最近の研究

摩擦攪拌接合に対する材料学的アプローチ

1. はじめに

摩擦攪拌接合(Friction stir welding, 以後 FSW と略す)は 1991年に英国溶接研究所(TWI)で開発された固相接合法で ある⁽¹⁾.溶融・凝固を伴わないがゆえに,接合時の変形が小 さい,溶接欠陥が少ない,接合部の機械的特性が良好である などの数多くの利点を有する.そのため,溶融溶接が難しい AI 合金への適用が真っ先に検討され,開発から20年余で代 表的な接合方法の1つとしての地位を確立し,すでに AI 合 金を中心に航空宇宙,自動車,船舶,橋梁などさまざまな分 野で実用化されている⁽²⁾⁽³⁾.近年,FSW の規格化も進めら れており,AI 合金の FSW に関しては2011年12月に国際規 格(ISO 25239)が成立し⁽⁴⁾,近々 JIS も発行される予定であ る(JIS Z3608).

FSW の原理を図1に示す⁽⁵⁾.ショルダとプローブから成 る非消耗接合ツールを回転させながら被接合材へ押し入れ, 接合線に沿って移動させるという単純な原理に基づいている が,接合ツール周りで生じる材料流動や接合部の形成機構な どの基礎現象は直接観察が難しいため明らかになっていなか った.現時点でも未解明な事象が数多く残されているが,種 々の材料学的解析によりFSW 基礎現象への理解が深まりつ つある.

本稿では,材料学的アプローチにより等軸的な微細粒組織 の形成機構,酸化膜の挙動,材料流動,接合メカニズムなど の解明に寄与した研究成果を紹介する.また,鉄鋼やチタン 合金のFSW を可能にする接合ツール材料の研究・開発の動 向についても解説する.

2. 微細粒組織の形成

FSW では,非消耗接合ツール/被接合材の間で発生する 摩擦熱と被接合材の加工発熱によって軟化した被接合材がツ ール周りを流動することで接合が達成される.適切な接合条



佐

藤

裕*

件を用いれば,接合欠陥のない継手が得られ,攪拌部には微細な等軸結晶粒組織が形成される(図2⁽⁵⁾に代表的な接合部断面マクロと組織分類を示す).微細な結晶粒組織は動的再結晶によって形成されると言われていたが,いかにして母材組織から微細な結晶粒組織が生成するのかについての知見はあまりなかった.2004~2005年にかけてAl合金のFSW過程での組織変化をストップアクション法により凍結し, EBSD法によって解析した結果が報告された⁽⁶⁾⁽⁷⁾.2195Al合金のFSW過程で接合ツールの移動と回転を強制停止し,接合ツール前方で生じた組織変化をEBSD解析した⁽⁷⁾.その結果,回転する接合ツールが近づくにつれて,母材組織がツールの回転に引き摺られるように変形して伸長粒になるとともに,元々の結晶粒界が波打ち始め,さらに元々の結晶粒

^{*} 東北大学准教授;大学院工学研究科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-02) Fundamental Understanding of Friction Stir Welding Based on Materials Science; Yutaka S. Sato(Tohoku University, Sendai) Keywords: *friction stir welding, microstructure, recrystallization, oxide layer, micro-texture, welding tool* 2015年11月5日受理[doi:10.2320/materia.55.53]

じ,接合ツール近傍では小角度粒界の方位差が増加して等軸 的な微細結晶粒が形成されるという微細化機構を提案してい る.また Mironovら⁽⁸⁾は,純鉄 FSW 部の接合方向に垂直 な断面において,母材部から攪拌部に至る広い領域で EBSD 解析を行い,母材の粗大粒組織が攪拌部の等軸微細 粒組織へ変化する過程を調べた.その結果を図3に示す. AI 合金のストップアクション法で得られた結果と同様,結 晶粒のサブディビジョンと小角度粒界の方位差増加によって 微細粒が形成されることを示している.その後,種々のAI 合金⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾,Mg 合金⁽¹¹⁾⁽¹²⁾,Ti 合金⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾,鉄鋼⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁸⁾,銅 合金⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾の FSW に伴う組織形成機構が系統的に調べら れ,また単結晶を用いた基礎的検討⁽¹⁶⁾⁻⁽¹⁸⁾も行われた.AI 合金や純鉄のように積層欠陥エネルギーの高い金属材料で は、上述のような結晶粒のサブディビジョンと小角度粒界方





図2 (a)Al 合金 FSW 部の断面マクロと(b)組織分類.

位差の増加による連続再結晶が主に生じるが,積層欠陥エネ ルギーが低い金属材料では,転位の再配列が生じにくいため 連続再結晶は生じにくく,元の結晶粒界が波打って新しい結 晶粒が形成される不連続再結晶が主体的になることが示され ている⁽¹⁵⁾⁽¹⁹⁾.また,再結晶挙動は接合条件にも依存する. 中くらいの積層欠陥エネルギーを有する銅におけるFSW 過 程での組織形成をストップアクション法にて調べた結果,回 転速度(接合温度)が低い場合には連続再結晶が生じるが,回 転速度の増加に伴って結晶粒界の波打ちによる微細粒形成が 見られ,連続再結晶から不連続再結晶へ遷移することが示さ れている⁽²⁰⁾.これは接合温度が増加すると粒界移動が生じ やすくなることに起因していると考えられる.

FSW は融点以下であるものの比較的高温で生じる巨大ひ ずみ加工と言える.従って,組織形成には温度とひずみ速度 が影響する.ひずみ速度の実測は難しいが,Masakiら⁽²¹⁾は FSW の熱履歴を与えながら高ひずみ速度下で平面ひずみ圧 縮試験を行い,FSW 過程でのひずみ速度を実験的に予測し た.すなわち,Al合金のFSW 過程で実測した最高到達温 度で,ひずみ速度を変えた平面ひずみ圧縮試験を実施し, FSW 過程と同じ冷却速度にて冷却した試験片の結晶粒組織 を攪拌部のものと比較した.その結果,ひずみ速度は約2~ 3s⁻¹程度であり,モデリング等で予測される値よりも小さ いことが示唆されている.

3. 酸化膜の挙動

A1合金の場合,表面を強固かつ安定な酸化膜で覆われて いるため,固相接合の障害となる.FSWでは,機械的なエ ネルギーにより酸化膜を分断し,2つの部材間の金属結合を 達成していると考えられていたが,FSW 過程での酸化膜の 挙動についての知見はあまりなかった.A1合金FSW部の



図3 純鉄 FSW 部から得られた EBSD 解析結果.(b)~(d)は(a)の各領域の拡大マップ.マップ中,白線は小角度 粒界(方位差 2~15°),黒線は大角度粒界(方位差15°以上)を示す.



図4 AA7075とAA2024の異種合金FSW 継手の断面 マクロ(AA7075を前進側, AA2024を後退側に配 置して突合せFSW. ツール回転速度:500 rpm, 接合速度:342 mm/min).

断面マクロをエッチング後に観察すると、断面にジグザグ模 様が観察される場合がある. 異種 Al 合金 FSW 部の断面マ クロは図4⁽²²⁾のようにジグザグ模様を境に異種合金が分か れて存在することがあるため, ジグザグ模様は酸化膜が存在 した初期突合せ面が移動した痕跡であることが分かる. エッ チング後にジグザグ模様が現れる Al 合金 FSW 部に対して 裏曲げ試験を行うと、ジグザグ模様の下部から割れることが ある⁽²³⁾. FSW では接合ツールを突合せ面に挿入して固相攪 **拌しているが,接合ツールのプローブ先端は被接合材の下面** に接触するまで挿入できない(接触すると被接合材は裏当て 材と接合される)ため、FSW 部の下部の攪拌が相対的に弱 くなり、初期突合せ面の酸化膜の分断が不十分になった結果 と言える. このような突合せ面下部に生じる未接合欠陥は Kissing bond もしくは Root flaw と呼ばれている $^{(23)-(26)}$. エッチング前の断面マクロで未接合欠陥は確認されないが, 裏曲げ試験で割れる試験片のジグザグ模様下部を TEM 観察 した結果,図5に示すように酸化膜が連続的に残存している ことが示された⁽²³⁾.一方,割れない試験片においては,局 所領域に酸化物粒子が観察され、部分的に酸化膜のない金属 結合部分が存在することが示されている(図5)⁽²³⁾⁽²⁷⁾. すな わち、断面マクロのジグザグ模様は初期突合せ面上の酸化膜 が分断されて局所領域に分布したものがエッチングによって 現れたものであり、酸化膜が連続的に存在しなければ機械的 特性に大きな影響を及ぼさないことが示されている.

4. 材料流動

接合ツール周りの材料流動は接合欠陥の発生や酸化膜の分断と関係するため,FSW にとって極めて重要である.材料



図5 裏曲げ試験でルート部から割れる継手と割れない 継手のルート部の TEM 写真と模式図. TEM サ ンプルは裏曲げ試験を採取した同じ継手から FIB にて採取.

流動を解析する手法としては, FSW 前の被接合材中に埋め 込んだ別な材質の小球の動きを追うトレーサー法⁽²⁸⁾,エッ チング度が異なる異種合金の移動を調べるマーカー法(29)(30), FSW 部に生成したミクロ集合組織の分布から変形方向を予 測する手法⁽³¹⁾⁻⁽³³⁾などがある.図6(a)にMg 合金 AZ61母 材と攪拌部中央から得られたミクロ集合組織を示す(33). {0001}底面が板面に平行に配置する母材の集合組織はFSW に伴って約90度回転している. 攪拌部における{0001}底面 の分布を調べた結果,図6(b)のようなトレースを示してお り, Mg 合金の主すべり面が接合ツールのプローブ表面にほ ぼ平行に並ぶことから, FSW における変形は主に単純せん 断によって特徴付けられ、せん断方向はツール回転方向にほ ぼ平行であることが示された. 単純せん断の痕跡は Al 合 金⁽⁹⁾⁽³¹⁾,鉄鋼⁽⁸⁾⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁸⁾,Ti合金⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽³⁴⁾などでも観察され ている.FSW による単純せん断で得られた主すべり面の回 転分布は材料流動に対する知見を提供するばかりなく、継手 性能に影響することがある(35)ため重要な基礎データと言え る.

上述した材料流動の解析法は有益な情報を提供している が,接合ツール周りで生じた最終段階での現象を反映してい るに過ぎない.近年,Morisadaら⁽³⁶⁾は高輝度X線透過シ ステムを用いてFSW中の塑性流動挙動を3次元可視化する ことに成功した.直径300µmのWトレーサーの動きを FSW中に観察し,前進側(Advancing side)に形成される接 合欠陥の発生メカニズム⁽³⁷⁾やひずみ速度⁽³⁸⁾を調べている.



図 6 (a) Mg 合金 AZ61 母材と攪拌部中央から得られた {0001} 極点図と(b) 攪拌部内における {0001} 底 面の分布.

図7(a)にX線透視画像を得るための装置配置図を示す. 1050A1合金のFSWを種々のツール回転速度で実施した結 果(図7(b)),接合欠陥が発生する場合には、ショルダによ る上下方向の塑性流動不足とプローブ周囲における塑性流動 速度のアンバランスが生じていることを明らかにした⁽³⁷⁾. また、Wトレーサーの移動速度変化からFSW過程でのひ ずみ速度変化を求め、最終段階でのひずみ速度は-13.4 s⁻¹ であることを示している⁽³⁸⁾.材料流動は被接合材料の種 類、接合ツールの形状、接合条件に大きく影響を受けるた め、これらを系統的に変えたときの挙動、ひずみ速度に関す る知見を得ることにより、接合プロセスの高度制御が可能に なるものと期待される.

5. 接合メカニズム

固相接合を達成するためには,金属材料表面の酸化膜を分 断し,酸化膜のない表面同士が密着して,2つの被接合材中 の原子が安定な原子間距離に達する必要がある.FSW で は,初期突合せ面の酸化膜は分断され,上述のように粒子状



37 (a) X 緑透倪画隊を得るための装置配置図と(b) 種々の回転速度で得られたWトレーサーの3次 元移動軌跡.

に分布している.酸化膜のない表面の形成には、ミクロ集合 組織解析の結果で示したとおり、単純せん断が寄与している ものと推察される.なぜなら、単純せん断を受けた材料はす べり変形によりすべり面上に酸化膜のない表面が形成される ためである.また、FSW では被接合材中へ接合ツールを無 理矢理押し入れているため、酸化膜のない表面同士は十分に 密着することができる.実際に、水中でFSW を行っても、 水が攪拌部内に取り込まれることはない.

FSW の接合メカニズムを模式的に示すと図8のようにな ると考えられる.接合ツールの回転によって被接合材は単純 せん断を受けて,主にツール回転方向に移動する.このと き,初期突合せ面の酸化膜が分断され,酸化膜のない表面が 現れる.酸化膜のない表面同士が密着することにより接合が 達成されているものと推察される.このとき,分断された酸 化膜は酸化物粒子として局所領域に残存するが,その周囲で 金属結合が達成されているため,機械的特性へほとんど影響 しないと考えられる.

6. 鉄鋼・チタン合金用接合ツールの開発

FSW の利点を鉄鋼でも活用するため、これらに対する適 用研究が国内外で進められている.しかし、鉄鋼の FSW に 耐えうる安価な接合ツールがほとんどないため、その実用化 は進んでいない.



図8 FSW の接合メカニズム.

鉄鋼の FSW では,被接合材が軟化する温度域で十分な高 温強度,靱性,耐摩耗性を有するとともに,室温でも十分な 硬さと靱性があり,被接合材との反応性が低いツール材料が 必要となる⁽³⁹⁾.これまで W-25% Re 合金,多結晶の cBN (PCBN), cBN/W-Re 合金の複合材料が鉄鋼の FSW に使 えるツール材料として,特に欧米で多用されているが,いず れもツール単価が高額であり,汎用的に用いられるには至っ ていない.広く普及させるには,コストパフォーマンスに優 れたツール材料の開発が不可欠であり,この分野の研究・開 発は国内で活発に行われている.

これまで国内で開発されたツール材料としては,窒化ケイ 素⁽⁴⁰⁾, Ni 基超・超合金⁽⁴¹⁾, Ir 基合金⁽⁴²⁾などがあるが,本 稿では筆者らが開発した Co 基合金⁽⁴³⁾⁻⁽⁴⁵⁾, Ir 添加 Ni 基合 金⁽⁴⁶⁾, W 基複合材料⁽⁴⁷⁾について紹介する.

Co 基合金と Ir 添加 Ni 基合金は y/y' 型組織を有する耐熱 金属材料である. Co 基合金は y/y' 型組織の母相と硬質相 (炭化物や金属間化合物)からなる合金であり,フェライト鋼 やチタン合金の FSW が可能なツール材料として市場展開さ れている.特に $\alpha + \beta$ 型チタン合金(例えば Ti-6Al-4V 合 金)の FSW においては,図9に示すようにアルミニウム合 金並みの滑らかで光沢のある接合部外観が得られる⁽⁴³⁾. Co 基合金は FSW 時に割れることはなく摩耗するが,摩耗の程 度は接合温度と硬質相の分布状態に依存し,2~5 μ m の硬 質相の体積率を増加させることにより耐摩耗性が向上するこ とが示された⁽⁴⁴⁾.そこで,硬質相の体積率を増加させた結 果,図10に示すように中炭素鋼(S45C)を3.6 m 接合しても ツールはほとんど摩耗せず,初期開発合金に比べて1.5倍以 上の長寿命化に成功している⁽⁴⁵⁾. Ir 添加 Ni 基合金は Co 基



FSW前後のCo基合金ツールの外観



 図9 Co基合金ツールで得られたTi-6Al-4V合金
 FSW 継手の外観写真とFSW 前後のツール外観 変化.



合金よりも高温強度に優れたツール材であり,プローブ長5 mm で SUS304ステンレス鋼の FSW も可能であることを報告している⁽⁴⁶⁾. いずれもツール寿命の向上を目指して,ツ ール材の更なる組織制御が試みられている.

W 基複合材料はWに種々のセラミック粒子を混合したものである.セラミック粒子の種類や混合量を調整して,高温強度を低下させることなく,靱性を向上させるとともに,接合ツール先端部の過熱を防止する目的で熱伝導率を向上させた.ツール表面にセラミック被膜をコーティングしてSUS304ステンレス鋼のFSWに用いた結果,プローブ長1.8 mmのツールでは接合長20m以上,プローブ長3.8 mmでは接合長12mを達成した.現在,このW基複合材料においても,混合する硬質粒子の種類や量,セラミック被膜の最適化を試みているところであり,実用上問題のないツール寿命と価格の実現を目指している.

7. おわりに

FSW の基礎現象と接合ツール材料の開発状況について, これまでの著者らの成果を交えて解説した. 十数年に渡る基 礎研究を通して, FSW 現象についての理解はある程度深ま ってきたが,例えば材料の流動単位や導入ひずみ量などの実 測は実験的アプローチが難しく,未解決のまま残されてい る.また,継手品質に影響する接合因子が多く,それらの影 響度がはっきりしないため,公表された成果同士が結び付か ない,実験結果とシミュレーション結果が一致しないといっ た状況が度々見られ,未だ学術的に成熟したとは言えない状 況にある. 今後も基礎現象の解明に向けた実験研究により, 地道なデータ取得が必要と考える.

文 献

- (1) W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needhan, M. G. Murch, P. Temple-Smith and C. J. Dawes: International Patent Application PCT/GB92/02203 and GB Patent Application 9125978.8, UK Patent Office, London, December 6, 1991.
- (2)粉川博之ら:特集「摩擦攪拌接合の基礎と応用」,金属,83-3 (2013),3-33.
- (3) 溶接学会編:摩擦攪拌接合 —FSW のすべて—,産報出版, (2006).
- (4) 松岡茂樹: 軽金属溶接, 51 (2013), 396-401.
- (5) 摩擦圧接協会編:摩擦接合技術,日刊工業新聞社,(2006).
- (6) R. W. Fonda, J. F. Bingert and K. J. Colligan: Scr. Mater., 51 (2004), 243–248.
- (7) P. B. Prangnell and C. P. Heason: Acta Mater., **53**(2005), 3179–3192.
- (8) S. Mironov, Y. S. Sato and H. Kokawa: Acta Mater., **56**(2008), 2602–2614.
- (9) U. F. H. R. Suhuddin, S. Mironov, Y. S. Sato and H. Kokawa: Mater. Sci. Eng. A, **527** (2010), 1962–1969.
- (10) S. Mironov, K. Inagaki, Y. S. Sato and H. Kokawa: Metall. Mater. Trans. A, 46A(2015), 783–790.
- (11) U. F. H. R. Suhuddin, S. Mironov, Y. S. Sato, H. Kokawa and C.-W. Lee: Acta Mater., 57 (209), 5406–5418.
- (12) S. Mironov, T. Onuma, Y. S. Sato and H. Kokawa: Acta Mater., (2015), in press.
- (13) S. Mironov, Y. S. Sato and H. Kokawa: Acta Mater., 57 (2009), 4519–4528.
- (14) S. Mironov, Y. S. Sato and H. Kokawa: Mater. Sci. Eng. A, 527 (2010), 7498–7504.
- (15) S. Mironov, Y. S. Sato, H. Kokawa, H. Inoue and S. Tsuge: Acta Mater., 59(2011), 5472–5481.
- (16) J. Jeon, S. Mironov, Y. S. Sato, H. Kokawa, S. H. C. Park and S. Hirano: Acta Mater., **59** (2011), 7439–7449.
- (17) J. Jeon, S. Mironov, Y. S. Sato, H. Kokawa, S. H. C. Park and S. Hirano: Acta Mater., **61** (2013), 3465–3472.
- (18) J. Jeon, S. Mironov, Y. S. Sato, H. Kokawa, S. H. C. Park and S. Hirano: Metall. Mater. Trans. A, 44A (2013), 3157–3166.
- (19) S. Mironov, K. Inagaki, Y. S. Sato and H. Kokawa: Philos. Mag., 94(2014), 3137–3148.
- (20) S. Mironov, K. Inagaki, Y. S. Sato and H. Kokawa: Philos. Mag., 95(2015), 367–381.
- (21) K. Masaki, Y. S. Sato, M. Maeda and H. Kokawa: Scr. Mater., 58(2008), 355–360.
- (22) Y. S. Sato, Y. Kurihara and H. Kokawa: Proc. 6th Intern. FSW Symp., St Sauveur, Canada, (2006), CD–ROM.
- (23) Y. S. Sato, H. Takauchi, S. H. C. Park and H. Kokawa: Mater. Sci. Eng. A, 405(2005), 333–338.

- (24) T. L. Dickerson and J. Przydatek: Int. J. Fatigue, 25(2003), 1399–1409.
- (25) C. Z. Zhou, X. Q. Yang and G. H. Luan: Mater. Sci. Eng. A, 418 (2006), 155–60.
- (26) C. Mandache, D. Levesque, L. Dobourg and P. Gougeon: Sci. Technol. Weld. Join., 12(2012), 295–303.
- (27) Y. S. Sato, F. Yamashita, Y. Sugiura, S. H. C. Park and H. Kokawa: Scr. Mater., 50(2004), 365–369.
- (28) K. Colligan: Weld. J., 78(1999), 229s-237s.
- (29) A. P. Reynolds: Sci. Technol. Weld. Join., 5(2000), 120-124.
- (30) T. U. Seidel and A. P. Reynolds: Metall. Mater. Trans. A, **32A** (2001), 2879–2884.
- (31) Y. S. Sato, H. Kokawa, K. Ikeda, M. Enomoto, S. Jogan and T. Hashimoto: Metall. Mater. Trans. A, **32A**(2001), 941–948.
- (32) D. P. Field, T. W. Nelson, Y. Hovanski and K. V. Jata: Metall. Mater. Trans. A, **32A**(2001), 2869–2877.
- (33) S. H. C. Park, Y. S. Sato and H. Kokawa: Metall. Mater. Trans. A, 34A(2003), 987–994.
- (34) S. Mironov, Y. Zhang, Y. S. Sato and H. Kokawa: Scr. Mater., 59(2008), 27–30.
- (35) S. H. C. Park, Y. S. Sato and H. Kokawa: Scr. Mater., 49 (2003), 161–166.
- (36) Y. Morisada, H. Fujii, Y. Kawahito, K. Nakata and M. Tanaka: Scr. Mater., 65 (2011), 1085–1088.
- (37)森貞好昭,今泉拓也,藤井英俊:溶接学会論文集,32 (2014),31-37.
- (38) Y. Morisada, T. Imaizumi and H. Fujii: Scr. Mater., 106 (2015), 57–60.
- (39) C. D. Sorensen and T. W. Nelson: Friction Stir Welding and Processing, edited by R. S. Mishra and M. W. Mahoney, ASM International, Materials Park, OH, USA, (2007), 111–121.
- (40) 総合車両製作所 HP (https://www.j-trec.co.jp/koukoku/toolcatalog06ol_2.pdf)
- (41)東 靖子,金野泰幸,高杉隆幸:溶接学会論文集,28
 (2010),116-122.
- (42) T. Miyazawa, Y. Iwamoto, T. Maruko and H. Fujii: Sci. Technol. Weld. Join., **17**(2012), 213–218.
- (43) Y. S. Sato, M. Miyake, H. Kokawa, T. Omori, K. Ishida, S. Imano, S. H. C. Park and S. Hirano: Friction Stir Welding and Processing VI, TMS, (2011), 3–9.
- (44) Y. S. Sato, M. Miyake, H. Kokawa, T. Omori, K. Ishida, S. Imano, I. Sugimoto, S. H. C. Park and S. Hirano: Proc. 10th Int. FSW Symposium, Beijing, China, (2014), CD–ROM.
- (45) Y. S. Sato, M. Miyake, S. Susukida, H. Kokawa, T. Omori, K. Ishida, S. Imano, I. Sugimoto, S. H. C. Park and S. Hirano: Friction Stir Welding and Processing VIII, TMS, (2015), 39– 46.
- (46) T. Nakazawa, Y. S. Sato, H. Kokawa, K. Ishida, T. Omori, K. Tanaka and K. Sakairi: Friction Stir Welding and Processing VIII, TMS, (2015), 77–82.
- (47) 辻 あゆ里,山崎繁一,上西 昇,池ヶ谷明彦,佐藤 裕,薄 田真一,粉川博之,伊石塚浩,森口秀樹:溶接学会全国大会 概要集,96(2015),62-63.



 ★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
 1997年 東北大学大学院工学研究科博士前期2年の 課程修了

1997年 東北大学助手(2007年から名称変更で助教) 2003年~2004年 米国ブリガムヤング大学博士研究員 2008年10月 現職

専門分野:溶接・接合工学

②各種溶接・接合部の組織解析,諸特性の改善等に従 事.特に摩擦攪拌を用いた接合技術と組織改質法に 関する材料学的研究を中心に活動.
