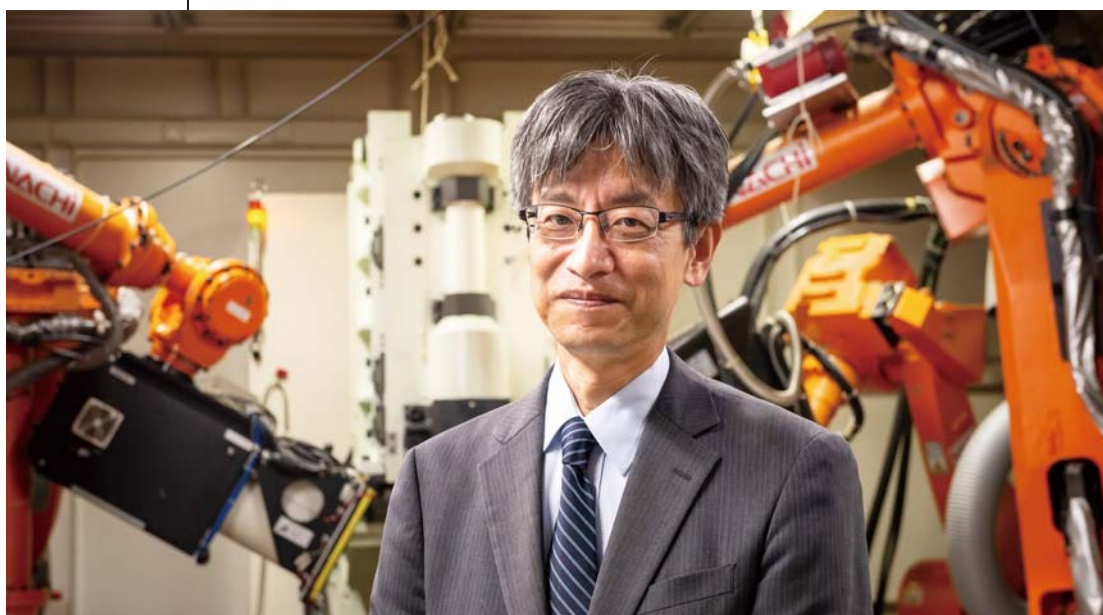


特集 | マルチマテリアルを実現する 「線形摩擦接合法 (LFW)」の開発



大阪大学 教授
藤井英俊 氏

ISMAプロジェクト参画のきっかけ となった中高炭素鋼の接合技術

ISMAプロジェクトの下、「固相摩擦接合技術」の研究開発を進めているのが、大阪大学接合科学研究所の藤井英俊教授を中心とする分担研究拠点です。

自動車の次世代の構造材料として期待されているものに、従来の鋼に比べて引張強度が高い「中高炭素鋼」があります。しかし、鋼が相変態を起こす723℃以上の高温で接合すると、冷却中に脆化するという課題があるため、従来の溶接技術では接合がむずかしく、自動車には使われていま

せん。そこで、ISMAプロジェクトの下、藤井教授らが取り組んだのが、固相摩擦接合技術の一種である「低温線形摩擦接合法 (LFW)」の開発です。

革新的な接合技術「LFW」の マルチマテリアルへの適用

LFWとは、材料同士を押し付けながら、擦り合わせることで、接合面で発生する摩擦熱を利用して接合する方法です(図1)。

中でも藤井教授らが本プロジェクトの初期に開発したLFWの特徴は高速かつ低温で接合できることにありました。そ

れを可能にしたのが、藤井教授らのある大きな発見でした。それは、材料同士を横から押し付ける力(印加圧力)を増加させ

線形摩擦接合 (LFW)

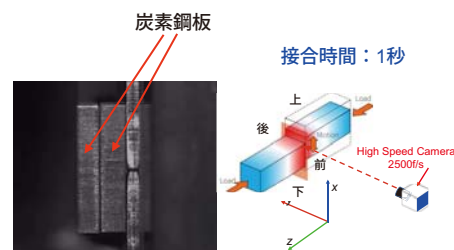


図1. 材料同士を押し付けながら、擦り合わせることで、接合面で発生する摩擦熱を利用して接合する「線形摩擦接合法 (LFW)」

マルチマテリアルの摩擦接合法の開発

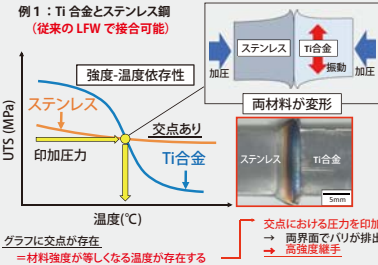


図2. ステンレス鋼が示すグラフ(オレンジ色)とチタン合金の示すグラフ(青色)。グラフの交点は両者の材料強度が等しくなる点を示している

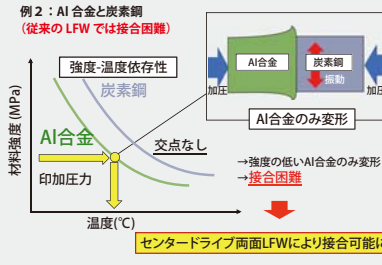


図3. アルミニウム合金(緑色)と炭素鋼(ねずみ色)の強度の温度依存性を表すグラフ。交点がないため、どの温度、印加圧力においてもアルミニウム合金が変形してしまう

ればさせるほど、接合温度が低下するという現象です。この発見により、藤井教授らは、中高炭素鋼同士を723℃よりも低い温度で接合でき、しかも十分な引張強度を確保できることを実証しました。この原理をもとに、次にこのLFWを、異種材料同士の接合に適用することに挑戦したのです。

まず、検討したのはステンレス鋼とチタン合金の接合です。ここで着目したのが、両者の強度の温度依存性でした(図2)。ステンレス鋼が示すグラフとチタン合金の示すグラフの交点は、両者の材料強度が等しくなる点です。この交点の温度と印加圧力で接合すれば、ステンレス鋼もチタン合金もともに変形し、高強度で接合

できるはずだと、藤井教授らは考えたのです。「実際に接合してみたところ、100%の継手効率が得られることを確認しました」(藤井教授)

3種類の材料を同時に接合することができる「センタードライブ両面LFW」

さらに、藤井教授らはアルミニウム合金と炭素鋼の接合を検討しました。両者の強度の温度依存性を表すグラフは図3の通りで、交点がありません。これは、どのような温度、印加圧力においても強度の低いアルミニウム合金のみが変形することを表しています。

そこで、藤井教授らが考案したのが、接

合したい材料と材料の間に“センター材”をはさむことでした。センター材には、図4のような強度の温度依存性をもっているものを選びます。

そして、低温で接合するべきアルミニウム合金には高い圧力を、一方、高温で接合すべき炭素鋼には低い圧力を印加しながら、両側から材料を押し付け、センター材だけを上下に振動させることで、3種類の材料を同時に接合することができるのです。

藤井教授はこの方法を「センタードライブ両面LFW」(図5)と命名しました。「これにより、継手効率92%を達成しました」(藤井教授)

このように、それぞれの材料の強度の温度依存性をもとに、最適な温度と印加圧力を割り出すことで、どのような異種材料であっても接合が可能となりました。

2021年に「接合技術拠点」を創設

ISMAプロジェクト終了後、藤井教授らは2021年に創設した「接合技術拠点」を基盤に、固相摩擦接合法のマルチマテリアル化への適用に向けた研究開発を継続していく計画です。「革新的な固相摩擦接合法の確立と1日も早い実用化を目指します」(藤井教授)

マルチマテリアルの摩擦接合法の開発

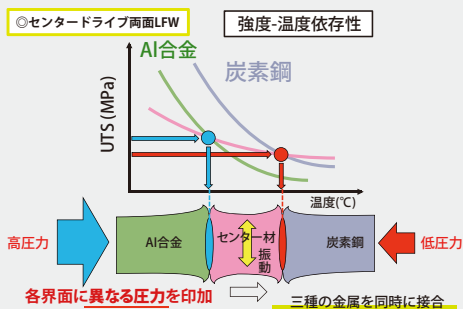


図4. センター材の強度の温度依存性を示すグラフ(ピンク色)。アルミニウム合金(緑色)とセンター材との交点、炭素鋼(ねずみ色)とセンター材との交点における温度と印加圧力で接合することで、センター材を介してアルミニウム合金と炭素鋼を同時に接合可能。具体的には、アルミニウム合金とセンター材は、アルミニウム合金とセンター材との交点における温度と印加圧力で接合し、炭素鋼とセンター材は、炭素鋼とセンター材との交点における温度と印加圧力で接合する



センタードライブ両面LFW装置

加圧 試料

振動

加圧 試料

仕様

- 最大振幅：±2mm
- 最大周波数：50Hz
- 最大荷重：300kN

特徴

- センタードライブ方式を有するLFW装置は現在唯一無二
- 左右の各圧力を独立制御できる

図5. ISMAで開発したセンタードライブ両面LFW装置。センター材だけを上下に振動させて3種類の材料を接合する。真ん中の小さなセンター材だけを振動させるので、振動させるのが困難な(同種の)大型構造物同士の接合も可能。また、本装置はセンター材を使わない2種類の材料の接合にも対応している

特集 革新的FSWによる 超ハイテン接合部材の開発



左：株式会社日立製作所
主任研究員

保田雄亮氏

右：JFEスチール株式会社
主任研究員

松下宗生氏

超ハイテン材を高速で接合可能な 「ハイブリッドFSW」の開発

衝突時の乗員保護と燃費向上のための軽量化を目的に、自動車用鉄鋼部材の高強度化が急速に進められています。その一環として、「革新的摩擦攪拌接合法（FSW）による超ハイテン接合部材の開発」に取り組んでいるのが、JFEスチールと日立グループです。

まずは、JFEスチールの取り組みから紹介しましょう。

乗員を事故から保護するには、キャビン周りに高強度で信頼性の高い超ハイテン材を使うことが求められます（図6）。しかし、超ハイテン材の場合、一度溶かしたあとに冷やし固めると脆くなる危険性が高いため、従来の接合技術を使うことができません。そこで、材料を溶かさないう接合方法であるFSWに期待が寄せられていましたが、FSWを使って鉄鋼部材を接合するに

は、接合速度が遅すぎて、量産化が不可能という課題があります。そこで、JFEスチールは、超ハイテン材を高速で接合可能な「ハイブリッドFSW」の開発に取り組みました。これは、部材の両面からツールを押し付けて摩擦攪拌することで接合する「両面FSW」（図7～9）と、接合する箇所を高周波誘導加熱やレーザー照射などにより予熱するプロセスを組み合わせたFSW技術です。

片面FSWに比べ両面FSWにした ことで8倍の高速化を実現

その結果、ハイブリッドFSWの接合速度は、従来のレーザー溶接と同等の速度を達成しました。「特に、両面FSWの鉄鋼部材への適用は初の試みで、どれくらい高速化が図れるか予測できませんでした。片面による接合速度の2倍程度になることを期待していましたが、実際には、約8倍の高速化を確認しました。そこまで高速化できるとは思っていませんでしたので、非常に驚きました」

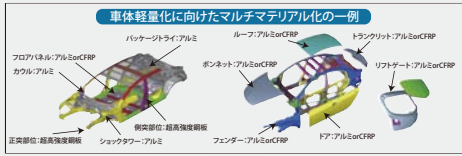
とJFEスチールの松下宗生氏は話します。

その後の解析により、摩擦攪拌による接合部の鉄の流動の仕方が、ツールが1個の場合と2個の場合ではかなり異なっており、それが顕著な高速化をもたらしていることがわかってきました。また、ハイブリッドFSWにすることで、片面FSWと比べて約16倍の接合速度が得られることも実証されました。

一方、特性に関しても、従来のレーザー溶接と同等の性能が得られることが確認されました。特に、超ハイテン材をレーザー溶接すると、接合部に水素が混入することで水素割れ、水素脆化が起こりやすくなるのですが、両面FSWでは、水素の混入が非常に少ないこともわかりました。「そこで、自動車部品を試作してみたところ、プレス成型が十分可能であることが確かめられました。実用化を検討できるレベルに達することができたのです」（松下氏）

背景

自動車車体のマルチマテリアル化により適材適所に材料を選択



キャビン回りは衝突事故時に乗員保護の役割から変形しにくい構造が必要 ⇒ 超ハイテンが適材

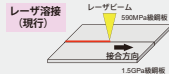
- 将来課題：超ハイテンの溶接においては、溶融により生じる割れ・脆化の感受性が高まる、溶接部強度確保が困難となる
- アプローチ：非溶融接合である摩擦攪拌接合(FSW)の高効率化により、割れ・脆化の回避と満足な継手性能・施工効率の接合技術を開発する。

図6. 搭乗者を事故から保護するには、キャビン周りに高強度で信頼性の高い超ハイテン材を使うことが最適。そのためには超ハイテン材の接合技術の開発が不可欠

両面FSW継手の特性の明確化

● 供試鋼：板厚1.6mm-1.5GPa級冷延鋼板 板厚1.6mm-590MPa級冷延鋼板

● 接合方法・条件：



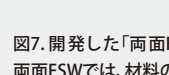
● 溶接条件：レーザー出力：2.5kW 溶接速度：3m/min

● 接合部観察：

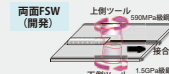
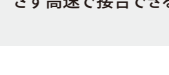
● レーザ溶接(現行)



● レーザ溶接(現行) 継手外観



● レーザ溶接(現行) 継手マクロ組織

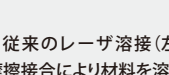


● 溶接条件：上側ツール 590MPa級鋼板 下側ツール 1.5GPa級鋼板 ツール回転数：1500rpm 接合速度：3m/min

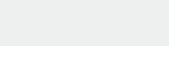
● 両面FSW(開発)



● 両面FSW(開発) 継手外観



● 両面FSW(開発) 継手マクロ組織



● どちらも外観、内部において欠陥の無い健全な接合部が安定的に形成

図7. 開発した「両面FSW」(右)と従来のレーザー溶接(左)。両面FSWでは、材料の両面から摩擦接合により材料を溶かさず高速で接合できる

合速度やツールの回転速度、ツールの挿入量などです」と日立製作所の保田雄亮氏。

主な成果は次の3つです。1つ目は、超ハイテン材に対する長寿命なFSWツール開発です。2つ目は、目標としていた長さ25mの連続接合の達成です。そして、3つ目は、最適化したツールをロボットに取り付け、接合条件を補正する制御機能を実装したことで、安定した品質で接合が可能となり、自動車部品を想定

したプレス成形部材のアセンブリ接合の試作に成功したことです。「今後はそれぞれの顧客の要望に応じたオーダーメイド型のFSW装置やFSWツールの開発を進めていきます」(保田氏)

両者は今後も超ハイテン材の自動車部品への適用に向けFSWによる超ハイテン材の接合技術の1日も早い実用化を目指していきます。

一方、実用化に向けた課題は両面FSWのツールのコストと耐久性です。そのため、同社では今後、ツールの製造企業との連携により、実用化を目指す予定です。

さまざまな形状の超ハイテン材に対応可能な「ロボットFSW装置」の開発

次に、日立グループの取り組みを紹介しましょう。

自動車部品の実用化に向けては複雑な形状に対応可能な接合装置の開発が不可欠です。そこで、日立グループではさまざまな形状の部品に対応可能な「ロボットFSW装置」による超ハイテン材のアセンブリ接合技術の開発を進めました(図10)。「まず、超ハイテン材に対して、FSWツールを開発し、ロボット制御する際の接合条件を最適化しました。接合条件とは、接



図8. JFEスチールが開発した「ハイブリッドFSW」に対応した実験装置。超ハイテン材をレーザー溶接並みの高速で接合可能

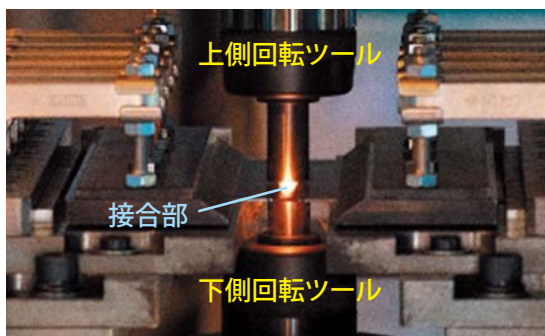


図9. 両面FSW装置での接合の様子



図10. 日立グループが開発した「ロボットFSW装置」。さまざまな形状の超ハイテン接合部材に対応可能

イベント情報

- 革新的新構造材料等研究開発「2022年度成果報告会」
日時：2022年12月20日(火) 場所：イイノホール(東京都千代田区内幸町)
- オートモーティブワールド2023「第13回 車の軽量化 技術展」
日時：2023年1月25日(水)～27日(金) 場所：東京ビッグサイト(東京都江東区有明)
- nano tech 2023 国際ナノテクノロジー総合展・技術会議
日時：2023年2月1日(水)～3日(金) 場所：東京ビッグサイト(東京都江東区有明)
- 革新的新構造材料等研究開発「最終成果報告会」
日時：2023年3月16日(木) 場所：イイノホール(東京都千代田区内幸町)

ISMA REPORT November 2022, No.16

©Innovative Structural Materials Association. 2022 All rights reserved.

発行 新構造材料技術研究組合(ISMA)

お問い合わせ先 新構造材料技術研究組合(ISMA)技術企画部
〒100-0006 東京都千代田区有楽町1-9-4 蚕糸会館10階
Tel：03-6213-5655 Fax：03-6213-5550
デザイン：高田事務所 撮影：石川典人(表紙ほか)
取材・執筆：山田久美