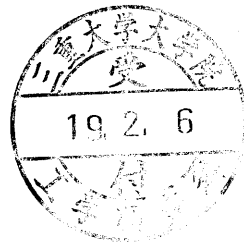


平成 18 年度 修士論文

アシストガスを用いないレーザー切断の限界切断速度
におよぼす焦点外しの影響



三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻
水越 健一

目次

| | | |
|-------|------------------------|--------|
| 第 1 章 | 緒言 | ・・・ 1 |
| 第 2 章 | 実験装置および実験方法 | |
| 2-1 | 実験装置の構成 | ・・・ 3 |
| 2-2 | 供試材および実験方法 | ・・・ 3 |
| 2-3 | レンズ焦点位置の確認 | ・・・ 4 |
| 第 3 章 | 限界切断速度におよぼす焦点外しの影響 | |
| 3-1 | 限界切断速度におよぼす焦点外しの影響 | ・・・ 5 |
| 3-2 | レーザの回折限界について | ・・・ 6 |
| 第 4 章 | 切断カーブ形状におよぼす焦点外しの影響 | |
| 4-1 | 平均カーブ幅について | ・・・ 8 |
| 4-2 | カーブ断面形状について | ・・・ 9 |
| 第 5 章 | 焦点外しの意味 | |
| 5-1 | 溶融領域と除去領域の関係 | ・・・ 12 |
| 5-2 | ピアッシング可否 | ・・・ 13 |
| 5-3 | ピアッシングに焦点外し距離が与える影響の検討 | ・・・ 14 |
| 5-4 | ドラグライン流れの検討 | ・・・ 15 |
| 5-5 | 焦点外しの意味 | ・・・ 17 |
| 第 6 章 | 結言 | ・・・ 19 |

参考文献

謝辞

第1章 緒言

被加工材にレーザを照射するとエネルギーの一部が被加工材に吸収され、熱エネルギーに変化する。金属材料のレーザ切断では、その熱を利用した加熱、溶融、蒸発、除去が行われている。装置自体が比較的高価であるにも関わらず、レーザを用いた板金加工の分野に広く普及しており、レーザ切断の長所として、1) 熱変形が極めて小さく切断精度が向上する。変形しやすい薄板の精密切断に適している、2) レーザ照射によって溶けた部分だけを除去するため、切断幅がレーザの集光径とほぼ同じ微小な幅で切断できる、3) 高いエネルギー密度を照射する加工のため、溶融および除去が迅速で、従来の切断法に比べて切断速度が速いうえに熱影響が少ない、4) 非接触加工であるため、刃の交換などは存在せず、レンズやミラー等の消耗部の劣化による交換頻度は接触除去加工法に比べて低い、5) 切断部の酸化が少ない。特に無酸素切断の場合、切断のまま使用可能である。つまり、切断後の仕上げ加工は省略可能である、6) 光学系を利用しているため、加工時の制御が容易である。そのためコンピュータとの接続性がよい、等が挙げられる。

金属材料のレーザ切断で、加熱溶融された金属はアシストガスによって除去される。アシストガスはガスホースを通して切断部付近に供給され、ガスノズルから噴射する。ここで問題となっているのは、ガスノズルが被加工材から数 mm の位置に据えなければならない点である。本来レーザビームによる被加工材への入熱は距離に依らない。しかし、レーザ切断では、被加工材付近にガスノズルの搬送を考慮する必要があり、レーザ切断の自由度を著しく阻害する主な要因となっている。レーザ発振器から照射されたビームを制御された反射ミラーによって加工部へ直接送るリモートレーザ技術があるが、これを切断加工に適用すると、距離の影響を受けにくい切断加工が可能になる可能性がある。しかし、その加工法では溶融金属の除去という課題が残る。そこで、本研究室では、溶融金属の除去にアシストガスではなく被加工材裏面に取り付けられた真空容器の負圧を用いた新加工法を検討している。この加工法ではガスの供給とガス噴出用のノズルが不要となり、レーザ発射口と被加工材との距離を長くとることができるため、リモ

ートレーザを切断に適用すると従来のレーザ加工機による切断と異なる高い自由度のレーザ切断を実現できる。本研究室ではこのアシストガスを用いないレーザ切断が過去の研究によって切断可能であることを明らかにしている⁽¹⁾。しかし、これは焦点を被加工材表面にあわせた状態 (Defocus length=0mm) の結果で焦点外し距離の影響を示す十分なデータとは言えない。通常のアシストガスを用いたレーザ切断では、焦点距離を被加工材表面から離れる方向に若干外すと切断性が向上するとされているが、アシストガスを用いない切断法における影響は明らかになっていない。また、焦点をある程度外した状態でも切断可能であれば、平面ではなく、ガスノズルがあった場合には対応しづらい曲面を加工することも可能であることを示し、リモートレーザによる切断の優位性が増す。

本研究では溶融金属の除去に真空容器内の負圧を用いるアシストガスを用いないレーザ切断を行った際の、レーザ集光レンズの焦点外し距離:DF(Defocus length)が切断結果に与える影響を検討する。1kW 定格で切断を行ったとき、切断速度が増加すると被加工材へ投入されるレーザ入熱は減少し、やがて入熱不足で切断できなくなる。そこで、加工性の観点から切断を行った際の加工可能な最大の切断速度(限界切断速度)へ焦点外し距離が与える影響を求める。切断加工は、加工材の分離を目的とするが、製品品質を考慮すると、切断カーフの断面形状の直線性を実現することがより望ましい。また、カーフ幅、除去金属量はコスト、加工精度にも影響し、実用においては重視される。アシストガスを用いた場合の切断と用いない場合の切断を実施した際の切断カーフ断面写真を Fig.1-1 に示す。これらの断面性状より、アシストガスを用いた場合は、切断後のカーフ断面形状が平行に近く、良好な状態といえる。

本研究で検討する切断方法においても、実用化の可能性を示すためには切断の可否とともに、切断カーフ形状を検討する必要がある。よって、本研究では切断における切断カーフの形状と、切断条件がおよぼす切断カーフ形成への影響を検討する。

第2章 実験装置および実験方法

2-1 実験装置の構成

本研究で使用したレーザ切断装置の構成を Fig.2-1 に示す。レーザ発振器は、定格出力：1kW、波長：10.6 μ m、ビーム径：20mm、連続発振型の炭酸ガスレーザ発振器（アマダ社製 OLC-1000P）を用いた。発振されたレーザ光は焦点距離：127mm、254mm、508mm の3種類の ZnSe 製集光レンズによって集光され、被加工材表面に照射される。次に真空容器の装置図面を Fig.2-2 に示す。切断の際は真空容器開口部を試験片で塞ぎ、容器に接続された排気速度：240l/min、直結型油回転真空ポンプ（アルバック機工社製 GLD-201A）によって容器内を排気し、その際に発生する負圧により熔融金属を除去する。レーザ集光レンズはレンズホルダーに取り付け、焦点外し距離はレンズホルダー台上のスケール付ガイドを用いて調整した。レーザ発振器とレンズホルダーの間にレーザ遮断装置を設置した。遮断装置には下向き 45° の角度でモリブデン製の反射鏡が取り付けられており、圧搾空気で作動する駆動シリンダーにより上下に可動する。駆動シリンダーの上下方向は時間設定器によって制御する。また、真空容器はコンピュータによって制御された、有効ストローク 500mm、分解能 0.01mm の電動スライダ（オリエンタルモータ社製 EZ limo EZHS6C-50）の上部に取り付けられ、レーザ光の照射に同期して左右に可動する。

2-2 供試材および実験方法

供試材として、ステンレス鋼板 JIS SUS304（板厚 0.8 , 1.0 , 1.2mm）を用いた。試験片は 39mm×300mm の矩形とした。

本研究においては以下の条件で切断実験を行った。焦点外し距離は、ピアッシング実験と同様に試験片表面で焦点が結ばれている状態を焦点外し無し（DF=0）とし、試験片から焦点位置が遠ざかる方向を正方向（+）、反対に試験片内部に焦点位置が潜り込む方向を負方向（-）と定めた。実験条件を以下に示す。

| | | |
|---------|-----|----------------------|
| レーザー出力 | ・・・ | 1000 [W] (一定) |
| ピッシング時間 | ・・・ | 1.0 [sec] (一定) |
| 切断速度 | ・・・ | 限界切断速度近傍 [mm/s] |
| 材質 | ・・・ | JIS SUS304 |
| 板厚 | ・・・ | 0.8 , 1.0 , 1.2 [mm] |
| 焦点距離 | ・・・ | 127 , 254 , 508 [mm] |
| 焦点外し距離 | ・・・ | +1 ~ -3 (127mm) |
| | ・・・ | +6 ~ -14 (254mm) |
| | ・・・ | +30 ~ -70 (508mm) |

2-3 レンズ焦点位置の確認

レーザー出力 150[W]、照射時間 1.0[sec]で板厚 2.0mm のアクリル板にレーザーを照射し、蒸発によってできるアクリル穴の直径を計測した。また、繰り返し数は 3 回で試験を行った。レンズ焦点距離と穴径の関係を Fig.2-3 に示す。グラフ上の点は各穴径の計測値を示し、また焦点外し正成分、負成分それぞれにおける計測値から最小自乗法を用いて近似直線を求めた。本研究では穴径の平均値が最小値を示す位置を焦点位置 (DF=0mm) とした。

第3章 限界切断速度におよぼす焦点外しの影響

3-1 限界切断速度におよぼす焦点外しの影響

レーザービームはレンズを通して集光され、レンズ焦点においては、次式で示す回折限界

$$r_0 = \frac{2M^2\lambda f}{\pi D}$$

まで集光されるが、焦点のビーム径はゼロにならない。一方、焦点から離れた位置におけるビーム径は、ほぼ直円錐と考えられるので、本研究では、焦点位置における回折限界を考慮して、レーザービーム全体を次の双曲線として近似することにする。

$$r^2 - \left(\frac{\lambda}{\pi r_0}\right)^2 z^2 = r_0^2$$

$f=127\text{mm}$ 、 $f=254\text{mm}$ および $f=508\text{mm}$ における回折ビーム径を Fig. 3-1 に示す。実験装置仕様から、ただし、 $M^2=1.5$ ，レンズに入るビーム径： $D=20\text{mm}$ 、炭酸ガスレーザーの波長： $\lambda=10.6\mu\text{m}$ とした。被加工材表面に照射されるビーム径は焦点外しなし ($z=DF=0\text{mm}$) で最も小さくなる事がわかる。

また、レーザー切断は熱切断法であり、切断速度を増加させていくと被加工材単位長さ当たりに投入されるレーザー入熱が減少し、ある切断速度以上では入熱不足のため切断が行われなくなる。例として $f=254\text{mm}$ の集光レンズ、SUS304、板厚 1.0mm 、焦点外し距離 0mm で切断を行った場合の切断速度と切断距離の関係を Fig. 3-2 に示す。切断速度 26mm/s では切断距離は 39mm であるが、切断速度 27mm/s では切断距離は急激に減少する。このように切断距離が極端に減少した場合は切断不可とみなした。したがって、この切断条件の場合の切断可能な最大速度は 26mm/s であり、これを限界切断速度と呼ぶことにする。焦点距離、切断速度を変化させ 3 種類の供試材について切断試験を実施した結果をレンズ焦点距離毎にそれぞれ Fig. 3-3-1～Fig. 3-3-3 に示す。切断可否の境界は切断条件ごとに異なった。

この切断可否結果から、限界切断速度を求め、焦点外しと限界切断速度の関係を Fig. 3-4 に示す。焦点外しなし ($DF=0\text{mm}$) に対して、負の焦点外しを適用すると限界切断速度が増大した。この傾向はレンズ焦点距離 127mm レンズの場合には顕著である。 $f=254\text{mm}$ レンズでも同様の傾向が認められるものの、 $f=127\text{mm}$ レンズほど顕著ではない。

f=508mm のレンズでは、SUS304 : 1.2mm のように焦点外し量なしで切断速度が小さい場合にのみ焦点外しの適用による限界切断速度の増大が認められる。焦点外し距離を更に増加すると限界切断速度は減少する。限界切断速度が極大になる焦点外し距離は f=127mm レンズで DF=-1mm、f=254mm のレンズでは DF=-5mm、f=508mm のレンズでは DF=-15mm である。また、限界切断速度が焦点外しなしの場合とほぼ同じになる焦点外し量は、f=127mm レンズで DF=-2mm、f=254mm のレンズでは DF=-8mm、f=508mm のレンズでは DF=-30mm である。焦点外し量が正の場合には、全ての集光レンズにおいて限界切断速度が急激に減少した。板厚と限界切断速度の関係を Fig. 3-5 に示す。集光レンズが同一の場合、限界切断速度は板厚の増加に伴い減少する。

次に、焦点を外すことによる限界切断速度の影響を知見するため、供試材板厚ごとの焦点外し距離と限界切断速度の関係を Fig. 3-6 に示す。508mm レンズを他の集光レンズと比較すると切断可能な焦点外しの範囲が広く、また限界切断速度の増減の幅が小さいことが分かる。焦点外しを大きく行ったとしても DF=0 における限界切断速度と同等の切断速度で加工可能という結果は、焦点距離がより長い集光レンズを用いることで、遠隔レーザ切断や曲面の切断への適用を可能とする可能性を持つことを示す。

3-2 レーザの放射束密度について

熱伝導の観点より、レーザ入熱領域が小さいほど切断性が向上し、限界切断速度が増加すると考えられる。Fig. 3-1 より、限界切断速度が極大を示す焦点外し量ではレーザ照射面積が大きくなっていることが分かる。また、本実験ではレーザ出力を 1[kW] 一定としているため、被加工材表面へ投入されるエネルギー密度は切断速度、焦点外しから決定される照射ビーム径によって決定される。本研究では、被加工材へのレーザ入熱が照射ビーム径から板厚方向へのびる円柱形の領域へ行われると仮定し、以下の式を用いて放射束密度[kW/mm³]とした。

$$\text{放射束密度}[kW/mm^3] = \frac{\text{レーザ出力}[kW]}{\text{放射束体積}[mm^3]}$$

放射束密度が限界切断速度に与える影響を供試材ごとに Fig. 3-7 に示す。グラフでは、焦点外し無しの点を起点として、黒点の方向へは順次進むごとに正の焦点外しが大きい切断条件における限界切断速度であることを示し、白点は負の焦点外しである。

両軸に常用対数をとると、いずれの供試材において、放射束密度の増大に伴い、限界切断速度はあるバンドに乗りながら、増加傾向を示す。レーザービームは回折限界を示す式より、レンズ焦点距離が小さい方がより強く集光される。本実験ではレーザー出力は1kWで一定なので、放射束密度はレーザービーム径が小さいほど高くなる。従って、限界切断速度の増加は単純な放射束密度の高さによって整理でき、放射束密度が高いほど限界切断速度は増加すると考えられる。しかし、同じ放射束密度でも負の焦点外しを行うことで、他の焦点外し条件と比較して限界切断速度が最も速くなることが分かる。

以上より、負の焦点外し条件で行う切断は焦点外しのない状態と比較して、レーザーの集光ビーム径が最小になっておらず、レーザービームのエネルギー密度が大幅に低くなるにもかかわらず限界切断速度が最も速くなる。さらに、焦点外しの正負によってカーフ幅の変化の挙動が異なる。限界切断速度の増加にはレンズ焦点距離、焦点外し距離が影響を与えており、さらに試験片への放射束密度の増大によって限界切断速度が増加する。

第4章 切断カーフ形状と焦点外しの関係

4-1 平均カーフ幅について

本研究では上部および下部の切断溝（カーフ）幅を Fig.4-1 に示すように光学顕微鏡とマイクロメータ、デジタルカウンタ付きステージを用いて切断溝の2次元座標を測定し、上部カーフ幅、下部カーフ幅の平均をとったものを平均カーフ幅とした。

前述した限界速度で切断したカーフ溝について、焦点外しに伴うカーフ平均幅の変化を Fig.4-2 に示す。 $f=127\text{mm}$ 、 $f=254\text{mm}$ レンズでは焦点外しがある値で平均カーフ幅が極小になる。ただし、同図に示したカーフ幅はそれぞれの焦点外しにおける限界切断速度における結果であり、平均カーフ幅の減少は切断速度の増加に伴う単位長さ当たり投入されるエネルギー入熱の減少によるものということも考えられる。そのため、各切断条件の影響を明らかにするために、切断速度、焦点外しを同一にした場合の平均カーフ幅の変化をさらに検討した。

切断速度を各条件で同一にし、被加工材に投入されるエネルギーを一定にそろえた場合の焦点外し距離と平均カーフ幅の関係を Fig.4-3 に示す。グラフより $f=254\text{mm}$ 、 $f=508\text{mm}$ レンズでは、焦点外し距離がある値で平均カーフ幅が最小値をとる。 $f=127\text{mm}$ レンズについても、同様の傾向が認められるが顕著ではない。カーフ幅はレーザ照射によって融点以上に加熱、熔融した領域が除去されて形成されるが、この領域の平均幅はレーザ集光を不十分にしておいてカーフの両側も同時に加熱した方が結果としては小さくなっている。この現象は、カーフの形成が熱伝導の観点からのみでは明らかに出来ないことを示唆している。さらに、前章における限界切断速度を求める実験結果同様に焦点外しの正負によって平均カーフ幅の変化の挙動が全く異なっている。

また、切断速度の変化によるレーザ入熱が平均カーフ幅に与える影響を明らかにするために限界切断速度を100%としてその50%、33%の切断速度で切断実験を実施した。切断速度の変化と平均カーフ幅の関係を Fig.4-4-1～Fig.4-4-3 に示す。この実験では集光レンズ、焦点外し条件ごとに平均カーフ幅の変化の傾向が異なるという結果を得た。 $f=127\text{mm}$ 、 $f=508\text{mm}$ レンズでは切断速度が遅くなり、試験片へのレーザ入熱が増えるごとに平均カーフ幅が増加するが、 $f=254\text{mm}$ レンズでは切断速度が限界切断速度の50%で平均カーフ幅が極小を示し、33%では再び平均カーフ幅は増加した。また、 $f=508\text{mm}$ レンズでは焦点外し距離ごとに切断速度の影響が異なり、 $DF=-15\text{mm}$ では $f=254\text{mm}$ レンズ同様切断速度が遅くなることで平

均カーフ幅が減少した。通常の切断では、カーフ幅は被加工材へ投入されるレーザー入熱が増大するほど溶融領域が拡がり、除去されていると考えられる。しかし、切断速度が半分になり、エネルギー入熱量が倍増したにもかかわらず平均カーフ幅が減少したことから、 $f=254\text{mm}$ レンズの結果は切断カーフの形成に熱伝導以外の影響が働くことを示唆していると考えられる。

レンズ焦点距離が平均カーフ幅へ与える影響を各集光レンズにおいて、焦点外しが正、 $DF=0$ 、限界切断速度、焦点外しが大きく負となる条件を取り出し、Fig.4-5 に示す。すべてのグラフにおいてレンズ焦点距離の増加に伴って平均カーフ幅が増加した。集光レンズごとの違いは主にレーザーの照射ビーム径なので、この結果はレーザーの照射ビーム径によって平均カーフ幅が変化することを示すものと考えられる。

次に、前章で示した放射束密度が平均カーフ幅へ与える影響を板厚ごとに分けたものを Fig.4-6-1～Fig.4-6-3 に示す。各グラフにおいて、レンズ焦点距離の増加に伴い平均カーフ幅がより大きくなるのが分かる。また、 $f=127\text{mm}$ レンズでは放射束密度の変化の幅が最も大きいにもかかわらず、他の集光レンズ条件による結果と比較して変化の幅は小さい。これは、加工材における溶融金属の表面張力など、不圧によって溶融金属を除去する際に最低限必要なカーフ幅が存在するためと考えられる。放射束密度が低下すると平均カーフ幅が増加傾向を示すのは、焦点を外すことにより、レーザー入射領域が増加したためと考えられる。

限界切断速度と平均カーフ幅の関係を Fig.4-7 に示す。グラフから、平均カーフ幅の減少に伴って限界切断速度が増加していることが読み取れる。これはレーザーを強く集光することで溶融領域は小さくなり、それが負圧によって除去できるのならば、切断に最低限必要な熱量は小さくなり、限界切断速度の増加に寄与すると考えられる。

以上より、レンズ焦点距離が小さくなる、放射束密度が大きくなるほど平均カーフ幅は狭くなり、限界切断速度はカーフ平均幅が狭いほど速くなることが分かった。

4-2 カーフ断面形状について

本項では焦点外し条件が切断カーフ形状の形成機構にどのような影響をおよぼすか検討するため、切断カーフ断面を観察した。計測条件は実験条件全体からそれぞれのレンズごとに焦点外し距離が正方向、焦点外しなし、限界切断速度が極大を示す点、大きく負方向の4条件で、カーフ断面形状を計測した結果を Fig.4-8-1～Fig.4-8-9 に示す。これらは紙面左側からレーザーが照射され、切断方向は手前から奥の方向として表示した。グラフ上の太線は計測

した断面形状を示し、細線は集光されたレーザーのビーム軌跡を示す。細線については後に詳しく述べる。

カーブ断面形状は集光レンズで特徴が異なる。本研究では被加工部材を鉛直方向に立て、そこへ垂直にレーザーを照射している。Fig.4-8-1～Fig.4-8-3より、 $f=127\text{mm}$ レンズによる切断では、全体的にカーブ幅が狭く上方に傾く。Fig.4-8-4～Fig.4-8-6、 $f=254\text{mm}$ レンズではカーブの傾き、流れの方向は $f=127\text{mm}$ レンズと同様だが、カーブ中ほどで大きなくびれが見られる。また、表面側のカーブ幅（上部カーブ幅）と裏面側のカーブ幅（下部カーブ幅）と比較したところ、他の集光レンズの傾向とは異なり、上部カーブ幅が狭くなっている。Fig.4-8-7～Fig.4-8-9、 $f=508\text{mm}$ レンズではカーブの大きな傾きは認められず、上部カーブ幅が大きく開き、下部カーブ幅へ向けて狭くなる形状をとる。焦点外し条件で比較すると、各集光レンズにおいて形状に大きな差異はない。本項で行った測定条件のうち、焦点外し距離が $f=127\text{mm}$ レンズでは $DF=-1\text{mm}$ 、 $f=254\text{mm}$ レンズでは $DF=-4\text{mm}$ 、 $f=508\text{mm}$ レンズでは $DF=-15\text{mm}$ において、 $DF=0$ による切断断面と比較したところ、カーブ断面形状が全体的により狭くなった。これらは最も限界切断速度が速くなる焦点外し条件である。また焦点外しを正方向に外した場合、および大きく負方向に外した条件では焦点外しを行わない場合よりもカーブ断面形状は大きくなった。

また、Fig.4-8-1～Fig.4-8-9 ではカーブ断面形状に前章の回折限界の計算式から導出されるレーザービーム径を細線で示した。いずれの切断条件でも、ビーム径と実際のカーブ形状は異なる。レーザーが直接照射されていない領域の金属が除去されているのは、熔融金属除去の際にレーザー入熱以外の作用が働いているためと考えられる。従って、単純なビーム径からのみでは下部カーブ幅について検討することができないと考えられるため、Fig.4-9-1～Fig.4-9-3 でレーザー入熱のビーム径による影響が最も強く働くと考えられる上部カーブ幅とその被加工材表面における入射ビーム径の関係を示す。最もビーム径が小さくなる $DF=0\text{mm}$ では上部カーブ幅は比較的大きな値を示すが、限界切断速度が極大を示す焦点外し条件では、入射ビーム径と上部カーブ幅がほぼ等しくなる傾向が $f=127\text{mm}$ 、 $f=254\text{mm}$ 、 $f=508\text{mm}$ レンズすべてにおいて見られた。これらの上部カーブ幅は限界切断速度における計測値である。限界切断速度が極大を示す切断条件では単位長さ当たり投入されるエネルギー入熱が小さくなる。そのため、限界切断速度が極大を示す点において上部カーブ幅が最も狭くなると考えられる。そして、焦点を負側に外すことで限界切断速度が極大を示すことについては、上部カーブ幅と等しい幅のレーザービームが照射されることが熔融金属の除去の段階で有利な影響

を与えていると考えられる。同様に Fig.4-10-1～Fig.4-10-3 では加工材裏面におけるレーザービーム径と下部カーフ幅の関係を示す。f=127mm , f=254mm ではビーム径よりも下部カーフ幅は大きくなった。レーザーの入射経路よりも金属除去領域が大きいという結果を得たが、これは、加工材上部にて溶融した金属が除去される過程で溶融金属の持つ熱エネルギーが加工材下部の金属へ伝熱し、結果として加工材下部ではレーザー入熱と上部における溶融金属からの伝熱によって加工材上部よりも多くの金属が溶融除去されることが考えられる。一方、f=508mm レンズではビーム径の大小に関係なく、下部カーフ幅はほぼ一定になる。これは、レーザー入射径が大きいため、エネルギー密度が分散されたレーザーによる直接的な入射では加工材下部が融点に到達せず、溶融金属からの伝熱によってようやく溶融するため、溶融金属が除去可能な最低限のカーフ幅が形成されているものと考えられる。

第5章 焦点外しの意味

本研究において真空容器を用いたレーザー切断加工を実施した結果、焦点外しを行うことで限界切断速度が改善されることを明らかにした。本章では、主に被加工材断面の熔融領域の観察、ピアッシング実験、ドラグライン計測を行い、限界切断速度に与える焦点外しの影響を検討する。

5-1 熔融領域と除去領域の関係

これまで、切断時に加工材表面へ焦点を外したエネルギー密度の低い状態のレーザーを照射することで限界切断速度が改善されるという結果を得た。しかし、被加工材内部における熱輸送にフーリエの法則

$$\frac{q[W]}{A[m^2]} = -k \frac{dt[K]}{dx[m]}$$

を適用すると、焦点外しを行い単位面積当たりの投入エネルギーが低くなった状態で加工材裏面を熔融させるには、焦点外しを行わない加工よりもより広い領域を加熱する必要があることが分かる。しかし、最も被加工材裏面が融点に達する所要時間が短い条件であるはずの焦点外しを行わない加工より、より時間がかかると考えられる焦点を外した加工がより素早く切断できる。そのため、熔融金属除去の段階で、焦点外しを行うことが限界切断速度に有利な影響を与えている可能性が考えられる。また、4章で平均カーフ幅を計測した結果、限界切断速度が極大を示す焦点外し条件において平均カーフ幅は最小をとった。しかし、加工材表面へ入射されるビーム径は焦点外しを行うことで大きくなるため、熱的影響を考慮するとカーフ幅は大きくなるはずである。そのため、本項ではレーザービーム径がカーフ形状の決定に与える影響をさらに検討するために、カーフ断面を腐食し断面の観察を行い、カーフ形成の過程を検討する。計測する切断条件を以下に示す。

| | | |
|--------|------------|--------------------------|
| 供試材 | ・・・ SUS304 | 1.2mm |
| 切断速度 | ・・・ | 限界切断速度（各集光レンズ） |
| 計測位置 | ・・・ | ピアッシング穴から 10mm |
| 焦点外し距離 | ・・・ | +1, 0, -1, -3 (127mm) |
| | ・・・ | +4, 0, -5, -12 (254mm) |
| | ・・・ | +20, 0, -15, -70 (508mm) |

実験後、切断面を切り出し、#1200のエメリー研磨紙による研磨の後、液温 70℃の 18%HCL 溶液に 30 分浸け腐食を行った。

各実験条件における腐食後の切断面画像を Fig.5-1-1～Fig.5-1-3 に示す。もし、熔融金属が除去されず、被加工材に残留していれば腐食により判別することができるが、画像から熔融領域を認めることが出来なかった。これは、限界切断速度による切断では全ての熔融金属は除去され、熔融領域と除去領域が等しいことを示す。以上より、カーブ断面形状は熔融金属の残留は影響せず、レンズ焦点距離によって決定される事が分かった。

5-2 ピアッシング可否

レーザ切断における加工材への入熱は加工材の表面ではなく切断前面に対して入熱を行うことにより効果的に熱エネルギーが投入され切断が進行する。ピアッシングを行わず、切断を実施した場合、切断能力は極端に低下する。また、焦点外しを正、および負方向に大きく外した場合、切断開始時にピアッシングが行われず条件が認められ、ピアッシング不可の条件ではその後、切断されることは無かった。従って、切断過程のはじめに行われるピアッシングについても切断実験同様に焦点外しの影響を検討する必要がある。本項では、各条件がピアッシングの可否に与える影響を検討した。

真空容器を用いたピアッシングではレーザ入熱が不足している状態、もしくは焦点外しを行いエネルギー密度が低い状態で入射すると、熔融領域が裏面まで貫通しない。そのため、各焦点レンズ、照射時間におけるピアッシング可否を確認した。計測する実験条件を以下に示す。

| | | |
|----------|-----|--------------------------------|
| 集光レンズ | ・・・ | f=127, 254, 508 [mm] |
| レーザ出力 | ・・・ | 1 [kW] |
| 供試材 | ・・・ | SUS304 |
| 板厚 | ・・・ | 1.2 [mm] |
| ピアッシング時間 | ・・・ | 0.1 ～ 1.0 [sec] 0.1 [sec]刻み |

以上の実験条件におけるピアッシングの可否を Fig.5-2 に示す。f=127mm レンズでは他の焦点レンズと異なり、照射時間 0.1s でもピアッシングが可能となり、最も短い照射時間でピ

アッシング出来る焦点外し条件を確認することが出来なかった。しかし、最小ピアッシング時間が $DF=\pm 3\text{mm}$ 近傍から急激に遅くなり、全体の可否の分布は $DF=0$ を中心とした対称形になっていることから、 $DF=0$ で最もピアッシングの能力が高いと思われる。 $f=254\text{mm}$ レンズでは $DF=0$ と比較し、焦点が試験片裏面に合わせてある状態、 $DF=-1$ においてより短い時間でピアッシング可能であった。ピアッシングが可能な最も大きい焦点外し条件は $DF=+10$, $DF=-30$ である。可否の分布は $f=127\text{mm}$ レンズの結果と異なり、 $DF=0$ を中心とした対称形はとらず、負方向に大きく伸びた形をとった。 $f=508\text{mm}$ レンズも $f=254\text{mm}$ と同様に $DF=-1\text{mm}$ で最小ピアッシング時間が $f=508\text{mm}$ レンズ条件全体で最短をとる。可否の分布も、 $f=254\text{mm}$ レンズ同様、ピアッシング可能な最大な焦点外しが $DF=+15\text{mm}$, $DF=-70\text{mm}$ で $DF=0$ を中心とした対称形はとらず、結果として $f=127\text{mm}$ レンズが特異な結果となった。また、 $f=254\text{mm}$, $f=508\text{mm}$ レンズについては、最小ピアッシング時間の分布について、焦点外しが負側ではある程度外れていてもピアッシング可能で、反対に正側では急激に加工効率が悪化するという点が、前章で求めた限界切断速度と焦点外しの関係に似ている。

ピアッシングが短時間で行われるということは、熔融金属の除去がスムーズに実行可能であることを示し、焦点外しが負方向では大きく外しても切断可能で、正方向で急激に限界切断速度が減少することを定性的に示していると考えられる。例として、 $f=254\text{mm}$ レンズにおける $DF=+10$ と $DF=-10$ では、被加工材表面に照射されるビーム密度が等しいが、 $DF=-10$ の方がより速くピアッシングが進行する。しかし、負圧によるピアッシング過程では熔融金属が貫通するまで加工部では流体的作用などが働かず、最短ピアッシング時間はレーザー入熱のみが働いているはずである本実験ではレーザーの詳細な光学経路を観測することが出来なかったが、このピアッシング実験結果は試験片へ同じエネルギー密度でエネルギーを投入したとしても、熔融領域の深さ方向の拡大の速度が異なることを示し、焦点外しの違いによりエネルギー入熱の吸収効率が異なるということを開節的に示している。

5-3 ピアッシングに焦点外し距離が与える影響の検討

前項では負の焦点外しを行いレーザーのビーム密度が低い状態でピアッシングを行っても十分速い時間で熔融領域が加工材裏面まで貫通し、除去されることを確認した。本項ではピアッシングによる金属の熔融が裏面に到達する直前で終了した実験条件を用い、焦点外しが熔融領域へ与える影響を観察、検討した。計測条件として、 $f=254\text{mm}$ レンズ、 $DF=+10$, 0 ,

—1, —5, —10, —30 [mm] から、ピアッシング可否の境界を決定するピアッシング可、不可の 2 条件を断面腐食し、形状を観察した。

最小ピアッシング時間におけるピアッシング結果の断面腐食写真を Fig.5-3-1 に示す。DF=—30mm 以外の断面形状がよく似ていることが画像より分かる。ただし (DF=—5, 照射時間 0.6s)、(DF=0, 照射時間 0.7s) では、断面下部の形状が溶融領域をそのまま取り除いたような丸みを帯びた形状をとる。DF=—30mm では上部ピアッシング径が大きく開く形状を取った。また、これらの計測条件で溶融金属の残留は見られなかった。

次に溶融領域が貫通する直前の実験条件における条件を断面腐食し、観測された溶融領域を Fig.5-3-2 に示す。(DF=0mm, 照射時間 0.6s) は、加工材表面のレーザ照射点においてくぼみが見られた。被加工材表面へ照射されるビーム密度が最も高いためと考えられる。被加工材内部の溶融領域の形状は実験条件で比較しても大きな差異が認められない。また、(DF=—30mm, 照射時間 0.6s) では溶融領域にくびれが認められ、また加工材表面では広範囲が溶融していることが分かる。これは、大きな焦点外しによってビーム密度を低くした場合、加工材表面では広範囲が溶融するものの、ビームが大きく拡散しているため、ビーム外周部分のレーザ入熱は溶融深さの拡大に使用されず、ビーム中心部分のみ溶融深さの成長に使われる。その結果、溶融金属除去に最低限必要なレーザ入熱量が増加し、限界切断速度の減少の要因となっていると考えられる。

次に、焦点を外し放射束密度が異なる状態で溶融領域が時間ごとに拡大していく様子を Fig.5-3-3 に示す。(DF=0mm, 照射ビーム径 0.38mm) (DF=—10, 照射面積ビーム径 0.88mm) のように照射ビーム径に倍以上の違いがあるにもかかわらず、溶融領域の成長の様子に大きな差異は見られなかった。また、DF=—10 では加工材表面においては溶融面積が広がった。これは表面へのレーザ照射面積の違いによるものと思われるが、その差は大きくない。ピアッシングにおける溶融領域の拡大の過程は加工材の表面積への放射束密度のみではそのメカニズムを解明できないと考えられる。

5-4 ドラグライン流れの検討

切断中に収束されたレーザビームが切断面に照射されると加工材切断面が削り取られる形でドリリングが行われる。その際、切断速度が極端に遅いとドリリングが行われた後、レーザビームが貫通してしまいその分のレーザエネルギーが無駄になる。そのためエネルギーロスを抑えるためには、レーザが貫通しないレーザ入熱、切断速度にすることが望ましい。ただし、

本研究においてはレーザー入熱について、焦点外しによるレーザー入熱の分散という要因が加わる。また、過去の研究で、真空容器を用いたレーザー切断では切断済みの切断溝から空気が流入し、加工材表裏の圧力差が 20kPa を下回ると切断が行われなくなることが明らかになっている⁽¹⁾。実験条件の一部の切断終端部を Fig.5-4 に示す。切断終端部に残留する熔融金属の様子から、焦点外しが大きい状態で切断を行うとカーフの両側に金属が残っている事が分かる。これは焦点外しを行うことで加工材表面において広範囲が熔融除去する反面、入熱が分散するため熔融領域の深さ方向への拡大が焦点外しなしと比較して迅速に行われず、その結果、圧力差が小さくなる過程で熔融金属が残留してしまい、切断が終了してしまうと考えられる。つまり、収束したレーザー入熱によってドリリングを迅速に行い切断部断面（ドラグライン）流れを小さくすることで切断距離が増加すると考えられる。しかし、限界切断速度を求める実験では、焦点を外して入熱を分散させた方がより高速で切断できるという結果を得ている。そこで、本項では各切断条件におけるドラグラインを計測し、検討を行った。ドラグラインの形成には容器内外の圧力差が大きく影響を与えてしまうおそれがあるため、切断距離が 15mm に達したところで強制的にレーザー入熱を止め切断を中断した。比較的早い段階で切断を中断することにより、容器内の圧力差は各条件で近いものとなり、等しい切断過程として比較出来るとした。本項における実験条件を以下に示す。

| | | |
|--------|------------|---------------------------|
| 供試材 | ・・・ SUS304 | 1.2mm |
| 切断速度 | ・・・ | 限界切断速度（各集光レンズ） |
| | ・・・ | 24 [mm/s]一定（f=127mm） |
| | ・・・ | 17 [mm/s]一定（f=254mm） |
| | ・・・ | 11 [mm/s]一定（f=508mm） |
| 切断距離 | ・・・ | 15 [mm] |
| 焦点外し距離 | ・・・ | +1, 0, -1, -3（f=127mm） |
| | ・・・ | +4, 0, -5, -12（f=254mm） |
| | ・・・ | +20, 0, -15, -70（f=508mm） |

切断後、試験片を精密砥石切断機で切断終端部を切断方向に切断した。この境界部分を 4 章同様、マイクロメータ、デジタルカウンタ付顕微鏡を用いて計測した。

各切断条件において、限界切断速度条件下におけるドラグラインを Fig.5-5-1 ~ Fig.5-5-3

に、一定切断速度条件下で切断した場合のドラグラインを Fig.5-5-4 ~ Fig.5-5-6 に示す。レーザー光は紙面上側から照射され、切断方向は左から右方向で、中央部分の境界が切断終端部（ドラグライン）形状である。図より、限界切断速度が極大をしめす焦点外し距離におけるドラグラインの流れが他の焦点外し条件と比較して大きくなることはなく、（ $f=127\text{mm}$, $f=508\text{mm}$ レンズ：限界切断速度）と（ $f=254\text{mm}$ ：切断速度一定）では $DF=0$ よりも小さくなった。

$f=127\text{mm}$ レンズでは他の切断条件のドラグラインと比較して比較的流れが小さい。これは、前項のピアッシング実験より、焦点付近のレーザービームが他のレンズよりも強く集光され、ドリリングが素早く行われるためと思われる。 $f=254\text{mm}$, $f=508$ レンズでは焦点外し条件ごとにドラグラインの流れ方が大きく異なっており、限界切断速度が極大を示す焦点外し距離では比較的小さくなり、焦点を負方向に大きく外すことで大きくなるという結果を得た。また、正方向へ外しても焦点外しなしと比較して流れが小さくなることは無かった。これらの結果は、

照射ビーム径が小さい：ドラグライン流れが小さくなり、熔融金属除去効率が上昇し限界切断速度が増加する。

照射ビーム径が大きい：ドラグライン流れは大きくなり、熔融金属の除去効率が低下し、限界切断速度が減少傾向を示す。

という傾向を示していると考えられる。ただし、例外として限界切断速度が極大になる焦点外しを行った方がよりドラグラインが小さくなる結果を得たが、本研究で原因を明らかにすることは出来なかった。

5-5 焦点外しの意味

焦点外しを行うことによる熔融金属の除去機構の差異を Wall-focussing 効果に基づいて説明する。Fig.5-6 はレーザーの焦点外しと空孔形成の相互作用を模式的に示している⁽²⁾。焦点外しが負になる C 点では、表面が沸点に達し、その蒸発の反動力によって加工材表面の熔融融池に浅い空孔を生じたことを示す。表面において空孔が形成されると 1) 焦点への接近に伴う入射ビーム径の減少、2) 空孔内の Wall-focussing 効果により、ビーム強度が増大することが図から分かる。そのため、空孔形成が進行する。このとき空孔深さが増大することでレーザーの反射回数は増加し、その結果、ビーム吸収量は加速度的に増加し空孔形成はさらに進行する。以上が焦点外し負側の空孔の遷移機構である。一方、焦点外しが正側の場合、C 点

と同じ表面入射径である D 点においても浅い空孔が形成さるはずであるが、しかし、1)焦点から遠ざかるため入射ビーム径が増大する、2)Wall-focussing 効果が有効に働かない事が図から分かる。そのため、空孔内でレーザーの反射回数は減少し、ビームの吸収効率が下がってしまう。また、SUS304 の融点における CO₂ レーザのビームの反射効率が 87%であることも考慮すると、正負で同じ焦点外し距離で加工材へ入射を行ってもビーム吸収効率に差異が生じて溶融金属の除去に影響を与えるものと考えられる。ただし、本研究で用いる集光レンズでは集光されるレーザーの拡散の割合は小さいため、C 点と D 点のような反射角度の違いは影響しないと考えられる。従って、どちらの焦点外しを大きく行ったとしても切断可能であるのは、この Wall-focussing 効果によるものと考えられる。Fig.5-3-1 における (DF=-30mm, 照射時間 0.7s) ピアッシング断面形状を観察すると、(DF=0mm, 照射時間 0.6s) と比較して、上部カーフ幅が大きく開き、カーフ断面形状は大きく傾いている。そのため、カーフの傾きがおおきくなることで、Fig.5-6 の模式図より、焦点外しによって拡散されたレーザーはこの大きく開いたカーフ面への入射し、反射レーザーは深さ方向へ集中しつつ入射される。深さ方向への入熱の集中が行われることで、カーフ幅は増大するものの、深さ方向への溶融の拡大は進行し、その結果溶融金属が加工材裏面に到達し、切断が行われると思われる。

第6章 結言

アシストガスを用いないレーザ切断を焦点を外して実施した結果、以下の結果を得た。

- ①加工材表面において焦点を負方向に外して切断することで限界切断速度が増加する。平均カーフ幅は限界切断速度が極大を示す焦点外し条件で最も狭くなる。
- ②レーザ入射密度が大きくなることで限界切断速度は速くなり、平均カーフ幅は小さくなる。また、カーフ形状はレンズ焦点距離の影響を受け、レンズ焦点距離の増加に伴い平均カーフ幅は大きくなる。
- ③焦点を負方向に大きく外しても切断可能であるのは、**Wall-focussing** 効果によるものと考えられる。

参考文献

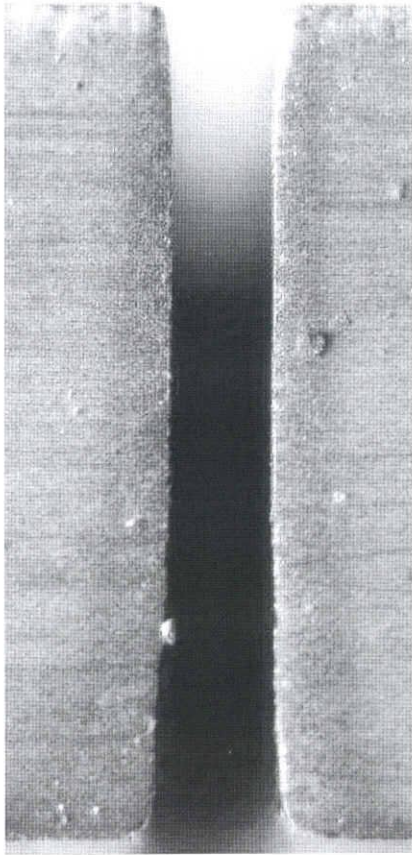
- 1) 平松 貴志 : アシストガスを用いないレーザー切断法の検討
(平成 17 年度 修士論文)

- 2) 荒田 吉明、ほか 3 名 : 溶接学会誌(1980), 49-10

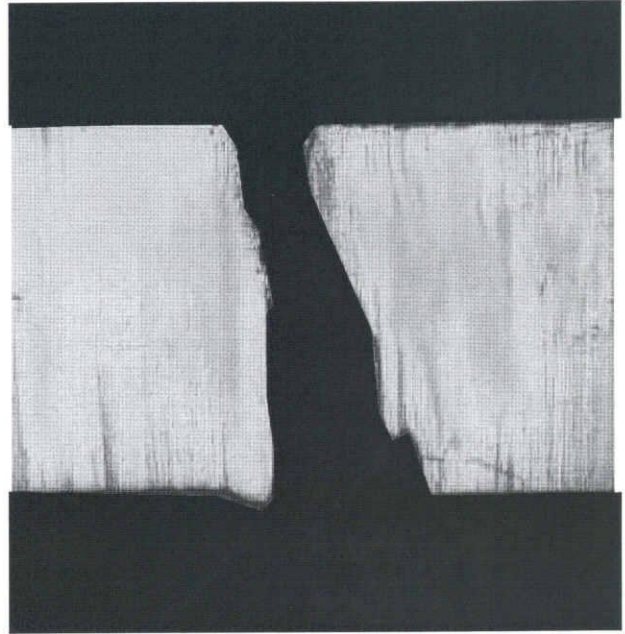
謝辞

本研究を進めるにあたり、終始懇切なご指導を賜りました三重大学工学部鈴木実平教授、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三重大学工学部平成 18 年度卒業の蒔田光明君との共同研究によるものです。ここに記してこれら諸氏に深く感謝致します。さらに本研究を遂行するにあたり多大なご協力を頂きました材料機能設計研究室の院生、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。



With O₂ assist gas



Without assist gas

Fig.1-1 Figure of kerf

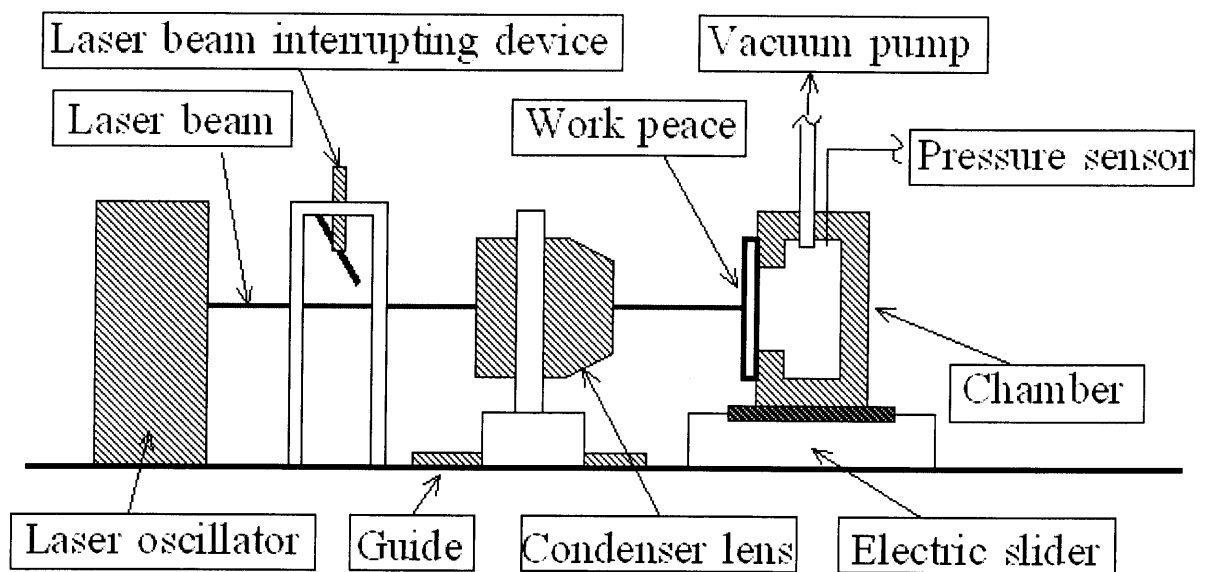
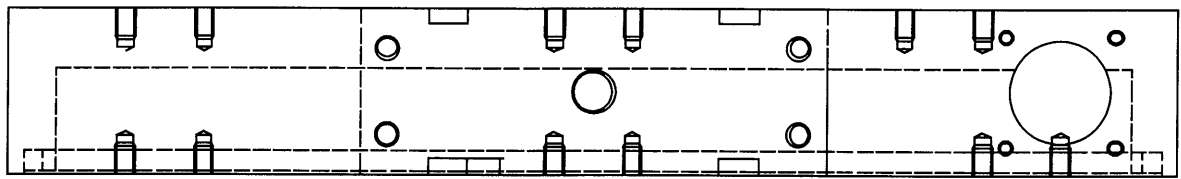
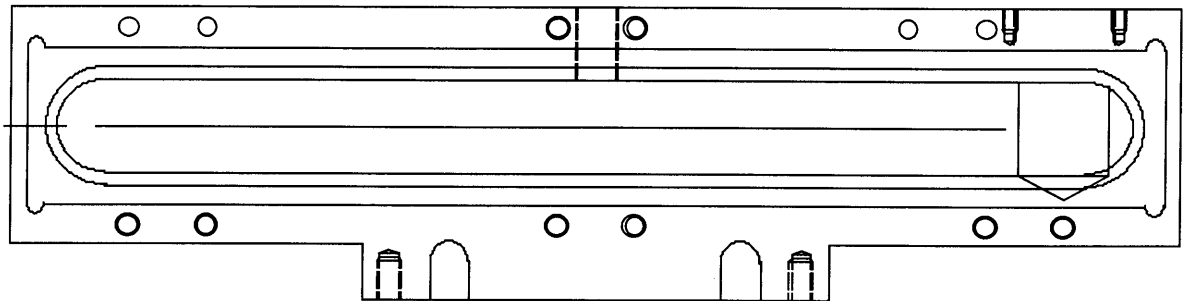


Fig.2-1 Laser cutting processing equipment



Top view



Front view

Fig.2-2 Schematic illustration of chamber

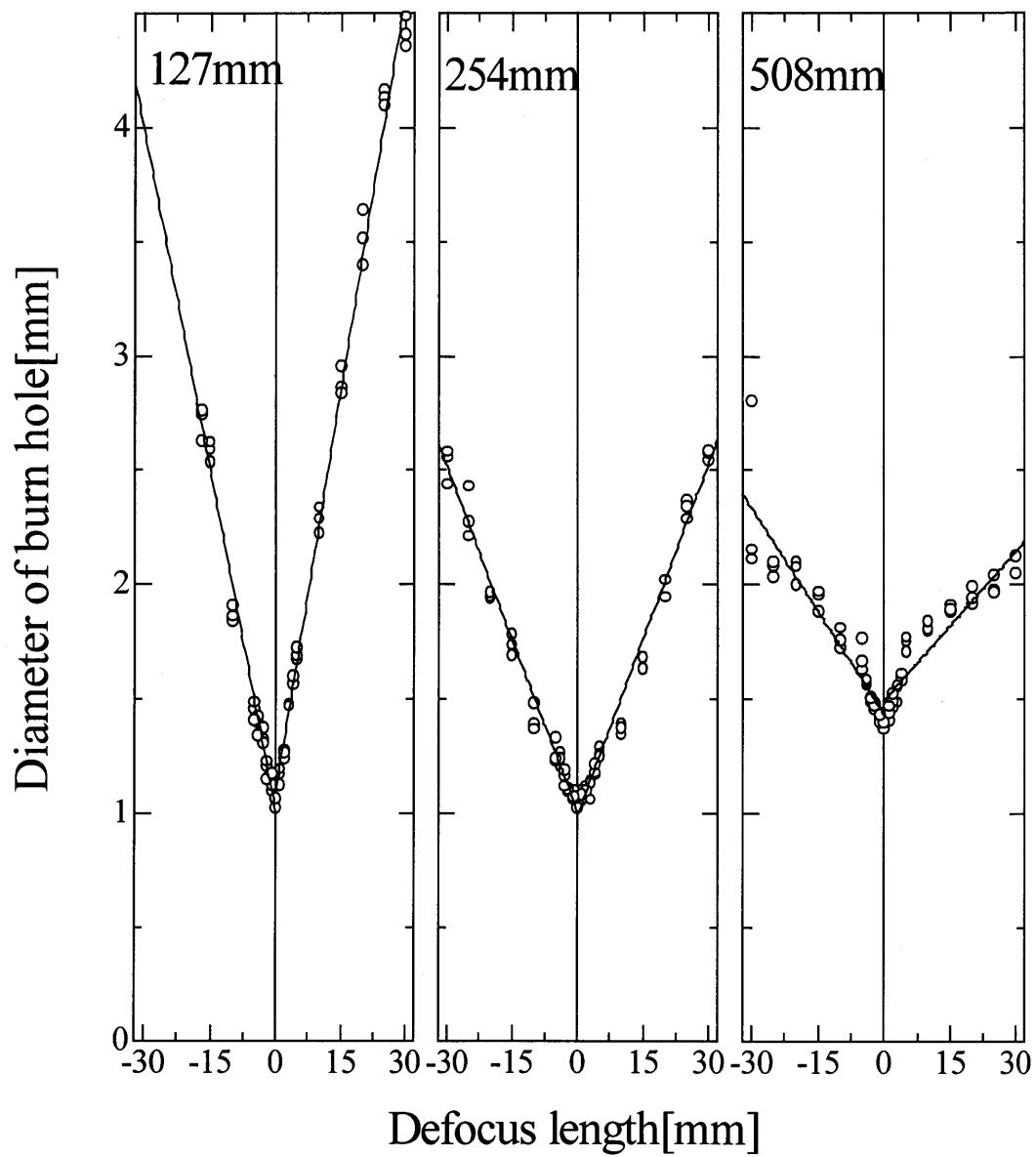


Fig.2-3 Effect of defocus length on diameter of burn hole

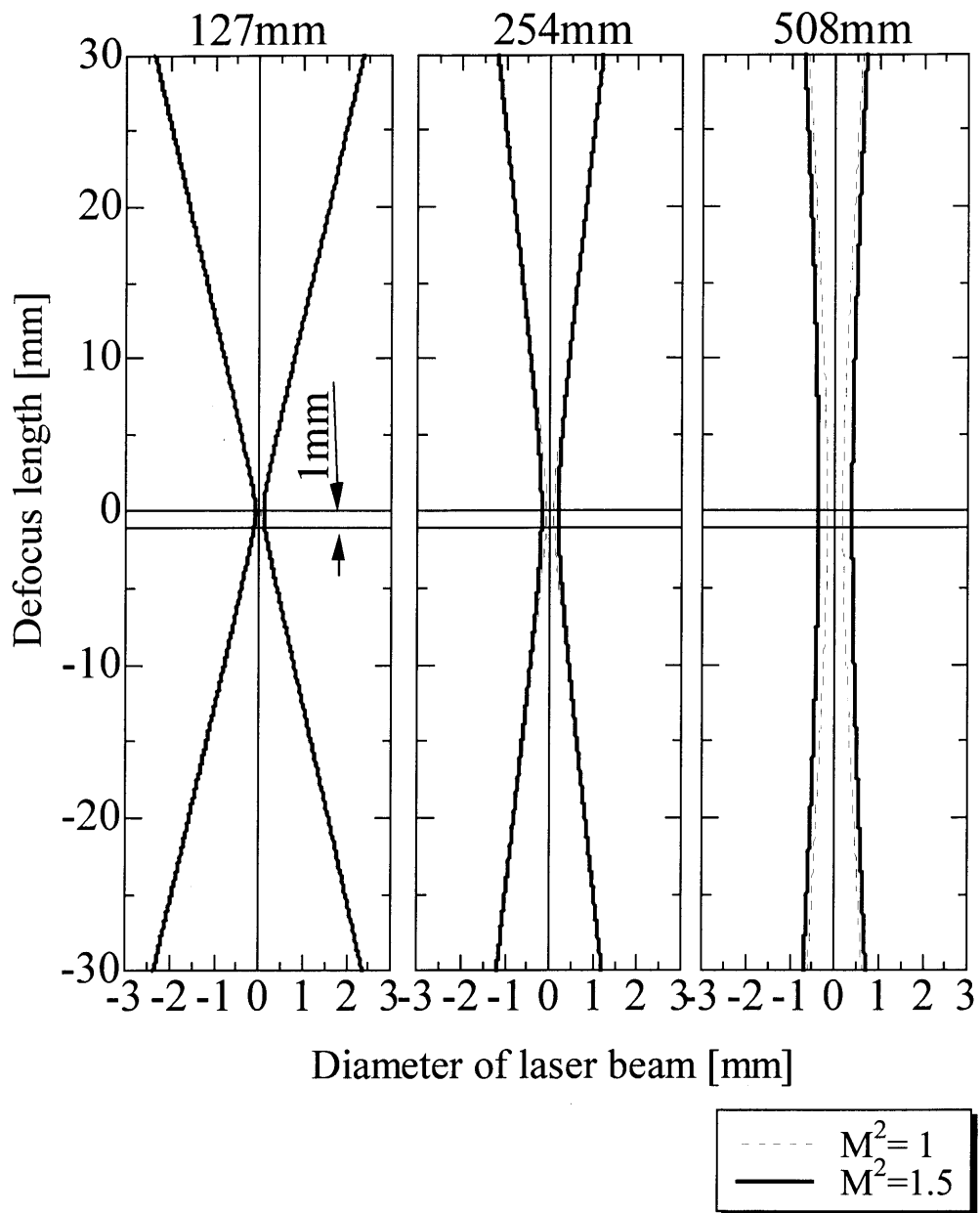


Fig.3-1 Relation between defocus and diameter of laser beam

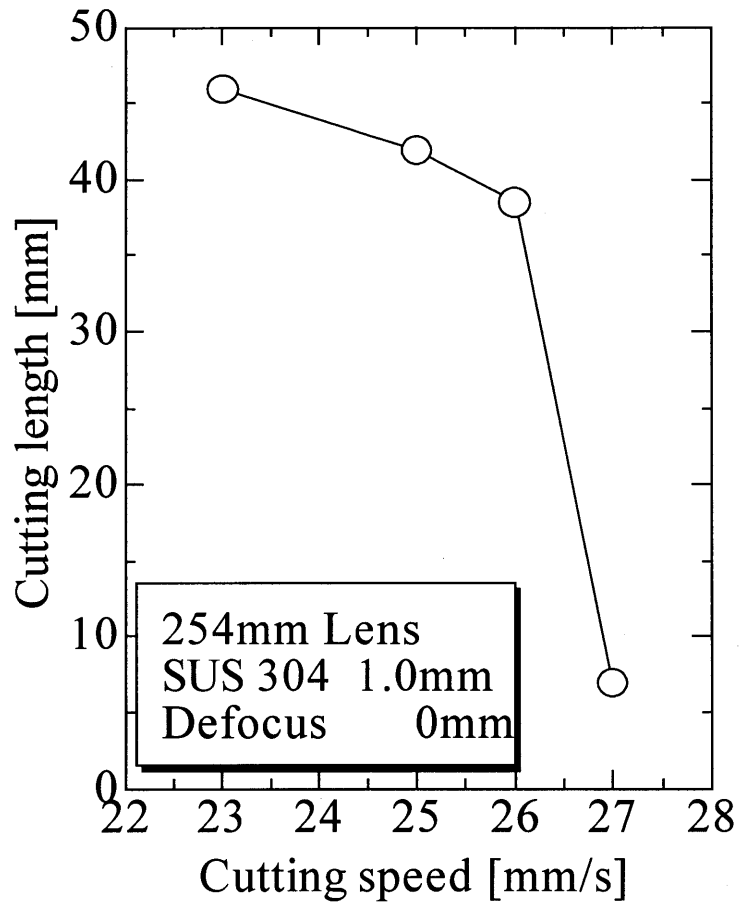


Fig.3-2 Relation between cutting length and cutting speed

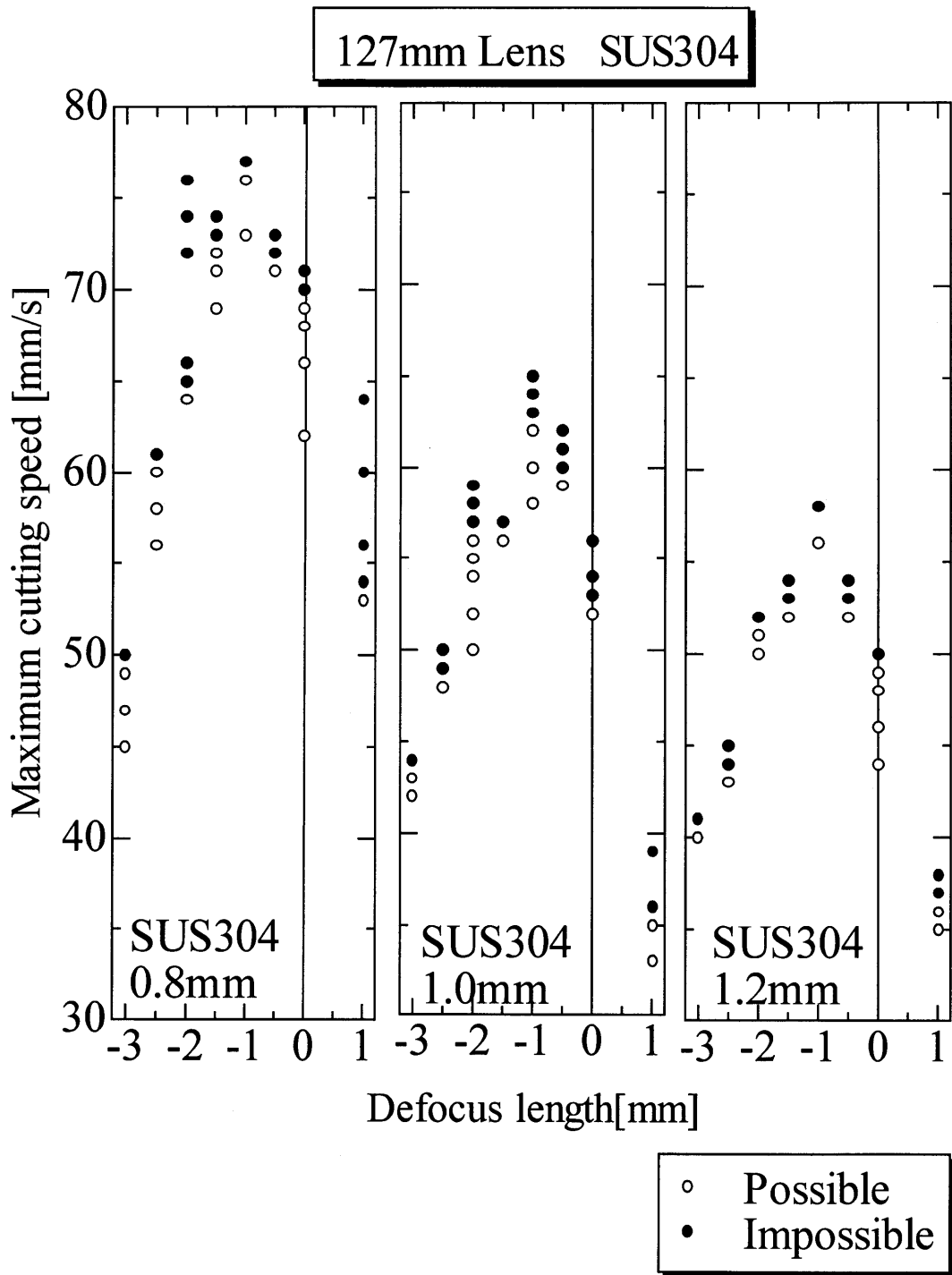


Fig.3-3-1 Effect of defocus length on maximum cutting speed

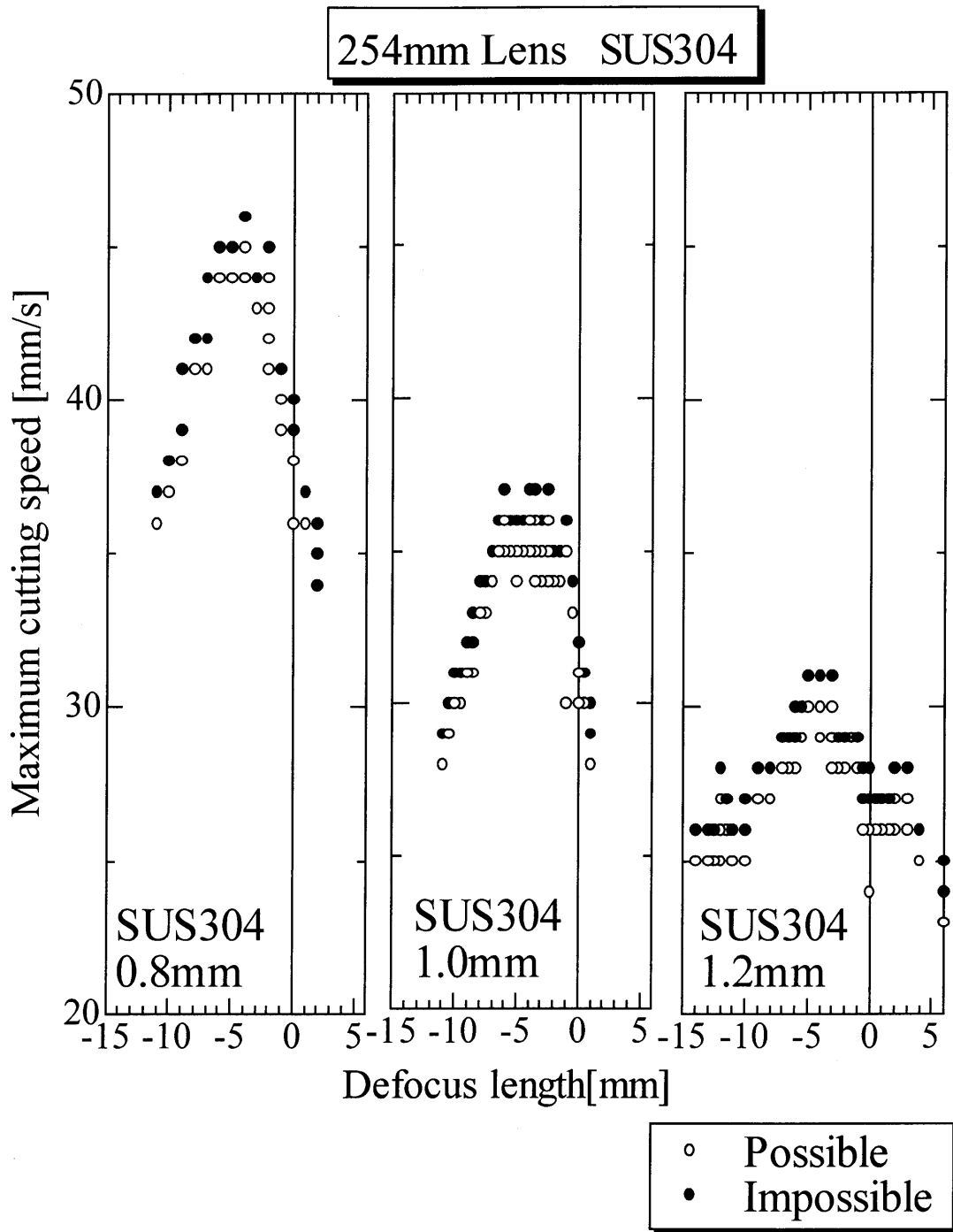


Fig.3-3-2 Effect of defocus length on maximum cutting speed

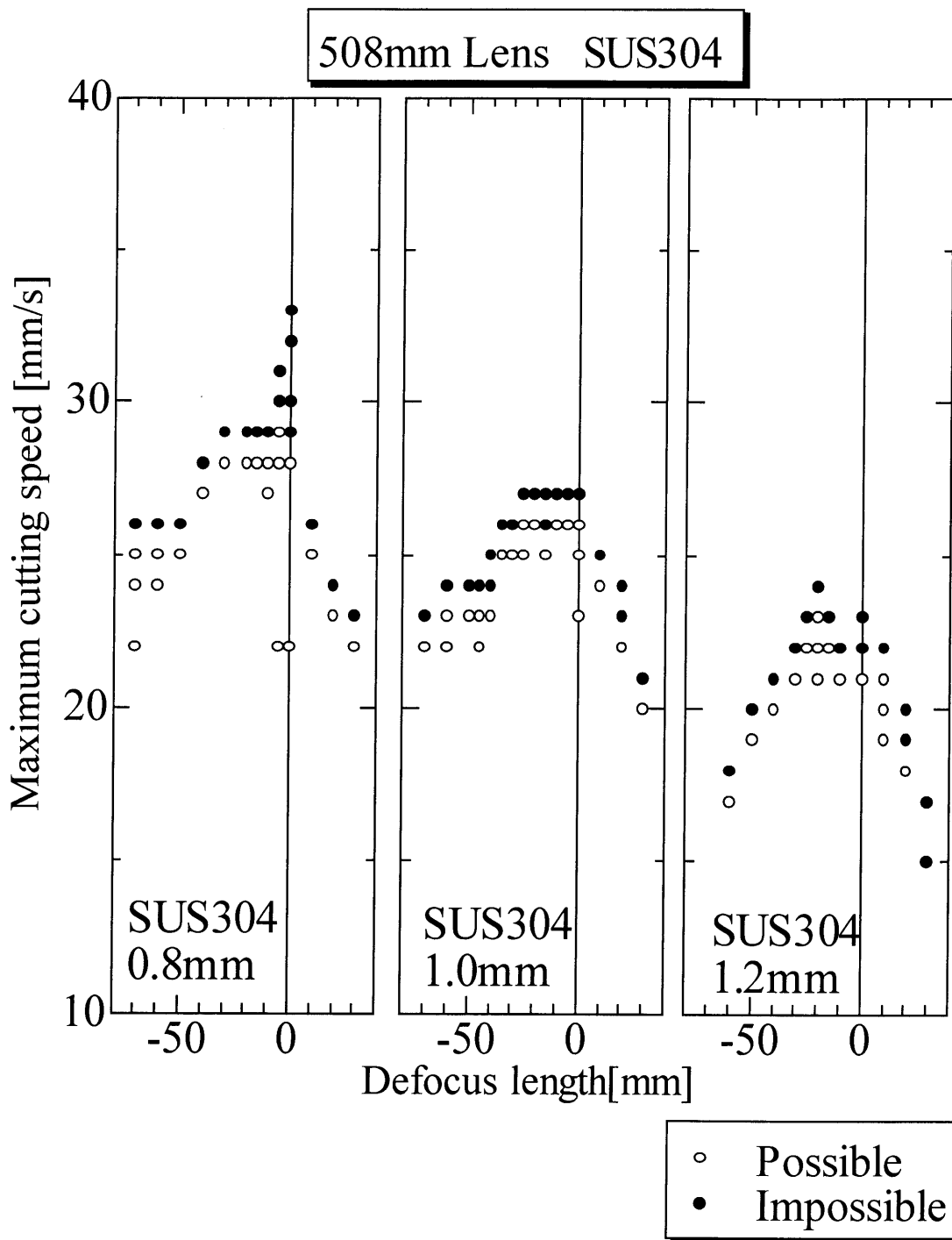


Fig.3-3-3 Effect of defocus length on maximum cutting speed

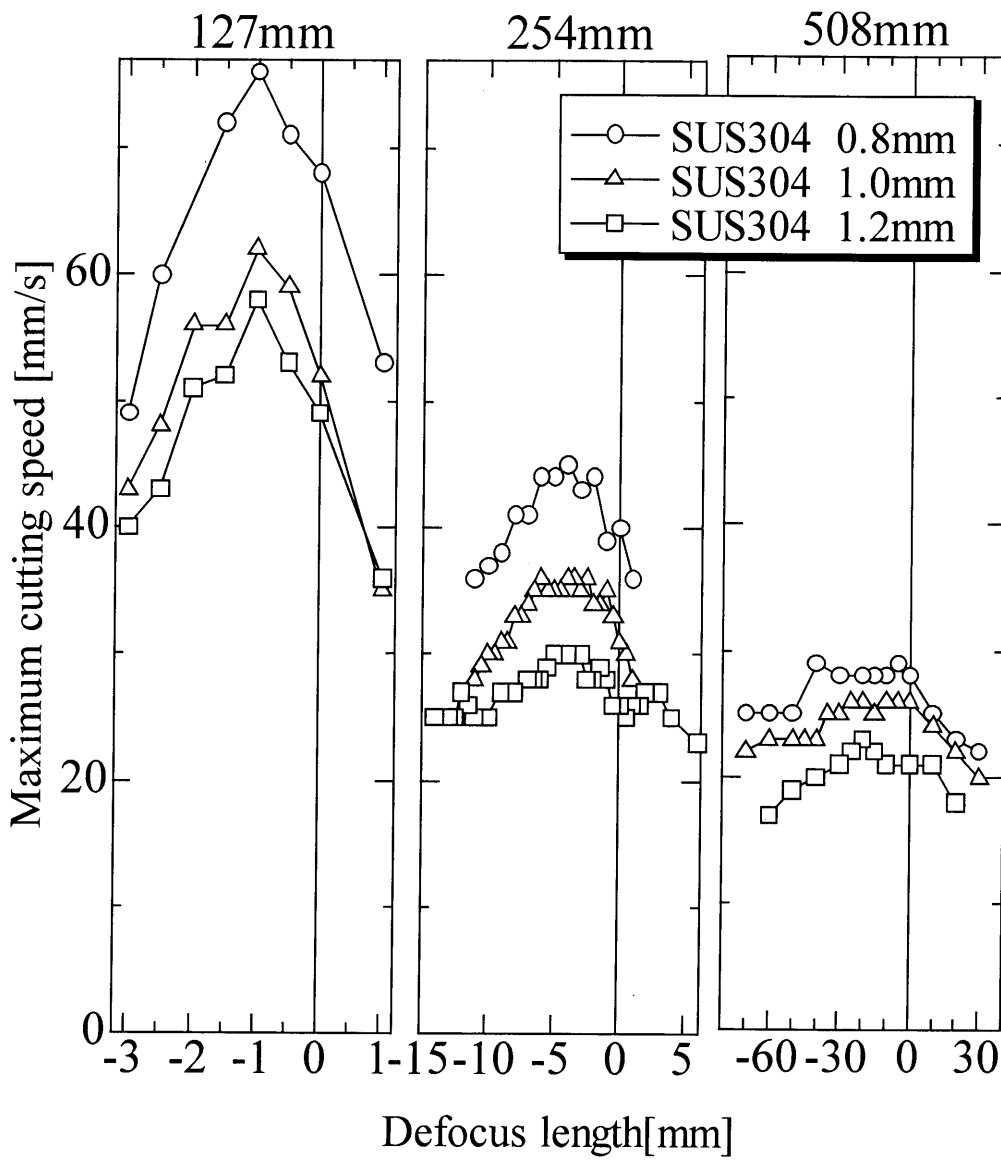


Fig.3-4 Relation between maximum cutting speed and defocus length

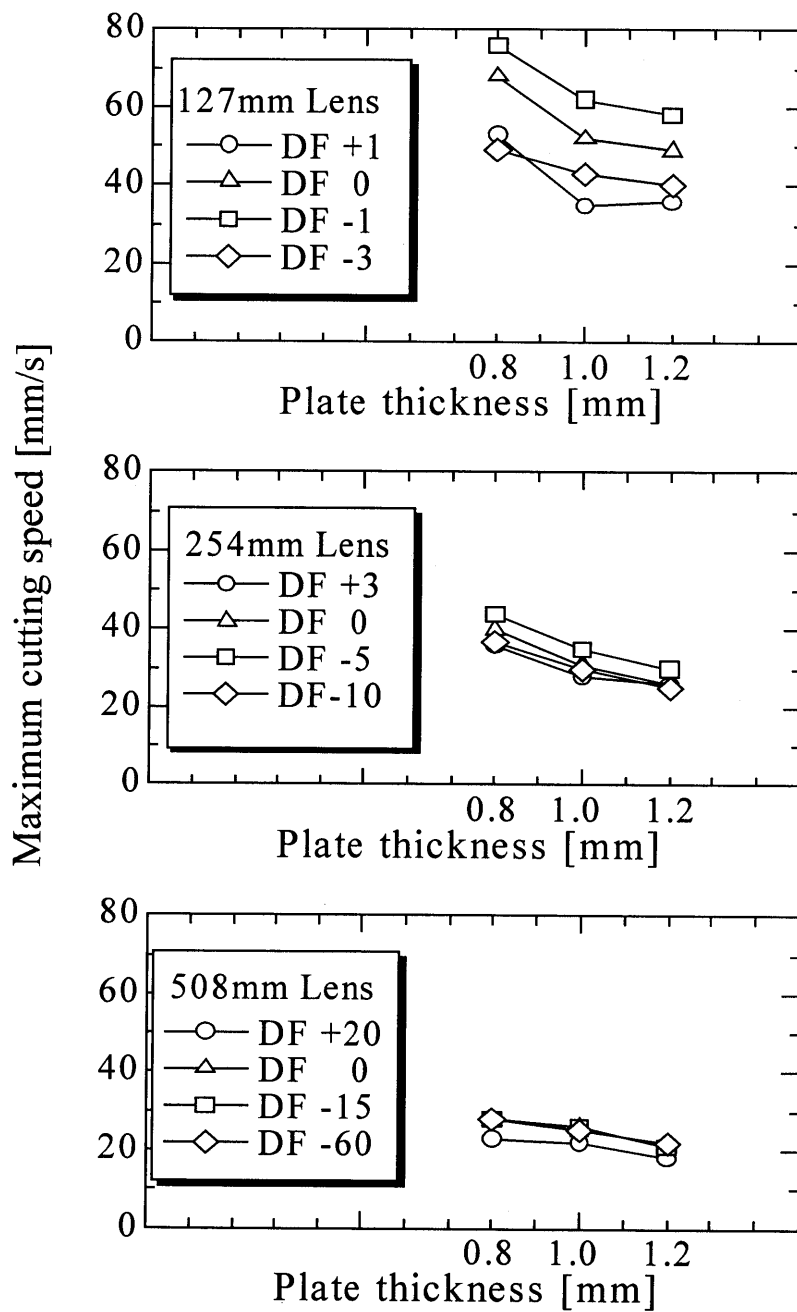


Fig.3-5 Relation between maximum cutting speed and plate thickness

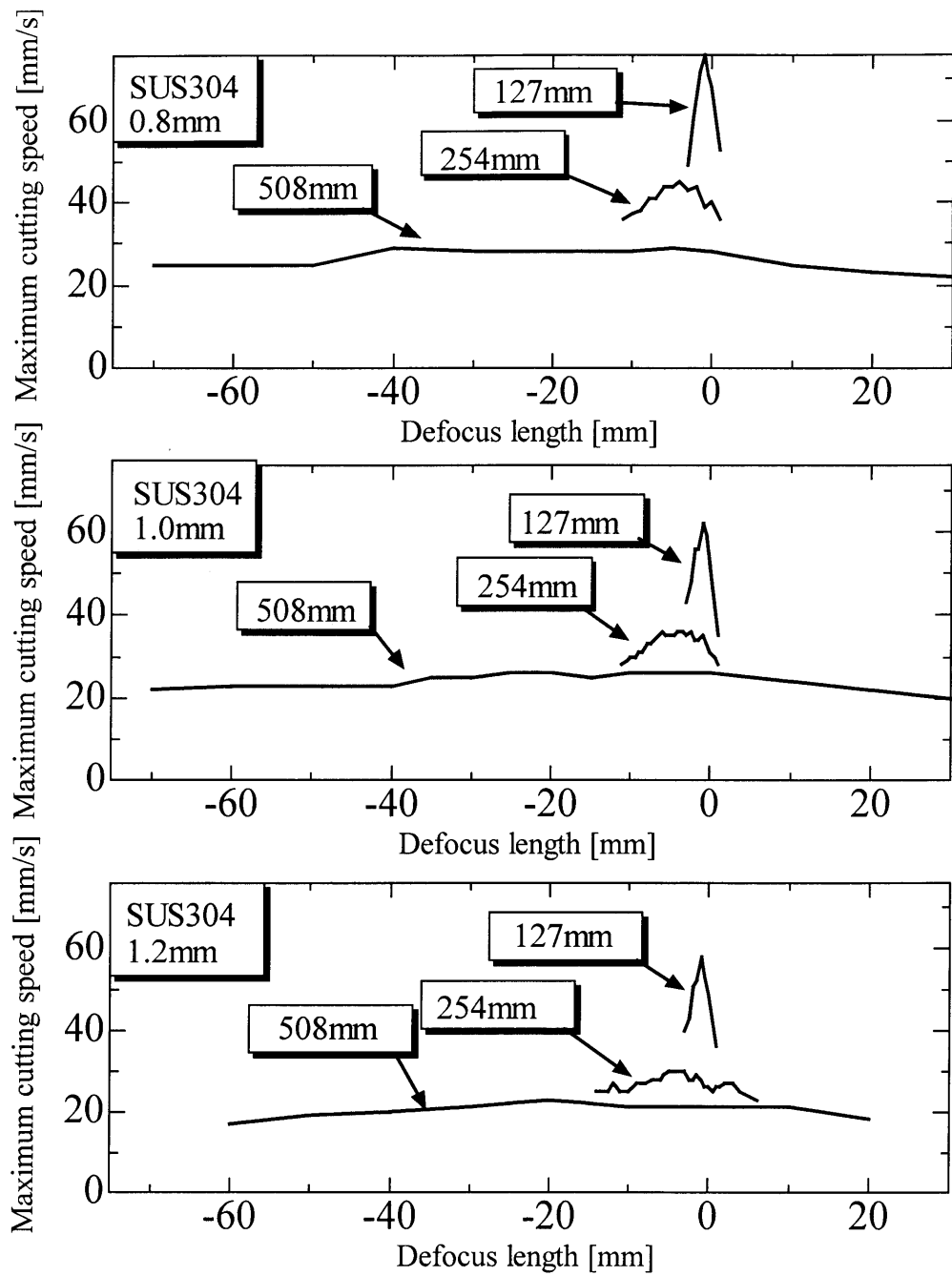


Fig.3-6 Relation between maximum cutting speed and defocus length

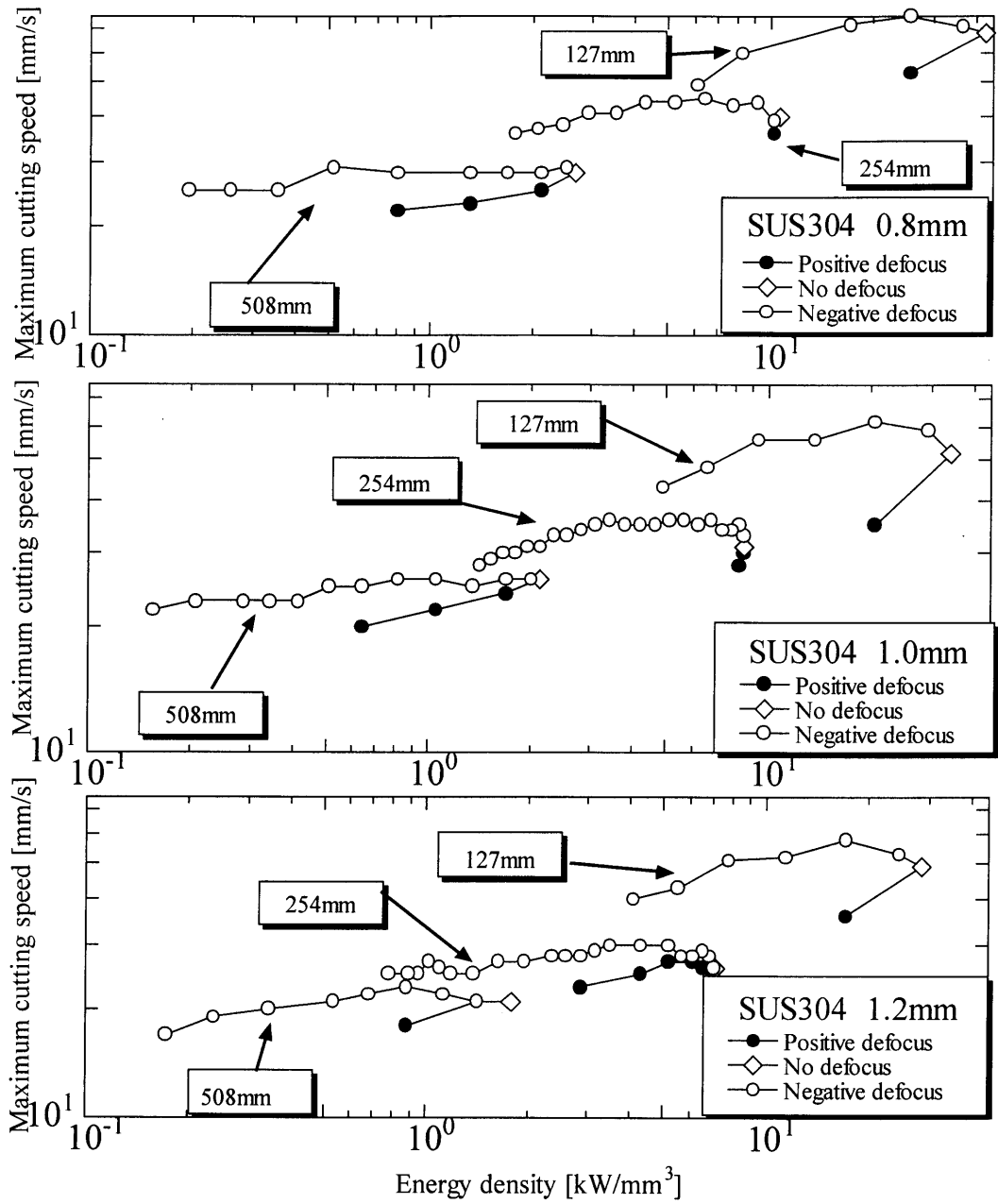
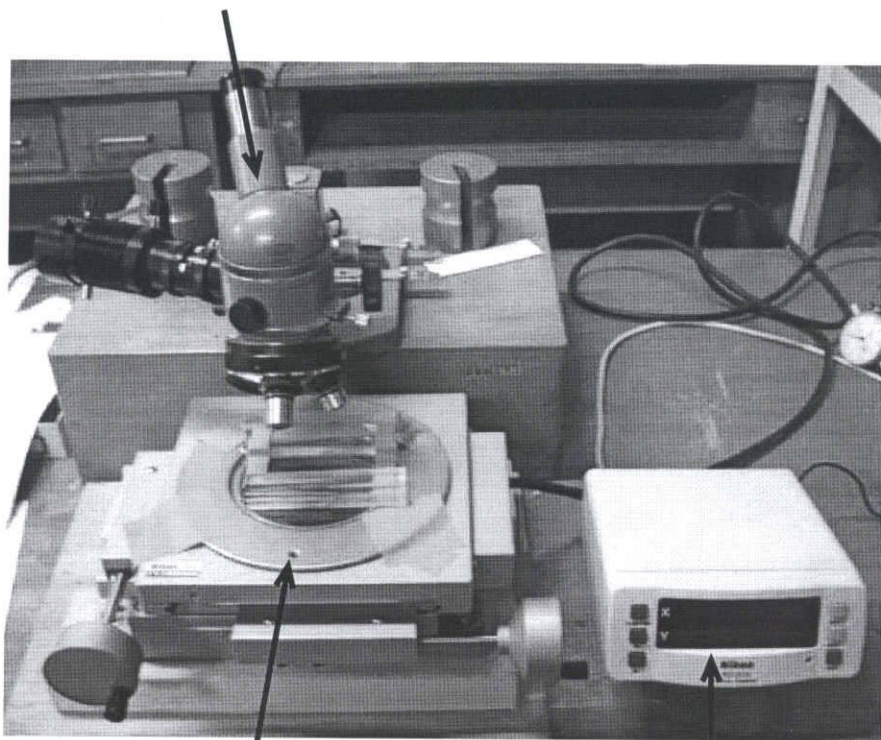


Fig.3-7 Relation between maximum cutting speed and energy density

Microscope

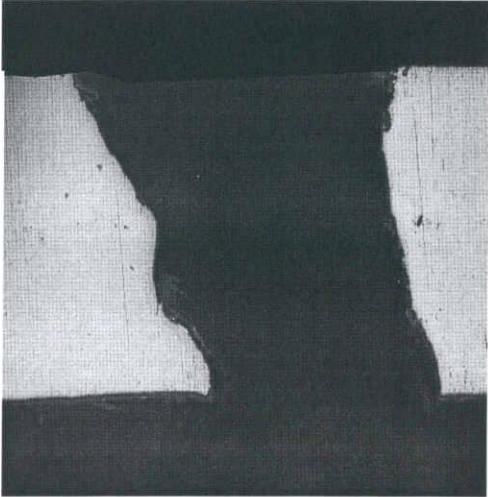


Stage with micrometer

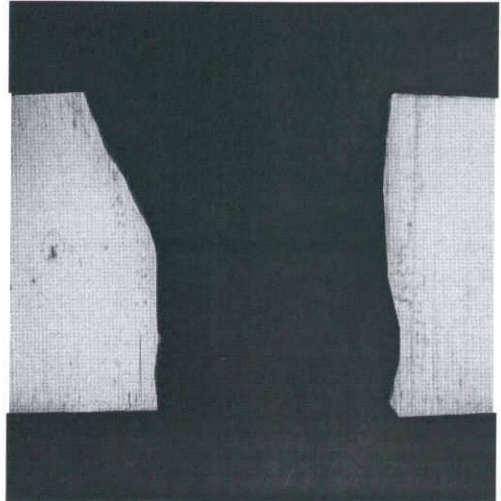
Digital counter

Fig.4-1 Appearance of the device for measuring.

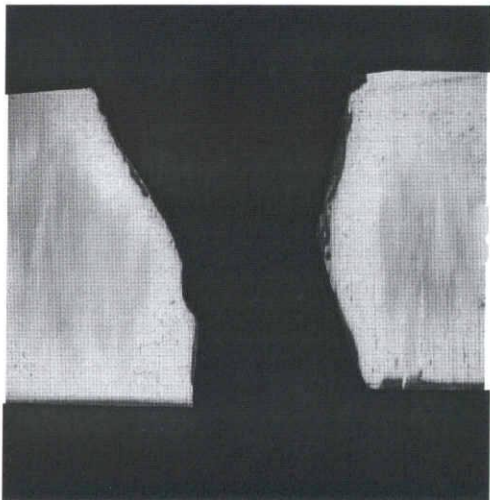
508mm Lens
SUS304 1.2mm



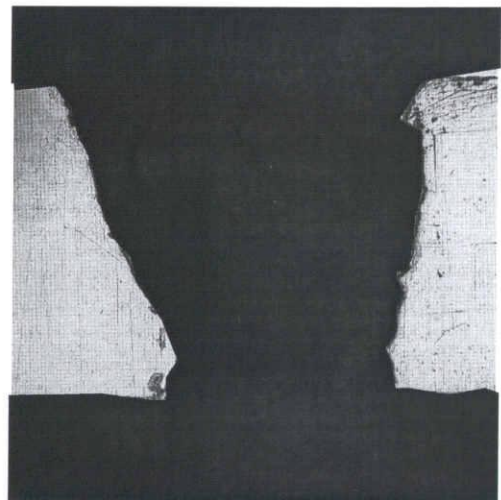
DF=+20mm
18mm/s



DF=0mm
21mm/s



DF=-15mm
22mm/s



DF=-60mm
17mm/s

Fig.5-1-3
Shape of kerf section at 10mm from piercing point

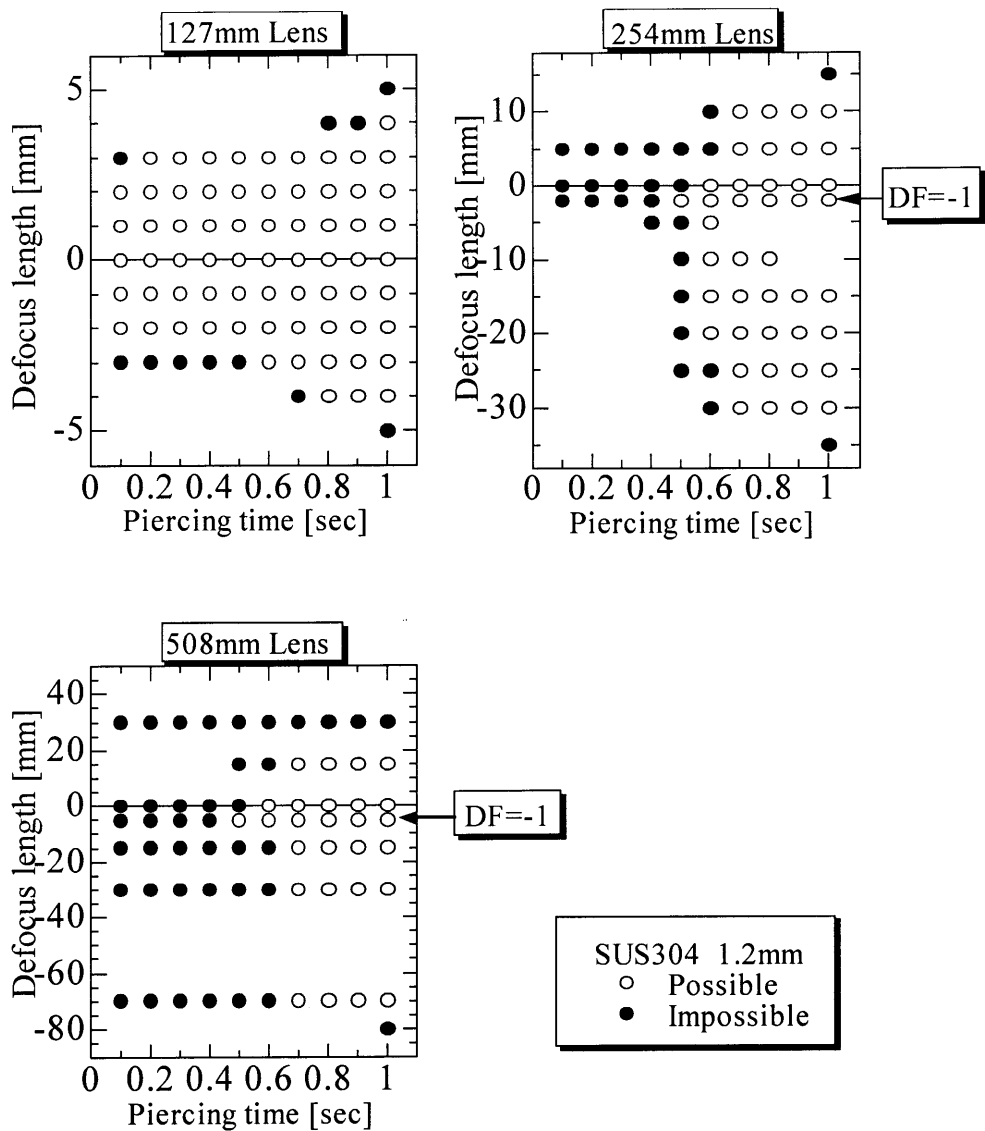


Fig.5-2 Relation between piercing time and defocus length

第2章 実験装置および実験方法

2-1 実験装置の構成

本研究で使用したレーザー切断装置の構成を Fig.2-1 に示す。レーザー発振器は、定格出力：1kW、波長：10.6 μ m、ビーム径：20mm、連続発振型の炭酸ガスレーザー発振器（アマダ社製 OLC-1000P）を用いた。発振されたレーザー光は焦点距離：127mm、254mm、508mm の3種類の ZnSe 製集光レンズによって集光され、被加工材表面に照射される。次に真空容器の装置図面を Fig.2-2 に示す。切断の際は真空容器開口部を試験片で塞ぎ、容器に接続された排気速度：240l/min、直結型油回転真空ポンプ（アルバック機工社製 GLD-201A）によって容器内を排気し、その際に発生する負圧により熔融金属を除去する。レーザー集光レンズはレンズホルダーに取り付け、焦点外し距離はレンズホルダー台上のスケール付ガイドを用いて調整した。レーザー発振器とレンズホルダーの間にレーザー遮断装置を設置した。遮断装置には下向き 45° の角度でモリブデン製の反射鏡が取り付けられており、圧搾空気で作動する駆動シリンダーにより上下に可動する。駆動シリンダーの上下方向は時間設定器によって制御する。また、真空容器はコンピュータによって制御された、有効ストローク 500mm、分解能 0.01mm の電動スライダー（オリエンタルモータ社製 EZ limo EZHS6C-50）の上部に取り付けられ、レーザー光の照射に同期して左右に可動する。

2-2 供試材および実験方法

供試材として、ステンレス鋼板 JIS SUS304（板厚 0.8 , 1.0 , 1.2mm）を用いた。試験片は 39mm×300mm の矩形とした。

本研究においては以下の条件で切断実験を行った。焦点外し距離は、ピアッシング実験と同様に試験片表面で焦点が結ばれている状態を焦点外し無し（DF=0）とし、試験片から焦点位置が遠ざかる方向を正方向（+）、反対に試験片内部に焦点位置が潜り込む方向を負方向（-）と定めた。実験条件を以下に示す。

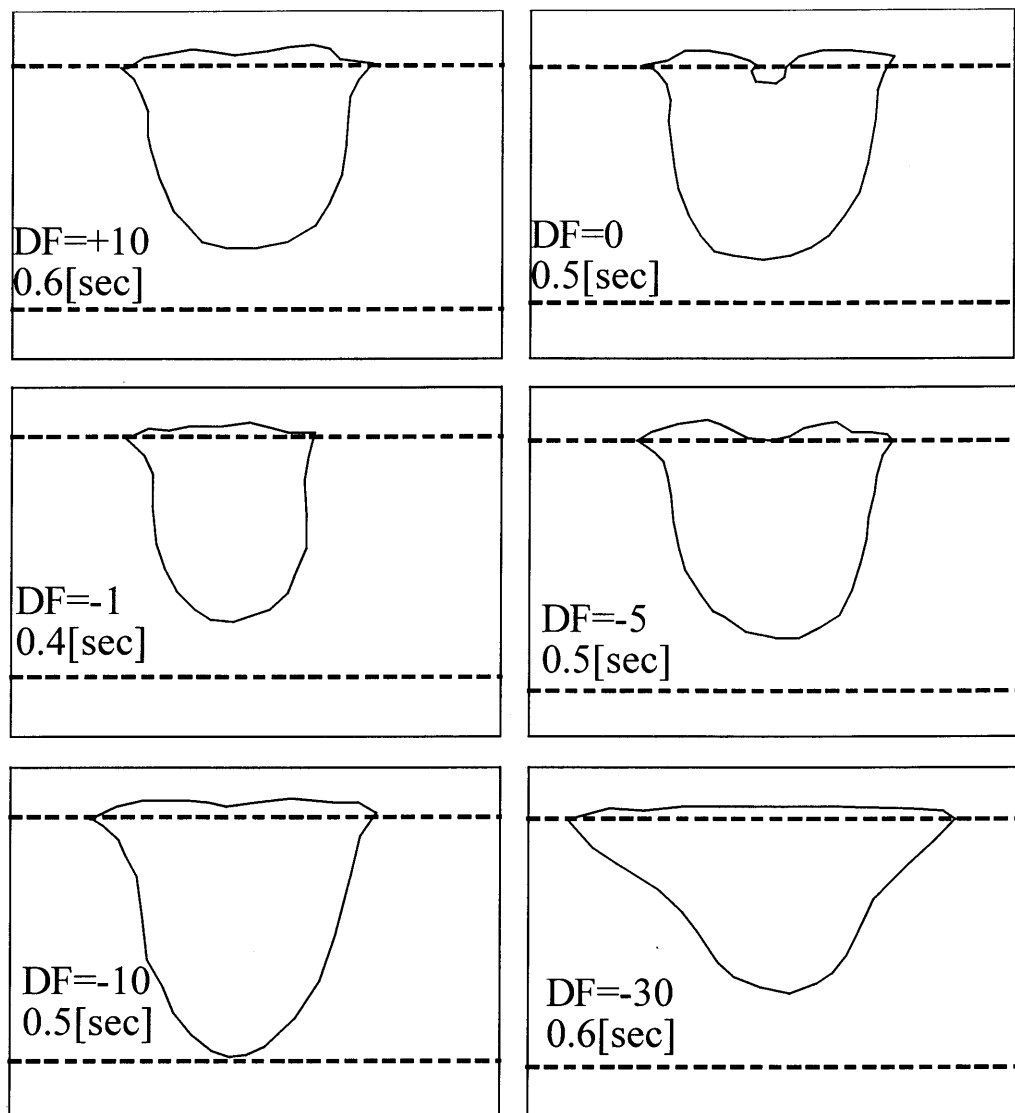


Fig.5-3-2 Shape of heat affected zone
(SUS304 , 1.2mm , 254mm Lens)

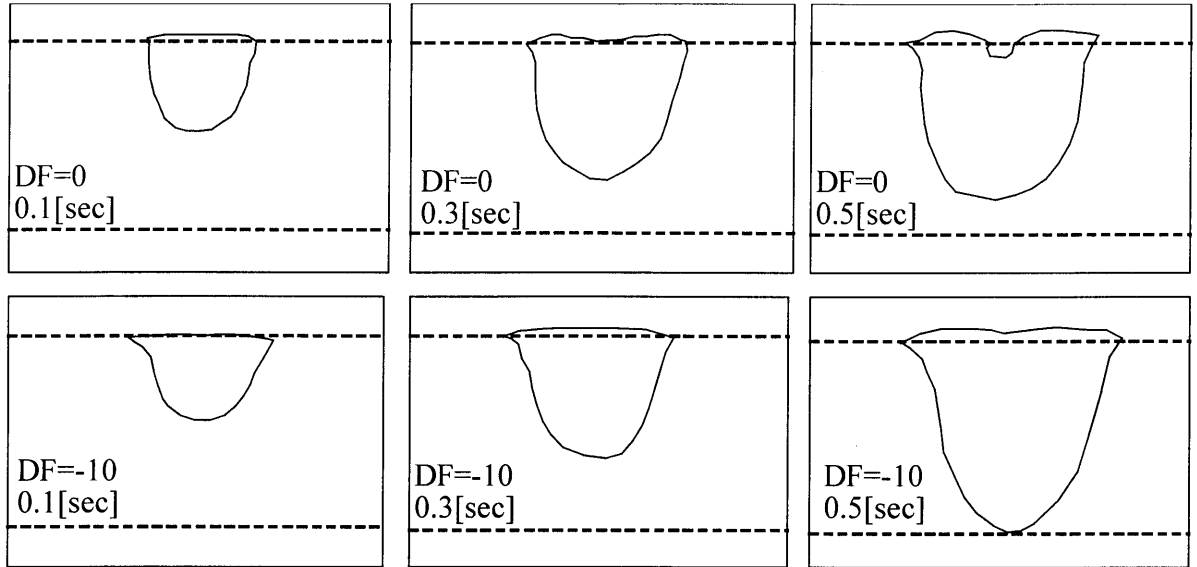
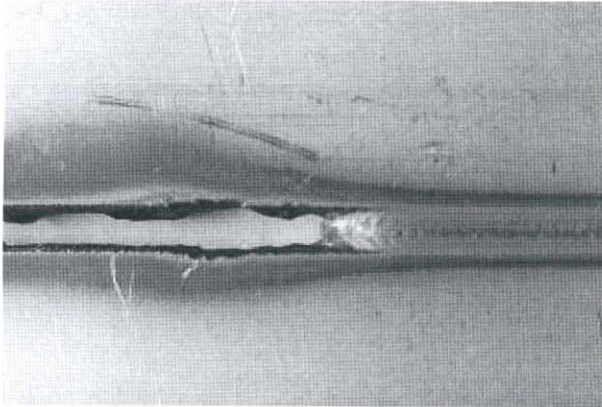
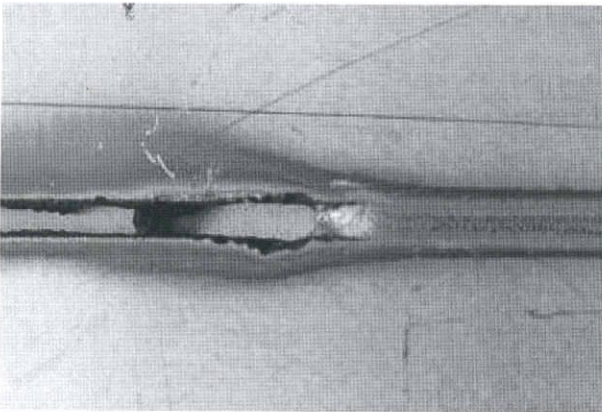


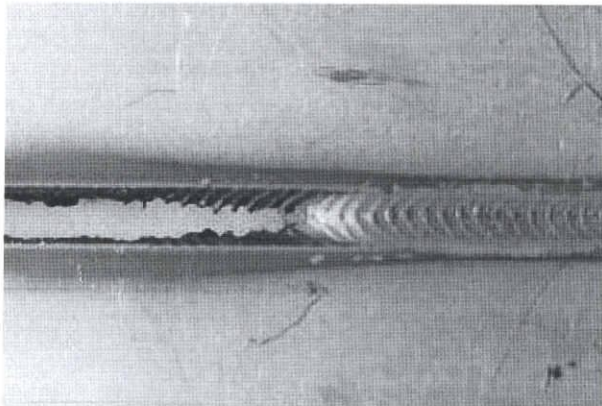
Fig.5-3-3 Shape of heat affected zone
(SUS304 , 1.2mm , 254mm Lens)



508mm Lens
SUS304 1.0mm
13mm/s
DF=0mm



508mm Lens
SUS304 1.0mm
13mm/s
DF= - 15mm



508mm Lens
SUS304 1.0mm
13mm/s
DF= - 70mm

Fig.5-4 Result of laser cutting without assist gas

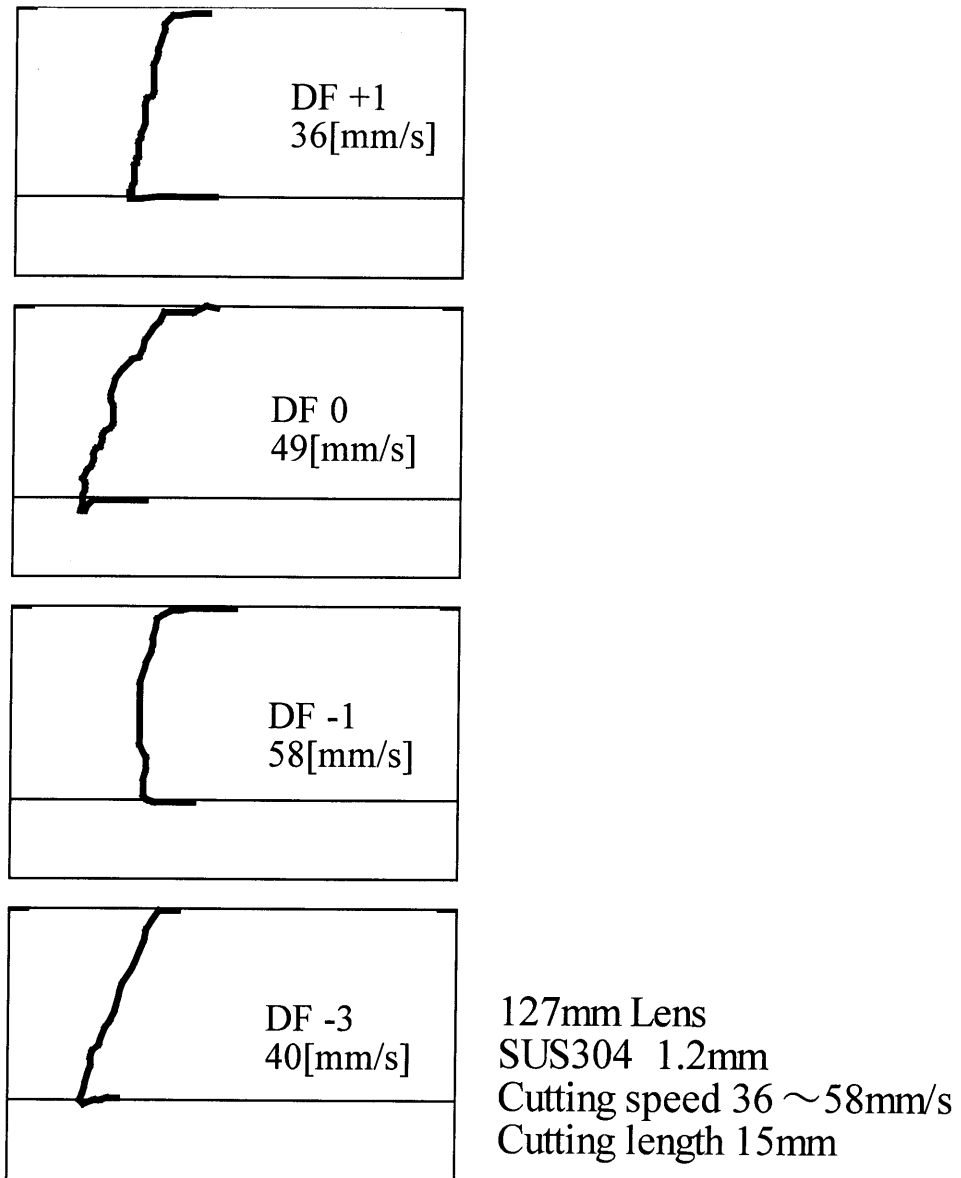


Fig.5-5-1 Shape of dragline at 15mm from piercing point

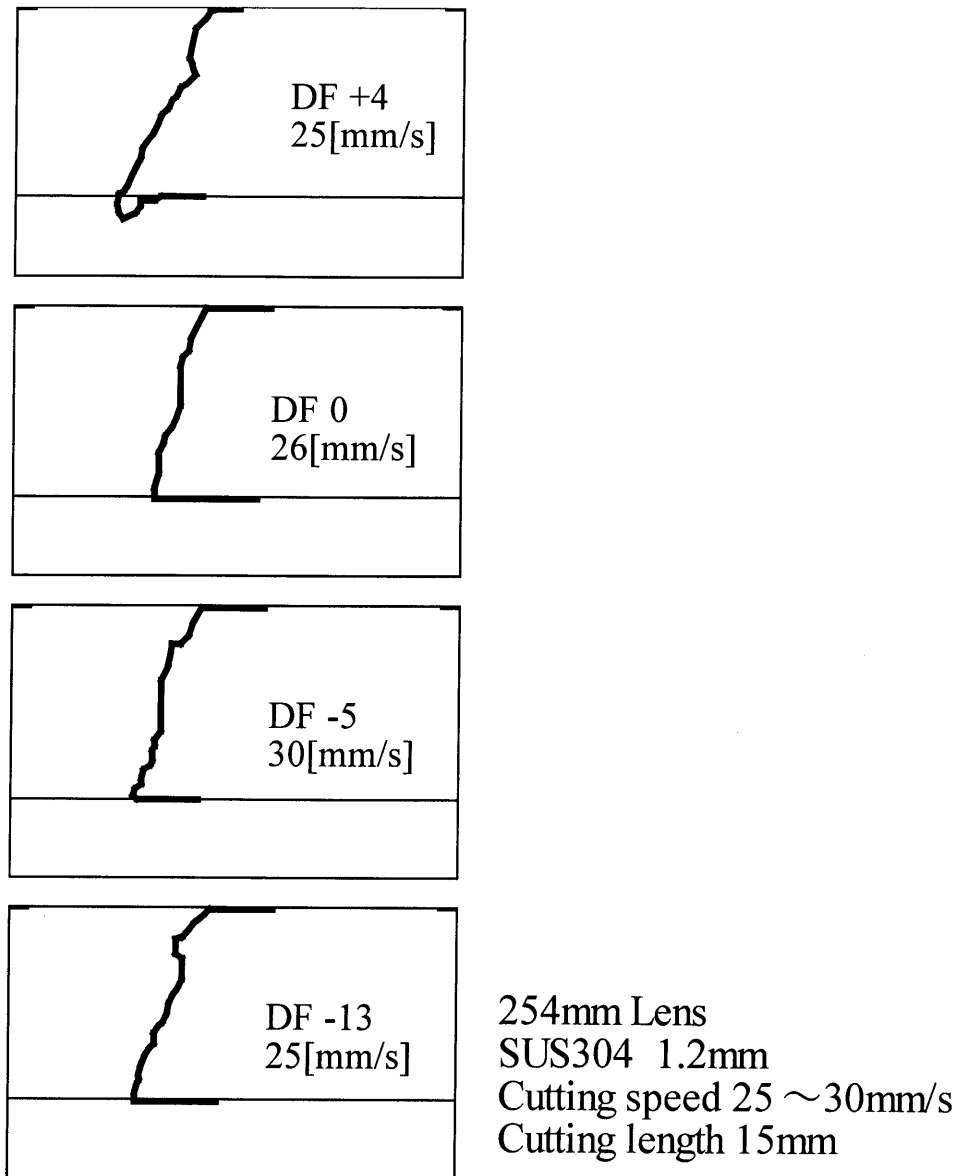


Fig.5-5-2 Shape of dragline at 15mm from piercing point

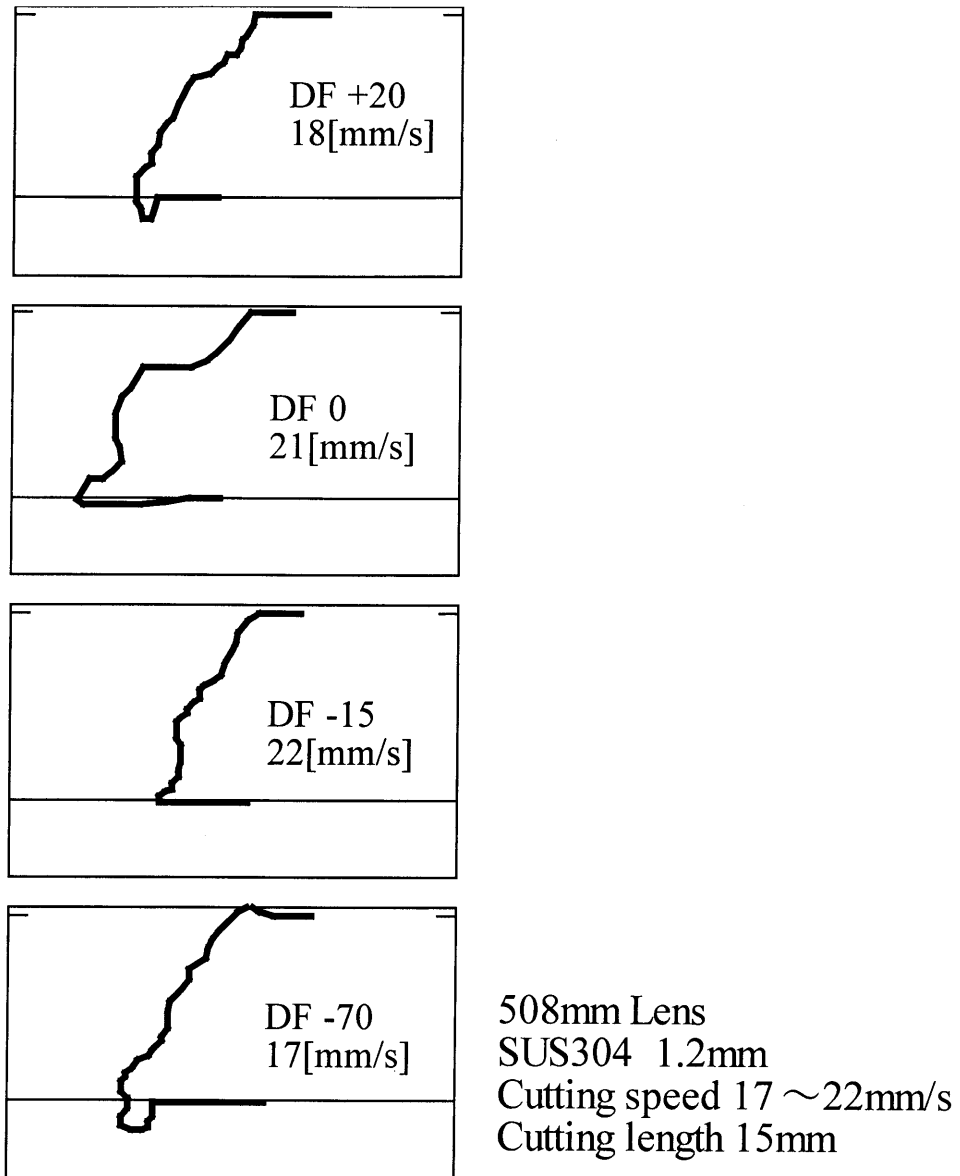


Fig.5-5-3 Shape of dragline at 15mm from piercing point

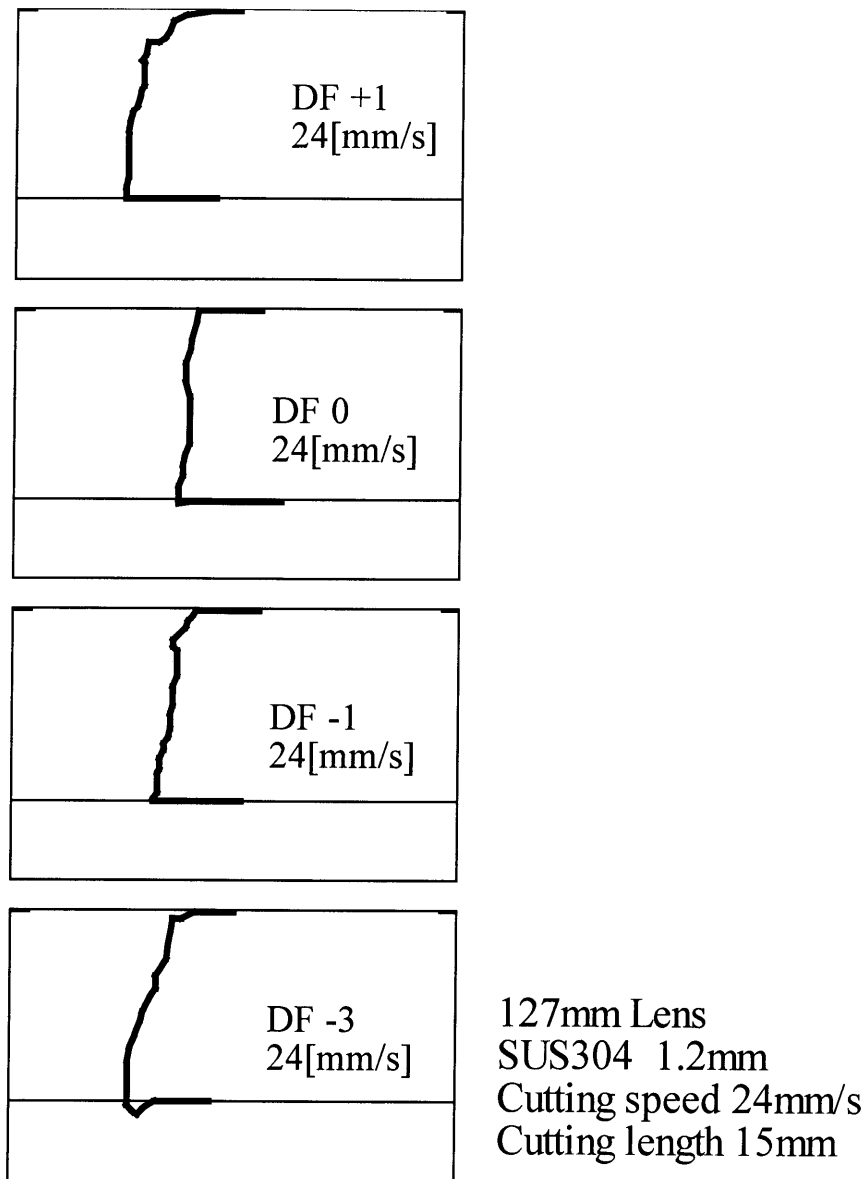


Fig.5-5-4 Shape of dragline at 15mm from piercing point

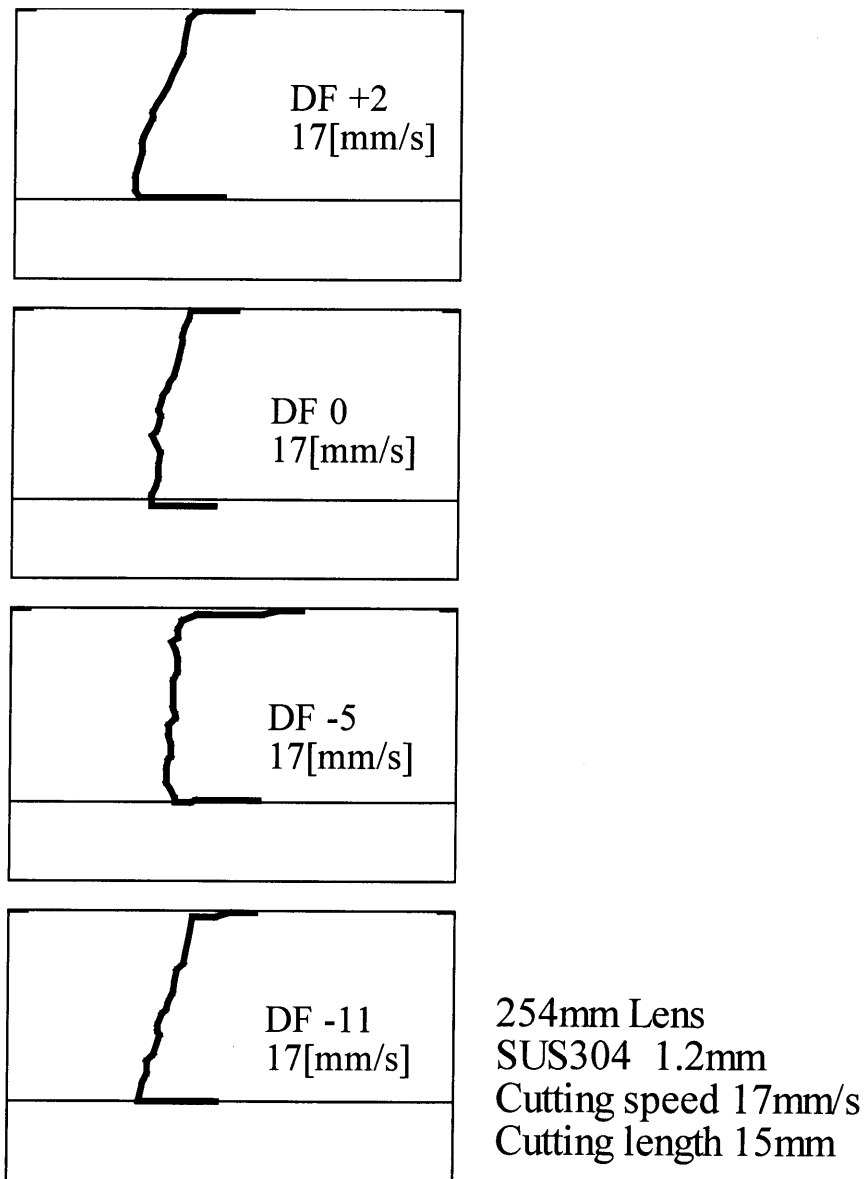


Fig.5-5-5 Shape of dragline at 15mm from piercing point

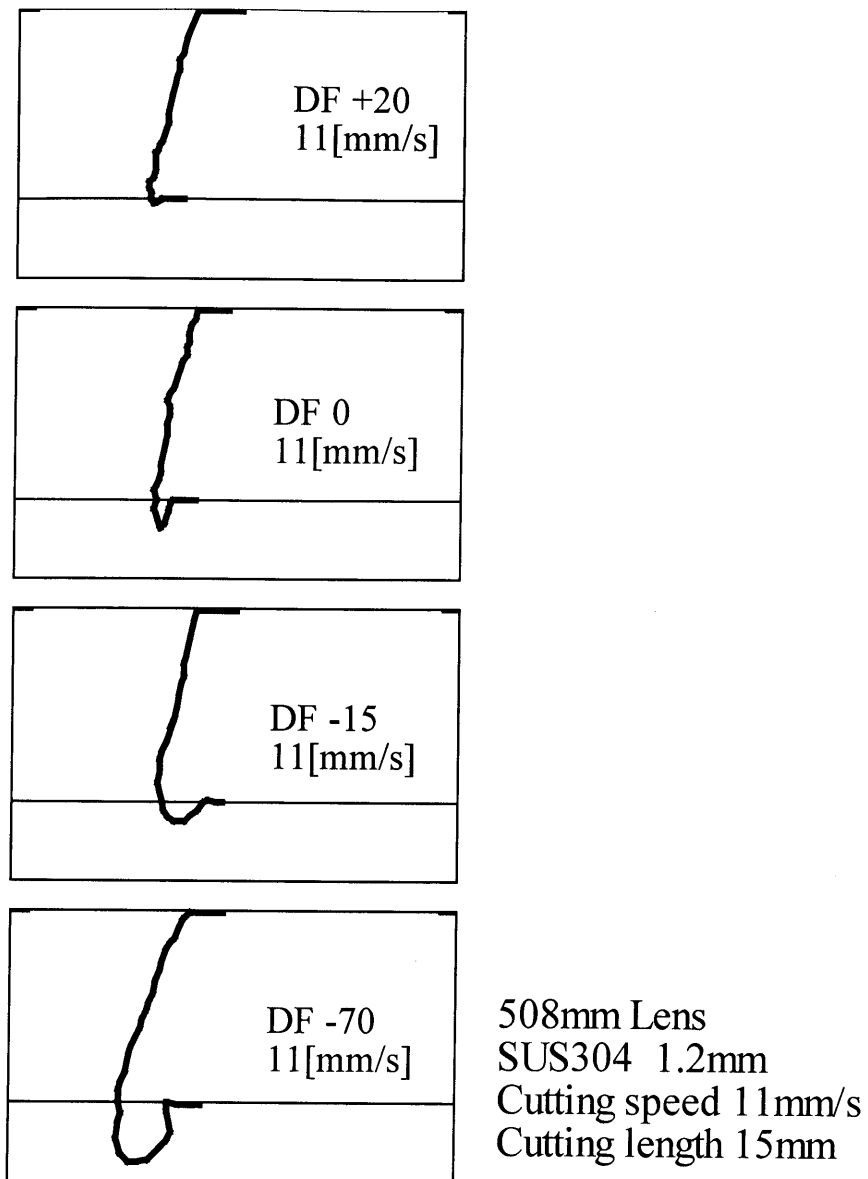


Fig.5-5-6 Shape of dragline at 15mm from piercing point

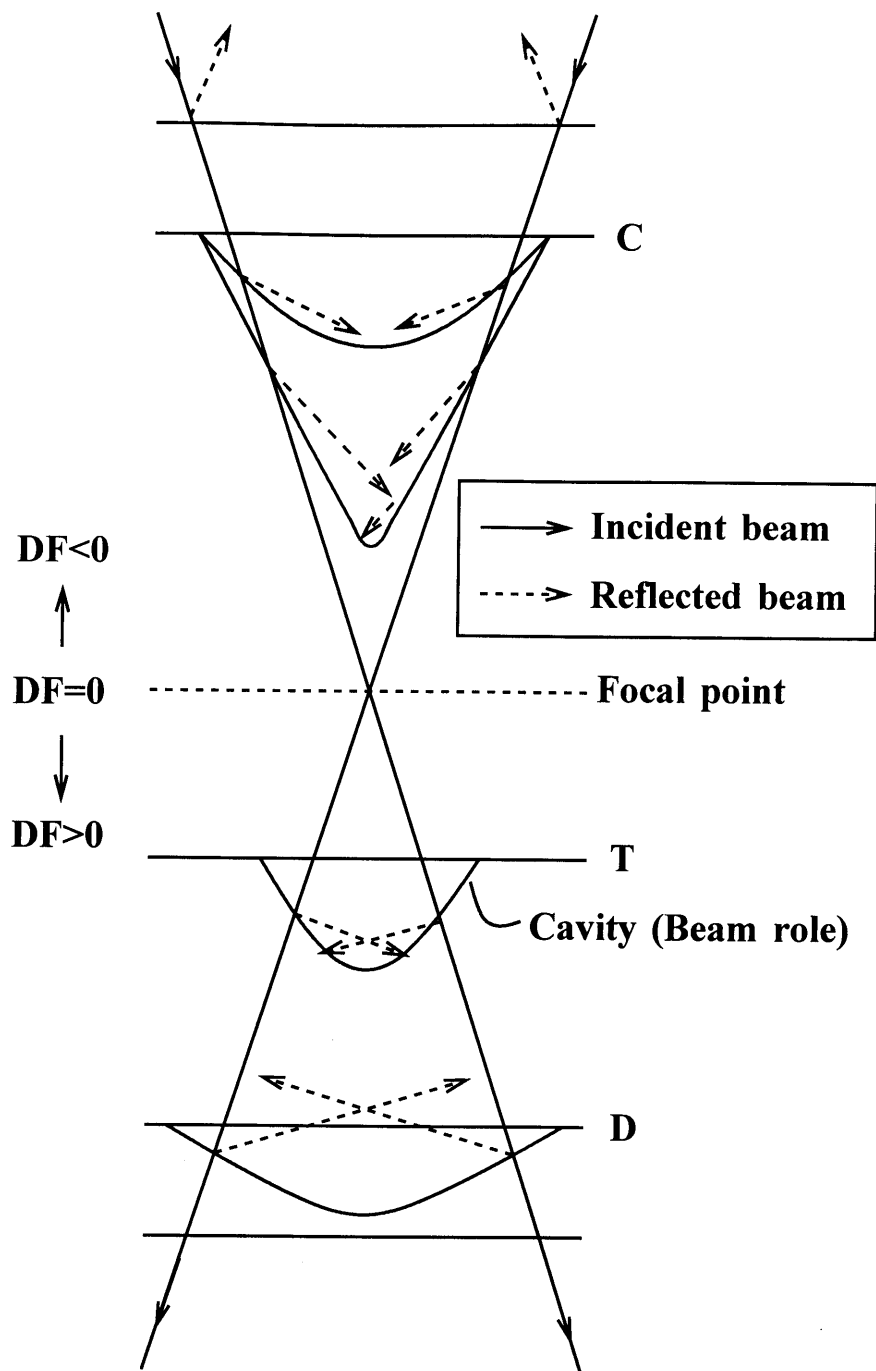


Fig.5-6
Schematic showing interaction between beam and cavity

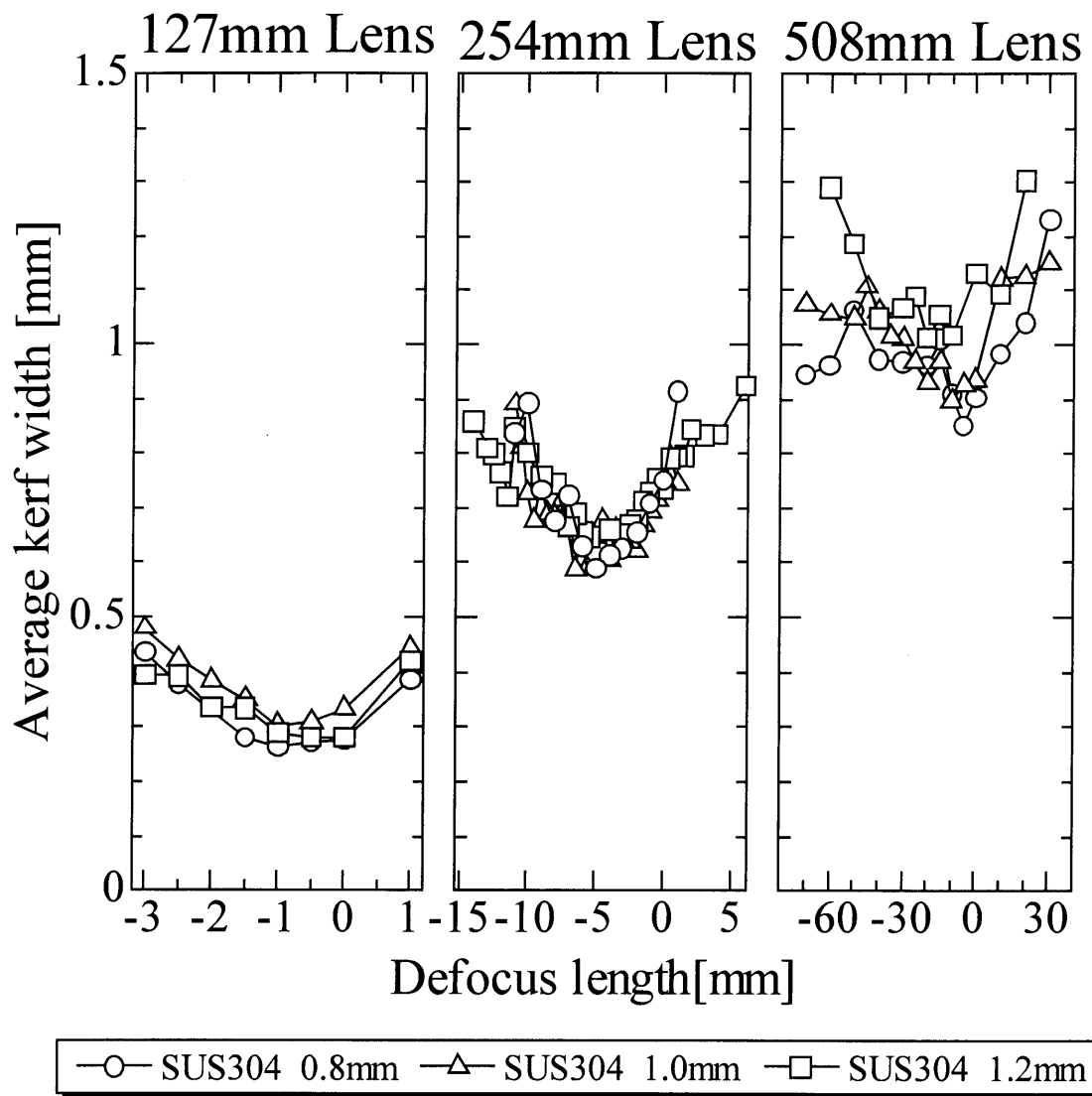


Fig.4-2 Effect of defocus length on average kerf width (Maximum cutting speed)

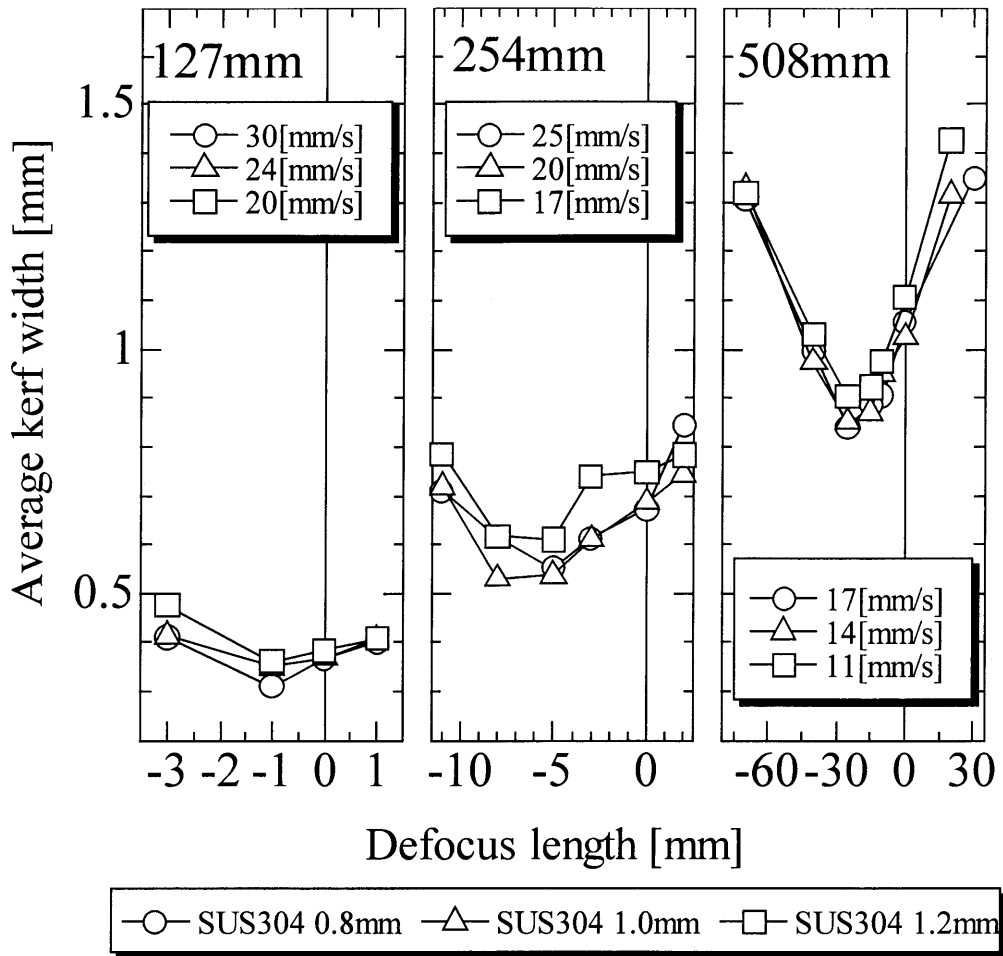


Fig.4-3 Effect of defocus length on average kerf width (Constant cutting speed)

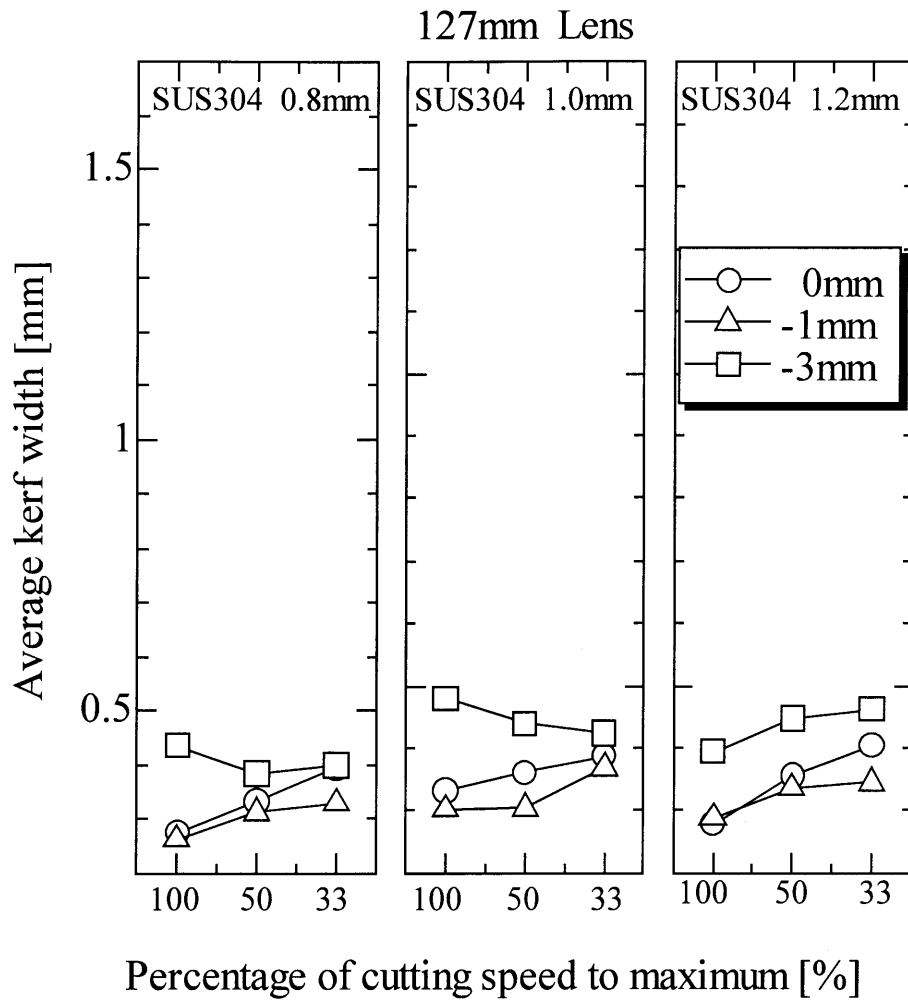


Fig.4-4-1 Effect of cutting speed on average kerf width (Constant defocus length)

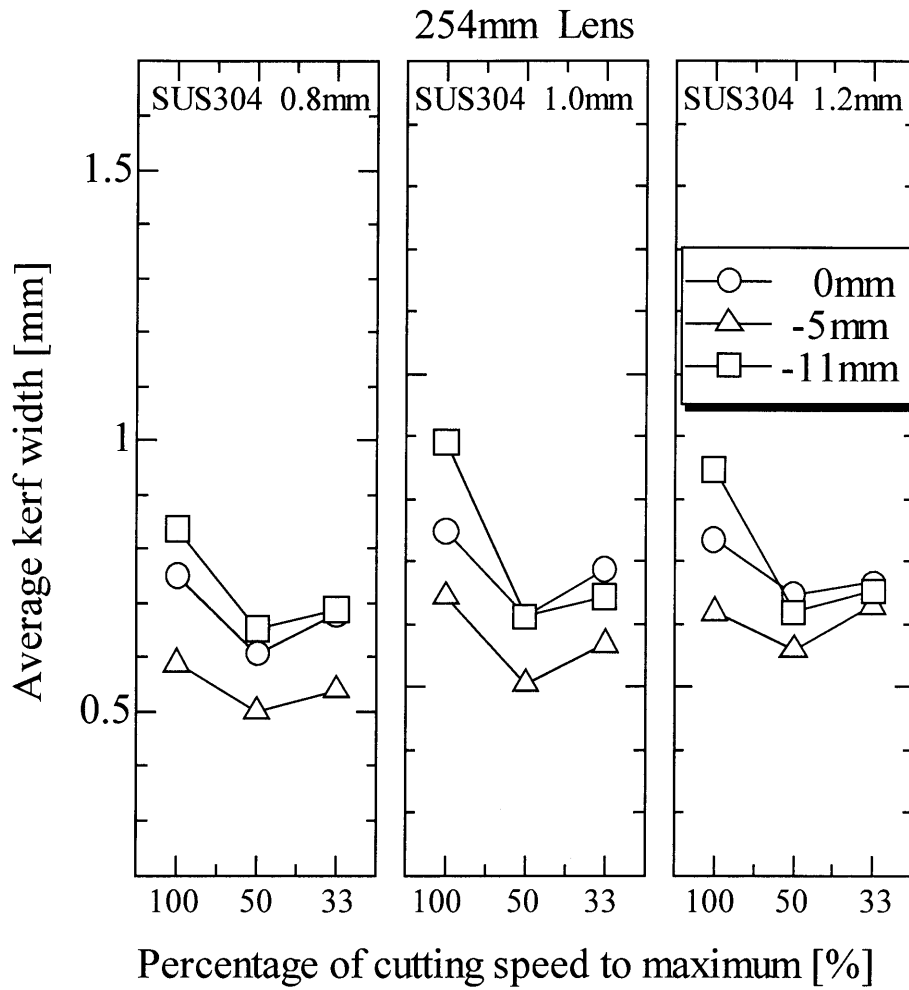


Fig.4-4-2 Effect of cutting speed on average kerf width (Constant defocus length)

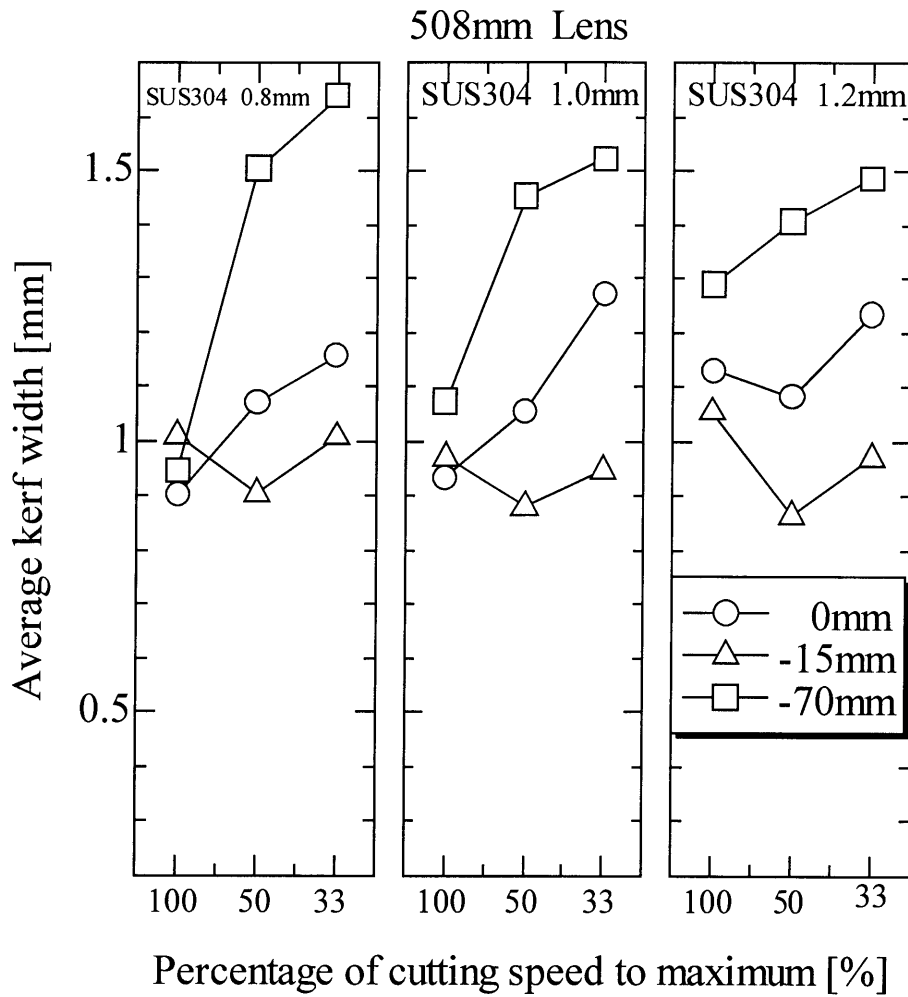


Fig.4-4-3 Effect of cutting speed on average kerf width (Constant defocus length)

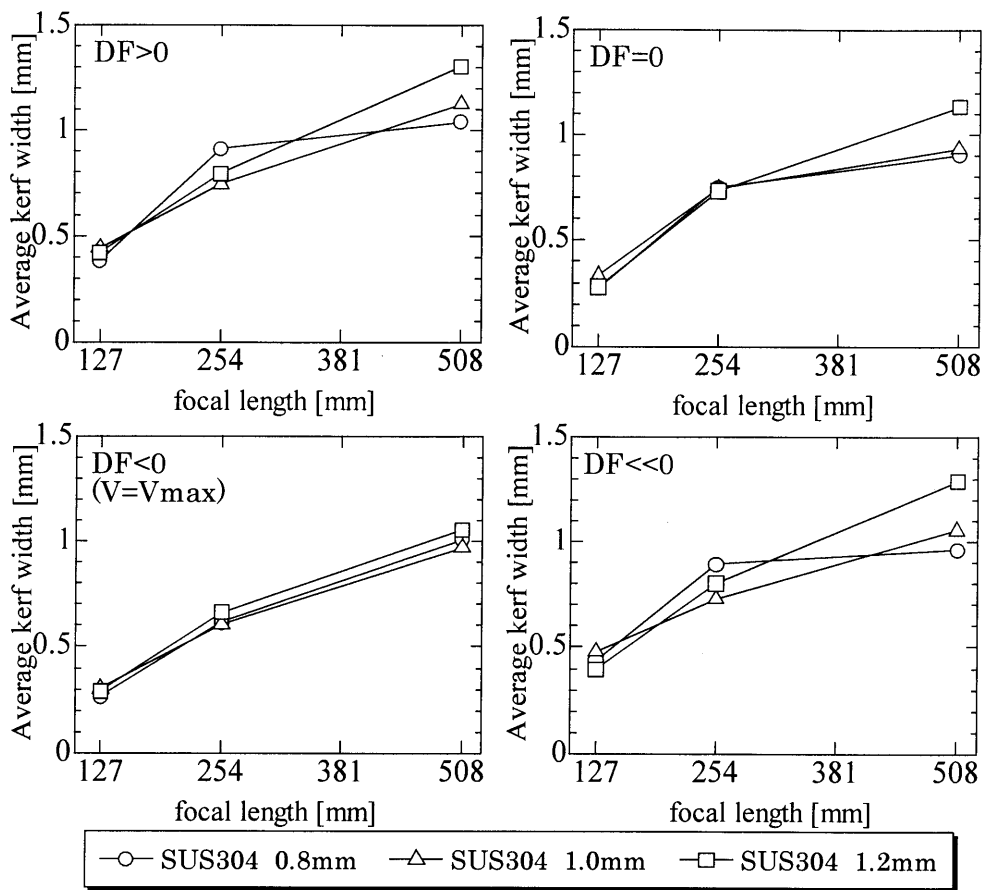


Fig.4-5 Relation between average kerf width and focal length

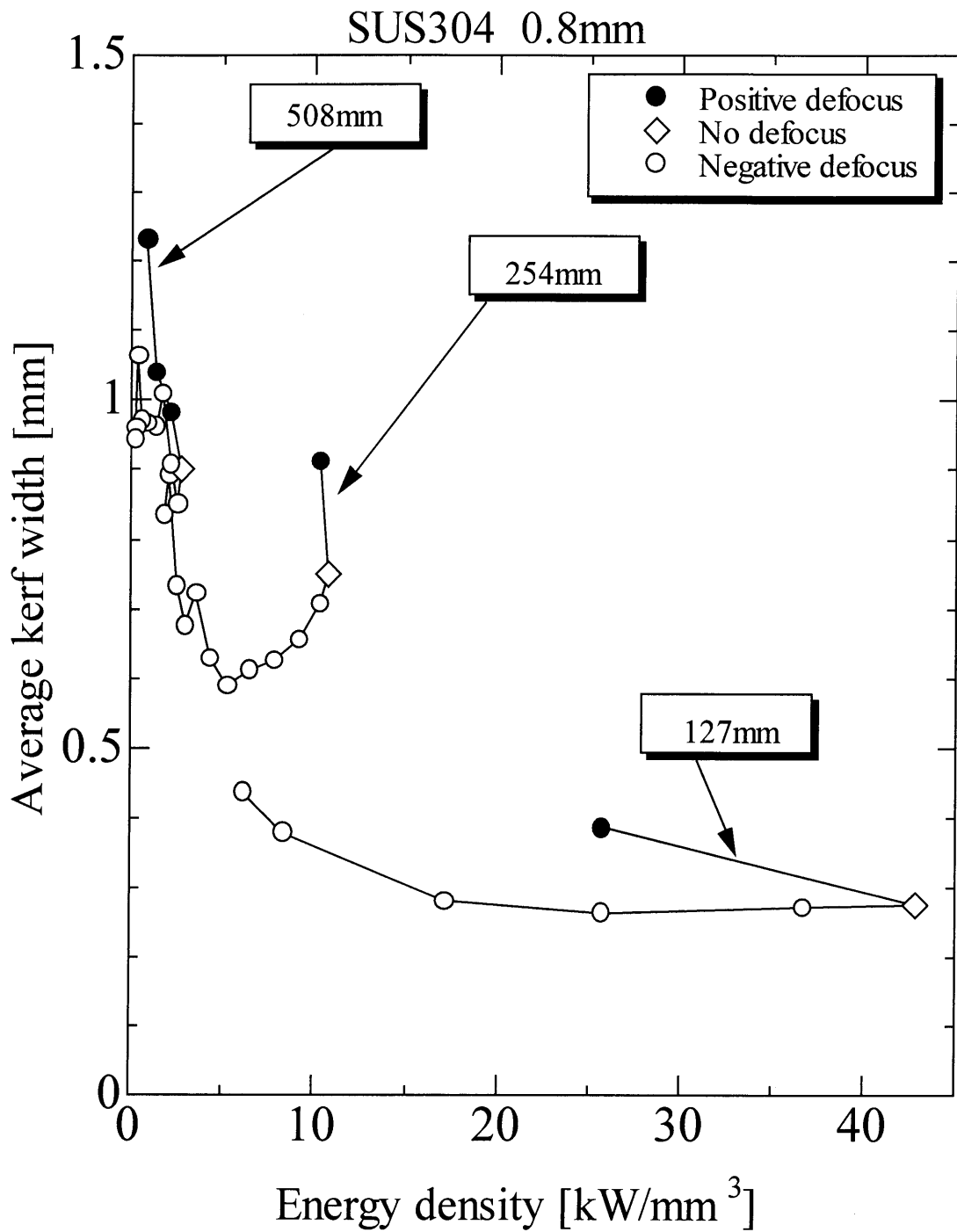


Fig.4-6-1 Relation between average kerf width and energy density

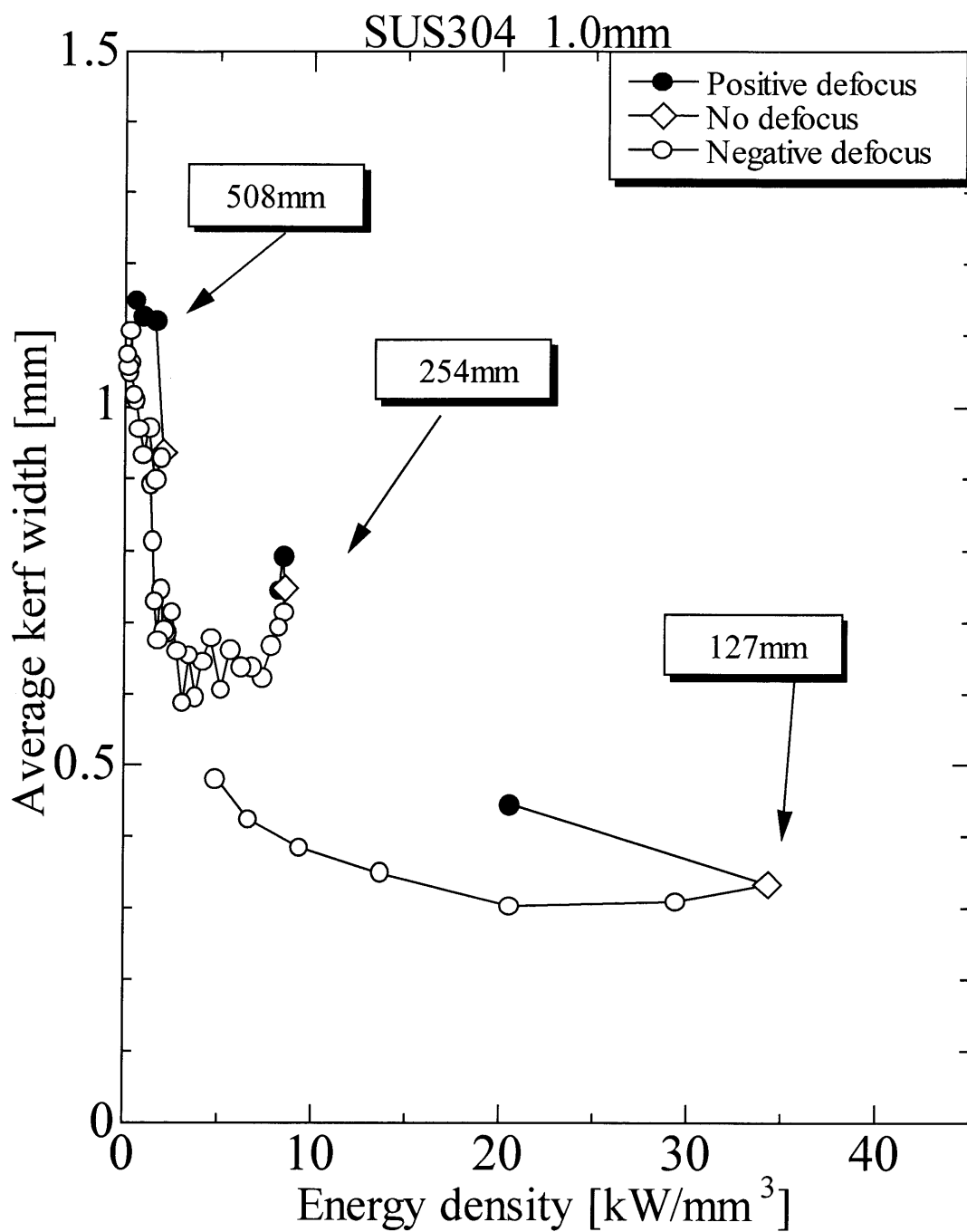


Fig.4-6-2 Relation between average kerf width and energy density

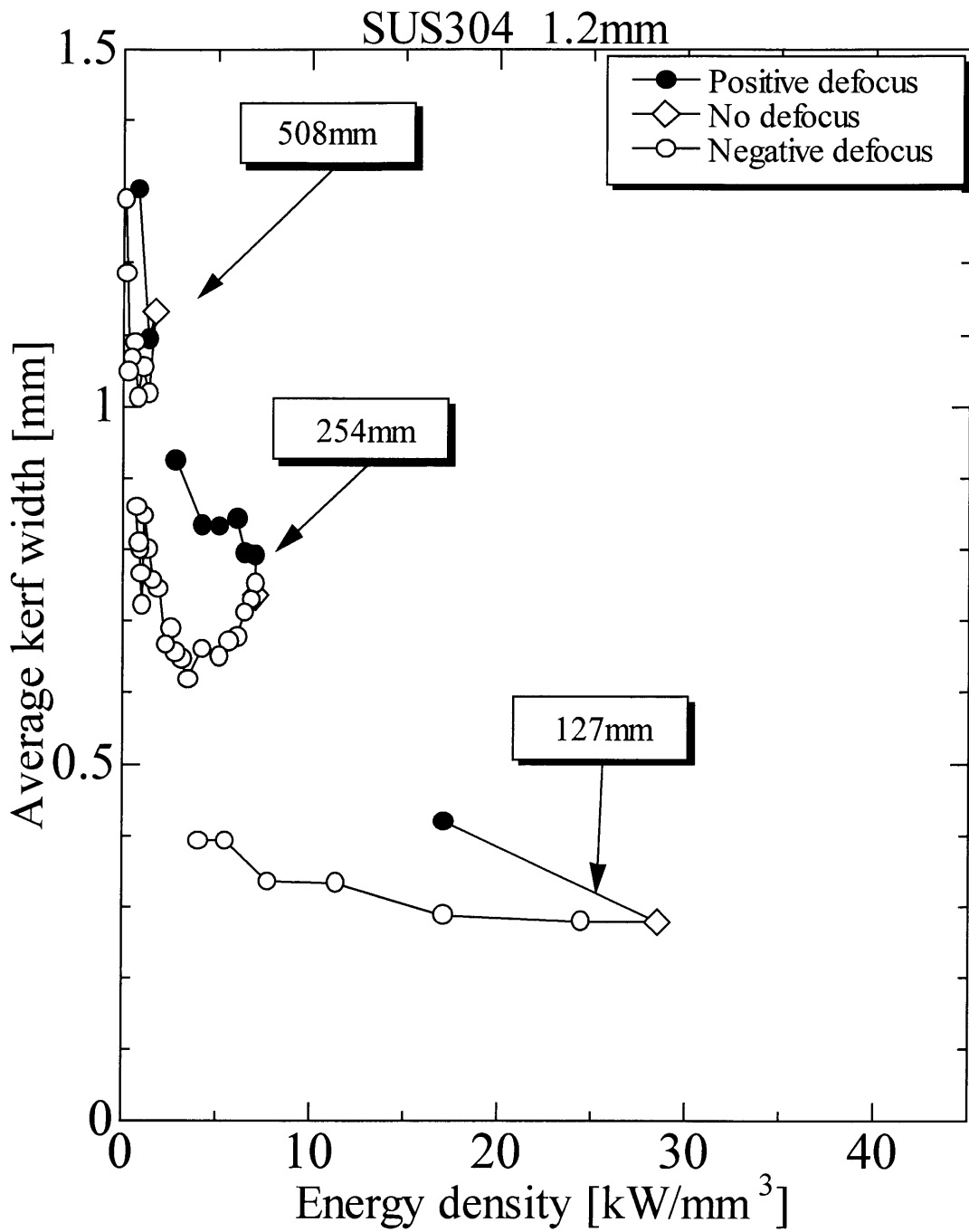


Fig.4-6-3 Relation between average kerf width and energy density

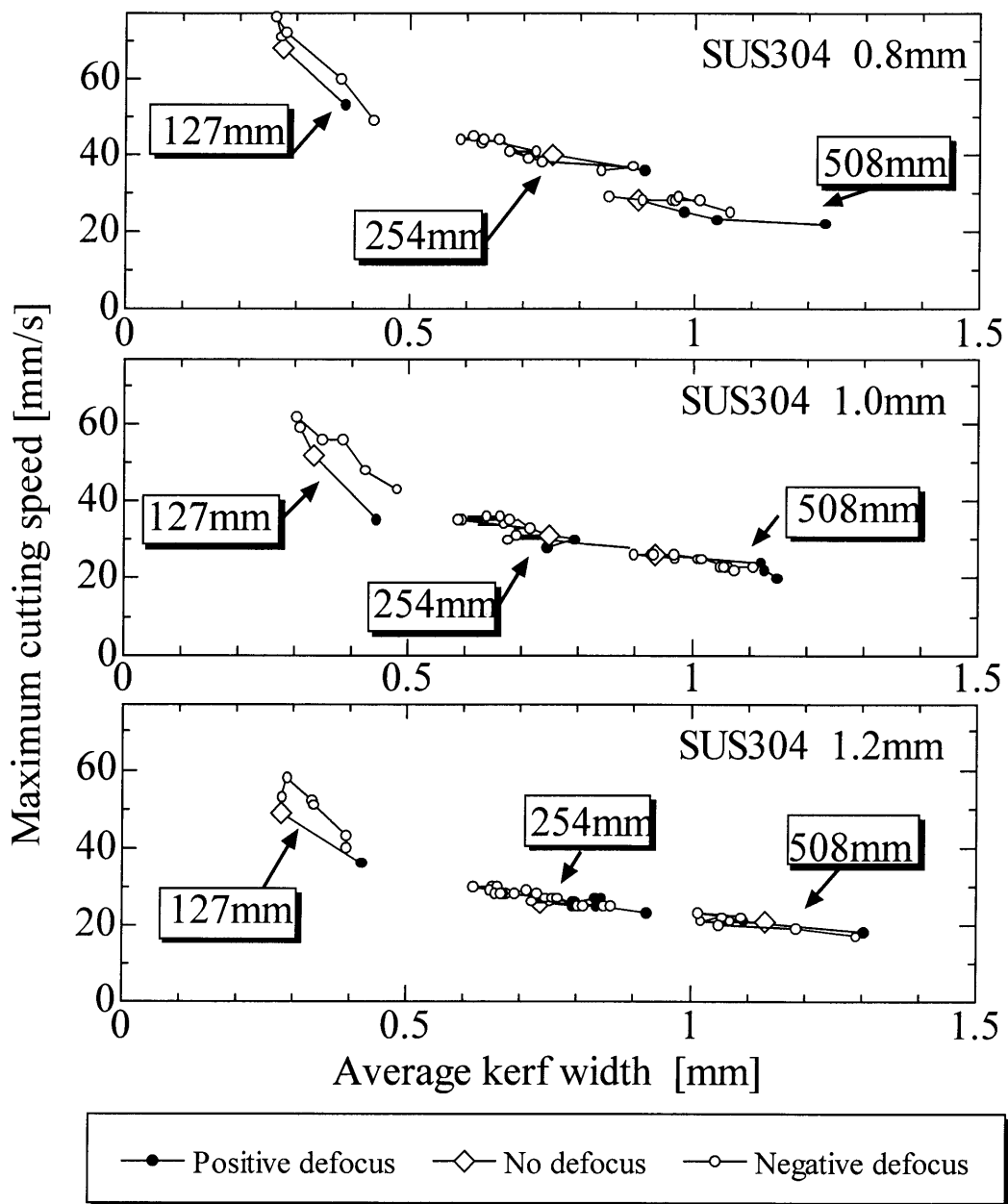


Fig.4-7 Relation between maximum cutting speed and average kerf width

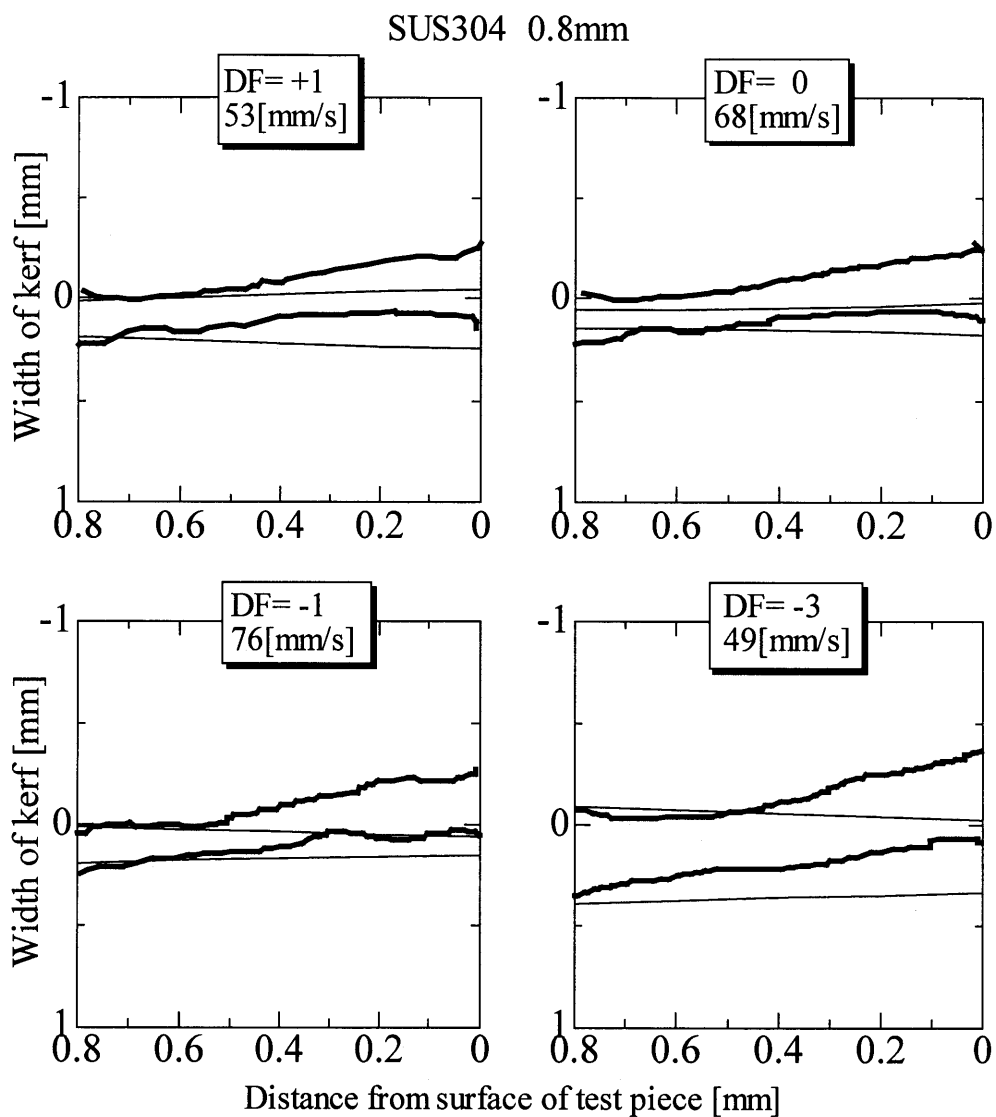


Fig.4-8-1 Shape of kerf section at 15mm from piercing point ;focal length 127mm , at maximum cutting speed

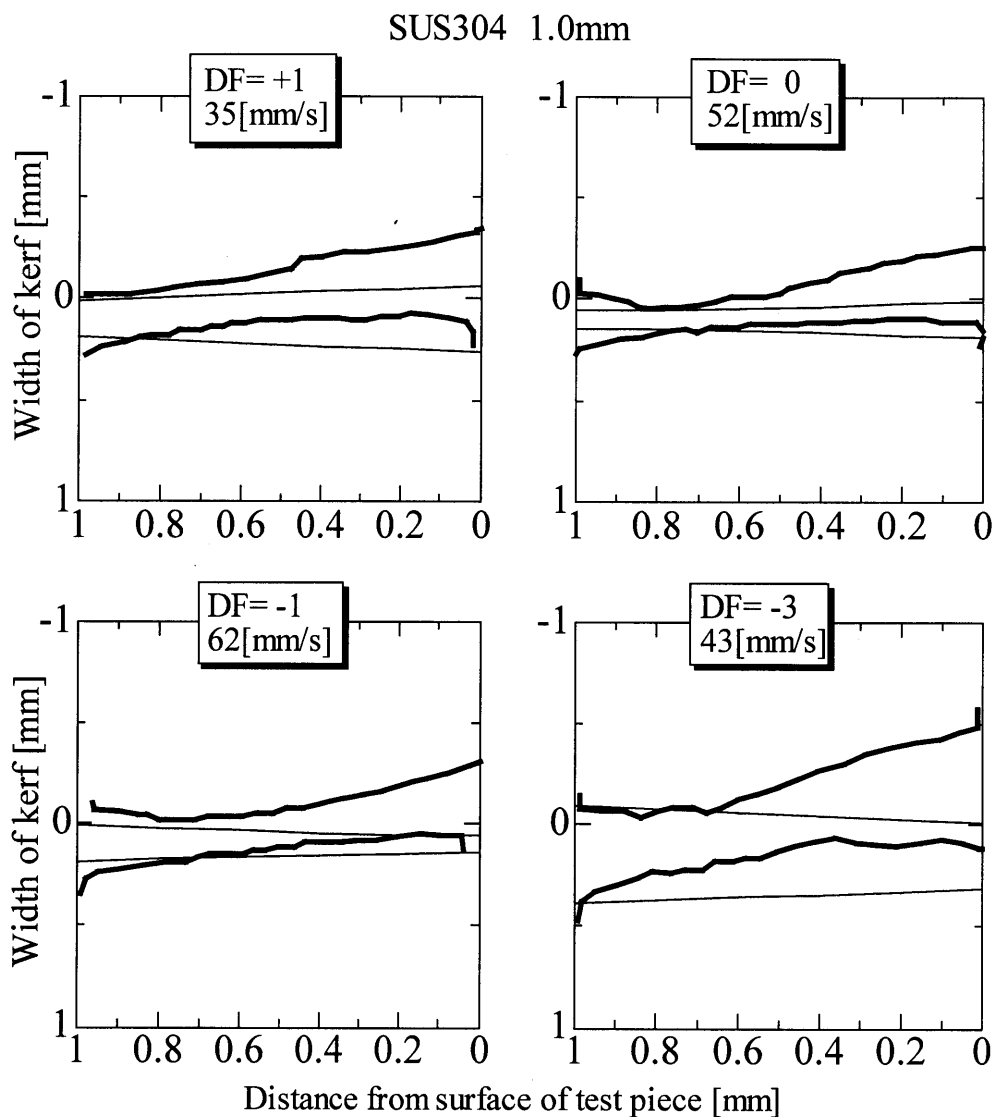


Fig.4-8-2 Shape of kerf section at 15mm from piercing point ;focal length 127mm , at maximum cutting speed

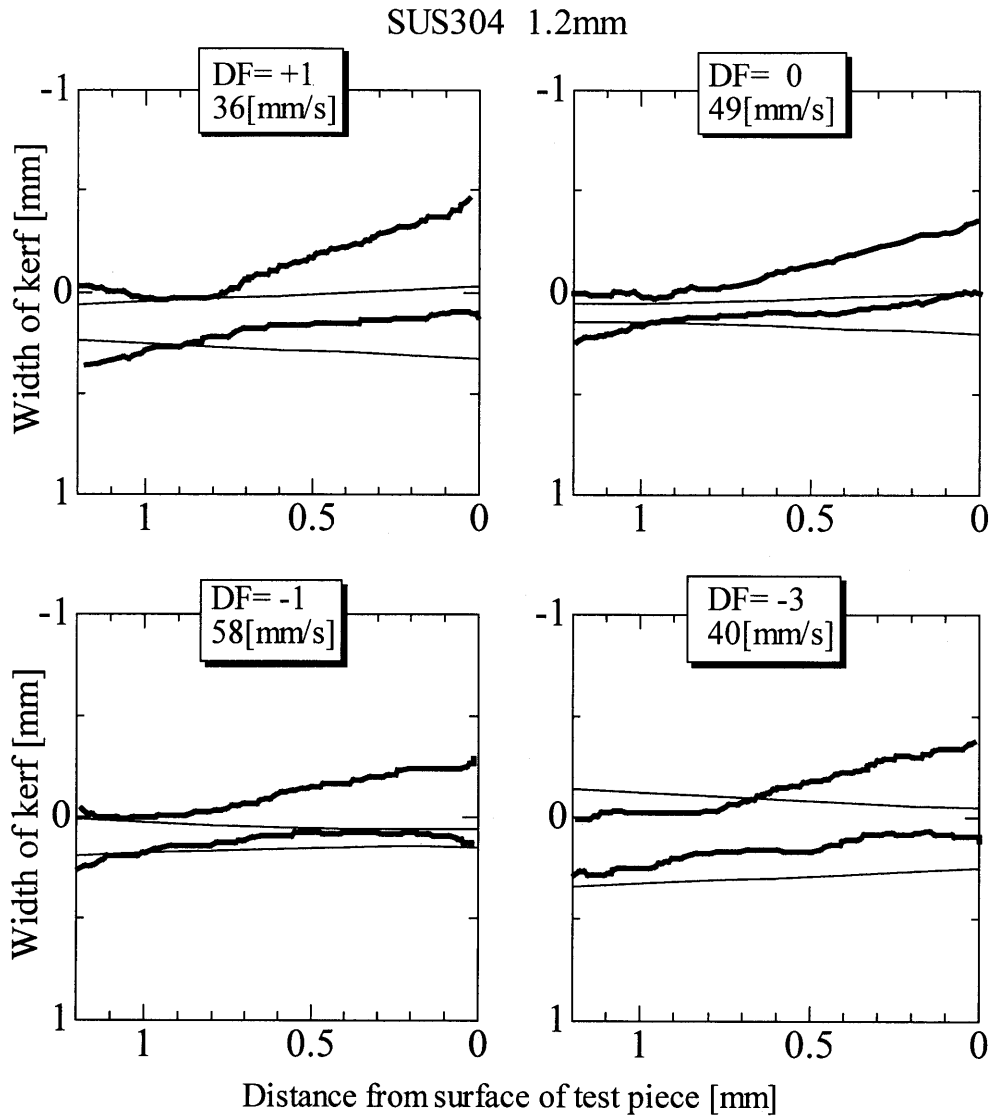


Fig.4-8-3 Shape of kerf section at 15mm from piercing point ;focal length 127mm , at maximum cutting speed

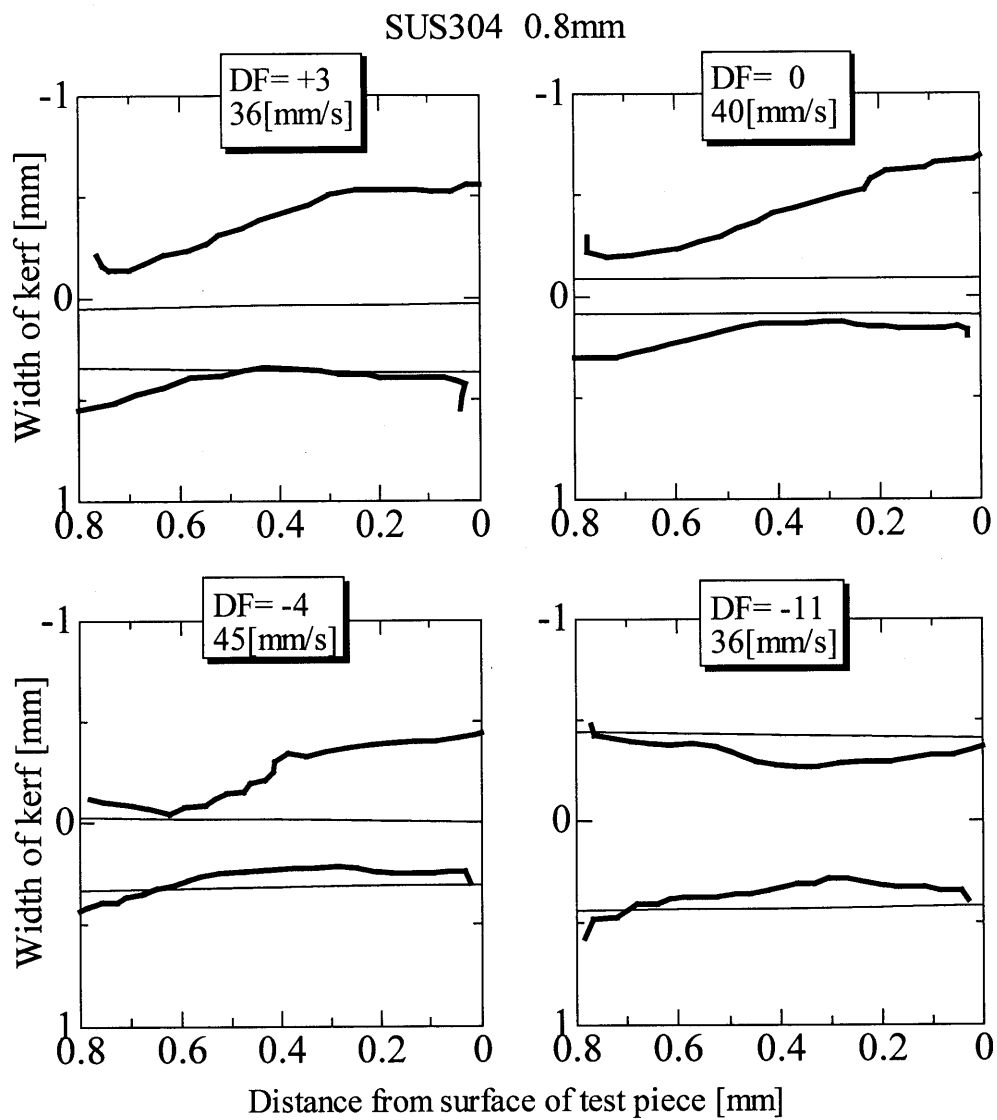


Fig.4-8-4 Shape of kerf section at 15mm from piercing point ;focal length 254mm , at maximum cutting speed

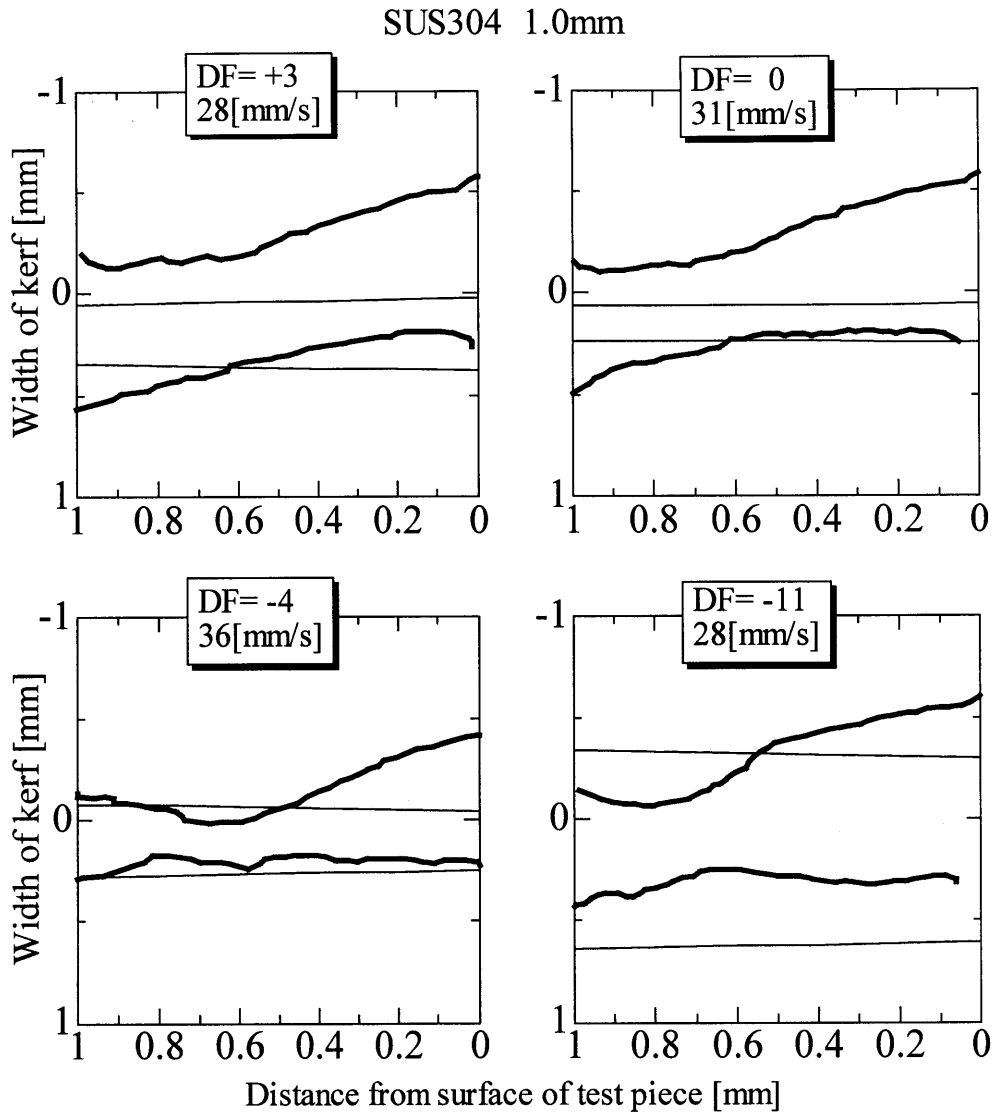


Fig.4-8-5 Shape of kerf section at 15mm from piercing point ;focal length 254mm , at maximum cutting speed

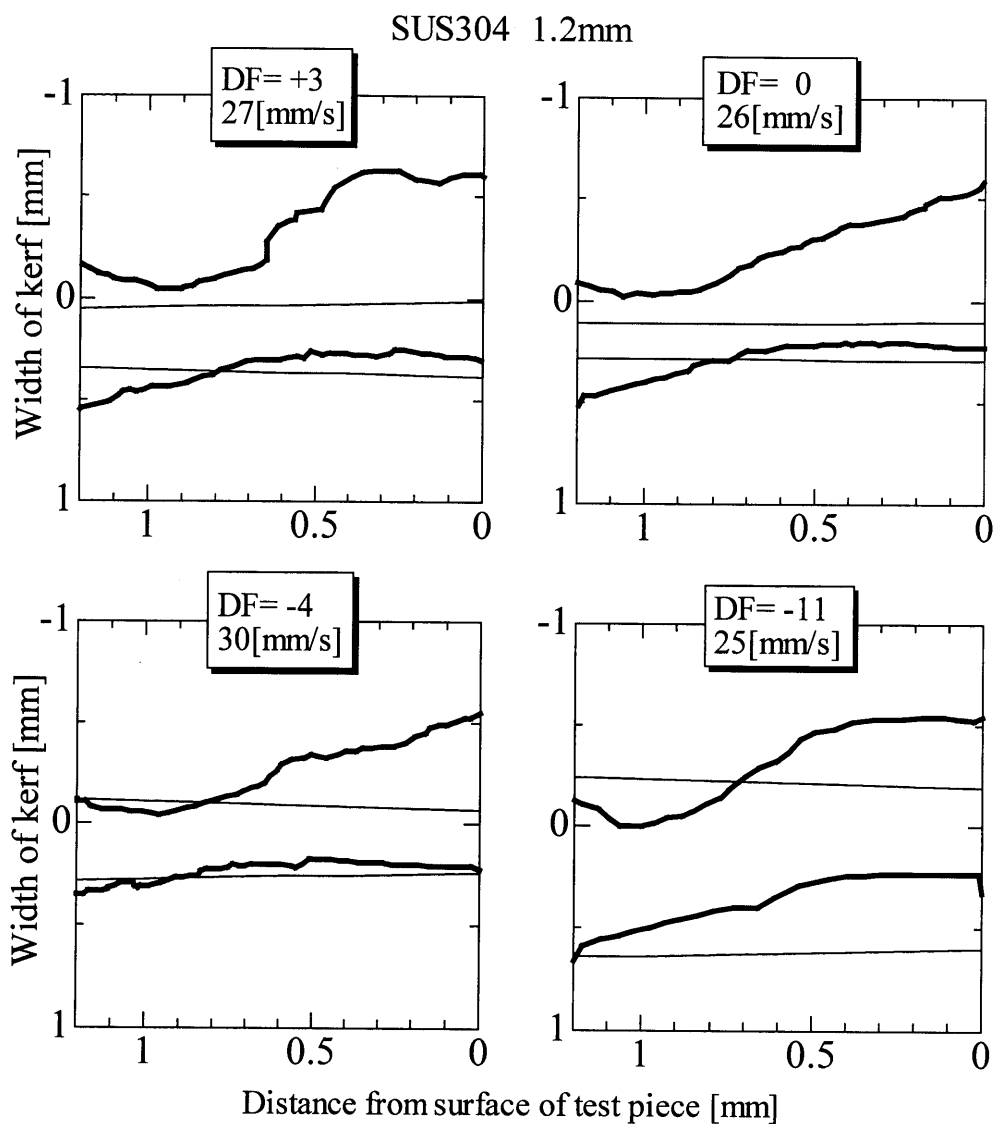


Fig.4-8-6 Shape of kerf section at 15mm from piercing point ;focal length 254mm , at maximum cutting speed

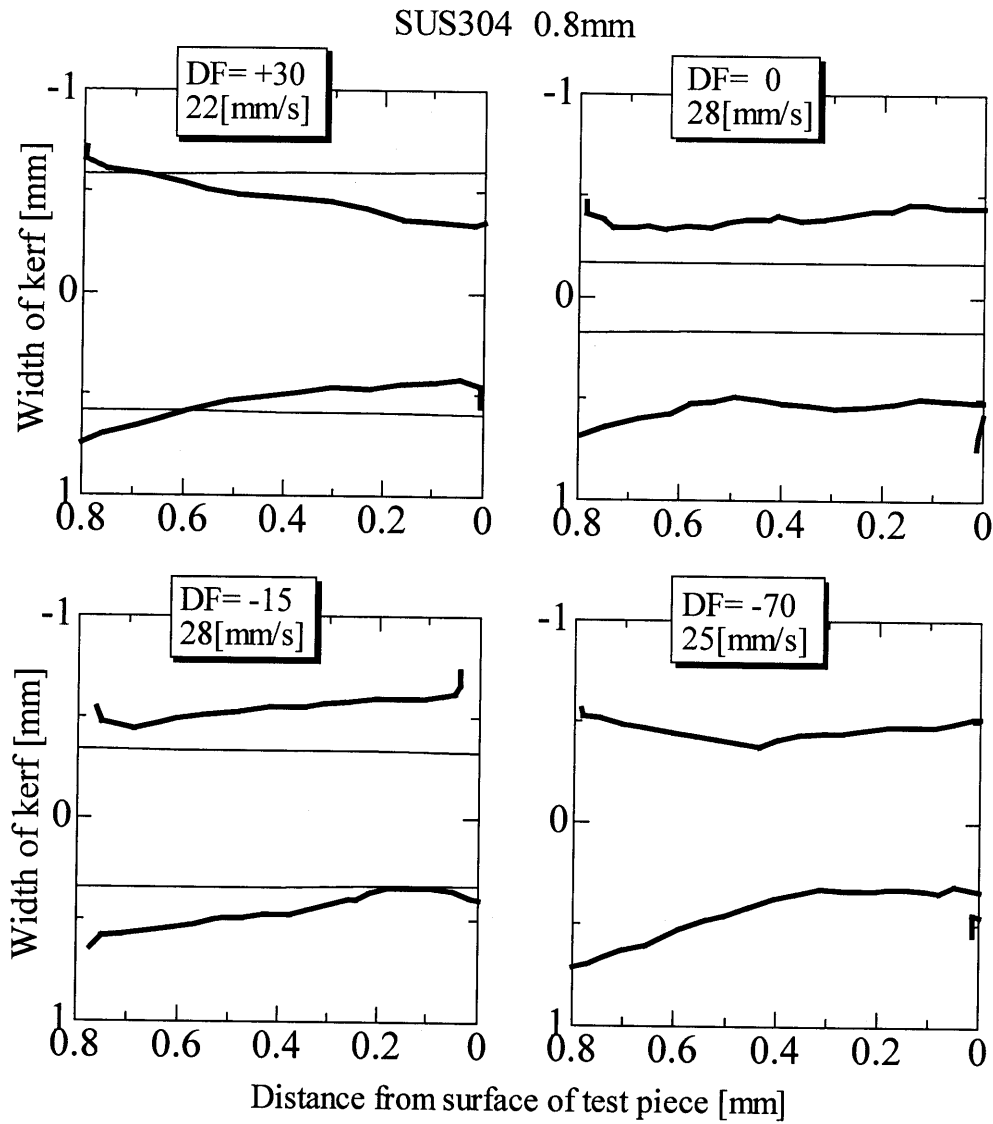


Fig.4-8-7 Shape of kerf section at 15mm from piercing point ;focal length 508mm , at maximum cutting speed

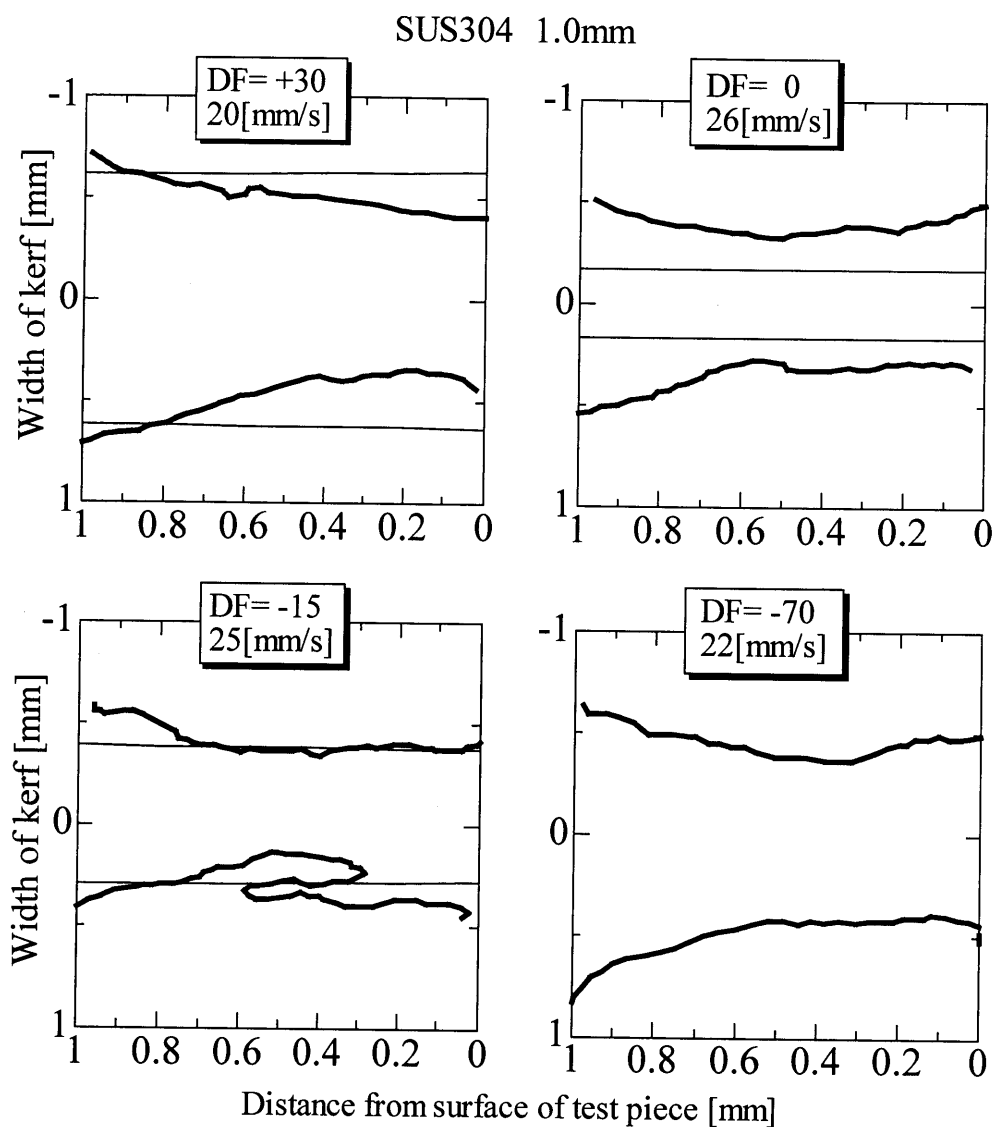


Fig.4-8-8 Shape of kerf section at 15mm from piercing point ;focal length 508mm , at maximum cutting speed

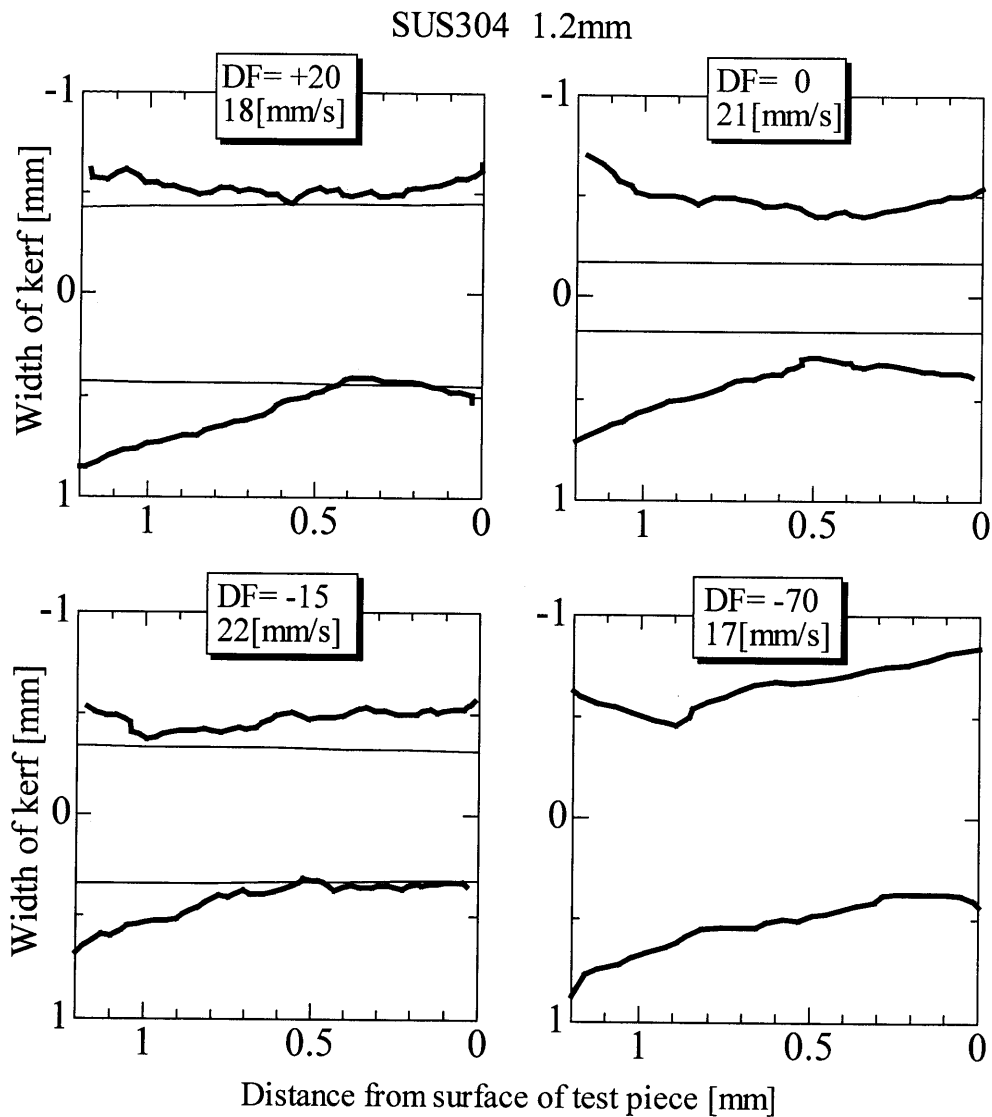


Fig.4-8-9 Shape of kerf section at 15mm from piercing point ;focal length 508mm , at maximum cutting speed

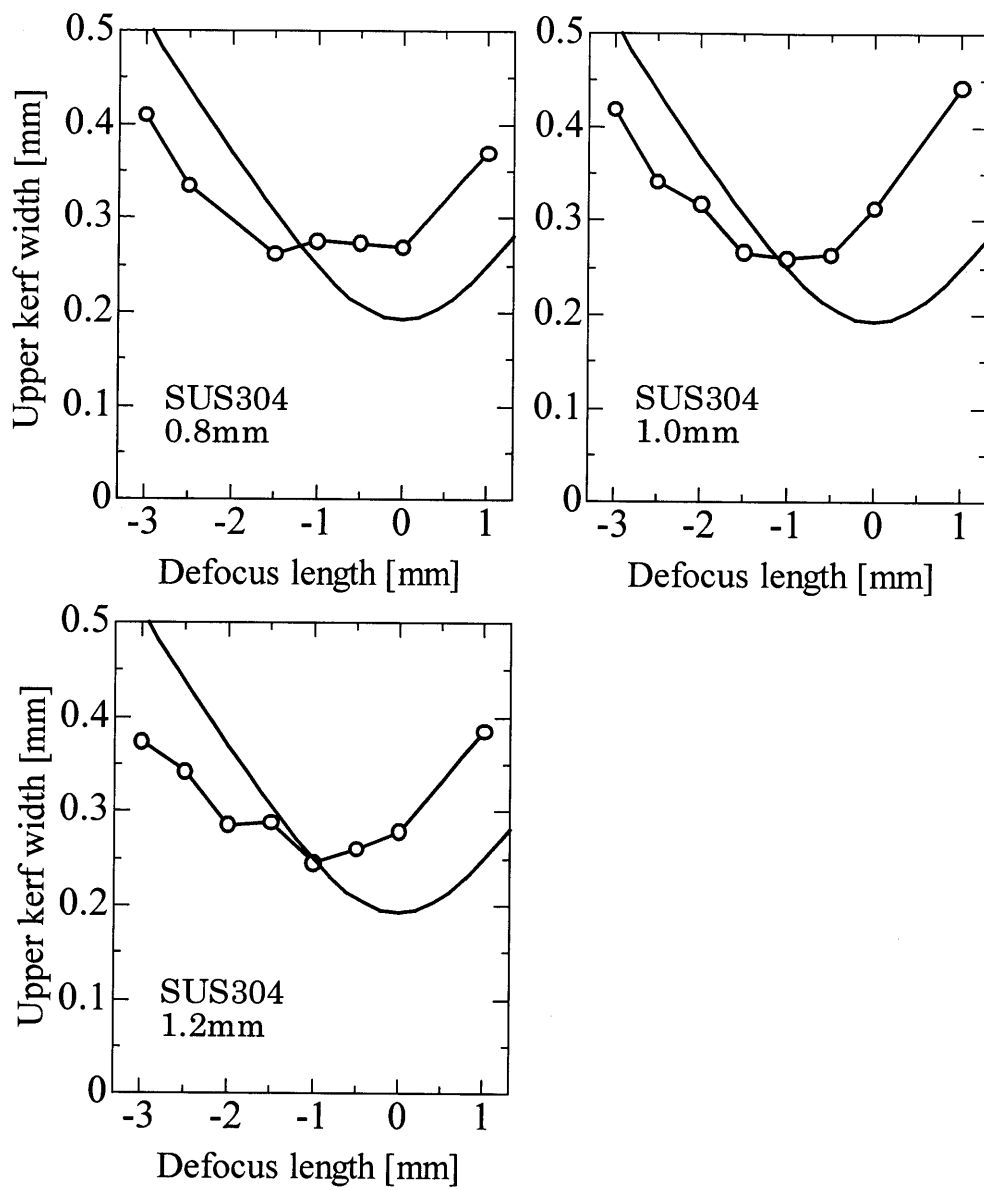


Fig.4-9-1 Relation between defocus length and upper kerf width (focal length 127mm)

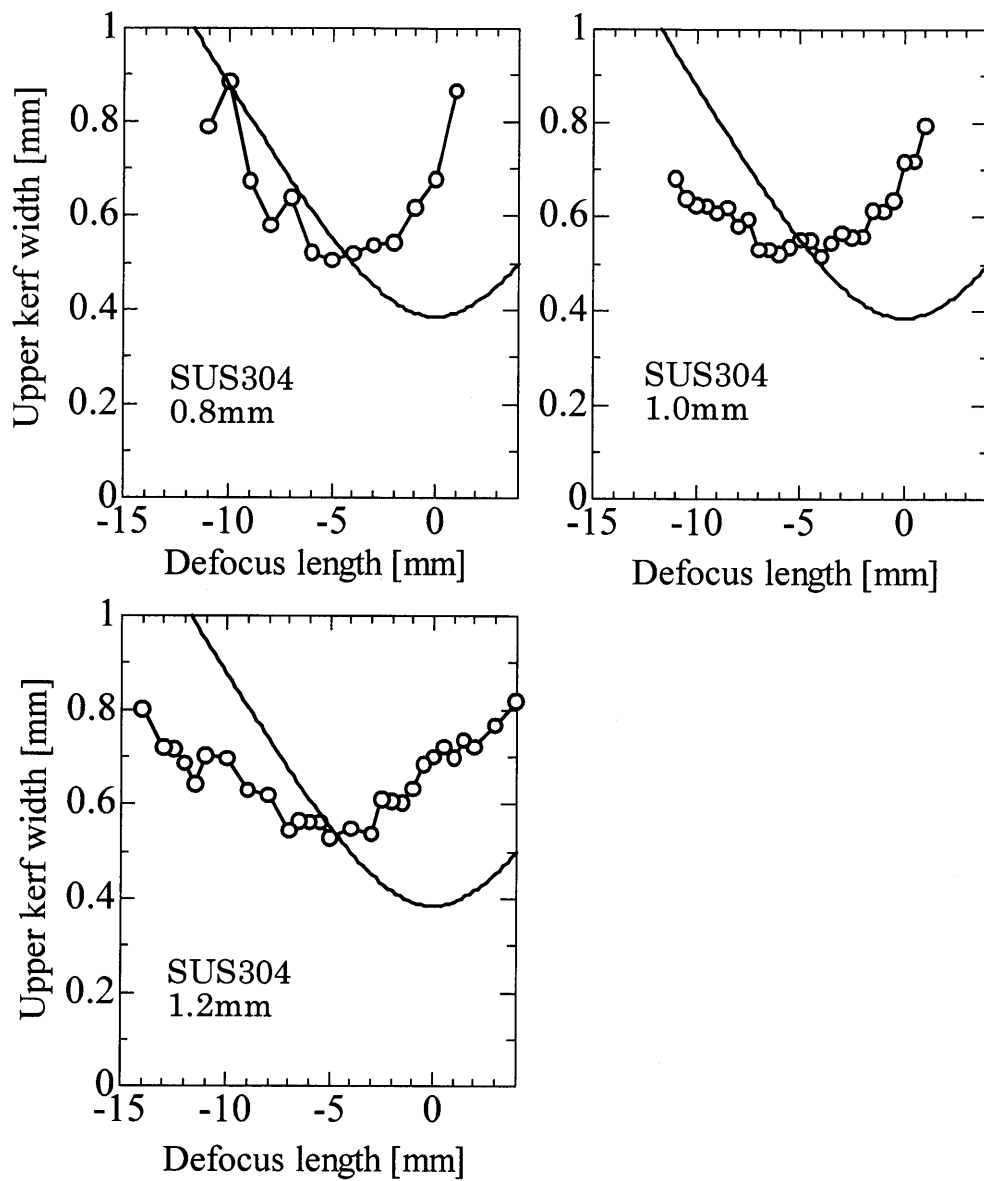


Fig.4-9-2 Relation between defocus length and upper kerf width (focal length 254mm)

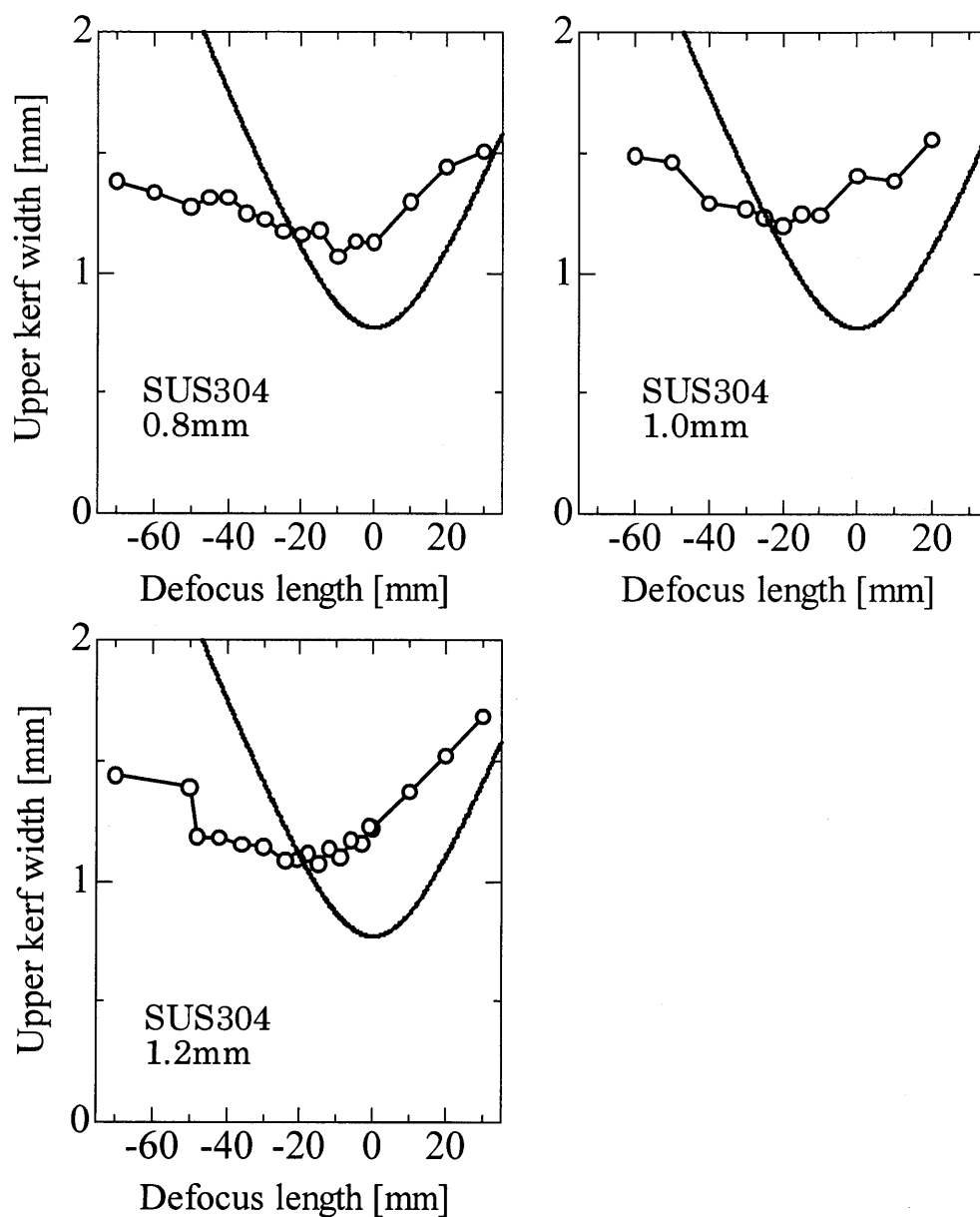


Fig.4-9-3 Relation between defocus length and upper kerf width (focal length 508mm)

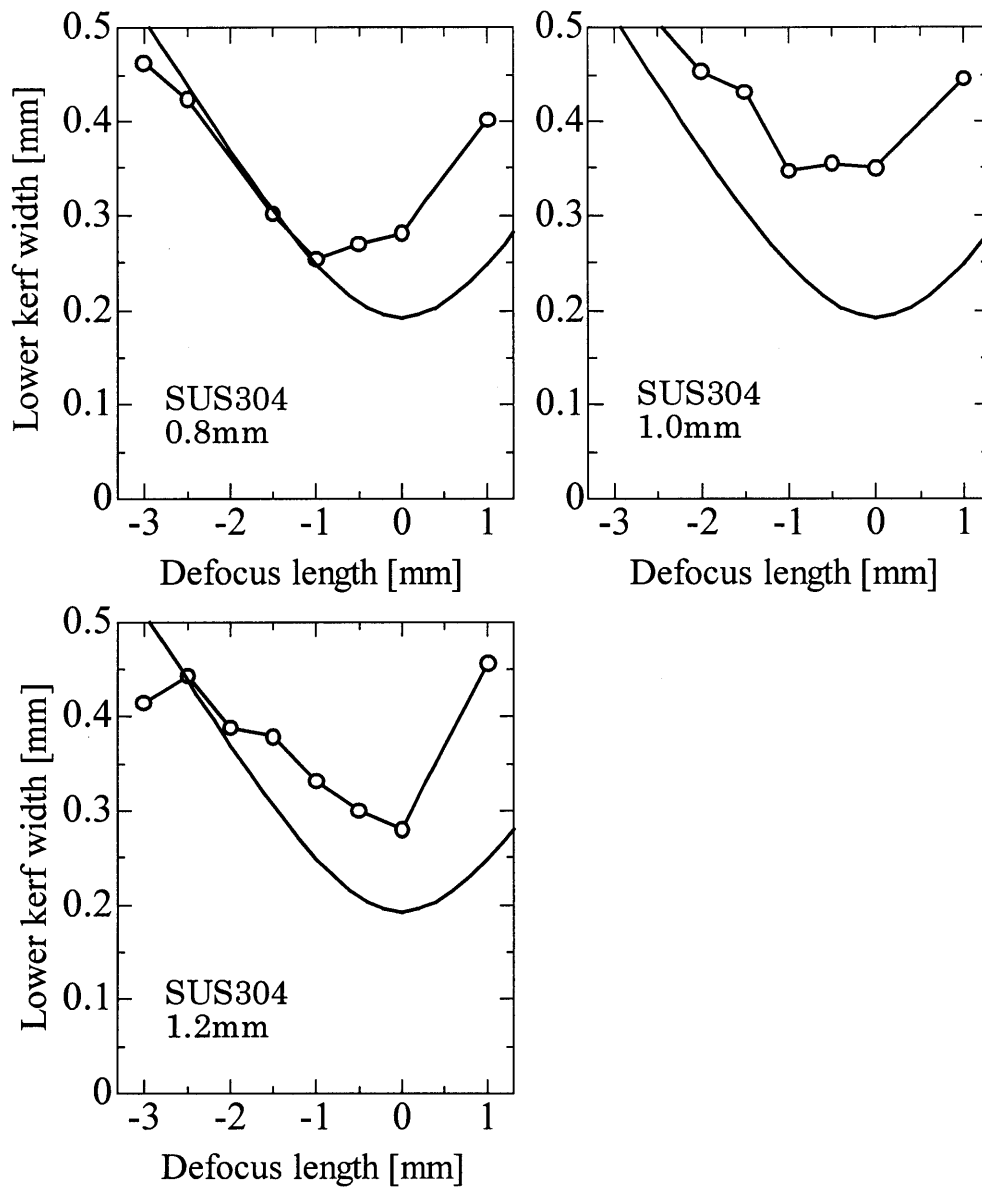


Fig.4-10-1 Relation between defocus length and lower kerf width (focal length 127mm)

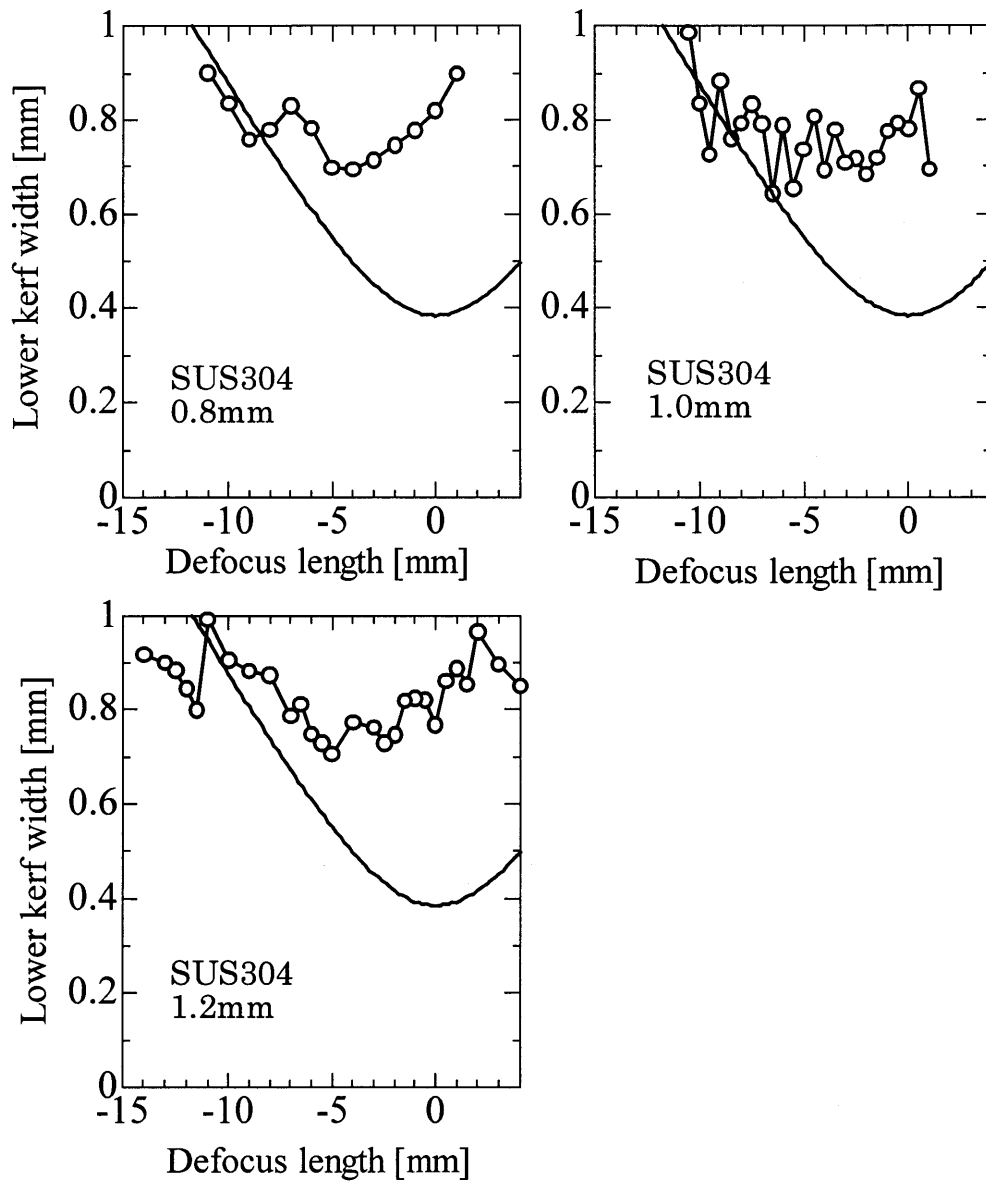


Fig.4-10-2 Relation between defocus length and lower kerf width (focal length 254mm)

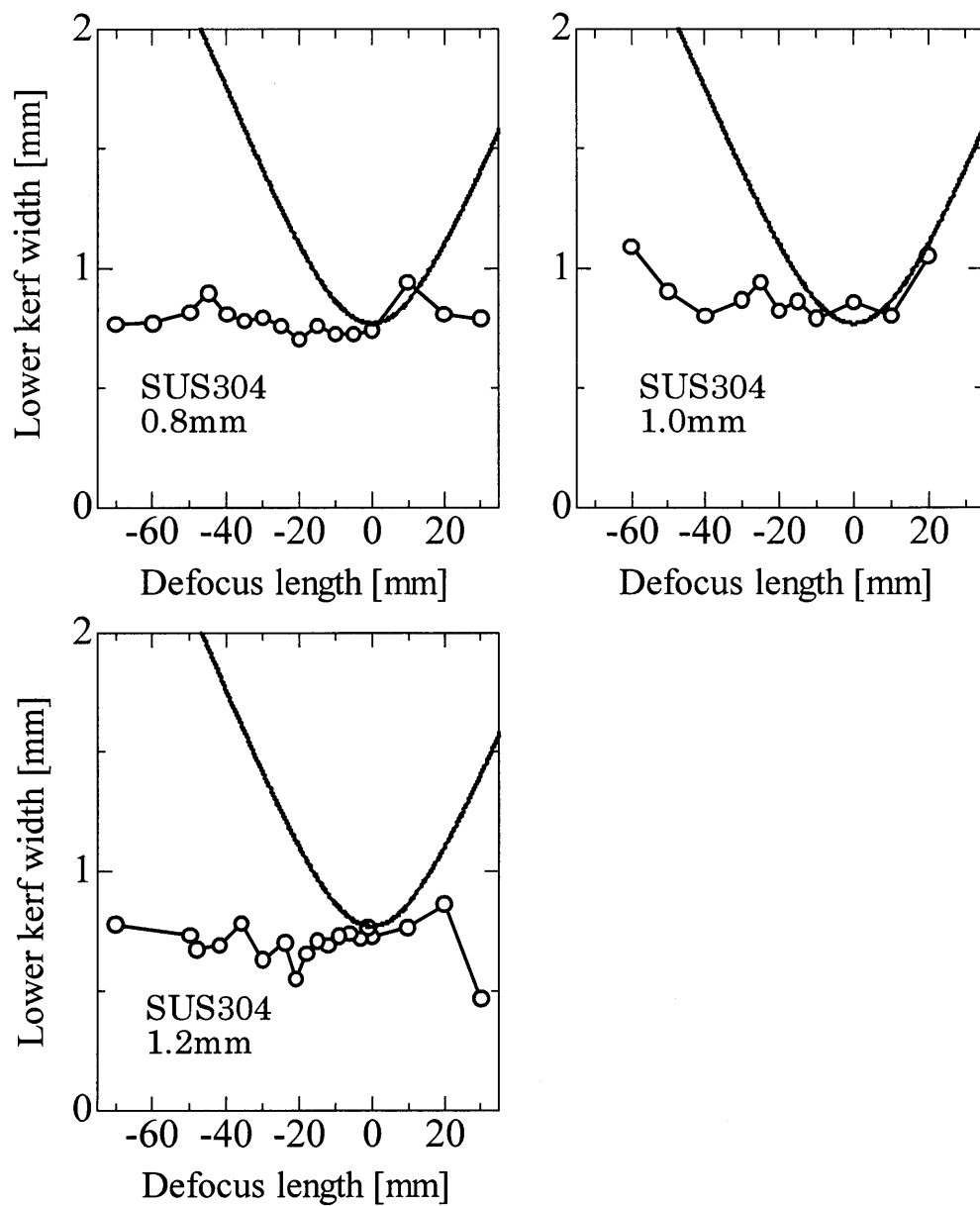
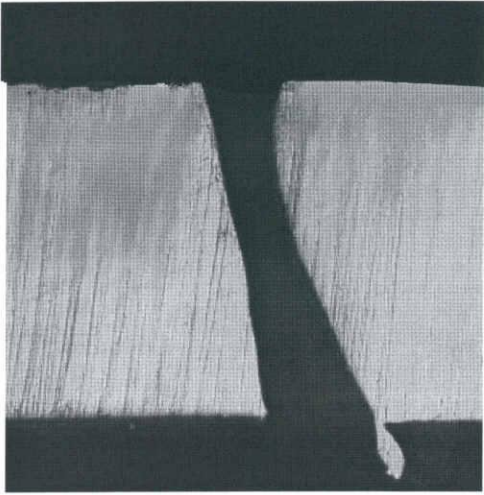
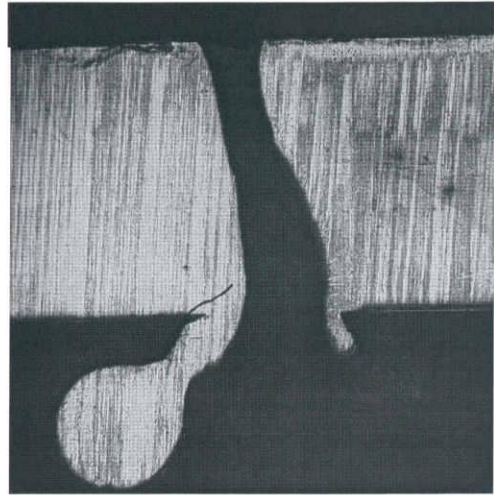


Fig.4-10-3 Relation between defocus length and lower kerf width (focal length 508mm)

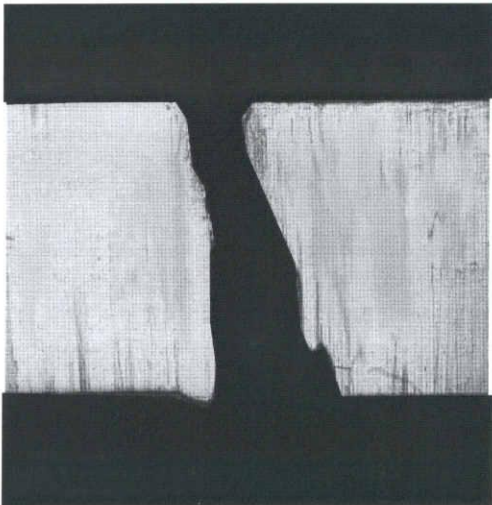
127mm Lens
SUS304 1.2mm



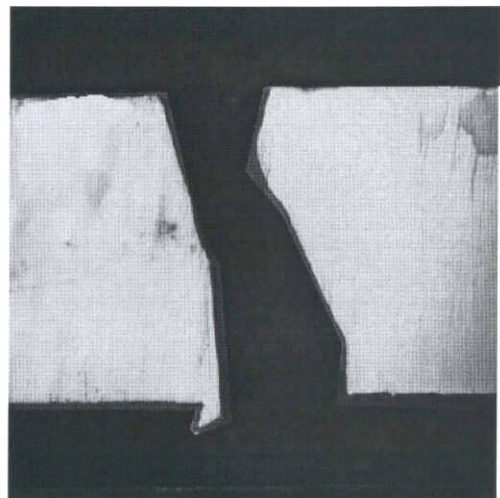
DF=+1mm
36mm/s



DF=0mm
49mm/s



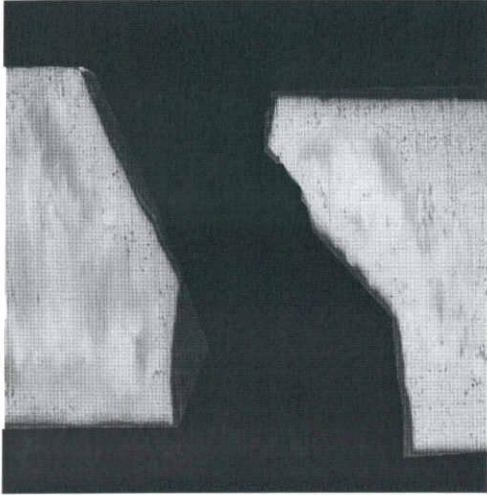
DF=-1mm
58mm/s



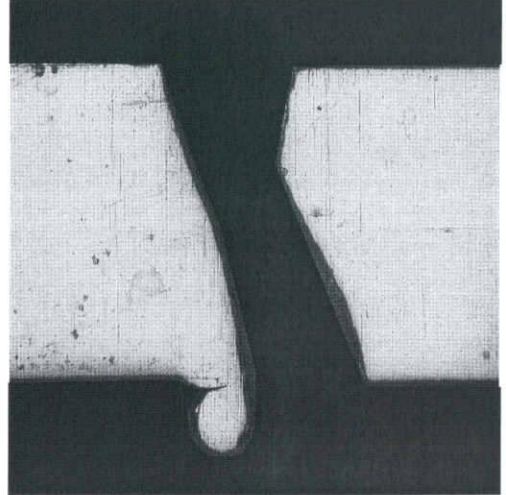
DF=-3mm
40mm/s

Fig.5-1-1
Shape of kerf section at 10mm from piercing point

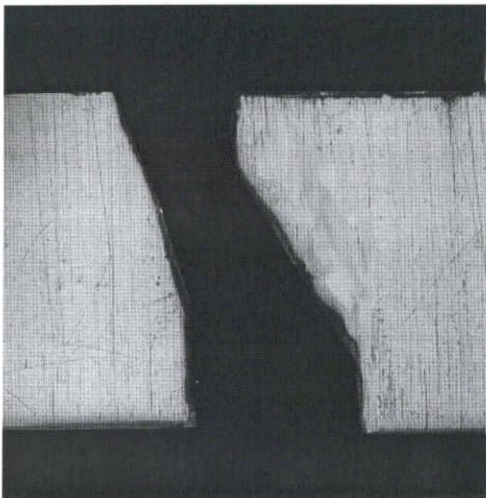
254mm Lens
SUS304 1.2mm



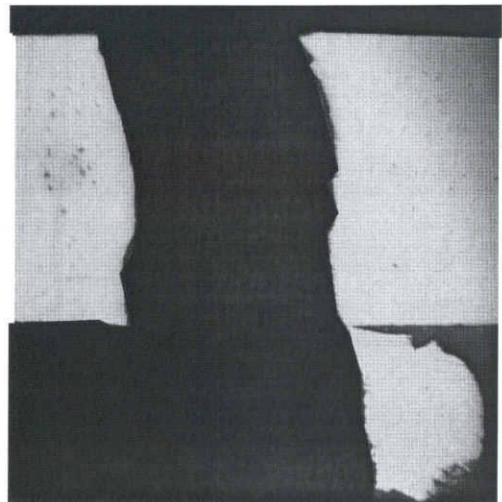
DF=+4mm
25mm/s



DF=0mm
26mm/s



DF=-5mm
30mm/s



DF=-13mm
25mm/s

Fig.5-1-2
Shape of kerf section at 10mm from piercing point