

複写可

平成 20 年度 修士論文

パーカッション溶接の  
最適溶接条件に及ぼす  
線材直径の影響

三重大学大学院工学研究科  
博士前期課程 機械工学専攻  
岡本 圭右



## 目次

第 1 章 緒言	．．． 1
第 2 章 パーカッション溶接過程と試験方法	
2-1 溶接装置構成	．．． 3
2-2 パーカッション溶接過程	．．． 4
2-3 試験片	．．． 5
2-4 実験条件	
(a) 充電エネルギー	．．． 5
(b) 接触時速度	．．． 5
2-5 継手強度の評価	．．． 7
第 3 章 継手強度におよぼす溶接条件の影響	
3-1 充電エネルギーの影響	．．． 9
3-2 接触時速度の影響	．．． 10
3-3 線材直径の影響	．．． 11
第 4 章 パーカッション溶接過程におよぼす溶接条件の影響	
4-1 放電時間	．．． 13
4-2 線材溶融長さ	．．． 13
4-3 母材への埋め込み量	．．． 15
第 5 章 パーカッション溶接の継手強度	
5-1 溶接過程と継手強度の関係	．．． 17
5-2 断面形状と継手強度の関係	．．． 18
第 6 章 結言	．．． 20
参考文献	
謝辞	

## 第1章 緒言

パーカッション溶接 (Percussion welding: 衝撃溶接) はスタッド溶接の一種である。スタッド溶接がスタッドと母材を接触させている状態から一度スタッドを引き上げ、アーク放電が発生した状態でスタッドを保持し、熔融したスタッドと母材を再び押し付けて継手を形成する溶接方法であるのに対し、パーカッション溶接は、コンデンサなどに蓄えられた電荷により電位差が生じた溶接部材を接近させていき、発生するアーク放電による発熱により溶接部材を熔融させ、そのまま圧着することで継手を形成する溶接方法である。

パーカッション溶接に用いる溶接機は一般的に小型軽量であり、身近な電気製品や船舶の配線押さえ、カーテンウォールや冷暖房装置など幅広い分野で使用されている。

本溶接方法の特徴として、単位時間当たりの入熱は非常に大きい、溶接の時間が数ミリ秒と非常に短いことが挙げられる。溶接の時間が非常に短いため、熱による酸化や溶接歪み、溶接部の溶け落ちなどの抑制が可能であり、生産性の向上が可能となるなどの利点が挙げられる。また熔融した金属同士を押し付けることで、加熱により生成された脆弱な金属間化合物を排出し減少させることが可能であり、通常溶接が困難である異種金属間の溶接にも用いられている。

良好な継手強度を得るためには、溶接部材を溶接に必要なだけ熔融させるための電気エネルギー、電気エネルギーを溶接部材の加熱・熔融に有効に利用するための放電の維持、熔融した溶接部材の間の接合圧力の確保などが問題となる。

しかし、溶接の時間が非常に短いことなどを理由に、接合部の特性の把握が非常に困難であり、実作業における条件設定は作業者の経験や試験データの積み重ねに頼っている。そして多品種少量生産の現代において、溶接材の形状・材料が変わるごとに最適な条件を検討することが必要となり、それには大きな労力と費用を費やすことになる。

また、本溶接は手動で行われることが多く、これまでの研究でコンデンサ容量や充電電圧などの電氣的条件、接触時速度や加圧力などの力学的条件などを制御してきたが、溶接部材自体の形状は同じものだった。

そこで本研究では、パーカッション溶接における最適な溶接条件を確立するため、線

材直径の変化が継手強度におよぼす影響を検討した。線材直径が変化することでこれまでの研究により得た溶接の最適条件が適切であるかは不明であるため、電気的條件、力学的條件の両方について検討した。

## 第2章 パーカッション溶接過程と試験方法

### 2-1 溶接装置構成

実験に使用した溶接装置の概要を Fig.2-1 に示す。本溶接機はコンデンサ充電式である。

水平調節用の鉄ブロック (steel block) を用いてレバー (lever) を水平にし、線材 (wire rod)、母材 (base metal) を設置する。線材はドリルチャック (drill chuck) に挟むことで設置する。ドリルチャックの数ミリ上の部分にナットで圧着端子を固定し、圧着端子を溶接機の陽極に接続する。

母材は銅板 (copper sheet) と母材固定板 (plate for fixing base metal) に挟むように設置されており、銅板が溶接機の陰極に接続されている。

レバーを持ち上げ、フック (hook) で固定する。その後フックを外すと、回転軸 (axis of the lever) を中心としてレバーが回転、落下し、線材先端が母材表面に接近していく。

線材と母材が接触する直前の線材の接近速度はレバーの持ち上げ高さを変化させることで調節する。

レバーとドリルチャックを接続する部品の図の位置に円形の錘 (weight) を設置し静的加圧力を調節する。また、加圧用の錘を設置していない際に回転軸まわりのモーメントを小さくするために、レバー後方の図の位置にカウンターウェイト (counter weight) を設置している。

昨年度の実験装置ではレバーが落下する際に左右にぶれることがあり、溶接位置が定まらないことがあった。また、線材直径を変化させた実験を行うため、線材直径が小さく、突き出し長が長すぎる場合、線材先端と母材表面が接触した際の衝撃のエネルギーを受け止めきれず、線材に歪みが生じることが考えられた。以上より、昨年度の実験装置において以下の改良を行った。

- 1.線材の突き出し長を短くするため、母材の設置位置をあげた。
- 2.レバーの左右へのブレを低減させるため、主軸の支持位置を広げた。

なお、装置各部品の具体的な寸法は巻末に示す。

## 2-2 パーカッション溶接過程

本実験におけるパーカッション溶接の溶接工程を示す。

レバーからフックが外されると、レバーと共に線材が落下し始める。レバーは支点を中心として回転運動をしながら落下・加速していく。

線材先端と母材表面との距離が約  $20\ \mu\text{m}$  にまで接近した時点で放電が開始され、熱エネルギーが発生する。発生した熱エネルギーにより線材先端と母材表面が溶融しはじめる。線材先端が溶融している間もレバーが落下し続け線材自体は母材へ接近し続ける。

レバーが落下し始めてから数ミリ秒後に線材先端と母材表面が接触し、その時点で放電が終了する。線材先端部の溶融金属と母材表面の溶融金属が接触し、その境界には脆弱な金属間化合物が生成される。

線材先端と母材表面が接触した後もレバーが落下し続け、母材側に線材と溶融金属が押し込まれる。金属間化合物を含む溶融金属は加圧により押し出される。

溶融金属が冷えて抵抗が増大し、それに伴いレバーが急激に減速し静止する。その後溶融金属が完全に冷えて継手が形成される。

継手強度に影響していると思われるのが、充電エネルギー、接触時速度、線材直径であり、それに従属して変化する放電時間、線材溶融長さ、線材の母材への埋め込み量である。

充電エネルギーを増大させることで、溶接部に投入されるエネルギーが大きくなり、放電時間の増加や発熱の強度が向上し、線材先端・母材表面の溶融量が増大する。溶融金属の量が増大することで、継手強度が向上すると考えられる。

接触時速度が増加することで、線材先端と母材表面が接触するときの運動エネルギーが増大し、線材を母材に打ち込む力が強くなり、線材をより深くまで埋め込むことが可能になる。そして母材と線材の接する面積が大きくなるため、継手強度が向上すると考えられる。また、打ち込む力が強くなることで線材側と母材側の溶融金属の境界に生成される脆弱な金属間化合物をさらに押し出すことが可能になり、継手強度が向上すると考えられる。

線材直径を大きくすることで、線材の断面積が増大し、線材と母材の接合面積が増大するため、継手強度を増大させることが出来ると考えられる。

### 2-3 試験片

同質材で異なる直径の線材を準備しやすかったため、実験にはアルメル線を使用した。線材直径として直径 1.0mm と直径 0.65mm の 2 種類を選択した。これにより断面積は約 2.4 : 1 となる。母材には板厚 1.5mm の工業用純アルミニウム A1050 を使用、溶接面を 1000 番の耐水研磨紙で研磨、酸化皮膜を除去した後アセトンで脱脂した。線材および母材の寸法・化学組成を Fig.2-2、Fig.2-3 にそれぞれ示す。なおアルメル線の材質は一般的なものの値を示している。

### 2-4 溶接条件

溶接条件は充電エネルギーおよび接触時速度とした。静的加圧力は 1N で一定とした。

#### (a) 充電エネルギー

コンデンサ容量を 70[mF]で固定、充電電圧を 30,40,50,60[V]と変化させることで充電エネルギーを調節した。これにより充電エネルギーは 31.5,56,87.5,126[J]となる。

#### (b) 接触時速度

接触時速度を線材先端と母材表面が接触する直前の線材先端の接近速度と定義する。レバーの持ち上げ高さを変化させることで接触時速度を変化させるが、直接目的の接触時速度に調節することは困難である。本実験装置はフックをはずすことで、レバーが落下を始め、回転運動を行いながら線材と母材が接近していく。そこでピンバイス支持レバーと、それに取り付けられた部品全てを一塊の剛体と考え、持ち上げ高さと接触時速度の関係を算出する。なお、ここで用いる定数および具体的な数値を Fig2-4 に示す。

接触時速度を  $v_c$ 、回転モーメントを  $M$ 、支点周りの慣性モーメントを  $I$  とすると、運動方程式は次のようになる。

$$M = I \frac{d^2\theta}{dt^2} = I \frac{d\omega}{dt} \quad \theta : \text{角度} \quad \omega = \frac{d\theta}{dt} : \text{角速度} \quad (1)$$

(1)式の両辺を  $t$  で積分すると

$$\omega = \frac{M}{I}t + C_1 \quad (C_1 : \text{積分定数}) \quad (2)$$

レバーを持ち上げ、静止した状態を最初の状態と考えると、初期条件 $t = 0$ のとき $\omega = 0$ より $C_1 = 0$ であるから

$$\omega = \frac{M}{I}t \quad (3)$$

(1)式の両辺を $t$ で積分すると

$$\theta_2 = \frac{M}{2I}t^2 + C_2 \quad (4)$$

初期条件 $t = 0$ の時 $\theta = -\theta_0$ より $C_2 = -\theta_0$ であるから

$$\theta = \frac{M}{2I}t^2 - \theta_0 \quad (5)$$

線材先端と母材表面が接触するまでの時間を $t_c$ とすれば、 $t = t_c$ の時 $\theta = 0$ であるから

$$0 = \frac{M}{2I}t_c^2 - \theta_0 \rightarrow t_c = \sqrt{\frac{2I\theta_0}{M}} \rightarrow t_c = \sqrt{\frac{2I}{M}}\sqrt{\theta_0}$$

$\theta$ が小さい場合を仮定しているから、 $\tan \theta_0 = \frac{h_1}{\ell_z} \cong \theta_0$ と考えると、

$$t_c = \sqrt{\frac{2I}{M \ell_z}}\sqrt{h_1} \quad (6)$$

ここで以下のように整理する。

$$t = K\sqrt{h}, \quad \text{ただし} \quad K = \sqrt{\frac{2I}{M \ell_z}}$$

$t = t_c$ のときの角速度を $\omega = \omega_c$ とするとその値は、次の2式を用いて、(7)のように表すことができる。

$$\theta = \frac{M}{2I}t^2 - \theta_0 \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega = \frac{M}{I}t$$

$$\omega_c = \frac{M}{I}t_c = \frac{M}{I}\sqrt{\frac{2I}{M}}\sqrt{\theta_0} = \sqrt{\frac{2M}{I}}\sqrt{\theta_0} \quad (7)$$

$t_c = \sqrt{\frac{2I}{M \ell_z}}\sqrt{h_1}$ の比例定数 $\sqrt{\frac{2I}{M \ell_z}} = K_z$ を求めるために、持ち上げ高さ $h_1$ と落下時間の



関係を求める。落下時間の測定には Fig2-5 のようにレバー先端にピアノ線を設置し、レバーとフックが離れると切れる回路を作製、回路が切れた時点からコンデンサの電圧が降下する点までの時間を測定し落下時間とした。その一例を Fig.2-6 に示す。持ち上げ高さ、落下時間の数値を用い、横軸に持ち上げ高さの累乗、縦軸に落下時間をとった Fig2-7 を作製し、その近似線の傾きより  $K_z$  の値をもとめた。

$$K_z = \sqrt{2} \sqrt{\frac{I}{M l_z}} \rightarrow \sqrt{\frac{I}{M l_z}} = \frac{K}{\sqrt{2}} \rightarrow \sqrt{\frac{M l_z}{I}} = \frac{\sqrt{2}}{K_z} \quad (8)$$

$$t = \sqrt{\frac{2I}{M l_z}} \sqrt{h} = \sqrt{\frac{2}{l_z}} \sqrt{\frac{I}{M}} \sqrt{h} \quad (9)$$

ピンバイス（実験する位置）の支点からの距離を  $l_p$  とすると

$$v_c = l_p \omega_c = l_p \frac{M}{I} t_c = l_p \frac{M}{I} \sqrt{\frac{2I}{M l_z}} \sqrt{h_1} = l_p \sqrt{\frac{2M}{I l_z}} \sqrt{h_1} \quad (10)$$

$$\omega_c = \frac{M}{I} t_c = \frac{2}{K_z^2 l_z} K_z \sqrt{h_1} \quad (11)$$

$$v_c = l_p \omega_c = \frac{2}{K_z^2 l_z} K_z \sqrt{h_1} l_p = \frac{l_z}{l_p} \frac{2}{K_z} \sqrt{h_1} \quad (12)$$

$$v_c = \frac{l_p}{l_z} \frac{2}{K_z} \sqrt{h_1} \quad (13)$$

(13)式に算出した  $K_z$  の数値、支点から持ち上げ高さを設定する位置までの距離  $l_z$ 、支点から溶接位置までの水平距離  $l_p$  を代入することで接触時速度と持ち上げ高さの関係が示される。以下がその式である。

$$v = 0.0835 \sqrt{h}$$

設定したい接触速度を  $v_c$  に代入すれば、対応する持ち上げ高さが算出される。

## 2-5 継手強度の評価

継手強度を測定するために使用した引張試験機を Fig.2-8 に示す。ロードセルに固定した治具に試験片を設置し、引張試験機中央の鋼板に固定したドリルチャックで線材部

をはさむ。試験機両端の柱はねじ切りされており、上部にあるモーターによる歯車の回転と連動し、ドリルチャックを固定している鋼板を上方へ移動させ、試験片の接合部に引張荷重を負荷する。

### 第3章 継手強度におよぼす溶接条件の影響

継手強度におよぼす溶接条件の影響を示す。なお、線材直径0.65mmの溶接について、接触時速度0.6m/s、充電エネルギー31.5J、および接触時速度0.7m/s、充電エネルギー31.5J、56J、87.5Jの4条件の溶接では線材の突出し長が大きすぎたため、線材が母材に接触した際の衝撃を吸収しきれず線材側に歪みが見られたため、データとして使用していない。また、0.65mmの接触時速度0.1m/s、0.2m/sの条件について、それぞれ充電エネルギー56J、126Jの条件のみ溶接を行った。

#### 3-1 充電エネルギーの影響

継手強度におよぼす充電エネルギーの影響を線材直径ごとに Fig.3-1、Fig.3-2 に示す。

接触時速度0.1m/sの場合を見てみると、Fig.3-1、Fig.3-2のどちらについても充電エネルギーが増加するに従って継手強度が増大していく。接触時速度0.2m/s、0.3m/s、0.7m/s、0.8m/sの場合も0.1m/sの場合と同様に充電エネルギーの増大に伴い継手強度が増大していく。

接触時速度0.4m/sの場合を見みると、Fig.3-1では充電エネルギーが31.5Jから56Jの範囲では充電エネルギーの増加に伴い継手強度が増大し、56Jから126Jの範囲では充電エネルギーの増大に伴い継手強度は減少する。また Fig.3-2 を見てみると、充電エネルギーの増加に伴い継手強度が増加する。

接触時速度0.5m/sの場合を見ると、Fig.3-1では充電エネルギーが31.5Jから56Jの範囲では充電エネルギーの増加に伴い継手強度が増大し、56Jから126Jの範囲では充電エネルギーの増加に伴い継手強度は減少する。また Fig.3-2 を見ると、充電エネルギーの増加に伴い継手強度が増大する。

接触時速度0.6m/sの場合を見ると、Fig.3-1では充電エネルギーが56J、87.5Jで継手強度が良好となり、126Jに増加すると継手強度は減少する。Fig.3-2では充電エネルギーが増大するに従って継手強度が増大する。

以上より、充電エネルギーが増加するにしたがって継手強度が増加するといえる。しかし、これは全ての条件についていえることではなく、線材直径0.65mm、接触時速度

0.4m/s、0.5m/s、0.6m/sの3条件では、充電エネルギーが大きすぎると、継手強度が低下する。

### 3-2 接触時速度の影響

Fig.3-1、Fig.3-2 に示した結果を整理しなおして、継手強度におよぼす接触時速度の影響を線材直径ごとに Fig.3-3、Fig.3-4 に示す。

充電エネルギーが 31.5J の場合、Fig.3-3 を見ると、実験条件が少ないため、傾向が判断しにくいですが、継手強度は接触時速度の増加にともない増大し、接触時速度 0.4m/s 付近で良好となり、それ以上の範囲では減少していく傾向が見られる。Fig.3-4 を見ると、継手強度におよぼす接触時速度の影響は見られずほぼ一定の値を示している。

充電エネルギーが 56J の場合、Fig.3-3 を見ると、接触時速度が 0.1m/s から 0.4m/s の範囲では接触時速度の増加に伴い継手強度が増大していき、それ以上の範囲では接触時速度の増加に伴う継手強度の変化は見られない。また、Fig.3-4 を見ると、接触時速度が 0.1m/s から 0.3m/s の範囲では、接触時速度の増加に伴い継手強度が増大するが、それ以上の範囲では接触時速度の増加に伴う継手強度の変化は見られない。

充電エネルギーが 87.5J の場合、Fig.3-3 を見ると、接触時速度 0.3m/s から 0.6m/s までの範囲での実験データのみであるが、接触時速度の増加に伴う継手強度の増大が見られる。Fig.3-4 を見ると、接触時速度が 0.1m/s から 0.5m/s までの範囲では接触時速度の増加に伴い継手強度が増大していき、それ以上の範囲では速度の増加に伴い継手強度は減少した。

充電エネルギーが 126J の場合、Fig.3-3 を見ると接触時速度が 0.1m/s から 0.3m/s の範囲では接触時速度の増加に伴い継手強度がわずかに増加したが、それ以上の範囲では、接触時速度の増加に伴う継手強度の変化は見られない。Fig.3-4 を見ると、接触時速度の増加と共に継手強度が増大していき、0.6m/s、0.7m/s 付近で継手強度が極大値を示し、その後速度の増大に伴い継手強度が減少した。

以上のことから、継手強度におよぼす接触時速度の影響について考えると、線材直径と充電エネルギーによりその傾向が異なる。よって単位断面積あたりの充電エネルギーを考える。

単位断面積あたりの充電エネルギーと継手強度の関係を Fig.3-5 に示す。

接触時速度と継手強度の関係から得られた傾向を以下の3つに分類する。

- (a) 継手強度に対する接触時速度の影響が見られない、もしくは接触時速度の増加に伴い継手強度が増大し、その後接触時速度の影響が見られなくなる条件
- (b) 増加に伴う継手強度の増加接触時速度に最適値が見られる条件
- (c) 速度の増加に伴い継手強度が増加していく条件

単位断面積あたりの充電エネルギーが小さすぎる場合には(a)の傾向を示し、適度な場合には (b) の傾向を示し、大きい場合には(c)の傾向を示す。また、接触時速度と継手強度の関係から得られた線材直径・充電エネルギーごとの最適な接触時速度の値を単位断面積あたりの充電エネルギーと継手強度の関係に当てはめると、単位断面積あたりの充電エネルギーが増大するに従い、最適な接触時速度が大きくなることが分かる。これにより実質的な供給エネルギーが変化すると考えられる。

### 3-3 線材直径の影響

継手強度の値を比較する。Fig.3-1、Fig.3-2 を比較してみると、継手強度の値がほぼ同じであることが分かる。線材直径が 0.65mm : 1.0mm の場合、断面積は 1 : 2.4 になっている。しかし、Fig.3-1、Fig.3-2 を比較すると、継手強度の値はそのようになっている。線材直径 0.65mm の場合の継手強度が 1.0mm の場合と同程度までに高強度であることについて、線材直径を変化させているにもかかわらず、充電エネルギーと接触時速度の値は線材直径に関わらず一定であったため、そのほかにも破断形態の変化などが考えられる。

#### 第4章 パーカッション溶接過程におよぼす溶接条件の影響

溶接過程におよぼす溶接条件の影響について見てみる。溶接過程の事象として、第2章2-2 であげた放電時間、線材溶融長、線材の埋め込み量を考える。

放電時間の測定方法について説明する。溶接の際、線材先端と母材表面の間の電圧は Fig.4-1 のように変化する。一例として、充電電圧 60V の場合の溶接時の電圧の変化を示している。最初に示している電圧はコンデンサの充電電圧である。レバーはフックから離れた後、支点を中心として回転・加速しながら落下していく。線材先端と母材表面が約 20  $\mu\text{m}$  まで接近した時点で放電が開始され、電圧が約 60V から 27V 付近まで急激に低下する。その後 20V 付近から 5V 付近まで再び急激に低下する。この時点で線材先端と母材表面が接触したと考え、この間の数ミリ秒を放電時間として測定した。

線材溶融長さ、母材への埋め込み量について説明する。Fig.4-2 に示すように溶接前、引張試験後の試験片に着目する。溶接前、引張試験後の線材の長さをそれぞれノギスで測定し、その差を取り線材の溶融長さとした。ノギスで測定を行ったため、最小目盛は 0.05mm である。また、引張試験後の母材表面に形成された窪みの深さを、光学顕微鏡を使用し板表面と穴底の焦点の差を利用して測定し、線材の母材への埋め込み量とした。

このように線材溶融長さ、線材の母材への埋め込み量を測定したが、実際には線材先端と母材表面がきれいにはく離することは稀で、先端には溶融金属などが付着することが考えられる。今回は引張試験後の線材先端に付着物が存在したとしても線材の一部として測定した。また、継手強度が高いものや埋め込み量が多いものには Fig.4-3 に示すように引張試験時に母材金属が引っ張られ、母材裏面にくぼみが出るものが確認されたため、その場合、母材表面の埋め込み量と同様に測定し、母材表面の埋め込み量と母材裏面のくぼみの深さの和を線材の母材への埋め込み量とした。

また、線材直径 0.65mm の場合、線材自体の塑性変形が開始される引張強度が約 125N であったことから、引張試験の際にそれ以上の値で破断したものについては、引張試験の際に線材部に伸びが生じているため、溶融長の値として使用していない。

#### 4-1 放電時間

充電エネルギーと放電時間の関係を線材直径ごとに Fig.4-4、Fig.4-5 に示す。また放電時間を log スケールで示したものを Fig.4-6、Fig.4-7 にそれぞれ示す。Fig.4-4、Fig.4-5 のどちらの図においても、充電エネルギーの増加に伴い、放電時間が増大している。また、接触時速度の増加に伴い、放電時間が減少している。線材直径で比較すると、Fig.4-4 の場合のほうが Fig.4-5 の場合よりも放電時間が大きい値を示している。このように充電エネルギー、接触時速度、線材直径の 3 つの変数が放電時間に影響している。

また、Fig.4-6、Fig.4-7 のそれぞれの図に示された 2 本の点線は放電が開始される距離  $20\mu\text{m}$  を接触時速度  $0.1\text{m/s}$ 、 $0.8\text{m/s}$  で落下した場合に要する時間を示した直線である。測定された放電時間の値は点線の値よりも大きい。この原因は線材の溶融にあると思われる。放電中に線材先端が溶融するため、線材自体は落下し続けているのに、線材先端部と母材表面の距離がさほど縮まらず、接触するまでの時間がのび、放電時間が長くなったと考えられる。

充電エネルギーが増加するに従い放電時間が増大する現象について、エネルギーが放出される断面積が一定であるにもかかわらず充電エネルギーが増加するため、放電の強度が向上する。そして線材先端の溶融長が増大するため放電時間が増大すると考えられる。

直径  $1.0\text{mm}$  の場合よりも直径  $0.65\text{mm}$  の方が放電時間の値が大きいのは、充電エネルギーが等しいにもかかわらず線材直径が異なるため、単位断面積あたりの充電エネルギーが大きく、線材先端の溶融速度が大きくなり線材先端と母材表面の接触までの時間が長くなるためと考えられる。

接触時速度の増加に伴い放電時間が減少する現象について、放電の際に線材先端が溶融して線材は短くなるが、線材先端の溶融速度よりもレバーが落下する速度のほうが大きく、接触時速度が増加すると短絡までの時間が短くなるため、放電時間が減少すると考えられる。

放電の性質について考えるために、放電開始時の電圧と終了時の電圧を示す。

充電エネルギーと放電開始電圧の関係を線材直径ごとに Fig.4-8、Fig.4-9 に、充電エネルギーと放電終了電圧の関係を Fig.4-10、Fig.4-11 に示す。放電開始電圧について Fig.4-8、Fig.4-9 を見ると、充電エネルギーが増加するに従い、放電開始電圧が増大する。その値は

接触時速度の影響はなく、線材直径が細いほうが放電開始の電圧が高い。

放電終了電圧について Fig.4-10、Fig.4-11 を見ると、接触時速度の影響を受けており、接触時速度ごとに異なる値を示した。また充電エネルギーの増加に伴い終了時の電圧値が増大する傾向が見られるが、Fig.4-10 の接触時速度 0.1m/s、0.2m/s のように異なる傾向を示すものも見られた。

充電エネルギーの増加に伴い放電開始電圧が増大するのは、充電エネルギーを増大させるために充電電圧の値を増加させたためである。

放電開始電圧がまとまった値を示しているにもかかわらず、放電終了電圧が接触時速度の影響を受け、示す傾向が定まらないことについて、放電が開始される前は先端形状が同一であるが、放電が終了したときには、溶融により先端形状が不均一になることや、放電の性質が異なることが理由として考えられる。

線材直径が小さいほうが高い放電開始電圧を示すことについて、先端は  $130^\circ$  で統一しているが、線材直径が大きい場合よりも小さい場合のほうが放電しやすく、早い段階で放電が開始されたためと考えられる。

#### 4-2 線材溶融長さ

充電エネルギーと線材溶融長さの関係を線材直径ごとに Fig.4-12、Fig.4-13 に示す。充電エネルギーの増加に伴い溶融長さが増大している。また、接触時速度の増加に伴い溶融長さは減少する。そして線材直径が小さいほうが溶融長さの値が大きい。また線材溶融長さの値が負となる場合も存在する。このよう傾向を示すのは充電エネルギーと接触時速度の変化により、放電時間が変化するためと考えられる。よって放電時間の影響を示す。

放電時間と線材溶融長さの関係を線材直径ごとに Fig.4-14、Fig.4-15 に示す。放電時間の増加に伴い線材溶融長さが増大する。また Fig.4-14 では接触時速度の影響がみられ、放電時間を一定とした場合、接触時速度の増加に伴い線材溶融長さが増大する。一方 Fig.4-15 では接触時速度が変化してもこの関係は一直線上にある。しかし、接触時速度 0.1m/s の場合は線材溶融長さが小さくても放電時間が大きな値を示した。

Fig.4-14 から、接触時速度によって放電の性質が異なり、それが線材溶融長さに影響すると考えられる。また Fig.4-15 において接触時速度の影響が見られないのは、放電時



間の変化する範囲が小さいためと考えられる。

線材の溶融長さが充電エネルギーと接触時速度に影響されているならば、投入した充電エネルギーと接触時速度が等しい条件では、線材直径に因らず一定の体積が溶融していると考えられる。そこで線材溶融体積の値について考えた。測定した線材溶融長に断面積をかけることで溶融体積を計算した。

充電エネルギーと溶融体積の関係を Fig.4-16 に示す。線材直径 0.65mm のデータを点線で、線材直径 1.0mm のデータを実線で示している。図を見ると接触時速度、充電エネルギーが等しくても線材直径により溶融体積に差が生じ、線材直径が大きいほうが溶融体積が小さい。これは、直径が小さい場合に比べて線材の長さ方向の溶融が遅く、線材と母材の接触が早くなり十分な溶融ができなかったためと考えられる。

放電時間の値が線材の溶融長さにより決定されるとするならば、線材先端が溶融した長さを線材が設定された接触時速度で通過する時間と測定された放電時間の値がほぼ一致するはずである。そこで横軸に線材溶融長さを接触時速度で移動した場合に要する時間、縦軸に測定された放電時間をとった図を Fig.4-17 に示す。なお溶融長がマイナスの値を示した条件はその値を接触時速度の値で割ってもマイナスになるため、採用していない。これを見るとほとんどのプロットが  $y=x$  の直線よりも  $y$  軸側によっている。つまり線材が溶融した長さを設定した接触時速度で移動した時間よりも放電時間のほうが長いことを示している。このことから放電時間の値は線材の溶融長さだけに影響されるわけではないことが分かる。線材溶融長さのほかに、放電中に、放電の圧力により母材側がへこむことなどが考えられる。

#### 4-3 母材への埋め込み量

充電エネルギーと埋め込み量の関係を線材直径ごとに Fig.4-18、Fig.4-19 に示す。充電エネルギーが増大するに従い、埋め込み量が増大する。また、エネルギーを一定と考えると接触時速度が遅いほうが埋め込み量が多い。このような傾向を示すのは放電によるものと思われるので、放電時間との関係を考える。

放電時間と埋め込み量の関係を Fig.4-20、Fig.4-21 に示す。接触時速度が同一の場合、放電時間の増加に伴い、埋め込み量が増大する。また、同じ放電時間で比べると接触時

速度の増加に伴って埋め込み量が増大する。

放電時間の増大に伴い埋め込み量が増大する現象について、充電エネルギーの増加や接触時速度の減少により放電時間が増加し、母材表面の加熱時間が増大して、熔融域が拡大し、より深くまで線材が押し込まれるためと考えられる。

接触時速度が増大するにつれて埋め込み量が増大する現象について、静的加圧力は1Nで一定としているが、線材先端と母材表面が接触する際にレバーが持っている運動エネルギーが、接触時速度の増加に伴い増大するため、レバーが停止するまでに作用する動的な加圧力が増加し埋め込み量が増大すると考えられる。よって動的加圧力の影響について考える。

動的加圧力の計算について、レバーを持ち上げた時の中心角の変位、線材先端が母材表面に接触した後に停止するまでの中心角の変位が小さいため、レバーの質量を無視し、錘とピンバイスが自由落下し線材先端と母材表面が接触し、一定の動的加圧  $F$  で埋め込み量の距離  $l$  だけ進んでレバーが停止したとみなして以下の式を用い計算する。

$$\frac{1}{2}mv^2 = Fl$$

なお錘とピンバイスの合計質量は  $m=184.4[\text{g}]$  である。

接触時速度と動的加圧力の関係を線材直径ごとに Fig.4-22、Fig.4-23 に示す。動的加圧力の値が小さいほうが、レバーが停止するまでに進む距離が長く、母材への埋め込み量が多い。静的加圧力は1Nで一定としても、動的加圧力は非常に大きな値をとる。これにより線材を母材の深くまで押し込めることが可能となり、継手強度が良好となると考えられる。

## 第5章 パーカッション溶接継手の強度

### 5-1 溶接過程と継手強度の関係

放電時間、線材溶融長さ、埋め込み量と継手強度の関連の有無を示す。

放電時間と継手強度の関係を接触時速度でまとめ、線材直径ごとに Fig.5-1、Fig.5-2 に示す。接触時速度 0.1m/s、0.2m/s、0.3m/s の条件では放電時間の増大に伴い継手強度が増大する傾向が見られる。接触時速度が大きい場合、放電時間が短い範囲で継手強度が急激に増加し、その後放電時間の増加に伴い継手強度が減少する。

次に線材溶融長と継手強度の関係を接触時速度でまとめ、線材直径ごとに Fig.5-3、Fig.5-4 に示す。Fig.5-3 を見ると、線材溶融長が増大するに従い、継手強度が増大する。

Fig.5-4 を見ると、接触時速度が 0.1m/s から 0.3m/s の間では、線材溶融長の増加に伴い継手強度が増大する。接触時速度が増加すると、溶融長が小さい範囲で継手強度が急激に増大し、その後、溶融長の増加に伴い継手強度が減少していく。

次に線材の母材への埋め込み量と継手強度の関係を接触時速度でまとめ、線材直径ごとに Fig.5-5、Fig.5-6 に示す。接触時速度 0.1m/s から 0.3m/s の範囲では、埋め込み量の増加に伴い継手強度が増大していく。接触時速度が増加すると、埋め込み量が小さい範囲で継手強度が急激に低下し、その後、埋め込み量の増加に伴い継手強度が減少していきます。

放電時間、線材溶融長、母材への埋め込み量と継手強度の関係をみると、接触時速度の値で放電時間、線材溶融長、埋め込み量の増加に伴い継手強度が増大する傾向と、それぞれの値が小さい範囲で継手強度が急激に増大し、その後継手強度が減少していく傾向の2つを見ることができる。このような傾向を示す原因を検討するために、試験片の断面形状を示す。

### 5-2 断面形状と継手強度の関係

引張試験後の線材、母材の断面を示す。今回は Fig.5-7 に示す条件のみ断面を示す。それぞれの条件における線材、母材の断面写真を Fig.5-8 から Fig.5-26 に示す。

接触時速度 0.1m/s、0.2m/s、0.3m/s の場合の試験片の断面写真を Fig.5-27 から

Fig.5-30 に示す。充電エネルギーの増加に伴い、線材側面と母材側に残る溶融金属の量が増加していき、埋め込み量が増大していく。また線材と母材の間には溶融金属の層が存在することが分かる。溶融金属の量と埋め込み量は線材直径や接触時速度により異なるが、充電エネルギーの増加に伴い溶融金属の量と埋め込み量が増大する傾向は同じである。接触時速度が遅い場合にエネルギーの増加に伴い継手強度が増大するのはこのためであると考えられる。

次に接触時速度 0.4m/s から 0.8m/s の場合の試験片の断面写真を Fig.5-31 から Fig.5-33 に示す。それぞれの図を見ると、充電エネルギーの増加に伴い以下の3つの形状が見られる。

- (a)線材側面にも母材側にも溶融金属が見られない
- (b)線材側面に溶融金属が付着しており、母材側にはほとんど見られない。また線材と母材の境界には溶融金属の層がない。
- (c)線材側面もしくは母材側に多量の溶融金属が見られ、線材と母材の境界には溶融金属の層が存在する。

継手強度と断面形状の関係を考えると、(b)の断面形状の場合に継手強度が良好となる。これは線材と母材が接触したときの動的加圧力の作用で溶融金属が排出され、線材と母材が密接になったためであると考えられる。

(a)の形状を示した場合、(b)の場合より継手強度が低下する。これは接触時速度が速すぎる、もしくは充電エネルギーが小さすぎて放電時間が短すぎて、溶融が十分に行われないため継手強度が低下したと考えられる。

(c)の形状を示した場合も(b)の場合よりも継手強度が低下する。これは充電エネルギーが増加することで溶融金属の量が増加してしまい、動的加圧力の作用だけでは溶融金属を排出することが出来ず、線材と母材の境界に溶融金属が残ってしまったため継手強度が低下したと考えられる。

継手強度と放電時間、線材溶融長、埋め込み量、そして、断面形状の関係をまとめると以下ようになる。

接触時速度が小さい場合、線材溶融長と放電時間の値が大きく、母材表面の加熱時間も長いため、線材を母材のより深い位置まで押し込むことができる。しかし接触時速度

が小さいため、線材と母材が接触した際の動的加圧力が小さく、境界に存在する熔融金属を押し出すことができず、継手強度が低い値を示すと考えられる。充電エネルギーを増加させることで、放電時間、線材熔融長、母材の加熱時間が増加し、線材をより深い位置まで押し込めるようになるが、線材と母材の境界には熔融金属が存在するため、継手強度がさほど増加しないと考えられる。

接触時速度が大きい場合は3つの形態が考えられる。

線材熔融長・放電時間の値が十分な値をとり、熔融が適度に行われている場合は、線材と母材が接触した際の動的加圧力により熔融金属が押し出され、線材と母材が密接になるため、継手強度が高い値をとると考えられる。

充電エネルギーの増加により線材熔融長・放電時間の値が増加した場合は、母材側が加熱される時間も増加し、熔融金属の量が増加する。熔融金属が増加するため線材と母材が接触した際に作用する動的加圧力だけでは熔融金属を押し出すことができず、線材と母材の境界に熔融金属が残ってしまうため、継手強度が低下すると考えられる。

接触時速度が大きすぎる、充電エネルギーが小さいなどの理由から線材熔融長・放電時間の値が小さすぎる場合、線材側も母材側も熔融が十分に行われていないため、継手強度が減少すると考えられる。

また、試験片の断面を観察すると、線材直径 0.65mm、充電エネルギー 126J の条件において、接触時速度が大きい場合、Fig.5-34 に示すように線材部分で斜めに破断する現象や Fig.5-35 に示すように溶接時の衝撃で破断している現象が見られたことから、充電エネルギーが過剰であり、放電時の熱エネルギーの影響が大きすぎたため、継手強度が低下したと考えられる。

## 結言

充電エネルギーの増加に伴い継手強度が増大する。しかしエネルギーが過剰である場合、放電時に発生する熱エネルギーの影響が大きすぎるため、線材部分で斜めに破断するなど継手強度の低下が見られる。

一部の条件では最適な接触時速度が存在し、線材直径 0.65mm、充電エネルギー 31.5J の場合、0.4m/s であり、線材直径 1.0mm、充電エネルギー 87.5J、126J の場合、それぞれ 0.5m/s、0.6m/s 付近であった。単位断面積あたりのエネルギーでまとめると、エネルギーが増大するにつれて最適な接触時速度が増大している。

放電時間、線材溶融長、埋め込み量は継手強度と関連しているが、その傾向は接触時速度により異なる。

接触時速度が大きい場合、継手強度は放電時間、線材溶融長、埋め込み量が小さい範囲で急激に増大する。線材と母材が接触した動的加圧力の作用で線材と母材の境界に存在する溶融金属を排出し線材と母材が密接になるため継手強度が高い値を示す。

接触時速度が小さい場合、動的加圧力が小さいため、線材と母材の境界に存在する溶融金属を排出することが出来ず溶融金属が残ってしまうため継手強度は低い値を示す。また、接触時速度の値に関わらず、線材溶融長、放電時間の値が小さく、溶融が不十分な場合、継手強度は減少する。

今回の実験では線材直径 0.65mm と線材直径 1.0mm であり断面積の比が 1:2.4 であるにもかかわらず継手強度の値は 1:2.4 にはならなかった。

## 参考文献

- (1) 溶接学会：溶接技術の基礎  
(参報出版)
- (2) 荒田吉明：朝倉金属工学シリーズ 溶接工学  
(中央出版)
- (3) 井口信洋：溶接構造設計入門  
(新日本印刷)
- (4) J. F. ランカスター：溶接アークの物理  
(黒木出版)
- (5) 日本金属学会編：金属便覧 改訂4版  
(丸善株式会社)
- (6) 松山文彦：鉄とアルミニウムのパーカッション溶接部の継手強度に及ぼす溶接条件の影響 (平成16年度 修士論文)
- (7) 伊藤洋介：鉄-アルミニウムのパーカッション溶接継手におよぼす接触時速度と加圧力の影響 (平成18年度 修士論文)

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、終始懇切なご指導を賜りました三重大学工学部工学研究科鈴木実平教授、川上博士准教授、尾崎仁志助教に深く感謝致します。

また、本論文中の検討に用いたデータは三重大学大学院工学研究科の小松聡司氏との共同研究によるものです。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、ここ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。



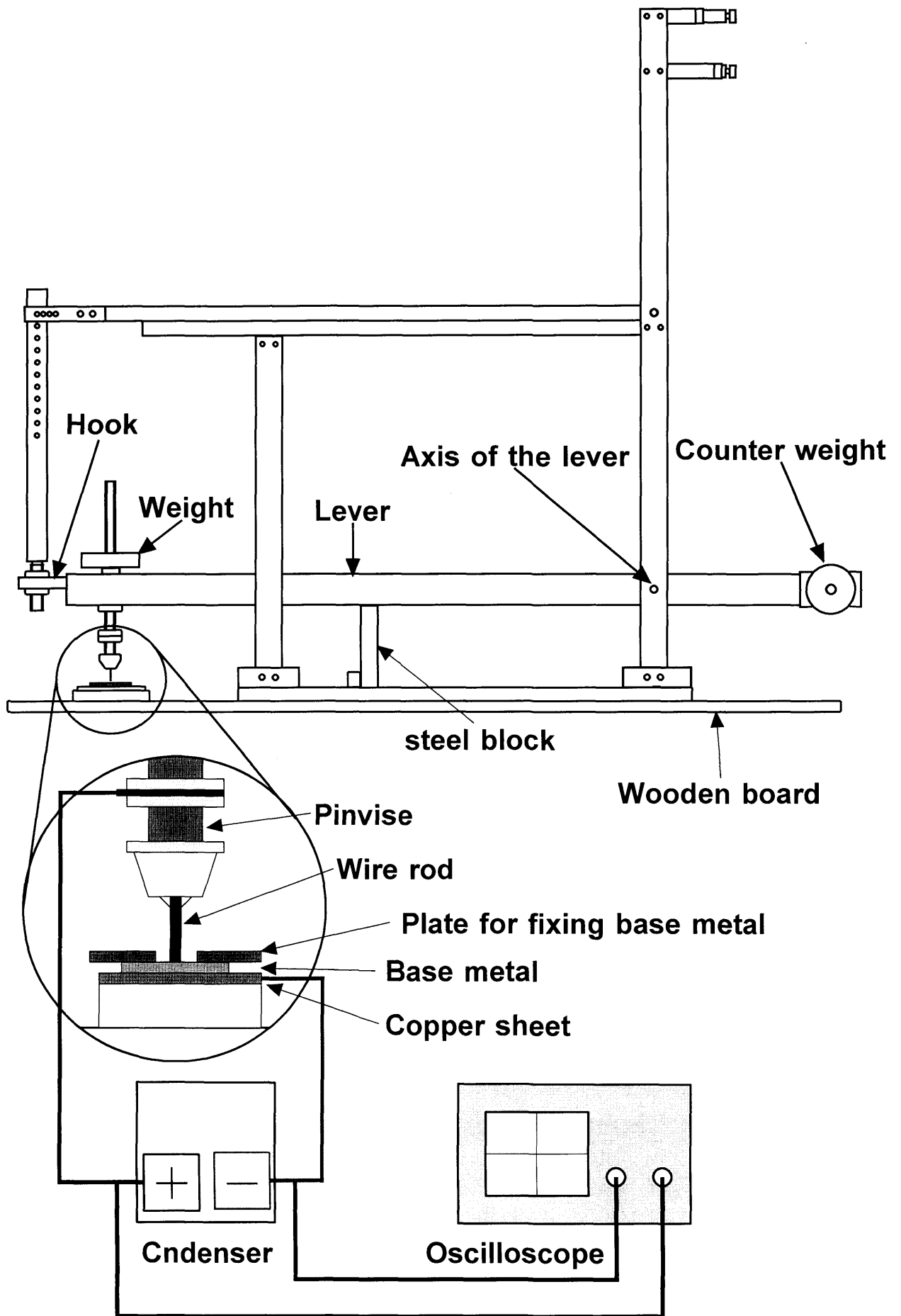
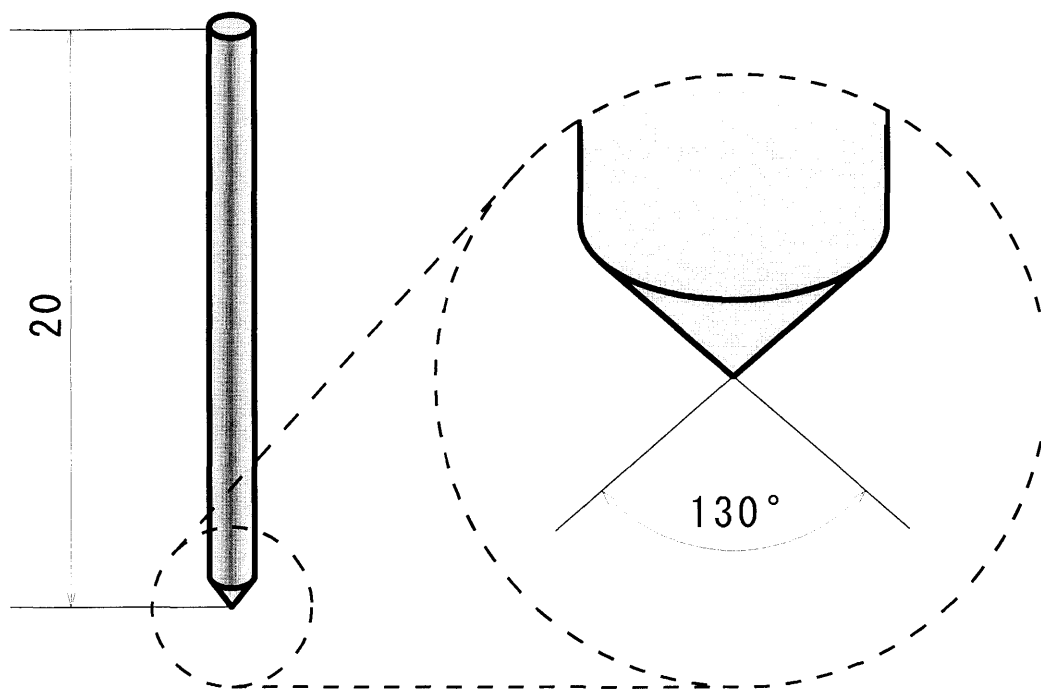


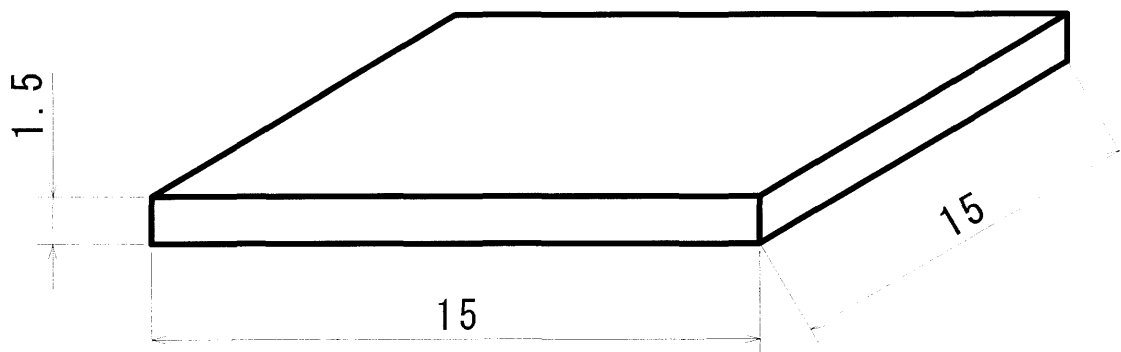
Fig.2-1 Drawing of experimental apparatus



Chemical composition of the wire rod [ % ]

	Ni	Mn	Al	Si	Fe
Alumel	94	2.5	2	1	0.5

Fig.2-2 Shape and chemical composition of wire rod



Chemical composition of the base metal [ % ]

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
A1050	0.25	0.4	0.05	0.05	0.05	-	0.05	0.03	99.5

Fig.2-3 Shape and chemical composition of base metal

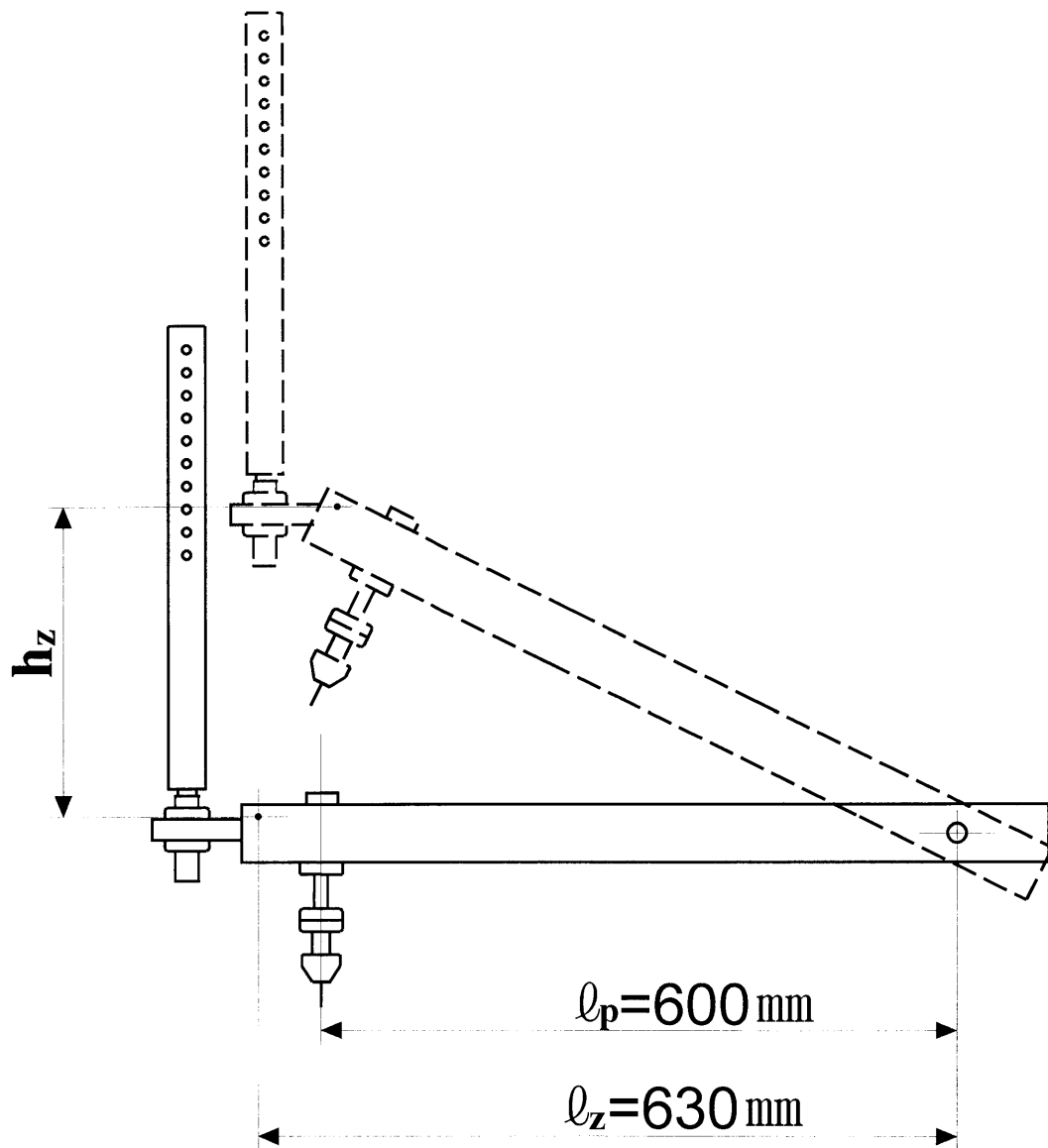


Fig.2-4 Position of  $l_z$  and  $l_p$

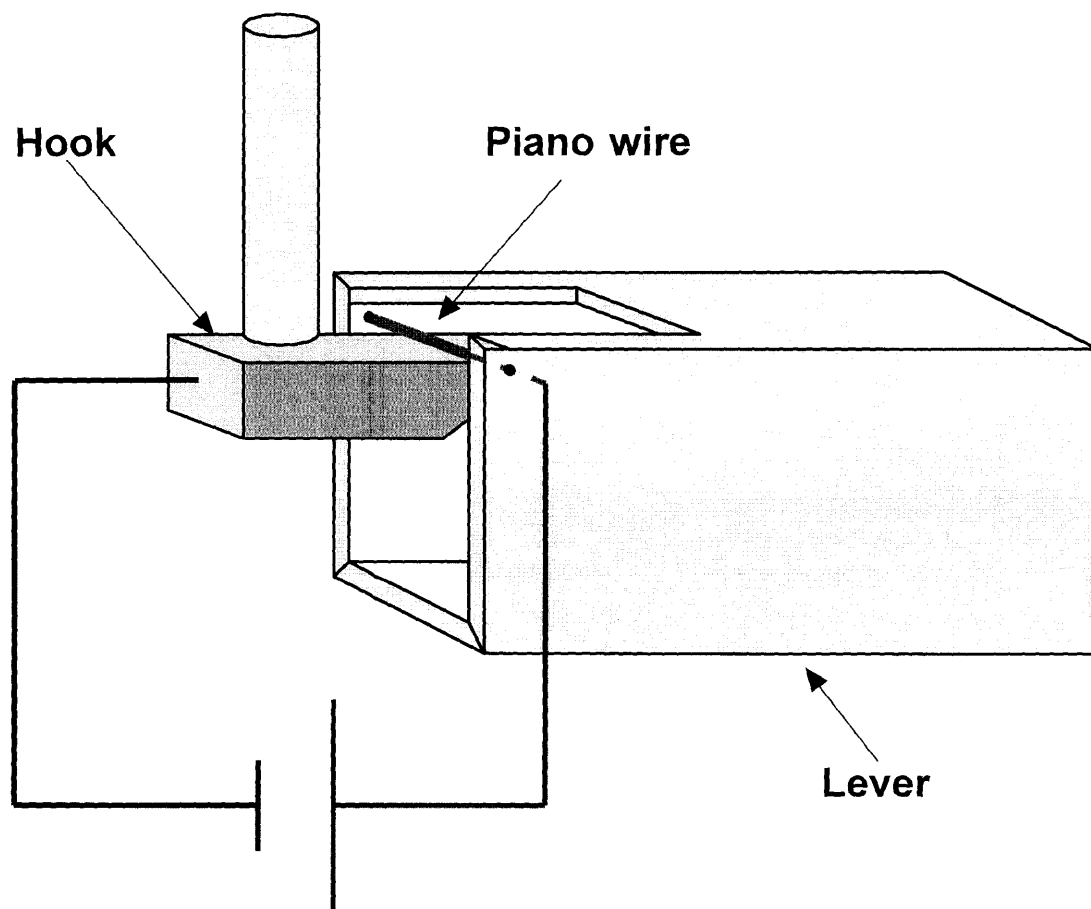


Fig.2-5 Circuit of measurement of fall start time

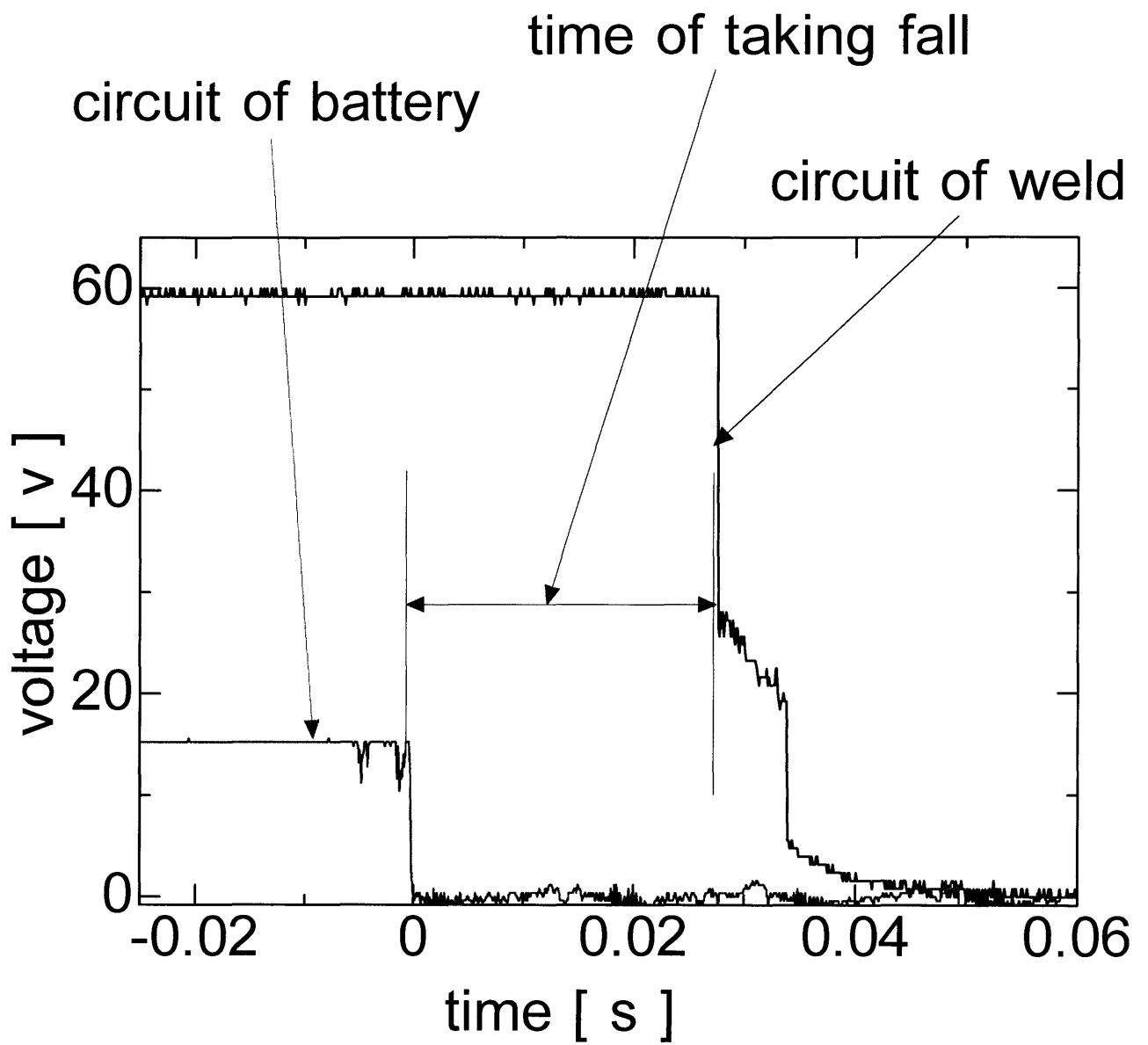


Fig.2-6 Definition of time of taking fall

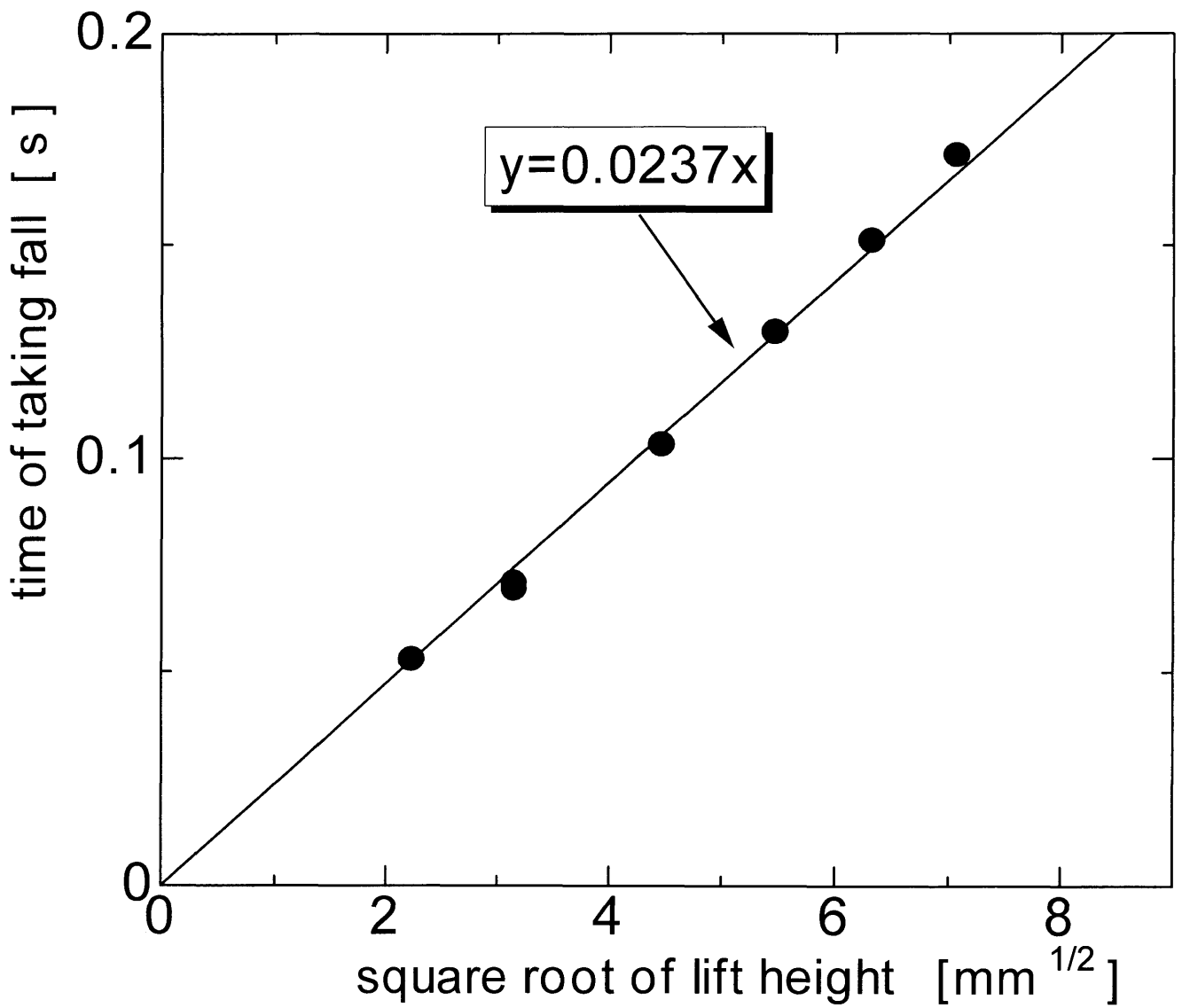


Fig.2-7 Relation of lift height and time of taking fall

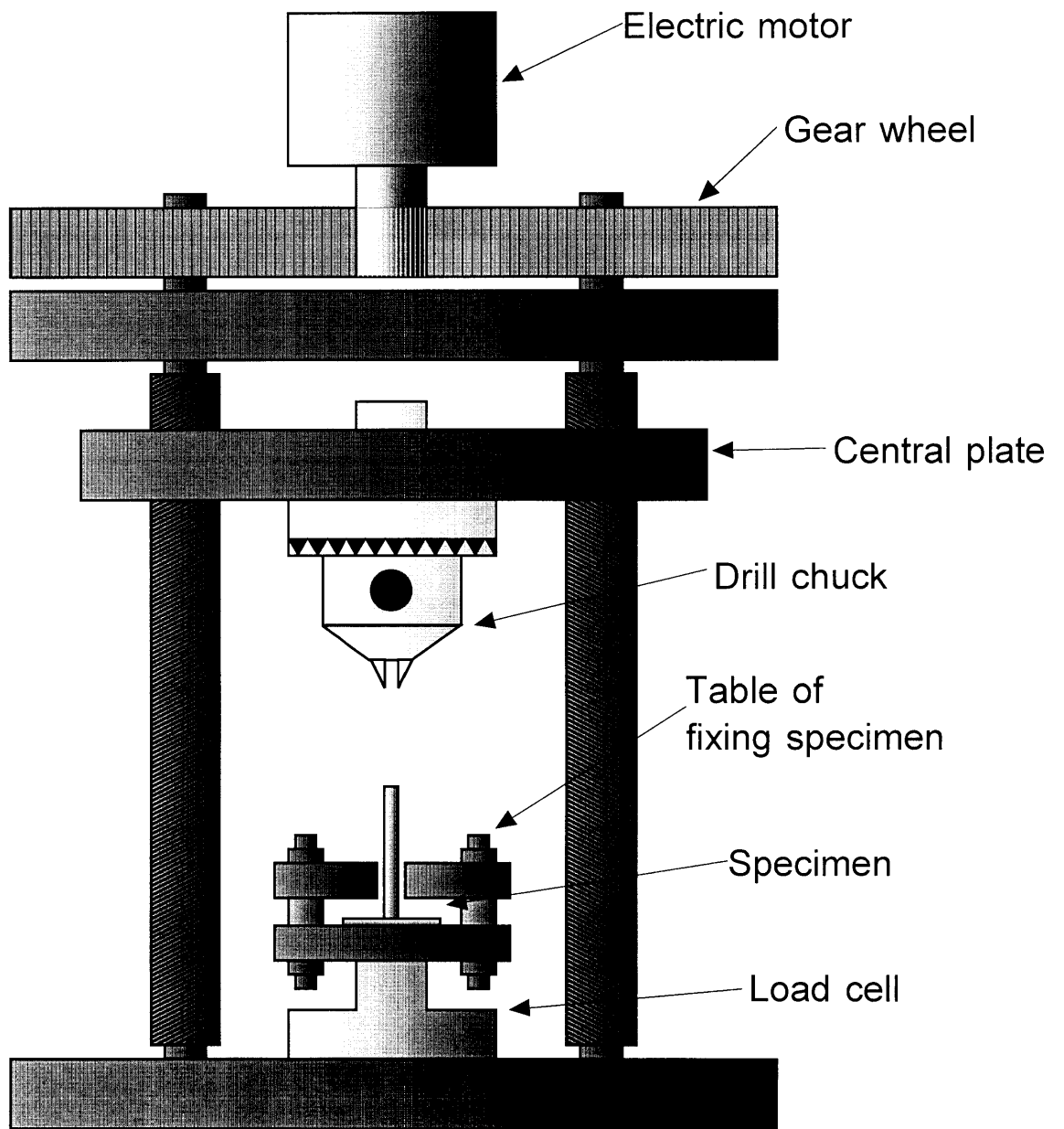


Fig.2-8 Tensile tester



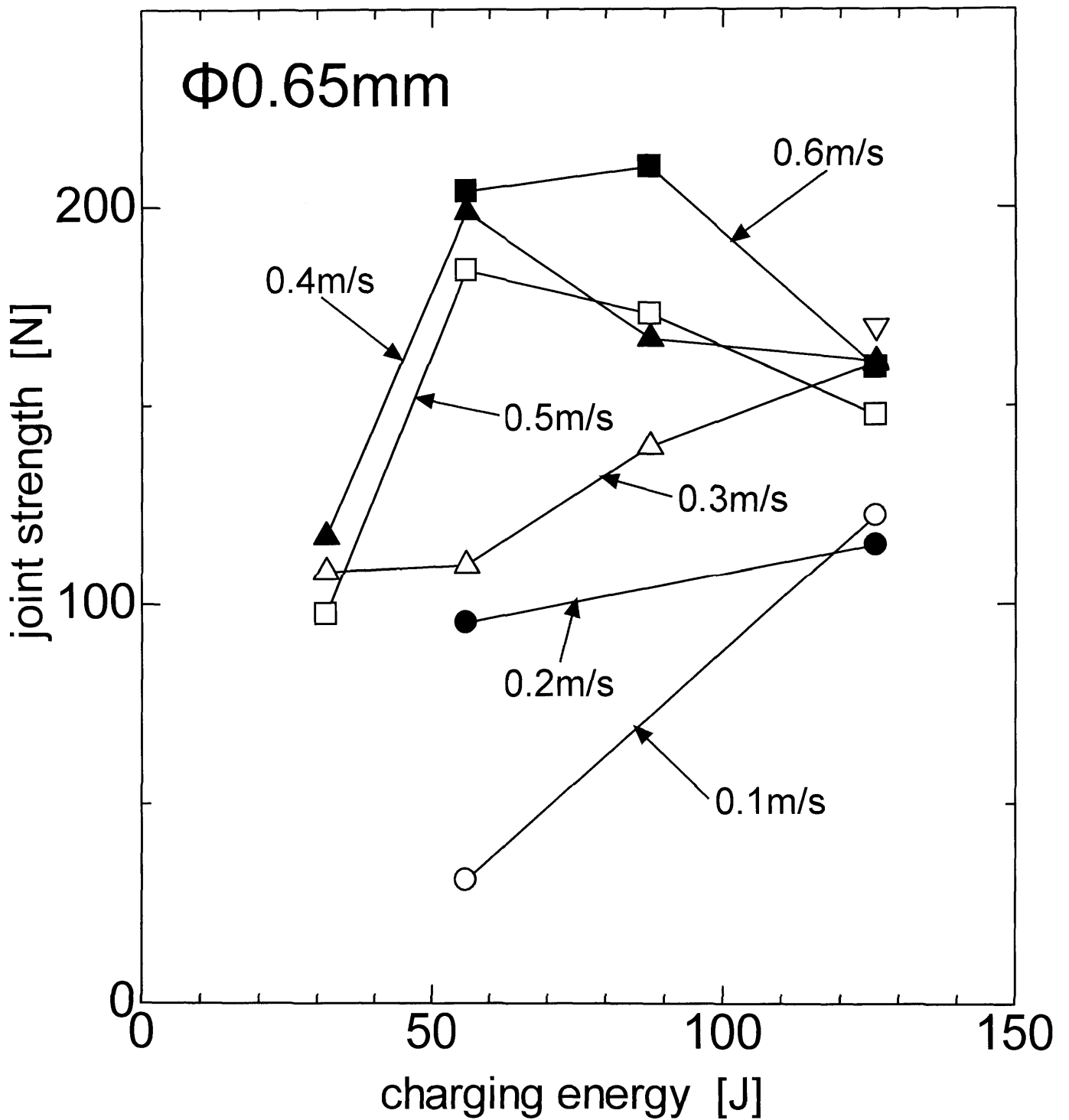


Fig.3-1 Influence of charging energy on joint strength

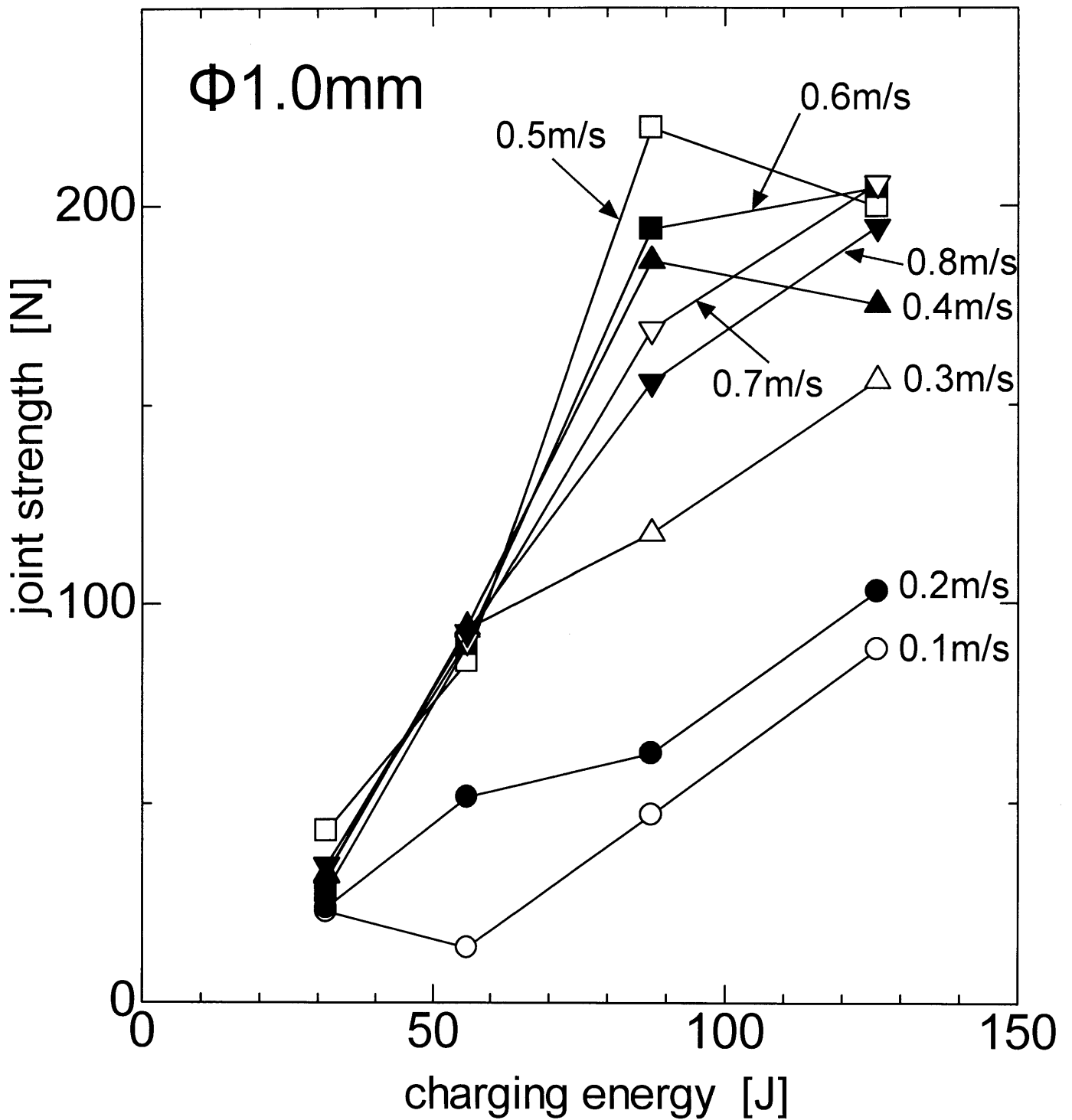


Fig.3-2 Influence of charging energy on joint strength

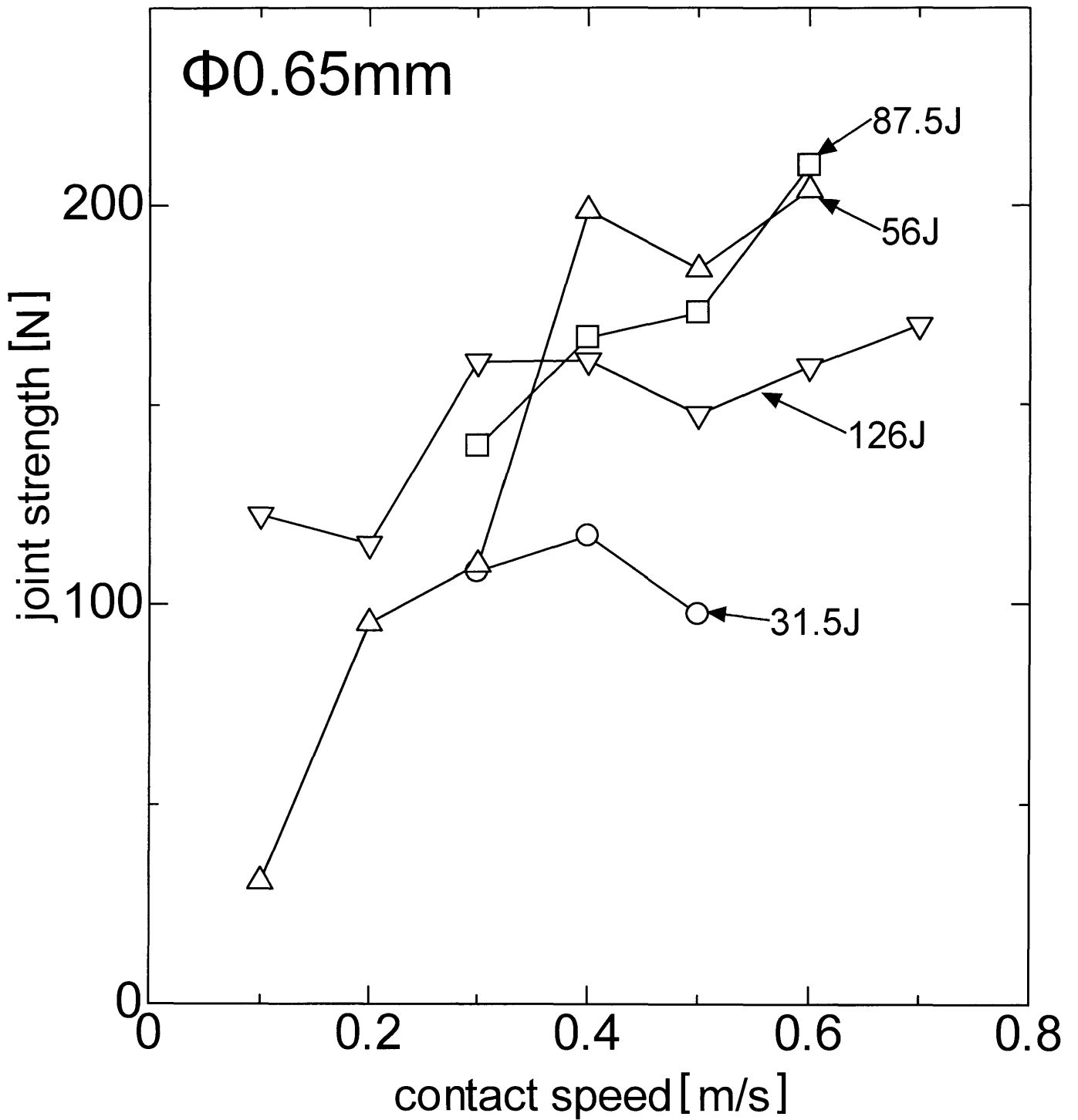


Fig.3-3 Influence of contact speed on joint strength

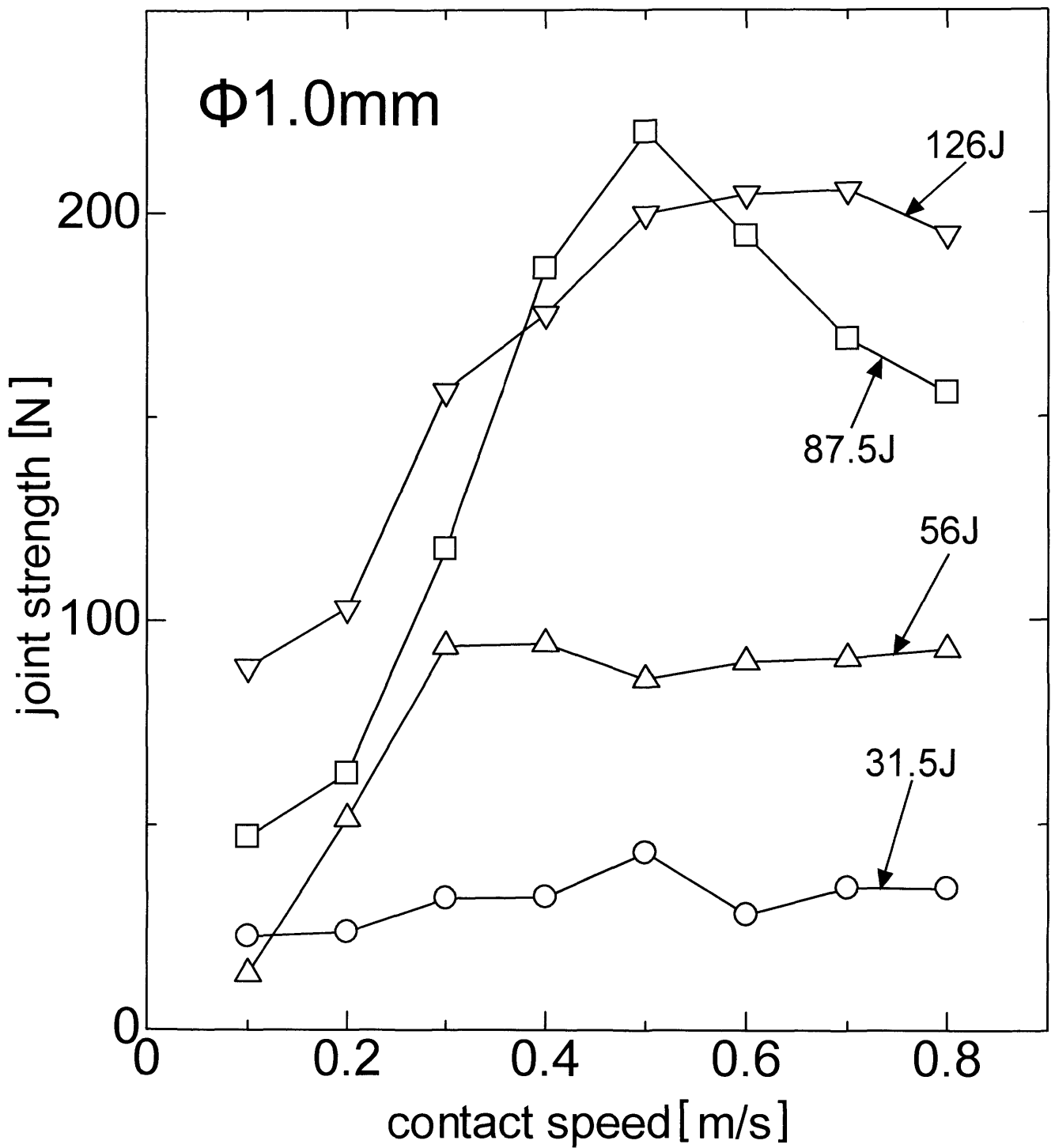


Fig.3-4 Influence of contact speed on joint strength

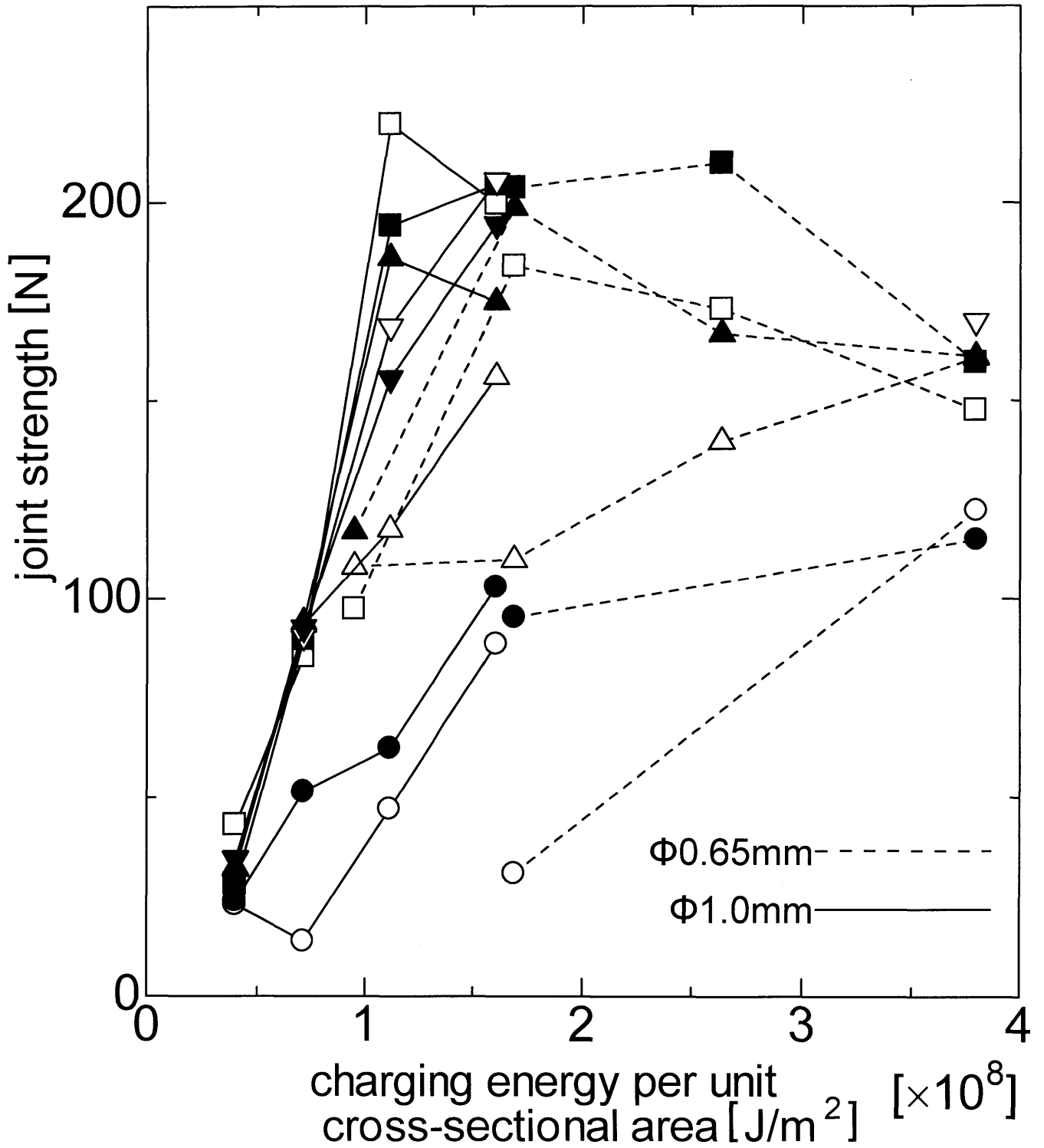


Fig.3-5 Relation between charging energy per unit cross-section area and joint strength

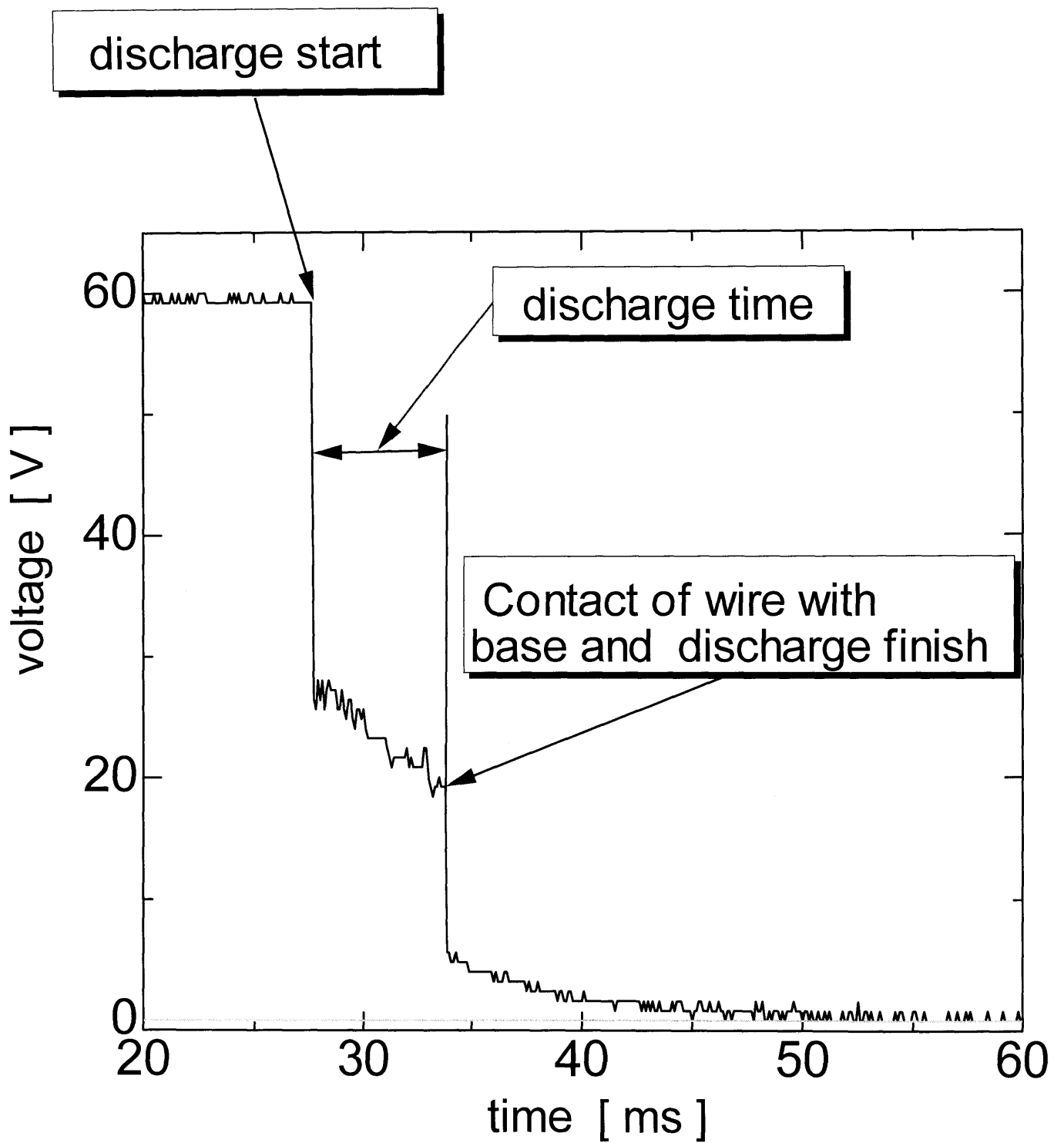


Fig.4-1 Definition of discharge time

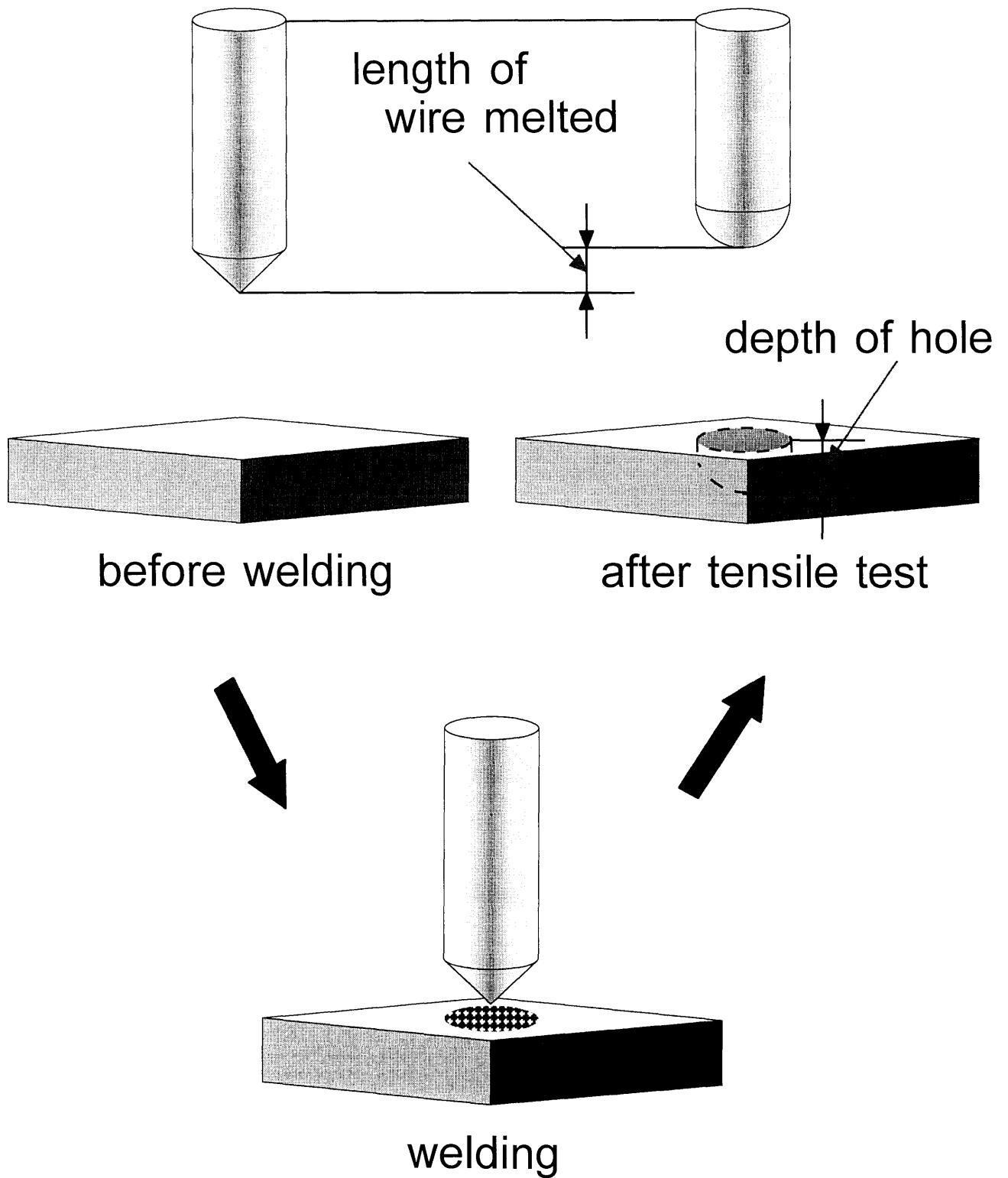


Fig.4-2 Definition of length of wire melted and depth of hole

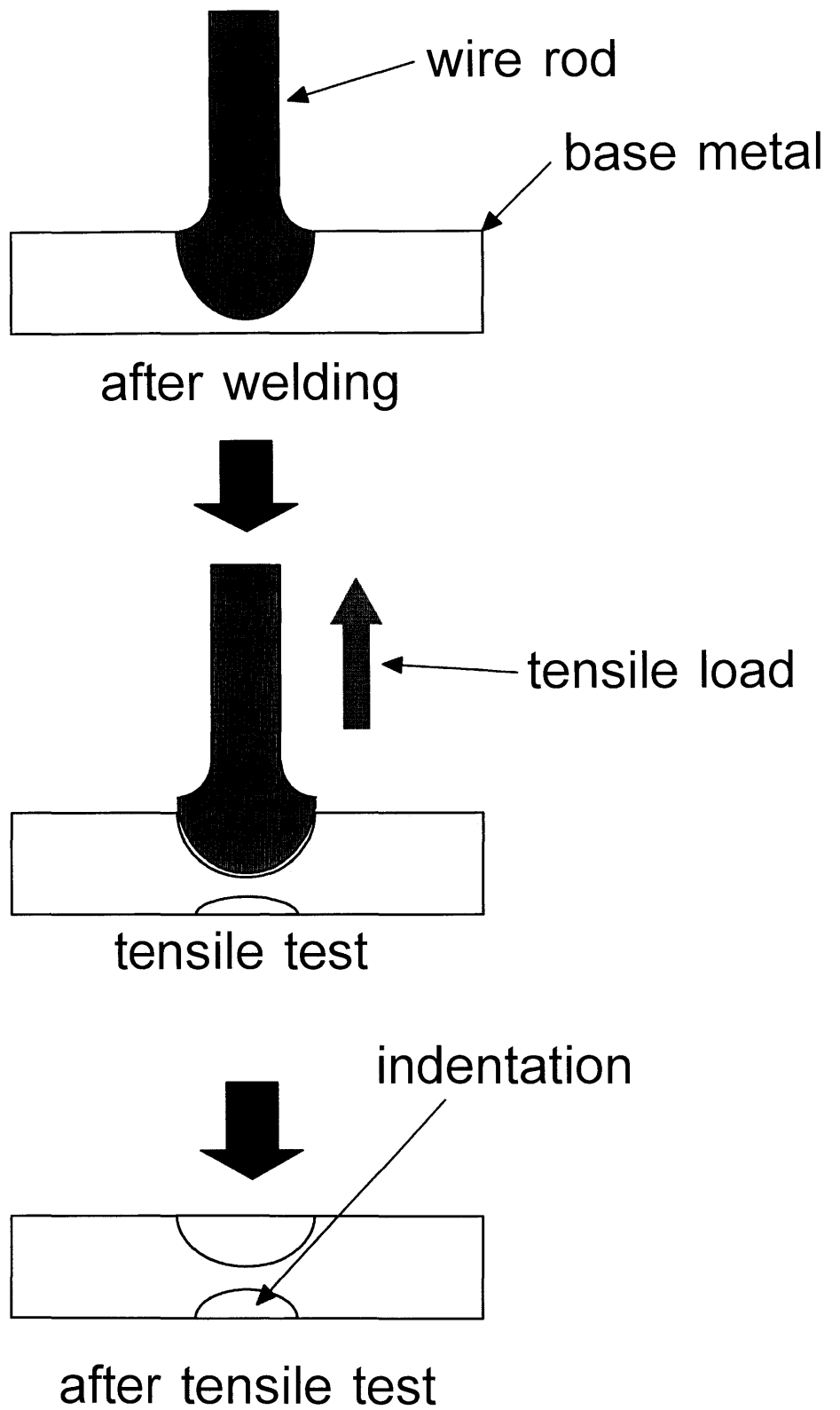


Fig.4-3 Indentation of back of base metal



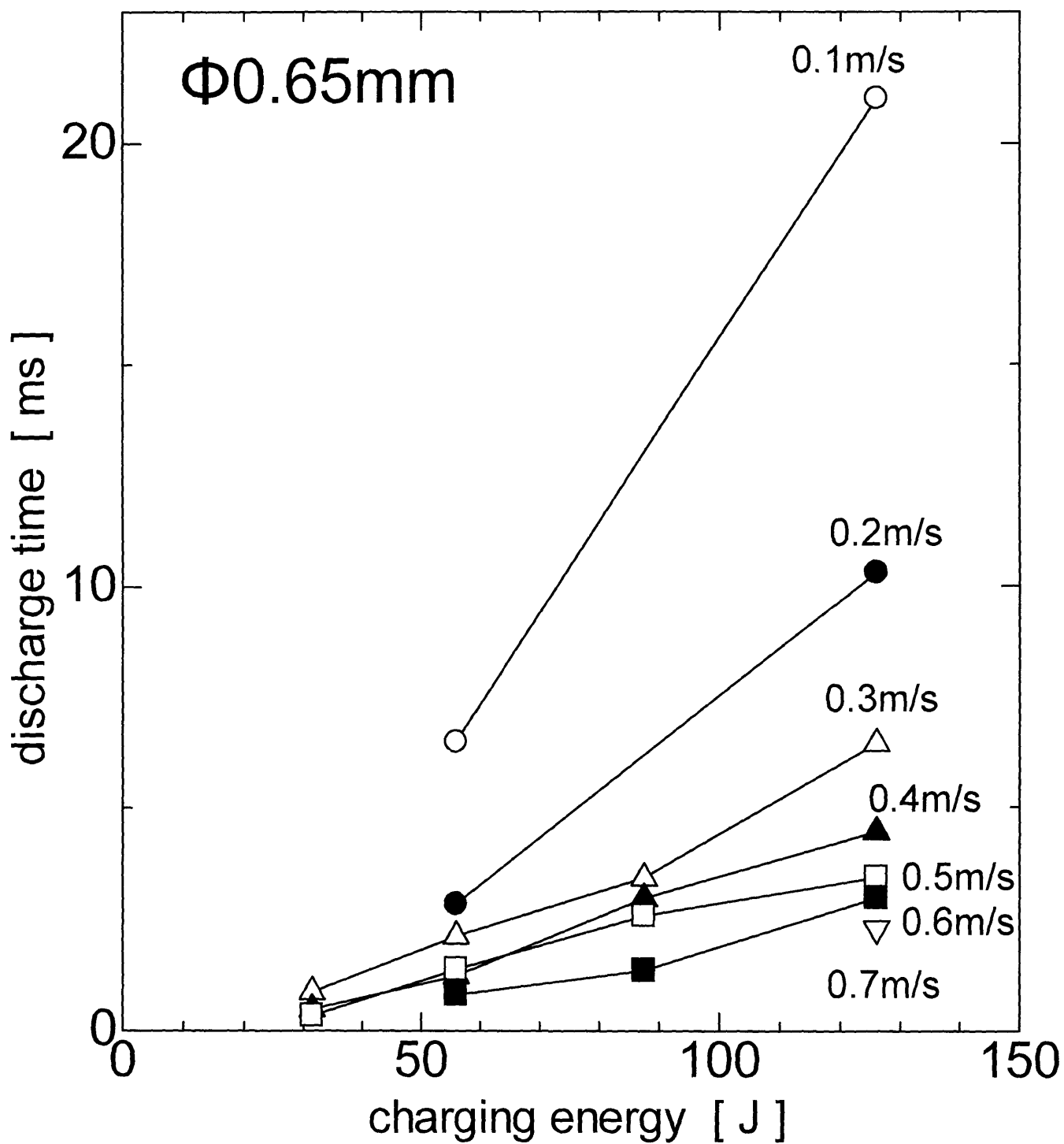


Fig.4-4 Relation between charging energy and discharge time

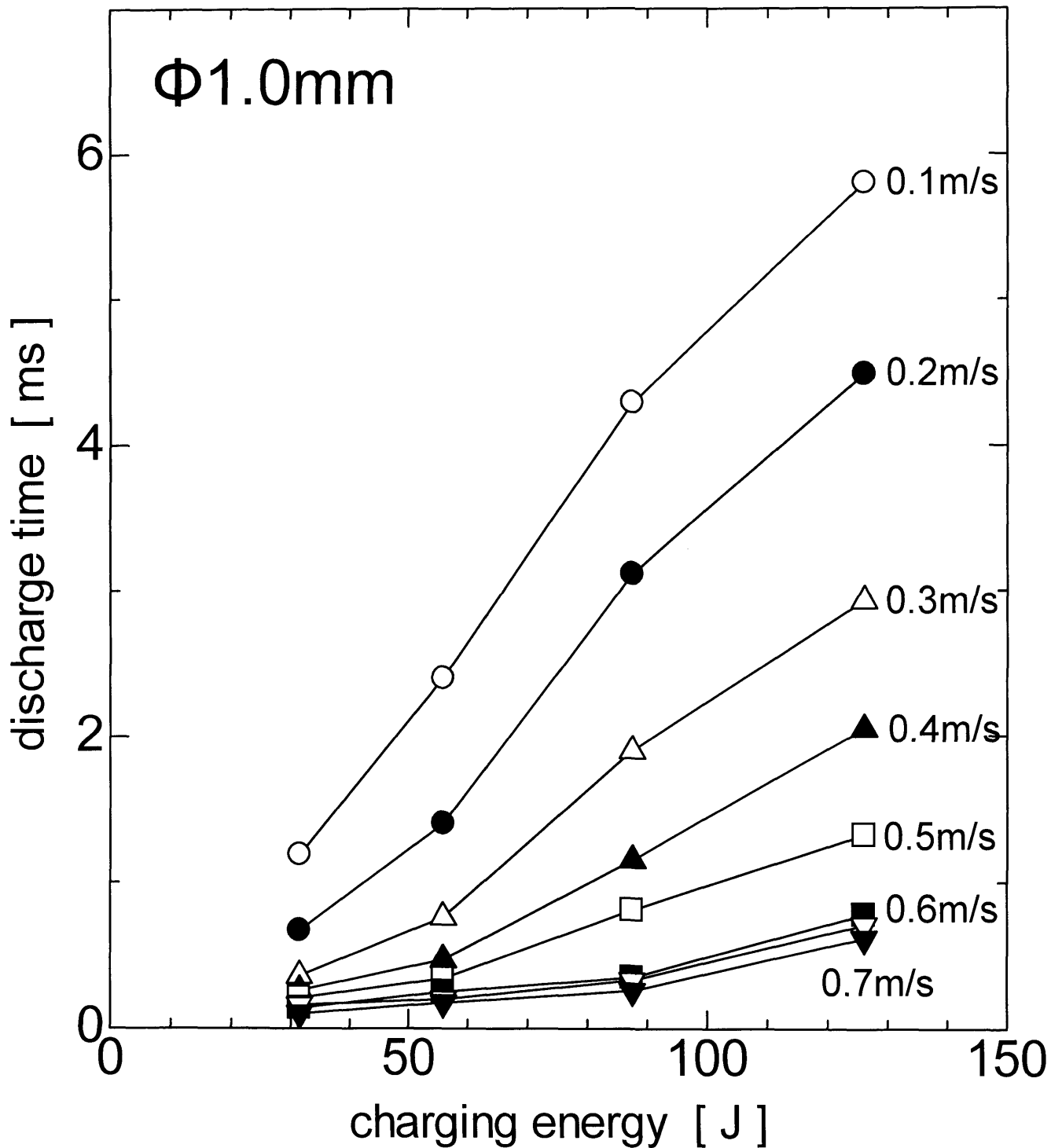


Fig.4-5 Relation between charging energy and discharge time

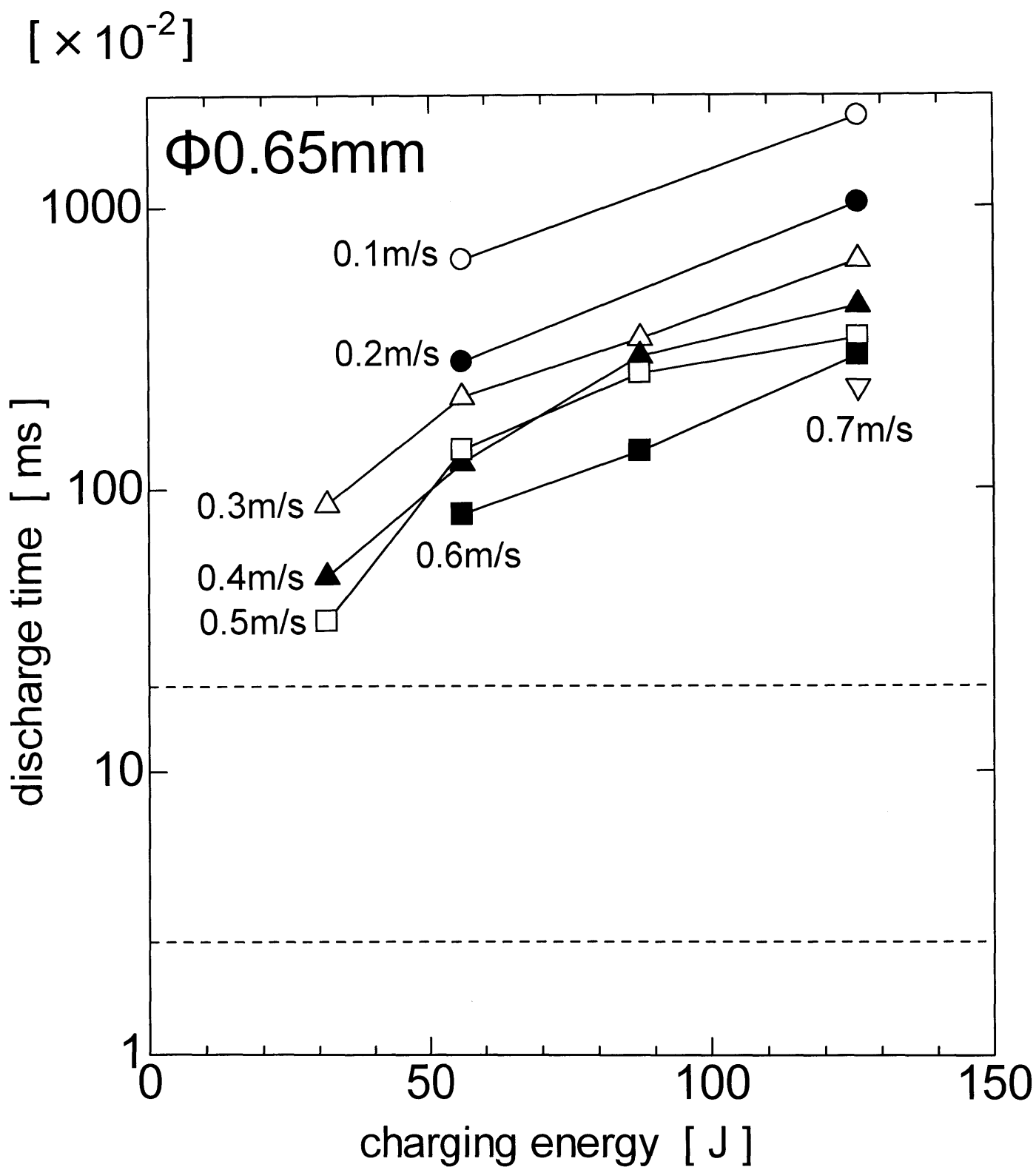


Fig.4-6 Relation between charging energy and discharge time

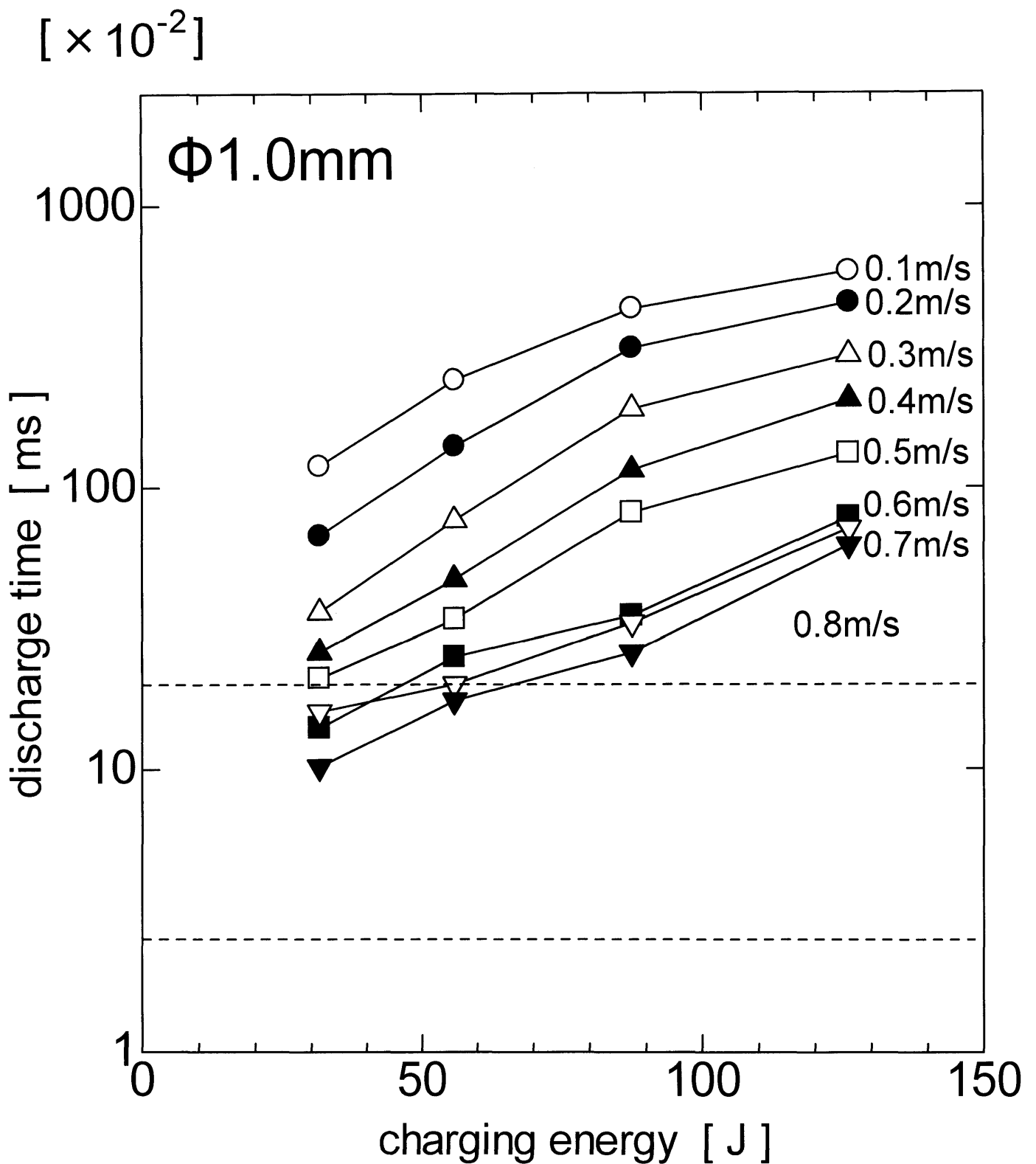


Fig.4-7 Relation between charging energy and discharge time

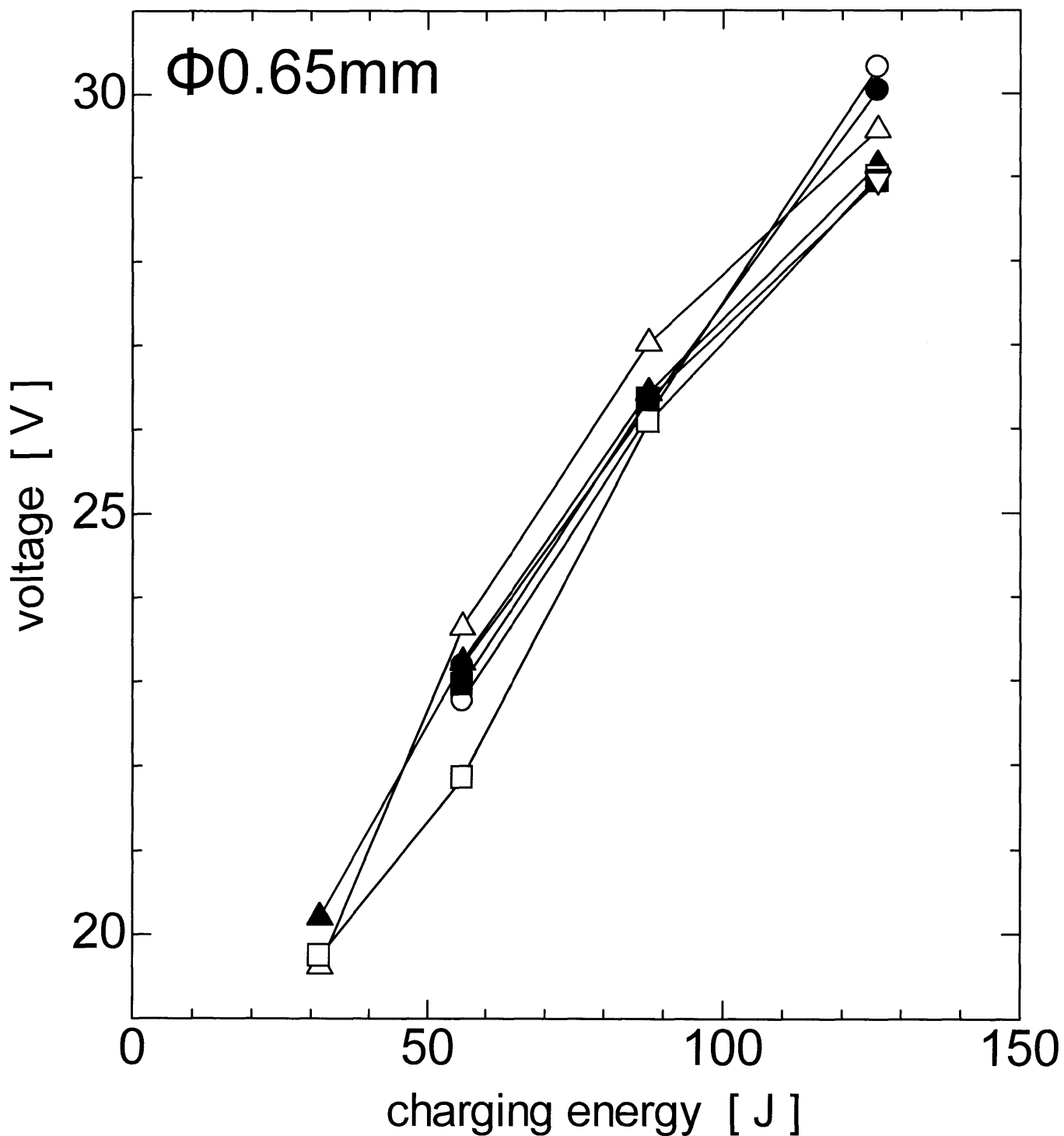


Fig.4-8 Relation between charging energy and voltage of discharge start

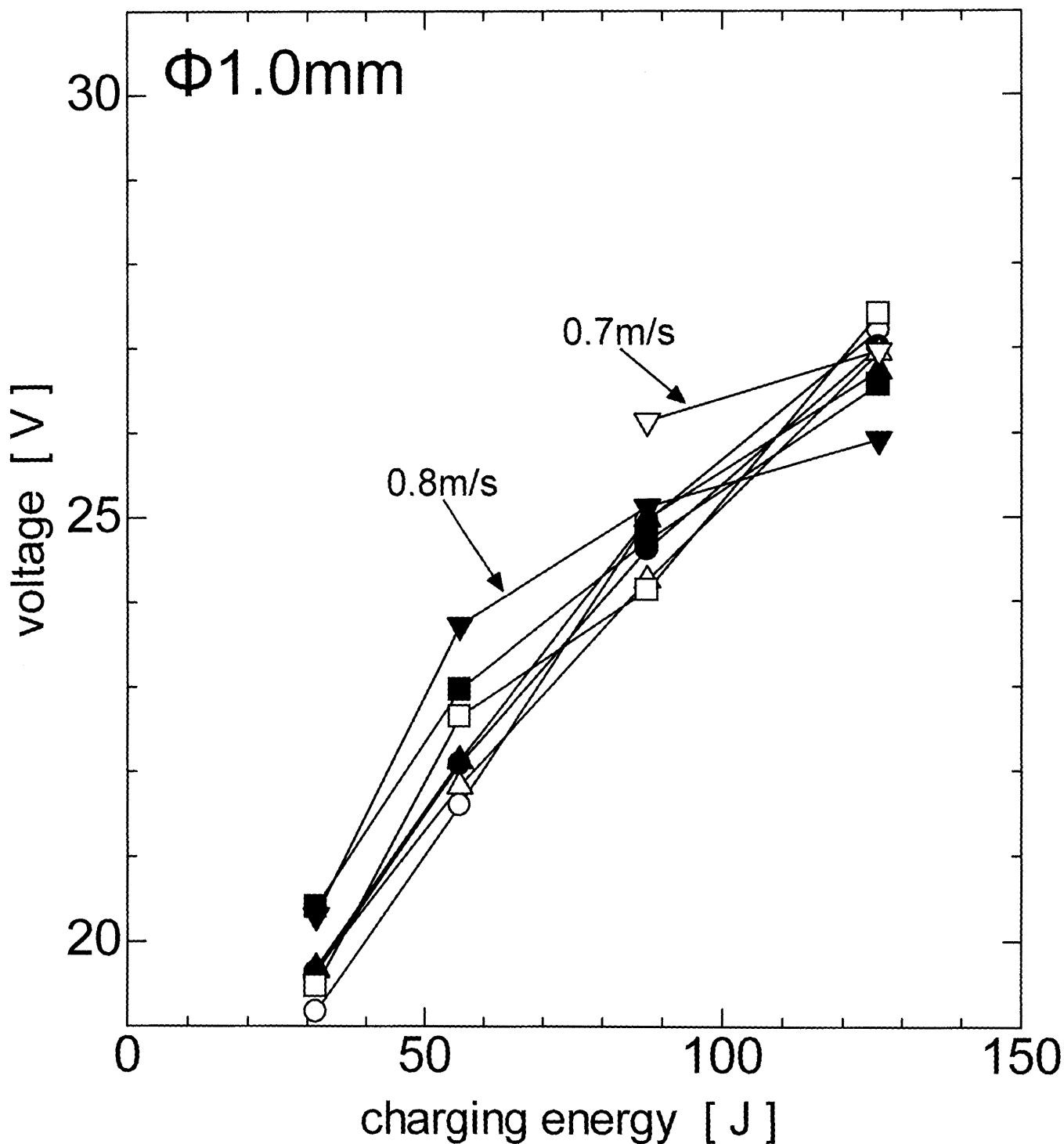


Fig.4-9 Relation between charging energy and voltage of discharge start

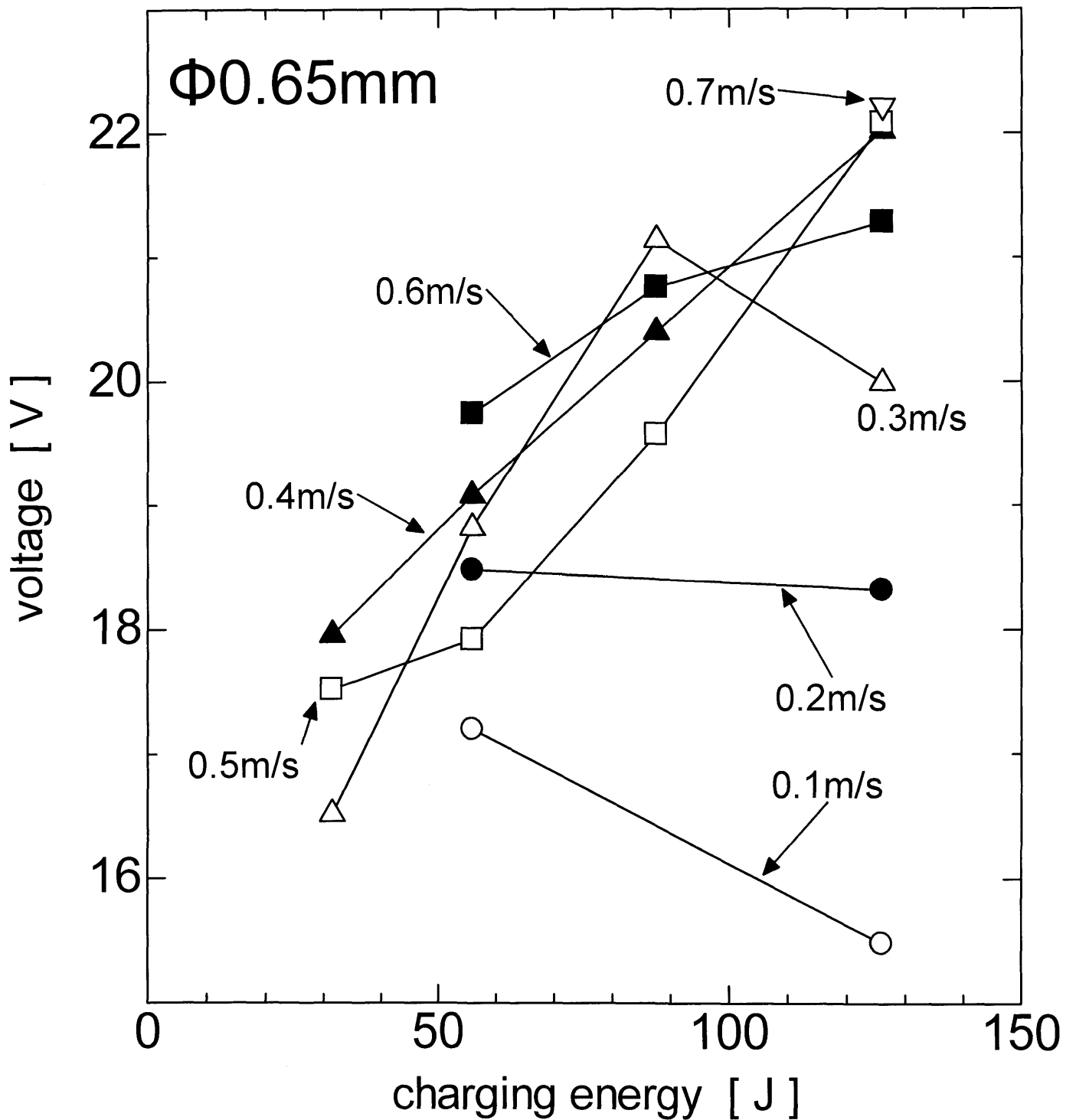


Fig.4-10 Relation between charging energy and voltage of discharge finish

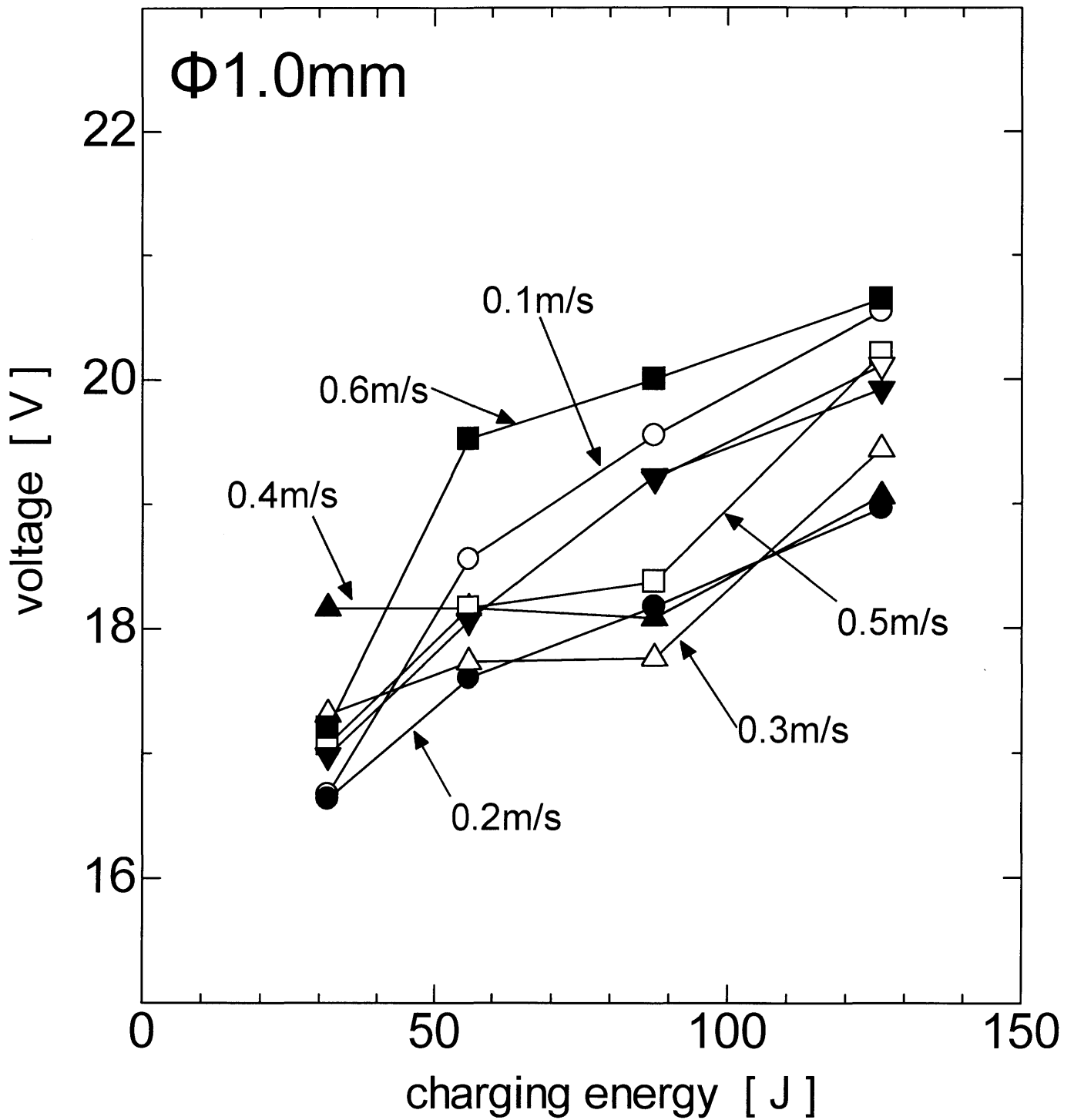


Fig.4-11 Relation between charging energy and voltage of discharge finish



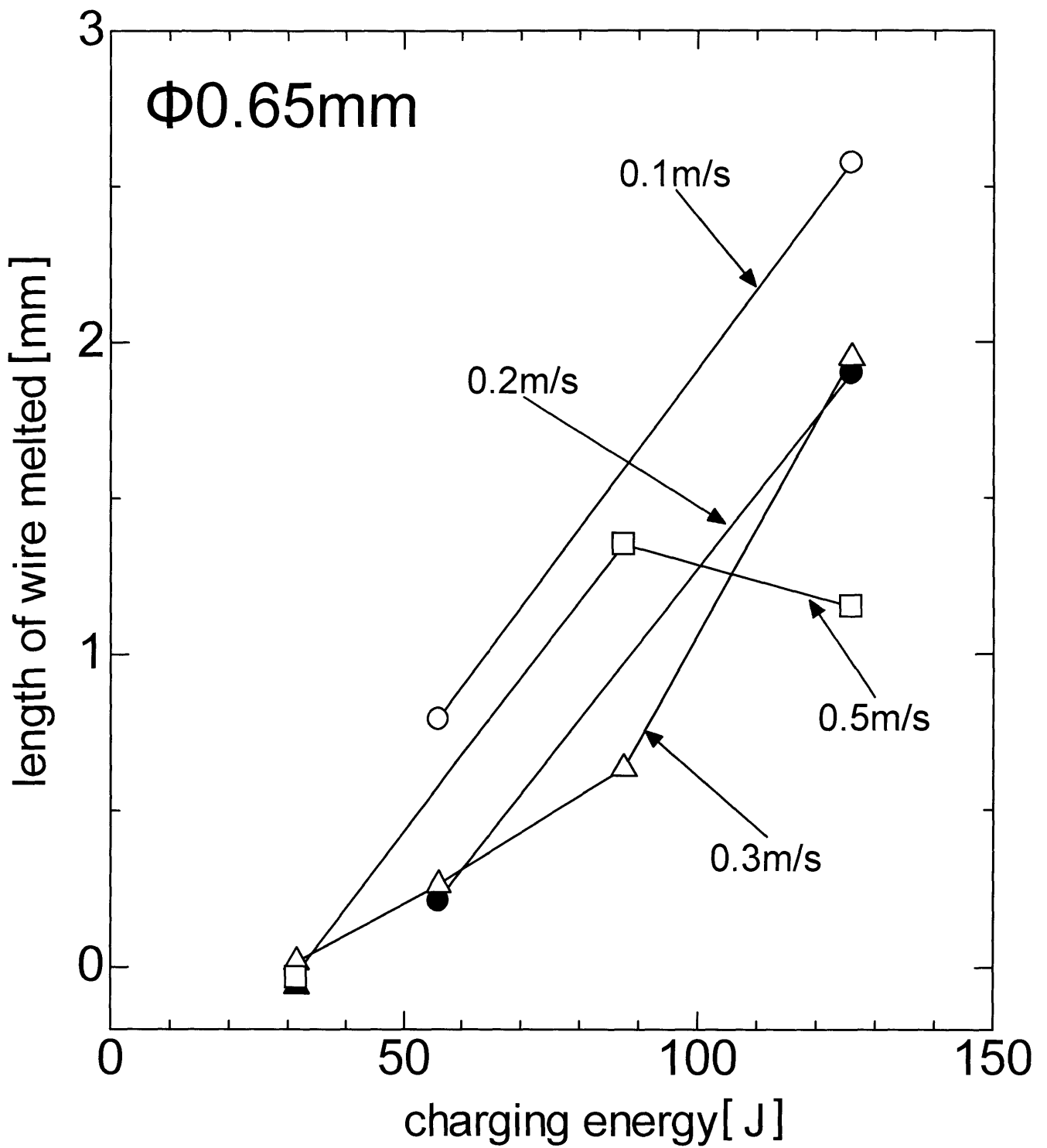


Fig.4-12 Relation between charging energy and length of wire melted

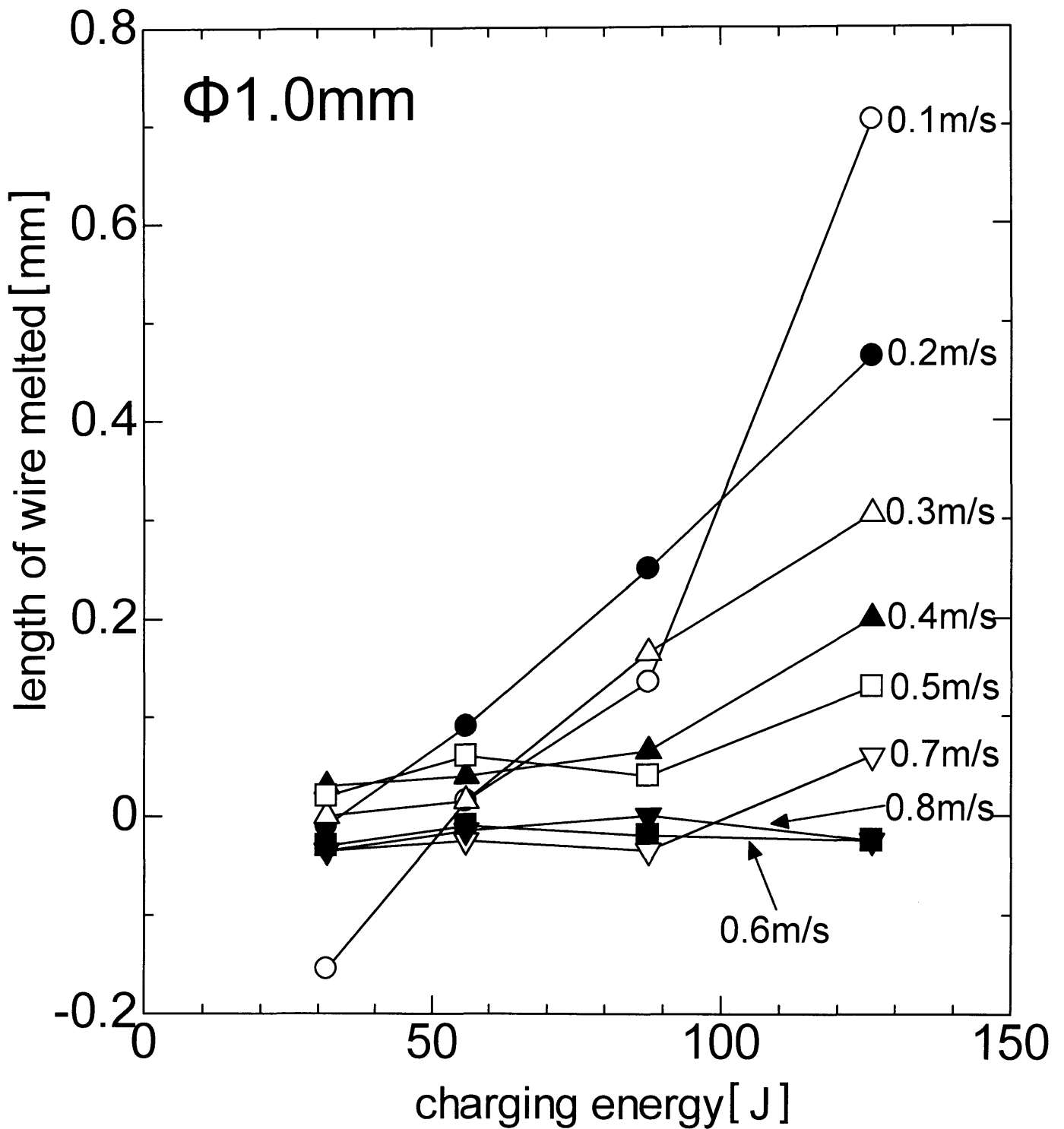


Fig.4-13 Relation between charging energy and length of wire melted

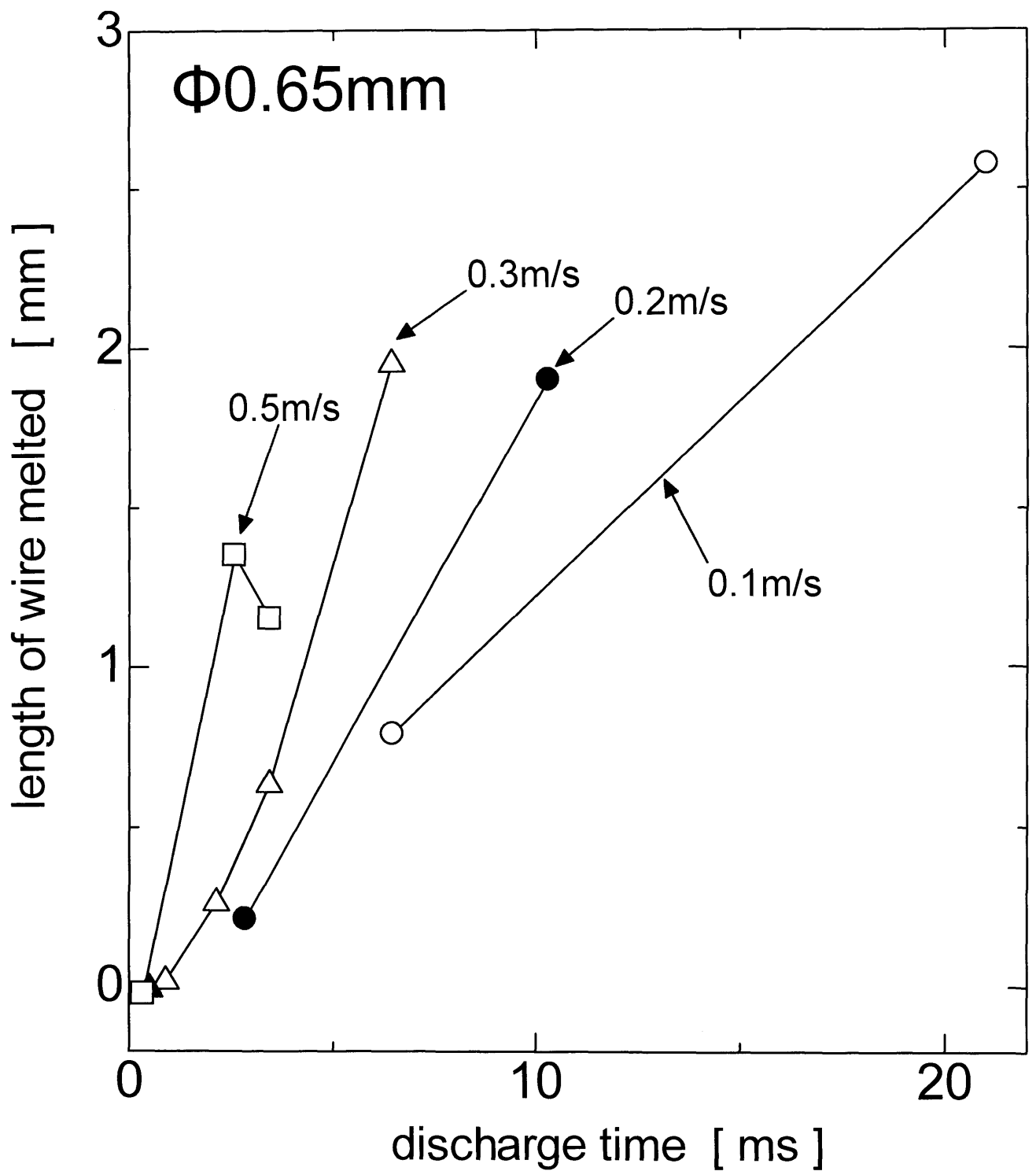


Fig.4-14 Relation between discharge time and length of wire melted

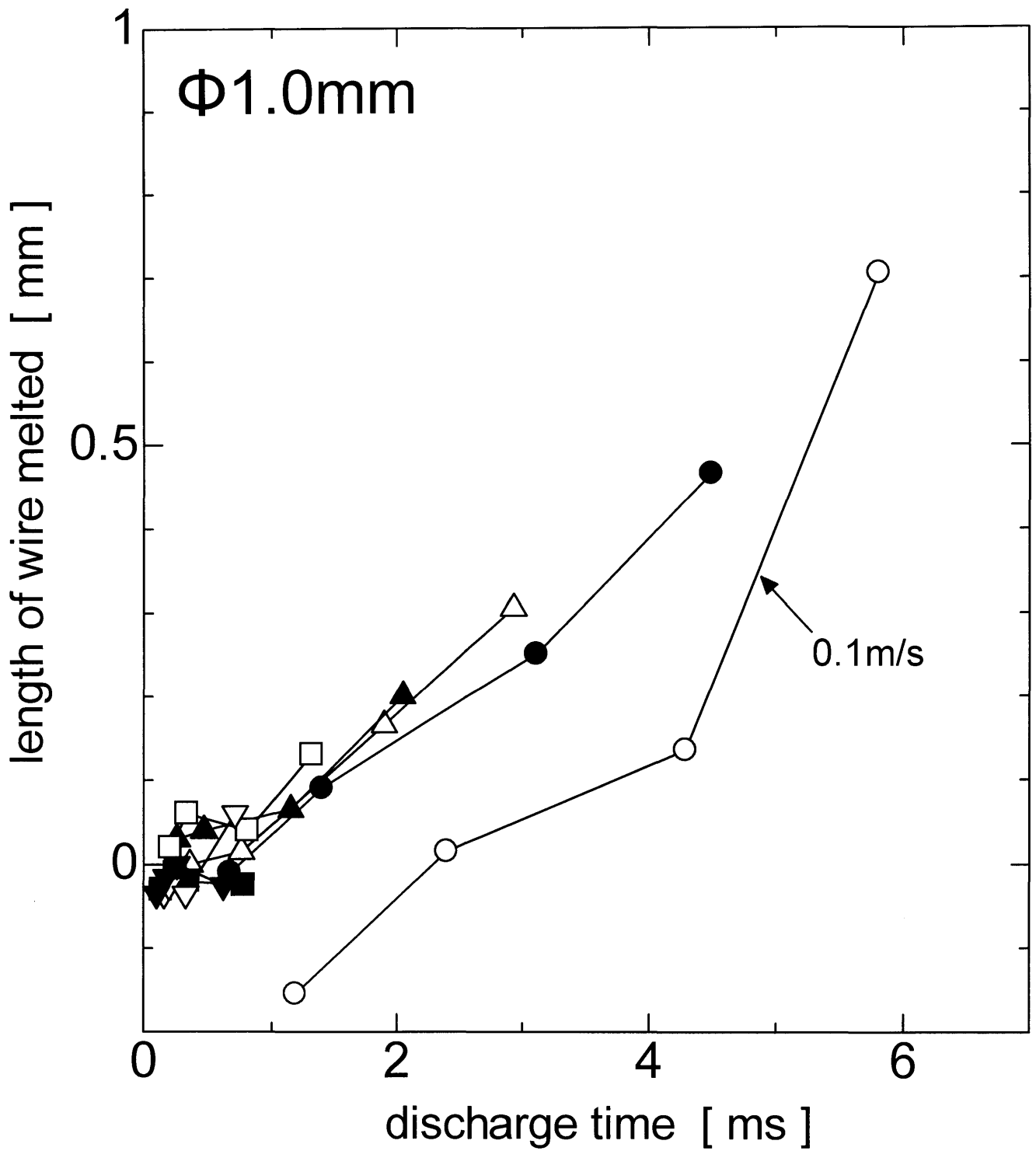


Fig.4-15 Relation between discharge time and length of wire melted

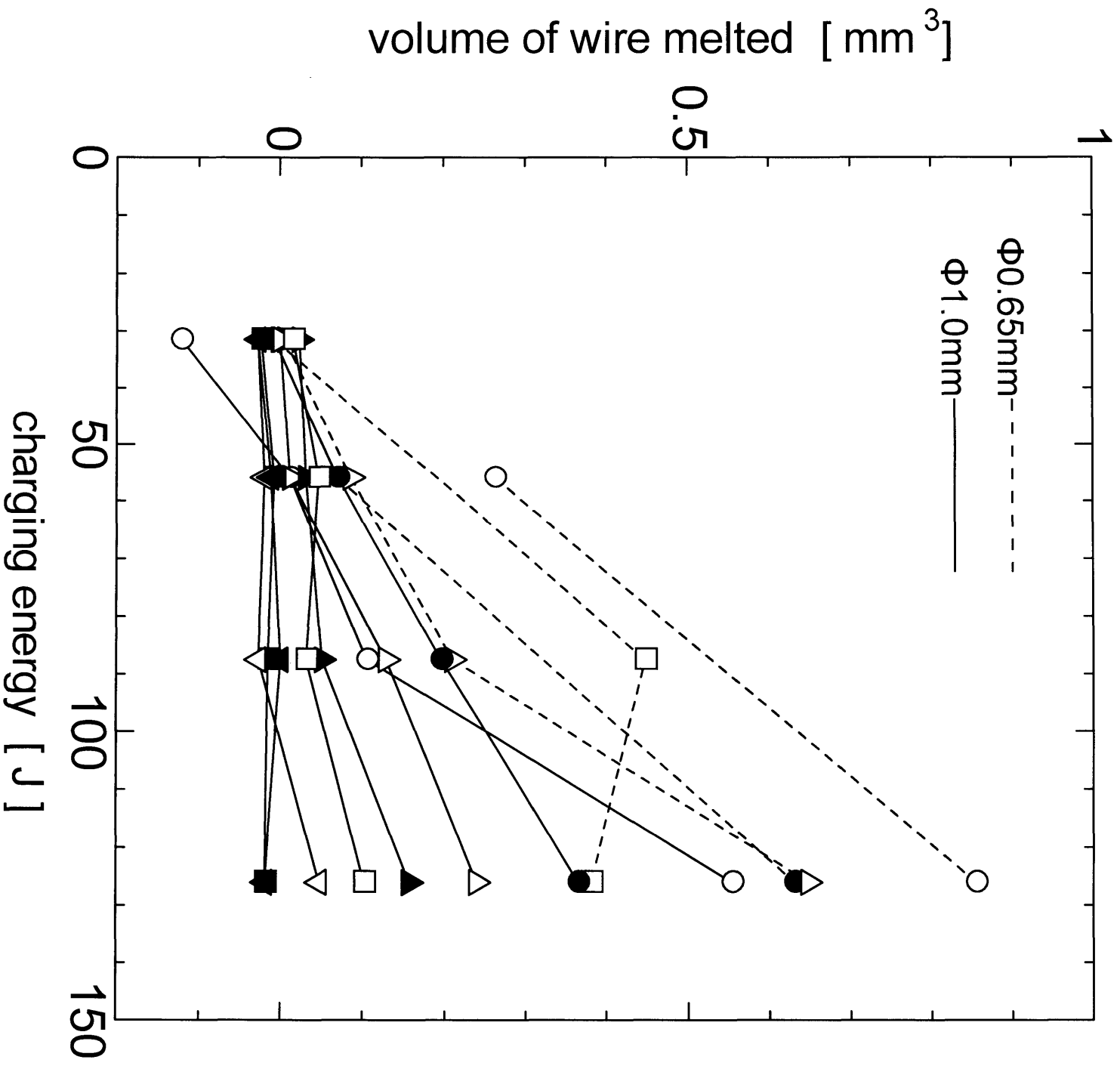


Fig.4-16 Relation between charging energy and volume of wire melted

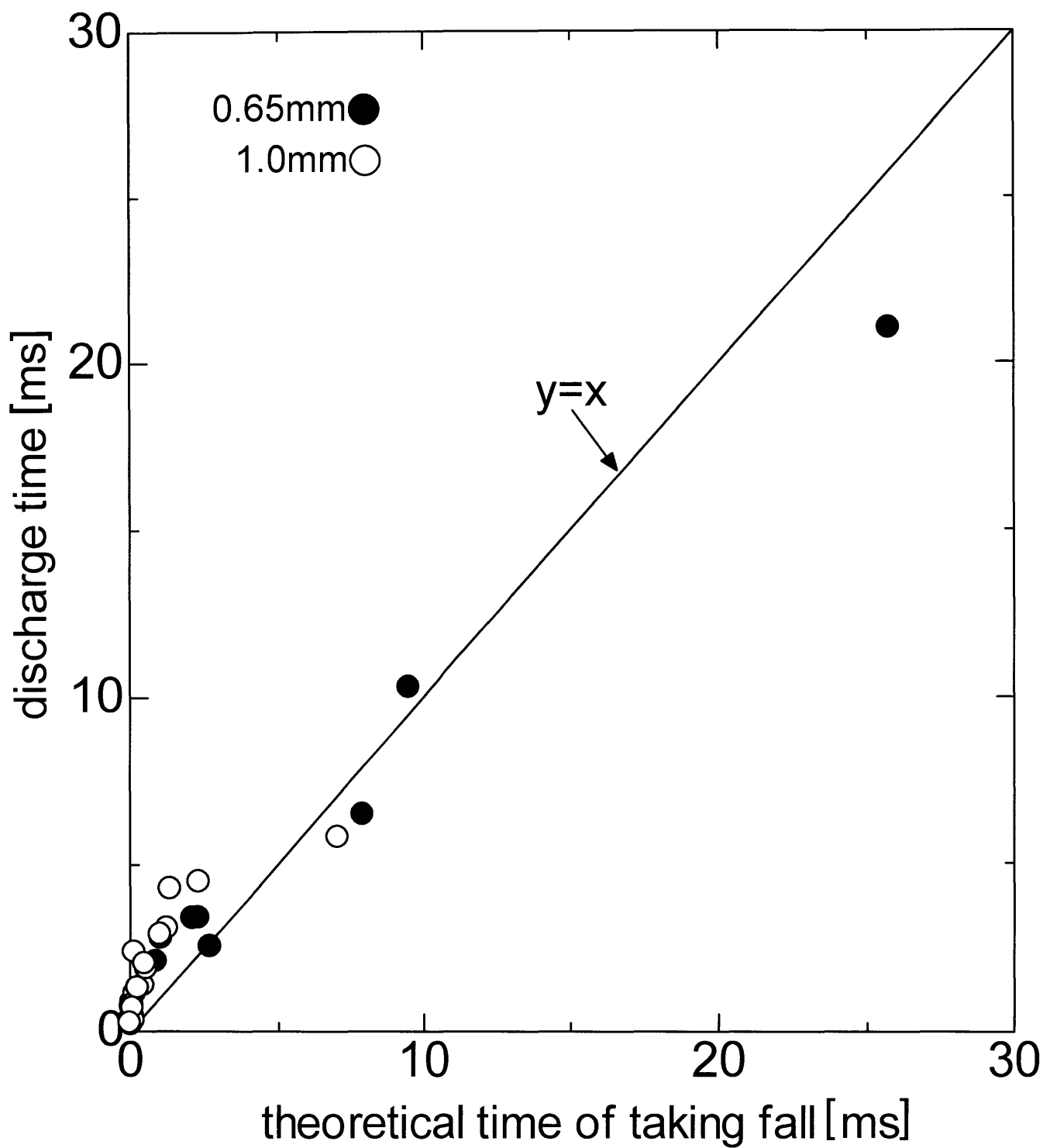


Fig.4-17 Relation between theoretical time of taking fall and discharge time

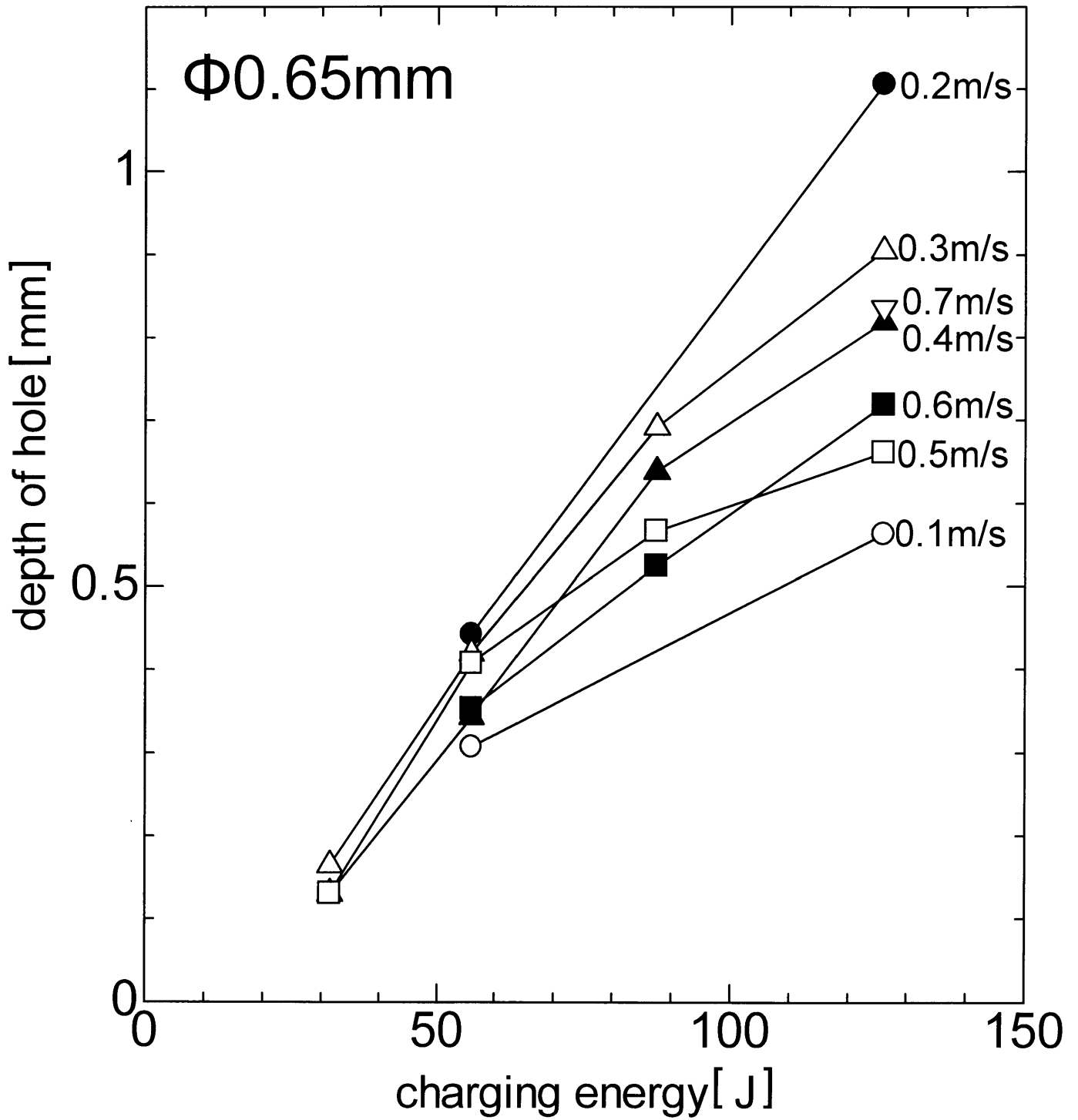


Fig.4-18 Relation between charging energy and depth of hole

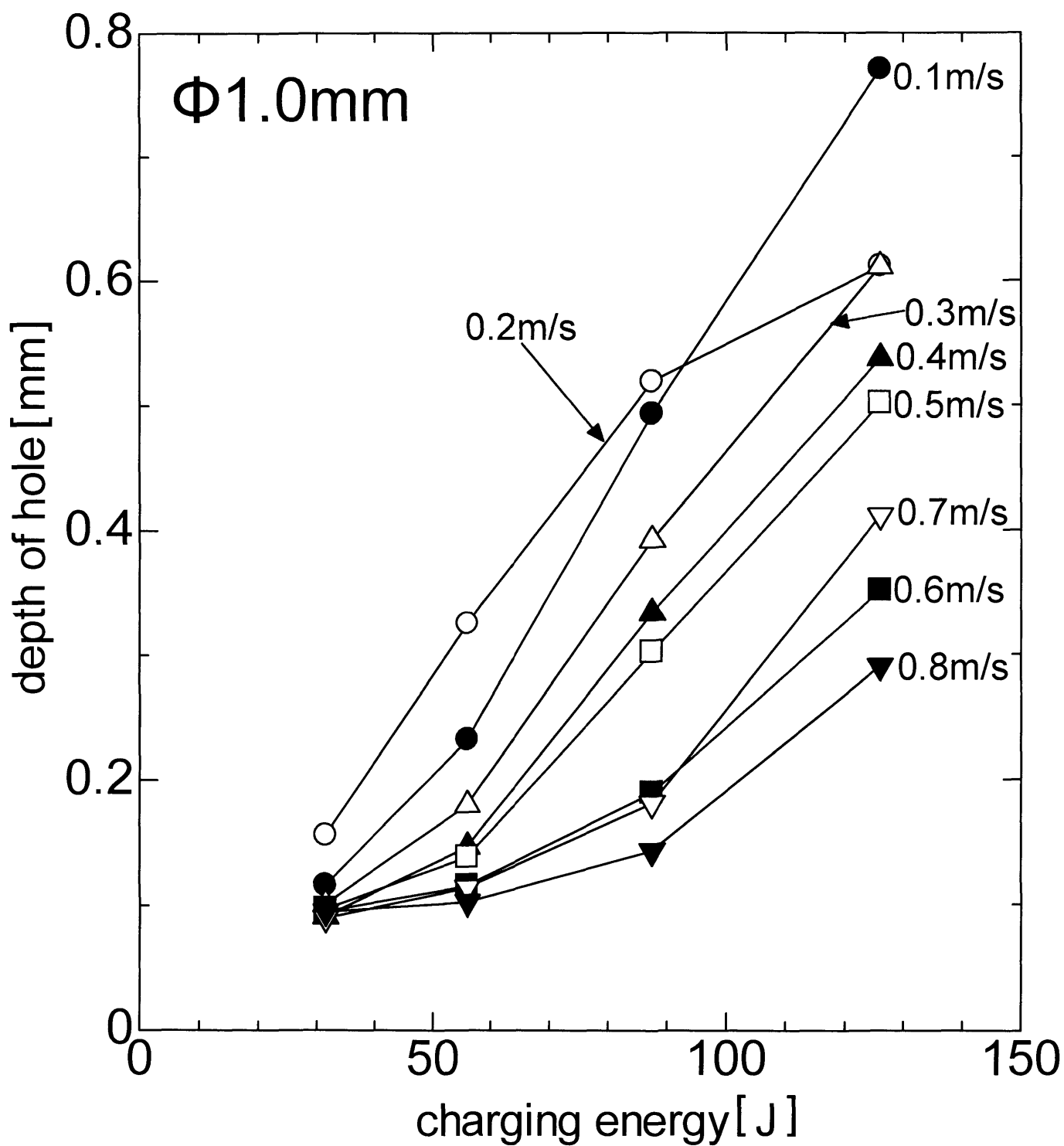


Fig.4-19 Relation between charging energy and depth of hole



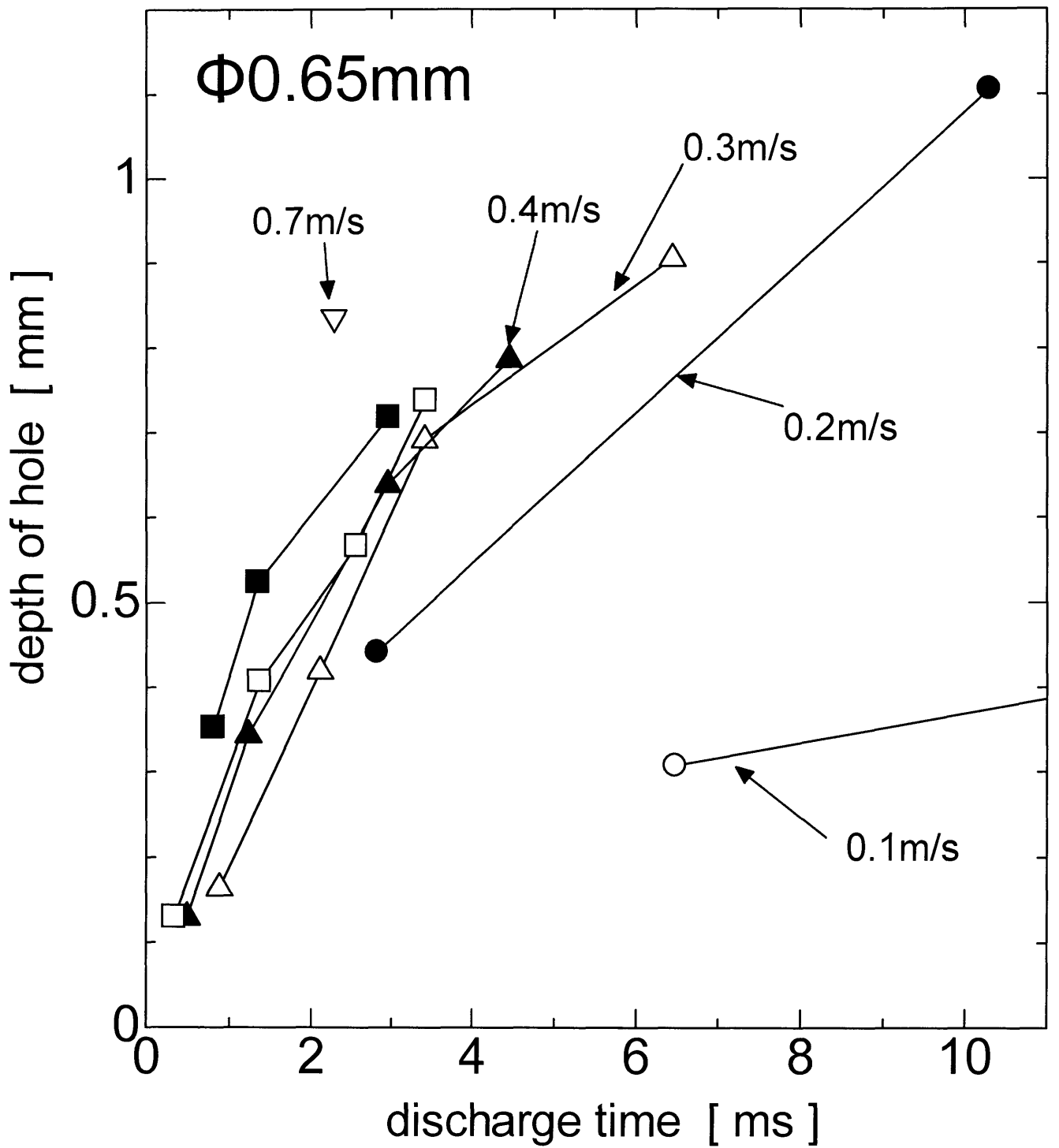


Fig.4-20 Relation between discharge time and depth of hole

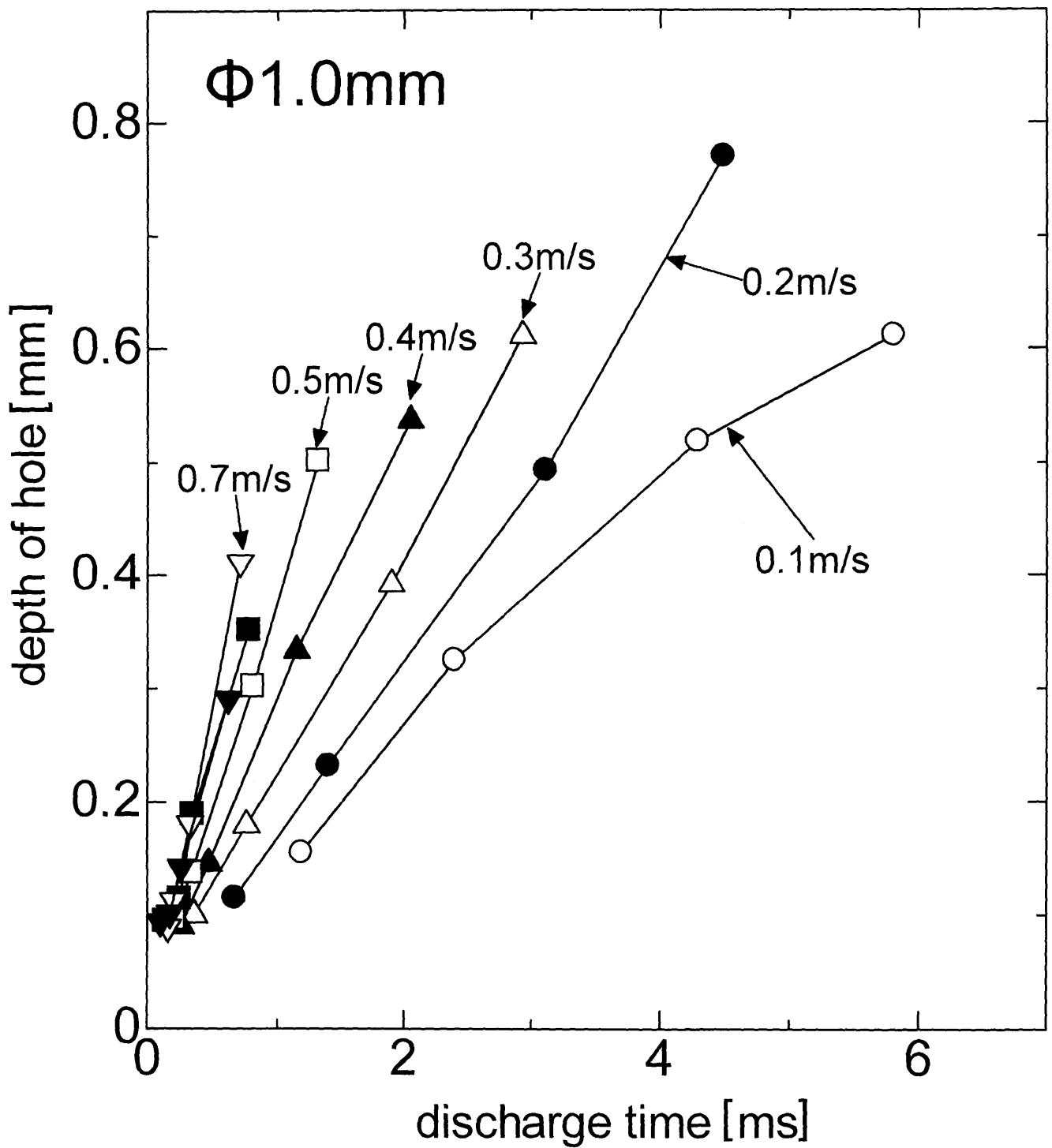


Fig.4-21 Relation between discharge time and depth of hole

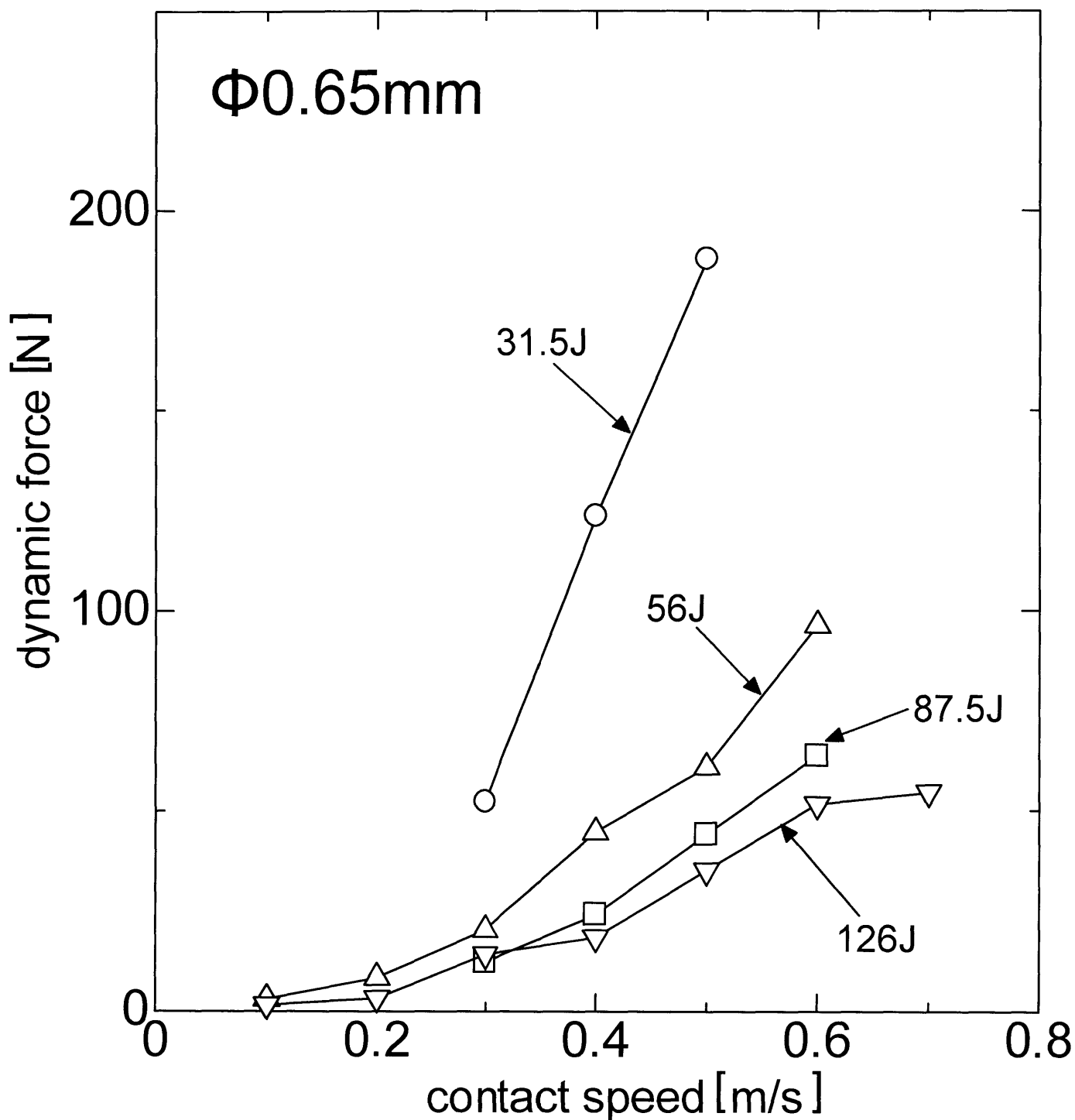


Fig.4-22 Relation between contact speed and dynamic force

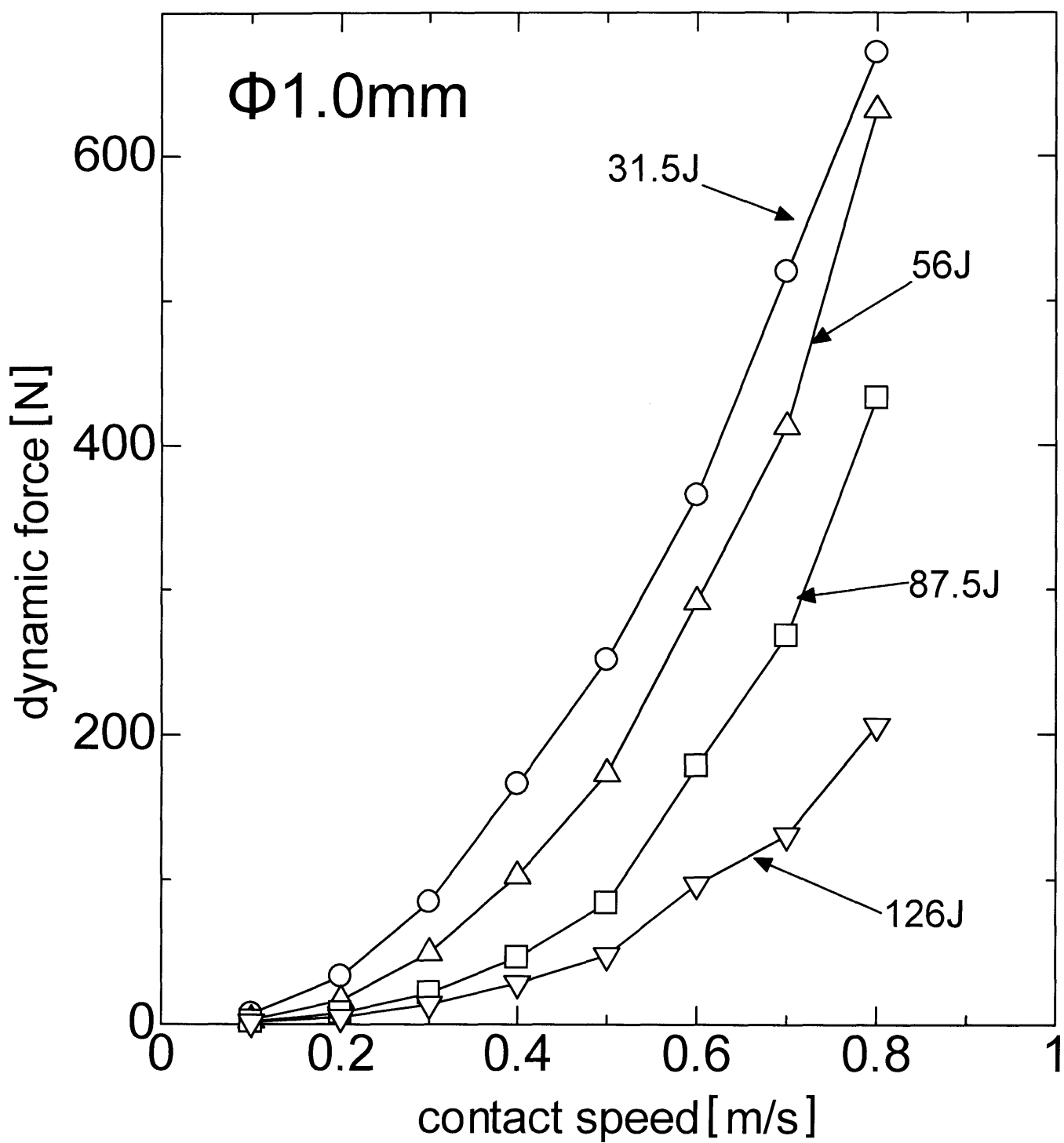


Fig.4-23 Relation between contact speed and dynamic force

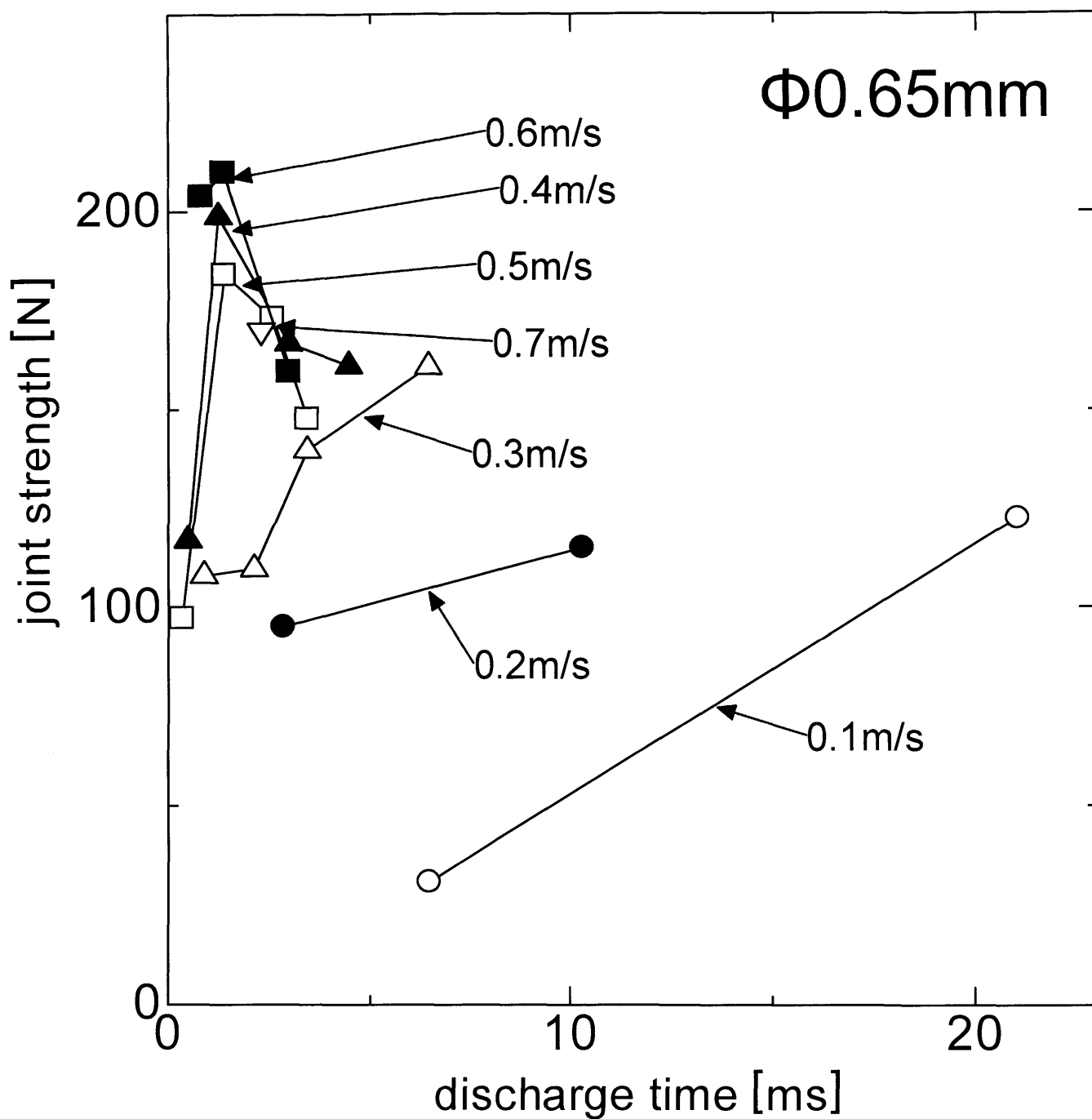


Fig.5-1 Relation between discharge time and joint strength

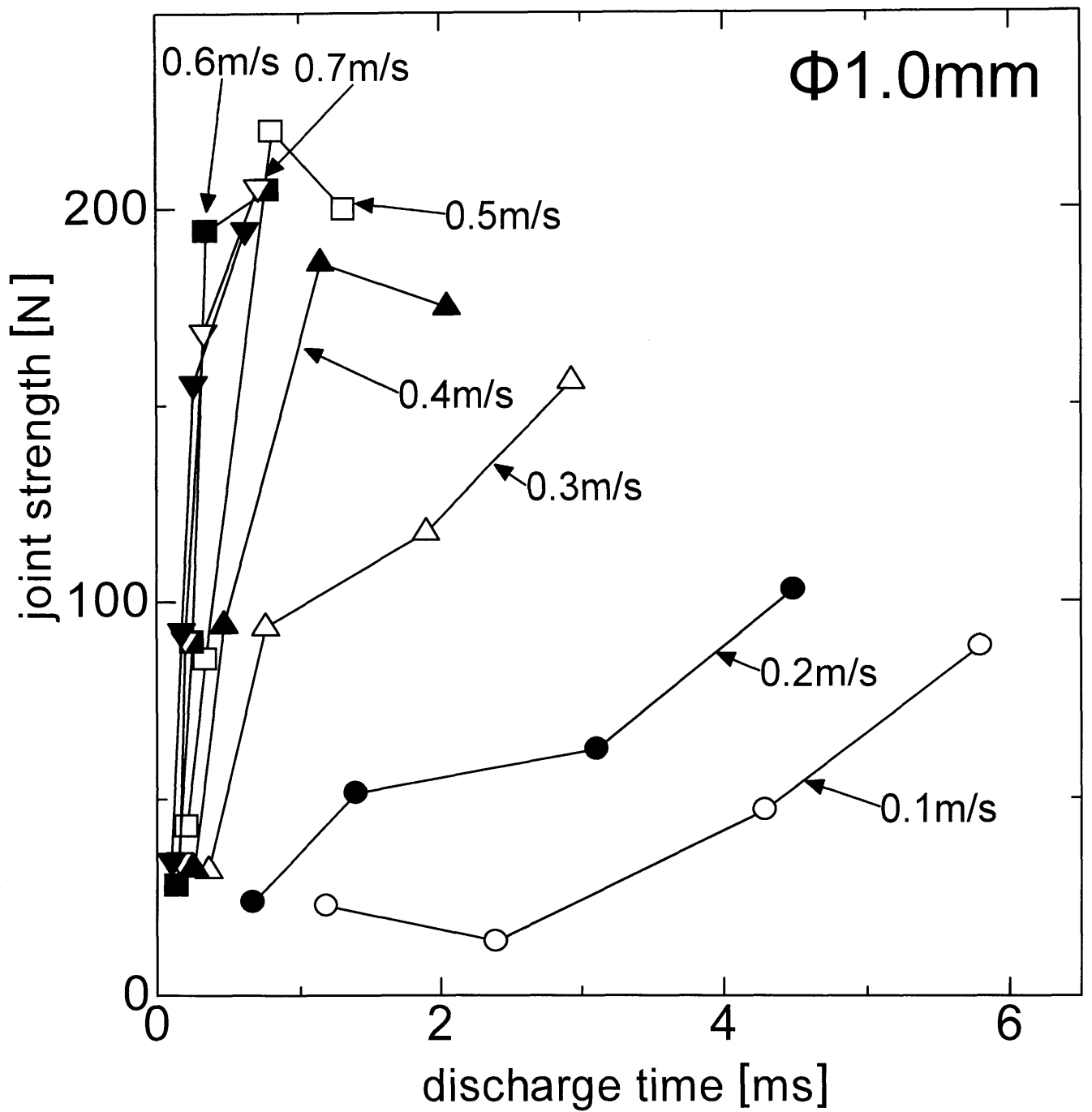


Fig.5-2 Relation between discharge time and joint strength

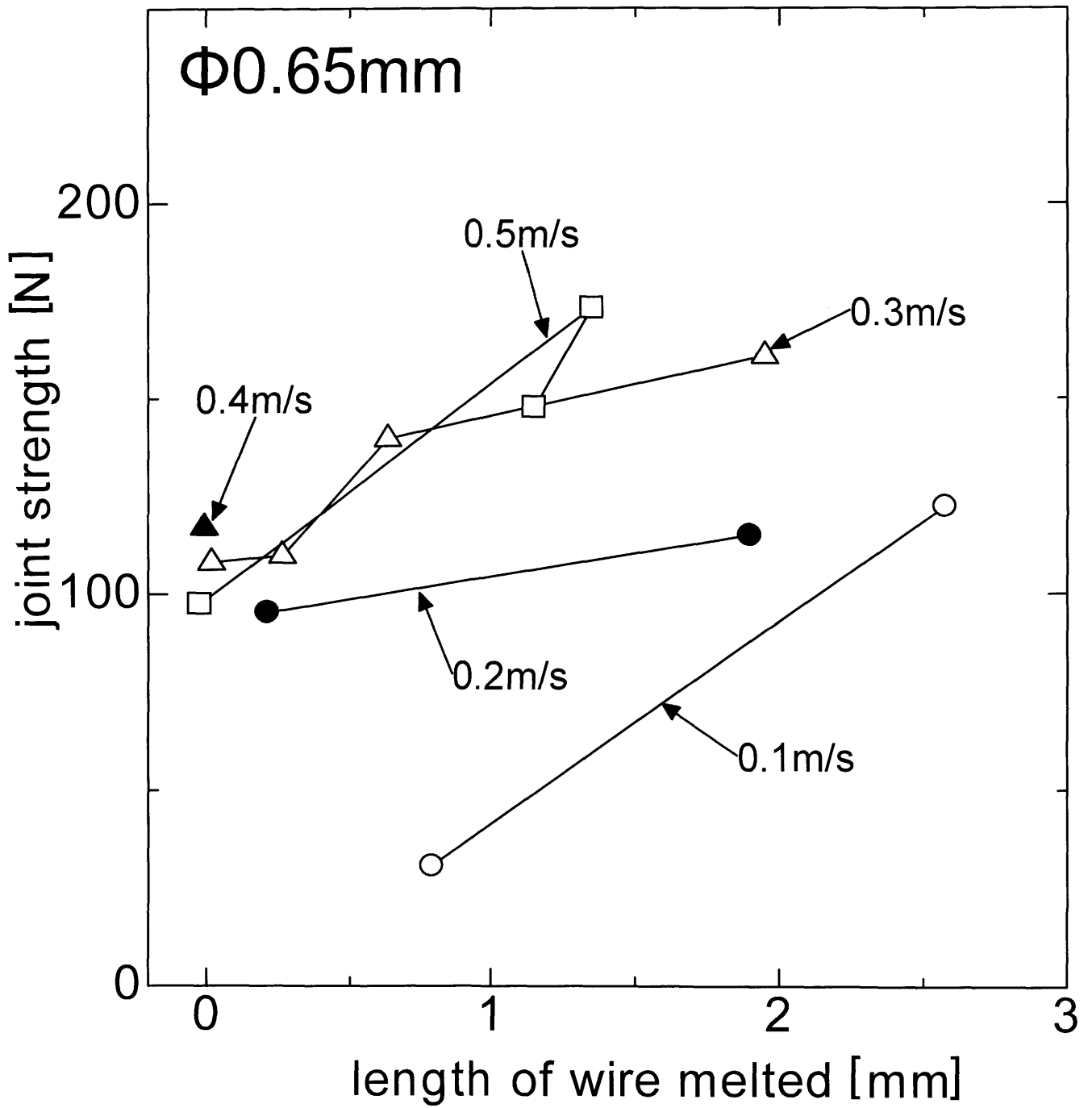


Fig.5-3 Relation between length of wire melted and joint strength

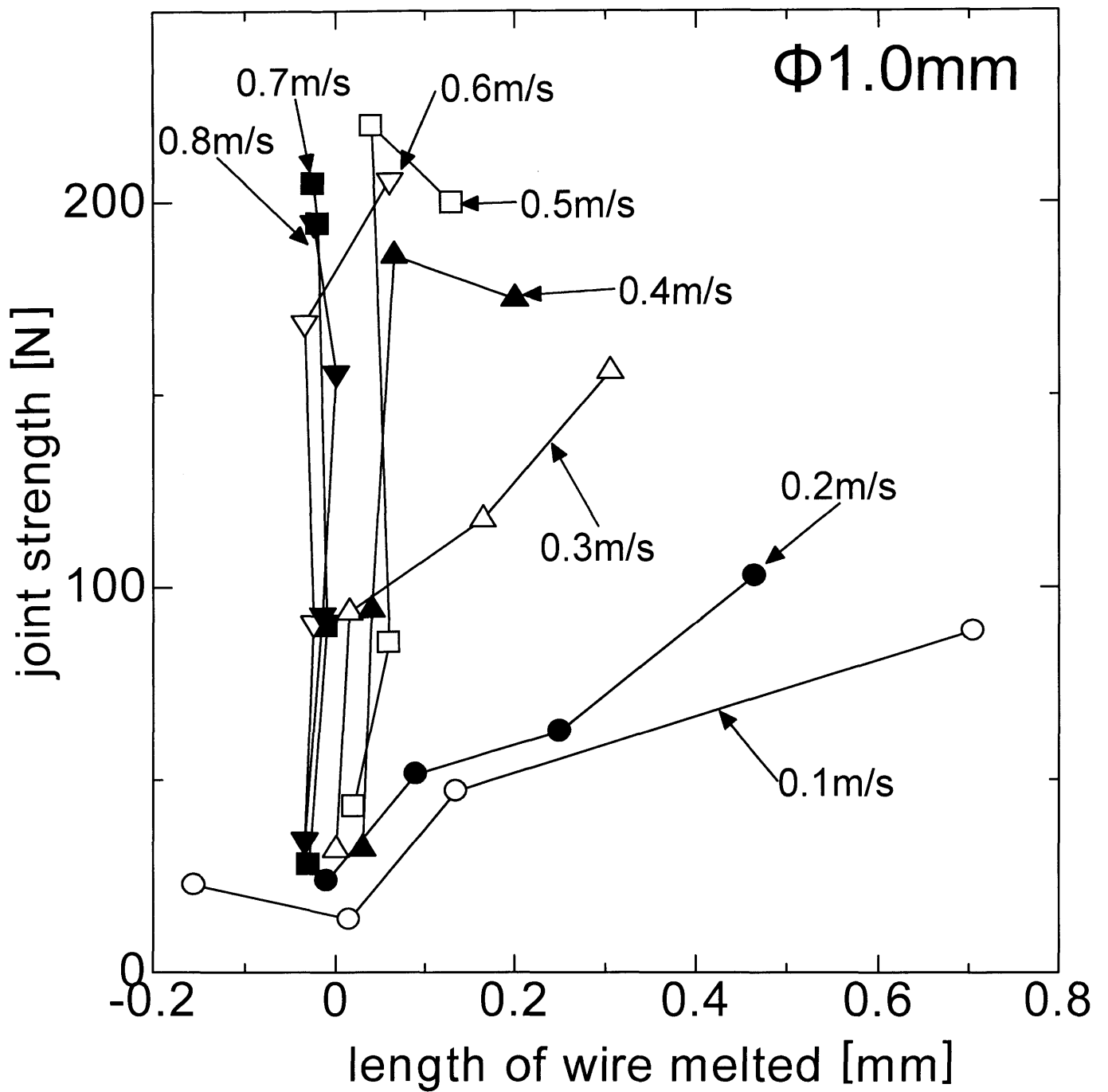


Fig.5-4 Relation between length of wire melted and joint strength



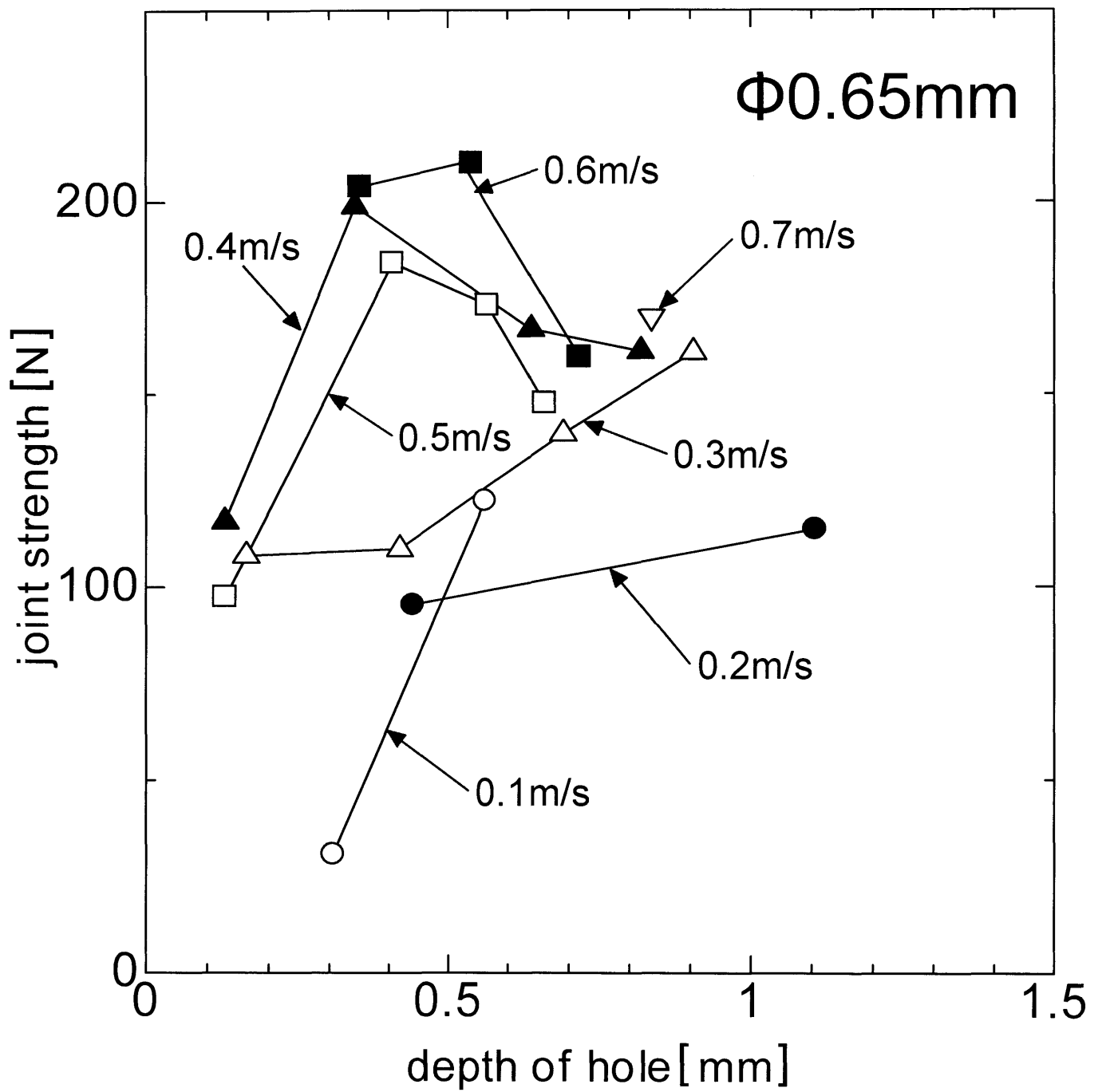


Fig.5-5 Relation between depth of hole and joint strength

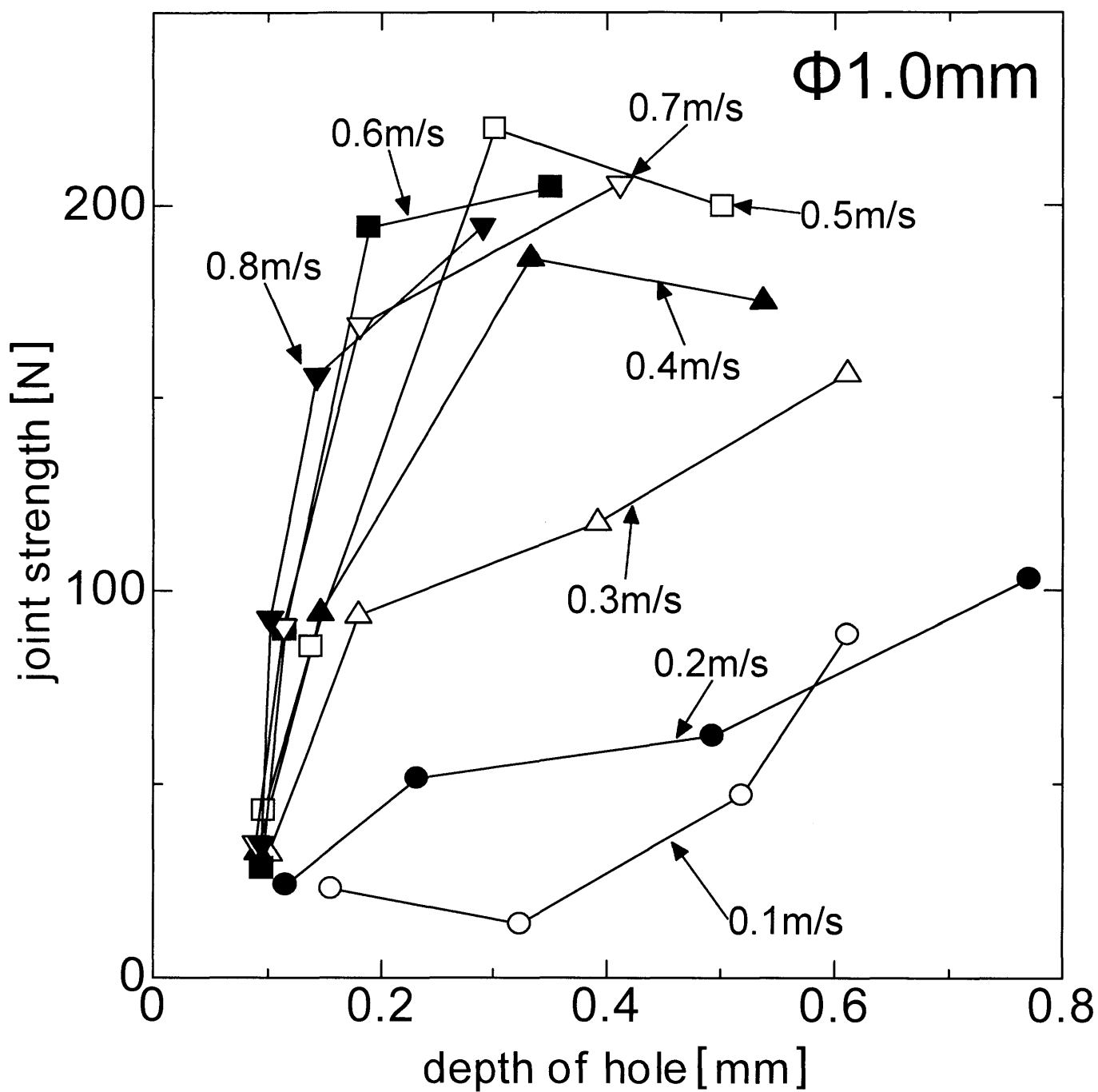


Fig.5-6 Relation between depth of hole and joint strength

$\phi 1.0\text{mm}$  contact speed

	0.1m/s	0.2m/s	0.3m/s	0.4m/s	0.5m/s	0.6m/s	0.7m/s	0.8m/s
30V	○				○			○
40V	○				○			○
50V	○	○	○	○	○	○	○	○
60V	○	○	○	○	○	○	○	○

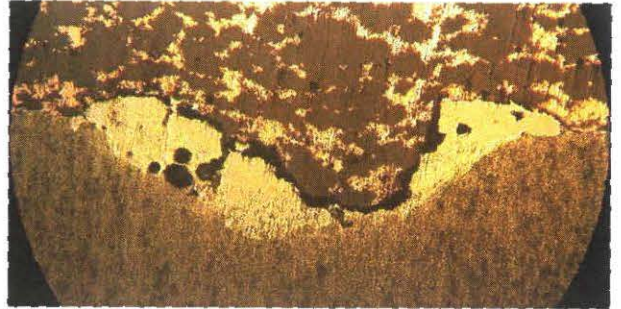
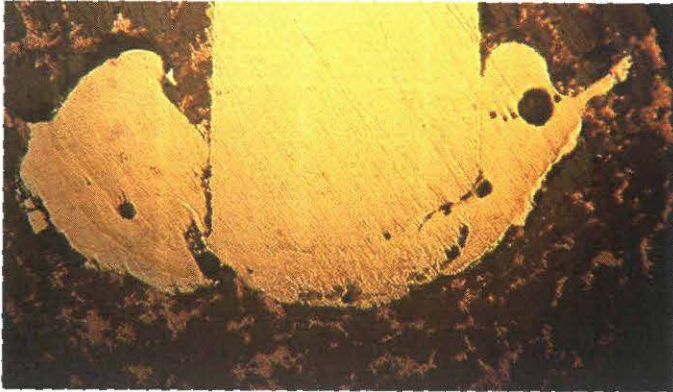
voltage

$\phi 0.65\text{mm}$  contact speed

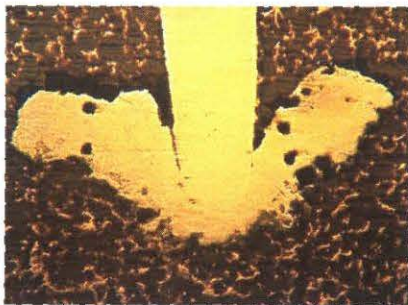
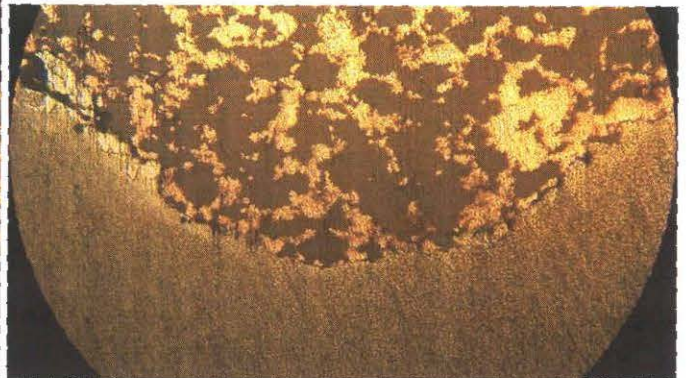
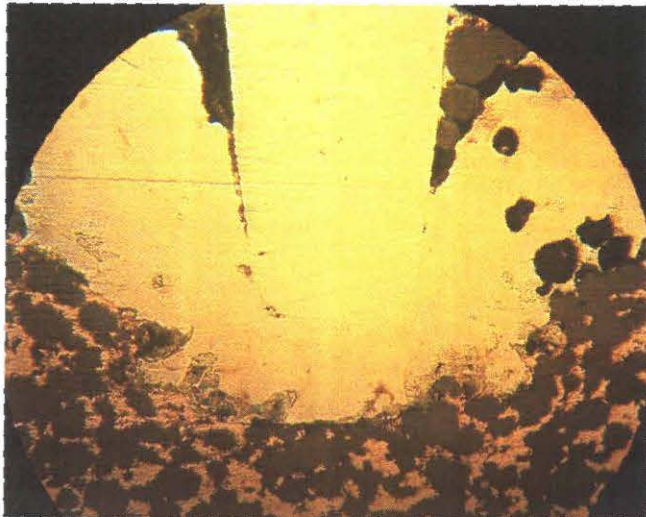
	0.1m/s	0.2m/s	0.3m/s	0.4m/s	0.5m/s	0.6m/s	0.7m/s
30V			○	○			
40v	○	○	○	○	○	○	
50V			○	○			
60v	○	○	○	○	○	○	

voltage

Fig.5-7 Condition of cross section



$\phi 0.65\text{mm}$  0.1m/s 40V

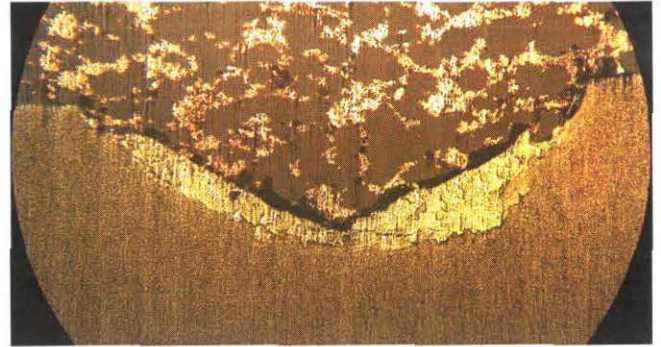
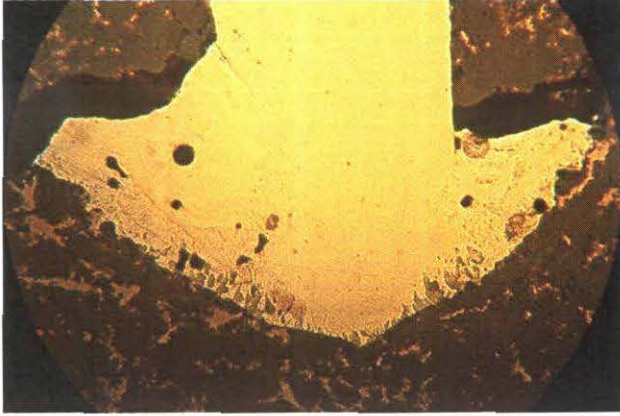


$\phi 0.65\text{mm}$  0.1m/s 60V

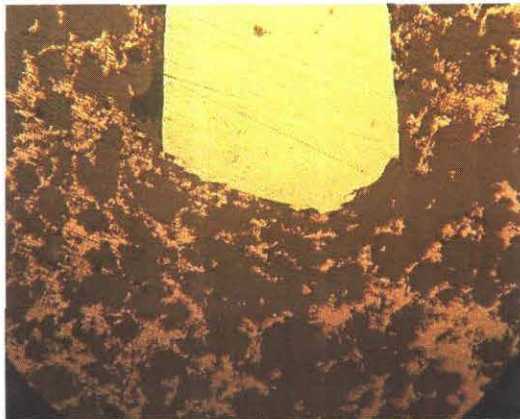
0.5mm



Fig.5-8 Cross-section of wire and base metal



$\phi$  0.65mm 0.2m/s 40V

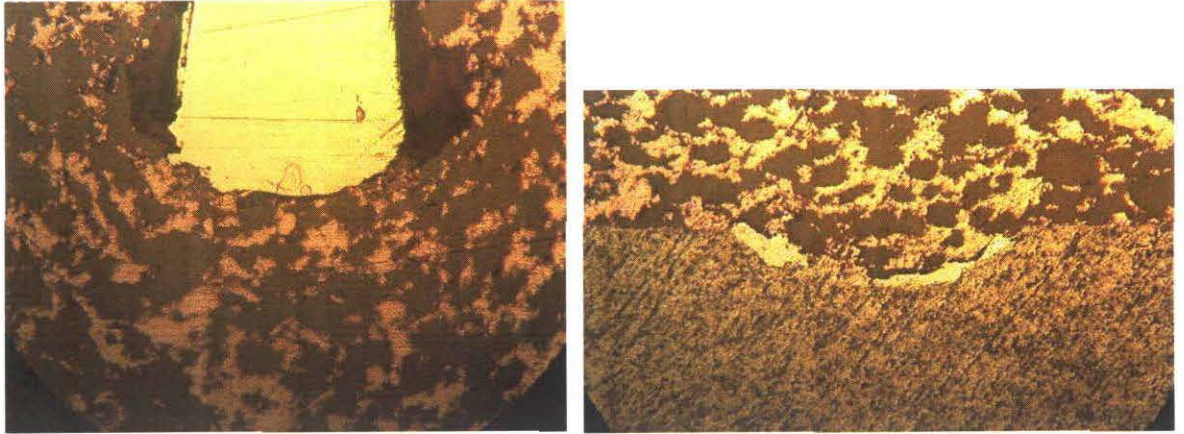


$\phi$  0.65mm 0.2m/s 60V

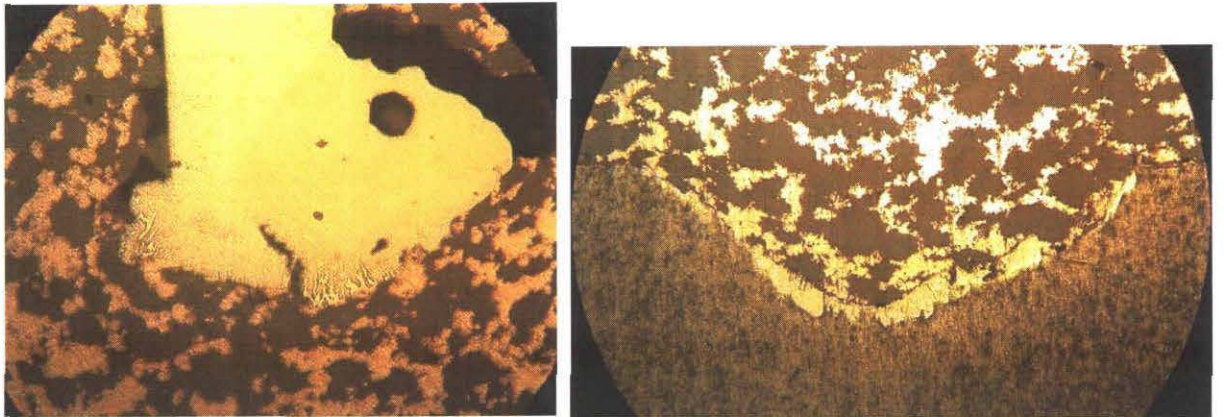
0.5mm



Fig.5-9 Cross-section of wire and base metal



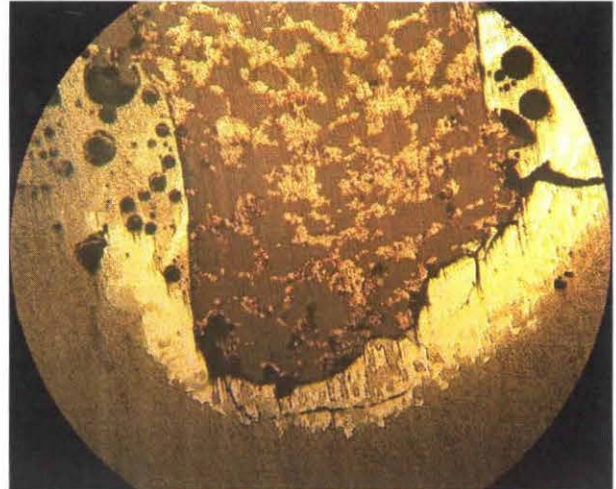
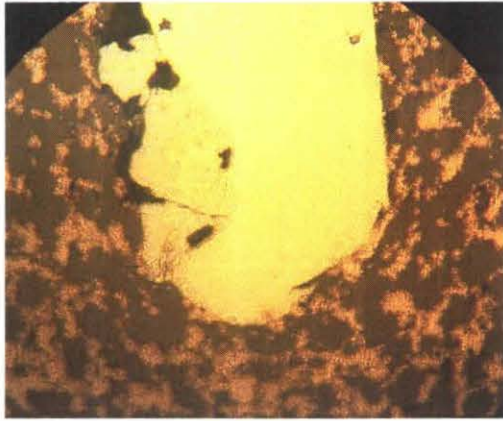
$\phi$  0.65mm 0.3m/s 30V



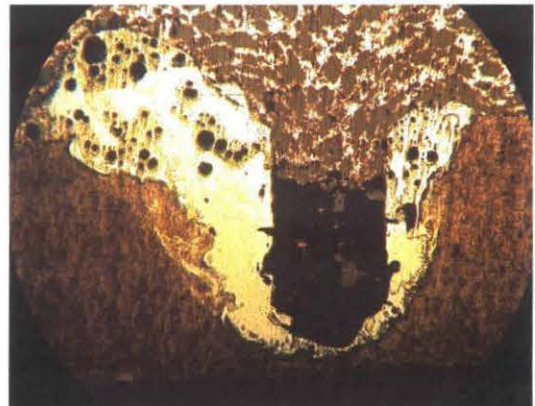
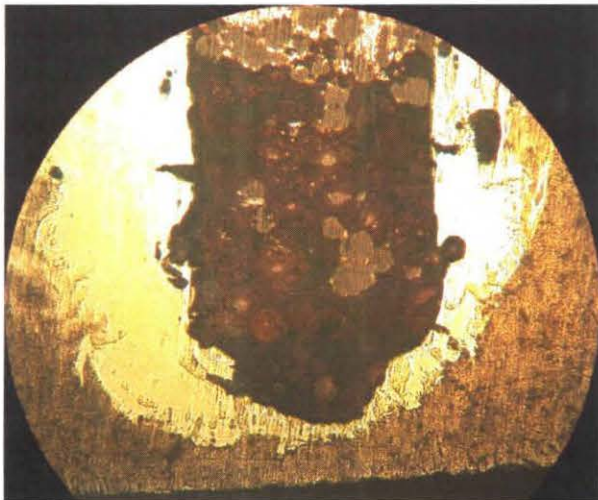
$\phi$  0.65mm 0.3m/s 40V

0.5mm

Fig.5-10 Cross-section of wire and base metal



$\phi$  0.65mm 0.3m/s 50V

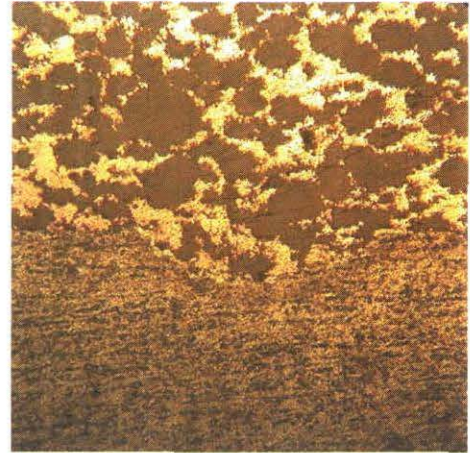
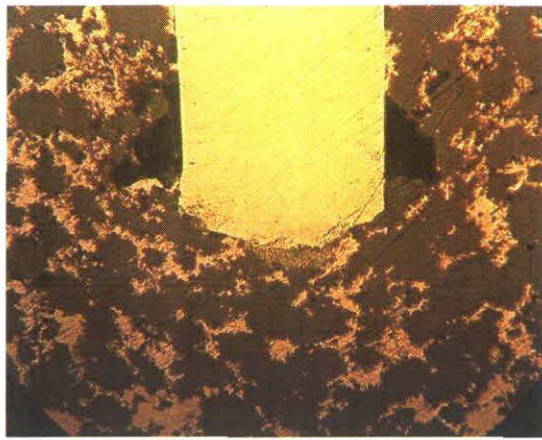


$\phi$  0.65mm 0.3m/s 60V

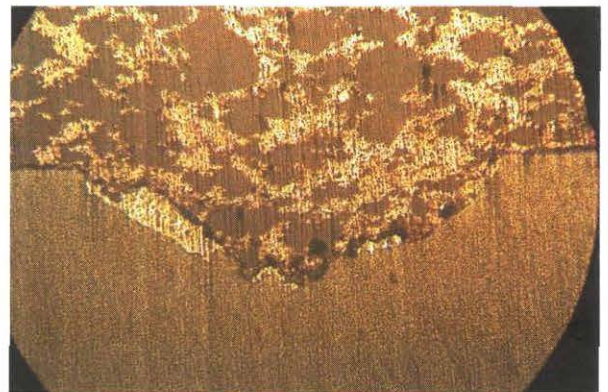
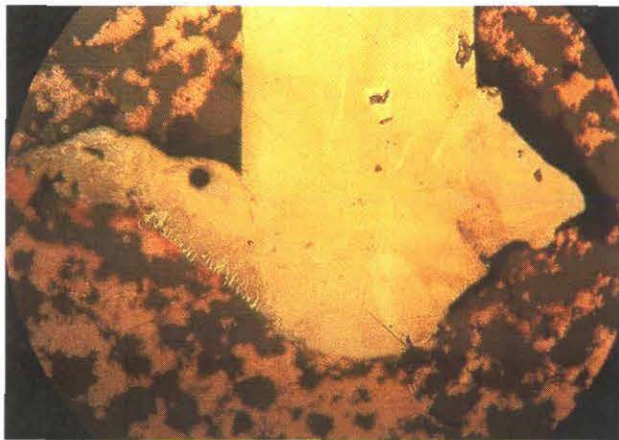
0.5mm



Fig.5-11 Cross-section of wire and base metal



$\phi$  0.65mm 0.4m/s 30V



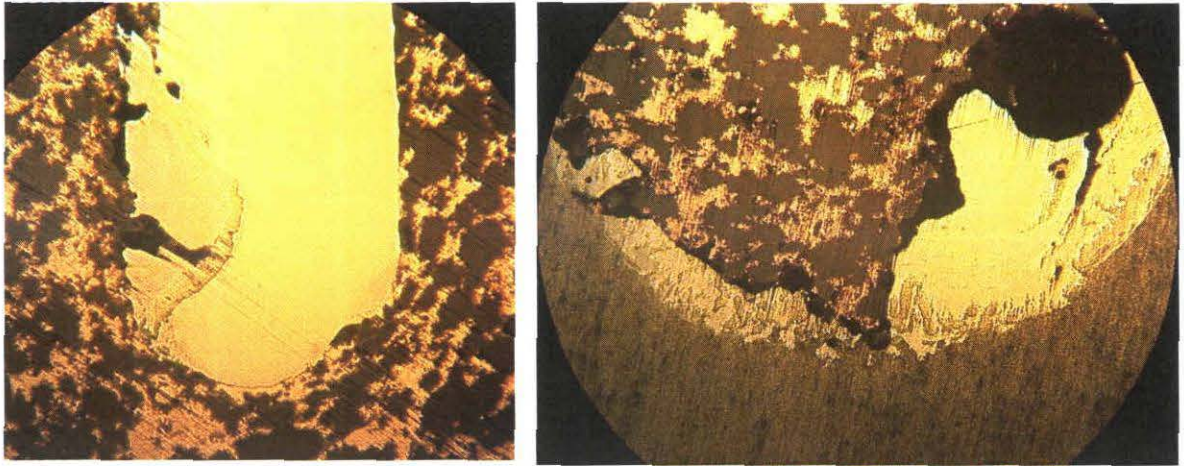
$\phi$  0.65mm 0.4m/s 40V

0.5mm

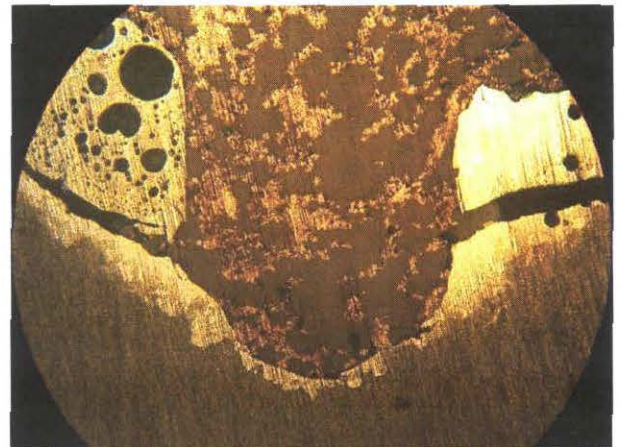
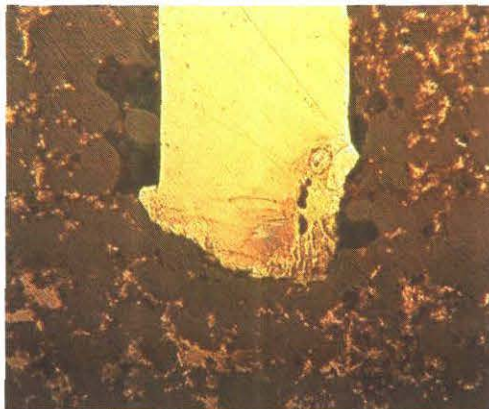
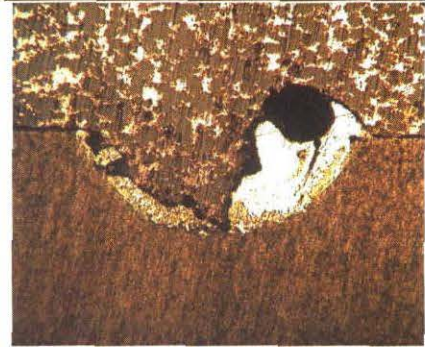


Fig.5-12 Cross-section of wire and base metal





$\phi$  0.65mm 0.4m/s 50V



$\phi$  0.65mm 0.4m/s 60V

0.5mm

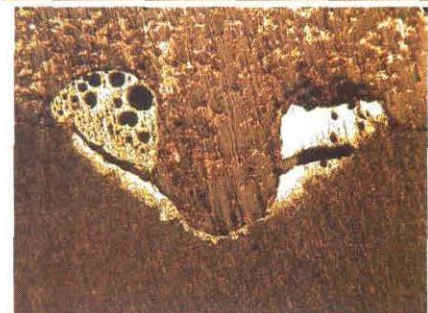
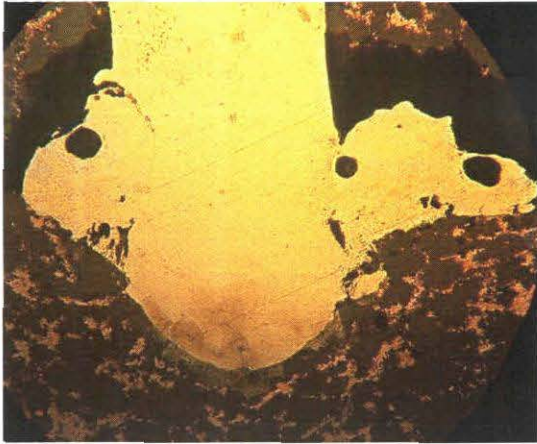
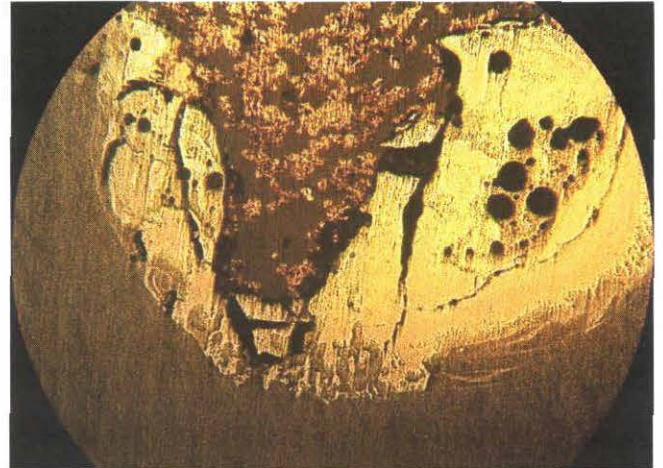
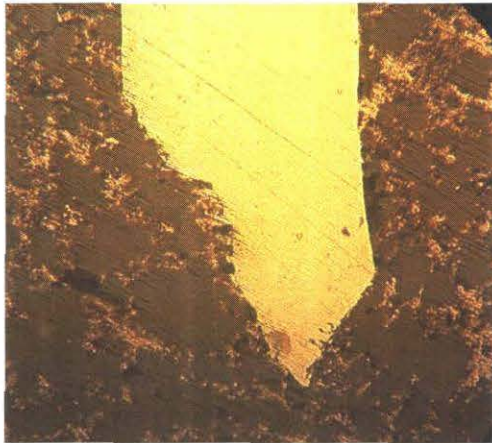


Fig.5-13 Cross-section of wire and base metal



$\phi$  0.65mm 0.5m/s 40V

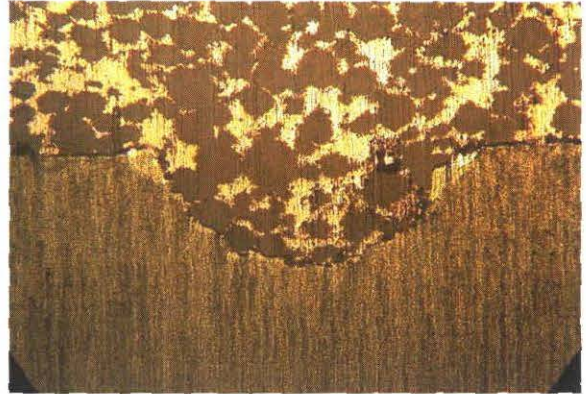
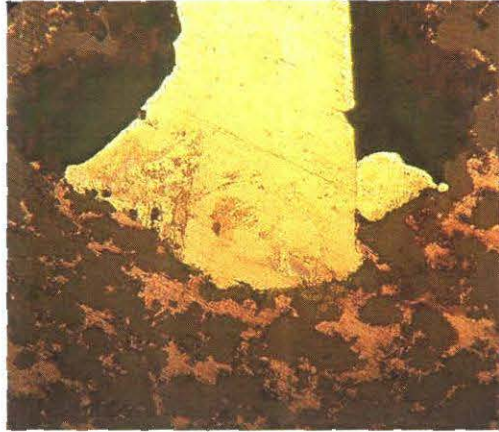


$\phi$  0.65mm 0.5m/s 60V

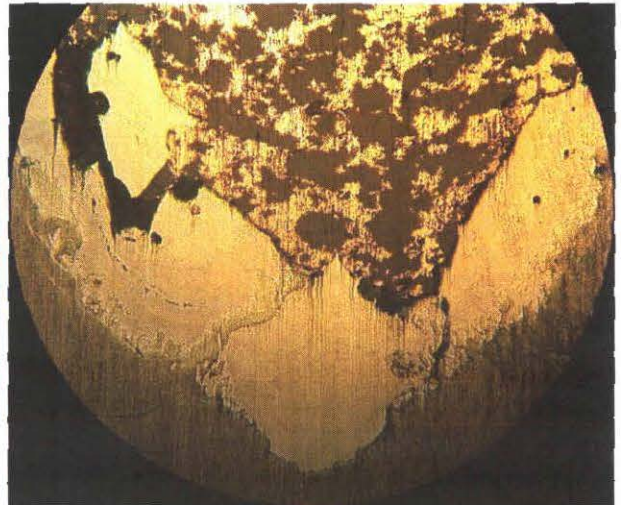
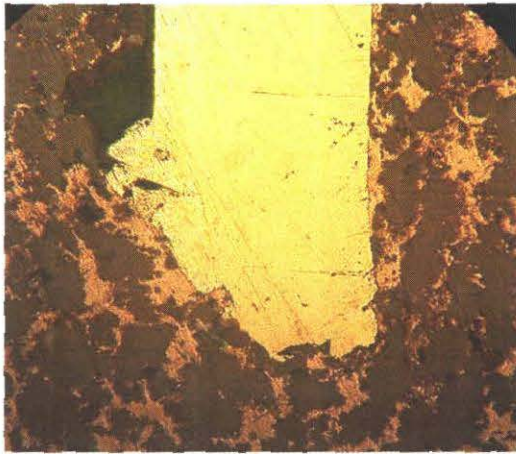
0.5mm



Fig.5-14 Cross-section of wire and base metal



$\phi$  0.65mm 0.6m/s 40V

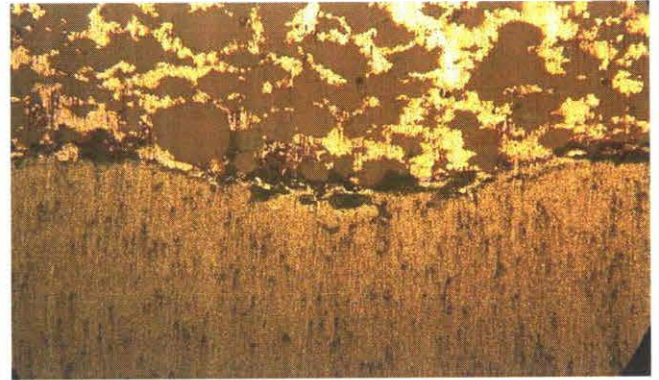
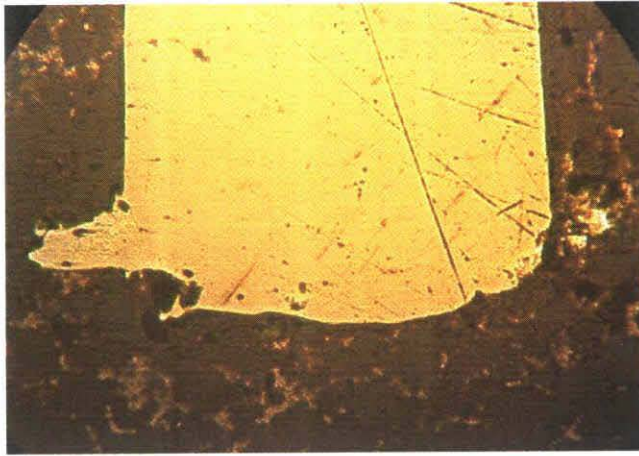


$\phi$  0.65mm 0.6m/s 60V

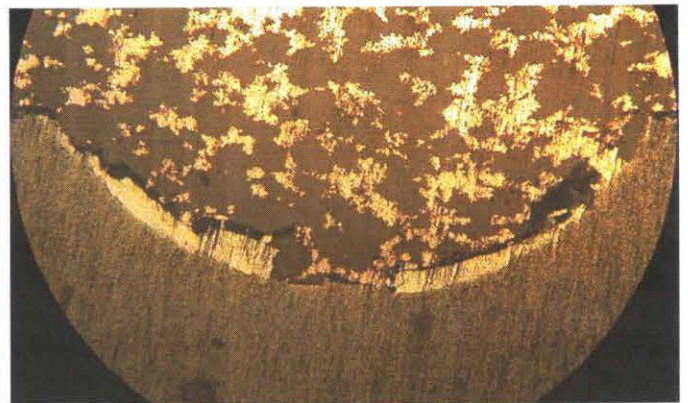
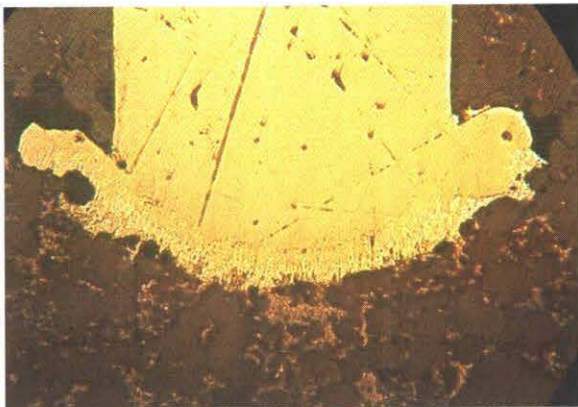
0.5mm



Fig.5-15 Cross-section of wire and base metal



$\Phi 1.0\text{mm}$  0.1m/s 30V



$\Phi 1.0\text{mm}$  0.1m/s 40V

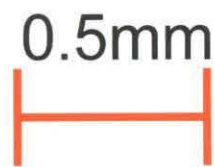
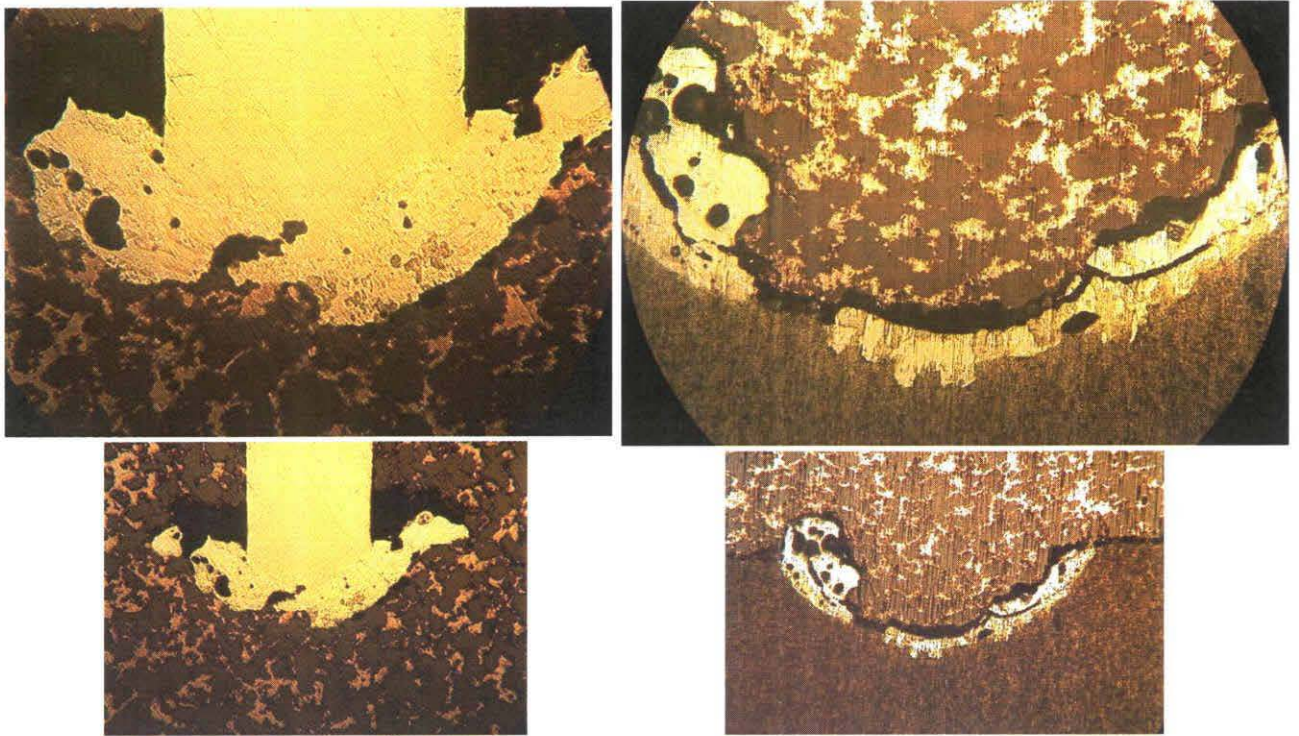
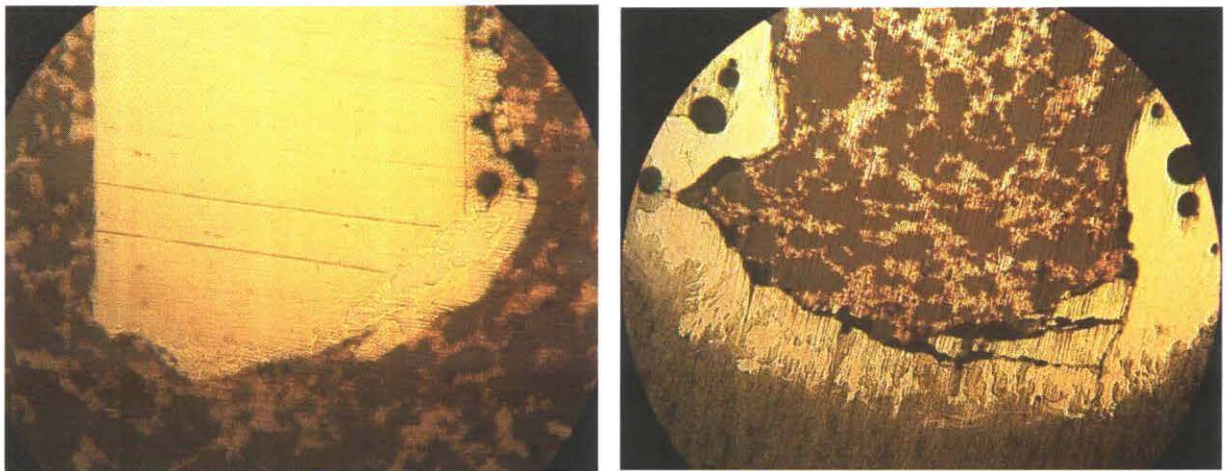


Fig.5-16 Cross-section of wire and base metal



$\Phi$  1.0mm 0.1m/s 50V

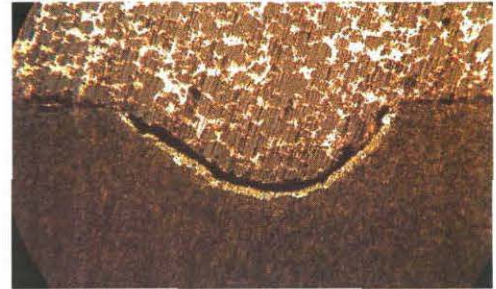
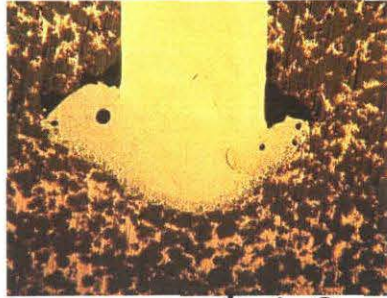
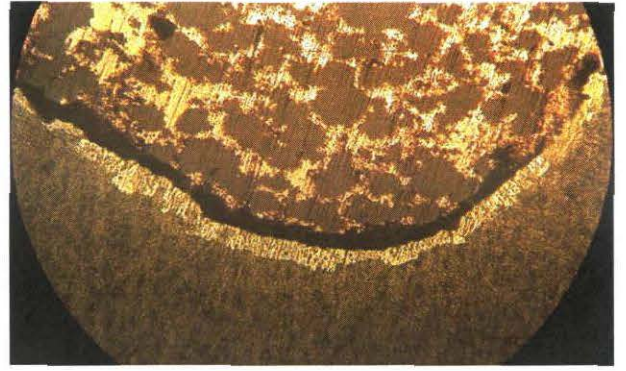
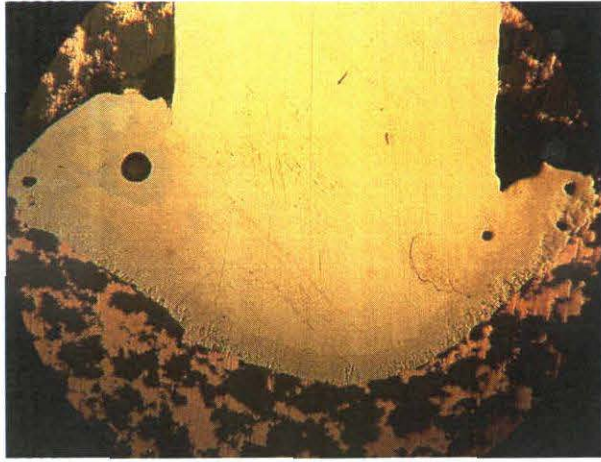


$\Phi$  1.0mm 0.1m/s 60V

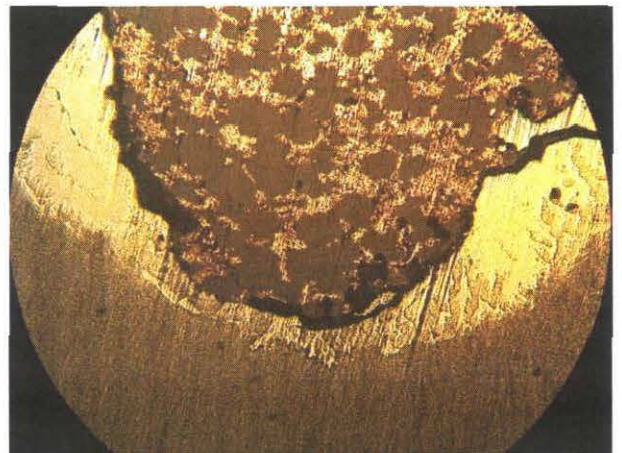
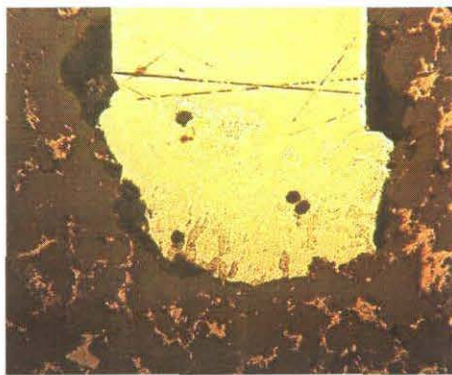
0.5mm



Fig.5-17 Cross-section of wire and base metal



$\Phi$  1.0mm 0.2m/s 50V

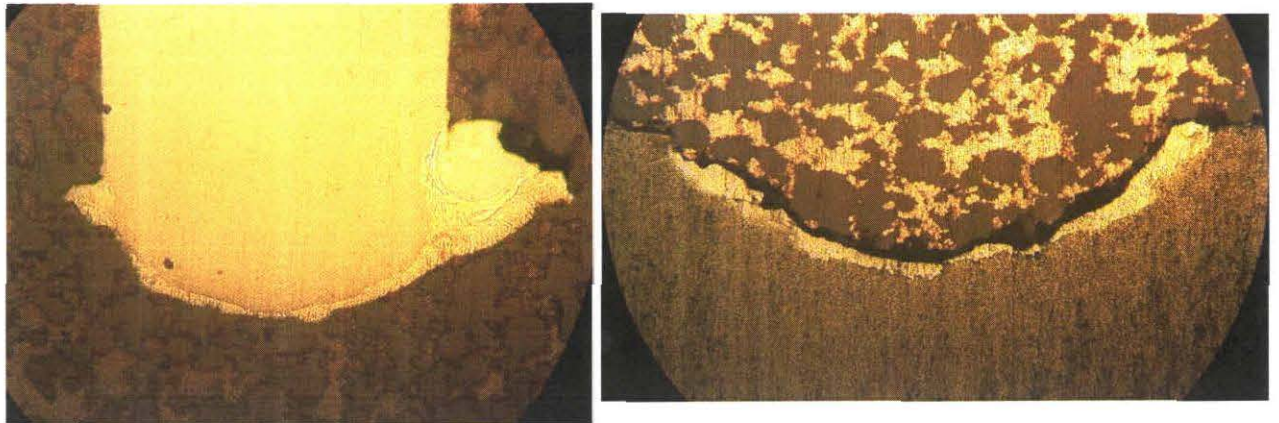


$\Phi$  1.0mm 0.2m/s 60V

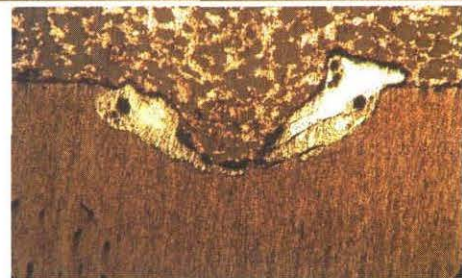
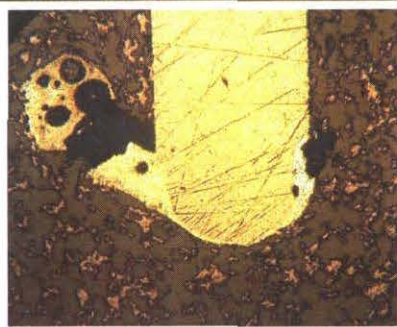
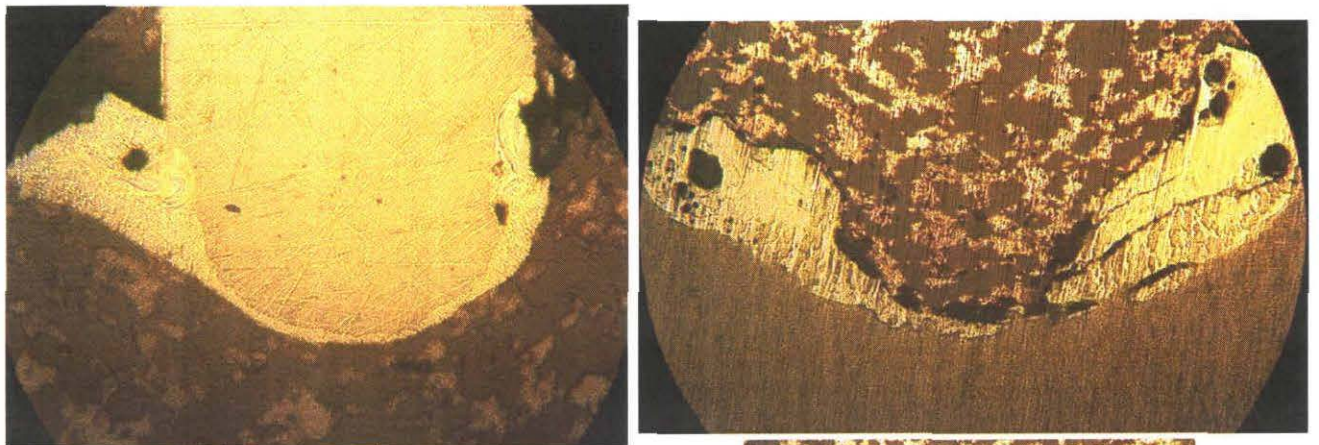
0.5mm



Fig.5-18 Cross-section of wire and base metal



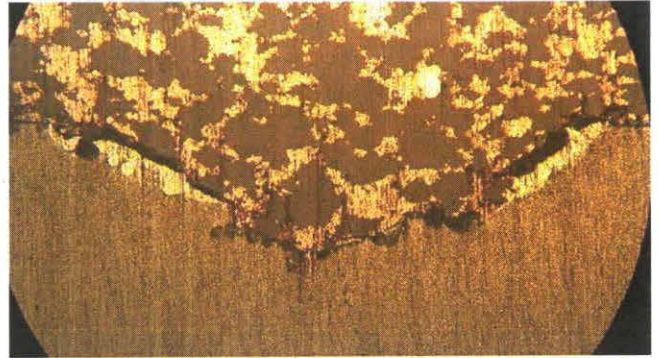
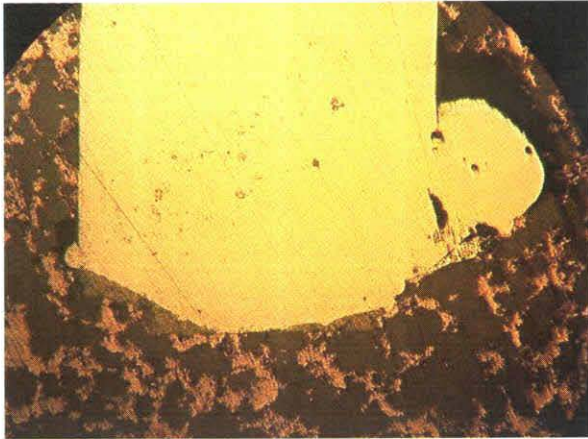
$\Phi$  1.0mm 0.3m/s 50V



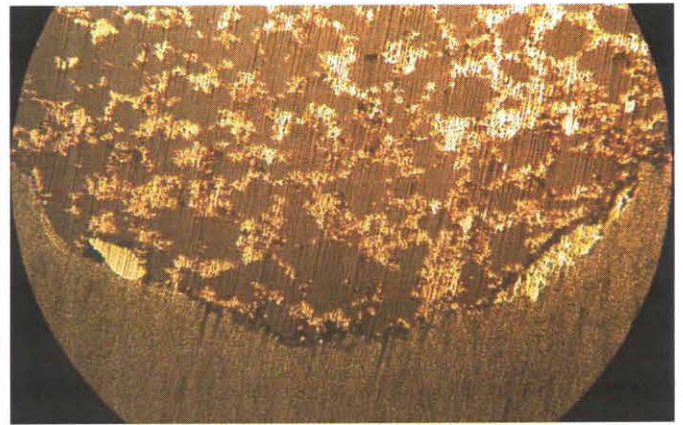
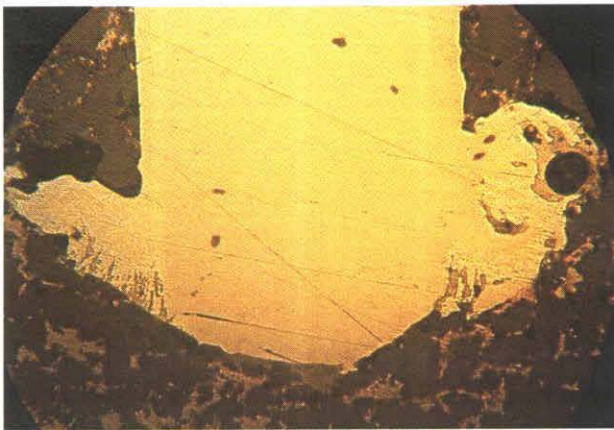
$\Phi$  1.0mm 0.3m/s 60V

0.5mm

Fig.5-19 Cross-section of wire and base metal



$\Phi$  1.0mm 0.4m/s 50V



$\Phi$  1.0mm 0.4m/s 60V

0.5mm

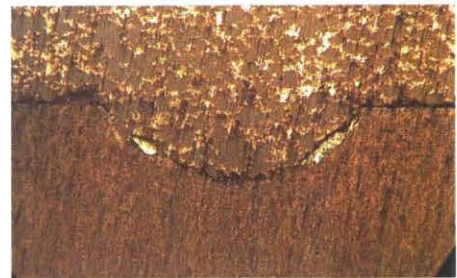
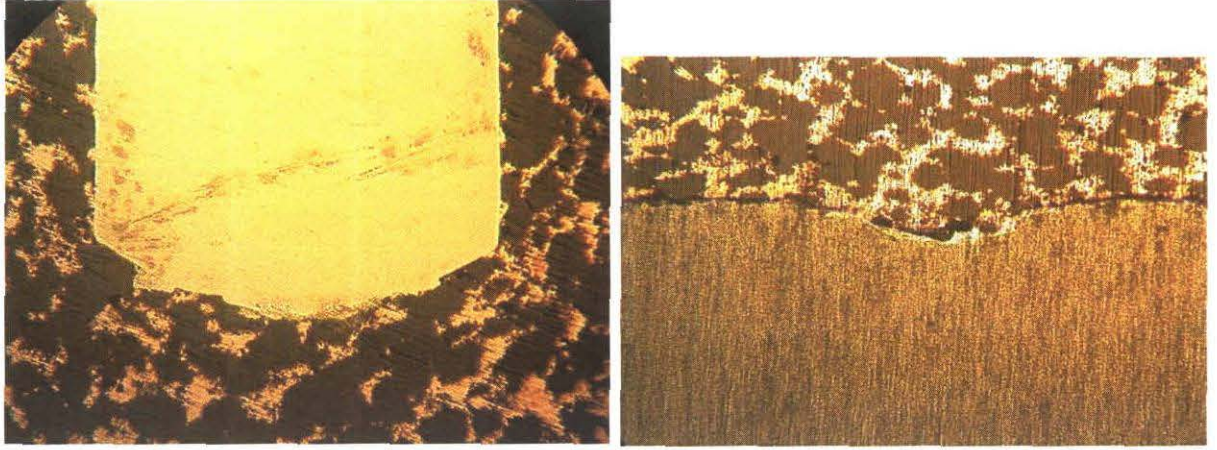
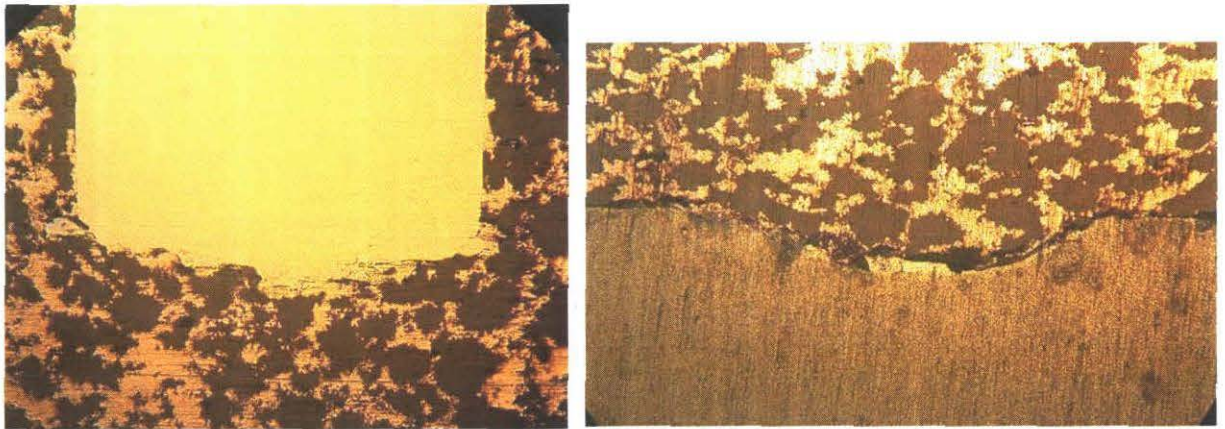


Fig.5-20 Cross-section of wire and base metal





$\Phi$  1.0mm 0.5m/s 30V



$\Phi$  1.0mm 0.5m/s 40V

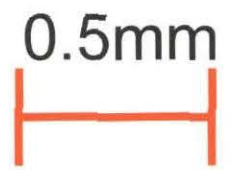
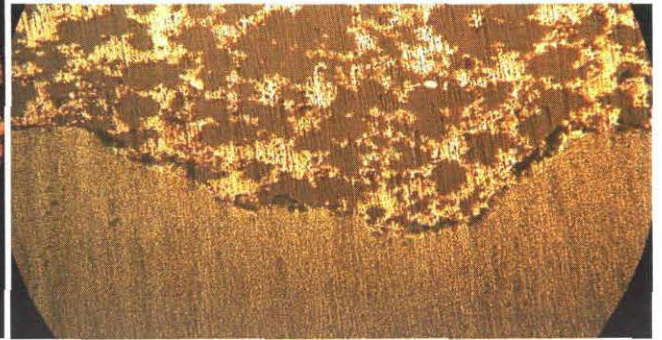
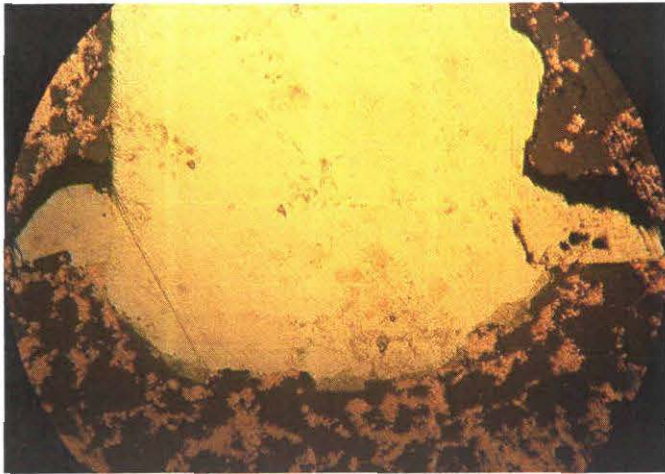
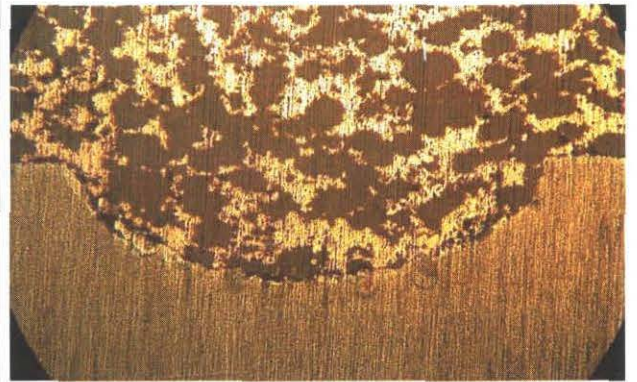
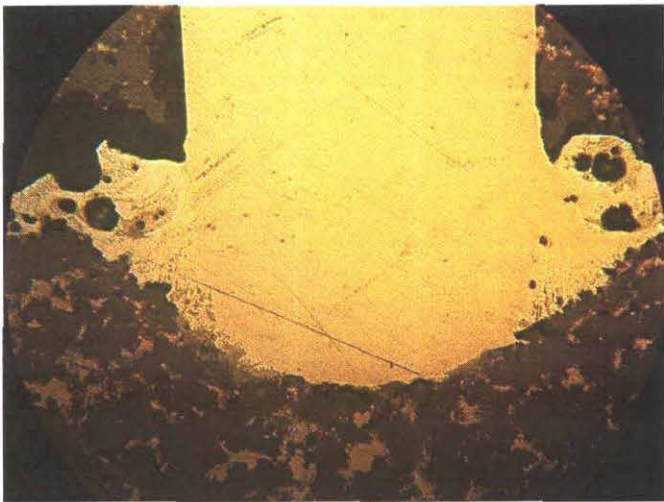


Fig.5-21 Cross-section of wire and base metal



$\Phi$  1.0mm 0.5m/s 50V



$\Phi$  1.0mm 0.5m/s 60V

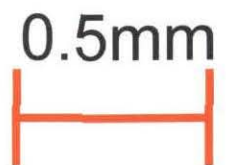
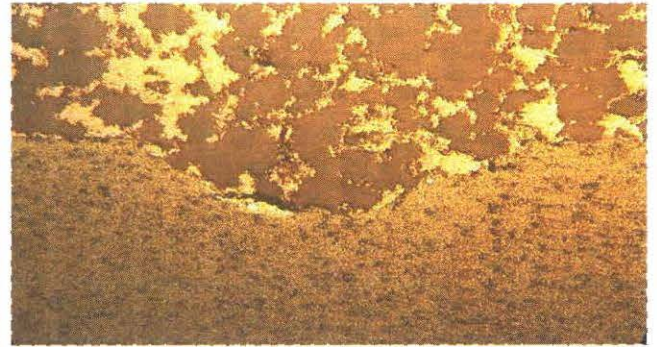
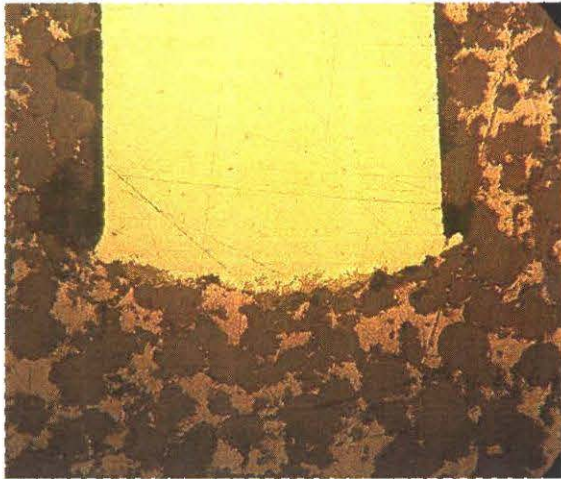
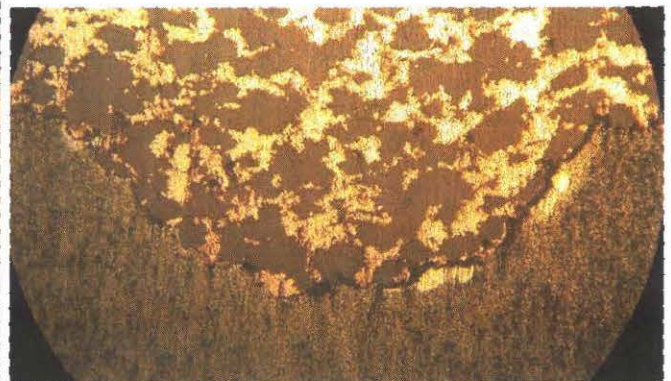
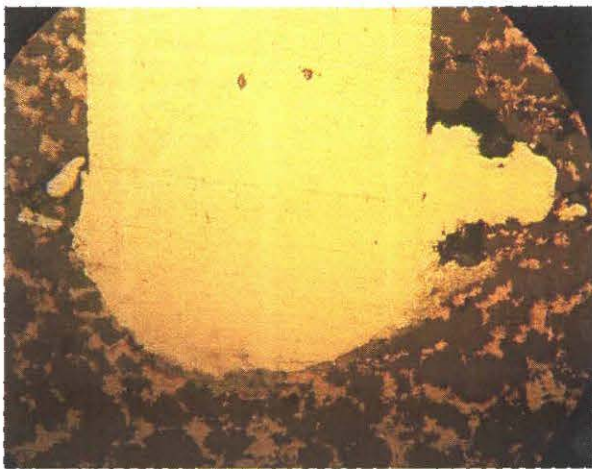


Fig.5-22 Cross-section of wire and base metal



$\Phi$  1.0mm 0.6m/s 50V



$\Phi$  1.0mm 0.6m/s 60V

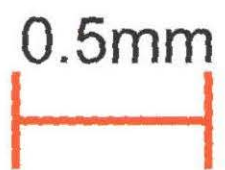
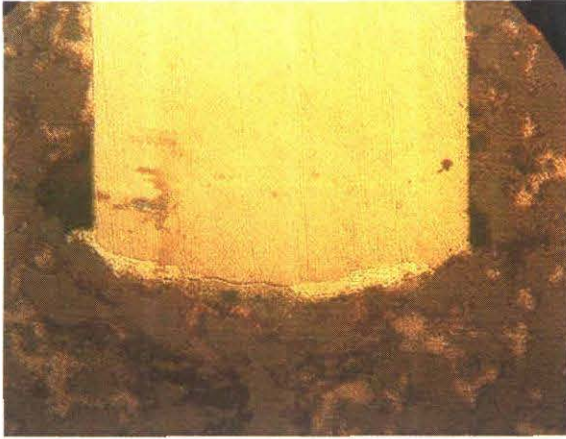
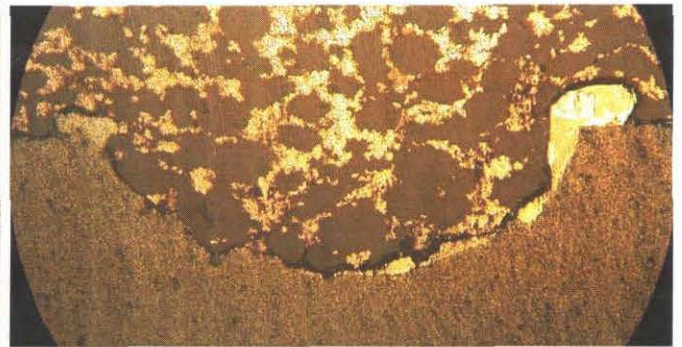
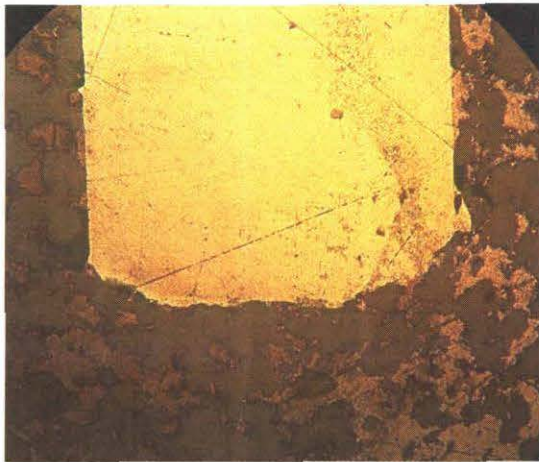


Fig.5-23 Cross-section of wire and base metal



$\Phi$  1.0mm 0.7m/s 50V



$\Phi$  1.0mm 0.7m/s 60V


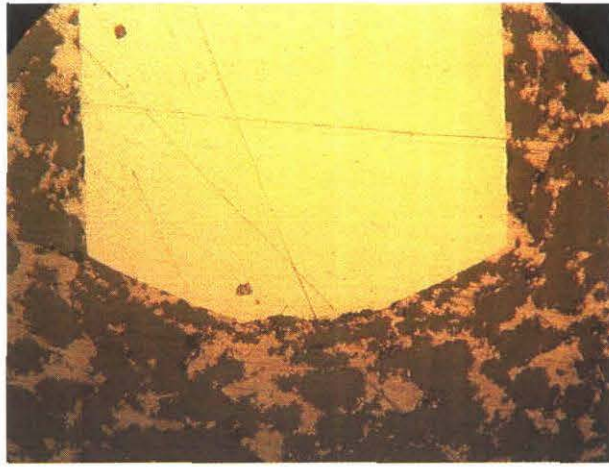
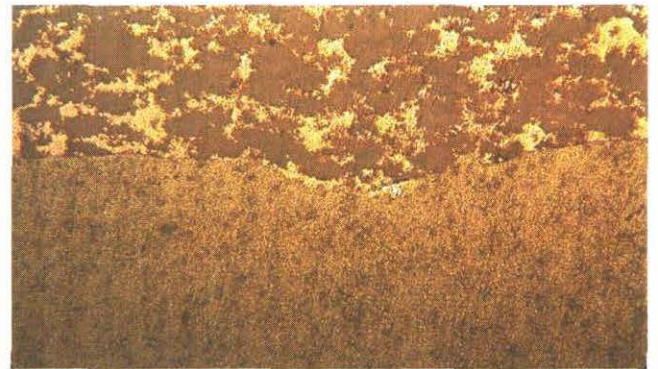
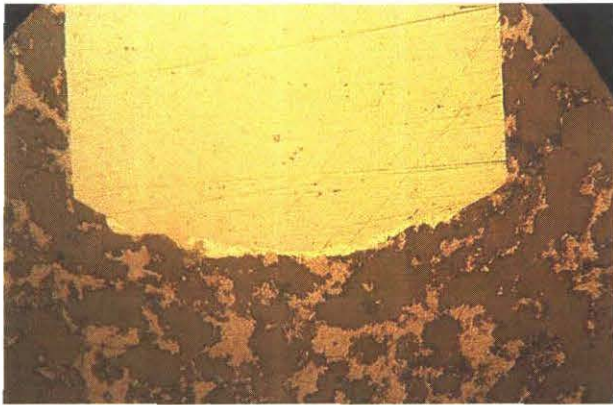
0.5mm  


Fig.5-24 Cross-section of wire and base metal



$\Phi$  1.0mm 0.8m/s 30V



$\Phi$  1.0mm 0.8m/s 40V


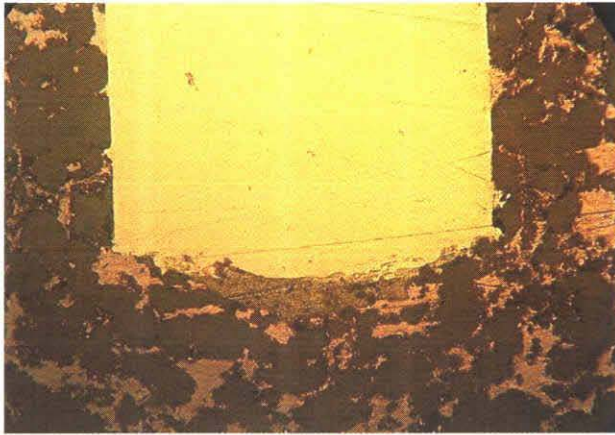
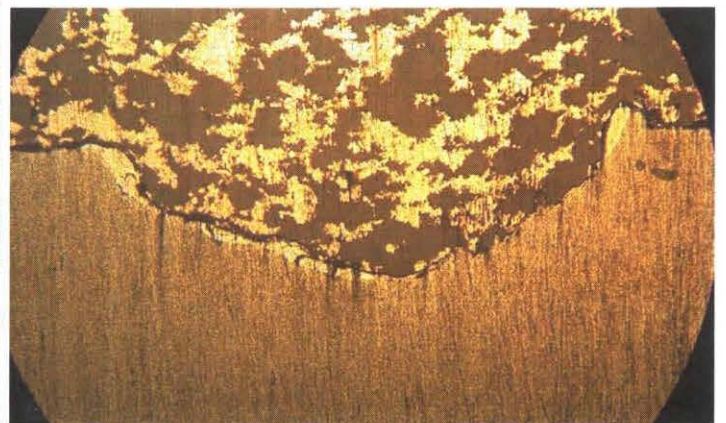
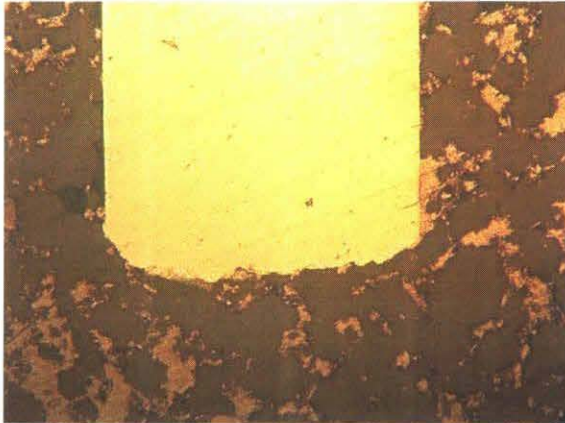
0.5mm  


Fig.5-25 Cross-section of wire and base metal



$\Phi$  1.0mm 0.8m/s 50V

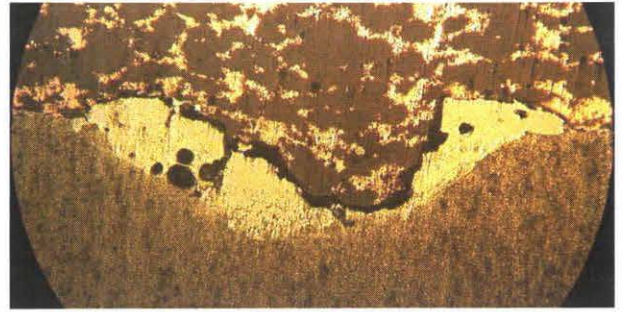
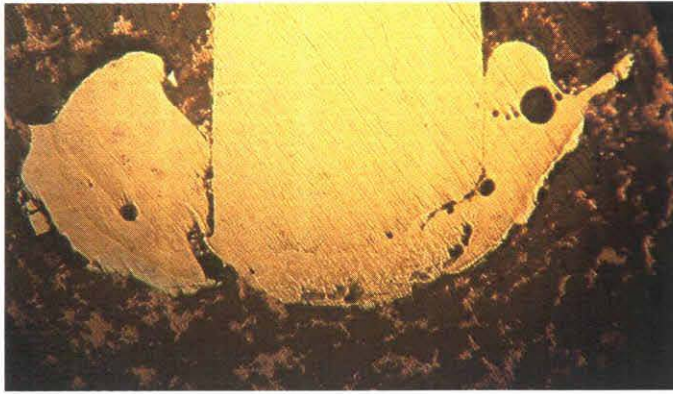


$\Phi$  1.0mm 0.8m/s 60V

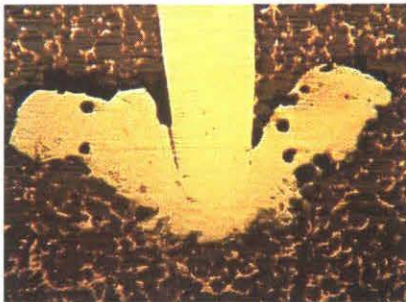
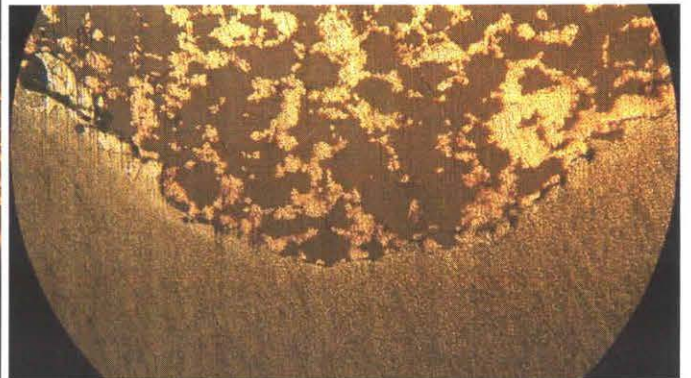
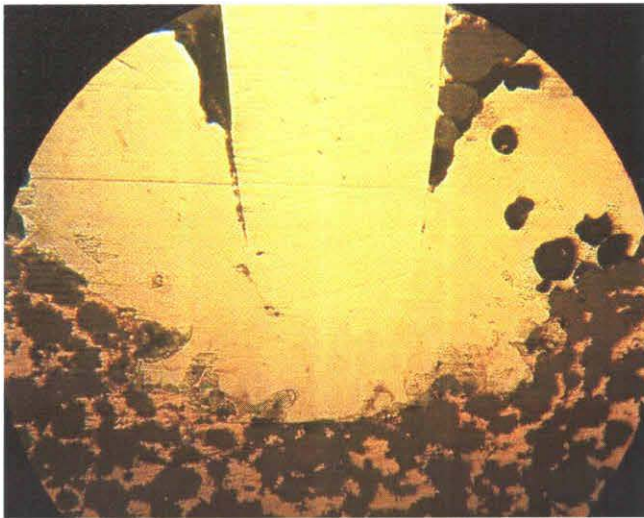
0.5mm



Fig.5-26 Cross-section of wire and base metal



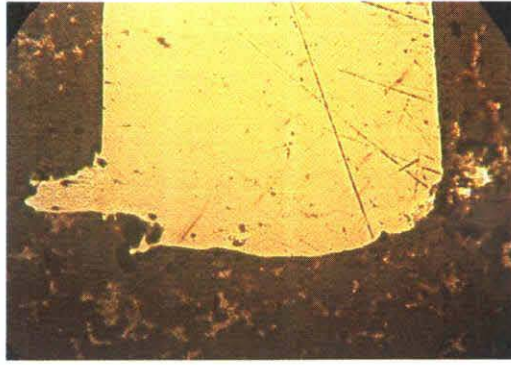
$\phi$  0.65mm 0.1m/s 40V



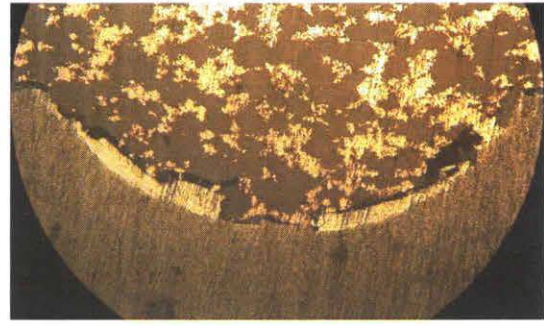
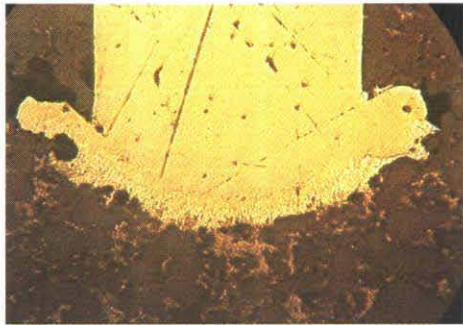
$\phi$  0.65mm 0.1m/s 60V

0.5mm  

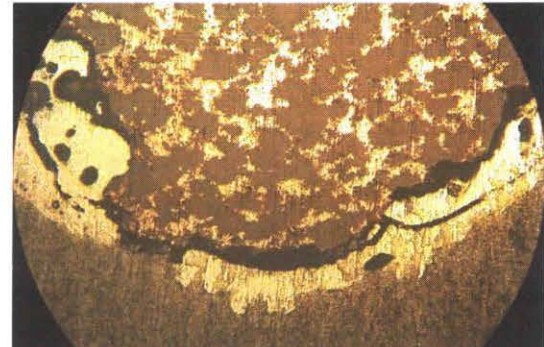
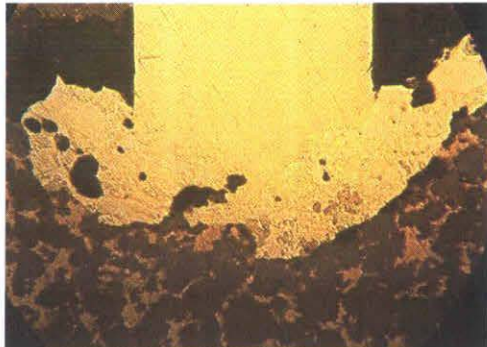

Fig.5-27 Cross-section of wire and base metal ( $\phi$  0.65mm)



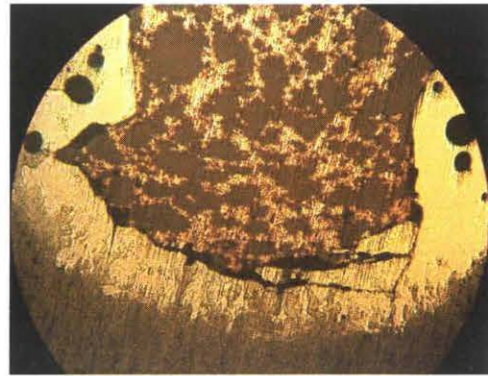
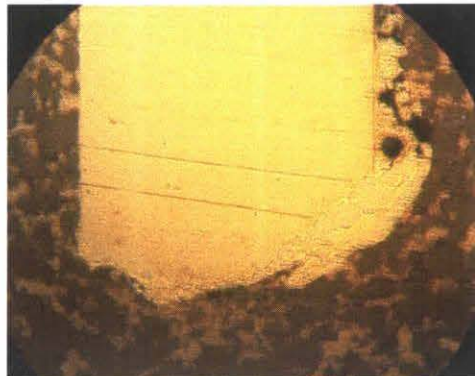
0.1m/s 30V



0.1m/s 40V



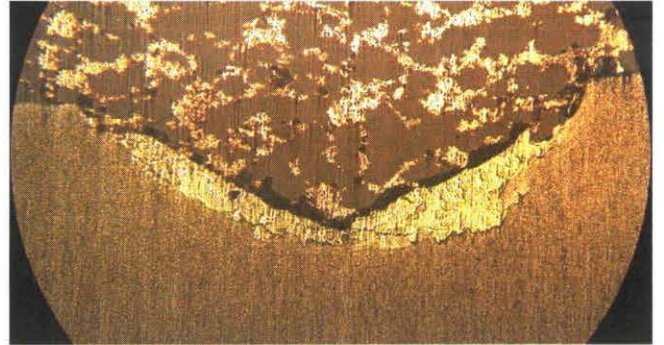
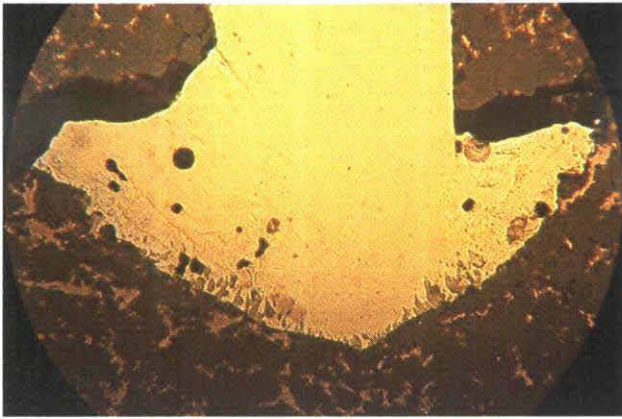
0.1m/s 50V



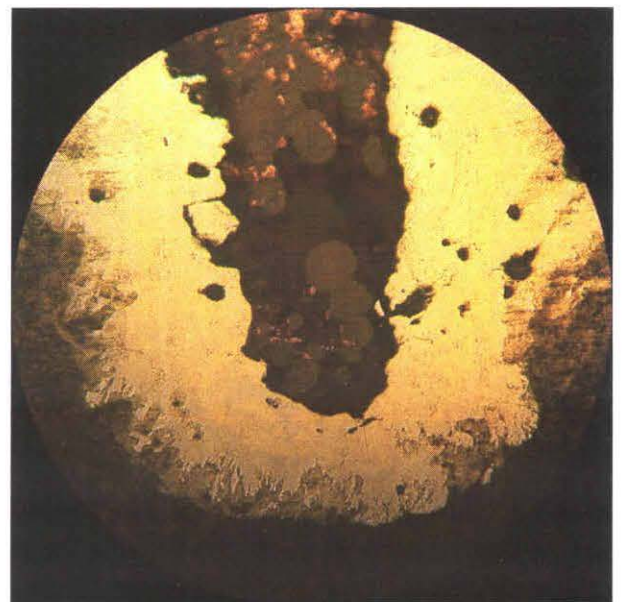
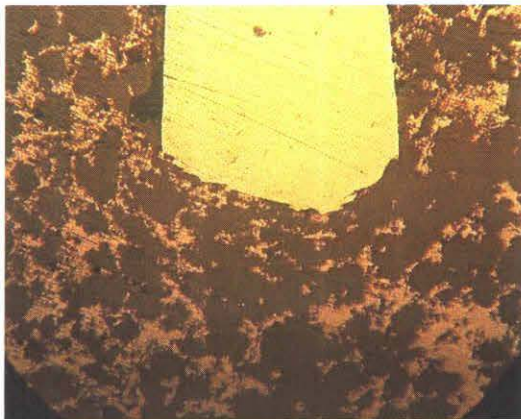
0.1m/s 60V

Fig.5-28 Cross-section of wire and base metal( $\phi$  1.0mm)





$\phi$  0.65mm 0.2m/s 40V

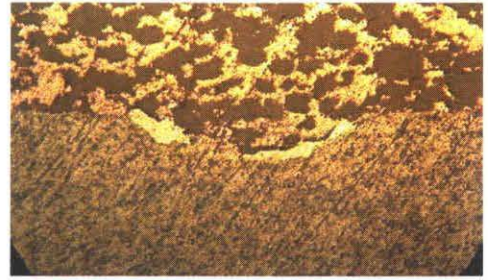
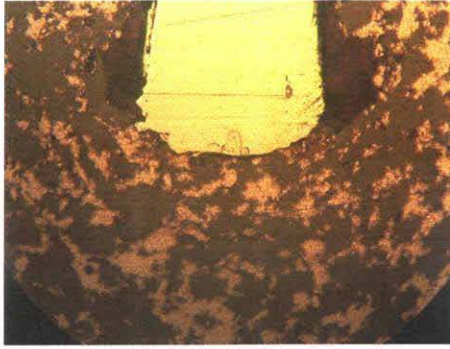


$\phi$  0.65mm 0.2m/s 60V

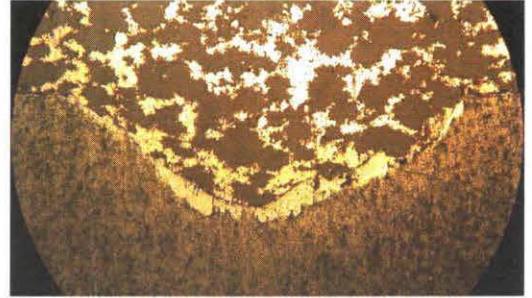
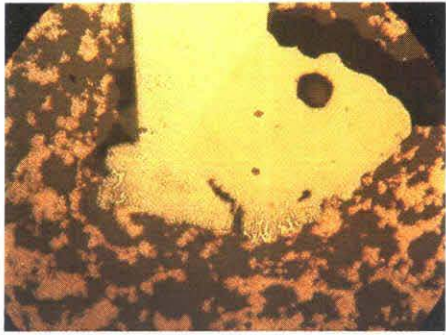
0.5mm



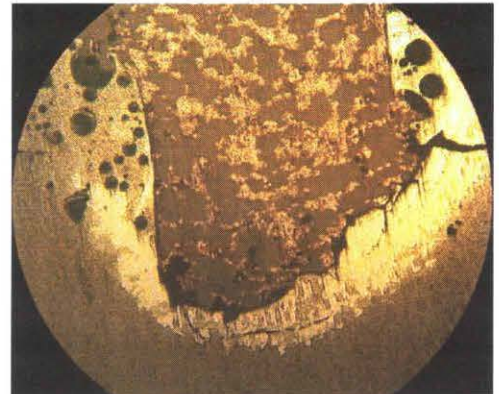
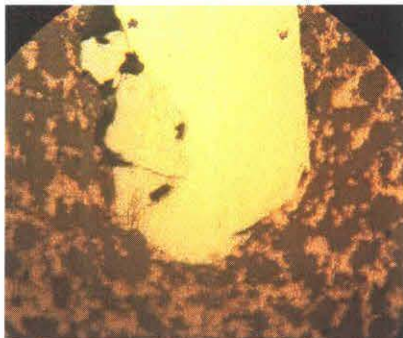
Fig.5-29 Cross-section of wire and base metal( $\phi$  0.65mm)



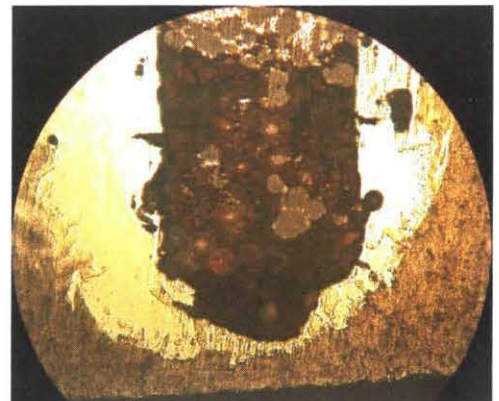
0.3m/s 30V



0.3m/s 40V

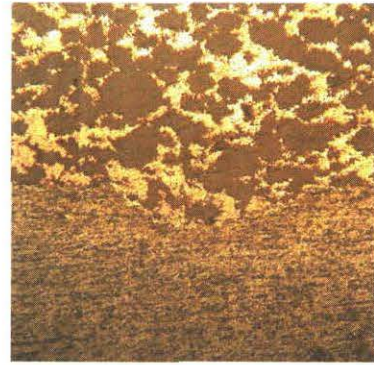
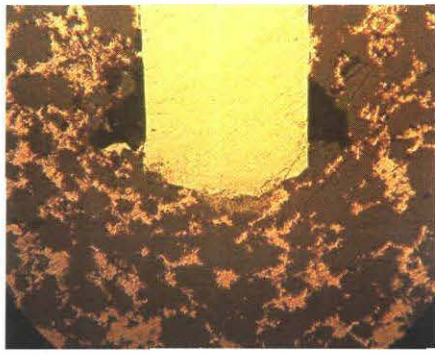


0.3m/s 50V

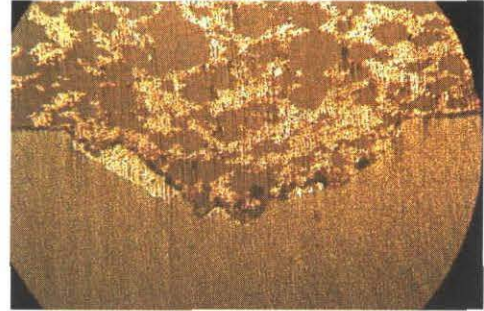
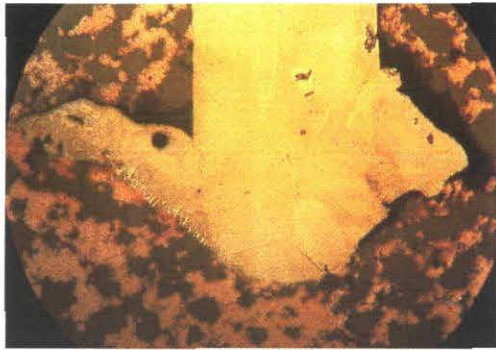


0.3m/s 60V

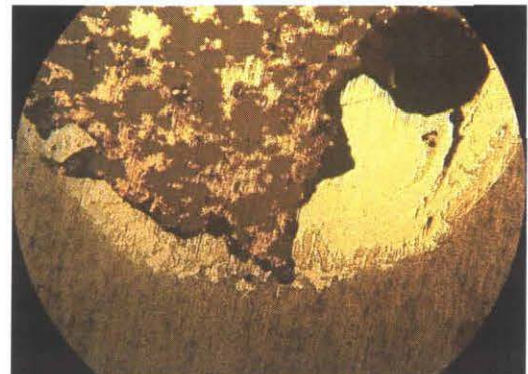
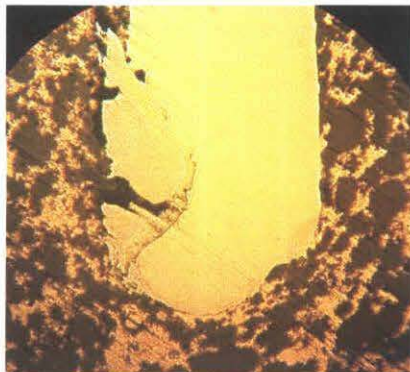
Fig.5-30 Cross-section of wire and base metal( $\phi$  0.65mm)



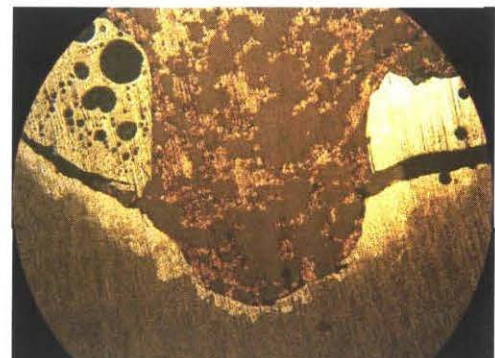
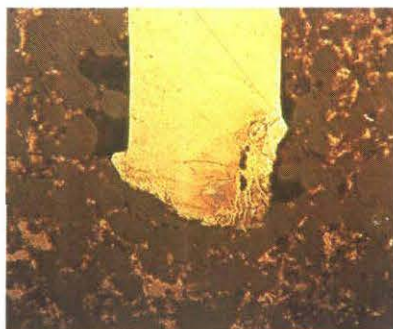
0.4m/s 30V



0.4m/s 40V

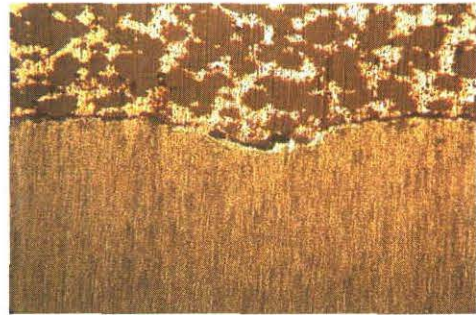
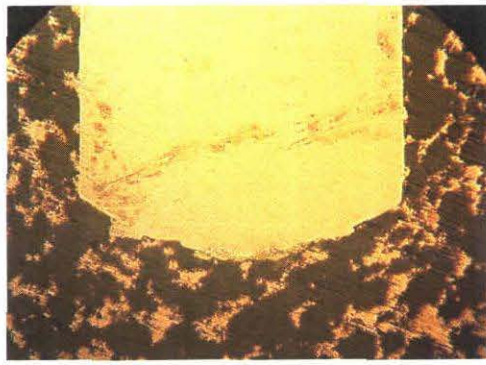


0.4m/s 50V

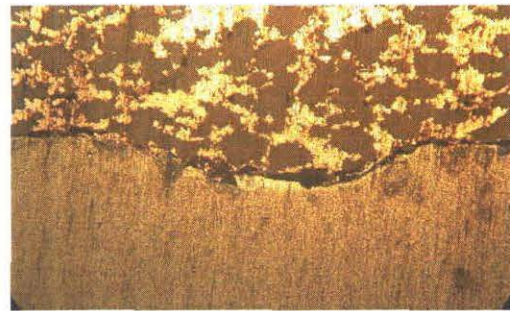
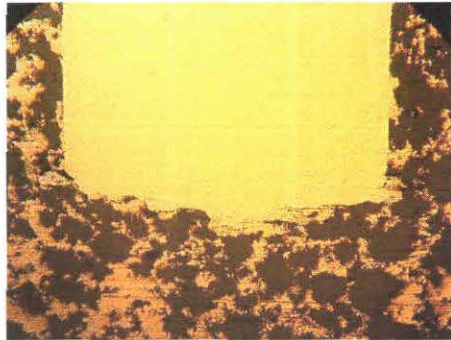


0.4m/s 60V

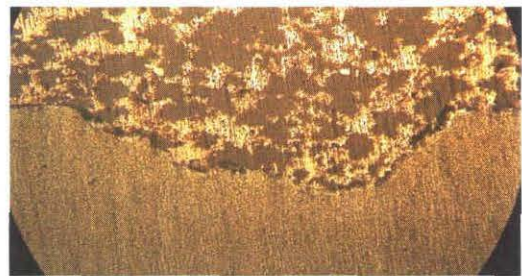
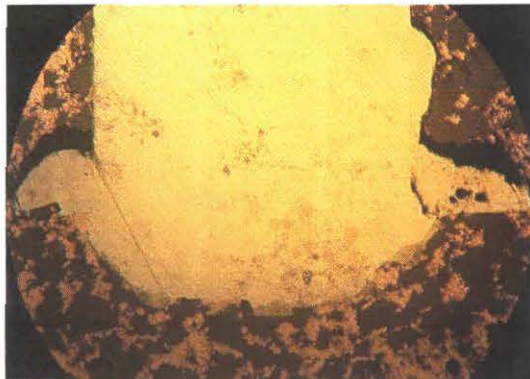
Fig.5-31 Cross-section of wire  
and base metal( $\phi$  0.65mm)



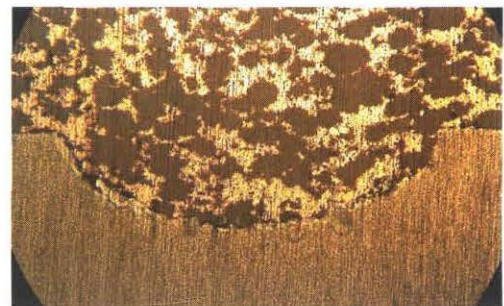
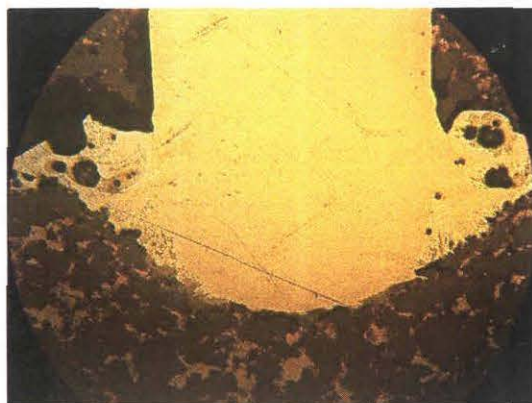
0.5m/s 30V



0.5m/s 40V

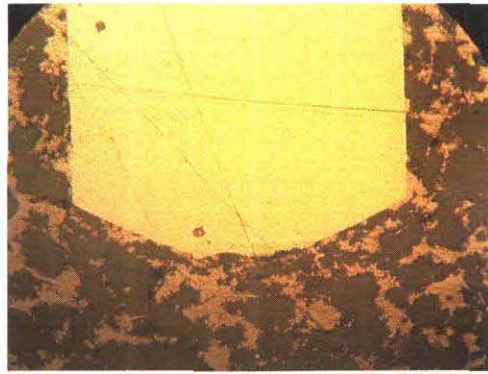


0.5m/s 50V

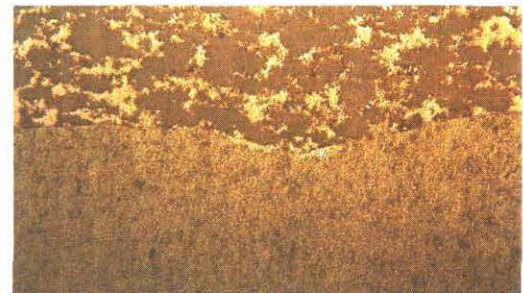
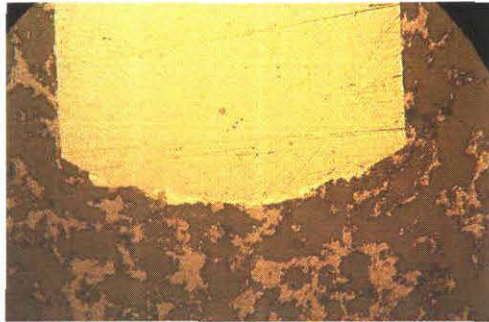


0.5m/s 60V

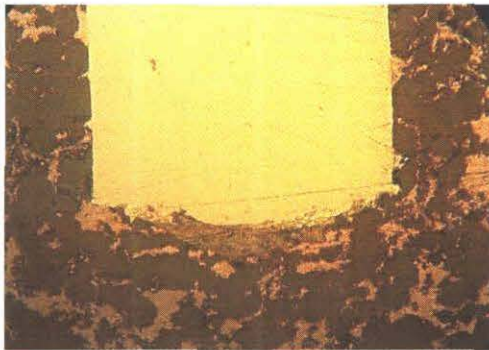
Fig.5-32 Cross-section of wire and base metal( $\phi$  1.0mm)



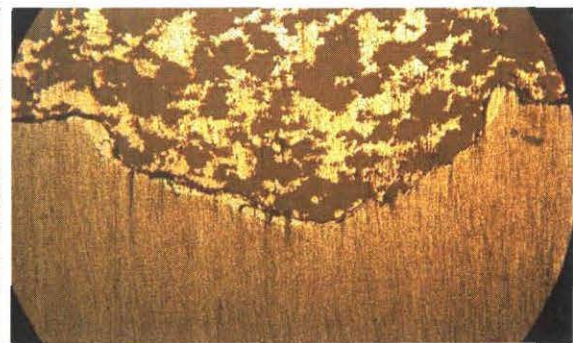
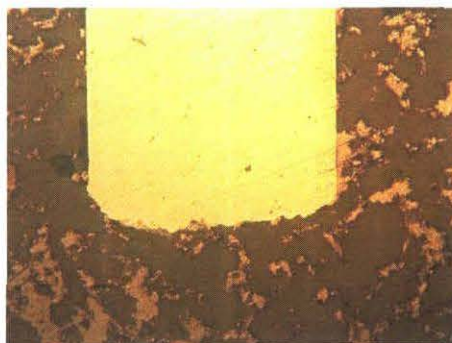
0.8m/s 30V



0.8m/s 40V

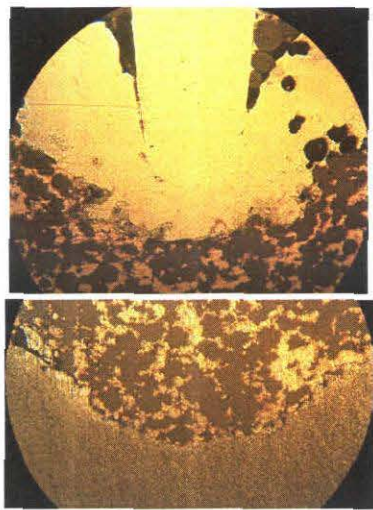


0.8m/s 50V

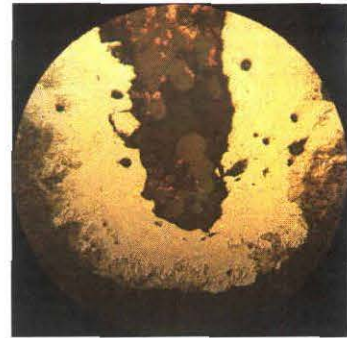
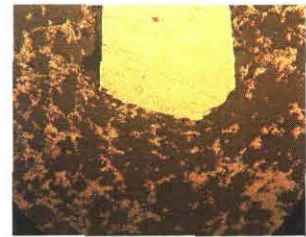


0.8m/s 60V

Fig.5-33 Cross-section of wire and base metal( $\phi$  1.0mm)



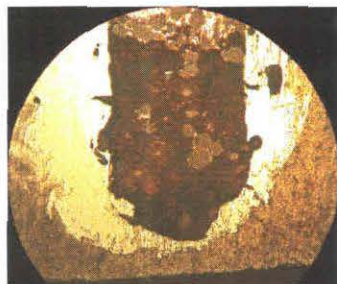
0.1m/s 60V



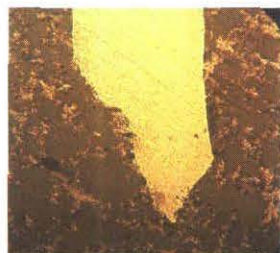
0.2m/s 60V



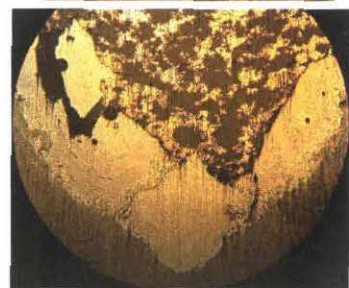
0.4m/s 60V



0.3m/s 60V

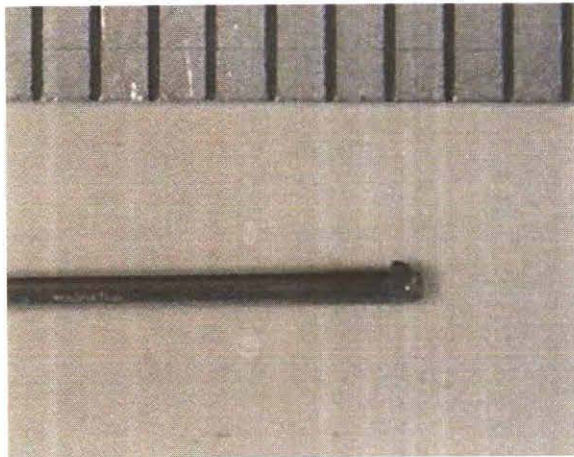


0.5m/s 60V

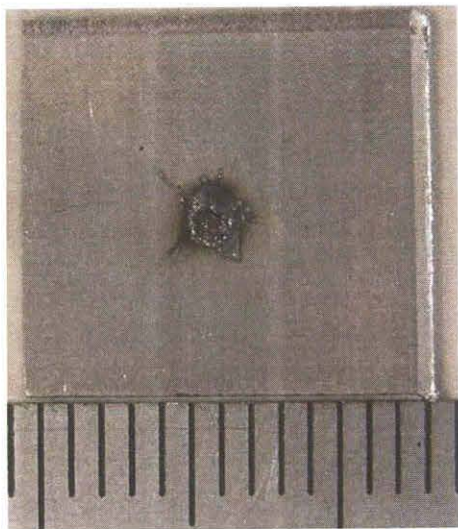


0.6m/s 60V

Fig.5-34 Cross-section of wire and base metal( $\phi$  0.65mm)



wire rod

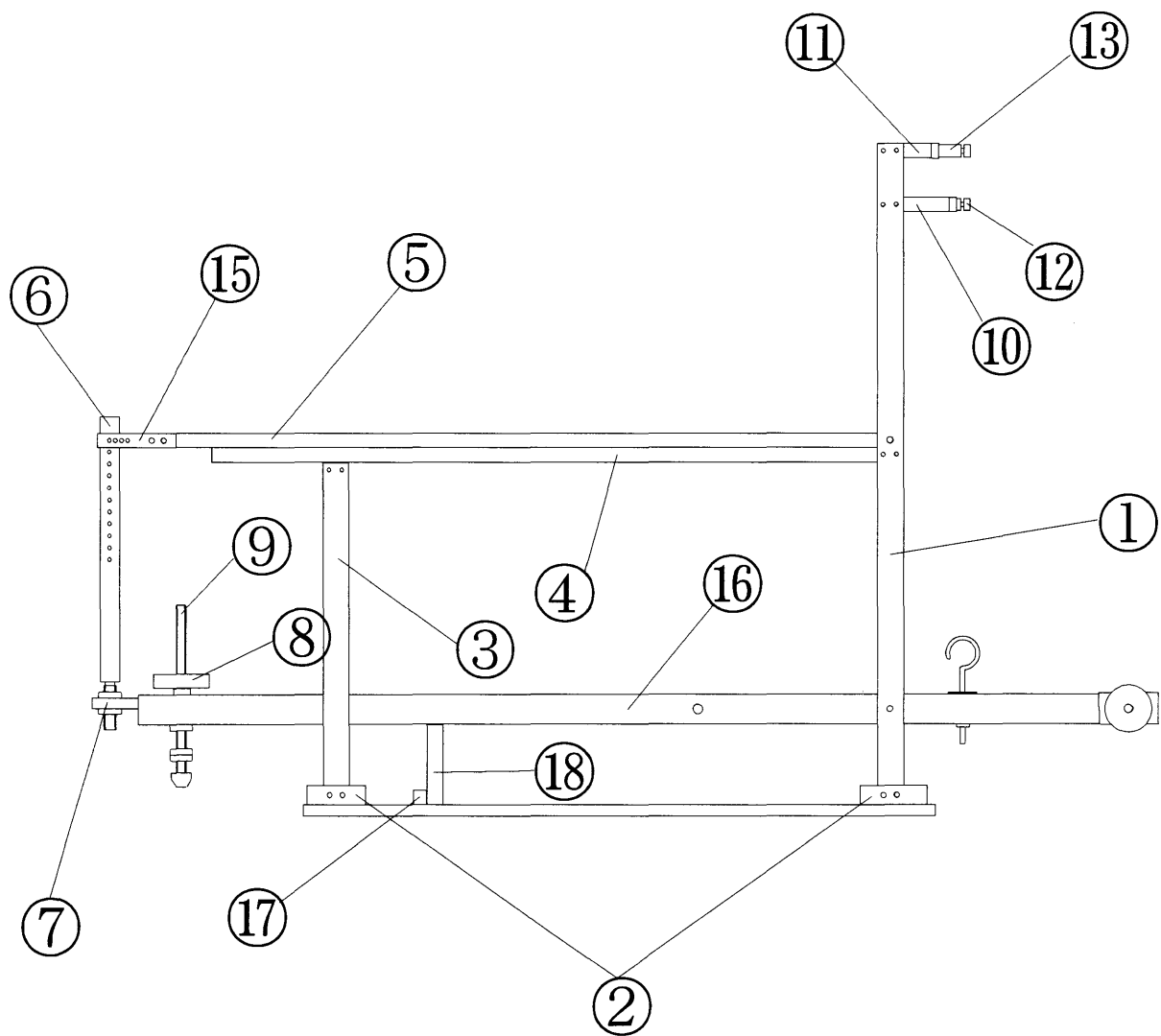


base metal



close-up

Fig.5-35 aberrance breaking





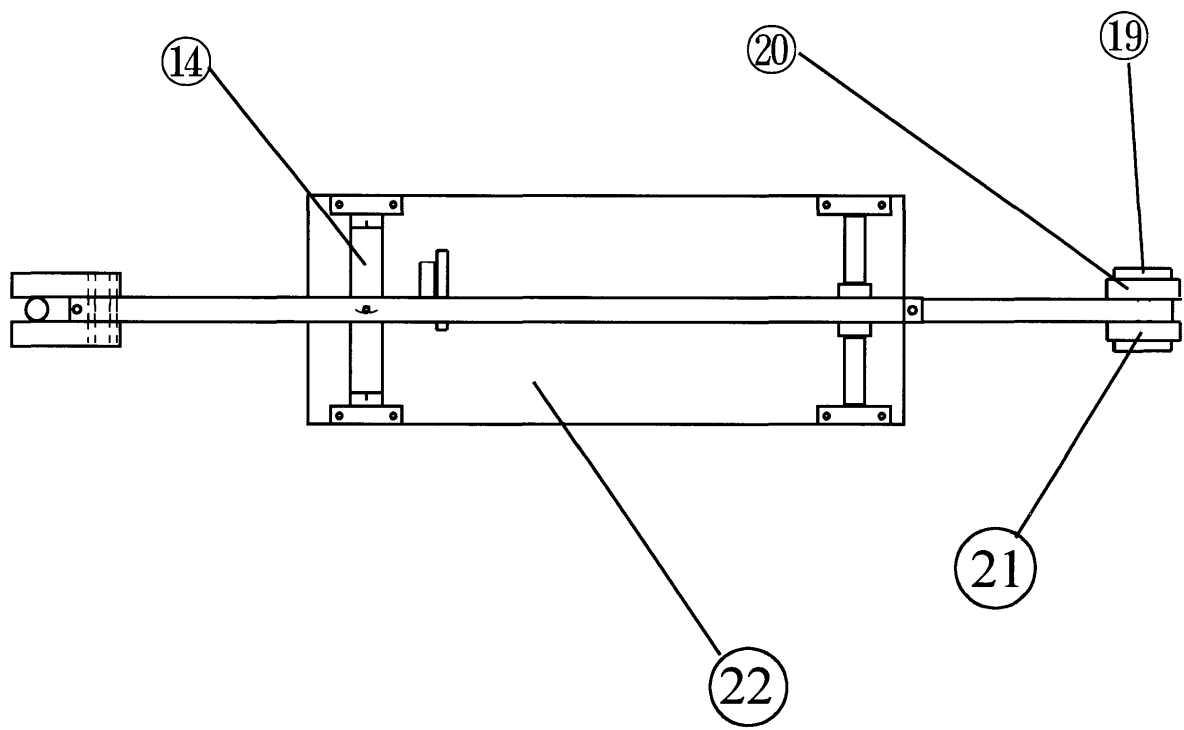


图 名	装置平面图
--------	-------

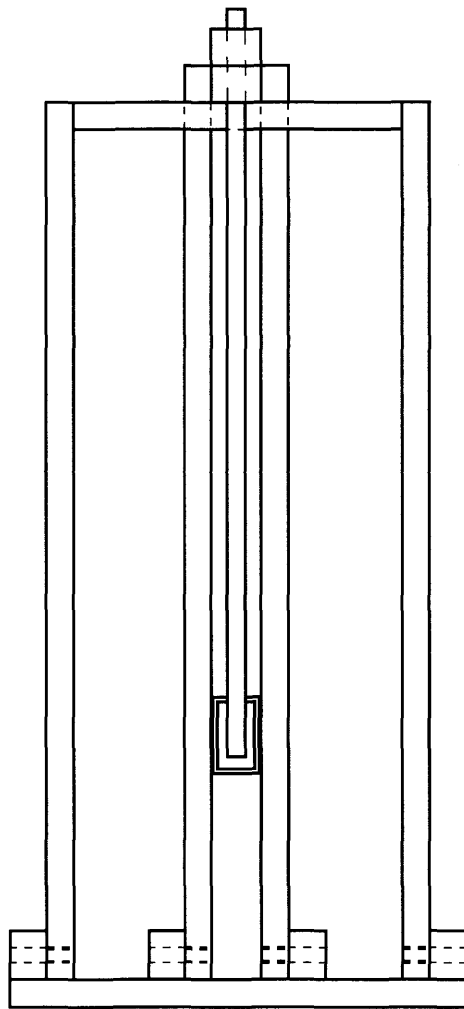
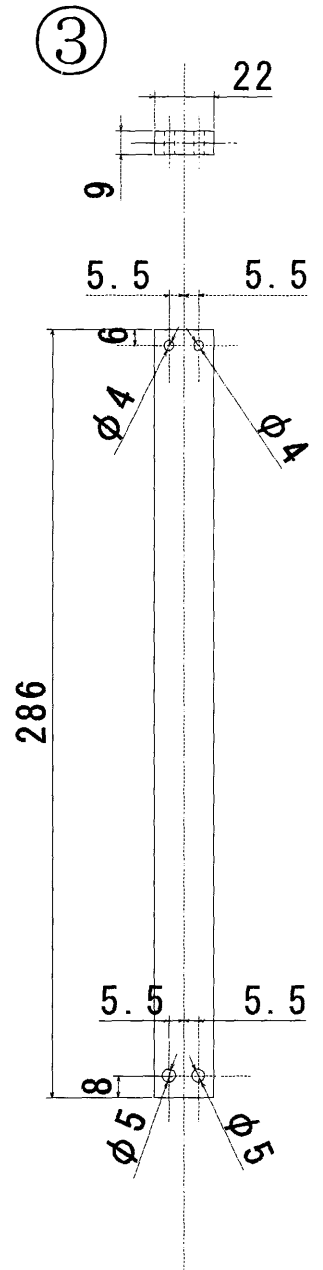
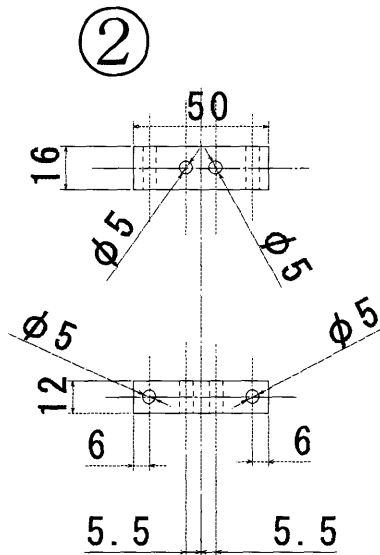
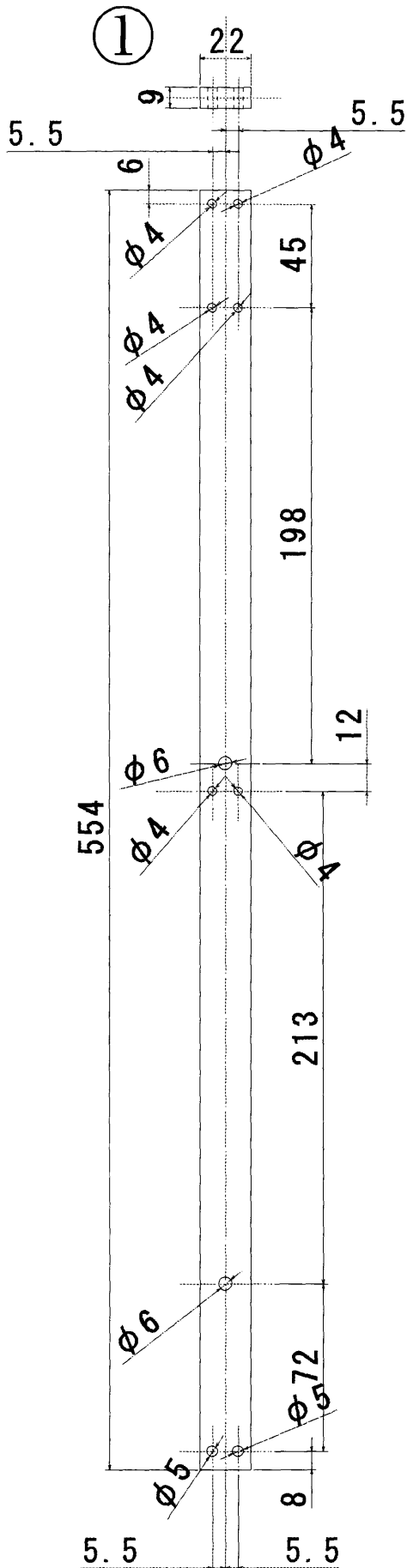
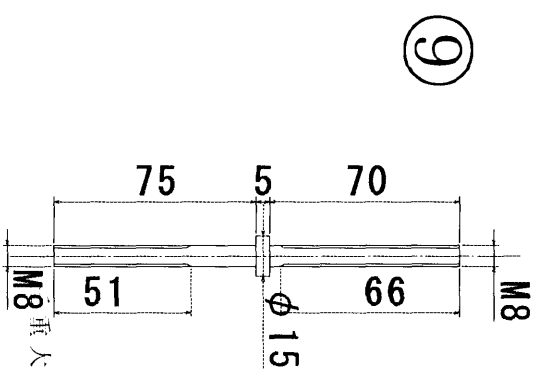
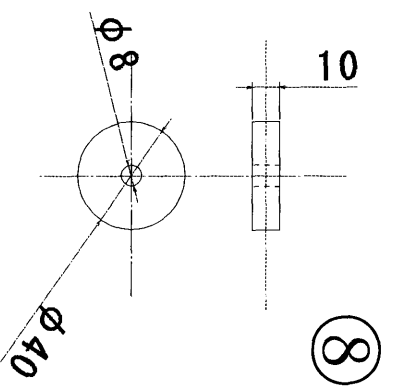
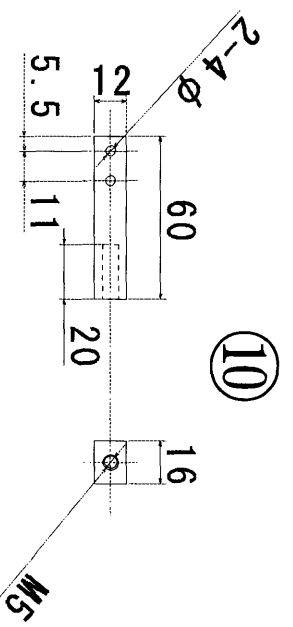
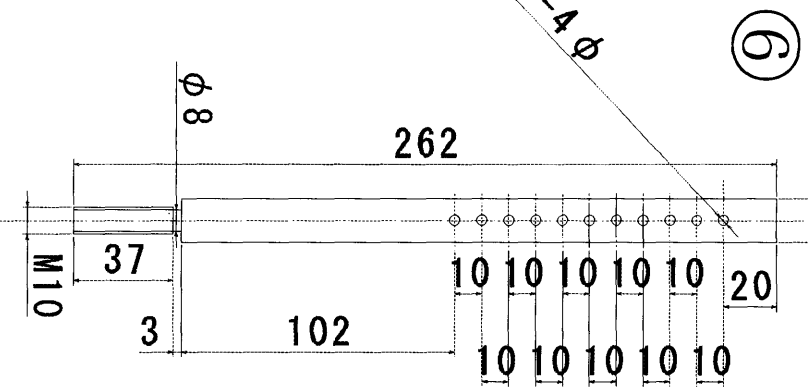
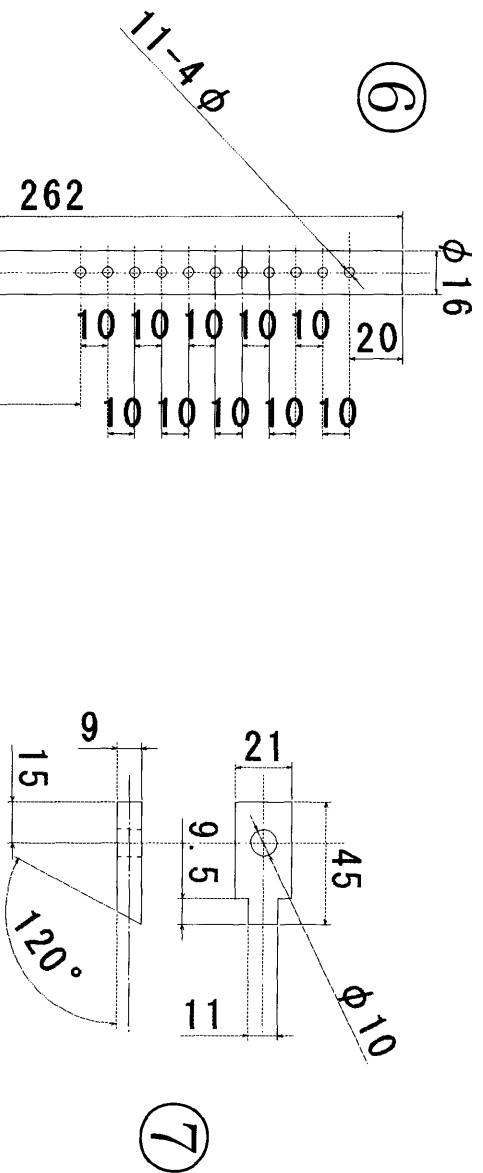


図  
名

装置側面図

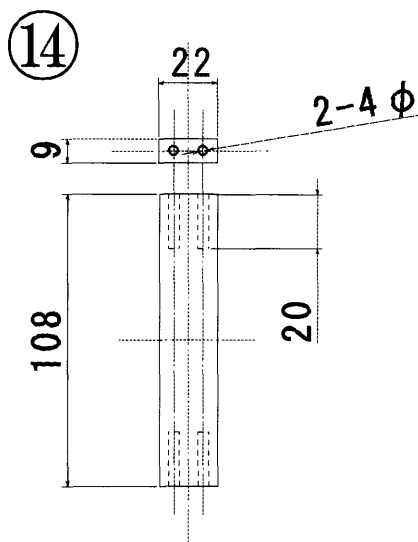
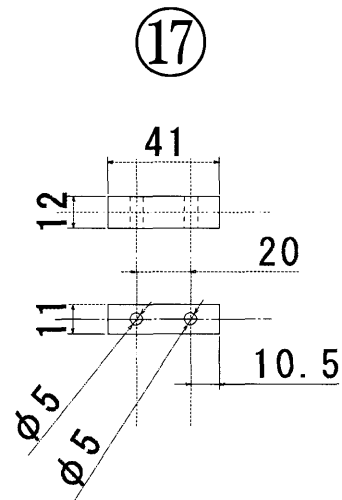
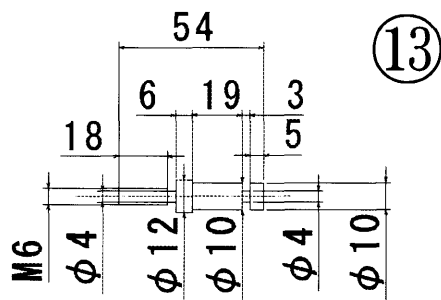
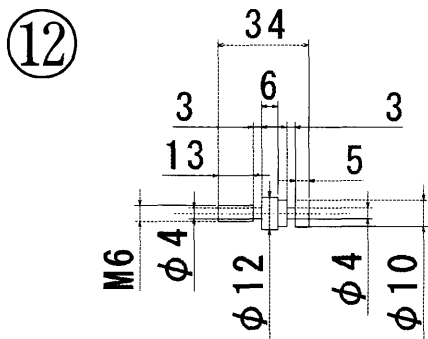
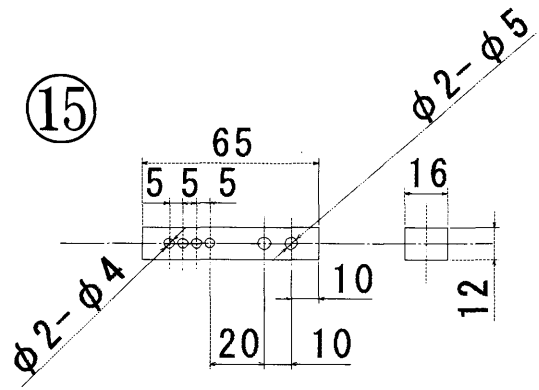
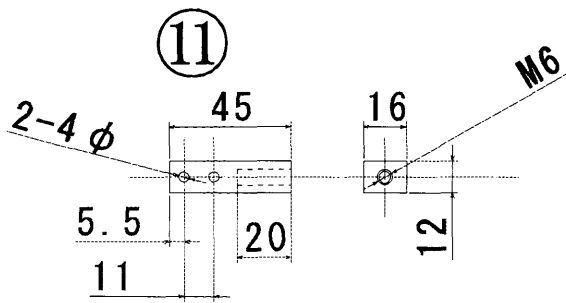


3	補助支柱	2	
2	支柱補助	4	
1	回転軸支柱	1	
番号	部品名	個数	材質
図名	部品図		



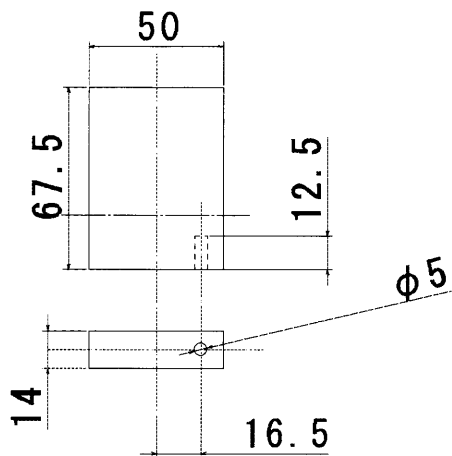
番号	部品名	個数	材質
10	ハネ調節用治具1	1	
9	ピンバイス支柱	1	
8	加圧用錘	4	
7	フック	1	
6	フック取り付け棒	1	

図名 部品図

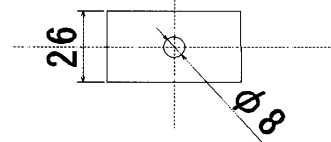
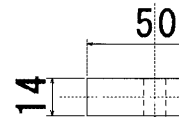
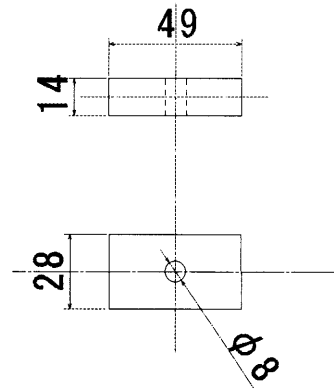


17	水平調節用補助具	1	
15	フック位置調整具	1	
14	補助治具	1	
13	バネ調節用治具4	1	
12	バネ調節用治具3	1	
11	バネ調節用治具2	1	
番号	部品名	個数	材質

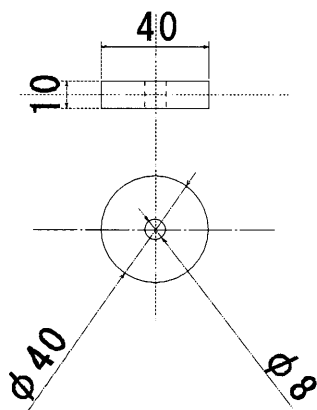
⑱



㉓



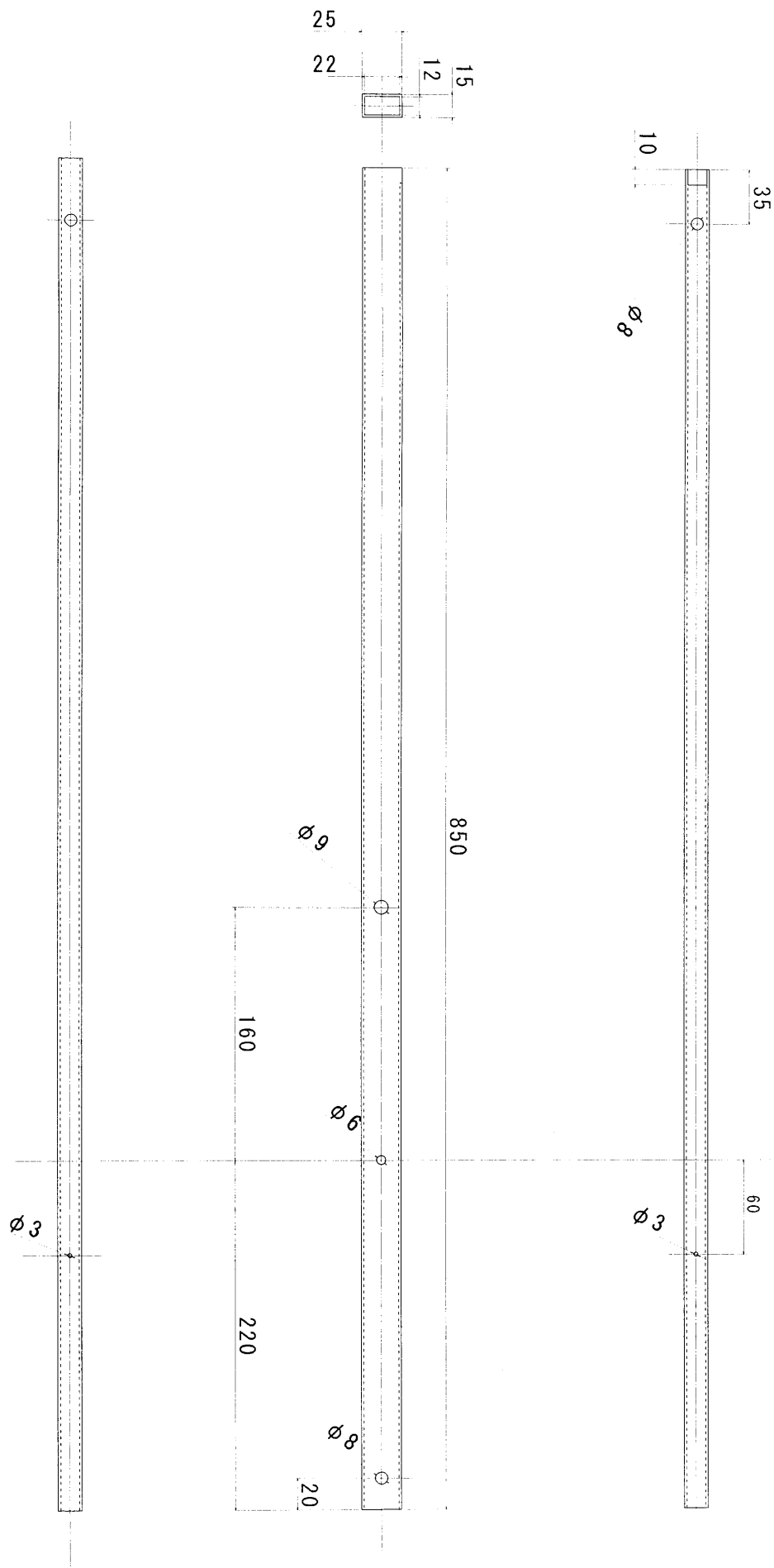
㉑



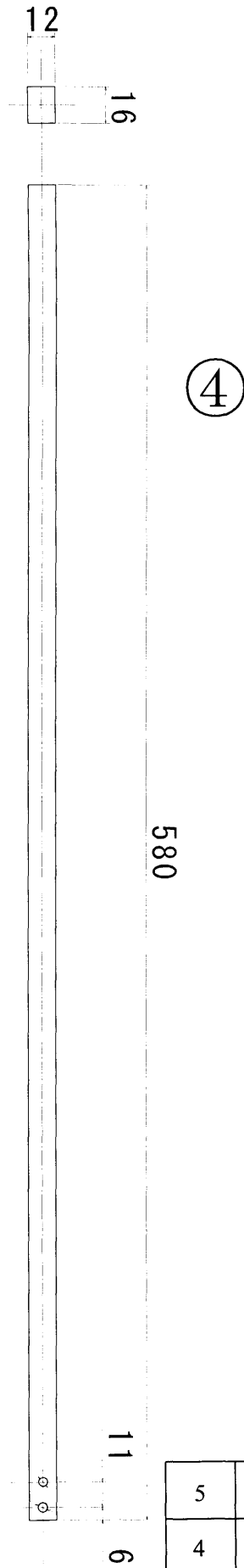
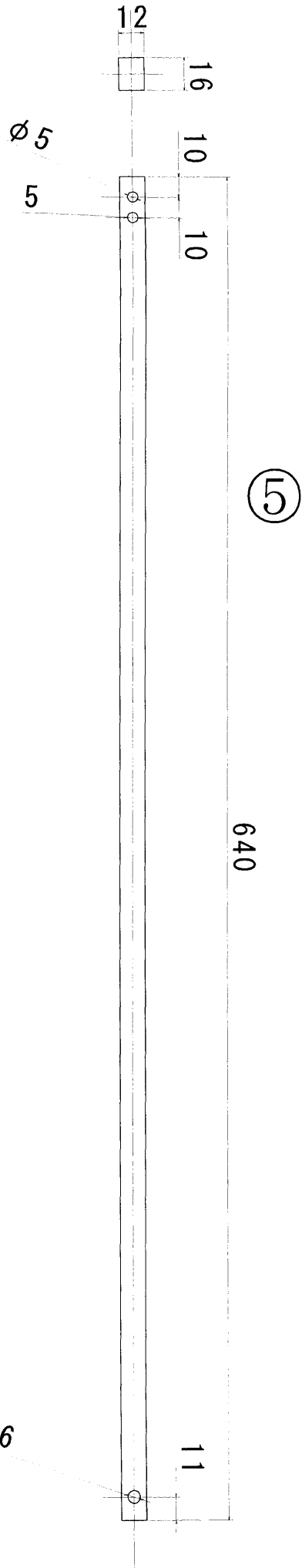
㉒

21	カウンタウエイト3	1	
20	カウンタウエイト2	1	
19	カウンタウエイト1	1	
18	水平調整用ブロック	1	
番号	部品名	個数	材質
図名	部品図		

16

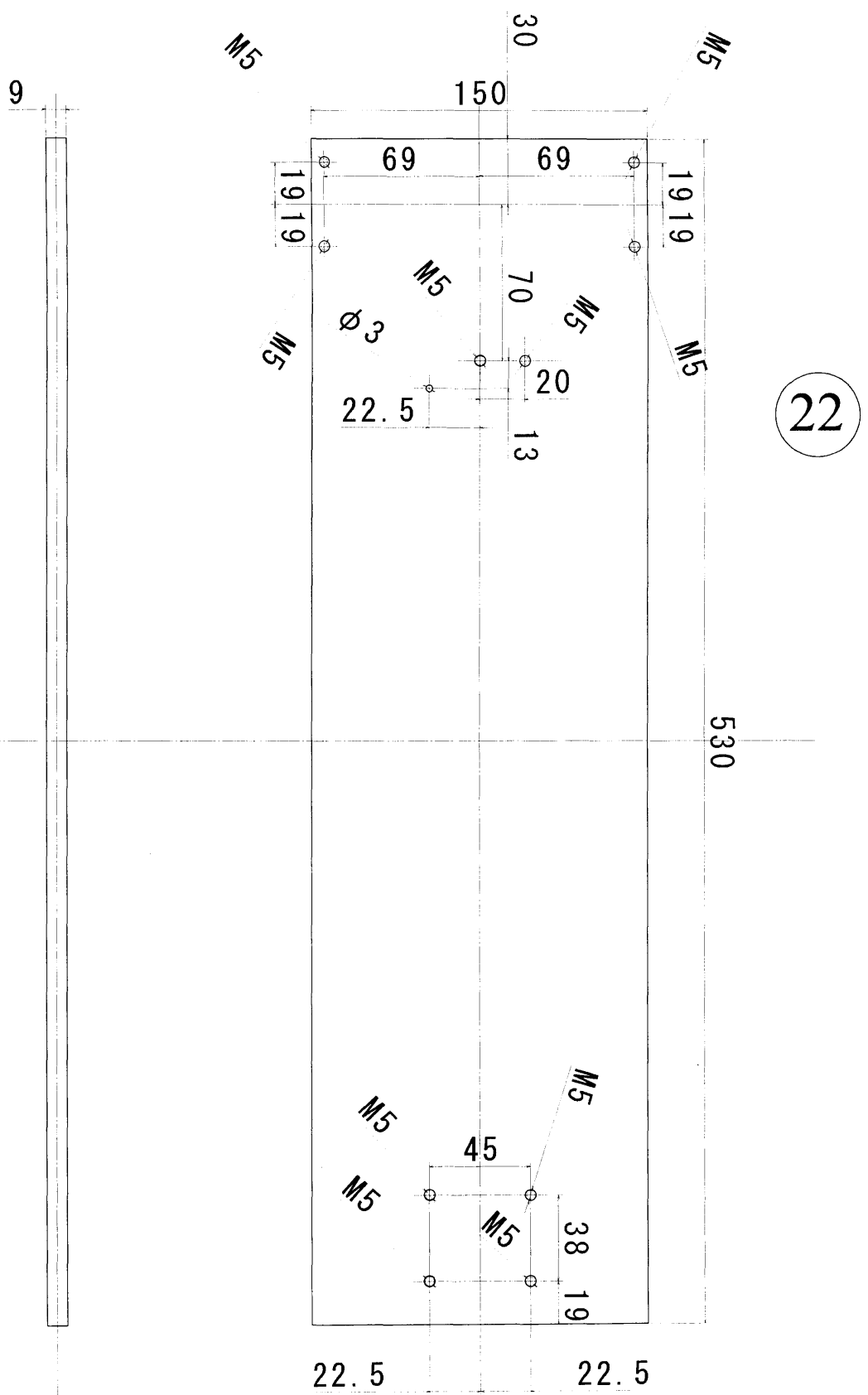


16	ピンバイス支持レバ	1	
番号	部品名	個数	材質
図名	部品図		



5	高さ調節バー	1	
4	水平バー	1	
番号	部品名	個数	材質
図名	部品図		





22

22	台座	1	
番号	部品名	個数	材質
図名	部品図		