

異材溶接の基礎とその展開

第3回

—アルミニウムと鉄のブレース溶接—

中田 一博

大阪大学 接合科学研究所

1 はじめに

前稿^{1, 2)}に引き続き鉄／アルミニウム異材継手の直接溶接に関して述べる。鉄／アルミニウムの直接溶接では脆い金属間化合物の生成を如何に抑制できるかが鍵となる。この場合、アルミニウムのみを溶融し、鉄は極力溶かさなことが一つの方法である。前報（第2回）²⁾で紹介したアーク溶接を用いた方法やレーザー溶接の一部の方法は、結果としてこの方法を利用していることになる。このような方法はブレース溶接法とも呼ばれるものであり、近年、薄板鋼板の新しい溶接法としてその適用が注目されている³⁾。本報ではブレース溶接法による鉄／アルミニウム異材溶接の最新の試みについて紹介する。

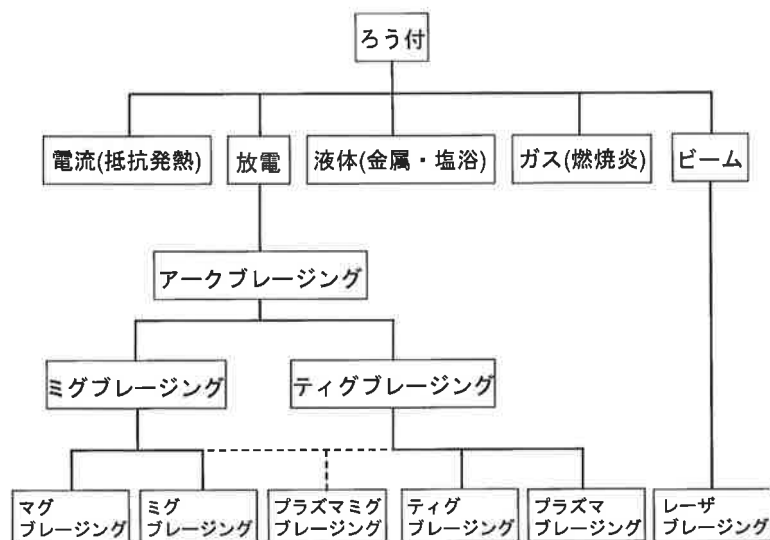
2 ブレース溶接法とは

ブレイジング（Brazing）はろう付と呼ばれ、450℃以上の高融点のろう材を用いるものであり、これ以下の低温の融点のろう材を用いるものはソルダーリング（Solder-

ing）、すなわち、はんだ付と呼ばれている。そしてこれらは総称してろう接と呼ばれる。高いろう接継手強度が要求される場合には一般にろう付が用いられる。

図1は各種のろう付法を加熱源の種類から分類したものである⁴⁾。一般のろう付には電気抵抗加熱を用いた炉内ろう付や浴中のディップろう付及びガス燃焼炎を用いたトーチろう付がある。これに対して、エネルギー密度の高い熱源である放電エネルギーやビームエネルギーを用いる方法があり、それぞれアークブレイジング及びレーザーブレイジングが代表的なものであり、総称してブレース溶接とも呼ばれる。

ブレース溶接法といわゆる溶接法とは共通点が多い。すなわちいずれもアークやレーザーなどの熱源を用いて、部材もしくは熱源を移動させながら開先を加熱し、同時に溶加材を連続供給しながらそれを溶融して開先を埋めて充填することにより接合継手を得るものである。一方両者の違いは次のようになる。すなわち図2に示すように、溶接では接合する母材は完全に溶融して溶加材と溶

図1 加熱源の種類からのろう付法の分類³⁾

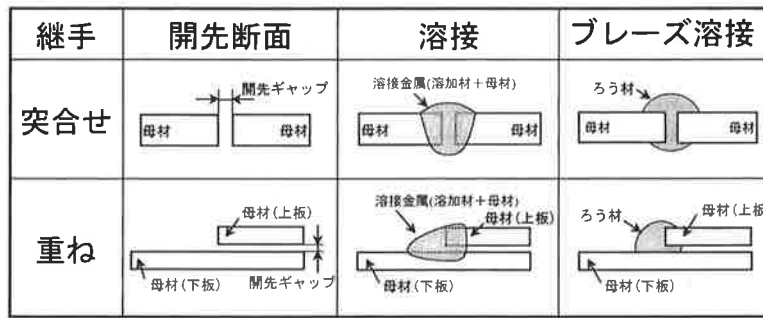


図2 ブレイズ溶接と溶接の相違説明図

表1 一般に用いられているろう材⁵⁾

種類	記号	化学成分 (mass%)	固相線 (°C)	液相線 (°C)	ろう付温度範囲 (°C)
Ag	BAg-1	45Ag-15Cu-16Zn-24Cd	605	620	620~760
	BAg-2	35Ag-26Cu-21Zn-18Cd	605	700	700~845
	BAg-4	40Ag-30Cu-28Zn-2Cd	670	780	780~900
	BAg-6	50Ag-34Cu-16Zn	690	775	775~870
	BAg-7	56Ag-22Cu-17Zn-5Sn	620	650	650~760
	BAg-8	72Ag-28Cu	780	780	780~900
	BAg-18	60Ag-30Cu-10Sn	600	720	720~840
	BAg-20	30Ag-38Cu-32Zn	675	765	765~870
Cu-Zn	BCu-1	>99.90Cu	1083	1083	1095~1150
	BCuZn-1	60Cu-40Zn	900	905	905~955
	BCuZn-2	59Cu-0.25~1.0Sn-Zn	890	900	900~955
	BCuZn-6	48Cu-10Ni-0.04~0.25Si-Zn	920	935	935~980
Cu-P	BCuP-1	Cu-5P	710	925	790~930
	BCuP-2	Cu-7.1P	710	795	735~845
	BCuP-3	Cu-6.3P-5Ag	645	815	720~815
	BCuP-5	Cu-5P-15Ag	645	800	705~815
Ni	BNi-1	Ni-14Cr-3.2B-4.5Si-4.5Fe	975	1010	1065~1205
	BNi-2	Ni-7Cr-3.2B-4.5Si-3Fe	970	1000	1010~1175
	BNi-5	Ni-19Cr-10Si	1080	1135	1150~1205
	BNi-7	Ni-14Cr-10P	890	890	990~1040
Au	BAu-2	80Au-20Cu	890	890	890~1010
	BAu-4	82Au-18Ni	950	950	950~1005
Al	BA 4343	Al-7.5Si	577	615	600~620
	BA 4047	Al-12Si	577	580	580~605
	BA 4003	Al-7.5Si-2.5Mg	559	607	595~620

融混合して一体化した接合部（溶接金属部）を形成するのに対して、ブレイズ溶接ではろう付と同様に母材は溶かすことなく、ろう材のみを溶かして開先を充填し継手を得るのである。

一般のろう付は部材全体が炉内でろう付温度にまで長時間加熱されるのに対して、ブレイズ溶接法では溶接と同じようにインラインで、局所加熱のためにエネルギー消費量が少なく、かつ早い接合速度で処理が可能の特徴がある。

また前報で述べた電子ビームなどの高エネルギービーム溶接を利用した溶接金属の組成制御方式による異材溶接では精密な開先加工と開先ギャップ制御が必要であったが、ブレイズ溶接では開先ギャップ裕度が大きいため

表2 状態図により推定した代表的なろう材素材金属と鉄及びアルミニウムとの適合性。(○)：良好，(△)：可能，(×)：困難

ろう材素材	異材母材			
		Fe		Al
Ag	○	化合物なし 2相分離 Fe/Ag	△	化合物形成 広い範囲で共晶
Al	×	多数の化合物形成	○	全率固溶体
Au	○	化合物なし 2相分離 Au/Fe	△	多数の化合物形成 広い範囲で共晶
Cu	○	化合物なし 2相分離 Cu/Fe	×	多数の化合物形成
Ni	○	全率固溶体	×	多数の化合物形成
Zn	△	化合物形成 広い範囲で固溶体	○	化合物なし 共晶 Al/Zn

に、より実用的なプロセスでもある。

表1⁵⁾は一般に用いられているろう材を示す。鉄/アルミニウム異材溶接に用いるには、すでに前報でも述べたように両金属との相性が重要になる。例えば第1回¹⁾で述べた状態図的検討を参考にすれば可能性の大きい順に並べると以下の様になる。すなわち、

- (i) 全率固溶体を形成し、金属間化合物を作らない。
- (ii) 2相分離型であり、金属間化合物を作らない。
- (iii) 金属間化合物を形成しても形成量が少なく、固溶体マトリックス中に分散する。

しかし、表2はろう材の基となっている代表的な金属と鉄及びアルミニウムとの相性を状態図的に分類した結果を示す。表中の(○)は上記の(i)および(ii)、(△)は(iii)に対応する。鉄とアルミニウムの両方の金属に対して、同時に(○)を満足するものは無い。Ag、Au及びZnは(○)と(△)の組合せであり、接合の可能性は大きい。ろう材のコスト、ろう付温度、ろう材の強度自体はアルミニウム母材よりも高いことが望ましいことなどを考慮すると、構造部材への適用を対象とし

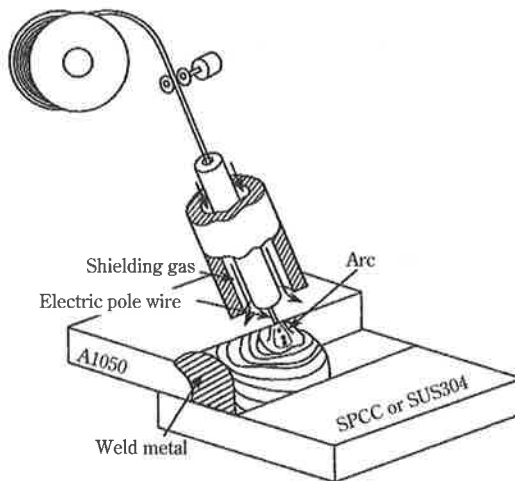


図3 ミグブレイズ溶接による薄板重ね溶接概念図⁶⁾

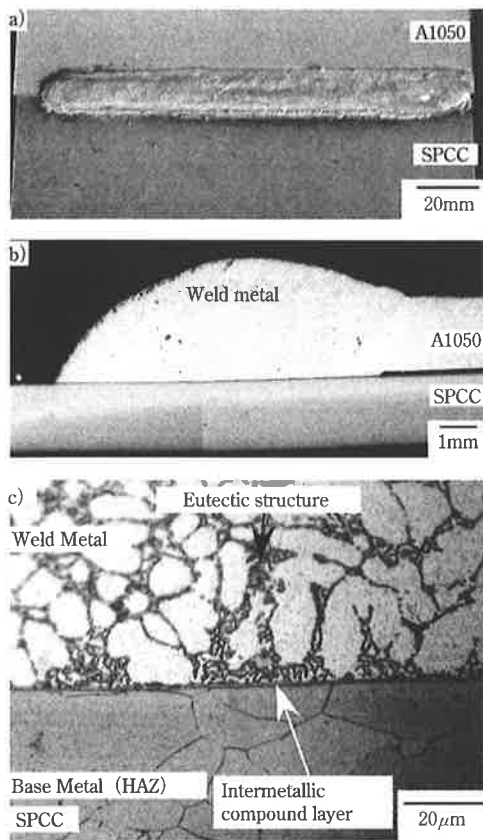


図4 ミグブレイズ溶接重ね継手⁶⁾, (a) 外観, (b) 断面, (c) 溶接金属/鉄 (SPCC) 接合界面マイクロ組織, 上板: A1050 アルミニウム, 下板: SPCC, 板厚2mm, 溶接ワイヤ: フラックスコアードBA4047, 直流パルスミグ溶接

た場合にはろう材としてはCu, Ni, Alを基にしたものになる。結局一方の金属との条件は満足するがもう片方の金属とは化合物を形成する組合せ (X) になってしまう。

したがって、現状のろう材では、第4のケースとして、(iv) 金属間化合物を形成しても接合界面における化合

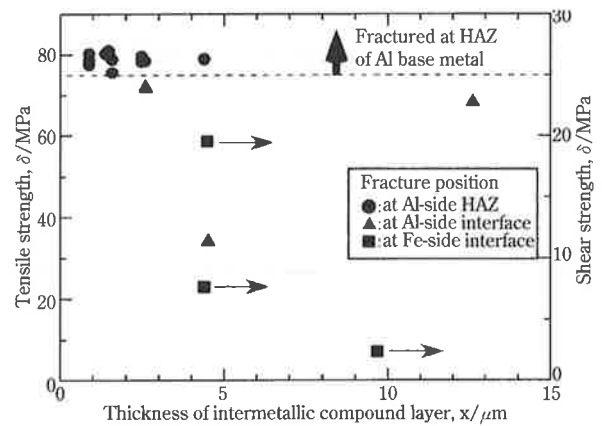


図5 ミグブレイズ溶接重ね継手の引張せん断強度 (破断部面積あたり) と接合界面の金属間化合物層厚さとの関係

物層は十分に薄いという条件を溶接プロセスの観点から達成することを目指すことになる。この場合、鉄母材表面の表面処理 (Zn, Alコーティング) は重要な因子となる。また、母材表面の酸化皮膜の除去も重要な課題である。

3 ブレイズ溶接による鉄/アルミニウム異材溶接に関する検討例

3.1 ミグアークブレイズ溶接

ミグアークブレイズ溶接は自動車用薄板鋼板の接合を目的としており³⁾, ろう材には表1にもあるCu-Si系合金が用いられている。これはすでに述べたように銅は鉄とは2相分離型の状態図を有し, このため金属間化合物は形成せず, かつ鉄となじみが良い金属のためである。

最近このプロセスを鉄/アルミニウム異材継手の直接溶接に適用する試みがなされている。

村上ら⁶⁾は, 図3に示すような商用パルスミグ溶接法により, 市販のAl-12Si合金系フラックスコアードワイヤBA4047Wを用いて一般工業用冷間圧延板SPCCと工業用純アルミニウム板A1050の重ね継手に対して, ミグブレイズ溶接を適用し, 継手強度を評価している。図4は代表的なブレイズ溶接部の外観及び断面写真である。下板にはSPCC, 上板にはA1050の組合せである。この場合, 上板のアルミニウム板はアークにより溶融するが, 下板の鉄板は溶融しないように溶接条件及び溶接トーチ狙い位置は最適化される。SPCCと溶接金属との間には $Al_{7.4}Fe_2Si$ 金属間化合物層が形成するが, 溶接条件の最適化により金属間化合物層は数 μm の薄さにまで制御できた。図5は化合物層厚さと引張せん断強度 (破断部面積あたり) を示すが, 化合物層厚さが約 $3 \mu m$ 以下ではア

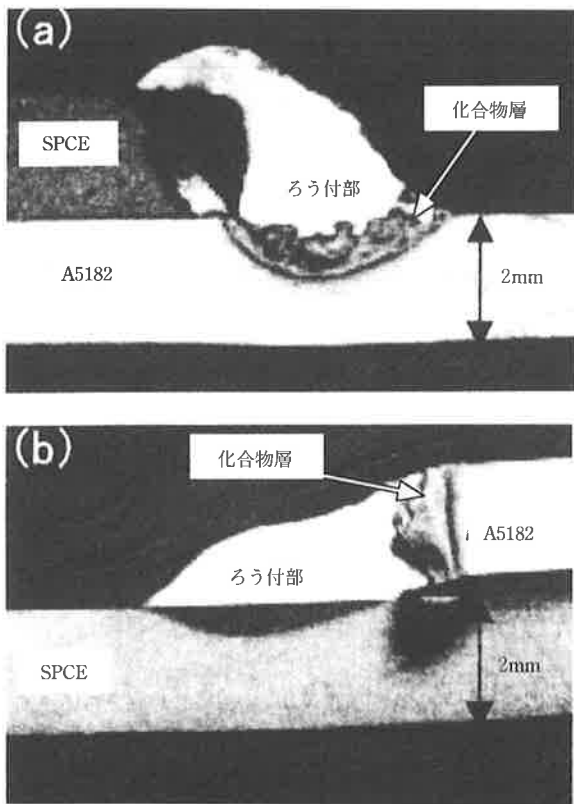


図6 ミグブレード溶接重ね継手断面⁷⁾, (a) 上板: SPCE鋼板, 下板: A5182アルミニウム合金, (b) 上板: A5182, 下板: SPCE, 溶接ワイヤ: Cu-2.5Si-1.5Mn合金

ルミニウム側の熱影響部で破断し、良好な結果が得られている。化合物層厚さが増加すると、金属間化合物層で破断し、継手強度は急激に低下する。このような傾向は拡散接合継手結果（第1回の図2）²⁾と同様である。

武田ら⁷⁻⁹⁾はCu系溶接材料（Cu-2.5Si-1.5Mn合金）を用いてミグブレード溶接によりSPCE鋼板とA5182アルミニウム合金板との重ね異材溶接を上板/下板の組み合わせを変えて検討している。図6⁷⁾に示すようにいずれの場合も溶接金属（Cu合金）と鉄との界面では化合物は形成されないが、アルミニウム合金との接合界面では高い硬度の金属間化合物層が形成した。継手部には溶接線に直角で板幅方向に引張溶接残留応力が加わるためにA5182が上板となる（b）では金属間化合物層で割れが発生しやすい。一方A5182が下板の場合（a）には金属間化合物層にはせん断方向に残留応力が働くことになり、溶接条件等を適正化してアルミニウム合金への熱影響を制御することにより良好な異材継手を得ている。

いずれの溶接材料（ろう材）でも、鉄の溶融を抑え、溶接入熱を制限して冷却速度を早くし、母材への熱影響を抑えて接合界面の金属間化合物層の厚さを薄くすることが重要である。

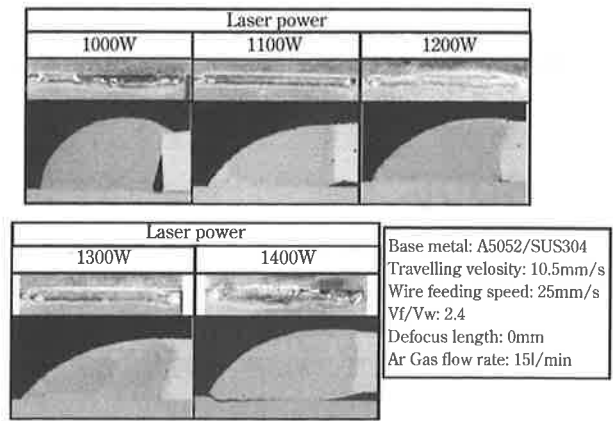


図7 半導体レーザーを用いたSUS304ステンレス鋼/A5052アルミニウム合金異材ブレード溶接継手断面組織例¹¹⁾, 上板: A5052, 下板: SUS304, BA4047ワイヤ, ノコロックフラックス

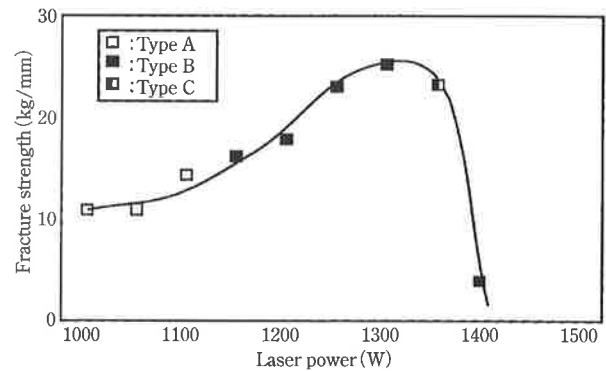


図8 SUS304/A5052異材レーザーブレード溶接重ね継手の引張せん断強度とレーザー出力との関係¹¹⁾; 破断位置A: A5052/ろう付部界面, B: SUS304/ろう付部界面, C: ろう付部内

3.2 レーザブレード溶接

レーザービームはアークよりもエネルギー密度が大きいために（第1回表5）¹⁾小入熱でのブレード溶接が可能となる。このため鉄/アルミニウム異材継手への適用がNd:YAGレーザーや半導体レーザーを用いて検討されている^{10, 11)}。この場合、レーザービーム径が小さくてエネルギー密度が大きすぎると母材を溶かしてしまうので、ろう材ワイヤのみをうまく溶かして、かつ母材に十分に濡れるようにこれらを制御し、最適化する必要がある。

図7は西本ら¹¹⁾による半導体レーザーを用いたSUS304ステンレス鋼/A5052アルミニウム合金異材溶接継手の断面組織例を示す。Al-12Si系BA4047ソリッドワイヤとノコロックフラックスを用いたものである。また図8はその引張継手強度とレーザー出力との関係を示す。強度はレーザー出力の増加とともに増加し、最適値では約250N/mmを示した。しかしそれ以上の出力では急激に

低下した。低出力ではろう材とアルミニウム間の濡れ不良が発生し、高出力ではろう材／ステンレス鋼界面での金属間化合物層の厚膜化が強度低下をもたらしたと考えられている。

4 おわりに

ブレイズ溶接によりかなりの強度を有する鉄／アルミニウム異材溶接継手の形成が可能になってきている。しかし現状のろう材の範囲では鉄／アルミニウム異材継手の工業的な応用にはまだ十分な継手強度とは言えない。常識を覆すような新しい発想によるろう材探索が必要であろう。

参考文献

- 1) 中田：溶接技術, 52-9 (2004), 141.
- 2) 中田：溶接技術, 52-10 (2004), 126.
- 3) B.Pekkari：溶接・接合の将来展望, 溶接技術, 52-10 (2004), 72.
- 4) U.Draugelates et al: Plasma-Arc Welding, A Low-Energy Joining Technology for Sheet Metal, Weld.J., 81-3 (2002), 38.
- 5) 溶接学会編：溶接・接合便覧第2版, 丸善, (2003), 410.
- 6) T. Murakami et al: Dissimilar Metal Joining of Aluminum to Steel by MIG Arc Brazing Using Flux Cored Wire, ISIJ International, 43-10 (2003), 1596.
- 7) 武田ら：MIGブレージングによるアルミニウム／鋼の接合, 溶接学会全国大会講演概要集, 73 (2003), 332.
- 8) 武田ら：MIGブレージングによるアルミニウム／鋼の接合 (第2報), 溶接学会全国大会講演概要集, 74 (2004), 194.
- 9) 武田ら：MIGブレージングによるアルミニウム／鋼の接合 (第3報), 溶接学会全国大会講演概要集, 75 (2004), 262.
- 10) (財)宇宙環境利用推進センター：「異材溶接技術の基礎研究」平成13年度調査報告書, (2002.3).
- 11) (財)金属系材料研究開発センター：「溶融プロセスアルミ／鋼異材接合技術に関する調査研究」平成14年度成果報告書.

