

平成 29 年度 修士論文

管材と薄板との抵抗溶接部の
溶融状態におよぼす
突出し長さの影響

三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻
貫井 景介

第1章 緒言	・・・1
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	・・・7
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	・・・8
2-7 引張試験方法	・・・8
2-7-1 引張試験片	・・・8
2-7-2 引張試験機	・・・9
第3章 実験結果	・・・10
3-1 板厚 1.5mm 2枚を用いた場合	・・・10
3-1-1 実験方法	・・・10
3-1-2 実験結果	・・・10
3-2 板厚 1.5mm 1枚を用いた場合	・・・11
3-2-1 縦断面観察結果	・・・11
3-2-2 横断面観察結果	・・・12
3-2-3 上部電極変位	・・・13
3-2-3(a) 第1変位および第2変位	・・・14
3-2-3(b) 各突出し長さにおける上部電極変位	・・・14
3-2-4 電気抵抗変化	・・・15
3-2-4(a) 半サイクル毎の平均電気抵抗の算出方法	・・・15
3-2-4(b) 各突出し長さにおける電気抵抗変化	・・・15
3-2-5 半サイクル毎のジュール発熱	・・・16
3-2-5(a) 半サイクル毎のジュール発熱の算出方法	・・・16
3-2-5(b) 各突出し長さにおける半サイクル毎のジュール発熱	・・・16

3-3-6 引張試験	・・・18
3-3-6(a) 引張試験用試験片と通常試験片との比較	・・・18
3-3-6(b) 各突出し長さにおける引張強さ	・・・18
3-3 板厚 3mm 1 枚を用いた場合	・・・19
3-3-1 縦断面観察結果	・・・19
3-3-2 上部電極変位	・・・19
3-3-3 半サイクル毎の平均電気抵抗変化	・・・20
3-3-4 半サイクル毎の平均電流値	・・・20
第 4 章 考察	・・・21
4-1 突出し長さの変化が累積発熱量におよぼす影響	・・・21
4-1-1 上部電極変位と平均電気抵抗値の比較	・・・21
4-1-2 各突出し長さにおける累積発熱量	・・・21
4-1-3 管材突出し部の溶融に必要な発熱量	・・・22
4-1-4 板材の溶融に必要な発熱量	・・・23
4-2 板材の変化が溶融状態におよぼす影響の考察	・・・24
4-2-1 上部電極変位の比較	・・・24
4-2-2 半サイクル毎の平均電気抵抗の比較	・・・25
4-3-3 半サイクル毎の平均電流値	・・・26
4-3 最適溶接条件	・・・26
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み立て技術の主要軸をなすに至っている¹⁾。

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电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、板材側に F 型電極を用いて管材と薄板との抵抗溶接を行う場合と、板材側に R 型電極を用いて管材と薄板との抵抗溶接を行う場合の二つの条件で実験を行った。板材側に F 型電極を用いて実験を行った場合では、溶接中の電気抵抗値が急増する現象および板材の溶融が不十分となる問題を指摘された。この問題は板材側に R 型電極を用いることで抑制されることがわかった。また、管材と薄板の組み合わ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し、接触面近傍を集中的に加熱する幾何学的配置を用いることで抵抗溶接法の適用が可能と考えられる。管材の溶融領域は管材を固定する電極からの突出し長さを調整することで制限することができる。また、温度分布の非対称性を解消するために、薄板を重合わせた接触面の接触抵抗を利用し、管材側にある発熱中心を薄板側へ移動させる試みを行う。

下部電極に R 型電極を用いた管材と板材との抵抗溶接において、上部電極からの管材突出し長さを変化させた際の抵抗溶接部の溶融状態について検討を行う。

第2章 実験装置及び実験方法

2-1 供試材

供試材として、管材および板材共にオーステナイト系ステンレス鋼SUS304を使用した。Fig.2-1 に管材および板材の概略図を示す。管材は外径 8mm、内径 6mm のパイプを旋盤で各突出し長さに合わせて切断し作製した。同時に、板材と接触する管材の表面は剣バイトを用い旋盤で表面処理も施している。管材の寸法は外径 8mm、内径 6mm、全長は $(15.2+x)$ mm とし、突出し長さ x に応じて変化させた。板材は、板厚 1.5mm または 3mm のものを使用し、形状は一辺 30mm の正方形とした。使用したステンレス鋼の化学組成の規格値および物性値を Table 2-1 および Table 2-2²⁾にそれぞれ示す。

2-2 実験装置

Fig.2-2 に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て、ピストン内部の部品はすべて機械構造用炭素鋼（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。

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る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)および突出し長さ(mm)を変化させて実験を行った。Fig.2-10 に突出し長さ 4mm 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 4mm 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 19.2mm となる。Fig.2-11 に各突出し長さにおける管材の概略図を示す。

以下に、本実験の実験条件における設定範囲を示す。

通電時間	4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 cycle
設定電流	8.0 , 9.0, 9.9 kA
電極加圧力	1, 2, 3 kN
突出し長さ	1, 2, 4 mm

2-6 断面観察方法

2-6-1 縦断面観察結果

本実験では継手の溶融状態を調べるため、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.2-12 に断面観察を行った試験片の例を示す。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.2-13 上部に示す。写真にある Front side, Back side は溶接機の手前側、右側は奥側の接合部に対応している。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。板材の熔融状態を、(a)のように板材が熔融して接合している場合を○、(b)のように板材が熔融していない場合を×、(c)のように板材が熔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。

2-6-2 横断面観察方法

本実験では接触部全週における断面観察を行った。Fig.2-19 に接触部全週における断面観察方法について示す。まず初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く。その後、管材が無くなるまで削り込んだ後に Fig.2-14 下の写真のようにベークライトに埋め込み、表面を粒度 800~2000 の研磨紙で研磨し腐食試験を行う。

2-7 引張試験方法

2-7-1 引張試験片

引張試験は管材にねじ加工を施すと、加工した部分の肉厚は約 0.65mm と非常に薄くなることに加え、加工の途中で変形してしまう。よって引張試験専用の試験片を作製した。作製した試験片の概略図を Fig.2-15 に示す。専用の試験片を管材に模擬し引張試験を行う。Fig.2-16 に突出し長さ 1mm, 6cycle, 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.2-16 であれば引張強度は約 11.3kN となる。

2-7-2 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.2-17 に示す。また、Fig.2-18 に試験片の管材側を固定するための治具、Fig.2-19 および Fig.2-20 に試験片の板側を固定するための治具を示す。円柱の治具の下側にある $\phi 8\text{mm}$ のねじ穴に管材を差し込み固定し、板側は 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.2-20 より、治具の下側のねじ穴にロードセルを差し込み固定する。ロードセルは KYOWA 製 LUX-A-20kN-P を使用した。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で 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。

第3章 実験結果

3-1 板厚 1.5mm 2枚を用いた場合

3-1-1 実験方法

過去の研究において、管材が潰れない溶接条件においては薄板が溶融しなかった。そこで、薄板を2枚重ねることで、下板は下部電極と接触することで冷却され、上板と下板で溶接されず、上板は下部電極から離れるために下部電極の冷却作用を受けにくくなり、上板の温度上昇が推進されると考えた。この理由から、管材突出し部が潰れない条件で板側に溶融部を得ることができると考えた。そこで、管材突出し長さを4mmとし、板厚1.5mmの薄板と下部電極の間に同様の下板を用いて実験を行う。

3-1-2 実験結果

Fig.3-1(a)および(b)は、電極加圧力1および2kN、設定電流9.9kA、通電時間4および5 cycleで行った試験片の外観である。これらは、溶接後に管材突出し部が潰れていなかった。(a)および(b)より、どの条件においても管材と薄板が接合されていないことから、管材が潰れない条件において管材と薄板が接合されることはないことがわかる。次に、Fig.3-1(c)に、電極加圧力1および2kN、設定電流8.0～9.9kA、通電時間6cycleで行った試験片の外観を示す。通電時間6cycleの条件内で最も加圧力および設定電流が低い条件である(c-1)において管材突出し部が潰れていること、および(c)のすべての条件において管材突出し部が潰れていることから、電極加圧力および設定電流に関わらず通電時間6cycleにおいて管材突出し部が潰れることがわかる。また、Fig.3-2に(c-6)の試験片において溶接機の手前側から観察した外観を(a)、および側方から観察した外観を(b)に示す。この写真は薄板と下板との間

にマイナスドライバーを挿入し、剥離を試みた後の写真である。写真からわかるように、上板と下板が溶接されているため、2枚の板が変形していることがわかる。また、管材が上板と接合しないことが確認できる。上記の結果から管材と上板が接合する前に、上板と下板が接合することがわかる。よって同材質の薄板を下板に用いて、薄板と管材を溶接することは困難であることがわかった。一方、通電時間を増加させ、管材と薄板の継手が得られるまで実験行ったところ、電極加圧力 1kN、設定電流 9.9kA、通電時間 12cycle において管材と上板が接合されることが確認できた。Fig.3-3 に、この条件で行った試験片の管材側の外観を(a)に、下板側の外観を(b)に示す。Fig.3-3(a)から、管材と上板が接合されていることが確認できるが、(b)の写真からわかるように、下板と上板との間で過度に発熱が起こったためか、板材裏側に穴があいていることがわかる。また、溶融した金属が下部電極表面と接合されてしまったために、下部電極を損傷してしまった。これらのことを踏まえると、同材質、同形状の薄板を下板として用いることは有効でないことが考えられる。

3-2 板厚 1.5mm 1 枚を用いた場合

3-2-1 縦断面観察結果

板厚 1.5mm 1 枚を用い、電極加圧力 3kN、通電時間を 4~16cycle とし、突出し長さを変化させた際の断面観察結果を Fig.3-4 に示す。なお、縦断面評価方法は Fig.2-13 に示した通りである。1つの通電時間に対し2つプロットがあるのは、溶接部の2か所を評価したためである。その2か所とは、溶接機に向かって手前側(Front side)および奥側(Back side)である。Fig.3-4 より、通電時間によって薄板の溶融状態が異なることがわかる。また、突出し長さが増加するに従い、薄板が溶融するために長い通電時間が必要となり、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わかる。

突出し長さ 4mm では確認されなかったが、突出し長さ 1mm では通電時間 10cycle から、突出し長さ 2mm では 16cycle から、通電時間が増加するに従い薄板に金属が充填されていない状態が生じることが確認できる。しかし、突出し長さ 1mm における 1 回目と 2 回目の断面観察結果が通電時間 10cycle 以降で異なることがわかる。この要因は、縦断面観察結果から、板材側の溶融状態を 2 箇所では観察していないことが要因であると考え、次に突出し長さ 1mm における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。

3-2-2 横断面観察結果

管材と薄板との接触面における板側の溶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無くなるまで削り込んでいき、板側の溶融状態を観察した。断面観察方法は Fig.2-14 に示した方法で行った。Fig.3-5 に管材突出し長さ 1mm における接触面全周の溶融状態を示す。Fig.3-5 からわかるように、通電時間 6cycle 以降で板側に溶融した痕跡が観察され、通電時間が増加するにつれてその痕跡は外側向かって拡大することがわかる。これは、R 型電極は板材と点で接触するため、電流密度はその点付近に集中することが考えられるが、上記の結果はその逆の結果が観察されている。Fig.3-6 に溶接中に管材突出し部が潰れた際の概略図を示す。また、外側に潰れた突出し部と上部電極が接触した部分を図中に赤で示している。上部電極と潰れた突出し部が接触したことによって、溶接中に薄板の通電領域が外側に拡大したと考えられる。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.3-4(a)の突出し長さ 1mm における断面観察結果と一致していることから、通電時間 10cycle 以降では板側に金属が充填されない場合が存在することがわかった。

3-2-3 上部電極変位

3-2-3(a) 第1変位および第2変位

Fig.3-7 に突出し長さ 1mm, 電極加圧力 3kN, 設定電流 9.0kA, 通電時間 16cycle で行った溶接中の電極変位の例を示す. 横軸に溶接時間を, 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, 薄板が溶融する前に管材だけが溶融し, 突出し長さ 4mm, 通電時間 4cycle を除く条件で管材が潰れる. 上記のことが要因で生じる 1 回目の大きな変位を第 1 変位とする. また, 上部電極変位が変化しない時刻を過ぎた後, 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.

3-2-3(b) 各突出し長さにおける上部電極変位

Fig.3-8~10 に各突出し長さにおいて, 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 度行ったために(a)に 1 回目, (b)に 2 回目に行った際の結果を示し, グラフは上から通電時間 4cycle, 6cycle, …の順となっている. Fig.3-8 は突出し長さ 1mm における上部電極変位のグラフである. 通電開始から約 3.5cycle 後に上部電極が急激に下降し, 約-0.975mm で一定になることがわかる. また, 通電時間 12cycle 以上では第 2 変位が確認できる. これは, 薄板が軟化することで下部電極の形状に沿って下降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 10cycle 以下のデータとして, 通電時間 4cycle の上部電極変位のデータを基に考えると, 第 1 変位は約-0.959mm となる. 最大の第 2 変位が確認された, 通電時間 16cycle の 2 回目の実験における最大変位が -1.294mm であることから, 第 2 変位量は上記 2 つの値より約 0.335mm 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.3-11 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。

Fig.3-9 は突出し長さ 2mm における上部電極変位のグラフである。通電開始から約 3.8cycle 後に上部電極が急激に下降し、約-1.856mm で一定になることがわかる。また、第 2 変位は通電時間 16cycle において確認できる。先ほどと同様な方法で第 2 変位量を考えると、第 2 変位は約 0.304mm となる。

Fig.3-10 は突出し長さ 4mm における上部電極変位のグラフである。通電開始から約 4.3cycle 後に上部電極が急激に下降し、約-3.845mm で一定になることがわかる。また、突出し長さ 4mm では第 2 変位は確認できなかったが、第 1 変位後に、一度上昇して再び下降することがわかる。この原因について検討するために、Fig.3-12 に通電時間 16cycle で溶接した、溶接後を含む時刻 8cycle から 24cycle における上部電極変位を示す。Fig.3-12 から、上部電極が大きく降下した後、明らかに振幅していることがわかる。また、突出し長さ 4mm において、最大振幅が 0.04mm に対して、突出し長さ 1 および 2mm において、最大振幅が約 0.08mm と非常に小さいことがわかった。これは、上部電極が急激に大きく降下したために、落下後の衝撃で反射板が振動したのだと考えられる。上記のことが要因で、突出し長さ 4mm では振幅が大きいため、第 1 変位が終了した位置が確認できないため、2 変位を求めることができなかった。

3-2-4 電気抵抗変化

3-2-4(a) 半サイクル毎の平均電気抵抗の算出方法

Fig.3-13 に本実験の溶接中の溶接部の電気抵抗の例を示す。電気抵抗は、電圧と電流との比とすれば求まる。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、ここでは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.3-13 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の電気抵抗で整理したグラフが Fig.3-14～16 である。

3-2-4(b) 各突出し長さにおける電気抵抗変化

Fig.3-14 に突出し長さ 1mm、通電時間 4～16 cycle における半サイクル毎の電気抵抗値を示す。実験を 2 度行ったため、(a)に 1 回目、(b)に 2 回目に行った際の結果を示し、グラフは上から通電時間 4cycle, 6cycle, …の順となっている。グラフから、通電時間にかか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。グラフから時刻 0.5cycle で約 0.21mΩ 前後を示し、時刻 3.5cycle まで緩やかに抵抗値が減少した後、平均電気抵抗値が急激に減少することがわかる。その後、時刻 4.5cycle 以降で約 0.09mΩ で安定することがわかる。同様に、Fig.3-15 に突出し長さ 2mm、Fig.3-16 に突出し長さ 4mm における半サイクル毎の平均電気抵抗のグラフを示す。Fig.3-15 から、突出し長さ 2mm では時刻 0.5cycle で約 0.25mΩ を示し、時刻 4cycle まで平均電気抵抗が緩やかに減少した後、電気抵抗が急激に減少することがわかる。Fig.3-16 から、突出し長さ 4mm においては時刻

0.5cycle で約 $0.30\text{m}\Omega$ 示し、時刻 4.5cycle まで緩やかに減少した後、平均電気抵抗値が急激に減少することが確認できる。これらのことから突出し長さの増加に従い、電気抵抗が急激に減少する時刻が遅れることがわかる。また、各時刻における平均電気抵抗の値は、通電時間にあまり依存しないことから、通電時間 16cycle を基に比較を行う。Fig.3-18 は各突出し長さにおける平均電気抵抗を示している。グラフの○印は突出し長さ 1mm、△印は突出し長さ 2mm、□印は突出し長さ 4mm を示した。Fig.3-17 から、5.5cycle 以前では、突出し長さが長いほど平均電気抵抗値が大きくなる。これは、突出し長さが増加することで管材突出し部の体積抵抗が増加したこと要因であると考えられる。また、5.5cycle 以降では突出し長さに関わらず約 $0.09\text{m}\Omega$ で一定になることがわかる。これは、管材突出し部が潰れたことによって、上部電極と下部電極の距離が各突出し長さで同様になったためだと考えられる。

3-2-5 半サイクル毎のジュール発熱

3-2-5(a) 半サイクル毎のジュール発熱の算出方法

3-2-4 節で求めた半サイクル毎の平均電気抵抗値とそれ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ジュール発熱量を求めた。Fig.3-18 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求めた。この方法で求めた各突出し長さにおける半サイクル毎の平均電流値を Fig.3-19～21 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ジュール発熱量のグラフが Fig.3-22～24 である。

3-2-5(b) 各突出し長さにおける半サイクル毎のジュール発熱

Fig.3-22 に突出し長さ 1mm における半サイクル毎のジュール発熱量を、上から通電時間 4~16cycle の順まとめたグラフを示す。通電時間 16cycle において、時刻 2.5cycle で最大である 7.27kJ を示し、約 4.5kJ まで緩やかに減少することがわかる。次に、同様の方法でまとめた突出し長さ 2mm における半サイクル毎のジュール発熱量について Fig.3-23 に示す。通電時間 16cycle において、時刻 2.5cycle で最大である 7.45kJ を示し、約 5.0kJ まで穏やかに減少する。最後に、突出し長さ 4mm における半サイクル毎のジュール発熱量を示したグラフを Fig.3-24 に示す。通電時間 4cycle で最大である 9.65kJ を示すことがわかる。また、突出し長さ 4mm では、突出し長さ 1mm および 2mm に比べに半サイクル毎のジュール発熱の変動が大きいことがわかる。Fig.3-24 で示した突出し長さ 4mm の半サイクル毎のジュール発熱量は、この時刻の付近以降で変動が大きくなることがわかる。突出し長さ 4mm における半サイクル毎のジュール発熱量の変動が大きいことから、各突出し長さにおける半サイクル毎のジュール発熱量を比較する際、(a)および(b)の半サイクル毎のジュール発熱量のデータを平均し比較を行う。Fig.3-25 に各突出し長さにおける半サイクル毎のジュール発熱量のグラフを示す。グラフから、突出し長さ 1mm では時刻 2.5cycle で最大発熱量 7.258kJ、突出し長さ 2mm では時刻 3cycle で最大発熱量 7.655kJ、突出し長さ 4mm では時刻 3cycle で最大発熱量 8.312kJ を示した。

3-3-6 引張試験

3-3-6(a) 引張試験用試験片と通常試験片との比較

通常の試験片と引張試験用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、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.3-26 に電流値、Fig.3-27 に電圧値について通常試験片と引張試験用試験片とを比較したグラフを示す。Fig.3-26 および Fig.3-27 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。

3-3-6(b) 各突出し長さにおける引張強さ

Fig.3-28 に各突出し長さにおける引張強さを示す。グラフの横軸は通電時間、縦軸引張強さを示す。また、グラフの○印は突出し長さ 1mm、△印は突出し長さ 2mm、□印は突出し長さ 4mm を示している。Fig.3-28 から、突出し長さ 1mm では通電時間 6cycle で最大引張強さ約 11.37kN となり、突出し長さ 2mm では通電時間 8cycle で最大引張強さ約 12.01kN となり、突出し長さ 4mm では通電時間 10cycle で最大引張強さ約 10.59kN となった。突出し長さにおける最大引張強さを比較すると、突出し長さ 2mm が最も大きく、突出し長さ 4mm が最も小さいことがわかり、その差は約 1.42kN となる。また、突出し長さ 1mm と 2mm において、最大引張強さの差は約 0.64kN と小さいことから差はないと考える。いずれの突出し長さにおいて、最大引張強さを示した通電時間から、通電時間が増加すると引張強さが減少する傾向がある。これは、通電時間が長くなることで板側に金属が充填されない継手が存在するためと考えられる。

3-3 板厚 3mm 1 枚を用いた場合

3-3-1 縦断面観察結果

一般的に板厚の増加により，板材同士を溶接する際，同一加圧力のもとでは接触抵抗は高くなることで知られている^②．このことから板厚を増加させることで，管材と薄板との接触界面における発熱量が増加し，管材突出し部が潰れない条件で薄板と管材が溶接できるのではないかと考えた．そこで，板厚を 3mm に増加させ，突出し長さ 4mm，電極加圧力 3kN，通電時間を 4～16cycle として実験を行った．溶接した試験片の断面観察結果を Fig.3-29 に示す．なお，縦断面評価方法は 3-2-2 節と同様の方法で評価する．Fig.3-29 から，通電時間 12cycle までは板側に溶融部が確認されず，通電時間 14cycle 以降であっても，手前側のみに板側に溶融部を得られることがわかる．これは，板厚が増加したことで，薄板の溶融に必要な熱量が増加したことに起因しているのではないかと考える．

3-3-2 上部電極変位

Fig.3-30 に突出し長さ 4mm における，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．グラフは上から通電時間 4cycle，6cycle，…の順となっている．グラフから，通電時間にかか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．Fig.3-30 より，通電開始から約 3.5cycle 後に上部電極が急激に下降し，約 3.454mm まで減少することがわかる．また，通電時間 4cycle において管材突出し部は潰れないことがわかる．これは，板厚 1.5mm，突出し長さ 4mm において同様の結果となった．

3-3-3 半サイクル毎の平均電気抵抗変化

Fig.3-31 に 3-2-4 節と同様の方法で求めた、突出し長さ 4mm，通電時間 4～16 cycle における半サイクル毎の電気抵抗値を示す。グラフは上から通電時間 4cycle，6cycle，…の順となっている。グラフから，通電時間にかか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。グラフから時刻 0.5cycle で約 0.29mΩ を示し，時刻 4.5cycle まで平均電気抵抗が緩やかに減少した後，電気抵抗が急激に減少することがわかる。また，通電時間 5.5～6.0cycle で一度電気抵抗が上昇するが，これは，管材突出し部潰れることで上部電極が薄板の表面に近づき，薄板が急激に発熱し電気抵抗が上昇したと考えられる。その後，0.09mΩ で一定に続くことがわかる。

3-3-4 半サイクル毎の平均電流値

Fig.3-32 に 3-2-5 節と同様の方法で求めた，突出し長さ 4mm，通電時間 4～16 cycle における半サイクル毎の電気抵抗値を示す。グラフは上から通電時間 4cycle，6cycle，…の順となっている。グラフから，通電時間にかかわらず平均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。グラフから時刻 0.5cycle で約 4.23kA を示し，時刻 4.5cycle まで平均電流値が緩やかに減少した後，時刻 4.5～5.5cycle にかけて平均電流値が急激に上昇することがわかる。時刻 5.5～6.0cycle にかけて一度減少し，6.5cycle 以降で約 8.14kA で一定に続くことがわかる。

以上の実験結果を基に第 4 章にて比較し考察を行う。

第 4 章 考察

4-1 突出し長さの変化が累積発熱量におよぼす影響

4-1-1 上部電極変位と平均電気抵抗値の比較

第 3 章から、上部電極変位および平均電気抵抗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 において上部電極変位と平均電気抵抗のグラフを比較する。Fig.4-1 上部に上部電極変位，下部に平均電気抵抗のグラフを示す。また、グラフ内の黒線は突出し長さ 1mm における上部電極の急激な下降の開始時刻である 3.51cycle，赤線は突出し長さ 2mm におけるその 3.72cycle，青線は突出し長さ 4mm におけるその 4.25cycle を示す。上記の 3 つの線から、上部電極変位の急激な下降の開始時刻と、平均電気抵抗の急激な減少の開始時刻が概ね一致することがわかる。上記のことから、平均電気抵抗の急激な減少は、上部電極の急激に下降する減少に起因していることが考えられる。

4-1-2 各突出し長さにおける累積発熱量

Fig.3-26 で示した各突出し長さにおける発熱量の値を 0.5～16cycle において、時刻毎に積算したグラフを Fig.4-2～4 に示す。Fig.4-2 に突出し長さ 1mm，Fig.4-3 に突出し長さ 2mm，Fig.4-4 に突出し長さ 4mm における累積発熱量を示す。また、グラフ内の赤線は、時刻 0.5～3cycle におけるプロットから求めた近似直線を示し、青線は、時刻 11.5～16cycle におけるプロットから求めた近似直線を示している。これは、累積発熱量のグラフにおいて最も線形的に推移した前半および後半のプロットを選定して近似を行った。Fig.4-1～3 よ

り、赤線の傾きは突出し長さ 1mm で 13.05、は突出し長さ 2mm で 13.89、は突出し長さ 4mm で 15.94 となり、突出し長さの増加により傾きが急になることがわかる。Fig.4-1 からこの発熱量の増加は、突出し長さの増加に伴い電気抵抗値が増加することによって生じると考えられる。同様に青線の傾きを比較すると、突出し長さ 1mm で 9.50、突出し長さ 2mm で 10.04、突出し長さ 4mm で 9.51 となり、管材が潰れてからの発熱量はあまり変わらないことがわかる。これは、上部電極から突出した管材が潰れたことにより、突出し長さに関わらず上部電極と下部電極の距離が概ね等しくなることで、電気抵抗値が概ね一致したため等しくなったと考えられる。

4-1-3 管材突出し部の溶融に必要な発熱量

抵抗溶接において、溶接中の試験片内部の抵抗値は激しく変動する。そのため溶接中の溶融生成過程における温度分布を計算によって求めることは困難とされている³⁾。そこで、本研究の測定データから求めた累積発熱量を用い、電極および試験材料周辺から逃げる熱を無視して考えた場合、管材と薄板の溶接において必要となる板側に溶融部を得るために必要な通電時間を、突出し長さ毎に求める手法を提案する。Fig.4-5 上部のグラフに、各突出し長さにおける累積発熱量を比較したグラフを示す。次に Fig.4-6 に各突出し長さにおける上部電極変位のグラフを示す。突出し長さ 1mm では時刻 6.60cycle、突出し長さ 2mm では時刻 7.22cycle、突出し長さ 4mm では時刻 8.63cycle で第 1 変位が完了していることがわかる。この時刻までに生じる、各突出し長さにおける累積発熱量を $Q_t(\text{突出し長さ})$ とし、管材突出し部 1mm 当たりを溶融するのに必要な累積発熱量 Q_m とする。Fig.4-5 上部のグラフから $Q_t(\text{突出し長さ})$ を読み取った値を Fig.4-5 下部に示す。 $Q_t(\text{突出し長さ})$ は、管材突出し部の固有抵抗による発熱量、管材と薄板の接触抵抗による発熱量および薄板の固有抵抗による発熱量と大きく 3 つに分類して考えることができ、このことを踏まえると $Q_t(\text{突出し長}$

さ)の差から計算によって Q_m を求めることができる。しかし、累積発熱量は半サイクル毎の発熱量であるため、この計算を行う際には 0.5cycle 毎の発熱量を 0.01cycle まで細分化し計算を行う。以下にその計算方法を示す。

$$(Q_t(4\text{mm}) - Q_t(1\text{mm})) / 3 = Q_m \dots (2)$$

$$(Q_t(4\text{mm}) - Q_t(2\text{mm})) / 2 = Q_m \dots (3)$$

$$Q_t(2\text{mm}) - Q_t(1\text{mm}) = Q_m \dots (4)$$

上記の式(1)~(3)から、 Q_m が 3 つ得られる。(1)から与えられる Q_m を Q_{m1} 、(2)から与えられる Q_m を Q_{m2} 、(3)から与えられる Q_m を Q_{m3} としたとき、Fig.4-5 下部の表より、 Q_{m1} は約 13.23kJ、 Q_{m2} は約 14.97kJ、 Q_{m3} は約 9.75kJ となることがわかる。結果が少しばらついてしまったため Q_{m1} 、 Q_{m2} および Q_{m3} の平均値を真値とし考えると、 Q_m は約 12.65kJ となる。

4-1-4 板材の溶融に必要な発熱量

Fig.3-5 から板側に溶融部が得られる通電時間は突出し長さ 1mm で 6cycle、突出し長さ 2mm で 8cycle、突出し長さ 4mm で 10cycle となる。上記の時刻までに生じる、各突出し長さにおける累積発熱量を Q_{pt} (突出し長さ)とした際の発熱量を Fig4-5 下部に示す。また、薄板 1.5mm 溶融するのに必要な累積発熱量 Q_p とすると、 Q_p を求める式は以下のようになる。

$$Q_{pt}(4\text{mm}) - Q_m \times 4 = Q_p \dots (5)$$

$$Q_{pt}(2\text{mm}) - Q_m \times 2 = Q_p \dots (6)$$

$$Q_{pt}(1\text{mm}) - Q_m = Q_p \dots (7)$$

上記の式(1)~(3)から、 Q_{pt} が 3 つ得られる。(1)から与えられる Q_{pt} を Q_{p1} , (2)から与えられる Q_{pt} を Q_{p2} , (3)から与えられる Q_{pt} を Q_{p3} としたとき、 Q_{p1} は約 84.64kJ, Q_{p2} は約 74.15kJ, Q_{p3} は約 61.16kJ となる。 Q_m を求めたときと同様に Q_{p1} , Q_{p2} および Q_{p3} の平均値を真値とし考えると、 Q_p は約 73.31kJ となる。よって Q_m および Q_p から発熱量を求めることで、この値と Fig.4-5 上部のグラフより板側に熔融部を得るために必要な通電時間を求めることができる。

4-2 板材の変化が熔融状態におよぼす影響の考察

4-2-1 上部電極変位の比較

板厚 1.5mm の板 2 枚で管材と板材の溶接を行った際、下部電極の表面と下板熔融部が接合してしまったために、実験を通電時間 12cycle までで終了したため、以降、電極加圧力 3kN, 設定電流 9kA, 通電時間 12cycle の測定データを基に考察を行う。また、板厚 1.5mm の板 1 枚と管材を溶接する場合を(a)、板厚 1.5mm の板 2 枚と管材を溶接する場合を(b)、板厚 3mm の板 1 枚と管材を溶接する場合を(c)とする。Fig.4-7 に突出し長さ 4mm において(a)~(c)で溶接した際の上部電極変位を示す。グラフから、(b)および(c)では上部電極変位の各時刻における値が概ね一致するのに対して、(a)は(b)および(c)と同様に上部電極変位が推移するが、全体的に変位量が小さいことがわかる。また、上部電極が急激に下降する以前の時刻において、(b)および(c)は上部電極変位が増加することがわかる。これは、溶接中のジュール発熱により薄板が熱膨張したために生じたと考えることができ、(b)および(c)では板側全体の厚さが 3mm で同様であることから、上部電極変位の示す傾向が同様であったと考えられる。しかし、(b)では薄板と下板との接触面において、接触抵抗が存在することから、(b)および(c)では電気抵抗値が異なることが考えられるため、次に半サイクル毎の平均

電気抵抗値の観点から考察を行う。

4-2-2 半サイクル毎の平均電気抵抗の比較

Fig.4-8 に(a)~(c)における平均電気抵抗のグラフを示す。(a)および(c)における半サイクル毎の平均電気抵抗は、上部電極の急激な下降が生じる時刻 4~7cycle を除き概ね一致し、7cycle 以後は約 $0.01\text{m}\Omega$ の差を保ったまま一定になる。これは、管材突出し部の体積抵抗が支配的であったため、板厚を厚くすることで得られる接触抵抗の増加が見られなかったことが考えられる。次に、(b)と(c)を比較する。(b)では時刻 0.5cycle で約 $0.39\text{m}\Omega$ を示し、0.5~2cycle の間で急激に抵抗値が減少していることがわかる。(a)および(c)において、時刻 0.5cycle で平均電気抵抗は約 $0.29\text{m}\Omega$ に対して、(b)では約 $0.39\text{m}\Omega$ と約 $0.1\text{m}\Omega$ 大きい。時刻 1.5cycle まで急激に減少した後、時刻 4cycle まで約 $0.3\text{m}\Omega$ で一定となる。その後、上部電極の急激な下降が生じる時刻 4~7cycle で電気抵抗が急激に減少し、約 $0.11\text{m}\Omega$ で一定となる。(b)の抵抗値は管材と薄板の接触抵抗、および溶接中の試験片がもつ体積抵抗を含んだ電気抵抗値であることから、(b)と(c)の電気抵抗の差は 2 枚の板の接触抵抗によるものだと考えることができる。上記のことから、2 枚の板の接触抵抗は約 0.1 から $0.01\text{m}\Omega$ に変動するのに対し、それ以外の抵抗は約 0.29 から $0.1\text{m}\Omega$ に変動し、その差は非常に大きいことがわかる。しかし、(b)では第 3 章から管材と板材が接合するよりも早く板材が接合することがわかっていることから、管材突出し部が軟化し時刻 5~6cycle の間で潰れてしまうことが要因で、管材と薄板の接合の妨げになることが考えられる。次に、この要因を半サイクル毎の平均電気抵抗の観点から考察する。

4-2-3 半サイクル毎の平均電流値

Fig.4-9 に(a)～(c)における平均電流値を示す。グラフから(a)では時刻 4.5cycle, (b)では時刻 5.5cycle, (c)では時刻 5.0cycle で電流値が急激に上昇していることがわかる。これは、Fig.4-8 から電気抵抗値が急激に減少した時刻と一致する。このことから、管材突出し部の電気抵抗が大きすぎるために外部電源の特性⁴⁾から、上部電極が急激に下降する時刻以前で、設定した電流値の約 56%の電流値しか得ることができなかったことが考えられる。一般的に、溶接電流値は抵抗溶接において最も重要な因子であり、溶接電流値が小さ過ぎると溶融部に溶着が起こらない⁵⁾とされている。上記のことから、管材と板材が潰れる前に接合するためには、溶接電流を増加させる必要があると考えられる。

4-3 最適溶接条件

上記の考察から、高い溶接電流において溶接を行うことが必要であることが確認できた。よって、電気抵抗値が最も低い条件で溶接を行うべきであることから、突出し長さ 1mm で実験を行うべきであることが言える。また、板 2 枚を用いることや、板厚を増加することは電気抵抗値を増加させる要因となるため、最適条件から除外する。次に、Fig.3-5 における縦断面観察結果より、突出し長さ 1mm では通電時間 6cycle 以降で板側に溶融部を得ることが確認されている。しかし、Fig.3-6 における横断面観察結果から、通電時間 12cycle 以降で板側に金属が充填されない状態が確認できることより、通電時間 6～8cycle を適正条件と考える。また、Fig.3-29 における引張試験の結果より、通電時間 6cycle で引張強さが最大となったことから、本研究における電極加圧力 3kN, 設定電流 9kA とした際の最適溶接条件は、突出し長さ 1mm, 通電時間 6cycle であると考えられる。

第5章 結言

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について検討した結果、以下の結論を得た。

- 1) 板厚 3mm, 突出し長さ 4mm における実験において、すべての通電時間で薄板の未熔融部が存在した。
- 2) 板厚 1.5mm を 2 枚利用し厚さを 3mm とした実験では、管材と板材の接触面、および両板材の接触面の 2 カ所で同時に発熱した。特に両板材の接触面における熔融が顕著で、溶接部が得られる前に薄板が溶け落ちた。
- 3) 板厚 1.5mm を 1 枚用いて突出し長さを変化させた実験において、管材だけでなく薄板が熔融する溶接条件を見出した。突出し長さを増加させると必要な通電時間は増加した。溶接電流 9.0kA における継手の最大引張強さは、突出し 1mm では通電時間 6cycle において 11.37kN, 突出し 2mm では 8cycle において 12.01kN, 突出し 4mm では 10cycle において 10.59kN を示した。
- 4) 板厚 1.5mm を 1 枚用いて突出し長さを変化させた実験において、突出し長さを増加させることにより管材の突出し部が潰れ始める時刻が遅れた。
- 5) 板厚 1.5mm を 1 枚用いて突出し長さを変化させた実験において、突出し長さを増加させることにより電気抵抗の急増が開始される時刻が遅れ、その開始時刻は管材突出し部が潰れ始める時刻と概ね一致した。また、管材が潰れる以前において、材料全体の電気抵抗の内、管材突出し部における電気抵抗が大きいため電源の外部特性から溶接電流は設定電流の約 56%となった。

以上の結果より、管材突出し部が潰れる以前では、材料全体の電気抵抗の内、管材の突出し部が占める割合が大きいため薄板を熔融するのに必要な電流を得られない。電流値が低いと管材と板材の間で溶接されないため、管材突出し部が潰れた後に板側に熔融部を得る。よって、管材の突出し部が増加するほど板側に熔融部を得る時刻が遅れる。これらのことより、高い溶接電流において溶接を行うために、抵抗値の低い条件で溶接を行う必要がある。よって本研究では、電極加圧力 3kN, 設定電流 9kA の条件下で抵抗値が最小であった、突出し長さ 1mm, 通電時間 6cycle が最適条件と考えられる。

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実平名誉教授，川上博士准教授，尾崎仁志助教に深く感謝致します．また本論文をまとめるにあたりご助言を賜りました同大学院工学研究科，松井正仁准教授に深く感謝いたします．

なお，本研究で用いたデータと実験装置は鈴木実平名誉教授，並びに三重大学大学院工学研究科博士前期課程平成 28 年度終了の松谷亮太氏によるものです．ここに記して，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．

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) 松谷 亮太: 薄板と細管の抵抗溶接部の熔融状態におよぼす下部電極形状の影響, 平成28年度, 修士論文
- 3) 浜崎 正信: 重ね抵抗溶接, 桜井広濟堂(1971)p22
- 4) 木原博士: 現代溶接工学, オーム(1974)p18
- 5) 木原博士: 現代溶接工学, オーム(1974)p50

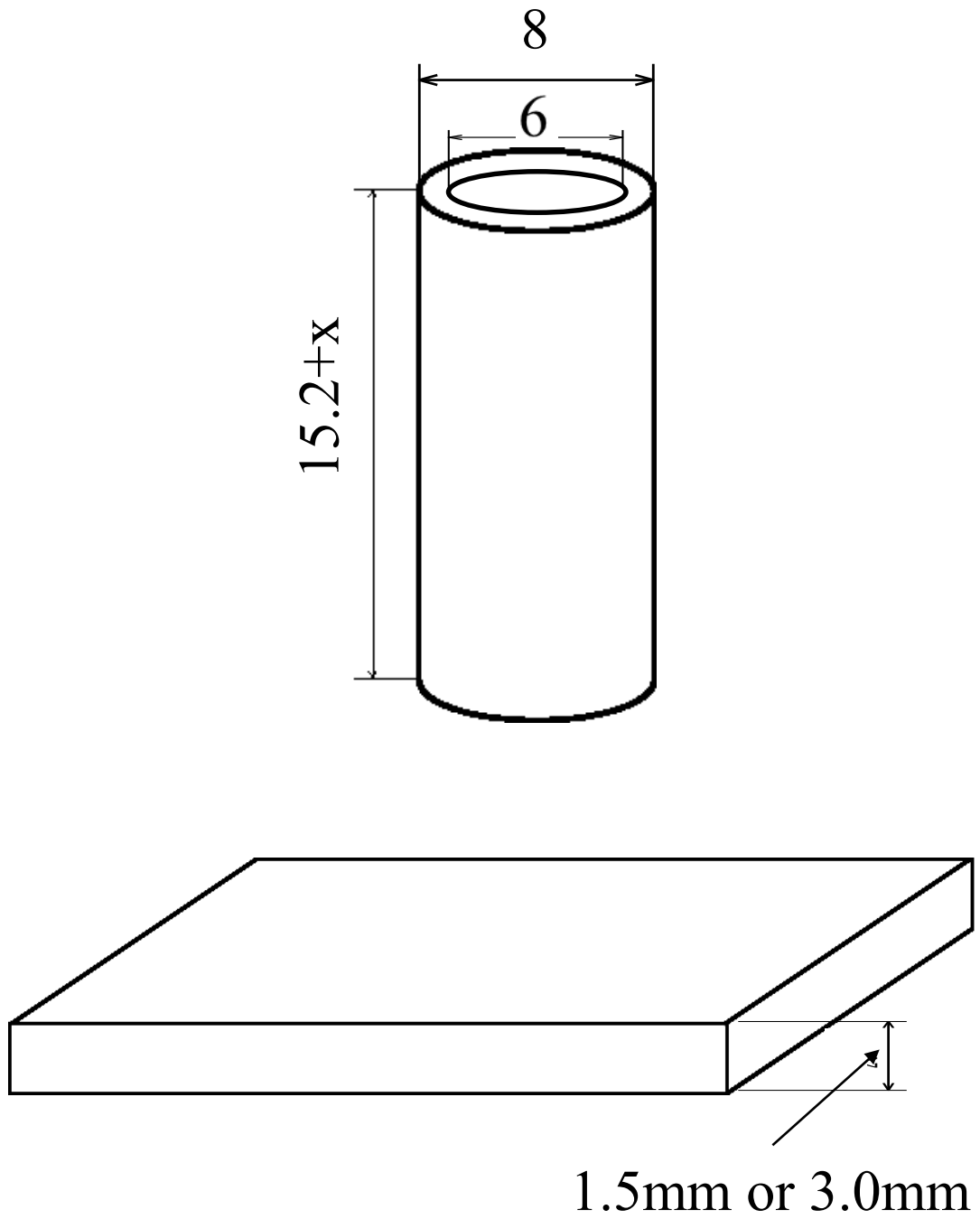


Fig.2-1 Schematic diagram of tube and plate

Table 2-1 Chemical compositions
of SUS304 used (mass%)

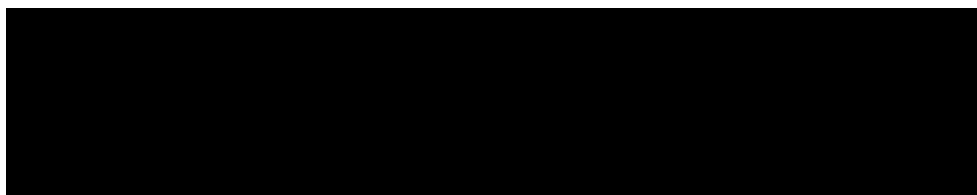
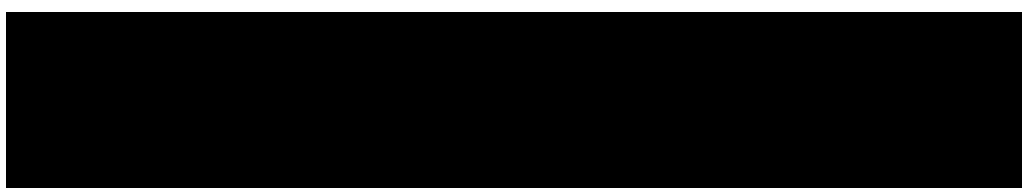
A large black rectangular box redacting the content of Table 2-1.

Table 2-2 Physical properties
of SUS304 used

A large black rectangular box redacting the content of Table 2-2.

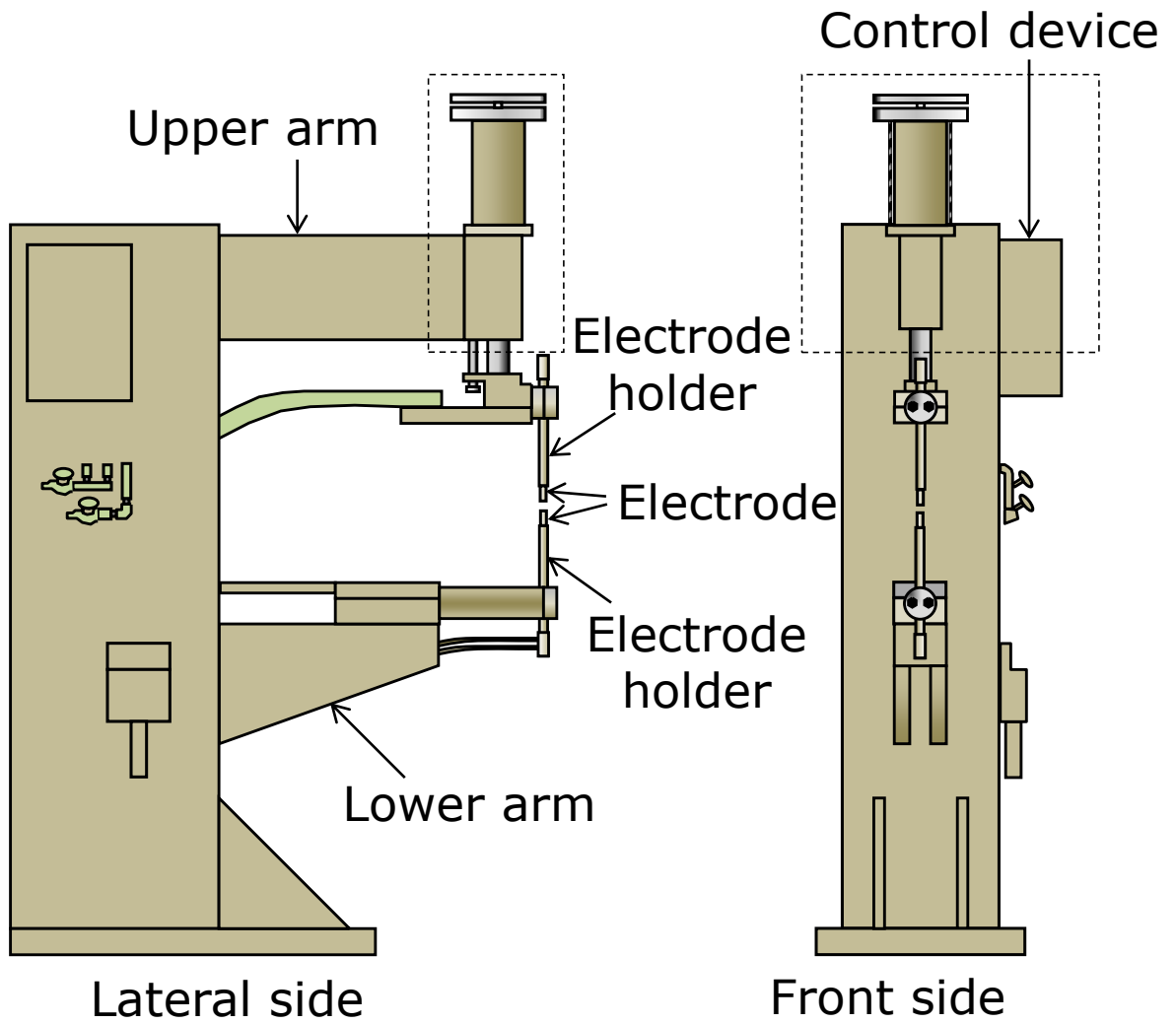


Fig.2-2 Schematic diagram of resistance welding machine

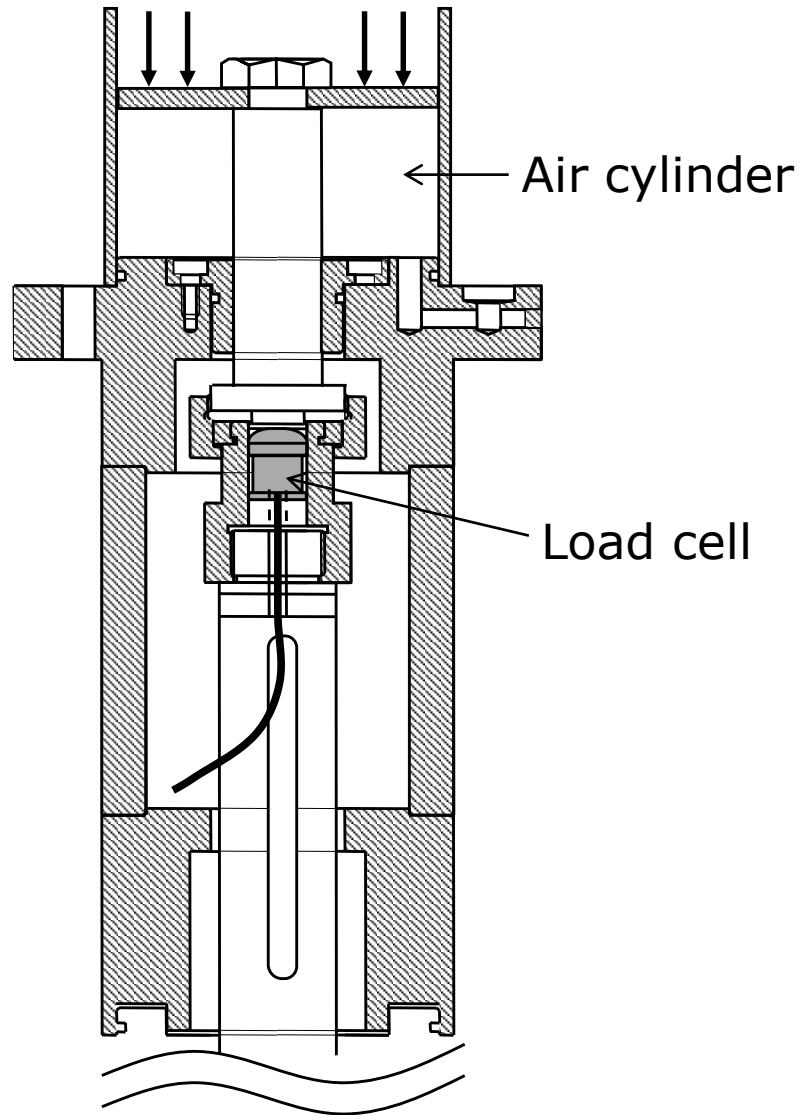


Fig.2-3 Schematic diagram of insertion position of load cell

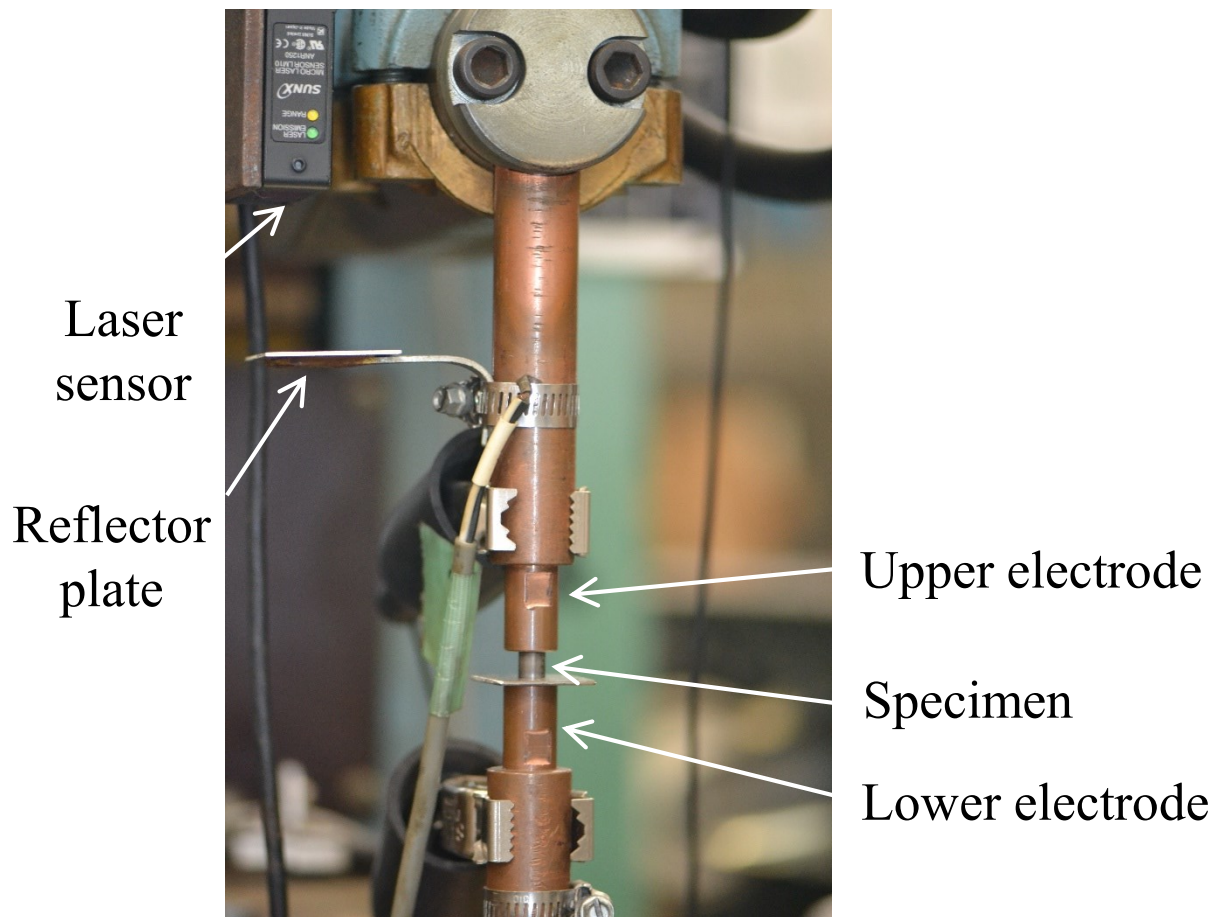


Fig.2-4 Measurement method of electrode displacement by using laser sensor

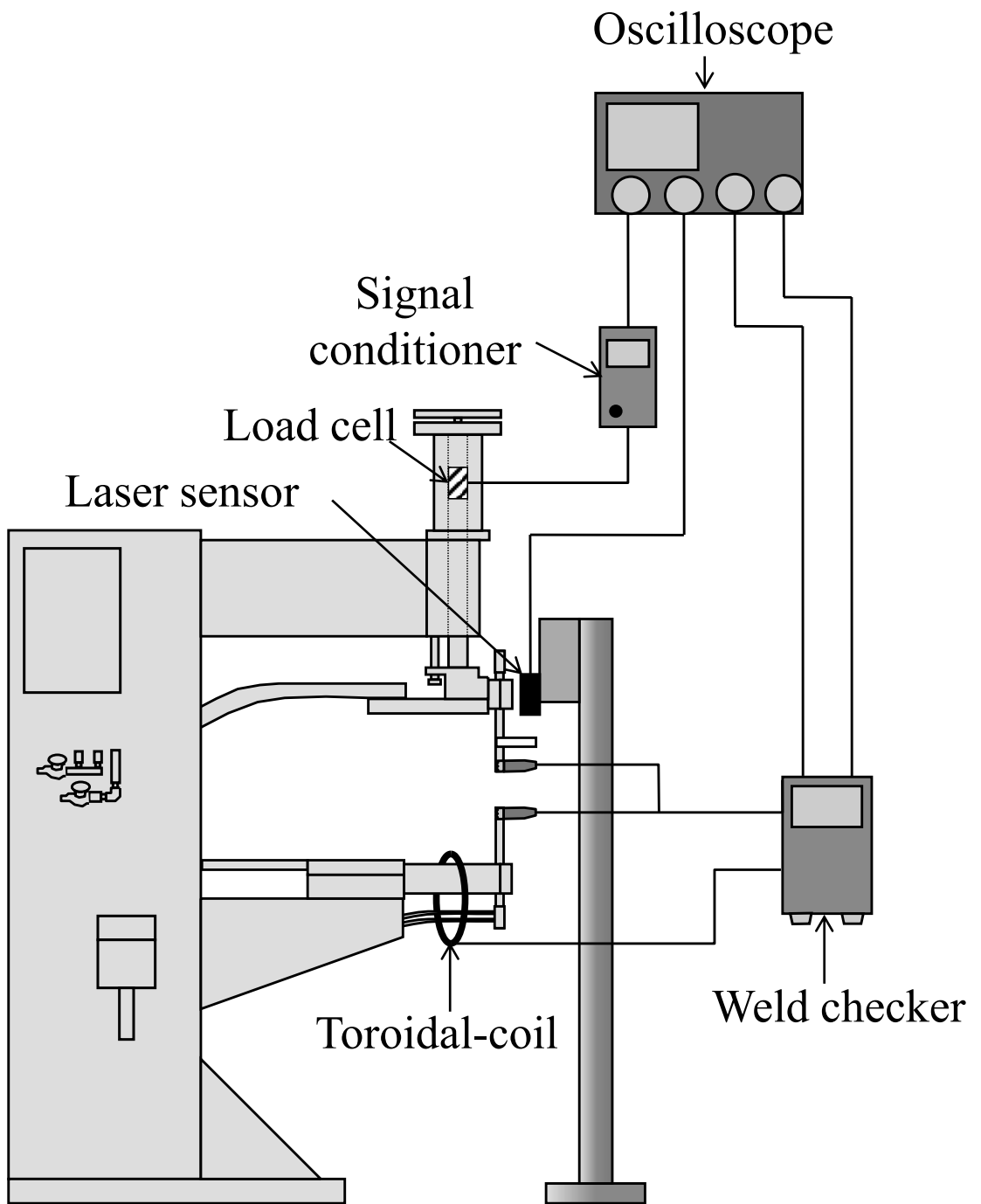


Fig.2-5 Schematic diagram of resistance welding machine after modification

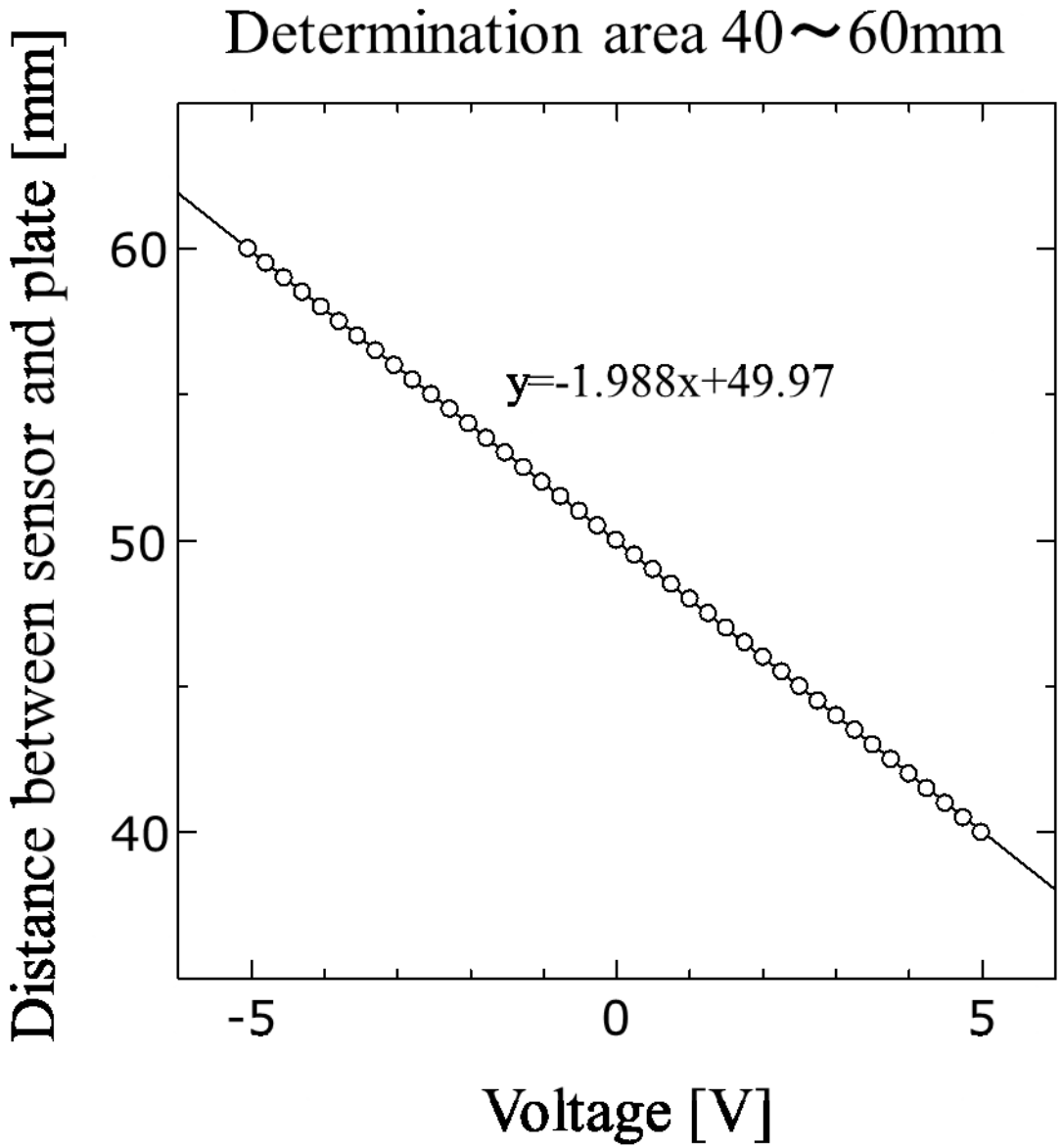


Fig.2-6 Relation between voltage
and displacement sensor

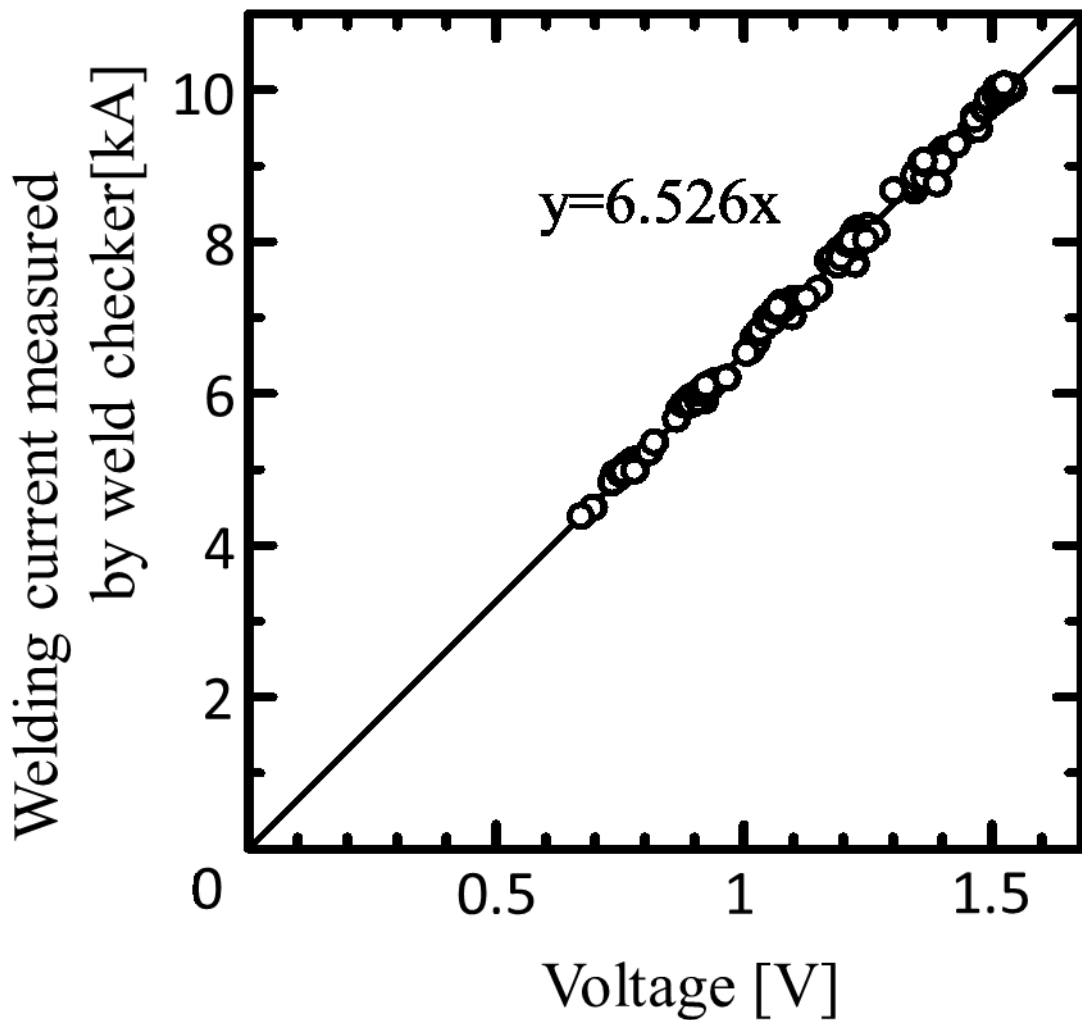


Fig.2-7 Relation between voltage and Welding current measured by weld checker

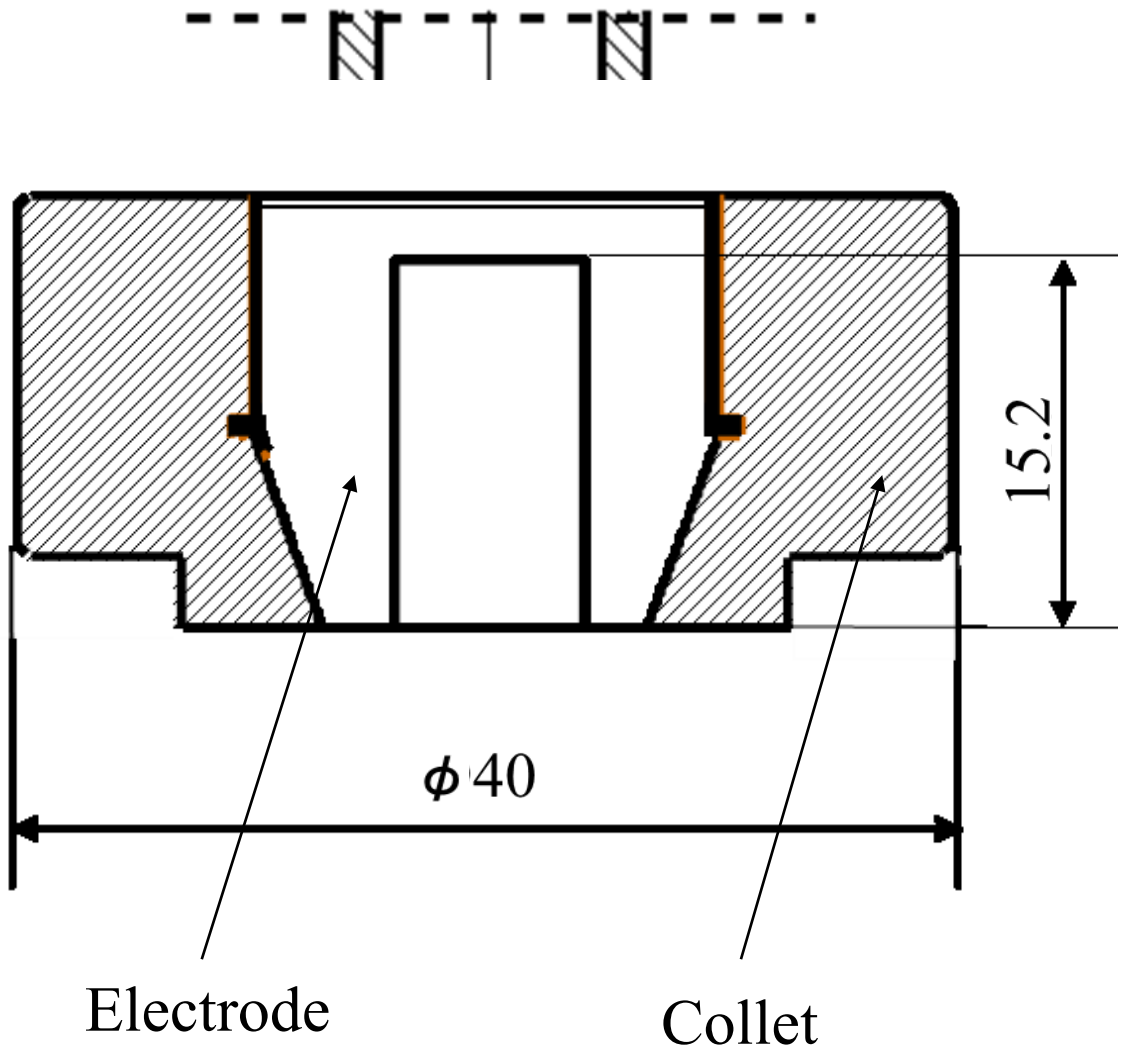


Fig.2-8 Schematic drawing
of upper electrode

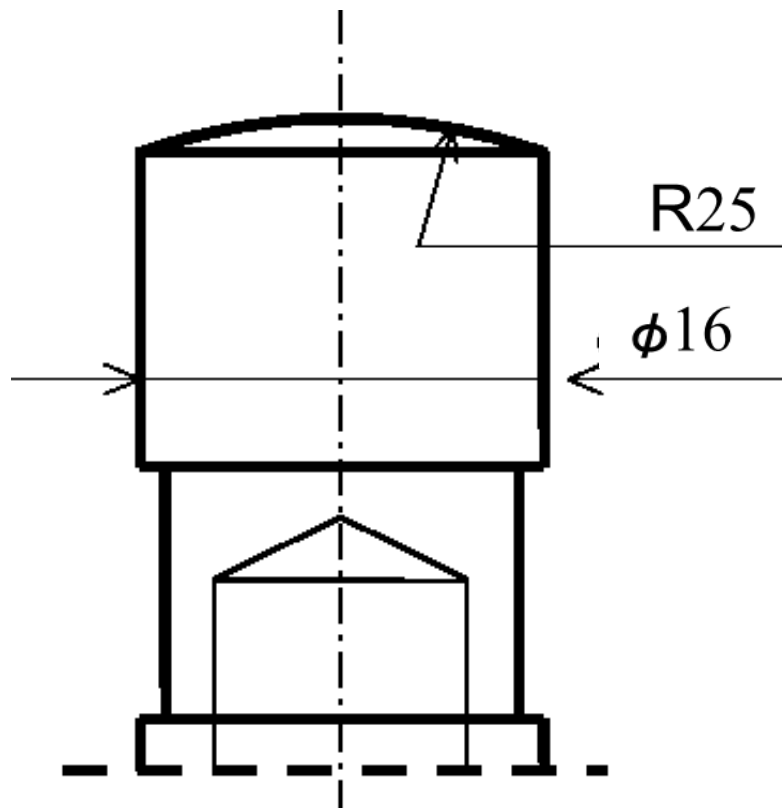


Fig.2-9 Schematic diagram of lower electrode

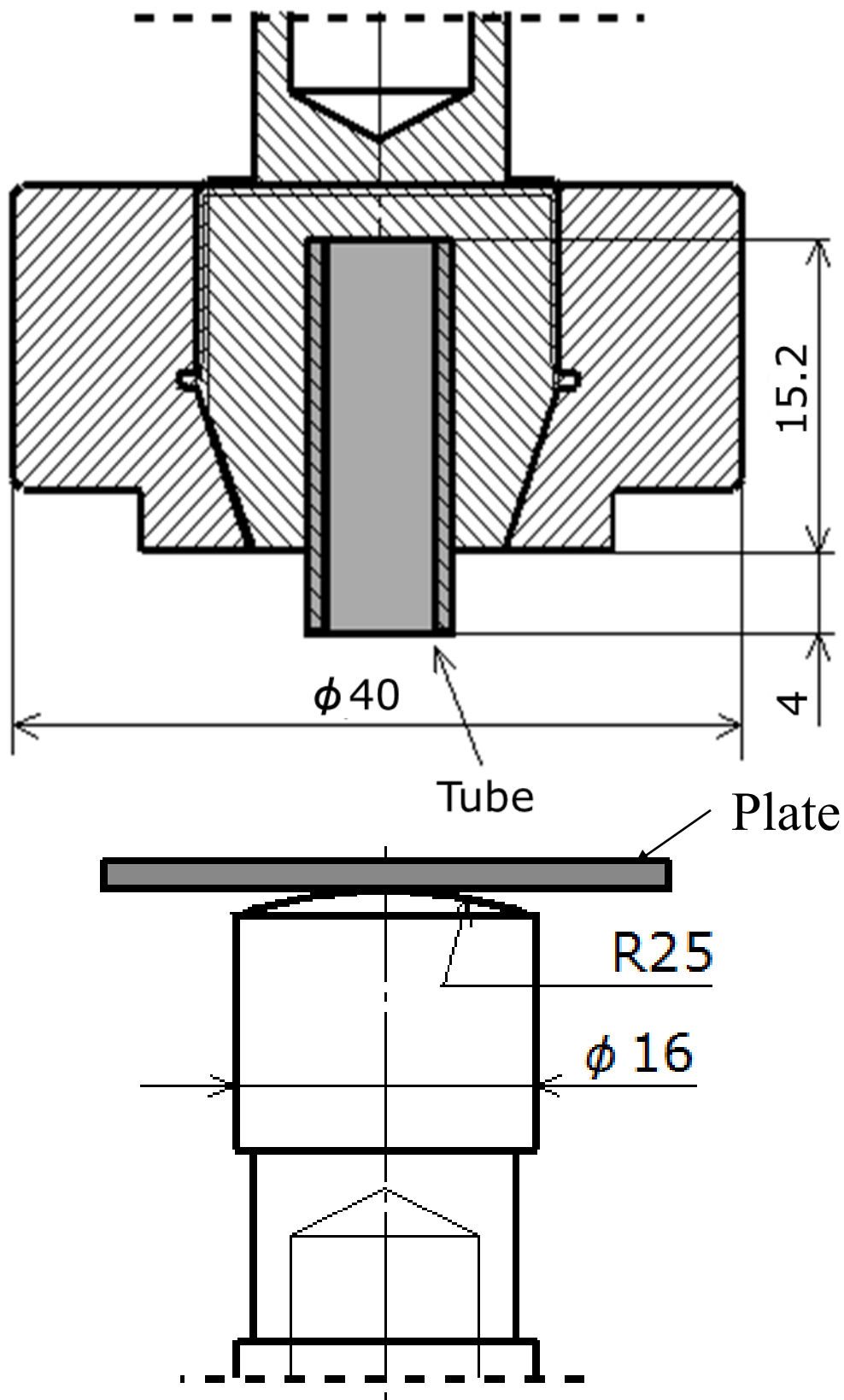


Fig.2-10 Schematic of diagram drawing of upper electrode

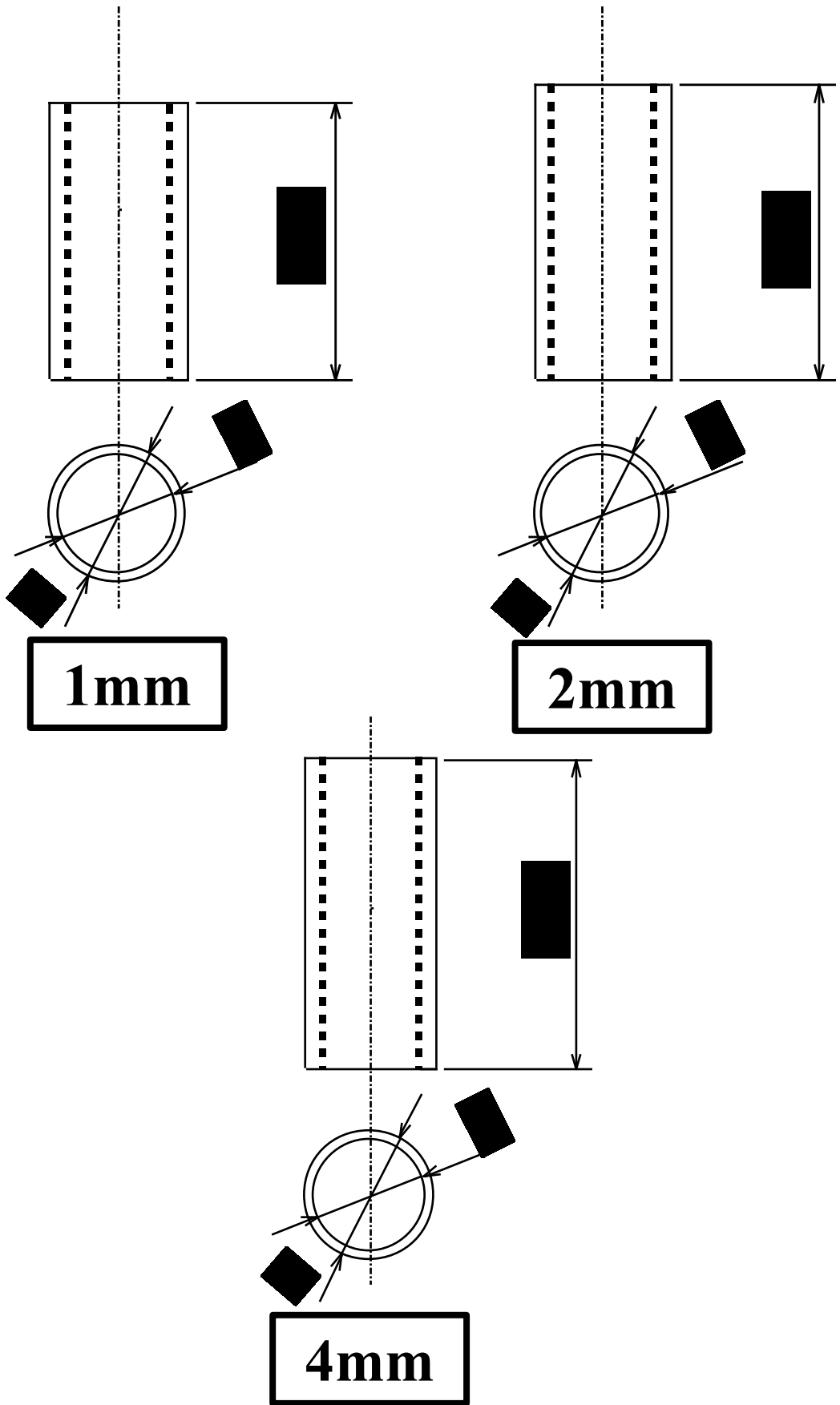


Fig.2-11 Schematic of diagram tube drawing for tensile test

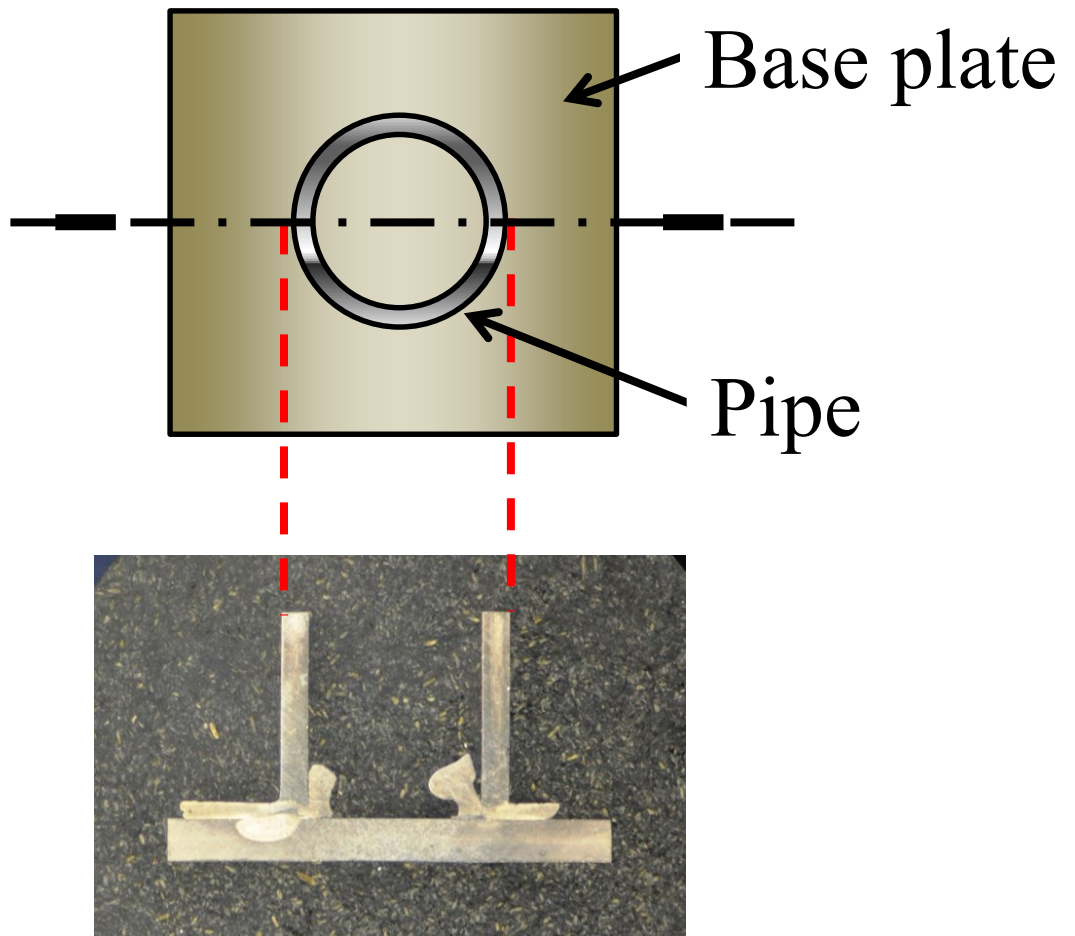
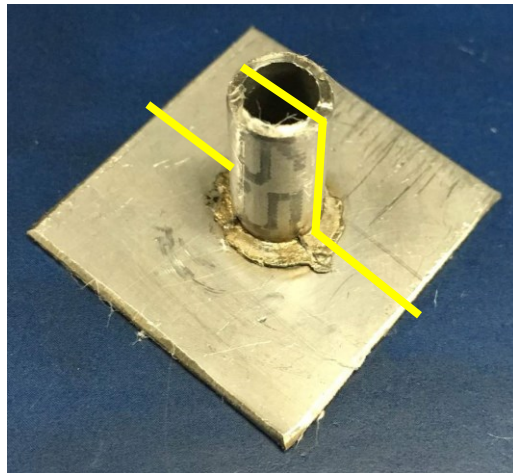
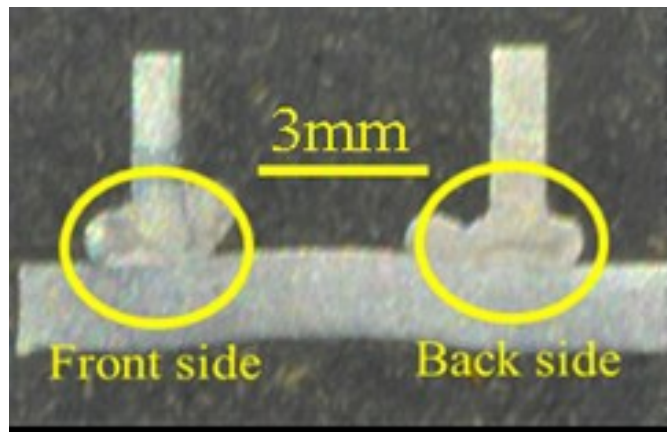
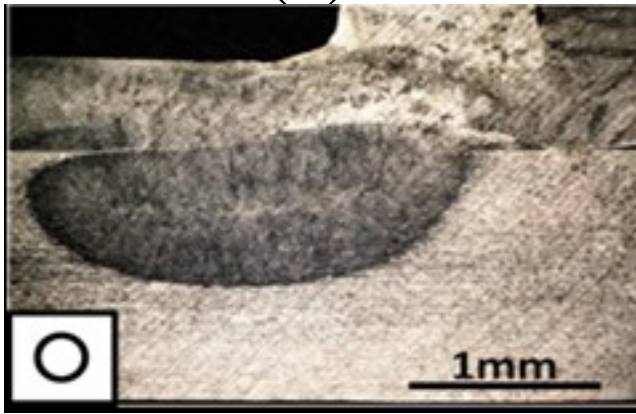


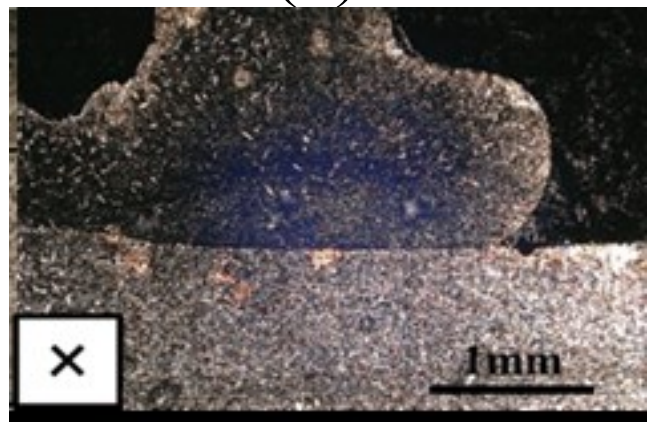
Fig.2-12 Appearance specimen after welding and method of cross section observation



(a)



(b)



(c)

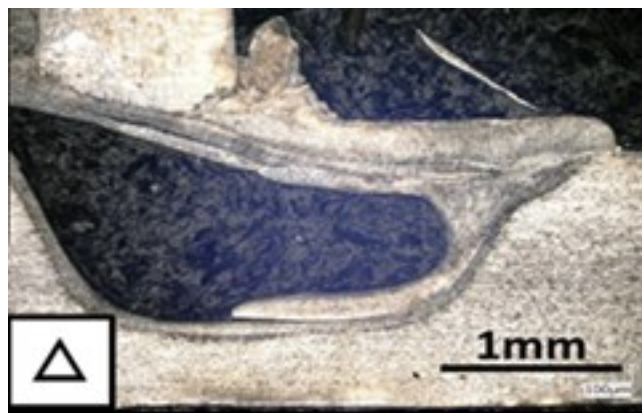


Fig.2-13 Method for evaluating melting of sheet material

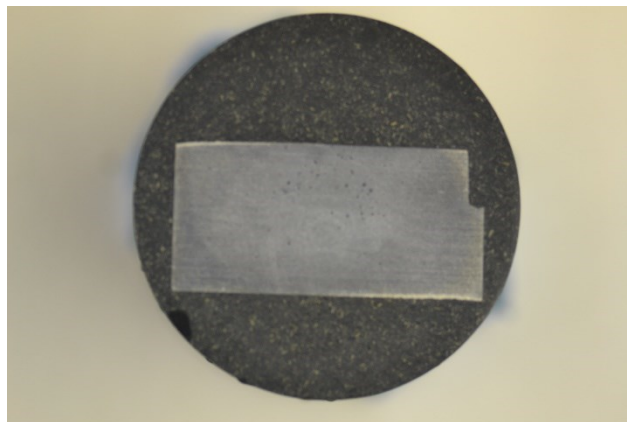
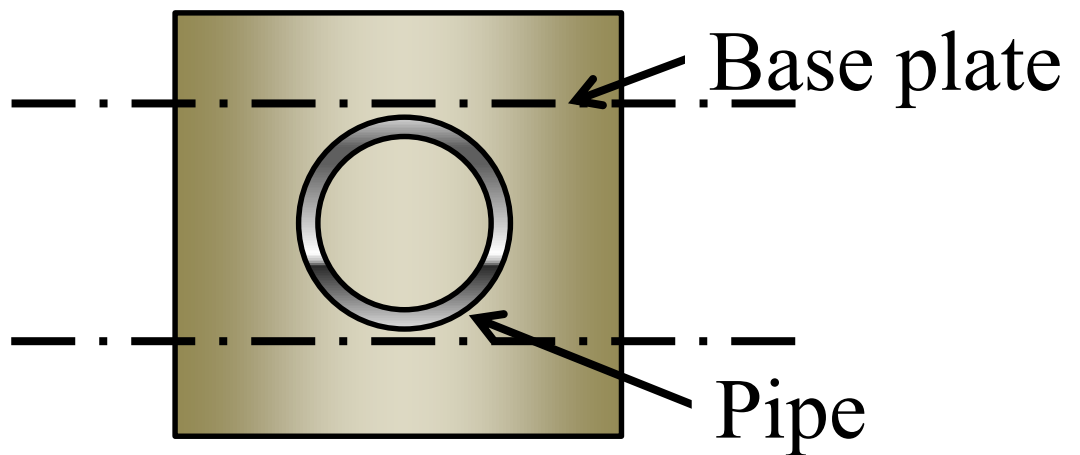
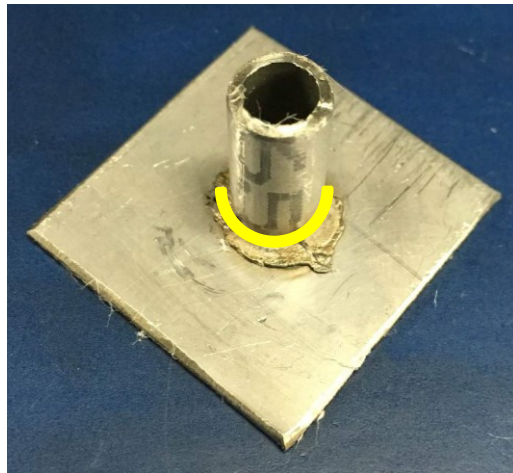


Fig.2-14 Appearance specimen after welding cross section observation method in the plane direction

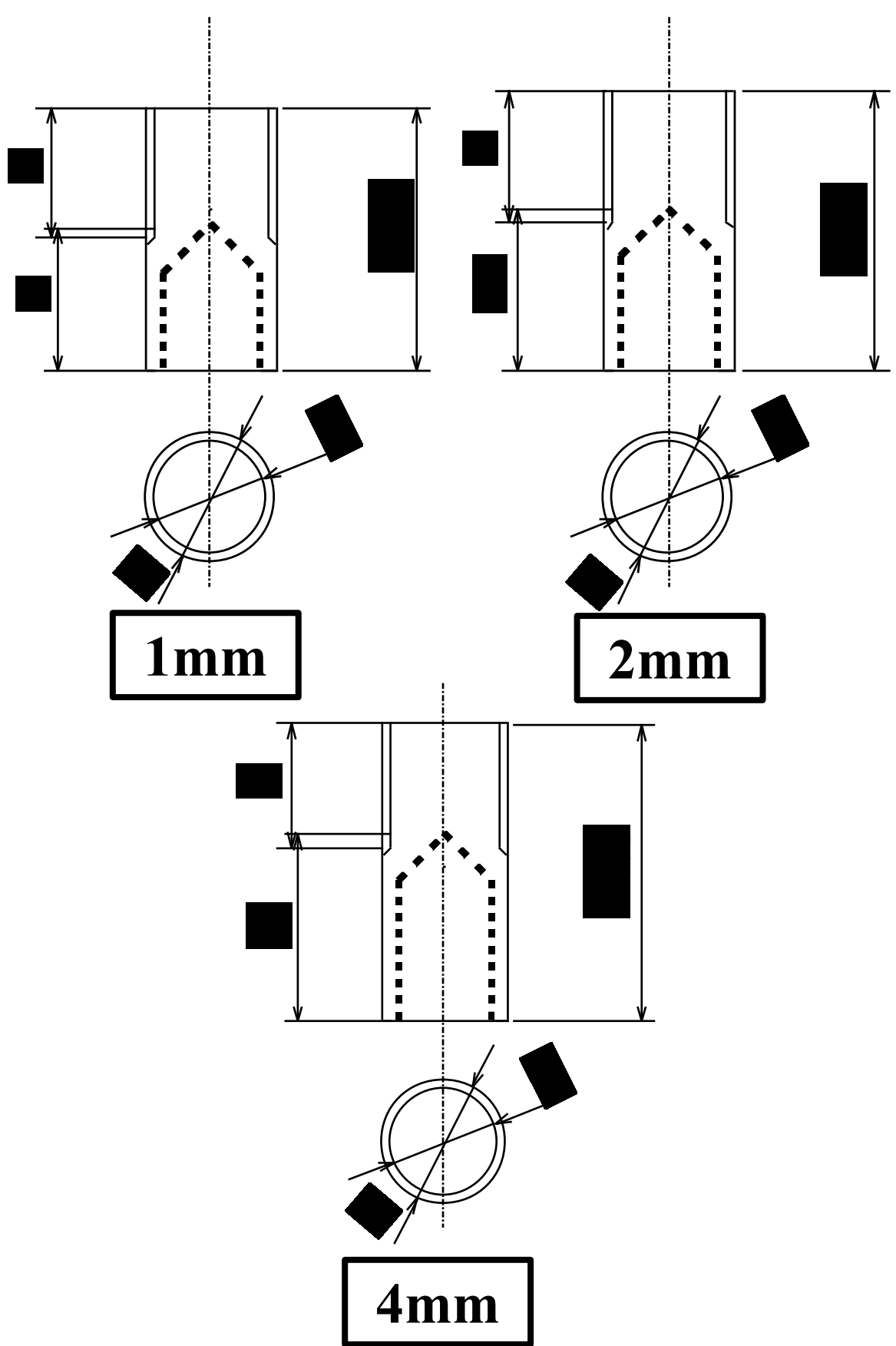


Fig.2-15 Tube drawing for tensile test

Maximum tensile strength

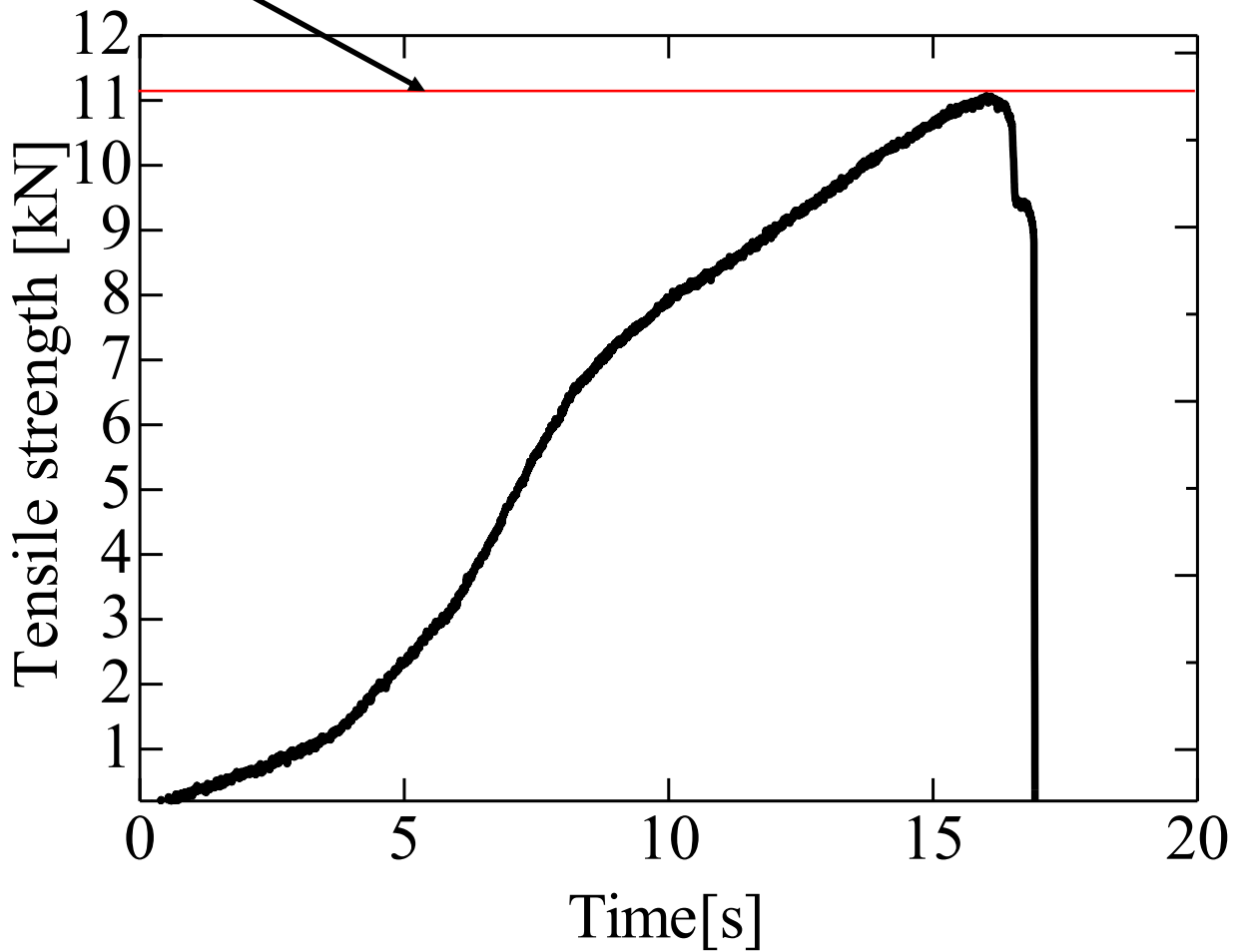


Fig.2-16 Tensile test data

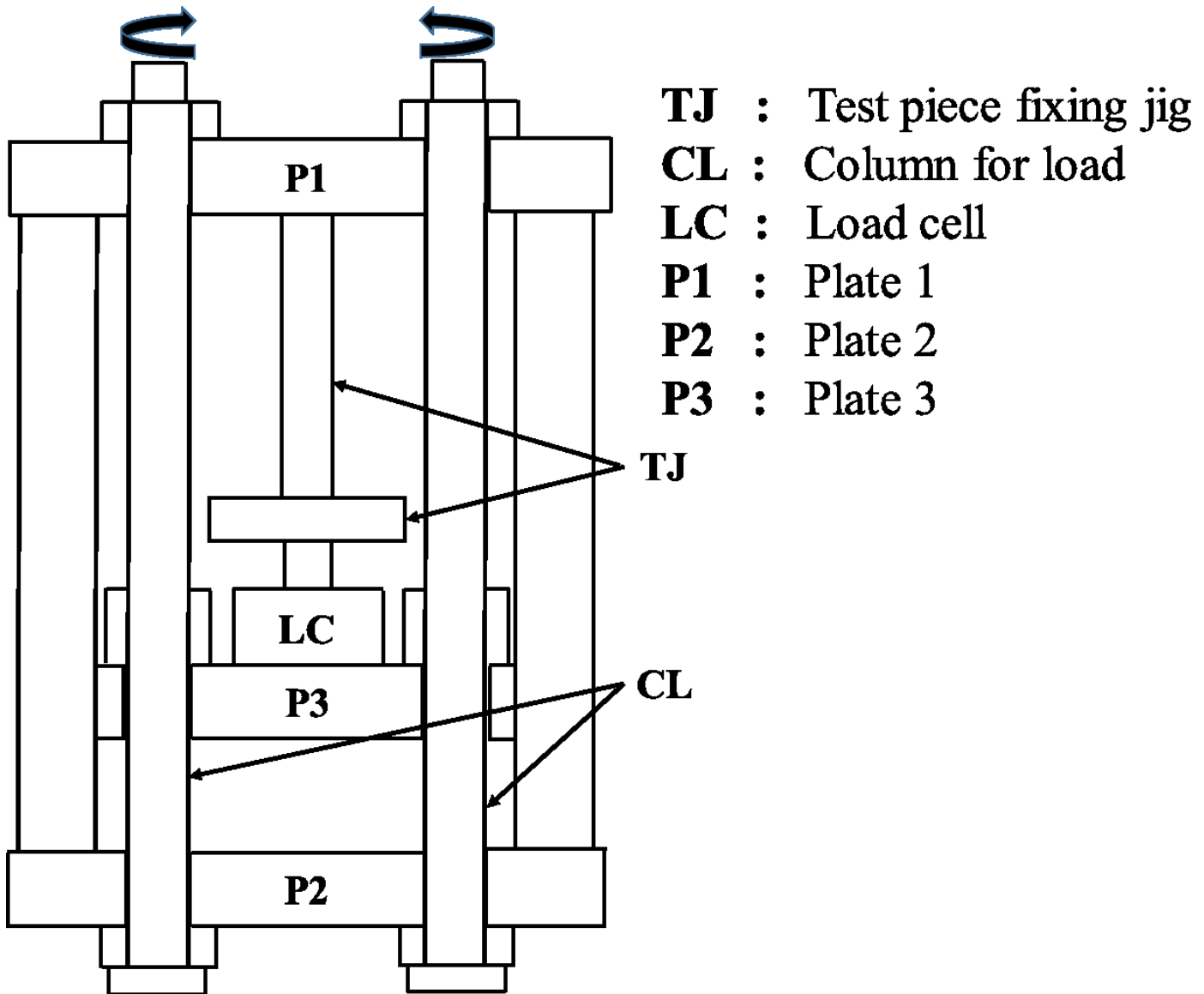


Fig.2-17 Tensile Test Machine Schematic

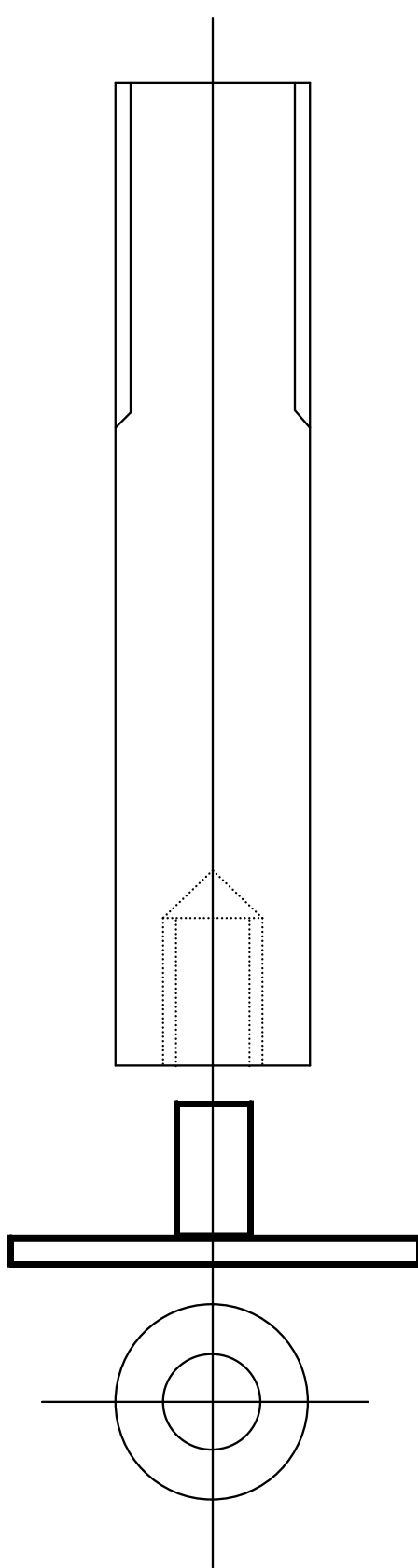


Fig.2-18 Tube side specimen holder

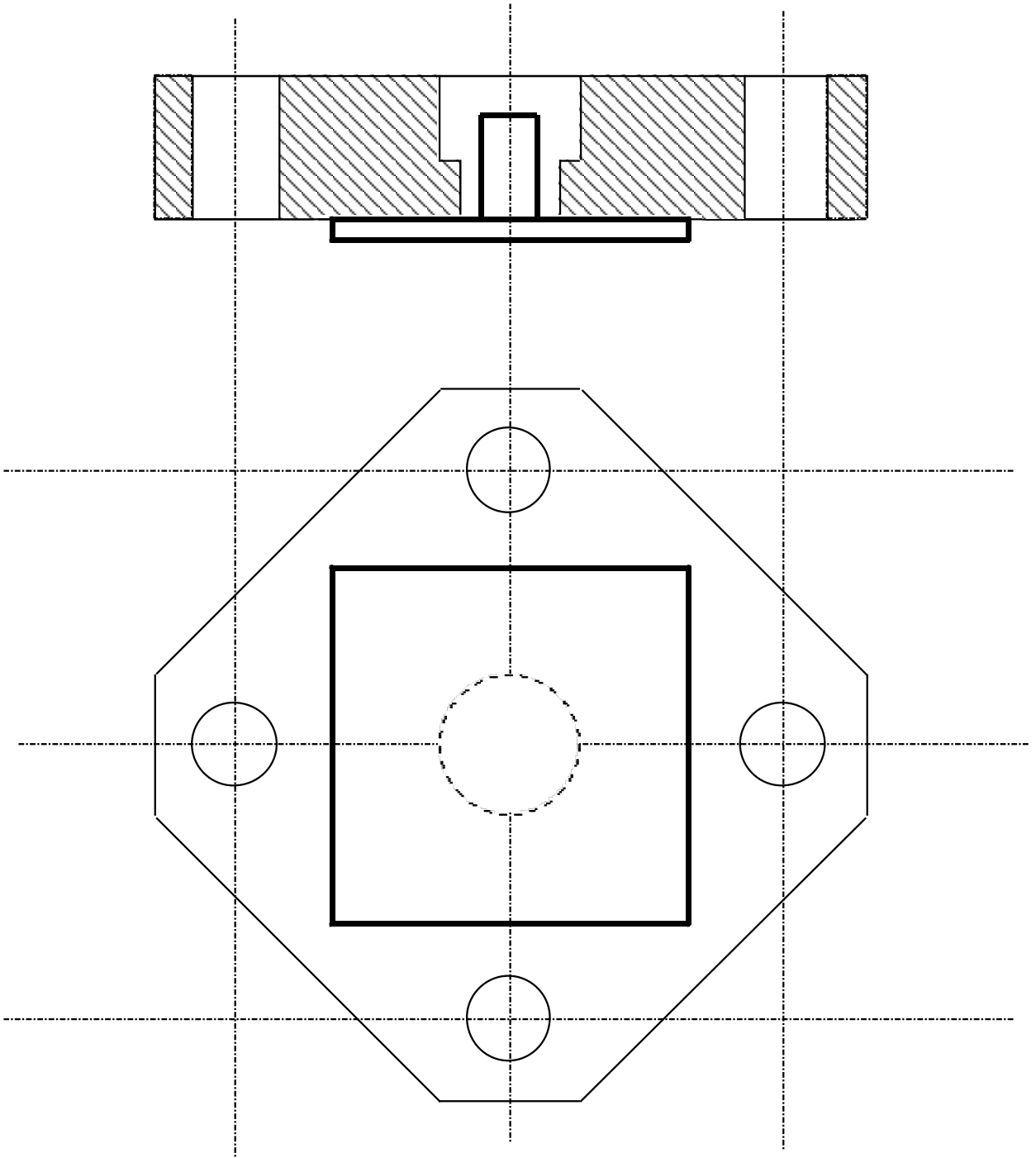


Fig.2-19 On the upper side of the specimen holder on the plate side

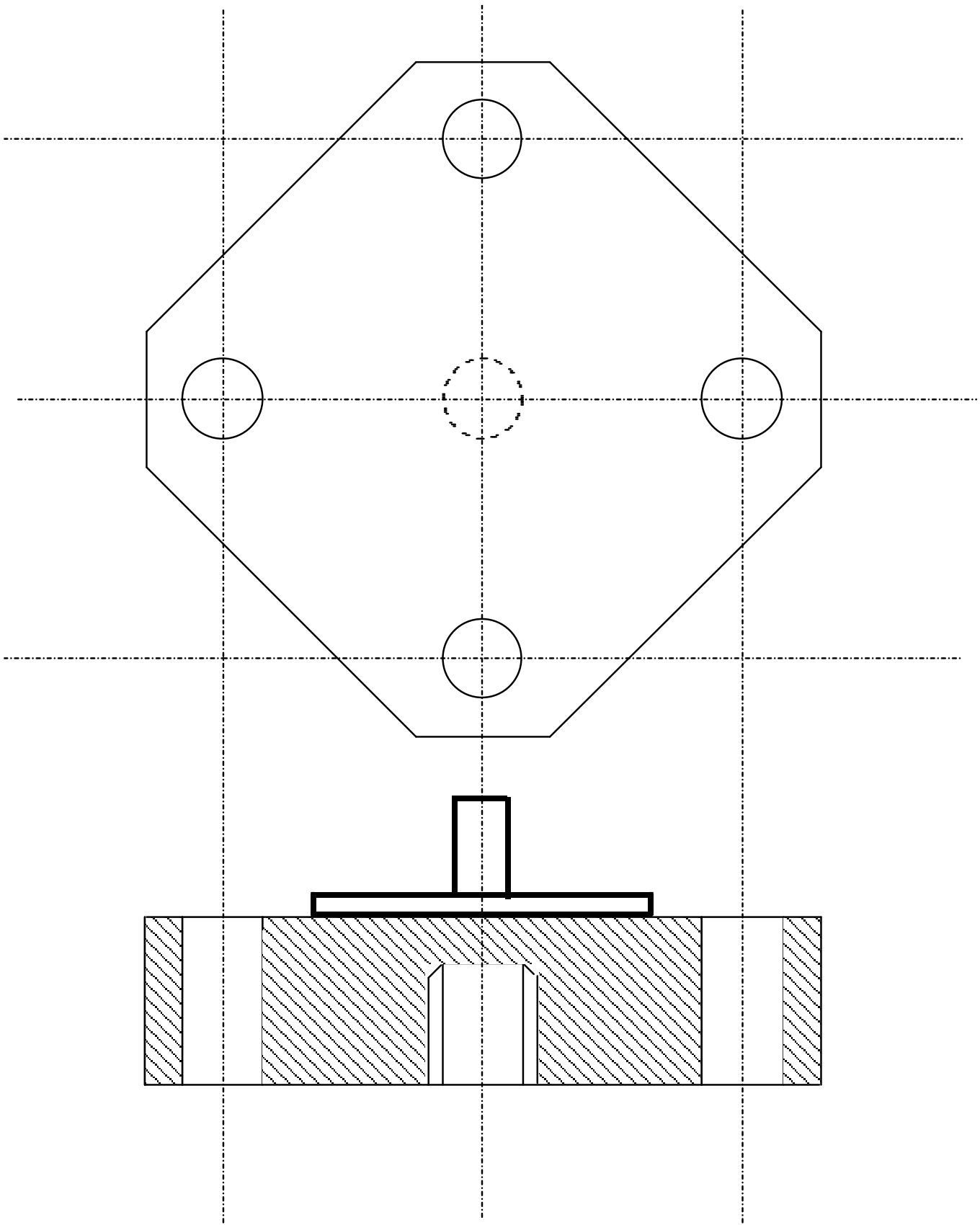
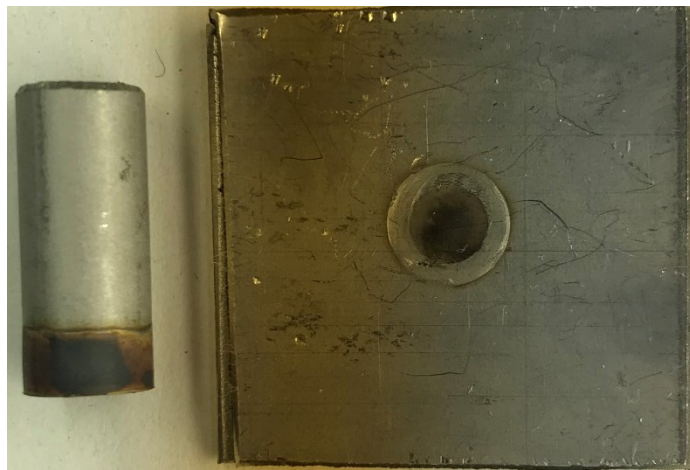
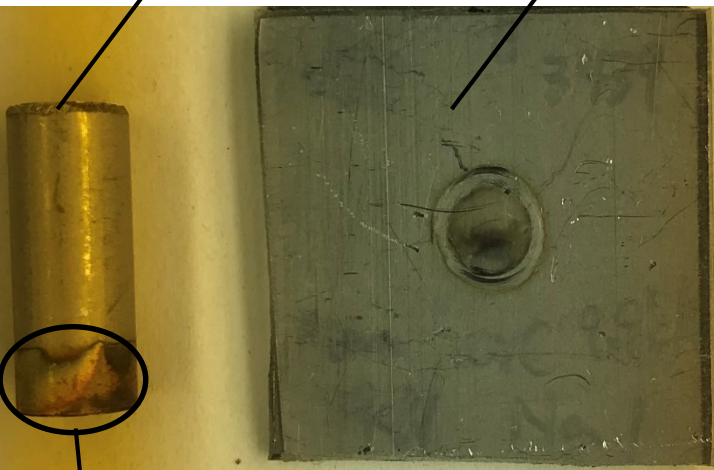


Fig.2-20 Bottom side of specimen
holder on plate side

Pipe

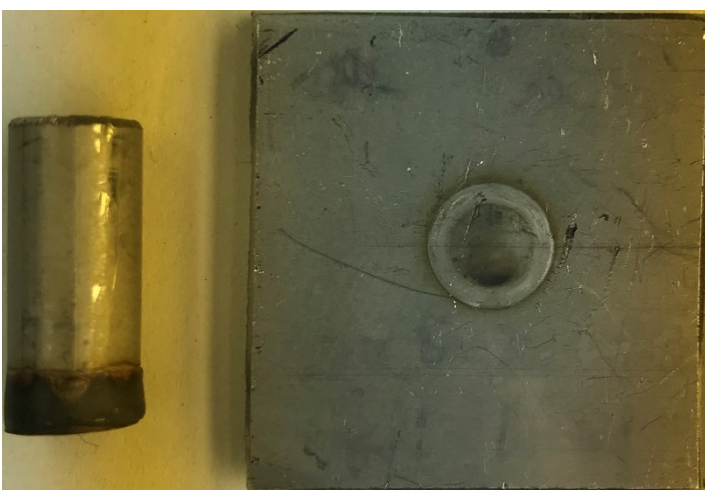
Plate



(a-1) 1kN, 9.9kA, 4cycle

(a-2) 2kN, 9.9kA, 4cycle

Pipe extension



(b-1) 1kN, 9.9kA, 5cycle

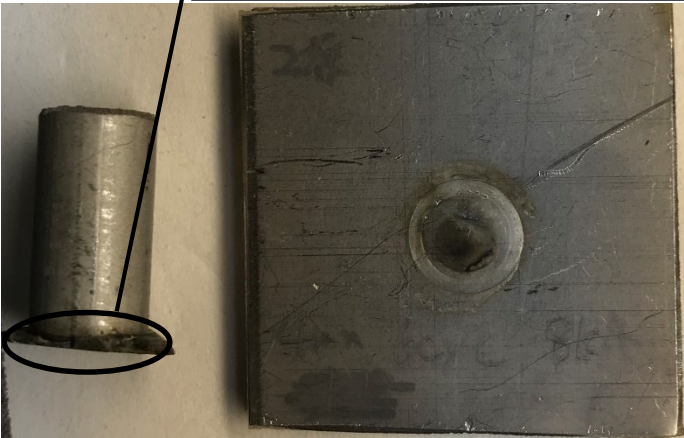


(b-1) 2kN, 9.9kA, 5cycle

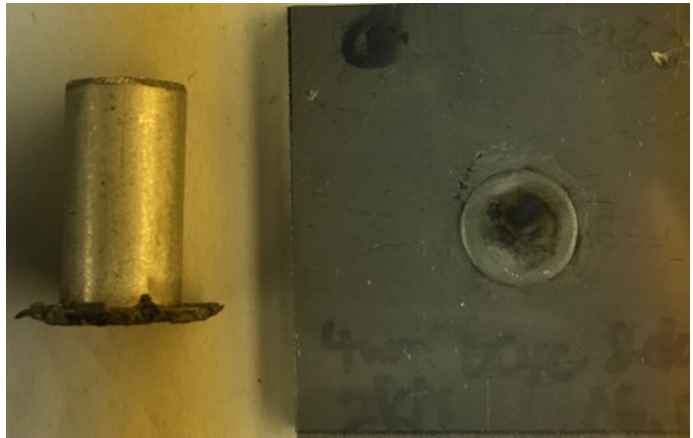
10mm

Fig.3-1 Appearance of specimens after welding
by two plates used

Pipe extension



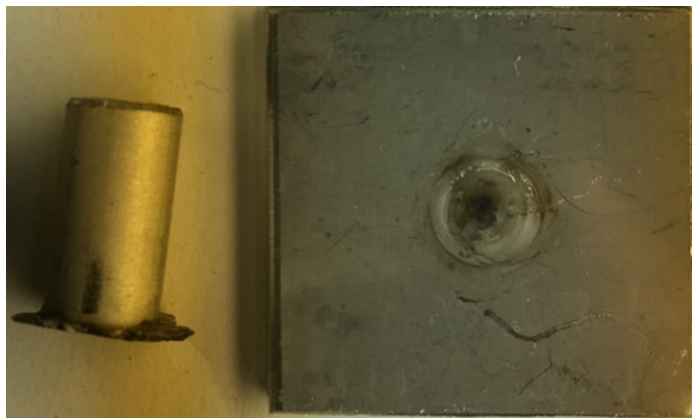
(c-1) 1kN , 8.0kA , 6cycle



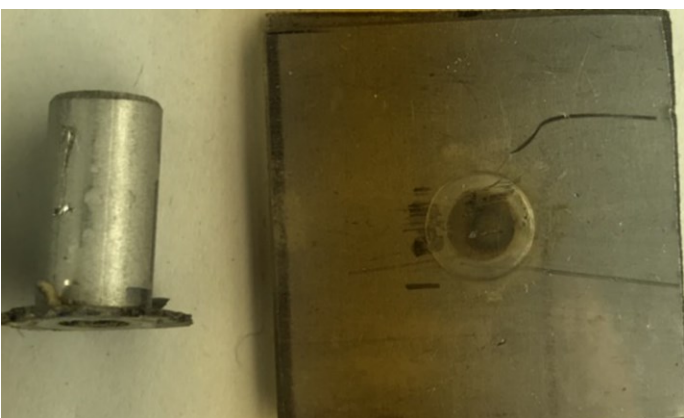
(c-2) 2kN , 8.0kA , 6cycle



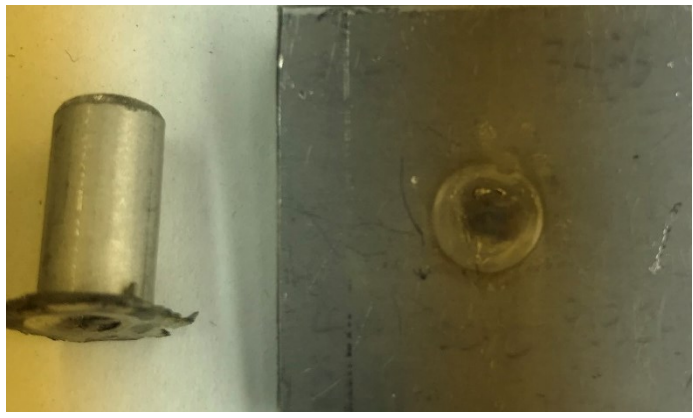
(c-3) 1kN , 9.0kA , 6cycle



(c-4) 2kN , 9.0kA , 6cycle



(c-5) 1kN , 9.9kA , 6cycle

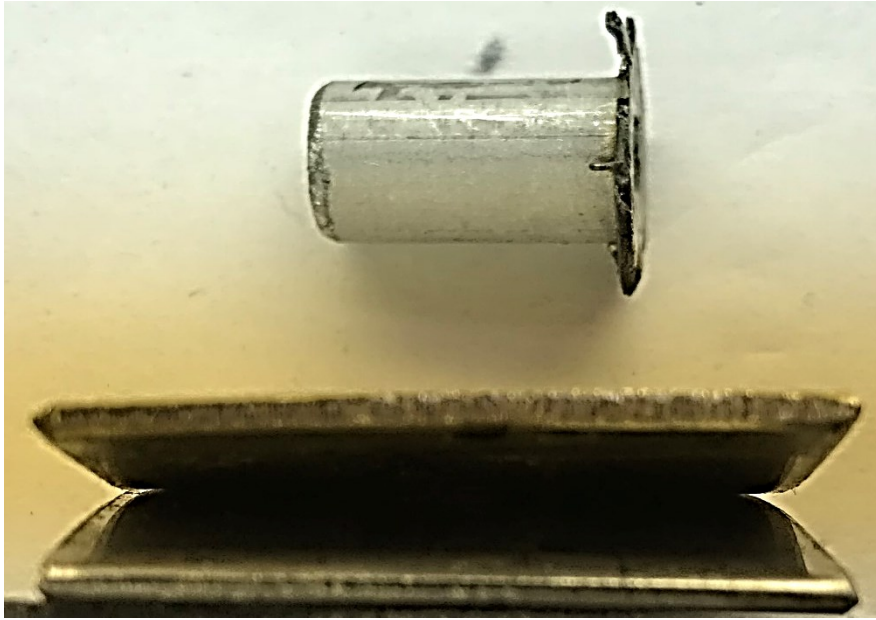


(c-6) 2kN , 9.9kA , 6cycle

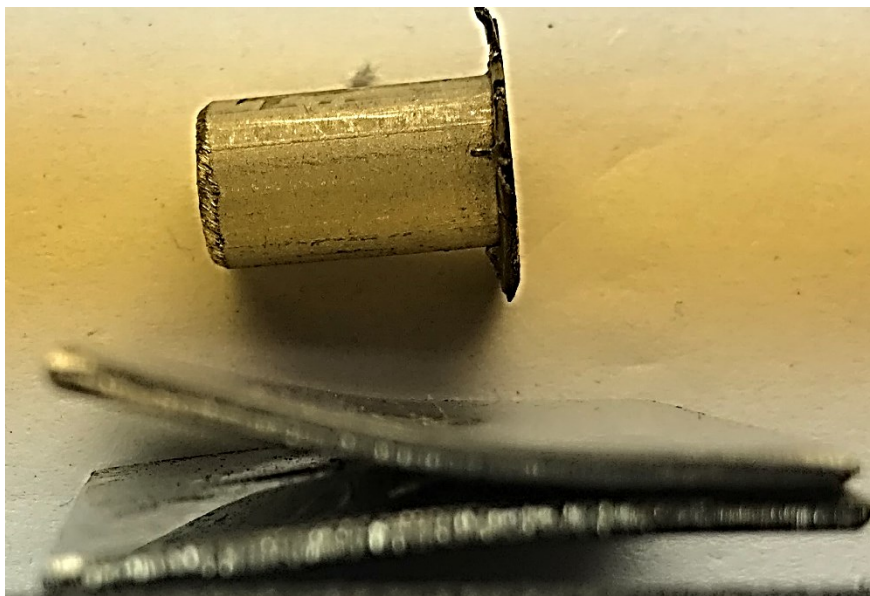
Fig.3-1 Continued

10mm

6cycle 9.9kA 2kN



(a) Front view

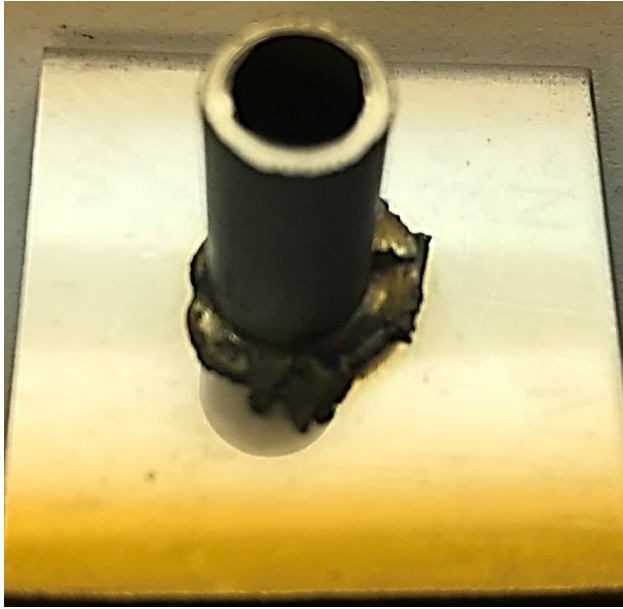


(b) Side view

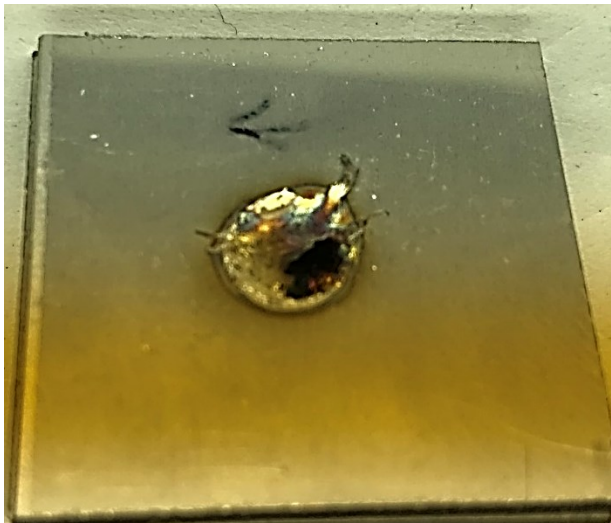
10mm

Fig.3-2 Appearance of specimen after peel test of joint
by two plates used

12cycle 9.9kA 2kN



(a) Pipe side view



(b) Lower plate view

10mm

**Fig.3-3 Appearance specimen after welding
by two plates used**

Welding time[cycle]		4	6	8	10	12	14	16	
Extension length	1mm	Front	×	○	○	○	○	○	△
		Back	×	○	○	△	○	△	○
	2mm	Front	×	×	○	○	○	○	△
		Back	×	×	○	○	○	○	△
	4mm	Front	×	×	×	○	○	○	○
		Back	×	×	○	○	×	○	○

(a) First time

Welding time[cycle]		4	6	8	10	12	14	16	
Extension length	1mm	Front	×	○	○	○	○	○	○
		Back	×	○	○	△	○	○	○
	2mm	Front	×	×	○	○	○	○	△
		Back	×	×	×	○	○	○	△
	4mm	Front	×	×	×	○	○	○	○
		Back	×	×	○	×	×	×	○

(b) Second time

○:Melting ×: not melting △:Melting but metal not filled

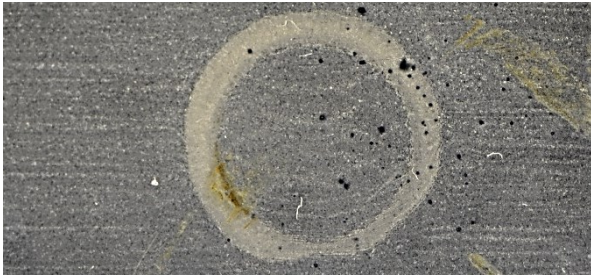
Fig.3-4 Evaluation results cross sectional observation of specimens after welding for different each extension lengths



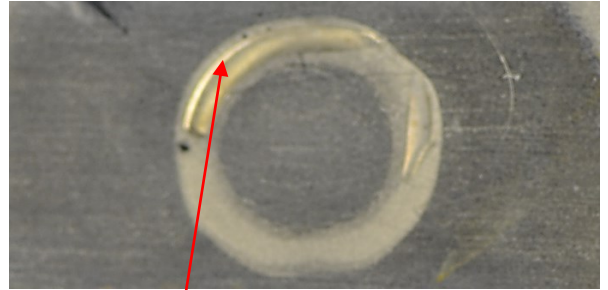
(a) 4cycle



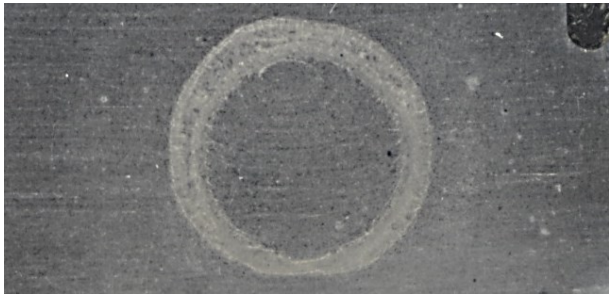
(b) 6cycle



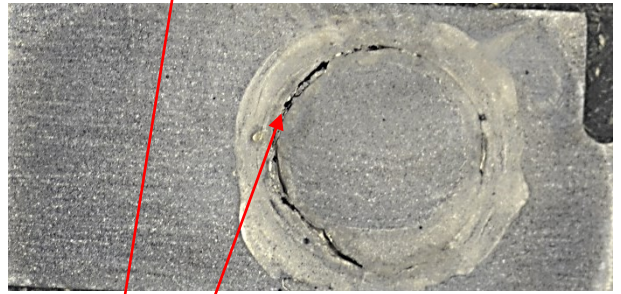
(c) 8cycle



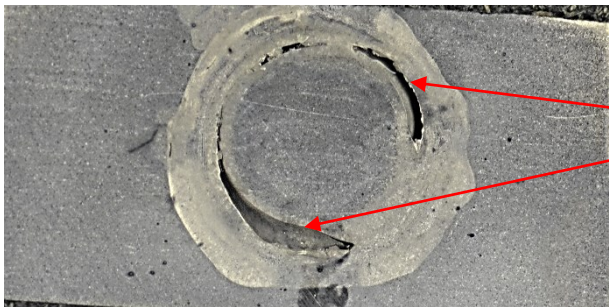
(d) 10cycle



(e) 12cycle



(f) 14cycle



(g) 16cycle

metal not filled

5mm

Fig.3-5 Appearance of specimens after welding side cross section observation

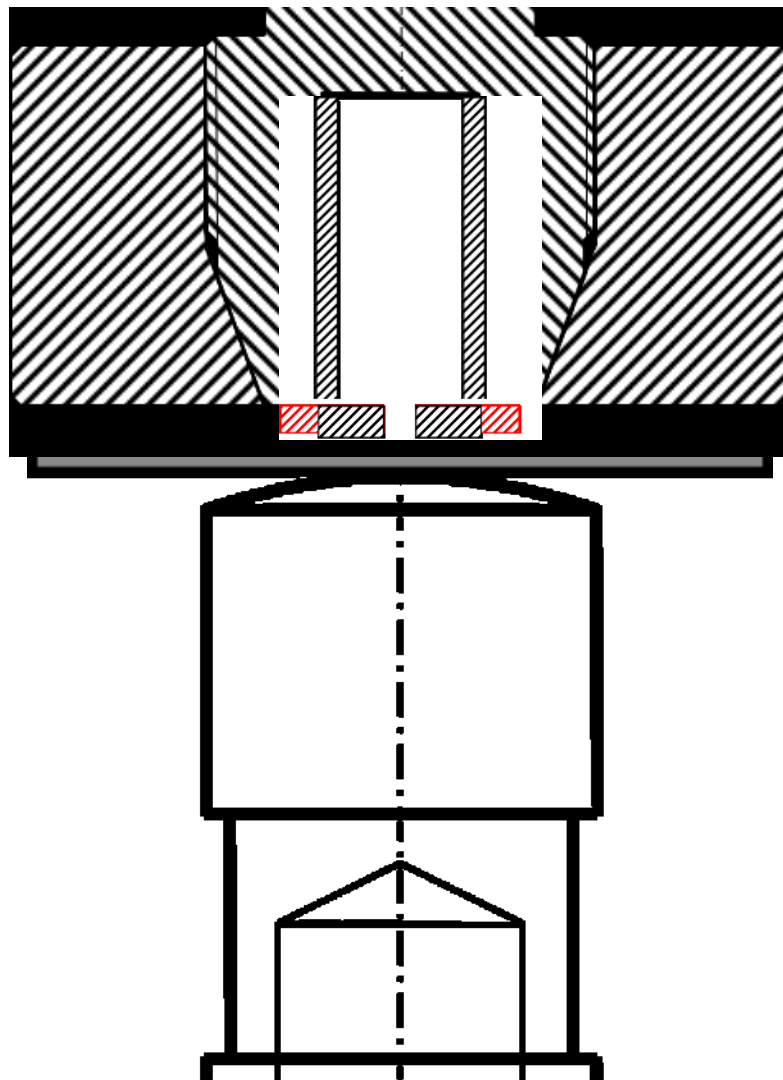
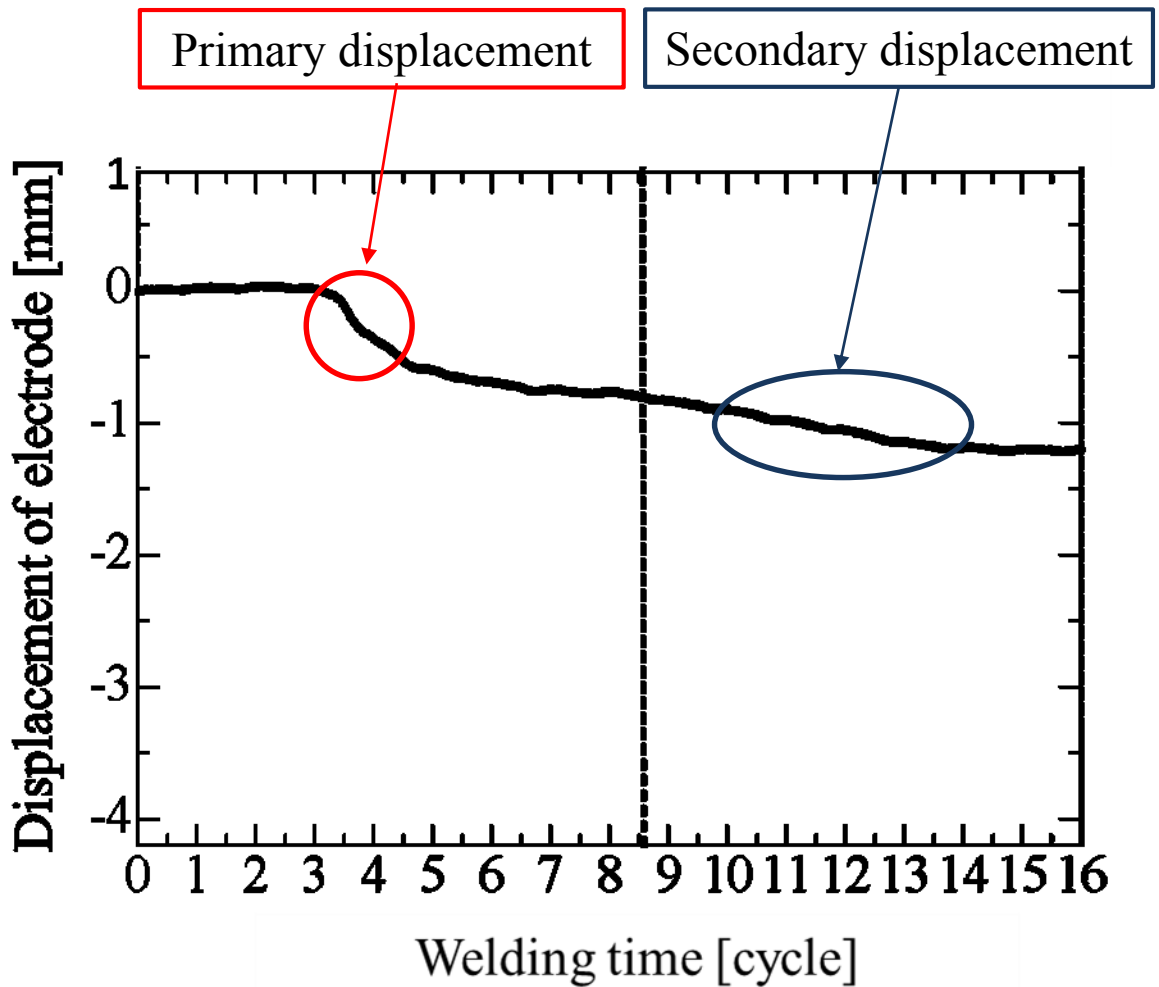
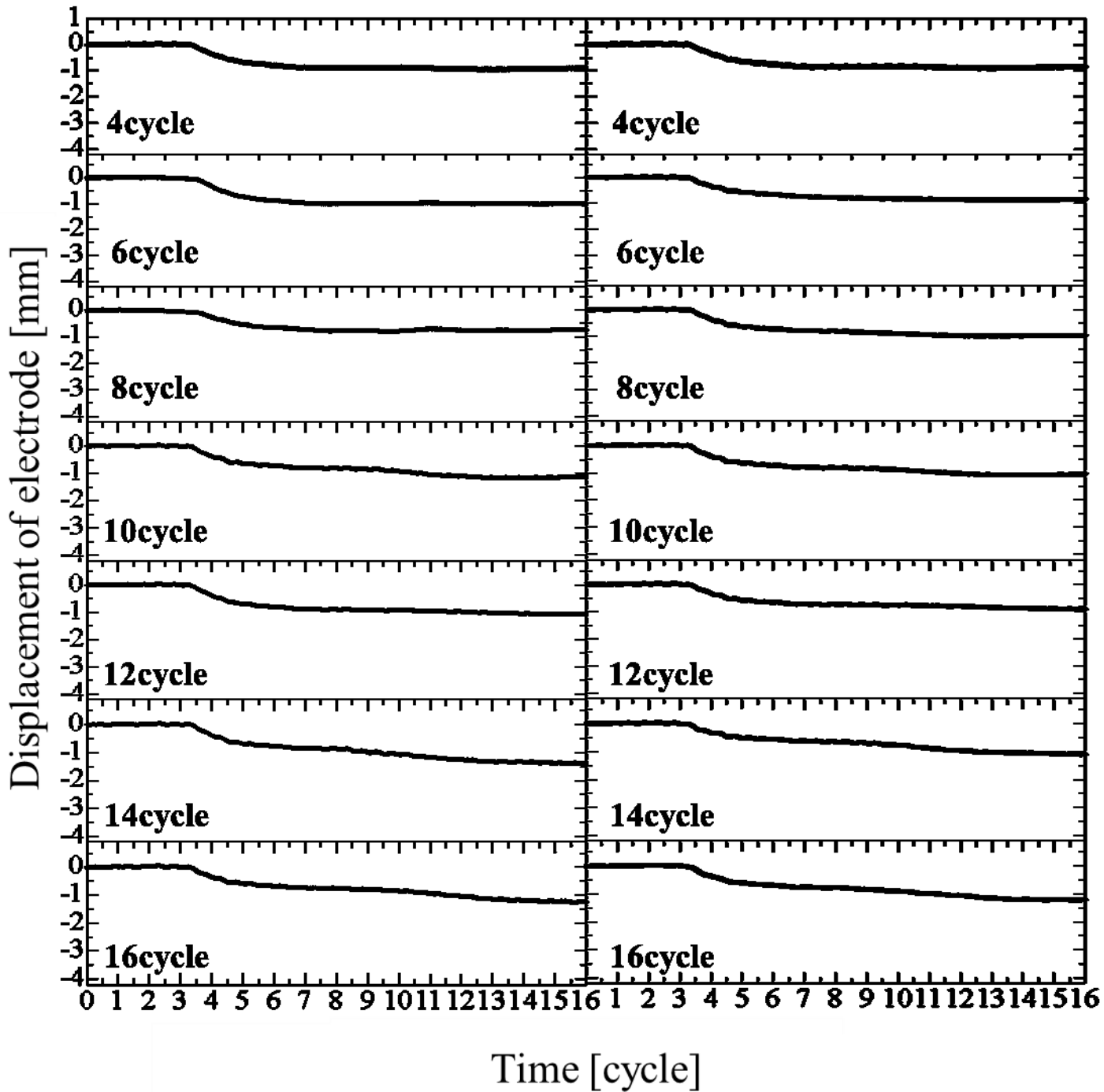


Fig.3-6 Schematic diagram of cross section of R type electrode and plate



*Extension length 1mm, Electrode force 3kN
 Set up current 9kA, Welding time 16cycle

Fig.3-7 Example measured during welding of electrode displacement

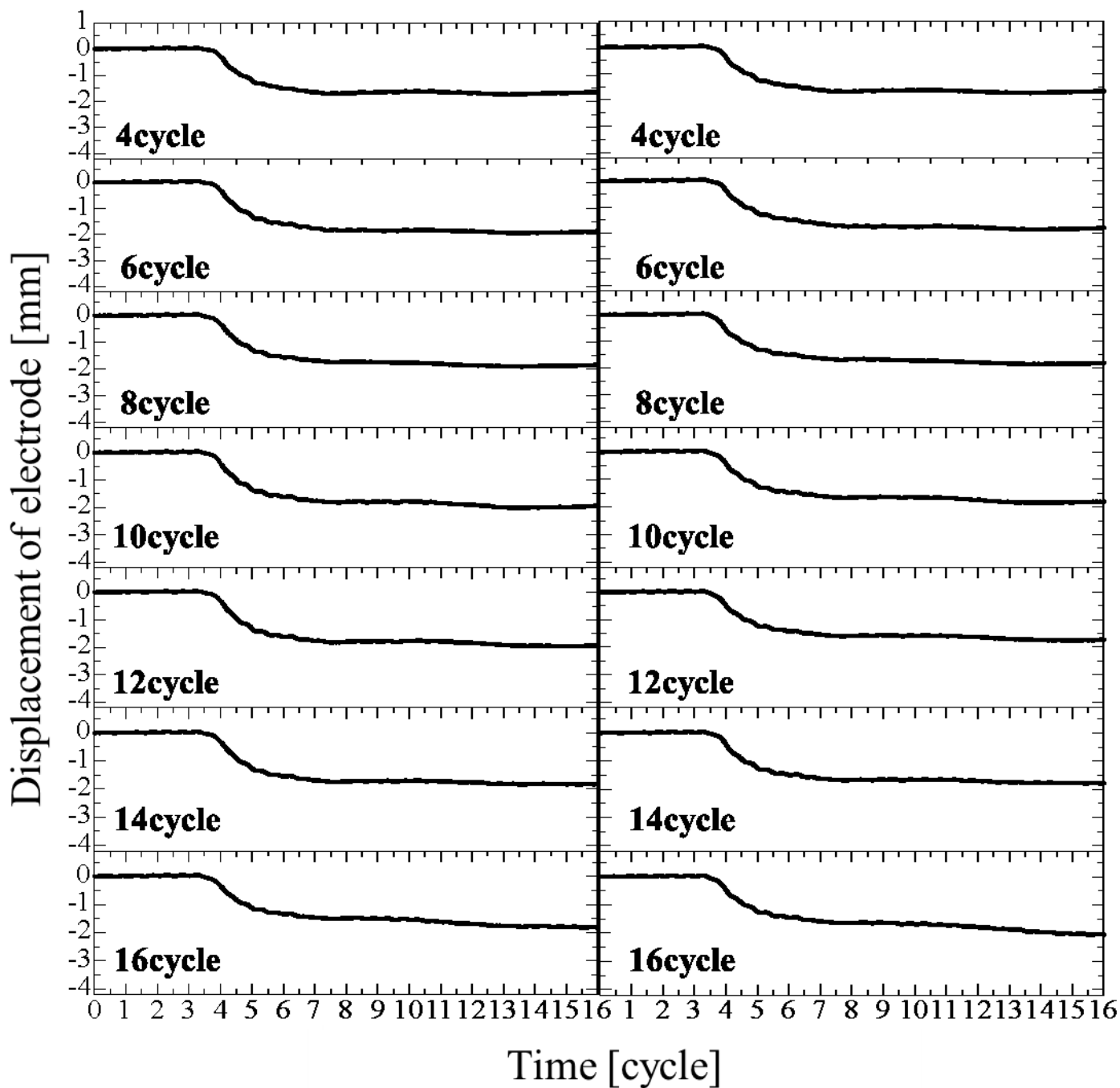


(a) First time

(b) Second time

*Electrode force 3kN , Set up current 9kA

Fig.3-8 Displacement of upper electrode
with extension length of 1mm

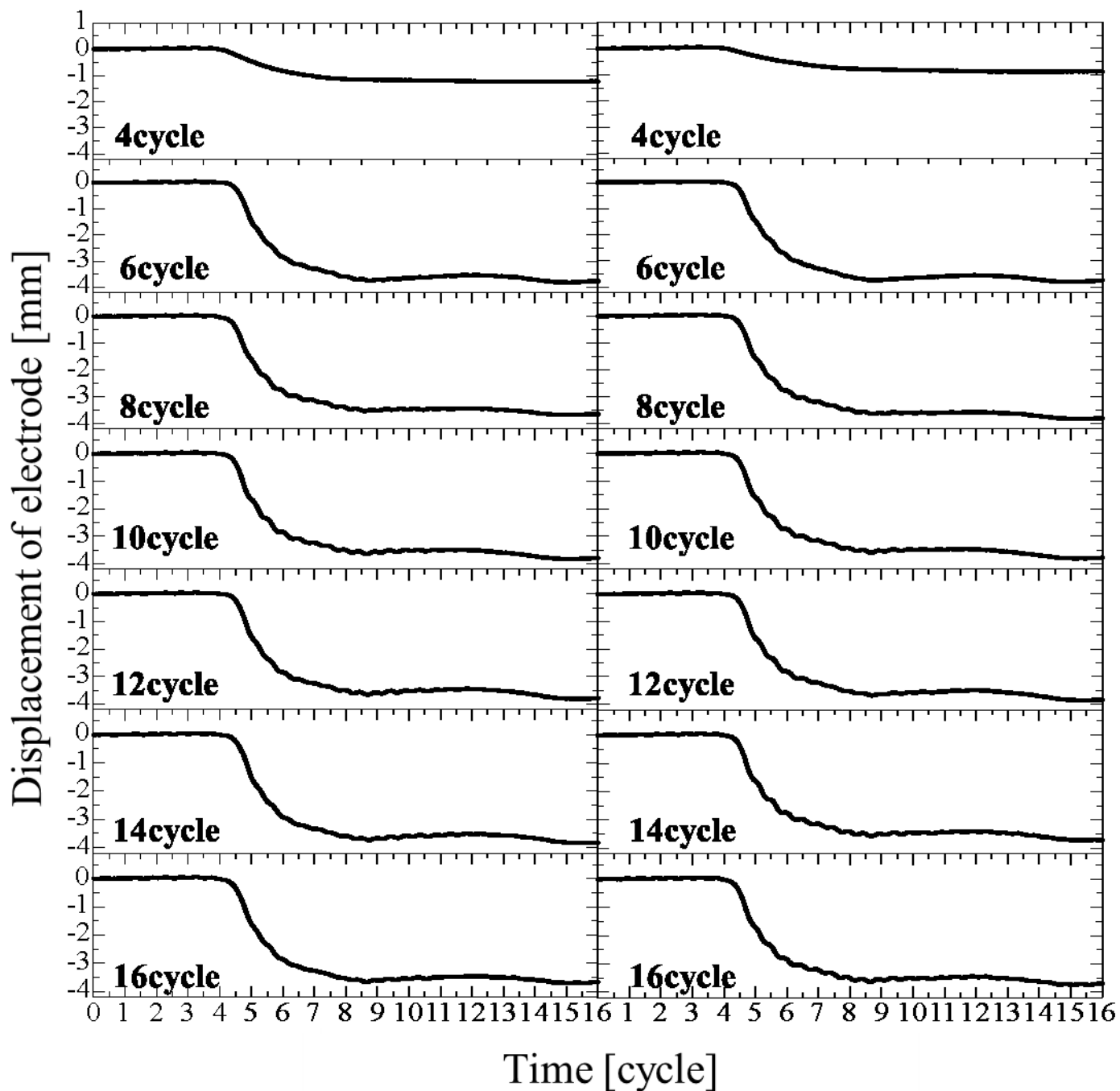


(a) First time

(b) Second time

*Electrode force 3kN , Set up current 9kA

Fig.3-9 Displacement of upper electrode
with extension length of 2mm



(a) First time

(b) Second time

*Electrode force 3kN , Set up current 9kA

Fig.3-10 Displacement of upper electrode
with extension length of 4mm

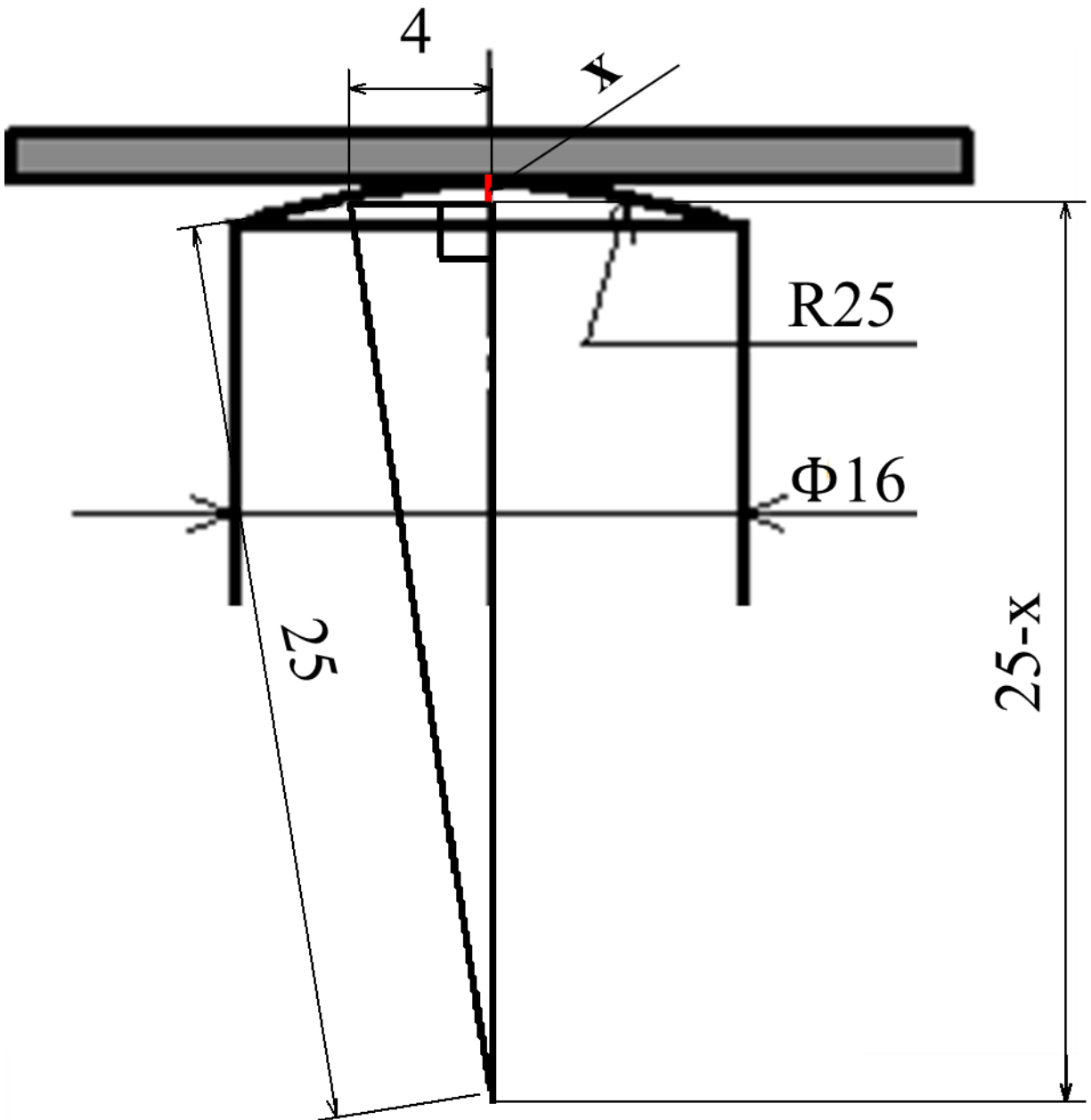
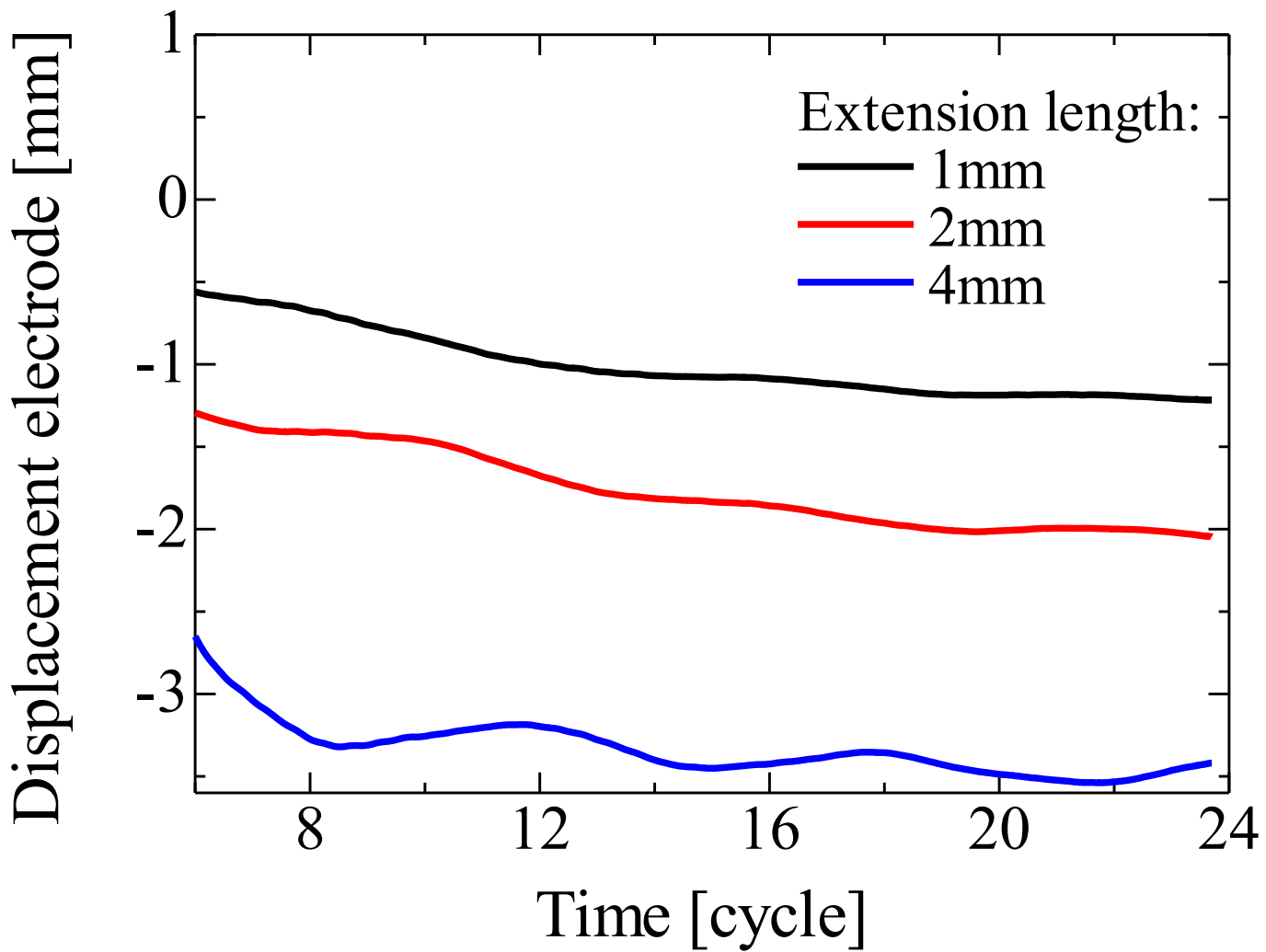
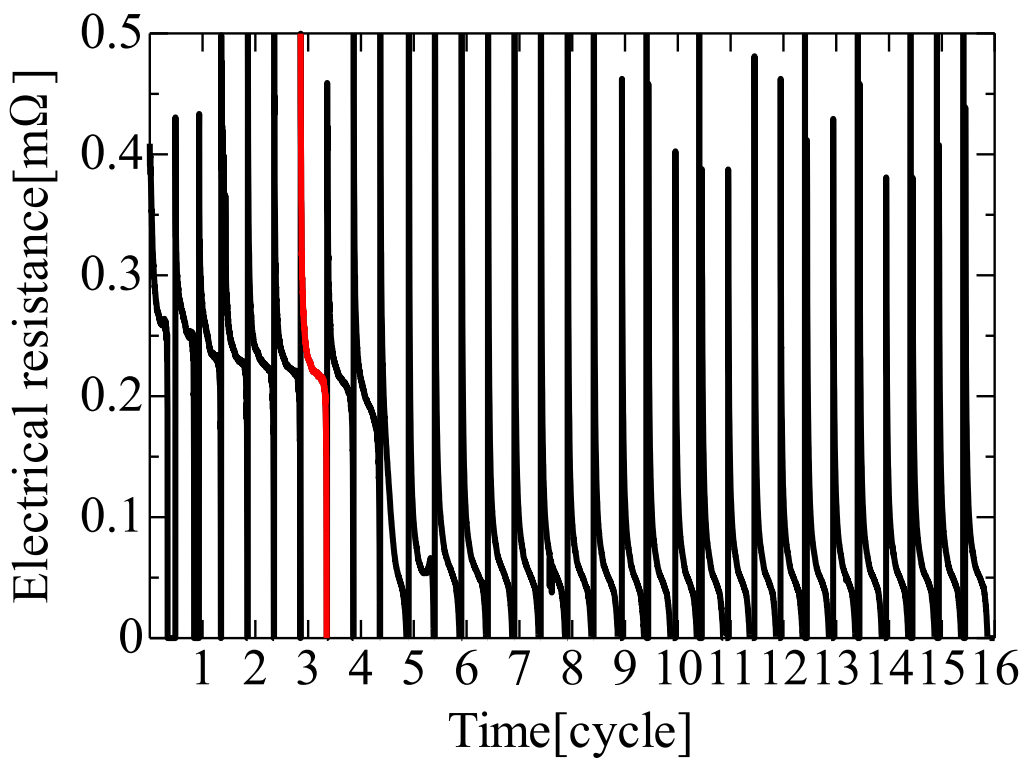



Fig.3-11 Schematic diagram of cross section of R type electrode and plate

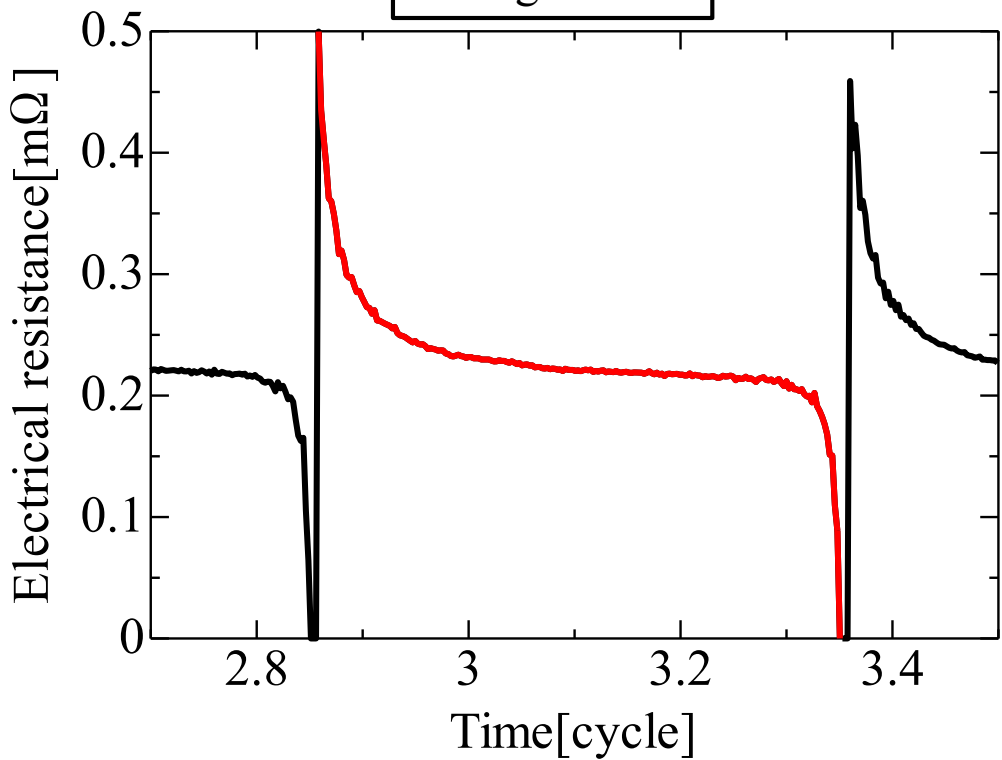


*Electrode force 3kN , Set up current 9kA, Welding time 16cycle

Fig.3-12 Displacement of upper electrode from 8 to 24 for different extension lengths

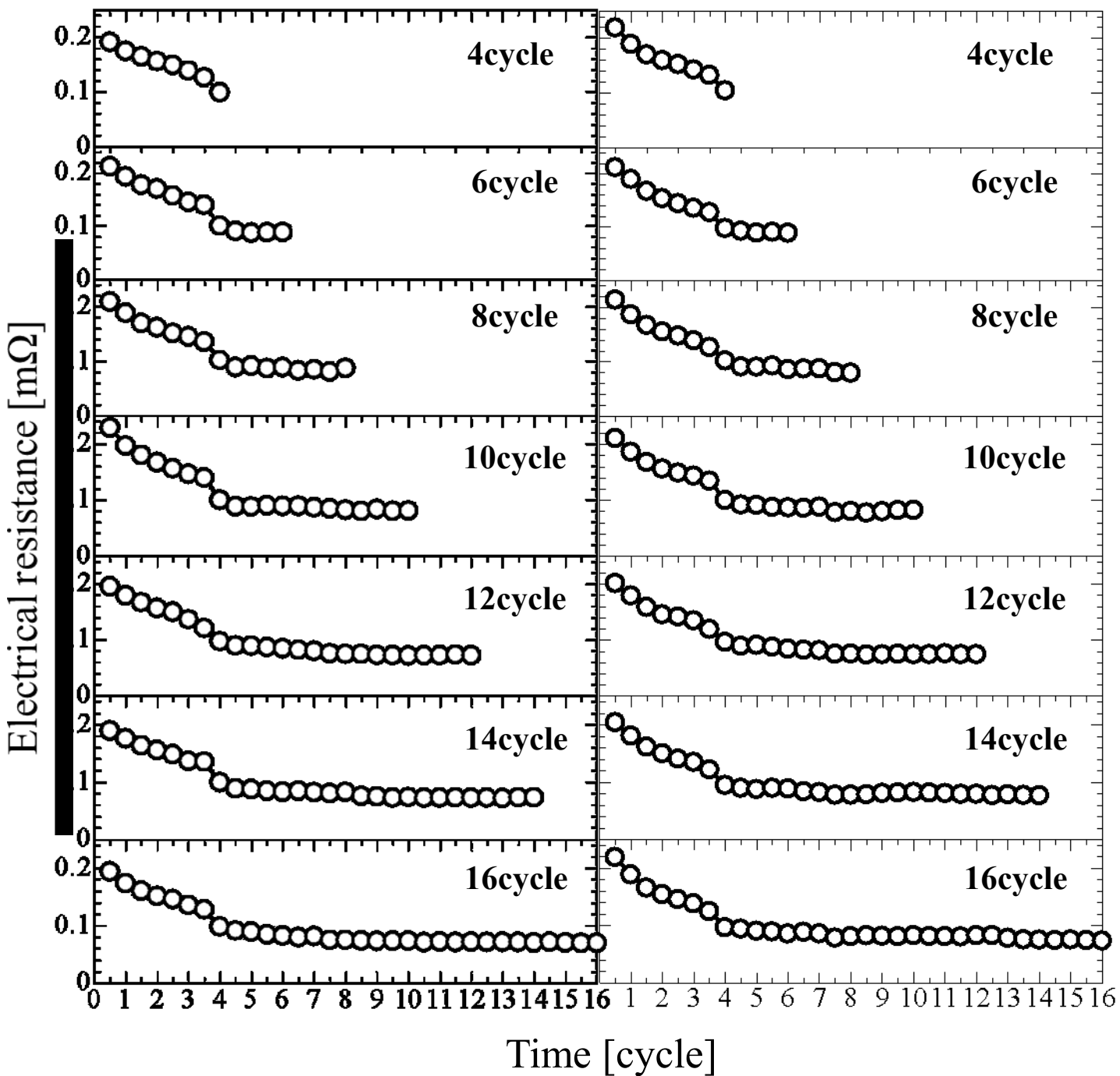



 Enlarged view



* First time, Extension length 1mm, Electrode force 3kN
 Set up current 9kA , Welding time 16cycle

Fig.3-13 Example of electrical resistance during welding

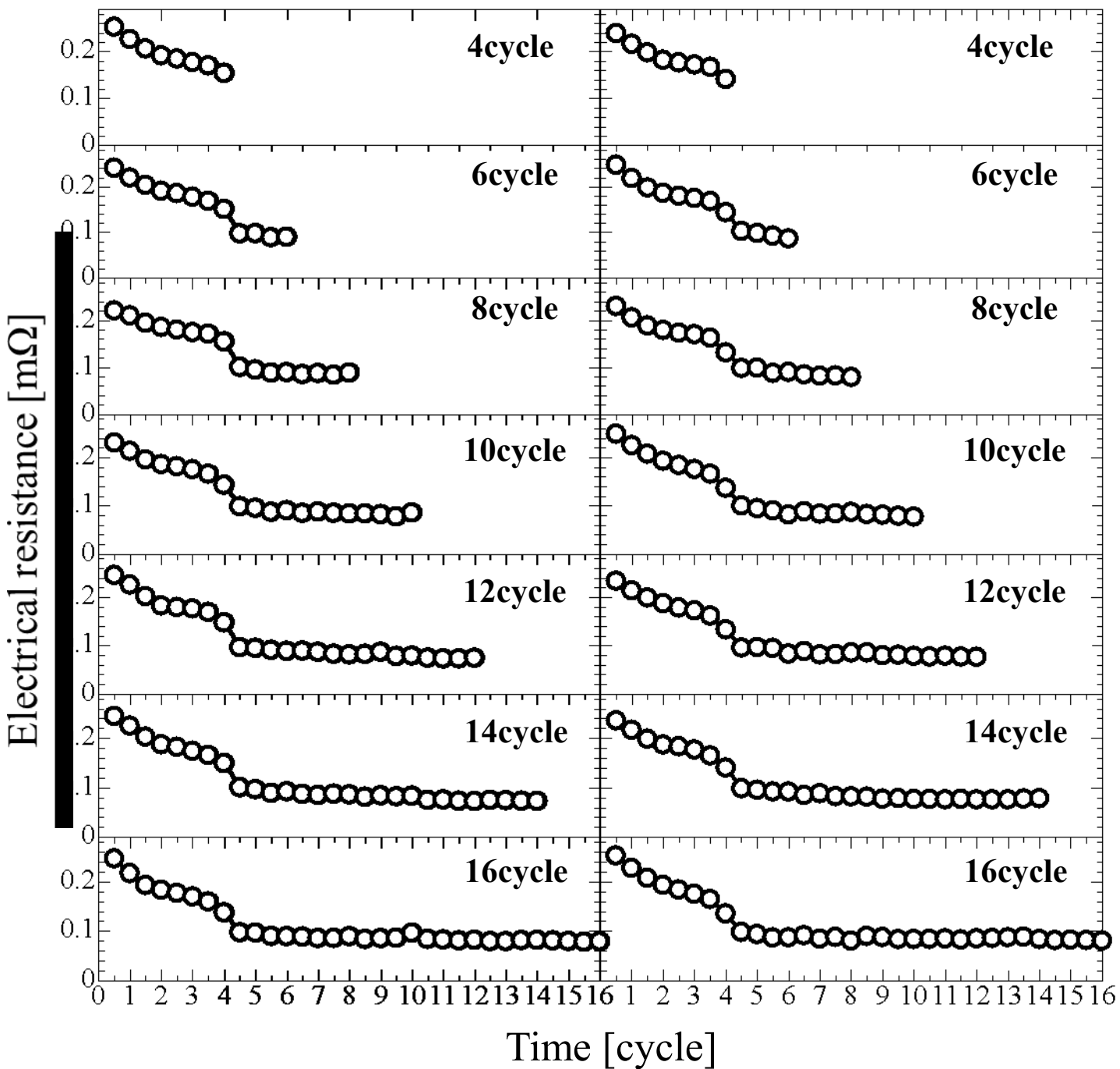


(a) First time

(b) Second time

*Electrode force 3kN , Set up current 9kA

Fig.3-14 Average electrical resistance
with extension length of 1mm

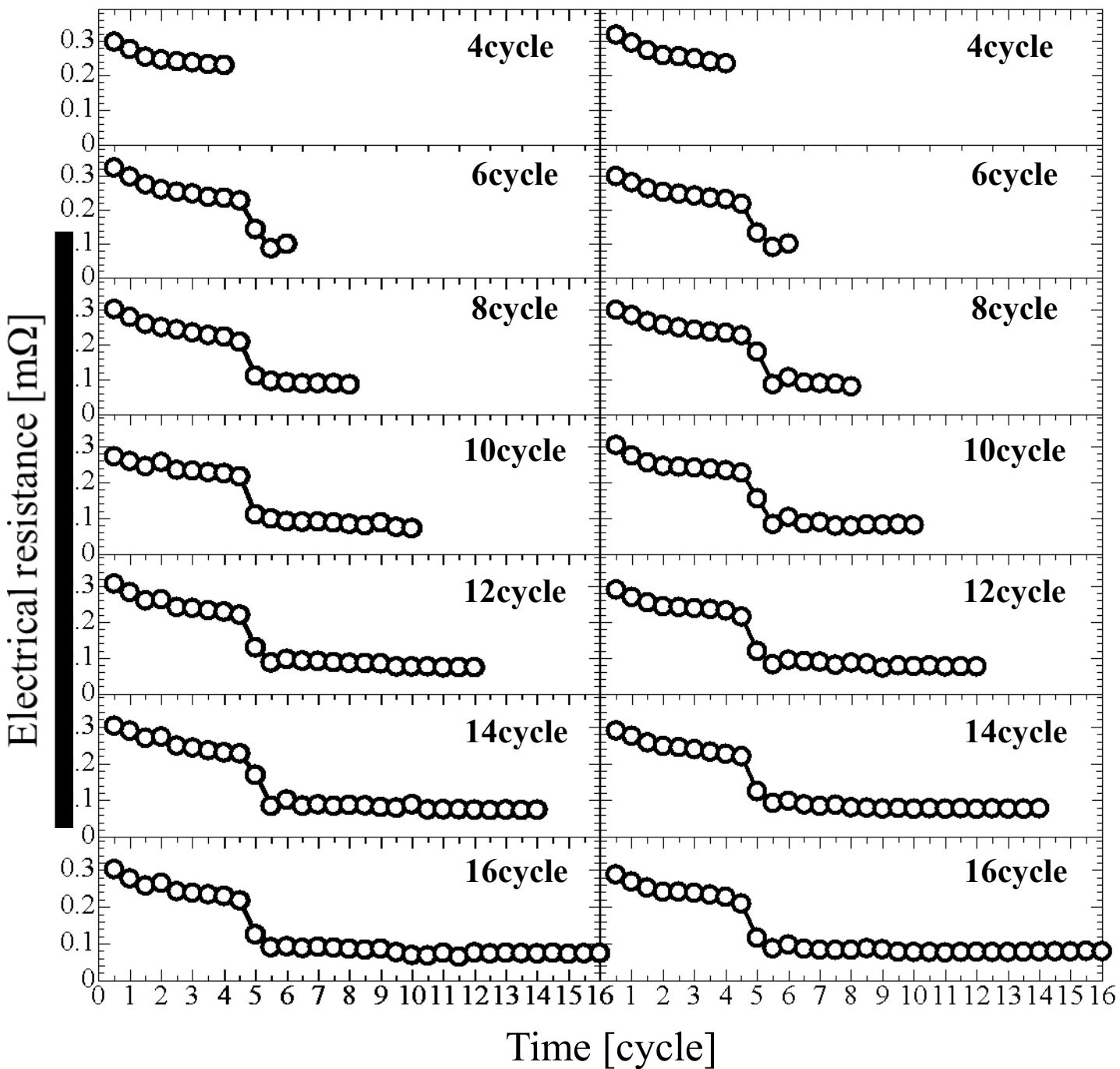


(a) First time

(b) Second time

*Electrode force 3kN , Set up current 9kA

Fig.3-15 Average electrical resistance
with extension length of 2mm



(a) First time

(b) Second time

*Electrode force 3kN , Set up current 9kA

Fig.3-16 Average electrical resistance
with extension length of 4mm

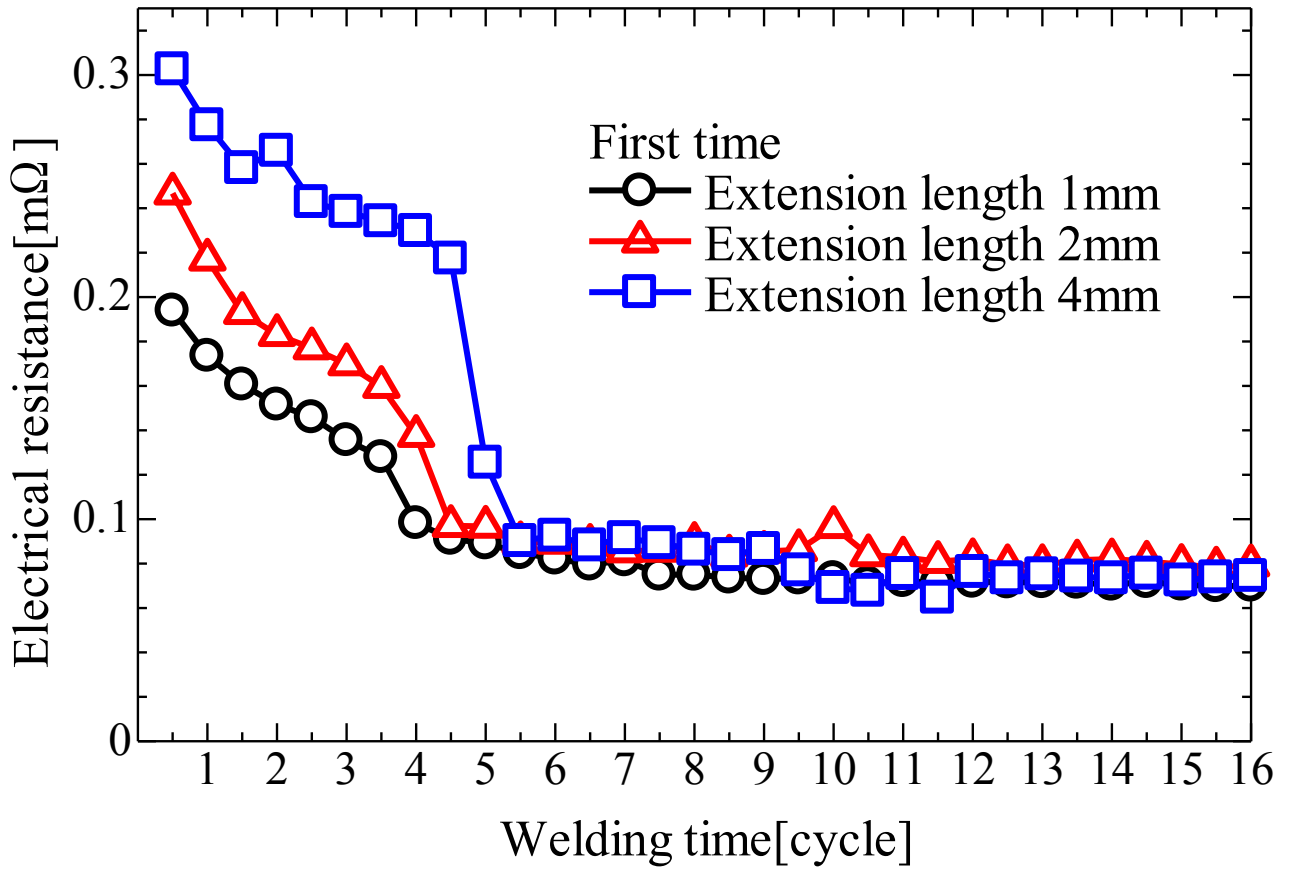
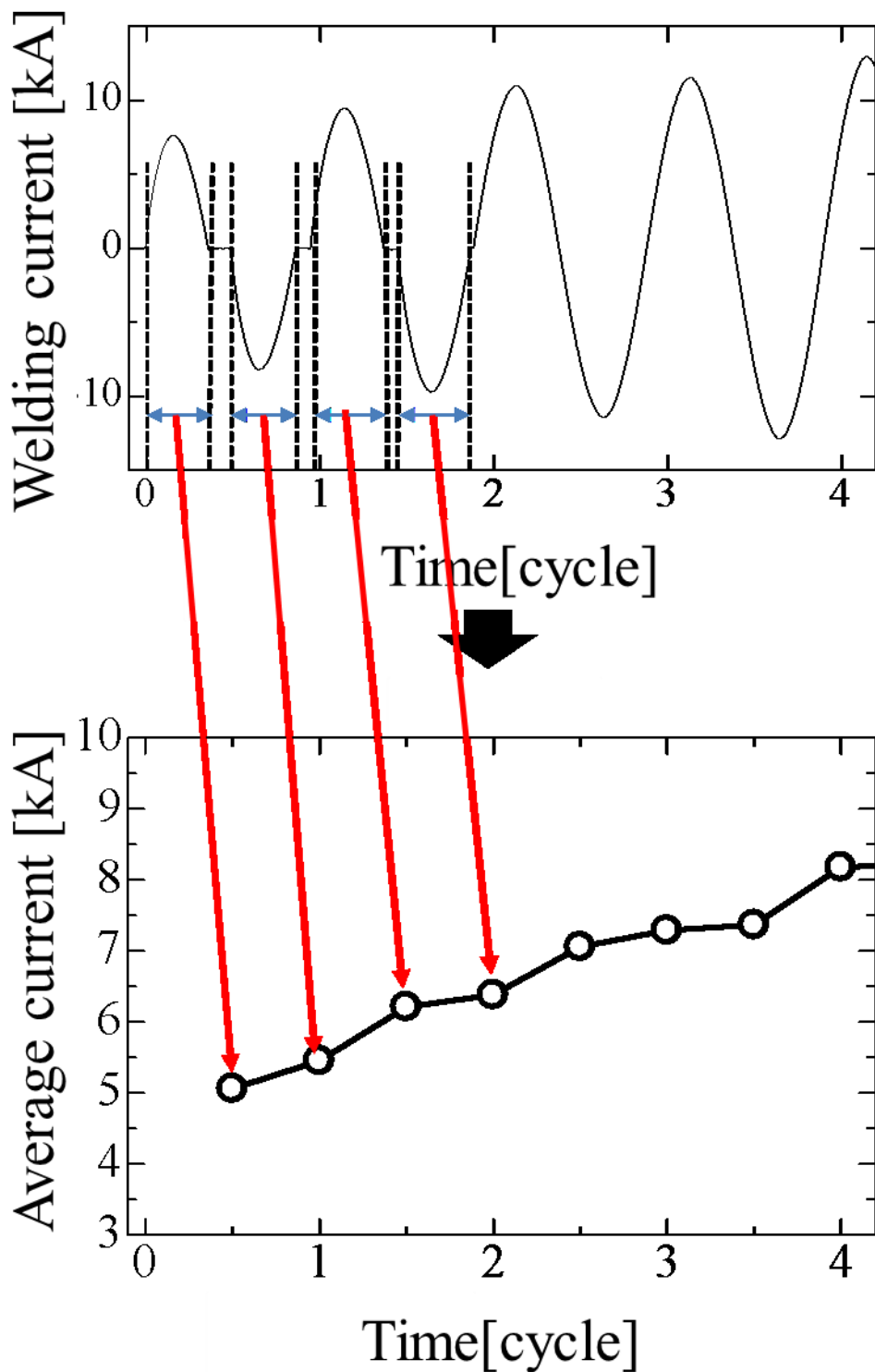
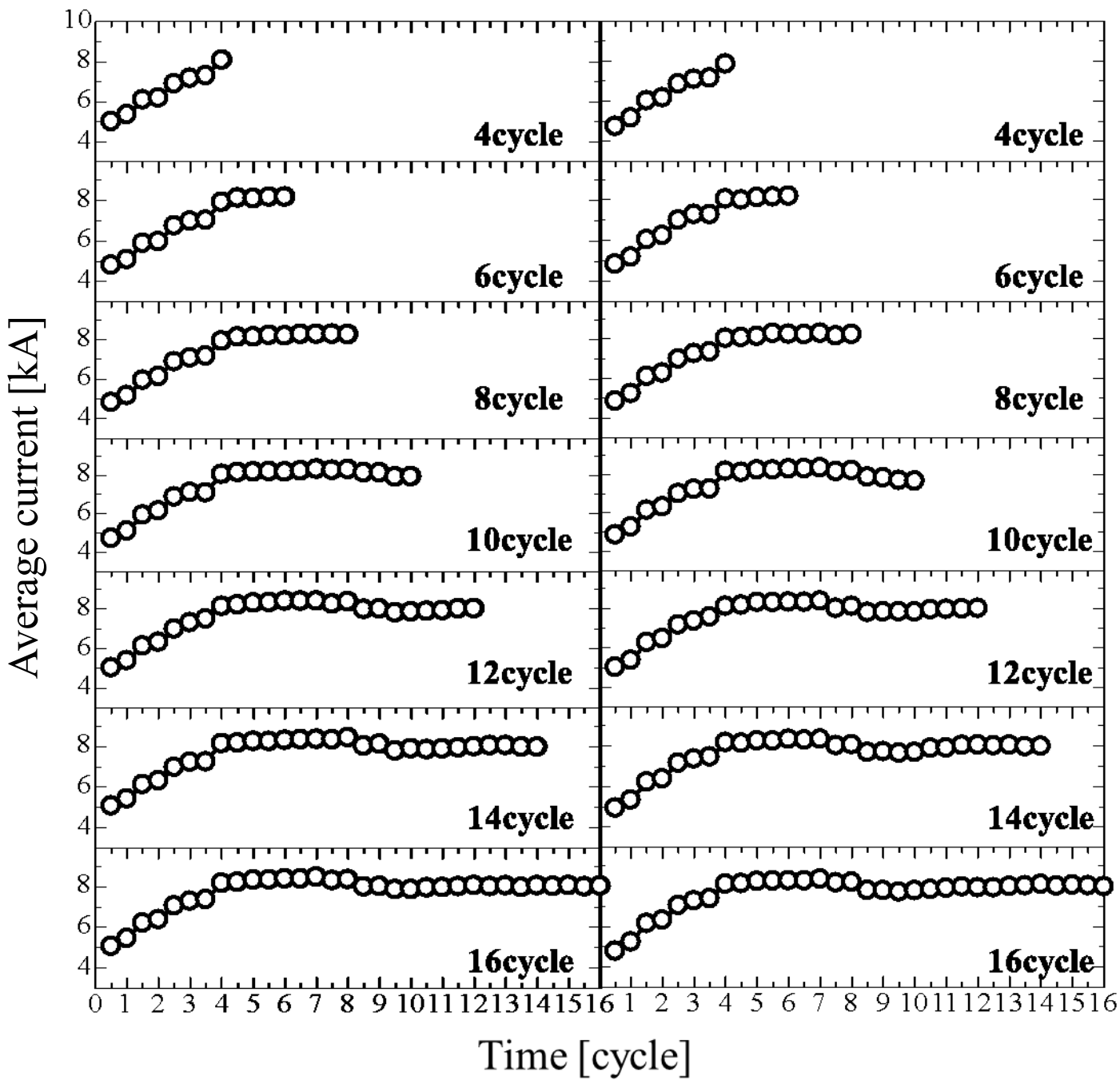


Fig.3-17 Average electrical resistance with welding time 16cycle for different extension lengths



* First time, Extension length 1mm, Electrode force 3kN
Set up current 9kA , Welding time 16cycle

Fig.3-18 Example of electrical current during welding

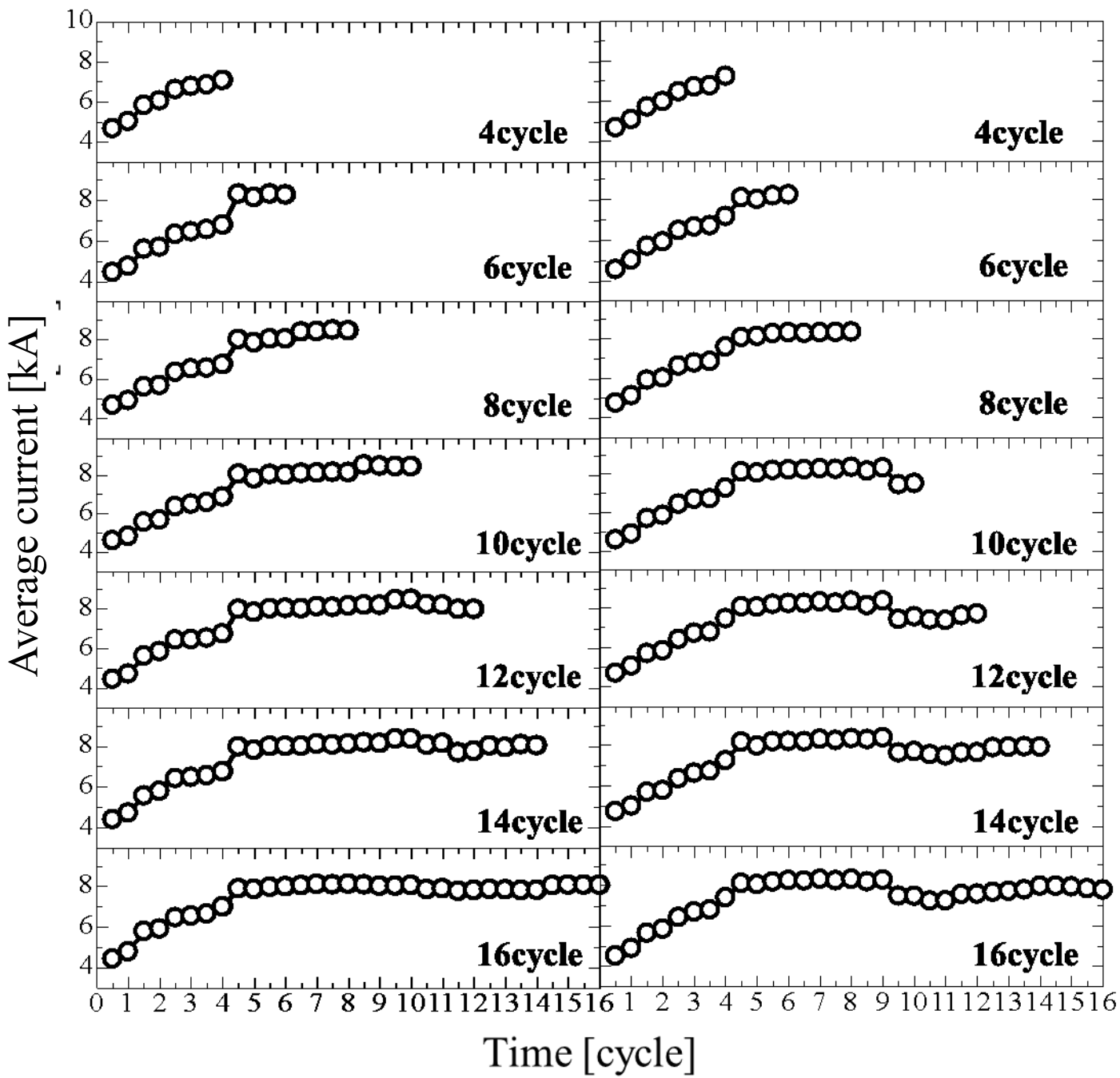


(a) First time

(b) Second time

*Electrode force 3kN , Set up current 9kA

Fig.3-19 Average electrode current
with extension length of 1mm

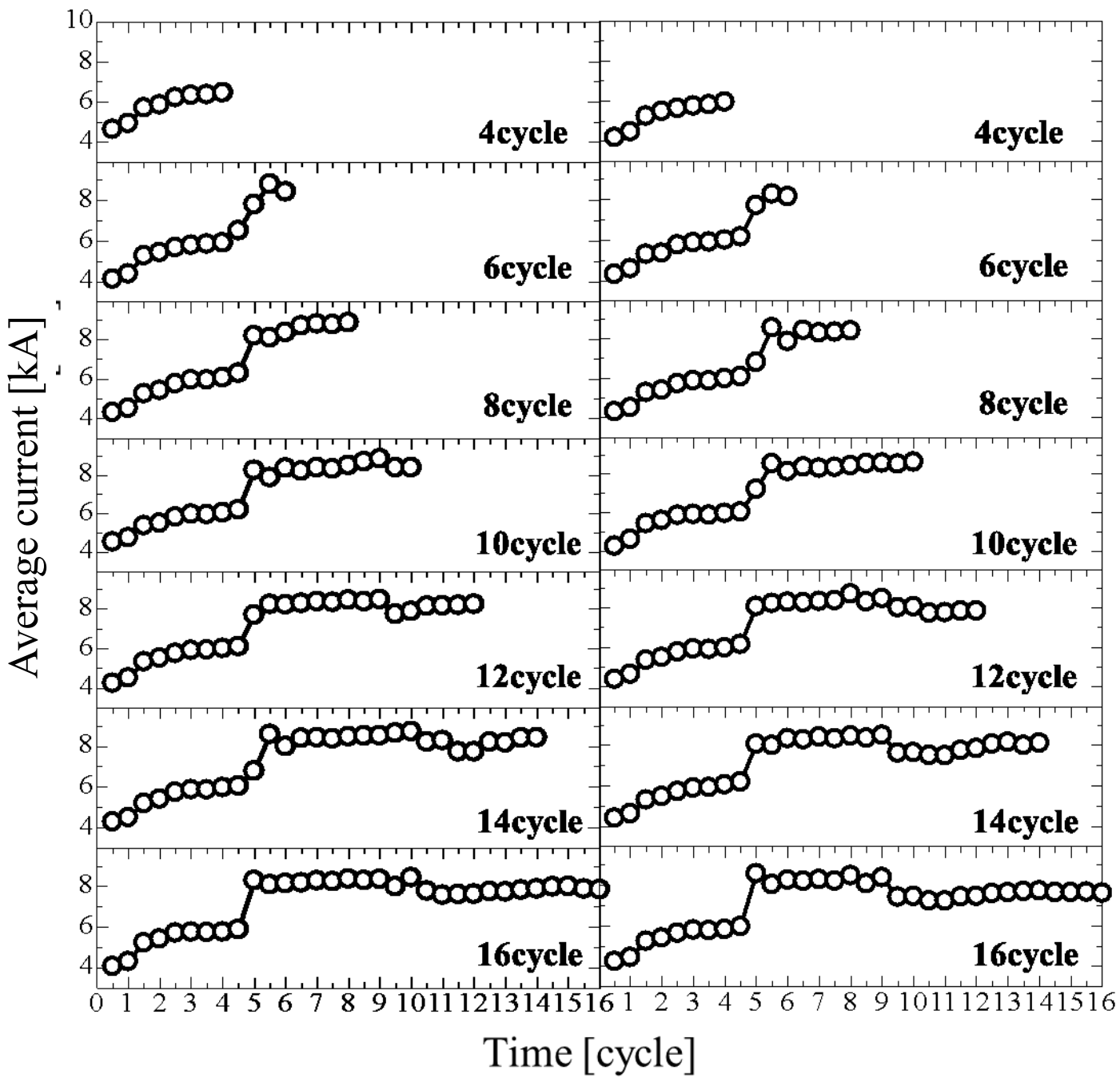


(a) First time

(b) Second time

*Electrode force 3kN , Set up current 9kA

Fig.3-20 Average electrode current
with extension length of 2mm

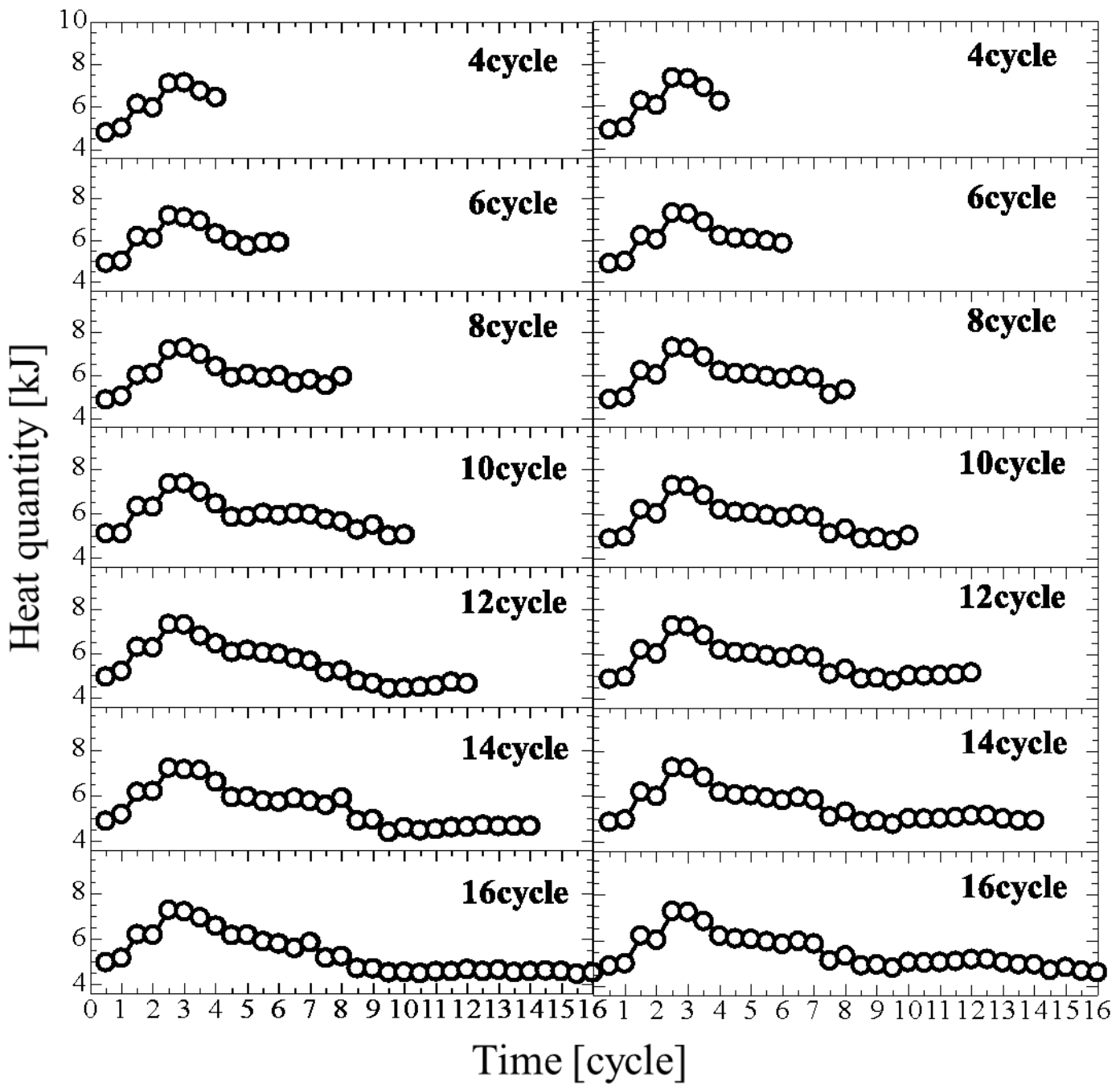


(a) First time

(b) Second time

*Electrode force 3kN , Set up current 9kA

Fig.3-21 Average electrode current
with extension length of 4mm

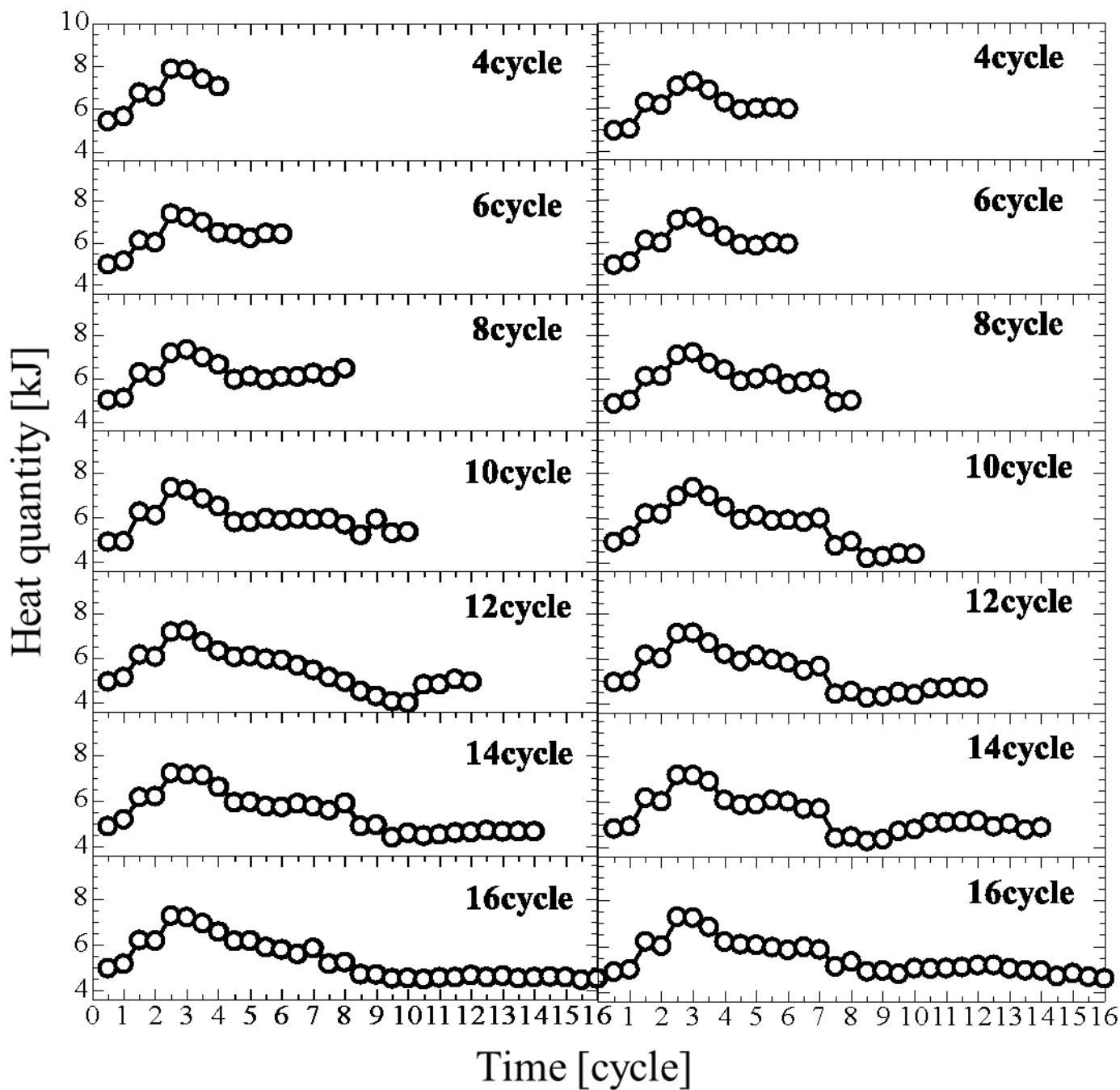


(a) First time

(b) Second time

*Electrode force 3kN , Set up current 9kA

Fig.3-22 Average quantity of Joule heat quantity
with extension length of 1mm

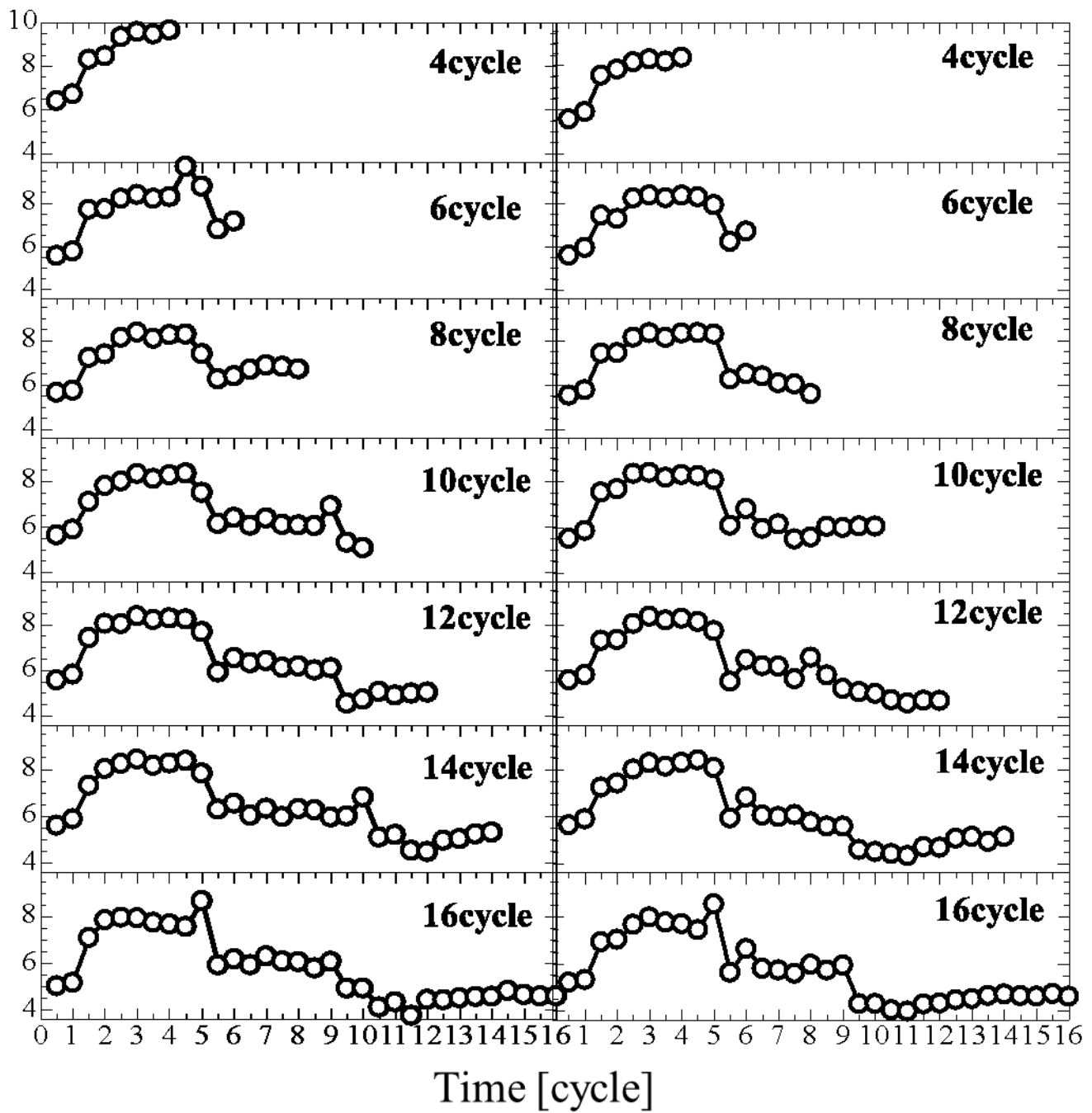


(a) First time

(b) Second time

*Electrode force 3kN , Set up current 9kA

Fig.3-23 Average quantity of Joule heat quantity
with extension length of 2mm



(a) First time

(b) Second time

*Electrode force 3kN , Set up current 9kA

Fig.3-24 Average quantity of Joule heat quantity
with extension length of 4mm

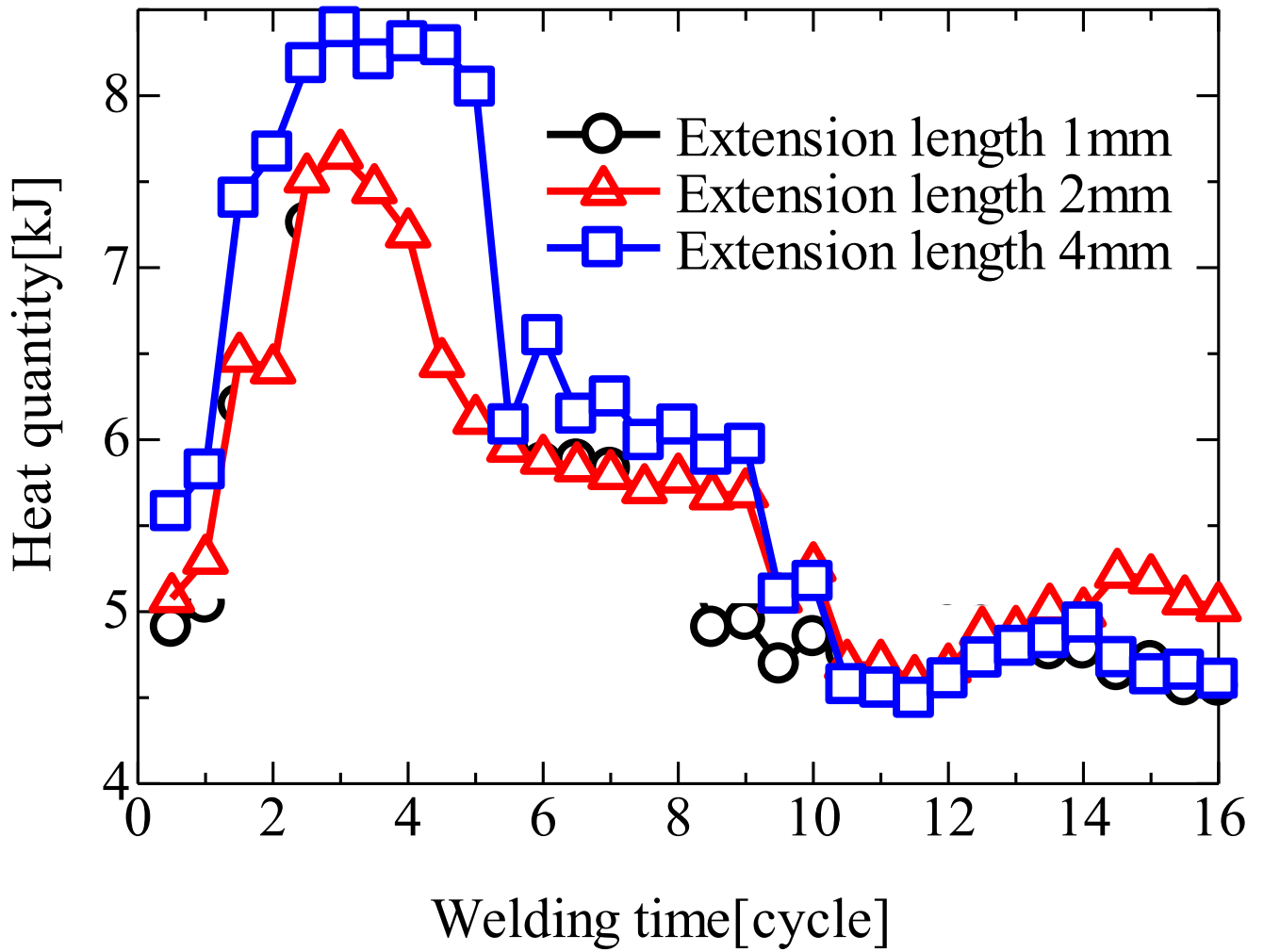
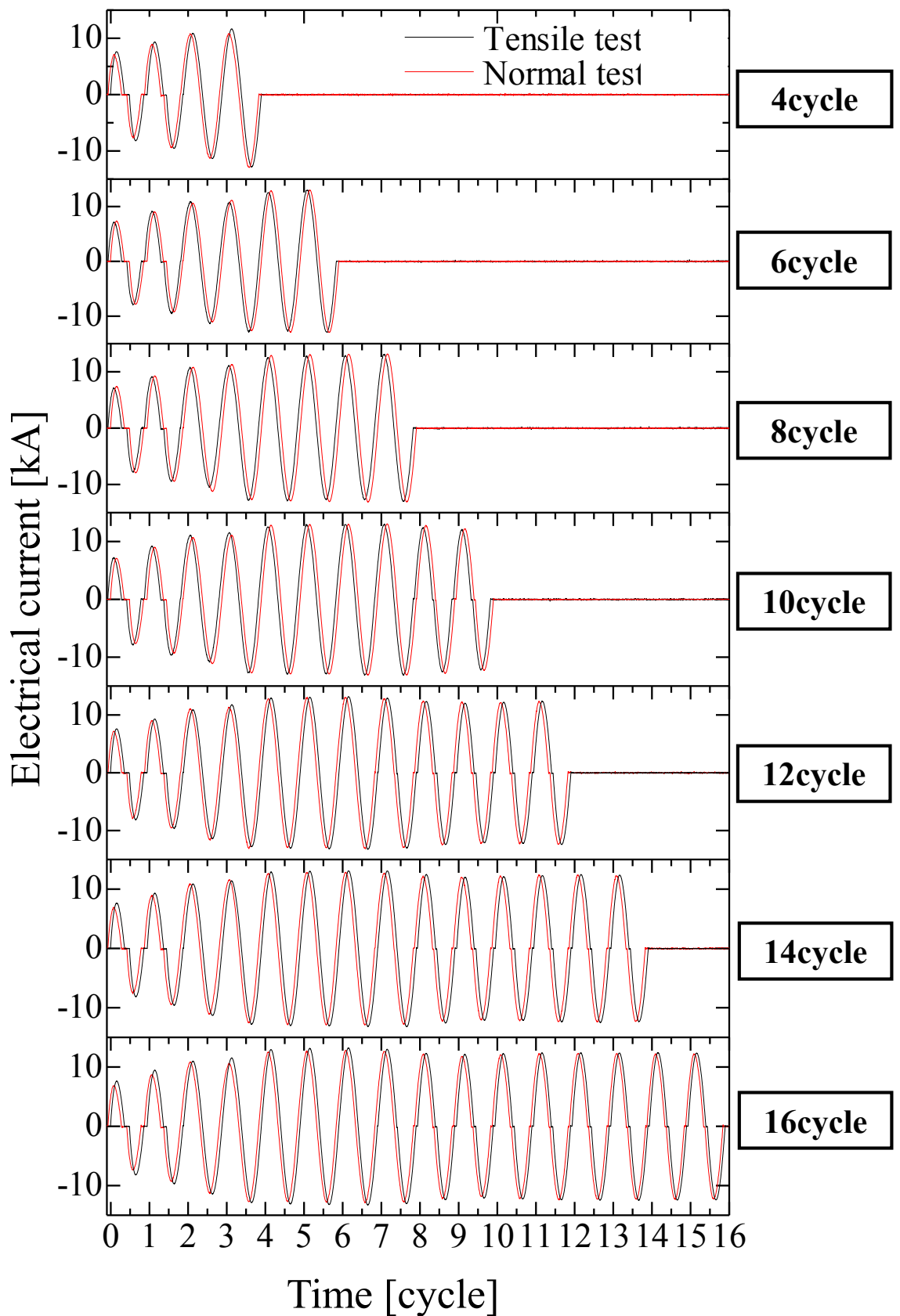
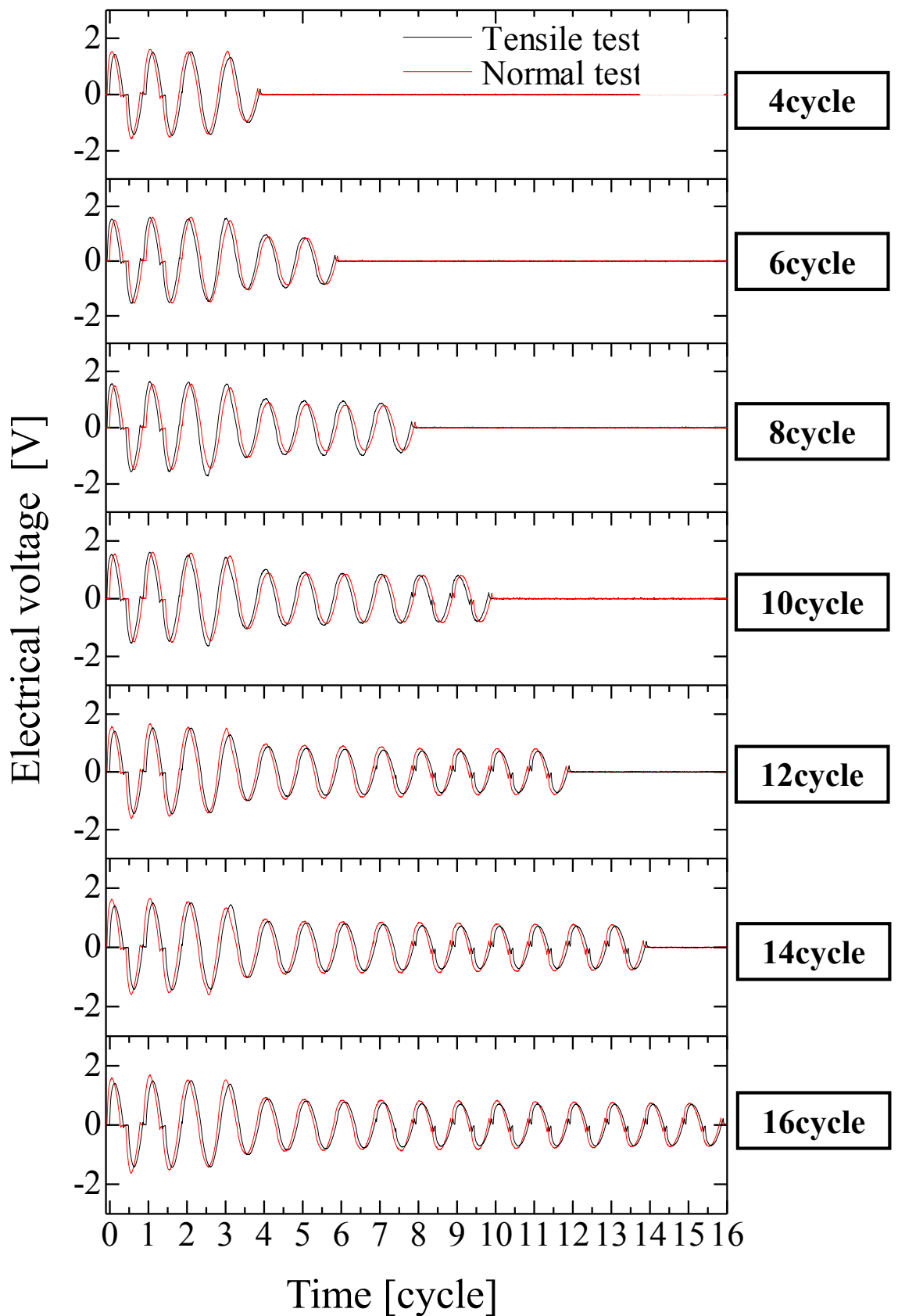


Fig.3-25 Average quantity of Jule heat
for different extension lengths



*Electrode force 3kN , Set up current 9kA

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



*Electrode force 3kN , Set up current 9kA

Fig.3-27 Comparison between electrical voltage during welding of tensile test specimen and that of normal specimen

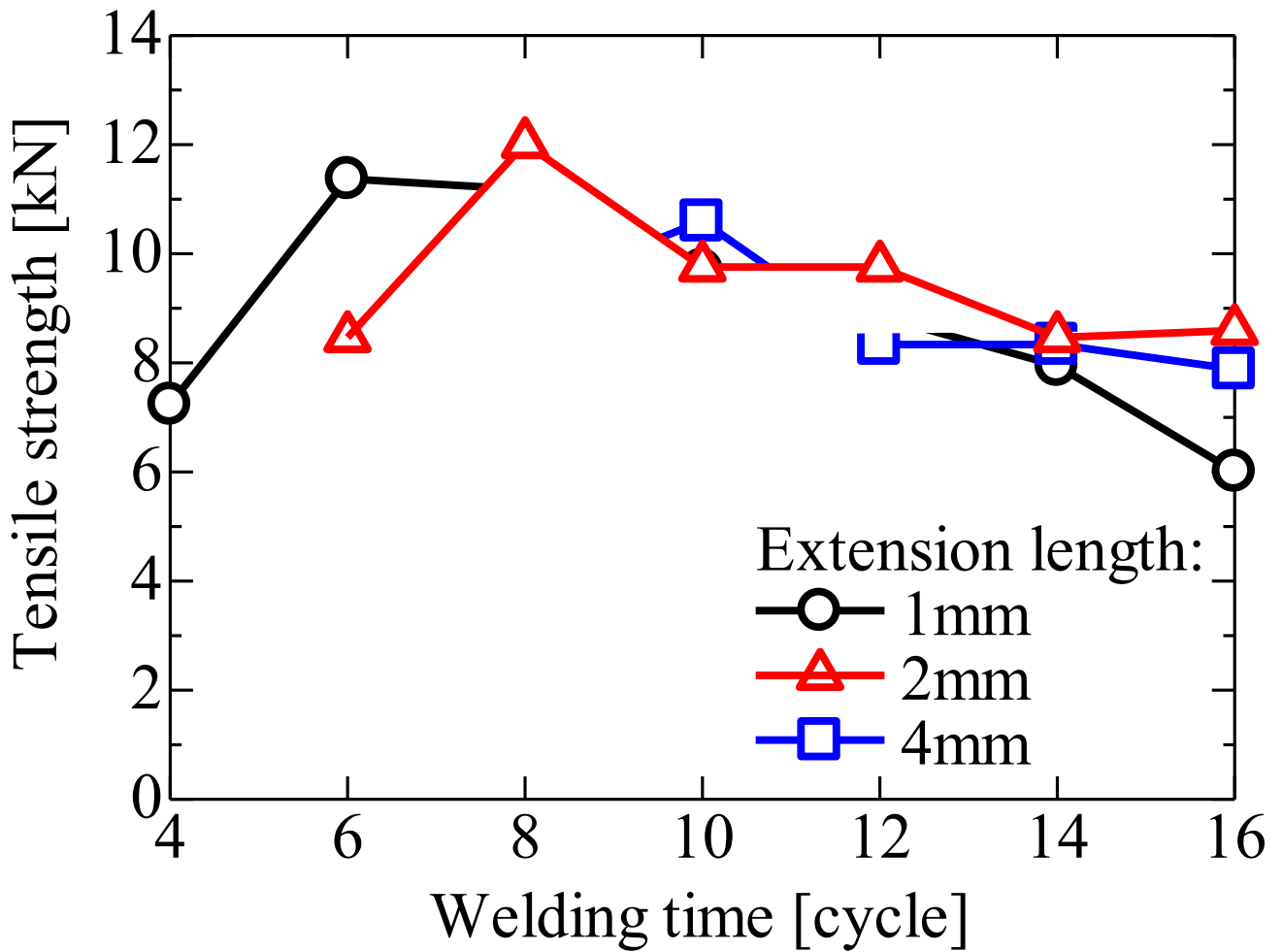
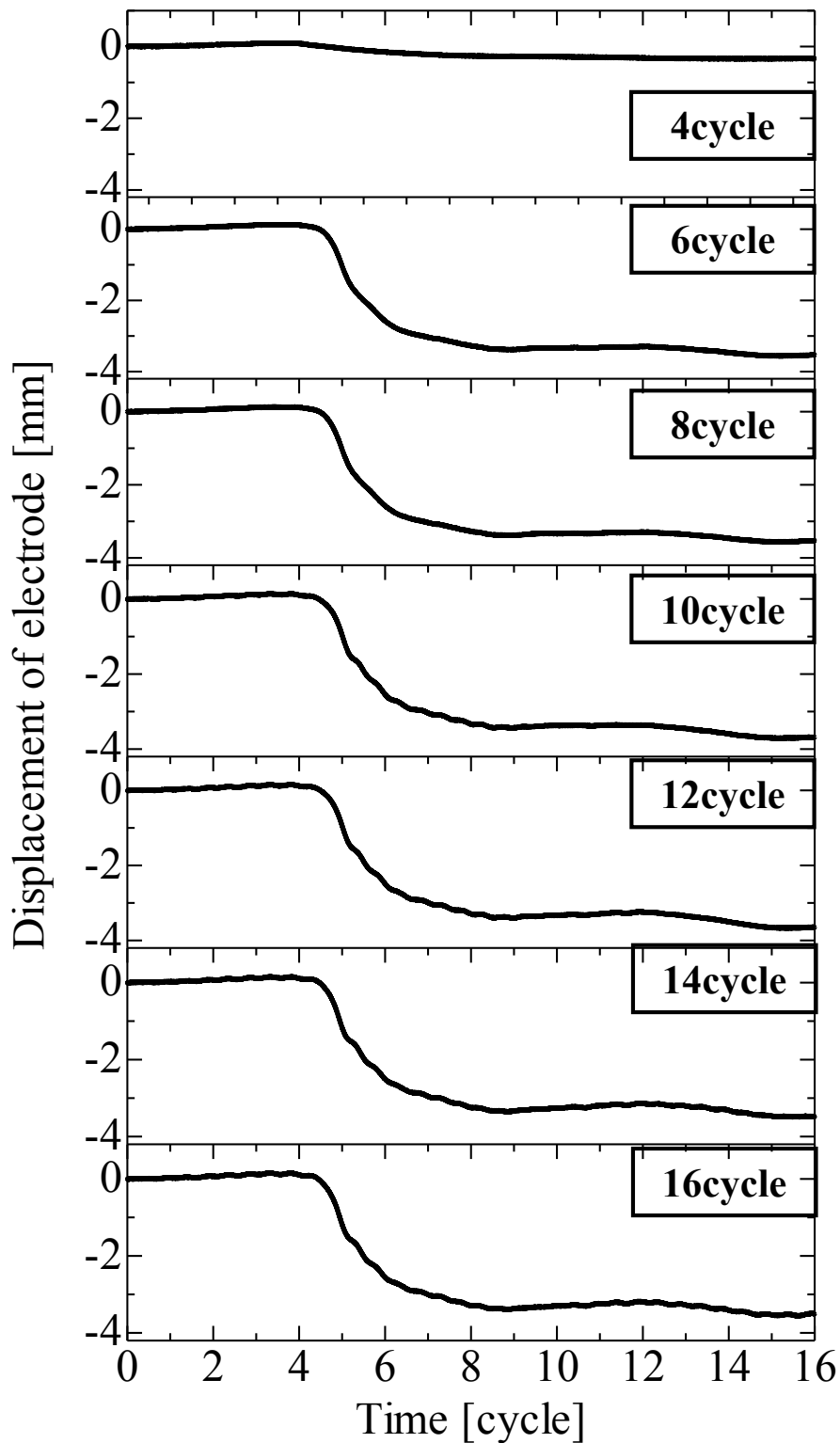


Fig.3-28 Relationship between welding time and for different tensile strength for different extension lengths

Welding time[cycle]	4	6	8	10
Front side	×	×	×	×
Back side	×	×	×	×

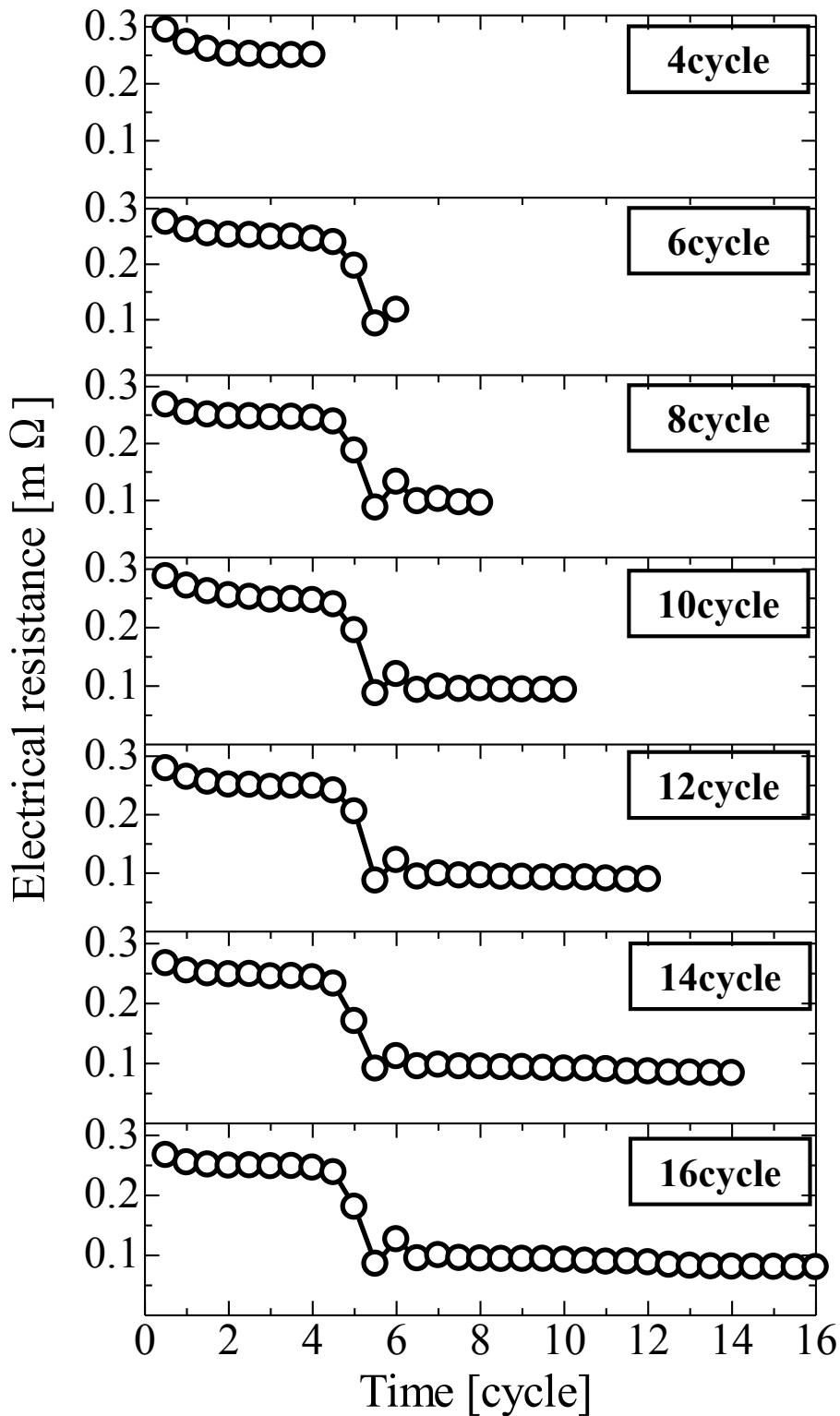
Welding time[cycle]	12	14	16
Front side	×	○	○
Back side	×	×	×

Fig.3-29 Evaluation results from cross sectional observation of specimens after welding plate thickness of 3mm



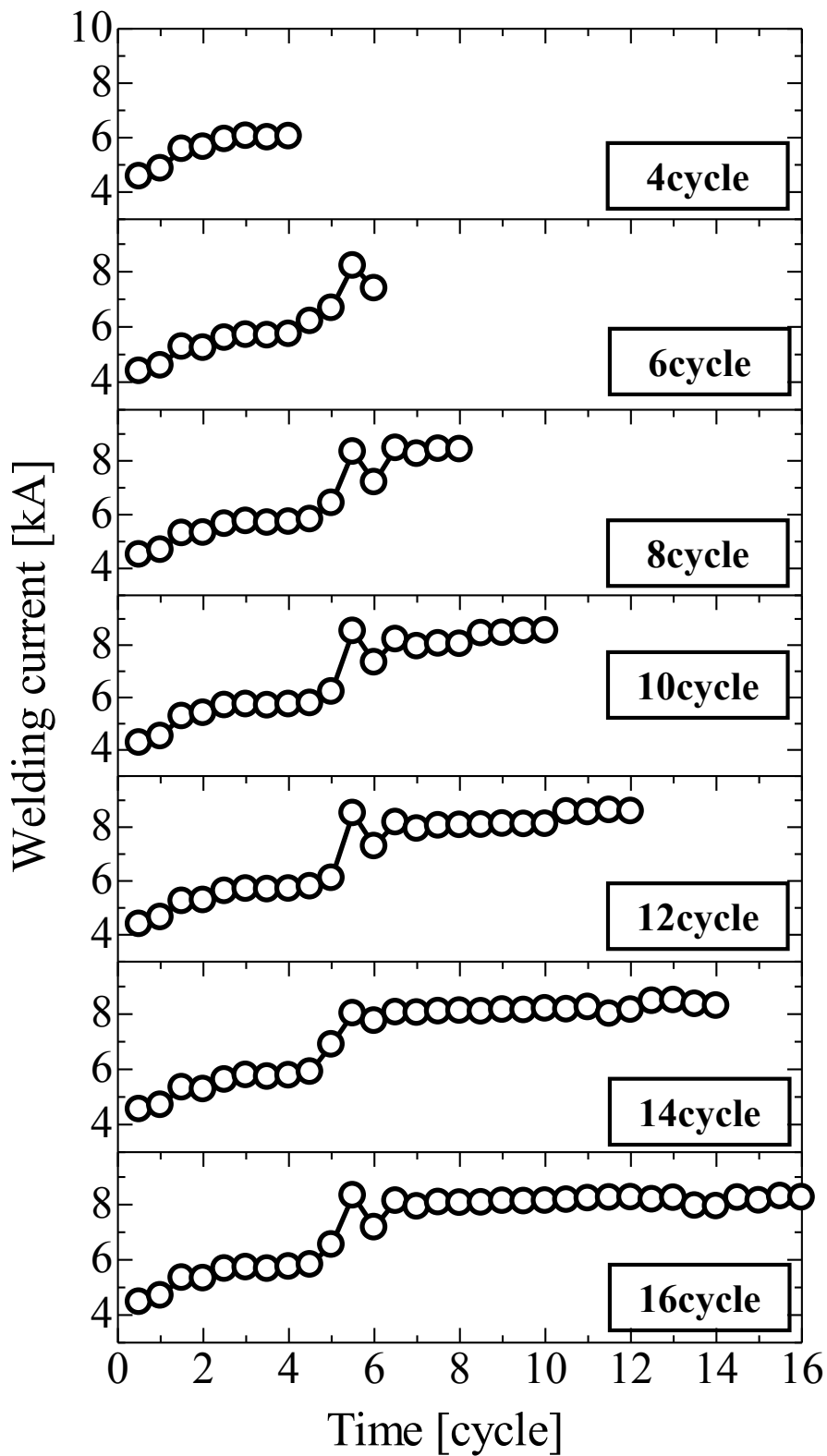
*Extension length 4mm, Electrode force 3kN, Set up current 9kA

Fig.3-30 Displacement of upper electrode
with extension length of 4mm



*Extension length 4mm, Electrode force 3kN, Set up current 9kA

Fig.3-31 Displacement of upper electrode
with extension length of 4mm



*Extension length 4mm, Electrode force 3kN, Set up current 9kA

Fig.3-32 Displacement of upper electrode
with extension length of 4mm

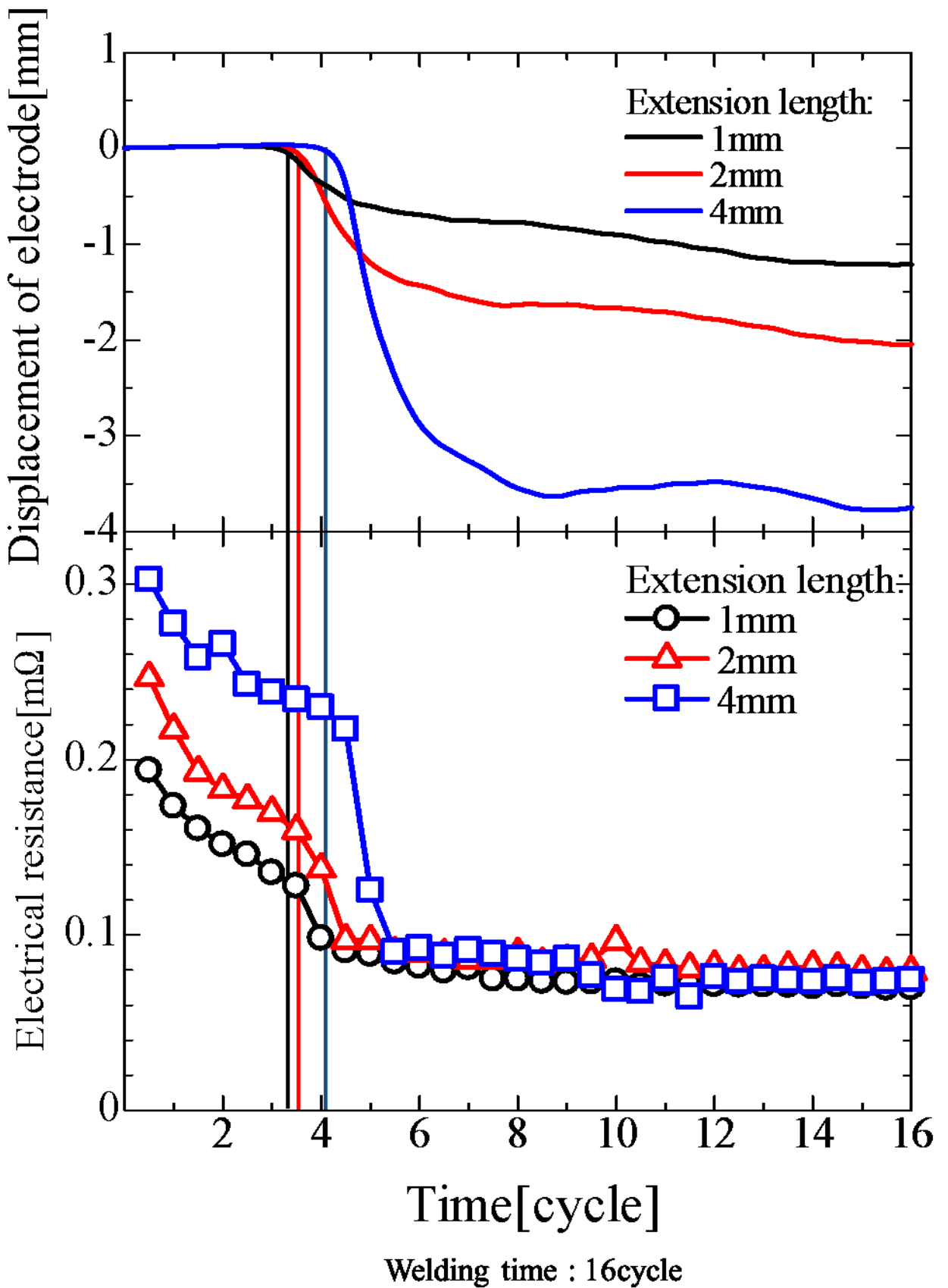


Fig.4-1 Displacement of upper electrode and average electrical resistance with welding time of 16 cycle for different extension lengths

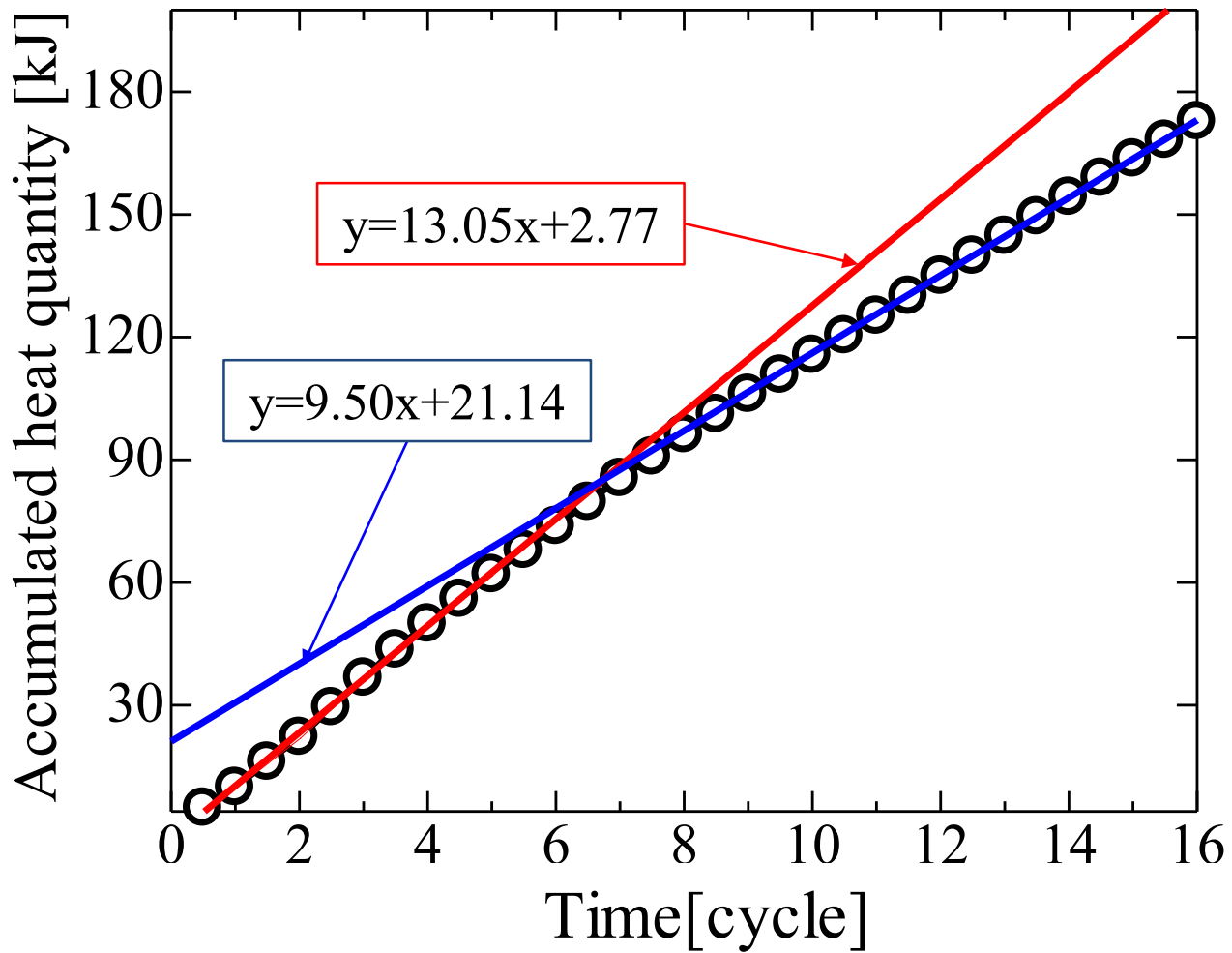


Fig.4-2 Cumulative average quantity of Joule heat with extension length of 1mm

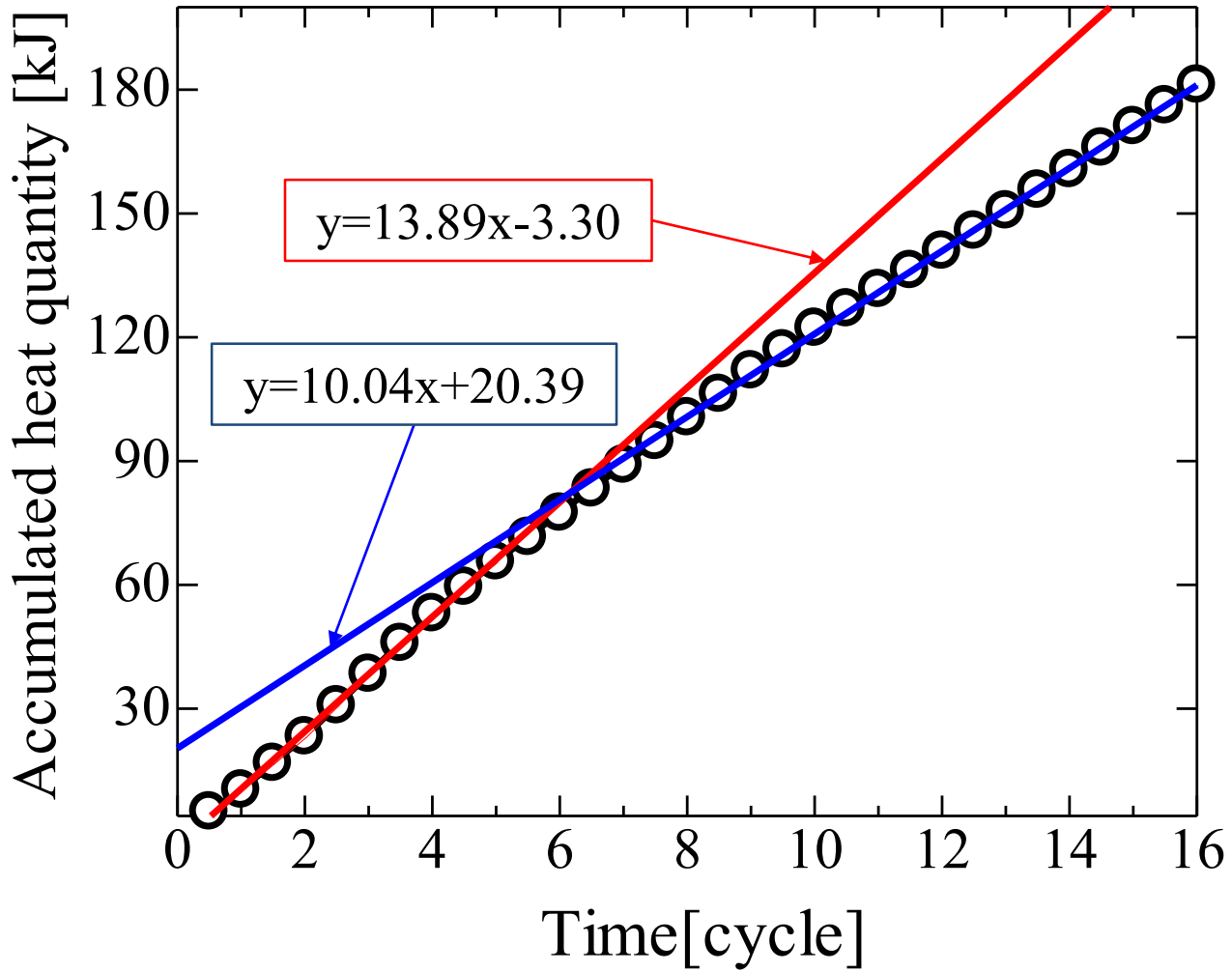


Fig.4-3 Cumulative average quantity of Joule heat with extension length of 2mm

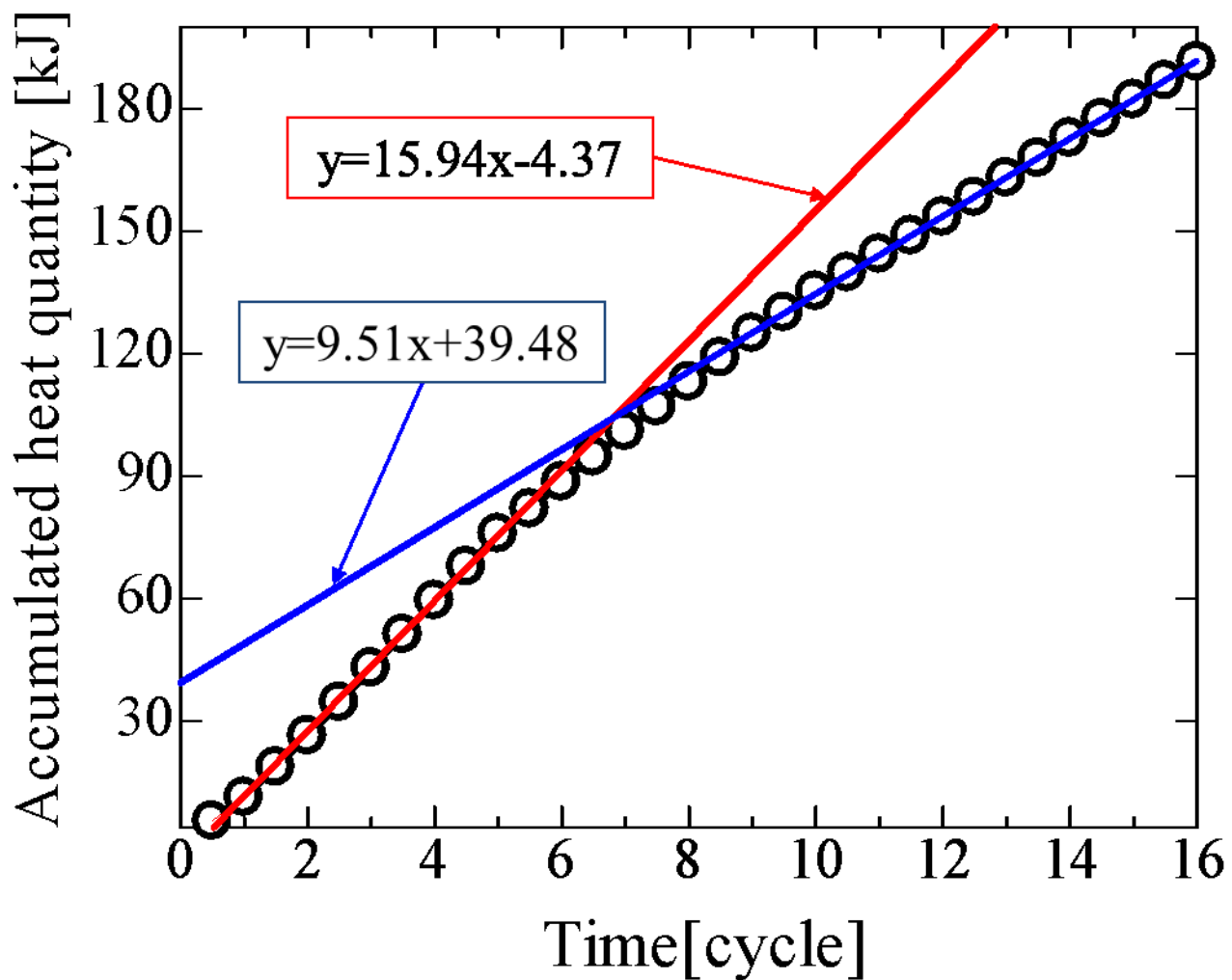
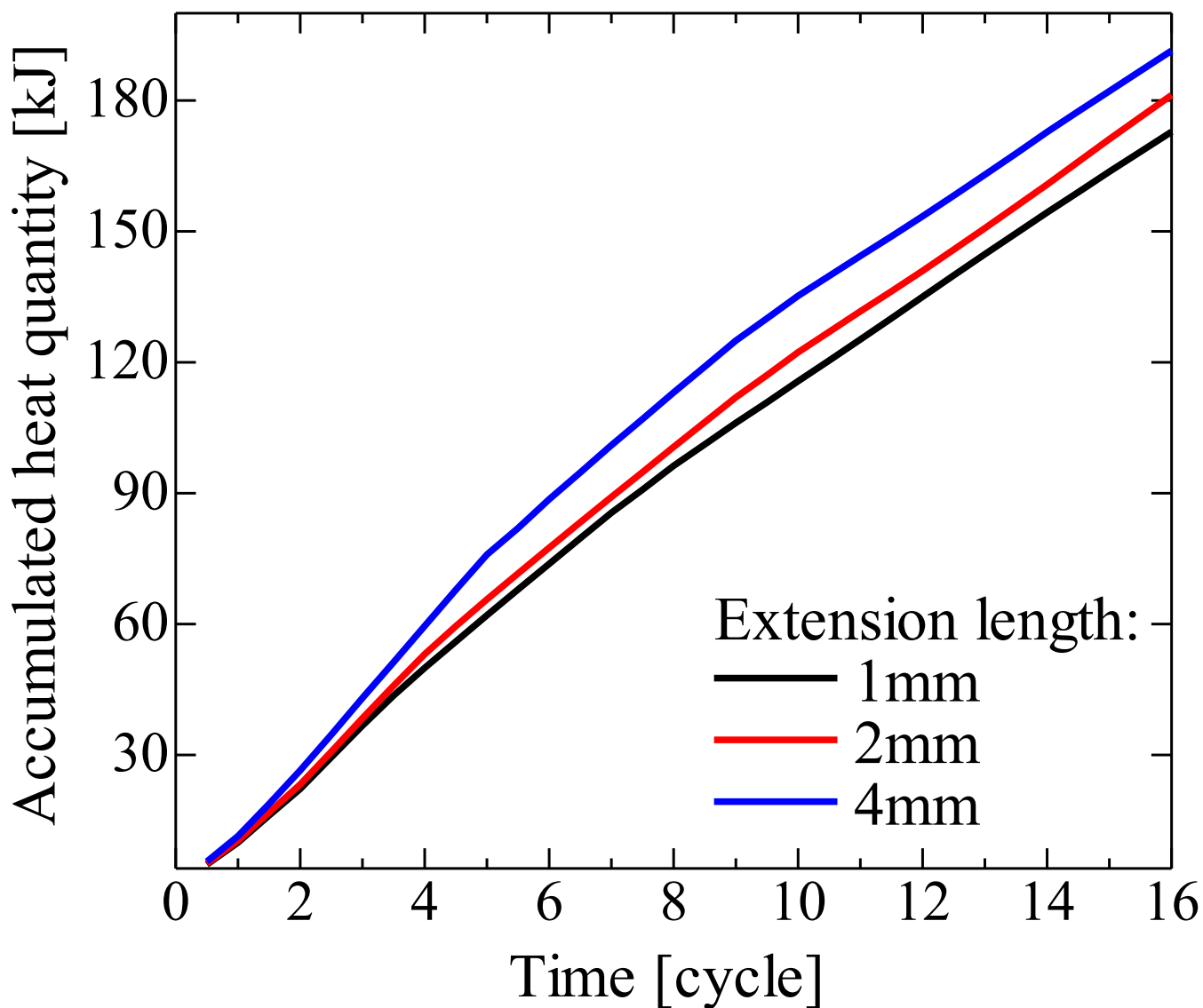


Fig.4-4 Cumulative average quantity of Joule heat with extension length of 4mm



	Q_t	Q_{pt}
1mm	80.85	73.80
2mm	90.60	100.60
4mm	120.54	135.23

Fig.4-5 Cumulative average quantity of Joule heat with extension for different extension lengths

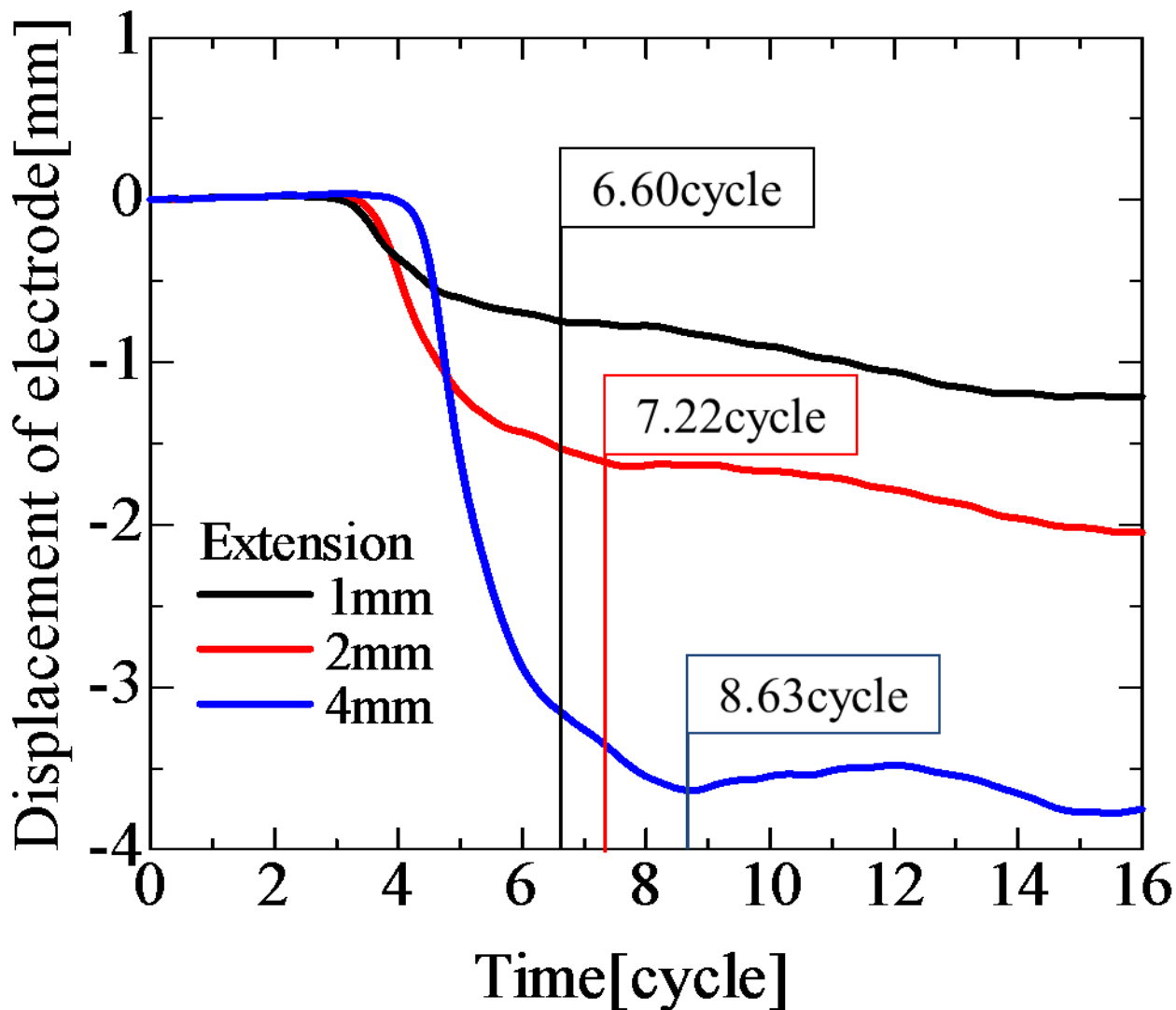


Fig.4-6 Displacement of upper electrode for different extension lengths

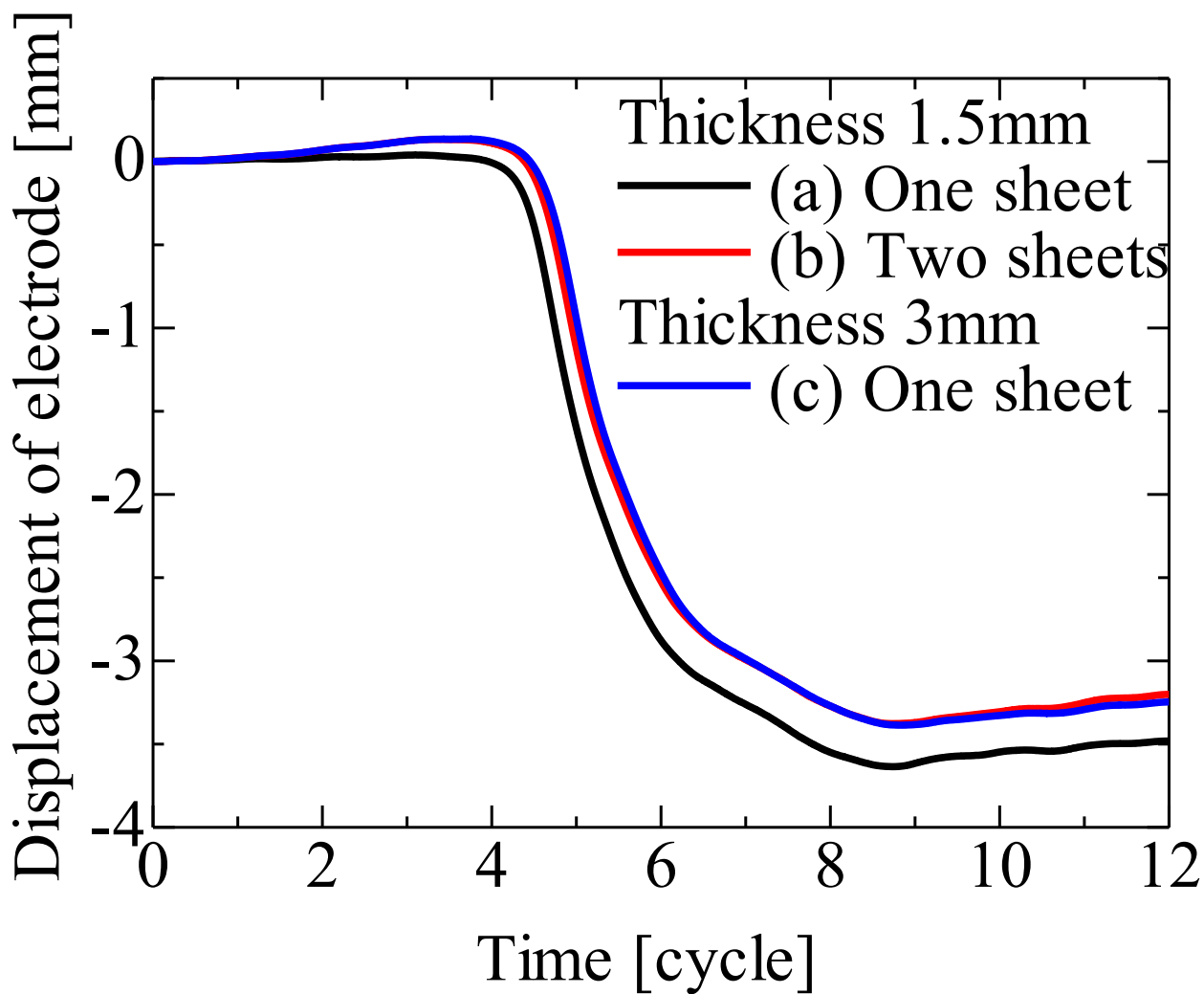


Fig.4-7 Displacement of upper electrode with welding time of 12 cycle for different sheets

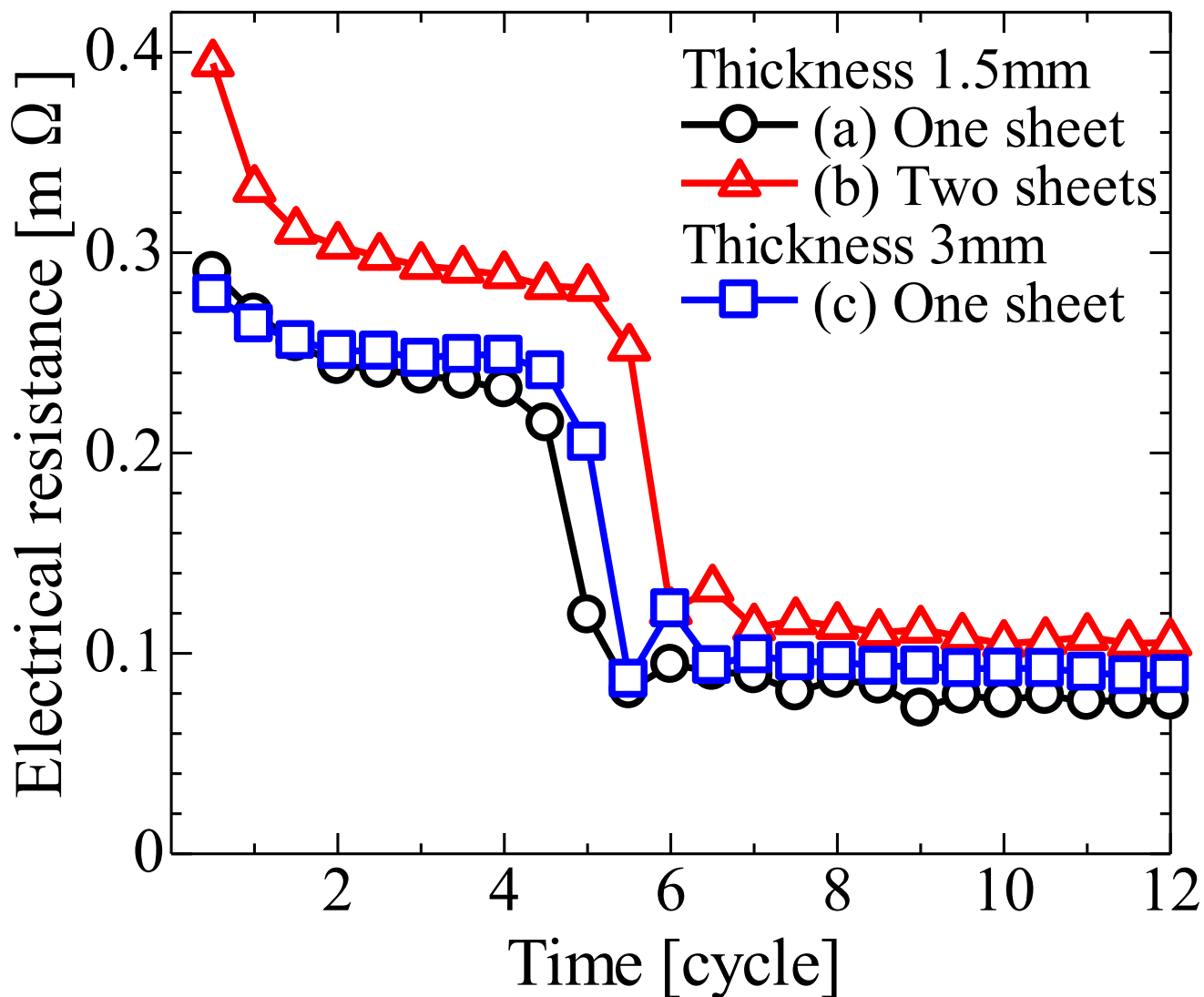


Fig.4-8 Average electrical resistance
 with welding time of 12 cycle for different sheets

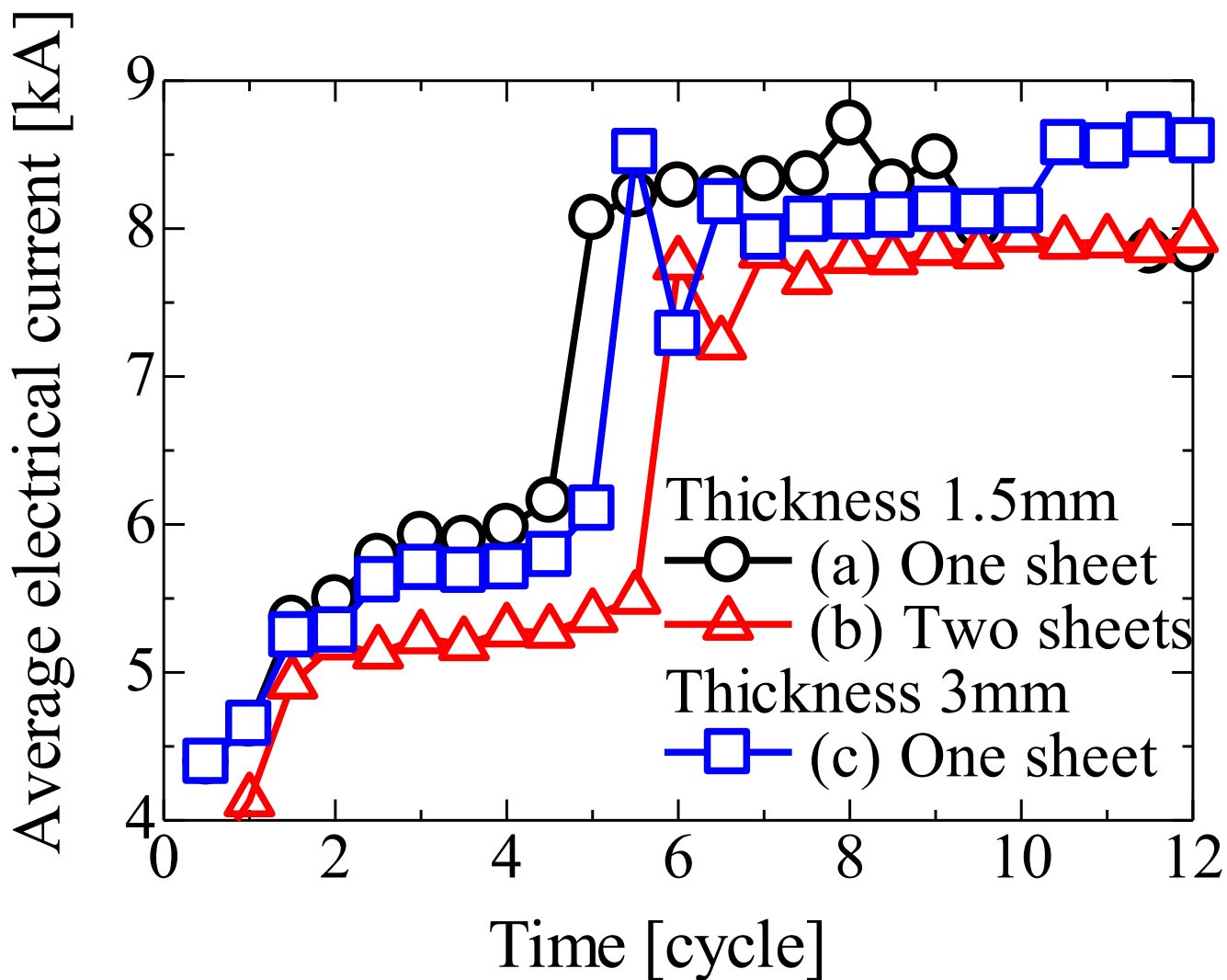


Fig.4-9 Average electrical current with welding time of 12 cycle for different sheets