

# 材料学的側面からみた溶接・接合プロセス の展開

中 田 一 博

溶接学会誌 第72巻 第1号 別刷

平成15年1月

### 材料学的側面からみた溶接・接合プロセスの展開\*



中田 一博\*\*

Advances in Joining and Welding Process Related to Materials Development\*

by NAKATA Kazuhiro\*\*

キーワード 溶接・接合プロセス, 難溶接材料, 新材料, プロセス開発, 材料開発

#### 1. 緒言

新素材・新機能材とも呼ばれる新しい材料の出現は、それを実用的に使いこなすことにより、新しい構造物・部材を生み出すことができ、国際競争力のある工業製品の生産をもたらす。これに対して、いわゆる「物作り」の観点からは、新素材・新機能材の部材化・製品化のためには溶接・接合が不可欠なことは言うまでもない。しかしそれが困難なことが多いのもまた事実である。一方、既存材料においても溶接・接合が極めて難しいか、もしくは高コストが必要とされる材料があり、これらに対し

て低コストの簡便な溶接・接合プロセスが出現すれば、同様の効果が期待できる。

溶接・接合プロセスにおいても新しい概念から開発されたプロセスがあり、その特殊性ゆえに適用ニーズがすぐには一般化しない例が多い。また新素材・新機能材では既存の溶接・接合プロセスが適用不可のものが多い。しかしこのような材料に対しては、意外にニュープロセスがうまくマッチングし、新しい工業製品が生み出される素地があるように思われる。

ニュー溶接・接合プロセスとその材料学的課題に関しては、西本によって表1のようにまとめられており、詳

表1 新溶接・接合プロセスにおける材料学的課題 (西本)

新溶接・接合プロセス	材料学的課題	将来の望まれる展望
レーザー溶接/ 電子ビーム溶接	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ブローホールおよび溶接割れの制御</li> <li>・急熱/急冷過程の相変化解明と組織制御</li> <li>・融体化学反応の解明</li> <li>・溶接部における特性評価と支配要因の解明</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・溶接性に優れる母材設計/開発</li> <li>・凝固制御/組織制御技術の確立</li> <li>・高品位溶接技術の開発</li> </ul>
液相拡散接合/ ハイテックろう付	<ul style="list-style-type: none"> <li>・接合に伴う組織変化/材質劣化の抑制</li> <li>・固液界面現象 (ぬれ, 流れ, 溶融, 凝固) の解明</li> <li>・接合プロセスのシミュレーション (移動境界問題)</li> <li>・接合プロセスの最適化と高信頼性化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・接合性に優れる材料設計/開発</li> <li>・レーザー/電子ビームの適用</li> <li>・組織制御/結晶制御技術の確立</li> <li>・プロセス最適化システム</li> </ul>
固相拡散接合	<ul style="list-style-type: none"> <li>・密着挙動/機構の解明</li> <li>・表面/界面現象, 界面性状と構造の解明</li> <li>・界面反応制御と組織制御</li> <li>・インサート材の効果解明</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・接合継手特性の改善</li> <li>・接合性に優れる材料設計/開発</li> <li>・界面制御/組織制御技術の確立</li> </ul>
摩擦圧接/ 爆発接合	<ul style="list-style-type: none"> <li>・接合現象の把握と機構の解明</li> <li>・表面/界面現象, 界面性状/構造の解明</li> <li>・界面反応解析と組織解析/制御</li> <li>・流動/加工現象の解明</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・界面制御/組織制御技術の確立</li> <li>・接合プロセスの改良</li> </ul>
摩擦撈拌接合	<ul style="list-style-type: none"> <li>・撈拌/流動/接合現象の解明</li> <li>・接合部の組織解析および特性評価</li> <li>・組織制御と接合欠陥制御</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・適用材料の拡大</li> <li>・接合ツールと接合プロセスの改良</li> </ul>
その場焼結接合	<ul style="list-style-type: none"> <li>・接合 (焼結) 現象/機構の解明</li> <li>・界面現象の把握, 組織制御と結晶制御</li> <li>・接合部の特性評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・材料創成/粉末冶金手法との併用</li> <li>・組織制御/結晶制御技術の確立</li> </ul>
超音波接合	<ul style="list-style-type: none"> <li>・密着挙動/機構の解明</li> <li>・界面現象の把握と界面性状/構造の解明</li> <li>・界面反応制御と組織制御</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・接合性に優れる材料設計/開発</li> <li>・界面制御/組織制御技術の確立</li> </ul>

\*原稿受付 平成14年11月1日

\*\*正員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining & Welding Research Institute, OSAKA University

細な解説がなされている<sup>1)</sup>。したがって、本稿では以上の観点から、特にアーク溶接のように連続した接合継手が得られるプロセスを中心に、ニュー溶接・接合プロセスと新素材・新機能材や難溶接・接合材料との最適マッチングに基づく実用化問題解決へのアプローチについて概観する。なおニュー溶接・接合プロセス開発の目的としては現場的には高能率・高効率プロセスが志向される場合が多いが、この点は他に譲りたい。

## 2. ニュー溶接・接合プロセス

ニュー溶接・接合プロセスをアーク溶接のように連続した接合継手が得られるプロセスを中心に観てみると、例えば表2のようになり、既存プロセスの改善・発展型、既存プロセスのハイブリッド型、そして新しい概念で開発されたプロセスに分類できよう。それぞれの特徴をうまく生かすことにより限定的ではあるが実用化されている。

## 3. 問題解決へのアプローチ例

すでに構造物材として用いられているが一般に難溶接材料とされているものと、いわゆる新素材で構造物材として実用化が期待されているものについて、ニュー溶接・接合プロセスの代表的な適用例を以下に示す。

### (1) 難溶接材料

#### (a) 極低硫黄含有ステンレス鋼

耐食性改善のために硫黄含有量を数十 ppm まで減少させたステンレス鋼では、ティグ溶接において周辺溶込み型の浅い溶融池となり、その溶込み不足が問題となってきた。A-TIG (アクティブ・ティグ) プロセス<sup>2)</sup>は従来とは視点が異なるニュープロセスと言えるものであり、単

表2 連続した接合継手が得られるニュー溶接・接合プロセス例。

タイプ	プロセス
既存プロセスの改善・発展型	・A-TIG (アクティブ・ティグ) ・ブレイズ溶接 (アーク、レーザ)
既存プロセスのハイブリッド型	・レーザ・アークハイブリッド溶接
新概念型	・摩擦攪拌接合

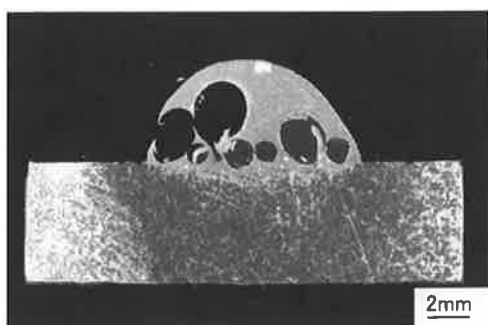


図1 マグネシウム合金 AZ91D ダイカスト材のミグ溶接部断面マクロ組織、AZ61ワイヤ使用、溶接金属部に多数の気孔発生 (中田)。

にTiO<sub>2</sub>等の活性フラックスを溶接線上に塗布してティグ溶接を行うだけであるが、溶融池対流がティグ溶接の場合の中心から周辺に向かう流れから、逆に中心に向かう流れに変化し、これにより深溶込みの溶接ビードが得られ、問題の解決が図られている。一般材料への適用に向けてそのメカニズムの十分な解明が期待されている<sup>3)</sup>。

#### (b) 亜鉛めっき鋼板

亜鉛めっき鋼板は自動車や一般構造物材に多用されている。しかし、重ね溶接継手においては亜鉛蒸気によりブローホールが発生しやすく、この対策のために溶接条件や開先形状等に工夫が凝らされているが、MAG 溶接およびレーザ溶接ともに制約が多いのが現状である。これに対して両者を組み合わせたハイブリッド溶接法では、先行レーザによるキーホールでの亜鉛蒸気の発散とレーザ照射による後行アークの安定化効果により重ね継手ギャップが無くてもブローホールを抑制しつつ、高速度溶接が可能になるとされている<sup>4)</sup>。同様の問題を抱えるプライマ鋼板への適用も期待されよう。

#### (c) ダイカスト・チクソモールド・鋳物材

これらの材料では材料内に必然的に内包されたガスにより、溶融溶接に際して溶接部には図1<sup>5)</sup>に示すようなブローホールや大きな空洞が発生しやすく、内包ガス量やガス圧によっては溶融溶接がほとんど不可能となる。このような材料に対しては、固相接合であるFSWが極めて有利であり、材質に依らず接合が可能である。それだけにとどまらず、接合部では鋳造組織の改質 (組織微細化、鋳造欠陥除去) も同時に行える利点がある。図2<sup>6)</sup>はマグネシウム合金チクソモールド材のFSW接合部の組織例を示す。

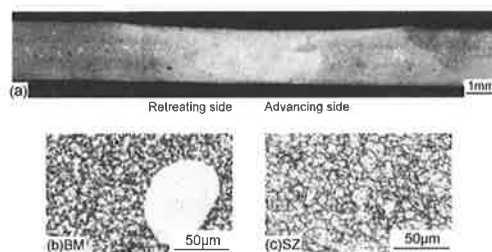


図2 マグネシウム合金 AZ91D チクソモールド材のFSW接合部。(a) 断面マクロ組織、(b) 母材ミクロ組織、(c) 攪拌部 (Stirred Zone) ミクロ組織。

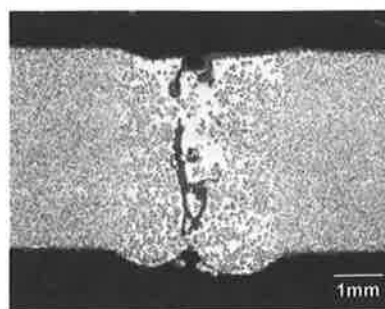


図3 アルミナ粒子分散6061アルミニウム合金基複合材のYAGレーザ溶接部断面組織、2 kW, 1 m/min, アルミナ体積10%、板厚4 mm、割れ、気孔、アルミナ粒子の凝集偏析が認められる (中田)。

(d) 複合材

金属基複合材の溶融溶接は一般に困難であり、図3に示すように、強化材の分解による気孔、空洞の発生や強化材の凝集による劣化等が避けられない。粒子分散型の複合材に対しては、FSWが適しており、図4に示すように、粒子が均一に分散した接合部が得られ、機械的性質も良好である。強化粒子の種類や含有体積率によっては、FSWのツールピンの摩滅が著しくなり、この問題の解決が今後の課題である。

(e) 鉄/アルミニウム合金の異材接合

自動車等の軽量化のために鉄・アルミニウム合金異材接合技術が求められている<sup>9)</sup>。従来よりこの異材組合せでは脆弱な金属間化合物の形成のために、溶融溶接では直接接合は困難とされてきた。しかしレーザ溶接により入熱を最小限に押さえて、かつ継手形状を工夫することにより金属間化合物層の厚さを数ミクロン以内とすることによりアルミニウム合金側での母材破断となる異材継手が得られている<sup>10)</sup>。

一方、溶融溶接の一種でありながら、基本的に鉄母材を溶かさないうプロセスであるレーザブレード溶接も有望な結果が報告されている<sup>11)</sup>。さらに、通常のミグ溶接機によるAl-Siフラックスコアードワイヤを用いたミグブレード溶接でも鉄側母材をほとんど溶融しない条件を選択すると、図5に示すように良好な継手が得られており、レ

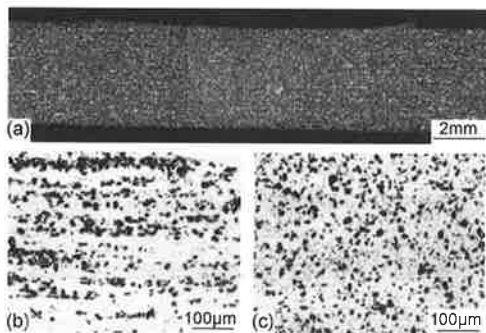


図4 アルミナ粒子分散6061アルミニウム合金基複合材のFSW接合部。(a)断面マクロ組織、(b)母材ミクロ組織、(c)攪拌部(Stirred Zone)ミクロ組織。

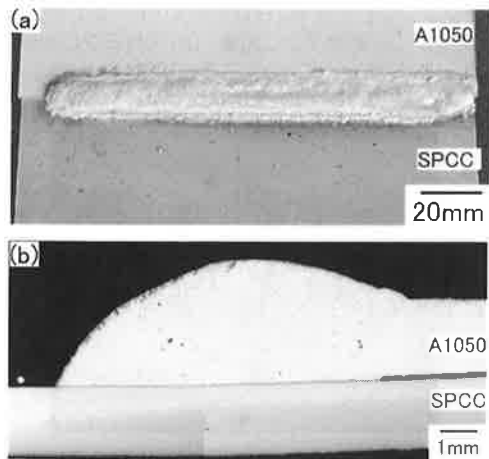


図5 ミグブレード溶接による鉄(SPCC)/アルミニウム異材溶接部。(a)概観、(b)断面ミクロ組織；重ね継手、上板工業用純アルミニウム、下板SPCC；フラックス入りワイヤ使用。

ーザ溶接に比して開先精度の裕度は大きい特長がある。ファイラーワイヤの開発が進めば他の異材接合系への展開も望まれる。

この系の異材接合には従来より固相接合である摩擦圧接や爆発圧接が実用化されてきたが、継手形状や接合条件の制約が大きい。これに対して同じ固相接合でも、FSWを用いる最近提案された方法<sup>12)</sup>は開先のアルミニウムのみを塑性流動させて鉄母材に押しつける方法であり、連続した接合継手が得られており新しい異材接合プロセスとして注目される。

(2) 新材料

幾つかの新材料ではその構造化・部材化のために溶接・接合性が検討されている。しかし連続した接合継手が得られた例はまだ少なく、うまくマッチングするニュープロセスの出現が待たれる。

(a) 発泡・ポーラス金属

現在、アルミニウム基の発泡金属が単に軽量構造材料としてのみならず、断熱・防音材や衝撃吸収材として注目されており、その接合法が検討されている。例えば、図6は発泡アルミニウムサンドイッチ材のティグ及びミグ溶接例であり、サンドイッチ材を介した間接的な溶接である。しかし、発泡材はいわば箔材の構造体であり、その直接接合はかなり困難である<sup>14)</sup>。さらに、一方向に細長く配向した気孔を有するロータス型ポーラス金属もその特異な性質を生かした用途開発が進められており<sup>15)</sup>、接合プロセスの検討も行われている<sup>16)</sup>。

(b) 微細結晶粒材料

超鉄鋼の名で知られる結晶粒数ミクロンの超微細粒鋼

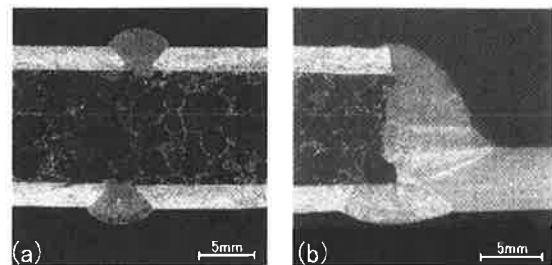


図6 発泡アルミニウムサンドイッチ材のミグ溶接部断面<sup>13)</sup>。(a)サンドイッチ材同士の溶接例、(b)サンドイッチ材とアルミニウム合金板材との溶接例。

Problems in fusion welded nitrogen-bearing stainless steels

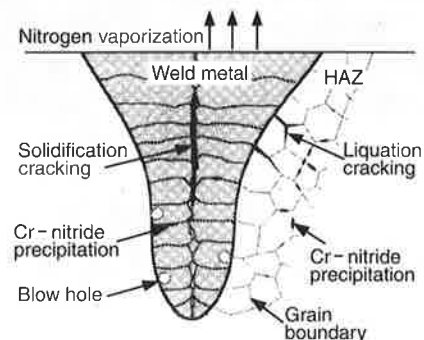


図7 高窒素ステンレス鋼の溶接に伴う劣化特性<sup>19)</sup>。

は、その後、アルミニウム基、銅基等へと展開されている。超微細粒鋼では、溶接部及びその近傍の粗粒化をいかに抑制するかが問題であり、溶接入熱の少ないレーザー溶接及び電子ビーム溶接がそのプロセス候補であるが、継手形状が問われなければハイパー界面接合法（瞬間表面溶融接合法）が有効であることが示されている<sup>1)</sup>。

#### (c) 高窒素ステンレス鋼

窒素含有量が0.3~1 mass%に達する高窒素含有ステンレス鋼は優れた耐食性と機械的性質を有しており、構造材料として期待されている<sup>18)</sup>。しかし溶接に際しては、図7<sup>19)</sup>に示すようにブローホール、割れ、クロム炭化物析出等による特性劣化が懸念されており、このため継手形状の制約があるが、摩擦圧接のような固相接合が有効とされている<sup>19)</sup>。

#### (d) アモルファス合金

近年開発されたアモルファス形成能が高く、ガラス遷移現象を示す、金属ガラス<sup>20)</sup>と呼ばれるアモルファス合金では、cm級のバルク材が鑄造法によって作製可能であるとともに、摩擦圧接、爆発圧接、パルス通電接合や電子ビーム溶接、レーザービーム溶接により、金属ガラスを結晶化させることなく、良好な溶接継手が得られることが明らかにされてきている<sup>21)</sup>。これらの金属ガラスでは、結晶化TTT線図（溶融部と熱影響部とは結晶化TTT線図に大きな違いがある）と溶接部の冷却速度との関係により、溶接性が判定できるとされており、溶接時の冷却速度の速いプロセスほど有利である。また、代表的な金属ガラス $Zr^{10}Be^{23}Ti^{11}Cu^{12}Ni^{10}$ では電子ビーム溶接により金属純Zrとの異材溶接が出来ることも報告<sup>22)</sup>されており、今後のアモルファス金属の構造化の急速な進展が期待されている。

## 4. ま と め

本稿では、ニュー溶接・接合プロセスとしてアーク溶接のような連続した接合継手が得られるプロセスを中心に、難溶接材料及び新材料への幾つかの応用例を紹介した。継手形状の制約を問題としなければ、固相接合において多くのニュープロセスが開発されている。例えば表1以外にも電磁パルス圧接法等がある。入熱量を極力抑えることができるこれらのプロセスでは、加熱を嫌う素材に対しては特に有効であり、例えば非晶質金属・ナノ構造結晶系新材料の寸法化や部材化に向けての異材接合に応用されよう。

## 参 考 文 献

- 1) 西本和俊：新溶接・接合プロセスの最近の動向， 本会講概要， 71 (2002-10)， F-3-F-12.
- 2) W. Lucas, D. Howse, M. M. Savitsky and I. V. Kovalenko: A TIG Flux for Increasing the Performance and Productivity of Welding Processes, IIW Doc. XII-1448-96 (1996).
- 3) 田中 学：TIG 溶接における活性フラックスによる溶込み促進機構， 本誌， 71-2， (2002)， 95-99.
- 4) 小野守章， 真保幸雄， 吉武明英， 大村雅紀：レーザー・アークハイブリッド溶接技術， NKK技報， No.176 (2002-3)， 70-74.
- 5) 中田一博：マグネシウム合金の溶接・接合， 軽金属溶接， 39-12， 582-591.
- 6) 中田一博， 居軒征吾， 長野喜隆， 橋本武典， 成願茂利， 牛尾誠夫：AZ91D マグネシウム合金チクソモールド薄板の摩擦攪拌溶接性， 軽金属， 51-10 (2001)， 528-533.
- 7) 中田一博， 牛尾誠夫， 居軒征吾， 徐昌済， 成願茂利， 橋本武典：アルミナ粒子分散6061複合材のFSW， 本概要， 69， (2002-10)， 128-129.
- 8) 中田一博， 牛尾誠夫：異材溶接・接合のニーズと今後の技術開発の動向， 本誌， 71-6， (2002)， 418-421.
- 9) 片山聖二：レーザー異材接合， 溶接技術， 50-2， (2002)， 69-73.
- 10) 新エネルギー・産業総合開発機構：平成13年度「異材溶接技術の基礎研究」， 公開用報告書 PDF (公開用 11401046-0-1.pdf) .
- 11) 村上太一， 中田一博， 全紅軍， 牛尾誠夫：MIG アーク溶接によるアルミニウムと鋼の異材接合， 本講演概要， 71 (2002-10)， 258-259.
- 12) 岡村久宣， 青田欣也， 青野泰久：摩擦攪拌作用を利用した異種金属の摩擦攪拌接合， 本講演概要， 71 (2002-10)， 442-443.
- 13) U. Dilthey und M. Kessel: Lichtbogenschweißen von Aluminiumschaumverbindungen, DVS-Berichte Band 220, (2002), 216-218.
- 14) A. G. Pogibenko, V. Yu. Konkevich, L. A. Arbuzova and V. I. Ryazantsev: The Weldability of Aluminium-Based Foam Materials, Welding International, 15-4 (2001), 312-316.
- 15) T. Bernard, J. Burzer and H. W. Bergmann: Mechanical Properties of Structures of Semifinished Products Joined to Aluminium Foam, J. Materials Processing Technology, 115 (2001), 20-24.
- 16) 中嶋英男：ロータス型ポーラス金属， ふえらむ， 6-9 (2002)， 701-707.
- 17) T. Murakami, K. Nakata, T. Ikeda, H. Nakajima and M. Ushio: Effect of Pore Direction on Penetration Depth of Lotus-Type Porous Copper by Laser Welding, 5th SANKEN International Symposium, Extended Abstract, 2002 March, Osaka, 166-167.
- 18) 友田陽：今， なぜ高窒素鋼？， ふえらむ， 7-11， (2002)， 846-847.
- 19) 菊地靖志：摩擦溶接の高窒素ステンレス鋼への応用， ふえらむ， 7-11， (2002)， 868-869.
- 20) 例えば， 川村， 井上， 増本， 上原， 垣内：高速超塑性を利用した金属ガラスの粉末固体化・鍛造加工技術の開発とゴルフクラブへの応用， まてりあ， 40-3， (2001)， 280-282.
- 21) Y. Kawamura, Y. Ohno, A. Chiba: Development of Welding Technologies in Bulk Metallic Glasses, Mater. Sci. Forum, 386-388, (2002), 553-558.
- 22) Y. Kawamura, S. Kagao, Y. Ohno: Electron Beam Welding of Zr-Based Bulk Metallic Glass to Crystalline Zr Metal, Mater. Trans., 42 (2001), 2649-2651.