

平成 28 年度 修士論文

# 5052/SPCC 回転ツール点接合の 継手強度におよぼす接合条件の影響

三重大学大学院工学研究科

博士前期課程 機械工学専攻

山本 湧二

## 目次

第1章 緒言	・・・1
第2章 実験装置および実験方法	・・・3
2-1 回転ツール点接合プロセス	・・・3
2-2 実験装置概要	・・・3
2-3 実験条件	・・・4
2-3-1 供試材および試験片形状	・・・4
2-3-2 ツール形状	・・・5
2-3-3 加工条件	・・・6
2-4 評価方法	・・・6
2-4-1 引張せん断試験	・・・7
2-4-2 SEM 観察及び EPMA 分析	・・・7
2-4-3 格子状けがきによる破断面観察	・・・8
第3章 実験結果と考察	・・・9
3-1 引張せん断試験後の破断形態	・・・9
3-2 プローブ挿入深さと引張せん断強さの関係	・・・9
3-3 接合界面の破断面様相	・・・10
3-3-1 破断面観察	・・・10
3-3-2 接合面積測定結果	・・・11
3-3-3 格子状けがきによる破断面観察	・・・11
3-3-4 接合部断面観察	・・・12
第4章 考察	・・・14
4-1 接合条件が及ぼす接合面積への影響	・・・14
4-1-1 プローブ挿入深さの影響	・・・14
4-1-2 保持時間の影響	・・・14

4-1-3 ツール回転速度の影響	・・・15
4-1-4 接合部形状の変化および引張せん断強さとの関係	・・・16
4-2 接合条件が及ぼす継手強度への影響	・・・16
4-2-1 保持時間の影響	・・・16
4-2-2 ツール回転数の影響	・・・17
第5章 結言	・・・19

参考文献

謝辞

## 第 1 章 緒言

Al は、常温常圧で熱伝道性、電気伝導性に優れており、実用金属としては軽量で加工性も良い事から様々な分野で使用されている。しかし、Al は柔らかい金属であるため、銅、マンガン、ケイ素、マグネシウム、亜鉛、ニッケルのような合金元素を添加することで強度などの機械的特性の向上が図られる。主な Al 合金の種類として、1000 番台の純 Al 系、2000 番台の Al-Cu 系、3000 番台の Al-Mn 系、4000 番台の Al-Si 系や 5000 番台の Al-Mg 系などが挙げられる。Al 合金は様々な利点を持つ反面、溶融溶接は困難とされている。その理由としては、(1)鋼と比較して比熱、溶融潜熱が大きく、熱伝導率が高いため、多くの熱量が必要であり集中的に加えなければならない(2)膨張係数が鋼と比較して大きい(3)液体状態と固体状態における水素の溶解度に著しい差があり、ブローホールを形成しやすい(4)Al は酸素と大変結合しやすく、溶接の際に酸化膜が阻害因子になるといった点が挙げられる。<sup>[1]</sup>また、Al 合金と異種金属との接合に溶融溶接を用いると、接合界面に脆弱な金属間化合物の厚い層が生成され健全な継手を得ることは難しいとされている。

Al など軽金属の接合法として摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding : FSW)が開発された。これらの接合法は回転する接合ツールを被接合材料に挿入し、接合ツールと被接合材料間で生じる摩擦熱によって軟化した接合部を攪拌(塑性流動)させて接合体を得る技術である。材料内最高到達温度は融点以下であるため、固相接合法に分類される。そのため、上記理由により溶融溶接が困難であった Al などの材料に適用されることとなった。また、溶融溶接に比べて変形を抑制できることや接合部の機械的性質に優れることなどの利点がある。さらに摩擦攪拌点接合は自動車ボディの接合法として用いられている抵抗スポット溶接に比べて接合に必要な電力が少ないことが利点として挙げられる。特に Al は熱伝導率が大きく、抵抗スポット溶接を行うためには鉄鋼材料よりはるかに大きい溶接電流が必要となる。このため Al の点接合継手作製において摩擦攪拌点接合は適用範囲を拡大するものと予想される。

回転ツール点接合法は摩擦攪拌点接合と同じく、接合ツールの回転、圧入、接合、引上げの4つのステップからなる接合法であるが、摩擦攪拌点接合とは異なり接合ツールのプローブが接合界面を貫通しない接合方法である。一般的な摩擦攪拌点接合では接合界面を貫通したプローブによりその周辺に攪拌部を形成させることで接合が完了する。一方で回転ツール点接合は、接合界面のツール直下部を間接的に回転させることで接合部を形成させる。本方法では下板に接合ツールが接触する必要がないため、例えばAlと鋼の異材接合をAl同材の場合と同じ接合条件において実施が可能である。

そこで本研究では、5052Al合金とSPCCの異材重ね継手に対して、位置制御によりプローブ挿入深さが5052/SPCCの界面位置を越えない範囲で変化させ、接合実験を行った。得られた継手を引張せん断試験に供することで、継手の静的引張せん断強度、接合部形状、接合界面形状に及ぼすプローブ挿入深さ、保持時間、ツール回転速度の影響について検討した。

## 第 2 章 実験装置および実験方法

### 2-1 回転ツール点接合プロセス

回転ツール点接合はツールの回転，圧入，接合部への接合，引き上げという 4 つの基本ステップからなる非常にシンプルな接合プロセスである。

Fig.2-1 に示すように，まず作製したツールを高速で回転させながら，被接合材表面と接触するように接近させる．このとき，高速回転しているツールを試験片と被接合材との摩擦により摩擦熱が発生する．その摩擦熱で材料を軟化させてツール自体を所定の押し込み量まで材料中に挿入させる．そしてツールの回転を所定の時間続けることでプローブから与えられる力により材料に塑性流動が生じ，その後接合面が回転方向に塑性流動することで接合が行われる．また回転ツール点接合と一般的な FSSW との違いを Fig.2-2 に示す．一般的な FSSW がプローブによって重ね合わせた試験片の界面を突き破り，プローブ側面に施されたねじ部によって材料を攪拌して接合するのに対し，回転ツール点接合では界面近傍をプローブ先端部によって回転方向に塑性流動させることによって接合する．

本実験では，Fig.2-3 に示すように，異なるプローブ長さのツールを用いてプローブ挿入深さをプローブ先端が上板内部に位置する条件で回転ツール点接合を行う．

### 2-2 実験装置概要

実験装置には，位置制御方式の NC フライス盤(春日製作所 SNC-V2-B)を使用した．NC フライス盤本体に直接 NC プログラムを打ち込む事により，任意の動作を設定する事が可能である．自作した NC プログラムは相対座標により記述した．そのため，ツールの移動方向である Z 軸の零点(プローブ先端と被接合材表面との接触開始位置)を決定し，ツール回転速度およびツールの挿入量を

プログラムに入力する事で実験可能である。本研究では試験片を固定する治具および実験に使用するツールをそれぞれ作製した。Fig.2-4 および Fig.2-5 に示すように、NC フライス盤にこの治具とツールを取り付ける。ツール形状の詳細については後述する。本実験の実験手順について次に示す。

- (1) ツールを NC フライスのチャックに固定する。
- (2) 試験片を治具に設置する。
- (3) プログラムにツール回転速度，ツールの挿入値，保持時間を入力する。
- (4) 零点を決定する。零点は試験片とツールとの間に薄いシート(紙)を挟み，ツールを近づけシートが動かなくなる位置とする。
- (5) ツールを零点から NC プログラムの開始位置である 50mm 上方へ移動させた後，プログラムを起動し接合を行う。

## 2-3 実験条件

### 2-3-1 供試材および試験片形状

本実験では、供試材として Al 合金 5052-H34(板厚 2mm)と冷間圧延鋼材である SPCC(板厚 1mm)を用いた。その化学組成及び物性値を Table2-1 および Table2-2 に示す。Al 合金 5052 は Al 合金の中で Mg 添加量が中程度の合金の代表的なものである。Al 合金の中で中程度の強度を持つ材料として最も一般的であり、加工性、耐食性がよく、耐海水性が優れている。使用用途としては一般板金、船舶、車両などに様々な用途で使われている。Al 合金 5052 の後に記されている H34 とは調質記号の一つで、冷間加工を行った後に約 150℃で加熱し安定化処理をしたもの(1/2 硬質)という意味を表す。

使用した試験片の形状は、Fig.2-6 に示すように上板に Al 合金 5052 を、下板に SPCC をそれぞれ 125×40×2mm, 125×40×1mm の寸法に加工したものをを用いた重ね代 40mm の重ね継手に対して回転ツール点接合を行う。試験片の

寸法はスポット溶接の引張せん断試験片寸法の JIS 規格(JIS Z 3136)に基づいて決定した。

### 2-3-2 ツール形状

回転ツール点接合では、Fig.2-7 に示すようにツールと呼ばれるエンドミル形状の工具を用いて接合を行う。回転ツール点接合における重要な接合因子として、ツール回転速度や保持時間のような接合装置を動作させるための加工条件の他にツール形状も影響があると考えられる。そのため、本実験では Fig.2-8 に示すように、プローブの長さを 1.0mm, 1.3mm に変化させたツールをショルダー径 15mm において作成した。ツールの詳細については以下に示す。ショルダーやプローブは被接合材表面と接触し、摩擦熱を発生させ、プローブ長さは長いほど材料とプローブが接触する面積が増加し、より広範囲に熱を与えることができると考えられる。

材質 : SKD61  
プローブ形状 : ネジ加工無しのプローブ  
プローブ直径 : 5 mm  
プローブ長さ(D) : 1.0, 1.3 mm  
ショルダー径 : 15 mm

ツールの材質は合金工具鋼(熱間ダイス鋼)SKD61 を用いた。SKD61 の化学組成を Table2-2 に示す。SKD 鋼は主に金型のような比較的使用環境の厳しい工具に使用される。Al 合金の摩擦攪拌接合や摩擦攪拌点接合において、ツールの材質として一般的に使用されている。プローブの根元部分には 10° のテーパがついており、プローブ部分にネジ加工を施していないツールを用いる。

### 2-3-3 加工条件

前項で述べたように、装置を動作させるための加工条件は回転ツール点接合における重要な接合因子である。加工条件は以下に示す通りである。

ツール回転速度を 200, 300, 500rpm とし、挿入深さ到達後の保持時間(侵入深さ時間)を 30~60s の範囲で変化させ点接合を行った。なお、接合実験においてツール押し込み量は、プローブ長さが 1.0mm の場合は 0.4, 0.6mm, プローブ長さが 1.3mm の場合は 0.4mm とし、ツール挿入速度は 15mm/min で一定である。本実験で用いる装置に位置制御方式の NC フライスをを用い、試験片は 2 枚の板から成る重ね合わせ部分(重ね代: 40mm×40mm)の中央に回転ツール点接合を施した。

ツール回転速度 : 200rpm, 300rpm, 500rpm

ツール回転方向 : 右回り

実験装置制御方式 : 位置制御方式

ツール押し込み量 : 0.4mm, 0.6mm

挿入速度 : 15mm/min

保持時間 : 30s, 45s, 60s

### 2-4 評価方法

Fig.2-9 に示すようにプローブ長さ(d)をショルダー外周部からプローブ先端までの長さとし、プローブ挿入深さ(D)を上板の上面からプローブ痕の底部までの長さとする。実際のプローブ挿入深さは NC プログラムにより設定した値と異なることが想定され、引張せん断試験に供する前に通電を利用した変位計を用いて全試験片のプローブ挿入深さを測定した。

#### 2-4-1 引張せん断試験

接合後の試験片は引張せん断試験を行い、引張せん断強度及び破断形態の評価を行う。引張せん断試験にはアムスラー万能試験機を用いる。試験片寸法および引張せん断試験方法は JIS Z 3136 に基づいて決定し、試験片寸法は 40×210mm、クランプ間距離を 100mm とした。引張方向は接合継手の長手方向に對して行った。

#### 2-4-2 SEM 観察及び EPMA 分析

本実験では SEM(Scanning Electron Microscope, JEOL 製 JXA-8530F)を使用して以下の手順で接合部断面の顕微鏡組織観察を行った。

- ① 試験片接合部中央をリファインカッターで切断し、ベークライト粉末樹脂に埋め込む。
- ② ベークライトに埋め込んだ試験片を耐水研磨紙#600, #800, #1000, #1200, #1500 で湿式研磨を行い、その後バフを用いて鏡面仕上げを行う。
- ③ 試験片表面に電流が流れるように Pt 蒸着装置を用い Pt を蒸着する。さらにカーボンシートを試験片と治具にかかるように貼り付ける。
- ④ SEM 画像により観察する。

同時に EPMA(Electron Probe Microanalysis, JEOL 製 JXA-8530F)を使用して接合部断面および引張せん断試験後の破断面の組織を調べた。EPMA 分析とは試料表面に細く絞った（ミクロンからサブミクロンの大きさ）電子線を照射して、照射された部分から発生する特性 X 線を検出し、その波長から試料を構成している元素の分布および量を知ることができる分析機器である。本実験で用いた分析方法は面分析であり、分析は加速電圧 15kV、ビーム電流  $3.0 \times 10^{-8} \text{A}$  の条件で行った。

### 2-4-3 格子状けがきによる破断面観察

回転ツール点接合において上板と下板の界面がどの程度塑性流動しているかを検証するため、Fig.2-10 に示した模式図のように接合界面に 2mm 間隔で格子状にけがきを施した試験片を用意し実験を行った。その後、Fig2-11 に示すように実験前と実験後の格子点を結ぶことでベクトル線図を作成した。けがきにはハイトゲージを用い、初めに上端から 2mm の部分にけがきを行い、その位置から上下に 2mm ずつ移動させながらけがきを行った。接合条件については次に示す。

ツール回転速度 : 200, 300, 500rpm

プローブ長さ : 1.0mm

ツール押し込み量 : 0.6mm

保持時間 : 30s, 60s

## 第3章 実験結果と考察

### 3-1 引張せん断試験後の破断形態

引張せん断試験後の破断面マクロ写真を Fig.3-1～18 に示す。アルミニウム同材継手に関する過去の研究<sup>[2]</sup>において、引張せん断試験を行った際には異なる破断形態が観察されたが、アルミニウムと鋼の異材継手に関する本実験範囲においては、全試験片において上板と下板の接合界面に沿って剥離し破断破壊している形態のみが観察された。これを過去の研究と同じく界面破断と呼ぶこととする。アルミニウム同材継手に関しては、プローブ先端の到達位置が一定量よりも深くなることで破断形態が変化することが分かっており、本実験範囲では比較的プローブ挿入深さが浅いため、界面破断のみが観察されたのだと考えられる。

### 3-2 プローブ挿入深さと引張せん断強さの関係

プローブ挿入深さと引張せん断強さの関係について Fig.3-19～21 に示す。プローブ挿入深さは前章で述べたように上板表面からプローブ痕の底部までの深さによって表されるものである。Fig.3-19 に示すようにツール回転速度 500rpm の場合、プローブ挿入深さが 1.3mm 前後となる比較的浅い接合条件は接合不可条件となり、それ以上の接合条件では接合が確認された。接合可能な条件においてはプローブ挿入深さ 1.45mm 前後において最大値を示し、それ以上ではプローブ挿入深さが深くなるにつれて引張せん断強さは低下する傾向を示した。保持時間ごとの実験結果を比較すると、全体的な引張せん断強さの増減傾向は同様であるが、保持時間が 60s の場合では引張せん断強さが最大値となるプローブ挿入深さは約 1.5mm と大きくなった。Fig.3-20 に示すツール回転速度 300rpm の場合でも 500rpm の結果と同様に、プローブ挿入深さが 1.3mm 前後では接合不可となり、1.45mm 前後で高い引張せん断強さを示した。500rpm

と比べると傾向は同様であったが、全体的に高い値を示した。Fig.3-21 に示す 200rpm の場合では、500rpm、300rpm において接合不可条件であった 1.3mm 前後でも接合が可能であることが確認された。また、引張せん断強さは最大値、平均値ともに 500rpm、300rpm に比べて高い値を示し、増減傾向は同様であった。本実験条件範囲での引張せん断強さの最大値はツール回転速度 200rpm、プローブ挿入深さ 1.42mm、保持時間 60s における 4.60kN である。

以上の事から、引張せん断強さはツール挿入深さおよびツール回転速度に大きく依存していると考えられる。

### 3-3 接合界面の破断面様相

#### 3-3-1 破断面観察

引張せん断試験後の下板側 (SPCC) 破断面の一例を Fig.3-22 に示す。接合が確認された継手の破断面には領域 I (Area I) や領域 II (Area II) のような特徴的な模様が観察できる。下部 SPCC における領域 I (Area I)、領域 II (Area II) の SEM 画像の一例をそれぞれ Fig.3-23(a) および (b) に示す。Fig.3-23 (a) に示す領域 I は比較的なめらかな外観となっており、接合部であることを示すような相手側の金属である 5052 合金 (Al) の付着はほとんど観察できなかった。一方で Fig.3-23 (b) に示す領域 II では所々に付着物 (Al) が確認できる部分が観察できたため、この領域が接合部であると考えられる。また、EPMA による面分析を行ったところ、Fig.3-24 に示したように領域 II には相手側の金属である 5052 合金 (Al) の付着が確認された。上板側である 5052 合金 (Al) の破面においても同様の観察を行い、Fig.3-25 に SEM 画像を、Fig.3-26 に EPMA による面分析結果を示した。領域 II では削れたような外観の領域がみられるが、接合部である領域 II、非接合部である領域 I のどちらにおいても相手側の金属である SPCC (Fe) の付着は確認されなかった。

### 3-3-2 接合面積測定結果

3-3-1 で述べたように領域Ⅱ (AreaⅡ) を接合面と考え、この面積を画像処理することにより接合面積を測定した。接合面積と引張せん断強さの関係を Fig.3-27 に示す。回転数によらず領域Ⅱ (AreaⅡ) の面積と引張せん断強さは比例関係になっていると考えられる。回転数ごとに見ると、500rpm, 300rpm と比べて 200rpm では比較的接合面積が大きくなっており、最大値としてはシヨルダ径内のおよそ 40% である約  $70\text{mm}^2$  となった。また、引張せん断強さを接合面積で割ることで求めた単位接合面積当たりの引張せん断強さの平均値はそれぞれ、200rpm では  $67.3\text{N/mm}^2$ 、300rpm では  $73.9\text{N/mm}^2$ 、500rpm では  $90.6\text{N/mm}^2$  となった。500rpm での平均値が高くなっているが、変動範囲としては  $67.4\sim 131.3\text{N/mm}^2$  と、300rpm の  $57.4\sim 96.3\text{N/mm}^2$ 、200rpm の  $47.7\sim 83.3\text{N/mm}^2$  に比べてばらつきは大きくなっている。また、500rpm で大きな値を示したのはもともと引張せん断強さおよび接合面積が小さい結果によるものであった。これらの結果から回転数を下げることで接合面積が増加し引張せん断強さの向上につながる事が分かった。

### 3-3-3 格子状けがきによる破断面観察

接合界面 (上下板表面) に 2mm 間隔で格子状にけがきを施し、実験を行った試験片の引張せん断試験後の破断面を Fig.3-28~30 に示す。上板と下板の両側に同時にけがきを施しての実験は実験中に一方の格子がもう一方の面に転写されるため別々の実験として行っている。全条件において下板のけがき線および格子点には移動がみられないため、下板の接合界面には塑性流動は起こっていないと考えられる。上板の接合界面に施したけがき線は一部の条件を除いて実験後には格子点が消失しており観察が行えない状態となっていた。これは接合時にかかる圧力や回転運動による摩擦、塑性流動によってけがき線がかき消されてしまったのだと思われる。格子点の観察が行えた条件に関して実験前後

の接合部のけがきの各格子点の位置からベクトル線図を作製し、Fig.3-31に示した。ベクトル線図においての原点はプローブ痕の中心とし、示した破断面のマクロ写真上における左右方向をx軸方向（右を正）、上下方向をy軸方向（下を正）とした。接合部内の格子点はツールの回転方向と同じ時計回りに回転していることが分かる。実験の前後で比較的大きく移動が見られた格子点のほとんどは接合部内に存在し、それよりも外側の格子点はほとんど移動していなかった。これは接合部では下板との相対的な回転運動により摩擦が発生することで接合が行われ、それよりも外側の領域では格子点は移動していないため摩擦は起こらず接合もされないのではないかと考えられる。また、移動量としては微量であるが、アルミニウムの接合阻害因子である酸化膜の破壊には十分であるため、接合界面の回転運動が微量であっても接合自体は問題なく行えると考えられる。

#### 3-3-4 接合部断面観察

接合部断面の一例を Fig.3-32 に示す。図に示した断面の実験条件はツール回転数 200rpm で保持時間 60s、プローブ長さ 1.0mm、ツール押し込み量 0.6mm である。Fig.3-33 に示したように、プローブ中心直下(a)、接合部が形成されるプローブ外周部付近(b)、ショルダー外周部(c)の3か所でそれぞれ SEM 画像の撮影および EPMA による面分析を行った。その結果を Fig.3-34 に示す3か所すべてにおいて、SEM 画像による観察レベルでは金属間化合物層は確認できなかった。EPMA による面分析においても同様に、プローブ中心直下において接合を阻害する酸化膜の存在が認められるが、それよりも外側のプローブ外周部、ショルダー外周部では酸化膜および金属間化合物の存在を示すような結果はみられなかった。そのため、接合界面に形成される金属間化合物層は SEM や EPMA での観察レベルでは確認できない程度の厚さであり、本接合プロセスにおいては金属間化合物の形成を抑制できると考えられる。しかしながら、金属間化合物層の厚さや分布は明らかにできていない。なお、プローブ直下にお

る酸化膜の成長は他の箇所比べて高温になると考えられること，接合界面の回転運動により酸化膜が移動することが原因と考えられる．

## 第4章 考察

### 4-1 接合条件が及ぼす接合面積への影響

3章で述べたように、接合面積の増加が引張せん断強さの向上に大きく関わっている。ここでは各接合条件の変化が接合面積の変化にどのような影響を及ぼすのかを考察する。また、Fig.4-1 に一例を示すように中心から非接合部である領域Ⅰまでの距離を内径  $d$ 、接合部である領域Ⅱの外周部までの距離を外径  $D$  として、接合面積がどのように変化していくのかを調べた。

#### 4-1-1 プローブ挿入深さの影響

まず初めにプローブ挿入深さが継手の接合面積に及ぼす影響をみるために両者の関係をツール回転数ごとに Fig.4-2~4 に示す。ツール回転数の変化によらずプローブ挿入深さが 1.4mm~1.5mm の間で接合面積が比較的大きくなっており、1.6mm 前後では小さくなっていることが分かる。これは、引張せん断強度が高くなるプローブ挿入深さが 1.45mm 前後であり、引張せん断強度と接合面積がおおよそ比例の関係にあることから、接合面積も同様に引張せん断強度の高くなる 1.45mm 前後で大きくなっているのだと考えられる。

#### 4-1-2 保持時間の影響

Fig.4-5~8 に保持時間と接合面積との関係を示す。ツール回転数 200rpm において、接合面積が最大となる保持時間は 60s であった。しかし、プローブ長さ 1.3mm、ツール押し込み量 0.4mm としたとき、同じ保持時間 60s においても接合面積が小さくなる場合があることが確認された。また、プローブ長さと同じ押し込み量を同じにし、保持時間のみを変化させた場合、保持時間の増加に比べ、接合面積には大きな変化は見られなかった。ツール回転数 300rpm

においても接合面積が最大となる保持時間は 60s であるが、プローブ長さを 1.0mm、ツール押し込み量を 0.6mm とした場合はツール回転数 200rpm と同様に保持時間と接合面積との間に関係性はみられなかった。プローブ長さを 1.3mm、ツール押し込み量を 0.4mm とした場合も同様であった。ツール回転数 500rpm の場合、接合面積が最大となったのは保持時間 30s のときであった。プローブ長さを 1.3mm、ツール押し込み量を 0.4mm とした場合はツール回転数 300rpm と同様に保持時間の増加とともに接合面積は縮小するような傾向がみられ、プローブ長さを 1.0mm、ツール押し込み量を 0.6mm とした場合は同じ条件で行った実験においても変動が大きくなる結果となった。上記の結果から保持時間の変化が接合面積に与える影響は小さいと考えられる。

#### 4-1-3 ツール回転速度の影響

Fig.4-9~11 にツール回転速度と接合面積との関係を示す。ツール回転数 500rpm の場合、接合面積の最大値は  $51.4\text{mm}^2$  であった。これは、考えられる最大の接合面積であるツールのショルダー径内の面積のおよそ 28.4%にあたる接合面積率である。ツール回転数 500rpm では接合面積が  $10\text{mm}^2\sim 20\text{mm}^2$  程度に集中しており、高い接合面積率を得られた条件は少なかった。300rpm の場合、接合面積の最大値は  $50.2\text{mm}^2$  であり、接合面積率は約 27.7%であった。500rpm に比べ最大値は小さくなっているが、最小でも  $30\text{mm}^2$  程度の接合面積が得られ、平均値としても 500rpm を上回る結果となった。200rpm においては、接合面積の最大値は  $67.7\text{mm}^2$  となり、このときの接合面積率は 38.3%であった。全体でみても高い接合面積率を示す場合が多く、接合面積を拡大するには、ツール回転数は低ツール回転数側である 200rpm が適していると考えられる。当初はツール回転数の高い条件の方が入熱は大きくなり、材料の軟化の促進や塑性流動の活発化につながることで接合面積が拡大すると考えていたが、Al 合金には高温での流動性が乏しいという特性があるということが分かっているため、入熱量の少ない低ツール回転数側で高い接合面積率を示したと思わ

れる。

#### 4-1-4 接合部形状の変化および引張せん断強さとの関係

Fig.4-12~14 に接合部の内径  $d$  および外径  $D$  とプローブ挿入深さとの関係を示す。ツール回転数 200rpm の場合、内径  $d$  はプローブ挿入深さや保持時間の变化によらず 2mm~4mm の間にまばらにプロットされているが、外径  $D$  はプローブ挿入深さ 1.45mm 前後までは大きくなり、その後深くなるにつれて小さくなるような傾向がみられた。ツール回転数 300rpm でも同様の傾向がみられるが、ツール回転数 500rpm の外径  $D$  に関してはプローブ挿入深さが 1.5mm から 1.6mm 前後の間での低下が急であり、1.6mm を超えると内径  $d$  に非常に近い値を示した。Fig.4-15~17 に接合部の内径  $d$  および外径  $D$  と引張せん断強さとの関係を示す。ツール回転数 200rpm の場合内径  $d$  と引張せん断強さの間には特定の傾向はないが、外径  $D$  は大きくなるにつれて引張せん断強さも高くなる比例のような関係にあることがわかる。ツール回転数 300rpm および 500rpm においても同様の傾向がみられた。これらのことから、内径  $d$  は接合条件に対して変化が小さいため接合面はショルダー外周部に向かって成長していくのだと考えられる。

#### 4-2 接合条件が及ぼす継手強度への影響

##### 4-2-1 保持時間の影響

Fig.4-18~20 に保持時間と引張せん断強度との関係を示す。ツール回転数 200rpm においてプローブ長さ 1.0mm, ツール押し込み量 0.4mm および 0.6mm としたとき、保持時間の増加による引張せん断強度への影響は小さいことが分かるが、プローブ長さ 1.3mm, ツール押し込み量 0.4mm とした場合は保持時間 60s においてのみ高い継手強度を示した。ツール回転数 300rpm の場合、プ

プローブ長さ 1.0mm, ツール押し込み量 0.4mm としたときは保持時間の変化によらず接合不可となり継手強度は得られなかった. プローブ長さ 1.0mm, ツール押し込み量 0.6mm としたときは, 200rpm と同様に保持時間の増加による引張せん断強さへの影響は小さいが, 200rpm に比べて同条件における実験結果のばらつきは大きくなった. プローブ長さ 1.3mm, ツール押し込み量 0.4mm としたときは, 保持時間 30s において高い引張せん断強さを示し, 45s, 60s では急激に低下する結果となった. ツール回転数 500rpm の場合は全体的に 300rpm と同様の傾向を示す結果となっているが, 同条件での実験のばらつきは他のツール回転数に比べ大きくなった. プローブ長さ 1.3mm, ツール押し込み量 0.4mm での結果が各ツール回転数で大きく傾向が異なるのは, ツール押し込み量が小さくなることで接合面での密着性が低下するため接合が不安定となり, 特定の傾向を示さない結果となったのではないかと考えられる. また, 保持時間の変化による引張せん断強さへの影響は, 本実験条件の範囲内においては特定の傾向がみられず不明であった.

#### 4-2-2 ツール回転数の影響

Fig.4-21~23 にツール回転数と引張せん断強度との関係を示す. プローブ長さ 1.0mm, ツール押し込み量 0.4mm としたとき, ツール回転数 300rpm および 500rpm においては保持時間の変化によらず接合不可であったが, 200rpm ではすべての保持時間で接合が可能であった. プローブ長さ 1.0mm, ツール押し込み量 0.6mm としたときはツール回転数 300rpm および 500rpm においても接合可能であり, ツール回転数 200rpm においてはどの保持時間でも比較的高い引張せん断強さを得られた. 最大値, 平均値ともにツール回転数の増加に伴い引張せん断強さは低下するような傾向がみられる. ツール回転数 200rpm および 300rpm では保持時間ごとの引張せん断強さには大きな差はないと考えられるが, ツール回転数 500rpm においては, 同条件での実験においても引張せん断強さに大きくばらつきがみられた. プローブ長さ 1.3mm, ツール押し込

み量 0.4mm としたときも同様に最大値，平均値ともにツール回転数の増加に伴い引張せん断強さは低下するような傾向がみられる．また，ツール回転数 200rpm と 300rpm を比べると平均的な差は小さいが，ツール回転数 500rpm とした場合は他のツール回転数に比べ平均値，最大値共に大きく下回る結果となっている．これらの結果から，ツール回転数を低くすることで被接合材にかかるトルクを大きくすることができ，そのため接合界面の回転運動がおおきくなる<sup>[3]</sup>ため継手強度の向上につながったのではないかと考えられる．

## 第 5 章 結言

本実験条件において 5052/SPCC 回転ツール点接合継手強度におよぼす接合条件の影響を検討した結果、以下の結論が得られた。

1. 引張せん断試験片において観察された破壊形態は、全試験片において接合界面に沿って剥離し破断している破壊形態である界面破断のみが観察された。
2. ツール回転数が低い方が全体的に高い継手強度を示し、200rpm の場合では 500rpm, 300rpm において接合不可条件であったプローブ挿入深さ 1.3mm 前後でも接合が可能であることが確認された。また、本実験範囲における引張せん断強さの最高値はツール回転数 200rpm, 保持時間 60s, プローブ挿入深さ 1.42mm における 4.60kN であった。
3. 保持時間の増加による引張せん断強さの変化には特定の傾向はみられなかったため、保持時間が強度に及ぼす影響は小さいと考えられる。
4. 引張せん断試験後の下部破断面において、接合部と推察される領域にのみ相手側の金属である 5052 合金(Al)の付着が確認された。
5. 破断面に見られる接合部の面積と引張せん断強さはおおよそ比例の関係にあり、単位接合面積当たりの引張せん断強さの平均値はそれぞれ、200rpm では  $67.3\text{N/mm}^2$ , 300rpm では  $73.9\text{N/mm}^2$ , 500rpm では  $90.6\text{N/mm}^2$  となった。
6. 接合部断面において SEM および EPMA による観察レベルでは金属間化合物層の存在は確認されなかったが、プローブ中心直下の接合界面には酸化膜の存在が認められた。

参考文献

[1] 時末光：FSW(摩擦攪拌接合)の基礎と応用

日刊工業新聞社

[2] 吉村 幸治：A5052 摩擦攪拌点接合継手に及ぼすプローブ挿入深さの影響

平成 23 年度修士論文

[3] 川上博士：5052 回転ツール点接合におけるツール回転数と破断形態  
との関係

溶接学会全国大会講演概要，第 97 集，pp.278-279，2015

[4] 西河厚志：Al 合金 5052 回転ツール点接合継手におよぼす接合条件の影響

平成 25 年度修士論文

[5] 社会法人 溶接学会：摩擦攪拌接合—FSW のすべて—

産報出版

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり，終始懇切にご指導いただきました三重大学工学部鈴木実平教授，ならびに実験の遂行・論文作成にあたり懇切なご指導をいただきました川上博士准教授，惜しみない協力と援助を頂いた尾崎仁志助教に深く感謝致します．

また，多忙なご予定の中 NC フライスなどの工作機械を貸し出していただいた実習工場の皆様に深く感謝致します．

なお，本研究に協力して頂いた久野博章君，諸井郁人君，尾山雄基君，三重大学大学院工学研究科平成 27 年度修了の駒田将樹氏に深く感謝します．さらに本研究を遂行するにあたりご協力頂いた同学工学部材料機能設計講座の諸氏に心より感謝致します．

最後に幾多のご協力を頂きながら，個々に御氏名を掲載できなかった方々に対し，その非礼をお詫びするとともに，謹んで御礼申し上げます．

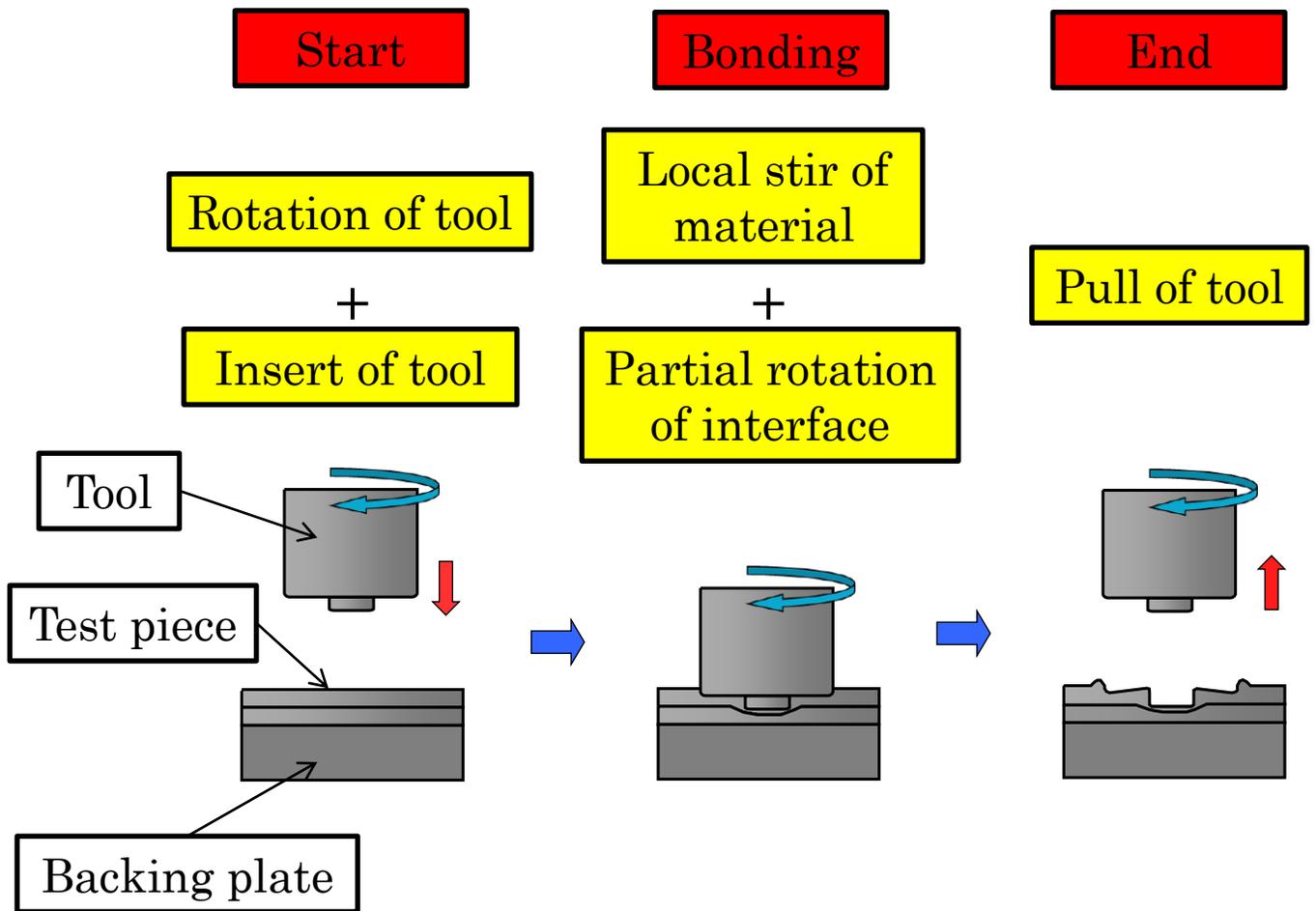
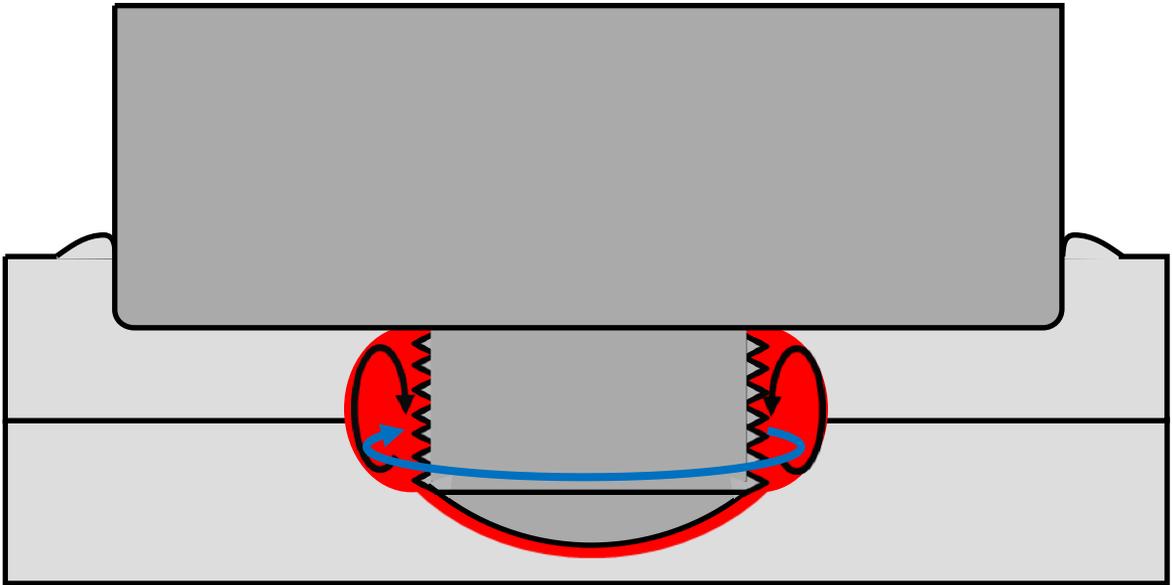
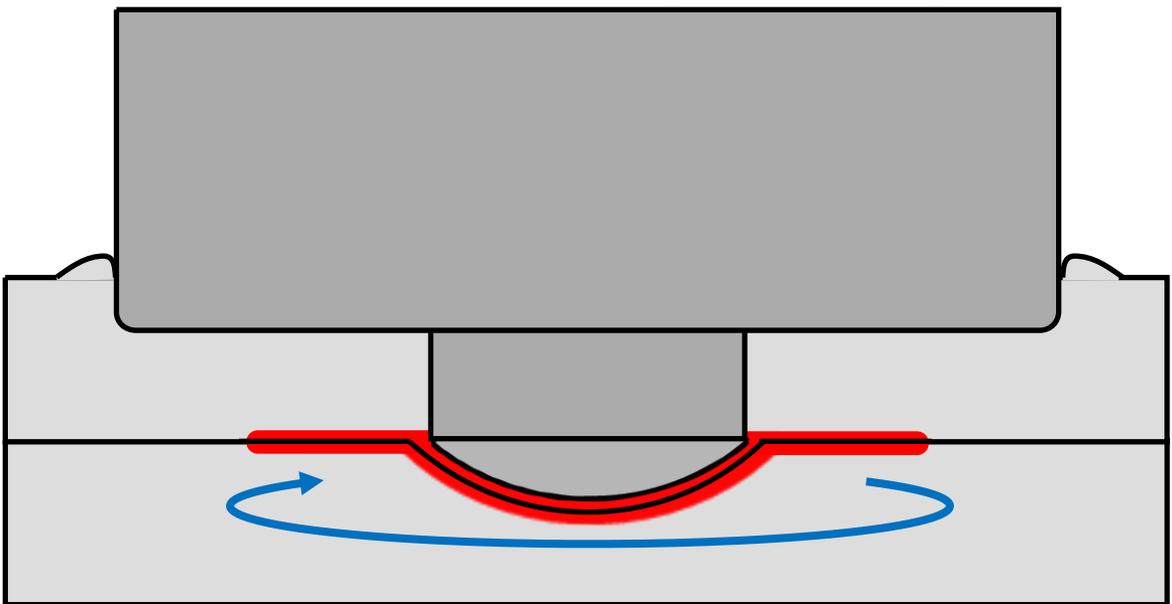


Fig.2-1 Schematic diagram of rotation tool bonding process.

(a) FSSW



(b) Rotation tool spot bonding



 Plastic flow area

Fig.2-2 Difference in the bonding process between FSSW and rotation tool spot joint.

Upper position from bonding surface

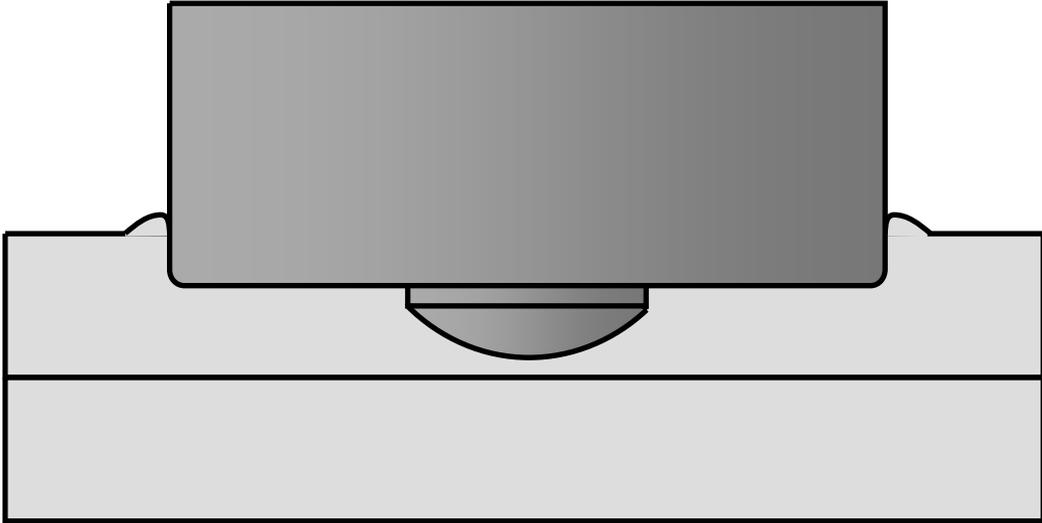


Fig.2-3 Relative position of probe tip from bonding surface by tools with different probe length.

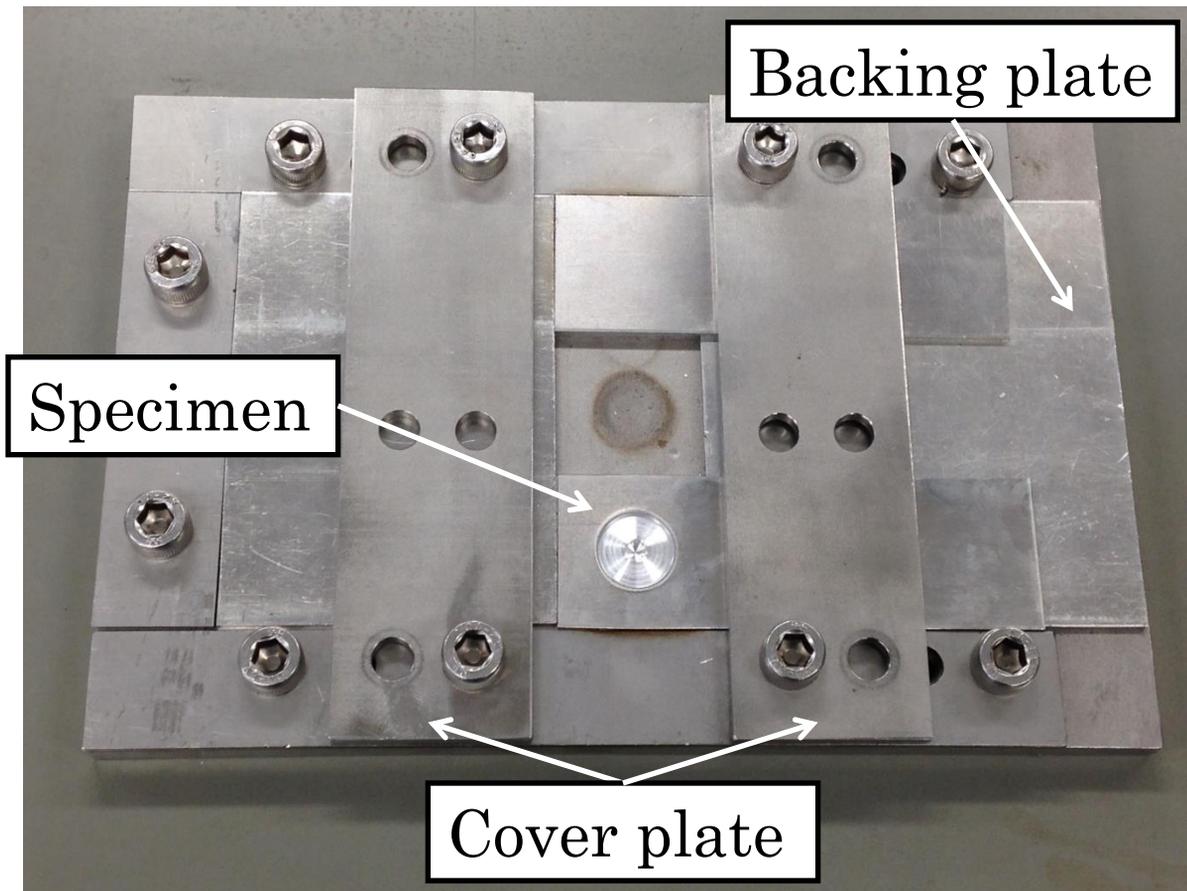


Fig.2-4 Photograph of rotation tool bonded specimen and jig.

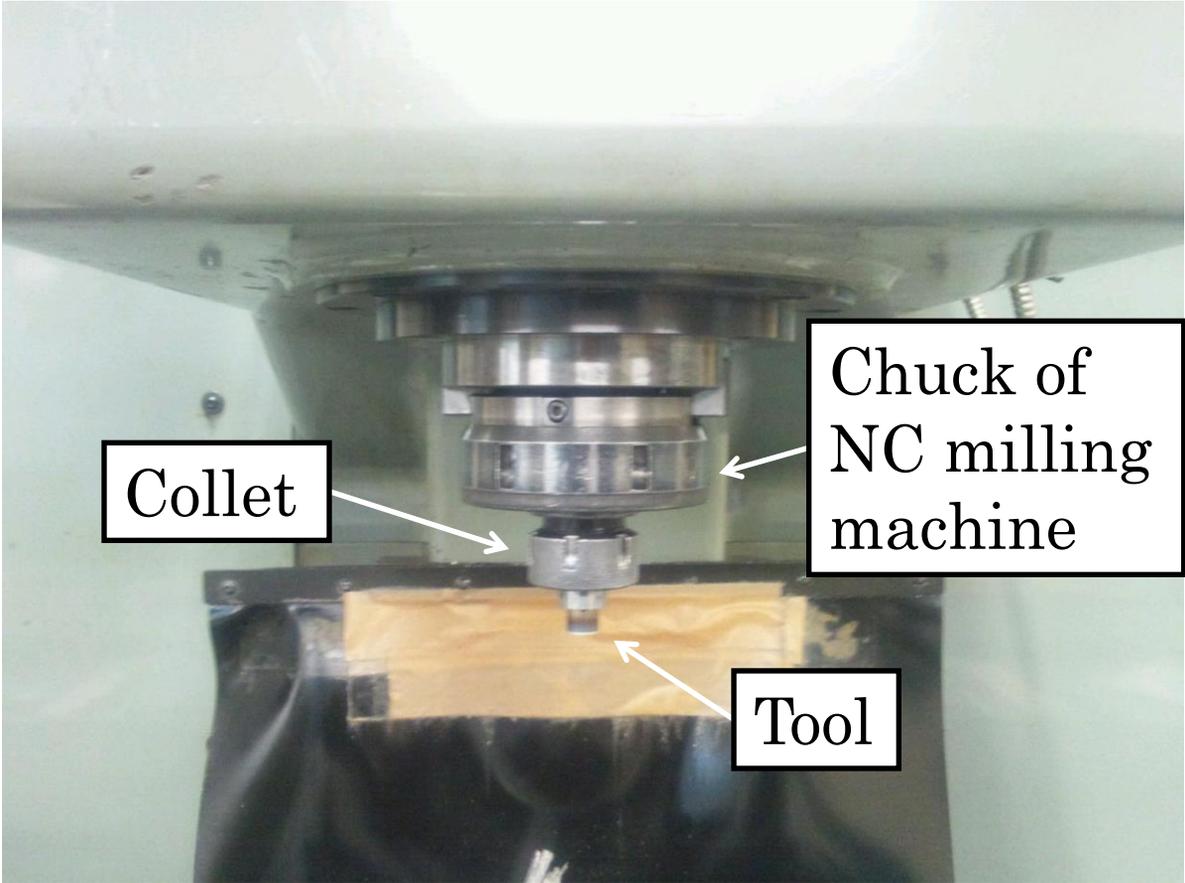


Fig.2-5 Photograph of bonding tool.

Table2-1 Chemical composition of A5052-H34  
(mass%).

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
0.07	0.25	0.01	0.01	2.61	0.18	0.01	Re
Tensile strength[MPa]				Elongation[%]			
256				11			

Table 2-2 Chemical compositions of SPCC(mass%).

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>
$\leq 0.15$	$\leq 0.60$	$\leq 0.100$	$\leq 0.035$

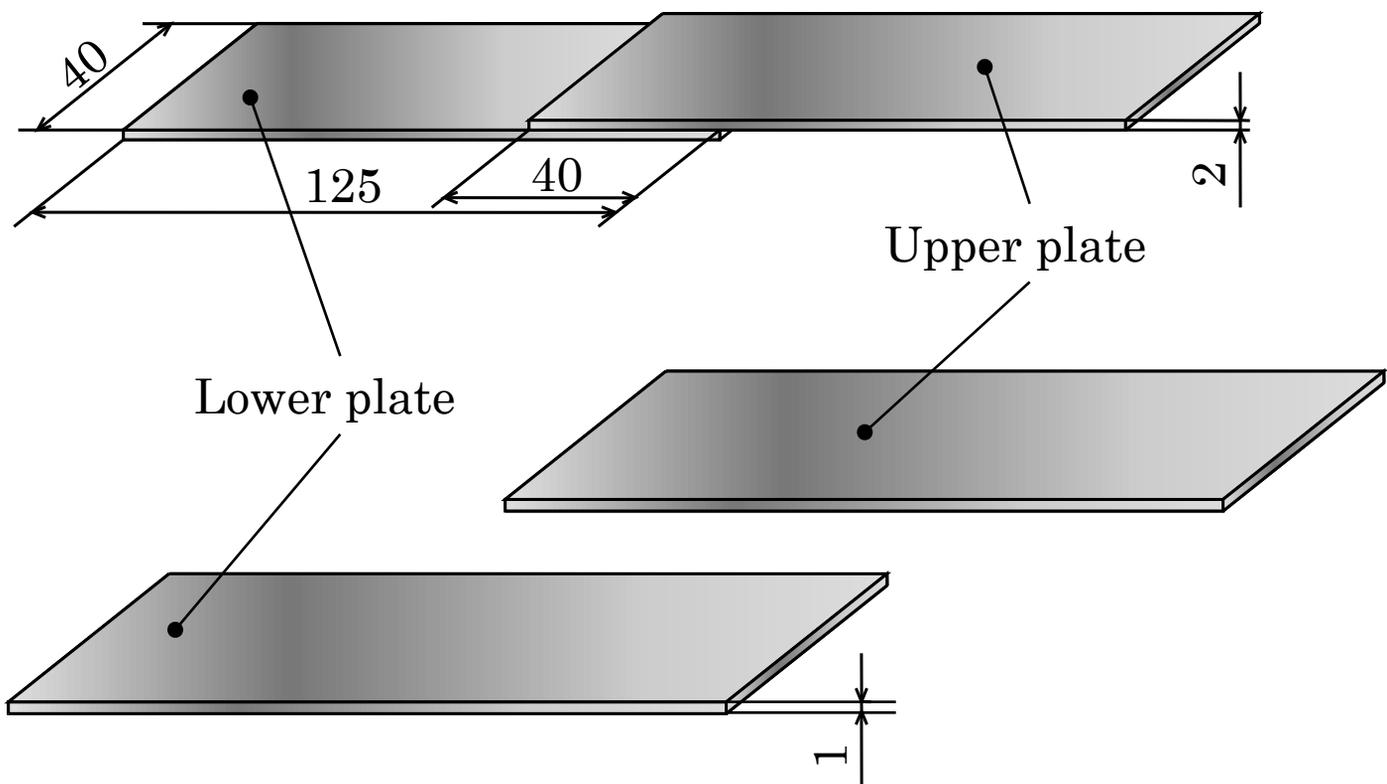


Fig.2-6 Shape of rotation tool bonded specimen.

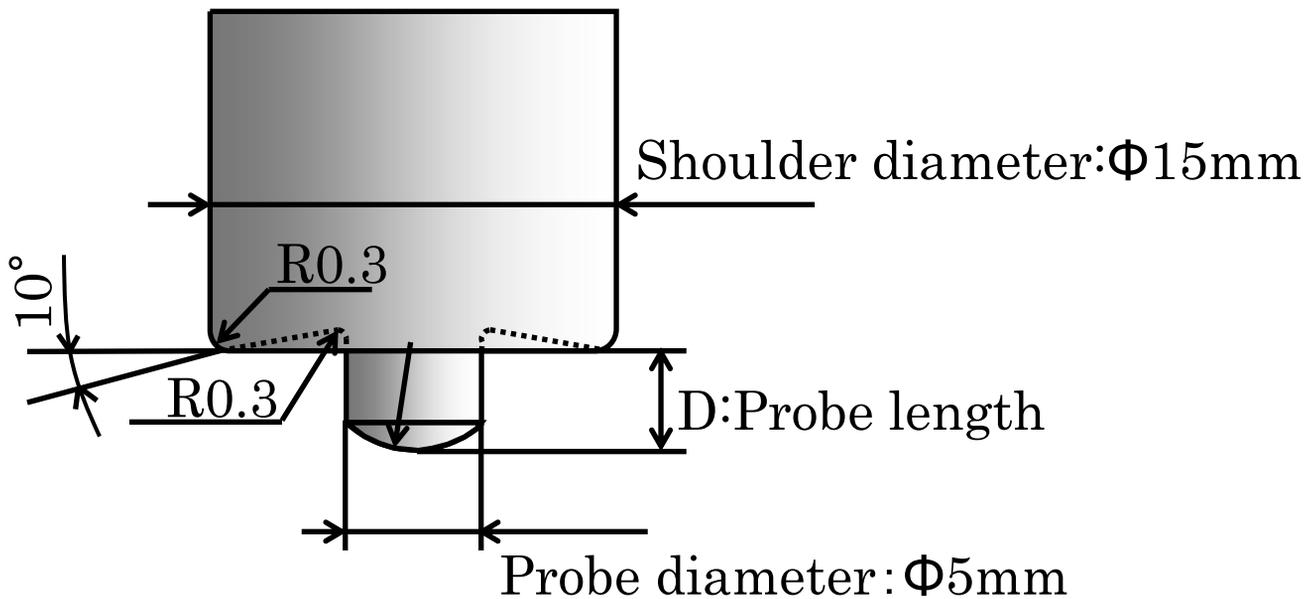


Fig.2-7 Dimension of bonding tool.

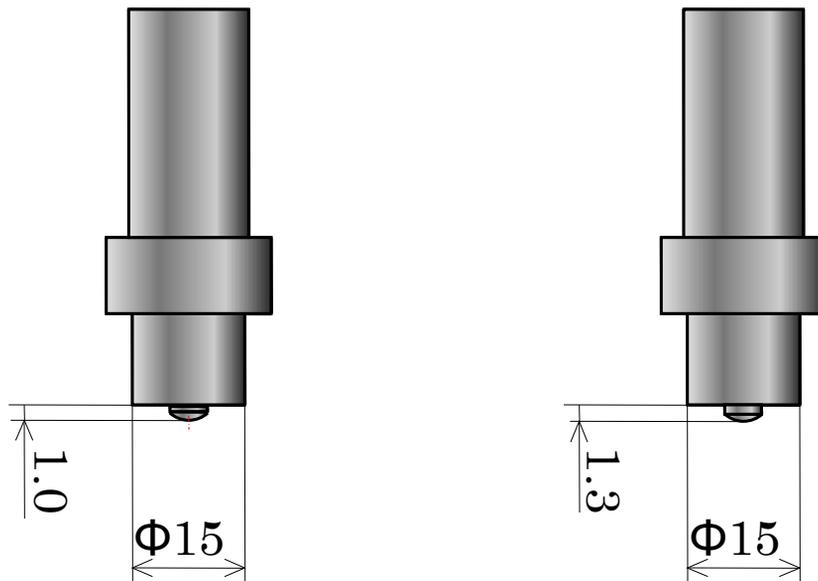


Fig.2-8 Geometry of tools employed for rotation tool bonding experiment.

Table2-3 Chemical composition of SKD61(mass%).

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.32-0.42	0.80-1.20	≤ 0.50	≤ 0.030	≤ 0.030	4.50-5.50
Mo	V	Fe			
1.00-1.50	0.80-1.20	Bal			

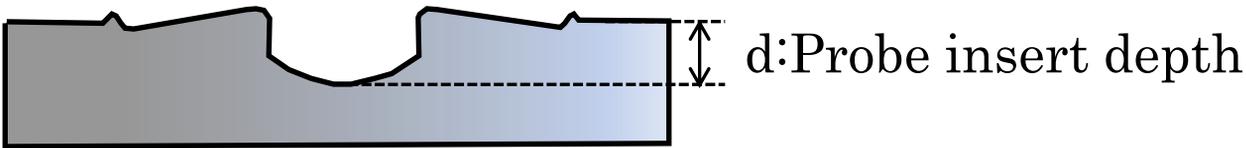
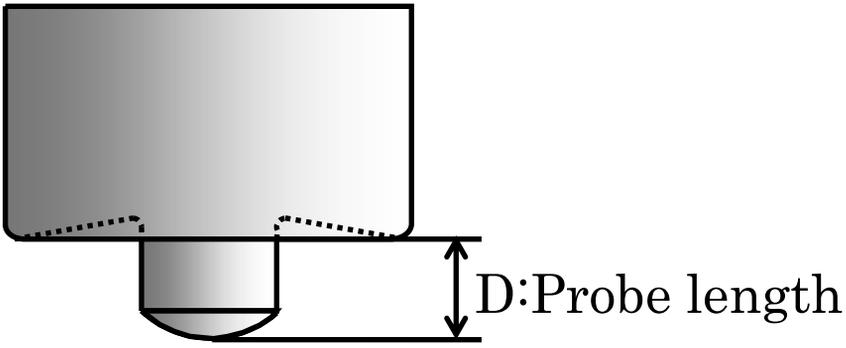


Fig.2-9 Difference between probe length and probe insert depth.

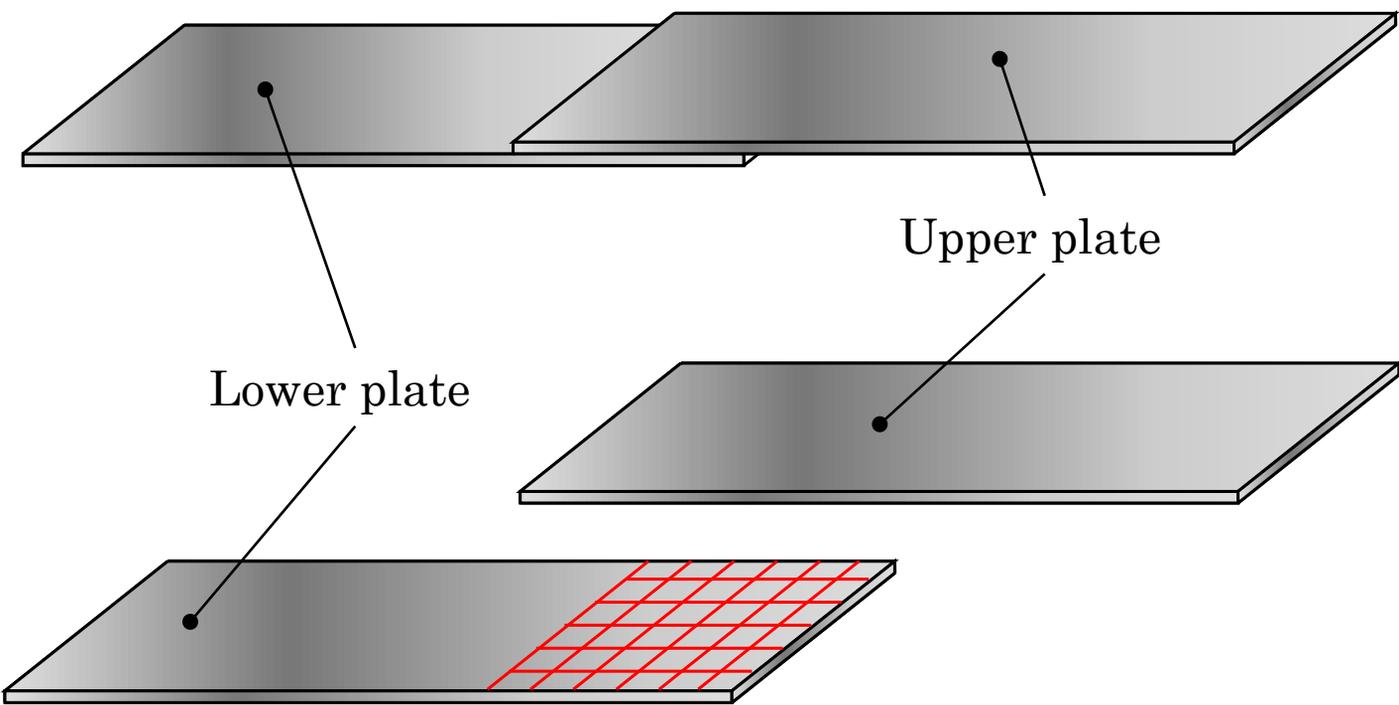
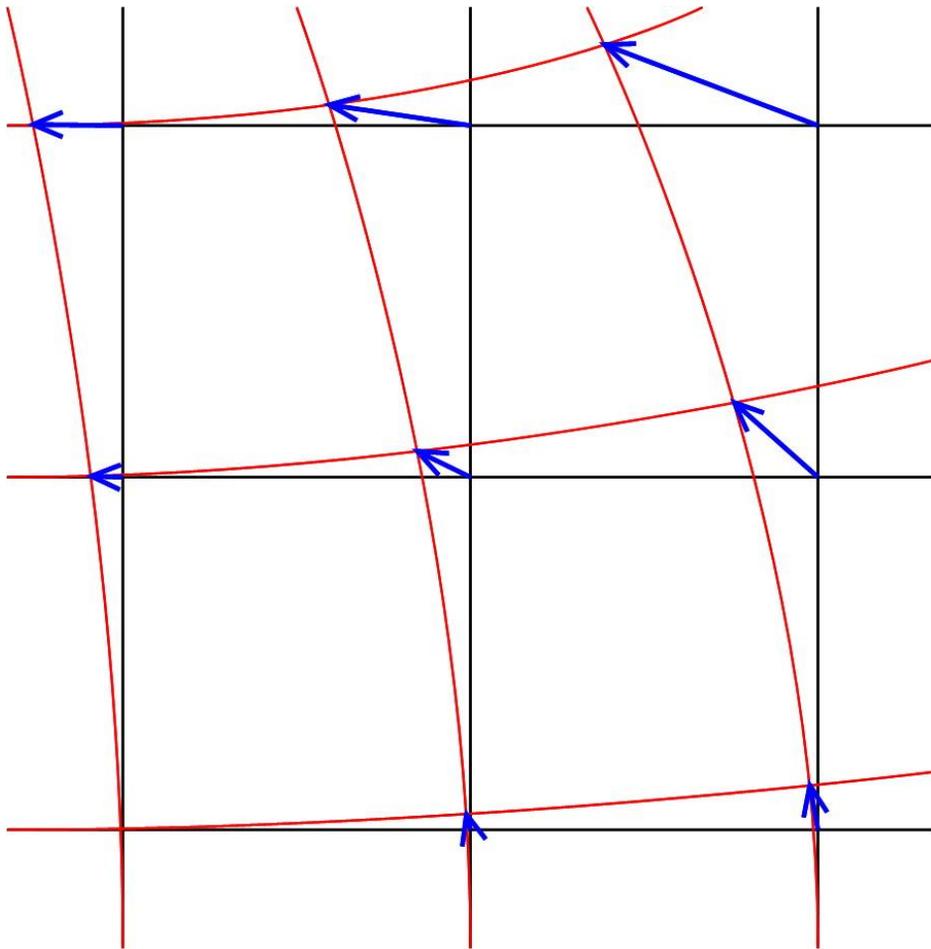
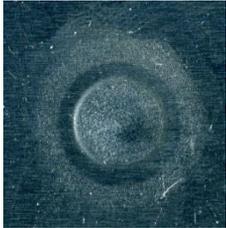
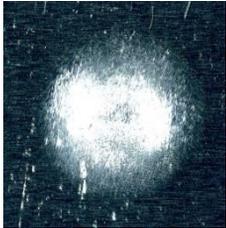
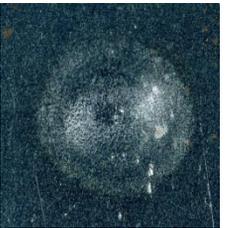
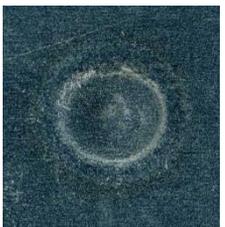


Fig.2-10 Marking grids around bonding region.



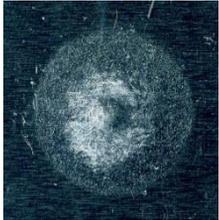
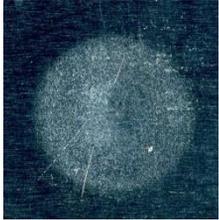
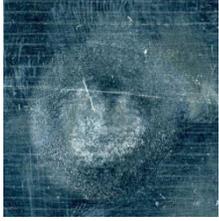
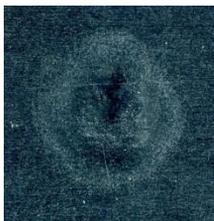
— Grid line before experiment  
— Grid line after experiment

Fig.2-11 Definition of vector of rotation.

	Upper plate	Lower plate
30s		
45s		
60s		

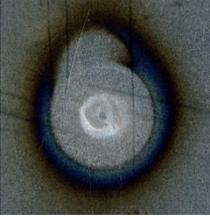
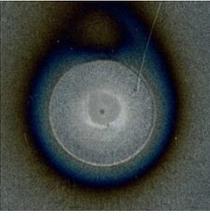
5mm

Fig.3-1 Macro photographs of fracture surfaces by rotation tool spot bonding by tool rotation speed of 500rpm, probe length of 1.0mm tool and insert depth of 0.4mm.

	Upper plate	Lower plate
30s		
45s		
60s		

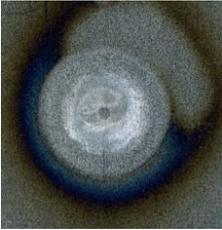
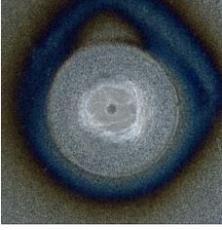
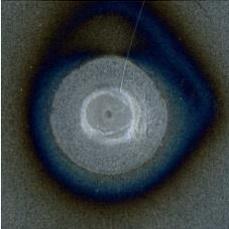
5mm

Fig.3-2 Continued.

	Upper plate	Lower plate
30s		
45s		
60s		

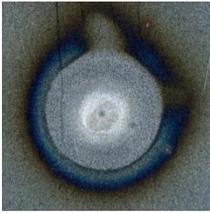
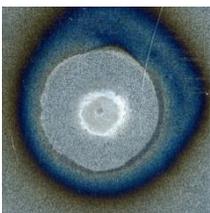
5mm

Fig.3-3 Macro photographs of fracture surfaces by rotation tool spot bonding by tool rotation speed of 500rpm, probe length of 1.0mm tool and insert depth of 0.6mm.

	Upper plate	Lower plate
30s		
45s		
60s		

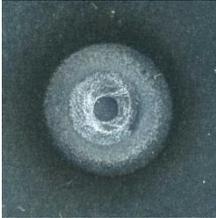
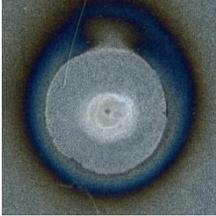
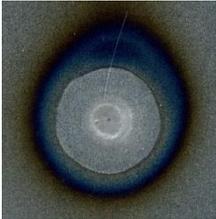
5mm

Fig.3-4 Continued.

	Upper plate	Lower plate
30s		
45s		
60s		

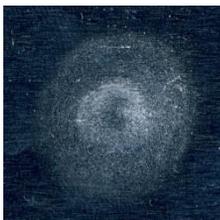
5mm

Fig.3-5 Macro photographs of fracture surfaces by rotation tool spot bonding by tool rotation speed of 500rpm, probe length of 1.3mm tool and insert depth of 0.4mm.

	Upper plate	Lower plate
30s		
45s		
60s		

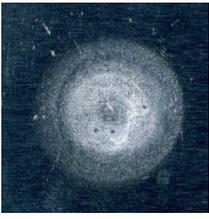
5mm

Fig.3-6 Continued.

	Upper plate	Lower plate
30s		
45s		
60s		

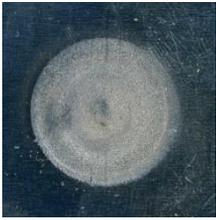
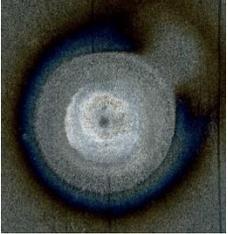
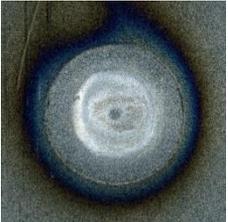
5mm

Fig.3-7 Macro photographs of fracture surfaces by rotation tool spot bonding by tool rotation speed of 300rpm, probe length of 1.0mm tool and insert depth of 0.4mm.

	Upper plate	Lower plate
30s		
45s		
60s		

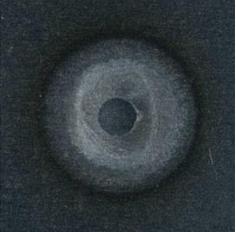
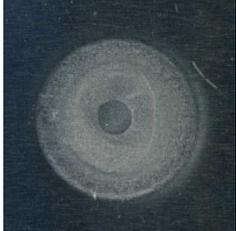
5mm

Fig.3-8 Continued.

	Upper plate	Lower plate
30s		
45s		
60s		

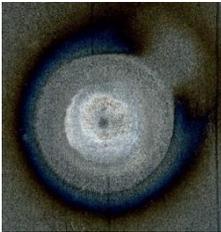
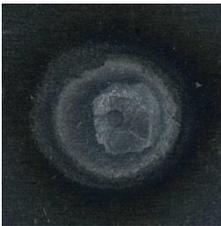
5mm

Fig.3-9 Macro photographs of fracture surfaces by rotation tool spot bonding by tool rotation speed of 300rpm, probe length of 1.0mm tool and insert depth of 0.6mm.

	Upper plate	Lower plate
30s		
45s		
60s		

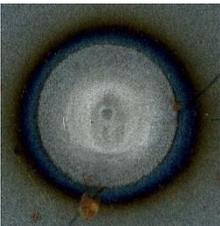
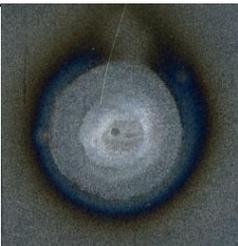
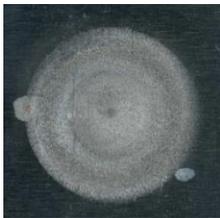
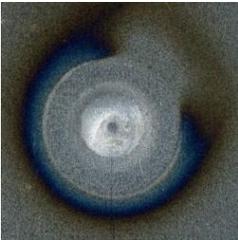
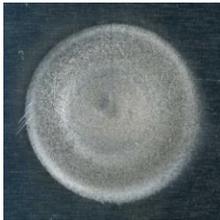
5mm

Fig.3-10 Continued.

	Upper plate	Lower plate
30s		
45s		
60s		

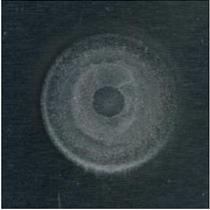
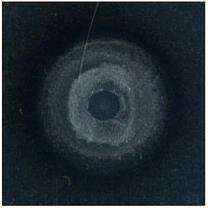
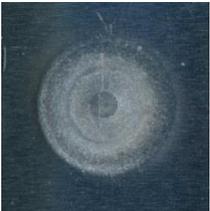
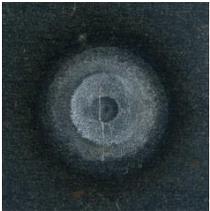
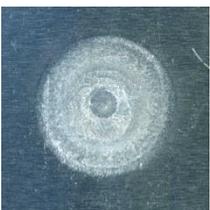
5mm

Fig.3-11 Macro photographs of fracture surfaces by rotation tool spot bonding by tool rotation speed of 300rpm, probe length of 1.3mm tool and insert depth of 0.4mm.

	Upper plate	Lower plate
30s		
45s		
60s		

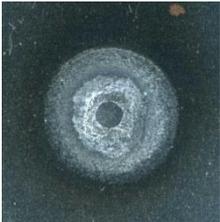
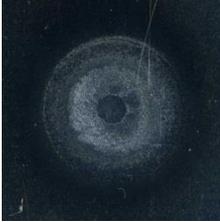
5mm

Fig.3-12 Continued.

	Upper plate	Lower plate
30s		
45s		
60s		

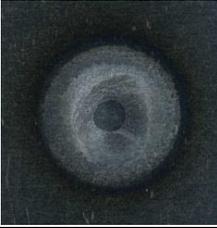
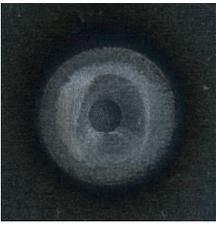
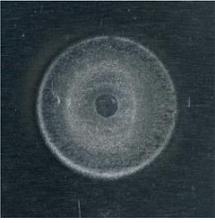
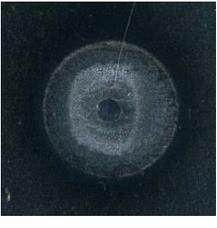
5mm

Fig.3-13 Macro photographs of fracture surfaces by rotation tool spot bonding by tool rotation speed of 200rpm, probe length of 1.0mm tool and insert depth of 0.4mm.

	Upper plate	Lower plate
30s		
45s		
60s		

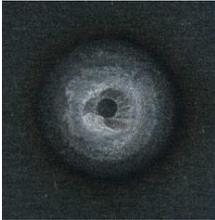
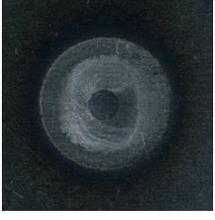
5mm

Fig.3-14 Continued.

	Upper plate	Lower plate
30s		
45s		
60s		

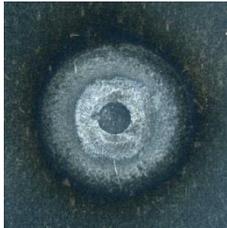
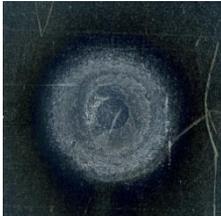
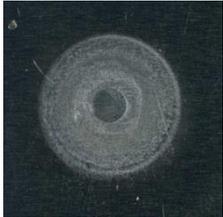
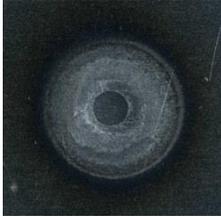
5mm

Fig.3-15 Macro photographs of fracture surfaces by rotation tool spot bonding by tool rotation speed of 200rpm, probe length of 1.0mm tool and insert depth of 0.6mm.

	Upper plate	Lower plate
30s		
45s		
60s		

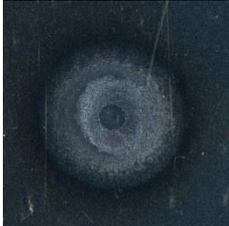
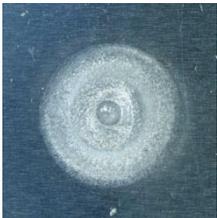
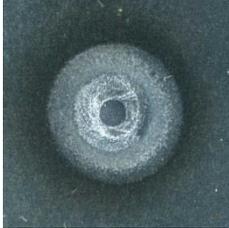
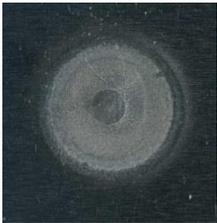
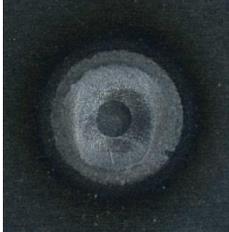
5mm

Fig.3-16 Continued.

	Upper plate	Lower plate
30s		
45s		
60s		

5mm

Fig.3-17 Macro photographs of fracture surfaces by rotation tool spot bonding by tool rotation speed of 200rpm, probe length of 1.3mm tool and insert depth of 0.4mm.

	Upper plate	Lower plate
30s		
45s		
60s		

5mm

Fig.3-18 Continued.

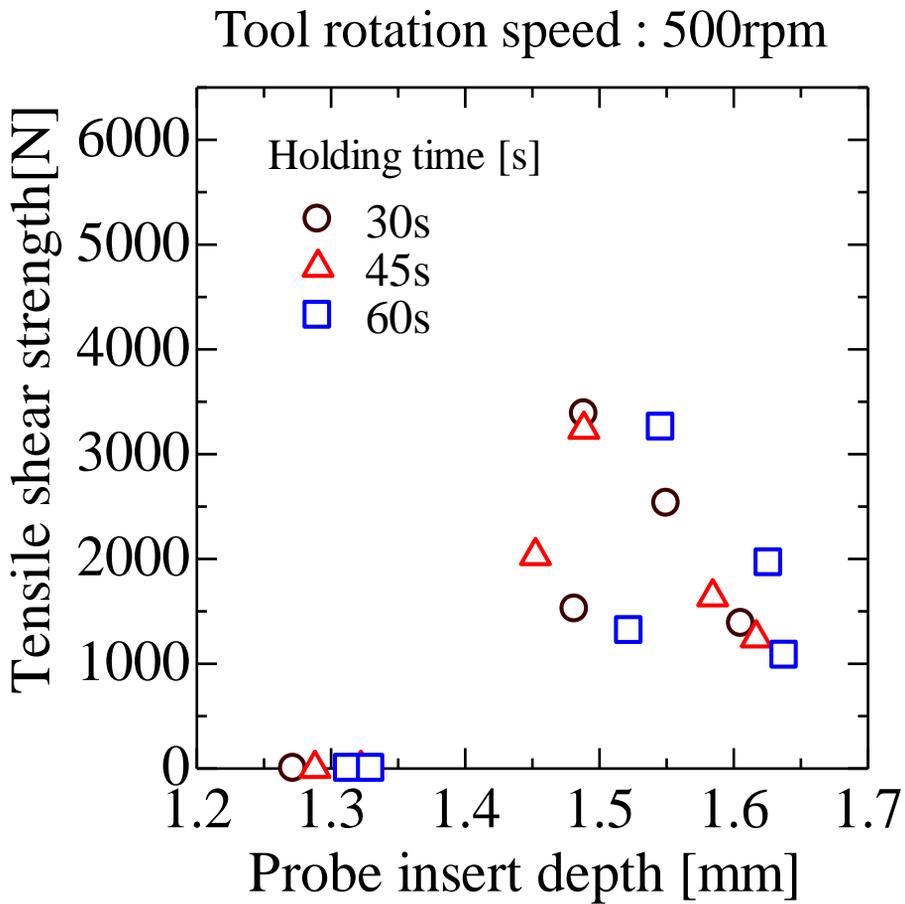


Fig.3-19 Relationship between probe insert depth and tensile shear strength by tool rotation speed of 500rpm.

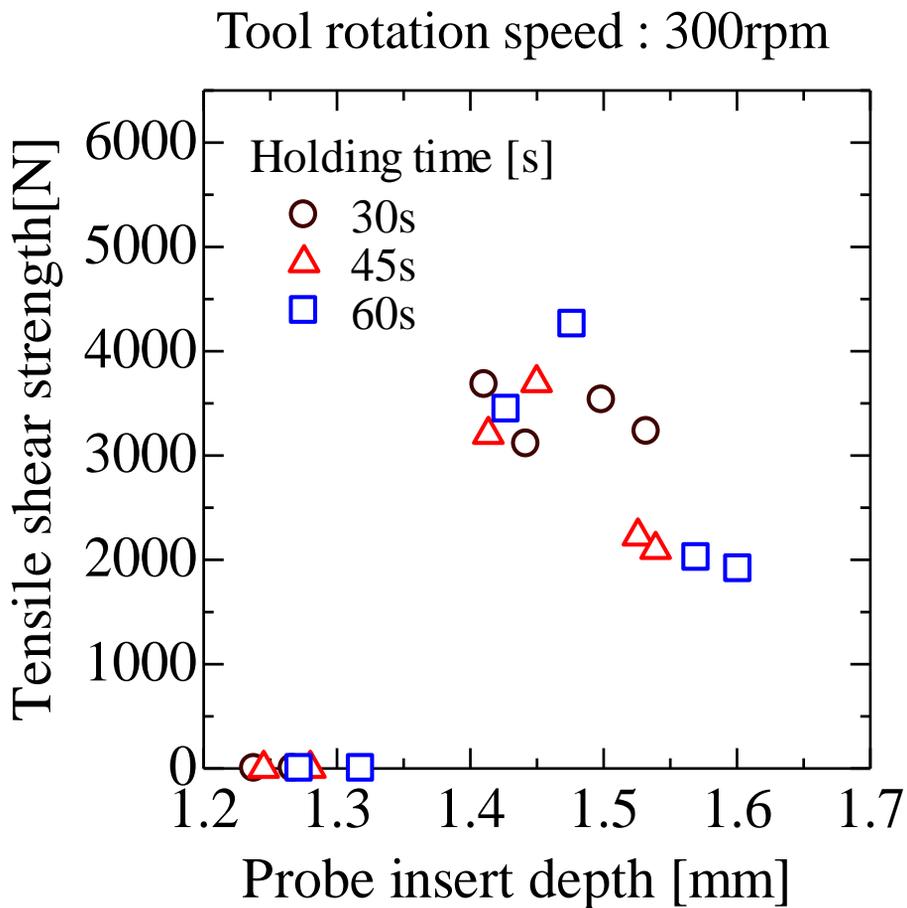


Fig.3-20 Relationship between probe insert depth and tensile shear strength by tool rotation speed of 300rpm.

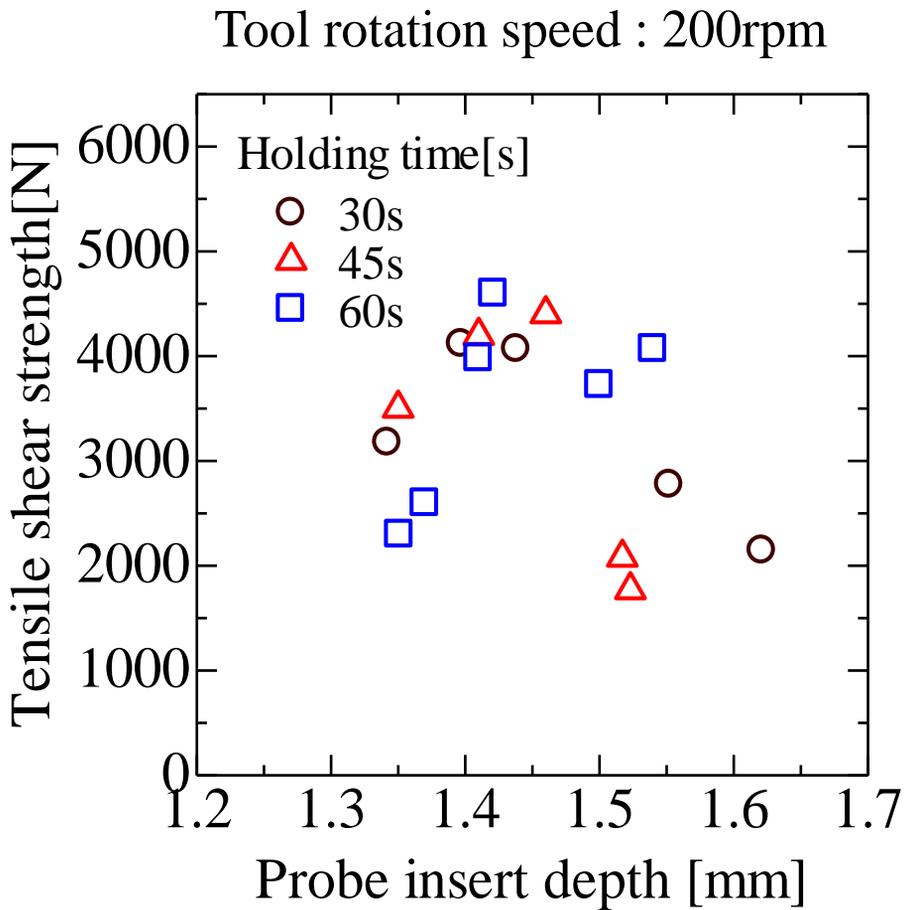
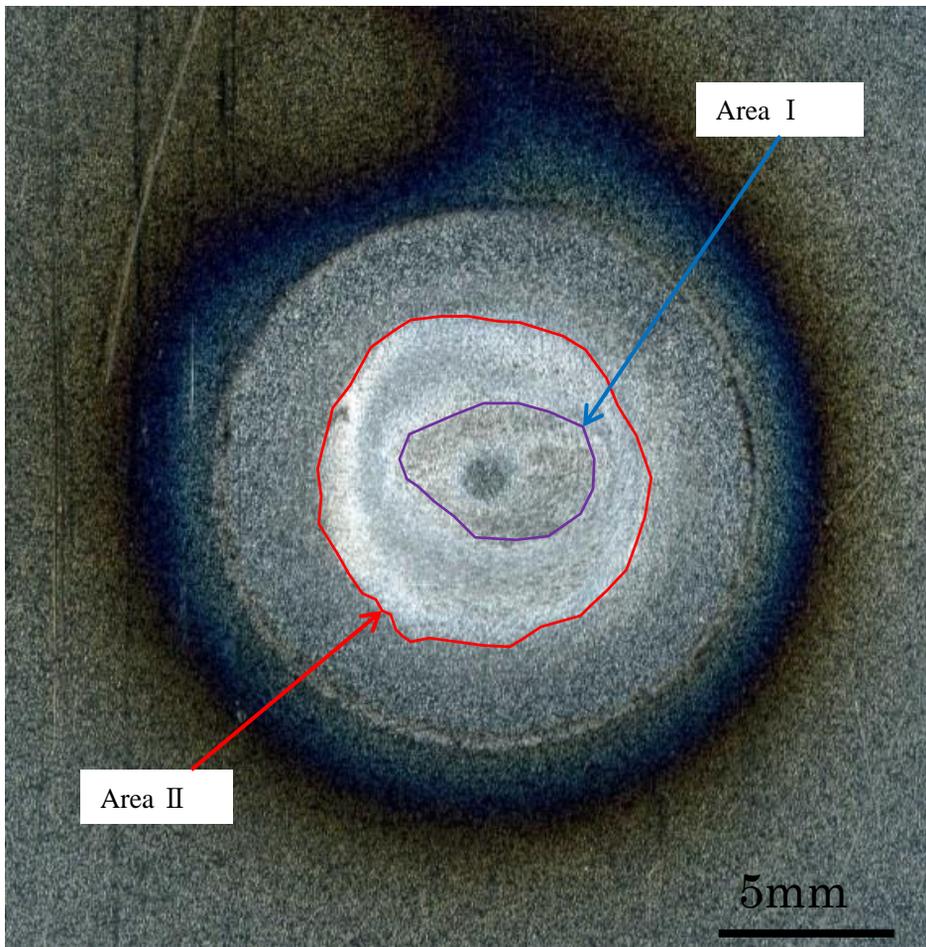
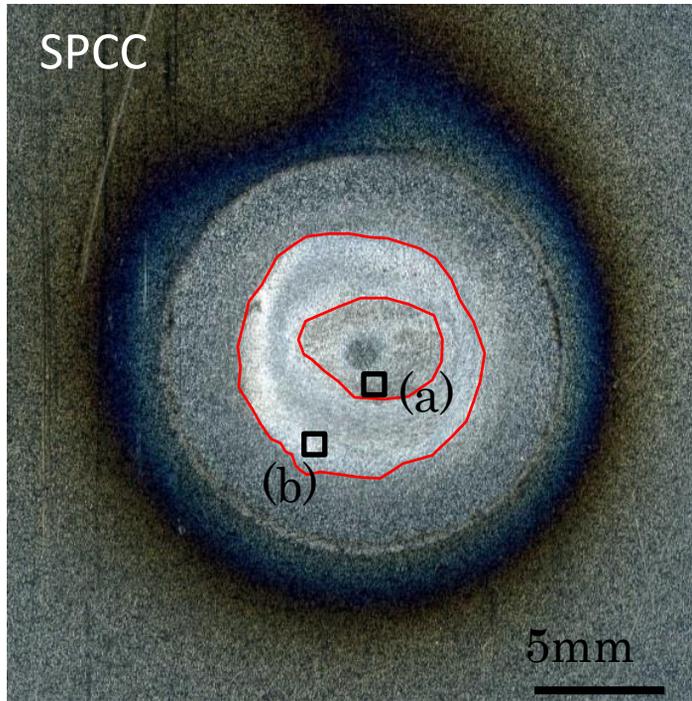


Fig.3-21 Relationship between probe insert depth and tensile shear strength by tool rotation speed of 200rpm.

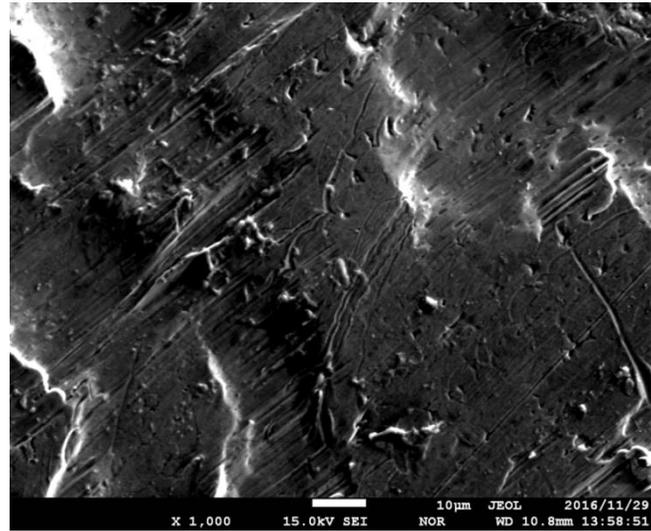


Tool rotation speed : 300rpm  
Tool insert depth : 0.6mm  
Probe length : 1.0mm  
Probe insert depth : 1.48mm  
Holding time : 60s

Fig.3-22 Two regions in interface fracture surface of lower plate after tensile test.



(a)Area I



(b)Area II

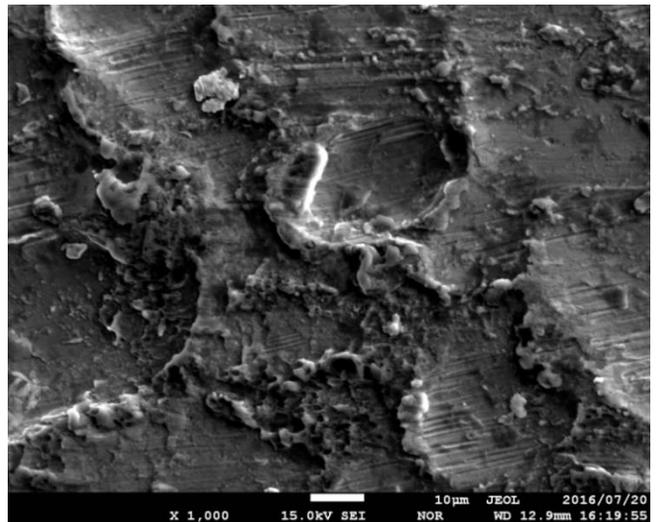
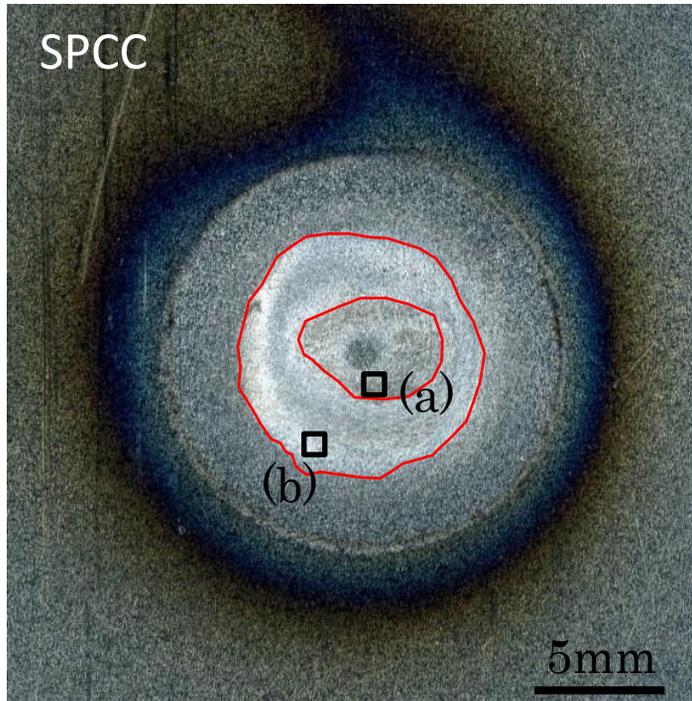
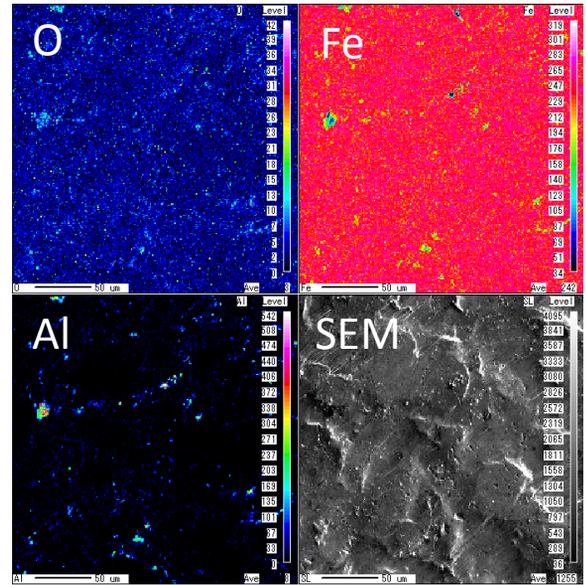


Fig.3-23 SEM micrographs of lower fracture surface by tool rotation speed of 300rpm, probe length of 1.0mm and tool hold time of 60s.



(a)Area I



(b)Area II

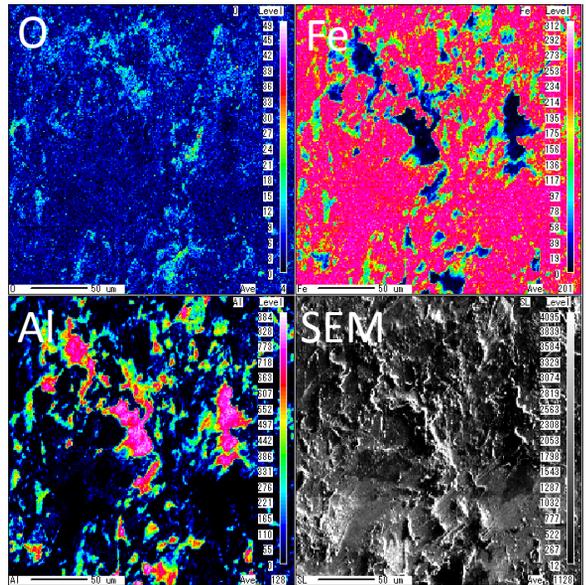
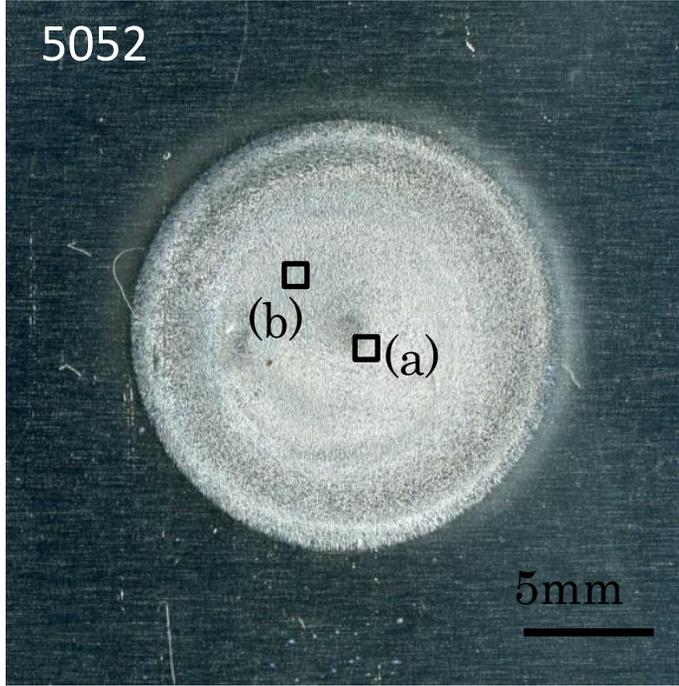
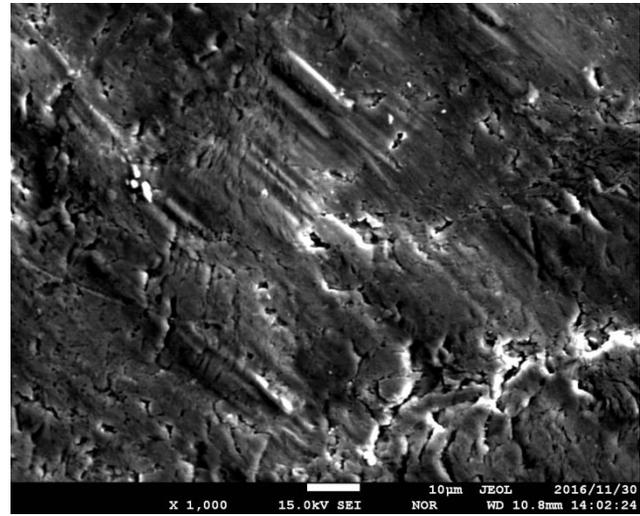


Fig.3-24 EPMA results of lower fracture surface by tool rotation speed of 300rpm, probe length of 1.0mm and tool hold time of 60s.



(a)Area I



(b)Area II

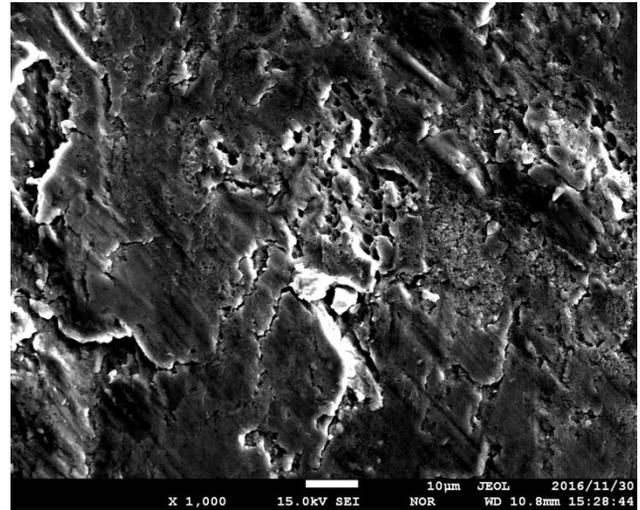
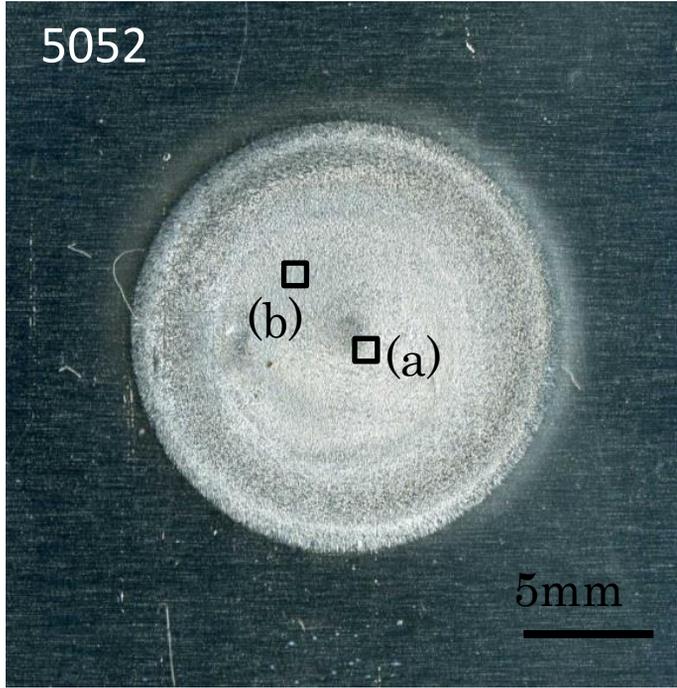
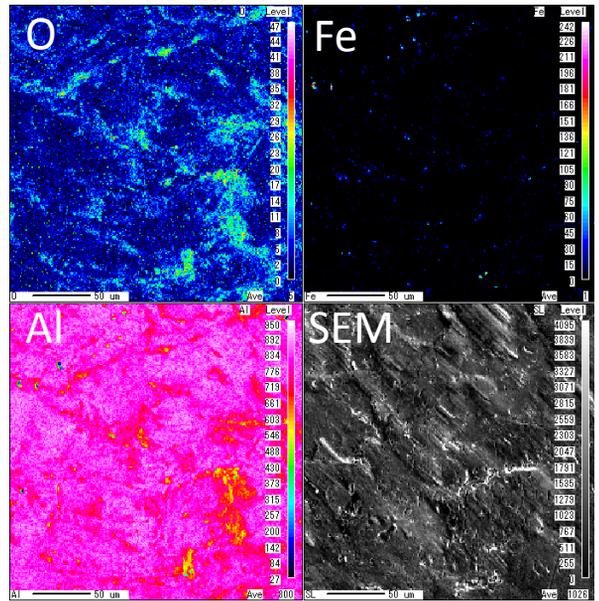


Fig.3-25 SEM micrographs of upper fracture surface by tool rotation speed of 300rpm, probe length of 1.0mm and tool hold time of 60s.



(a)Area I



(b)Area II

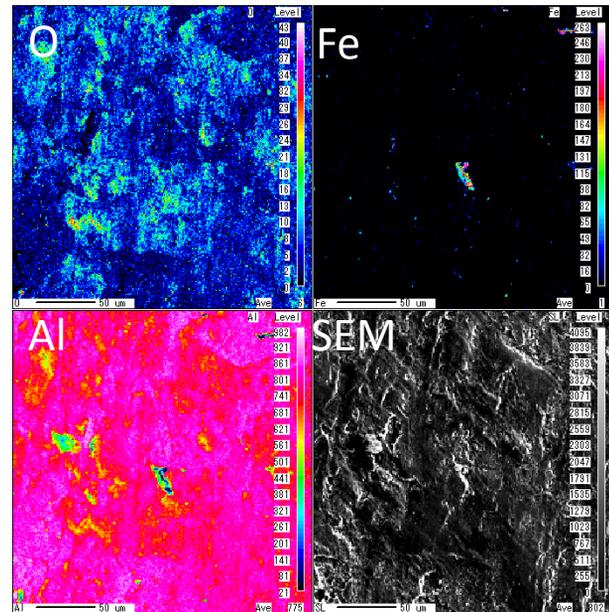


Fig.3-26 EPMA results of upper fracture surface by tool rotation speed of 300rpm, probe length of 1.0mm and tool hold time of 60s.

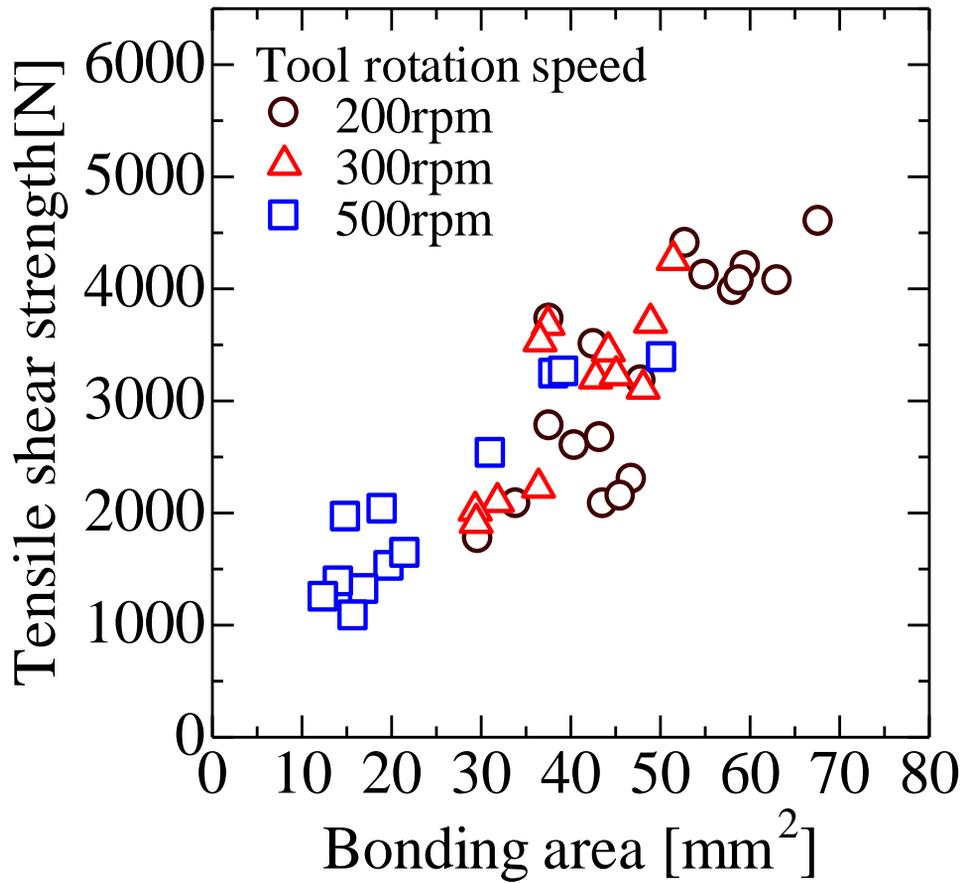


Fig.3-27 Relationship between bonding area and tensile shear strength .

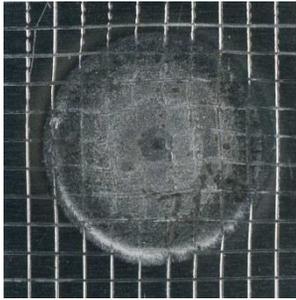
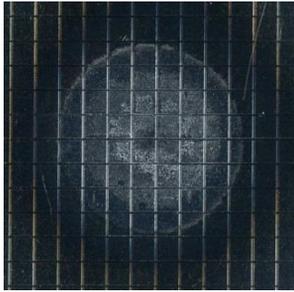
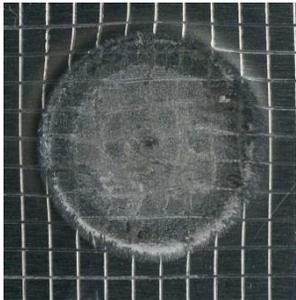
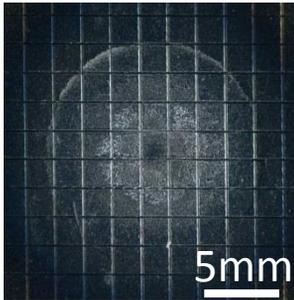
	Upper plate	Lower plate	Note
30s			Probe insert depth:1.46mm Tensile shear strength:2530N
60s			Probe insert depth:1.48mm Tensile shear strength: 2341N

Fig.3-28 Macro photograph of grid point of fracture surfaces by rotation tool spot bonding by tool rotation speed of 500rpm, probe length of 1.0mm, tool insert depth 0.6mm.

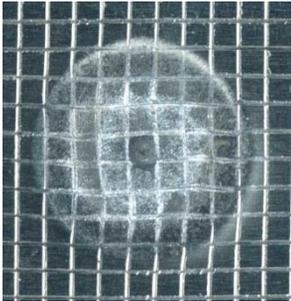
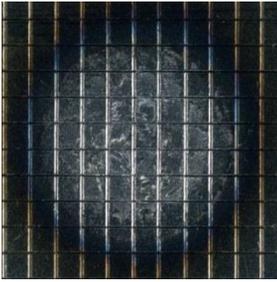
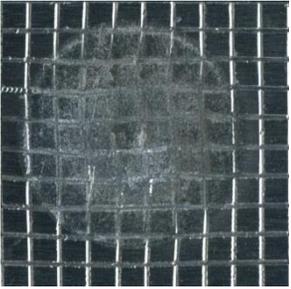
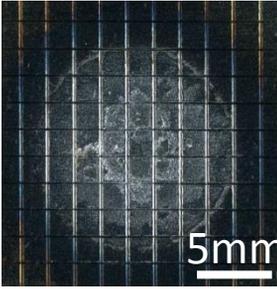
	Upper plate	Lower plate	Note
30s			Probe insert depth:1.41mm Tensile shear strength:3211N
60s			Probe insert depth:1.47mm Tensile shear strength : 3403N

Fig.3-29 Macro photograph of grid point of fracture surfaces by rotation tool spot bonding by tool rotation speed of 300rpm, probe length of 1.0mm, tool insert depth 0.6mm.

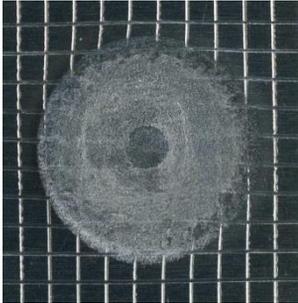
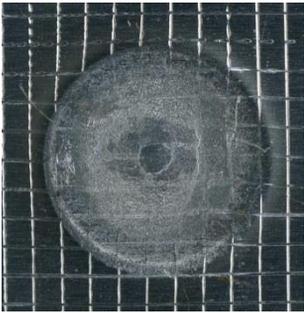
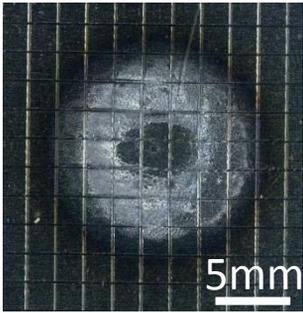
	Upper plate	Lower plate	Note
30s			Probe insert depth:1.42mm Tensile shear strength:3628N
60s			Probe insert depth:1.43mm Tensile shear strength : 3821N

Fig.3-30 Macro photograph of grid point of fracture surfaces by rotation tool spot bonding by tool rotation speed of 200rpm, probe length of 1.0mm, tool insert depth 0.6mm.

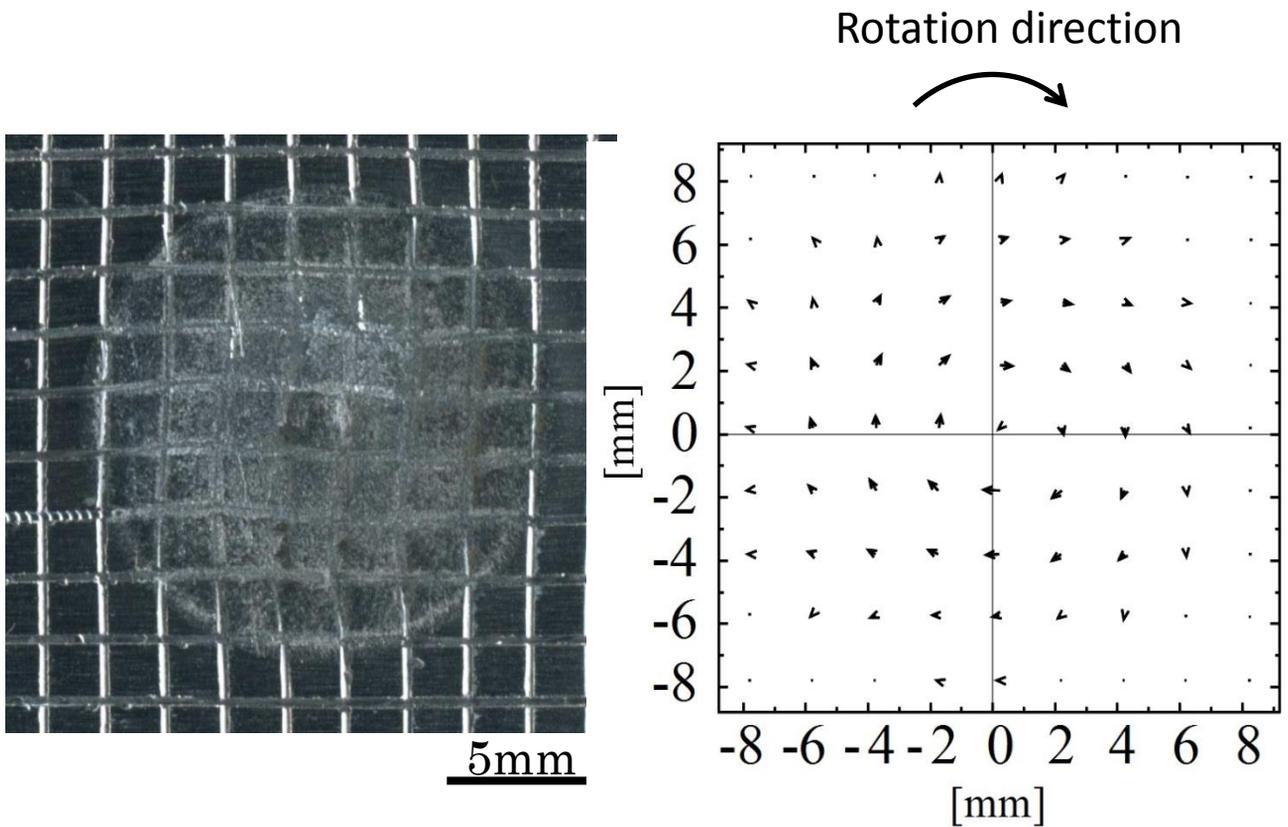
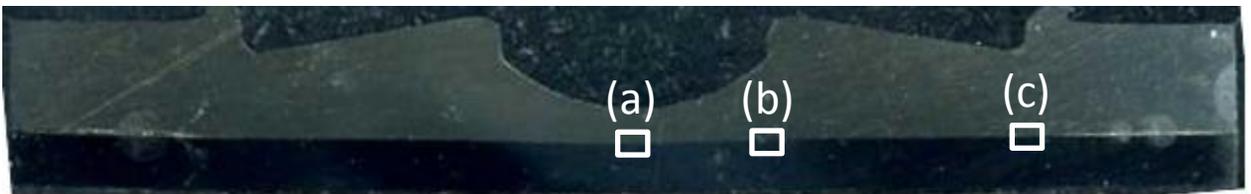


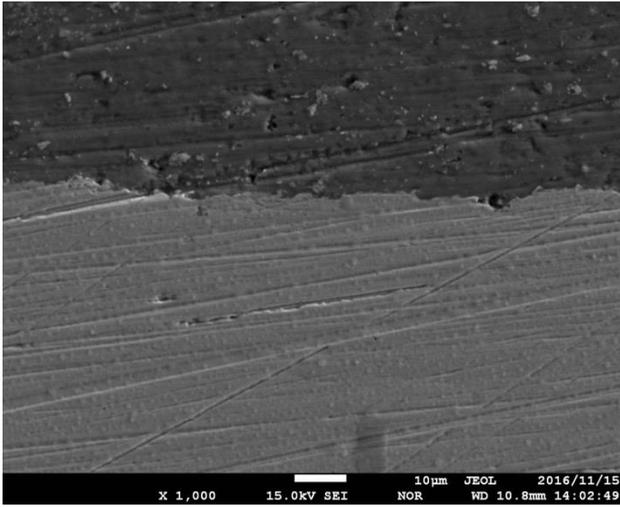
Fig.3-31 Macro photograph and vector diagram showing amount of movement of grid point of fracture surfaces by tool rotation speed of 300rpm, probe length of 1.0mm, holding time of 60s.



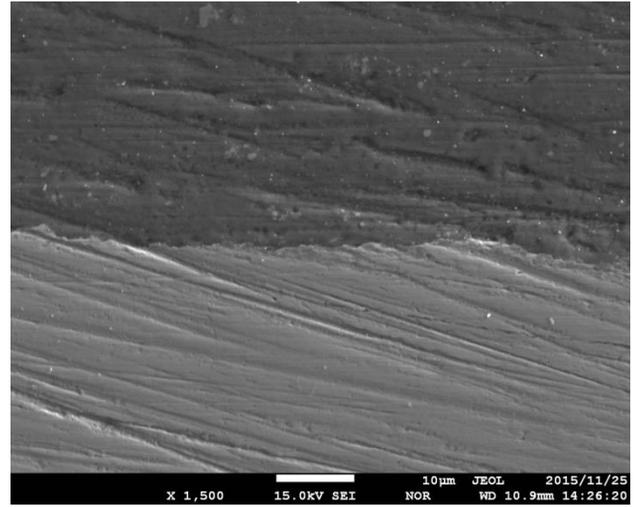
Tool rotation speed : 200rpm  
Tool insert depth : 0.6mm  
Probe length : 1.0mm  
Probe insert depth : 1.49mm  
Holding time : 60s

Fig.3-32 Macro photograph of cross-sectional joint.

(a) Under the probe



(b) Outer periphery of the probe



(c) Outer periphery of the shoulder

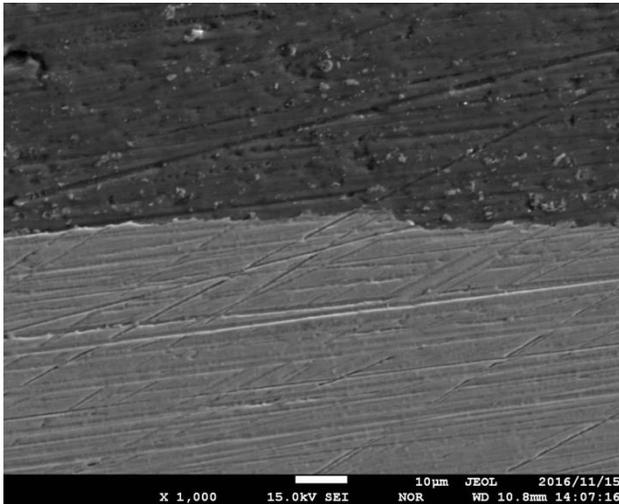
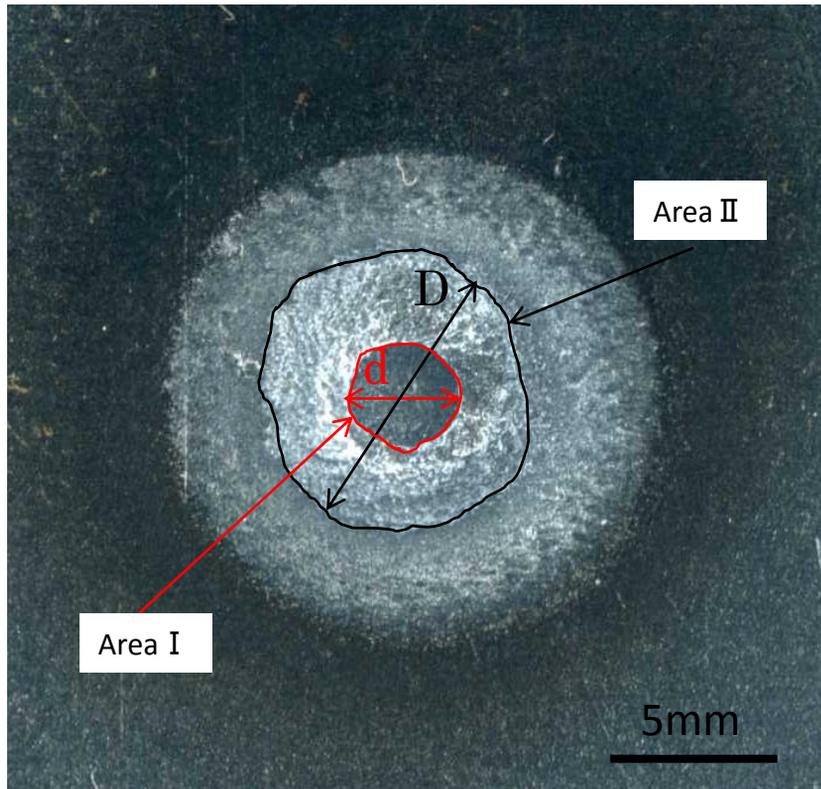


Fig.3-33 SEM micrographs of cross-sectional joint by tool rotation speed of 200rpm, probe length of 1.0mm and tool hold time of 60s.





Tool rotation speed : 200rpm  
Tool insert depth : 0.6mm  
Probe length : 1.0mm  
Probe insert depth : 1.40mm  
Holding time : 30s

Fig.4-1 Two diameter in interface fracture surface of lower plate after tensile test.

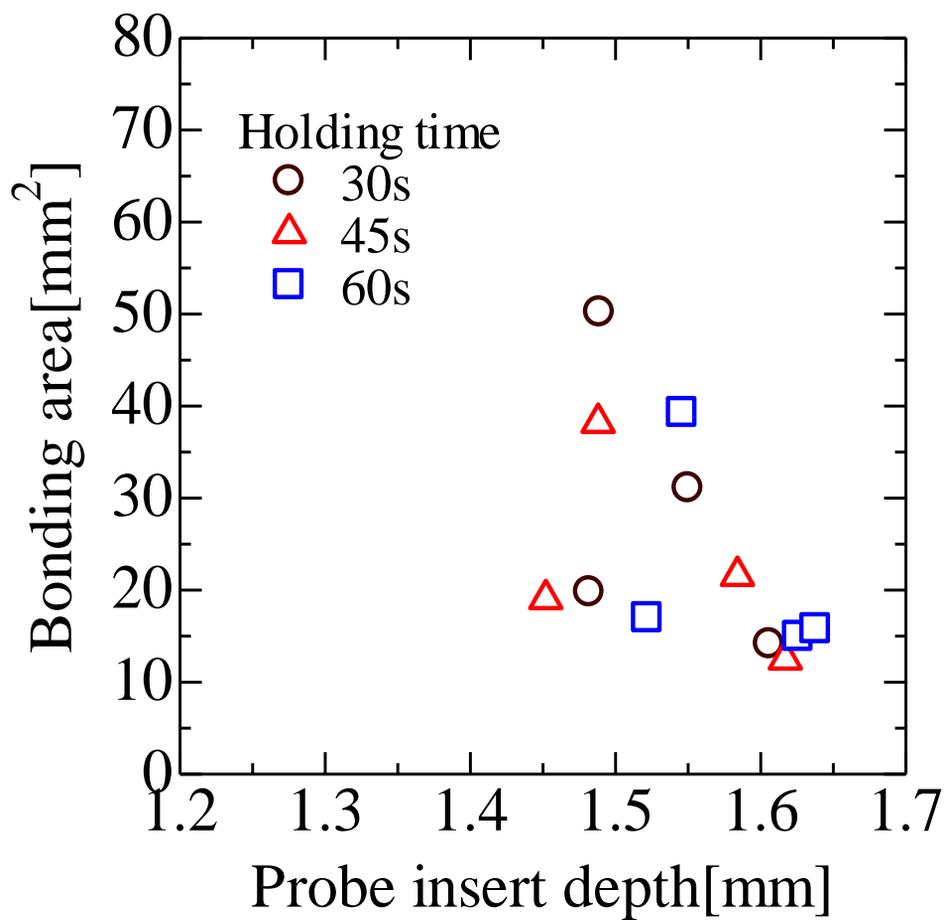


Fig.4-2 Relationship between probe insert depth and bonding area by tool rotation speed 500rpm.

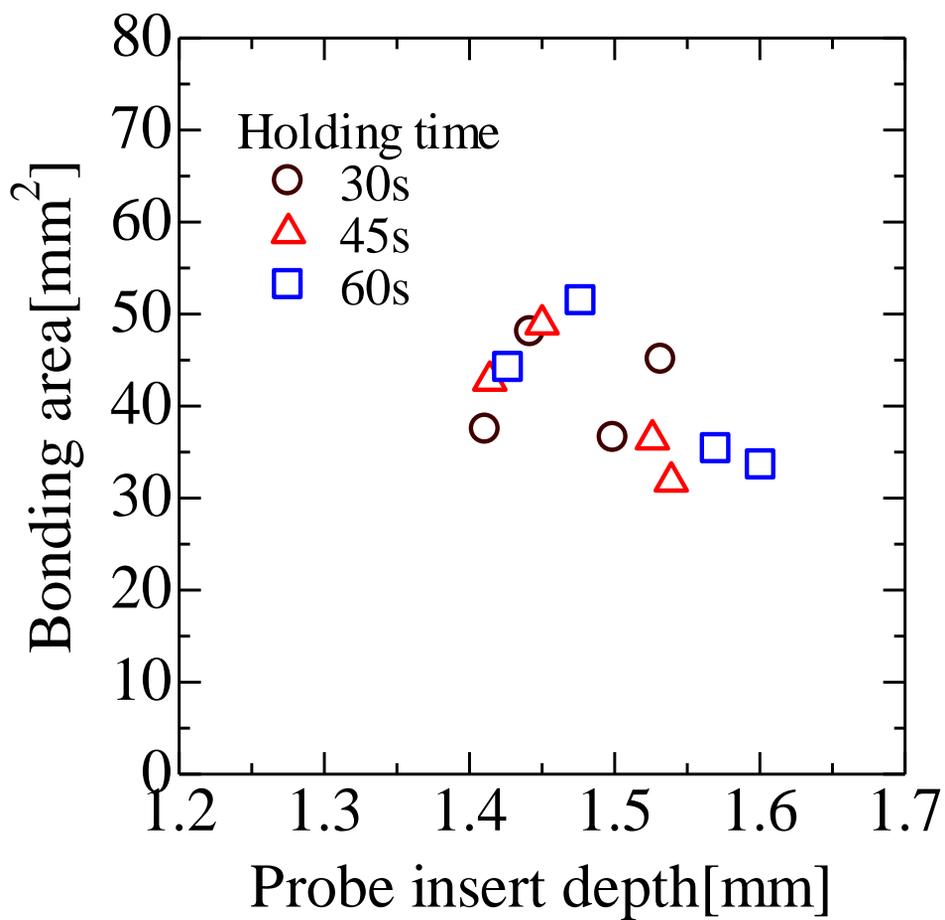


Fig.4-3 Relationship between probe insert depth and bonding area by tool rotation speed 300rpm .

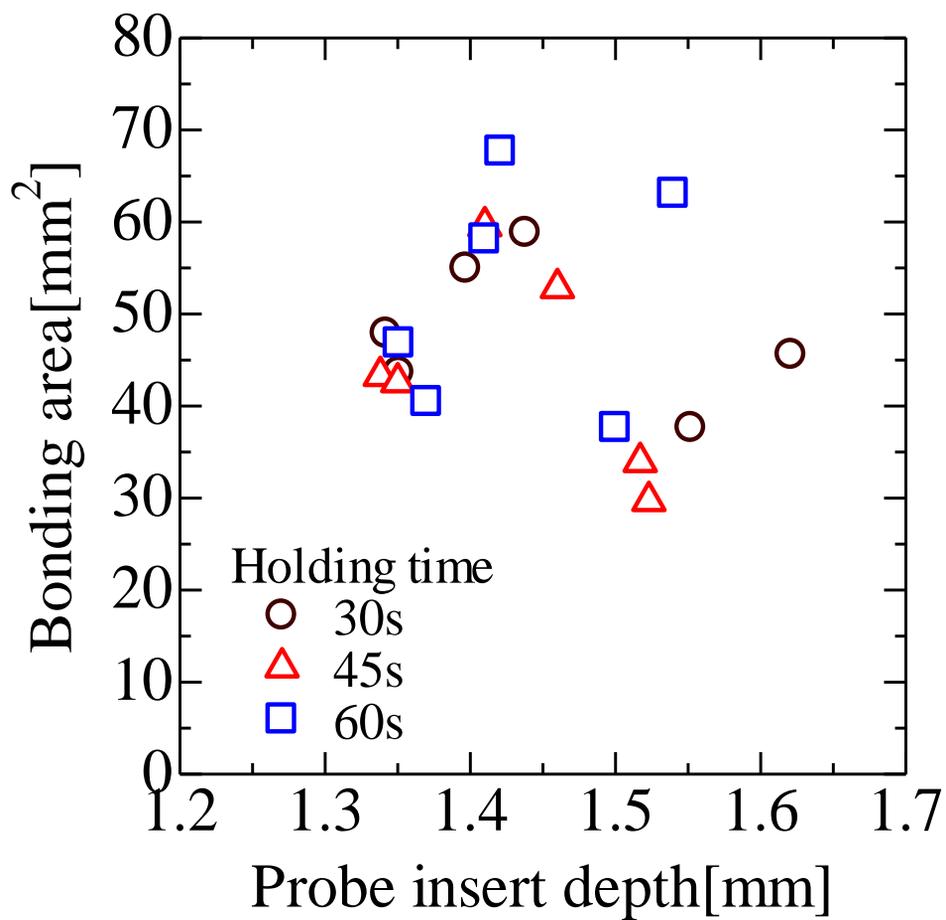


Fig.4-4 Relationship between probe insert depth and bonding area by tool rotation speed 200rpm .

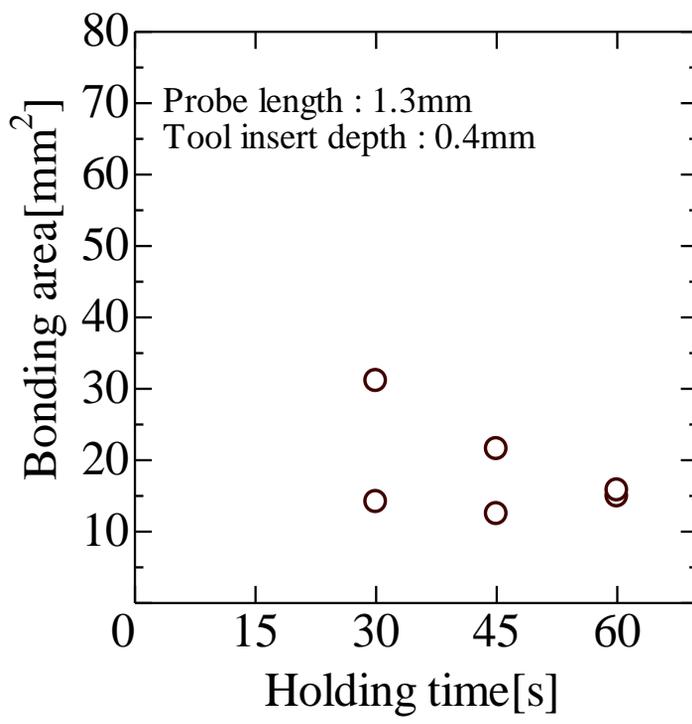
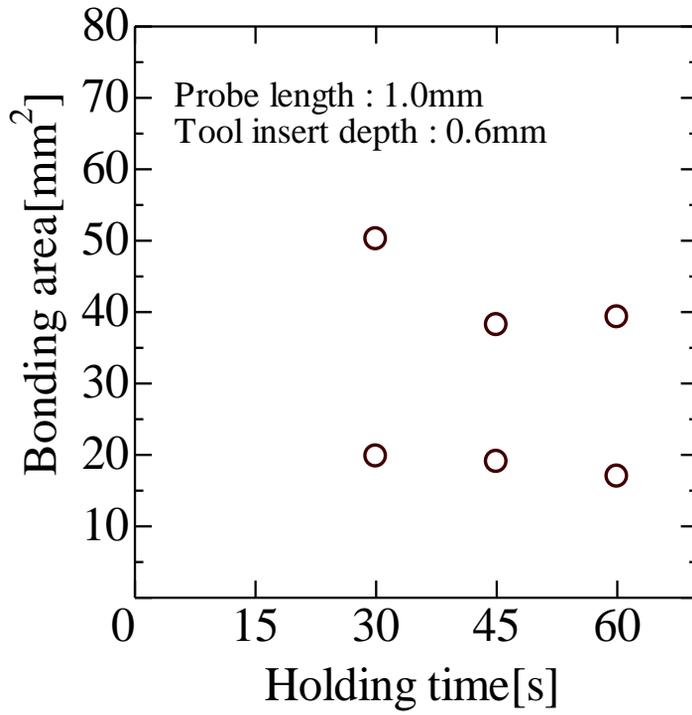


Fig.4-5 Relationship between holding time and bonding area by tool rotation speed 500rpm.

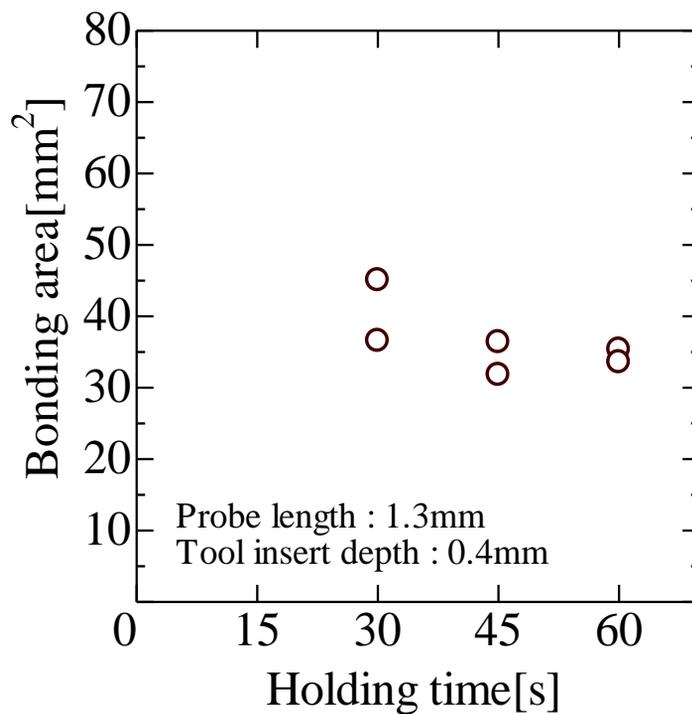
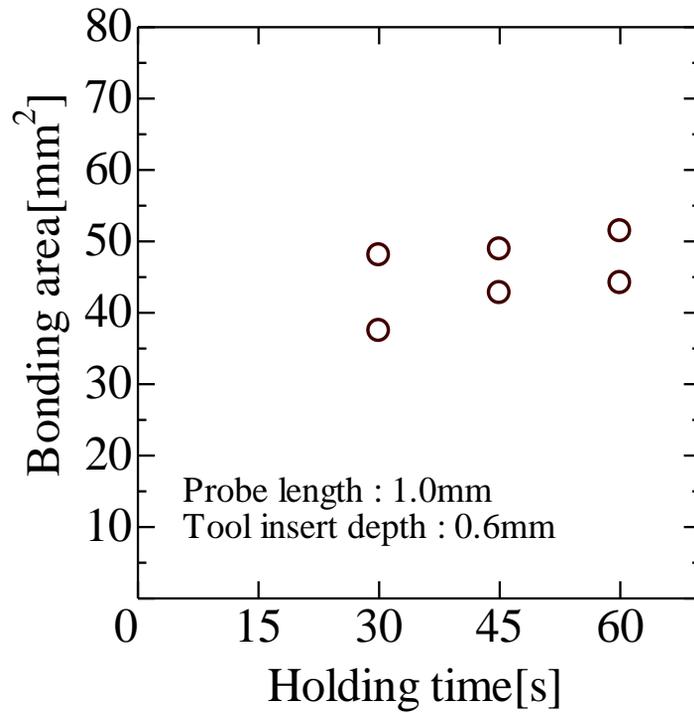


Fig.4-6 Relationship between holding time and bonding area by tool rotation speed 300rpm .

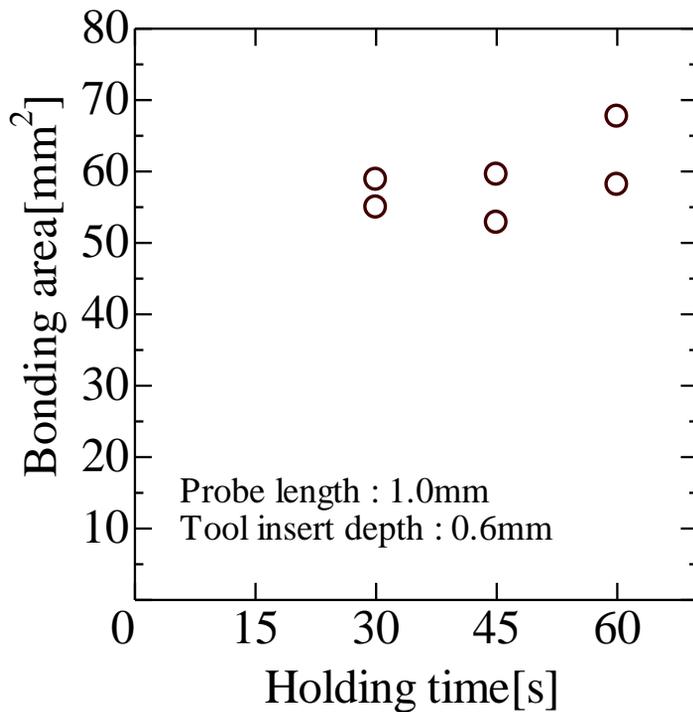
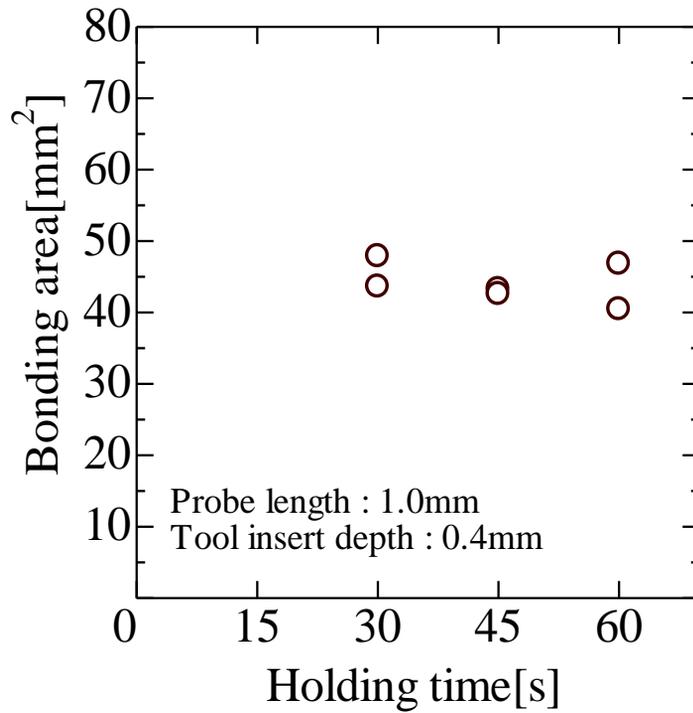


Fig.4-7 Relationship between holding time and bonding area by tool rotation speed 200rpm, probe length 1.0mm.

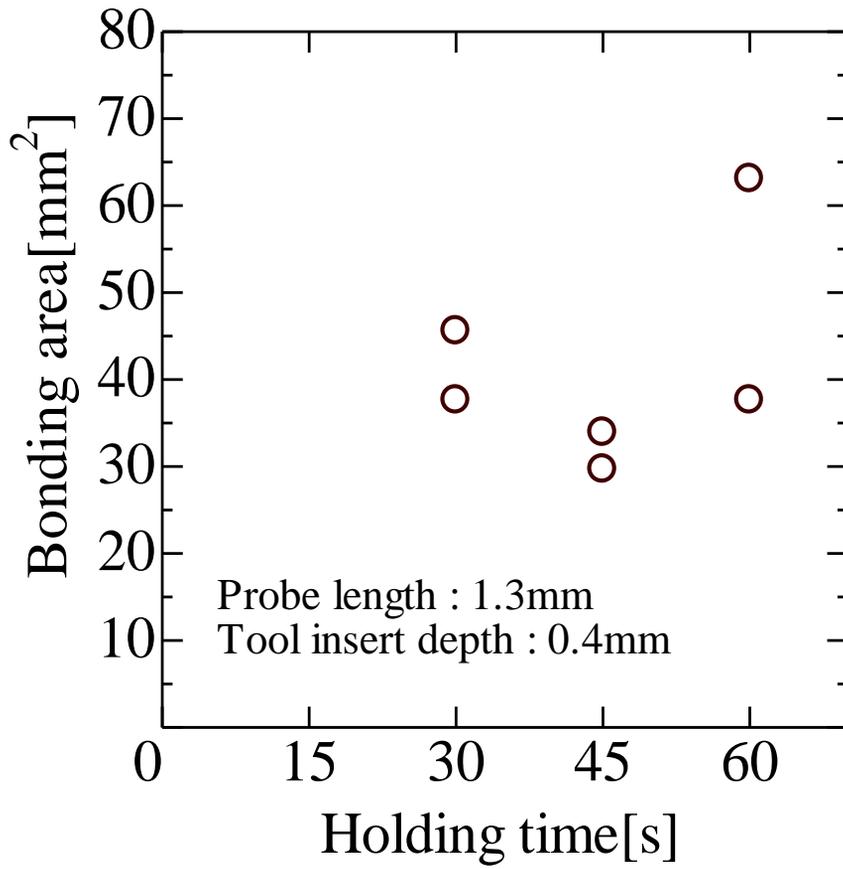


Fig.4-8 Relationship between holding time and bonding area by tool rotation speed 200rpm, probe length 1.3mm.

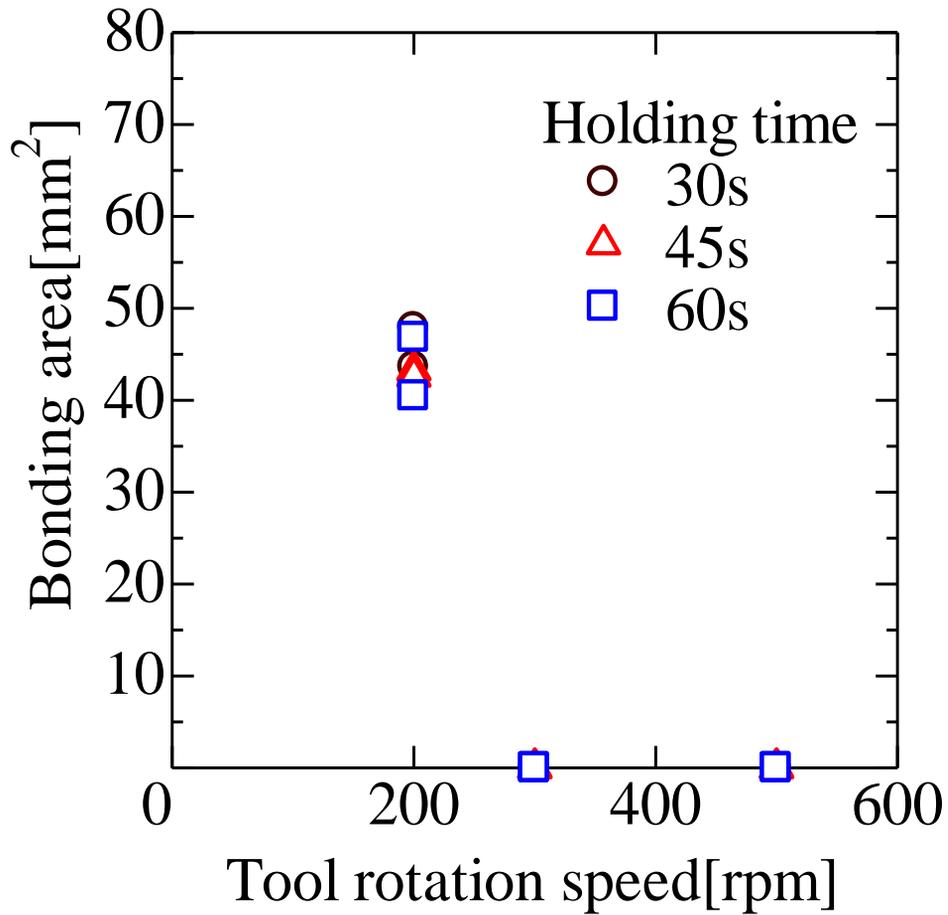


Fig.4-9 Relationship between tool rotation speed and bonding area by probe length 1.0mm, tool insert depth 0.4mm.

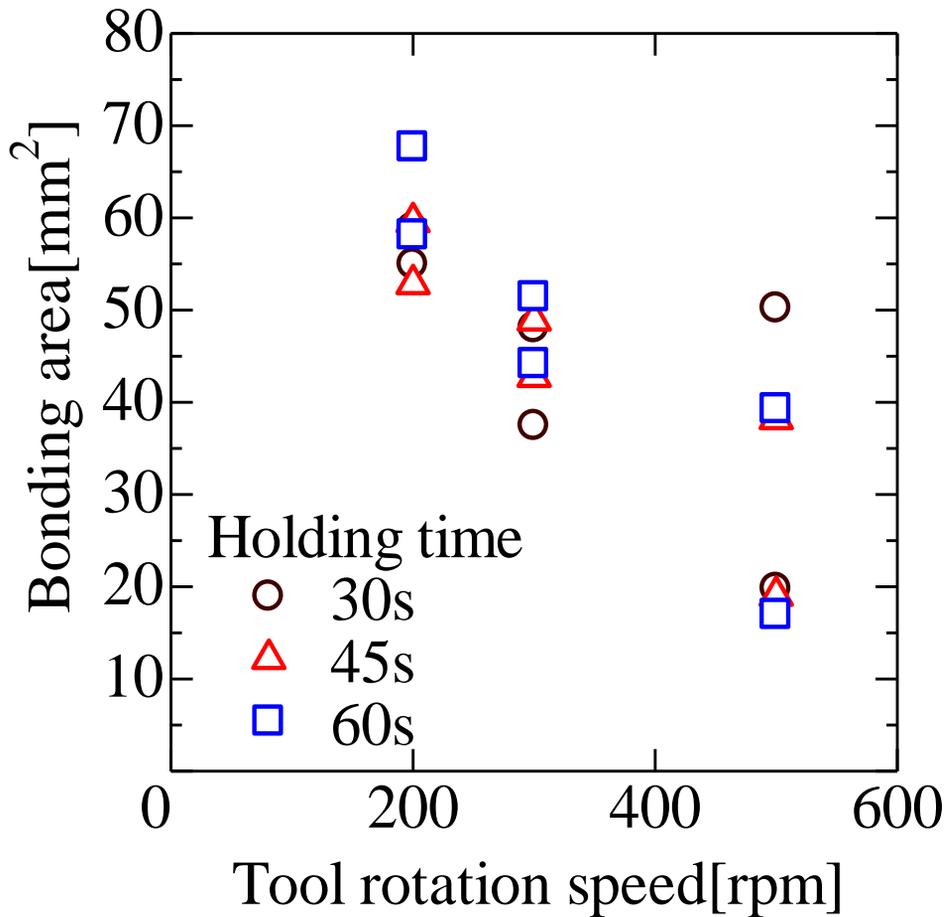


Fig.4-10 Relationship between tool rotation speed and bonding area by probe length 1.0mm, tool insert depth 0.6mm.

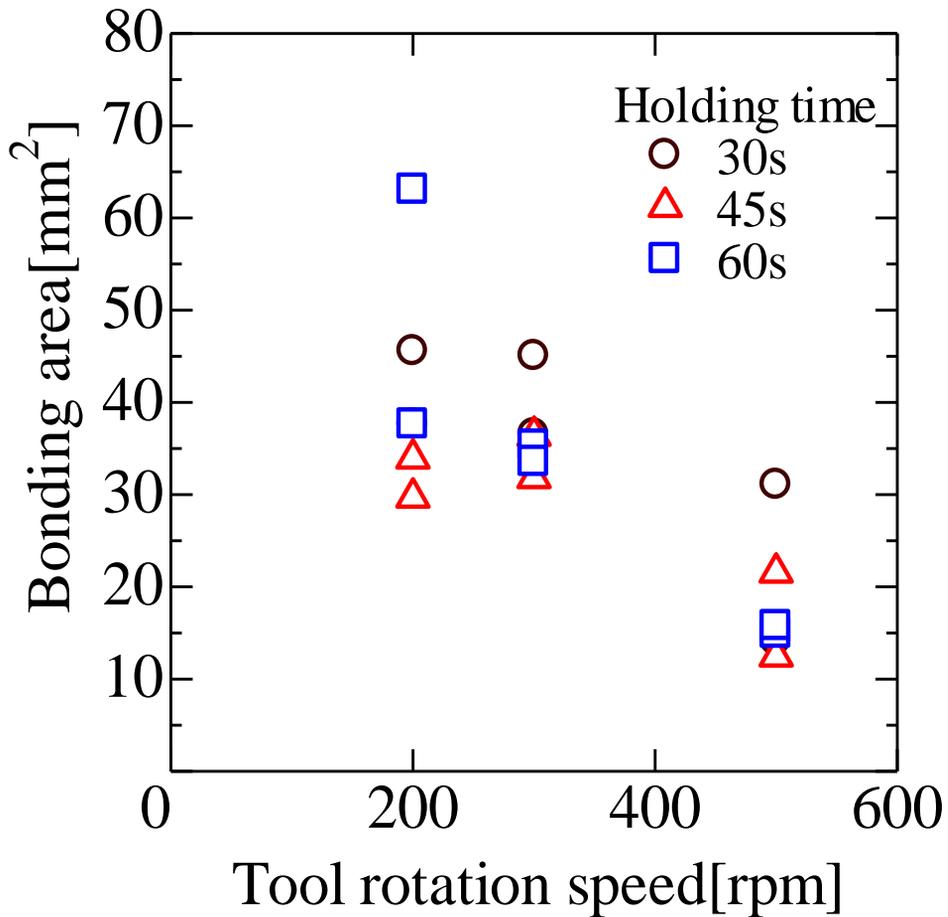


Fig.4-11 Relationship between tool rotation speed and bonding area by probe length 1.3mm, tool insert depth 0.4mm.

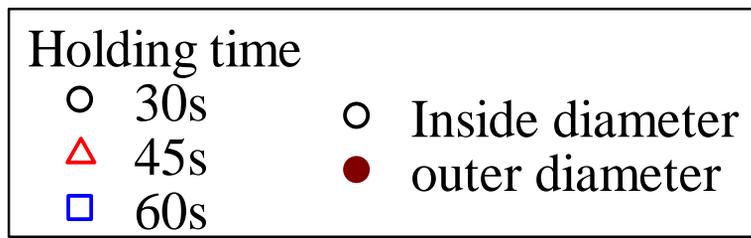
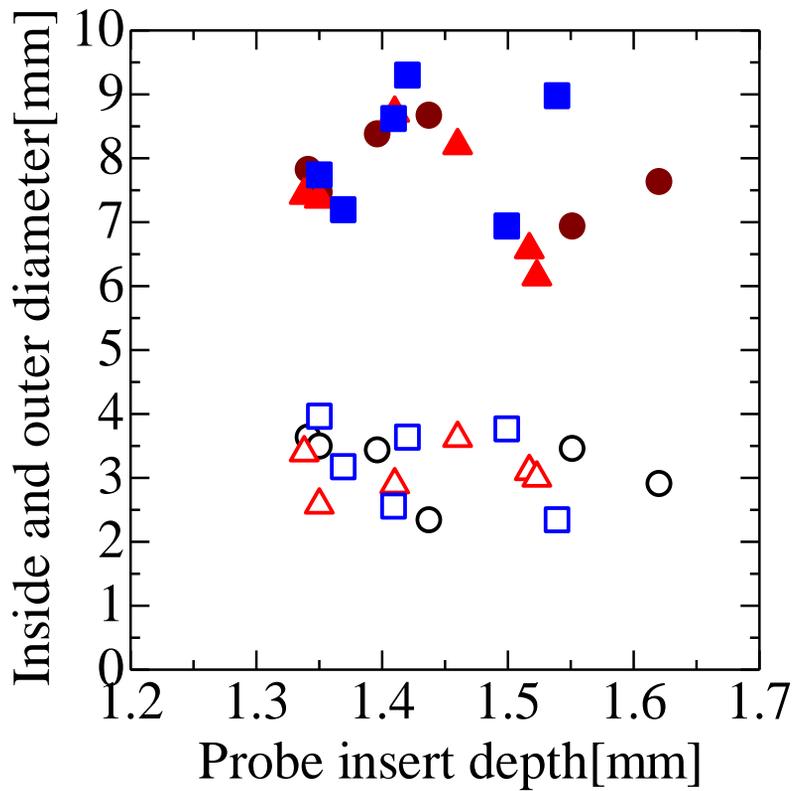


Fig.4-12 Relationship between probe insert depth and inside and outer diameter by tool rotation speed 200rpm.

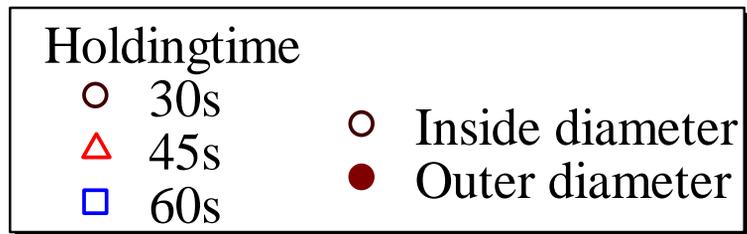
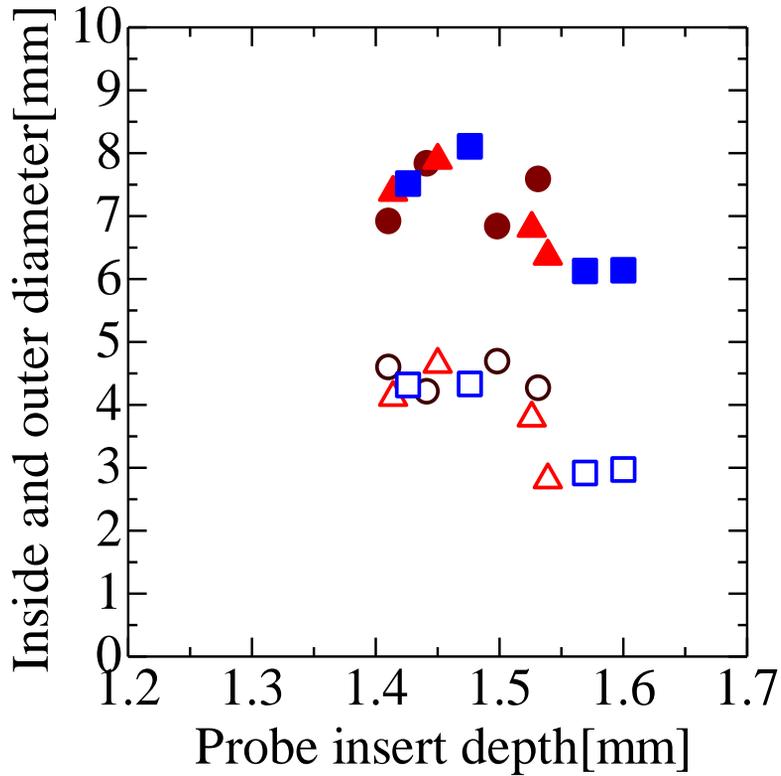


Fig.4-13 Relationship between probe insert depth and inside and outer diameter by tool rotation speed 300rpm.

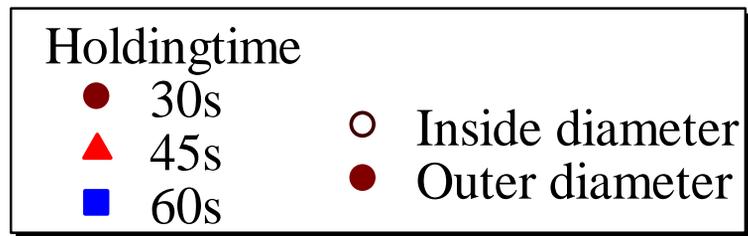
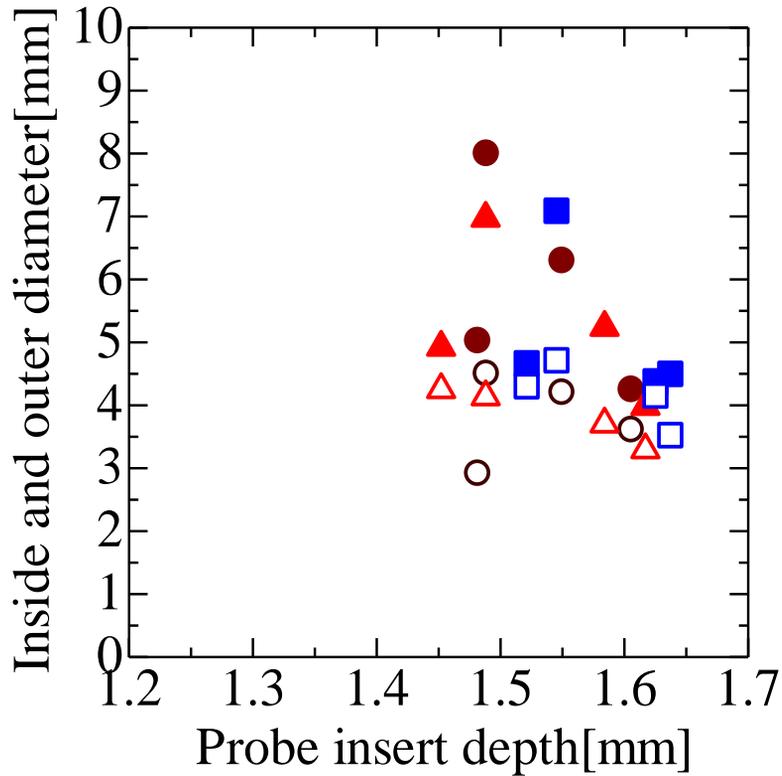


Fig.4-14 Relationship between probe insert depth and inside and outer diameter by tool rotation speed 500rpm.

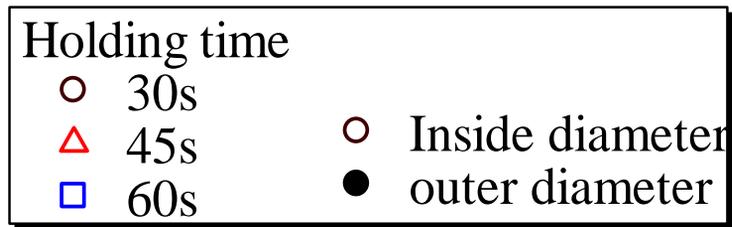
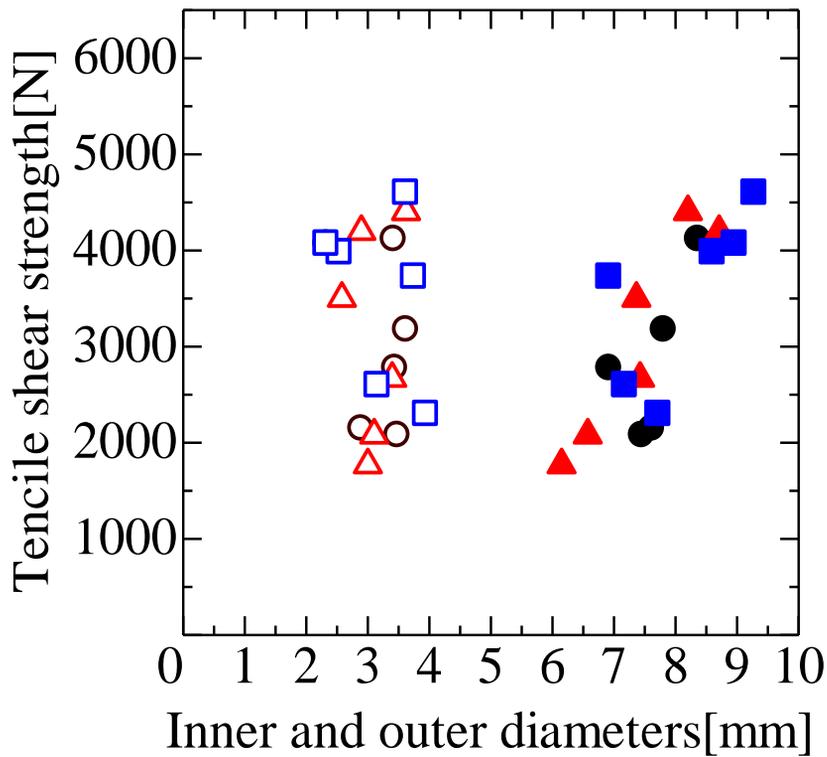


Fig.4-15 Relationship between inside and outer diameter and tensile shear strength by tool rotation speed 200rpm.

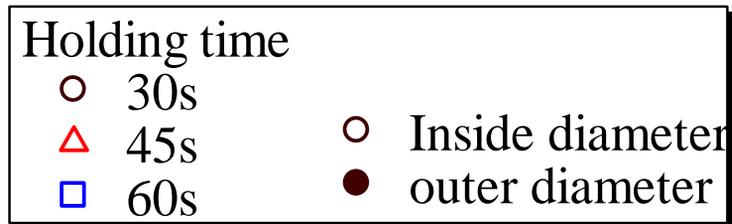
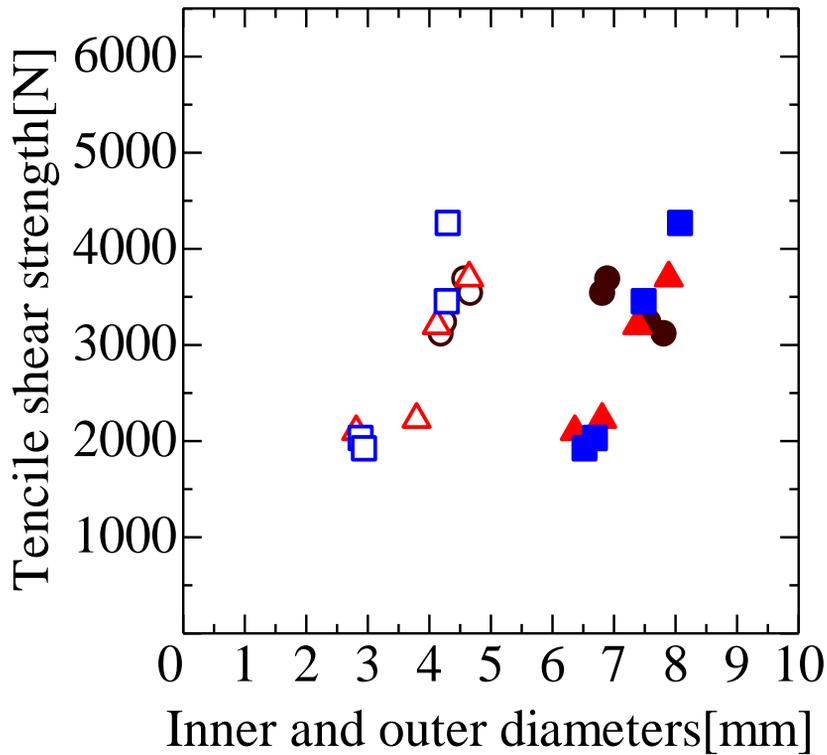


Fig.4-16 Relationship between inside and outer diameter and tensile shear strength by tool rotation speed 300rpm.

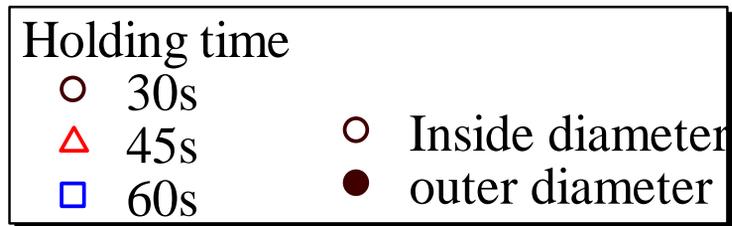
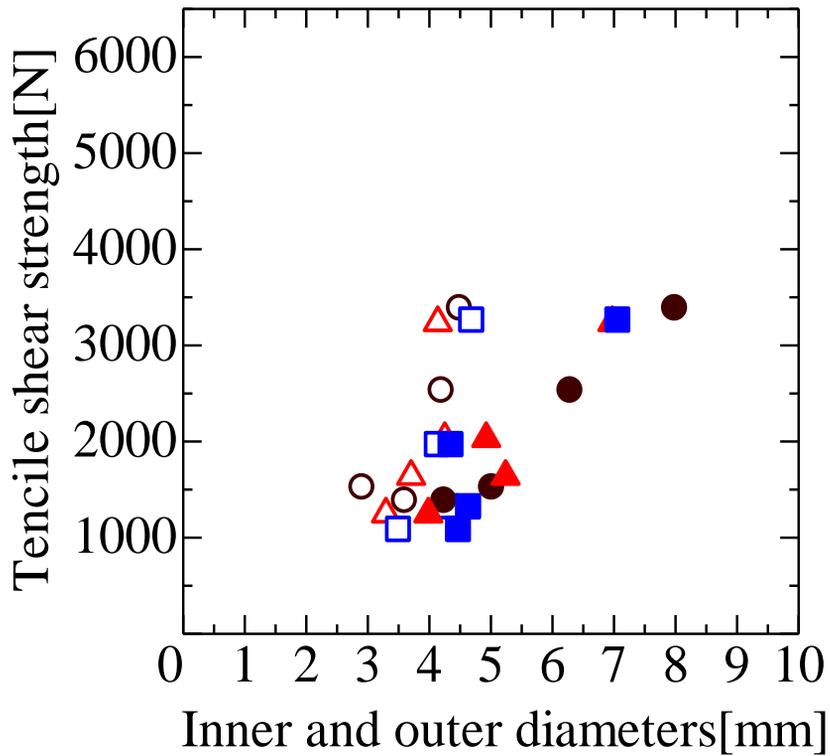


Fig.4-17 Relationship between inside and outer diameter and tensile shear strength by tool rotation speed 500rpm.

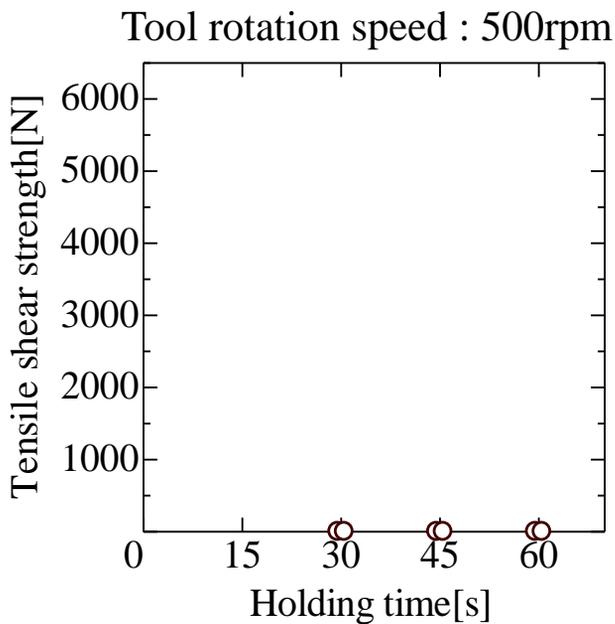
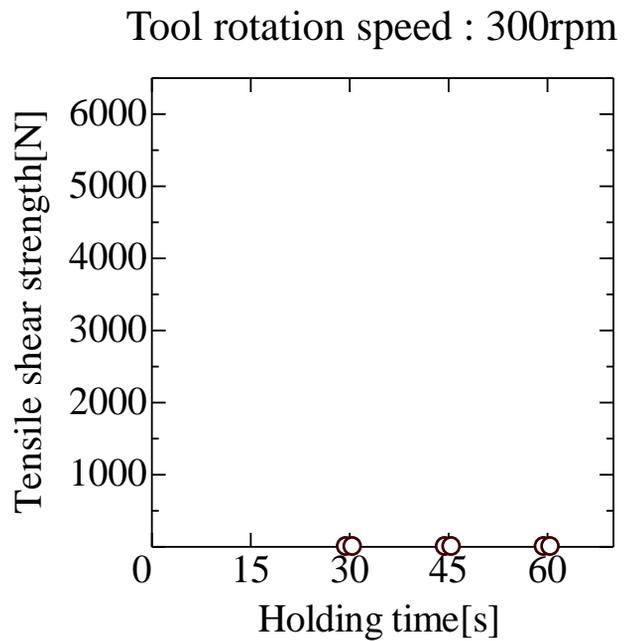
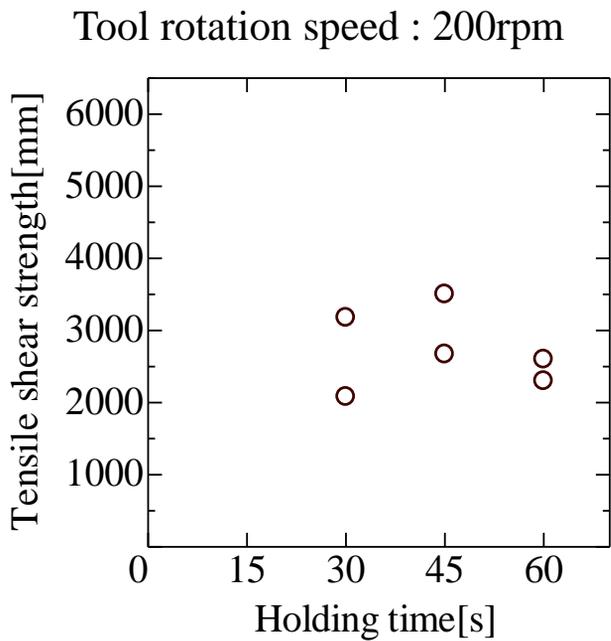
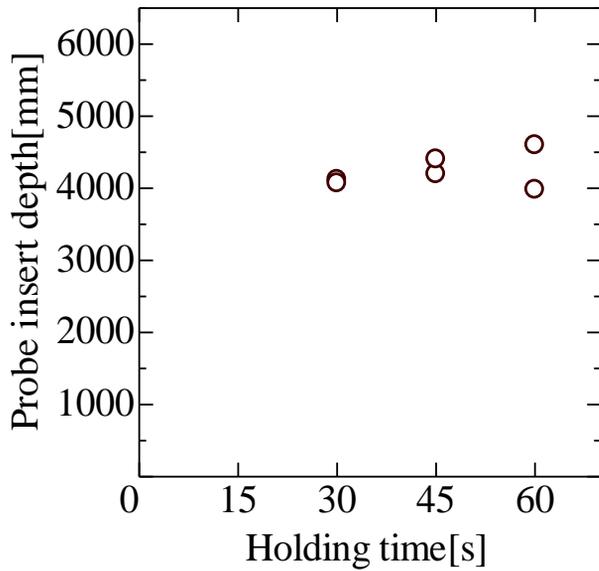
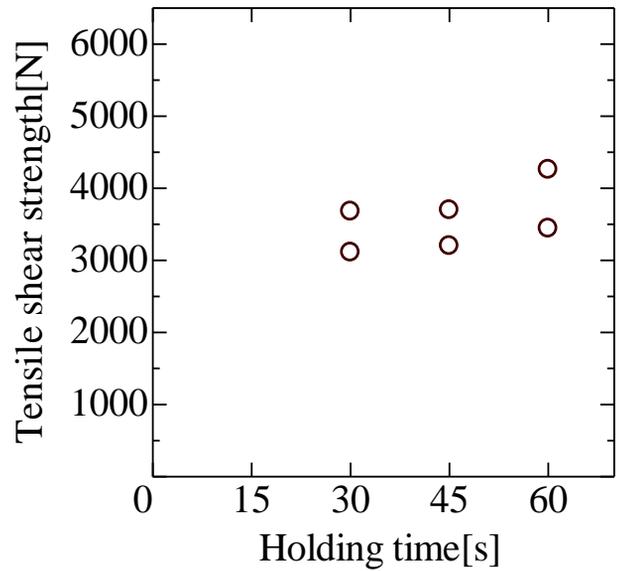


Fig.4-18 Relationship between holding time and tensile shear strength by probe length 1.0mm, tool insert depth 0.4mm.

Tool rotation speed : 200rpm



Tool rotation speed : 300rpm



Tool rotation speed : 500rpm

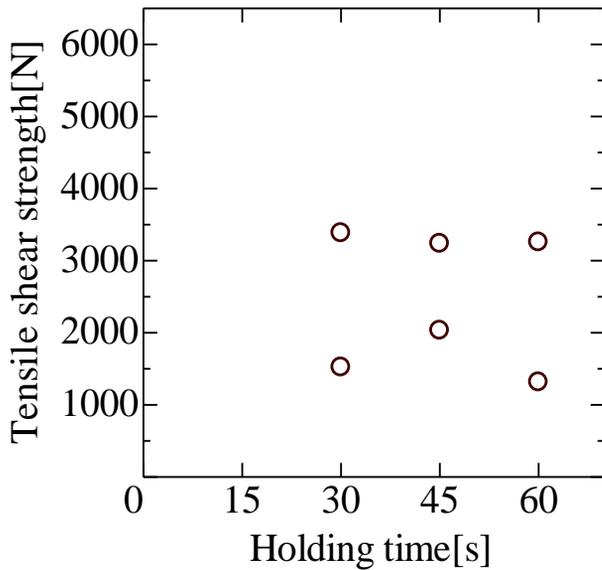


Fig.4-19 Relationship between holding time and tensile shear strength by probe length 1.0mm, tool insert depth 0.6mm.

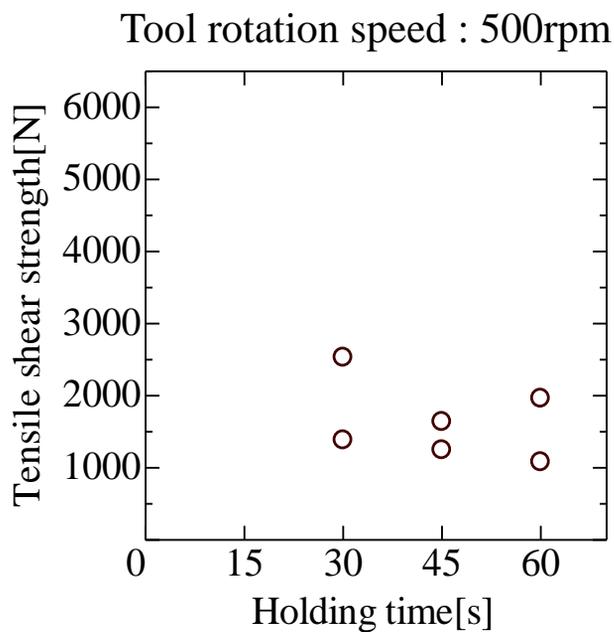
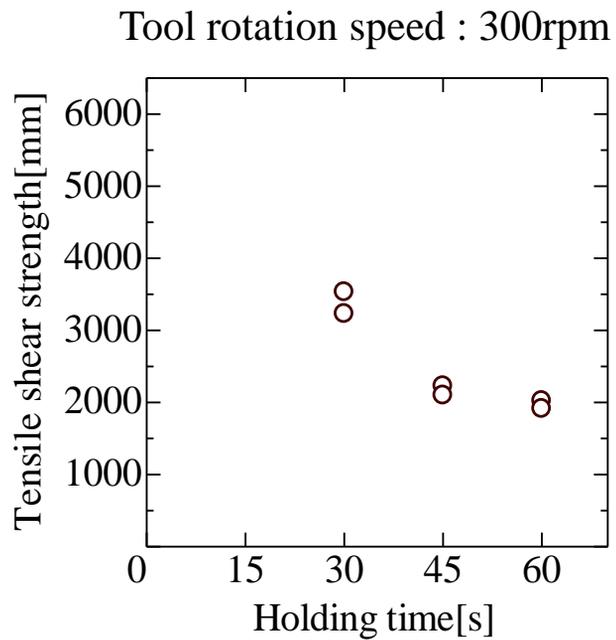
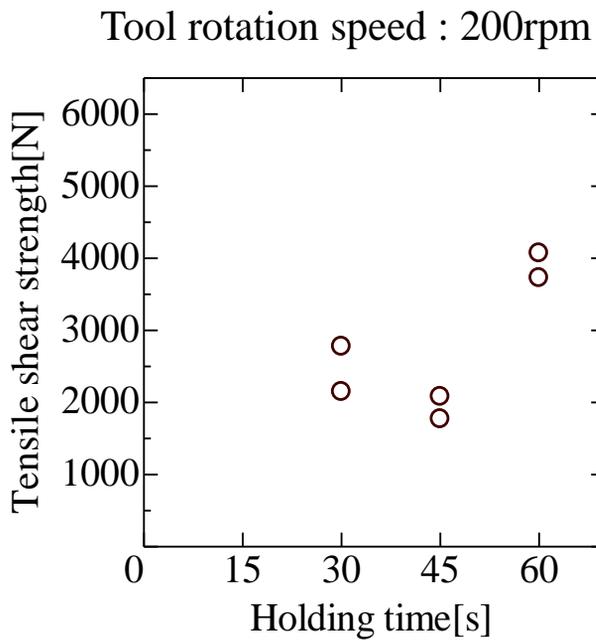


Fig.4-20 Relationship between holding time and tensile shear strength by probe length 1.3mm, tool insert depth 0.4mm.

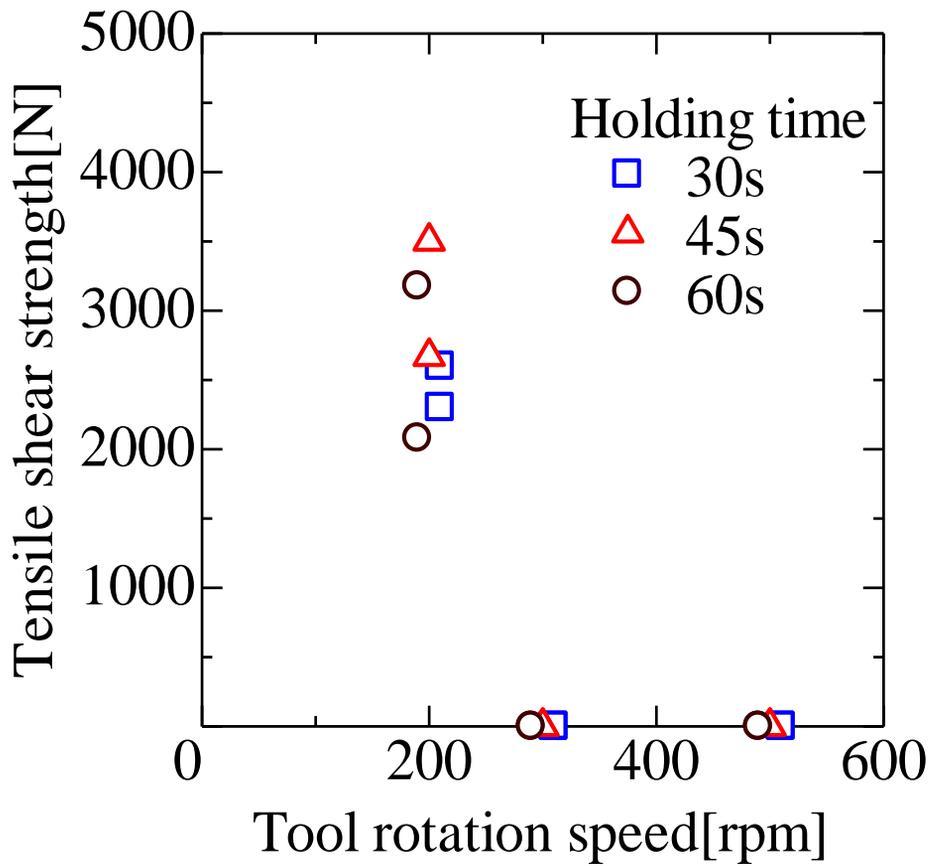


Fig.4-21 Relationship between tool rotation speed and tensile shear strength by probe length 1.0mm tool insert depth 0.4mm.

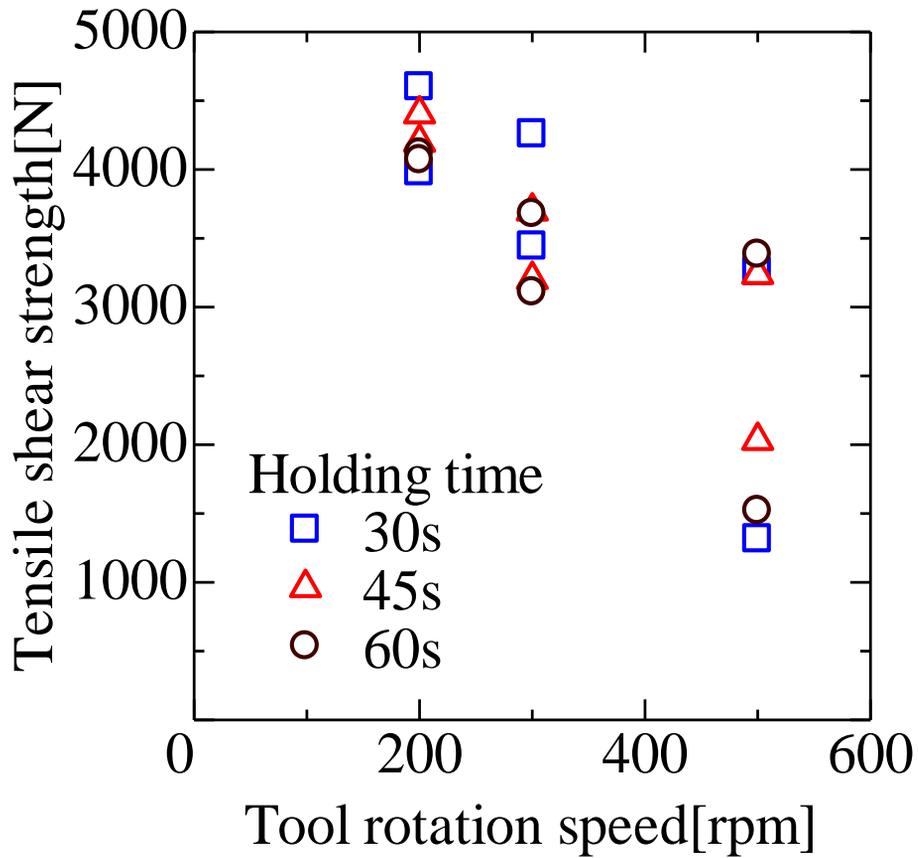


Fig.4-22 Relationship between tool rotation speed and tensile shear strength by probe length 1.0mm tool insert depth 0.6mm.

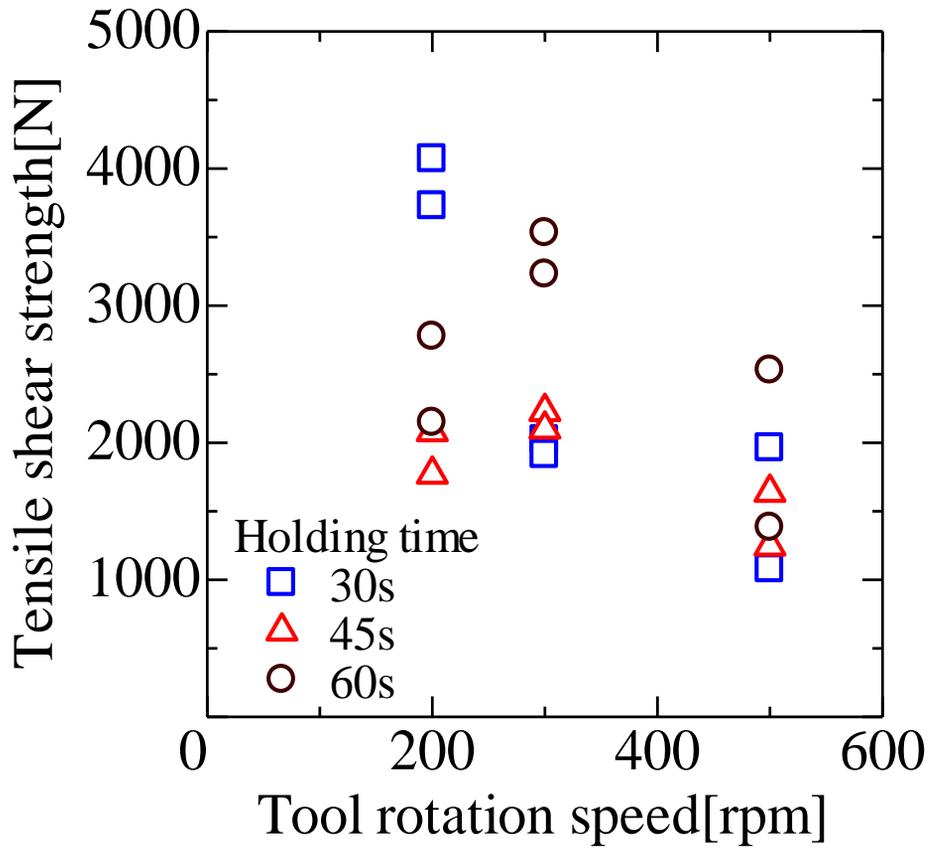


Fig.4-23 Relationship between tool rotation speed and tensile shear strength by probe length 1.3mm tool insert depth 0.4mm.