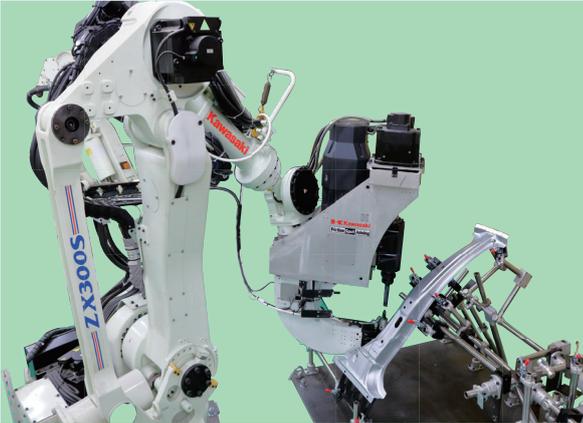


高張力鋼への革新的なスポット接合技術の適用 —鋼FSJロボットシステム—

Application of Friction Spot Joining Technology to High Strength Steel: FSJ Robot System for Steel



福田 拓也①	Takuya Fukuda
福原 一美②	Kazumi Fukuhara
大橋 良司③※	Ryoji Ohashi
小林 良崇④	Yoshitaka Kobayashi
三宅 将弘⑤※	Masahiro Miyake

産業用ロボットの主な適用分野の一つに、自動車ボディの組立工程におけるスポット接合がある。当社では抵抗スポット溶接ロボットに加え、当社独自のフリクションスポット接合法を用いた「FSJロボットシステム」を販売しており、既にアルミニウム材料の接合に用いられている。

現在、自動車ボディ材料として使用量が増加している超高張力鋼板へのFSJの適用を目指し、「鋼FSJシステム」を開発している。

One of the main application areas of industrial robots is spot joining in the assembly process for car bodies. We are selling resistance spot welding robots. In addition, friction spot joining (FSJ) robots that include our unique technology are already being offered on the market. The FSJ is used for joining of aluminum alloys in the field of manufacturing.

We are currently developing a “FSJ system for steel,” with the aim of applying it to ultra-high-strength steel, whose utilization in car bodies has been increasing.

まえがき

地球温暖化が社会問題としてクローズアップされるようになって久しい。先進国において既に数多く利用され、また発展途上国において年々増加している自動車においては、地球規模でCO₂などの温室効果ガスの規制がますます厳しくなっている。

1 背景

近年の自動車の厳しいCO₂排出規制を満たすためには自動車の走行燃費を改善する必要があり、自動車メーカーは駆動効率の改善や空気抵抗の軽減に加え、ボディの軽量化に注力している。欧米の高級車などではアルミニウム材料やCFRP（炭素繊維強化プラスチック）といった軽量材料への置換が進められているが、一方で、コスト面で有利な鉄鋼材料の徹底した使い切りも、国内メーカーを含めて進められている。鋼材はその強度範囲が広く、外板に使われる引張強度が270MPa程度の軟質なものから、ピラーなどの骨格部材に用いられる1,500MPa級まで多種多様な鋼板が使用されている。特に、780MPaを超えるような超高張力鋼板の適用が急激に増加している（図1）。

しかしながら、これらの高強度な超高張力鋼板は溶接が

難しく、現在の自動車ボディ溶接で主流の抵抗スポット溶接法のみで対応することが困難な状況となっている。この原因は、超高張力鋼板には焼入れ性を向上させ引張強度を高める元素が多く添加されているため、溶接における溶融と急冷で溶接部が著しく硬くなるからである。そのため、継手強度、特に剥離強度にバラツキが生じやすく、また、強度自体の確保も困難となっており、鉄鋼材料の使い切りにおける重要課題となっている。

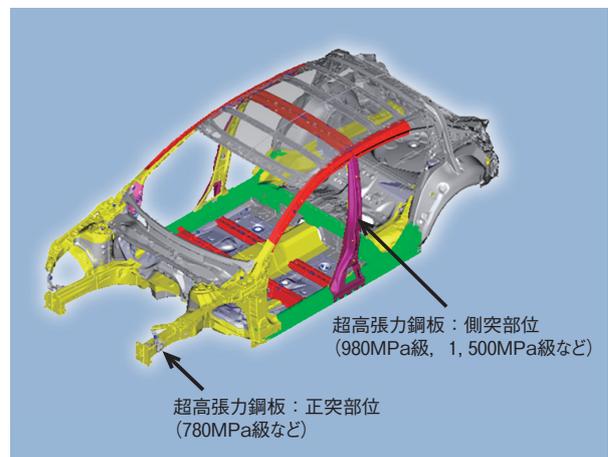


図1 車体軽量化を目指した自動車ボディの構成例：文献1)を一部改変
Fig. 1 High-strength steel applied to car bodies

このような中、当社では摩擦発熱と材料の塑性流動により接合する摩擦攪拌接合を点接合に応用したフリクションスポット接合 (FSJ : Friction Spot Joining) と「FSJロボットシステム」を開発しており、アルミニウム合金製の自動車部品を中心に適用が進んでいる²⁾。

2 「FSJロボットシステム」について

FSJの基本原理の模式図を図2に示す。接合ツールを回転させながらワークに押付けることで摩擦熱を発生させてワークを軟化させ、先端にあるピンをワーク中に没入して、その周辺に塑性流動を生じさせ一体化するという接合法である。

「FSJロボットシステム」は、自動車のアルミニウム合金製のボンネットやドアなどの生産に用いられており、既に300台以上のシステムが自動車メーカーの生産ラインに導入されている。

現在、超高張力鋼板へ適用すべく「鋼FSJロボットシステム」を開発している。

3 超高張力鋼板への適用

超高張力鋼板は、アルミニウム合金と比べて材料が硬く、軟化温度も高いためFSJを適用することは困難であると考えられてきた。特に、抵抗スポット溶接と比べて電極に該当する接合ツールの寿命や継手強度の確保という点でハードルが高かった。そのため、「実用的な高耐久接合ツール」と「超高張力鋼に適したFSJの接合プロセス」を主テーマとして開発に取り組んだ (図3)。

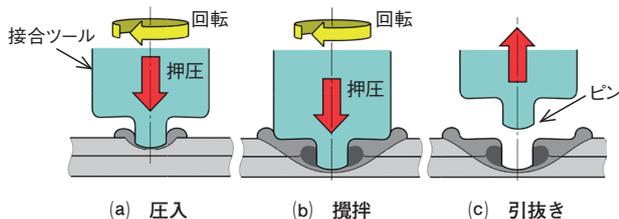


図2 FSJの基本原理
Fig.2 Fundamental process of FSJ

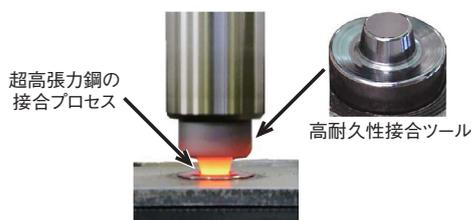


図3 開発テーマ
Fig.3 Development theme

(1) 実用的な高耐久接合ツールの開発

(i) 接合ツールの素材

寿命が長く安価なツールの開発にあたり、特に自動車分野で現在用いられている抵抗スポット溶接と同等のタクトタイムを満たしながら、同等の打点コストであることが基本的な要求条件となる。

接合ツールに求められる素材の主な特性を以下に示す。

- ① 数秒で室温から1,000℃以上まで達する急峻な熱サイクルに耐えられること
- ② 接合対象の材料と反応性が低いこと
- ③ 耐酸化性に優れること
- ④ 高温でも組織が安定しており、十分な強度と硬度および靱性を有していること

超高張力鋼板の接合においては、20kN以上の大きな加圧力がツールに加わることがある。そのため室温から高温までの温度域において、高い軸力に加えてねじり応力に耐える必要がある。また、接合対象の材料である超高張力鋼がアルミニウム合金と比べて高温でも硬いためツールは摩擦しやすく、耐摩耗性の確保も重要である。

ツール素材の候補としては、タングステンカーバイド (WC) を主成分とした超硬合金や窒化珪素 (Si_3N_4) などのセラミック、立方晶窒化ホウ素粒子を焼結したPCBN (Poly-crystalline Cubic Boron Nitride) などがある。開発にあたっては工業的に受け入れられるツールとして、超高張力鋼接合における寿命が概ね5千点以上、1打点あたりのコストが1円以下となることを第一目標とした。また、ロボットによる接合では、可搬重量や動作スピードなどの制約から、可能な限り小型で軽量の接合ガンが望まれる。そのため、小さな加圧力でも十分な摩擦熱を発生させられるよう、摩擦係数や熱伝導特性の選択もツール素材選定における重要なポイントとした。

(ii) ツール耐久性評価システム

ツールの開発においては、ツールの耐久性を評価する必要がある。ツールの耐久性評価試験では、連続打点試験はもちろん、試験中に変化するツール寸法やプロファイル、さらには外観を詳細に観察して記録する必要がある。また、ツールの寸法変化に伴う継手強度の変遷も定期的を取得する必要がある。これらの評価作業を人が行う場合、1日にせいぜい1,500打点程度が限界であった。そこで、ツールの評価およびその開発を効率的に推進すべく、図4に示すような3台のロボットを用いたツール耐久性評価システムを構築した。これまで、このシステムは接合治具への各種試験片の自動供給と接合後の取り出しのほか、接合状況のモニタリング、ツールと試験片の寸法計測と写真撮影、引張試験まで一連の作業とデータ採りを自動で行うものである。これにより、最大で1日に1万点の連続打点試験が可能となり、加速的なツール開発が可能となった。

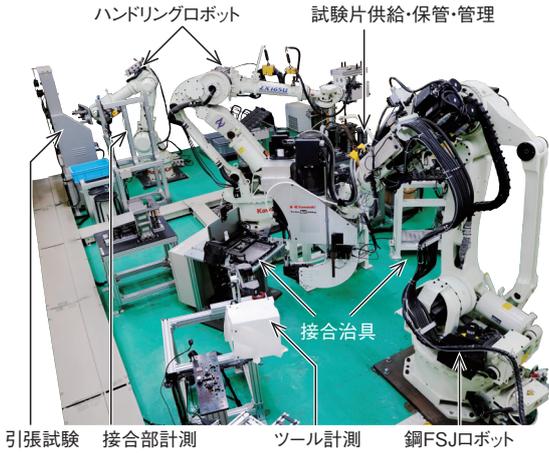


図4 ツール耐久性評価システム
Fig. 4 Evaluation system for tool durability

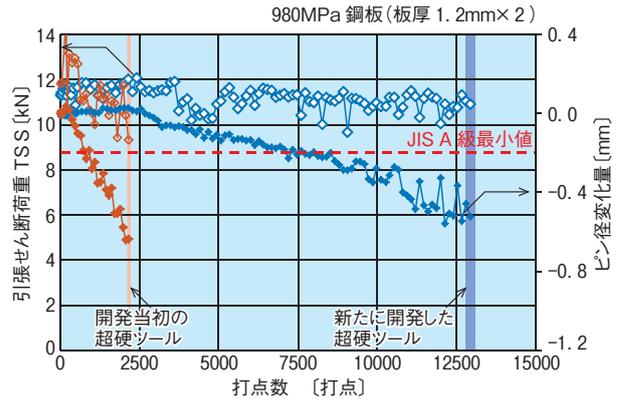


図5 連続打点試験結果
Fig. 5 Test results of continuous joining

(iii) 高耐久接合ツール

ツール耐久性評価システムを用い、膨大な試作ツールについての性能評価を行った。ツール素材には、表1に示すPCBN、セラミック、コーティングを施した超硬合金を用いた。PCBNは非常に硬く、耐摩耗性にも優れており、試験の結果、引張強度980MPa級の超高張力鋼板でも7,000打点という比較的長寿命が得られているが、非常に高コストな材料である。セラミックは低コストでの量産が可能となるが、低靱性による欠損対策などが課題となる。超硬合金は素材とコーティングの改良による寿命改善が必要であるが、耐久性とコストのバランスに優れる。

当社はこの超硬合金に着目し、住友電気工業株式会社と超硬合金製ツールの共同開発を進めた³⁾。この開発において、ツールの耐塑性変形、耐欠損性、耐摩耗性などの改善を目指して、素材とコーティングの改良さらには接合プロセスの最適化を行った。

連続打点試験における本ツールのピン径と引張せん断荷重の変化を図5に示す。打点数が増加するにつれて、ピン先端の角部が磨滅してピン径が減少した。これに伴って引張せん断荷重は徐々に低下するが、判定基準としたスポッ

ト溶接のJIS規格 (Z3140) におけるA級最小値をクリアしており、13,000打点以上の耐久性が確認された。

開発当初は、わずか2,000打点でツールのピンが摩耗して継手強度が低下し、ツールは寿命と判断された。しかし、素材改良したツールと、ツールへの負荷を軽減する接合プロセスを開発することで摩耗が少なくなり、13,000打点経過後もJISで規定された継手強度を満たし、寿命を当初の6倍以上に改善できた。抵抗スポット溶接の電極は約1万打点で交換されるとも言われていることから抵抗スポット溶接の電極に匹敵する寿命が得られており、着実に実用化に向けて近づいたといえる。

今後はさらに高強度な鋼板を用いた耐久性評価を進めるとともに、ツール品質の安定性や低コスト化についても検討を進める予定である。

(2) 超高張力鋼に適した接合プロセスの開発

鉄鋼材料ではその強度を高めるために炭素が用いられるが、特に超高張力鋼では炭素の含有量が高くなる。また焼入れ性を高めるため、マンガンなどの元素がいくらか添加されている。含有量は溶接性も考慮して設定されているものの、実際には溶接強度にバラツキが生じたり、継手強度自体を確保することが困難となっている。これらは超高張力鋼特有の溶接課題となっており、鉄鋼材料を徹底的に使い切るにはその解決が重要な鍵となる。

抵抗スポット溶接など、いわゆる溶融溶接法では鉄鋼材料を融点以上に加熱するため、冷却時に溶接部に焼きが入って脆化してしまう。そのため、焼入れされた溶接部を同一または別のプロセスにより再加熱することで、焼戻して靱性を回復させる方法がある。しかしながら、溶接後の焼入れ状態や加熱方法、加熱温度や時間によって特性が変化するため、慎重な入熱管理が必要となる。

一方、FSJは鉄鋼材料を溶かさず、固体状態のまま塑性流動によって接合する。そのため、接合中の最高温度を焼入れ温度よりも低く抑えることができ、そもそも継手を硬

表1 試作した接合ツールの例
Table 1 Example of prototype tool

	PCBN	セラミック	超硬合金
外観			
耐久性	○	△	○
製造コスト	×	○	○
打点コスト	×	○	○
総合	△	○	◎

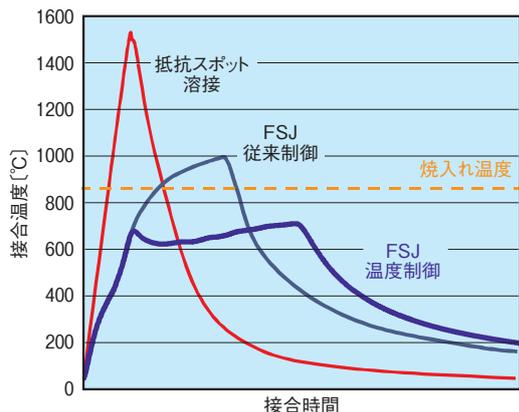


図6 接合温度履歴
Fig. 6 Thermal history of joint during FSJ

化させない接合ができる可能性がある。これは固相接合であるFSJの特徴的な利点であり、従来の溶接法と一線を画す革新的な工法と言える。

当社ではこのFSJの革新性に着目するとともに、接合中の温度をモニタリングしながら温度が一定となるよう接合条件を変化させる、独自の接合温度制御プロセスを開発した。

接合温度の履歴を図6に示す。比較として抵抗スポット溶接と従来制御のFSJの温度履歴を模式的に示す。抵抗スポット溶接では焼入れ温度を大きく超えており、冷却時に焼きが入るために脆化する。また、FSJでも従来制御では、焼入れ温度以上の高温に達する。これに対して、接合温度制御を用いたFSJでは、焼入れ温度を超えることなく接合することが可能である。

次に、引張強度が1,500MPa級の超高張力鋼板（板厚1.8mm）に対して、接合温度制御により接合温度を変化させた場合の継手の引張せん断荷重と剥離強度を図7に示す。接合温度の違いにより両者は特徴的な変化を示しており、高い接合温度では剥離強度は低いものの、高い引張せん断荷重が得られる。一方、概ね焼入れ温度を境界にして、それより低い接合温度では引張せん断荷重は低下するものの、剥離強度が大幅に増加している。このときの剥離強度は抵抗スポット溶接の2倍以上であることを確認している。

引張せん断荷重と剥離強度とは、トレードオフの関係にある。これを利用して、せん断強度が必要な部位は高温で接合し、剥離強度が重視される部位では低温で接合するように温度制御することで、部位ごとの所望の特性を得ることができる。

また、この接合温度制御を用いると、著しい脆化のため溶接が困難とされる高炭素鋼の接合が可能となることや、異種材料の接合で接合界面における金属間化合物の厚さを制御することも可能になると考えられる。このように接合温度制御を用いたFSJは全く新しい第2世代のFSJであり、

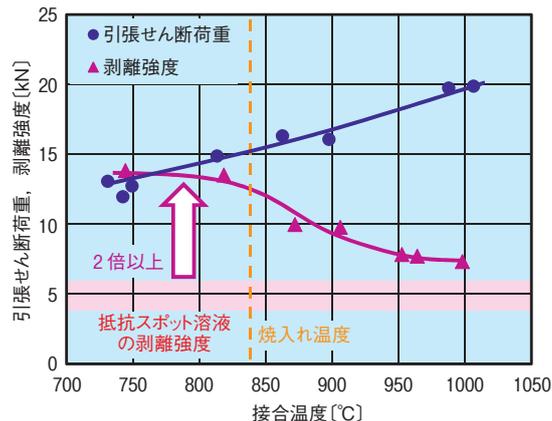


図7 1.5GPa級超高張力鋼板（板厚1.8mm）の接合温度と接合強度
Fig. 7 Joining temperature and joint strength

従来の溶接法よりも接合材料の対象範囲が格段に広がる、革新的な接合方法と言える。

あとがき

鉄鋼材料へのFSJ適用において最大の課題であったツール寿命に実用化の兆しが見え始めた。また、超高張力鋼の接合に適した独自の接合温度制御プロセスの開発に成功した。今後は、「鋼FSJロボットシステム」を自動車ボディの生産に適用すべく、実用化に向けて開発を加速させる。

本開発の一部は、新構造材料技術研究組合（ISMA：Innovative Structural Material Association）の援助の下で実施したものである。

参考文献

- 1) 新構造材料技術研究組合: ISMA REPORT, No.1 (2015)
- 2) 福原, 藤本, 黒川, 平塚: “先進接合ロボットシステム”, 川崎重工技報, No.172, pp.48-51 (2012)
- 3) 宮崎, 内海, 津田: “980MPa級鋼板用摩擦攪拌接合ツール” SEIテクニカルレビュー, No.81, pp.70-74 (2015)



福田 拓也



福原 一美



大橋 良司



小林 良崇



三宅 将弘