

鉄-アルミニウムのパーカッション継手
強度におよぼす接触速度と加圧力の影響

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

伊 藤 洋 介

平成 18 年度 修士論文

鉄 - アルミニウムのパーカッション継手 強度におよぼす接触速度と加圧力の影響



三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻
伊藤 洋介

目次

第 1 章	緒言	・ ・ ・ 1
第 2 章	パーカッション溶接の原理及び溶接装置の構成	
2 - 1	溶接の原理	・ ・ ・ 3
2 - 2	溶接新装置の作製	・ ・ ・ 3
2 - 3	溶接装置の構成	・ ・ ・ 4
2 - 4	強度評価	・ ・ ・ 5
第 3 章	線材接触速度算出と実験条件	
3 - 1	線材接触速度の算出	・ ・ ・ 6
3 - 2	実験条件の決定	・ ・ ・ 15
第 4 章	実験結果と考察	
4 - 1	放電波形	・ ・ ・ 16
4 - 2	接触速度の測定	・ ・ ・ 16
4 - 3	接触速度の影響	・ ・ ・ 17
4 - 4	加圧力の影響	・ ・ ・ 20
第 5 章	結言	・ ・ ・ 22

参考文献

謝辞

第 1 章 緒言

パーカッション溶接(Percussion Welding)は、溶接技術において術語として用いられる溶接用語で、溶接一般の溶接方法に定義される用語の一つである。パーカッション溶接は、加圧アーク溶接ともいえる溶接方法の一種である。

パーカッション溶接では、溶接しようとする金属(母材)を接触させて、あらかじめコンデンサに蓄えられている電気エネルギーを母材の接触面を通じて放電し、その時発生するアーク熱のエネルギーで接合部(溶接継手)を集中加熱し、その際の発熱により金属が熔融して、その熔融している金属同士を圧着することで溶接をなす方法で、細線材同士あるいは細線材と部材との溶接に有効である。

一般的な溶接機は小型軽量で、溶接ガンとして作業性もよく手軽に使い、接合部の信頼性をさほど要求されない場合には最適で、主な用途としてはダクト断熱材、天井金具、輸送機器の配線押さえ、配電盤、家電製品等に用いられている。

パーカッション溶接はコンデンサに電荷を蓄電するため、入力電源量が小さくても安定した溶接が可能である。比較的弱い加圧力で溶接でき、単位時間あたりの入熱は非常に大きい、大電流のアークをごく短時間かつ局部集中させるので材料の酸化防止や、熱影響部を非常に小さくすることが可能である。そのため薄板でも溶け落ちが生じにくく、溶接ひずみも小さくすることができる。また、母材に塩化ビニル、塗装などの表面処理が施してある場合や、電気抵抗や融点の異なる金属の溶接、アルミや銅などの熱伝導性のよい材質の溶接も可能である。

しかし、これらの長所は前述したように接合部の信頼性をさほど要求されない場合という条件つきでの溶接の場合に限ってのことである。パーカッション溶接は電気抵抗溶接法と金属アーク溶接法とを混合したような特徴を有しており、入熱源となる過渡的アークの特性が溶接機と被溶接材とで構成される電気回路に依存するばかりでなく、線材の先端形状などにも左右される。さらに接合機構には、被溶接材間に生じる加圧力も影響するため、接合部の特性の把握が非常に困難である。その結果、パーカッション溶接では最適な溶接条件が確立されておらず、実作業における条件設定は試験データの積み重ねまたは作業者の経験に頼っている。多品種少量生産が求められる中で、溶接材料や溶接材

料形状が変わる毎に最適な条件を探すことになり大変な労力と時間を費やす結果となる。本溶接法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源側条件は制御されているが、溶接部材の加圧などの力学的条件については不明な点が多い。そこで本研究はパーカッション溶接の良好な溶接条件を確立するため、線材と母材との接触速度、線材を母材に接触させる際の加圧力が継手強度に及ぼす影響を検討した。

また本研究では溶接材料として線材に鉄線を、また母材にアルミニウム板を用いて異種金属の溶接をおこなった。鉄とアルミニウムは融点、熱伝導度、電気伝導度などの物性値が大きく異なること、さらに接合領域に数種類の硬く脆弱な金属間化合物(Fe_3Al , Fe_2Al_5 , FeAl , Fe_2Al)を生じることから溶接が困難である異種金属接合である。しかし、鉄とアルミニウムの溶接が可能になれば両者の材料の特性を生かした用途が数多く上げられ、最近、注目されている組み合わせの一つである。通常の溶接では金属間化合物の生成により、接合は全く不可能であるが、金属間化合物の層が極めて薄い場合にはその影響は小さいことが報告されている。パーカッション溶接のアーク放電時間は数ミリ秒と非常に短いため熱影響部も非常に狭く、溶接線材を加圧することによって接合に不必要な熔融金属を押し出すことも可能であり、金属間化合物の生成をわずかにおさえることが期待され、最適な溶接条件の確立を本研究での目的とする。

第2章 パーカッション溶接の原理および溶接装置構成

2-1 溶接の原理

パーカッション溶接の概念図を Fig.2-1-1(A)に示す。溶接装置はコンデンサ充電回路 Charge circuit と被溶接材を含むコンデンサ放電回路 Discharge circuit から構成される。充電回路のスイッチ S1 を閉じコンデンサを充電する。充電時には放電回路のスイッチ S2 は開いておき、不用意な放電を予防する。コンデンサの充電終了後にスイッチ S1 を開いてからスイッチ S2 を閉じる。放電回路はスイッチ S2 だけでなく、被溶接材である線材(wire rod)と母材(base material)との間も離しているためスイッチ S2 を閉じて直ちには放電しない。

次に線材を母材へ近づけていくと、大気の絶縁破壊が生じ線材と母材との間で放電が生じる。放電中も線材は母材へ接近し続け、線材が母材に接触すると、放電は停止する。この時点でコンデンサに残っていた電荷は短絡電流として回路を流れて、コンデンサは完全に放電する。線材と母材とが短絡した後、線材はさらに母材へ接近し続けるため、接合界面に圧力が生じる。この圧力が局部溶融した接触界面を圧接して溶接プロセスが終了する。

以上がパーカッション溶接の接合機構であり、このプロセスの概略図を Fig.2-1-1(B)に示す。パーカッション溶接において十分な接合強度を有する継手を得るためには以下の諸点が問題になると考えられる。

1. 線材先端及び母材表面を溶接に必要なだけ溶融させるための電気エネルギー
2. 電気エネルギーを被溶接材の加熱・溶融に有効に利用するためのアークの維持
3. 線材と母材との間の接合圧力の確保

2-2 溶接新装置の作製

これまでの研究で不明だった点を明確にするため、Fig.2-2-1(A)に示す新装置を作製した。また、新装置各部品の具体的な寸法は巻末に示す。Fig.2-2-1(B)に示すよう旧装置ではレバーの持ち上げ高さを四段階にしか変化させられず、加圧力を増加させるとともに速度も変化してしまっていた。そのため、加圧力の影響については明確に出来なかった。新装置では、Fig.2-2-2(A)で示すよう

にフック支持レバーに 10mm 間隔の穴を設け、さらに残りの高さ調節を Fig.2-2-2(B)で示すよう蝶ネジで持ち上げた分をノギスで測ることによって、細かく正確な調節を可能にした。また、Fig.2-2-3(A)に示すよう旧装置のフックは回転式であり、フックを外す際レバーに余分な捻れが生じていたと考えられるため、Fig.2-2-3(B)に示すようにフックを真横に外す方法にした。また、フックを引っ掛ける部分に、0.7mm のピアノ線を使用することで、誤差を抑えた。

装置の改善点

- 1、 細かく正確な高さ調節を可能にした。
- 2、 フックを回転式から真横に外す方式にした。
- 3、 レバー自体を長くし、実験可能速度の幅を広げた。
- 4、 バネにバネ量りを用いることでバネによる力調節を明確にした。
- 5、 水平位置を決めるための鉄ブロックの位置を固定した。

2-3 溶接装置の構成

実験に使用した溶接装置の概要を Fig.2-3-1 に示す。溶接電源であるコンデンサは(株) TYK Percussion Welder TI-550 を使用した。本電源は充電電圧を 22.0~63.0(V)の範囲で無段階に変化でき、またコンデンサ容量は 10,30,70(mF) の 3 段階に設定することが出来る。

母材は母材固定板(Plate for fixing base metal)を用いてコンデンサの陽極へつながっている銅板(Copper plate)の上に固定する。線材を挟むピンバイス(Pin vise)はピンバイス支持レバー(Pin vise support lever)に固定され、レバー回転軸(Axis of the lever)を中心として上下方向に回転する。ピンバイスの近くにコンデンサの陰極へとつながる圧着端子をつなげるため、ピンバイス上のワッシャーの間に圧着端子を挟む。レバーを水平に保ったままピンバイスに線材を挟むために鉄ブロック(iron block)を置いてレバーを水平にした状態で線材を挟み、線材と母材が垂直に接触するようにする。フックを引っ掛け、鉄ブロックをはずし、コンデンサに電荷を蓄電する。高さ調節をしたフックを外し、溶接機のレバーがピンバイス、線材と共に回転軸を中心とした回転運動をしな

がら落下し母材に近づいていき、線材と母材が接触する寸前で大気の絶縁破壊が生じ線材と母材の間でアーク放電が生じる。線材はレバーとピンバイスの自重と、実験条件によってはピンバイスの真上に設置する加圧用の錘(Weight)や溶接機後部にある加圧バネ(Spring)によって加圧される。溶接装置のレバー後部に Fig2-3-2 に示すカウンターバランスを保持するためのブロック設置した。

被溶接材の母材には厚さ 1.5mm の工業用純アルミニウム A1050 を用い、母材をせん断加工した際に生じたバリを除去するため耐水研磨紙で試験片の面取りを行った。また溶接表面は皮脂や工作油の影響を除くために、アセトンを用いて脱脂した。線材には直径 1.0mm の、純鉄(純度 99.5%)を用いた。試験片に用いる母材と線材の材質と形状を Fig2-3-3 に示す。

2-4 強度評価

継手強度を測定するために用いた引張試験機を Fig.2-4-1 に示す。ロードセル(Load cell)に固定した試験片台(Table of fixing specimen)に溶接した試験片を乗せ、引張試験機中央部の鋼板(Central plate)に固定してあるドリルチャック(Drill chuck)で線材部を強く挟む。試験機の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って歯車を回し、ドリルチャックを装着してある中央部の鋼板を上方向へ移動し、接合部に引張張力を負荷する。この際に生じる荷重をロードセルにより測定し、試験片の破断荷重を求めた。本実験では、このときの引張強度を継手強度と定めた。

第3章 線材接触算出と実験条件

3-1 線材接触速度の算出

接触速度を直接測定するのは非常に困難である。本実験装置は溶接機に取り付けられたピアノ線からフックを外すことでピンバイス支持レバーの軸を中心として回転運動を行い線材が落下してゆく。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ひとかたまりの回転する剛体と考え、回転の運動方程式によって線材と母材との接触速度を求めることにした。ここで用いる定数および具体的な値を Fig.3-1-1 に示す。

加圧方法が錘の場合での接触速度を V_c

回転モーメントを N

支点周りの慣性モーメントを I

運動方程式

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

① 式の両辺を t で積分すると

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

初期条件 $t=0$ のとき $\omega=0$ より $C_1=0$

$$\omega = \frac{N}{I}t \quad \text{②}$$

② 式の両辺を t で積分すると

$$\theta = \frac{N}{2I}t^2 + C_2$$

初期条件 $t=0$ の時 $\theta = -\theta_0$ より $C_2 = -\theta_0$

$$\theta = \frac{N}{2I}t^2 - \theta_0 \quad \text{③}$$

落下時間を t_c とすれば、 $t = t_c$ の時 $\theta = 0$ であるから

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

θ が小さい場合を仮定しているから、

$$\tan \theta = \frac{h}{\ell_z} \cong \theta \text{ と考えて、}$$

$$t_c = \sqrt{\frac{2I}{N \ell_z}} \sqrt{h} \quad (4)$$

$$t_c = K \sqrt{h}, \quad \text{ただし} \quad K = \sqrt{\frac{2I}{N \ell_z}} \quad \text{※ } \ell_z = 630 \text{ (mm)}$$

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

$t = t_c$ のとき $\omega = \omega_c$: 接触時の角速度

$$\omega_c = \frac{N}{I} t_c = \frac{N}{I} \sqrt{\frac{2I}{N}} \sqrt{\theta_0} = \sqrt{\frac{2N}{I}} \sqrt{\theta_0}$$

$$t_c = \sqrt{\frac{2I}{N \ell_z}} \sqrt{h_0} \text{ の比例定数 } \sqrt{\frac{2I}{N \ell_z}} = K_{Z_s} \text{ をコンデンサと電池を用いて、コンデ}$$

ンサの電圧が降下し始める点から電池の電圧が降下する時間差を落下時間とし、線材の持ち上げ高さの距離の関係を最小二乗法したものを加圧別に Fig3-1-2 に示す。

$$K_Z = \sqrt{2} \sqrt{\frac{I}{N \ell_z}} \rightarrow \sqrt{\frac{I}{N \ell_z}} = \frac{K_Z}{\sqrt{2}} \rightarrow \sqrt{\frac{N \ell_z}{I}} = \frac{\sqrt{2}}{K_Z}$$

$$t_c = \sqrt{\frac{2I}{N \ell_z}} \sqrt{h} = \sqrt{\frac{2}{\ell_z}} \sqrt{\frac{I}{N}} \sqrt{h}$$

ピンバイス（実験する位置）の支点からの距離を ℓ_p である。

$$V_c = \ell_p \omega_c = \ell_p \frac{N}{I} t_c = \ell_p \frac{N}{I} \sqrt{\frac{2I}{N\ell_z}} \sqrt{h} = \ell_p \frac{2N}{I\ell_z} \sqrt{h}$$

$$\omega_c = \frac{N}{I} t_c = \frac{2}{K_z^2 \ell_z} \cdot K_z \sqrt{h}$$

$$V_c = \ell_p \omega_c = \frac{2}{K_z^2 \ell_z} K_z \cdot \ell_p \sqrt{h} = \frac{\ell_p}{\ell_z} \cdot \frac{2}{K_z} \sqrt{h}$$

$$V_c = \frac{\ell_p}{\ell_z} \cdot \frac{2}{K_z} \sqrt{h} \quad (5)$$

落下速度が未知数であるので、加圧別に持ち上げ高さを 10mm から 70mm まで設定し、算出したものである K_z を⑤式に代入し、支点から持ち上げ高さを設定する位置までの距離を $\ell_z = 630\text{mm}$ とし、支点から実験位置までの距離を $\ell_p = 600\text{mm}$ としたものを Fig3-1-3 に示したものを⑤式に加圧別に K_z 、 ℓ_z 、 ℓ_p のそれぞれを代入して以下の式が算出される。

$$V_c = 0.08 \sqrt{h} \quad 1\text{N のとき}$$

$$V_c = 0.10 \sqrt{h} \quad 2\text{N のとき}$$

$$V_c = 0.11 \sqrt{h} \quad 3\text{N のとき}$$

$$V_c = 0.12 \sqrt{h} \quad 4\text{N のとき}$$

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。

加圧方法がバネでの速度の算出では梃子の回転運動に関する微分方程式

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = M(\theta)$$

(1)

ここで、 I は梃子の慣性モーメント、 θ は梃子の回転速度、 t は時間、 $M(\theta)$ は

梔子に作用する回転モーメントである。回転モーメント M は支点から距離 ℓ の位置に設置されたバネによる力 F によるものであり、 F は梔子の回転速度 θ のよって変化するから、 M は次式のようになる。

$$M(\theta) = \ell F(\theta) = \ell(f_0 - k\theta) \quad (2)$$

上の微分方程式(eq・(1))は次のようになる。

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = M(\theta) = \ell(f_0 - k\theta) \quad (3)$$

これを整理すると、

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{\ell k}{I} \theta = \frac{\ell f_0}{I} \quad (4)$$

見通しの良い用書き換えると、

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + b\theta = r \quad (5)$$

ここで、 $b = \frac{\ell k}{I}$ 、 $r = \frac{\ell f_0}{I}$ である。

初期条件を $\theta(0) = \theta_0$ 、 $\theta'(0) = 0$ として、微分方程式を Laplace transform あるいは Variation of parameters を使って解くと解は次のようになる。

$$\theta(t) = \theta_0 \cos(\sqrt{b}t) + \frac{r}{b} (1 - \cos(\sqrt{b}t)) = \left(\theta_0 - \frac{r}{b} \right) \cos(\sqrt{b}t) + \frac{r}{b} \quad (6)$$

各係数の次元について検討する。なお、長さの単位は [m]、質量の単位は [kg]、力の単位 [N]、角度の表示はラジアン [rad.] で統一する。

・ $\frac{r}{b}$ について置き換えの式から、

$$\frac{r}{b} = \frac{\frac{\ell f_0}{I}}{\frac{\ell k}{I}} = \frac{f_0}{k} \cdot \frac{\frac{[N]}{[N]}}{\frac{[rad.]}{[rad.]}} = [rad.] \quad (7)$$

であり、 $\frac{r}{b}$ は角度の次元である。ただし、角度はラジアン表示すれば無次元である。

・ \sqrt{b} について

・ \sqrt{b} について

$b = \frac{\ell k}{I}$ であり、梃子を θ だけ回転した時のばねの力の k の単位を

$[\text{N/rad.}] = [\text{N/-}]$ とすれば、

$$b = \frac{\ell k}{I}, \quad \left[\text{m} \frac{\text{N}}{\text{kg} \cdot \text{m}^2} \right] = \left[\frac{\text{N}}{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{rad.}} \right] = \left[\frac{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}}{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{rad.}} \right] = \left[\frac{1}{\text{rad.} \cdot \text{s}^2} \right] \quad (8)$$

したがって、 \sqrt{b} の次元は $\frac{1}{\text{s}}$ である。(ここで $\sqrt{\text{rad.}}$ は無次元であることに注意が

必要である。角度の表記をラジアンで統一しておくことが重要である。)

したがって \sqrt{bt} の次元は無次元である。

慣性モーメント I は錘を使った落下時間の測定結果によれば、

$$I = 6.1521 \times 10^7 [\text{g} \cdot \text{mm}^2] \quad (9)$$

ばね定数 k は 1 ラジアン当たりのばね力の増分であるから、

$$k = 61.74 [\text{N/rad.}] \quad (10)$$

持ち上げ高さ h をラジアン表記の角度に換算してから、(6)式を図示して $\theta = 0$ となる時間を求めれば、落下時間 t_c となる。

(6)式を微分すれば、落下速度が得られる。ただし、得られる速度は梃子の角速度であるから、支点からの距離を乗じて周速度に換算しなければならない。

Appendix

Laplace transform による解法

微分方程式 $y'' + by = r$ を初期条件 $y|_{t=0} = y_0$, $y'|_{t=0} = y_1$ の下で Laplace 変換する

$$\int_0^\infty e^{-st} y'' dt = -y_1 - p y_0 + p^2 \int_0^\infty e^{-st} y dt \quad (11)$$

$$\int_0^\infty e^{-st} dt = \frac{1}{s} \quad (12)$$

$$L(y) \quad (13)$$

したがって微分方程式 $y'' + by = r$ の変換は $\int_0^\infty e^{-st} y dt$ を

$$-y_1 - sy_0 + s^2 L(y) + bL(y) = \frac{r}{s} \quad (14)$$

したがって、

$$L(y) = \frac{1}{s^2 + b} \left(y_1 + st_0 + \frac{r}{s} \right) \quad (15)$$

$$= y_1 \frac{1}{p^2 + b} + y_0 \frac{p}{p^2 + b} + \frac{r}{p(p^2 + b)} \quad (16)$$

$$= y_1 \frac{1}{p^2 + b} + y_0 \frac{p}{p^2 + b} + \frac{r}{b} \left(\frac{1}{s} - \frac{p}{p^2 + b} \right) \quad (17)$$

上の $L(y)$ を逆変換すれば、

$$y(t) = \frac{y_1}{\sqrt{b}} \sin \sqrt{b}t + y_0 \cos \sqrt{b}t + \frac{r}{b} (1 - \cos \sqrt{b}t) \quad (18)$$

別解 (Method of variation of parameter)

非同次微分方程式

$$y'' + by = r \quad (19)$$

に対応する同次微分方程式

$$y'' + by = 0$$

の解 $y_1 = \cos \sqrt{b}t$, $y_2 = \sin \sqrt{b}t$ の Wronskian, W は

$$W(y_1, y_2) = y_1 y_2' - y_2 y_1' = \sqrt{b} \quad (20)$$

したがって、解 y_p は

$$\begin{aligned} y_p &= -y_1 \int \frac{y_2 r}{W} dt + y_2 \int \frac{y_1 r}{W} dt \\ &= -\cos \sqrt{b}t \int \frac{r \sin \sqrt{b}t}{\sqrt{b}} dt + \sin \sqrt{b}t \int \frac{r \cos \sqrt{b}t}{\sqrt{b}} dt \\ &= C_1 \frac{r}{b} \cos \sqrt{b}t + C_2 \frac{r}{b} \sin \sqrt{b}t + \frac{r}{b} \quad C_1, C_2 \text{ 積分定数} \end{aligned} \quad (22)$$

初期条件によって C_1, C_2 を決めれば、ラプラス変換による解が得れる。(22)式

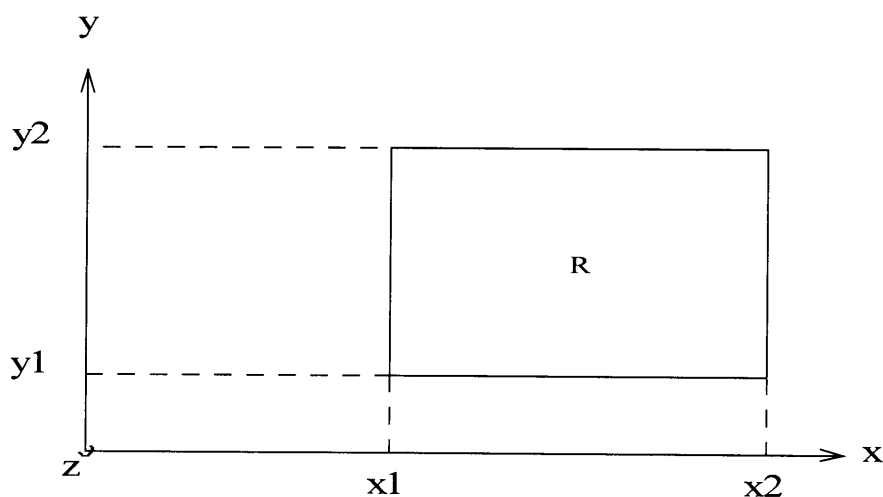
を微分すると速度が算出され、設定したい接触速度がわかる。

そして実験で得られた実効値と、計算によって求めた理論値を加圧力別に Fig3-1-4 に示す。実効値と理論値に若干誤差があるが許容範囲とし、無視した。BASIC のプログラムを利用して加圧別の持ち上げ高さと接触速度の関係が算出でき、持ち上げ高さと落下速度の関係が算出され、Fig3-1-5 に示す。これを使用して任意の落下速度をだすことの出来る持ち上げ高さを得ることができる。また、それぞれの加圧力、持ち上げ高さにおける落下時間の経過とレバーの変位が算出され Fig3-1-6 に示す。

また本実験の溶接機はピンバイス支持パイプ軸を中心に線材を挟むピンバイス、支持パイプが回転運動をするので落下速度を考える際に溶接装置の慣性モーメントが非常に重要になるので正確な計算が必要になる。溶接装置はピンバイス、ピンバイス支持パイプ、支持パイプ回転軸など様々な形状があって複雑である。そこで部品の形状別に慣性モーメントの計算を行った。また、各部品ごとの詳細な寸法は巻末の部品図に示す。

直方体の慣性モーメント（ x 軸上に剛体がない直方体の場合）

（ピンバイス支持パイプ上下面）



上図のように剛体 R を x 軸 y 軸平面上において考える。

$$I = \iiint_T (x^2 + y^2) \sigma dx dy dz \quad (\sigma: \text{密度})$$

$$I = \frac{1}{3} \sigma (z_2 - z_1)(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)(x_1^2 + x_1 x_2 + x_2^2 + y_1^2 + y_1 y_2 + y_2^2)$$

直方体の3辺の長さをそれぞれ Lx , Ly , Lz とすれば

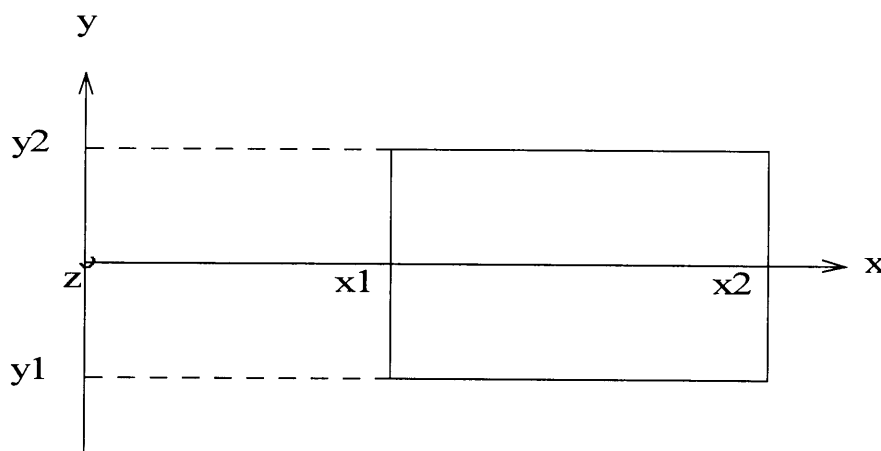
$$Lx = x_2 - x_1, \quad Ly = y_2 - y_1, \quad Lz = z_2 - z_1$$

したがって

$$I = \frac{1}{3} \sigma Lx Ly Lz (Lx^2 + 3x_1 x_2 + Ly^2 + 3y_1 y_2)$$

直方体の慣性モーメント (x 軸を中心とし、上下対称の直方体の場合)

(ピンバイス支持パイプ側面)



前ページの直方体の計算より

$$I = \frac{1}{3} \sigma Lx Ly Lz (Lx^2 + 3x_1 x_2 + Ly^2 + 3y_1 y_2) \quad \text{であるが}$$

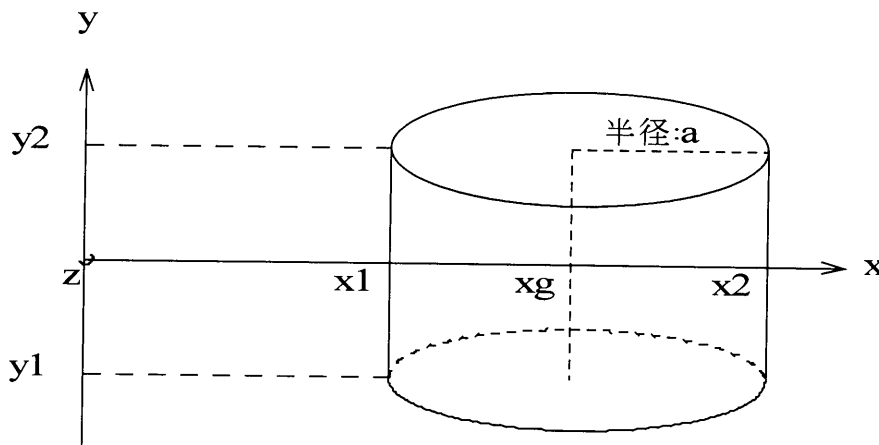
剛体が x 軸上において上下対称であることを利用して

$$y_2 = -y_1 = \frac{Ly}{2}, \quad x_G = x_1 + \frac{Lx}{2} = x_2 - \frac{Lx}{2} \quad \text{となるので}$$

$$I = \frac{1}{12} \sigma Lx Ly Lz (Lx^2 + Ly^2 + 12x_G^2)$$

円柱の慣性モーメント（x 軸上にあり、y 軸方向を向く円柱の場合）

（ピンバイス、錘）



$$I = \iiint_T (x^2 + y^2) \rho dx dy dz \quad \text{において}$$

$$R: X^2 + Z^2 = (x - x_G)^2 + z^2 = a^2 \quad \text{とすると}$$

$$\iiint_T (x^2 + y^2) dx dy dz = \int_{y_1}^{y_2} \left[\iint_R (x^2 + y^2) dx dz \right] dy$$

$$= Ly \int_R x^2 dx dz + \int_{y_1}^{y_2} y^2 \pi a^2 dy$$

第1項について

$$x = X + x_G \quad z = Z \quad \text{とおけば}$$

$$\frac{\partial(x, z)}{\partial(X, Z)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial X} & \frac{\partial x}{\partial Z} \\ \frac{\partial z}{\partial X} & \frac{\partial z}{\partial Z} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = 1$$

$$\iint_R x^2 dx dz = \iint_R (X + x_G)^2 dx dz = \iint_R X^2 dx dz + 2 \iint_R X x_G dx dz + x_G^2 \iint_R dx dz$$

ここで、

$$X = r \cos \theta, \quad Z = r \sin \theta \quad \text{より}$$

$$r: 0 \rightarrow a \quad \theta: 0 \rightarrow 2\pi \quad \text{として計算すると}$$

$$\iint_R x^2 dx dz = \pi a \left(\frac{a^2}{4} + x_G^2 \right) \quad \text{となる。}$$

第2項も計算すると、求める慣性モーメントは

$$I = V \rho \left(\frac{a^2}{4} + x_G^2 + \frac{Ly^2}{3} \right)$$

以上より慣性モーメントを求め、線材にかかる加圧力と線材接触速度の計算を行った。

3・2 実験条件の決定

以前の実験結果を基に、電源側条件は電圧 60V、コンデンサ容量 70mF に固定で、全ての線材は Fig 3・2・1 に示す研磨装置を用い、Fig3・2・2 に示すように先端角度を最もばらつきの少ない 130° に研磨し実験を行った。また、本実験装置の持ち上げ高さの範囲は、0～110 mm、持ち上げ高さはノギスでの調整のため 1/20mm 単位で行った。

加圧力はレバーとピンバイスの重量によるものが 1.6N あり、レバーの後部に錘を固定して 1.0N の加圧力を設定できるようにした。そこから加圧力を変化させるためにそれぞれ錘、バネを用いた。それに伴う接触速度について、上述の計算を基に巻末に示す各部品の具体的な寸法、値を代入し算出した結果の一覧を Fig 3・2・3 ～ Fig 3・2・5 に示す。研究目的である接触速度と加圧力の継手強度への影響を調べるため、丸で囲った部分を実験した。また、そこで継手強度が良好な部分を中心に追加実験を行った。

第4章 実験結果と考察

4-1 放電波形

溶接時に発生するアーク電圧、アーク放電時間をオシロスコープ Tektronix 株式会社 TDS3000B を用いて測定する。

充電電圧を 60V にして溶接を行った時にオシロスコープを用いて観測された電圧波形を Fig.4-1-1 に示す。時間 0 以前はコンデンサの充電電圧が測定されるので 60V の少し低い 58V 付近を示す。線材を落下させると母材に接触する寸前に大気の絶縁が破壊されて試験片間にアークが発生し、その瞬間を時間 0 とする。アーク放電が始まると電圧は充電電圧 58V から一瞬にして 25V 付近まで下がる。これはアーク電圧が線材と母材との間にかかっていることを示し、この状態がごく短時間続き、ある時間になると瞬間的に 0V まで減少する。電圧が 0V に減少するのは溶融した線材と母材が接触して試験片間のアーク放電が消滅してしまうことを示す。この時点でコンデンサに残っていた電荷は短絡電流として回路を流れているため正確に 0V を示さない状態が続いた後にコンデンサは完全に放電する。以上より充電電圧が急降下した瞬間からアーク電圧が 0V 近くまで急降下するまでの時間はアーク放電が起こっていた時間となり、これを放電時間と呼ぶ。同条件下で溶接を行ったときにもアーク電圧、放電時間に多少の誤差は出てしまうがアーク電圧の増減の傾向は同じである。

4-2 接触速度の測定

前章で述べた通り線材と母材との接触速度を直接測定するのは困難であるため、Fig.4-2-1 に示すようにフックとフックを掛けるピアノ線とをスイッチとした回路を作り、線材が落下してから母材に接触するまでの時間を実際に測定した。フックが外れると同時に回路のスイッチは OFF となり、そこから線材と母材が接触して放電が終わるまでの時間をオシロスコープで測定した。レバーを持ち上げることでバネはわずかに下に引っ張られており、このバネの余分

な伸びの影響で接触速度は設定値より少し速くなっていると考えられる。しかし、この誤差は測定できない。本実験では、バネを用いた実験データは、持ち上げ高さをあまり大きくしなかったことでこの誤差を無視できるとして計算値と等しいとした。

4-3 接触速度の影響

線材と母材との接触速度はアーク放電時間に影響する。加圧方法を錘とバネとし、加圧別に Fig.4-3-1 に加圧方法を錘で行ったものを示す。なお、本実験では 1 つの条件を 10 回繰り返しで行った。Fig.4-3-1 その平均値を用いて放電時間と接触速度の関係を加圧力別に示した。同様に加圧方法をバネで行ったものを Fig.4-3-2 に示す。バネに得られた接触速度が遅くなるにつれて、放電時間が長くなっている。つまり接触速度が遅いほど線材と母材までの接触時間が長くなり、その分アーク放電時間も長くなるからであると考えられる。加圧力が 1N の接触速度が 0.1m/s と 0.2m/s の場合では他の加圧力よりも放電時間が長いという結果が得られた。これは線材から母材に接触する際にピンバイスが固定してあるレバーが微弱に振動し、速度に微小の時間差を生じさせているためと考えられる。加圧方法にバネを用いての結果では錘加圧のように加圧力 1N でみられる長い放電時間はみられなかった。アーク放電時間の変化と共に継手強度も変化する。加圧方法を錘とし、これを Fig.4-3-3 に示し、1 つの条件を 10 回行ったものの平均を用いた放電時間と同様に継手強度の平均の関係を加圧力別にし、それぞれの接触速度のプロットを分類して示した。同様に加圧方法をバネにしたものを Fig.4-3-4 に示す。加圧法がバネの場合でも放電時間とともに継手強度も変化する。加圧方法が錘については、加圧力別にそれぞれの加圧力で高い継手強度を示したのは、充電電圧、コンデンサ容量を最大限に大きくしたものを変化させずに 3ms から 5ms の放電時間のときに比較的高い継手強度が得られた。同様に加圧方法をバネとしたときも放電時間が 3ms から 5ms のときに比較的高い継手強度が得られた。加圧方法が錘、バネ同様にアーク放電時間が長すぎると、線材が接触するまでに線材への入熱量が大きくなり、線材が溶融してしまい、溶融部の凝固が始まり、十分な接合ができないと考え

られる。逆にアーク放電時間が短すぎると、線材に十分な加熱がなされず、線材が十分に溶融されないまま接触してしまうため、継手強度も低下すると考えられる。加圧方法が錘である場合は加圧力 3N については接触速度が変化しても継手強度に大きなばらつきが他の加圧力のものに比べて比較的小さいという結果が得られた。しかし速度の違いによる継手強度への影響はあるといえる。加圧方法が錘の場合の、接触速度と継手強度の関係を加圧力別に Fig.4-3-5 に示す。なお、継手強度に関しては 1 つの条件を 10 回繰り返したものの平均としたものを加圧力別に分けてプロットしてある。同様にバネでの加圧の場合の接触速度と継手強度の関係を加圧力別に Fig.4-3-6 に示す。錘加圧の場合は接触速度が 0.2m/s のときに、それぞれの加圧力で最大の継手強度が得られた。同様に加圧方法がバネの場合でも接触速度が 0.2m/s のときが比較的高い継手強度という結果が得られた。前述にも記してあるが、接触速度が放電時間に影響しているからだと考えられる。放電時間を調節するには線材の接触速度を変化させればよい。加圧にバネを用いると加圧力と同時に接触速度も増加してしまい、錘を使用すると加圧力を大きくなる反面、慣性モーメントが大きくなるので速度が遅くなってしまう。そこで前章で述べた通り、持ち上げ高さで落下・接触速度の調節を行った。

溶接後の線材と母材をみると、加圧や熱を帯びた影響により試験片形状が変化する。線材がコンデンサからの電荷の影響で加熱され、母材に接触する際に母材が溶融することに加え、加圧された線材が侵入すると、くぼみを生成される。

同時に試験片形状として設定してある長さ 25mm の線材はコンデンサからの電荷によって入熱することによって線材が溶融し、長さが減少する。くぼみ深さの大小にも条件があり、関係しているのは線材が母材に対しての接触速度であると考え、そのときの放電時間と母材のくぼみ深さと線材の溶融量が継手強度におよぼす影響が重要と考えた。そこで、錘加圧の場合での放電時間の変化に伴って、くぼみ深さの変化の関係を加圧方法が錘の場合とバネの場合で繰り返し 10 回実験での平均値を用いて Fig.4-3-7、Fig.4-3-8 に示す。放電時間の増加に伴って、くぼみ深さも大きくなる。加圧力が 1N のときの接触速度が 0.1m/s と 0.2m/s という低速のときにだけ、くぼみ深さが小さくなるという結

果が顕著にみられる。加圧方法を錘およびバネの場合での放電時間と線材の溶融量の関係を繰り返し 10 回の実験の平均値を用いて Fig.4-3-9, Fig.4-3-10 に示す。錘加圧およびバネ加圧ともに放電時間が 3ms のときにおいて線材の溶融量が大きく、それ以降の時間に限っては下がっている傾向がみられた。錘加圧の結果からはそのようすが顕著にみられ、Fig.4-3-11 に線材の溶融量と継手強度の関係を示す。なお、1 条件を繰り返し 10 回の実験を行い、それぞれの平均値を用いた。

加圧方法が錘の場合での、くぼみ深さと継手強度の関係を Fig.4-3-12 に示す。くぼみ深さにおいて、接触速度が他の接触速度と相対的にみて 0.2m/s のときに加圧力別に最大の継手強度が得られた。加圧力 1N の場合のときは継手強度において、低い結果が得られた。加圧力が 1N から 4N という本研究での実験条件は低い加圧力の設定であるため、加圧力の影響はさほどないと考えられる。接触速度が継手強度におよぼす影響は大きいと考え、接触速度と因果関係がある放電時間部分と継手強度を検討するために、加圧方法が錘の場合での接触速度における各速の放電波形を Fig.4-3-13 に示す。このグラフからわかるように、やはり接触速度の増加に伴い放電時間が短くなっており、短くなるほど強度が低下する結果がえられた。一方、放電時間が長すぎても継手強度が低下する結果が得られた。加圧方法が錘の場合で加圧力 4N の各速度における放電波形を Fig.4-3-14 に示し、比較的良好な継手強度が得られたものを、繰り返し 10 回行った実験のデータの中から 1 つ抜粋したものを示した。加圧方法が錘およびバネの互いが接触速度 0.2m/s 条件下では、共に接触速度 0.2m/s の条件下より良好な継手強度は得られることは出来ず、継手強度は減少した。また、このときの加圧方法にバネを用い、加圧力 1N であり、接触速度が 0.1m/s～0.6m/s における放電波形を速度別に Fig.4-3-15 に示す。また、接触速度 0.2m/s 条件下での継手強度に対して、接触速度 0.3m/s 条件下と 0.1m/s での継手強度の減少(Fig.4-3-5, Fig.4-3-6 参照)は加圧方法にバネを用いた方が著しくみられ、これは各加圧方法で接触速度を同じにしても落下中の速度が異なることに原因があると考えられる。バネを用いた場合、錘を用いた場合に比べ落下中の加速度が大きいいため、同じ接触速度の条件下では、加圧方法にバネを用いた方が、若干放電時間が長くなると考えらえる。また、加圧に錘を用いた場合、接触速度

0.2m/s に対して、接触速度 0.3m/s での継手強度の減少は少なく、放電時間の関係から考えると接触速度 0.2m/s と 0.3m/s の間に更に良好な継手強度が得られる条件があるのではないかと予想される。また、これまでの結果で見られるように本実験方法で同じ速度かつ同じ加圧力で実験を行った場合、加圧方法が錘よりもバネを用いる方が良好な継手強度が得られる結果も、加圧方法の違いに原因があると考えられる。しかし、加圧方法に錘を用いた場合、錘をピンバイスの真上に設置したため、溶接時にピンバイスの運動量が大きくなり、ばらつきが出てしまい平均的に継手強度が低下してしまうと考えられる。そのため、錘を重くし回転軸方向に近づけることでより良好な継手強度が得られるのではないかと考えられる。本研究での最大継手強度は 336N であり Fig.4-3-14 中に示すそのときの溶接条件は接触速度が 0.2m/s であり加圧力は 4N であった。そのときの電圧波形を Fig.4-3-16 に示す。この条件でも繰り返し 10 回の溶接を行い、そのときの継手強度の平均値は約 265N であり、他の条件と比較しても顕著に高い継手強度であった。一方、継手強度が最も低い条件であったのが、接触速度が 0.1N であり、加圧力が 1N のものであった。その条件で最も継手強度が低かったものを加圧方法別に Fig.4-3-17 に示す。継手強度が高いものについては放電部分の時間が繰り返し 10 回実験を行った平均の値が約 3ms であるが、同様な繰り返し実験の結果で強度が低いものに関しては放電部分の時間が約 11ms というであった。放電時間に関係する接触速度の影響は継手強度を大きく変化させると考えられる。

4-4 加圧力の影響

線材はピンバイス支持レバーとピンバイスの重量による加圧、また条件により錘、バネによる加圧によって母材へと加圧されている。加圧力をかけることで線材を母材へ溶融金属を押し込み、良質な継手を得られると考えられる。そこで加圧力が継手強度に及ぼす影響について考察した。本実験では加圧力の調整としてバネを使う方法と、錘を使う方法を用いている。バネはバネ量りを用い、レバー回転軸よりも後方 60mm の位置に設置し、上方へと引っ張る。本実験ではバネによる加圧力を 1N から 4N の 4 種類と設定した。また接触速度一

定のグラフを加圧方法別にそれぞれ Fig.4-4-1, Fig.4-4-2 に示した。なお、1つの条件を 10 回繰り返した平均を用いた継手強度と加圧力を接触速度別に分類したものを示す。加圧方法が錘の場合では多少のばらつきがあるものの、加圧力が 1N のものは著しく継手強度が低い結果が得られた。錘での加圧方法の場合は接触速度が 0.1m/s と 0.2m/s のものにおいて著しく低い継手強度である結果が得られた。バネを用いて加圧した場合は、加圧力の増加に伴う継手強度の増加はあまり見られない。しかし、接触速度が 0.1m/s のものについては、継手強度にかなりの、ばらつきがあるといえる。加圧方法が錘の場合は接触速度が 0.1m/s の条件以外は接触速度が遅いほど継手強度が高いという結果が得られた。これは接触時間が遅すぎても継手強度は低下するが、接触時間が速すぎても継手強度が低下するといえる。バネの場合は全体の加圧力を与えてもほぼ一定値に収束し、平均値を見ると加圧力が 4 のときに、むしろ少し減少している。接触速度が 0.2m/s の場合が最も高い継手強度という結果が得られた。これは加圧力を上げる事でばらつきが生じているのが原因であると考えられる。このばらつきは同速度で加圧力を上げると接触する時の衝撃が大きくなることで生じていると考えられる。そのため、安定した継手強度を求める場合は必要以上の加圧は必要なく、低い加圧力での溶接が望ましいと考えられる。

また、加圧方法がバネの接触速度 0.1m/s の場合は加圧力の増加に伴う、継手強度の増加が多少見られる。これは落下速度が速いため、放電時間が短く、金属の溶融層が薄いため、加圧力が低いとまったく着かないが加圧力を上げる事で圧着することができると思われる。しかし線材の溶融される部分は 130° に研磨した先の部分だけであるため、さらに加圧力を上げててもそれほどの継手強度が得られないと考えられる。

第5章 結言

本実験の継手形状の場合、最大継手強度は約 336N である。この強度は鉄線の強度に匹敵する。一方、アルミニウムの強度から推定できる継手強度よりはるかに大きい。これは接合過程において鉄線がアルミニウム母材に貫入する継手形状の特徴に起因するものと考えられる。

線材と母材との接触速度の減少に伴ってアーク放電時間が増加し、継手強度が増大する。瀬触速度が 0.2m/s より小さくなると、アーク放電時間はさらに増加するが、継手強度は減少する。

線材の溶融量は加圧方法が放電時間の増加に伴って増加するが、放電時間が 3ms 以上になると溶融量は低下する。

線材の母材へのくぼみ深さは放電時間の増加に伴って増加する。ただし 1N の加圧を錘で行った場合は接触速度が 0.3m/s から 0.1m/s へ減少するときに放電時間が長くなるにも関わらず、くぼみ深さが減少する。

継手強度におよぼす、加圧力付与方法の影響を錘とバネで比較した方法の影響は認められない。ただし加圧力 1N で接触速度が小さい場合、錘加圧による継手強度はバネ加圧に比べて著しく低い結果となった。

継手強度におよぼす加圧力の影響は認められない。

参考文献

溶接学会：溶接技術の基礎

(参報出版)

荒田吉明：朝倉金属工学シリーズ 溶接工学

(中央出版)

井口信洋：溶接構造設計入門

(新日本印刷)

J. F. ランカスター：溶接アークの物理

(黒木出版)

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)

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工学研究科 鈴木実平教授、川上博士助教授、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工学部平成 18 年度卒業の岡本圭右君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。

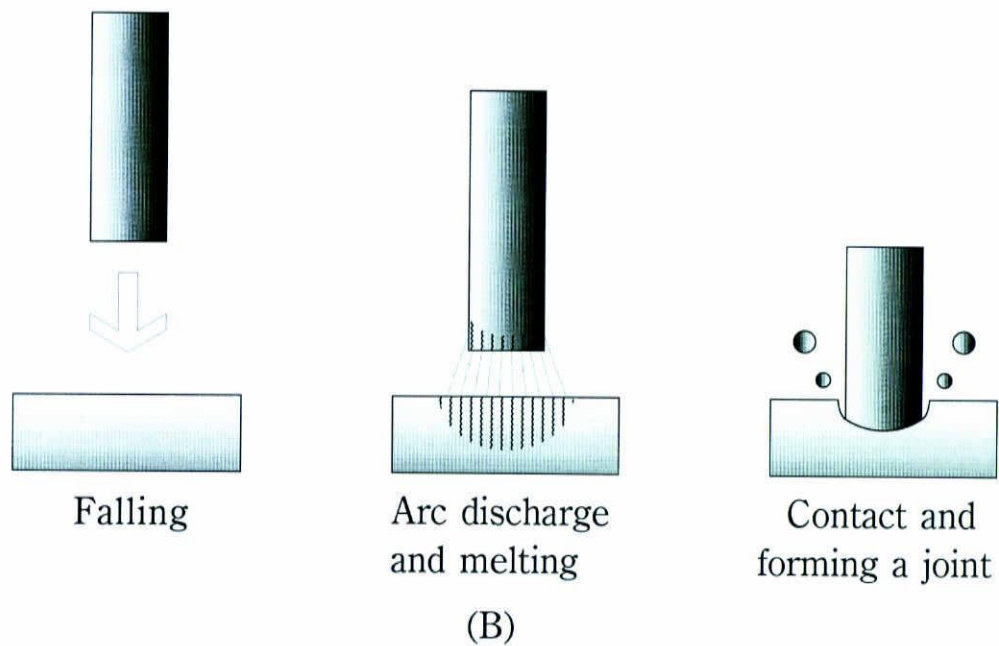
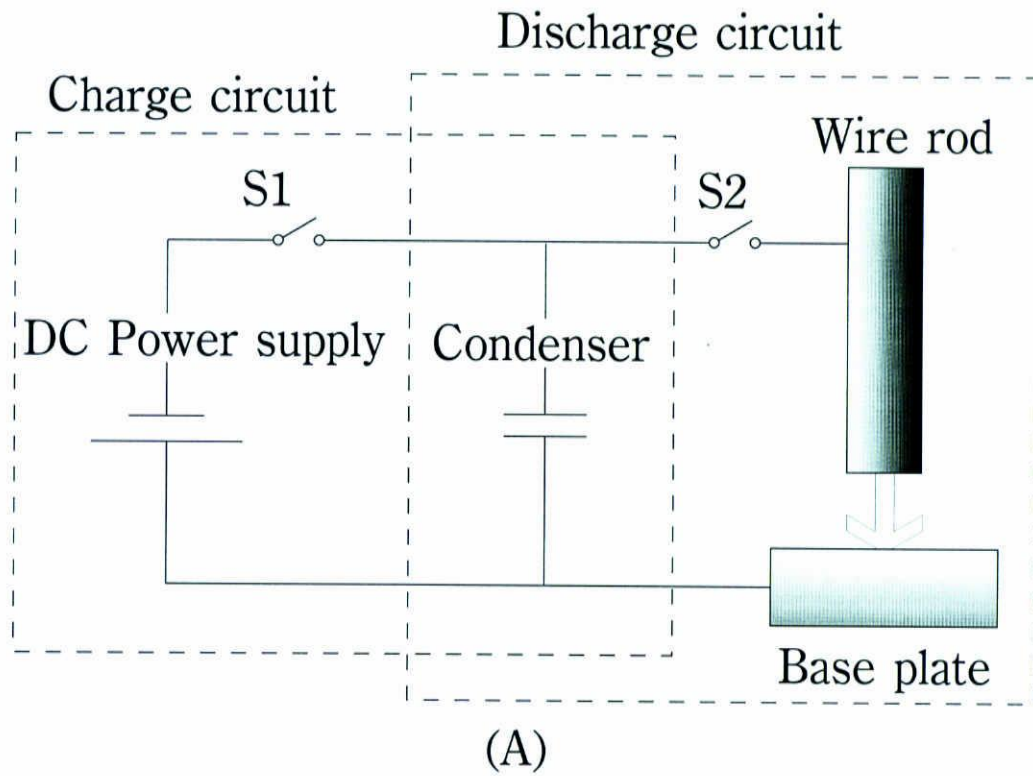
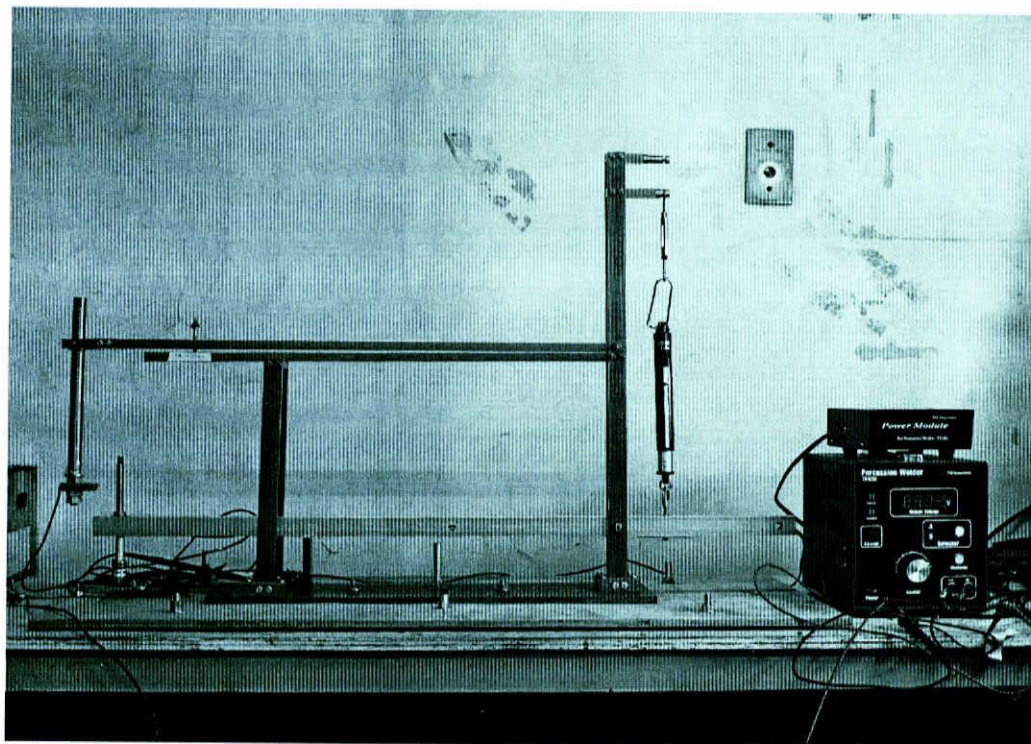
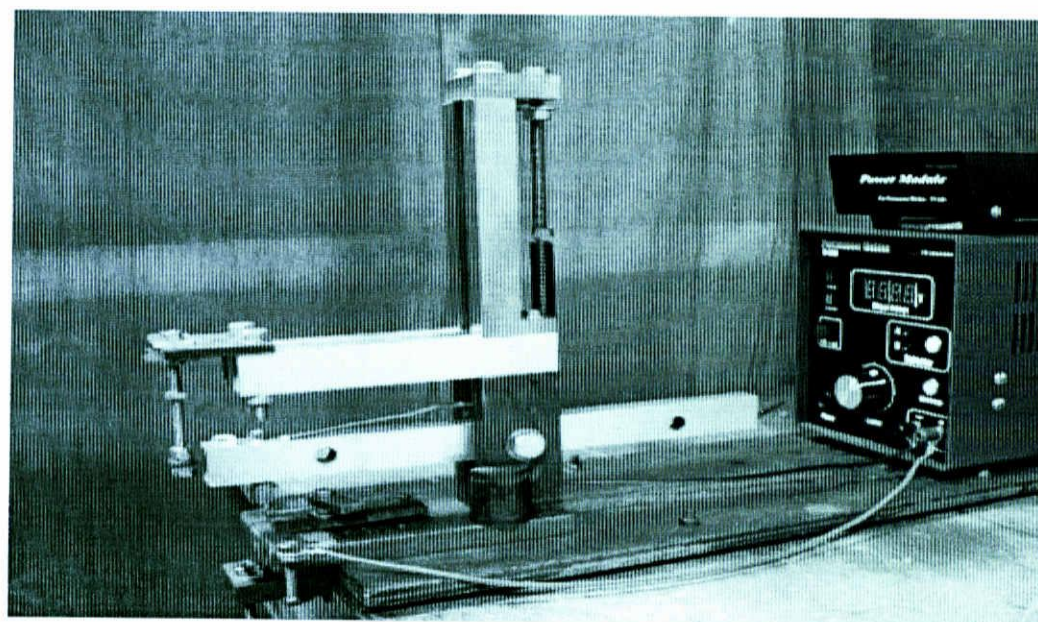


Fig.2-1-1 Brief description of percussion welding.

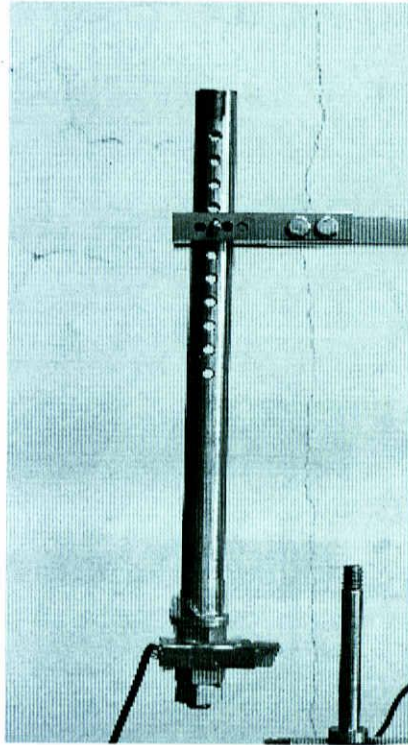


(A)

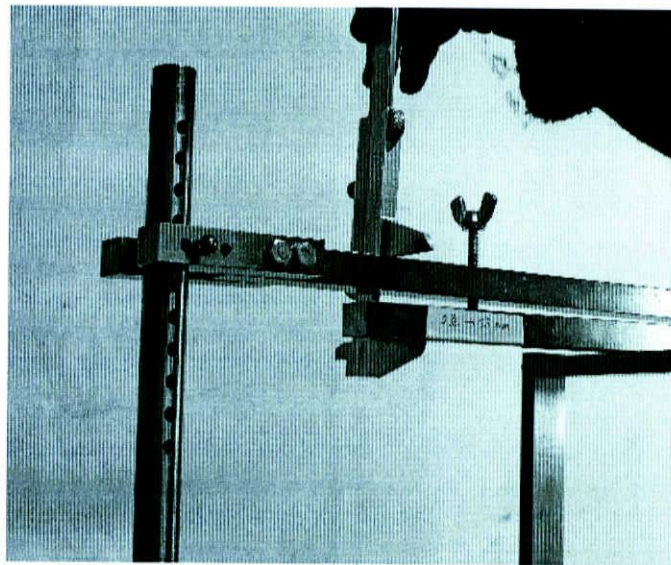


(B)

Fig. 2-2-1 Experimental apparatus.

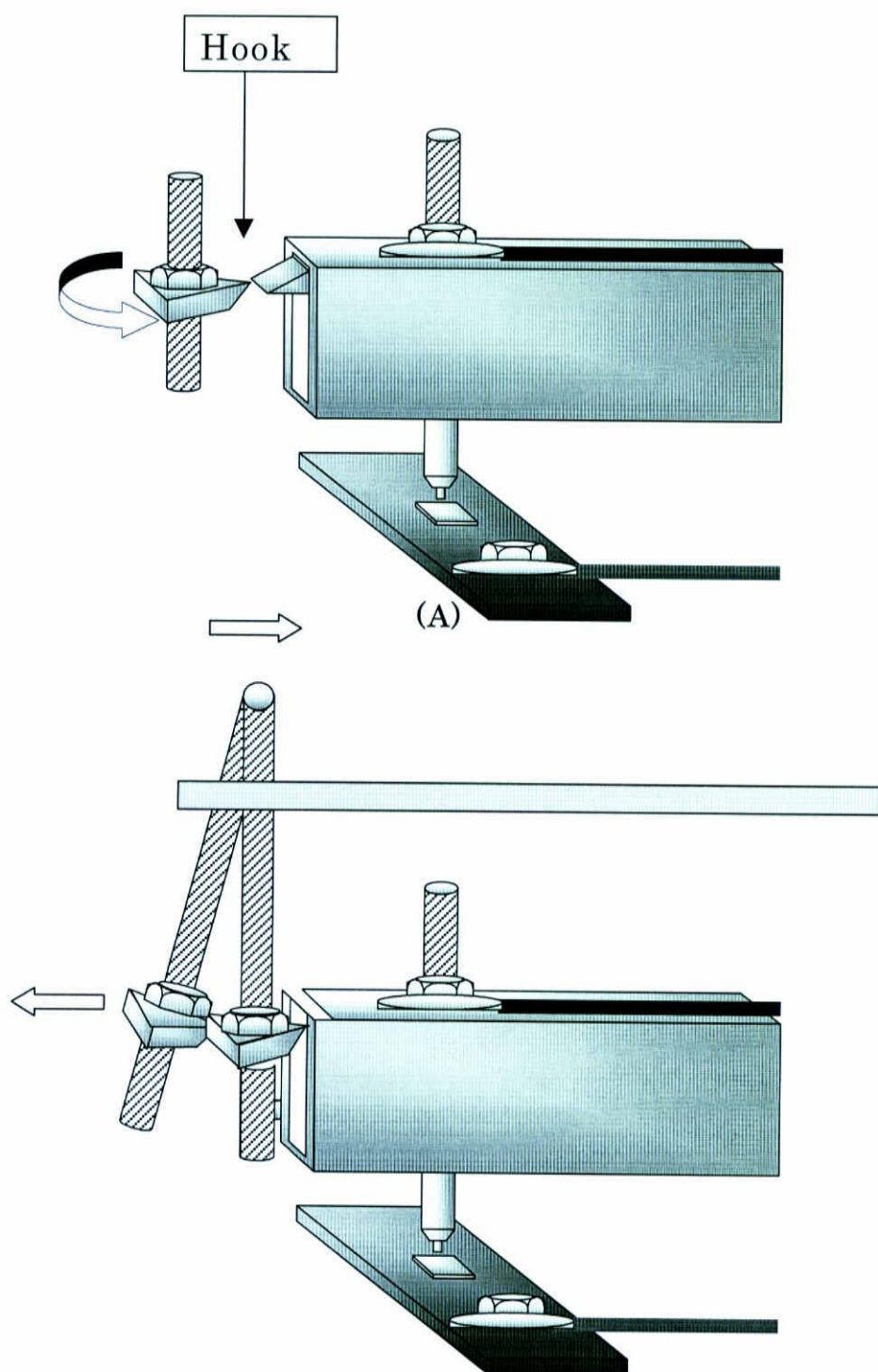


(A)



(B)

Fig. 2-2-2 Height control jig.



(B)Fig. 2-2-3 Hook

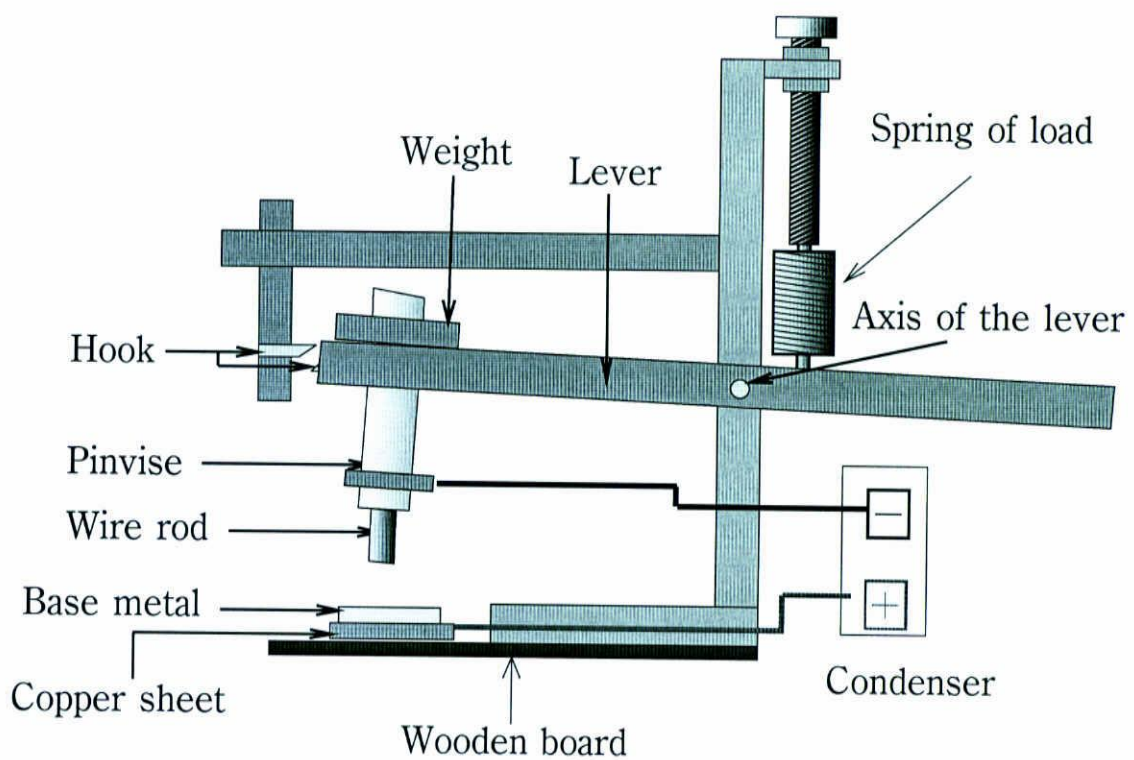


Fig.2-3-1 System of percussion welding.

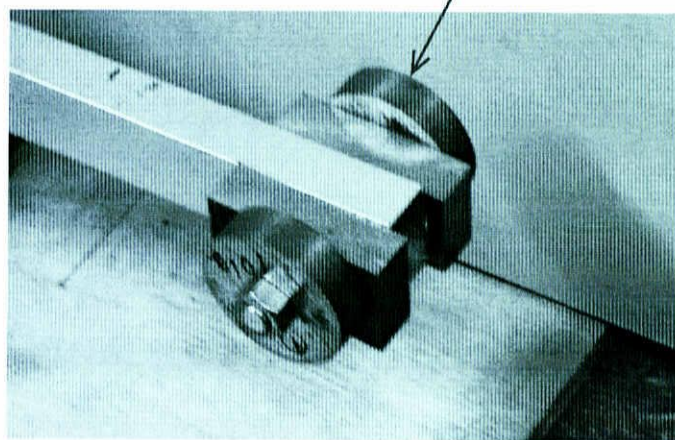
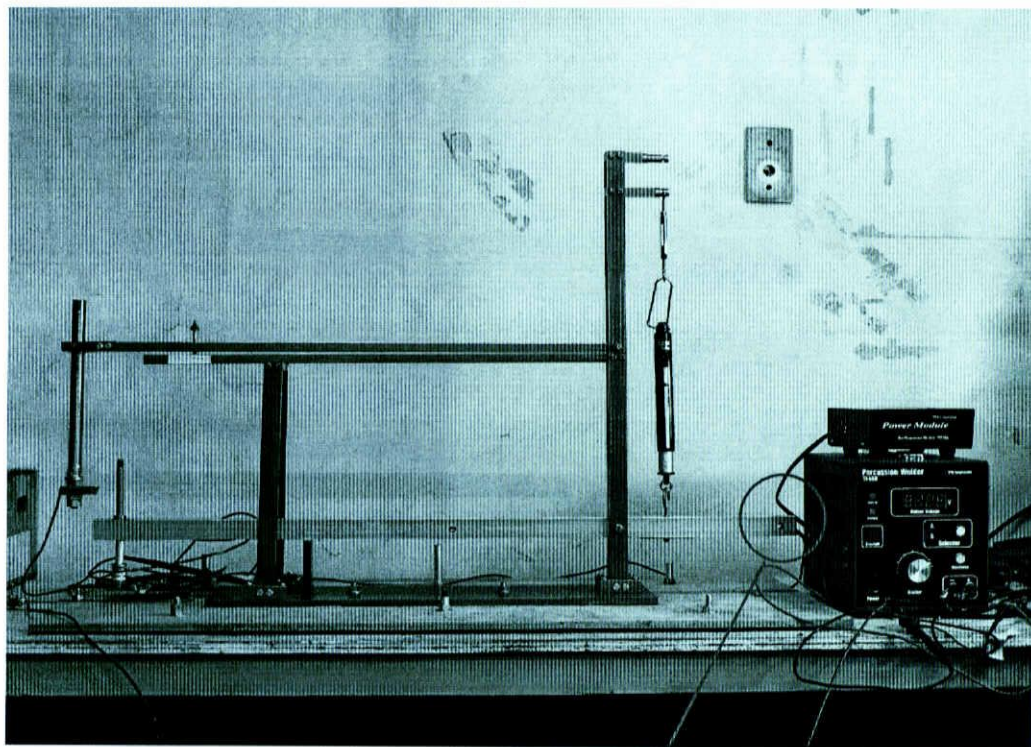


Fig.2-3-2 Weight set up on the back of lever for balance.

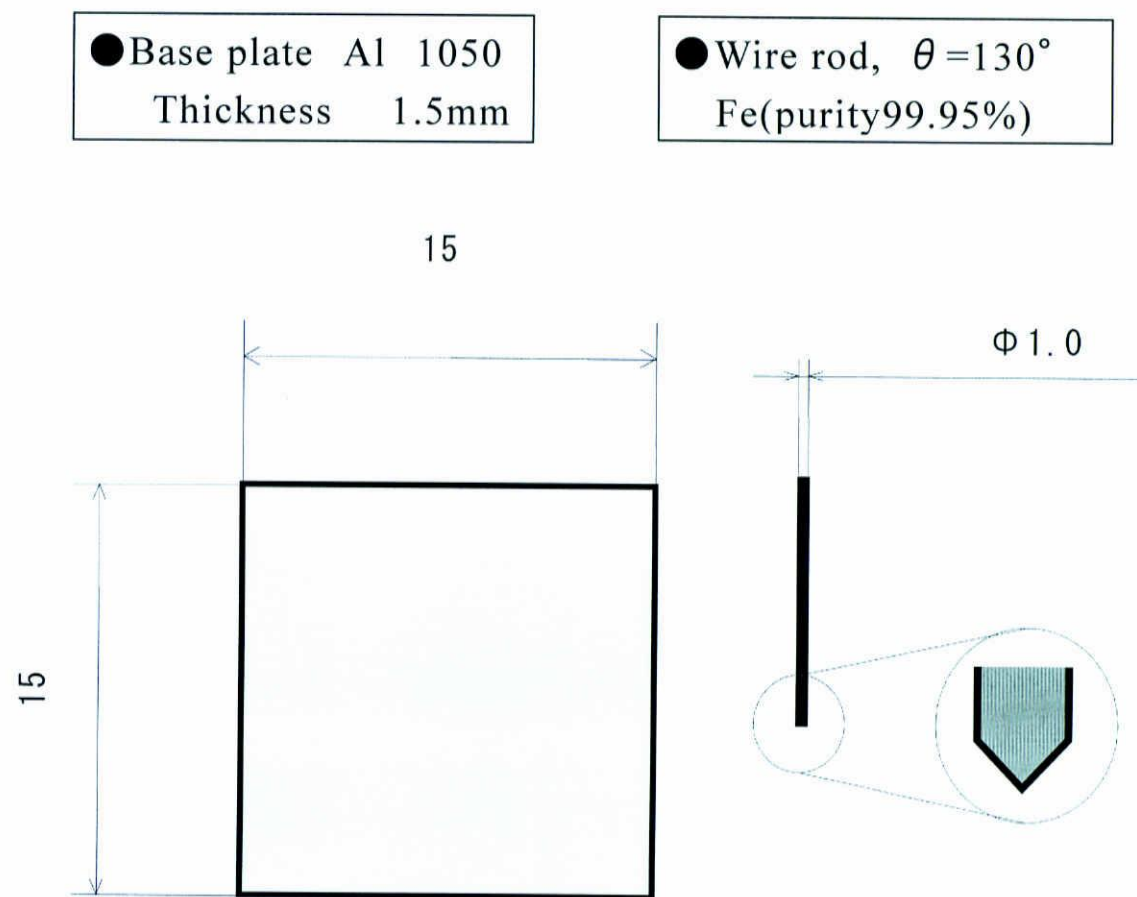


Fig.2-3-3 Base metal plate of shape and wire rod of shape.

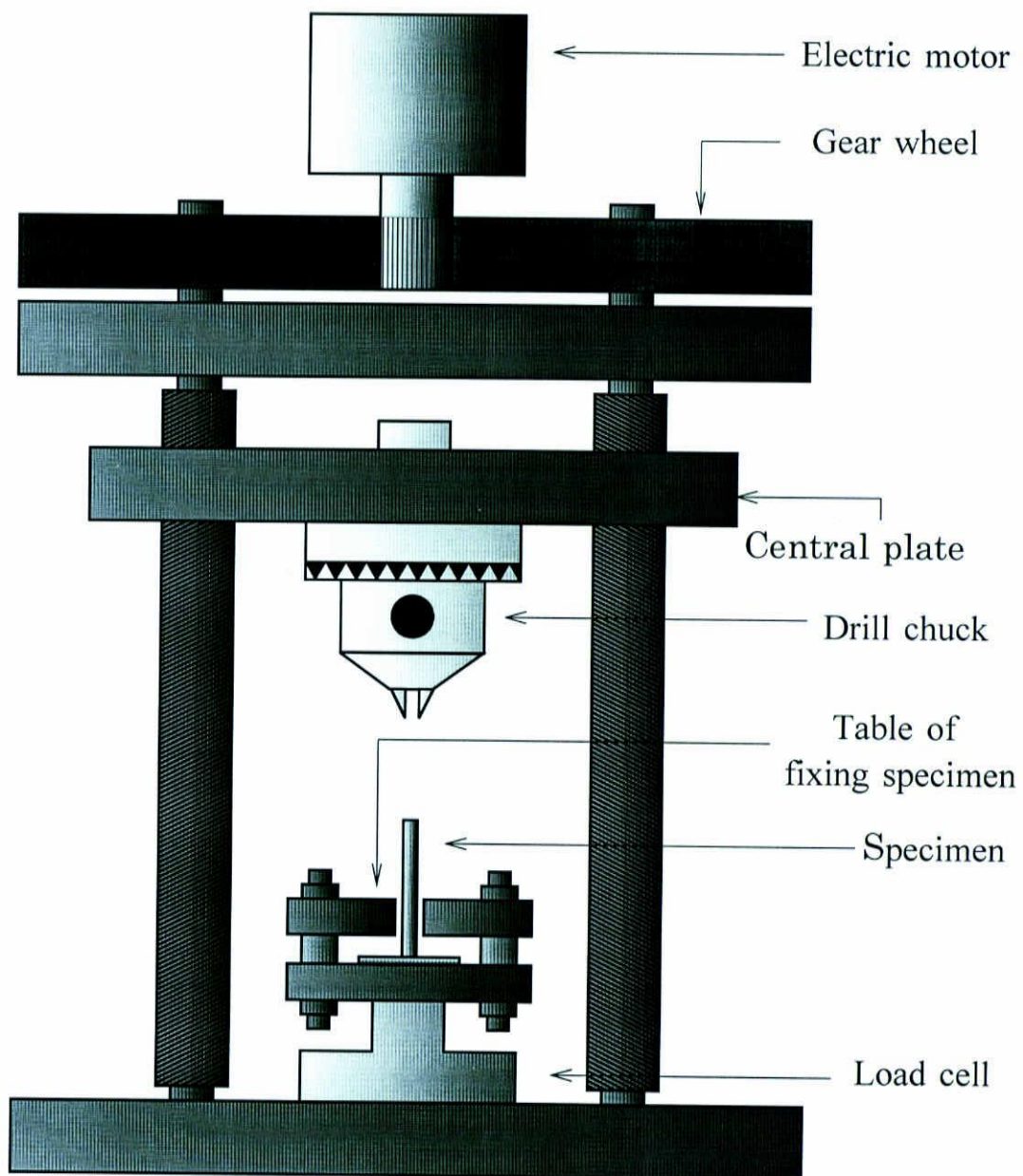
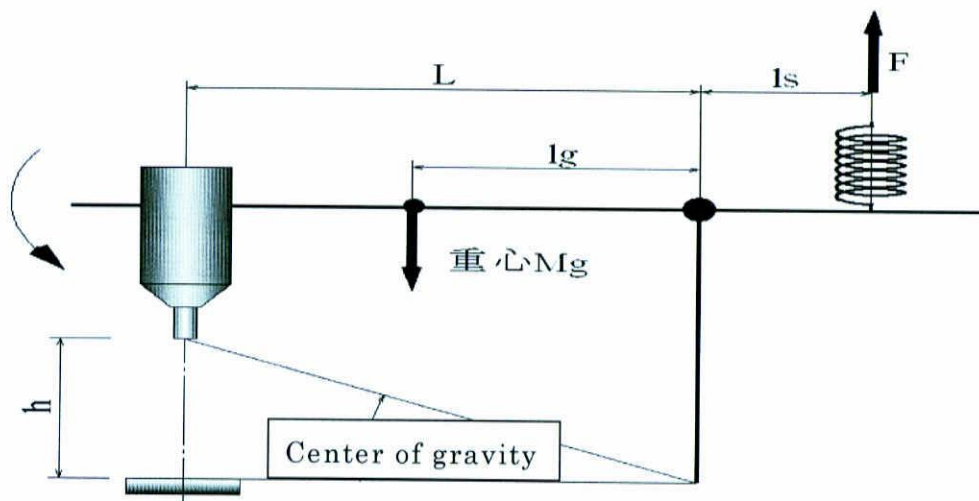


Fig.2-4-1 Tensile tester

Table 3-1-1 Constant for the contact velocity calculation.



Spring force	F (g)	102	204	306	408
Distance from the fulcrum to the spring	ls (mm)	60			
Mass of the lever	Mg (g)	238.4			
Distance from supporting point to the center of gravity	lg (mm)	205			
Distance from supporting point to wire	L (mm)	600			
Height of wire edge	h (mm)	range from 0 to 110			
Additional weight for welding force	Ma (g)	102	204	306	408
Distance from supporting point to additional weight	Lp (mm) = L	600			

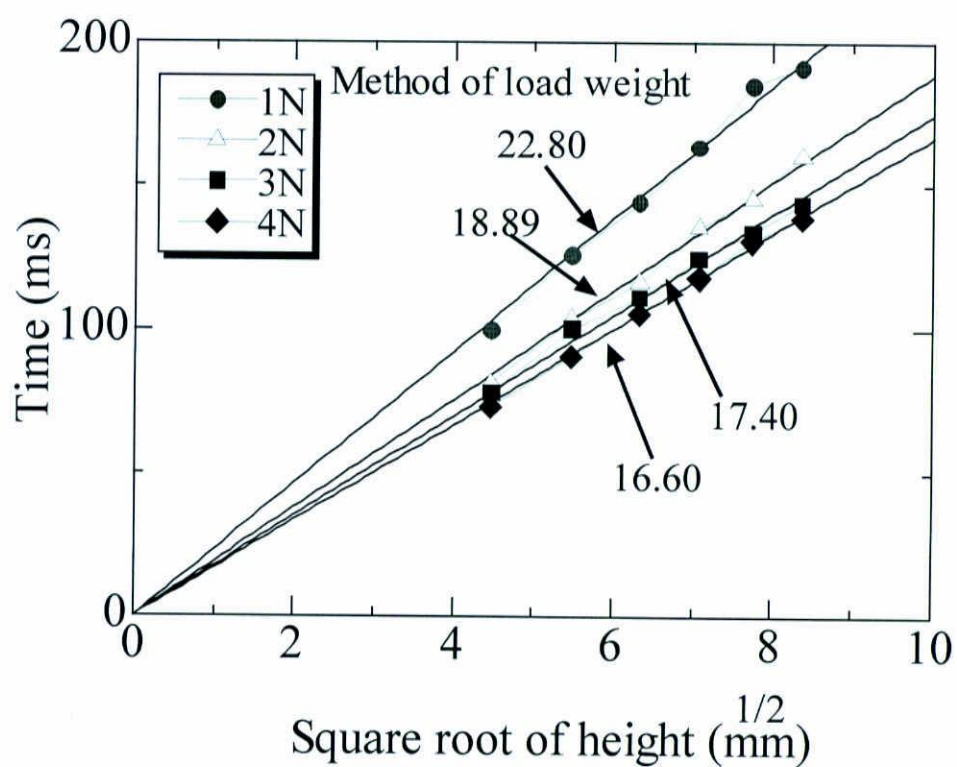


Fig.3-1-2 The thing that calculated a degree of leaning to welding load square root of height and time.

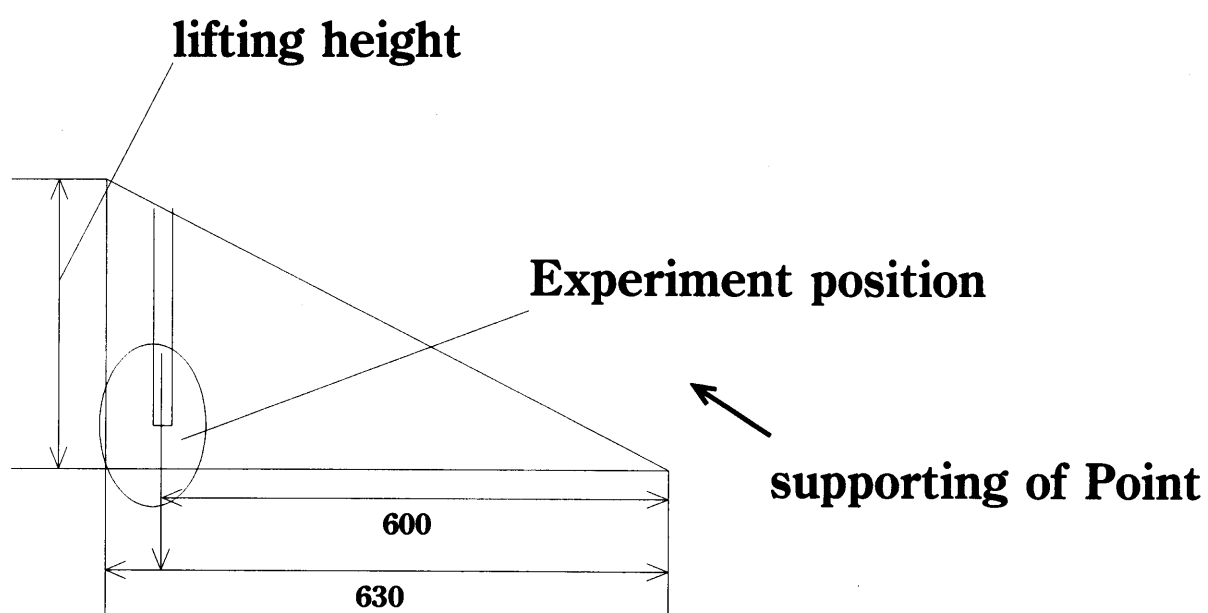


Fig.3-1-3 Position of ℓ_p and ℓ_z .

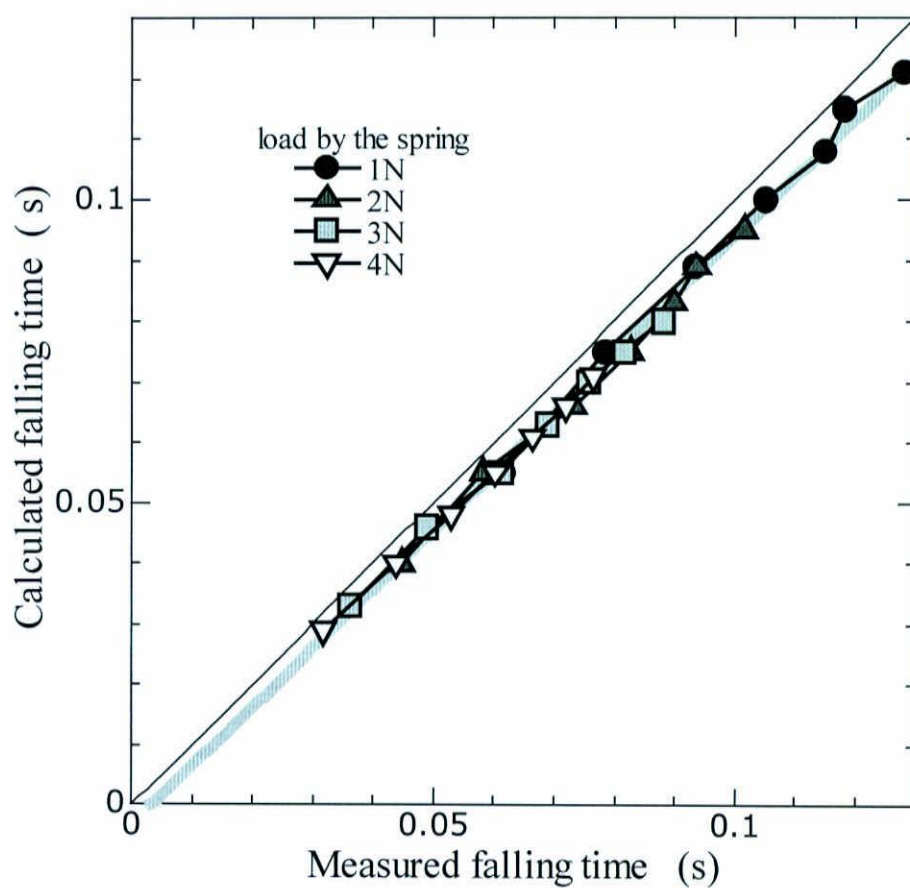


Fig.3-1-4 Relation of measured falling time in weight pressurization and calculated falling time.

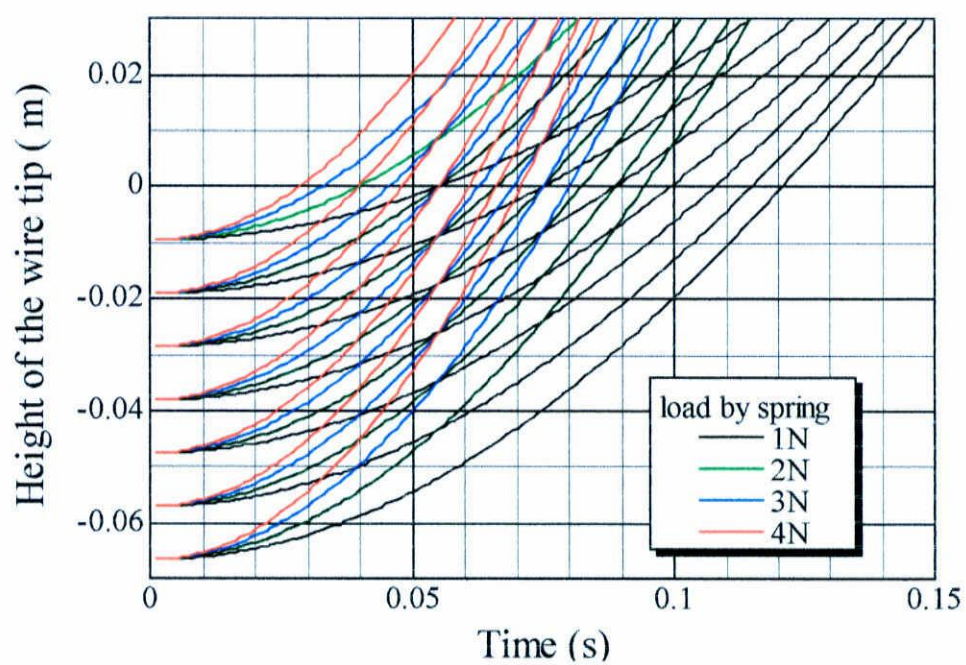


Fig.3-1-5 Relations of time and height of the wire tip.

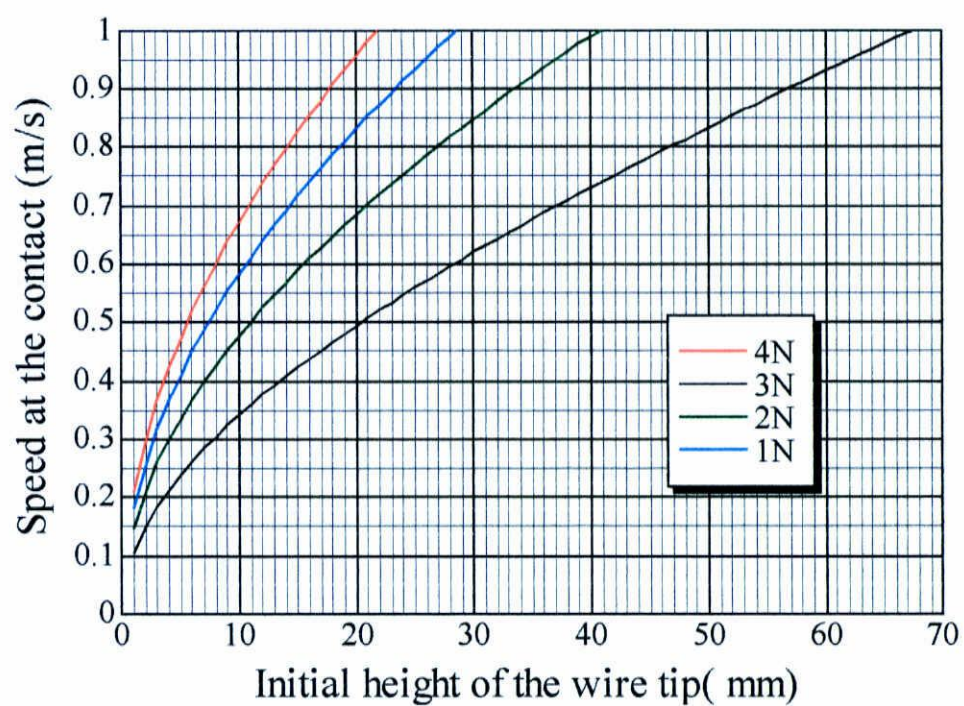


Fig.3-1-6 Relations of initial height of the wire tip and speed at the contact.

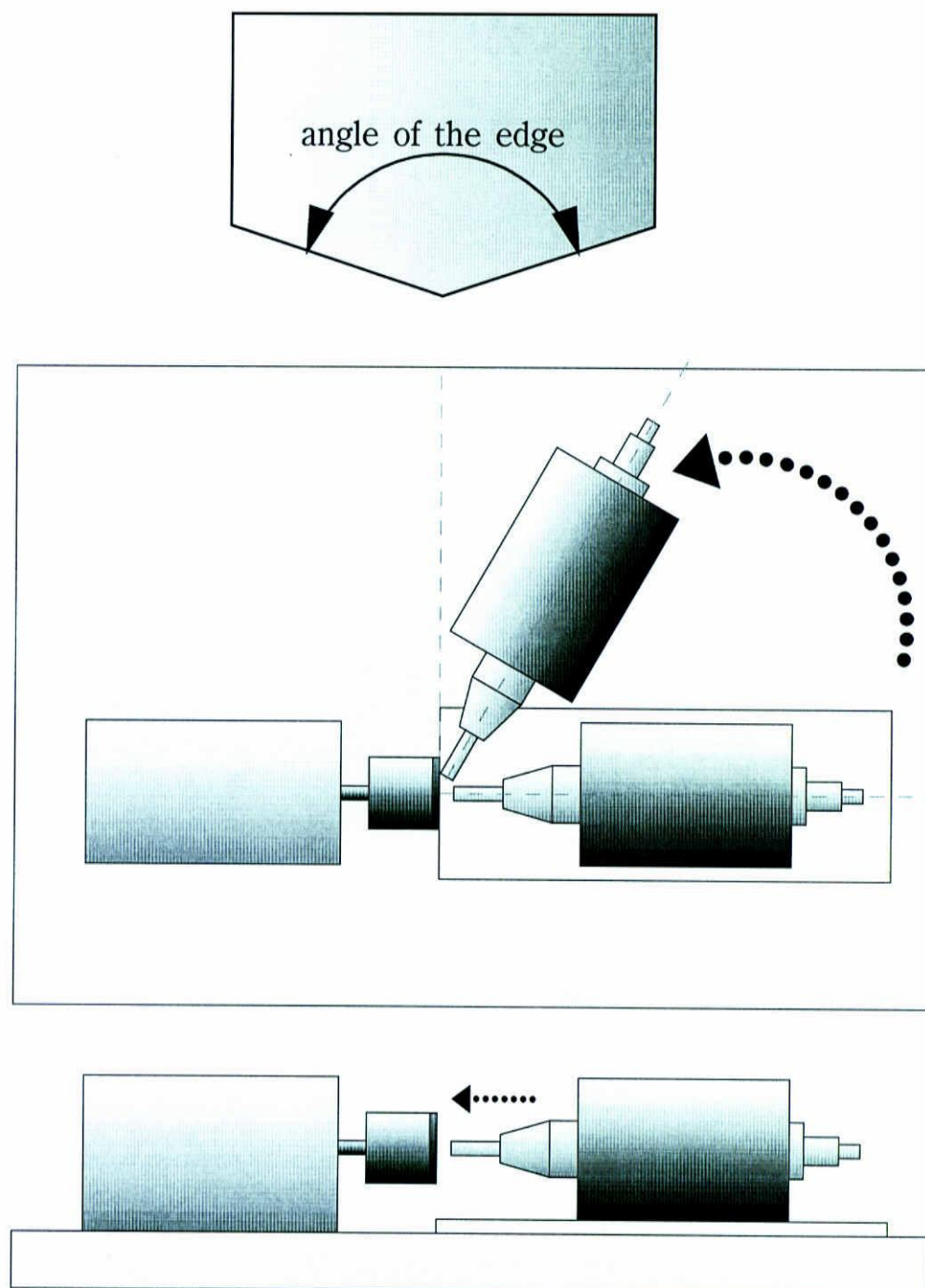


Fig.3-2-1 Device of angle lapping of metal tip.

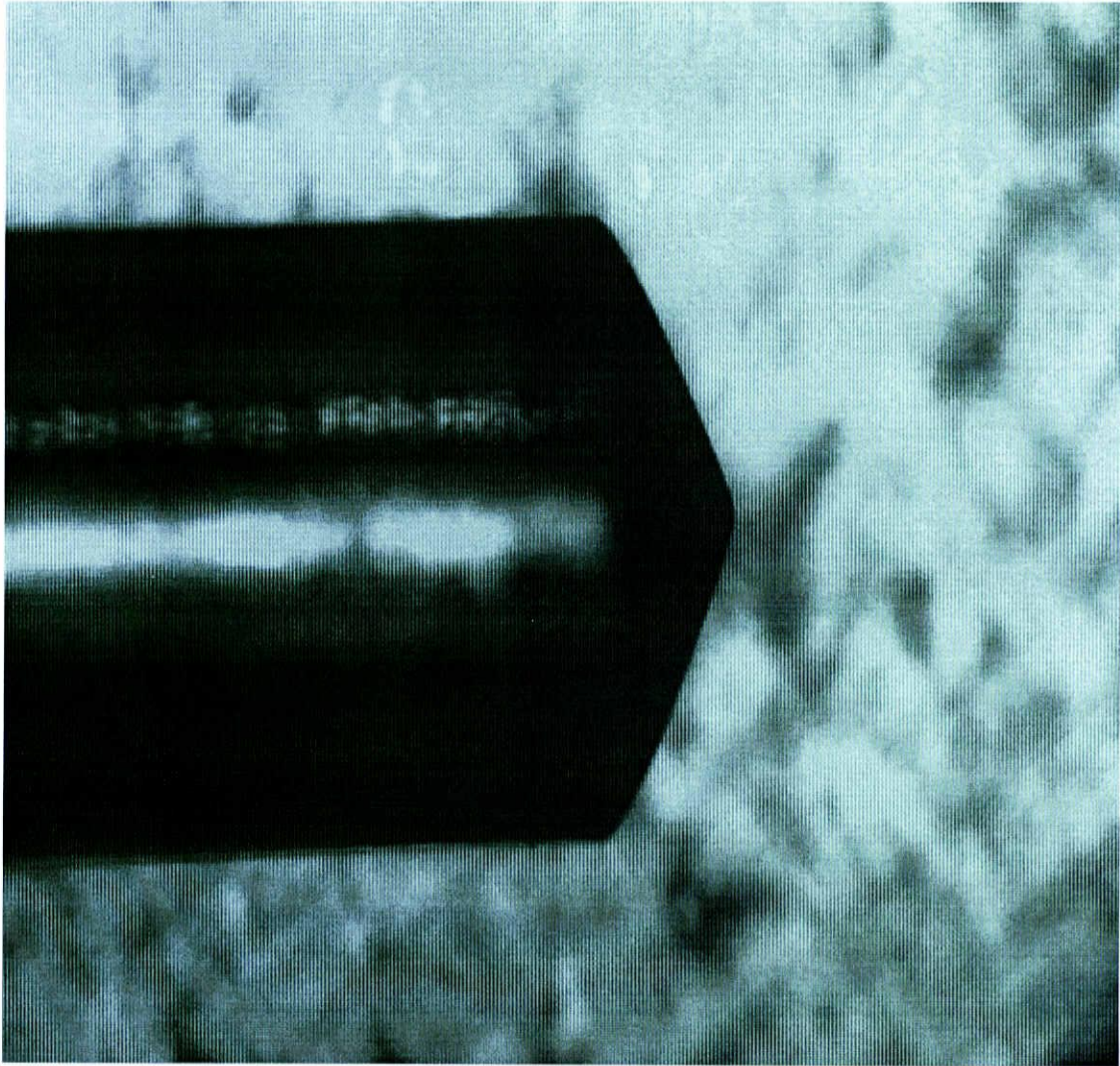


Fig.3-2-2 Angle of metal tip.

No weight and spring			
h(mm)	v(m/s)	h(mm)	v(m/s)
0.52	0.10	22.56	0.66
0.63	0.11	23.25	0.67
0.75	0.12	23.95	0.68
0.88	0.13	24.66	0.69
1.02	0.14	25.38	0.70
1.17	0.15	26.11	0.71
1.33	0.16	26.85	0.72
1.50	0.17	27.60	0.73
1.68	0.18	28.36	0.74
1.87	0.19	29.14	0.75
2.07	0.20	29.92	0.76
2.28	0.21	30.71	0.77
2.51	0.22	31.51	0.78
2.74	0.23	32.33	0.79
2.98	0.24	33.15	0.80
3.24	0.25	33.98	0.81
3.50	0.26	34.83	0.82
3.78	0.27	35.68	0.83
4.06	0.28	36.55	0.84
4.36	0.29	37.42	0.85
4.66	0.30	38.31	0.86
4.98	0.31	39.20	0.87
5.30	0.32	40.11	0.88
5.64	0.33	41.03	0.89
5.99	0.34	41.95	0.90
6.34	0.35	42.89	0.91
6.71	0.36	43.84	0.92
7.09	0.37	44.80	0.93
7.48	0.38	45.77	0.94
7.88	0.39	46.75	0.95
8.29	0.40	47.73	0.96
8.71	0.41	48.73	0.97
9.14	0.42	49.74	0.98
9.58	0.43	50.76	0.99
10.03	0.44	51.80	1.00
10.49	0.45	52.84	1.01
10.96	0.46	53.89	1.02
11.44	0.47	54.95	1.03
11.93	0.48	56.02	1.04
12.44	0.49	57.10	1.05
12.95	0.50	58.20	1.06
13.47	0.51	59.30	1.07
14.01	0.52	60.41	1.08
14.55	0.53	61.54	1.09
15.10	0.54	62.67	1.10
15.67	0.55	63.82	1.11
16.24	0.56	64.97	1.12
16.83	0.57	66.14	1.13
17.42	0.58	67.31	1.14
18.03	0.59	68.50	1.15
18.65	0.60	69.70	1.16
19.27	0.61	70.90	1.17
19.91	0.62	72.12	1.18
20.56	0.63	73.35	1.19
21.22	0.64	74.59	1.20
21.88	0.65	75.83	1.21

Weight 40g			
h(mm)	v(m/s)	h(mm)	v(m/s)
0.52	0.10	22.66	0.66
0.63	0.11	23.35	0.67
0.75	0.12	24.05	0.68
0.88	0.13	24.77	0.69
1.02	0.14	25.49	0.70
1.17	0.15	26.22	0.71
1.33	0.16	26.97	0.72
1.50	0.17	27.72	0.73
1.69	0.18	28.49	0.74
1.88	0.19	29.26	0.75
2.08	0.20	30.05	0.76
2.29	0.21	30.84	0.77
2.52	0.22	31.65	0.78
2.75	0.23	32.47	0.79
3.00	0.24	33.29	0.80
3.25	0.25	34.13	0.81
3.52	0.26	34.98	0.82
3.79	0.27	35.84	0.83
4.08	0.28	36.71	0.84
4.37	0.29	37.58	0.85
4.68	0.30	38.47	0.86
5.00	0.31	39.37	0.87
5.33	0.32	40.28	0.88
5.66	0.33	41.21	0.89
6.01	0.34	42.14	0.90
6.37	0.35	43.08	0.91
6.74	0.36	44.03	0.92
7.12	0.37	44.99	0.93
7.51	0.38	45.97	0.94
7.91	0.39	46.95	0.95
8.32	0.40	47.94	0.96
8.74	0.41	48.95	0.97
9.18	0.42	49.96	0.98
9.62	0.43	50.98	0.99
10.07	0.44	52.02	1.00
10.53	0.45	53.07	1.01
11.01	0.46	54.12	1.02
11.49	0.47	55.19	1.03
11.99	0.48	56.26	1.04
12.49	0.49	57.35	1.05
13.01	0.50	58.45	1.06
13.53	0.51	59.56	1.07
14.07	0.52	60.68	1.08
14.61	0.53	61.81	1.09
15.17	0.54	62.94	1.10
15.74	0.55	64.09	1.11
16.31	0.56	65.25	1.12
16.90	0.57	66.42	1.13
17.50	0.58	67.61	1.14
18.11	0.59	68.80	1.15
18.73	0.60	70.00	1.16
19.36	0.61	71.21	1.17
20.00	0.62	72.43	1.18
20.65	0.63	73.67	1.19
21.31	0.64	74.91	1.20
21.98	0.65	76.16	1.21

Fig.3-2-3 Relationship between lifting height and contact velocity.

Weight 240 g			
h (m m)	v (m / s)	h (m m)	v (m / s)
0.53	0.10	23.00	0.66
0.64	0.11	23.70	0.67
0.76	0.12	24.42	0.68
0.89	0.13	25.14	0.69
1.03	0.14	25.87	0.70
1.19	0.15	26.62	0.71
1.35	0.16	27.37	0.72
1.53	0.17	28.14	0.73
1.71	0.18	28.91	0.74
1.91	0.19	29.70	0.75
2.11	0.20	30.50	0.76
2.33	0.21	31.31	0.77
2.56	0.22	32.13	0.78
2.79	0.23	32.95	0.79
3.04	0.24	33.79	0.80
3.30	0.25	34.64	0.81
3.57	0.26	35.50	0.82
3.85	0.27	36.38	0.83
4.14	0.28	37.26	0.84
4.44	0.29	38.15	0.85
4.75	0.30	39.05	0.86
5.07	0.31	39.97	0.87
5.41	0.32	40.89	0.88
5.75	0.33	41.82	0.89
6.10	0.34	42.77	0.90
6.47	0.35	43.73	0.91
6.84	0.36	44.69	0.92
7.23	0.37	45.67	0.93
7.62	0.38	46.66	0.94
8.03	0.39	47.65	0.95
8.45	0.40	48.66	0.96
8.88	0.41	49.68	0.97
9.31	0.42	50.71	0.98
9.76	0.43	51.75	0.99
10.22	0.44	52.80	1.00
10.69	0.45	53.86	1.01
11.17	0.46	54.94	1.02
11.66	0.47	56.02	1.03
12.17	0.48	57.11	1.04
12.68	0.49	58.21	1.05
13.20	0.50	59.33	1.06
13.73	0.51	60.45	1.07
14.28	0.52	61.59	1.08
14.83	0.53	62.73	1.09
15.40	0.54	63.89	1.10
15.97	0.55	65.06	1.11
16.56	0.56	66.24	1.12
17.16	0.57	67.42	1.13
17.76	0.58	68.62	1.14
18.38	0.59	69.83	1.15
19.01	0.60	71.05	1.16
19.65	0.61	72.28	1.17
20.30	0.62	73.52	1.18
20.96	0.63	74.77	1.19
21.63	0.64	76.04	1.20
22.31	0.65	77.31	1.21

Weight 440 g			
h (m m)	v (m / s)	h (m m)	v (m / s)
0.53	0.10	23.00	0.66
0.64	0.11	23.71	0.67
0.76	0.12	24.42	0.68
0.89	0.13	25.14	0.69
1.04	0.14	25.88	0.70
1.19	0.15	26.62	0.71
1.35	0.16	27.38	0.72
1.53	0.17	28.14	0.73
1.71	0.18	28.92	0.74
1.91	0.19	29.71	0.75
2.11	0.20	30.50	0.76
2.33	0.21	31.31	0.77
2.56	0.22	32.13	0.78
2.79	0.23	32.96	0.79
3.04	0.24	33.80	0.80
3.30	0.25	34.65	0.81
3.57	0.26	35.51	0.82
3.85	0.27	36.38	0.83
4.14	0.28	37.26	0.84
4.44	0.29	38.15	0.85
4.75	0.30	39.06	0.86
5.07	0.31	39.97	0.87
5.41	0.32	40.90	0.88
5.75	0.33	41.83	0.89
6.10	0.34	42.78	0.90
6.47	0.35	43.73	0.91
6.84	0.36	44.70	0.92
7.23	0.37	45.67	0.93
7.63	0.38	46.66	0.94
8.03	0.39	47.66	0.95
8.45	0.40	48.67	0.96
8.88	0.41	49.69	0.97
9.32	0.42	50.72	0.98
9.76	0.43	51.76	0.99
10.22	0.44	52.81	1.00
10.69	0.45	53.87	1.01
11.17	0.46	54.94	1.02
11.67	0.47	56.03	1.03
12.17	0.48	57.12	1.04
12.68	0.49	58.22	1.05
13.20	0.50	59.34	1.06
13.74	0.51	60.46	1.07
14.28	0.52	61.60	1.08
14.83	0.53	62.74	1.09
15.40	0.54	63.90	1.10
15.97	0.55	65.07	1.11
16.56	0.56	66.24	1.12
17.16	0.57	67.43	1.13
17.77	0.58	68.63	1.14
18.38	0.59	69.84	1.15
19.01	0.60	71.06	1.16
19.65	0.61	72.29	1.17
20.30	0.62	73.53	1.18
20.96	0.63	74.78	1.19
21.63	0.64	76.05	1.20
22.31	0.65	77.32	1.21

Fig.3-2-4 Relationship between lifting height and contact velocity.

Spring force 400g				Spring force 2400g				Spring force 4400			
h(mm)	v(m/s)	h(mm)	v(m/s)	h(mm)	v(m/s)	h(mm)	v(m/s)	h(mm)	v(m/s)	h(mm)	v(m/s)
0.42	0.10	18.08	0.66	0.21	0.10	9.07	0.66	0.14	0.10	6.06	0.66
0.50	0.11	18.63	0.67	0.25	0.11	9.35	0.67	0.17	0.11	6.24	0.67
0.60	0.12	19.19	0.68	0.30	0.12	9.63	0.68	0.20	0.12	6.43	0.68
0.70	0.13	19.76	0.69	0.35	0.13	9.92	0.69	0.23	0.13	6.62	0.69
0.81	0.14	20.34	0.70	0.41	0.14	10.21	0.70	0.27	0.14	6.81	0.70
0.93	0.15	20.93	0.71	0.47	0.15	10.50	0.71	0.31	0.15	7.01	0.71
1.06	0.16	21.52	0.72	0.53	0.16	10.80	0.72	0.36	0.16	7.21	0.72
1.20	0.17	22.12	0.73	0.60	0.17	11.10	0.73	0.40	0.17	7.41	0.73
1.34	0.18	22.73	0.74	0.67	0.18	11.41	0.74	0.45	0.18	7.61	0.74
1.50	0.19	23.35	0.75	0.75	0.19	11.72	0.75	0.50	0.19	7.82	0.75
1.66	0.20	23.98	0.76	0.83	0.20	12.03	0.76	0.56	0.20	8.03	0.76
1.83	0.21	24.61	0.77	0.92	0.21	12.35	0.77	0.61	0.21	8.24	0.77
2.01	0.22	25.26	0.78	1.01	0.22	12.67	0.78	0.67	0.22	8.46	0.78
2.20	0.23	25.91	0.79	1.10	0.23	13.00	0.79	0.74	0.23	8.68	0.79
2.39	0.24	26.57	0.80	1.20	0.24	13.33	0.80	0.80	0.24	8.90	0.80
2.59	0.25	27.24	0.81	1.30	0.25	13.67	0.81	0.87	0.25	9.12	0.81
2.81	0.26	27.91	0.82	1.41	0.26	14.01	0.82	0.94	0.26	9.35	0.82
3.03	0.27	28.60	0.83	1.52	0.27	14.35	0.83	1.01	0.27	9.58	0.83
3.25	0.28	29.29	0.84	1.63	0.28	14.70	0.84	1.09	0.28	9.81	0.84
3.40	0.29	29.99	0.85	1.75	0.29	15.05	0.85	1.17	0.29	10.05	0.85
3.74	0.30	30.70	0.86	1.87	0.30	15.41	0.86	1.25	0.30	10.28	0.86
3.99	0.31	31.42	0.87	2.00	0.31	15.77	0.87	1.34	0.31	10.52	0.87
4.25	0.32	32.15	0.88	2.13	0.32	16.13	0.88	1.42	0.32	10.77	0.88
4.52	0.33	32.88	0.89	2.27	0.33	16.50	0.89	1.51	0.33	11.01	0.89
4.80	0.34	33.62	0.90	2.41	0.34	16.87	0.90	1.61	0.34	11.26	0.90
5.09	0.35	34.38	0.91	2.55	0.35	17.25	0.91	1.70	0.35	11.51	0.91
5.38	0.36	35.14	0.92	2.70	0.36	17.63	0.92	1.80	0.36	11.77	0.92
5.68	0.37	35.90	0.93	2.85	0.37	18.02	0.93	1.90	0.37	12.03	0.93
5.99	0.38	36.68	0.94	3.01	0.38	18.41	0.94	2.01	0.38	12.29	0.94
6.31	0.39	37.46	0.95	3.17	0.39	18.80	0.95	2.11	0.39	12.55	0.95
6.64	0.40	38.26	0.96	3.33	0.40	19.20	0.96	2.22	0.40	12.81	0.96
6.98	0.41	39.06	0.97	3.50	0.41	19.60	0.97	2.34	0.41	13.08	0.97
7.32	0.42	39.87	0.98	3.67	0.42	20.01	0.98	2.45	0.42	13.35	0.98
7.68	0.43	40.69	0.99	3.85	0.43	20.42	0.99	2.57	0.43	13.63	0.99
8.04	0.44	41.51	1.00	4.03	0.44	20.83	1.00	2.69	0.44	13.90	1.00
8.41	0.45	42.35	1.01	4.22	0.45	21.25	1.01	2.82	0.45	14.18	1.01
8.78	0.46	43.19	1.02	4.41	0.46	21.67	1.02	2.94	0.46	14.47	1.02
9.17	0.47	44.04	1.03	4.60	0.47	22.10	1.03	3.07	0.47	14.75	1.03
9.56	0.48	44.90	1.04	4.80	0.48	22.53	1.04	3.20	0.48	15.04	1.04
9.97	0.49	45.77	1.05	5.00	0.49	22.97	1.05	3.34	0.49	15.33	1.05
10.38	0.50	46.64	1.06	5.21	0.50	23.41	1.06	3.48	0.50	15.62	1.06
10.80	0.51	47.53	1.07	5.42	0.51	23.85	1.07	3.62	0.51	15.92	1.07
11.22	0.52	48.42	1.08	5.63	0.52	24.30	1.08	3.76	0.52	16.22	1.08
11.66	0.53	49.32	1.09	5.85	0.53	24.75	1.09	3.91	0.53	16.52	1.09
12.10	0.54	50.23	1.10	6.07	0.54	25.21	1.10	4.05	0.54	16.82	1.10
12.56	0.55	51.15	1.11	6.30	0.55	25.67	1.11	4.21	0.55	17.13	1.11
13.02	0.56	52.07	1.12	6.53	0.56	26.13	1.12	4.36	0.56	17.44	1.12
13.49	0.57	53.01	1.13	6.77	0.57	26.60	1.13	4.52	0.57	17.75	1.13
13.96	0.58	53.95	1.14	7.01	0.58	27.07	1.14	4.68	0.58	18.07	1.14
14.45	0.59	54.90	1.15	7.25	0.59	27.55	1.15	4.84	0.59	18.39	1.15
14.94	0.60	55.86	1.16	7.50	0.60	28.03	1.16	5.01	0.60	18.71	1.16
15.45	0.61	56.82	1.17	7.75	0.61	28.52	1.17	5.17	0.61	19.03	1.17
15.96	0.62	57.80	1.18	8.01	0.62	29.00	1.18	5.34	0.62	19.36	1.18
16.48	0.63	58.78	1.19	8.27	0.63	29.50	1.19	5.52	0.63	19.69	1.19
17.00	0.64	59.78	1.20	8.53	0.64	30.00	1.20	5.70	0.64	20.02	1.20
17.54	0.65	60.78	1.21	8.80	0.65	30.50	1.21	5.87	0.65	20.36	1.21

Fig.3-2-5 Relationship between lifting height and contact velocity.

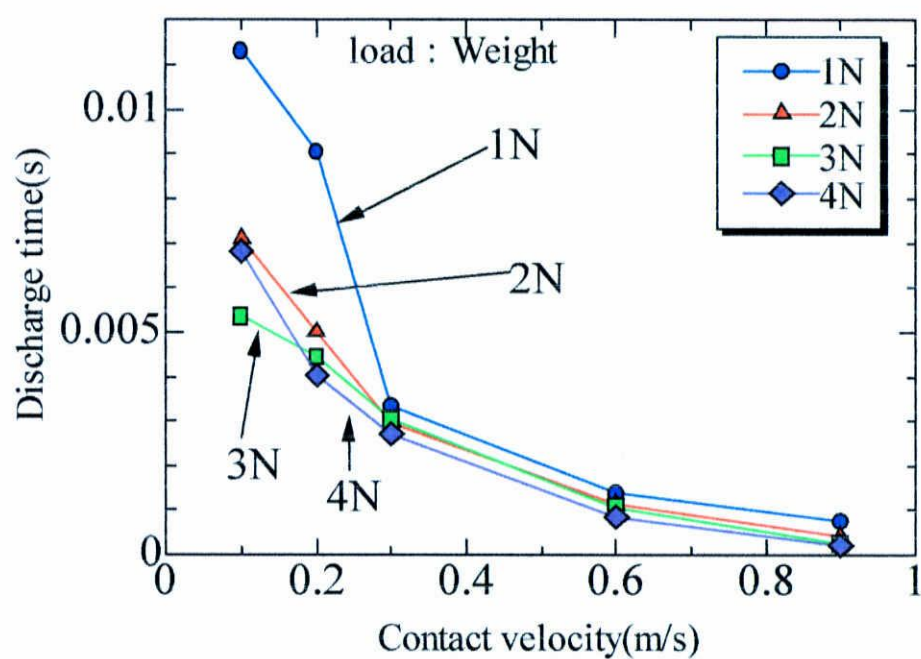


Fig.4-3-1 Influence contact velocity on the discharge time welded by using the weight.

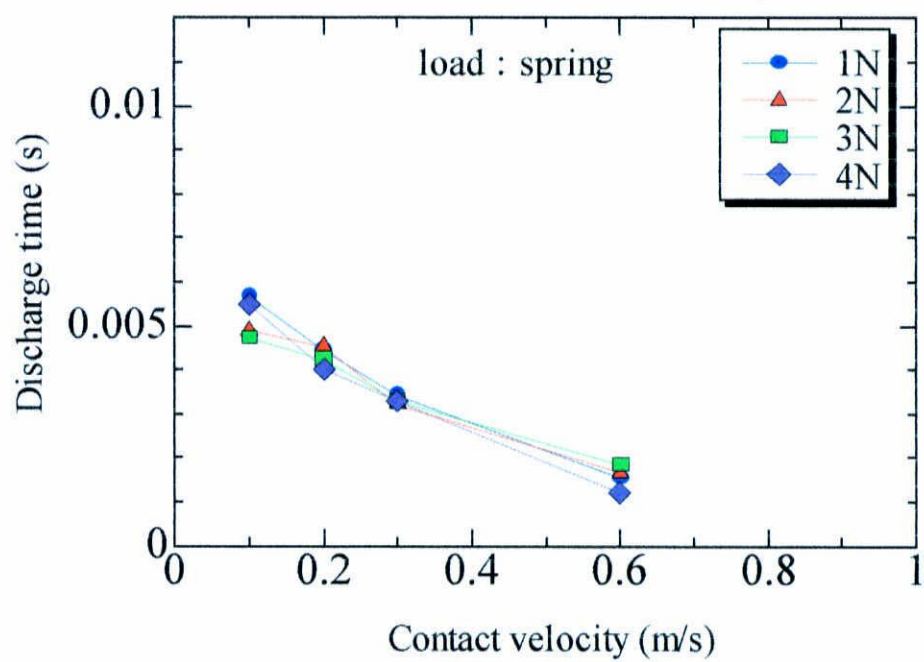


Fig.4-3-2 Influence contact velocity on the discharge time welded by using the spring.

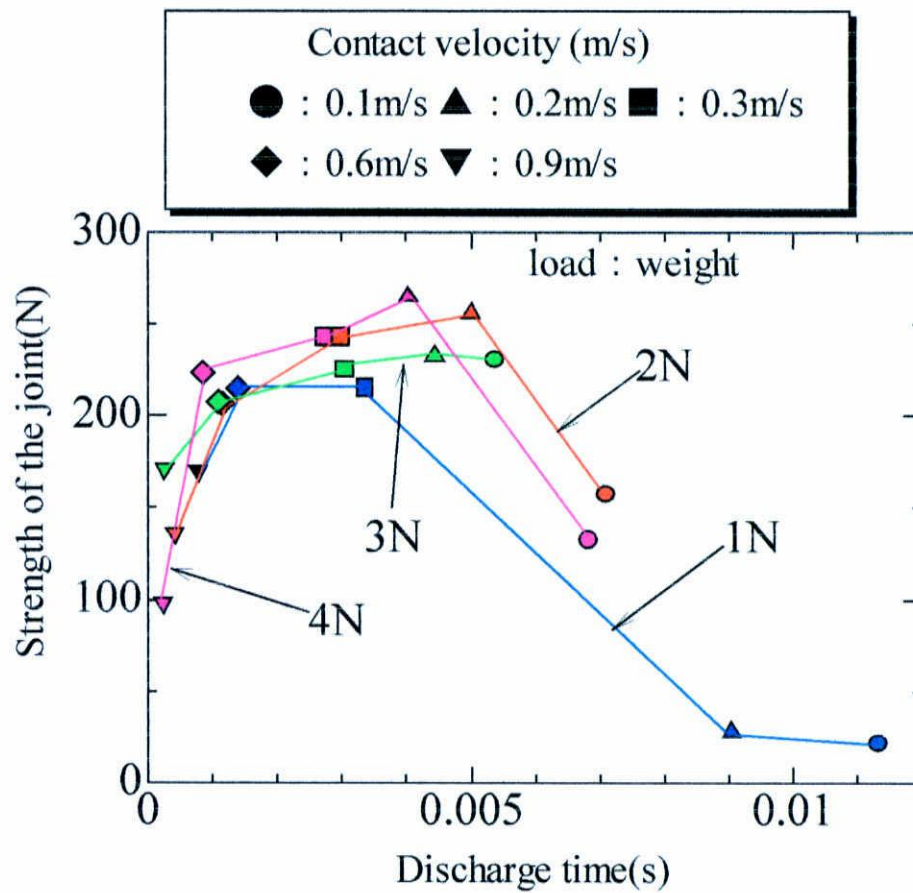


Fig.4-3-3 Influence discharge time on the strength of the joint welded by using the weight.

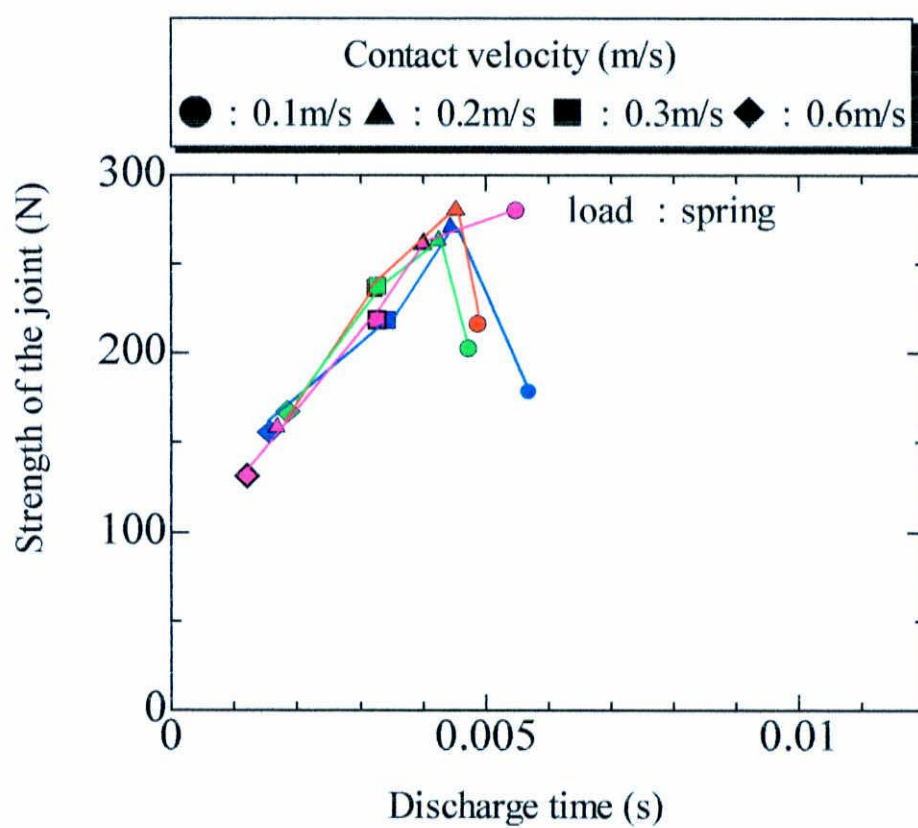


Fig.4-3-4 Influence discharge time on the strength of the joint welded by using the spring.

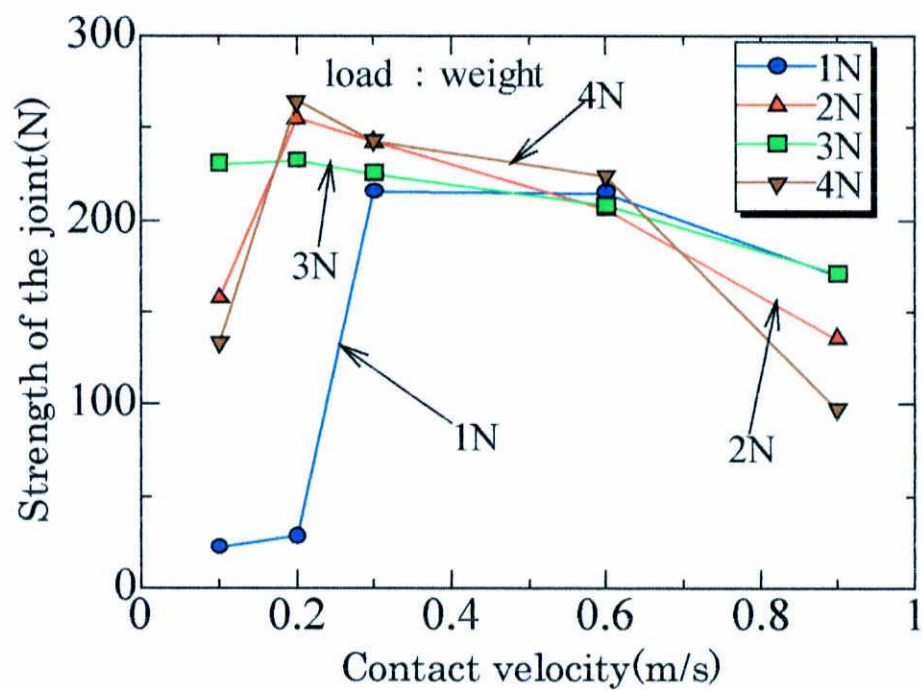


Fig.4-3-5 Influence contact velocity on the strength of the joint welded by using the weight.

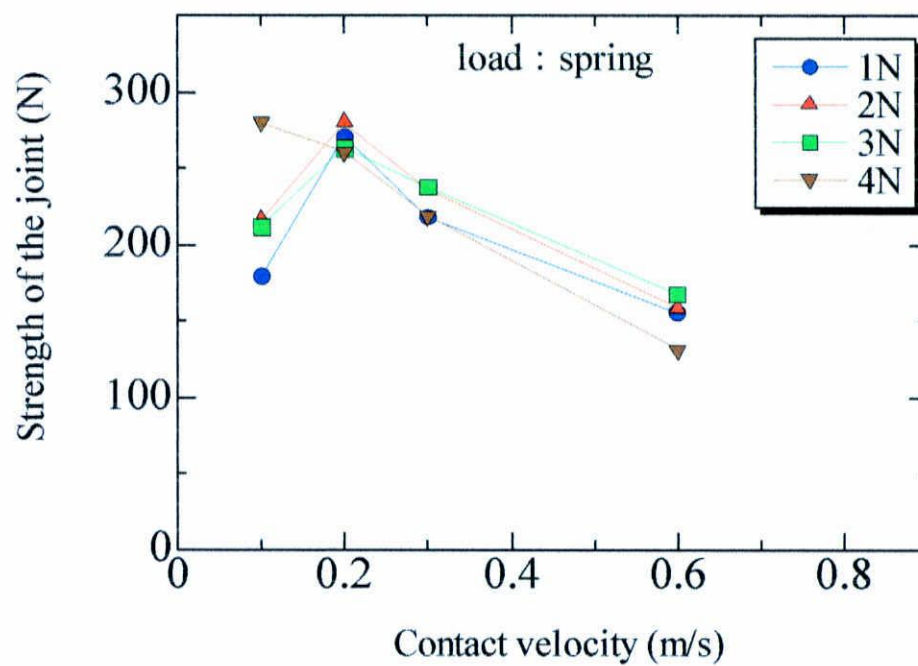


Fig.4-3-6 Influence contact velocity on the strength of the joint welded by using the spring.

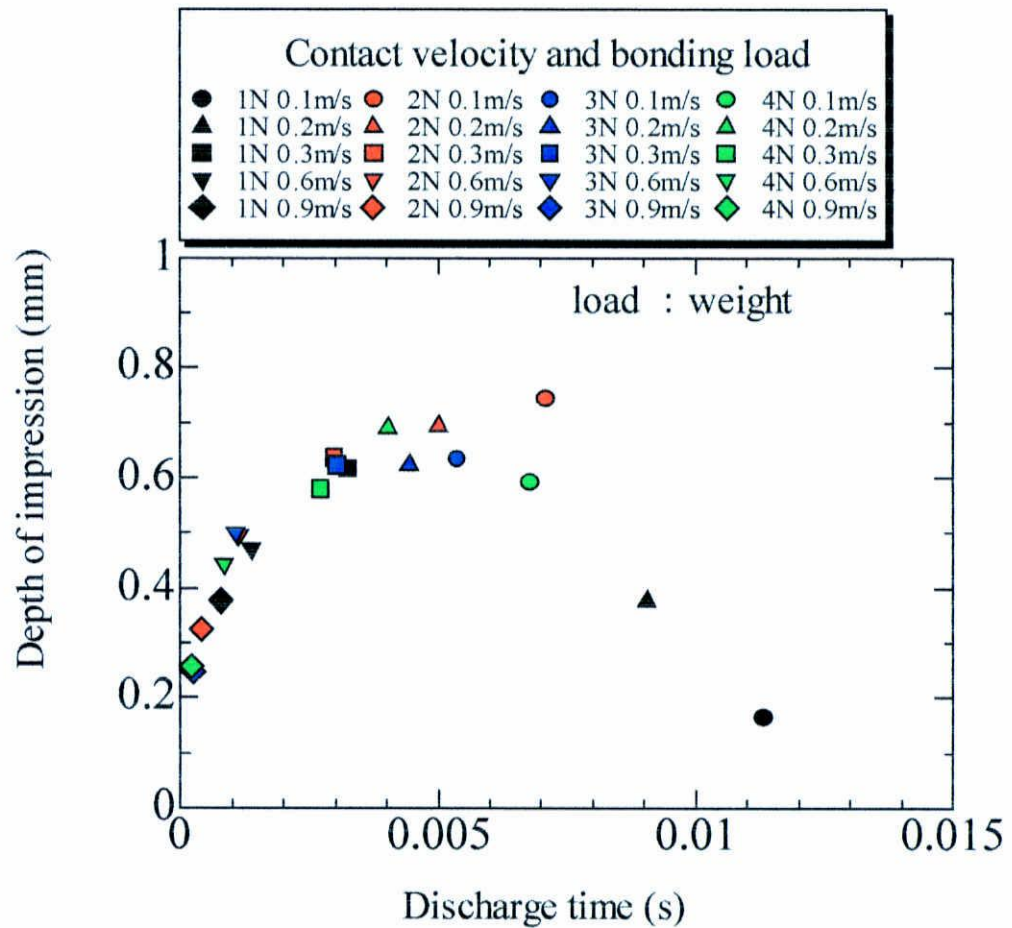


Fig.4-3-7 The relation between discharge time and depth of impression welded by using the weight.

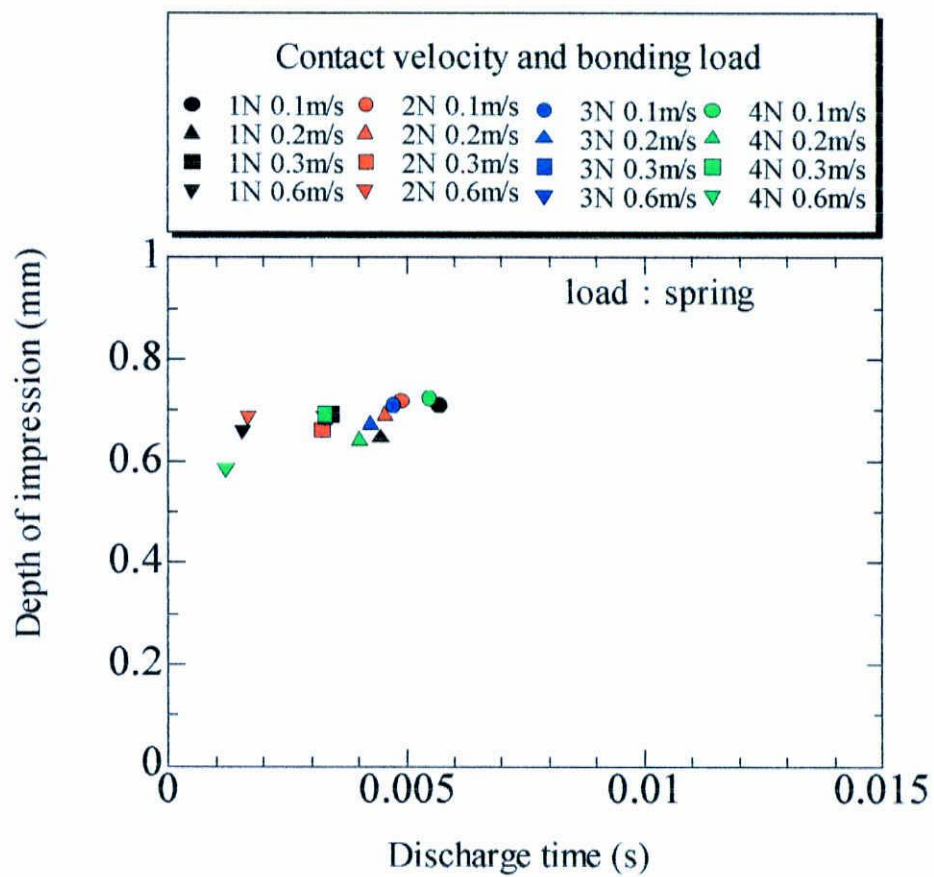


Fig.4-3-8 The relation between discharge time and depth of impression welded by using the spring.

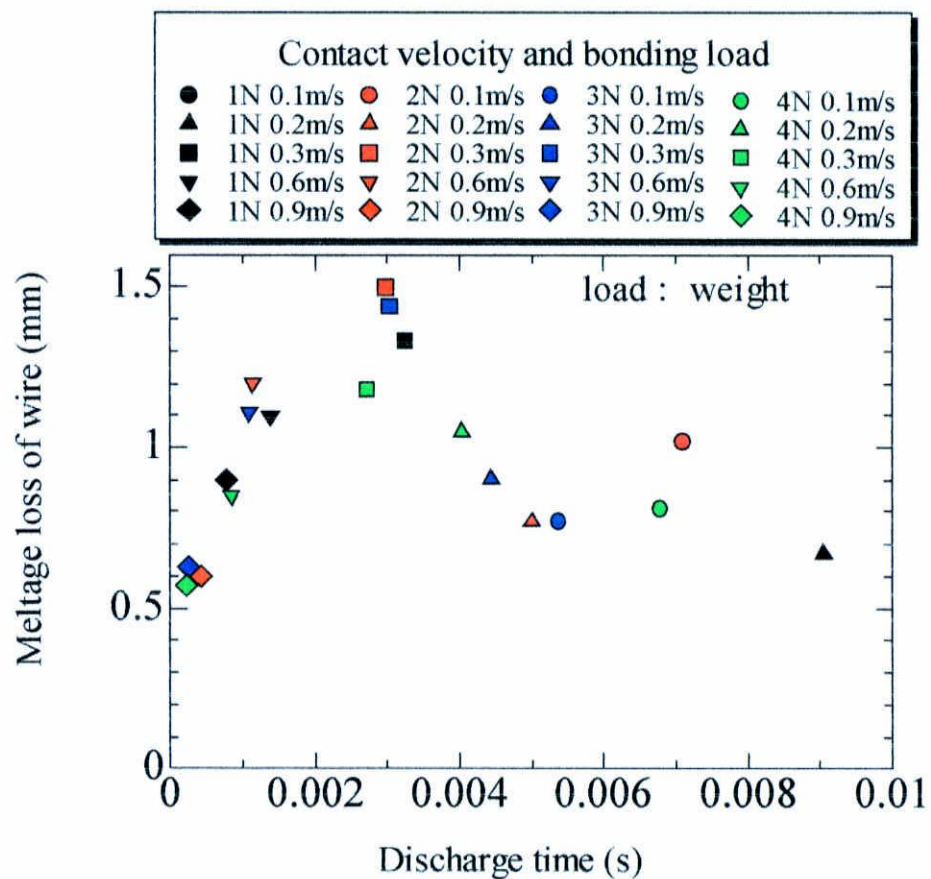


Fig.4-3-9 The relation between discharge time and meltage loss of wire welded by using the weight.

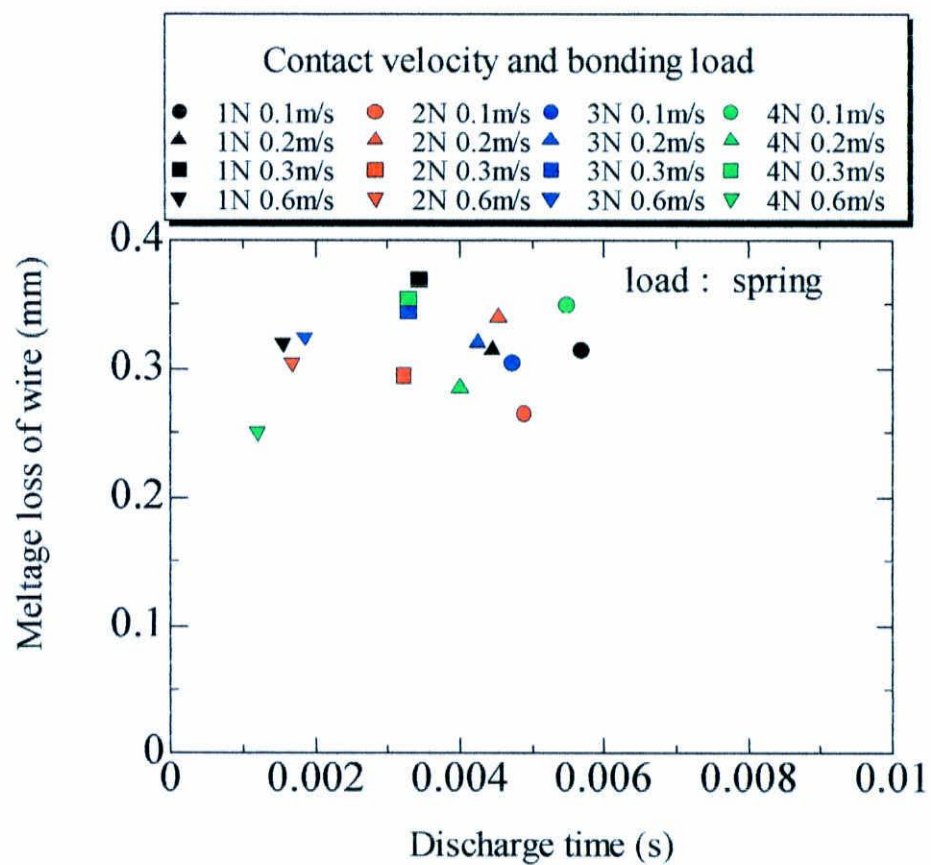


Fig.4-3-10 The relation between discharge time and meltage loss of wire welded by using the spring.

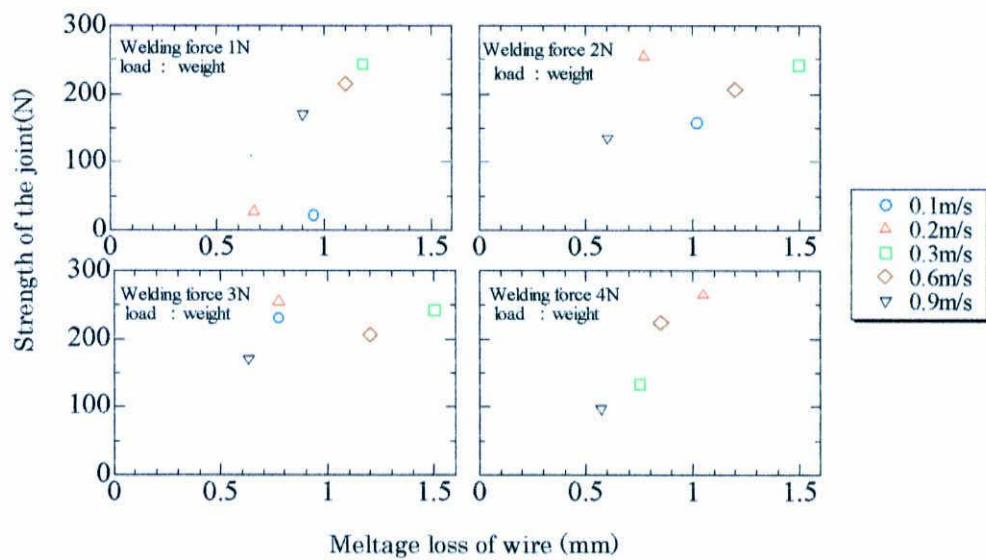


Fig.4-3-11 The relation between meltage loss of wire and strength of the joint welded by using the weight.

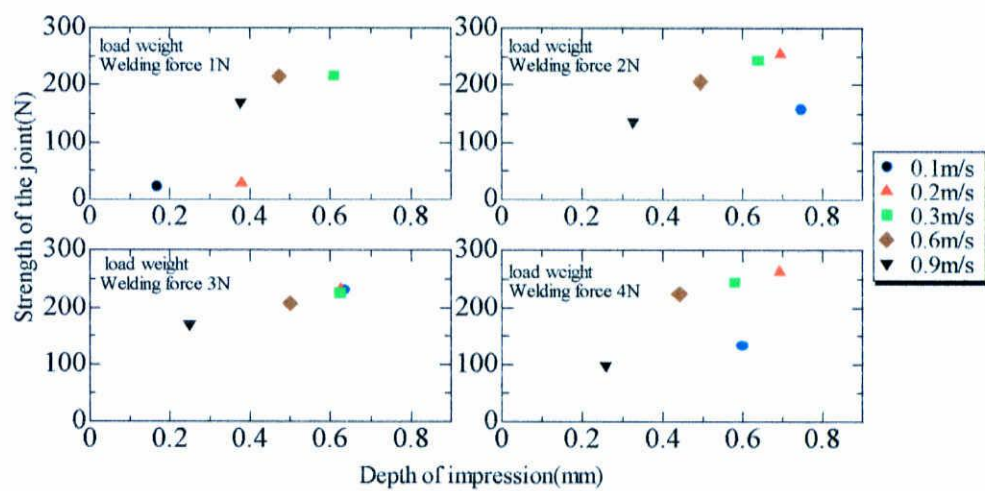


Fig.4-3-12 The relation between depth of impression and strength of the joint welded by using the weight.

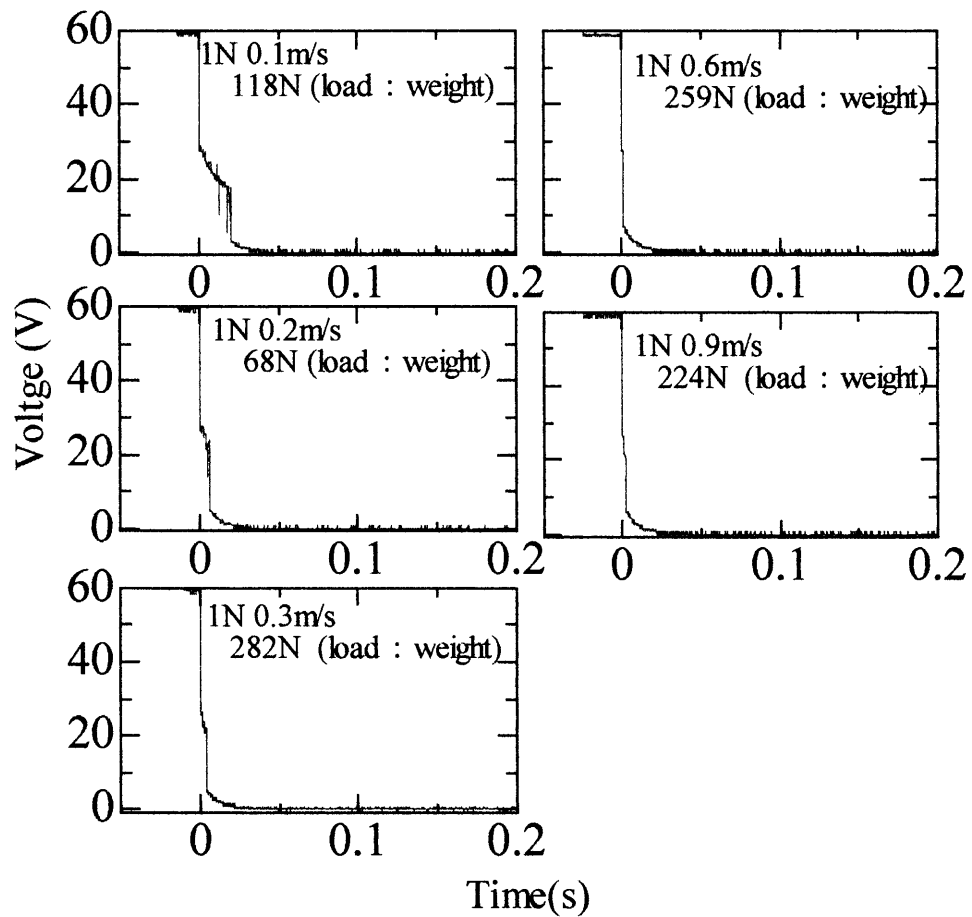


Fig.4-3-13 A wave pattern when the highest strength appeared in an experiment of load by a weight. (1N)

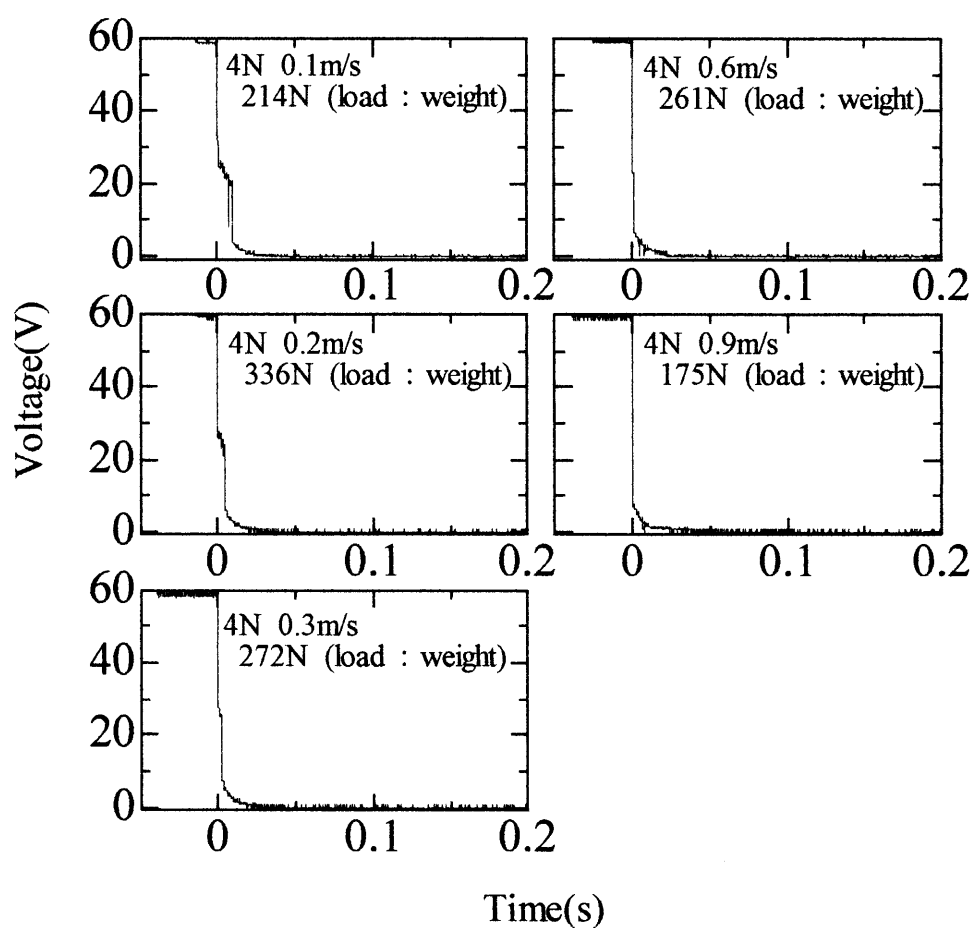


Fig.4-3-14 A wave pattern when the highest strength appeared in an experiment of load by a weight.(4N)

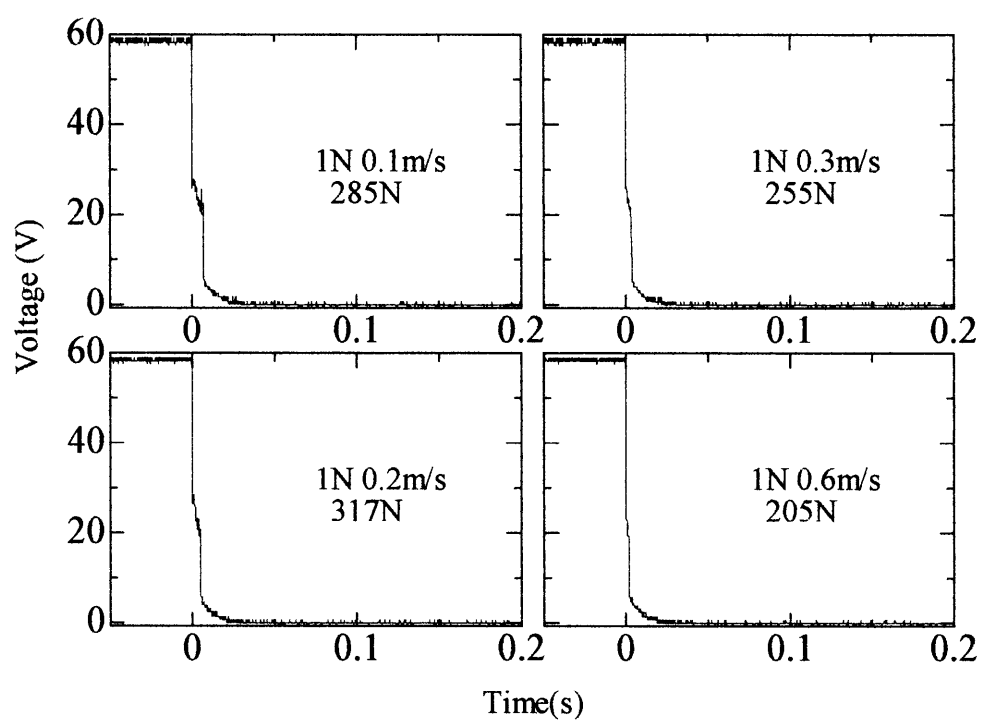


Fig.4-3-15 A wave pattern when the highest strength appeared in an experiment of load by a spring. (1N)

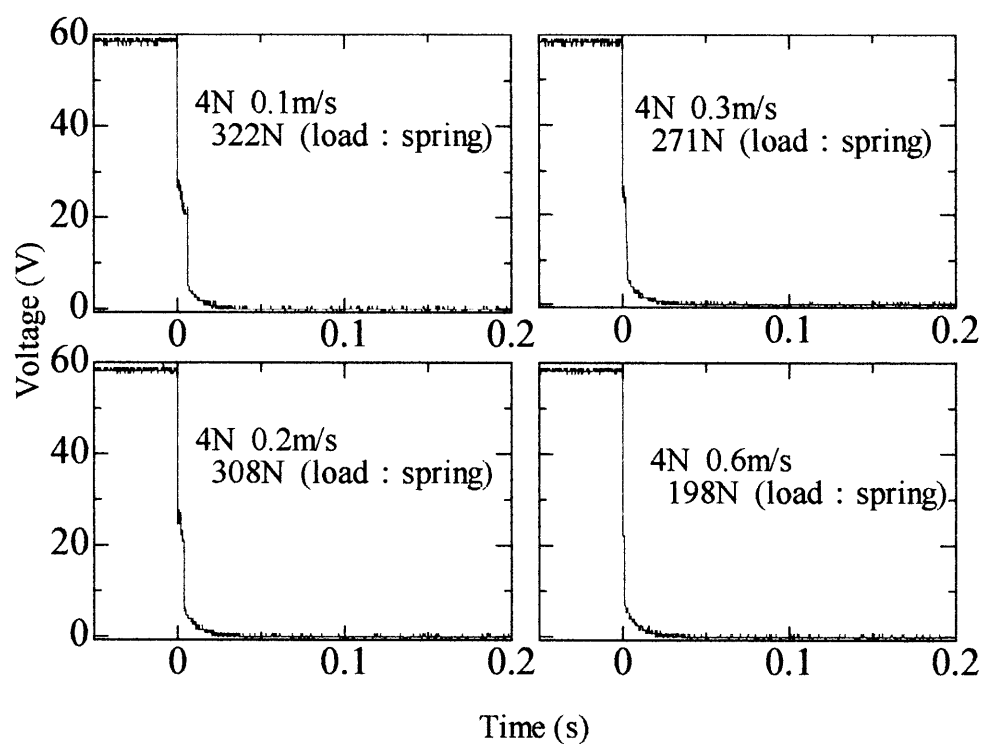


Fig.4-3-16 A wave pattern when the highest strength appeared in an experiment of load by a spring.(4N)

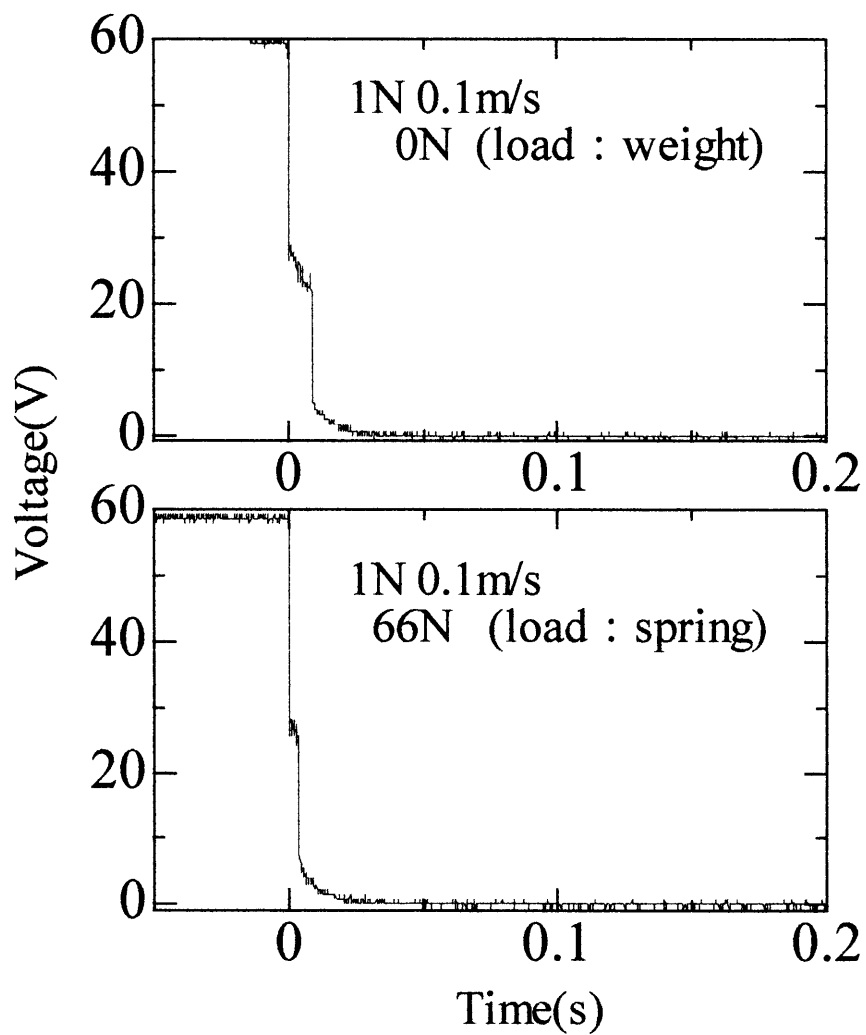


Fig.4-3-17 A voltage wave pattern of minimum strength of a case of a weight in a load method.

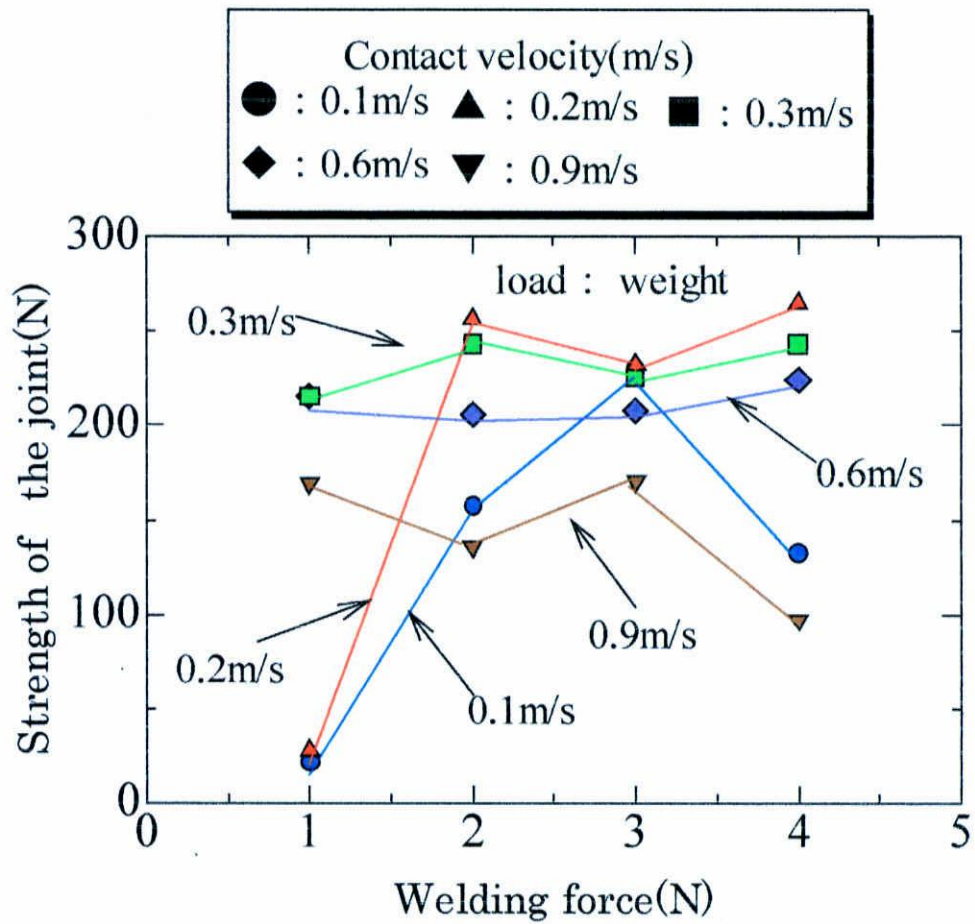


Fig.4-4-1 Influence welding force on the strength of the joint welded by using the weight.

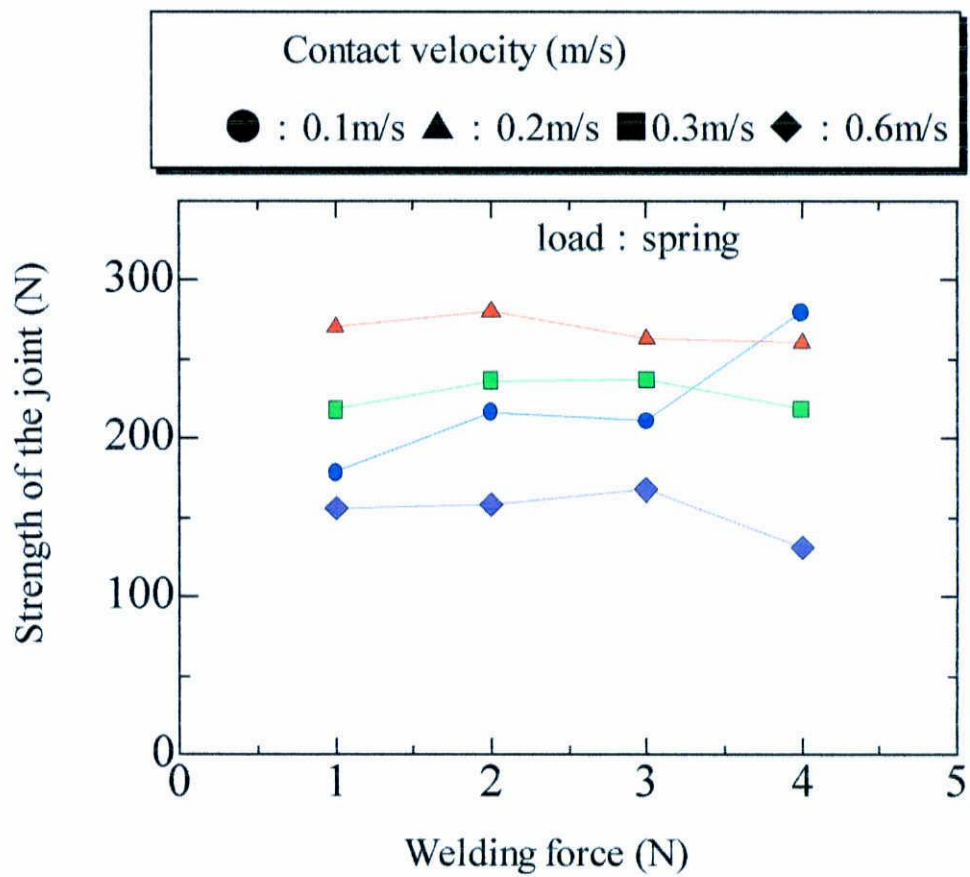


Fig.4-4-2 Influence welded force on the strength of the joint welded by using the spring.

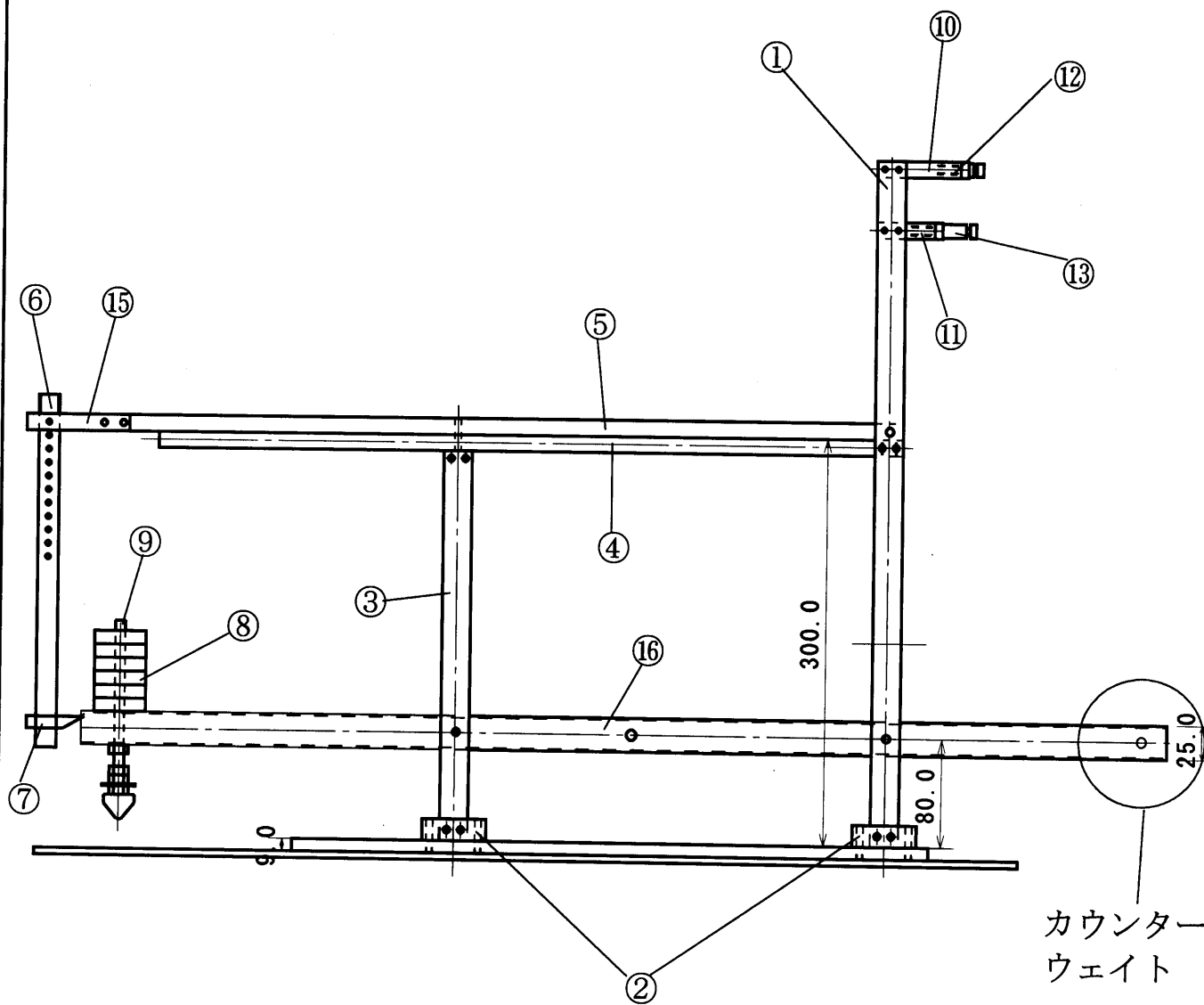


図
名

装置全体図

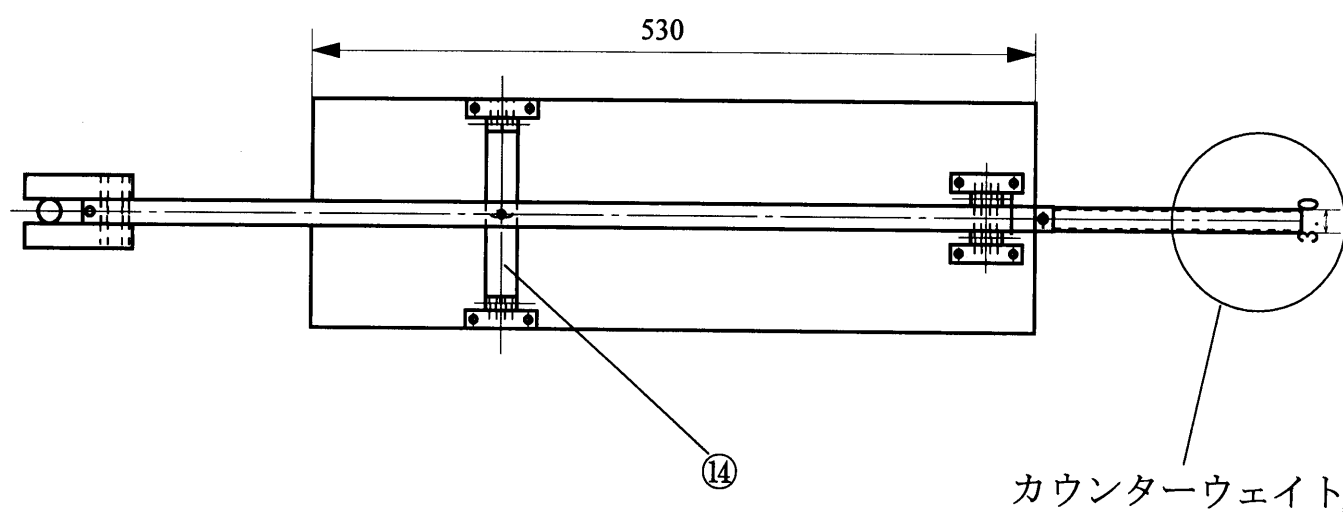


図
名

装置平面図

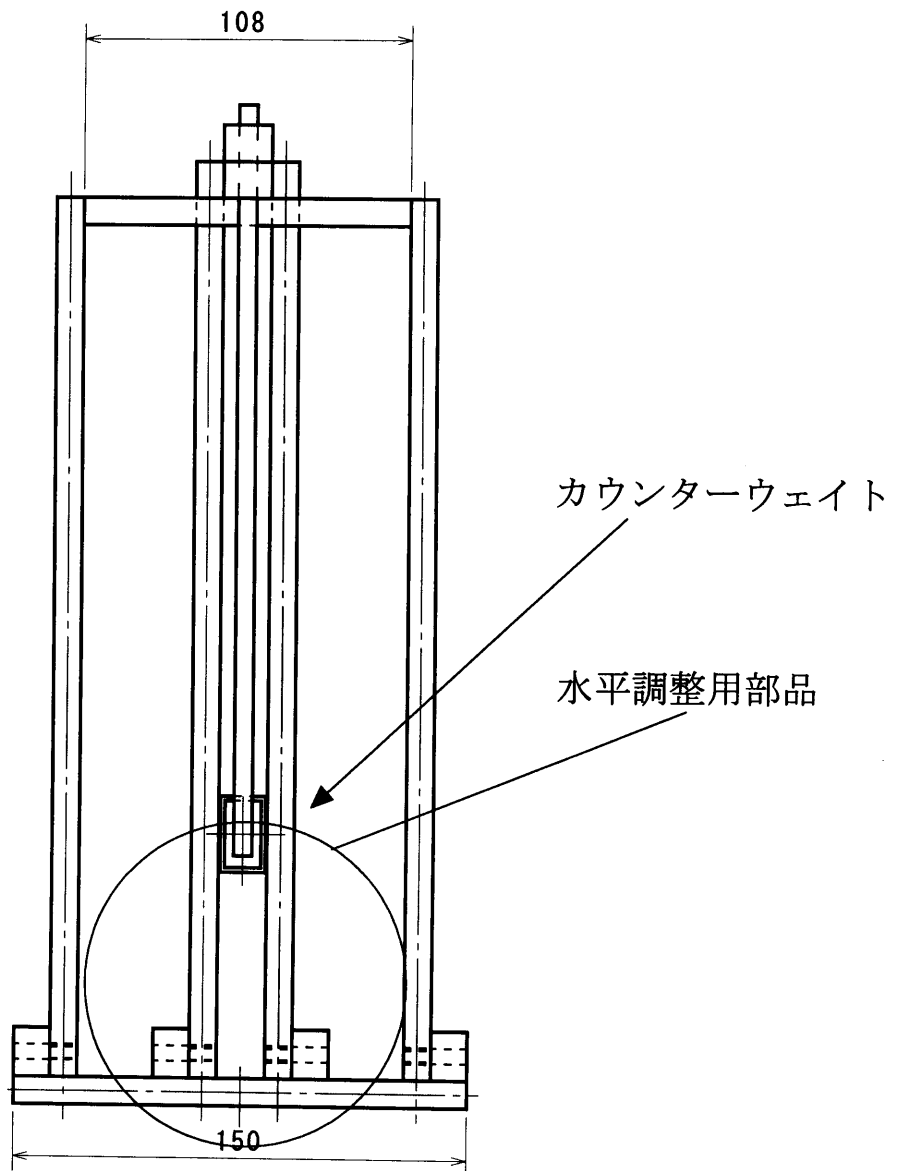
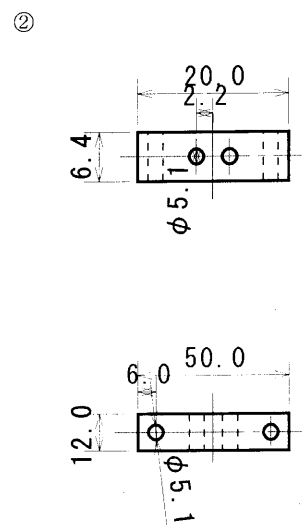
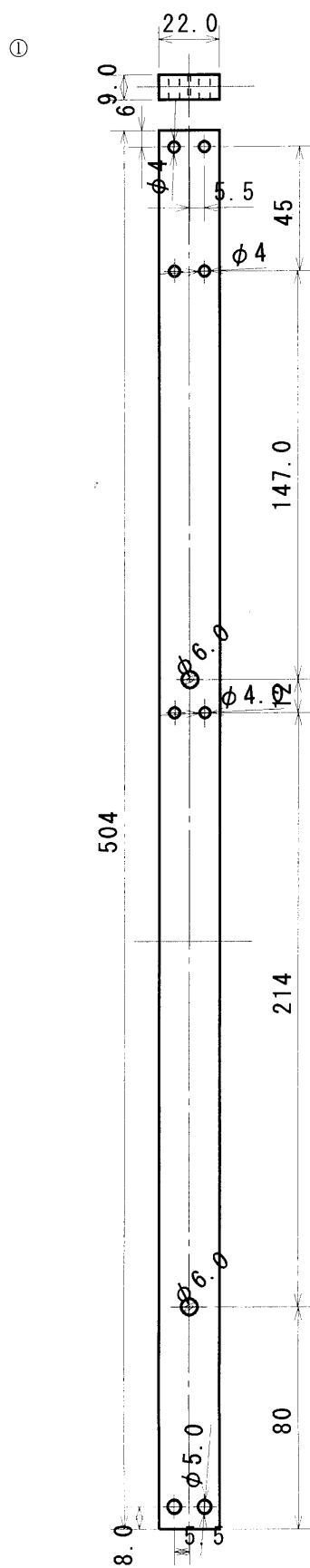
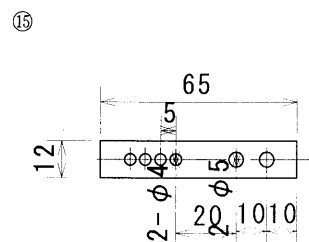
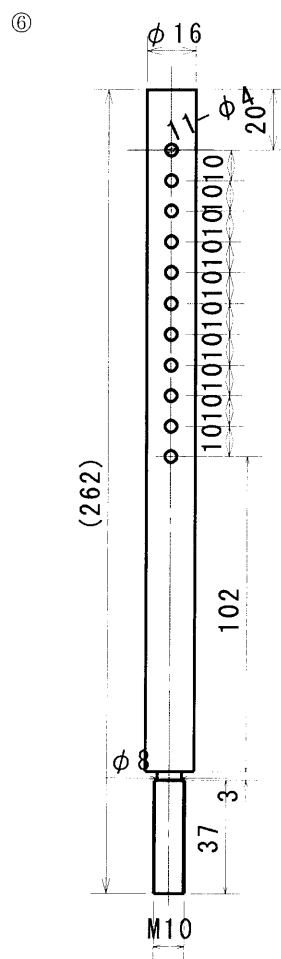
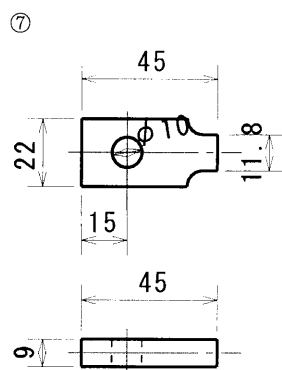
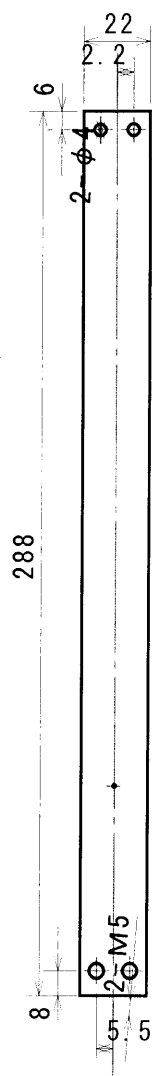
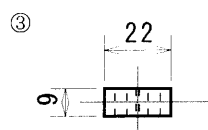


図
名

装置側面図

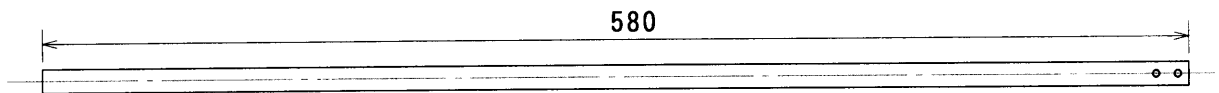


2	支柱補助	4	
1	回転軸支柱	2	
番号	品名	個数	材質
図名	部品図		

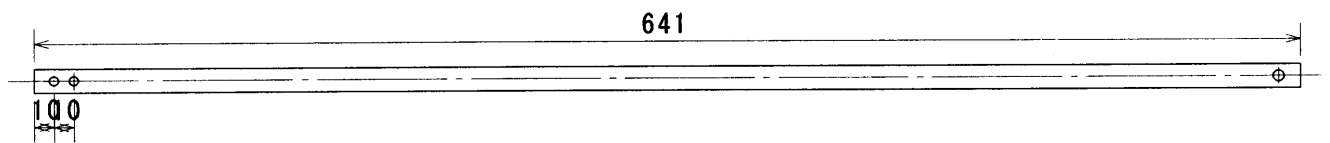


15	高さ調節治具	2	
7	フック	1	
6	フック取り付け棒	1	
3	補助支柱	2	
番号	品名	個数	材質
図名	部品図		

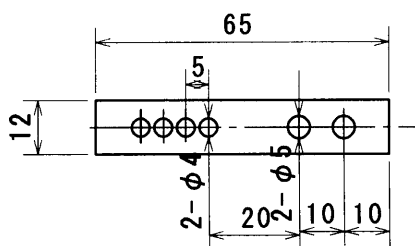
④



⑤

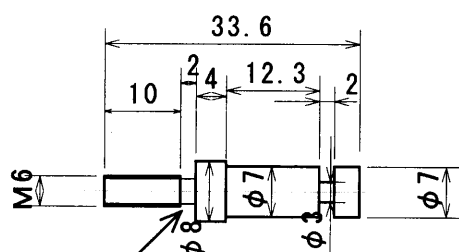


⑮



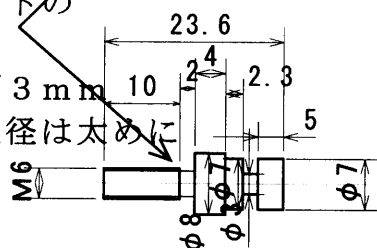
15		1	
5		1	
4		1	
番号	品名	個数	材質
図名	部品図		

ねじ治具

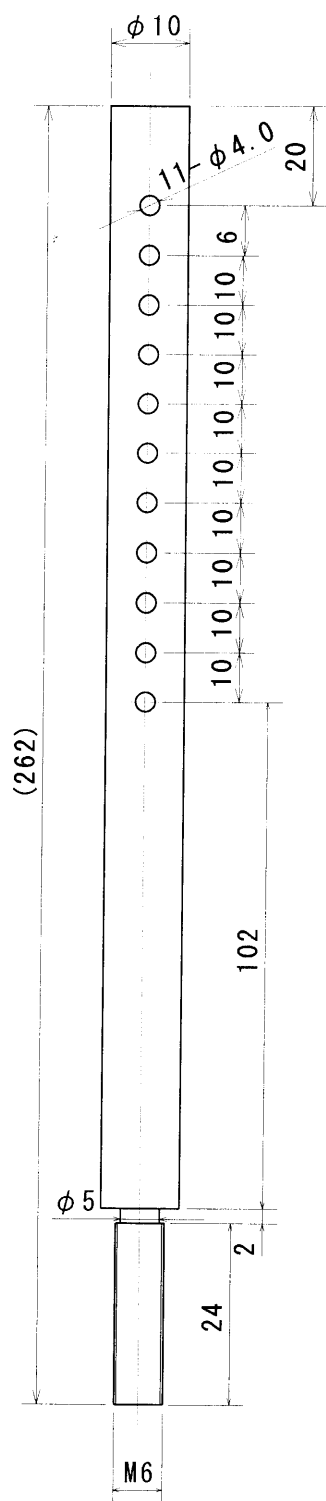


ねじ切りバイトの
逃げ代

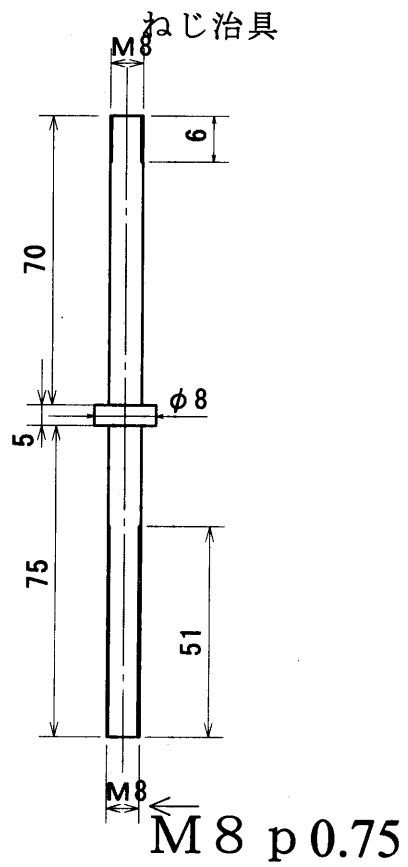
出来るだけ幅 3 mm
は少なく、直径は太めに



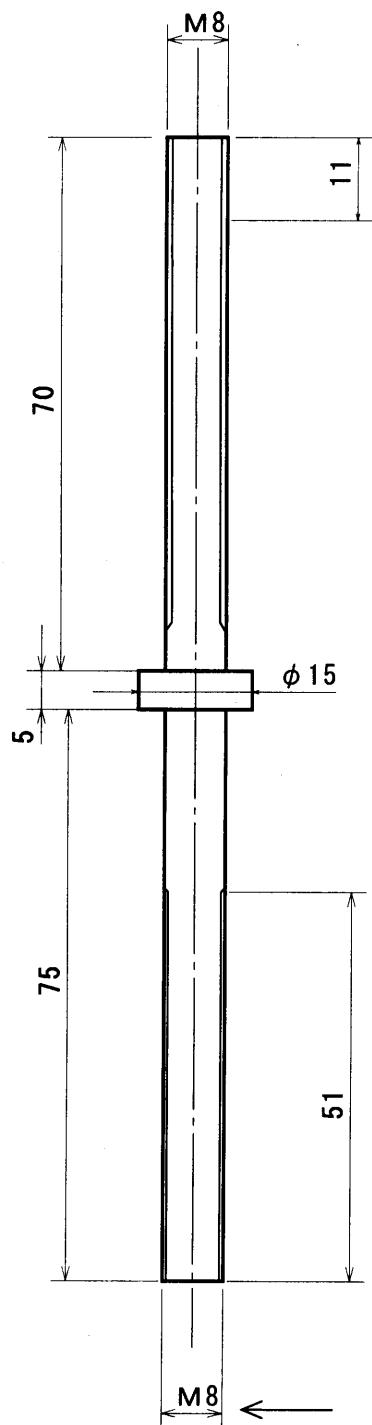
調節機



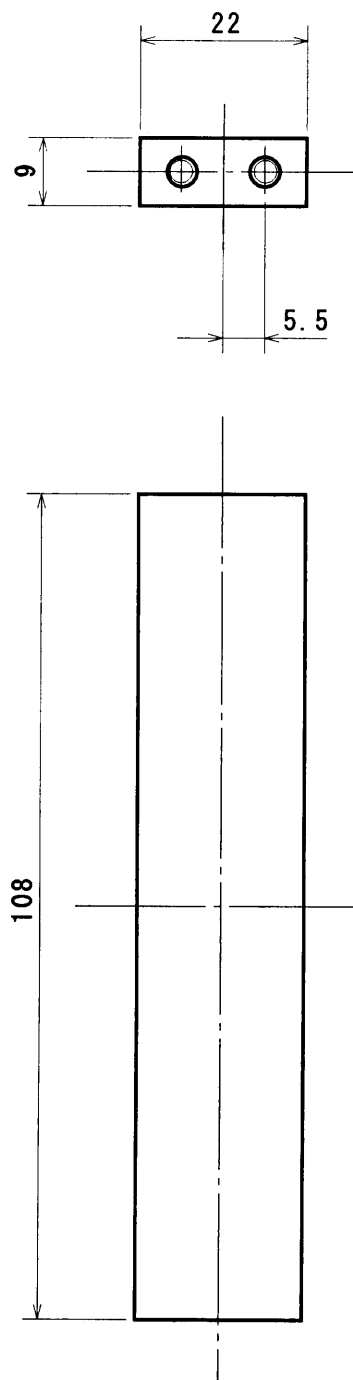
6	高さ調節機	1	
番号	品 名	個数	材 質
図名	部 品 図		



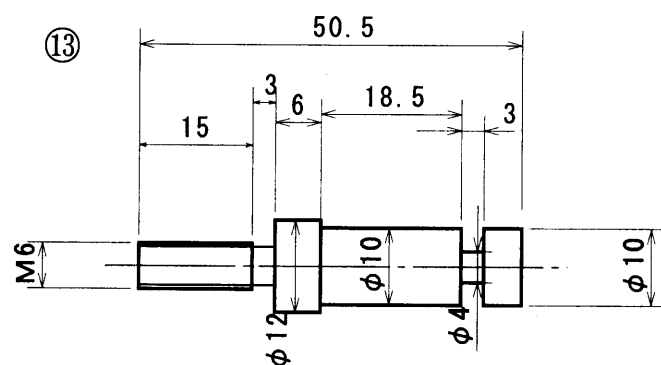
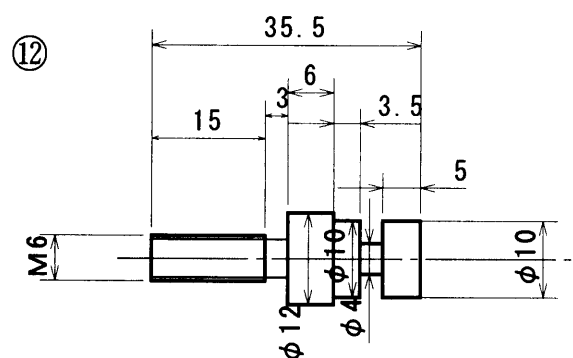
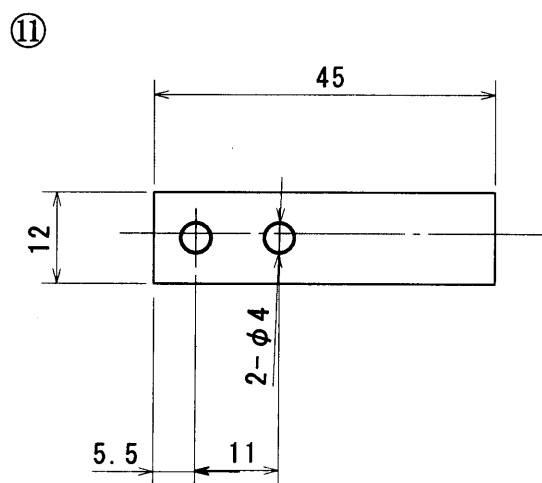
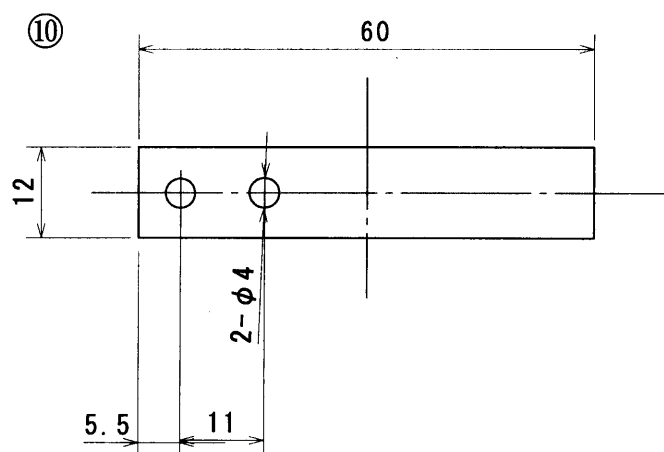
⑨



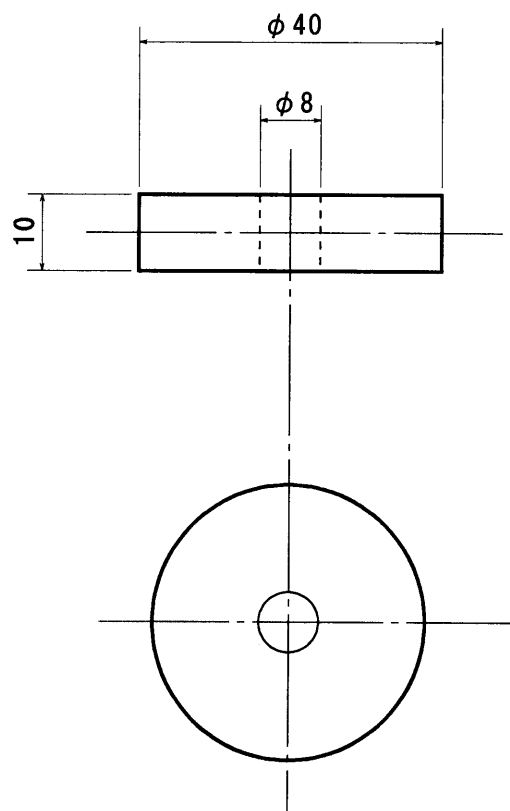
⑭



14	補助治具	1	
9	ピンバイス支柱	1	
番号	品名	個数	材質
図名	部品図		



13	バネ調節治具 4	1	
12	バネ調節治具 3	1	
11	バネ調節治具 2	1	
10	バネ調節治具 1	1	
番号	品 名	個数	材 質
図 名	部 品 図		



15	錘	1	
番号	品 名	個数	材 質
図 名	部 品 図		