

大径鋼スタッドの横向アークスタッド溶接に関する研究

平成 29 年 3 月

中世古 圭基

目次

第 1 章	研究の背景と目的	1
1-1	アークスタッド溶接とは	1
1-2	スタッド溶接における下向溶接と横向溶接	2
1-3	本論文の構成	4
第 2 章	横向溶接における溶接現象	5
2-1	本章の目的と内容	5
2-2	実験方法	6
2-2-1	横向溶接の方法	6
2-2-2	スタッド溶接の手順	6
2-2-3	継手の評価法	9
2-3	実験結果	10
2-3-1	溶接時のアーク放電の状況	10
2-3-2	押込み距離とカラー角度	14
2-3-3	溶接部の欠陥度	16
2-3-4	継手の引張強度	17
2-4	考察	20
2-4-1	スタッドと母材の溶融および押込み距離に関する考察	20
2-4-2	短絡に関する考察	21
2-4-3	押込み距離，カラー角度と欠陥度に関する考察	22
2-4-4	大径スタッド横向溶接の適正な条件	23
第 3 章	継手の健全性の改善	67
3-1	本章の目的と内容	67
3-2	実験方法	68
3-2-1	フェルルールを逆方向に設置した横向溶接の手順	68

3-2-2	アルゴンガスの雰囲気中での下向溶接の手順	69
3-2-3	継手の欠陥度の評価法	70
3-2-4	溶融金属の厚さの評価法	70
3-3	実験結果	71
3-3-1	フェルールの設置方向と電圧値の変化	71
3-3-2	フェルールの設置方向と融合不良	72
3-3-3	フェルールの設置方向と押込み距離	74
3-3-4	フェルールの設置方向と溶融金属の厚さ	75
3-3-5	大気からのシールドと気孔の発生	76
3-4	考察	77
3-4-1	電圧値の変化に対するフェルールの設置方向の影響に関する 考察	77
3-4-2	融合不良に対するフェルールの設置方向の影響に関する考察 ．．．．．	79
3-4-3	押込み距離に対するフェルールの設置方向の影響に関する考 察	80
3-4-4	溶融金属の厚さに対するフェルールの設置方向の影響に関す る考察	82
3-4-5	大気からのシールドに関する考察	82
第 4 章	総括	117
参考文献	．．．．．	119

謝辞

第 1 章 研究の背景と目的

1-1 アークスタッド溶接とは

母材である板材に棒状の部材を垂直に溶接する方法としてスタッド溶接は開発された。溶接が終了すると母材の表面から棒状の部材が突き出ている形状になることから、棒状の部材をスタッド、溶接法をスタッド溶接と呼ぶ。特に、スタッドを熔融させる熱源としてアーク熱を使用する場合をアークスタッド溶接と呼ぶ。実際の溶接作業においてはスタッドを母材から引き上げてアークを発生させた後、スタッドを中空に保持することでアークを継続させてスタッドおよび母材表面を熔融させる。その後、母材表面にできた熔融池にスタッドを押し込むことでアークを消滅させると、熔融金属が凝固して溶接が終了する。スタッドを押し込んだ際には余分な熔融金属が熔融池にあふれ出し、スタッドの軸部の周りを取り囲むように余盛りが形成され、この余盛りをカラーと呼ぶ。なお、アーク熱の集中、溶接部への異物やガスの巻き込みの防止、溶接後の急冷の回避およびカラーの成形などを目的として、スタッドの先端にセラミックス製の筒状のシールドが鋳型として設けられる。この部品をフェルールと呼び、溶接後には破碎して除かれる。

アークを熱源として使用するので比較的容易に高密度の熱量を得ることができ、現在までにアークスタッド溶接は広範囲に利用されてきた。アークそのものの歴史は古く、1802 年にロシアの **Petrow** がアークを研究したことに始まる。19 世紀初頭から主にヨーロッパの技術者らによって金属の溶接に関する研究が盛んに行われ、1849 年にイギリスの **Staite** がアークによる金属の溶接法に関する英国特許を取得している^[1]。

アークスタッド溶接が実際に使用されたのは、1918 年頃にイギリスのポーツマスの造船所において艀装用に黄銅製スタッドを使用したのが最初であるといわれている。アメリカでは海軍工廠で航空母艦のメタルデッキの上に木甲板を止めるために鋼のボルトがスタッド溶接され、これが鋼アークスタッド溶接の最初であるとされている。

日本においては昭和初期から艦船内の電気配線やその他の電気器具を取

り付けるための黄銅製スタッドを鋼板に取り付ける際に使用された。そして、第 2 次世界大戦後にアメリカのネルソンスタッドウェルディング社およびイギリスのクロンプトンパーキンソン社などの技術を導入したことで日本国内のスタッド溶接の技術が急速に進歩を遂げ、今日では造船はもとより、建築、橋梁や自動車などの多方面の分野で使用されている^[2]。

スタッド溶接の適用範囲が広がるに伴って、その用途に応じて最適な溶接部を得るための溶接装置が開発された。溶接できるスタッド径により溶接方式は 3 種類に大別される。

(1)CD(Capacitor Discharge)方式は主にボルトを薄板に溶接する用途に用いられる。適用範囲は鋼スタッドの場合で M3~M10、アルミニウムや黄銅の場合で M8 までに限定される。径が小さいために、コンデンサーからの放電により発生するアーク熱で 0.001~0.003s の極短時間で溶接することができる。スタッドの先端に突起部を設け、これを押し付けた状態で電流を流すとジュール発熱で突起部が焼損し、わずかに空隙ができた瞬間に発生するアークで金属の表面が溶け、そのまま母材に押し付けながら溶接を終了させる。

(2)ショートサイクル方式は薄板にボルトを溶接する用途に用いられる。主に自動車産業用の M3~M16 のスタッドで使用され、例えば 1.6mm の鋼板に M12 のスタッドを溶接する場合のように、板厚の 6~8 倍の径のスタッドの溶接が可能とされている。スタッドを引き上げることでアークを発生させ、0.01s 程度のアークの保持時間で溶接する。フェルールは使用しないが、シールドガスを使用することはある。CD 方式に比べてアークからの入熱量が大きいので、薄板の裏面に焼け斑が残る。

(3)アーク方式は直径 6~25mm の大径のスタッドを 0.01~1.0s の比較的長いアークの保持時間で溶接する方式であり、ボルトに限らず頭付きスタッドや異形鉄筋スタッドなども用いられる。材質としては主に鋼が使用される。

1-2 アークスタッド溶接における下向溶接と横向溶接

アークスタッド溶接の適用範囲は初期のころに実施された造船部門での

施工に留まらず，現在では多くの分野に適用されている．最も多く適用されているのが建築鉄骨の分野であり，鋼製の部材とコンクリートの間に力の伝達が要求される箇所に使用される．例えば，鋼製の梁にスタッドを溶接し，梁の間にデッキプレートを敷いてコンクリートを流すことで合成梁を作る作業においては，JIS B 1198 で規定される頭付きスタッドが使用される．建物の基礎に使われる既製コンクリート杭の端板に異形棒鋼スタッドを溶接することでこれらを一体のものとして製作する例もある．土木工事では，ケーソン，護岸工事，橋脚の基礎部分で鋼部材とコンクリートの間で力を伝達するためにスタッドが使用されている．道路関係では，中央分離帯やエクステンションジョイントの製作において，コンクリートと鋼製の部材を分離させない目的で異形スタッドが使用される．

スタッド溶接には経済性や工期の短縮などの利点があり，従来の工法に代わって適用が拡大している．鉄筋コンクリート構造物の改修に対して，従来からの工法では困難な事例が増加しつつある．このため，スタッド溶接を応用した鉄筋継手工法の研究・開発がさらに進められている^{[3][4][5]}．道路の拡幅工事において鉄筋を延長する施工に適用する場合においては，既存部分の鉄筋の露出が短くても溶接施工することができるので，鉄筋を露出するためのハツリ騒音の軽減や廃棄物の量の低減に効果が期待されている^[6]．

以上に述べた施工において，溶接姿勢に関しては水平な母材へ下向姿勢でスタッドを押し付ける下向溶接の他に，垂直な母材へ横向姿勢でスタッドを水平方向に押し付ける横向溶接がある．下向溶接では容易に健全な品質の溶接部が得られるが，横向溶接においては溶融金属が重力の作用で溶融池から垂れ落ちるために溶接部に欠陥が発生しやすくなり，溶接作業の困難さが増す^[7]．特に，スタッドの径が大きくなると不良率が高くなり，個々の欠陥の程度も重篤になる．このため，日本におけるスタッド溶接部材の主たる供給元は，下向姿勢で溶接する場合には直径 25mm までのスタッドの溶接条件を提示しているが，横向溶接に対しては直径 16mm までであり^[8]，この直径より大きいスタッドについては下向溶接以外はできないとされている．横向溶接における適正条件を検討した研究では，推奨されている条件で溶接を行っても 30% もの不良率であるとされており，信頼性の高い溶接条件が確

立されているとはとても言えない状況である^[9].

1-3 本論文の構成

現在，スタッド溶接において横向溶接に対する要望は高く，特に大径のスタッドに適用できる技術の確立が望まれている．しかし，達成は技術的に非常に困難であり，本論文ではこの課題を検討した．対象とするスタッドの直径はいまだ施工条件が確立されていない **19mm** とし，このスタッドの直径から溶接法としてアーク方式のスタッド溶接を採用した．論文の構成は以下のとおりである．

第 1 章においては，研究の背景について述べた．

第 2 章においては，市販されている頭付きスタッドに下向溶接用のフェルールを使用して，スタッドの軸部が水平になるように市販の溶接ガンを回転させて横向溶接を行った．下向溶接で推奨されている条件で溶接を行うと種々の欠陥が溶接部に発生した．そこで，アークの電流値と保持時間を変化させ，健全な溶接部となる条件を決定した．横向姿勢で溶接を行った際に特有な，重力が熔融金属に作用することによる熔融・凝固現象への影響について調べた．下向姿勢の場合では見られない熔融金属の垂れ落ちが加わり，これによる溶接不良が生じる要因について考察した．

第 3 章においては，第 2 章で明らかにした不良が生じる要因を改善する試みを行った．まずフェルールの方向に着目し，下向溶接用のフェルールを横向溶接にそのまま使用した場合には，熔融金属の垂れ落ちを防ぐことを想定して製作されていないために不都合が生じる．このため，フェルールを通常の方法とは逆方向に設置することでカラーの形成のための隙間をなくし，熔融金属の垂れ落ちを防ぐことで欠陥の発生を抑制した．また，種々のシールドを施すことで溶接部の気孔を減少させ，これによる欠陥度を下げることで横向溶接された継手の強度を改善した．

第 4 章においては，研究の総括を行った．

第 2 章 横向溶接における溶接現象

2-1 本章の目的と内容

スタッドの直径が大きくなると横向姿勢のスタッド溶接は技術的に困難となり、スタッドの直径が 16mm より大きいと横向溶接はできないとされてきた。従来から行われている下向姿勢の溶接ではアーク熱によってスタッドと母材が溶融し、スタッドの溶融金属が垂れ落ちるような入熱量としても溶融池の溶融金属が脱落することはない。一方、横向姿勢では重力が母材表面に平行に作用するために、溶融池から溶融金属を脱落させる方向に働く。つまり、スタッドの直径が大きくなるにつれて溶融金属が溶融池から垂れ落ちやすくなり、このことが横向溶接することを困難にしている。

そこで本章では、直径 19mm のスタッドを対象として、横向溶接が困難になる要因を検討した。下向溶接用のフェルールを使用し、下向姿勢用の溶接ガンを 90 度回転させることで横向姿勢で溶接を行った。種々の欠陥が発生したため、継手の強度に対するこれらの欠陥の影響を調べた。溶接部の断面積を実質的に減少させている融合不良と気孔が継手の強度を低下させるが、その欠陥の面積がスタッドの断面積の 10% 以下の場合であれば継手効率が 100% となることがわかった。さらに、カラーの形成は横向溶接においては継手の強度に関係しないことがわかった。

まず、アークの電流値に対する電圧値の時間変化から溶接時のアーク放電の状況を推測し、下向溶接の場合と比べた。次に、アークの電流値と保持時間を変化させた場合において、スタッドの押込み距離とスタッドの軸部の周囲に形成されるカラーの角度の相関関係を調べた。従来から下向溶接の場合で指摘されているように、横向溶接においても母材の表面に形成される溶融池が適正であることが重要となり、これにはアークからの入熱量が影響した。しかし、継手の総合的な強度の観点からは溶接部における欠陥度が支配的な因子であり、この欠陥度と押込み距離やカラー角度の間の相関関係が弱いために、これらは健全な継手であることの指標とはならないことがわかった。最後に、総括として大径スタッドの横向溶接における適正な条件を決定し、

以上の結果より最適となる理由を説明した．

2-2 実験方法

2-2-1 横方向溶接の方法

横方向姿勢の溶接には直径 19mm の頭付きスタッド（JIS B 1198）を使用した．形状を Fig.2-1(a)に示す．頭の部分の直径は 32mm，高さは 10mm であり，溶接する側の端面の先端に 0.1g のアルミニウムが点弧用に圧入されている．スタッドの端面からアルミニウムの先端までの高さは 1.5mm であり，先端部は球面に成形されている．一方，母材としては 100×100×19mm の一般構造用圧延鋼材（JIS SS400）を使用した．

溶接装置の概略図を Fig.2-2 に示す．母材を垂直に設置し，市販の溶接ガンを使用した．図中に示すような治具によりスタッドの軸部および溶接ガンを水平に保持した．容量が 2.5kA の直流の溶接電源により，母材が正極に，スタッドが負極になる極性で溶接を行った．500A の定格電流に対して定格出力電圧が 50mV となるシャント抵抗の電圧値より電流値を測定した．母材の鋼板と溶接ガンの可動部の間（図中の A・B 間）の電圧値をアークの電圧値と見なした．溶接ガンの抵抗，コレットチャックとの接触抵抗や母材と鋼板との間の接触抵抗による電圧降下を含んだ電圧値であるが，それらによる抵抗値は $4.82 \times 10^{-4} \Omega$ と測定され，1.5kA の電流を流した場合で約 1V の誤差となるために無視した．

スタッドは溶接ガンの可動部分の一部であるコレットチャックに差し込まれて固定され，これと一体となって移動する．この移動する箇所は Fig.2-3 の黄色の部分である．このため，可動部の反射板の移動量をレーザ変位計で測定するとスタッドの移動量となる．

2-2-2 スタッド溶接の手順

横方向姿勢のスタッド溶接は以下の手順で行った．

1) フェルール押えを調整する．フェルール押えには 2 つの役割がある．1 つ目は，スタッドをコレットチャックに取り付けた後にフェルールをスタッドの先端から差し込んで固定する際，スタッドの端面をフェルールが母材に接する面から突き出す長さを決めることである．2 つ目は，溶接時にフェルールが溶接する箇所から動かないように固定することであり，この役割のゆえにフェルール押えと呼ぶ．

Fig.2-1(b)に示すように，本実験ではフェルールの突き出し量は 19mm のスタッドに対する下向溶接で推奨されている 5mm とした．Fig.2-3 に示したように，位置調整のための棒によりフェルール押えを溶接ガンの本体に固定した．

2) スタッドの頭の部分を溶接ガンのコレットチャックに差し込んで固定した後，スタッドが母材に対して垂直となるように溶接ガンを保持する．先端にフェルールを差し込んだスタッドを母材に押し付け，フェルールから突き出ているスタッドの端面のアルミニウムボールを母材に接触させる．これが接触した後，さらにフェルールの端面が母材に接触するまで溶接ガンを押し付ける．この際に溶接ガンに内蔵されているばねが縮み，フェルールの端面から突き出ていたスタッドは可動部とともに溶接ガンの本体に引き込まれる．その結果，アルミニウムボールの先端とスタッドの端面がともに母材表面に接するようになる．フェルールがフェルール押えを介して母材に対して垂直に押し付けられている状態で溶接ガンを治具により固定する．溶接の開始前のスタッドおよびフェルールの状況を Fig.2-4 の上図(a)に示す．

3) 溶接ガンを固定した後，スタッドと母材の間に溶接電流が流れない設定にして溶接ガンのスイッチを押すことでソレノイドだけに通电し，ソレノイドによりスタッドが所定の距離だけ引き上げられることを確認する．本実験におけるスタッドの引き上げ距離は 2.5mm とした．なお，引き上げ量は溶接ガンの底部のねじで調整することができる．

4) 溶接電源に付帯している制御盤から溶接条件を入力する．入力の後，スタッドと母材の間に溶接電流が流れる設定にして，溶接ガンのスイッチ押しで溶接を開始する．母材とスタッドに通电された直後に，ソレノイドがスタッドを設定時間だけ引き上げる．

- 5) ソレノイドによる引き上げによってスタッドが母材表面から離れると、これらの間にアーク放電が始まる。アーク熱によりスタッドの端面と母材の表面が溶融する。一定時間だけ設定値より低い値でアークを維持した後、設定値まで電流値を増加させ、設定時間だけ所定の電流値でアークを維持する。溶接の開始時に一定時間だけ低い値で流す電流によるアークをパイロットアークと呼び、設定値の電流によるアークをメインアークと呼ぶ(Fig.2-4 の下図(b))。パイロットアークの電流値を 1.2kA とし、保持時間を 0.1s で一定として、メインアークの電流値と保持時間を変化させて横向溶接を行った。なお、スタッドの引き上げはメインアークの放電の前に終了する。
- 6) メインアークの保持時間の後に、ソレノイドへの通電が遮断され、溶接ガンにばね力で引き上げられていたスタッドは母材表面に形成された溶融池に押込まれる。スタッドが溶融池に接触するとアークが消滅し、溶融金属の凝固が始まる。この後も設定時間だけ電流を流し続け、この過程をポストヒートと呼ぶ (Fig.2-4 の下図(c))。

アーク熱によりスタッドと母材は溶融する。アーク電流の保持時間の後にスタッドを母材に押込むと、溶接の開始前にフェルール押えを固定した際にフェルールから突き出ていた体積の分だけ溶融金属が溶融池からあふれ出し、フェルールとスタッドの間の隙間を充填することで余盛りとなる。この余盛りをカラーと呼ぶ。

Fig.2-1(b)に示したように、フェルール押えの位置決めをする際のスタッドの端面が突き出た量を溶け代と呼ぶ。スタッドおよび母材表面が十分に溶融していればスタッドを押込む際に溶け代のすべてが押込まれるが、未溶融の部分が残されていればこれに達しない。このため、母材にスタッドが押込まれた実際の距離を押込み距離と呼ぶ。

Fig.2-4 に示したようにスタッドの引き上げ距離は 2.5mm であり、アーク放電の開始と同時に点弧用の高さ 1.5mm のアルミニウムは消失すると考えられるため、溶接の開始時のアーク長は 4.0mm (1.5mm+2.5mm) となる (Fig.2-4(b))。一方、押込み距離の最大値は溶け代の 5.0mm である。したがって、スタッドは最大で 6.5mm (1.5mm+5.0mm) だけ移動する (Fig.2-4(c))。

スタッドの移動の例を Fig.2-4 の下図に示す。スタッドが引き上げられる

と同時にパイロットアークの放電が開始し、この電流値はすぐに一定となる。その後、設定値までメインアークの電流値を増加させても、メインアークやポストヒートの段階でも電流値はほぼ一定となるように制御される。一方、アークの電圧値は溶接の開始時から徐々に減少する。この例においては途中で溶融金属によりスタッドと母材の間に短絡が発生し、電圧が急激に減少した後、メインアークが再開しているが、溶接が終了するまでに再開しない場合もある。

2-2-3 継手の評価法

(1) 下向溶接においては全周にわたるカラーが形成される。これに対して、横向溶接においては溶融金属が垂れ落ちることとスタッドを押込んだ際に横方向に溶融金属があふれ出すためにカラーの肉厚に偏りがあり、必ずしも全周にわたるカラーが形成されないことがある。このため、国土交通省が定める道路橋示方書^[10]および一般社団法人スタッド協会の技術検定試験の判定基準^[11]に基づいて、カラーが形成されている領域を測定した。Fig.2-5(a)に示すように、同判定基準では高さが 1mm 以上で幅が 0.5mm 以上の余盛の部分をカラーとしている。このため、Fig.2-5(b)に示すようにカラーが形成された領域の円周角をカラー角度と定義し、下向溶接の場合に準拠して、横向溶接に対してもスタッド溶接の健全性の指標になると考えた。

(2) JIS に規定された引張試験法に準じた方法により継手の強度を測定した。溶接された継手には丸棒の両端に母材とスタッドの頭が付いているために、そのままでは引張試験機に取り付けることができない。このため、Fig.2-6に示すような治具により継手を固定した。ねじを切った丸棒、袋ナットおよびスタッドの頭を支える止め具で構成され、丸棒と袋ナットを組み付けるねじ径は M100 とした。外径 140mm、内径 92mm、ねじ部長さ 55mm の袋ナットに直径 32.4mm の穴をあけることで直径 32mm のスタッドの頭が通るようにし、以下の手順で継手を固定した。

継手の母材部分を 70×60mm の大きさに切断し、これを下にしてスタッドの頭を上に向ける。スタッドの頭を通す穴をあけた下側の袋ナットを通し

(Fig.2-6(a))，上側の袋ナットを同様にスタッドの頭に通す(Fig.2-6(b))。スタッドの頭の部分が抜けないようにするために袋ナットとスタッドの頭の間に3分割した止め具を挟み(Fig.2-6(c))，丸棒を袋ナットの上側と下側からねじ込む(Fig.2-6(d))。これらの2つの丸棒を油圧式万能試験機に固定する。スタッドを母材に対して垂直に引張り，破断に達するまでの荷重を引張強度とした。

(3) 溶接部で破断した継手に対しては破面上の欠陥をそのまま観察した。一方，スタッドの軸部で破断した継手の溶接部においても欠陥が存在するために，「JIS Z 3104：1995 鋼溶接継手の放射線透過試験」に準じて，溶接部のX線透過試験を行った。像のコントラストを強めるために母材を裏面から切削加工して6.5mmの厚さにし，引張試験の後に残るスタッドの軸部を母材表面から6mmの高さにまで切削加工した。全体で12.5mmとし，加速電圧160kVのX線源を使用して60s間のX線透過撮影を行った。フィルム上に記録された未溶融もしくは垂れ落ちによる融合不良の部分と気孔の部分の面積を積算し，スタッドの軸部の断面に占める割合で欠陥度を定義して，継手の欠陥の量を評価する指標とした。

2-3 実験結果

2-3-1 溶接時のアーク放電の状況

溶接時のアーク放電の状況を全般的に把握するために，Fig. 2-7にはアークの電圧値と電流値の関係を示す。電流値は設定値に応じてほぼ一定となる。一方，電圧値は溶接条件ごとで異なった傾向を示した。電流値の設定が1.5kA，2.0kA，2.5kAの場合の電圧値の時間平均を○印で表し，それぞれのアークの電流値における平均値を折線で結ぶ。アークの電流値が大きくなると電圧の平均値はわずかに増加した。アーク長が同じであるとすればアークの電流値が大きくなると電圧値が増加する傾向を示すはずであるが^[12]，電流値が1.5kAから2.5kAとなっても電圧値が増加する量は1V以下であり，このことからアーク長がほぼ一定であるか短くなっていると考えられる。横

姿勢の溶接では溶融金属が重力の作用によりアークの雰囲気領域から垂れ落ち、ある程度まで溶融が進んで溶融金属の量が増加することでフェルールの下部に滞留するまでは電圧の減少が抑制されていることが考えられる。

次に、電圧値のアーク放電開始からの時間変化に関して、Fig.2-8 に示すように期間を取り、開始時、中間時および終了時の3つの期間における電圧の平均値を比べた。パイロットアークの終了した直後の0.05sにおける電圧値の時間平均を開始時の電圧値とし、スタッドを押込むことによって電圧値が10V以下となる直前の0.05sにおける電圧値の時間平均を終了時の電圧値とした。また、アークの保持時間の全体を3分割した中間における電圧値の時間平均を中間時の電圧値とした。なお、それぞれの期間中に短絡が発生した場合にはそれを除外した。

電流が1.5kAの場合における電圧値の時間変化をFig.2-9にアークの保持時間ごとにまとめる。開始時の電圧値、中間時の電圧値および終了時の電圧値を折れ線で結んだ。いずれのアークの保持時間においても終了時の電圧値は開始時の電圧値より小さい。アークの保持時間が短い0.4sの場合においては中間時はメインアークの放電の開始から0.2s付近であり、中間時の電圧値は開始時の電圧値よりわずかに大きい。しかし、アークの保持時間が長くなると中間時の電圧値が開始時の電圧値より小さくなる。溶接の開始から0.2sまではスタッドの端面が溶融し垂れ落ちることでアーク長が長くなるために電圧値が増加し、それよりさらにアークの保持時間が長くなると垂れ落ちによってアーク長が短くなるために電圧値は減少すると考えられる。アークの保持時間が長くなると開始時と中間時の間の電圧値の差が大きくなり、逆に中間時と終了時の間の電圧値の差が小さくなる。アーク熱によってスタッドの溶融が進むにつれて溶融金属が垂れ落ちることでアーク長が短くなるが、やがて溶融金属の垂れ落ちが頻繁に起こり、アーク長がそれよりも短くならないことによると考えられる。アークの保持時間を1.6sより長くした場合において終了時の電圧値のばらつきが大きくなるのは、溶融金属の揺動がそのたびごとでまちまちであるためと考えられる。

電流値が2.1kAの場合における電圧値の時間変化をFig.2-10にアークの保持時間ごとにまとめる。電流値が1.5kAの場合と同様に、アークの保持時

間が短い 0.3s および 0.4s の場合において中間時の電圧値は開始時の電圧値より大きくなるが、電圧値が増加する量は 1.5kA の場合に比べて小さくなる。そして、アークの保持時間が長くなるにつれて中間時の電圧値が開始時の電圧値より小さくなる。

最後に、電流値が 2.6kA の場合における電圧値の時間変化を Fig.2-11 にアークの保持時間ごとにまとめる。アークの保持時間が最も短い 0.3s の場合でも中間時の電圧値は開始時の電圧値より大きくなる。中間時である 0.15s よりも短い時間でスタッドの端面の溶融金属が垂れ落ちることでアーク長が短くなり、フェルールの下部への溶融金属の滞留が始まることを示していると考えられる。中間時および終了時の電圧値が開始時の電圧値より小さくなる傾向は電流値が 1.5kA や 2.1kA の場合と同じであるが、電圧値が減少する量が大いことが異なる。また、1.1s の場合において終了時の電圧値のばらつきが大きくなり、開始時の電圧値より大きくなることもある。溶融金属がフェルールから垂れ落ちることで終了時には開始時より長いアーク長になっているためと考えられる。

つまり、アークの電流値が大きく保持時間が長い場合においては、溶融金属が垂れ落ちることによってフェルールの下部に滞留するために短絡に近い状態となり、終了時の電圧値が減少することがある場合には起こる。別の場合には溶融金属がフェルールから脱落することでアーク長が長くなるために終了時の電圧値が増加することが起こる。同じ溶接条件であっても溶融金属の状態はそのたびごとに異なり、いずれかの状態になっていると考えられる。

Fig.2-9, Fig.2-10, Fig.2-11 をまとめ、平均値を Fig.2-12 に比べる。図中の□は開始時の電圧値、△印は中間時の電圧値、○印は終了時の電圧値を表す。電流値が 1.5kA の場合においては中間時の電圧値および終了時の電圧値はアークの保持時間が長くなると減少する。溶融金属の量の増加に伴ってそれがフェルールの下部に滞留することでアーク長が短くなっているためと考えられる。一方、2.1kA および 2.6kA の場合においてはアークの保持時間が長くなると終了時の電圧値は減少し、最小となった後に再び増加している。スタッドが溶融するとともに溶融池の溶融金属がフェルールから脱落す

ることである。アーク長が長くなるためと考えられる。電流値が 2.6kA の場合の方が 2.1kA の場合より電圧値の減少および増加の量が大きくなっているのは、電流値が大きくなるとスタッドが溶融するとともに、フェルールの下部へ滞留する溶融金属とフェルールから脱落する溶融金属の量が増加するためと考えられる。

次に、溶接時に発生する短絡に関して、いずれの溶接条件でもアーク放電の開始から約 0.5s までは短絡が発生しない。電流値が 1.5kA の場合には 1.0s 以上になると持続時間が長い短絡が頻繁に発生する。アーク放電の開始から 1.4s までは短絡が発生しない場合もあるが、1.5s 以上になると必ず短絡が発生した。

電流値が 2.1kA の場合においては 1.5kA の場合と比べて短絡の継続時間が短くなる。電流値が 2.6kA の場合においては短絡の継続時間がさらに短くなり、実験した限りでは短絡から回復しない場合はなかった。電流値が増加するにつれてより短時間で短絡から回復した。

短絡が発生した場合に対して、横軸を最初の短絡が発生するまでの時間とし、縦軸を短絡の継続時間の総量として、Fig.2-14 に電流値ごとにまとめる。ただし、最後まで短絡から回復しない場合は、図中に参考点として●印で示した。最初に短絡が発生するまでの時間の平均値は、電流値が 1.5 kA, 2.1 kA, 2.6kA の場合においてそれぞれ 1.01s, 0.76s, 0.62s であり、短時間側に移行する。

短時間側に移行することからこの現象にはアークからの入熱量が影響していると考えられ、入熱量と短絡の継続時間の総量との関係を Fig.2-15 に電流値ごとに取り直す。なお、最後まで短絡から回復しない場合は参考点として●印で示した。入熱量と溶融金属の量は比例し、溶融金属の量がある程度にまで達するまでは短絡が発生しないと考えられる。実際、電流値が 1.5kA, 2.1kA, 2.6kA の場合において最初に短絡が発生する入熱量は 36kJ, 42kJ, 40kJ でほぼ同じである。一方、電流値が大きくなると短絡の継続時間の総量は小さくなる。短絡からの回復においては、ジュール発熱による局部加熱で溶融させる現象よりアークの圧力で短絡した部分が吹き飛ばされる現象が支配的であるためと考えられる。つまり、入熱量が 40kJ 以上にな

ると短絡が発生し始め、電流値が小さい場合には回復しない場合があるが、電流値を 2.6kA 以上にすると入熱量が 100kJ 以下では短時間で短絡から回復する。

2-3-2 押込み距離とカラー角度

横向溶接においては、アークの保持時間が短いと母材表面の溶融池の形成が不十分になり、逆に、アークの保持時間が長すぎると溶融池の溶融金属が垂れ落ちるために、いずれの場合においても健全な継手とならないと考えられる。電流値をそれぞれ 1.5kA、2.1kA および 2.6kA とした場合における押込み距離に対するアークの保持時間の影響を Fig.2-16 に示す。2-2-2 で述べたように押込み距離の最大値は 5mm であり、図中に破線で示した。●印は測定値を、○印を結ぶ折れ線は平均値をそれぞれ表す。いずれの電流値においてもアークの保持時間が長くなると押込み距離が長くなり、最大値に達した後には短くなる傾向を示す。また、電流値が大きくなると、最大値に達するまでの時間は短時間側に移行する。電流値が 1.5kA の場合においては 1.3s、電流値が 2.1kA の場合においては 1.0s、2.6kA の場合においては 0.5s が最大値に達する時間であった。

一方、Fig.2-17 にはカラー角度に対するアークの保持時間の影響を示す。電流値が 1.5kA の場合においてはアークの保持時間が長くなるとカラー角度が増加する傾向を示した。電流値が 2.6kA の場合においてはアークの保持時間の短時間側でカラー角度が最大となり、さらにアークの保持時間が長くなるとカラー角度が減少する傾向を示した。電流値 2.1kA の場合においては、アークの保持時間が長くなるとカラー角度が増加した後に減少する傾向を示した。

アークの保持時間が長くなるとアークからの入熱量が増加する。このため、入熱量を横軸に取り直した場合におけるカラー角度との関係を Fig.2-18 に示す。電流値が 1.5kA の場合においては入熱量の増加に伴ってカラー角度は緩やかに増加する。全周にわたるカラーが形成されるのは 55~75kJ の範囲となる。電流値が 2.1kA の場合においては入熱量の増加に伴ってカラー角度が

緩やかに増加し、やがて緩やかに減少する．全周にわたるカラーが形成されるのは 35~65kJ の範囲となる．電流値が 2.6kA の場合においては入熱量の増加に伴ってカラー角度が減少する．全周にわたるカラーが形成されるのは 30kJ 以下の範囲となる．

スタッドが十分に押込まれれば余剰の熔融金属があふれ出すことでカラーが形成されるため、Fig.2-16 と Fig.2-17 を重ねて Fig.2-19 に比べる．○印と●印はそれぞれ押込み距離とカラー角度の平均値を表す．電流値が 1.5kA の場合において 1.5s までは同じ傾向である．しかし、1.5s 以上でばらつきがあるものの 1.7s まではカラー角度はほぼ全周にわたる角度となる．一方、押込み距離は 1.5s で極大となりそれ以上では短くなる．電流値が 2.1kA の場合においては増加と減少の傾向を示すこと似ているが、極大となる時間がカラー角度では 0.4~0.8s の短時間側にあり、押込み距離が 1.0s~1.3s で極大となることが異なる．電流値が 2.6kA の場合においては押込み距離が 0.5s 付近で極大となるが、アークの保持時間が長くなるとカラー角度は減少し、極大が測定した範囲よりも短時間側にあると考えられる．

さらに、押込み距離とカラー角度の関係を Fig.2-20 に示す．電流値が 1.5kA の場合に弱い相関関係が認められるものの、電流値が大きくなるとほとんど相関関係が認められない．スタッドを押込むことによってあふれ出した熔融金属のすべてがカラーの形成に使われるならば、押込み距離が長くなるとカラー角度が増加するはずであるが、そうではないことに対しては熔融金属の脱落が影響していると考えられる．

実際、アークからの入熱量の増加に伴って熔融金属の量が増加すると考えられるため、入熱量と押込み距離の関係を Fig.2-21 に示す．電流値が 1.5kA の場合においては弱い相関関係が認められ、入熱量の増加に伴って押込み距離が長くなる．しかし、電流値が 2.1kA と 2.6kA の場合においては、入熱量の増加に伴って押込み距離が緩やかに長くなった後に短くなる傾向である．

高温の熔融金属が熔融池から脱落すると熱量が失われる．つまり、入熱量が大きい場合に熔融金属の垂れ落ちが起こると、スタッドおよび母材が凝固しやすくなり、さらに短絡の発生によってアーク熱が熔融金属に供給されないことから凝固が起こりやすくなる．このために押込み距離が短くなると

考えられる。

2-3-3 溶接部の欠陥度

溶接部の X 線透過試験で撮影されたフィルム上に記録された欠陥の像を Fig.2-22 に示す。Fig.2-22(a)ではほぼ全周にわたるカラーが形成されているのにもかかわらず、大きな面積の融合不良がある。一方、Fig.2-22(b)では気孔が見られる。

Fig.2-23 には電流値をそれぞれ 1.5 kA, 2.1 kA および 2.6kA とした場合における融合不良の欠陥度に対するアークの保持時間の影響を示す。それぞれの電流値において融合不良が起こりやすいアークの保持時間がある。電流値が 1.5kA の場合においてはアークの保持時間が短い範囲と長い範囲で融合不良は発生し、1.2~1.7s の範囲が融合不良の少ない適正な保持時間である。電流値が 2.1 kA および 2.6kA の場合においては、それぞれアークの保持時間が 0.8s 以下および 0.5s 以下では融合不良は発生しないが、それより保持時間が長くなると融合不良が発生するようになる。

このことは過剰のアーク熱による溶融金属の垂れ落ちに関係すると考えられ、電流値が大きくなると融合不良が始まる時間が短時間側に移行する。ただし、電流値が 1.5kA の場合におけるアークの保持時間が短い範囲での融合不良は、母材に供給されるアーク熱が不足しているために十分な大きさの溶融池が形成されていないためと考えられる。実際、Fig.2-15 で示したように、この保持時間ではスタッドを十分に押込むことができない。

電流値が大きくなると融合不良が始まる時間が短時間側に移行することにはアークからの入熱量が関係すると考えられ、横軸を入熱量に取り直した結果を Fig.2-24 に示す。横軸をアークの保持時間とした Fig.2-23 においては融合不良の発生が急激に増加するアークの保持時間が電流値に応じて変化した。入熱量に取り直すと 70kJ 以上になると増加することがわかる。なお、1.5kA の場合において 40 k J 付近で欠陥度の急激な増加が見られるが、これらの値となった欠陥度の継手では持続時間の長い短絡が発生して最後まで回復しなかったため、融合不良が起こったことが考えられる。

次に、Fig.2-25 には電流値をそれぞれ 1.5 kA, 2.1 kA および 2.6kA とした場合における気孔の欠陥度に対するアークの保持時間の影響を示す。いずれの電流値においてもアークの保持時間が長くなると気孔が発生する。アークの保持時間が短いと熔融池の熔融金属の量が少ないため、それに含まれる気孔の量は少ないが、保持時間が長くなるにつれて熔融金属の量が増加し、鋼中の炭素との反応の時間も長くなるために気孔の量は増加する。しかし、アークの保持時間がさらに長くなると熔融金属が垂れ落ち、フェルールの外に脱落することで熔融金属に含まれる気孔そのものは減少する。このため、X 線透過試験で撮影されるフィルム上に記録される気孔の量としては減少するが、アークの保持時間が長くなるにつれて実際に発生する気孔の量は増加すると考えるべきである。

2-3-4 継手の引張強度

横軸をアークの保持時間とし、縦軸を引張強度として、電流値が 1.5kA の場合における継手の引張強度の結果を Fig.2-26 に示す。JIS B 1198 が規定する鋼スタッドの引張強度の最小値 400N/mm^2 に直径 19mm のスタッドの断面積を掛けて荷重にすると 113kN であり、横線で示した。図中の●印はそれぞれの継手での測定値を表し、折れ線で結んだ○印は設定したアークの保持時間における測定値の平均を表す。電流値が 1.5kA の場合においてはアークの保持時間が 1.5s 以上になると引張強度の平均値が JIS の規定値を満たさない継手となることがあった。

電流値が 2.1 kA と 2.6kA の場合における継手の引張強度の結果をそれぞれ Fig.2-27 と Fig.2-28 に示す。継手の引張強度が JIS の規定値を満たすアークの保持時間はそれぞれ 1.1s 以下と 0.8s 以下である。電流値が大きくなると JIS の規定値が満たされるアークの保持時間は短時間側に移行した。

これらの結果に対して、横軸を欠陥度として Fig.2-29 に取り直す。なお、横軸は対数目盛で表示した。スタッドの軸部で破断した継手を Fig.2-29(a) に○印で示し、溶接部で破断した継手を Fig.2-29(b)に●印で示した。欠陥の

ない継手の引張強度は Fig.2-29(a)の左端に示し、いずれも継手効率が 100% であり、スタッドの引張強度が JIS の規定値を満たす。溶接部で破断した継手においても 9 個の継手の引張強度は JIS の規定値を満たしていた。

一方、横軸をカラー角度とし、縦軸を欠陥度として、破断箇所および引張強度でわけた結果を Fig.2-30 に示す。縦軸は対数目盛で表示した。図中の○印はスタッドの軸部で破断した場合、●印は溶接部で破断して引張強度が JIS の規定値を満たす場合、▲印は溶接部で破断して引張強度が JIS の規定値を満たさない場合を表す。欠陥度とカラー角度の間には特別な相関関係は認められない。引張強度が 113kN 以上の継手において、カラー角度は 120～360° の広い範囲に分布する。つまり、カラー角度は引張強度に対して支配的な因子でもなければ、継手の健全性の指標ともならないことを意味する。

欠陥のない継手の結果は下側に示した。電流値が 1.5kA の場合ではカラー角度が 360° の継手は 2 個、電流値が 2.1kA の場合ではカラー角度が 360° の継手は 6 個、電流値が 2.6kA の場合ではカラー角度 240° の継手は 2 個が重なって表示されている。これらの欠陥のない継手のカラー角度を Fig.2-31 にヒストグラムとして示す。カラー角度が 180～270° であっても欠陥のない継手があった。しかし一方で、330° のカラーが形成されていても引張強度が 41kN となる継手があった。引張試験の前に直交する 2 方向からこの継手の外観を撮影し、引張試験の後に破面を観察した結果を Fig.2-32 に示す。カラーが形成されている領域の内側で延性破面とスタッドと母材が融合せずに凝固した痕跡の両方があり、このことは外観からは推測できない。

78 個の継手の引張強度の結果を破断箇所と欠陥の有無でわけて、Table 2-1 にまとめる。A 群と B 群の 53 個の継手は欠陥の有無にかかわらずいずれもスタッドの軸部で破断したために継手効率は 100% である。したがって、これらの継手では溶接熱影響を受けていないスタッドの原質部の引張強度を測定したことになる。引張強度の分布を Fig.2-33 にヒストグラムとして示すが、平均値は 125.9kN であり、標準偏差は 3.52kN であった。一方、JIS B 1198 が規定する鋼スタッドの引張強度の最小値は 113 k N である。したがって、引張強度の平均値から標準偏差の 3 倍を引いた値は 115.3kN であるため、スタッドの強度は JIS の規定値を十分に満たし、継手の総合的な強度には直接

的に影響しない。

欠陥を含むのにもかかわらず，B 群の継手はスタッドの軸部で破断したために継手効率が 100%である．引張強度に対する欠陥の影響を評価するため，欠陥度を横軸とし，引張強度を縦軸として，Fig.2-34 にすべての継手の結果とともに示す．横軸の欠陥度は対数目盛で表示した．A 群の継手の欠陥度は 0 であるために図中の左端に示した．A 群および B 群においてはすべての継手が JIS の規定値を満たしている．B 群の継手の欠陥度の最大値は 40%であるにもかかわらず，スタッドの軸部で破断している．

溶接部で破断した C 群の継手においては，いずれの場合においても欠陥が含まれていた．欠陥度が 5%の継手が 1 つだけ溶接部で破断しているが，その他の溶接部で破断した継手では 10%以上の欠陥度であり，欠陥度が 10%以上になると引張強度が急激に低下することがわかる．逆に，欠陥度が 10%以下の場合においてはスタッドの軸部で破断し，引張強度が JIS の規定値を満たす．このため，横向溶接された継手の引張強度において欠陥度のしきい値は 10%である．

B 群の継手が欠陥を含むのにもかかわらずスタッドの軸部で破断することや，欠陥度が 10~60%であるために溶接部で破断するにもかかわらず，引張強度が JIS の規定値を満たすことは，溶接部および溶接熱影響部の強度がスタッドの原質部の強度より大きいことを示していると考えられる．実際，それぞれのアークの電流値において保持時間を 1.0s とした継手の溶接部に対してビッカース硬さを 200g-30s の条件で測定し，その結果を Fig.2-35 に比べる．熔融金属の厚さはそれぞれの継手で異なるため，横軸に示す位置は溶接部の境界間の長さで 0 と 1 の値に規格化してある．溶接時の熱の影響を受けていないスタッドの軸部の硬さが約 Hv150 であるのに対して，溶接部の硬さは Hv225~300 である^[15]．したがって，溶接部に欠陥が存在しても，その欠陥度があるしきい値を越えなければ破断はスタッドの軸部で先に起こることがわかる．

Fig.2-29(b)に示したように，欠陥度が 10%までの継手では引張強度の低下が見られないが，欠陥度が 20%以上の継手では引張強度が急激に低下する．一方，Fig.2-30 で示したように，カラー角度によって引張強度が低下するし

きい値は認められない．カラー角度が 360° に近いからといって必ずしも欠陥度が小さいわけではなく，逆に，カラー角度が 360° よりかなり小さいからといって必ずしも欠陥度が大きいわけでもない．したがって，溶接部の欠陥度は継手の強度の支配的な因子であるが，横向溶接においてカラー角度は健全な継手であることの指標とはならないことがわかる．

2-4 考察

2-4-1 スタッドと母材の溶融および押込み距離に関する考察

アーク熱によるスタッドの溶融と母材表面に形成される溶融池に着目したスタッドの移動を考え， Fig.2-36 に模式的に示す． Fig.2-35 (a)はスタッドの引き上げ直後の過程であり， A および B はスタッドの端面および母材表面の位置を表す． AB 間の距離は 4mm である． 次に， Fig.2-35 (b)はスタッドを中空に保持することでアーク熱によりスタッドおよび母材が溶融する過程である． ハッチングされた部分は溶融域を表す． 距離 AC は溶融しているスタッドの長さであり， 距離 BD は母材の溶け込み深さである． 最後に，設定したアークの保持時間の後にソレノイドに流れる電流が遮断されると，引き上げられていたスタッドは溶接ガンに内蔵されたばねによって溶融池に押込まれる． その移動量はスタッドの端面では AF，スタッドの溶融した境界面では CE となる． Fig.2-36 (c)はスタッドを押込んだ過程であり，母材とスタッドの固体部分が接触するとスタッドの移動は終了する．これによりハッチングが交差する部分の溶融金属があふれ出し，フェルールとスタッドの間の隙間を充填することでカラーが形成される．

アーク熱によって母材がスタッドの断面よりも大きく溶融し，スタッドの端面の全体が溶融すれば， AC および BD の距離がごくわずかであってもスタッドと母材は接合する．ところが，アークスタッド溶接において設定できる溶接条件はアークの電流値と保持時間およびスタッドの引き上げ距離だけで，アークの放電状態は直接に制御することができない．このため，下向溶接においては AC および BD の距離を大きくし，十分な量の溶融金属が溶

融池に形成される溶接条件とすればよい．ところが，横向溶接においてはさらに溶融金属の垂れ落ちが起こるため，このことがスタッドを横向溶接することを困難にする．

2-4-2 短絡に関する考察

短絡が発生してアークが消滅するとジュール発熱の局部加熱のみとなり，溶融金属の凝固が始まるために欠陥が発生しやすい．電流値が小さい溶接条件で短絡が発生すると，アークの保持時間が長くなるのにつれて短絡の継続時間も長くなり，最後まで短絡から回復しない場合もある．短絡から回復してアーク放電を再開させるためには，短絡した部分を吹き飛ばしてアークの通り道を確保する必要がある．このため，電流値が大きくなると短絡の継続時間が短くなることは，電流値が大きいために高いアークの圧力により短絡した部分が容易に吹き飛ばされることを意味していると考えられる．

溶接の開始時では溶融金属はアークの雰囲気から外れてフェルールとスタッドの間の隙間に達するために，溶融によってスタッドの端面および母材表面が後退することでアーク長が長くなり，アークの電圧値が増加する．しかし，アーク放電の開始から時間が経過すると，スタッドおよび母材から垂れ落ちる溶融金属の一部はフェルールの通気溝を通して外に落下するものの，残りの部分はフェルールの下部に滞留するためにアーク長が短くなり，アークの電圧値が減少する．

溶融金属が揺動することで短絡の状態となっても，アークの圧力で短絡した部分が吹き飛ばされるとアーク放電が再開すると考えられる．溶融金属の量が増加するにつれて，フェルールの下部に滞留する溶融金属の量が増加し，短絡した部分は大きくなる．このため，電流値が小さい溶接条件ではアークの圧力が低いために，アークの保持時間が長い場合には短絡した部分を吹き飛ばすことは困難となる．しかし，電流値を大きくするとアークの圧力が高いために，大きな短絡した部分でも吹き飛ばすことができ，短絡から回復しやすくなる．したがって，短絡による欠陥を防止するためには電流値を大きくすればよいと考えられる．

2-4-3 押込み距離，カラー角度と欠陥度に関する考察

アークの保持時間が長くなると溶融金属の量が増加する．そして，もし短絡や溶融金属の垂れ落ちがなければ，押込み距離が長くなるとカラー角度が増加すると考えられる．Fig.2-16 と Fig.2-17 を重ね，押込み距離とカラー角度の関係を Fig.2-37 に電流値ごとにまとめる．図中の○印はそれぞれのアークの保持時間における押込み距離とカラー角度の平均値を表し，数値はアークの保持時間を表している．

電流値が 1.5kA の場合においては，アークの保持時間が 0.4s から 1.4s までは押込み距離が長くなるとカラー角度が増加するが，それ以上ではカラー角度はほぼ一定であるのに対して，押込み距離は逆に短くなる．この電流値の場合においては，アークの保持時間が長くなると短絡が頻繁に発生し，アーク熱の供給が止まることで溶融金属の凝固が始まり，そのために押込み距離が短くなっていると考えられる．

電流値が 2.1kA の場合においては，アークの保持時間が 0.8s までは押込み距離が長くなるとカラー角度が増加するが，それ以上では 1.0s までは押込み距離が長くなるのに対してカラー角度は減少し，1.0s 以上になると押込み距離とカラー角度の両方が小さくなる．このことはアークの保持時間が長くなると溶融金属の量は増加するが，同時に溶融金属の垂れ落ちが起こるために，溶融金属の量の増加が必ずしもカラー角度の増加とならないことを意味する．

電流値 2.6kA の場合においては，溶融金属の垂れ落ちがアークの保持時間が短いときから起こり，アークの保持時間が 0.3s ですでに垂れ落ちが始まっていると考えられる．0.5s 以下ではアークの保持時間が長くなると押込み距離が長くなるが，それ以上では短くなる．カラー角度はアークの保持時間が 0.4s 以上でほとんど一定である．このことは増加した溶融金属がそのまま垂れ落ちていることを意味する．

アークからの入熱量の不足により十分な量の溶融金属でない場合の他に，入熱量を過剰にした際に溶融金属が垂れ落ちることで脱落する場合があります，

溶融池に十分な量の溶融金属が確保されないためにスタッドの端面の全体が接合されず，さらにスタッドの押込み距離が最大にまで達しないため，全周にわたるカラーが形成されない．そして，実験結果よりカラー角度は溶接部の引張強度に直接的に関係しないことがわかったため，大径鋼スタッドの横向溶接における適正な条件の範囲を決める際にカラーの形成は適正な判断基準にはならない．

2-4-4 大径スタッドの横向溶接の適正な条件

溶接作業の条件として一般的に使われるのはアークの電流値と保持時間である．このため，横軸をアークの保持時間とし，縦軸を電流値として，これまでに述べてきた結果をまとめる．

融合不良の結果を Fig.2-38 にまとめる．図中の●印は溶接条件を表し，数値は欠陥度を％で表している．アークからの入熱量が不足する範囲と過剰となる範囲で融合不良による欠陥度が大きくなっている．図中の 2 本の曲線で囲まれた範囲でしきい値である 10%より小さくなる．

気孔の結果を Fig2-39 にまとめる．数値は欠陥度を％で表している．アークの電流値が小さく保持時間が短い範囲では気孔は発生せず，図中の曲線で区切られた，アークの電流値が大きく保持時間が長い範囲でしきい値である 10%より大きくなる．

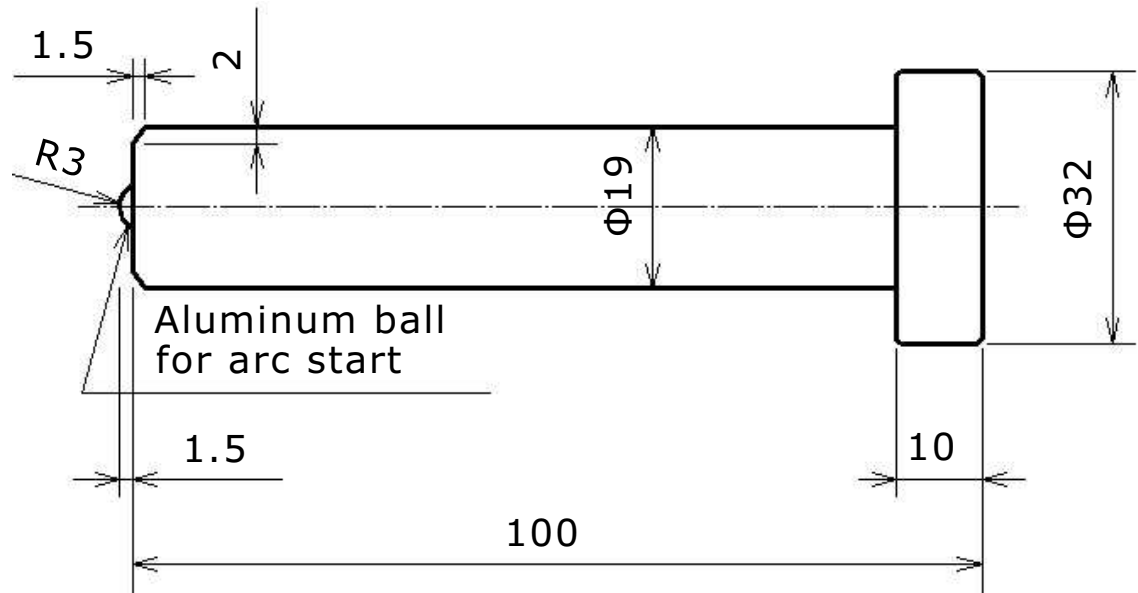
引張強度の結果を Fig.2-40 にまとめる．数値は引張強度の平均値を表している．図中の 2 本の曲線で囲まれた範囲で JIS の規定値を満たす継手となる．

Fig.2-38, Fig.2-39, Fig2-40 より本章の実験結果を Fig.2-41 に総括し，大径スタッドの横向溶接における適正な条件を決定する．JIS の規定値である引張強度 113kN を判定基準として，図中の○印と●印は適合となる溶接条件であり，◆印は不適合をとる溶接条件である．また，○印はスタッドの軸部で破断した継手を表し，●印と◆印は溶接部で破断した継手を表す．言うまでもなく，前者の継手においてはすべてが適合であると判定された．アークの電流値と保持時間に関して適正な溶接条件の範囲は，アークの電流値が大きく保持時間が短い範囲であることがこの図よりわかる．

その理由として、まず溶融池の形成に対する熱量という要因が挙げられる。これにより、図中の右上および左下の範囲ではそれぞれアークからの入熱量が不足もしくは過剰となるために適正な条件とはならない。次に、それらの中間の範囲において、アークの電流値は大きいが保持時間は短い溶接条件と、アークの電流値は小さいが保持時間は長い溶接条件を比べると、後者の溶接条件においては長時間の保持の間に溶融池の溶融金属の垂れ落ちが進み、気孔も多く発生するのに対して、前者の溶接条件においては逆である。このため具体的には、直径 19mm の頭付き鋼スタッドの横向溶接において、欠陥度がしきい値である 10% より小さくなり、JIS の規定値を満たす継手となる溶接条件は、アークの電流量が 2.0~2.5kA で、保持時間が 0.3~0.4s であると決定される。

なお、日本におけるスタッド溶接部材の主たる供給元は、直径 19mm の頭付き鋼スタッドを下向溶接する場合においてアークの電流値が 1.5 kA で保持時間が 1.0s である溶接条件を推奨しており、図中にはその範囲を円で示した。横向溶接においてもこの溶接条件とした場合に JIS の規定値を満たす継手となるが、横向溶接における最適な溶接条件よりもアークの電流値は小さいが保持時間は長い溶接条件である。このことは下向溶接の溶接条件が横向溶接にそのまま適用されないことを意味する。

(a)



(b)

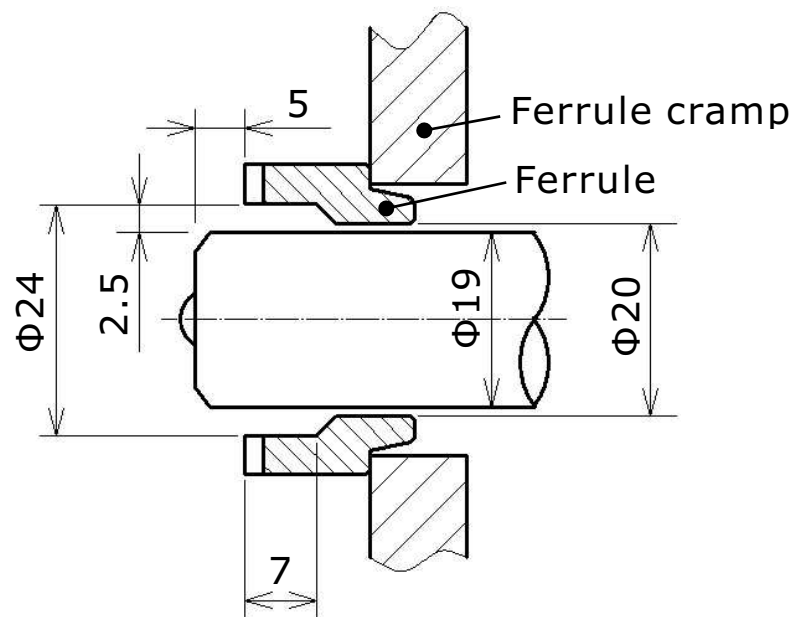
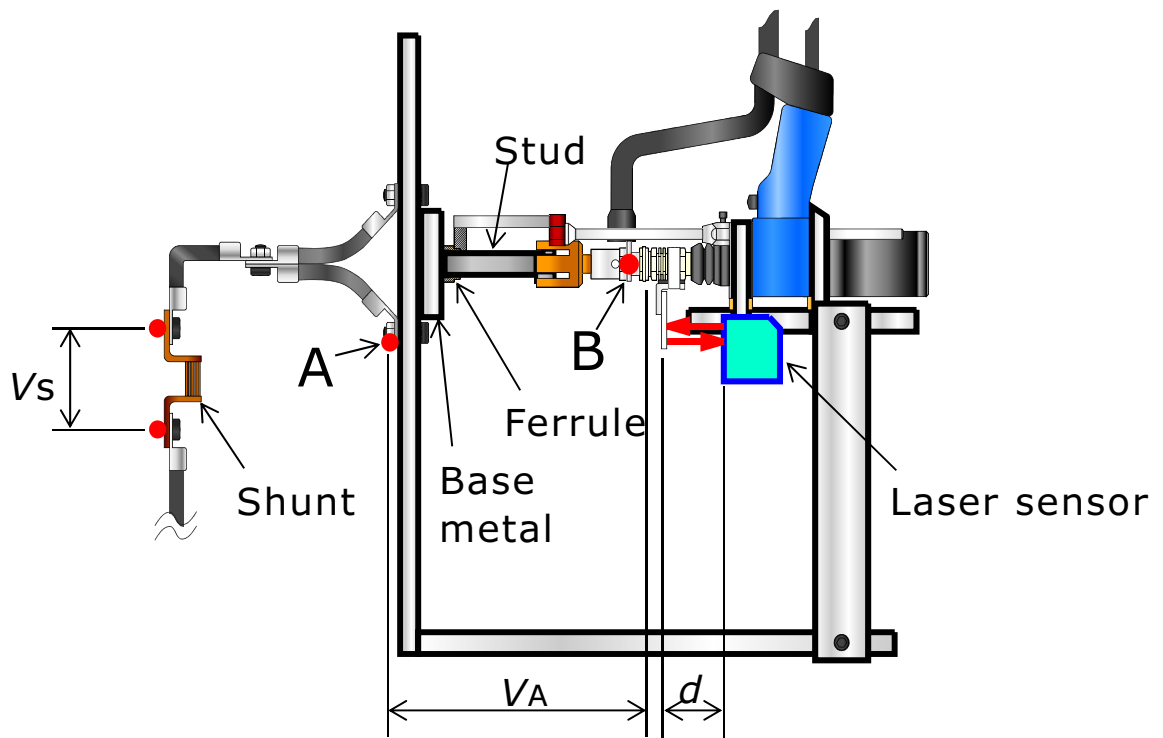


Fig.2-1 Dimension of stud and ferrule



V_A : arc voltage

V_s : voltage of shunt to monitor welding current

d : distance between laser sensor and reflecting plate
(corresponding to relative displacement of stud)

Fig.2-2 Apparatus for arc stud welding

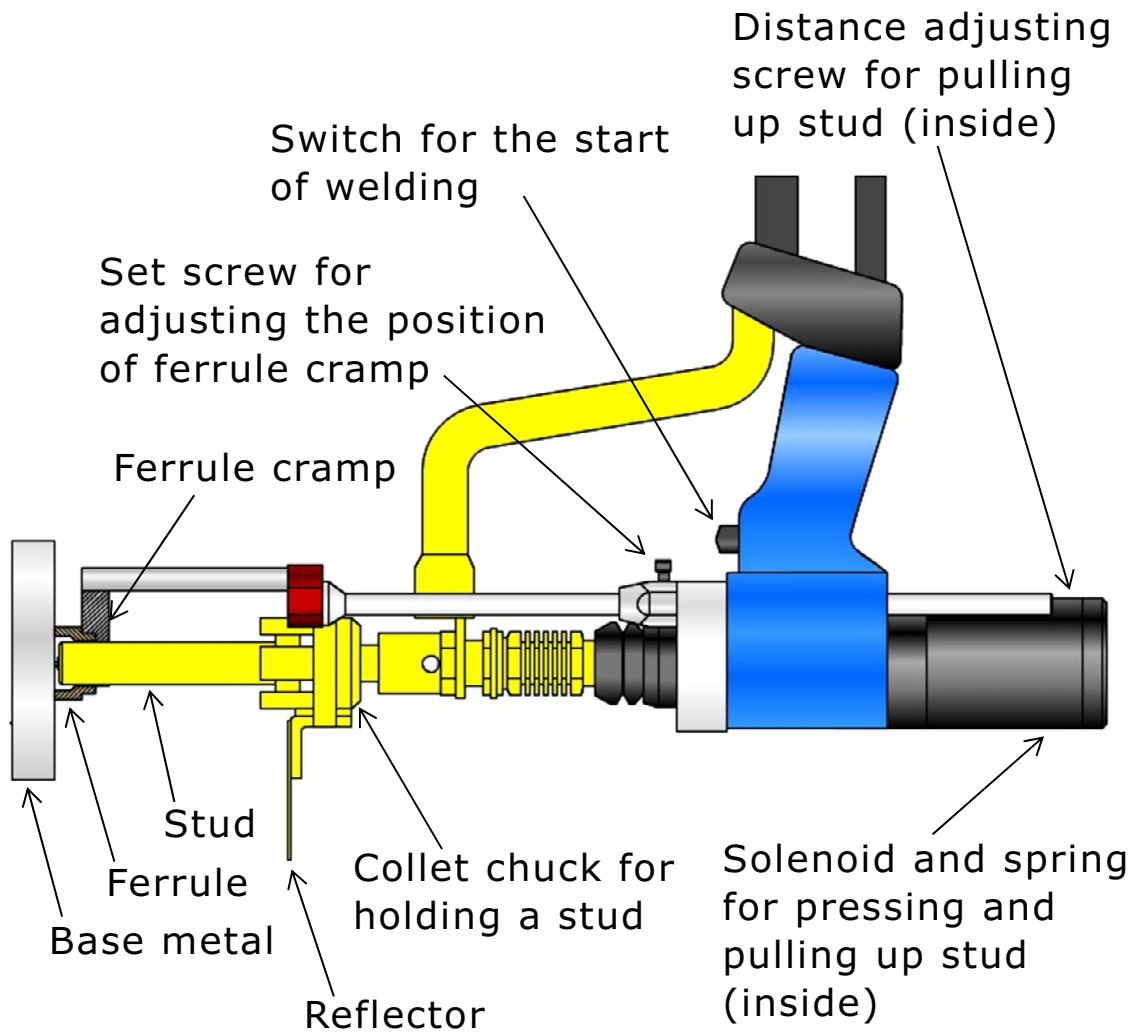


Fig.2-3 Details of welding gun

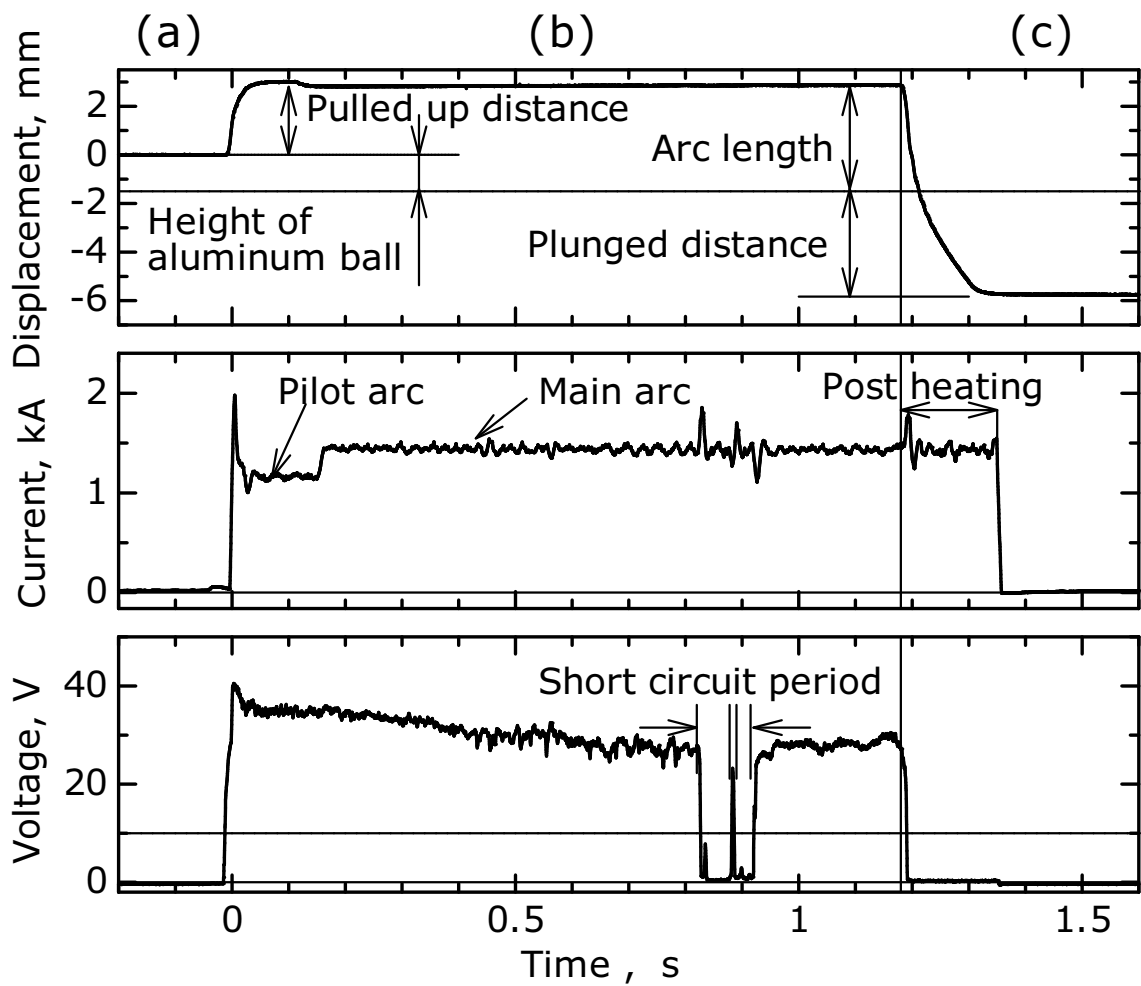
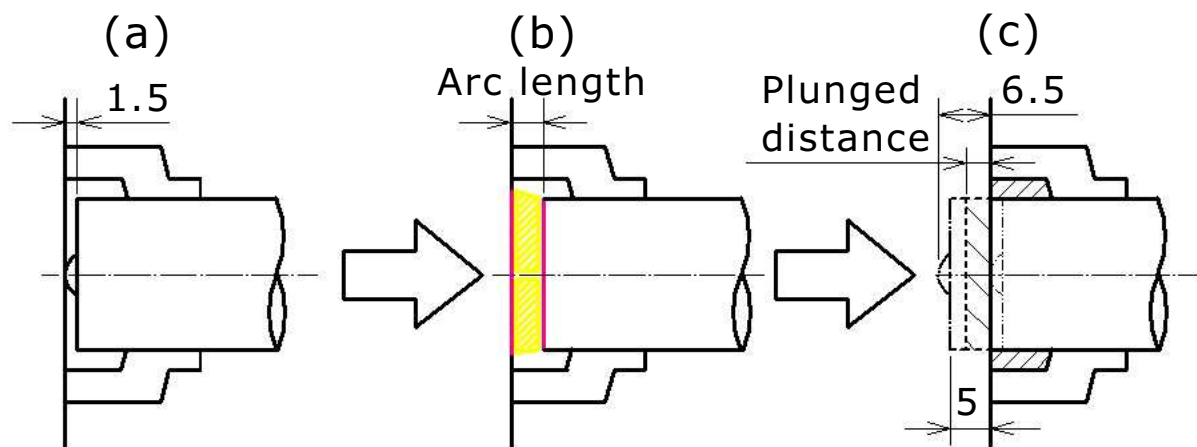


Fig.2-4 Motion of stud and resultant change of current and voltage in arc stud welding

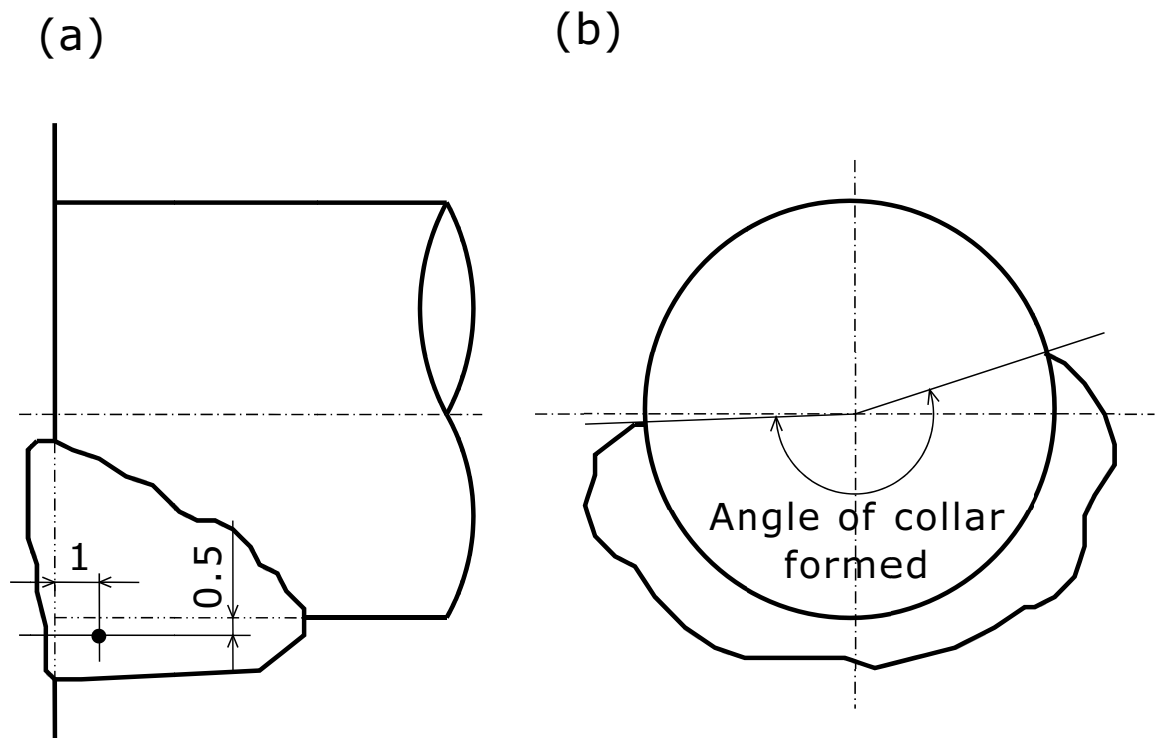


Fig.2-5 Criterion of collar and definition of angle of collar formed

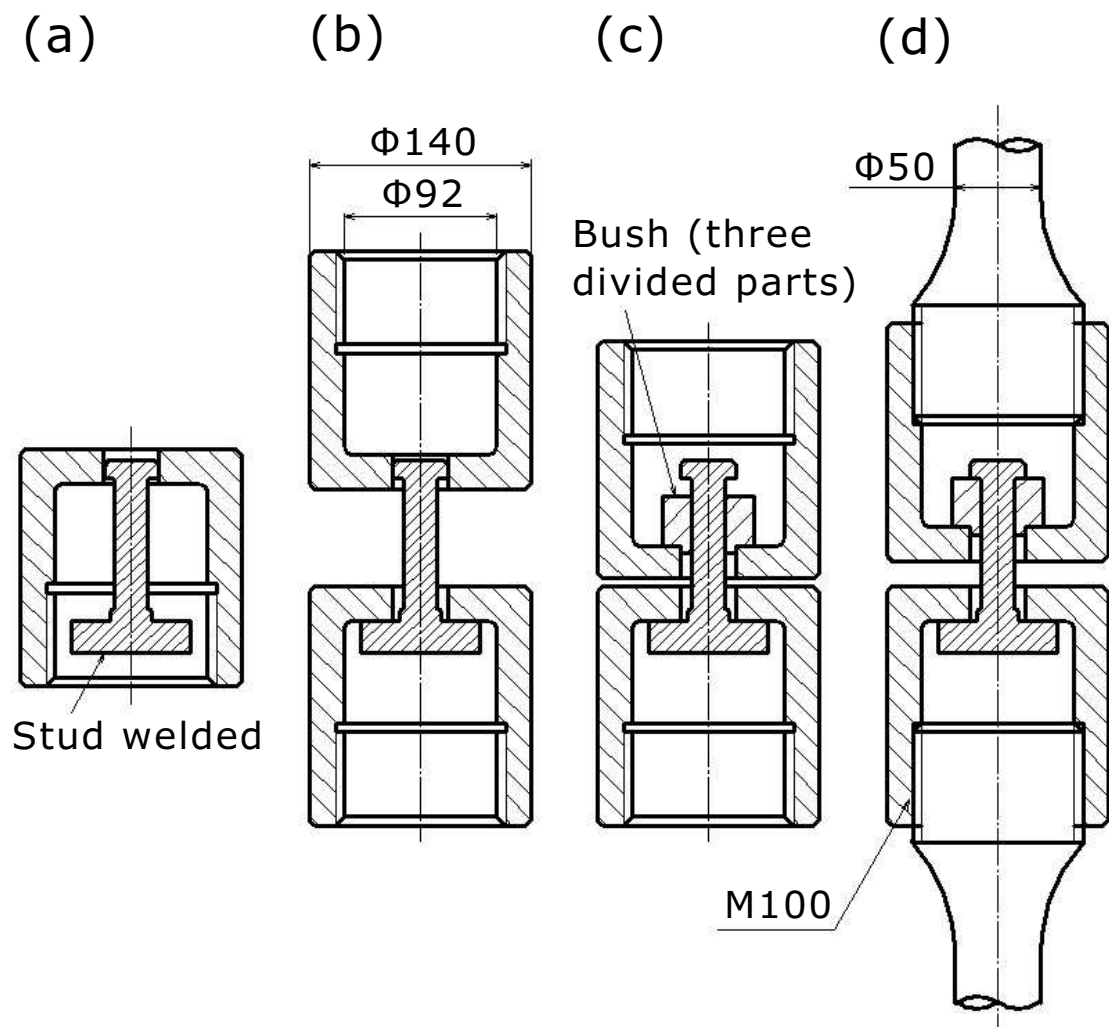


Fig.2-6 Procedure of the setup of jigs for tensile strength test

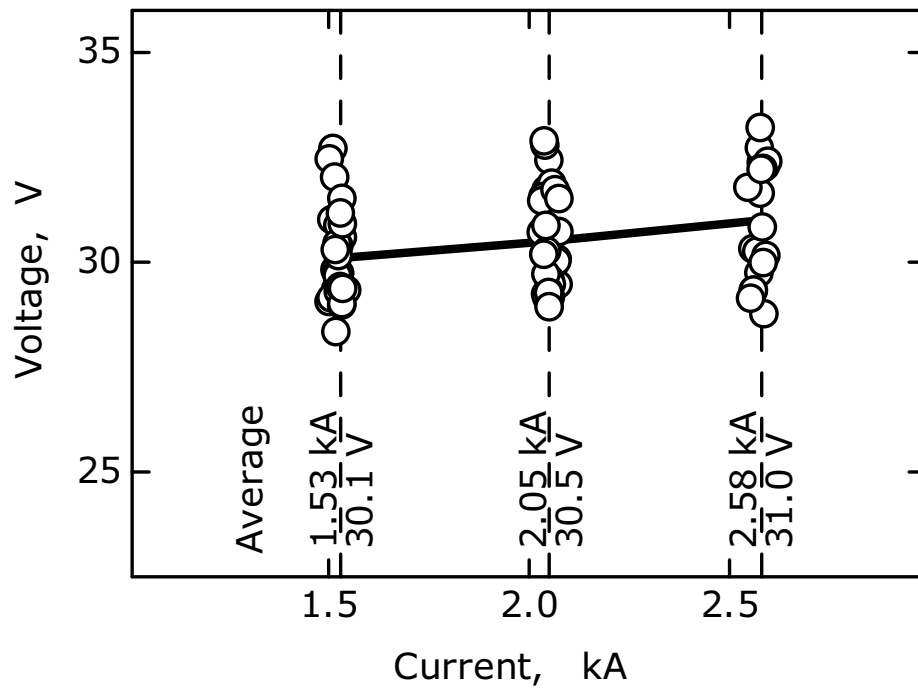


Fig.2-7 Change of voltage for currents in arc stud welding

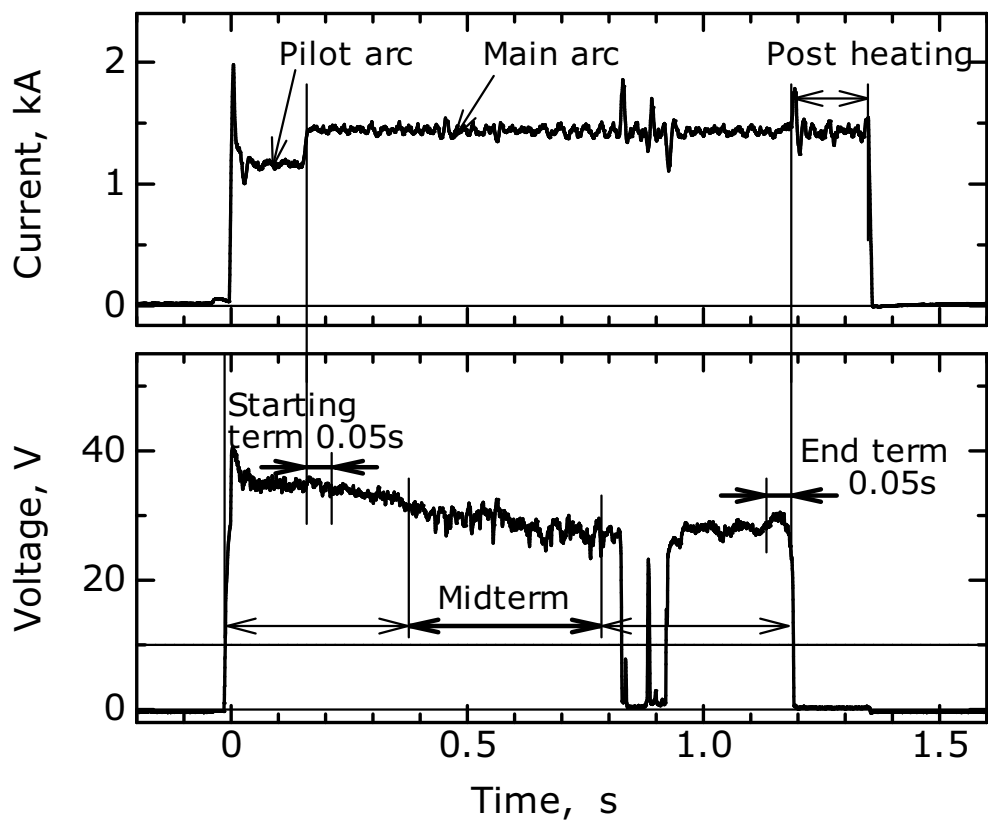


Fig.2-8 Measuring a temporal change of voltage

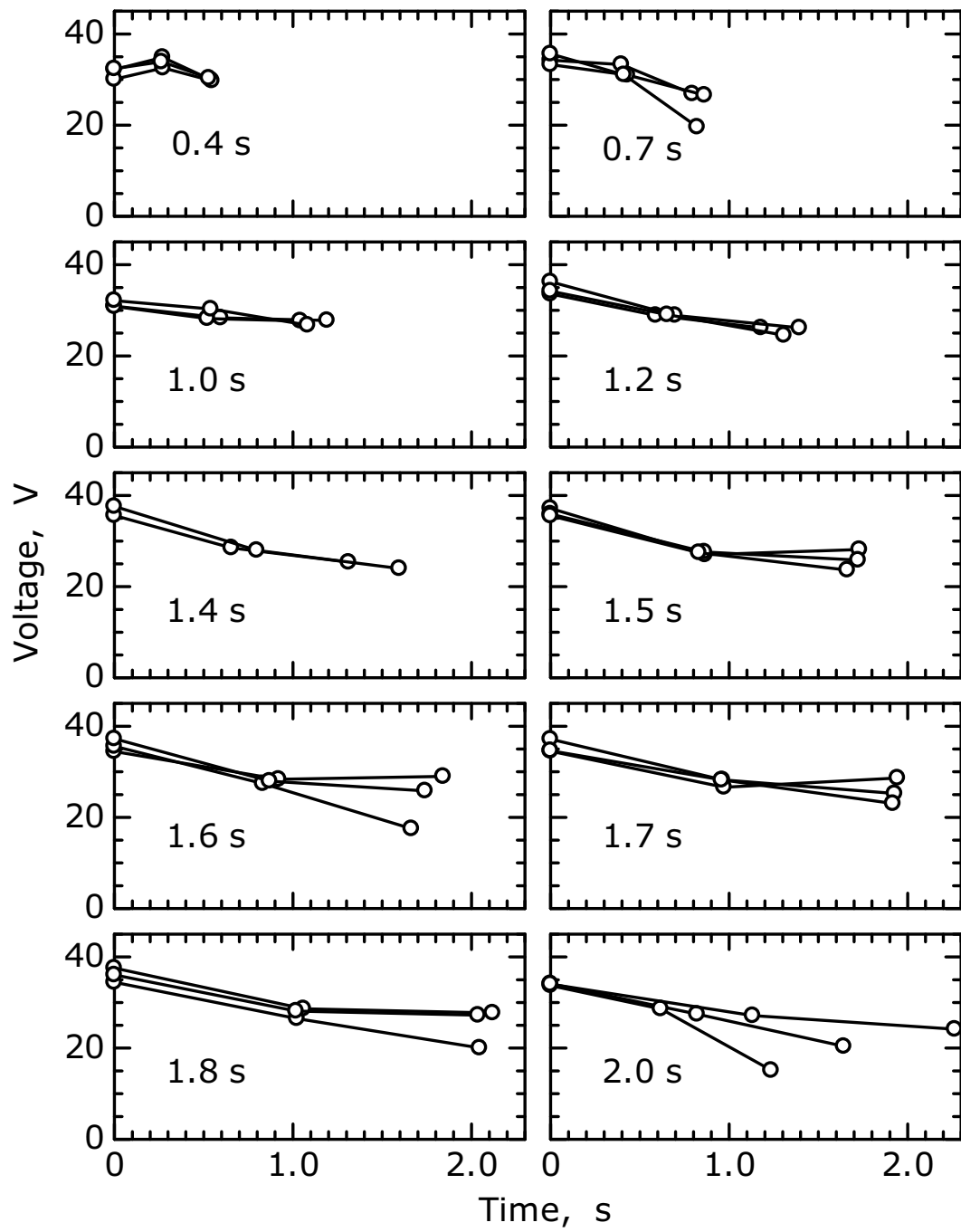


Fig.2-9 Temporal change of arc voltage(1.5kA)

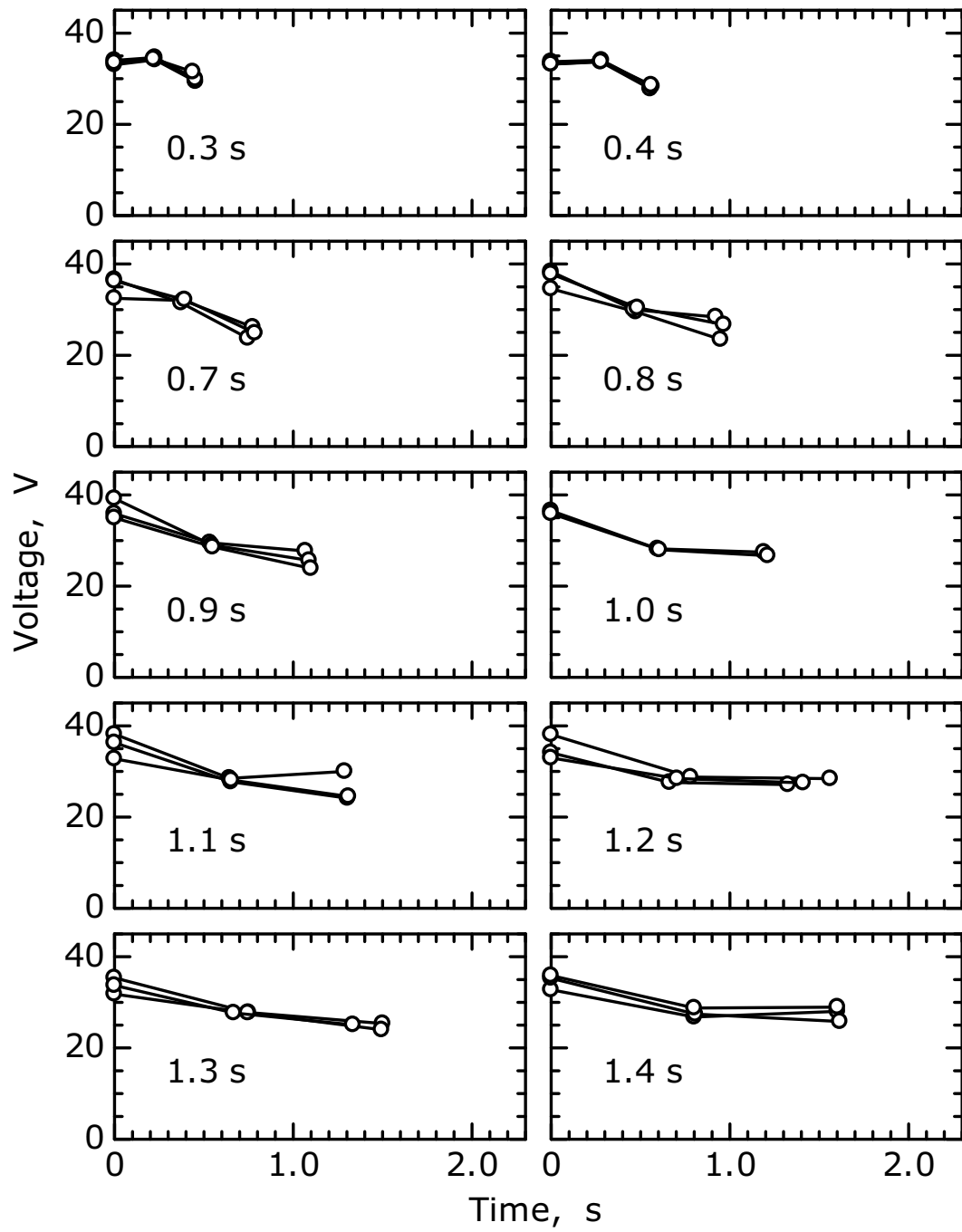


Fig.2-10 Temporal change of arc voltage(2.1kA)

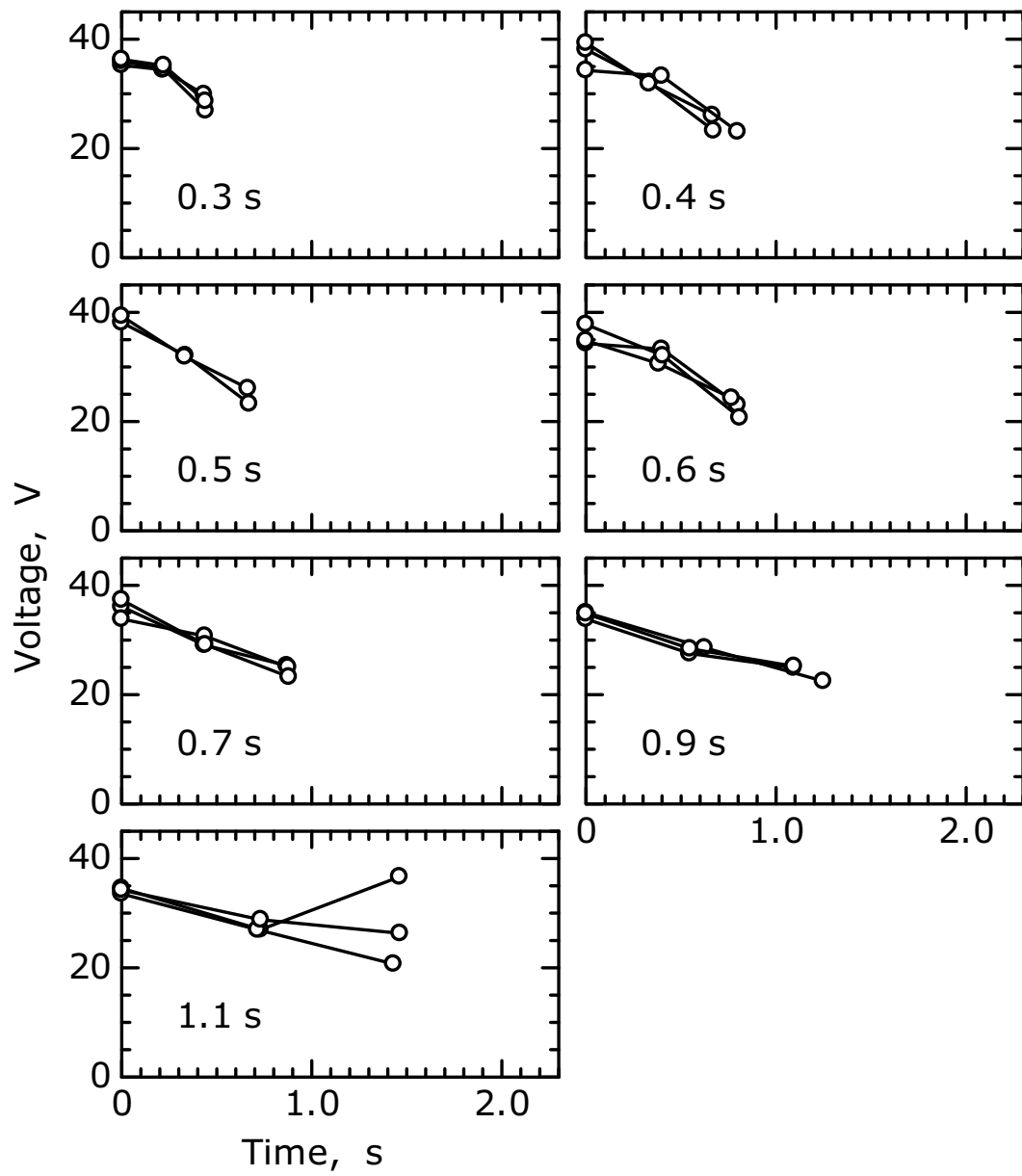


Fig.2-11 Temporal change of arc voltage(2.6kA)

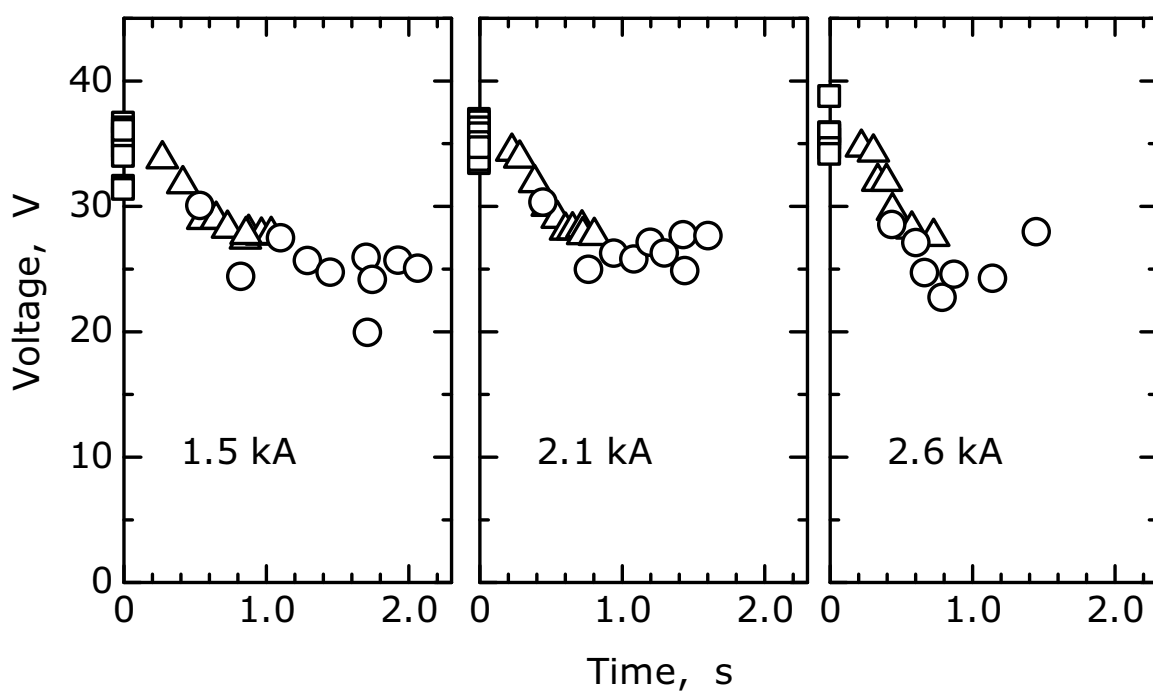


Fig.2-12 Influence of arc current on temporal change of arc voltage

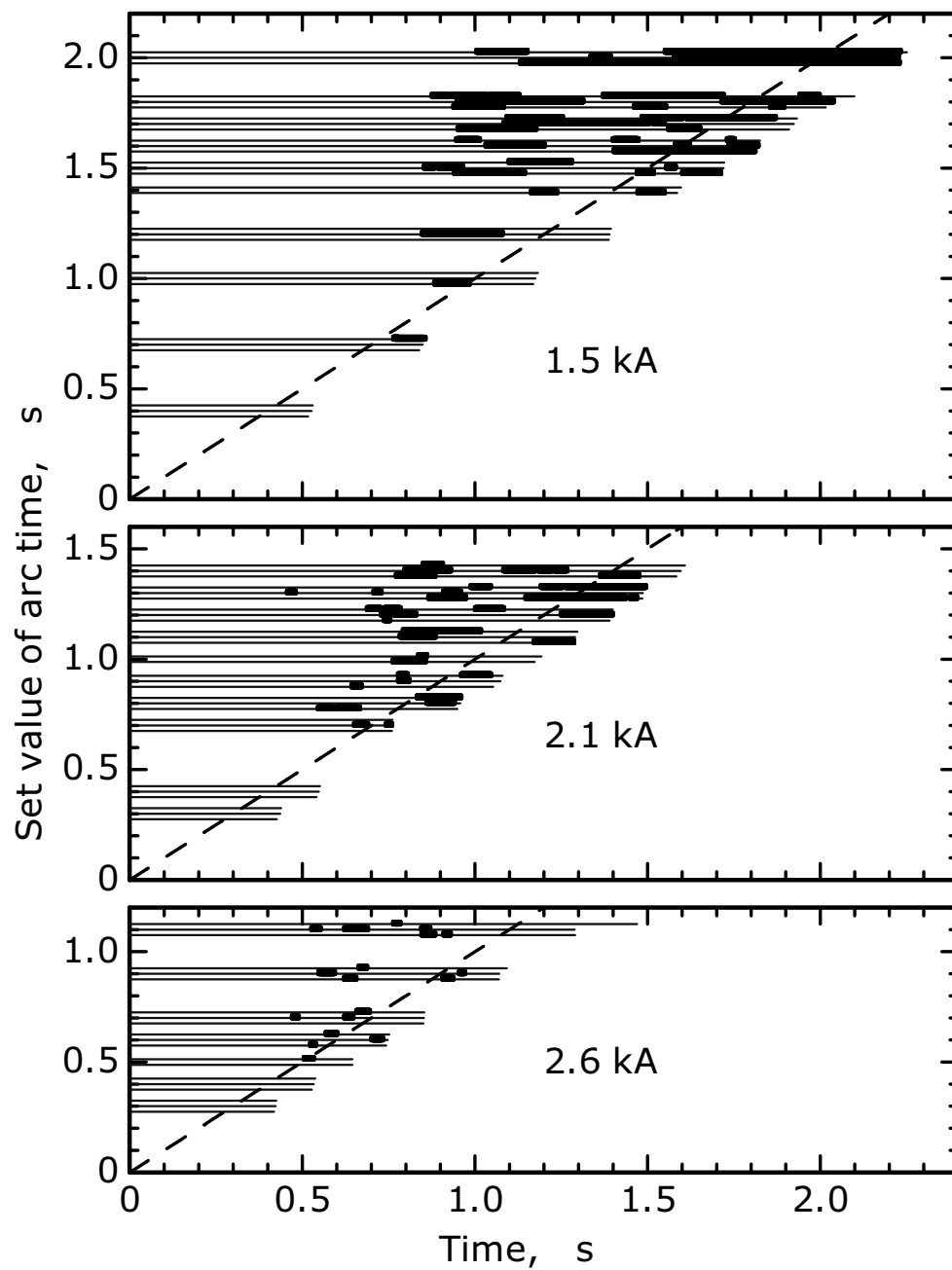


Fig.2-13 Occurrence of short circuit during welding

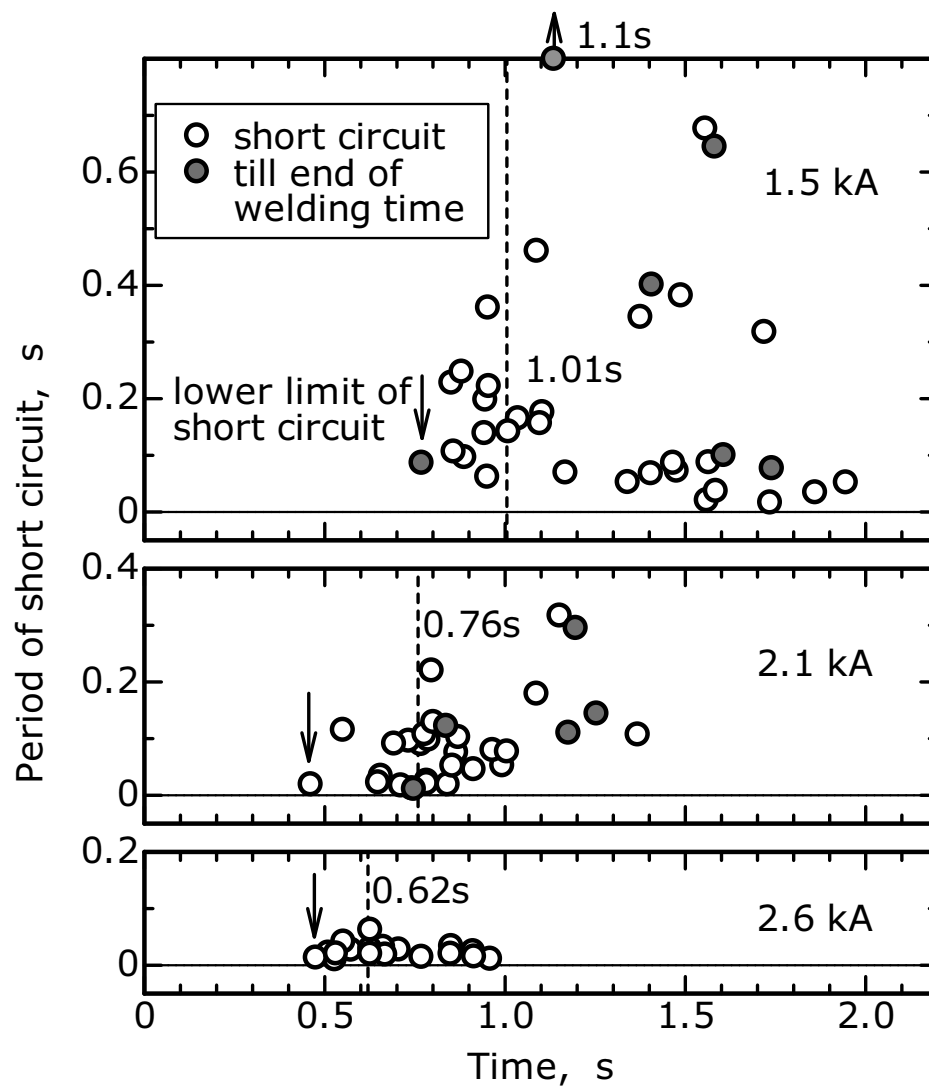


Fig.2-14 Influence of current on initial time and total period of short circuit

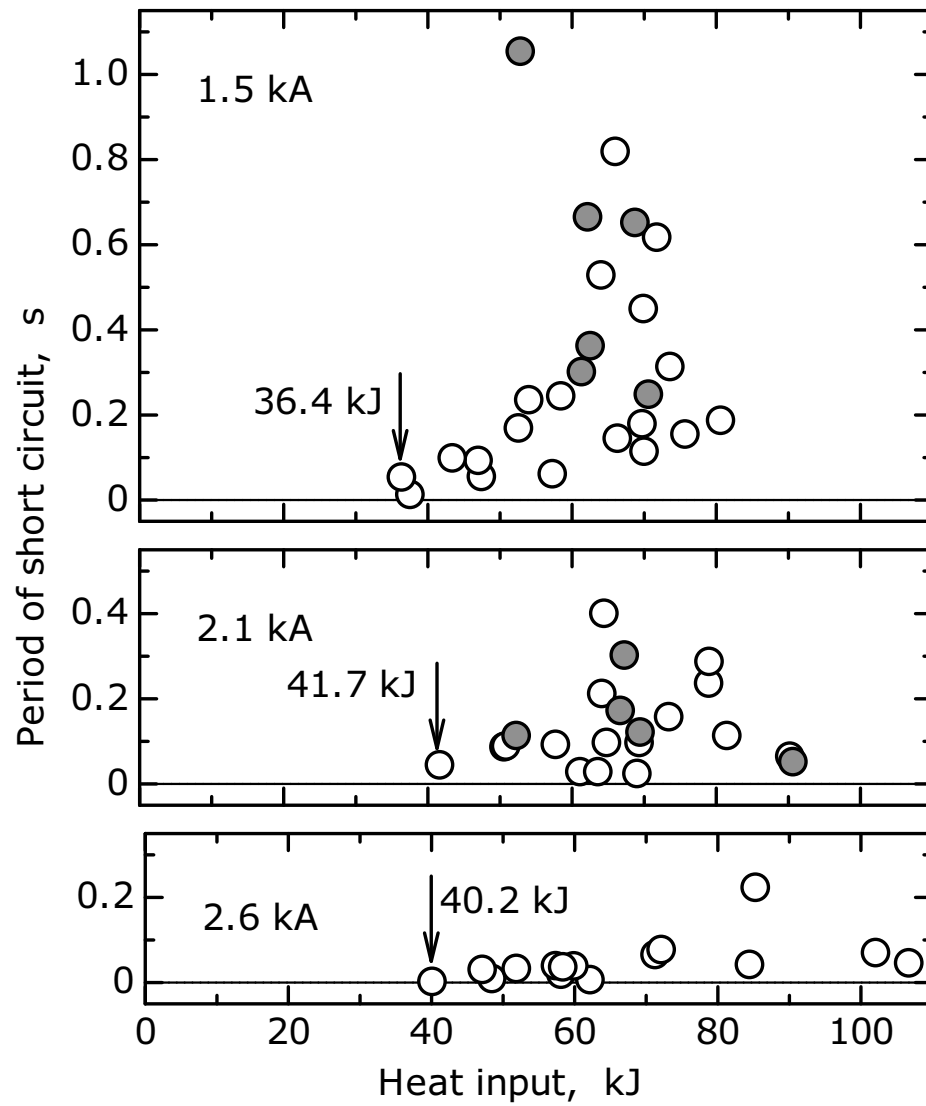


Fig.2-15 Initial time and total period of short circuit for heat input

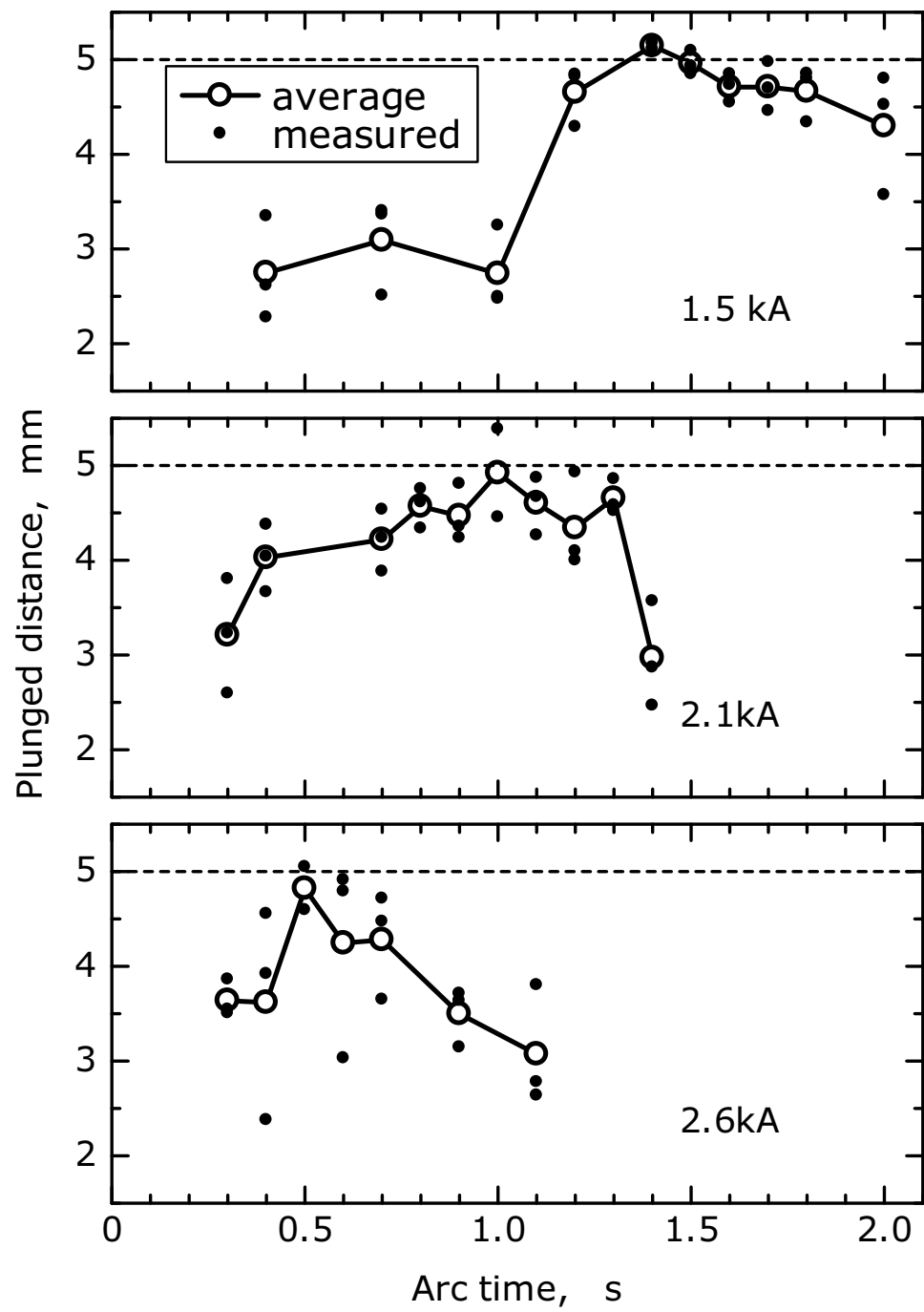


Fig.2-16 Influence of arc time on plunged distance

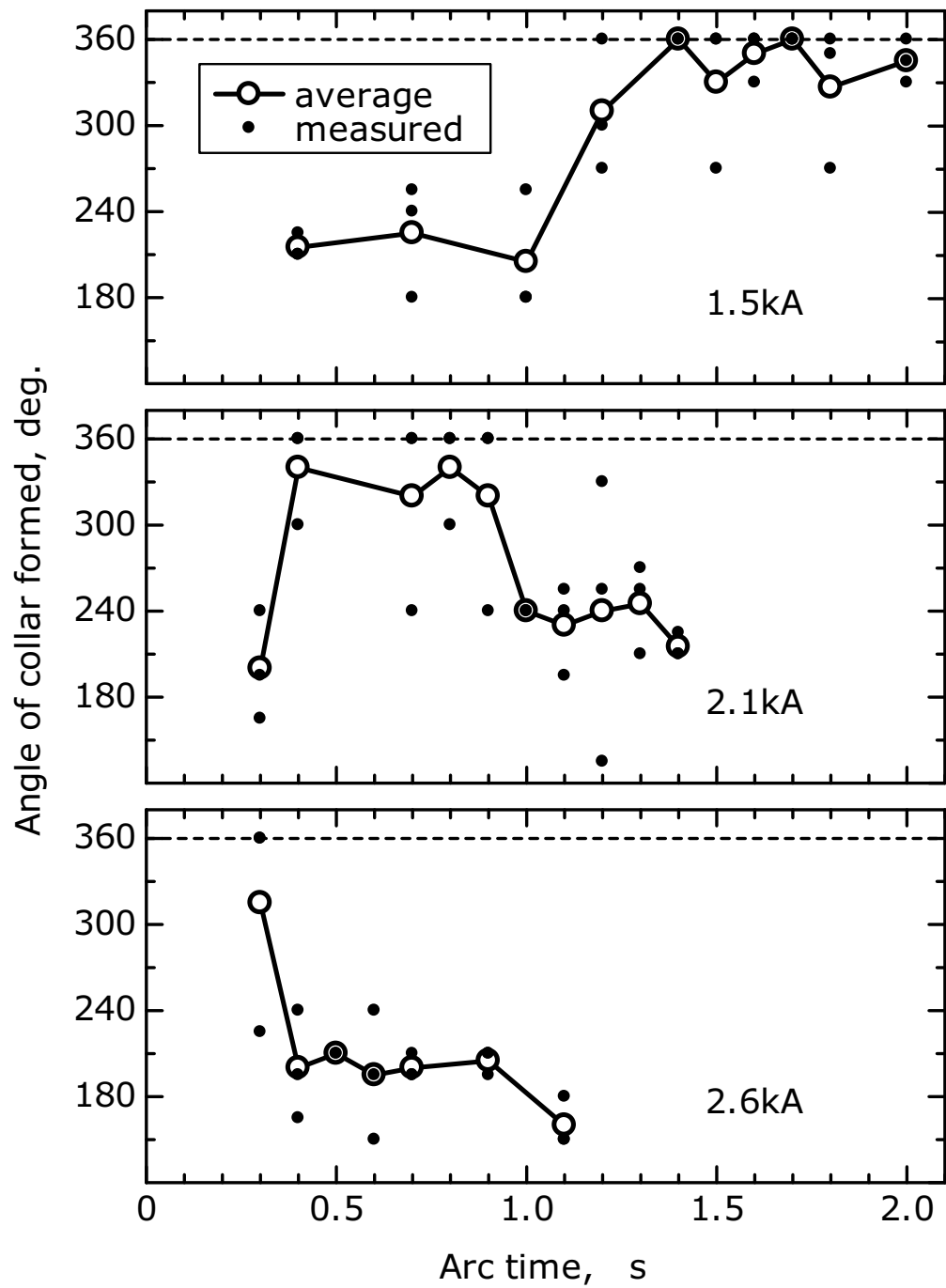


Fig.2-17 Influence of arc time on angle of collar formed

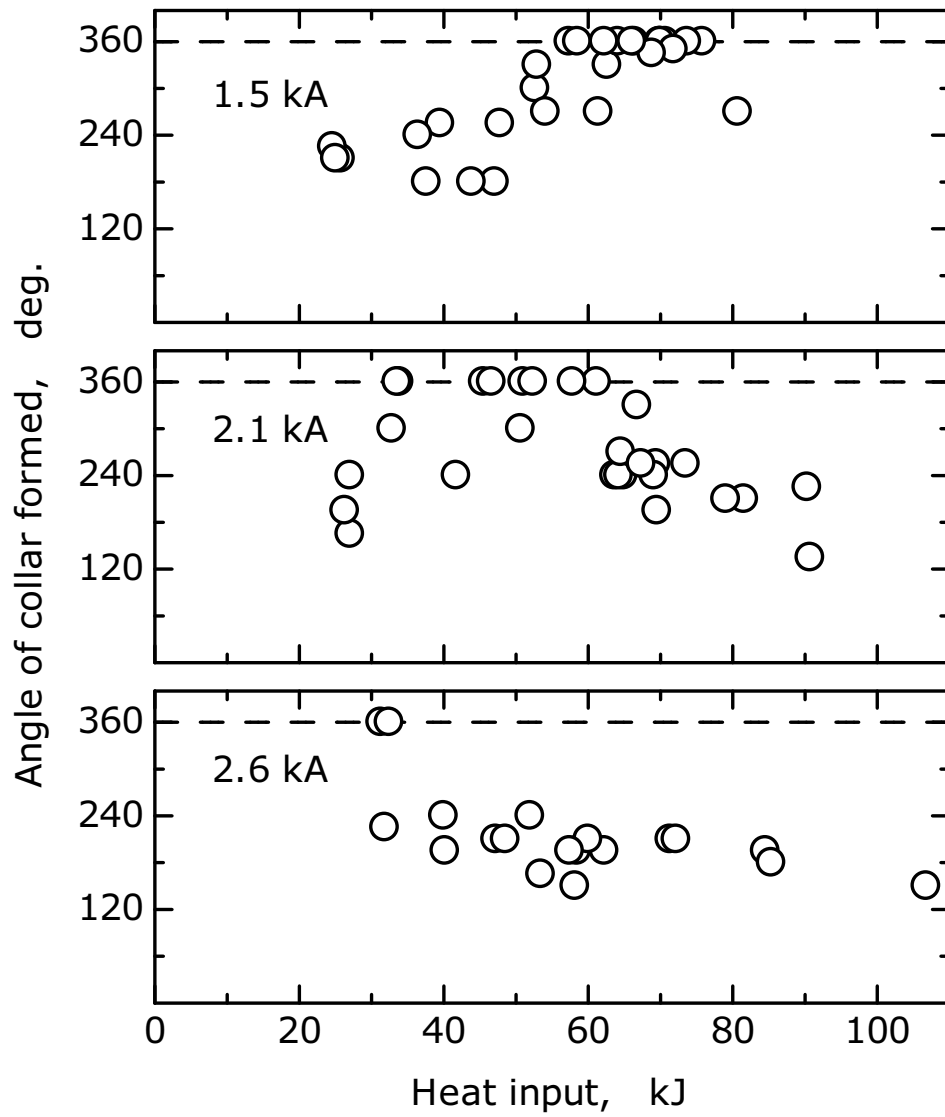


Fig.2-18 Correlation between heat input and angle of collar formed

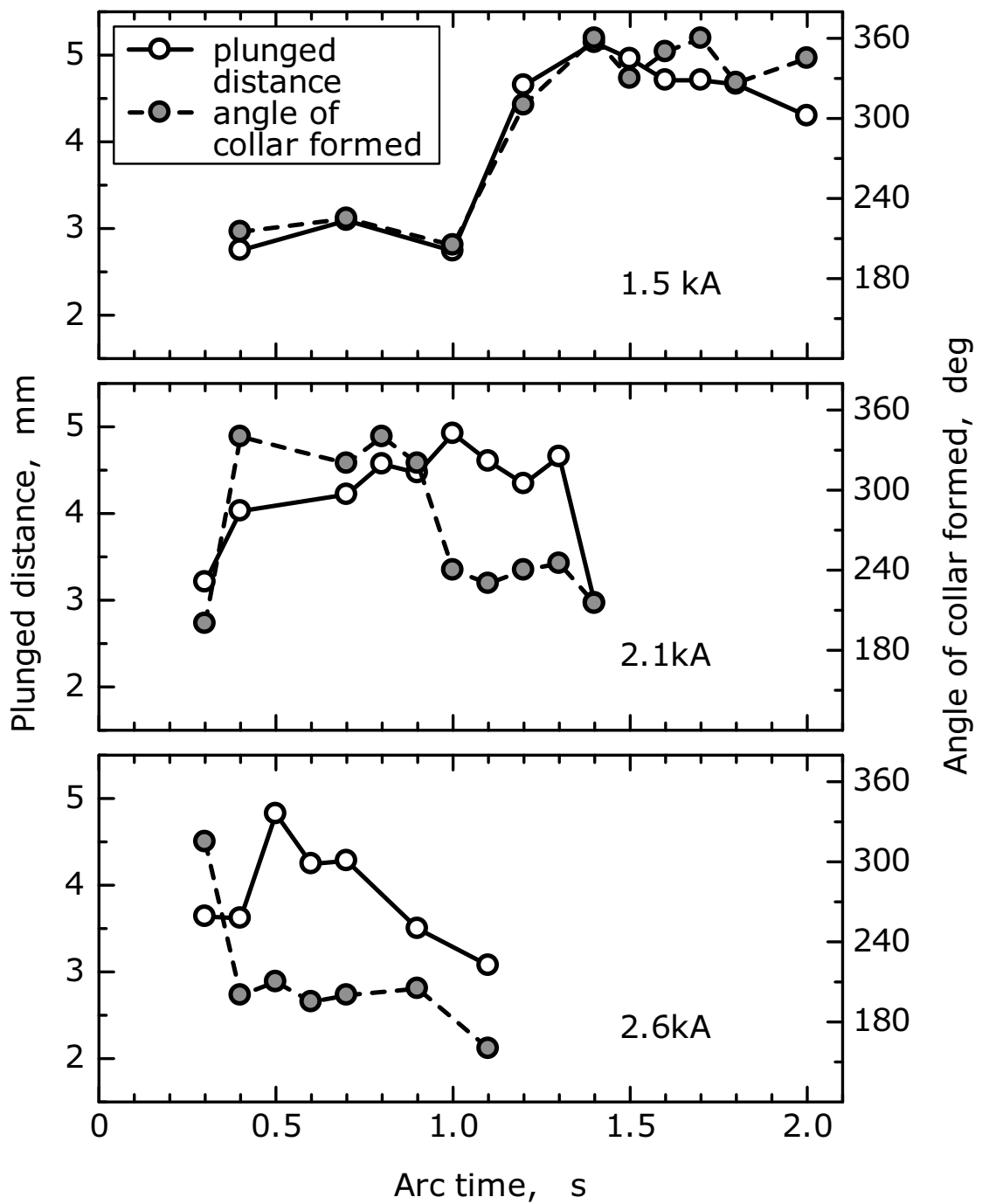


Fig.2-19 Influence of arc time on plunged distance and angle of collar formed

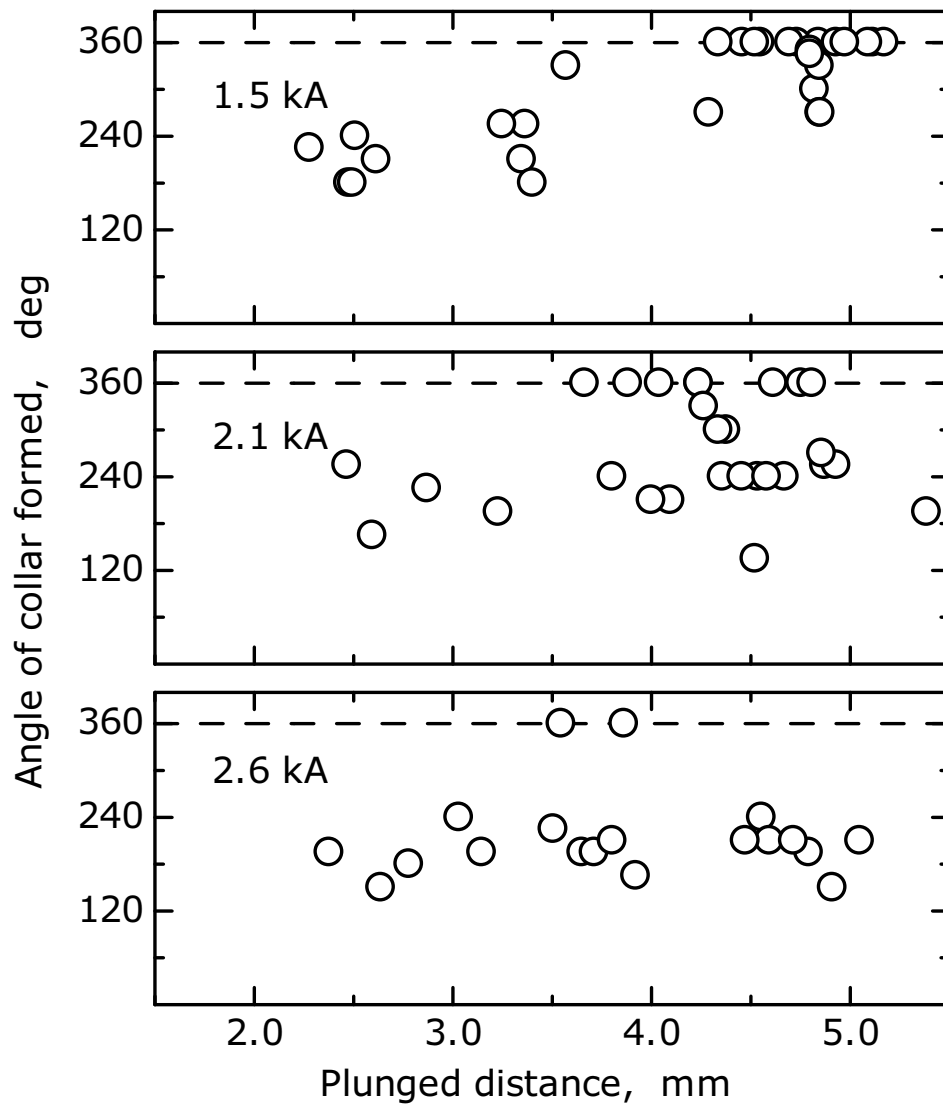


Fig.2-20 Correlation between plunged distance and angle of collar formed

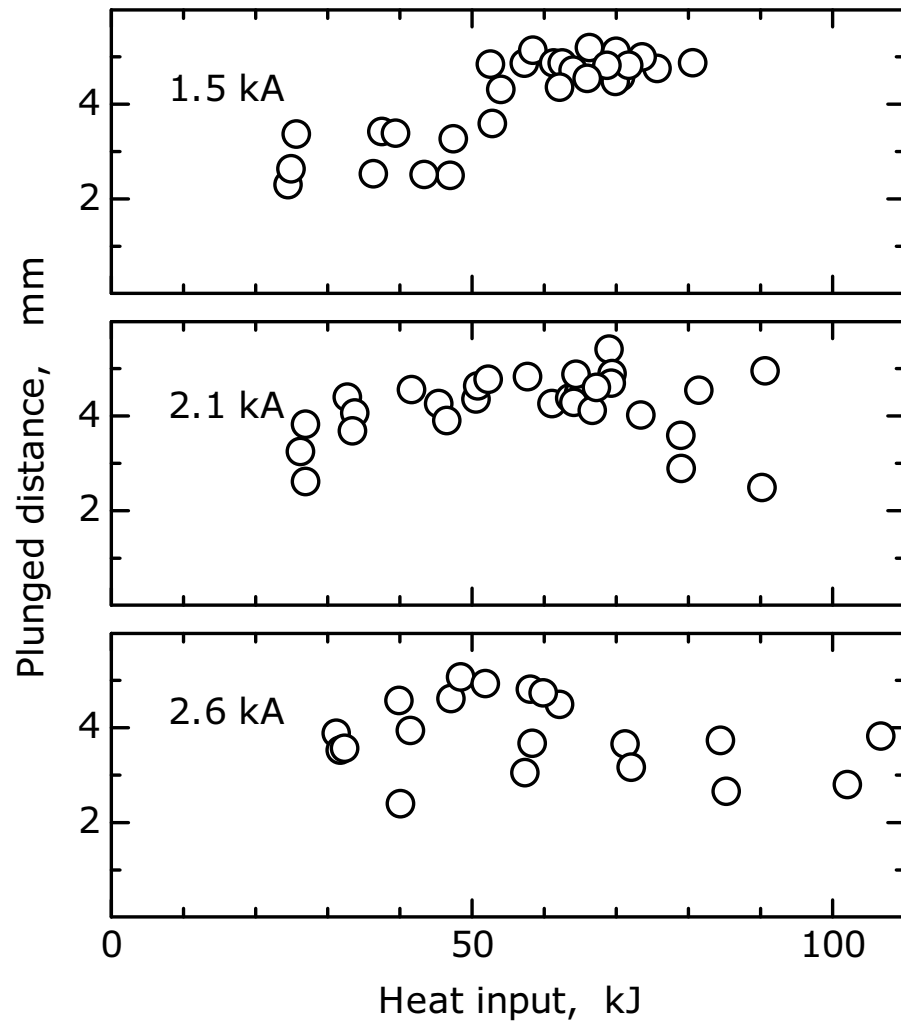
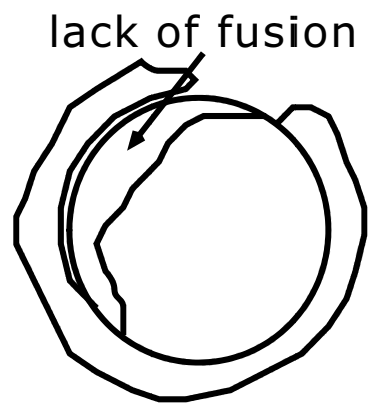
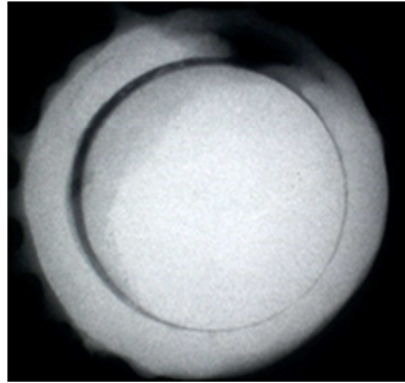


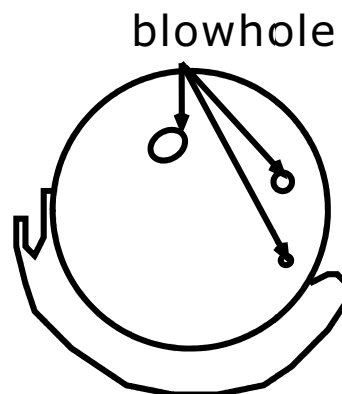
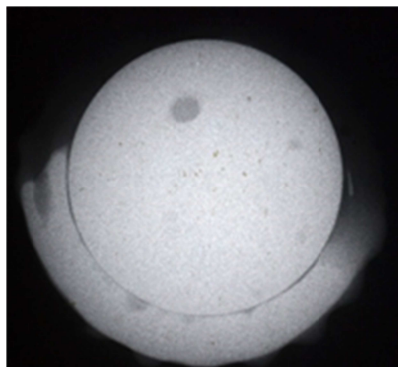
Fig.2-21 Correlation between heat input and plunged distance

(a)



Current 1.5kA, Arc time 1.6 s

(b)



Current 2.5kA, Arc time 0.5 s

Fig.2-22 X-ray photographs of stud welded incorporating
(a) lack of fusion and (b) blowholes, respectively

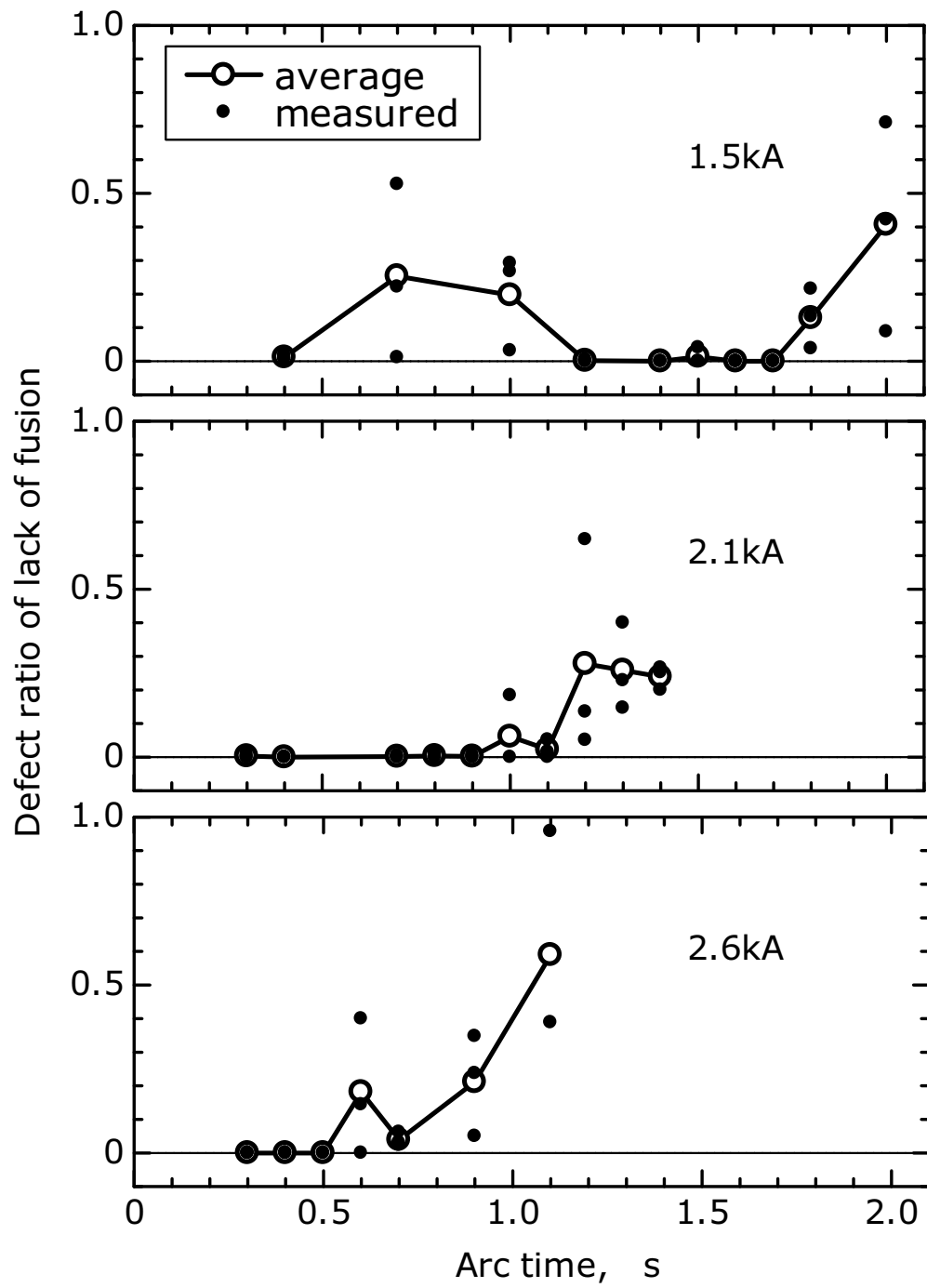


Fig.2-23 Influence of arc time on defect ratio of lack of fusion

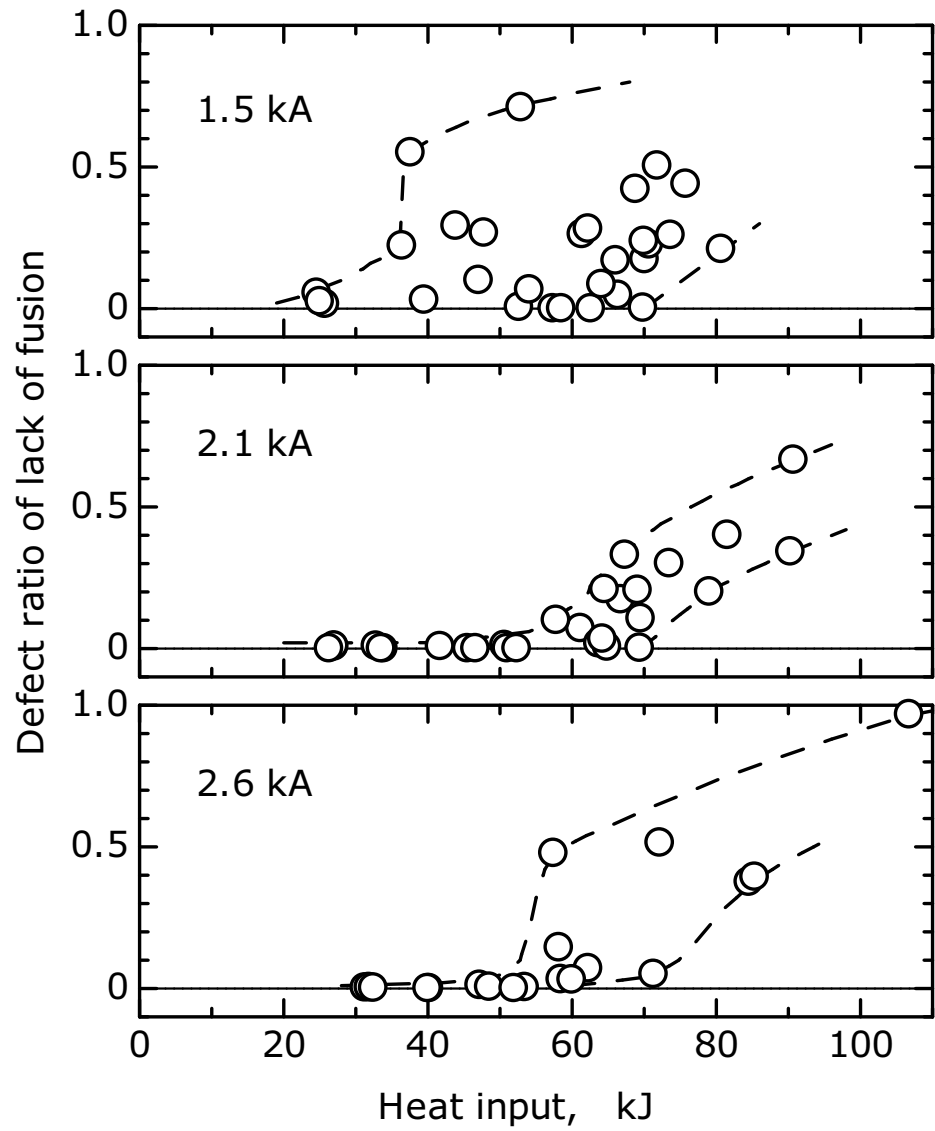


Fig.2-24 Influence of heat input on defect ratio of lack of fusion

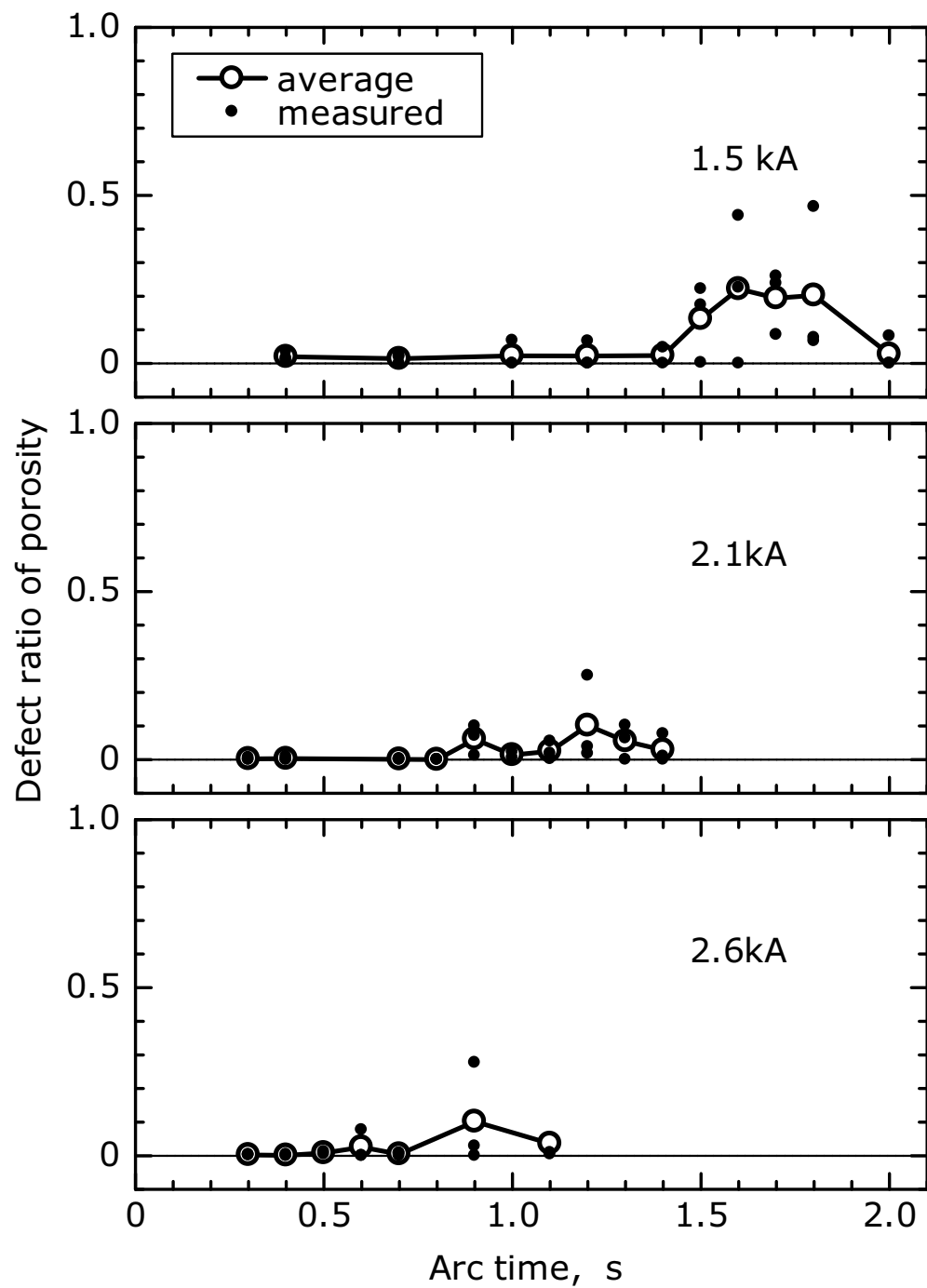


Fig.2-25 Influence of arc time on defect ratio of porosity

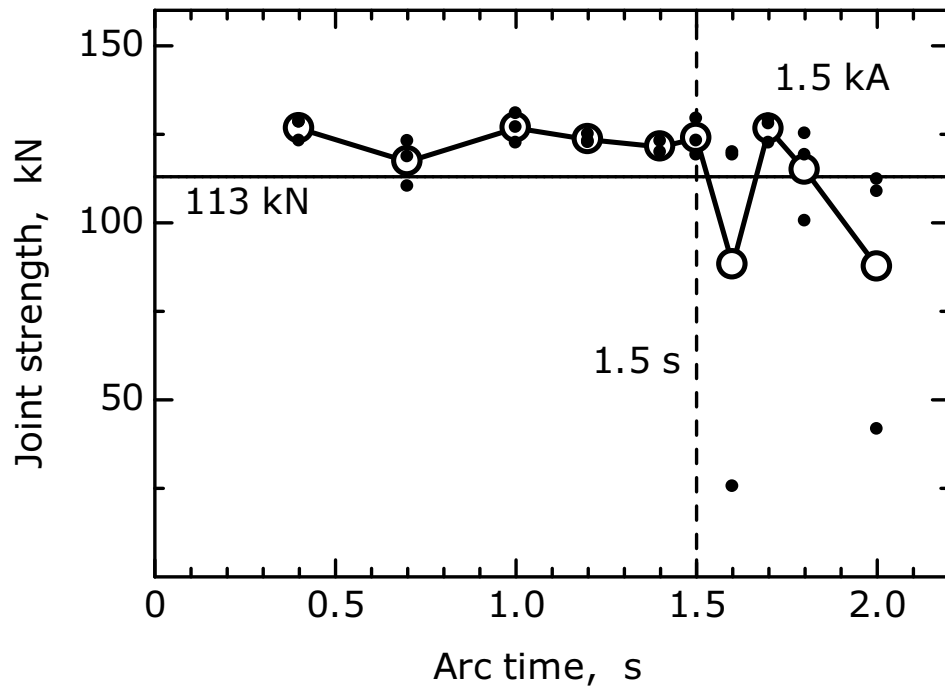


Fig.2-26 Influence of arc time on joint strength welded with current of 1.5kA

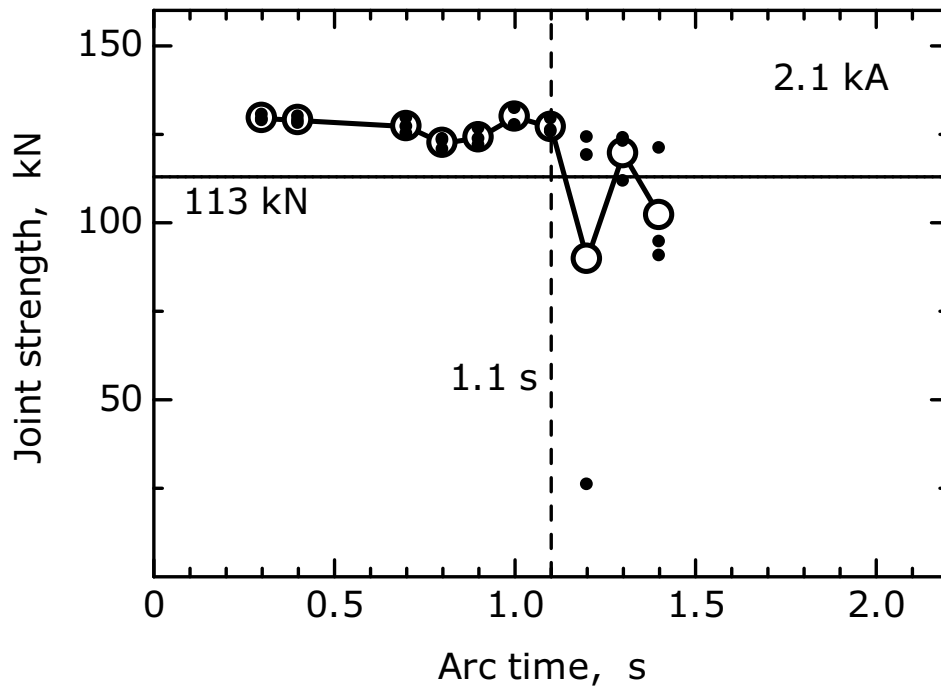


Fig.2-27 Influence of arc time on joint strength welded with current at 2.1kA

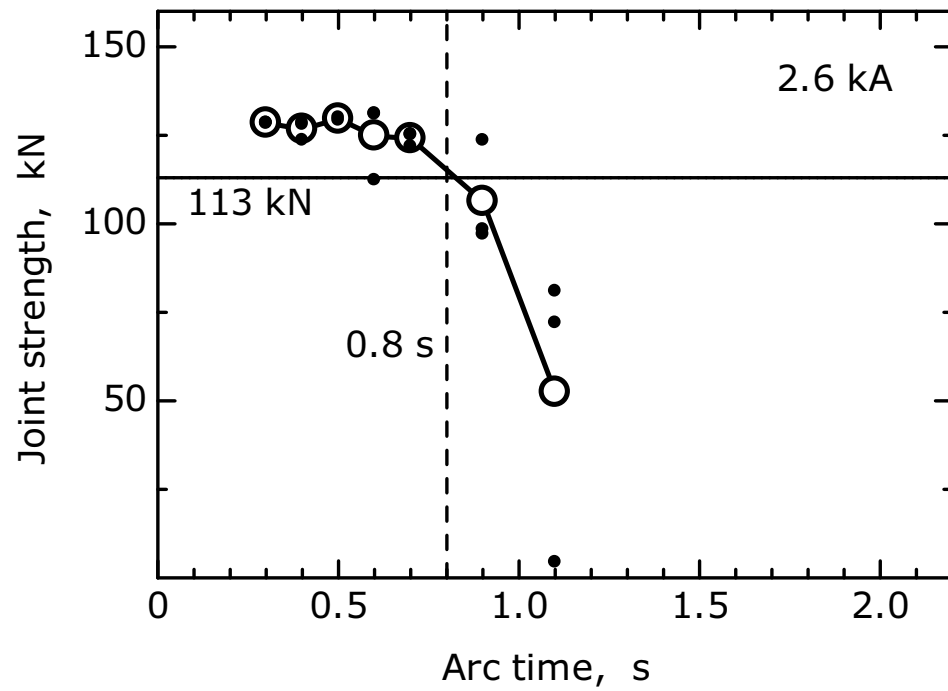


Fig.2-28 Influence of arc time on joint strength welded with current of 2.6kA

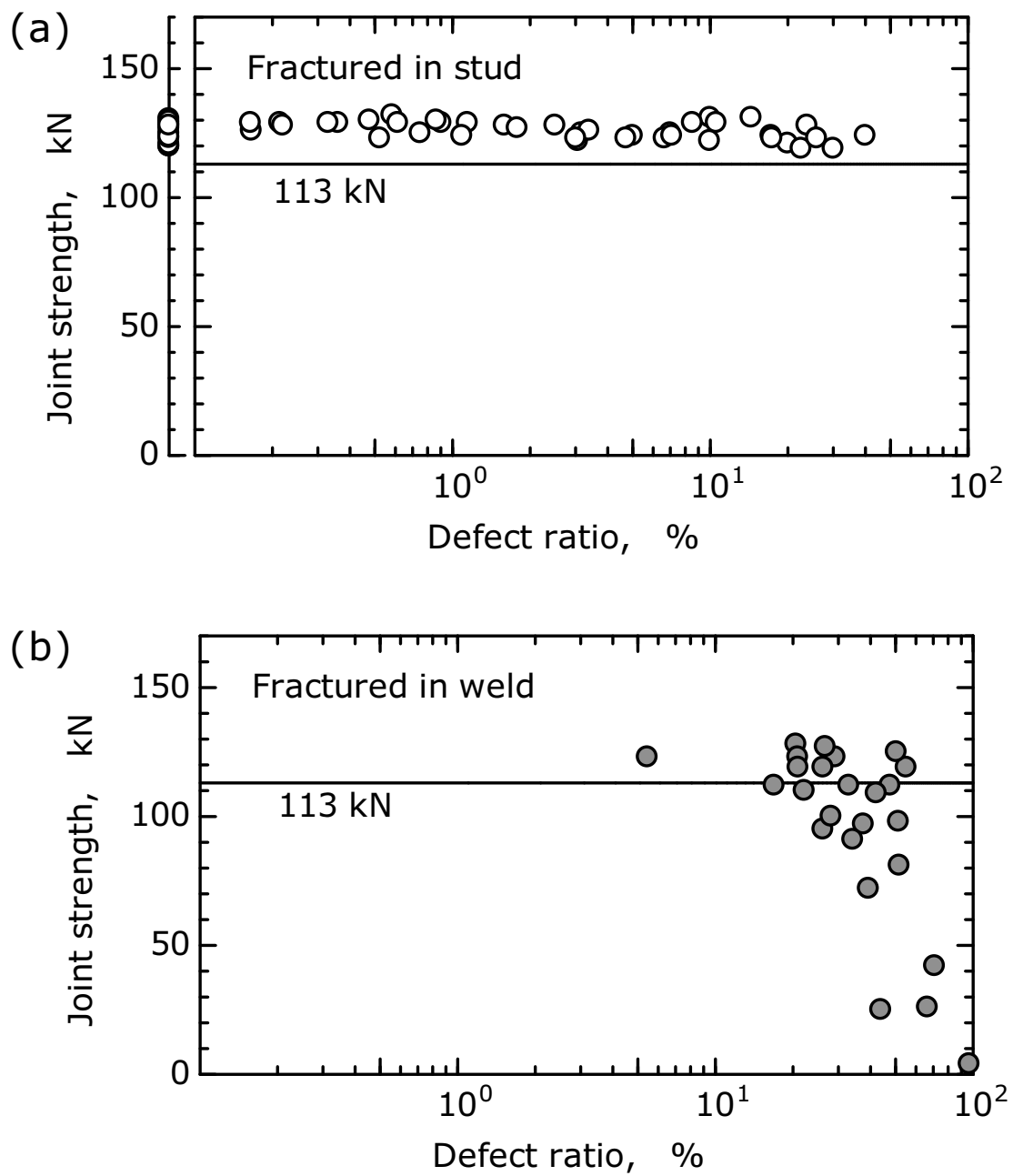


Fig.2-29 Relationship between defect ratio and joint strength;(a)fractured in stud, (b)fractured in weld

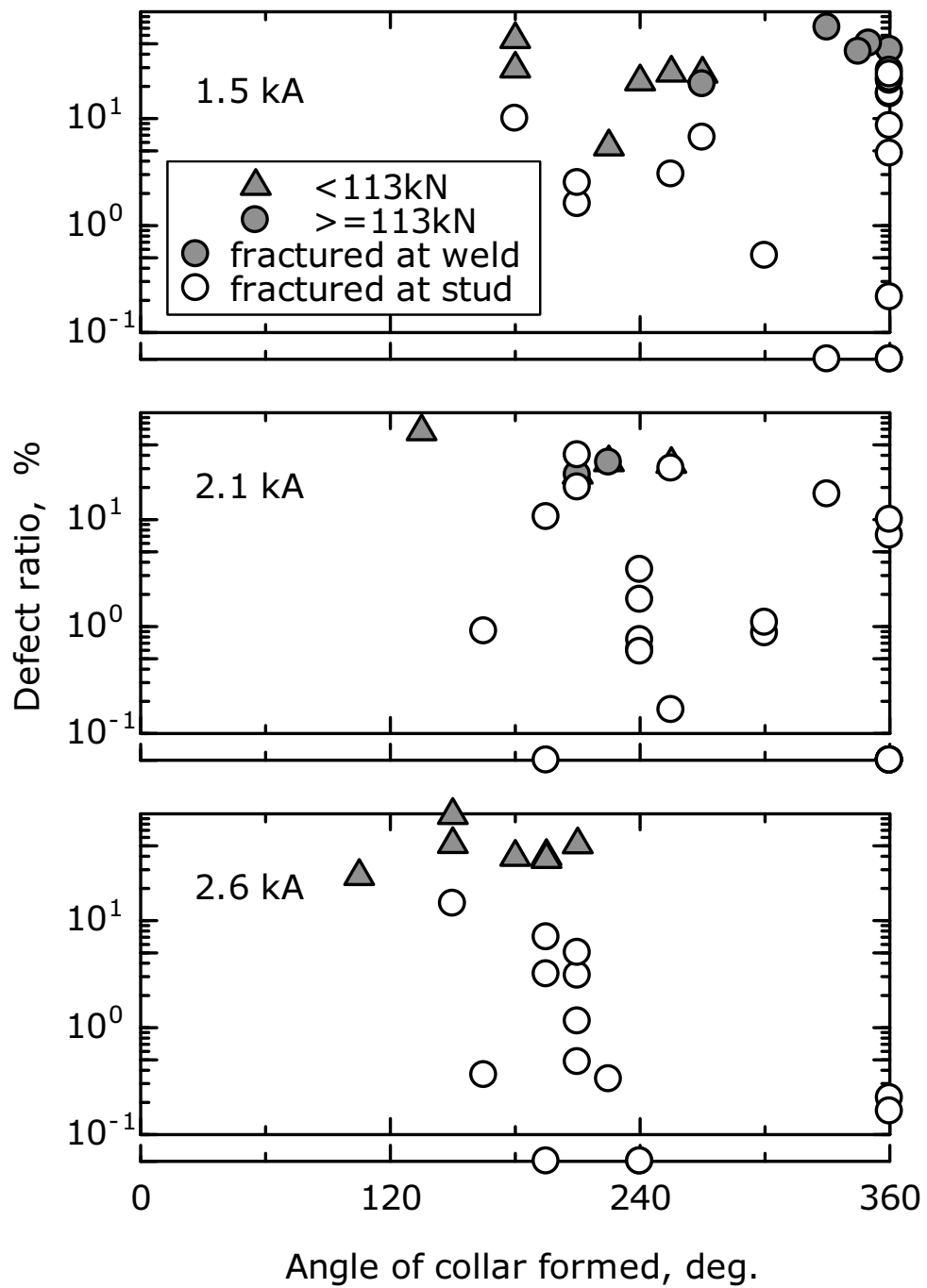


Fig.2-30 Correlation between angle of collar formed and defect ratio

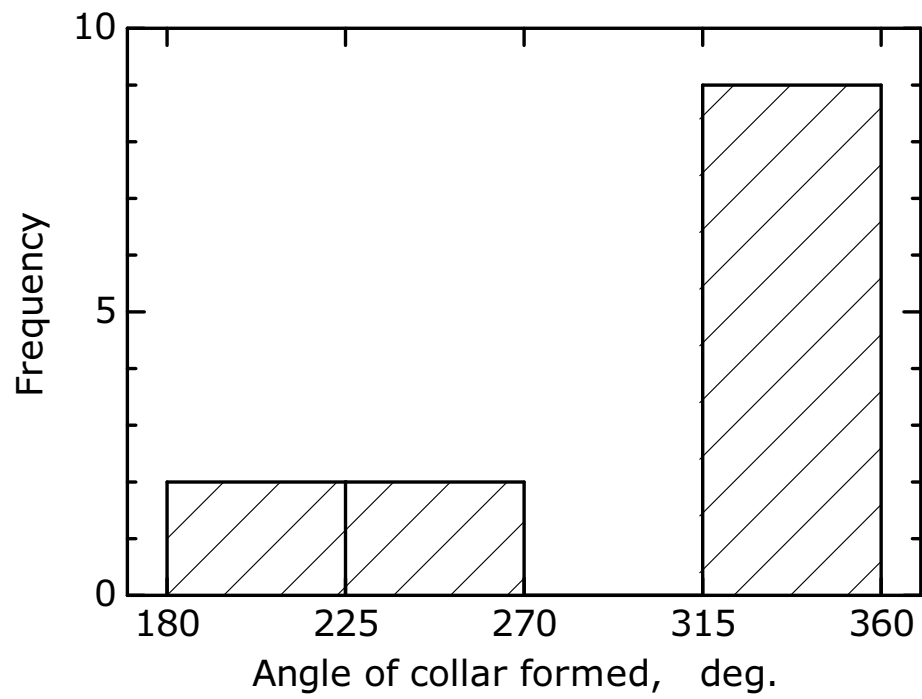


Fig.2-31 Distribution histogram of angle of collar formed in defect-free joints

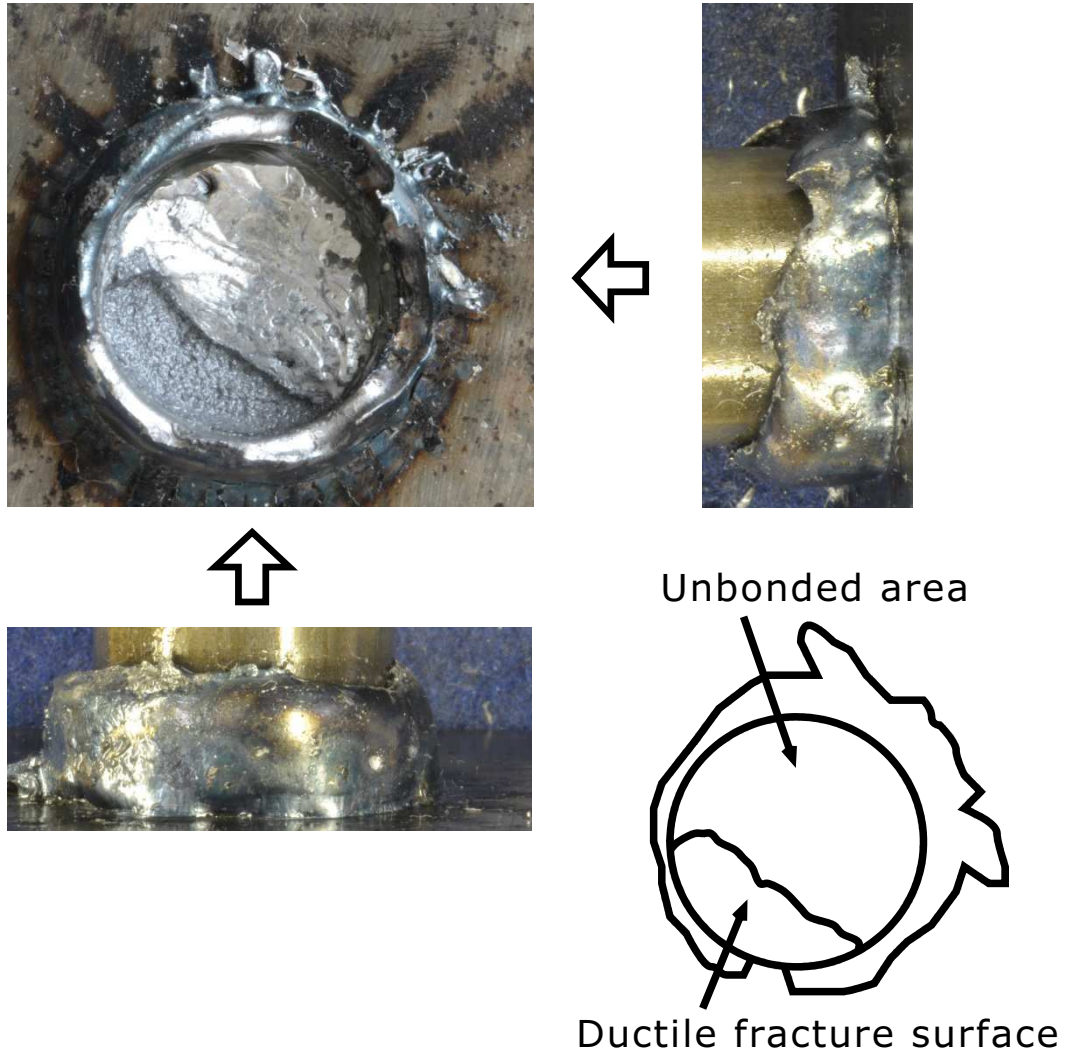


Fig.2-32 Trace of weld defects observed after tensile strength test with welding condition of 1.5kA and 2.0s

Table2-1 Results of joint strength test

	fracture position	weld defect	number of joints	minimum strength, kN	maximum strength, kN
Group A	stud	not found	13	120	131
Group B	stud	found	40	119	132
Group C	weld	found	24	4	128

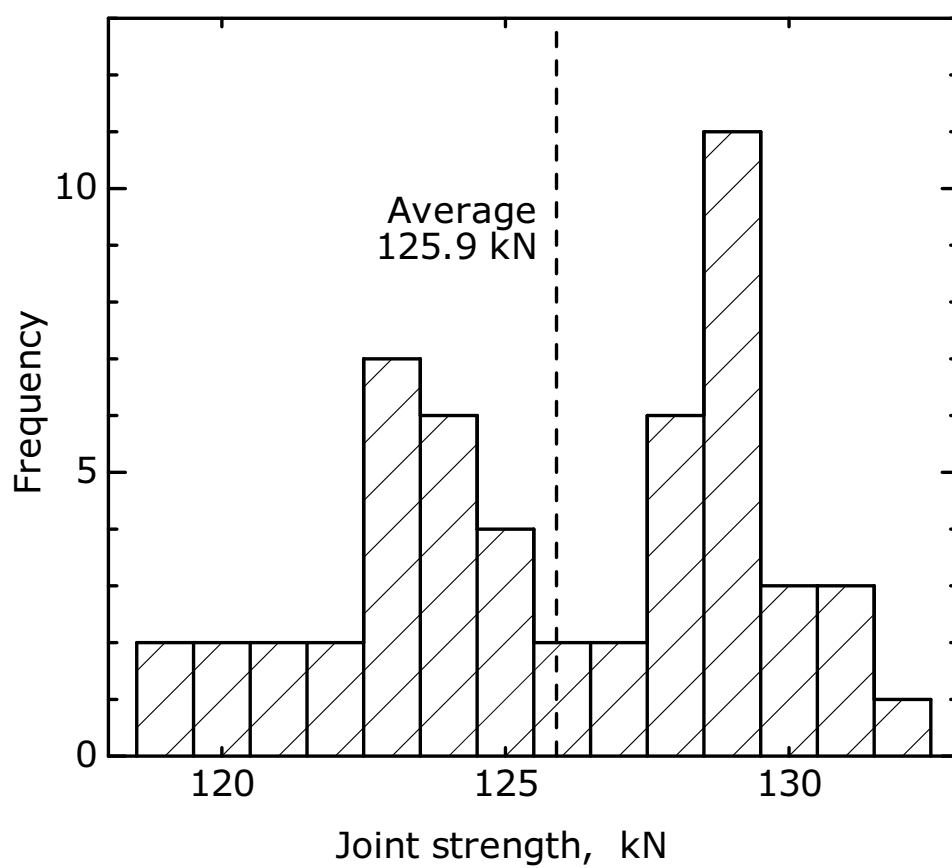


Fig.2-33 Distribution histogram of joint strength in group A and B

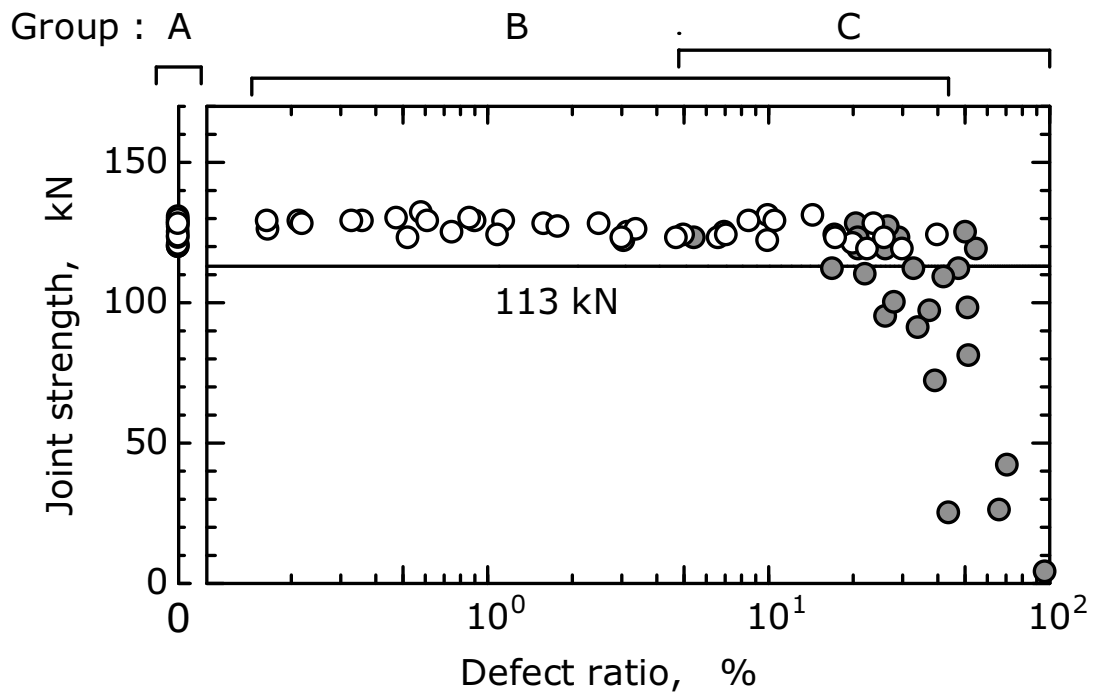


Fig.2-34 Relationship between defect ratio and joint strength

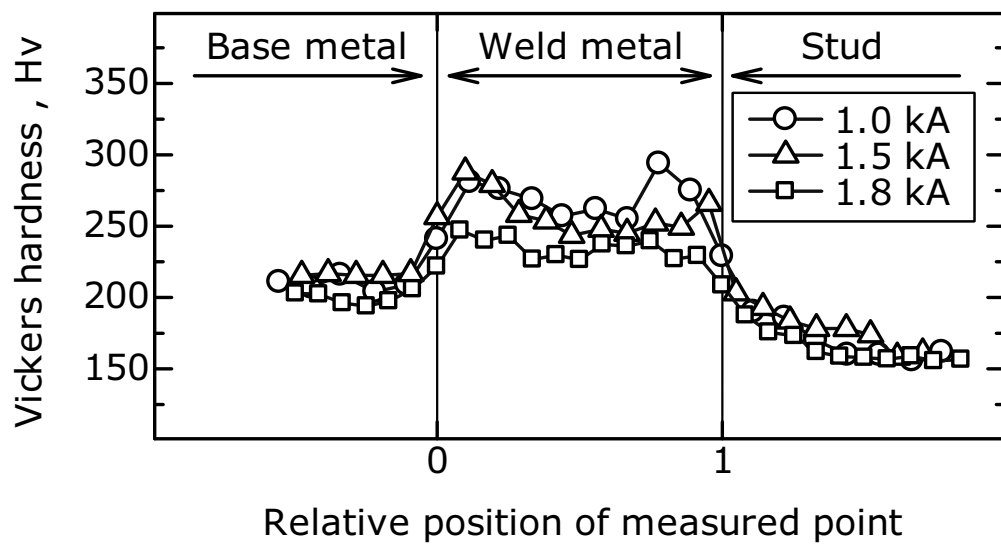


Fig.2-35 Profile of Vickers hardness in stud welds

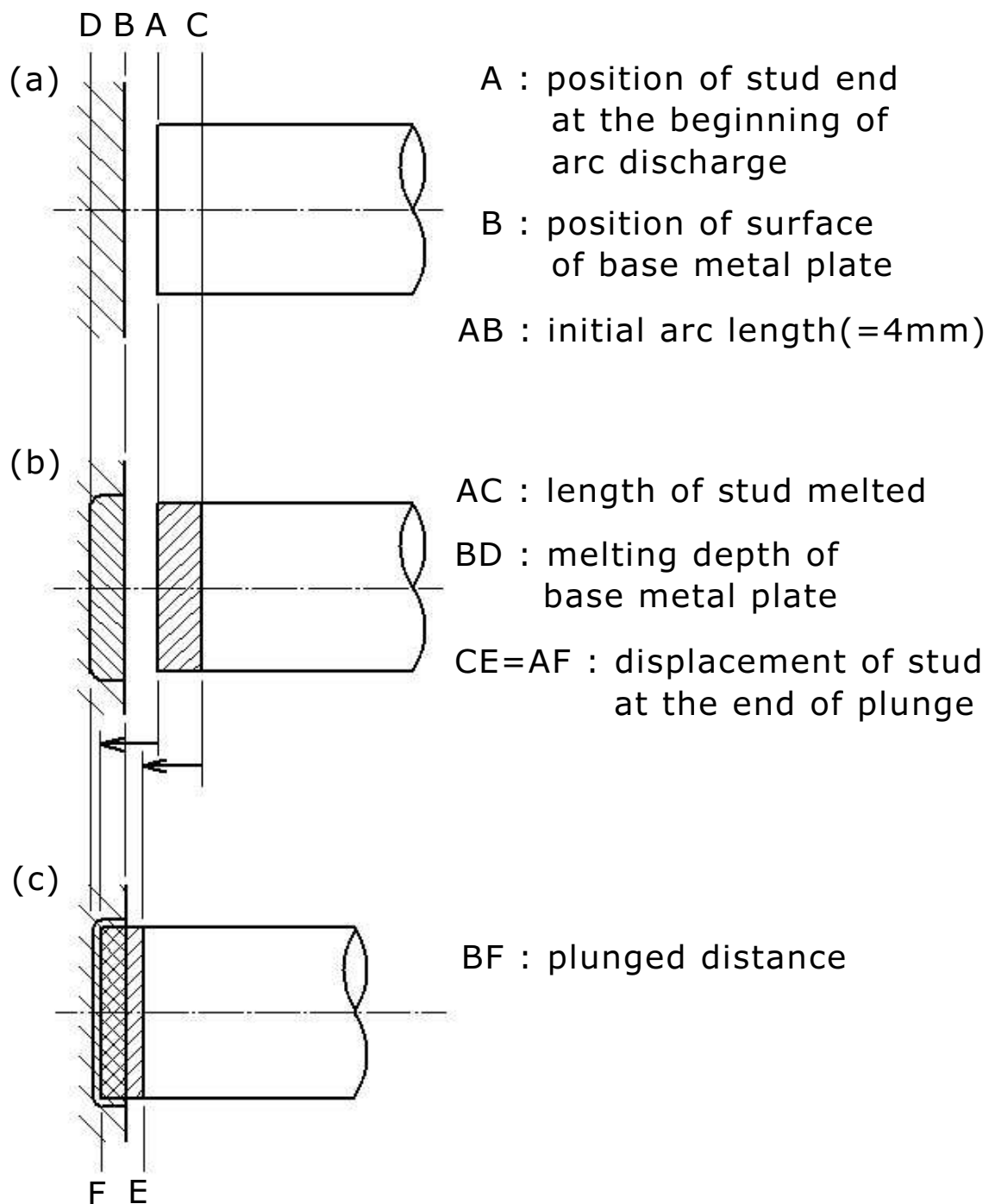


Fig.2-36 Schematic diagram of plunging the motion of stud

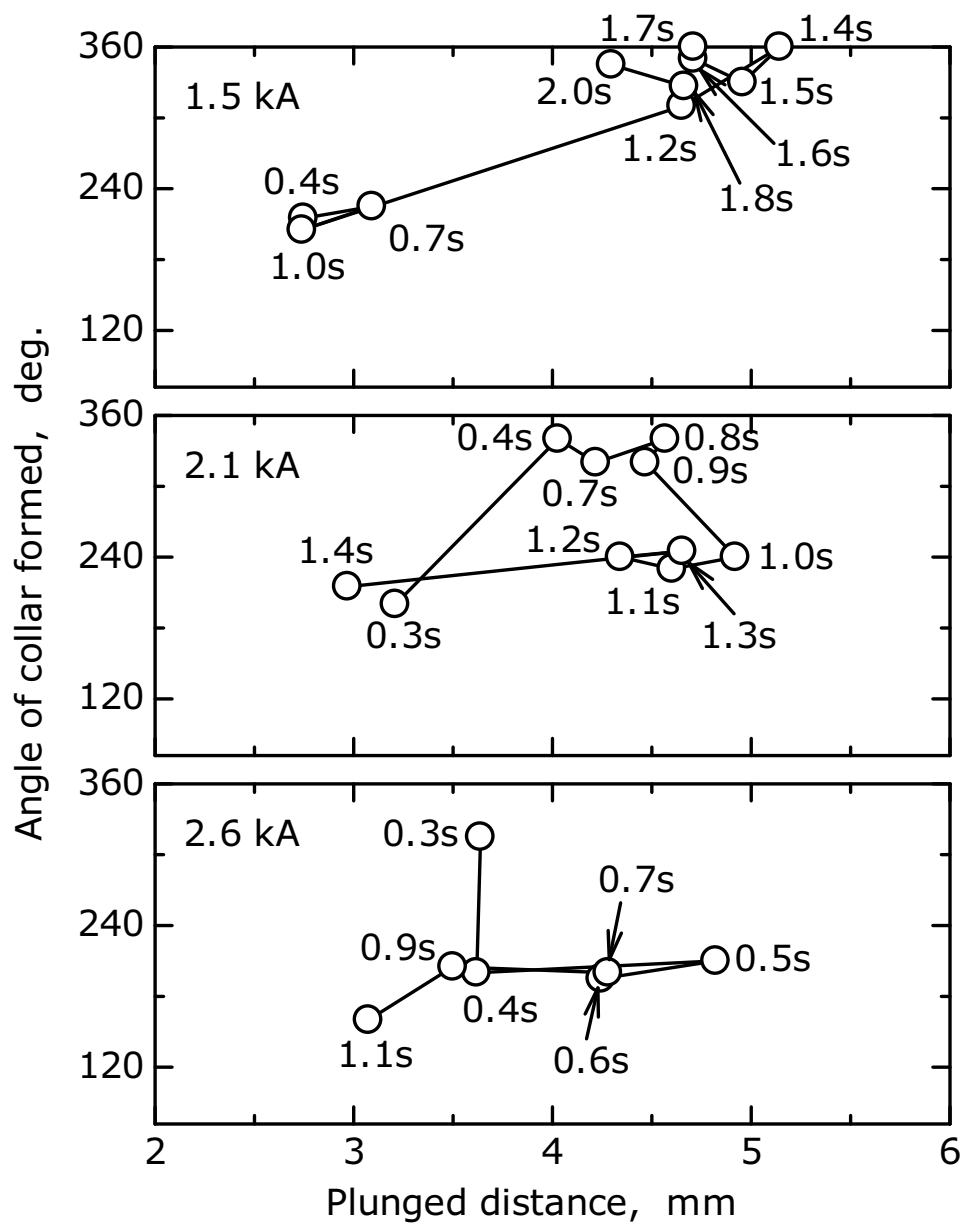


Fig.2-37 Influence of plunged distance on angle of collar formed

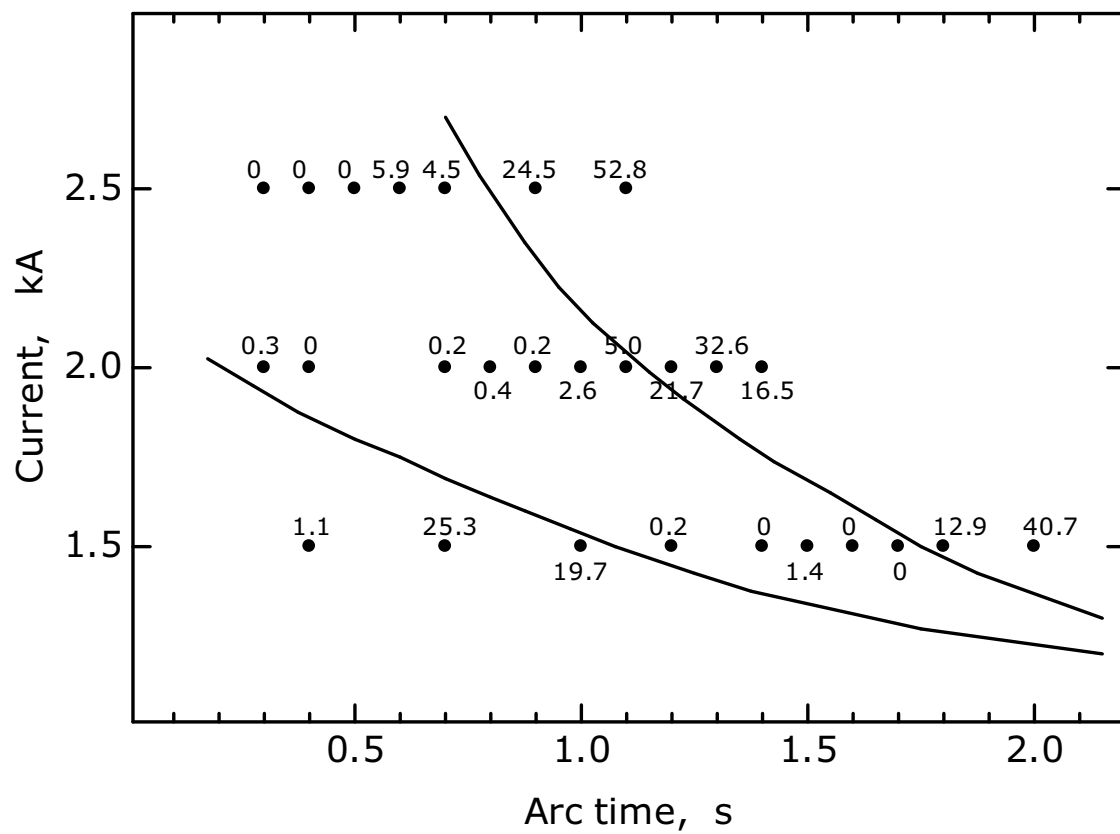


Fig.2-38 Diagram of defect ratio related to lack of fusion as the function of arc time and current

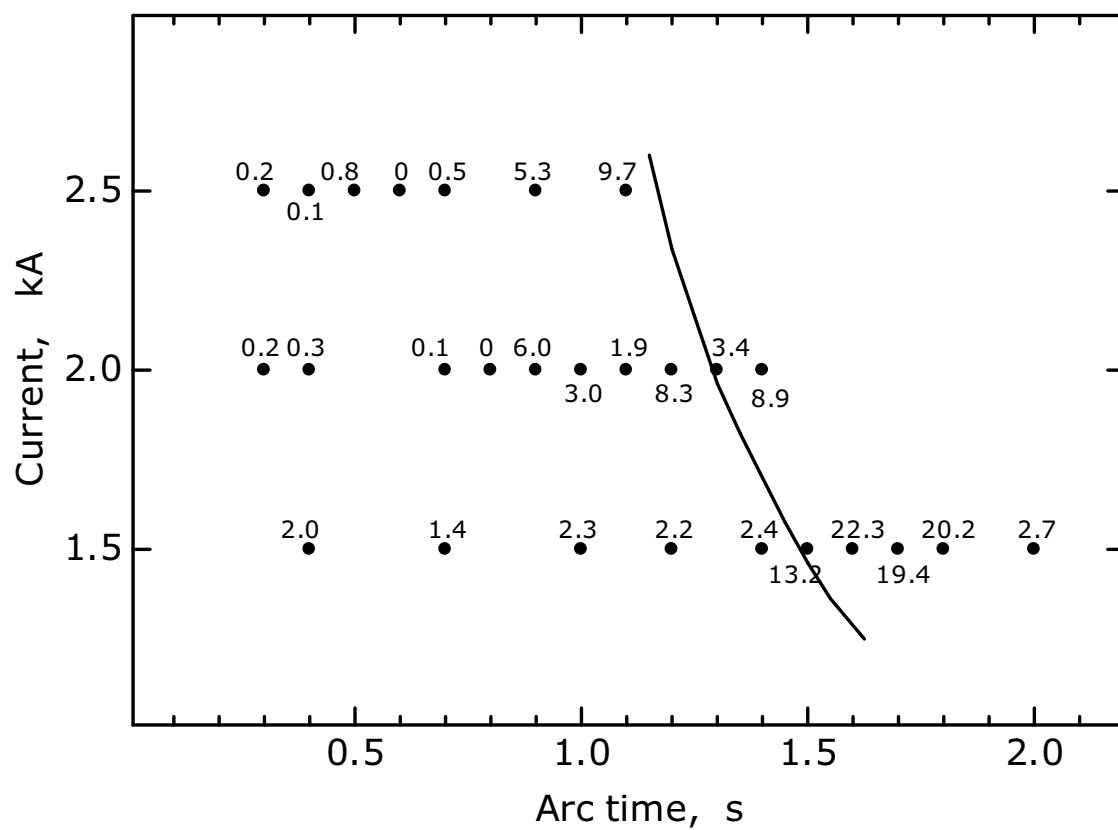


Fig.2-39 Diagram of defect ratio related to porosity as the function of arc time and current

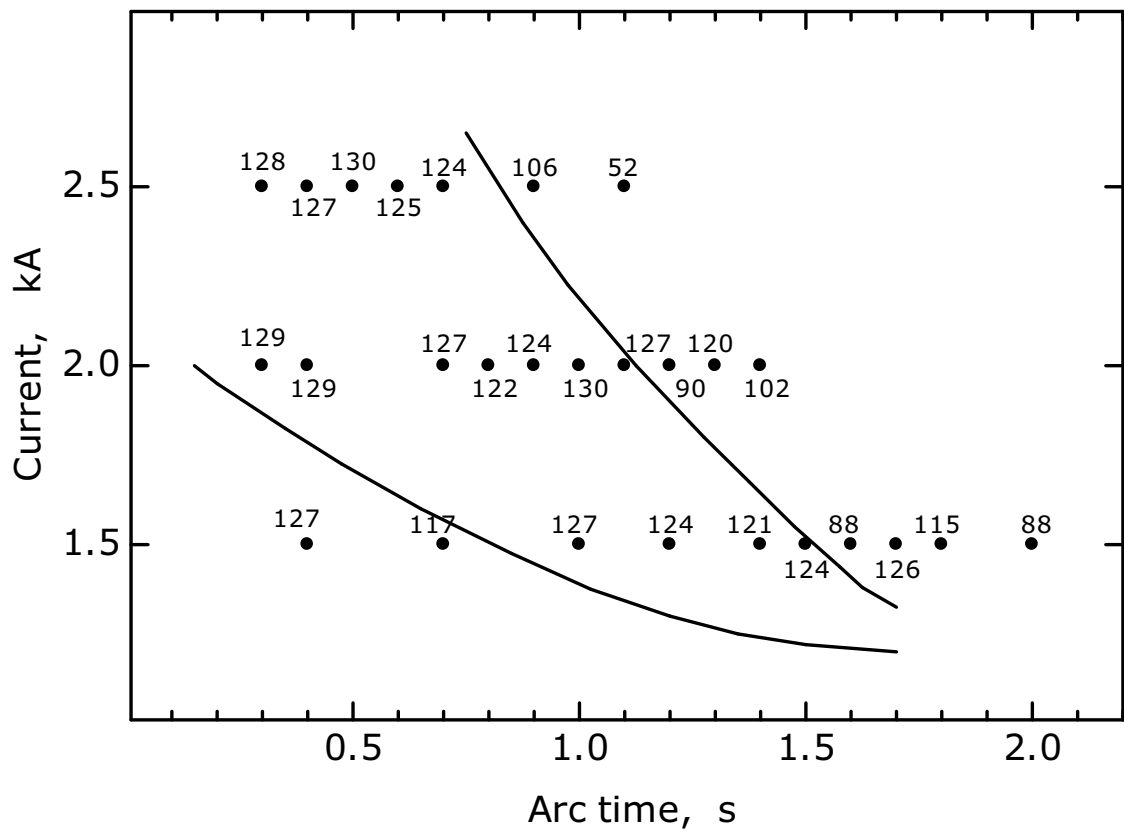


Fig.2-40 Diagram of joint strength as the function of arc time and current

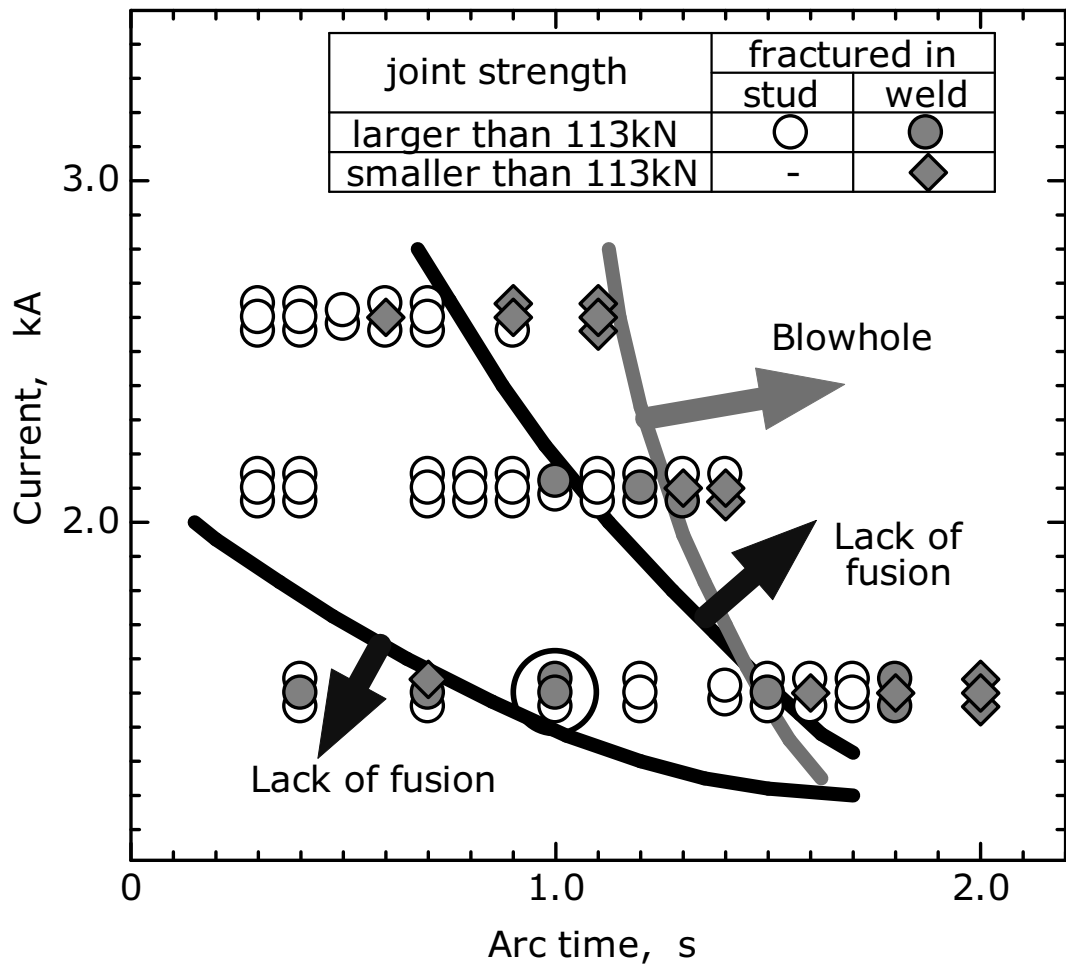


Fig.2-41 Suitable range of arc time and current to prepare a sound weld

第 3 章 継手の健全性の改善

3-1 本章の目的と内容

前章においては以下のことがわかった。横向姿勢のアークスタッド溶接ではカラーの形成は溶接部の健全性の指標とはならない。継手の強度に対しては溶接時における溶融金属の垂れ落ちと溶接部での気孔の発生が影響する。このため、X線透過試験で得られた透過像において融合不良の部分と気孔の面積がスタッドの軸部に対して占める割合で欠陥度を定義すると、溶接部の強度はスタッドの軸部の強度より大きいために、欠陥度が 10%以下では継手効率が 100%になるのに対して、10%以上では溶接部で破断する継手が多くなり、引張強度も急激に低下する^[13]。したがって、横向溶接においては、溶融金属の垂れ落ちを防止することと、溶接時の気孔の発生を抑制することの 2 点を達成すればよいという指針が示された。

これに対して、前章ではアークの電流値と保持時間の適正な溶接条件を決定したため、本章ではアーク放電の条件以外の要因を検討し、さらに健全性を改善するための試みを行った。

(1) 下向溶接用のフェルールをそのまま横向溶接に使用すると、フェルールとスタッドの間の隙間は溶融池から垂れ落ちる溶融金属の溜り場を提供する箇所となる。そして、アーク放電の際に発生するガスを逃がす目的で設けられたフェルールの底部の通気溝は横向溶接において垂れ落ちる溶融金属にその経路を提供していることにもなり、横向溶接においてこれらは溶接部の健全性を阻害していると考えられる。このため、横向溶接においてカラーの形成が引張強度に影響しないことからこれを意図しないことにした。通常に設置されている方向と逆方向にフェルールを設置した場合を試し、余分な隙間や通気溝をなくすことの効果を検討した。

(2) 横向溶接された継手の強度において欠陥度は支配的な因子であり、この欠陥には融合不良と気孔がある。アークからの入熱量が大きい溶接条件では溶融池の溶融金属の垂れ落ちによる融合不良が避けられず、これは重力が母材に対して垂直に作用する下向溶接の場合では起こらない現象である。実際、

溶接後のスタッドとカラーの外観を Fig.3-1 に比べる． Fig.3-1 (a)に示す下向溶接の場合においては全周にわたるカラーが形成されているのに対して， Fig.3-1 (b)に示す横向溶接の場合においてはスタッドの軸部の下部にカラーが形成されているが，溶融金属の垂れ落ちにより融合不良が起こっている．ただし，横向溶接において融合不良が起こっていても，それによる欠陥度がしきい値である 10%程度であれば，気孔の量を減少させることで溶接部での欠陥の総量がしきい値を越えないようにすることは可能であり，このような場合には継手の総合的な健全性は保たれる．このため，アルミニウムによる脱酸およびアルゴンガスによる雰囲気置換を行い，溶接部を大気からシールドすることで気孔の発生を抑制した．

3-2 実験方法

フェルールを通常の方法に設置する場合と逆方向に設置する場合を比べる実験では溶融金属に重力が作用する影響を調べることが目的であるため，横向姿勢で溶接を行った．一方，シールドの違いによる気孔の発生を比べる実験では下向姿勢とした．大気中の酸素が溶融金属に溶解し，鋼中の炭素と反応して一酸化炭素になることで溶接部に気孔が発生するが，この現象には重力の方向は関係しない．そして，横向姿勢で溶接すると気孔の発生他に溶融金属の垂れ落ちが起こるため，気孔の発生に関する欠陥のみを評価する目的に対しては不都合である．

3-2-1 フェルールを逆方向に設置した横向溶接の手順

横向姿勢の溶接は以下の手順で行った．

- (1) 機械構造用炭素鋼鋼材(JIS S10C)を直径 19mm に旋削した丸棒をスタッドとして使用した．一方，母材としては 100×70×19mm の一般構造用圧延鋼材(JIS SS400)を使用した．2-2-1 で述べた直流定電流の溶接電源により，母材が正極，スタッドが負極になる極性で溶接した．
- (2) 下向溶接用のフェルールを使用し，フェルールを逆方向に設置して固定

した状況を Fig.3-2 に示す. 垂直に設置された鋼板 A に対して母材を固定し, さらにフェルールを設置した後, 押さえ板 B を母材固定用の鋼板にねじ止めることでフェルールの位置決めを行った.

フェルールの設置方向によるフェルールとスタッドの間の隙間の違いを Fig.3-3 に示す. メーカーの指定に従って, 通常の溶接においては通気溝のある側が母材に面するように設置される. Fig.3-3(a)に示すように, フェルールとスタッドとの間には幅が 2.5mm で高さが 7mm の円筒形の隙間があり, 溶接時にスタッドを押込んだ際に余剰となった溶融金属がその隙間にあふれ出すことでカラーが形成される. 一方, フェルールを逆方向に設置した場合には, Fig.3-3(b)に示すように隙間の幅は 0.5mm になる.

(3) スタッドの端面と同じ大きさに切り取った厚さが 0.6mm で質量が 0.2g のアルミニウム網を丸棒の端面と母材表面の間に配置し, 市販のスタッドにおいて点弧用として端面に圧入されているアルミニウム球の代用とした.

(4) 溶接の開始時にスタッドを母材から 3.4mm だけ引き上げる. アーク放電の開始と同時に 0.6mm の厚さのアルミニウム網は消失すると考えられるため, 溶接の開始時のアーク長は 4mm(0.6+3.4)となる. そして, 所定のアークの保持時間の後にスタッドを押込み, アークを消滅させる. 溶融金属の凝固が始まった後もさらに 0.1s の間だけ電流を流し続けてポストヒートを行った.

3-2-2 アルゴンガスの雰囲気中での下向溶接の手順

上述したように, 溶接部を大気からシールドする効果の検討においては下向溶接で継手を作製した. アルミニウムによる脱酸の有無とアルゴンガスによる雰囲気置換の有無により, 4種類の試料を作製した. その組み合わせを Table 3-1 に示す. それぞれで 9 個の継手を作製し, 気孔の分布を比べた. なお, フェルールは通常の方法に設置した.

試料 1: 大気中において丸棒をそのままスタッドとして使用すると, フェルールのみによるシールドとなる. この場合には点弧用としてスタッドの端面に直径が 4mm で高さが 1.5mm の突起を旋削した.

試料 2: 厚さが 1.5mm で質量が 0.1g のアルミニウム片を丸棒の端面に配置した丸棒を大気中でスタッドとして使用すると、溶接時にアルミニウム蒸気が発生し、母材表面に形成された熔融池の熔融金属にアルミニウムが混ざり込む。このため、まずアルミニウム蒸気の脱酸作用によりフェルールの内部の大気から酸素が除かれる。さらに、残留した酸素が熔融金属に溶け込んだとしても、熔融金属の中のアルミニウムと優先的に反応し、炭素との反応が抑制される。

試料 3: アルゴンガスによる雰囲気置換においては、母材およびスタッドを気密性のチャンバーで囲い、溶接が終了するまで 3ℓ/min の流量でアルゴンガスを流し続け、大気を置換した。この場合には点弧用としてスタッドの端面に直径が 4mm で高さが 1.5mm の突起を旋削した。

試料 4: アルゴンガスの雰囲気中においてアルミニウム片を配置した丸棒をスタッドとして使用して、大気からシールドする効果を重畳させた。

それぞれの試料の作製においては、溶接の開始時にアーク長が 4mm となるようにスタッドを引き上げ、アークの電流値を 1.5kA とし、保持時間を 1.0s とした。その後 0.2s のポストヒートを行った。

3-2-3 継手の欠陥度の評価法

溶接部に対して、2-2-3 で述べた手順で「JIS Z 3104:1995 鋼溶接継手の放射線透過試験」に準じた X 線透過試験を行った。像のコントラストを強めるための切削加工、X 線による撮影法や撮影後のフィルムから欠陥を評価する方法も同じとした。

3-2-4 熔融金属の厚さの評価法

継手の断面を観察することで熔融池の深さを測定した。熔融金属の量はアークからの入熱量と伝熱による熱の拡散の兼ね合いによって決まる。単位時間当たりの入熱量との関係を調べた。

熔融金属の厚さや形状は重力の作用によりスタッドの周方向で一様では

ないためにスタッドの軸部の中心線上で評価した。 Fig.3-4 に示すように、溶接部をスタッドの軸部の中心線で切断した後、研磨した断面を 3%硝酸アルコールで腐食し、光学顕微鏡で観察した。スタッドの軸部の中心線 A-A 上において、スタッド側の溶融線に対する母材側の溶融線および母材表面との距離より、溶融金属の厚さと溶融池が形成される位置を測定した。ただし、スタッドを押込む方向を正の方向に取った。

3-3 実験結果

3-3-1 フェルールの設置方向と電圧値の変化

フェールを通常の方法に設置して横向姿勢で溶接した場合において、横軸をアークの保持時間とし、縦軸を電圧値として、アークの保持中における電圧値の時間平均を○印で表し、同じ設定時間での平均値を折れ線で結んで Fig.3-5 に示す。それぞれの電流値においてアークの保持時間が長くなると平均値はわずかに減少する。また、電流値が大きくなると電圧が減少する量はわずかに大きくなる。このことは横向姿勢においてはアークの保持時間が長くなり、スタッドおよび母材表面の溶融金属の量が増加しても、アーク長の変化が小さいことを意味する。

一方、フェールを逆方向に設置した場合の結果を Fig.3-6 に比べる。電流値が 1.0kA の場合においてはフェールを通常の方法に設置した場合と同様に、アークの保持時間が長くなると電圧は減少する傾向を示す。電流値が 1.5kA の場合においては、0.7s までは電圧の平均値は減少する傾向を示すが、それ以上ではわずかに増加する。電流値 2.0kA の場合においては、0.5s までは電圧の平均値が減少し、それ以上では増加する。電流値 2.5kA の場合においては、0.2s までは電圧の平均値が減少するが、それ以上では増加し、アークの保持時間が短い場合の電圧の平均値より大きくなる。電圧の平均値が減少から増加となるアークの保持時間は電流値が大きくなると短時間側に移行する。フェールを逆方向に設置した場合にこのようになるのは、フェールとスタッドの間の隙間の体積が小さいためにアーク熱が狭

い領域に閉じ込められ、フェルルールを通常の方法に設置した場合より狭い面積の母材表面の金属が溶融することで溶融池が深くなり、それが垂れ落ちることによってアーク長が長くなることによると考えられる。

この場合においてもメインアークの期間中に短絡が発生し、状況を **Table 3-2** にまとめる。フェルルールを設置した方法でわけて、通常の方法に設置した場合と逆方法に設置した場合を **Fig.3-7** と **Fig.3-8** に比べる。横軸は溶接の開始時からの経過時間を表し、縦軸は設定したアークの保持時間を表す。同じ設定時間の実験結果を並べて表示した。**Fig.2-13** で述べた市販のスタッドの場合に比べて短絡の発生回数は大幅に減少し、個々において短絡の継続時間も短くなっている。本章で使った機械構造用炭素鋼 **S10C** と一般構造用鋼 **SS400** とでは溶融金属の状態での流動性が異なるためと推測される。

横軸をアークの保持時間とし、縦軸をそれぞれにおいて発生した短絡の継続時間の総量としてフェルルールの設置方法でわけ、通常の方法に設置した場合の結果と逆方法に設置した場合の結果を **Fig.3-9** と **Fig.3-10** に示す。図中の○印はアークの保持時間中に回復した短絡を表し、●印は終わりまで回復しなかった短絡を表す。事例が少ないために傾向は明らかでないが、電流値が大きくなると短絡が発生する時間の平均値が短時間側に移行する。

短時間側に移行することからこの現象にはアークからの入熱量が影響していると考えられ、通常の方法に設置した場合と逆方法に設置した場合を **Fig.3-11** と **Fig.3-12** に比べる。横軸は最初に短絡が発生するまでの入熱量を表し、縦軸は短絡の継続時間の総量を表す。事例が少ないために傾向は明らかでないが、電流値が大きくなると最初に短絡が発生するまでの入熱量は増加すると考えられる。

3-3-2 フェルルールの設置方法と融合不良

フェルルールを通常の方法に設置した場合の継手の外観を **Fig.3-13(a)** に示す。その様子から溶融金属の垂れ落ちが起こり、通気溝を通して流れ出た後にスタッドが押込まれたことが推測され、フェルルールはカラーを形成するという役割を果たしていない。これに対して、フェルルールを逆方法に設置した

Fig.3-13(b)の継手においては、溶融池に溶融金属が保持された状態でスタッドが押込まれ、溶融金属が全周にわたって 0.5mm の隙間にあふれ出したことが推測される。つまり、隙間や通気溝をなくすと溶融金属が溶融池から垂れ落ちることが防止され、融合不良が抑制されることが考えられる。

未溶融もしくは垂れ落ちによる融合不良に関して、Fig.3-14 にはそれらによる欠陥度に対するアークの保持時間の影響を示す。○印、△印、□印、▽印はフェルールを通常の方法に設置した場合を表し、●印、▲印、■印、▼印は逆方向に設置した場合を表す。同じアークの保持時間の平均値を前者では実線で、後者では破線で結んだ。

アークの電流値が 1.0kA の場合の結果を Fig.3-14(a)に示す。アークの保持時間が短い場合には溶融池の形成が不十分なことによる融合不良が起こる。フェルールを通常の方法に設置した場合においては 0.5s 以下のアークの保持時間で、逆方向に設置した場合においては 0.4s 以下のアークの保持時間で未溶融による欠陥度がしきい値である 10%より大きくなるため、フェルールの設置方向によらず、横向溶接における適正な溶接条件ではない。

逆に、保持時間が長い場合には過剰のアーク熱により溶融金属が垂れ落ちることによって融合不良が起こる。フェルールを通常の方法に設置した場合において、アークの保持時間が 0.5s 以上になると融合不良が起こり始め、それより長くなるにつれて欠陥度が増加する傾向となった。つまり、フェルールを通常の方法に設置した場合においては、溶融池の形成が不十分な状態からすでに垂れ落ちが始まり、融合不良が発生していると考えられる。一方、逆方向に設置した場合に 0.4~1.0s で融合不良が起こりやすくなっているのはばらつきであると考えられる。

アークの電流値が 1.5kA の場合の結果を Fig.3-14(b)に示す。未溶融による融合不良は 1.0kA の場合より短時間側に移行し、しきい値である 10%より小さくなる保持時間はフェルールの設置方向によらず 0.4s 以上となる。フェルールの設置方向が通常の場合においてはしきい値より小さくなる保持時間の範囲は狭い。1.0s 以上の保持時間において融合不良が起こりにくいのは、他の電流値における傾向と併せ考えるとばらつきであると考えられる。ところが、フェルールを逆方向に設置した場合においては、しきい値

より小さくなってから保持時間が 1.0s となるまではばらつきが小さく、しきい値より大きくなることがない。溶融金属の垂れ落ちが防止されているためと考えられる。

アークの電流値が 2.0kA の場合の結果を Fig.3-14(c)に示す。フェルールの設置方向が通常の場合においては 0.1~0.7s の範囲で融合不良が起こりにくくなっている。一方、逆方向の場合においては 0.1~0.7s の範囲において平均値がしきい値より小さくなる。

アークの電流値が 2.5kA の場合の結果を Fig.3-14(d)に示す。入熱量が大きいために、未溶融による融合不良のアークの保持時間はさらに短時間側に移行し、フェルールの設置方向が通常の場合において 0.1s 以下であると考えられる。フェルールの設置方向によらず 0.1~0.5s の範囲が適正な保持時間となるが、フェルールを通常の方に設置した場合にはばらつきが大きいために適正な範囲が明らかではない。フェルールを逆方向に設置した場合には欠陥度が小さいため、この範囲では融合不良が起こりにくいと考えられる。健全な継手となる溶接条件の範囲が 2.0kA の場合より狭いが、やはり溶融金属の垂れ落ちが防止されることで健全な継手となることがわかる。

3-3-3 フェルールの設置方向と押込み距離

横軸をアークの保持時間とし、縦軸を押込み距離として、フェルールを通常の方に設置した場合の結果と逆方向に設置した場合の結果を Fig.3-15 と Fig.3-16 に電流値ごとにまとめる。○印、●印、●印は電流値が 1.0kA の場合、△印、▲印、▲印は電流値が 1.5kA の場合、□印、■印、■印は電流値が 2.0kA の場合、▽印、▼印、▼印は電流値が 2.5kA の場合であることを表す。また、○印、△印、□印、▽印は短絡が発生しなかった場合、●印、▲印、■印、▼印は短絡は発生したがアークの保持時間の終了時まで回復した場合、●印、▲印、■印、▼印は終了まで回復しない場合を表す。

アークの保持時間が長くなると入熱量が増加し、溶融金属の量が増加するために押込み距離が長くなると考えられる。フェルールの設置方向によらず、電流値が 1.0 kA および 1.5kA の場合においてはアークの保持時間を長くし

でも押込むことができない継手があった。このような継手では接合が期待できないために、横向溶接における適正な溶接条件ではない。また、短絡が発生すると押込み距離が短くなり、この傾向はフェルールを逆方向に設置した場合に著しい。アークの保持時間が 0.7s 以上の場合に短絡が発生しなくても押込み距離が短くなる場合がある。溶融金属が垂れ落ちてフェルールの下部に滞留することで、スタッドの押込み距離が短くなったためと考えられる。

3-3-4 フェルールの設置方向と溶融金属の厚さ

スタッドの端面と母材の表面が両方とも溶融している場合でも、溶融池に未溶融の部分が残されていればスタッドを押込むことはできない。そのような場合の継手の外観とその断面を観察した結果を Fig.3-17～Fig.3-19 に示す。Fig.3-17 においては、スタッドの端の部分が母材表面と干渉しているためにそれ以上は押込まれてはいない。また、押込まれた場合においても、Fig.3-18 に示すような固体スタッドが母材表面に達していない継手と Fig.3-19 に示すような固体スタッドが母材表面より押込まれた継手がある。

これには母材表面に形成された溶融池の深さが関係する。電流値を小さくして保持時間を長くする方法と電流値が大きく保持時間を短くする方法でアークからの入熱量をほぼ同じとする溶接条件において、横軸をアークからの入熱量とし、縦軸を溶融金属の母材表面からの位置として、フェルールの設置方向でわけて Fig.3-20 に示す。図中の垂直な線分の長さが溶接金属の厚さを表し、上部の○印が固体スタッドの先端の位置であり、下部の○印が母材の溶け込み深さである。実線は前者のアーク熱の供給法の場合を表し、点線は後者のアーク熱の供給法の場合を表す。なお、図中の太い破線は固体スタッドの先端の位置を入熱量で 1 次回帰した直線を示す。

フェルールを通常の方法に設置した場合において、入熱量を 10kJ 付近にすると、いずれのアーク熱の供給法でも、母材表面の位置を中心にしてスタッドと母材がほぼ同じ距離だけ溶融する。

入熱量を 30kJ 付近にすると、前者のアーク熱の供給法により母材およびスタッドがほぼ同じ距離だけ溶融する。ところが、実線で示す後者のアーク

熱の供給法ではスタッドの固体部分が母材表面より押込まれた状態になる。溶融金属の量が多いと垂れ落ちが起こりやすいために接合には不利な溶接条件になるが、スタッドの固体部分が母材表面より押込まれることは接合において有利になる。

入熱量を 60kJ 付近にすると、前者のアーカ熱の供給法によりスタッドの側が溶融する場合がある。しかし、後者のアーカ熱の供給法ではスタッドの固体部分が母材表面より押込まれた状態になる。また、入熱量が 30kJ 付近と 60kJ 付近の場合において、前者のアーカ熱の供給法とするとスタッドの側の溶融量がまちまちなのはばらつきであると考えられる。

一方、フェルールを逆方向に設置した場合において、入熱量やアーカ熱の供給法によらず、ほとんどの継手においてスタッドの固体部分が母材表面より押込まれた状態であった。このため、接合において有利である。

3-3-5 大気からのシールドと気孔の発生

3-2-2 で述べた試料 1～4 を光学顕微鏡で観察し、それぞれの溶接部の断面を比べた。すべての継手において健全なカラーが外観上は形成されていたが、溶接部における気孔の分布の様子はかなり異なった。

試料 1 の 9 個の継手の観察結果を Fig.3-21 に示す。フェルールのみによるシールドでは、いずれの継手においても数 mm の巨大な気孔が継手の内に残る。これより、大気からシールドする必要があることがわかる。

試料 2 の 9 個の継手の観察結果を Fig.3-22 に示す。アルミニウムによる脱酸作用を利用する方法は市販のスタッドにおいて行われ、試料 1 に比べて気孔は減少する。ただし、約 1mm の大きさの気孔がいくつか観察される場合があり、気孔の発生を抑制する方策としては不十分であった。試料 3 の 9 個の継手の観察結果を Fig.3-23 に示す。アルゴンガスで置換した場合にも同程度の改善は見られたが、やはり不十分であった。

最後に、試料 4 の 9 個の継手の観察結果を Fig.3-24 に示す。アルミニウムによる脱酸作用とアルゴンガスで置換する効果が重畳するために、気孔がまったく観察されない場合がほとんどであった。

これらの 4 つの試料に対して X 線透過試験を行い、像から得られた気孔の分布の状況をヒストグラムとして Fig.3-25 に示す。ただし、カラーの部分の気孔は除外し、スタッドの断面の気孔のみを測定した。気孔の個数を指標とした分布を Fig.3-25(a)に比べる。試料 1 において気孔の個数が最も多く、試料 2 と試料 3 においてはほぼ同じ程度にまで個数が減る。試料 4 においては最も個数が少ない。

さらに、気孔の欠陥度を指標とした場合の分布を Fig. 3-25(b)に比べる。横軸は対数目盛りで表示した。この結果においても試料 4 の場合の気孔が最も少なく、2 つの効果を併用したことによりさらなる改善が確認された。つまり、アルゴンガスで置換することで雰囲気中の酸素分圧が下がるために、熔融金属へ溶け込む酸素の量が減少し、その酸素も熔融金属に混ざり込んだアルミニウムと優先的に反応するため、気孔を発生させる原因である一酸化炭素の生成が抑制されたためと考えられる^[14]。

3-4 考察

3-4-1 電圧値の変化に対するフェルールの設置方向の影響に関する考察

アークの保持時間に対する電圧の平均値の変化に関して、Fig.3-5 と Fig.3-6 を重ねることで、Fig.3-26 にフェルールの設置方向による違いを電流値ごとに比べる。図中の実線はフェルールを通常の方法に設置した場合を表し、破線は逆方向に設置した場合を表す。フェルールを通常の方法に設置した場合の電圧の平均値は逆方向に設置した場合の電圧の平均値より全般的に大きくなっているが、アークの電流値および保持時間によって個々の状況は異なる。

フェルールを通常の方法に設置すると、アークの保持時間が長くなると電圧の平均値はほとんど一定であるか、わずかに減少する傾向を示す。電流値が 2.5kA の場合においてはアークの保持時間が 0.7s 以上になると電圧の平均値は大きく減少する。電流値が 2.0kA 以下の場合に電圧値の変化が小さいのは、アーク熱によってスタッドおよび母材表面の熔融が進むものの、溶

融金属がフェルールの下部の隙間に流れ込むためにアーク長が変化しないためであり、電流値が 2.5kA の場合においてアークの保持時間が長くなると電圧の平均値が減少するのは、溶融金属がフェルールの下部に滞留するようになってアーク長が短くなるためであると考えられる。

一方、フェールを逆方向に設置した場合の傾向は単純ではない。電流値が 1.0kA の場合においては、フェールを通常の方法に設置した場合と同様に、アークの保持時間が長くなると電圧の平均値はわずかに減少する。電流値が大きくなると、アークの保持時間が長くなるにつれて電圧の平均値はあるアークの保持時間までは減少するが、それ以上のアークの保持時間では増加する。電圧の平均値が減少から増加となるアークの保持時間は電流値が大きくなると短時間側に移行する。また、電圧の平均値も大きく増加する。

電圧の平均値が減少している場合にはフェールを通常の方法に設置した場合と同様の現象が起こっていると考えられる。一方、電圧の平均値が増加するのはアーク長が長くなることによると考えられる。フェールを逆方向に設置したためにフェールとスタッドの間の隙間の体積が小さく、アーク熱が狭い領域に閉じ込められ、狭い面積の母材表面の金属が溶融することで溶融池が深くなり、これが垂れ落ちることでアーク長が長くなるためと考えられる。

電流値が 2.5kA の場合においては、アークの保持時間が 0.7s 以上で電圧の平均値が大きく増加する。アークからの入熱量が大きくなったことで母材表面の溶融が進み、フェールの断面より大きな溶融池となることでフェールが支えられなくなり、溶融金属の激しい垂れ落ちによってアーク長が長くなったためと考えられる。また、この溶接条件の継手の中には、フェールを逆方向に設置したためにアークとフェールの内壁の間の距離が短く、磁器製のフェールの内面がアーク熱によって溶融して破損するものもあった。第2章で述べたように、溶接の際に過剰な入熱は避けるべきである。

次に、短絡の発生回数に関して、Table 3-2 にまとめたように、フェールを通常の方法に設置した場合においては8回であったのに対して、逆方向に設置した場合においては20回であり、短絡が頻繁に発生する。フェールとスタッドの間の隙間が小さいことと通気溝がないことで、少量の溶融金

属でスタッドと母材がつながることによると考えられる。

電流値が比較的小さい場合には、フェルールを逆方向に設置した場合の発生回数が通常の方法に設置した場合の発生回数より多くなる。通常の方法に設置した場合においては通気溝から溶融金属が垂れ落ちることで短絡が発生しにくくなっているのに対して、逆方向に設置した場合においては溶融金属がフェルールの下部に滞留するが、アークの圧力が低いことで短絡した部分が吹き飛ばされにくいためであると考えられる。一方、電流値が大きくなるとフェルールを通常の方法に設置した場合において発生回数が多くなるのは、溶融金属が垂れ落ちることで入熱量の一部が失われ、逆方向に設置した場合と比べて溶融金属の流動性が低いことによると考えられる。

3-4-2 融合不良に対するフェルールの設置方向の影響に関する考察

フェルールを使用する目的の1つとしてはカラーの形成がある。スタッドを押込んだ際にフェルールとスタッドの間の隙間に溶融金属があふれ出すことでカラーは形成される。溶融金属の脱落がなければ、あふれ出した余剰の金属の量は、溶接の前にスタッドをフェルールに設置する際のフェルールの端面から突き出たスタッドの量と一致することになる。

スタッドの軸部とカラーは直接的に接合していないために、継手の強度などの機能上の特性にはほとんど影響がなく、外観のきれいさや溶接作業の適切さの判断基準といった副次的な役目しかない。さらに、これらの役目も下向溶接の場合に限られ、横向溶接においては重力の作用によりカラーの肉厚に偏りがあるために一様なカラーが形成されず、溶接の健全性の判断基準にはならないことを第2章で述べた。

測定された結果のばらつきにより平均値として見た場合にはそれほど明らかではないが、指標をアークからの入熱量に取り直し、分布が幅を持つと考えることで、欠陥度を統一的に解釈することができる。フェルールの設置方向でわけて、Fig.3-27にすべての電流値での結果をまとめる。第2章で述べたように、融合不良を避けるためには入熱量が適正である必要があり、溶接条件がこれから外れるほど、入熱量が大きくなっても小さくなっても欠

陥度が大きい継手となりやすい。図中の破線はその欠陥度の最大値を意味する。

Fig.3-27(a)に示したフェルールを通常の方法に設置した場合において、例えば入熱量を 30kJ とすると、継手の欠陥度は 0 から 0.6 までとなり、これは健全でない継手となることがある溶接条件である。入熱量を 40kJ 付近にした場合でのみ最大値がしきい値を越えなくなり、信頼性のある継手となる溶接条件である。ただし、アークの電流値を固定すると、ごく限られたアークの保持時間でしか信頼性のある継手となる溶接条件にならない。

欠陥度の最大値の曲線が鋭く深い谷となっているため、溶融池の形成と溶融金属の垂れ落ちが競合して起こっていることが推測される。つまり、径の大きいスタッドを対象としているため、そのスタッドを押込むために必要な大きさの溶融池が形成される前から溶融金属の垂れ落ちが起こり始める。入熱量が大きくなるにつれて溶融池は大きくなるが、垂れ落ちの量も多くなる。このため、入熱量が小さい段階では入熱量の増加に伴って溶融池が大きくなるが、スタッドの軸部の断面より大きくなるとスタッドが押込めるようになり、欠陥度は減少する。しかし、さらに入熱量を増加させても接合するのに十分な量の溶融金属が存在する状況に変わりはないが、垂れ落ちの量が多くなるために欠陥度は再び増加すると考えられる。

これに対して、フェルールを逆方向に設置した場合においては、Fig.3-27(b)に示すように最大値がしきい値である 10%より小さくなる入熱量は 25~40kJ となる。欠陥度の最大値の曲線の谷に幅があり、健全な継手となる溶接条件はより広い。この場合には溶融金属の垂れ落ちが防止されていることが推測される。つまり、フェルールとスタッドの間の隙間が狭いため、垂れ落ちようとする溶融金属がフェールの内壁により支えられ、十分な大きさの溶融池の形成と溶融金属の垂れ落ちが競合しない。十分な量の溶融金属が存在するようになった後に、さらに過剰な入熱をした際に垂れ落ちが始まるためだと考えられる^[15]。

3-4-3 押込み距離に対するフェールの設置方向の影響に関する考察

押込み距離に関しても指標をアークからの入熱量に取り直す．横軸を入熱量とし，縦軸を押込み距離として，フェルールを通常の方法に設置した場合の結果を Fig.3-28 に示し，逆方向に設置した場合の結果を Fig.3-29 に示す．図中の記号は Fig.3-15 や Fig.3-16 の記号と同様であり，矢印とともに示した数値は押込み距離が 0.1mm より小さくなる入熱量の最大値を表し，この押込み距離の継手に対してはスタッドが押込まれなかったと見なした．

スタッドを押込むためには，フェルールの設置方向と電流値に応じてこの値より大きな入熱量にする必要がある．Fig.3-30 に電流値とスタッドが押込まれる最小の入熱量の関係を示す．図中の○印および実線はフェルールを通常の方法に設置した場合を表し，●印および破線はフェルールを逆方向に設置した場合を表す．いずれの場合においても電流値が大きくなるとこの入熱量は減少するが，フェルールを逆方向に設置した場合には通常の方法に設置した場合より小さい入熱量で押込むことができることがわかる．

次に，フェルールの設置方向でわけて，Fig.3-31 にすべての電流値での入熱量と押込み距離の関係をまとめる．図中の破線は入熱量のすべてがスタッドおよび母材表面での熔融に使われたとして計算した場合の押込み距離を表す．

実際，純鉄 1mm³ を室温から熔融させた場合，顕熱 Q_{sh} [J/mm³]と潜熱 Q_{lh} [J/mm³]はそれぞれ

$$Q_{sh} = c \rho \Delta T = 5.63 \text{ J/mm}^3$$

$$Q_{lh} = I_E / V_{Femol} = 2.16 \text{ J/mm}^3$$

である．ここで， $c = 0.448 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ は純鉄の比熱(298K) ^[16]， $\rho = 7.8 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$ は鉄の密度^[17]， $I_E = 15360 \text{ J/mol}$ は純鉄の融解熱^[16]， $V_{Femol} = 7.11 \times 10^3 \text{ mm}^3/\text{mol}$ は純鉄のモル体積であり，温度差 ΔT は 1600 K とした．したがって，純鉄 1mm³ を溶かすために必要な入熱量 Q [J/mm³]は

$$Q = Q_{sh} + Q_{lh} = 8.79 \text{ J/mm}^3$$

となる．これに直径 19mm のスタッドの断面積を掛けて，スタッドを単位長さだけ押込むのに必要な入熱量は 2.49kJ/mm であり，図中の破線となる．

これに対して，図中の実線は測定された押込み距離の最大値を表す．Fig.3-30(a)に示すフェルールを通常の方法に設置した場合において，その傾

きよりスタッドを押込むのに必要な熱量は 8.38kJ/mm であり、最大の熱効率は 0.297 となる。一方、Fig.3-30(b)に示すフェルールを逆方向に設置した場合においては 5.28kJ/mm であり、最大の熱効率は 0.416 となる。フェルールを通常の方法に設置した場合には逆方向に設置した場合より熱効率が低い。伝熱によって溶融池から拡散する熱量はフェルールの設置方向によらないと考えられるために、通常の方法に設置した場合には溶融金属の垂れ落ちが頻繁に発生し、高温の溶融金属が溶融池から脱落することで熱量が失われていることが考えられる。

3-4-4 溶融金属の厚さに対するフェルールの設置方向の影響に関する考察

溶融金属の量はアークからの入熱量によって決まる。フェルールを逆方向に設置した場合にはこの傾向が見られる。アークの電流値は大きいが保持時間は短い溶接条件とアークの電流値は小さいが保持時間は長い溶接条件のいずれにおいても、アークの保持時間が長くなり入熱量が増加するのに伴って溶融金属の量が増加するために厚くなる。一方、フェルールを通常の方法に設置した場合にはいずれの溶接条件でも溶融金属の厚さが入熱量に比例していない。

これには溶融金属の垂れ落ちが影響していると考えられる。つまり、フェルールを逆方向に設置した場合には溶融金属の垂れ落ちが防止されているために、アークからの入熱量に比例してできた溶融金属がそのまま凝固するために入熱量の増加に伴って溶融金属も厚くなる。一方、フェルールを通常の方法に設置した場合にはフェルールの先端の通気溝を通して溶融金属が外に垂れ落ちる。このため、凝固する溶融金属の量が減少し、その量もまちまちとなるため、入熱量に比例しない。

3-4-5 大気からのシールドに関する考察

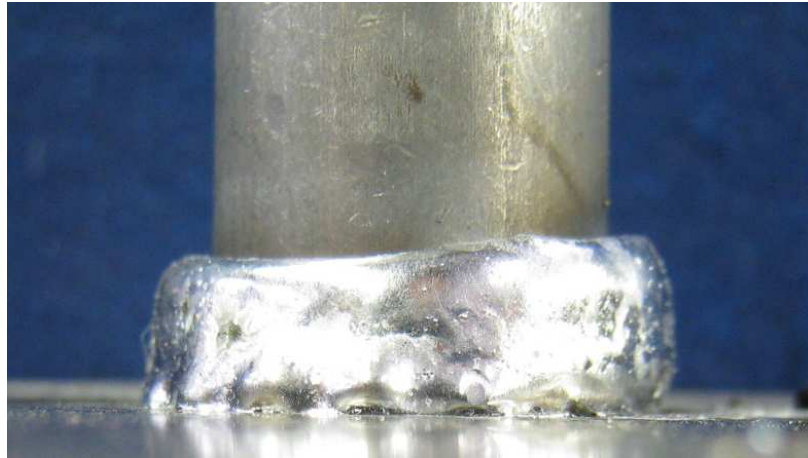
溶接の際に雰囲気からの酸素と鋼中の炭素の反応によって一酸化炭素が生成し、その一酸化炭素が溶接部に残ることで気孔となる^[18]。したがって、

雰囲気中の酸素をシールドすれば気孔の発生が抑制される。

アルミニウムによる脱酸は市販の鋼スタッドにおいて行われている方法である。さらに、実際の施工への適用の困難さは別にして、アルゴンガスで置換することで不活性雰囲気中での溶接を行い、気孔の発生を抑制することを試みた。母材およびスタッドを気密性のチャンバーで囲い、大気をアルゴンガスで置換した。

置換が完全であれば鋼中の炭素との反応は起こらないはずであるが、わずかな気孔が溶接部に観察されたことは完全に置換することの施工上での困難さを示していると考えられる。アルゴンガスによる置換に加えて、アルミニウムによる脱酸を併用することで気孔による欠陥度を 1%以下にまで下げることができた^[19]。これにより欠陥度のしきい値である 10%に対して気孔の影響を無視できる程度とすることができると、気孔の発生を抑制する方策として十分であると考えられる。

(a)



Flat position

(b)



Horizontal position

Fig.3-1 Appearance of stud welded; (a)flat position, (b)horizontal position

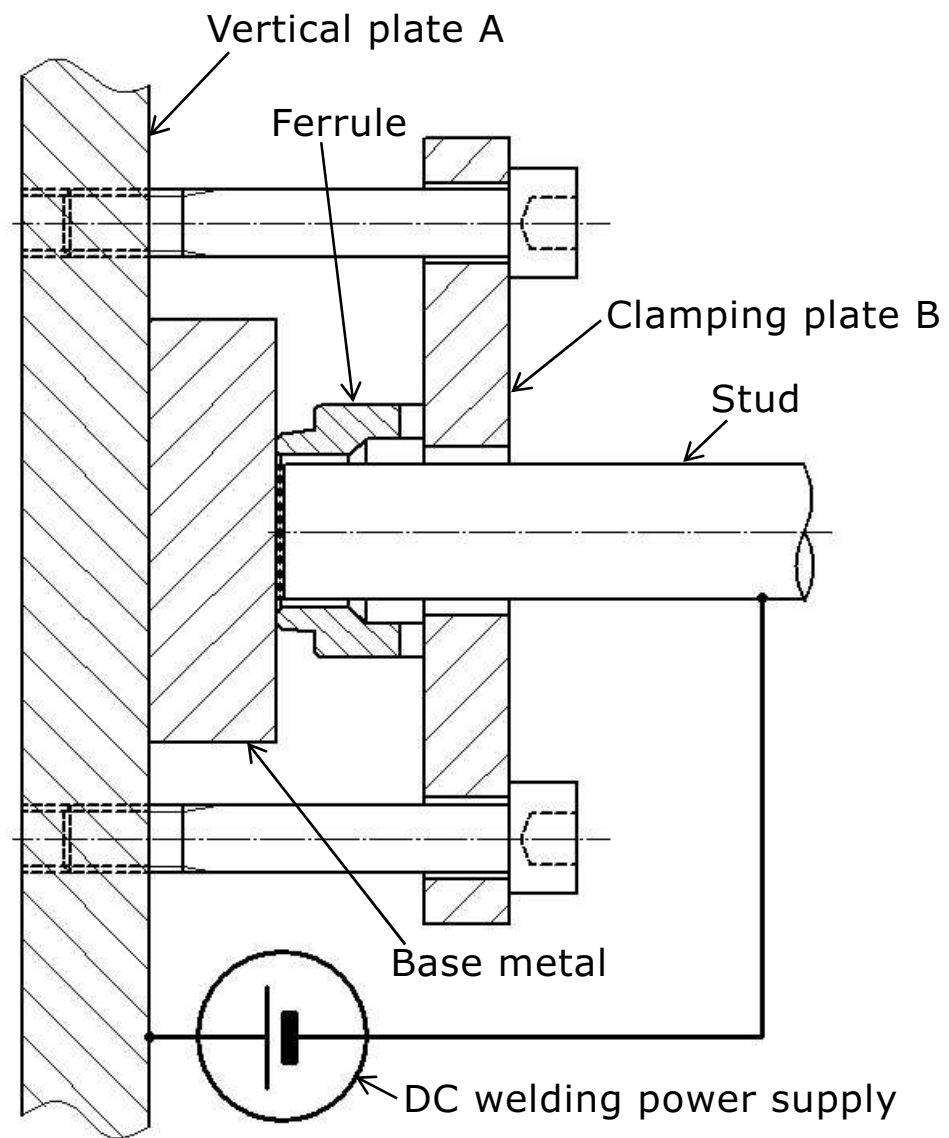


Fig.3-2 Schematic drawing of apparatus for arc stud welding

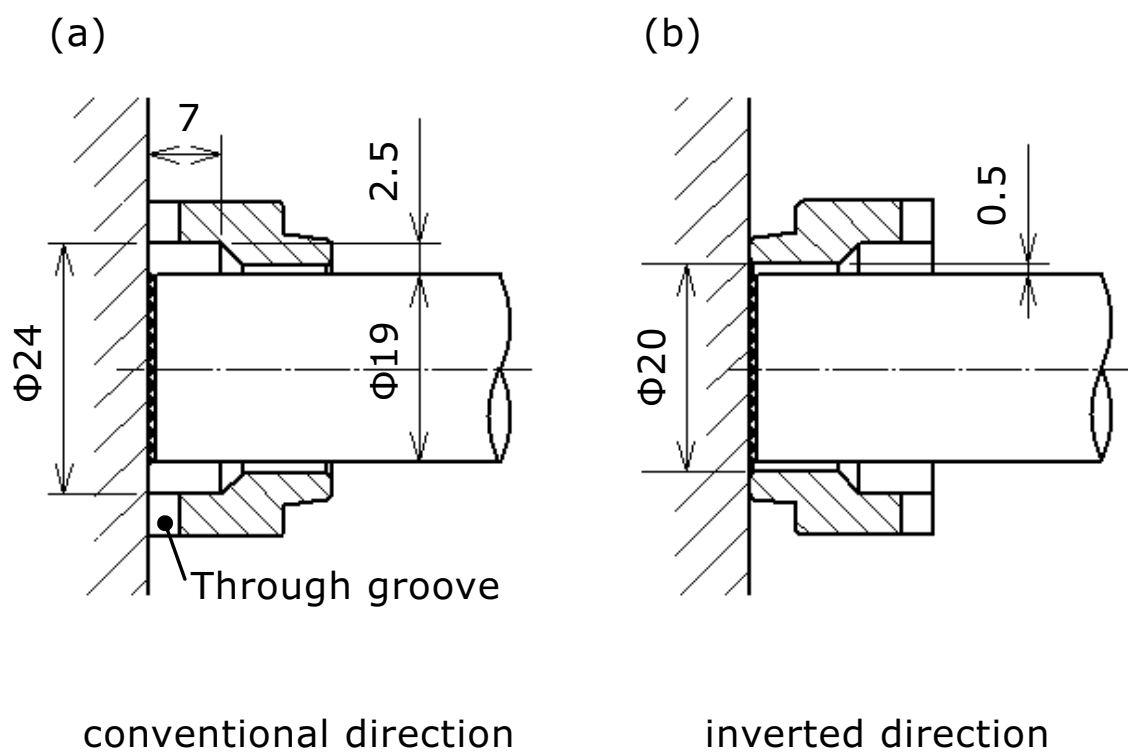
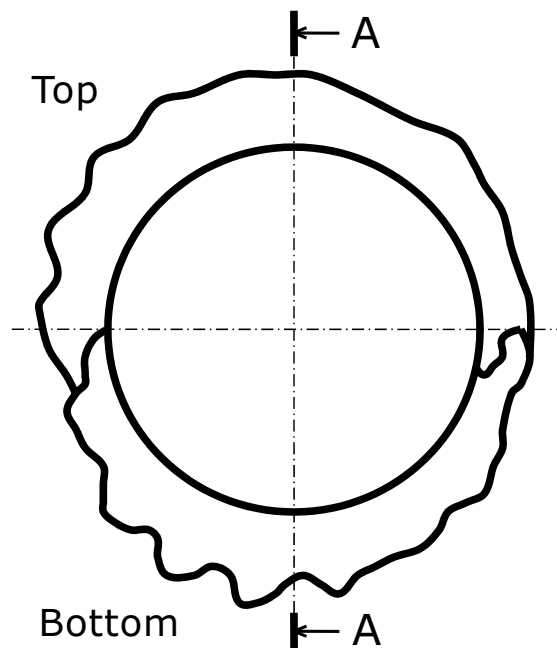


Fig.3-3 Dimension of interstice between stud and ferrule

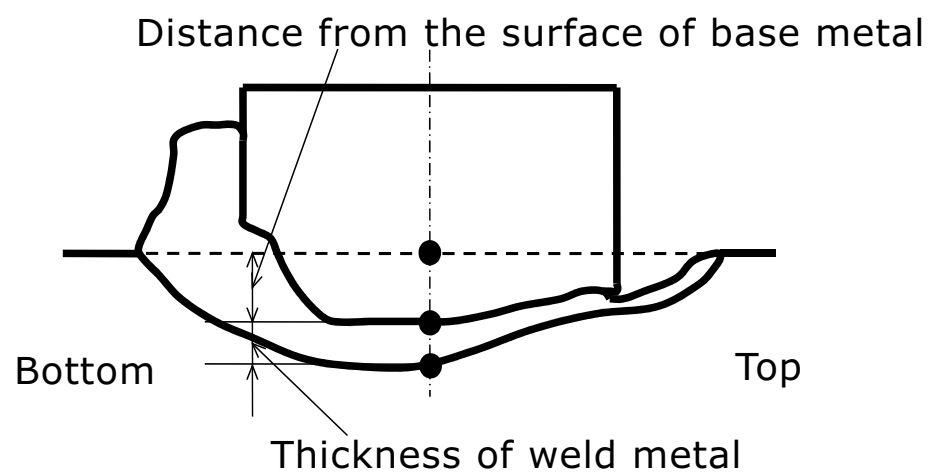
Table3-1 Welding condition of sample 1-4

	aluminum disk	argon gas atmosphere
sample 1	no	no
sample 2	yes	no
sample 3	no	yes
sample 4	yes	yes

(a) Top view



(b) Side view



Cross-section A-A

Fig.3-4 Definition of distance from the surface of base metal and the thickness of weld metal

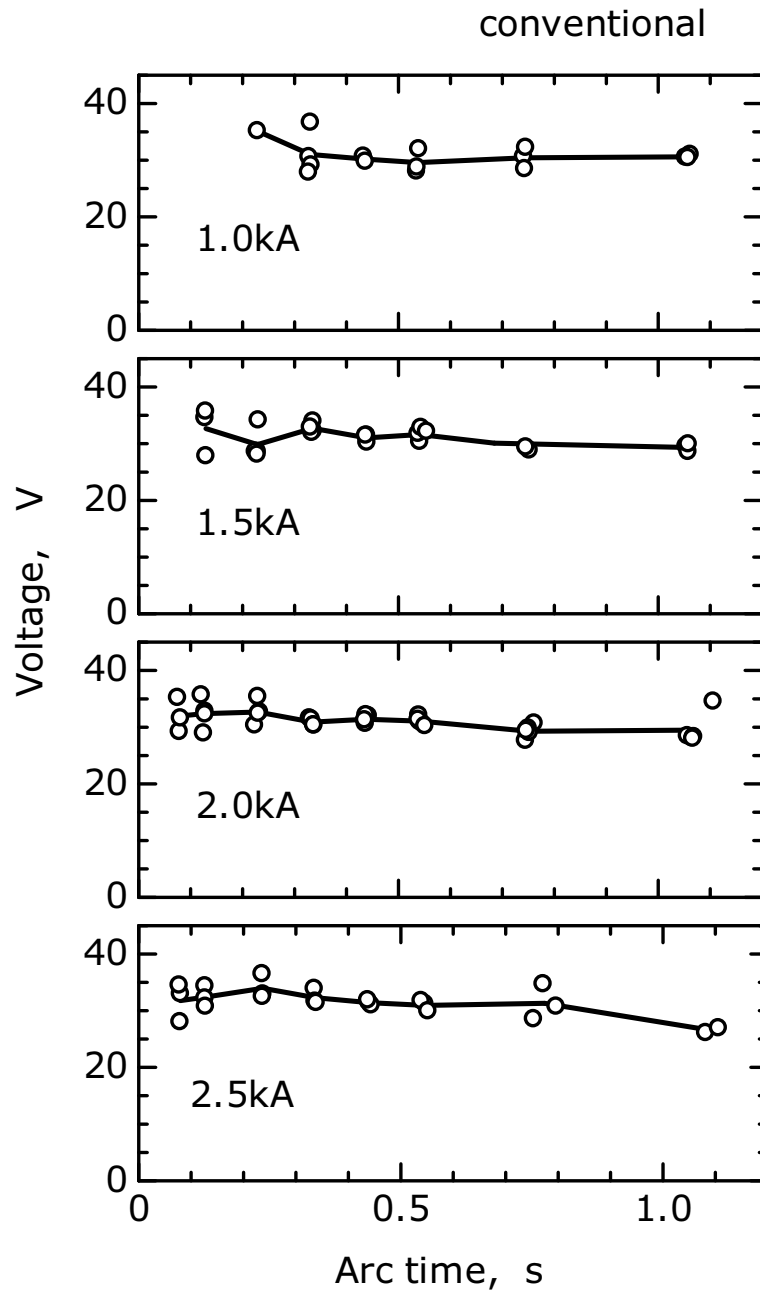


Fig.3-5 Changes of voltage for arc currents in case of the conventional direction of ferrule

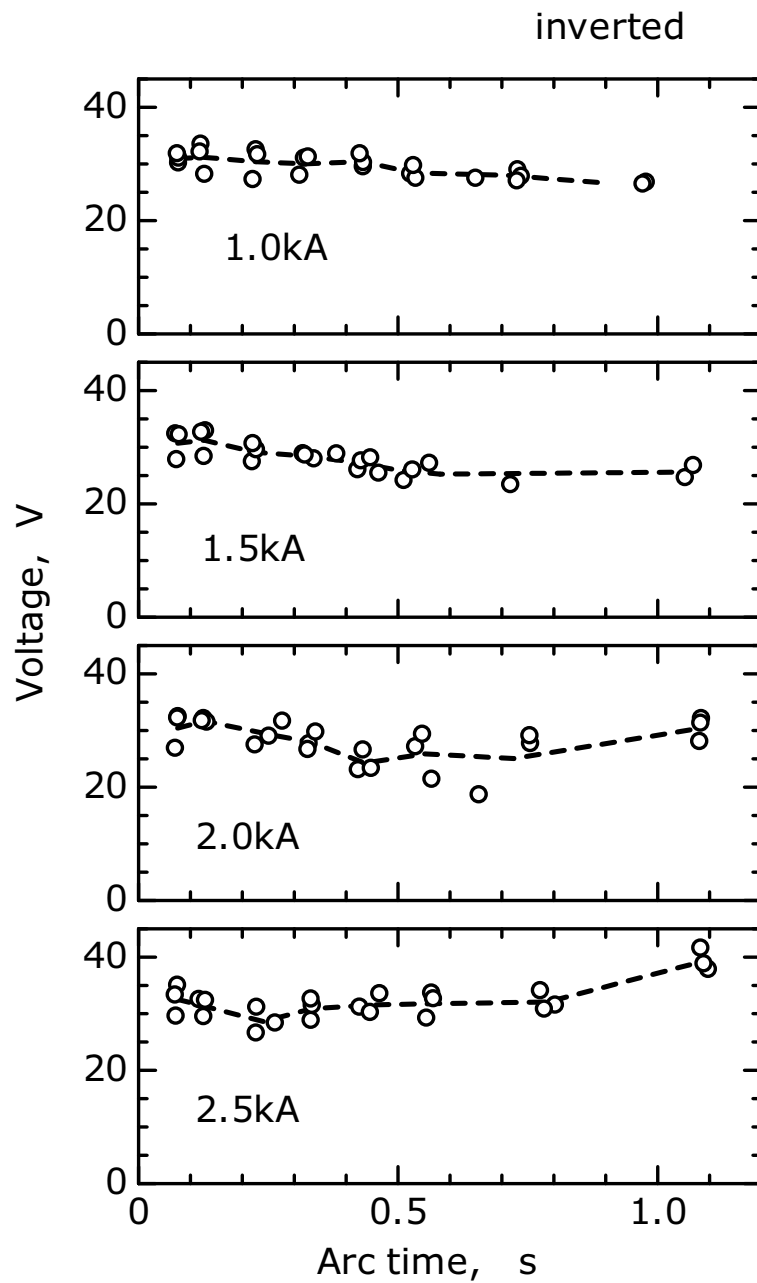


Fig.3-6 Changes of voltage for arc currents in case of the inverted direction of ferrule

Table3-2 Frequency of the occurrence of short circuit

nominal current, kA	conventional		inverted	
	number of experiments	number of short circuit	number of experiments	number of short circuit
1.0	18	0	26	4
1.5	25	2	25	8
2.0	38	2	27	6
2.5	25	4	24	2
total	106	8	102	20

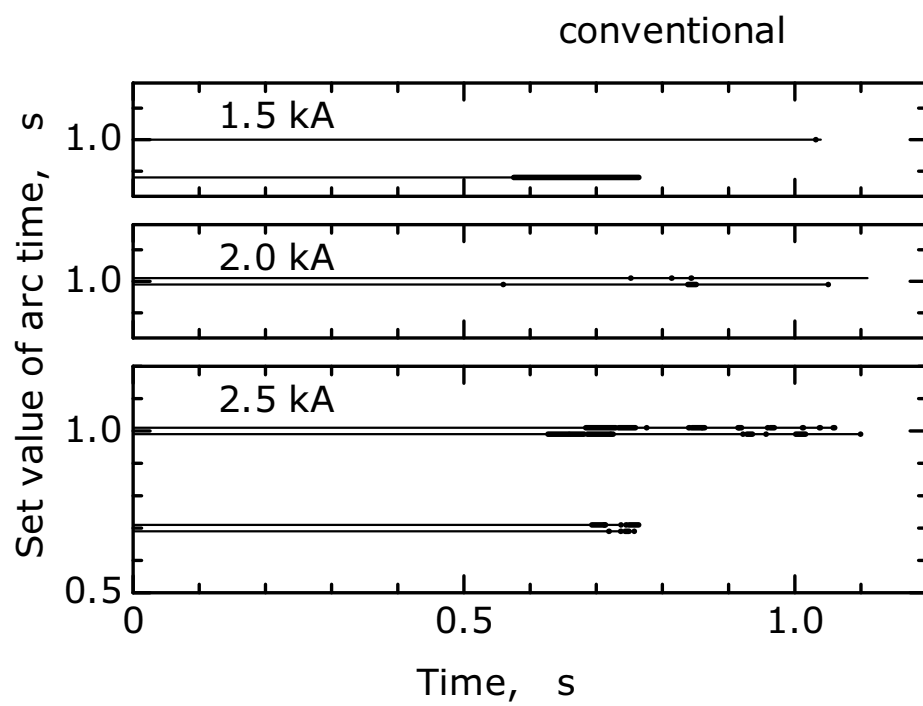


Fig.3-7 Occurrence of short circuit during welding
(conventional direction)

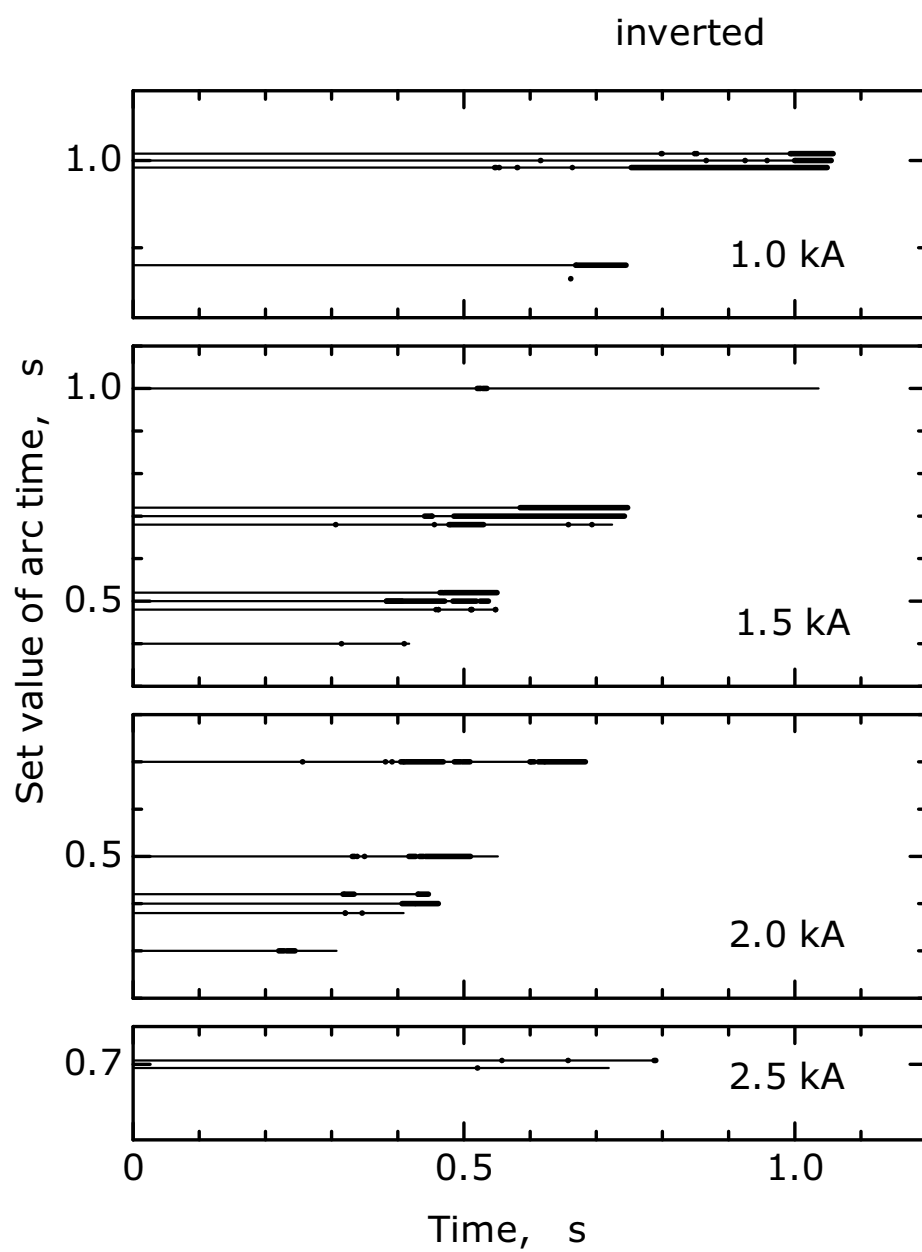


Fig.3-8 Occurrence of short circuit during welding
(inverted direction)

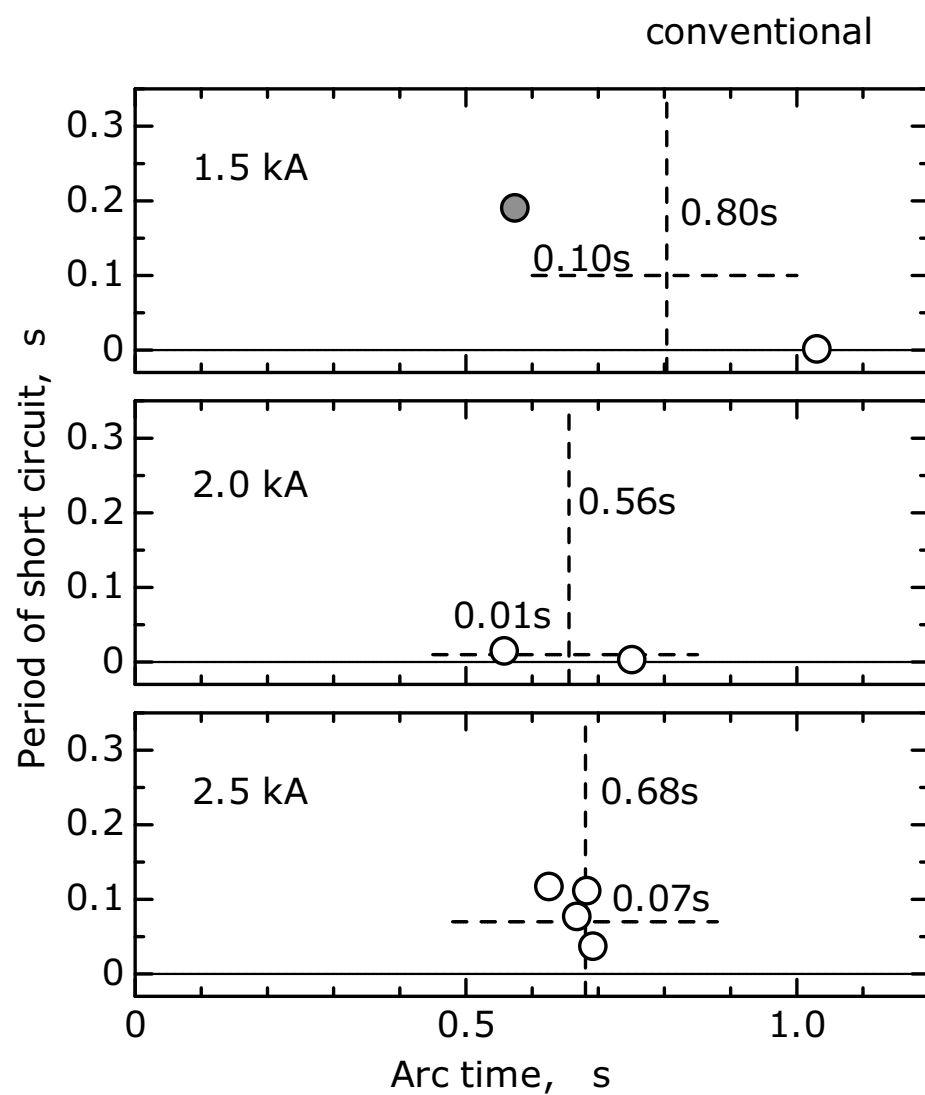


Fig.3-9 Influence of arc time on the period of short circuit (conventional direction)

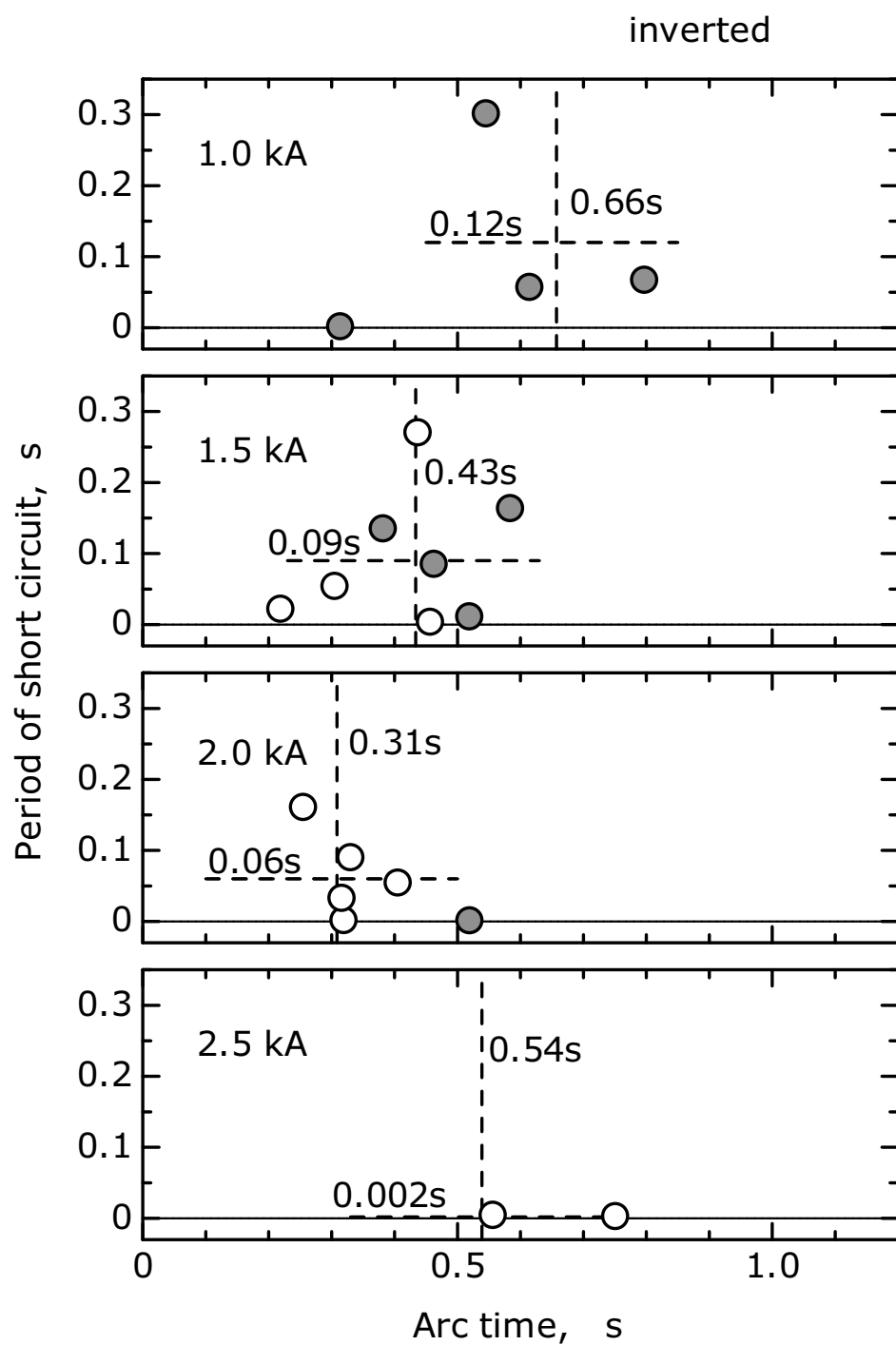


Fig.3-10 Influence of arc time on the period of short circuit (inverted direction)

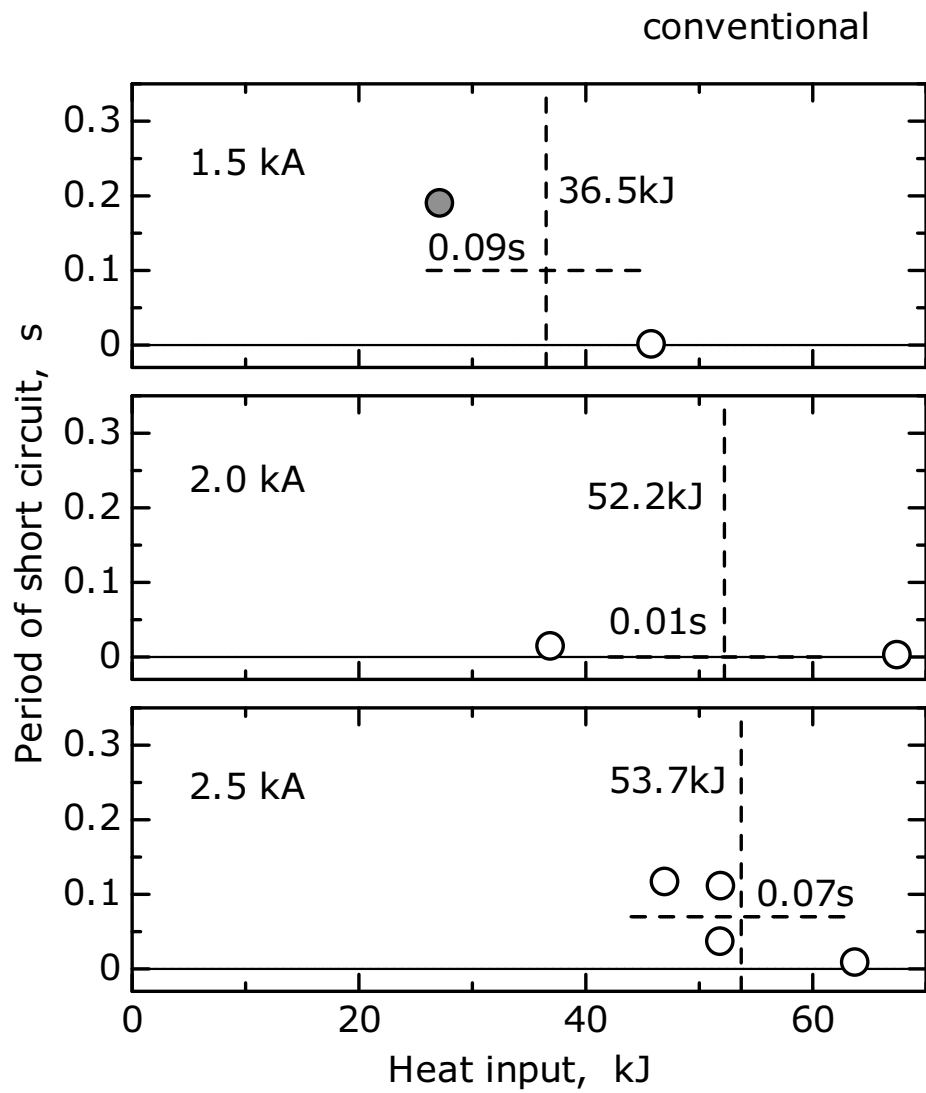


Fig.3-11 Influence of heat input on the period of short circuit (conventional direction)

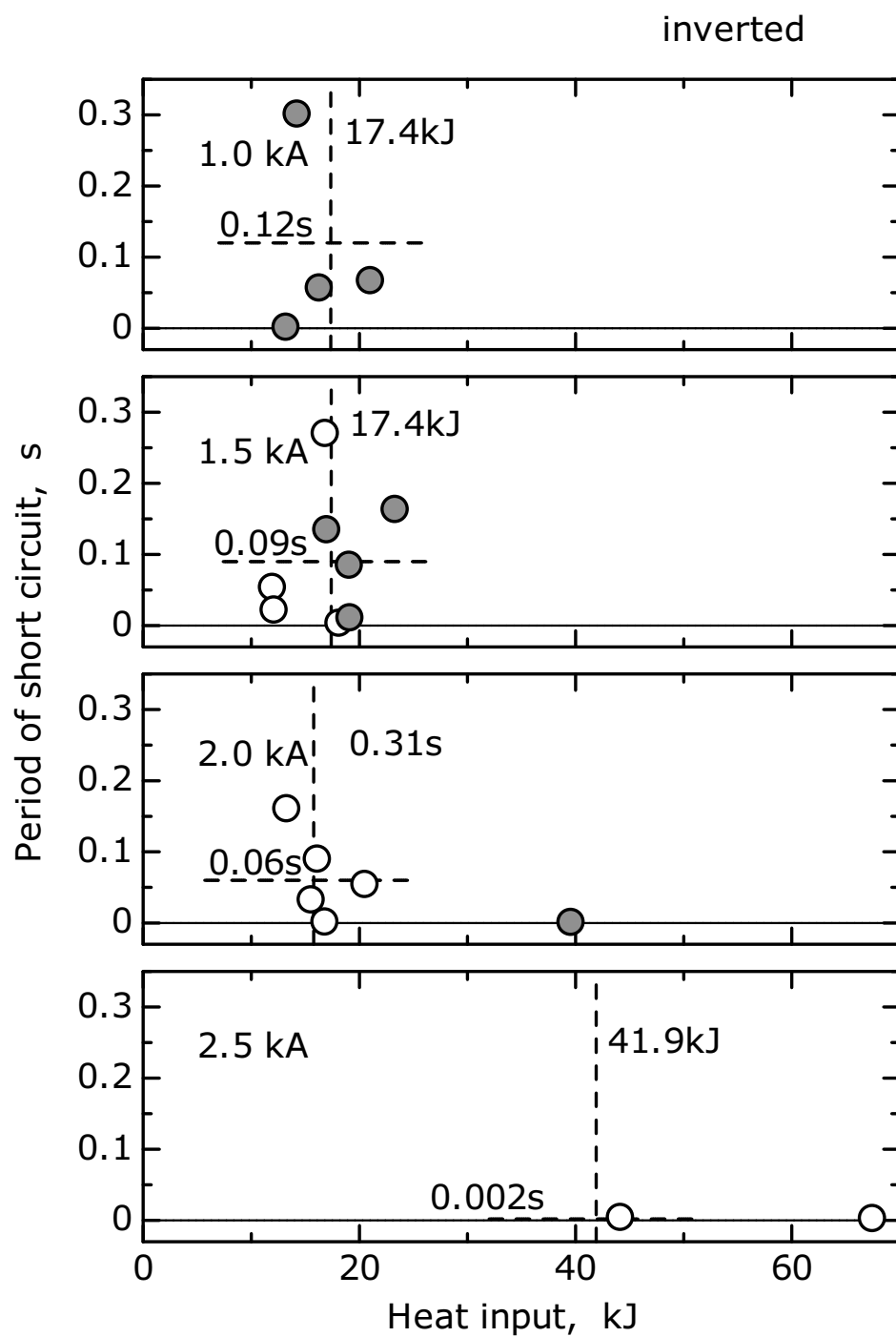


Fig.3-12 Influence of heat input on period of short circuit (inverted direction)

(a)



(b)

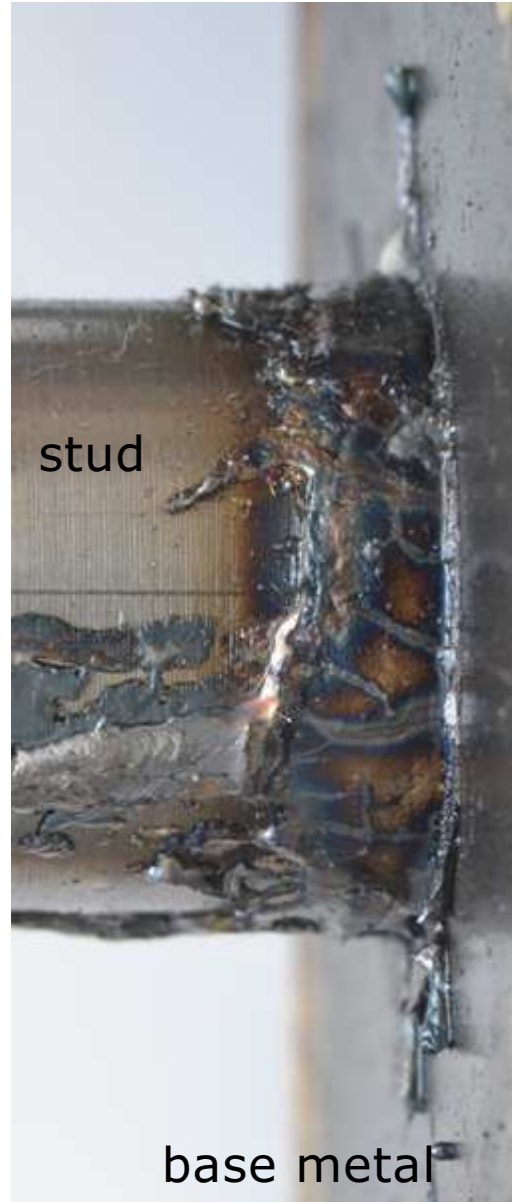


Fig.3-13 Appearance of stud welded;
(a)conventional, (b)inverted

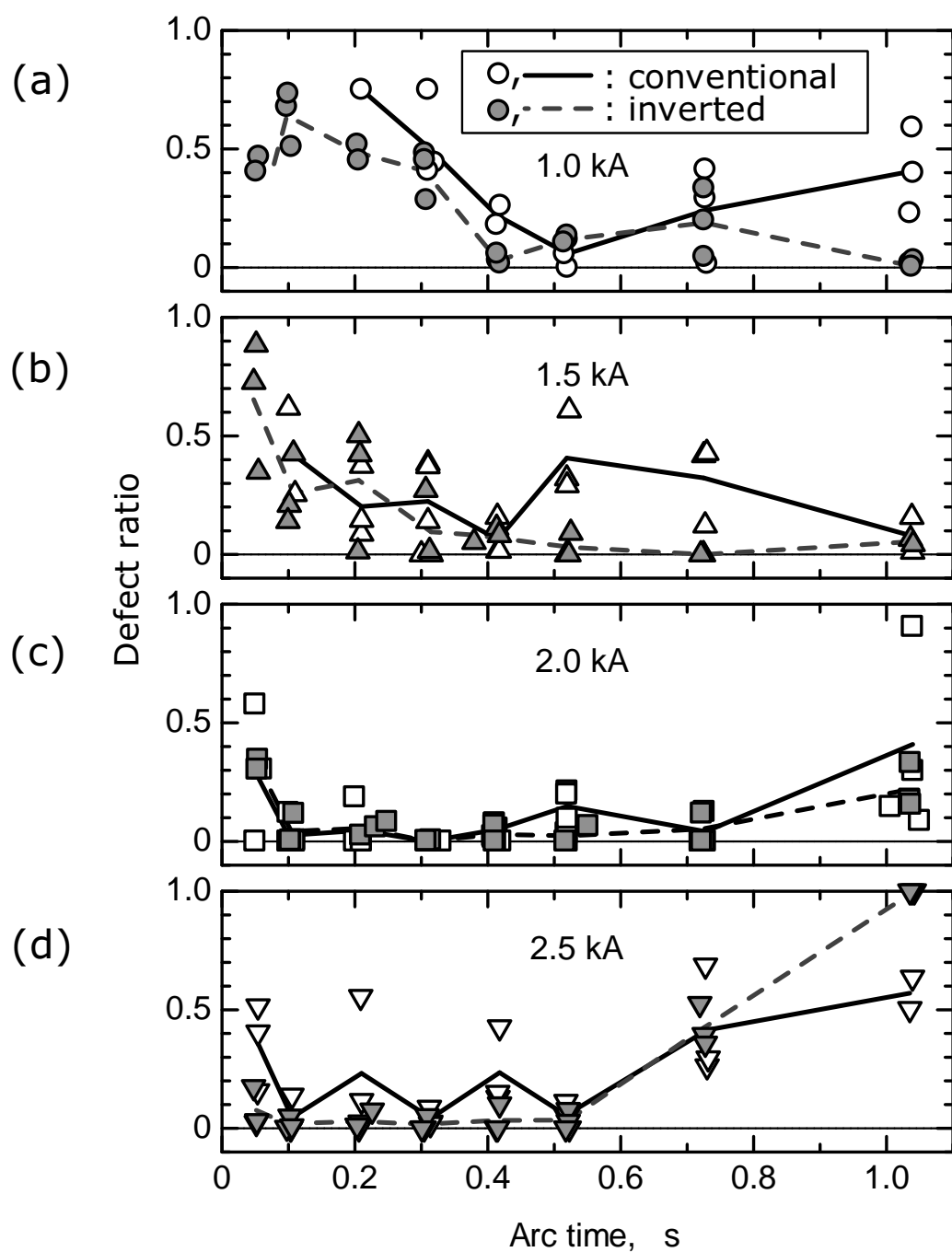


Fig.3-14 Influence of arc time on defect ratio concerning the effective area of welded region

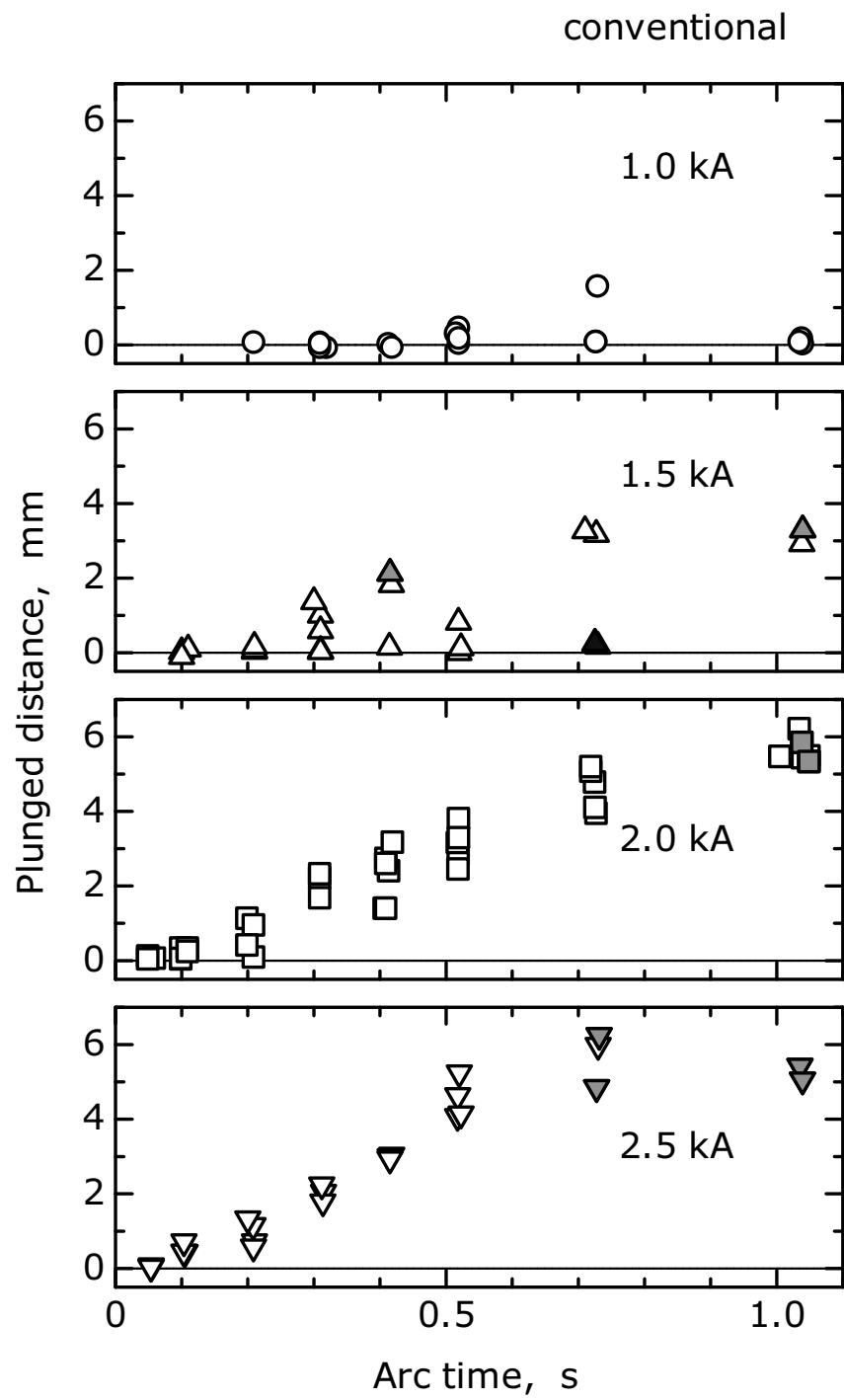


Fig.3-15 Influence of arc time on plunged distance (conventional direction)

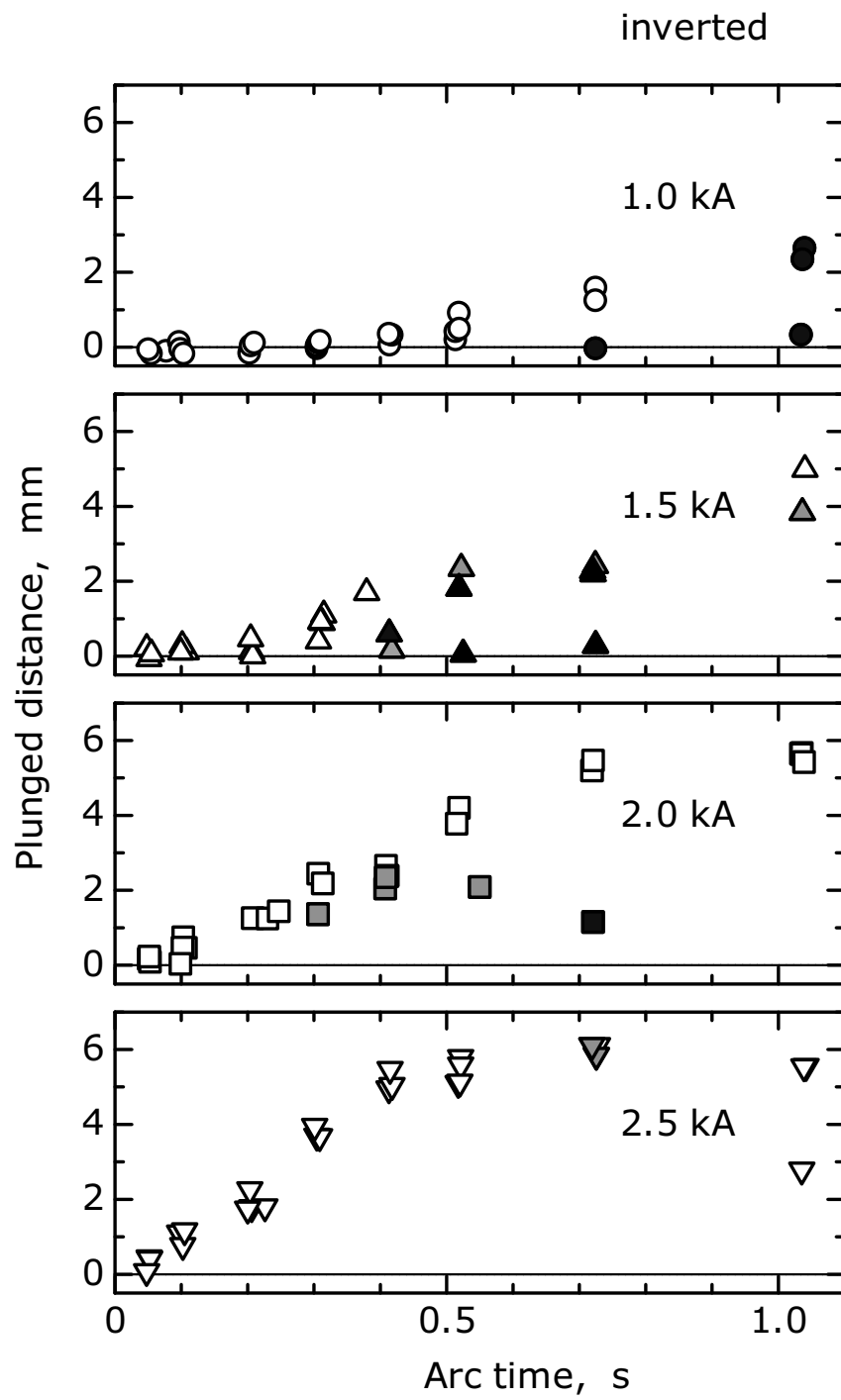
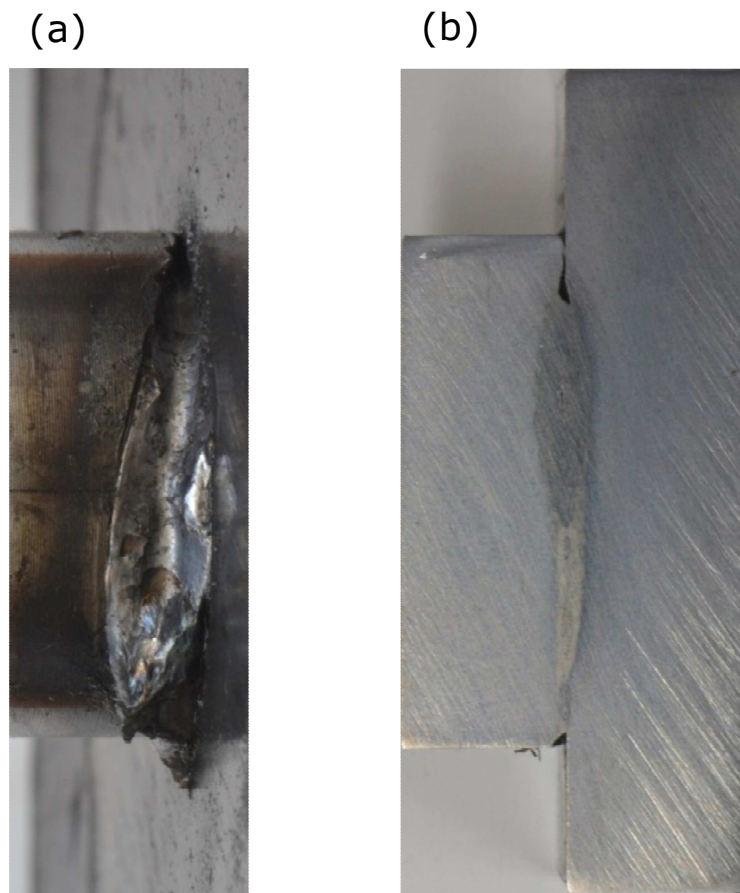


Fig.3-16 Influence of arc time on plunged distance (inverted direction)



current 1.0 kA
arc time 0.3 s
ferrule direction conventional
plunged distance 0.03 mm

Fig.3-17 (a)appearance and (b)cross-section
of a defective joint - case1

(a)



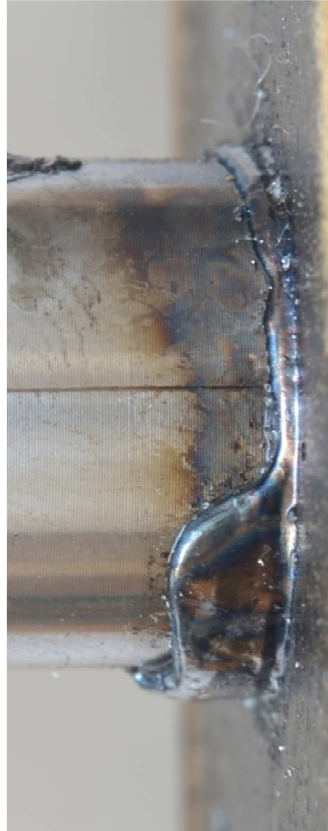
(b)



current 2.0 kA
arc time 0.1 s
ferrule direction inverted
plunged distance 0.56 mm

Fig.3-18 (a)appearance and (b)cross-section
of a defective joint - case2

(a)



(b)



current 2.0 kA
arc time 0.5 s
ferrule direction inverted
plunged distance 3.87 mm

Fig.3-19 (a)appearance and (b)cross-section
of a defective joint - case3

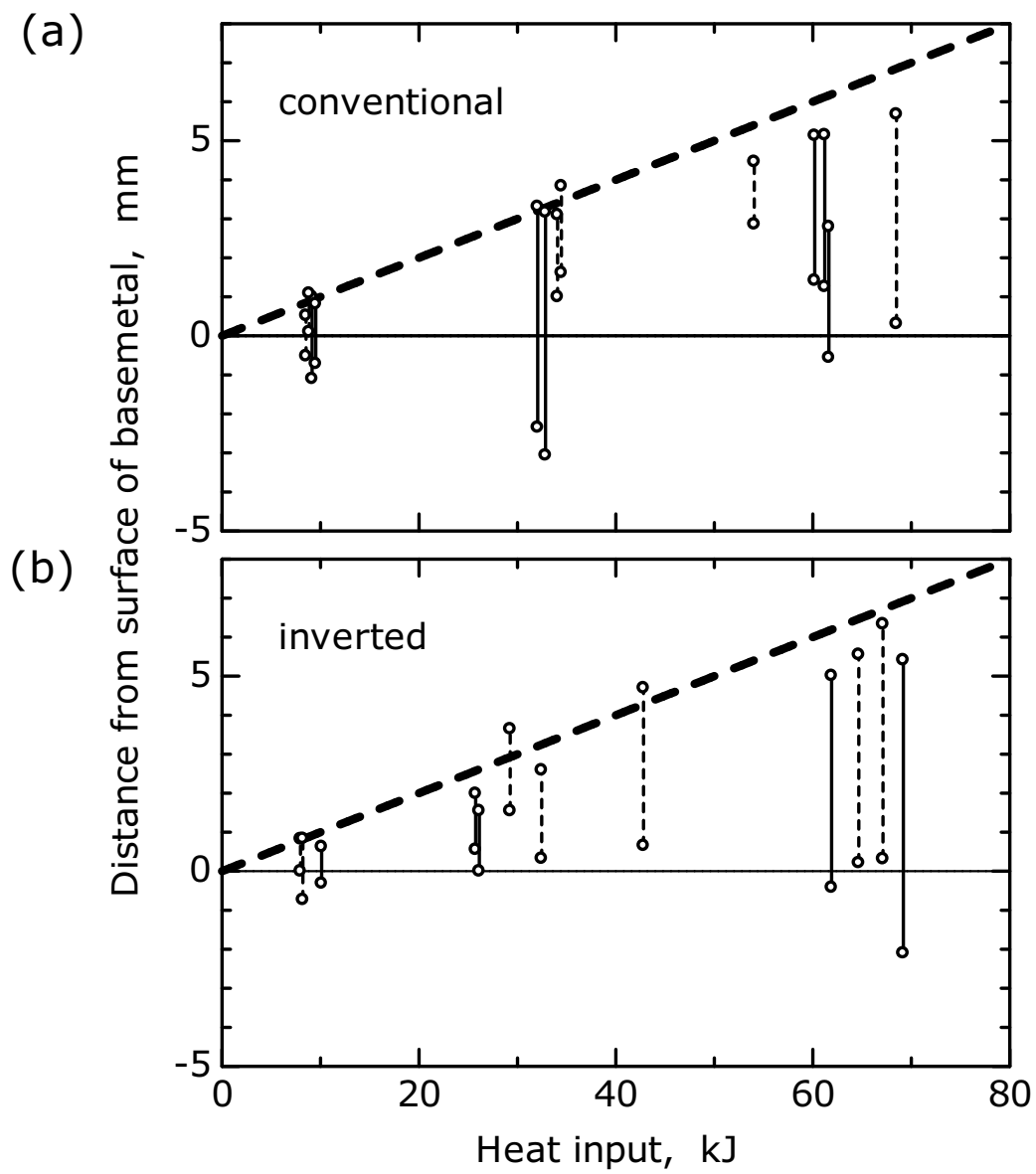


Fig.3-20 Relationship between heat input and the plunge of stud to a base metal

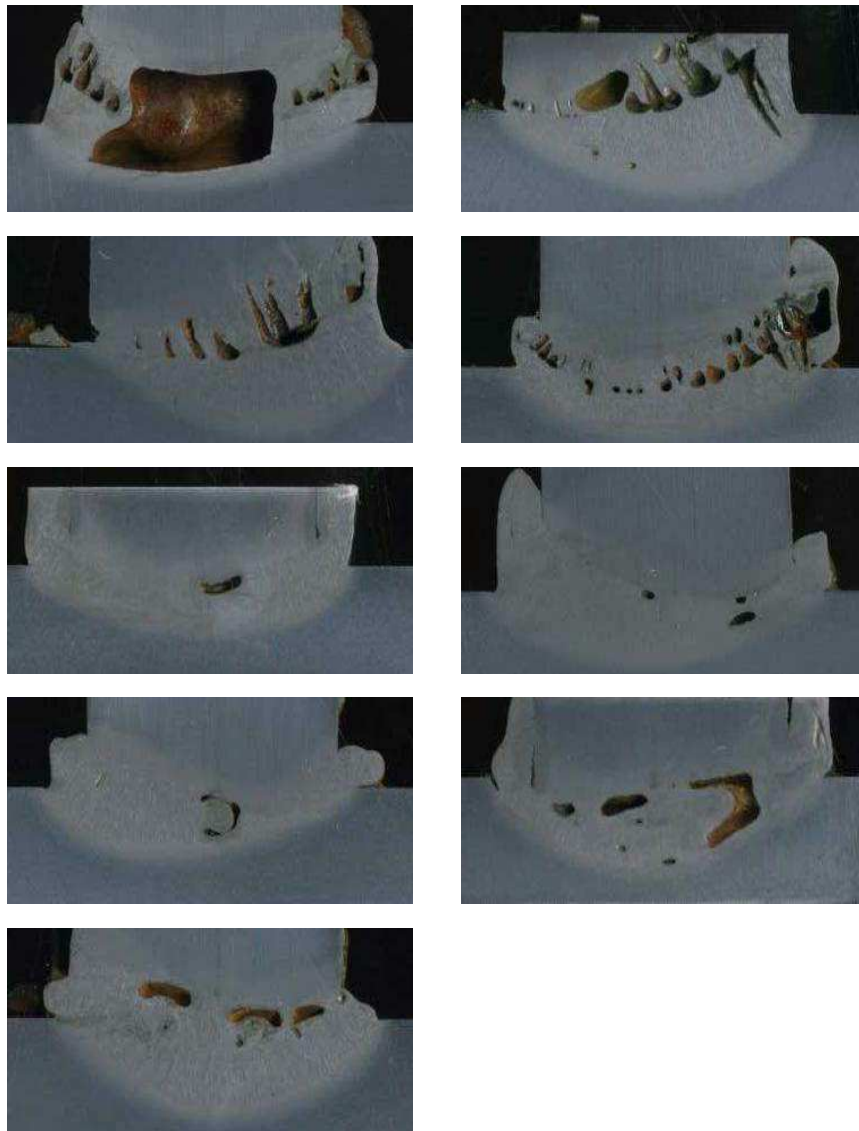


Fig.3-21 Cross-sections of all joints in sample 1
(without aluminum disk and in ambient
atmosphere)

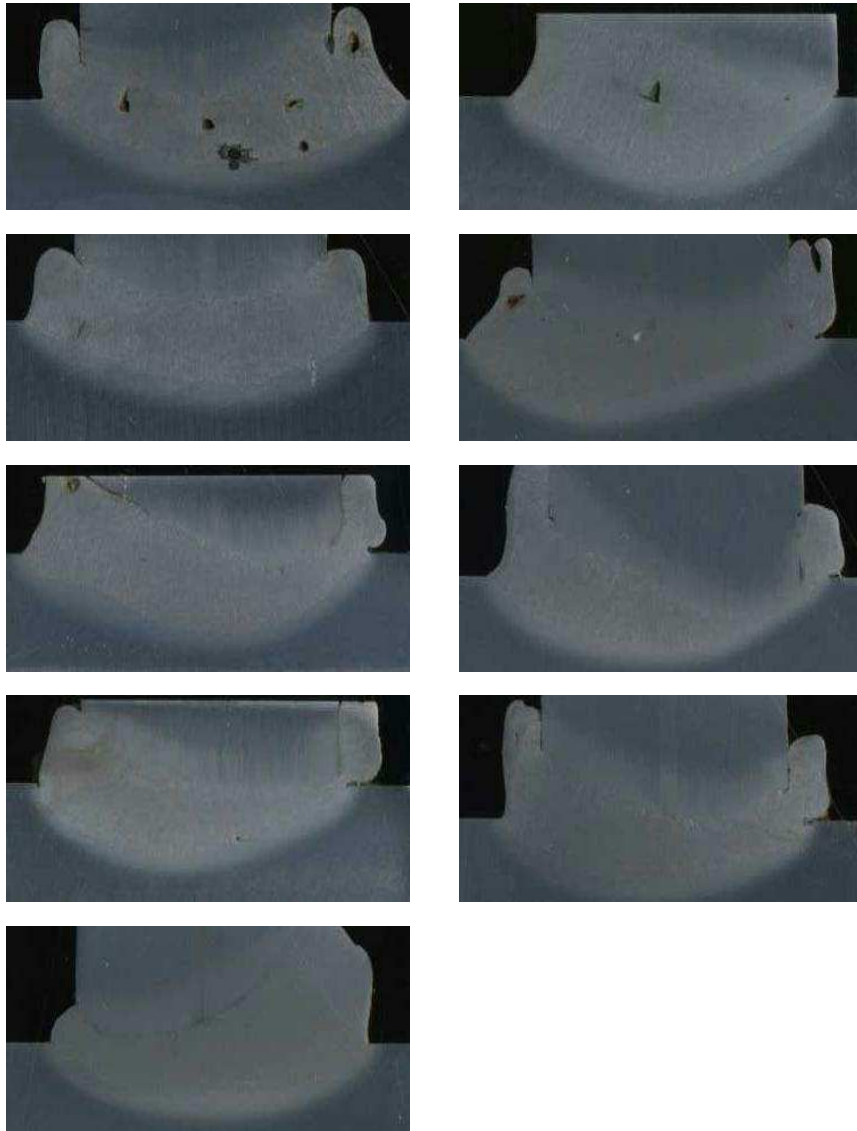


Fig.3-22 Cross-sections of all joints in sample 2
(with aluminum disk and in ambient
atmosphere)



Fig.3-23 Cross-sections of all joints in sample 3
(without aluminum disk and in argon gas
atmosphere)

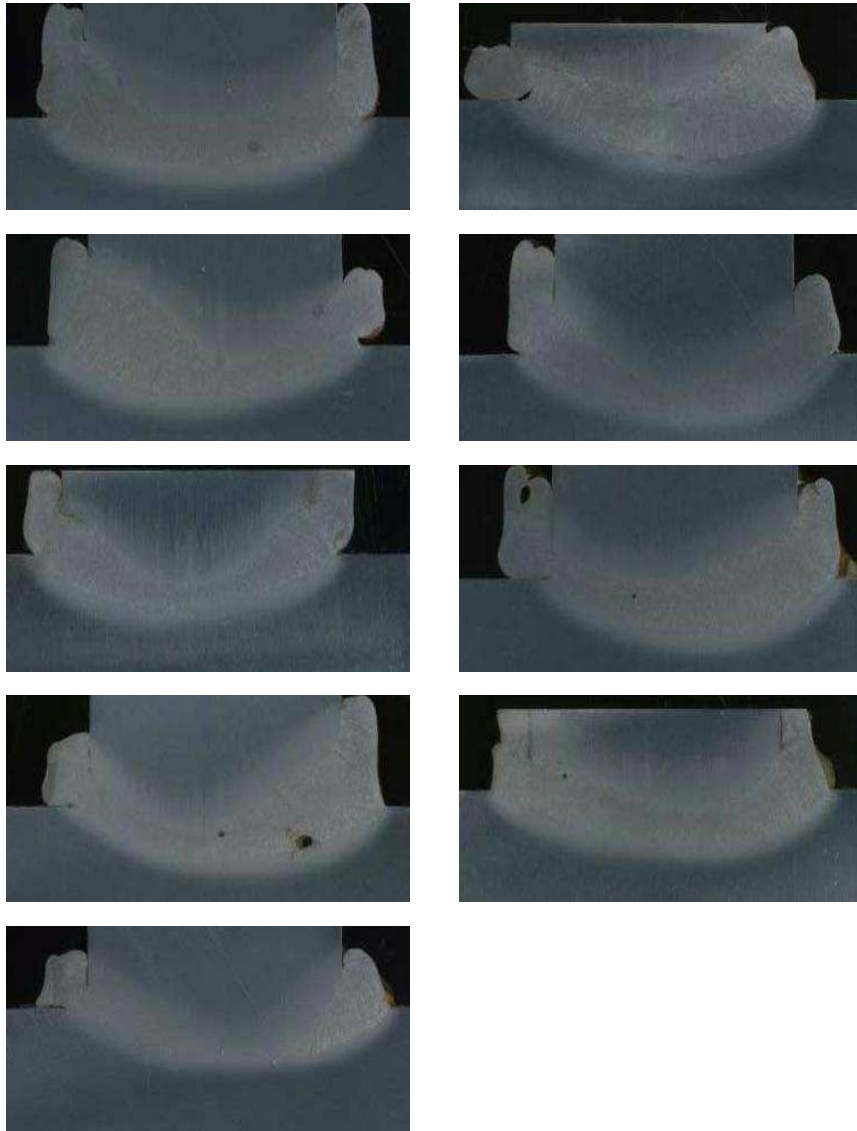


Fig.3-24 Cross-sections of all joints in sample 4
(with aluminum disk and in argon gas
atmosphere)

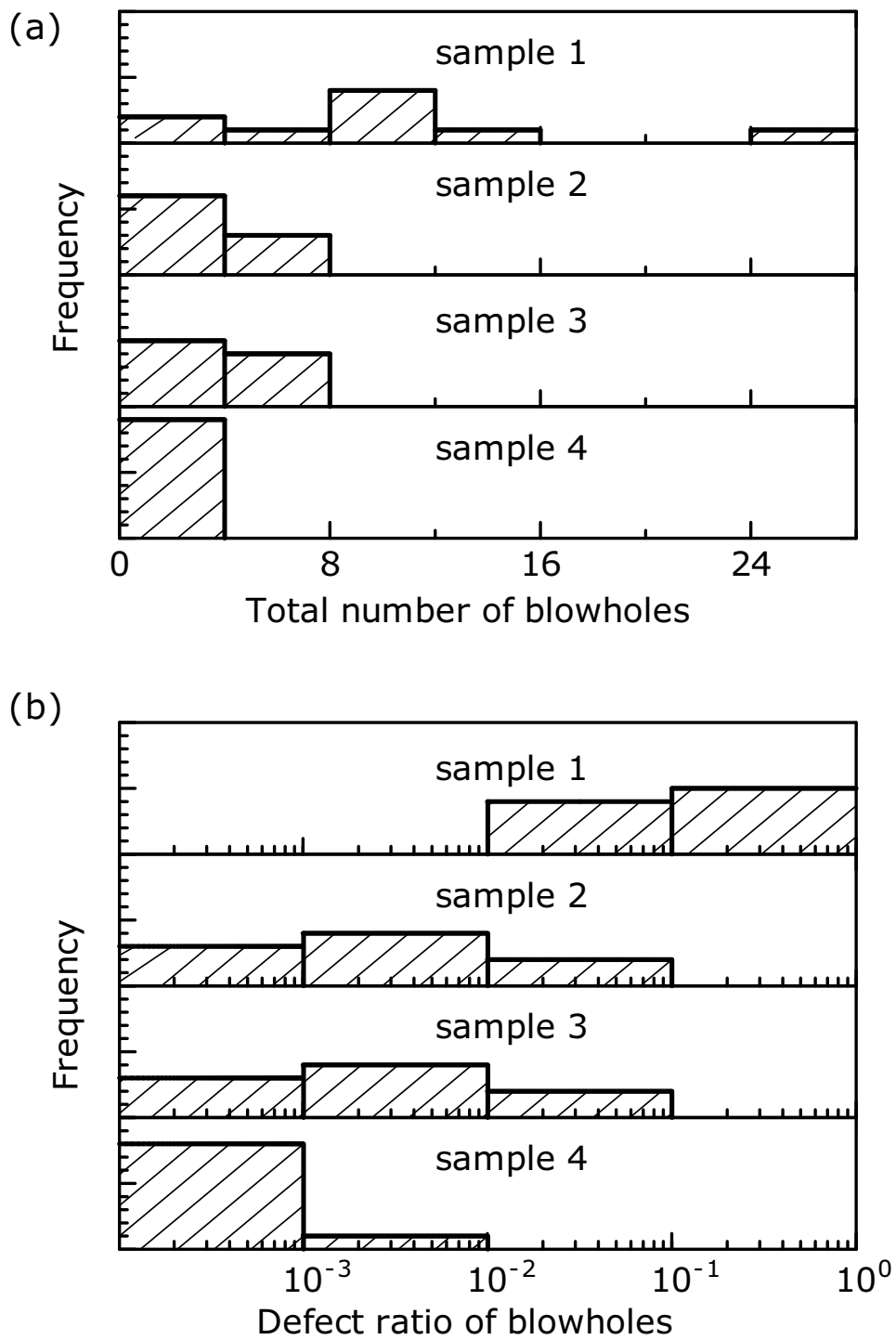


Fig.3-25 Distribution histograms of blowholes in sample 1 to 4; (a)total number, (b)defect ratio

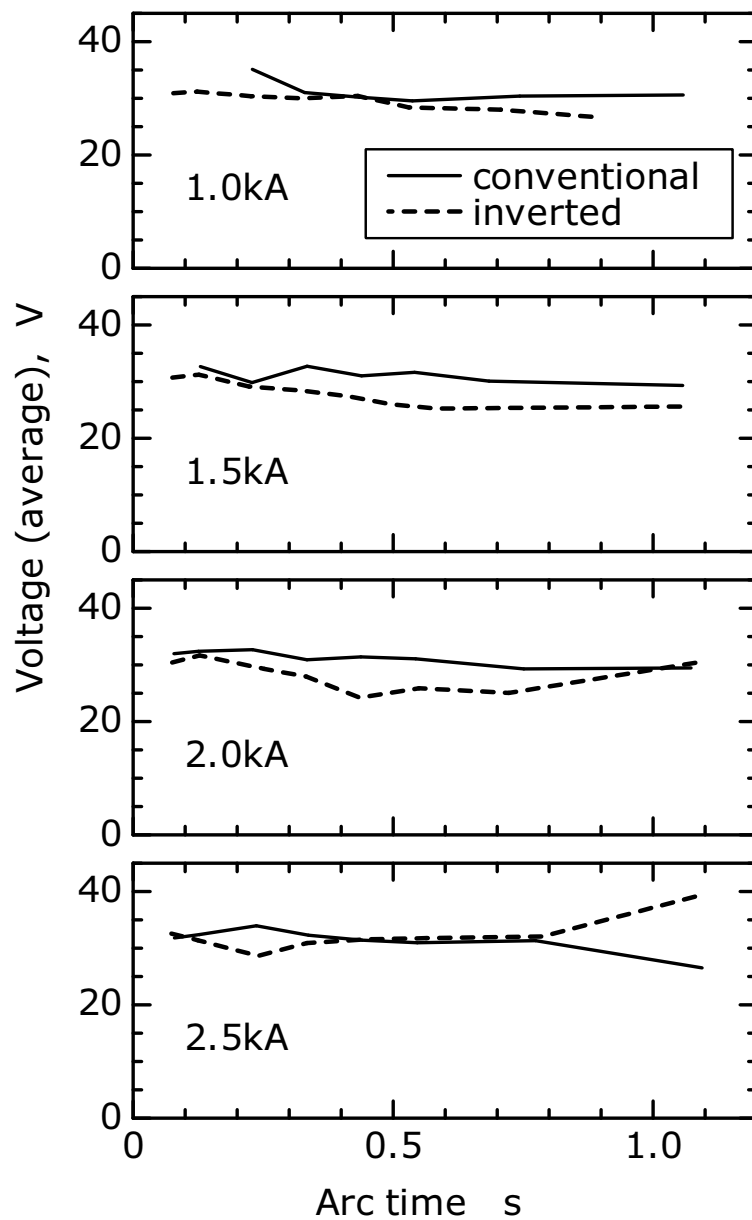


Fig.3-26 Comparison of arc time dependence of average voltage in conventional and inverted direction of ferrule

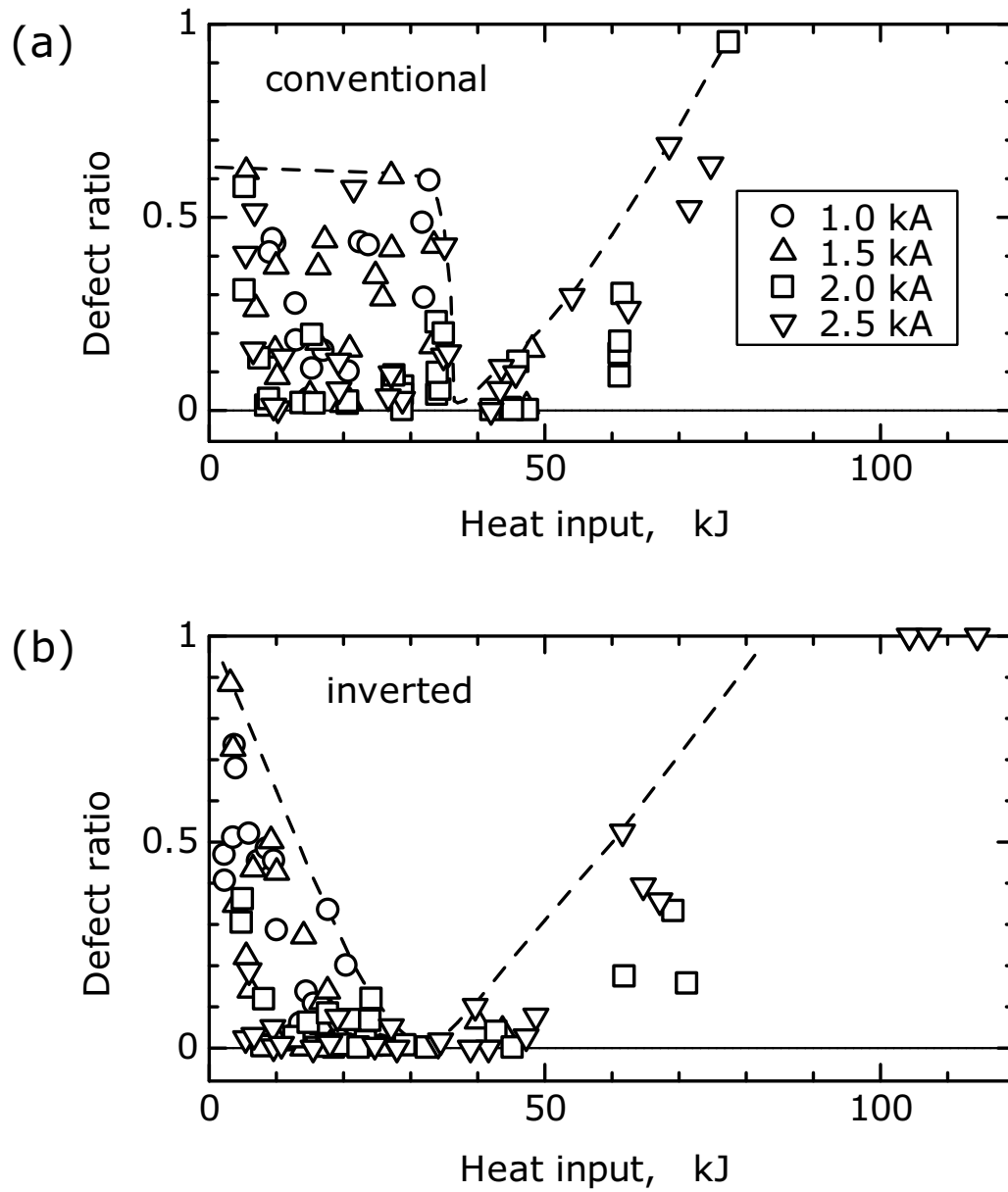


Fig.3-27 Relationship between heat input and defect ratio;(a)conventional, (b)inverted

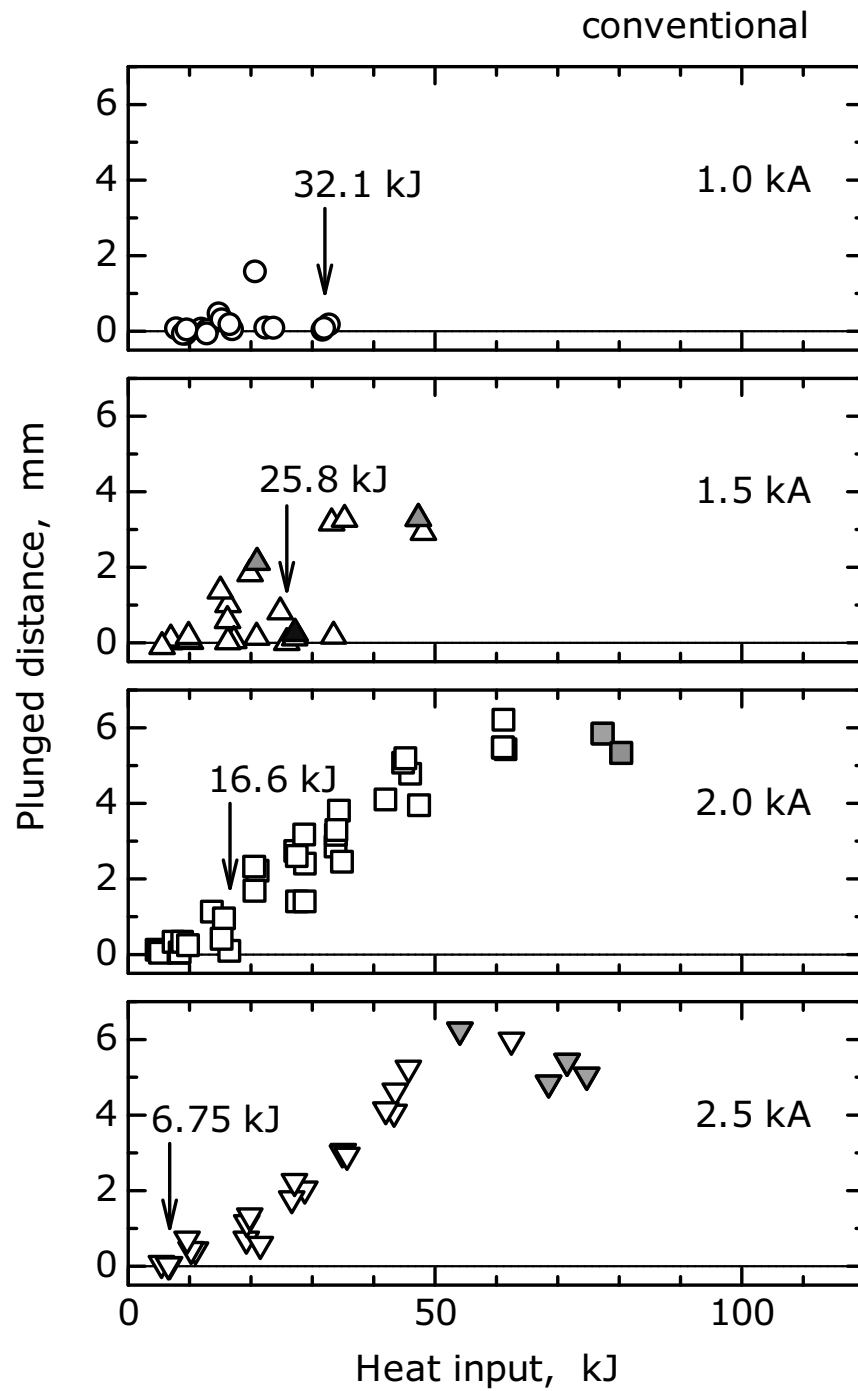


Fig.3-28 Relationship between heat input and plunged distance (conventional)

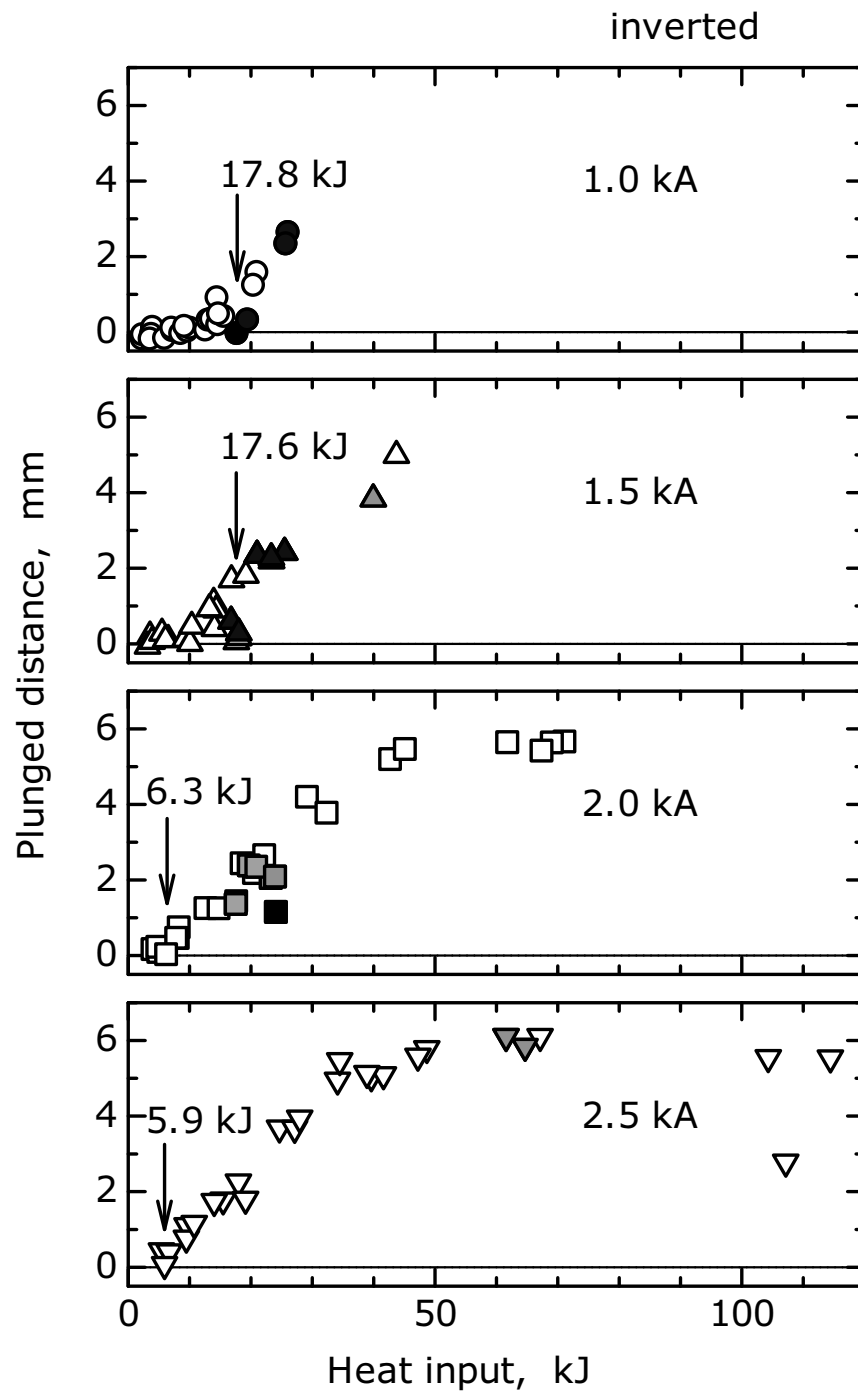


Fig.3-29 Relationship between heat input and plunged distance (inverted)

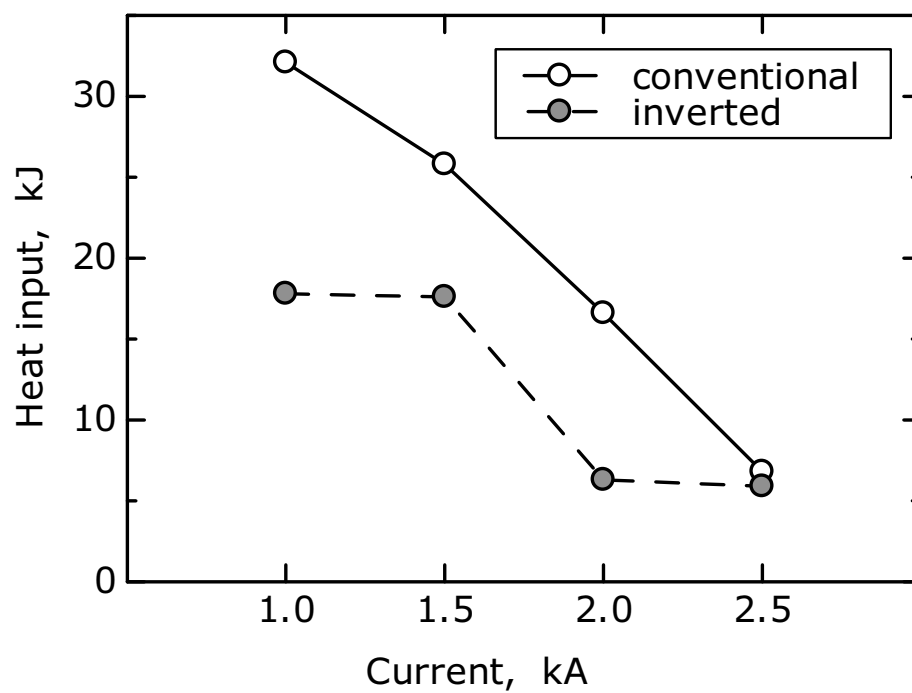


Fig.3-30 Influence of arc current on minimum value of heat input enabling a stud to be plunged

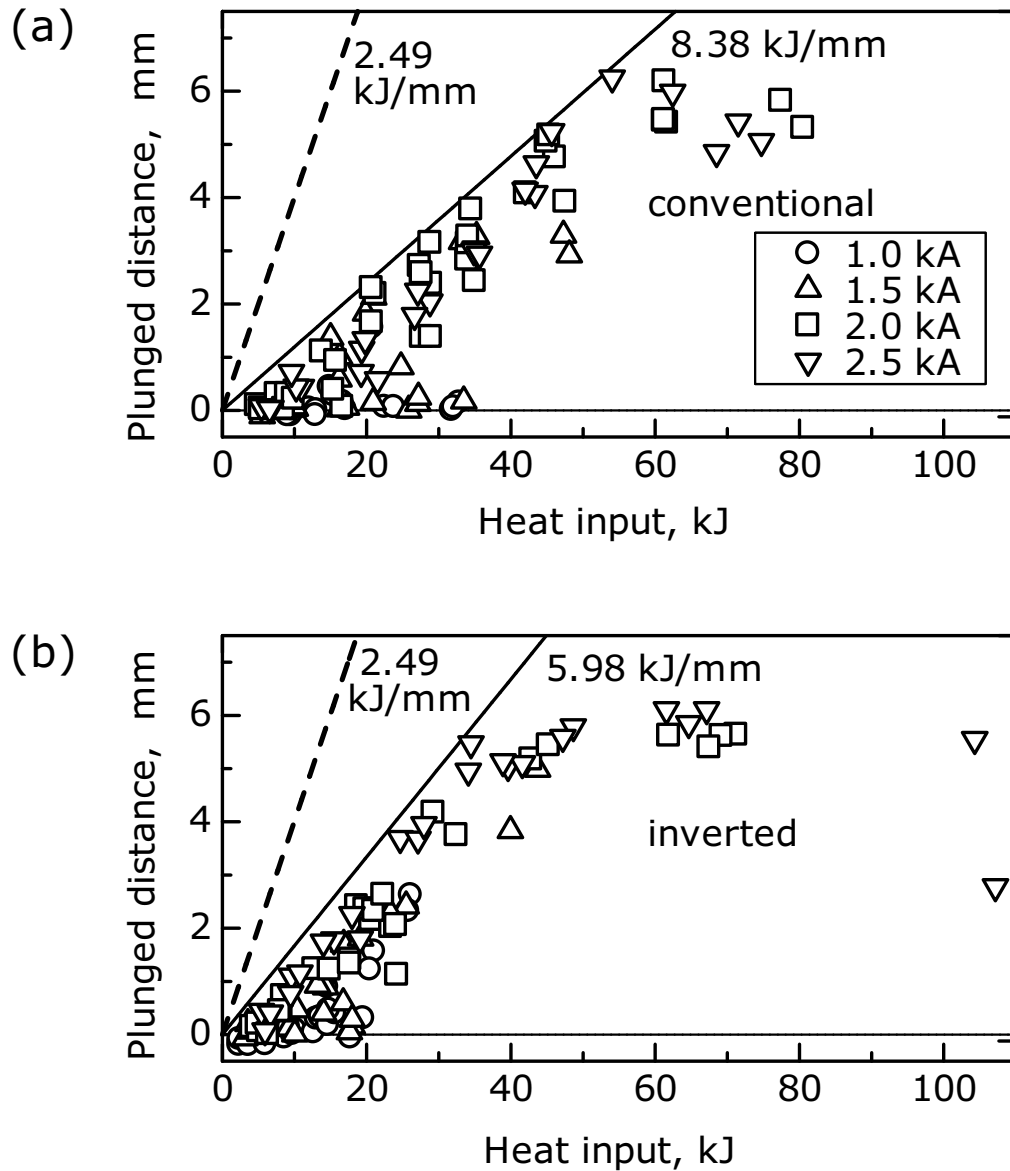


Fig.3-31 Estimated and experimental values of heat input for the melt of a stud per unit length; (a)conventional, (b)inverted

第 4 章 総括

アークスタッド溶接においては下向姿勢で行うことを前提にして研究・開発が進められてきた。溶接部に大きな熱量を与えることで母材表面に十分な量の溶融金属が作られ、スタッドを押込むと溶融金属が溶融池からフェルールとスタッドの間の隙間にあふれ出し、スタッドの軸部の周りにカラーが形成される。そのことから現在ではスタッド溶接の健全性の判断基準として全周にわたってカラーが形成されることが定められている。ところが昨今、溶接施工の現場では下向以外の姿勢で施工する必要性が生じ、さらにこれまでは施工することができないとされてきた大径の鋼スタッドを溶接することが求められている。

横向姿勢においては重力の作用により溶融金属が溶融池から脱落する。このため、溶融金属の垂れ落ちを防ぐことで融合不良による欠陥の発生を阻止することが最大の課題であった。また、気孔の発生を抑制することが溶接部の欠陥を低減させるために必要であることが確認された。

アークスタッド溶接が他の溶接法と大きく異なる点は 2 つある。1 つ目は、溶接する 2 つの部材と溶接棒という構成ではなく、母材とスタッドだけで構成され、スタッド自体が溶融することで溶加材の役目も果たすことである。2 つ目は、アークの開始から押込みまでの一連の動作を母材表面上でのアークの移動を伴わずに 1 回の操作で終了することである。このため、他の溶接法に比べて溶接条件を改良する余地は少ない。しかし、本研究においては横向姿勢のスタッド溶接に関して以下の知見を得ることができた。

1 直径 19mm の鋼スタッドを横向溶接する場合には、アークの電流値は大きいが保持時間は短い溶接条件とする必要がある。具体的には、推奨される範囲は、アークの電流量が 2.0~2.5kA で、保持時間が 0.3~0.4s である。

2 溶接部に欠陥がないことが望ましいが、スタッドの軸部の断面に占める欠陥の割合が 10%以下であれば、溶接部の静的引張強度はスタッドの原質部の強度を上回り、これにより継手効率は 100%となる。

3 溶接部に発生する気孔を抑制するためには、アルミニウムによる脱酸

に加えて，アルゴンガスによるシールドを行うことが望ましい．

4 スタッドの軸部の全周にカラーが形成されなければならないというスタッド溶接の判断基準は下向溶接において適用されるべきものであり，横向溶接においては溶接部の健全性の判断基準とはならない．

参考文献

- [1] 木原博編集，現代溶接工学，オーム社，昭和 54 年 8 月．
- [2] 日本スタッドウェルディング株式会社，スタッド溶接の歴史，URL：
<http://www.nsw-j.com>，2016 年 10 月現在．
- [3] 大西弘志，松井繁之，下田幸義，総田完治，西川和一，富岡恒夫，スタッド溶接を応用した鉄筋溶接継手の静的強度，溶接学会全国大会講演概要第 69 集（2001），pp.446-447．
- [4] 大西弘志，松井繁之，野中晴夫，阪野雅則，西川和一，富岡恒夫，スタッド溶接を応用した鉄筋溶接継手の疲労強度，溶接学会全国大会講演概要集，第 69 集（2001），pp.466-467．
- [5] 重田尚孝，大岩健治郎，遠藤年誠，細江茂美，村上正勝，スタッド溶接を用いた SC 杭の杭頭接合方法に関する実験研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国）（1999），pp.535-536．
- [6] 西川和一，スタッド溶接の原理と応用分野，溶接学会誌，第 71 巻第 8 号（2002），pp.575-580．
- [7] 辻幸佐，島本昌輝，舘石和雄，横向溶接されたスタッドの施工品質と溶接補修の適用可能性に関する基礎的研究，鋼構造論文集 9-35（2002），pp.17-24．
- [8] ダイヘンスタッド株式会社，アークスタッド溶接，技術資料 75103F，p3．
- [9] 河野六郎，立川博，片山猛，川上圭二，矢幡秀介，横向き太径スタッド溶接法の開発，溶接学会全国大会講演概要集，第 42 集（1988），pp.222-223．
- [10] 日本道路協会，道路橋示方書・同解説（2012），日本道路協会，p.154．
- [11] 一般社団法人スタッド協会，スタッド溶接技術検定テキスト，スタッド溶接．
- [12] 安藤弘平，溶接アーク現象入門，産報，1969 年 8 月．
- [13] 中世古圭基，内田拓磨，鈴木実平，川上博士，尾崎仁志，下向溶接用鋼スタッドの横向溶接への適用に関する基礎的研究，溶接学会論文集，第 34 巻第 3 号（2016），pp.204-209．

- [14] 酒井拓哉，鈴木実平，川上博士，尾崎仁志，中世古圭基，鋼スタッド溶接部の気孔抑制におよぼす押し込み速度の影響，溶接学会全国大会講演概要，第 93 集（2013），pp.235-236.
- [15] 中世古圭基，鈴木実平，川上博士，尾崎仁志，鋼大径スタッドの横向溶接現象の観察(第 3 報)，溶接学会全国大会講演概要，第 95 集（2015），pp.430-431.
- [16] 社団法人日本鉄鋼協会編，第 3 版鉄鋼便覧第 1 巻基礎，丸善，昭和 56 年 6 月．
- [17] 岩波理化学辞典第 3 班第 6 刷，岩波書店，1975 年 4 月．
- [18] 森本朋和，ガスシールドアーク溶接における気孔欠陥とその防止法，溶接学会誌，第 73 巻第 8 号(2004)，pp.27-32.

謝 辞

本研究を実施するにあたり，終始ご指導ご鞭撻を賜りました本学大学院工学研究科 機械工学専攻 材料機能設計研究室 鈴木実平教授に深く感謝いたします．本論文をまとめるにあたりご助言ご助力を賜りました同 量子物性工学研究室 鈴木泰之教授，同 超精密加工研究室 高橋裕教授，および同 材料機能設計研究室 川上博士准教授に感謝いたします．

X 線透過試験の実施にあたりご助言を賜りました三重県工業研究所ものづくり研究課 増井孝実氏，試験片の加工に当たりお世話になりました本学大学院工学研究科 機械工学専攻 集積加工システム研究室 中西栄徳准教授，制御プログラムの作成方法をご指導いただきました同 メカトロニクス研究室 松井博和助教に感謝いたします．試験片の作製にご助力いただきました堀場映次グループリーダーをはじめとする本学工学部技術部 装置開発グループの方々にお礼申し上げます．

共同研究者として研究いただき，貴重なデータの使用を快諾いただきました本学大学院工学研究科 機械工学専攻 材料機能設計研究室 尾崎仁志助教，同研究室の卒業生の山田有希氏，酒井拓哉氏，および内田拓磨氏にお礼申し上げます．研究室の諸氏にも心から感謝します．

また，ご指導いただきながらここにお名前を掲載することができなかった本学の先生方にお詫びいたしますとともに，本研究に関わっていただきました皆様方に心より感謝いたします．