II 溶接・接合プロセスとシステム化技術

3. 固相接合プロセス

高橋 誠*, 泰山 正則**, 木村 真晃***

Solid State Joining Process

by TAKAHASHI Makoto*, YASUYAMA Masanori** and KIMURA Masaaki***

キーワード：摩擦撹拌接合，摩擦圧接，拡散接合，材料，プロセス，基礎研究，開発，動向

3.1 摩擦撹拌接合 (FSW)

高橋 誠

3.1.1 非アルミニウム合金のFSW, FSWによる異材接合

アルミニウム合金以外の材料のFSWは，従来から進められているマグネシウム合金や銅に対するもののほか，銅をはじめとする高融点金属に対する応用の研究も最近多く発表されている。

溶接学会誌2005年4月号の特集「摩擦撹拌接合」には，銅合金¹⁾，マグネシウム合金²⁾，高強度アルミニウム合金(7075)³⁾，オーステナイト系ステンレス鋼の摩擦圧接⁴⁾についての報告が集められている。中田は黄銅をはじめとする銅合金のFSWの現状を紹介し，特に60Cu/40Zn黄銅の継手部の組織と機械的性質の変化，特に撹拌部においては組織の微細化に伴って材料の硬さ，引張強さが大きく向上することを詳しく示している¹⁾。また銅合金のFSWの今後の課題として，ツールの材質の問題を指摘している。有年はAZ系マグネシウム合金と難燃性マグネシウム合金について，FSW継手の組織と性能を示し，マグネシウム合金のFSWによって実際に製品を試作した例を紹介している²⁾。朴らはSUS304鋼のFSW継手の組織を詳細に観察して，FSW撹拌部中にシグマ相が生成していることを示し，短時間のFSW中のシグマ相の生成メカニズムを検討している。またSUS304鋼FSW継手の耐食性を調査して，シグマ相の生成された部位では耐食性が大きく低下することを示している³⁾。

マグネシウム合金については，加藤らもAZ91合金鋳物のFSWを行い，同じマグネシウム合金であるAZ31と比べると適切な接合条件の範囲が狭くなるものの，継手の引張強さ，延びは母材より優れているかほぼ同等であり，靱性は母材より大きく改善することを示している⁵⁾。

石川らはSUS304鋼と，SUS304鋼と比べて高い高温強度

を持つSUS301L-1/4H鋼のFSWを行い，SUS304鋼においては420 mm/minもの高速での接合が可能であり，高温強度の高いSUS301L-1/4HではSUS304に比べて適正な接合条件の範囲が狭いものの，母材を越える強さを持つ継手の作成が可能であることを示している⁶⁾。また藤井は，溶接技術2005年12月号の記事「鉄鋼材料の摩擦撹拌接合 (FSW) の現状」において，炭素鋼からステンレス鋼にいたるさまざまな鋼のFSWについての内外の研究の紹介のほか，鋼のような高融点材料のFSWのための装置的要求や，材料の塑性流動のしやすさと適切なツール形状の関係について述べている⁷⁾。

FSWによる異材接合については，渡辺らがSS400軟鋼板とA5083-H24アルミニウム合金板⁸⁾，SS400軟鋼板とAZ31B-Oマグネシウム合金板¹⁰⁾の組み合わせの突き合わせ接合を，FSWツールのプローブの大部分がアルミニウム，もしくはマグネシウム合金中に位置し，プローブの側面が鋼の接合面をわずかに削り取るような条件で行った結果を報告している。特に，回転するプローブが鋼を削って鋼の新鮮面が表れ，そこにアルミニウム（マグネシウム）合金が充填される過程，また削り取られてアルミニウム（マグネシウム）合金に巻き込まれた鋼が継手の性能に与える影響を，接合後の継手の組織から詳しく議論している。安井らは，渡辺らが採ったものと似た方法でA6063-T5合金板とS45C鋼板の突き合わせ接合を行った。ショルダーの摩擦による発熱に注目し，大径のショルダーを持つツールを用いることで大きな入熱量を得て，1000 mm/minの接合速度を達成した。また継手の組織を観察して，接合界面の金属間化合物層の厚さは1 μm以下であること，撹拌部，HAZの6063合金は軟化しており，継手の引張試験ではこの部位で破断が生じることを明らかにした。田中らは摩擦撹拌点接合によって，6000系アルミニウム合金板とSPCC鋼板の重ね接合を行った¹²⁾。プローブをアルミニウム合金側に，プローブ先端が接合界面にわずかに届かない位置まで挿入して，引張せん断試験によってアルミニウム合金側が栓抜け破断する継手を得た。

3.1.2 複動式摩擦撹拌接合

FSWのツールのショルダーとプローブをべつべつに駆動する「複動式摩擦撹拌接合」については，熊谷らがこの方法を用いた点接合について報告している¹³⁾。通常の摩擦撹拌点接合においては接合位置にショルダーの跡の穴

原稿受付 3.1, 3.2, 3.3: 平成19年6月29日 3.4: 平成19年5月11日
3.5, 3.6: 平成19年4月20日
*正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, JWRI, Osaka University
**正 員 住友金属工業(株) Member, Sumitomo Metal Industries Ltd.
***正 員 兵庫県立大学大学院工学研究科 Member, Graduate School of Engineering, University of Hyogo

が残るが、複動式の装置を用いると、ショルダーを材料に押しつけたままプローブだけを抜くことでこの穴のない継手を得ることが出来る。点接合の場合、さらにショルダーの周囲をクランプで押さえてショルダーからのバリの発生を抑えることで、穴やバリがないだけでなく広い接合部を持つ継手を得ることが出来る。また藤井らは、複動型摩擦撹拌接合の利点として、プローブ跡の穴が残らない、材料の板厚の変化に対応できる、キッシングボンドを抑止できるほか、ショルダーとプローブを異なる速さで回転させることで接合条件の幅をより広げられることを述べている⁹⁾。

3.1.3 加熱摩擦撹拌接合

鈴木らは、FSWの接合速度を改善するため、材料を加熱した状態でFSWを行う「加熱摩擦撹拌接合」をA5052アルミニウム合金に対して試み、423 Kから573 Kの範囲の加熱は得られる継手の性能を損なわないことを示している¹⁴⁾。また同じ材料で、573 Kへの加熱によって（ほかの条件を等しくして）600 mm/min弱が限界であった接合速度を、900 mm/minまで改善し得たことを示している¹⁵⁾。鈴木らの方法は接合する材料全体を加熱するため、接合において加熱の行程がひとつ余計に加わるほか、材料によっては加熱による材質の変化が問題になる。そこで、FSWする前に接合線上のみをレーザーで加熱するハイブリッド摩擦撹拌接合を開発して、構造用鋼 (SS400) の接合に使用して効果を上げたことを立野らが紹介している¹⁶⁾。

3.1.4 摩擦撹拌プロセス (FSP)

摩擦撹拌現象を利用して材料の特性の改善を図るFSPについても、内外で多くの報告がなされている。FSPの代表的な応用は、撹拌部の強加工後の再結晶を利用した結晶粒の微細化であるが、柴柳らはFSP (FSW) によって微細化した組織を加熱したときしばしば観察される異常粒成長の原因を探るため、FSPしたA5083アルミニウム合金の組織と、その熱処理による変化を観察し、FSP時にショルダーが接触した面近傍の材料中に残る残留応力の影響の可能性を示している¹⁷⁾。

FSPによる鋳造材の組織・特性の改善¹⁸⁾や、材料の複合化による表面改質¹⁹⁾についても報告がある。

3.1.5 その他

軽金属溶接の2005年5月号において、難波らは、複数のメーカーによって製造された同品種 (A5083-O, A6N01S-T5, A7N01S-T5) のアルミニウム合金を、さらに複数のメーカーが自社で用いている手法によってFSWした継手を用意して、それらの継手のさまざまな特性を評価した結果を報告している²⁰⁻²⁵⁾。固相接合であるFSWによって作製した継手は溶融溶接したものとは比べより母材の特性を反映しやすいであろうとの考えのもと、さらに接合プロセスの違いが継手の特性に与える影響も明らかにしようとしたものである。調べられた特性は、継手の組織から硬さ²²⁾、引張特性²³⁾、曲げ性²⁴⁾、疲労特性²⁵⁾に及び、また、従来から用いられている検査法では検出しにくい、キッシングボンドなどのFSW継手特有の微小な欠陥を、超音波フェイズドアレイ探傷試験によって高い精度で検出し得た結果も報告されている²¹⁾。

佐藤らは、FSWによって作成したアルミニウム合金テ

ーラードブランク材の成型性を検討するため、A5052-Oアルミニウム合金のFSW継手の擬平面ひずみ変形性に対する継手組織の影響を調べて報告している²⁶⁾。A5052等のAl-Mg合金の延性は結晶粒径の増加とともに向上することが知られており、接合パラメーターを変化させて作製したA5052合金FSW継手も、平均結晶粒径が小さい範囲ではその傾向に従うが、粒径がある範囲を超えて大きくなると逆に擬平面ひずみ変形による破断限界ひずみが小さくなることを見出し、これが大きな結晶粒中に存在する亜粒界や転位の効果であることを示している。また佐藤らは、ECAPやARBで結晶粒を微細化して強度を増した工業用純アルミニウム合金へのFSWの適用性を検討し、FSWによっても撹拌部やTMAZにおいて若干の硬度低下を生じるもののその幅は溶融溶接を行った場合と比べると著しく小さいことを示している²⁷⁾。

東山らは、FSW中の材料の流れを明らかにするため、透明なポリ塩化ビニル (PVC) 樹脂をFSWしてツール周囲の樹脂の流れをビデオ撮影し、ツールの周囲には、プローブによってその背後に生じる軸が縦に向いた渦と、ショルダーによって生じる軸が横に寝た渦があること、またプローブのねじの向き (右ねじ-左ねじ) によって生じる流れの違いを観察している²⁸⁾。

武久は、欧米において先行しているが、最近日本でも研究の進みつつある航空宇宙分野へのFSWの応用についての解説において、この分野では国内で初めてのFSWの量産への応用となる、無人標的機への適用を紹介している²⁹⁾。航空宇宙分野で多く利用される7000系アルミニウム合金については、田中らがA7050アルミニウム合金について、接合と熱処理の組み合わせが継手の性能引張強さと耐応力腐食割れ性に与える影響について³⁾、伊藤らがA7075合金のFSW継手の組織と機械的性質について³⁰⁾検討した結果を報告している。

3.2 摩擦圧接

川井、小川、山本らは、摩擦圧接について多岐にわたる報告を行っている。彼らは従来より、摩擦圧接継手の健全性が、アプセット過程における変形入熱 (アプセット過程においてアプセット推力が行う仕事)、またこの変形入熱と強い相関を示すアプセット寄りしろ量で整理できることを提唱しているが、この関係を用いて、アプセット寄りしろから摩擦圧接継手の品質を自動判定するシステムを試作して、A6061-T6アルミニウム合金の摩擦圧接に適用した結果や³¹⁾、またこの関係をイナーシャ式の摩擦圧接にも拡張する試みについて³²⁾報告している。また、6061-T6アルミニウム合金摩擦圧接継手の疲労強度を評価し、摩擦圧接継手の疲労強度もアプセット過程の変形入熱、もしくはアプセット寄りしろによって評価できることを報告している³³⁾。2017-T4、60601-T6アルミニウム合金の同種・異種摩擦圧接継手³⁴⁾、純チタンと純銅の異種摩擦圧接継手³⁵⁾の疲労特性のワイブル解析も試みている。また、摩擦入熱による摩擦圧接中の継手内温度分布のモデリングを行い、S25C鋼とSUS304鋼について、実際に接合した継手の熱影響部の組織からその妥当性を検証している³⁶⁾。

木村らは、従来から進めている摩擦圧接初期の接合面の焼付現象の解明に関連して、接合面の焼付は摩擦圧力が大きいほど、また摩擦速度が小さいほど低い温度で起きるという仮説を実験的に検証した結果を報告している³⁹⁾。また、彼らが提唱している低入熱摩擦圧接法の中・高炭素鋼への適用を検討するための、S35C鋼、S55C鋼の低入熱摩擦圧接の試みについても報告している。炭素の多い鋼では、接合面の酸化と、炭素量が0.4%を越える鋼では急冷した場合のマartenサイト変態による焼割れが問題になる。S35C鋼では、大きな摩擦圧力を加えることで接合面の酸化を抑制して健全な継手を得ることが出来たが、焼割れを生じるS55C鋼では、大きな摩擦圧力を加えると焼割れの発生は抑えられるものの、バリの生成速度が増して接合界面中心部に未接合部が生じるため健全な継手を得ることが困難であった³⁸⁾。

山本（尚嗣）らは、A1070工業用純アルミニウム³⁹⁾、A5052⁴⁰⁾、A5083⁴¹⁾アルミニウム合金とS10C鋼との摩擦圧接を行い、得られた継手の引張試験による強度評価、接合界面組織の詳細な観察を行って、アルミニウムの合金元素が接合界面の金属間化合物層の形成に与える影響、金属間化合物層の厚さと継手強度の関係の解明を試みた。同じAl-Mg系合金でも、A5052合金の継手と、Mg濃度がより高く、Mnも多く含むA5083合金の継手では、主に生成する金属間化合物が異なり、また摩擦時間が長くなると、A5083合金の継手ではMgを含む複合酸化物も界面に生成することが見出された。継手の引張強さと金属間化合物層の厚さは、A5052合金とA5083合金ではほぼ同一の関係に乗ったが、同じ厚さの金属間化合物層が生成していても、A1070純アルミニウムの継手はほかの合金の継手よりずっと小さな応力で破断することが見出された。また引張試験後の破面最表面を透過型電子顕微鏡で観察して、金属間化合物層の厚さが1 μ mに満たない場合でも、金属間化合物層が破面の伝播経路になることを見出した。

長谷川らは、都市ガス用のポリエチレン管の接続への適用をめざして、ポリエチレン管の摩擦圧接の研究を進めている^{42, 43)}。ポリエチレンは、これまで摩擦圧接が適用されてきた金属とは全く異なった物性を持つため、摩擦圧接の過程も金属のそれとは全く異なる。例えば、金属の摩擦圧接は基本的に固相接合であるが、高分子のポリエチレンは融解しない限り接合されない。そこでまず、ポリエチレン中実丸棒を用いた実験で接合界面の温度変化を詳細に調べて健全な継手が得られる接合条件を明らかにし⁴²⁾、それから同じ中実丸棒同士、また実際にガス管に用いられるのと同じポリエチレン管同士を接合して、得られた継手の評価と、接合初期に摩擦される接合面において生じる、ガス管の接合に摩擦圧接を用いた場合トラブルの原因となりうるポリエチレン粉の発生を抑制する方法を検討している⁴³⁾。

加藤らは、電気接点などへの適用が考えられる、アルミニウムと銅の接合に摩擦圧接を適用し、得られた継手の界面の組織と、引張強さ、靱性の観察を行い、また後熱処理が組織と継手性能に与える影響を検討した⁴⁴⁾。結果、接合ままの継手の界面に生じる反応生成物は、銅とアルミニウムの金属間化合物の θ 相が主であり、適切な接合

条件を選ぶことで母材のアルミニウムと同等の引張強さを持つ継手が得られるが、熱処理を加えると金属間化合物層の γ_2 相が多く発生して、この層が厚く成長すると、継手の引張強さ・靱性ともに急激に低下することが見出された。

篠田らは、回転軸をサーボモーターで駆動して、回転側材料の回転角を自由に制御できる位相制御摩擦圧接機を用いてA6061-T6アルミニウム合金角材の摩擦圧接を行い、得られた継手の接合界面の組織と引張強さを観察して、健全な継手が得られる条件を検討した⁴⁵⁾。結果、方形断面の角の部分まで接合された継手を得るためにはバリを十分に出して摩擦面を円形に近づける必要があり、なるべく熱影響が小さいままその状態を達成するためには、大きな摩擦圧力で短時間の摩擦で接合する必要があることが明らかになった。

3.3 拡散接合

坂元らは、ニューラルネットワークのひとつであるRBFネットワーク（放射状基底関数ネットワーク：Radial Basis Function Network）にベイズ推定を導入した手法（ベイジアンRBFネットワーク）を用い、実験と数値計算を相互に活用して、液相拡散接合におけるインサート金属合金設計とプロセスパラメータ最適化を一貫して行う、液相拡散接合プロセス最適化システムを開発した⁴⁶⁾。そしてこのシステムを用いてS45C鋼の液相拡散接合に用いるインサート金属合金の設計を行って、同じ作業を従来法で行った場合と比較して新しいシステムの優位性を検証している。さらにそのシステムを用いて、ニッケル基超合金IN738LCの液相拡散接合プロセスの最適化⁴⁷⁾、同じくニッケル基超合金のInconel718の均一化熱処理省略を目的とした液相拡散接合プロセスの開発⁴⁸⁾を行い、目標を満足するインサート金属合金設計とプロセスパラメータの最適化に成功している。

オ田らは、アルミニウム合金とステンレス鋼の拡散接合において、ステンレス鋼表面の酸化膜除去と再酸化防止を目的として、ステンレス鋼表面に銀、ニッケル、銅の保護金属膜をコーティングする、表面活性化プリコート法を開発しているが⁴⁹⁾、この保護金属膜とアルミニウム合金の界面反応性を明らかにするため、銀、銅、ニッケルのバルク体とA6061アルミニウム合金の拡散接合を行って界面反応層の成長を観察した。その結果から、A6061合金とこれらの金属の接合界面では、共晶温度以上の温度で接合を行うと、共晶反応による液相の生成がA6061合金表面の酸化膜を破碎して、拡散接合性の向上に寄与することを推論している⁵⁰⁾。

青山らは、超高温構造部材のためのモリブデン合金とグラファイトの拡散接合において、従来耐熱性接合材として用いられているZrをインサート金属として用いたものよりさらに高温に耐える継手を開発するため、Nb、Nb-Ti合金をインサート金属に用いた拡散接合を行い、Zrインサートの継手と比較した。接合組織の観察と、高温での曲げ試験によって継手の評価を行い、低温ではZrイ

ンサートの継手が最も高い強度を示すものの、高温では、温度上昇に伴う強度低下の小さい、54%Nb-Ti合金をインサート金属に用いた継手が、Zrインサートの継手に比べておよそ100 Kの高温強度改善の効果を示すことを見出した⁵¹⁾。

金井らは、SUJ2軸受鋼と、実用チタン合金Ti-6Al-4Vの拡散接合を行い、接合温度に対する界面反応生成物と、継手の引張強さ、伸びの変化を観察した。その結果、引張強さと伸びは接合温度に対して山形の変化を示し、ともに接合温度1250 Kで最大となった。また反応生成物は接合界面からSUJ2鋼側に生成し、主要な生成物は、接合温度の上昇に伴って $\text{FeTi}_2 \rightarrow \text{FeTi} \rightarrow \text{Fe}_2\text{Ti}$ と変化する事がわかった⁵²⁾。

長田らは生体インプラントに用いるチタン表面に、その中に新生する骨が入り込んで強固な機械的結合を作るポーラス構造を形成するため、チタン材表面へチタンメッシュを何層か重ねて拡散接合することを試みた。その結果、接合中に加える加重と接合温度を大きくするとメッシュ材の結合力は大きくなるが、同時にメッシュ材の塑性流動によって穴がつぶれるため、変形を押さえつつ必要な接合強さを得るための最適な接合条件を求めた⁵³⁾。

吉田らは、塑性加工できるセラミックス、超塑性を示すナノ結晶イトリア安定化正方晶ジルコニアY-TZPの開発と、これをインサート材に用いた超塑性拡散接合について紹介している⁵⁴⁾。

文 献

- 1) 中田一博：溶接学会誌，74-3 (2005)，148-151
- 2) 有年雅敏：溶接学会誌，74-3 (2005)，152-157
- 3) 伊藤勉ほか：溶接学会誌，74-3 (2005)，143-147
- 4) 朴勝煥ほか：溶接学会誌，74-3 (2005)，138-142
- 5) 加藤数良，時末光，北原孝施：軽金属，55-6 (2005)，259-264
- 6) 石川武ほか：溶接学会論文集24-2 (2006)，174-180
- 7) 藤井英俊：溶接技術，53-12 (2005)，60-67
- 8) 熊谷正樹，青木 健太：軽金属溶接，44-12 (2006)，560-564
- 9) 渡辺健彦ほか：溶接学会論文集，23-4 (2005)，603-607
- 10) 渡辺健彦ほか：溶接学会論文集，24-1 (2006)，108-115
- 11) 安井利明ほか：溶接学会論文集，23-3 (2005)，469-475
- 12) 田中晃二，熊谷正樹，吉田英雄：軽金属，56-6 (2006)，317-322
- 13) 藤井英俊，中田博：溶接技術，54-10 (2006)，68-72
- 14) 鈴木理一ほか：溶接学会論文集，24-3 (2006)，281-286
- 15) 日置進：溶接技術，54-11 (2006)，60-64
- 16) 立野高寛ほか：溶接学会全国大会講演概要，第79集，(2006)，58-59
- 17) 柴柳敏哉，前田将克，中 正明：軽金属，56-7 (2006)，347-353
- 18) 金永坤，藤井英俊，津村卓也：鑄造工学，78-9 (2006)，451-456
- 19) 森貞好昭：科学と工業，80-11 (2006)，547-552
- 20) 難波圭三：軽金属溶接，43-5 (2005)，1-6
- 21) 岩木俊一ほか：軽金属溶接，43-5 (2005)，7-17
- 22) 江口法孝ほか：軽金属溶接，43-5 (2005)，18-29
- 23) 谷川久男ほか：軽金属溶接，43-5 (2005)，30-37
- 24) 橋本武典，武田治郎，難波圭三：軽金属溶接，43-5 (2005)，38-45
- 25) 大久保克己，難波圭三：軽金属溶接，43-5 (2005)，46-57
- 26) 佐藤裕，杉浦祐介，粉川博之：軽金属溶接，44-5 (2006)，15-22
- 27) 佐藤裕，粉川博之：溶接学会誌，74-2 (2005)，25-28
- 28) 東山実樹，篠田剛，竹上弘彰：軽金属，56-10 (2006)，533-537
- 29) 武久浩之：軽金属，56-3 (2006)，178-183
- 30) 田中直ほか：軽金属，56-3 (2006)，162-165
- 31) 安富雅典ほか：軽金属溶接，44-5 (2006)，187-194
- 32) 桜井恵三ほか：高温学会誌，32-2 (2006)，145-150
- 33) 山本義秋ほか：軽金属，56-7 (2006)，366-370
- 34) 川井五作ほか：軽金属，56-1 (2006)，2-7
- 35) 辻野良二ほか：軽金属溶接，43-8 (2006)，386-391
- 36) 一色美博ほか：高温学会誌，32-4 (2006)，236-243

- 37) 木村真見ほか：溶接学会論文集，23-3 (2006)，460-468
- 38) 木村真見ほか：溶接学会論文集，23-4 (2006)，577-586
- 39) 山本尚嗣ほか：溶接学会論文集，23-4 (2005)，622-627
- 40) 山本尚嗣ほか：溶接学会論文集，23-2 (2005)，352-358
- 41) 山本尚嗣ほか：溶接学会論文集，23-3 (2005)，496-503
- 42) 長谷川正義，小倉和憲：溶接学会論文集，23-3 (2005)，476-483
- 43) 長谷川正義，小倉和憲：溶接学会論文集，24-3 (2006)，265-272
- 44) 加藤数良，時末光：軽金属溶接，43-8 (2005)，392-400
- 45) 篠田剛，石川和俊，竹上弘彰：軽金属，55-5 (2005)，210-215
- 46) 坂元理絵ほか：溶接学会論文集，24-1 (2006)，93-99
- 47) 坂元理絵ほか：溶接学会論文集，24-1 (2006)，100-107
- 48) 坂元理絵ほか：溶接学会論文集，24-3 (2006)，281-286
- 49) 西本和俊，才田一幸，黒田晋一：溶接学会論文集，18-4 (2000)，563-571
- 50) 才田一幸，黒田晋一，西本和俊：溶接学会論文集，23-3 (2005)，405-411
- 51) 青山齊ほか：溶接学会論文集，23-2 (2005)，337-343
- 52) 金井覚，瀬戸佐智生，伊藤正明：溶接学会論文集，23-3 (2005)，484-490
- 53) 長田圭司，落合清秀，大橋修：軽金属溶接，44-9(2006)，415-420
- 54) 吉田道之，若井史博：溶接学会誌，75-3 (2006)，171-174

3. 4 抵抗溶接

泰山正則

科学技術振興機構 (JST) の文献情報データベースサービス (JDream II) を用い、抵抗溶接に関係した文献検索を行った結果、国内外における報告は、2005年で94件、2006年で115件あった。本検索は全ての文献を網羅しているものでないが、2003，2004年では、約100件の検索結果が得られており、ほぼ同数の報告がなされていると考えられる。

抵抗溶接に関する報告は、スポット溶接，プロジェクトン溶接，フラッシュ溶接，シーム溶接などが取り上げられている。以下に主なものを紹介する。なお、各種溶接機の解説・適用例については、参考文献¹⁻⁵⁾を参照されたい。

スポット溶接に関する報告としては、亜鉛めっき鋼板^{6, 7)}，高張力鋼板^{8, 9)}，ステンレス，アルミニウム合金などの同種及び異種材料のスポット溶接法の開発，電極材料の開発¹⁰⁾，継手強度特性とその力学的解析¹¹⁻²³⁾，溶接プロセスにおけるモニタリング²⁴⁾やシミュレーション²⁵⁻²⁷⁾，溶接部の検査技術²⁸⁻³⁰⁾などが報告された。特に、車体の軽量化や高剛性化ニーズを背景として、軽量金属であるアルミと鋼の異材接合や高張力鋼の溶接技術の検討が進められ、アルミ／鋼の異材接合¹²⁻²²⁾では、継手強度や接合界面の金属間化合物の形成・成長に及ぼす鋼，アルミの母材成分²¹⁾，鋼表面の酸化物層やめっき層¹⁵⁻¹⁹⁾の影響が検討され、母材やめっき中のSiの影響が示された。また、電極形状^{15, 20)}，ウェルドボンドによる影響¹⁶⁾や連続打点性の検討¹⁷⁾など、多岐に渡る検討がなされている。一方、プロセスに関しては、鋼板を対象とした板厚差の大きい三枚重ね (薄板／厚板／厚板) 溶接でのナゲット形成挙動³¹⁾が検討され、薄板／厚板間，厚板／厚板間，それぞれにナゲットを成長させるためには、加圧力・溶接電流制御による2段階通電・2段階加圧プロセスが有効であることが報告された。さらに、片側スポット溶接では、その接合機構が検討され、多段階通電を用いることにより、上板の発熱を有効に利用しナゲットを成長させ、高い継手強度が得られる^{32, 33)}。

ことが示された。スポット溶接のシミュレーションに関しては、チリ発生現象²⁵⁾やナゲット形成^{26, 27)}に関するもの、電極劣化挙動²⁴⁾に関するものが報告され、実験結果と良く一致する手法が開発されつつある。また、検査技術では、非線形超音波を用いることにより、従来法(線形)超音波では検出できない微細な溶接欠陥の検出が可能²⁹⁾であることが示された。このように、材料、プロセス、モニタリング、シミュレーションなど多方面から様々な研究が活発に行われており、今後の展開が期待される。

フラッシュ溶接³⁵⁻³⁷⁾に関しては、建築用部材である型钢を対象として、接合工期の短縮を狙い、現場で使用可能な可搬式フラッシュ溶接システムが開発され、その溶接部の破壊靱性や残留応力などの特性が調べられている。

その他の溶接法として、2相ステンレス溶接では、HAZ部の組織変化による靱性低下を抑制するため、無加圧での突合せ抵抗溶接³⁸⁾やワイヤをインサートする手法³⁹⁾が提案され検討されている。

文 献

- 1) 吉田ら：最新のコンデンサ式プロジェクション溶接機の適用，溶接技術，54-3 (2006)，79-84.
- 2) 三野ら：大容量直流インバータ式プロジェクション溶接機，溶接技術，54-8 (2006)，58-62.
- 3) Wang et. al: Effect of Surface Treatments of Galvanized Steels on Process Properties of Projection Welding, Weld World 49-1-2 (2005), 39-41.
- 4) 山本ら：ワイヤシーム溶接による缶の製作，溶接技術，54-3 (2006)，72-78.
- 5) 古川：ステンレス鋼材の抵抗シーム溶接，溶接技術，53-3 (2005)，106-111.
- 6) 坂口ら：溶融亜鉛めっき鋼板の直流抵抗スポット溶接，溶接学会全国大会講演概要，78 (2006)，168-169.
- 7) 仲沢ら：亜鉛めっき鋼板の溶接に及ぼす二段通電の効果，材料とプロセス，18-6 (2005)，1507.
- 8) Subramaniam S et. al: Considerations for Spot Welding of Advanced High Strength Steels, SAE Tech Pap Ser (2006), 7.
- 9) Vural M et. al: Effect of Welding Nugget of Diameter on the Fatigue Strength of the Resistance Spot Welded Joint of Different Steel Sheet, J Mater Process Technol, 176-1-3 (2006), 127-132.
- 10) Palma Rodrigo et. al: Performance of Cu-TiC Alloy Electrodes Developed by Reaction Milling for Electrical Resistance Welding, J Mater Process Technol, 176-1-3 (2006), 127-132.
- 11) Tong Wei et. al: Deformation and Fracture of Miniature Tensile Bars with Resistance Spot Weld Microstructure, Metall Mater Trans A, 36A-10 (2005), 2651-2669.
- 12) 里中ら：抵抗スポット溶接によるアルミニウム合金異材接合部の継手性能評価，溶接学会全国大会講演概要，76 (2005)，136-137.
- 13) FURUKAWA ら：Relation between Welding Conditions and Temporal Change of Electrode Force, 溶接学会論文集，24-1 (2006)，3-9.
- 14) FURUKAWA ら：Influence of Electrode Pressure and Welding Conditions on the Maximum Tensile Shear Load, 溶接学会論文集，24-1 (2006)，10-16.
- 15) 漆原ら：抵抗スポット溶接によるアルミニウム/合金化溶融亜鉛めっき鋼板の接合 (第2報)，溶接学会全国大会講演概要，78 (2006)，162-163.
- 16) 漆原ら：抵抗スポット溶接によるアルミニウム/合金化溶融亜鉛めっき鋼板の接合 (第3報)，溶接学会全国大会講演概要，79 (2006)，376-377.
- 17) 岩瀬ら：溶融アルミめっき鋼板を用いたアルミニウム合金材と鋼材との抵抗スポット溶接による異種金属接合 (第1報)，溶接学会全国大会講演概要，77 (2005)，324-325.
- 18) 服部ら：溶融アルミめっき鋼板を用いたアルミニウム合金材と鋼材との抵抗スポット溶接による異種金属接合 (第2報)，溶接学会全国大会講演概要，77 (2005)，326-327.
- 19) 服部ら：溶融アルミめっき鋼板を用いたアルミニウム合金材と鋼

材との抵抗スポット溶接による異種金属接合 (第4報)，溶接学会全国大会講演概要，79 (2006)，380-381.

- 20) 漆原ら：抵抗溶接によるアルミニウム/高張力鋼板の接合 (第3報)，溶接学会全国大会講演概要，76 (2005)，134-135.
- 21) 漆原ら：抵抗溶接によるアルミニウム/高張力鋼板の接合 (第4報)，溶接学会全国大会講演概要，77 (2005)，322-323.
- 22) 渡辺ら：軟鋼と Al-Mg 合金の抵抗スポット溶接，溶接学会論文集，23-3 (2005)，491-495.
- 23) 中山：超小型試験片による局所材料強度特性評価，溶接学会誌，75-6 (2006)，461.
- 24) Ji C. T: Monitoring of Dynamic Mechanical Parameters in Resistance Spot Welding of Aluminium, Weld World, 49-1-2 (2005), 17-21.
- 25) 福本ら：スポット溶接 CAE によるチリ発生要因の検討，溶接学会全国大会講演概要，79 (2006)，382-383.
- 26) 土井良ら：抵抗スポット溶接シミュレーション技術の開発，自動車技術会学術講演前刷集，74-16 (2006)，13-16.
- 27) Hou Zhigang et. al: An Analysis of Resistance Spot Welding, Weld J, 85-3 (2006)，36-40.
- 28) 石川：超音波探傷装置を利用したスポット溶接部検査，溶接技術，3 (2005)，112-115.
- 29) 松田ら：非線形超音波画像による抵抗スポット溶接部の非破壊検査，溶接学会全国大会講演概要，76 (2005)，122-123.
- 30) Ikeda T et. al: Development of New Ultrasonic Inspection Technique for Spot Welds with Matrix Arrayed Probe and Saft, Weld World, 50-5-6 (2006)，3-13.
- 31) 沖田ら：高板厚比三枚重ね抵抗スポット溶接プロセスの開発 (第1報)，溶接学会全国大会講演概要，78 (2006)，164-165.
- 32) 平井ら：多段通電による片側点溶接技術 (第1報)，溶接学会全国大会講演概要，79 (2006)，384-385.
- 33) 池田ら：多段通電による片側点溶接技術 (第2報)，溶接学会全国大会講演概要，79 (2006)，386-387.
- 34) 福本ら：抵抗スポット溶接における電極劣化挙動の画像解析及び実験的シミュレーション，軽金属学会大会講演概要，109 (2005)，307-308.
- 35) 奥ら：新開発のフラッシュ溶接システムによる圧延 H 形鋼溶接部の破壊靱性，Trans JWRI, 34-1 (2005)，131-134.
- 36) 奥ら：圧延 H 形鋼のフラッシュ溶接で生じる残留応力とその特徴，溶接学会論文集，24-2 (2006)，162-167.
- 37) Wang et. al: FEM Simulation on Microstructure of DC Flash Butt Welding for an Ultra Fine Grain Steel, J Mater Process Technol 161-3 (2005), 497-503.
- 38) 山村ら：二相ステンレス鋼の突合せ抵抗溶接継手性能に及ぼすアップセット圧力及び時間の影響，溶接学会全国大会講演概要，79 (2006)，388-389.
- 39) 寺島ら：ワイヤをインサート材として用いた二相ステンレス鋼の抵抗溶接，溶接学会全国大会講演概要，78 (2006)，172-173.

3.5 爆発接合・圧延接合・電磁圧接

木村真晃

科学技術振興機構 (JST) の文献情報データベースサービス (JDream II) を用い、各キーワードについて2005年1月から2006年12月の間の発表された文献の検索を行った結果、爆発接合が60件、圧延接合が26件、電磁圧接が15件あった。2003年1月から2004年12月、および2001年1月から2002年12月の間では爆発接合がそれぞれ86件、79件、圧延接合が25件、27件、電磁圧接が6件、4件あったが、検索結果はすべての文献を網羅しているわけではないので数字変動の意味は論じない。以下に主なものを紹介する。

爆発接合については、同法の一般的な解説ならびに諸特性、応用例などの具体例を挙げ、その利点や問題点について簡潔に述べられている¹⁻³⁾。また、同法の界面に認められる波状模様の形成メカニズム解明のための検討が行われるなど現象解明に関する報告がいくつかあり⁴⁾、興

味深いものがある。さらに、Mg 合金同士⁵⁾、NiTi 合金同士⁶⁾、純 Ti/軟鋼⁷⁾、純 Ti/SUS304⁸⁾、Cu-Be 合金/SUS304⁹⁾、酸化物粒子分散強化銀/純銅¹⁰⁾など各種組合せについて、その継手性能や界面状態などが詳細に調べられている。このように、同法の各種材料への適用も盛んに行われており、基礎データの蓄積に繋がっている。また、水中衝撃波を用いる爆発接合により接合した継手の接合状態の改善方法¹¹⁾、数値解析により良好な継手を得るための接合条件を求める試みが行われるなど^{12, 13)}様々な研究が活発に行われており、今後の展開が期待される。

圧延接合では、真空圧延法により接合された純 Al/SS400 クラッド材や純 Al/純 Ti クラッド材について、その接合界面の構造と継手性能について調べられており、いずれもアモルファス層を介して接合されていることが示されている^{14, 15)}。また、A3003/SUS304L クラッド材について十字隅肉溶接継手の疲労試験を実施した結果、疲労強度が従来の爆着材と同等であることが報告されている¹⁶⁾。一方、繰返し圧延接合 (ARB) 法を利用して IF 鋼^{17, 18)}、純 Cu^{18, 19)}、純 Ni²⁰⁾、純 Al^{18, 21)}、A3103²²⁾、A8011²³⁾、AZ31²⁴⁾などの各種素材の微細組織を創成する方法や、純 Al/AZ31²⁵⁾、純 Al/純 Ni²⁶⁾、純 Zr/純 Cu²⁷⁾の組合せの多層積層板を作製することなども試みられている。このように、様々な素材・組合せに対して活発に研究が行われている。さらに、個々の方式は異なるものの接合部をレーザにより加熱を行い、その直後にロールで圧延して接合する方法について、亜鉛メッキ鋼板/A6061²⁸⁾、高張力鋼/A5052²⁹⁾、純 Ti/鋼材³⁰⁾、純 Ti/A5052³¹⁾、SUS304/A5052³²⁾などの組合せについて検討が行われており、いずれも圧下力が継手性能に大きく影響することが報告されている。向かい合わせた板同士を挟み込み、パルス的な電磁場を付加させて両者を高速度で接触させて接合を行う電磁圧接については、接合前の板材間の隙間により衝突速度が変化し、適切な隙間とすることで効率的な接合が可能であることが示されている³³⁾。また、SUS304 鋼同士や Al 系材料/鉄鋼材料の異材継手にも同法が適用でき、いずれも母材から破断するような良好な継手が得られ、かつ爆発接合の界面に類似した波状模様を示すことが報告されている^{34, 35)}。さらに、薄箔/薄板³⁶⁾、平板/線材^{37, 38)}、Cu 板/Al 平角線などといった様々な素材形状に対しても接合が可能であること³⁹⁾、Al 平板を重ね接合部が円周軌道を描いて接合することが可能であることが示されているなど⁴⁰⁾、同法の基礎解明から各種素材への適用、その応用に至るまで様々な報告があり、今後の展開が期待される。

3.6 接着・機械的接合・その他

JDream II を用いて「接着」と「機械的接合」をキーワードにして 2005 年 1 月から 2006 年 12 月の間の発表された文献の検索を行った結果、18 件あった。その中で、接着に関しては接着メカニズムに関与する一つのパラメータとして物質のぬれ性と溶解度パラメータを用い、その接着性の評価が可能であることが示されている⁴¹⁾。また、GFRP/金属⁴²⁾、C/C 複合材⁴³⁾、木材⁴⁴⁾などの各種材料についてその接着性の評価などが行われている。なお、接合・

複合技術一般についてまとめられた報告^{45, 46)}もいくつかあるので、そちらも参照されたい。

同じく、「超音波接合」をキーワードにして同期間の発表された文献の検索を行った結果、54 件あった。その中で、凝着機構解明のための検討⁴⁷⁻⁴⁹⁾など現象解明に関する報告があり、興味深いものがある。また、超微細粒鋼同士⁵⁰⁾、Al 系材料同士^{51, 52)}からポリスチレンやポリプロピレンなどの高分子材料⁵³⁾、SS400/Al 系材料⁵⁴⁾や A5052/SUS304⁵⁵⁾などの異種材料の組合せ、さらに電子デバイス関連として Al 箔/Pd 電極⁵⁶⁾、錫メッキ黄銅/純 Al⁵⁷⁾などに至るまで様々な素材・組合せについての研究も活発に行われている。さらに、超音波ワイヤボンディング法⁵⁸⁾による検討も行われるなど、様々な研究が活発に行われている。なお、超音波接合技術一般についてまとめられた報告^{59, 60)}もいくつかあるので、そちらも参照されたい。

さらに、予熱と攪拌により接合部を軟化させて高分子材料を接合する方法の検討や⁶¹⁾、陽極接合⁶²⁻⁶⁶⁾、常温接合⁶⁷⁻⁷⁰⁾など様々な接合方法についての報告があり、それぞれ研究が活発に行われている。

文 献

- 1) D. Cutter: What You Can Do with Explosion Welding, Weld J., 85-7 (2006), 38-43.
- 2) C. Merriman: The Fundamentals of Explosion Welding, Weld J., 85-7 (2006), 27-29.
- 3) 外本：衝撃変形・高速変形のメカニズムと応用 衝撃プロセッシングによる材料創製, 金属, 75-12 (2005), 1268-1272.
- 4) A. A. A. Mousavi et. al.: Numerical and experimental studies of the mechanism of the wavy interface formations in explosive/impact welding, J. Mech. Phys. Solids, 53-11 (2005), 2501-2528.
- 5) 佐藤ら：爆発圧着法によるマグネシウム合金クラッドの作製, 日本金属学会講演概要, 139 (2006), 261.
- 6) T. Xing et. al.: Transformation and Damping Characteristics of NiTi/NiTi Alloys Synthesized by Explosive Welding, Mater. Trans., 47-3 (2006), 658-660.
- 7) Y. Yang et. al.: Adiabatic Shear Bands on the Titanium Side in the Titanium/Mild Steel Explosive Cladding Interface: Experiments, Numerical Simulation, and Microstructure Evolution, Metall. Mater. Trans A, 37-10 (2006), 3131-3137.
- 8) P. Manikandan et. al.: Explosive Welding of Titanium/Stainless Steel by Controlling Energetic Conditions, Mater. Trans., 47-8 (2006), 2049-2055.
- 9) 森園ら：爆発圧着したベリリウム銅/ステンレス鋼接合体の界面組織と接合特性に及ぼす時効の影響, 銅と銅合金, 45 (2006), 232-236.
- 10) 森園ら：酸化物粒子分散強化銀と純銅の固相接合, 溶論, 23-2 (2005), 296-301.
- 11) 森ら：水中衝撃波を利用する爆発圧接法における接合状態の改善, 塑性加工春季講演会講演論文集, (2005), 75-76.
- 12) 白本ら：反射水中衝撃波による爆発圧着法 (衝撃圧作用の数値解析シミュレーションによる考察), 塑性加工連合講演会講演論文集, 56 (2005), 467-468.
- 13) 森ら：水中衝撃波を利用する爆発圧接法における衝撃圧力の制御法, 塑性と加工, 47-542 (2006), 195-199.
- 14) 山口ら：純 Al/炭素鋼クラッド材の接合部特性と微細構造の観察, 溶論, 24-3 (2006), 215-222.
- 15) 杉山ら：真空圧延接合法により作製した Al/Ti クラッド材の接合特性, 講概, 77 (2005), 342-343.
- 16) 佐藤ら：真空圧延接合法による A3003/SUS304L クラッド材の LNG 船への適用, 日本船舶海洋工学会論文集, 3 (2006), 271-275.
- 17) A. L. M. Costa et. al.: Ultra grain refinement and hardening of IF-steel during accumulative roll-bonding, Mater. Sci. Eng. A, 406-1/2 (2005), 279-285.
- 18) B. I. Li et. al.: Microstructure homogeneity in various metallic materials heavily deformed by accumulative roll-bonding, Mater. Sci. Eng. A, 423-1/2 (2006), 331-342.

- 19) Y. Jang et. al.: Role of trace elements on tensile behavior of accumulative roll-bonded pure copper, *J. Mater. Sci.*, 40-13 (2005), 3527-3529.
- 20) 小泉ら：繰り返し重ね接合圧延 (ARB) により結晶粒超微細化されたニッケルの内部摩擦, *日本金属学会誌*, 69-11 (2005), 997-1003.
- 21) H. Sharma et. al.: Development of Ultra High Strength and Nanocrystalline Materials by Accumulative Roll Bonding, *Mater. Sci. Technol.*, 3 (2005), 59-64.
- 22) S. G. Chowdhury et. al.: Evolution of texture during accumulative roll bonding (ARB) and its comparison with normal cold rolled aluminum-manganese alloy, *Scr. Mater.*, 54-9 (2006), 1691-1696.
- 23) H. W. Kim et. al.: Deformation Textures of AA8011 Aluminum Alloy Sheets Severely Deformed by Accumulative Roll Bonding, *Metall. Mater. Trans. A*, 36A-11 (2005), 3151-3163.
- 24) 泉ら：高速圧延を用いた繰り返し重ね接合圧延 (ARB) による AZ31 マグネシウム合金板の強ひずみ加工, 塑性加工連合講演会講演論文集, 57 (2006), 339-340.
- 25) M. C. Chen et. al.: The evolution of microstructures and mechanical properties during accumulative roll bonding of Al/Mg composite, *J. Alloy. Compd.*, 416-1/2 (2006), 169-172.
- 26) G. Min et. al.: Evolution of microstructure for multilayered Al/Ni composites by accumulative roll bonding process, *Mater. Lett.*, 60-27 (2006), 3255-3259.
- 27) 加藤ら：Zr/Cu 積層材の強ひずみ加工による非平衡化, *材料とプロセス*, 18-3 (2005), P25.
- 28) 西本ら：レーザ圧接法による亜鉛めっき銅板とアルミニウム合金の接合, *講概*, 77 (2005), 242-243.
- 29) M. Kutsuna et. al.: Laser Roll Welding of High Strength Steels and Aluminum Alloy for Car Light Panels, *Proc. JAAA 2005*, (2005), 163-171.
- 30) 杵名ら：純チタンと低炭素鋼のレーザロール溶接の研究, *講概*, 76 (2005), 72-73.
- 31) 杵名ら：界面層のミクロ組織及び継手強度に及ぼす溶接条件の影響, *講概*, 77 (2005), 240-241.
- 32) 杵名ら：ステンレス鋼とアルミニウム合金のレーザロール溶接による異種金属接合, *講概*, 79 (2006), 270-271.
- 33) 岡川ら：衝撃電磁シーム溶接, *講概*, 76 (2005), 126-127.
- 34) 田村ら：ステンレス鋼の電磁シーム溶接, *講概*, 79 (2006), 374-375.
- 35) T. Aizawa et. al.: Seam Welding Method using Magnetic Pressure from One Side, *Proc. JAAA 2005*, (2005), 97-105.
- 36) 相沢ら：アモルファス金属箔の電磁圧接, *講概*, 78 (2006), 174-175.
- 37) 相沢ら：アルミニウム端子板と電線の電磁圧接 (第1報) - 板と単線の接合 -, *Proc. Mate 2006*, 12 (2006), 181-184.
- 38) 花崎ら：アルミニウム端子板と電線の電磁圧接 (第2報) - 板と撚り線の接合 -, *Proc. Mate 2006*, 12 (2006), 185-188.
- 39) 花崎ら：純銅端子板とアルミニウム平角線の電磁圧接, *講概*, 79 (2006), 368-369.
- 40) 相沢ら：アルミニウム薄板の周回電磁シーム溶接, *軽金属溶接*, 44-1 (2006), 20-25.
- 41) 森井：高分子材料の溶解度パラメータと接着性に関する検討, *電子情報通信学会技術研究報告*, 106-132 (2006), 29-32.
- 42) 松崎ら：孔空処理法による GFRP/金属一体成形継手の開発, 強化プラスチック, 52-7 (2006), 319-323.
- 43) 小山ら：セラミックスの接合・接着の最前線 C/C 複合材料の耐熱接合技術, *セラミックス*, 41-6 (2006), 449-453.
- 44) 小松：木材および木質材料の接合, 橋梁と基礎, 39-8 (2005), 131-132.
- 45) 岡井ら：接合・複合, 塑性と加工, 47-547 (2006), 754-757.
- 46) 宮入：最近の金属材料の接合技術, 検査技術, 10-9 (2005), 25-34, 78.
- 47) 前田ら：超音波微細接合における初期凝着形成機構, *Proc. Mate 2005*, 11 (2005), 405-408.
- 48) 北森ら：超音波接合による太径アルミニウムワイヤと電極の凝着界面組織, *Proc. Mate 2006*, 12 (2006), 345-348.
- 49) 山根ら：超音波接合におけるウェッジツール先端部の振動とワイヤ/基板界面凝着, *Proc. Mate 2006*, 12 (2006), 349-352.
- 50) 難波ら：超微細粒鋼の超音波付加接合, *材料とプロセス*, 19-5 (2006), 1022.
- 51) H. Imai et. al.: Finding the Optimum Parameters for Ultrasonic Welding of Aluminum Alloys, *JSME Int Journal. Ser A*, 48-4 (2005), 311-316.
- 52) T. Ishikuro et. al.: Ultrasonic Welding of Thin Alumina and Aluminum Using Inserts, *JSME Int. Journal. Ser A*, 48-4 (2005), 317-321.
- 53) 久松ら：PS, PP 成形品の超音波接合機構の検討, *成形加工*, 16 (2005), 275-276.
- 54) 作山ら：アルミニウム合金と鉄鋼の超音波接合, *講概*, 77 (2005), 348-349.
- 55) H. A. Aleem et. al.: Evaluation by Ultrasonic Testing and TEM Observation of Bond Interface for Ultrasonic Bonds of 5052/SUS304 and 5052/SPCC, *溶論*, 23-2 (2005), 194-202.
- 56) 櫻井ら：誘電体皮膜を有するアルミニウム箔とパラジウム電極との超音波接合, *Proc. Mate 2005*, 11 (2005), 395-398.
- 57) 村上ら：錫めっき黄銅とアルミニウムの超音波接合に関する研究, *Proc. Mate 2005*, 11 (2005), 399-404.
- 58) 山根ら：Al ワイヤボンディングにおけるループ共振の解析, *Proc. Mate 2005*, 11 (2005), 409-412.
- 59) 高野：高付加価値化を推進する二次加工技術 最新二次成形加工技術の動向, *プラスチック*, 57-7 (2006), 61-66.
- 60) 松岡：環境にやさしい接合技術 - 異種材料間の超音波接合 -, *機械の研究*, 58-1 (2006), 179-187.
- 61) 外輪ら：加熱工具と攪拌を利用した高分子材料の接合機構と継手特性, *溶接構造シンポジウム 2006 講演論文集*, 2 (2006), 749-752.
- 62) K. M. Knowles et. al.: Anodic bonding, *Int. Mater. Rev.*, 51-5 (2006), 273-311.
- 63) 萩野：ビギナーのための MEMS 設計・製造技術 陽極接合, *電子材料*, 45-11 (2006), 62-67.
- 64) 高橋ら：各種金属とホウケイ酸ガラスの陽極接合, *講概*, 77 (2005), 340-341.
- 65) 高橋ら：逆電圧を加えた銀含浸ガラス陽極接合継手中の銀析出物の形成過程, *講概*, 78 (2006), 10-11.
- 66) 高橋ら：アルカリイオンを他元素で置換したホウケイ酸ガラスとコバルト合金の陽極接合継手強度, *講概*, 79 (2006), 348-349.
- 67) 須賀：常温接合とは？ - その適用と実用化 -, *溶接技術*, 54-7 (2006), 76-80.
- 68) 須賀：セラミックスの接合・接着の最前線 無機材料ウエハの表面活性化常温接合, *セラミックス*, 41-6 (2006), 424-428.
- 69) 高木：MEMS/NEMS の最前線 ウエハ常温接合技術, *表面科学*, 26-2 (2005), 82-87.
- 70) 西条ら：アルミニウム/銅および銅/銅の表面活性化常温圧接強度に及ぼす表面粗さの影響, *日本金属学会誌*, 69-7 (2005), 560-566.