

複合化プロセス工学領域 —溶接・接合プロセスの材料科学研究—

大阪大学大学院工学研究科
マテリアル生産科学専攻 教授

才 田 一 幸

1. はじめに

「ものづくり」の根幹をなす最も重要な基盤技術として、材料をつなぐ技術、—溶接・接合—がある。本研究室では、溶接・接合プロセスにおける材料科学分野を守護しており、以下の3項目を主たる教育・研究領域として取り組んでいる。

- ①「最先端材料の溶接・接合性」では、溶接施工健全性を担保するための欠陥制御や特性制御・改善
- ②「新溶接・接合プロセスの材料科学」では、新しい接合技術である界面接合プロセスの材料挙動解明と特性評価
- ③「溶接部材料挙動のモデリング・シミュレーション」では、溶接・接合現象の理論的解析やモデル化および計算機シミュレーション

これらの3つの教育・研究の柱について概説するとともに、今後の取り組みと展開方針について紹介する。

2. 当研究室の研究領域および取り組み事例

2.1 最先端材料の溶接・接合性研究

この研究領域では、新材料や高性能材料対応の溶接・接合プロセスの材料研究を行っており、ファイナセラミックスと金属の接合、酸化物分散強化 (ODS) 合金のパルス通電焼結接合、耐熱・耐食合金の高温割れ、単結晶合金補修、超高張力鋼の溶接材料開発などが主たる研究テーマである。このうち、ODS 合金のパルス通電焼結接合では、母材合金粉末をインサート材として用い、その場焼結接合法による高性能・高信頼接合に成功するとともに、パルス通電焼結挙動と接合機構を学術的に検証している。耐熱・耐食合金の高温割れ研究では、高耐食 Ni 合金、超高純度 EHP ステンレス鋼、耐熱超合金などの溶接高温割れ現象と機構を解明し、溶接施工健全性の確保のための学術的・技術的指針を提示している。特に、高温割れのモデル化に基づいた割れ発生予測では、母材組成や溶接施工の差異による割れ発生防止条件範囲を定量的に予測するま

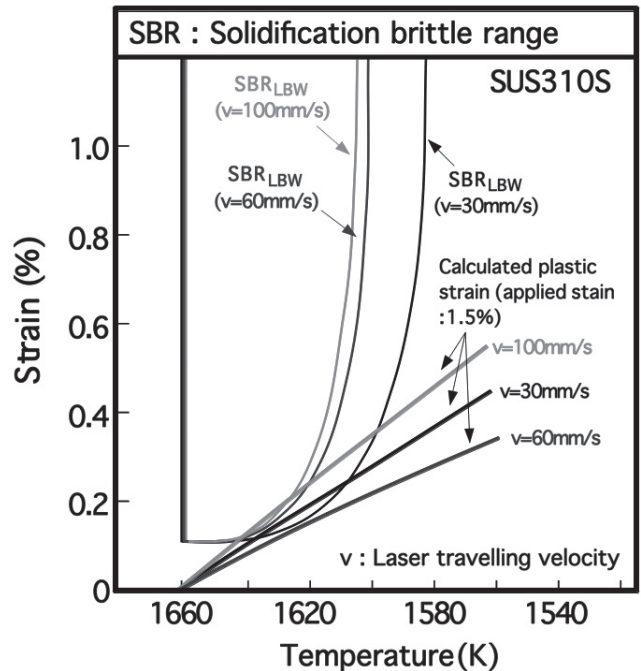


図1 310Sステンレス鋼レーザ溶接部における高温割れ発生予測

でに至っている。図1は、310S ステンレス鋼レーザ溶接部における高温割れ発生を予測した結果を示したものである。溶接速度が30mm/sと100mm/sの時、熱ひずみ曲線と割れ発生延性曲線 (SBR) が交差し、割れが発生することが予測される。この結果は、実溶接部の割れ発生と一致することを確認している。また、Ni基690合金多層盛溶接金属に発生するマイクロ割れ (延性低下割れ) に及ぼす不純物元素量の影響を評価した結果、図2に示すように多層盛溶接金属中でマイクロ割れが発生しない不純物元素量 (P+1.2S) は約30ppm以下であることが推定された。一方、単結晶合金補修では、単結晶タービン翼の補修技術として、レーザ結晶制御肉盛 (レーザ・エピタキシャル・クラディング) を開発し、肉盛部の単結晶化に成功するとともに、補修部の特性と実機適用性を明らかにしている。図3は、レーザによる単結晶肉盛の断面組織と結晶方位解析結果を示したものであり、3mm×1.5mmの単結晶肉盛が実現できていることが確認できる。

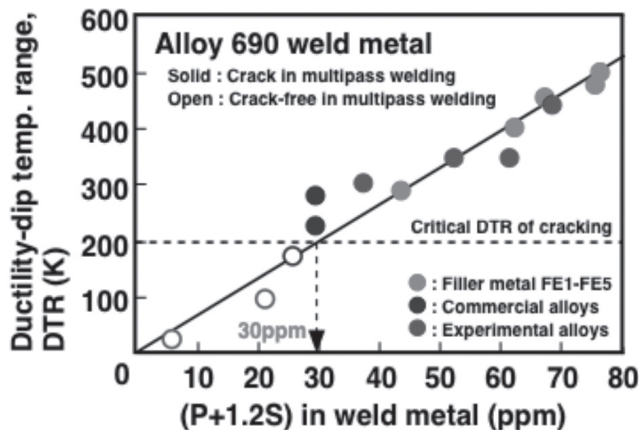


図2 Ni基690合金多層盛溶接金属に発生するマイクロ割れに及ぼす不純物元素量の影響

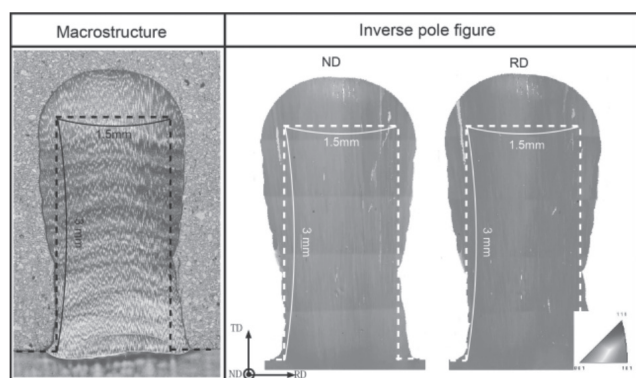


図3 Ni基単結晶合金に対するレーザ単結晶肉盛の断面組織と結晶方位解析結果

2.2 新溶接・接合プロセスの材料科学研究

この研究領域では、新溶接プロセス・新接合プロセスにおける材料挙動研究を行っており、結晶制御合金の液相拡散接合 (TLP 接合)、Zr とステンレス鋼の異材接合、アルミニウム合金とステンレス鋼の拡散接合、超微細粒鋼のハイパー界面接合、レーザブレイジング、水素拡散誘起β変態による低温精密接合などが主たる研究テーマである。このうち、結晶制御合金のTLP 接合では、Ni 基単結晶合金接合部の単結晶化達成と母材同等の高温継手特性の確保を可能としている。レーザブレイジングでは、世界に先駆けて高出力半導体レーザによるレーザブレイジング技術の開発・確立を行い、各種の高性能耐熱合金をはじめ、Al 合金、ステンレス鋼、Ti、Ni、Cu、金属間化合物などの異材接合へのレーザブレイジングの適用性を明らかにした。図4はその一例を示したものであり、Ni 基耐熱合金の薄肉チューブの管束ろう付に成功している。また、水素拡散誘起β変態による低温精密接合では、Ti および Zr に対する新たなコンセプトによる接合技術

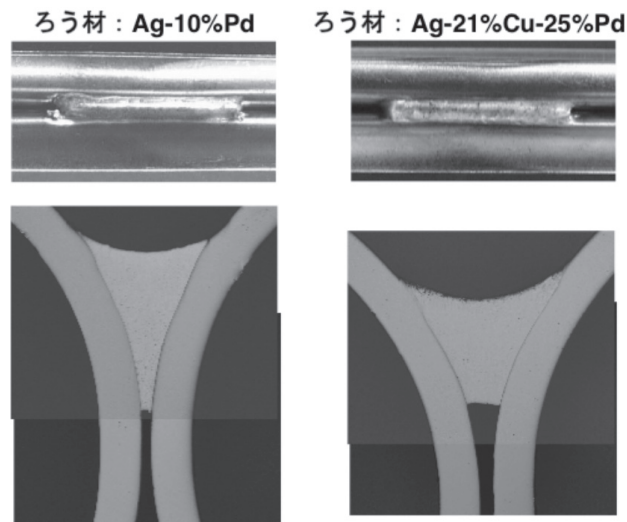


図4 レーザブレイジングによるNi基耐熱合金チューブの管束ろう付(チューブ肉厚: 0.5mm)

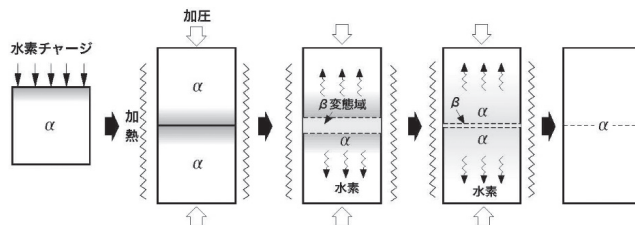


図5 水素拡散誘起β変態を活用した低温拡散接合技術

として、水素拡散に起因するβ変態を活用した低温拡散接合技術を提案した。本接合法のコンセプトを図5に示す。接合面を水素チャージしたのち、突き合せて加圧・加熱すると、水素拡散誘起変態により接合面近傍が局部的に低温でβ変態する。このため、接合界面で容易に密着化、相互拡散が進行し、接合体全体を高温で処理することなく、無変形で拡散接合が達成される。これまで、本接合法の特徴および有効性について明確にしたが、今後は適用性拡大に向けた取り組みが課題と考えている。

2.3 溶接部材料挙動のモデリング・シミュレーション研究

この研究領域では、溶接・接合における材料挙動の情報化研究を行っており、溶接部における材料挙動シミュレーション、ステンレス鋼の熱脆化予測、液相拡散接合のエキスパートシステムなどが主たる研究テーマである。溶接部における材料挙動シミュレーションやステンレス鋼の熱脆化予測研究では、溶接・接合部における相変態、析出・相分解、再結晶・粒成長などの材料挙動をモデル化し、計算機シミュレーションにより溶接・接合部の特性予測を可能とする取り組みを進めている。モンテカルロ・シミュレーションを用い

て、アーク溶接部およびレーザー溶接部の再結晶・粒成長挙動を可視化シミュレーションした結果を図6に示す。レーザー溶接部では再結晶および粗粒化領域がアーク溶接に比べかなり局所化されていることが容易に理解される。液相拡散接合のエキスパートシステムでは、ニューラルネットワーク、遺伝的アルゴリズム、

多目的最適化法などの先進的数理解析手法を用いて、液相拡散接合プロセス（インサート金属組成と接合条件）を最適化する手法およびソフトウェアの開発を行っている（図7）。本システムを用いて、液相拡散接合技術の一層の高度化・先進化が進展するものと期待されている。

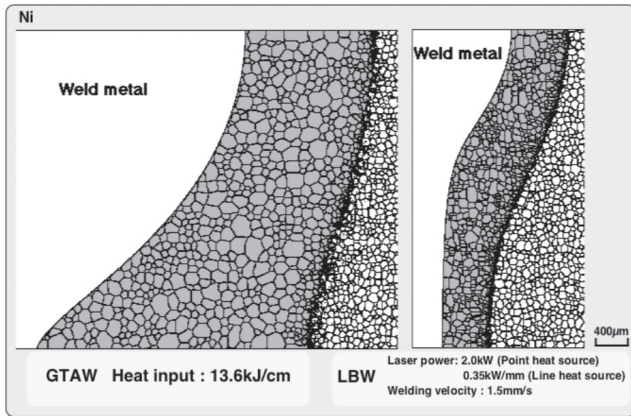


図6 Ni溶接部の再結晶・粒成長シミュレーション結果（モンテカルロ法）

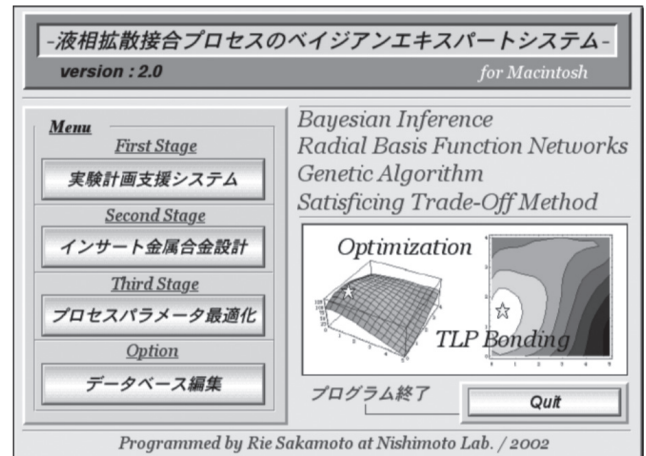
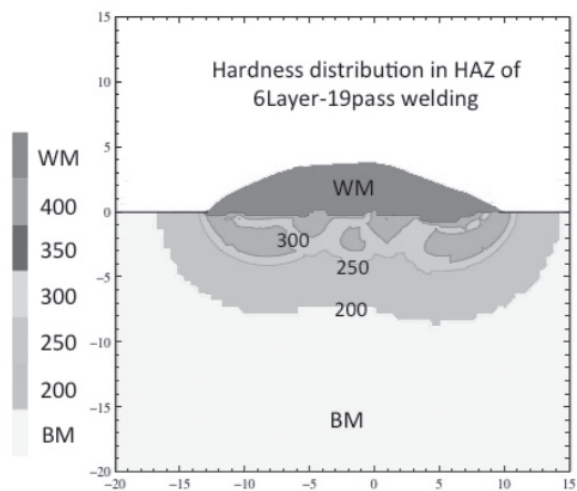


図7 液相拡散接合プロセスのベイジアンエキスパートシステム（ソフトウェア）

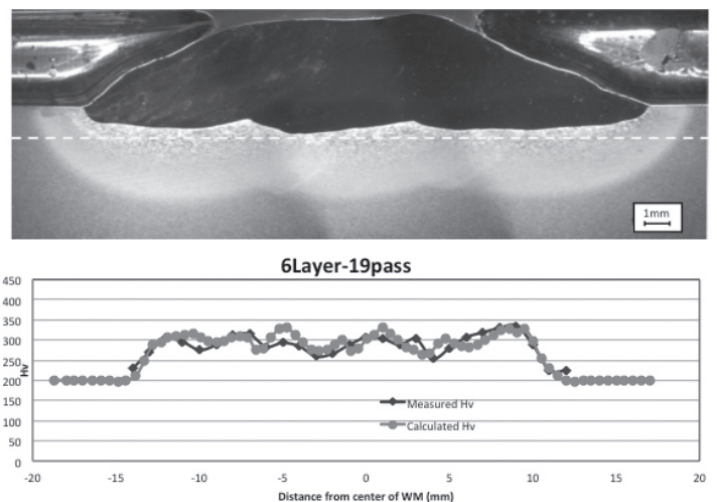
3. 溶接保全共同研究講座との連携

本研究室の重要な活動展開のひとつとして、溶接保全共同研究講座との連携が挙げられる。この研究領域では、補修・保全の高度化・高信頼性化研究を目指して、ピーニングの長期安定性評価、テンパービード溶接部の特性予測、PWHTフリー溶接技術の確立などに取り組んでいる。このうち、ピーニングの長期安定性評価では、各種ピーニング施工部の組織学的検討と

力学的検討を融合させた応力改善効果の長期安定性評価を試みている。また、テンパービード溶接部の特性予測では、ニューラルネットワークを用いたテンパービード溶接熱影響部の硬さ・靱性予測システムの開発に成功しており（図8にその一例を示す）、補修・保全の材料科学を探究する取り組みを進めているところである。



(a) 硬さ予測結果



(b) 予測値と実測値の比較

図8 低合金鋼テンパービード溶接部の硬さ予測結果

4. おわりに

本研究室は、生産科学教室の開祖より続く、最も伝統ある研究室のひとつであり、これまで偉大な先生方が担当されてきました。小職は平成24年6月より本研究室をお預かりすることになり、溶接・接合プロセスと補修・保全の高度化・先進化を目指し、溶接・接合／補修・保全材料科学（プロセッシング・メタラジー）を探究・体系化するとともに、将来を担う高度人材を育成することが目標です。具体的な教育・研究の展開方針としては、以下のテーマに取り組んでいきたいと考えています。

溶接・接合材料科学研究の高度化・先進化としては、統合的可視化理解や原子論的アプローチを指向したマ

ルチスケール連成材料挙動の解明、新材料・新プロセス対応の材料科学研究を指向した界面接合研究・表面改質研究の新規展開、材料と力学・プロセスとの接点で生じる溶接・接合現象の理解と予測を目指した材料⇔力学⇔プロセスの連携研究の推進。補修・保全の材料科学研究への展開としては、補修・保全の高度化・高信頼性化に資する溶接補修・取替え／予防保全に対する材料学的アプローチに取り組んでいきたい。

大阪大学工業会会員の皆様方のご指導、ご支援を賜りますようお願い申し上げます。

（溶接 昭和58年 60年修士）