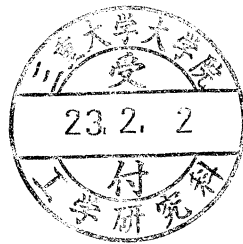


平成 22 年度 修士論文

抵抗スポット溶接中の被溶接材の 電気抵抗変化



三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻
佐波 孝洋

目次

第 1 章 緒言	・ ・ ・ 1
第 2 章 実験方法及び実験装置	・ ・ ・ 4
2-1 供試材	・ ・ ・ 4
2-2 抵抗スポット溶接実験装置	・ ・ ・ 4
2-2-1 実験装置の仕様	・ ・ ・ 4
2-2-2 実験装置全体の仕様	・ ・ ・ 6
2-3 加圧方式の検討	・ ・ ・ 6
2-4 測定信号の校正	・ ・ ・ 7
2-5 溶接電流の制御特性	・ ・ ・ 8
2-6 実験方法と実験条件	・ ・ ・ 9
第 3 章 抵抗スポット溶接実験結果	・ ・ ・ 11
3-1 抵抗スポット溶接現象の定性的な把握	・ ・ ・ 11
3-2 溶接中の溶接中の各種影響因子の変化	・ ・ ・ 13
3-2-1 溶接中の電極加圧力	・ ・ ・ 13
3-2-2 溶接中の電極変位	・ ・ ・ 14
3-3 抵抗スポット溶接におけるチリ発生現象	・ ・ ・ 15
3-3-1 チリ発生境界条件	・ ・ ・ 15
3-3-2 チリ発生時間	・ ・ ・ 15
3-4 ナゲットの形成過程	・ ・ ・ 16
第 4 章 引張試験および電気抵抗率の測定	・ ・ ・ 18
4-1 引張試験	・ ・ ・ 18
4-1-1 実験方法および実験装置	・ ・ ・ 18
4-1-2 引張試験結果	・ ・ ・ 19
4-2 電気抵抗率の測定	・ ・ ・ 20
4-2-1 実験方法および実験装置	・ ・ ・ 20
4-2-2 電気抵抗率測定結果	・ ・ ・ 20
第 5 章 抵抗スポット溶接の電気抵抗に関する考察	・ ・ ・ 21
5-1 溶接中の電気抵抗	・ ・ ・ 21
5-2 溶接中の電気抵抗変化の考察	・ ・ ・ 23
第 6 章 結言	・ ・ ・ 26

参考文献

謝辞

第 1 章 緒言

電気抵抗溶接は導体中を流れる電流によるジュール発熱を熱源とした溶接法で、アーク放電を利用するアーク溶接法と原理が異なる。電気抵抗溶接は、アメリカの E.Thomson による 1885～1886 年の研究に端を発するが、ドイツの N.v.Benardos の炭素アーク溶接法の特許取得が 1885 年であるから、電気抵抗溶接も歴史のある溶接法である。

抵抗スポット溶接は、比較的薄い板材を重ね溶接する手段として広範囲に利用されている。抵抗溶接の原理は簡単に述べれば次のようである。被溶接材の薄板を重ね合わせた溶接部を一对の水冷銅電極で加圧力を負荷して挟み、電極間に大電流を短時間通電し、被溶接材の電気抵抗によるジュール発熱を生じさせて、被溶接材を加熱・溶融して溶接する。抵抗スポット溶接はジュール発熱を熱源とするため、発熱は材料の固有抵抗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。銅電極の電気抵抗に比べて被溶接材の電気抵抗が大きく、また銅電極よりも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、銅電極は水冷されており、電極が溶融したり、被溶接材と電極の接触面が溶融したりする現象は通常は発生しない。

抵抗スポット溶接では、①通電時間が短く、発生したエネルギーは有効にナゲットの生成に消費されるため、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に与える熱影響は極めて少ない。②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。③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。などの利点があり、金属薄板を短時間に大量に接合することに適している。

抵抗スポット溶接において大きな問題は、過度の発熱によってチリと呼ばれる溶融金属が飛散する現象が生じることである。チリの発生によって溶接部の強度が特別に影響を受けることはないが、飛散した溶融金属が製品を汚損するため、チリの発生は抑制しなければならない。一方、抵抗スポット溶接に求められる基本的な品質は溶接継手部の強度であり、溶接部の強度はナゲットと呼ばれる被溶接材間に形成される溶融部の大きさに依存する。そのためナゲット径を増大させるには被溶接材間の十分な発熱が必要である。すなわち、抵抗スポット溶接ではチリ発生条件に近い条件ほどナゲット径が大きく継手強度の観点からはチリ発生条件に近い溶接条件を選択する必要があるが、チリの発生する溶接条件は避けなければならない。

ナゲットの形成およびチリの発生はどちらも溶接中の被溶接材の発熱によるものである。抵抗スポット溶接の熱源は被溶接材の電気抵抗によるジュール発熱であるから、被溶接材固有の電気抵抗率は発熱量に直接影響する。溶接部の電気抵抗は材料固有の電気抵抗率だけでなく被溶接材間の真の接触面積などにも影響される。これらの影響因子は被溶接材の温度に依存し変化する。すなわち、材料の電気抵抗率の温度依存性のために、通常は温度上昇に伴って電気抵抗が増大する。また温度上昇に伴って材料は熱膨張するとともに降伏強度が低下する。被溶接材の熱膨張は加圧力が負荷された電極を押し広げようとするため、電極加圧力の増加となって表れる。この被溶接材の熱膨張と加圧力の増加量との関係は、電極を支持している溶接機本体の剛性（ばね定数）によって異なる。電極加圧力の増加および材料の降伏強度の減少は被溶接材間の真の接触面積を増大させ、通電面積の増大による電気抵抗の減少をもたらす。

抵抗スポット溶接中の電気抵抗は、被溶接材の温度上昇および被溶接材間の真の接触面積の増大により変化する。溶接中の電気抵抗の変化は溶接部の発熱量の変化を表している。しかし、溶接部の温度および被溶接材間の真の接触面

積は直接測定することが困難である．本研究では 2 種類の鋼材質を用い，電気抵抗に影響を与える因子である材料の電気抵抗率および降伏強度を測定した結果から，溶接中の電気抵抗変化の過程を検討することで抵抗スポット溶接現象の全体像の把握を試みた．

第 2 章 実験方法及び実験装置

2-1 供試材

本実験で使用した供試材は、板厚 1.2mm の冷間圧延鋼板 (JIS SPCC)、ステンレス鋼 (JIS SUS304) を用いた。試験片の形状は 39×40mm の矩形とした。冷間圧延鋼板 (JIS SPCC)、ステンレス鋼 (JIS SUS304) の化学組成と物性値を Table 2-1 および Table 2-2 に示す^{1,2)}。

2-2 抵抗スポット溶接実験装置

2-2-1 実験装置の仕様

Fig.2-1 に実験装置全体を示す。溶接機 (ダイヘン製 PRAB-22) に電極加圧力が測定できるようシリンダー部の下にロードセルを設置した。部品は材料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-G20) を使用し、設置位置を Fig.2-2 に示す。ロードセルの定格容量は 20kN である。

制御装置には溶接電源と溶接の条件制御を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	3.0kA～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、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 LM-10）を使用した。上部電極に地面と平行な受光板を設置しその変化量を光変位センサで測定する。取り付け位置を Fig.2-3 に示す。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	$10\text{Hz}-1\mu\text{m}$
	$100\text{Hz}-3.5\mu\text{m}$
	$1\text{kHz}-10\mu\text{m}$

溶接電流およびチップ間電圧の測定は溶接チェッカー（MIYATI 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	$1.00\text{kA}\sim 19.99\text{kA}, 10.0\sim 199.9\text{kA}$
	検出コイル	トロイダルコイル（MB-800K）
チップ間電圧	測定範囲	$0.1\text{V}\sim 9.99\text{V}$
	検出線	電極検出ピックアップ
通電サイクル	測定範囲	$0.5\sim 99.5\text{cycle}$
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行値）	
	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 2 次導体の一部にかける。

2-2-2 実験装置全体の仕様

Fig.2-4 に計装化後の実験装置を示す。仕様は以下のようになった。

電源	単相交流式
制御方式	定電流制御
最大溶接電流	10000A
溶接時間	0～99cycle
最大電極加圧力	空気加圧方式：約 4.98kN (0.5MPa) ねじ加圧方式：約 8.00kN
変位分解能	10 μ m
電流・電圧測定値	実効値
測定範囲	
溶接電流	1.00kA～19.99kA
チップ間電圧	0.10～9.99V
チップの変位	±10mm

2-3 加圧方式の検討

溶接中の電極加圧力は溶接機の剛性に左右され、この剛性は加圧方式に起因する。剛性の低い加圧方式としてエアシリンダーによる空気加圧 (Air cylinder) と剛性の高い加圧方式であるねじによる上部電極可動部の機械的加

圧（機械式加圧，Screw）を用いた．Fig.2-1 において破線部分で囲まれた部分を拡大し，それぞれの加圧方式を Fig.2-5 と Fig.2-6 に示す．

2-4 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で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校正する必要がある．以下にそれぞれの換算方法と値を示す．

ロードセル

ロードセル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に定格出力を設定し，オシロスコープ画面上に定格容量 20kN を表示させ，測定して単位の換算を行った．

- ・ 空気ゲージ圧 (MPa) 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) は電圧値では 2.52V なので

換算式は

$$\text{荷重 (kN)} = \text{電圧値 (V)} \times (20 \div 2.52)$$

で表すことができる．

- ・ 空気ゲージ圧 (MPa) とシリンダー直径で求められる荷重

シリンダー直径は 0.11m, $1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$ であるので

計算式は

$$\text{荷重 (kN)} = \text{空気ゲージ圧 (MPa)} \times \text{シリンダーの面積}$$

光変位センサ

光変位センサの受光部には鉄に艶消しの塗料を塗ったものを用いた．光変位センサの換算にはマイクロメーターを使い， $100\mu\text{m}$ から $2000\mu\text{m}$ の電圧を測定し，電圧との換算を行った．測定結果を Fig.2-7 に示す．この結果から $1\text{V}=1.977\text{mm}$ と換算出来る．

溶接電流

溶接チェッカーにも実効値か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．オシロ値は正確に測ることが難しいためいくつかのデータの平均で換算式を作る．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. 2-8 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換算係数を $1\text{V}=6.526\text{kA}$ とした．

2-5 溶接電流の制御特性

溶接電流は交流であり，電源の制御方式は定電流制御であるが，通電開始から2-3周期は電流値が増加する．溶接開始時(第1周期)および溶接中(第6周

期)の電流波形の詳細を Fig. 2-9(a)および(b)に示す. いずれの場合も制御電流値の増加に伴ってピーク電流値が増大するが, ピーク値は設定値に比例していない. 電流値は正弦波ではなく, 半周期毎に電流が流れていない休止時間がある. この休止時間の長さは設定電流値に依存して変化する. 使用した溶接電源の定格値の 9.9kA の場合, Fig. 2-9(b)のように電流の休止時間はほとんど観察されないが, 設定値の減少に伴って休止時間が増大する. 設定電流値は瞬時電流値の二乗の時間平均の平方根(実効値)であり, 時間平均は休止時間も含めた時間で算出している. 設定電流値は制御されており, 鋼材質, 被溶接材板厚および電極加圧力が変化してもほとんど影響を受けずに一定値である. チリが発生した場合には被溶接材の状態が大きく変化すると考えられるが, 溶接電流にはほとんど影響が観察されない.

2-6 実験方法と実験条件

本実験では供試材, 加圧方式, 溶接電流, および電極加圧力を変化させた. 溶接電流, 初期加圧力を主に各材質のチリ発生条件付近で変化させ, 冷間圧延鋼板 (JIS SPCC) は, 5.0kA~9.9kA, 0.2kN~3.8kN, ステンレス鋼 (JIS SUS304) は, 5.0kA~9.9kA, 0.7kN~8.0kN の範囲で変化させた. 通電時間は, 冷間圧延鋼板 (JIS SPCC), ステンレス鋼 (JIS SUS304) とともに 12 サイクルとした. なお, 溶接中のナゲット径を観察する際には通電時間を変化させて溶接を行っている. ナゲットとは接合時に与えられたジュール発熱により融解し, その後冷却により凝固した部分で溶接部に相当する. ナゲット形状を観察するため, 溶接部の中心を切断した. 切断後は#1500 までの耐水研磨紙を用いて研磨を行い, 冷間圧延鋼板 (JIS SPCC) は硝酸 5cc に対してエタノール 100cc を混ぜたものに 30 秒浸け, ステンレス鋼 (JIS SUS304) は濃度 15%の塩酸に

30 分浸け腐食を行った。電極形状は上下電極とも先端曲率半径 25mm の R 型電極を採用した。繰り返し数は冷間圧延鋼板 (JIS SPCC), ステンレス鋼 (JIS SUS304) とともに 10 回とし, チリが発生した回数を記録した。なお, 各鋼材質とも空気加圧では初期加圧力時間は 60 サイクルで, 保持加圧時間 (通電終了後の加圧時間) は 60 サイクルで実験を行った。また, 機械式加圧では初期加圧力時間, 保持加圧時間ともに考慮しない。

第3章 抵抗スポット溶接実験結果

3-1 抵抗スポット溶接現象の定性的な把握

溶接中の電極変位，電極加圧力，溶接電流，チップ間電圧の時間変化の測定例を，溶接電流を8.0kAに設定してSPCC鋼を溶接した場合を例にとってFig.3-1およびFig.3-2に示す．Fig.3-1にはそれぞれの加圧方式での電極変位および電極加圧力を示し，Fig.3-2には溶接電流およびチップ間電圧を示す．

抵抗スポット溶接において，被溶接材の加熱は溶接電流の通電開始で始まるが，後述するように電圧の立ち上がりにより明瞭に観察できるために，同図では電圧増加開始時刻を時間軸の原点(ゼロ)とした．通電時間は200msであり，交流60Hzで12サイクルである．

電極変位は上部電極に取り付けたレーザ反射板の位置を測定しており，正の変位は上部電極が上方に移動していることを示す．全ての溶接実験で変位は溶接開始から増加しており，被溶接材の熱膨張によって上部電極が持ち上げられている．チリが発生しない場合，電極変位は溶接中に極大を示し，その後，通電中にもかかわらず減少する．通電に対して被溶接材の温度上昇が飽和することは考えられるが，チリが発生しなかったすべての実験において電極変位の溶接中の減少が観察されることから，この変位の減少は被溶接材が電極加圧によって圧縮変形した結果と考えられる．すなわち，温度上昇に伴って材料強度が電極加圧力より小さくなり，板厚が減少するためと考えられる．チリが発生する場合，電極変位は急激な減少を示す．これはチリの発生によってコロナボンドを突き破ってナゲット内の溶融金属が外部に流出した結果と考えられる．本研究では電極変位が急激な減少を示す時刻を，チリ発生時刻とした．

電極加圧力は溶接電流の通電開始前に負荷する．Fig.3-1に示した負時間の

間の値が初期電極加圧力である。空気式加圧の場合には、電極加圧力は溶接中にほとんど変化しない。一方、機械式加圧の場合には、通電によって被溶接材が熱膨張を開始すると電極加圧力が増加する。空気式加圧では被溶接材の熱膨張による電極変位はエアシリンダのピストンを変位させるだけで加圧力の増加としては表れないが、機械式加圧では熱膨張は溶接機本体の弾性変形を引き起こして加圧力の増加となって表れる。なお、電極変位と電極加圧力の測定結果には大きな半サイクルの変化と細かい周期的な変化が認められる。上述したように大きな変化は被溶接材の熱膨張および圧縮変形による板厚減少を反映していると考えられるが、細かい周期変動は溶接電流が半サイクル毎に変動する周期と連動しているため、溶接電流の変動による雑音であると考えられる。チップ間電圧は上下の銅電極および測定回路の電気抵抗によって生じる電圧、被溶接材の電気抵抗によって生じる電圧、電極－被溶接材および被溶接材同士の界面の接触抵抗によって生じる電圧などの合計である。溶接電流に対応してチップ間電圧は 60Hz で変動する。電圧のピーク値の変化については、溶接電流と同様に溶接開始時からおよそ 4 周期まで増加する。各々のサイクルにおける溶接電流とチップ間電圧の変化を Fig.3-3 に示す。ただし Fig.3-3 の縦軸は電圧あるいは電流を示すが、変化割合を比較するためにそれぞれのピーク値が一致するように伸縮されている。したがって同図は定性的な電圧や電流の変化を示しているに過ぎない。全般に電流の増加割合に比べて電圧の増加割合が大きい。この傾向は Fig.3-3(a)に示すように第 1 周期の前半のサイクルで顕著であり、同図(b)に示すように第 1 周期以降は差が小さい。後述するようにチップ間電圧と電流との比は接合部の電気抵抗である。

通電開始直後には電圧値と電流値の立ち上がりの差異が認められるが、溶接過程全体として差は小さく、この比によって電気抵抗を推定できると考えられる。抵抗スポット溶接部では被溶接材の熱膨張および圧縮変形が生じる。この

現象に対応して電極加圧力に変化が生じ、これらの現象によって溶接中の通電面積が変化することにより、溶接中の電気抵抗値が変化する。溶接中の電極加圧力の変化の程度は加圧の方法、すなわち溶接機の剛性によって異なる。次節ではこれらの溶接現象を定量的に示す。

3-2 抵抗スポット溶接中の各種影響因子の変化

3-2-1 溶接中の電極加圧力

溶接中の被溶接材の熱膨張を溶接機本体が抑制するために電極加圧力は増加する。増加量は熱膨張量と溶接機の剛性に依存する。SPCC 鋼および SUS304 鋼についての初期加圧力と溶接中の最大加圧力との関係を Fig.3-4 に示す。各図の白抜きの記号は空気加圧方式の場合であり、中塗りの記号は機械式加圧の場合である。また、○印は溶接中にチリが発生しなかったことを、△印はチリが発生したことをそれぞれ示す。いずれの鋼種についても、空気加圧方式では初期加圧力と最大加圧力がほぼ同等の値であり、溶接中の加圧力増加が非常に小さい。これは前節で述べたように、電極変位がエアシリンダのピストンの変位として吸収されてしまうために加圧力の増加として表れないためである。すべての空気式加圧の溶接実験の場合に 100N 程度の増加が認められるが、これはピストンの摩擦抵抗によるものだと考えられる。一方、いずれの鋼種についても、機械式加圧では加圧力の増加が認められる。溶接中にチリが発生する場合の最大加圧力はチリ発生直前の加圧力である。チリの発生によって加圧力が大きく減少するために、全般にチリの発生する場合の最大加圧力は発生しない場合の値より小さくなる。いま、Fig.3-4 に示した加圧増加量の結果には溶接電流および電極加圧力が異なる条件が含まれている。溶接中の電極加圧力の

変化には被溶接材の熱膨張と高温における降伏応力の低下による変形が関与すると考え、加圧力の増加量におよぼす溶接電流および電極加圧力の影響を Fig.3-5 に示す。これらの結果はチリが発生しなかった場合のみを示す。各図の白抜きの記号は SPCC 鋼の加圧増加量を、中塗りの記号は SUS304 鋼の加圧増加量をそれぞれ示す。また、○印は機械式加圧の場合であり、△印は空気式加圧の場合である。鋼種によらず、空気加圧の場合は、初期化圧力を変化させても加圧増加量はほぼ一定となる。一方、機械式加圧の場合では、加圧増加量は初期加圧の増加に伴って減少する。溶接電流が同一である場合、チリ発生による加圧力の低下がない場合において、初期加圧力を増加すると、電極－板間および板－板間の真の接触面積が増大し、電流密度の低下をもたらし溶接部の平均温度が低下するためであると考えられる。

3-2-2 溶接中の電極変位

全般に空気式加圧の場合には溶接中の加圧力変化が小さく、電極変位が大きい。一方、機械式加圧の場合には電極変位が抑制され、加圧力が増加する。チリが発生しなかった場合について、電極変位の最大値を SPCC 鋼および SUS304 鋼について電流値毎に Fig.3-6 に示す。図中の○印は空気式加圧であることを、また△印は機械式加圧であることを示し、それぞれの記号について白抜きの記号は SPCC 鋼を、中塗りの記号は SUS304 鋼を示す。前節で述べたように、機械式加圧では被溶接材の熱膨張による電極変位を溶接機本体の剛性によって抑制するために、空気式加圧の方が機械式加圧より電極変位が大きい。鋼種によらず、機械式加圧では電流値が同一である場合、初期加圧力を増加させると電極変位が減少する傾向が認められる。

3-3 抵抗スポット溶接におけるチリ発生現象

3-3-1 チリ発生境界条件

抵抗スポット溶接では、溶接条件により溶接中に溶融金属が溶接部から飛散するチリと呼ばれる現象が発生する。そこで、SPCC 鋼および SUS304 鋼について、本研究で使用した 2 種類の加圧方式を用いて、溶接電流と電極加圧力を変化させ溶接を行いチリの発生境界条件を求めた。SPCC 鋼および SUS304 鋼のチリ発生境界条件を Fig.3-7 および Fig.3-8 に示す。横軸は溶接電流をとり、縦軸は初期加圧力とした。図中の○印はチリが発生しなかった場合であり、●印はチリが発生した場合を表している。2 種類の加圧方式を比較すると、チリ発生境界条件は機械式加圧の方が低加圧側となる。前節で述べたように、機械式加圧の場合、溶接中に加圧力の増加が生じることがわかっている。そこで、縦軸を溶接中の最大電極加圧力としたチリ発生境界条件を Fig.3-9 および Fig.3-10 に示す。同様に 2 種類の加圧方式を比較すると、溶接中の最大加圧力を用いるとチリ発生境界条件がほぼ一致する。

3-3-2 チリ発生時間

前節で述べたようにチリが発生すると加圧方式によらず電極変位に急激な変化が観察される。そこで、電極変位が急激に減少する時刻をチリ発生時間とした。通電開始からチリが発生するまでの時間を溶接電流毎に整理したものを SPCC 鋼および SUS304 鋼について、Fig.3-11 および Fig.3-12 に示す。図中の○印は空気式加圧の場合であり、●印は機械式加圧の場合のチリ発生時間を示している。鋼種によらず電極加圧力を増加するとチリ発生時間が長くなる

傾向が認められ、チリ発生境界条件付近が最もチリ発生時間が長くなることがわかる。これは電極加圧力を増加すると、被溶接材の真の接触面積が増大しそれに伴い溶接部の温度上昇が減少するため、チリが発生するまでの時間が長くなると考えられる。

3-4 ナゲットの形成過程

抵抗スポット溶接において求められる最も基本的な品質は溶接継手部の強度である。抵抗スポット溶接の継手の強度はナゲット径の大きさで決まる。チリ発生境界条件付近のチリが発生しない条件において、通電時間をそれぞれ変化させて溶接した場合のナゲット径を、SPCC 鋼および SUS304 鋼について Fig.3-13 および Fig.3-14 に示す。図中の○印は空気式加圧の場合で、△は機械式加圧の場合である。図に示す各電流値の加圧力は初期加圧力であり、溶接中の最大加圧力がほぼ一致する条件とした。鋼種によらず、チリ発生境界条件付近では溶接電流を増加すると、ナゲットが形成されるまでの時間が短くなり、溶接終了時のナゲット径が増大する。ナゲットは、形成初期では急激に成長し、12 サイクルを超えると成長の飽和が認められた。ナゲット径が飽和するまでの成長過程では、わずかに加圧方式による差がみられる。これは、後述するように加圧方式による溶接中の電気抵抗変化の違いによるものだと考えられる。そこで、横軸を投入エネルギーとして整理したものを Fig.3-15 および Fig.3-16 に示す。溶接電流が同一の場合、ナゲット径は加圧方式によらずほぼ投入エネルギーによって決まる。また、被溶接材に投入されるエネルギーが 200J を超えるとナゲットが形成される。次に溶接電流値を 6.0kA とし、初期加圧力をチリ発生境界条件付近から増加させた場合のナゲット径を、SPCC 鋼および SUS304 鋼について Fig.3-17 および Fig.3-18 に示す。○印は空気式加圧の場合であ

るが、SUS304 鋼は空気式加圧では 5000N までしか加圧できないため、機械式加圧を用いて初期加圧力を変化させた場合の図を△印で示す。初期加圧力の増加に伴って、ナゲットが形成されるまでの時間が増加し、溶接終了時のナゲット径も減少する。SPCC 鋼と SUS304 鋼を比較した場合、SUS304 鋼の方が加圧増加量に対するナゲットの減少量が小さい。これは SUS304 鋼の方が溶接開始時の降伏強度が大きいため、電極－板間および板－板間の接触面積の増加が同じ加圧増加量に対して小さくなるためと考えられる。次に溶接電流値を 6.0kA としたときのチリ発生境界条件付近の、SPCC 鋼と SUS304 鋼のナゲット形成過程の比較を Fig.3-19 に示す。Fig.3-19(a)には各サイクルにおけるナゲット径を示し、(b)には板厚方向のナゲットの厚さを示している。(c)はナゲット径について横軸に投入エネルギーを用いて整理したものである。なお、加圧方式は空気式加圧とし、SPCC 鋼の場合初期加圧力は 1500N であり、SUS304 鋼は 3500N である。SPCC 鋼と SUS304 鋼について、同一電流におけるナゲットの形成過程を比較した場合、SPCC 鋼は SUS304 鋼よりも熱伝導率が大きいため SUS304 鋼に比べ板厚方向へもナゲットが成長している。

第4章 引張試験および電気抵抗率の測定

4-1 引張試験

抵抗スポット溶接の場合，被溶接材間の真の接触面積は電極加圧力と降伏強度に依存すると考えられる．さらに，材料の降伏強度は温度に依存し変化するため，溶接中の接触面積を検討するには材料の降伏強度の温度依存性を把握しなければならない．そこで，高温までの引張試験を行い，各種鋼材の引張強度および降伏強度を測定した．

4-1-1 実験方法および実験装置

高温引張試験で応力測定に用いた試験機概念図を Fig.4-1 に示す．試験機の筐体は，上板と下板を左右前後4本の大支柱で固定した構造である．試験片の上下を，上板と可動板それぞれに連結された固定具にそれぞれ固定し，可動板を下方へ移動させて試験片に負荷を与える．可動板の上下移動は，ORIENTAL MOTOR 社製レーバシブルモーター（ユニット品名 MSS425-411WU-3，モーター品名 USM425-411W）を用い，モーターの回転をギヤヘッド（4GN25RA, 4GN75RA）と歯車を介して負荷用柱の回転に換え，負荷用柱のねじ部を用いて行う．供試材は板厚 1.2mm の冷間圧延鋼板（SPC270C），ステンレス鋼（JIS SUS304）を用い，試験片の形状は全長 120mm，幅 16mm とした．試験片を加熱するための加熱装置は，高周波誘導加熱装置（富士電波工機製 FIH-153 型）を使用した．変位速度に関しては，筐体の負荷用柱に取り付けた遮断板とフォトインタラプタにより負荷用柱の回転数を測定し変位速度を得た．

4-1-2 引張試験結果

SPC270C 鋼および SUS304 鋼について行った高温引張試験の公称応力-変位曲線を Fig.4-2 および Fig.4-3 に示す。それぞれの曲線に温度および変位速度を示している。スポット溶接現象を考察するうえで、変位速度は可能な限り速い方がスポット溶接中の現象に近い値が求められると考えられる。そこで、各温度において引張荷重を許容できる最も高回転のギアヘッドを用いたため、温度により変位速度が異なっている。

常温での引張試験は試験片形状を JIS 5 号試験片とし、SPCC 鋼および SUS304 鋼についてそれぞれ測定した。これらの引張試験結果から各温度における引張強さおよび降伏強さについて整理したものを Fig.4-4 に示す。図の□印は SPCC 鋼を示し、○印は SPC270C 鋼を、△印は SUS304 鋼を示している。また、図中の白抜きの記号は引張強さを示し、中塗りの記号は降伏強さを示す。各鋼材とも温度が上がるにつれて引張強さおよび降伏強さが減少し、高温側では引張強さと降伏強さの差が小さくなる。両鋼を比較すると、測定したすべての温度において SUS304 鋼の方が SPC270C 鋼よりも引張強さおよび降伏強さが大きい値となっている。

次に変位速度の影響について検討するため、同一の温度において異なる変位速度で引張試験を行った場合の公称応力-変位線図を Fig.4-5 に示す。800K ではばらつきが大きく、変位速度による影響は認められないが、900K では変位速度を速くすると降伏強度および引張強さともに大きな値を示した。変位速度が速くなると材料の加工硬化が回復現象より大きくなるため、材料強度が増加したと考えられる。

4-2 電気抵抗率測定

4-2-1 実験方法および実験装置

Fig.4-6 に実験装置の全体を示す．試験片の両端を銅電極で挟み，通電し加熱する．通電中における試験片の電圧，温度およびシャントの電圧を測定することで，各温度における電気抵抗率を得た．供試材は板厚 1.2mm の冷間圧延鋼板（SPC270C），ステンレス鋼（JIS SUS304）を用いた．電極中心間距離を 168mm とし，試験片の形状は全長 180mm，幅 36mm とした．試験片の電圧は試験片中心部 90mm の区間を測定した．電源にはスタッド溶接用直流溶接機（ダイヘンスタッド製 MRN-2500）を使用した．

4-2-2 電気抵抗率測定結果

測定した試験片の電圧，温度およびシャントの電圧から算出した SPC270C 鋼および SUS304 鋼の電気抵抗率を Fig.4-7 に示す．電気抵抗率が測定できなかった高温域は 2 次曲線で近似して推定し破線で示した．また，灰色で示す線は SUS304 および 0.1%C 軟鋼の電気抵抗率をそれぞれ文献から引用した値である^{3,4)}．SPC270C 鋼は 1000K までの温度域において，電気抵抗率が文献値よりも高い値となっているが，1000K 以降の温度では文献値とほぼ同じ値となった．また，SUS304 鋼は文献値よりも $10\Omega\cdot\text{cm}$ ほど高い値を示している．溶接中の電気抵抗の推定には実験により得られた実測値を用いて検討を行う．

第 5 章 抵抗スポット溶接の電気抵抗に関する考察

5-1 溶接中の電気抵抗

溶接中の電気抵抗は測定したチップ間電圧と電流との比である。溶接中の電気抵抗の一例を Fig.5-1 に示す。上図(a)は SPCC 鋼の場合であり、下図(b)は SUS304 鋼の場合である。白抜きの記号は空気式加圧を示し、中塗りの記号は機械式加圧を示している。各条件はそれぞれチリ発生境界条件付近の加圧力とした。溶接中の電気抵抗は、SPCC 鋼では通電開始と同時に増加し、溶接中に極大を示してから減少する。SUS304 鋼では通電開始時に大きな値を示した後、その後急激に減少する。溶接中期には抵抗値の減少が認められなくなり、その後再び減少する。SPCC 鋼および SUS304 鋼とも、通電開始時は空気式加圧に比べ機械式加圧の方が大きな抵抗値を示すが、溶接終了時にはほぼ同じ値を示している。チリ発生境界条件付近の加圧力で加圧方式による影響を比較した場合、機械式加圧は通電開始時には空気式加圧に比べ電極加圧力が小さく、溶接中に加圧力が増加し、溶接中に空気式加圧とほぼ同じ加圧力になる。加圧方式による溶接初期の抵抗値の差は電極加圧力の影響であると考えられる。そこで、SPCC 鋼および SUS304 鋼について、抵抗値に対する加圧力の影響を Fig.5-2 および Fig.5-3 に示す。上図は空気式加圧の場合であり、下図は機械式加圧の場合である。SPCC 鋼および SUS304 鋼ともに、加圧力の増加に伴って抵抗値は減少する。また、SPCC 鋼では加圧力の増加に伴って抵抗値が最大を示す時間の増加が認められる。これは、抵抗値の減少に伴い溶接部の発熱量が減少したためと考えられる。SPCC 鋼と SUS304 鋼を比較すると、SPCC 鋼の方が同一の加圧増加量に対する抵抗値の減少が大きい。SUS304 鋼に比べ SPCC 鋼の降伏強さが小さいので、同一の加圧増加量に対する接触面積の増加量が大きく

なるためと考えられる。この現象は3章のナゲットの形成過程の項において加圧力を増加させた場合のナゲット径の減少にも現れており、電気抵抗の変化により、溶接部の発熱量に依存するナゲット径も影響を受けることがわかる。次に電流値が溶接中の抵抗値に与える影響を Fig.5-4 に示す。上図(a)は SPCC 鋼の場合であり、下図(b)は SUS304 鋼の場合である。溶接電流が大きくなると、抵抗値が最大となる時間が早くなることが観察される。

通電開始時の抵抗値が大きな値を示した後、急激に減少していく現象について、被溶接材の表面状態が影響していると考え、SPCC 鋼および SUS304 鋼の表面を 400 番の研磨紙を用いて研磨し表面状態を変化させて溶接した場合の抵抗値を Fig.5-5 に示す。電極加圧力を SPCC 鋼では 2000N、SUS304 鋼は 3000N とし、溶接電流 6.0kA で溶接した場合の抵抗値を示している。また、白抜きの記号は研磨していない供試材を溶接した場合の抵抗値を示し、中塗りの記号は研磨後の供試材の抵抗値を示す。被溶接材の表面を研磨し、表面状態を変化させると、通電開始時における抵抗値の減少が認められるが、抵抗値が最大となる時刻では表面状態の影響は小さくなり、溶接終了時には表面状態の影響はほとんど認められなくなる。チリ発生境界付近の条件において、電流値および電極加圧力を変化させた場合の、表面状態が抵抗値におよぼす影響を Fig.5-6 および Fig.5-7 に示す。白抜きの記号は研磨していない供試材を溶接した場合の抵抗値を示し、中塗りの記号は研磨後の供試材の抵抗値を示している。図(a)は通電開始から 0.5 サイクル経過した時刻における抵抗値である。図(b)の抵抗値は SPCC 鋼では溶接中の最大値を示し、SUS304 鋼では溶接開始から抵抗値が減少し、その後抵抗値の減少が認められなくなった時の値を示しており、図(c)は溶接終了時の抵抗値を示している。表面状態を変化させると、溶接条件によらず通電開始時の抵抗値が減少することがわかる。

5-2 溶接中の電気抵抗変化の考察

抵抗スポット溶接中の電気抵抗変化について，得られた測定値に基づいて検討する．溶接中の電気抵抗 R は測定した溶接電流 I と電極間電圧 V の比として算出することができる．一方，溶接部の電気抵抗 R は通電面積および被溶接材の電気抵抗率 ρ から推定することもできる．しかし，抵抗スポット溶接における実際の通電径は，電極－被溶接材間および被溶接材間の接触部では狭まり，被溶接材中では広がるとされており，実際の通電径を実験値から推定することは困難である．そこで，通電径は推定した被溶接材間の真の接触面積 S_c とほぼ等しく，板厚方向において変化しないと仮定し，溶接部の電気抵抗 R について検討した．

被溶接材間の真の接触面積 S_c は電極加圧力 P を被溶接材の降伏応力 σ_y の 3 倍の値で除した値として推定できる．ただし，接触部分の変形が圧縮変形であるために塑性拘束などの影響を受けると考えられ，比例定数 K を考慮しなければならない．

$$S_c = K \frac{P}{\sigma_y} \quad (5-1)$$

上式により求めた接触面積 S_c および溶接部の板厚 h ，被溶接材の電気抵抗率 ρ から，溶接部の電気抵抗 R は，

$$R = \rho \frac{h}{S_c} = \rho \cdot \sigma_y \frac{h}{K \cdot P} \quad (5-2)$$

と表される．

比例定数 K を $K=1.5$ と仮定し，(5-2) 式より求めた電気抵抗 R と，実験により求められた抵抗値との比較を行う．ここで，実験により得られた抵抗値には電極および測定回路の抵抗値も含まれていることを考慮しなければならない．

溶接電流を 5.0kA, 電極加圧力を 2000N とし供試材を挟まずに通電した場合の電極間電圧および抵抗値を Fig.5-8 に示す. ここから, 電極および測定回路には $0.01\text{m}\Omega$ の抵抗が含まれることが認められる. また, 前節で述べたように通電開始時から抵抗値が最大となるまでの時間において, 測定された抵抗値は被溶接材の表面状態の影響を受けている. Fig.5-6 および Fig.5-7 における結果から, SPCC 鋼の場合, 研磨した被溶接材の抵抗値は加圧方式によらず通電開始から 0.5 サイクルでは $0.015\text{m}\Omega$ 減少し, 抵抗値が最大となる点では $0.005\text{m}\Omega$ 減少している. また, SUS304 鋼の場合, 研磨した被溶接材の抵抗値は通電開始から 0.5 サイクルでは空気式加圧では $0.015\text{m}\Omega$ 減少し, 機械式加圧では $0.02\text{m}\Omega$ 減少しており, 通電初期の抵抗値の減少が認められなくなった点までに表面状態の影響は認められなくなる. (5-2) 式から求めた抵抗値と, 空気式加圧で溶接した場合の抵抗値を, SPCC 鋼および SUS304 鋼についてそれぞれ比較した結果を Fig.5-9 に示す. 図(a)には SPCC 鋼での推定値と実測値の比較を示し, 図(b)には SUS304 鋼での比較を示す. 推定値の計算では通電開始から 0.0083 秒の時間で溶接部の平均温度が 400K まで上昇したと仮定し, その後 0.075 秒の時刻では平均温度を 800K, 通電終了時の溶接部の平均温度を 1300K と仮定した. さらに 400K から 1300K までの間を 100K 毎にとり, 前章で述べた引張試験の結果から σ_y を読み取り, 溶接中の抵抗値を推定した. 推定値と実測値では通電開始時および通電終了時において両者の値が一致していないが, 溶接中の電気抵抗変化を見ると, 推定値においても実測値と同様に SPCC 鋼では通電開始から抵抗値が増加し, 極大を示した後減少する傾向を示しており, SUS304 鋼では通電開始から減少していく傾向を示す. よって, SPCC 鋼と SUS304 鋼が溶接中に異なる電気抵抗変化を示す理由は, 電気抵抗の推定式から, 両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であるとわかる.

通電開始時および通電終了時において推定した抵抗値と実測値が異なることについて検討する．まず，通電開始時の差に関しては，前述したように被溶接材の表面状態の影響により，実測値の電気抵抗が大きな値を示したと考えられる．次に，通電終了時において推定した抵抗値が実測値と大きく異なることについて検討する．まず，通電による加熱が 0.2 秒という短時間で行われ，溶接部の温度が急激に上昇するため，溶接部の降伏応力 σ_y は通常の引張試験で得られた値より大きいと考えられる．また，材料温度 400K と 1300K における引張試験の降伏応力 σ_y を比較すると，その差は SPCC 鋼で約 8 倍，SUS304 鋼で約 5 倍となる．溶接部の接触面には温度勾配が存在していると考えられることから，1300K と仮定した通電終了時における接触面の降伏応力 σ_y は引張試験結果よりも大きくなると考えられる．

第 6 章 結言

本実験条件において抵抗スポット溶接中の被溶接材の電気抵抗変化について検討を行った結果，以下の結論を得た．

- (1) 電気抵抗は電極加圧力の増加に伴って減少した．SPCC 鋼と SUS304 鋼を比較した場合，同一の加圧増加量では SPCC 鋼の方が SUS304 鋼よりも抵抗値の減少が大きくなった．
- (2) 電気抵抗は溶接電流の増大に伴い，抵抗値が最大を示すまでの時間が短くなった．
- (3) 電極加圧力の増加による電気抵抗の減少に伴い，溶接部のナゲット径も減少した．
- (4) 通電開始時の電気抵抗は被溶接材の表面状態の影響を受け，受け入れ状態の被溶接材は表面を研磨した被溶接材と比較して，わずかに大きな抵抗値を示した．表面状態の影響は抵抗値が最大となるまでに減少し，通電終了時には表面状態の影響は認められなくなった．
- (5) 測定した降伏応力と電気抵抗率から溶接中の電気抵抗変化を推定した結果，SPCC 鋼と SUS304 鋼では溶接中の電気抵抗の変化が異なることを説明できた．しかし，推定した抵抗値と実測値を一致させることはできなかった．

参考文献

- 1) 日本規格協会編：JIS ハンドブック鉄鋼，財団法人日本規格協会，(1989)
- 2) 日本金属学会編：改訂 3 版 金属データブック
- 3) 溶接学会軽構造接合加工委員会編：薄鋼板及びアルミニウム合金板の抵抗スポット溶接－抵抗スポット溶接現象とその応用，溶接学会，(2008)
- 4) 奥田滝夫：スポット溶接入門，産報出版株式会社，(1986)

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．

また，本研究をすすめるにあたり惜しめない協力と援助を頂きました集積加工システム研究室の牧清二郎教授，中西栄徳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大学院工学研究科博士前期課程平成 19 年度卒業の岡村和哉氏，平成 20 年度卒業の ISHAK BIN IBRAHIM 氏，平成 21 年度卒業の久松淳氏，三重大学工学部平成 22 年度卒業の村上翼君らと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．

Table 2-1 Composition of material (mass%)

Type	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304	<0.08	<1.00	<2.00	<0.045	<0.030	8.00~10.50	18.00~20.00
SPCC	<0.12	—	<0.50	<0.040	<0.045	—	—

Table 2-2 Material properties

Type	Electrical resistance [$\mu \Omega \cdot \text{cm}$]		Specific heat capacity [$\text{J/kg} \cdot \text{K}$]	
	20°C	1200°C	50~100°C	850~900°C
SPCC	13	121.6	481	845
SUS304	71	124.1	511	640

Type	Coefficient of thermal expansion [10^{-6}K^{-1}]	
	0~100°C	0~650°C
SPCC	12.6	15
SUS304	17.3	18.7

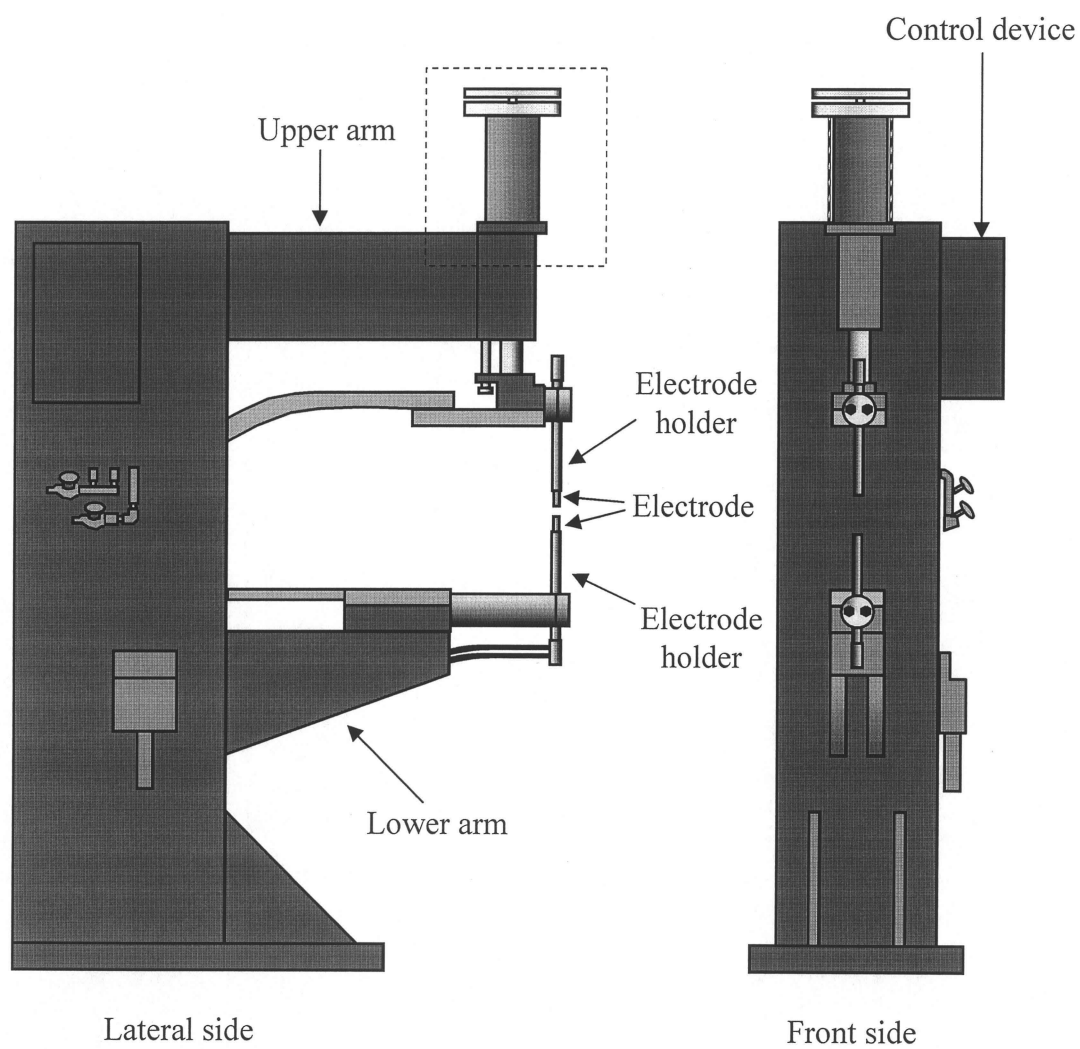


Fig.2-1
Resistance spot welding machine

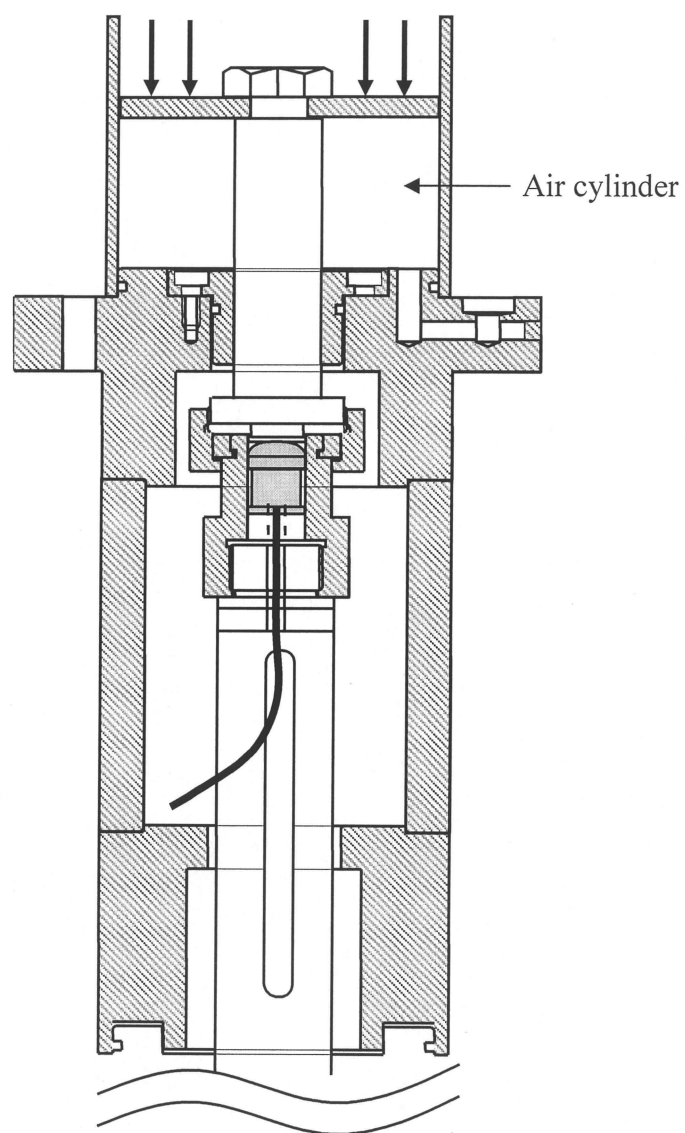


Fig.2-2
Insertion position of load cell

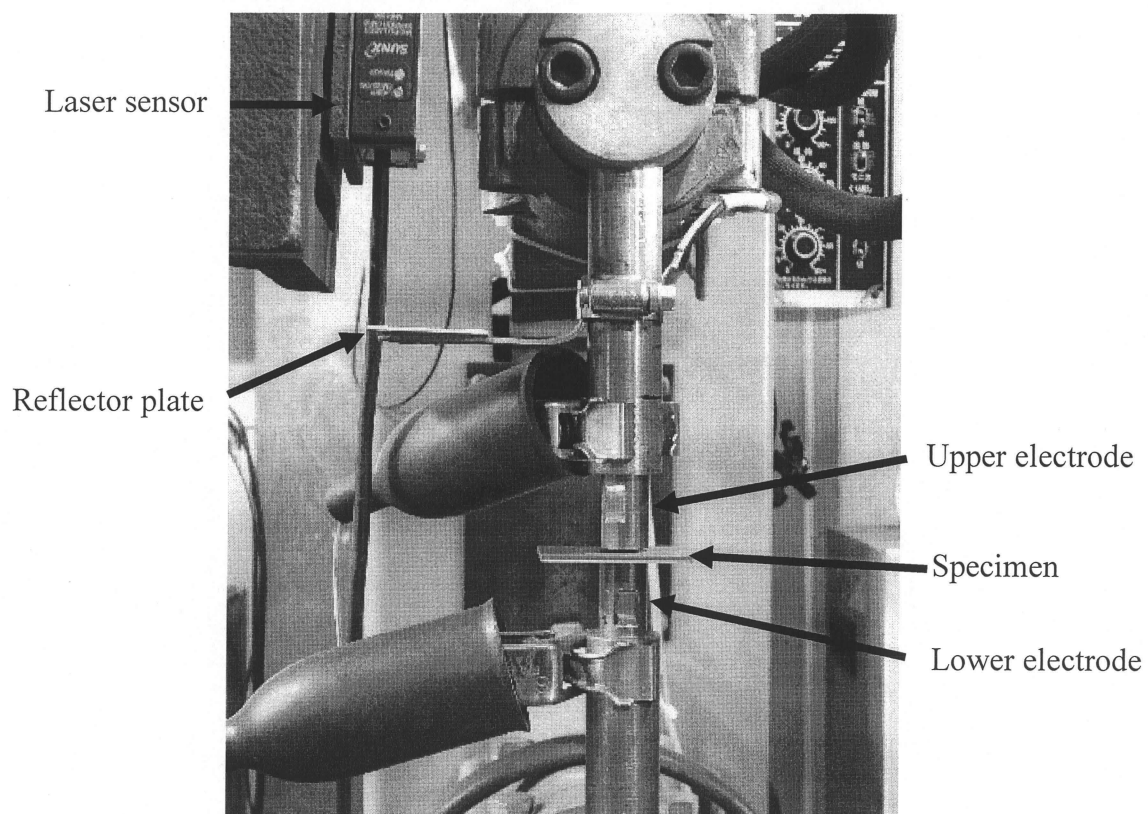


Fig.2—3

Measurement method of electrode displacement
by using laser sensor

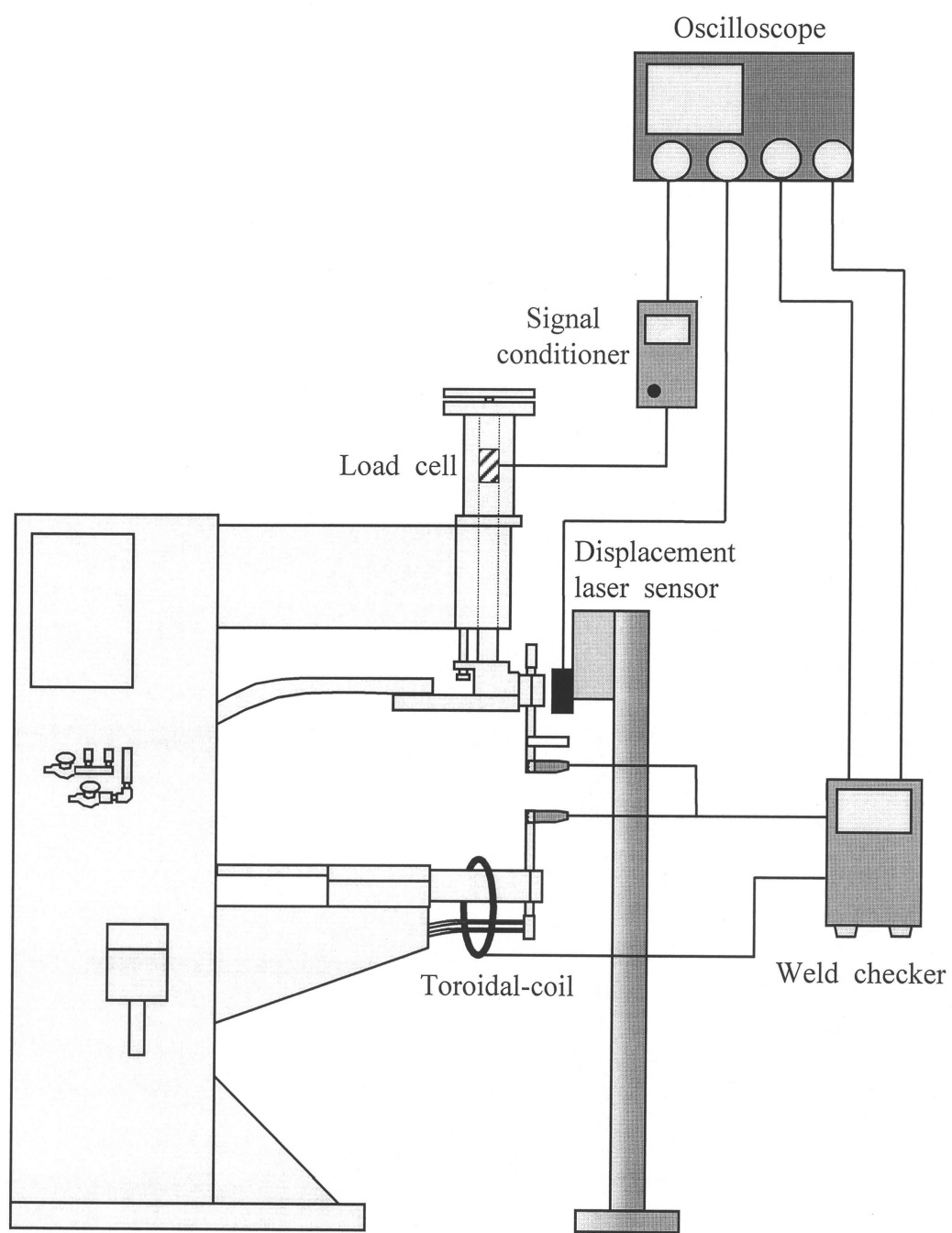


Fig.2-4
Resistance spot welding machine after modification

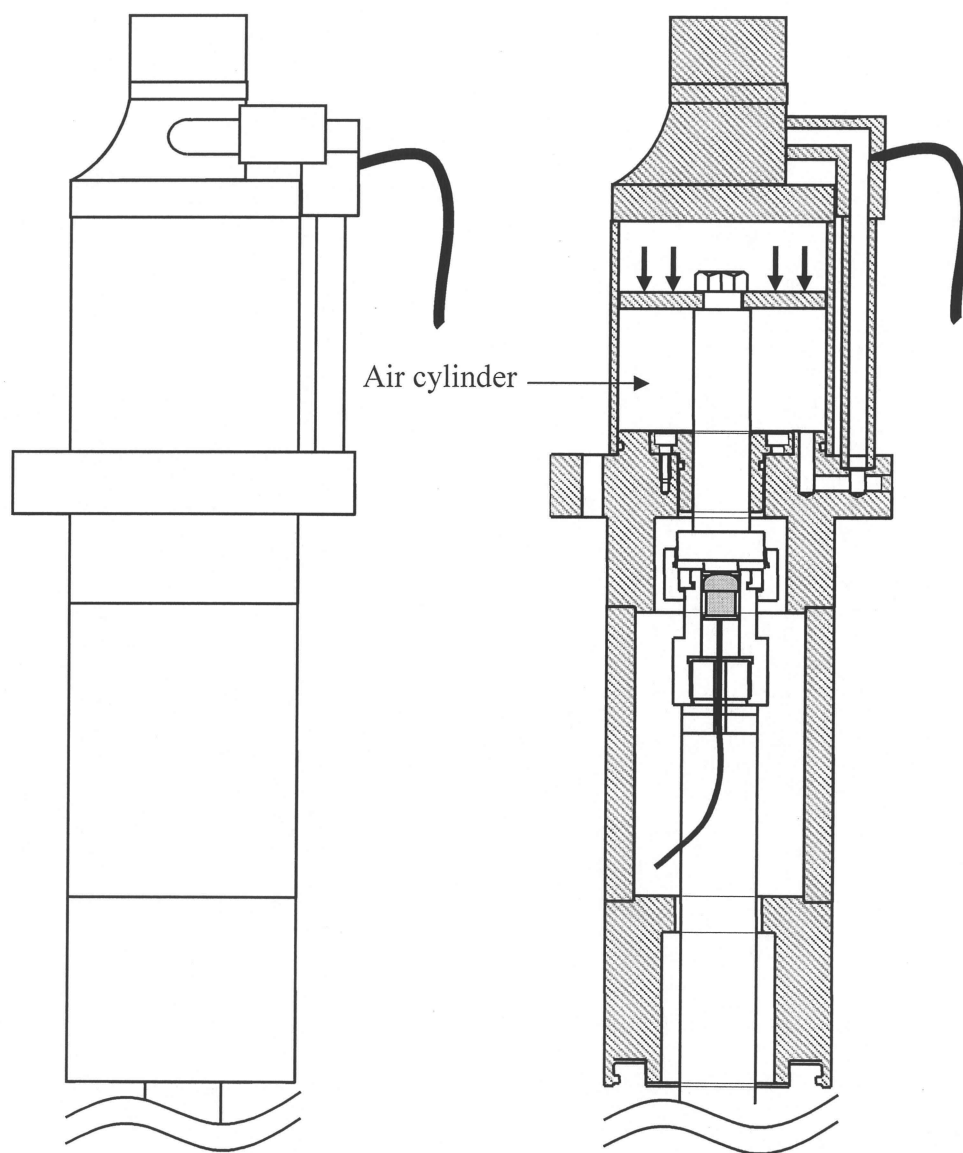


Fig.2-5
Cylinder pressurizing with air compressor

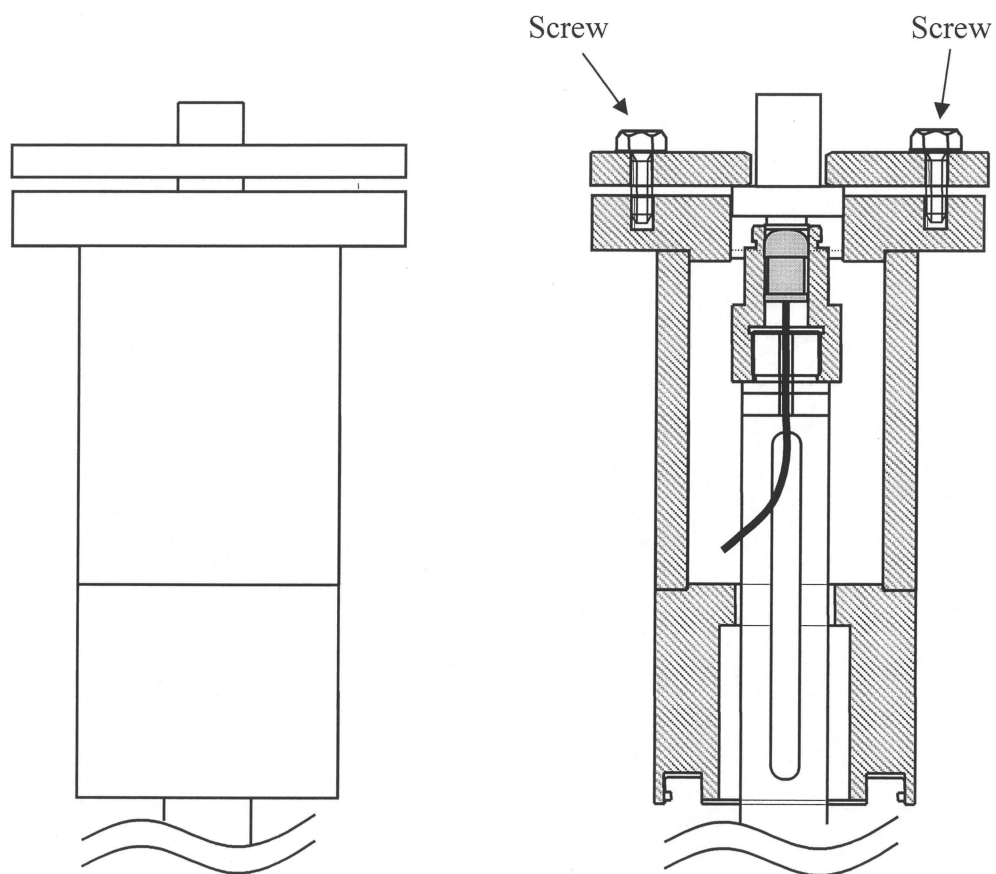


Fig.2-6
Pressurizing system by Screw

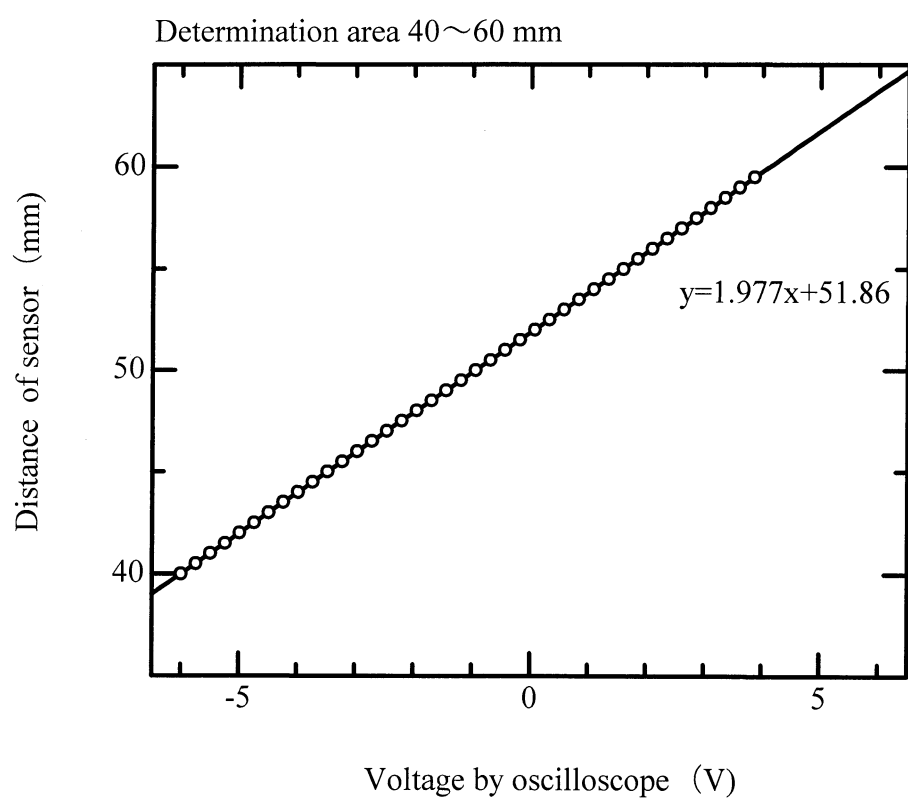


Fig.2-7
Relation between of voltage with oscilloscope and displacement sensor

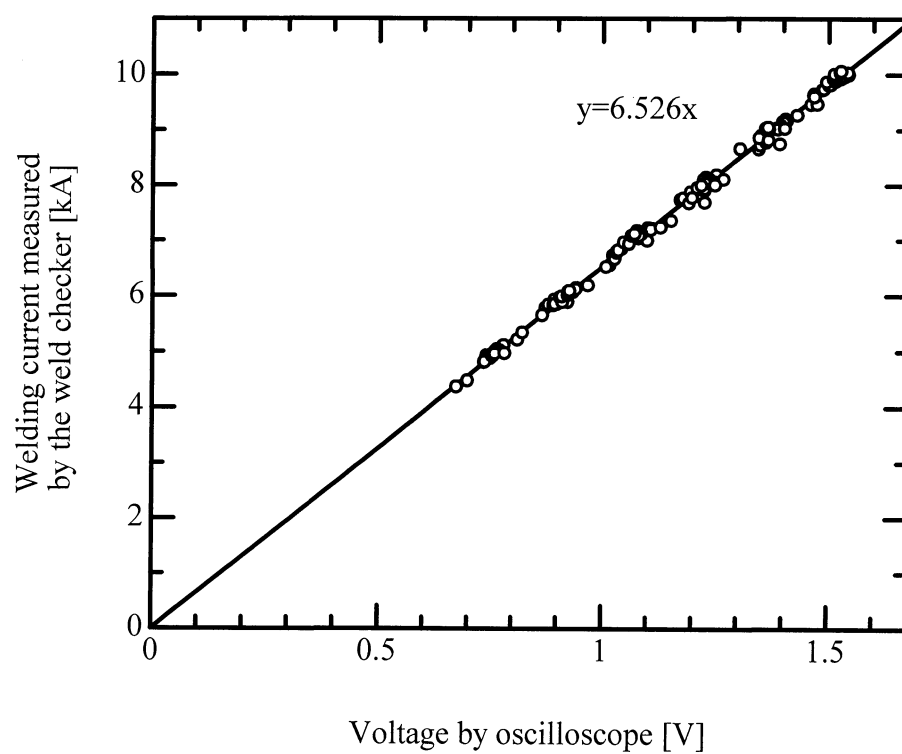


Fig.2—8
Effective value of welding current from welding checker and
voltage value read by oscilloscope

Material: SPCC
Pressure type: Air cylinder

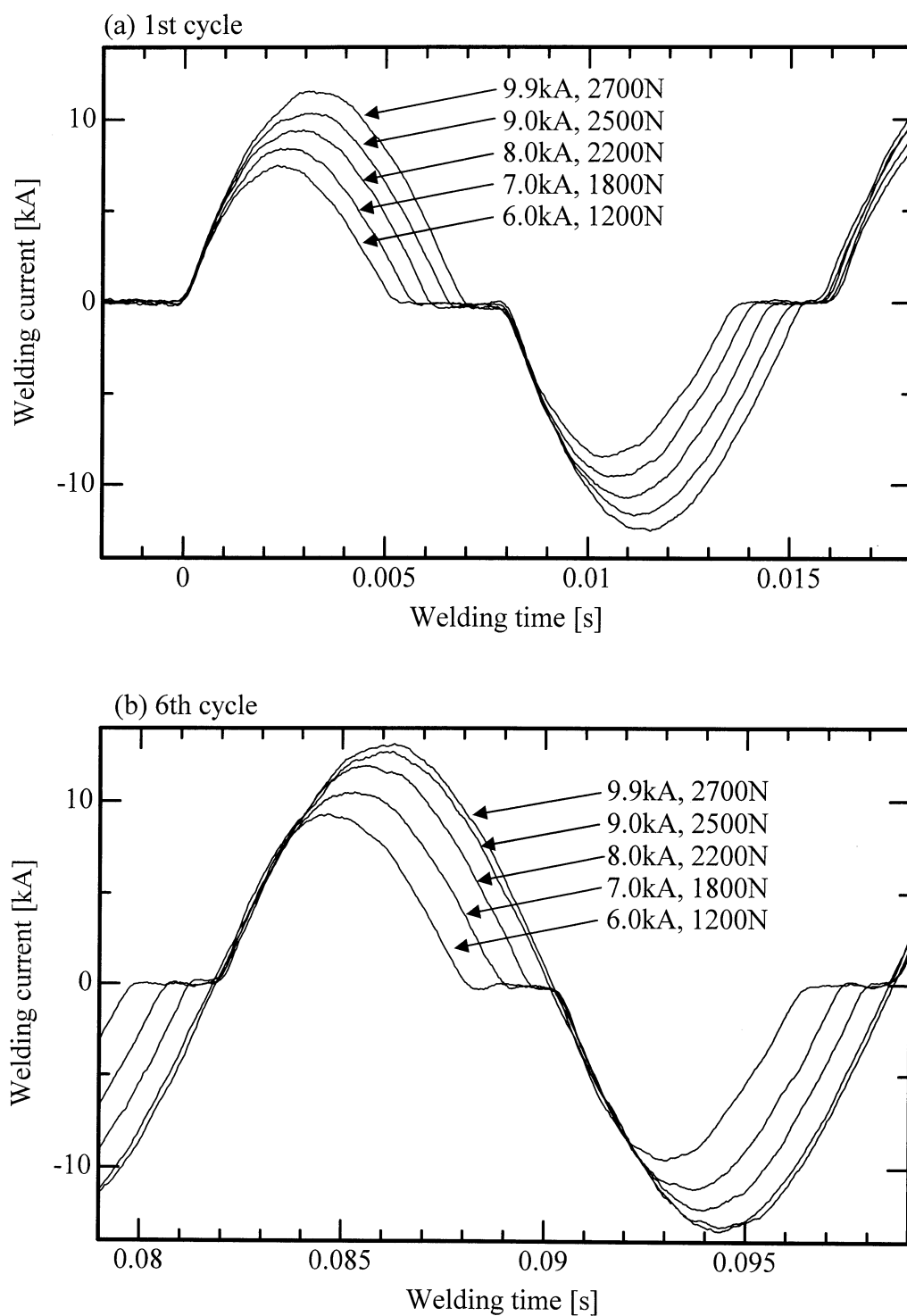


Fig.2-9
Welding current resting time in
(a) 1st cycle
(b) 6th cycle

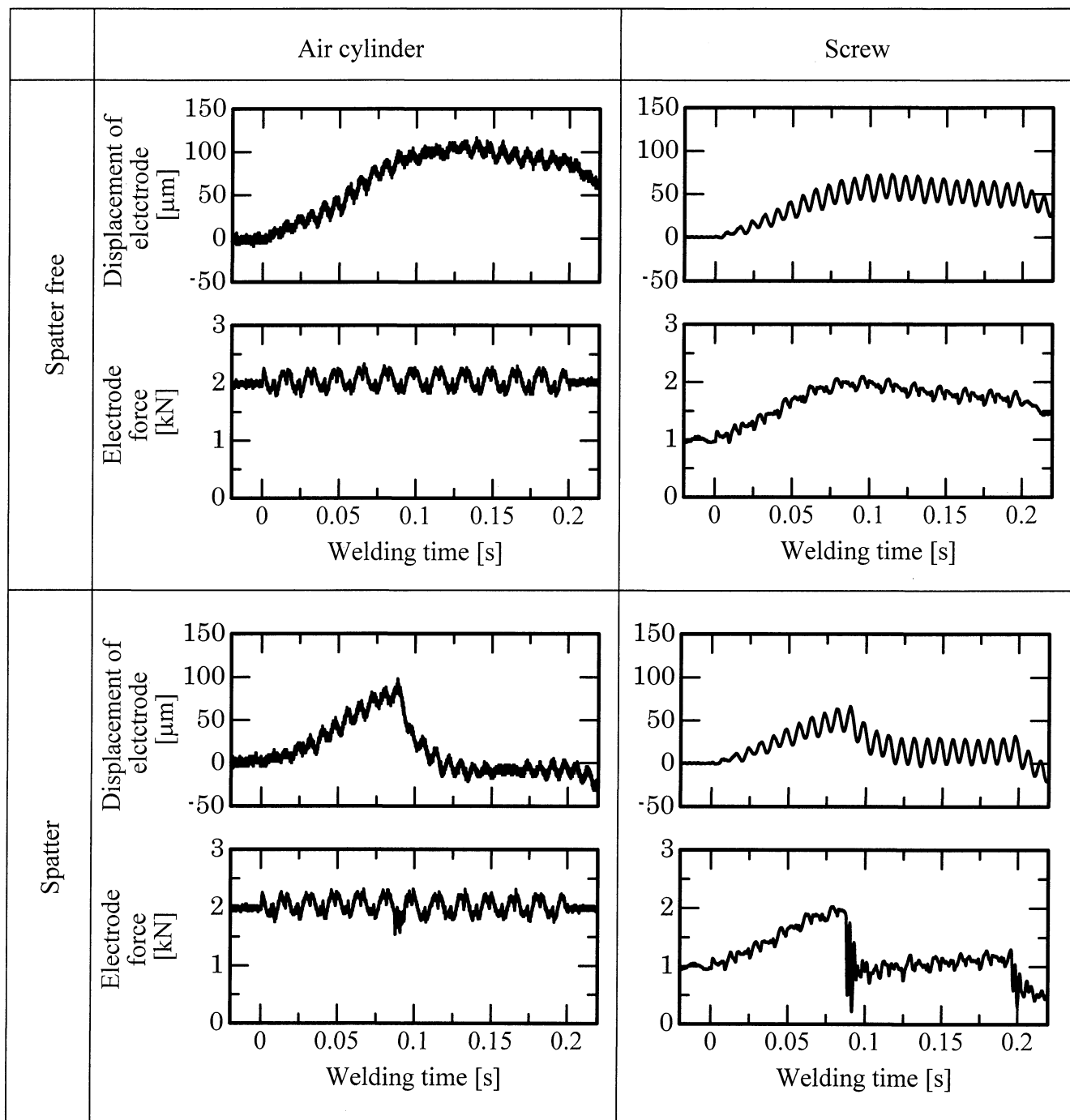


Fig.3—1

Measurement example of displacement of electrode and initial electrode force at welding current 8.0kA and initial electrode force 2.0kN for air cylinder, and initial electrode force 1.0kN for screw

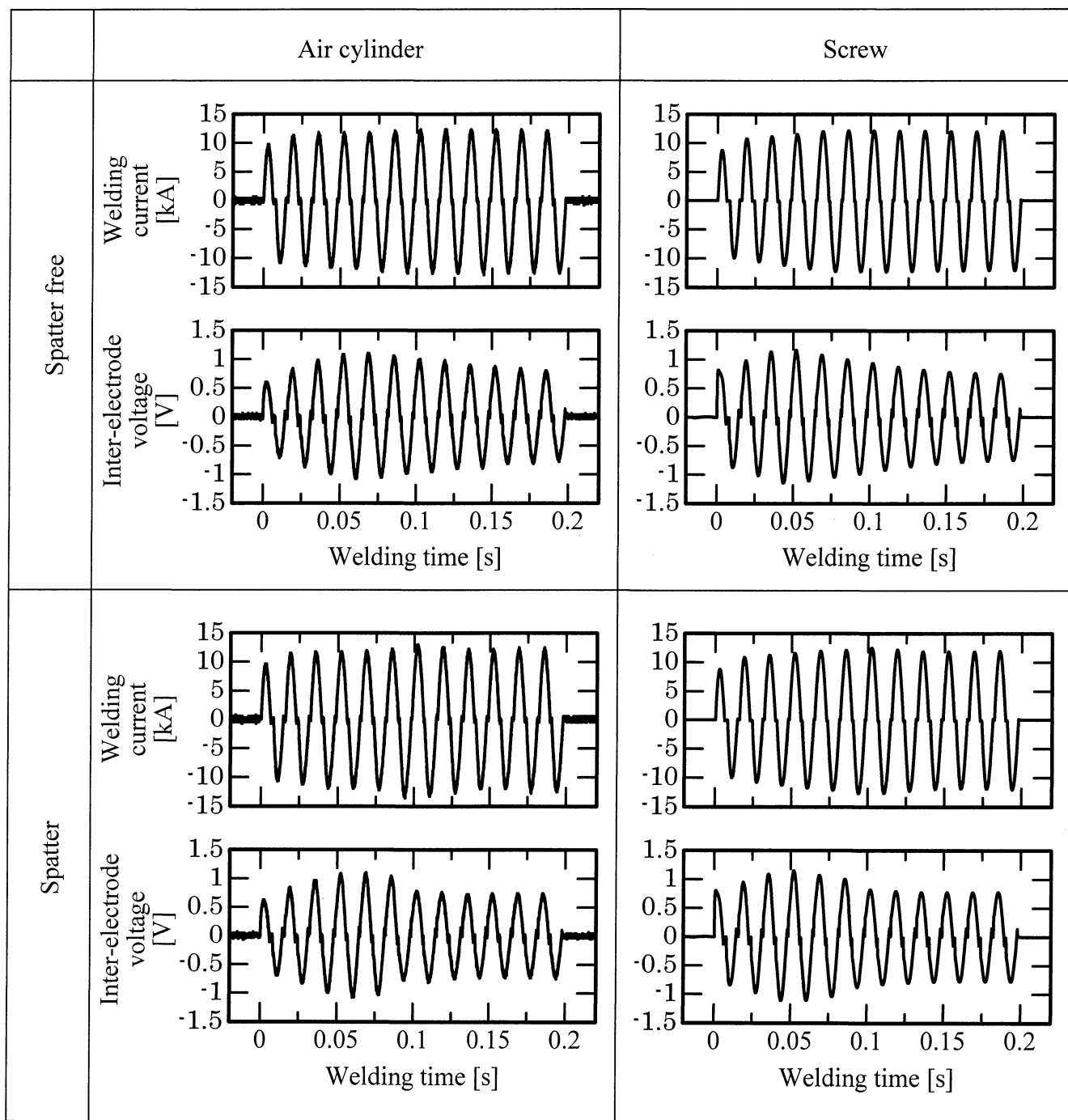


Fig.3—2

Measurement example of welding current and inter-electrode voltage at welding current 8.0kA and initial electrode force 2.0kN for air cylinder, and initial electrode force 1.0kN for screw

Welding condition

Material: SPCC

Welding current: 8.0kA, Initial electrode force: 2.6kN

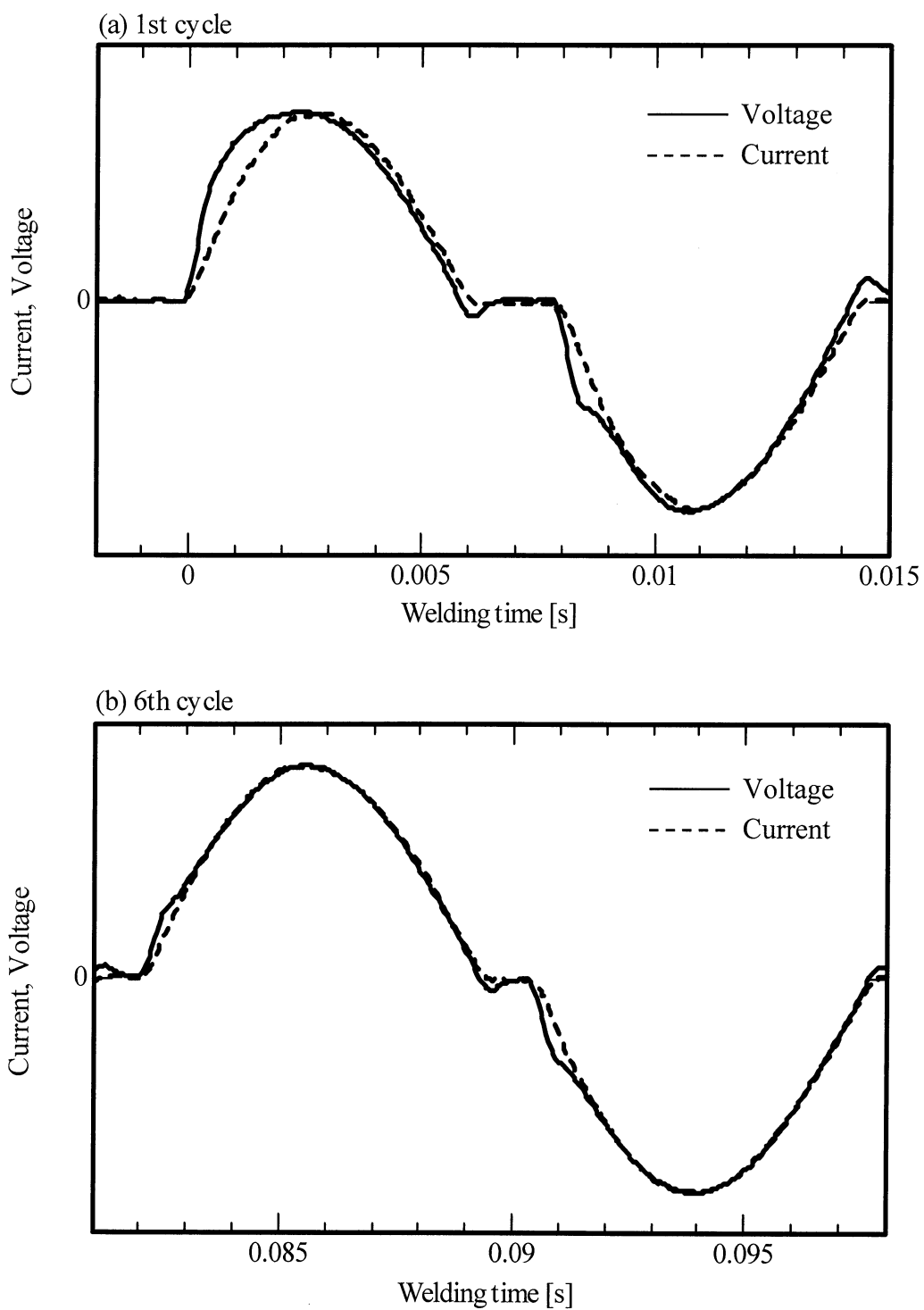


Fig.3-3
Inter-electrode voltage and welding current in
(a) 1st cycle
(b) 6th cycle

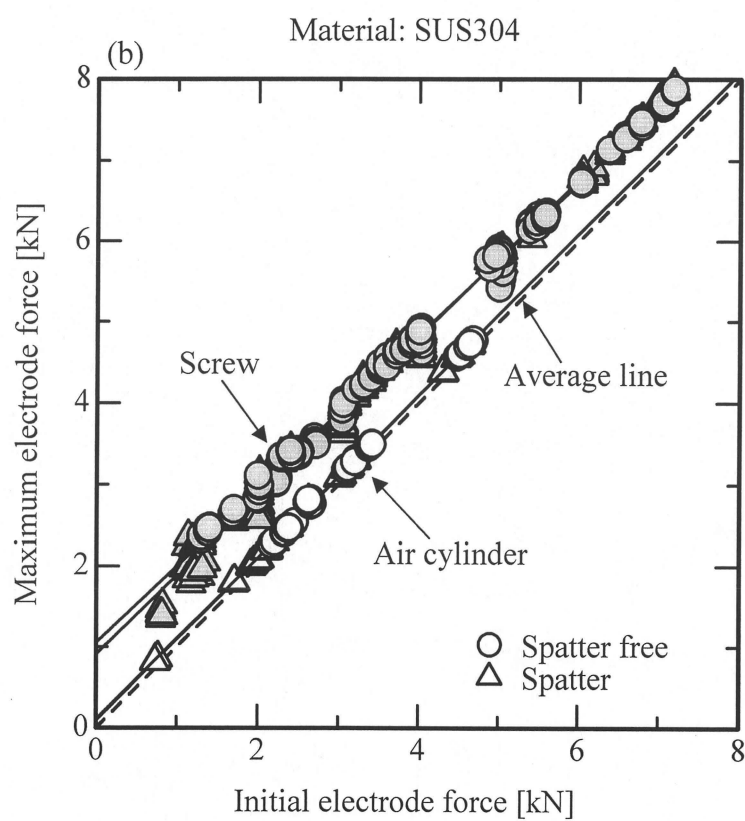
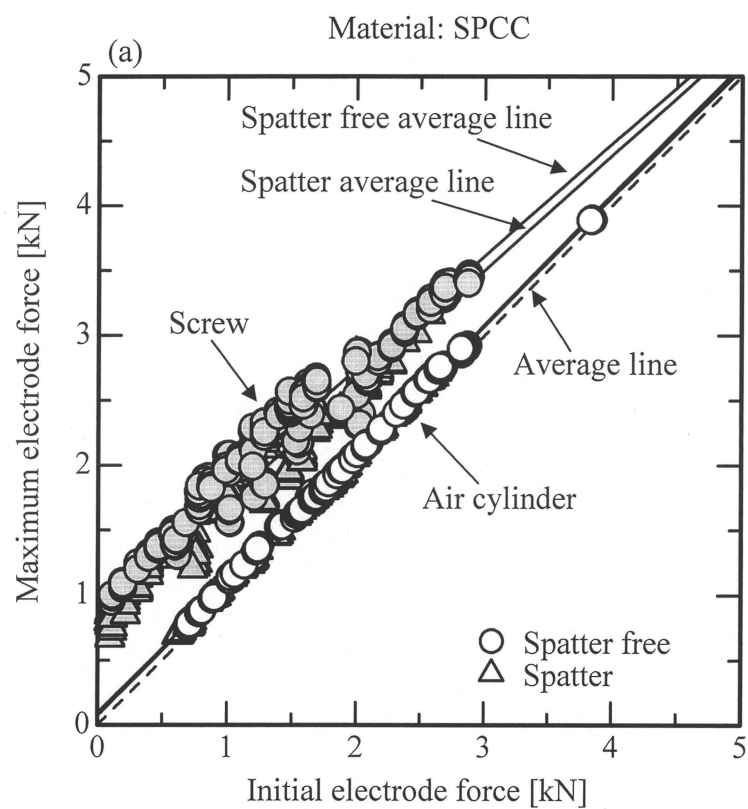


Fig.3-4

Relationship between initial electrode force and maximum electrode force during welding for SPCC, SUS304

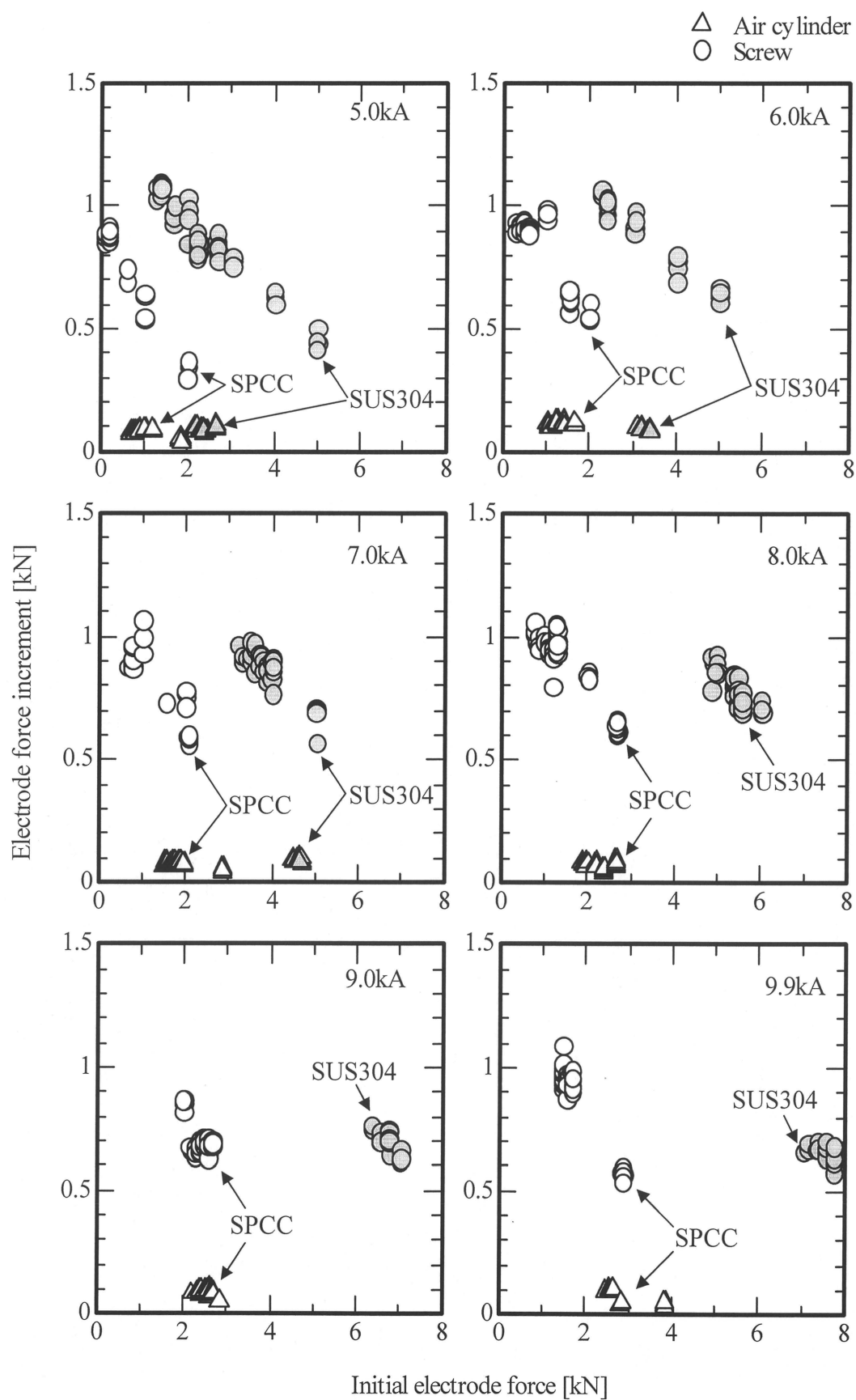


Fig.3-5

Influence of welding condition on electrode force increment for SPCC, SUS304

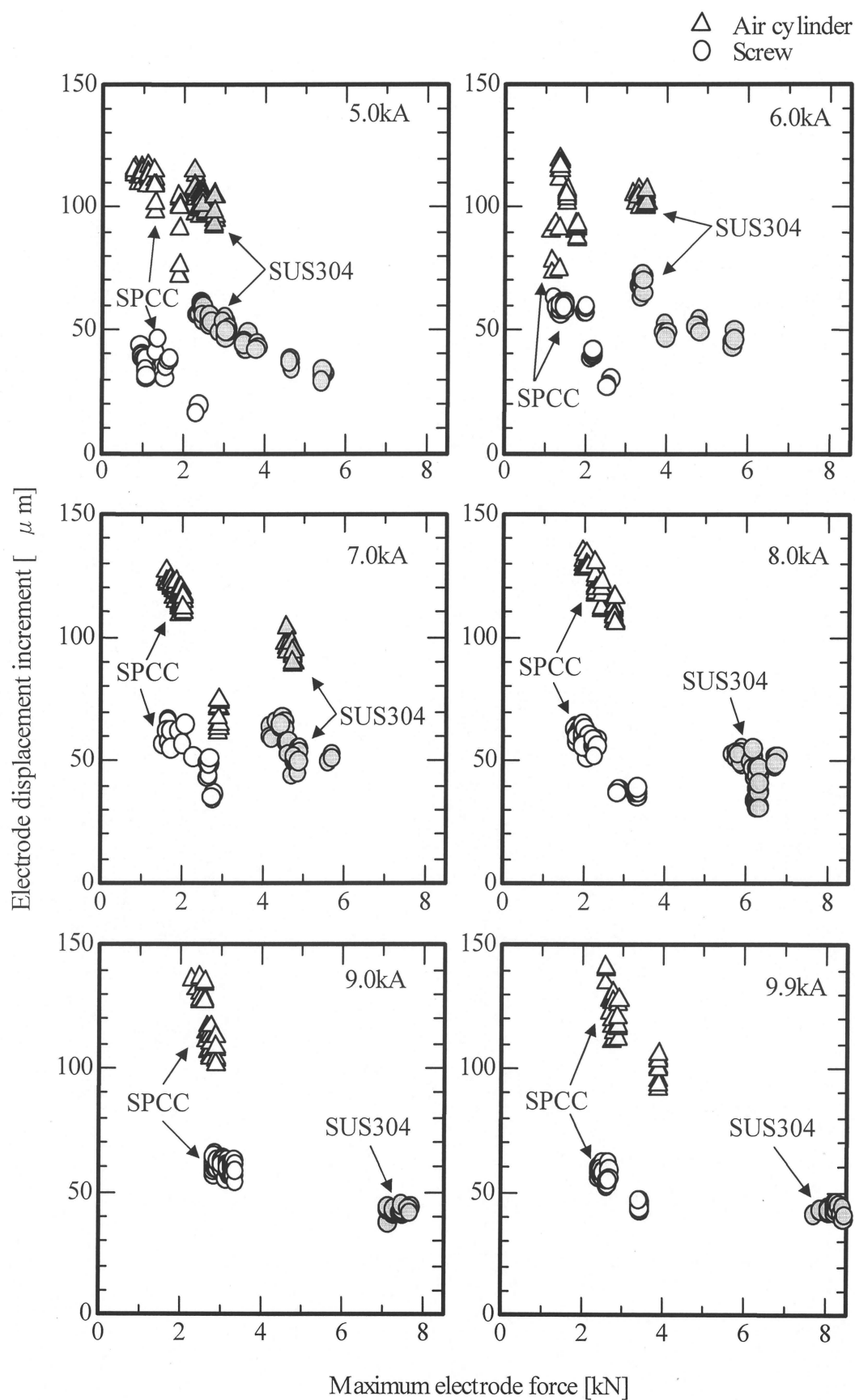


Fig.3-6
 Influence of welding condition on electrode displacement increment
 for SPCC, SUS304

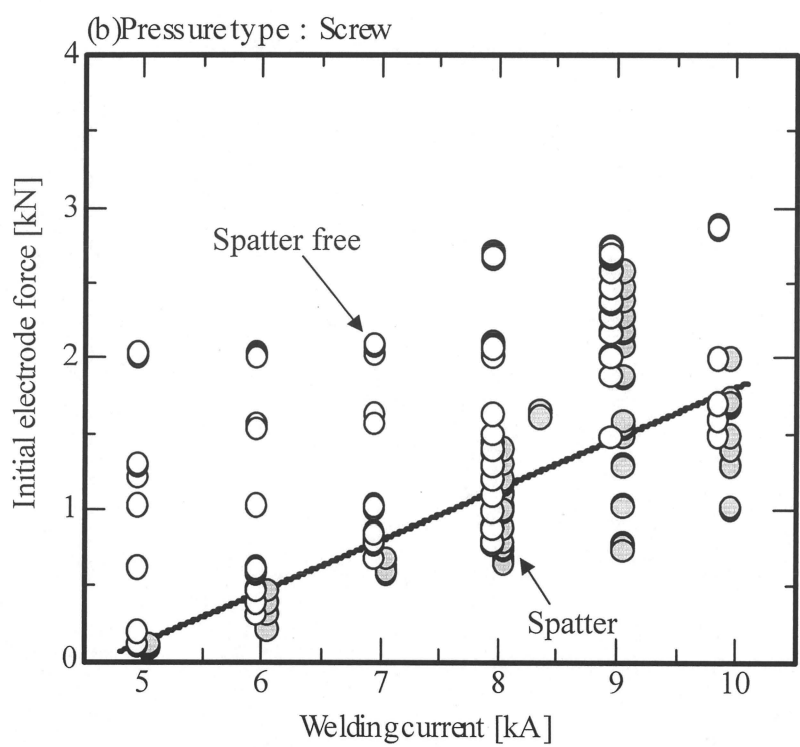
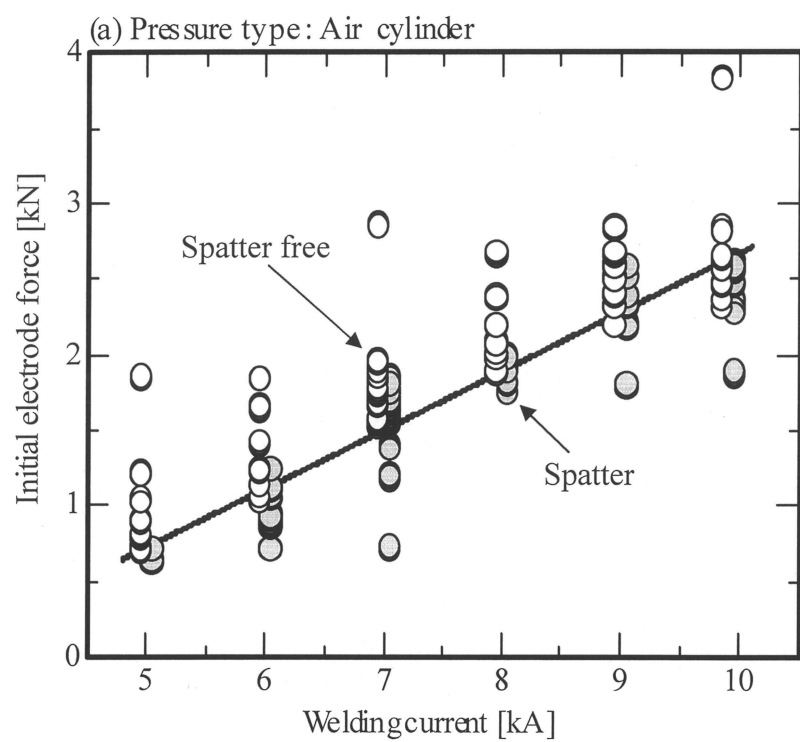


Fig.3-7

Condition of spatter and spatter free for SPCC
by initial electrode force

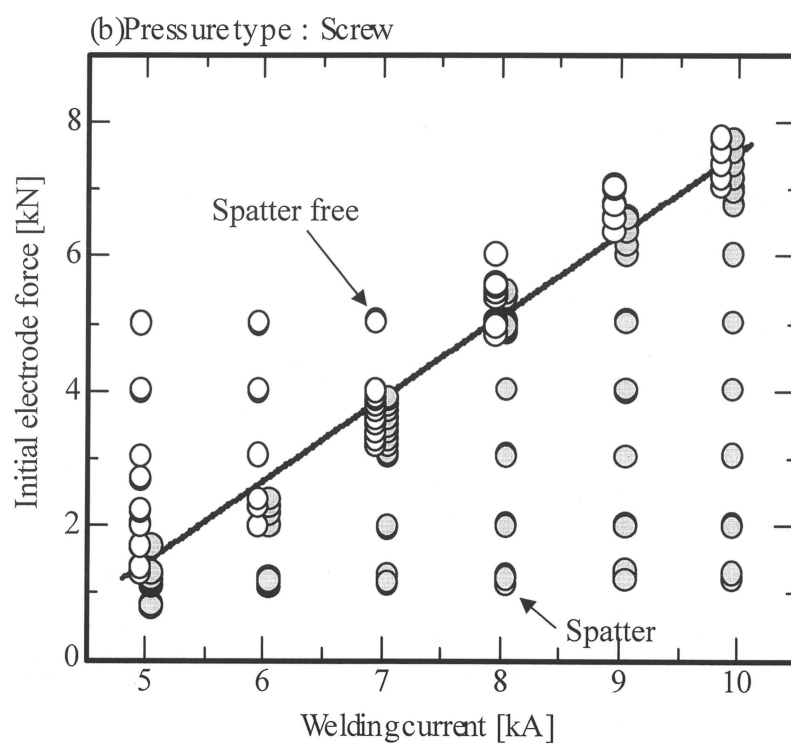
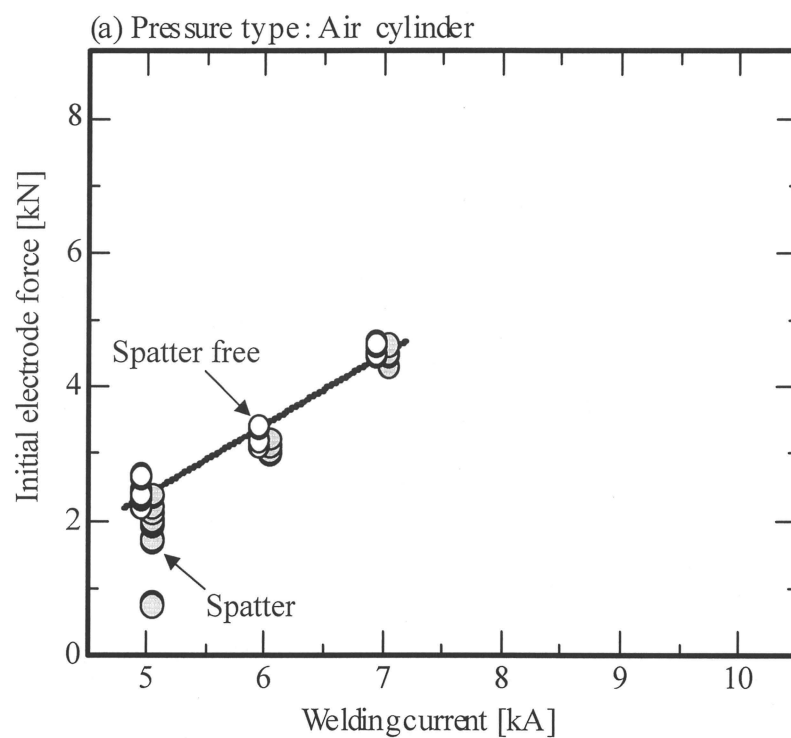


Fig.3—8

Condition of spatter and spatter free for SUS304
by initial electrode force

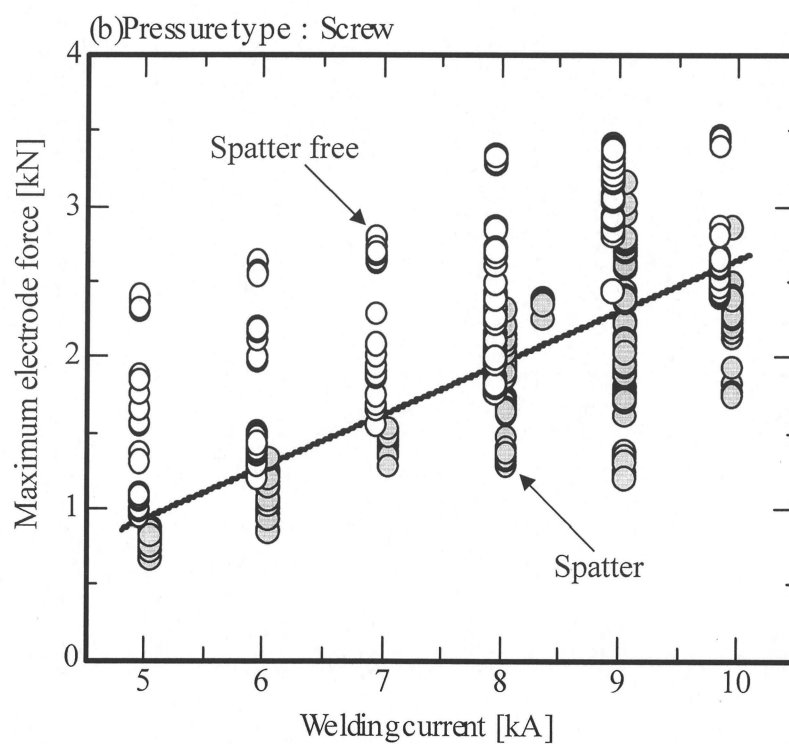
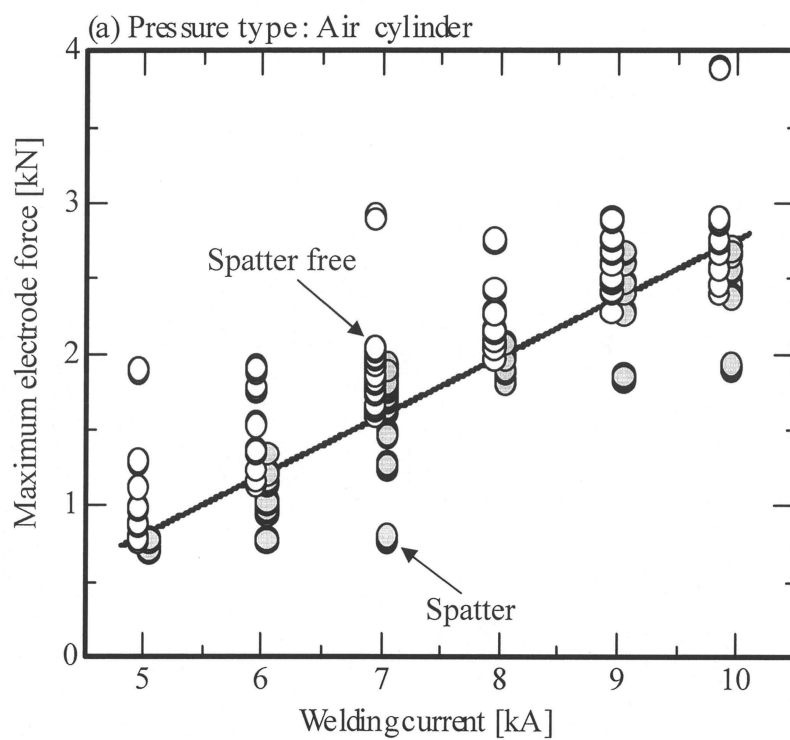


Fig.3-9

Condition of spatter and spatter free for SPCC
by maximum electrode force

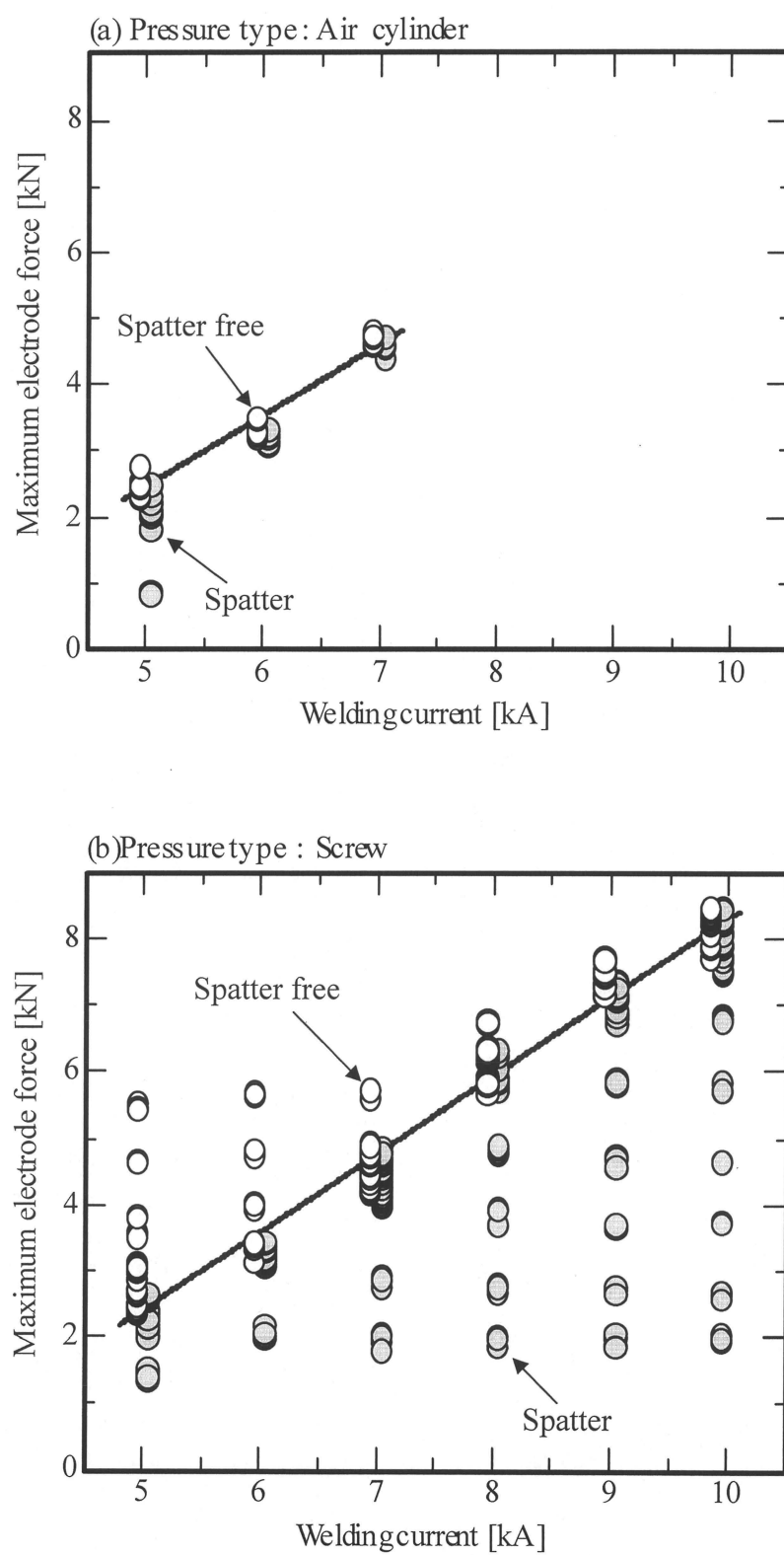


Fig.3-10

Condition of spatter and spatter free for SUS304
by maximum electrode force

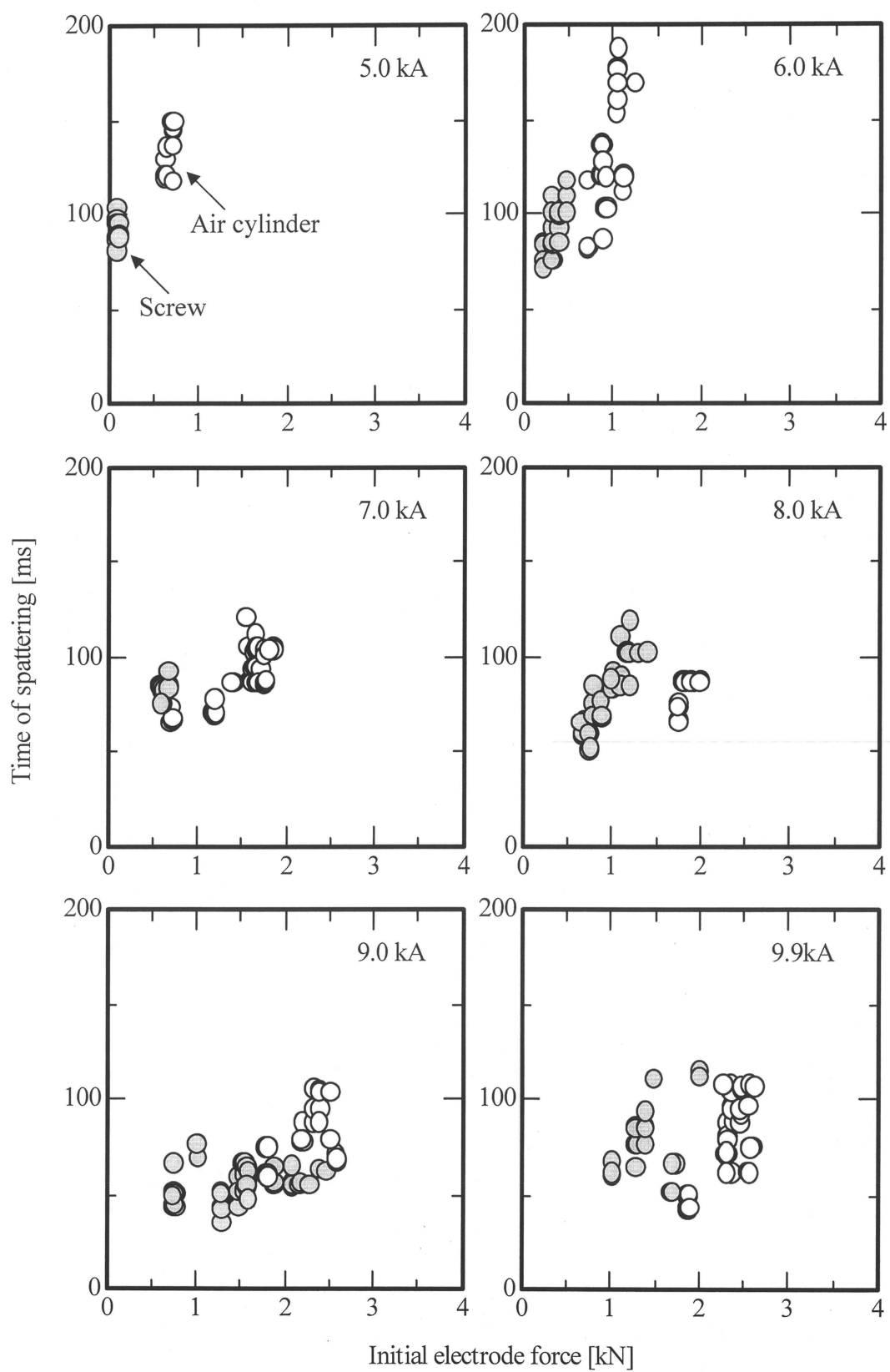


Fig.3-11
Influence of welding condition on time of spattering for SPCC

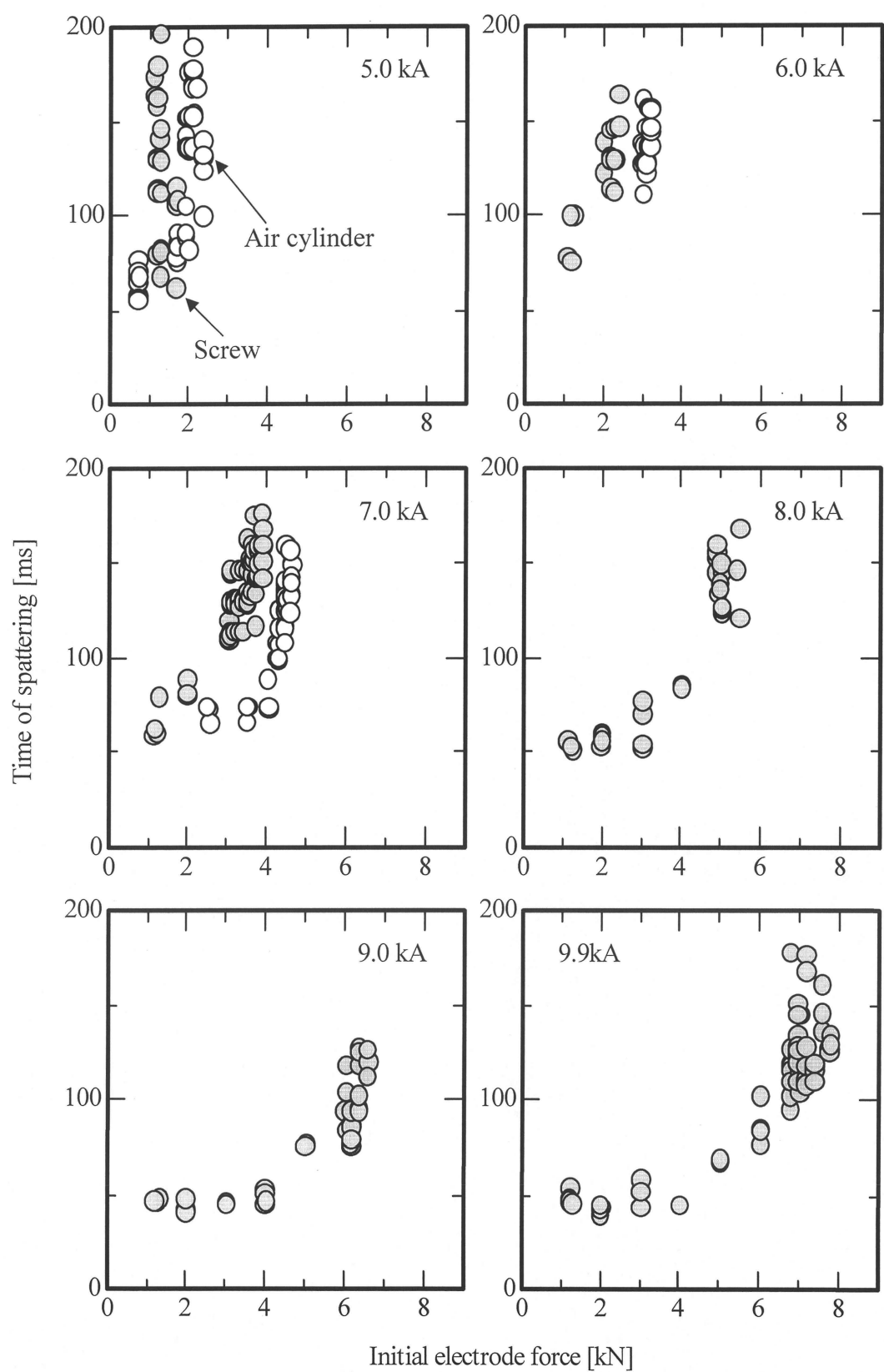


Fig.3-12
Influence of welding condition on time of spattering for SUS304

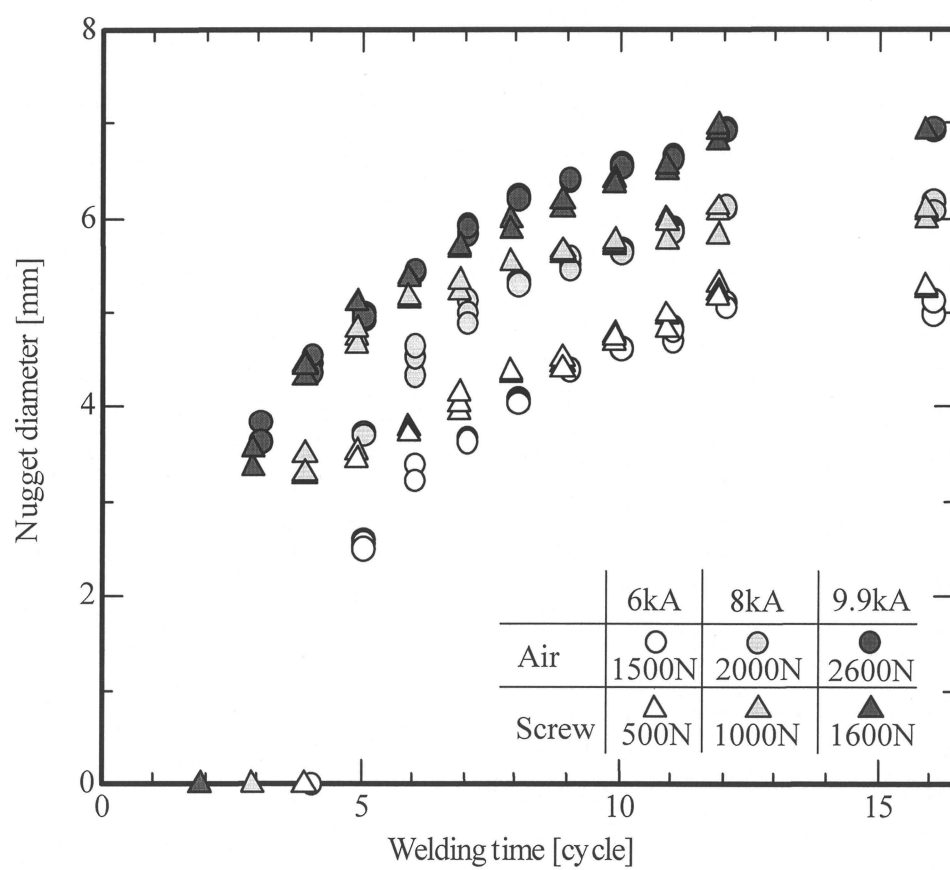


Fig.3-13

Nugget growth process in each cycle for SPCC

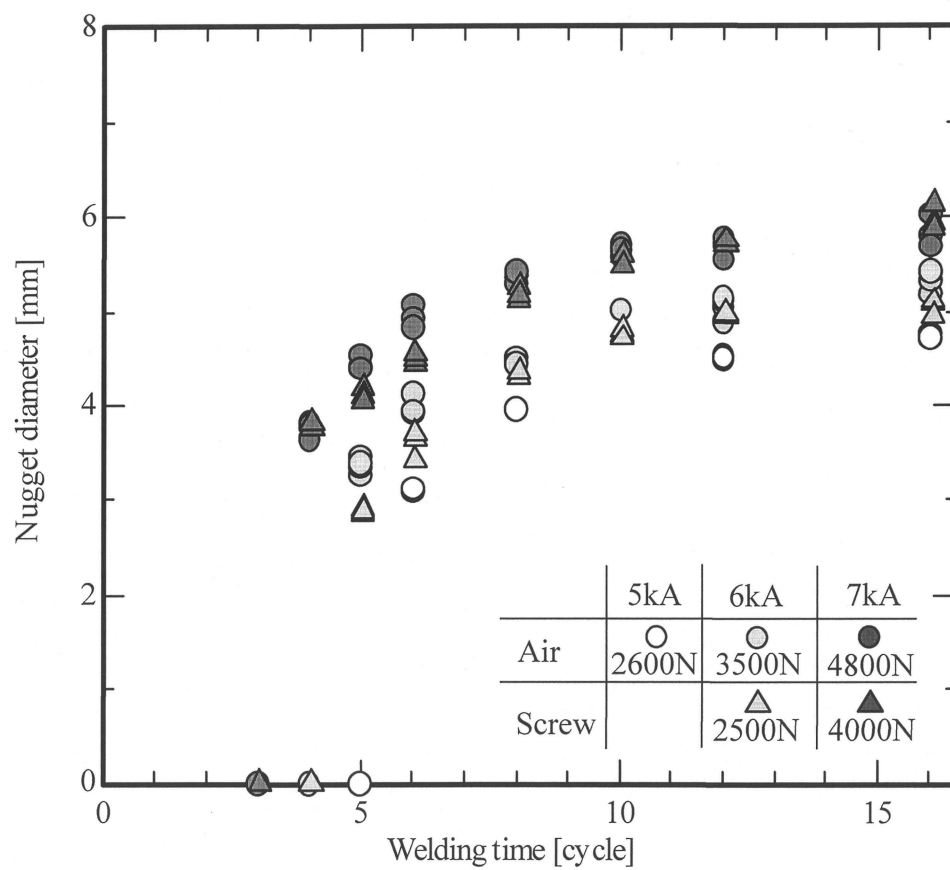


Fig.3-14

Nugget growth process in each cycle for SUS304

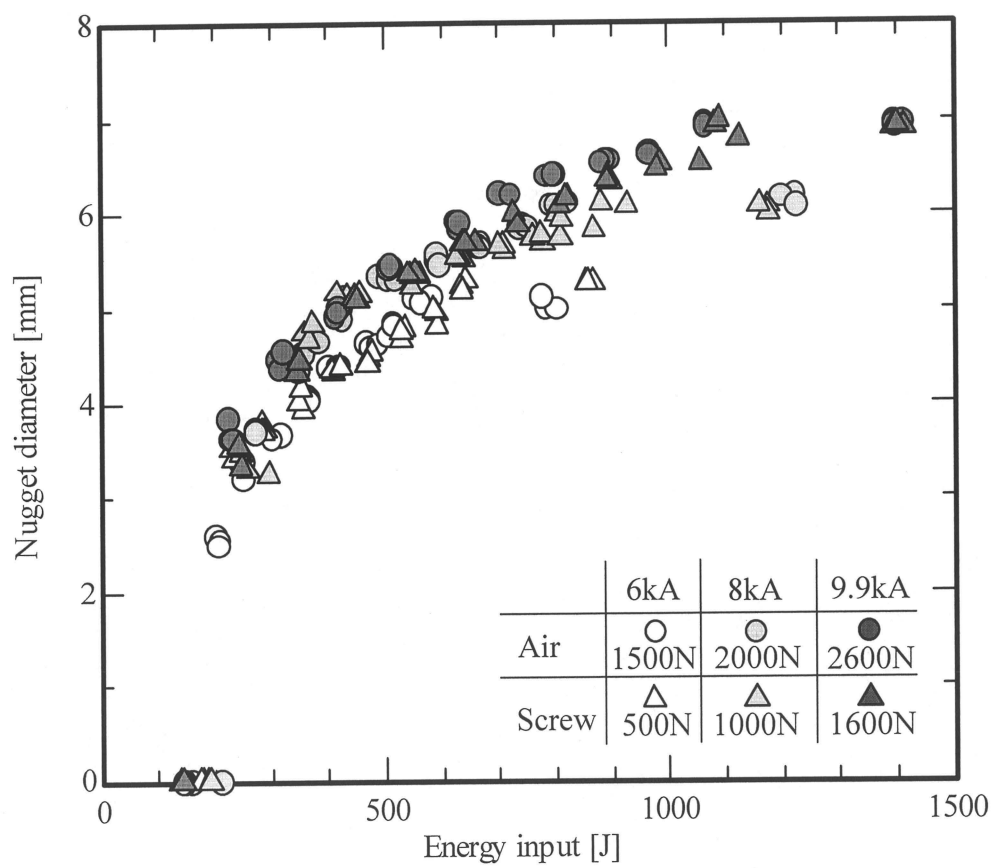


Fig.3-15

Influence of welding condition on energy input and nugget diameter for SPCC

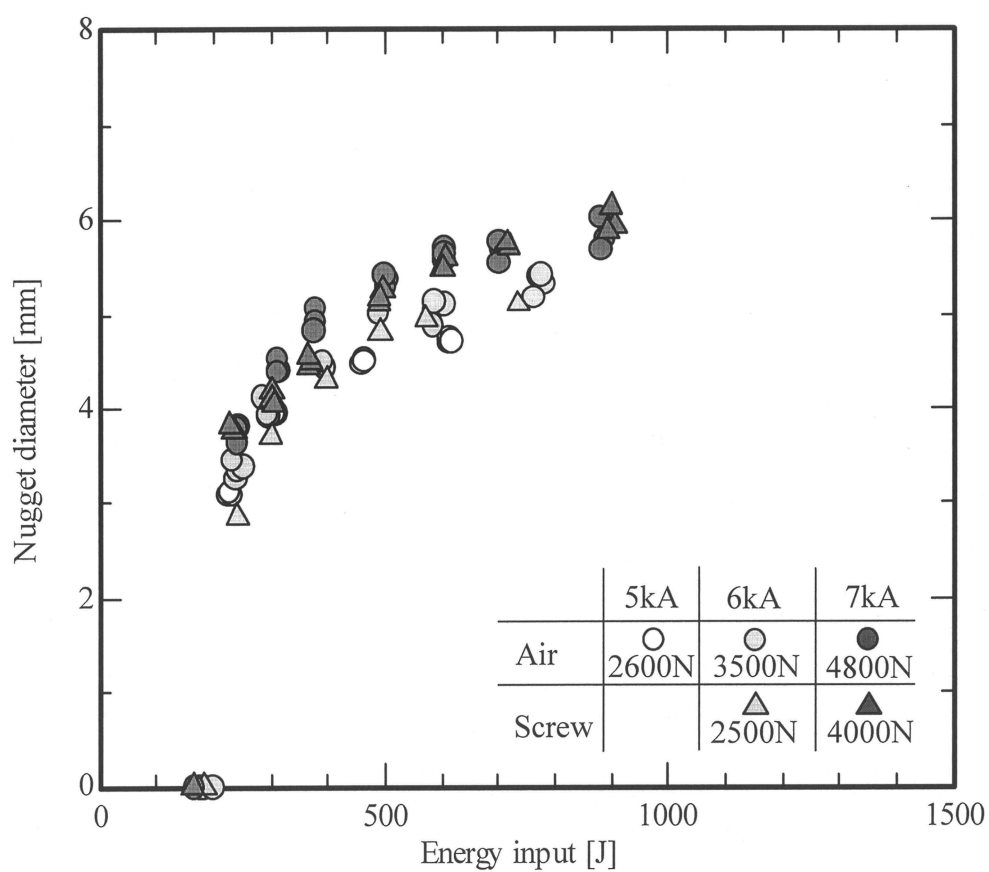


Fig.3-16

Influence of welding condition on energy input and nugget diameter for SUS304

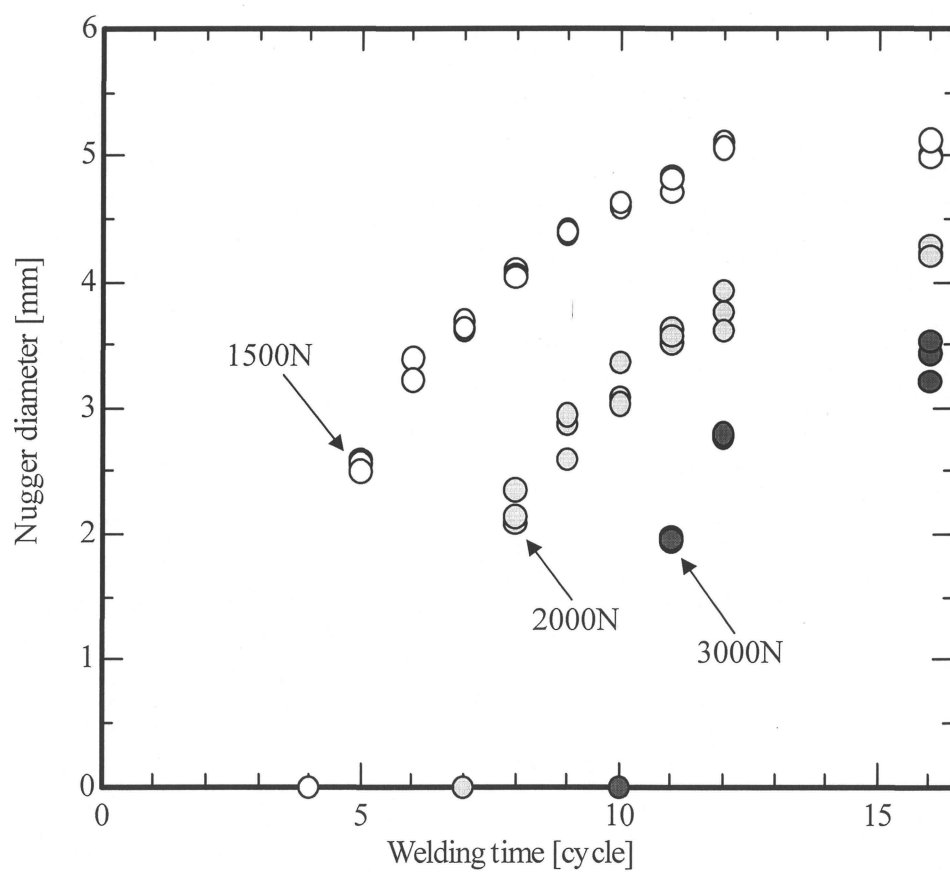


Fig.3-17

Influence of welding condition on nugget growth process
at welding current 6kA for SPCC

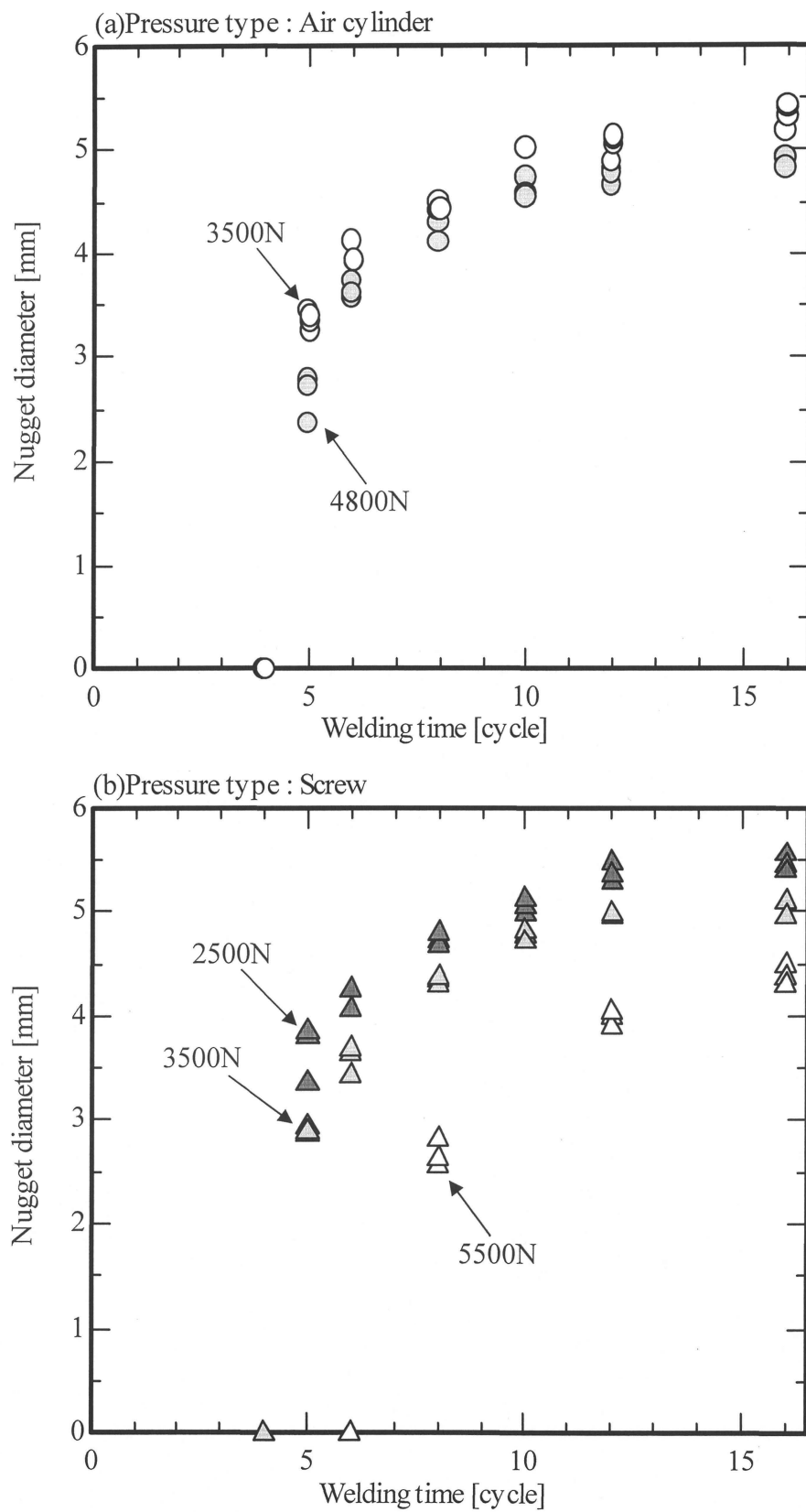


Fig.3-18

Influence of welding condition on nugget growth process
at welding current 6kA for SUS304

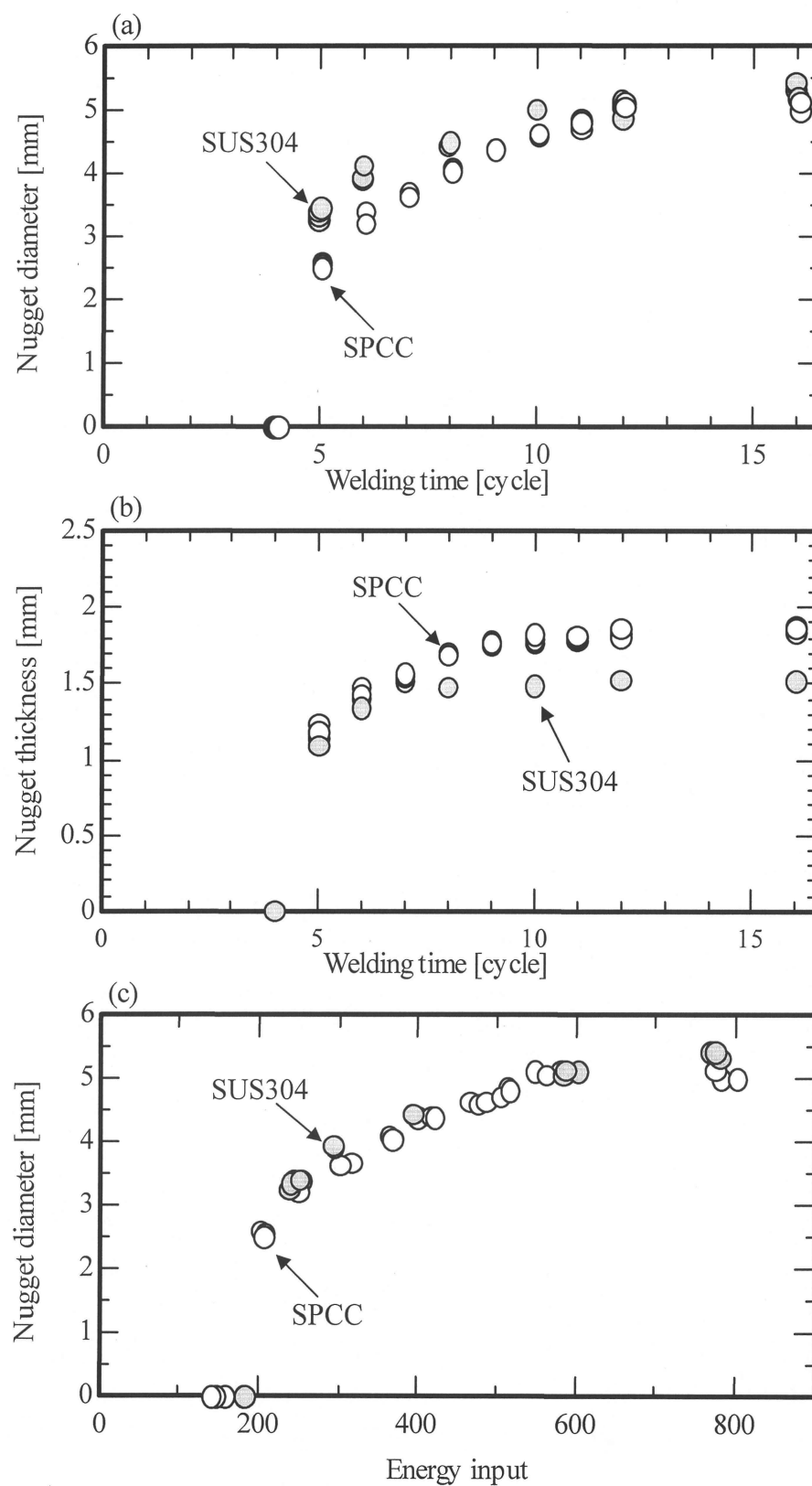


Fig.3-19

Nugget growth process on boundary condition
at welding current 6kA for SPCC , SUS304

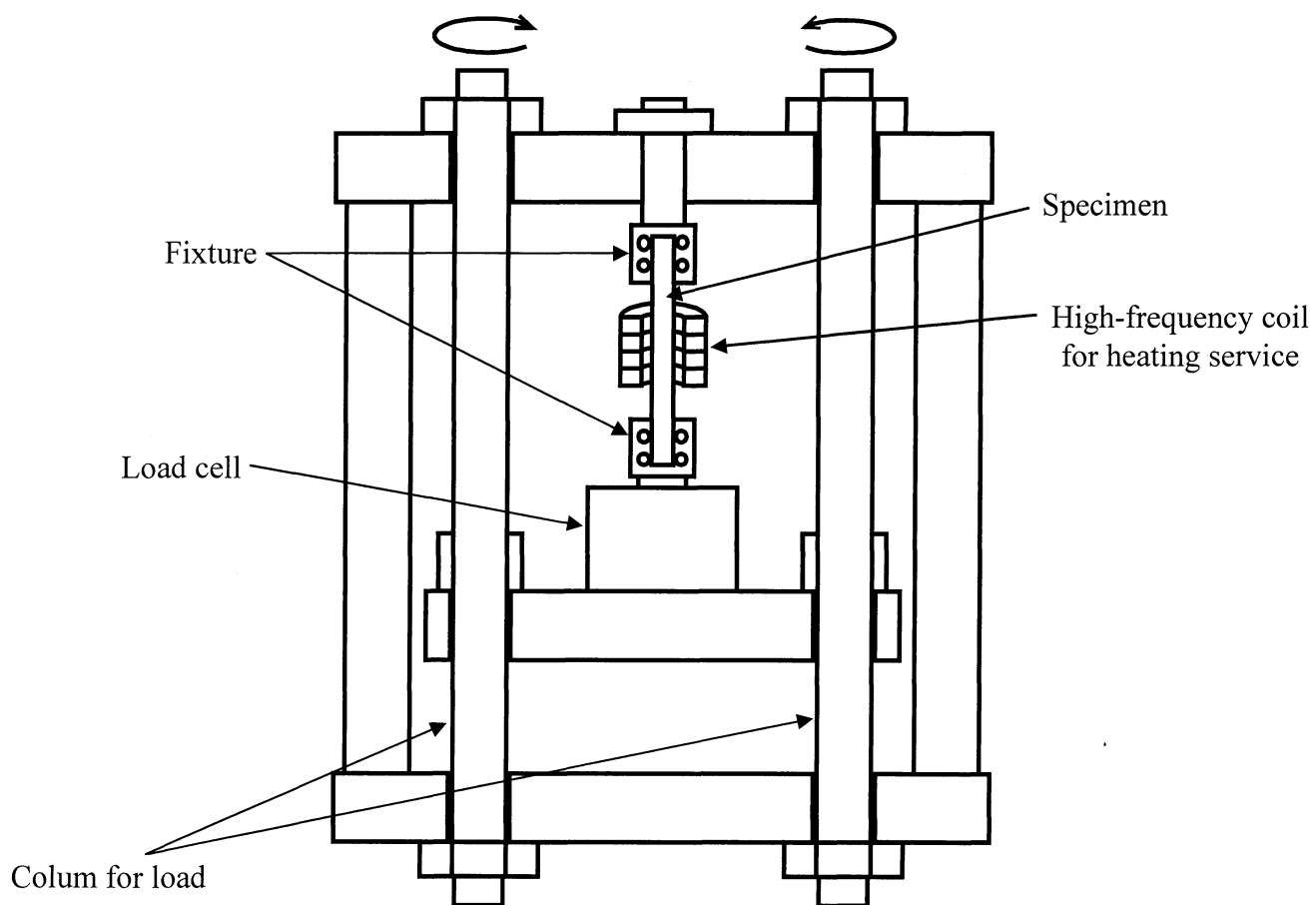


Fig.4-1
Tensile testing machine

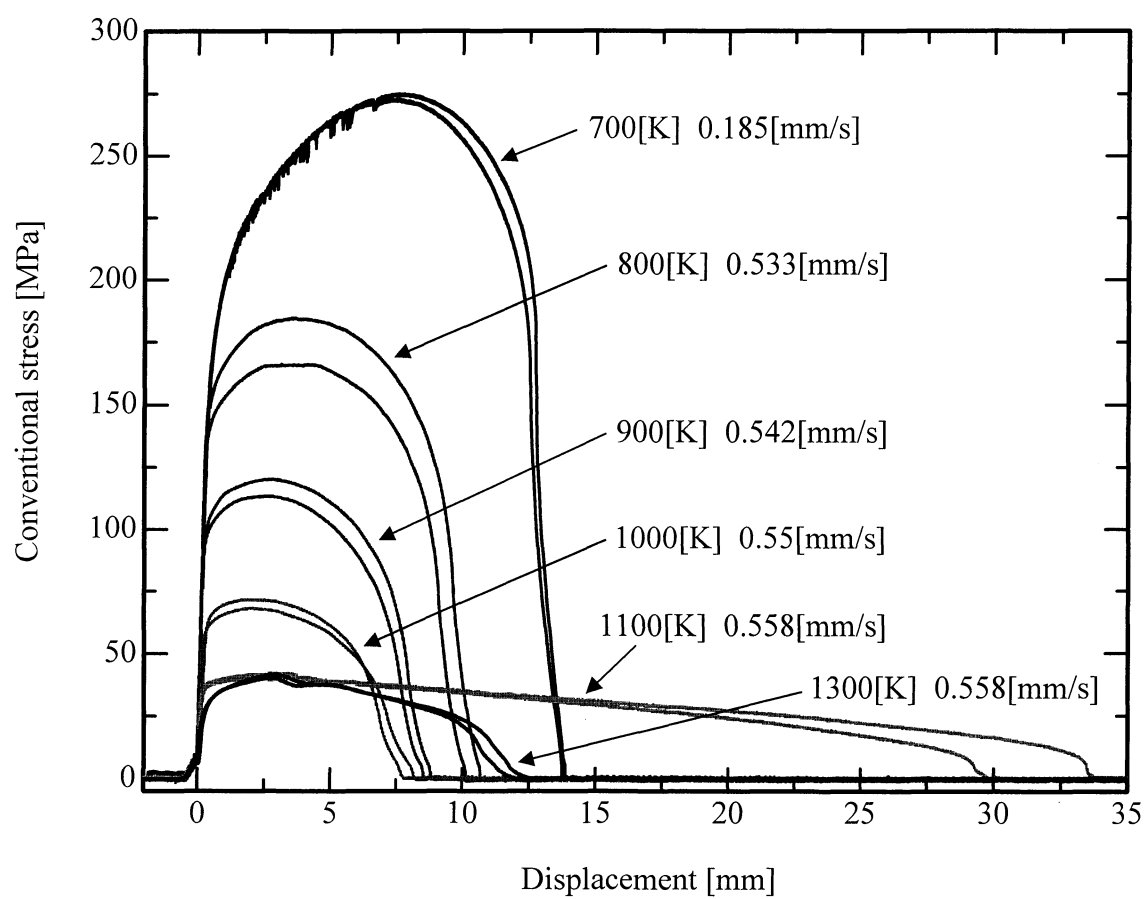


Fig.4-2

Conventional stress-displacement curve for SPC270C

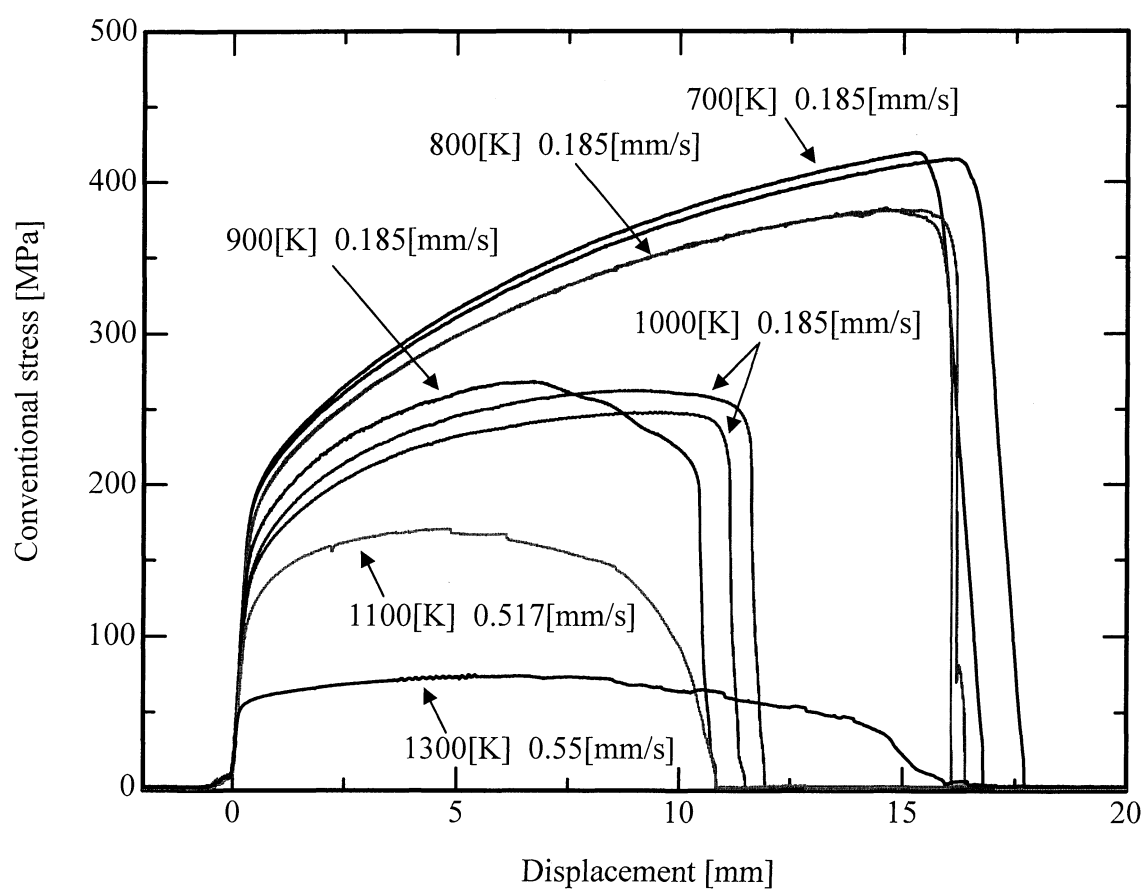


Fig.4-3

Conventional stress-displacement curve for SUS304

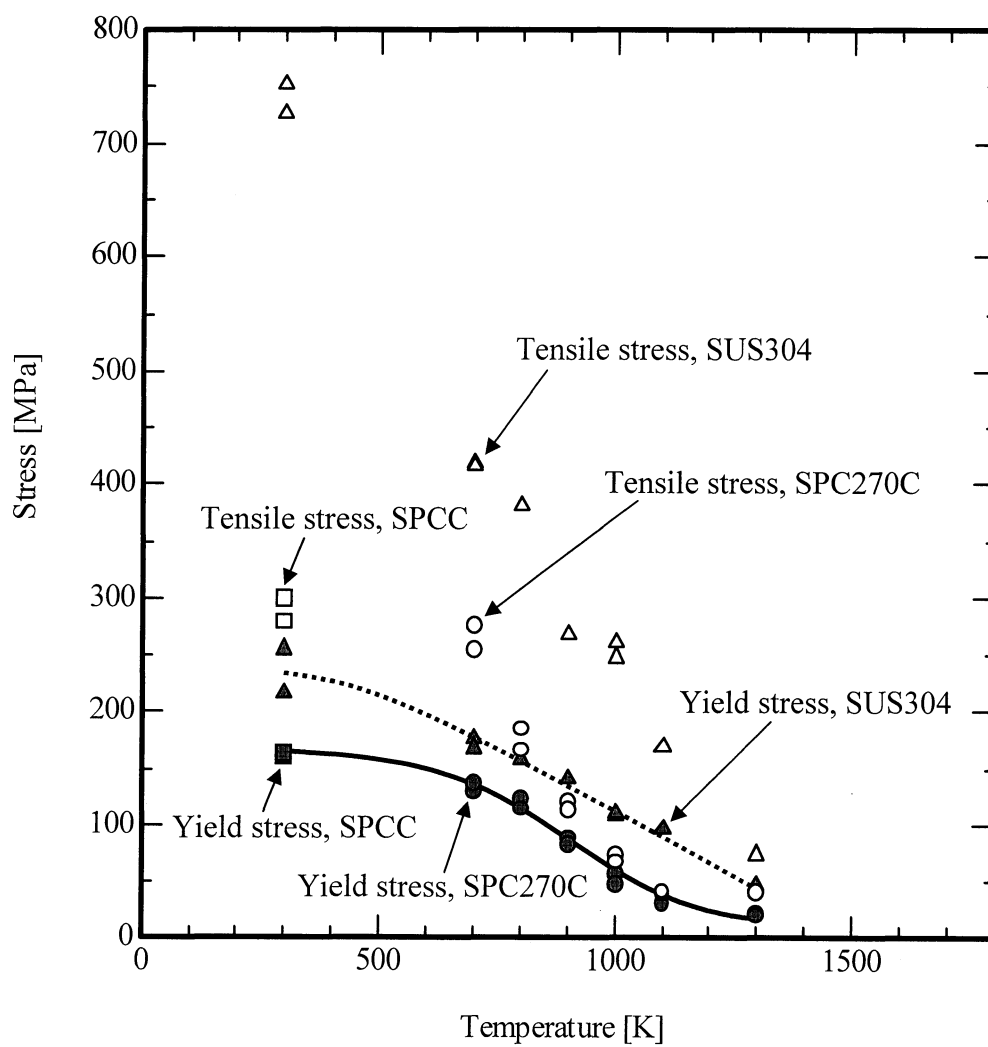


Fig.4-4

Relation between yield stress and temperature for
SPC270C , SUS304

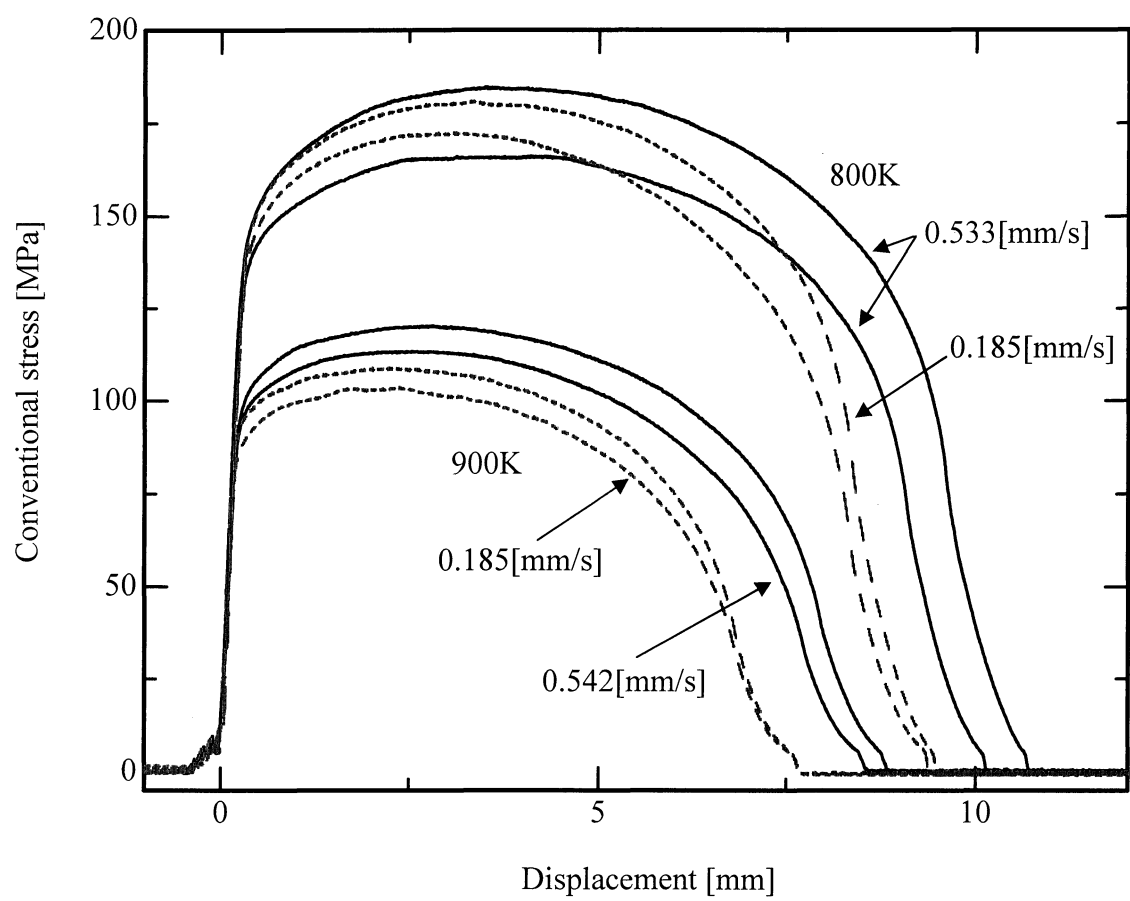


Fig.4—5

Influence of displacement rate on conventional stress
for SPC270C

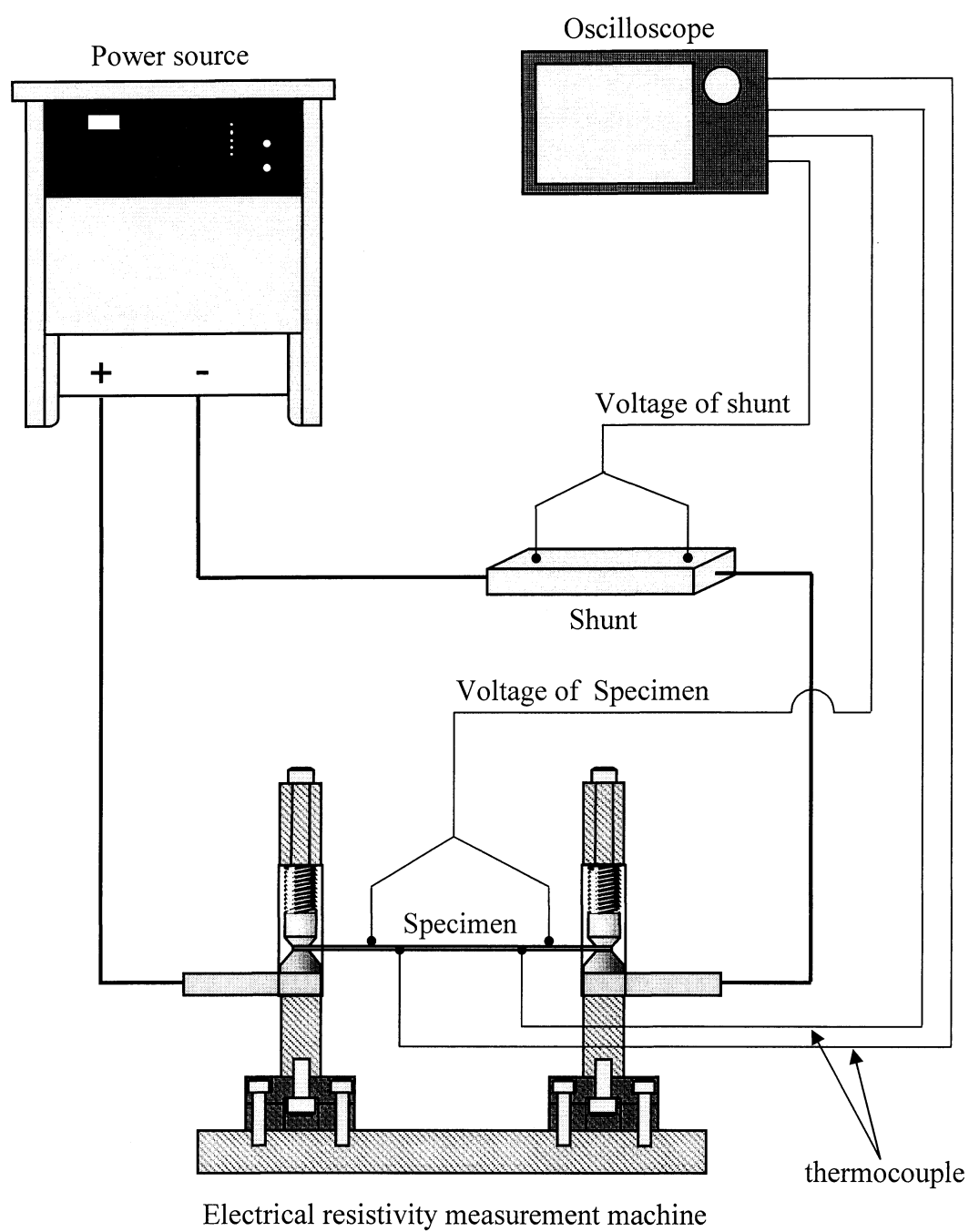


Fig.4—6

Electrical resistivity measurement machine

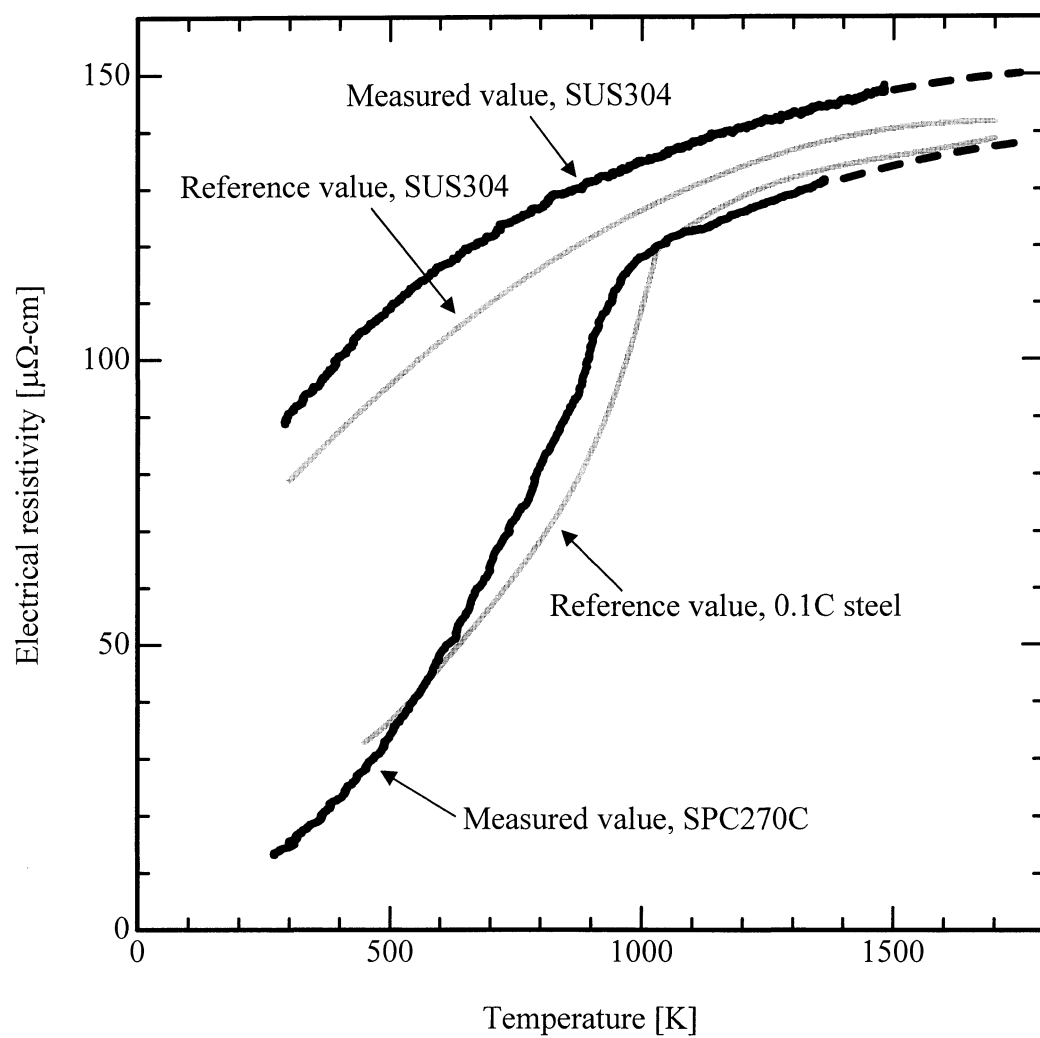


Fig.4-7

Influence of material temperature on material resistivity
for SPC270C , SUS304

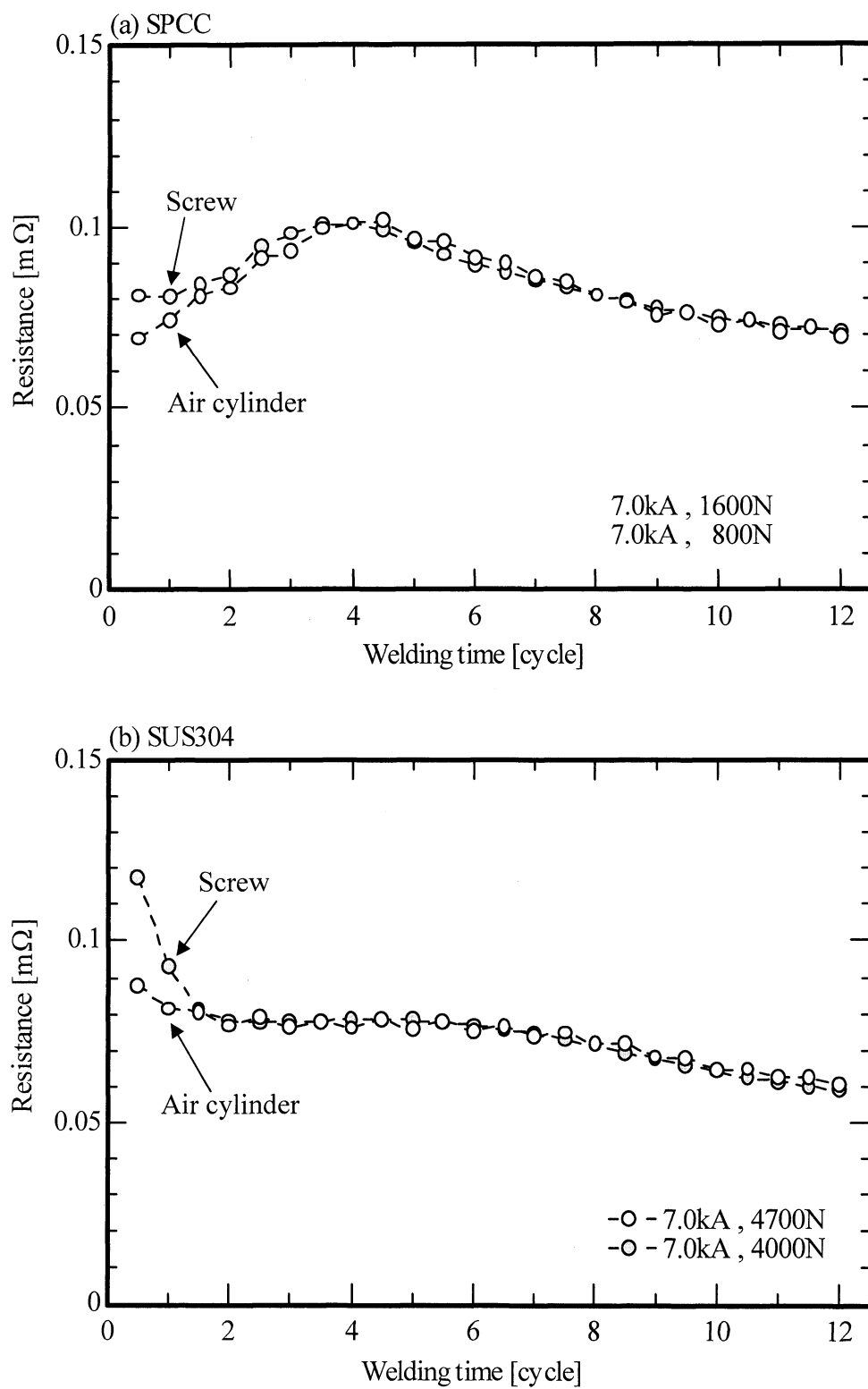


Fig.5-1

Measurement example of resistance during welding
for SPCC, SUS304

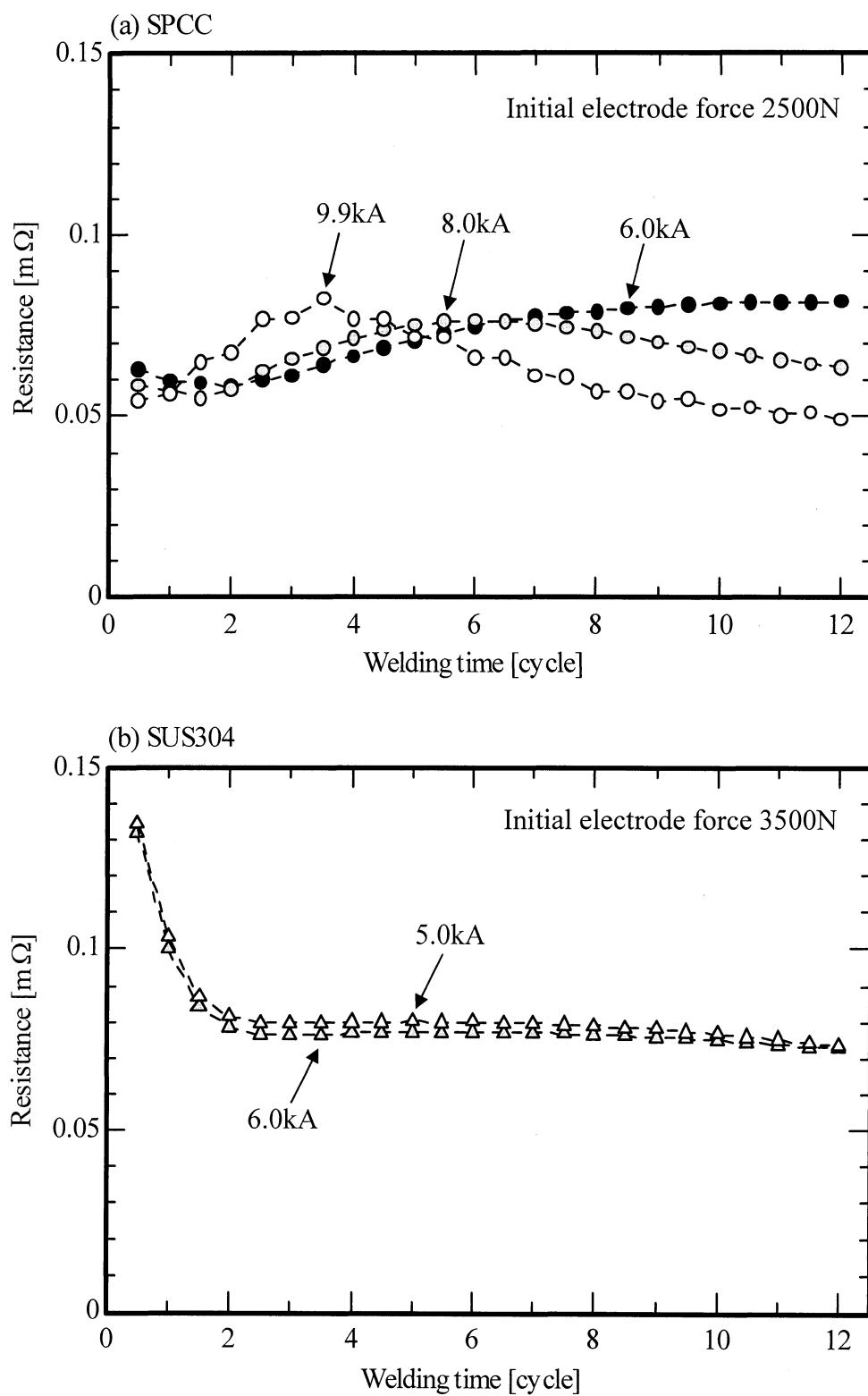


Fig.5-2

Influence of welding current on resistance
for SPCC , SUS304

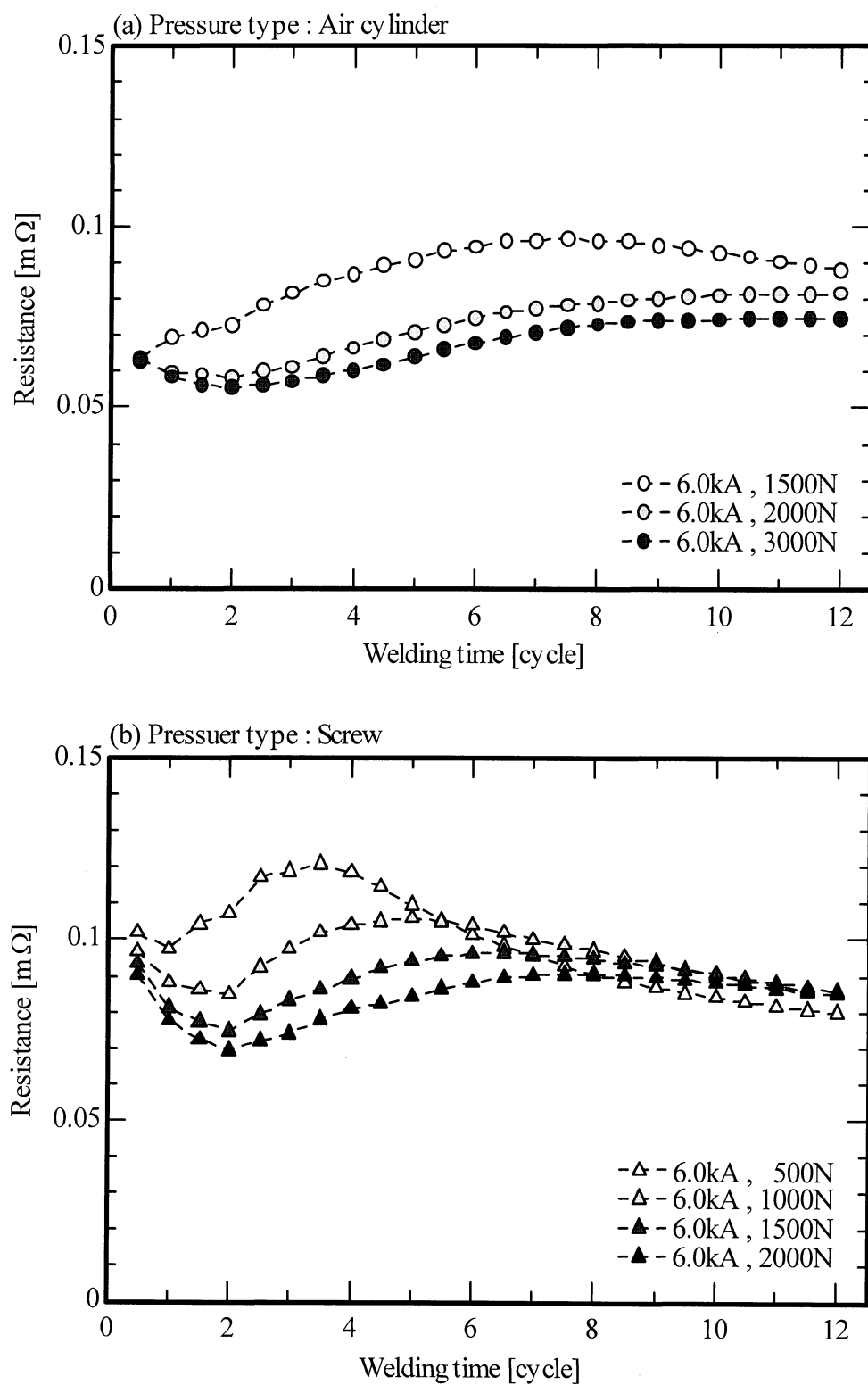


Fig.5—3

Influence of initial electrode force on resistance for SPCC

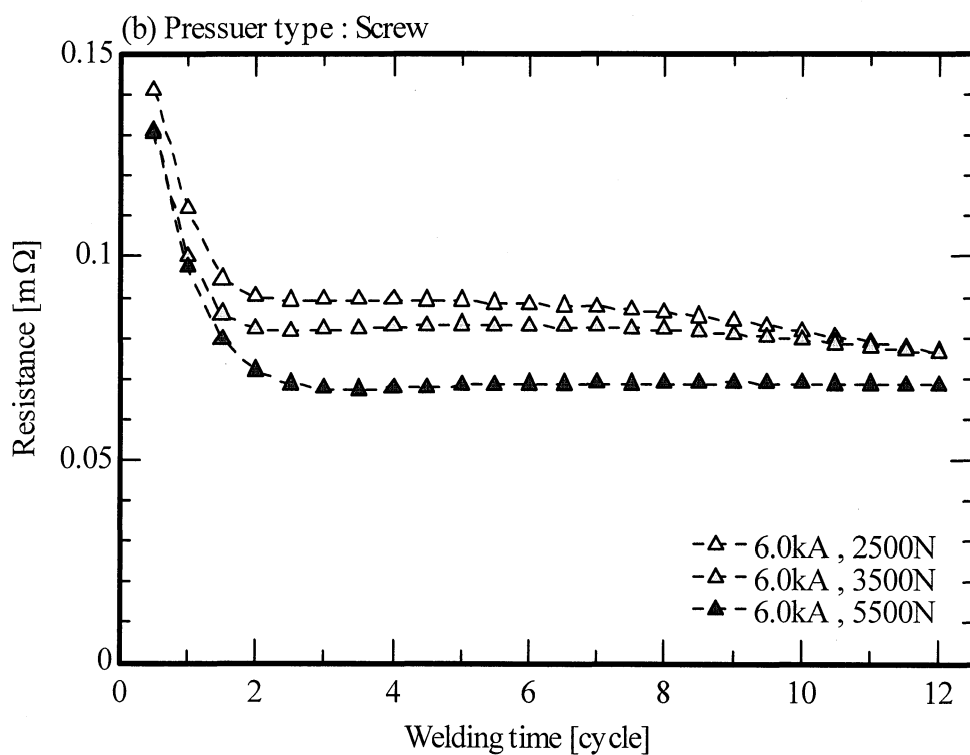
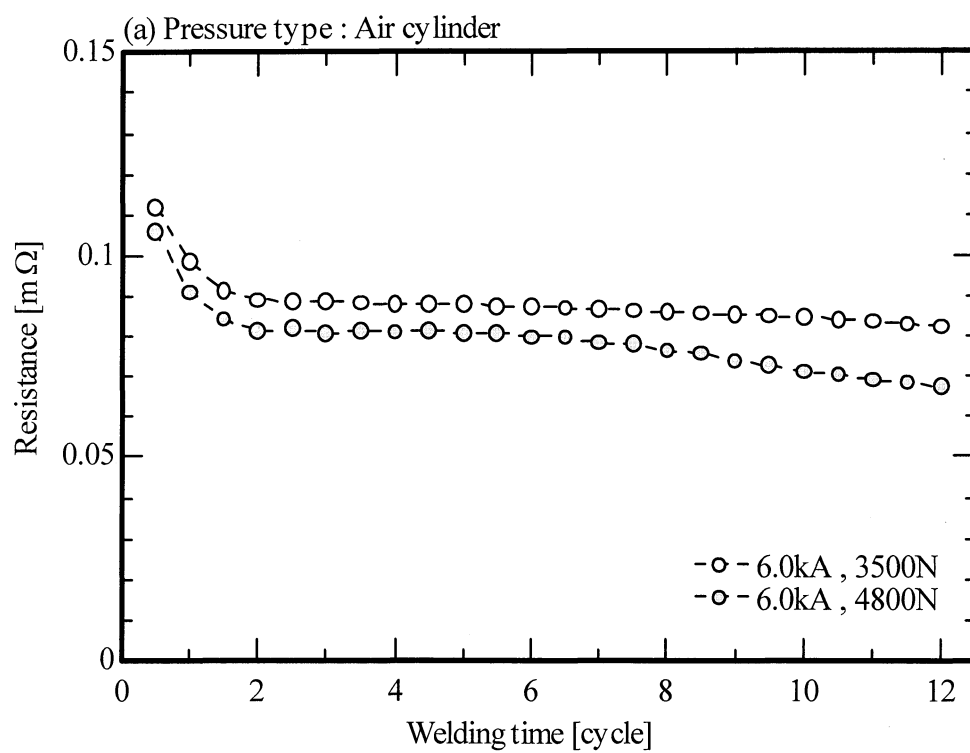


Fig.5-4

Influence of initial electrode force on resistance for SUS304

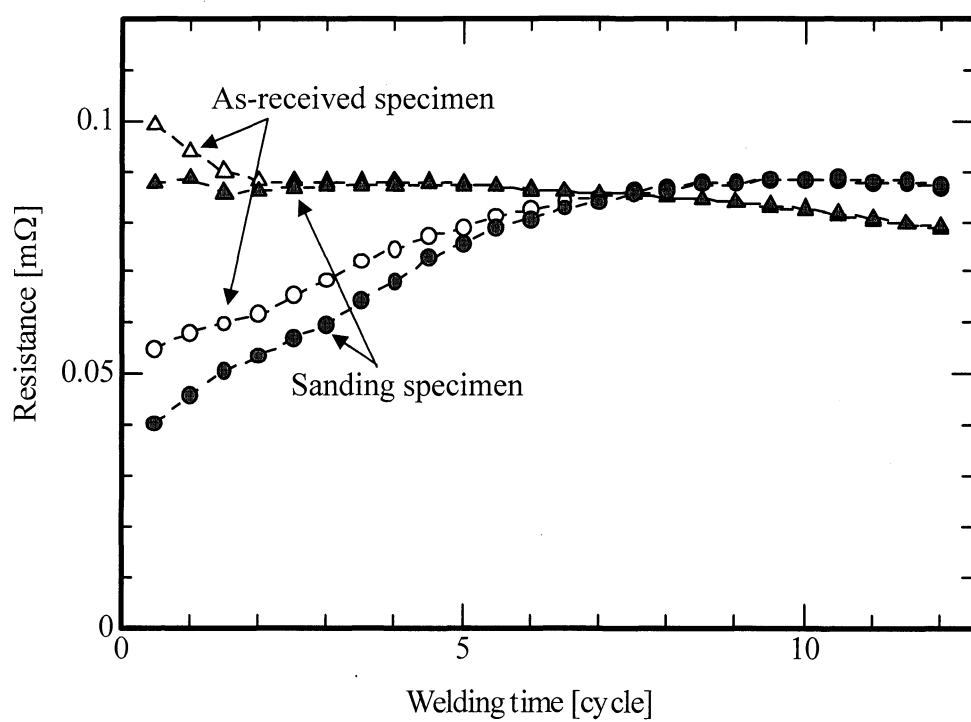


Fig.5—5
Influence of surface condition on resistance at 6.0kA
for SPCC , SUS304

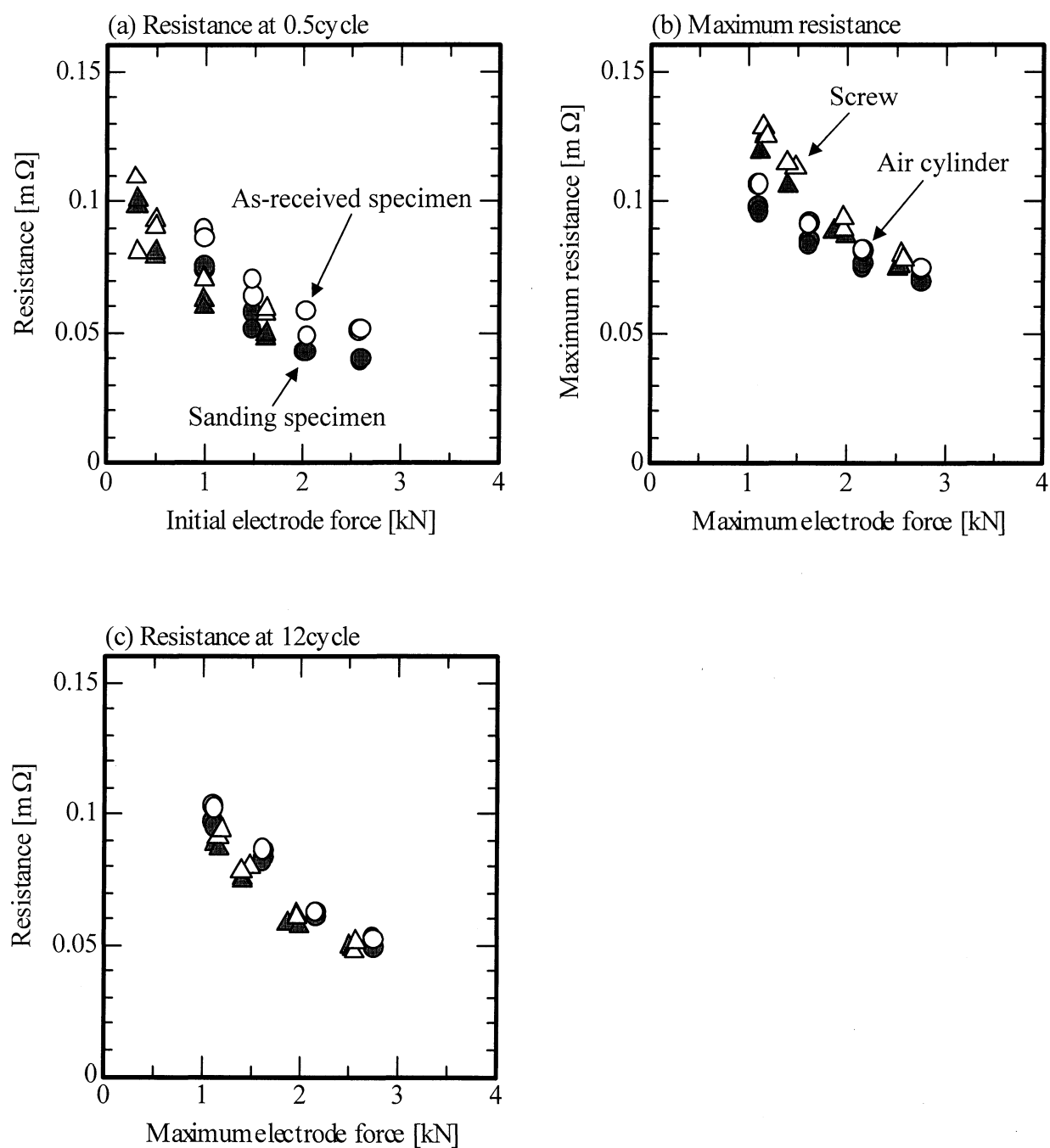


Fig.5—6

Influence of surface condition on resistance for SPCC

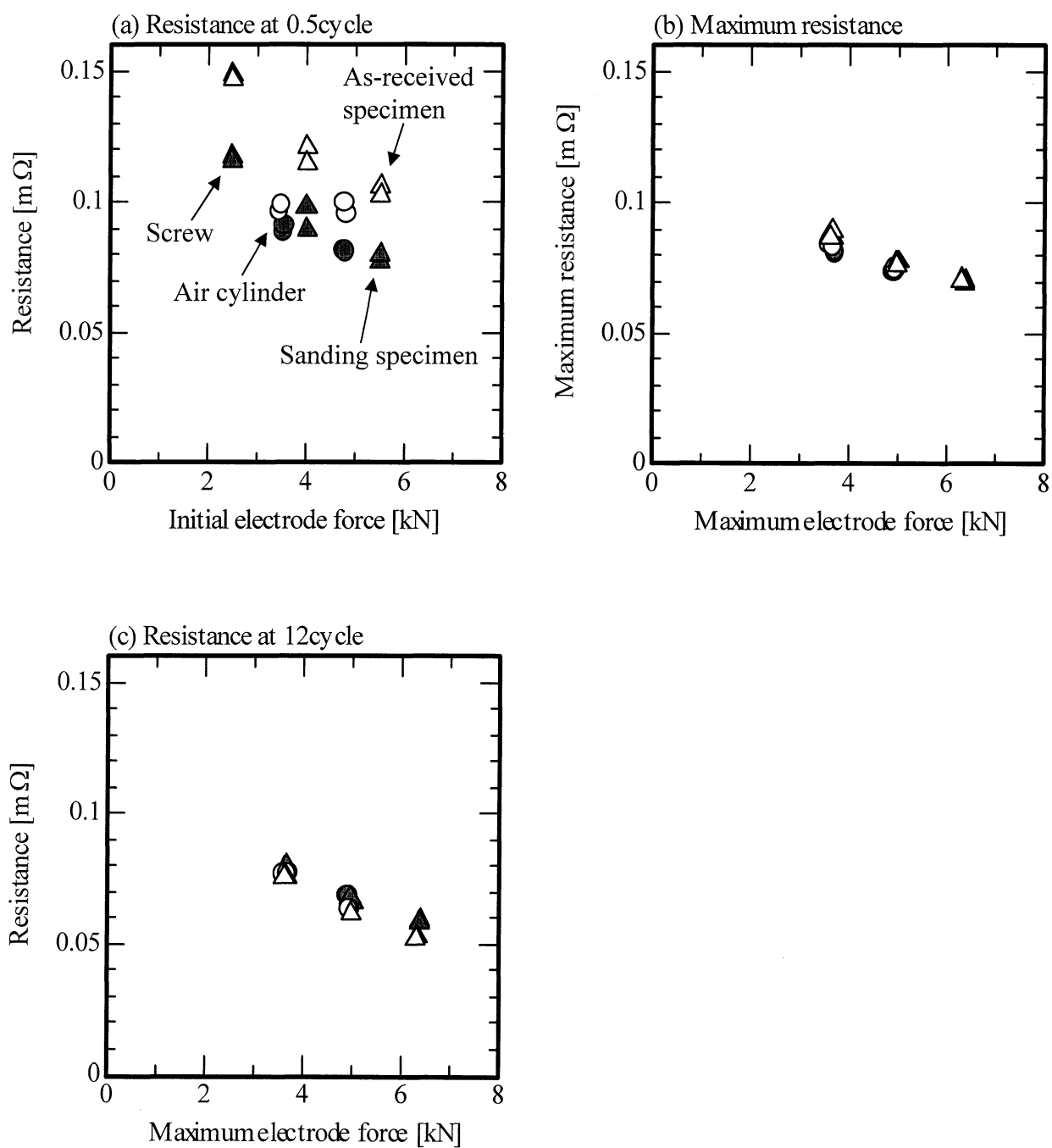


Fig.5—7

Influence of surface condition on resistance for SUS304

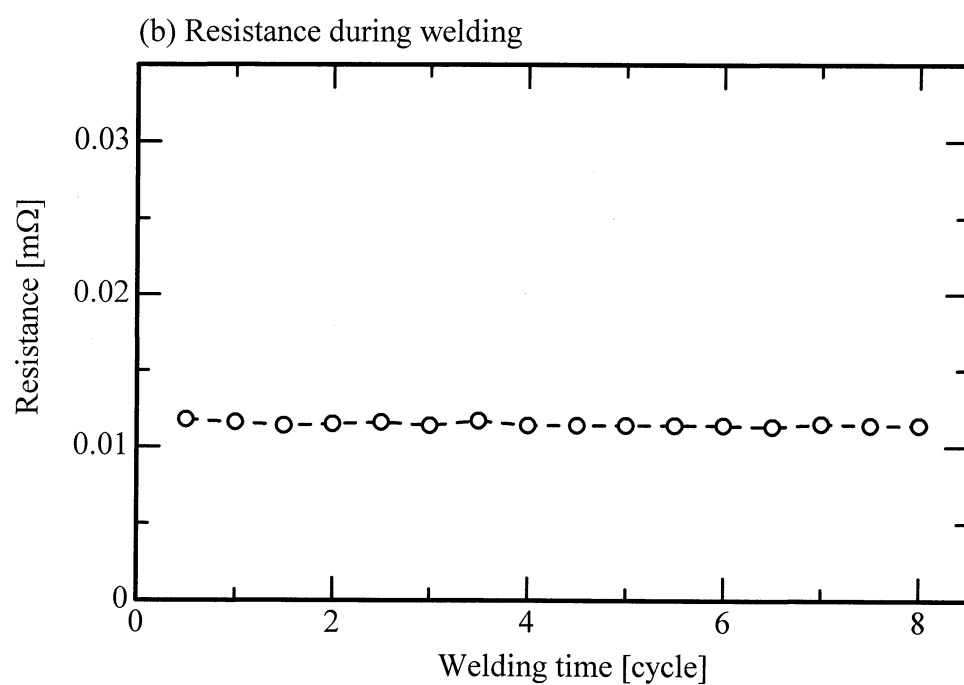
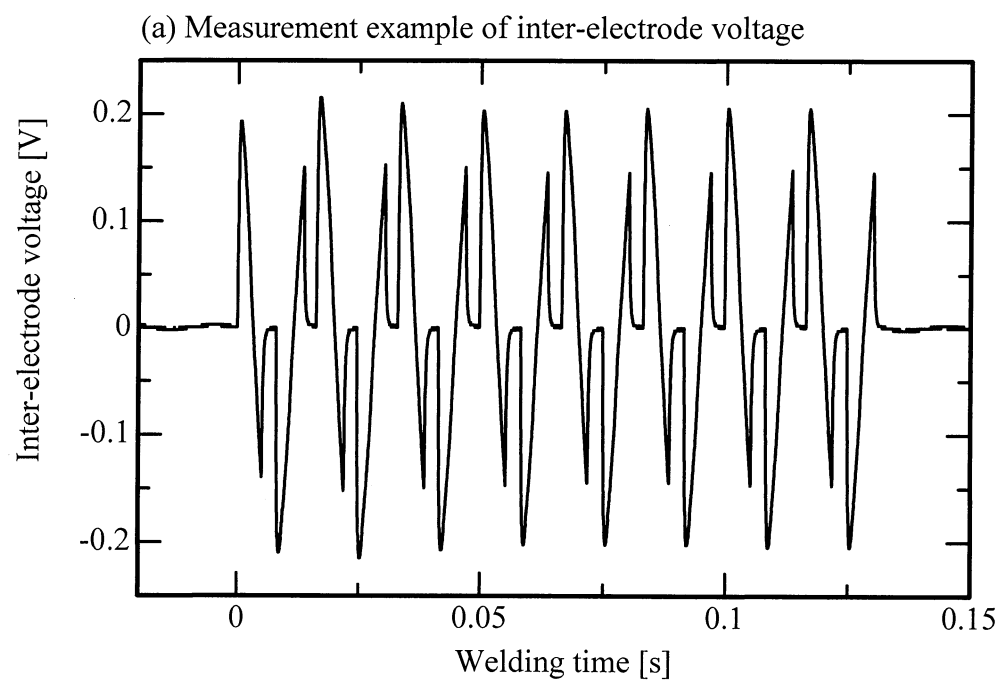


Fig.5—8
Inter-electrode voltage without specimen at welding current 5.0kA
and electrode force 2000N

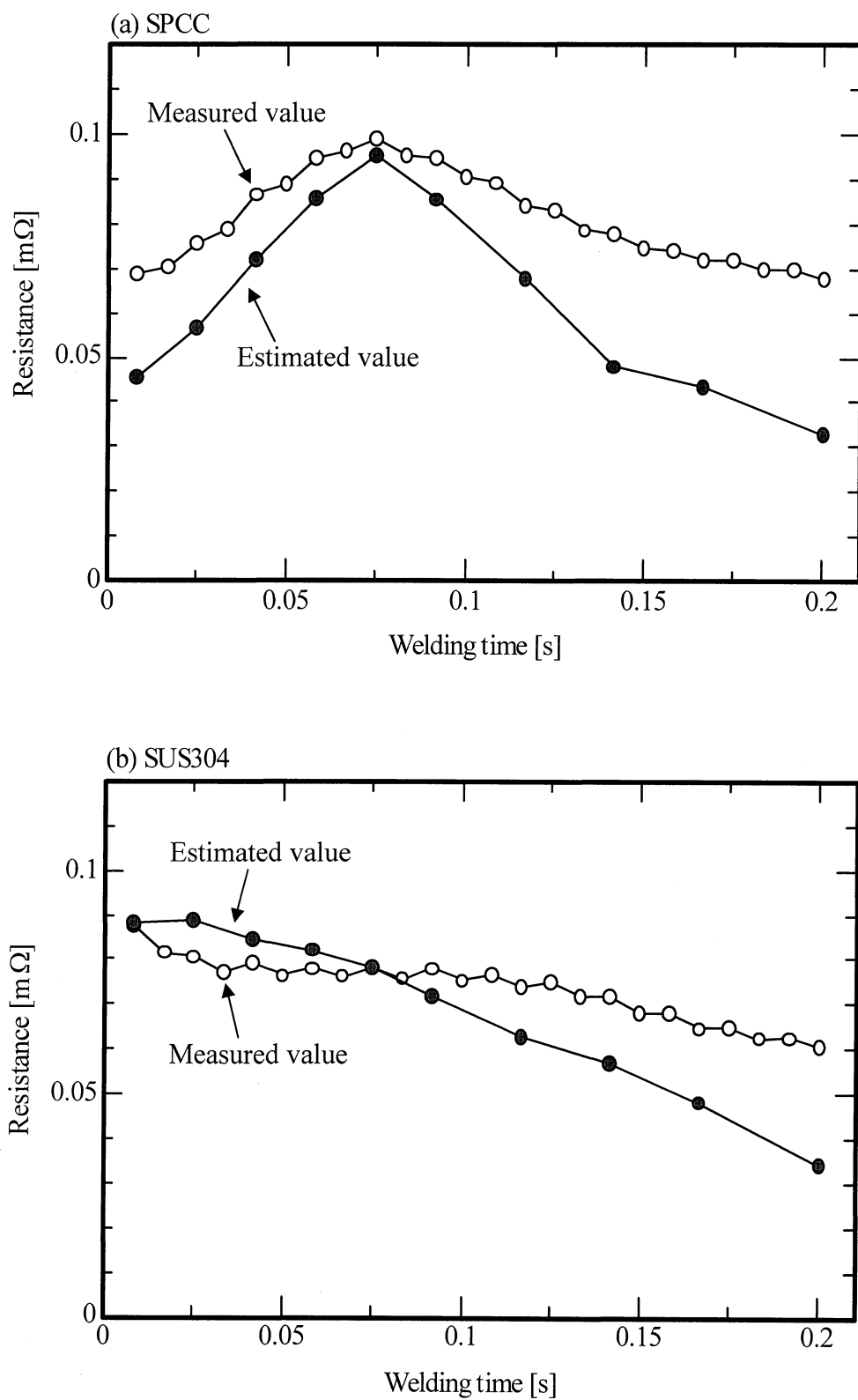


Fig.5-9

Comparison of measured value of resistance with estimated resistance
for SPCC , SUS304