

平成 23 年度 修士論文

鋼スタッド溶接における溶融・凝固過程に関する 基礎的研究



三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻
山田 有希

目次

第1章 緒言	・・・1
第2章 実験方法	・・・3
2-1 スタッド溶接のシーケンス	
2-2 スタッドの押し込み速度について	
2-3 試験材	
2-4 実験条件	
2-5 実験装置の仕様	
2-6 測定信号の校正	
2-7 断面観察方法	
2-8 溶融量の算出方法	
2-9 シャルピー衝撃試験方法	
第3章 実験結果	・・・7
3-1 スタッド溶接現象	
3-1-1 溶接開始時の実験結果	
3-1-2 パイロットアーク期間の実験結果	
3-1-3 主アーク期間の実験結果	
3-1-4 ポストヒート期間の実験結果	
3-2 引張試験結果	
3-3 シャルピー衝撃試験結果	
第4章 考察	・・・14
4-1 溶融量と投入エネルギーとの関係について	
4-2 スタッド溶接現象について	
4-3 溶接部の欠陥について	
4-4 溶接金属内の硬さについて	
第5章 結言	・・・20

参考文献

謝辞

第 1 章 緒言

溶接技術が本格的に発達したのは、電気エネルギーを容易に利用できるようになってからのことであり、このエネルギーを利用した代表的なものとしてアーク溶接が挙げられる。この溶接法は 2 つの電極間にアークを発生させ、その熱によって接合部を溶融して溶接する方法で、比較的容易に局所的に集中した高い熱エネルギーが得られるため、現在、溶接法の中で最も広範囲に利用されている。アーク溶接の歴史は古く、1802 年のロシアの Petrow による「アークの研究」に端を発し、1849 年にはイギリスの Staite が「アークによる金属の溶接」の特許を、1885 年にはロシアの Benardos が「炭素アークによる金属の溶接」の特許を取得しており、古くから盛んにアーク溶接に関する研究が行われている^[1]。

スタッド溶接はアーク溶接の一種で、板材に丸棒（スタッド）を垂直に溶接する手段として開発された溶接法である。スタッド溶接の原理はおおよそ次のようである。最初、母材とスタッドは接触している。通電と同時にスタッドを母材から離し、アークを発生させる。そして、1 秒程度アークによってスタッド先端と母材表面を溶融させる。最後にスタッドを溶融池に押し込み、溶融金属が凝固して、溶接が終了する（Fig.1-1 参照）。

スタッド溶接では、①大電流（200～2500A 程度）で短時間（1 秒程度）に溶接ができ、溶接ひずみが小さく、低コストな接合法である。②溶接作業者は、スタッドをセットした溶接ガンを母材にフェルールと共に押し付け、溶接ガンのスイッチを押し、溶接終了時まで確実に垂直度を保ったまま、溶接ガンを保持すればよいだけであり、スタッドの引き上げ、押し込みは溶接ガンが自動的に行うため、溶接結果が作業者の技量に左右されにくい。などの利点があり、造船や橋梁などの構造物における大きな平板に数多くのスタッドを迅速に接合することに適している^[2]。スタッド溶接における主要な溶接条件は溶接電流、アーク時間、スタッドの引き上げ距離および溶代である。その他にもパイロット電流・時間やポストヒート時間がある。さらに、溶接ガンに取り付けられたダンパの効きを変化させることで、スタッドを母材に押し込むときの速度を変

えることができ、これもスタッド溶接条件の1つである。これら溶接条件の基準値は、スタッドの径に応じて実験が行われ経験的に明らかになったとされている。しかし、溶接電流やアーク電圧などの溶接アーク現象とスタッドの引き上げや押し込みなどの動的現象との相互関連については明確に示されていないのが現状であり、スタッド溶接適用範囲の拡大には、溶接中のアーク現象やスタッドの動きを定性かつ定量的に把握することが必要であると考えられる。さらに、スタッドの特徴として先端部には、溶接金属内の脱酸作用のためにアルミボールが埋め込まれている。これが溶接金属内のブローホールを抑制すると考えられている。しかし、アルミボールがこの働きをする実験結果は示されておらず、この現象を明らかにすることは、溶接部の品質改善に必要な知見であると考えられる。

スタッド溶接の原理は比較的単純であるが、実際には、アーク放電現象とスタッドの動きが互いに関連しながら溶接中に変化する。本研究ではこれら現象を、各種溶接条件およびスタッド先端形状を変化させた場合について、実際の電流、電圧値およびスタッド変位を測定し、スタッド溶接における溶融・凝固現象を総合的に検討した。また、アルミボールの働きについても同時に検討した。なお、JIS規格にシャルピー衝撃吸収エネルギーの規定が無いものには、衝撃試験を実施しないのが通常であるが^[3]、本研究では、スタッド溶接の基礎的知見を得るため、スタッド溶接金属のエネルギー遷移曲線を作成し、エネルギー遷移温度を算出した。

第 2 章 実験方法

2-1 スタッド溶接のシーケンス

溶接シーケンスの概略図を Fig.2-1 に示し，同図に各値の名称を記した．溶接ガンのスイッチが ON になると同時に電流およびスタッド変位が立ち上がる．その後，電流値は図に示すように，階段状に上昇し，各期間の電流値は一定である．スタッドの変位については，正の方向をスタッドの引き上げ距離とし，負の方向をスタッドの押し込み距離とすると，同図に示すような変化を溶接中にする．本実験における溶接シーケンスで示した各値の基準値を Table2-1 に示す．

2-2 スタッドの押し込み速度について

溶接ガンに取り付けられているダンパの値を弱，中，強に変化させると，Fig.2-2 に示すようにスタッド変位の傾き（押し込み速度）を変化させることができる．しかし，スタッドの押し込み開始から終了までの変位は，同図に示すように一定とならないため，スタッドの押し込み速度を定義するには無理があると考えられる．そこで，本研究ではスタッドの押し込み速度をダンパの値を用いて弱，中，強と表した．

2-3 試験材

Fig.2-3 に示すような直径 19mm の頭付きスタッド（JIS B 1198）の先端形状を同図の左図に示すようなアルミボールが付いているものと，右図に示すような直径が 5mm で高さを 1.5mm に加工した鋼突起との 2 種類のスタッドを用いた．詳細な寸法および形状は同図に示すとおりである．なお，スタッドの機械的性質と化学組成を Table2-2, 3 に示す．

Fig.2-4 の上図および中図に示すように板材に一般構造用圧延鋼材（JIS

SS400) を、下図に示すように直径 36mm の機械構造用炭素鋼 (S20C) をシャルピー衝撃試験用の母材として使用した。詳細な寸法および形状は同図に示すとおりである。なお、S20C の化学組成を Table2-4 に示す。

2-4 実験条件

本研究では、大きく分けて 4 種類の実験を行った。以下に実験の呼び名、使用した装置および実験条件を記す。なお、極性は正極性 (スタッド負極-母材正極) で溶接した。また、実験結果や考察のグラフに示す番号は呼び名の番号を示し、グラフのプロット値は表の順に並べてある。

呼び名	使用装置	実験条件
溶接実験①	Fig.2-5	Table2-5
溶接実験②	Fig.2-5	Table2-6
溶接実験③	Fig.2-6	Table2-7
溶接実験④	Fig.2-7	Table2-8

2-5 実験装置の仕様

溶接機には直流溶接機 (ダイヘンスタッド社製 MRN-2500) を、溶接ガンにはダイヘンスタッド社製 (GS-202) のものを使用した。溶接機および溶接ガンの仕様を以下に記す。

・アークスタッド溶接用直流溶接機

出力電流範囲	200～2500A
溶接時間	0.01～2.5s
パイロット電流	13～590A, 自動設定
パイロット時間	0.001～0.15s
ポストヒート時間	0.05～0.24s

・GS-202

引き上げ距離調整範囲	1～6mm
------------	-------

溶接電流の測定には、シャント抵抗器（YOKOGAWA HOKUSHIN ELECTRIC 製 TYPE221）を使用した。シャント抵抗器の仕様は以下の通りである。

定格電流 500A

定格出力電圧 50mV

溶接中のスタッド変位の測定は、光変位センサ（SUNX 製 LM-10）を使用した。溶接ガンの軸部に地面と平行な受光板を取り付け、その受光板の動きを光変位センサで測定した。光変位センサの仕様は以下の通りである。

測定範囲 $\pm 10\text{mm}$

測定中心距離 50mm

分解能 $10\text{Hz}-1\mu\text{m}$, $100\text{Hz}-3.5\mu\text{m}$, $1\text{kHz}-10\mu\text{m}$

2-6 測定信号の校正

すべての測定機器の信号はオシロスコープに取り込むことで表示させた。オシロスコープではすべての信号が電圧信号として表示されるので電圧信号をそれぞれの単位に公正する必要がある。以下に各換算方法および値を示す。

・溶接電流

シャント抵抗器の定格電流（500A）と定格出力電圧（50mV）から単位の換算を行い $1\text{V}=10\text{kA}$ とした。

・スタッド変位

光変位センサの受光部には鋼につや消しの塗料を塗ったものを用いた。光変位センサの換算にはマイクロメータを使用し、 $\pm 10\text{mm}$ の範囲で受光部を移動させ、光変位センサの出力電圧を測定し換算を行った。測定結果を Fig.2-8 に示す。この結果から $1\text{V}=1.99\text{mm}$ とした。

2-7 断面観察方法

スタッド溶接部の形状および溶接欠陥の有無を観察するため、溶接部の中心を切断した。切断後は#1500 番までのカーボランダム研磨紙を用いて研磨を行

った．さらに，バフ研磨によって観察面を鏡面に仕上げた後，硝酸 5cc に対してエタノール 100cc を混ぜたものに 10 秒浸け，腐食し断面観察を行った．

2-8 溶融量の算出方法

本研究では，スタッドおよび母材溶融量を溶接部中心の断面から求めた．スタッド中心軸 ($x=0$) で母材溶融面積を左半分と右半分に分け，それぞれの面積を $x=0$ で回転させ，平均したものを母材溶融量とした．スタッドの溶融量は，Fig.2-9 の斜線で示す範囲の体積を母材の時と同様にして求め，その体積を同図に示す点線で囲まれた体積（溶接する前のスタッドの形状から求めた体積）から引いた値をスタッドの溶融量とした．

2-9 シャルピー衝撃試験方法

本研究では，溶接実験④で溶接した溶接金属の中心にノッチを入れ，衝撃試験を行いエネルギー遷移曲線とエネルギー遷移温度を求めた．試験機は金属材料衝撃試験方法（JIS Z 2242）の規定に基づく 10kgf・m シャルピー衝撃試験機（JIS B 7722）を使用した．試験片は Fig.2-10 に示す試験片，すなわち JIS4 号試験片（JIS Z2242）と長さ，幅および切欠き形状が同じで，厚さが半分の 5mm のものを使用した．ノッチの位置は衝撃試験前に腐食を行い溶接金属の中心に切欠きがくるようにした．低温で試験を行う場合には，試験片を指定の試験温度に対して $\pm 2\text{K}$ に保たれた液相中で少なくとも 10 分間，試験片温度を一定に保った後に取り出して試験機の支持台に置き，ハンマで衝撃を与えた．液相から試験片を取り出してから衝撃を与えるまでの時間は，5 秒以内とした．試験片の冷媒として，エタノールと液体窒素を用いた．また，加熱が必要な場合は温湯を用いた．

第3章 実験結果

3-1 スタッド溶接現象

溶接中の全過程における電流値の変化、電極間電圧の変化およびスタッドの変位について、測定の実例を Fig.3-1 に示す。溶接ガンのスイッチを入れると僅かに電流が流れ、その後、定電流制御によってパイロットアーク、主アーク期間ではほぼ一定の電流が流れる。電圧値は主アークに移行した初期に極大を示し、その後、減少する。また、主アーク期間中に急激な電圧降下が生じる場合もあった。スタッドは電流の立ち上がりと同時に引き上げられ、溶接中、一定に保たれた後、最後に押し込まれる。

本研究では、スタッド溶接時における電氣的現象とスタッドの動的現象との相互関連について、第2章で示した溶接シーケンスの溶接開始時、パイロットアーク期間、主アーク期間およびポストヒート期間の4つにわけて実験結果を述べる。

3-1-1 溶接開始時の実験結果

溶接開始時の電氣的現象とスタッドの動的現象との関係について述べる。Fig.3-2 に溶接開始時の電流、電圧値およびスタッド変位の代表例を示す。同図に示すように電流、電圧値は溶接開始と同時に増加する。電流と電圧が立ち上がる時間(aおよびb)はほとんど一致している。溶接開始時の数十msの間、電流値($I_{\text{start}}=40\text{A}$ 程度)および電圧値($V_{\text{start}}=1\text{V}$ 未満)が主アーク放電中に比べて、非常に小さい期間が存在する。次に時間cにおいて電圧値が急増し、続いて時間eにおいて電流値が急増し、時間f(Fig.3-3参照)において電圧値が再び急増した。電流および電圧の変化に対して、スタッドの移動が開始する時間dは電圧が急増する時間cの直後である。以上が溶接開始時における電流、電圧値およびスタッド変位の定性的な変化である。

上述した溶接開始の電流、電圧値およびスタッド変位が変化する時間を全実

験について比較して Fig.3-4 に示す．同図では，電圧が急増する時間 c の測定値が最も明確に得られたので， a ， b ， d ， e ， f の各時間は c を基準として表示した．図中の時間ゼロの太い水平線が， c である．

電圧の立ち上がりは電流の立ち上がりよりも僅かに先行するが，その時間差は，ほとんどの実験で 0.6ms 程度であった．差が 2ms を超える場合もあったが，逆に電圧の立ち上がりより電流の立ち上がりが先行する場合も 5 例あった．したがって， a と b の有意な差は認められず，電圧と電流は同時に増加すると判断できる．電圧が急増するまでの間，電流と電圧は周期変動を伴うがほぼ一定の値を示す．この間の電流および電圧値 (I_{start} および V_{start}) は Fig.3-5 の上図に示すように， I_{start} については他の溶接条件に関わらず $40\sim 50\text{A}$ 程度であるのに対し， V_{start} は $0.05\sim 0.75\text{V}$ の範囲で大きく変動した．同図に示すように， V_{start} の値と他の溶接条件との関連は認められず， V_{start} の変動は各溶接毎のバラツキと考えられる．

スタッドの移動が開始する時間は電圧の急増から $3\sim 6\text{ms}$ 程度で溶接条件によらずほぼ一定となった．電圧が急増した後， $10\sim 18\text{ms}$ の間，電流値はほぼ I_{start} の低い水準に止まっていた．電圧が再び急増する時間は電流が急増する時間よりも僅かに先行するが，その時間差はほとんどの実験で 0.2ms 程度であった．差が 2ms を超える場合もあったが，時間の関係が逆転する場合も 5 例あった．

したがって， e と f の有意な差は認められず，電流の急上昇と電圧が再び急増する時間は同時であると判断できる．同図の下図に示すように，電流と電圧の急激な上昇が起こったときのスタッド変位 H_e は $0.7\sim 1.3\text{mm}$ の範囲で変動し，他の溶接条件との関連は認められず， H_e の変動は各溶接毎のバラツキと考えられる．

3-1-2 パイロットアーク期間の実験結果

パイロットアーク期間の電氣的現象とスタッドの動的現象との関係について述べる．Fig.3-6 にパイロットアーク期間の電流，電圧値およびスタッド変位の代表例を示す．同図の太い矢印で示すように溶接開始時とパイロットアーク

期間の間で非常に高い電流が数 ms 流れる時間があった。そのとき電圧値も同じ挙動を示し高い値となった。そこから電流値が減少していくと電圧値も減少していく傾向が認められ、その後、ほぼ一定値のパイロット電流 $I_{\text{piaverage}}$ が流れる。パイロットアーク期間における電圧値 $V_{\text{piaverage}}$ は同図に示すようにほぼ一定であった。パイロット電流値を自動設定にすると Fig3-7 に示すように、 $I_{\text{piaverage}}$ は 1200~1250A の範囲で変動した。同図に示すようにパイロット電流値を 200A に設定した場合、 $I_{\text{piaverage}}$ が設定値で流れたものは 33 個中 1 つだけであった。また、パイロット電流値を 200A に設定した場合における $I_{\text{piaverage}}$ の変動範囲は 200~390A であった。

次に $I_{\text{piaverage}}$ と $V_{\text{piaverage}}$ の関係について述べる。Fig.3-8 に横軸 $I_{\text{piaverage}}$ 、縦軸 $V_{\text{piaverage}}$ としたときのグラフを示す。パイロット電流値を自動設定とした場合、スタッドの引き上げ距離 L が 2.5mm で $V_{\text{piaverage}}$ の平均値は 33.3V、 $L=1.0$, 4.0mm とした場合の $V_{\text{piaverage}}$ の値はそれぞれ 31.6V と 39.7V であった。同じ電流値でも引き上げ距離によって電圧値が変化した。また、パイロット電流を 200A とした場合、スタッドの引き上げ距離 L が 2.5mm で $V_{\text{piaverage}}$ の平均値は 27.9V、 $L=1.0$, 4.0mm とした場合の $V_{\text{piaverage}}$ の値はそれぞれ 22.9V と 30.9V であった。自動にしたときと同様にほぼ同じ電流でも引き上げ距離を変化させると電圧値に変化が生じた。また、電流値を変化させた場合の電圧値を比べると 200A のほうが $L=1.0$, 2.5, 4.0mm 全ての場合において設定値を自動にした場合より低い値をとった。

3-1-3 主アーク期間の実験結果

主アーク期間の電氣的現象とスタッドの動的現象との関係について述べる。Fig.3-9 に主アーク期間の電流、電圧値およびスタッド変位の代表例を示す。同図の L はスタッドの引き上げ距離を示している。ただし、この時点でアルミボールが溶融して消失しているため、スタッド端面と母材との距離は、引き上げ距離 L にアルミボールの高さ 1.5mm を足した距離になっており、この放電距離を Gap として表した。また、主アーク期間中の電圧の最大値は初期に現れ、

その値を V_{\max} とし、最小の電圧値を V_{\min} とした。同図に示すようにスタッド保持中に電圧の急激な降下が生じる場合もあった。主アーク期間の最大電圧 V_{\max} 、最小電圧 V_{\min} を各溶接条件について整理し、 V_{\max} および V_{\min} と溶接条件との関係を Fig.3-10, 11 に示す。Fig.3-10 の①からパイロット電流を自動設定にした場合について、スタッドの引き上げを一定にし、溶接電流を 1200A, 1500A, 1800A と変化させたとき、 V_{\max} の各値および平均値は 1200A=34.4V, 1500A=36.6V, 1800A=34.8V であった。また、溶接電流を 1500A の一定とし、スタッドの引き上げを 1.0mm, 4.0mm と変化させたとき、 V_{\max} の各値は 1.0mm=32.5V, 4.0mm=39.2V であった。同図の②からパイロット電流を 200A にした場合について、上述したようにまとめると、スタッドの引き上げを一定にし、溶接電流を 1200A, 1500A, 1800A と変化させたとき、 V_{\max} の各値および平均値は 1200A=35.8V, 1500A=36V, 1800A=37.1V であった。また、溶接電流を 1500A の一定とし、スタッドの引き上げを 1.0mm, 4.0mm と変化させたとき、 V_{\max} の各値は 1.0mm=31.4V, 4.0mm=37.4V であった。

Fig.3-11 から溶接電流 1500A, スタッドの引き上げ距離 2.5mm とした場合、 V_{\max} の値は鋼突起（同図の緑の円）を除くとほぼ一定であり、その平均値は 34.4V であった。スタッド先端形状を鋼突起にして溶接したとき、主アーク期間中の最大電圧 V_{\max} の平均値は 31V となった。 V_{\min} については、溶接条件をアーク時間 0.5s とスタッド先端形状を鋼突起にした場合を除くとほぼ一定であり、その平均値は 25.8V であった。アーク時間を 0.5s とした場合の V_{\min} の値は、①で 28.1V, ②で 29.9V であった。また、鋼突起にした場合の V_{\min} の平均値は 21.5V であった。

次にスタッド保持中の急激な電圧降下について述べる。主アーク期間において、初めて電圧が急激に降下した時間を全実験について比較したものを Fig.3-12 に示す。図中の「○」印は初めて急激な電圧降下が起こった時間を、「×」印はスタッドの押し込みが始めるまで、急激な電圧降下が起こらなかったものを示している。同図から短絡が始めて起こる時間は、0.7～1 秒程度の範囲で変動した。全実験で短絡が起こらなかったものを次ページに記す。

- ①溶接電流：1200A，アーク時間：0.5s，
引き上げ距離：1.0mm，溶代：2，8mm
- ②溶接電流：1200，1500A，アーク時間：0.5s，
引き上げ距離：1.0mm，溶代：2，8mm
- ③溶接電流：1500A（ダンパ：弱，中，強）

3-1-4 ポストヒート期間の実験結果

ポストヒート期間の電氣的現象とスタッドの動的現象との関係について述べる．Fig.3-13 にポストヒート期間の電流，電圧値およびスタッド変位の代表例を示す．同図に示すように，スタッドの押し込みが始まった時間 g の直後，電圧値が急激に減少する (h)．電圧が減少しても溶接電流は一定の値で流れ続け，その間に 1V 未満の電圧 $V_{\text{postaverage}}$ が掛かる．電流と電圧がほぼゼロとなる時間 (i および j) はほぼ一致している．電流および電圧値が変化し続けている間，スタッドは降下し続け，最後にスタッドの押し込みが終了する (k)．以上が溶接開始時における電流，電圧値およびスタッド変位の定性的な変化である．

上述したポストヒート期間の電流，電圧値およびスタッド変位が変化する時間を全実験について比較して Fig.3-14 に示す．同図では，電圧が急減する時間 h の測定値が最も明確に得られたので， g ， i ， j ， k の各時間は h を基準として表示した．図中の時間ゼロの太い水平線が， h である．電圧がほぼゼロとなる時間は電流がほぼゼロとなる時間より僅かに先行するが，その時間差はほとんど実験で，0.5ms 程度である．差が 1ms 以上となる場合もあるが，逆に電圧がほぼゼロとなる時間より電流がほぼゼロとなる時間が先行する場合も 5 例ある．したがって， i と j の有意な差は認められず，電圧と電流がほぼゼロとなる時間は一致すると考えられる．スタッドの押し込みが始まった時点で電圧値がすでに 1V 未満になっていたものが 5 例あった．また，5 例を除くその他の条件において，スタッドの押し込みが始まる時間は，電圧が 1V 未満になる前であり，その時間は 3.8～32ms の範囲であった．

電圧が急激に減少してから，スタッドの押し込みが終了するまでの時間は，

同図の下図に示すように、91.5～1183.5ms の範囲であった。ダンパの値を弱，中および強としたときのそれぞれの平均の値は，弱=93ms，中=350ms，強=980msであった。電圧が急激に減少したときのスタッド変位 H_h および押し込みが完了する位置 H_k についてスタッドの初期位置をゼロとして Fig.3-15 の上図に示す。図中の変位ゼロの赤線が，スタッドの初期位置を示している。同図から電圧が急減したとき，スタッドが降下した時点で電圧値がすでに 1V 未満になっていた 5 例を除く全実験において，スタッドの変位が初期位置より下がっていた条件は認められなかった。Fig.3-15 の下図に示すように，電圧が急減してから電圧がほぼゼロとなる間に掛かる電圧値 $V_{\text{postaverage}}$ は，0.35～1V の範囲であった。なお，同図の 0V のプロットは電圧が急減してから電圧がほぼゼロとなる期間がなかったため， $V_{\text{postaverage}}$ の値をゼロとした。また， $V_{\text{postaverage}}$ の値と溶接条件との関連は認められず， $V_{\text{postaverage}}$ の変動は各溶接毎のバラツキと考えられる。

3-2 引張試験結果

本研究において、 $t_{pi}=0.12s$ が基準値であるのに対して、 $t_{pi}=0.15s$ として溶接を行ったスタッド溶接部の引張試験を行った。Fig.3-16 に $t_{pi}=0.12s$ および $0.15s$ で溶接した場合の電流、電圧値およびスタッド変位を示す。

同図から t_{pi} の値を $0.12s$ および $0.15s$ とした場合、電流値において $100A$ 程度の差が認められた。しかし、溶接中に電圧が減少していく傾向やスタッドの動きに関しては、 t_{pi} の値を $0.12s$ および $0.15s$ と変化させてもほぼ一致していると同図から判断できる。したがって、本研究では、 $t_{pi}=0.15s$ で溶接したスタッド溶接部の引張荷重を基準値で溶接した場合の引張荷重と考え、JIS 規格の定める最小と最大引張荷重の範囲に入っているか否かを確認した。なお、引張試験の試行回数は 6 回とした。Fig.3-17 に引張試験結果を示す。同図に示すように JIS が定める最小と最大の引張荷重値はそれぞれ $12ton$ と $16ton$ であり、 $t_{pi}=0.15s$ で溶接したスタッド溶接部の引張荷重値は 6 試験片ともこの範囲に入っており、引張荷重の平均値は $13ton$ であった。したがって、 $t_{pi}=0.15s$ を基準値で溶接した場合の引張荷重と考えると、その値 ($13ton$) は JIS 規格を満たす結果となった。また、同図の写真に示すように、破断箇所は全ての試験片においてスタッド軸部であった。

3-3 シャルピー衝撃試験結果

本研究では、スタッド溶接金属の衝撃試験を行った。その結果について述べる。Fig.3-18 に衝撃試験を行って得られたスタッド溶接金属のエネルギー遷移曲線を示す。得られた曲線から吸収エネルギーがほぼ一定となる値は $90J$ であった。その値が半分になったときの温度をエネルギー遷移温度として、同図から読み取った。その結果、同図に示す溶接条件で溶接したスタッド溶接金属のエネルギー遷移温度は約 $0^{\circ}C$ であった。

第 4 章 考察

4-1 溶融量と投入エネルギーとの関係について

スタッド溶接において溶接金属はアーク放電で発生した熱によって、スタッドと母材が溶融・凝固し形成される。そこで、実測値の投入エネルギーを以下の式より求めた。

$$H = IVt$$

(H: 投入エネルギー, I: 溶接電流, V: アーク電圧, t: 溶接時間)

この式を用いて、スタッドおよび母材溶融量と投入エネルギーの関係を Fig.4-1 に示す。同図に示すように、スタッド、母材および合計の溶融量は、ほぼ原点を通る直線になっており、投入エネルギーの増加に伴い、各溶融量は増大する。図中の破線は、純鉄 1mm^3 を溶かすために必要なエネルギー(Q_{Fe})を 9.079J/mm^3 と仮定し、その値を用いて溶接入熱から換算される鋼の溶融量を示している。なお、 Q_{Fe} の算出方法は、純鉄 1mm^3 を溶かすために必要な比熱と潜熱によるエネルギーの合計から算出した。比熱および潜熱によるエネルギーをそれぞれ Q_{sh} と Q_{lh} とし、その値を以下に示す。

$$Q_{\text{sh}} = c \cdot \rho \cdot \Delta T = 7.201\text{J/mm}^3$$

$$Q_{\text{lh}} = IE/V_{\text{Femol}} = 1.878\text{J/mm}^3$$

$$Q_{\text{Fe}} = Q_{\text{sh}} + Q_{\text{lh}} = 9.079\text{J/mm}^3$$

ここで、

$$c \text{ (鉄の平均密度)} = 0.625\text{J/g} \cdot \text{K}^{[4]}$$

$$\rho \text{ (純鉄の平均比熱)} = 7.6 \times 10^{-3}\text{g/mm}^3^{[4]}$$

$$\Delta T \text{ (室温 } 293\text{K} \text{ と純鉄の融点 } 1516\text{K} \text{ との差)} = 1516\text{K}$$

$$IE \text{ (純鉄の融解熱)} = 13800\text{J/mol}^{[4]}$$

$$V_{\text{Femol}} \text{ (純鉄のモル体積)} = 7.348 \times 10^3\text{mm}^3/\text{mol} \text{ とする。}$$

溶接入熱から求めた溶融量の計算値（図中の破線）とスタッドおよび母材の溶融量の合計値との比である溶融効率（ $\eta_{\text{stud welding}}$ ）は 0.44 となった。また，スタッドと母材の溶融量を比較すると，母材溶融量よりスタッド溶融量のほうが大きく，この理由として Fig.4-2 に示すように，仮にスタッドの直径 19mm が均一に溶けたとすると熱の流れは z 軸方向の 1 次元熱伝導であると，母材については板幅および板厚方向の x, y, z 軸方向に熱が広がるため 3 次元熱伝導であるとそれぞれ解釈すると，スタッドのほうが母材に比べ，熱が逃げにくいため，母材溶融量よりスタッドの溶融量のほうが大きくなったと考えられる。

4-2 スタッド溶接現象について

実際の測定波形から電流値および電圧値の立ち上がりとスタッド変位の立ち上がりが異なることは実験結果で示した。スタッド先端部と母材は最初接触しているので，スタッド変位の立ち上がり前に電流と電圧が立ち上がりほぼ一定の値で推移する時間においてスタッド先端のアルミボールまたは鋼突起がジュール発熱をしていると考えられる。その期間の電圧値 V_{start} と電流値 I_{start} との比で求めた抵抗値 R_1 を Fig.4-3 に示す。実験結果から V_{start} の値はバラツキことが示されており，当然 V_{start} と I_{start} との比で求めた抵抗値 R_1 もバラツキを示した。ここで，アルミボールを直径 5mm で高さが 1.5mm の円柱と仮定し，アルミニウムの電気抵抗率から算出した抵抗値 $R_{\text{calculate}}$ を実際の抵抗値と比較し，溶接開始時ではどのようなことが起こっているのか推定した。次に抵抗値 $R_{\text{calculate}}$ の計算方法を示す。材料の電気抵抗 R 求めるには，その材料の電気抵抗率 ρ ，長さ L よび断面積 A から求めることが可能でその関係は以下の式で表される。

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

ここで， $\rho = 4.78 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}^{[4]}$ とし， $L = 0.0015\text{m}$ ， $A = 1.96 \times 10^{-5}\text{m}^2$ とすると，アルミニウムの電気抵抗率から求めた抵抗値 $R_{\text{calculate}}$ は $0.004\text{m}\Omega$ となった。測定結果から得られる抵抗値 R_1 は， $V_{\text{start}} = 0.1\text{V}$ ， $I_{\text{start}} = 50\text{A}$ の場合， $R = 2\text{m}\Omega$ であ

り，計算値から求めた抵抗値 $R_{\text{calculate}}$ よりも著しく大きい結果となった．したがって，この抵抗値 R_1 にはスタッド先端のアルミボールと母材との間の接触抵抗が関与していると考えられる．溶接実験によって R_1 は 10 倍以上にも変化しており，このような抵抗の大きな変動はスタッド先端のアルミボールと母材との接触抵抗に起因していると考えられる．電圧が 1 回目に急増する時間 c とスタッド変位が立ち上がる時間 d の関係については，電圧が急上昇した 3～6ms 後にスタッド変位が立ち上がっていると実験結果で示したが，仮にスタッドは可動部分の慣性力によって徐々に運動を開始していると考えれば，スタッド変位の立ち上がり前に電圧が急増する現象について次に示すようなことが考えられる．電圧が急増したとき流れている電流値は実験結果からほぼ一定値で推移しているため，スタッド立ち上がり前の電圧が急増する現象は，可動部分の慣性力によってスタッドに掛かる力が徐々に緩和され，接触状態が大から小と変化したため，電圧は逆に小から大に急増したと考えられる．また，電圧が急増（ c ）してから電流が急増（ e ）するまでの間は，Fig4-4 に示すように電圧と電流の比で求めた抵抗は 1Ω 近い値となり，固体金属中の通電時の電気抵抗とは著しく異なる．この間の電気抵抗の値は，接触して通電している状態から放電が始まるまでの過渡的状态であると考えられる．

第 3 章のパイロットアーク期間中の現象で示したように，電流値と電圧値の関係はゼロを通る直線にはならなかった．この現象はよく知られており，「電流値が高くなると，アークプラズマの温度が高い状態となり，この状態ではアークプラズマの温度が上昇しても，アークの伝導率は大きく変化しないため，電流値の増加に伴って，アーク電圧が増加する」^[5]というアーク放電中の電流－電圧特性を示している．

全ての条件において，主アーク期間中に電圧が減少していくことが認められた．この理由として，以下 2 つのことが考えられる．

- ①スタッド溶融に伴って溶融金属が垂れ下がりアーク長が実質的に減少し，電流が変化しない場合には電圧が減少する．
- ②時間経過に伴い，アーク温度が上昇し，結果としてアークの抵抗が減少し，電圧が降下する．

Fig.4-5 は、電流値や材料は異なるが、よく知られているアーク電圧とアーク長の関係を示したもので^[5]、Fig.4-6 は、本実験によって得られた Gap と V_{\max} の関係を示している。Fig.4-5 からアーク長が短くなるとアーク電圧も減少していく傾向が見られ、Fig.4-6 から Gap が小さくなると V_{\max} も減少していく傾向が認められた。この結果から、電流値が一定の条件で電圧値が変化するのは、Gap の変化だと考えられ、この観点から主アーク期間中のアーク電圧の減少を考えると、Fig.4-7 に示すように、スタッド溶融金属の垂れ下がりによって、主アーク期間中に電圧降下が生じたのではないのかと考えられる。また、主アーク期間でこのような電圧降下の著しい場合、溶融金属が短絡していると考えられる。Fig.4-8 は、溶接開始から時間経過に伴う、投入された電氣的エネルギーを示している。同図から電流値の低い場合には勾配が緩やかで、逆に電流値が高ければ勾配が急になる。また、図中の点は最初短絡した時間を示し、以降を赤線で表した。同図から短絡が生じる境は 1500A 程度であり、投入エネルギーが 40kJ 付近を越えると短絡が起こり易い結果となった。この結果は引き上げ距離を 2.5mm の一定とした場合であり、引き上げ距離を 1.0, 4.0mm とした場合について Fig.4-9 に示す。同図から電流値を一定にしても、引き上げ距離が大きくなればアーク電圧が増加するので曲線の勾配は大きくなる。1500A において、引き上げ距離が 4.0mm の場合には短絡が生じ、1.0mm の場合には短絡が起こらない結果となった。溶接終了時の現象について次に述べる。第 3 章で示したように H_k は初期位置からスタッドが押し込まれる距離を表しており、Fig.4-10 に示すようにアルミボールの高さ 1.5mm と溶代とを足した値が、設定したスタッドの押し込み量である。 H_k と投入エネルギーとの関係を Fig.4-11 に示す。図中の線は、設定した押し込み量を示している。同図から低入熱では設定した押し込み量までスタッドを押し込むことができなかった。この理由として低入熱では、Fig.4-1 に示したように、スタッドおよび母材の溶融量が小さいため、スタッド押し込み中に溶融金属が凝固し、設定した押し込み量に達しなかったと考えられる。また、同図に示すように、ほぼ同じ投入エネルギーでもスタッドの押し込み速度を変化させると、押し込み距離に違いが認められた。これは溶融金属の凝固の長短によるものと考えられる。

4-3 溶接部の欠陥について

Fig.4-12～14 に実験を行った全ての断面写真を示す。ただし、シャルピー衝撃試験に用いた溶接部の断面写真は除く。スタッド溶接部の欠陥として代表的なものとしてブローホール欠陥が挙げられる。Fig.4-13 の L が 4.0mm の断面写真を見ると、溶接金属内に巨大なブローホールが生じていた。その他条件関しても断面写真に示すように大小様々なブローホールが生じた。本研究では、このブローホール欠陥について着目した。ブローホール欠陥を条件によって評価するため、Fig.4-15 に示すように溶接欠陥の対角長さ l を測定し、その長さを全実験について比較した図を Fig.4-16 に示す。なお、欠陥が多数ある場合には、各欠陥の長さを足し合わせ、その合計を対角長さ l とした。

スタッドの先端形状を鋼突起にして溶接した場合（同図の緑線で囲まれたプロット値）とアルミボールで溶接した場合（同図の緑線で囲まれた以外のプロット値）とを比較すると、鋼突起における最小の対角長さは 12mm であるのに対して、アルミボールの場合、最大の対角長さは 5mm であり、その差は 2 倍を超える値となった。したがって、スタッド先端形状をアルミボールで溶接した場合、鋼突起で溶接したときに比べてブローホール欠陥を抑制しやすいと判断できる。

4-4 溶接金属内の硬さについて

スタッド溶接金属内の硬さ分布について測定結果を述べる。Fig.4-17 に試験荷重 200g-30s で硬さ試験を行った試験片の形状および測定箇所を、Fig.4-18 に硬さ分布を示す。なお、硬さ分布の表し方として、母材溶融ラインを 0 に、スタッド溶融ラインを 1 として図を作成した。Fig.4-18 に示すように、緑および紫の測定ラインにおいて溶接金属内の硬さ値に最大 50Hv 程度の差が認められた。通常、溶接金属内において硬さのバラツキ値は 20～30Hv といわれており、測定結果はこの値より大きく変動した。スタッド溶接金属内において硬さ値に変動が生じるか否かを確かめるため、緑および紫ラインの溶接金属内の測

定結果で硬さ値の変動が 50Hv となった周辺の硬さ試験を行った。緑ラインの測定箇所および組織写真を Fig.4-19 に、硬さ分布を Fig.4-20 に示す。また、紫ラインの測定箇所および組織写真を Fig.4-21 に、硬さ分布を Fig.4-22 に示す。なお、硬さ値が 300Hv 以上となった測定箇所について、各組織写真に赤丸を記した。Fig.4-20, 22 に示すように、初め測定したラインと追加測定をしたラインとで硬さの変動を比較するとほぼ一致した。硬さ値が最大または最小な圧痕周辺のミクロ観察した写真を Fig.4-23 に示す。同図に示すようにミクロ観察した結果、硬さ値が 300Hv 以上となった圧痕の周辺組織には微細フェライトの量が多く、硬さ値が 300Hv 以下となる圧痕の周辺組織では初析フェライトの量が多かった。試験荷重 200g において溶接金属内における硬さ値はミクロ組織による影響を受けて変動したと考えられる。

第 5 章 結言

スタッド溶接における溶融・凝固現象について,実験的に以下の結論を得た.

- ① 放電開始前に一定電流が流れている間, 電圧値が急上昇する.
- ② スタッド溶融金属の垂れ下がりにより, 主アーク期間中に電圧値が減少すると考えられる.
- ③ 投入エネルギーが 40kJ 付近を越えると, 短絡が起こり易い結果となった.
- ④ 溶融金属の凝固が短時間に終了するため, 溶接終了時のスタッドの押し込み距離は, 設定値に達しない場合がある. これは溶融金属の凝固時間に左右されるため, 低入熱条件あるいはスタッドの押し込み速度が遅い場合に顕著である.
- ⑤ スタッドおよび母材の溶融量は, 投入エネルギーにほぼ比例する. そのときの溶融効率 は 0.44 であった.
- ⑥ スタッド先端のアルミボールは溶接金属内のブローホールを抑制する働きがある.

参考文献

- [1] 木原 博 : 現代溶接工学 (出版: オーム社)

- [2] 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 (2002) 第 8 号 575-580

- [3] 大西 弘志 : スタッド溶接を応用した鉄筋溶接継手の力学特性
コンクリート工学年次論文集 Vol.25 No.2 (2003) 937-942

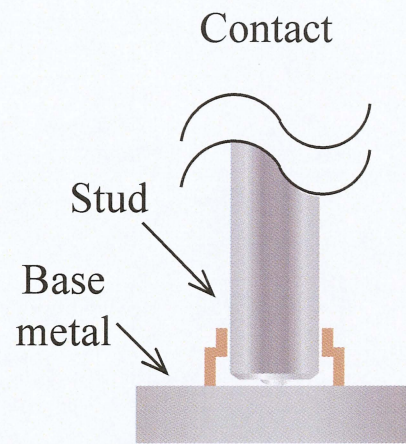
- [4] 日本金属学会 : 金属データブック 改訂 3 版 (出版: 丸善)

- [5] 長谷川 光雄、安藤弘平共著 : 溶接アーク現象 (出版: 産報出版)

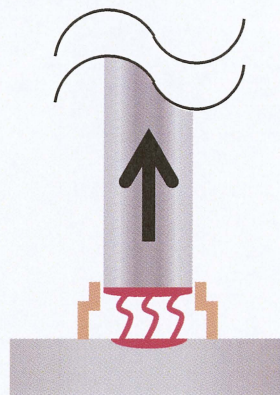
謝 辞

本研究を遂行するにあたり，終始懇切にご指導を賜りました三重大学工学部鈴木実平教授，川上博士准教授，尾崎仁志助教に深く感謝します．

なお，本研究で用いたデータと実験装置は，三重大学工学部平成 23 年度卒業の酒井拓哉君と彦坂一輝君の共同研究によるものです．ここに記して，諸氏に深く感謝致します．さらに本研究を遂行するにあたり多大なご協力を頂きました材料機能設計研究室の院生の方々，学部生の皆様方に深く感謝致します．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．



Applied current
and
lifted stud



Pushed stud

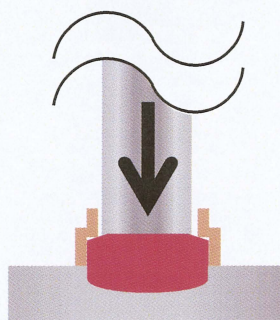


Fig.1 — 1
Stud welding process

Table2—1 Standard condition

No.	I_{pi} [A]	t_{pi} [s]	t_{post} [s]	<i>Welding current</i> [A]	<i>Arc time</i> [s]	L [mm]	WA [mm]
Standard	Auto	0.12	0.2	1500	1.0	2.5	5

Table2—2 Mechanical properties

Type	Yield point [N/ mm ²]	Tensile strength [N/ mm ²]	Elongation [%]
Stud	235	400~550	20

Table2—3 Composition of material(mass%)

Type	C	Si	Mn	P	S
stud	<0.2	0.15 ~ 0.35	0.30 ~ 0.90	<0.004	<0.004

Table2—4 Composition of material(mass%)

Type	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
S20C	0.25	0.25	0.69	0.013	0.013	0.03	0.14	0.07

Table2—5 Welding condition①

No.	I_{pi} [A]	t_{pi} [s]	t_{post} [s]	<i>Welding</i> <i>current</i> [A]	<i>Arc</i> <i>time</i> [s]	L [mm]	WA [mm]	<i>damper</i>	<i>Stud</i>	<i>Base</i> <i>metal</i>			
1	Auto	0.12	0.2	1200	1.0	2.5	5	Middle	Al	A			
2				1500									
3				1500									
4				1800									
5				1500	0.5								
6					1.2								
7					1.0	1							
8						4							
9						2.5	2						
10							8						

Table2—6 Welding condition②

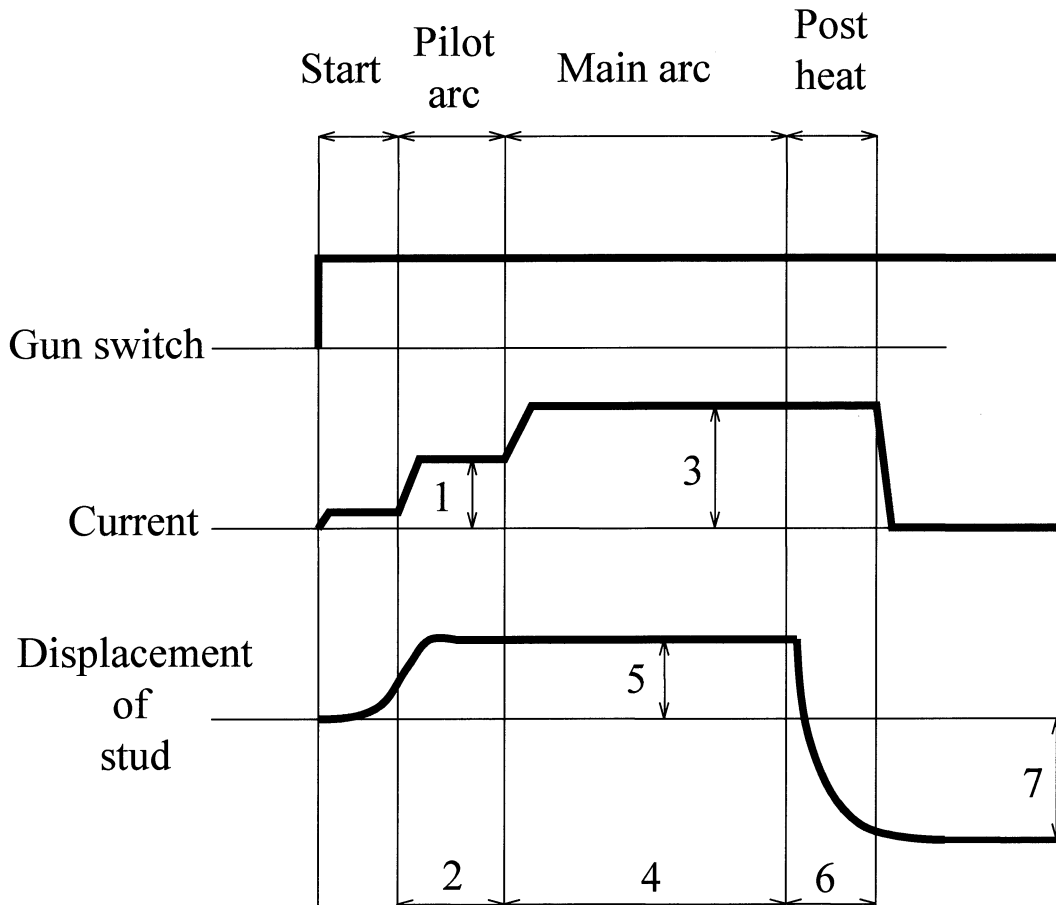
No.	I_{pi} [A]	t_{pi} [s]	t_{post} [s]	<i>Welding current</i> [A]	<i>Arc time</i> [s]	L [mm]	WA [mm]	<i>damper</i>	<i>Stud</i>	<i>Base metal</i>			
11	200	0.05	0.05	1200	1.0	2.5	5	Middle	Al	A			
12				1500									
13				1500									
14				1800									
15				1500	0.5								
16					1.2								
17					1.0	1							
18						4							
19						2.5	2						
20							8						

Table2-7 Welding condition③

No.	I_{pi} [A]	t_{pi} [s]	t_{post} [s]	<i>Welding current</i> [A]	<i>Arc time</i> [s]	L [mm]	WA [mm]	<i>damper</i>	<i>Stud</i>	<i>Base metal</i>
21	200	0.05	0.05	1500	1.0	2.5	5	Weakness	Al	B
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										
29										
30										
31										
32										

Table2—8 Welding condition④

No.	I_{pi} [A]	t_{pi} [s]	t_{post} [s]	<i>Welding current</i> [A]	<i>Arc time</i> [s]	L [mm]	WA [mm]	<i>damper</i>	<i>Stud</i>	<i>Base metal</i>
33	200	0.05	0.05	1500	1.0	2.5	5	Middle	Al	C
34										
35										
36										
37										
38										
39										
40										
41										
42										
43										
44										



1 : Pilot current (I_{pi})

2 : Pilot time (t_{pi})

3 : Welding current (I_{main})

4 : Arc time (t_{arc})

5 : Distance of lifted stud (L)

6 : Post heat time (t_{pi})

7 : WA^*

* WA is the length of stud that protrudes beyond the ferrule.

Fig.2—1
Stud welding sequence

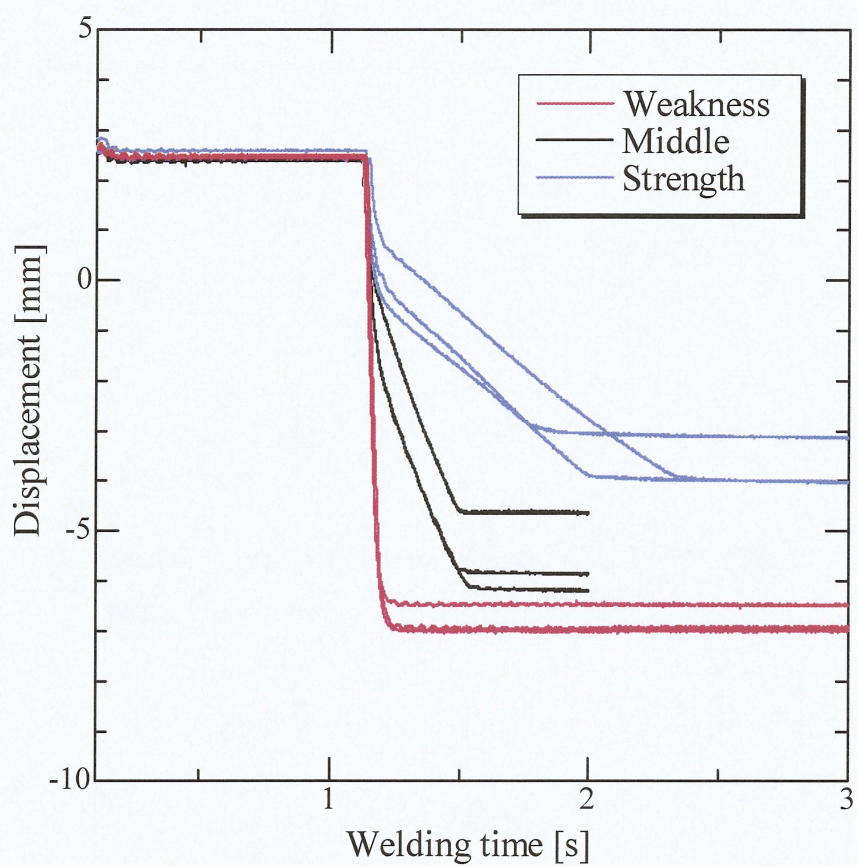


Fig.2—2
Plunging speed of stud

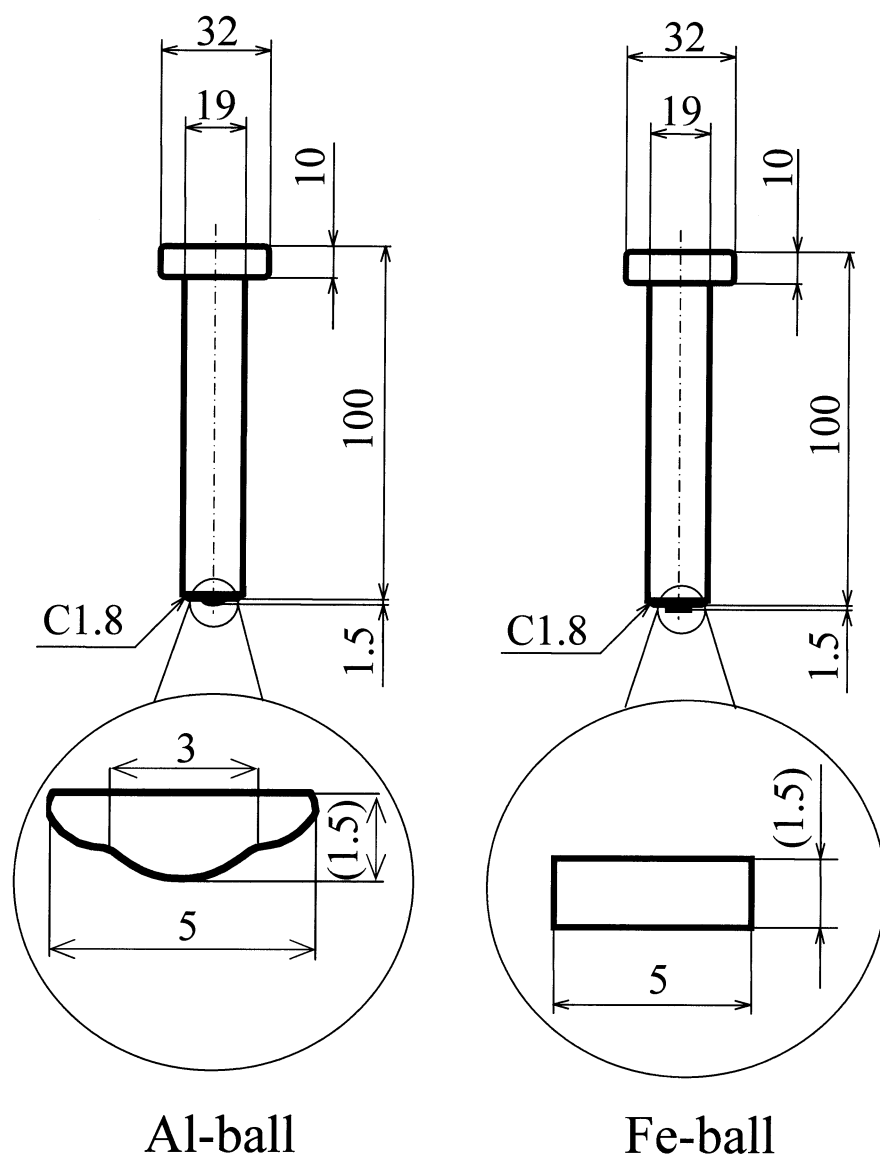
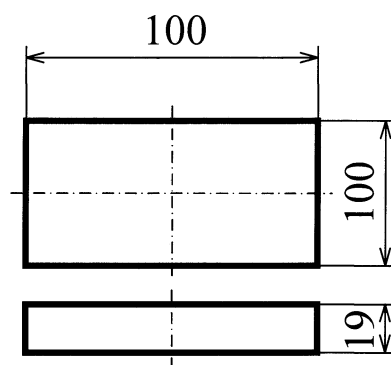
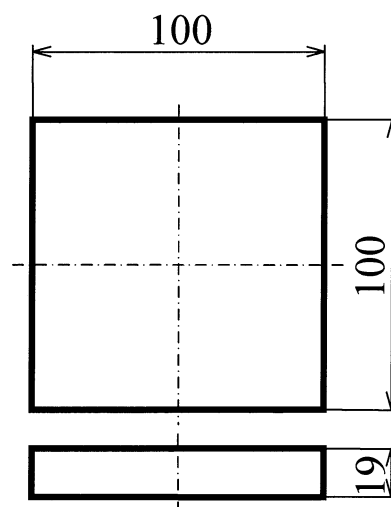


Fig.2—3
Shape of stud

A:SS400



B:SS400



C:S20C

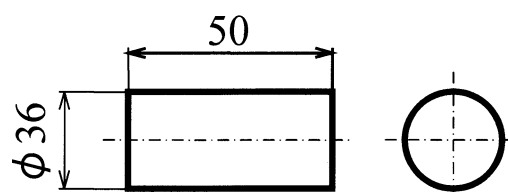


Fig.2—4
Shape of base metal

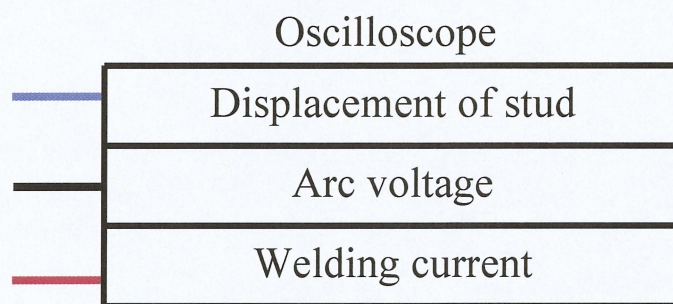
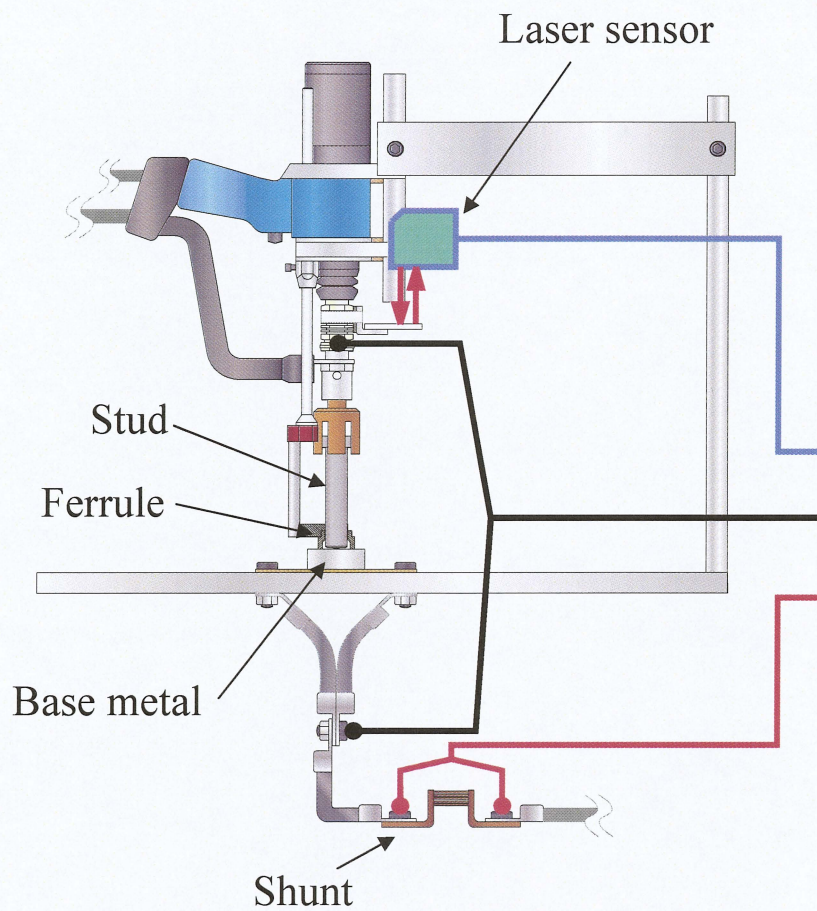


Fig.2—5
Experimental equipment I

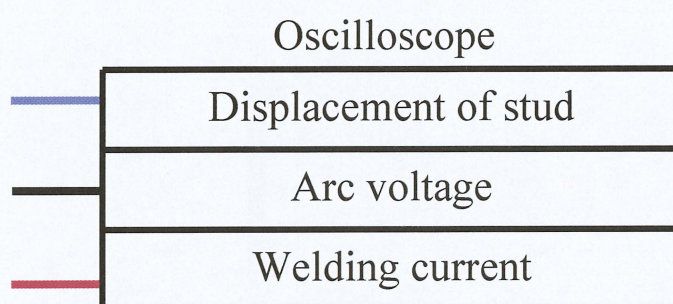
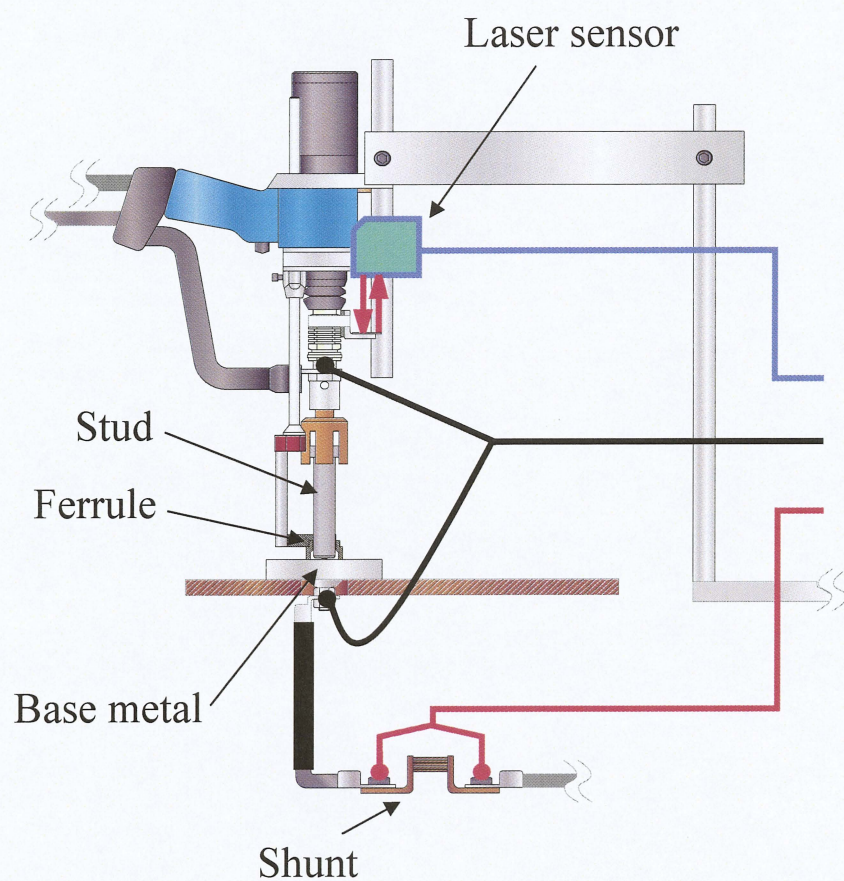


Fig.2—6
Experimental equipment II

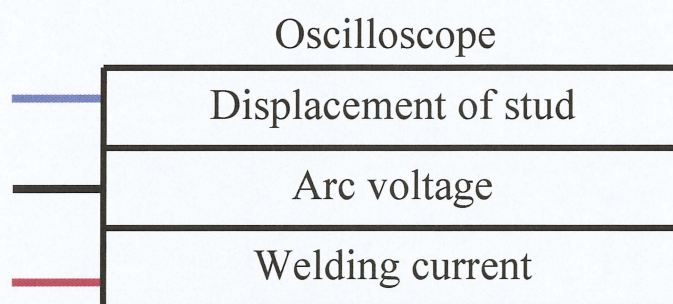
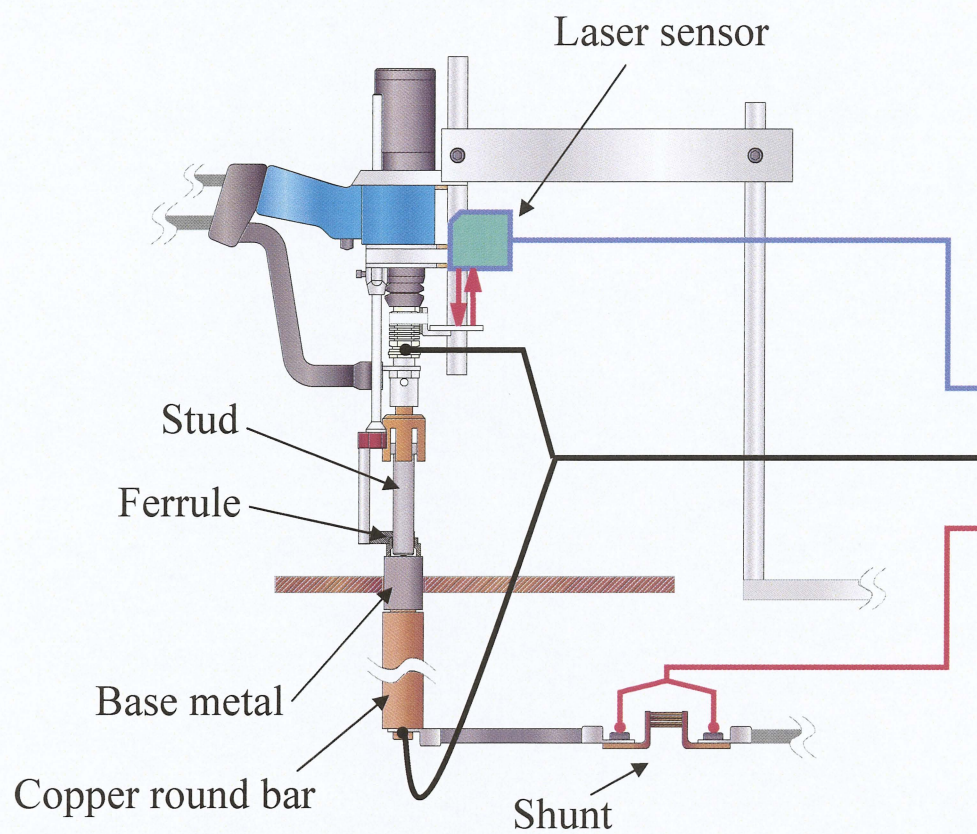


Fig.2—7
Experimental equipmentⅢ

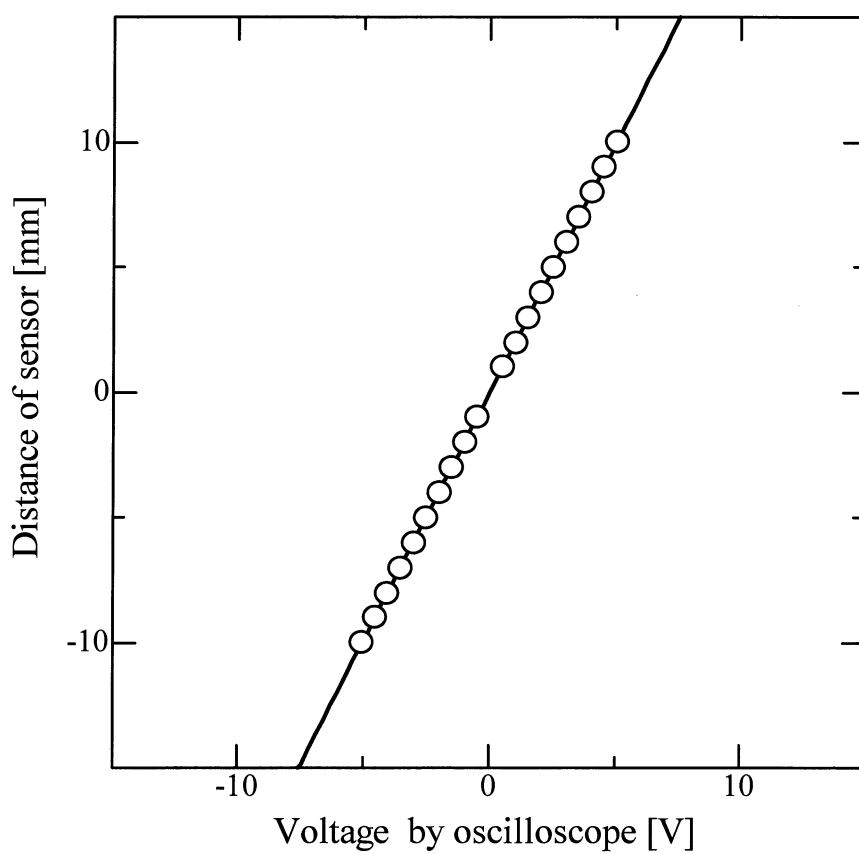


Fig.2—8
Relationship between voltage
by oscilloscope and distance of sensor

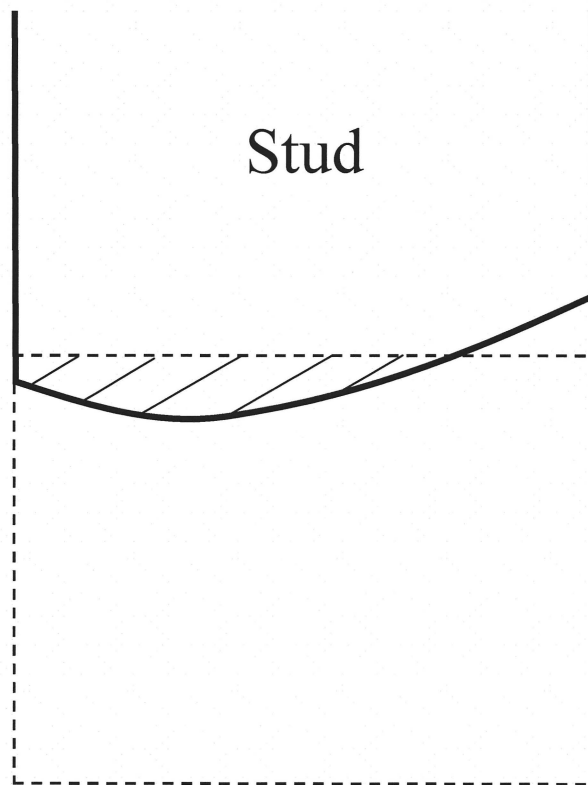


Fig.2—9
Volume of molten metal (stud)

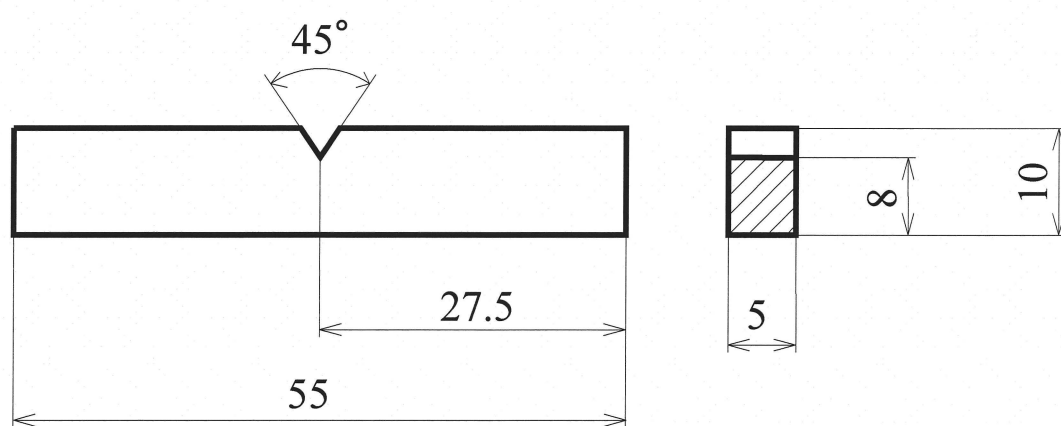


Fig.2—10
Impact specimen

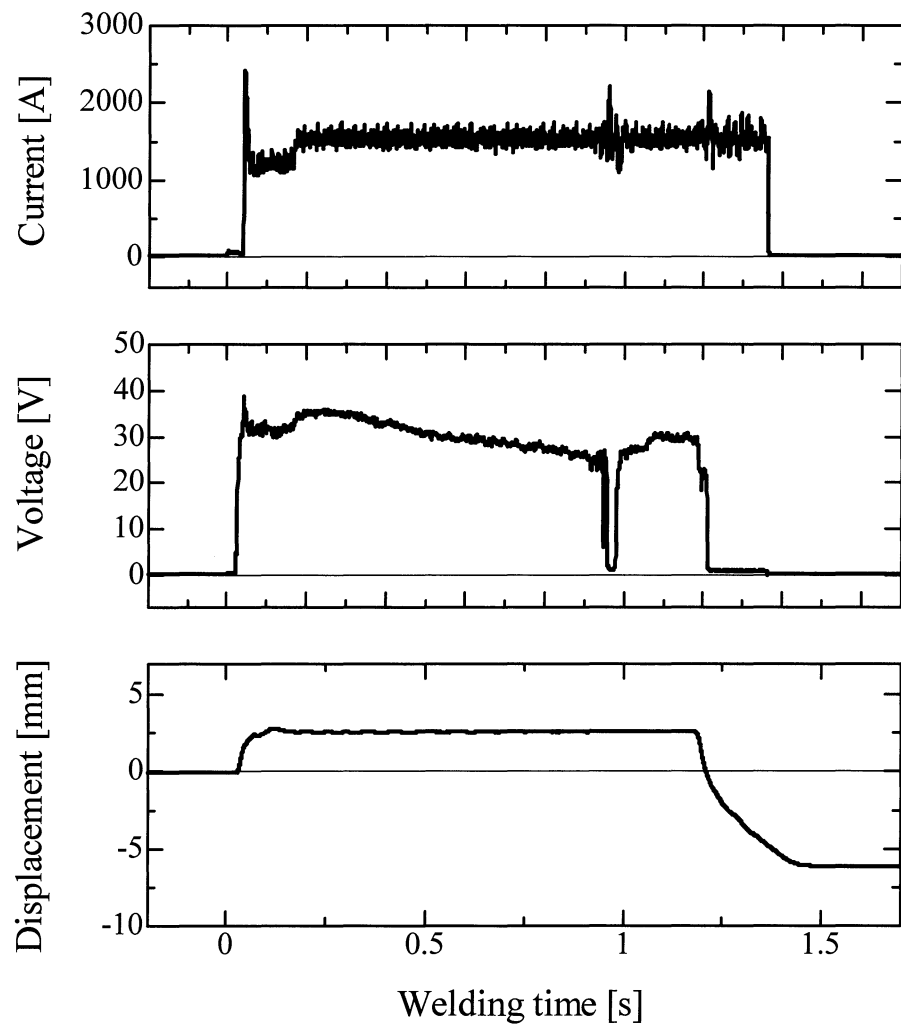


Fig.3 — 1
Electric phenomenon and
movement of stud during stud welding

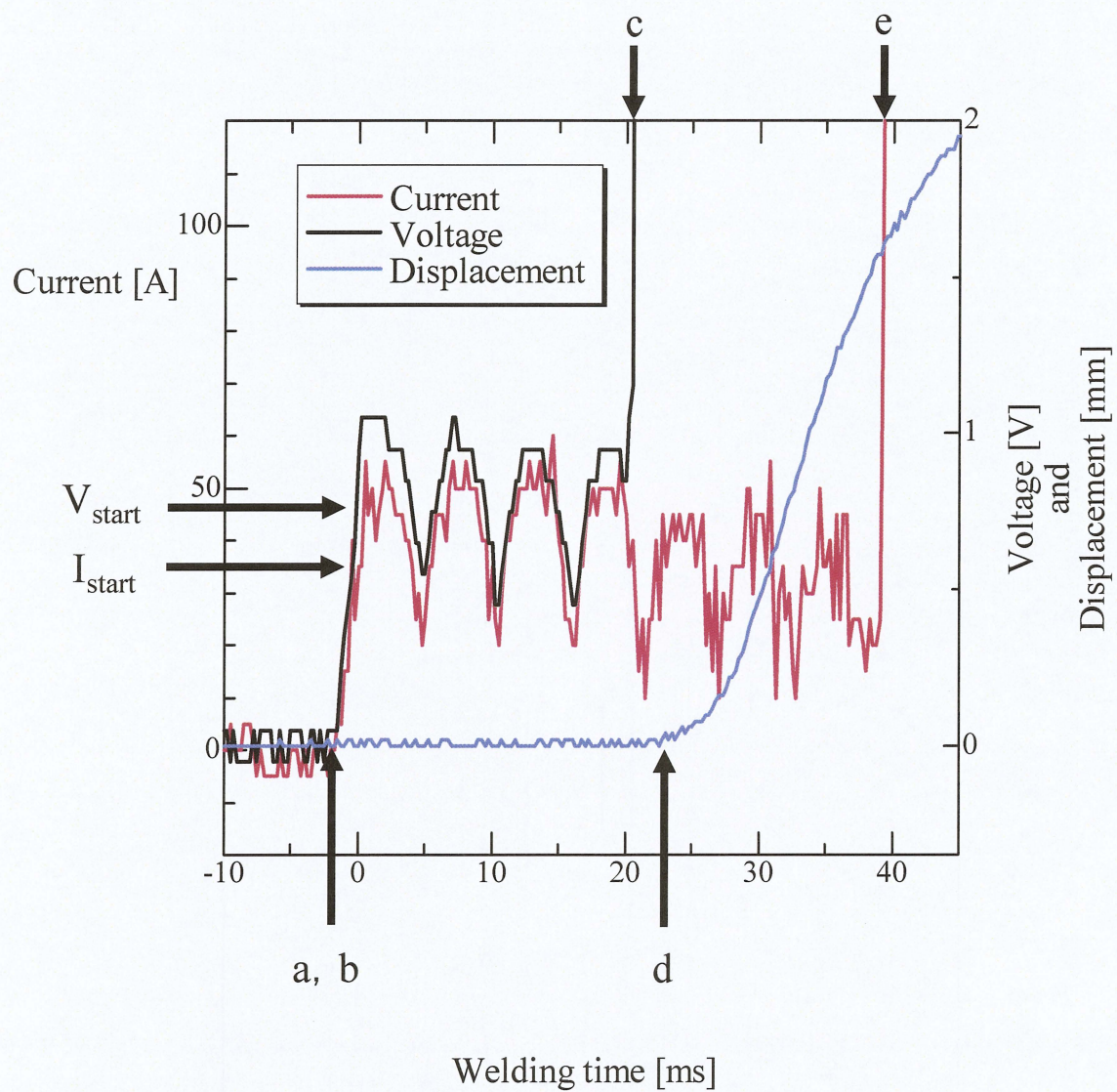


Fig.3—2
Electric phenomenon and
movement of stud during start

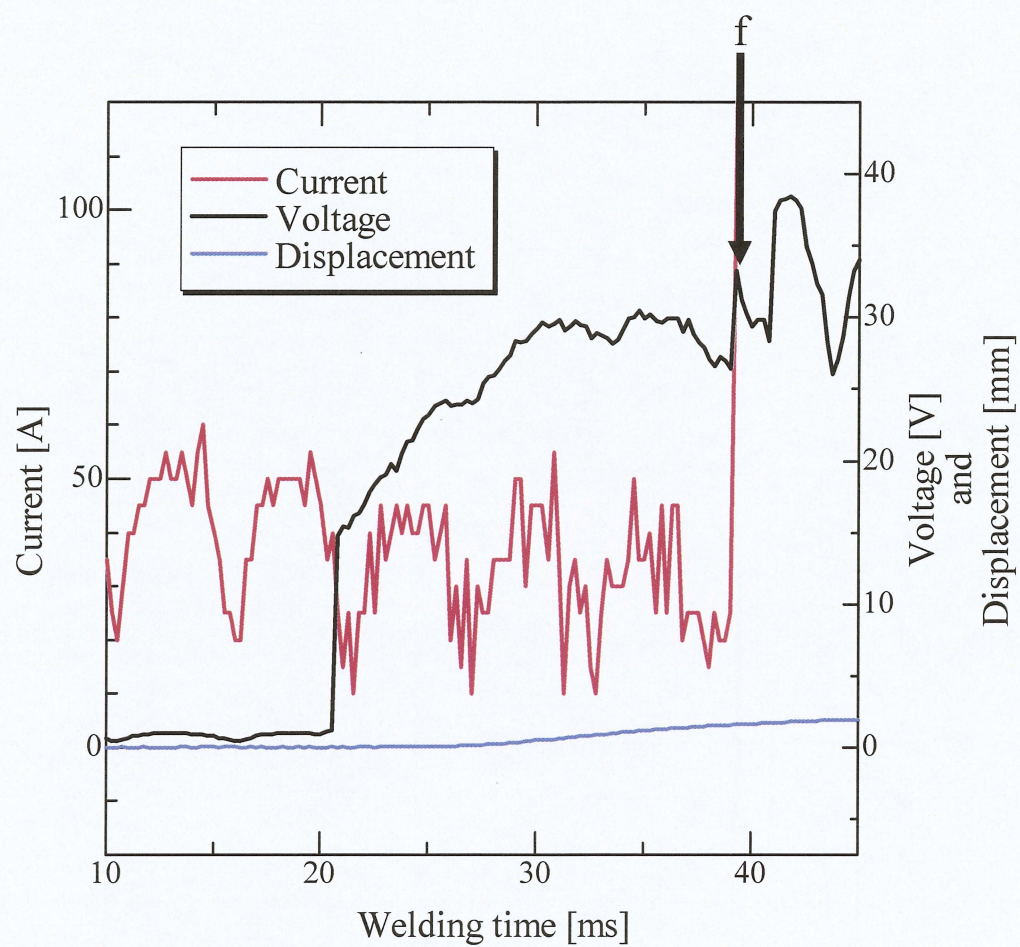


Fig.3—3
Electric phenomenon and
movement of stud during start

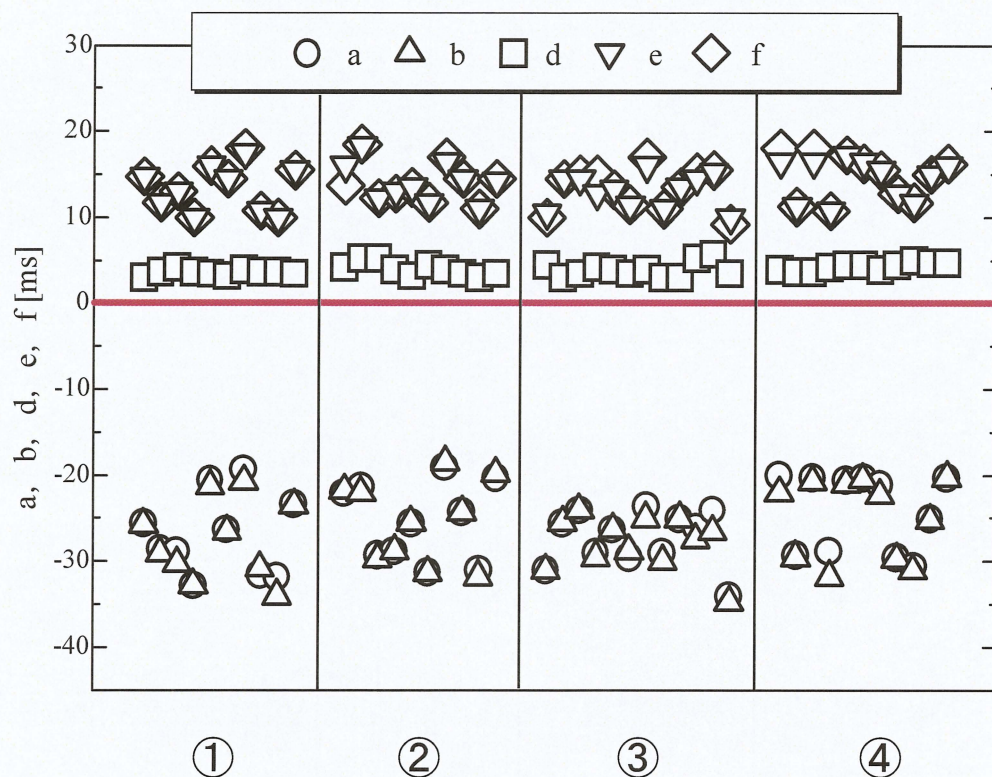


Fig.3—4
Time of a, b, d, e and f

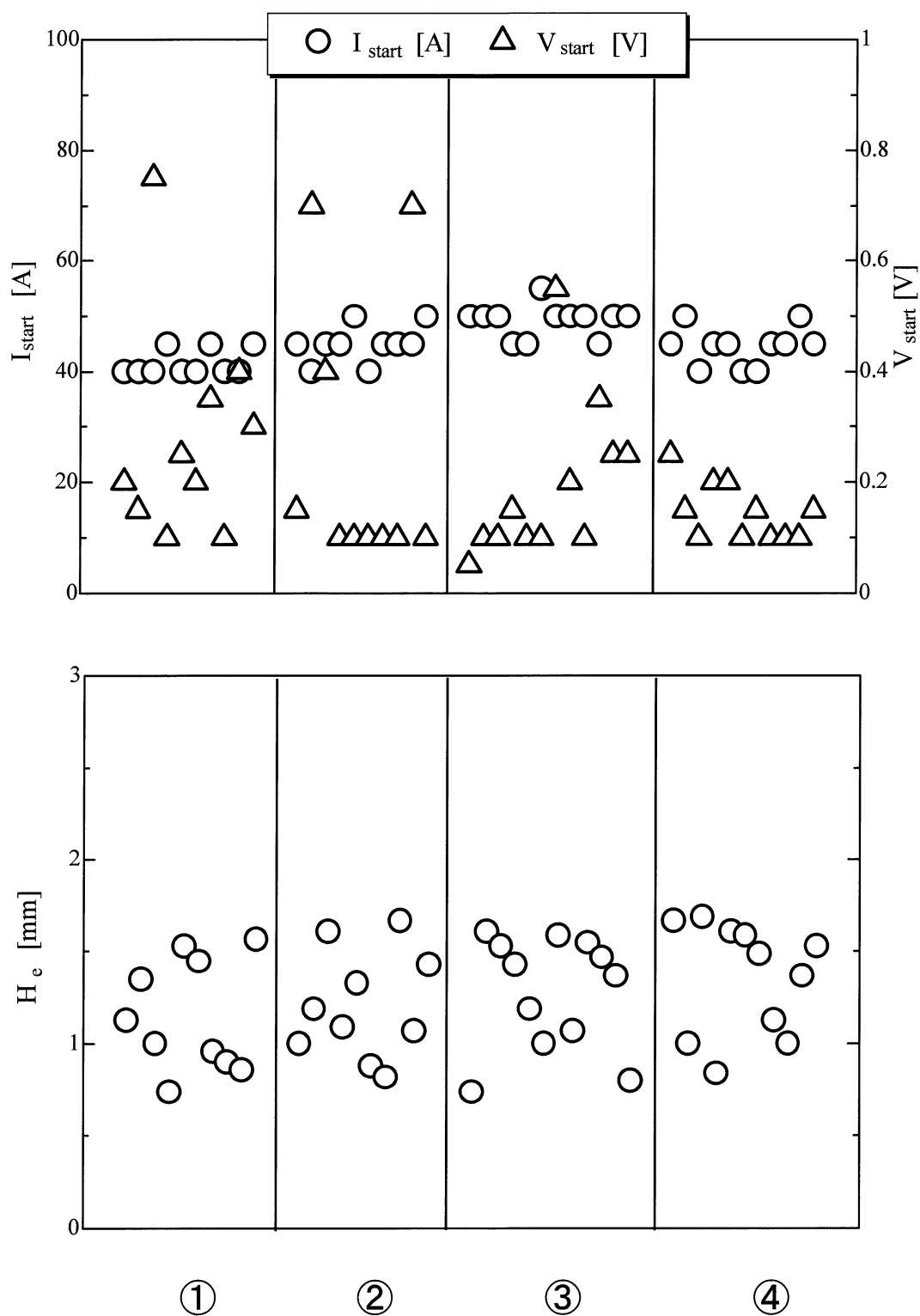


Fig.3—5
 I_{start} , V_{start} and H_e

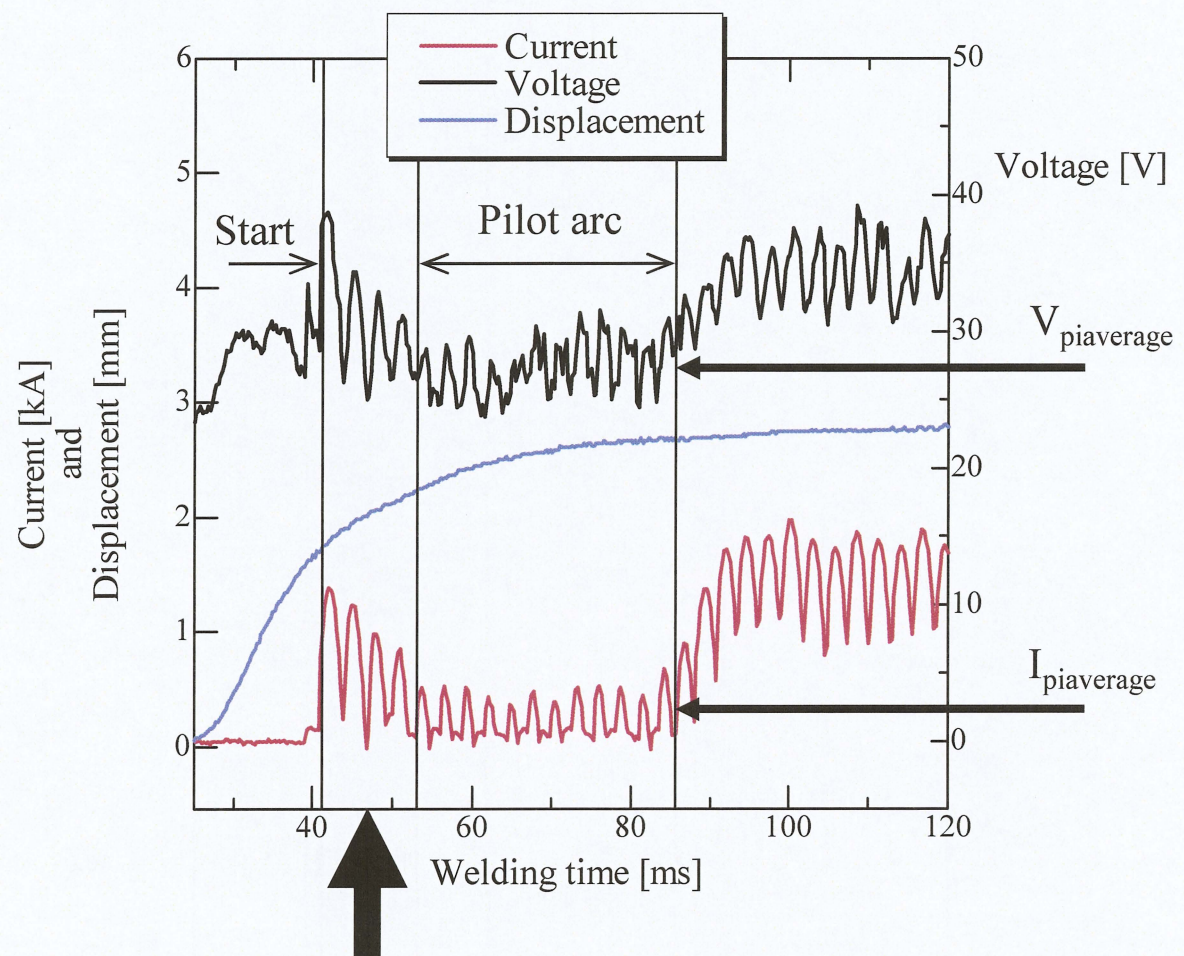


Fig.3 — 6
Electric phenomenon and
movement of stud during pilot arc

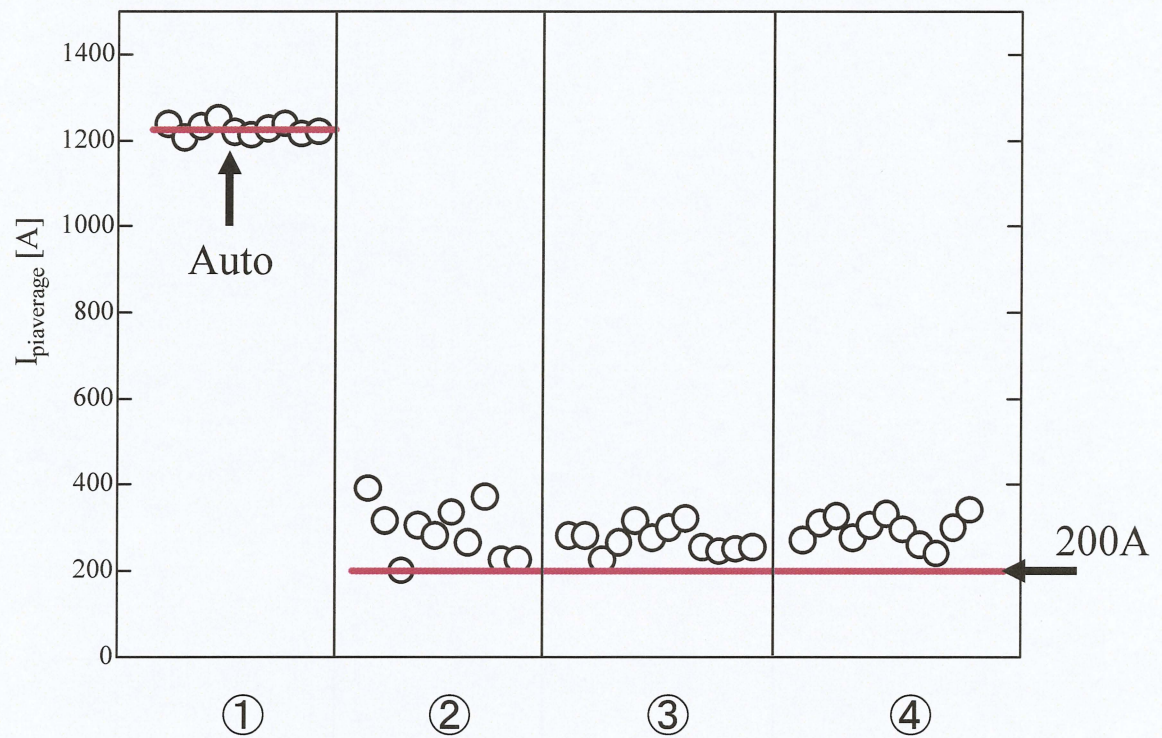


Fig.3—7
Relationship between set value
and observed value

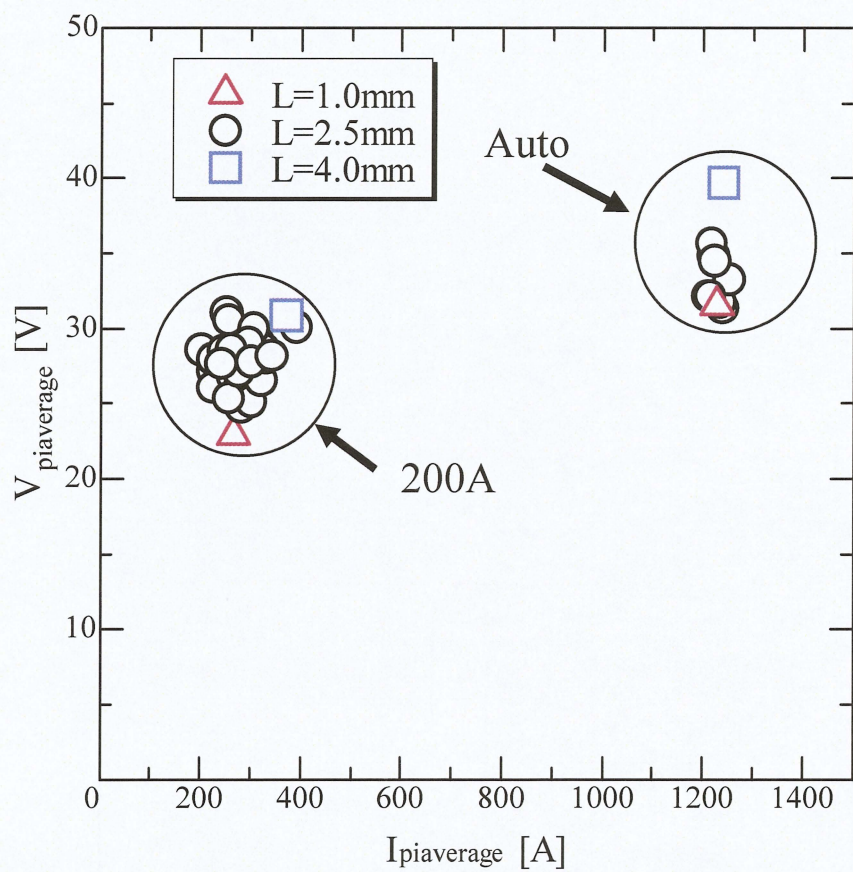


Fig.3—8
Relationship between $I_{\pi\text{average}}$ and $V_{\pi\text{average}}$

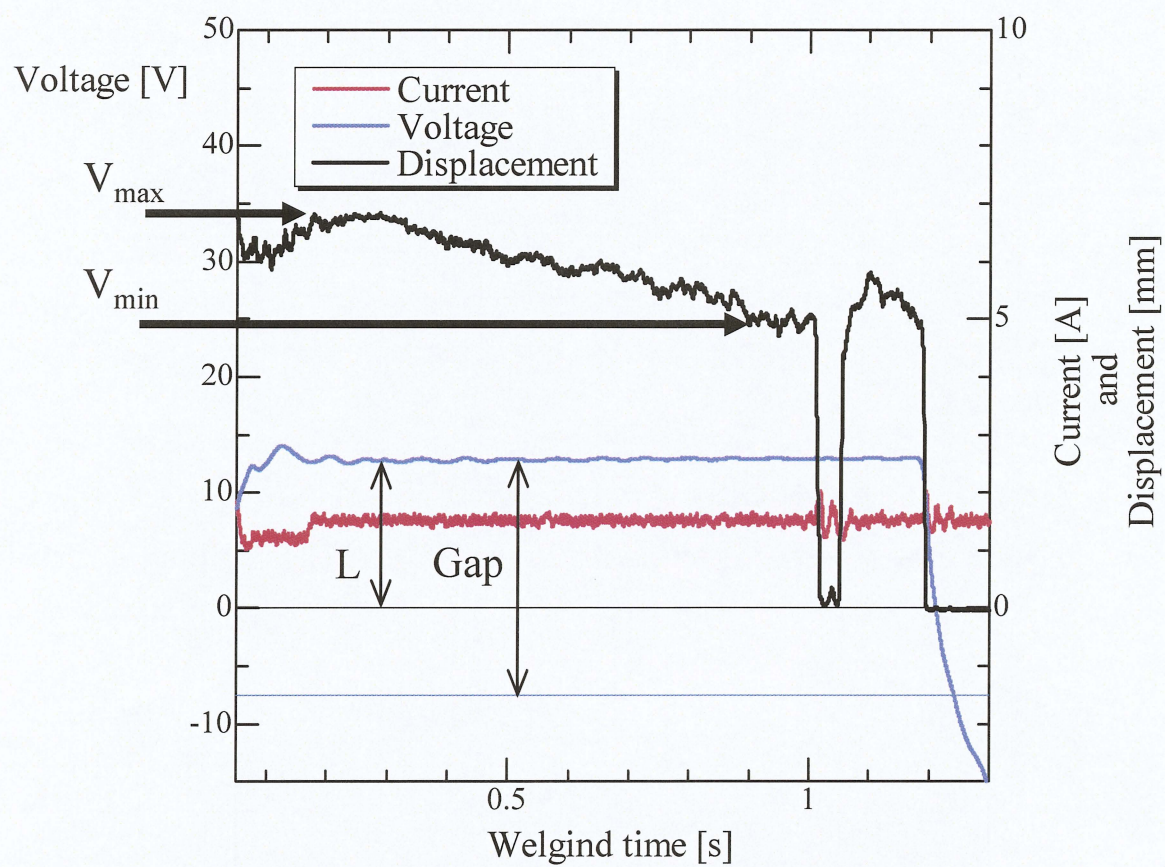
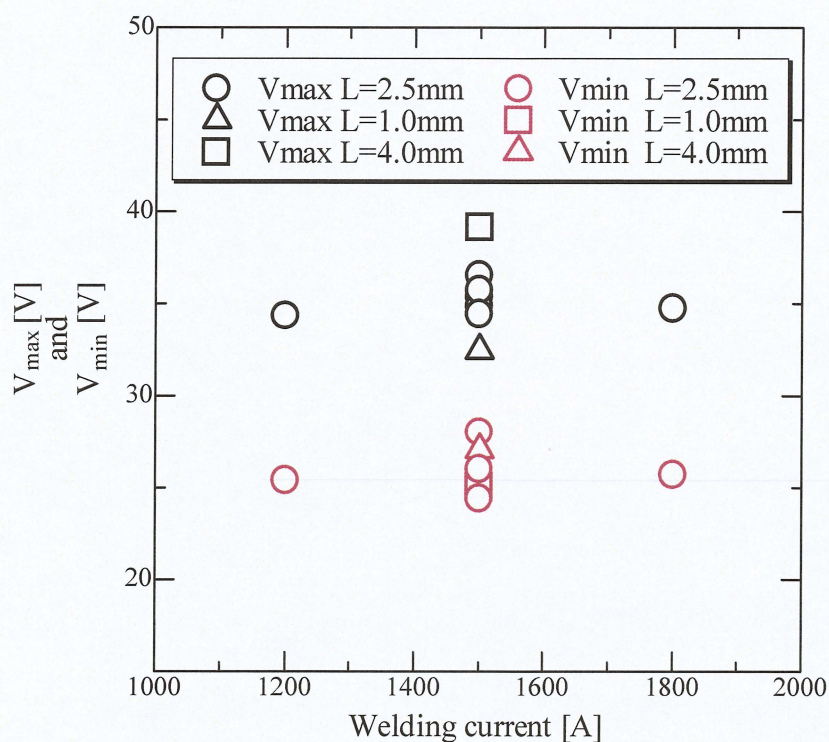
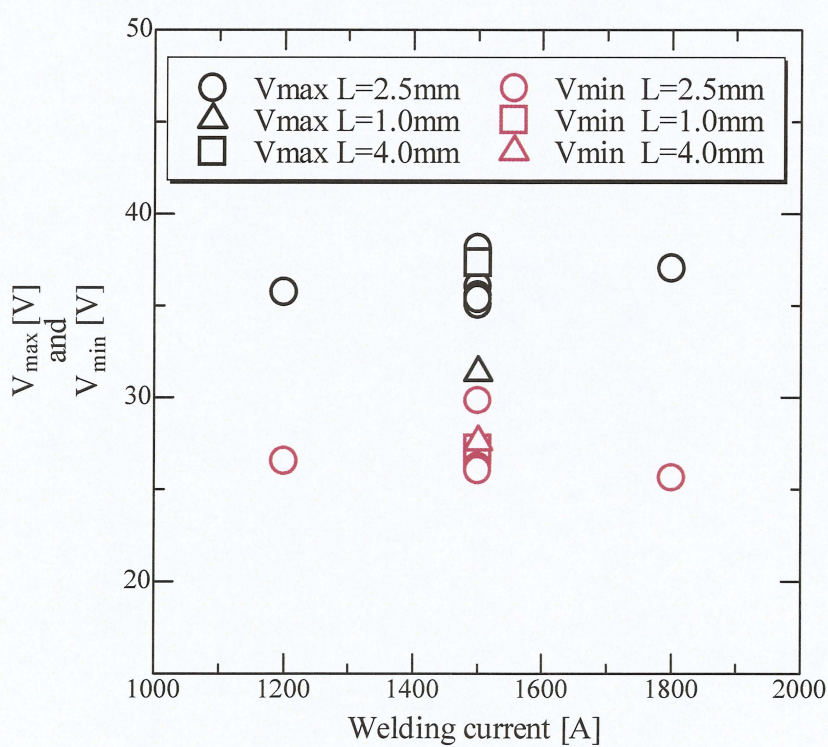


Fig.3—9
 Electric phenomenon and
 movement of stud during main arc



①



②

Fig.3—10
Relationship between welding current and $V_{\max, \min}$

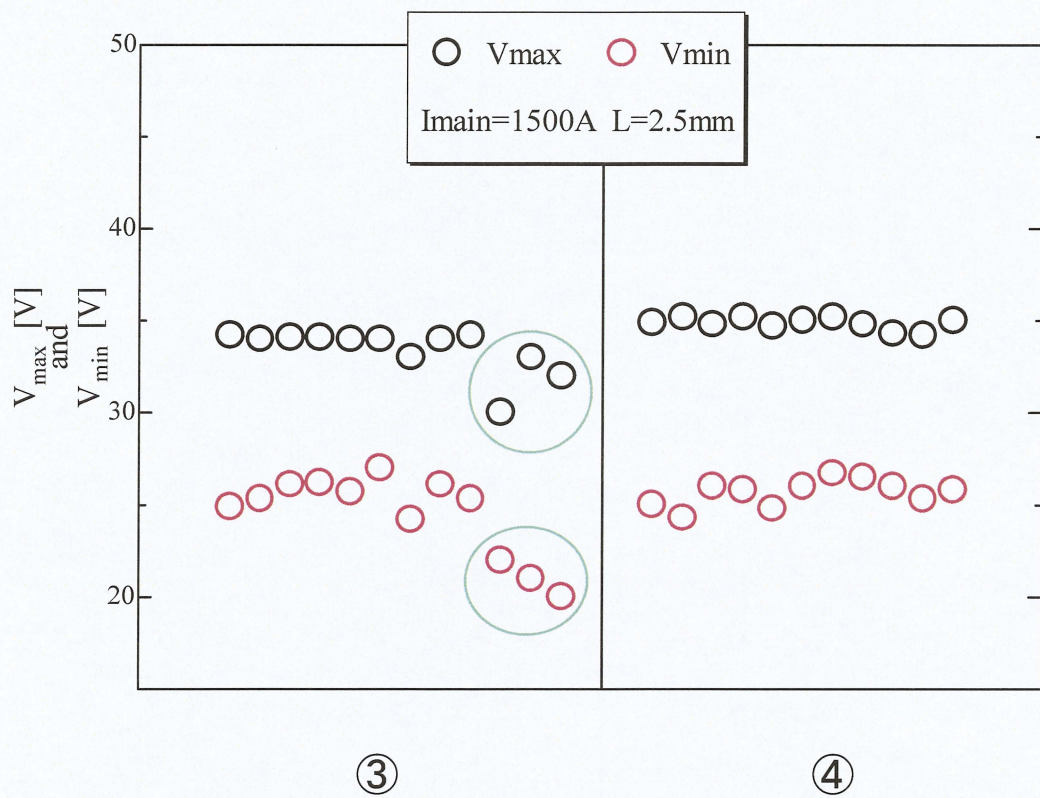


Fig.3—11
Relationship between welding current and $V_{\max, \min}$

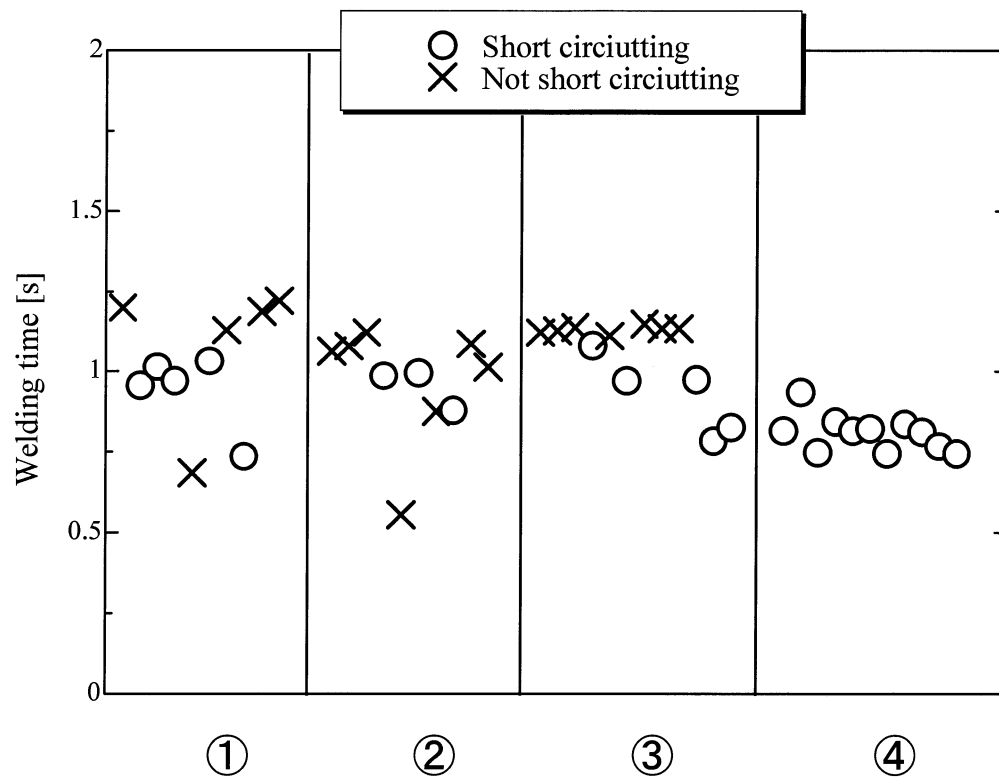


Fig.3—12
Rapid voltage drop during main arc

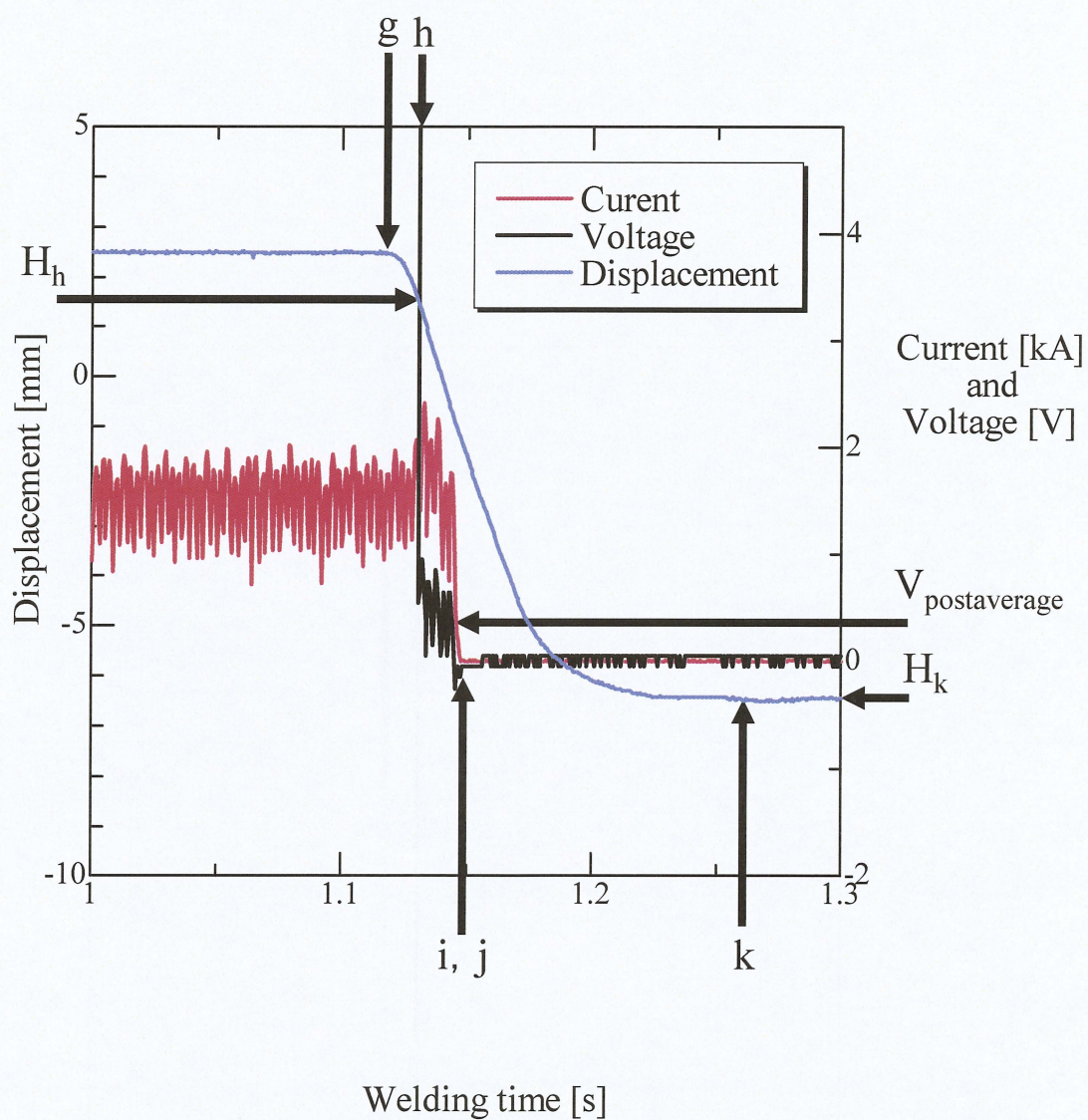


Fig.3—13
Electric phenomenon and
movement of stud during post heat

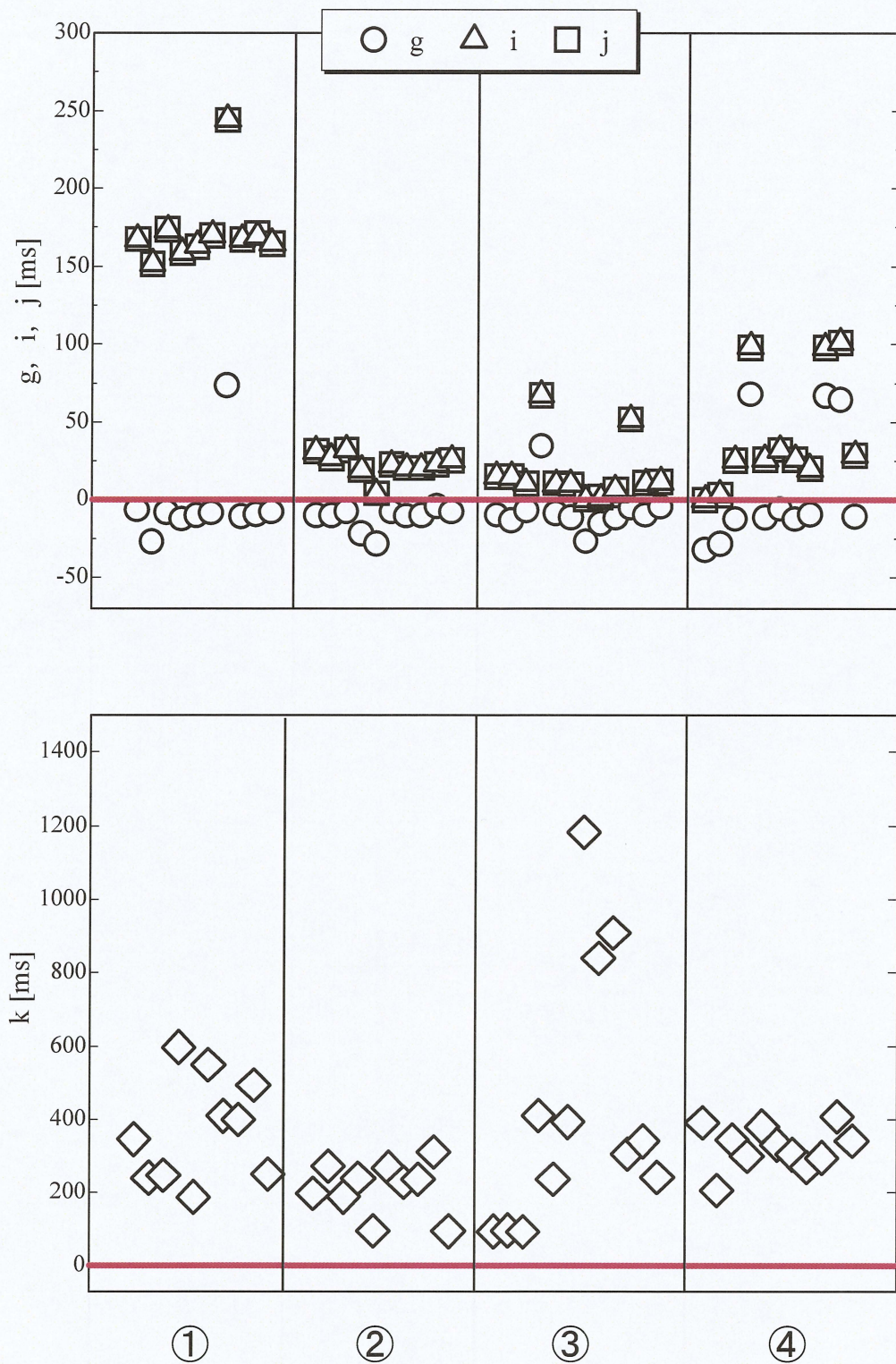


Fig.3-14
Time of g, i, j and k

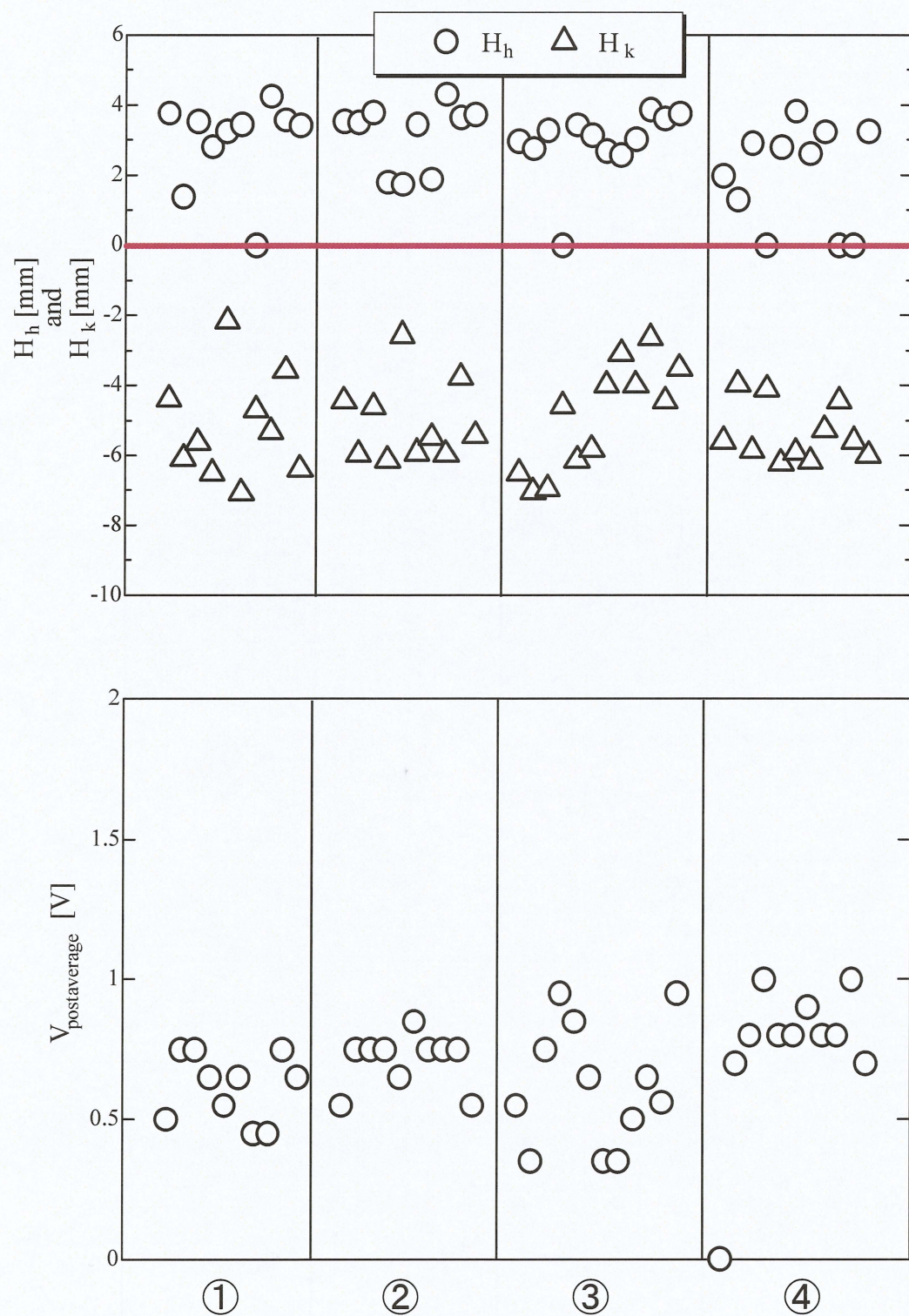


Fig.3—15
 H_h , H_k and $V_{\text{postaverage}}$

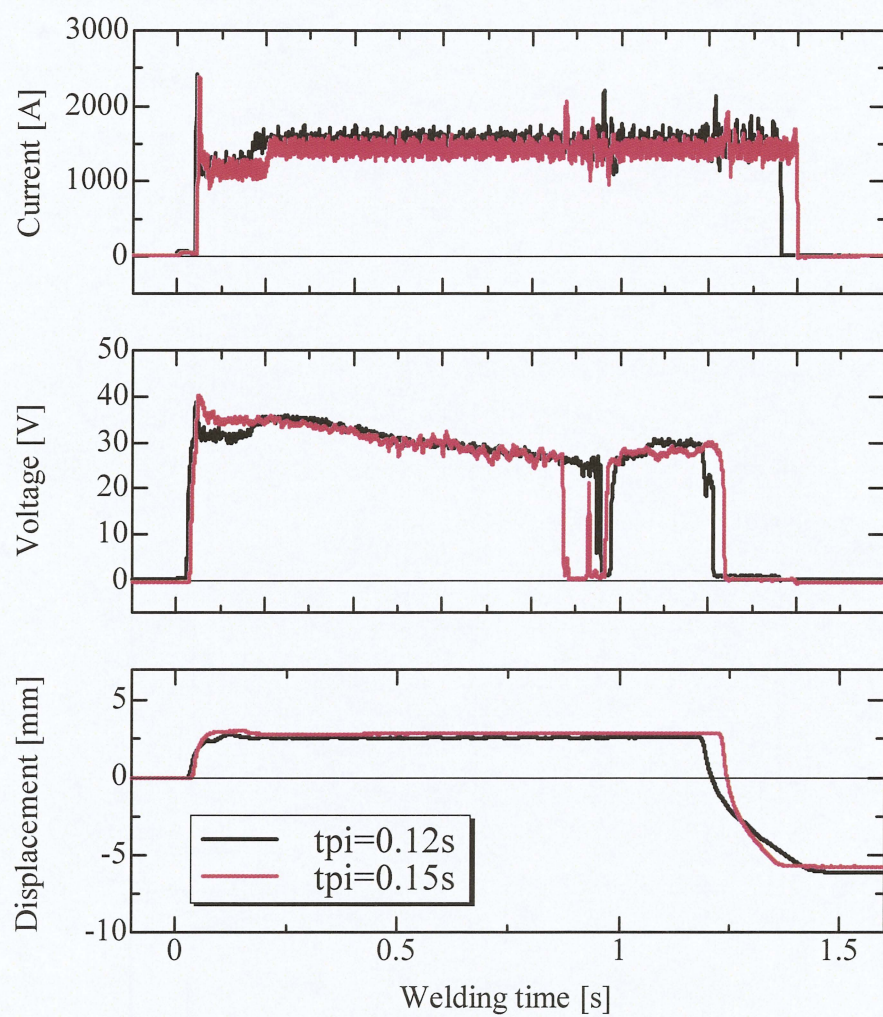
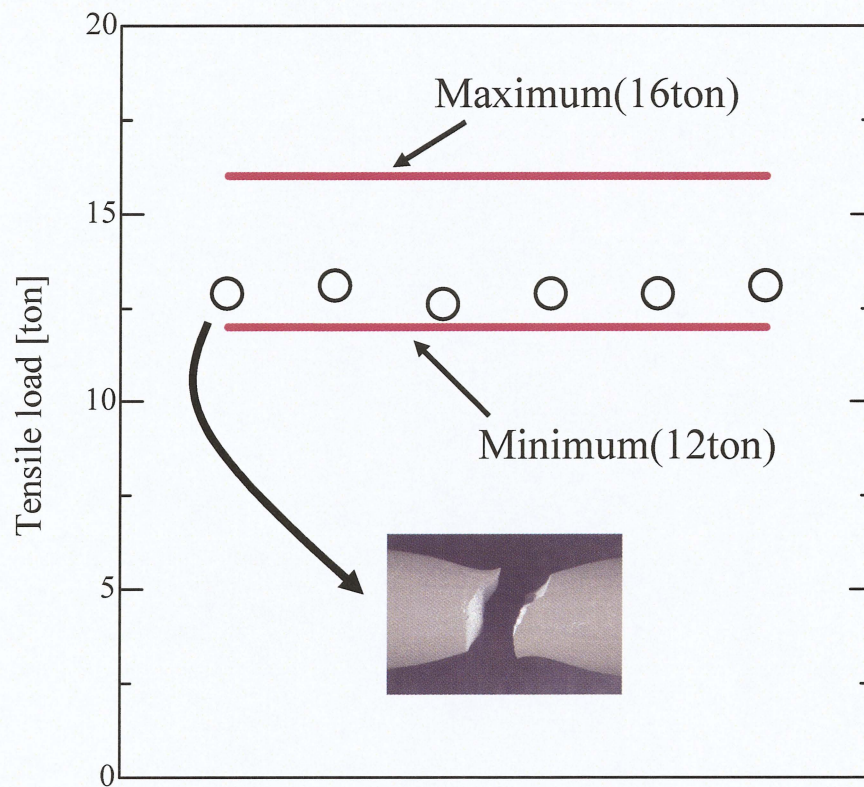


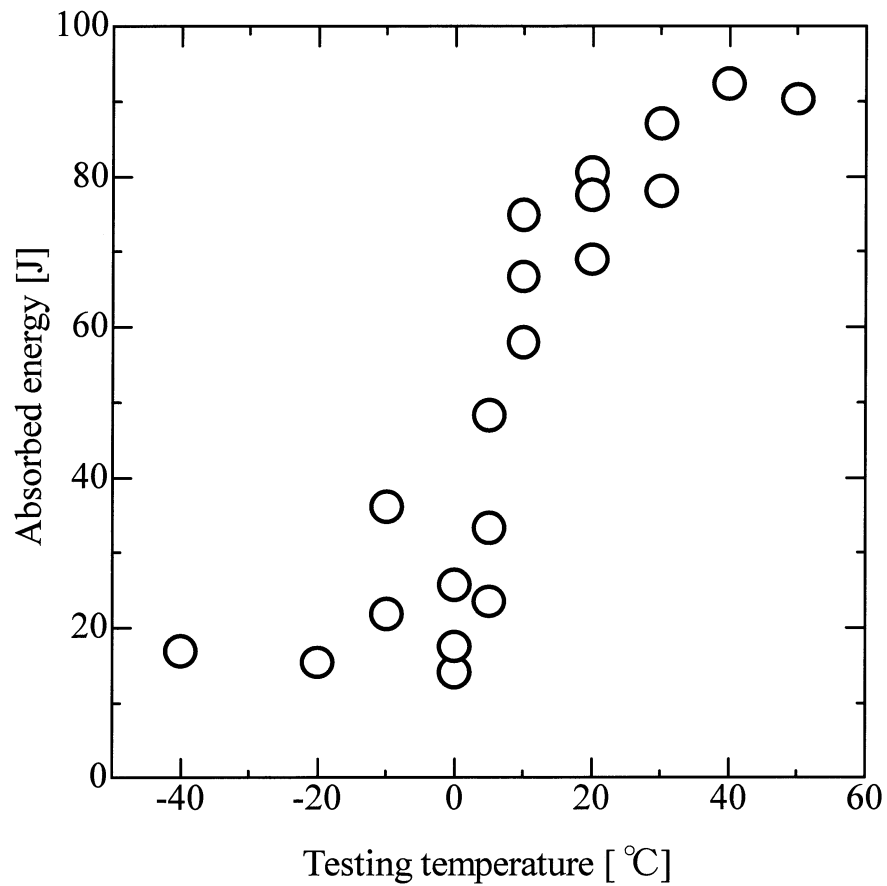
Fig.3—16
Measured result



Welding conditions

$I_{pi} = \text{Auto}$
 $t_{pi} = 0.15s$
 $t_{post} = 0.2s$
 $I_{main} = 1500A$
 $t_{arc} = 1.0s$
 $L = 2.5mm$
 $WA = 5mm$

Fig.3—17
Tensile load of stud welds



Welding conditions

$I_{pi} = 200A$

$t_{pi} = 0.05s$

$t_{post} = 0.05s$

$I_{main} = 1500A$

$t_{arc} = 1.0s$

$L = 2.5mm$

$WA = 5mm$

Fig.3—18
Relationship between testing temperature
and absorbed energy

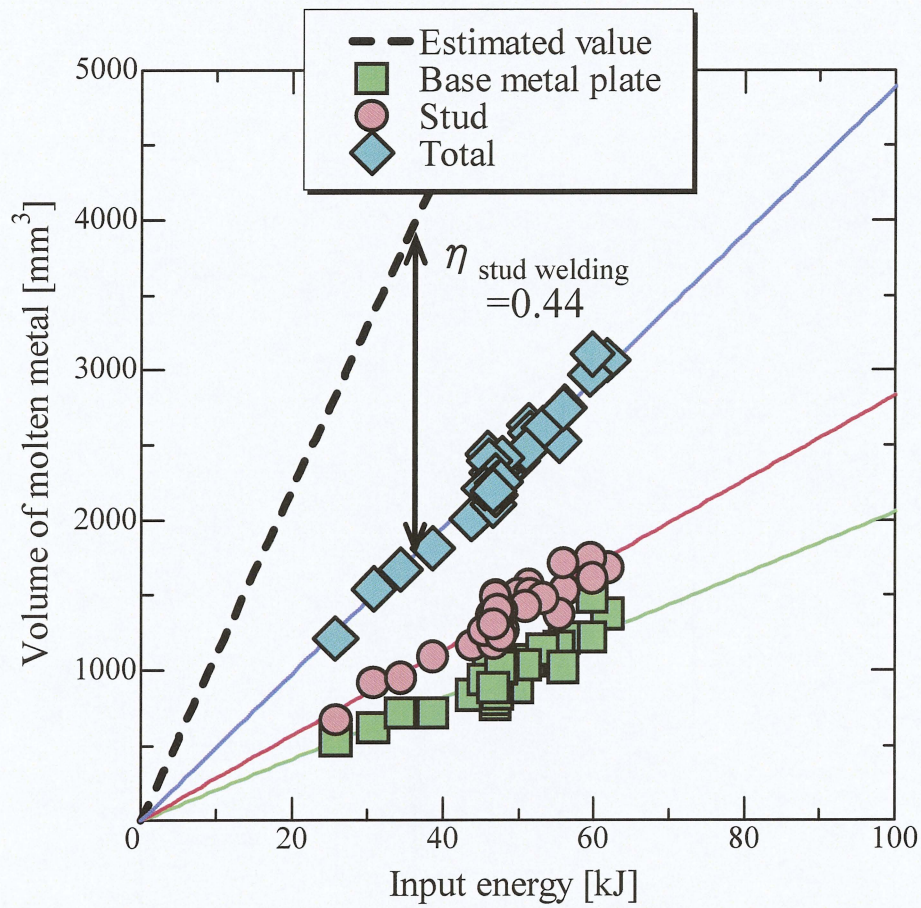


Fig.4—1
Relationship between input energy and
volume of molten metal

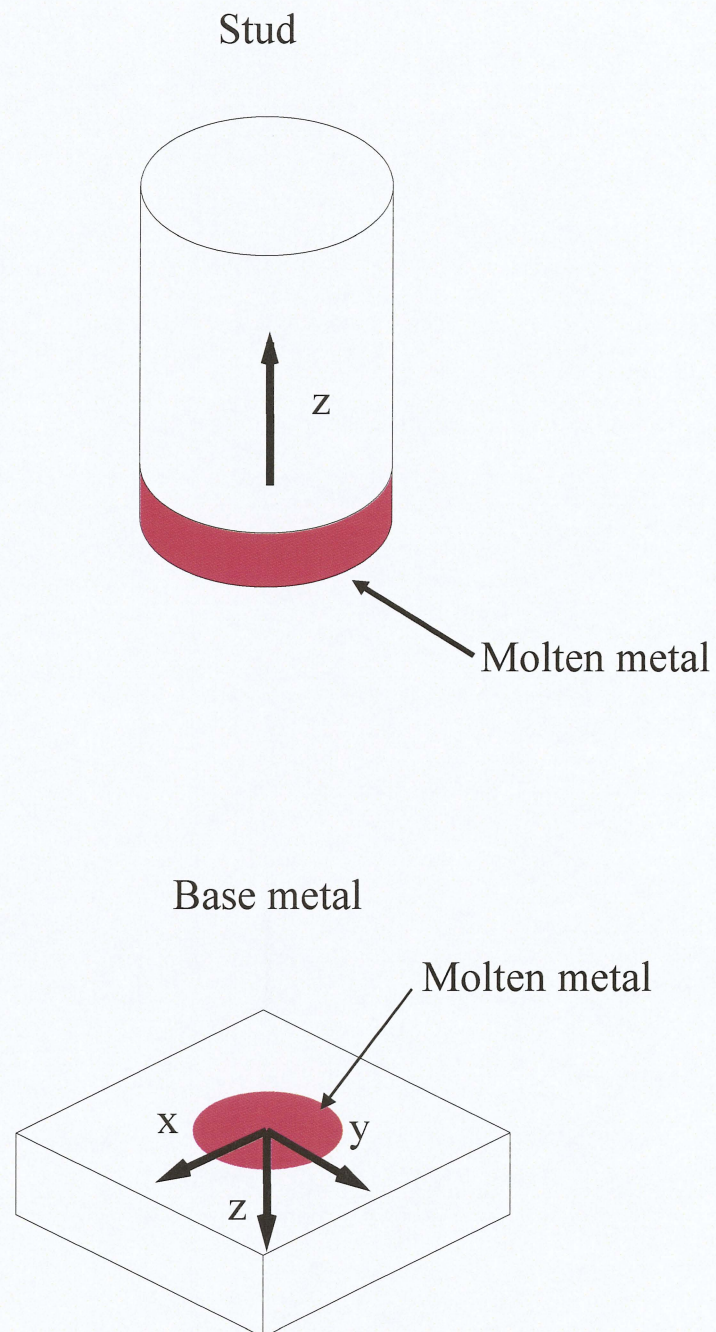


Fig.4—2
Direction of heat flow
(stud and Base metal)

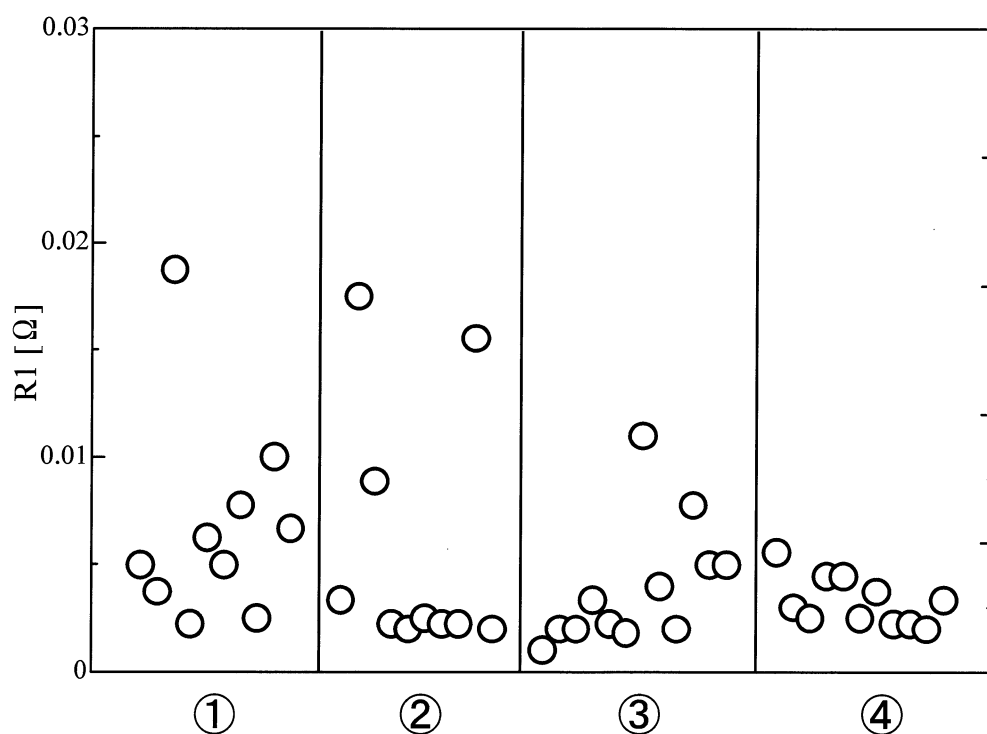


Fig.4—3
Ratio of V_{start} to I_{start}

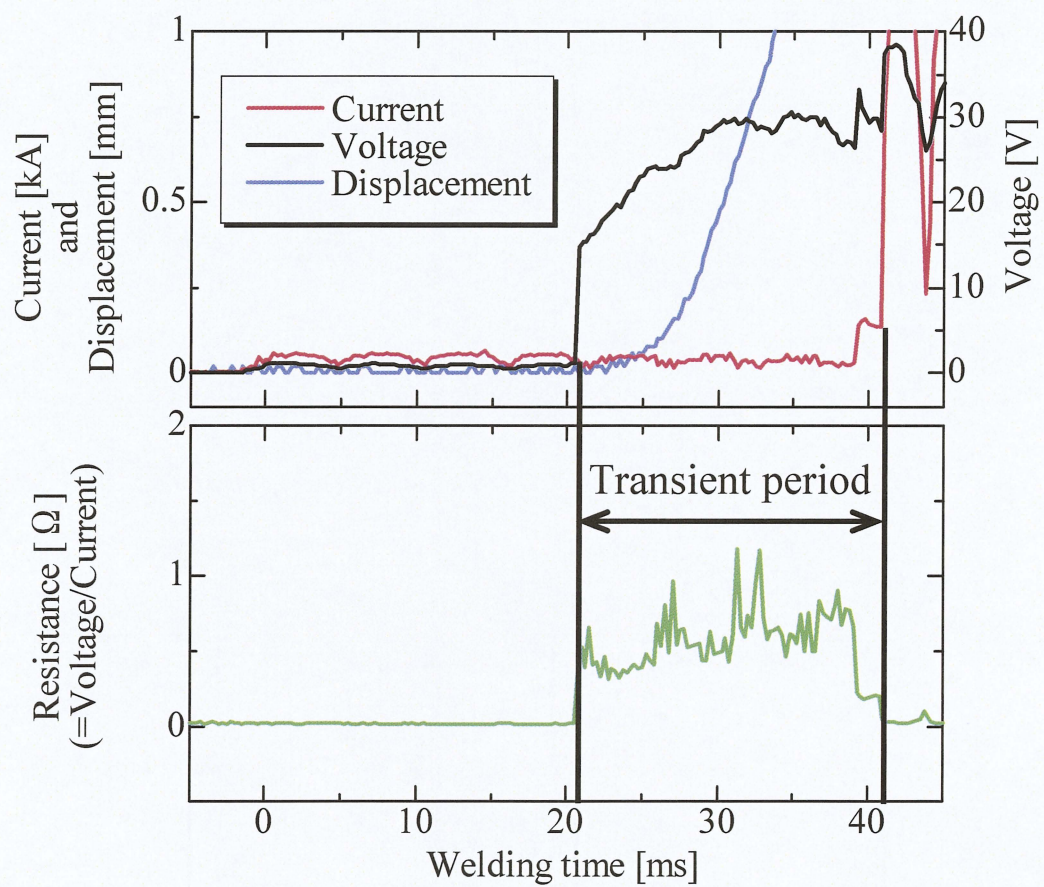


Fig.4—4
Changing of resistance during welding

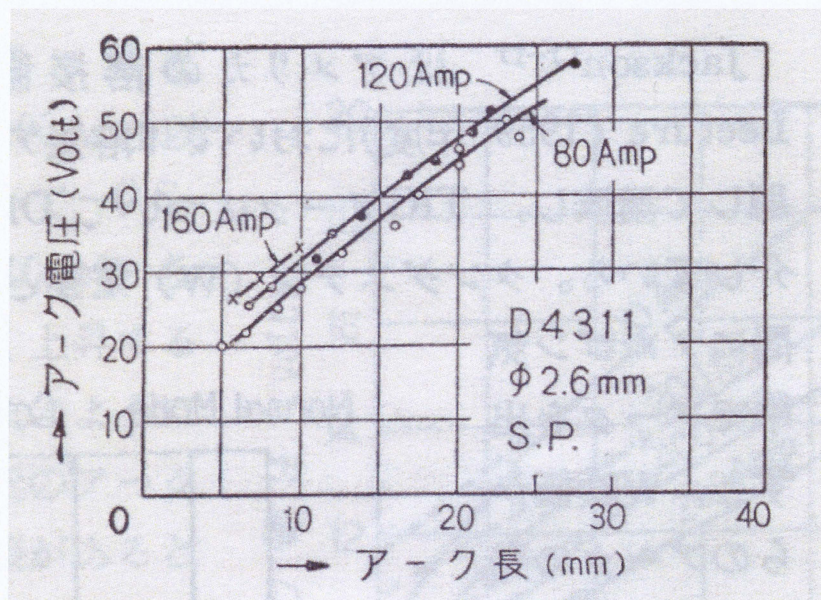


Fig.4-5
Relationship between arc length and arc voltage

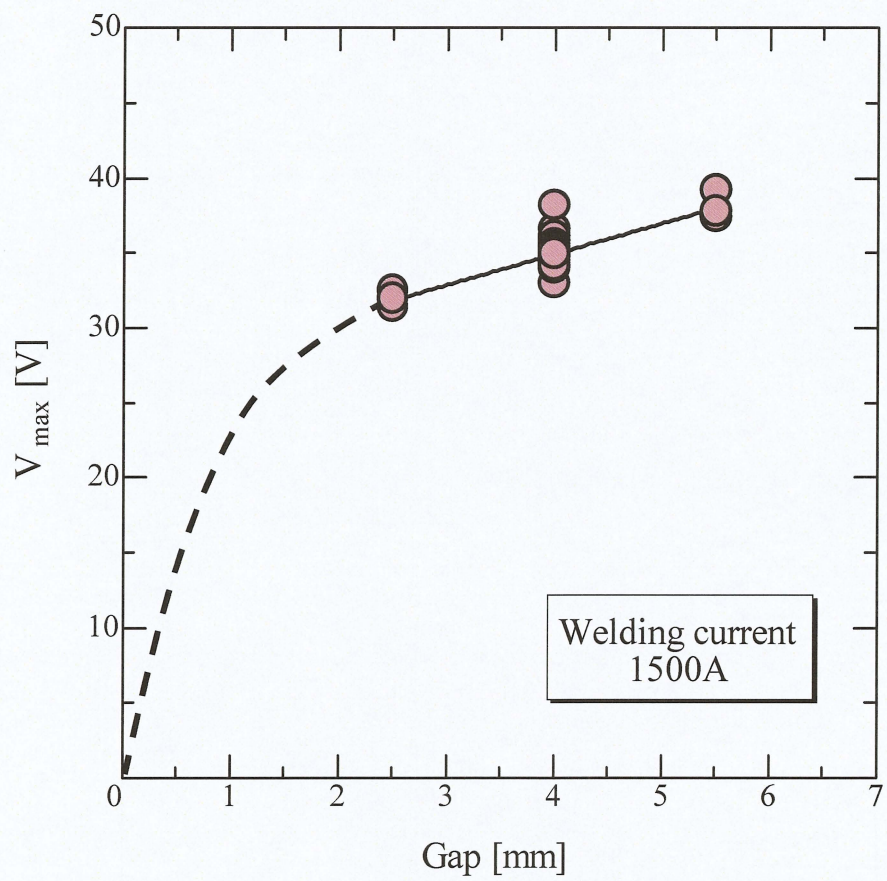


Fig.4—6
Relationship between Gap and V_{\max}

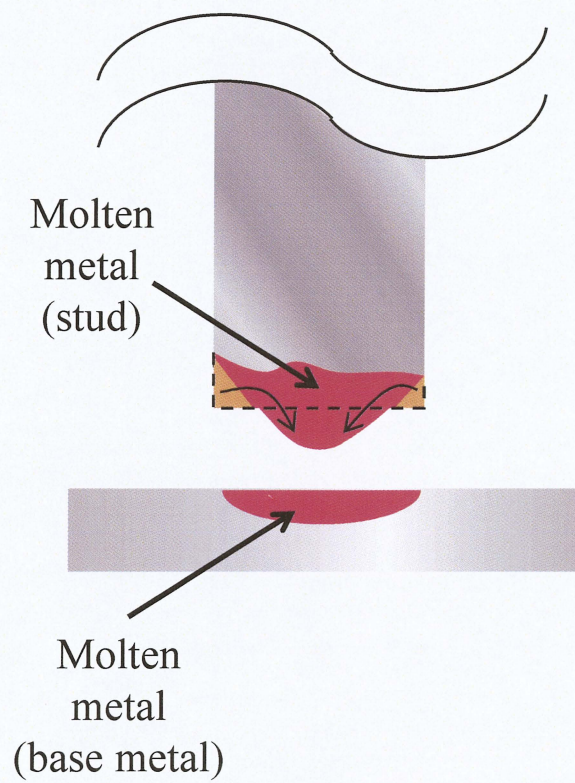


Fig.4—7
Sagging of molten metal (stud)

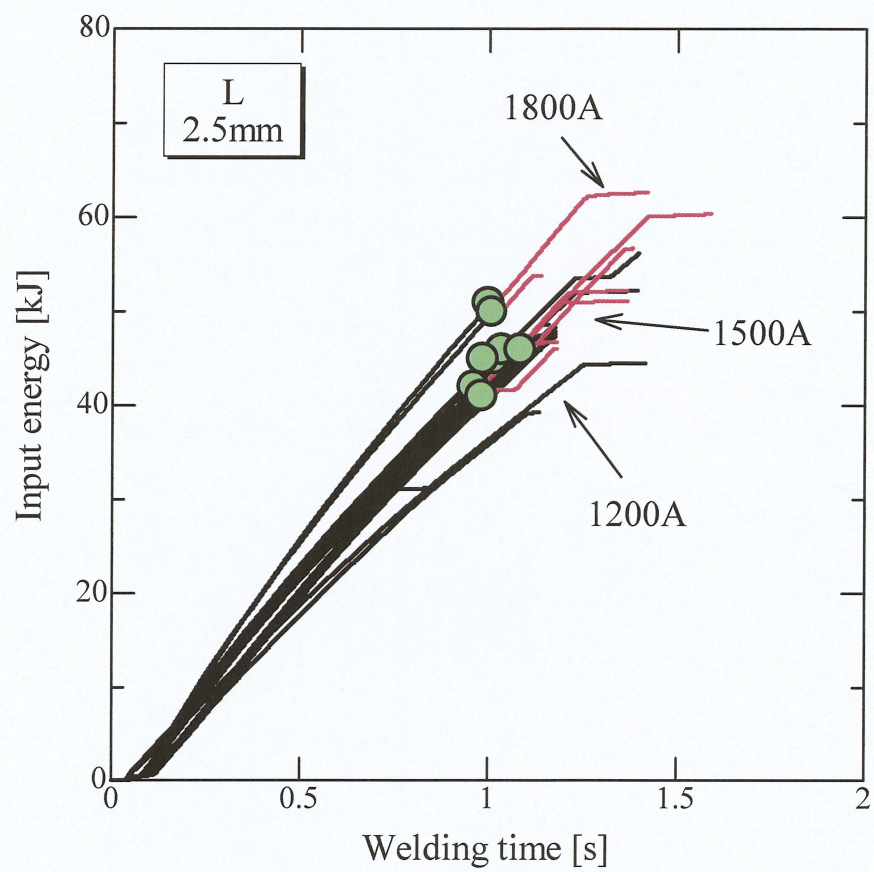


Fig.4—8
Relationship between welding time and input energy

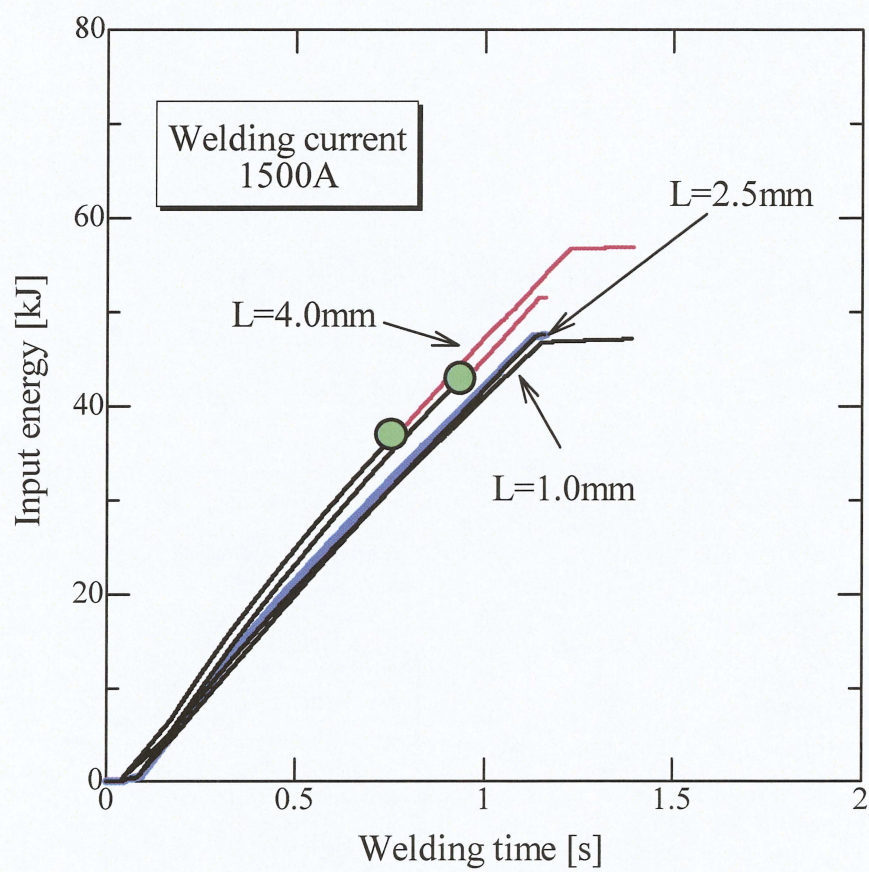


Fig.4—9
Relationship between welding time and input energy

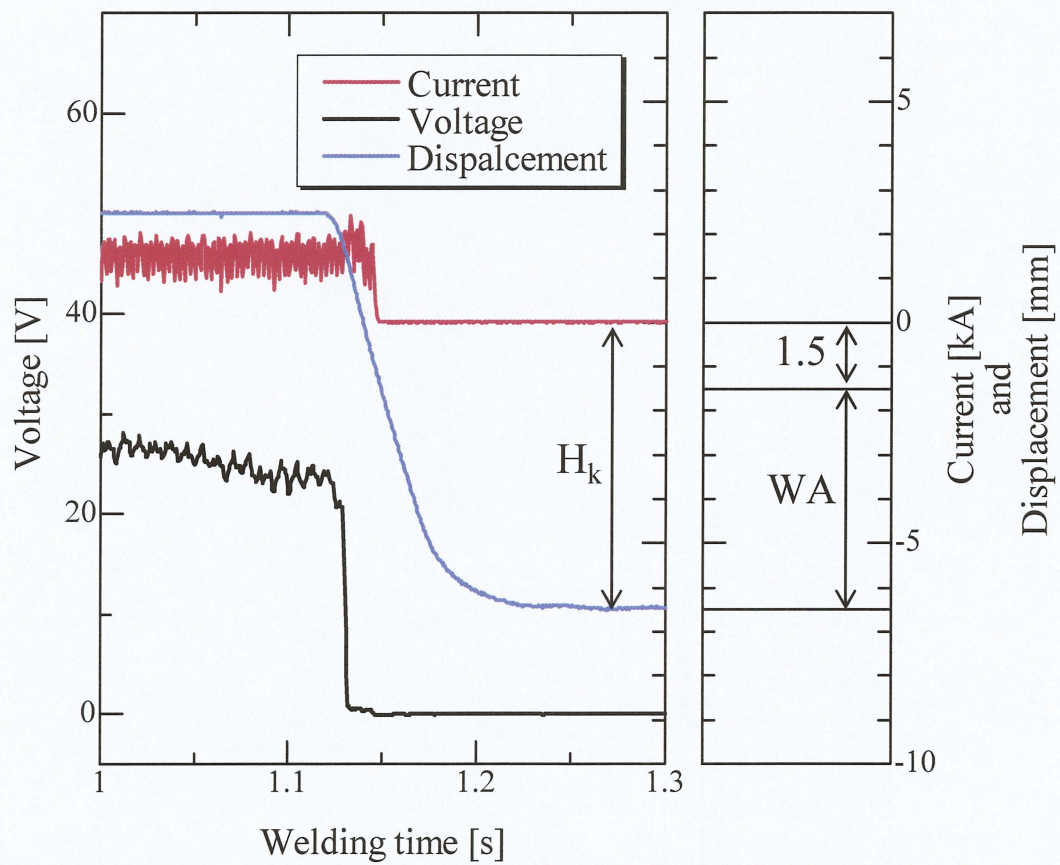


Fig.4—10
Distance of pushed stud

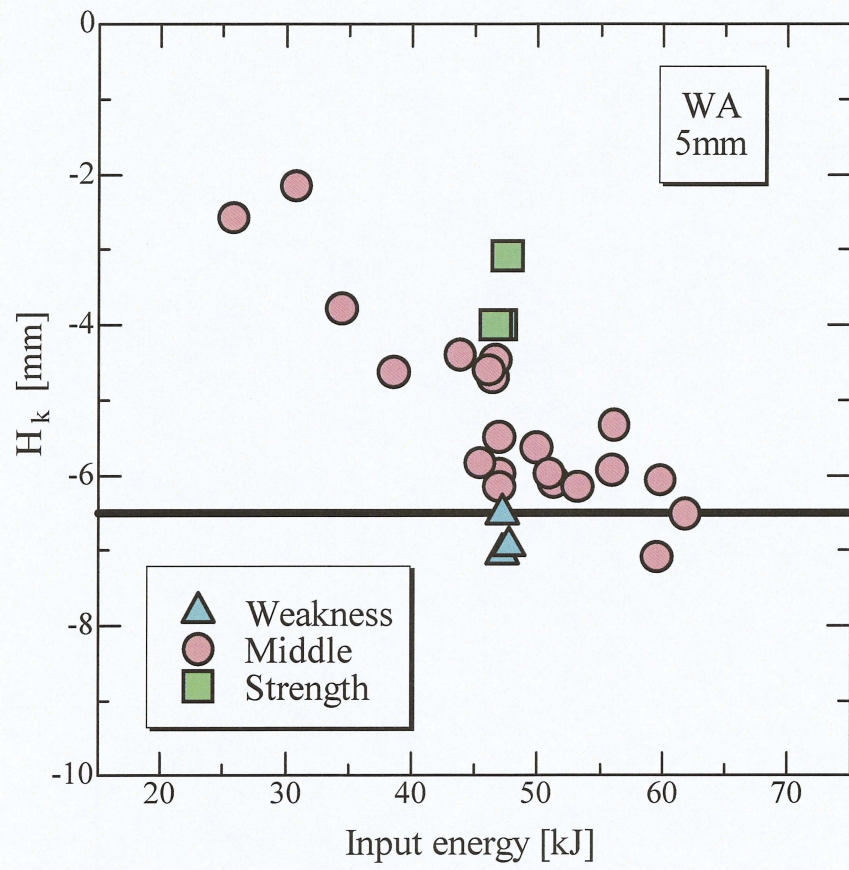


Fig.4—11
Relationship between input energy and H_k

Welding Current

Arc time



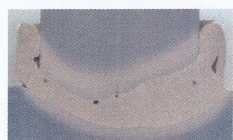
1200[A]



0.5[s]



1.2[s]



1500[A]



1.0[mm]



4.0[mm]



1500[A]

WA



1800[A]



2.0[mm]



8.0[mm]

10mm
|↔|

Fig.4—12
Cross—sectional picture of joint ①

Welding Current

Arc time



1200[A]



0.5[s]



1.2[s]



1500[A]

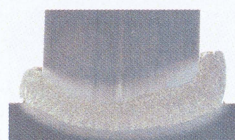
L



1.0[mm]



4.0[mm]



1500[A]

WA



1800[A]



2.0[mm]



8.0[mm]

10mm
|↔|

Fig.4—13
Cross—sectional picture of joint ②

Weakness



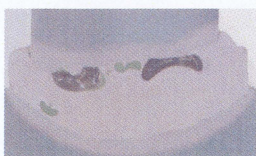
Middle



Strength



Fe-ball



10mm
|↔|

Fig. 4—14
Cross-sectional picture of joint ③

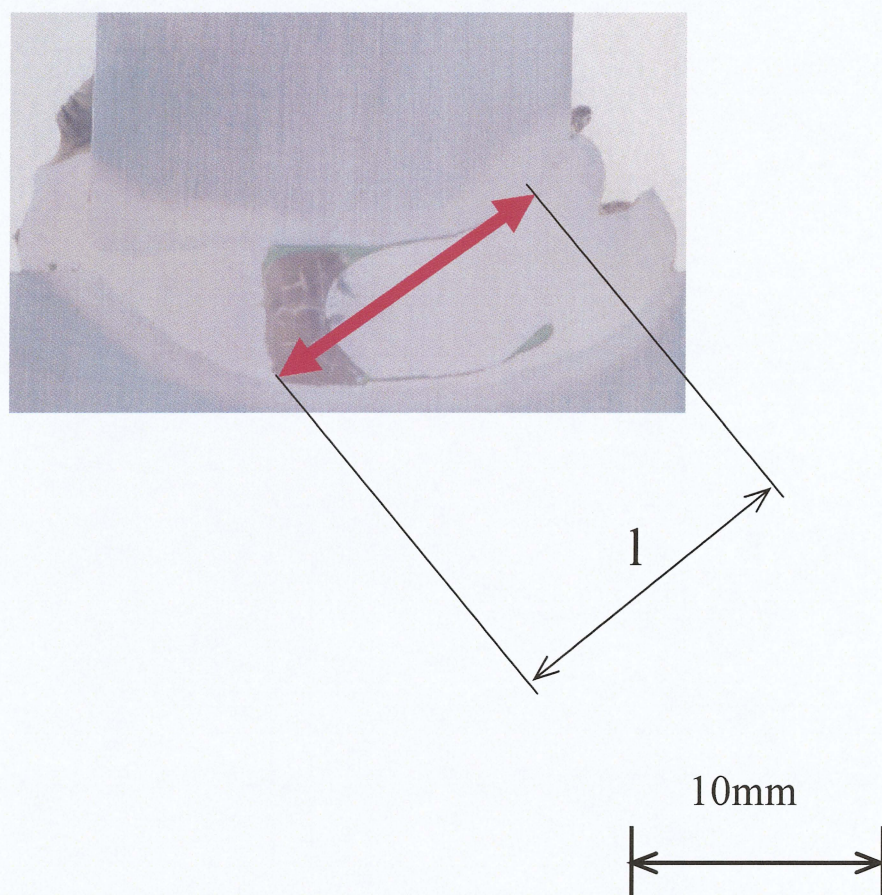


Fig.4—15
Valuation method of welding defect

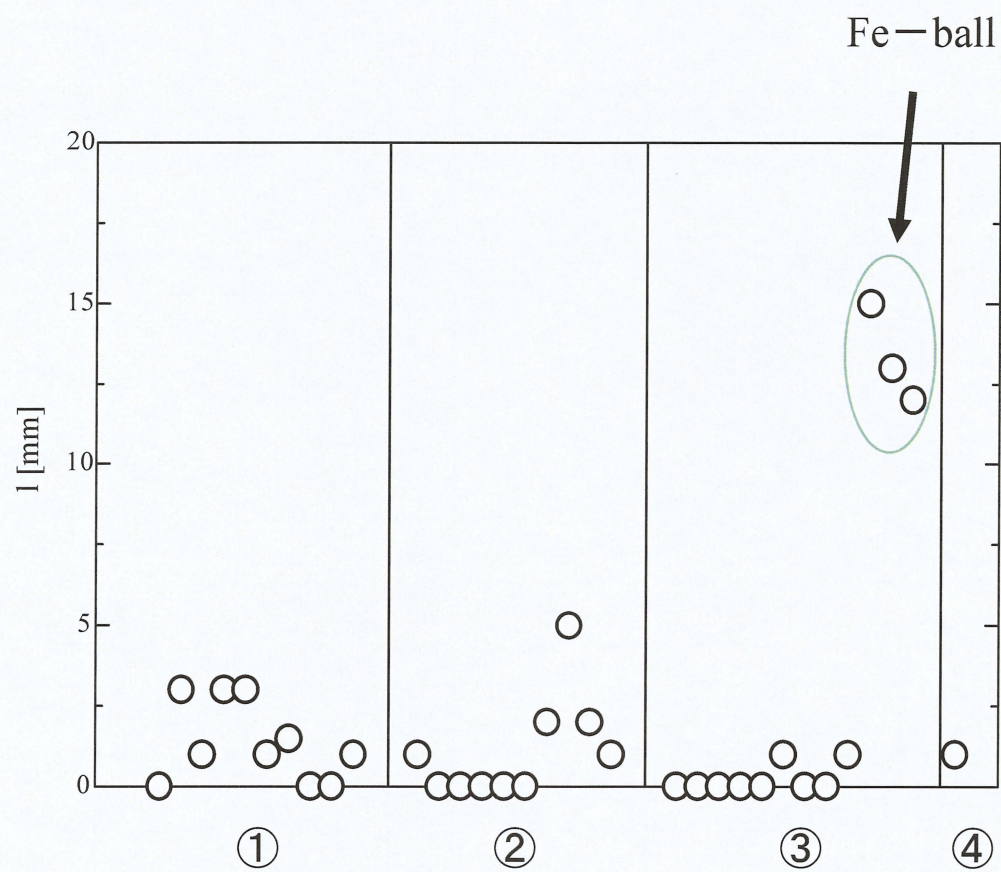
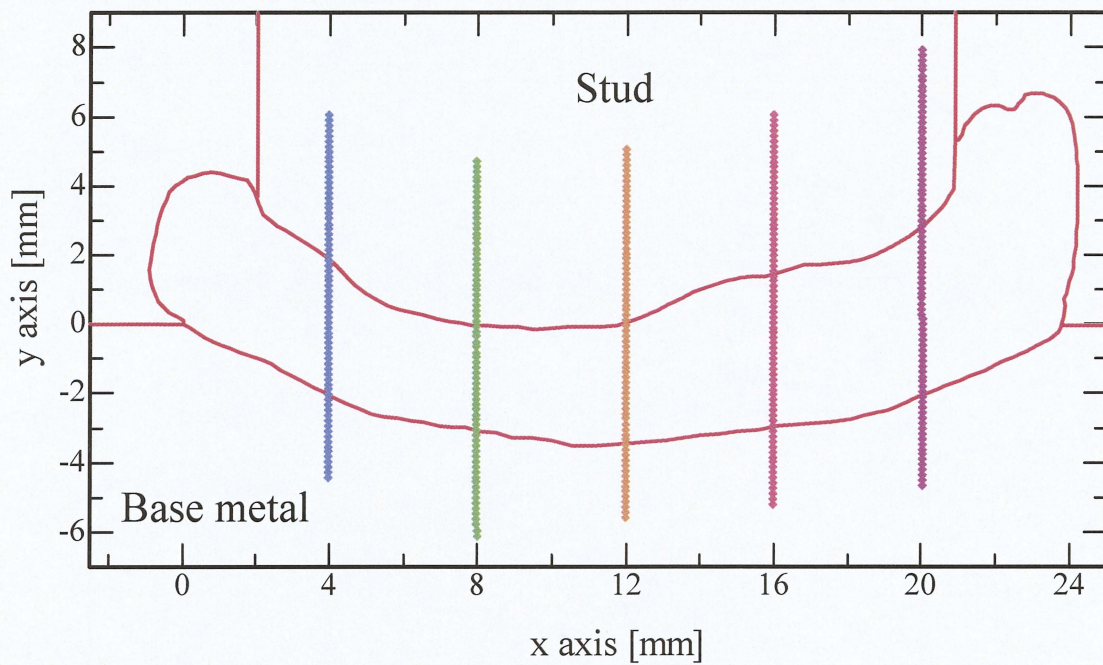


Fig.4—16
Width across corner:1



Welding conditions

$$I_{pi} = 200A$$

$$t_{pi} = 0.05s$$

$$t_{post} = 0.05s$$

$$I_{main} = 1500A$$

$$t_{arc} = 1.0s$$

$$L = 2.5mm$$

$$WA = 5mm$$

Fig.4—17
Vickers hardness number plotline

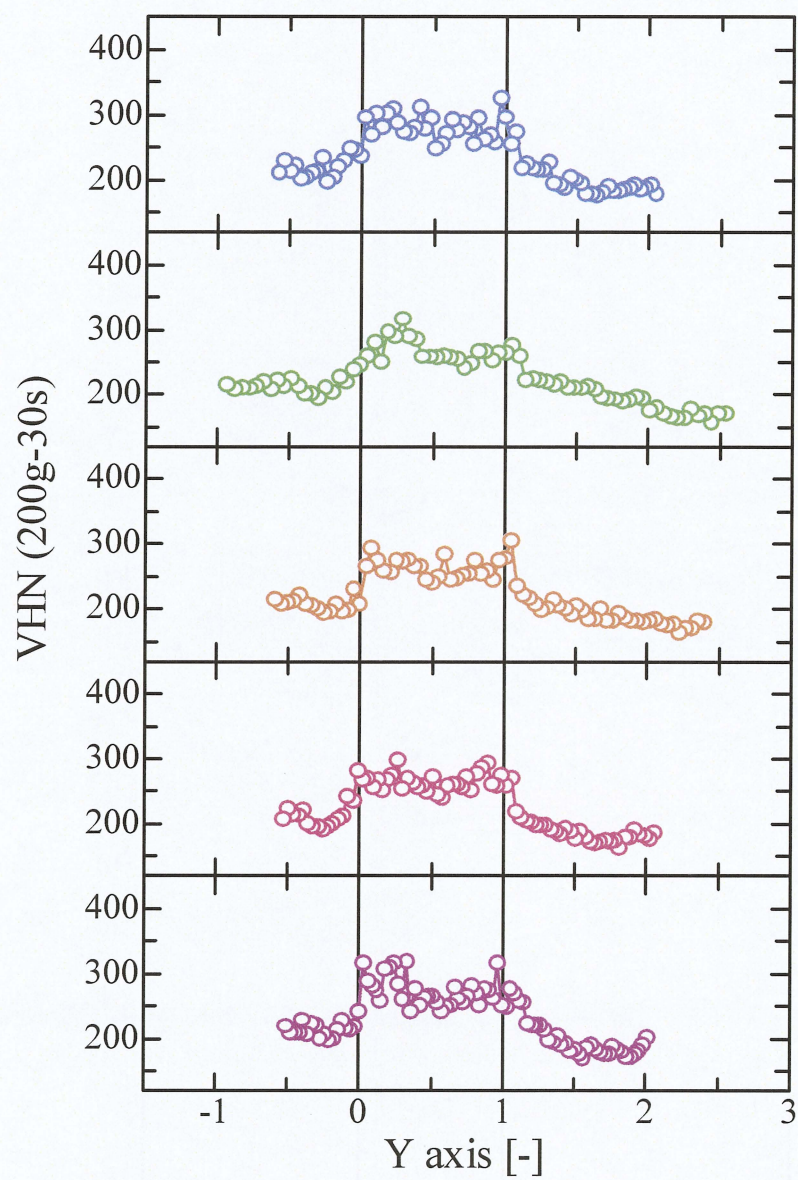
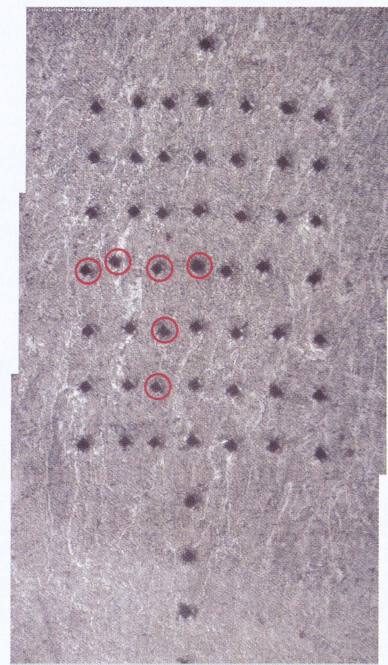
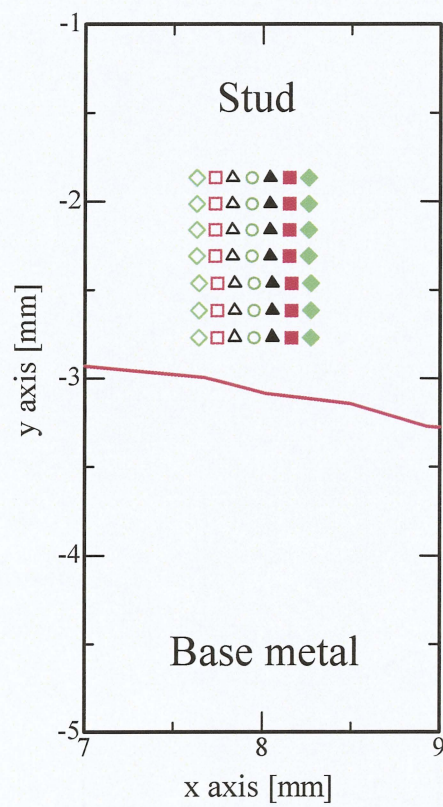


Fig.4—18
Results of Vickers hardness test



100 μ m
|<=>|

Fig.4—19
Vickers hardness number plotline
(green line)

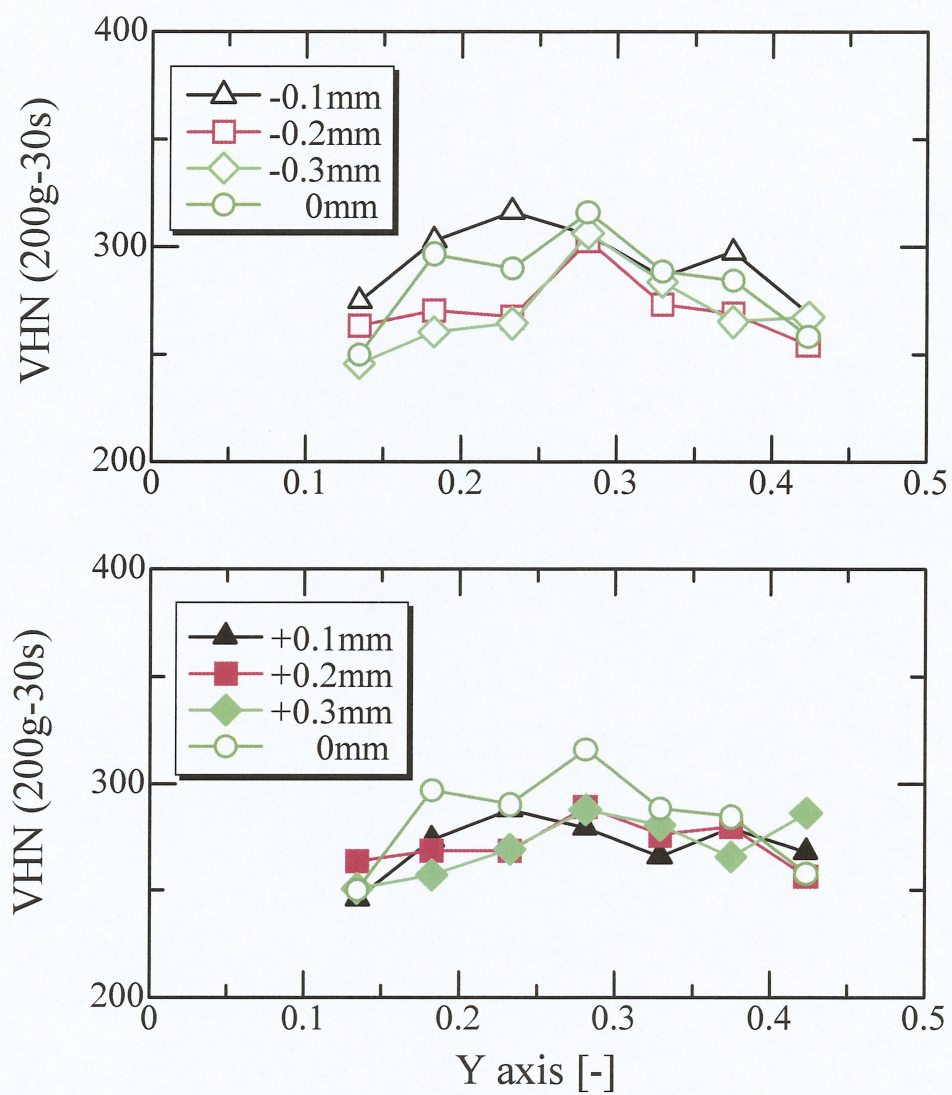


Fig.4—20
Results of Vickers hardness test
(green line)

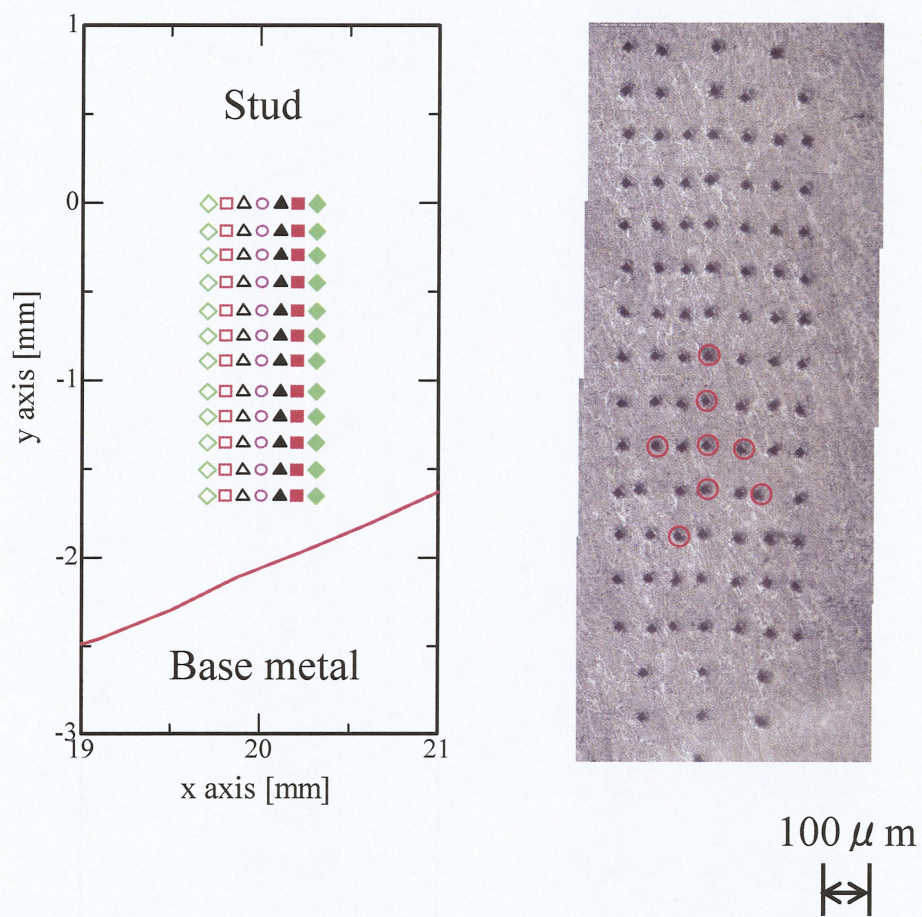


Fig.4—21
Vickers hardness number plotline
(purple line)

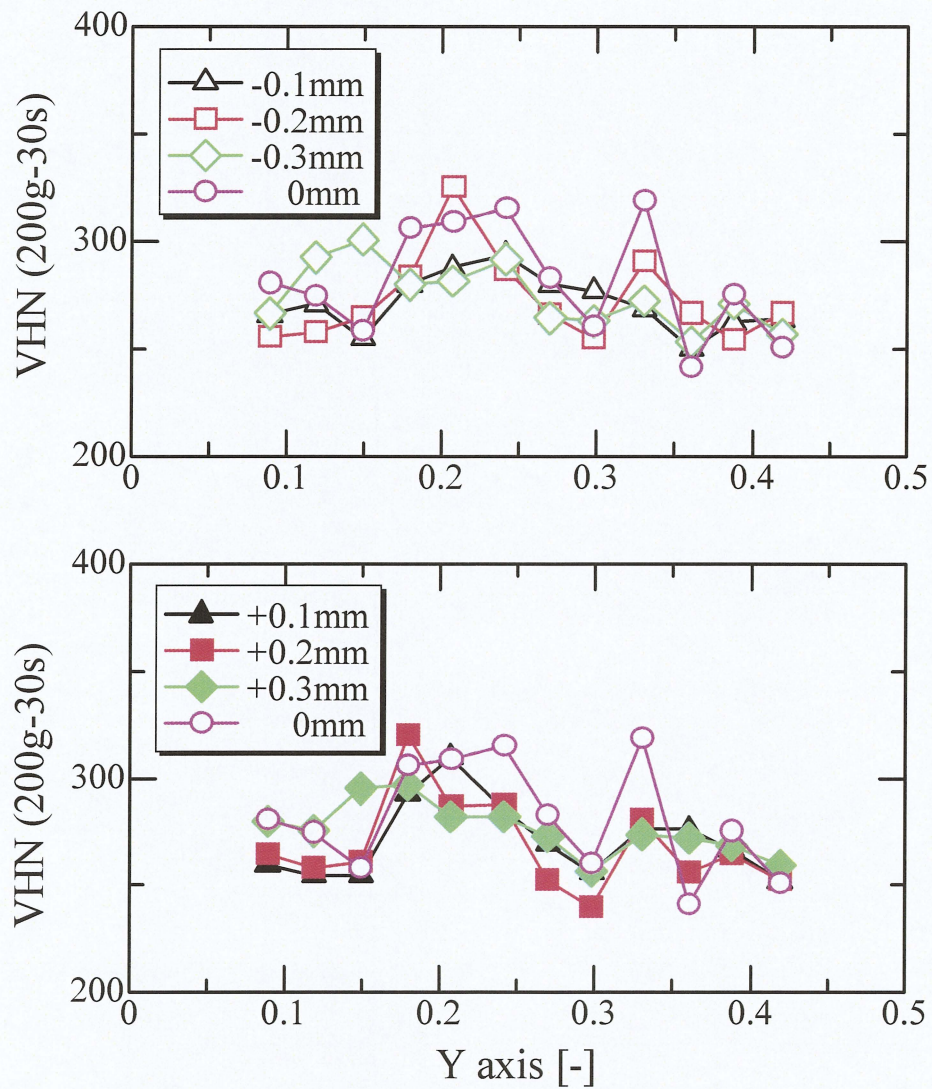
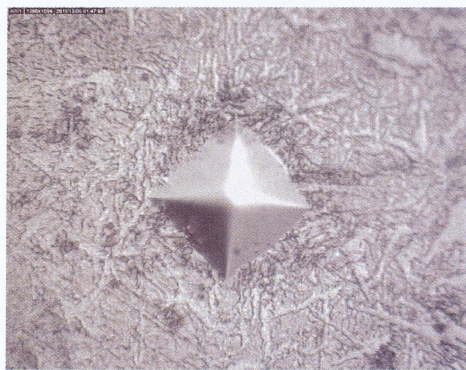


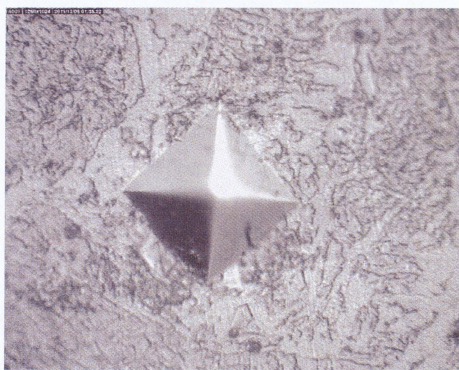
Fig.4—22
Results of Vickers hardness test
(purple line)

Green line

VHN=310Hv

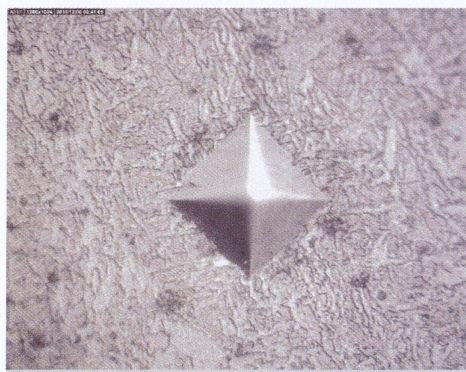


VHN=245Hv

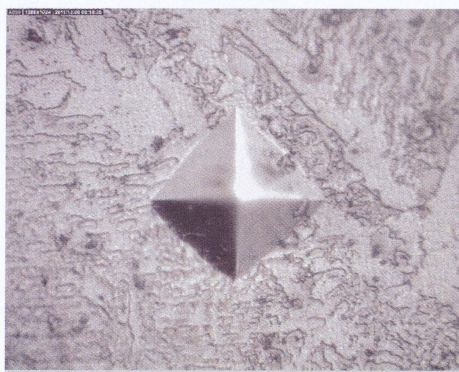


Purple line

VHN=320Hv



VHN=265Hv



10 μ m
| \longleftrightarrow |

Fig.4—23
Microstructure observation