

特集2

OVERVIEW ■

自動車の重量は燃費に直結するため、より軽くて丈夫な材料の開発が進んでいる。しかし、組み立てる際の接合は非常に困難で、材料によっては溶接時に本来の強度特性を損なうこともあるという。この課題に対し、大阪大学接合科学研究所の藤井英俊教授は、高い圧力をかけながら電流を流すことで、強度特性を変えずに低温で金属同士を接合する「固相抵抗スポット接合技術」を開発した。従来は困難とされた金属同士の接合が可能になるだけでなく、省電力や廃棄物削減など、脱炭素化をはじめとするさまざまな社会課題の解決につながる技術としても大いに期待される。

強度特性を保つ金属同士の「低温接合」 省電力、廃棄物削減につながる新技術

左 藤井 英俊 Fujii Hidetoshi

大阪大学 接合科学研究所 副所長・教授
2019年より未来社会創造事業 研究開発代表者

右 相原 巧 Aibara Takumi

大阪大学 接合科学研究所 博士後期課程

中央 上山 智之 Ueyama Tomoyuki

ダイヘン 常務執行役員 技術開発本部長 兼 接合技術開発部長

大手企業との共同研究 1つの動画がつないだ縁

2021年5月、大阪大学接合科学研究所の藤井英俊教授は、自身が研究開発代表者を務める未来社会創造事業での成果を携え、「新技術説明会」に登壇した。この説明会は、産学連携を狙う企業と大学のマッチングの場としてJSTが主催しているものだ。新型コロナウイルス感染症のまん延後は、オンラインで開催が続いている。この日も多くの企業関係者が聴講する中、藤井さんは新しい接合技術を紹介し、社会実装に向けた共同研究のパートナーを募った。

念頭にあったのは、自動車や鉄道

の車両製造企業だ。「従来の溶接技術では接合が難しい材料にも対応し、生産性も遜色はない」と特徴を強く訴えた。後日、講演のアーカイブ動画を見て手を挙げたのが、大阪に本社を構える溶接機・産業用ロボットの大手、ダイヘンの上山智之常務執行役員である。藤井さんのことは以前から知っていたものの、それまでは食指が伸びなかったという。

「今回は違いましたよ。オリジナリティーも高く、これはいけると直感しましたね。装置開発には自社の技術も活用できます。まさに1つの動画がつないだ縁でした」と上山さんは当時の衝撃を語る。折しも、ダイヘンは次世代の画期的な接合技術を求め

ていた。また藤井さんのいる大阪大学接合科学研究所内に、産学連携の拠点を持っており、共同研究に迅速に乗り出せる環境も整っていた。

大手からの申し入れに、当時の藤井さんは快哉を叫んだという。「私たちが自動車メーカーに直接呼び掛けでも、実用化への懸念を示されるのが落ちでした。しかしダイヘンが装置開発を受け持ってくれるなら、話は180度変わってきます」。上山さんが動画を見てからわずか2カ月後に共同研究を開始。22年7月開催の国内最大の溶接・接合、切断技術を専門とする技術展示会「国際ウエルディングショー」に試作機を出展することが、当面の目標となった。

攪拌するほど再結晶温度が低下 相変態しない700度で鋼を接合

藤井さんの接合技術の最大の特徴は、接合が難しいとされている材料にも対応できる点だ。従来の技術では、炭素量の多い鋼を溶融させて接合すると割れが発生する。裏を返せば、炭素量の多い高炭素鋼がうまく接合できれば、材料の選択肢が広がる。また製鋼の過程では、鉄鉱石をコークス(石炭)により還元した鉄とと呼ばれる生成物を精錬し、含有している炭素を二酸化炭素(CO_2)として排出させるため、高炭素鋼の製造時にその工程を省ければ、 CO_2 排出量の大幅な削減にもつながる(図1)。

ポイントは、金属を溶融させずに、低温で接合する点だ。発想の原点は、アルミニウムの接合技術として使われている「摩擦攪拌接合(FSW)」だ

(図2)。左右に並べたアルミニウム板に、先端に突起を持つ円筒状の鋼製工具を押し付け、回転させながら接合部全体をなぞると、2枚の板は接合されて1枚の板になる。「工具の摩擦と突起の攪拌によって、アルミの融点の7～8割程度まで温度が上がります。この熱と工具の攪拌で結晶構造がゆがんだ後、再結晶することで、接合できるのです」と藤井さんは説明する。

このFSWを鋼にも適用するには、工具の材料が大きな課題となる。アルミ同士ならそれより硬い鋼製で良いが、鋼同士の場合は、さらに硬い材料を選ぶ必要がある。試行錯誤の末に藤井さんが採用したのは、切削工具にも利用される超硬合金だった。摩擦攪拌接合に至る鋼の温度は、計算では1000～1200度だ。しかしその温度では、超硬合金のように比較的安価な材料では硬度不足になる。

そこで、より低い温度での摩擦攪拌接合の可能性を探っていた。その結果、攪拌すればするほど再結晶温度が下がり、鋼の場合、300度という低温でも再結晶することを見いだした。直感的には攪拌すれば当然温度が上がるように思うが、藤井さんは工具の回転速度を下げ、移動速度を速くすることで、

局所的な温度上昇を抑えながら、結晶構造をゆがませて再結晶化を促したのだ。

ついに、それまで常識とされていた1000～1200度より低い約700度での接合を実現した。「鋼は同じ固体の状態でも、結晶の構造が異なる3つの相を持っています。温度変化によって、これらの相が変わる『変態』が生じると、硬度は高いものの脆い状態になってしまいます。しかし、700度程度であれば、鋼もアルミのように相変態なしに接合できるのです」。低温へのこだわりは、ここから生まれた。

温度制御の条件は圧力 実験という師が教える

低温摩擦攪拌接合はまさに画期的な技術だったが、容易には普及しなかった。「現在主流となっているアーク溶接と比べると、コスト面で課題がありました。攪拌用の工具は消耗品なので、生産ラインで何百メートルも接合するとすると、かなりのコストになってしまいます」と藤井さんは語る。そこで、さらに効率的な接合技術の開発に取りかかった。次に藤井さんらが目を付けたのは、「線形摩擦接合(LFW)」と呼ばれる旧来の接合技術だ。

LFWは、左右に並べた2枚の金属板を外側から押さえ付けるように圧力を加え、片方を上下に水平移動させ摩擦を生じさせて接合するものだ

図1 革新的接合技術の実用化による低炭素社会の実現

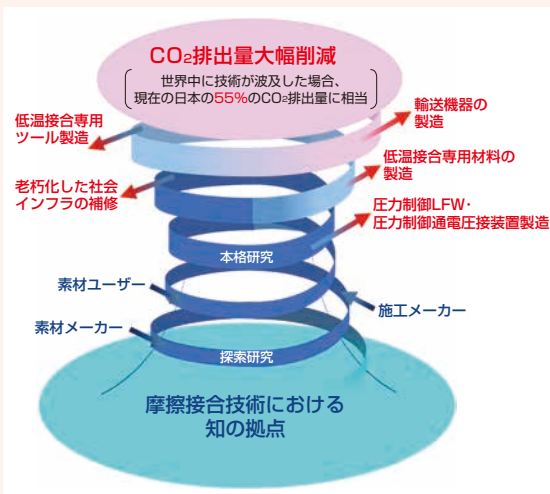
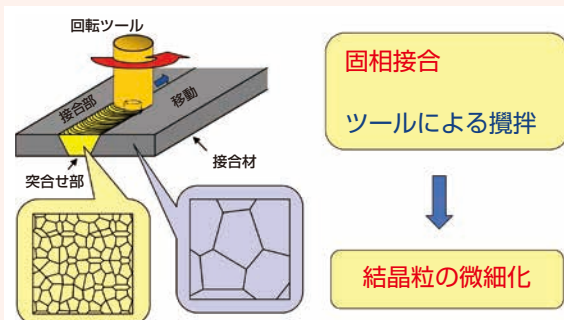


図2 摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding)



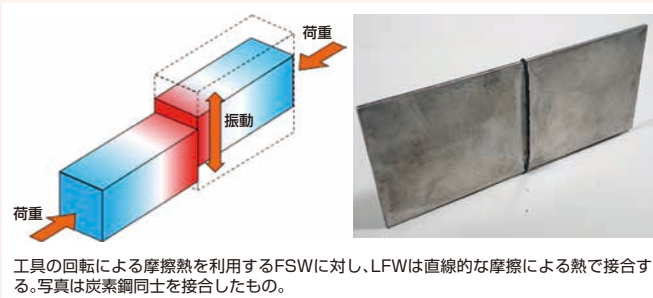
工具と接合部



接合部の裏面

FSWは、先端に突起のある円筒状の工具を回転させながら強い力で押し付けることで突起部を貫入させ、摩擦熱と工具の回転力によって部材を接合する。鉄道車両や航空機のアルミ合金などの接合に採用されている。工具を押し当てた面には後が残る(写真左)。一方、裏面は境目がわからないほど、きれいに接合できる(写真右)。

図3 線形摩擦接合 (Linear Friction Welding)



(図3)。原理はFSWと似ているが工具は不要で、技術そのものもFSWより古い。また、FSWはアルミ板の移動速度と工具の回転速度で温度が決まることもわかっていた。それならば、LFWで温度を制御する変数は、金属板を振動させる周波数と振幅、外側から加える圧力の3つとなる。

普通、圧力が上がると温度も上がるように思うが、実験したところ、圧力を上げたら温度が下がってしまったのだ。予想を裏切る結果に困惑する学生に、藤井さんはやり直しを指示したが、再び同じ結果が出た。この奇妙な結果について数時間は議論したという藤井さん。「私たちの分野では『実験』という師が正解を教えてください。どんなに偉い先生がもっともらしい理論を唱えても、それが誤っていれば、実験が教えてくれます。今回も、実験結果を尊重し『温度が下がっているという結果が真実』という結論に達しました」。

注目したのは、圧力を上げることによって接合面からはみ出す、いわゆるバリが存在だ。「圧力を上げると、それだけ早

くバリがはみ出します。それによって熱が放出され、温度が引き下げられるのです」と藤井さんは温度変化の原因を分析した。温度を制御する条件として圧力の存在を確認した藤井さんは、装置をコンパクト化して「圧力制御通電圧接法」という独自の接合技術を確認した(図4)。

面で接合する画期的手法 鉄道車両を見てひらめく

FSWやLFWでは摩擦で接合面の温度を上げているので、装置はどうしても大掛かりになる。そこで藤井さんが考案したのが、摩擦熱の代わりにジュール発熱、つまり、電気を利用する方法だ。2つの金属を突き合わせ、その外側から圧力を加えながら通電すると、接合面はジュール熱で温度が上がり、FSWやLFWと同じ状態を作ることができる。圧力を上げるほど温度が下がるのはLFWと共通で、鋼でも相変態なしに接合可能だ。

藤井さんらは、未来社会創造事業を活用した新しい接合技術の確立に乗り出した。圧力制御通電圧接法を軸に難接合材の接合を実現し、脱炭素社会に貢献できる接合技術の開発を提案したが、結果は不採択だった。

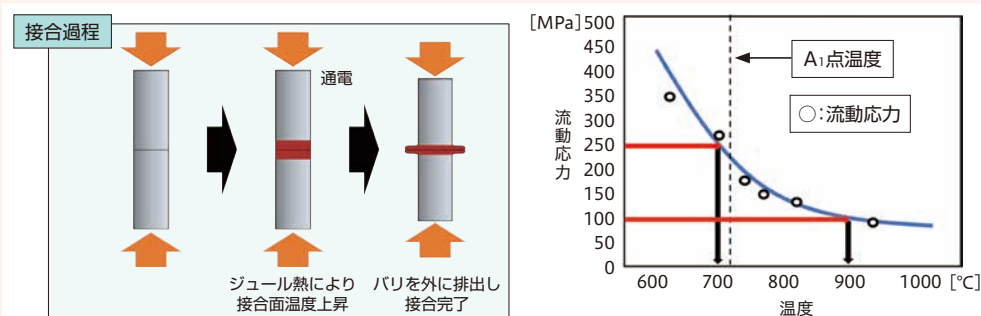
肝心の自動車産業で利用できないのではないか、と審査で指摘されたのだ。というのも、LFWも圧力制御通電圧接法も、線材や面材の端部を突き合わせる接合技術だが、自動車産業で必要とされているのは、面と面で接合する技術だったからだ。

従来、面材と面材を重ね合わせには、「抵抗スポット溶接」と呼ばれる接合法が利用されてきた。2枚の金属を重ねて銅製の電極で加圧しながら大電流を流す。すると、金属に抵抗発熱が生じて溶融部が形成され、面材が点で溶接できる。この接合技術は、鉄道車両の製造にも利用されているが、藤井さんが改善のヒントを得たのもまさに、鉄道車両だった。「ずっと考え続けていたせいか、ふと目の前に来た車両を見て、突如アイデアがひらめきました」。

それは、抵抗スポット溶接を土台に圧力制御通電圧接法として結実した接合技術の要素を組み込んだものだった。アイデアが実り、無事審査を通過した。「3回目での採択に喜んだのもつかの間、毎年厳しい審査が続きました。運営会議の先生方から多くの有益なコメントをいただきながら、必死にアイデアを絞り、研究しました」と藤井さんは振り返る。

その結果、通電用の電極とは別に加圧用の金属軸を設けることで、これまで追い求めてきた低温接合を実現した。従来の抵抗スポット溶接を土台にしながらも、接合面を溶融させずに固相のまま接合する技術で

図4 大荷重通電圧接法と接合温度低下の原理



被接合材の端部を突き合わせ、加圧しながら通電することで得られるジュール熱による発熱を熱源とする。高圧力を付与することにより、接合温度を炭素鋼の焼き入れできる臨界温度である723度(A1点温度)以下にすることができると言われています。写真は実際に、圧力制御通電圧接法で接合した鋼棒材。中央の出っ張った部分がバリだ。(図中のMPaはメガ(メガは100万)パスカル)



図5 固相抵抗スポット接合法

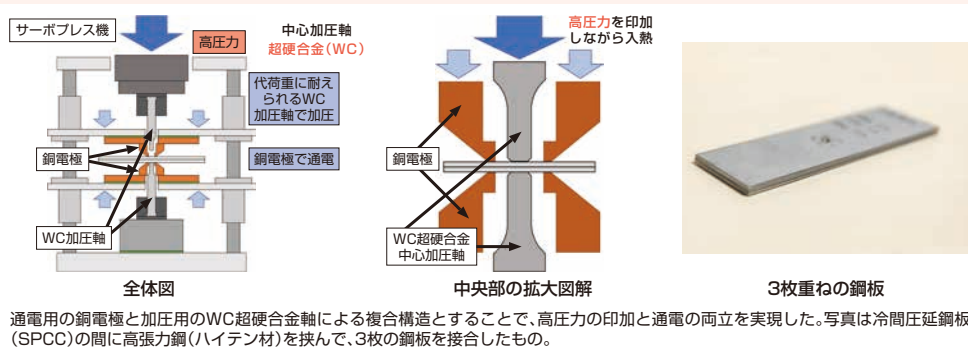
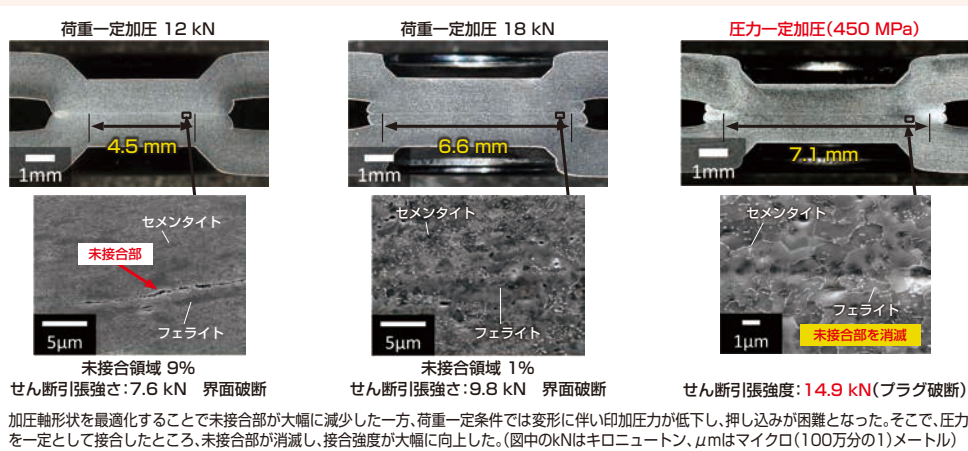


図6 固相抵抗スポット接合法の高圧力・一定加圧の検証



あることから、「固相抵抗スポット接合」と名づけた(図5, 6)。これが、ダイヘンの心をつかんだ画期的な接合技術の正体である。

大学は新しい成果を生み続ける 企業は実用化を支え社会に貢献

大阪大学接合科学研究所博士後期課程の相原巧さんが作り上げたプロトタイプを基にダイヘンが開発した試作機は、国際ウエルディングショーでも大きな反響を呼んだ(図7)。「従来の抵抗スポット溶接に比べ、環境、電力、コストの面で圧倒的なメリットがあります。国内外の自動車メーカーからも、声が掛かりましたよ」と上山さんは語る。環境面では、接合の過程で出る溶融された鉄の酸化物である「スパッタ」が、発生しない。スパッタは品質向上の観点から後処理での除去が必要となるだけでなく、産業廃棄物として処理が必要であるため、ス

パッタの発生を抑えることは生産効率化とコストダウンにつながる。

電力については、抵抗スポット溶接では瞬間的に約8000アンペアの電流が必要だが、固相抵抗スポット接合はその半分程度だ。「確実に電気代も抑えられますから、機器の置き換えも十分に見込めます。接合品質も保証できれば、世界中の自動車産業に広がっていくと確信しています」と上山さんは展望を語る。

とはいえ、これほどの短期間で試作機が国際展示会に出品できるケースはまれだろう。「社内でも『こんな面白い技術があるのか』と、初めから皆がやる気を見せてくれました。溶接・接合に関わる事業部の協力を得られたのも、大きいですね。全員野球で取り組み、試作機の基本設計は1カ月で完了させ、さらにデザインにもかなりこだわりました」と上山さんは笑顔を見せる。まさに、企業と大学の産学連携への姿勢がしっかりとかみ合った結果だ。

一方で、大学のリソースを踏まえれば、研究者だけでは社会実装を実現するのは難しい、とも指摘する。「企業は大学の研究成果をリスペクトし、優れた技術の社会実装をサポートしようという姿勢がないと、うまくいかないでしょう。良い技術を実用化し、社会に貢献することが私たちの使命でもあります」と自社の姿勢を説く。

対して大学人の藤井さんは、常に新しい研究成果を生み出し続けることこそ、自らの使命だと訴える。その目線は、研究者というより教育者のそれを思わせる。「学生に楽しく学んでもらい、卒業後も楽しく人生を送ってもらいたいと思っています。そのために常に新しいものを生み出そうとする『心』を、学生に植え付けるのが、大学で教育すべきことです」。

わくわく感を味わわせ、モチベーションを高めてもらうには、教育者として何をすればいいのか。その点を常に心掛けてきたからこそ、固相抵抗スポット接合という新技術の開発に至るさまざまな発見や成果を得ることができた。藤井さんの目は、接合技術が変革する社会と、その先を担う次代の研究者たちを見据えている。

(TEXT: 茂木俊輔、PHOTO: 石原秀樹)

図7 国際ウエルディングショーで展示された固相抵抗スポット接合



近年、産業用機械でも機能性とデザイン性が求められる。この試作機も、ダイヘンの企業カラーの青が映える美しいデザインだ。展示会場で行われたプレゼンテーションの様子は、ウェブ上で公開している(<https://daihen.oatnd.com/weldingshow2022-jp>)。(画像提供: ダイヘン)