

鋼板用摩擦攪拌点接合技術の開発 (第1報)

ツール形状変更の効果

坂村 勝, 大石 郁, 竹保義博, 津村卓也^{*1}, 中田一博^{*1}

Development of Friction Stir Spot Welding for Steel Sheets I

Effects of the change of a tool shape

SAKAMURA Masaru, OHISHI Kaoru, TAKEYASU Yoshihiro, TSUMURA Takuya^{*1} and NAKATA Kazuhiro^{*1}

A friction stir spot welding process, in which a newly devised rotating tool was employed, was applied to a lap joint of low carbon steel (SPCC) with 1 mm thick. The newly devised rotating tool has a spherical probe at the edge. Consequently, the maximum tensile failure load of the lap joint increased with increasing of the plunged depth. By using the backing plate on which there was a hollow, the maximum tensile failure load became still higher. When a silicon nitride was used as the spherical probe at the condition of the plunged depth: 2.5mm, the tool rotation speed: 1500RPM and the depth and the curvature radius of the hollow on the backing plate: 1mm and R8, the maximum tensile failure load was 5.5kN at minimum, 7.4kN at average and 9.0kN at maximum. Some kinds of ceramics were applied to this process. It was concluded that a silicon nitride was most suitable as the spherical probe. But, even if a silicon nitride was used with the tool rotation speed of 1500RPM and the plunged depth of 1.6mm, the shoulder part of the spherical probe was worn after several hundred points were welded. The life of this tool was less than 1000 points. When the tool rotation speed was changed from 1500RPM to 760RPM, the spherical probe was hardly worn after 2505 points were welded. We could restrain the decline of the maximum tensile failure load.

先端にセラミックス製の球面プローブを有する接合ツールを用いて、低炭素鋼板 SPCC (厚さ 1mm) に対して摩擦攪拌点接合を行った。継手形状は重ねとした。その結果、接合強度はツール圧入深さが大きくなるほど大きくなった。また、裏当金として窪み付き裏当金を使用することで、接合強度はさらに大きくなり、球面プローブ材質が窒化珪素、ツール圧入深さ 2.5mm、回転数 1500RPM、裏当金窪みの深さ 1mm、曲率半径 8mm という条件で、接合強度最小値 5.5kN、平均値 7.4kN、最大値 9.0kN を達成した。ツール先端に用いる球面プローブの材質としては、窒化珪素が最も有効であることが判った。しかし、回転数 1500RPM、圧入深さ 1.6mm という条件では、数百打点で球面肩部に摩耗が発生し、1000 打点以下でツールとして使用できなくなった。そこで、回転数を 760RPM に低減したところ、2505 打点後も球面プローブの形状に変化はなく、接合強度の低下を抑制することができた。

キーワード：摩擦攪拌点接合，鋼板，ツール寿命，窒化珪素

1. 緒 言

摩擦攪拌接合は、1991 年に英国の溶接研究所 (The Welding Institute-TWI) により開発された接合技術で、接合ツールによる摩擦熱で軟化させた母材同士を塑性流動により一体化させる固相接合法である¹⁾。これまで、主に線状接合に適用されてきたが、近年、自動車産業を中心に重ね点接合への適用が進められている²⁾。アルミニウム合金については、現段階で実用レベルに達しており、現象の解析を含め多くの研究報告が行われている³⁻⁷⁾。しかし、自動車産業を中心に構造用材料として最も多く用いられている鋼に対しては、その適用が非常に困難な状態にある。この原因として接合に用いられるツール寿

命が挙げられ、現在、摩擦攪拌点接合技術を鋼に適用すべく、多くの研究機関でツール寿命向上のための研究開発が盛んに行われている。

図 1 に従来の摩擦攪拌点接合方法を示す。接合ツールは、接合ツール本体端部 (以下、ショルダーという) と本体端部から突出した部分 (以下、プローブという) から構成される。この接合ツールを、重ねて配置された被

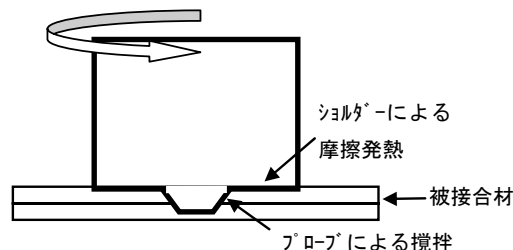


図 1 従来ツールでの接合方法

接合材に回転させながら押し当て、ショルダーと被接合材の間で発生する摩擦発熱によって材料を軟化させ、これをプローブで攪拌させて接合するのである。この際、ショルダーで積極的に摩擦発熱を発生させるため、鋼を接合する場合にはショルダーの温度が1000~1200℃という高温になり、摩耗が起こるといった問題が発生する。また、プローブの欠損という問題も発生する。

接合ツールの寿命向上対策として、青田らはプローブ無しツールの適用を行っている⁸⁾。立野らはレーザ加熱を補助的に用いることで、ツールへの負荷を軽減している⁹⁾。大橋らは窒化珪素にコーティングを施して接合を行っている¹⁰⁾。いずれの研究も現在進行中である。

一方、筆者らは、これまで、接合ツールの形状を見直すことで、できるだけ安価な接合ツールを開発することに取り組んできた。考案した接合ツールを図2に示し、接合方法について以下に説明する。考案した接合ツールは、接合ツールの耐久性向上及び低コスト化のために、接合ツール本体は鋼製とし、先端部をセラミックスとした。また、セラミックスの欠損対策として、形状を応力集中の少ない球面(以下、球面プローブとする)とした。

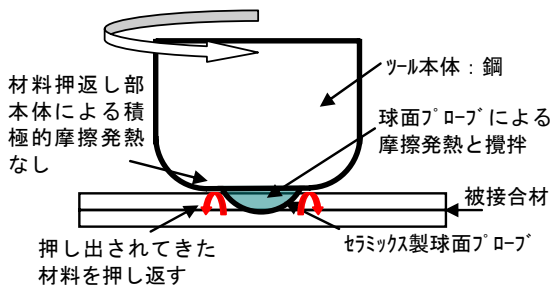


図2 考案した接合ツールと接合方法

この考案ツールを用いた接合法では、球面プローブの回転によって、被接合材に摩擦と攪拌の両方を起こさせて接合を行う。この際、接合ツール本体端部(以下、材料押し戻し部という)は、従来法のショルダーとは異なり、積極的に摩擦発熱を発生させるためのものではなく、球面プローブを押し込むことで押し出されてきた材料を押し返すためのものである。押し出されてきた材料は1000~1200℃と高温ではあるものの、非常に軟化しているため、材料押し戻し部には従来法のショルダーほどの耐摩耗性は必要とされず、摩耗を大幅に低減できる。また、プローブを球面にすることにより、従来法で問題となるプローブの欠損も大幅に低減できる。

本報告では、今回考案した方法を鋼板の重ね点接合に適用した際の、被接合材の接合強度及び接合ツール寿命について報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材

強度評価用の供試材として薄板の冷間圧延鋼板として広く用いられているSPCC材を用いた。表1上段に用いたSPCC材の成分分析結果を示す。炭素量0.01%程度の低炭素鋼である。供試材の寸法は、110mm×80mm×1mmとし、供試材の表面は、接合前に180番の耐水研磨紙で研磨した後、アセトンで脱脂した。また、接合ツールの寿命評価を行うための供試材として、300mm×200mm×3.2mmのSPCCを用いた。成分分析結果を表1下段に示す。強度用供試材と同様に炭素量0.04%程度の低炭素鋼である。供試材の表面はツール寿命評価前にアセトンで脱脂した。

表1 供試材の元素分析結果 (%)

	C	Si	Mn	P	S
SPCC1mm	0.01	0.02	0.20	0.012	0.008
SPCC3mm	0.04	0.07	0.30	0.017	0.005

2.2 接合ツール

接合ツールは図2に示したものを用いた。接合ツール本体にはS45Cの焼きならし材を用い、先端のセラミックスとしては、アルミナ、ジルコニア、炭化珪素、窒化珪素2種類(A,Bとする)、超合金を用いた。なお、窒化珪素A,Bはメーカーが異なることを意味する。接合ツールの寸法は、本体直径が20mm、セラミックスは直径10mmの球面とした。また、球面プローブの、材料押し戻し部からの突出長さは、ツールの圧入深さとほぼ等しくなるようにした。

2.3 接合(強度評価用)

SS400製の裏当金の上に供試材を図3に示すように、2枚重ねて配置し、接合ツールを回転数1500RPMで回転させたまま0.17mm/sの速度で所定の深さまで圧入して、所

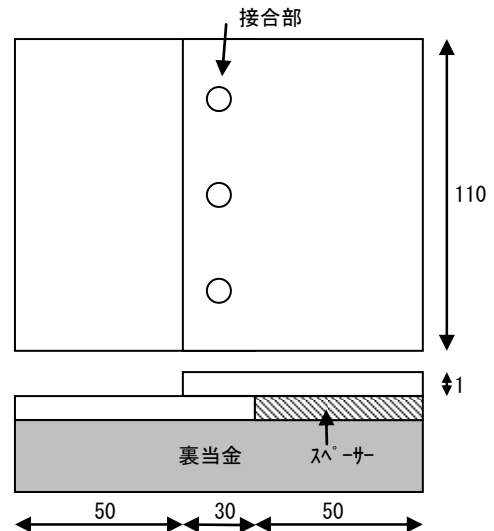


図3 供試材の配置方法

定の深さに達した後、直ちに0.17mm/sの速度で引き上げた。なお、接合用装置としては日立精機(株)製汎用フライス盤3K(立型)を用い、シールドガスは用いなかった。また、接合強度向上対策として図4に示す、窪み付き裏当金も用いた。窪みは深さ1mmで曲率半径を8mmとした。

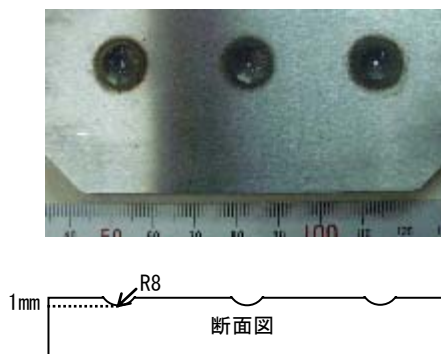


図4 窪み付き裏当金

2.4 接合強度及び組織評価

得られた被接合材は、JIS-Z3136に従い、幅30mm×長さ130mmの短冊状に切断し、これをせん断引張試験用の試料とした。せん断引張試験は(株)島津製作所製オートグラフAG-10TBを用いて引張速度0.08mm/sで行い、被接合材の断面組織については、JIS G0553に記載の硝酸エタノール法(ナイタール法)により、硝酸とエタノールとの体積比で0.5:9.5の溶液で腐食を行った後、光学顕微鏡を用いて観察した。

2.5 接合ツール寿命評価

2.1に示した寿命評価用供試材に90打点程度のStir in Plateを行った後、2.3に示した引張試験用試料の接合を6打点行い、そのうちの5打点について2.4に示すせん断引張試験を行った。残り1打点については、レーザ変位計(株)キーエンス製LK-030)を用いて接合部の断面形状測定を行った。上記の作業を繰り返すことによって接合ツールの寿命評価を行った。なお、実験の能率向上のため、テーブル上に配置した供試材をエア圧で押し上げる装置を自作し、これで連続打点実験を行った。この際の加圧力は6300Nとした。

3. 結果及び考察

3.1 接合部の外観

図5に接合部の外観を示す。これらはセラミックスとして窒化珪素Aを用いており、(a)はフラット裏当金を用いた結果である。なお、(a)の場合の接合ツールの圧入深さは1.4mmである。接合部の表側は接合ツールの押圧によって半球状の窪みが生じ、酸化して黒色化する。窪みの外周部には、球状プローブの押圧によって押し出されてきた材料が、材料押返し部によって押し込まれた跡が認められる。また、裏側の接合中心は接合ツールの押圧により裏当金と密着するため、酸化はせず、黒色化し

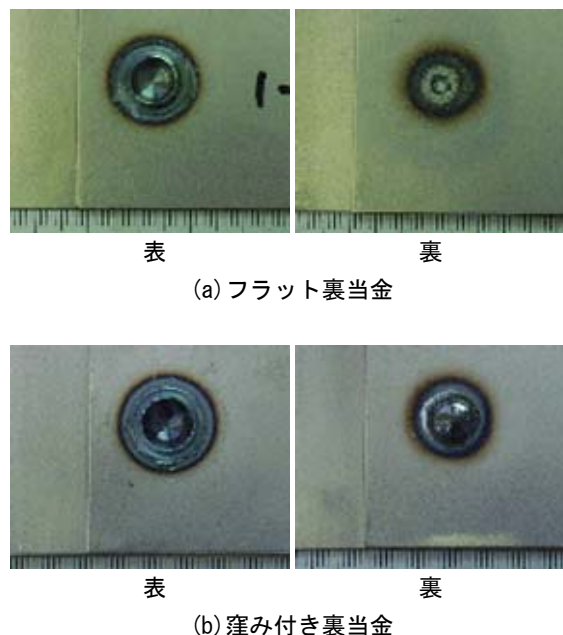
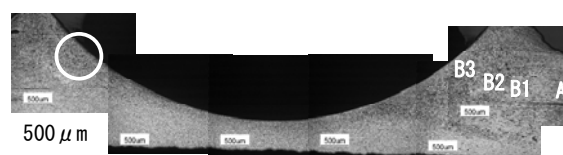


図5 接合部外観

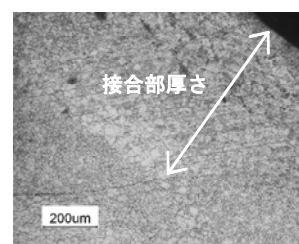
ないものの外周部は黒色化する。一方、(b)は窪み付き裏当金を用いた場合の外観である。なお、(b)の接合ツールの圧入深さは2.5mmである。裏側には裏当金の窪みに起因する凸部が認められる。

3.2 接合部の断面組織

図6にフラット裏当金を用いた場合の接合部断面マクロ写真を示す。接合条件は図5(a)と同じである。Aの領域は未接合部である。マクロ写真ではB1~B3の領域は接合しているように見える。次に、図7に断面マイクロ写真を示す。マクロ写真では接合しているように見えたBの領域のうち、B1は連続的に接合線が残留しており、B2は不連続的に接合線が残留し、B3は接合線が認められない。また、B1では、接合線近傍に母材よりも粒径の小さいフェライトが若干認められ、B2、B3の順で粒径の小さ



(a) 接合部全体



(b) ○部拡大図

図6 断面マクロ写真(フラット裏当金)

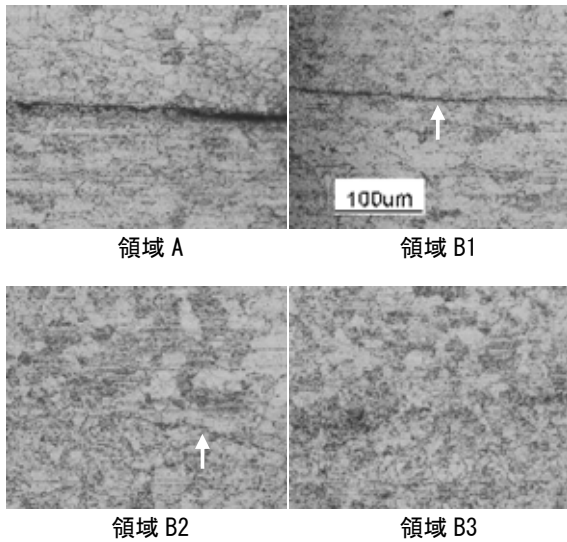
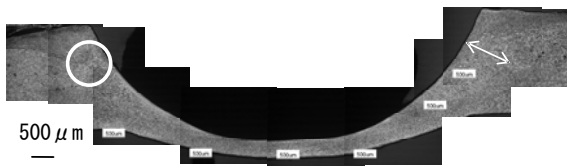


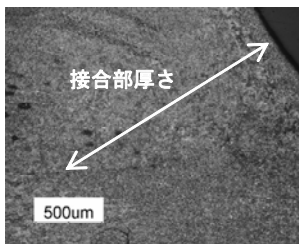
図7 断面マイクロ組織写真(フラット裏当金)

いフェライトが多くなること判る。フェライト粒が細くなることについては、接合初期の表面酸化によって形成された酸化物が接合線近傍の材料内に取り込まれ、この酸化物による粒界のピン止め効果によりオーステナイト結晶粒の粗大化が抑制されたため、フェライトが微細化したものと考えられる。接合線の残留については、酸化物等の介在物が界面上に残留していることを示唆しており、ツールからの圧力により接合面は互いに接触しているものの、接合温度が低いために、界面介在物が接合線近傍の材料内に取り込まれず残留したものと考えられる。接合線近傍でフェライト粒が細くなる原因、及び接合線の残留の原因については青田ら⁸⁾も同じ考察をしているが、今後、接合部近傍の温度測定等を行うことで、これらのことを解明していきたい。

次に、残留接合線の端と球面プローブの接触面との距離を“接合部厚さ”と定義し、図6中に両矢印でこれを



(a) 接合部全体



(b) ○部拡大

図8 断面マクロ写真(窪み付き裏当金)

示す。図6の条件で接合した場合、接合部厚さは断面左側で824μm、右側で902μmである。

図8に窪み付き裏当金を用いた場合の断面マクロ写真を示す。接合条件は図5(b)と同じである。窪み付き裏当金を用いた場合は下板が下側に凸になっている様子が判る。図8中には、図6同様、接合部厚さを表す両矢印を示す。測定の結果、接合部厚さは断面の左側が2019μm、右側が1094μmであり、フラット裏当金を用いた場合に比し、接合ツールの圧入深さを大きくすることができ、これによって大幅に接合部厚さを大きくできることが判った。

3.3 接合部の接合強度

図9にせん断引張試験後の試験片の外観を示す。図9はツール圧入深さ1.6mmの場合の結果である。ツール圧入深さ1.2mm、1.4mm、1.6mm、1.8mm、2.5mm(窪み付き裏当金使用)のいずれにおいても破断形態はプラグ破断となった。また、ツール圧入深さ1.0mmにおいては、図10に示すように接合しなかった。なお、いずれもセラミックスとしては窒化珪素Aを用いた。図11にツール圧入深さと接合強度の相関を示す。図より、今回の実験範囲においては、ツール圧入深さが大きくなるほど接合強度が大きくなる傾向が認められ、窪み付き裏当金を用い、ツール圧入深さ2.5mmの際に、接合強度最小値5.5kN、平均値7.4kN、最大値9.0kNを達成した。このような傾向となる原因を調査するため、3.2で述べた接合部厚さをそれぞれの試料において測定し、断面右側の接合部厚さと断面左側の接合部厚さの平均値を求めた。図12にはツ



図9 せん断引張試験後の試験片

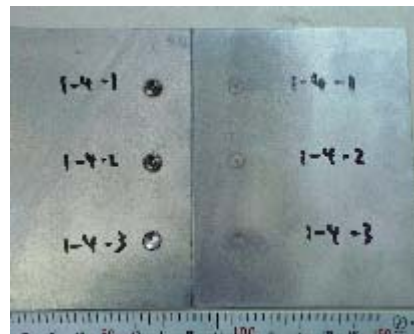


図10 圧入深さ1.0mmの接合部外観

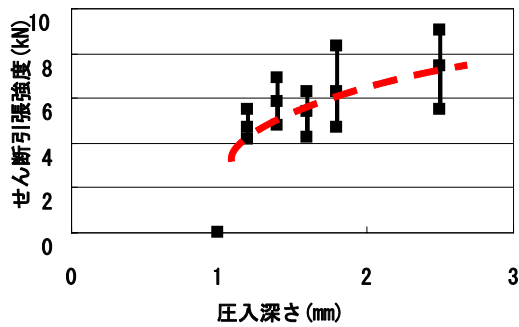


図 11 ツール圧入深さと接合強度の相関

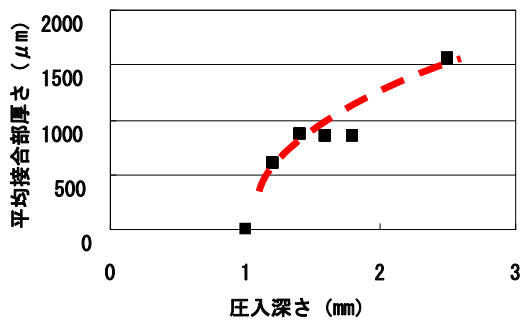


図 12 ツール圧入深さと接合部厚さの相関

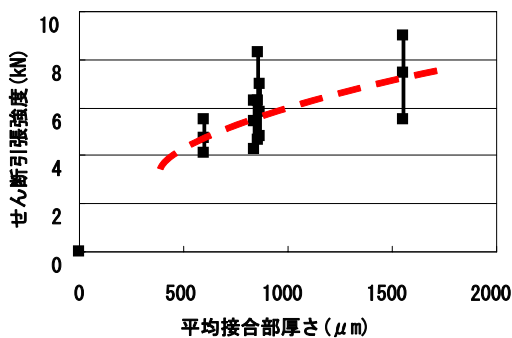


図 13 接合部厚さと接合強度の相関

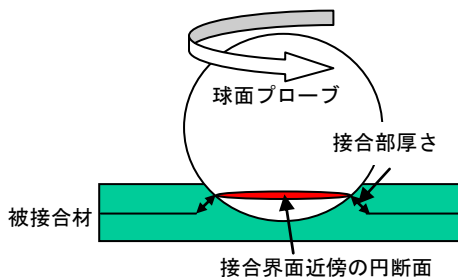


図 14 球面プローブによる接合模式図

ル圧入深さと平均接合部厚さとの相関を示す。図より、圧入深さが大きくなるほど接合部厚さが大きくなる傾向が認められる。また、図 13 には平均接合部厚さと接合強

度の相関を示す。図より、接合部厚さが大きくなるほど接合強度が大きくなることが判る。これらの結果から、球面プローブを用いる摩擦攪拌点接合では、図 14 に示すように、ツールの圧入深さが大きくなるほど、被接合材の接合界面近傍における球面プローブの円断面の面積が大きくなることによって攪拌力が大きくなり、接合部厚さが大きくなるものと推定される。

3.4 ツール先端用材料の最適化

球面プローブ用材料として各種セラミックスを適用した結果を図 15 に示す。ツール圧入深さはいずれも 1.6mm とし、フラット裏当金を用いた結果である。アルミナ、ジルコニアは欠損により使用不能となり、炭化珪素、超硬合金は摩耗により使用不能となった。いずれのセラミックスも 100 打点以下のツール寿命となった。これに対して、窒化珪素は A 材、B 材ともに欠損は起こらず、1005 打点まで接合を実施することができた。しかし、図に示すように、A 材、B 材とも 1005 打点後は球面の肩部が大きく摩耗していることが判る。



図 15 接合後のツール外観

3.5 ツールの寿命評価

3.4 で述べた窒化珪素の摩耗が打数とともにどのように進んでいったのかを調べるために接合部の断面形状を測定し、また、接合材のせん断引張試験を実施した。断

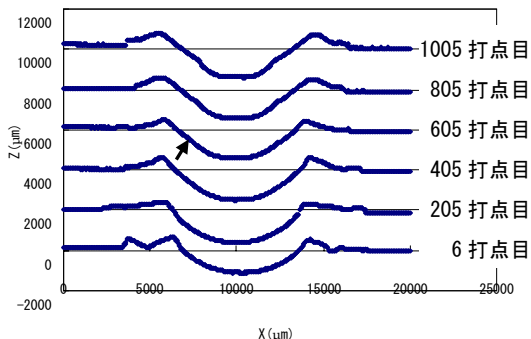


図 16 窒化珪素 A 材の形状変化

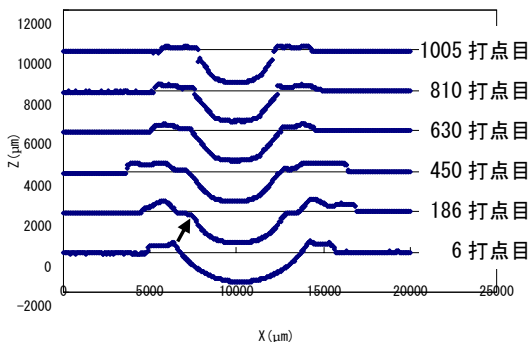


図 17 窒化珪素 B 材の形状変化

面形状測定結果を図 16 及び図 17 に示す。図より、A 材は 600 打点目くらいから球面の肩部の R 形状が直線形状になってきており (605 打点目の矢印)、B 材は 200 打点前から球面肩部の摩耗が進行していることが判る (186 打点目の矢印)。図 18 及び図 19 に打数と接合強度の相関を示す。A 材については明確な傾向は認められなかったものの、B 材については、明らかに打数とともに接合強度が低下していくことが認められた。この差異の原因は球面プローブの摩耗の仕方と関係があると予想し、図 20 に示すように、窪み部の断面積を求めることでプローブ断面積を推測することを試みた。図 21 及び図 22 に打数と窪み部断面積の相関を示す。図より打数とともに窪み部断面積が低下傾向にあることが判る。図 23 及び図 24 には窪み部断面積と接合強度の相関を示す。窒化珪素 B では窪み部断面積が大きいほど接合強度が大きくなるという傾向が明確に認められたが、窒化珪素 A では窪み部

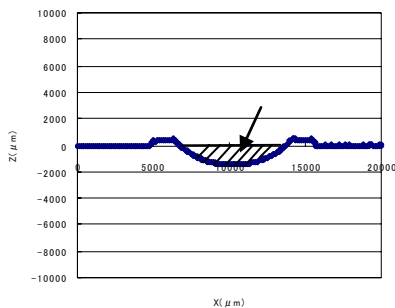


図 20 窪み部断面積の測定箇所

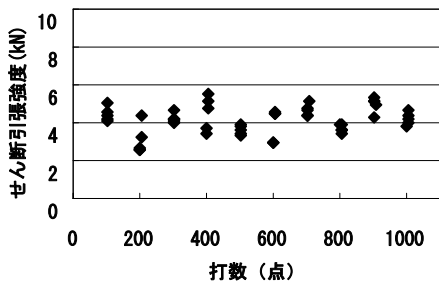


図 18 窒化珪素 A 材 打数と接合強度の相関

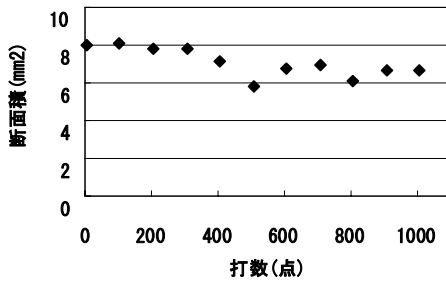


図 21 窒化珪素 A 材 打数と窪み部断面積の相関

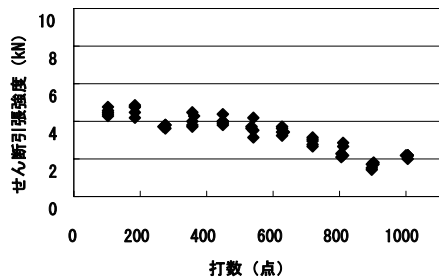


図 19 窒化珪素 B 材 打数と接合強度の相関

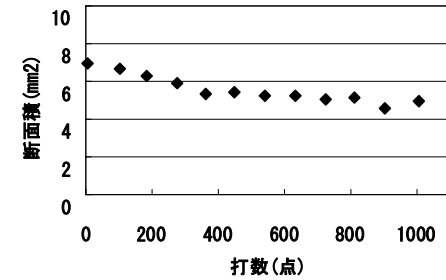


図 22 窒化珪素 B 材 打数と窪み部断面積の相関

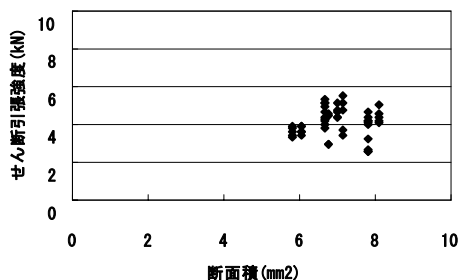


図 23 窒化珪素 A 窪み部断面積と接合強度の相関

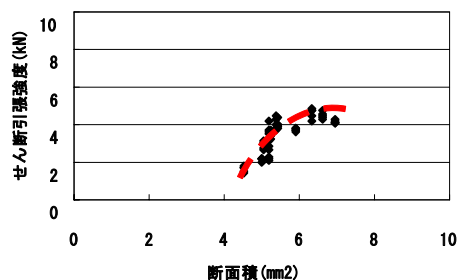


図 24 窒化珪素 B 窪み部断面積と接合強度の相関

断面積と接合強度の間に明確な相関は認められなかった。以上の結果から、窒化珪素 A と窒化珪素 B の接合強度の差異について、窪み部断面積の差異だけでは説明がつかず、この差異の解明のためには、窪み部断面積以外の何らかのパラメータも探し出す必要があることが判った。しかし、ここでは示さなかった他の窒化珪素においても、窒化珪素 B と同様に、打数とともに窪み部断面積が低下し、接合強度が低下する傾向が認められた。これらの結果から、球面プローブの摩耗をいかに低減するかが接合強度を低下させないための重要な対策の一つであるということとは少なくともと言えると考えている。

3.6 ツール寿命向上対策

藤井らは、高炭素鋼の線状摩擦攪拌接合を 200RPM という低速回転で実施すると、超合金系のツールでも、ツールの摩耗がほとんどないと報告している¹¹⁾。そこで、接合時の回転数を 1500RPM から 760RPM に低減して接合を試みた。球面プローブとしては窒化珪素 B を用い、接合ツールの圧入深さは 1.6mm とした。なお、加圧力については 1500RPM のときと同様に 6300N とした。図 25 は接合前後の接合ツール外観であるが、2505 打点後において球面プローブがほとんど摩耗していないことが判る。次に、3.5

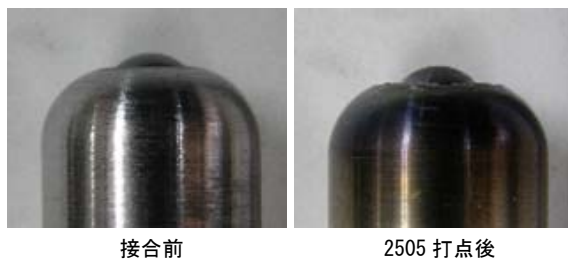


図 25 低速回転接合後のツール外観

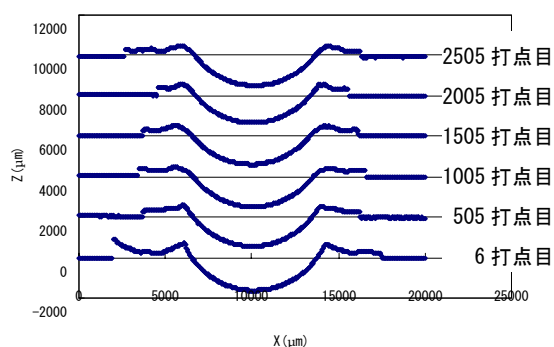


図 26 低速回転時窪み部断面形状変化

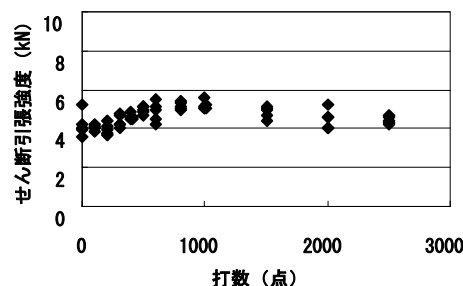


図 27 低速回転時の打数と接合強度の相関

と同じように接合部の断面形状及び接合材のせん断引張試験を実施した。図 26 に断面形状測定結果を示す。図から 2505 打点後もほとんど窒化珪素に摩耗が起っていないことが判る。図 27 に打数と接合強度の相関を示す。1000 打点程度まで接合強度が上昇傾向にあり、その後は、やや低下傾向にあるものの、回転数が 1500RPM の時のような急激な低下傾向は認められない。以上の結果から、回転数を低減することで球面プローブの摩耗を大幅に低減でき、その結果、接合強度の低下を抑制できることが判った。なお、接合強度の絶対値は図 11 に示した値に比し低位であるが、3.3 で述べたように、窪み付き裏当金を用いることで、接合強度を向上できることが判っている。今後は、低回転速度接合に窪み付き裏当金を組み合わせることによって接合強度を向上させることに努めたいと考えている。

4. 結 言

先端にセラミックス製の球面プローブを有する接合ツールを用いて、低炭素鋼板 SPCC (厚さ 1mm) の重ね点接合を行った。また、球面プローブの耐久性についても調査を行い、以下の結論を得た。

- 1) 接合強度はツール圧入深さが大きくなるほど大きくなる。また、裏当金として窪み付き裏当金を使用することで、接合強度はさらに大きくなり、球面プローブ材質が窒化珪素、ツール圧入深さ 2.5mm、回転数

1500RPM, 裏当金窪みの深さ 1mm, 曲率半径 8mm という条件で接合強度最小値 5.5kN, 平均値 7.4kN, 最大値 9.0kN を達成した。

- 2) ツール先端に用いる球面プローブの材質としては, 窒化珪素が最も有効である。しかし, 回転数 1500RPM, 圧入深さ 1.6mm という条件では, 数百打点で球面肩部に摩耗が発生し, 1000 打点以下でツールとして使用できなくなる。
- 3) 回転数を 760RPM に低減し, 2) と同様にツール寿命評価を行なったところ, 2505 打点後も球面プローブの形状に変化はなく, 接合強度の低下を抑制することができる。

本研究は大阪大学接合科学研究所共同研究員制度を利用して行いました。

文 献

- 1) W. M. Thomas et al. : International Patent Appl. No. PCT/GB92/02203.
- 2) 坂野律夫, 加藤喜久夫: 溶接技術, **52**, 99 (2004).
- 3) 藤本光生, ほか 4 名: 溶接学会論文集, **25**, 553 (2007).
- 4) 宮川 堅, ほか 3 名: 溶接学会論文集, **26**, 42 (2008).
- 5) 植松美彦, ほか 4 名: 溶接学会論文集, **26**, 7 (2008).
- 6) 麻 寧緒, ほか 4 名: 軽金属溶接, **46**, 17 (2008).
- 7) 藤本光生, ほか 4 名: 溶接学会論文集, **26**, 67 (2008).
- 8) 青田欣也, 池内健二: 溶接学会論文集, **26**, 54, (2008).
- 9) 立野高寛, ほか 4 名: 溶接学会全国大会講演概要集, **79**, 58 (2006).
- 10) 大橋良司, 藤本光生: 溶接学会全国大会講演概要集, **82**, 66 (2008).
- 11) 藤井英俊, ほか 5 名: 溶接学会全国大会講演概要集, **80**, 216 (2007).