

ペーマイト表面処理による  
アルミニウムの低電流抵抗溶接

平成 18 年 度

三重大学大学院工学研究科  
博士前期課程 機械工学専攻

菊 田 諭

平成 18 年度 修士論文

ベーマイト表面処理による  
アルミニウムの低電流抵抗溶接



三重大学大学院工学研究科  
博士前期課程 機械工学専攻

菊田 諭

## 目次

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 第 1 章 緒言                             | …1  |
| 第 2 章 実験装置および実験方法                    | …3  |
| 2-1 アルミニウムの溶接性の検討                    | …3  |
| 2-2 低電流抵抗溶接                          | …5  |
| 第 3 章 アルミニウム抵抗スポット溶接性におよぼすベーマイト処理の効果 | …9  |
| 3-1 無処理供試材によるアルミニウムの溶接性              | …9  |
| 3-2 ベーマイト処理供試材による結果                  | …12 |
| 3-3 ベーマイト処理による溶接性の向上                 | …13 |
| 第 4 章 アルミニウム抵抗スポット溶接の低電流化            | …16 |
| 4-1 ベーマイト処理の効果                       | …16 |
| 4-2 ベーマイト処理を適用したアルミニウムの低電流溶接         | …17 |
| 4-2-1 ベーマイト処理による低電流溶接                | …18 |
| 4-2-2 アルミニウム抵抗スポット溶接における低電流化の検討      | …22 |
| 第 5 章 結言                             | …31 |
| 参考文献                                 | …32 |
| 謝辞                                   | …33 |

## 第 1 章 緒言

抵抗溶接であるスポット溶接は、比較的薄い金属板を重ね電極チップで加圧しておき、材料に電圧を加えて直接電流を流し、材料自体の抵抗および接触面の接触抵抗によるジュール発熱によって加熱して局部的に融解させて溶接する方法である。抵抗溶接では、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、発熱は局部的であり、しかも発生したエネルギーの余分は電極に吸収されるため母材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。などの利点を持っているため金属薄板を短時間で大量に接合することに適しており、自動車の製造や鉄道車両、航空機、家電製品など多様な分野において使用されている。また、一台の抵抗溶接機で多種多様な金属を簡単に溶接することが可能であるため、大量生産の現場以外の工場でも活用されている。この場合、被溶接材の材質や板厚によって溶接電流、通電時間、電極加圧力の 3 大溶接条件の選定が必要である。

本研究では被溶接材としてアルミニウム材料を使用した。アルミニウムは軟鋼や銅に比べ比重が軽く、省エネルギーの面から自動車の軽量化に有用である。また、アルミニウム表面には強固な酸化皮膜が形成されており、これにより他の金属と比べて耐食性に優れていることから利用が望まれている。しかしながら、アルミニウム材料は①固有抵抗が軟鋼に比べ 3 分の 1 程度と小さい。スポット溶接では、発熱量( $H$ )=抵抗値( $R$ )×電流値( $I^2$ )×溶接時間( $t$ )となるため、得られる発熱量も小さい。②熱伝導率が大きいために溶接部が冷却されてしまうため温度が上昇しにくい。そのためにアルミニウムは、融点は低いが大溶接電流で溶接しなければならない。しかしながら軟鋼用の溶接機には最大溶接電流が 10kA となっているものがあり、その溶接電流ではアルミニウムの溶接は出来ない。

この問題を解決するためにアルミニウム材料の接触抵抗を、表面処理を用いて増大させることによりスポット溶接中の抵抗発熱量を増加させることが可能であると考え、検討することにした。アルミニウム材料の表面処理としては、アルマイト処理に代表される陽極酸化処理が広く用いられるが、本研究では化学皮膜処理であるベーマイト (Boehmite) 法を用いて表面処理を施した。本表面処理法は、沸騰水をアルミニウム材料表面に接触させることにより、ベーマイト ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  もしくは  $\gamma\text{-AlOOH}$ ) 皮膜を表面に生成させる方法であり、特別な装置および技術は必要としないのである。

スポット溶接では溶接部の接合状態は外観からは判断ができず、簡単な非破壊検査法がないので引張せん断試験か溶接面のナゲットを観察することで判断する。アルミニウム材料の継手強度は溶接面に出来たナゲットの形状において、ナゲット高さではなくナゲット径に関係している。アルミニウム材料の溶接性を考慮すると被溶接材表面の接触抵抗を大きくすれば発熱量が増加し、低い溶接電流でも固有抵抗の低い被溶接材を溶接できる、つまり小型で電気容量のさほど大きくないスポット溶接機でもアルミニウム材料のスポット溶接が可能になると考えられる。

そこで本研究ではベーマイトの出来やすいとされる純アルミニウム A1050 を試験片とし、ベーマイト処理することで接触抵抗を大きくし、溶接部のナゲット形成を溶接電流や加圧力で制御することで低い溶接電流でも一定の継手強度を持つアルミニウム材料のスポット溶接をベーマイト処理時間、溶接電流、電極加圧力、溶接時間の条件を変化させて検討した。

## 第2章 実験方法及び実験装置

アルミニウム材料は鉄鋼材料に比べて融点が低いものの、以下の理由により溶接時には大電流が必要となる。

- ① 固有抵抗が低い
- ② 熱伝導率が大きい

本研究では、始めに交流式スポット溶接機におけるアルミニウム材料 A1050 の溶接可能条件を調べた。次に、接触抵抗を増大させ、溶接電流値を低電流化させるために材料表面に化学皮膜処理（ベーマイト処理）を施し、溶接実験を行った。

また、本研究では通常アルミニウムの抵抗溶接に使われている最大溶接電流 30kA の溶接機と、軟鋼用で最大溶接電流 10kA の二台の溶接機を使用している。本来アルミニウムのスポット溶接は大電流が必要だが、接触抵抗による低電流溶接の検討のために軟鋼用の溶接機を使用して溶接した。

### 2-1 アルミニウムの溶接性の検討

アルミニウム材料の溶接性を検討する実験では電源が 3 相インバーター式 200V 50/60Hz、最大溶接電流 30kA の溶接機（アマダ製 ID40 II HP）を使用した。

試験片として工業用純アルミニウム A1050 を用いた。A1050 材の物性値を Table2-1 に示す。また、本研究室のこれまでの研究により被溶接材の重ね代を 30mm 以上とした場合は継手強度に影響がない事がわかったので、試験片はいずれの材料も  $1.5 \times 30 \times 100$  に切断し、重ね合わせ部分を 30mm とした。試験片形状を Fig.2-1 に示す。

また、その試験片に化学皮膜処理の一つであるベーマイト処理を用いて、アルミニウム材料の表面に皮膜（ベーマイト： $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  もしくは  $\gamma\text{-AlOOH}$ ）を生成させたものを溶接した。ベーマイト処理を選択した理由として

- ① 処理方法自体がとても簡単である。
- ② 精製水しか使わないので特別な装置を必要としない。

以上の点からベーマイト処理を用いたアルミニウム材料の溶接性について検討した。

実験には Fig.2-2 に示すように全面にベーマイト処理をした試験片と、Fig.2-3 に示す

ように重ね合わせ面にのみベーマイト処理をした試験片を用いた。ベーマイト処理の方法は、容量 1 リットルのビーカー内で 373K にてアルミニウムと精製水とを反応させた。なお、反応中の精製水の追加および交換は行わなかった。片面のみベーマイト処理の試験片を作成する際には、電極接触面がベーマイト処理されないようにテープ（基材：ポリエステル、接着剤：アクリル系）で保護した。容量 1 リットルのビーカー内で試験片 8 本を同時にベーマイト処理を行った。この際に、ステンレス製の枠をビーカー内に設置し、試験片表面に他の試験片が接触しないようにした。

電極は上部電極（プラス極性）が曲率半径 25mm の R 型電極を使用し、下部電極（マイナス極性）は F 型電極（平面端面）を使用した。スポット溶接の電極は、溶接部を加圧し、電流を供給すると同時に溶接部を加圧しながら冷却させる役目をもっている。R 型電極の利点は電極と板が球面で接触しているため、溶接が進行して溶接部がやわらかくなると、それに応じて電極が板に食い込み電極と板の接触面積が増加し電流密度が低下する。このため電極一板間の接触が低電流では小さく、大電流では大きくなり、多少溶接電流が変化してもうまくナゲットを作ることが出来る。一方、F 型チップの利点は電極面がフラットなため被溶接材に残る圧痕が小さい、つまり被溶接材の美観をあまり損ねないという点である。

溶接結果については以下の方法で検討した。

#### 引張せん断試験

スポット溶接された部品や製品は、その使用状態によって、いろいろな加重が加わる。そして製品としての変形抵抗や破断強さは、その場合によって条件が異なり統一的な試験解析は困難である。そこで本実験では試験片の作成と破断試験の容易さから Fig.2-4 に示すような「引張せん断試験」を行いスポット溶接部の継手強度とした。引張試験器は島津製 AUTO GRAPH を用いた。しかしながら、引張せん断試験は実用上では使われるものの、破断の形式が変化するため溶接性や発熱量についての検討は難しい。よってベーマイト処理を施した状態ではナゲットについて測定している。

#### ナゲットの測定

ナゲットとは接合時与えられたジュール熱より融解し、その後の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、Fig.2-5 に示すように溶接部の中心を切断した。切断後は#1500 までのカーボランダム研磨紙を用いて研磨を行い、液温 70℃ の 10%NaOH 溶液に 60 秒浸け腐食を行った。これにより表れたナゲットを光学顕微鏡とマイクロメーター付きのスライドバイスを使用して Fig.2-6 に示すようなナゲット径を測定した。なお、図中心部に観察される空洞はブローホールと呼ばれるものである。

### チリの観察

溶接条件が過大になると、被溶接材からチリと呼ばれる溶融金属が飛散し始める。非溶接材の電極接触面から飛散したものを表チリ、重ね合わせ面においてコロナボンドを通過した物をチリと呼ぶ。表チリが発生した場合 Fig.2-7 に示す様になり、電極汚損が激しくなる、製品の外観を著しく損ねるなどの問題を生じる。そこで、本実験では溶接実験終了後に試験片表面を肉眼にて観察し、表チリの発生の有無を確認した。また、チリに関してはナゲット測定時にブローホールを観察することにより、肉眼にてチリの発生の有無を確認した。

## 2-2 低電流抵抗溶接

低電流溶接を検討する実験では電源が単相交流式 400V 50/60Hz、最大溶接電流 10kA のスポット溶接機（ダイヘン製 RPAB-22）を使用した。電源が 3 相インバーター式と単相式の異なる 2 種類の溶接機を使っているので溶接性を直接比較することはできないが、アルミニウム材料が溶接可能な大溶接電流を持つ溶接機と、そうではない軟鋼用の溶接機を使って実験することで低電流溶接の可能性を検討した。

本実験で使用した電極はすべて直径 16mm であり上部電極（プラス極性）、下部電極（マイナス極性）ともに曲率半径 25mm の R 型（曲面湯麺）電極を使用した。また、電極加圧力の影響を調べるため上部電極に R 型電極、下部電極に F 型電極（平面端面）の組み合わせと、上部、下部電極ともに F 型電極の組み合わせの実験をした。

低電流溶接の実験では、被溶接材の溶接性に影響するパラメータと考えられる溶接電流、



チップ間電圧、電極加圧力、電極変位量を測定するため以下のような装置を取り付けた。また、制御装置に抵抗溶接用制御装置（ダイヘン製 RE-01）を使用した。なお、全ての装置からの出力信号はオシロスコープに接続することで表示、記録した。実験装置の概略図を Fig.2-8 に示す。

- ・ 溶接電流およびチップ間電圧の測定

溶接電流の測定は、電流検出コイル（トロイダルコイル MB-800K）を被測定溶接機の 2 次導体の一部にかけ、溶接チェッカー（MIYATI 製 MM-326B）を使い検出した。また、チップ間電圧の測定では上下の電極に電圧検出コードを溶接チェッカーに接続する。

- ・ 電極加圧力の測定

電極加圧力の計測方法は撓み式の加圧力計などがあるが、溶接中の加圧力の変化を観察できる圧縮用ロードセルを溶接機のピストンシリンダーの下に設置することにより測定する。電極加圧の測定にはロードセル（KYOWA 製 LCR-G20）を使用した。また、圧縮用ロードセルからの信号出力をシグナルコンディショナーで電圧信号に変換した。設置位置を Fig.2-9 に示す。ロードセルの定格容量は 20 k N である。

- ・ 電極変位量の測定

変位の測定方法としては溶接中のチップの変位を調べるためには  $10\mu\text{m}$  以下の分解能が必要であり、測定範囲としては被溶接材が板厚ほど膨張しないと思われるので  $\pm 10\text{mm}$  程度測定できるものを用意する。そこで溶接実験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。測定中心距離は 50mm、測定範囲は  $\pm 10\text{mm}$  である。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。

### 測定値の較正について

低溶接電流実験において全ての装置からの出力信号をオシロスコープで表示、記録したが、オシロスコープでは全ての出力信号を電圧信号で記録しているので実際の数値に換算するためには係数を掛ける必要がある。なお、チップ間電圧値については最初から電圧値で表されているので換算の必要はない。

#### ・溶接電流値の較正

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.2-10 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なっている。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  $1V=6.526kA$  とした。

#### ・電極加圧力の較正

電極加圧力の較正については、ロードセルの定格出力が  $20kN=2.68V$  なので、オシロスコープによる電圧値から電極加圧力への換算係数は  $1V=7.46kN$  とした。また、溶接機の電極加圧力の設定は圧力(MPa)表示となっているので、実験を 10 回行い平均電極加圧力とした。それを Table2-2 に示す。

#### ・電極変位量の較正

電極変位量の較正は、光学変位センサの測定距離の直線性と、ある点からの変位をマイクロメーターで求め、電圧をマルチメーターで測定し、それらを比較して係数を求めた。そのグラフを Fig.2-11 に示す。よって電極変位量の換算係数は  $1V=1.976mm$  とした。

低電流溶接の実験においてもベーマイト処理を施した試験片を溶接した。試験片形状は前述したものと同じだが、溶接性の検討実験においてベーマイト両面処理は現段階ではスポット溶接に不適合という結果より、無処理の場合とベーマイト片面処理を被溶接材として使用した。また、本実験における溶接性の検討については、前述した方法と同様にナゲット径の測定とチリの観察を行った。また、ベーマイト処理の影響を調べるために以下の測定についても行った。

#### ベーマイト被膜生成の測定

本研究ではベーマイト処理を用いるため、最初にアルミニウム箔の表面に皮膜（ベーマ

イト： $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  もしくは  $\gamma\text{-AlOOH}$ ) を生成させ、ベーマイト生成量と処理時間の関係を調べた。

試験片形状は  $100\text{mm} \times 100\text{mm}$  で厚さが  $0.1\text{mm}$  の純アルミニウム箔(99.5%Al)を用いた。試験片形状を Fig.2-12 に示す。処理時間は 1,3,4,5,15,25 分とした。また、ベーマイト生成量の測定は質量増加により検討を行った。測定には化学天秤を使用し  $0.1\text{mg}$  の位まで測定した。なお、測定は3回行いその平均値を実験値とした。

### 接触抵抗の測定

金属の板の表面には、加工の際につく巨視的な凹凸があるほか、肉眼では全く平らにみえても、光学顕微鏡やさらに高倍率の電子顕微鏡で観察すると、微視的な凹凸が多数存在する。また、その表面には素地の金属とは異なった酸化皮膜が付いている。接触抵抗とはこのような接触面の存在により生じる抵抗のことで、電流が接触面全体にわたって流れることが出来ず、電流通路の面積が小さくなるために生じる集中抵抗と、板表面に存在する抵抗の高い酸化皮膜によって、電流が流れにくくなることによって生じる皮膜抵抗がある。アルミニウムは特に後者の酸化皮膜を生じその電気抵抗が大きく軟鋼などに比べ接触抵抗の溶接への影響が大きいとされている。アルミニウム材料の接触抵抗値が増大すると  $H=R \times I^2 \times t$  より発熱量は増加すると考えられる。接触抵抗の測定実験において、試験片は溶接実験と同じもの(Fig.2-1)を使用した。また、実験条件を Table2-3 に示す

本実験はそれぞれの測定を6回繰り返し、それを平均したものを実験値とした。Fig.2-13 に接触電気抵抗測定の概略図を示す。測定には試験片に  $\phi 6$  の穴を開けACコードに圧着端子をボルト締めした。試験片の加圧には溶接機の溶接電流を止め加圧を行った。測定手順を次に示す。まず溶接機で2枚の試験片を上下の電極で挟み加圧した状態で回路に1Aの電流を流し、それを電流計で測定する。次に電圧計で試験片の間のチップ間電圧を測定する。計測した値をオームの法則の  $V(\text{電圧})=R(\text{抵抗}) \times I(\text{電流})$  に代入し、チップ間電圧と電流の比として試験片間のチップ間電気抵抗を計算した。

### 第3章 アルミニウム抵抗スポット溶接性におよぼすペーマイト処理の効果

本実験では三相インバーター式スポット溶接機を使用してアルミニウム材料の溶接性およびペーマイト処理の効果について検討した。

#### 3-1 無処理供試材によるアルミニウムの溶接性

以下に無処理の場合の溶接条件と継手強度の関係を示す。溶接条件を Table3-1 に示す。なお、以下の結果は溶接条件による継手強度への影響をわかりやすくするために同じデータを溶接条件別に表示してある。

##### 溶接電流の影響

Fig.3-1 に溶接電流と継手強度の関係を示す。この図より、溶接電流の増加に伴って継手強度はほぼ直線的に大きくなっている事が分かる。電極加圧力が小さい場合、溶接電流 15kA でも溶接可能だが、電極加圧力が 5.88kN では溶接電流 18kA までは溶接することが不可能だった。また、Fig.3-2 には溶接電流とナゲット径の関係を示す。ナゲット径も溶接電流が増加すると大きくなっている。

##### 電極加圧力の影響

Fig.3-3 に電極加圧力の継手強度に及ぼす影響を示す。電極加圧力を増加させると継手強度は減少している。電極加圧力を 3.92kN から 5.88kN にした場合では、1.96kN から 3.92kN に増加させた場合より継手強度の減少が激しい。Fig.3-4 にナゲット径におよぼす電極加圧力の影響を示す。こちらも継手強度と同じ傾向で、電極加圧力の増加に伴ってナゲット径は減少しており、特に電極加圧力を 3.92kN から 5.88kN にした場合がナゲット径の減少が激しい。

##### 通電時間の影響

Fig.3-5 は通電時間と継手強度の関係のグラフである。溶接電流および電極加圧力を一定とした場合、通電時間 60ms から 120ms では増加する傾向にある。特に電極加圧力が 5.88kN では溶接電流 21kA で溶接不可能だったが、通電時間を長くすることによって溶接

可能になっている。しかし、通電時間を 120ms から 240ms まで変化させた場合では、継手強度はほぼ一定値を示した。Fig.3-6 にナゲット径におよぼす通電時間の影響を示す。ナゲット径においても溶接電流、電極加圧力が同じ溶接条件ならばほぼ一定の値を得られた。すなわち、他の溶接条件である溶接電流や電極加圧力ほど継手強度に影響をおよぼさない。また溶接時間を増加させると多少はナゲットが増加するが他の 2 条件と比べるとナゲット径に及ぼす溶接時間の影響が小さいという事が分かる。

#### 無処理の溶接性の検討

溶接電流の増加による継手強度およびナゲット径の増加については、ジュールの法則の  $H = R \times I^2 \times t$  ( $H$  ; 発熱量、 $R$  ; 電気抵抗、 $I$  ; 電流、 $t$  ; 時間) が影響していると考えられる。この式から分かるように溶接電流を大きくすると、発熱量は溶接電流の二乗で増大する。発熱量が増加すると大きなナゲットを形成ため継手強度が大きくなっていると考えられる。しかしながら継手強度およびナゲット径は溶接電流の 2 乗で成長してはいない。これは発熱の全てがナゲットの成長に寄与しているわけではなく熱伝導や冷却効果により熱の移動の影響であると考えられる。

電極加圧力の増加による継手強度、ナゲット径の減少では、電極加圧力を上げると水冷を行っている電極と被溶接材の接触面積が増加しそれに伴い溶接部の温度が上昇しにくくなっているのと、電極加圧力の増大に伴う通電路（接触部）寸法の拡大に起因していると考えられる。後者は具体的には発熱量  $H = R I^2 t$  を通電路径  $d$  で表してみる。まず固有抵抗が  $\rho$  [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] 断面積  $S$  [ $\text{cm}^2$ ] 長さ  $l$  [ $\text{cm}$ ] の金属材料を考えるとその抵抗  $R$  [ $\Omega$ ] は

$$R = \frac{\rho l}{S} \cdots (3-1)$$

となる。次に電流密度  $\delta$  [ $\text{A}/\text{cm}^2$ ] の式

$$\delta = \frac{I}{S} \cdots (3-2)$$

(3-2) を (3-1) に代入すると発熱量  $H$  は次のように書き換えられる

$$H = (\delta S)^2 \rho \frac{l}{S} t$$

$$= \rho \delta^2 S l t \cdots (3-3)$$

また  $\delta$  は単位面積に流れる電流の値なので

$$\delta = I / \frac{\pi}{4} d^2 \cdots (3-4)$$

となり、(3-4) を (3-3) に代入することにより

$$H = \rho \delta^2 S l t = \rho \left( \frac{I}{\frac{\pi}{4} d^2} \right)^2 S l t = \frac{16 \rho I^2 t}{\pi^2 d^4} S l \cdots (3-5)$$

を得る。

(3-5) 式を見ると発熱量  $H$  は通電経路  $d$  の 4 乗に反比例していることが分かる。電極加圧力を増加させた場合、溶接前加圧時の被溶接材と電極との接触面積が増加し、溶接時の通電径は電極加圧力の増加と共に増加する。すなわち、(3-5) 式より一定電流の条件下では高加圧力になるほど電流密度の減少により発熱量が低下し、継手強度が減少する事がわかる。Fig.3-3 の(a),(b)の電極加圧力が 5.88 kN の継手強度が 0 となっているように、溶接電流が小さい溶接条件では、電極加圧力を大きくすると発熱不足により溶接が満足に行われなくなってしまう。また、Fig.3-7 に電極加圧力に対する接触抵抗のグラフを示す。これを見ると電極加圧力の増加に伴って接触抵抗が減少している。電極加圧力によってアルミニウムの表面にある酸化皮膜が破壊されてしまうため接触抵抗値の減少に伴い発熱量も減少する。

溶接時間が他の溶接条件である溶接電流や電極加圧力ほど継手強度に影響をおよぼさない原因としては、板中の発熱量と電極への冷却損失（伝導損失）との釣り合いによって決まる溶融部の温度に起因する。アルミニウム材料は熱伝導率が高いので溶接後千分の数十秒で発熱量と冷却損失が平衡になってしまいそれ以上通電を続けても継手強度を大きくする事ができなくなると考えられる。しかし、細かく見ていくと、どの条件でも溶接時間 60ms から 120ms に関してはほぼ継手強度が上昇している。また、1.96kN と 5.88kN を比べると電極加圧力が小さい方が溶接電流の影響を受けて継手強度が上昇している。電極加圧力が小さいと前述した冷却効率が低くなり熱平衡に達するまでの時間が長くなるためナゲットを形成するエネルギーが増大し継手強度が大きくなると考えられる。溶接電流

が大きい時に継手強度が時間の増加に伴い大きくなり易くなるのも同じ原因でこちらは溶接電流値が大きいほうが発熱量において大きく冷却がこの発熱量に追いつくまでに時間がかかるからである。

### 継手強度とナゲットの関係

Fig.3-8 に継手強度とナゲット面積の関係を示す。ナゲット面積はナゲットを円と仮定し測定したナゲット径より算出した。Fig.3-8 より継手強度はナゲット面積にほぼ比例して増加していることが分かる。このことよりナゲット径を測定することにより、継手強度をある程度予測することが可能であるといえる。Fig.3-9 にナゲット径とせん断強度の関係を示す。ここでのせん断強度は継手強度をナゲット面積で除したものである。また、A1050 材のせん断強度は 63.7MPa である。ナゲットが大きいほどせん断強度が小さくなっているがこれはナゲットの大きさにより溶接部にかかる荷重が異なるため、せん断の状態が異なるためにこのようなせん断強度の差が出てきているものと思われる。しかし、Fig.3-8、Fig.3-9 よりナゲット面積から継手強度を推定する際にナゲットが大きくなるのに伴いせん断強度が減少する事はほとんど影響しないことが分かる。

### 3-2 ベーマイト処理供試材による結果

A1050 材の溶接電流とナゲット径の関係を Fig.3-10 に示す。Fig.3-10 の(a)はベーマイト処理時間 3 分、(b)は 5 分、(c)15 分、(d)は処理時間 25 分とした。この図よりベーマイト両面および片面処理を行った場合、無処理の場合と同様に溶接電流の増加に比例してナゲット径も増加していることが分かる。Fig.3-10 を見て分かるように、無処理の場合では溶接電流 12 k A で電極加圧力 1.96kN、3.92kN での両条件において溶接出来なかった。これに対してベーマイト処理を行ったものは、どの電極加圧力でも 10 k A の溶接電流で溶接が可能であった。また、ベーマイト両面処理においては図の上部のように溶接電流 15 k A 以上でナゲットが飛び散ったのに対し、片面処理の方は溶接電流値を 27 k A にしてもナゲットの飛び散りは発生しなかった。Fig.3-11 に電極加圧力とナゲット径の関係を示す。電極加圧力において、ナゲットの飛び散った条件をのぞく、健全な溶接条件では無処理の場合に比べてナゲット径が大きくなった。無処理の場合では溶接可能な条件に対し、電極加圧力を上げていくとナゲット径は減少しているのがわかる。一方、ベーマイト処理をし

た条件では電極加圧力上昇に対して、ナゲット径が著しく低下する減少はみられなかった。

Fig.3-12 に A1050 ベーマイト両面処理での処理時間とナゲット径の関係を示す。溶接電流 12 k A 以下では無処理の場合では溶接できないがベーマイト処理をすることによって溶接可能になる。処理時間が短いときには無処理の場合よりもナゲット径は大きくなっている。しかし処理時間が 5 分を超えるとナゲット径は急激な成長はみられない。Fig.3-12(b) に関しては処理時間を 15 分としたときナゲット径が 5 分に比べ小さくなっている。(b) においては処理時間 3 分より大きくなるものはなかった。

Fig.3-13 に A1050 材のベーマイト両面処理におけるナゲット径のばらつきについて示す。無処理の場合に比べばらつきがかなり大きく出ている。溶接電流が大きくなるにつれてばらつきも大きくなっている。

Fig.3-14 に A1050 ベーマイト片面処理の処理時間とナゲット径の関係を示す。溶接電流 12 k A 以下では無処理の場合では溶接できないがベーマイト処理をすることによって溶接可能になる。ナゲット径は処理時間 5 分で成長しきってしまう事がわかる。5 分を超えるとあまり成長しない。

Fig.3-15 に A1050 ベーマイト片面処理におけるナゲット径のばらつきを示す。これを見ると (c) のグラフが無処理の場合に次いでばらつきがすくなかった。

### 3-3 ベーマイト処理による溶接性の向上

ベーマイト処理により同じ溶接条件でも無処理の場合より大きいナゲットが得られた理由として、ベーマイト処理を施すことにより接触抵抗値が増大したため、電流を流したときも同量の発熱量の増加が可能になったと考えられる。また、電極で加圧した部分以外ではベーマイト被膜による接触抵抗が破壊されず抵抗値が大きく、電流が流れにくくなり、通電経路が制限されることにより電流密度が上昇し発熱量が増大すると考えられる。

両面ベーマイト処理は、溶接直後に上部電極に試験片がくっついてしまう。試験片を取り除いた後電極を観察すると Fig.3-16 の様に電極がえぐれる電極損傷(ピックアップ)現象が発生していた。しかしながら、片面処理では電極汚損は無処理の場合と同じ程度しかおこらなかった。また無処理の場合のナゲットの写真 Fig.3-17 と両面処理のナゲットの写真 Fig.3-18 を比較することでわかるようにナゲットが試験片同士の真ん中ではなく上部電



極から下部電極にかけて形成されている。両面ベーマイト処理においては電極の劣化が著しく、こまめに電極を交換しないと試験片の溶接面に凹凸が出来てしまう。このことは、電極と試験片の間の接触抵抗も増加しているため、溶接中に電極接触面温度は溶接条件によっては、アルミニウムの融点まで上昇する。そのため、電極表面では銅とアルミニウムの共晶反応が生じ、電極汚損がおきやすくなるものと考えられる。そのときの試験片の様子を Fig.3-19 に示す。溶接面に凹凸ができてしまうこと、上部、下部の両電極の寿命が極端に短くなってしまうことなどから、実際の製品の生産現場においてベーマイト両面処理は利用するのは今の状況では難しい。

また、ナゲットが飛び散ってしまった様子を Fig.3-20 に示す。また、その断面を Fig.3-21 に示す。なお、溶融したアルミニウムが外へ出てしまったために出来たブローホールである。これをみると溶融したナゲット全体がおもてに飛び散る様子がわかる。このことは、両面処理では重ねあわせ面だけでなく、電極接触面の接触抵抗が無処理の場合に比べて増加しているために、片面処理と比べて試験片外表面(電極接触面)電極接触面での発熱が付加される事になる。そのため、重ねあわせ面から電極接触面までナゲット成長した状態で中チリと表チリが同時におこるときに、飛び散りがおこるものと考えられる。一方、片面処理では電極接触面の接触抵抗は無処理の場合と同じであるために電極接触面からの飛び散りがおこらず、高溶接電流においても溶接ができるものと思われる。ナゲット径におよぼすベーマイト処理した場合、同じ溶接条件における無処理の場合の結果と比べて大きくなっている。Fig.3-22 に A1050 両面処理のナゲットが飛び散る条件を、Fig.3-23 に A1050 片面処理のナゲットが飛び散る条件を示す。両面処理を施したものは処理時間 3 分、溶接電流 18kA でチリが発生し始めた。一方片面処理では溶接電流 27kA、処理時間 25 分でもチリは発生しなかった。

一方、ベーマイト片面処理ではこの現象が発生しなかった。片面処理では電極と試験片の接触面にベーマイト処理を施さなかったため電極－試験片間では無処理の場合と同様にあまり発熱しないためと考えられる。よって以降の実験ではベーマイト処理は重ね合わせ面のみ施すことにした。

ベーマイト両面処理試験片におけるスポット溶接時の通電状況を Fig.3-24 に示す。両面処理では試験片の密着面だけではなく電極との密着面も接触抵抗が増加しているためそこでも発熱が発生し、上部電極付近から下部電極付近にかけてナゲット高さが増加している。

またベーマイト処理の影響で接触抵抗が増加し、また、通電経路が狭くなっているので無処理の場合に比べ発熱量が増加している。ベーマイト片面処理試験片における通電状況は Fig.3-25 に示す。片面処理では電極と試験片の間の接触抵抗は無処理の場合と同じなのでナゲット高さは上がらないが、試験片同士の密着面は両面処理と同様に接触抵抗値が増大し、通電経路は狭くなるので発熱量が増すと考えられる

## 第4章 アルミニウムの低電流スポット溶接

### 4-1 ベーマイト処理の効果

#### ベーマイト皮膜の生成量

ベーマイト処理の効果を検討するためにアルミニウム箔の表面に皮膜（ベーマイト： $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  もしくは  $\gamma\text{-AlOOH}$ ）を生成させ、ベーマイト生成量と処理時間の関係を調べた。純アルミニウム箔のベーマイト処理についての結果を Fig.4-1 に示す。グラフから分かるように無処理の場合と比較するとベーマイト処理をした試験片では、微量ながらも質量が増加している。この質量を  $1\text{ m}^2$  辺りの増加率に換算したものを Fig.4-2 に示す。なお、縦軸は常用対数で示す。これを見ると処理時間 0～4 分の間では処理時間に伴ってベーマイト皮膜重量が急激に増加している。そして 5 分間のベーマイト処理では 1 平方メートル当たり約  $0.4\text{ g}$  質量が増加している。しかし、ベーマイト処理時間が 5 分を過ぎると増加率は著しく収縮していく。また、左の軸はベーマイト ( $\text{AlOOH}$ ) の密度を  $3.07\text{ g/cm}^3$  として計算した膜厚について示す。これを見ると収束し始めるベーマイト皮膜の厚さは約  $1.2\text{ }\mu\text{m}$  となっている。以上のことから、純アルミニウムにおいてベーマイト処理の時間は 5 分程度で十分被膜が形成されているといえる。

#### ベーマイト処理による接触抵抗の増加

次にベーマイト皮膜の生成による接触抵抗値の変化を調べた。上下が曲率半径  $25\text{ mm}$  の R 形の電極を使用 (RR) したときのチップ間電気抵抗値のグラフを Fig.4-3 に示す。また、Fig.4-4 に上下の電極に端面が平坦な F 形を使用 (FF) したときの実験結果を示す。両図とも、左図 (a)、(c) は接触電気抵抗の変化を電極加圧力に対して示し、右図 (b)、(d) はベーマイト処理時間に対して示した。なお、Y 軸は常用対数で示す。

Fig.4-3、4-4 を比べると電極形状において、無処理の場合は電極形状が RR の方が接触抵抗はやや高い傾向にある。ベーマイト処理を施したもののでもその傾向はうかがえる。しかしながら、ベーマイト処理を施すことで接触抵抗値のばらつきがとて大きくなってしまった。電極加圧力による影響では、Fig4-3(a)、4-4(c) から分かるように無処理の場合では電極加圧力の上昇に反比例して接触抵抗値は減少する。ベーマイト処理においても電極加圧力と接触抵抗の関係は同じ傾向にある。

電極が RR、FF の両条件において、無処理の場合では接触電気抵抗は約  $0.1\text{m}\Omega$  であるのに対し、ベーマイト処理を施したものはどの処理時間、どの電極加圧力でも接触電気抵抗値が  $10\sim 100\text{m}\Omega$  となっており、受取状態と比べると  $100\sim 1000$  倍となっている。また Fig4-3(b)、4-4(d)より、ベーマイト処理時間を長くすることによって接触抵抗値は上昇する傾向にあるが、一番傾きが大きいのは無処理からベーマイト処理時間 1 分までの間である。

以上の結果より、電気抵抗率が小さく抵抗溶接性の悪いアルミニウム材料において接触抵抗値を 100 倍以上にするベーマイト処理を利用することで低電流溶接は可能になると考えられる。

接触電気抵抗の測定において、F 形電極と R 形電極では電極が試験片と接触する面積が異なる。加圧のかかる面積が F 形電極のほうが大きいため、より多くの接触抵抗が破壊されたためであると考えられる。また、電極加圧力の増大によって A1050 材の表面にある酸化皮膜の破壊の度合いも増加するため接触電気抵抗値が減少すると考えられる。

ベーマイト生成重量測定と接触抵抗測定の実験結果はほぼ対応している。4-1 のベーマイト被膜の重量測定実験においては処理時間が約 5 分まで生成量は増加していた。一方、接触抵抗値は処理時間 1 分ですでに無処理の場合の 100 倍以上に増大している。よってベーマイト処理時間が 0~1 分の間は接触電気抵抗、ベーマイト被膜量の両方が急激に増加していき、処理時間 1~5 分までは収束点付近までの質量、接触抵抗値が増加していき、それ以降の処理時間では両方とも微量な増加をするものと言える。Fig.4-2、Fig.4-3 よりベーマイト処理を施すことで無処理のアルミニウムよりも低電流で一定のナゲット径を得ることができた。

以上の結果を基に軟鋼用のスポット溶接機におけるアルミニウム材料の溶接について検討した。溶接性はナゲット径を計測することで確かめた。

#### 4-2 ベーマイト処理を適用したアルミニウムの低電流溶接

本実験では空気加圧式で電源が単相交流式で最大溶接電流  $10\text{kA}$  のスポット溶接機を使用した。この溶接機では上部に設置されたエアシリンダーに空気圧をかけて、その力が電極まで伝わり被溶接材を加圧する方式である。実験条件を Table4-1 に示す。基準溶接

実験では Table4-1(a)の 4 個のパラメータのうち、3 個の条件を太文字で固定し、残りのパラメータを変化させて実験をした。また、全体実験では Table4-1(b)の溶接条件を組み合わせて溶接した。また、溶接中の電極変位量、溶接電流、チップ間電圧、電極加圧力については以下のような結果を得ることができる。

#### 溶接条件の測定

2-2 に示したように溶接中の各条件の変化を測定する装置を取り付けたことにより Fig.4-5 に示す波形が得られるようになった。この溶接機では溶接時間の設定がサイクル表示となっている。なお、波形の 1 サイクルは 1/60 秒である。

Fig.4-5(a)は電極変位量のグラフである。溶接初期から熱膨張により電極が上昇し、溶接電流が流れ終わると発熱がなくなり電極は下がる。溶接の前後で電極変位量が変わるのは熱により軟化したアルミニウムが電極加圧により押し込まれるためと考えられる。

Fig.4-5(b)は溶接電流のグラフである。溶接制御装置による設定が定電流制御となっているため同じ溶接電流では、ほぼ同じ形の波形になる。溶接開始後 1 サイクル、あるいは 1 サイクルから 2 サイクルにおける溶接電流値のピーク値が、それ以外のサイクルのピーク値を下回っている。これは溶接電流の流し初めのために立ち上がりでの電流が流れにくくなっているためと考えられる。

Fig.4-5 (c)はチップ間電圧を表している。チップ間電圧も溶接電流と同じように、全体的に一定の値となっている。

Fig.4-5(d)は電極加圧力のグラフである。電極加圧力の測定では溶接電流の影響で雑音が入ってしまっている。電極加圧力においては溶接中の変化は得られなかった。一方で、Fig.4-5(a)の電極変位量が大きく変動している。これは加圧方式が圧縮空気式なので、電極に力が掛かっても空気の圧縮により吸収されてしまうためと考えられる。圧縮方法がサーボモーター式ならばこれとは逆で、電極加圧力が大きく変化し電極変位量が変わらないという結果が得られるのではないかと考えられる。

#### 4-2-1 ベーマイト処理による低電流溶接

基準の溶接条件を設定して単相交流スポット溶接機で溶接した結果をそれぞれの溶接条件に対するナゲット径で示す。基準条件は溶接電流 8kA、電極加圧力 2.649kN、溶接

時間 10 サイクル、ベーマイト処理時間 5 分である。なお、処理時間は Fig.4-6 から 5 分に設定した。また、ベーマイト処理を行うことにより無通電エラーによる溶接不可現象が発生している。その状況はグラフ下部のエリアに示す。

ベーマイト処理時間の影響を調べるため溶接条件を溶接電流 8kA、電極加圧力 2.649kN、溶接時間 10 サイクルで固定し、ベーマイト処理時間を変化させて溶接した。ベーマイト処理時間に対するナゲット径を Fig.4-6 に示す。無処理の場合ではナゲット径が 1mm なのに対し、ベーマイト処理を 1 分することで、平均で 2 倍以上のナゲット径を得ることができた。しかしながら、処理時間 5 分と 60 分では、処理時間を 12 倍しても約 1.2 倍のナゲット径しか得られなかった。処理時間 5 分以降ではナゲットの成長率は収縮しており、ベーマイト処理時間は 5 分で十分であるといえる。この結果は三相インバーター式の溶接機と同じ傾向である。また、ベーマイト処理時間 5 分から無通電エラーが発生し始めた。無通電エラー発生率は 5 分で 18%だったが 60 分では 25%だった。以上の結果から単相交流式の溶接機でも A1050 材におけるベーマイト処理時間は 5 分程度で十分であるといえる。

次にベーマイト処理による溶接電流の影響を検討するため、電極加圧力を 2.649kN、溶接時間を 10 サイクルで固定し、無処理の場合とベーマイト処理時間 5 分の条件において、溶接電流を 3~10kA まで変化させ溶接した。実験結果を Fig.4-7 に示す。無処理の場合では 6kA までは溶接しても 2 枚の試験片が接合されずナゲットも確認できなかったが、7kA からナゲットが確認できた。それ以降は溶接電流の増加に比例してナゲット径は増大し、溶接電流を 1kA 上昇させると約 0.3mm のナゲット径の上昇が確認できた。一方、ベーマイト処理時間 5 分の試験片においては溶接電流 5kA でも溶接が可能だった。ベーマイト処理を施したものでも無処理の場合と同様に、溶接電流に比例してナゲット径は成長している。また、どの条件でも無処理の場合の 2 倍以上のナゲット径を得ることができ、ベーマイト処理を施すことで、溶接電流を 1kA 増加させるとナゲット径が約 0.5mm 上昇した。

Fig.4-8 は溶接電流 8kA、溶接時間 10 サイクル、処理状況は無処理の場合とベーマイト処理時間 5 分で固定し、電極加圧力と電極を変化させて溶接したグラフである。電極加

圧力は  $0.756\text{kN} \sim 4.395\text{kN}$  の範囲で変化させ、電極形状は上下部電極が R 形、上部電極が R 形で下部電極が F 形、上下の電極が F 形電極の組み合わせで溶接した。電極加圧力の影響については、無処理の場合では電極加圧力が増加するに従ってナゲット径は減少する傾向にあり、電極加圧力を  $1000\text{N}$  増加させるとナゲット径は  $0.25\text{mm}$  減少した。また、この条件では  $2.649\text{kN}$  以上の電極加圧力で、電流を流しても接合しなかったものがあった。ベーマイト処理を 5 分間施したものは、ほぼ一定のナゲット径が得られた。しかしながら、ベーマイト処理を施すことにより無通電エラーが発生した。無通電エラーは電極加圧力にかかわらず発生している。

次に電極形状の影響について検討する。無処理の場合におけるナゲット径は電極形状が RR、RF、FF の順に減少している。接触抵抗の測定において、上下の電極形状が RR よりも FF の組み合わせの方が接触抵抗値において大きかったことからみても、発熱量においては RR の組み合わせが FF の組み合わせより大きいといえる。ベーマイト処理を施したものは電極形状の影響をあまり受けず、どの条件でもほぼ一定のナゲット径が得られている。また、ベーマイト処理を施したもので、無通電エラーは電極形状が RR の組み合わせと RF の組み合わせで発生している。FF の組み合わせにおいては発生しなかった。

次に溶接電流  $8\text{kA}$ 、電極加圧力  $2.649\text{kN}$  で無処理の場合とベーマイト処理時間 5 分における溶接時間の影響について検討した。その結果を Fig.4-9 に示す。無処理の場合では 2 サイクルまでは溶接電流を流しても接合できず、ナゲットが確認できたのは 3 サイクルからだった。しかし、溶接時間を 5 サイクルまで長くしても接合できないものがあった。接合できたナゲット径は溶接時間に比例して増大しており、溶接時間を 1 サイクル長くすると約  $0.125\text{mm}$  ずつ成長して行く。溶接時間を 3 サイクルから 10 サイクルまで増加させると約 4 倍のナゲット径を得た。一方、ベーマイト処理を施したものは 1 サイクルから溶接が可能で、ナゲット径が  $2\text{mm}$  だった。しかしながら溶接時間を増加させていってもナゲット径は大きく成長するわけではなく、1 サイクルごとに約  $0.06\text{mm}$  の成長量であり、1 サイクルから 10 サイクルに 10 倍してもナゲット径は 1.2 倍しか成長しなかった。この結果から無処理の場合では溶接時間を増加させるとナゲット径も増加する傾向にあるが、ベーマイト処理を施したものは溶接時間にあまり影響されず、ごく短時間で溶接が可能であるといえる。

以上の結果によりアルミニウム材料にベーマイト処理を施すことで無処理の場合よりも溶接電流の低電流化、溶接時間の短縮化が出来ると言える。しかしながらこれらの実験結果は溶接電流 8kA、電極加圧力 2.649kN、溶接時間 10 サイクル、ベーマイト処理時間 5 分を基準とした実験結果である。よって溶接条件全体の傾向を検討するために溶接条件を拡大して実験した。

Fig.4-10 は溶接電流に対するナゲット径のグラフである。無処理の場合およびベーマイト処理をほどこしたものはどの条件でも溶接電流の増加に比例してナゲット径は成長する。無処理の場合では、溶接時間 1 サイクルでは溶接電流を 10kA まで増加させても溶接できたのは 50%以下であり、そのナゲット径も微量であった。5 サイクルの溶接時間では 6kA において 0.756kN でナゲットが確認できた。それ以上の電極加圧力では溶接できなかったが、溶接電流を 8kA まで増加させることでナゲットが確認できた。溶接時間 10 サイクルでも 5 サイクルと同様に 6kA でナゲットが確認できたのは電極加圧力が 0.756kN だけだった。一方、ベーマイト処理を施すことにより全ての条件で溶接電流 6kA においてナゲットが確認できた。また、全てのベーマイト処理を施したものは、同溶接条件において無処理の場合の 1.5 倍以上のナゲット径を得ることができた。電極加圧力 0.756kN において、ベーマイト処理をして溶接電流 8kA で溶接した時に得られたナゲット径は、無処理の場合の溶接電流 10kA に相当する。2.649kN では、処理を施した状態の 6kA が無処理の場合の 10kA と同等のナゲット径を得ることができ、4.395kN では処理を施した状態の 6kA が無処理の場合の 10kA 以上の溶接電流に相当する。なお、無処理の場合の溶接時間 1 サイクルにおいては、電極加圧力が 2.649kN、3.495kN の両条件では溶接電流 10kA でもナゲットが確認できなかったのもベーマイト処理を施すことによって 10kA 以上の溶接電流に相当すると考えられる。

Fig.4-11 は電極加圧力とナゲット径の関係を示したグラフである。無処理の場合では電極加圧力を上昇させるとナゲット径は現象する傾向にある。また、溶接時間を長くした方が電極加圧力の影響を受けやすい傾向にある。一方、ベーマイト処理を施したものについては電極加圧力を上昇させてもナゲット径が減少する傾向が見られず、ほぼ横ばいとなっている。よって電極加圧力を上昇させるほど無処理の場合とベーマイト処理を施したもののナゲット径の差は大きくなっていく。また、溶接時間 1 サイクルおよび 5 サイクル 6kA、



10kA においてはナゲット径が増加しているものもある。しかし、10 サイクルにおいてはナゲット径の増加は認められなかった。以上の事よりベーマイト処理を施すことにより電極加圧力の影響をあまり受けずに溶接することができ、影響を受けても電極加圧力が 4.395kN までならナゲット径は減少しない。

Fig.4-12 に示すのは溶接時間の影響に対するナゲット径のグラフである。全条件にわたって溶接時間を長くすればナゲット径は増大した。無処理の場合では、溶接時間 1 サイクルではどの条件でも溶接ができず、さらに電極加圧力が 2.649kN と 4.395kN おいて、溶接電流 6kA では溶接時間を 10 サイクルまで延長してもナゲットは確認できなかった。一方、ベーマイト処理を施したものはどの条件でも 1 サイクルからナゲットが生成されており、そのナゲット径は 1mm 以上だった。これは無処理の場合の溶接時間 5 サイクルと同様もしくはそれ以上となっている。また、電極加圧力 0.756kN では無処理の場合の 10 サイクルとベーマイト処理を施した試験片の 1 サイクルがほぼ同じナゲット径となった。電極加圧力 2.649kN および 4.395kN においては溶接時間 10 サイクルの無処理の場合よりも、溶接時間 1 サイクルにおけるベーマイト処理を施した試験片のナゲット径が大きい。ベーマイト処理を施すことで溶接電流、電極加圧力が同じでも、無処理の場合よりも短時間で同等かそれ以上の大きさのナゲットを得ることができる。

#### 4-2-2 アルミニウム抵抗スポット溶接における低電流化の検討

アルミニウムのスポット溶接において、無処理の場合では溶接できなかった条件でも、ベーマイト処理することにより低溶接電流で接合が可能になった、またはナゲット径が大きくなった理由として、4-2 の実験より接触抵抗がベーマイト処理による被膜を生成したことで、無処理の場合の 100 倍から 1000 倍にまで増加したことによる溶接初期の発熱量の増加が上げられる。接触抵抗は 1/2 サイクルから 1 サイクルまでに消滅するので、全体発熱量における接触抵抗がもたらす発熱量は大したものではない。しかしながら、アルミニウムのような固有抵抗値が低い材料では、接触抵抗による発熱、それによってもたらされる温度上昇、そしてその結果として得られる固有抵抗値の増加が溶接における大きな要素となる。ベーマイト被膜による接触抵抗によって、その極短時間の間に板一板間の温度をアルミニウム材料の融点にまで上昇させる。接触抵抗が消滅してもアルミニウムの温度

が融点近傍まで上昇しているためにアルミニウム材料の固有抵抗値が増加し、発熱量が大きくなる。この繰り返しによってナゲットの生成が可能になると考えられる。無処理の場合では接触抵抗値が小さいために溶接初期における板－板間の温度が十分上昇しないので低電流で溶接が出来ないといえる。

Fig.4-13 は溶接電流 8kA、電極加圧力 2.649kN、溶接時間 10 サイクルにおける無処理の場合(a)とベーマイト処理を 5 分間施した溶接電流(b)のグラフである。両者に大きな違いはないことがわかる。これは溶接機の制御装置が定電流制御なためである。Fig.4-14 はその時のチップ間電圧を示す。溶接電流とは異なり、チップ間電圧のグラフではベーマイト処理を施した電圧結果(d)が無処理の場合の結果(c)に比べ溶接開始から 1/2 サイクルまでにおいてチップ間電圧が大きい。チップ間電圧のピーク値では無処理の場合が約 0.3V なのに対し、ベーマイト処理を施したものは 2 倍の約 0.6V となっている。チップ間電圧が増大した理由として考えられるのは、ベーマイト処理を施すことによって接触抵抗が増大し電流が流れにくくなったが、溶接機が定電流制御なため電流値を増加させるためにはチップ間電圧を増加させるしかない。そのため抵抗値が増大しても溶接電流値はあまり変わらず、その代わりにチップ間電圧値を上昇させることで同じ値の溶接電流を流したと考えられる。また、ベーマイト処理を施した試験片のチップ間電圧が、無処理の場合とほぼ同じ値まで減少するのは、ベーマイト被膜による絶大な接触抵抗がアルミニウムの溶融によってその時間に破壊させるためであると考えられる。

Fig.4-15 に示したのは溶接電流 8kA、電極加圧力 2.649kN、溶接時間 10 サイクルにおける無処理の場合とベーマイト処理を 5 分間施した試験片の投入エネルギー(H)を比較したグラフである。投入エネルギー(H)=溶接電流(I)×チップ間電圧(V)×時間(s)により計算した。無処理の場合とベーマイト処理を施した試験片を比べるとベーマイト処理を施した試験片の消費電力が無処理の場合のそれを上回っている。また、接触抵抗が消滅したと考えられる 1/2 サイクル以降も発熱量の差は大きくなっていく。ベーマイト被膜による接触抵抗により溶接初期に被溶接材の重ね合わせ面の温度が上昇する。材料の固有抵抗は以下の式で表すことが出来る。

$$R = \frac{2L}{S} \{ \rho_0 \times (1 + \alpha \times \Delta T) \} \quad (\text{式 5-1})$$

L : 板厚 [mm]

S : 通電面積 [mm<sup>2</sup>]

$\rho_0$  : 固有抵抗 [ $\Omega \text{ cm}$ ]

$\alpha$  : 抵抗の温度係数 [ $1/^\circ\text{C}$ ]

$\Delta T$  : 温度上昇 [ $^\circ\text{C}$ ]

アルミニウム材の固有抵抗の温度係数は  $4.0 \times 10^3 [1/^\circ\text{C}]$  である。この式より、固有抵抗は温度によってその値が変化し、温度上昇によって固有抵抗も増加するので、無処理の場合よりベーマイト処理を施した方が固有抵抗値も高くなり、その結果発熱量の総量も大きくなっている。

また、ベーマイト処理を施すことで溶接電流 **6kA**、**0.756kN** から **4.395kN** の電極加圧力において、1 サイクルで溶接が可能だった。無処理の場合では 1 サイクルでは **10kA** でもナゲットが確認できなかったことから、ベーマイト処理を施すことで低電流溶接だけでなく、短時間溶接も可能になったといえる。短時間溶接では特に接触抵抗が重要となる。先ほど述べたように接触抵抗は長くても 1/2 サイクルで消滅してしまうが、接触抵抗が大きければ極短時間でアルミニウム材料の溶接中心部を融点まで上昇させることが出来る。特にアルミニウム材料の場合、融点が低いため接触抵抗が極端に大きければそれによる発熱で極短時間のうちにナゲットを形成出来るためである。

無処理の場合の溶接電流 **8kA**、電極加圧力 **2.649kN**、溶接時間 1 サイクルにおいて溶接可能な場合とナゲットが確認できなかった試験片がある。このことは水冷電極の冷却によって発熱された熱が移動するため、アルミニウムを溶融させるほど温度が上昇しなかったと考えられる。よってこの条件における溶接できなかった場合を参考に冷却により移動したエネルギーを換算し、全投入エネルギーから引いたものをナゲット生成に使われた有効エネルギーとした。冷却により消失されるエネルギーは

$$y=1020x$$

y: 冷却による消失エネルギー

x: 溶接時間(サイクル  $\times$  1/60)

とした。なお、この式および 1020 という値は実験から求めた。

Fig.4-16 にはナゲット径に対する全投入エネルギーを示す。縦軸にはナゲット径を示し、Fig.4-16(a)の横軸は投入した全エネルギーを示す。無処理の場合では、全投入エネルギーを

大きくなれば決してナゲットができるわけではない。予備実験において溶接電流 6kA、溶接時間 30 サイクルの条件で実験したがナゲットはできなかった。そこで Fig.4-16(b) では冷却を考慮した有効エネルギーを示す。エネルギーが負の領域は全投入エネルギーと消失エネルギーの差が負になった条件であり、この領域にプロットしてあるのは、無処理のナゲットが確認できなかった条件のみであった。ナゲットが確認された条件は冷却を考慮した有効エネルギーが全て正の領域に存在している。Fig.4-16(b)の場合は冷却を考慮した有効エネルギーに比例してナゲット径が増加する傾向にある。ベーマイト処理を施した状態においても全投入エネルギーの増加に対するナゲット径の増大は認められない。一方、冷却を考慮した有効エネルギーに対しては、エネルギーが増大するに従ってナゲットの下限値が成長する傾向となっている。全体を見るとナゲット径が無処理の場合よりグラフの右側にシフトしている。これは同じ溶接条件でもベーマイト処理をすると発熱量が増えたためであると考えられる。また、上限値に関しては一定となっている。また、ベーマイト処理を施した試験片は無処理の場合に比べてばらつきが激しい。これはベーマイト処理によるナゲット径のばらつきである。これは前述したようにベーマイト被膜が一様にできないため同じエネルギーを投入しても接触抵抗に違いがありナゲット径にばらつきが出たと考えられる。

Fig.4-17に Fig.4-6の溶接条件におけるベーマイト処理時間を変化させた場合の全投入エネルギー(a)と冷却を考慮した有効エネルギー(b)を示す。投入した全エネルギーに大きな差はなく、ややベーマイト処理を施した状態が大きい。また冷却を考慮してもその傾向は変わらない。しかしながらこのグラフは投入したエネルギーの最終値なので微少時間における傾向はみられない。一方 Fig.4-18 には同条件における有効エネルギーに対するナゲット径を示す。投入したエネルギーが同じでもナゲット径には差がある。これは後述するが、接触抵抗によりナゲットが生成されるため熱影響部が大きくなり、その結果投入エネルギーが増加したと考えられる。

Fig.4-19は Fig.4-7と同じ溶接条件での溶接電流の変化に対する投入エネルギーを示す。Fig.4-19(a)の縦軸は全投入エネルギーで Fig.4-19(b)の縦軸は冷却を考慮した有効エネルギーである。(a)より、当然ながら溶接電流が増加すると投入エネルギーも増加しているが、同じ溶接電流ではベーマイト処理を施した方が投入したエネルギーは多い。また、Fig.4-19(b)は冷却を考慮しているが、冷却による損失エネルギーは同じ値なので上図が全体に下がっただけである。ナゲットが生成されることにより、アルミニウムの固有抵抗値が上昇するためチップ間電圧が上昇する。よってナゲットができると投入エネルギーも上昇する。このこ

とから熱影響部の領域が大きいほど冷却された損失エネルギーとの差が大きくなる。また、Fig.4-20 のグラフは同溶接条件におけるナゲット径に対する冷却を考慮した有効エネルギーを示す。無処理の場合に対してベーマイト処理を施した状態が全体的に右にシフトしているが、そのことを考慮するとこのグラフは Fig.4-7 に示す溶接電流とナゲット径のグラフに似た形になっている。無処理の場合は溶接電流に比例して有効エネルギーが大きくなっている。一見有効エネルギーの最終値は同じなのにナゲット径に差があるように見えるが、溶接電流が同じ条件では明らかにベーマイト処理を施した状態が無処理よりも有効エネルギーが大きい。ベーマイト処理と無処理で溶接条件は違うが最終的に同じ量のエネルギーを投入しているにもかかわらずナゲットの大きさが異なる、または溶接できない理由として以下の事が考えられる。ベーマイト処理を施した状態は無処理の場合より溶接初期において、投入したエネルギーの多くが接触抵抗による発熱に使われる。この発熱により被溶接材の温度が上昇し、固有抵抗値が増加する。溶接初期の微少時間における投入エネルギーには大きな差があるが、無処理の他の条件と比べると、設定した溶接電流が大きい。その結果、投入エネルギーの最終値が同じになり、見かけは同じエネルギーを投入しているにもかかわらずナゲットの生成に差ができた。また、この現象によりベーマイト処理を施した状態が無処理に比べて全体的にグラフの右方向にシフトした。

Fig.4-21 に示すのは Fig.4-8 における電極 R-R の場合の電極加圧力に対する全投入エネルギー(a)と冷却を考慮した場合の有効エネルギー(b)のグラフである。無処理の場合は電極加圧力が上昇するに従って全投入エネルギーが減少していく。これは電極加圧力が上昇するとナゲットが成長しづらくなるために熱影響部が少なくなり、投入エネルギーも少なくなる。一方ベーマイト処理を施した状態ではほぼ一定の値を示している。ナゲット径の結果からもベーマイト処理を施すと電極加圧力の影響を受けにくいことがわかっており、よって熱影響部はほぼ一定となるので投入したエネルギーもほぼ同じ値になった。Fig.4-22 に示すグラフは同条件における冷却を考慮した有効エネルギーとナゲット径の関係である。無処理の場合は電極加圧力の上昇に従って有効エネルギーが減少し、ナゲット径も減少する傾向にある。一方、ベーマイト処理を施した状態では有効エネルギー 130J、ナゲット径 2.5mm の領域に集まりつつある。これによりベーマイト処理を施した状態では、冷却を考慮した有効エネルギーとナゲット径がほぼ同一になることがわかる。

次に Fig.4-9 と同条件における全投入エネルギーと冷却を考慮した有効エネルギーに対する溶接時間の影響を Fig.4-23 に示す。(a)が全投入エネルギーと溶接時間の関係で、(b)が冷却

を考慮した有効エネルギーの場合のグラフである。溶接時間を長くすると当然投入エネルギーは増加する。全ての条件においてベーマイト処理を施した状態が無処理の場合よりエネルギーが大きく Fig.5-9 と同じ傾向にある。しかし、(b)を見ると無処理の場合は 7 サイクルから冷却を考慮した有効エネルギーが一定になりつつあるのがわかる。また、予備実験において同溶接条件において溶接時間 30 サイクルで溶接しても形成されたナゲット径は約 1.2mm だったことから、アルミニウム溶接の場合、溶接時間を長くしても冷却を考慮した有効エネルギーとナゲット径は溶接時間 7~10 サイクルで収束する傾向にあることが分かる。また、Fig.4-24 は同条件における冷却を考慮した有効エネルギーとナゲット径の関係である。両条件において、冷却を考慮した投入エネルギーに比例してナゲット径が大きくなるのがわかる。また、投入した全エネルギーが同じでもベーマイト処理を施した状態が無処理の場合のナゲット径を上回っている。このグラフに関してもベーマイト処理を施した状態が全体的に右にシフトしているのは、溶接電流の場合と同じ理由であると考えられる。

以上の結果からベーマイト処理を施すと同溶接条件においては全投入エネルギー、冷却を考慮した有効エネルギーの両条件において無処理の場合を上回っており、ナゲット径も大きくなる。また、投入したエネルギーが同じなら同じ径のナゲットができるわけではなく、溶接初期の投入エネルギーによる発熱が大きく影響を及ぼしているといえる。

次にベーマイト被膜による通電回路への影響について検討する。接触抵抗の被膜が破壊されるようすを Fig.4-25 に示す。この接触抵抗が電極加圧力によって破れることにより通電回路ができるが、それが無処理の場合のものと比べて小さいので電流密度が上がり発熱量が増加すると考えられる。前述したが発熱量は通電回路  $d$  の 4 乗に反比例するため通電回路が小さいほど局所的な集中発熱が引き起こされる。よってベーマイト被膜により通電回路が制御されることも要因の 1 つと考えられる。

Fig.4-26 に中チリが発生したときの電極変位量(a)、溶接電流(b)、チップ間電圧(c)の波形について示す。本実験においてチリが発生したのはベーマイト処理を施した試験片のみであった。チリが発生するのはベーマイト被膜による高い接触抵抗値がある溶接初期の、チップ間電圧がピーク値およびピーク値後で発生している。また、チリが発生する前のチップ間電圧は約 0.7V となっており、これは無処理のチップ間電圧の 2 倍以上となっている。このことからベーマイト処理による極小さな通電回路の形成、および接触抵抗値の増

加により発熱量が増大したため試験片表面が融点を超えてしまい、ナゲットが飛び散ると考えた。また、熔融金属が飛散するとナゲットの一部が空洞化してしまうのでチップ間電圧が高くなると考えられる。また、電極変位量においては通常の溶接では熱膨張のため上昇する傾向にあるがチリが発生すると下がってしまう。この現象についてもナゲットに空洞ができ、電極加圧によってその部分が押し込まれるために電極が下がるのである。そしてチリ発生後は空洞がなくなり電流が流れるため熱膨張によってまた電極は上昇していく。

一方で溶接電流が流れないときに発生する無通電エラーの時の溶接電流 Fig.4-27 (a)とチップ間電圧 Fig.4-27 (b)を示す。無通電エラーが発生するのは、溶接電流が流れない場合に、制御装置が溶接を強制的に中止させるものである。無通電エラーはこのような波形になっており、3 サイクルチップ間電圧を掛けても溶接電流が流れなかった場合は溶接が中止される。本実験では無通電エラーが発生した条件は、3 分以上ベーマイト処理を施した条件のみであった。また、通電エラーが発生する確率は 10%~50%と差があった。このことから溶接部において、ベーマイト処理により電極加圧でも破壊できないほど強い接触抵抗ができることがあるが、ベーマイト被膜が一樣でないため発生率は一定ではないと考えられる。

ベーマイト処理をして溶接したものは無処理の場合の試験片を溶接したものよりナゲット径のばらつきが大きかった。以上のことからベーマイト処理における被膜生成は様にできるものではなく、ある部分から徐々に生成され、そして全体に広がっていくものだと考えられる。また、この被膜生成過程のばらつきがナゲット径のばらつきになるものである。

Fig.4-28 は溶接電流 8kA、溶接時間 10 サイクルにおける電極変位量を変化させたときの電極の変位量について、雑音をフーリエ変換にて消去したグラフである。なお、グラフ背面に描かれているのが雑音を消さない状態の電極変位量であり、グラフ上部に示してあるのは同溶接条件の溶接電流波形である。どの条件でも溶接終了時における電極の位置が溶接前よりも下がっている。電極加圧力 0.756kN (a)、2.649kN (b)では溶接電流を流すと電極は上がる。被溶接材は発熱により熱膨張しようとするが、その周囲は冷たい母材で囲まれているためナゲット径の方向には膨張できず、上部へと膨張使用としたものと考え

られる。電極加圧力が低い条件で電極が上昇したのは、この熱膨張による電極を上げる力が電極加圧力の力を上回ったためであると考えられる。また、同電極加圧力において無処理の場合では溶接電流を流す前後での差が約  $30\ \mu\text{m}$  であるのに対し、ベーマイト処理を施したものは約  $100\ \mu\text{m}$  下降した。一方、電極加圧力  $4.395\text{kN(c)}$  では、熱膨張による電極を押し上げる力より加圧する力が大きいので熱膨張による電極上昇を抑えており、溶接時間が進むに従って電極が下降している。無処理の場合では  $100\ \mu\text{m}$ 、処理をしたものは  $170\ \mu\text{m}$  も下降している。また、ベーマイト処理を施した試験片は無処理の場合に比べ電極上昇が抑えられており、溶接時間が進むにつれて電極変位が下がっていく。ベーマイト処理を施した試験片で電極が下降する理由として、熱伝導率の高いアルミニウム材料において、接触抵抗の存在している溶接初期で局部的に溶融し、周囲にもその高熱が伝わることによって広い範囲が軟化したことによるものだと考えられる。その結果溶接終了時において、無処理の場合よりもベーマイト処理をした状態の方が電極による窪みが深く、圧痕も大きくなる。また、溶接電流の通電終了と共に発熱がなくなり電極や熱放射によって冷却されるため、電極は急激に下がる。

無処理の場合においては電極加圧力増加に対してナゲット径は減少している。この原因としては電極で加圧して試験片表面の被膜を破壊するが、電極加圧力が低いと通電経路も小さくなる。そのため電流密度が増加して発熱量がふえるので低電極加圧力の方がナゲットにおいて大きくなると考えた。一方、ベーマイト処理を施したものでは電極加圧力の影響を受けにくくなっている。この原因として考えられるのはベーマイト被膜による接触抵抗値の増加による発熱量の増加と通電経路の制限によるものである。ベーマイト処理を施すことで接触抵抗が電極加圧力に破壊されにくくなり、十分な発熱を得ることが出来るようになったため影響を受けにくくなったと考えられる。

ベーマイト処理をした A1050 材は接触電気抵抗値において無処理の場合の 100 倍から 1000 倍の抵抗値を得た。よって接触抵抗による発熱量も約 1000 倍となり 1 サイクルで、また溶接電流についても  $6\text{kA}$  で溶接が可能になったと考えられる。

以上のことからアルミニウムの抵抗溶接における接触抵抗は、溶接初期の発熱における重要な要素と考えることができる。そして、この接触抵抗が存在することによって低電流、短時間溶接が可能になると考えた。そこで接触抵抗による温度上昇への影響を検討するた



めに一次元熱伝導の近似を BASIC にて計算した。上部電極－被溶接材－下部電極では上下で対象であると考え、上部電極と上側試験片のみを計算した。発熱量  $H = R \times I^2 \times t$  とした。また、電極は常に  $0^\circ\text{C}$  とし、溶接電流を流す時間は 0.05 秒とした。物性値は純アルミニウム(99.5%Al)のものを使用した。接触抵抗の影響を検討するため、存在時間は溶接開始より 0.01 秒間として、4-2-2 において観測された接触抵抗値を使用して計算している。固有抵抗値は式 5-1 を使用し、固有抵抗値は  $0.003\ \Omega$  で一定とした。なお、本計算には冷却や熱拡散、融点の潜熱などを入れていないので定性的なことのみに確認した。その結果を Fig.4-29 に示す。Fig.4-29(a)に示したものが無処理の場合の接触抵抗値を入れて計算したものである。そして Fig.4-29(b)、(c)はベーマイト処理を施した試験片の接触抵抗値を代入した。0.01 秒後の温度は接触抵抗値の増加と共に上昇し、それに伴って時間が経過しても温度が上昇している。接触抵抗値が無処理の場合の 100 倍である Fig.4-29(b)では 0.01 秒後の試験片の重ね合わせ面の温度が一番高くなっている。接触抵抗が 0.01 秒で消滅するにもかかわらず接触抵抗値に高い値を代入したものでは、時間が経過しても温度が上昇しており、接触抵抗を 1000 倍にまで増加させた Fig.4-29(c)では 0.01 秒後の温度は無処理の場合とは比べられないほど上昇している。

溶融部周辺のアルミニウムこの温度上昇による熱伝導を受け、温度が上昇していく。温度上昇のため固有抵抗値が増加するので通電によりさらに温度が上昇するという現象を繰り返し、ナゲットを拡大していくものと考えられる。実際にはあり得ないが、そのまま接触抵抗が存在し続けると温度は限りなく上昇していく。この計算と本研究の実験結果より接触抵抗、特にベーマイト処理による絶大な被膜抵抗はアルミニウム材料の低電流溶接において十分有効な手段なかつ、実用可能な方法であるといえる。

## 第 5 章 結言

純アルミニウム A1050 材にベーマイト処理を施し、スポット溶接を実施することで次の結果を得た。

1. 片面ベーマイト処理した試験片 A1050 の溶接面は受け取り状態を溶接したものと同じであり、電極に著しい劣化はなかった。しかし、両面ベーマイト処理をした A1050 材を溶接すると、電極汚損が激しく、溶接面には凹凸が出来る。

このことより以下は全て片面処理の場合の実験結果である。

2. 試験片の接触抵抗値はベーマイト処理を施すことにより、接触電気抵抗値が無処理の場合と比較して 100～1000 倍増加する。また、接触抵抗値はベーマイト処理時間 5 分でほぼ飽和する。
3. 単相交流式スポット溶接機において、無処理の場合と同一のナゲットを得るために必要な溶接電流はベーマイト処理を施すことによって減少する。よってベーマイト処理を施すことにより無処理の場合より低電流溶接が可能である。
4. ベーマイト処理を施した場合、溶接時間 1 サイクルで得られるナゲット径は無処理の場合の 10 サイクルで得られるナゲット径に匹敵する。よってベーマイト処理を施すことによって無処理の場合より短い溶接時間での溶接が可能である。
5. ベーマイト処理を施すと電極加圧力の影響を受けにくくなり、加圧力を大きくしてもナゲット径の変化が小さい。
6. ベーマイト処理をした場合は受け取り状態に比べ、ナゲット径のばらつきが大きくなる。また、接触電気抵抗についてもばらつきが大きくなる。

## 参考文献

- (1) 奥田滝夫：スポット溶接入門 (産報出版)
- (2) J.A.Greenwood:temperatures in spot Welding  
(British Welding Journal,8(6),pp.316-332)
- (3) 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] スポット溶接 [下] (溶接学会抵抗溶接研究委員会)

## 謝辞

本研究をすすめるにあたり、終始懇切なご指導を賜りました三重大学工学部鈴木実平教授、川上博士助教授に深く感謝致します。また、多大なご支援を頂いた三重大学のリサーチフェローの佐藤之彦氏に深く感謝いたします。

また、本論文中の検討に用いたデータは三重大学大学院工学研究科博士前期課程平成16年度卒業の前島武始君、三重大学大学院所属の岡村和哉君、三重大学工学部平成18年度卒業の伊藤篤史君らとの共同研究によるものです。ここに記して、これら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共に、謹んで御礼申し上げます。

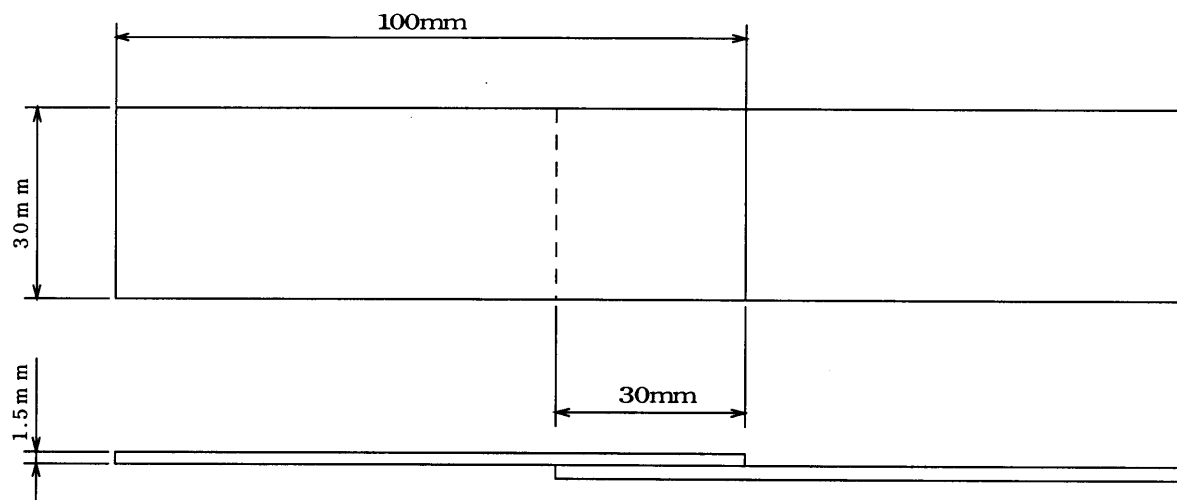


Fig.2-1 As received specimen

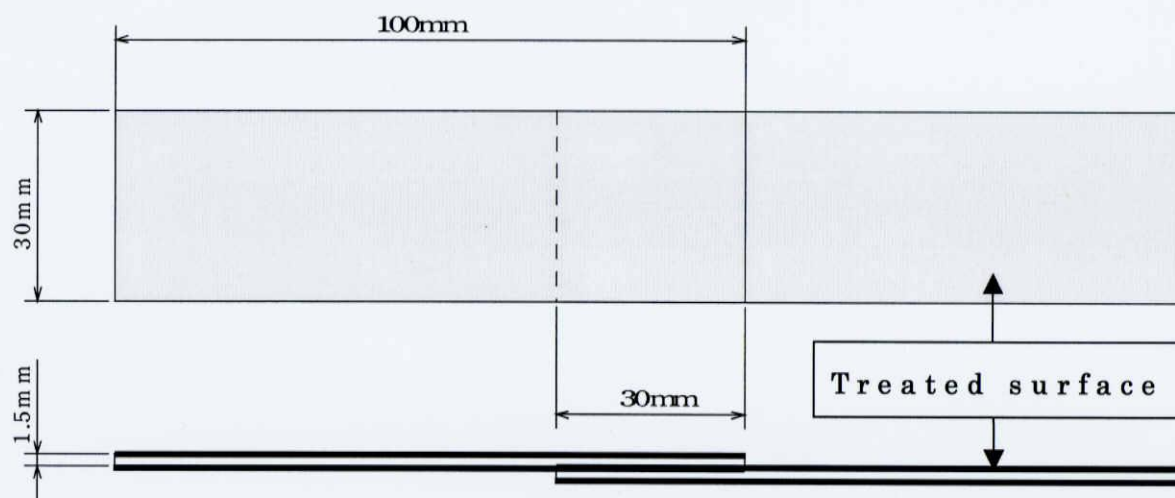


Fig.2-2 Specimen of both sides boehmite

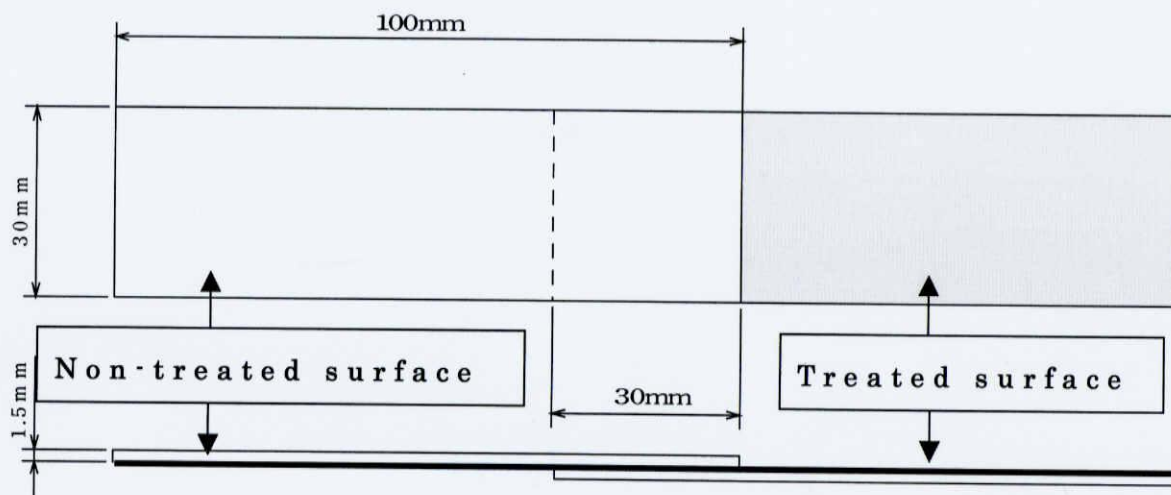


Fig.2-3 Specimen of one side boehmite

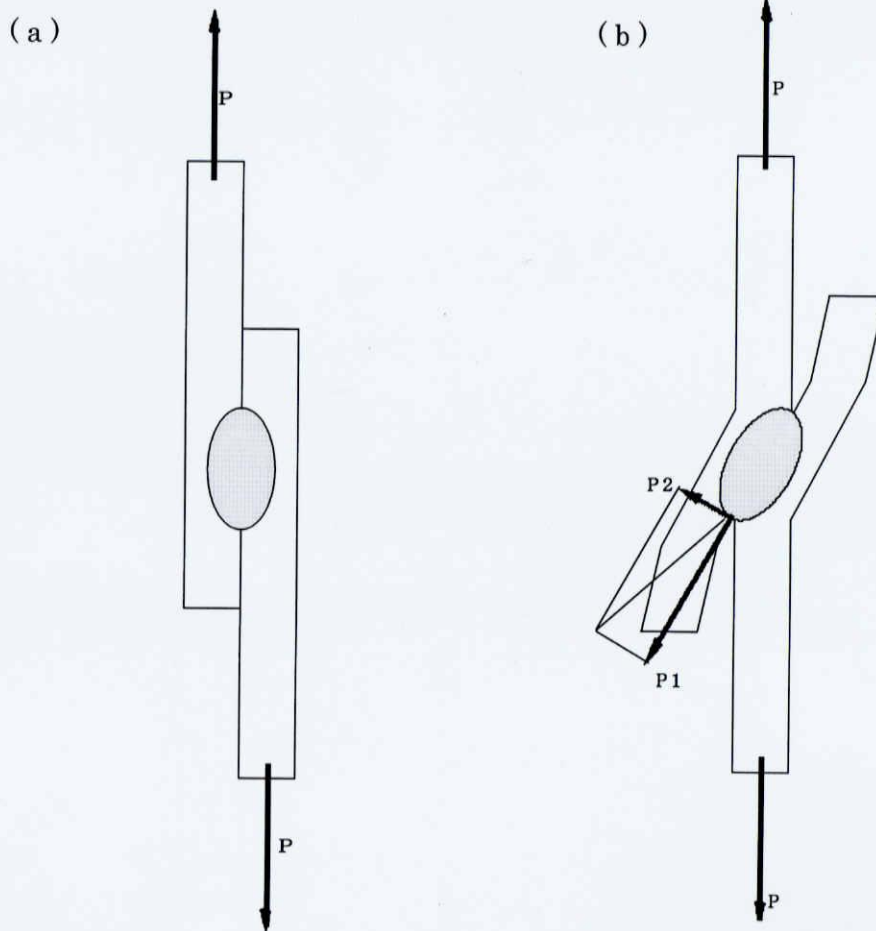


Fig.2-4

The figure of a fracture load examination

*testing*



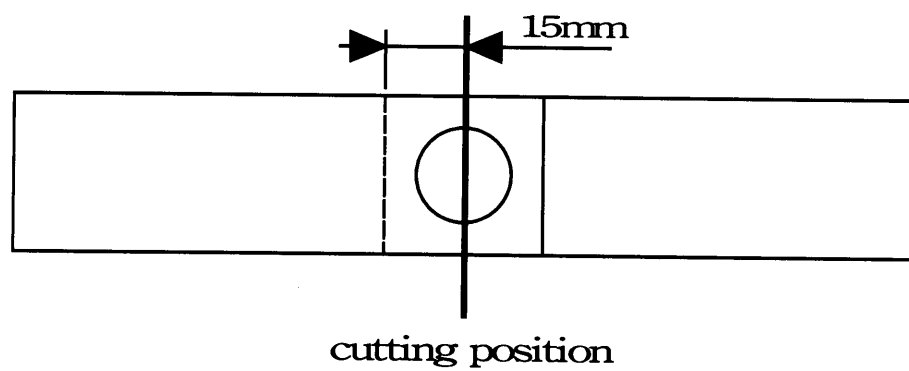


Fig.2-5

Cutting position for observe cross section

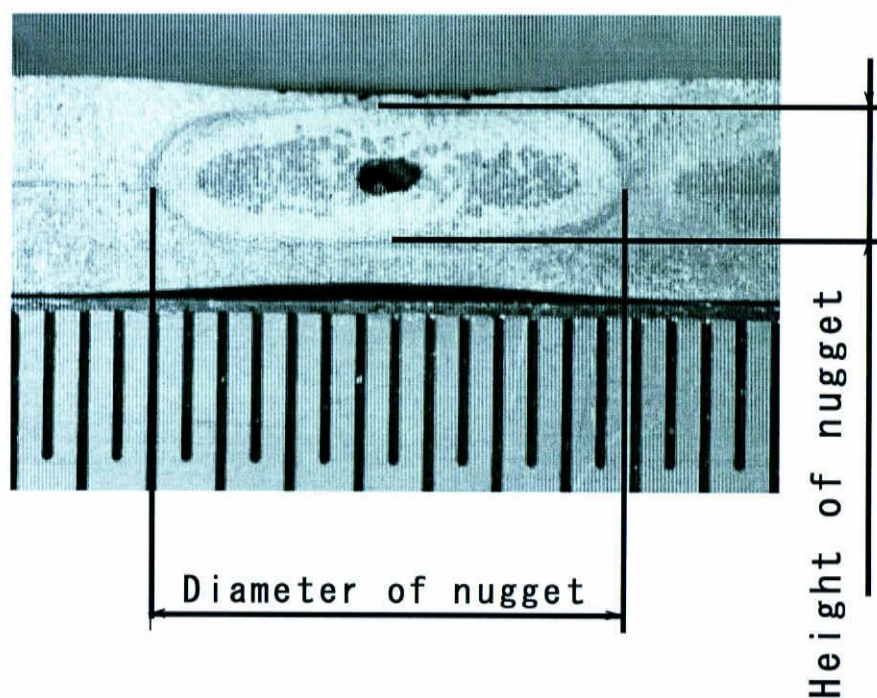
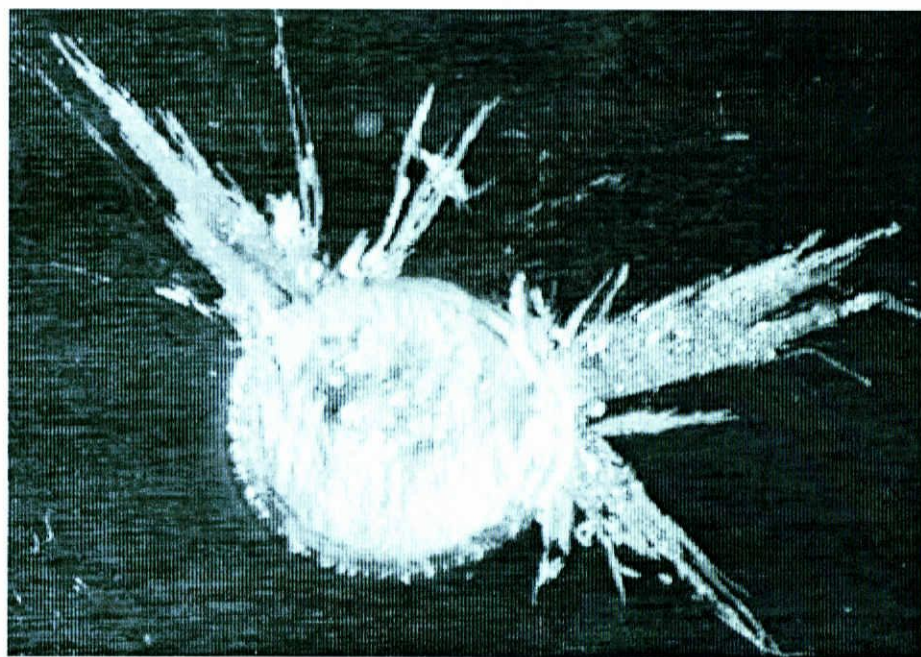


Fig. 2-6

Photograph of cross section



← 10mm →

Fig.2-7 photograph of dust

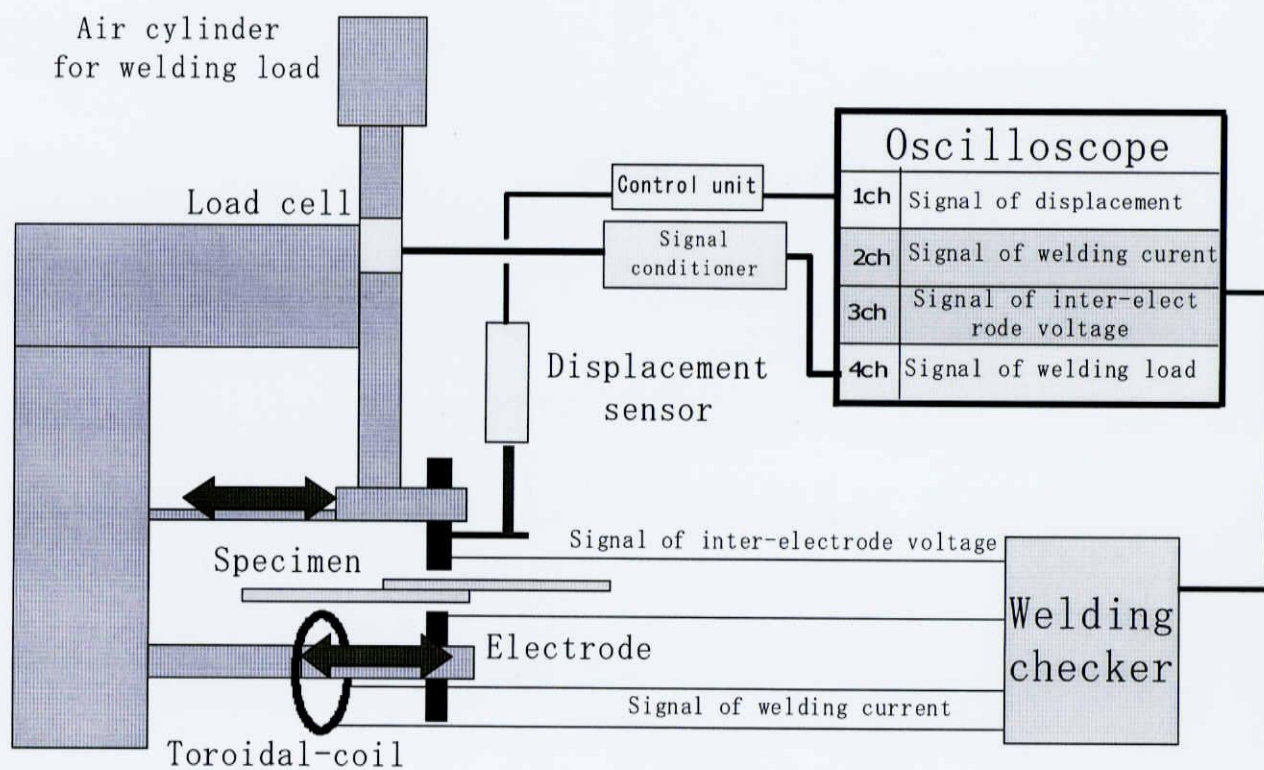


Fig.2-8

Outline chart of spot welding machine  
in lower welding current

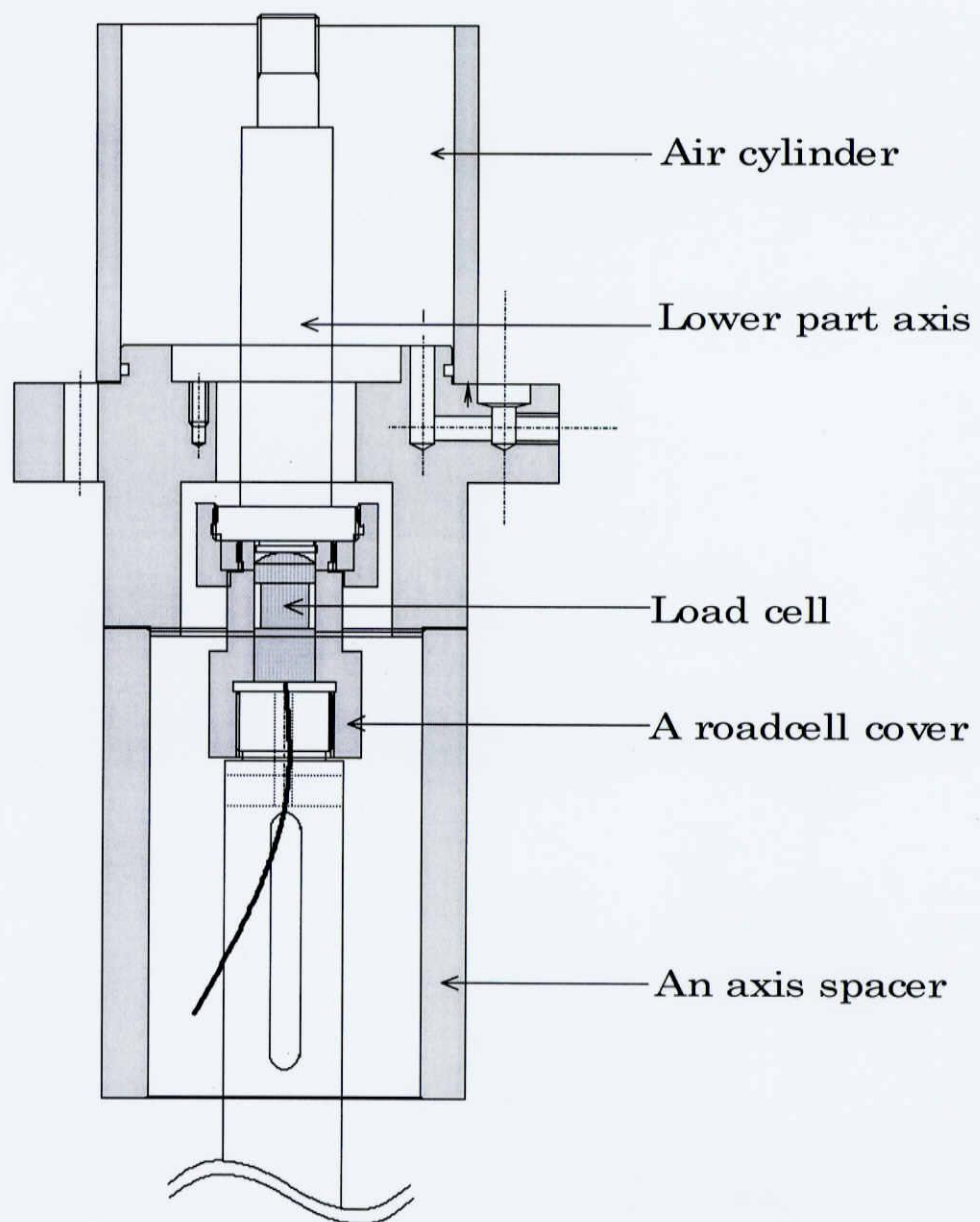


Fig.2-9

An insertion of point of load cell

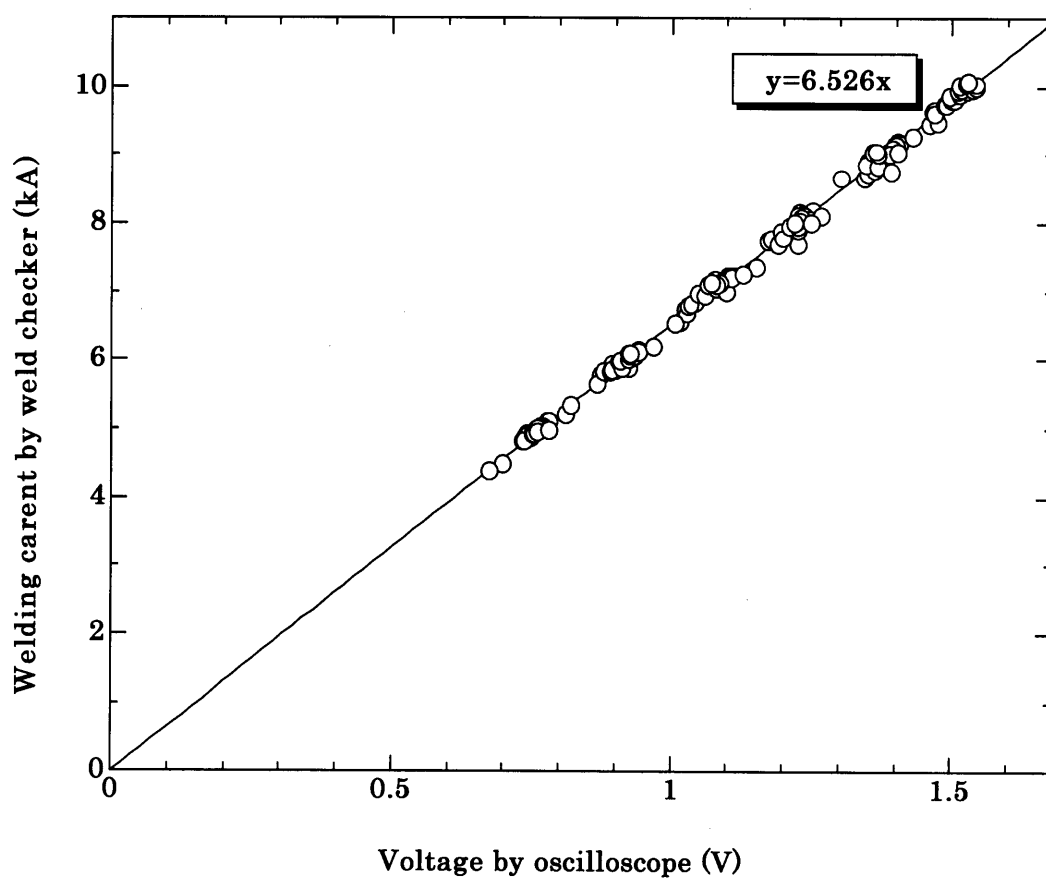


Fig.2-10

Relation between display of oscilloscope  
and effective value of the welding checker

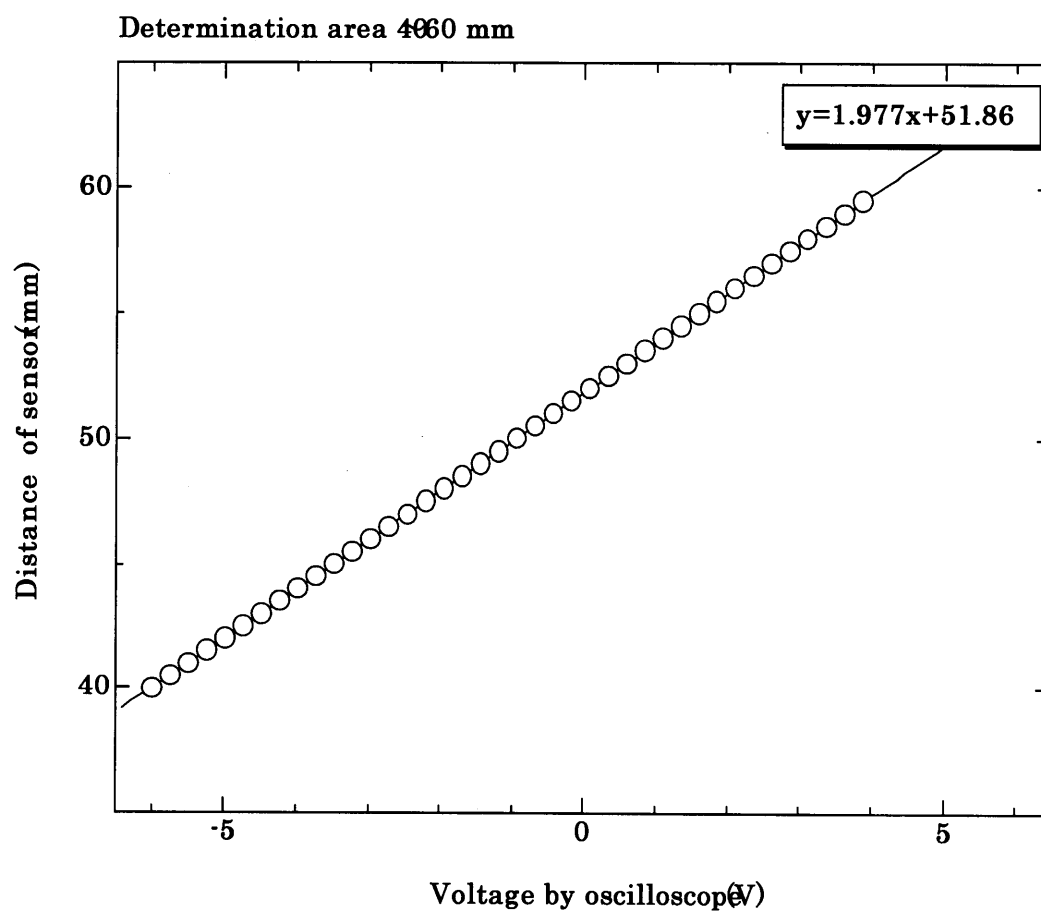
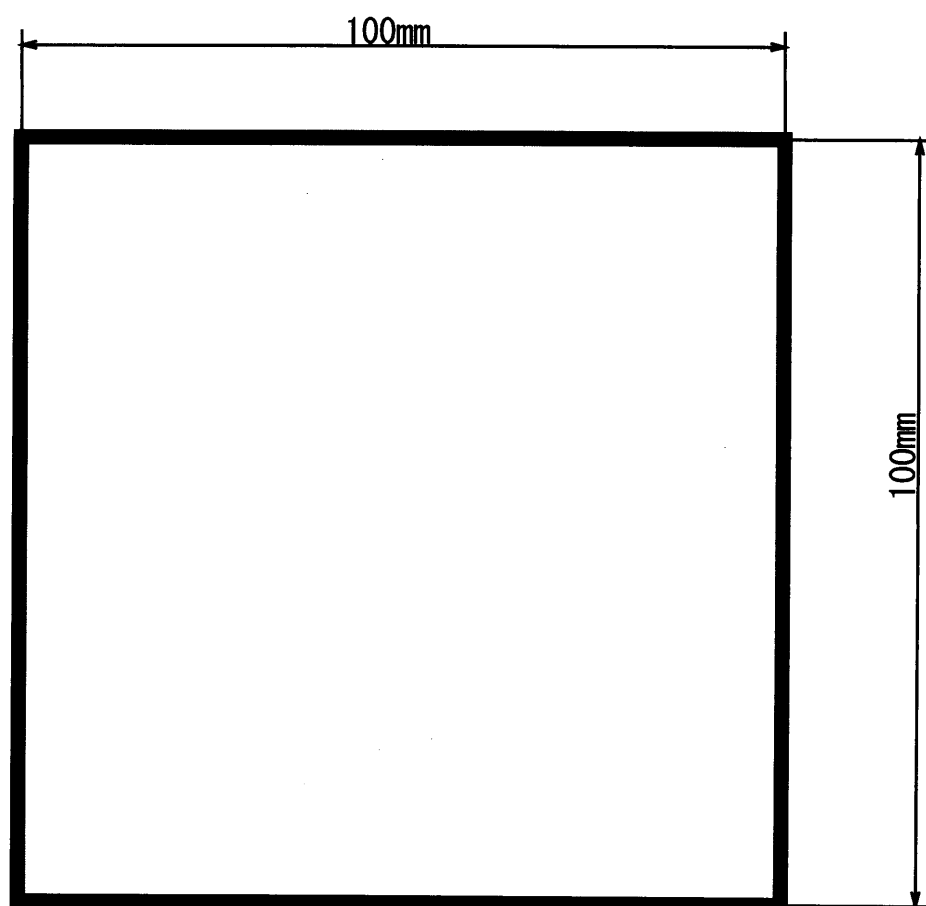


Fig.2-11

Relation of voltage with micrometer  
and displacement sensor



Thickness 0.1mm

Fig.2-12 Specimen dimensional



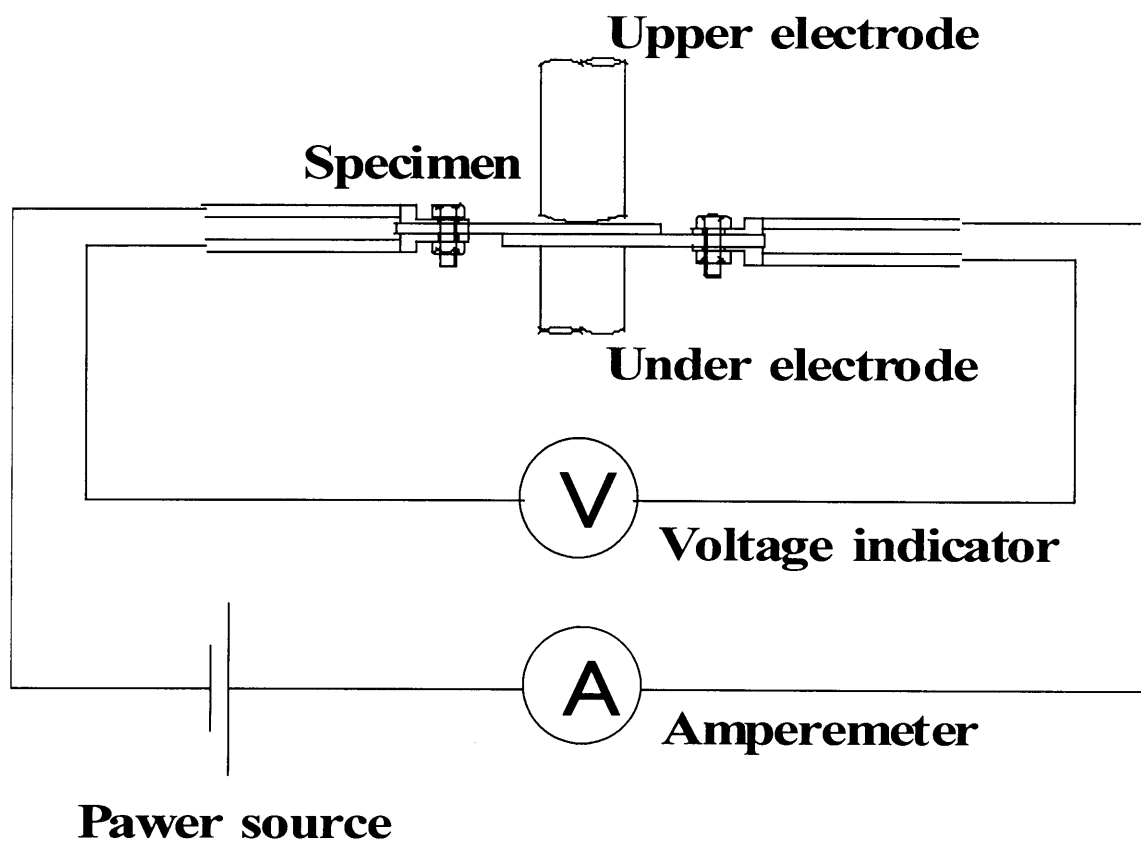


Fig.2-13

Outline chart of contact resistance measurement

Table.2-1

Chemical composition of A1050 [mass%]

| Specimen | Si        | Fe        | Cu        | Mn        | Mg        |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| A1050    | under0.25 | under0.40 | under0.05 | under0.05 | under0.05 |

| Cr | Zn        | Ti        | others    | total | Al        |
|----|-----------|-----------|-----------|-------|-----------|
| —  | under0.05 | under0.03 | under0.03 | —     | over99.50 |

| Specimen | Resistivity<br>[ $\mu \Omega$ cm] | Melting point<br>[°C] | Conductance<br>[cal/cm·sec·°C] |
|----------|-----------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| A1050    | 2.9                               | 650                   | 0.53                           |

Table.2-2

10 times experiment and average of welding load

| Set value      | Load (N) |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |
|----------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| pressure (MPa) | No.1     | No.2   | No.3   | No.4   | No.5   | No.6   | No.7   | No.8   | No.9   | No.10  | Average |
| 0.1            | 775.8    | 768.4  | 753.5  | 775.8  | 768.4  | 723.6  | 783.3  | 731.1  | 738.5  | 746.0  | 756.4   |
| 0.2            | 1745.6   | 1760.6 | 1753.1 | 1708.3 | 1730.7 | 1723.3 | 1760.6 | 1700.9 | 1693.4 | 1693.4 | 1727.0  |
| 0.3            | 2670.7   | 2678.1 | 2678.1 | 2625.9 | 2611.0 | 2611.0 | 2678.1 | 2640.8 | 2648.3 | 2648.3 | 2649.0  |
| 0.4            | 3588.3   | 3536.0 | 3536.0 | 3528.6 | 3565.9 | 3551.0 | 3573.3 | 3528.6 | 3528.6 | 3528.6 | 3546.5  |
| 0.5            | 4319.3   | 4446.2 | 4297.0 | 4423.8 | 4461.1 | 4326.8 | 4446.2 | 4468.5 | 4431.2 | 4334.3 | 4395.4  |

Table.2-3

Experimental condition of contact resistance

| Electrode<br>upper-lower | Electrode load<br>[kN] | Boehmite treatment time<br>[min] |
|--------------------------|------------------------|----------------------------------|
| R-R                      | 0.756                  | Non-treatment                    |
| F-F                      | 1.728                  | 1                                |
|                          | 2.649                  | 5                                |
|                          | 3.547                  | 15                               |
|                          | 4.395                  | 30                               |

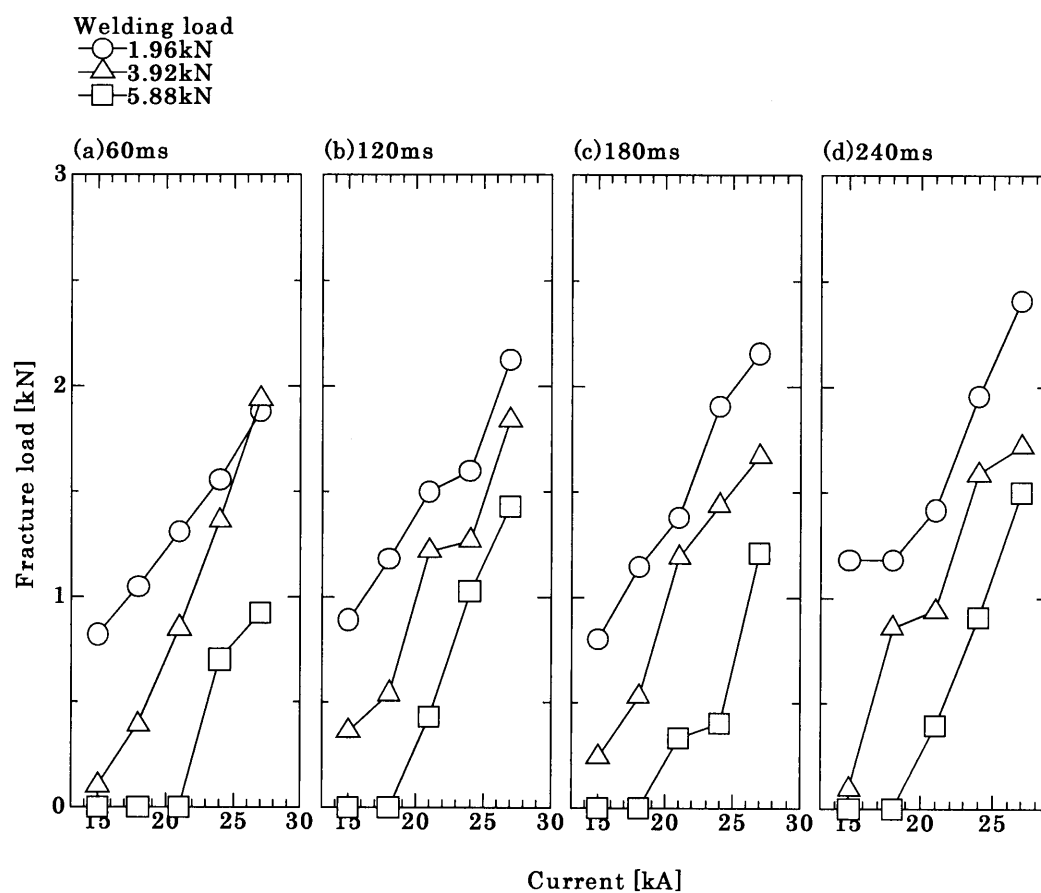


Fig. 3-1

Influence of current on fracture load

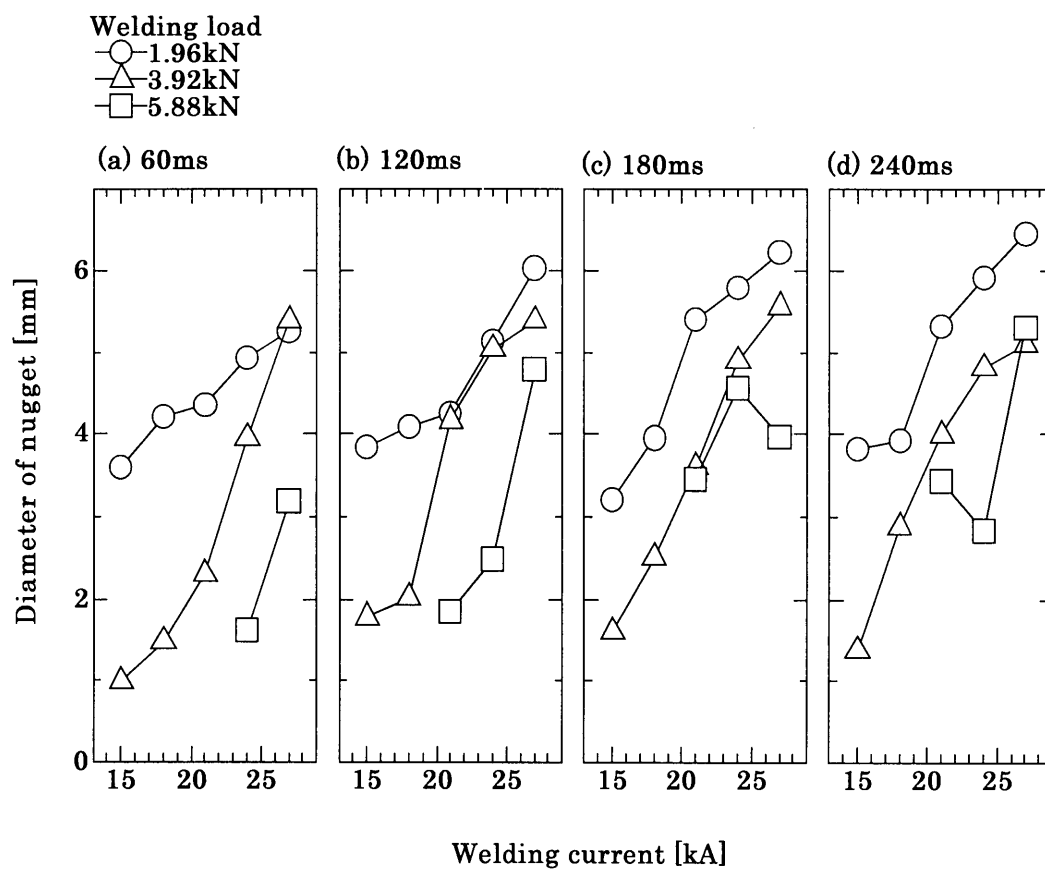


Fig. 3-2

Influence of diameter of nugget on welding current

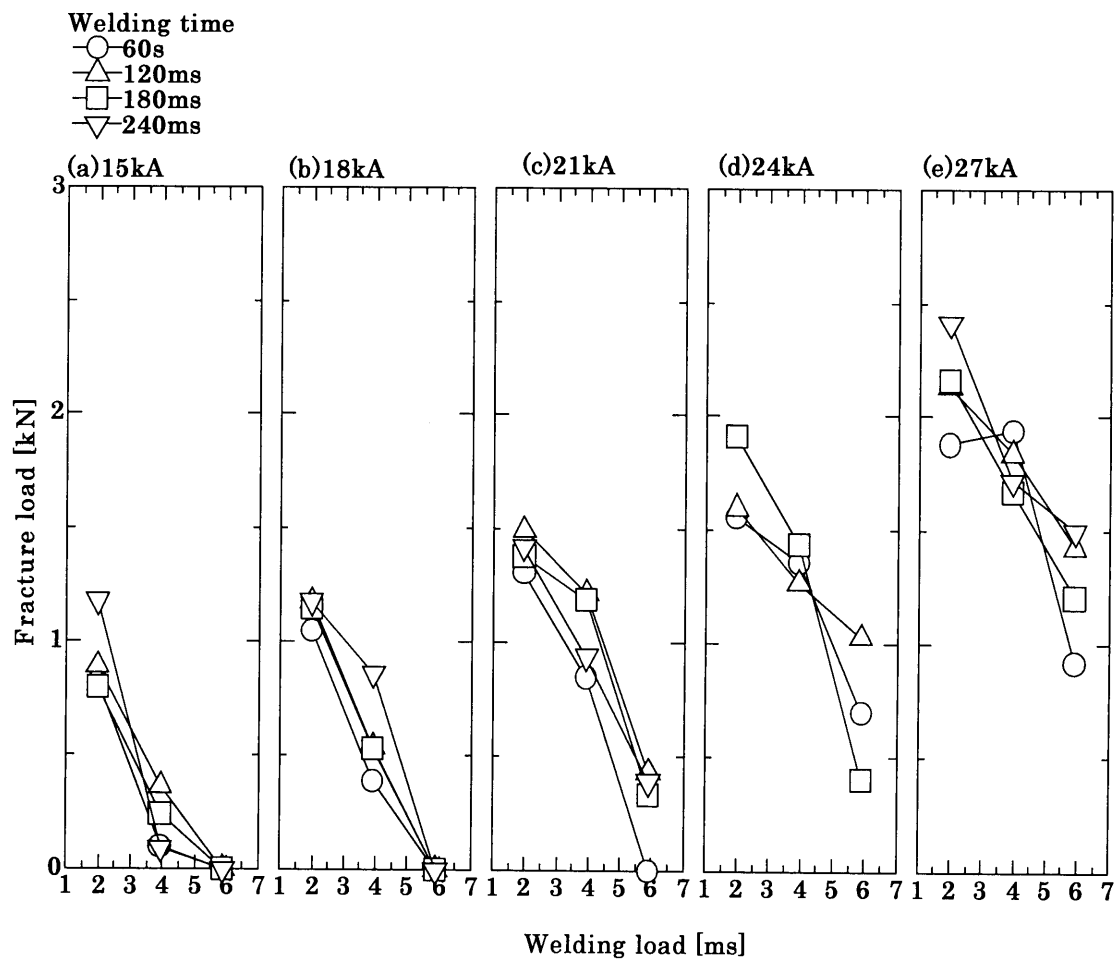


Fig.3-3

Influence of welding load on fracture load

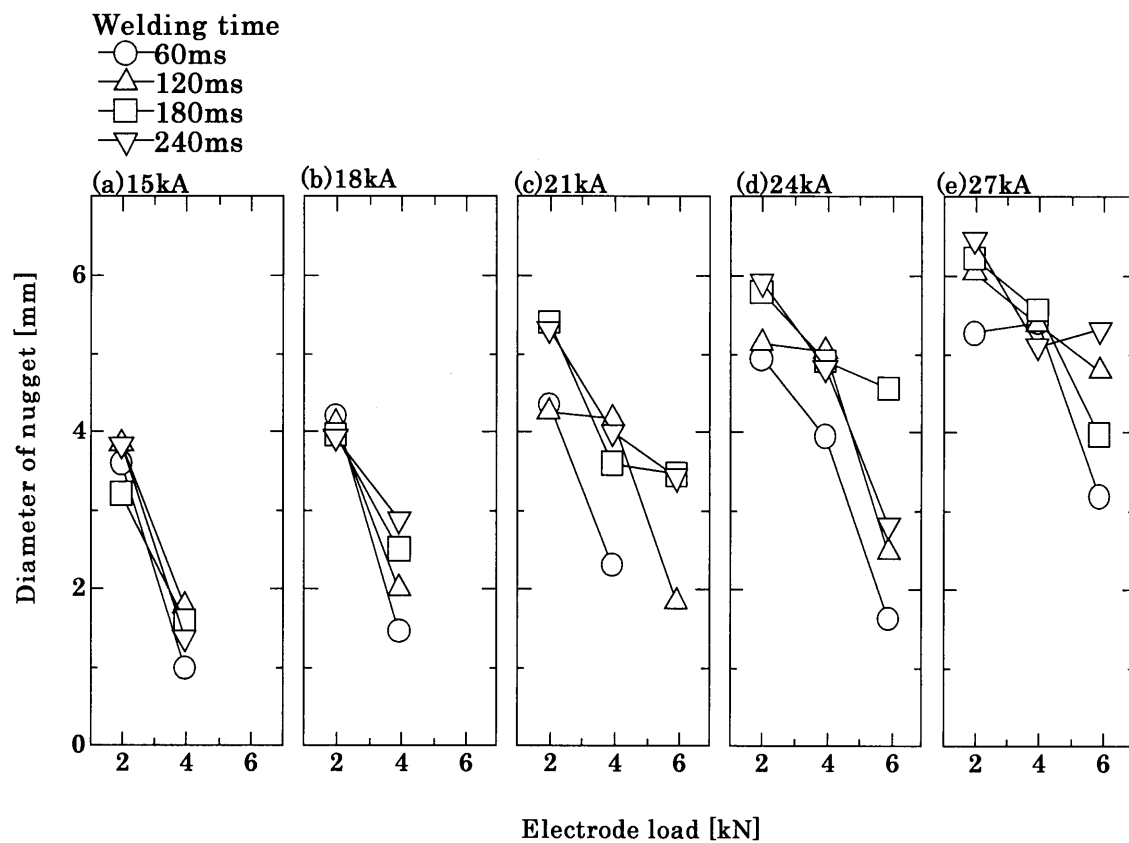


Fig.3-4

Influence of diameter of nugget on electrode load



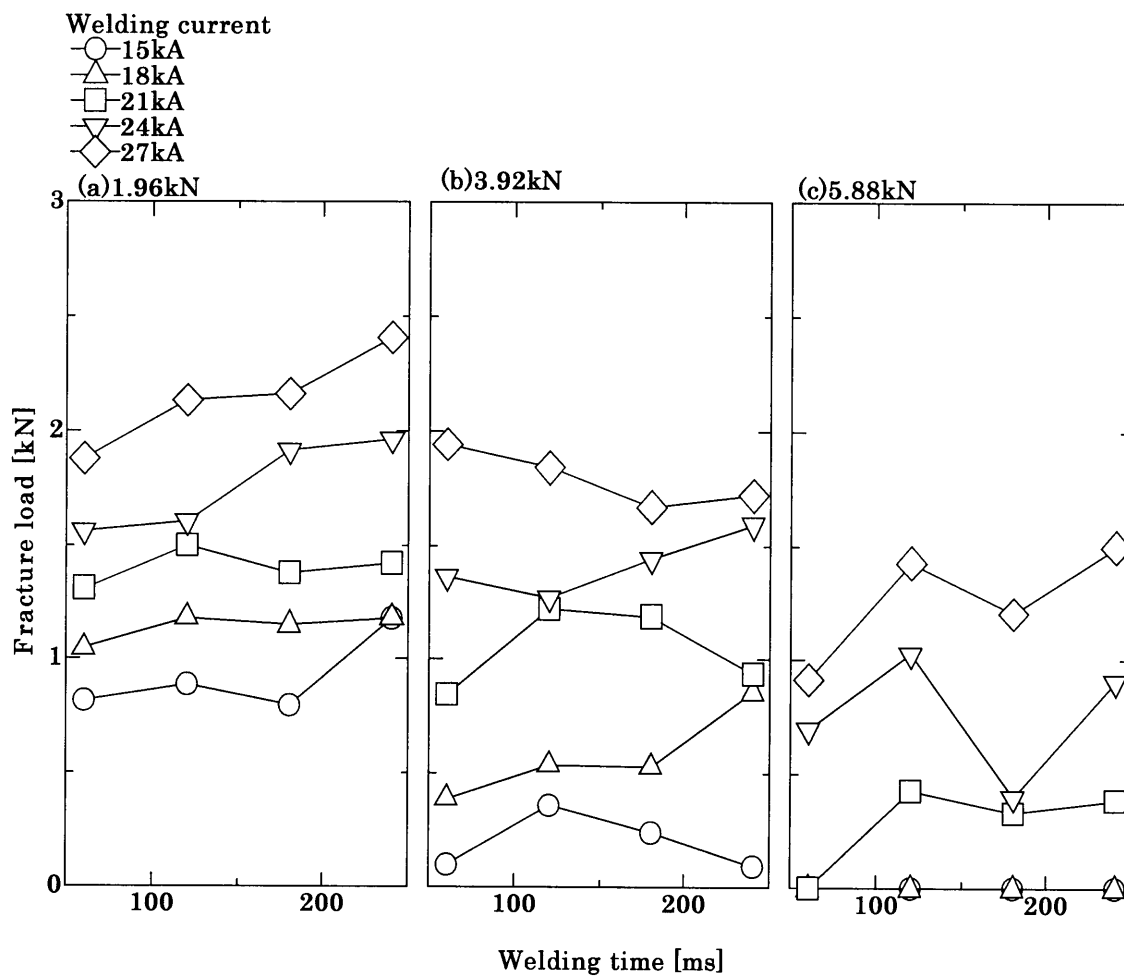


Fig.3-5

Influence of welding load on fracture load

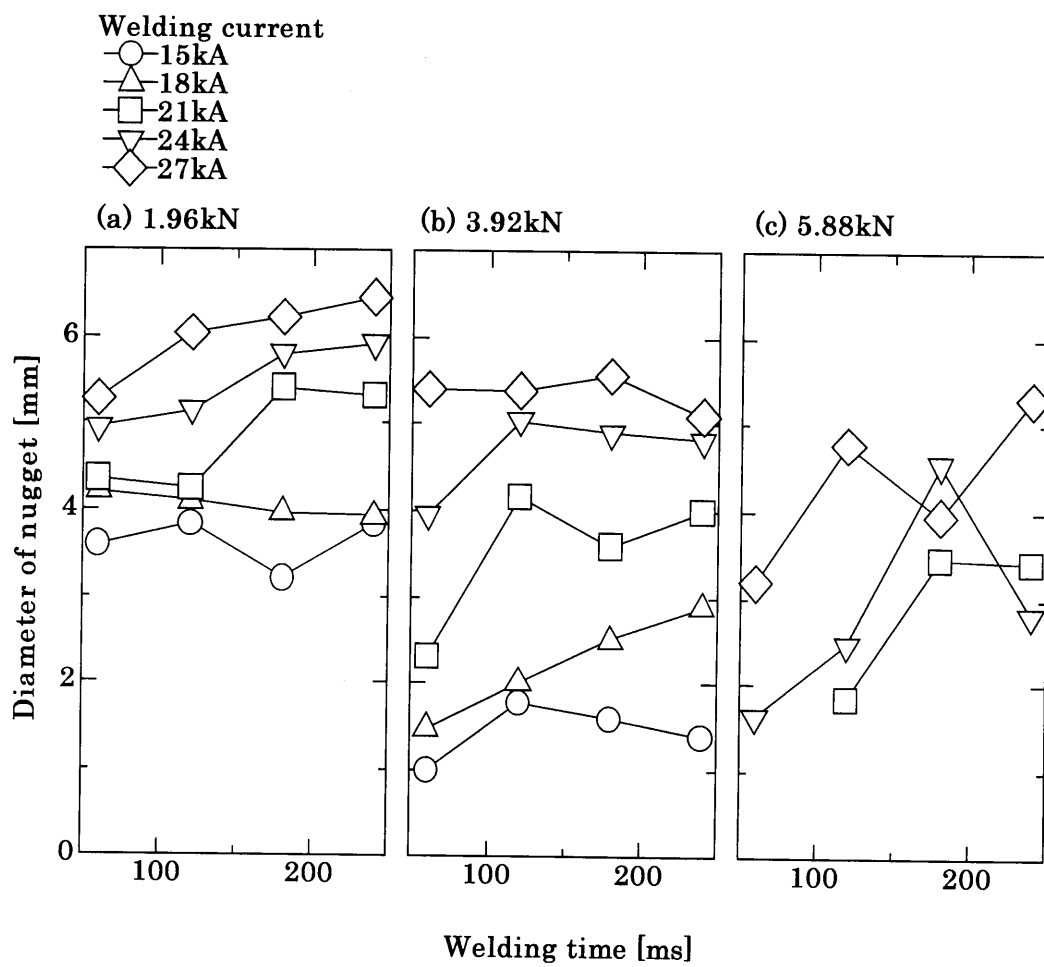


Fig.3-6

Influence of diameter of nugget on electrode load

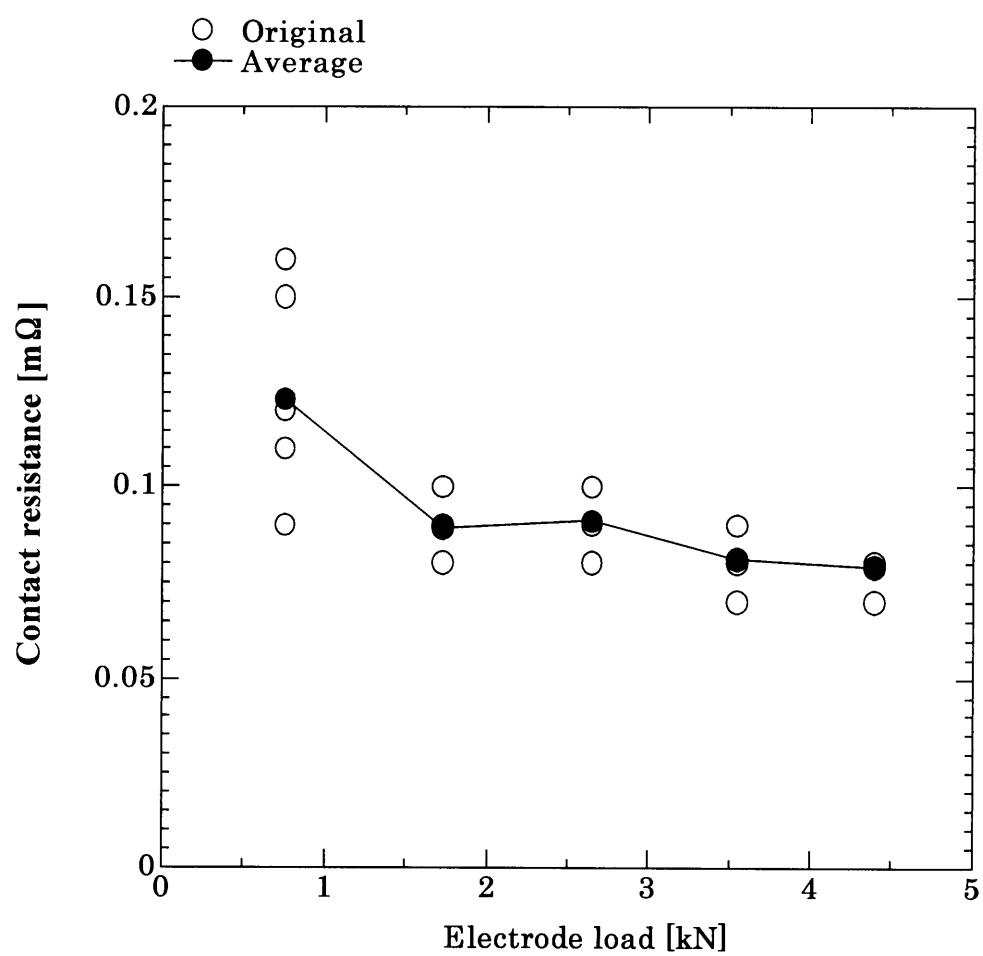


Fig.3-7

Influence of electrode load on contact resistance

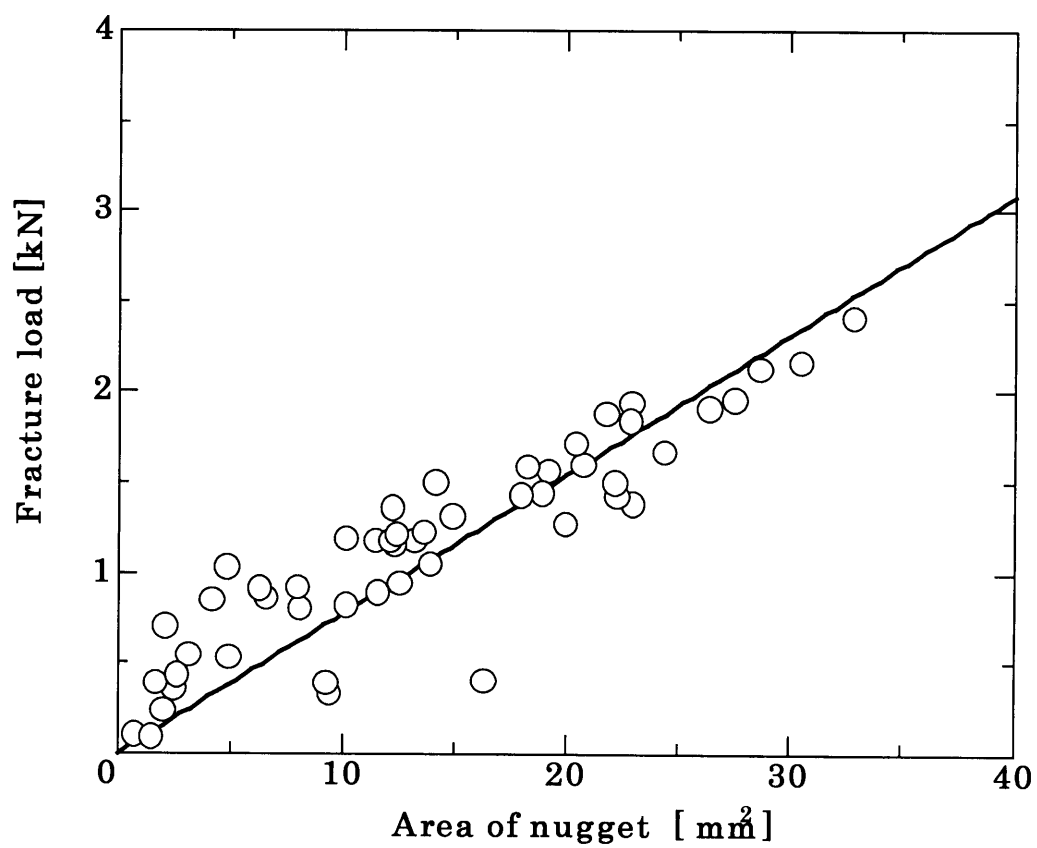


Fig.3-8

Relation between area of nugget  
and fracture of load

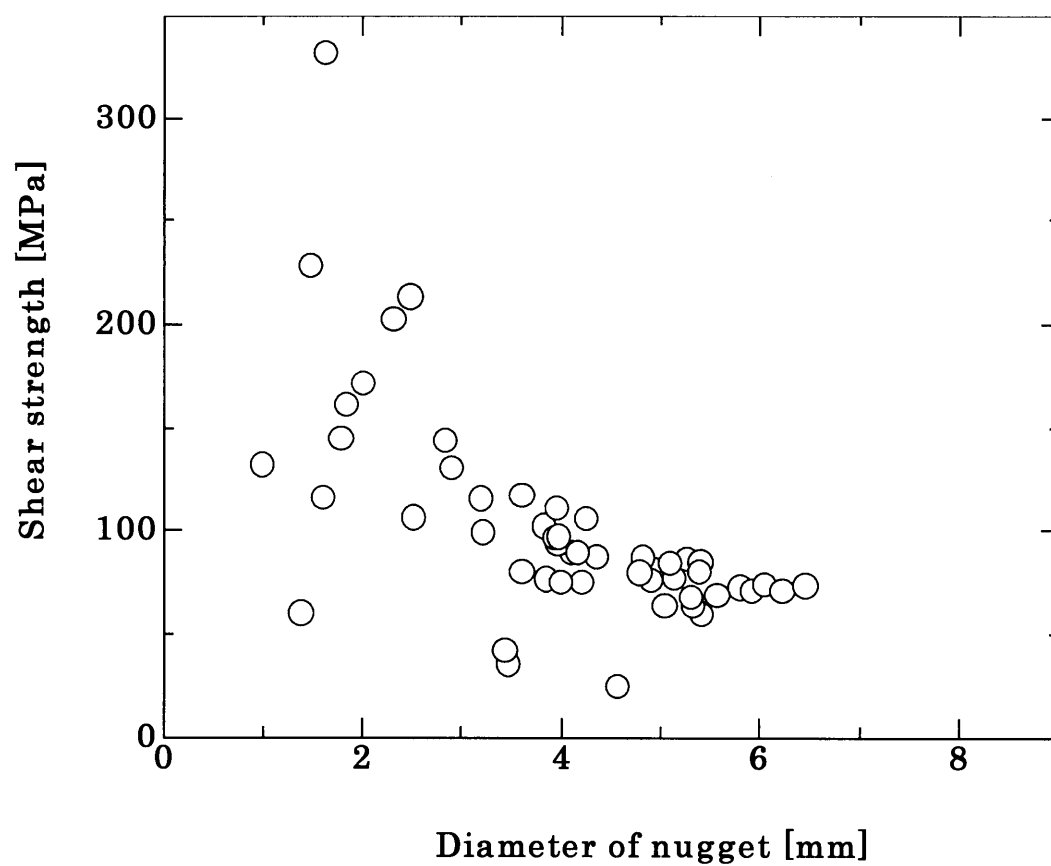


Fig.3-9

Relation between diameter of nugget  
and shear strength

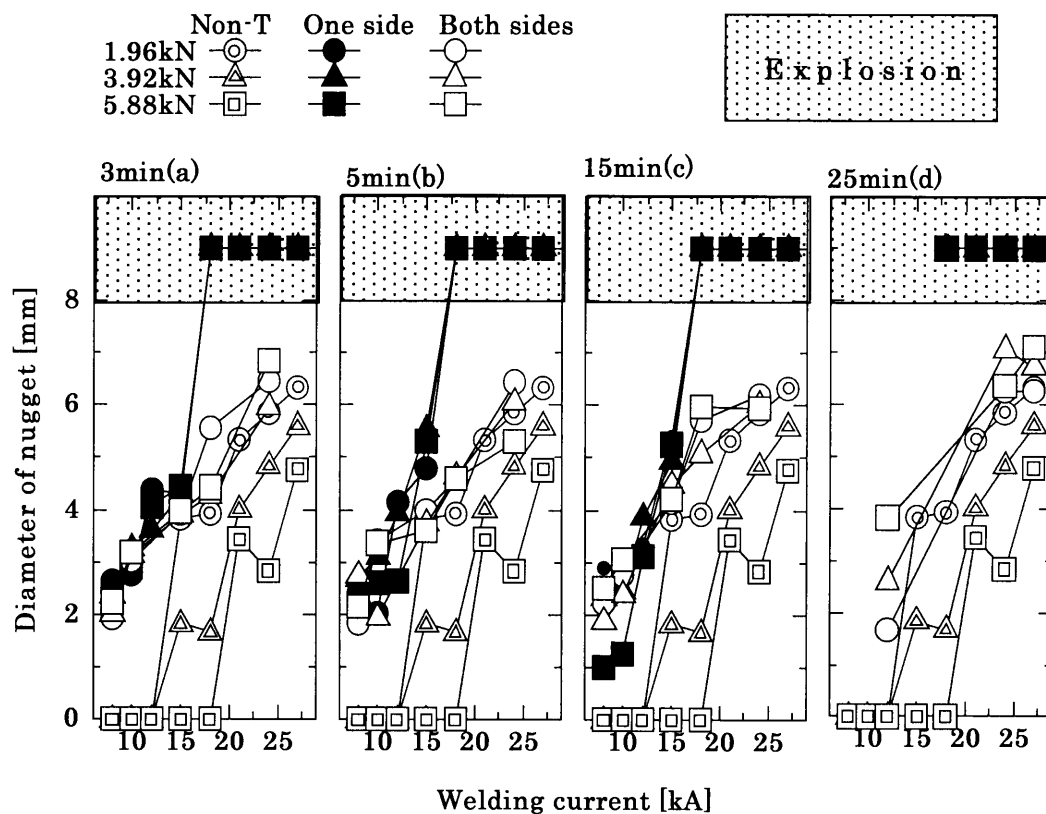


Fig.3-10

Influence of welding current on the diameter of nugget  
in A1050 boehmite treatment

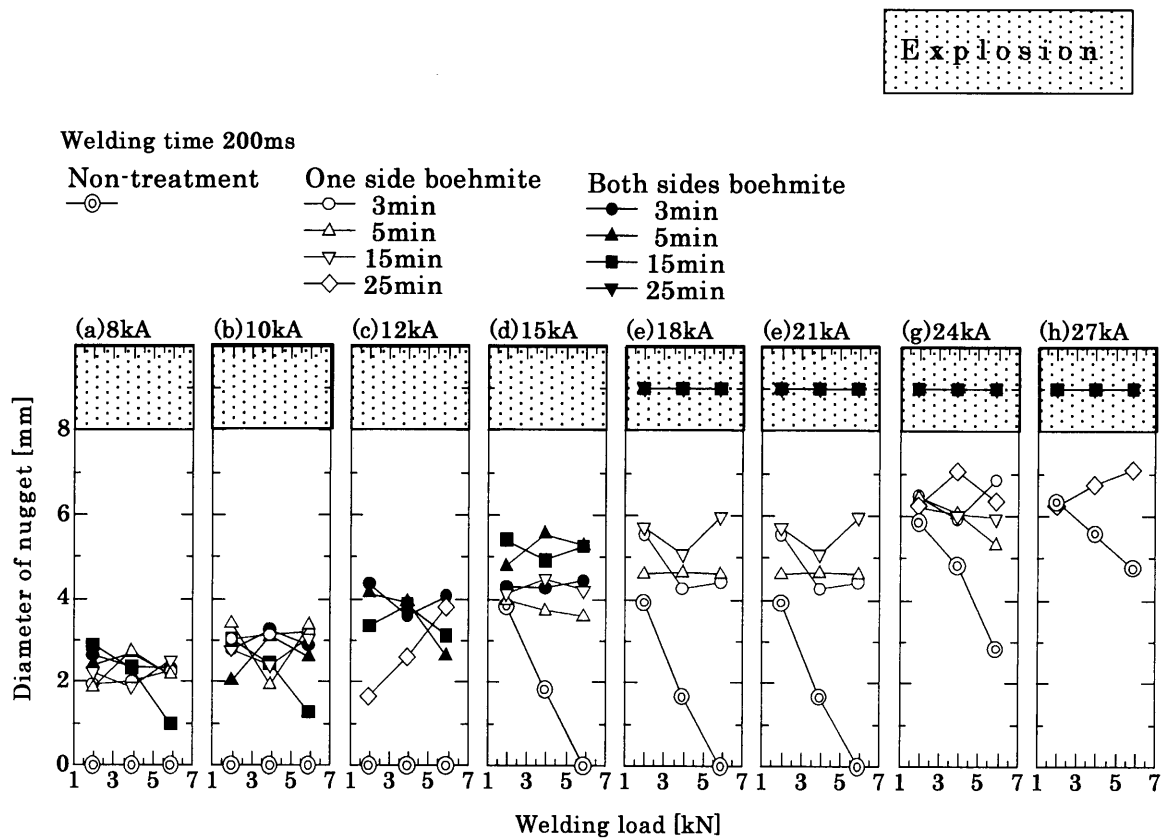


Fig.3-11

Influence of welding load on the nugget diameter  
in A1050 boehmite treatment

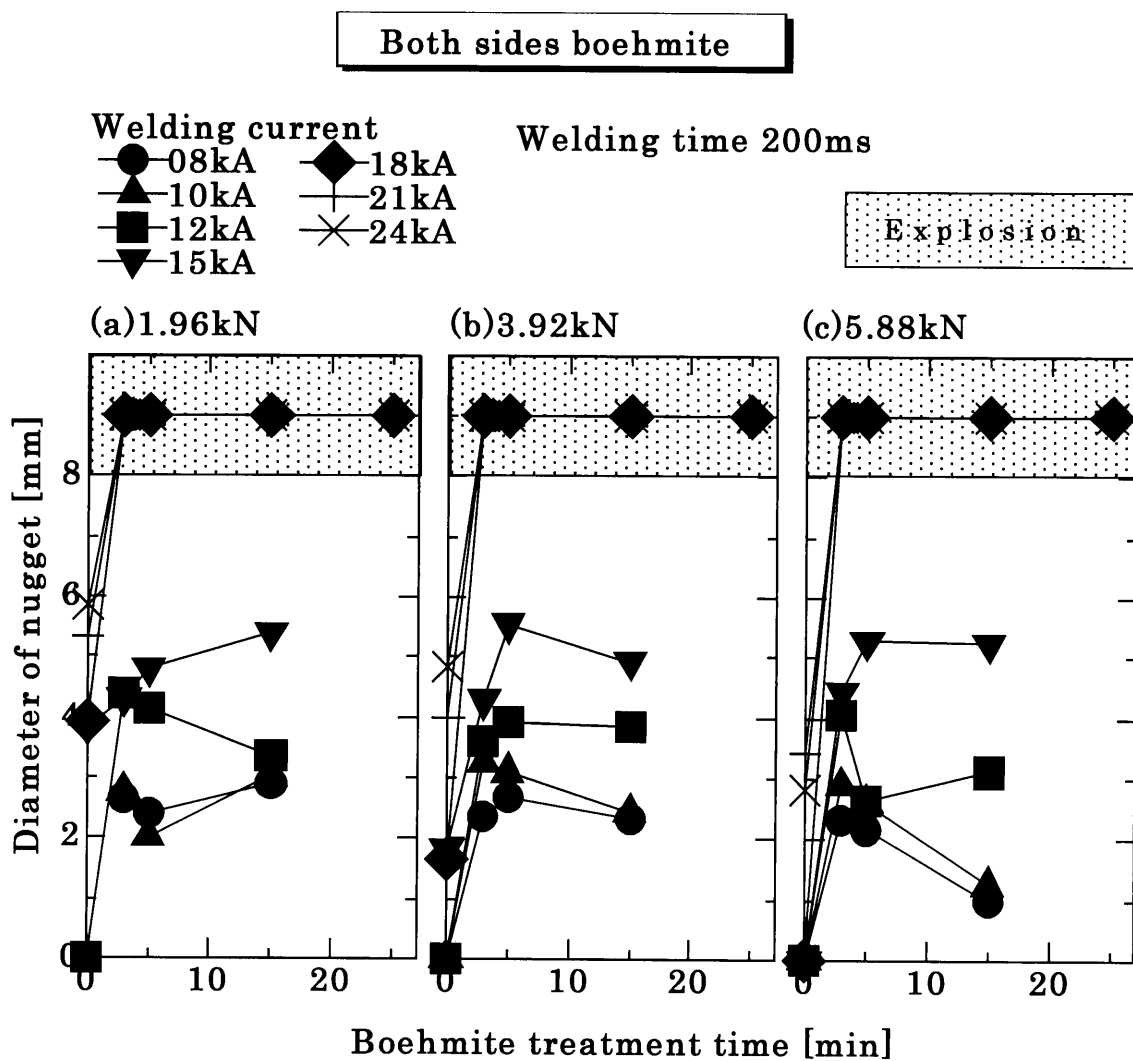


Fig.3-12

Influence of boehmite treatment time on the nugget  
diameter in A1050 both sides treatment



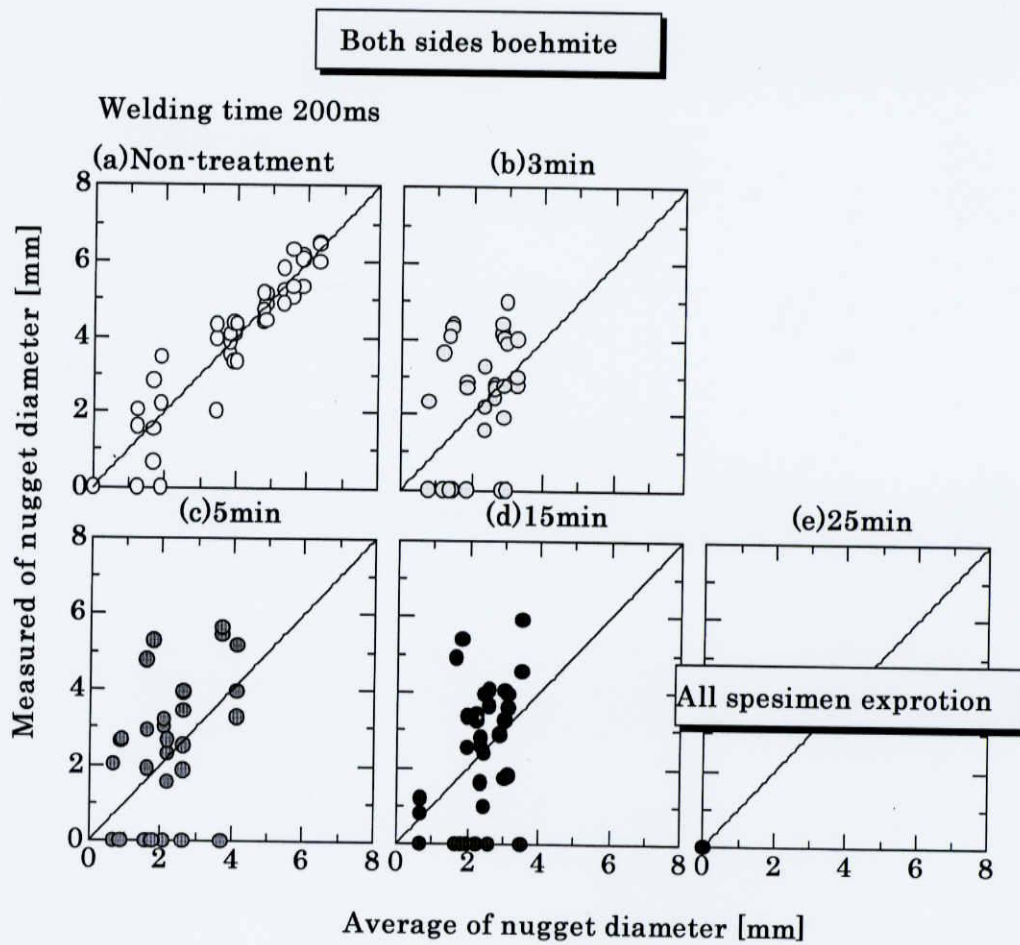


Fig.3-13

Fluctuation of nugget for A1050 both sides treatment

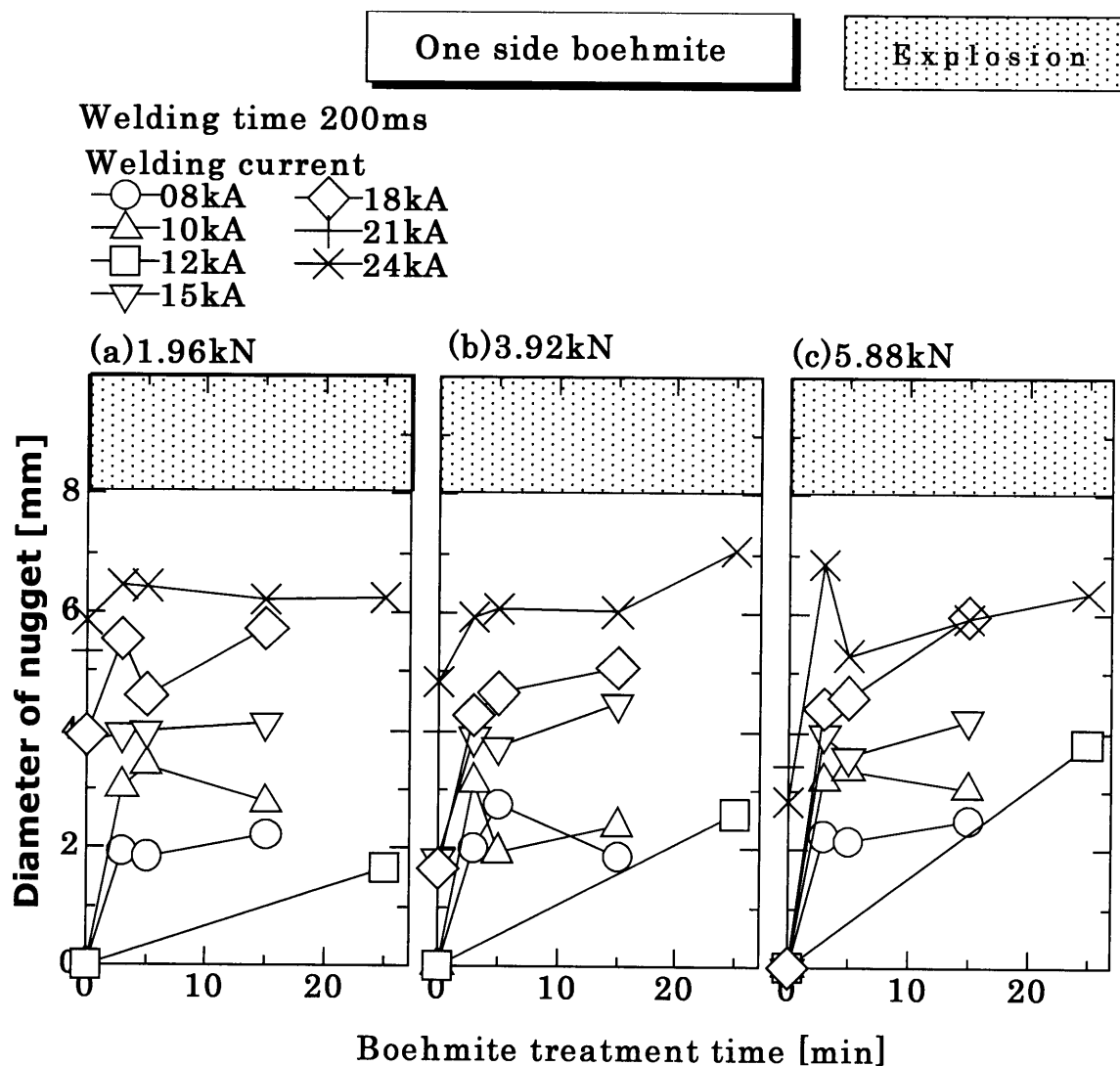
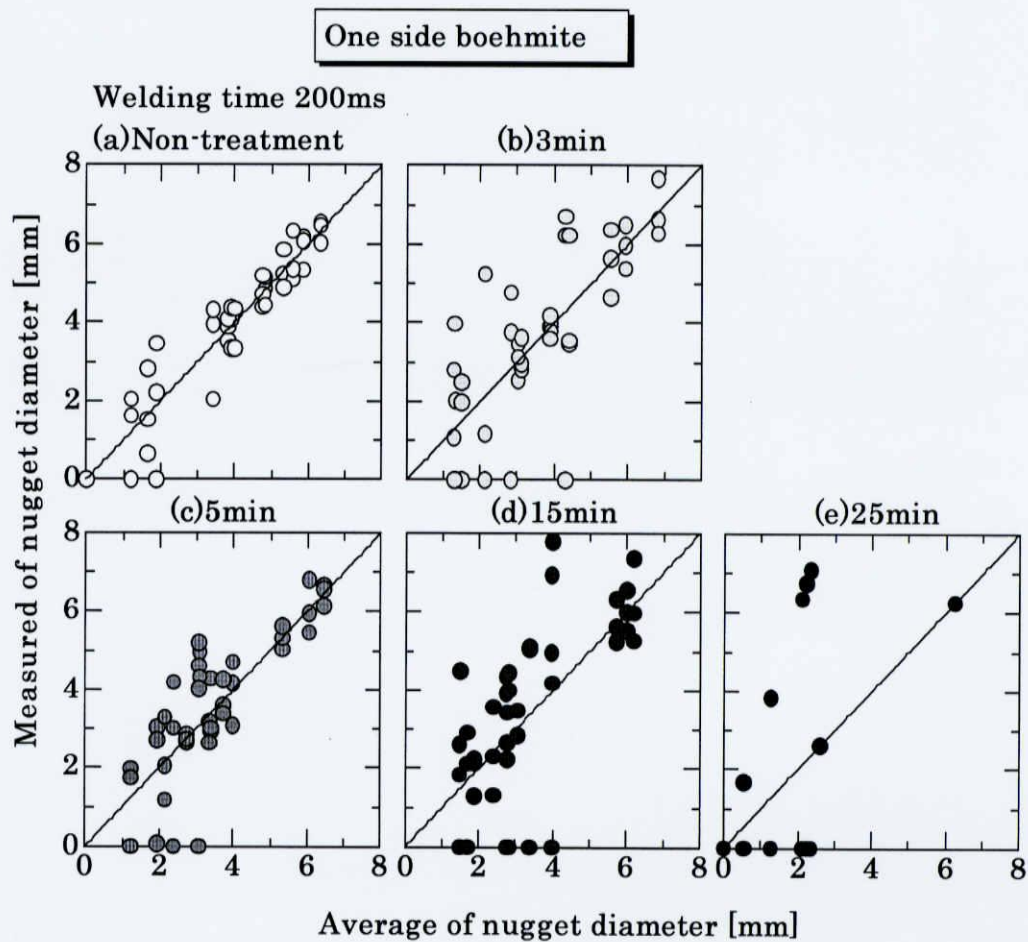


Fig.3-14

Influence of boehmite treatment time on the nugget  
diameter for A1050 one side treatment



Welding time 200ms

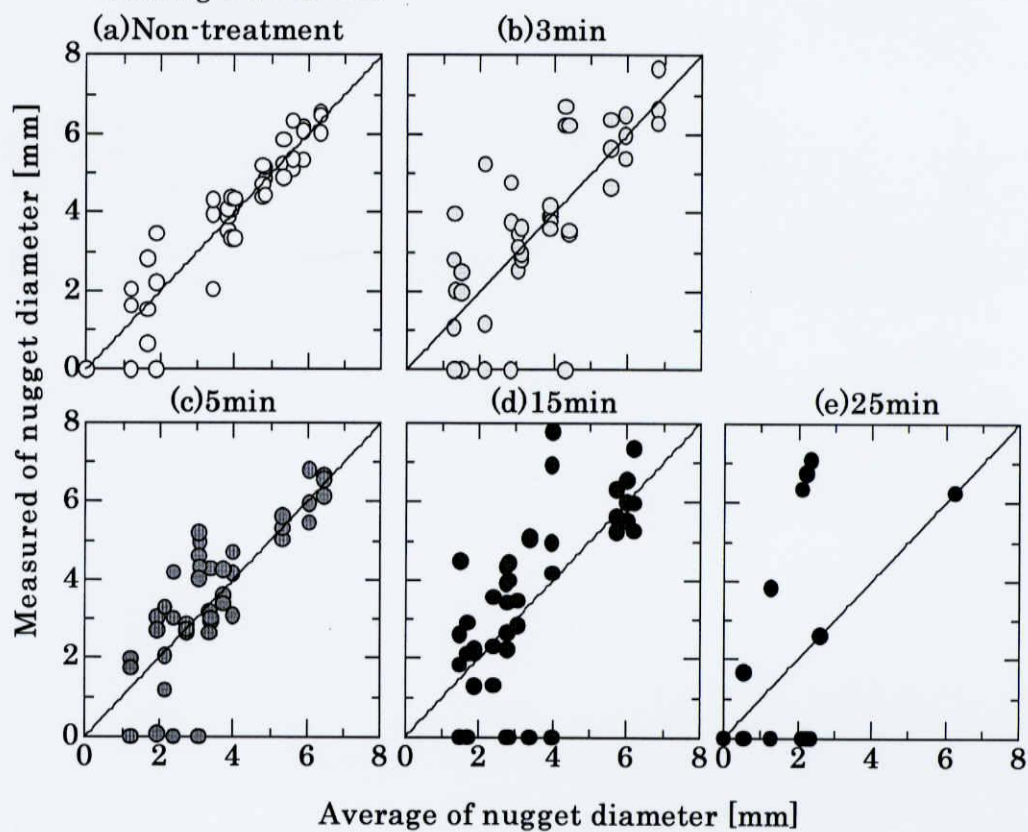


Fig.3-15

Fluctuation of nugget for A1050 one side treatment

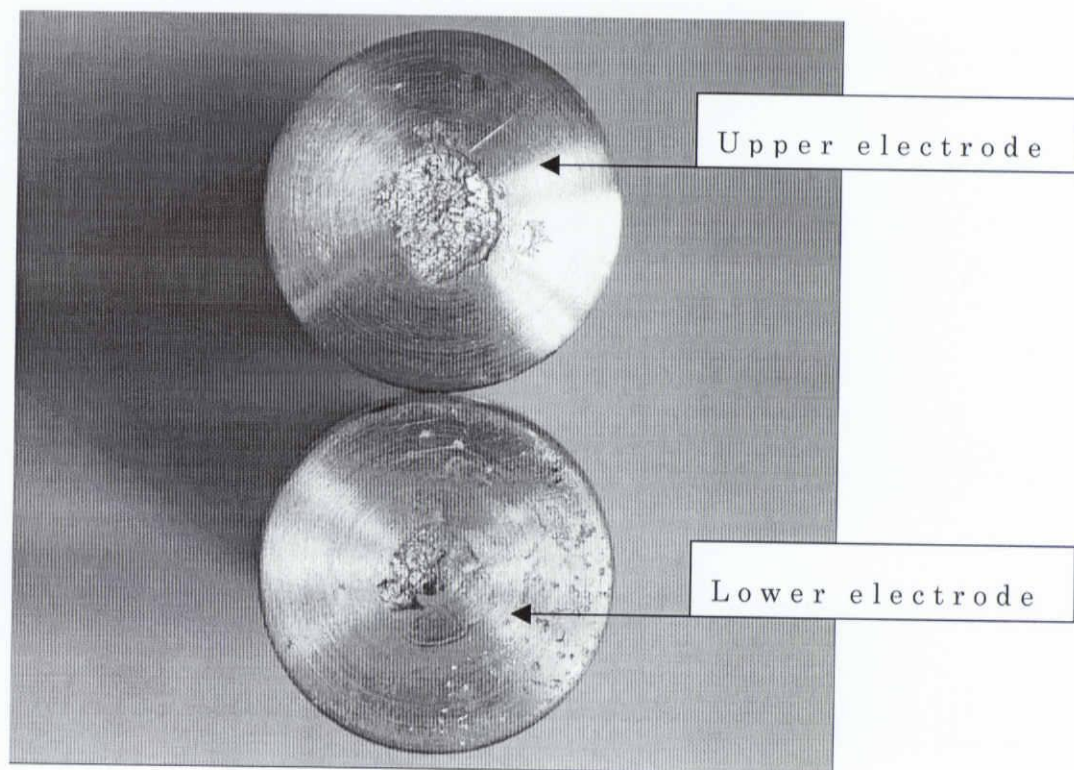


Fig.3-16

Used electrode during both side boehmite treatment

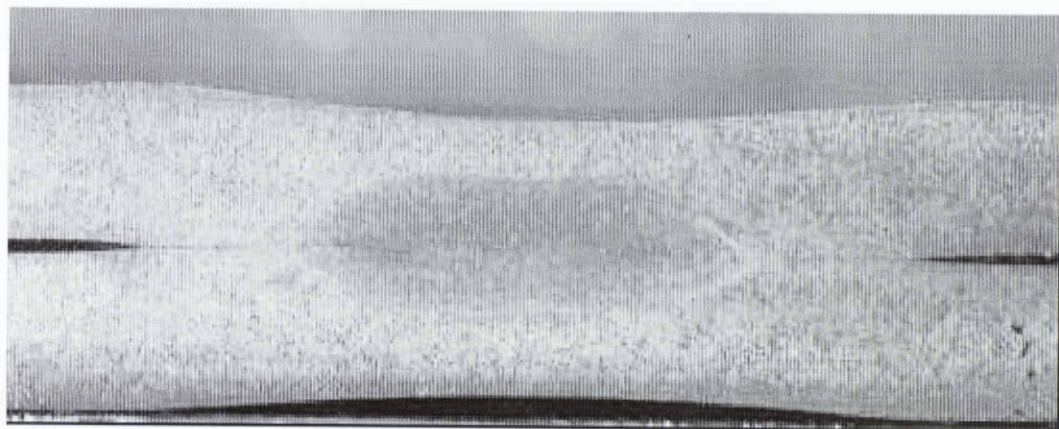


Fig.3-17 Normal nugget

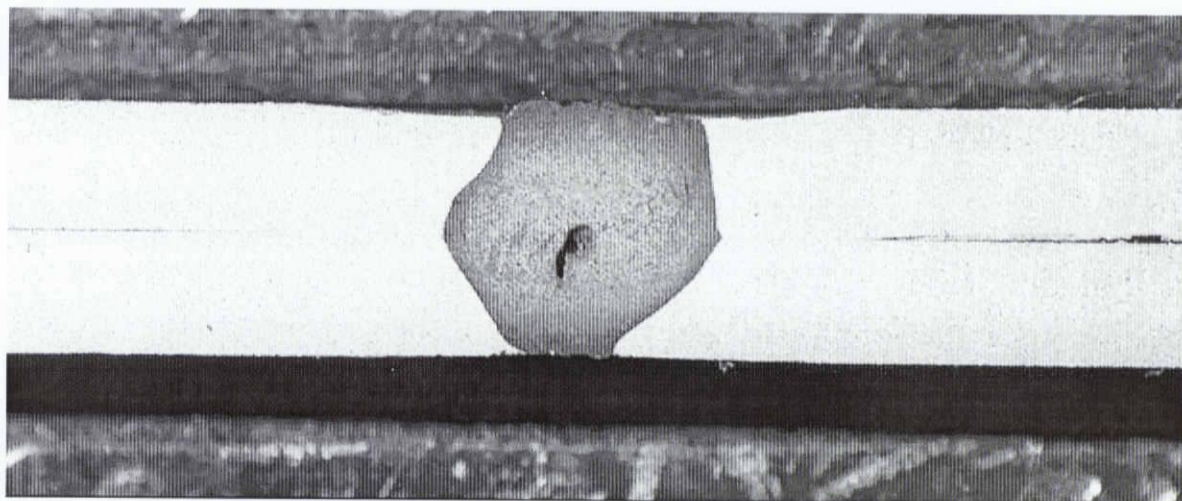


Fig.3-18

Nugget from both side boehmite treatment



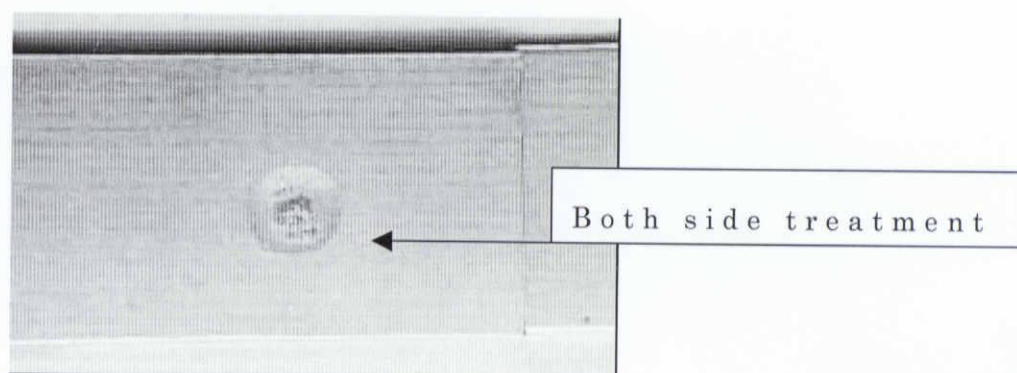
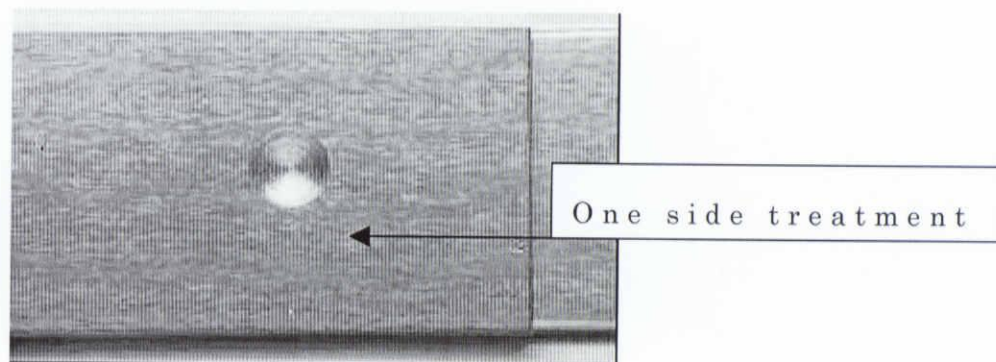


Fig.3-19 Specimen surface of spot welding

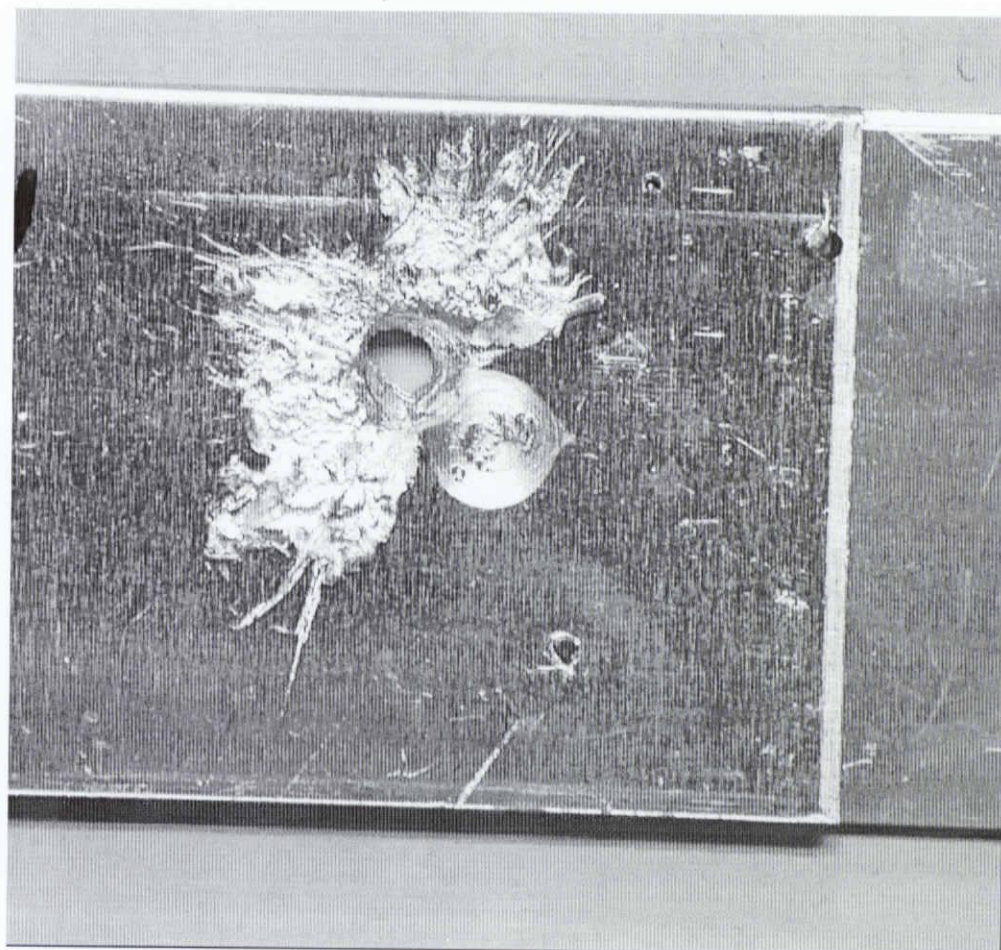


Fig.3-20 Specimen with surface explosion



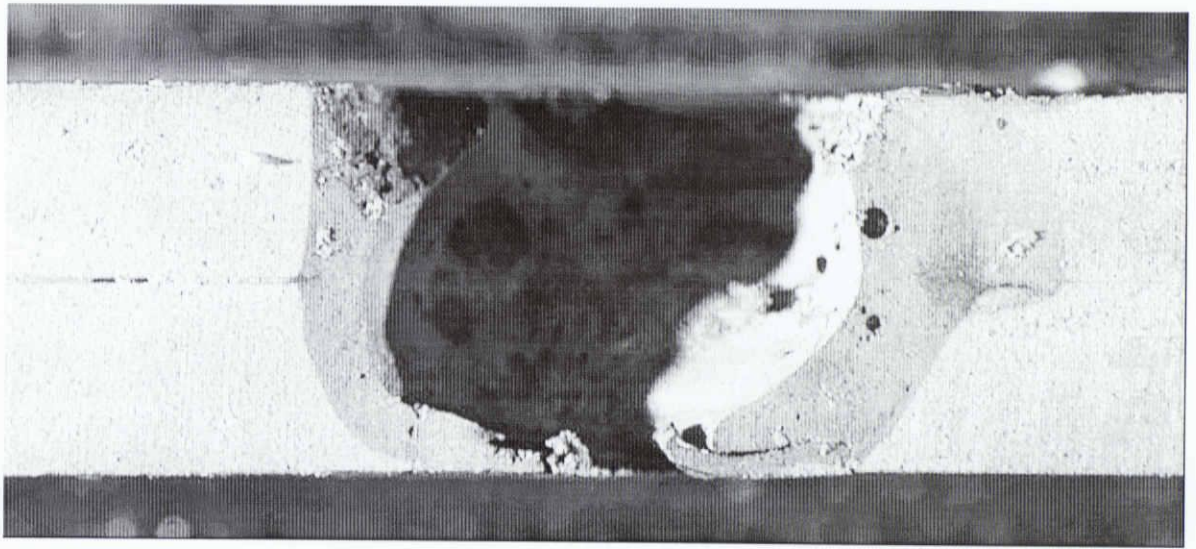


Fig.3-21 Explosion of nugget

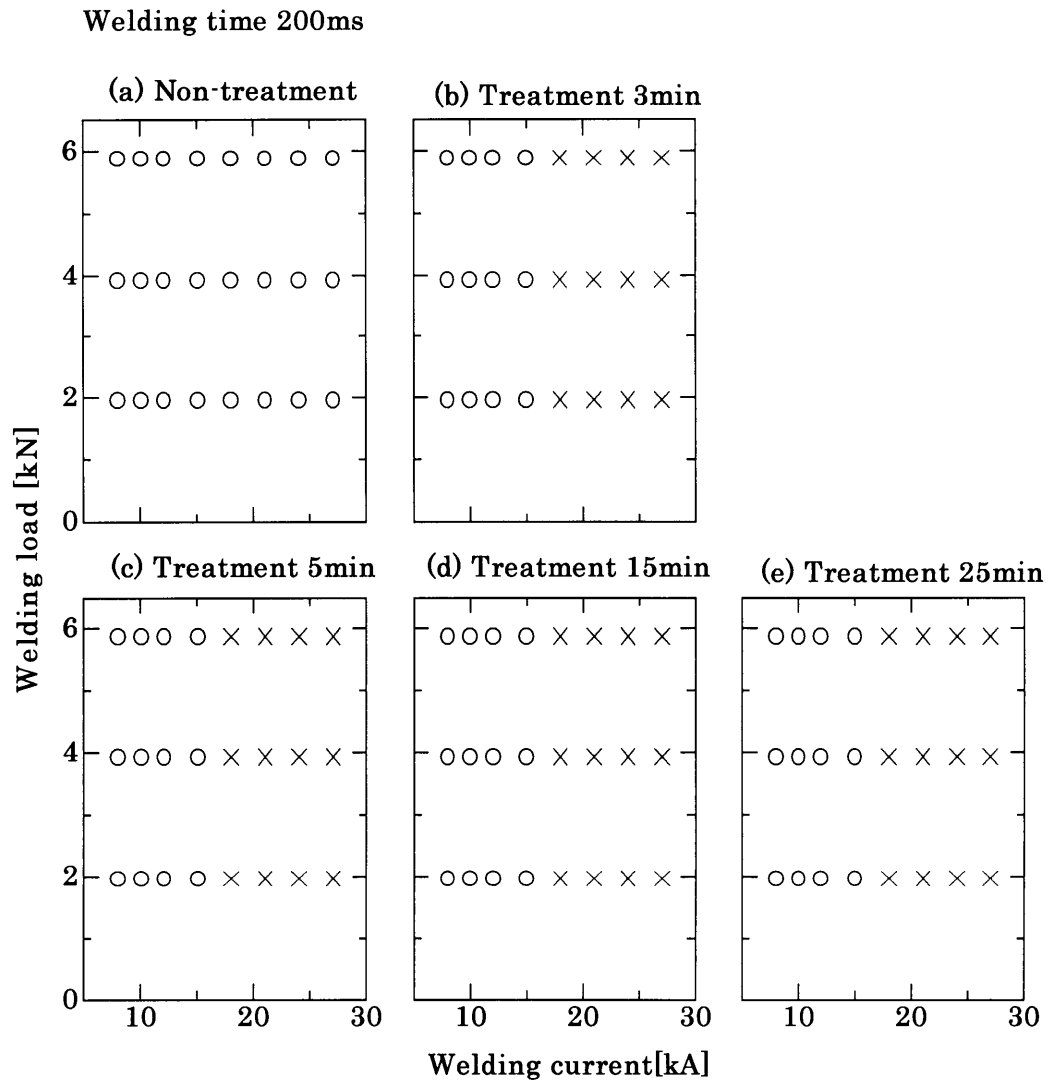


Fig.3-22

Condition when explosion of A1050 both side treatments

Welding time 200ms

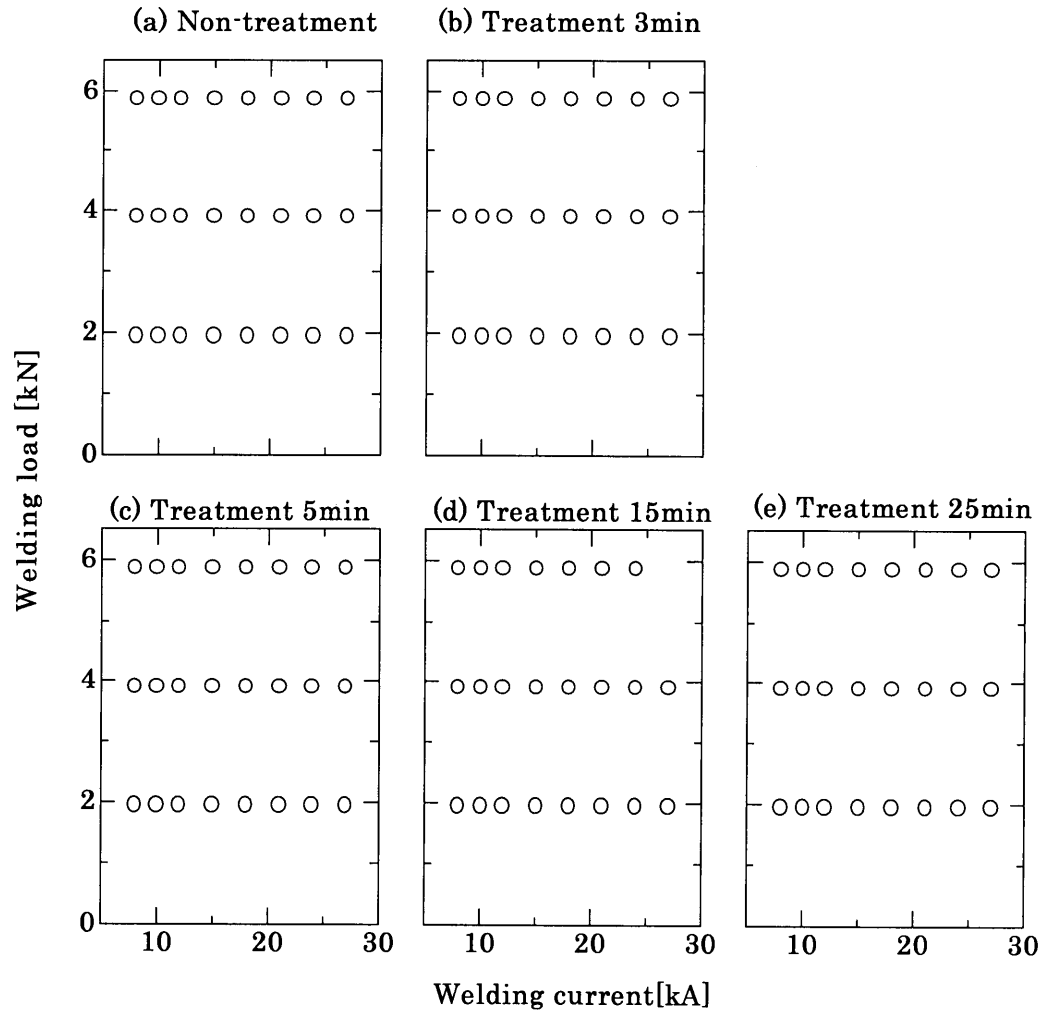


Fig.3-23

Condition when explosion of A1050 one side treatment

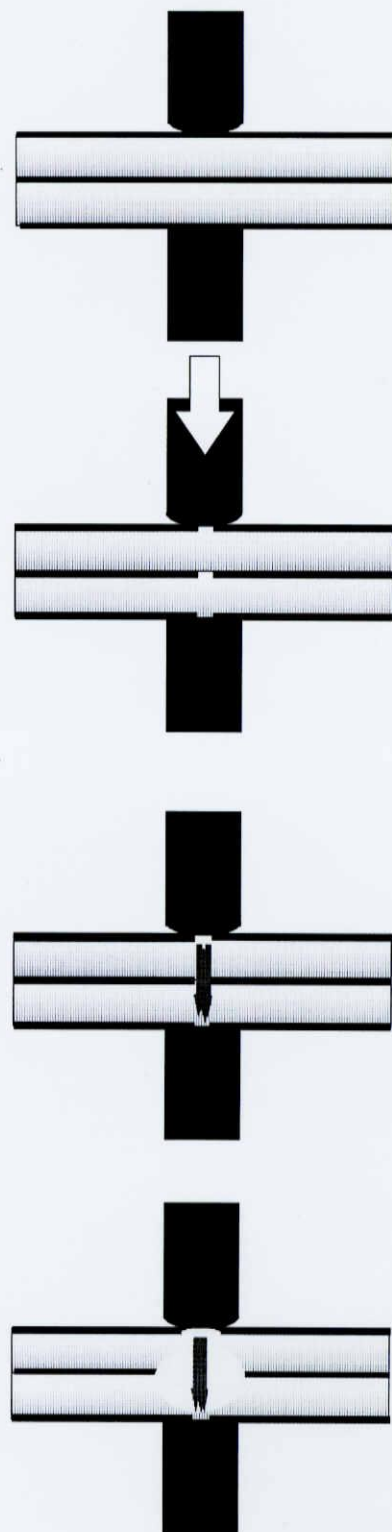


Fig.3-24

Illustration of both side boehmite treatment welding

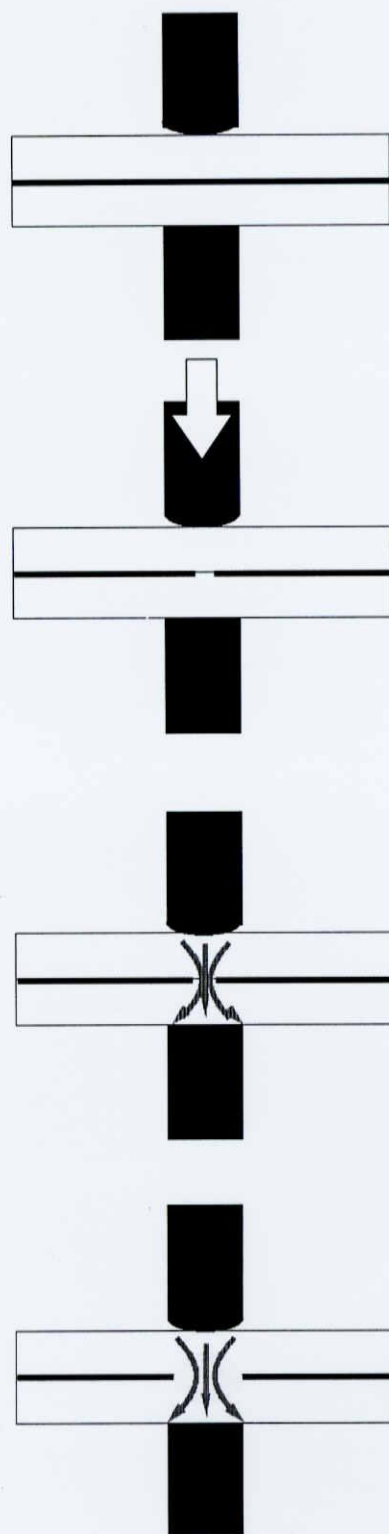


Fig.3-25

Illustration of One side boehmite treatment welding

Table.3-1  
welding condition

| Specimen | Weldig current<br>[kA] | Welding load<br>[kN] | Welding time<br>[ms] | Time of boehmite<br>treatment and face<br>[min] |
|----------|------------------------|----------------------|----------------------|---|
| A1050    | 8                      | 1.96                 | 20                   | 0   |
|          | 10                     | 3.92                 | 40                   | 3   |
|          | 12                     | 5.88                 | 60                   | 5   |
|          | 15                     |                      | 120                  | 15  |
|          | 18                     |                      | 180                  | 25  |
|          | 21                     |                      | 200                  |   |
|          | 24                     |                      |                      | One side  |
|          | 27                     |                      |                      | Both sides                                      |

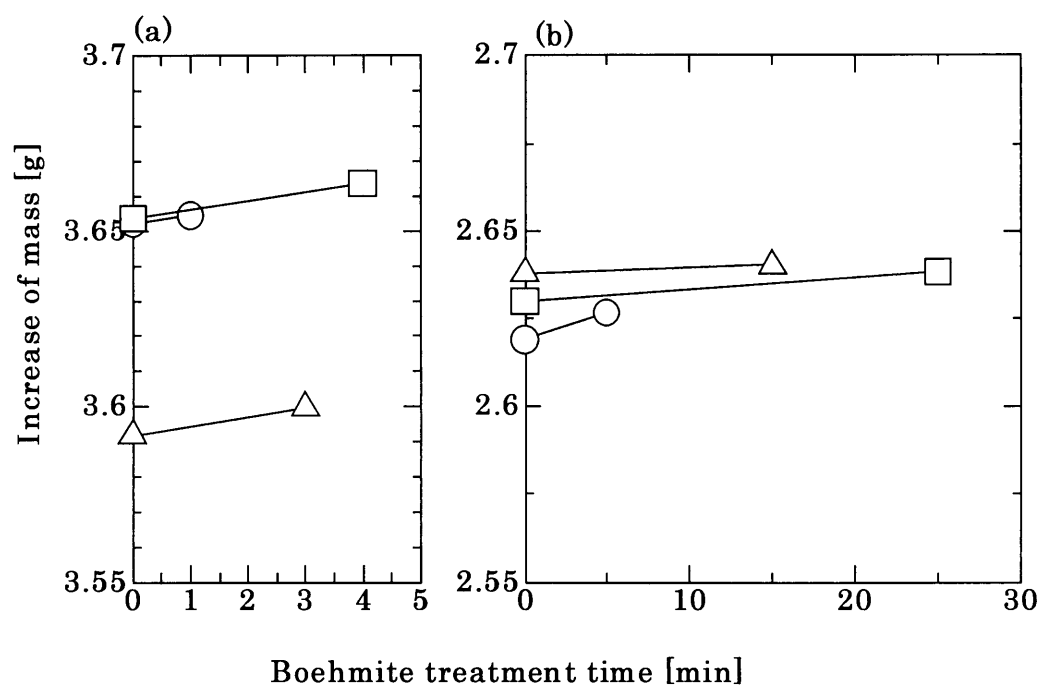


Fig.4-1

Weight increase by boehmite treatment time

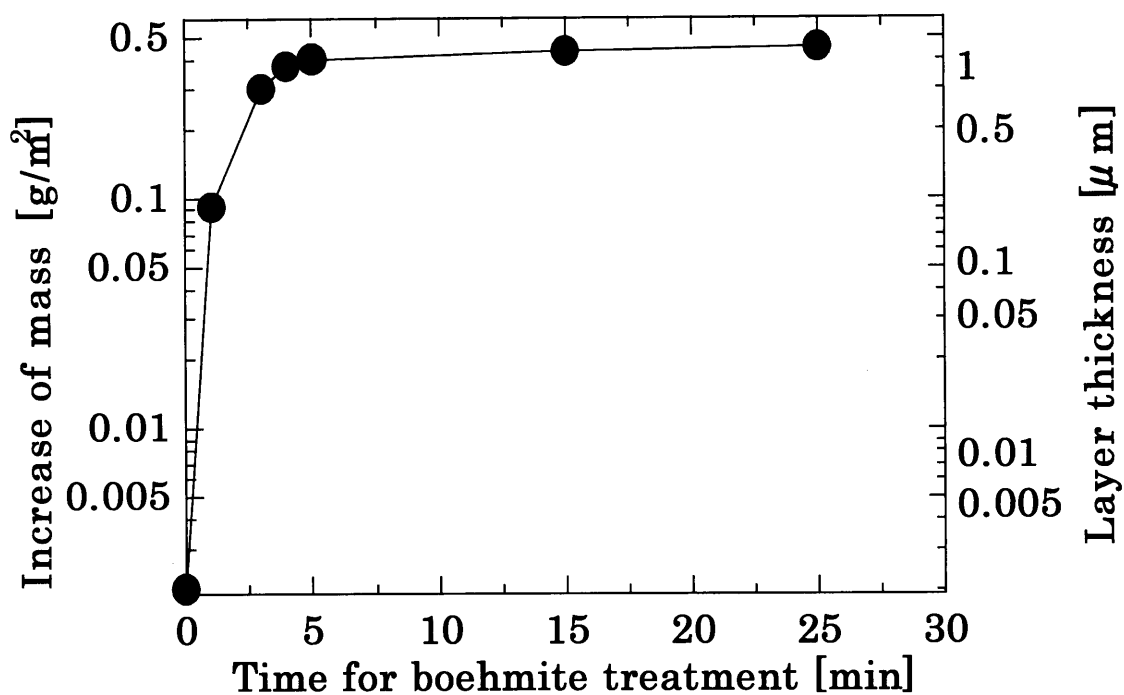


Fig.4-2

Increase of mass for boehmite and layer thickness by  
boehmite treatment time



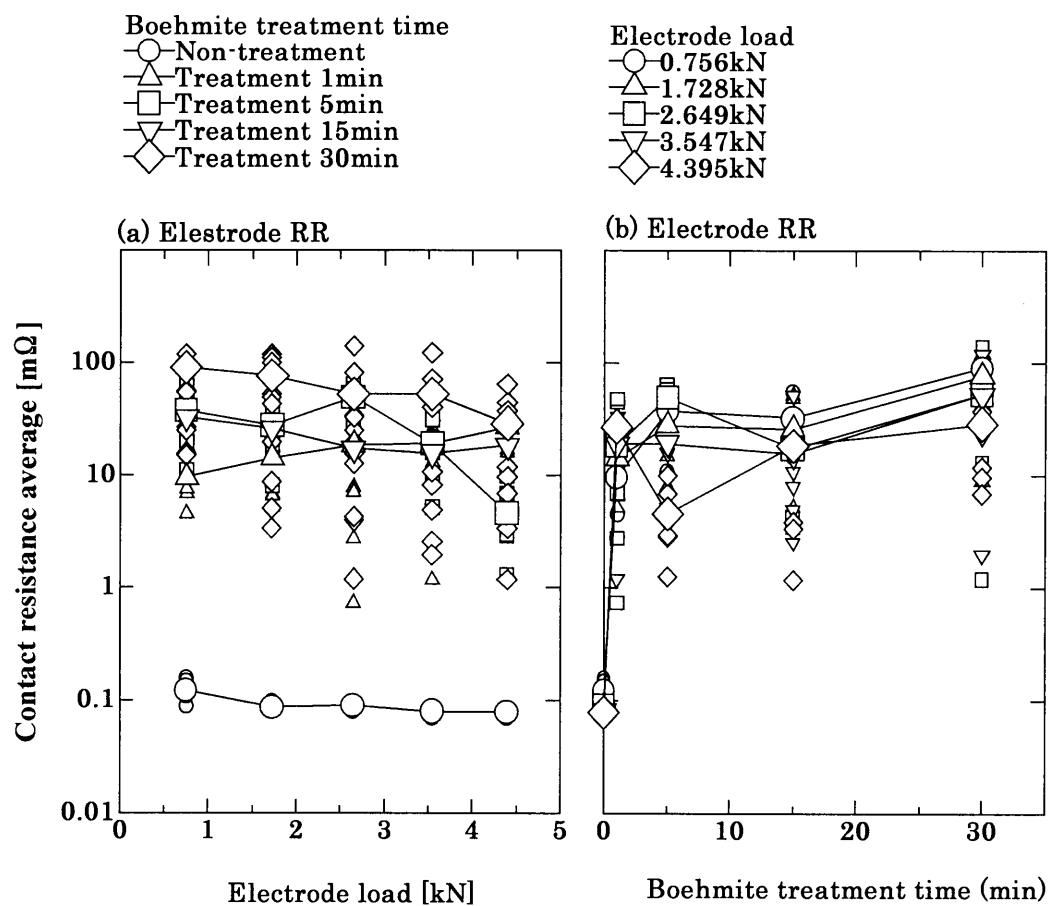


Fig.4-3 Influence of contact resistance

by boehmite treatment

Upper and under electrodes used R-figure

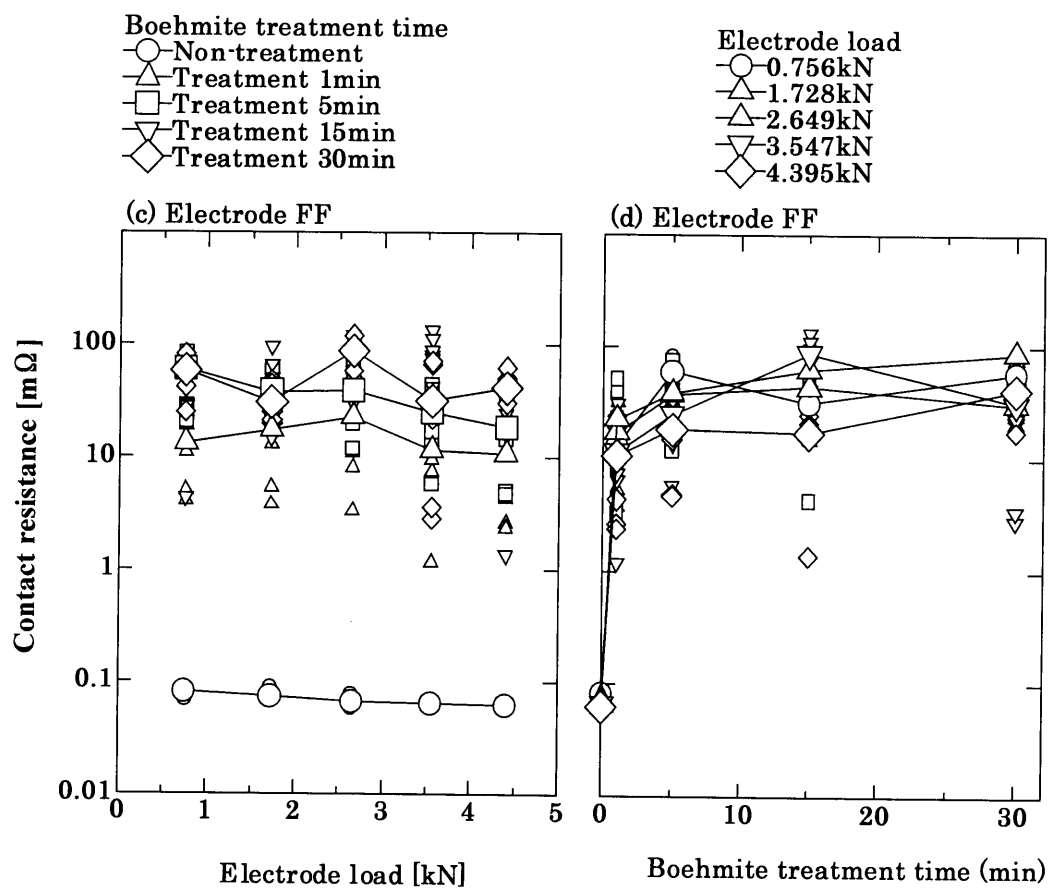


Fig.4-4 Influence of contact resistance  
by boehmite treatment

Upper and under electrodes used F-figure

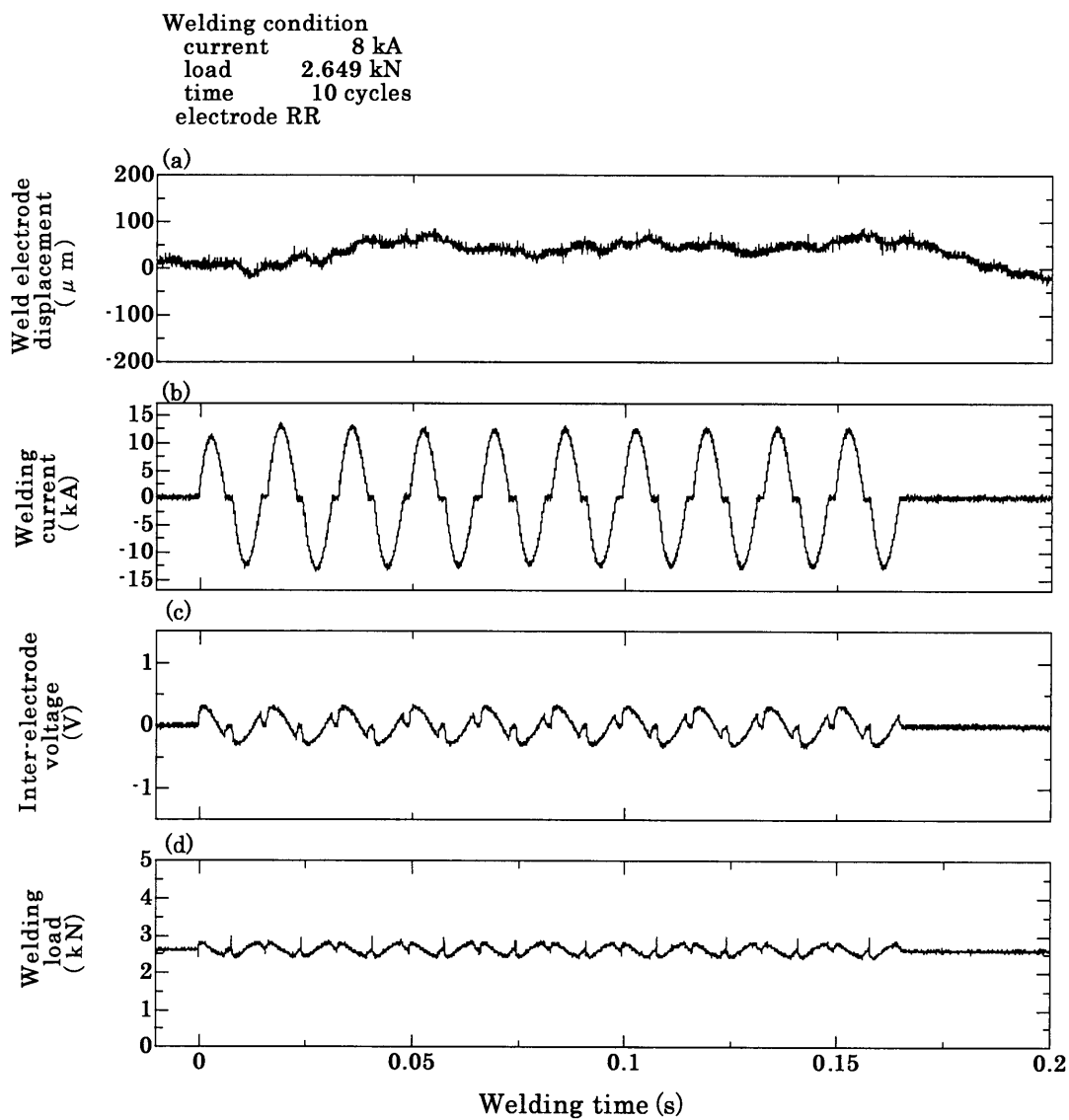


Fig. 4-5

Parameter responsency under spot welding

(a) Weld electrode displacement [ $\mu\text{m}$ ]

(b) Welding current [kA]

(c) Inter-electrode voltage [V]

(d) Welding load [kN]

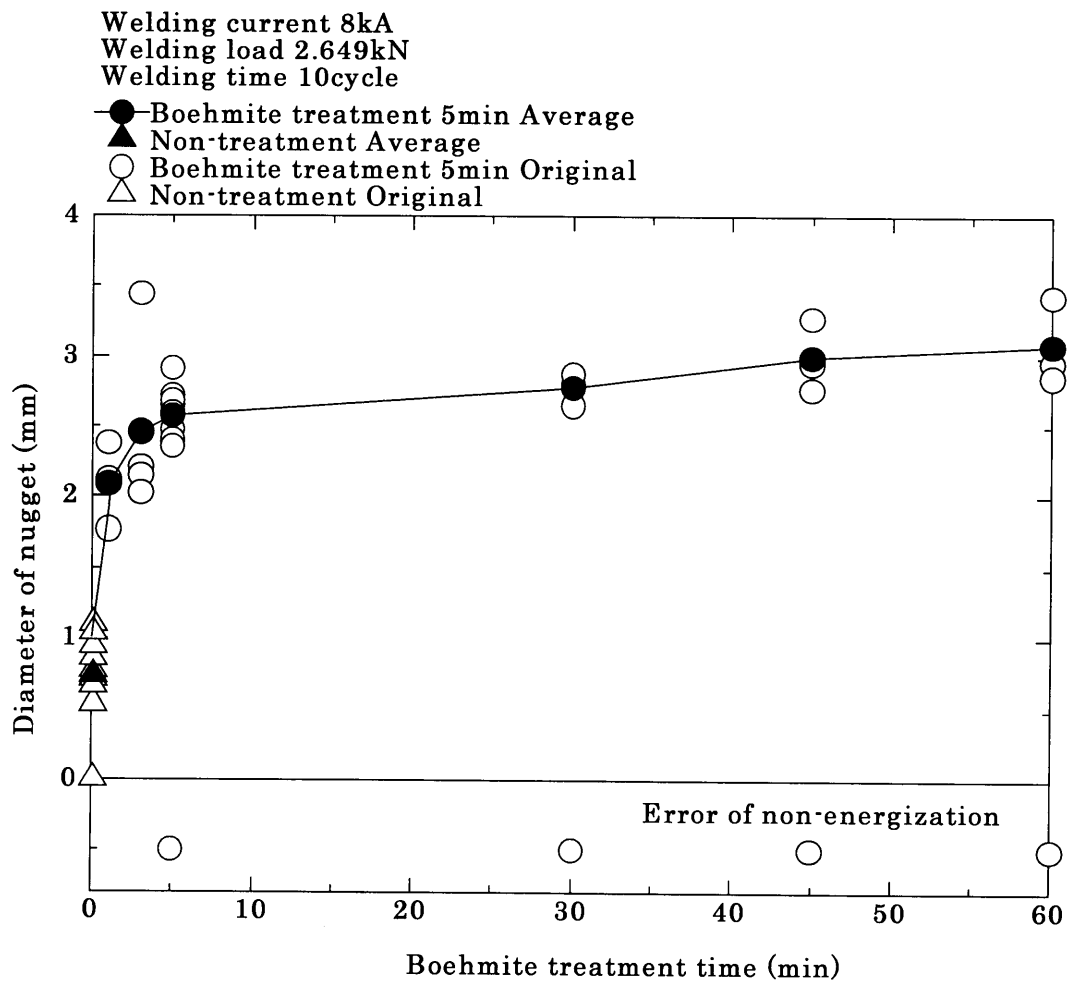


Fig. 4-6

Influence of boehmite treatment time on the nugget  
diameter in standard experiment

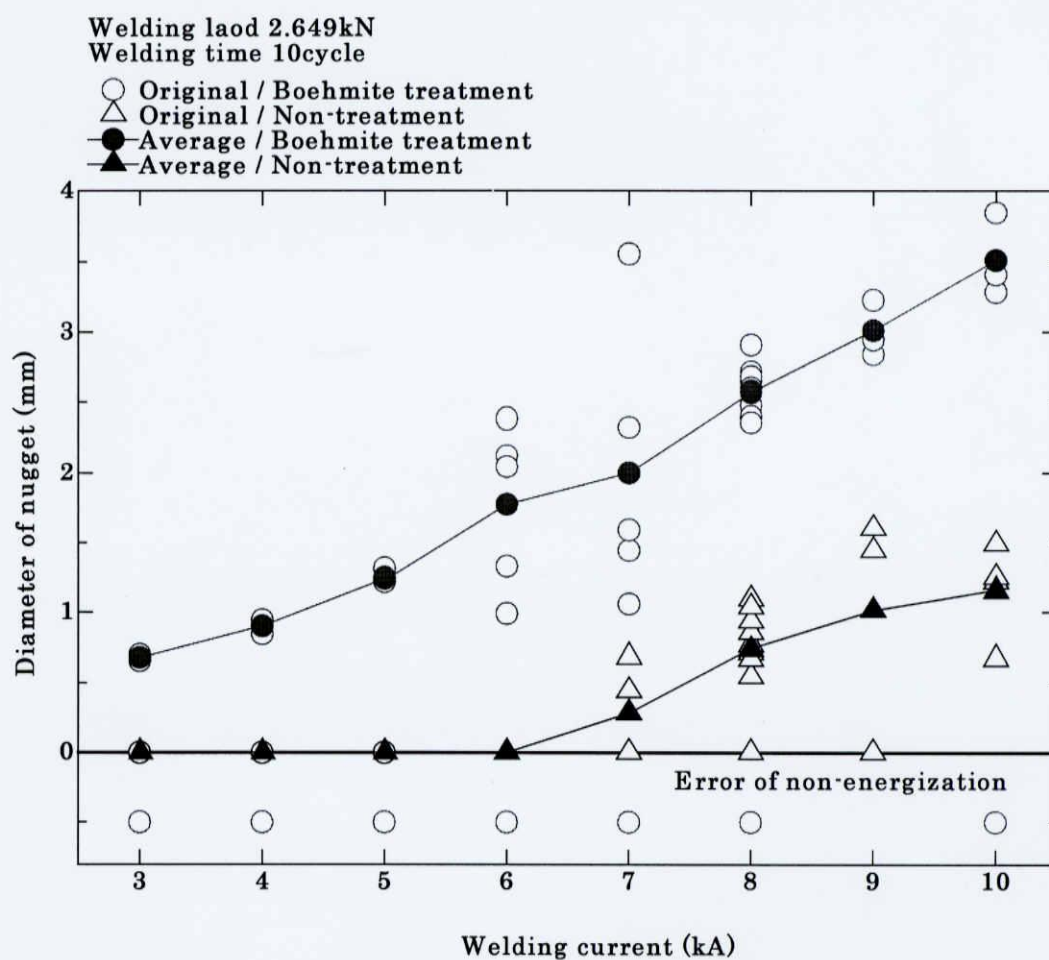


Fig.4-7

Influence of welding current on the nugget diameter  
in standard experiment

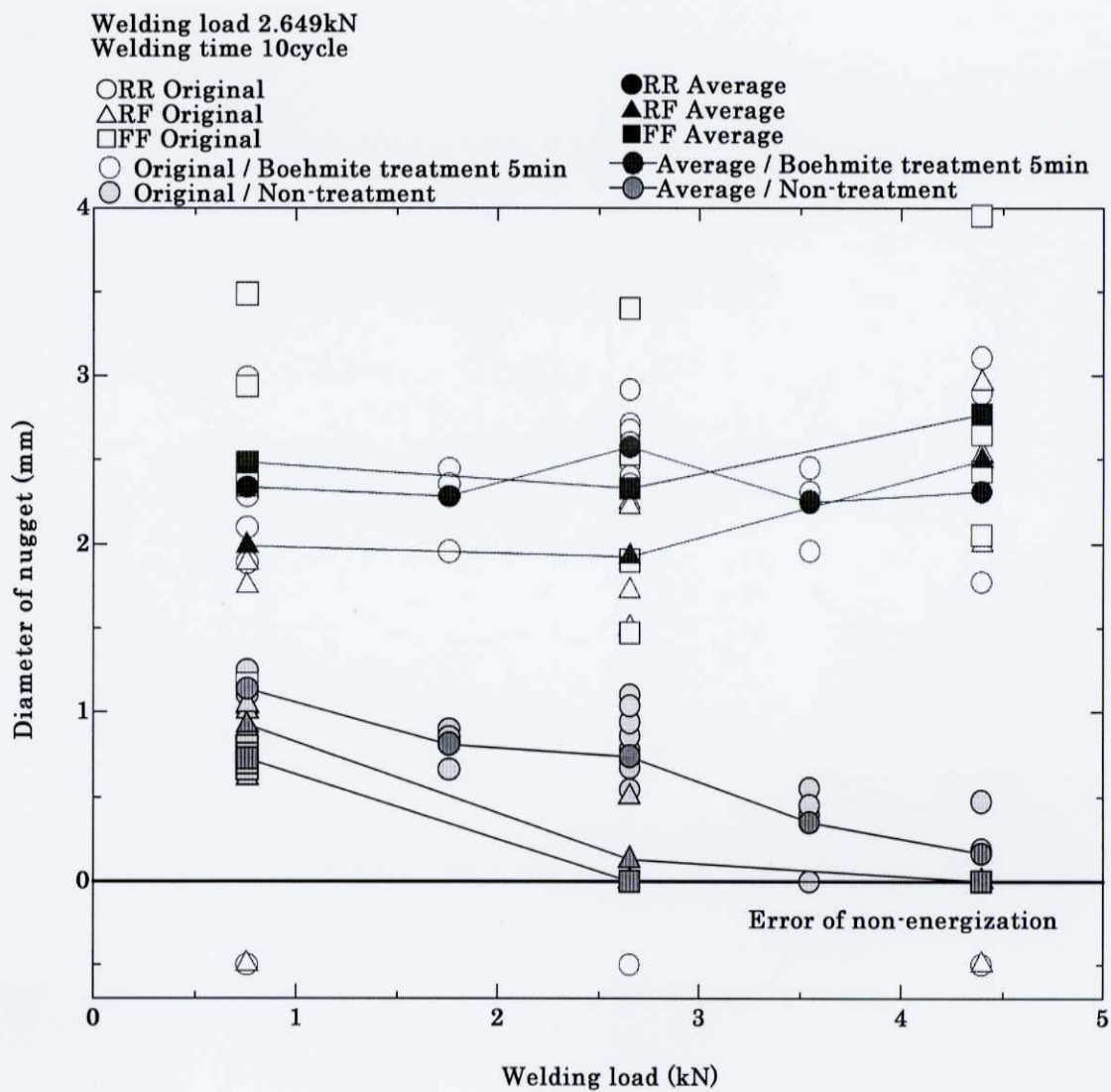


Fig. 4-8

Influence of welding load and electrode shape  
on the nugget diameter in standard experiment

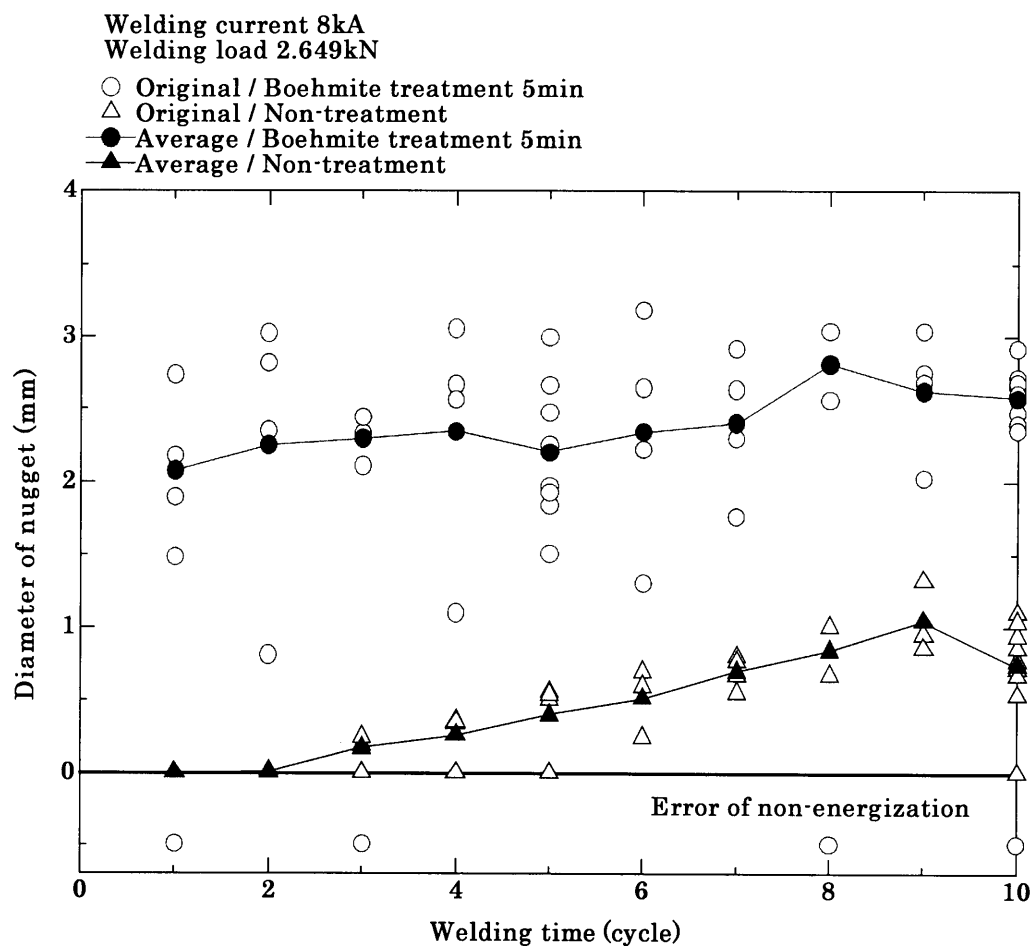


Fig.4-9

Influence of welding time on the nugget diameter in  
standard experiment

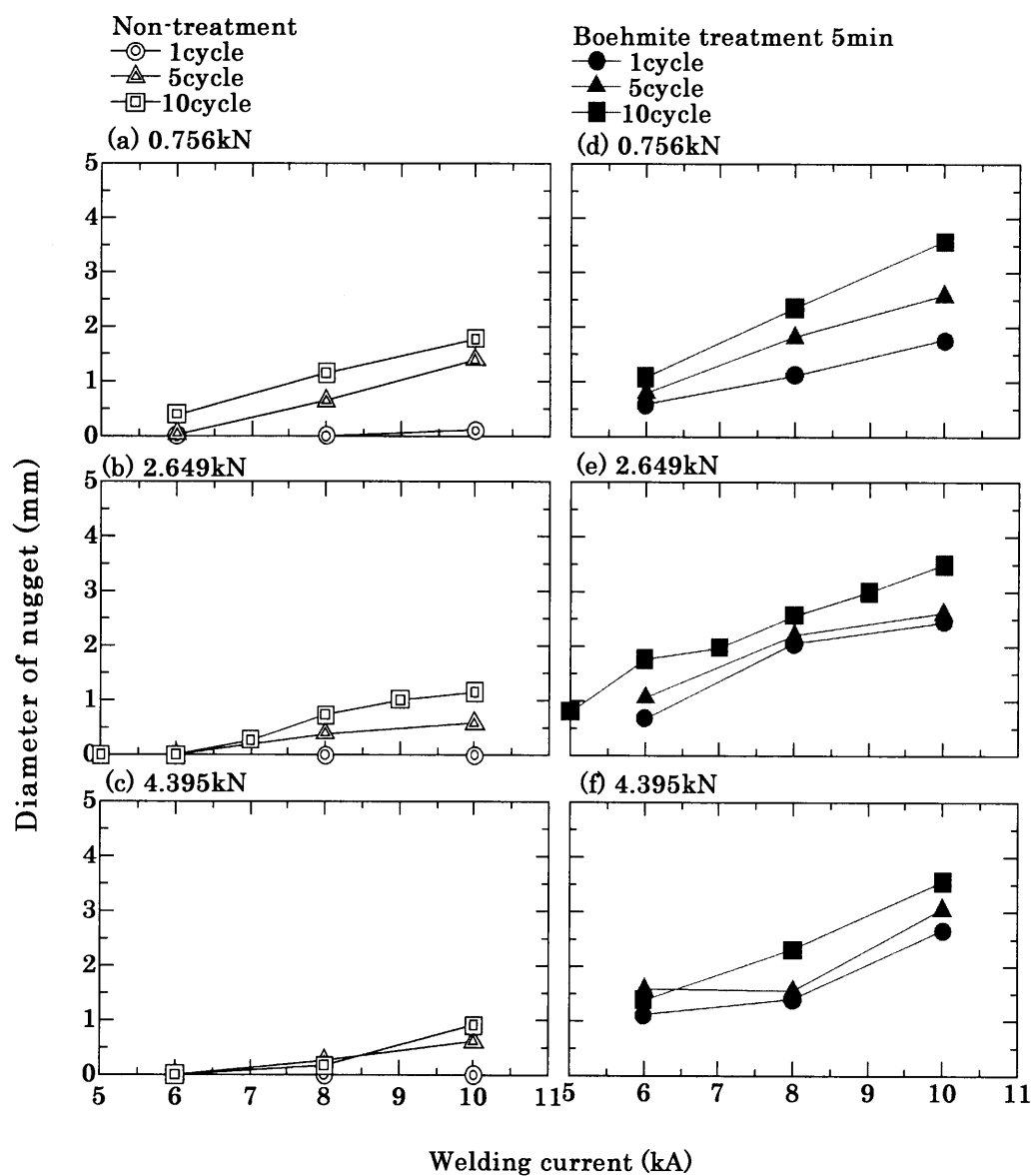


Fig.4-10

Influence of welding current on the nugget diameter



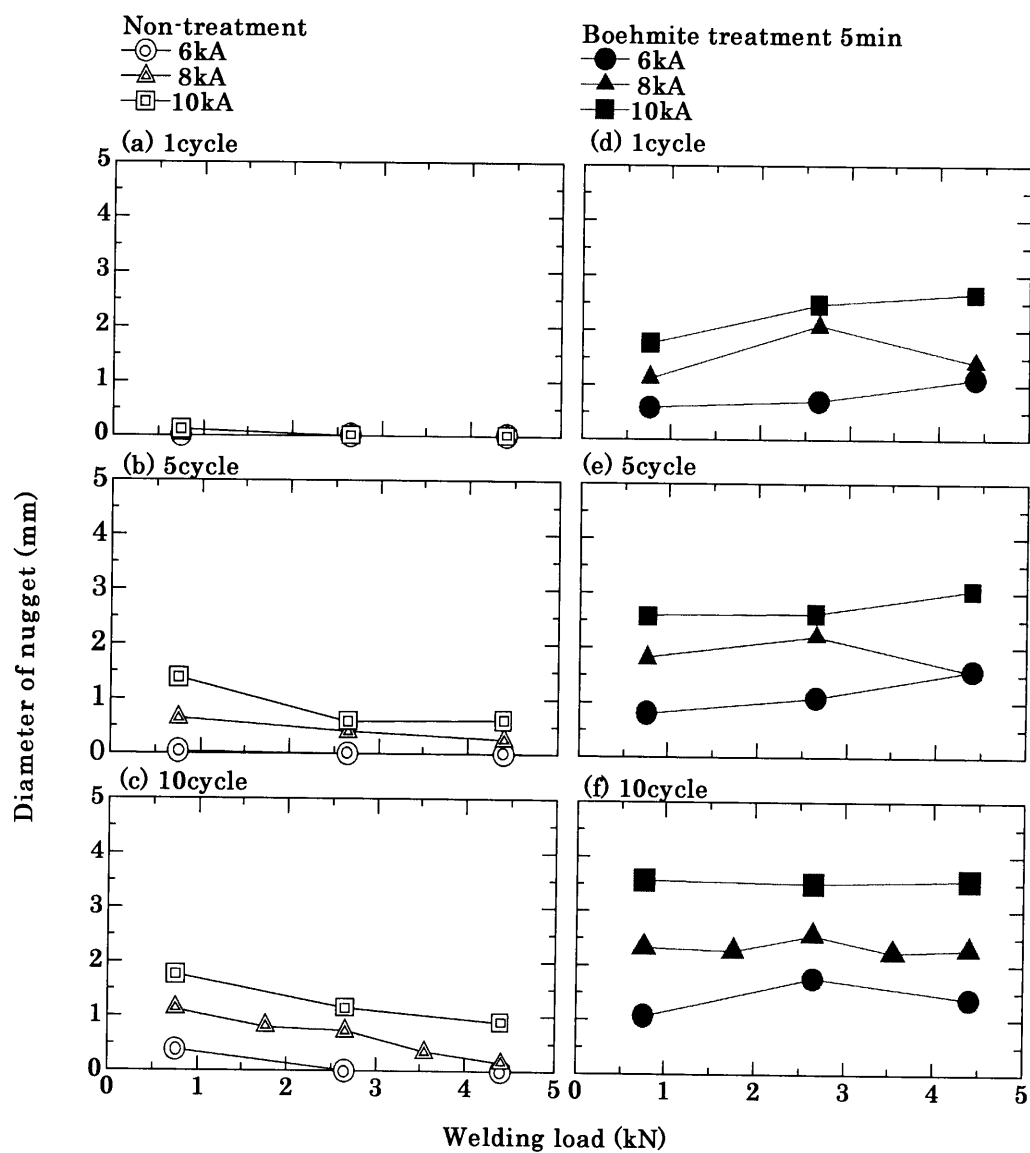


Fig. 4-11

Influence of welding load on the nugget diameter

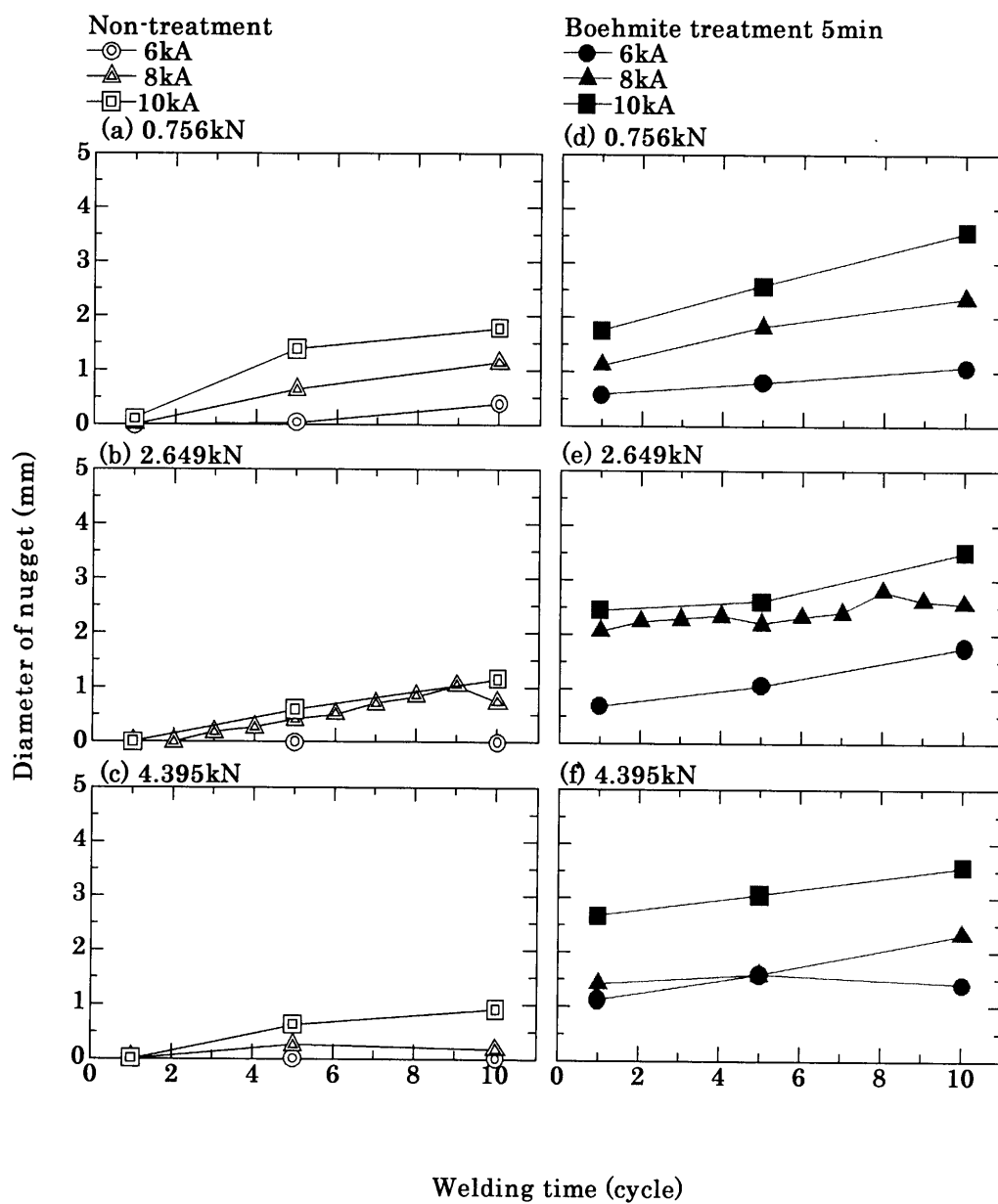


Fig.4-12

Influence of welding time on the nugget diameter

Welding condition  
current 8 kA  
load 2.649 kN  
time 10 cycles

Electrode RR

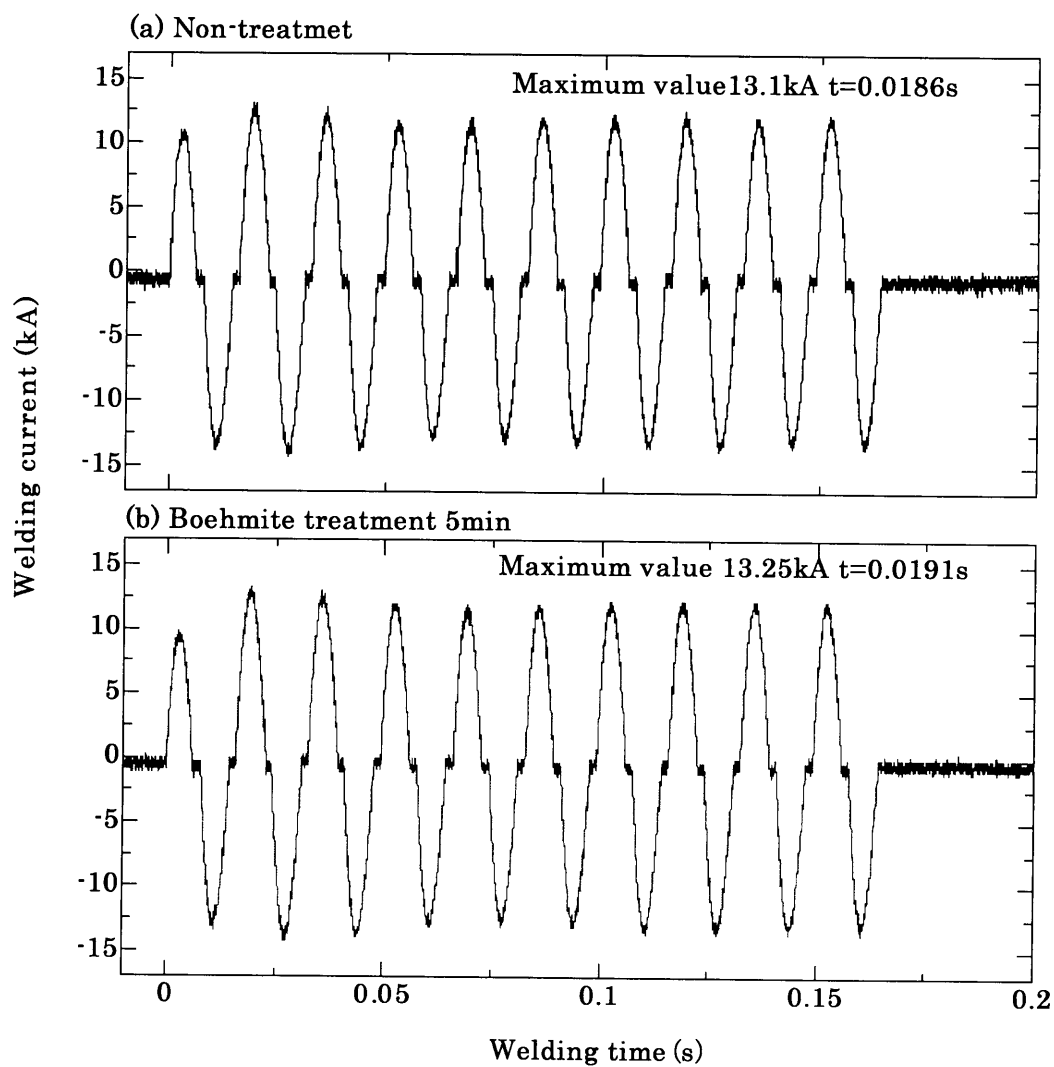


Fig.4-13

Welding current of non-treatment and  
boehmite treatment 5min

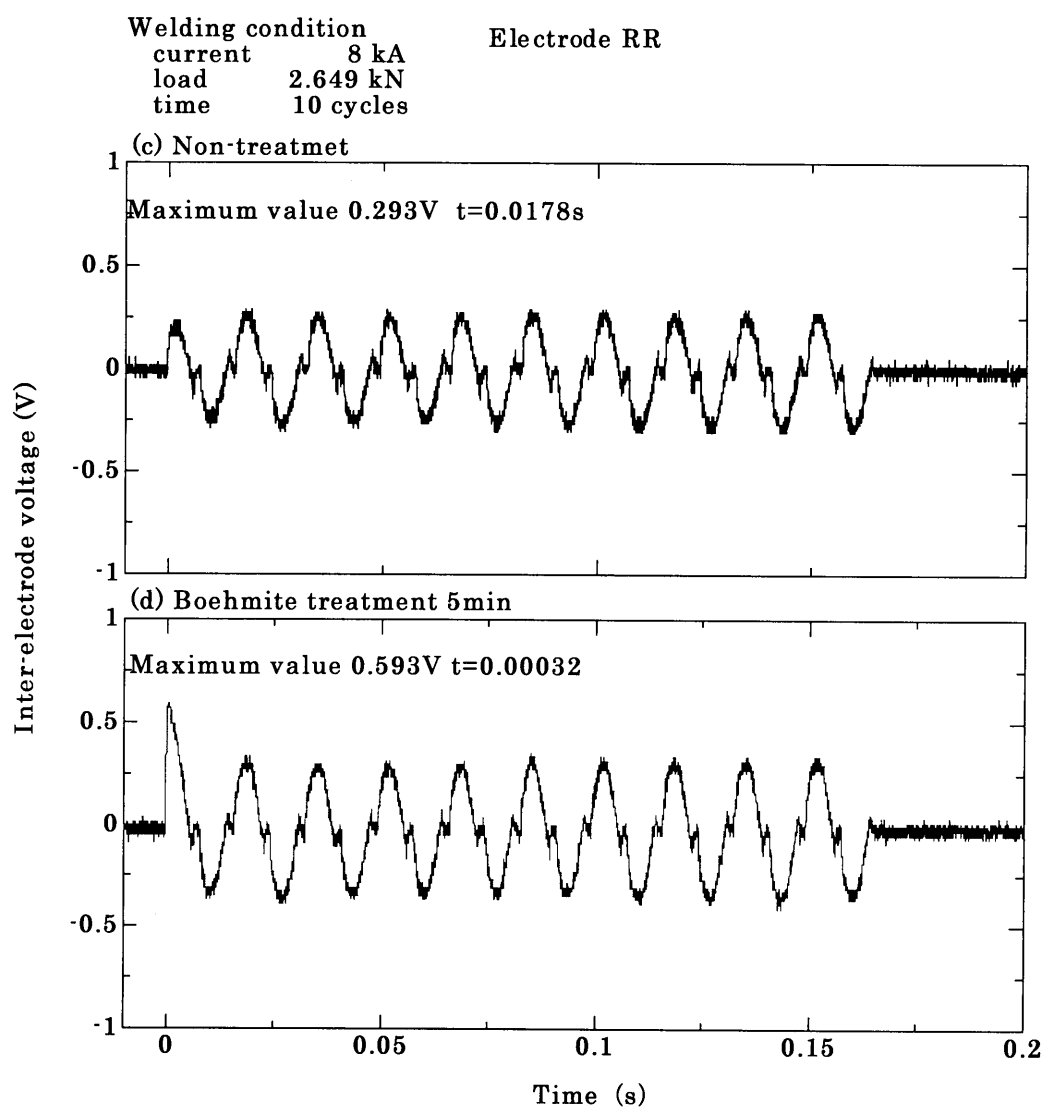


Fig.4-14

Inter-electrode voltage of non-treatment and  
boehmite treatment 5min

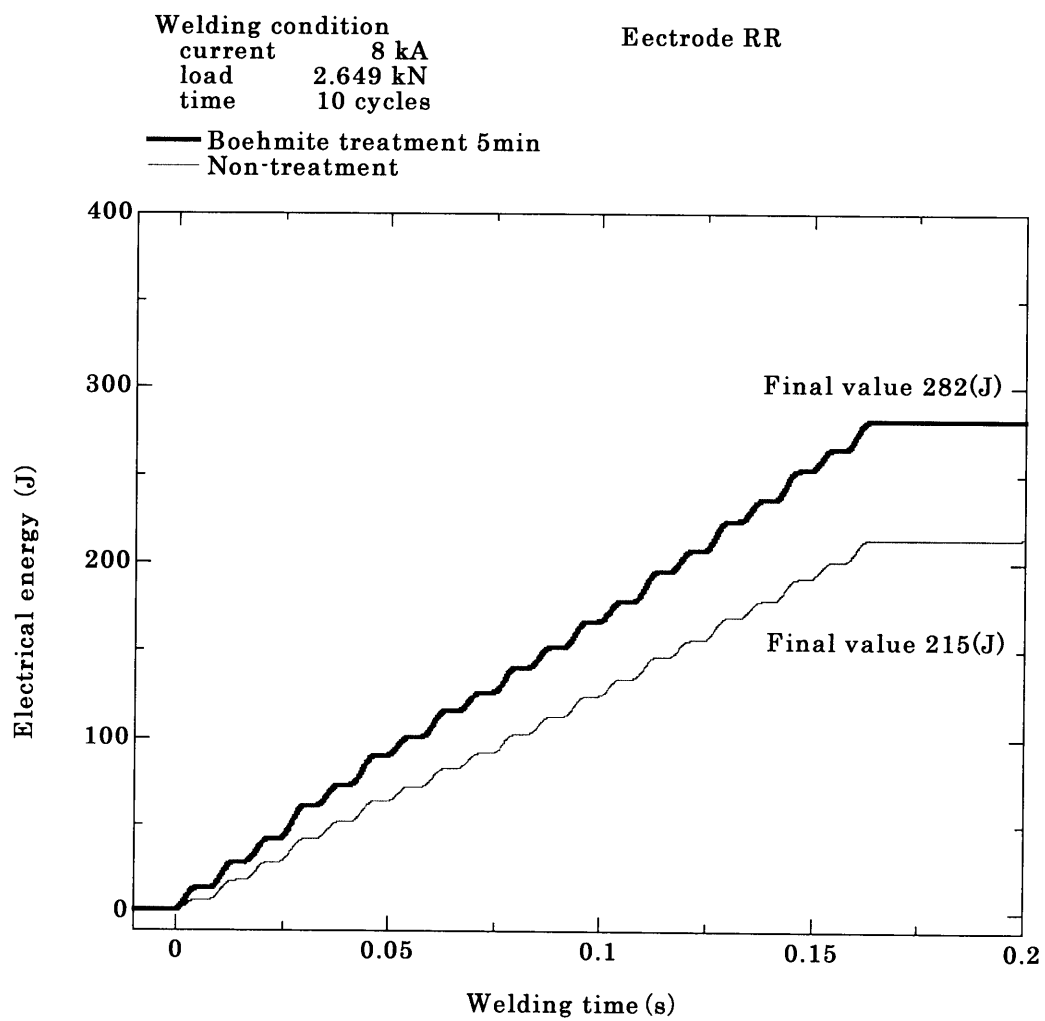


Fig.4-15

Electrical energy of non-treatment and  
boehmite treatment 5min

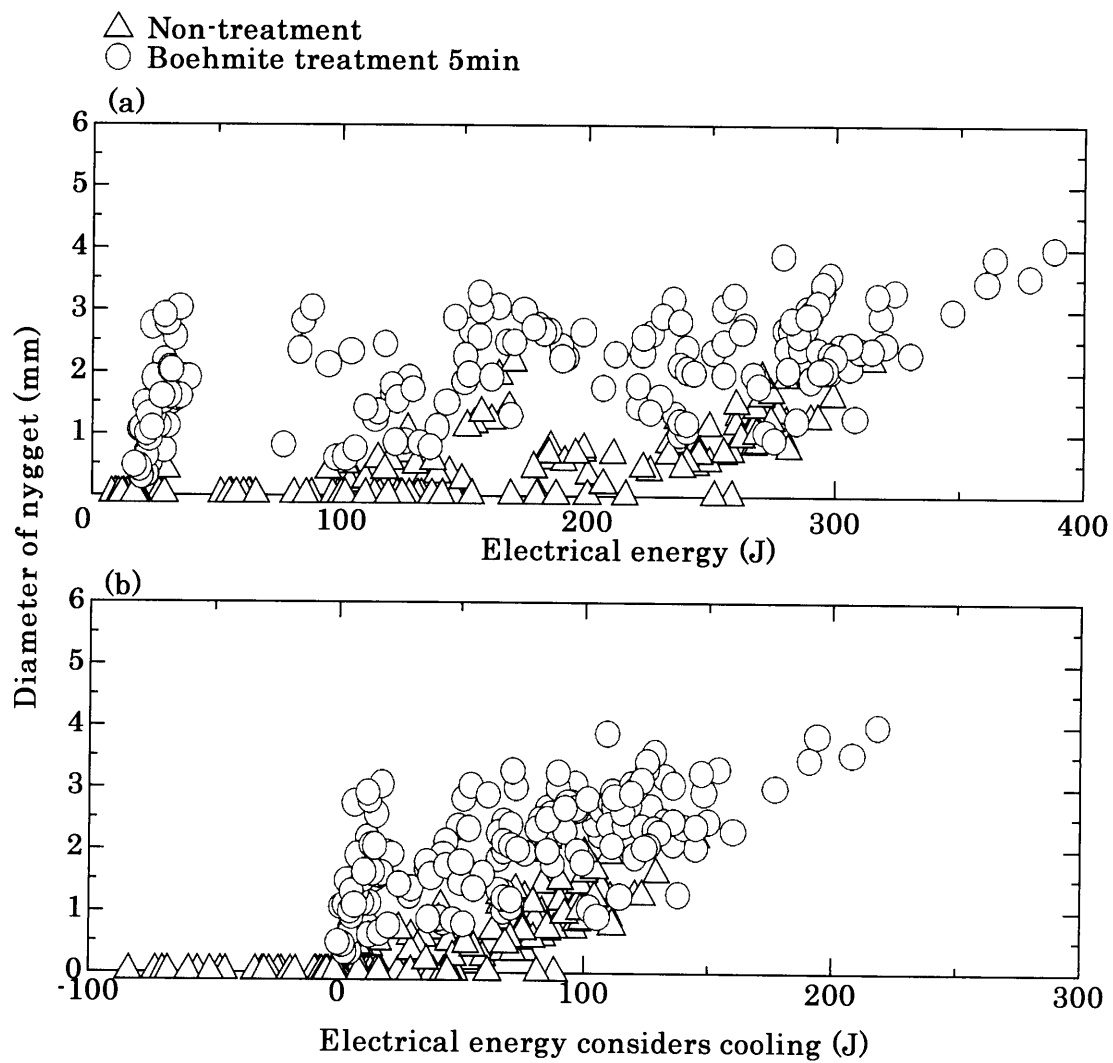


Fig.4-16

Influence of electrical energy (a) and electrical energy considers cooling (b) on nugget diameter in non-treatment and boehmite treatment 5min

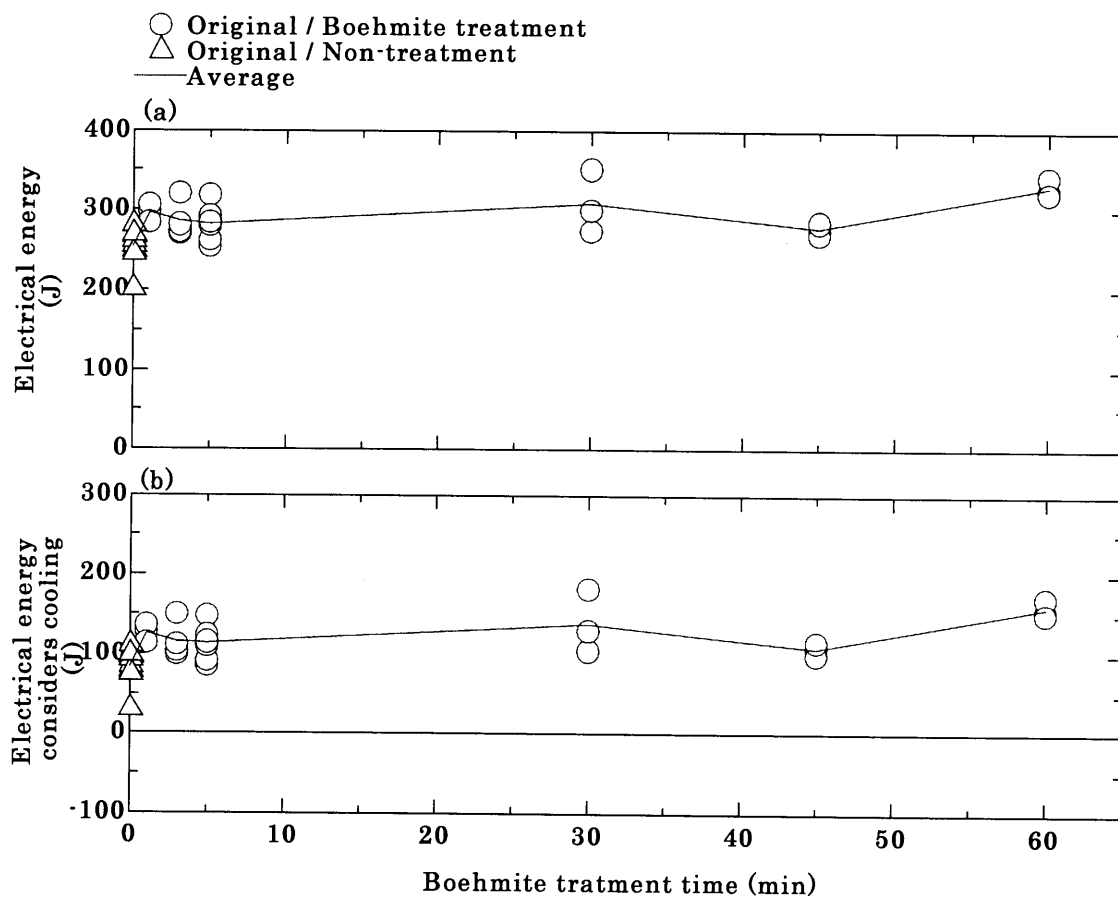


Fig.4-17

Relation between boehmite treatment time (a) and electrical energy (b) or electrical energy considers cooling

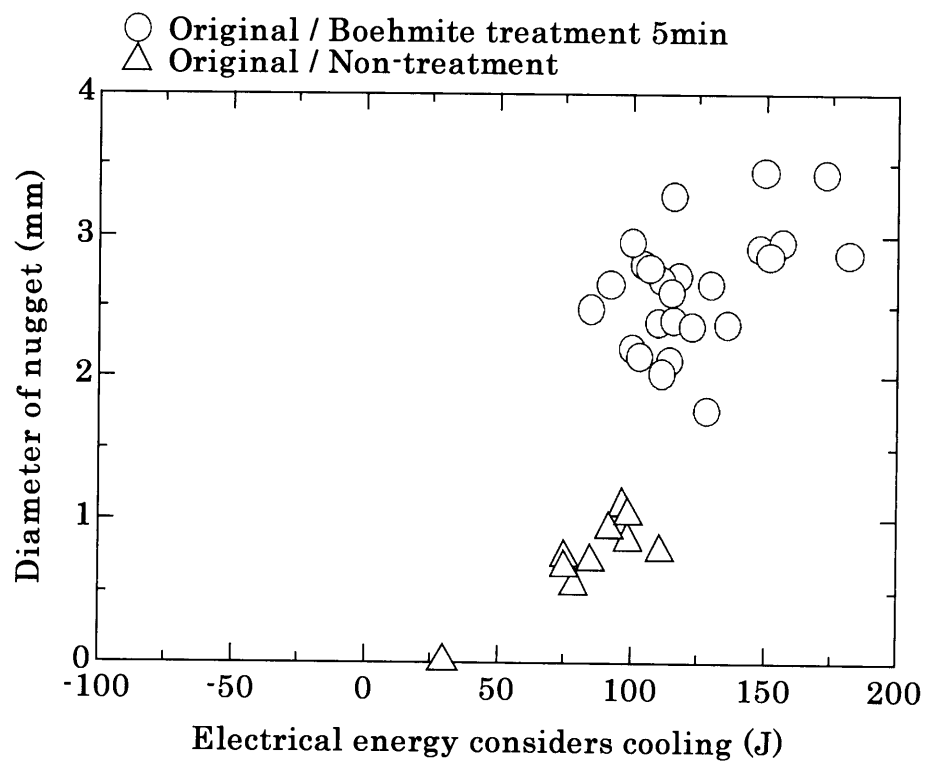


Fig.4-18

Influence of electrical energy considers cooling on  
nugget diameter  
when boehmite treatment time changes



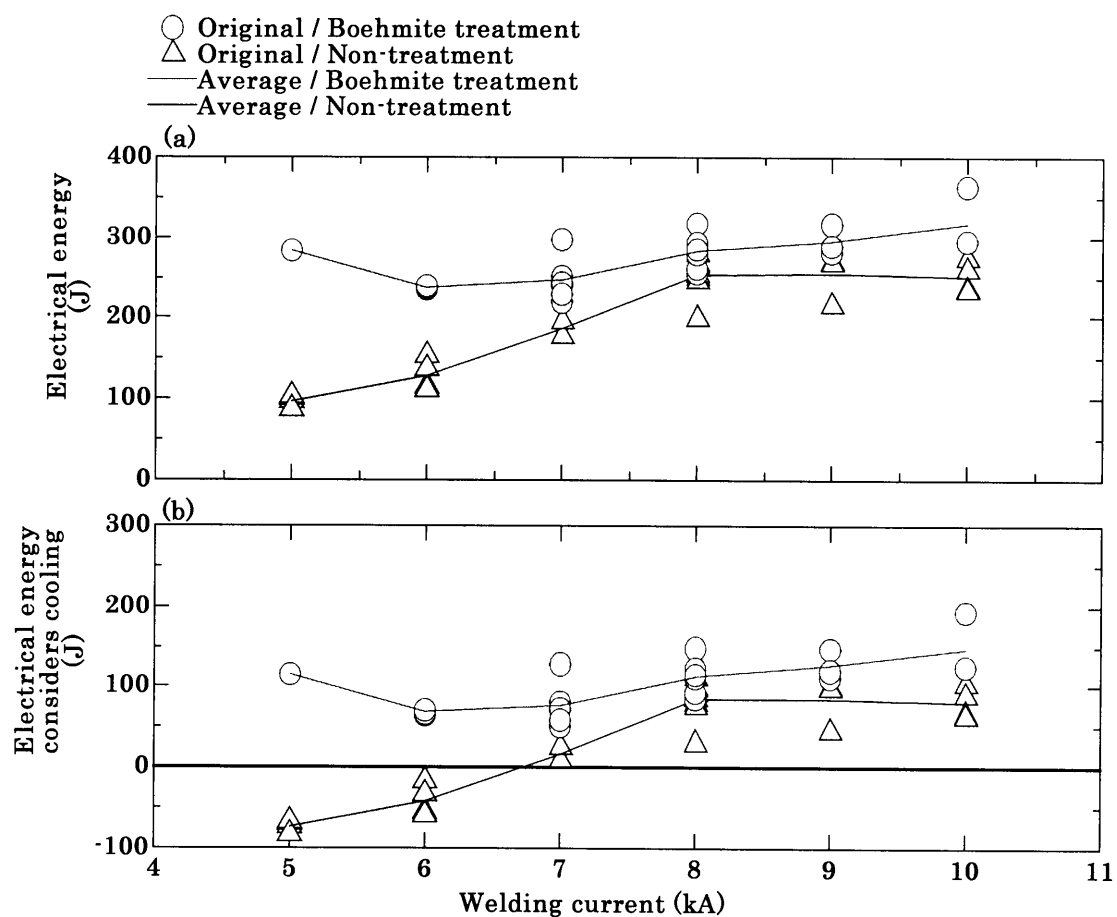


Fig.4-19

Relation of welding current (a) and electrical energy (b)  
or electrical energy considers cooling  
in non-treatment and boehmite treatment 5min

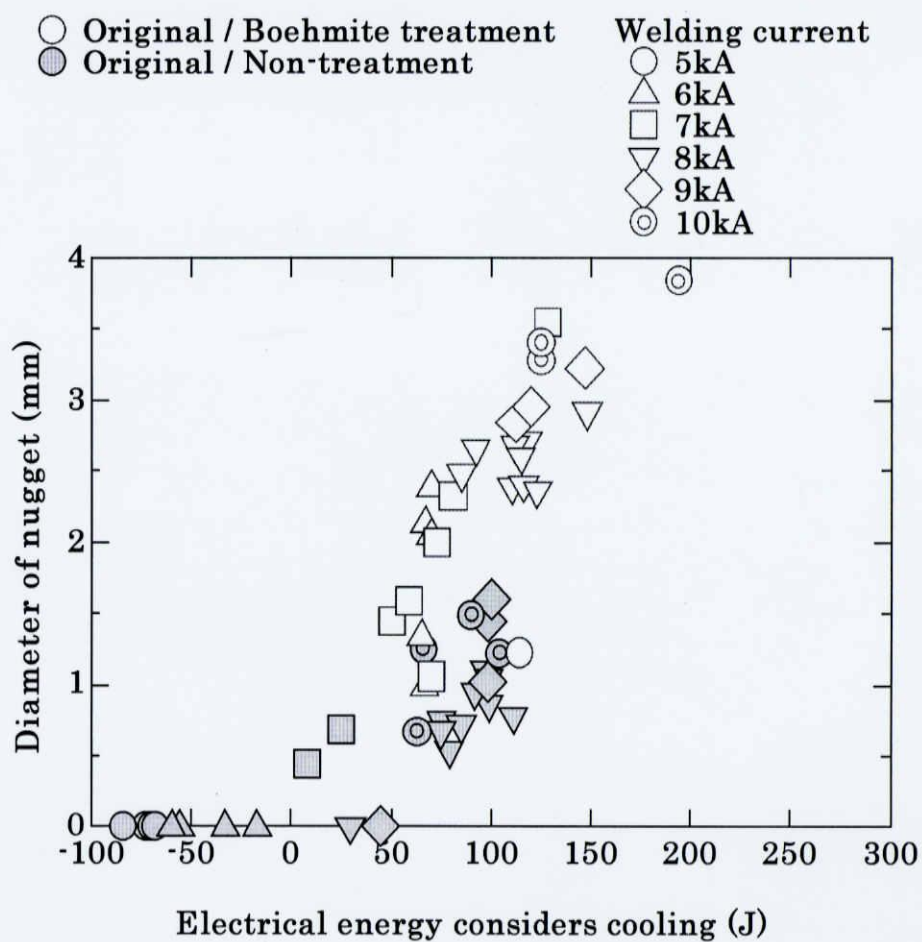


Fig.4-20

Influence of electrical energy considers cooling on nugget diameter when welding current changes for non-treatment and boehmite treatment 5min

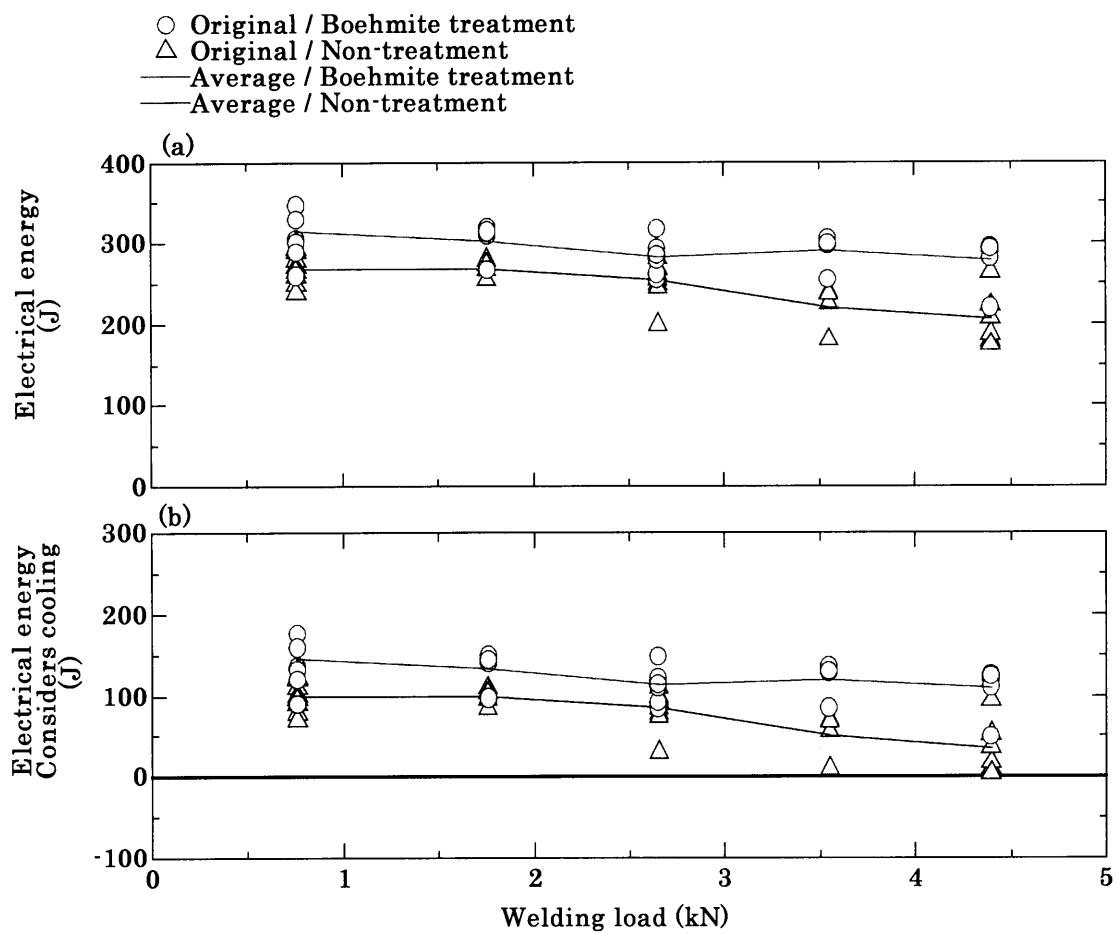


Fig.4-21

Relation of electrical welding load and (a) electrical energy (b) or electrical energy considers cooling for non-treatment and boehmite treatment 5min

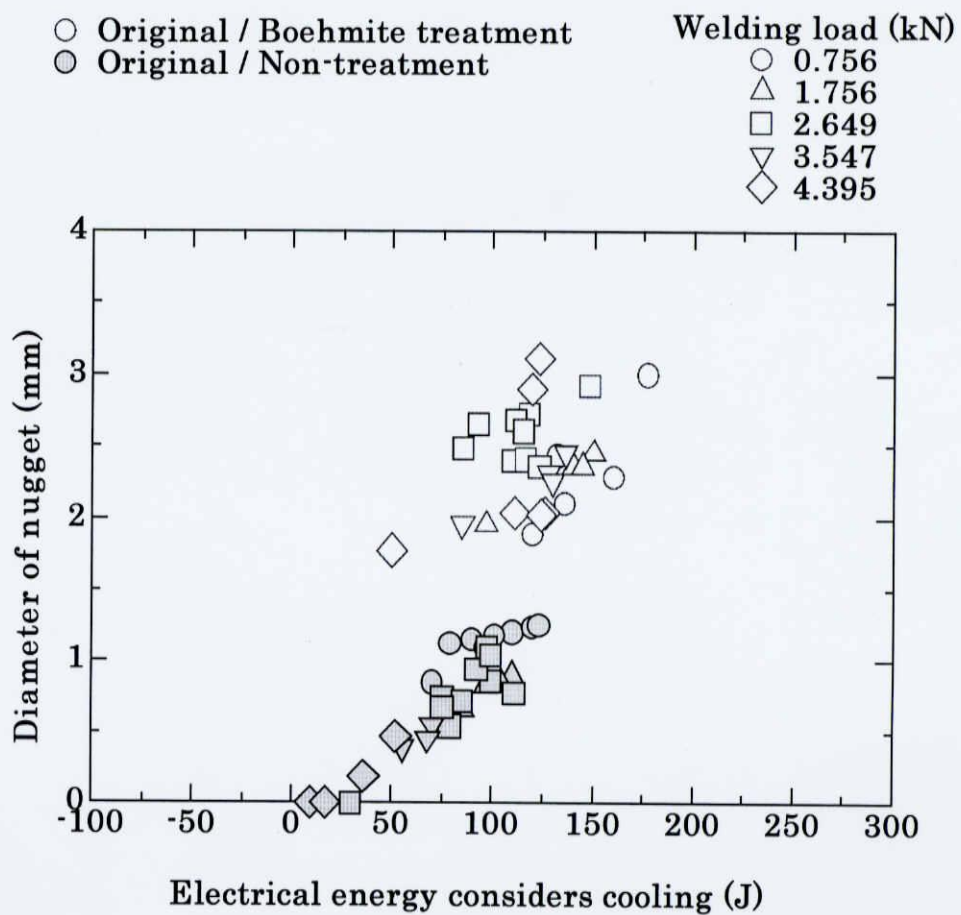


Fig.4-22

Influence of electrical energy considers cooling on  
 nugget diameter when welding load changes for  
 non-treatment and boehmite treatment 5min

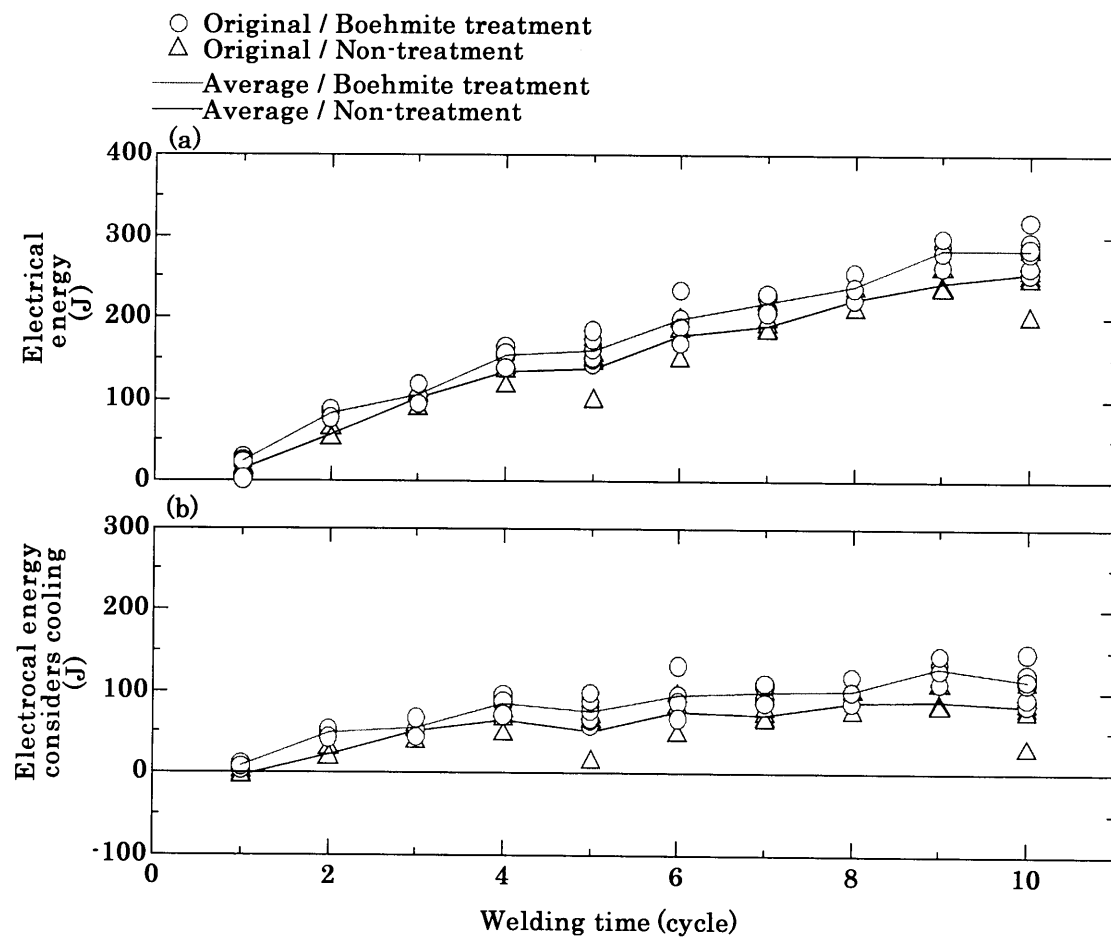


Fig.4-23

Relation between welding time and (a) electrical energy  
(b) or electrical energy considers cooling  
for non-treatment and boehmite treatment 5 min

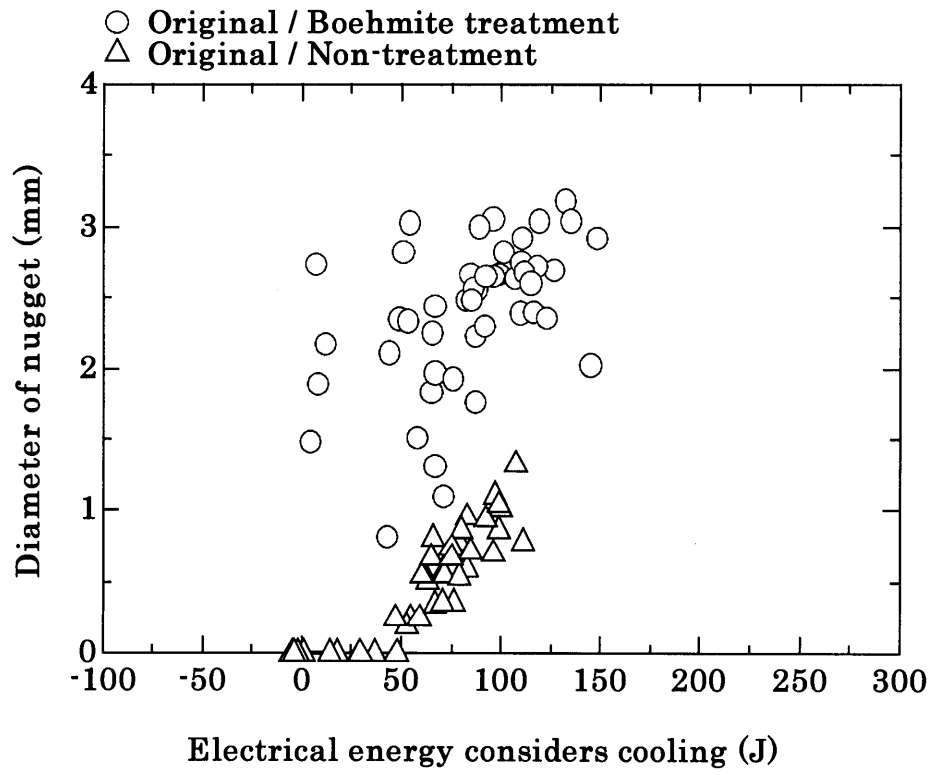


Fig.4-24

Influence of electrical energy considers cooling on nugget diameter when welding time changes for non-treatment and boehmite treatment 5min

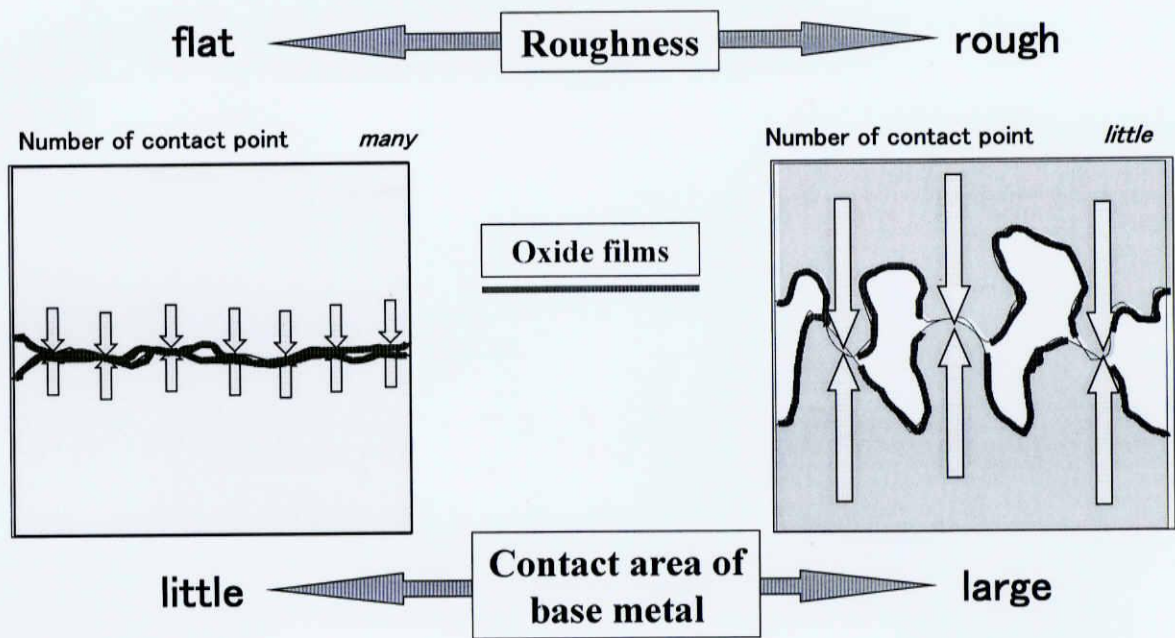


Fig.4-25

Destruction of oxide film

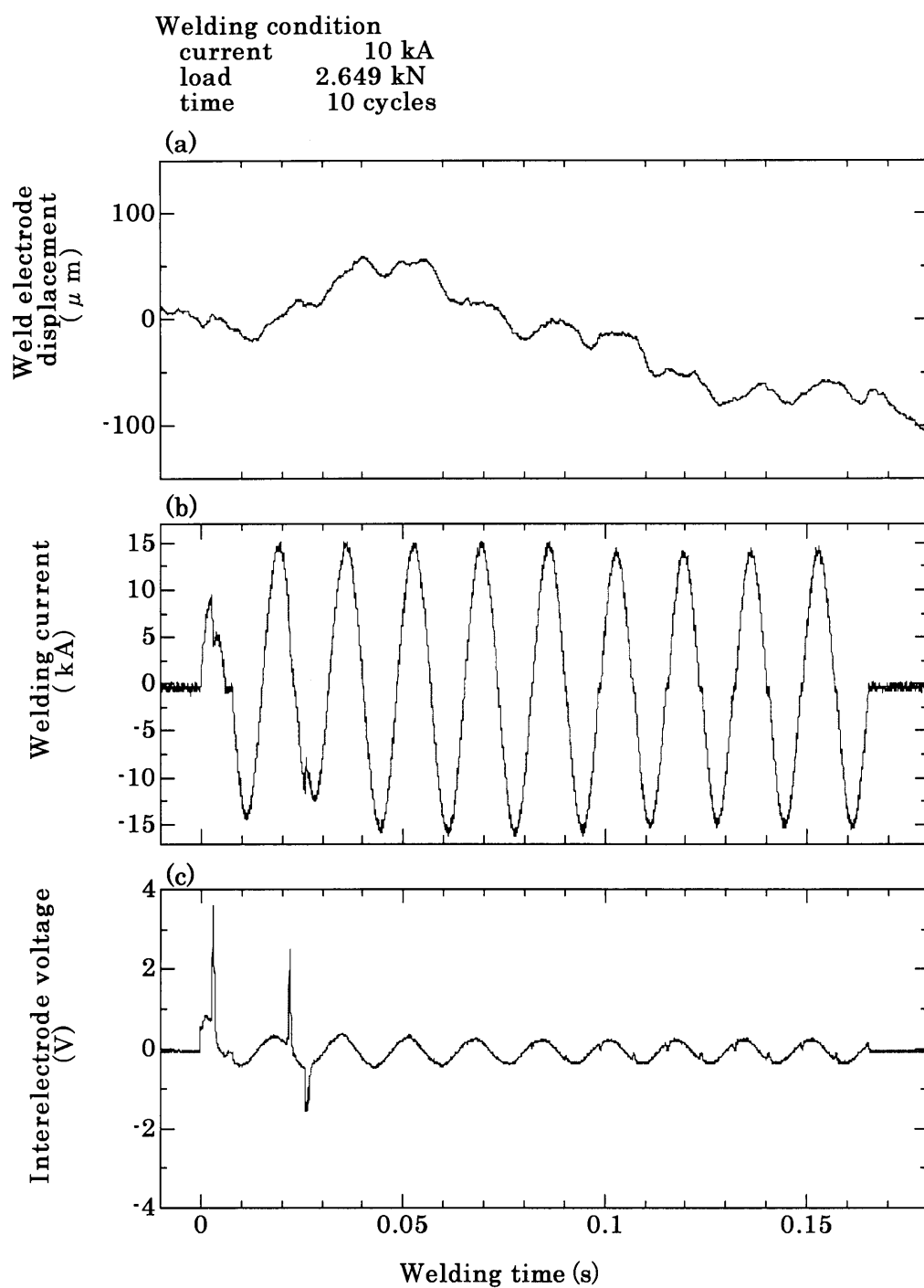


Fig. 4-26

(a) Weld electrode displacement, (b) welding current and  
(c) inter-electrode voltage waveform when explosion  
occurred



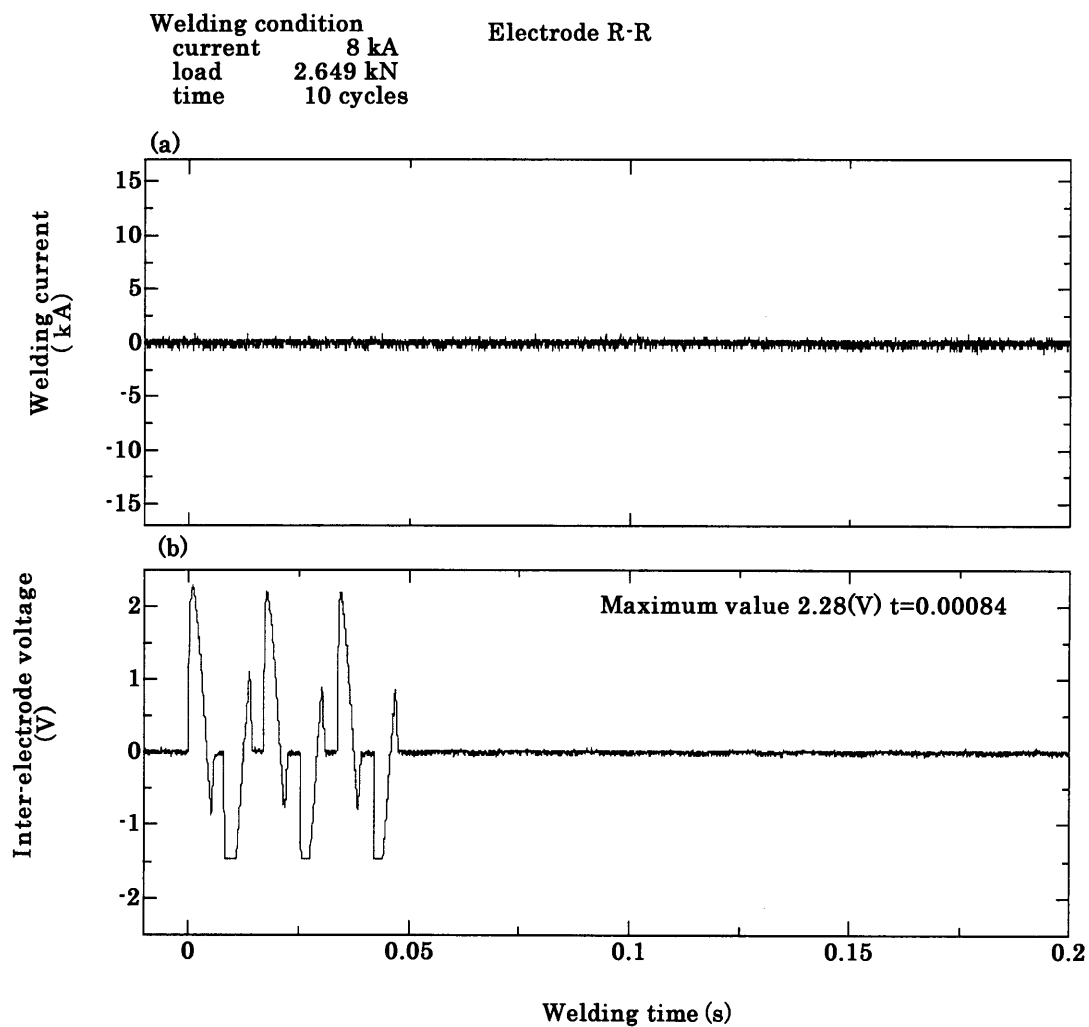


Fig.4-27

Waveform at (a) welding current and (b) inter-electrode voltage in non-energization error

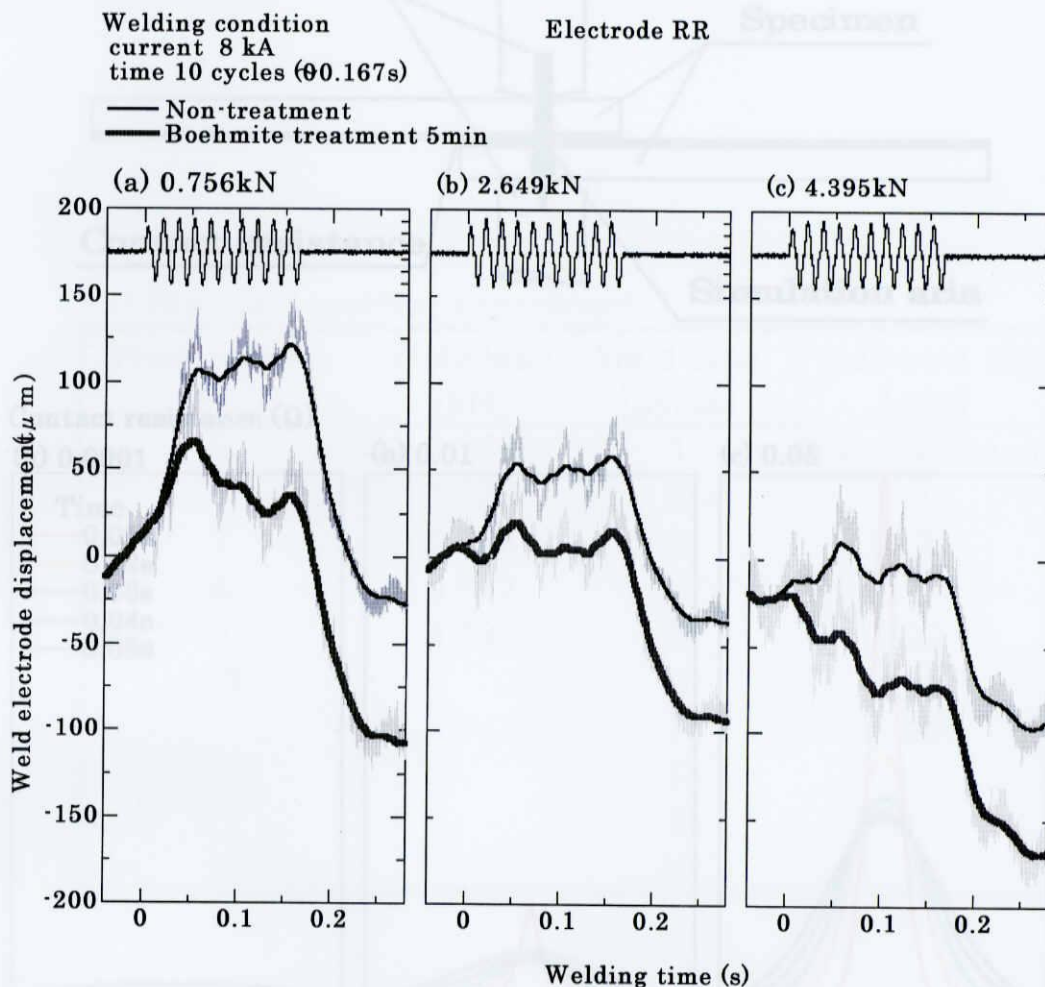


Fig.4-28

Weld electrode displacement for  
boehmite treatment 5min and non-treatment

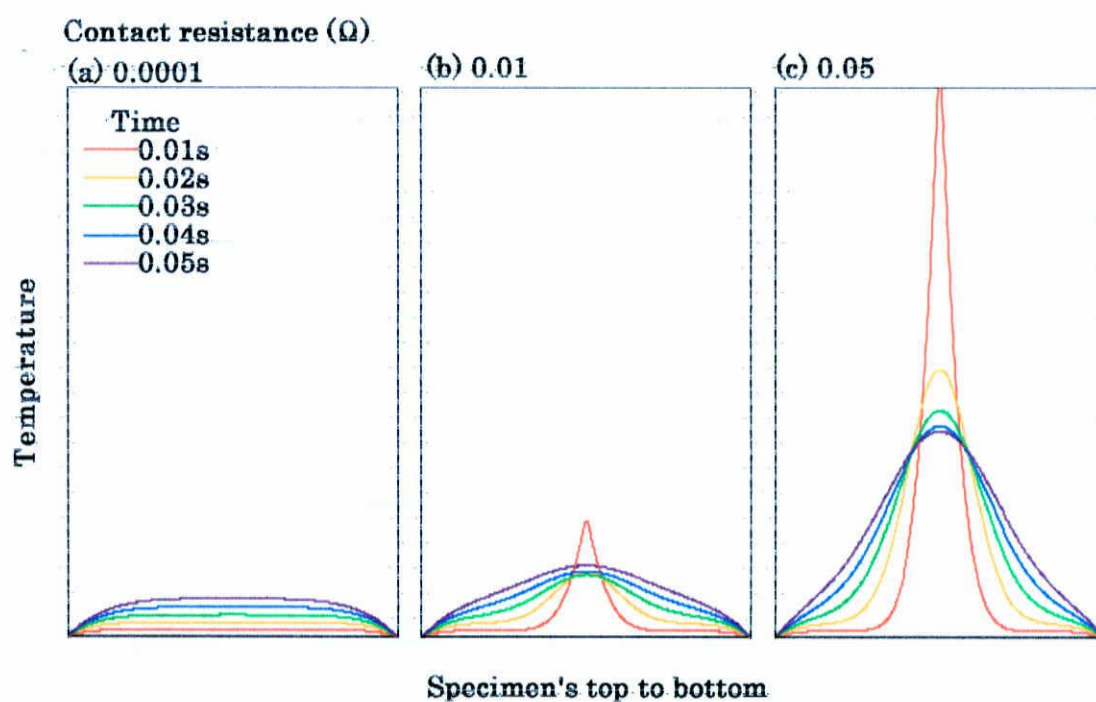
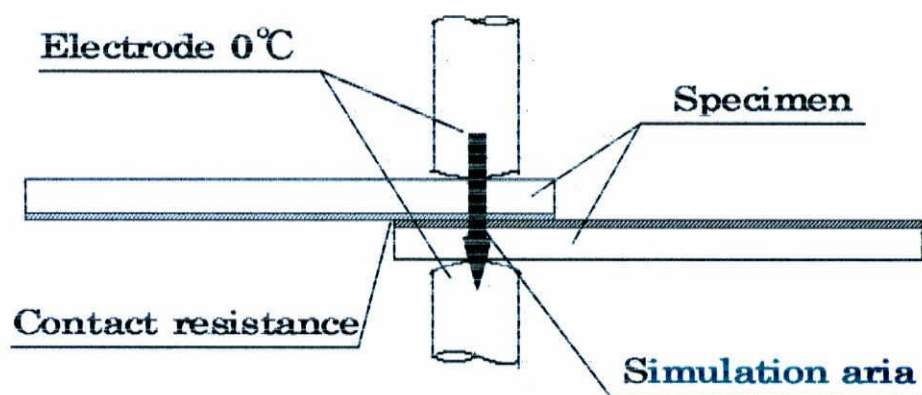


Fig. 4-29

One-dimensional simulation of thermal conduction  
proximity for relationship between the influence of  
contact resistance and specimen's temperature  
during welding

Table.4-1

Welding condition for low weld current experiment

## (a) Standard welding experiment

| Weld current<br>[kA] | Weld load<br>[kN] | Weld time<br>[cycle] | Treatment time<br>[min] |
|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------|
| 5                    | 0.756             | 1                    | Non-treatment           |
| 6                    | 1.728             | 2                    | 1                       |
| 7                    | <b>2.649</b>      | 3                    | 3                       |
| 8                    | 3.547             | 4                    | 5                       |
| 9                    | 4.395             | 5                    | 30                      |
| 10                   |                   | 6                    | 45                      |
|                      |                   | 7                    | 60                      |
|                      |                   | 8                    |                         |
|                      |                   | 9                    |                         |
|                      |                   | 10                   |                         |

## (b) Welding experiment in large areas

| Weld current<br>[kA] | Weld load<br>[kN] | Weld time<br>[cycle] | Treatment time<br>[min] |
|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------|
| 6                    | 0.756             | 1                    |                         |
| 8                    | 2.649             | 5                    | 5                       |
| 10                   | 4.395             | 10                   |                         |