

レーザー溶接のCPS化による 製造プロセスの自動化

Automation of Laser Welding Process by Applying Cyber-Physical System (CPS) Approach

熟練者の経験によらず、物理現象シミュレーションとAIによる 特徴量抽出で、溶接状態の安定化を目指す

従来、レーザー溶接は、その現象の複雑さから、経験を主体とした条件出しが行われてきました。しかし、近年の計算機の性能向上やシミュレーション技術の発達により、現象を定量的に捉え、プロセスをCPS（サイバーフィジカルシステム）で構築する（CPS化する）取り組みが進んでいます。CPS化には、レーザー溶接モデルの作成と、加工状態を観測するための最適なモニタリングシステムの開発が必要です。東芝は、AIを導入し、取得データから特徴量を自動抽出してCPS上に構成された溶接データベースと照合することで、良否判定や条件制御を自動化できるシステムの開発を目指しています。

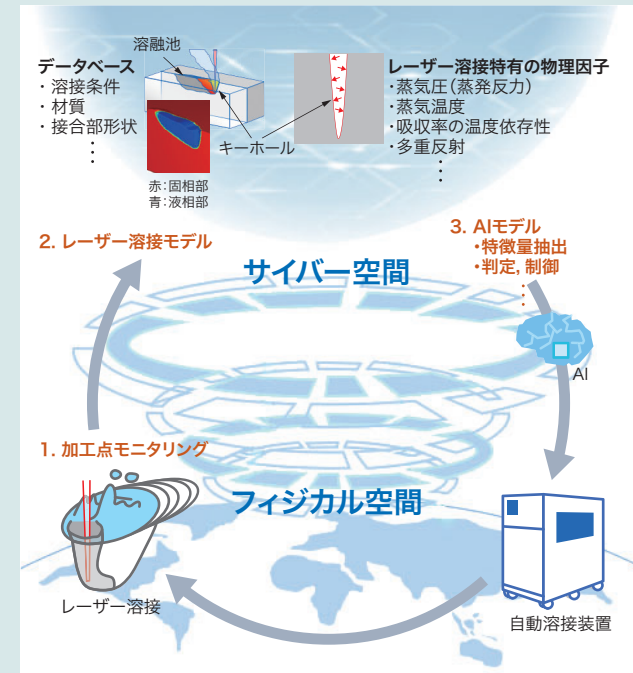


図1. CPSにAIを搭載したレーザー溶接自動システムの概念図

加工点データの特徴量をAIで抽出し、サイバー空間上のデータベースと照合した後、加工条件へフィードバックします。

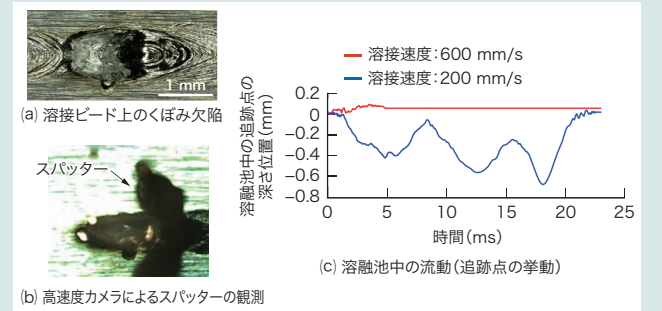


図2. レーザー溶接欠陥の解析

溶融池中の挙動を解析することで、溶接ビードのくぼみやスパッターなどの発生メカニズムを推測できます。

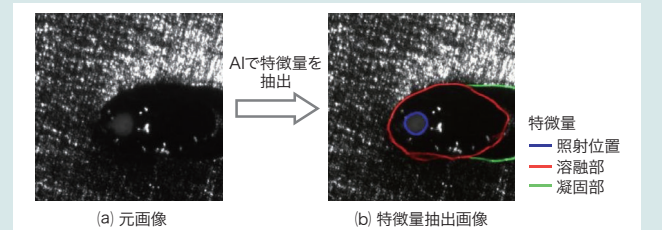


図3. AIによるレーザー溶接の特徴量抽出

AIモデルは、レーザー照射位置（キーホール）と、溶融部（溶融池）、凝固部（ビード）のエッジを自動認識しています。

レーザー溶接のCPS化による自動溶接の構想

近年、高出力で高安定なレーザー発振器の出現により、東芝グループ内でも様々な製造工程にレーザー溶接技術が適用されてきています。これまで、溶接条件は、熟練者の経験を基に多数の試作検証を実施し、決定していました。そのため、問題が生じた際に、迅速に原因を特定して対策することができないという課題がありました。そこで、東芝は、レーザー溶接のCPS化を目指し、プロセスの暗黙知を形式知化する取り組みを進めています。

図1は、レーザー溶接プロセスで構築したCPSにAIを適用した自動溶接装置の構想で、加工点モニタリング、レーザー溶接モデル、AIモデルの三つの重要な開発要素が示してあります。

まず、溶接状態の特徴量を捉えることができるモニタリングシステムから加工点のデータを取得します。次に、レーザー溶接モデルで計算した結果から構成したデータベースとAIによって抽出された取得データの特徴量を照合し、AIが加工状態の良否判定や安定な条件を自己判断し、装置へフィードバック若しくはフィードフォワードします。これが、当社が目指す、レーザー溶接のCPS化による自動溶接装置の構想です。

レーザー溶接のモデル化

レーザー溶接は、レーザー光を材料表面に集光して局

所的に加熱することで、アスペクト比の高い溶け込みを実現できる技術です。しかし、溶融した液体の挙動や、高温蒸気の圧力によって溶融した液体が押し広げられてできるキーホールの挙動は複雑なため、現象を定量的に把握することができませんでした。そこで、レーザー溶接特有の物理現象を取り込んだ熱流体解析を導入し、現象の定量化に取り組んでいます。

レーザー溶接のCPS化には、複雑な現象を表現するために、多くの物理量を考慮したシミュレーションモデルが必要です^{(1) (2)}。その物理量には、キーホールから噴出する蒸気の圧力と噴出方向や、蒸気温度、キーホールと溶融金属の間の熱伝達率とせん断応力、キーホール内でのレーザー光の多重反射、材料の温度に対する光の吸収率変化など、数多くの項目があります。これらの物理量を考慮してモデル化することで、溶接部の挙動を再現できます（図1上部）。このように、現象を再現できるモデル化によって、溶接中に発生する、巨大なスパッターの発生原因を特定できました（図2(a), (b)）。また、溶融池内の流動をシミュレーションした結果、溶融池の液面は激しく振動しており、内部のある点を追跡したところ、深さ方向に大きく変位していることから、液面から底まで達する流れが生じていることが明らかになりました（図2(c)の青線）。これにより、激しく振動する液面と蒸気の流れが干渉することで溶融物が飛散し、スパッ

ターが発生していると推測されました。そして、この対策として、溶接速度を増大させることで、スパッターが低減できることをシミュレーションから明らかにしました。高速化の効果としては、蒸気の流れが一定方向に傾くのでキーホールのサイズが大きくなることと、溶融池が長くなって液面の流動が安定化することで、蒸気との干渉が少なくなることが挙げられます（図2(c)の赤線）。この効果は、実験でも検証され、再現されることが確認できました。

モニタリングとAIによる加工状態判定の試行

シミュレーションにより、キーホールと溶融池の輪郭やビード幅（凝固部の幅）が、プロセスの安定性に強く影響することが分かりました。これらの特徴量を定量的に捉えてプロセスを制御するため、CMOS（相補型金属酸化膜半導体）カメラで加工点観測を行うモニタリングシステムを試作しました。このようなシステムでは、溶接中に発生するヒューム（物質の加熱や昇華で生じる粉体）や加工表面の変化が画像処理の妨げとなります。そのため、人が特徴量を記した画像を教師データとして学習したAIを用い、安定して画像から特徴量を抽出する技術を開発しました（図3）。

また、教師データ以外に、様々な状況の変化を想定し、画像の回転や、拡大・縮小、コントラストの明暗、疑似的に予測した欠陥など、あらかじめ変化の種類を学習させて

データを拡張し、より汎用性の高いシステムとしています。

今後の展望

レーザー溶接モデルは、溶け込み形状などの解析結果が実際の現象と一致しない問題があるため、レーザーと蒸気の相互作用まで拡張したモデルにすることで、サイバー空間上の結果を、更に高精度化することが重要です。また、モニタリング技術では、シミュレーションを基に、複雑な溶接状態の特徴量を捉え、最適なモニタリング手法の開発を進めていきます。AIネットワークでは、実際に発生する溶接欠陥の種類を学習させ、より汎用性を高めた自動判定システムの実現を目指します。

今後も、誰にでも簡単に取り扱えるシステムを、いち早く展開できるように研究開発を進めていきます。

文献

- (1) Dal, M.; Fabbro, R. An overview of the state of art in laser welding simulation. Opt. & Laser Technol. 2016, 78, Part A, p.2-14.
- (2) Meng, C. et al. Research on formation and stability of keyhole in stationary laser welding on aluminum MMCs reinforced with particles. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2013, 67, 9-12, p.2917-2925.

坂井 哲男

研究開発本部 生産技術センター
光技術研究部
博士(工学) レーザー学会・応用物理学会会員