

平成 30 年度 修士論文

低炭素鋼と各種鋼板との
抵抗溶接性に関する検討

三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻

樹神 琢人

第1章 緒言	・・・1
1-1 研究背景	・・・1
1-2 研究目的	・・・2
第2章 実験装置及び実験方法	・・・3
2-1 供試材	・・・3
2-2 実験装置	・・・3
2-3 測定信号の校正	・・・5
2-4 電極の仕様	・・・6
2-5 実験条件	・・・6
2-6 断面観察方法	・・・7
2-6-1 縦断面観察方法	・・・7
2-6-2 横断面観察方法	・・・7
2-7 引張試験方法	・・・8
2-7-1 引張試験機	・・・8
2-7-2 引張試験片	・・・8
2-8 温度履歴測定方法	・・・9
第3章 実験結果	・・・10
3-1 板材に SUS304 を使用した場合の実験結果	・・・10
3-1-1 縦断面観察結果	・・・10
3-1-2 横断面観察結果	・・・10
3-1-3 上部電極変位	・・・11
3-1-3(a) 第1変位及び第2変位	・・・11
3-1-3(b) 各通電時間における上部電極変位	・・・11
3-1-4 半サイクル毎の電気抵抗変化	・・・12
3-1-4(a) 半サイクル毎の平均電気抵抗の算出方法	・・・12
3-1-4(b) 半サイクル毎の電気抵抗変化	・・・13
3-1-5 半サイクル毎の電流変化とジュール発熱	・・・13
3-1-5(a) 半サイクル毎の平均ジュール発熱量の算出方法	・・・14
3-1-5(b) 半サイクル毎の平均電流値	・・・14
3-1-5(c) 半サイクル毎の平均ジュール発熱量	・・・14
3-1-6 引張試験	・・・15
3-1-6(a) 引張試験用試験片と通常試験片との比較	・・・15
3-1-6(b) 各通電時間における最大引張荷重	・・・15
3-2 板材に SPCC を用いた場合の実験結果	・・・16

3-2-1	縦断面観察結果	・・・16
3-2-2	横断面観察結果	・・・16
3-2-3	上部電極変位	・・・17
3-2-4	半サイクル毎の平均電気抵抗変化	・・・17
3-2-5	半サイクル毎の電流変化とジュール発熱	・・・18
3-2-5(a)	半サイクル毎の平均電流値	・・・18
3-2-5(b)	半サイクル毎の平均ジュール発熱量	・・・19
3-2-6	引張試験	・・・19
3-2-6(a)	引張試験用試験片と通常試験片との比較	・・・19
3-2-6(b)	各通電時間における最大引張荷重	・・・20
第4章 考察		・・・21
4-1	板材の鋼種の違いが溶融状態におよぼす影響	・・・21
4-1-1	断面観察結果の比較	・・・21
4-1-2	上部電極変位の比較	・・・21
4-1-3	半サイクル毎の平均電気抵抗の比較	・・・22
4-1-4	半サイクル毎の平均電流値の比較	・・・22
4-1-5	半サイクル毎の平均ジュール発熱量の比較	・・・23
4-1-6	累積発熱量の比較	・・・23
4-1-7	板材の温度上昇の比較	・・・24
4-2	溶接性の検討	・・・25
4-3	SPCC板に溶融部を得るための溶接条件の検討	・・・25
第5章 結言		・・・27

参考文献

謝辞

第1章 緒言

1-1 研究背景

抵抗溶接法はアーク溶接法とならんで広く利用されており、特に最近では自動車、鉄道車両、航空機、家電製品、パイプなど、薄板を主体とする工業分野において組立て技術の軸をなすに至っている。

一般的な抵抗溶接の原理を簡単に述べる。被溶接材を一对の水冷銅電極で加圧して挟み、大電流を通电させ、生じるジュール発熱を利用して被溶接材を加熱・熔融させて溶接を行う。抵抗溶接はジュール発熱を熱源とするため、発熱は材料の電気抵抗率および電流密度に依存し、これらが大きい場所ほど発熱量が大きくなる。電極の電気抵抗に比べて被溶接材の電気抵抗は大きく、また、銅電極より被溶接材の通電経路の方が小さくなるため、電極の発熱量に比べ被溶接材の発熱量が大きくなる。さらに、電極は水冷されているために、電極が熔融したり、被溶接材と電極の接触面が熔融したりする現象は生じない。

抵抗溶接では、通电時間が短く、発生したエネルギーは有効に溶接部の形成に利用されるため、発熱は局所的であり、しかも発生したエネルギーの損失は電極に吸収されるため、被溶接材は熱影響をあまり受けない。また、消耗品が電力だけで、生産コストが他の溶接方法に比べ低くできる。さらに、溶接スイッチを押すだけで一連の溶接工程が自動で行われるため、溶接結果が作業者の技量に左右されることがないなどの利点がある。

現在、抵抗溶接は板材を重ね溶接する際に広く用いられている。被溶接材の材質および板厚が同一な場合は、被溶接材中の温度分布が接触面に対して対称となるため、容易に溶接部を形成できる。しかし、板厚の異なる重ね継手や形状の異なる部材の抵抗溶接では、被溶接材中の温度分布が接触面に対して非対称であり、接触面に溶接部を形成することが困難になる。また、形状の異なる部材の抵抗溶接では、被溶接材に負荷される応力が断面形状によって大きく異なる。そのため、接触面に溶接部を形成する前にどちらか一方の被溶接材だけが大きく変形する場合がある。つまり、形状の異なる部材の抵抗溶接では、被溶接材の変形

を抑え、接触面に溶接部を形成することが非常に困難である。

1-2 研究目的

過去の研究²⁾において、ステンレス鋼の管材と薄板との抵抗溶接を行った。管材と薄板の組合せにおける抵抗溶接では、管材と薄板の接触面よりも先に管材部で溶融が始まる場合がある。そのため、管材だけが溶融してしまい管材と薄板が溶融した溶接部の形成が困難となる。この問題に対して、管材の溶融領域を制限することで管材と薄板が溶融した溶接部の形成を試み、管材を固定する電極からの管材の突出し長さを調整することで溶融領域を制限し、管材と薄板が溶融した溶接部の形成が可能であることが明らかにされている。

一方、管材は配管材料として使用されることも多いが、その配管材料において最も多く使用されるのがコストの最も低い炭素鋼系鋼管である³⁾。よって、炭素鋼の管材と薄板との抵抗溶接も可能であることが望ましいが、ステンレス鋼と炭素鋼では融点をはじめとする物性値が異なるため、過去の研究と同様の条件で抵抗溶接が可能であるかどうかは明らかでない。

そこで本研究では、管材と板材との抵抗溶接において、管材をステンレス鋼から低炭素鋼に変更し、それとステンレス鋼または低炭素鋼の薄板とを抵抗溶接した場合の溶接性について検討する。

第2章 実験装置及び実験方法

2-1 供試材

供試材として、管材には低炭素鋼として JOHS 規格の油圧配管用精密炭素鋼鋼管 OST2 を使用し、板材にはステンレス鋼としてオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 (板厚 1.5mm) および低炭素鋼として SPCC (板厚 1.6mm) を使用した。Fig.2-1 に管材及び板材の概略図を示す。管材の寸法は外径 8mm, 内径 6mm, 全長 16.2mm とし、電極に管材を設置した際に突出し長さが 1mm となるようにした。また、板材の形状は一辺 30mm の正方形とした。使用した各供試材の化学組成の規格値および物性値を、OST2 については Table2-1(a), (b)に、SUS304 については Table2-2(a), (b)に、SPCC については Table2-3(a), (b)にそれぞれ示す。

2-2 実験装置

Fig2-2 に本研究で使用した溶接機の概略図を示す。定置式単相交流抵抗溶接機 (ダイヘン製 PRAB-22) に電極加圧力が測定できるように、ピストン部の下にロードセルを設置した。Fig.2-2 に点線で示された部分の内部構造を Fig.2-3 に示す。Fig.2-3 はピストン内部を示している。ピストン内部の部品はすべて機械構造用炭素鋼鋼材 (S55C) である。電極加圧力の測定にはロードセル (KYOWA 製 LCR-G-20KNSA2) を使用し、ロードセルの定格容量は 20kN である。

制御装置には溶接条件を制御する抵抗溶接用制御装置 (ダイヘン製 RE-01) を使用する。制御装置本体の仕様は以下の通りである。

制御方法	定電流制御
制御可能範囲	3.0~30.0kA (二次電流制御)

定電流制御の場合，設定できる条件は初期加圧時間，溶接時間および保持加圧時間などである。

溶接における電極移動量の測定は，光変位センサ（SUNX 製 LM10）を使用した。上部電極に地面と平行な反射板を設置し，その移動量を光変位センサで測定する。光変位センサの反射板には鉄に艶消しの塗料を塗ったものを用いた。光変位センサの取り付け位置を Fig.2-4 に写真で示す。光変位センサの設定値は以下とする。

測定範囲	±10mm
測定中心距離	50mm
分解能	10Hz－1 μ m 100Hz－3.5 μ m 1kHz－10 μ m

測定中心距離はセンサから反射板までの距離をいい，測定範囲は，測定中心距離から±10mm の範囲が測定可能範囲であることを示している。本実験では分解能は，1kHz-10 μ m で実験を行った。

溶接電流および電極間電圧の測定は，溶接チェッカー（MIYACHI 製 MM-326B）を使用した。溶接チェッカーの仕様は以下の通りである。

溶接電流	測定範囲	1.00～19.99kA
	検出コイル	トロイダルコイル（MB-800K）
電極間電圧	測定範囲	0.10～9.99V
	検出線	電極検出ピックアップ
通電サイクル	測定範囲	0.5～99.5cycle

電流・電圧測定値 実効値（測定区間の半サイクルの相加平均実効値）

ピーク値（全通電サイクル中の最大突頭値）

溶接電流の測定は、電流検出コイルを被測定溶接機の導体の一部にかけることにより行われる。

上記の測定データをオシロスコープにより計測する。Fig.2-5 に実験装置および測定機器概略図を示す。

2-3 測定信号の校正

上記のデータはすべて電圧信号として表示されるため、電圧信号を校正しそれぞれの物理量に換算する必要がある。以下にそれぞれの校正方法を示す。

ロードセル

ロードセルの電圧はシグナルコンディショナーを経由し、オシロスコープに表示させた。シグナルコンディショナーは、ロードセルの校正表に記載されたひずみ出力を設定する。オシロスコープ画面上に定格容量 20kN となる電圧を表示させ、測定して単位の換算を行った。

加圧力 (kN) とロードセルの信号値との換算

ロードセルの定格容量 (20kN) における電圧値は 2.372V なので

換算式は

$$\text{加圧力 (kN)} = \text{電圧値 (V)} \times (20\text{kN} \div 2.372\text{V})$$

で表すことができる。

光変位センサ

光変位センサの校正にはマイクロメーターを使い、変位量を 40mm から 60mm に設定したときの電圧を測定し、電圧から変位量への換算を行った。測定結果を Fig.2-6 に示す。この結果から 1V は 1.988mm と換算出来る。

溶接電流

溶接チェッカーでは実効値や電流のピーク値は測定できるが、実効値では測定区間の半サイクルの相加平均実効値が表示され、ピーク値では全通電サイクルの中の突頭値が表示される。そのため測定値を正確に測ることが難しいため、溶接電流 4.1~9.9kA で行った測定データを元に換算式を作る。溶接電流の換算は、溶接チェッカーにて表示された実効値とオシロスコープに表示された電流の電圧値の 2 乗を半サイクルの実効値の範囲で平均し、平方根をとって算出した値を比較して係数を求めた。なお、実効値の範囲は半サイクルの始まりから次の半サイクルの始まりまでとした。その結果を Fig.2-7 に示す。この結果より溶接チェッカーの実効値とオシロスコープの表示より算出した実効値はどの溶接電流でも係数は変わらず直線にのっている。よって、この傾きを電圧値から溶接電流値への校正係数とし、その係数は 1V あたり 6.526kA である。

2-4 電極の仕様

本実験では、管材を固定するために自作の上部電極を使用した。Fig.2-8 に自作した上部電極の概略図を示す。管材は上部電極の深さ 15.2mm の穴に差し込み、付属のテーパ付きのコレットで締め付け固定する。次に、Fig.2-9 に下部電極の概略図を示す。下部電極にはダイヘン製の直径 16mm, R25 の R 型電極を使用する。上部電極、下部電極共に熱伝導性に優れた銅合金を使用している。

2-5 実験条件

本実験では、通電時間(cycle)および板材の鋼種を変化させて実験を行った。Fig.2-10 に突出し長さ 1mm の管材を固定した上部電極の概略図を示す。突出し長さとは上部電極から管材が突き出ている長さとし、突出し長さを 1mm としたとき上部電極の深さが 15.2mm であることから、管材の長さは 16.2mm となる。以下に、本実験の実験条件における設定範囲を示す。

板材	SUS304, SPCC
通電時間	4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 cycle
設定電流	9.0 kA
電極加圧力	3 kN
突出し長さ	1 mm

2-6 断面観察方法

2-6-1 縦断面観察方法

本実験では継手の溶融状態を調べるため、Fig.2-11 上部写真に示すように、溶接部中心を通るように切断し、ベークライトに埋め込み断面観察を行った。Fig.2-11 に断面観察を行った試験片の例を示す。Fig.2-11 下部写真の赤丸 2 か所の接合部を KEYENCE 製の光学顕微鏡 VHX-900F によって断面観察した。突出し長さ 1mm、通電時間 16cycle で溶接した継手の断面を Fig.2-12 上部に示す。Fig.2-12(a), (b)および(c)にそれぞれ異なる溶接条件で作製した継手の接合部の断面拡大写真を示す。板材の溶融状態を、(a)のように板材が溶融して接合している場合を○、(b)のように板材が溶融していない場合を×、(c)のように板材が溶融しているが接合部に金属が充填されていない場合を△とし、3 種類に分類した。

2-7-1 横断面観察方法

本実験では接触部全周における断面観察を行った。Fig.2-13 に接触部全周における断面観

察方法について示す。溶接後の試験片を管材の上部から管材部分が無くなるまで削り込んでいく、管材が無くなるまで削り込んだ後に Fig.2-13 下部写真のようにベークライトに埋め込み、表面を粒度 800~2000 の研磨紙で研磨紙観察を行った。

2-7 引張試験方法

2-7-1 引張試験機

本実験で溶接した試験片の継手強度を測定するために用いた引張試験機を Fig.2-14 に示す。また、Fig.2-15 に試験片の管材側を固定するための治具、Fig.2-16 および Fig.2-17 に試験片の板側を固定するための治具を示す。Fig.2-15 に示した円柱の治具の下部にある $\phi 8$ のねじ穴に管材挿入して固定し、板側は Fig.2-16 および Fig.2-17 に示した 2 枚の治具で挟み、4 本のボルトで締め付けることで試験片を固定する。Fig.2-17 より、治具の下部のねじ穴にロードセルを挿入して固定する。ロードセルは KYOWA 製 LUX-A-20kN-P を使用した。Fig.2-14 に示した試験機のプレート 3 と繋がる 2 本の柱はねじ加工がされており、上部にあるモーターによって歯車が回ることによって 2 本の柱が回り、プレート 3 が移動し負荷がかかる仕様である。負荷の方向は板材表面に対し垂直方向とする。モーターには、ORIENTAL MOTOR 社製レバーシブルモーター(ユニット品名 MSS425-411WU-3, モーター品名 USM425-411W)定格出力 25W を使用した。ギアヘッドには 4GN75RA を使用した。

ロードセルの校正係数は 1V 当たり 12.923 であることからオシロスコープにより測定した電圧値から荷重への換算式は

$$\text{荷重 (kN)} = \text{電圧値 (V)} \times 12.923$$

で表すことができる。

2-7-2 引張試験片

引張試験は管材にねじ加工を施し，引張試験専用の管材の試験片を作製した．作製した試験片の概略図を Fig.2-18 に示す．専用の試験片を管材に模擬し引張試験を行う．Fig.2-19 に板材に SUS304 を使用し，通電時間 16cycle, 9kA, 3kN で試験を行った際の，継手の引張試験結果を示す．継手の強度は最大引張強度を基に考察を行う．Fig.2-19 であれば継手強度は約 8.9kN となる．

2-8 温度履歴測定方法

本実験では板材の温度履歴を測定するために，熱電対を Fig.2-20 に示した様に管材から 1mm 離れた溶接機手前側(Front side)の板材の表面に取り付けた．また，測定温度の記録には Fig.2-21 に示すようなデータロガー（KEYENCE 社製 GR-3500）を使用した．

第3章 実験結果

3-1 板材に SUS304 を使用した場合の実験結果

3-1-1 縦断面観察

板材に SUS304 を使用し、通電時間を 4~16cycle と変化させた際の断面観察写真の例を Fig.3-1(a)~(g)に示す。左側が溶接機に向かって手前側(Front side)、右側が奥側(Back side)の写真である。図の様に、通電時間を変化させると板材の溶融状態も変化することがわかる。そこで、その状態を評価して結果を表にまとめたものを Fig.3-2 に示す。同条件で実験を 2 回行ったため、1 回目を First time、2 回目を Second time とし、Fig.3-2(a)に 1 回目、Fig.3-2(b)に 2 回目の結果をそれぞれ示す。なお、断面観察方法および断面評価方法は 2-6 節で説明したように、○は板材が溶融している場合、×は板材が溶融していない場合、△は板材が溶融しているが接合部に金属が充填されていない場合である。1 つの通電時間に対し記号が 2 つあるのは、溶接部の 2 か所を評価したためである。評価した 2 か所は、前述のように溶接機に向かって手前側 (Front side) および奥側 (Back side) である。Fig.3-2(a)および(b)より、実験 1 回目と 2 回目ではほぼ同様の結果を示し、通電時間を変化させると板材の溶融状態が異なり、通電時間 4cycle では板材に溶融部が得られず、通電時間 6cycle 以上で板材に溶融部が得られることがわかる。また、溶接機の手前側と奥側で異なる溶融状態が生じることがあるのがわかる。この要因は、縦断面観察では、板材側の溶融状態を 2 か所でしか観察していないことが要因であると考え、次に管材と薄板の接触面全周における薄板の溶融状態について調査した。

3-1-2 横断面観察

管材と薄板との接触面全周における板材の熔融状態について確認するために、溶接後の試験片を管材の上部から管材部分がなくなるまで削り込んでいき、板側の熔融状態を確認した。断面観察方法は2-6節に示した方法で行った。Fig.3-3(a)～(g)に通電時間4～16cycleで溶接した場合の接触面周辺の横断面観察写真を示す。Fig.3-3 からわかるように、通電時間6cycle以上の条件で板側に熔融した痕跡が確認された。また、通電時間10, 14および16cycleにおいて薄板に金属が充填されていない状態が確認できた。これはFig.3-2の縦断面観察結果と概ね一致していることがわかった。一方、Fig.3-2において△である板材に金属が充填されない場合は通電時間10, 14cycleで発生したが、横断面観察において板材に金属が充填されない場合は通電時間10, 14および16cycleであった。これは、縦断面観察では2か所だけの観察であったため、このような相違がでてしまったと考えられる。しかし、×となる板材が未熔融の場合は、縦断面観察と横断面観察の結果は一致することがわかった。また、縦断面観察において○である板材に金属が充填される場合と判断した通電時間でも、横断面観察においては△である板材に金属が充填されない箇所があることがわかった。

3-1-3 上部電極変位

3-1-3(a) 第1変位および第2変位

Fig.3-4に通電時間16cycleで行った溶接中の電極変位の例を示す。横軸に通電時間を、縦軸に電極変位を取っている。なお、電極変位は上部電極の変位量を測定したもので、上部電極が降下する場合をマイナスとしている。また本実験では、薄板に対して管材の方が電流密度が高いことが理由で、薄板が熔融する前に管材だけが熔融し、管材が圧潰する。これが要因で生じる1回目の大きな変位を第1変位と呼ぶこととする。また、上部電極変位が変化しない時刻を過ぎた後に生じる2回目の小さな変位を第2変位と呼ぶこととする。

3-1-3(b) 各通電時間における上部電極変位

Fig.3-5に板材にSUS304を使用した場合において、通電時間4～16cycleで溶接した際の

上部電極変位のグラフを示す。実験を2回行ったため、1回目を First time, 2回目を Second time とし、それぞれ(a)に1回目を、(b)に2回目の結果を示す。またグラフは上から通電時間 4cycle, 6cycle, …の順となっており、横軸が通電時間、縦軸が上部電極の変位を示している。通電時間が 6cycle 以上の条件では、通電開始から約 5cycle 後に上部電極が急激に降下し、約-1mm で一定になる事が分かる。また、通電時間 4cycle の条件では、上部電極はあまり降下せず、約-0.25mm で一定になることがわかる。これは、入熱が小さいために管材はあまり溶融せず、板材も変形しなかったためであると考えられる。また、通電時間 10cycle 以上では第2変位が確認できる。これは、板材が軟化することで下部電極の先端形状に沿って上部電極が降下したことが考えられる。そこで、第2変位が確認されない通電時間 8cycle 以下のデータとして通電時間 6cycle のデータを基に考えると、第1変位は約-0.689mm となる。最大の第2変位が確認された、通電時間 12cycle の最大変位が約-0.981mm であることから、第2変位は上記2つの値から約 0.292mm となる。ここで、第2変位を幾何学的に明らかにするために、Fig.3-6 に R 型電極と薄板断面の概略図を示す。R 型電極の先端は R25 の曲面であり、管材の外径が 8mm であることから上部電極が第2変位により下降する距離を x としたとき、x を求める式は

$$(x - 25)^2 + 4^2 = 25^2 \cdots (1)$$

となる。式(1)より薄板が軟化して上部電極が下降する距離 x は約 0.322mm となる。これは、第2変位の測定値と概ね一致することがわかる。

3-1-4 半サイクル毎の平均電気抵抗変化

3-1-4(a) 半サイクル毎の平均電気抵抗の算出方法

Fig.3-7 に本実験における溶接中の溶接部の電気抵抗の例を示す。電気抵抗は、電流と電

圧との比とすれば求めることができる。しかし、本実験では交流電源を使用しており、半サイクル毎に電流が休止するため、電気抵抗は定期的に無限大へと発散する。そこで、電流休止時の値を除外して、半サイクル毎の平均電気抵抗を求めた。その際、測定した電流値の絶対値において 0.2kA 以下の値を除外して使用した。平均した区間を Fig.3-7 の下部の図に赤線で示す。この方法を用いて、半サイクル毎の平均電気抵抗で整理したグラフが Fig.3-8 である。

3-1-4(b) 半サイクル毎の電気抵抗変化

Fig.3-8 に板材に SUS304 を使用した場合において、通電時間 4~16cycle で溶接した際の半サイクル毎の平均電気抵抗値のグラフを示す。実験を 2 回行ったため、1 回目を First time, 2 回目を Second time とし、それぞれ(a)に 1 回目を、(b)に 2 回目の結果を示す。また、グラフは上から通電時間 4cycle, 6cycle, … の順となっており、横軸が通電時間、縦軸が半サイクル毎の平均電気抵抗値を示している。グラフから、通電時間に関わらず電気抵抗値の変化が同様であることから、通電時間 16cycle を例に説明する。グラフから通電時間 0.5cycle で約 0.2mΩ を示し、5cycle まで抵抗値が減少した後、5cycle からさらに減少することがわかる。その後、6.5cycle 以降は約 0.1mΩ で安定することがわかる。抵抗値の減少については、5cycle までは板材の電気抵抗値の温度依存性に従って抵抗値が減少していくと考えられる。Fig.3-9 に電気抵抗値の温度依存性のグラフを示す⁴⁾。横軸に温度、縦軸に電気抵抗値を示している。また、化学組成より SUS304 は High alloy steel, OST2 と SPCC は Carbon steel に対応している。Fig.3-9 より、温度が上昇するにつれて、電気抵抗値は増加することがわかる。そのため、5cycle までは温度依存性に従って減少していく。また、5cycle では管材突出し部が圧潰したことによって、上部電極と下部電極の距離が縮まったためであると考えられる。

3-1-5 半サイクル毎の電流変化とジュール発熱量

3-1-5(a) 半サイクル毎の平均ジュール発熱量の算出方法

3-1-4 節で求めた半サイクル毎の平均電気抵抗値と同様の方法で求めた半サイクル毎の平均電流値を用いて、半サイクル毎の平均ジュール発熱量を求めた。Fig.3-10 に半サイクル毎の平均電流値の算出方法を示す。半サイクル毎の平均電流値は、電流値の絶対値が 0.2kA を超えた時刻から、0.2kA を下回る間を半サイクル毎に平均して求めた。この方法で求めた半サイクル毎の電流値を Fig.3-11 に示す。さらに、半サイクル毎の平均電流値を用い、ジュールの法則から求めた半サイクル毎の平均ジュール発熱量のグラフが Fig.3-12 である。

3-1-5(b) 半サイクル毎の平均電流値

Fig.3-11 に板材に SUS304 を使用した場合において、通電時間 4~16cycle で溶接した際の半サイクル毎の平均電流値のグラフを示す。実験を 2 回行ったため、1 回目を First time, 2 回目を Second time とし、それぞれ(a)に 1 回目を, (b)に 2 回目の結果を示す。またグラフは上から通電時間 4cycle, 6cycle, . . . の順となっており、横軸が通電時間、縦軸が半サイクル毎の平均電流値を示している。グラフから、通電時間に関わらず電流値の変化が同様であることから、通電時間 16cycle を例に説明する。通電時間 16cycle において、0.5cycle で約 4.5kA を示し、そこから 5cycle まで緩やかに電流値が上昇し、そこからさらに上昇し約 8kA で安定することがわかる。これは 3-1-3(b)節で述べた抵抗値と逆の傾向を示している。また、設定電流 9kA で実験しているにもかかわらず、通電初期は約 5kA と小さいのは溶接部の抵抗が大きいためであり、電源の外部特性の影響を受けたためと考えられる。

3-1-5(c) 半サイクル毎の平均ジュール発熱量

Fig.3-12 に板材に SUS304 を使用した場合において通電時間 4~16cycle で溶接した際の半サイクル毎の平均ジュール発熱量のグラフを示す。実験を 2 回行ったため、1 回目を First

time, 2回目を Second time とし, それぞれ(a)に1回目を, (b)に2回目の結果を示す. またグラフは上から通電時間 4cycle, 6cycle, . . . の順となっており, 横軸が通電時間, 縦軸が半サイクル毎の平均ジュール発熱量を示している. グラフから, 通電時間に関わらず平均ジュール発熱量の変化が同様であることから, 通電時間 16cycle を例に説明する. 通電時間 16cycle において, 5cycle まで上昇し, その後約 6kJ となる. ジュール発熱量は, 抵抗値と電流値から算出しているが, その際, 電流値の影響をより受けやすいためこのような電流値の変化の傾向と同様になると考えられる.

3-1-6 引張試験

3-1-6(a) 引張試験用試験片と通常試験片との比較

引張試験用の試験片と通常の試験片をそれぞれ同一の溶接条件においてそれぞれ溶接した際, 溶接結果に著しい差が生じていないか確認するため, 計測した溶接中の電流値および電圧値の比較を行った. Fig.3-13 に電流値, Fig.3-14 に電圧値について引張試験用試験片と通常試験片とを比較したグラフを示す. Fig.3-13 および Fig3-14 より, 両者の試験片における測定データの差が小さいことから, 以降, 引張試験用試験片と通常試験片を同様と取り扱う.

3-1-6(b)各通電時間における最大引張荷重

Fig.3-15 に板材に SUS304 を使用した場合において, 通電時間 4~16cycle で溶接した際の最大引張荷重のグラフを示す. グラフの横軸が通電時間, 縦軸が最大引張荷重を示している. また, 試験片は全て界面で破断していた. Fig.3-15 より通電時間 16cycle において最大引張荷重のピークとなり約 9.44kN となった. OST2 の管材の引張強さは Table2-1 より 440N/mm^2 であることから, 継手効率は 97%となった. 最大引張荷重の変化には規則性はみられないが, これは 3-1-2 節より通電時間の変化によって, 板側に金属が充填されない場合がみられ

るためであると考えられる。また, Fig.3-16 に示すように溶接機に向かって手前側(Front side)の管材と薄板との接着面の幅を Xmm, 奥側(Back side)の管材との接着面の幅を Ymm としその合計を管材と薄板との接着面の幅とし, その結果を Fig.3-17 のグラフに示す。グラフより, 通電時間が増すにつれて接着面の幅も増加し通電時間 16cycle で最大の接着幅 5.03mm となった。Fig.3-15 より通電時間 10cycle 以上で板材に金属が充填されない場合があるにもかかわらず, 通電時間 16cycle で最大引張荷重が確認されたのは, 接着面の幅が通電時間 16cycle が最も大きかったからであると考えられる。

3-2 板材に SPCC を使用した場合の実験結果

3-2-1 縦断面観察結果

板材に SPCC を使用し, 通電時間を 4~16cycle と変化させた際の断面観察写真の例を Fig.3-18(a)~(g)に示す。3-1-1 と同様に結果を表にまとめたものを Fig.3-19 に示す。同条件で実験を 2 回行ったため, 1 回目を First time, 2 回目を Second time とし, Fig.3-19(a)に 1 回目, Fig.3-19(b)に 2 回目の結果をそれぞれ示す。なお, 断面観察方法および, 断面観察評価方法は 3-1 節と同様である。1 つの通電時間に対し記号が 2 つあるのは, 溶接部の 2 か所を評価したためである。評価した 2 か所は, 前述のように溶接機に向かって手前側(Front side)および奥側 (Back side) である。Fig.3-17(a)および(b)より, 実験 1 回目および 2 回目で同様の結果を示し, 通電時間を変化させても板材の熔融状態は変化せず, どの条件でも板材に熔融部が得られないことがわかる。この原因に関しては第 4 章で考察する。

3-2-2 横断面観察結果

管材と薄板との接触面における板材の熔融状態について確認するために, 3-1-2 節と同様に, 溶接後の試験片を管材の上部から管材部分がなくなるまで削り込んでいき, 板側の熔融

状態を確認した。Fig.3-20に通電時間 16cycle で溶接した場合の接触面周辺の横断面観察写真を示す。断面観察方法は Fig.2-7 に示した方法で行った。板材に SPCC を用いた場合、Fig.3-19 に示した縦断面観察では、いずれの通電時間でも板材に金属が充填されない場合であるため、通電時間が最も長い通電時間 16cycle の場合を観察した。Fig.3-20 からわかるように、通電時間 16cycle の条件で板側に溶融した痕跡は確認されなかった。以上より、通電時間 4~16cycle の条件では SPCC 板には溶融部が得られないことが示唆される。

3-2-3 上部電極変位

Fig.3-21 に板材に SPCC を使用した場合において、通電時間 4~16cycle で溶接した際の上部電極変位のグラフを示す。実験を 2 回行ったため、1 回目を First time, 2 回目を Second time とし、それぞれ(a)に 1 回目、(b)に 2 回目の結果を示す。また、グラフは上から通電時間 4cycle, 6cycle, ... の順となっており、横軸が通電時間、縦軸が上部電極変位を示している。通電時間が 6cycle 以上の条件では、通電開始から約 5cycle 後に上部電極が急激に降下し、約-0.7mm で一定になる事が分かる。また、通電時間 4cycle の条件では、上部電極の降下量は小さく、約-0.12mm で一定になることがわかる。これは、入熱が小さいために管材はあまり溶融せず、板材も変形しなかったためであると考えられる。また、通電時間 8cycle 以上では第 2 変位が確認できる。これは、板材が軟化することで下部電極の先端形状に沿って上部電極が降下したことが考えられる。そこで、第 2 変位が確認されない通電時間 6cycle 以下のデータとして通電時間 6cycle のデータを基に考えると、第 1 変位は約-0.466mm となる。最大の第 2 変位が確認された、通電時間 12cycle の最大変位が約-0.762mm であることから、第 2 変位は上記 2 つの値から約 0.296mm となる。管材の突出し長さを 1mm とし実験を行っているため、板材に SPCC を用いた場合では、管材が十分圧潰しなかったと考えられる。

3-2-4 半サイクル毎の平均電気抵抗変化

Fig.3-22 に板材に SPCC を使用した場合において、通電時間 4~16cycle で溶接した際の半サイクル毎の平均電気抵抗値のグラフを示す。実験を 2 回行ったため、1 回目を First time, 2 回目を Second time とし、それぞれ(a)に 1 回目, (b)に 2 回目の結果を示す。また、グラフは上から通電時間 4cycle, 6cycle, . . . の順となっており、横軸が通電時間、縦軸が半サイクル毎の平均電気抵抗値を示している。グラフから、通電時間に関わらず電気抵抗値の変化が同様であることから、通電時間 16cycle を例に説明する。通電時間 16cycle において、グラフから通電時間 0.5cycle で約 0.15mΩ を示し、そこから減少し、約 0.13mΩ でとなる。また管材が圧潰したと考えられる 5cycle での抵抗値の減少が小さいのは、管材突出し部の圧潰が不十分であり、上部電極と下部電極との距離があまり短縮されなかったためであると考えられる。通電時間 16cycle について説明したが、通電時間 8cycle のように 5cycle あたりでピークがでることもある。

3-2-5 半サイクル毎の電流変化とジュール発熱量

3-2-5(a) 半サイクル毎の平均電流値

Fig.3-23 に板材に SPCC を使用した場合において、通電時間 4~16cycle で溶接した際の半サイクル毎の平均電流値のグラフを示す。実験を 2 回行ったため、1 回目を First time, 2 回目を Second time とし、それぞれ(a)に 1 回目を, (b)に 2 回目の結果を示す。またグラフは上から通電時間 4cycle, 6cycle, . . . の順となっており、横軸が通電時間、縦軸が半サイクル毎の平均電流値を示している。グラフから、通電時間に関わらず電流値の変化が同様であることから、通電時間 16cycle を例に説明する。通電時間 16cycle において、0.5cycle で約 6kA を示し、そこから 5cycle まで電流値が上昇し、そこからさらに上昇し約 8kA で安定することがわかる。5cycle で管材が圧潰して溶接部の電気抵抗が減少するため、その影響で電流値は上昇したものと考えられる。また、設定電流 9kA で実験しているにもかかわらず、通電

初期は約 6kA と小さいのは溶接部の抵抗が大きいためであり、電源の外部特性の影響を受けたためと考えられる。

3-2-5(b) 半サイクル毎の平均ジュール発熱量

Fig.3-24 に板材に SPCC を使用した場合において、通電時間 4~16cycle で溶接した際の半サイクル毎の平均ジュール発熱量のグラフを示す。実験を 2 回行ったため、1 回目を First time, 2 回目を Second time とし、それぞれ(a)に 1 回目, (b)に 2 回目の結果を示す。また、グラフは上から通電時間 4cycle, 6cycle, . . . の順となっており、横軸が通電時間、縦軸が半サイクル毎の平均ジュール発熱量を示している。グラフから、通電時間に関わらず平均ジュール発熱量の変化が同様であることから、通電時間 16cycle を例に説明する。通電時間 16cycle において、5cycle まで上昇し、約 7kJ を示す。その後 8cycle まで減少し、約 6kJ で安定する。また、3-1-4 で述べたように、ジュール発熱量は、抵抗値と電流値から算出しているが、その際、電流値の影響をより受けやすいためこのような電流値の変化の傾向と似たものになると考えられる。

3-2-6 引張試験

3-2-6(a) 引張試験用試験片と通常試験片との比較

引張試験用試験片と通常試験片をそれぞれ同一の溶接条件においてそれぞれ溶接した際、計測した溶接中の電流値および電圧値に著しい差が生じていないか確認するため、それらの比較を行った。Fig.3-25 に電流値、Fig.3-26 に電圧値について引張試験用試験片と通常試験片とを比較したグラフを示す。Fig.3-25 および Fig.3-26 より、両者の試験片における測定データの差が小さいことから、以降、引張試験用試験片と通常試験片を同様と取り扱う。

3-2-6(b) 各通電時間における最大引張荷重

Fig.3-27 に板材に SPCC を使用した場合において，通電時間 4～16cycle で溶接した際の最大引張荷重のグラフを示す．また，試験片は全て界面で破断していた．グラフの横軸が通電時間，縦軸が最大引張荷重を示している．グラフより通電時間 16cycle において最大引張荷重のピークとなり約 8.49kN となった．OST2 の引張強さは $440\text{N}/\text{mm}^2$ であることから，継手効率は約 88% となった．通電時間の増加にともない最大引張荷重も増加することがわかる．3-1-6 節と同様の方法で求めた管材と板材との接着幅のグラフを Fig.3-28 に示す．グラフより通電時間の増加に伴い，管材と板材との接着幅も増加し通電時間 16cycle で最大の接着幅 4.47mm となる．Fig.3-27 より通電時間 16cycle で最大引張荷重となったのは，管材と板材との接着幅が大きいからであると考えられる．

第4章 考察

4-1 板材の鋼種の違いが溶融状態におよぼす影響

4-1-1 断面観察結果の比較

板材に SUS304 および SPCC を用いた際の板材の溶融状態を各材料間で容易に比較するため、Fig.3-2 および Fig.3-19 の結果を Fig.4-1 にまとめて示す。Fig.4-1(a)に板材に SUS304 を使用した場合を、(b)に板材に SPCC を使用した場合の結果を示す。(a)および(b)より、板材に SUS304 を使用した場合、通電時間 6cycle 以上で板材に溶融部が得られるが、SPCC では得られないことがわかる。このことから、通電時間 6cycle 以上の条件において、板材の違いによって溶融状態が異なることが分かる。この板材の溶融状態に影響を与える因子について、上部電極変位、半サイクル毎の電気抵抗値、および累積発熱量の観点から考察していく。

4-1-2 上部電極変位の比較

Fig.4-2 に通電時間 16cycle で溶接した際の板材が SUS304 の場合と SPCC の場合における上部電極変位のグラフを示す。3-1-3 節および 3-2-3 節より、上部電極変位の時間経過による変動は通電時間によらないことが明らかであることから、通電時間 16cycle を例に比較する。また、グラフは横軸が通電時間、縦軸が上部電極変位を示しており、黒色が SUS304 を、赤色が SPCC を示している。通電時間が 5cycle まではどちらも変化がなく、いずれの板材の場合でも管材の溶融は始まっていないと考えられる。5cycle 以降は板材に SUS304 を使用した場合は 8cycle、SPCC を用いた場合は 7cycle まで降下し、それ以降は緩やかに降下している。しかし、溶接終了時の 16cycle において、板材に SUS304 を使用した場合は約-0.8mm 降下しているのに対し、板材に SPCC を用いた場合では約-0.6mm 程度しか降下していない

ことがわかる。また、3-1-3 節および 3-2-3 節より、この場合の管材の圧潰量はそれぞれ 0.689mm および 0.466mm である。過去の研究²⁾より、管材が圧潰してから板材の溶融が始まることが明らかになっていることから、板材に SPCC を用いた場合では管材の圧潰量が小さいため、板材に溶融部が得られなかった可能性がある。

4-1-3 半サイクル毎の平均電気抵抗変化の比較

Fig.4-3 に通電時間 16cycle で溶接した際の板材が SUS304 の場合と SPCC の場合における、半サイクル毎の平均電気抵抗値のグラフを示す。3-1-4 および 3-2-4 節より、平均電気抵抗値の時間経過による変動は通電時間によらないことが明らかであることから、通電時間 16cycle を例に比較する。また、グラフは横軸が通電時間、縦軸が平均電気抵抗値を示しており、黒色が SUS304 を、赤色が SPCC を示している。グラフから、板材に SUS304 を使用した場合は通電時間 0.5cycle で約 0.2mΩ を示し、板材に SPCC を用いた場合は約 0.12mΩ と約半分程の抵抗値しかないことがわかる。これは Fig.3-9 より、初期抵抗が高合金鋼の方が炭素鋼よりも大きいためであると考えられる。また、5cycle までは、板材に SUS304 を使用した場合の方が大きな値を示しており、電気抵抗値が減少していくのに対して、板材に SPCC を用いた場合は増加していくことがわかる。過去の研究より、SUS304 鋼と SPCC 鋼の電気抵抗率および降伏応力が温度依存性に伴い変化する過程が異なるため、両鋼の溶接中の電気抵抗変化の傾向が異なることがわかっている。そのため、このような結果となったと考えられる。また、5cycle 以降では、どちらの条件も同様の変化を示し、約 0.1mΩ で安定する。

4-1-4 半サイクル毎の平均電流値の比較

Fig.4-4 に通電時間 16cycle で溶接した際の、板材が SUS304 の場合と SPCC の場合における、半サイクル毎の平均電流値のグラフを示す。3-1-5 および 3-2-5 節より、均電流値の時間

経過による変動は通電時間によらないことが明らかであることから、通電時間 16cycle を例に比較する。また、グラフは横軸が通電時間、縦軸が平均電流値を示しており、黒色が SUS304 を、赤色が SPCC を示している。グラフから、板材に SUS304 を使用した場合は通電時間 0.5cycle で約 5kA を示し、板材に SPCC を用いた場合は約 6kA と、板材に SUS304 を用いた場合の方が小さいのがわかる。これは Fig.4-3 より、初期抵抗が SUS304 の方が大きいことにより、このような結果となることがわかる。また、5cycle までは板材に SUS304 を使用した場合の方が小さな値を示しており、電気抵抗値と逆の変化の傾向を示している。その後、5cycle 以降で上昇しそこからどちらの条件も同様の変化を示し、約 8kA で安定する。

4-1-5 半サイクル毎の平均ジュール発熱量の比較

Fig.4-5 に通電時間 16cycle で溶接した際の、板材が SUS304 の場合と SPCC の場合における、半サイクル毎の平均ジュール発熱量のグラフを示す。3-1-5 および 3-2-5 節より、平均ジュール発熱量の時間経過による変動は通電時間によらないことが明らかであることから、通電時間 16cycle を例に比較する。また、グラフは横軸が通電時間、縦軸が平均ジュール発熱量を示しており、黒色が SUS304 を、赤色が SPCC を示している。グラフから、板材に SUS304 を使用した場合、板材に SPCC を用いた場合ともに 5cycle まで上昇し、その後約 6kJ で安定するのがわかる。どちらも半サイクル毎の平均電流値の変化傾向と似ていることがわかる。これは、発熱量が電流値の影響を受けやすいためであると考えられる。

4-1-6 累積発熱量の比較

Fig.4-5 に示した各板材の通電時間 16cycle における発熱量の値を、0.5~16cycle において、時刻ごとに積算したグラフを Fig.4-6 に示す。グラフは横軸が通電時間、縦軸が累積発熱量を示しており、黒色が SUS304 を、赤色が SPCC を示している。どちらの場合も同様の変化を示し、溶接終了時の 16cycle において、SUS304 を使用した場合は約 200kJ、SPCC を用い

た場合は約 197kJ を示し、差は小さいことがわかった。これは Fig.4-5 より、ジュール発熱量の変化の傾向が同様であり、差が小さいためであると考えられる。また、4-1-2 および 4-1-3 節より、板材に SPCC を用いた場合は SUS304 を用いた場合よりも管材の圧潰量が小さく、通电初期における電気抵抗が小さいため、管材を圧潰するのに十分な発熱量が得られず、板材に溶融部が得られないと考えられる。しかし、前述のように累積発熱量の差は小さいことから、熱伝導率が高い SPCC 板は、発生した熱が溶接部からその周辺の板材に伝導しやすく、あまり温度上昇していないと考えられる。そこで、板材の温度履歴について検討する。

4-1-7 板材の温度上昇の比較

Fig.4-7 に通电時間 10cycle で溶接した際の、板材が SUS304 の場合と SPCC の場合における、板材の温度履歴のグラフを示す。温度履歴の測定方法および測定位置は 2-8 節の通りであり、管材から 1mm 離れた板材の表面で測定を行った。グラフは横軸が経過時間、縦軸が温度を示しており、黒色が SUS304 を、赤色が SPCC を示している。また、サンプリング周期を短く設定するとノイズの影響が大きく温度履歴が測定できなかったため、サンプリング周期を長く設定し測定を行った。そのため、温度のピークが測定できていない可能性がある。グラフより、板材に SUS304 を用いた場合はピーク温度が約 328°C であるのに対し、板材に SPCC を用いた場合は約 185°C とその半分程度しかないのがわかる。Fig.4-8 と Fig.4-9 に各板材の熱伝導率と平均見掛比熱の温度依存性のグラフを示す⁴⁾。化学組成より、High alloy steel を SUS304、Pure iron および Carbon steel を SPCC とみなす。Fig.4-8 より、温度の上昇に伴って SPCC は熱伝導率が減少するが、SUS304 に比べて常に大きいことがわかる。そのため 4-1-5 および 4-1-6 節より、量板材で発熱量の差は小さいものの、板材の温度履歴には差がでてしまったと考えられる。また Fig.4-9 より、300°C 以上で SUS304 に比べて SPCC の方が比熱が大きく、温度上昇により多くの発熱量が必要であることがわかる。また、Table2-1 および Table2-3 より SUS304 よりも SPCC の方が融点も 100°C 近く高い。前述のように、SPCC の方が SUS304 より融点が高く熱伝導率および比熱も大きいことから、より多

くの発熱量が必要なにもかかわらず、同程度の発熱量しか得られなかったために、板材の温度上昇が小さかったと考えられる。そのため、板材に SPCC を用いた場合の方が管材の圧潰量が小さく、板材に溶融部を得られなかったと考えられる。

4-2 溶接性の検討

3章の結果より、板材に SUS304 を用いた場合と SPCC を用いた場合との溶接性を比較する。まず、板材の溶融の観点からは、板材に SUS304 を用いた場合は通電時間 6cycle 以上で溶融部が得られたが、それと同条件で溶接した場合、板材に SPCC を用いた場合には通電時間を変化させても溶融部が得られず、板材に SUS304 を用いた場合の方が板材に溶融部が得られるという観点では良好であると考えられる。また、継手強度の観点からは、板材に SUS304 を用いた場合では通電時間 16cycle で継手効率 97%、SPCC を用いた場合では通電時間 16cycle で継手効率 88%が得られ、板材に SUS304 を用いた場合の方が継手効率が高いことが確認された。以上より、本研究の溶接条件においては板材に SUS304 を用いた場合の方が溶接性が良好であると考えられる。

4-3 SPCC 板に溶融部を得るための溶接条件の検討

4-1 節より、SPCC 板に溶融部を得るためには、さらに多くの発熱量が必要なことがわかった。そこで、通電時間を増加させ累積発熱量を増加させること、突出し長さを短くして管材を通電開始から早い段階で圧潰させること、電極加圧力を低下させて通電初期の抵抗値を増加させ、管材の圧潰を促進することを試みた。Fig.4-10(a)に通電時間を増加させた場合、(b)に突出し長さを短くした場合、(c)に電極加圧力を低下させた場合の継手の縦断面観察結果を示す。(a)より通電時間 20cycle 場合では板材に溶融部が得られなかったことから、累積発熱量が不足していると考えられる。また、(b)より突出し長さ 0.5mm の場合も同様に板材に溶融部が得られなかったことから、管材の圧潰が不十分であると考えられる。また、(c)より通電時間 12cycle 以上の条件で△(板材に溶融部が得られるが金属が充填されない場合)

が得られたことから、板材に溶融部が得られることがわかった。Fig.4-11 に板材に SPCC を用い通電時間 16cycle で溶接した際の、電極加圧力 3kN の場合と電極加圧力 1kN の場合における上部電極変位のグラフを示し、Fig.4-12 に平均電気抵抗値のグラフを示す。また、グラフは横軸が通電時間、縦軸が上部電極変位、または平均電気抵抗値を示しており、黒色が電極加圧力 3kN の場合を、赤色が電極加圧力 1kN の場合を示している。Fig.4-11 および Fig.4-12 より、電極加圧力を低下させることで上部電極変位は増加し、管材の圧潰が始まる 5cycle までの通電初期の平均電気抵抗値が増加することがわかる。よって、電極加圧力を低下させることで抵抗値が増加し、発熱量が増加することで管材の圧潰が促進され板材に溶融部が得られたと考えられる。

第5章 結言

低炭素鋼管と各種鋼板との抵抗溶接性について検討した結果、以下の結論を得た。

- 1) 板材にステンレス鋼を用いた実験において、通電時間 6cycle 以上の場合に板材に溶融部が得られたが、通電時間 10cycle 以上の場合に金属が充填されない現象が生じた。
- 2) 板材に低炭素鋼を用いた実験において、通電時間を 4~16cycle と変化させても板材に溶融部が得られなかった。
- 3) 板材に低炭素鋼を用いた場合、ステンレス鋼を用いた場合と比較して発熱量の差は小さいが、板材の温度上昇が小さく、管材の圧潰量が小さくなった。
- 4) 板材に低炭素鋼を用いた場合、電極加圧力を低下させることで板材に溶融部が得られた。
- 5) 板材にステンレス鋼を用いた実験において、継手強度は通電時間 16cycle で最大値 9.44kN を示し、低炭素鋼を用いた実験に多おいて、継手強度は通電時間 16cycle で最大値 8.29kN を示した。

以上の結果より、板材に SUS304 を用いた場合において、通電時間 6cycle 以上で板材に溶融部が得られるが、通電時間 10cycle 以上の条件で板材に金属が充填されないことがわかった。また、板材に SPCC を用いた場合において、板材の電気抵抗値、熱伝導率および平均見掛比熱の温度依存性と、融点の影響により板材に溶融部が得られない。

参考文献

- 1) 奥田滝夫, 坂口章, 仲田周次, 中根豊, 松山欽一: 抵抗溶接現象とその応用第一編 スポット溶接 [上], 溶接学会抵抗溶接研究委員会(1981)p3
- 2) 貫井景介: 管材と薄板との抵抗溶接部の熔融状態におよぼす突出し長さの影響, 平成 29 年度, 修士論文
- 3) 西野悠司: 「配管設計」 実用ノート, 日刊工業新聞社(2017), 10
- 4) 日本金属学会編 改訂 4 版 金属データブック

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大学院工学研究科鈴木泰之教授，川上博士准教授，尾崎仁志助教に深く感謝します．また，中西栄徳准教授には大変お忙しい中，本論文の副査として時間を割いていただき深く感謝いたします．

また，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学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．

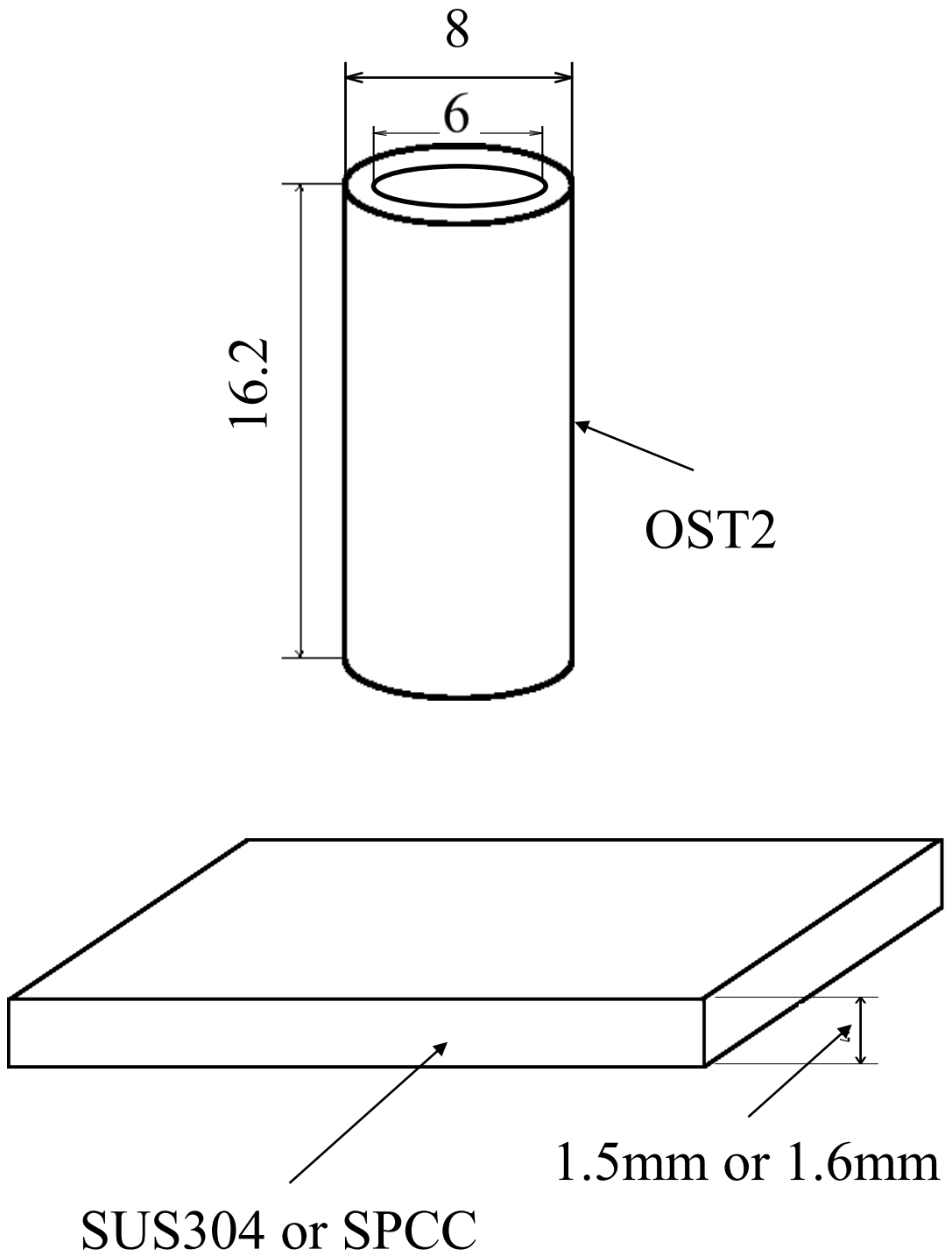


Fig.2-1 Schematic diagram of pipe and plate.

Table 2-1(a) Chemical compositions of OST2 used (mass%).

C	Si	Mn	P	S	Cu
0.08~ 0.18	0.10~ 0.35	0.30~ 0.60	≤ 0.035	≤ 0.035	≤ 0.20

Table 2-1(b) Physical properties of OST2 used.

Tensile strength[N/mm ²]
≤ 440

Table 2-2(a) Chemical compositions of SUS304 used (mass%).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.045	≤ 0.030	8.00 ~ 10.50	18.00 ~ 20.00

Table 2-2(b) Physical properties of SUS304 used.

Density[g/cm ²]	Melting point[°C]
7.93	1400~1450

Table 2-3(a) Chemical compositions of SPCC used (mass%).

C	Si	Mn	P	S
≤ 0.15	—	≤ 0.60	≤ 0.100	≤ 0.035

Table 2-3(b) Physical properties of SPCC used.

Density[g/cm ²]	Melting point[°C]
7.85	1530

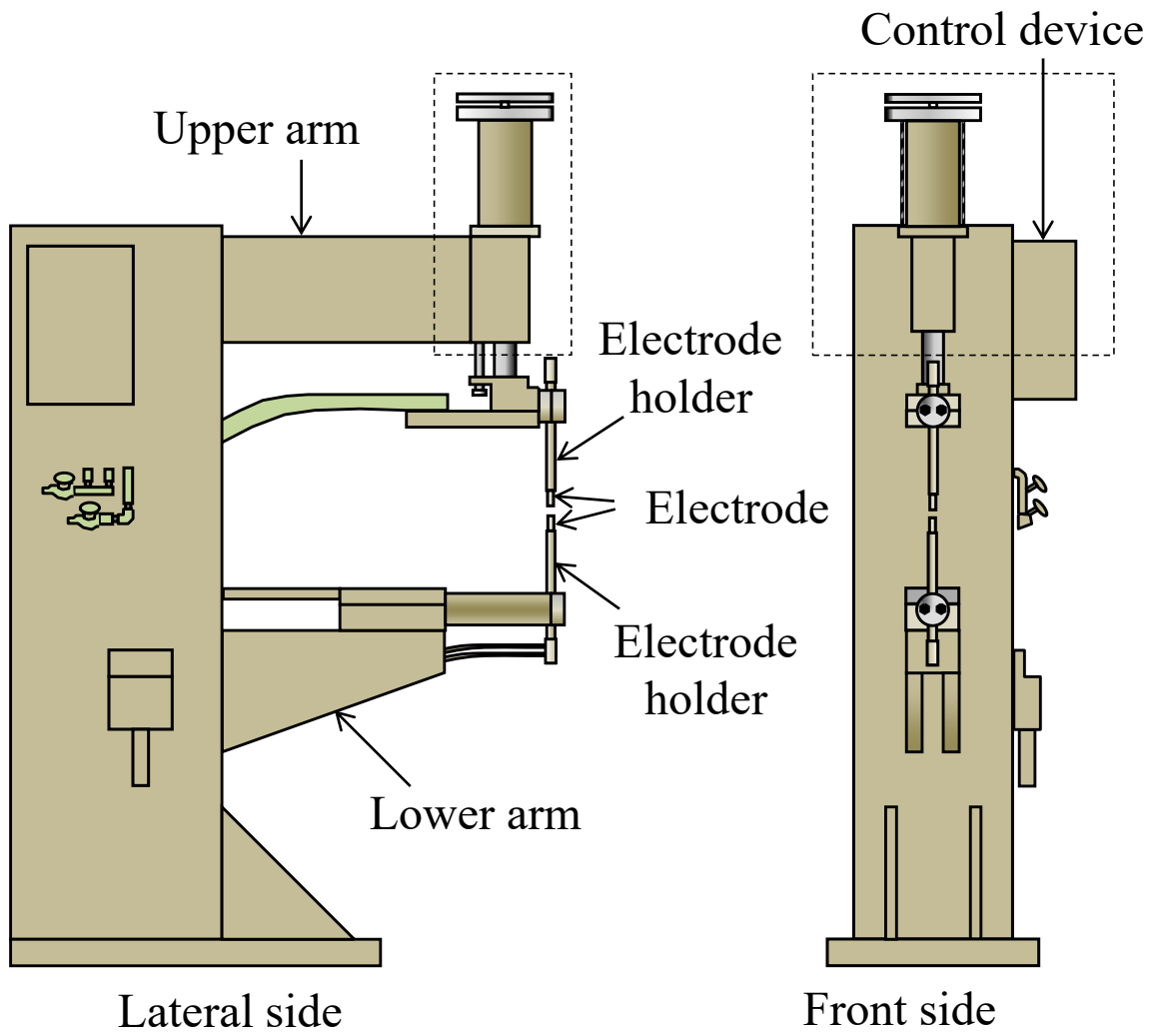


Fig.2-2 Schematic diagram of resistance welding machine.

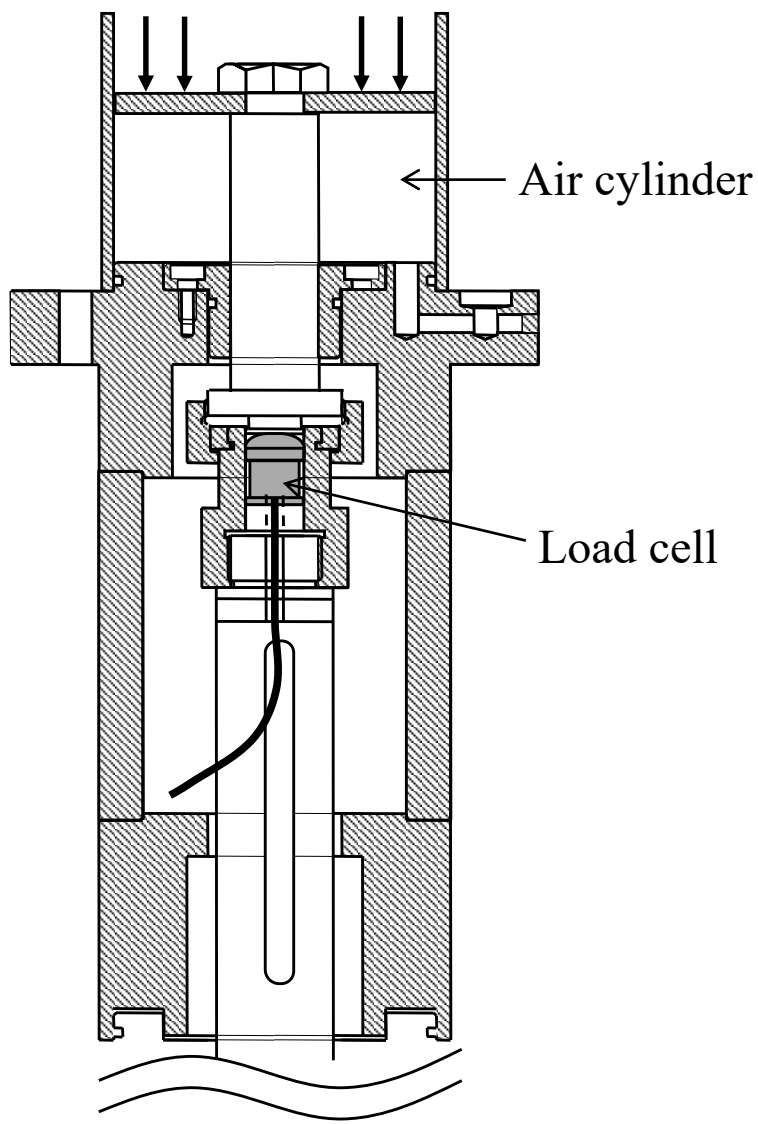


Fig.2-3 Schematic diagram of insertion position of load cell.

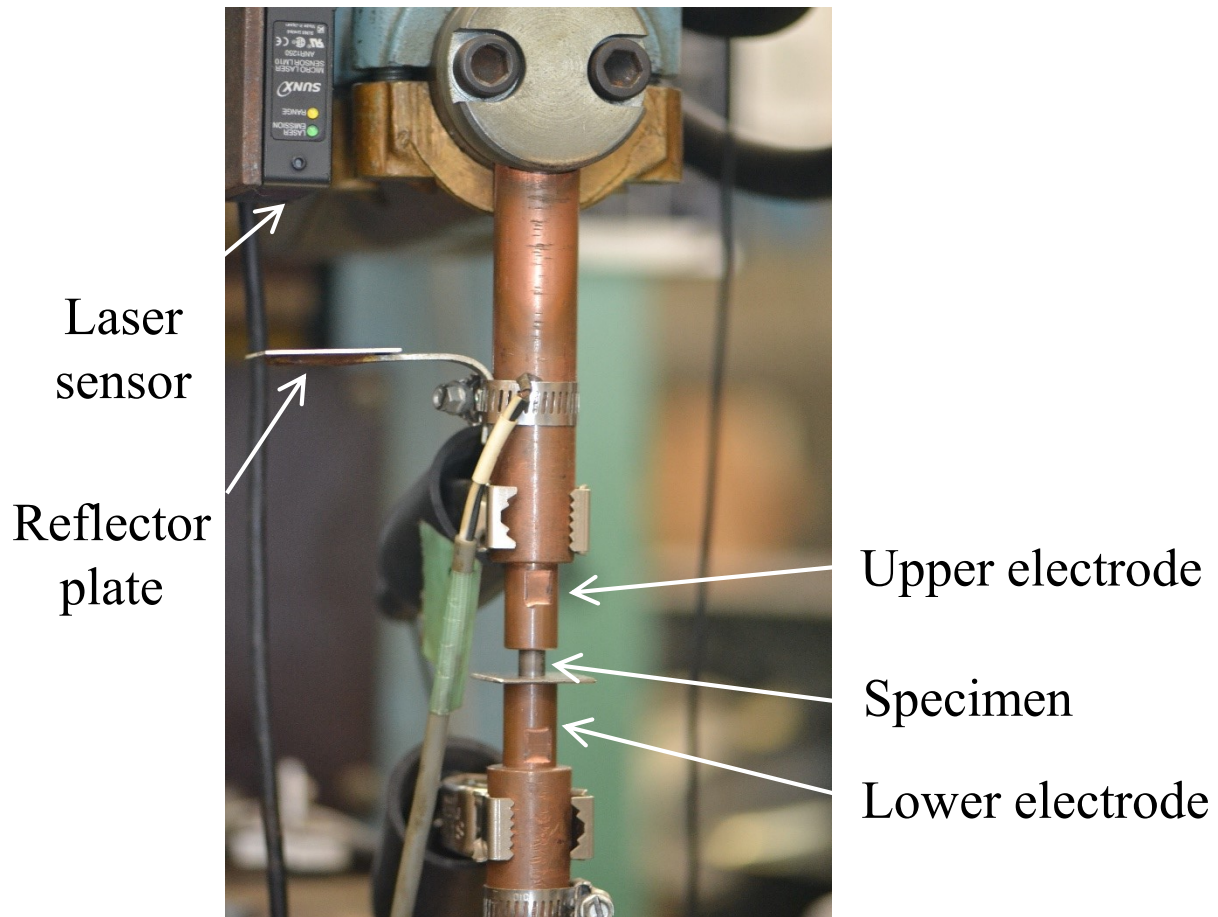


Fig.2-4 Measurement method of electrode displacement by using laser sensor.

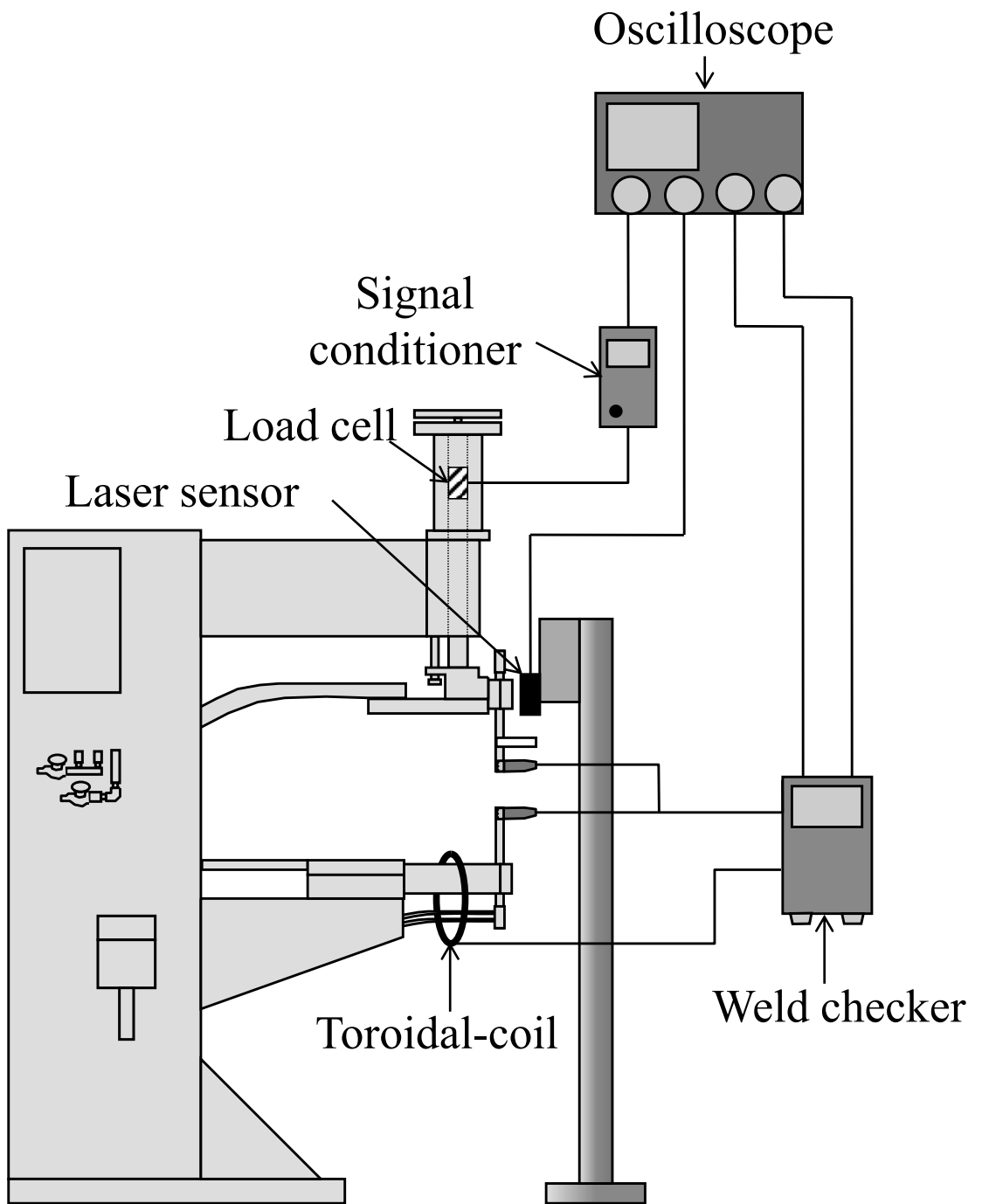


Fig.2-5 Schematic diagram of resistance welding machine after modification.

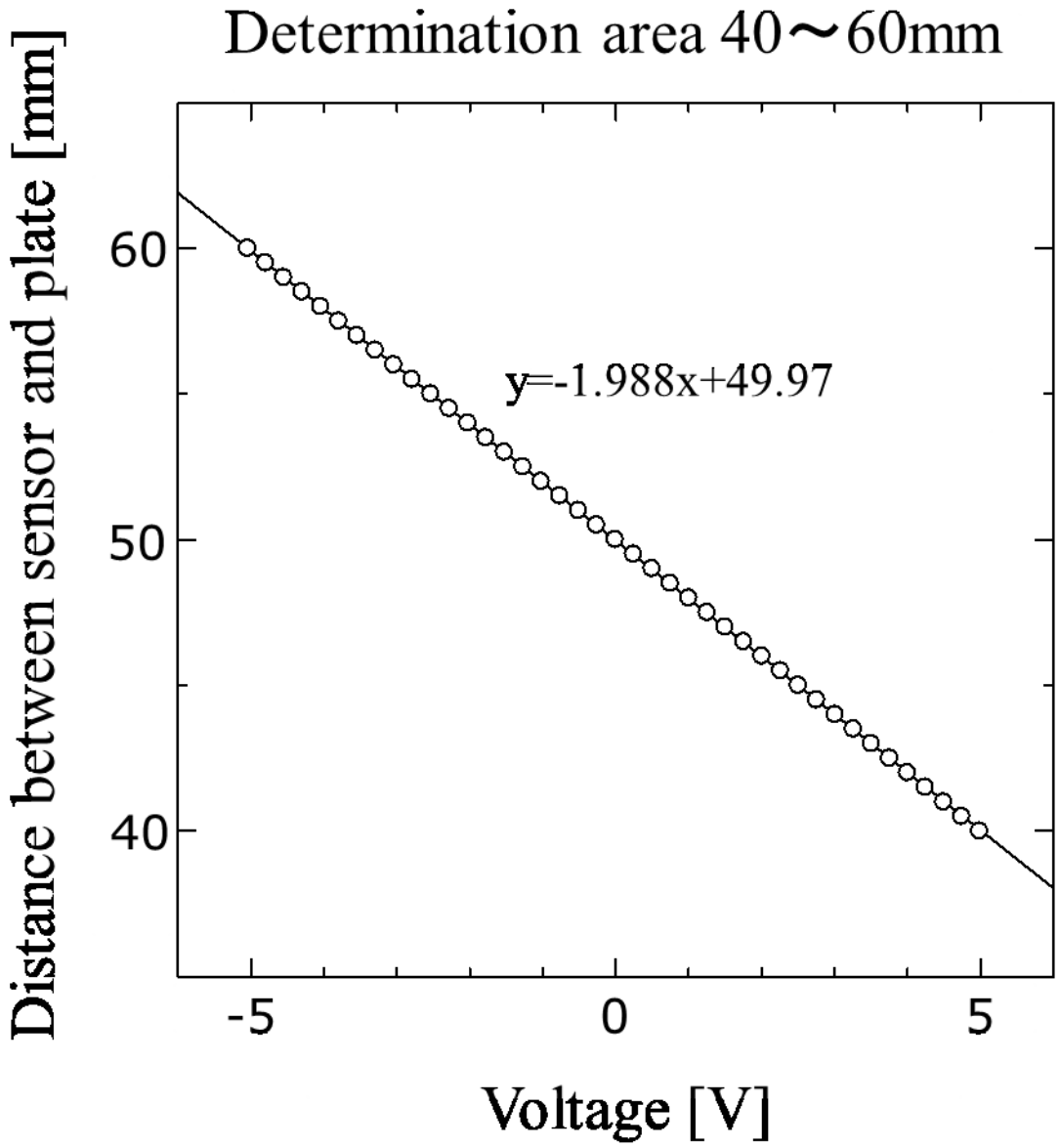


Fig.2-6 Relation between voltage and displacement sensor.

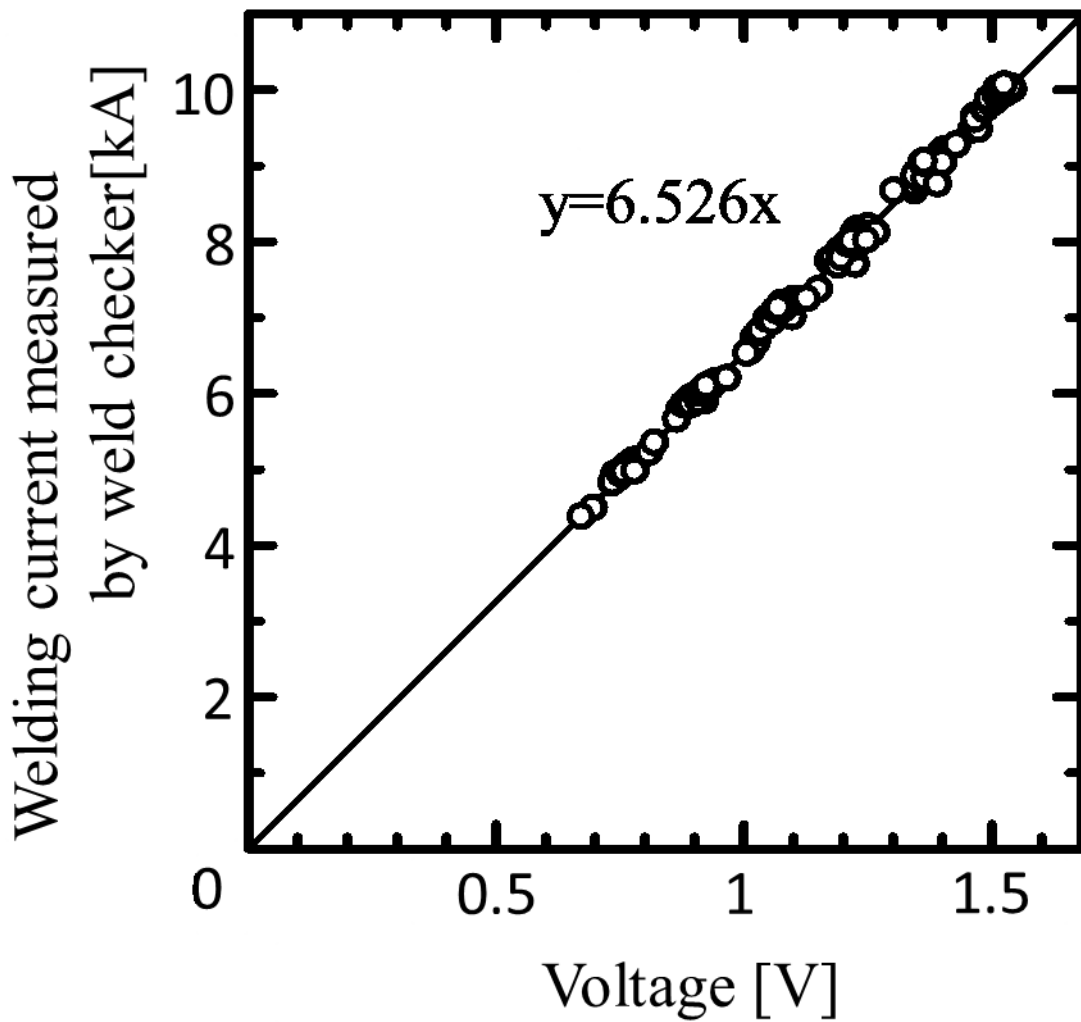


Fig.2-7 Relation between voltage and welding current measured by weld checker.

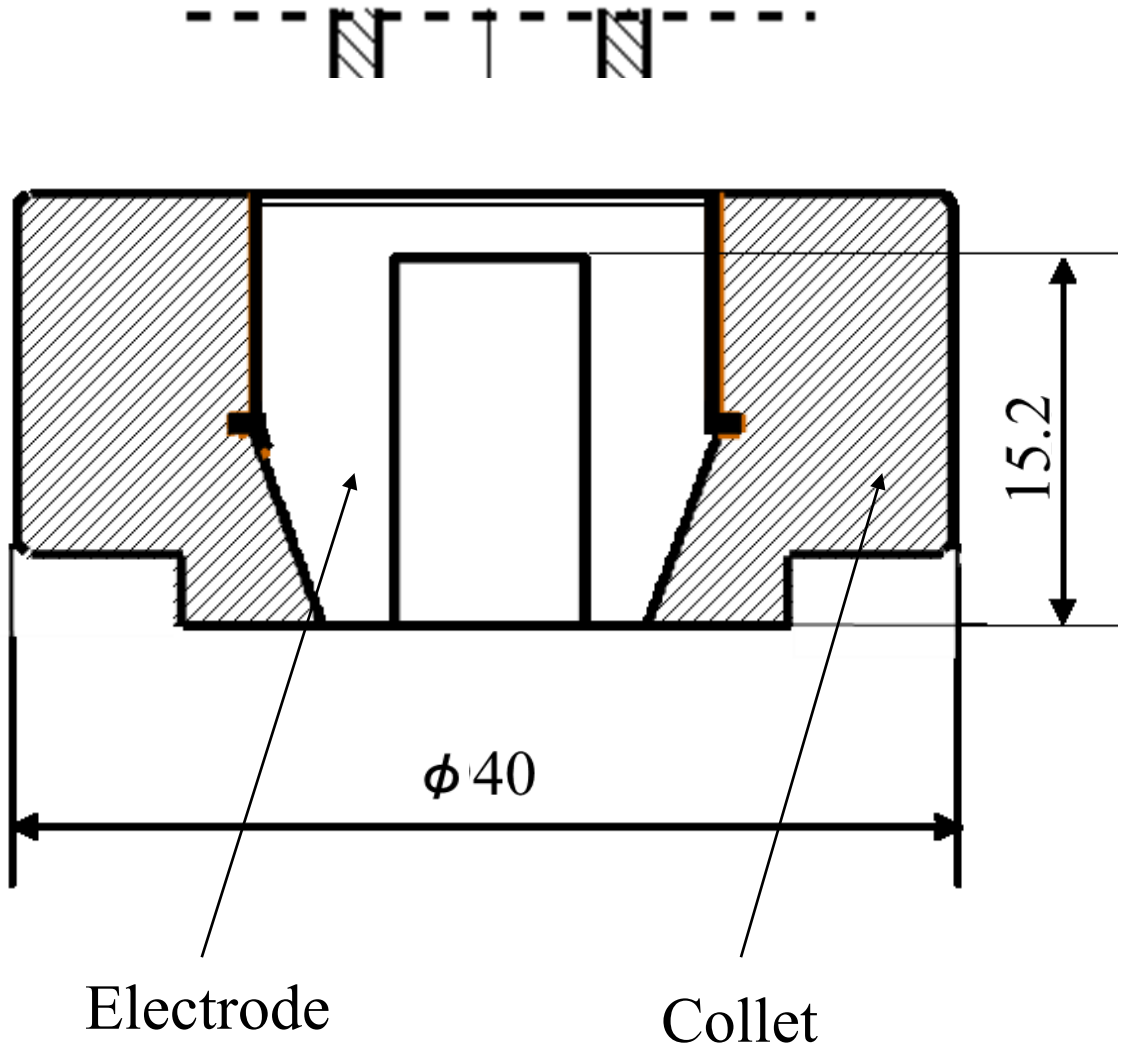


Fig.2-8 Schematic drawing of upper electrode.

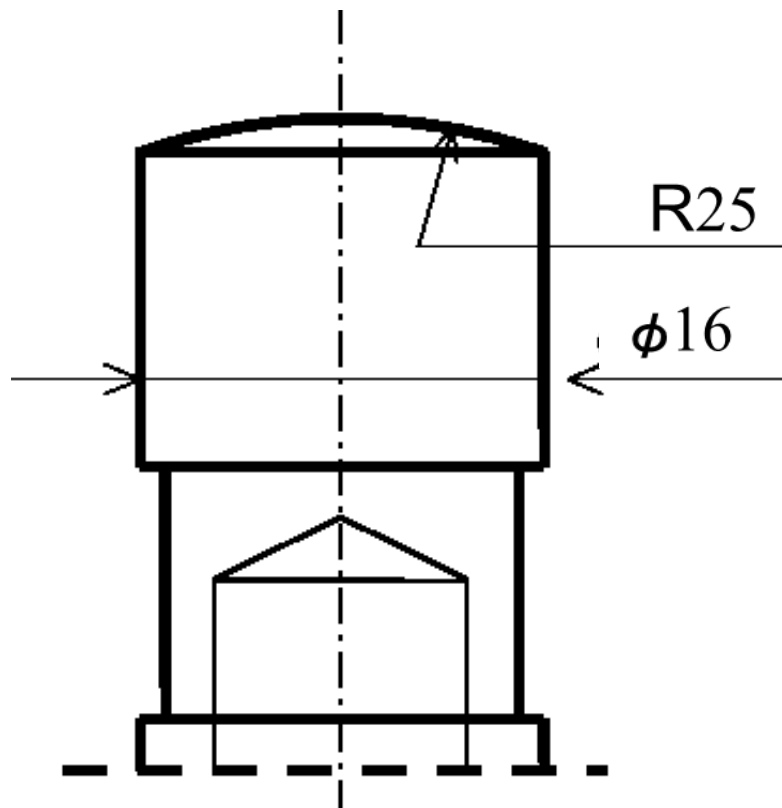


Fig.2-9 Schematic diagram of lower electrode.

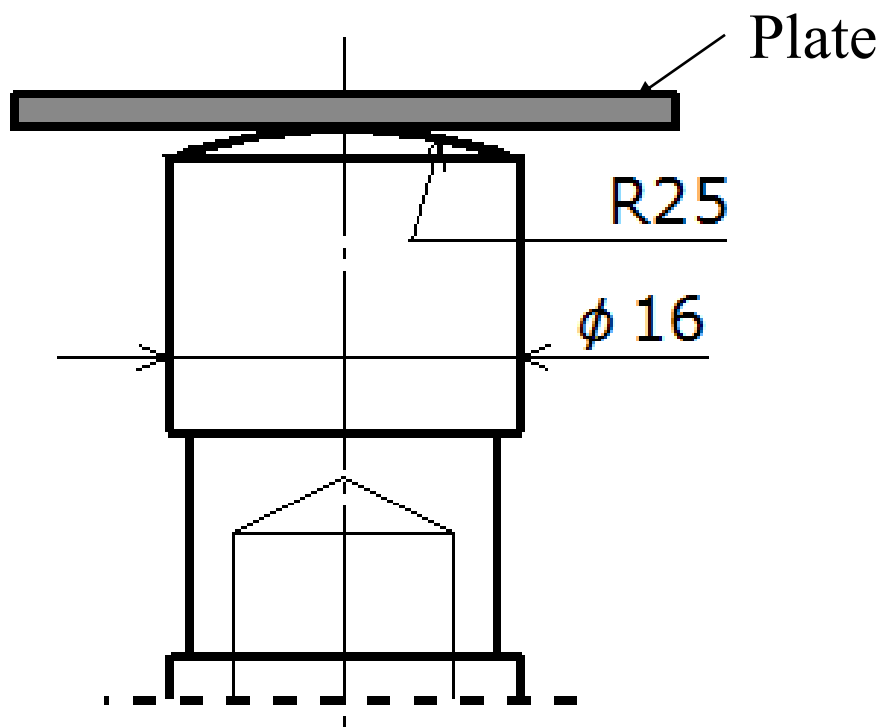
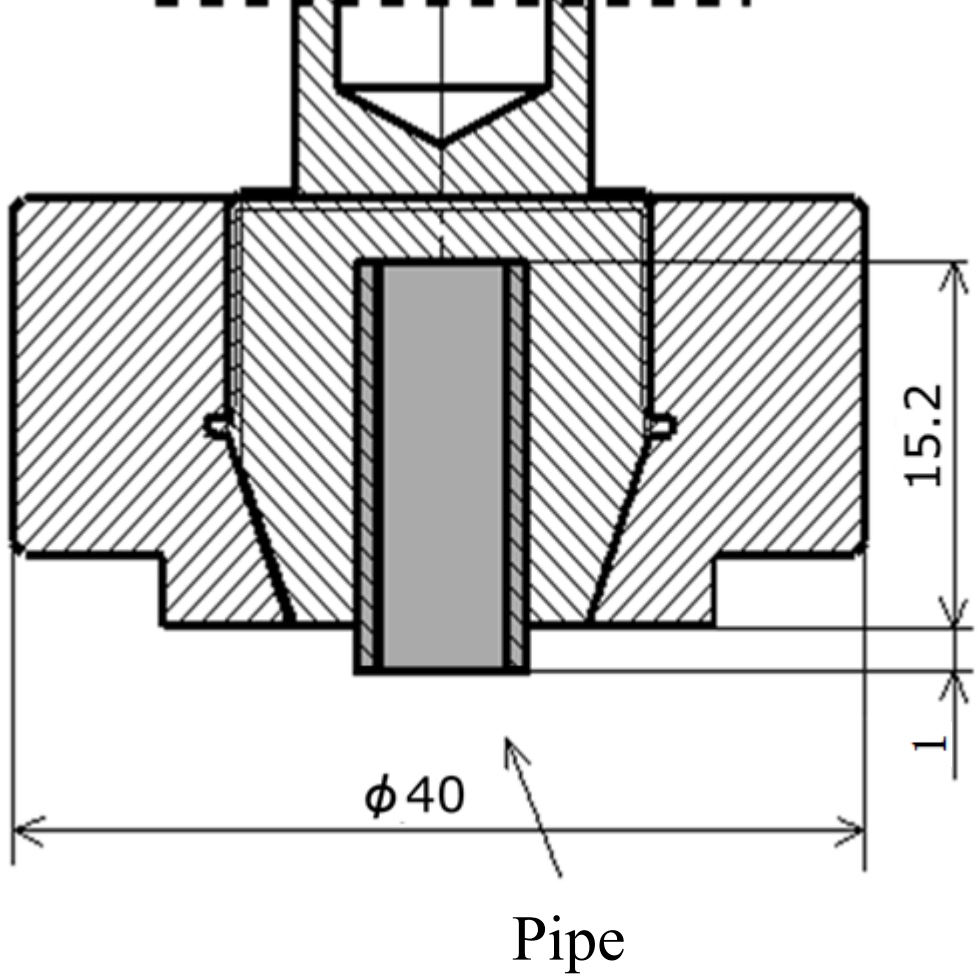


Fig.2-10 Schematic diagram of upper and lower electrode.

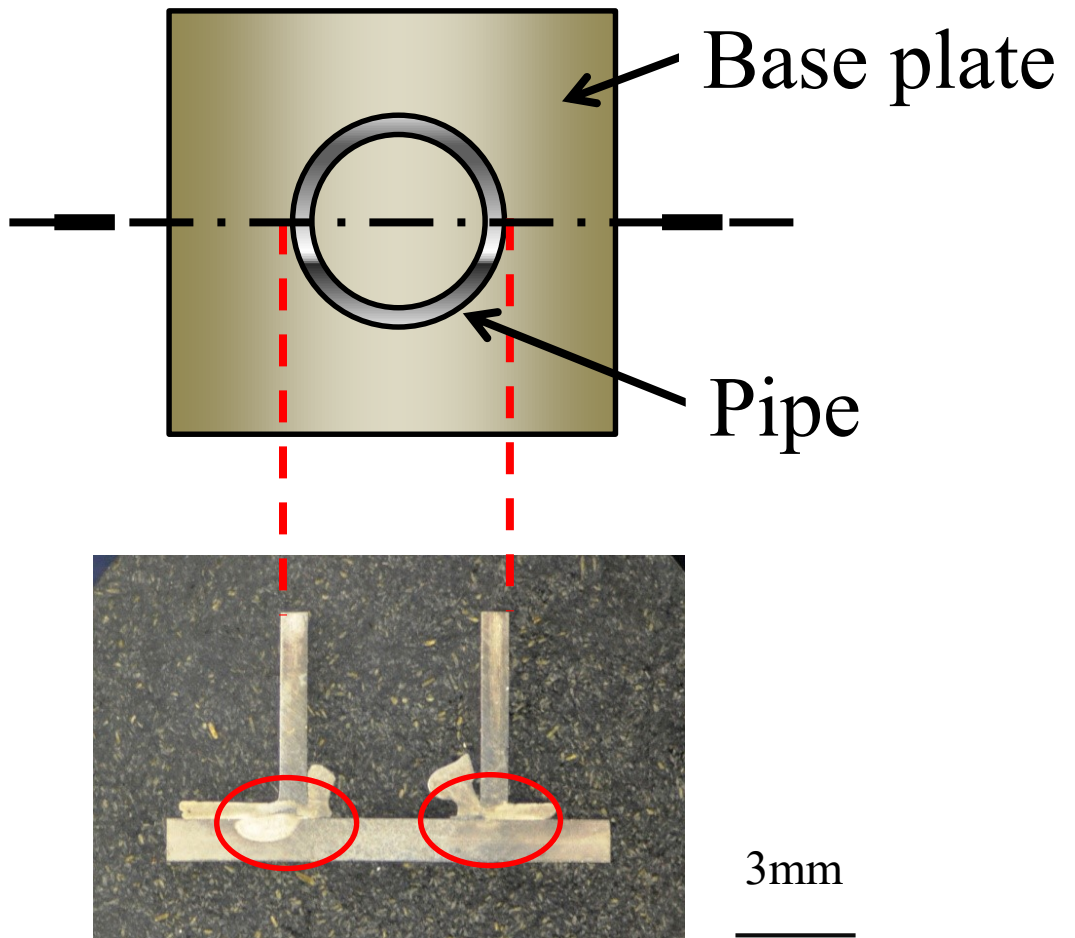
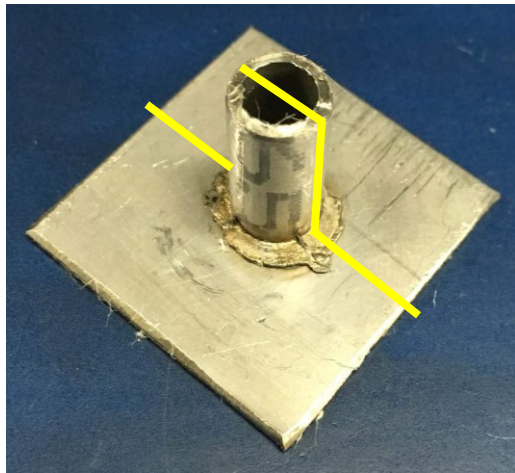
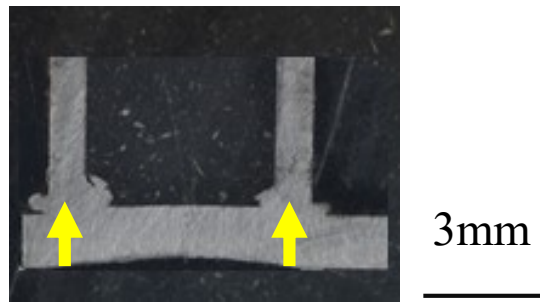


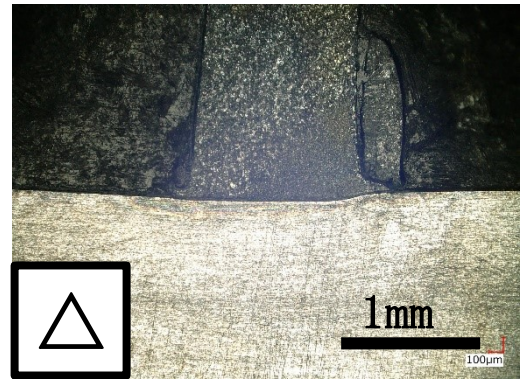
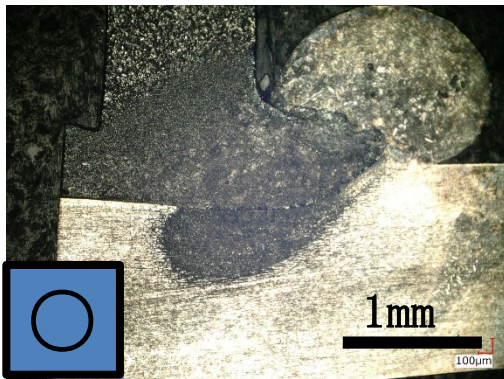
Fig.2-11 Appearance of specimen after welding and observation method of cross section.



(a)



(b)



(c)



Fig.2-12 Method for evaluating melting of sheet material.

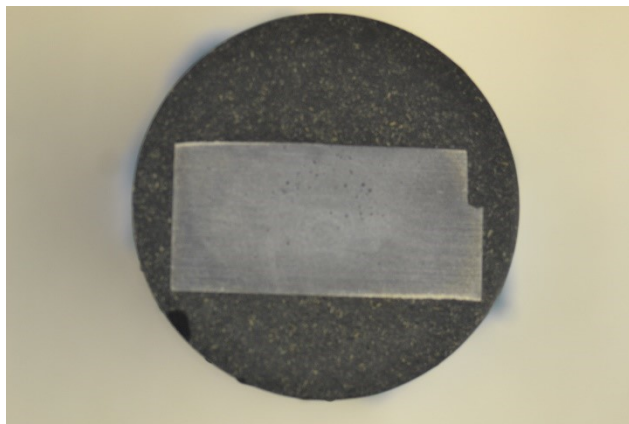
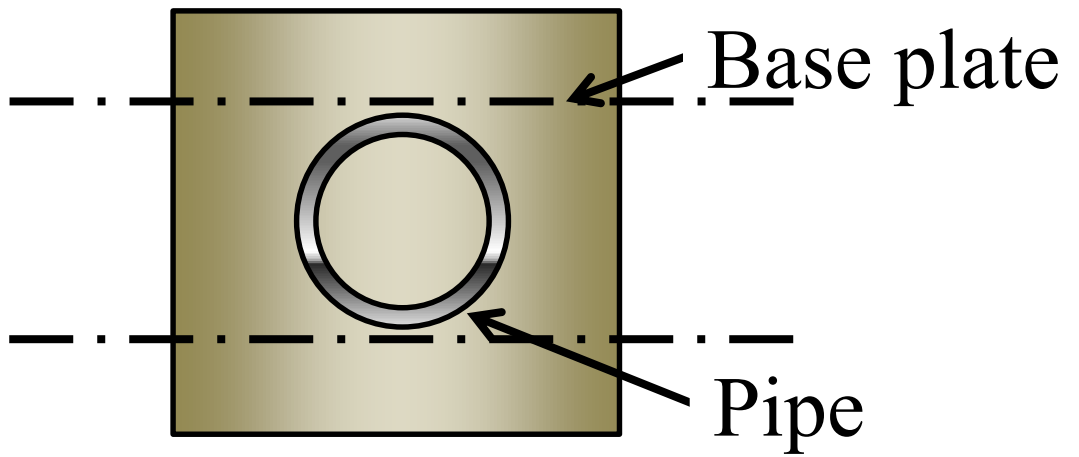
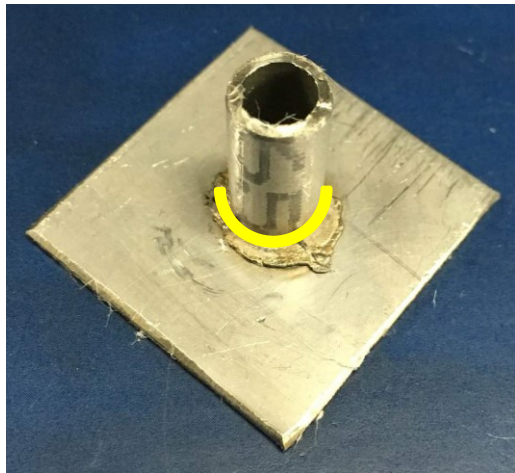


Fig.2-13 Appearance specimen after welding cross section observation method in the plane direction.

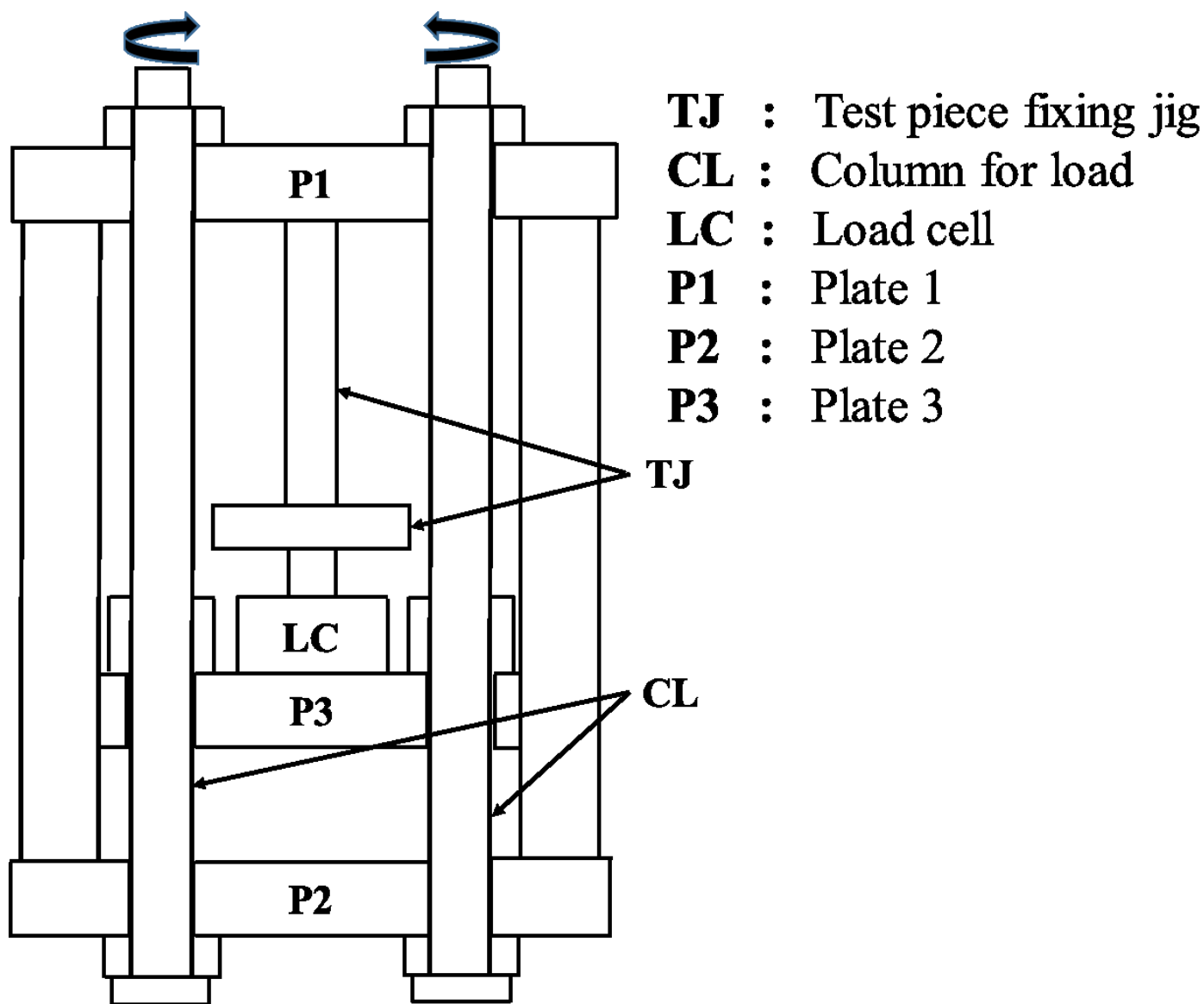


Fig.2-14 Schematic diagram of tensile testing machine.

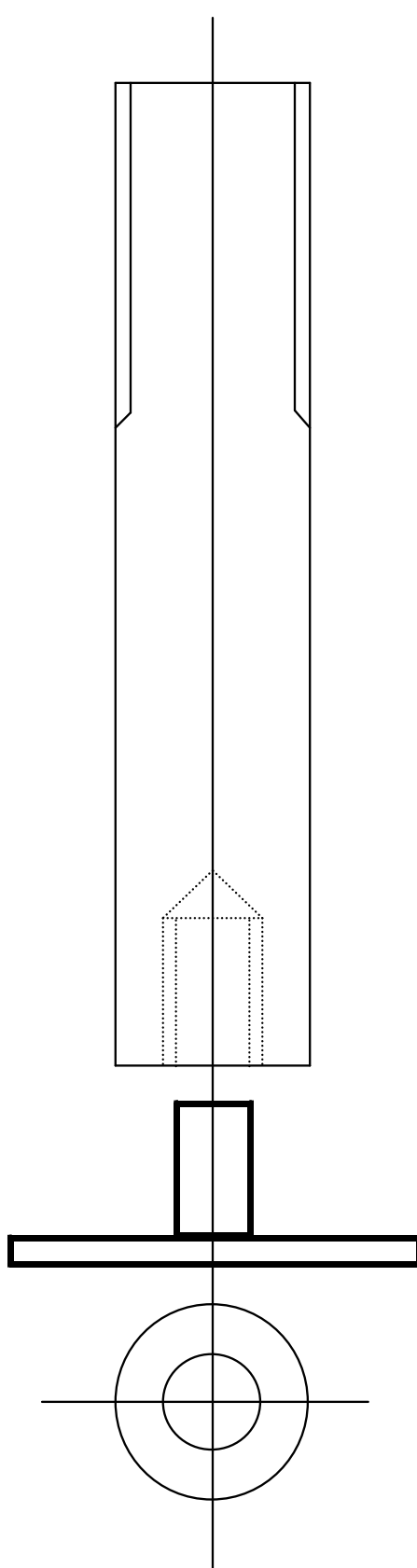


Fig.2-15 Schematic diagram of fixing jig for pipe side of specimen holder.

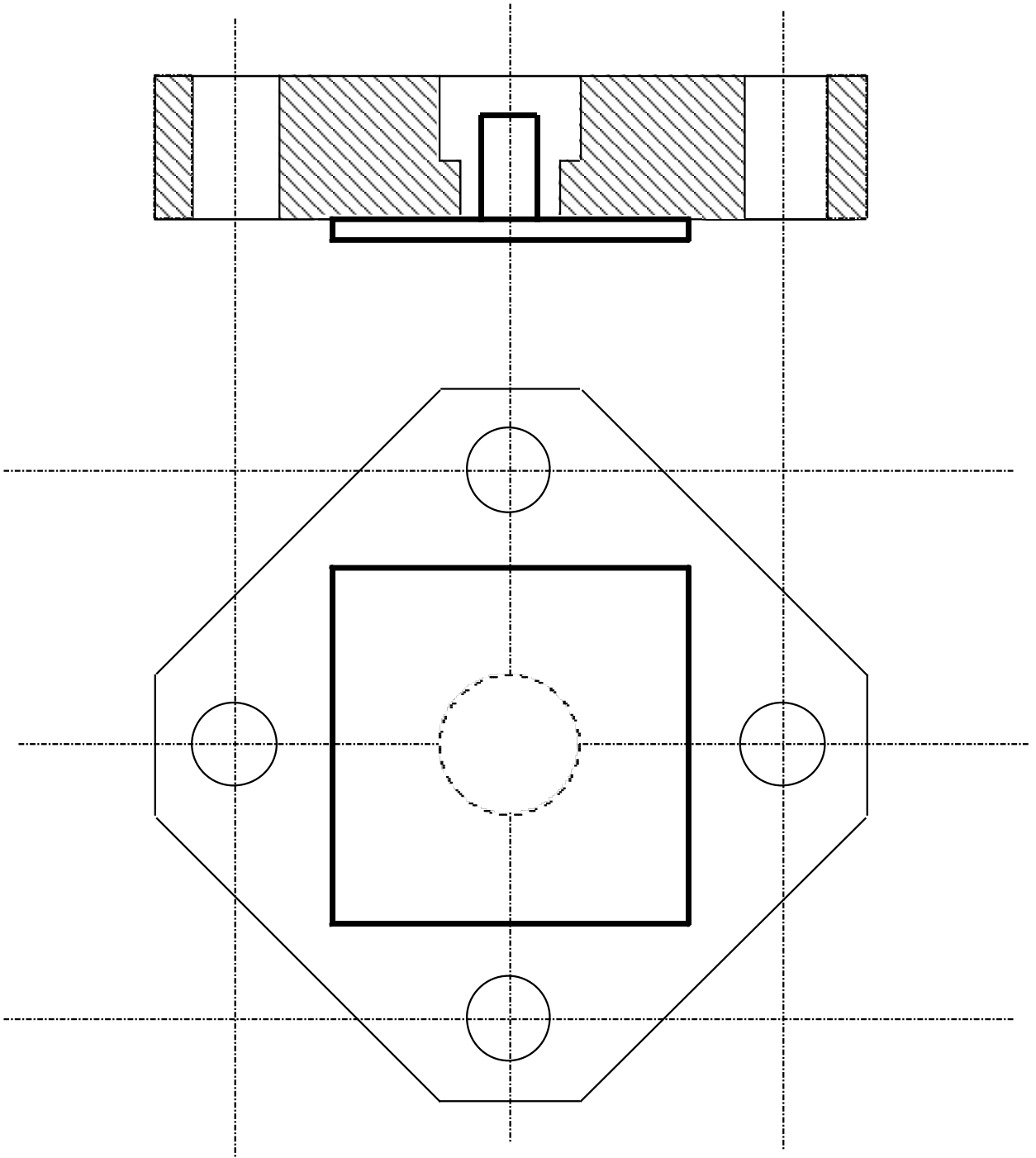


Fig.2-16 Schematic diagram of upper side of fixing jig for plate side of specimen.

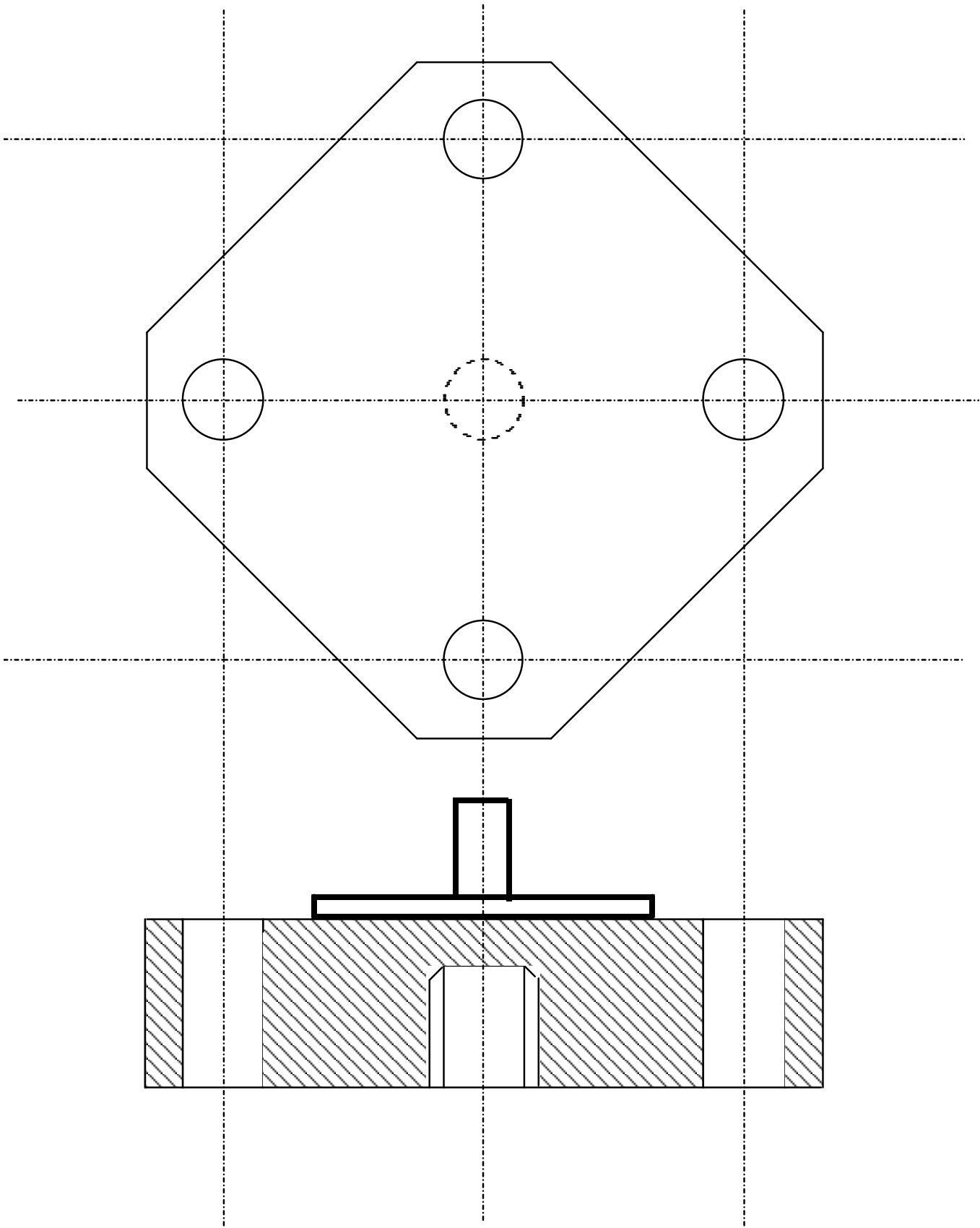


Fig.2-17 Schematic diagram of bottom side of fixing jig for plate side of specimen.

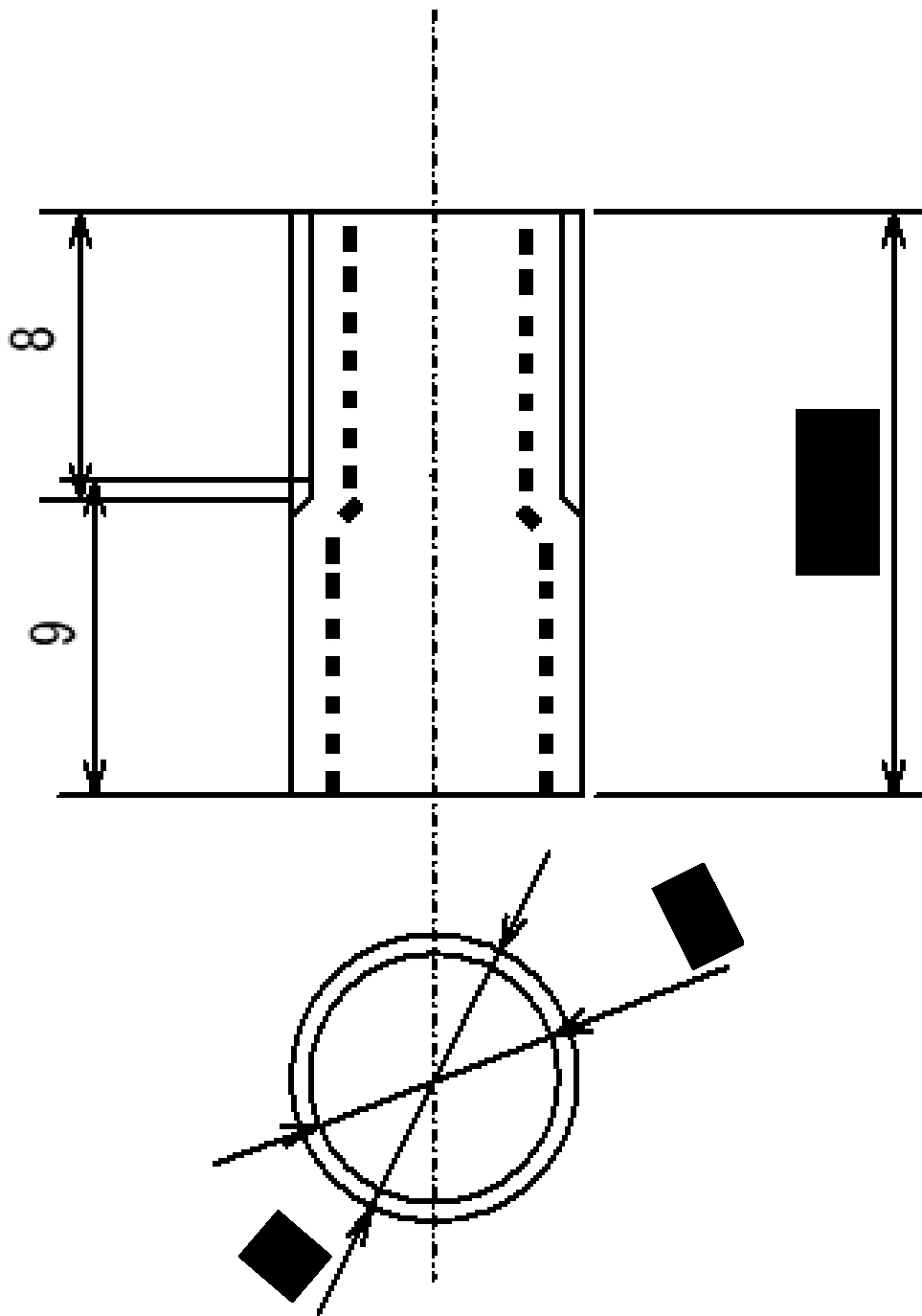


Fig.2-18 Schematic drawing of pipe for tensile test.

Maximum tensile load

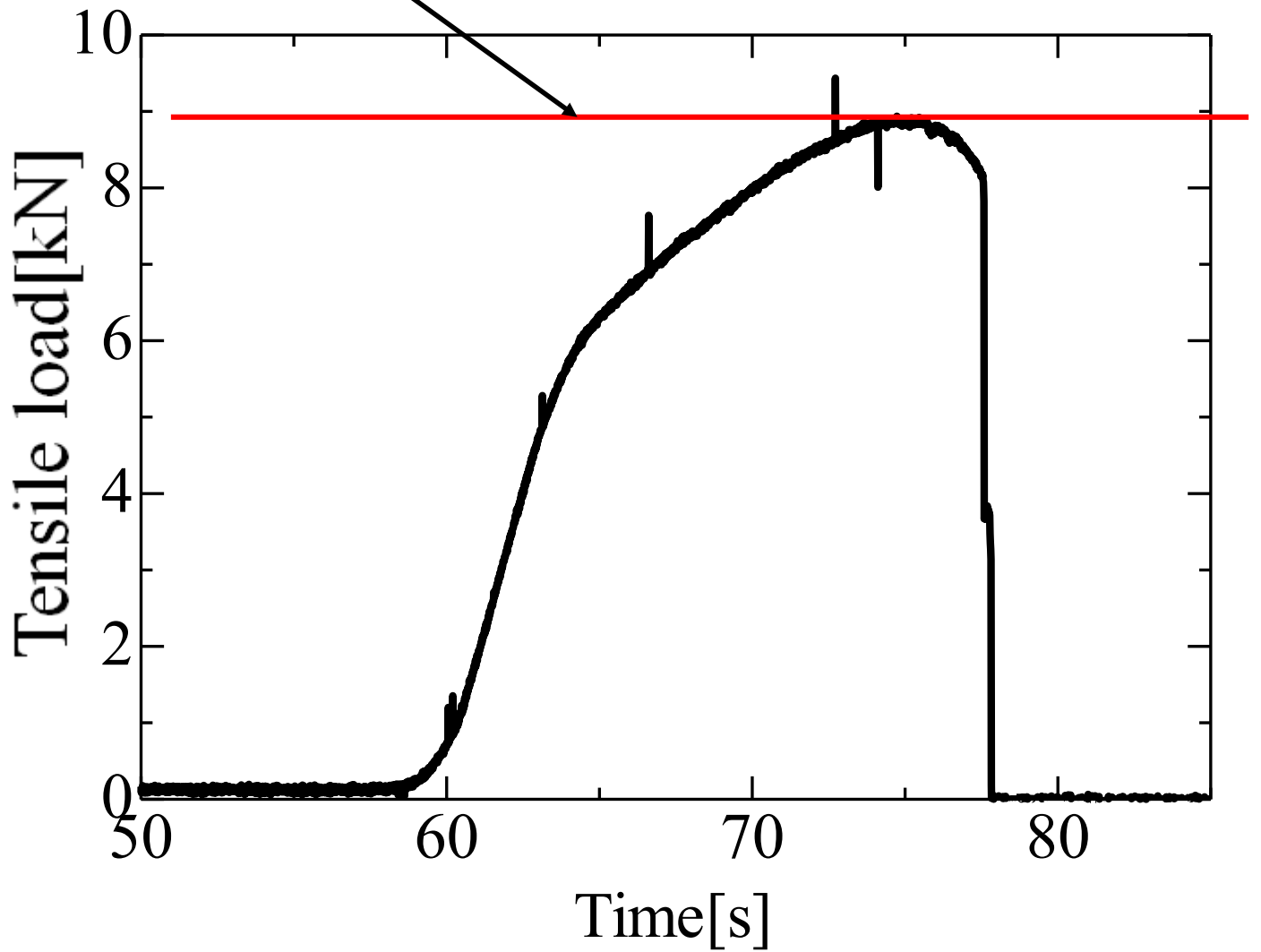


Fig.2-19 Result of Tensile test data.

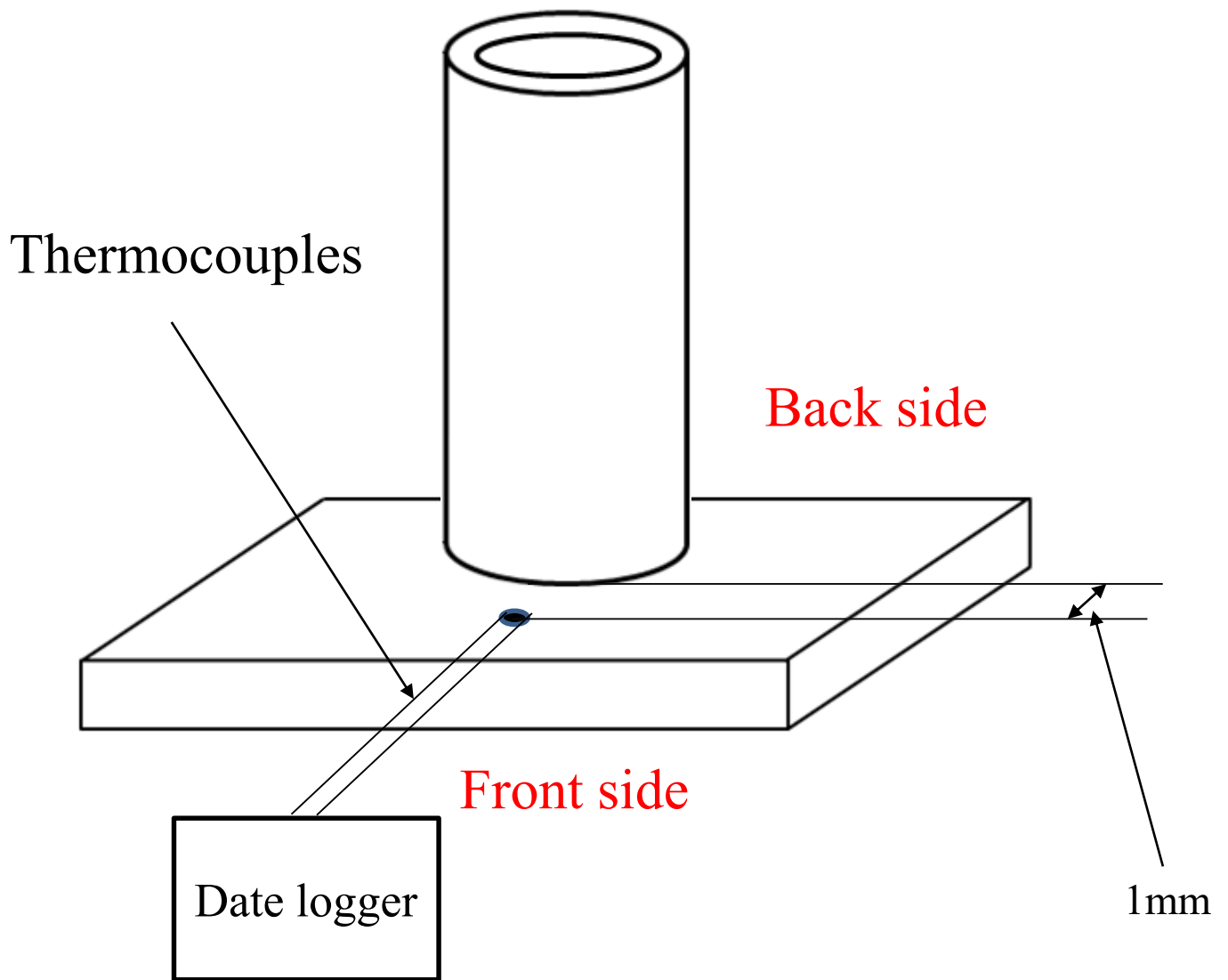


Fig.2-20 Schematic of experimental setup.



Fig.2-21 Appearance of data logger.

Front side

Back side



(a) 4cycle



(b) 6cycle



(c) 8cycle

Fig.3-1 Cross sectional observation on specimens after welding for different welding time.

Front side



Back side



(d) 10cycle



(e) 12cycle



(f) 14cycle

Fig.3-1 Continued.

Front side



Back side



(g) 16cycle

Welding time [cycle]		4	6	8	10	12	14	16
First time	Front	△	○	○	○	○	○	○
	Back	△	○	○	●	○	○	○

(a) First time

Welding time [cycle]		4	6	8	10	12	14	16
Second time	Front	△	○	○	○	○	○	○
	Back	△	○	○	○	○	●	○

(b) Second time

○: Molten △: Not molten

●: Insufficient filling of molten metal

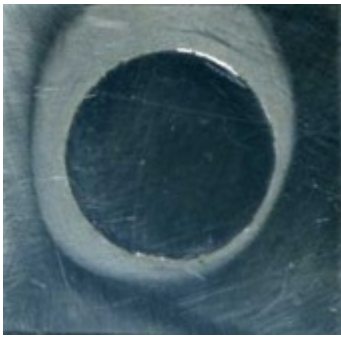
Fig.3-2 Evaluation results of cross sectional observation on specimens after welding for different welding time.



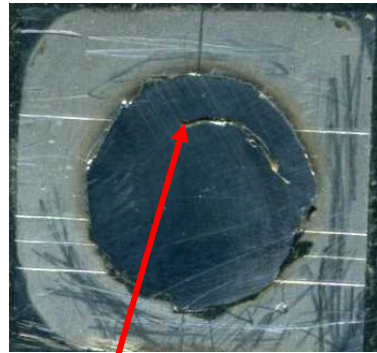
(a) 4cycle



(b) 6cycle



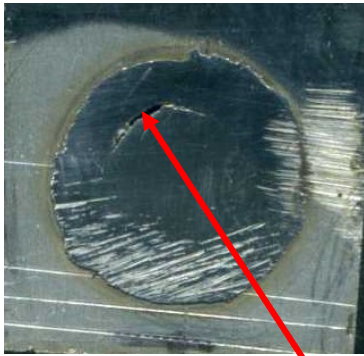
(c) 8cycle



Metal not filled

5mm

Fig.3-3 Side cross sectional observation of specimen after welding.



(f) 14cycle

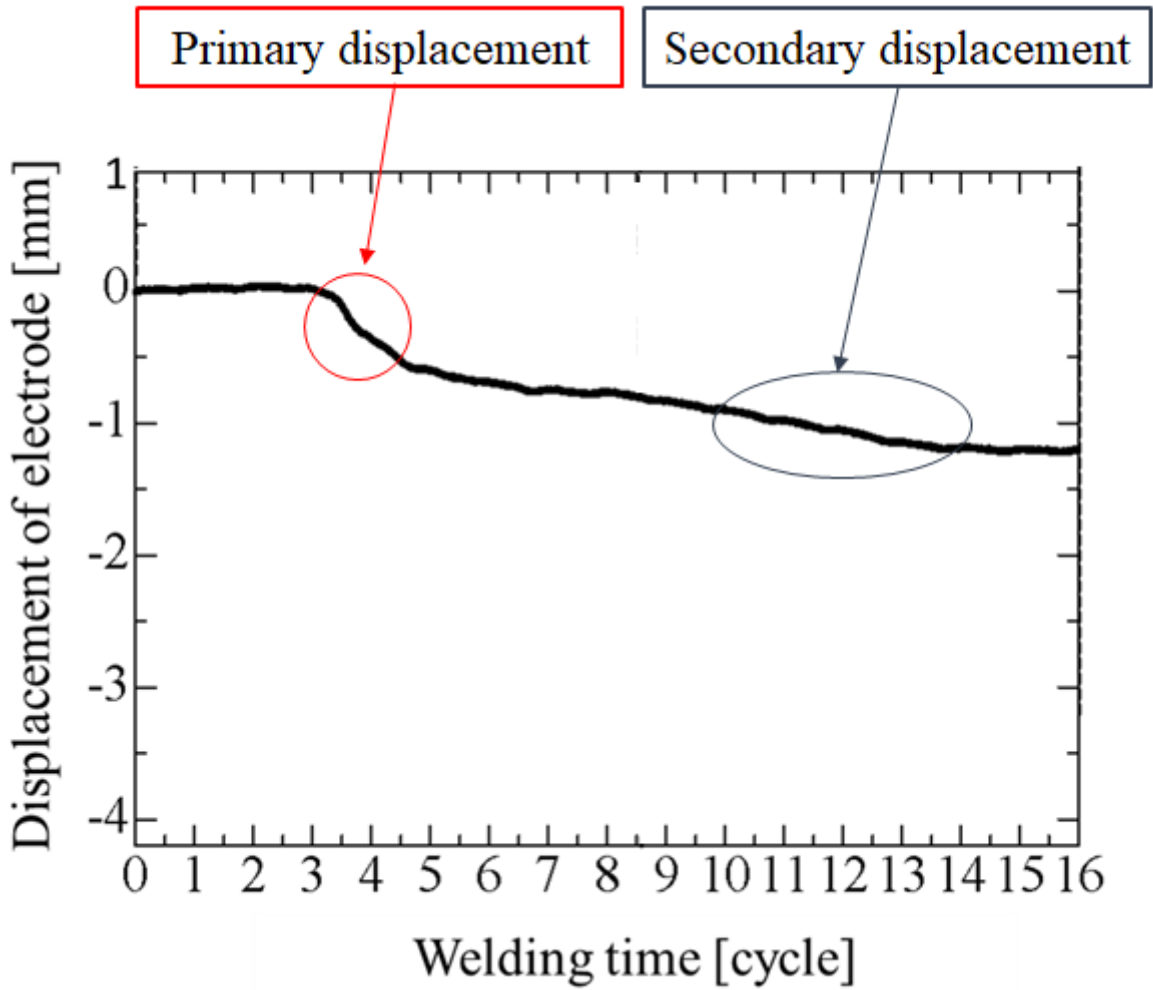


(g) 16cycle

Metal not filled

5mm

Fig.3-3 Continued.



*Welding time 16cycle

Fig.3-4 Example of electrode displacement measured during welding.

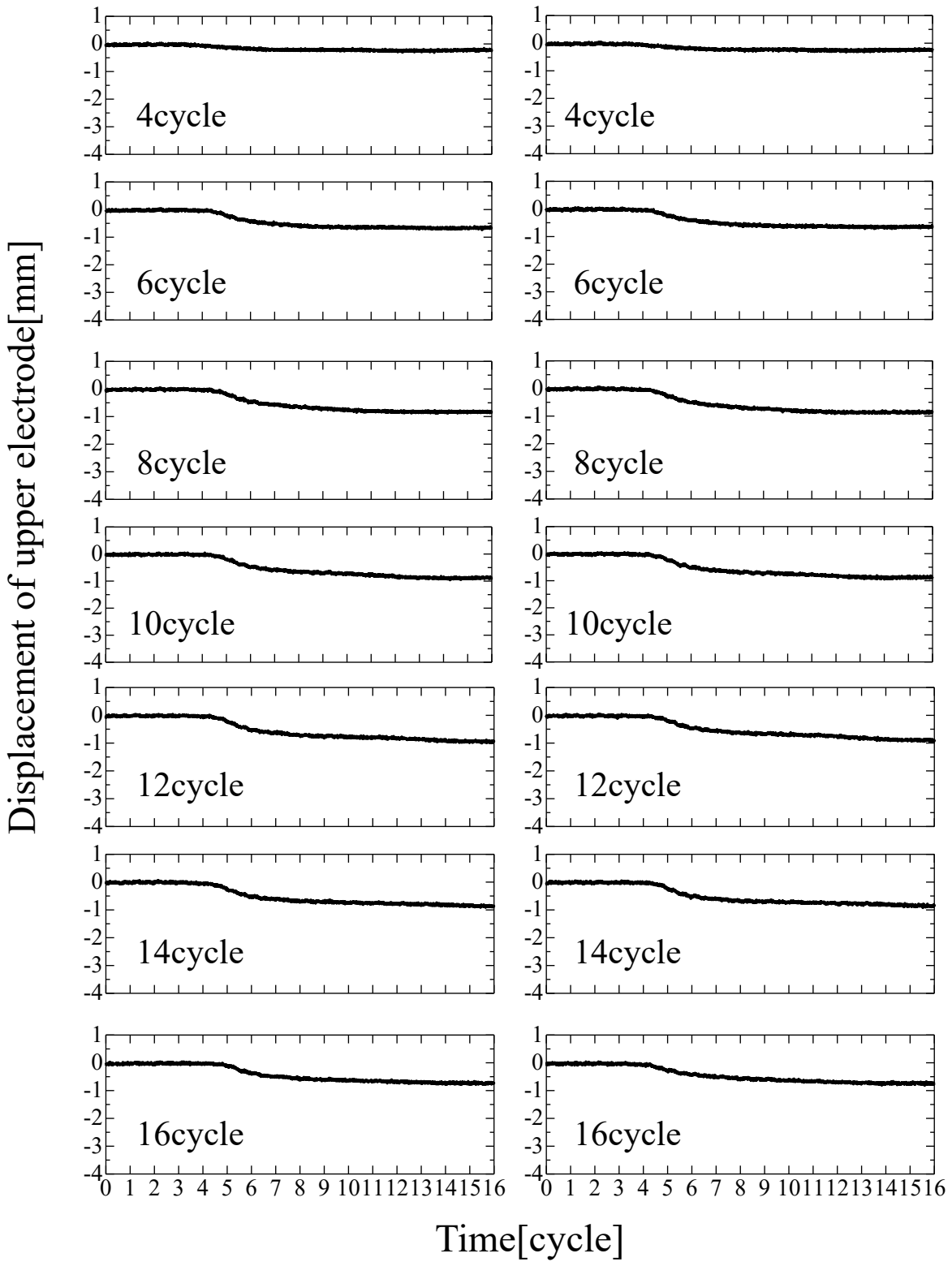


Fig.3-5 Displacement of upper electrode when using SUS304 plate.

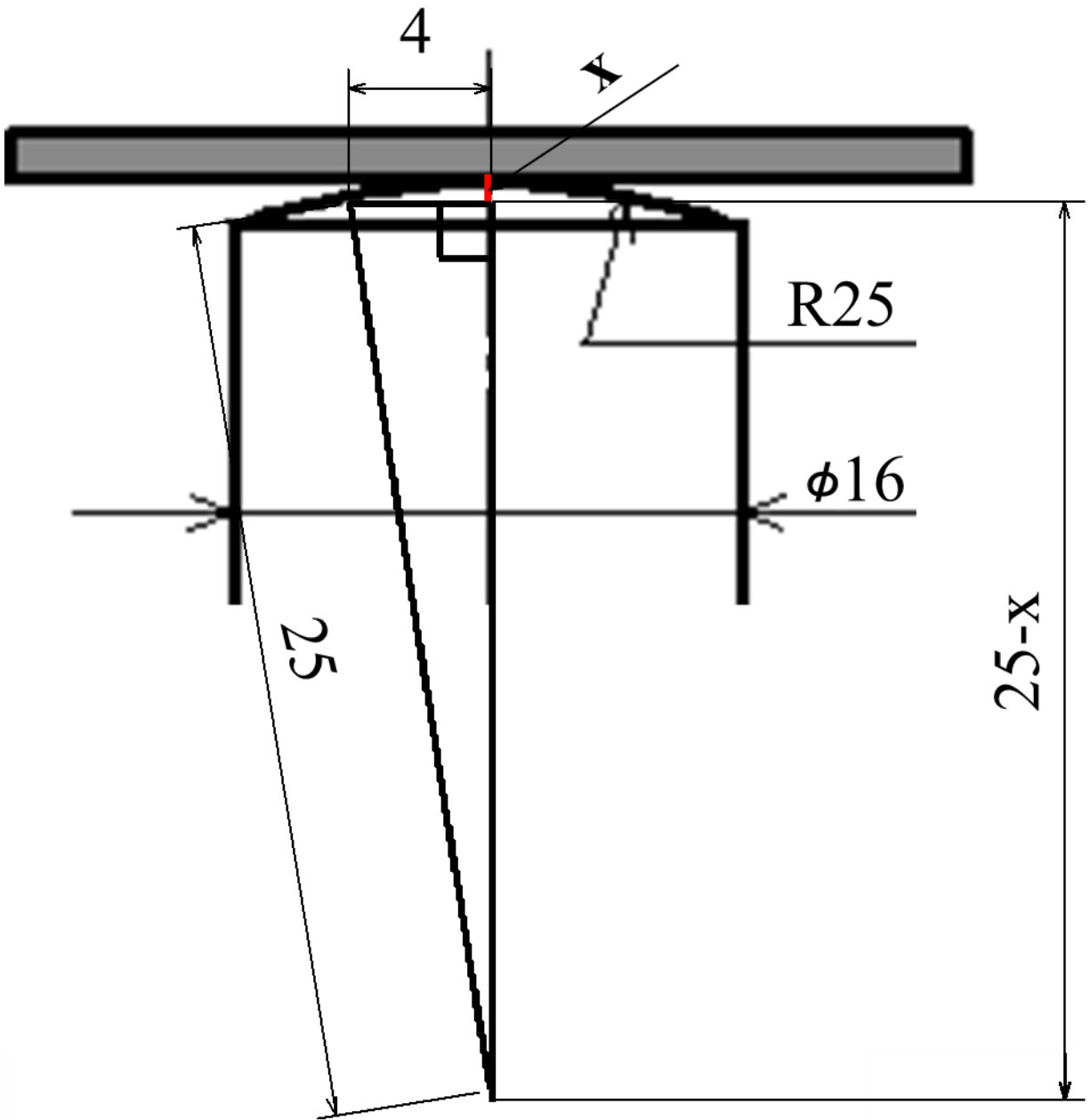
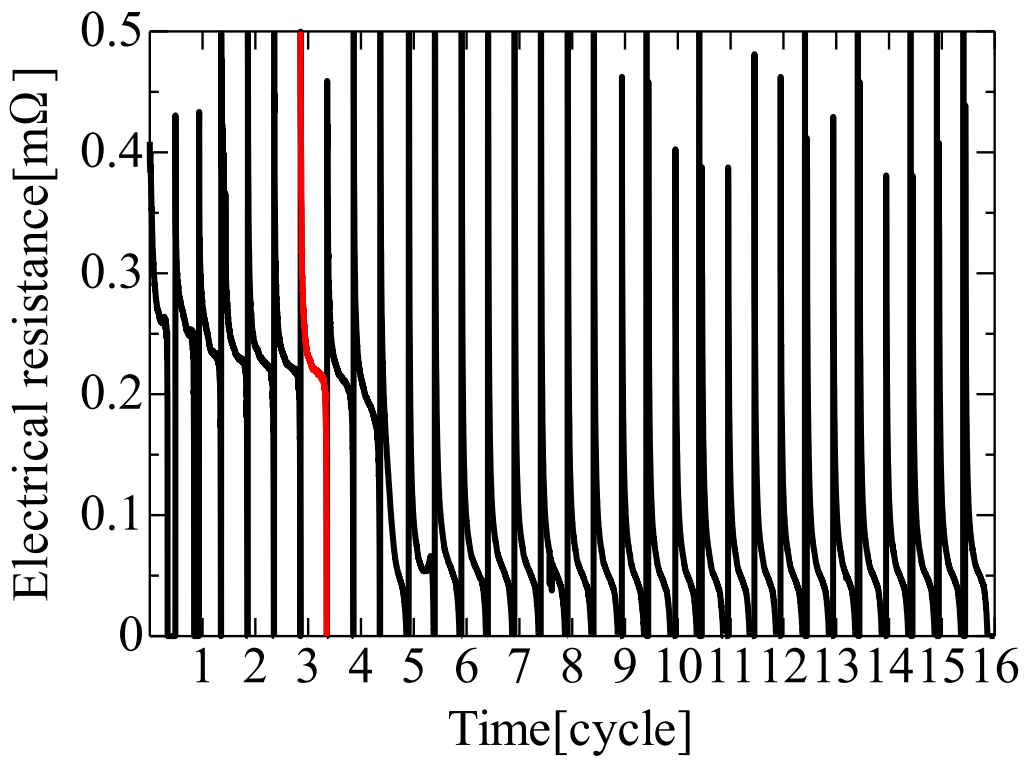
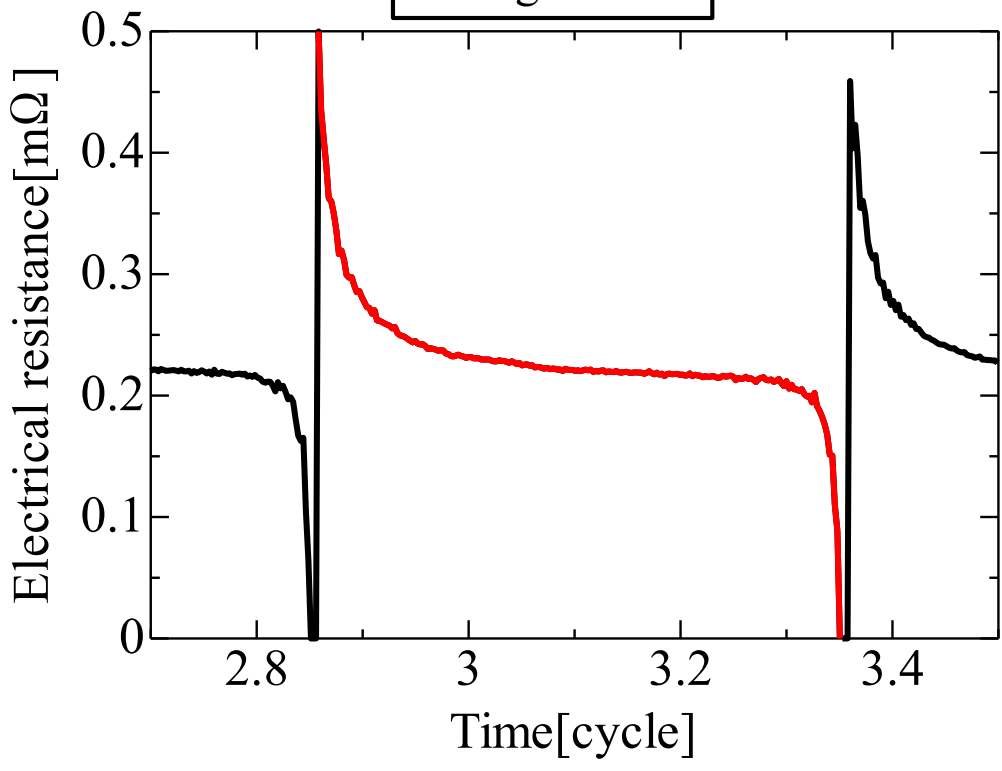


Fig.3-6 Schematic diagram of cross section of R type electrode and plate.



Enlarged view



*Welding time 16cycle

Fig.3-7 Example of electrical resistance during welding.

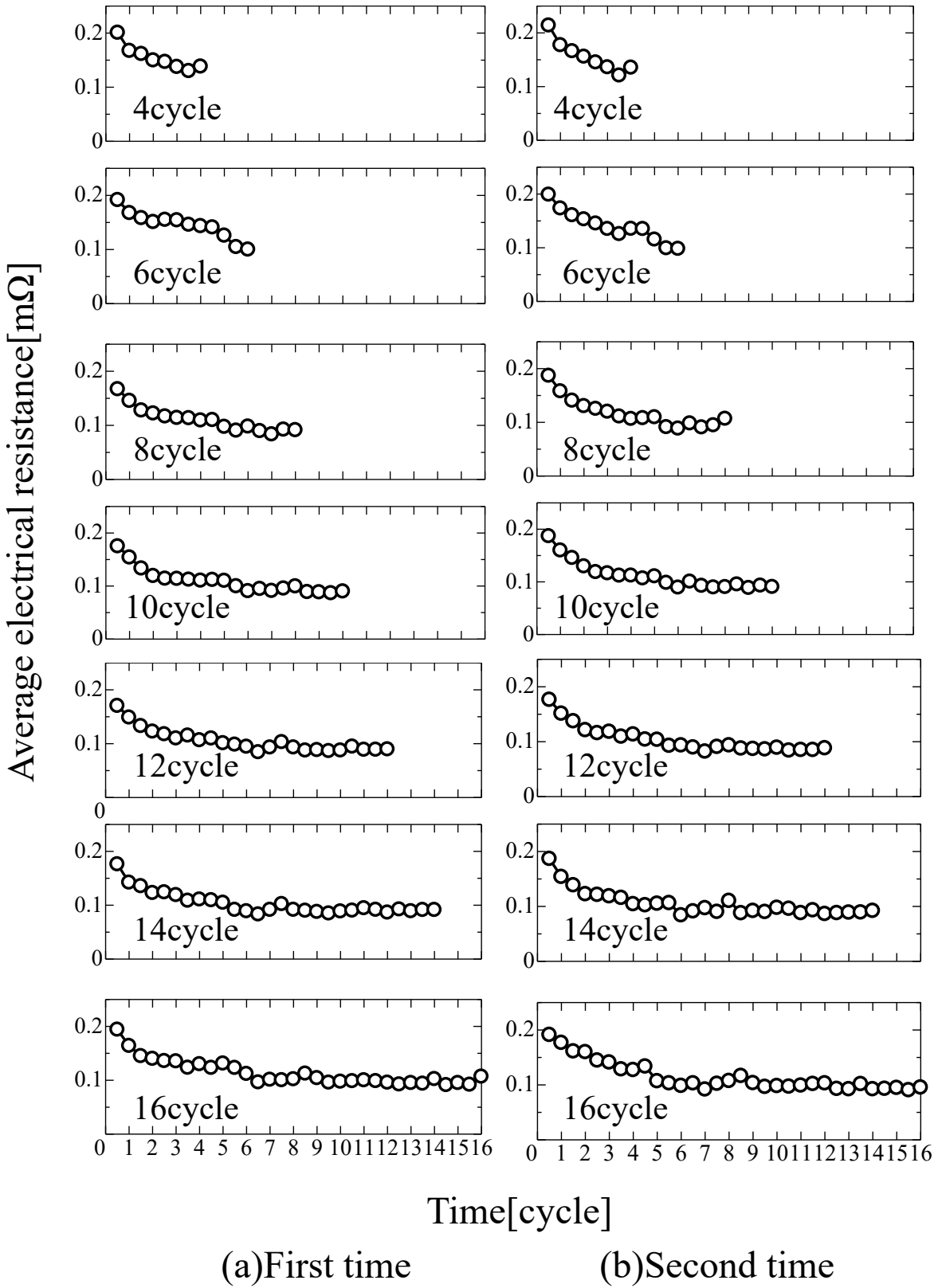
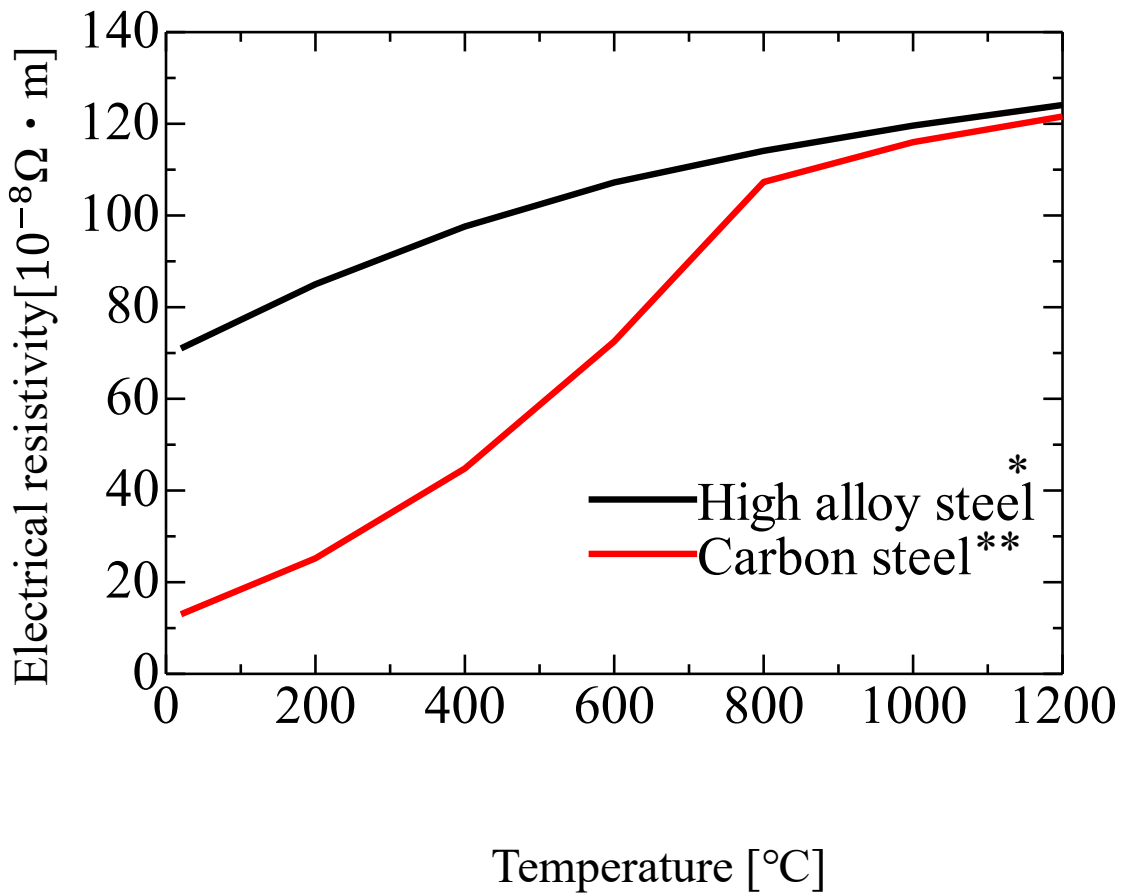


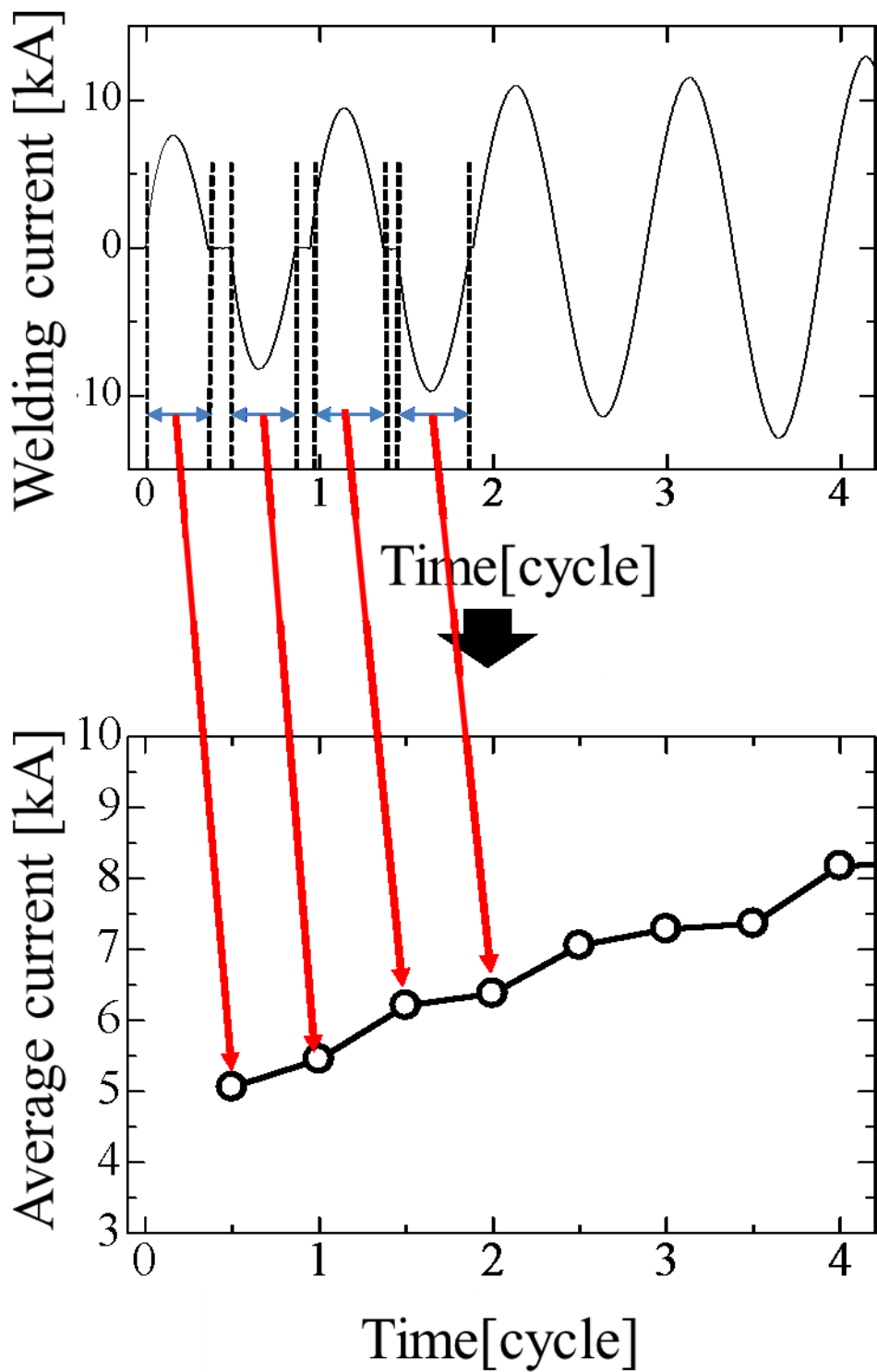
Fig.3-8 Average electrical resistance when using SUS304 plate.



*0.06C, 0.38Mn

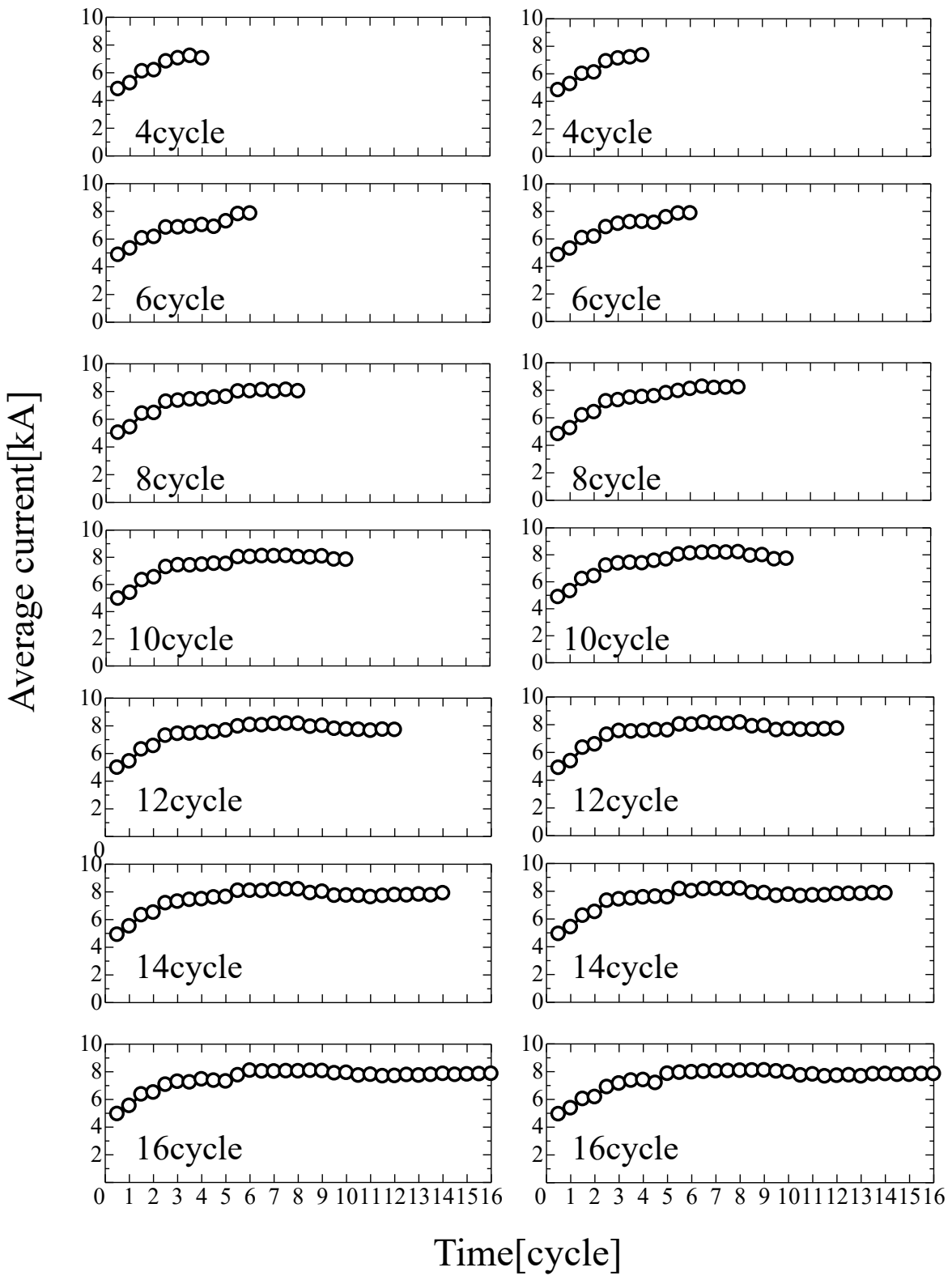
**0.08C, 0.37Mn, 19.1Cr, 8.14Ni

Fig.3-9 Dependence of electrical resistance on temperature of each steel.



* Welding time 16cycle

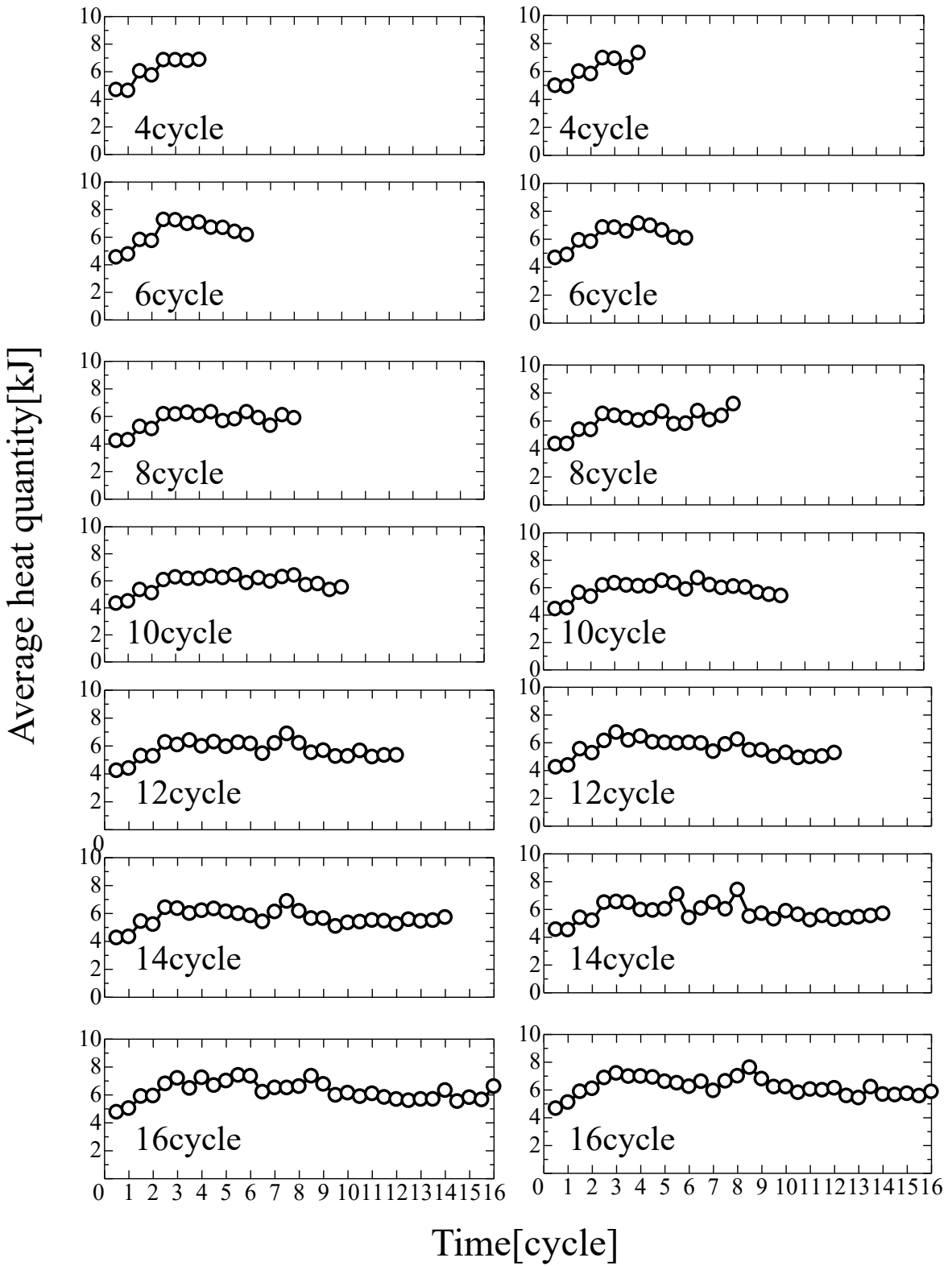
Fig.3-10 Example of electrical current during welding.



(a) First time

(b) Second time

Fig.3-11 Average electrical current when using SUS304 plate.



(a) First time

(b) Second time

Fig.3-12 Average quantity of Joule heat when using SUS304 plate.

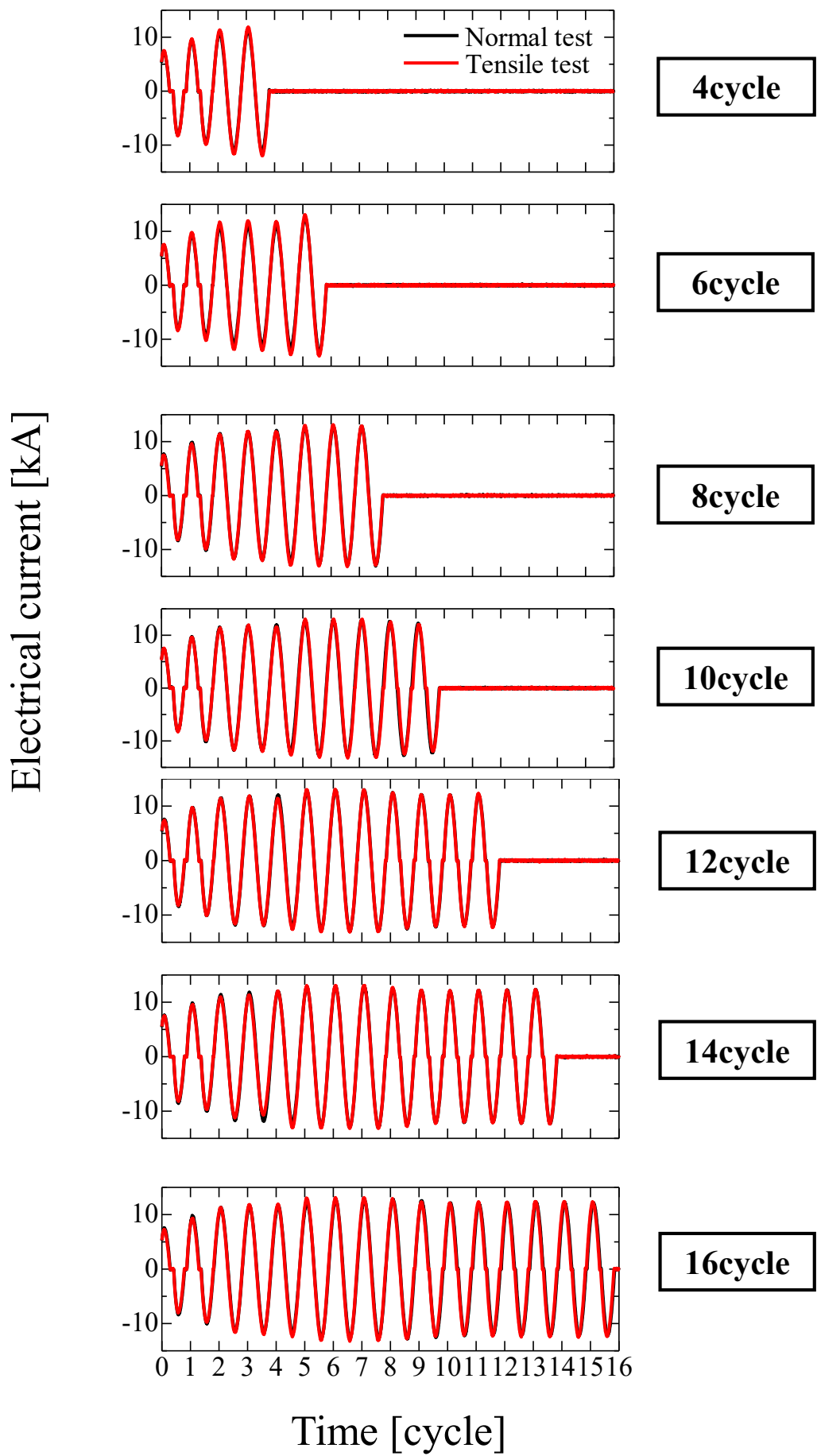


Fig.3-13 Comparison between electrical current during welding of tensile test specimen and that of normal specimen.

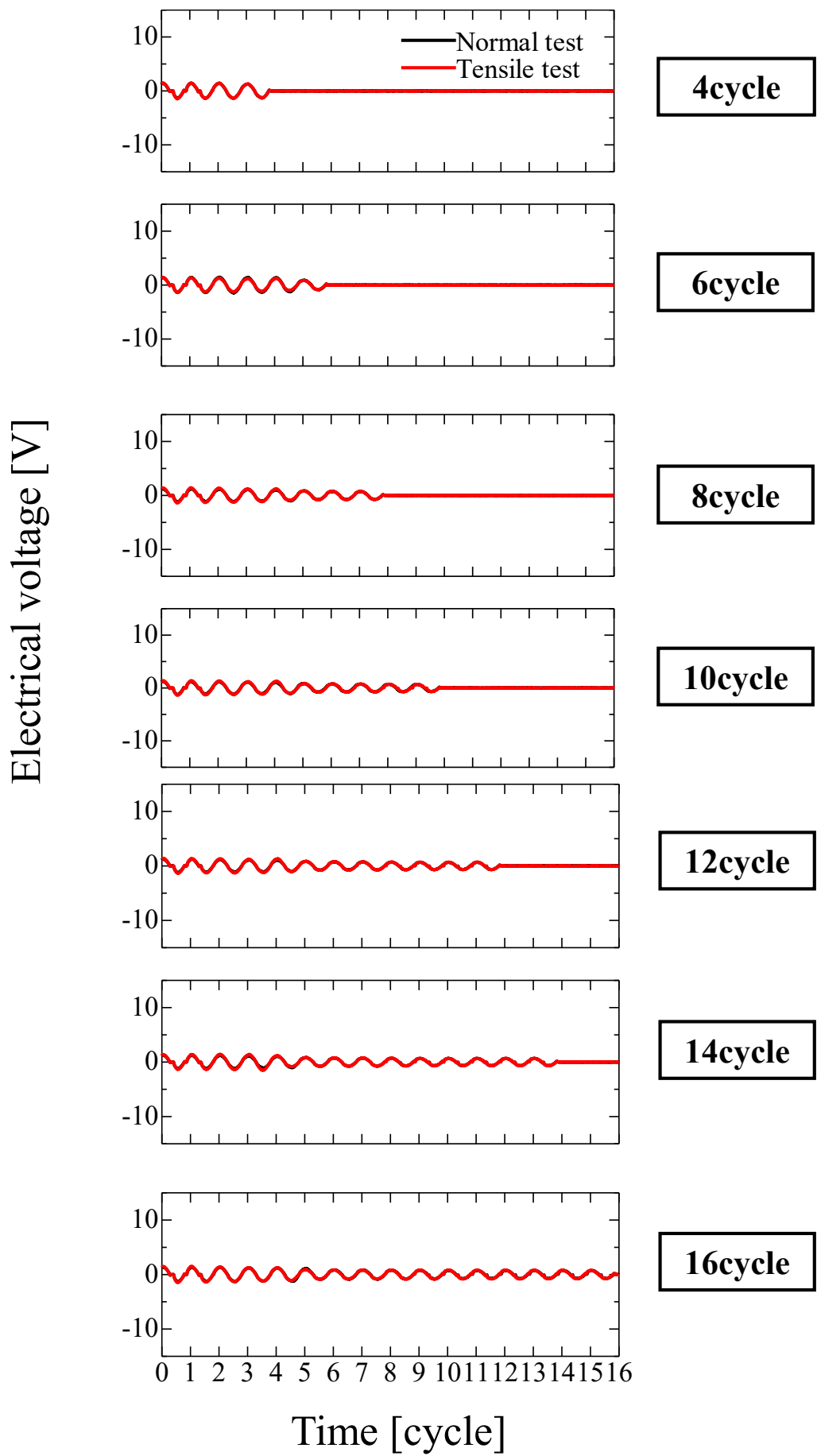


Fig.3-14 Comparison between electrical voltage during welding of tensile test specimen and that of normal specimen.

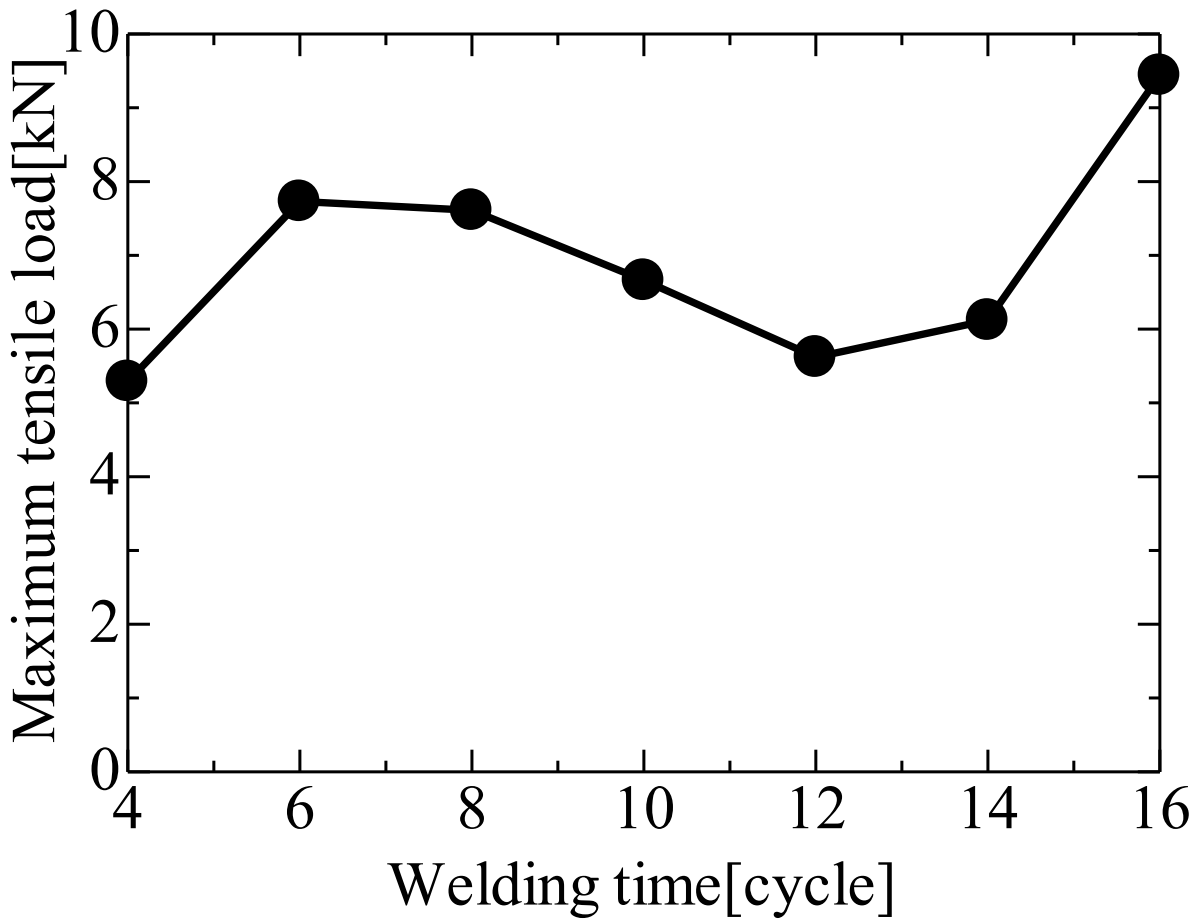


Fig.3-15 Maximum tensile load for different welding time when using SUS304 plate.



$X+Y$ =Bonding width

Fig.3-16 Measurement position of bonding width of pipe material.

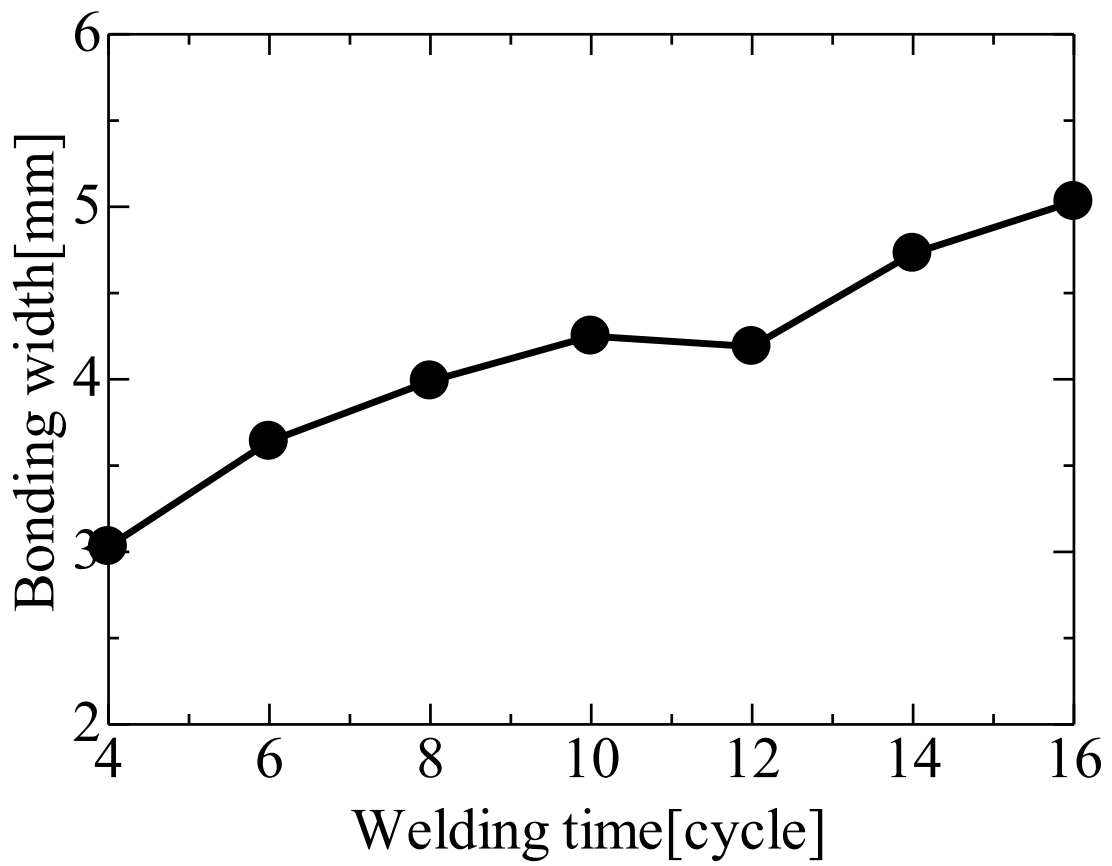


Fig.3-17 Bonding width of pipe material.

Front side

Back side



(a) 4cycle



(b) 6cycle



(c) 8cycle

Fig.3-18 Cross sectional observation on specimens after welding for different welding time.

Front side



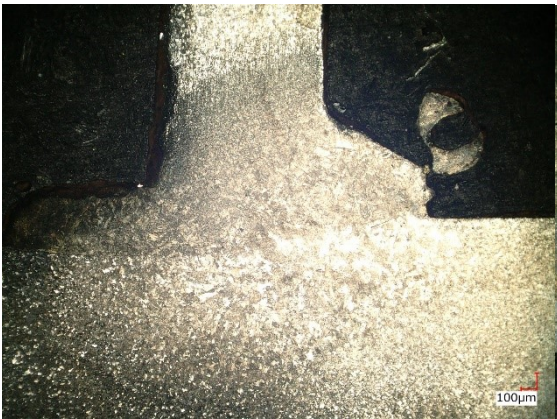
Back side



(d) 10cycle



(e) 12cycle



(f) 14cycle

Fig.3-18 Continued.

Front side



Back side



(g) 16cycle

Welding time [cycle]		4	6	8	10	12	14	16
First time	Front	△	△	△	△	△	△	△
	Back	△	△	△	△	△	△	△

(a) First time

Welding time [cycle]		4	6	8	10	12	14	16
Second time	Front	△	△	△	△	△	△	△
	Back	△	△	△	△	△	△	△

(b) Second time

○: Molten △: Not molten

●: Insufficient filling of molten metal

Fig.3-19 Evaluation results of cross sectional observation on specimens after welding for different welding time when using SPCC plate.



5mm

Welding time 16cycle

Fig.3-20 Side cross sectional observation of specimen after welding.

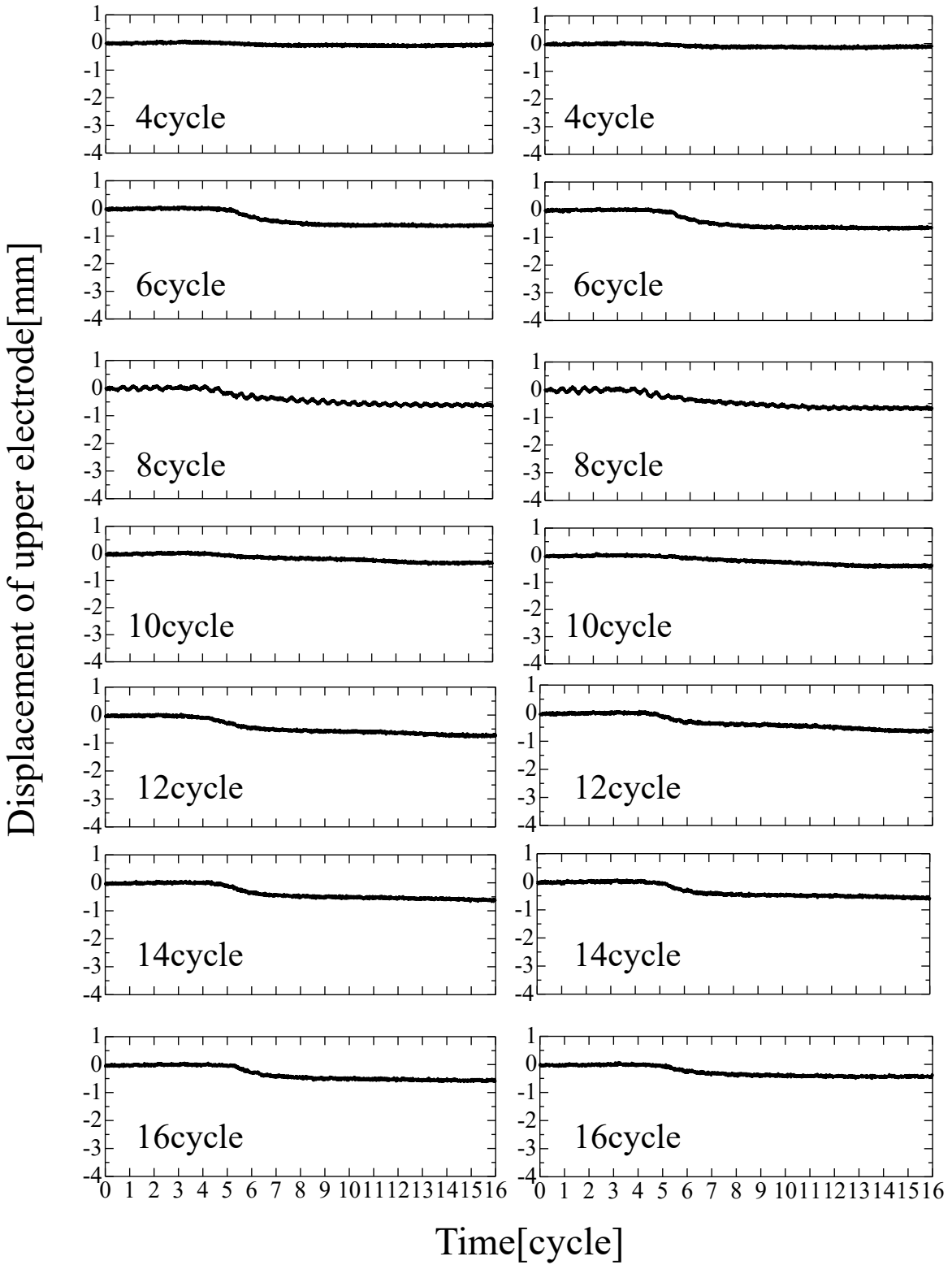
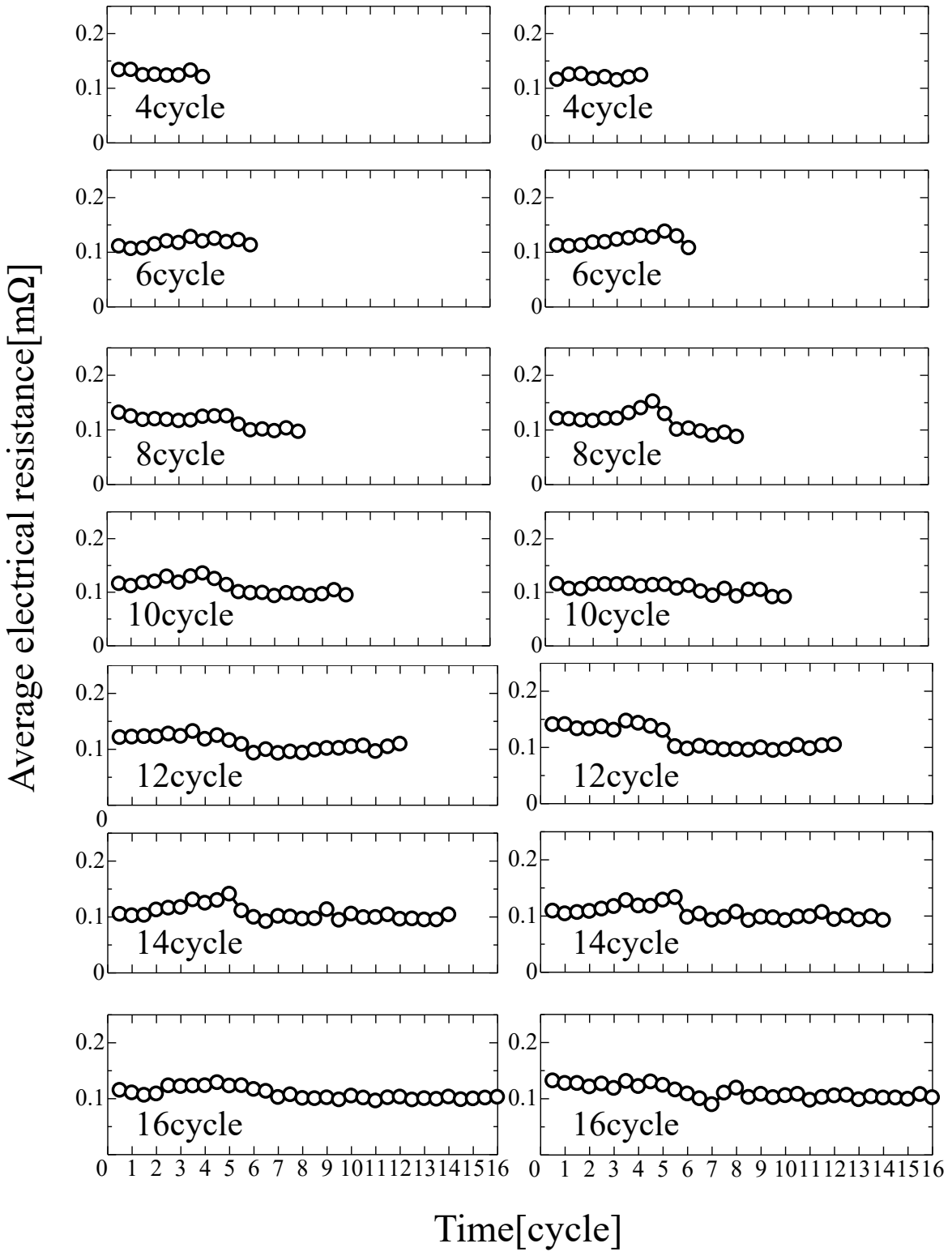


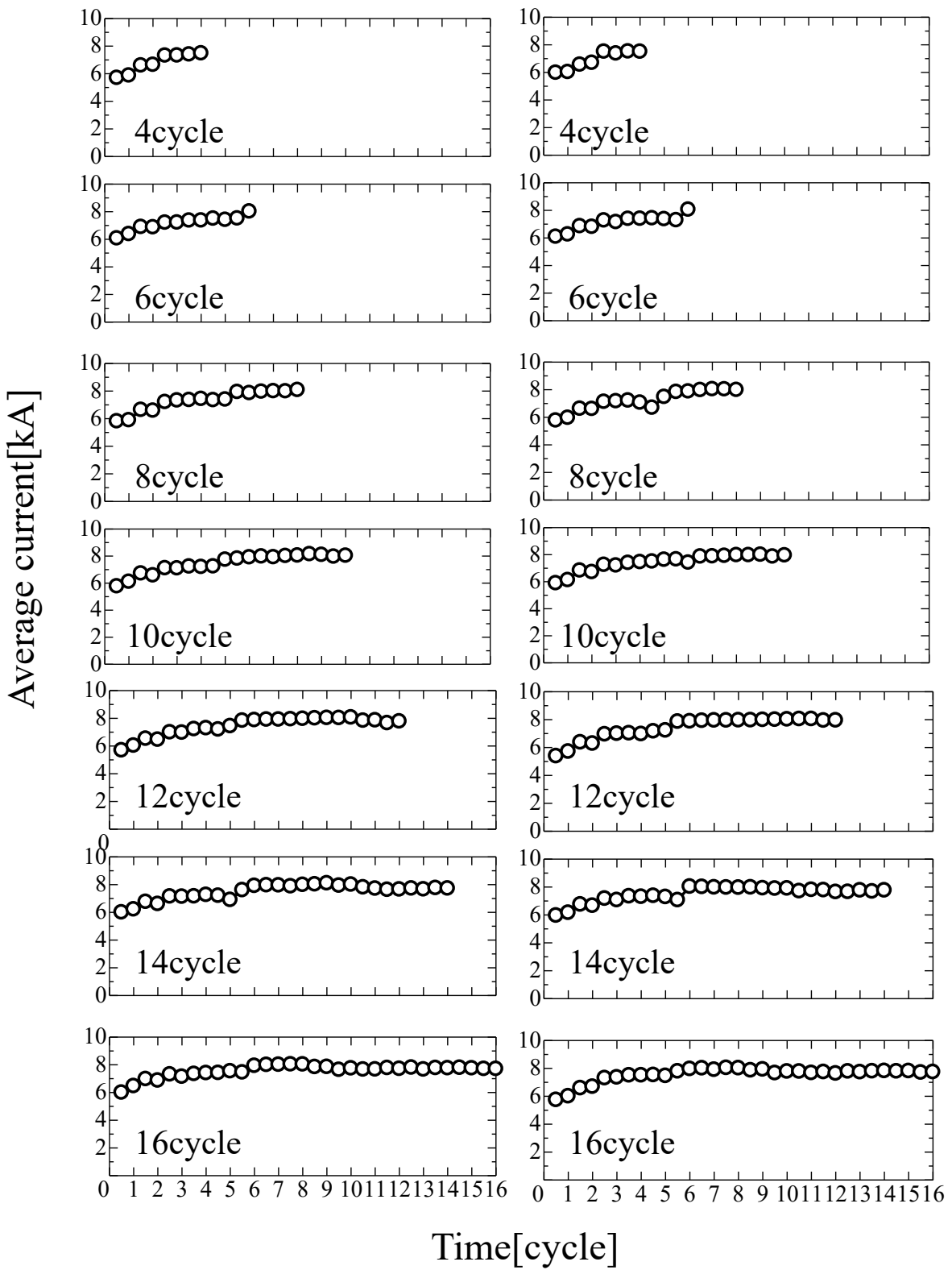
Fig.3-21 Displacement of upper electrode when using SPCC plate.



(a) First time

(b) Second time

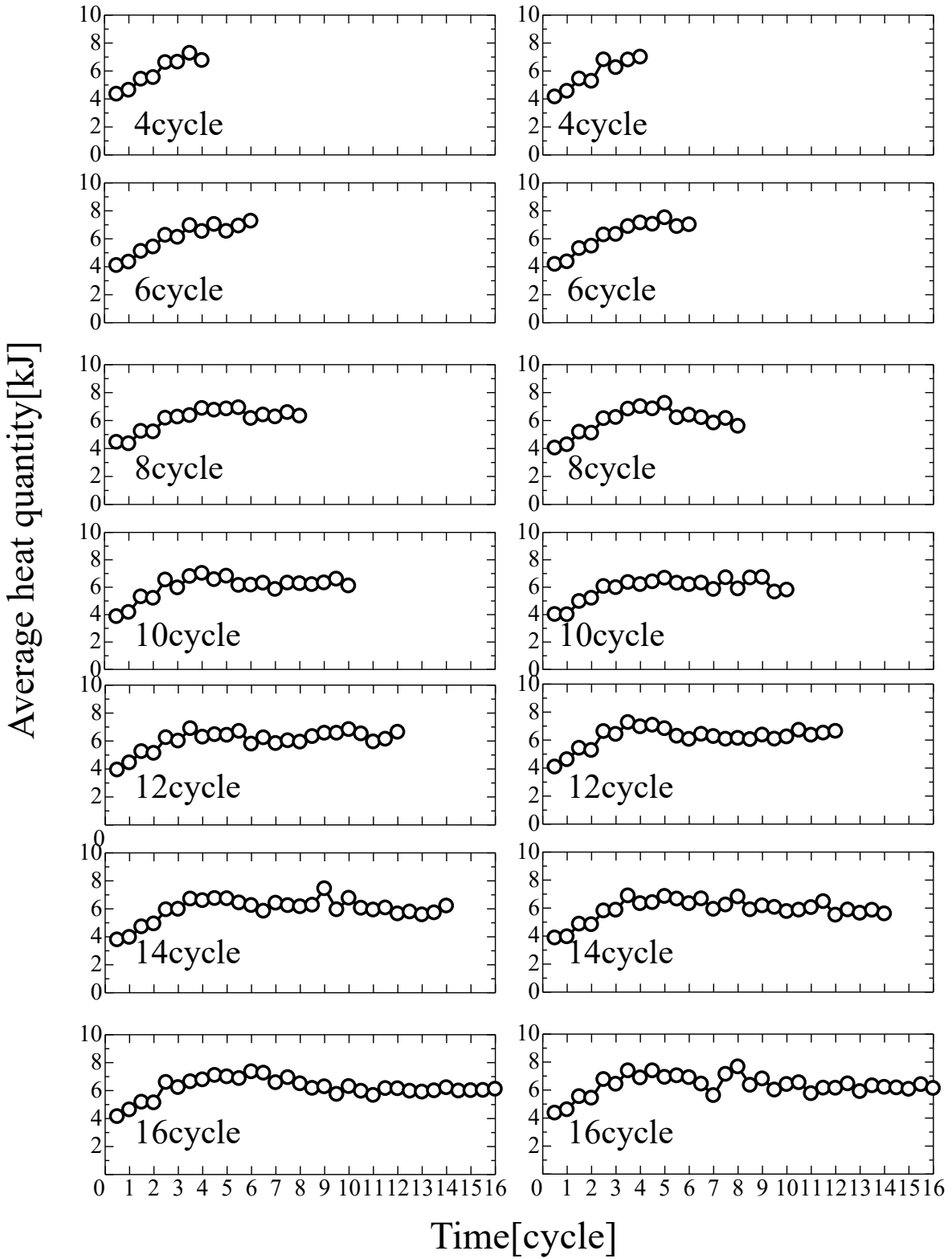
Fig.3-22 Average electrical resistance when using SPCC plate.



(a) First time

(b) Second time

Fig.3-23 Average electrical current when using SPCC plate.



(a) First time

(b) Second time

Fig.3-24 Average quantity of Joule heat quantity when using SPCC plate.

Electrical current [kA]

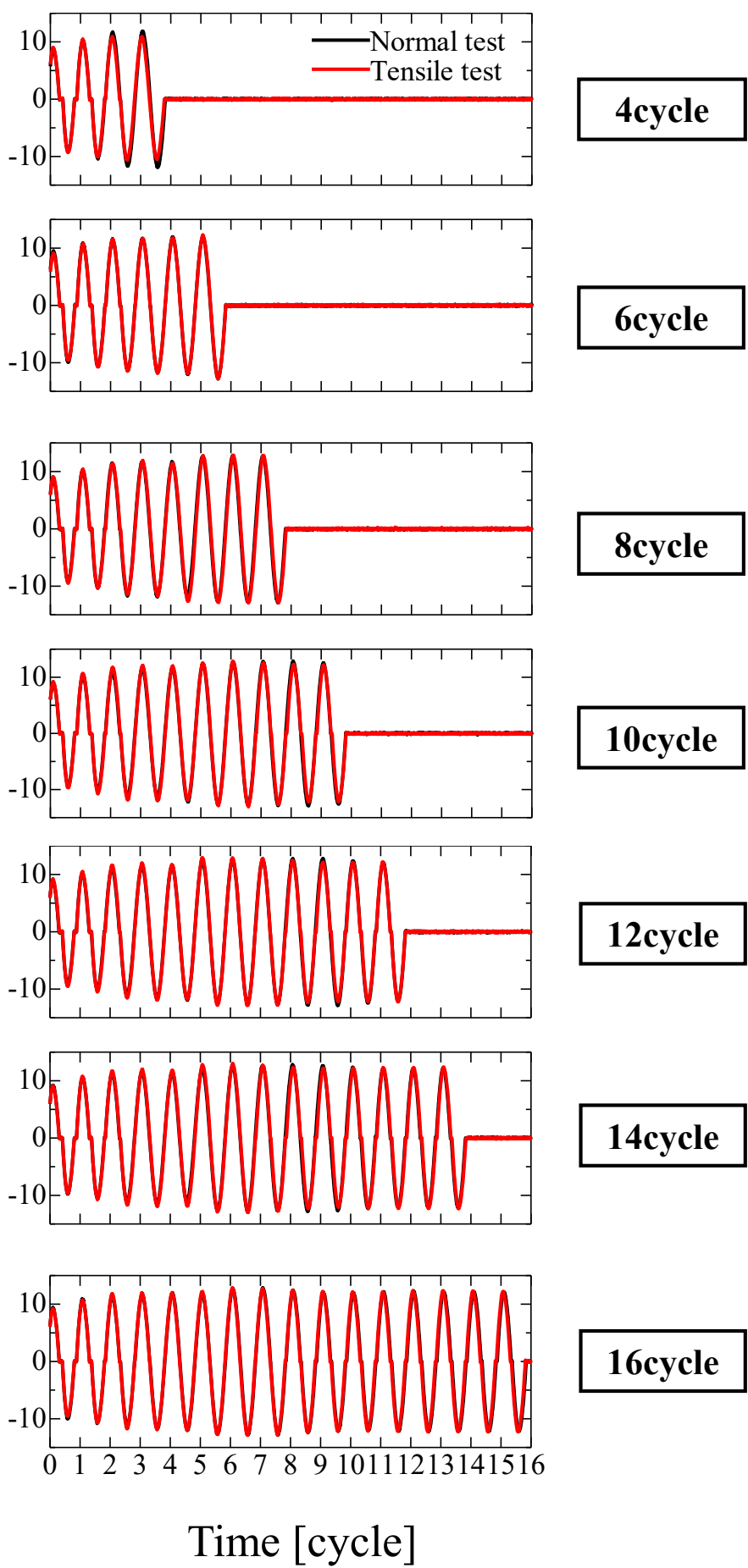


Fig.3-25 Comparison between electrical current during welding of tensile test specimen and that of normal specimen.

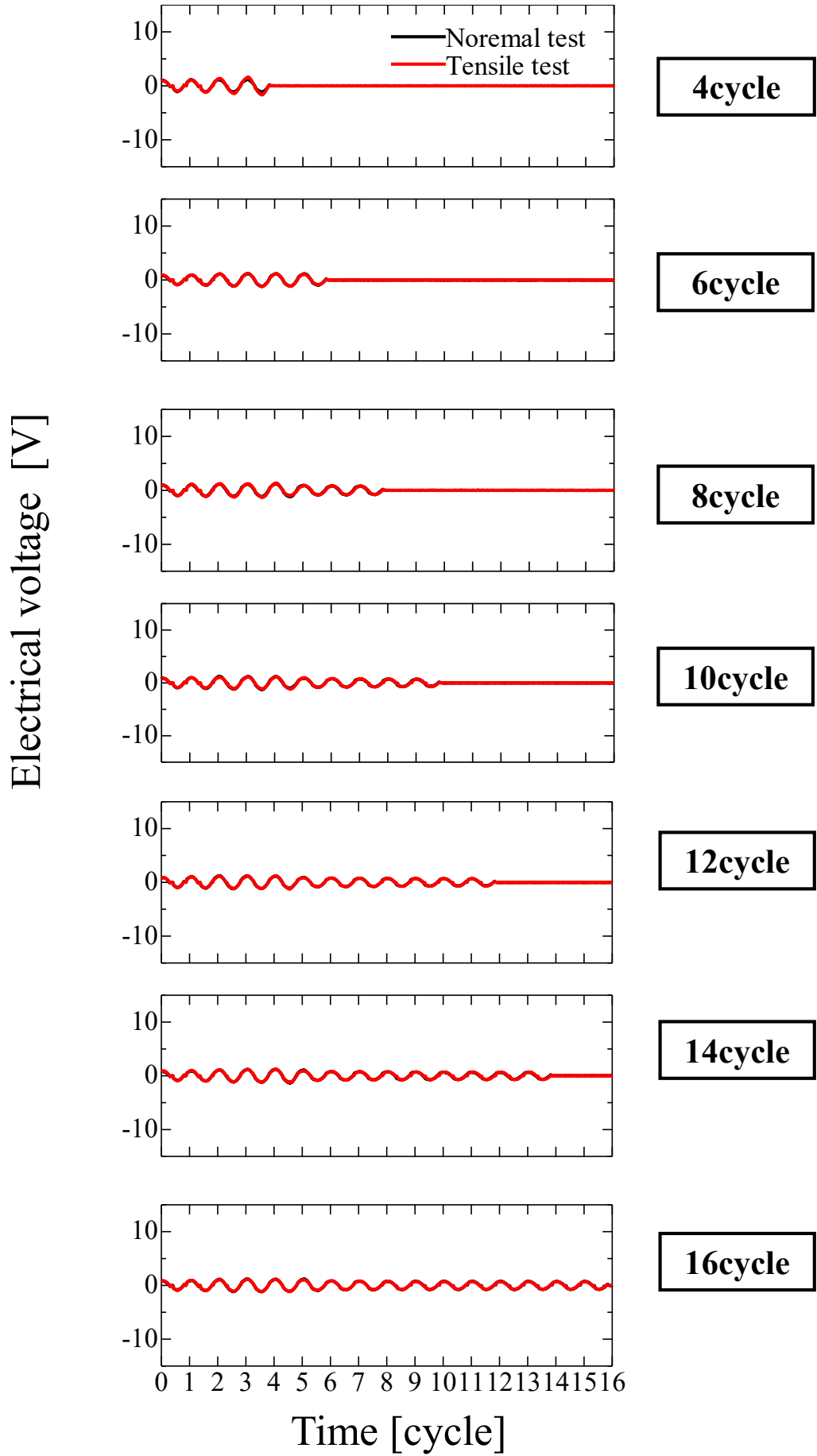


Fig.3-26 Comparison between electrical voltage during welding of tensile test specimen and that of normal specimen.

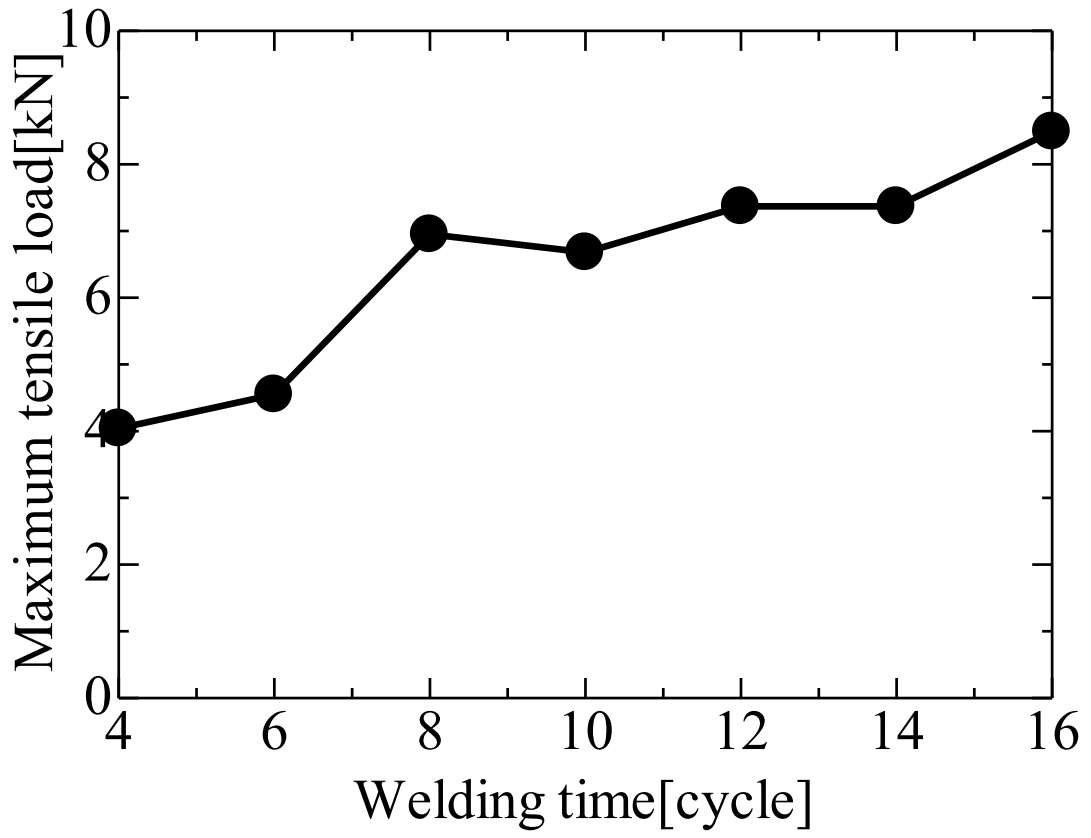


Fig.3-27 Maximum tensile load for different welding time when using SPCC plate.

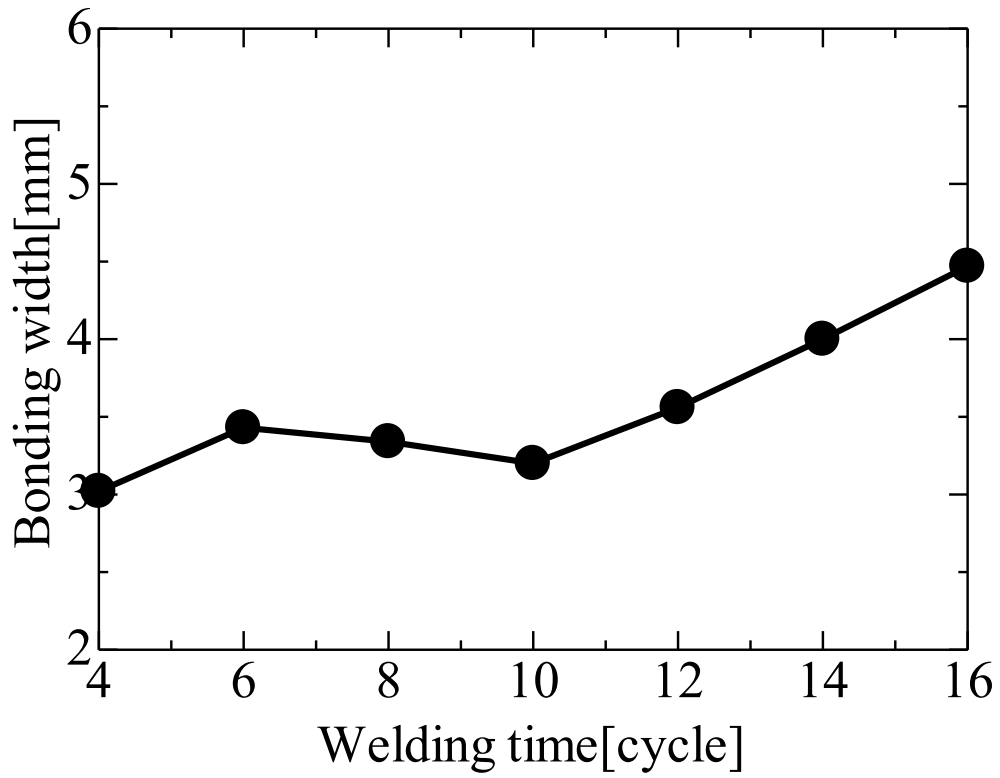


Fig.3-28 Bonding width of pipe material.

Welding time [cycle]		4	6	8	10	12	14	16
First time	Front	△	○	○	○	○	○	○
	Back	△	○	○	●	○	○	○
Second time	Front	△	○	○	○	○	○	○
	Back	△	○	○	○	○	●	○

(a) SUS304 plate

Welding time [cycle]		4	6	8	10	12	14	16
First time	Front	△	△	△	△	△	△	△
	Back	△	△	△	△	△	△	△
Second time	Front	△	△	△	△	△	△	△
	Back	△	△	△	△	△	△	△

(b) SPCC plate

○: Molten △: Not molten

●: Melting but metal not filled

Fig.4-1 Evaluation results of cross sectional observation on specimens after welding for different welding time.

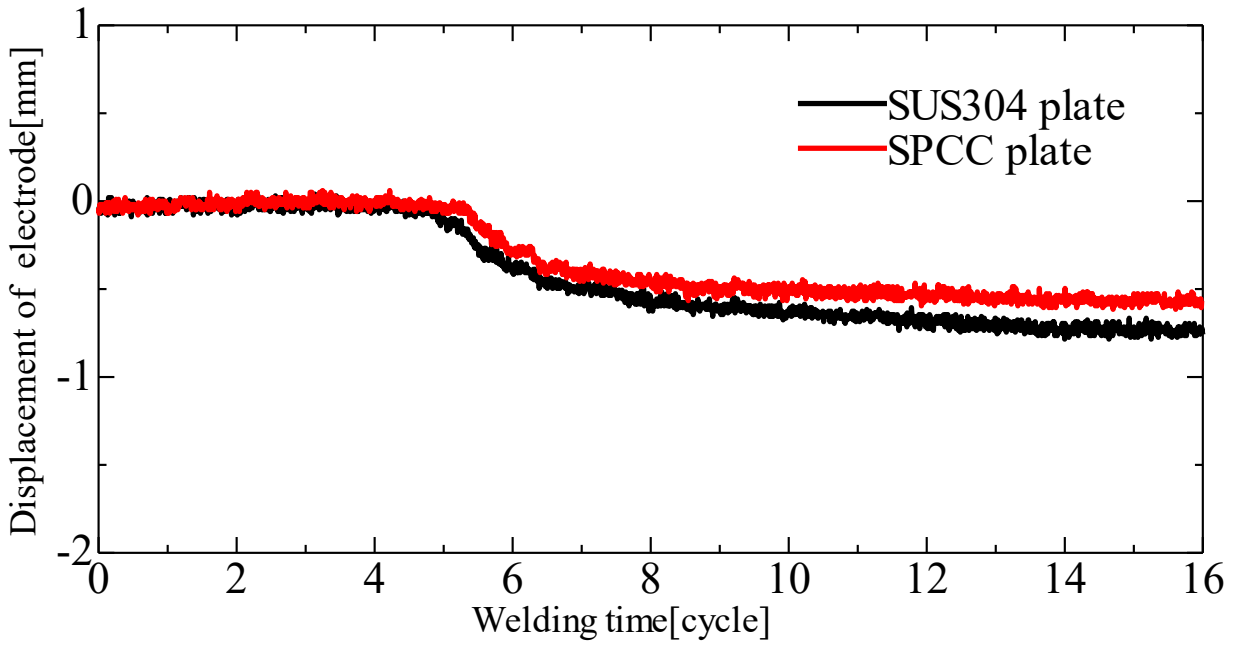


Fig.4-2 Displacement of upper electrode for each steel.

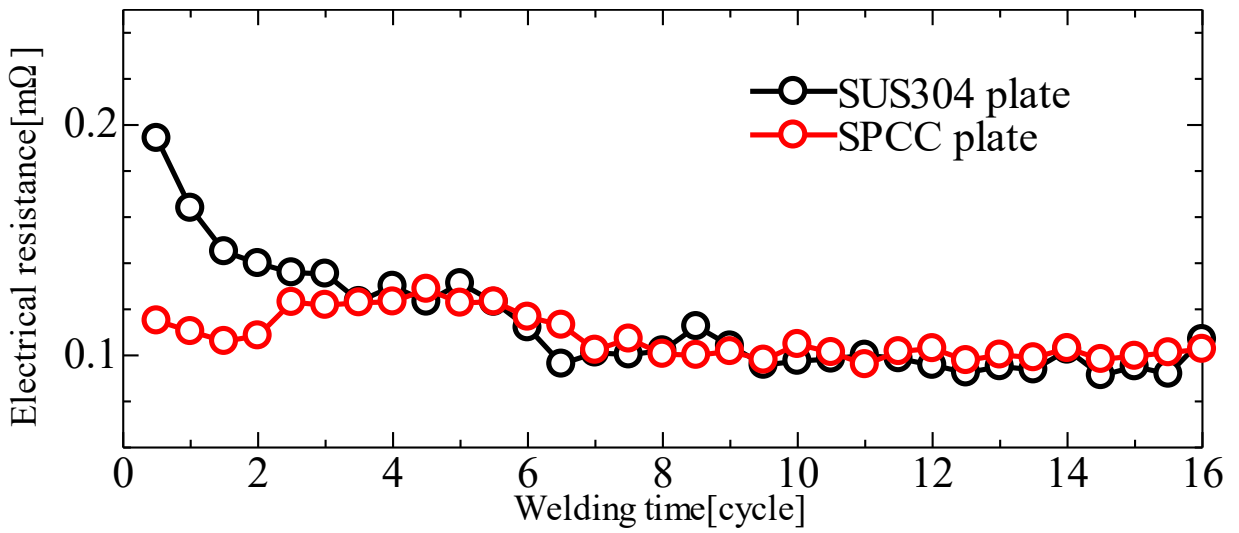


Fig.4-3 Average electrical resistance for each steel.

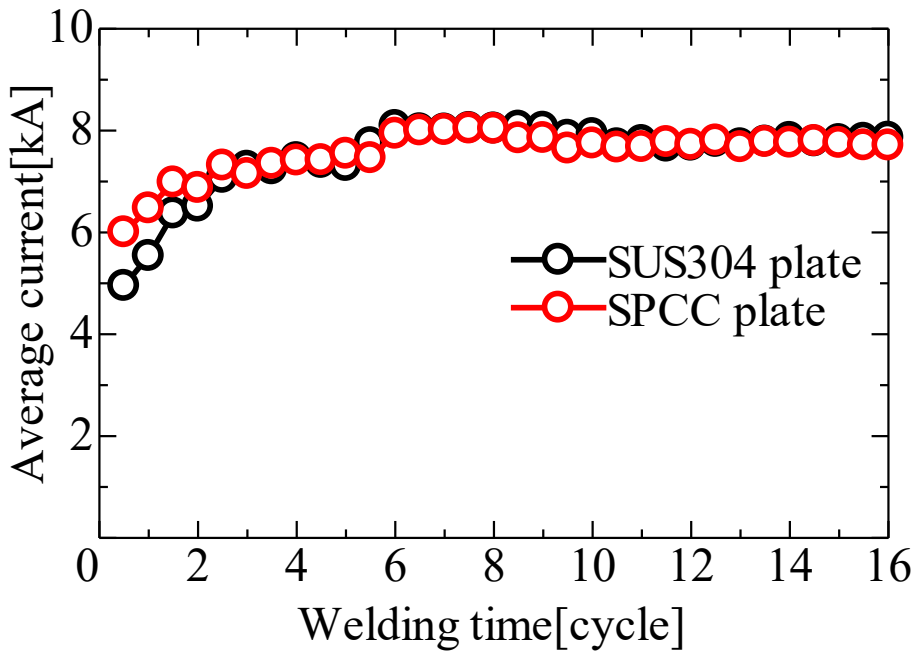


Fig.4-4 Average current for each steel.

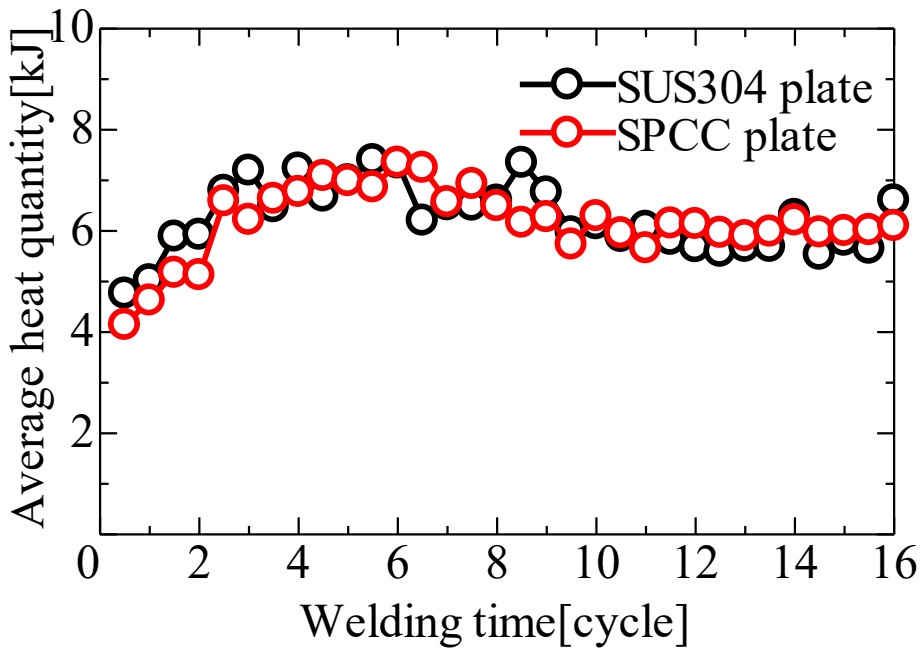


Fig.4-5 Average heat quantity for each steel.

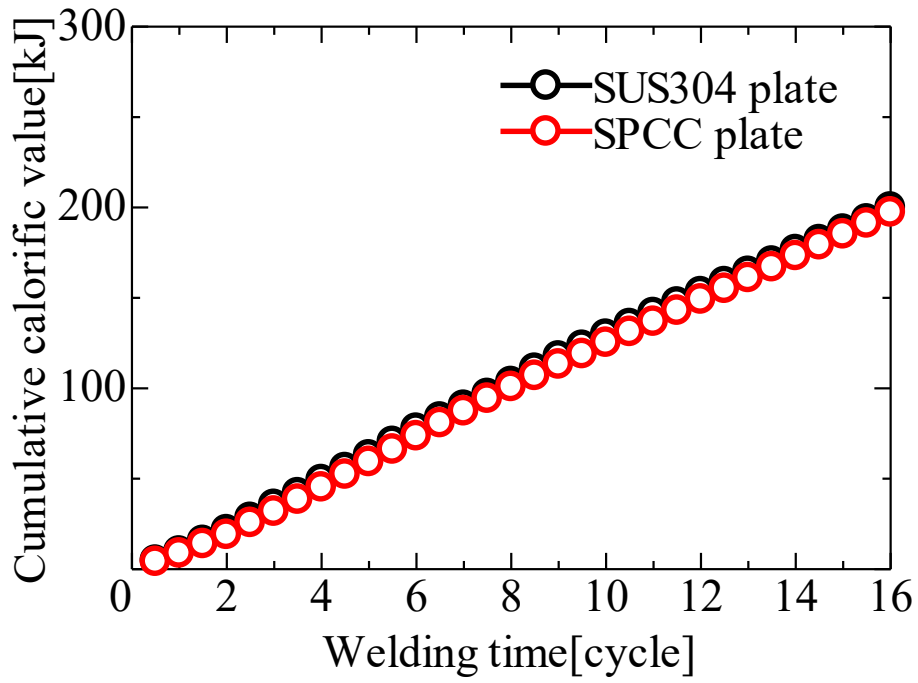


Fig.4-6 Cumulative calorific value for each steel.

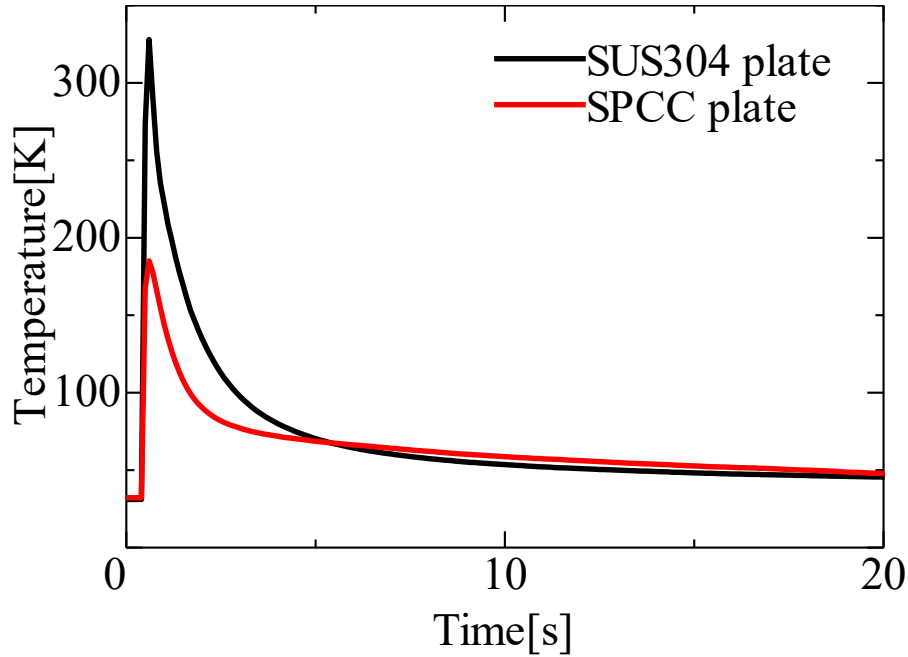
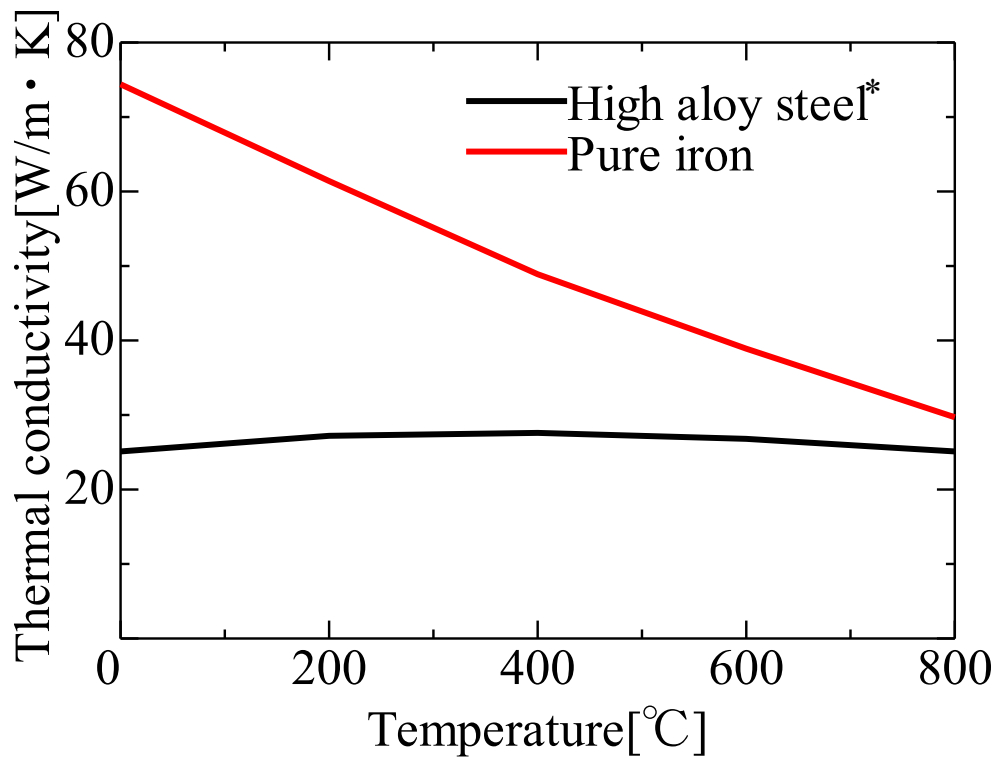
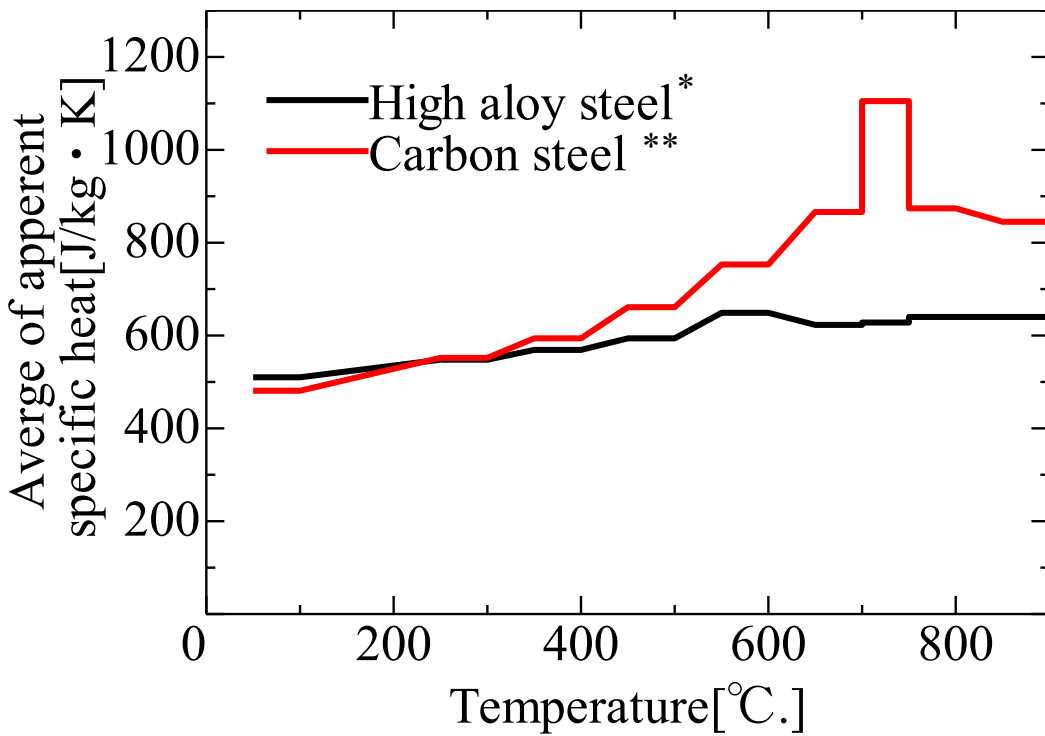


Fig.4-7 Temperature history for each steel.



*0.27C, 0.28Mn, 13.7Cr, 0.2Ni, 0.25W, 0.02V

Fig.4-8 Thermal conductivity for each material.



*0.08C, 0.37Mn, 19.1Cr, 8.14Ni
 **0.06C, 0.38Mn

Fig.4-9 Average of apparent specific heat for each material.

Welding time [cycle]		20
SPCC	Front	△
	Back	△

(a) Welding time 20cycle

Welding time [cycle]		10
SPCC	Front	△
	Back	△

(b) Extrusion length 0.5mm

Welding time [cycle]		10	12	16
SPCC	Front	△	△	●
	Back	△	●	●

(c) Pressing force 1kN

○: Molten △: Not molten

●: Melting but metal not filled

Fig.4-10 Evaluation results of cross sectional observation on specimens after welding for difference welding time or extrusion length or pressing force.

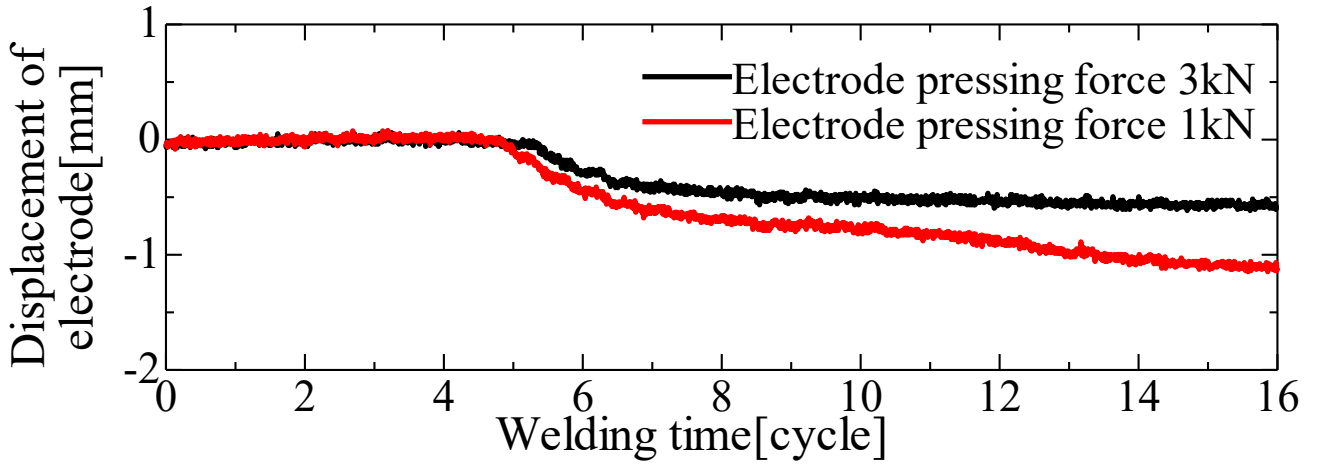


Fig.4-11 Displacement of upper electrode for each electrode pressure.

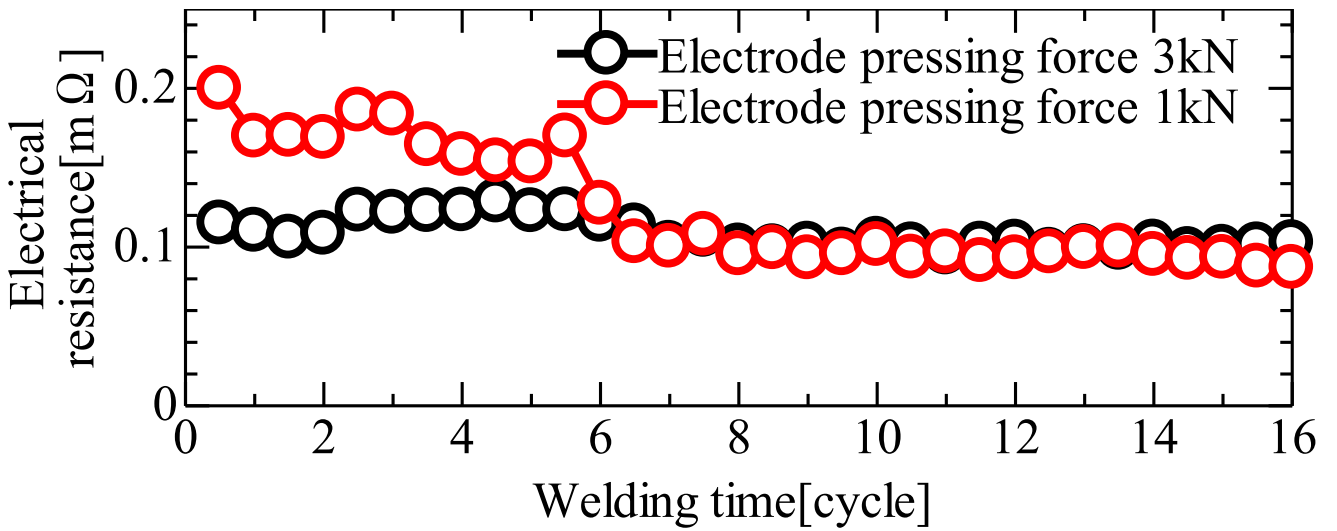


Fig.4-12 Average electrical resistance for each electrode pressure.