

溶接・接合技術の進歩と動向

Progress and Trend of Welding and Joining Technology

平田好則 大阪大学国際共創大学院 特任教授
Yoshinori Hirata 大阪大学 名誉教授

1 はじめに

溶接・接合技術は、自動車をはじめ、重工、造船、電力、石油化学、建築などの基幹産業における組立て・製造工程の基盤技術として広く利用されている。溶接プロセスは材料局部に熱を集中させ、溶かしてつなぐ技術であり、溶接部は製品の一部となる。しかし、急速な加熱・冷却は溶接部の強度や耐食性を劣化させ、同時に変形や残留応力発生の原因にもなる。この溶接プロセスに内包する不完全性は、世界的にも共通の認識がなされ、ISO 国際品質管理規格において「特殊工程」と位置づけられており¹⁾、技術者・技能者の知識や技量、経験による施工管理に加えて、放射線や超音波などによる非破壊検査を通して、継手部の信頼性を確保している。

溶接施工技術の範囲には、継手品質の確保はもとより、溶接前後の材料調達から曲げ・成形加工、機械加工、熱処理、仕上げの精度なども含まれるため、基幹産業の各分野においては、蓄積されたノウハウや暗黙知を駆使しながら、製造工程全体にわたる品質レベルと生産性の向上に努めてきたと言える。しかし、急速なグローバル化の進展は、従来にも増して製品の低価格化や納期の短縮化を誘導し、あらゆる面から溶接工程を含む生産システムの効率を高める検討が進められている。本稿では、生産システムの高効率化の観点から、アーク溶接プロセスの自動化・ロボット化、デジタル化、非破壊検査を含むセンシング・制御などの現状と動向について述べる。

2 アーク溶接プロセスの高効率・高性能化

製造各分野ではアーク溶接が多用されており、さらに自動化・ロボット化に適したガスシールドメタルアーク (GMA) 溶接法の研究開発と実用化が活発に行われているので、その現状について紹介する。

図1にGMA溶接の原理を示す。GMA溶接はシールドガスの種類によってマグ溶接 (Ar + 20% CO₂ 混合ガス) や炭酸ガス溶接 (100% CO₂ ガス)、ミグ溶接 (Ar ガス) と呼ばれる。GMA溶接では、溶接ワイヤと母材がアーク放電の電極となり、溶接電源から電力が供給される。トーチノズルからシールドガスが流出し、大気から溶融金属を保護 (シールド) するとともに、同時にアーク放電のプラズマガスとなる。溶接ワイヤと母材はアーク熱により溶融する。溶接ワイヤの先端が溶融すると、溶滴となって母材へ移行し、溶接部を形成する。GMA溶接の特長として、他の溶接法に比べ、ワイヤが溶融する速度が大きいので、単位時間当たりの母材への溶着量が多く、高能率な溶接ができること、溶接ワイヤはスプールに巻かれており連続的に供給されるので、溶接作業が途切れることがないなどが挙げられる。このため、自動化やロボット化に適する溶接法として、もっとも広く利用されている。

しかし、溶接ワイヤ端に形成される溶滴は、シールドガスの種類や電流値に依存して、その大きさや形状が異なる。従って、溶滴がワイヤ端から離脱し、溶融池へ移行する毎に、アーク長やアーク発生位置が断続的に変化する。このこ

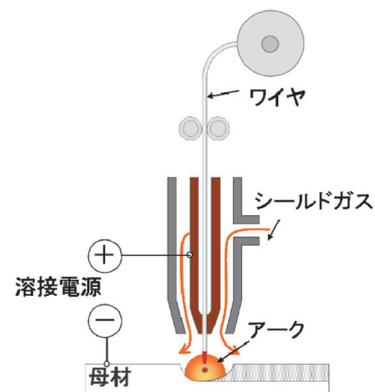


図1 ガスシールドメタルアーク (GMA) 溶接の原理

とは、移行現象の安定性が溶接品質と作業性に直結していると言える。溶融金属の移行形態は大別すると、図2に示すようにワイヤ端の溶滴がアーク空間を通過して母材の溶融池へ移行する自由移行と、溶滴が溶融池表面と接触して移行する橋絡（短絡）移行とに分類される。実際にはアークの発生形態がシールドガスの組成や電流値によって大きく異なるため、溶滴離脱の駆動力として重要な電磁力の方向や大きさに影響し、図3に示すように移行形態の違いとして表れる。ワイヤ端から移行する溶滴サイズが大きい場合やふぞろいになると、溶滴移行に伴うアーク長の変動が大きく、また、スパッタを発生するなど好ましくない。実用的に溶接品質や生産性を向上するためには、いずれの移行形態においてもスムーズな溶滴移行を実現することが必要である。そのためには、電流波形やワイヤ送給速度を精密にかつ高速制御できる溶接電源・機器の適用と、目的に応じてシールドガス組成とワイヤの選択が重要である。

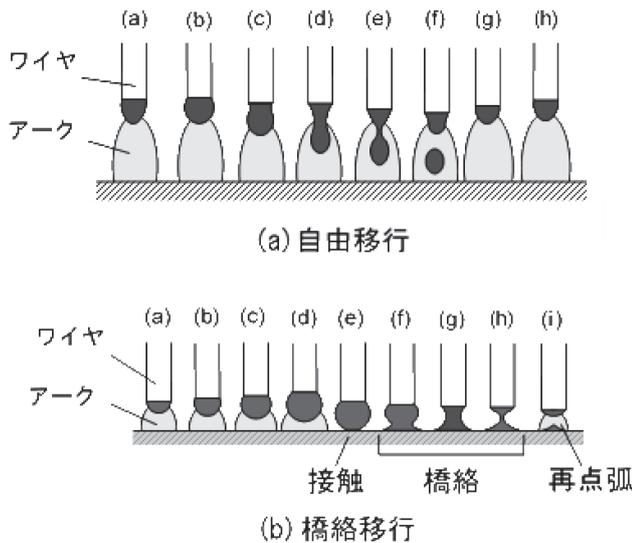


図2 電極ワイヤからの溶滴移行

図4は高効率・高性能化を目指して、国内・海外の溶接機メーカー、溶接材料・ガスメーカーが開発したGMA溶接法を電流・電圧条件上に並べたものである²⁾。それぞれ商品名で示しており、高い溶着量を確保できるものや低電流でも極めて安定な溶接ができるなどのキャッチフレーズで、市場に投入されている。1980年にはじめてチョッパ式のトランジスタ電源が登場したが、1984年頃からインバータ電源になって、アーク溶接機の性能が向上した。その後、半導体技術・回路設計技術のさらなる進歩により、インバータ電源の性能が格段に向上し、10A/μs以上の高速の電流制御が可能になった。また、DSP (Digital Signal Processor) 素子が開発され、コンピュータのCPU (Central Processing Unit) から直接にすべてデジタルで高速に、溶接電流・電圧に加えてワイヤ送給量をコントロールできるようになり、ハード的には溶接現象を精密に制御できるポテンシャルにまで達した³⁾。さらに、後述する溶接電流の波形制御やワイヤ送給速度制御などの詳細を、プログラムソフトによってデジタル制御できるASIC素子 (Application Specific Integrated Circuit) が開発された。制御の詳細は溶接現象の機構理解に依存しており、その現象解明の進捗に合わせて、逐一プログラムを変更することで、これまで以上に適切で、合理的な制御が行えるようになって

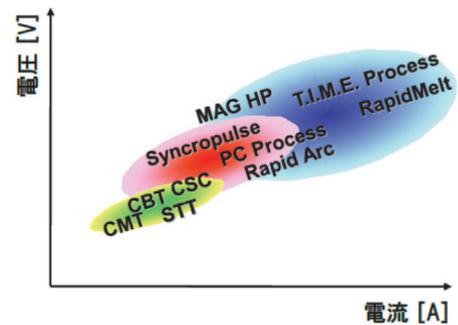


図4 種々のGMA溶接法とその適用範囲

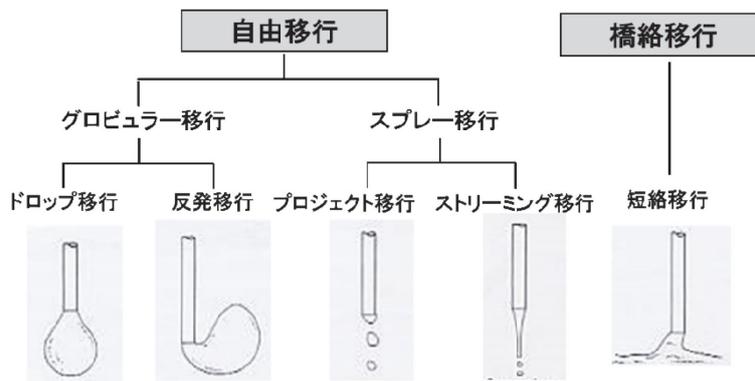


図3 IIW 分類による溶滴移行形態 (IIW Doc.XII-636-76,1976)

きた。

溶接工程ではスパッタと呼ばれる溶接火花が飛散し、作業環境を悪化させるが、トーチノズルや母材にスパッタが付着すると、溶接品質とともに生産効率を低下させる。すなわち、トーチノズルへのスパッタ付着はシールドガスの流れに乱れを生じさせ、溶接部への大気の影響などを招くため、定期的にスパッタ除去をする必要がある。また、母材へのスパッタ付着は、製品表面の外観とともに耐食性にも影響するので、除去する工程が必要となり、生産効率が低下する。

図5は上述の制御技術の適用により、スパッタを大幅に低減する効果を発揮する短絡移行形式のGMA溶接の動作原理を示す。図5(a)は、アークでワイヤを溶かして溶滴を作り、ある大きさになると、電流を下げ、低い電流値で溶融池とソ

フトコンタクトして、橋絡させ、その後、短絡電流による電磁ピンチ力で溶融金属の橋絡部を切ってアークを再点弧させ、一連のプロセスを繰り返すものである⁴⁾。スパッタ低減のポイントは溶滴とプールとのソフトタッチと再点弧する前に電流を下げるところにある。一方、図5(b)では溶滴と溶融池に形成された橋絡部を破断するのに、電磁ピンチ力ではなくワイヤ送給の方向を反転させ、機械的に引きちぎる方法である⁵⁾。これらのプロセスはスパッタ低減効果に加え、溶込みの安定化など溶接品質も向上し、いずれも自動車関連分野をはじめとする製造各分野で、その適用が拡大している。

3 アーク溶接技術の智能化・デジタル化

この10年ほどの間に、コンピュータやカメラなどが高性能となり、さらに低価格となったので、施工現場に可視化機器が導入され、センシング・制御技術が飛躍的に進歩した。従来の溶接ロボットでは、ティーチングと呼ばれる溶接線や開先部などの位置情報をあらかじめロボットに教示する必要があり、人がロボットアーム先端に取り付けられた溶接トーチを持って、部材の溶接位置に複数点タッチすることで、位置情報を教示する作業を行う。最近の溶接ロボットにはオフライン・ティーチング機能があり、CAD図面から溶接位置を指定することができるので、コンピュータ上で溶接すべき位置を教示できる。しかし、溶接中に熱変形が生じ、時々刻々と溶接位置が変化するので、センサーを用いて監視し、修正する作業が必要となる。このため、人の目や耳の代わりになるセンサが用途に応じて開発されてきた。現在、実用されているセンサにはタッチセンサ、アークセンサ、レーザセンサ、カメラセンサなどがあり、さまざまな制御手法をリンクさせることで、開先ならいや適応制御などを行うことが可能と

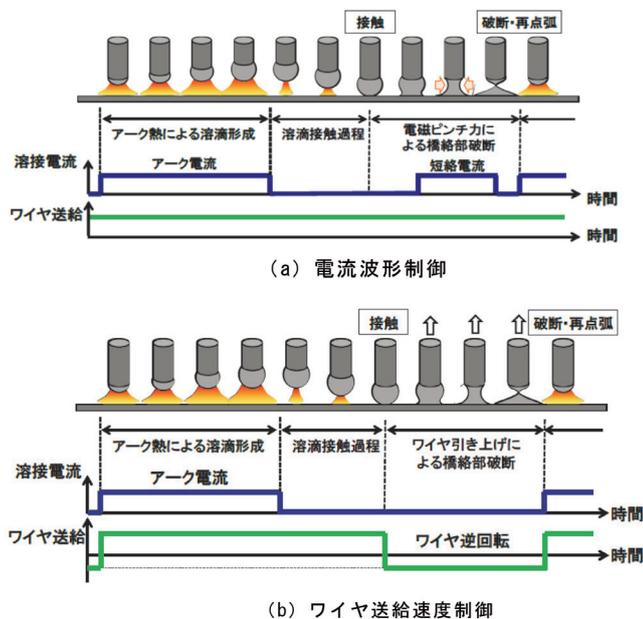


図5 コントロール短絡移行GMA溶接の原理

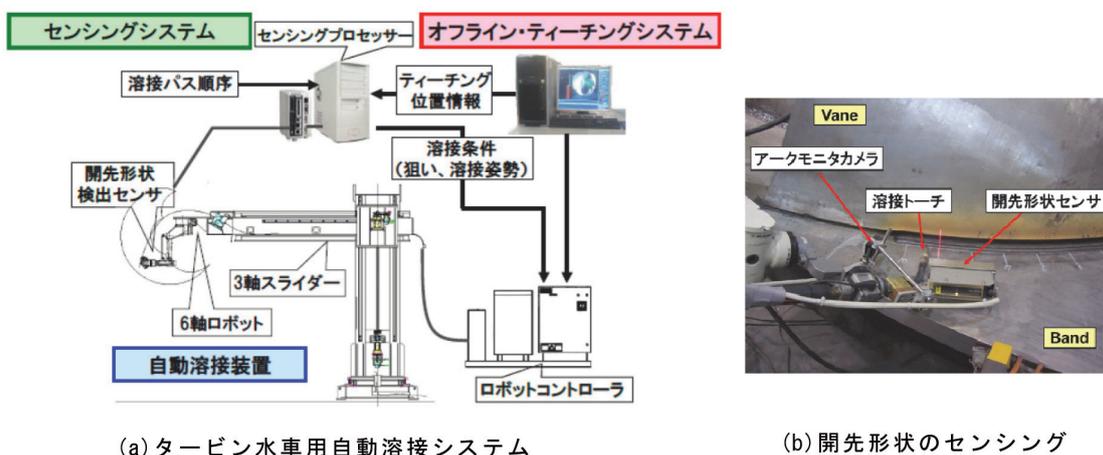


図6 知能化ロボット溶接システムの例

なっている。図6は水力発電用水車ランナーの現地溶接に適用されたオフライン・ティーチングとセンシングシステムを組み合わせた例であるが⁶⁾、製造各分野における溶接システムの自動化レベルが着実に高まっている。

一方、精密計測技術などの進歩に伴い、溶接施工中のオンライン非破壊検査技術が開発・実用化され、生産システムの高効率化を促進している。その例のひとつとして、図7にレーザー超音波検査法を示す。母材表面にパルスレーザを照射することで、照射点が瞬時に加熱され、膨張収縮することで、非接触で超音波を誘起させることができる。このパルスレーザによって発信された超音波音源を用いて、溶融池の形状や溶接欠陥を検出する手法である。検出側も表面の微小変位をレーザで計測するので、非接触でその場計測ができる。すでにタービンロータのナローギャップ溶接施工中の欠陥検出に

実用化されており、施工時の信頼性を高めている⁷⁾。

溶接ロボットは与えられた溶接位置情報に基づいて、溶接トーチを忠実に動かす機能を有するが、溶接電流や電圧、溶接速度などの溶接条件はすべて予め施工実験によって得られた条件やデータベースに基づいて、人がロボットに教示(入力)する必要がある。計算科学の進歩に伴い、溶接現象や変形などを精度よく予測できる数値シミュレーションモデルの開発が進められ、ソフトウェアとして整備されつつある。図8は様々な継手形式や溶接姿勢に応じて、溶接現象を数値シミュレーションしたものである⁸⁾。図(b)(c)に示すように、立向溶接や上向溶接では、入熱とともに溶融池が大きくなり、重力の影響で溶融池金属が垂れ下がることになり、シミュレーションを活用して適正な溶接条件を選択することが可能になる。また、図(f)に示す厚板の多層盛溶接では、トーチ

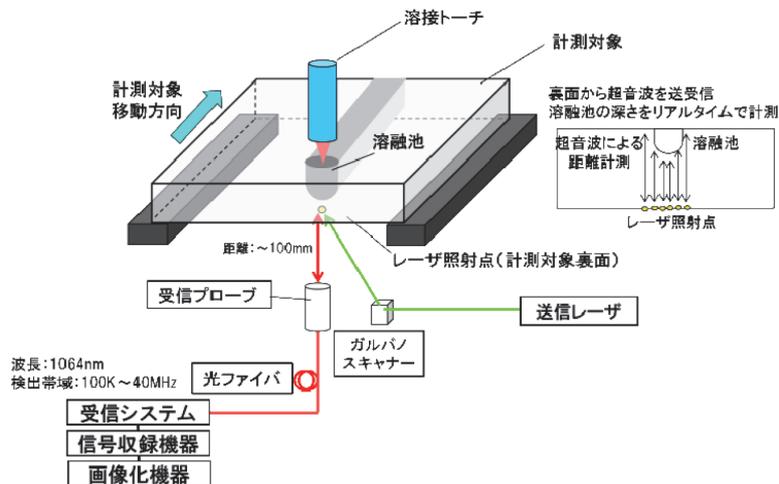


図7 レーザ超音波検査法の原理と装置

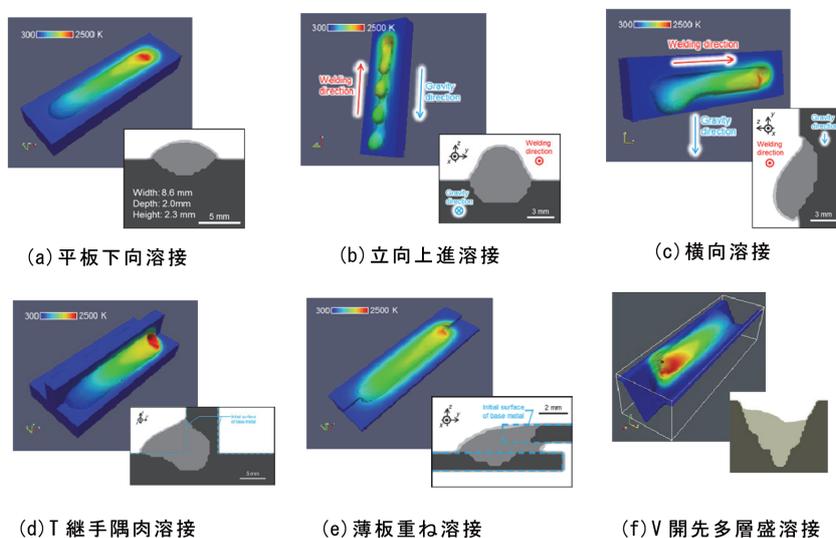


図8 様々な継手形式・溶接姿勢に対応したマグ溶接の数値シミュレーション

チ狙い位置や溶接姿勢、溶接条件によって各パスの溶込み形状が異なり、未溶融部など欠陥が発生する場合もあり、シミュレーションを用いて、予め適正条件を探索することが可能になる。現在、SIP/JSTプロジェクトにおいて「溶接部性能保証のためのシミュレーション技術の開発」(代表：阪大 廣瀬教授) が実施されており、本プログラムソフトは阪大サイバーメディアセンターにインストールされ、国内のメーカーはインターネットを通して利用できるよう計画されている⁹⁾。これらのソフト技術はCAD/CAMシステムとのリンク、溶接機の知能化など生産・開発サポートツールとしても活用されるものと考えている。

4 ワイヤーク積層造形技術

知能化やデジタル化によってGMA溶接機器の性能が向上し、ロボットやコンピュータ、センサなどの周辺技術の飛躍

的な進歩によって、GMA溶接による積層造形技術(WAAM: Wire Arc Additive Manufacturing)の開発と実用化が盛んに行われている。積層造形技術は金属や樹脂の粉末やワイヤをレーザーやアーク、電子ビームなどの熱源で溶融・凝固させることで、材料を積み上げ、成形する方法である。樹脂分野では液体樹脂を紫外線で硬化させるラピッドプロトタイプングが1980年代後半から始まった。一方、溶接分野では溶接技能者の技量向上の手法にも関連し、古くから溶接アートとして花瓶や動物など様々な物体を手溶接で作成することが行われてきた。1990年代になり溶接ロボットのトーチ狙いや位置の精度が向上するとともに、マグ溶接による積層造形の特許が取得されているが、この5-6年の間に世界各国の機械装置メーカーや溶接機メーカーなどが市場参入してきたので、今後のものづくり手法の一つとして普及する可能性を秘めている。図9に示すTi-6Al-4V製のランディングギアはBTF(素材重量/製品重量)比が1.2で、従来手法から22kg節減できるとしている¹⁰⁾。また、本年の国際溶接学会(IIW)年次大会では、オランダの船舶用プロペラメーカーがMn-Alブロンズ材で450kgのプロペラを製造し、3船級の認定を受け、試運転が行われたことが発表された。

WAAMプロセスでは溶着金属を積み上げていく過程で、熱が蓄積されるので、安定な溶融池を維持する必要がある。併せて、各積層パスのマイクロ組織を揃え、積層部材の性能を確保するために冷却速度を調整する必要がある。GMA溶接パラメータの電流や移動速度などを制御することになる。実用的には製作対象の形状や大きさ、溶着箇所に応じて、溶接パラメータを調整することになるので、数値シミュレーションは有用なツールとなる。シンプルな積層造形の例として、直線状に積み上げる場合の計算例を図10に示す¹¹⁾。な

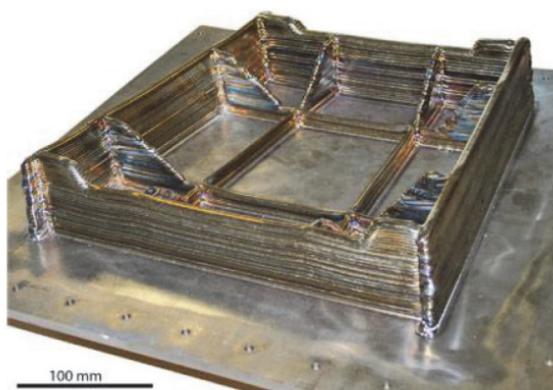


図9 Ti-6Al-4V 製ランディングギア (機械加工前)

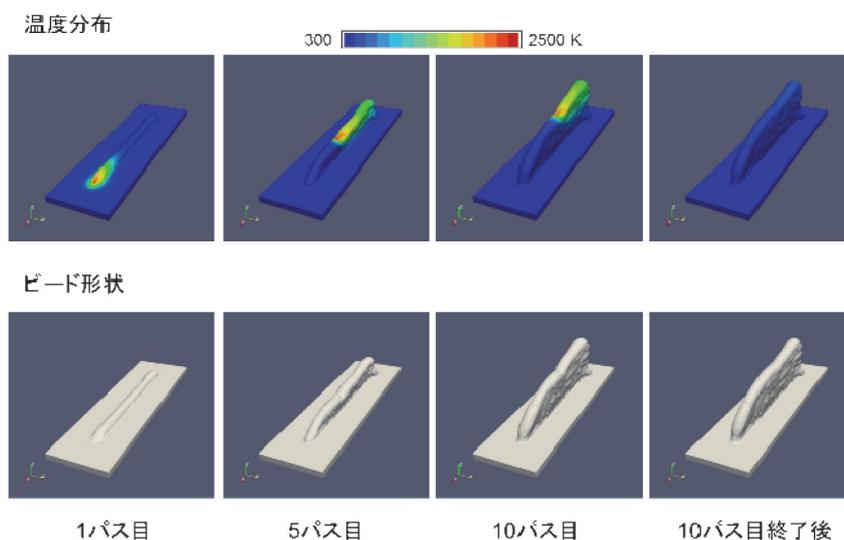


図10 WAAM プロセスの数値シミュレーション例

お、WAAMプロセスではGMA溶接による金属積層と同時にピーニングなどを行い、機械的性質を確保している。

5 NEDO/ISMA プロジェクトにおける接合技術開発¹²⁾

経済産業省が未来開拓研究プロジェクトとして策定し、2013年度よりスタートした「革新的新構造材料等研究開発」(PL:岸 輝雄東京大学名誉教授)は、自動車をはじめとする輸送機器の軽量化を通して、エネルギーを節約し、CO₂排出量を削減しようとするプロジェクトである。このプロジェクトはNEDO委託事業として新構造材料技術研究組合 (ISMA) によって運営されている。

本プロジェクトでは軽量化に資する中高炭素鋼の超ハイテン材やアルミ、マグネ、CFRPなどの材料開発を行っている。そして、車体軽量化に向けて、これらの開発材料とともに既存材料も含めて、適材適所に採用するマルチマテリアル構造に対応する接合技術開発を行っている。具体的には、超ハイテン材同士、鋼板/非鉄金属、金属/樹脂・CFRPなどをつなぐ接合技術を確立する必要がある。図11にマルチマテリアル構造に対応した接合技術開発を示す。材料の視点からは中高炭素鋼の超ハイテン材の接合技術と異種材料の接合技術に大別できる。接合プロセスには、様々なエネルギー源やメカニズムを用いた手法が開発・実用化されているが、溶融接合、ろう接、固相接合/界面溶着、接着プロセス、機械的締結に分類される。これら接合プロセスの選択は、接合強度や疲労強度、環境耐久性などの継手性能に大きく依存するが、量産技術とするためには、生産性とコストの観点が重要となる。

図12に国内自動車メーカーで実用化されている接合技術と本プロジェクトの開発技術を示す。ここでは構造材料として鋼材、アルミ材、複合材をとりあげている。円を六等分し、それぞれの線分に各材料を当て、例えば鋼材と鋼材の間の領域に鋼材同士の接合プロセスをプロットしている。同心円の内側に実用技術、外側にISMA開発技術として区分している。まず、内側の円に示される実用技術に着目すると、欧米も含めて現状では鋼材使用率が圧倒的に高く、主たる接合プロセスは抵抗スポット溶接 (RSW) であり、アーク溶接 (GMAW) も多用されている。また、レーザ性能が向上するとともに設備が比較的安価になり、レーザ溶接 (LBW) やレーザブレードング (LBr) が実用されている。さらに、車体剛性を高めるために、接着 (AB) との併用が行われている。次に、鋼材/アルミの異材接合、アルミ同士の接合プロセスでは、機械的締結のセルフピアシングリベット (SPR) とともに摩擦攪拌接合 (FSW、FSSW) が実用されている。なお、アルミ/複合材の異材接合はブラインドリベット (BR) が適用されている。

ISMAプロジェクトでは、鋼材として中高炭素鋼の超ハイテン材が開発されており、その接合プロセスとして、抵抗スポット溶接 (RSW)、レーザ溶接 (LBW)、アークスポット溶接 (GMAW)、摩擦攪拌接合 (FSW、FSJ) が開発されている。一方、異材接合技術では、鋼材/アルミには抵抗スポット溶接 (RSW) と接着 (AB)、アルミ/CFRPには摩擦攪拌点接合 (FSSW) や摩擦重ね接合 (FLJ)、レーザ溶着 (LAMP)、接着 (AB) の開発が進められている。また、鋼材/CFRPには摩擦重ね接合 (FLJ) やレーザ溶着 (LAMP)、接着 (AB) が取上げられている。

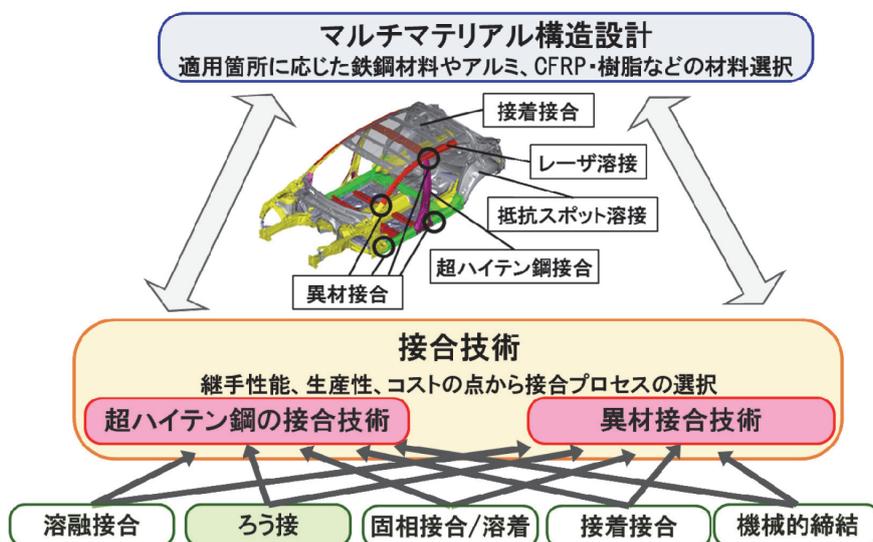


図11 マルチマテリアル構造に対応した接合技術開発

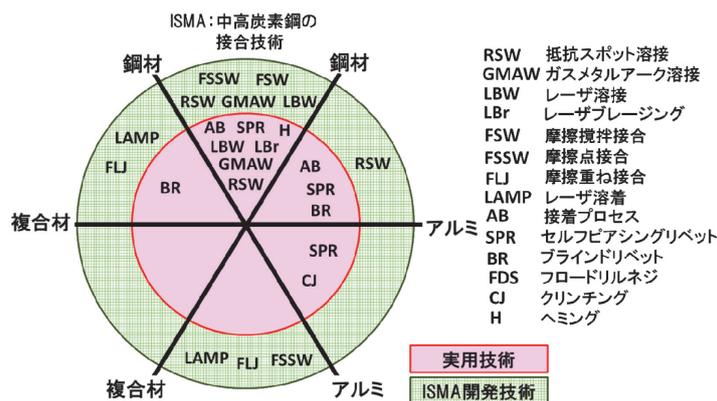


図12 日本の実用技術とISMAプロジェクトの開発技術

6 おわりに

グローバル化の急速な進展によって、情報をはじめ、モノ、人、金融など、あらゆるものが相互に影響を及ぼす状況となり、既存の産業構造や技術分野の枠組みにとらわれることなく、経済や社会の構造が変化する時代になってきた。ドイツではインダストリー4.0、米国ではインダストリアル・インターネットなどと呼ばれる「第4次産業革命」とも言える変革期を迎え、ICT(情報通信技術)、IOT(もののインターネット)を活用したものづくりのイノベーションが叫ばれているが、溶接・接合技術はそのプロセスの複雑さのため、他の技術分野に比べて定量化・デジタル化の進展が遅れていると言える。

我が国が世界でトップレベルのものづくり国家として発展していくためには、自動車や重工、インフラ分野などの基幹製造産業が高い国際競争力を維持していくことが不可欠であり、そのためには、その基盤技術である溶接・接合技術を大きく革新する必要がある。すなわち、溶接プロセスがもつ不完全性を克服し、設計・施工の時点で接合部あるいは継手部の性能を保証できる新しい溶接・接合技術(ノベル・ジョイニング技術)を開発・実現しなければならないと考えている。溶接・接合後の試験・検査や補修を大幅に減らすことができるようになると、技術者・技能者による製造管理体制も大きく変えることが可能となる。これらは生産システムを革新する駆動力になるとともに、高効率生産や高付加価値の製品創成につながることを考えている。

参考文献

- 1) ISO 9001 : 2000/JIS Q 9001 : 2001「品質マネジメントシステム—要求事項」
- 2) 平田好則:溶接プロセスはどう進むか, 溶接法ガイドブック, 溶接法研究委員会編, 溶接学会, 6 (2008)
- 3) 平田好則: 溶接学会誌, 74 (2005) 7, 473.
- 4) 恵良哲生, 井手章博, 上園敏郎, 上山智之, 平田好則: 溶接学会論文集, 27 (2009) 3, 189.
- 5) K.Himmelbauer: The CMT-Process - A revolution in welding technology, IIW Doc.XII-1875-05, (2005)
- 6) T.Kato, K.Aoyama, T.Oodake, T.Aikawa, S.Asai, S.Sato and H.Takebayashi: Development of on-site automatic welding system for large-sized water wheel runner, IIW Doc.XII-2034-11, (2011)
- 7) Y.Fujita, T.Ogawa, S.Asai, S.Yamamoto, T.Ohdake and M.Ochiai: Welding in the World, 56 (2012) 11-12, 15.
- 8) 荻野陽輔, 平田好則, 浅井知: 溶接学会 平成27年度秋季全国大会講演概要集, 97 (2015), 46.
- 9) 浅井知, 田中学, 川人洋介, 茂田正哉, 野村和史, 松田朋己, 荻野陽輔: 溶接学会誌, 86 (2017) 1, 27.
- 10) S.W.Williams, F.Martina, A.C.Addison, J.Ding, G.Pardal and P.Colegrove: Materials Science and Technology, 32 (2016) 7, 641.
- 11) 荻野陽輔, 浅井知, 平田好則: 溶融池モデルによる金属積層造形シミュレーション, 溶接学会 平成29年度春季全国大会講演概要, (2017)
- 12) 平田好則: 溶接学会誌, 86 (2017) 1, 6.

(2018年10月9日受付)