

平成 28 年度 修士論文

線材と板材とのばね加圧式パーカッション溶接部の  
継手強度におよぼす溶接条件の影響

三重大学大学院工学研究科  
博士前期課程 機械工学専攻  
前田 晃

## 目次

第1章	緒言	1
第2章	溶接過程と実験方法	3
2-1	溶接過程	3
2-2	溶接機の諸元	3
2-3	実験装置	3
2-4	実験条件	4
2-5	継手強度の評価方法	4
2-6	溶接現象の検討	5
2-7	アーク放電現象の評価方法	5
2-8	一般的なRC回路の放電特性	6
2-9	線材溶融量の検討	7
第3章	実験結果	8
3-1	継手強度におよぼす加圧力の影響	8
3-2	継手強度におよぼす充電電圧の影響	8
3-3	継手強度におよぼすコンデンサ容量の影響	9
3-4	アーク発生の有無	9
3-5	アーク放電時間におよぼす加圧力の影響	10
3-6	アーク放電時間におよぼす充電電圧の影響	10
3-7	アーク放電時間におよぼすコンデンサ容量の影響	10
3-8	平均電圧におよぼす加圧力の影響	11
3-9	平均電圧におよぼす充電電圧の影響	11
3-10	平均電圧におよぼすコンデンサ容量の影響	12
3-11	平均電流におよぼす加圧力の影響	12
3-12	平均電流におよぼす充電電圧の影響	12
3-13	平均電流におよぼすコンデンサ容量の影響	12
3-14	アーク放電エネルギーにおよぼす加圧力の影響	13
3-15	アーク放電エネルギーにおよぼす充電電圧の影響	13
3-16	アーク放電エネルギーにおよぼすコンデンサ容量の影響	13
3-17	線材溶融量のおよぼす溶接条件の影響	14
第4章	溶接現象の検討	
4-1	パーカッション溶接におよぼすアークの影響	15

4-2	継手強度の検討	16
4-3	アーク放電時間に関する考察	17
4-4	アーク放電エネルギーと線材溶融量に関する考察	20
4-5	線材溶融量におよぼすアーク放電エネルギーの影響	21
4-6	継手強度におよぼすアーク放電エネルギーの影響	21
4-7	継手強度におよぼす加圧力の影響	23
4-8	平均電圧が高い実験の検討	24
4-9	最適溶接条件の検討	24
第5章	破断形状の観察	26
5-1	破断形状の評価方法	26
5-2	溶融部直径におよぼす加圧力の影響	26
5-3	溶融部直径におよぼす電氣的溶接条件の影響	26
5-4	破断界面深さにおよぼす加圧力の影響	27
5-5	破断界面深さにおよぼす電氣的溶接条件の影響	27
5-6	板材溶融量の検討	28
5-7	継手強度におよぼす板材溶融量の影響	29
第6章	結言	30

参考文献

謝辞

## 第1章 緒言

コンデンサ放電式パーカッション溶接とは大容量のコンデンサを充電し、瞬間的に局部にアーク放電をおこし、金属を溶融し圧着することで接合を行う溶接方法である。

一般的に、パーカッション溶接機は小型軽量であることから、持ち運びが可能であり、作業性もよく、電気製品や配電盤、配線の押さえとして使用されている。そのなかでも微小物の溶接に適しており、熱電対の溶接に広く使われている。熱電対の溶接にはパーカッション溶接のほかに抵抗溶接やレーザー溶接が研究されているが、パーカッション溶接は、ごく短時間に大電流のアークを局部に集中させるため、対象物の酸化防止や熱影響部を非常に小さくでき、対象物が薄板でも溶け落ちが生じにくい。

パーカッション溶接を用いた熱電対材料の溶接に関する研究はこれまでも行われていたが、安定した継手強度が得られないことが多いとされている。特に母材がアルミニウム材料の場合、接合領域の金属間化合物の影響で安定した継手強度が得られないことが報告されている。

本研究では、線材の加圧方式にばね加圧方式を採用した。そこでばね加圧方式の溶接中のプロセスを Fig.1-1 に示す。放電前、線材と母材は接触しており線材側から母材に対して垂直に加圧している。Fig.1-1(a)のように、コンデンサによる放電が開始し、線材の先端が抵抗熱により溶融飛散する。その後、Fig.1-1(b)のように、アーク放電が開始する。またアーク放電中、線材はばねにより板材方向に押し込まれる。次に Fig.1-1(c)のように、線材と板材の溶融池が接触することで短絡しアーク放電が終了する。その後、Fig.1-1(d)のように線材が板材の溶融部に押し込まれ、溶融金属が自然冷却し継手が完成する。

これまでの研究で線材の加圧方式を錘加圧方式からばね加圧方式にすることで継手強度の増加がみられたり、また、錘加圧方式における、電氣的溶接条件、接触時速度、線材直径が継手強度におよぼす影響はこれまでに検討されてきたが、ばね加圧方式における溶接条

件の検討はまだ行われていない。

そこで本研究では、ばね加圧方式における加圧力、電氣的溶接条件（コンデンサ容量、充電電圧）が継手強度および溶接現象に及ぼす影響を検討する。

## 第2章 溶接過程と実験方法

### 2-1 溶接過程

本研究で使用するコンデンサ放電式パーカッション溶接機と被溶接材の概念図を Fig.2-1 に示す。Fig.2-1 に示したように溶接装置はパーカッション溶接機と被溶接材により構成されている。まず初めにスイッチ S1 を閉じ直流電流によりコンデンサを充電する。この時、S2 は開いている状態にする。充電完了後 S1 を開き S2 を閉じることでコンデンサにより放電を行う。放電中、線材と母材の間の接触部で溶接が行われる。

### 2-2 溶接機の諸元

溶接機の回路図を Fig.2-2 に示す。両切りのスイッチ S1 を閉じることで各コンデンサに充電することができる。コンデンサの充電電圧はアナログ式の電圧計で確認することができる。また、S2,S3 を閉じることでコンデンサ容量を切り替えることが可能となっている。電圧計が目的の値を指したところで、S1 を開け充電を終了する。その後、トグルスイッチ S4 を閉じ、サイリスタに微電流を流すことでコンデンサの放電が開始する。

充電電圧は 50V まで可能で、コンデンサ容量は 20, 40, 60mF と切り替えることができる。

### 2-3 実験装置

実験装置の概略図を Fig.2-3 に示す。線材は固定治具（チャック）に取り付け、治具はばねをかいして板材に押し付けられる。加圧力はばね上部のボルトにより調整可能である。

板材はロードセル上においてあり、溶接中の加圧力を測定し、固定治具に取り付けられた反射板を利用して、レーザー変位計により線材の動きを測定した。また、放電中の線材－板材間の電圧 V1 とシャント電圧 V2 を換算して、電流値を測定した。各測定値はオシロスコ

ープにより、0.01ms 刻みで記録した。

#### 2-4 実験条件

実験に使用した線材および母材を Fig.2-4, Fig.2-5 に示す。線材には直径 0.65, 0.32mm のアルメル熱電対線、板材には板厚 1.5mm のアルミニウム合金 1050 を用いた。線材の先端形状は線材-板材間の接触抵抗に影響するため、Fig.2-4(a)のようなニッパーで切断したままの状態を統一した。また、固定治具からの線材の突き出し長さは 3mm で統一した。試行回数は通常、各条件でアークが確認された実験が 10 回になるまで行った。しかし、5 回実験を繰り返しアークが 2 回以上発生しない場合もしくは、10 回実験を繰り返し 4 回以上アークが発生しない場合はそこで実験を終了した。また、線材の溶融量が大きく固定治具と板材が接触した場合もそこで実験を終了した。

##### (A)直径 0.65mm

継手強度に及ぼす溶接条件の影響を検討するため、加圧力を 0.5, 2.0, 3.5, 5.0, 7.5N, コンデンサ容量を 20, 40, 60mF, 充電電圧を 16, 32, 48V (コンデンサ容量 20mF の条件のみ充電電圧を 16, 20, 24, 28, 32, 48V) にそれぞれ変化させ実験を行った。

##### (B)直径 0.32mm

継手強度に及ぼす溶接条件の影響を検討するため、加圧力を 0.5, 2.0, 3.5N, コンデンサ容量を 20, 40, 60mF, 充電電圧を 16, 24, 32, 40V (コンデンサ容量 20mF の条件のみ充電電圧を 16, 20, 24, 32, 36, 40V) にそれぞれ変化させ実験を行った。

#### 2-5 継手強度の評価方法

継手強度を測定するために使用した引張試験機を Fig2-6 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。試験機両端の柱にはねじが切っており、上部にあるモータ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。引張速度は  $1.36 \times 10^{-5} \text{m/s}$  で行い、破断荷重を継手強度とした。また、試験片の設置前に破断したものは継手強度を 0N とした。

## 2-6 溶接現象の検討

Fig.2-7(a)にコンデンサ容量 40mF、充電電圧 48V、加圧力 7.5N の溶接中における電圧値および電流値の例を示す。溶接開始直後から 13V 付近まで電圧が増加し、電流値も 650A 付近まで増加する。その後電圧値、電流値ともに緩やかに減少していく。このようにこの溶接条件では電圧値、電流値の減少が、RC 回路特有な特徴を示しており、アーク放電は認められない。Fig.2-7(b) にコンデンサ容量 40mF、充電電圧 48V、加圧力 3.5N の場合の電圧および電流値の例を示す。溶接開始時に電圧が 13V 付近まで増加し、電流値も 630A 付近まで増加している、続いて電圧値が 30V 付近まで増加し電流値が 380A まで減少している。この時点で線材の先端が溶融飛散し、アーク放電が開始したと考えられる。4ms 付近で電圧値が 8V 付近まで減少し電流値が増加する。ここでアーク放電が終了し、4ms 以降は線材と板材が短絡したと考えられる。このように溶接中の電圧値、電流値からアーク発生の有無を判断した。

## 2-7 アーク放電現象の評価方法

アーク放電現象におよぼす溶接条件の影響を検討するため、アーク放電の評価方法を以下のように定めた。Fig.2-8 にアーク放電中の電圧値、電流値、電力値を示す。アークの持続時間を検討するため、アーク放電開始から終了までの時間をアーク放電時間とした。また、アーク放電部の電圧値、電流値におよぼす溶接条件の影響を検討するため、アーク放電部の電圧値、電流値の平均値をそれぞれ平均電圧、平均電流とする。また、アーク放電部で消費されるエネルギーを評価するため、電流値と電圧値の積で求めた電力値  $W$  から、エネルギー



一E を次のように定めた.

$$E = \sum W \Delta t \quad (a)$$

ここで,  $\Delta t$ は測定値のサンプル間隔[s]である. また, アーク放電部でのエネルギーをアーク放電エネルギーとした. また, アークの発生していない条件はアーク放電時間を 0s とし, 平均電圧, 平均電流については除外しデータの整理を行った.

## 2-8 一般的な RC 回路の放電特性

Fig.2-9(a)のような一般的な RC 回路の場合, まずコンデンサに充電されるエネルギーは以下の式で表される

$$U = \frac{1}{2} CV^2 \quad (b)$$

ここで U は充電エネルギーであり, V は充電電圧, C はコンデンサ容量である. 次に放電中のコンデンサの電圧は以下のように表される.

$$V_c = V \cdot \varepsilon^{-\frac{t}{CR}} \quad (c)$$

ここで,  $V_c$ はコンデンサの電圧,  $\varepsilon$ は自然対数, t は放電開始からの時間, R は抵抗である. また, 式(c)から電力 W は次のように表される.

$$W = V_c \cdot \frac{V_c}{R} \quad (d)$$

充電電圧を増加させることで, 充電エネルギーを得た場合の電力値の変化を Fig.2-9(b)に示す. また, コンデンサ容量を増加させることで, 充電エネルギーを得た場合の電力値の変化を Fig.2-9(c)に示す. このように充電電圧の増加により, 充電エネルギーを得た場合は放電直後の電圧値, 電力値が増加する. また, コンデンサ容量により放電エネルギーを得た場合は放電開始時の電圧値, 電力値には影響せず, 放電後の電力値, 電圧値を増加させる.

## 2-9 線材溶融量の検討

線材の溶融量を評価する為、線材の変位差  $X$ [mm]、溶融量  $v$ [mm<sup>3</sup>]をそれぞれ以下のよう  
に定義した。

$$X = x_B - x_A \quad (e)$$

$$v = (x_B - x_A) \cdot \frac{\pi D^2}{4} \quad (f)$$

ここで、 $x_B$ は実験前の線材の変位、 $x_A$ は実験後の線材の変位、 $D$ は線材の直径である。た  
だしここで定義した線材の変位差  $X$ 、溶融量  $v$ には、アーク放電終了後に線材が溶融部に押  
し込まれた変位も含んでいる。

## 第3章 実験結果

### 3-1 継手強度におよぼす加圧力の影響

各条件の継手強度をコンデンサ容量別に横軸に加圧力をとり Fig.3-1, 3-2 に示した。継手強度は線材の断面積を用いた公称応力で示した。また、本研究で使用しているアルメル線の母材強度は  $560\text{N/mm}^2$  である。加圧力の低い範囲では、加圧力の増加に伴い継手強度が増加する傾向がみられた。加圧力が高い範囲では、加圧力の増加に伴い継手強度が減少する傾向がみられた。これは加圧が高い範囲ではアークが生じない実験が出てきており、アークの発生が起きなかった実験では継手はできず、継手強度を ON と評価しているためである。またアークの発生の有無によってプロットを変えた各条件の継手強度を Fig.3-3 から Fig.3-24 に示した。アークが生じなかった実験は Fig.3-24 の線径  $0.32\text{mm}$ 、コンデンサ容量  $60\text{mF}$ 、充電電圧  $24\text{V}$ 、加圧力  $3.5\text{N}$  の一回の実験を除いて接合はみられなかった。また、加圧力が高い条件で、アークが生じない実験が多くみられた。これは、加圧力の増加に伴い線材-板材間の接触抵抗が小さくなり、抵抗熱が減少しアークの発生に必要な熔融量を得られなかったためだと考えられる。

### 3-2 継手強度におよぼす充電電圧の影響

各条件の継手強度をコンデンサ容量別に横軸に充電電圧をとり Fig.3-25, 3-26 に示した。充電電圧の低い範囲では、充電電圧の増加に伴い継手強度が増加する傾向がみられた。充電電圧の高い範囲では、充電電圧の増加に伴い継手強度の増加傾向が緩やかになる、または減少する傾向がみられた。継手強度を増加させるのに、充電電圧を増加させるのは有効だと考えられる。しかし、有効な範囲にも限度があると考えられ、充電エネルギーの高い条件では充電電圧の増加に伴い継手強度が低下する傾向がみられる。

### 3-3 継手強度におよぼすコンデンサ容量の影響

各条件の継手強度を充電電圧別に横軸にコンデンサ容量をとり Fig.3-27, 3-28 に示した。加圧力、充電電圧がともに低い条件（充電電圧 16V の条件は除く）では、コンデンサ容量の増加に伴い継手強度が増加する傾向がみられた。加圧力、充電電圧がともに高い条件ではコンデンサの増加によって継手強度が減少する傾向がみられた。コンデンサ容量の増加により、継手強度を増加させるのは加圧力、充電電圧がともに低い条件でのみ有効だと考えられる。

### 3-4 アーク発生の有無

前述した継手強度の実験結果から、安定した継手強度を得るためにはアークの発生は必須だと考えられる。そこで溶接条件がアーク発生の有無におよぼす影響を検討する。コンデンサ容量、線径別にアーク発生の有無を Fig.3-29, 3-30 に示す。Fig.3-29(a), (b), (c), 3-30(a), (b), (c)は各コンデンサ容量におけるアーク発生の有無を示している。また、青色でアークが発生していないこと、オレンジ色でアークが発生した事を示している。扇形にプロットしてあるものは、アークの発生割合を示している。また、赤印はアークの発生はおきたが、線材の溶融量が大きく線材の固定治具と板材が接触したことを示している。

低加圧力—高充電電圧の範囲で、アークの発生がみられた。高加圧力—低充電電圧の範囲ではアークの発生がみられなかった。これは 3-1 節で述べたように、加圧力の増加に伴い線材—板材間の接触抵抗が小さくなるためだと考えられる。

コンデンサ容量の増加に伴い、より低充電電圧の条件で固定治具と板材の接触が起きている。また、アークの発生にのみ着目すると今回の条件範囲内では、両線径でアークの発生におよぼすコンデンサ容量の影響はみられなかった。これは 2-8 節で述べたように、放電開始直後の放電電圧にコンデンサ容量は影響を及ぼさないためである。

そこで、コンデンサ容量による区別をせずにプロットしたグラフを Fig3-31 に示した。

ここでは、線材と板材が接触した実験もオレンジのプロットとして示している。また、線材が細くなるに伴い、より加圧力が高く、充電電圧が低い範囲でアークが発生しやすくなる傾向がみられた。これは、同じ荷重ならば線径が小さいとき断面積が小さいので圧力が上がるためだと考えられる。

### 3-5 アーク放電時間におよぼす加圧力の影響

各条件の放電時間をコンデンサ容量別に横軸に加圧力をとり、Fig.3-32, 3-33 に示した。両線径ともに、加圧力の増加に伴い放電時間が減少する傾向がみられた。これは加圧力の増加に伴い、固定冶具の押し込み速度が増加し、早く短絡することが原因だと考えられる。

### 3-6 アーク放電時間におよぼす充電電圧の影響

各条件の放電時間をコンデンサ容量別に横軸に充電電圧をとり、Fig.3-34, 3-35 に示した。両線径ともに、充電電圧の増加に伴い放電時間が増加する傾向がみられた。これは充電電圧が増加することで、線材の溶融量が増加し、短絡までに長時間要するためだと考えられる。

### 3-7 アーク放電時間におよぼすコンデンサ容量の影響

各条件の放電時間を充電電圧別に横軸にコンデンサ容量をとり、Fig.3-36, 3-37 に示した。低充電電圧—高加圧力の条件では、コンデンサ容量による影響は小さいと考えられる。高充電電圧—低加圧の条件では、コンデンサ容量の増加に伴い放電時間が増加する傾向がみられた。これは、充電エネルギーは充電電圧の二乗に比例するため、高充電電圧の条件の方がコンデンサ容量を増加させた場合の充電エネルギーの増加量が大きいことと、加圧力の減少による線材の押し込み速度の減少の二つの要因がもたらしている結果だと考

えられる。加圧力 0.5N の条件が特に放電時間が長いのも線材の押し込み速度が関係しており、加圧力が押し込み速度に与える影響については 4-3 節に示す。

### 3-8 平均電圧におよぼす加圧力の影響

各条件の平均電圧をコンデンサ容量別に横軸に加圧力をとり Fig.3-38, 3-39 に示した。

#### (A) 線径 0.65mm

Fig.3-38 より、充電電圧の高い条件では、加圧力の増加に伴い平均電圧が増加する傾向がみられた。これは加圧力が減少するに伴い放電時間が増加するためである。RC 回路の放電電圧は時間の経過に伴い減少するため、放電時間が増加すると平均電圧は減少すると考えられる。充電電圧の低い条件では、全加圧力の条件で、平均電圧におよぼす加圧力の影響はみられなかった。これは、充電電圧の低い条件では放電時間が短いためである。それらを考慮するとアークの発生が起こった場合、アーク放電中の線材と板材間にかかる電圧におよぼす加圧力の影響は小さいと考えられる。

#### (B) 線径 0.32mm (Fig.3-39)

Fig.3-39 より、線径 0.65mm と同様に充電電圧 24V 以上の条件で、加圧力の低下に伴い平均電圧が低下する傾向がみられた。しかし、32V の条件でその平均電圧の減少傾向が緩やかになっている。これは、コンデンサ容量 20mF、充電電圧 32V、加圧力 0.5N の条件でプロットが一つだけ 30V 付近を示しているプロットがある。その影響で平均値が若干増加しているためである。また、コンデンサ容量 40mF、充電電圧 24V、加圧力 0.5N の条件でも同じように高い平均電圧を示しているプロットが一つある。この現象については 4-8 節にて考察を行う。

### 3-9 平均電圧におよぼす充電電圧の影響

各条件の平均電圧をコンデンサ容量別に横軸に充電電圧をとり、Fig.3-40, 3-41 に示し

た。両線径ともに、充電電圧の増加に伴い平均電圧が増加する傾向がみられた。2-9 節でも述べた RC 回路のように、充電電圧を増加させると放電開始付近の電圧が増加するためだと考えられる。

### 3-10 平均電圧におよぼすコンデンサ容量の影響

各条件の平均電圧を充電電圧別に横軸にコンデンサ容量をとり、Fig.3-42, 3-43 に示した。充電電圧の高い条件では、コンデンサ容量の増加に伴い平均電圧が増加する傾向がみられた。これは、2-9 節でも述べた RC 回路のように、コンデンサ容量を増加させると放電中の電圧が増加することが原因だと考えられる。

### 3-11 平均電流におよぼす加圧力の影響

各条件の平均電流をコンデンサ容量別に横軸に加圧力をとり、Fig.3-44, 3-45 に示した。両線径ともに、加圧力の増加に伴い平均電流が増加する傾向がみられた。これは平均電圧と同様に、加圧力の増加に伴い放電時間が減少するためだと考えられる。

### 3-12 平均電流におよぼす充電電圧の影響

各条件の平均電流をコンデンサ容量別に横軸に充電電圧をとり、Fig.3-46, 3-47 に示した。両線径ともに、充電電圧の増加に伴い平均電流が増加する傾向がみられた。こちらも平均電圧と同様に充電電圧を増加させると放電開始時の電流が増加するためだと考えられる。

### 3-13 平均電流におよぼすコンデンサ容量の影響

各条件の平均電流を充電電圧別に横軸にコンデンサ容量をとり、Fig.3-48, 3-49 に示した。平均電圧と同様に、充電電圧の高い条件では、コンデンサ容量の増加に伴い平均電流

が増加する傾向がみられた。こちらも、2-9 節でも述べた RC 回路のように、コンデンサ容量を増加させると放電中の電流が増加することが原因だと考えられる。

#### 3-14 アーク放電エネルギーにおよぼす加圧力の影響

各条件のアーク放電エネルギーをコンデンサ容量別に横軸に加圧力を取り、Fig.3-50, 3-51 に示した。両線径ともに、加圧力の増加に伴いアーク放電エネルギーが減少する傾向がみられた。3-8, 3-11 節から平均電圧、平均電流におよぼす加圧力の影響は小さいと考えられるため、加圧力の増加に伴う放電時間の減少によりアーク放電エネルギーが減少すると考えられる。

#### 3-15 アーク放電エネルギーにおよぼす充電電圧の影響

各条件のアーク放電エネルギーをコンデンサ容量別に横軸に充電電圧を取り、Fig.3-52, 3-53 に示した。両線径ともに、充電電圧の増加に伴いアーク放電エネルギーが増加する傾向がみられた。これは、充電電圧の増加に伴い、アーク放電中の線材と板材間にかかる電圧、電流値の増加、またそれに伴い線材の溶融量が増加しアーク放電時間が増加したためだと考えられる。

#### 3-16 アーク放電エネルギーにおよぼすコンデンサ容量の影響

各条件のアーク放電エネルギーを充電電圧別に横軸にコンデンサ容量を取り、Fig.3-54, 3-55 に示した。両線径ともに、コンデンサ容量の増加に伴いアーク放電エネルギーが増加する傾向がみられた。充電電圧と同様に、コンデンサ容量の増加に伴い、アーク放電中の線材と板材間にかかる電圧、電流値の増加、またそれに伴い線材の溶融量が増加しアーク放電時間が増加したためだと考えられる。



### 3-17 線材溶融量におよぼす溶接条件の影響

各条件の 2-9 節で定義した線材溶融量をコンデンサ容量別に横軸に、加圧力をとったグラフを Fig.3-56, 3-57, 充電電圧をとったグラフを Fig.3-58, 3-59 に示した。また、充電電圧別に横軸にコンデンサ容量をとったグラフを Fig.3-60, 3-61 に示した。線材溶融量におよぼす溶接条件の影響はアーク放電エネルギーにおよぼす溶接条件の影響と同様の傾向を示す結果となった。そのため、線材溶融量はアーク放電エネルギーに依存していると考えられる。また、線材溶融量とアーク放電エネルギーの関係については 4-4 節にて考察を行った。

## 第4章 溶接現象の検討

### 4-1 パーカッション溶接におよぼすアークの影響

Fig.4-1 に放電回路の概略図を示す。また溶接中，オシロスコープにより測定した電圧を  $V_a$ ，その間の抵抗を  $R_a$  とする。この測定電圧  $V_a$  には実際に線材-板材間で消費された電圧のほかに固定治具や板材とロードセルの接地面などで消費された電圧も含まれている。そこで，実際に線材と板材間で消費されている電圧を  $V_b$ ，その間の抵抗を  $R_b$  とする。

次に，測定電圧  $V_a$  と測定電流から溶接中の抵抗  $R_a$  を算出した。線径 0.65mm，加圧力 3.5N，コンデンサ容量 40mF，充電電圧 48V の溶接中の抵抗  $R_a$  を Fig.4-2 に示した。放電前は電流が 0A だが，測定値のため 0A 付近を示しており，抵抗  $R_a$  は発散している。アーク放電開始直後に抵抗  $R_a$  が  $0.06\Omega$  を示し，その後緩やかに増加する。アーク放電が終了したところで抵抗  $R_a$  は急減し，しばらく一定の抵抗  $R_a$  を示し，電流が 0A に近づくと抵抗  $R_a$  が発散する。アーク放電部での抵抗  $R_a$  の平均値を  $R_{a1}$  とし，アーク放電終了直後から，抵抗  $R_a$  が発散するまでの範囲（抵抗  $R_a$  が安定している範囲）の平均値を  $R_{a2}$  とすると，それぞれ  $R_{a1}=0.095\Omega$ ， $R_{a2}=0.018\Omega$  の値を示した。

アーク放電中およびアーク放電後の線材と板材間以外の抵抗は変化しない。また，アーク放電後は線材と板材は短絡しているため非常に抵抗  $R_b$  は小さいと考えられる。そこで，抵抗  $R_a$  が安定している範囲の抵抗  $R_b$  を  $R_{b2}$  とすると次のようになる。

$$R_{b2} \ll R_{a2} \quad (1)$$

抵抗  $R_a$  が安定している範囲の電圧  $V_b$  を  $V_{b2}$  とすると

$$V_{b2} \ll V_{a2} \quad (2)$$

となり，線材と板材間で消費されるエネルギーは測定値よりも非常に小さいと考えられる。また，アーク放電部での抵抗  $R_b$  を  $R_{b1}$  とすると，次のように表される。

$$R_{b1} = R_{a1} - (R_{a2} - R_{b2}) \quad (3)$$

ここで、線材と板材が短絡している範囲（抵抗  $R_a$  が安定している範囲）では抵抗  $R_{b2}$  は式(1)より

$$R_{a2} - R_{b2} = R_{a2} \quad (4)$$

式(4)を式(3)に代入すると

$$R_{b1} = R_{a1} - R_{a2} \quad (5)$$

となる。また、アーク放電部での電圧  $V_b$  を  $V_{b1}$  とすると次のようになる。

$$V_{b1} = \left\{ (R_{a1} - R_{a2}) / R_{a1} \right\} \cdot V_{a1} \quad (6)$$

ここに、線径 0.65mm, 加圧力 3.5N, コンデンサ容量 40mF, 充電電圧 48V の溶接中の抵抗を代入すると

$$V_{b1} = 0.81V_{a1} \quad (7)$$

となり、測定電圧の約 8 割が実際に線材と板材間で消費されていると考えられる。

以上のことから、アーク放電部以外で測定された電圧は、実際には線材と板材で消費されていない電圧を大きく含んでいると考えられる。そこから、アーク放電部内で消費されるエネルギーが継手に大きく影響していると考えられる。

## 4-2 継手強度の検討

4-1 節からアーク放電の有無によって同条件の実験でも現象が大きく異なると考えられる。そこで、アークの発生がおきた実験とおきていない実験でわけて考察を行った。そこで、実験結果で示した Fig.3-1, 3-2, 3-25, 3-26, 3-27, 3-28 のグラフをアークの発生の有無によってプロットをわけ、平均値をアークの発生がおきた実験のみで算出し、Fig.4-3～4-8 に示した。Fig.4-3, 4-4 より、低加圧域では Fig.3-1, 3-2 同様、加圧力の増加に伴い継手強度の増加がみられた。しかし、高加圧域では継手強度に影響がみられないもしくは若干の増加がみられた。このことから、高加圧域でもアークの発生さえおきれば十分な継手強度が得られると考えられる。

Fig.4-5～4-8 よりアークの発生がおきた実験のみで考えた場合でも，充電電圧およびコンデンサ容量の増加に伴い，継手強度が増加する傾向がみられ，充電電圧およびコンデンサ容量が一定の値を超えるとそれ以上の継手強度の増加はみとめられなかった．つまり，アークの発生状況が継手強度に影響していると考えられる．また，加圧力によって線材の押し込み速度が変化し，アーク放電時間，アーク放電エネルギーに影響をおよぼす．そのため，最適な電氣的溶接条件の範囲は加圧力によって変化すると考えられる．

#### 4-3 アーク放電時間に関する考察

実験結果より，加圧力の増加に伴いアーク放電時間が減少していた．これは，加圧力の増加に伴い線材の押し込む速度が増加し，速く短絡するためだと考えられる．そこで放電直後から放電が終了するまでの固定治具の動きを算出した<sup>2)</sup>．

まず，固定治具とばねの関係を Fig.4-9 のような 1 自由度のばね－質量系と仮定する．ばねの質量は固定治具に対し小さいため無視し，固定治具の質量を  $m$  とする．

ばねに固定治具を吊るして静止した時の，ばねの自然長からの伸びを静変位  $\delta_{st}$  とすれば，次の関係が成立する．

$$mg = k\delta_{st} \quad (8)$$

ここで， $g$  は重力加速度であり， $k$  はばね定数である．式(8)より静変位  $\delta_{st}$  は次式で表される．

$$\delta_{st} = \frac{mg}{k} \quad (9)$$

次に，静つりあいの状態における固定治具の重心の位置を原点とし，それから下向きに  $x$  軸をとる．溶接前の固定治具の重心の位置を  $x_0$  とし，溶接後の位置を  $x$  とする．また，ばねが自然長になるまでは 1 自由度の自由振動と同じ動きをすると考える．つまり，ばねが自然長になるまでの運動方程式はニュートンの運動の第 2 法則により，次式で表される．

$$m\ddot{x} = mg - k(x + \delta_{st}) \quad (10)$$

ここで、 $\ddot{x}$ は変位  $x$  を時間  $t$  で二回微分したものである。式(10)に式(9)を代入すると、

$$m\ddot{x} = -kx \quad (11)$$

となる。また、(11)式を次のように書き換える。

$$\ddot{x} + p^2x = 0 \quad (12)$$

ここで、

$$p^2 = \frac{k}{m} \quad (13)$$

である。式(12)の一般解は、 $c_1$ および $c_2$ を未定定数とすれば、

$$x = c_1 \cos pt + c_2 \sin pt \quad (14)$$

で表される。また、速度 $\dot{x}$ は次のようになる。

$$\dot{x} = -c_1 \sin pt + c_2 \cos pt \quad (15)$$

次に式(14)を次のように表す。

$$x = a \cos(pt - \alpha) \quad (16)$$

式(16)は加法定理により、

$$x = a \cos pt \cos \alpha + a \sin pt \sin \alpha \quad (17)$$

となり、式(14)、(17)より

$$c_1 = a \cos \alpha \quad (18)$$

$$c_2 = a \sin \alpha \quad (19)$$

となる。振幅  $a$  と初期位相  $\alpha$  は式(18)、(19)より、次式で表される。

$$a = \pm \sqrt{c_1^2 + c_2^2} \quad (20)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{c_2}{c_1} \right) \quad (21)$$

また、初期条件は次のようになる。

$$x_0 = -\left( \frac{F}{k} + \delta_{st} \right) \quad (22)$$

$$\dot{x}_0 = 0 \quad (23)$$

ここで  $F$  は線材の初期加圧力である。式(14), (15), (22), (23)より未定定数は次のようになる。

$$c_1 = x_0 \quad (24)$$

$$c_2 = 0 \quad (25)$$

次にばねが自然長になったあとの固定治具はばねの力をうけず，固定治具が受ける力は重力のみとなり，運動方程式は次式のようなになる。

$$m\ddot{x} = mg \quad (26)$$

また，加速度 $\ddot{x}$ ，速度 $\dot{x}$ ，変位  $x$  は次のようになる。

$$\ddot{x} = g \quad (27)$$

$$\dot{x} = gt + b_1 \quad (28)$$

$$x = \frac{1}{2}gt^2 + b_1t + b_2 \quad (29)$$

$b_1$ と $b_2$ は未定定数である。ばねが自然長になる時間 $t_1$ の時の固定治具の速度を $v_1$ ，変位を $x_1$ とすると変位は

$$x = \frac{1}{2}g(t - t_1)^2 + v_0(t - t_1) + x_1 \quad (30)$$

となる。また  $v_0$  は次式で表される。

$$v_0 = -c_1 \sin pt_1 + c_2 \cos pt_1 \quad (31)$$

式(16), (30)により固定治具の変位を算出した。また，本実験で用いた固定治具の質量は $m=0.0184\text{kg}$ ，ばね定数は $k=776\text{N/m}$ である。Fig.4-10 に各加圧力における，時間と変位の計算結果を示す。

3-5～3-7 節ではアークの発生の有無に関係なくアーク放電時間の検討を行った。4-1 節で述べたように，アークの有無は溶接現象を大きく変えるため，アークの発生がおきた実験でのみ考える。3-5～3-7 節の実験結果で示した Fig.3-32～3-37 のグラフをアークの発生の有無によってプロットをわけ，平均値をアークの発生がおきた実験から算出し，Fig.4-11～4-16 に示した。アークの発生がおきない実験は，アーク放電時間は 0s である。そのた

め、アークの有無が混在している条件では Fig.3-32～3-37 に比べ平均値が若干増加しているが、アークの発生しない実験は高加圧-低電圧の範囲でみられるため平均値に大きな変化はなく、基本的なアーク放電時間におよぼす溶接条件の影響は、アークの有無により実験を区別しても、Fig.3-32～3-37 の実験結果と傾向は変わらなかった。

また、各条件の溶接前後の線材の変位と前述した計算結果を比較するため、横軸に放電時間を取り Fig.4-17, 4-18 に示した。実験結果は計算結果と同様の傾向を示していることから、放電時間は線材の落下中の溶融量と加圧力に依存していると考えられる。

#### 4-4 アーク放電エネルギーと線材溶融量に関する考察

アーク放電エネルギーについて Fig.3-50～3-55 の実験結果を、アークの発生の有無によってプロットをわけ、平均値をアークの発生がおきた実験のみで算出し、Fig.4-19～4-24 に示した。アークの発生がおきない実験はアーク放電時間が 0s であることからアーク放電エネルギーは 0J となる。そのため、アーク放電エネルギーのアーク放電時間と同様、アークの有無が混在している条件では平均値が増加している。また、アークの発生しない実験は高加圧-低電圧の範囲でみられるため平均値に大きな変化はなく、基本的なアーク放電エネルギーにおよぼす溶接条件の影響は、アークの有無により実験を区別しても変わらなかった。つまり、アーク放電の有無に関わらず、充電電圧、コンデンサ容量の増加に伴い充電エネルギーが増加し、アーク放電エネルギーが増加する。また、加圧力の増加に伴い線材の押し込み速度が増加およびアークの発生確率が減少するため、アーク放電エネルギーが減少する。

次に線材溶融量について Fig.3-56～3-61 の実験結果を、アークの発生の有無によってプロットをわけ、平均値をアークの発生がおきた実験のみで算出し、Fig.4-25～4-30 に示した。アークの発生がおきていない実験はすべて線材溶融量 0mm<sup>3</sup>を示している。また、各

溶接条件に対する増加傾向もアーク放電エネルギーと同様の結果となった。

#### 4-5 線材溶融量におよぼすアーク放電エネルギーの影響

4-1 節で述べたように、溶接過程の中でアーク放電部での消費エネルギーが最も大きいと考えられる。また、3-17, 4-4 節ではアーク放電エネルギーと線材溶融量におよぼす溶接条件の影響がそれぞれ同様の傾向をしめした。そこで、線材溶融量におよぼすアーク放電エネルギーの影響を検討した。

Fig.4-31, 4-32 に線材溶融量とアーク放電エネルギーの関係を示す。また、加圧力毎に最小二乗法により一次曲線を引いた。線径 0.65mm では全加圧力で相関係数  $r=0.94$  以上を示しており、線径 0.32mm では相関係数  $r=0.80$  以上を示している。一般的に相関係数  $r=0.7$  以上を示していると、強い相関があると考えられている。そこから、アーク放電エネルギーと線材溶融量は比例関係にあると考えられる。

また、線径 0.65, 0.32mm のグラフを重ねたものを Fig.4-33 に示す。線径 0.32mm のプロットと線径 0.65mm のプロットが重なっていることから、線材溶融量とアーク放電エネルギーとの関係におよぼす線径の影響は小さいと考えられる。

#### 4-6 継手強度におよぼすアーク放電エネルギーの影響

##### (A) 線径 0.65mm

各加圧力の継手強度を横軸にアーク放電エネルギーをとり、Fig.4-34~4-38 に示した。

(a), (b) はそれぞれ、同じデータにより描いたグラフで (a) は横軸の目盛間を等間隔にとり (b) は横軸に対数をとっている。

加圧力 0.5N では、全アーク放電エネルギーで継手強度 0N がみられ、加圧力 0.5N では全エネルギー域で安定した継手強度は得られないと考えられる。

加圧力 2.0N 以上では、一定のアーク放電エネルギー値まで、アーク放電エネルギーの増



加に伴い継手強度が増加している。ここでは、溶融量の増加に伴い継手強度が増加していると考えられる。アーク放電エネルギーが一定の値を超えるとアーク放電エネルギーの増加にともない継手強度のばらつきが大きくなり、継手強度の増加はみられない。

これらのことから、各加圧力で適正なアーク放電エネルギーの範囲があると考えられる。

#### (B) 線径 0.32mm

各加圧力の継手強度を横軸にアーク放電エネルギーをとり、Fig.4-39～4-41 に示した。

加圧力 0.5N では、アーク放電エネルギーに関係なく安定した継手強度を得ることができなかった。

加圧力 2.0N では、アーク放電エネルギーの増加に伴い継手強度が増加している。また線径 0.65mm のような、アーク放電エネルギーの増加に伴い継手強度が低下する条件が確認されなかった。これは、固定治具と板材とが接触する条件が線径 0.65mm より低エネルギーで起きることが原因である。そのため、突き出し長さ 3mm に固定した本実験では線径 0.32mm のアーク放電エネルギーの増加による継手強度の減少は確認されなかったと考えられる。

加圧力 3.5N では、アーク放電エネルギー 6J 以下ではアーク放電エネルギーの増加に伴い継手強度が増加している。6J 以上ではアーク放電エネルギーの増加に伴う継手強度の増加はみられない。

また、加圧力 3.5N のコンデンサ容量 20mF、充電電圧 28V とコンデンサ容量 40mF、充電電圧 24V の各条件で同程度のアーク放電エネルギーを示しているのに対し、コンデンサ容量 20mF、充電電圧 28V の条件で実験を行ったほうが継手強度は比較的高い値を示している。加圧力 2.0N のコンデンサ容量 20mF、充電電圧 28V とコンデンサ容量 60mF、充電電圧 24V にも同様の傾向がみられた。どちらもコンデンサ容量が低く、充電電圧が高い条件の方が比較的高い継手強度を示している。そこで加圧力 3.5N のコンデンサ容量

20mF, 充電電圧 28V とコンデンサ容量 40mF, 充電電圧 24V の各条件の比較的能量一値に近い実験の電圧, 電流を Fig.4-42 に示す. また, アーク放電エネルギーはそれぞれ 2.09J, 2.11J で継手強度はそれぞれ 346.9N/mm<sup>2</sup>, 170.3N/mm<sup>2</sup> である. Fig.4-42 のようにコンデンサ容量が低く, 充電電圧が高い条件の方がアーク放電時間が短く, 電圧, 電流が高くなる. これは, RC 回路の放電特性からも妥当な結果だと考えられる. つまり, 同アーク放電エネルギーの場合, 電圧, 電流が高く, アーク放電時間が短いほうが比較的高い継手強度が得られると考えられる.

#### 4-7 継手強度におよぼす加圧力の影響

加圧が高い条件では, 低いアーク放電エネルギーで継手強度を得ることができる. また加圧が低い条件, 特に加圧力 0.5N の条件ではアーク放電エネルギーに関わらず十分な継手強度を得ることはできなかった. そこで, 加圧力を 0.5, 2.0, 3.5N (線径 0.65mm, コンデンサ容量 40mF, 充電電圧 48V) に変化させ実験を行った, それぞれの継手の断面写真を Fig.4-43 に示す. 加圧力 0.5N の断面には熔融金属が充填されていないブローホールだと考えられる箇所がおおくみられた. それに対し, 加圧力 2.0, 3.5N の断面にはブローホールが多少は確認されるものの加圧力 0.5N と比べると極めて少ない結果となった. また, 加圧力 0.5N では線材の中心に向かって熔融金属が盛り上がる傾向がみられた. これは, 線材と板材の熔融部分が接触して短絡し, 線材の固相部分が板材の固相部分まで押し込まれずに凝固したためだと考えられる. 加圧力 2.0N, 3.5N では熔融金属が外側では線材の中心に向かって盛り上がり, 線材の中心にある程度近づいたところで線材の中心に向かって落ちこむ傾向がみられた. これは短絡後, 線材の固相部分が板材の固相部分まで押し込まれ熔融金属が押し出されたところで凝固したためだと考えられる.

これらのことから, 加圧力 0.5N では, 線材の押し込み速度が十分ではなく熔融金属が押し込められないため, ブローホールができたと考えられる. また, 加圧力 0.5N で十分な継手を

得られない原因はこのブローホールが原因だと考えられる。

#### 4-8 平均電圧が高い実験の検討

3-8-B 節でみられた線径 0.32mm での、平均電圧が他の実験と比べて高くなる現象について考察を行った。その現象については全実験のなかで、2 回確認された。そこで、通常の溶接中の波形を Fig.4-44(a)に示し、その現象が起きた実験の溶接中の波形を Fig.4-44(b), 4-44(c)に示した。Fig.4-44(a)では、アーク放電開始後電圧値は徐々に低下していく、また電流値も緩やかに減少していく。ところが Fig.4-38(b) , 4-38(c)では、アーク放電開始後、電圧値は一定で保たれている。また、その間の電流値は 0 に近い値を示している。そのことから、電流はほぼ流れておらず絶縁に近い状態になっていると考えられる。また、アーク放電エネルギー、線材溶融量も他の同条件の実験に比べ非常に低い値を示している。この現象が、線径が細く、加圧力の低い条件でみられることから、アーク放電開始直後に線材の先端が吹き飛んでしまい、線材と板材間の距離が大きくなってしまったことが原因だと考えられる。

#### 4-9 最適溶接条件の検討

本実験範囲内での各線径の最適条件を継手強度の結果から検討を行った。

##### (A) 線径 0.65mm

実験結果より、継手強度の平均値が一番高い値を示したのは加圧力 5.0N、コンデンサ容量 20mF、充電電圧 48V の条件で 349N/mm<sup>2</sup>（継手効率 62.3%）である。また、アークの発生がおきた実験のみで考えるならば加圧力 7.5N、コンデンサ容量 20mF、充電電圧 48V の条件で 364N/mm<sup>2</sup>（継手効率 65.0%）である。

##### (B) 線径 0.32mm

実験結果より、継手強度の平均値が一番高い値を示したのは加圧力 3.5N、コンデンサ容

量 20mF, 充電電圧 28V の条件で 348N/mm<sup>2</sup> (継手効率 62.1%) である。また, アークの発生がおきた実験のみで考えた場合も同条件が一番高い継手強度の平均値を示した。

## 第5章 破断形状の観察

4-6節でアーク放電エネルギーの増加に伴い継手強度の増加がみられたが、線径0.65mmでは一定のエネルギー値を超えるとそれ以上の継手強度の増加がみられない。そこで線径0.65mmの引張試験後の線材と板材から破断形状を観察し、定量的に評価を行った。そこで第5章では破断形状におよぼす溶接条件の影響および破断形状と継手強度の関係について考察を行う。

### 5-1 破断形状の評価方法

引張試験後の線材及び板材を光学顕微鏡により観察し以下のような評価を行った。

引張試験後の板材から溶融部の直径  $D$  を評価するため、Fig.5-1のように測定を行った。

アーク放電が確認されたすべての試験片において、引張試験後の線材に溶融部の一部が付着しているのが確認された。そこで破断面までの深さ  $h$  を評価するため、線材に付着した溶融部の長さを Fig.5-2のように線材に対して平行に測定した。また破断界面の深さ  $h$  は線材の中心を軸とし90度ずつ回転させて4回測定した平均を採用した。

### 5-2 溶融部直径におよぼす加圧力の影響

各条件の溶融部直径をコンデンサ容量別に横軸に加圧力をとり Fig.5-3 に示した。またアーク発生の有無によりプロットを分けており、実線は平均値を示しており、アークが生じた実験でのみ算出したものである。加圧力の増加に伴い、溶融部直径は減少する傾向がみられた。これは線材溶融量と同じく加圧力の増加に伴いアーク放電エネルギーが減少し、板材の溶融量が減少したためだと考えられる。

### 5-3 溶融部直径におよぼす電氣的溶接条件の影響

各条件の溶融部直径をコンデンサ容量別に横軸に充電電圧をとったグラフを Fig.5-4 に、

充電電圧別に横軸にコンデンサ容量をとったグラフを Fig.5-5 に示した。Fig.5-4,5-5 より、充電電圧、コンデンサ容量の増加に伴い溶融部直径が増加する傾向がみられた。これは線材溶融量と同様に充電電圧、コンデンサ容量を増加させるとアーク放電エネルギーが増加し、板材溶融量が増加するためだと考えられる。そこでアーク放電エネルギーと溶融部直径の関係を加圧力毎に Fig.5-6, 5-7 に示す。

Fig.5-6 からアーク放電エネルギーの増加に伴い溶融部直径が増加する傾向がみられた。また Fig.5-7 から加圧力 0.5N の実験だけ他の加圧力の実験に比べ、アーク放電エネルギーに対する溶融部直径が小さくなる傾向がみられた。加圧力 0.5N の実験は他の加圧力に比べ、アーク放電時間が大きく、平均電圧、平均電流が小さい。このように同じアーク放電エネルギー値でも加圧力によりアーク放電特性が異なることが関係していると考えられる。

#### 5-4 破断面深さにおよぼす加圧力の影響

各条件の破断面深さをコンデンサ容量別に横軸に加圧力を取り Fig.5-8 に示した。またアーク発生の有無によりプロットを分けており、実線は平均値を示しており、アークが生じた実験でのみ算出したものである。コンデンサ容量 20mF, 充電電圧 20V の条件を除いて、加圧の低い条件では加圧力の増加に伴い、破断界面深さが増加する傾向がみられた。それに対し加圧力の高い条件では増加傾向が緩やかになる、もしくは減少する傾向がみられた。

#### 5-5 破断面深さにおよぼす電氣的溶接条件の影響

各条件の破断界面深さをコンデンサ容量別に横軸に充電電圧をとったグラフを Fig.5-9 に、充電電圧別に横軸にコンデンサ容量をとったグラフを Fig.5-10 に示した。両グラフともアーク発生の有無によりプロットを分けており、実線は平均値を示しており、アークが生じた実験でのみ算出したものである。Fig.5-9 から充電電圧の増加に伴い、破断面深さは増加する傾向がみられた。また、充電エネルギーの高い条件では増加傾向が緩やかになっている。

Fig.5-10 では充電エネルギーの低い条件ではコンデンサ容量の増加に伴い破断面深さが増加している傾向がみられた。それに対し充電エネルギーの高い条件ではコンデンサ容量の増加に伴い破断面深さが減少する傾向がみられた。

#### 5-6 板材溶融量の検討

溶融部直径は加圧力の増加に伴い減少し、充電エネルギーの増加により増加することから、溶融部直径の増加に伴い板材溶融量が増加していると考えられる。それに対し、破断面深さは充電エネルギーが高い条件では充電エネルギーによる増加がみられない。そこで加圧力 3.5N、充電電圧 48V、コンデンサ容量 20mF の試験片と加圧力 3.5N、充電電圧 48V、コンデンサ容量 60mF の引張試験後の板材の断面写真をそれぞれ Fig.5-11(a), (b)に示す。赤い線で囲った部分が溶融金属であり、(a)は溶融界面付近で破断しているのに対し(b)は板材に多くの溶融金属が残っている状態が確認された。このように充電エネルギーの高い条件では板材側に多くの溶融金属が残っている状態だと考えられる。そこで溶融部直径と破断面深さの関係を Fig.5-12 に示す。加圧力 0.5N は比例関係にあるものの、加圧力が高い条件では溶融部直径が大きくなると破断面深さのばらつきが大きくなる傾向がみられた。加圧力 0.5N が比例関係を示しているのは、溶融界面で破断が起きていると考えられる。

そこで加圧力 0.5N ではすべて溶融界面で破断が起きており、溶け込み深さと溶融部直径は比例関係にあると考え、ほかの加圧力においてもそれらの関係が成り立つと仮定する。また、板材溶融部界面を二次曲線と仮定し、板材溶融部は二次曲線の回転体と仮定すると、板材溶融量  $V$  は次のように考えられる。

$$V = \frac{\pi D^2 l}{8} \quad (32)$$

ここで、 $D$  は溶融部直径、 $l$  は溶け込み深さである。また、溶融部直径と溶け込み深さは比例しているという仮定から、溶融部直径と溶け込み深さは以下のような関係になる。

$$l = a \cdot D \quad (33)$$

ここで  $a$  は比例定数であり，今回は加圧力  $0.5\text{N}$  の溶融部直径と破断面深さのグラフに最小二乗法を用いて求めた傾き  $a=0.207$  を用いた．

計算結果を Fig.5-13, 5-14 に示す．計算結果から，アーク放電エネルギーの増加に伴い，板材溶融量が増加していると考えられる．また，Fig.5-14 に最小二乗法により一次直線を引いたところ相関係数が高い値を示した．このことから，板材溶融量とアーク放電エネルギーは比例関係にあると考えられる．

#### 5-7 継手強度におよぼす板材溶融量の影響

5-6 節で推定した板材溶融量と継手強度の関係を加圧力毎に Fig.5-15 に示す．加圧力  $0.5\text{N}$  の実験では，板材溶融量が増加することで継手強度が増加しているが，ブローホールの影響で安定した継手強度が得ることができていない．加圧力  $2.0\sim 5.0\text{N}$  の実験では板材溶融量が約  $0.2\text{mm}^3$  までは板材溶融量の増加に伴い継手強度が増加している．板材溶融量が  $0.2\text{mm}^3$  以上を超えると継手強度の増加はみられない．加圧力  $7.5\text{N}$  の実験では  $0\sim 0.2\text{mm}^3$  の板材溶融量をえることはできなかった．



## 第6章 結言

アルメル線材とアルミニウム板のパーカッション溶接における適正条件について以下の点が明らかになった。

- ・加圧力の増加に伴いブローホールが抑制され、継手強度が増大する。ただし加圧力の高い範囲ではアーク発生が抑制されるために、継手強度が減少する。また、充電電圧、コンデンサ容量の増加に伴い、継手強度が増加する。ただし充電エネルギーの高い範囲では継手強度は減少する。

- ・アークの発生確率は加圧力の増加に伴い減少し、コンデンサ容量による影響は受けず、充電電圧の増加に伴い増加する。

溶接条件がアーク発生状況におよぼす影響および、アークの発生状況が継手強度におよぼす影響について以下の点が明らかになった。

- ・アーク放電中に線材-板材間で消費されたエネルギー（アーク放電エネルギー）はコンデンサ容量および充電電圧の増加に伴い増加する。また、加圧力の増加に伴い線材の押し込み速度が増加するため、アーク放電エネルギーは減少する。

- ・線材の溶融量はアーク放電エネルギーに伴い増加する。また、アーク放電エネルギーの増加に伴い継手強度が増加し、アーク放電エネルギーが一定の値を超える範囲では継手強度のさらなる増加はみられなかった。また、その値は加圧力の増加に伴い減少する。

線径 0.65mm の破断後の溶融部形状から板材溶融量を推定し以下の結果を得た。

- ・板材の溶融量はアーク放電エネルギーに伴い増加する。
- ・加圧力 2.0～5.0N の条件では、板材溶融量の増加に伴い継手強度が増加するが、板材溶融量が 0.2mm<sup>3</sup> を超える範囲では継手強度のさらなる増加はみとめられなかった。

参考文献

- 1) 平成 25 年度 修士論文 線材と板材とのパーカッション溶接部の継手強度に及ぼす加  
圧方式の影響 三重大学大学院 工学研究科機械工学専攻 材料機能設計 西嶋 康
  
- 2) 新機械工学シリーズ 機械力学 麻生 和夫, 谷 順二, 長南 征二, 林 一夫 共著  
朝倉書店

## 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大学院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、本研究を遂行するにあたり多大なご協力を頂きました材料機能設計研究室の院生の方々、学部生の皆様方に深く感謝いたします。

最後に、幾多のご協力を頂きながら、ここに御指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。

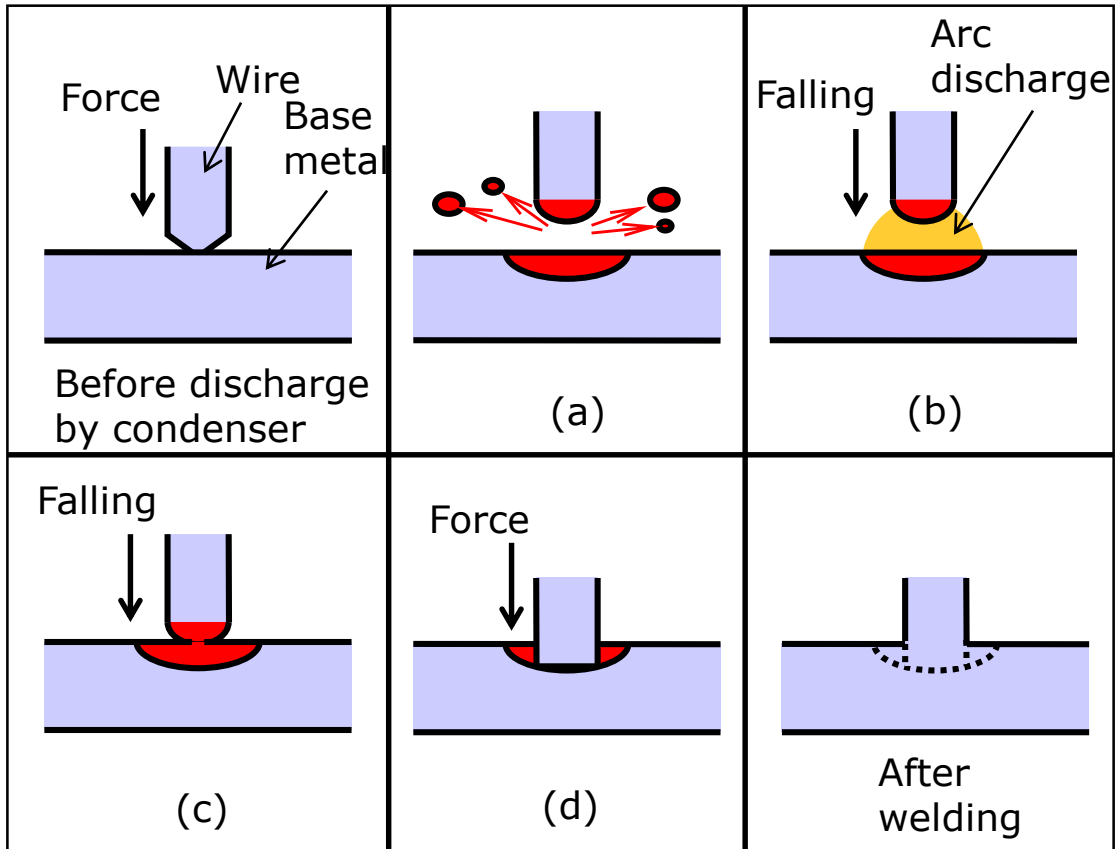


Fig. 1-1 Welding process

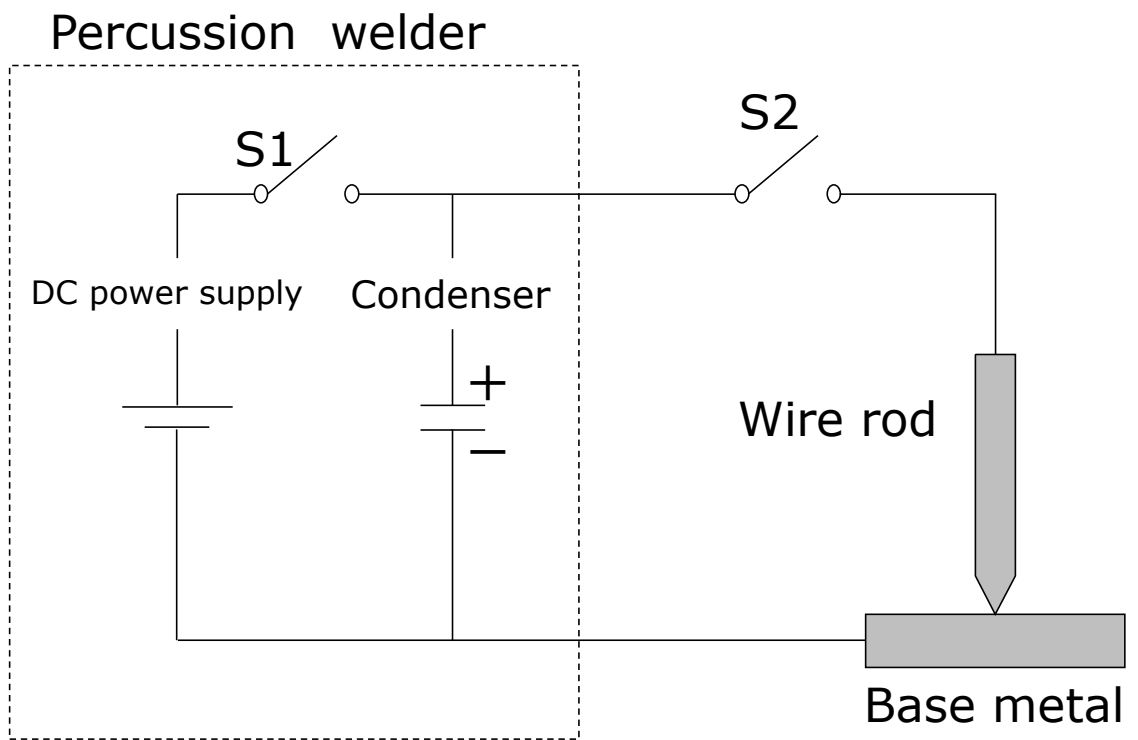


Fig. 2-1 Percussion welding process

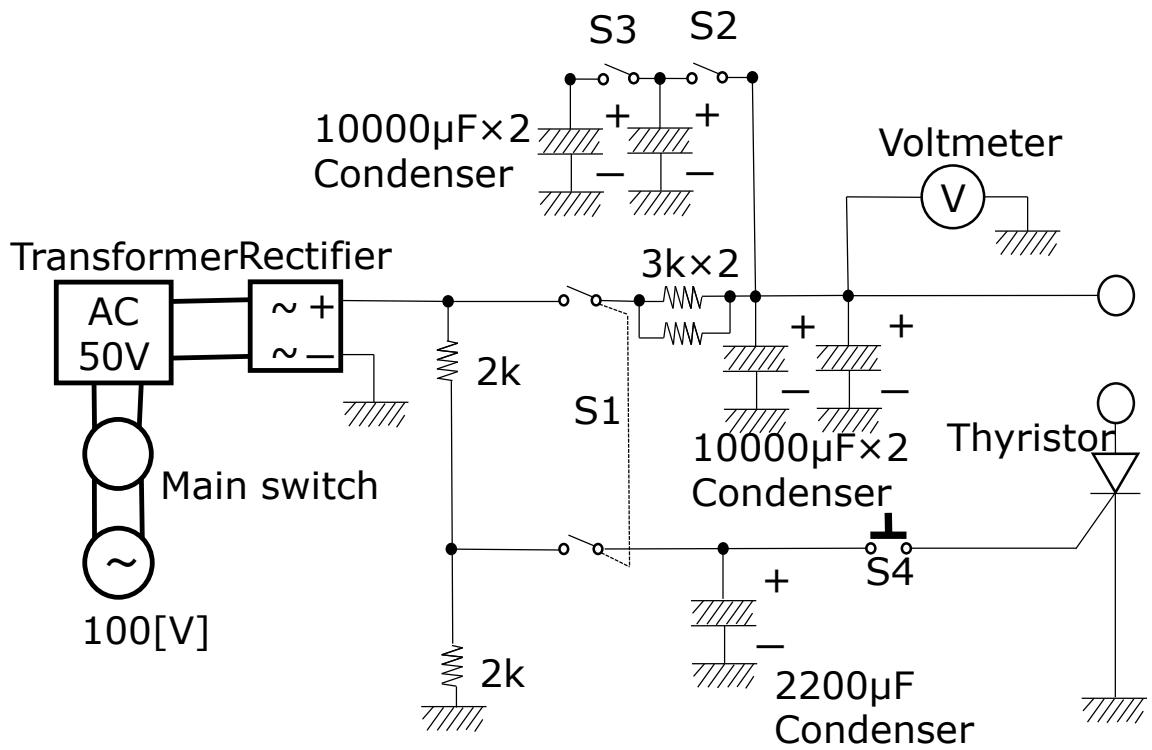


Fig. 2-2 Circuit diagram of welding machine

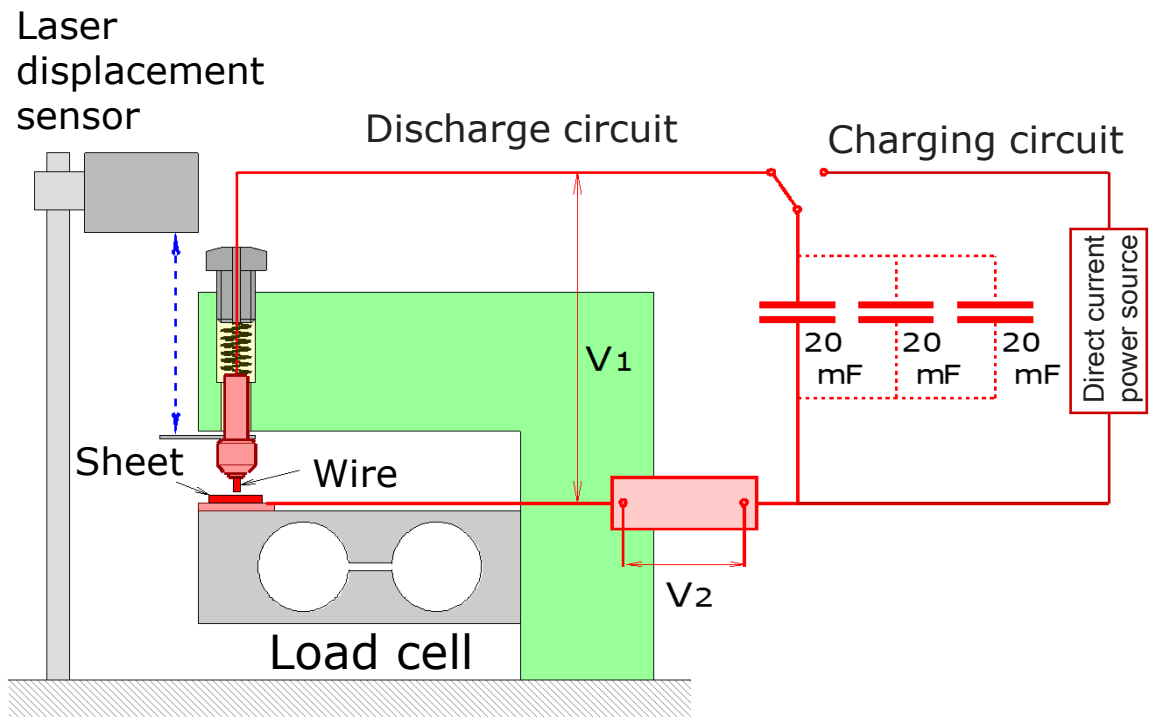
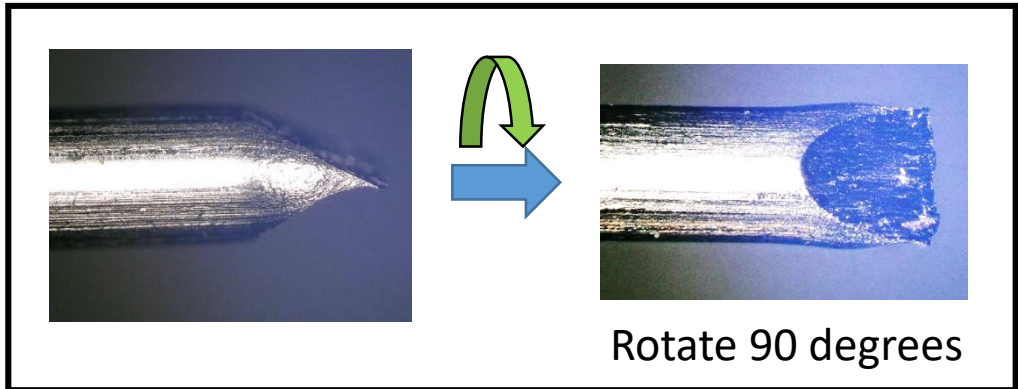


Fig. 2-3 Drawing of experimental apparatus

# Chemical composition of wire rod (%)

	Ni	Mn	Al	Si	Fe
Alumel	94	2.5	2	1	0.5



(a) Wire before welding

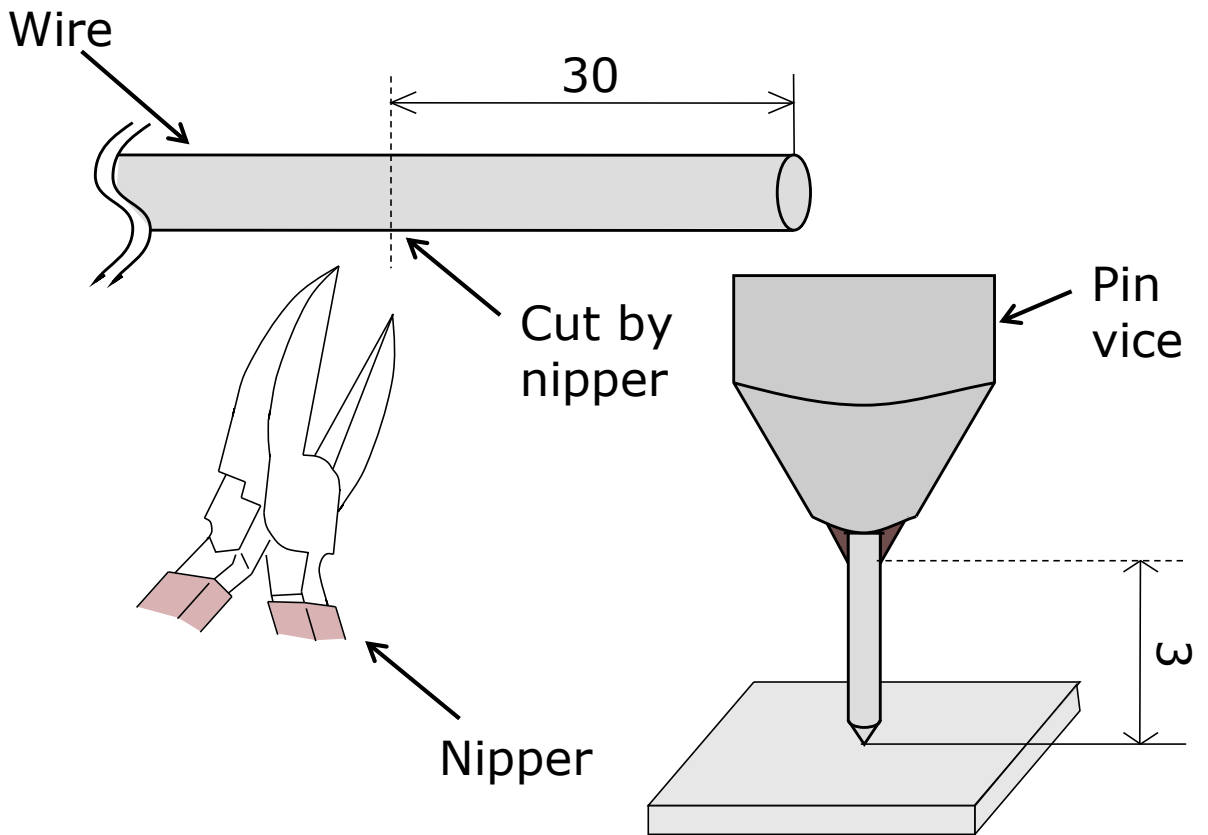
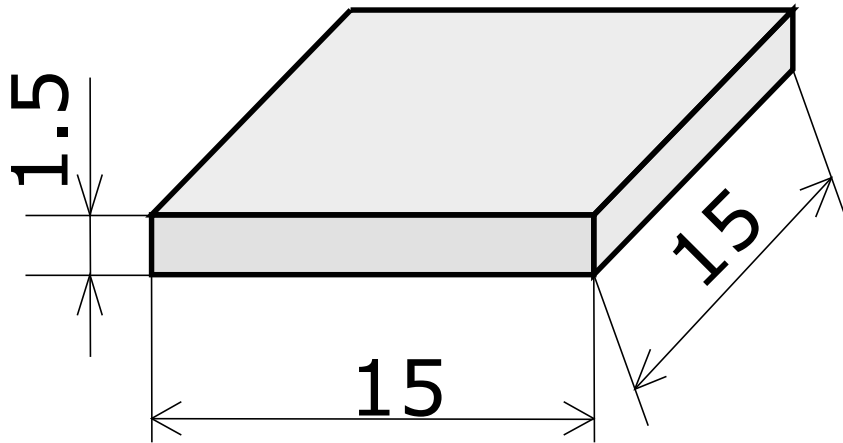


Fig. 2-4 Form and chemical composition of wire





Chemical composition of base metal (%)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
A1050P	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	Remaining

Fig. 2-5 Form and chemical composition of base metal

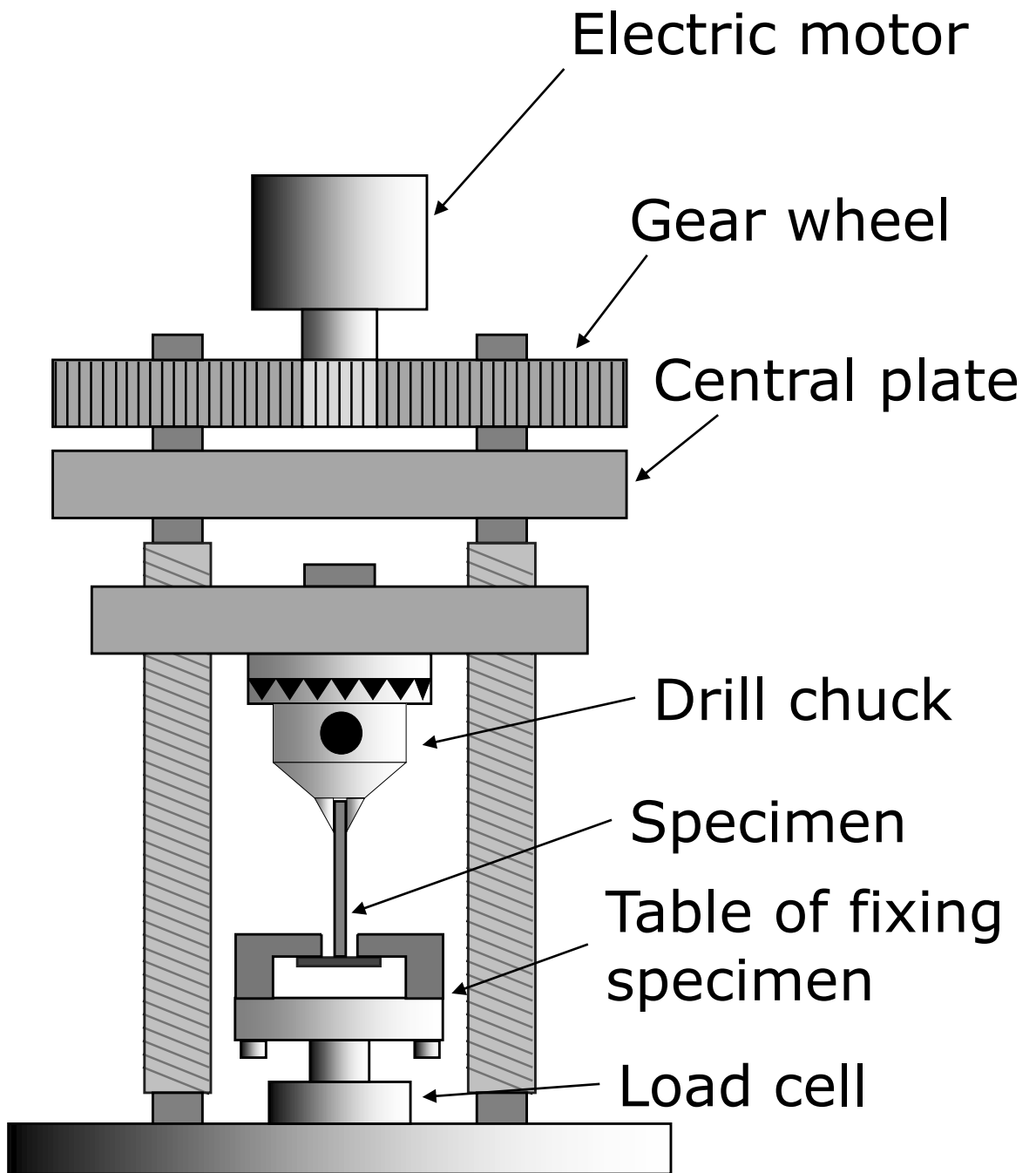
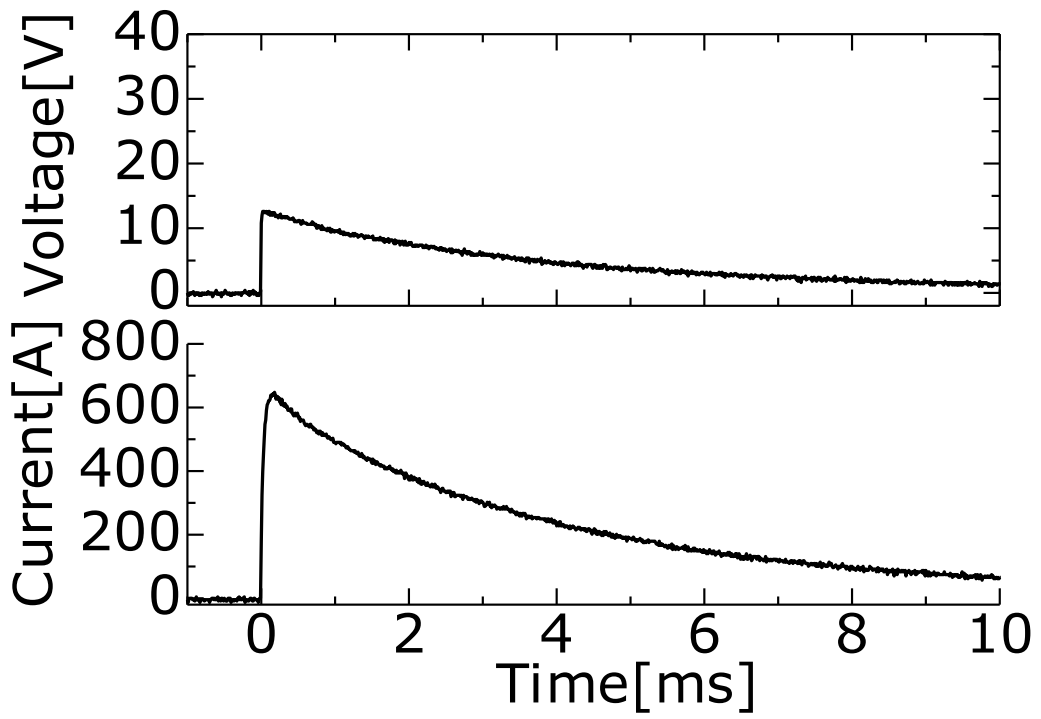
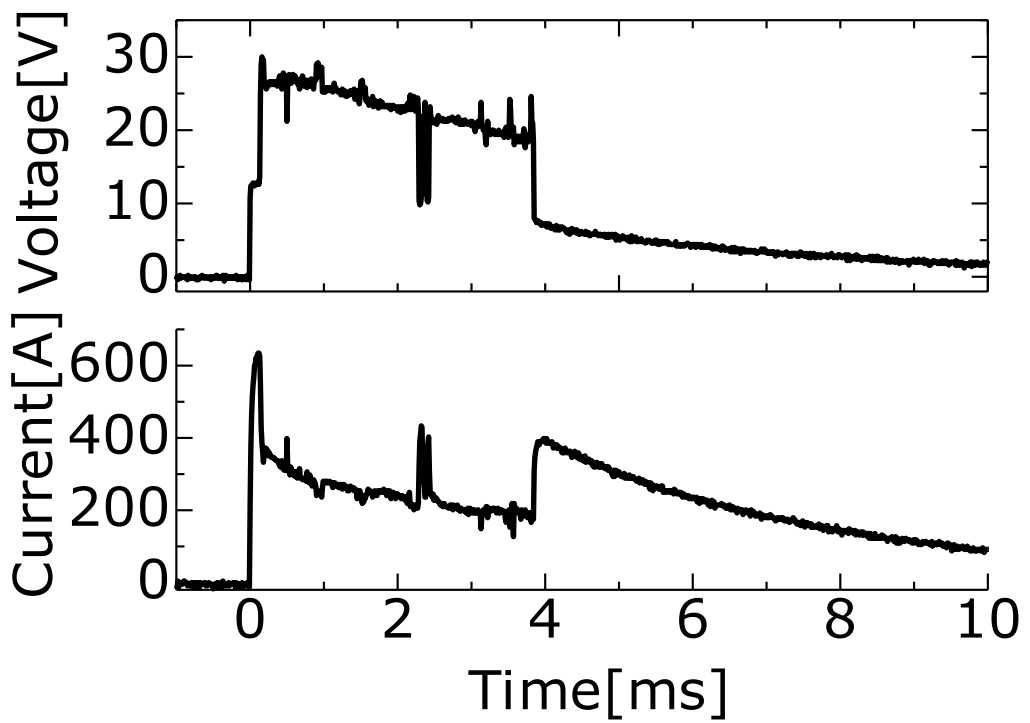


Fig. 2-6 Tensile tester



(a)



(b)

Fig.2-7 Change in voltage and current during welding

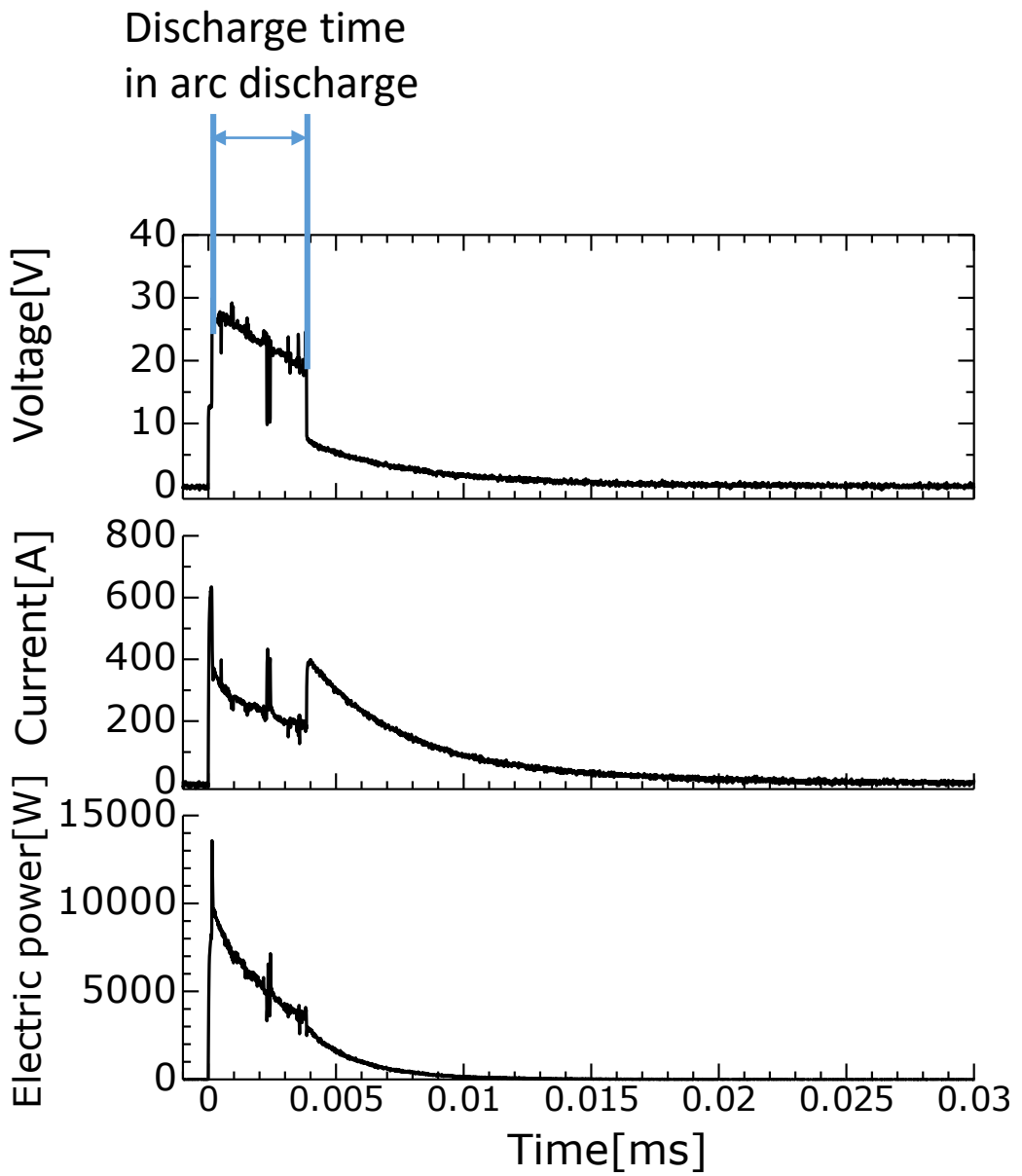
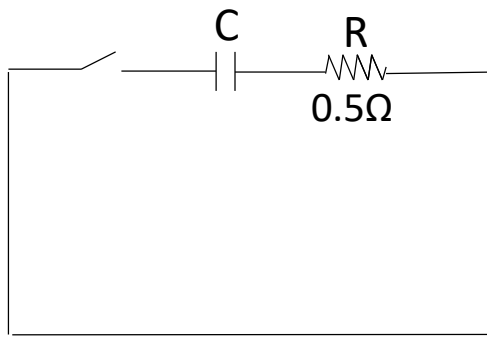
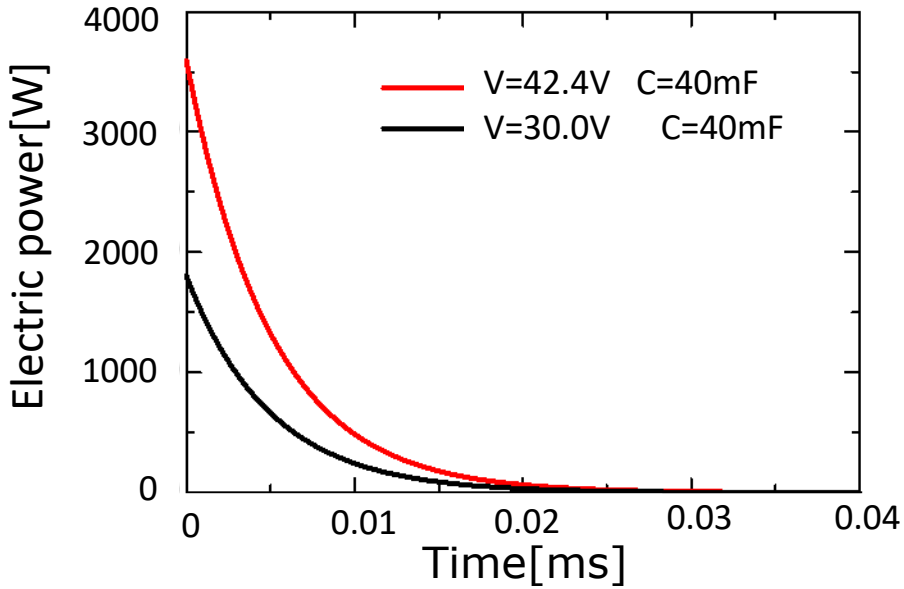


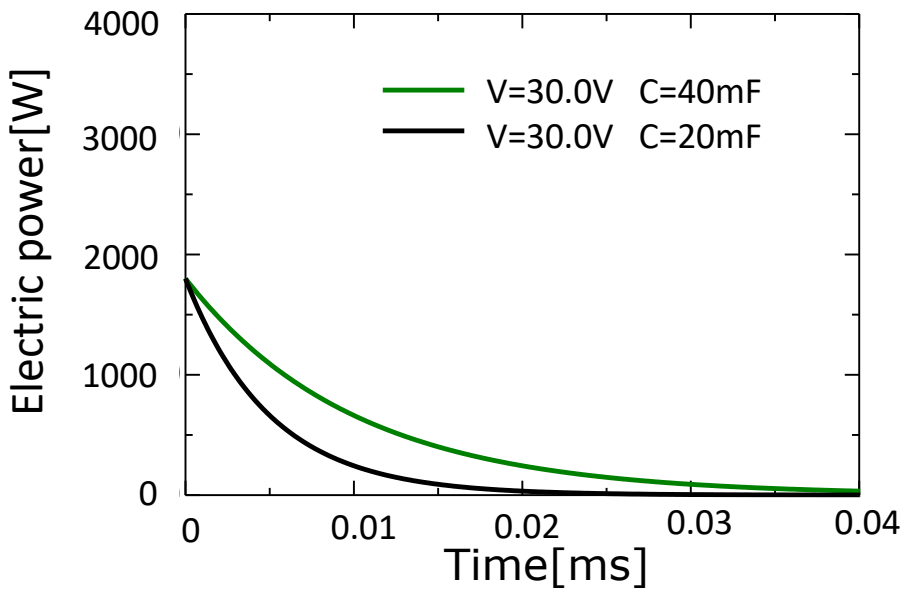
Fig.2-8 Change in voltage and current , electric power during welding



(a)



(b)



(c)

Fig.2-9 Discharge characteristics of RC circuit

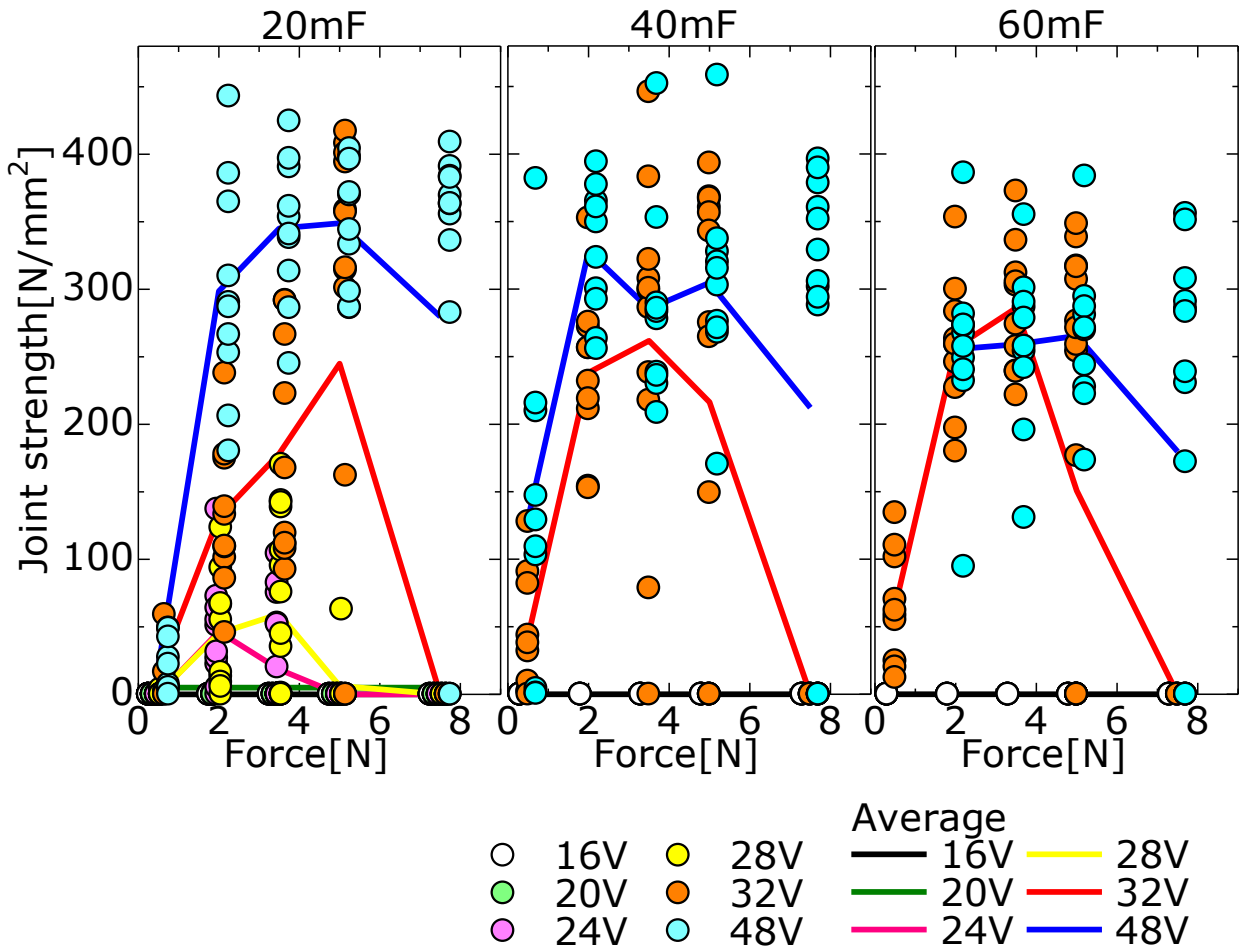


Fig.3-1 Influence of force on joint strength of wire diameter 0.65mm

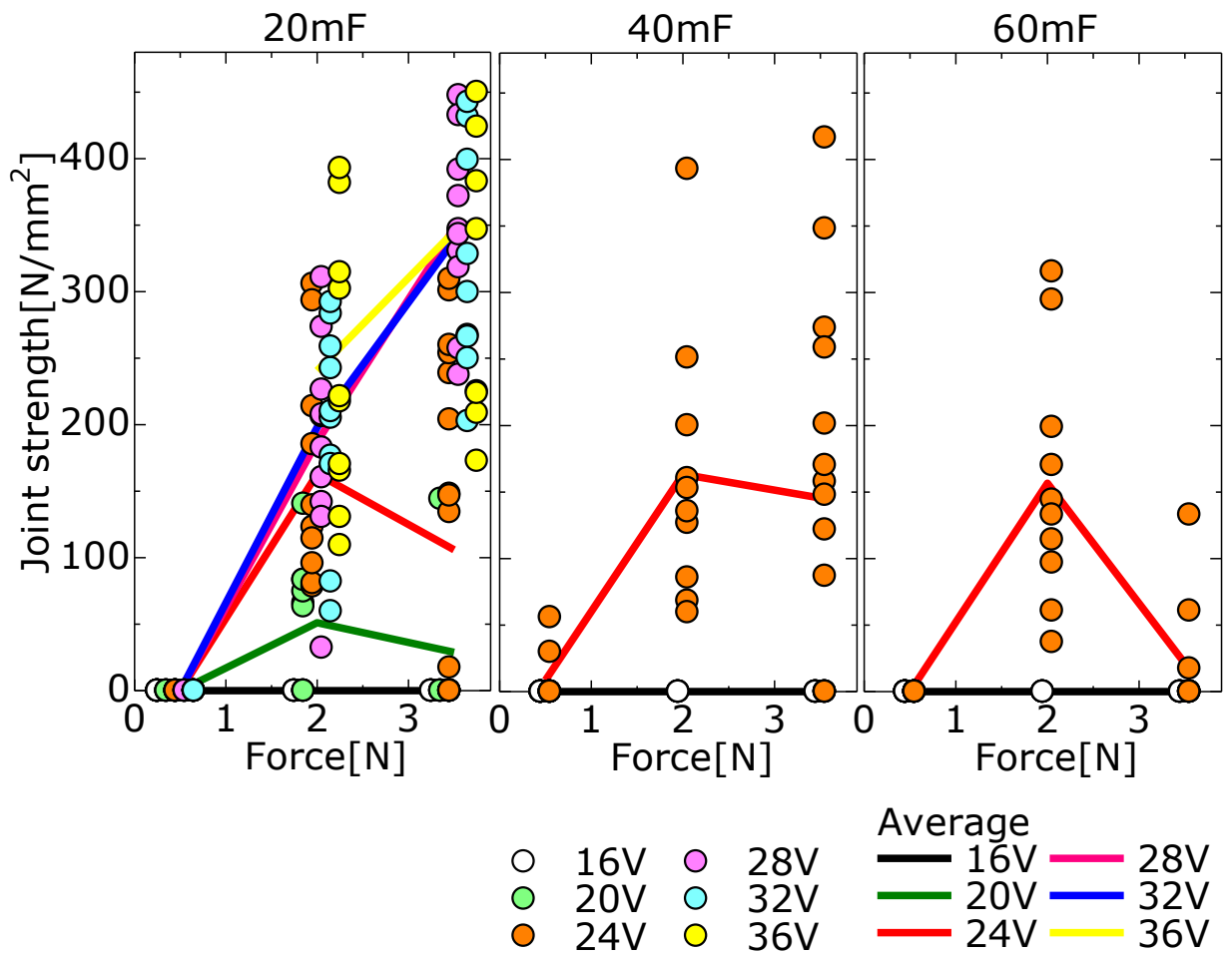


Fig.3-2 Influence of force on joint strength of wire diameter 0.32mm

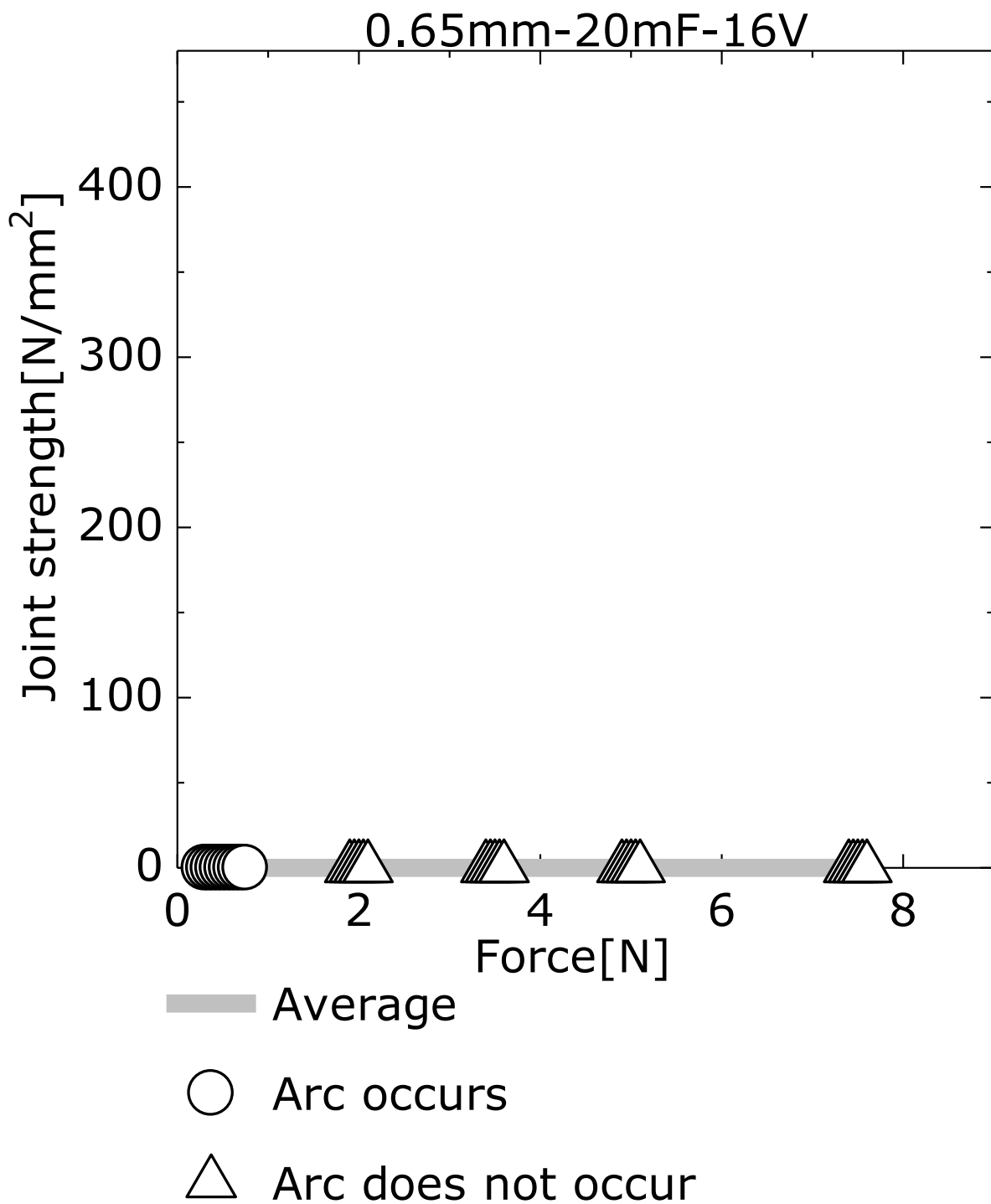


Fig.3-3 Influence of force on joint strength of charging voltage 16V , condenser capacity 20mF by wire diameter 0.65mm



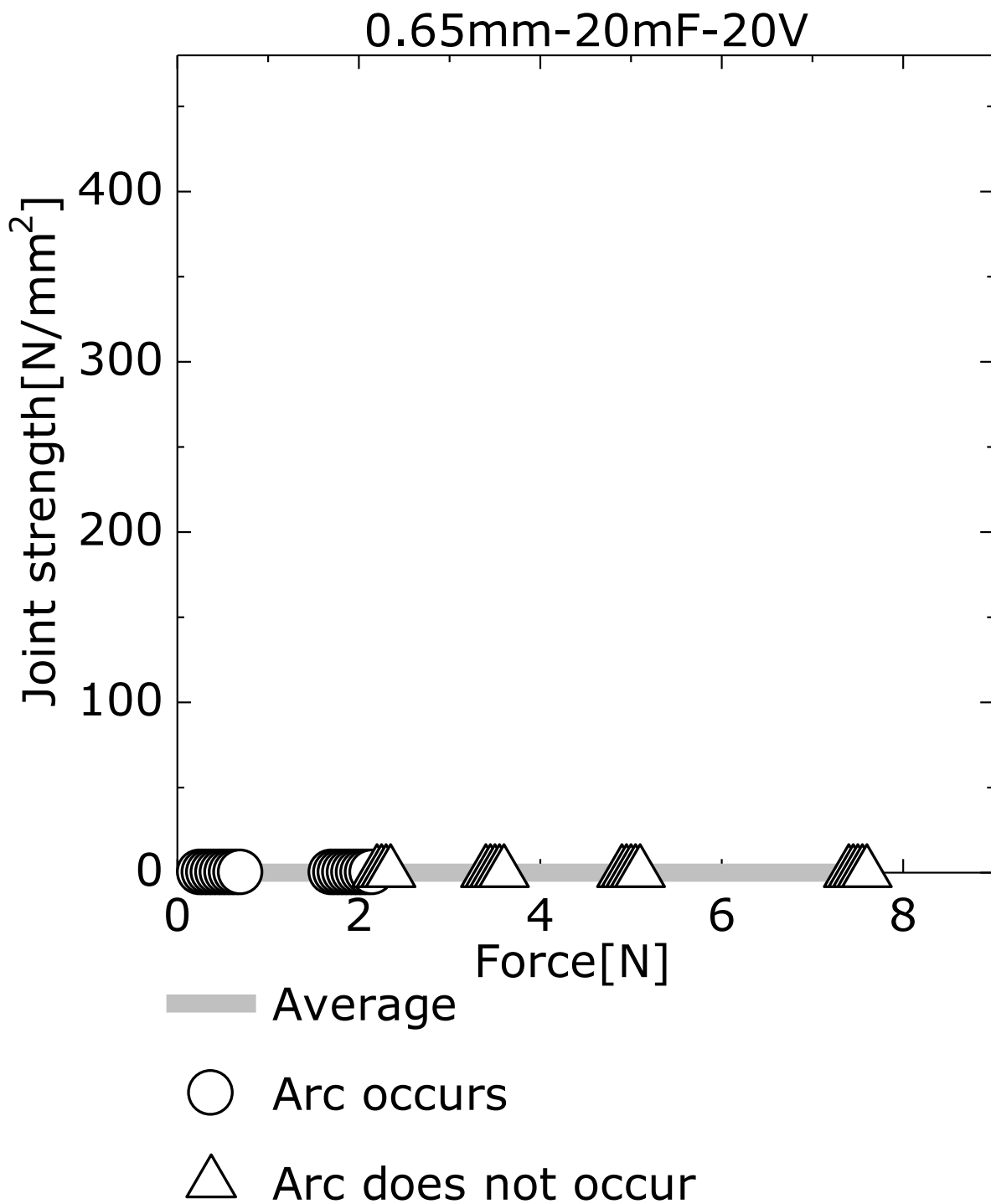


Fig.3-4 Influence of force on joint strength of charging voltage 20V , condenser capacity 20mF by wire diameter 0.65mm

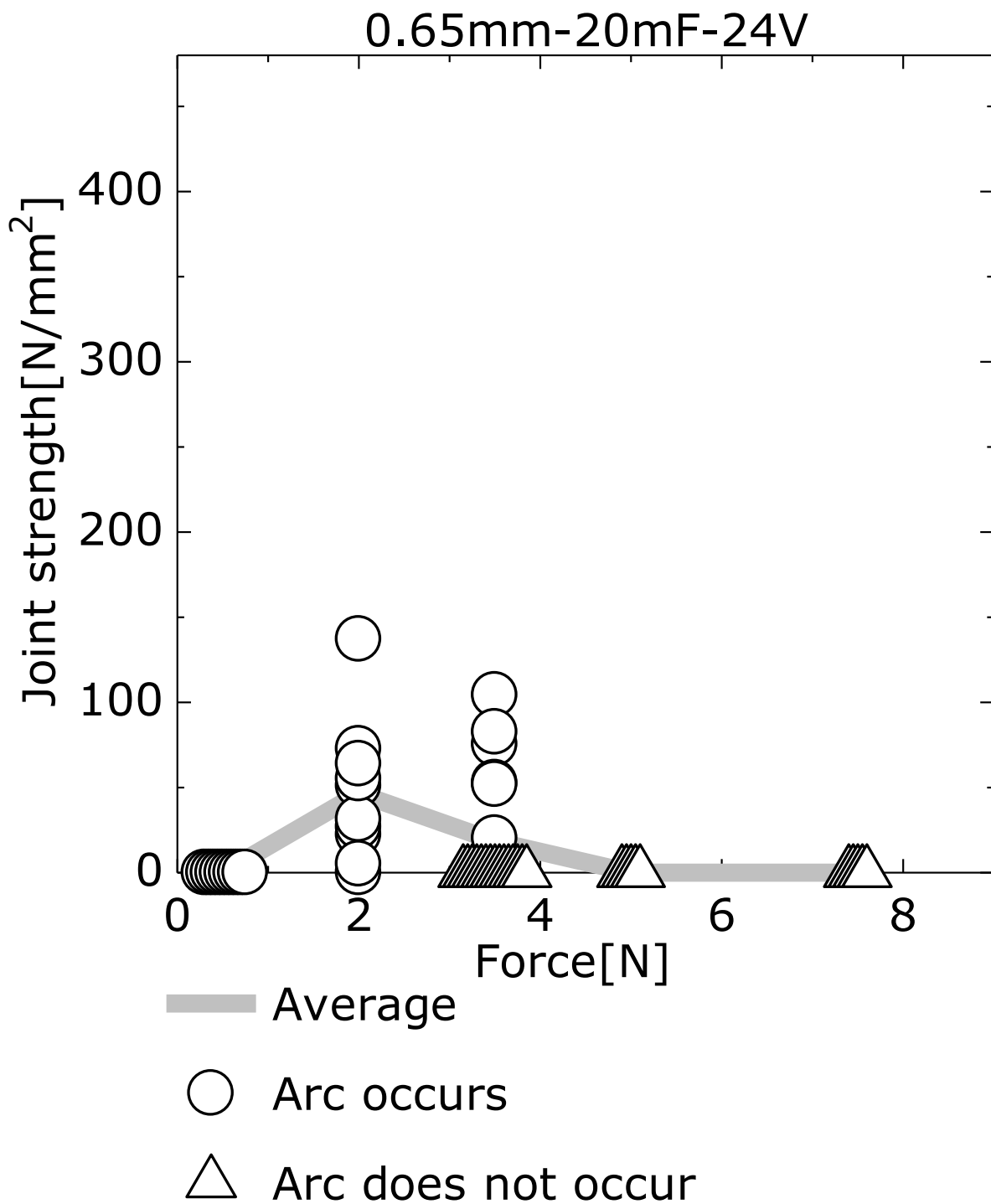


Fig.3-5 Influence of force on joint strength of charging voltage 24V , condenser capacity 20mF by wire diameter 0.65mm

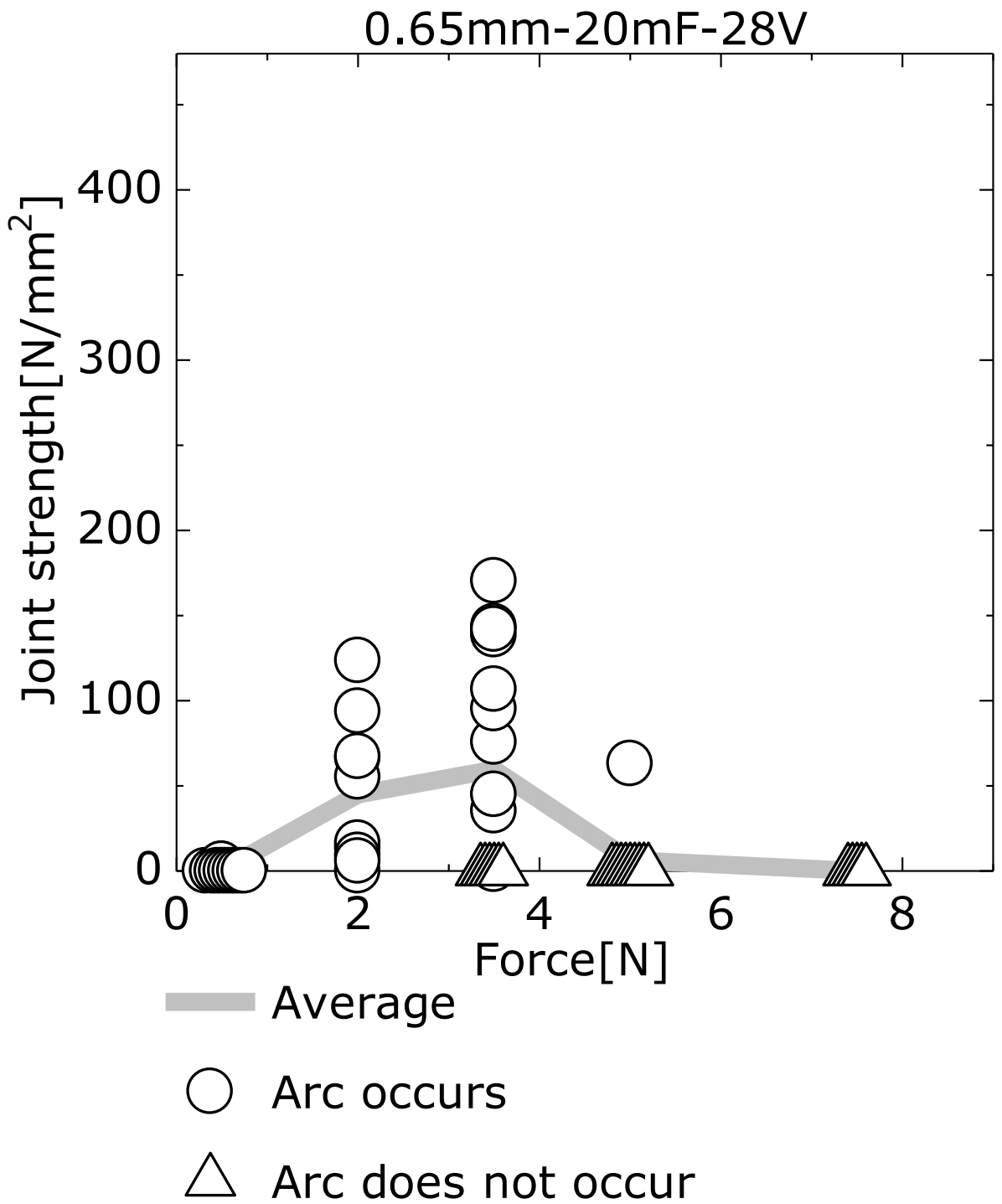


Fig.3-6 Influence of force on joint strength of charging voltage 28V , condenser capacity 20mF by wire diameter 0.65mm

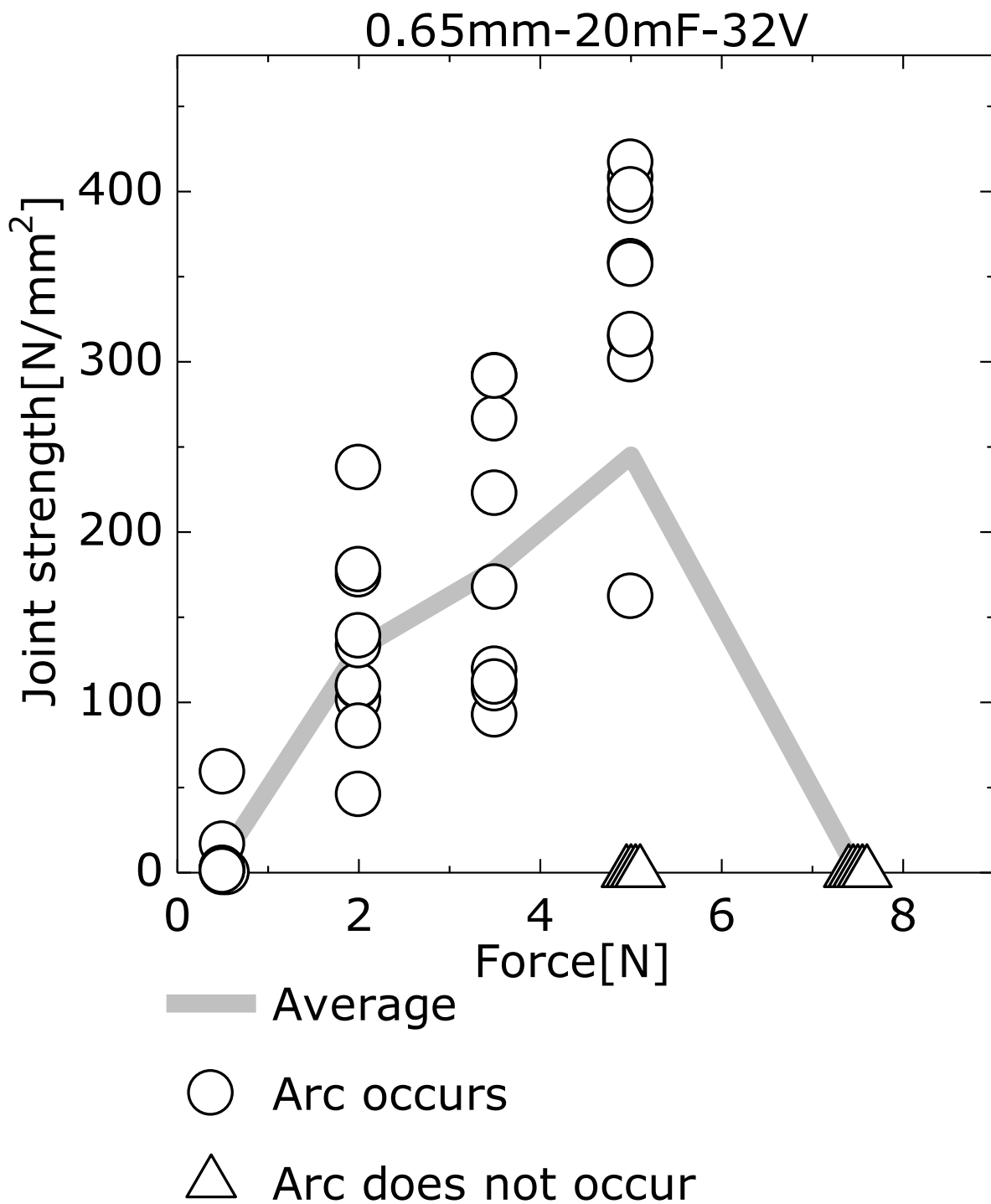


Fig.3-7 Influence of force on joint strength of charging voltage 32V , condenser capacity 20mF by wire diameter 0.65mm

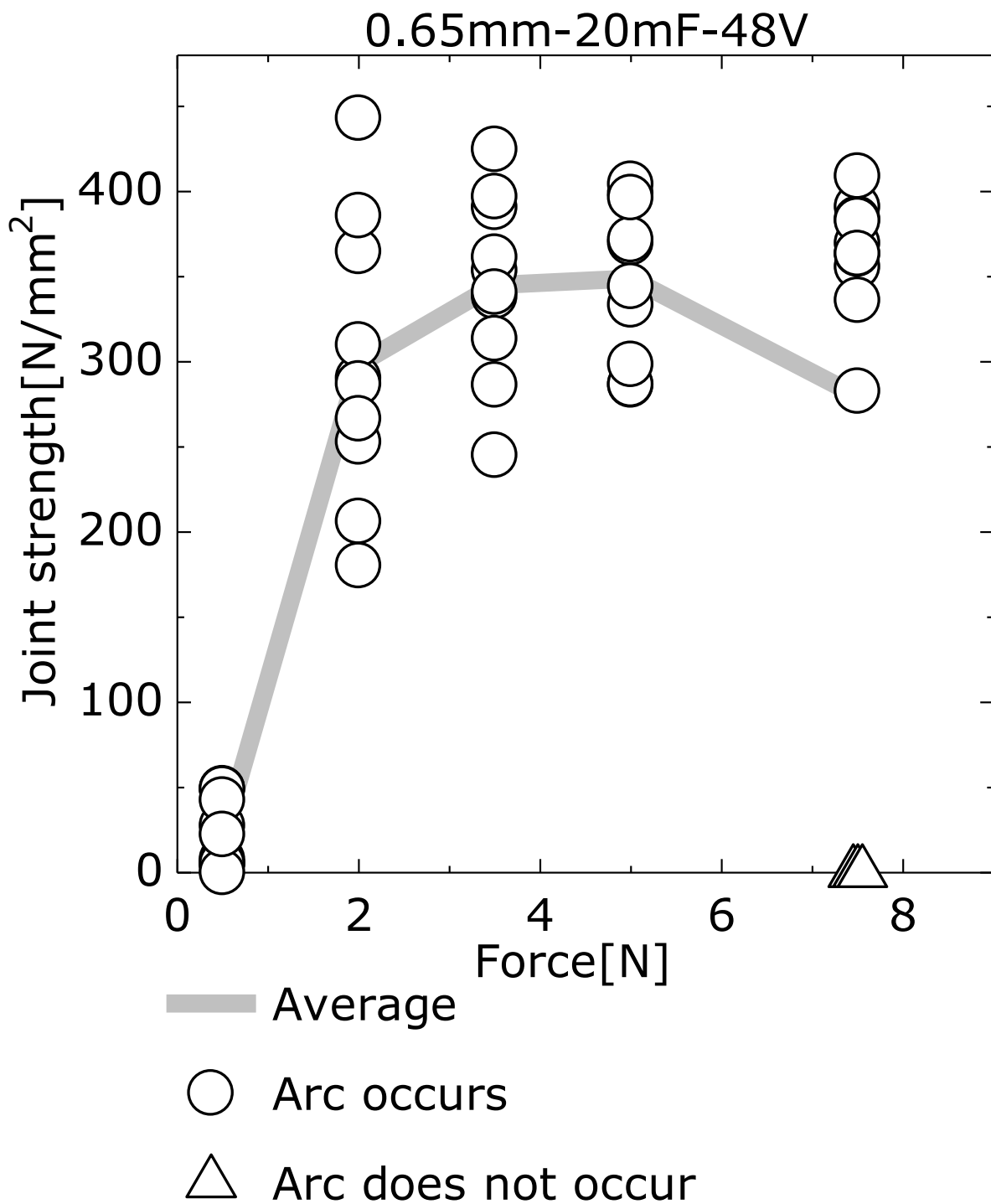


Fig.3-8 Influence of force on joint strength of charging voltage 48V , condenser capacity 20mF by wire diameter 0.65mm

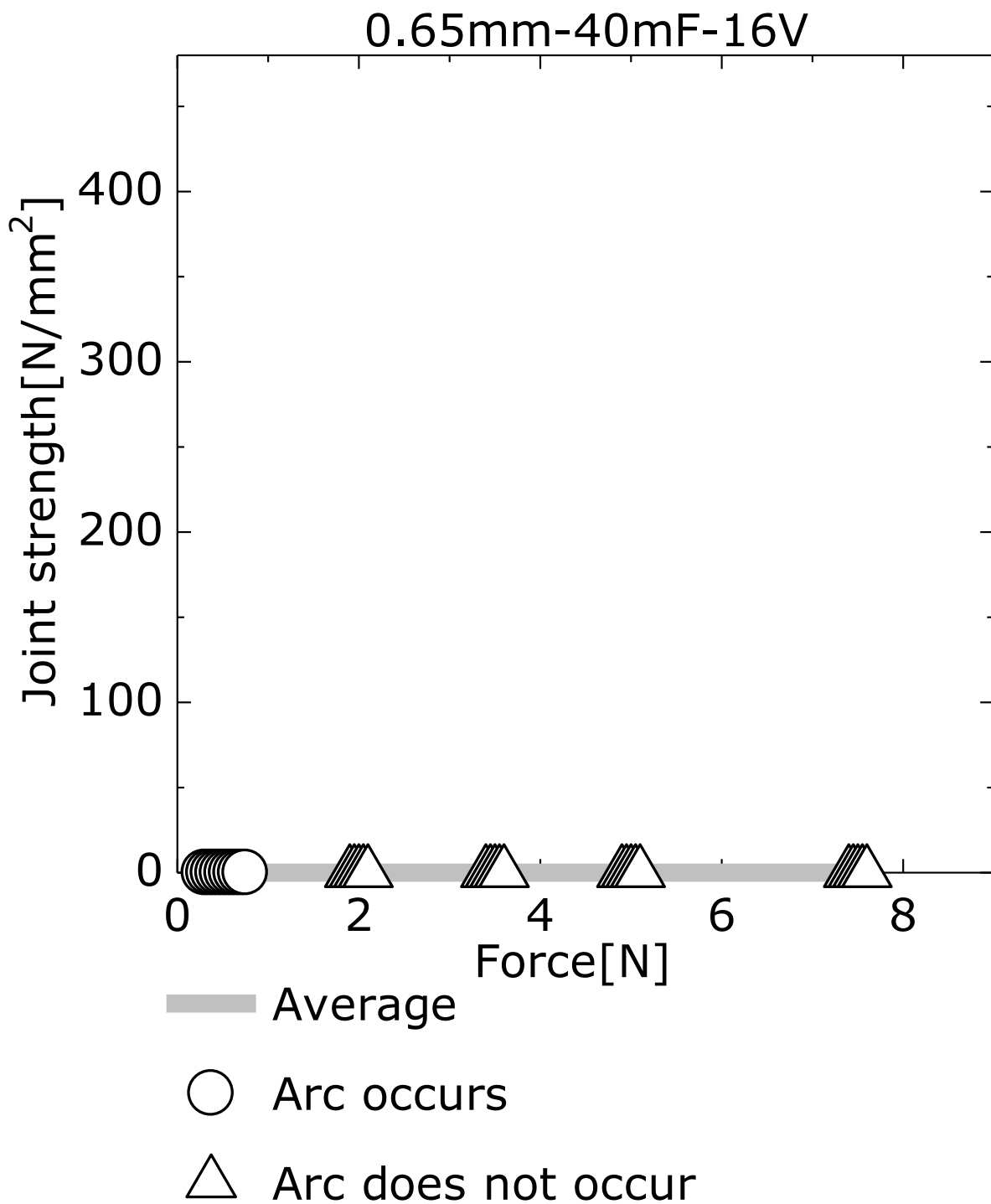


Fig.3-9 Influence of force on joint strength of charging voltage 16V , condenser capacity 40mF by wire diameter 0.65mm

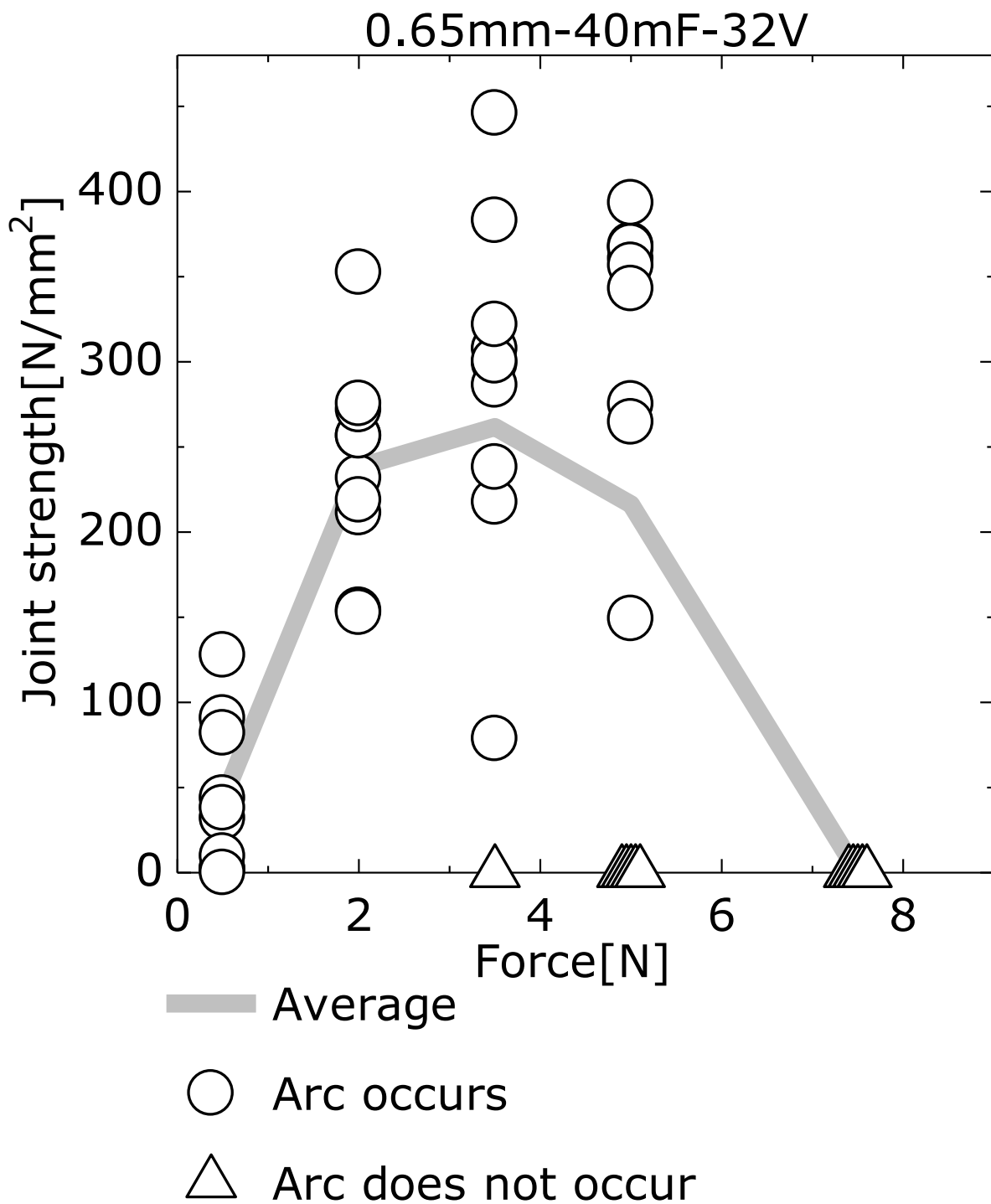


Fig.3-10 Influence of force on joint strength of charging voltage 32V , condenser capacity 40mF by wire diameter 0.65mm

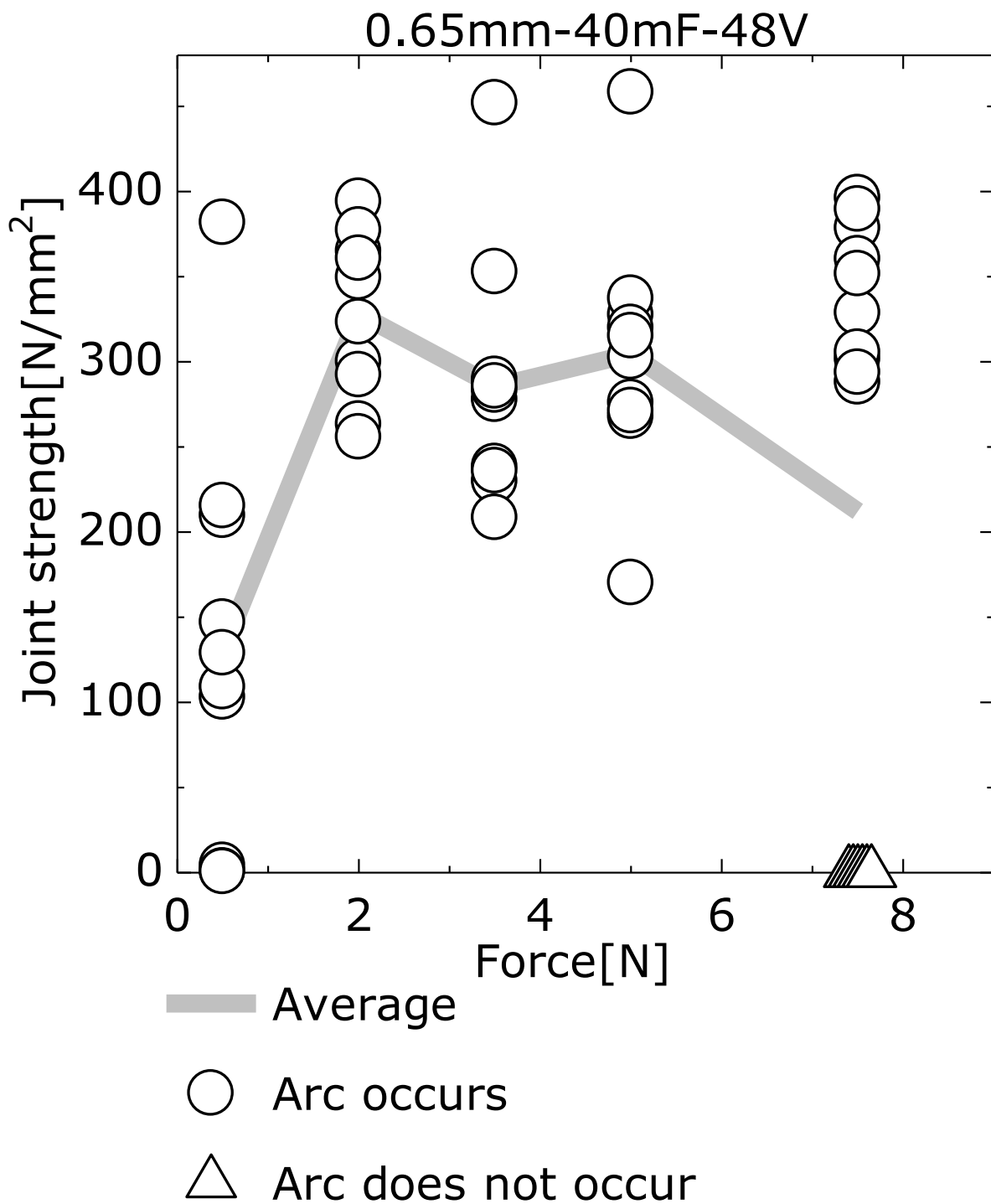


Fig.3-11 Influence of force on joint strength of charging voltage 48V , condenser capacity 40mF by wire diameter 0.65mm



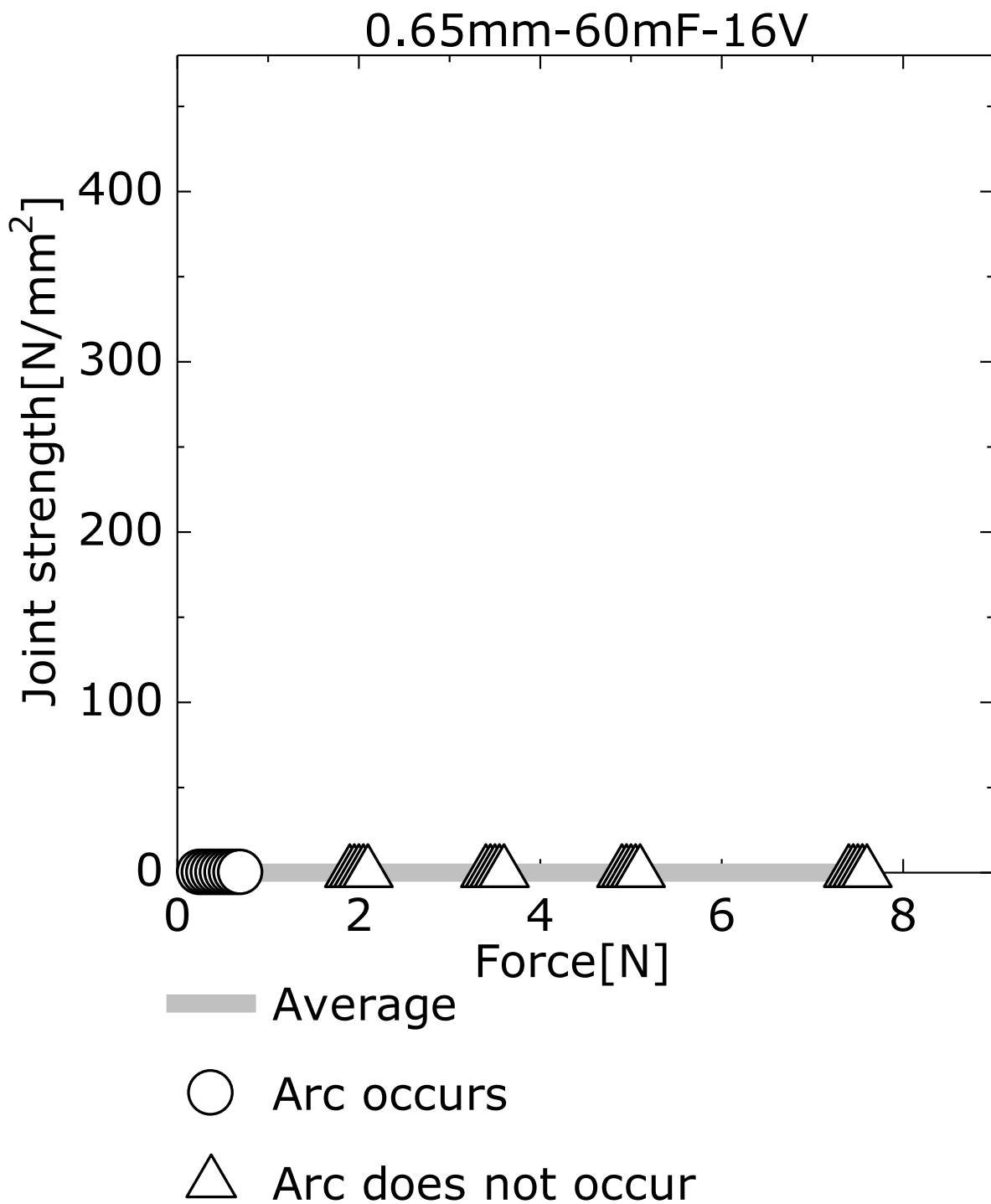


Fig.3-12 Influence of force on joint strength of charging voltage 16V , condenser capacity 60mF by wire diameter 0.65mm

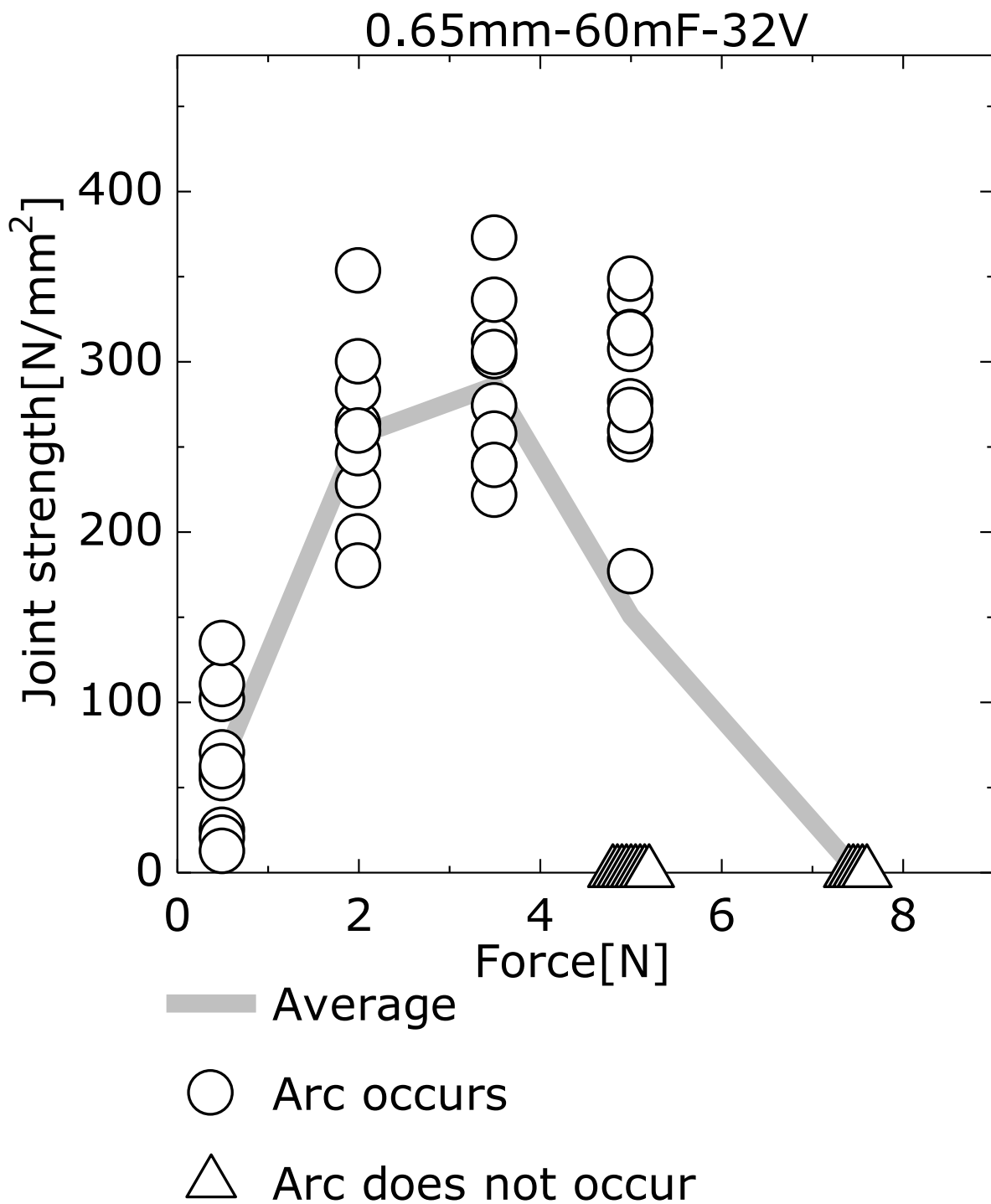


Fig.3-13 Influence of force on joint strength of charging voltage 32V , condenser capacity 60mF by wire diameter 0.65mm

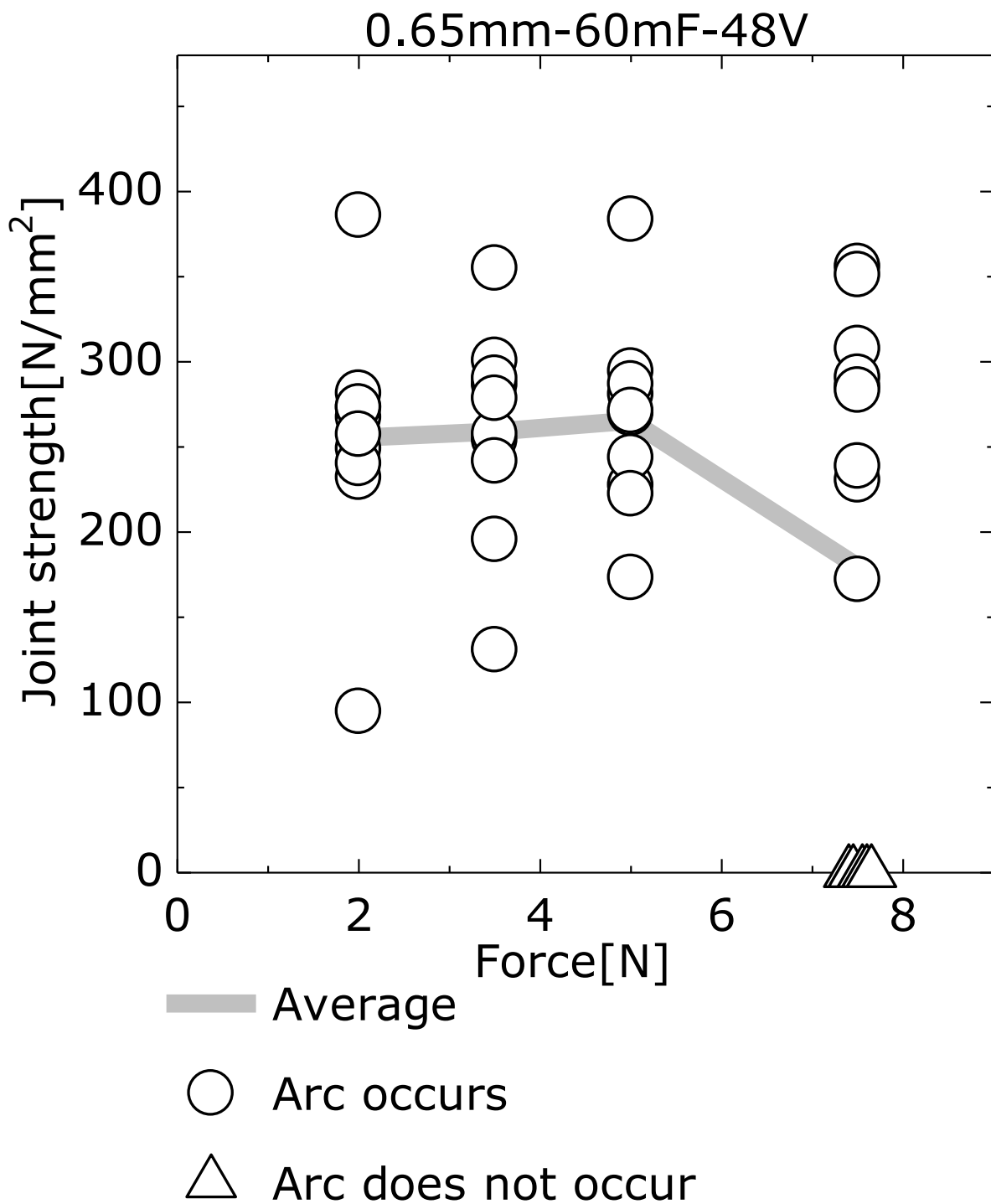


Fig.3-14 Influence of force on joint strength of charging voltage 48V , condenser capacity 60mF by wire diameter 0.65mm

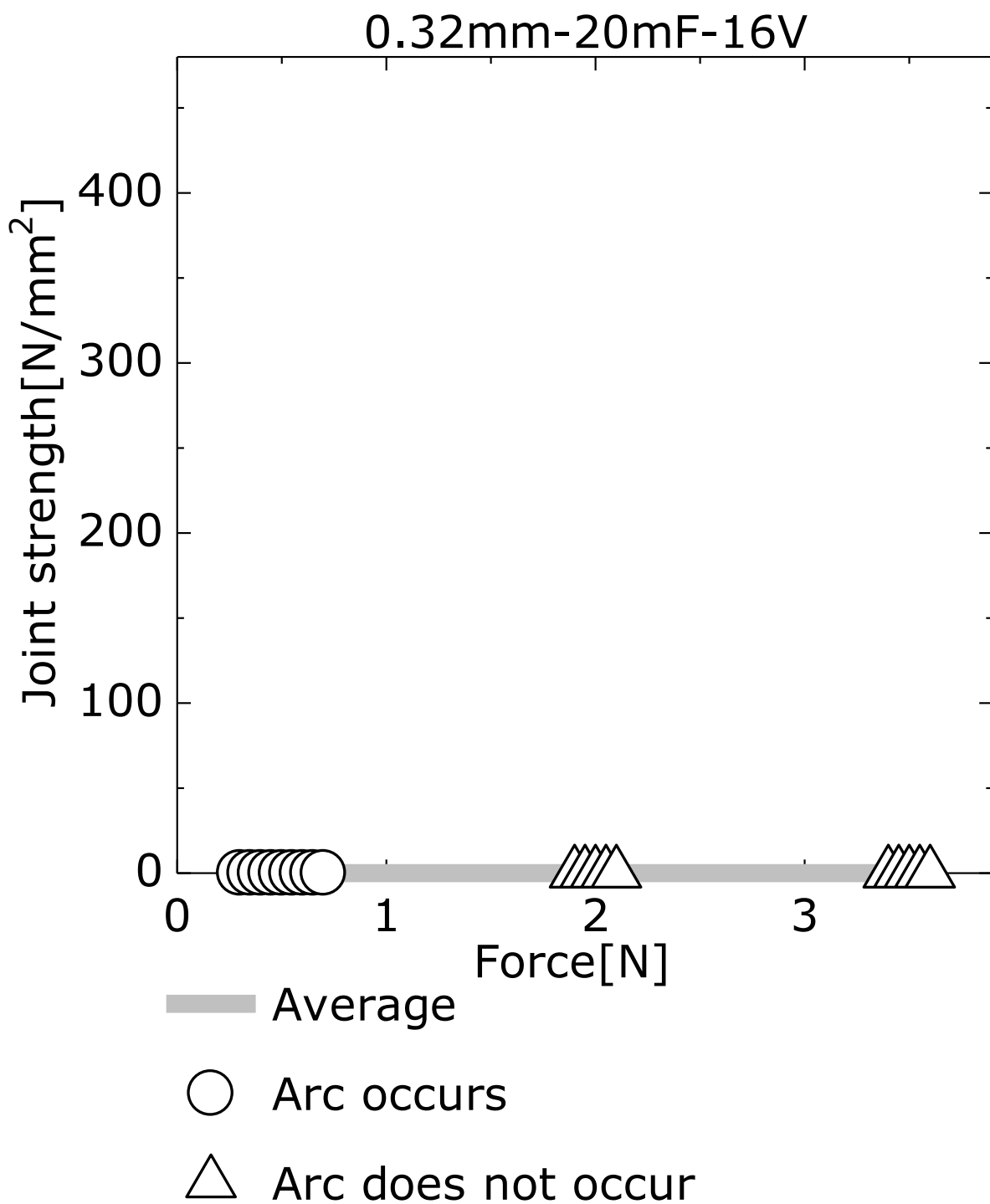


Fig.3-15 Influence of force on joint strength of charging voltage 16V , condenser capacity 20mF by wire diameter 0.32mm

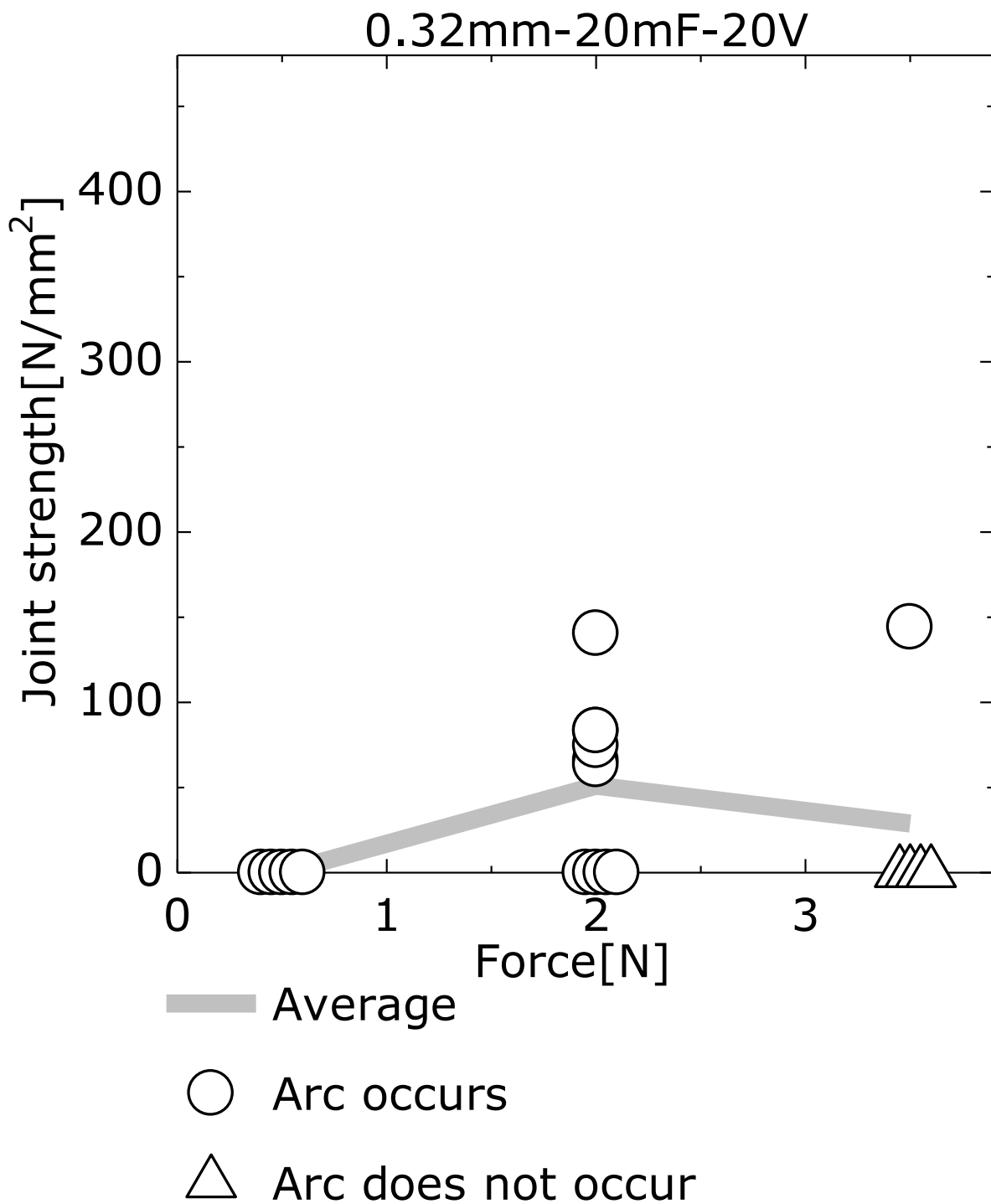


Fig.3-16 Influence of force on joint strength of charging voltage 20V , condenser capacity 20mF by wire diameter 0.32mm

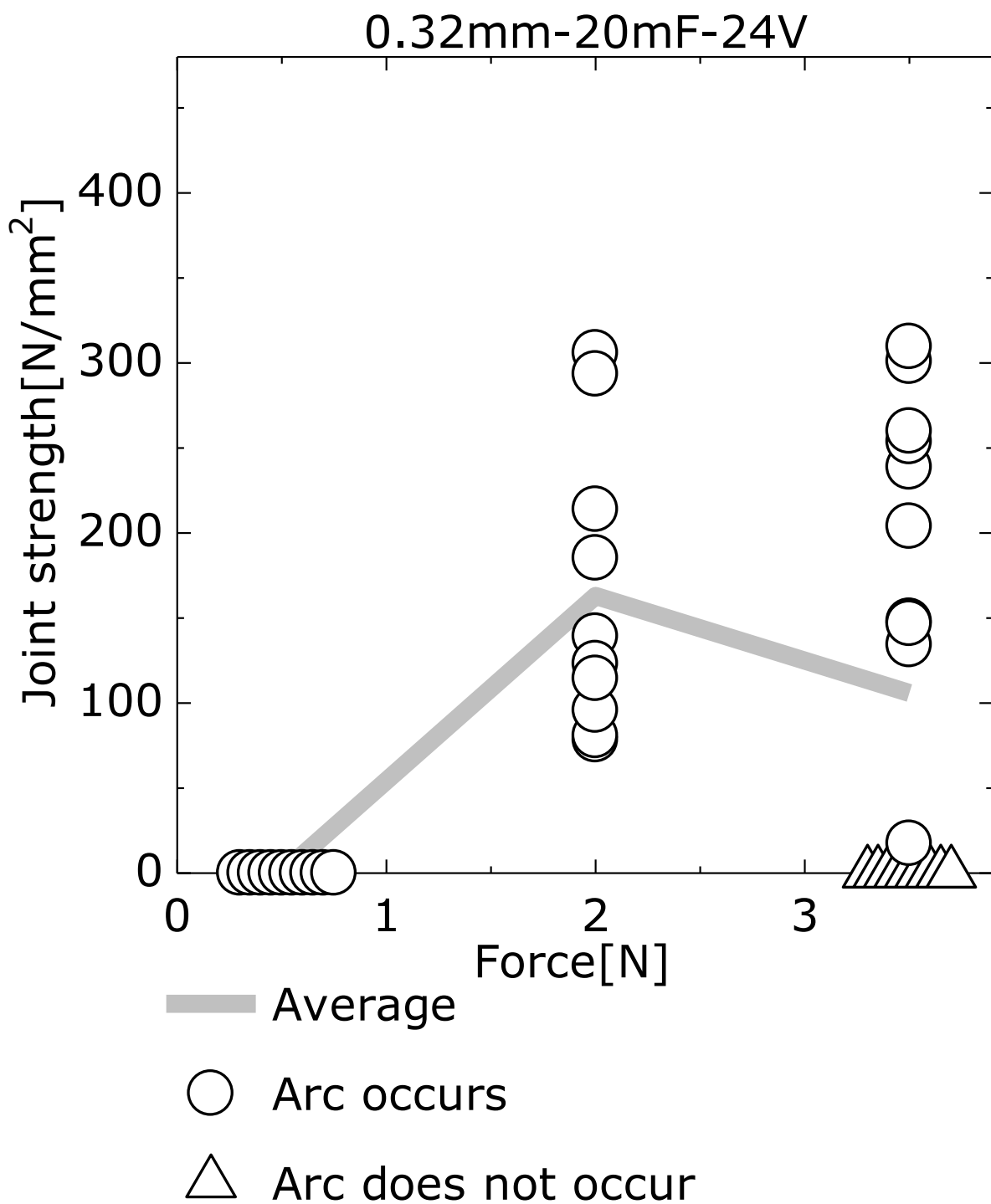


Fig.3-17 Influence of force on joint strength of charging voltage 24V , condenser capacity 20mF by wire diameter 0.32mm

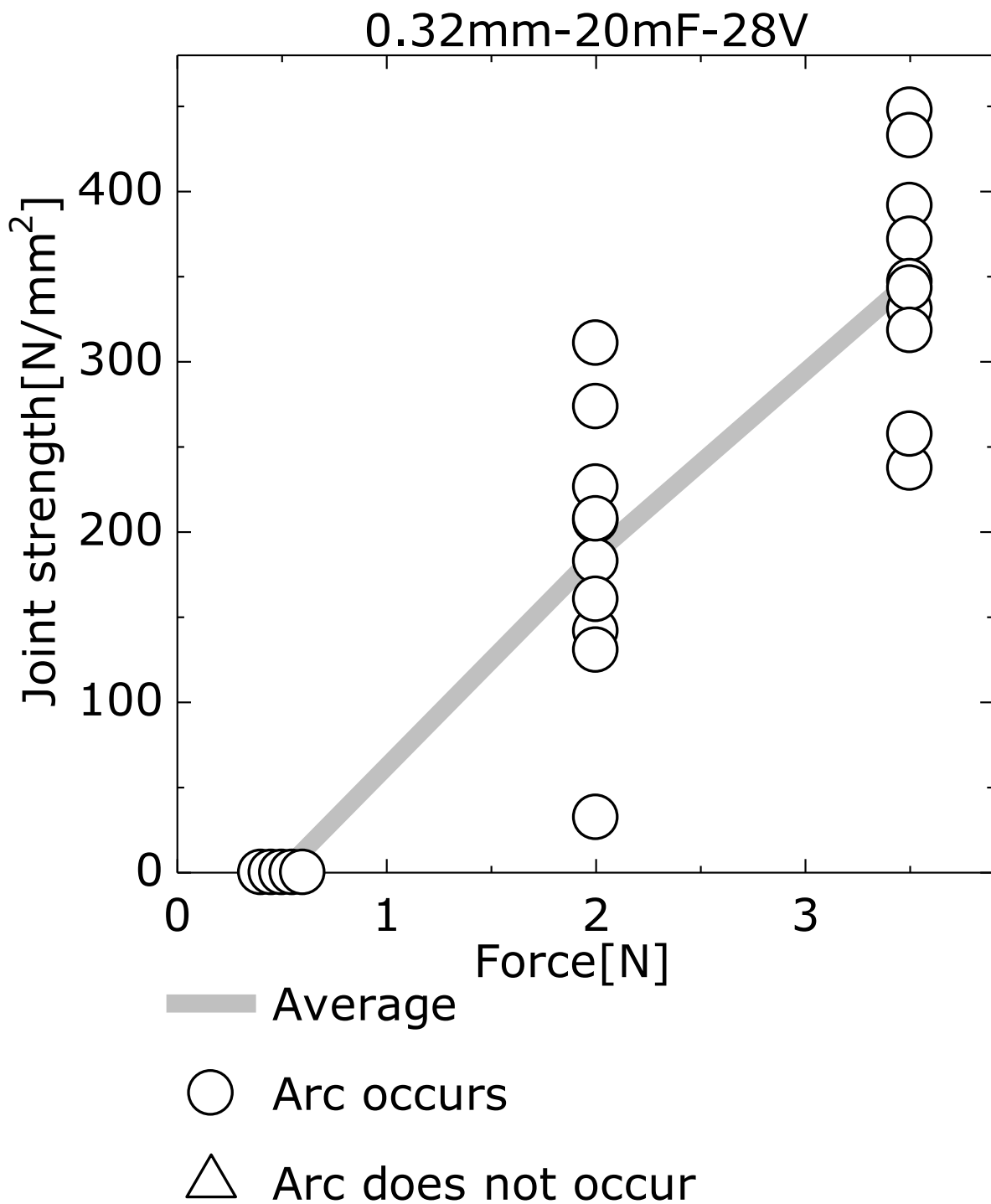


Fig.3-18 Influence of force on joint strength of charging voltage 28V , condenser capacity 20mF by wire diameter 0.32mm

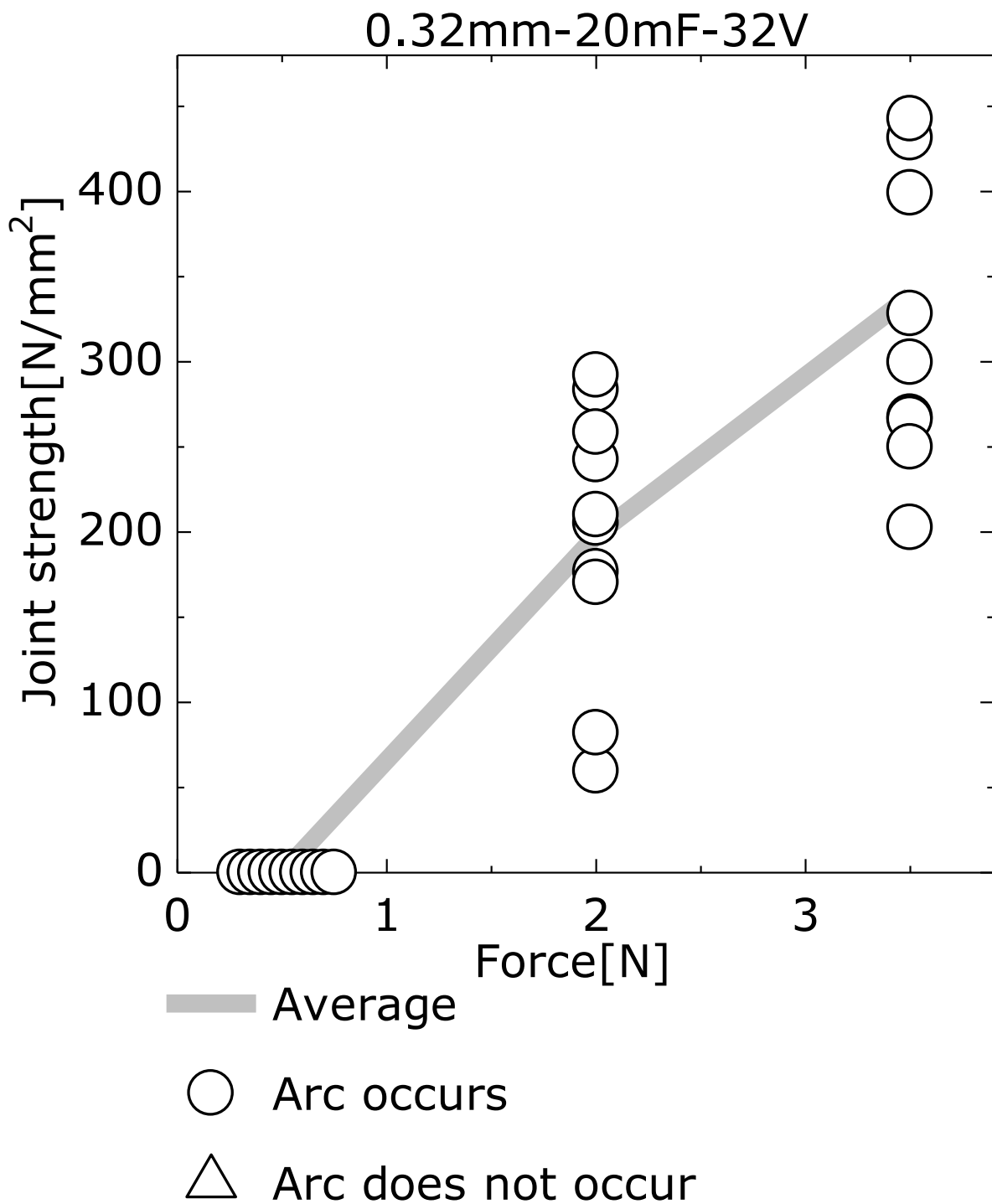


Fig.3-19 Influence of force on joint strength of charging voltage 32V , condenser capacity 20mF by wire diameter 0.32mm



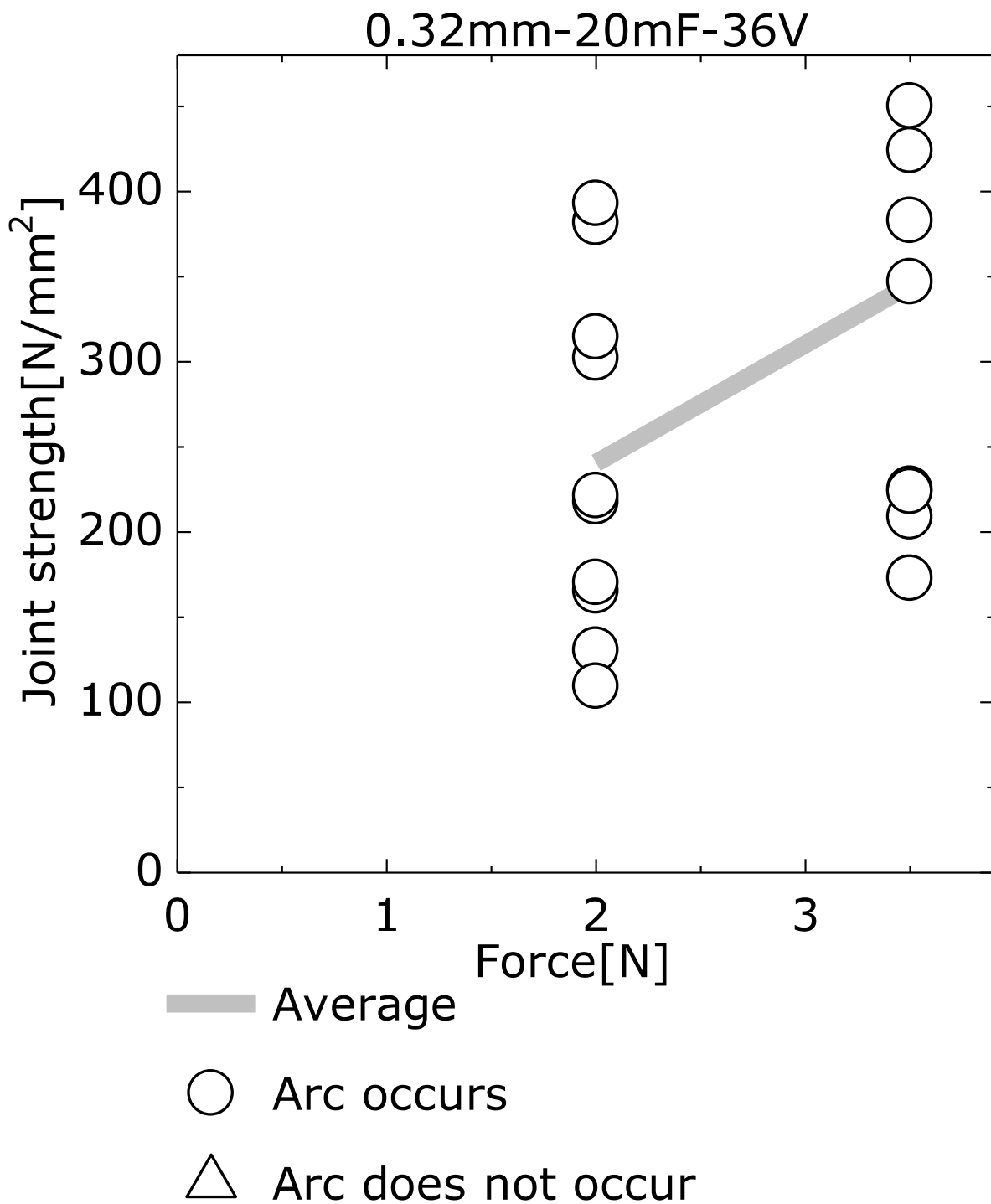


Fig.3-20 Influence of force on joint strength of charging voltage 36V , condenser capacity 20mF by wire diameter 0.32mm

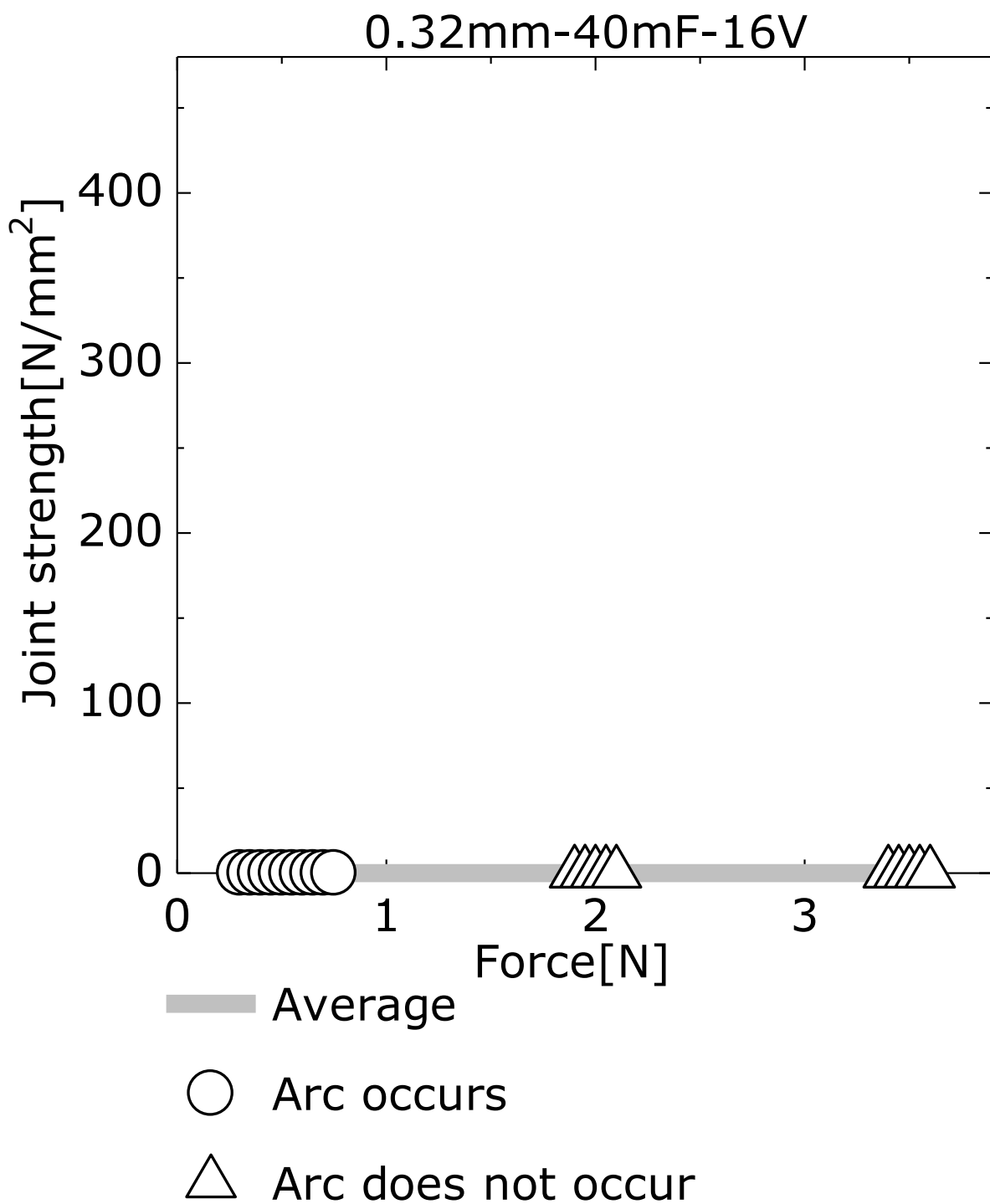


Fig.3-21 Influence of force on joint strength of charging voltage 16V , condenser capacity 40mF by wire diameter 0.32mm

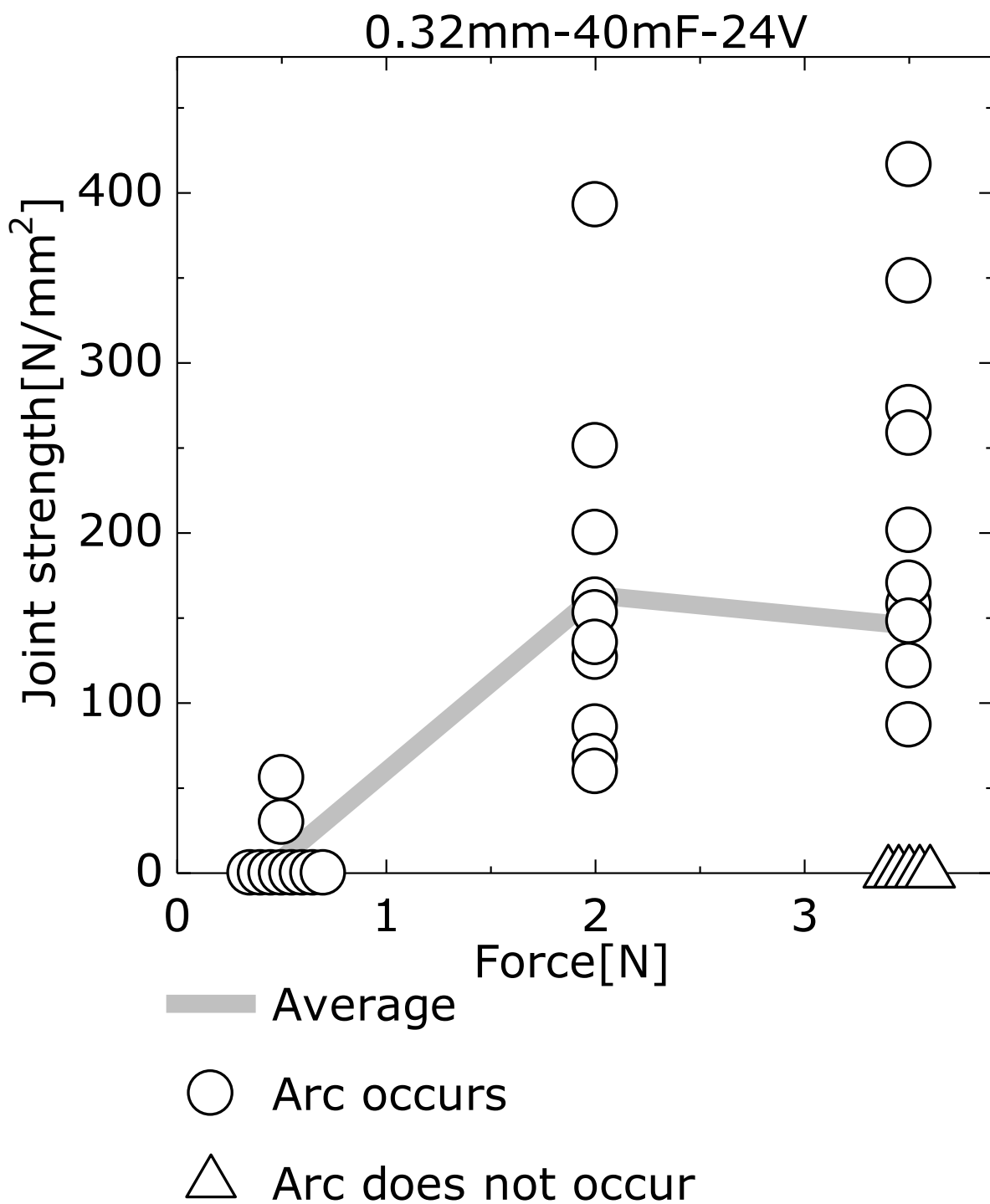


Fig.3-22 Influence of force on joint strength of charging voltage 24V , condenser capacity 40mF by wire diameter 0.32mm

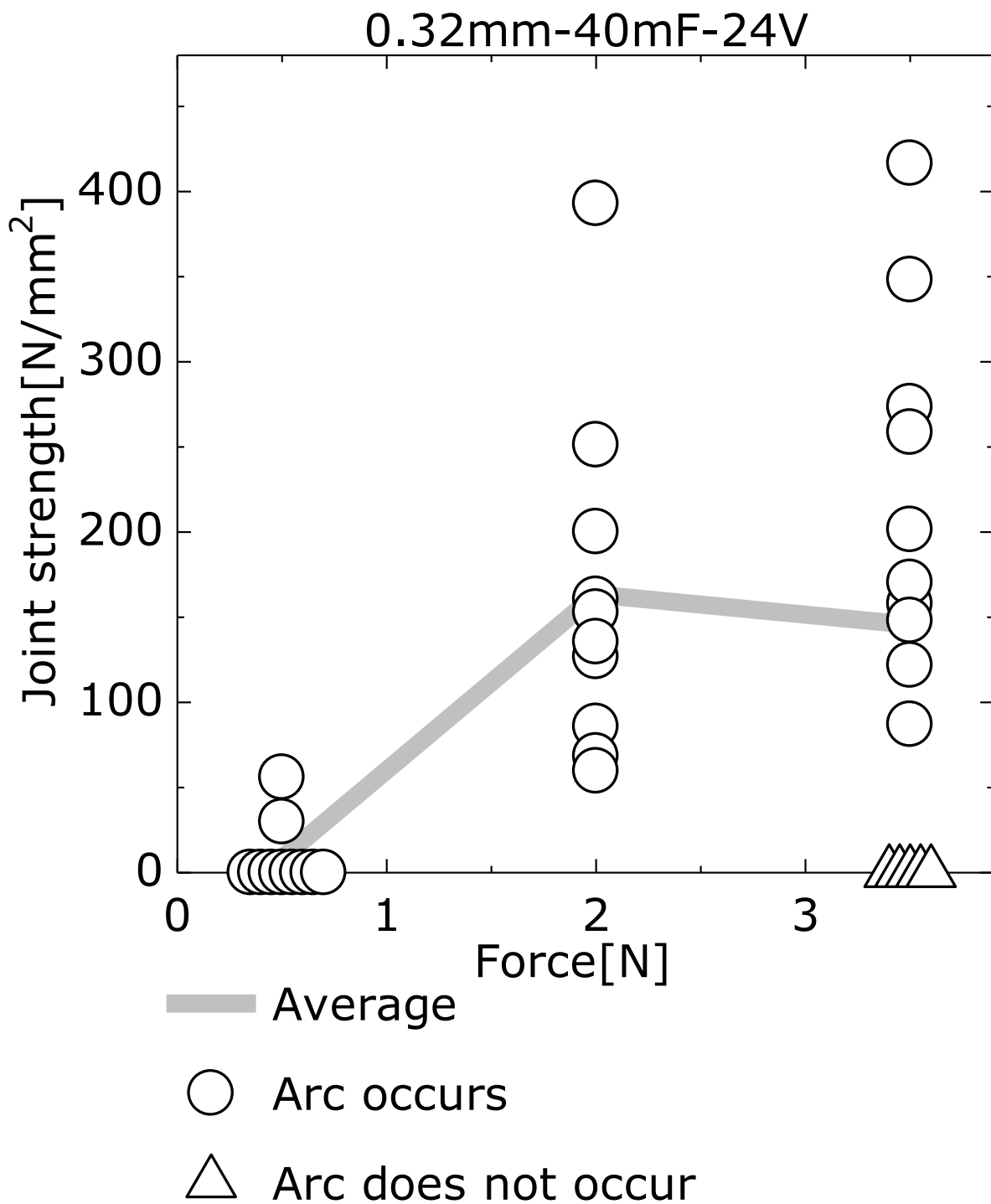


Fig.3-23 Influence of force on joint strength of charging voltage 16V , condenser capacity 60mF by wire diameter 0.32mm

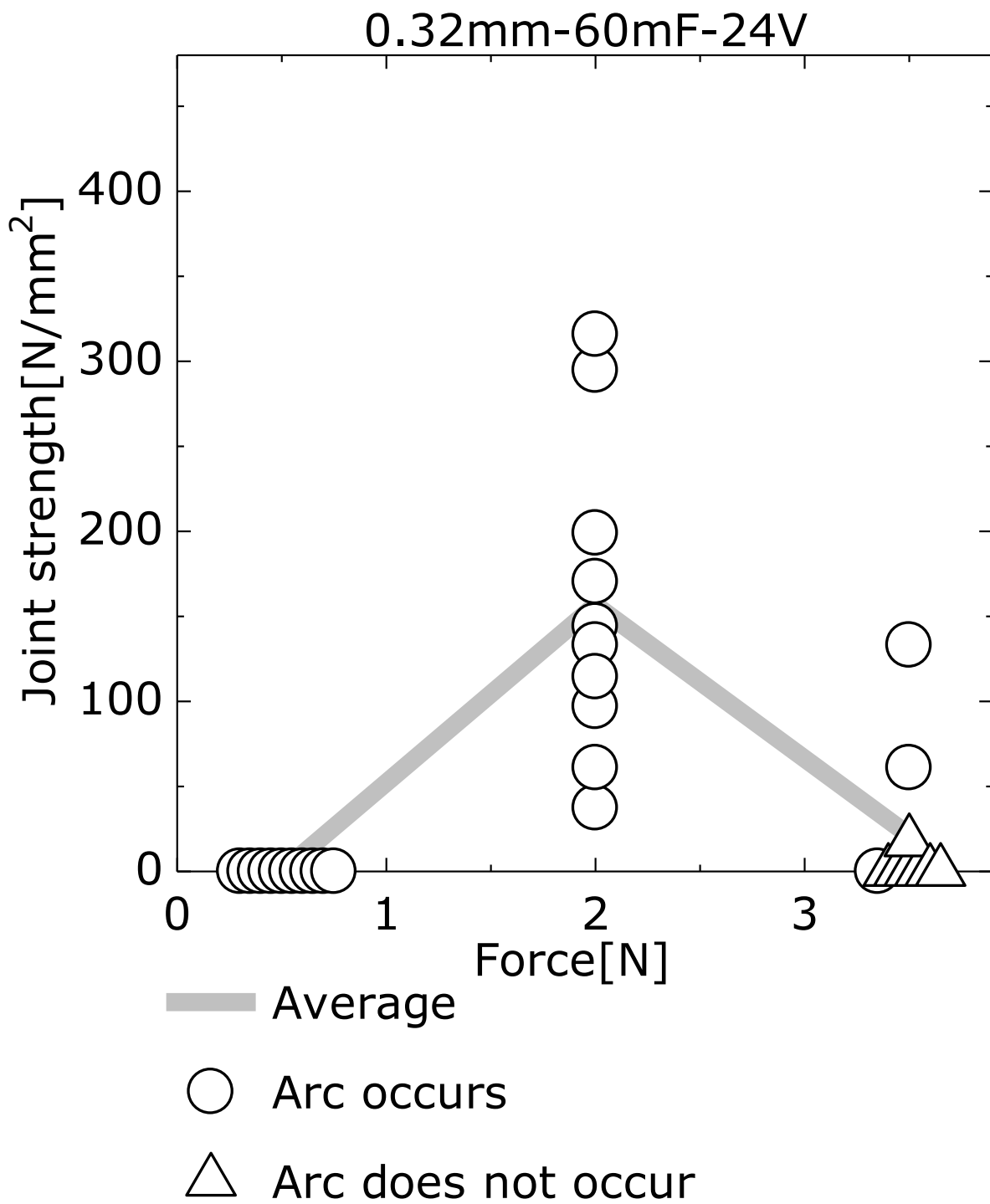


Fig.3-24 Influence of force on joint strength of charging voltage 24V , condenser capacity 60mF by wire diameter 0.32mm

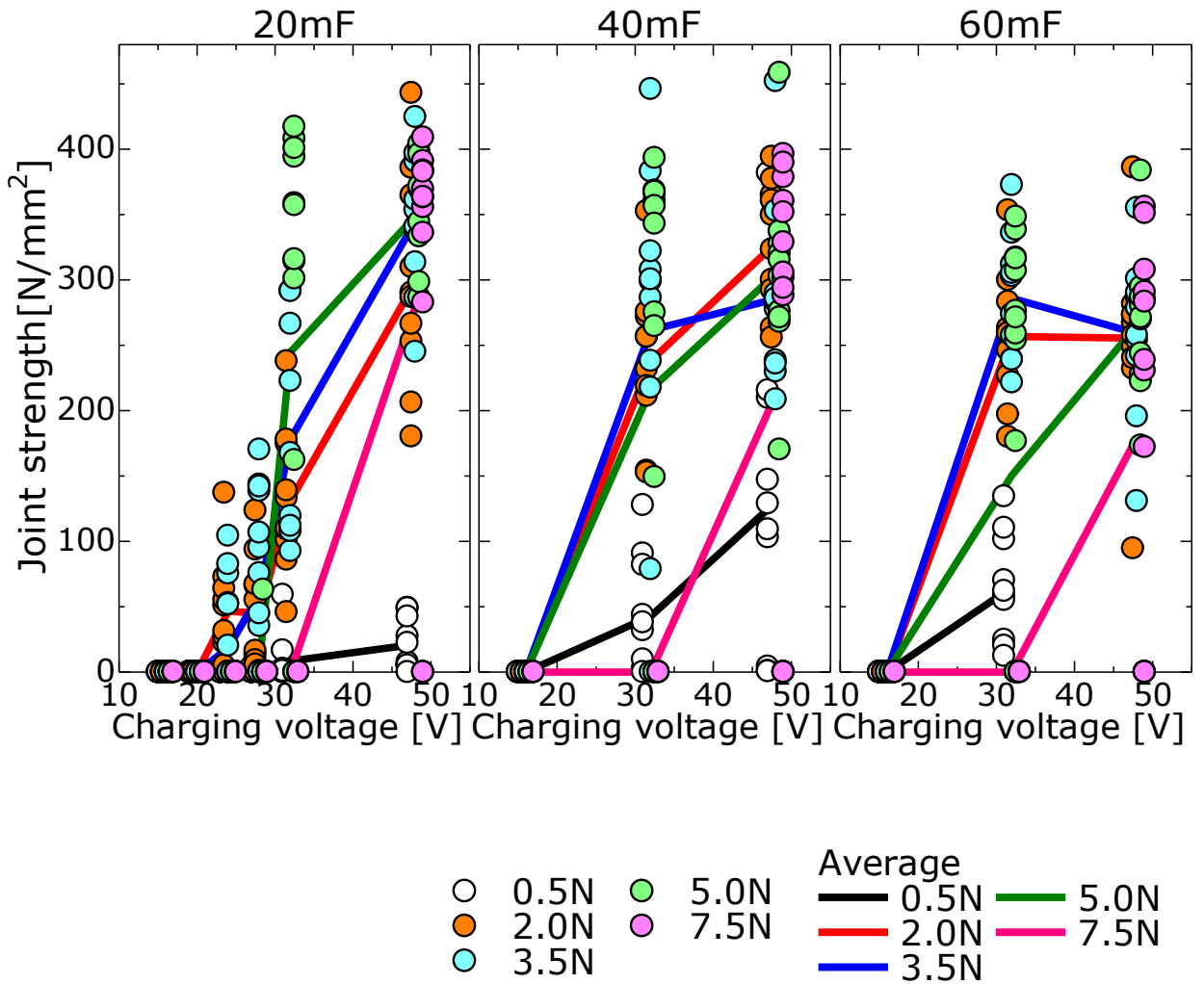


Fig.3-25 Influence of charging voltage on joint strength of wire diameter 0.65mm

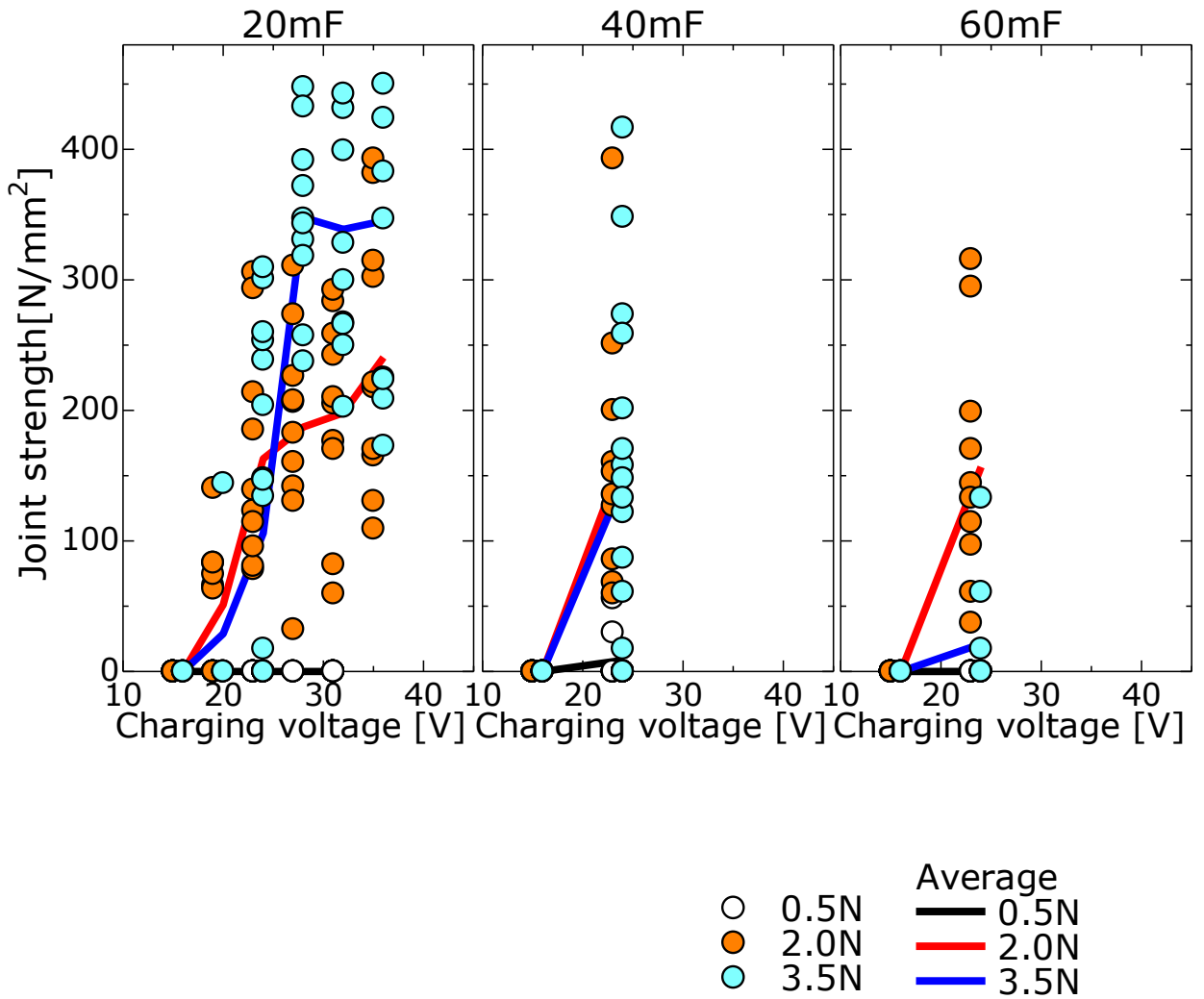


Fig.3-26 Influence of charging voltage on joint strength of wire diameter 0.32mm

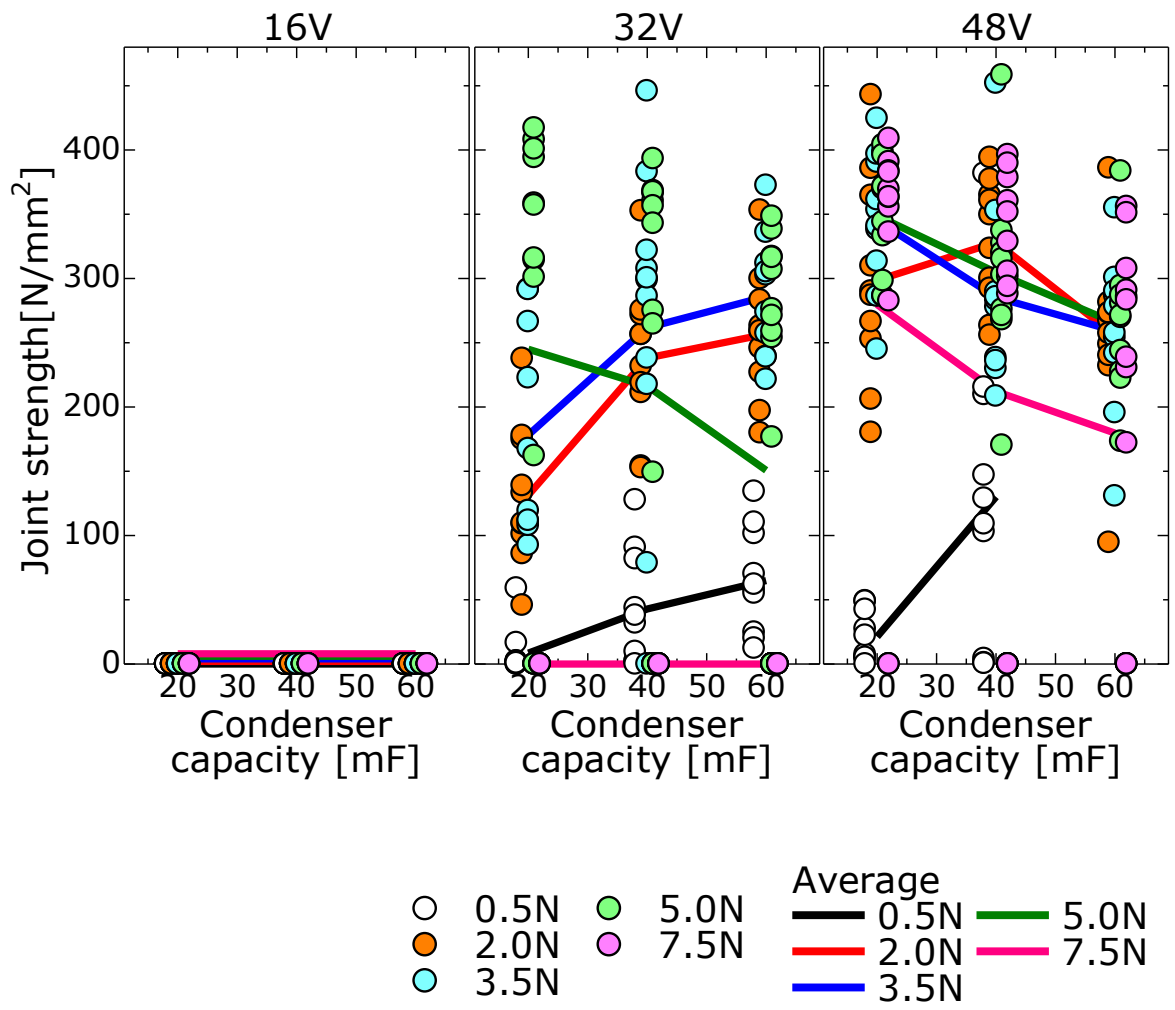


Fig.3-27 Influence of condenser capacity on joint strength of wire diameter 0.65mm



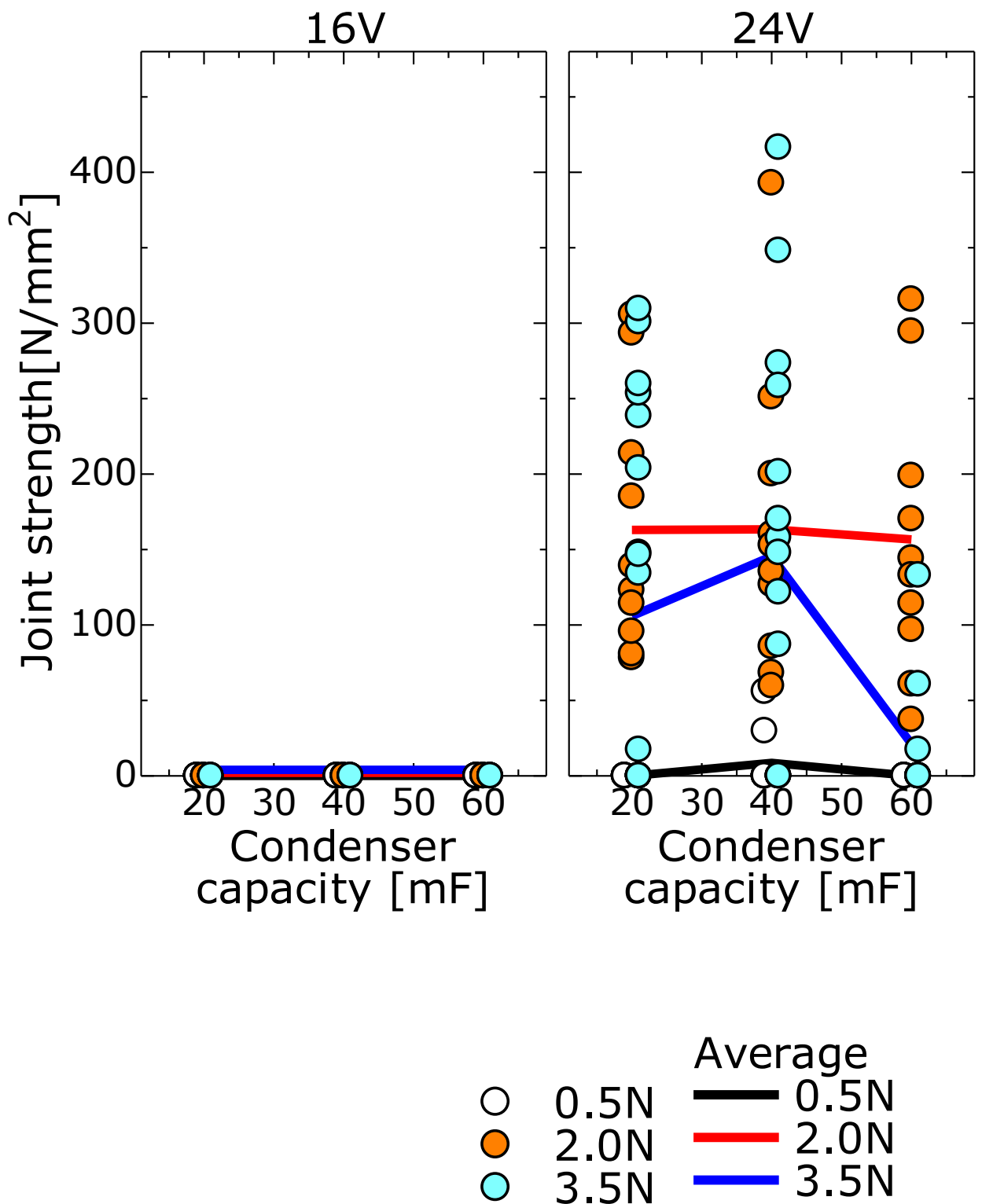
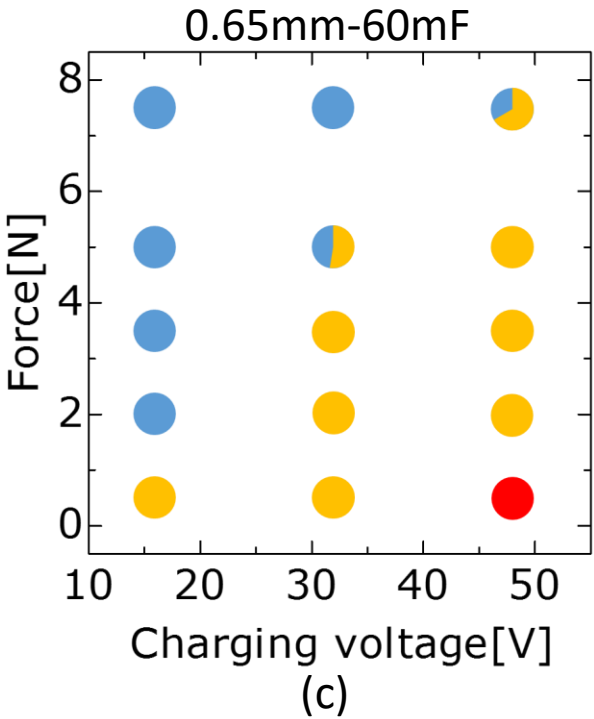
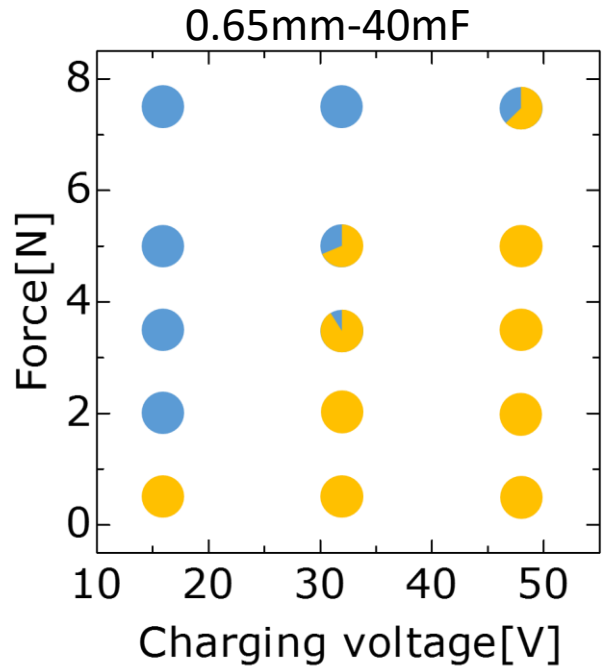
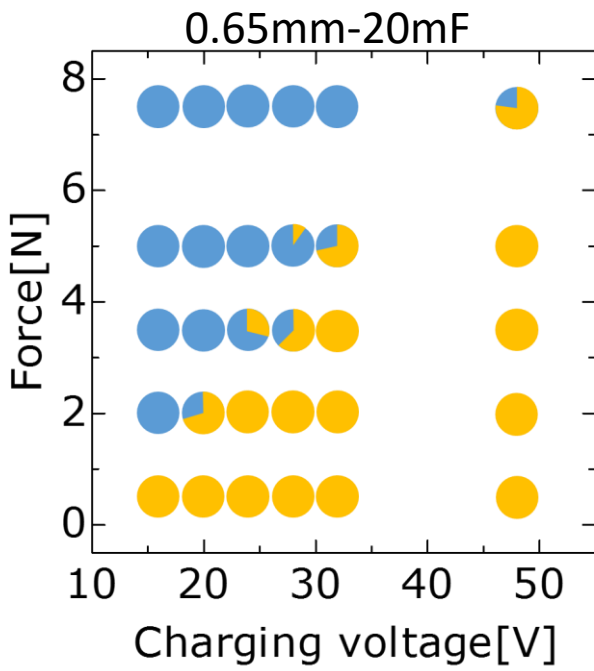
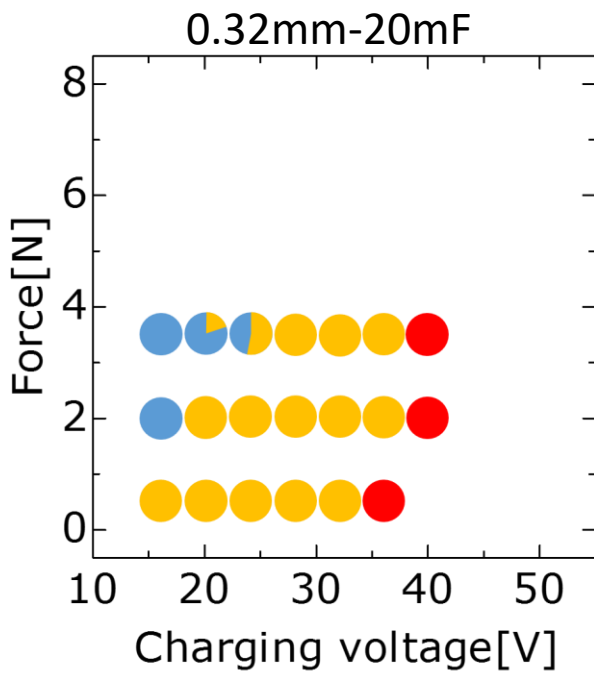


Fig.3-28 Influence of condenser capacity on joint strength of wire diameter 0.32mm

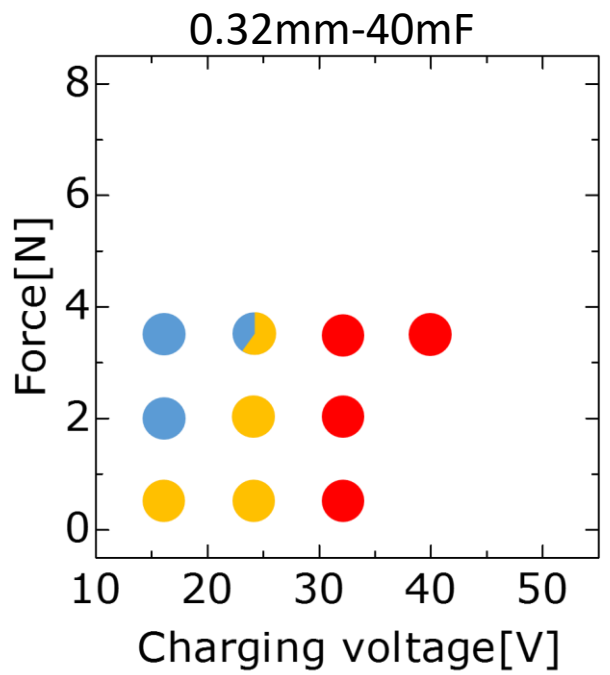


- Arc occurs
- Arc does not occur
- Over-melting

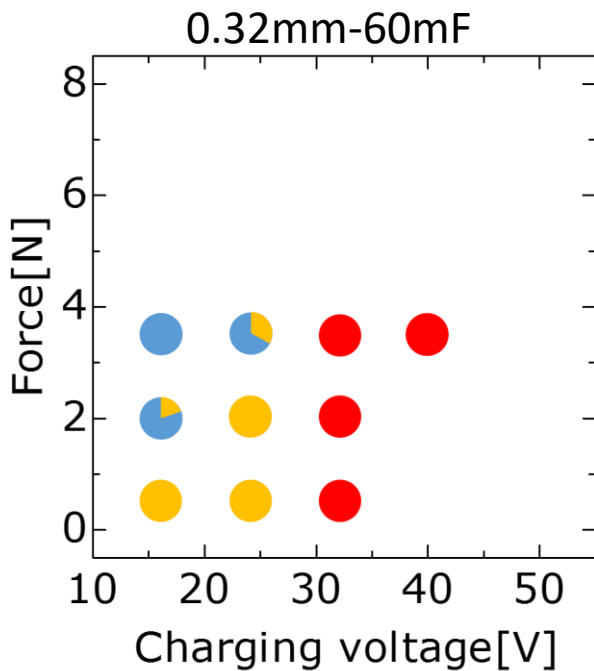
Fig.3-29 Influences of charging voltage and force on occurrence of arc by wire diameter 0.65mm



(a)



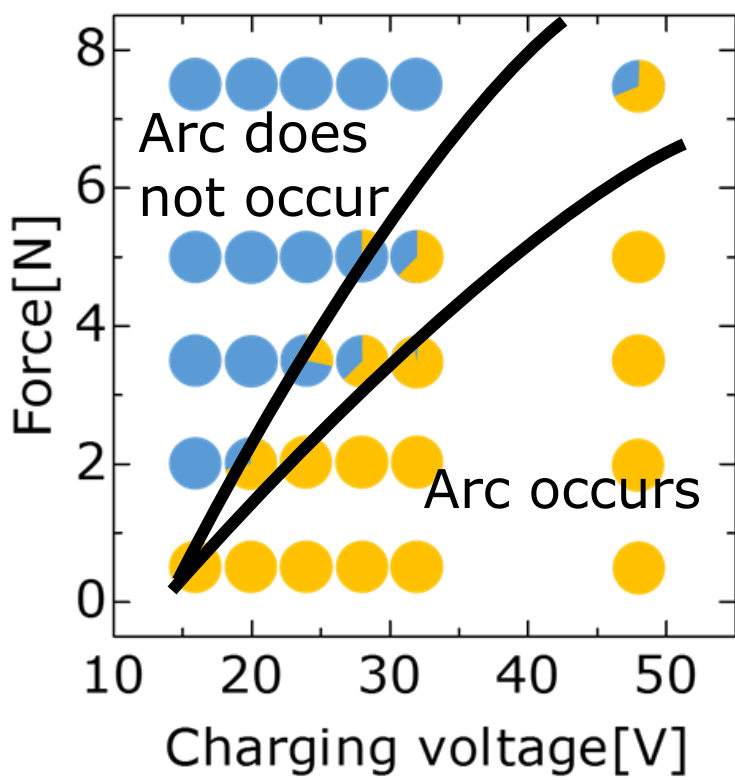
(b)



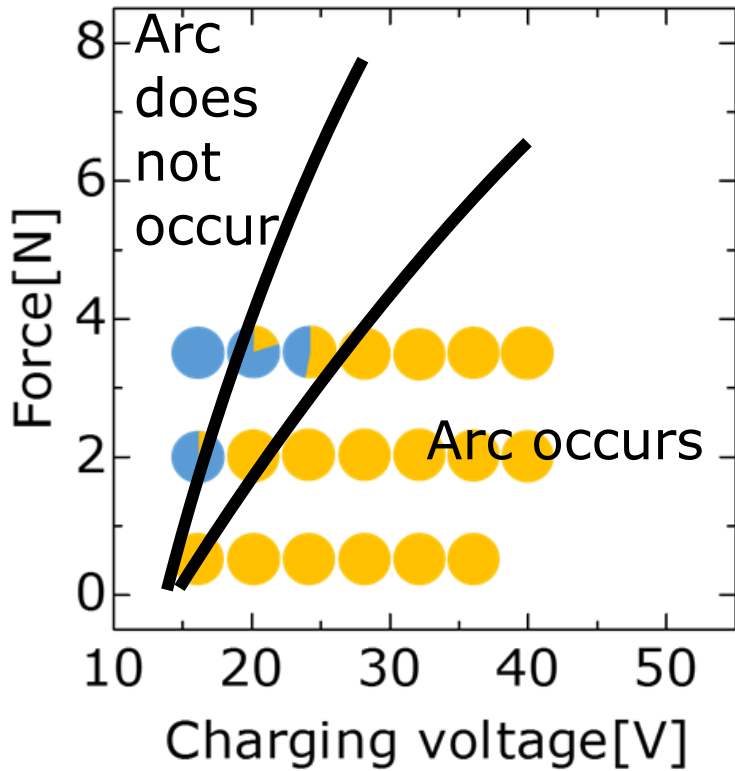
(c)

- Arc occurs
- Arc does not occur
- Over-melting

Fig.3-30 Influences of charging voltage and force on occurrence of arc by wire diameter 0.32mm



(a) 0.65mm



(b) 0.32mm

● Arc occurs (Yellow)  
● Arc does not occur (Blue)

Fig.3-31 Influences of charging voltage and force on occurrence of arc

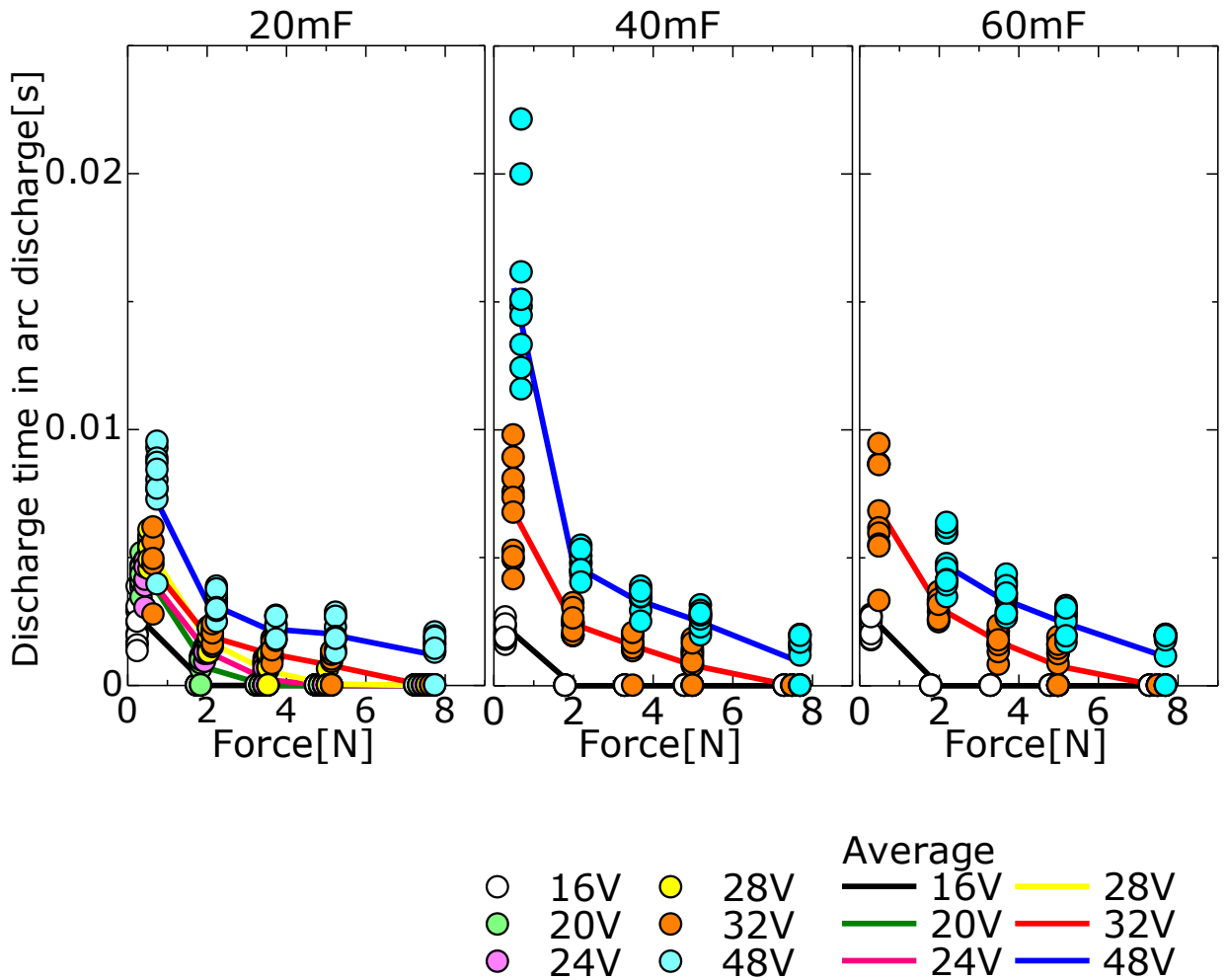


Fig.3-32 Influence of force on discharge time in arc discharge of wire diameter 0.65mm

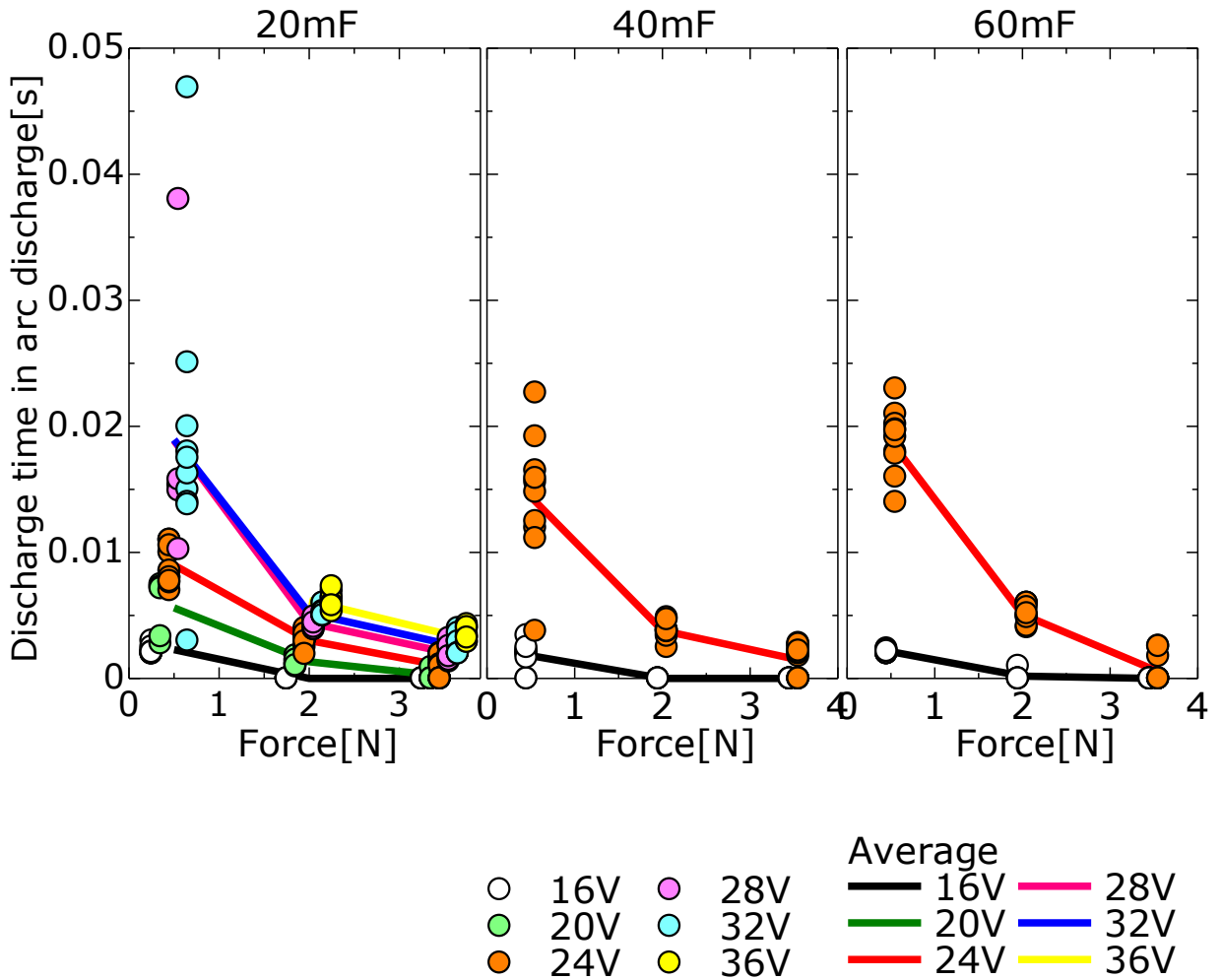


Fig.3-33 Influence of force on discharge time in arc discharge of wire diameter 0.32mm

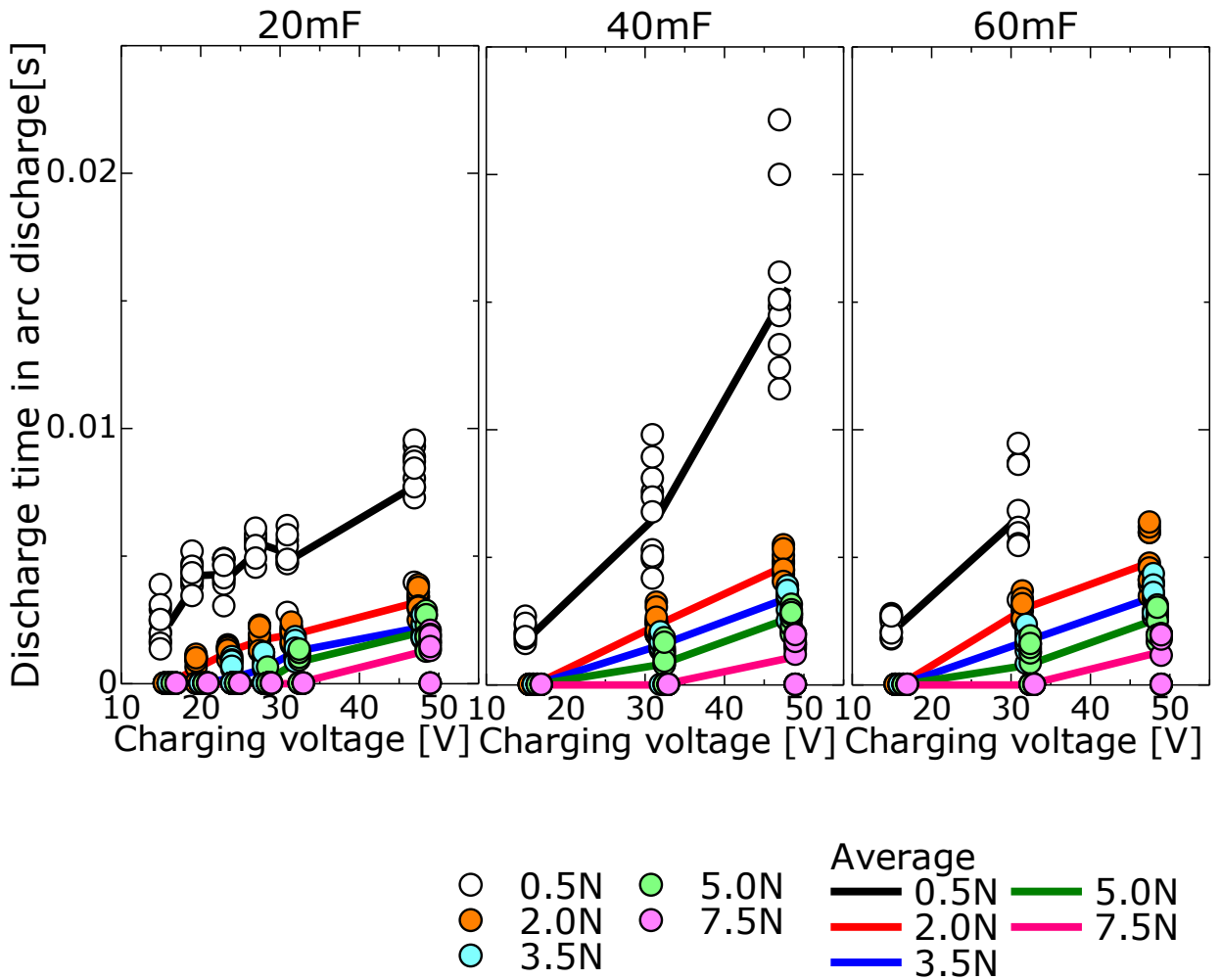


Fig.3-34 Influence of charging voltage on discharge time in arc discharge of wire diameter 0.65mm

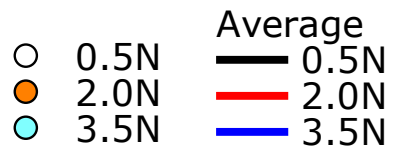
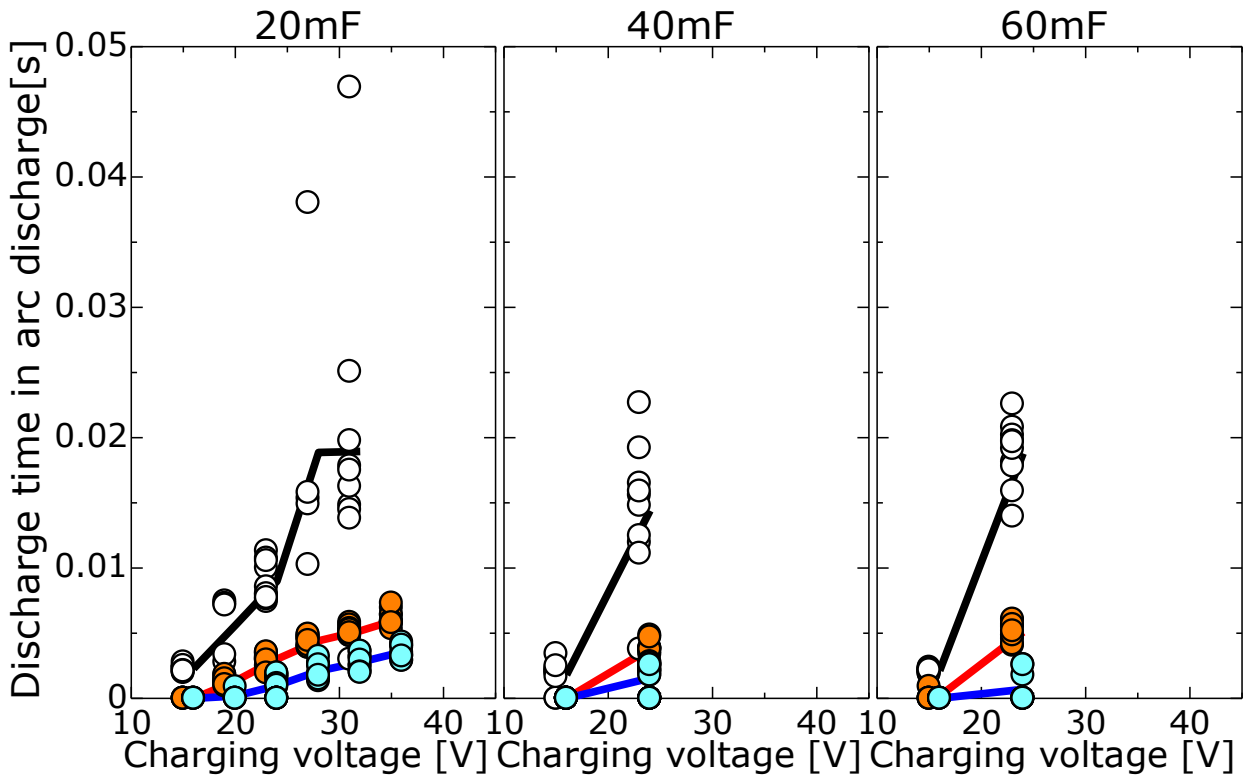


Fig.3-35 Influence of charging voltage on discharge time in arc discharge of wire diameter 0.32mm



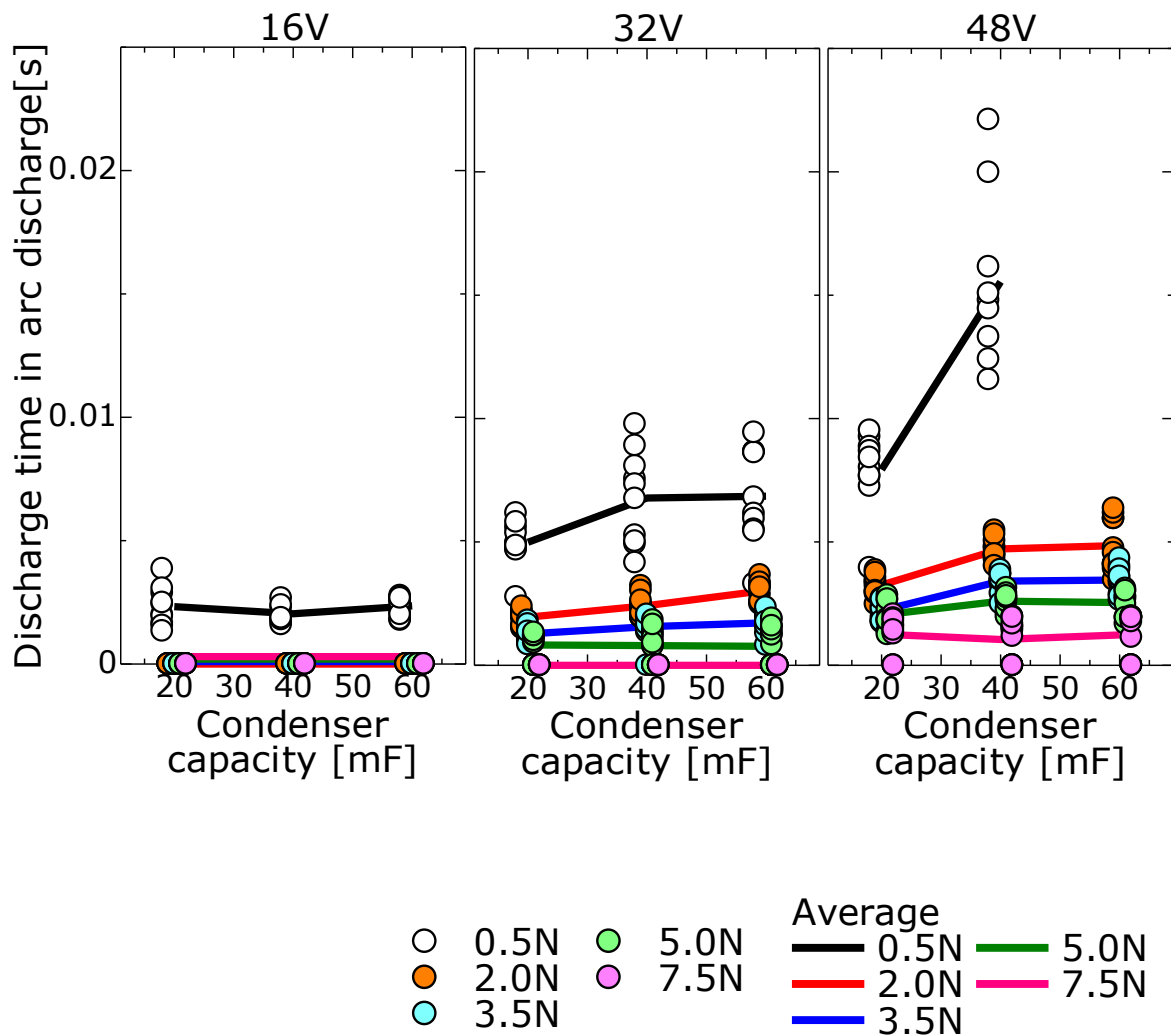


Fig.3-36 Influence of condenser capacity on discharge time in arc discharge of wire diameter 0.65mm

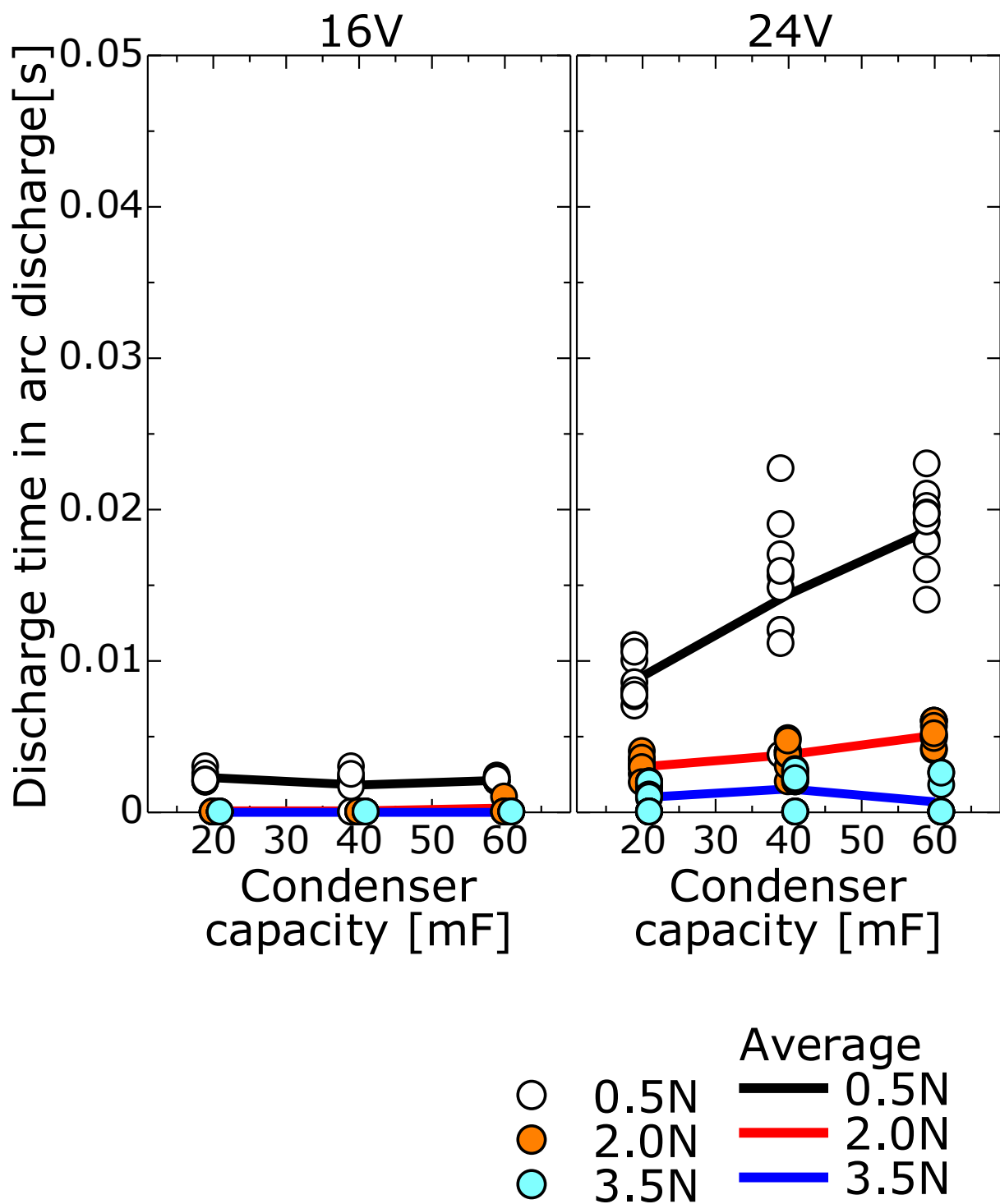


Fig.3-37 Influence of condenser capacity on discharge time in arc discharge of wire diameter 0.32mm

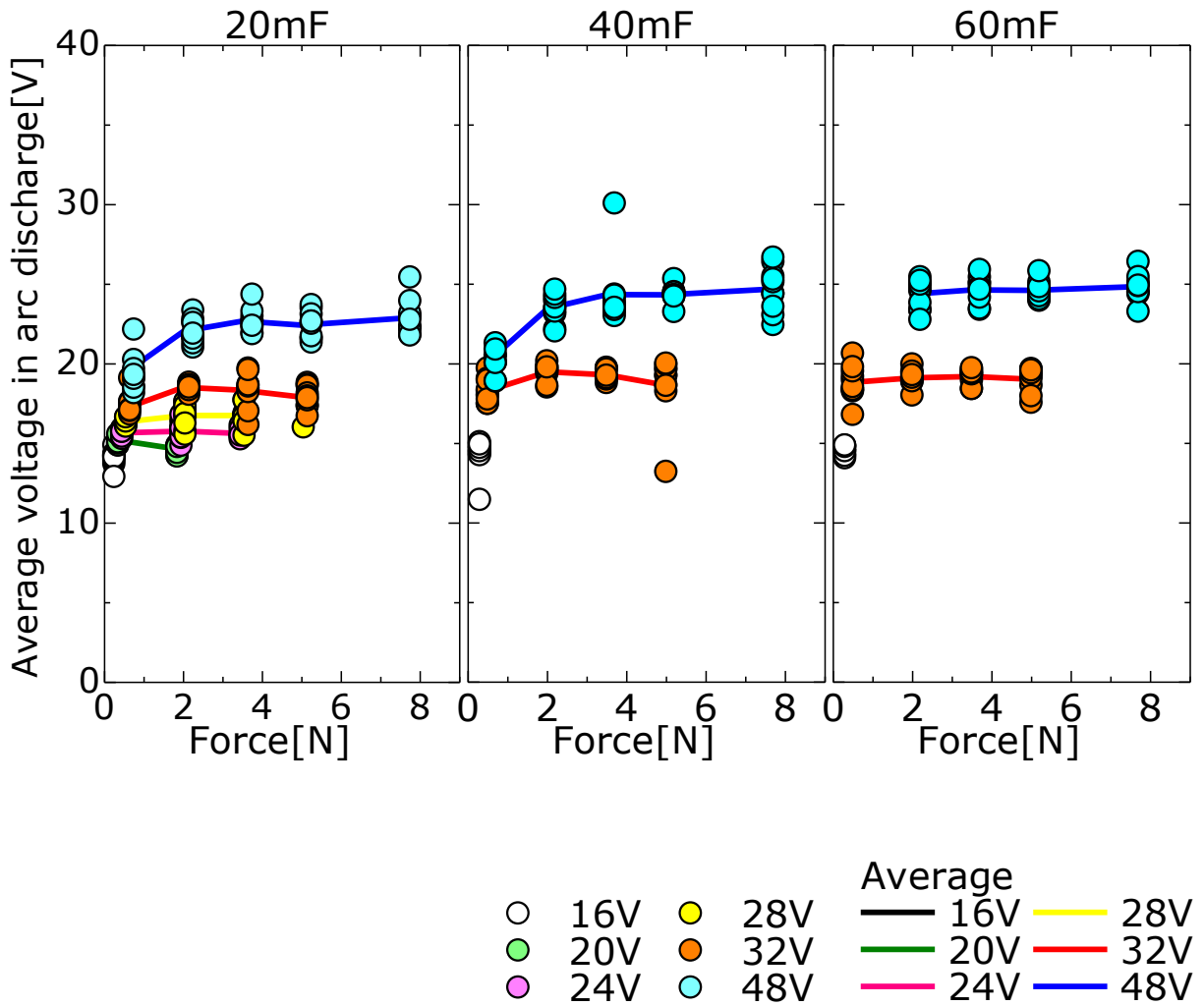


Fig.3-38 Influence of force on average voltage in arc discharge of wire diameter 0.65mm

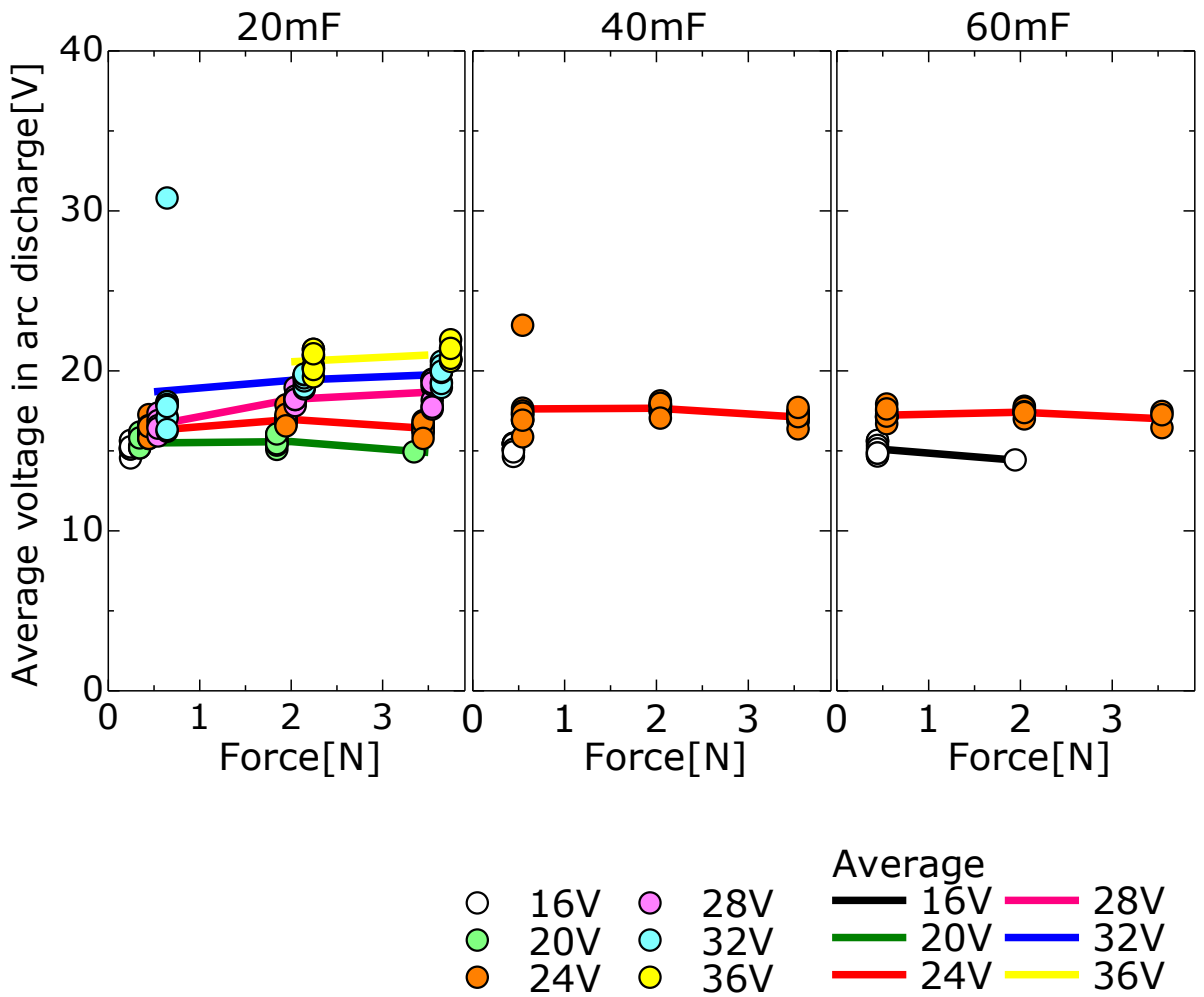


Fig.3-39 Influence of force on average voltage in arc discharge of wire diameter 0.32mm

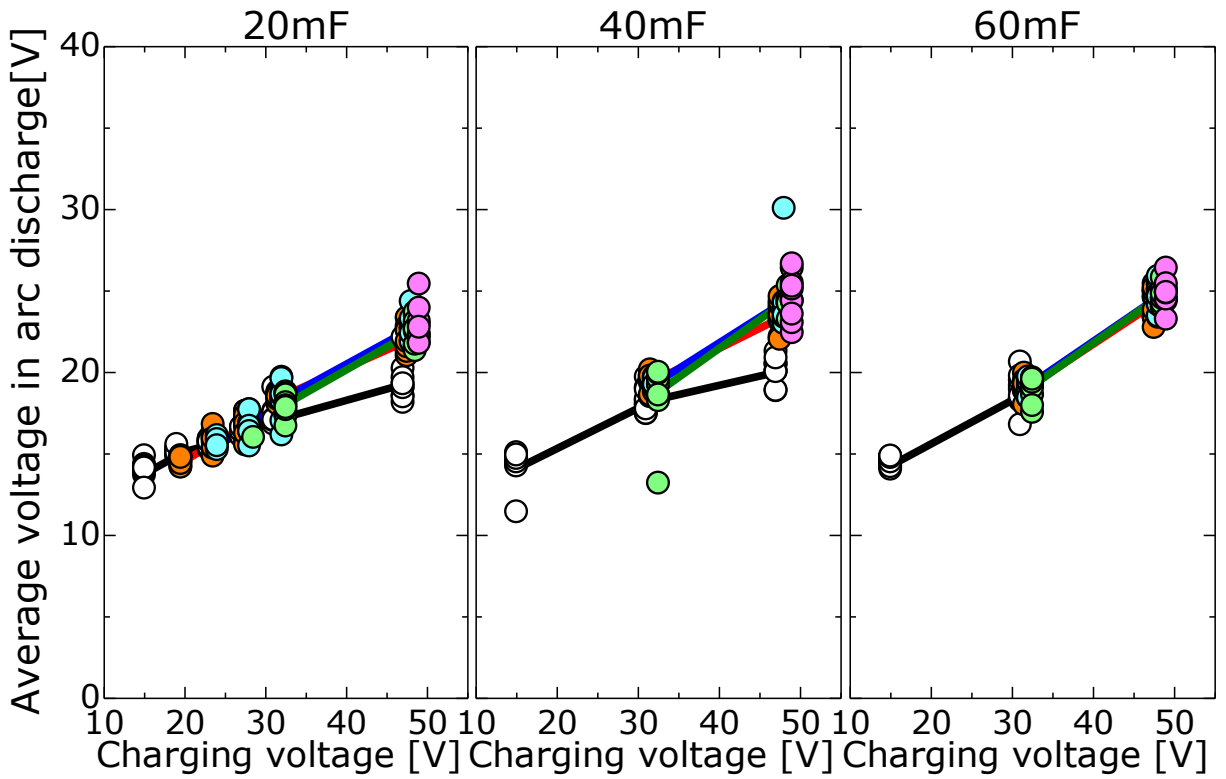
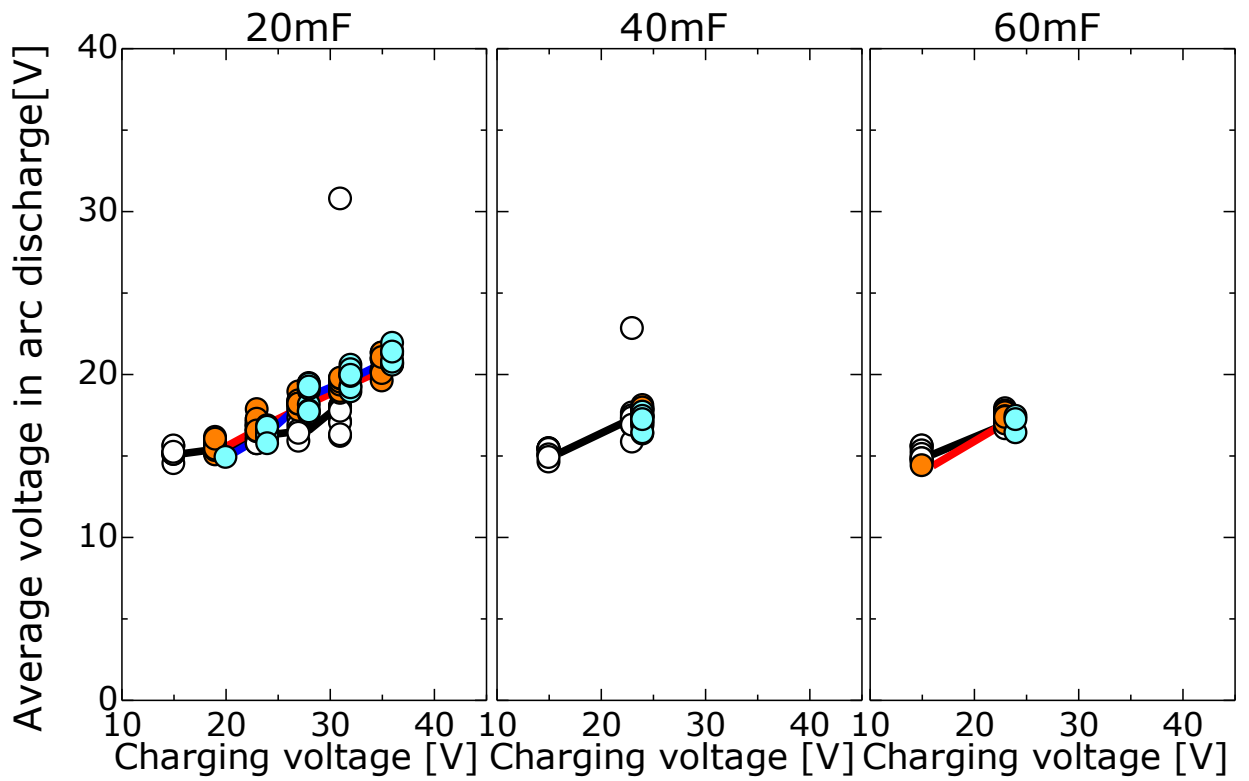


Fig.3-40 Influence of charging voltage on average voltage in arc discharge of wire diameter 0.65mm



○ 0.5N      Average  
 ● 2.0N      — 0.5N  
 ● 3.5N      — 2.0N  
                  — 3.5N

Fig.3-41 Influence of charging voltage on average voltage in arc discharge of wire diameter 0.32mm

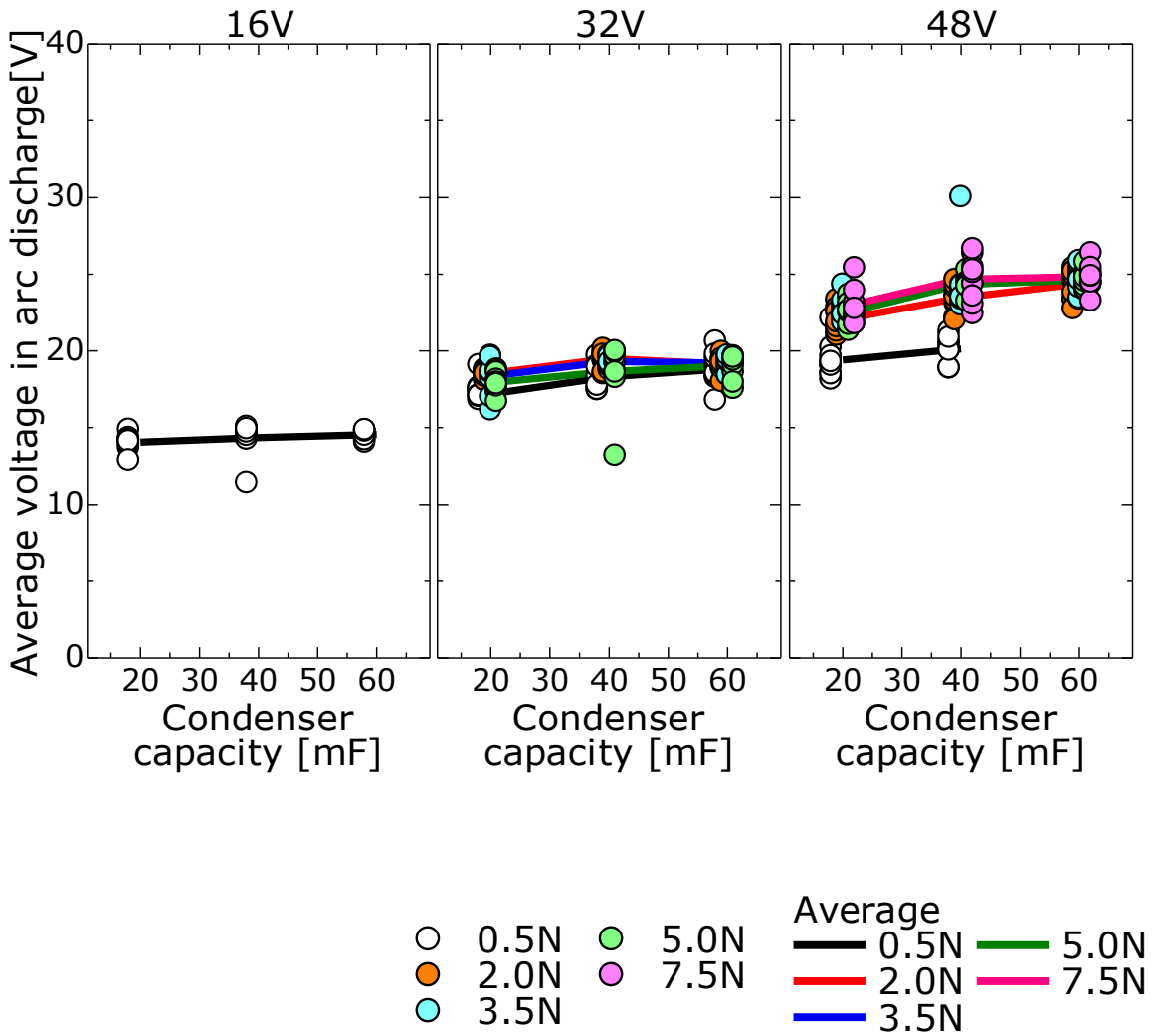


Fig.3-42 Influence of condenser capacity on average voltage in arc discharge of wire diameter 0.65mm

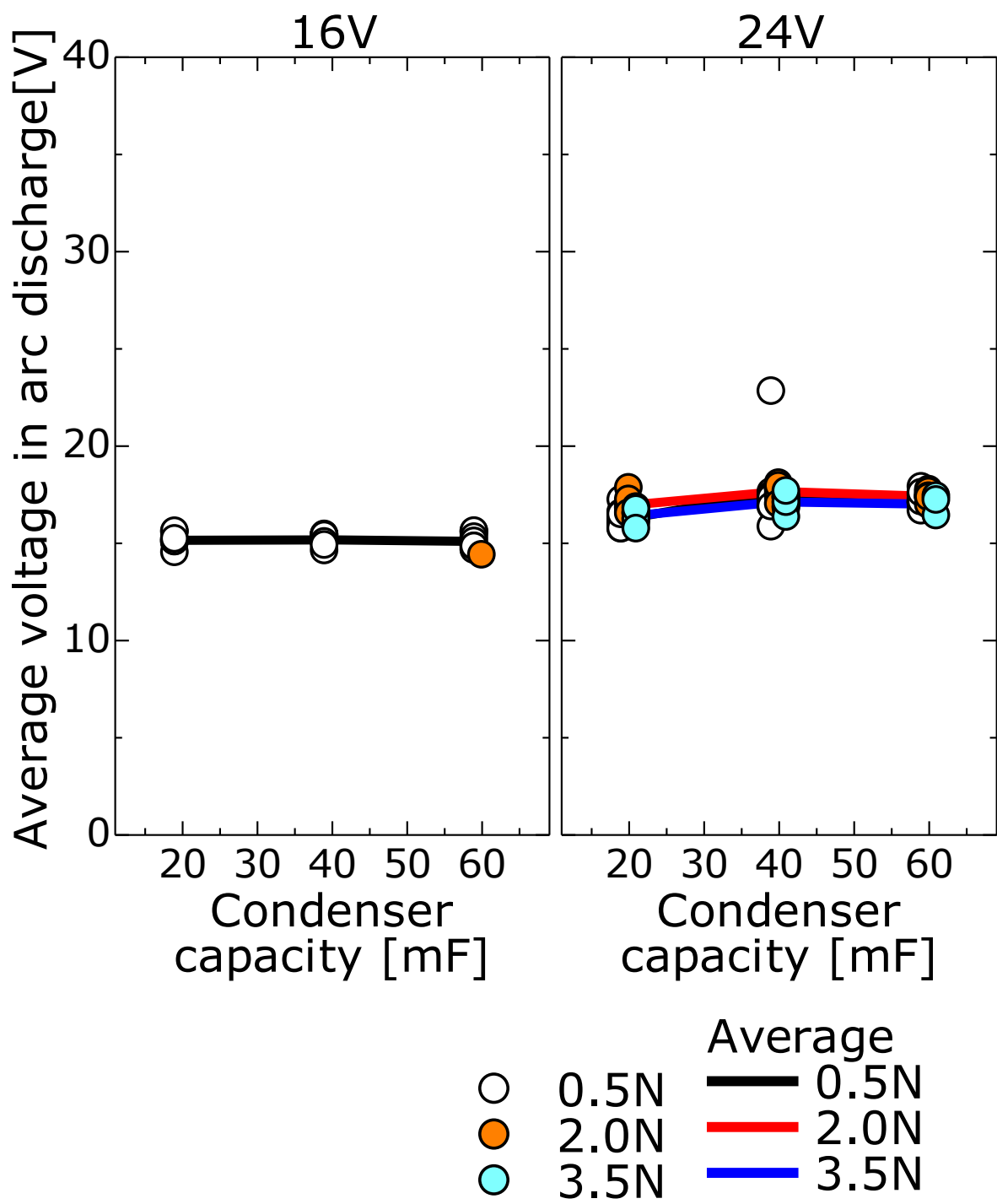


Fig.3-43 Influence of condenser capacity on average voltage in arc discharge of wire diameter 0.65mm



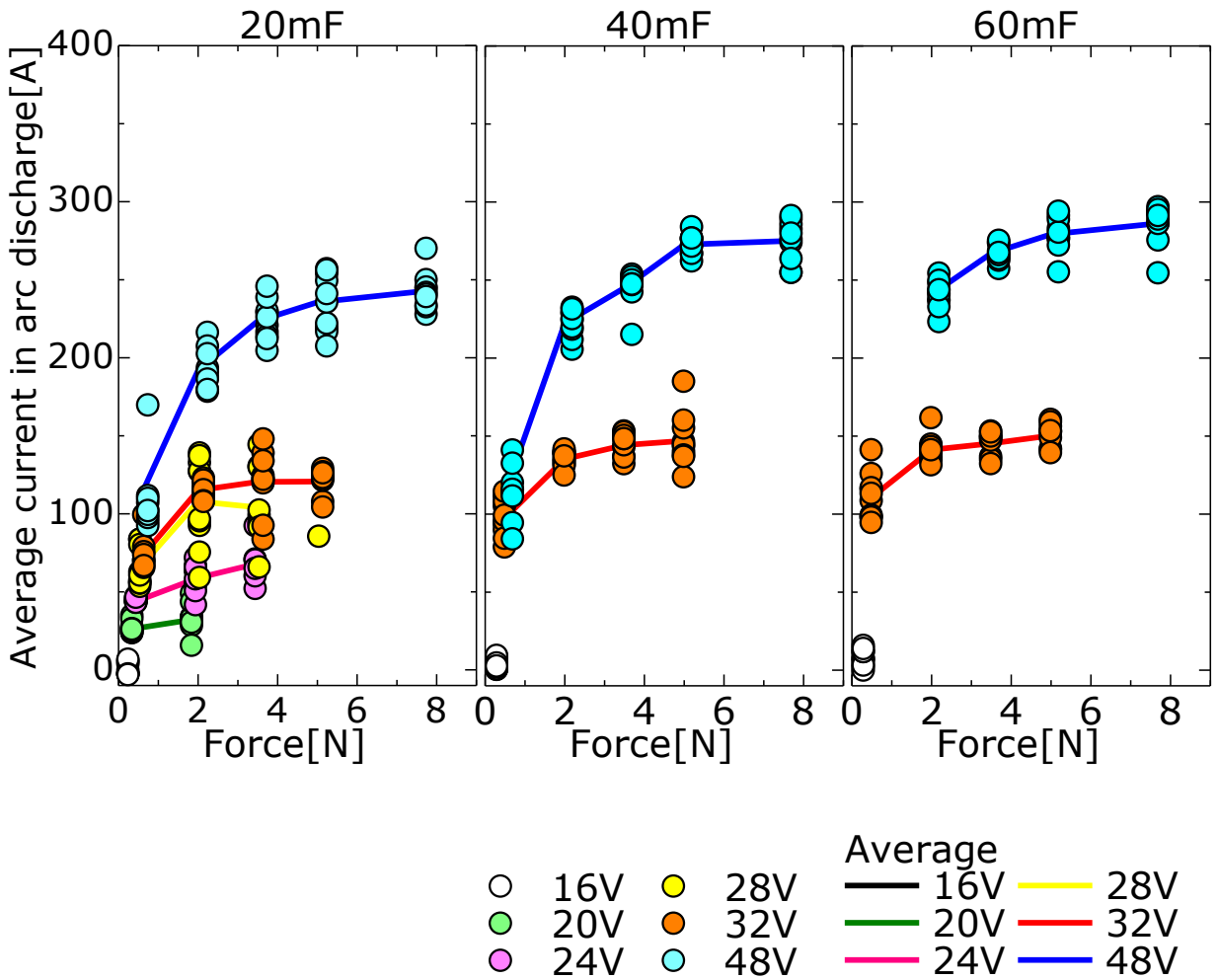


Fig.3-44 Influence of force on average current in arc discharge of wire diameter 0.65mm

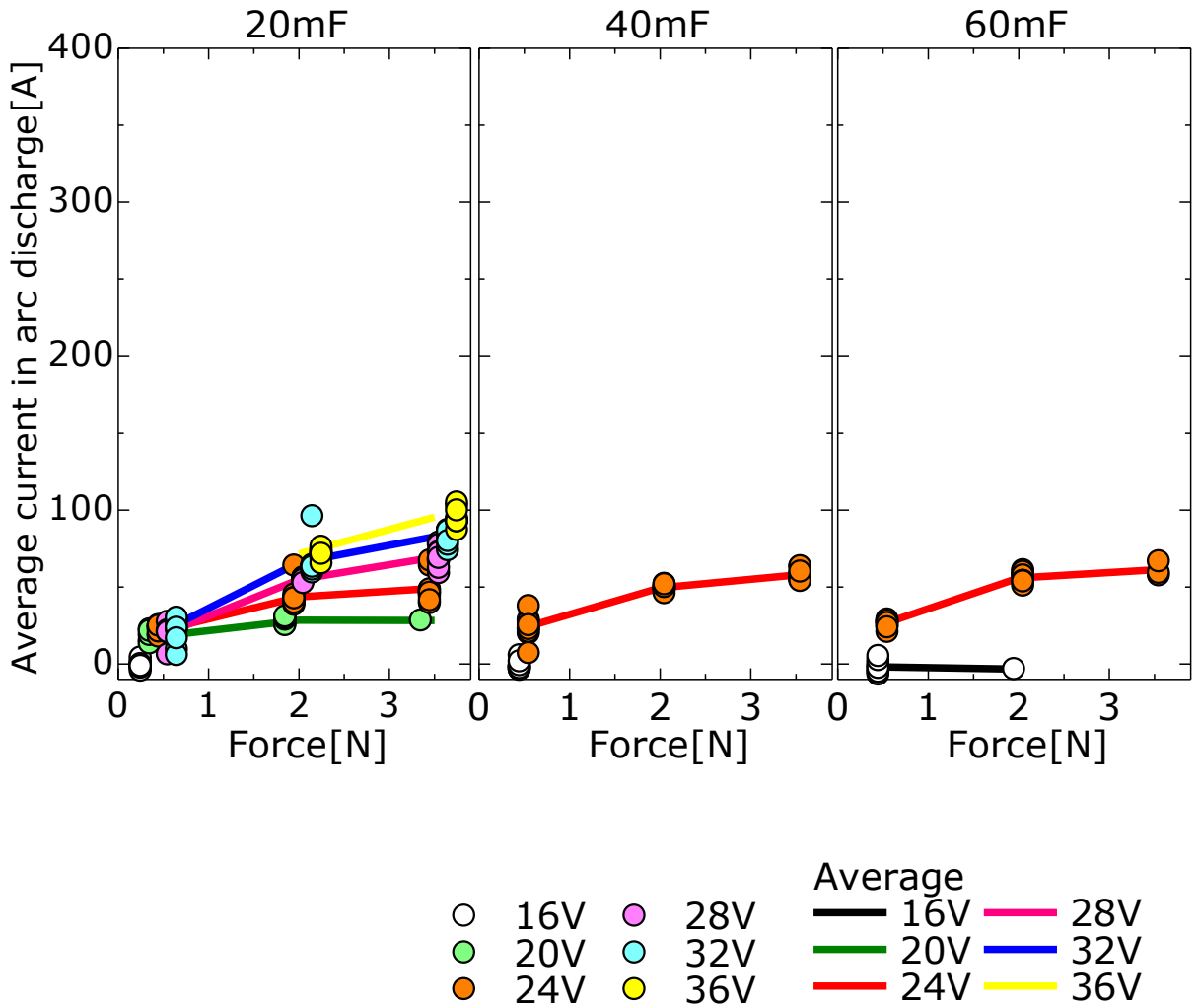


Fig.3-45 Influence of force on average current in arc discharge of wire diameter 0.32mm

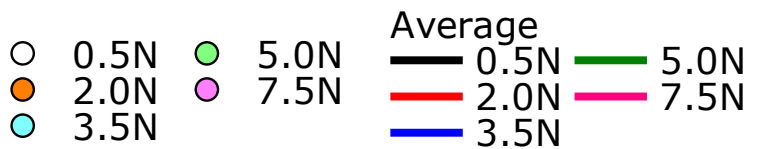
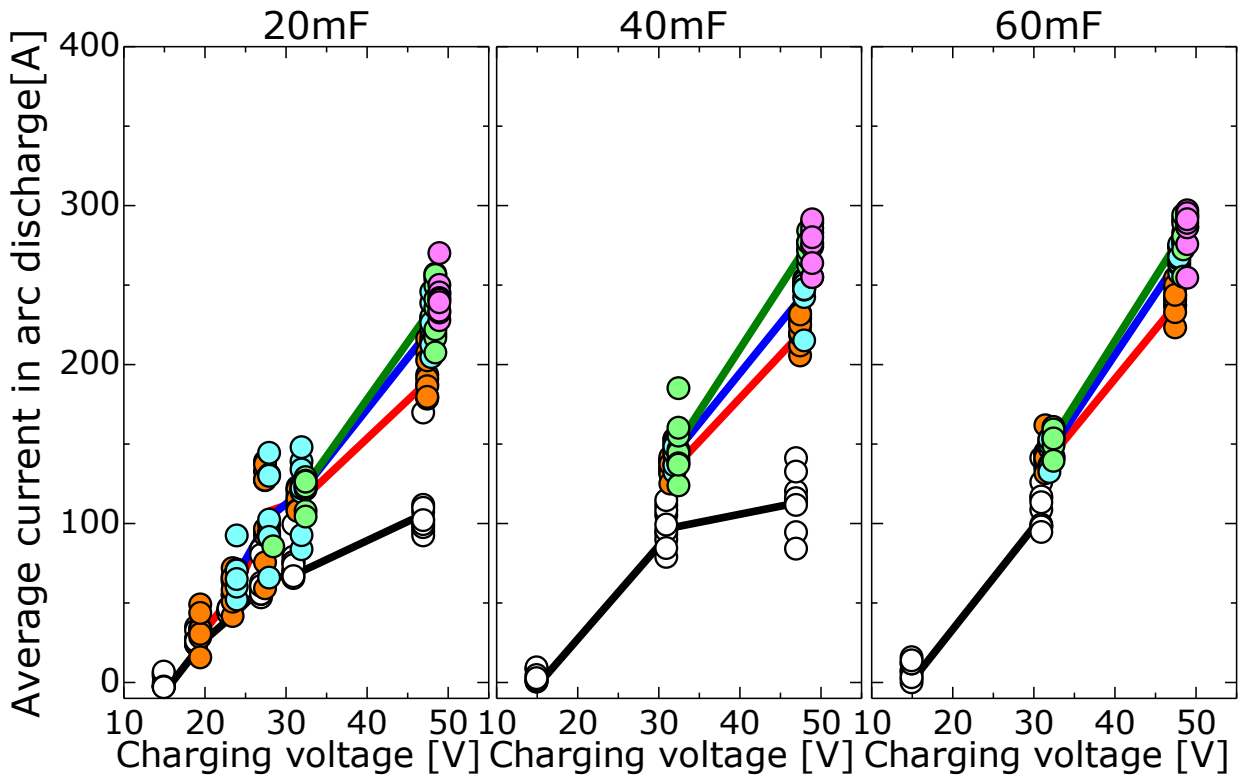


Fig.3-46 Influence of charging voltage on average current in arc discharge of wire diameter 0.65mm

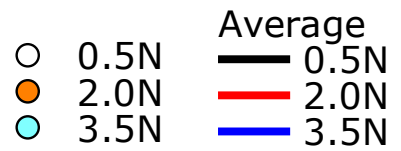
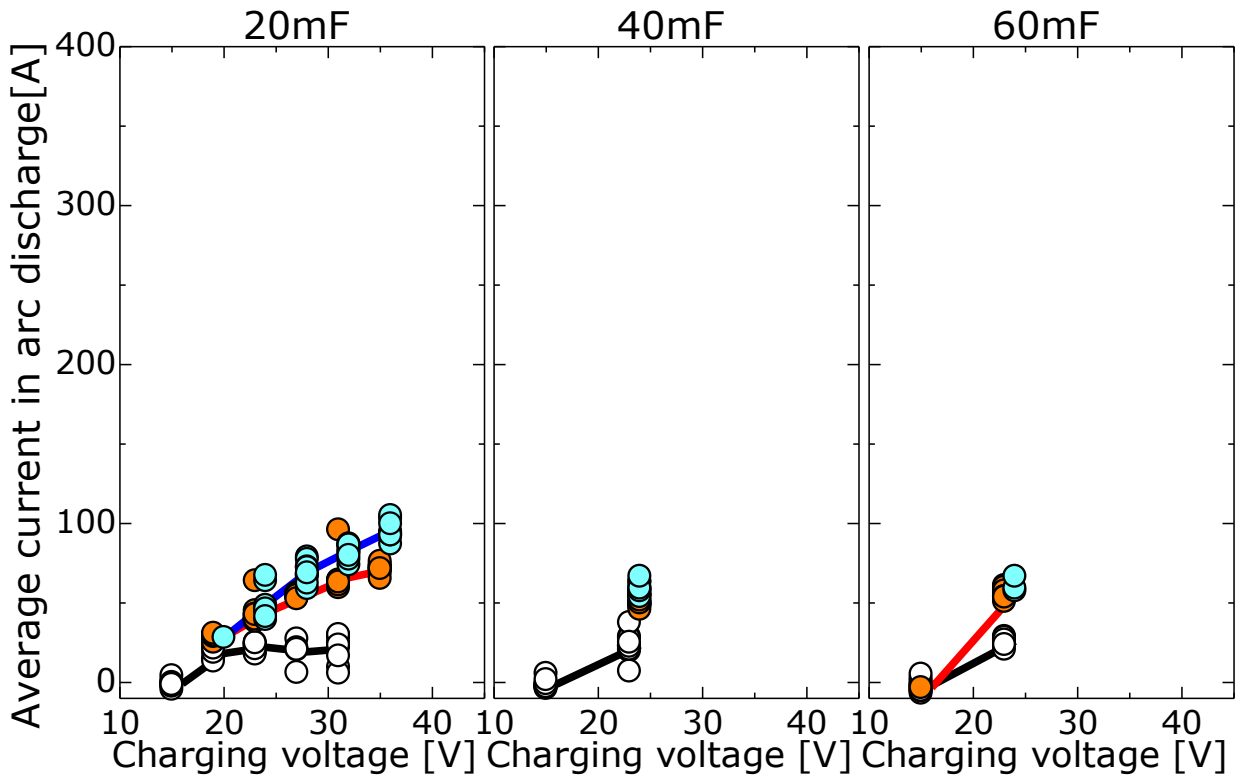


Fig.3-47 Influence of charging voltage on average current in arc discharge of wire diameter 0.32mm

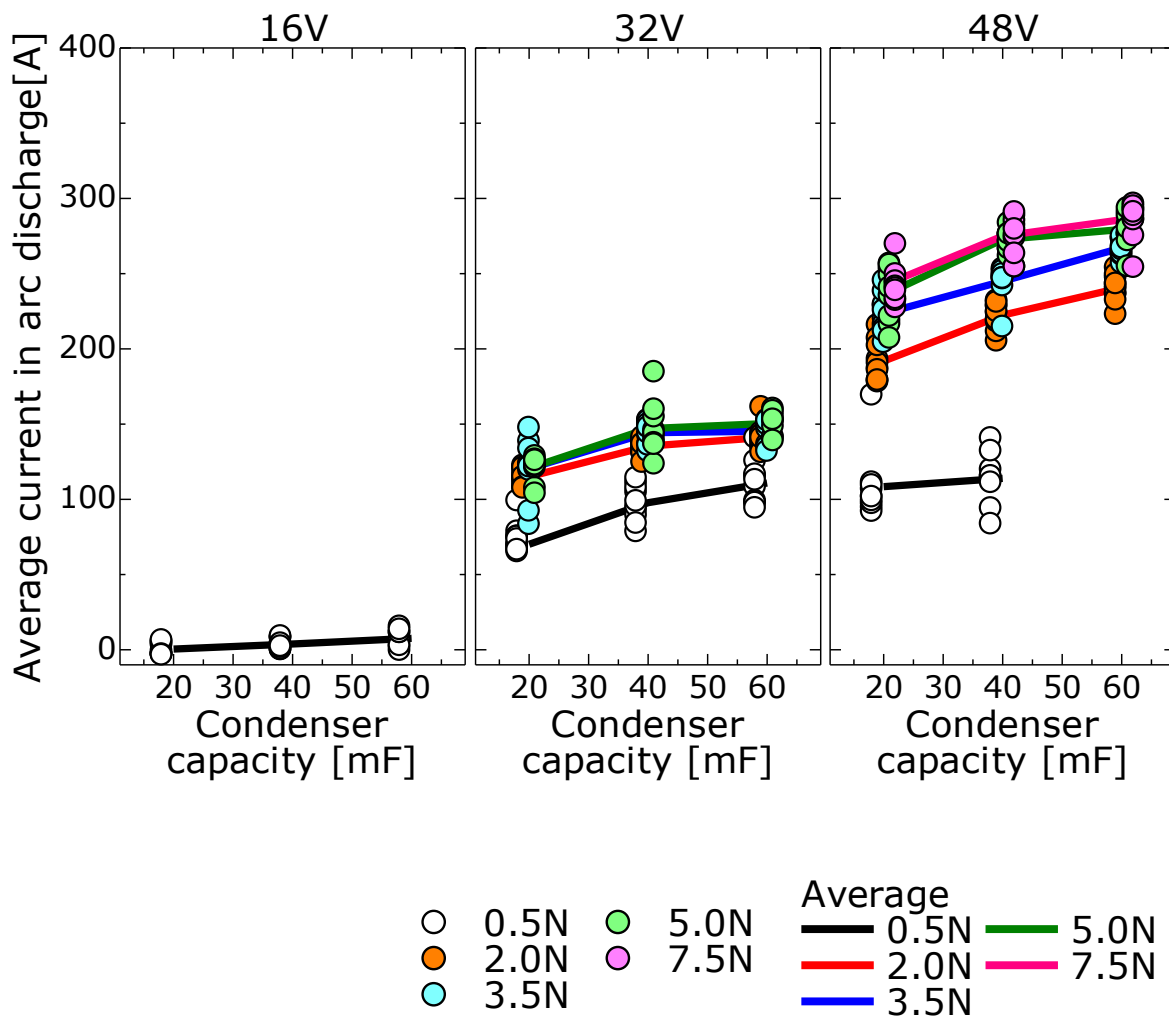


Fig.3-48 Influence of condenser capacity on average current in arc discharge of wire diameter 0.65mm

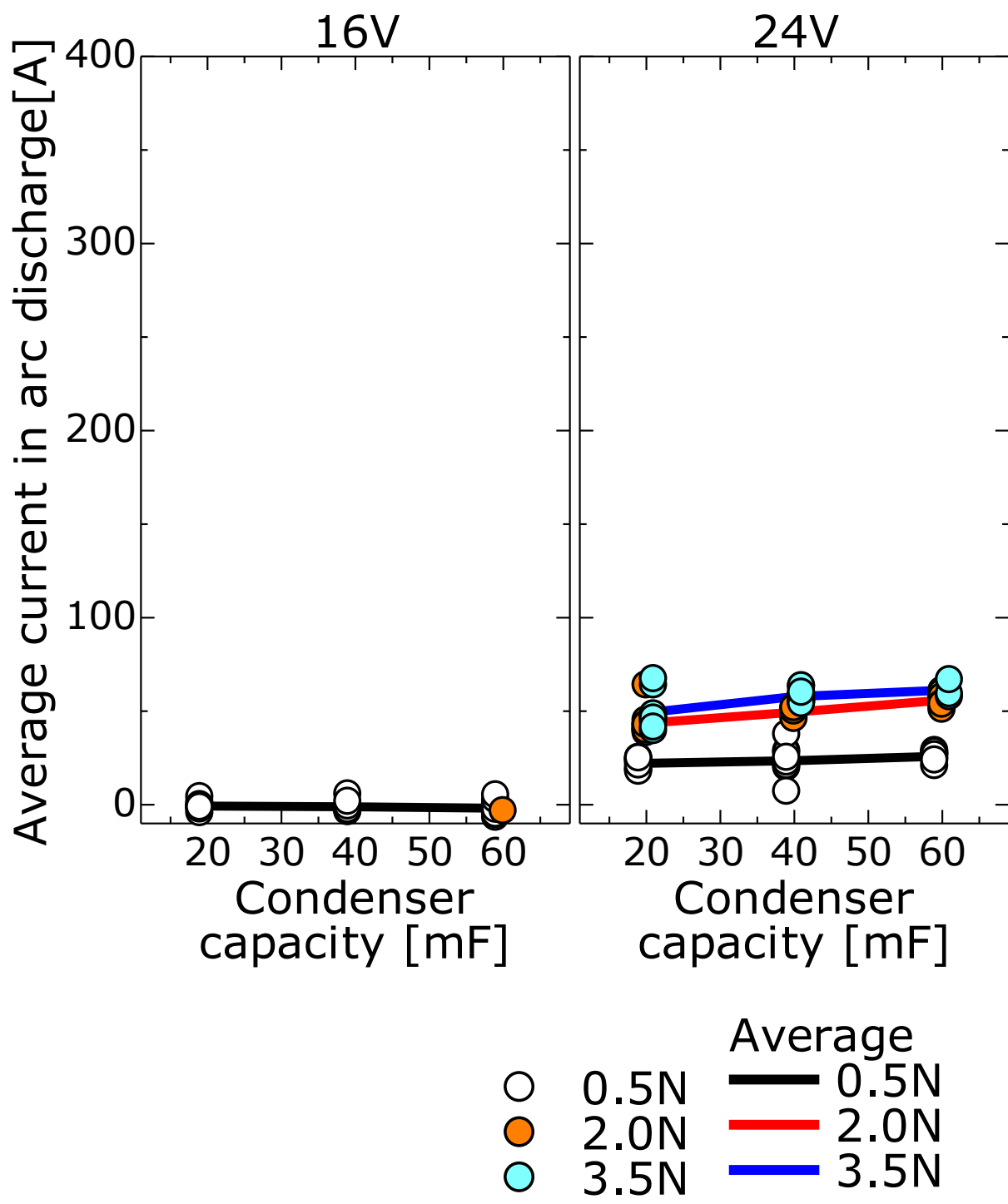


Fig.3-49 Influence of condenser capacity on average current in arc discharge of wire diameter 0.65mm

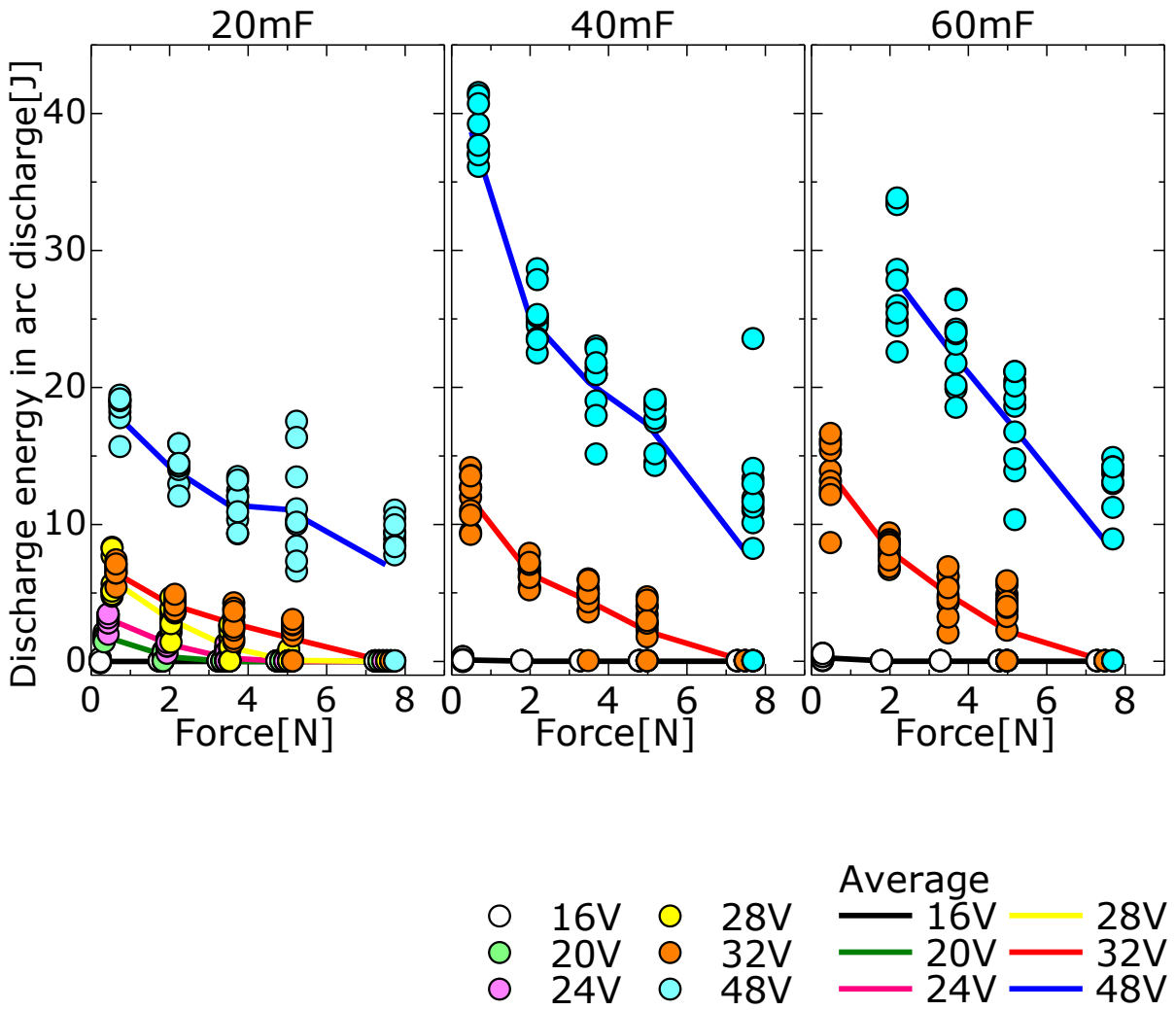


Fig.3-50 Influence of force on discharge energy in arc discharge of wire diameter 0.65mm

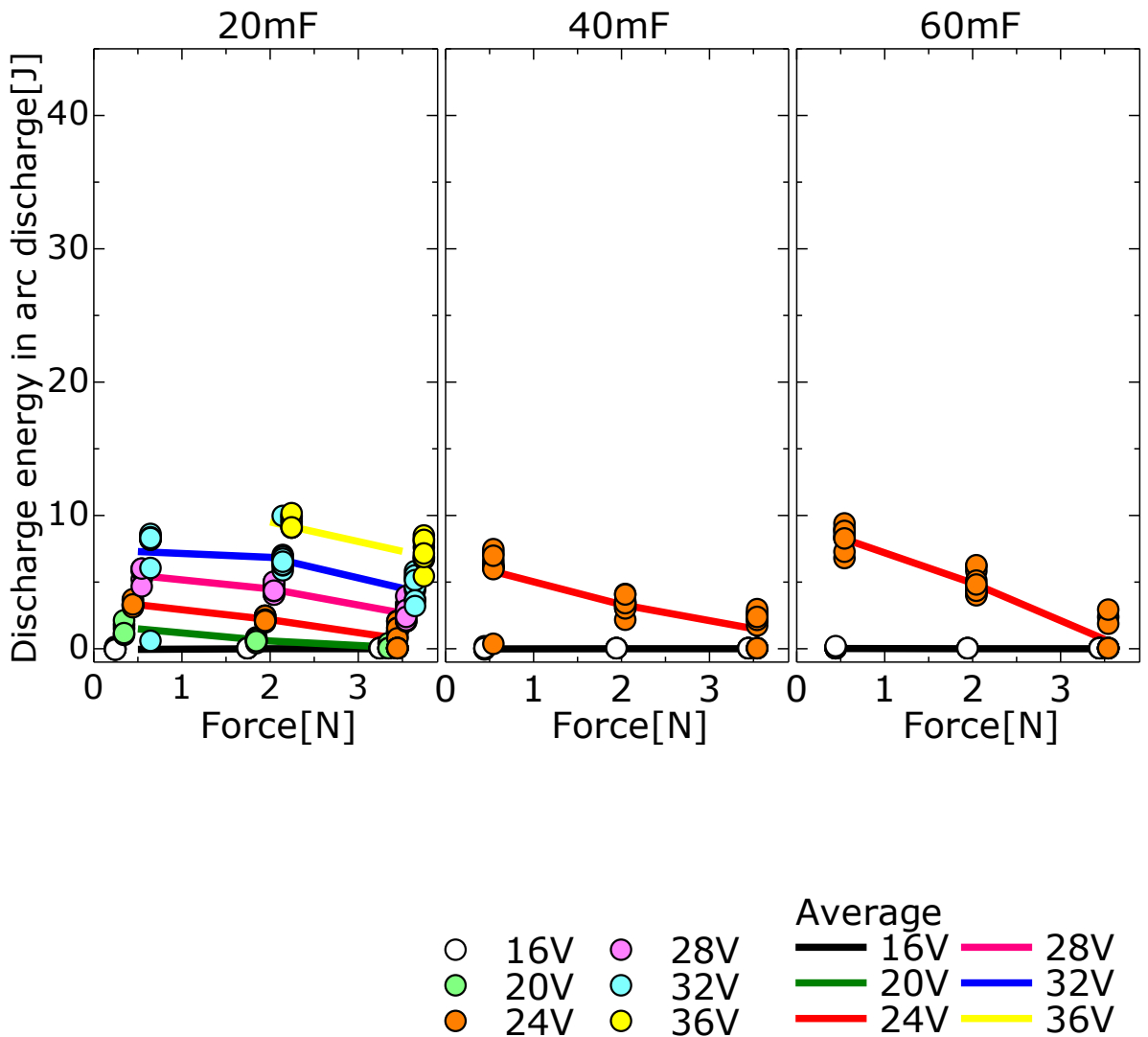


Fig.3-51 Influence of force on discharge energy in arc discharge of wire diameter 0.32mm



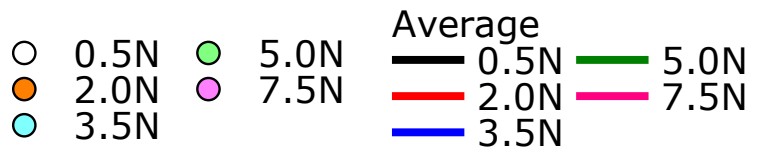
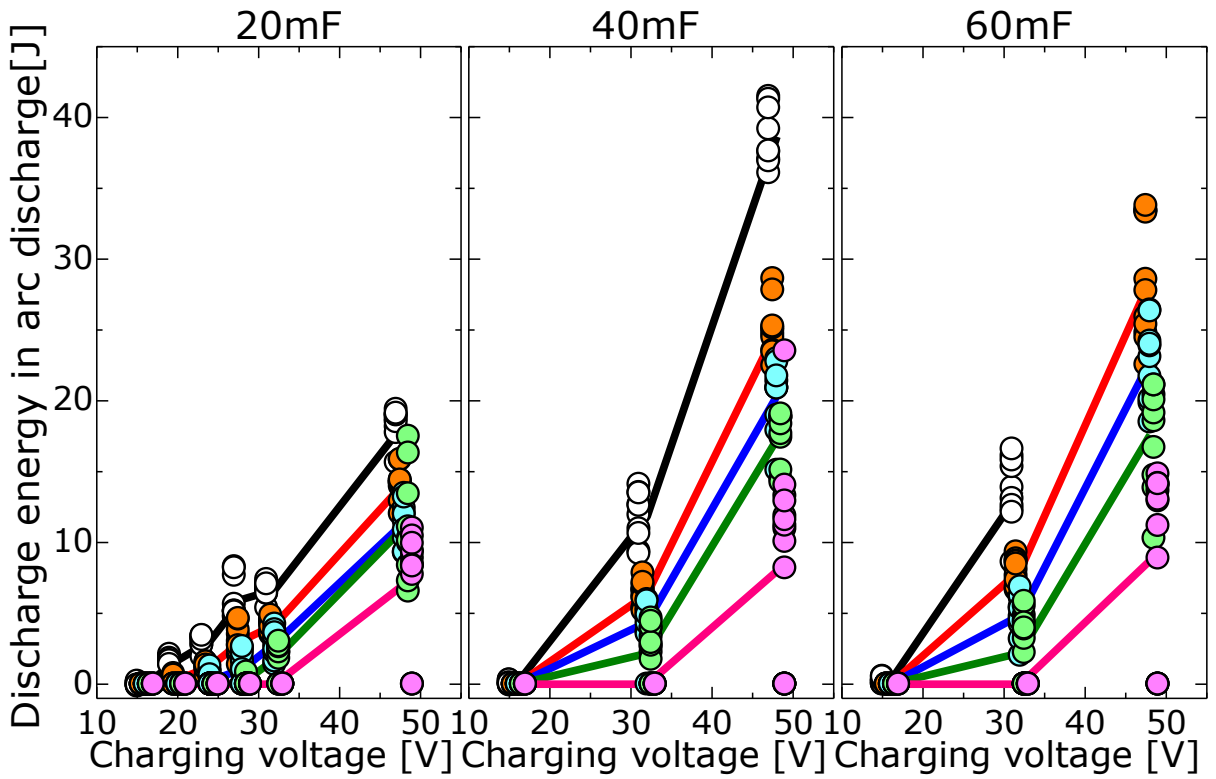


Fig.3-52 Influence of charging voltage on discharge energy in arc discharge of wire diameter 0.65mm

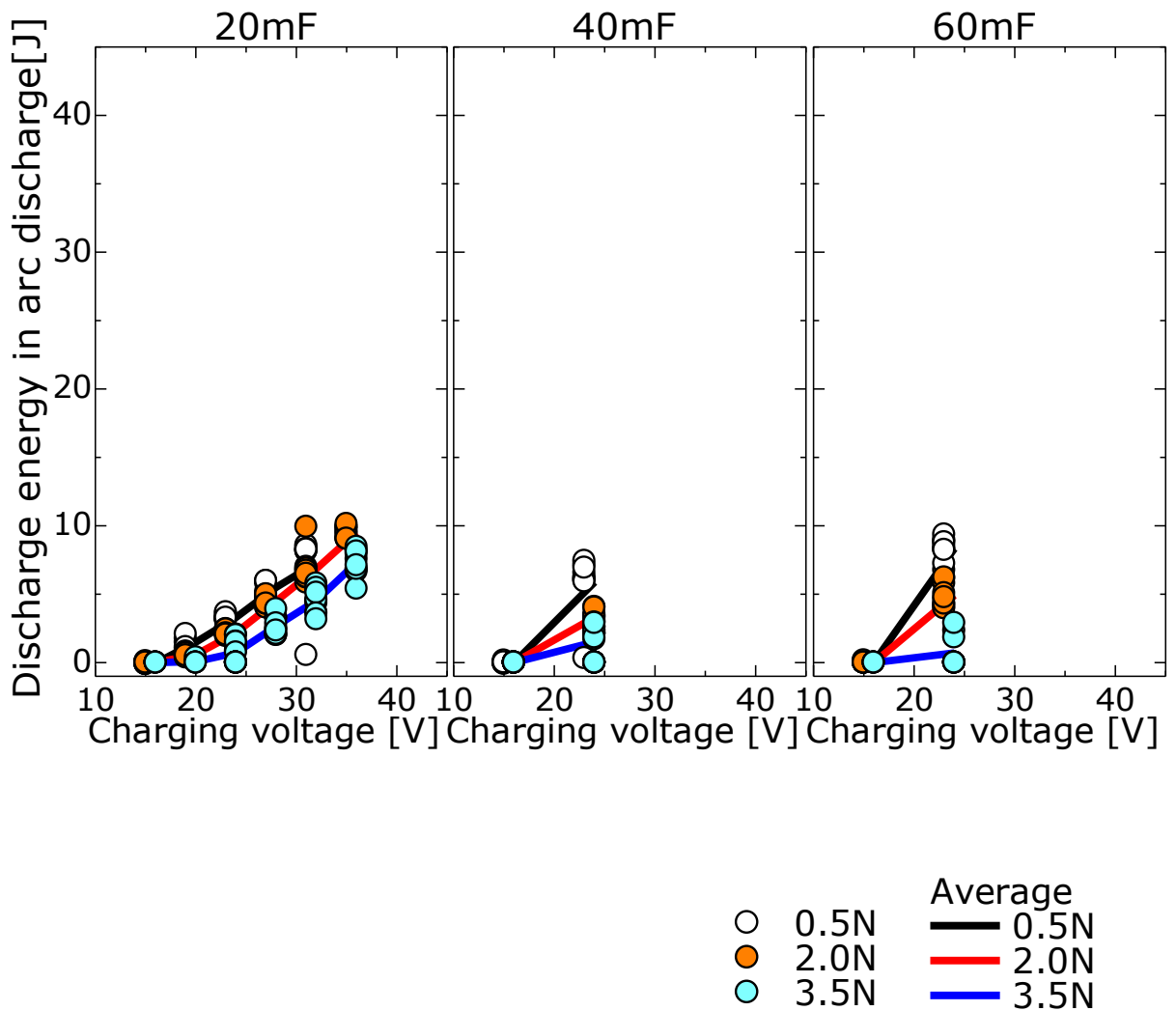


Fig.3-53 Influence of charging voltage on discharge energy in arc discharge of wire diameter 0.32mm

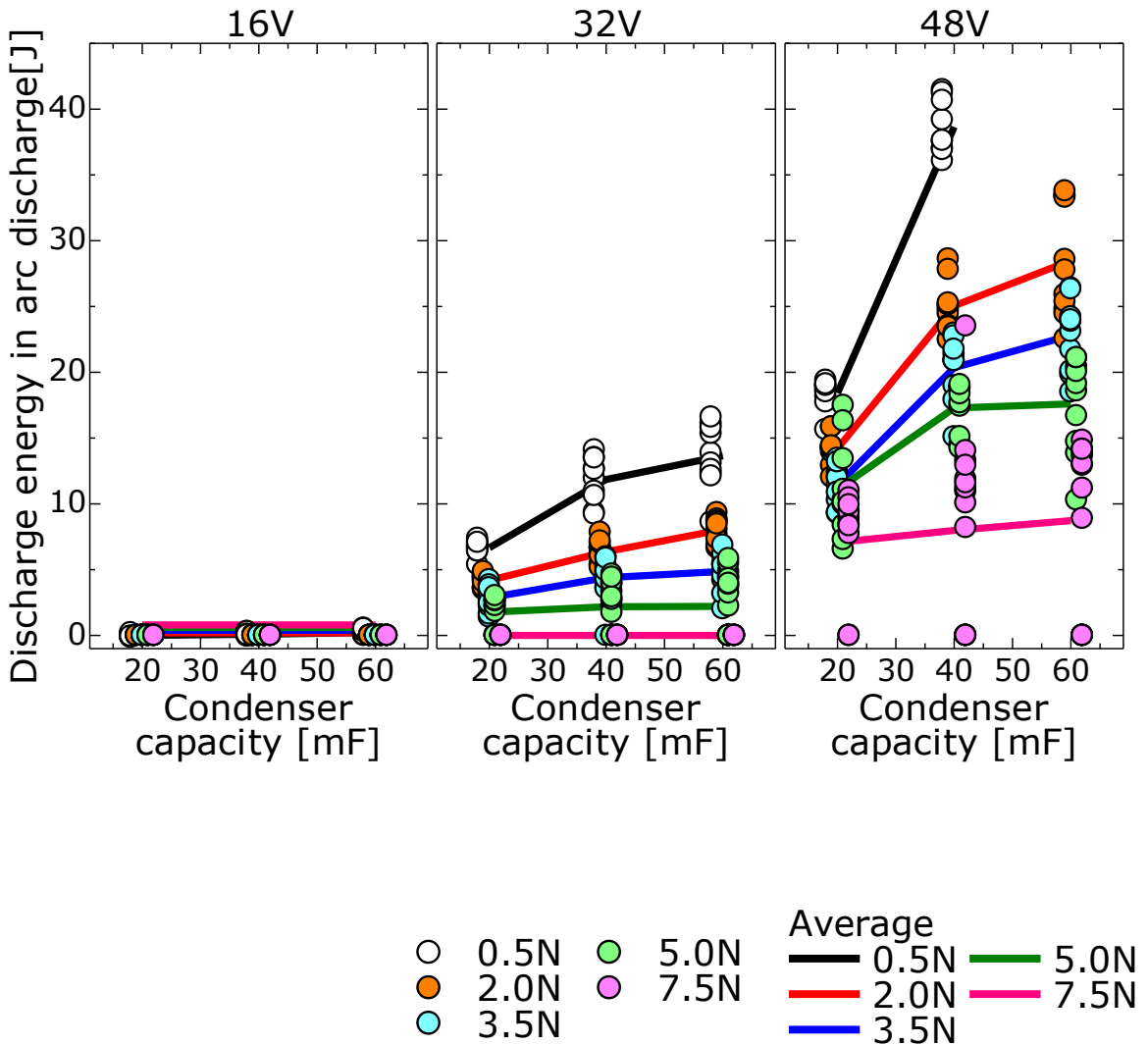


Fig.3-54 Influence of condenser capacity on discharge energy in arc discharge of wire diameter 0.65mm

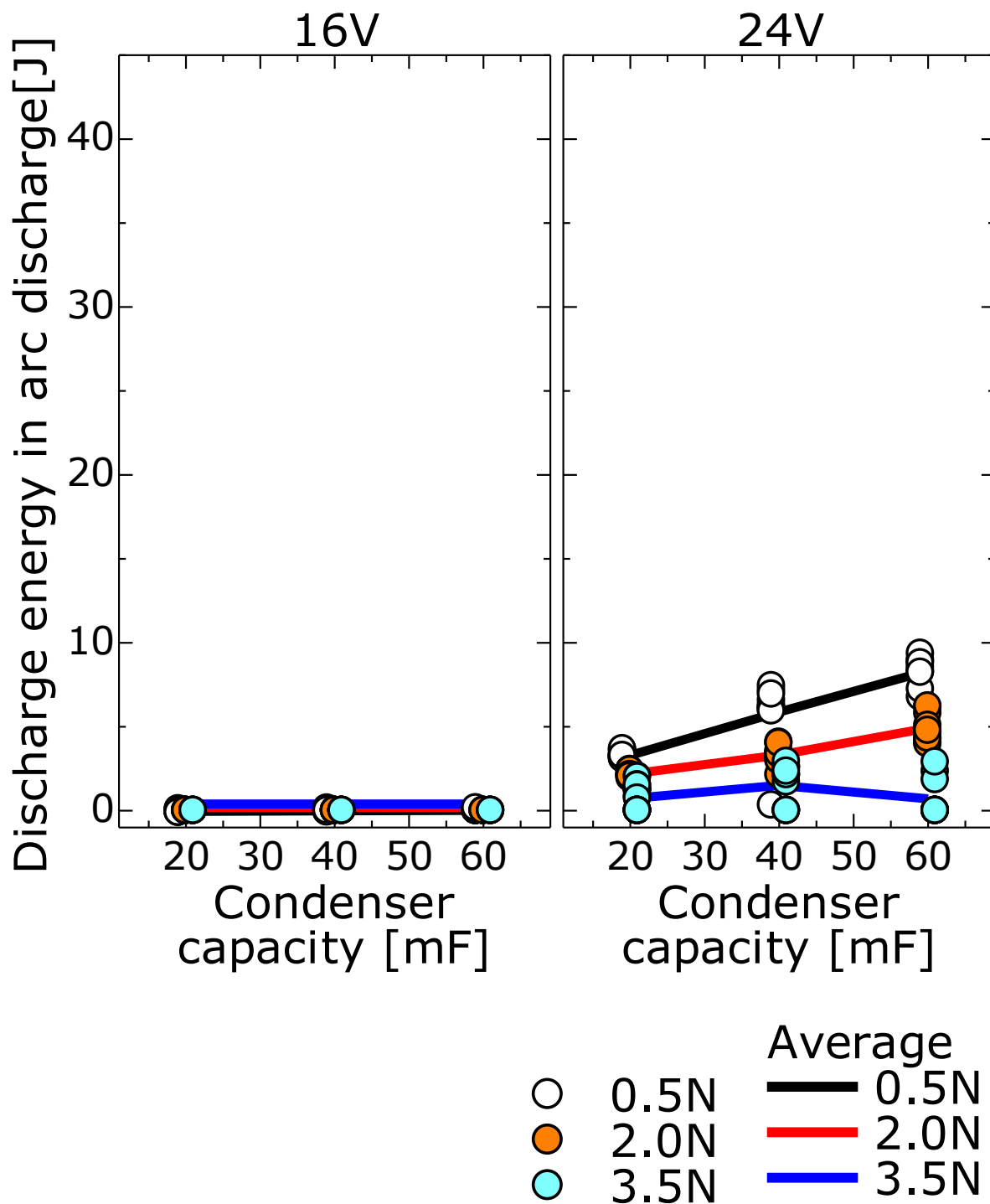


Fig.3-55 Influence of condenser capacity on discharge energy in arc discharge of wire diameter 0.32mm

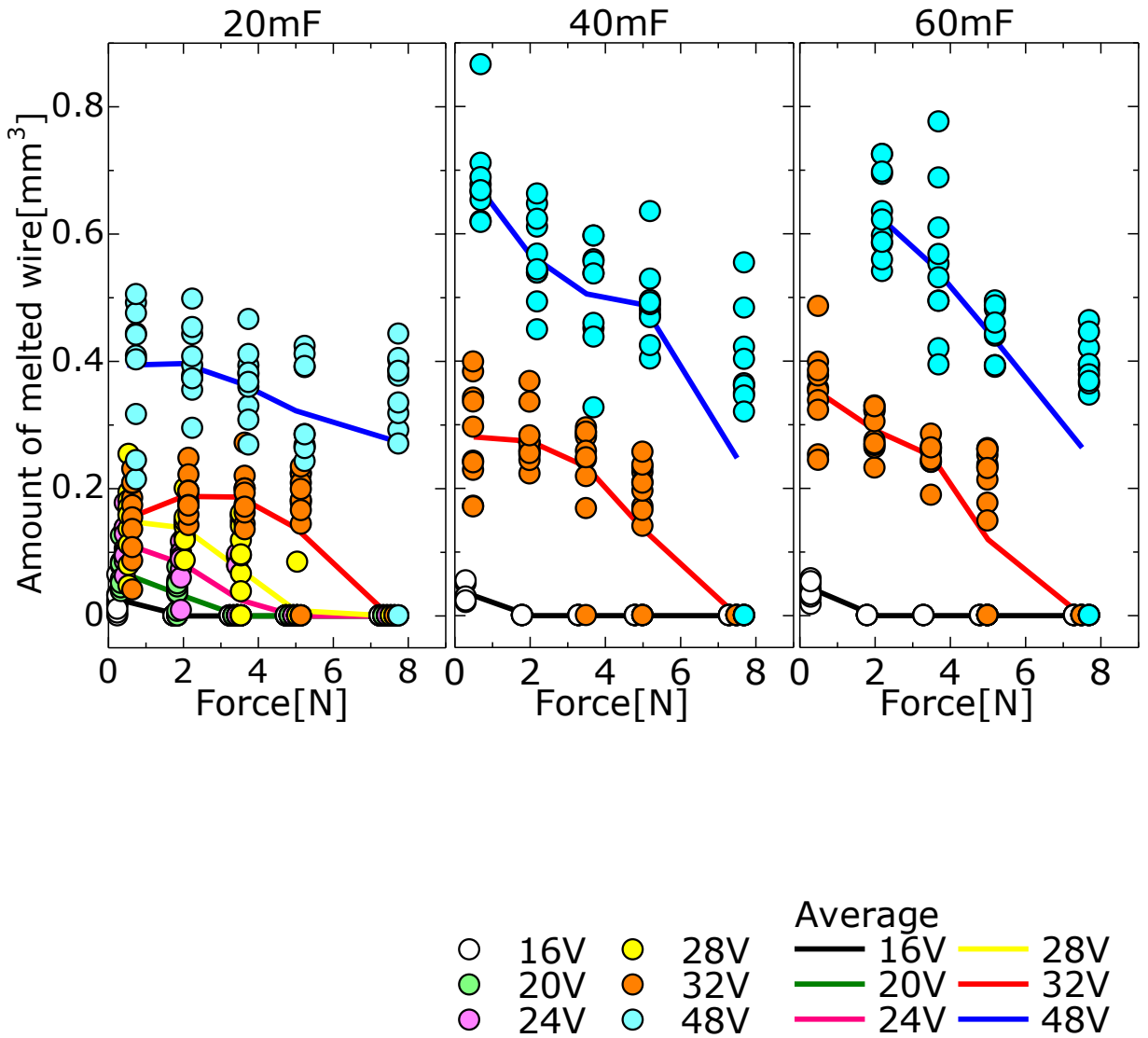


Fig.3-56 Influence of force on amount of melted wire of wire diameter 0.65mm

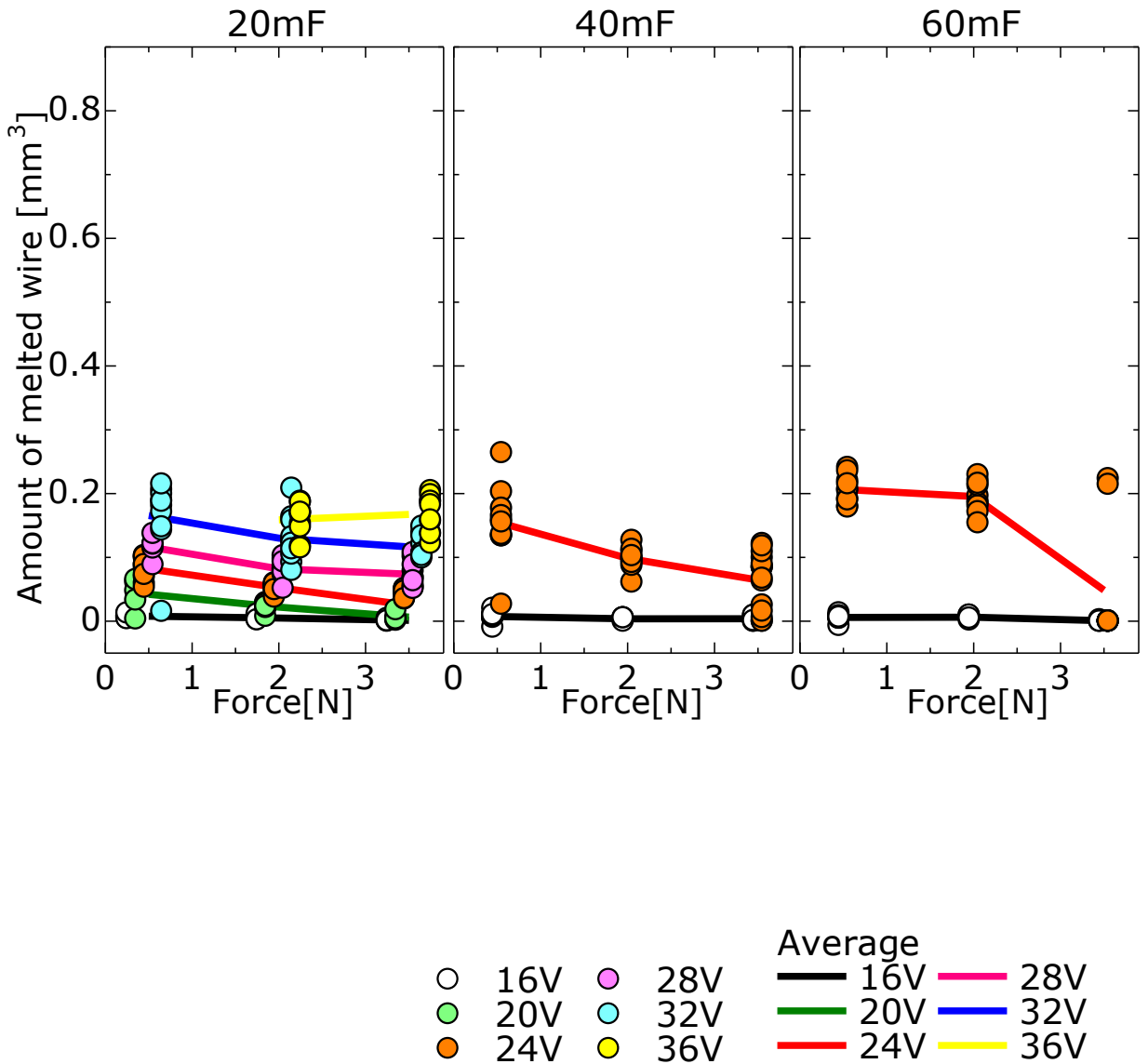


Fig.3-57 Influence of force on amount of melted wire in of wire diameter 0.32mm

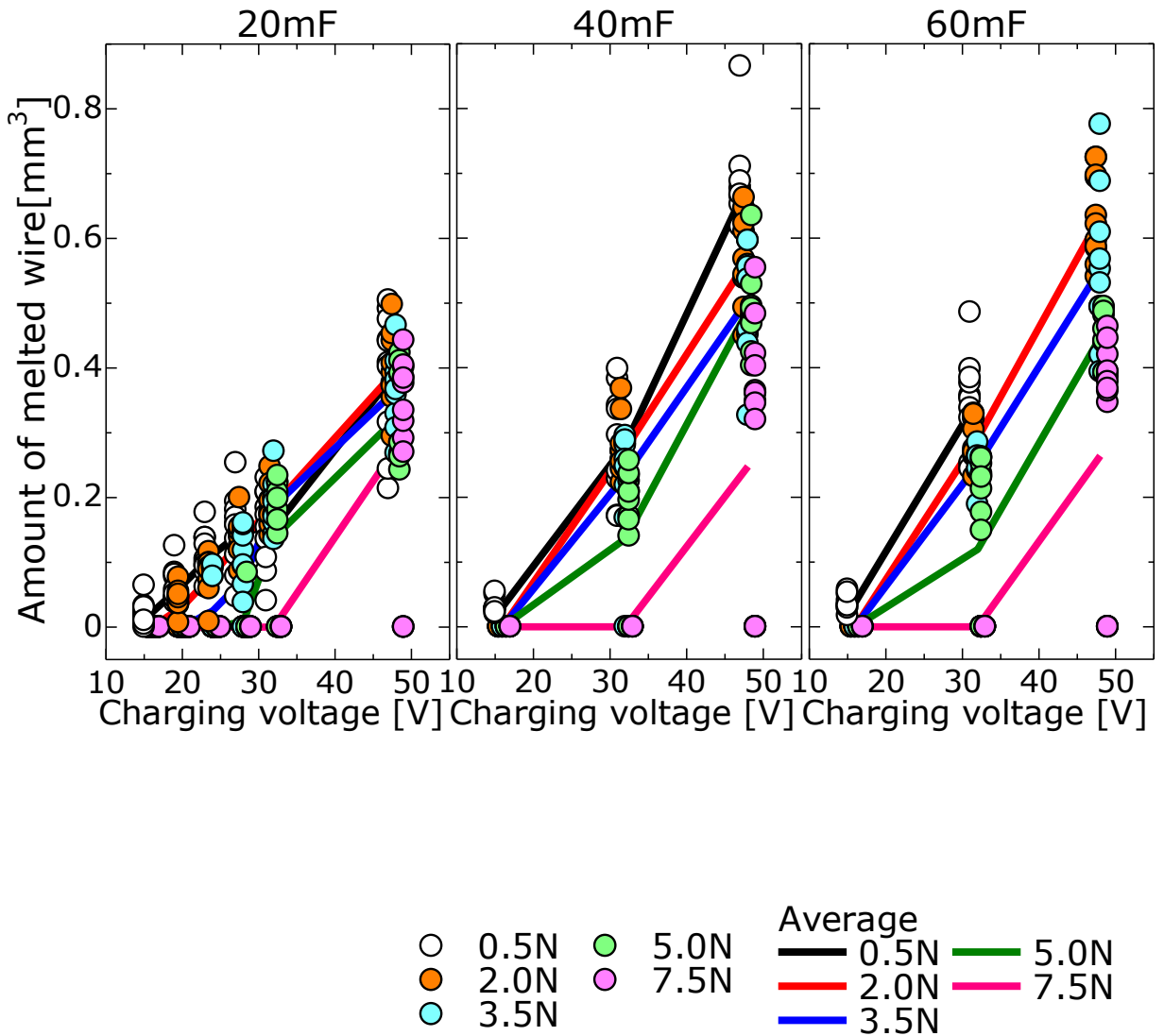


Fig.3-58 Influence of charging voltage on amount of melted wire of wire diameter 0.65mm

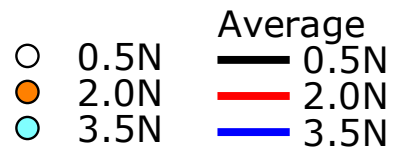
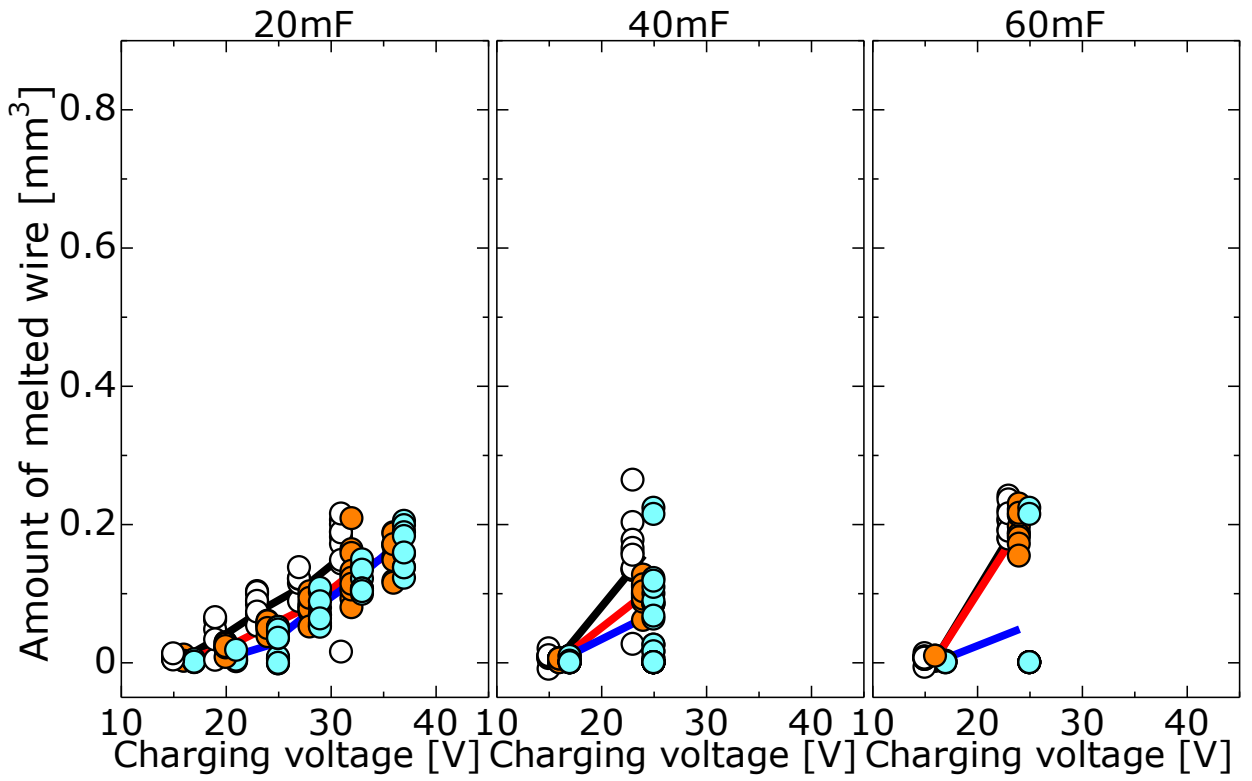


Fig.3-59 Influence of charging voltage on amount of melted wire of wire diameter 0.32mm



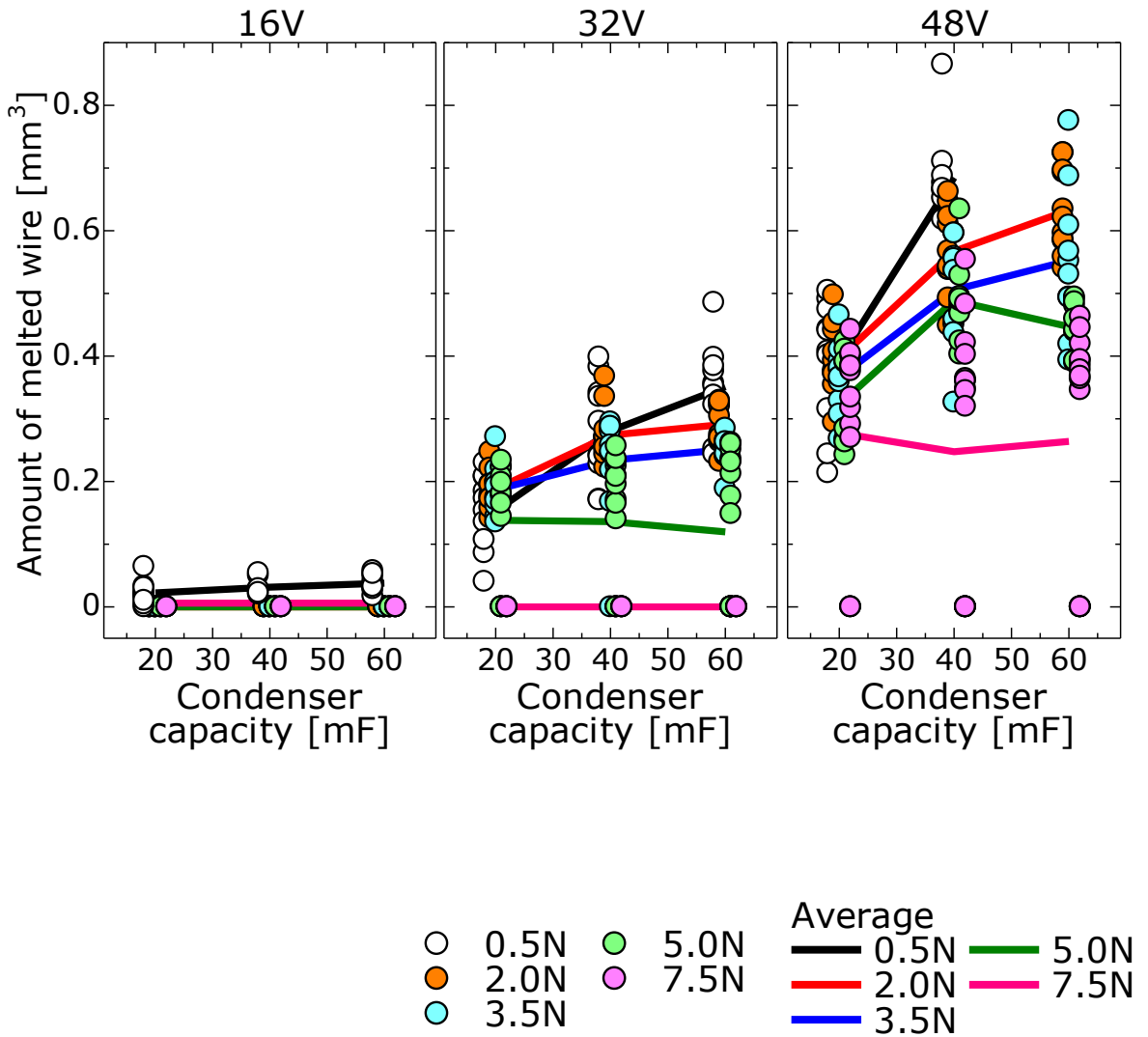


Fig.3-60 Influence of condenser capacity on amount of melted wire of wire diameter 0.65mm

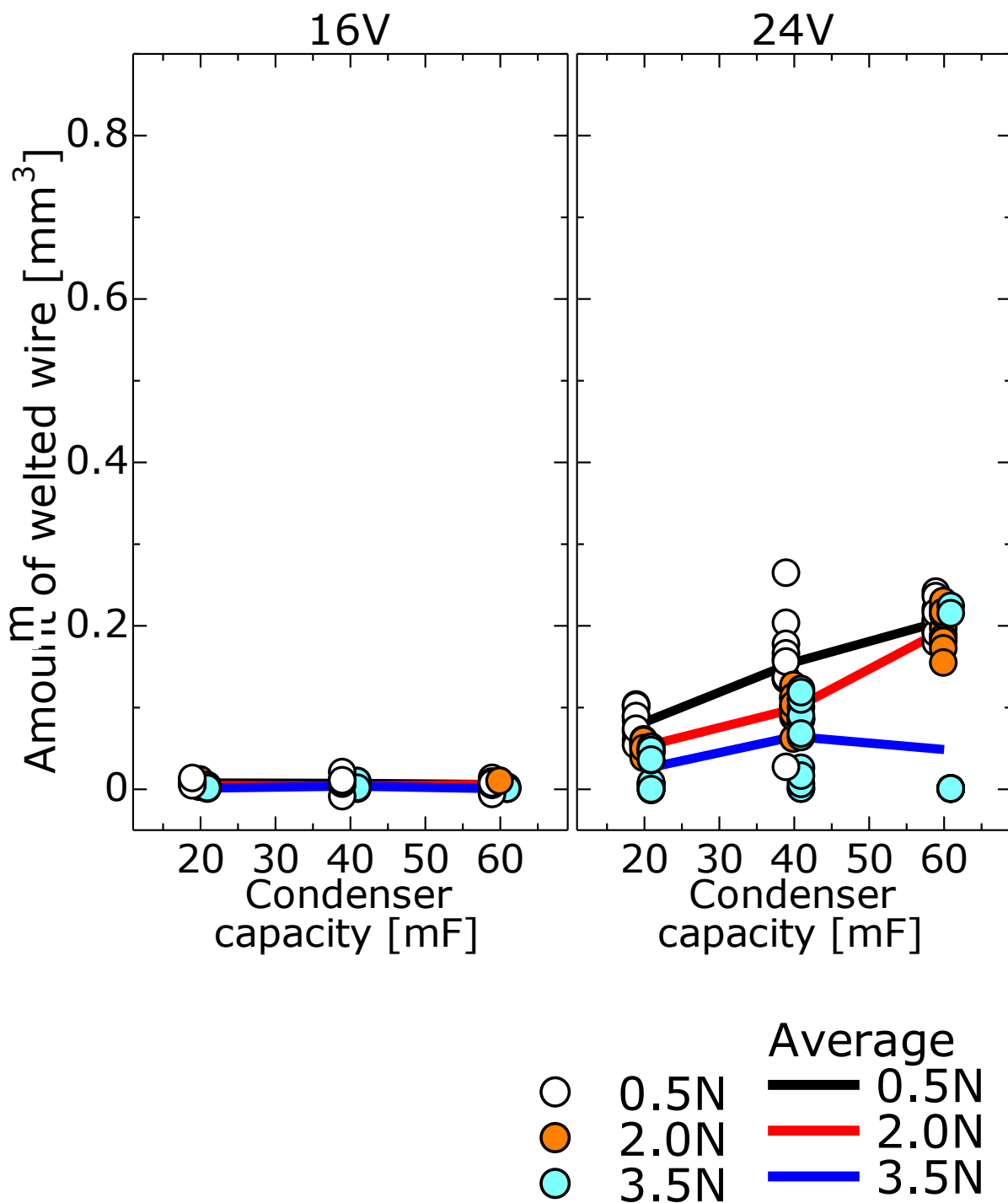


Fig.3-61 Influence of condenser capacity on amount of melted wire of wire diameter 0.32mm

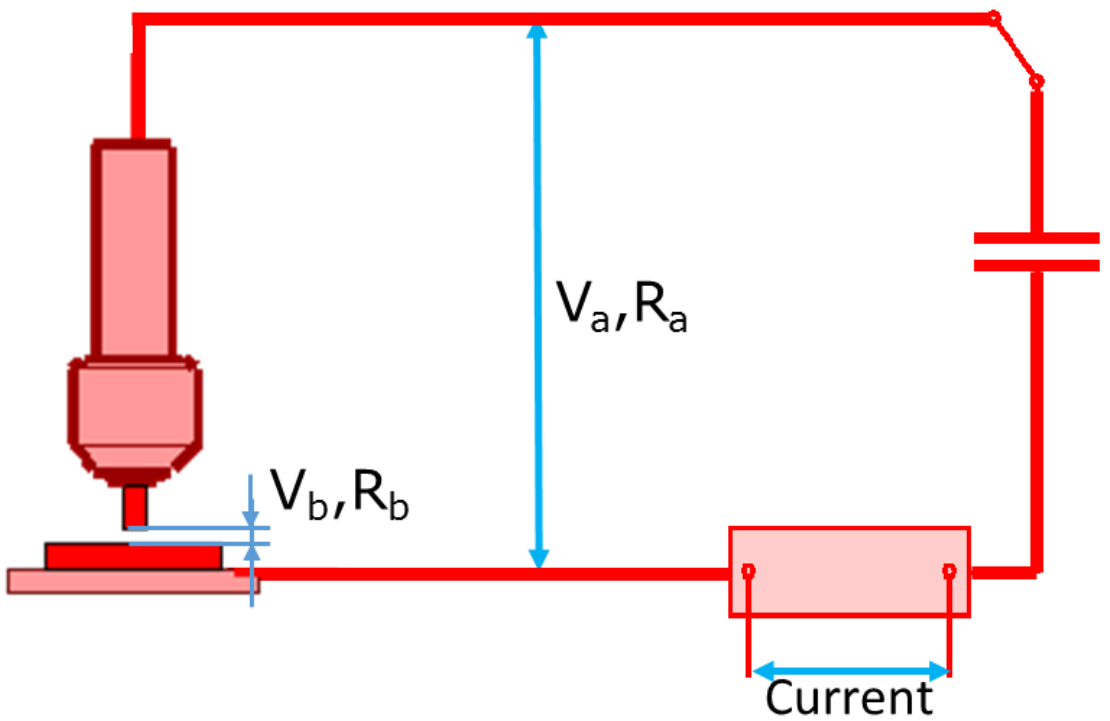


Fig.4-1 Schematic of discharge circuit

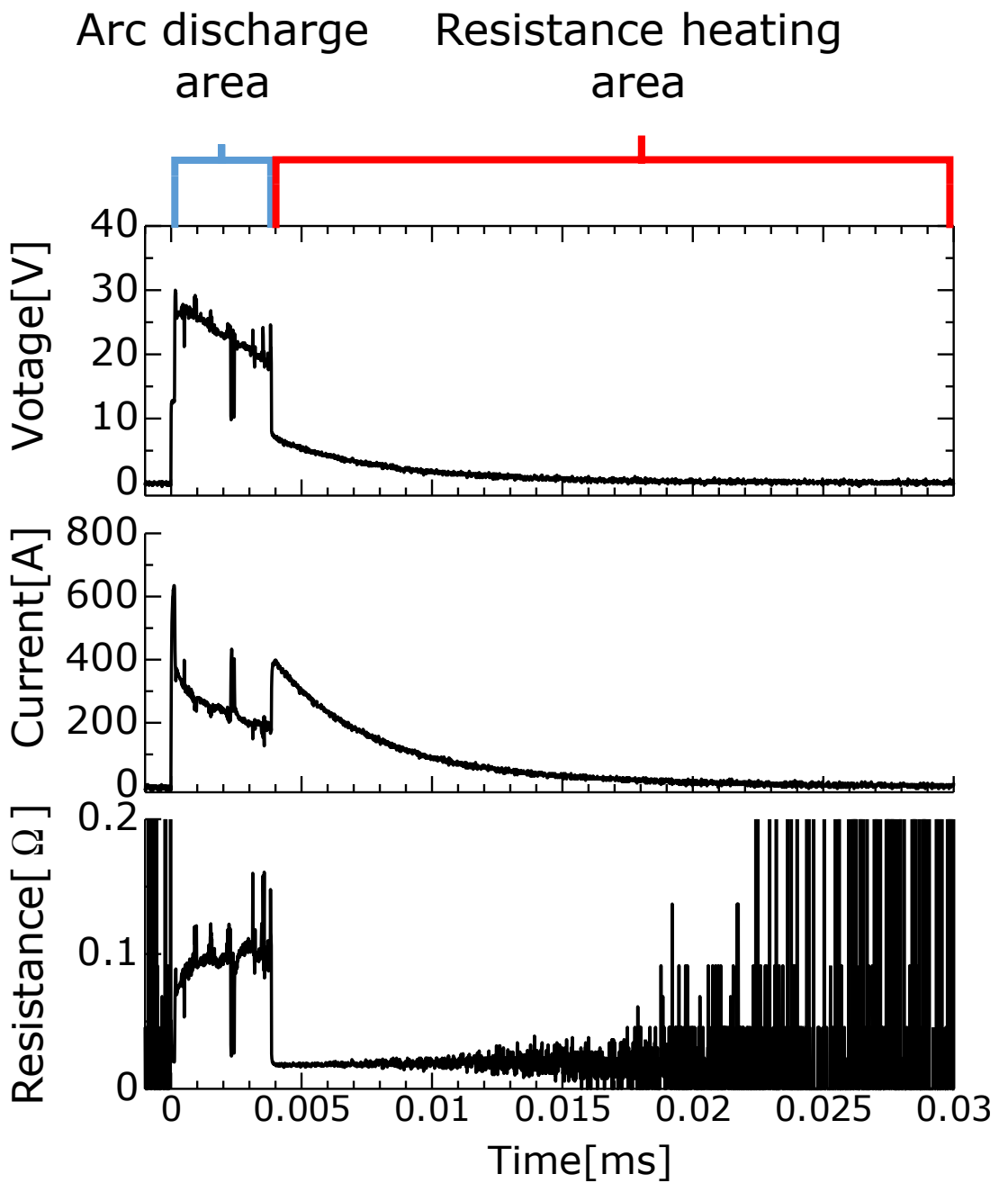


Fig.4-2 Change in resistance during welding

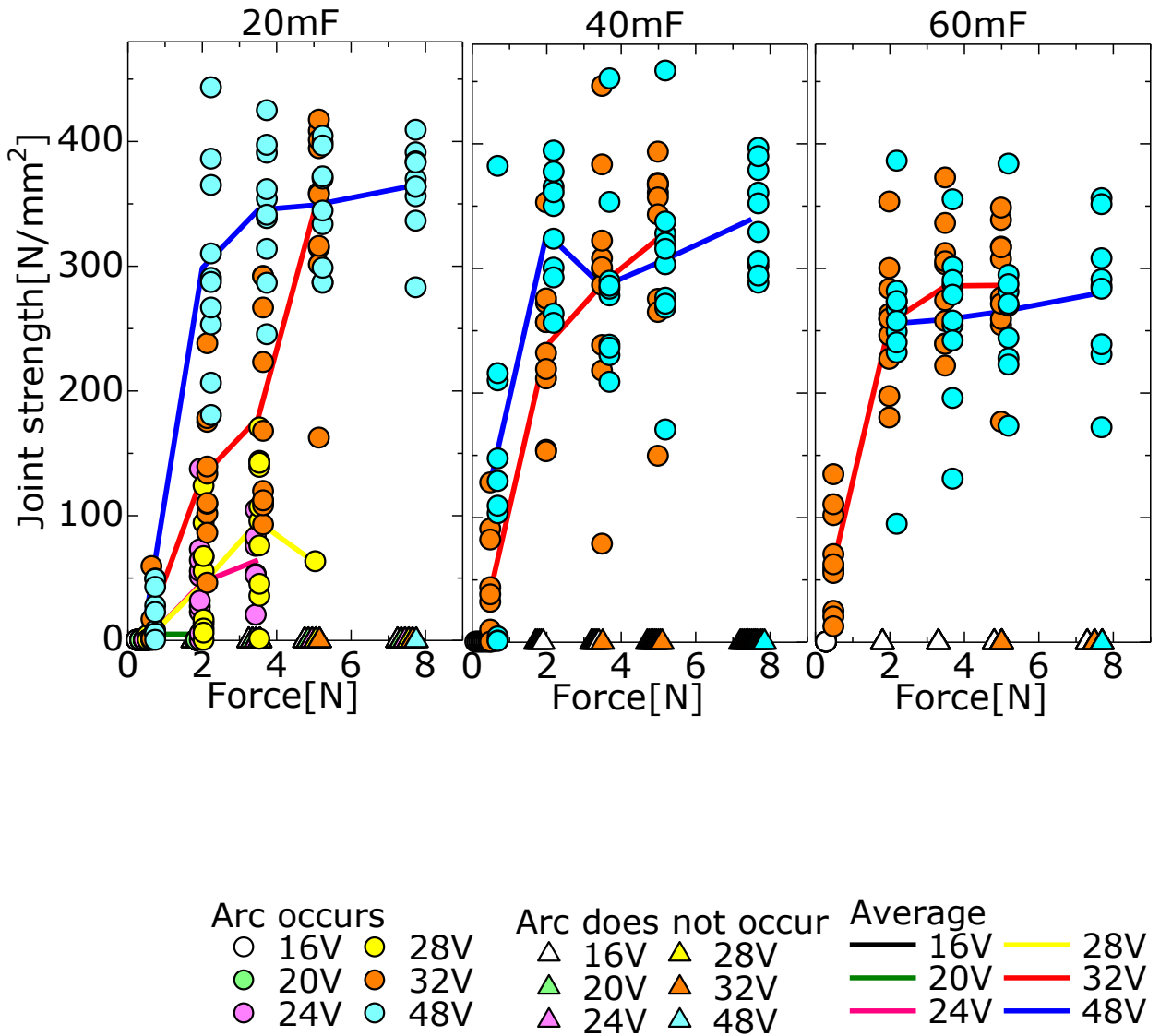


Fig.4-3 Influence of force and arc on joint strength of wire diameter 0.65mm

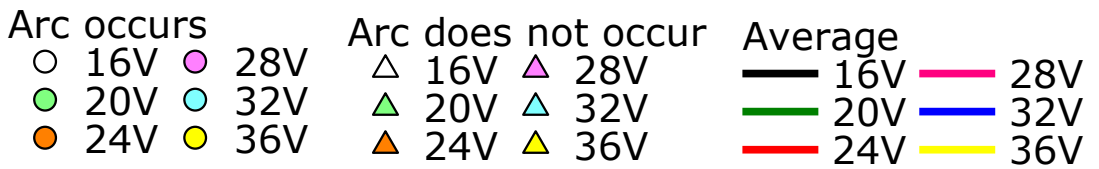
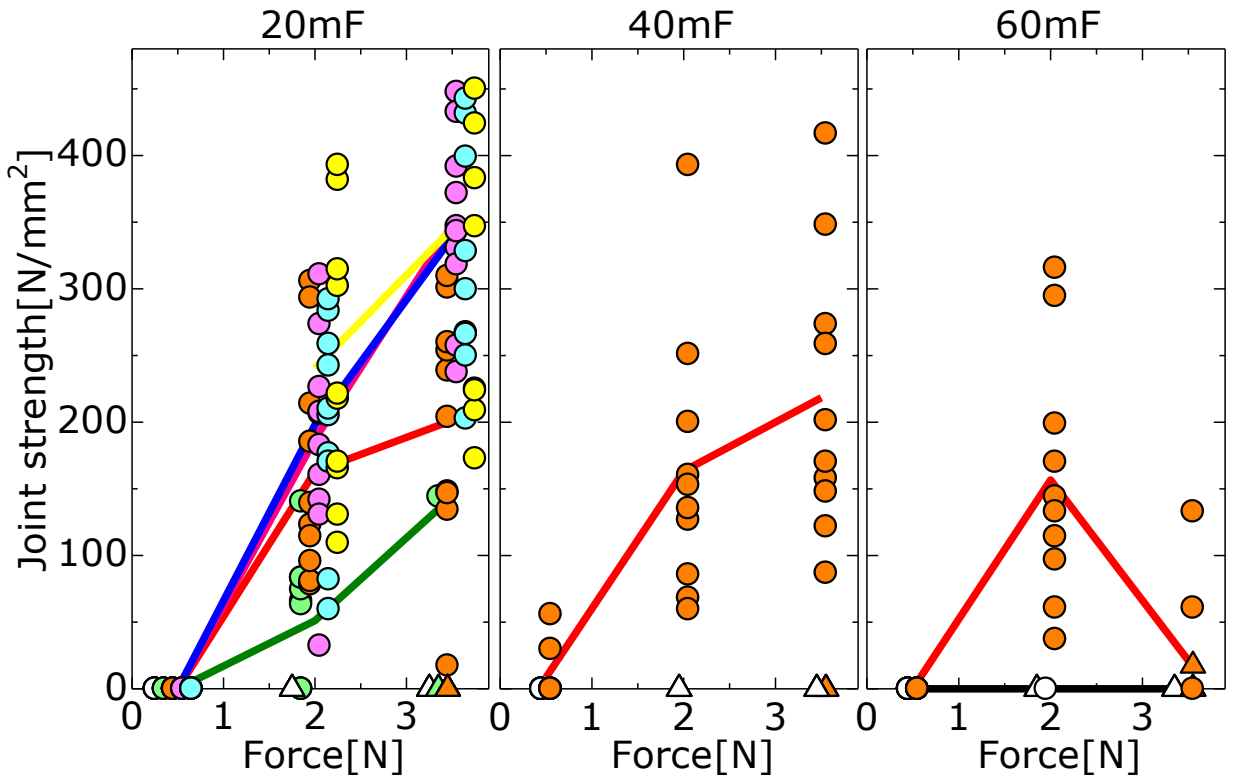


Fig.4-4 Influence of force and arc on joint strength of wire diameter 0.32mm

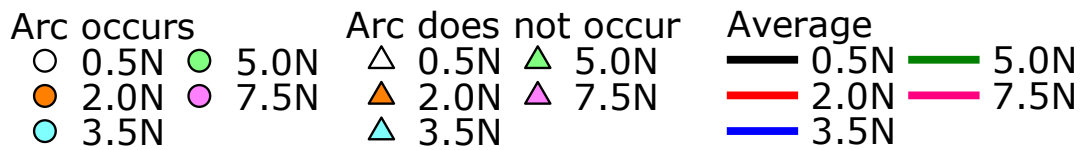
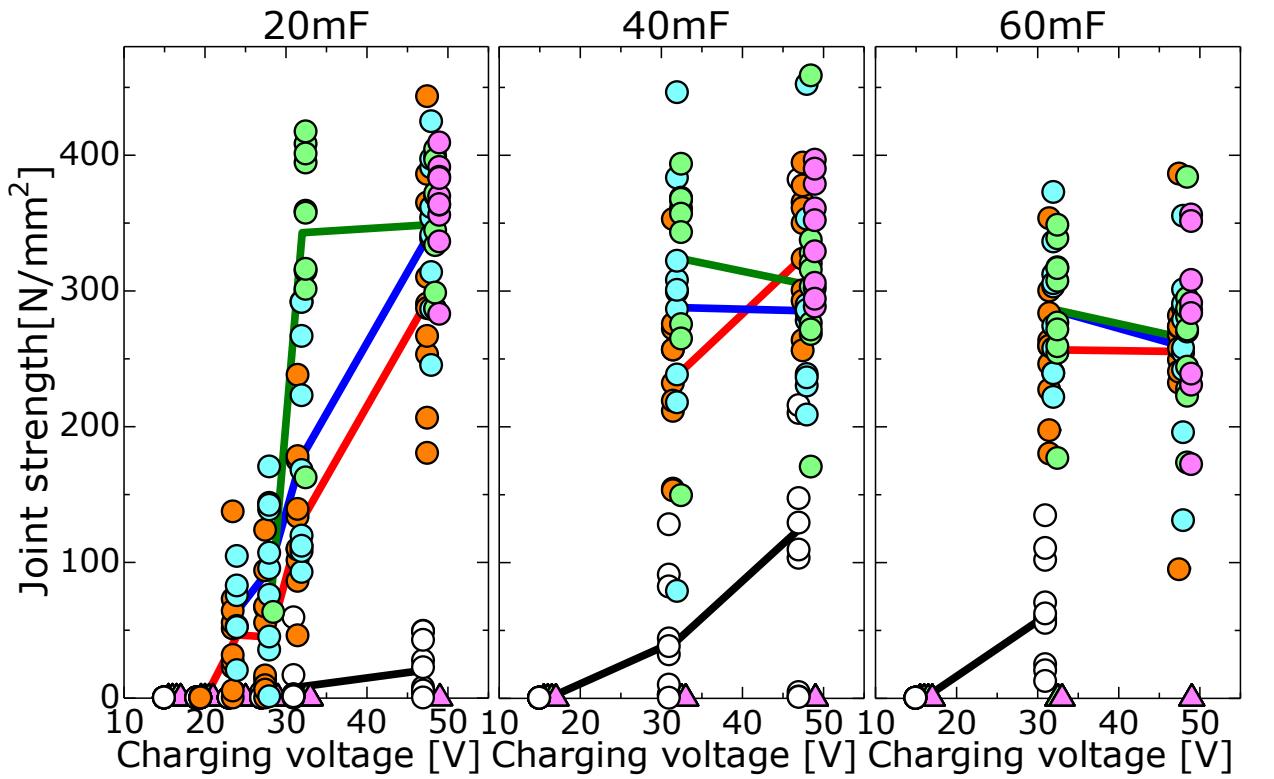
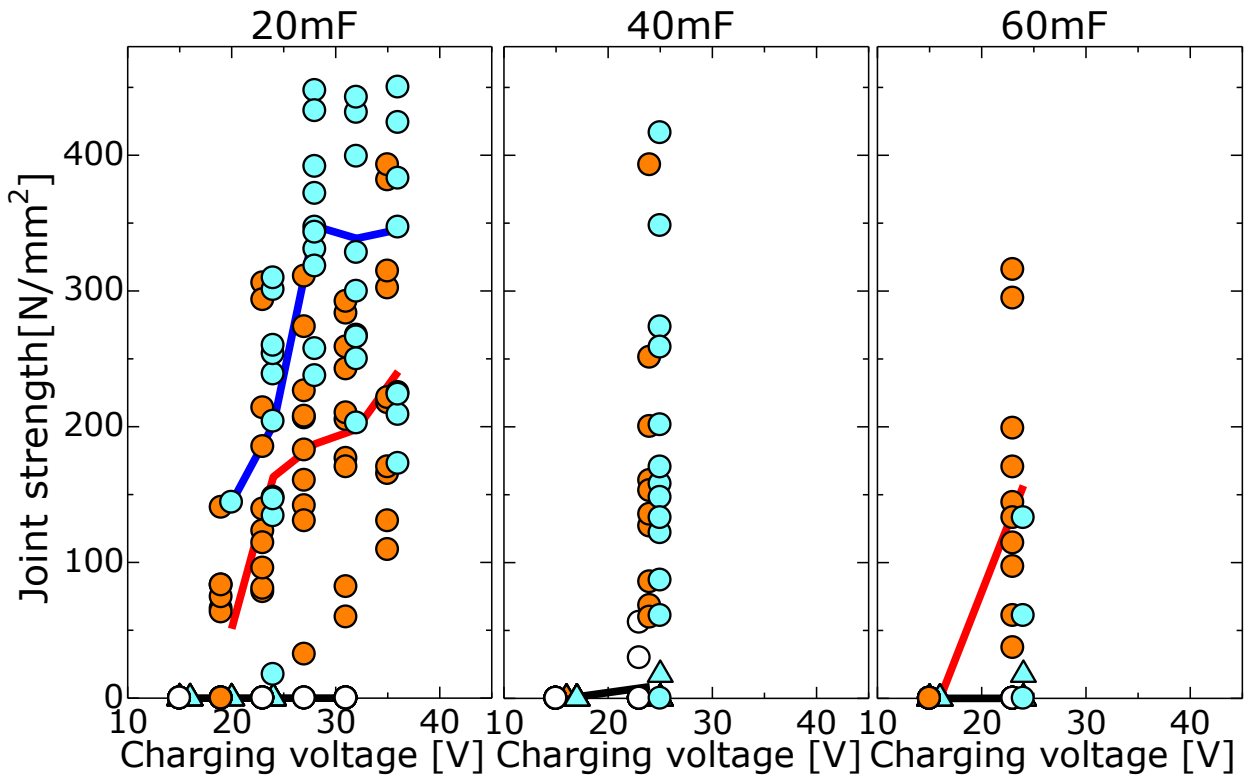


Fig.4-5 Influence of charging voltage and arc on joint strength of wire diameter 0.65mm



Arc occurs	Arc does not occur	Average
○ 0.5N	△ 0.5N	— 0.5N
● 2.0N	▲ 2.0N	— 2.0N
● 3.5N	▲ 3.5N	— 3.5N

Fig.4-6 Influence of charging voltage and arc on joint strength of wire diameter 0.32mm



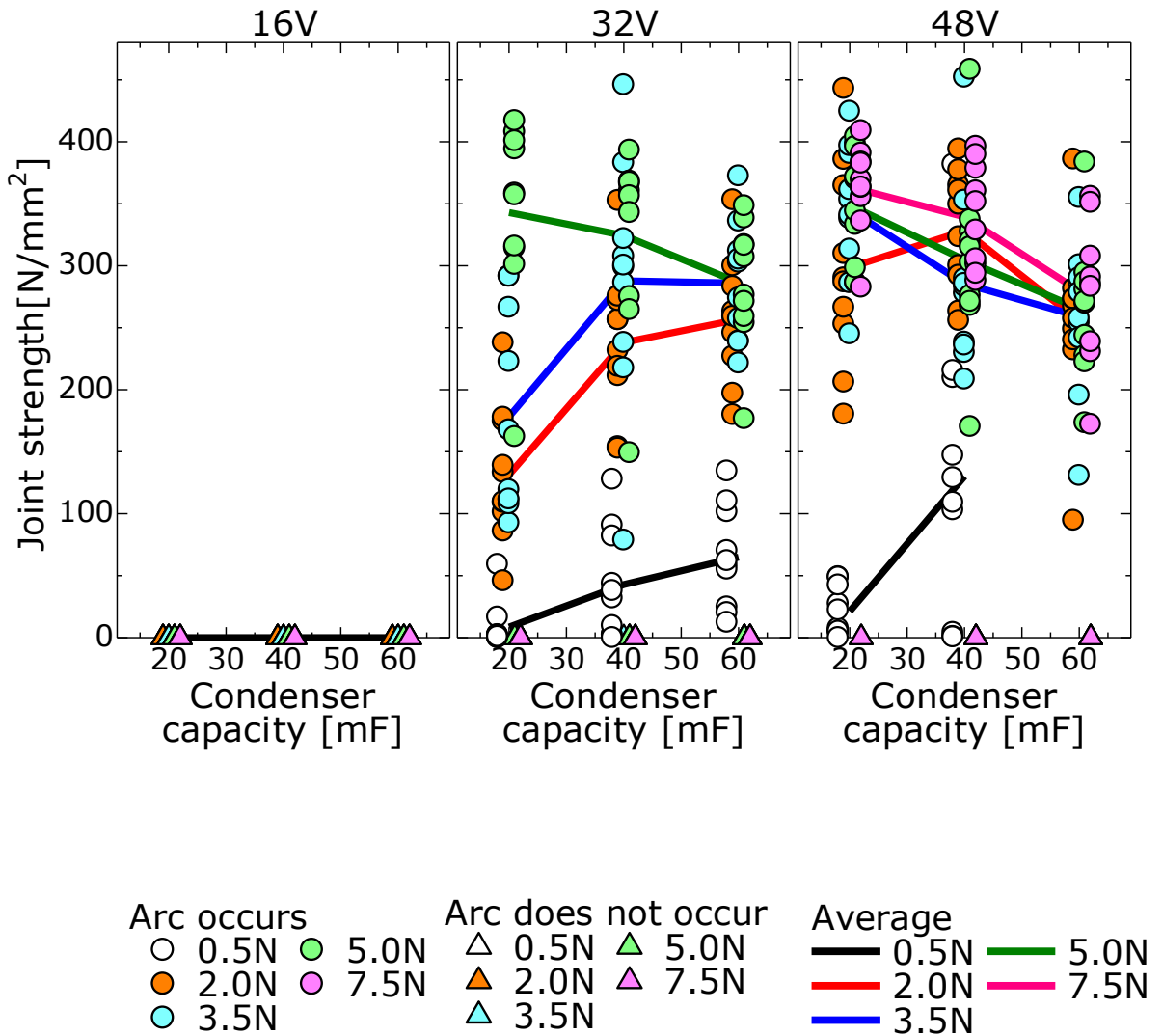


Fig.4-7 Influence of condenser capacity and arc on joint strength of wire diameter 0.65mm

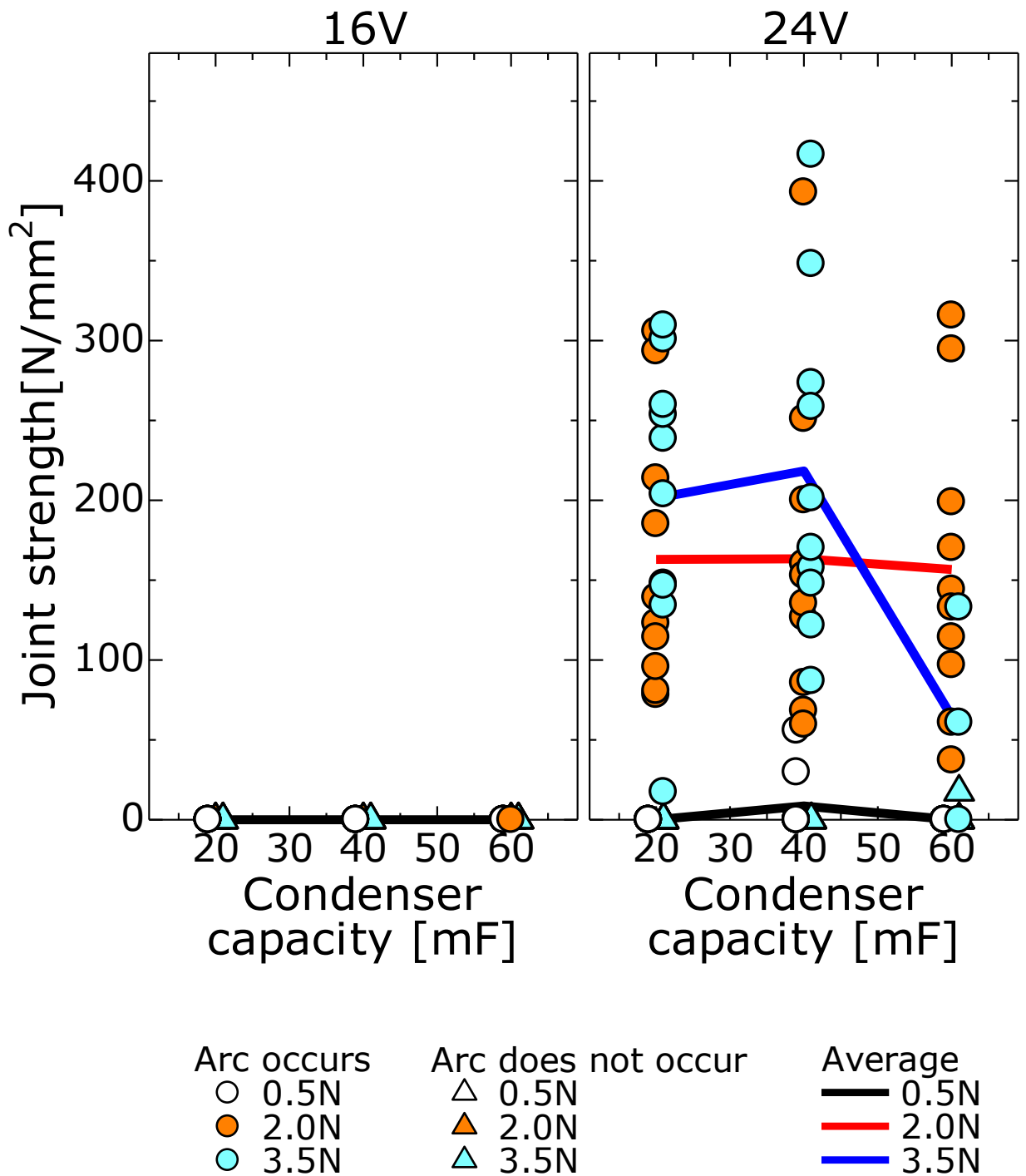


Fig.4-8 Influence of condenser capacity and arc on joint strength of wire diameter 0.32mm

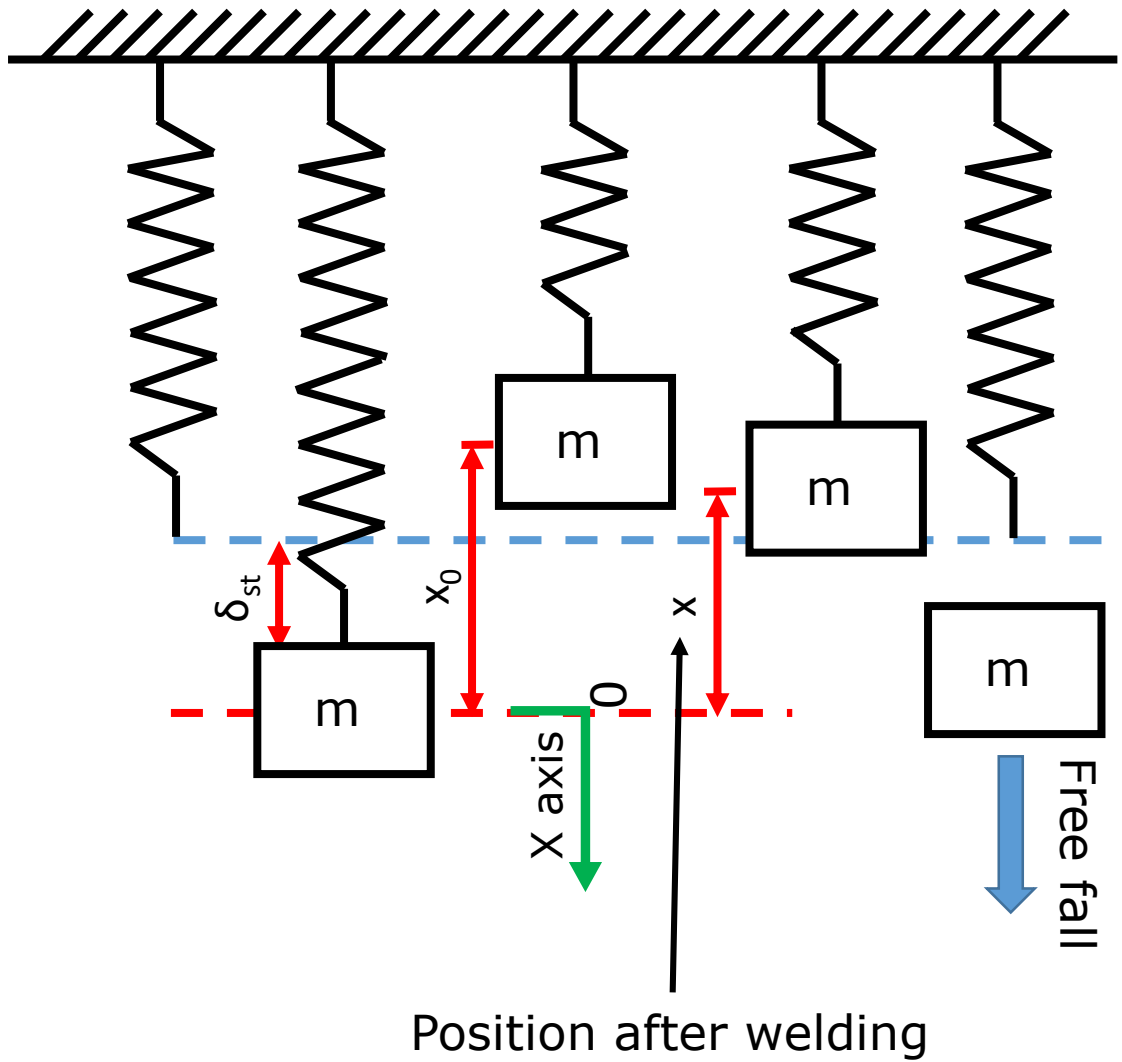


Fig.4-9 Relationship between chuck and spring

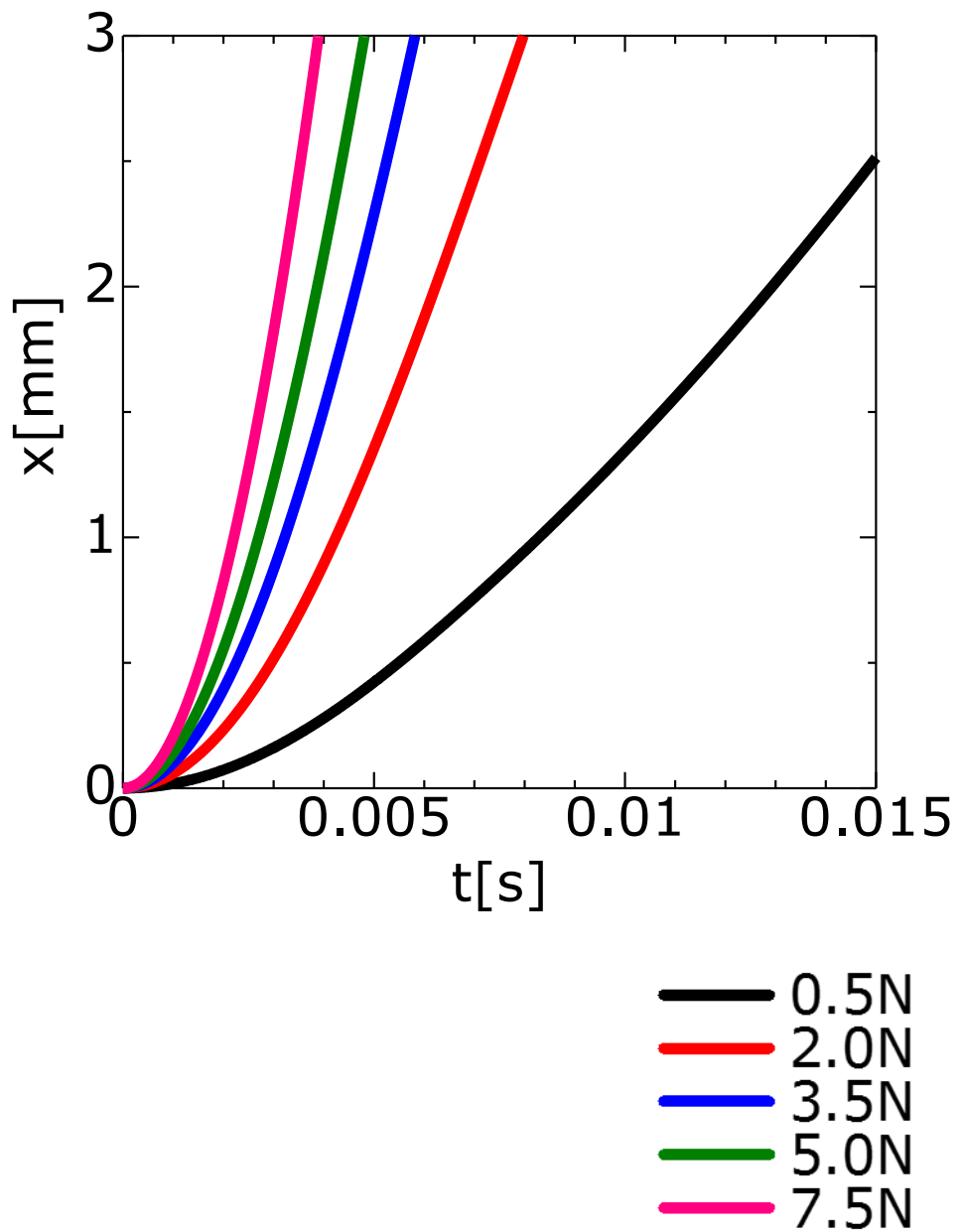


Fig.4-10 Calculation result of displacement

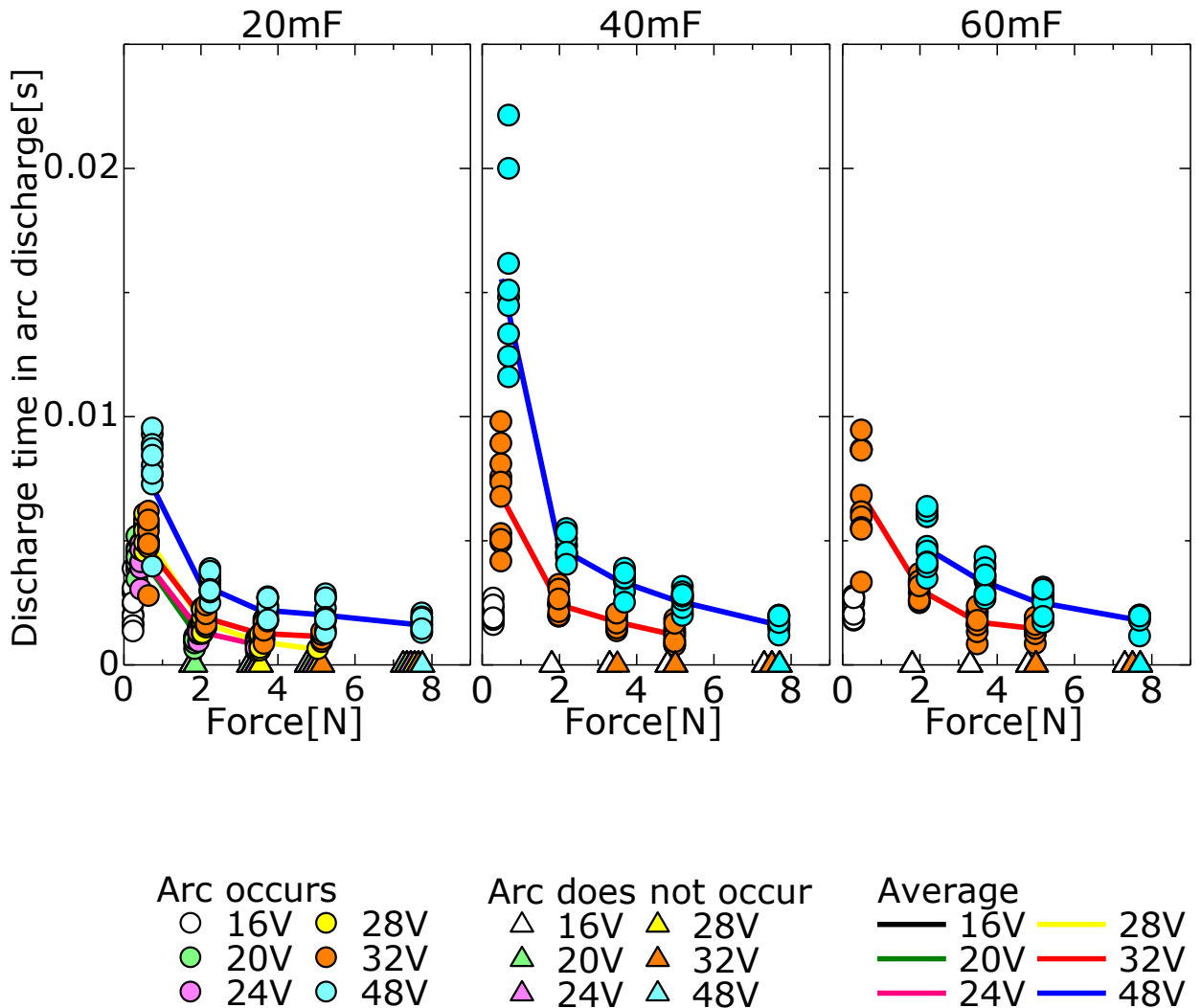


Fig.4-11 Influence of force and arc on discharge time in arc discharge of wire diameter 0.65mm

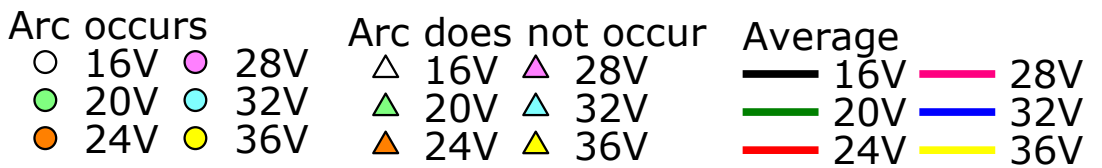
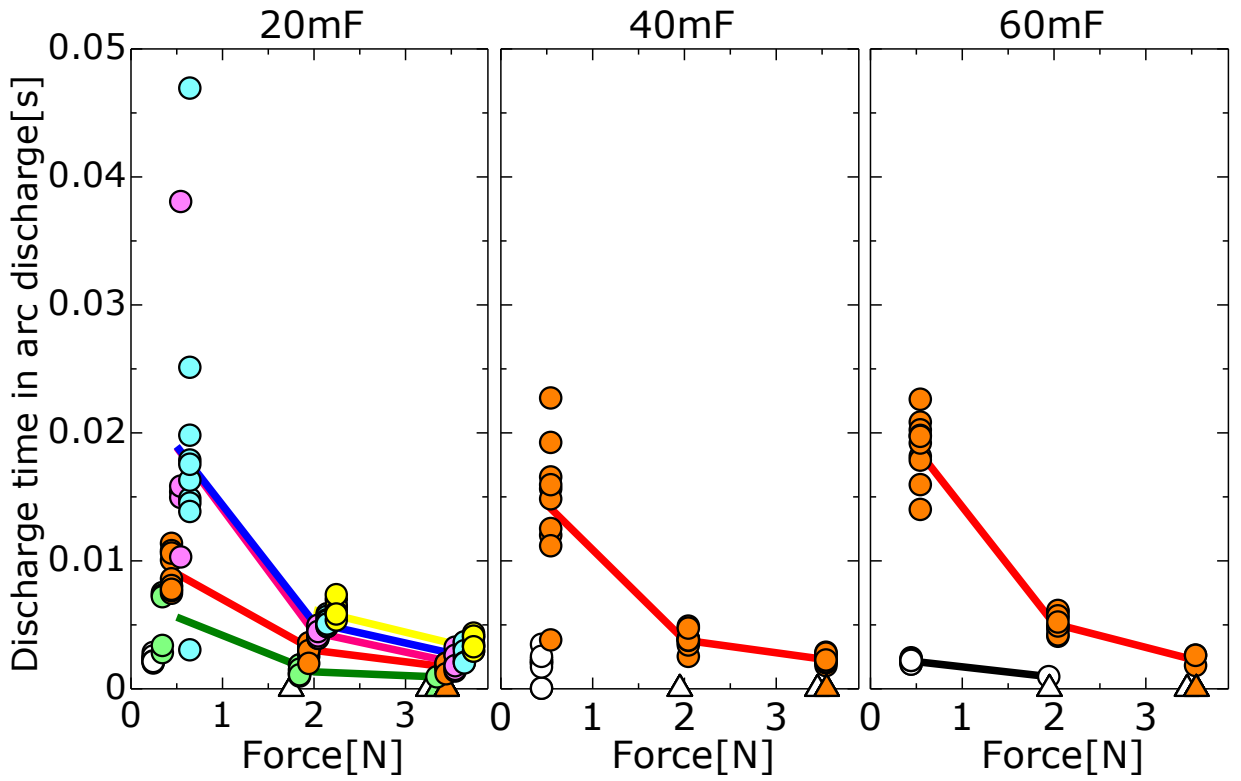


Fig.4-12 Influence of force and arc on discharge time in arc discharge of wire diameter 0.32mm

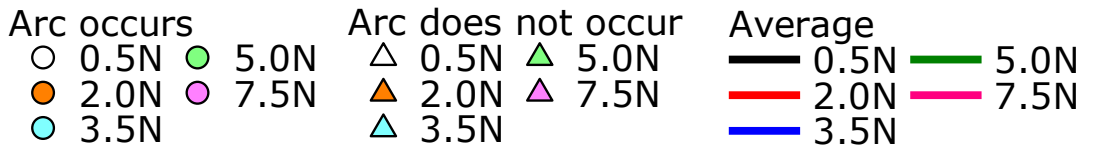
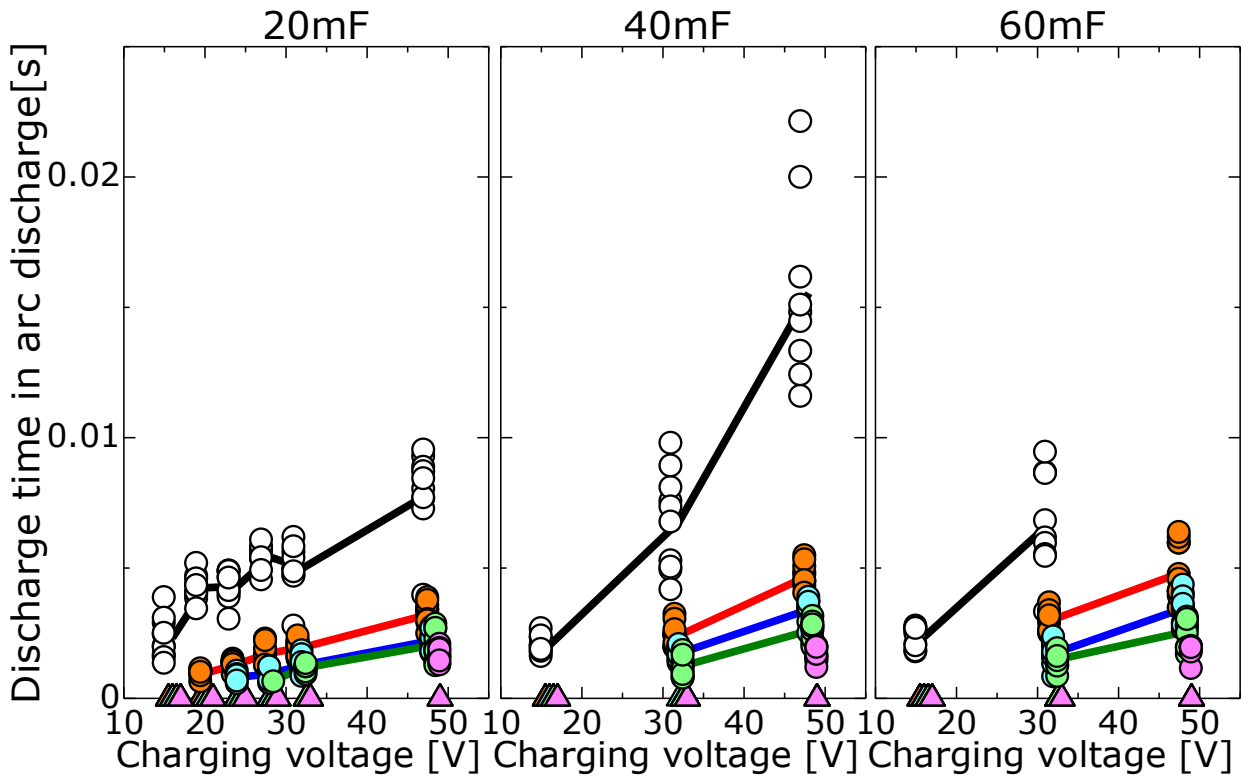
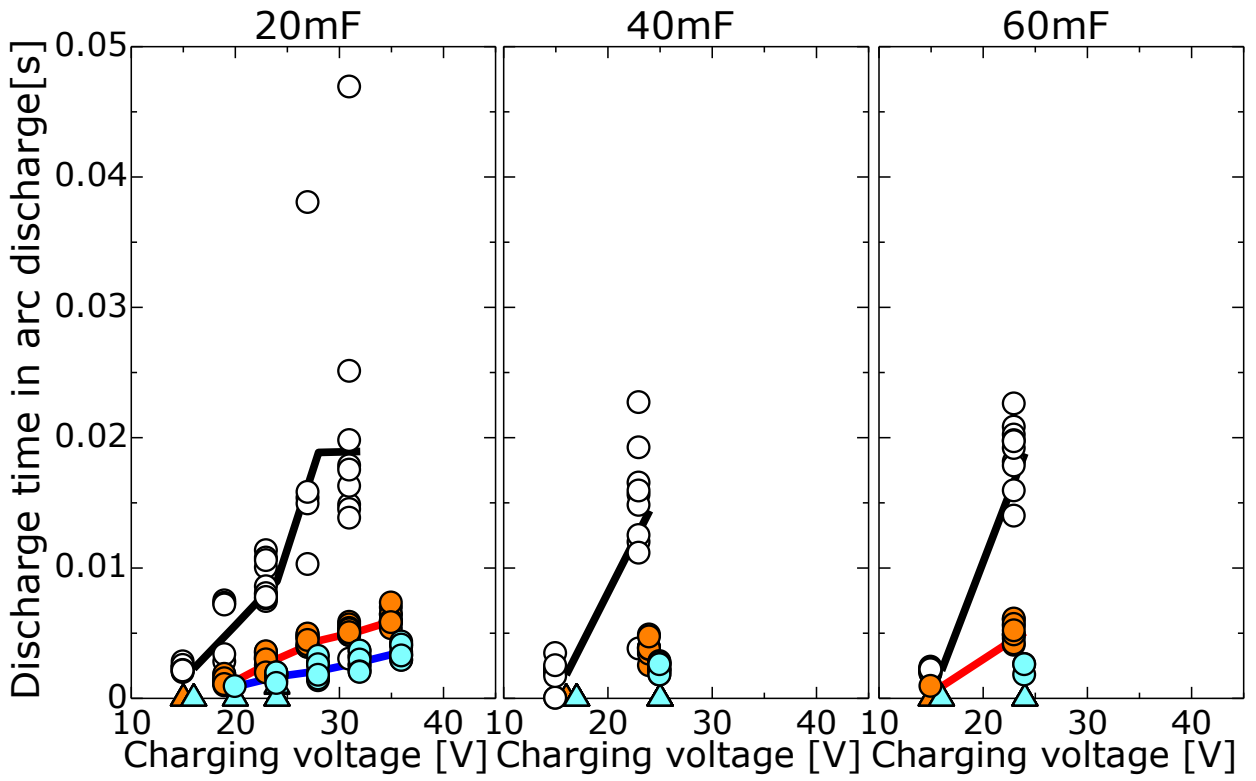


Fig.4-13 Influence of charging voltage and arc on discharge time in arc discharge of wire diameter 0.65mm



Arc occurs	Arc does not occur	Average
○ 0.5N	△ 0.5N	— 0.5N
● 2.0N	▲ 2.0N	— 2.0N
● 3.5N	▲ 3.5N	— 3.5N

Fig.4-14 Influence of charging voltage and arc on discharge time in arc discharge of wire diameter 0.32mm



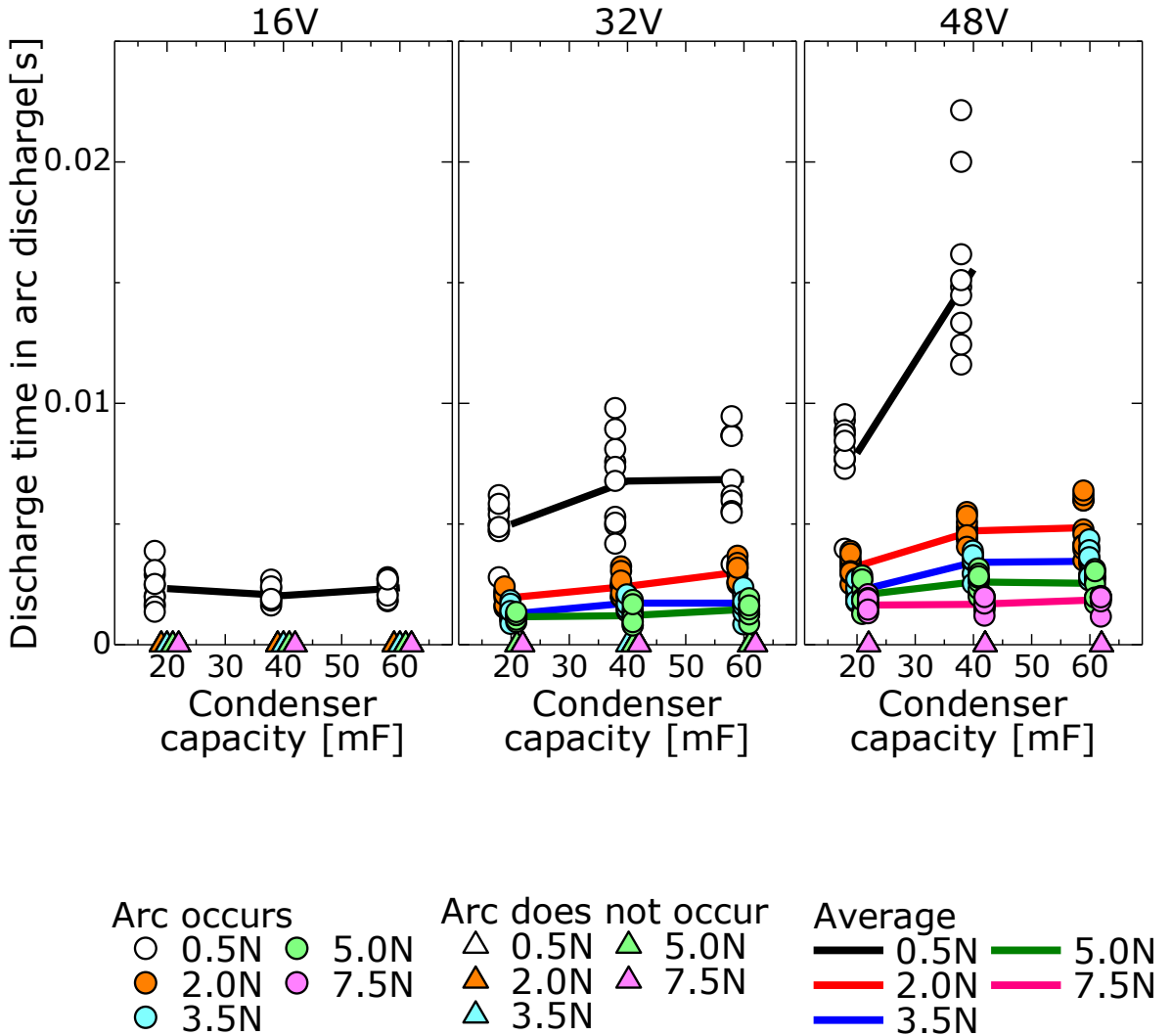


Fig.4-15 Influence of condenser capacity and arc on discharge time in arc discharge of wire diameter 0.65mm

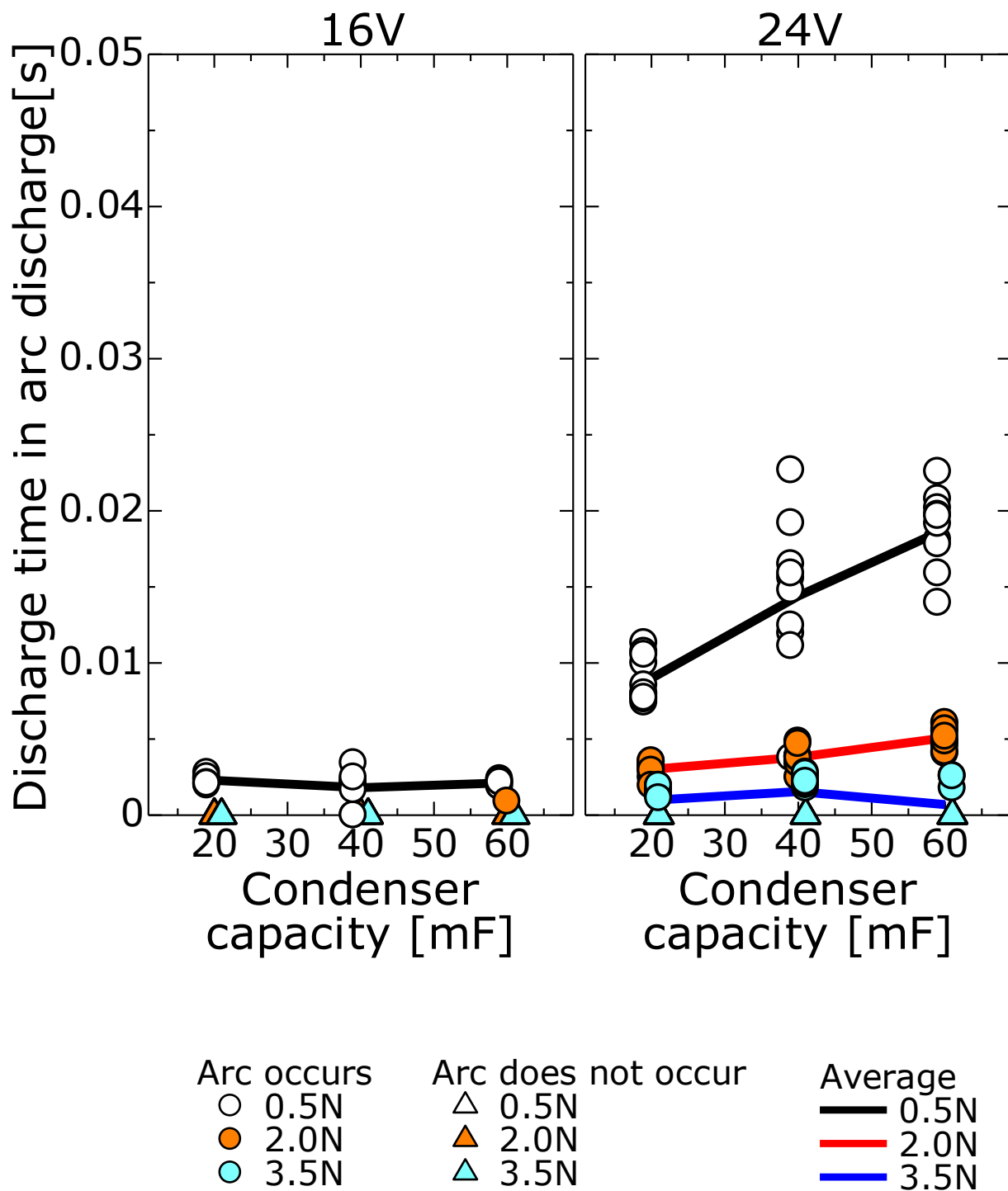
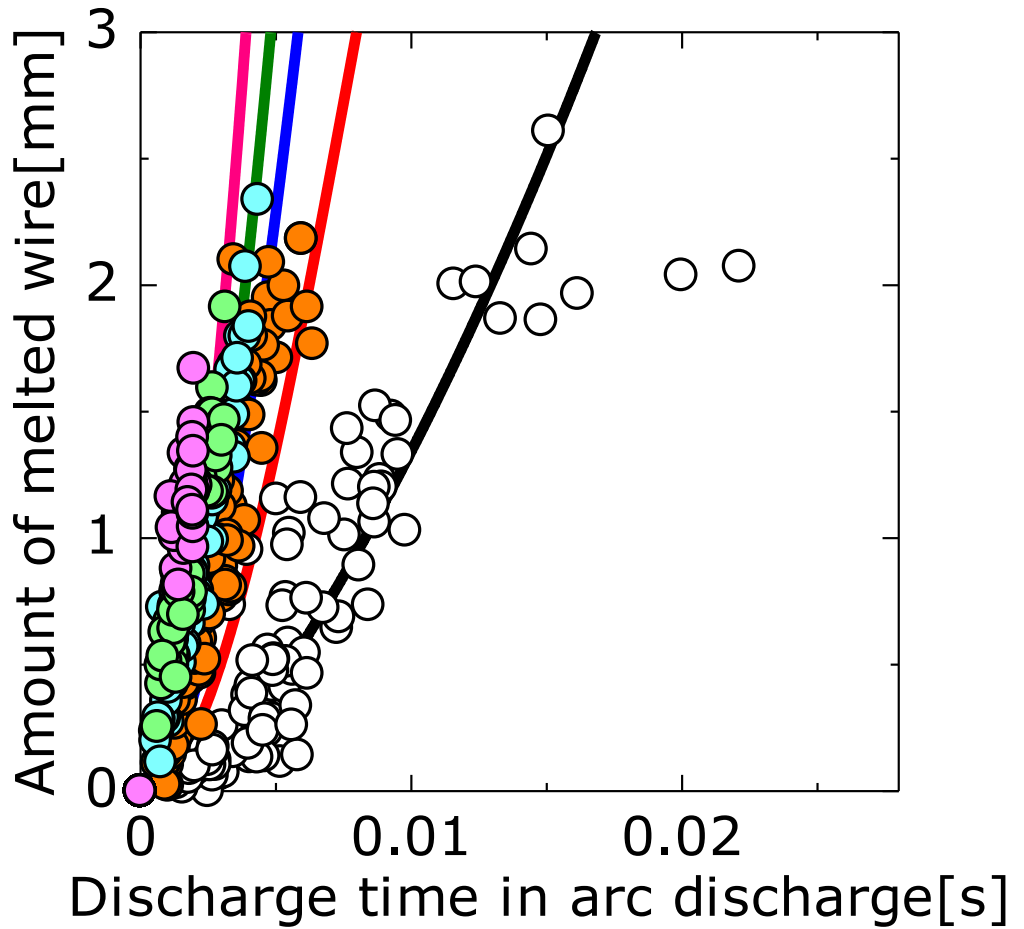


Fig.4-16 Influence of condenser capacity and arc on discharge time in arc discharge of wire diameter 0.32mm



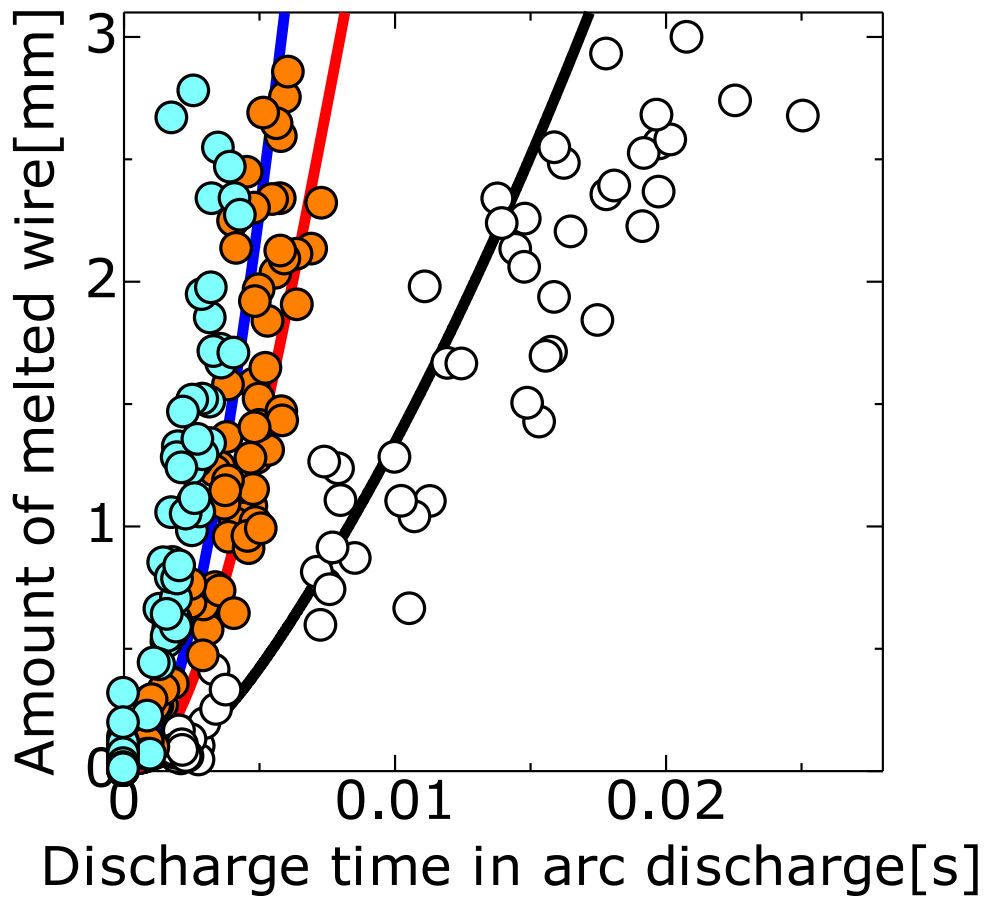
Observed value

Calculated value

- 0.5N
- 2.0N
- 3.5N
- 5.0N
- 7.5N

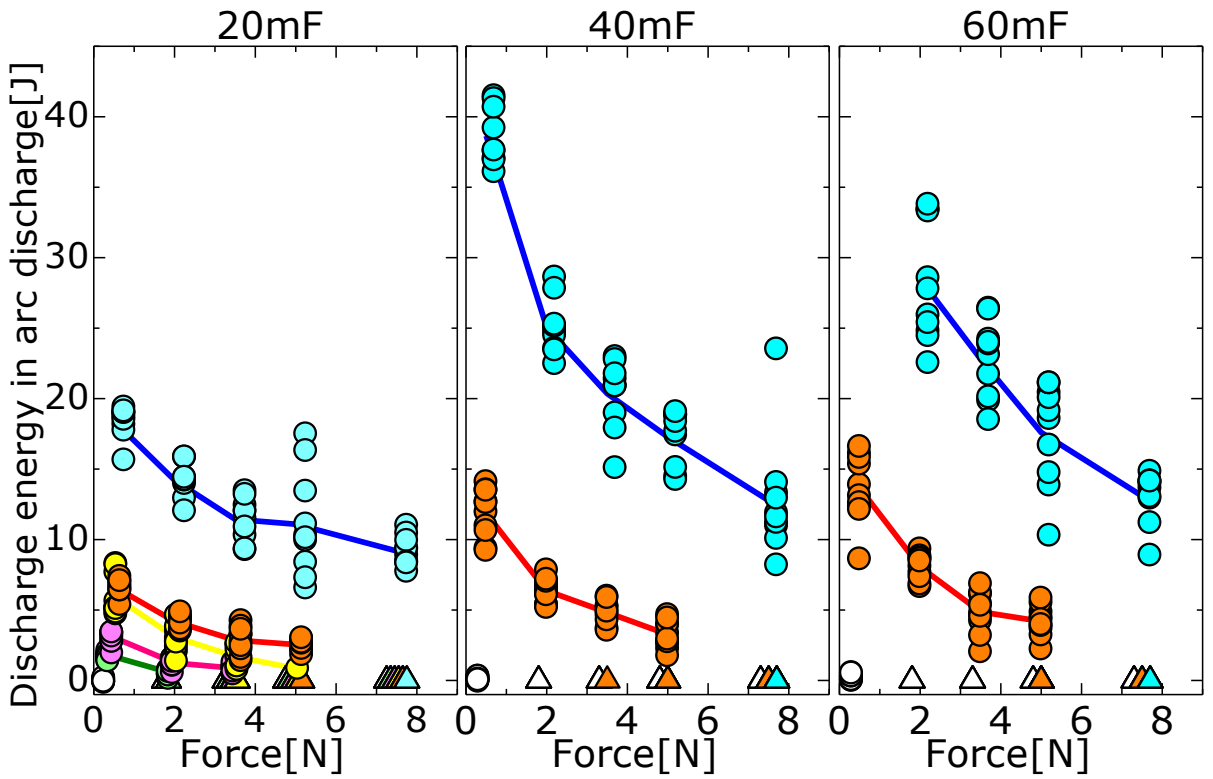
- 0.5N
- 2.0N
- 3.5N
- 5.0N
- 7.5N

Fig.4-17 Influence of discharge time in arc discharge on amount of melted wire of wire diameter 0.65mm



Observed value	Calculated value
○ 0.5N	— 0.5N
● 2.0N	— 2.0N
● 3.5N	— 3.5N

Fig.4-18 Influence of discharge time in arc discharge on amount of melted wire of wire diameter 0.32mm



Arc occurs		Arc does not occur		Average	
○ 16V	● 28V	△ 16V	▲ 28V	— 16V	— 28V
● 20V	● 32V	△ 20V	▲ 32V	— 20V	— 32V
● 24V	● 48V	△ 24V	▲ 48V	— 24V	— 48V

Fig.4-19 Influence of force and arc on discharge energy in arc discharge of wire diameter 0.65mm

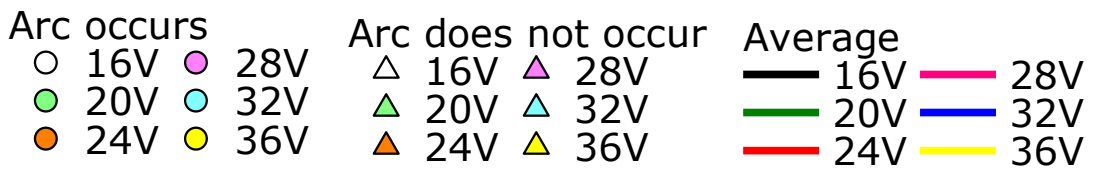
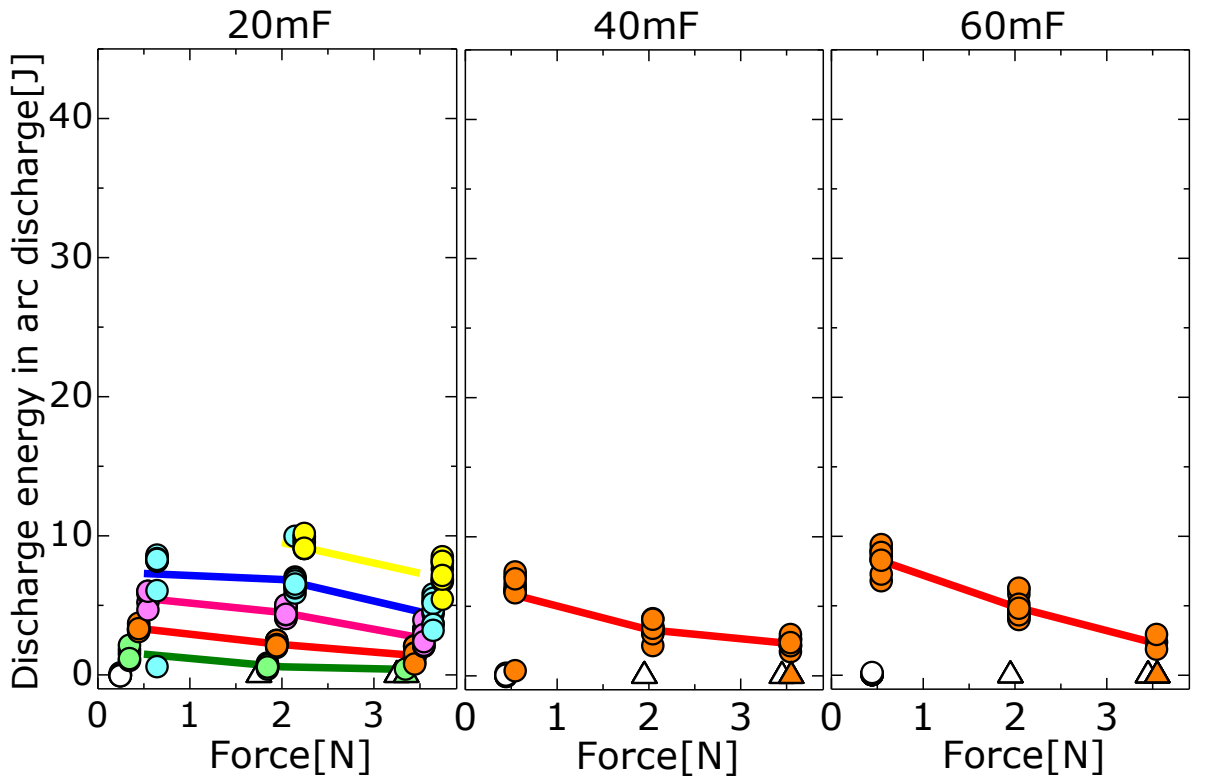


Fig.4-20 Influence of force and arc on discharge energy in arc discharge of wire diameter 0.32mm

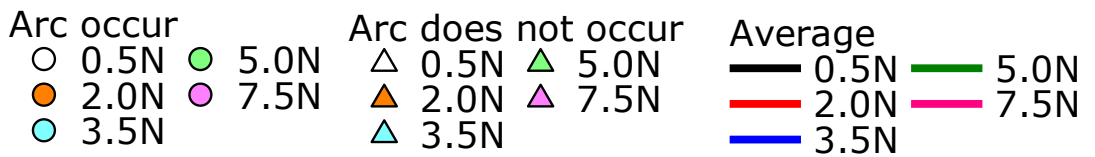
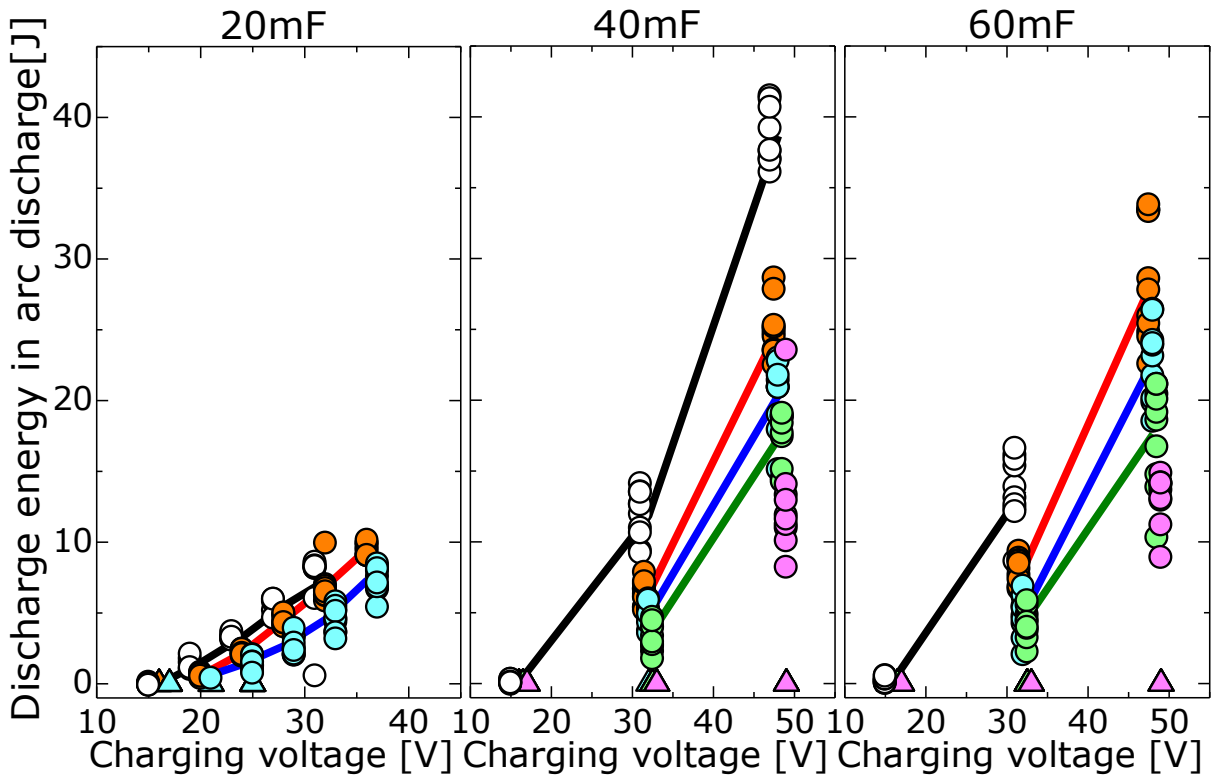
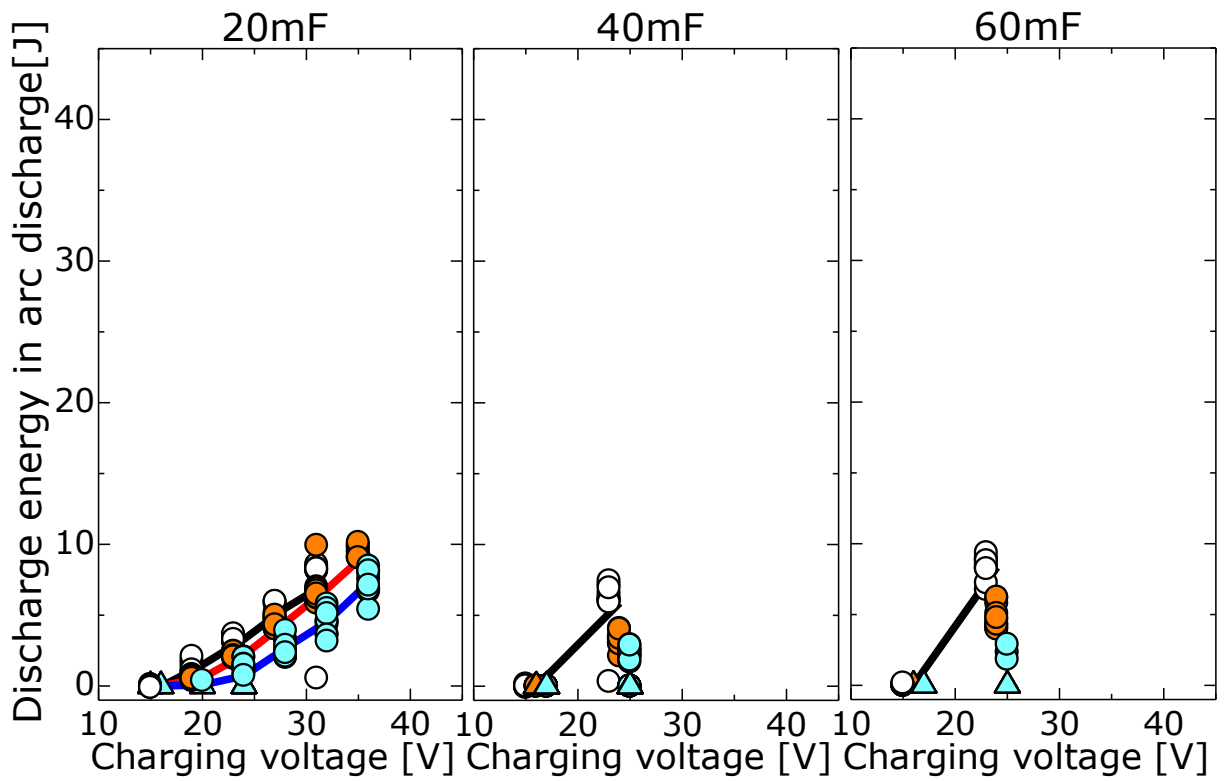


Fig.4-21 Influence of charging voltage and arc on discharge energy in arc discharge of wire diameter 0.65mm



Arc occurs	Arc does not occur	Average
○ 0.5N	△ 0.5N	— 0.5N
● 2.0N	▲ 2.0N	— 2.0N
● 3.5N	▲ 3.5N	— 3.5N

Fig.4-22 Influence of charging voltage and arc on discharge energy in arc discharge of wire diameter 0.32mm



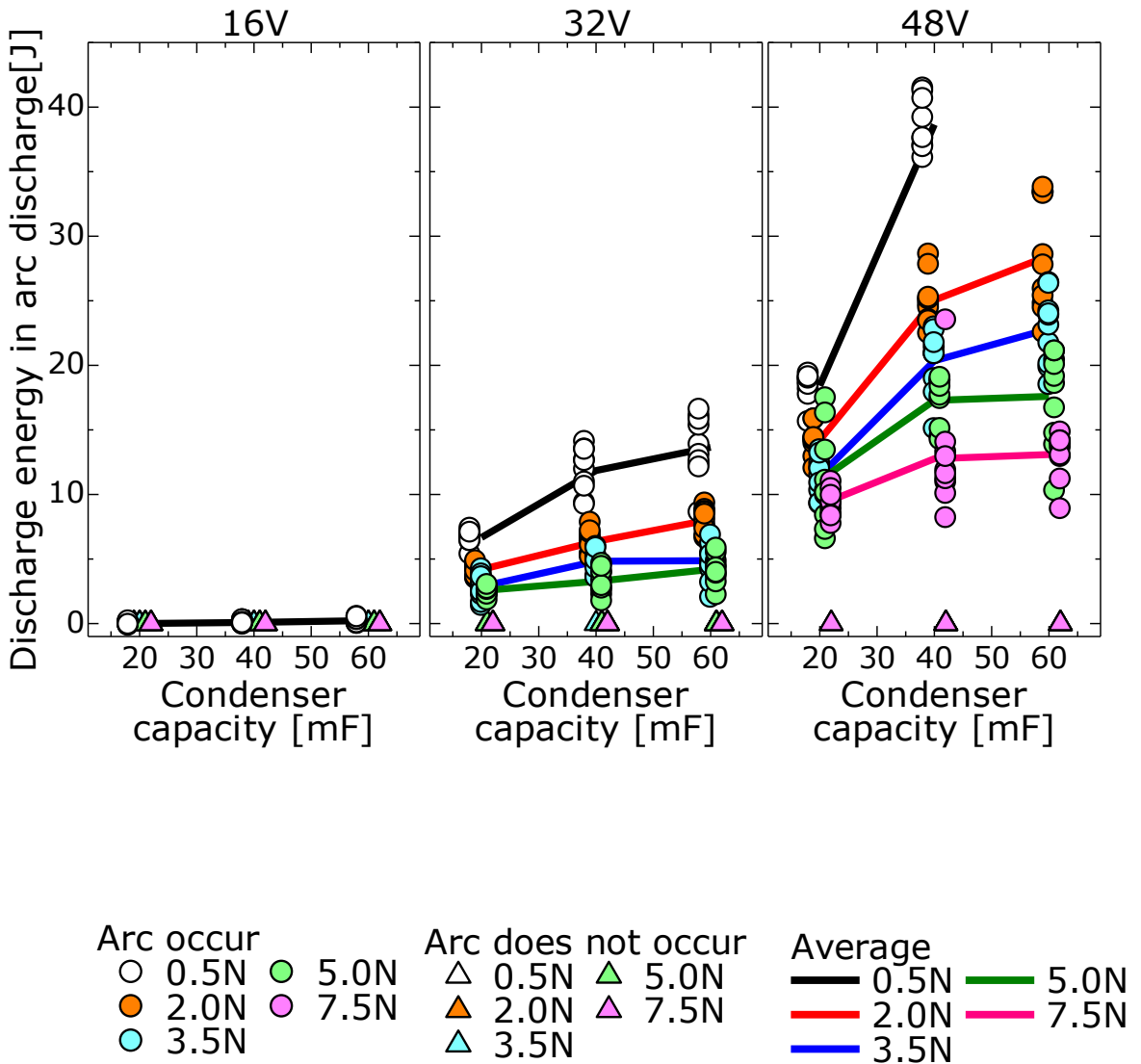


Fig.4-23 Influence of condenser capacity and arc on discharge energy in arc discharge of wire diameter 0.65mm

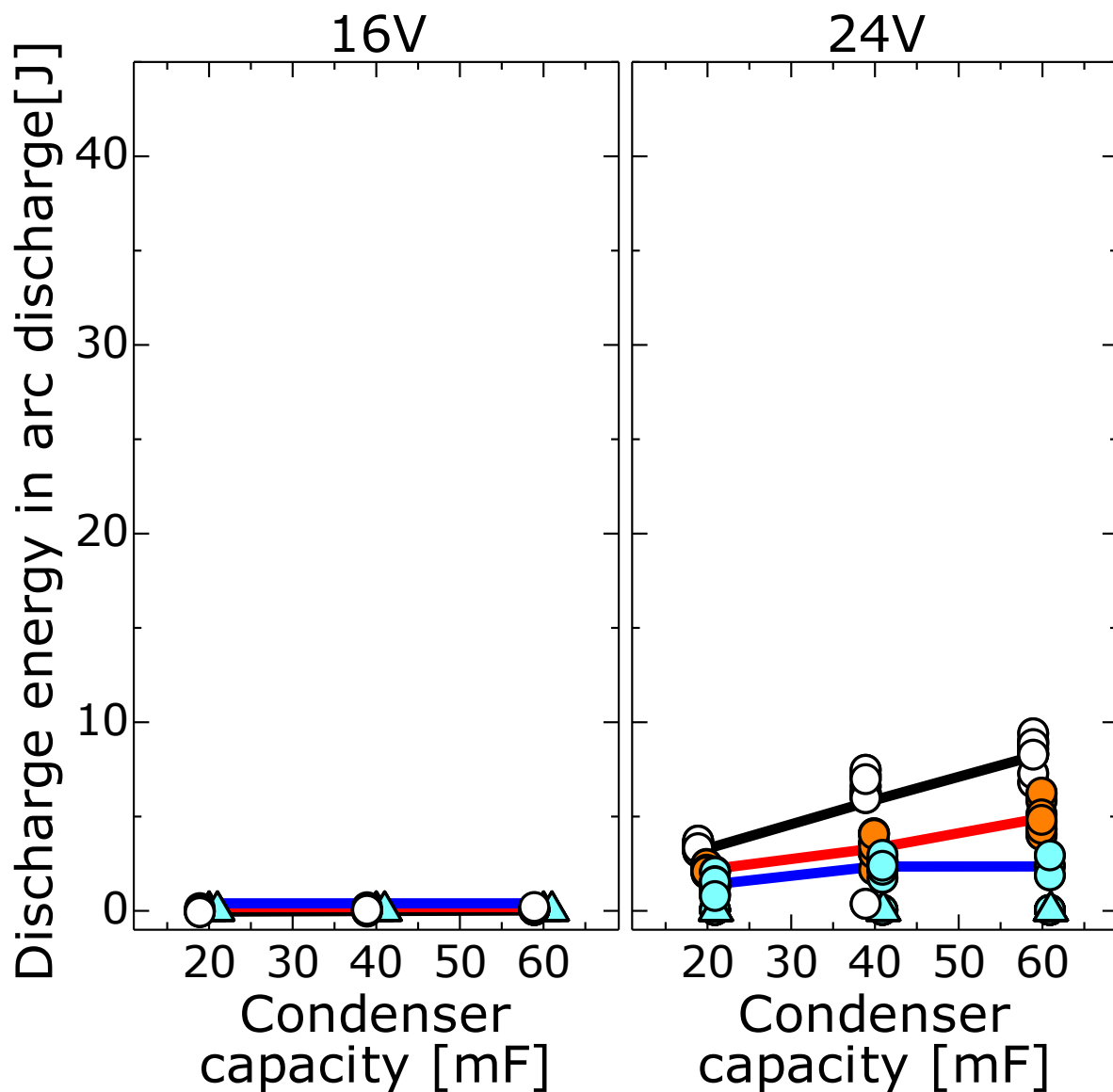


Fig.4-24 Influence of condenser capacity and arc on discharge energy in arc discharge of wire diameter 0.32mm

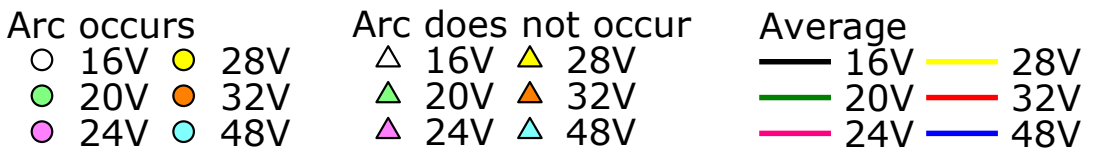
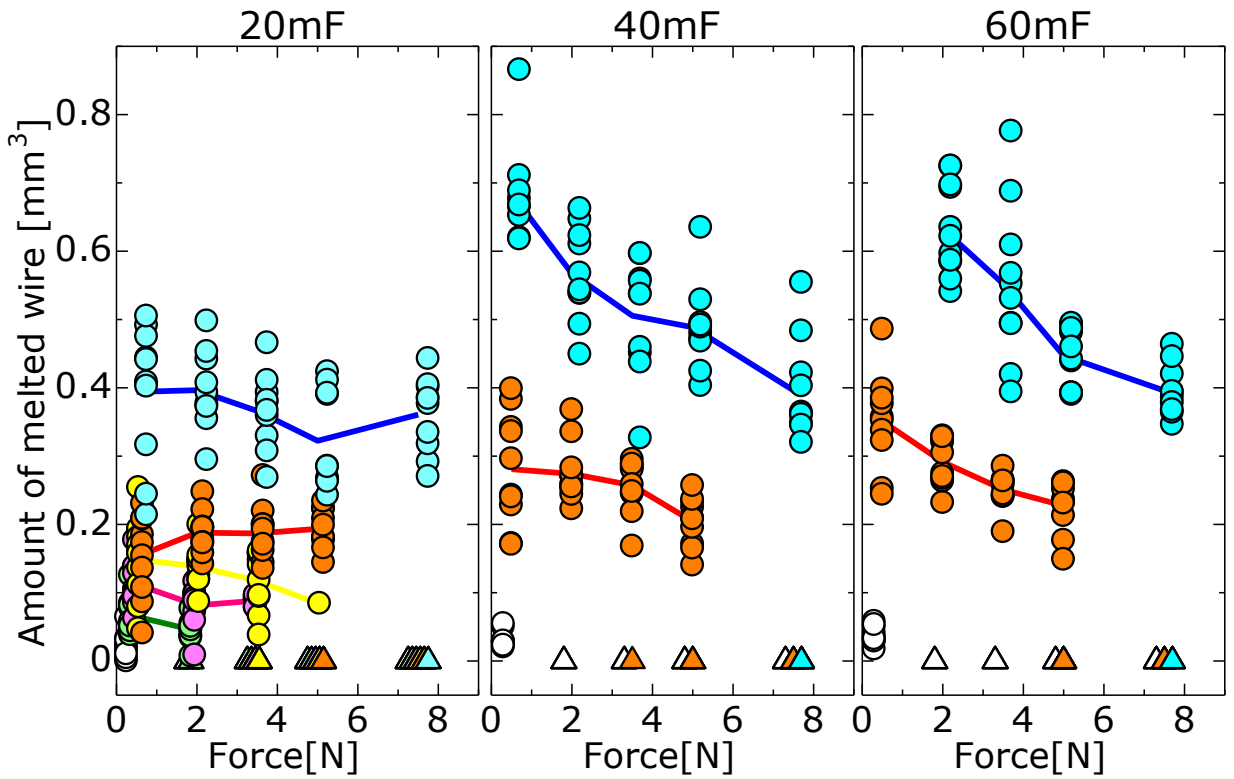


Fig.4-25 Influence of force and arc on amount of melted wire of wire diameter 0.65mm

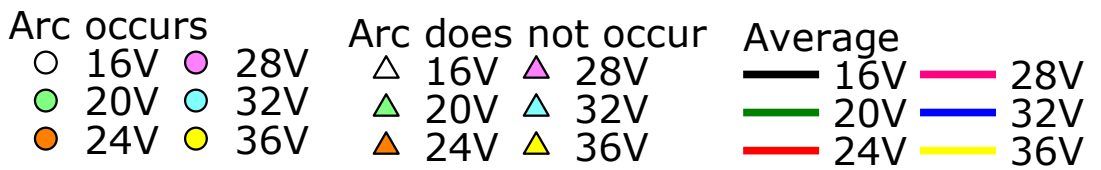
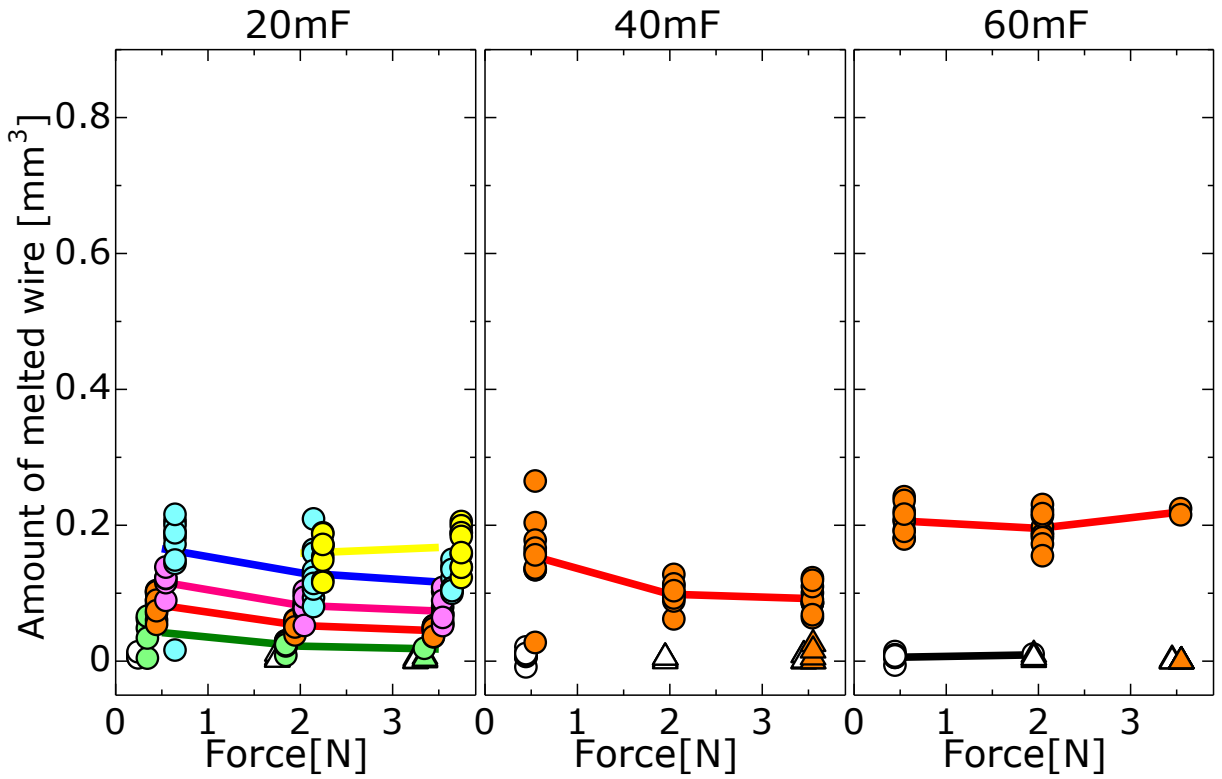


Fig.4-26 Influence of force and arc on amount of melted wire of wire diameter 0.32mm

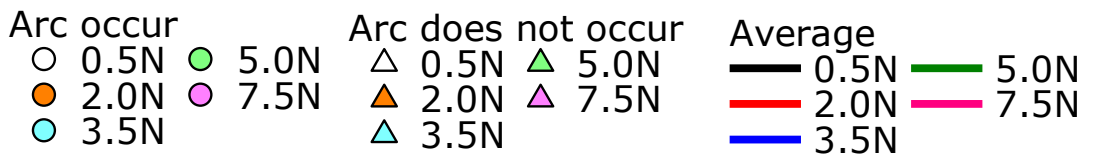
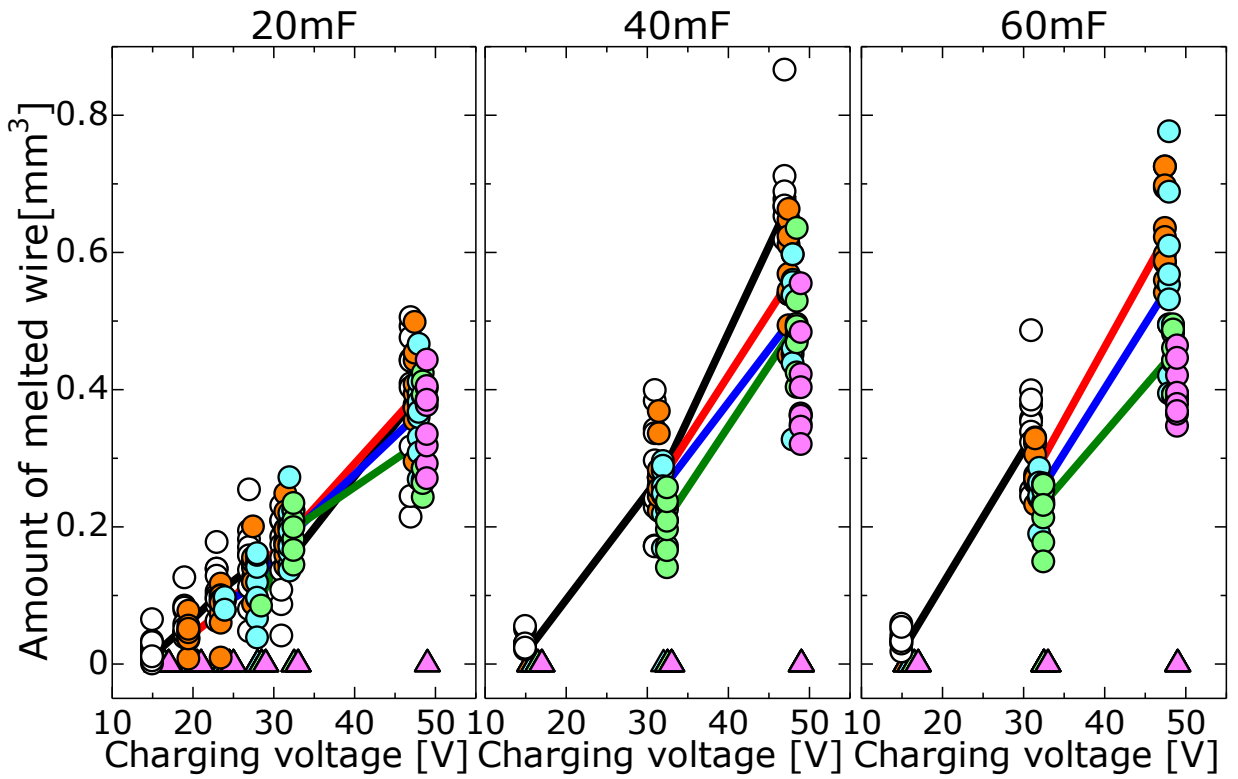
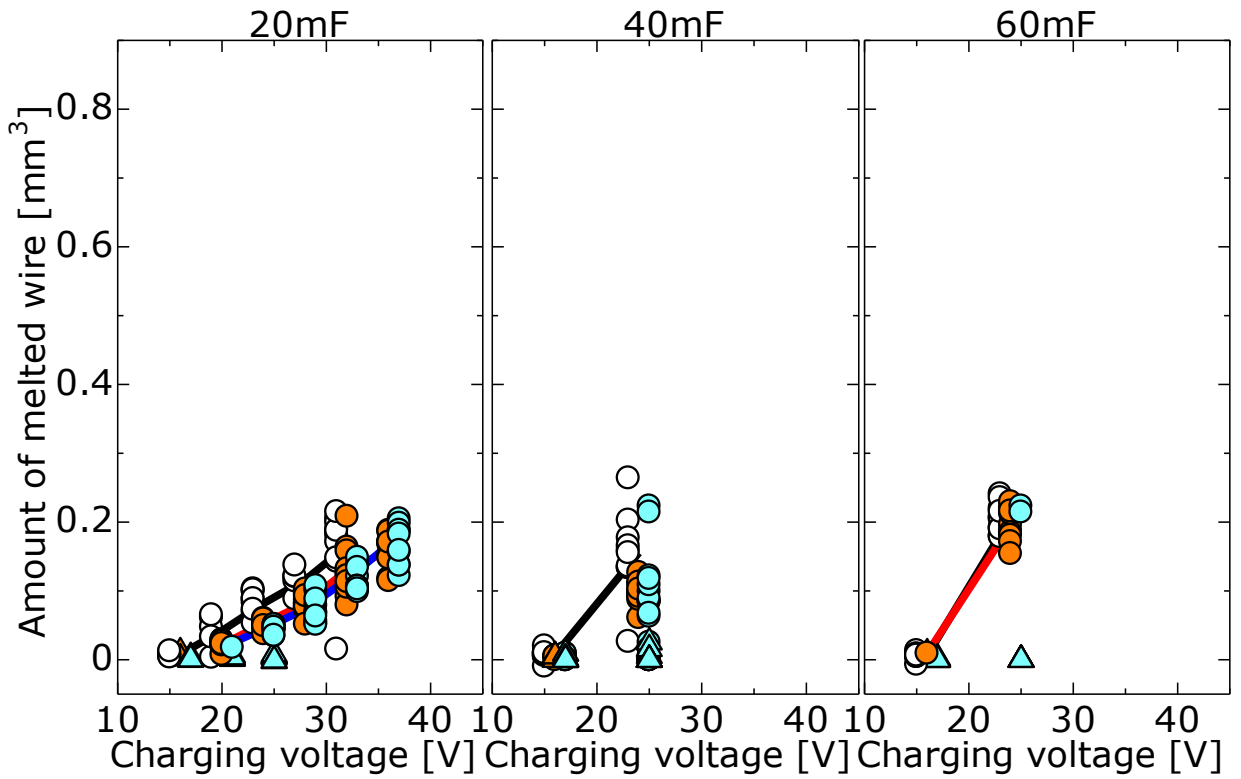


Fig.4-27 Influence of charging voltage and arc on amount of melted wire of wire diameter 0.65mm



Arc occurs	Arc does not occur	Average
○ 0.5N	△ 0.5N	— 0.5N
● 2.0N	▲ 2.0N	— 2.0N
● 3.5N	▲ 3.5N	— 3.5N

Fig.4-28 Influence of charging voltage and arc on amount of melted wire of wire diameter 0.32mm

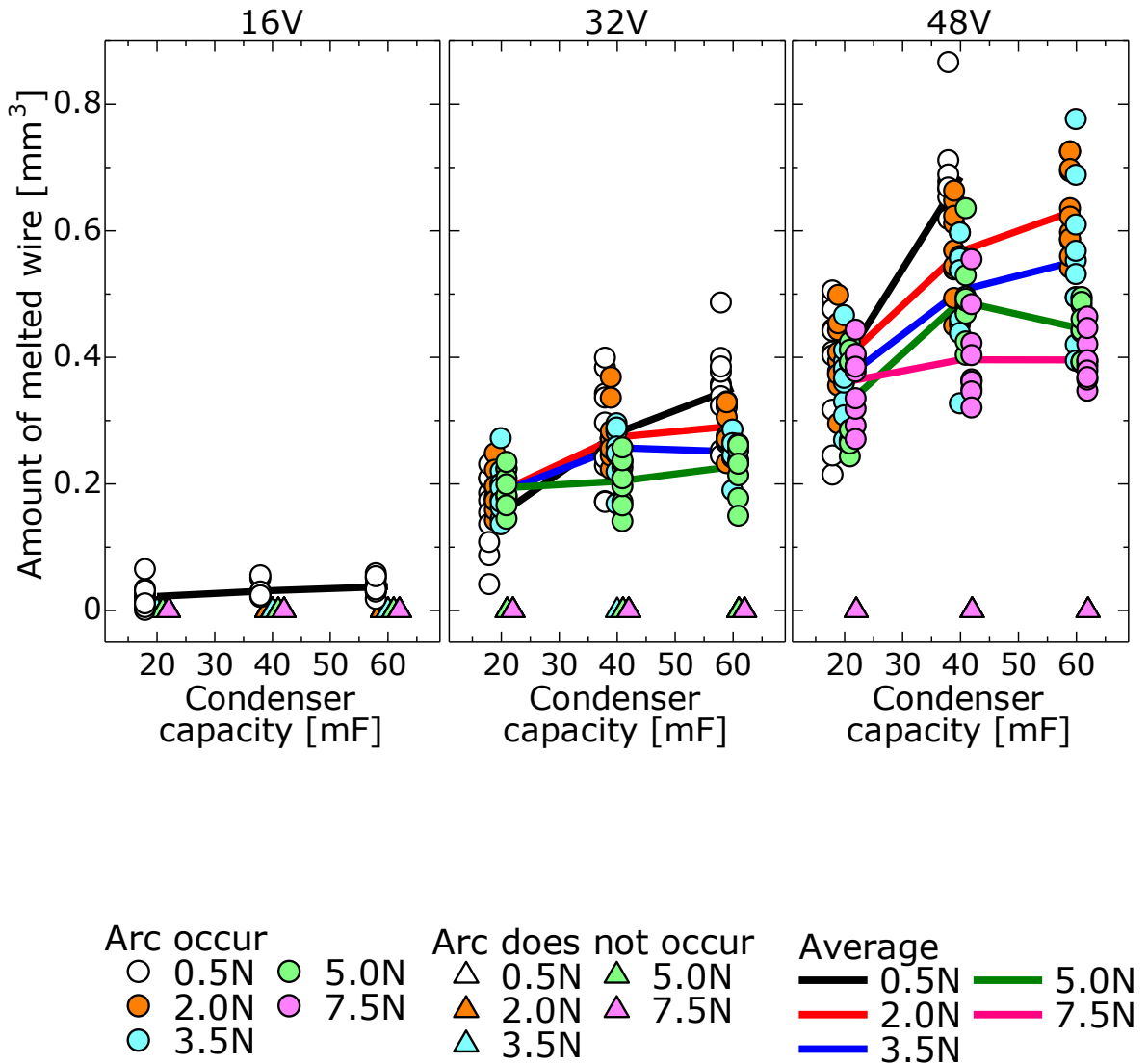


Fig.4-29 Influence of condenser capacity and arc on amount of melted wire of wire diameter 0.65mm

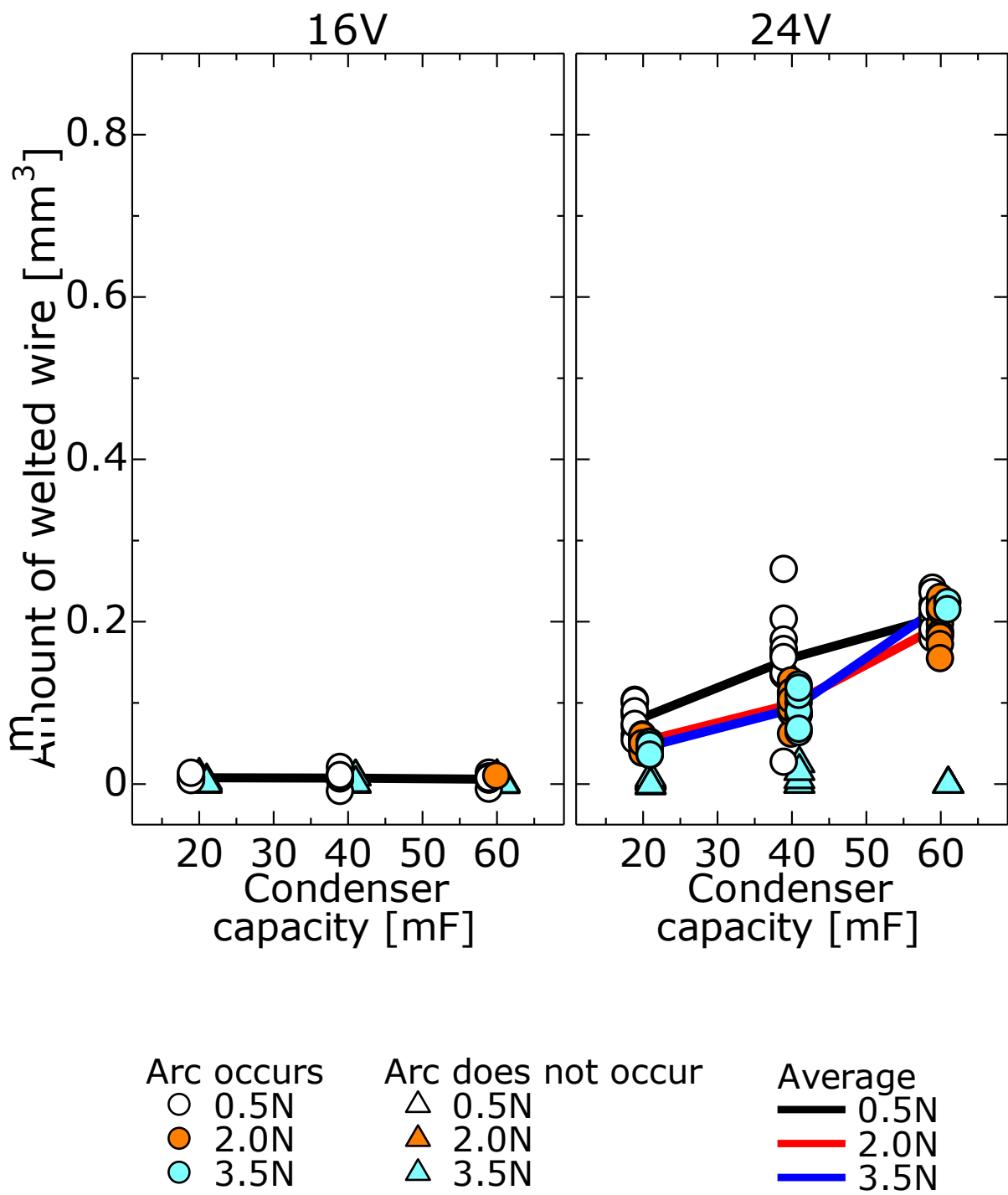
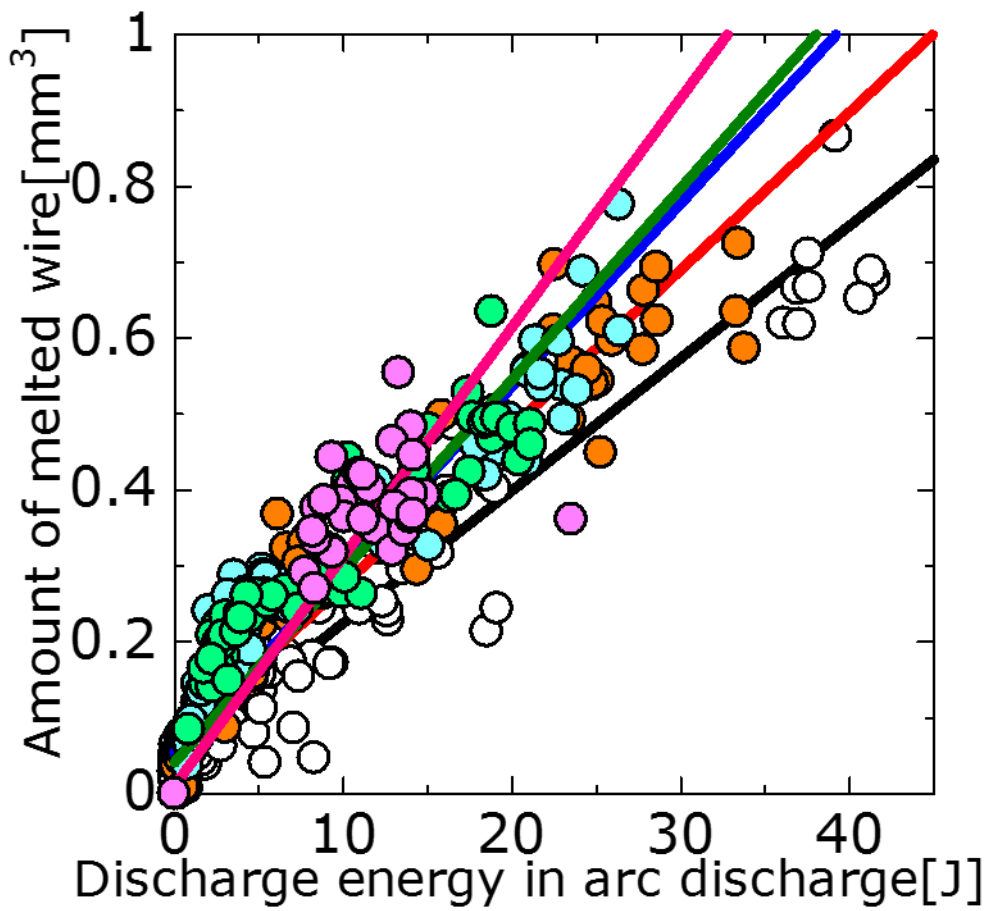


Fig.4-30 Influence of condenser capacity and arc on amount of melted wire of wire diameter 0.32mm





○ 0.5N	— 0.5N $r=0.96$
● 2.0N	— 2.0N $r=0.96$
● 3.5N	— 3.5N $r=0.95$
● 5.0N	— 5.0N $r=0.94$
● 7.5N	— 7.5N $r=0.95$

Fig.4-31 Influence of discharge energy in arc discharge on amount of melted wire of wire diameter 0.65mm

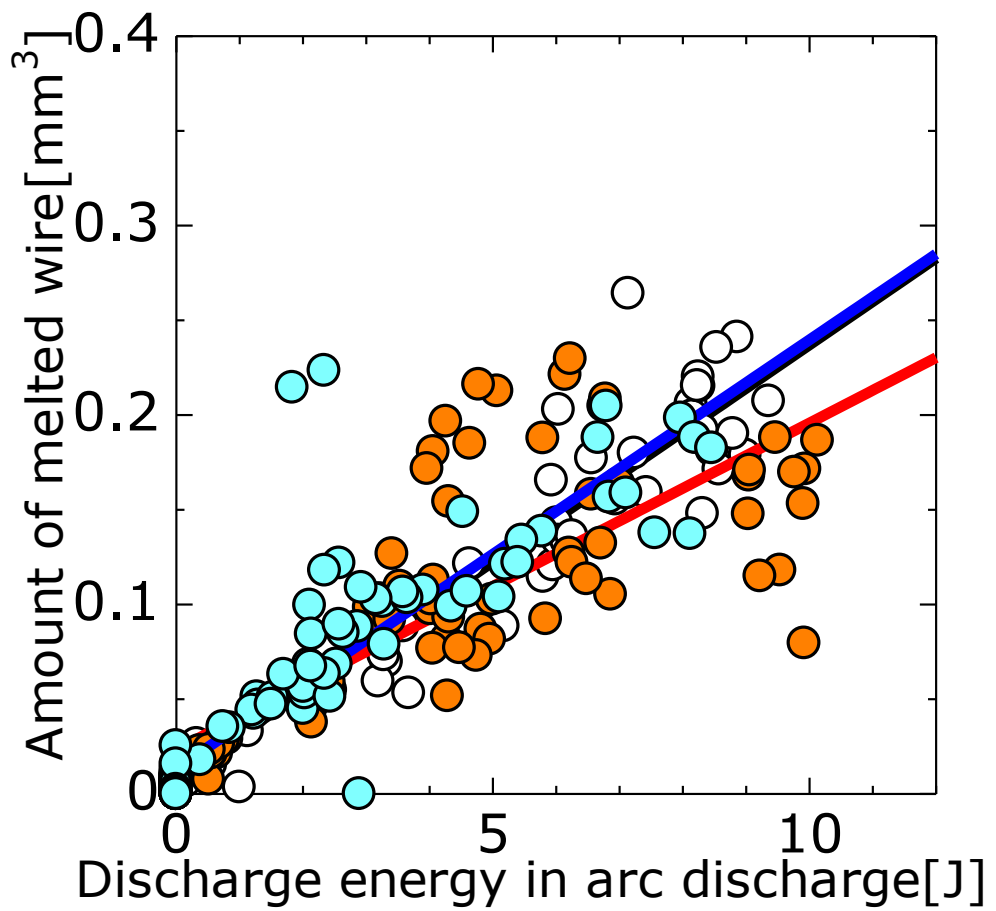


Fig.4-32 Influence of discharge energy in arc discharge on amount of melted wire of wire diameter 0.32mm

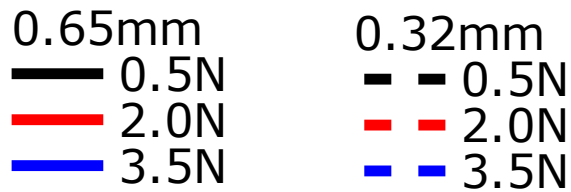
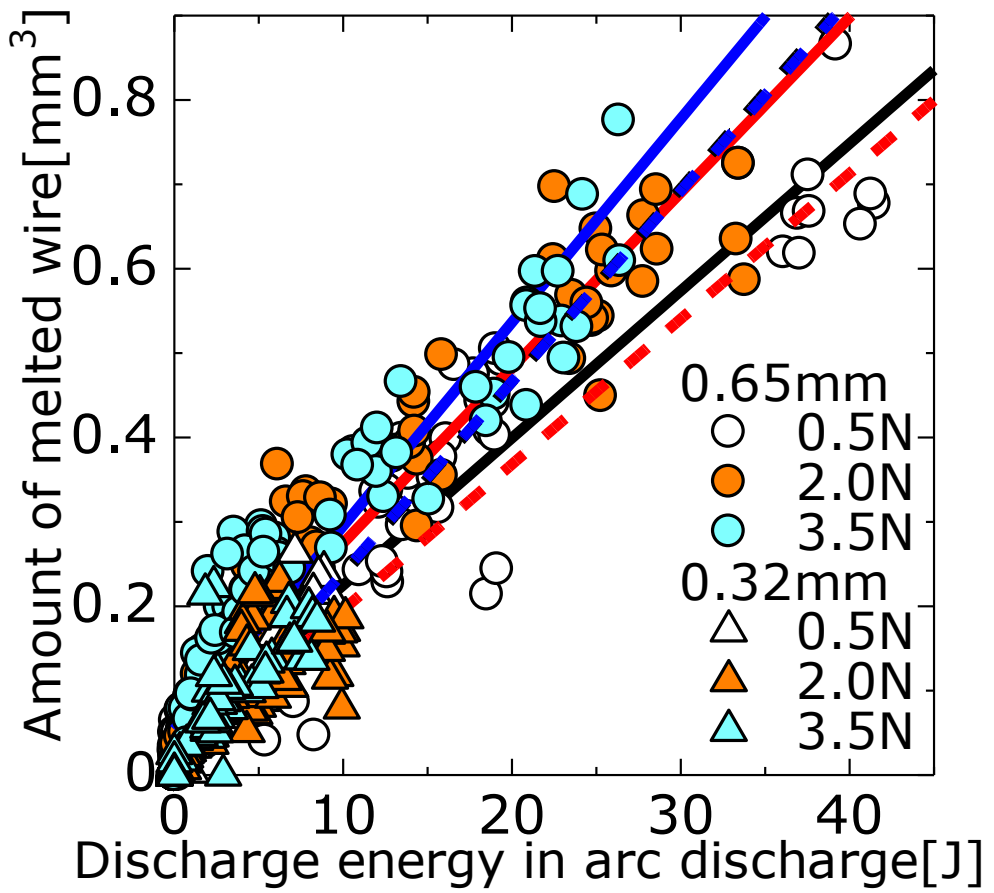
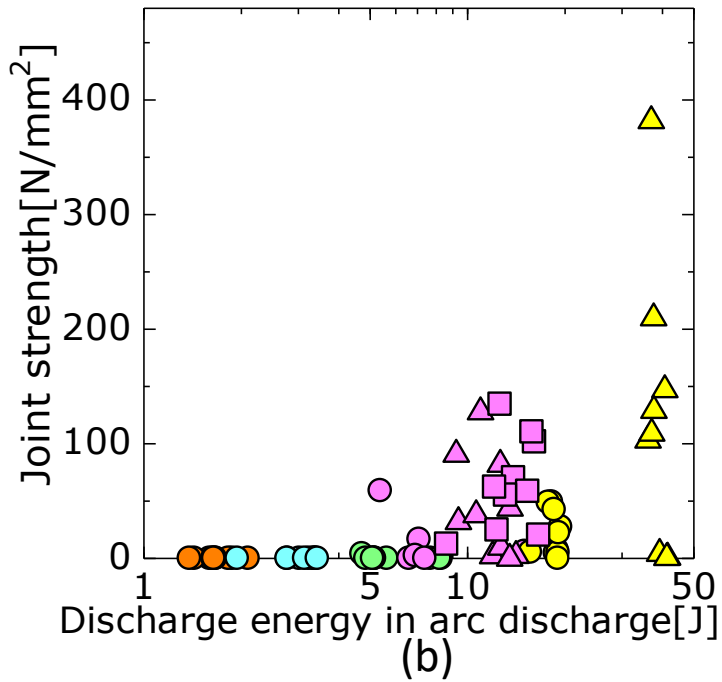
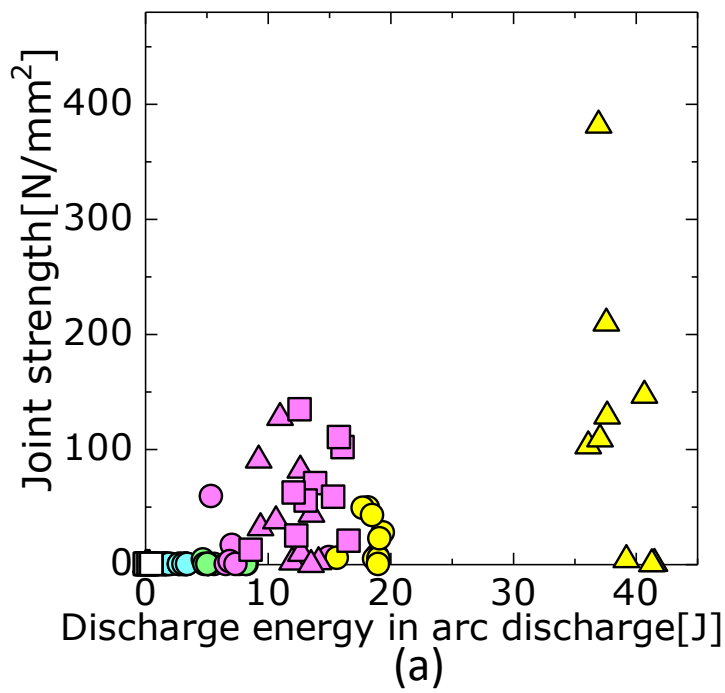
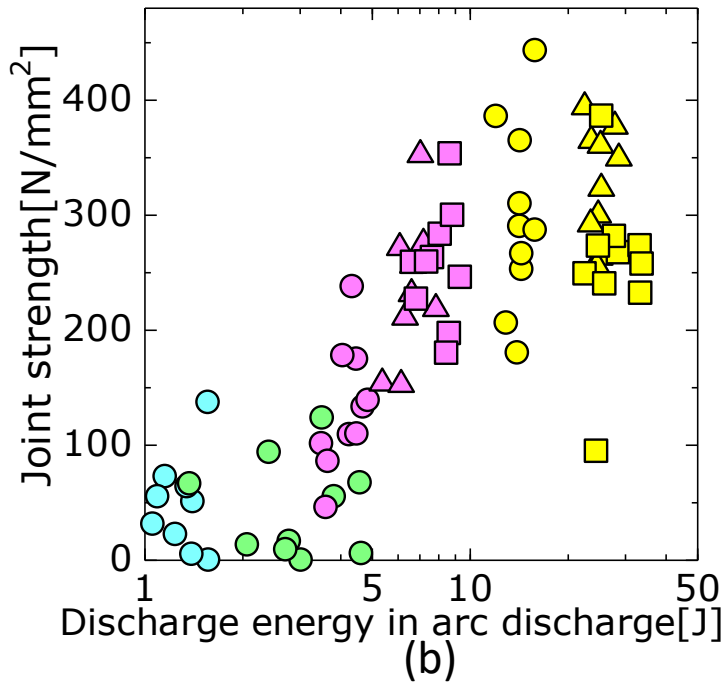
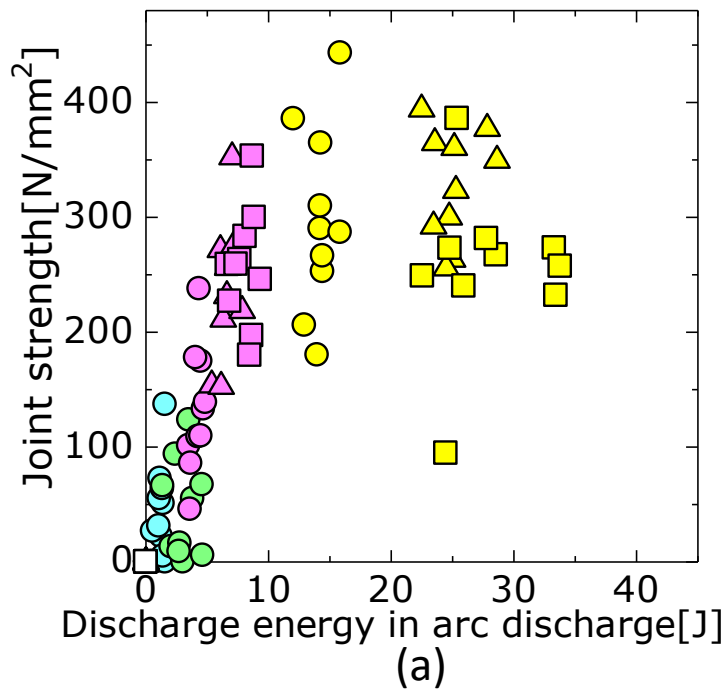


Fig.4-33 Influence of discharge energy in arc discharge on amount of melted wire of  $\Phi 0.65\text{mm}$  and  $\Phi 0.32\text{mm}$



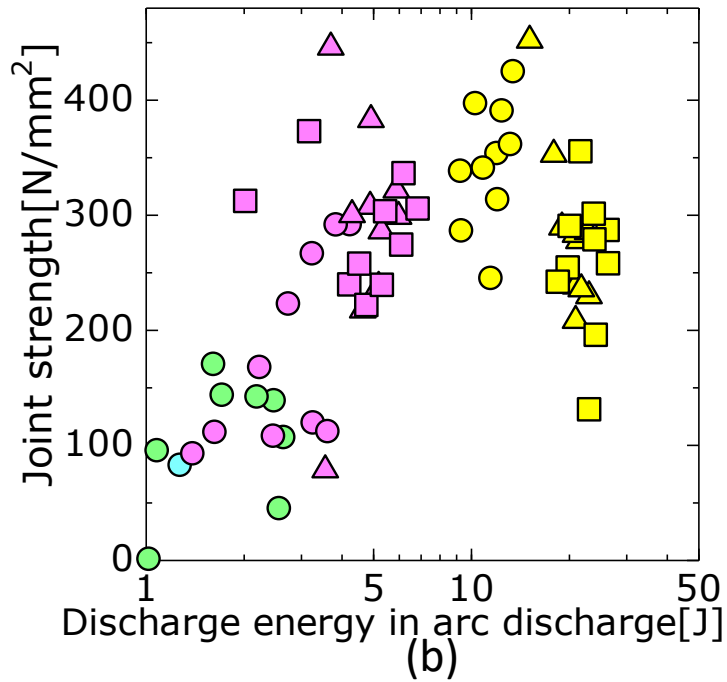
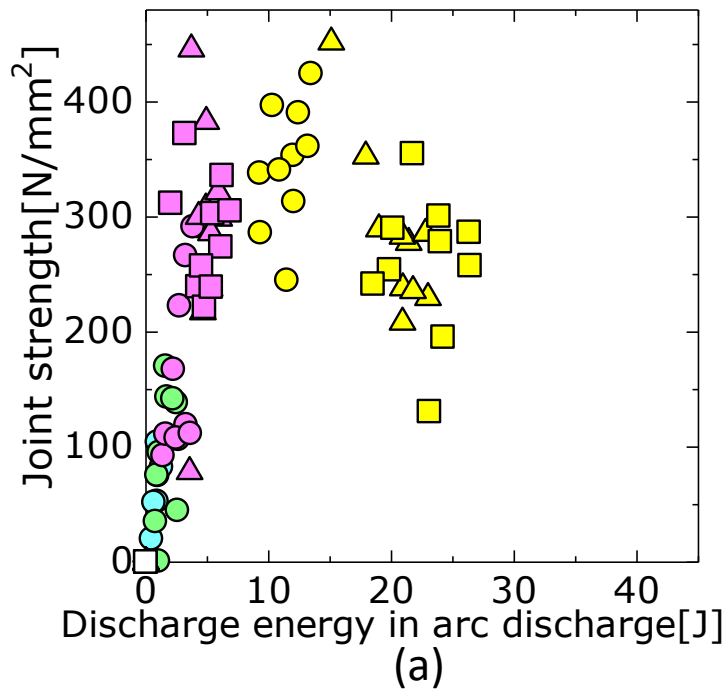
- |            |            |
|------------|------------|
| ○ 20mF-16V | △ 40mF-16V |
| ● 20mF-20V | △ 40mF-32V |
| ● 20mF-24V | △ 40mF-48V |
| ● 20mF-28V | □ 60mF-16V |
| ● 20mF-32V | ■ 60mF-32V |
| ● 20mF-48V |            |

Fig.4-34 Influence of discharge energy in arc discharge on joint strength of force 0.5N by wire diameter 0.65mm



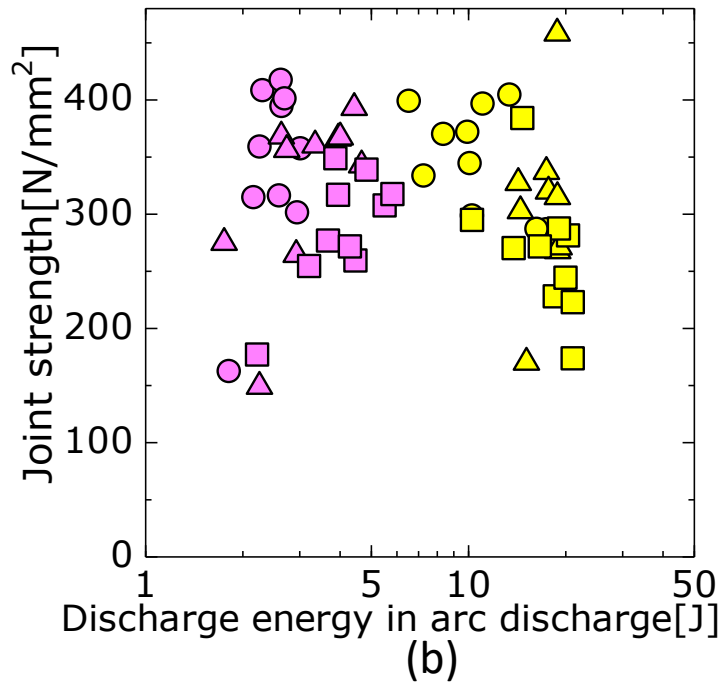
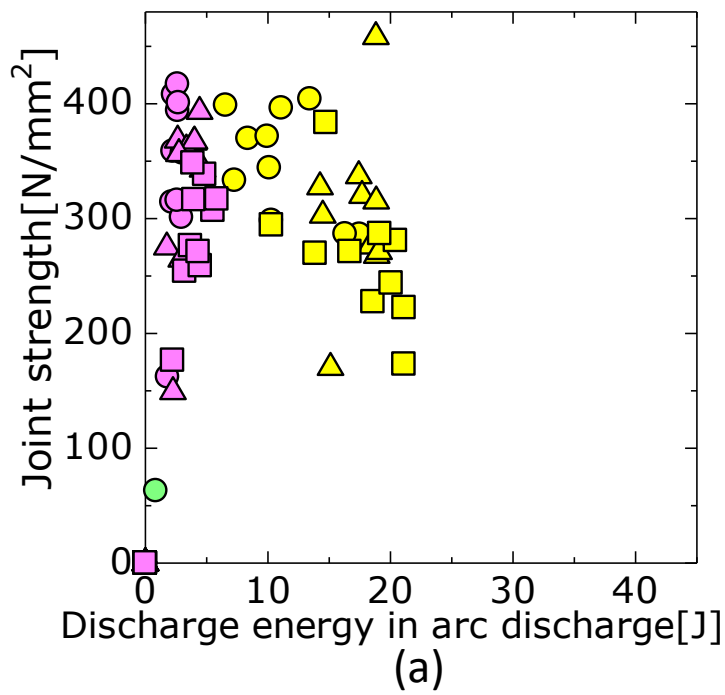
- |            |            |
|------------|------------|
| ○ 20mF-16V | △ 40mF-16V |
| ● 20mF-20V | ▲ 40mF-32V |
| ● 20mF-24V | ▲ 40mF-48V |
| ● 20mF-28V | □ 60mF-16V |
| ● 20mF-32V | ■ 60mF-32V |
| ● 20mF-48V | ■ 60mF-48V |

Fig.4-35 Influence of discharge energy in arc discharge on joint strength of force 2.0N by wire diameter 0.65mm



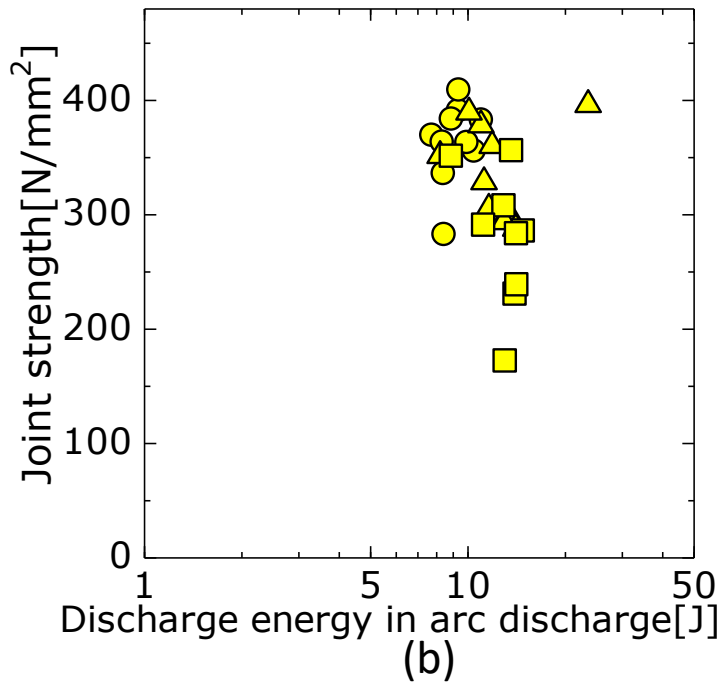
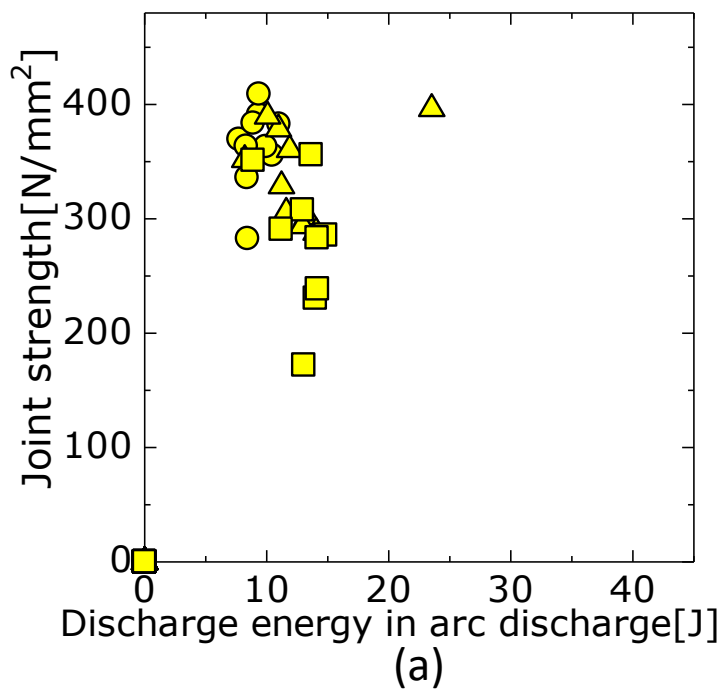
- |            |            |
|------------|------------|
| ○ 20mF-16V | △ 40mF-16V |
| ● 20mF-20V | ▲ 40mF-32V |
| ● 20mF-24V | ▲ 40mF-48V |
| ● 20mF-28V | □ 60mF-16V |
| ● 20mF-32V | ■ 60mF-32V |
| ● 20mF-48V | ■ 60mF-48V |

Fig.4-36 Influence of discharge energy in arc discharge on joint strength of force 3.5N by wire diameter 0.65mm



- |            |            |
|------------|------------|
| ○ 20mF-16V | △ 40mF-16V |
| ● 20mF-20V | ▲ 40mF-32V |
| ● 20mF-24V | ▲ 40mF-48V |
| ● 20mF-28V | □ 60mF-16V |
| ● 20mF-32V | ■ 60mF-32V |
| ● 20mF-48V | ■ 60mF-48V |

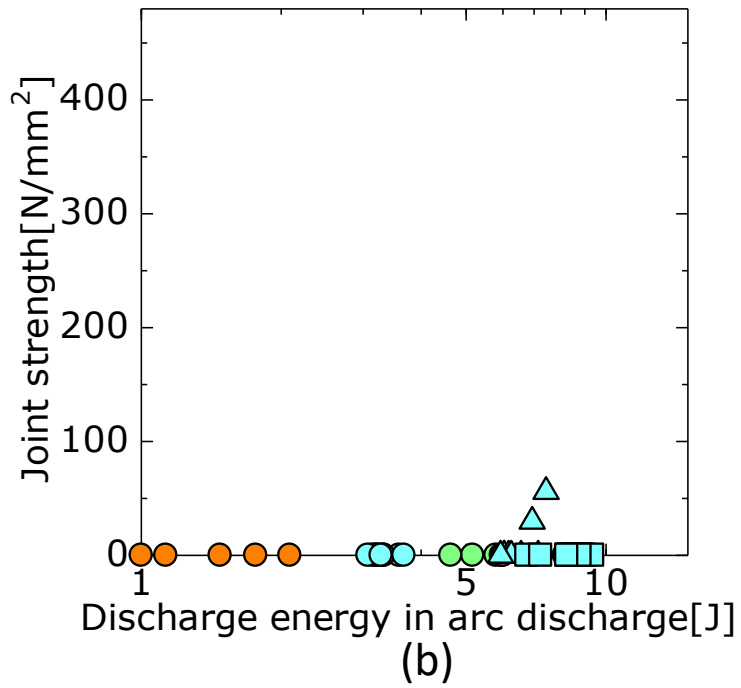
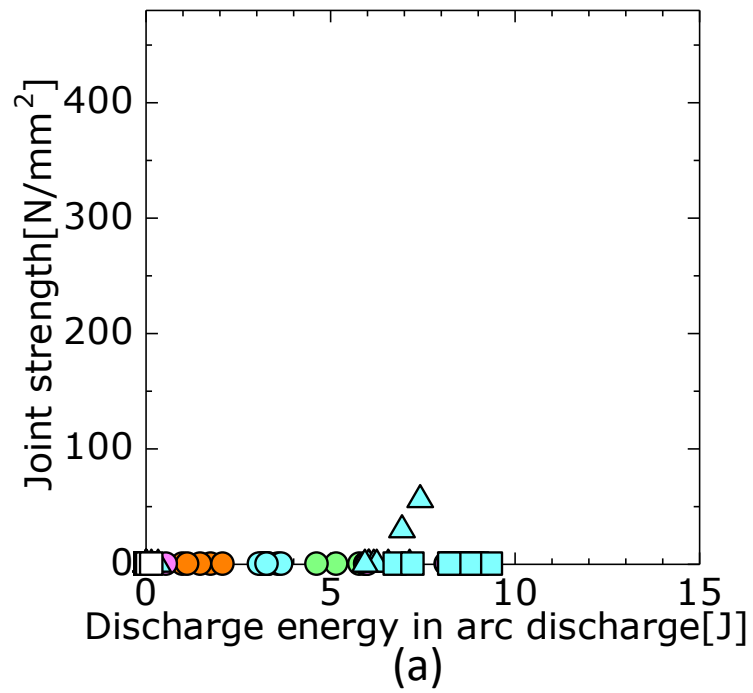
Fig.4-37 Influence of discharge energy in arc discharge on joint strength of force 5.0N by wire diameter 0.65mm



- |            |            |
|------------|------------|
| ○ 20mF-16V | △ 40mF-16V |
| ● 20mF-20V | ▲ 40mF-32V |
| ● 20mF-24V | ▲ 40mF-48V |
| ● 20mF-28V | □ 60mF-16V |
| ● 20mF-32V | ■ 60mF-32V |
| ● 20mF-48V | ■ 60mF-48V |

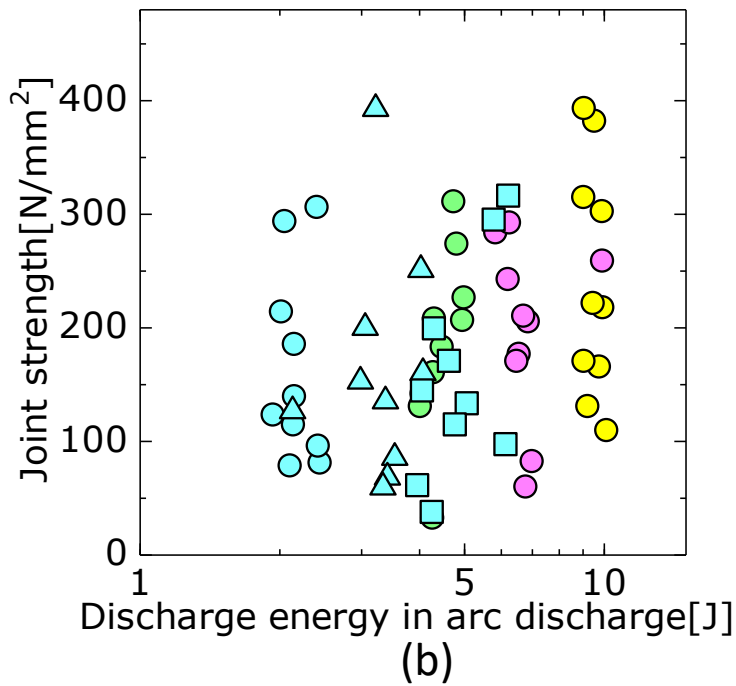
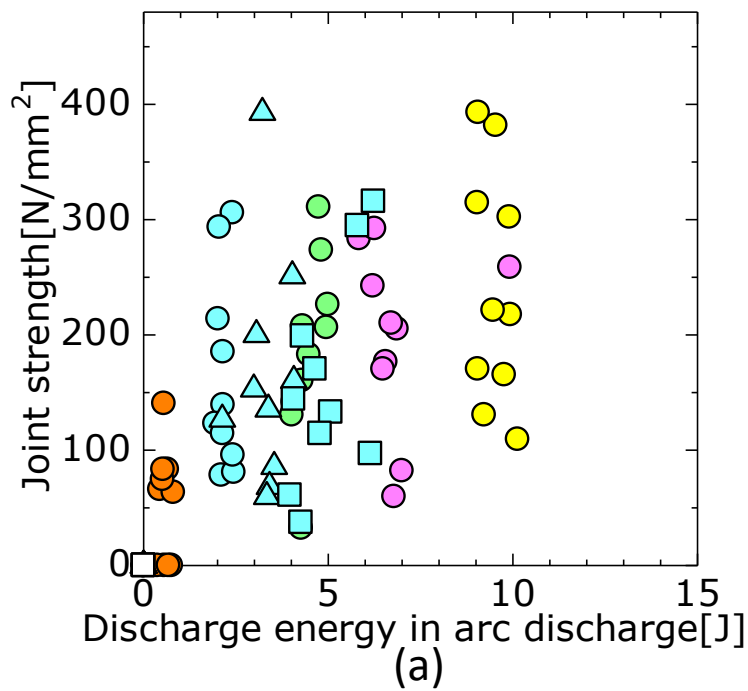
Fig.4-38 Influence of discharge energy in arc discharge on joint strength of force 7.5N by wire diameter 0.65mm





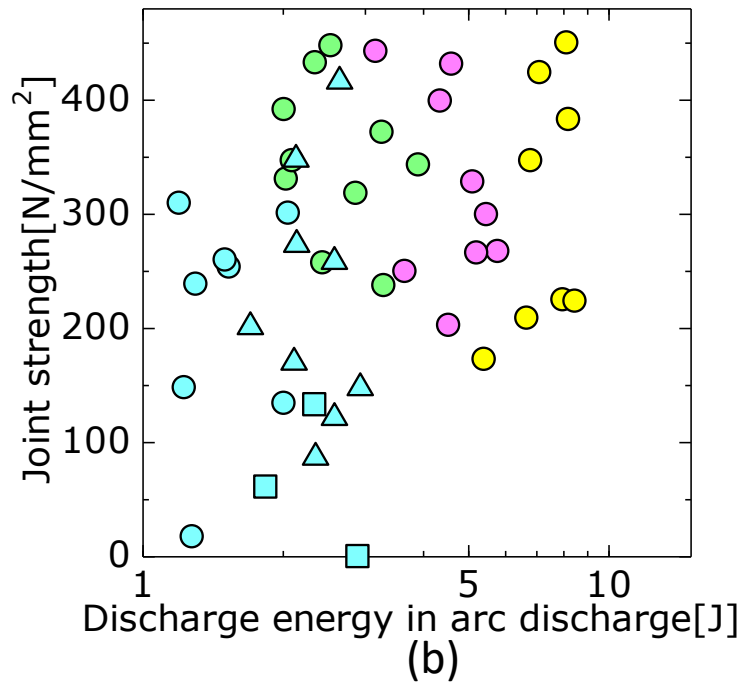
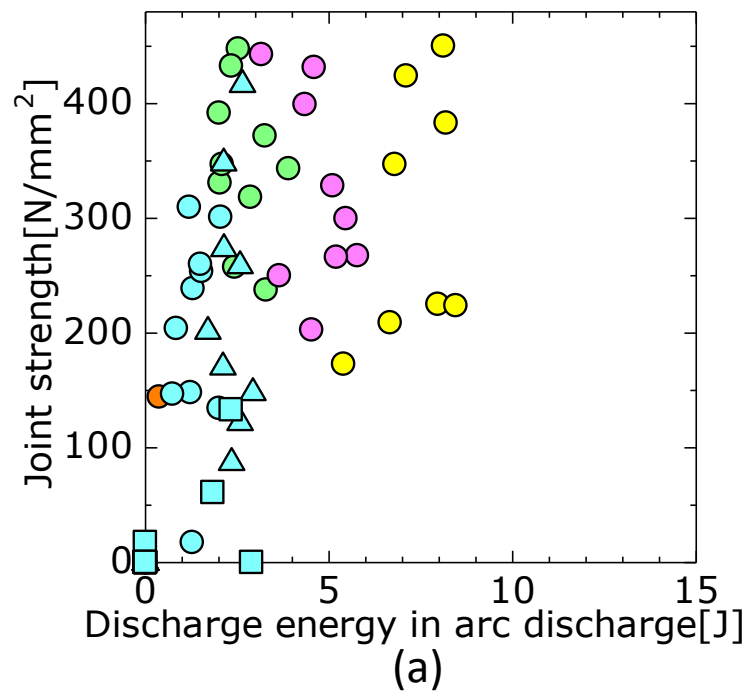
- |            |            |
|------------|------------|
| ○ 20mF-16V | △ 40mF-16V |
| ● 20mF-20V | ▲ 40mF-24V |
| ● 20mF-24V | □ 60mF-16V |
| ● 20mF-28V | ■ 60mF-24V |
| ● 20mF-32V |            |

Fig.4-39 Influence of discharge energy in arc discharge on joint strength of force 0.5N by wire diameter 0.32mm



- |            |            |
|------------|------------|
| ○ 20mF-16V | △ 40mF-16V |
| ● 20mF-20V | ▲ 40mF-24V |
| ● 20mF-24V | □ 60mF-16V |
| ● 20mF-28V | ■ 60mF-24V |
| ● 20mF-32V |            |
| ● 20mF-36V |            |

Fig.4-40 Influence of discharge energy in arc discharge on joint strength of force 2.0N by wire diameter 0.32mm



- |            |            |
|------------|------------|
| ○ 20mF-16V | △ 40mF-16V |
| ● 20mF-20V | ▲ 40mF-24V |
| ● 20mF-24V | □ 60mF-16V |
| ● 20mF-28V | ■ 60mF-24V |
| ● 20mF-32V |            |
| ● 20mF-36V |            |

Fig.4-41 Influence of discharge energy in arc discharge on joint strength of force 3.5N by wire diameter 0.32mm

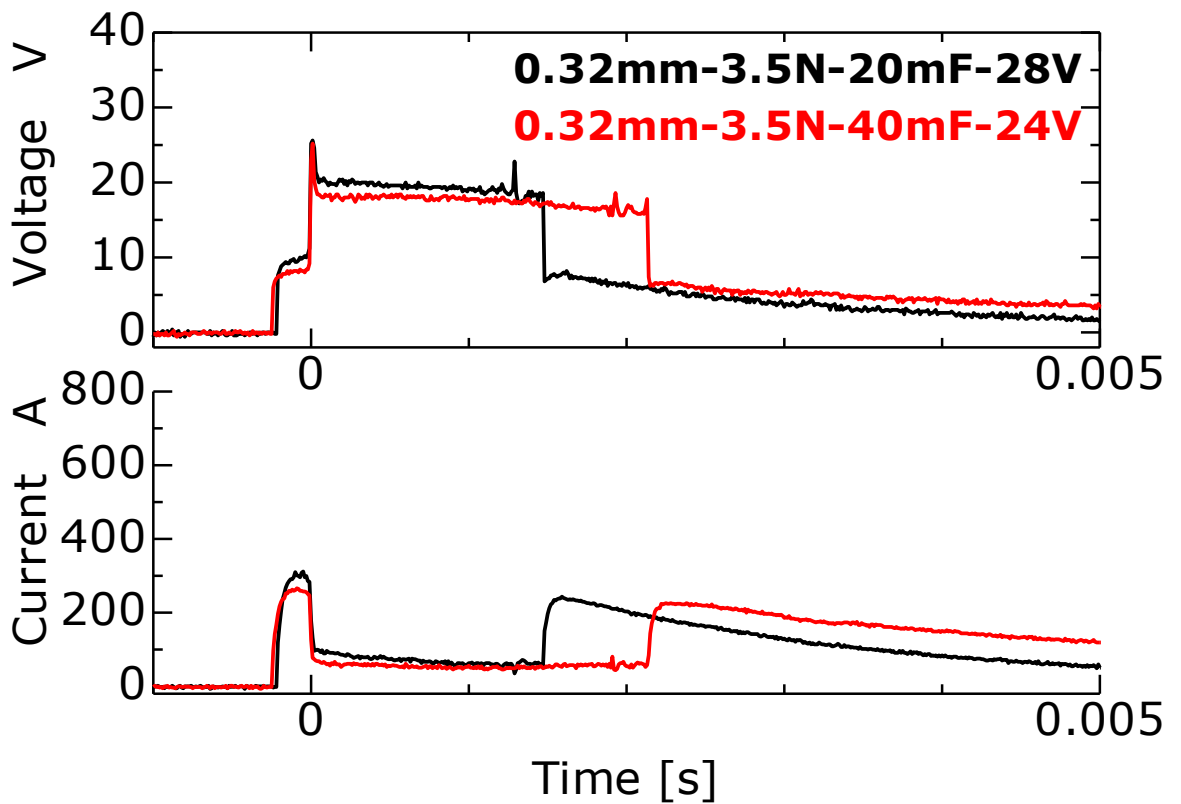
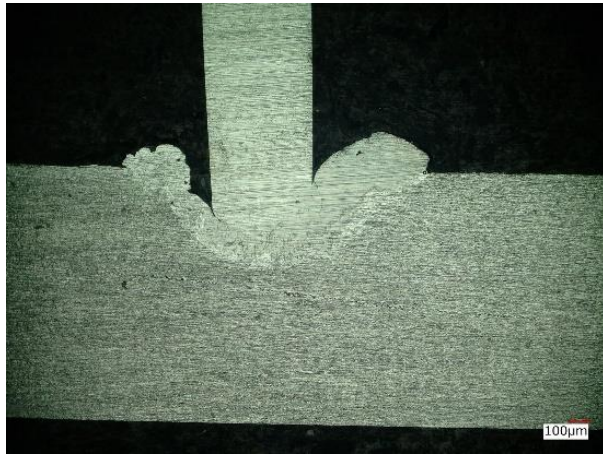


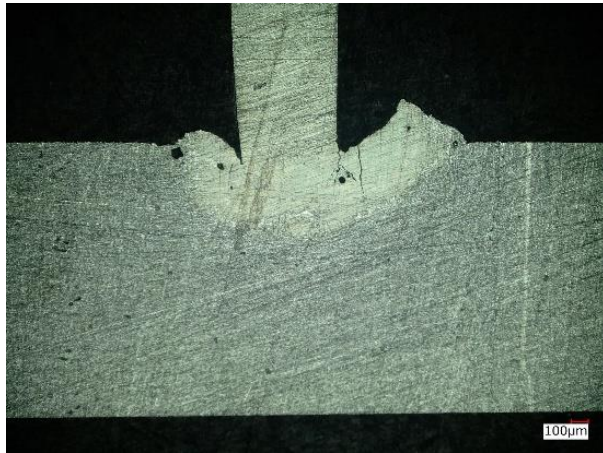
Fig.4-42 Change in voltage and current during welding of conditions in which the arc discharge energy is close



0.5N



2.0N



3.5N

500µm

Fig.4-43 Result of cross section observation of each force

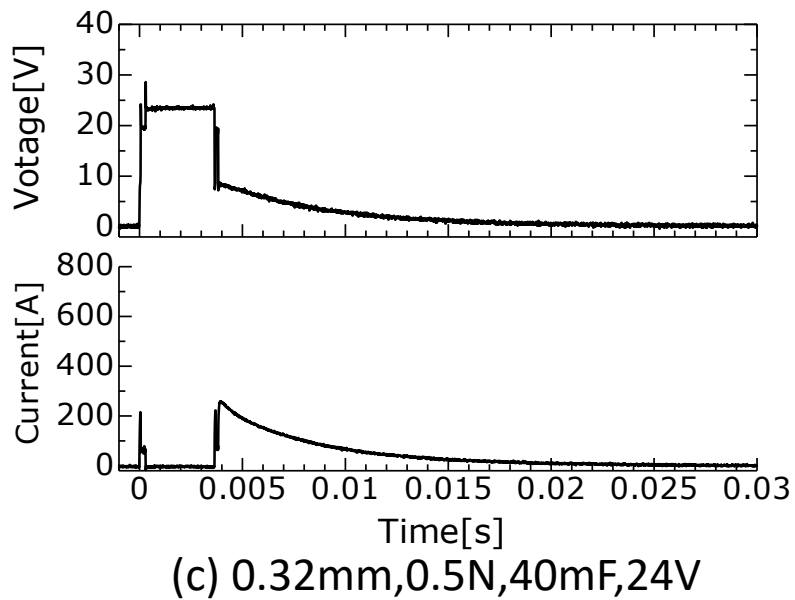
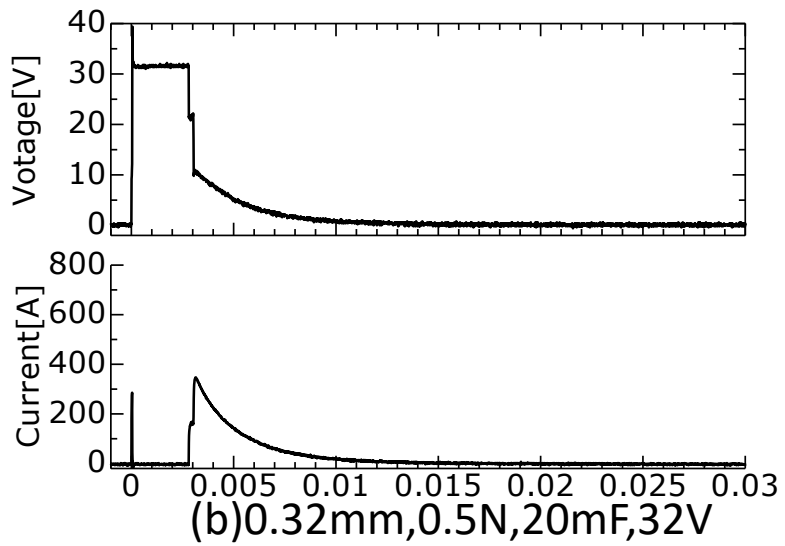
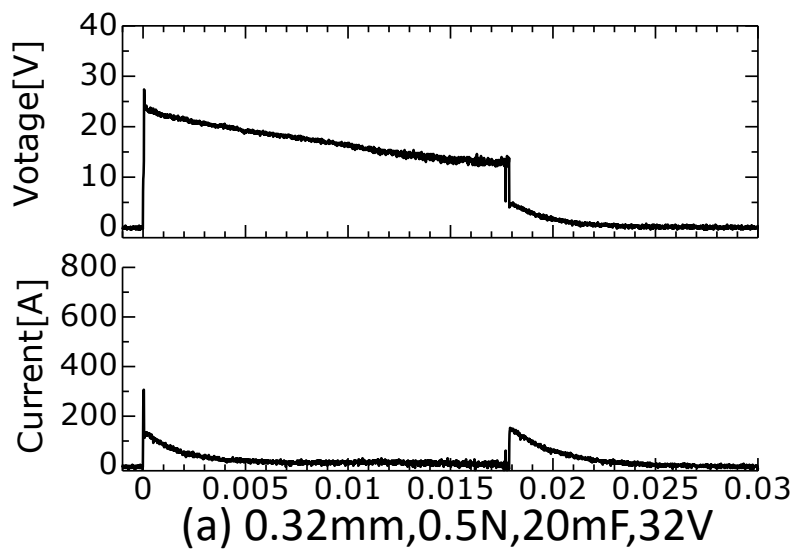


Fig.4-44 Change in voltage and current during welding



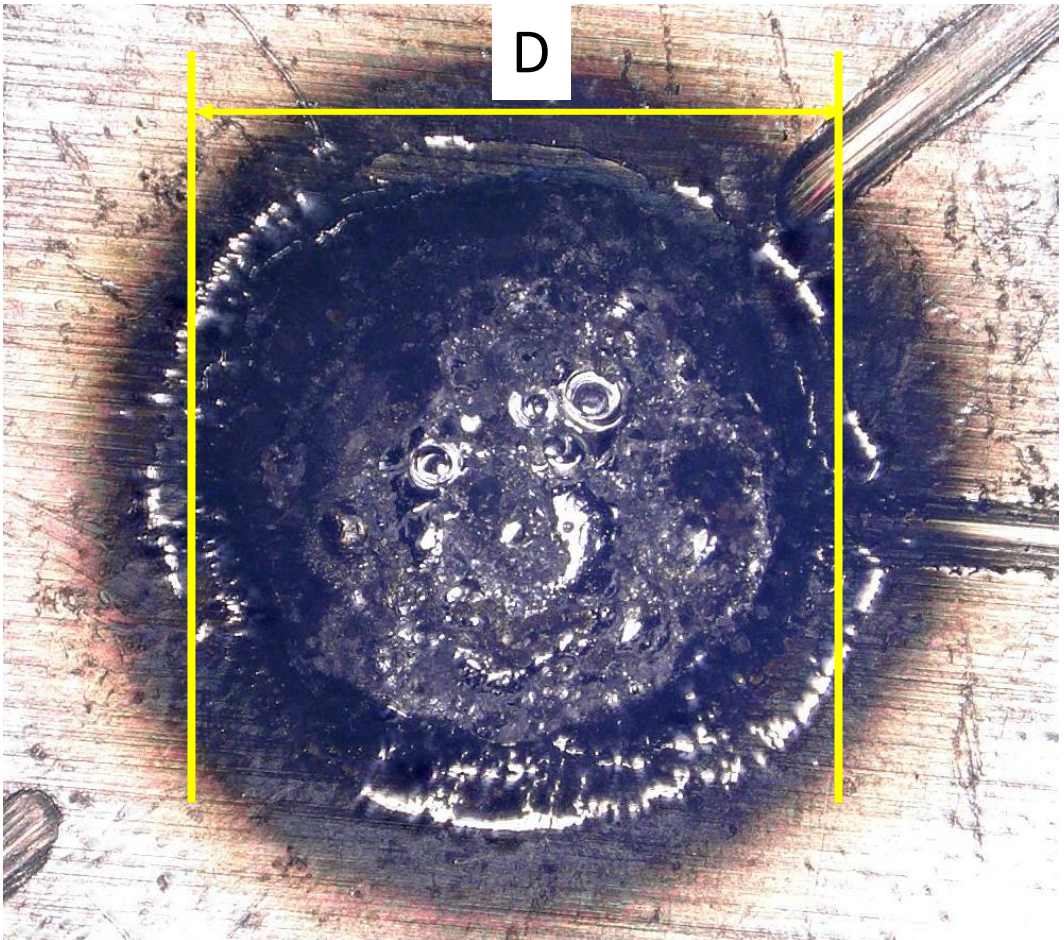


Fig.5-1 Definition of diameter of sheet fusion zone

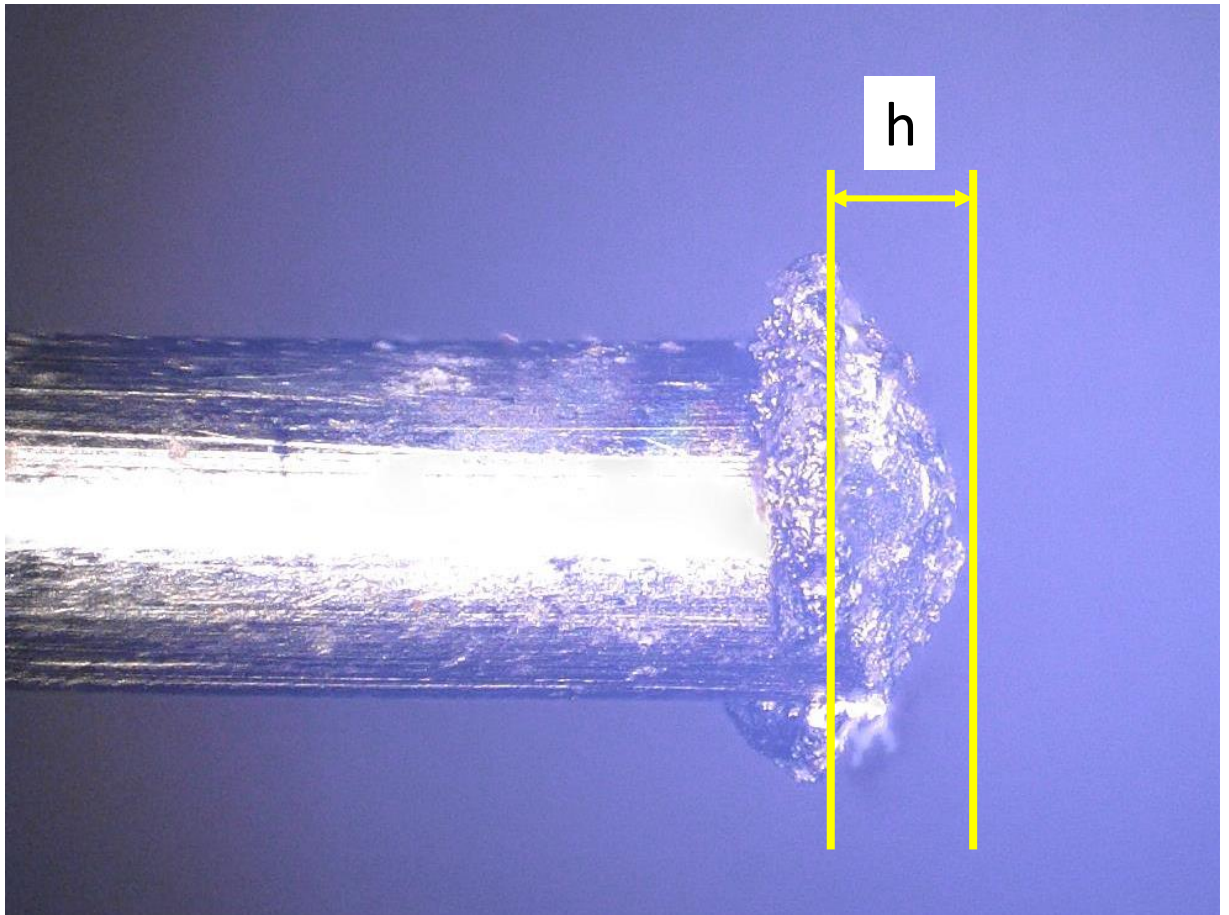
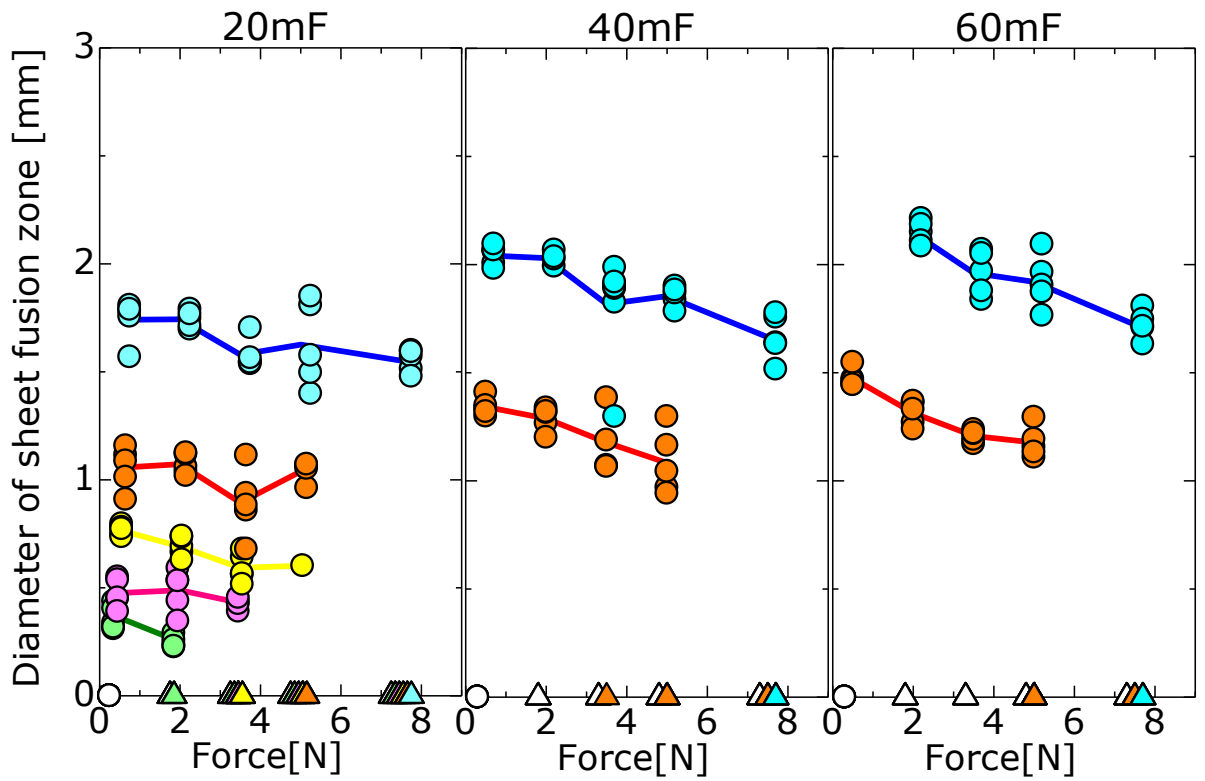


Fig.5-2 Definition of depth of fracture surface





Arc occurs		Arc does not occur		Average	
○ 16V	● 28V	△ 16V	△ 28V	— 16V	— 28V
● 20V	● 32V	△ 20V	△ 32V	— 20V	— 32V
● 24V	● 36V	△ 24V	△ 36V	— 24V	— 36V

Fig.5-3 Influence of force on diameter of sheet fusion zone

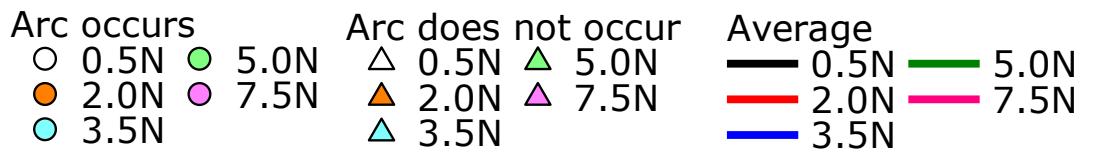
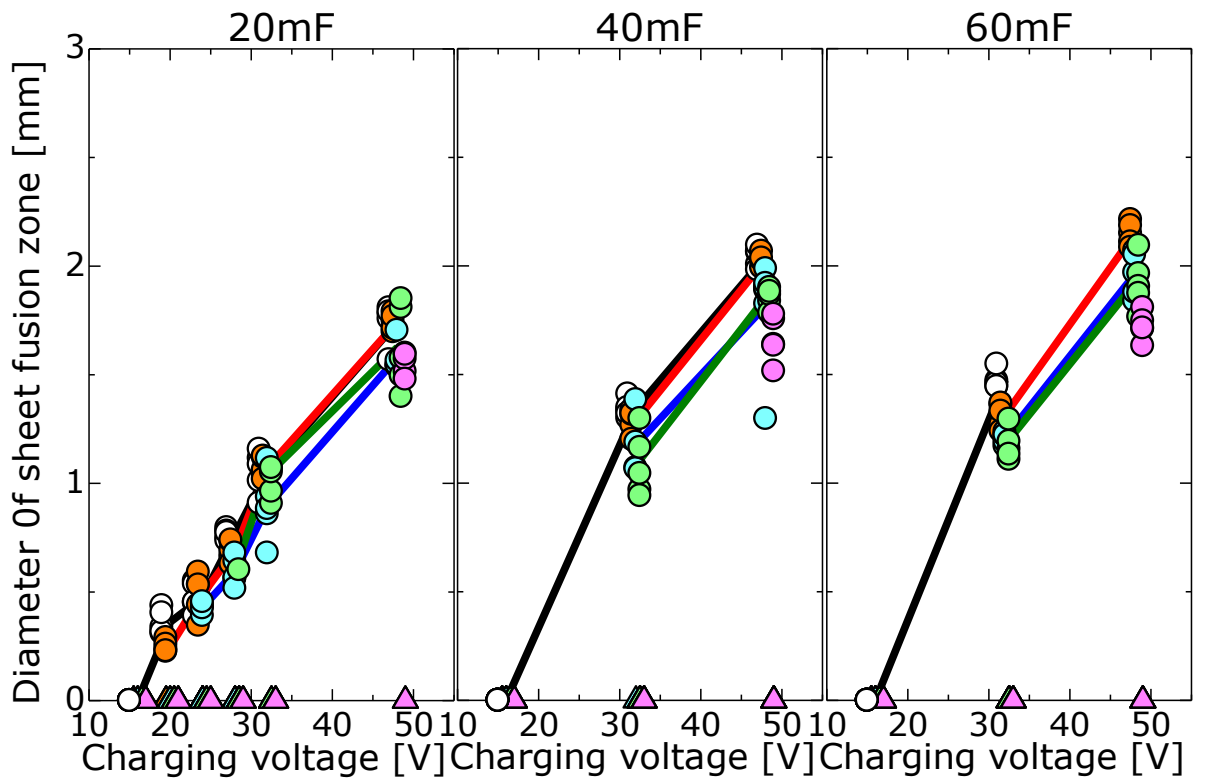


Fig.5-4 Influence of charging voltage on diameter of sheet fusion zone

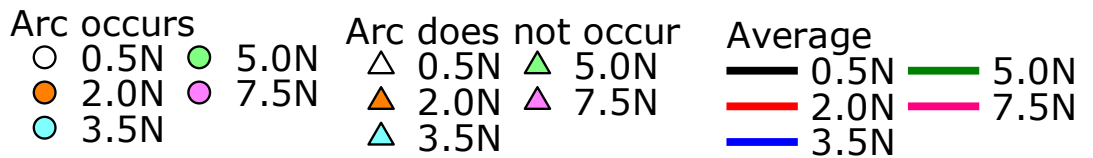
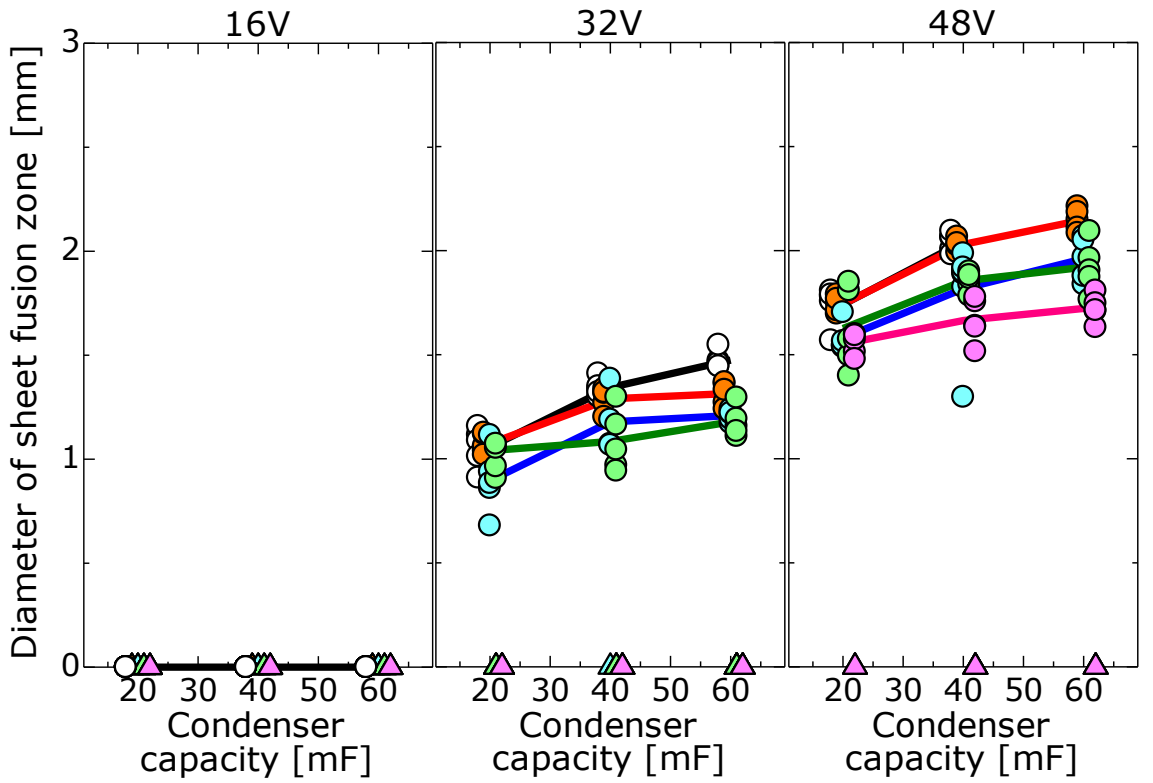
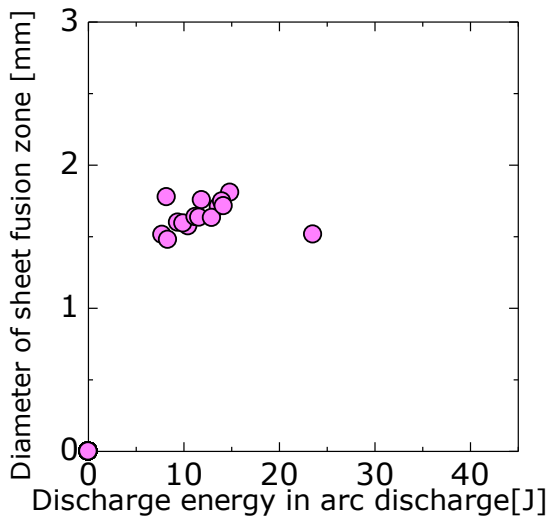
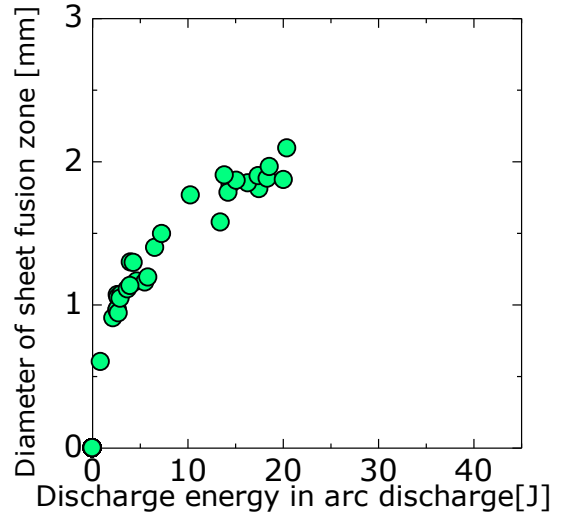
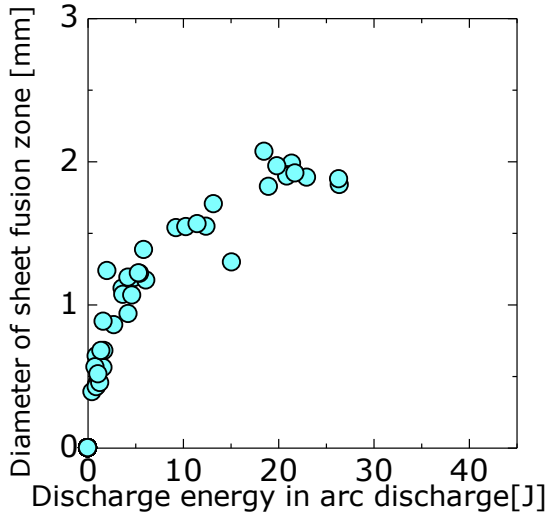
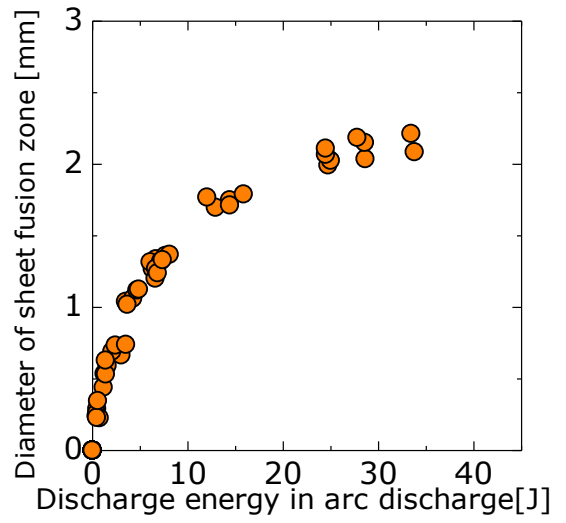
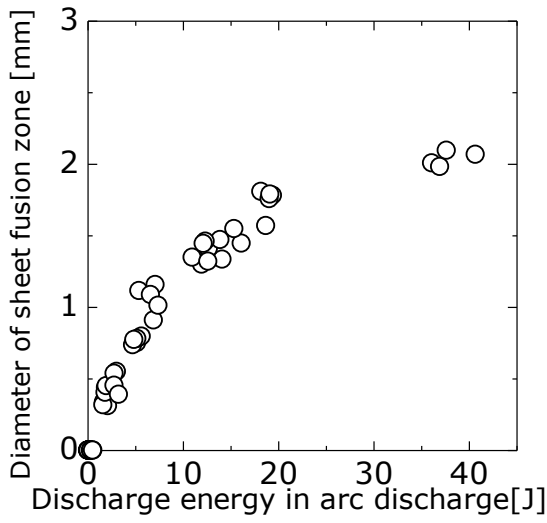
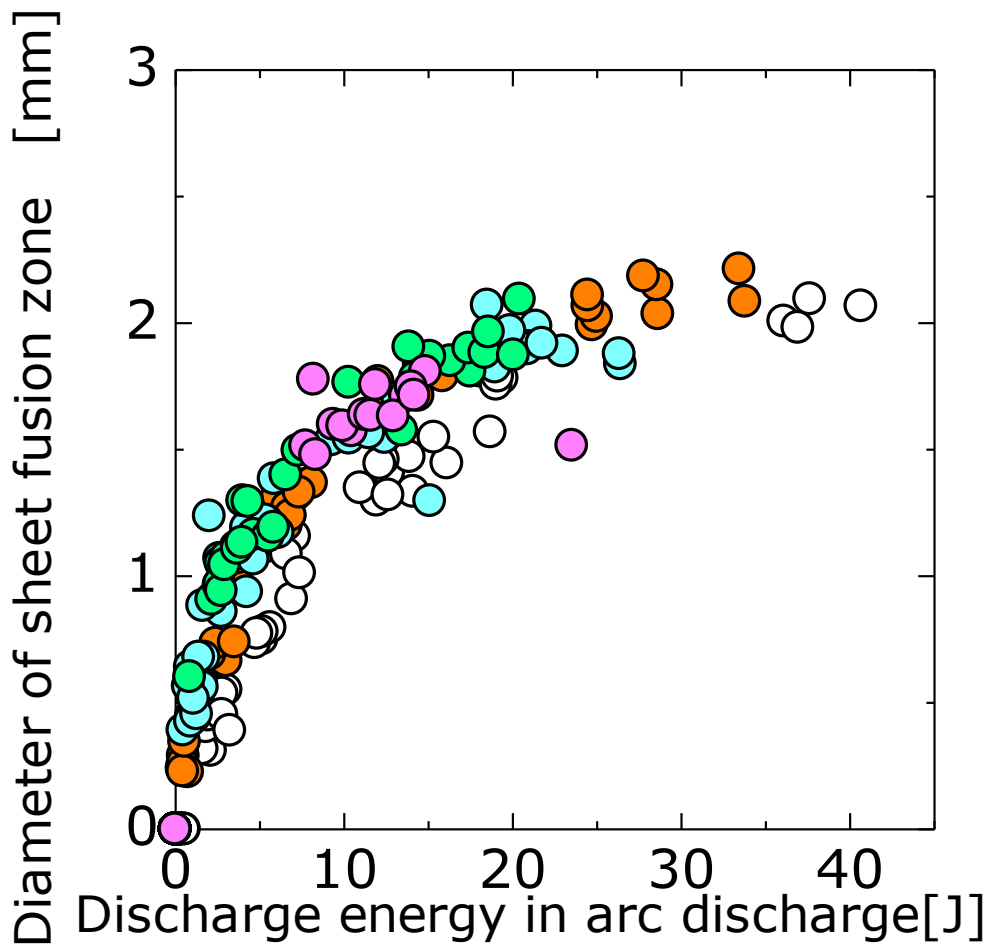


Fig.5-5 Influence of condenser capacity on diameter of sheet fusion zone



- 0.5N
- 2.0N
- 3.5N
- 5.0N
- 7.5N

Fig.5-6 Influence of discharge energy in arc discharge on diameter of sheet fusion zone



- 0.5N
- 2.0N
- 3.5N
- 5.0N
- 7.5N

Fig.5-7 Influence of discharge energy in arc discharge on diameter of sheet fusion zone of wire diameter 0.65mm

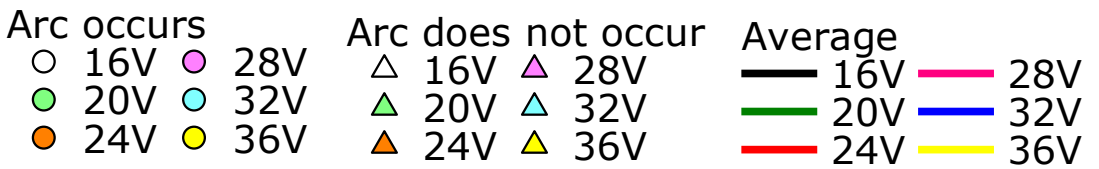
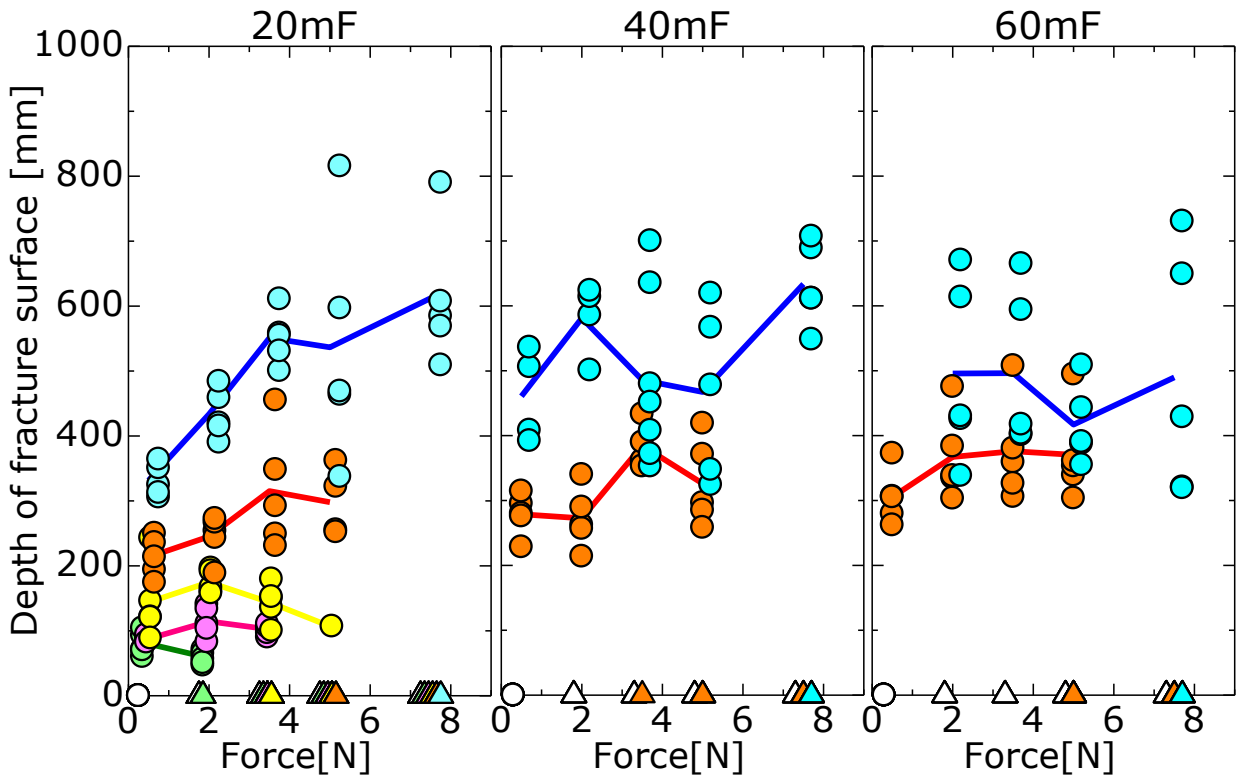


Fig.5-8 Influence of force on depth of fracture surface

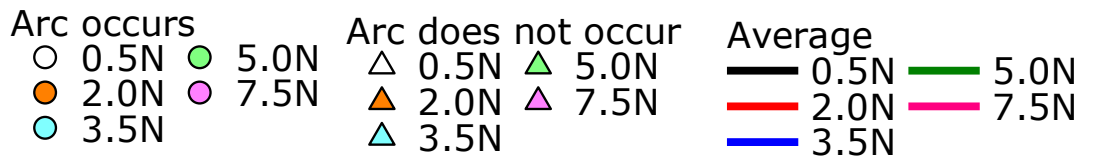
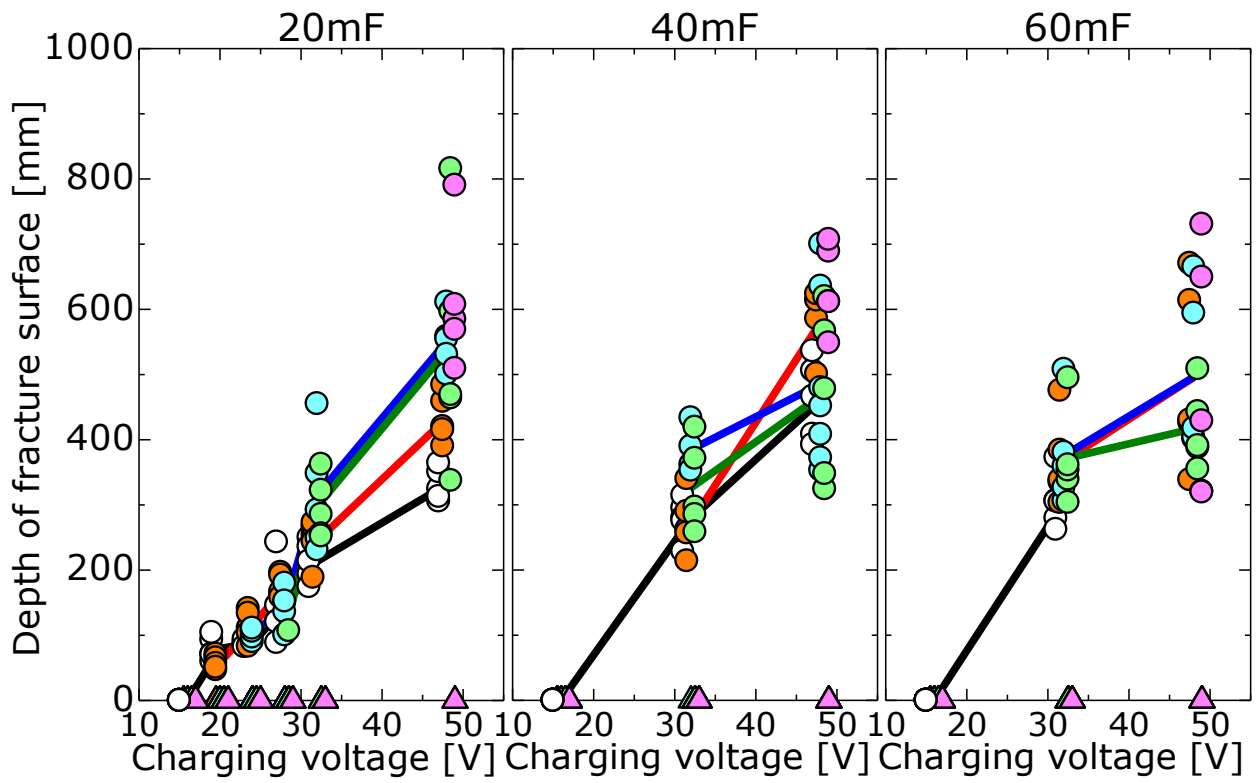


Fig.5-9 Influence of charging voltage on depth of fracture surface

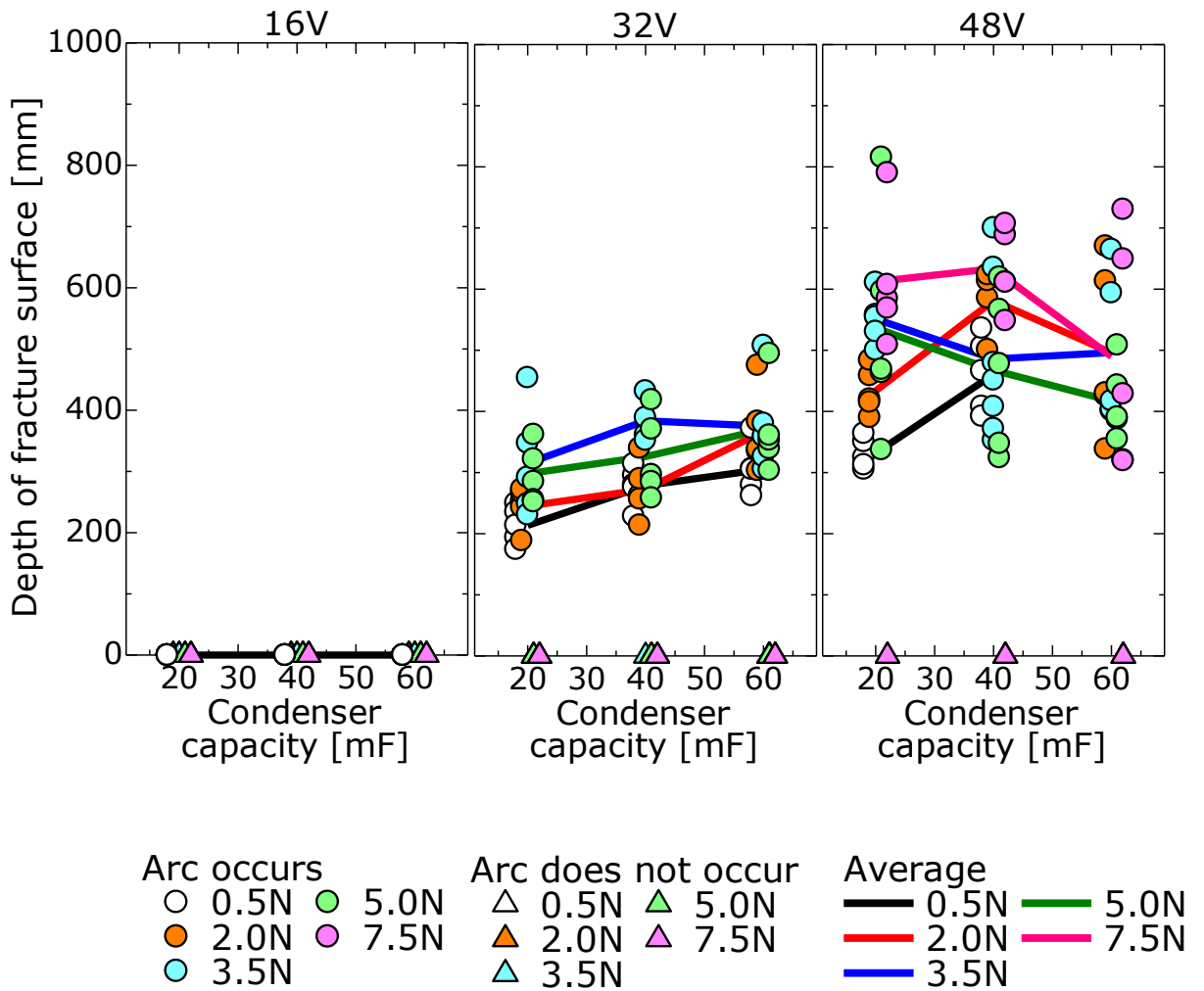
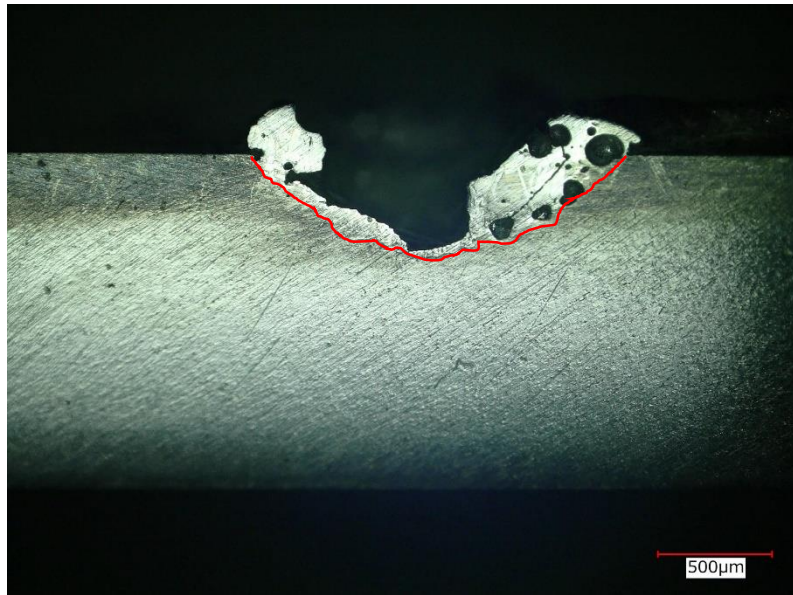


Fig.5-10 Influence of condenser capacity on depth of fracture surface





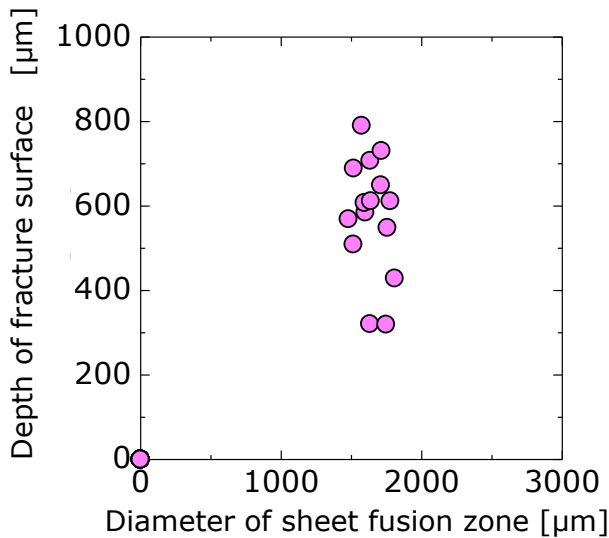
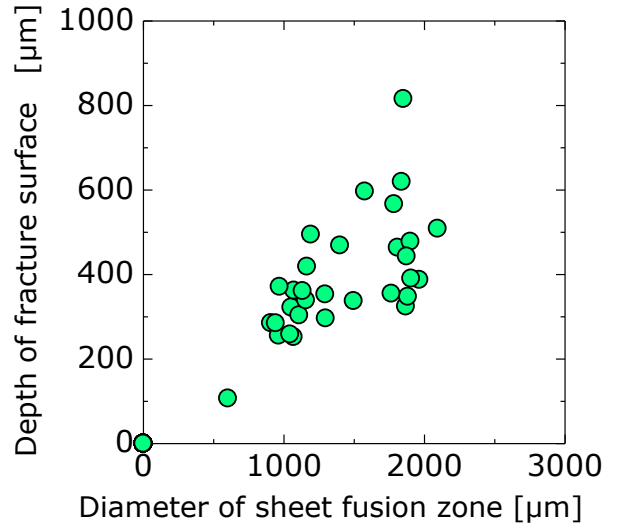
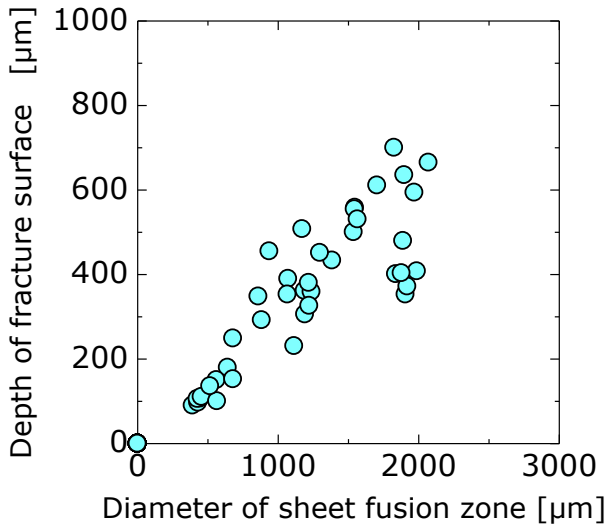
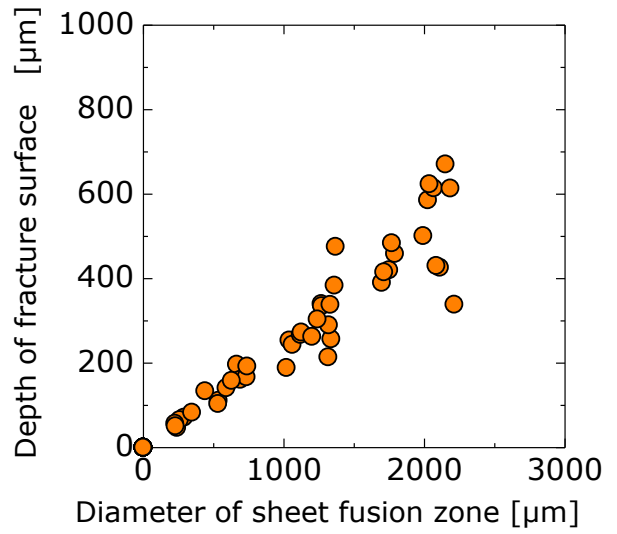
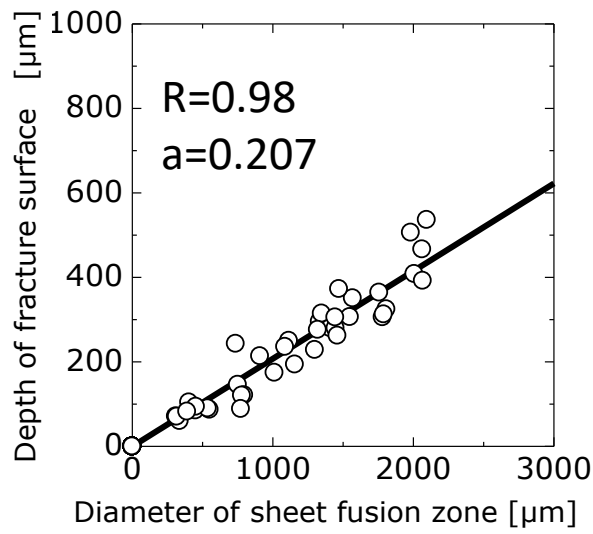
(a)  $F=3.5\text{N}$   $V=48\text{V}$   $C=20\text{mF}$



(b)  $F=3.5\text{N}$   $V=48\text{V}$   $C=60\text{mF}$

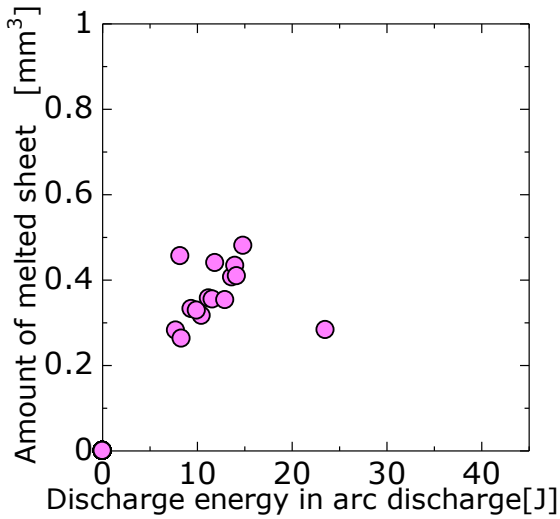
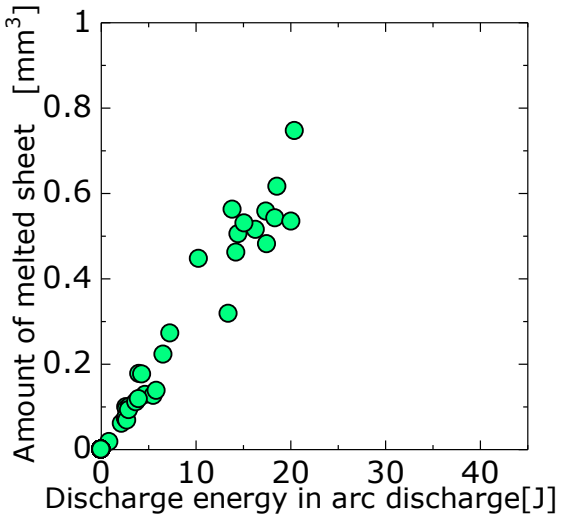
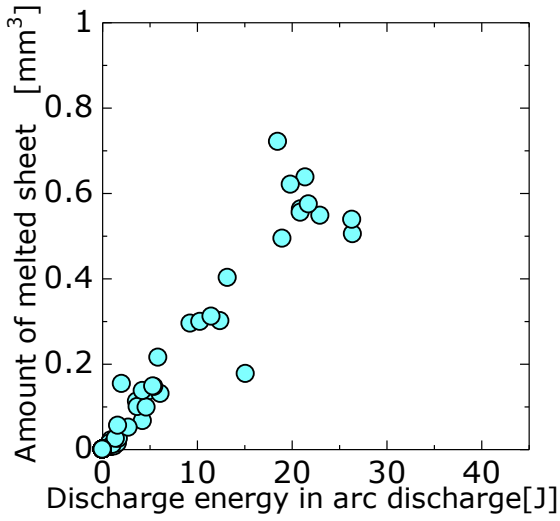
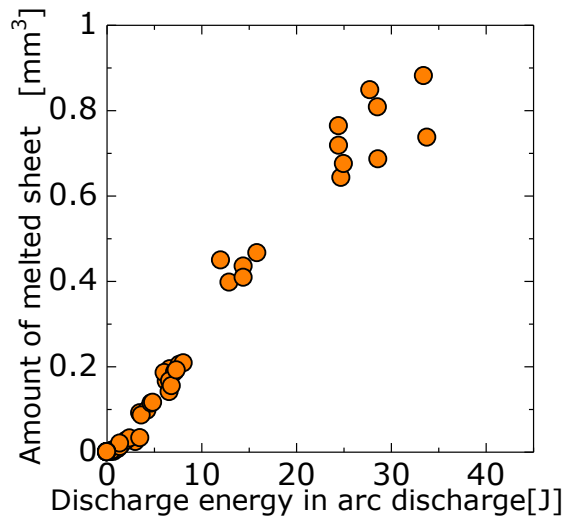
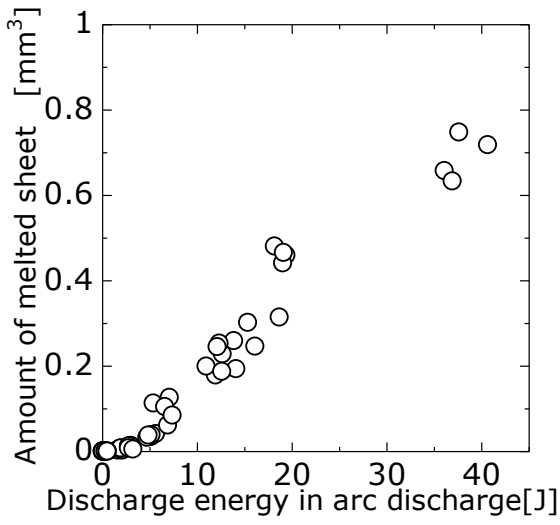
500µm

Fig.5-11 Result of cross section observation of each condenser capacity



- 0.5N
- 2.0N
- 3.5N
- 5.0N
- 7.5N

Fig.5-12 Influence diameter of sheet fusion zone on depth of fracture surface



- 0.5N
- 2.0N
- 3.5N
- 5.0N
- 7.5N

Fig.5-13 Influence of discharge energy in arc discharge on amount of melted sheet

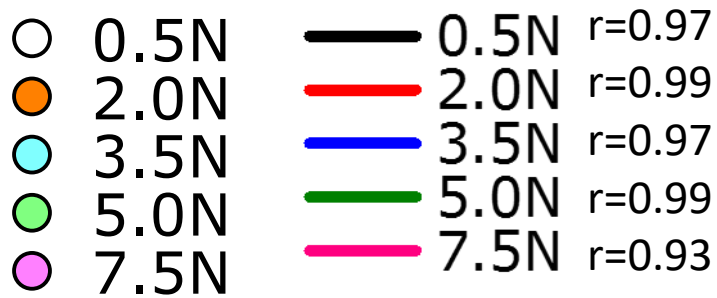
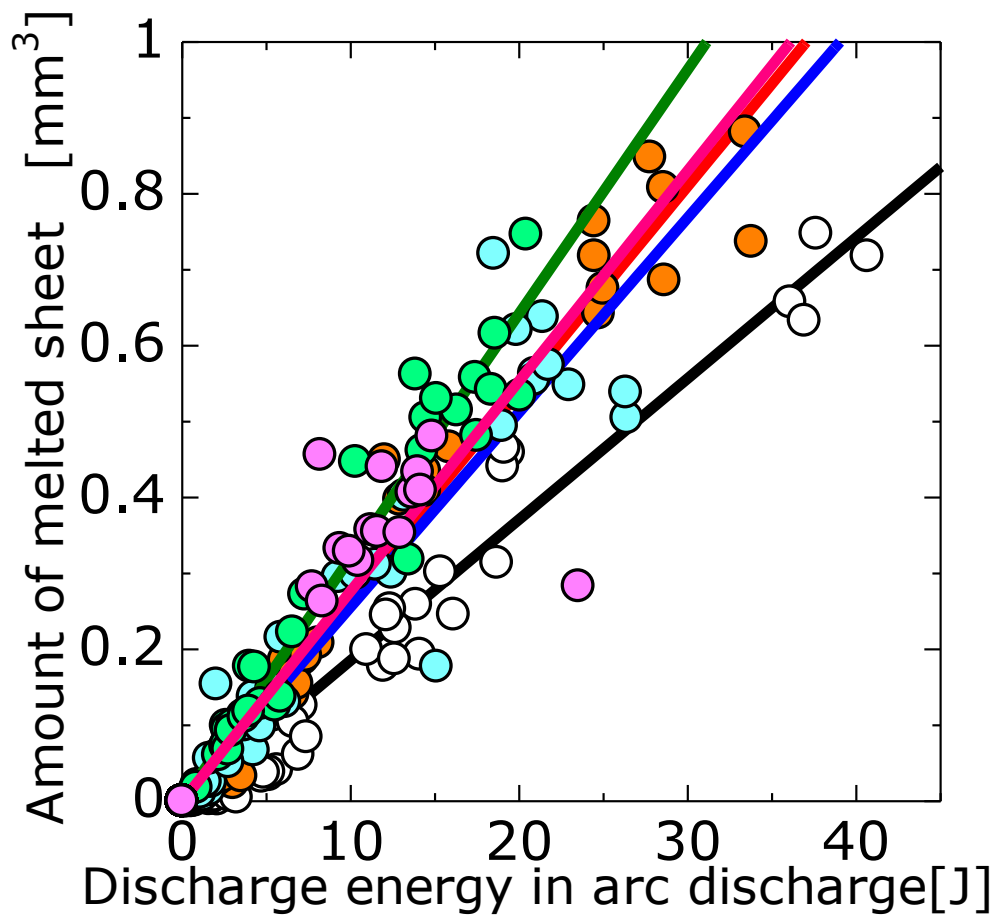


Fig.5-14 Influence of discharge energy in arc discharge on amount of melted sheet

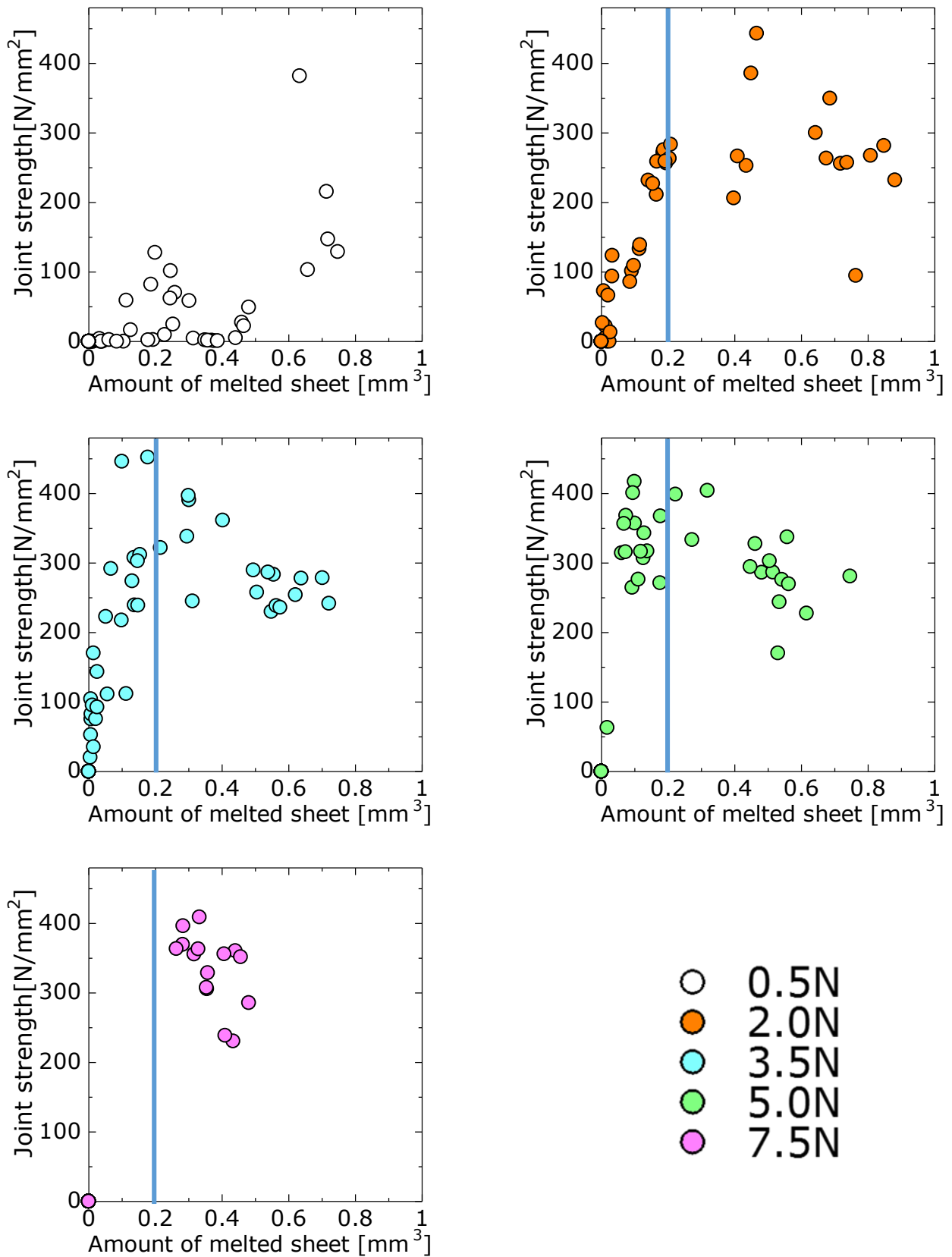


Fig.5-15 Influence of amount of melted sheet on joint strength