

## 研究論文

## 摩擦攪拌スポット接合継手の非破壊検査に関する研究

花井敦浩<sup>\*1</sup>、古澤秀雄<sup>\*2</sup>

## Study on Non-destructive Inspection of Friction Stir Spot Welding

Atsuhiko HANAI<sup>\*1</sup> and Hideo FURUZAWA<sup>\*2</sup>Industrial Research Center<sup>\*1\*2</sup>

自動車、鉄道車両、航空機などの輸送機器は燃費向上のため軽量化が求められており、構造用部材には鋼の代替としてアルミニウム合金などの軽金属部材の適用が進められている。近年、これら軽金属部材の新しい接合技術として摩擦攪拌接合技術が注目されているが、接合継手の品質評価に関する規格や品質検査方法などの整備が遅れているという課題を抱え、本技術の普及には至っていない。本研究では、非破壊検査である超音波フェイズドアレイ探傷試験とX線CT観察の結果を、破壊試験である引張せん断試験、硬度試験、疲労試験、断面組織試験の結果と比較し、非破壊検査の結果と破壊試験による継手強度の間に相関性を見出した。このことから、非破壊検査を行うことで接合継手強度の推測が可能であることがわかった。

## 1. はじめに

近年、英国溶接研究所 (TWI) で固相接合法である摩擦攪拌接合法 (FSW、Friction Stir Welding) が開発された。FSW はツールと呼ばれる専用の回転工具を接合する材料に押し付け、ツールを回転させながら移動させる際に発生する摩擦熱で材料が軟化、塑性流動することにより接合する方法である。FSW は、非溶融による接合であるため、難溶接のアルミニウム合金に対しても極めて有効な接合法として注目を集め、基礎研究と共に実用化が急速に進んでいる。一方でこの接合法は、原理が最近まで特許化されており、中小企業が技術導入するのは困難であった。そこで、この特許を回避したスポット接合専用の摩擦攪拌スポット接合 (FSSW) が開発され、従来の抵抗スポット溶接に比べて電力消費量が極めて少なく、溶融溶接でないため電極の消耗や外観不良につながるチリの発生もなく、高品質な継手が形成可能な接合法として注目されている。装置価格も比較的低いため、中小企業にも導入しやすい。しかし、本技術の普及には、いくつか課題がある。その一つに接合継手の品質評価に関する規格や品質検査方法がないことがあげられる。摩擦攪拌スポット接合技術を広く普及させるためには、接合継手の品質評価方法の確立が必要である。

本研究では、アルミニウム合金の摩擦攪拌スポット接合継手の接合状態を、超音波フェイズドアレイ探傷とX線CTによって非破壊で可視化することで、定量的な

評価を可能とする接合継手評価法について検討した。

## 2. 実験方法

## 2.1 摩擦攪拌スポット接合 (FSSW)

接合原理を図1に示す。ツールを回転させ、ツール先端の突起部 (プローブ) を被接合材表面に垂直になるように押し当てた時に発生する摩擦熱により、材料が軟化してプローブが材料の中に圧入される (図1 (a))。ツールの肩部であるショルダーが、盛り上がりつつくる材料を抑えながらツールを圧入することで、プローブ周囲では塑性流動域が形成される (図1 (b))。充分攪拌を行った後ツールを引き抜き接合が完了する (図1 (c))。

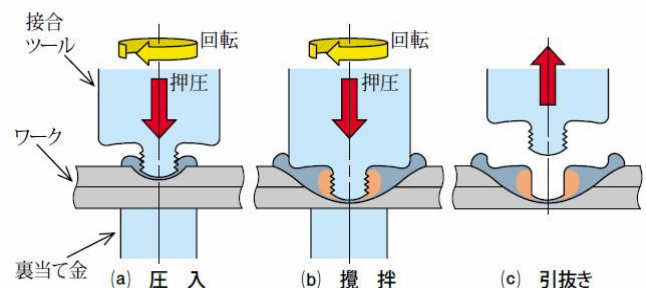


図1 摩擦攪拌スポット接合の原理

## 2.2 供試材および接合条件

供試材として A5052-O 板材 (長さ 100mm、幅 30mm、板厚 3mm) を用いた。摩擦攪拌スポット接合

条件として、ツール回転速度、ツール挿入深さ、及びツール挿入位置での保持時間の3つの条件を検討した。

挿入保持時間の影響を調べるため、ツール回転速度 1800rpm、挿入深さ 3mm とし、ツール挿入後の保持時間を 1、3、6 秒と変化させた。次に、回転速度の影響を調べるため、挿入深さ 3mm、保持時間 6 秒とし、ツール回転速度を 950、1320 及び 1800rpm と変化させた。また、挿入深さの影響を調べるため、ツール回転速度 1800rpm、保持時間 6 秒とし、挿入深さを 2.0、2.5、2.8、3.0、3.2、3.5、4.0 及び 4.5mm と変化させた。

図2に作製した接合試験片を示す。この接合試験片を用い、破壊強度試験と非破壊試験を行った。



図2 摩擦攪拌スポット接合試験片

## 2.2 摩擦攪拌スポット接合ツール

接合に用いた、摩擦攪拌スポット接合ツールを図3に示す。ツールは工具鋼 (SKD61) を機械加工した後、熱処理を行い、硬さ HRC46~48 に調整したものをを用いた。ツールの形状は、ショルダー直径 10mm、プローブ直径 5mm とした。またプローブの長さは 3mm とし、プローブには逆ネジを施した。なお、接合には汎用フライス盤を用いた。



図3 摩擦攪拌スポット接合ツール

## 2.3 接合部の評価

摩擦攪拌スポット接合の接合強度に及ぼす接合条件の影響を評価するために、破壊試験と非破壊試験を実施し、比較検討を行った。

### 2.3.1 破壊試験

破壊試験である、引張せん断、疲労、及び硬さの各試験により接合部の強度を評価した。引張せん断試験と疲労試験の試験片は短冊状の2枚の試料を30mm×30mm 重ね合わせ、その中央に摩擦攪拌スポッ

ト接合を施した試験片を用いた。引張せん断試験は万能試験機を用い、引張速度 5mm/min で行った。疲労試験は油圧サーボ式疲労試験機を用いた。疲労試験後の破断面は走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察した。硬さ測定はマイクロビッカース硬さ試験機を用いて測定した。組織は接合部中央を切断し、鏡面研磨後、エッチング液により腐食して、光学顕微鏡により観察した。

### 2.3.2 非破壊試験

接合部の非破壊試験は、超音波探傷器及び X 線 CT 装置を用いて行った。超音波探傷には、超音波フェイズドアレイ探傷装置を用い、測定周波数 17MHz、振動子 64 のプローブを用いた。なお、超音波フェイズドアレイ探傷装置は、従来の超音波探傷装置とは異なり、超音波を送受信する探触子を複数同時に制御し、広範囲の測定を迅速、正確に検出することができる装置である。

図4に接合部の上面透過図 (C スコープ) を示す。C スコープから摩擦攪拌スポット接合部の大きさとして、ドーナツ状の接合部 (攪拌部) の直径を計測した。X 線 CT による観察は、電圧 130kV、電流 40μA の条件で撮影を行い、その断面観察像から重ね合わせ部の接合部径を計測した。観察事例を図5に示す。また、これらの装置を使用して接合継手のナゲット形状、及び内部欠陥等の可視化を行った。

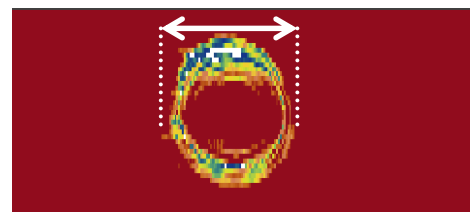


図4 超音波フェイズドアレイ探傷 C スコープ

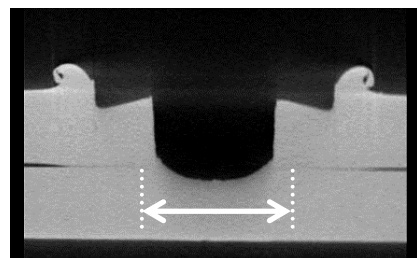


図5 X 線 CT 装置による断面観察画像

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 引張せん断試験

ツール回転速度 1800rpm、挿入深さ 3mm とし、ツール挿入後の保持時間を 1、3 及び 6 秒と変化させた時の引張せん断試験結果を図6に示す。保持時間の延長に伴い引張せん断荷重が上昇する傾向が見られた。次に、挿入深さ 3mm、保持時間 6 秒とし、ツール回転速度を

950、1320 及び 1800rpm と変化させた時の引張せん断試験結果を図 7 に示す。高速回転になるに従い引張せん断荷重が上昇する傾向が見られた。

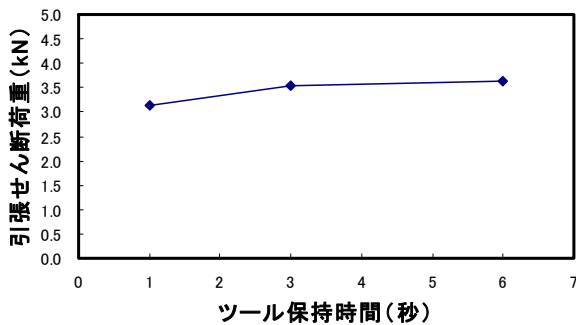


図 6 保持時間と引張せん断強さの関係

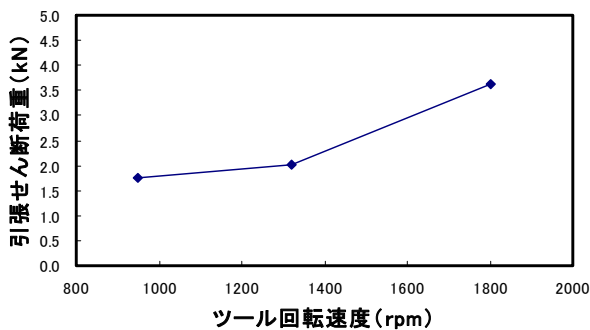


図 7 ツール回転速度と引張せん断強さの関係

これらの結果から、保持時間が長いほど、また回転速度が上がるほど、接合部がより攪拌され接合強度が高くなると考えられる。

次に、ツール回転速度 1800rpm、保持時間 6 秒とし、挿入深さを 2.0、2.5、2.8、3.0、3.2、3.5、4.0 及び 4.5mm と変化させた場合における接合継手の引張せん断試験結果を図 8 に示す。なお、挿入深さ 2.0mm では接合ができなかった。また、挿入深さ 2.5mm から 4.0mm までは挿入深さが深くなるに従い引張せん断荷重が大きくなったが、挿入深さ 4.5mm の場合は引張せん断荷重の低下が見られた。

そこで、挿入深さ 3.0mm と 4.5mm の引張せん断試験後の試験片を X 線 CT 装置を用いて観察した。その断面像を図 9 に示す。断面像から、接合部の破断箇所の違いがあることがわかる。4.5mm の挿入深さでは、重ね合わせた上板の厚みが減少し、上板部で破断することによって接合強度が減少したものと考えられる。このような過度な挿入深さによる接合強度の減少は、図 9 の矢印部で示す上板の厚みを測定すれば強度の推定が可能であるということを示唆していると考えられる。

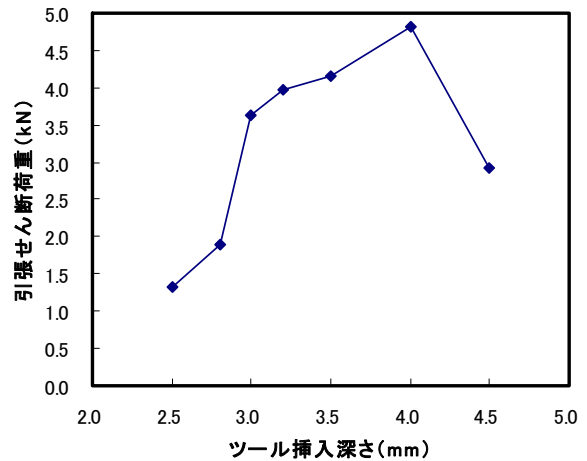


図 8 挿入深さと引張せん断強さの関係

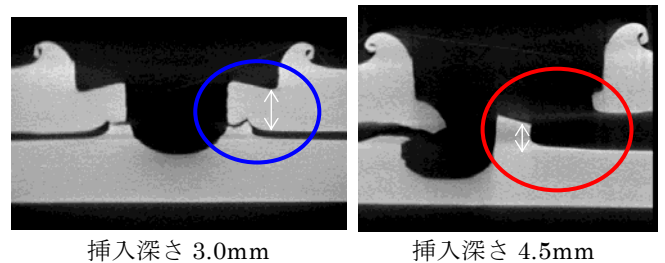


図 9 破断断面

### 3.2 疲労試験

図 10 にツール回転速度 1800rpm、ツール挿入深さ 3mm、保持時間 6 秒で接合した継手の S-N 曲線を示す。継手の疲労限度は 500N であったが、負荷荷重の違いにより継手の破壊形態の違いがみられた。高荷重では引張せん断と同じ板界面での破断形態を示したのに対して、低荷重の場合は母材板部で破断した。その破断形態の違いを図 11 に示す。

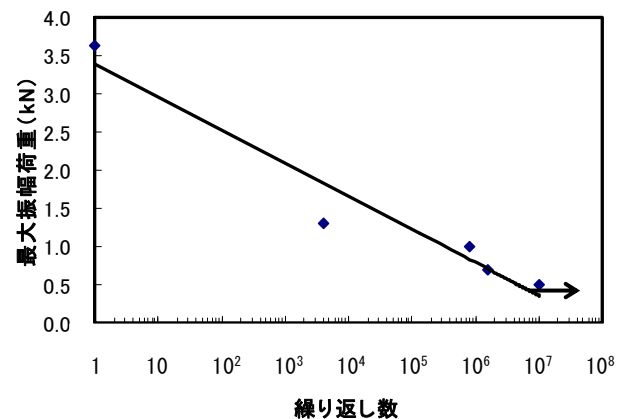


図 10 接合継手の S-N 疲労線図

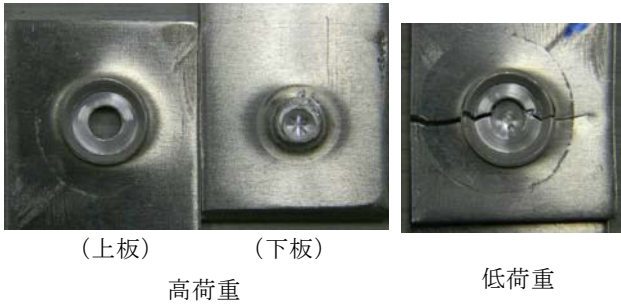


図 1.1 疲労破断試験片

### 3.3 接合部組織と硬さ分布

ツールの回転速度 1800rpm、挿入深さ 3mm、保持時間 6 秒の条件で接合した継手断面を図 1.2 に示す。プローブ痕跡の周囲領域は、攪拌部となっており結晶粒が微細化され、流動の軌跡も明瞭に認められる。また、図 1.3 に示す接合部の硬さ分布結果からも、攪拌部の硬度増加が明らかで、摩擦攪拌による結晶粒の微細化が強度上昇に繋がっていると考えられる。硬さの分布は図 1.2 の矢印部分を計測した。

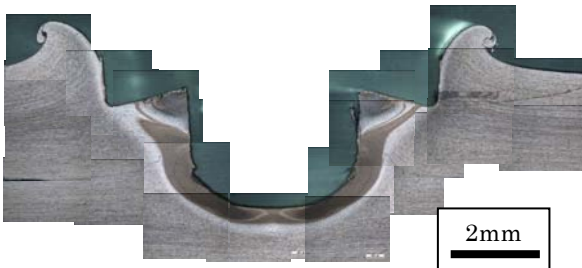


図 1.2 接合継手の断面組織写真

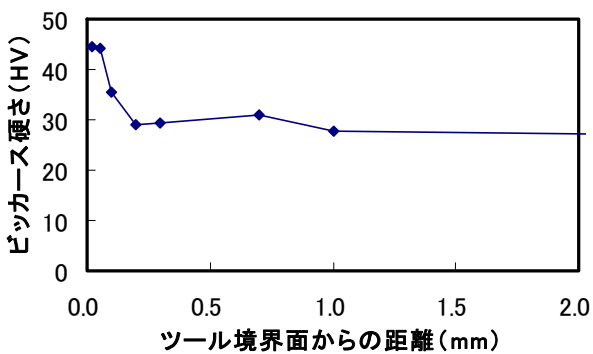


図 1.3 接合継手の断面硬さ分布

### 3.4 非破壊試験

摩擦攪拌スポット接合継手の強度を推定するために、超音波探傷結果及び X 線 CT 観察結果と破壊試験による継手強度との相関性について調べた。超音波探傷によ

る C スコープ及び X 線 CT による断面画像から求めた接合部径と引張せん断荷重の関係を図 1.4 に示す。その結果、非破壊試験により測定した接合部径は、いずれも引張せん断荷重と高い相関性が確認された。また、非破壊試験から得られた接合部径は、組織試験で観察した接合部の実測値とほぼ対応しており、非破壊試験による接合部径の測定は継手強度の推定に有効な手法であることが分かった。

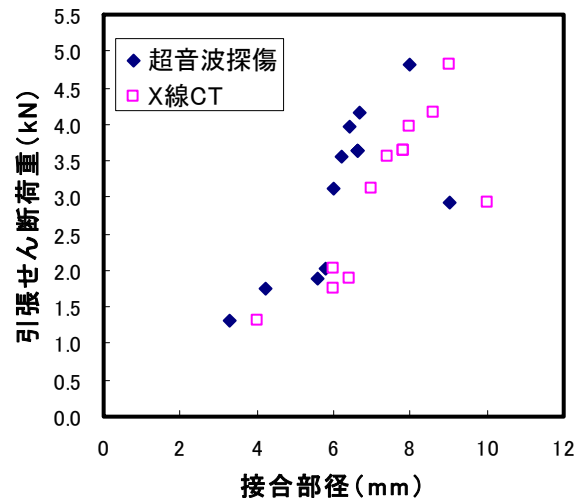


図 1.4 非破壊試験により測定した接合部径と引張せん断荷重の関係

## 4. 結言

摩擦攪拌スポット接合継手の接合強度を定量的に評価できる接合継手評価法について検討した。非破壊検査として超音波フェイズドアレイ探傷試験と X 線 CT 観察を、破壊試験として引張せん断試験、硬度試験、疲労試験、断面組織試験を実施した。その結果、非破壊試験による接合部径の大きさは接合強度と高い相関性があることがわかった。また、X 線 CT 観察により重ね合わせた上板の厚みを計測することで破壊形態を推測できることがわかった。これらの結果より、非破壊検査は摩擦攪拌スポット接合継手の接合強度を推測するための有用な手法であることが明らかとなった。

## 5. 付記

本研究は公益財団法人 JKA 補助事業において導入した超音波フェイズドアレイ探傷装置を使用した。