

特別企画

溶接接合工学会振興会 2024年度木原賞・金澤賞受賞者 業績報告

溶接接合工学会振興会は、1991年に文部省によって認可された公益財団法人であり、「溶接接合工学の研究および技術の発展を推進し、それに関係する研究・技術者を支援・育成し、以って学術文化の交流に寄与すること」を設立の趣旨としている。

木原賞は、故・木原博氏の遺徳を偲び、35歳以下の新進気鋭の研究者、技術者に授与される賞で、1992年から溶接接合工学会振興会が表彰している。

金澤賞は、故・金澤武氏の遺徳を偲び、50歳以下の中堅研究者・技術者を対象に、2004年度から溶接接合工学会振興会が表彰している。

【木原賞】

溶接冶金現象のモデル化と予測・制御技術の開発

—溶接凝固割れのモデル化とAMへの展開—

山下 正太郎

大阪大学大学院工学研究科

— 84 —

アーク現象を活用した 革新的アーク溶接技術の開発・実用化

小西 恭平

JFEスチール(株)

— 88 —

【金澤賞】

溶接ロボットシステム高性能化と 溶接DX技術の開発と製品化

小池 武

(株)神戸製鋼所 溶接事業部門 技術センター 溶接システム部

— 93 —

溶接冶金現象のモデル化と 予測・制御技術の開発

—溶接凝固割れのモデル化とAMへの展開—

山下 正太郎

大阪大学大学院工学研究科

1 はじめに

私は溶接冶金学を取り扱う研究室に所属し、溶接冶金学を体系化すべく日々研究活動しているが、この成果は今日まで溶接冶金学の体系化に向けて取り組んできた研究活動の副産物であると強く考えるところがあり、西本和俊先生、才田一幸先生、平田弘征先生（現研究室 教授）をはじめ、本研究室と関わりを持って研究活動にご尽力いただいた産学官の関係者の皆様のお陰であるところが多分にあることを忘れずにお伝えしたい。さらに言えば、決して最適化をはかるためのモデル化・予測を行おうとした訳ではなく、学問体系化を図るべく定量評価し、理論的に現象を説明していこうとした結果として、自ずとモデル化・予測、それらを活用した制御が可能となったということであると考えている。

溶接すると溶接部周辺の組織が変化するだけでなく、その変化に応じて様々な問題が生じる。溶融凝固にともなう欠陥、熱影響部の組織変化による機械的性質・特性の低下など、溶接継手や材料に応じて様々である。溶接冶金現象と表現すれば、溶接における組織変化とそれに付随する問題について取扱うことになるが、溶接プロセスが比較的簡単にその施工の善し悪しが判断できるのに対して、この組織変化の問題は一見して判断することが難しく、その作業にはかなりの時間と労力が必要となることから、溶接プロセスと材料挙動を適正化する上で溶接冶金現象を定量的に評価し、モデル化することで「見える化・見える化」することが重要である。また組織変化とその問題は、材料の化学組成に依存するところがあり、溶接プロセス的視点から組織変化の適正化をはかり

つつ、その化学組成をも適正化できれば、問題解決に至れるが、それには人材・時間・物資などのあらゆるリソースを費やさなければならない。このような問題に対しては現象のモデル化、予測技術が有効となる。

以下、直近の進捗について簡単にまとめる。

2 凝固割れの高温延性曲線のモデル化

溶接時の溶融凝固過程で生じる最初の問題として、凝固割れがある。これまでに、鋼、ステンレス鋼、Ni合金、アルミニウム合金といった実用材料のほとんどで割れ発生が報告されている。凝固割れの高温延性曲線のモデル化にあたっては、バレストレイン試験を用いた実験の検討が重要であったことから、それについても記述する。

凝固割れの発生のしやすさを論じる上で、凝固割れ感受性という言葉がある。凝固割れが発生しやすい材料を感受性が高い、逆を低いと表現するが、その感受性評価にはバレストレイン試験（1965年Savage¹⁾、国内では1972年松田²⁾）が活用されてきた。その方法は、凝固ぜい性温度範囲（BTR）を材料ごとに取得して、その大小を比較するというものである。バレストレイン試験が提案されて以降、凝固割れ感受性についてバレストレイン試験整理が活用されてきた経緯から、凝固割れ感受性はバレストレイン試験と一対一の関係にあったと言える。

凝固割れの発生は、高温延性曲線を用いて説明される（図1）³⁾。凝固時に生じるひずみが高温延性曲線と交差した場合に凝固割れが生じる。BTRは、高温延性曲線の温度範囲に相当するが、延性曲線が明らかになれば割れ発生を予測することが可能となる。

高温延性曲線に対してもバレストレイン試験結果が大きく影響を与えている。バレストレイン試験の整理の過程で得られる最大凝固割れ長さと公称ひずみの関係が高温延性曲線であると認識されており（図2）、それに従えば凝固が進行するにつれて延性値は高くなる¹⁾。しかしながら、近年のその場観察を用いた割れ発生ひずみ評価では、そのような傾向に対して相関性があるとはい

がたく、むしろ延性は凝固進行に伴い低下する傾向にあった^{4), 5)}。この矛盾を解消するため、筆者らはバレストレイン試験における割れ挙動を直接観察することで、凝固割れ発生ひずみを評価した。バレストレイン試験では、ひずみ速度が一定であり、公称ひずみに依らず凝固割れ発生ひずみが一定であることが明らかとなり、バレストレイン試験から高温延性曲線が得られないことを明

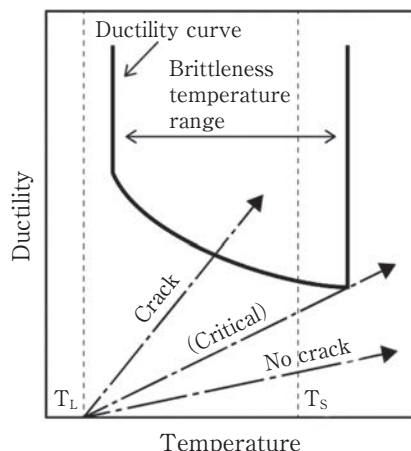


図1 凝固割れに関する高温延性曲線

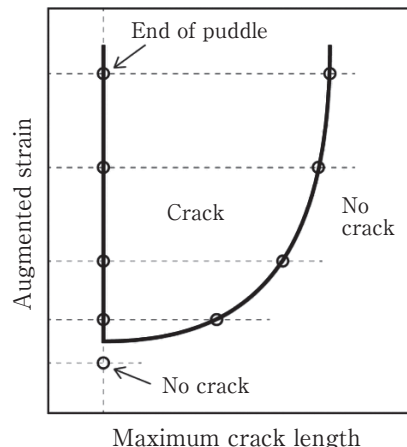


図2 バレストレイン試験の整理から得られる公称ひずみと最大凝固割れ長さの関係

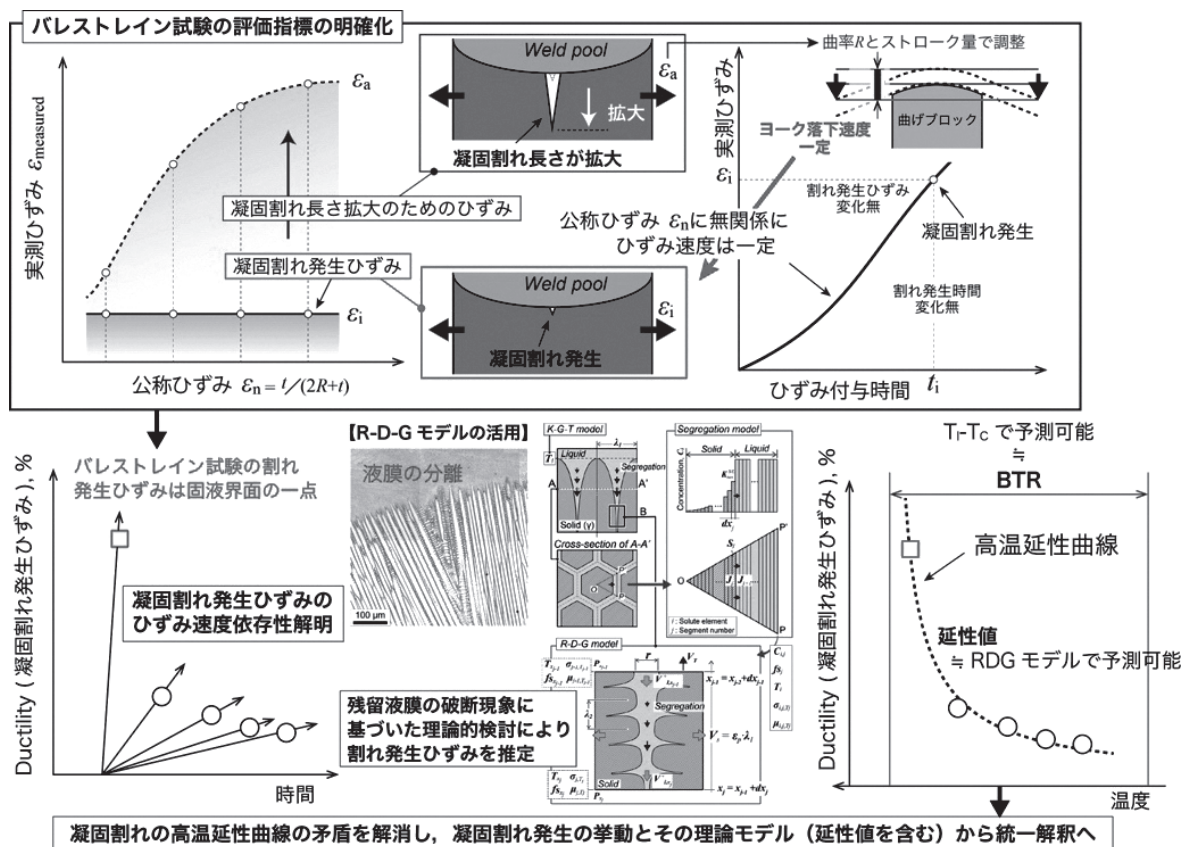


図3 バレストレイン試験の評価指標の明確化による現象の理論モデル化

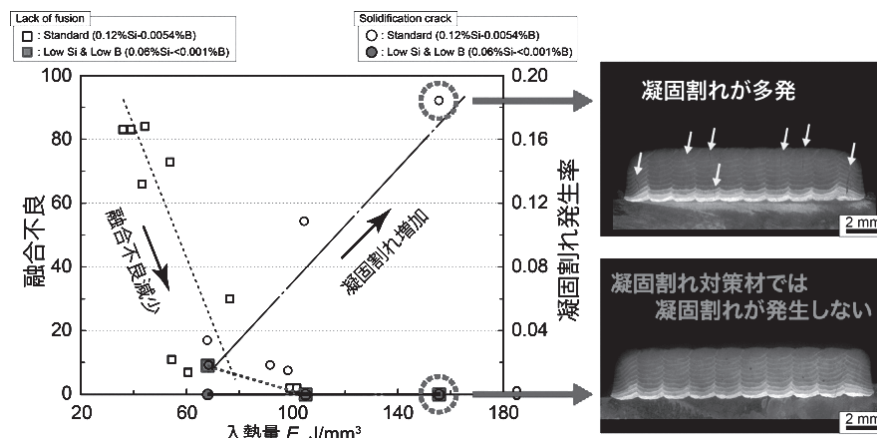


図4 金属積層造形における凝固割れ対策の効果検証

らかとした(図3)⁶⁾。加えて、拘束緩和式のU型高温割れ試験法により様々なひずみ速度での延性値を取得し、凝固割れの高温延性曲線が、凝固進行にともない延性低下することを実験的に明らかにした。

液膜分離により生じる凝固割れの高温延性曲線が、凝固進行にともない延性低下する傾向、つまり残留液量が減少することが凝固割れが生じやすくなることの本質であることが明らかとなったことから、以下のような展開でモデル化を試みた。BTRは、凝固開始温度TIと完了温度TCをK-G-Tモデルと凝固偏析計算により算出するが、各凝固過程における残留液膜の延性をR-D-Gモデルを用いて計算することとした(図3)。計算により得られた延性曲線と実験結果が類似傾向であることに基づけば、K-G-Tモデルと凝固偏析計算でBTRの傾向を論じるだけでなく、R-D-Gモデルを連成させることで延性曲線の挙動をも解析的に求められることとなった。これを活用することで、これまでにBTRで割れ感受性を議論し、対策できていたことを説明できるようになっている^{7),9)}、また異種材料における凝固割れ感受性をどのように議論すべきかについて言及するに至っている^{8),9)}。

3 金属積層造形時の凝固割れ問題への展開

上述のように、凝固割れ感受性は数値シミュレーションにより求めることが可能となっている。近年、金属積層造形(AM)においても凝固割れの発生が問題となっている。AMの特徴として急冷凝固プロセスであり非平衡であることが挙げられるが、このような状況は溶接と非常に類似している。上述の数値シミュレーションは、数000 K/sとなるようなレーザー溶接における凝固割れ感受性評価に対しても適用可能であることが明らかとなっていることから、AMの溶融凝固プロセスにおける割れ

問題を数値シミュレーションに基づいた化学組成の最適化を図ることで解決することを試みた^{10),11)}。数値シミュレーションに基づき、材料中の溶質元素の影響を定量的に把握し、AMを想定し凝固割れ感受性を低減させた粉末組成を提案し、従来組成に比べて、広範な積層条件において凝固割れが発生しない化学組成を提案できることが明らかとなった(図4)。

このような結果は、溶接において培われてきた凝固割れ対策がAMにおける対策になり得ることを示唆しており、組織変化が非平衡下で生じることを前提に学問体系化を図ってきた溶接冶金学の知見に基づき金属積層造形分野の組織学的問題も説明可能であることを示唆しているものと考えている。

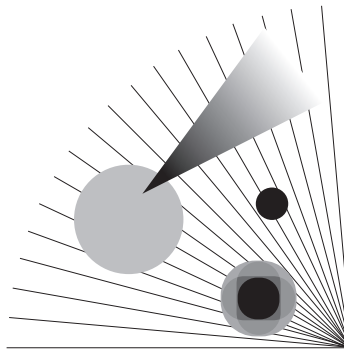
4 おわりに

凝固割れを中心にモデル化とその応用としてAMへの展開について記述したが、凝固割れ以外にも熱影響部の組織変化などもモデル化について研究が進められており、単一の組織変化の予測のみならず、複数現象を考慮した組織変化の予測も達成されている^{12)~15)}。溶接組織変化の「見せる化・見える化」は今後さらに求められるが、従来プロセスのみならずAMなどの新プロセスに対しても溶接で培ってきた非平衡現象のモデル化・予測技術の活用が期待される。

参考文献

- (1) W. F. Savage and C. D. Lundin: The Vareststraint test, Welding Journal, 44(1965), p.433s-442s.
- (2) 仙田, 松田 他: Trans-Vareststraint試験法による溶接金属の凝固割れ感受性の研究, 溶接学会誌, 41(1972), pp.709-723.
- (3) N. N. Prokhorov: The Technological Strength of Metals while Crystallising during Welding, Star. Proiz., 4(1962), pp.1-5.
- (4) 篠崎, 山本ら: 溶接凝固割れ発生の予測, 溶接学会誌, 77(2008),

- pp.284-289.
- (5) K. Kadoi et al. : The effect of welding conditions on solidification cracking susceptibility of type 310S stainless steel during laser welding using an in-situ observation technique, *Welding in the World*, 57 (2013), pp.383-390.
- (5) 山下, 才田 : 凝固割れ発生の高温延性曲線の解釈とその冶金的モデル化, *溶接学会論文集*, 38 (2020), p.275-290.
- (6) 山下, 才田 : 高温延性曲線に対する冶金的モデルを用いた凝固割れ発生ひずみに及ぼす不純物元素の影響, *溶接学会全国大会講演概要 第108集* (2021-4), pp.32-33.
- (7) 山下, 才田 : オーステナイト系ステンレス鋼とNi基合金の耐凝固割れ性の比較, *溶接学会全国大会講演概要 第110集* (2022-4), pp.48-49.
- (8) 山下, 才田 : 凝固割れ発生クライテリアの明確化に基づいた溶接金属の耐凝固割れ性, *溶接学会全国大会講演概要 第111集* (2022-9), pp.182-183.
- (9) 山下ら : 溶接凝固割れ対策指針に基づくレーザメタルデポジション法を用いた718合金積層造形部の割れ対策とその有効性, *溶接学会論文集*, 42 (2024), pp.12-21.
- (10) 山下ら : 割れ破面解析に基づく718合金積層造形部に生じた割れ挙動の解明およびその検証, *溶接学会論文集*, 42 (2024), pp.1-11.
- (11) 山下ら : リーン二相ステンレス鋼溶接熱影響部における粒内クロム窒化物析出予測, 第260回溶接冶金研究委員会
- (12) 山下ら : 二相ステンレス鋼溶接熱影響部における σ 相析出予測, *溶接学会全国大会講演概要 第115集* (2024-9), pp.318-319.
- (13) 山下ら : 二相ステンレス鋼溶接部のオーステナイト析出・固溶に対する速度論的検討に対するPhase-Field法の適用可能性, *溶接学会全国大会講演概要 第115集* (2024-9), pp.320-321.
- (14) S. Yamashita, et al. : Relationship between Ferrite-Austenite Phase Transformation and Precipitation Behavior of Sigma Phase in Super Duplex Stainless Steel Weldment, *Welding in the World*, 66 (2022), pp.351-362.



アーク現象を活用した 革新的アーク溶接技術の開発・実用化

小西 恭平

JFE スチール(株)

1 はじめに

アーク放電を用いたアーク溶接技術は、素材から製品の組立てに至るものづくりの基盤技術として古くから利用されてきた。近年では高度なアーク放電の制御を目的として溶接アーク現象を可視化する取組みが盛んに行われており、電子部品や自動車部品などに使用される薄板の接合から、建築、造船、再生可能エネルギー設備などに使用される厚板の接合まで、様々な分野でその需要に合わせた新たなアーク溶接技術が開発されている。本稿では、そういった背景の中、「アーク現象」を使いこなす技術として著者が携わってきた電子部品向け極薄板ティグ溶接技術の確立ならびに自動車足回り部品向けマグ・ミグ溶接技術の開発について述べる。

2 電子部品向け極薄板ティグ溶接技術の確立

モーターコアや半導体などの電子部品の生産には、薄板金属がコイル状に巻かれたフープ材が用いられる。フープ材はアンコイラー（繰り出し機）からプレス機へ

高速で供給され部品となっていくが、板厚が $100\mu\text{m}$ 以下の極薄板の突合せ溶接は溶落ちなどの溶接欠陥が起りやすく、ティグ溶接では安定した溶接が困難とされてきた。この課題に対し、シールドガス流制御によってアークの熱源としての特性を変化させ、極薄板でも安定した突合せ溶接を可能とする「狭窄ノズルティグ溶接技術^{1)~4)}」を確立した。

図1に狭窄ノズルティグ溶接の溶接トーチならび狭窄ノズルの断面図を示す。本手法は、狭窄ノズルをタングステン電極とガスノズルの間に装着することでシールドガスの流路を狭窄ノズルの内側と外側に分離する。内側と外側のシールドガス量を適正化することで、内側のシールドガスはこのノズルによって高速化されてアークに吹き付けられるため、熱的ピンチ効果⁵⁾によって図2のようにアークが緊縮する。

図3に数値シミュレーションによって得られたアークの温度場を示す。従来のティグ溶接と狭窄ノズルティグ溶接を比較すると、狭窄ノズルを装着することによって図2と同様にアークの温度場も緊縮していることがわか

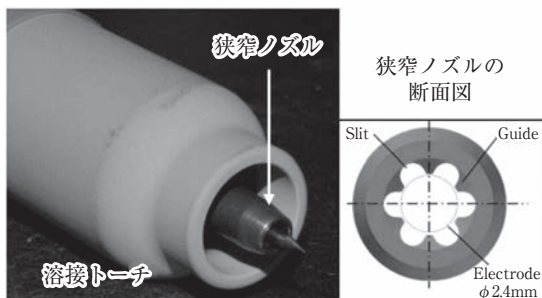


図1 狭窄ノズルティグ溶接の溶接トーチならび狭窄ノズルの断面図⁴⁾

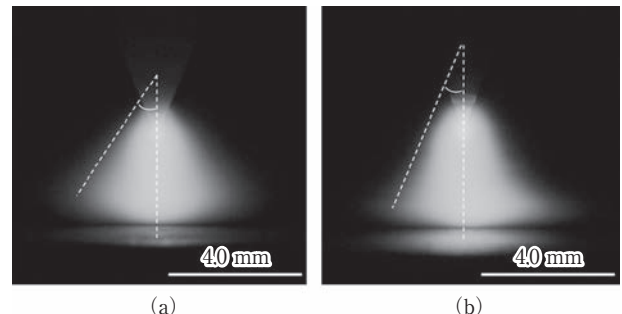


図2 アーク外観画像³⁾
(a) 従来ティグ溶接, (b) 狭窄ノズルティグ溶接

る。これによって電流経路がアーク中心部に集約される結果、ジュール発熱が増大しアークがより高温の熱源へと変化している。

以上の通り、狭窄ノズルティグ溶接では、レーザ溶接のように高エネルギー密度の入熱が可能であり、安定した極薄板の突合せ溶接を実現している。

また、極薄板の溶接では局所的な溶融が求められるため、アーク長（タングステン電極先端と母材表面の距離）を短く保つ必要があるが、10,000℃を超える高温のアークによって加熱される溶融池の表面からは金属蒸気が発生し、この金属蒸気がタングステン電極先端に付着することでタングステン電極の消耗およびアークの不安定化を助長する。この課題に対する対策としても狭窄ノズルは有効であり、電極消耗の低減が確認されている。

図4に母材をSUS304とし、アーク長1.0mmでアーク溶接を実施した場合の鉄蒸気濃度分布の解析結果を示す。従来ティグ溶接では溶融池表面で発生した鉄蒸気が半径方向だけでなく上方にも拡散していることがわかる。この上方に拡散した鉄蒸気が再びシールドガスの流れに乗ってタングステン電極へと輸送されることで電極の消耗が促進される。一方、狭窄ノズルティグ溶接では

狭窄ノズル内側のシールドガス流速が増加するため、鉄蒸気は上方へは拡散せず半径方向に掃き出されており、この効率的な掃き出し効果が電極寿命の向上の要因であると考えられる。

以上のように、狭窄ノズルティグ溶接は狭窄ノズルを用いたシールドガス流制御のみによって従来の課題であった「アークの高エネルギー密度化」と「タングステン電極の長寿命化」を実現しており、フープウェルダーへの実装および電子部品製造などで実用化に至っている。

3 自動車用鋼板に適したマグ・ミグ溶接技術の開発

3.1 自動車部材の高強度・薄肉化における溶接の課題

自動車分野では、車体の安全性・信頼性に対する部材の高強度・高剛性化と、燃費改善を目的とした軽量化の両立に対するニーズが高まっている⁶⁾。近年ではSDGsや省資源など環境面での価値が注目されるようになり、部材の軽量化は安全性・信頼性向上や燃費改善だけでなく、温室効果ガスの排出量削減の観点でより重要視されてきている。また、電気自動車の開発・普及が加速している一方、現状の電池性能では軽自動車でも100kgを超える大型の電池を搭載する必要がある。そのため、EV化が進行しても部材の軽量化ニーズは変わらず、適用鋼板の高強度・薄肉化は引き続き推進されるものと想定される。

上記の軽量化ニーズは足回り部品においても例外ではなく、近年では780MPa、980MPa超級の高強度鋼板が適用されるようになり、その使用比率も増加する傾向にある^{7), 8)}。足回り部品の製造には主に重ね隅肉継手の形式でマグ溶接または炭酸ガスアーク溶接が適用されるが、溶接継手に対する要求特性としては、溶接部における耐食性や疲労強度が挙げられる。一般的に、アーク溶接部は母材の平板部分に比べて早期に錆が発生し、腐食が進行しやすいことが知られている⁹⁾。これは、溶接部に付着したスラグやヒューム、スパッタが原因で、化成処理や電着塗装の状態が悪化し、腐食が進みやすくなるためである。このような溶接部の腐食による鋼板の板厚減少は、外観の劣化だけでなく継手強度にも大きな影響を及ぼす。

一方、鋼板の高強度化・高機能化には高合金成分化が不可避であり、腐食の原因となるスラグの増加が予想される。そのため溶接部の耐食性を確保するためには、スラグの生成や付着を抑え、塗膜の防錆機能を持続させる

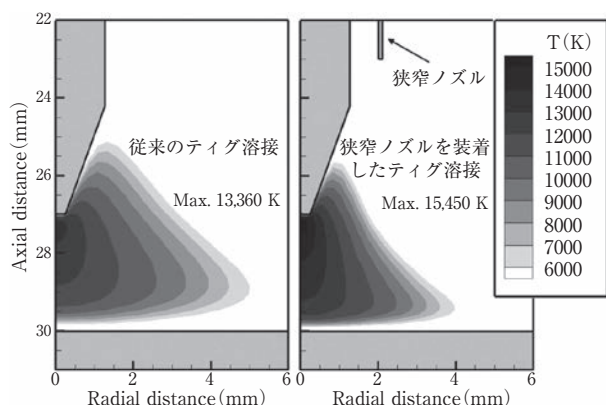


図3 温度場の数値シミュレーション結果⁴⁾
((左) 従来ティグ溶接, (右) 狭窄ノズルティグ溶接)

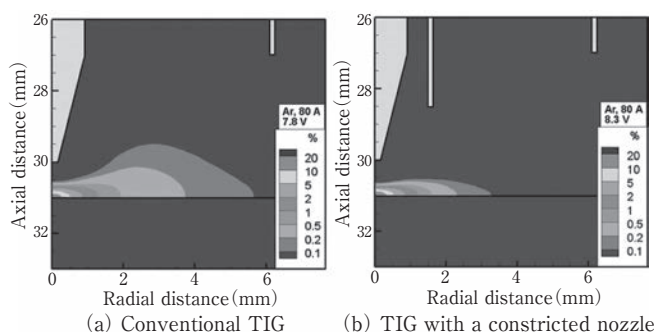


図4 鉄蒸気濃度分布の数値シミュレーション結果¹⁾
((a) 従来ティグ溶接, (b) 狭窄ノズルティグ溶接)

ことが重要であり、著者らは、シールドガス組成や溶接条件を制御した溶接技術の開発を実施してきた。

3.2 低CO₂ガスシールドアーク溶接

前節にて述べたように、溶接部の耐食性確保に対してはスラグの生成・付着を抑制することが重要である。これに対して、溶接の安定性を確保しつつシールドガスに含まれるCO₂ガス比率を低減した「低CO₂ガスシールドアーク溶接^{10), 11)}」を紹介する。低CO₂ガスシールドアーク溶接では、シールドガスに含まれるCO₂ガス比率

を従来マグ溶接の20%から5%に低減させて溶接を行うが、これにより、鋼板ならびに溶接ワイヤに含まれるSi, Mnなどの合金元素と酸素(O)との酸化反応を抑制し、溶接部へのスラグの付着を低減することができる。

図5にマグ溶接(Ar-20%CO₂ガス)試験片および低CO₂ガスシールドアーク溶接(Ar-5%CO₂ガス)試験片の腐食試験中の表面外観を示す。鋼板は板厚2.3mmの400MPa級熱延鋼板(非めっき材)である。マグ溶接の場合では、溶接時に形成したスラグ部で塗膜欠陥が存在しており、そこを起点として錆が発生・進展していることがわかる。これに対して、低CO₂ガスシールドアーク溶接では、スラグ生成反応が抑制されることで、溶接部表面では良好な塗膜が形成されており、長期間の腐食環境下においても下地鋼の腐食はほとんど進んでいない。このように、低CO₂ガスシールドとすることによりスラグ起因の腐食進展を抑制できるため、鋼板の高合金成分化が必要となる高強度鋼板を用いた部材においても、溶接継手の耐食性を向上させることができる。

更に、低CO₂ガスシールドアーク溶接は耐食性の向上に加えて溶接ビード形状の平滑化に寄与する効果も認められている。図6に重ねすみ肉溶接継手の断面観察結果を示す。シールドガスの低CO₂化により熱的ピンチ効果によるアークの緊縮が緩和されるためアークの広がりが大きくなり、溶接ビード止端部のフランク角が増大している。図7にレーザ変位計による溶接部形状の測定結果とFEMによる平面曲げ荷重負荷時(荷重: 247N)の応力分布結果を示す。FEM解析は溶接部形状の実測形状で作成したモデルを用いて、物性値を溶接部を含めてすべて均一な鋼(ヤング率206,000N/mm², ポアソン比0.3, 密度7.85g/m³)との仮定の下で実施している。重ね隅肉継手では、一般的に下板側の溶接ビード止端部近傍に応力が集中することが知られており、マグ溶接と低CO₂ガスシールドアーク溶接のいずれにおいても止端部で引張

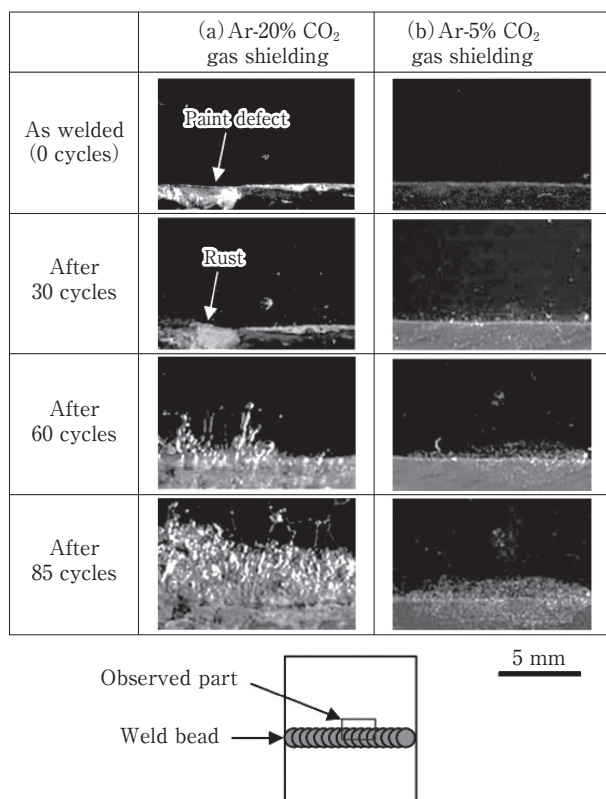


図5 溶接試験片の腐食試験中の表面外観¹⁰⁾
(a) マグ溶接, (b) 低CO₂ガスシールドアーク溶接

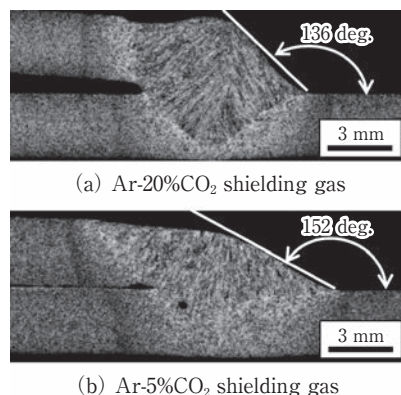


図6 重ねすみ肉溶接部の断面マクロ画像¹¹⁾
(a) マグ溶接, (b) 低CO₂ガスシールドアーク溶接

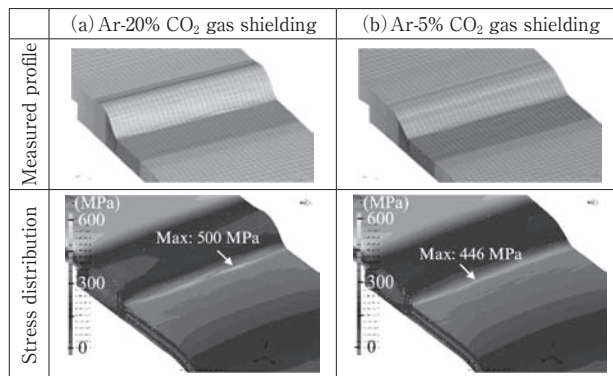


図7 溶接部周辺の応力分布計算結果¹¹⁾
(a) マグ溶接, (b) 低CO₂ガスシールドアーク溶接

応力が最大となっているが、低CO₂ガスシールドアーク溶接ではCO₂ガス比率の低減による止端部の平滑化にともなって引張応力の最大値がマグ溶接に対して11%低下している。また、重ねすみ肉継手の疲労強度は、溶接金属硬さに加えて溶接止端部形状に大きな影響を受けることが報告されており¹²⁾、低CO₂ガスシールドアーク溶接が継手強度の向上に対しても有効であることがわかる。

上述した耐食性や疲労特性の向上を実現するCO₂ガス比率の低減手法は一部の自動車メーカーにて高強度鋼板の適用と合わせた溶接技術として実用化されている。

3.3 高電流パルスミグ溶接技術

前述したように、溶接継手の耐食性向上に対してはシールドガス中のCO₂ガス比率の低減によるスラグの生成・付着の抑制が有効である。このスラグ低減効果は、原理的にはCO₂ガス比率をさらに減少させることでより大きくなり、シールドガスにCO₂ガスを含まない、いわゆる純Arガスを用いたミグ溶接で最大となる。しかし、実際にはシールドガス中のCO₂ガス比率を5%よりさらに減少させると、アークのふらつきや溶滴移行の不安定化が生じ、広範囲でビードの蛇行や波打ちが発生する。この課題が炭素鋼に対する純Arガスを用いたミグ溶接適用の阻害要因になっている。これに対して、筆者らは

ミグ溶接の安定化を図る新しいアーク溶接技術として「高電流パルスミグ溶接^{13)~16)}」を開発した。

従来ミグ溶接では、ワイヤ端からの溶滴の離脱に作用する電磁ピンチ力が十分に得られず溶滴移行が不安定で不規則になるのに対して、高電流パルスミグ溶接は図8に示す高いピーク電流を有するパルス電流を活用し、図9のように溶滴移行を周期的な短絡移行に制御することで良好な溶接継手を実現することを特徴とする。

図10に溶滴移行挙動の撮影画像を示す。定電流の従来ミグ溶接では連続的に液柱が発生し、不規則な溶滴移行が生じている。一方、高電流パルスミグ溶接では、ベース期間において低電流化によってアークが縮小し、ワイヤの溶融領域がワイヤ端に限定されるため、ワイヤ端での溶滴の安定成長・サイズ一定化が起こっている。また、その後のピーク期間では、高電流パルスにより誘起された高速のプラズマ気流によってワイヤ端の溶滴が溶融池へと押し下げられるように移動していることが確認できる。これにより1パルス1短絡の周期的な短絡移行が実現されている。

図11に溶接ビード外観ならびにスラグ領域可視化画像を示す。ここでは溶接ビード形状だけでなく、スラグの付着量を比較するためにマグ溶接の結果も示している。高電流パルスミグ溶接では、パルス電流波形制御による周期的な短絡移行によって従来ミグ溶接に見られる溶接ビードの蛇行・波打ちが抑制され、マグ溶接と同等

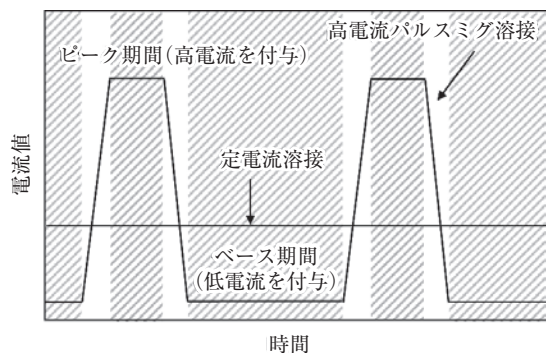
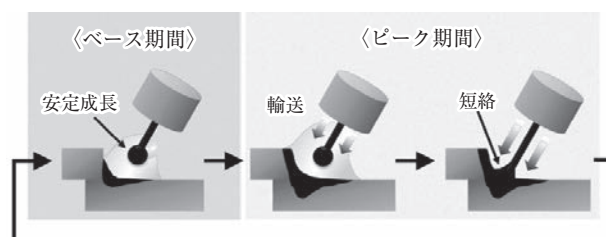


図8 高電流パルスミグ溶接における電流波形の概略図



周期的な「溶融金属の安定性成長」と「短絡(母材へ輸送)」

図9 高電流パルスによる短絡移行制御コンセプト

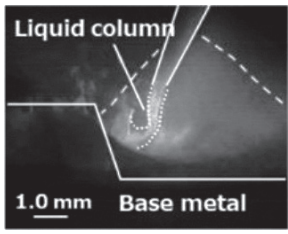
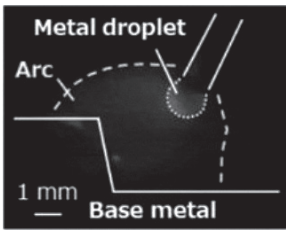
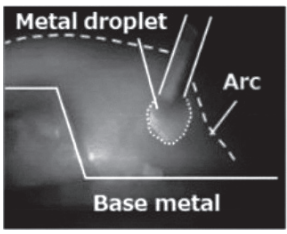
	Conventional MIG	Pulse MIG	
Capturing timing		Base period	Peak period
Images			
Metal transfer mode	Streaming (Mainly)	Short-circuit	

図10 溶滴移行挙動の撮影画像¹³⁾
(左) 従来ミグ溶接, (中央および右) 高電流パルスミグ溶接

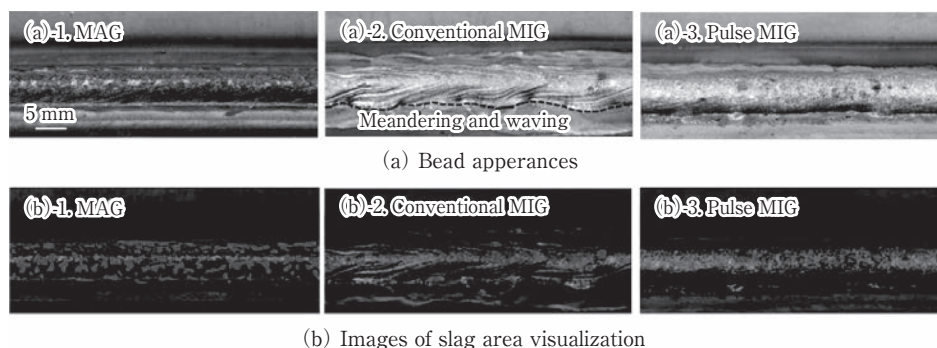


図11 溶接ビード外観ならびにスラグ領域可視化画像
((a, b-1) マグ溶接, (a, b-2) 従来ミグ溶接, (a, b-3) 高電流パルスミグ溶接)¹³⁾

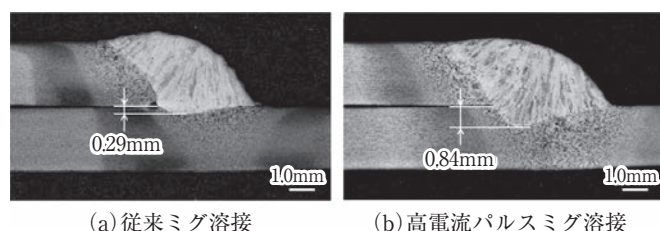


図12 溶接部の断面マクロ画像

の整った溶接ビード形状が得られている。また、耐食性の指標となるスラグ付着量の観点では、マグ溶接ではスラグ被覆面積率（スラグ付着部が溶接ビード領域に占める割合）が36.1%であるのに対し、高電流パルスミグ溶接では溶融池への酸化性ガスの侵入が遮断されることでスラグ生成反応が抑制され、その結果、スラグ被覆面積率は1.2%と極めて低い値となっている。

このように、耐食性の向上がますます注視される高強度鋼板の部材に対しては、スラグレス化を実現する高電流パルスミグ溶接が有効であるが、純Arガスを用いたミグ溶接では、アークの広がりが大きく入熱が分散しやすいことが原因で、マグ溶接に比べて溶接部の溶込み深さが得られにくいことも課題である。図12に従来ミグ溶接と高電流パルスミグ溶接の断面観察結果を示す。ただし、いずれの場合においても平均溶接電流は210Aである。従来ミグ溶接における溶込み深さは0.29mmであるのに対して、高電流パルスミグ溶接での溶込み深さは0.84mmと約2.9倍に増加している。これは、ピーク期間の高電流パルスによってアークが高温化し、母材への入熱が増大するためであり、高電流パルスは溶滴移行の安定化に加えて溶接部の溶込み改善にも効果的であるといえる。

以上の通り、高強度鋼板の溶接に対して、耐食性向上の観点および溶込み形状の観点においても高電流パルスミグ溶接は有効であり、前述した低CO₂ガスシールドアーク溶接とあわせて今後さらに注目が高まることが期待される。

4 おわりに

本稿では、「アーク現象」を使いこなす技術として著者が携わってきた電子部品向け極薄板ティグ溶接および自動車足回り部品向けマグ・ミグ溶接についてその概要を紹介した。技術の詳細については既報^{1)~3), 9)~15)}を参照されたい。今後、これらのアーク溶接技術が、高強度鋼板のような新材料や極薄板厚の難溶接材料などの適用拡大の一助となることを期待するとともに、日本のものづくりの発展を担う重要な溶接技術を開発すべく、精進していく所存である。

参考文献

- 1) 小西恭平, 茂田正哉, 田中学, 村田彰久, 村田唯介: 溶接学会論文集, 第32巻, 第2号, 47-51 (2014)
- 2) 小西恭平, 茂田正哉, 田中学, 村田彰久, 村田唯介: 溶接学会論文集, 第32巻, 第3号, 207-212 (2014)
- 3) 三木聡史, 小西恭平, 茂田正哉, 田中学, 村田彰久, 村田唯介: 溶接学会論文集, 第36巻, 第1号, 21-25 (2018)
- 4) 小西恭平: 溶接学会誌, 第85巻, 第7号, 676-678 (2016)
- 5) 田中学, 田代真一: 溶接学会論文集, 第25巻, 第2号, 336-342 (2007)
- 6) 木谷靖, 松田広志, 松下宗生, 山本俊佑, 安藤聡, 池田倫正: JFE技報, No.41, 55-61 (2018)
- 7) 船川義正, 長滝康伸: JFE技報, No.41, 1-5 (2018)
- 8) 岡本力, 麻生敏光, 岡田浩幸: まてりあ, 第51巻, 第1号, 28-30 (2012)
- 9) 山本俊佑, 鈴木幸子, 安藤聡, 池田倫正, 片岡時彦: 溶接学会論文集, 第36巻, 第1号, 77-85 (2018)
- 10) 山本俊佑, 鈴木幸子, 安藤聡, 池田倫正, 片岡時彦, 上田聡, 中澤嗣夫: 溶接学会全国大会講演概要, 第97集, 304-305 (2015)
- 11) 片岡時彦, 池田倫正, 上田聡, 中澤嗣夫: 溶接学会全国大会講演概要, 第95集, 356-357 (2014)
- 12) 澤西央海, 松田広志, 田川哲哉, 池田倫正, 堤成一郎: 溶接学会論文集, 第38巻, 第4号, 448-457 (2020)
- 13) 小西恭平, 松田広志, 澤西央海, 伊木聡: 溶接学会全国大会講演概要, 第111集, 32-33 (2022)
- 14) 小西恭平, 澤西央海, 谷口公一, 伊木聡: 溶接学会全国大会講演概要, 第113集, 70-71 (2023)
- 15) 小西恭平, 高島克利, 植田圭治: 溶接学会全国大会講演概要, 第115集, 170-171 (2024)
- 16) 小西恭平, 澤西央海, 松田広志, 伊木聡: 溶接技術, 第71巻, 第2号, 45-50 (2023)

溶接ロボットシステム高性能化と 溶接DX技術の開発と製品化

小池 武

(株)神戸製鋼所 溶接事業部門 技術センター 溶接システム部

1 はじめに

著者らは、神戸製鋼所における溶接ロボット技術の開発と溶接ロボットシステムの提供を通じて、人材不足が進む中で製造業の持続的発展に貢献することを使命としている。近年、日本国内では少子高齢化が急速に進行しており、2023年時点で65歳以上の高齢化率は29%に達している¹⁾。出生数も2024年には68万人と過去最低を記録し²⁾、若年労働力の減少が深刻化している。特に製造業では、1970年に48万人いた金属溶接・溶断従業者が2020年には約16万人にまで減少しており³⁾、溶接分野における人材不足は構造的な課題となっている。

こうした背景から溶接工程の自動化は、製造業における人材不足や品質管理の課題に対応するための重要な取り組みである。その実現方法として、例えばアーク溶接ロボットシステムの導入が進められている。中でも中厚板の溶接は、溶接量が多くなり、溶接中および溶接後に発生する熱による材料の膨張・収縮に起因して、ひずみや変形が大きくなるため、高度な制御技術が求められる分野である。周期外乱オブザーバや弾性変形補償といった高度な動作制御技術の導入により、従来困難とされていた中厚板の高精度溶接が可能となっており、品質の安定化が図られている⁴⁾。

一方で、ロボットの導入に不可欠な、ロボット操作やロボット動作を記録させる教示作業を担う熟練オペレータの確保も困難となっており、ロボットシステムには「使いやすさ」が強く求められている。教示作業の煩雑さは、導入の大きな障壁となっており、特に中厚板などの複雑な溶接対象では、教示作業に高度な技能が必要とされる。こうした課題に対し、教示作業の削減・自動化

が必要であり、オフライン教示やプログラム自動生成技術の活用により、現場作業者の負担軽減と導入障壁の低減によるロボット導入の促進が見込まれる。

また、溶接対象の大型化や組立誤差、熱ひずみにより溶接線に隙間が生じることが多く、これに対応する補正技術も重要である。近年では、センシング技術の進展により、開先形状の高精度な計測や溶接中の温度管理の自動化が可能となりつつあり、品質の安定化と作業負担の軽減が期待されている。

さらに、冒頭で述べたように社会全体で高齢化が進行し、製造業においても熟練溶接士の引退が進み、技術継承が課題となっている。従来は長年の経験が必要であった難易度の高い継ぎ手の溶接においても、自動化の必要性が一層高まっている。これらの溶接は、溶接部の状態を常に把握する必要があるため、画像処理技術の活用が求められる。製造業においても、主に検査等への取り組みから画像処理技術が導入されている⁵⁾。溶接部材形状や溶融池の状態をロボットに認識させることで、複雑形状や難溶接部材への対応が可能になると考えられる。

本稿では、こうした社会的背景と技術的課題を踏まえ、著者らが取り組む溶接ロボット技術と溶接システムについて紹介する。自動化・省人化のニーズに応えるための技術的工夫や、スマート化への対応、さらには難溶接への適応に向けた取り組みを通じて、現場の課題解決に資する実践的なアプローチを明らかにする。

2 溶接ロボットシステムの高性能化⁶⁾

中厚板溶接における高精度・高品質な施工を実現するため、神戸製鋼所では溶接ロボットの制御性能向上に取り組んできた。近年では、コントローラのCPU性能を強

化し、マニピュレータや溶接電源との通信に高速通信規格EtherCATを採用することで、従来比3倍以上の制御精度を達成したCBコントローラを開発した。これにより、複雑な構造物に対してもより安定した溶接品質が確保可能となった。溶接対象物（ワーク）の位置ズレを検出するワイヤタッチセンサでは、ワイヤ先端がワークに接触した瞬間にロボットを急停止させる必要がある。この際に発生する振動が位置検出誤差の原因となり、その低減のための待ち時間が必要であった。CBコントローラでは、モデルベース制御技術を応用することで、振動を早期に収束させることで振動が収束するまでの待ち時間を短縮し、タッチセンシング時間を従来比20%削減した（図1）。これにより、タクトタイムの短縮と生産性の向上が図られている。

操作性の面でも改良を進めている。教示ペンダントのユーザインターフェースを刷新し、ロボットの動作方向と操作キーの配置を一致させることで直感的な操作が可

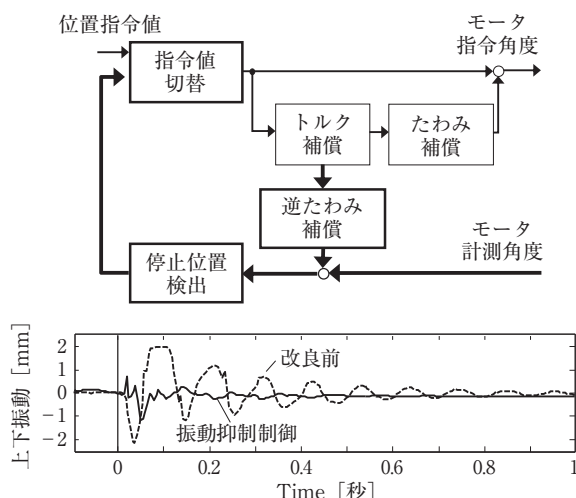


図1 モデルベース制御例と振動抑制結果

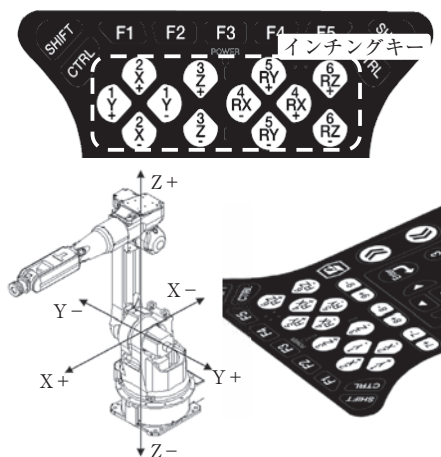


図2 インチング操作を改善した教示ペンダント

能となり、現場作業者の負担軽減と教示作業の効率化が実現された（図2）。

コントローラ性能の向上にともない、新たな溶接施工法の開発も可能となった。ウィービングカスタマイズ機能では、斜め振り（図3）や立板・下板側それぞれの電圧設定、端停止時間の調整が可能となり、450Aの高電流域においてもアンダカットやオーバラップのない高品質な溶接が実現されている。これにより、従来は50cm/分が限界であった脚長6mmのシングル水平すみ肉溶接が、70cm/分という高速で可能となった。約40%のスピード向上により、生産性の大幅な向上が期待されている。

このように、神戸製鋼所の溶接ロボットは、制御技術、操作性、施工法の各側面において進化を遂げている。これら技術は溶接ロボットシステムとして生産現場に提供されており、中厚板溶接における自動化と高品質化の両立を支えている。

3 センサ活用による補正・管理技術

中厚板溶接では、開先形状の複雑化や組立誤差、熱ひずみによる隙間の変動が品質に大きく影響する。著者らは非接触かつ高速にワーク形状を計測可能なレーザセンサ⁷⁾を活用した補正技術と、温度センサを活用した補正技術を導入し、溶接の自動化と高精度化を実現した。

レーザセンサによる開先形状の計測技術は、複雑な開

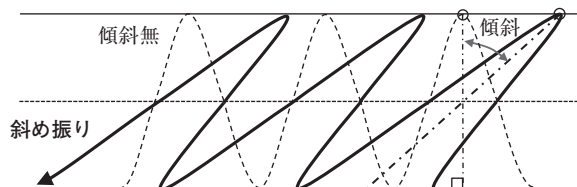


図3 ウィービングカスタマイズによる溶接軌跡

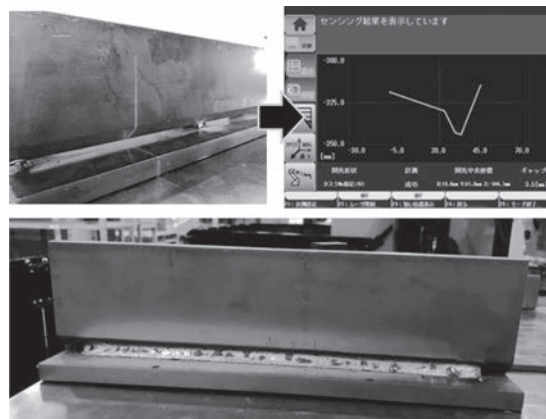


図4 レーザセンサ開先形状計測による隙間埋め溶接

先を有する難溶接部材への対応を可能にしている。とくに、ウィーピングカスタマイズ機能との組み合わせることにより、開先隙間の変動に応じた溶接軌道の自動補正が可能となり、隙間埋め溶接の安定性が向上した(図4)。従来は熟練作業者の手動調整が必要だった工程が自動化され、作業負担の軽減が達成されている⁸⁾。

また、レーザセンサの活用により、従来のタッチセンシング方式と比較で測定時間が約10分の1に短縮され、生産時間の効率化が実現した。また、計測の安定性を重視しロボットでセンサを移動させて計測する走査計測と、計測速度を重視したワンショット計測を使い分けることで、計測箇所に応じた適切な計測方法が選択可能となった。このレーザセンサは神戸製鋼所の建築鉄骨向け溶接システム(図5)や建設機械溶接システムとして溶接現場に提案・提供されている。

さらに、建築鉄骨向けの溶接工程に向けて非接触型温度センサを用いたパス間温度の管理技術を開発した。建築鉄骨分野では、次パス溶接前にワークの温度を人が温度計などで測定し、管理基準以下であることを確認している。そこで、非接触温度センサをロボットに搭載し、溶接開始前に自動的に温度計測を行い、測定した温度が設定値以下になっていることを確認してロボットが溶接を開始する機能を開発した。また、溶接速度や入熱量、

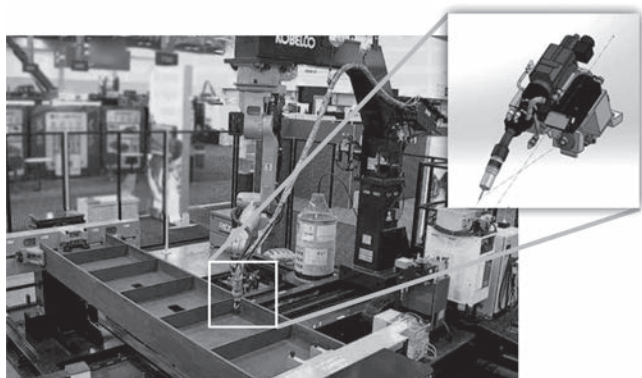


図5 鉄骨梁溶接システムへのレーザセンサ搭載

工事名称				作業日	2022/06/30
柱番号				ロボット名称	
職手名				オペレータ	
母材		部位	コラム	記録書	
板厚	32mm	ルート間隔	8.5mm	積層図	
開先角度	35°	溶接姿勢	下向姿勢		
溶接材料	規格				
	ワイヤ径				
	メーカー				
管理	銘柄				
	パス間温度	250℃			
	溶接入熱	30000J/cm			
パス	区間	溶接電流(A)	アーク電圧(V)	溶接速度(cm/min)	溶接入熱(J/cm)
1	直線	318	34.8	24.0	27666
	コーナ	301	33.3	24.0	25058
2	直線	295	35.8	26.8	23644
	コーナ	289	34.4	26.2	22787

図6 パス間温度管理 施工法レポート例

自動計測したパス間温度を記録として保存可能な施工レポートを自動生成する機能も開発した(図6)。厚板構造物においては、温度管理の精度が溶接品質に直結するため、この技術の導入は大きな効果が期待される⁸⁾。

4 溶接現場のDX

労働力不足、製品の多様化など、製造業を取り巻く環境が急速に変化しており、DXによる製造プロセスの改善が期待されている。とくに中厚板分野の溶接工程では、溶接自動化システム導入に加えて、安定生産を支える技術が必要となる。中厚板溶接ではワークの大型化による組み立て誤差、長時間溶接に起因したチョコ停(軽度異常による一時なライン停止)など安定した生産を阻害する要因が多い。この課題に対し、著者らは長年、生産見える化システムの開発を通じて溶接プロセスの改善につながる技術を提供してきた⁹⁾。

ARCMAN™ PRODUCTION SUPPORT (以下、AP-S) は、溶接ロボットの稼働データや溶接条件をリアルタイムで収集・分析することで、チョコ停や溶接不良の原因を特定し、迅速な対策が可能となる溶接工程の最適化を支援するプラットフォームである¹⁰⁾。さらに、AP-Sのオプション機能である ARCMAN™ View では、ロボット先端位置情報をもとにカメラを制御し、常に溶接部位を映像中心に捉えることが可能である(図7)。これにより、遠隔地からでも大型構造物の溶接状況を正確に把握でき、作業監視用途にも活用可能である。撮影された動画は溶接の開始・終了・アーク異常などロボットの停止などのタイミングとともに自動車のドライブレコーダのように記録され、異常発生時などの原因特定に活用することが可能である(図8)。

さらに、溶接中の映像からスパッタ量をリアルタイムで数値化する機能も開発した。溶接条件や溶接状態にと

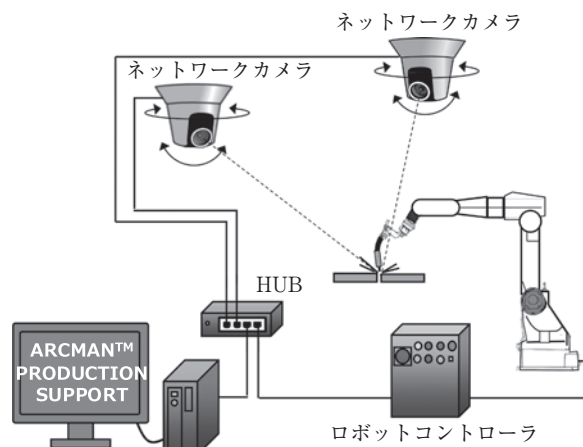


図7 ARCMAN™ View構成図

もなうスパッタ量の増減を簡単に数値化することができ、ワイヤ銘柄や溶接条件変更時の結果確認作業時間の短縮や、溶接不良の検知につながることを期待される¹⁰⁾。

加えて、消耗部品の状態を監視することで、予期せぬ稼働停止や溶接不良の発生を未然に防ぐARCMAN™ Self Monitoring（以下、ASM）を開発した。ASMは、ワイヤ送給負荷アラーム、消耗部品の交換時期通知（図9）、ワイヤ使用量モニタの3機能を備えており、予防保全の実現と安定した溶接品質の維持に寄与するものとする¹⁰⁾。

これらのDX技術は、単なる自動化にとどまらず、溶接工程の「見える化」と「予測管理」を可能にすることで、熟練技能者の減少や作業負担の増加といった現場課題の解決に貢献すると期待される。

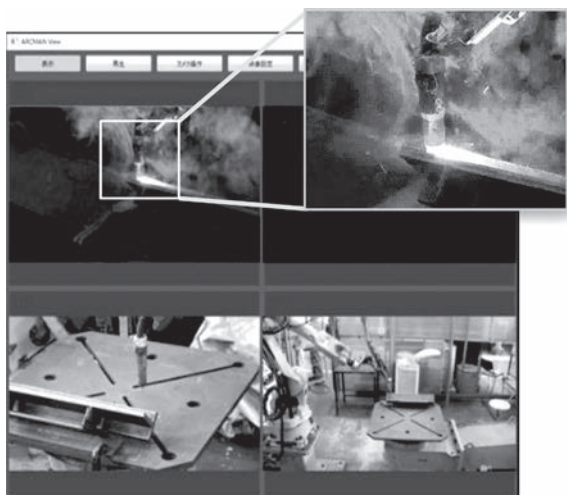


図8 ARCMAN™ Viewの映像例

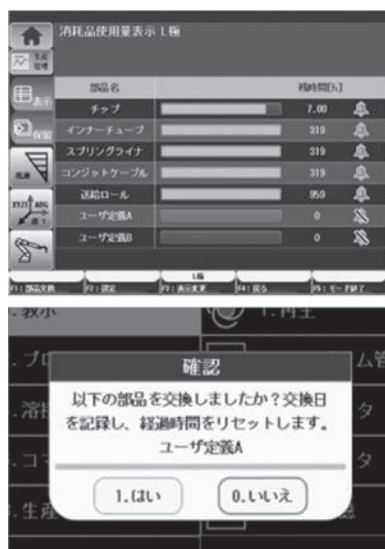


図9 ARCMAN™ Self Monitoringの教示ペンダント画面

5 教示レスシステムの開発

近年、製造現場では少量多品種生産へと移行し、さらに製品の種類や数量が頻繁に変化する変種変量生産への対応が求められており、溶接ロボットの柔軟な運用が課題となっている。従来のロボット教示作業は専門知識と時間を要し、作業者の負担が大きかった。これに対し、著者らは自動でロボット動作を生成する教示レスシステムの開発を進めている。溶接プログラムの自動生成とケーブルシミュレーションなどの技術を組み合わせることで、作業効率と品質を両立させた。

溶接ロボットは同一形状のワークを大量生産する際に高い効率を発揮するが、製品の種類が頻繁に変わる場合には都度教示作業が必要である。中厚板溶接ではワークが大型で教示に時間を要する上、熟練者の技能に依存しやすい点が課題であった。教示作業を不要とする教示レス技術は、こうした課題を解決し教示作業の標準化と省力化を可能にする。著者らが開発したARCMAN™ Offline Teaching Systemは、3DCADデータをもとに溶接動作を生成する機能を備えている。これにより、設計段階でも溶接プログラムを作成可能であり、現場での教示作業を削減できる。さらに、VR教示システムとの連携により、作業者は仮想空間で溶接動作を確認できるため、実機での試行錯誤を大幅に削減することが可能となる¹⁰⁾。

また、トーチケーブルの干渉は溶接品質悪化や機器破損に直結する。著者らは、ケーブルシミュレーション機能を開発し、トーチケーブルの屈曲、干渉や巻き付きリスクを事前に確認可能とした。図10はケーブル表示の例であり、色の濃淡により屈曲の大きさを可視化している。濃い色ほど屈曲が大きいことを表しており、矢印部は屈曲が大きいことを示している。ケーブル屈曲や干渉リスクを事前に可視化することで、従来2日を要した検討作業を半日に短縮し、狭所空間での破損リスクも低減

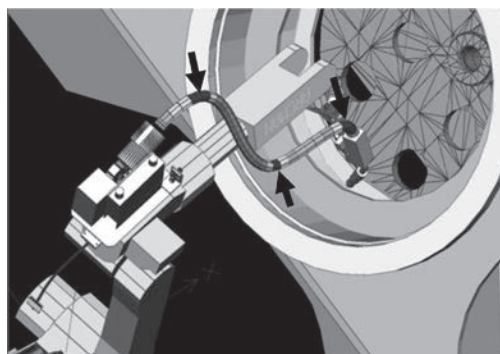


図10 ケーブルシミュレーションによる屈曲表示

した¹⁴⁾。

溶接プログラム自動生成機能により、多品種少量生産のワークごとに人が教示を行う必要はなくなった。また、シミュレーション環境と現場環境の差を減少させ、生産ラインでの教示修正を削減する取組みも行っている。CADデータからプログラム自動生成機能で教示プログラムなどを生成しロボットシステムと関係させることで、溶接工程全体の自動化を実現することが最終目標である。

6 画像処理AIを利用した難溶接自動化

熟練溶接士の高齢化と引退が進む中、従来は人手に頼っていた難易度の高い継ぎ手の溶接も自動化が求められている。これらの溶接は、溶接部の状態をリアルタイムに把握し、適切な補正を行う高度な判断力を要するため、画像処理AIの活用が必要である。画像処理技術により、溶接部材の形状や溶融池の状態を認識し、熟練者の「目」に相当する機能をロボットに持たせることで、複雑形状や難溶接部材への対応が可能になる。

従来のセンサ技術では、開先形状やアーク電流・電圧の情報から間接的に溶接状態を推定していたが、片面からの溶接で裏面にもビードを形成する裏波溶接などの難易度の高い溶接では、アーク直下の溶融池の状態を直接観察し、速度や運棒を調整する必要がある。人が処理手順を記載するルールベースの画像処理では、スパッタなどによる画像の乱れが原因で誤認識しやすく（図11）、

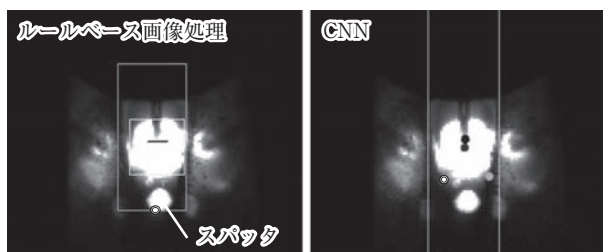


図11 ルールベースとAIによる溶融池認識の比較

アルゴリズム設計に多大な工数を要するという課題があった。著者らはこれに対し、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）やU-Netを用いた画像処理AIを利用することで、ロバスト性と開発効率の両立を実現した¹¹⁾。

セラミック裏当て材を用いたマグ裏波溶接において、トーチ先端に搭載したカメラで溶融池を撮像し、CNNで特徴点を抽出することで、溶接速度やウィービング幅をリアルタイムに制御可能とした。従来手法と比較して、スパッタ発生時の誤認識が大幅に低減され、平均誤差も0.3mm以下に抑えられた（図12）。

また、造船分野で課題となっていた裏当てなし横向き初層溶接に対しては、U-Netを用い、特徴量の分布を画像的に出力するヒートマップ型画像処理AIを導入した。図13は実験に用いた横向き裏当てなしのテストピースである。図14左図はヒートマップ型画像処理AIの特徴量検出の様子であり、溶融池上下端など特徴量が存在する可能性が高い箇所が濃淡で表されている。ヒートマップ型AIを用いることにより従来の数値出力型AIと比較

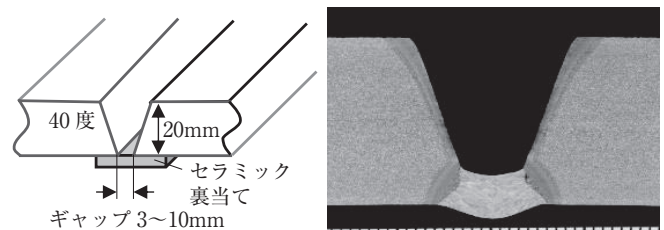


図12 裏当て材を用いたマグ裏波溶接条件と溶接例

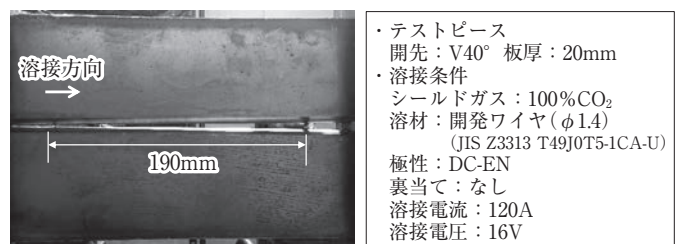


図13 裏当てなし横向き溶接 テストピース

- ・テストピース
開先：V40° 板厚：20mm
- ・溶接条件
シールドガス：100%CO₂
溶材：開発ワイヤ（φ1.4）
（JIS Z3313 T49J0T5-1CA-U）
極性：DC-EN
裏当て：なし
溶接電流：120A
溶接電圧：16V

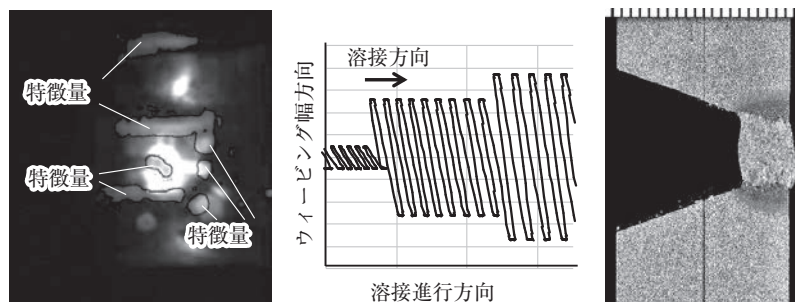


図14 ヒートマップ型AI認識結果と認識結果に基づくウィービング制御と溶接結果

して、視野ブレや光軸変化に対するロバスト性が向上し、特徴量の認識誤差が半減した。図14中央は、溶融池幅からギャップ変動を推定し、変動に応じてウィーピングの幅等を変化させた様子である。図14右図が断面マクロ結果である。肉厚の偏りが少ない裏ビード形状が得られており、欠陥の発生が抑制された継ぎ手が形成されている¹²⁾。

画像処理AIによる難溶接自動化技術は、AIWelder™として小型可搬型ロボットARCMAN™ PORTABLEに搭載し、横向継手の裏波溶接自動化に向け実証を進めている。

7 おわりに

本稿では、著者らが推進する溶接ロボット技術の高度化に向けた取り組みと溶接ロボットシステムへの応用を紹介した。高性能なロボットシステムの構築、センサによる補正技術、DXの活用、教示レス化、画像AIによる難溶接の自動化など、各技術は現場課題の解決に資するものである。今後も、製造現場の多様なニーズに応える技術開発を継続し、溶接自動化のさらなる進化と持続可能なものづくりの実現に貢献していく所存である。

本稿の執筆にあたり、(株)神戸製鋼所 溶接事業部門 溶

接システム部の木村雄士氏、東良敬矢氏、小向航平氏には、技術的な助言および貴重なご意見を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。また、本開発・製品化に際し、多大なるご協力をいただいた皆様に心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 内閣府：令和6年版高齢社会白書(全体版)，2024年
- 2) 厚生労働省：令和6年人口動態統計(速報)，2025年
- 3) 総務省統計局：国勢調査，2020年
- 4) 西田ほか：中厚板向けアーク溶接ロボットの動作制御，計測と制御，Vol.51, No.9, p.874-881, 2012年
- 5) 経済産業省：令和5年度ものづくり基盤技術の振興施策，2024年
- 6) 小池ほか：新型ロボットコントローラ(CBタイプ)の特長，R&D神戸製鋼技報，Vol.67, No.1, 2018年
- 7) 東良：レーザーセンサによるギャップ幅検出機能のご紹介，ほうだより技術がいど，Vol.504, 2019年
- 8) 小池ほか：溶接ロボットシステムにおけるICT活用，R&D神戸製鋼技報，Vol.68, No.2, p.59-62, 2018年
- 9) 福永ほか：溶接ロボットシステム導入を推進するDX技術，神戸製鋼技報，Vol.72, p.21-26, 2023年
- 10) 木村ほか：ロボット溶接のさらなる自動化に貢献するDX技術，R&D神戸製鋼技報，Vol.73, No.1, p.77-81, 2024年
- 11) 芦田ら：溶接自動化のための画像センサ技術の開発，R&D神戸製鋼技報，Vol.68, No.2, p.63-66, 2018年
- 12) 尾崎ほか：溶融池画像認識による横向き片面諸相溶接の自動化技術，溶接学会論文集，Vol.39, No.4, p.309-321, 2021年