



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	C02レーザによる切断精度に関する研究
Author(s)	金岡, 優
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	乙第4328号
Issue Date	1993-06-30
DOI	https://doi.org/10.11501/3073064
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/49914
Type	doctoral thesis
File Information	000000267495.pdf



CO₂レーザによる
切断精度に関する研究

金岡 優

①

CO₂レーザによる 切断精度に関する研究

平成 4 年 12 月

金 岡 優

目 次

頁

第1章 序 論

1・1	緒 言	1
1・2	レーザ切断に関する従来の研究	7
1・3	本研究の目的	12

第2章 ビーム集光特性の切断品質へ及ぼす影響

2・1	緒 言	16
2・2	ビームの集光特性	18
2・3	実験装置および実験方法	22
2・4	実験結果および考察	25
2・4・1	A1合金の切断品質へのビーム集光特性の影響	25
2・4・2	ステンレス鋼の無酸化切断品質への ビーム集光特性の影響	31
2・4・3	薄板の切断溝テーパ度へのビーム集光特性の影響	35
2・4・4	厚板切断での加工品質へのビーム集光特性の影響	45
2・4・5	コーナ部の溶け落ちへのビーム集光特性の影響	49
2・4・6	非金属材料の切断品質へのビーム集光特性の影響	57
2・5	第2章の結言	63

第3章 パルス特性の切断品質へ及ぼす影響

3・1	緒 言	65
-----	-----	----

3・2	CO ₂ レーザの矩形パルス波形と低入熱加工品質との関係	67
3・2・1	実験装置および実験方法	67
3・2・2	パルスピーク出力の影響	72
3・2・3	パルス周波数の影響	78
3・3	パルス特性の切断面品質に及ぼす影響	89
3・3・1	切断面粗さの形成メカニズム	89
3・3・2	実験装置および実験方法	91
3・3・3	条痕ピッチへのパルス特性の影響	93
3・3・4	切断面粗さへのパルス特性の影響	97
3・3・5	切断溝形状へのパルス特性の影響	101
3・3・6	薄板切断の面粗さへのレーザ出力変動の影響	108
3・4	第3章の結言	111

第4章 偏光度の切断精度へ及ぼす影響

4・1	緒言	113
4・2	偏光特性と加工の原理	115
4・3	実験装置および実験装置	118
4・4	実験結果および考察	122
4・4・1	円偏光度とスリットずれ量の関係	122
4・4・2	レーザ出力および加工速度とスリットずれ量の関係	125
4・4・3	板厚とスリットずれ量の関係	130
4・4・4	焦点位置とスリットずれ量の関係	133
4・4・5	アシストガス中の酸素含有量とスリットずれ量の関係	135
4・5	第4章の結言	137

第5章 アシストガスの適正条件

5・1	緒言	138
5・2	実験装置および実験方法	140
5・3	誘引特性	143
5・4	厚板の切断結果	147
5・4・1	サイドノズルからの酸素ガスシールドの効果	147
5・4・2	二重ノズルによる切断結果	156
5・4・3	切断品質の改善現象の検討	164
5・5	アシストガス圧の影響	168
5・5・1	ノズル直下のアシストガス圧の測定	168
5・5・2	ドロス高さに及ぼすアシストガス圧の影響	171
5・5・3	軟鋼厚板の切断品質に及ぼすアシストガス圧の影響	173
5・6	ノズルの芯ずれ	175
5・6・1	コアンダ効果	175
5・6・2	ノズル芯ずれと加工品質の関係	177
5・7	第5章の結言	179

第6章 軟鋼薄板のレーザー切断における切断溝幅の推定

6・1	緒言	181
6・2	実験装置および実験方法	183
6・3	切断溝幅推定の計算結果	184
6・3・1	移動線熱源による熱伝導計算	184
6・3・2	レーザー光のスポット径	189
6・4	実験結果及び考察	190
6・4・1	Y_{max} とSの関係	190
6・4・2	アシストガスに酸素ガスを使用した切断溝幅	191
6・4・3	アシストガスにアルゴンガスを使用した切断溝幅	195
6・4・4	切断中に透過する出力の測定	199
6・4・5	理論値と実験値との比較	202

6・5	第6章の結言	205
第7章	被加工物の物性値と切断特性	206
7・1	緒言	206
7・2	熱定数との関係	207
7・3	被加工物のビーム反射率と偏光度の影響	222
7・4	第7章の結言	225
第8章	結論	226
参 考 文 献		232
主 要 記 号 一 覧		238
図・表一覧		242
謝 辞		248

第1章 序 論

1・1 緒 言

金属材料や非金属材料の切断は、製造における基幹をなす工程であり、その方法や適用分野は幅広い。ガス切断のように鉄を酸化させて融点を下げて切断する化学的な方法、プラズマやレーザー切断のように局部的に溶解または昇華させる方法、タレパンのようにせん断による方法、切削による切断などその方法は多岐にわたる。これら切断の技術は、一部を除き長い歴史を持っているが、多くの場合実用化が先行し、技術的な裏付けがその跡を追う例が多い。ところが、切断品質の改善や効率の向上を図るうえで、切断現象がどのようなメカニズムによって引き起こされているのか、あるいは加工条件のパラメータがどのように作用するのかという基本的な問題を解明することの重要性は言うまでもない。

近年、多品種少量生産・試作期間の短縮・騒音等の環境問題といった社会的要請から、加工方法にレーザー加工を用いる場合が多くなってきている。これは、レーザー加工法が、レーザーのエネルギーを微小な空間に集中させ、そのエネルギーで物質を非接触に高速・高精度に加工する従来の機械的、熱的加工法から脱却した新しい加工法であることと、数値制御装置（NC）や高剛性の加工テーブルとの組み合わせによって、信頼性と生産性の向上、あるいは自動化に最適な加工法であるためである。

一方、レーザ発振器の開発は、1960年のメイマン (T.H.Maiman) によるルビーレーザの発振成功以来、数多くのレーザ発振が確認されている。He-Ne、Ar、CO₂、YAG、半導体レーザなど今日実用化されている有力なレーザは1964年までに発振が実現されたものである。その後もダイ(色素)レーザ、エキシマレーザ、半導体レーザの室温連続発振など急速な技術の発展と広がりをみせたが、平行して加工や計測などの応用技術の開発が試みられた。大出力レーザの出現に伴い、レーザ加工は最先端加工技術の一つとして注目され、今や世界的に活発な研究開発が進められている。

レーザの加工用熱源としての特徴は、集光部のパワー密度が現存する熱源中最高とされる電子ビームと同等或いはそれ以上になることである。電子ビームが主として真空中での使用に限られるのに対し、レーザビームはその波長の光を通す媒質であれば雰囲気圧力を問わず遠方にもエネルギーを伝送できる。したがって、レーザ加工では電子ビームにはできない種々の加工が可能になる。レーザ切断の特徴を整理すると、以下のようになる。

- (1) 集光スポット部でのエネルギー密度は容易に 10^8 W/cm^2 以上にも高められ、従来では加工が困難とされていた超硬脆性材料、すなわち超鋼合金、ダイヤモンド、セラミックスなども加工が可能である。
- (2) ビーム照射による非接触加工であるので、加工反力がなく薄肉部品やゴム、紙、皮革などの高精度な加工が可能である。
- (3) 局部的加熱方法なので、入熱量が少ないために加工ひずみや熱変形の少ない加工ができる。
- (4) 電子ビーム加工のようなX線の発生がなく防御装置が不要なために、加工装置の構造が簡単である。

(5) エネルギー密度と照射時間を変えることにより、同一機械で切断、溶接、熱処理が行える。

(6) 加工中の騒音、振動が無く、作業環境の改善につながる。

(7) 接触加工のような工具の摩耗が無いため、長時間にわたり同一の加工品質を維持できる。

レーザ加工の適用分野では、 $10.6\mu\text{m}$ の遠赤外で発振する CO_2 レーザは最も発振効率が高いこと、大出力が比較的容易に得られることで、幅広く用いられている。国産のレーザ発振器が生産現場において高い信頼性をもって導入され始めたのは、1977年からの通産省工業技術院の大型プロジェクトとして官民共同の研究が行われてからである。最近では、レーザ出力が 10kW までの発振器が実用化されており、溶接用には主に $3\sim 10\text{kW}$ 、切断用には、 $1\sim 3\text{kW}$ の出力範囲の発振器が用いられる。 CO_2 レーザの開発当初は、直流放電励起のものが主流であった。しかし近年では、メンテナンス性および省スペース性のすぐれている交流放電励起のものが主流になりつつある。また、加工用途では、金属・非金属の切断・穴あけが 80% 以上の割合を占めているが、溶接や熱処理への適用割合は少ない。

図1.1 には切断中の外観、図1.2 にはレーザ切断で用いる加工ヘッドの概要を示す。図示していない発振器より出射されたレーザビーム (Laser beam) は金コーティングされた銅の反射鏡 (Bending mirror) によって鉛直方向に曲げられ ZnSe 製レンズ (Lens) によって集束される。レンズはビームの吸収による温度上昇を防ぐためホルダーを通じて水冷されている。ノズルは 50° の円錐形であり、ノズル出口穴中心とビームの光軸との位置関係は調整ネジ (Coaxial adjustment) で修正できる。アシストガス (Assist gas) は、レンズ下のノズルホルダー側壁から供

給し、ノズルからレーザービームと共に被加工物に噴射する。切断を目的として被加工物に照射されたレーザービームは、熔融や蒸発を瞬時に起こすが、アシストガスは酸化・燃焼作用によって加工効率を高めたり、熔融金属の除去を行なうために用いる。

レーザーの加工技術は、旋盤、ボール盤、研削盤といった汎用工作機械による加工技術に比べ、加工ソフトの蓄積や加工メカニズムの解明が不十分であるため、特殊加工の域を出ていない。その理由は、集光したレーザービームのパワー密度が極度に高いため、これを物質に作用させると瞬時に熔融、蒸発が生じ、通常の熱源による加工現象とは比較にならないほど複雑な現象が生じるためである。とくに、パルス波形やビームモードは機種ごとに異なるため、加工結果は用いる機種によって異なるのが普通である。このため、加工は機種に応じて適正条件を経験的に決定しなければならない、必ずしも適正加工条件の裕度或いは加工制御範囲は広くないのが実状である。したがって、レーザー加工の適正制御を行うためには、加工現象を詳細に解明し、制御因子を抽出する必要がある。

本研究では、CO₂レーザー加工機による切断加工をとりあげ、加工精度を向上させるための制御因子の抽出とその最適制御に関する検討を行ったものである。

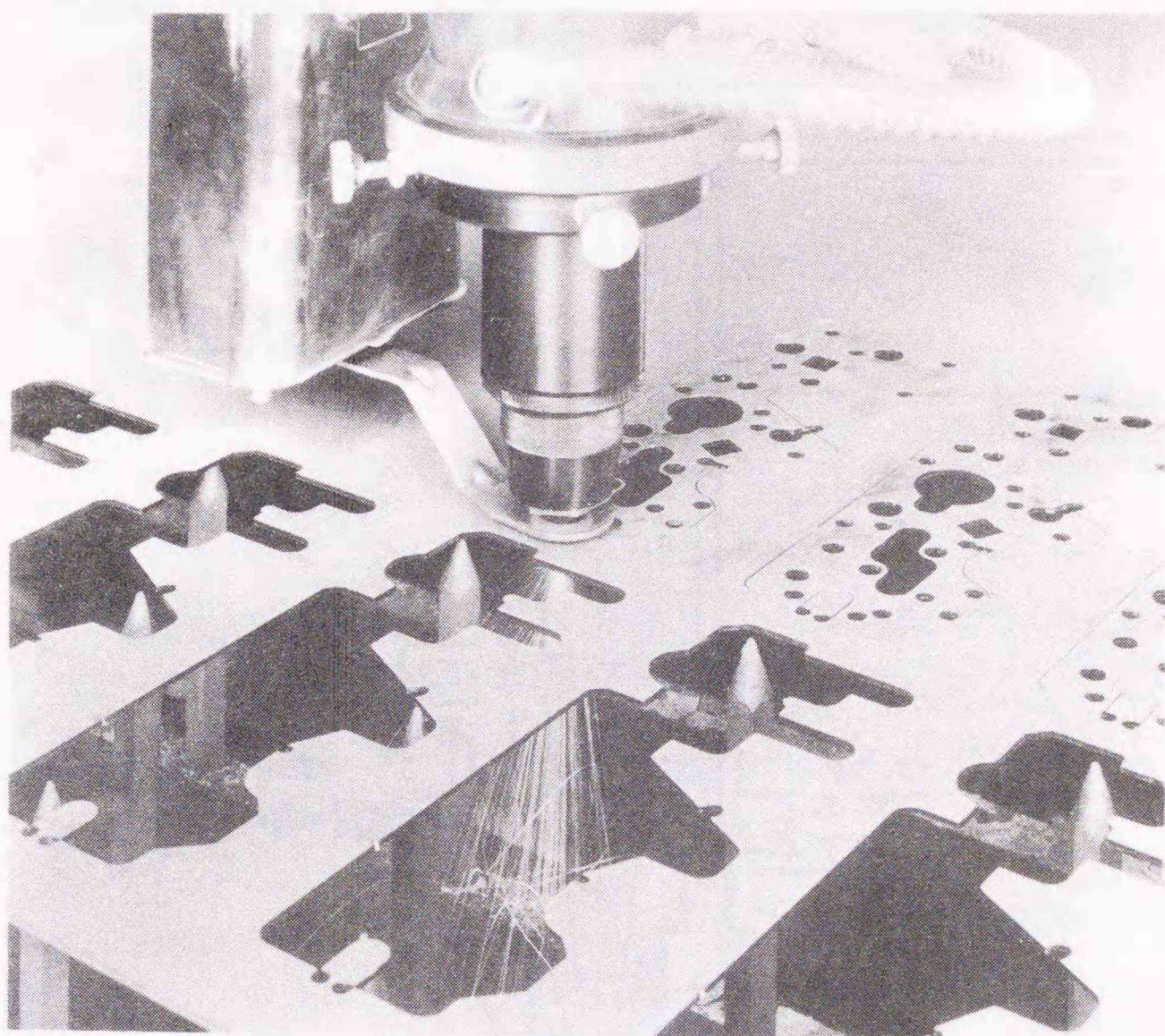


図 1 ・ 1 切断中の外観

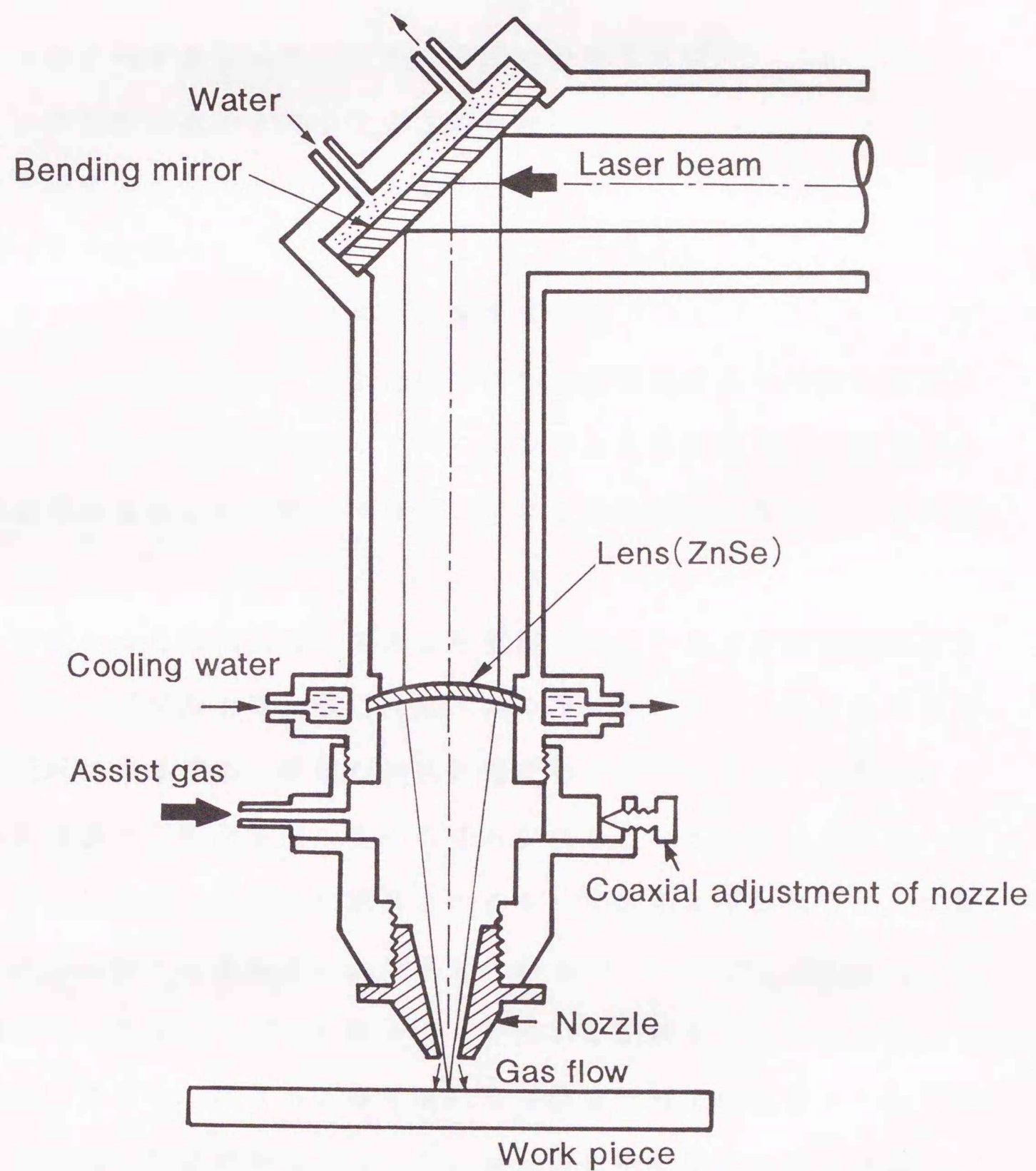


図 1 ・ 2 切断用加工ヘッドの構造

1. 2 レーザ切断に関する従来の研究

レーザー切断に関する従来の研究を内容別に分類すれば、

(1) レーザ切断の加工メカニズムに関するもの

(2) 加工特性及び加工条件に関するもの

に大別できる。

(1) レーザ切断の加工メカニズムに関する研究

荒田ら⁽¹⁾が切断速度に応じた切断溝各部の特徴により、切断形態を入熱過剰で異常燃焼状態のセルフバーニングから入熱不足で板厚下部の切断面品質が悪化した状態のガウジングまでの5段階の変化で示している。

レーザービームと同軸状にノズルより噴出するアシストガスに酸素ガスを用いるレーザー切断では、酸化反応エネルギーとレーザーエネルギーの両者が切断溝形成に寄与する。荒田らは切断速度による両エネルギーの割合、および切断速度と切断面温度の変化を明らかにしている⁽²⁾。さらに、照射エネルギーに対する切断中に消費されるレーザーエネルギーの割合は、切断速度の増加に伴って増えることを示している⁽¹⁾。

軟鋼材料をアシストガスに酸素ガスを用いて切断すると、レーザー出力の変動がなくても、約 2 m/min 以下の低速度域で切断面にレーザー切断特有の周期的な条痕を生じる。これは材料の酸化反応の伝播速度が、ビームの速度（切断速度）よりも速いことに直接起因する。また、切断前面の挙動を高速度カメラで撮影することにより、材料とレーザービームの相互作用を解析する研究がなされている⁽³⁻⁵⁾。

CO_2 レーザーのCW（連続波-Continuous wave）出力には種々の原因

により出力リップルが含まれる。その場合レーザ出力のリップル率が増大すると切断面粗さが悪化することが宮崎ら⁽⁶⁾によって報告された。この場合、高速軸流タイプの発振器におけるレーザガス流の乱れがレーザ出力のリップルの原因になっている。最近の宮本ら⁽⁷⁾⁽⁸⁾の研究では、様々なリップル率のレーザ出力波形を人為的に与え、リップル率と表面粗さの関係を定量的に明らかにしている。

切断加工では切断面の粗さやドロスの付着などが品質評価の重要な対象となるが、切断溝の幅や、垂直度も重要な品質評価の対象である。集光ビームのスポットサイズが小さいほど切断溝幅が狭く、切断面精度の良好な加工が可能となる⁽⁸⁻¹⁰⁾。

レーザ切断では切断面が被加工物表面に垂直であることが望ましいが、実際には若干の傾きが発生する。この”傾き”は切断溝の表面と裏面の幅寸法の違いによる”傾き”と、切断溝自体の傾斜による”傾き”とがある⁽²⁰⁾。切断溝の傾斜による傾きは偏光の影響によることが多い。偏光特性の加工性能に及ぼす影響については、Olsen⁽¹¹⁾により直線偏光で切断した場合、偏光面方向への切断速度が向上することや切断面が傾斜する現象について報告されている。

切断溝の表面と裏面の差の違いによる傾きは、主に被加工物表面での集光スポットサイズの影響を受ける⁽¹⁰⁾との報告がある。

理論的には、高エネルギー密度のレーザビームを集束・照射するだけで材料の除去、すなわち切断は可能ではあるが、このようなレーザビームのみによる切断は、薄い金属またはプラスチックなどの非金属材料に限られる。金属材料の切断には、溶融と除去の2つの過程が関与する。そのためアシストガスを用いる必要があり、一般的にはレーザビームと同軸状にノズルよりガスを噴出する。これによって溶融物にモーメンタム

が加わり、除去がより促進される。したがって、ノズルはガスジェットを生成する重要な影響因子であり、松野⁽¹²⁾やM. Erard⁽¹³⁾は切断におけるノズルの最適形状の検討を報告している。

さらに、このアシストガスに酸素ガスを用いることによって、酸化反応が発熱と酸化皮膜を発生させレーザービームの吸収率が向上し、切断能力は飛躍的に向上する。宮本⁽¹⁴⁾は各種金属材料の反応生成熱を示し、Arガス、O₂ガスによる限界切断速度を明らかにした。しかし、最近では金属材料の切断でも、切断面に発生する酸化物を防止するために、N₂ガス⁽¹⁵⁾やエアー⁽¹⁶⁾を用いて、被加工物裏面への溶融金属（ドロス）の付着なしで加工する方法が開発された。

(2) 加工条件パラメータの影響

加工パラメータが切断結果にどのような影響を及ぼすかを知ることが切断品質を最適化するために重要なことである。荒田ら⁽¹⁷⁾はSS400材に対し出力1kWのCW切断におけるレーザー出力、アシストガス圧、被加工物の板厚と切断速度の関係を明らかにしている。

切断能率や切断品質はアシストガスの圧力に大きな影響を受ける。荒田ら⁽³⁾は酸素ガス圧力、切断速度と切断品質の関係を示している。その結果は、軟鋼の薄板において良好な切断品質が得られる限界速度はアシストガス圧が1kg/cm²までは急激に増大し、それ以上の圧力ではあまり大きく変化していない。森ら⁽³¹⁾は薄板を対象にしたアシストガス圧と面粗さの改善について報告している。

浦井⁽¹⁸⁾は軟鋼材料における良好な切断品質が得られる領域を加工レンズの焦点距離を変えて比較を行っている。その結果では焦点距離の短い加工レンズは薄板の高速切断に有利であり、焦点距離の長い加工レンズは薄板から厚板までの、幅広い板厚の加工に対応できることを示して

いる。

米山ら⁽¹⁹⁾は、アクリルの切断において焦点位置が被加工物表面の上方にはずれるほど、上部と下部の切断溝幅差を小さくする速度領域が狭くなると報告している。これは焦点位置が上方にはずれるほど被加工物下部でのパワー密度が減少し、入熱量がほぼ一定となる送り速度範囲が狭くなるためと考えられている。木谷ら⁽²⁰⁾は軟鋼材料における焦点位置と切断溝幅の関係を示している。これはパルス切断の場合であるが、切断溝幅の形成に焦点位置が大きく影響することがわかり、焦点を被加工物の上面付近に設定したところで最も切断溝幅が狭くなる。

焦点位置のドロス付着に対する影響の検討も行われている。木下ら⁽²¹⁾は厚板の軟鋼材料の切断において焦点位置が+2mm近傍で良好な切断品質を得ることが可能なノズルと被加工物間距離が広範囲にあることを示した。

精密加工、複雑形状の加工を可能にしたのはパルス発振によるレーザー切断である。パルス加工条件のパラメータが加工品質にどのように影響するか検討したものに、C.S.Lee.A.ら⁽²²⁾の研究がある。切断溝幅とパルス幅の関係では、中央部と下部の溝幅はパルス幅の影響を受けるが、上部はパルス幅の影響を受けない。切断面粗さに対してはパルス幅に関係なく中心線平均面粗度Raは0.8mm~1.4mmの間に存在する。パルス幅と限界速度の関係では、軟鋼とアルミニウムはほぼ同じ挙動を示すが、銅は逆の現象を起こし、パルス幅0.9ms付近でピークになる。パルス幅と加工表面と裏面との位相ずれ量の関係では、パルス幅を増大させると位相ずれは減少し、1.2msでその変化はなくなると報告している。

一般にCW切断では切断現象の周期的性質⁽³⁾によって切断面には規

則的条痕が形成されるが、J.Powellら⁽²³⁾はこの条痕の発生周波数の2倍のパルス周波数で切断すると切断品質は最も良くなると報告している。

ドロス付着の改善に対しては、後藤ら⁽²⁴⁾が板厚1.6mmのSPCCを用いて検討を行っている。CW切断ではドロスの付着が起こらないドロスフリーの良好な切断品質が得られる領域わずかなのに対し、レーザ出力をパルス化し、時間比率1.0以上でドロスフリーの良質切断が行えると報告している。

宮本⁽²⁵⁾は平均出力を一定として1パルス当たりのビームON時間の割合であるパルスデューティを変化させて熱影響幅を測定した結果、パルス切断の熱影響層は極めて狭く、パルスデューティが小さくなるほどその傾向は顕著であると報告している。

木谷ら⁽²⁶⁾は、パルス平均出力を一定として軟鋼材料の各種板厚をパルス切断し、パルスピーク出力と切断面粗さとの関係を示している。その結果は、切断面粗さは板厚が薄いほど良好であり、パルスピーク出力を高くするほどすべての板厚で面粗さは改善すると報告している。

1・3 本研究の目的

以上のように、レーザ切断に関するこれまでの多くの研究では、加工メカニズムに関するものや、加工特性および加工条件に関する報告がなされてきたが、切断精度の向上を目的とした研究は少ない。また、その中で扱われた材料はほとんどが軟鋼やステンレス鋼など CO_2 レーザによる加工が比較的容易なものであった。

ここ数年来産業界の広範囲な分野で、生産システムのFMS化とこれに続くCIM化が推進されるようになり、レーザ切断には高品質で高能率な生産手段としての期待が大きい。加工対象も軟鋼やステンレス鋼の他にアルミニウム、アルミニウム合金、チタン合金、銅や黄銅など多岐にわたる。そこで本研究の目的は、 CO_2 レーザの切断における各種材料の加工特性を解明し、加工精度を向上させるための制御因子を最適化しようとするものである。加工精度に影響するレーザビーム側の主な因子には、ビームの集光特性、偏光特性、パルス特性、アシストガス特性などがあり、加工対象や加工目的に応じてその最適化を検討した。

本論文は8章から構成されており、以下に各章毎の概要を述べる。

まず第1章は、序論である。レーザ切断に関するこれまでの研究を概説し、本研究の目的を述べた。

第2章では、レーザ加工の大きな特徴である加工位置でのビーム集光特性と加工品質との関係を詳細に検討する⁽²⁷⁻²⁹⁾。被加工物表面に照射したレーザビームの集光特性には、熱源になる集光されたビームのスポット径とその位置でのエネルギー密度、焦点位置の前後での等価なエネ

ルギ範囲を示す焦点深度、さらにビームの集束角度があげられる。基本的な加工品質の調査結果をもとにして、各集光特性の最適化を追求する。

レーザ加工はそのエネルギーで物質を加熱、溶融、蒸発させる過程をとるため、第3章では、被加工物の熱的な性質に依存した加工特性を示す。レーザ出力は制御性の高いパルス発振が可能であり、加工熱源のパルス化によって被加工物への入熱量は正確に制御することができる。精密加工や複雑形状の加工には、このパルス切断によって被加工物の熱的加工特性を最適に制御することが必要不可欠である。従来のパルス切断に関する研究は、軸流形発振器によるものがほとんどであり⁽²²⁻²⁴⁾、低周波数領域ではパルスピーク出力が低下し、加工特性を正確に表したものではない。本研究では3軸直交形発振器を用いて、とくに低周波数領域での矩形高ピークパルス波形による加工を扱う。パルス発振によるレーザ出力には多くの条件パラメータが存在するため、各パラメータと加工品質との関係を明らかにし、加工特性をさらに向上させるための検討を行っている。

板厚が9 mm以上の軟鋼のレーザ切断では、現状の発振器出力の制約から加工速度が2 m/min以下でしか加工できず、切断速度と酸化反応速度との相互作用による切断面粗れ⁽³⁻⁵⁾が起きる。また、薄板の高速切断では出力リップルによる切断面の粗れ⁽⁶⁻⁸⁾が起きる。このような切断面粗れに対し、その改善を検討した研究は見あたらない。ここでは比較的短いパルス幅に設定されたレーザ出力を用いて、パルスパラメータと切断面品質との関係を定量的に検討する⁽³⁰⁾。さらにパルスパラメータの制御から、切断面品質を改善するための方法についても検討している。

第4章では、レーザ加工における高精度化に重要な光学的性質による

被加工物の加工特性について調べる。偏光と切断品質については、前節で述べたとおり、Olsen.F.O.の報告⁽¹¹⁾があり、その中では定性的な結論を導いている。本論文では反射率の異なる材料を用いて、円偏光度と切断精度との関係を定量的に示し、その最適設定について論ずる⁽³²⁾。さらに、加工条件の各種パラメータと偏光の影響を受ける加工特性の関係を明らかにし、加工精度を向上させる最適パラメータ設定を示す。

第5章では、軟鋼の厚板切断におけるアシストガスの酸素濃度の影響とアルミニウム合金切断でのアシストガス条件の最適設定について示す。レーザ切断用のノズルはアシストガス噴出孔であると同時にレーザビームの出射孔でもあり、ビームとの干渉を避ける必要性から、その形状は流体力学的に理想的な形状とは言い難い。このようなノズルでは内圧をむやみに高くしても流速はほぼ音速で飽和し、出口では気流が急速に広がって乱流や衝撃波を発生し、空気の巻き込みや、熔融金属の波打を引き起こすことがある。その結果、切断能力や切断品質の劣化を招く。本論文では、厚板の切断における空気の巻き込みを防止するノズルの提案とその加工品質を示す。さらに、ステンレス鋼の無酸化切断やアルミニウムの切断など、熔融金属がドロスとして被加工物裏面に付着しやすい加工での最適アシストガス条件を明らかにする。

切断溝幅を加工する以前に推定し、その情報を加工プログラムに反映させることは、切断精度の向上と加工の自動化にとって重要なことである。第6章では、レーザビームの照射面積を点熱源とした切断溝幅の広がりを検討する。レーザビームの照射スポット径を点熱源とした熱伝導理論はW.W.DULEYの研究⁽⁶¹⁾があるが、まだ断片的な点が多く、実加工での検証も行われていない。ここでは、アシストガスに酸素ガスとアルゴンガスを使用して薄板の軟鋼材料の切断実験を行い、熱伝導理論による

結果との比較について述べる。

第7章では、切断品質を向上させるために前章までの検討で得られた加工条件や加工精度と被加工物の物性値との関係について検討する。

第8章は、本研究の総括である。本研究で得られた結論をまとめて示し、今後残された問題点について若干考察している。

第2章 ビーム集光特性の切断品質へ及ぼす影響

2・1 緒言

加工品質の向上を目的とした検討に対して、出力、加工速度、パルスパラメータなど加工条件による加工品質への影響の検討⁽⁹⁾⁽²⁸⁾⁽³³⁻³⁶⁾は数多く報告されている。ところが、他の熱加工法には無いレーザ加工に特有なビームの集光特性と加工品質の関係について詳細に検討されたものは少ない⁽⁹⁾。レーザ切断における熱源は、発振器からほぼ平行に出射されたビームが加工レンズで集光され、被加工物へ照射されたものである。そのため、各種光学系により集光した焦点位置でのエネルギー密度や、その前後での等価なエネルギー範囲を示す焦点深度およびビームの集束角度などの集光特性が加工熱源を特徴づける。このビーム集光特性は加工品質への影響が大きく、かつ加工現象を複雑にしている。ビームの集光特性と、代表的な加工対象物の加工品質との関係を明らかにすることは、レーザ加工の適用範囲を広げて、さらに加工品質を向上させるものと考ええる。

そのため、本章ではCO₂レーザのビーム反射率の全く異なる金属材料と非金属材料のレーザ切断品質を向上させるビーム集光特性の検討を行う。金属材料の切断では、レーザビームの高反射材料であるAl合金の切断、ステンレス鋼をN₂ガスを用いて切断する無酸化切断、および

軟鋼の薄板と厚板の切断品質に及ぼすビーム集光特性の影響を明らかに
する。非金属材料の切断では、アクリル樹脂のレーザ切断における上部
と下部切断溝幅寸法の差が小さくなる切断品質に及ぼすビーム集光特性
の影響を明らかにする。

2・2 ビームの集光特性

レーザビームの集光は幾何光学で論ずる場合と回折から論ずる場合とがある。幾何光学で論ずる場合は、加工レンズへの入射ビーム径を D (mm)、加工レンズ焦点距離を f とすると集光径 S (mm) は式(2-1)で表される⁽⁵⁶⁾⁽⁵⁷⁾。

$$S = 2.44 \frac{f}{D} \lambda + \frac{1}{16} A \frac{D^3}{f} \dots\dots\dots(2-1)$$

ここで

$$A = \left| - \left(\frac{n}{n-1} \right)^2 \cdot \frac{1}{2f} + \frac{2n+1}{(n-1)} \cdot \frac{1}{r} - \frac{n+2}{2n} \cdot \frac{f}{r^2} \right| \dots\dots\dots(2-2)$$

$$r = (n-1) \cdot f \dots\dots\dots(2-3)$$

ここに、 n は加工レンズの屈折率、 λ はレーザビームの波長である。図2・1には各種焦点距離の ZnSe 製レンズ ($n=2.403$) による入射ビーム径と焦点位置での集光径との関係を示す。本実験で使用した2機種 of レーザ加工機におけるレンズ位置での入射ビーム径は、約 2.4 mm と 3.2 mm である。

回折で論ずる場合、ガウシアンビームの伝搬において光軸上の任意の点 Z におけるガウシアンビーム $1/e^{-2}$ 径 $\omega(Z)$ は、

$$\omega(Z) = \omega_0 \sqrt{1 + (Z/b)^2} \dots\dots\dots (2-4)$$

ここで

$$b = \pi \omega_0^2 / \lambda \dots\dots\dots (2-5)$$

で表される⁽⁵⁸⁾。上式中 ω_0 は、ビーム伝搬でのスポット径である。加工レンズによるガウシアンビームの集光においてレンズ上のビーム径 ω_1 は式(2-2)より次式のように表される。

$$\omega_1 = \omega_0 \sqrt{1 + (d_1/b)^2} \dots\dots\dots (2-6)$$

ここで、 d_1 は入射ビームの最小スポット位置から加工レンズまでの距離である。加工レンズで集光されたビームの最小スポット径 S は式(2-7)で表される⁽⁵⁹⁾。

$$S = \omega_0 \frac{f}{\sqrt{(d_1 - f)^2 + b^2}} \dots\dots\dots (2-7)$$

一般に $d_1 \gg f$ となるため、式(2-7)は

$$S = \frac{f \lambda}{\pi \omega_0} \dots\dots\dots (2-8)$$

となる。

以上のように、被加工物上に集光されるレーザビームのスポット径や集束角度は、加工レンズの焦点距離、レンズへの入射ビーム径や焦点位置の影響を大きく受ける。



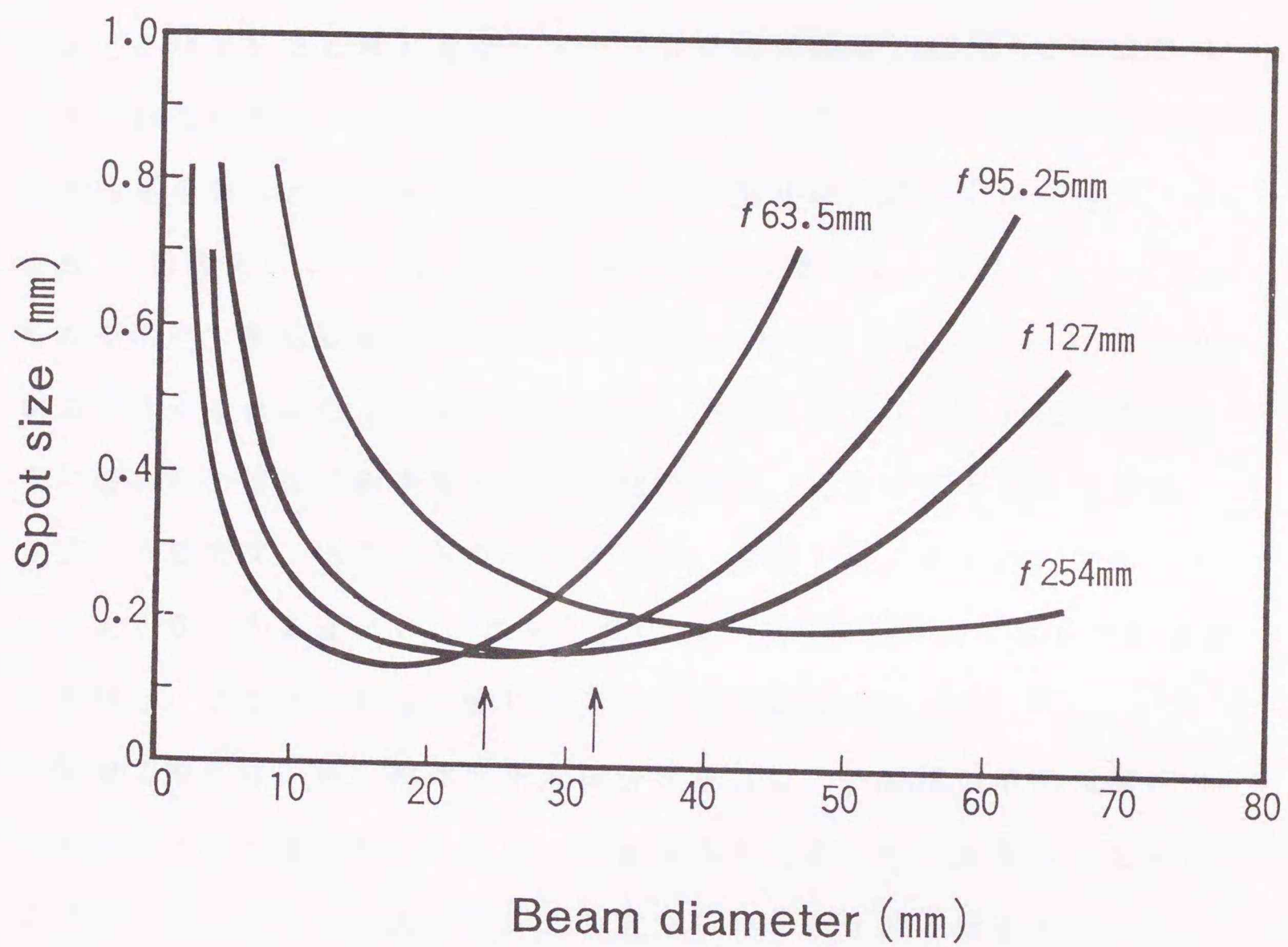


図 2 ・ 1 入射ビーム径と集光径との関係

2・3 実験装置および実験方法

本研究に使用した CO_2 レーザ加工機は、三菱電機製ML2012HB2-3016SとML806T-25Cの2機種である。ビームモードはそれぞれ TEM_{00} と TEM_{02} であり、加工レンズ位置でのビーム径は約24mmと32mmである。ノズル形状は円錐で出口直径2.0mm、出口部ストレート長さは5mmである。集光レンズはZnSe製のものを用い、焦点距離 f が95.25mm、127mm、190.5mmおよび254mmの4種類を使用した。焦点位置 Z (mm)は焦点の水平に置かれた被加工物表面からの距離で表し、上方を正とした。なお、焦点の求め方は、出力150~250W、速度1m/min、アシストガスAr0.5kg/cm²の加工条件で、レーザビームをSPCC表面に照射し、プラズマが最も強く発生する位置を焦点とした。

被加工物には、第一種冷間圧延鋼板SPCC、一般構造用圧延鋼板SS400（中部鋼板製）、Al-Mg系合金（JIS A5052）およびオーステナイト系ステンレス鋼板SUS304の4種類を用いた。レーザ切断品質は被加工物の含有成分によって大きく左右されるため、本実験で用いた材料の化学組成を表2・1に示す。非金属切断での被加工物には、板厚20mmと30mmの亚克力樹脂を用いた。出力形態はパルス波（PW）と連続波（CW）を用いた。パルス条件におけるパルス周波数やパルスデューティについては予備実験を実施し、切断面品質が良好でドロスの付着が少なくなる値を採用した。

切断品質の評価は、金属切断ではセルフバーニングやガウジングの観察とドロス高さ（最大値）の測定、非金属切断では切断溝幅の均一性に

よって行った。

実際の加工では、ノズルからレーザービームと同軸状にアシストガスが噴射される。加工部におけるアシストガス圧と加工品質の関係を調べるために、アシストガスが切断溝を通過し、被加工物下部より抜けた時のガス圧力測定を行った。ガス圧の測定には、図2・2に示すようにノズル直下のあらかじめ切断してある切断溝下に、半導体圧力センサ（三菱電機製）を設置して行う。このガス圧測定部の直径は、2.5 mmである。

表2・1 被加工物の化学組成

Materials	Chemical composition (mass%)											
	Cu	C	Si	P	Mn	Mg	S	Zn	Ni	Cr	Fe	Al
A5052	0.02	—	0.07	—	0.04	2.44	—	0.01	—	0.23	0.21	Bal.
SPCC		0.09	—	0.04	0.48	—	0.044	—	—	—	Bal.	—
SS400	0.22	0.09	0.25	0.020	0.56	—	0.017	—	0.06	0.08	Bal.	—
SUS304	—	0.07	0.98	0.044	1.88	—	0.028	—	8.50	18 80	Bal.	—

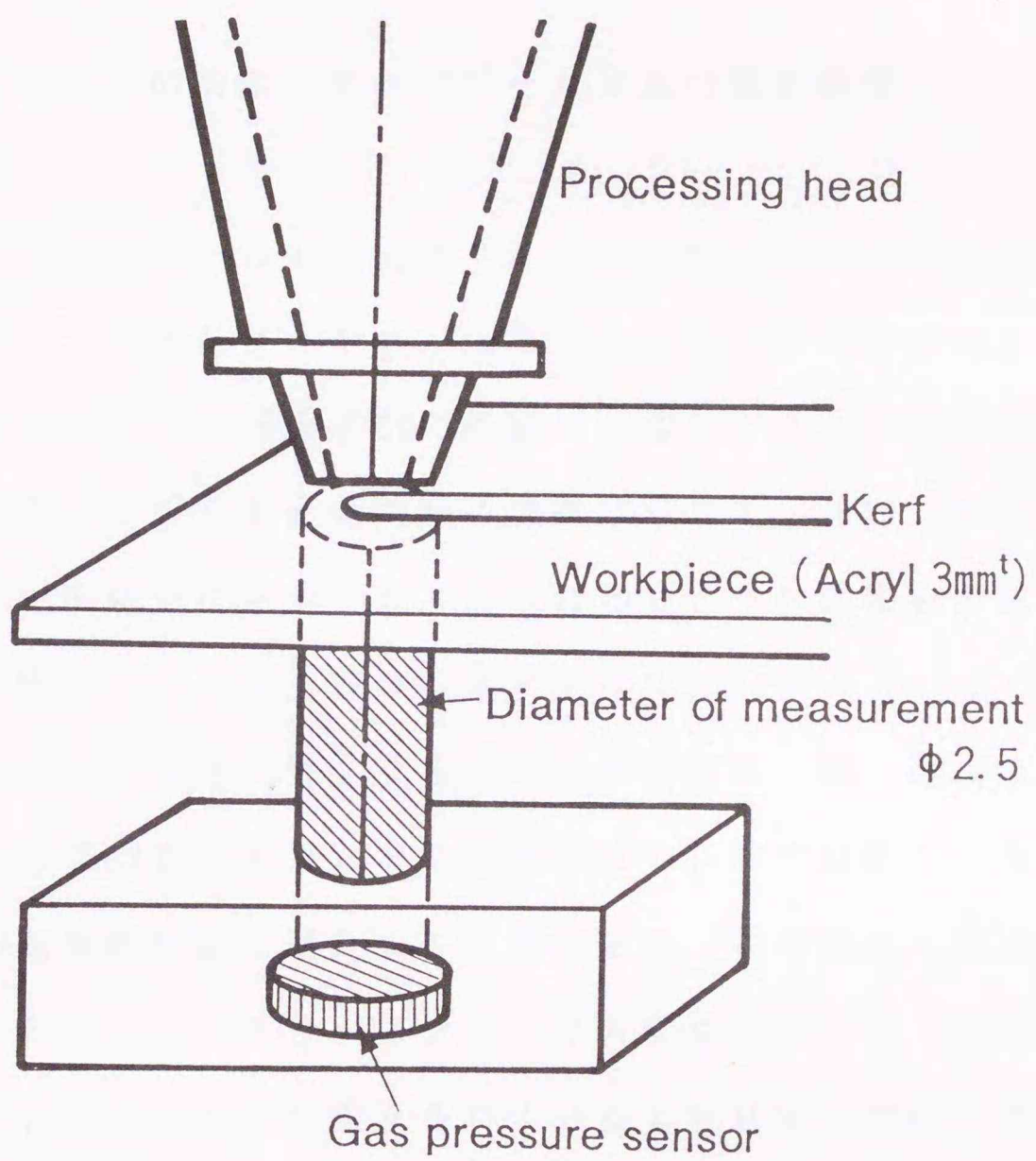


図 2 ・ 2 被加工物直下のアシストガスの測定方法

2・4 実験結果および考察

2・4・1 A1合金の切断品質へのビーム集光特性の影響

A1合金は、レーザビームの反射率や熱伝導率が高く、また熔融金属の流動性が低い⁽³³⁾ことなどのため、A1合金のレーザ切断では、熔融した金属がドロスとして切断部裏面に強固に付着したり、切断面粗度の悪化を招いていた。このA1合金切断の問題に対して、被加工物上でのビーム集光特性が切断面粗さやドロス高さにどのような影響を及ぼすかについて実験で検証し、加工品質の改善を図った。

図2・3は板厚5mmのA5052を出力2000W、加工速度0.8m/minで、焦点位置Zをそれぞれ変化させてレーザ切断して得られた被加工物の切断溝横断面と切断面の写真である。この場合、焦点距離がf127mmの加工レンズと、アシストガスには乾燥エアーを使用している。被加工物表面に焦点が設定されているZ=0mmの時では、切断溝が上部から下部にかけて全体に狭く、歪曲している。しかし、焦点位置を被加工物表面から下方に設定するにしたがい、切断溝上部の幅が広がり、上部溝幅と下部溝幅の差が大きくなっている。切断溝幅が狭いと熔融金属はアシストガスによって完全に排除されず切断溝中に残留するが、上部切断溝が広がると熔融金属の大部分は除去された。

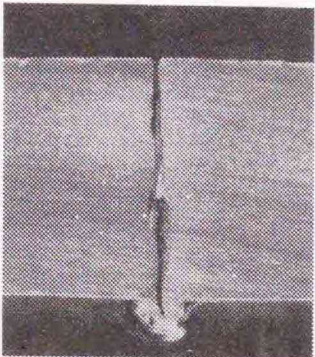
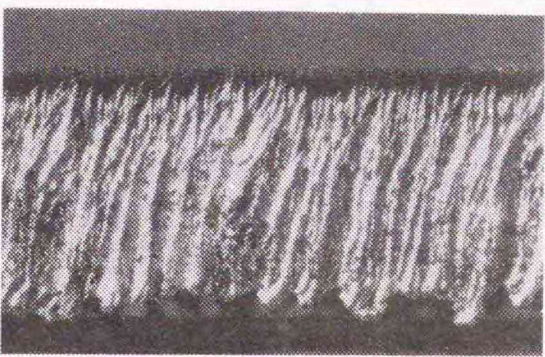
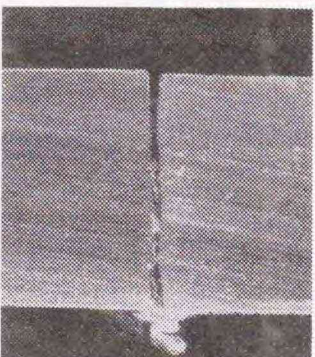
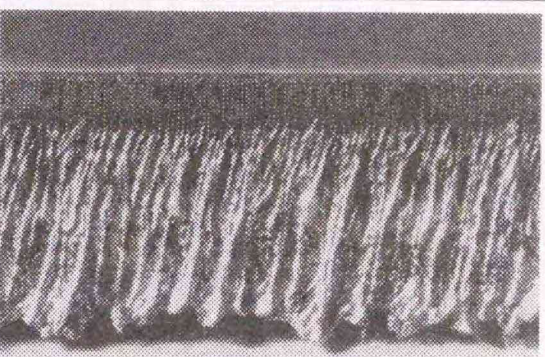
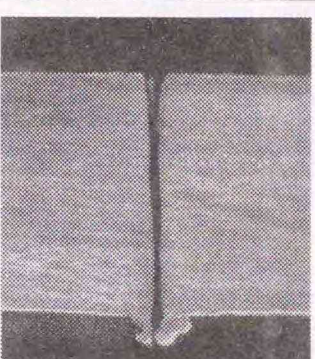
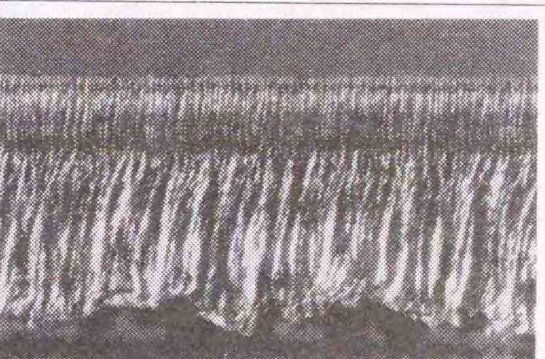
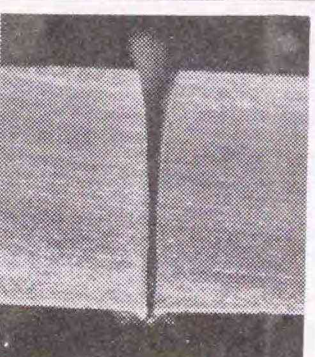
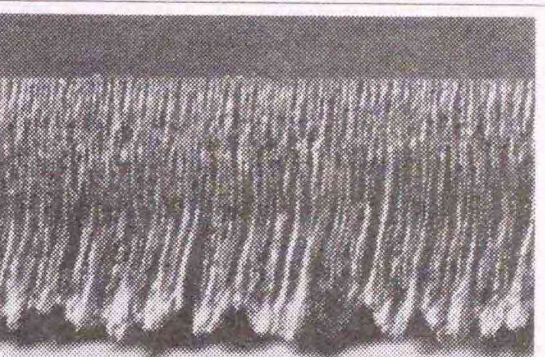
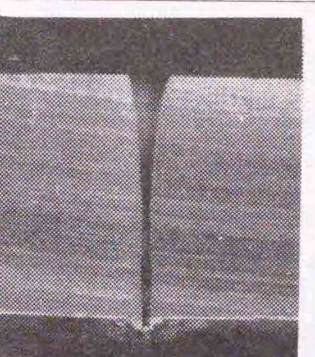
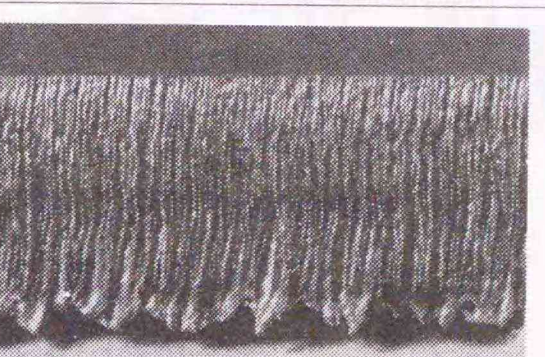
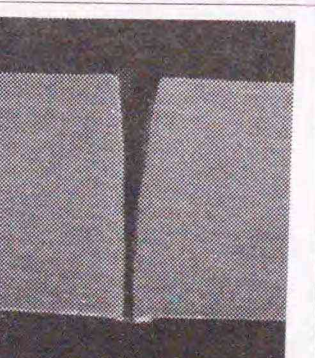
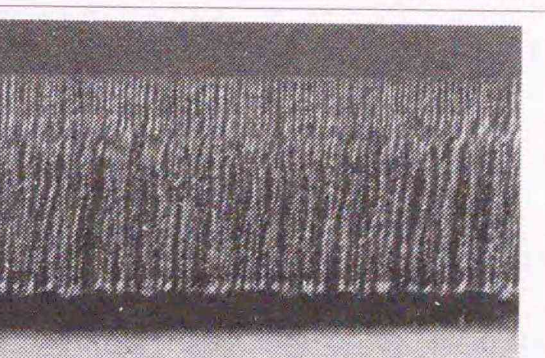
切断面粗さは、切断面上部の細かなピッチが加工方向にほぼ等間隔に生じる比較的良好な部分と、その下部にある粗い部分とからなる⁽⁹⁾⁽³⁷⁾。切断面粗さは焦点位置Zに応じて変化している。焦点位置をZ=0mmから負側にとれば、上部の比較的良好な部分は下方に進展し、同時に下

部の粗い部分が減少した。その結果、面粗さの改善が行われた。また、ドロスの付着高さも、焦点位置を負側に变化させるほど減少している。一方、焦点位置を被加工物上方の正側に变化させた場合 ($Z = +1 \text{ mm}$ 、 $+2 \text{ mm}$) は、切断溝下部が入熱不足のために粗れるガウジングが発生した。さらに $Z = +3 \text{ mm}$ 以上では照射レーザービームの大部分が反射し、A1合金表面の溶融は起こらなかった。また、焦点位置を $Z = -6 \text{ mm}$ 以下に変化させた場合もガウジング状態から、レーザービームの大部分が反射し切断不可能な状態へと移り変わった。

図2・4 は板厚 5 mm のアクリル板を用いて、切断溝形状を変化させ、切断溝下部より抜けるアシストガス圧を前述の半導体圧力センサで測定した結果である。アクリル板は、切断溝下部にドロスの付着が起こらないため、圧力測定部と切断溝下部の密着性が増し、精度の高いガス圧測定が行える。切断溝形状の変化は、焦点位置を $Z = 0 \text{ mm}$ から $Z = -5 \text{ mm}$ まで変化させて行い、図中にその際の切断溝寸法 (Kerf width) も示した。ノズル出口のアシストガス圧はガス圧計で測定し、その結果は、 120 kPa であった。図2・4 から明らかなように、焦点位置変化に伴い切断溝上部の幅が広がるほど、切断溝下部から抜けるアシストガス圧は増加している。この結果から、切断溝内部においてアシストガス圧が高く保持されることがA1切断の品質向上に影響することが考えられる。このため、第5章ではガス圧とドロス高さについての検討結果を示す。

被加工物表面を溶融させるためのエネルギー密度は、レーザービームの焦点を中心にその前後で対象であるが、板厚方向の溶融能力には焦点位置近傍のビーム集束角度が大きく影響している。図2・5 は、レーザービームの照射によるキーホール溶接原理の説明で使われる模式図⁽³⁸⁾である。図中で、Cは焦点位置が負側にある場合、DおよびTは正側にある場合

の被加工物表面の位置を示す。A1切断や次節で示すステンレスの無酸化切断などの酸化発熱反応が切断にあまり寄与しない切断原理も同図で説明ができる。すなわち、高エネルギー密度のビームが被加工物に照射されると、熔融と蒸発が起き空孔(Cavity)が発生する。焦点位置を被加工物内部に追い込んだ状態では、板厚方向にビームエネルギーの絶対量は消費されるが、空孔の底が焦点に近づくことになり、ビームのエネルギー密度が増すことになる。また、円錐状の切断溝形状では、切断溝壁面をビームが多重反射しながら底まで到達する(Wall focusing)。この間、ビームは集光されエネルギー密度が増し、熔融を促進する。レーザー切断がレーザー溶接と異なる点は、この空孔の発生を助けるために熔融金属を下方に押し下げる高圧アシストガスの効果があると考えられる。そのため、熔融金属の流れ抵抗を小さくするような切断溝形状の形成が重要となる。

Z	Cross section	Cut surface
0		
-1		
-2		
-3		
-4		
-5		

2 mm

Material: Aluminum alloy A5052, Thickness: 5mm, Power: 2000W,
Cutting speed: 0.8m/min, Focal length: 127mm, Assist gas: Air,
Gas pressure: 800kPa

図 2・3 A1 合金切断での焦点位置変化と切断溝形状の関係

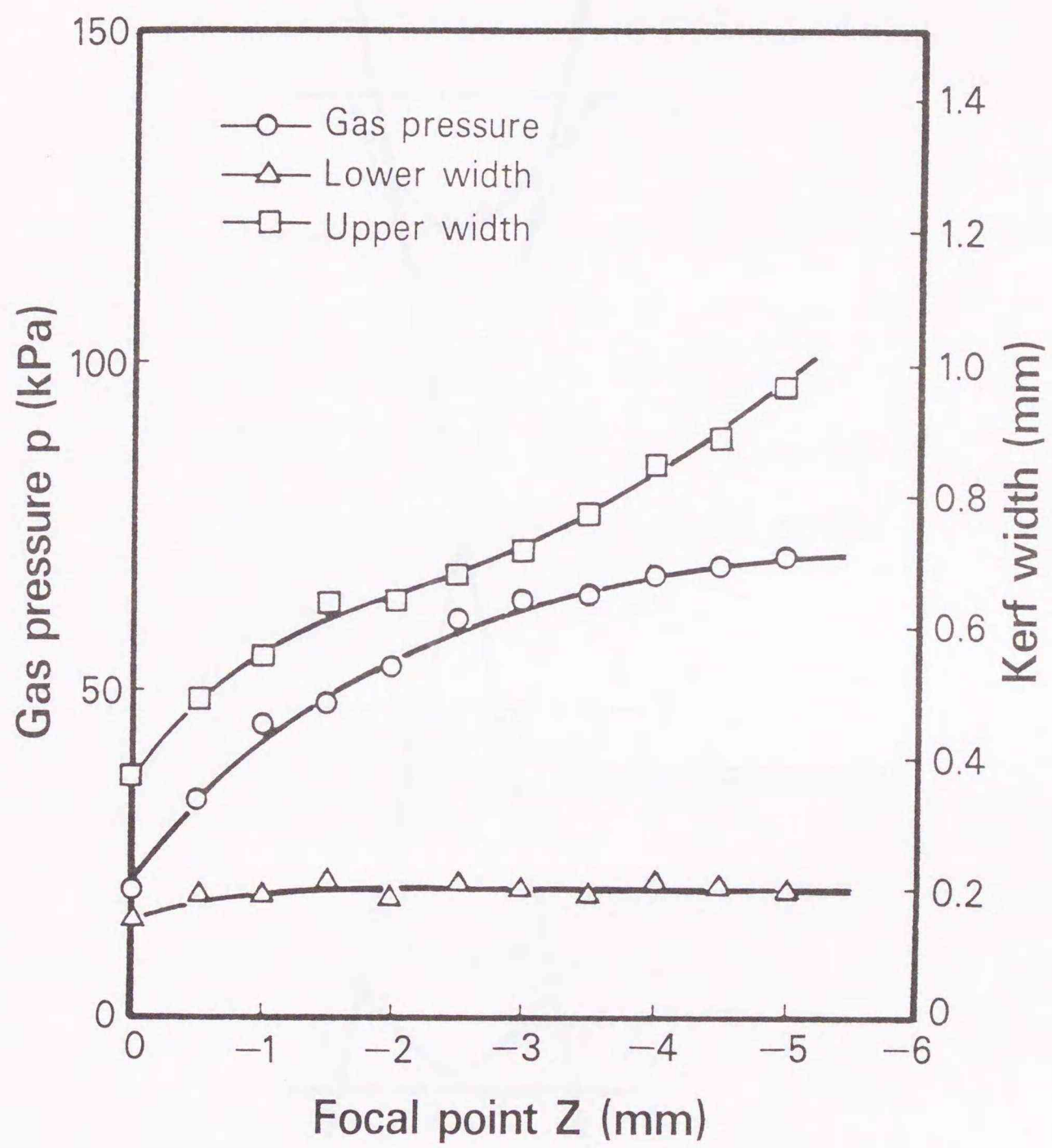


図 2・4 切断溝形状と切断溝より抜けるアシストガスの関係

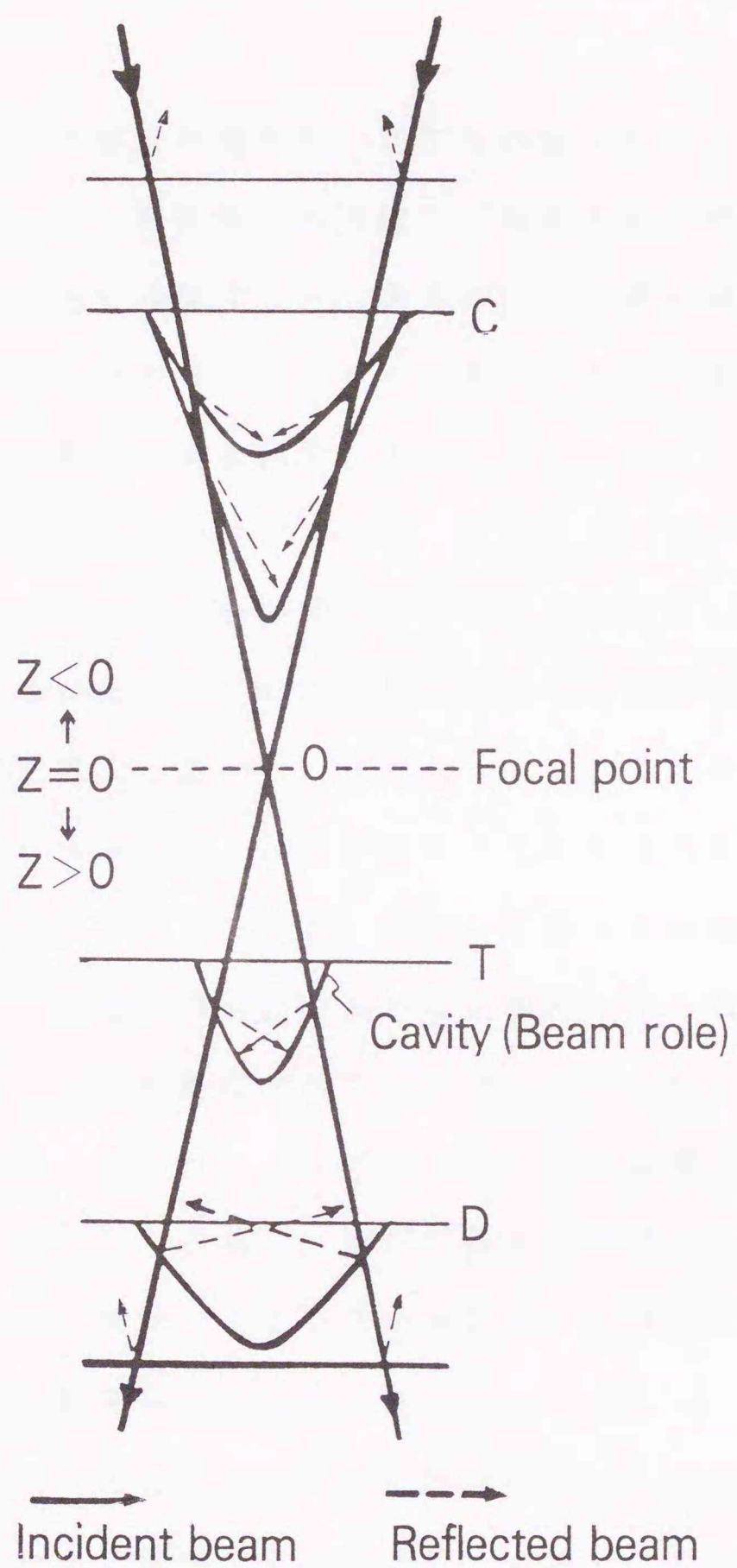


図 2 ・ 5 焦点位置と空孔形成の関係

2・4・2 ステンレス鋼の無酸化切断品質へのビーム集光特性の影響

ステンレス鋼のレーザ切断の場合は、切断面の酸化を防止する目的で、アシストガスに不活性ガスを使用する無酸化切断がある。次に、この無酸化切断での切断面粗さに及ぼすビーム集光特性の影響を調べた。

図2・6 は板厚 6.0 mm の SUS 304 を焦点位置 Z を変化させてレーザ切断した場合の切断面写真を示す。また、加工レンズの焦点距離による切断品質の改善効果もあわせて調べた。アシストガスには N_2 ガスを使用した。図より、良好な切断面粗さが得られる領域は、焦点距離が f 127 mm と f 254 mm のいずれの加工レンズを用いても、焦点位置が負側に変化するほど拡大している。ただし、 f 127 mm レンズでは $Z = +1$ mm、 f 254 mm レンズでは $Z = +2$ mm 以上の場合、ガウジングが起これ切断は不可能であった。また、 f 254 mm レンズによる加工では $Z = 0 \sim -3$ mm の範囲で良好な面粗度を得られ、その領域は f 127 mm レンズでの切断に比べて広がった。しかし、 $Z = -4 \sim -6$ mm では逆に f 127 mm レンズでの加工による良好な切断面粗さを示す領域が広がった。さらに、板厚下部までをほぼ良好な切断面粗さを生じさせる焦点位置は、 f 127 mm レンズでは $Z = -6$ mm、 f 254 mm レンズでは $Z = -8$ mm であった。

図2・7 は無酸化切断での焦点位置 Z と切断溝幅 (Kerf width) の関係である。 $Z = 0 \sim -3$ mm の範囲では、 f 254 mm レンズを用いて加工した切断溝幅は f 127 mm レンズで加工したものより広がっている。そのため、 f 254 mm レンズで加工したものは、アシストガスの圧力が切断溝内部で強いまま保たれることが、上記切断結果に影響しているものと思われる。逆に、 $Z = -4 \sim -6$ mm では f 127 mm レンズで

加工したものの上部切断溝幅が広いため、切断品質が良好になる。

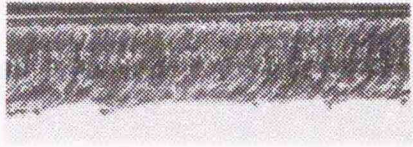
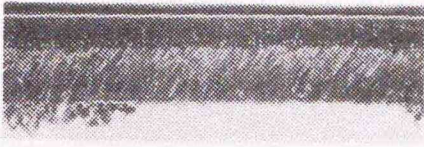
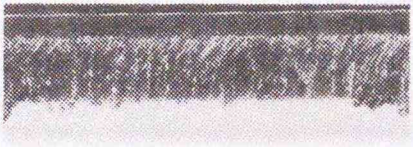
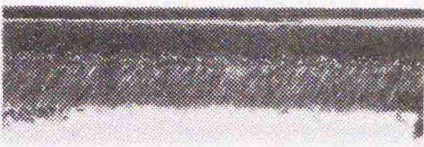
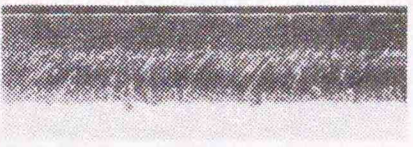
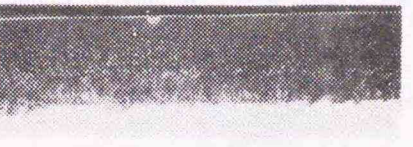
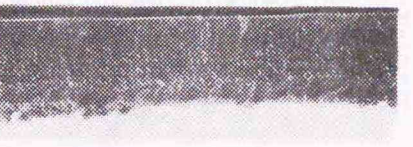
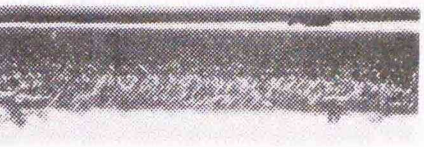
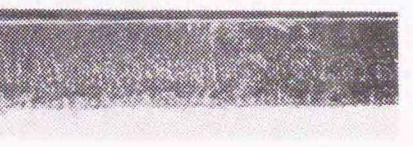
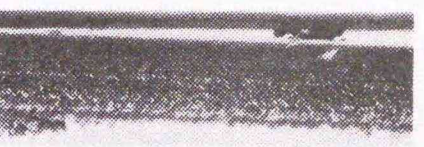
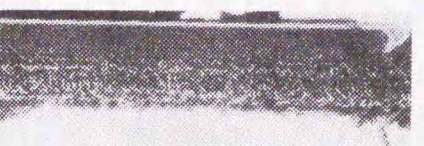
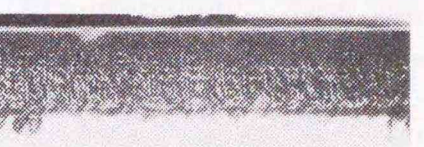
Z	f127	f254
0		
-1		
-2		
-3		
-4		
-5		
-6		
-7		
-8		

図 2 ・ 6 無酸化切断での焦点位置変化と切断面の関係

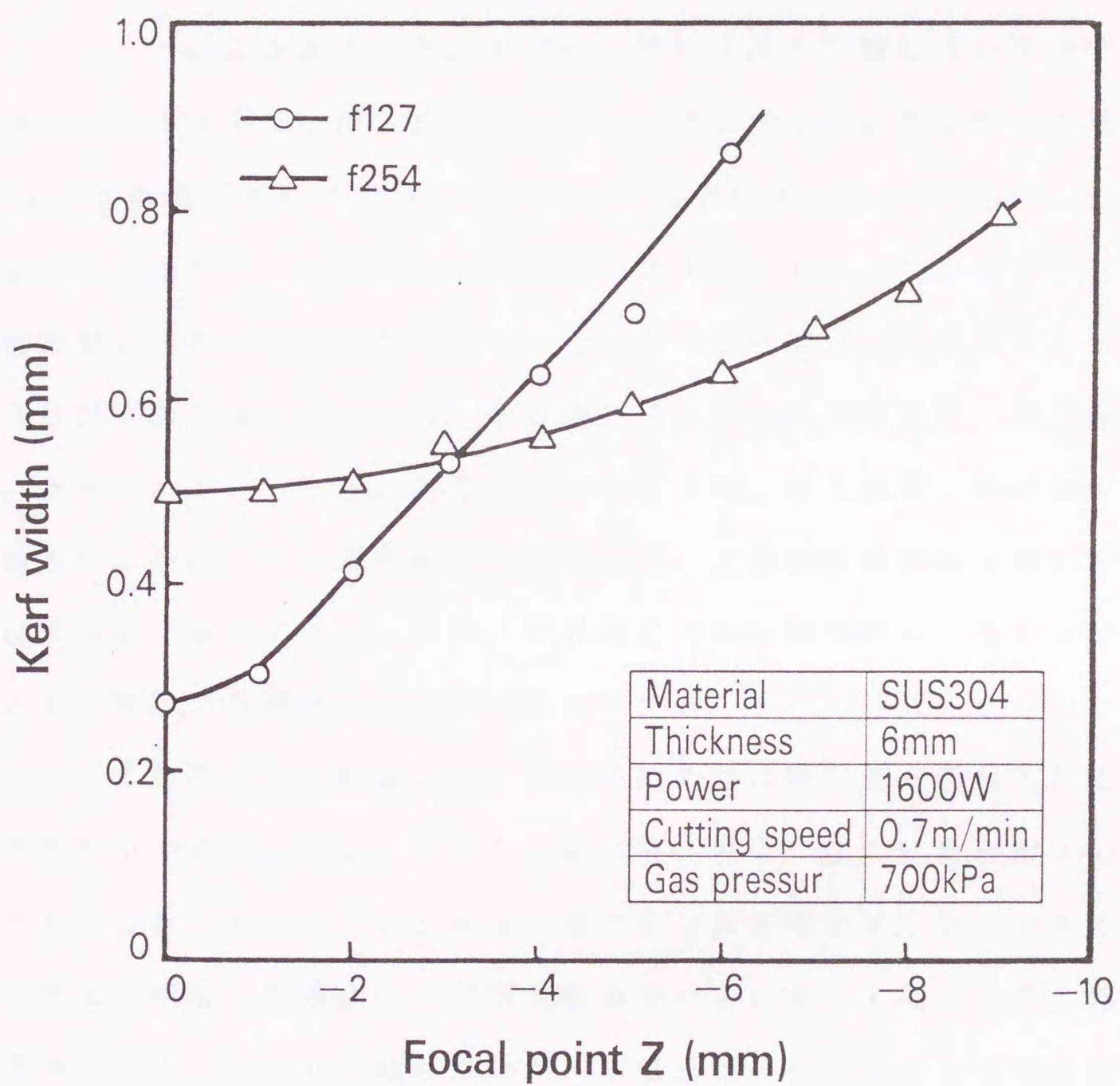


図 2 ・ 7 焦点位置と上部切断溝幅

2・4・3 薄板の切断溝テーパへのビーム集光特性の影響

軟鋼材の薄板切断では切断寸法精度がレーザ加工に最も要求される。そこで、この節では薄板の切断品質を扱い、上部と下部切断溝幅の差（テーパ）と切断面粗さに及ぼすビーム集光特性の影響について示す。

図2・8 は板厚1 mmのSPCCを焦点位置 $Z = 0$ mmで切断した場合の、上部切断溝幅 K_u (Upper) と下部切断溝幅 K_l (Lower) およびその差のテーパ度 $(K_u - K_l) / 2$ (Taper) と加工レンズ焦点距離との関係を示したものである。出力形態はパルス(PW)と連続(CW)の2種類で行った。PW加工では平均出力90 W、加工速度0.5 m/min、CW加工では出力750 W、加工速度7 m/minである。どの加工レンズを使用した場合も、上部切断溝幅は下部切断溝幅に比べ広がっている。また、PW加工での切断溝幅は下部および上部ともCW加工の場合よりも狭くなっている。テーパ度は短焦点レンズほど小さくなるため、薄板の加工精度の向上には短い焦点距離の加工レンズを使用することにより良好な結果が得られる。図2・9 は板厚1 mmのSPCCを、 $f 95.25$ mmの加工レンズを用いて、焦点位置 Z を変化させて切断した場合の、切断溝幅の変化を示す。上部および下部切断溝幅とも $Z = 0$ mmで最も狭いが、焦点位置 Z に対する上部切断溝幅の変化は、下部切断溝幅の変化よりも大きくなっている。それに伴い、テーパ度も焦点位置が $Z = 0$ mmから離れるにしたがい大きくなっている。これらのことから、テーパ度を小さく抑えなければならない高精度加工には、被加工物表面での集光ビーム径をできるだけ小さく絞り、切断溝上部の幅を広がりを抑える必要のあることが判明した。

次に、板厚4.5 mmのSPCCと板厚6.0 mmのSS400をそ

れぞれ下記条件を使用し、異なった焦点距離の加工レンズで切断したときの切断面粗度を調査する。

被加工物板厚	4. 5 m m	6. 0 m m
平均出力	3 5 0 W	5 0 0 W
加工速度	3 0 0 m m / m i n	3 0 0 m m / m i n
パルスデューティ	3 5 %	5 0 %
パルス周波数	1 5 0 H z	1 5 0 H z
アシストガス圧	3 5 0 k P a	3 5 0 k P a
焦点位置	0 m m	0 m m
ノズル径	1. 5 m m	1. 5 m m
ノズル高さ	1. 0 m m	1. 0 m m
レンズへの入射ビーム径	2 0. 4 m m	2 0. 4 m m

切断面粗さは集光ビームと酸化反応との進行速度差に起因するとされている⁽⁵⁾。そのため酸化反応の広がる範囲を小さくするほど、すなわちビームスポット径が小さいほど切断面粗さの改善が予想される。ただし厚板の切断面品質は、ドロスの流れ状態に依存するところが大きい⁽³⁹⁾ため、本検討では薄板の切断に限る。

切断溝幅の測定では図2・10に示すA、B、C、Dの寸法を測定した。ただし、AとCについては左右の平均値寸法とした。表2・2は焦点距離がf 63. 5 m m、f 95. 25 m m、f 127 m mの加工レンズによる切断結果である。焦点距離が短い加工レンズによる切断ほど上部切断溝幅Bは広がるが、下部切断溝幅Dはどの焦点距離のレンズでもほぼ等しい幅であった。上部切断溝側のダレ量Aは焦点距離の短いレンズほど

少なくなっている。スポット径をより小さくできる短焦点レンズほど被加工物表面での溶融面積が小さくでき、切断溝幅も小さくなる。しかし、切断溝下部では上部で溶融した金属が燃焼源となった酸化反応作用による切断現象となるため、どの加工レンズによる切断においても切断溝幅は同じになると思われる。また、上部溝でのダレもスポット径が小さいほど溶融領域が小さくなり減少する。以上のような加工レンズ焦点距離と切断溝幅との関係は、被加工物が6 mmと4.5 mmのいずれの板厚においても同様の傾向を示した。

図2・11および図2・12は板厚6.0 mmと4.5 mmの加工レンズ焦点距離と切断面粗さの関係を示す。切断面粗さの測定は被加工物表面から0.3 mmの上部(Ru)と板厚中央部(Rm)、さらに被加工物裏面から0.3 mmの下部(Rd)切断面の3箇所を実施した。中央部の切断面粗さは加工レンズ焦点距離の違いによらずどのレンズでもほぼ同じ粗さであった。しかし、上部および下部切断面粗さとも加工レンズ焦点距離が長くなるほど悪化した。下部切断溝幅がどの加工レンズでも同じであるにもかかわらず切断面粗さが異なっている。このことは下部切断面粗さが上部でのビームと酸化反応の進行速度差に起因するメカニズム⁽⁵⁾とは異なる要因によるものと思われる。上部から下部に溶融金属が進行すると、母材から冷却を受けて凝固して切断面を形成する。この凝固過程で酸素アシストガス噴流によって表面に乱れが生じ、これが凝固して切断面粗さとして現れる。この裏付けとして、次に示す現象も確認されている。切断面粗さとパルスピーク出力の関係を調べた結果では、パルスピーク出力が大きくなるほど下部切断面粗さが良好になる⁽³⁶⁾⁽⁴⁰⁾。また、二重ノズルを用いて純度の高い酸素をアシストガスとして加工部に供給すると、切断面粗さが良好になることも第5章で示す。切断面の

温度は加工速度の増加とともに上昇する⁽⁴¹⁾との報告がある。図2・13には、板厚12mmのSS400を出力と切断速度をそれぞれ1300W-700mm/min、1400W-800mm/min、1500W-900mm/minの3条件で切断した面粗さの測定結果を示す。面粗さの測定部は被加工物表面から0.5mmのHu、中央部のHm、裏面から0.5mmのHdの3箇所で行った。切断出力と速度の関係は、ドロス付着の少ない関係から決定した。上部切断面では大きな差は見られないが、中央部から下部にかけては高出力で高速度の加工条件ほど切断面粗さは向上した。切断部での加工エネルギーの増加は、熔融金属の温度を上昇させ粘性が低下し、切断面上の熔融金属の流動軌跡が小さくなると思われる。以上のことから、下部切断面粗さの品質向上には加工部への投入エネルギーや発熱量を増加させ高速加工することが効果的である。

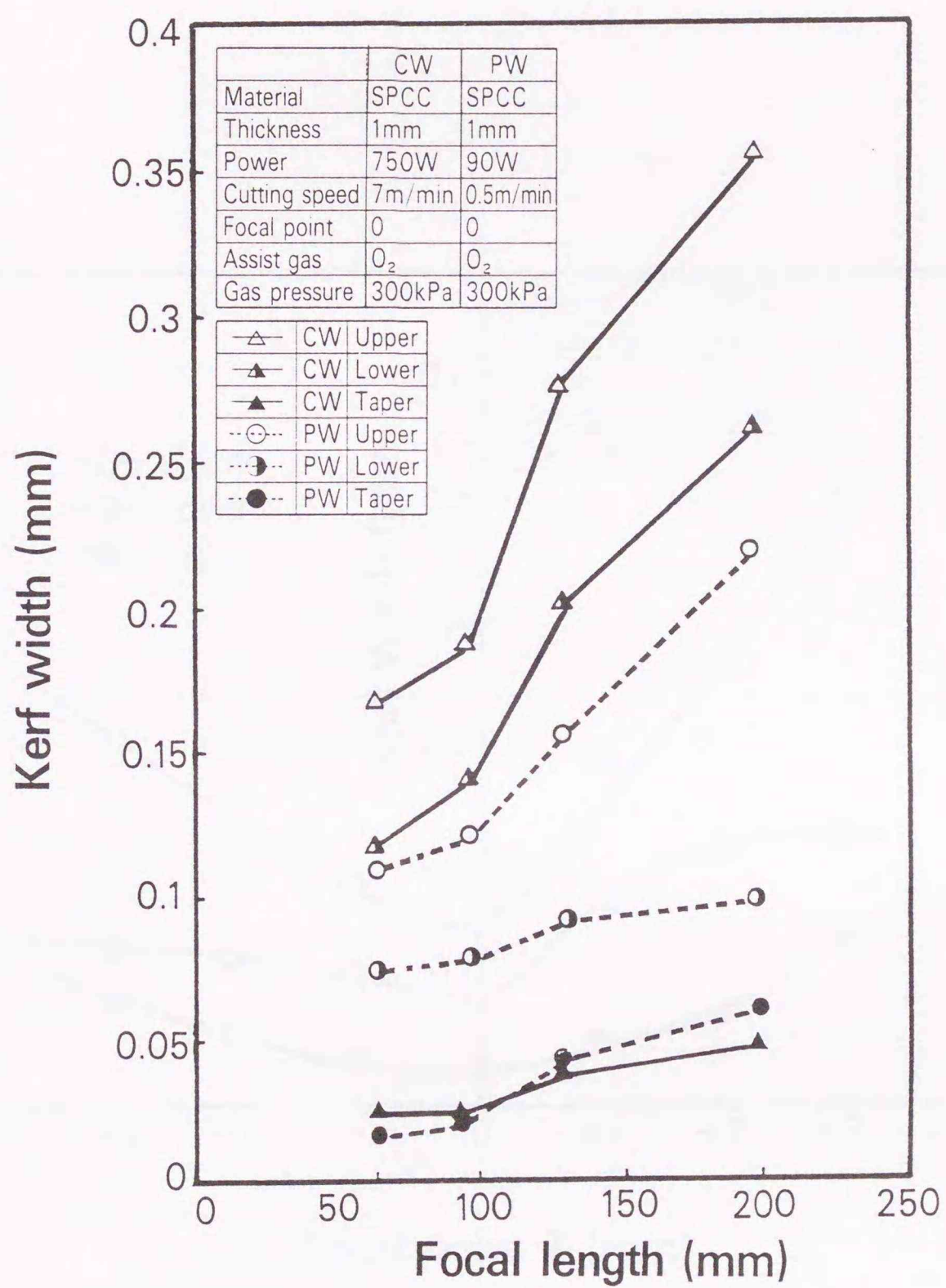


図 2 ・ 8 切断溝寸法に及ぼす加工レンズ焦点距離の影響

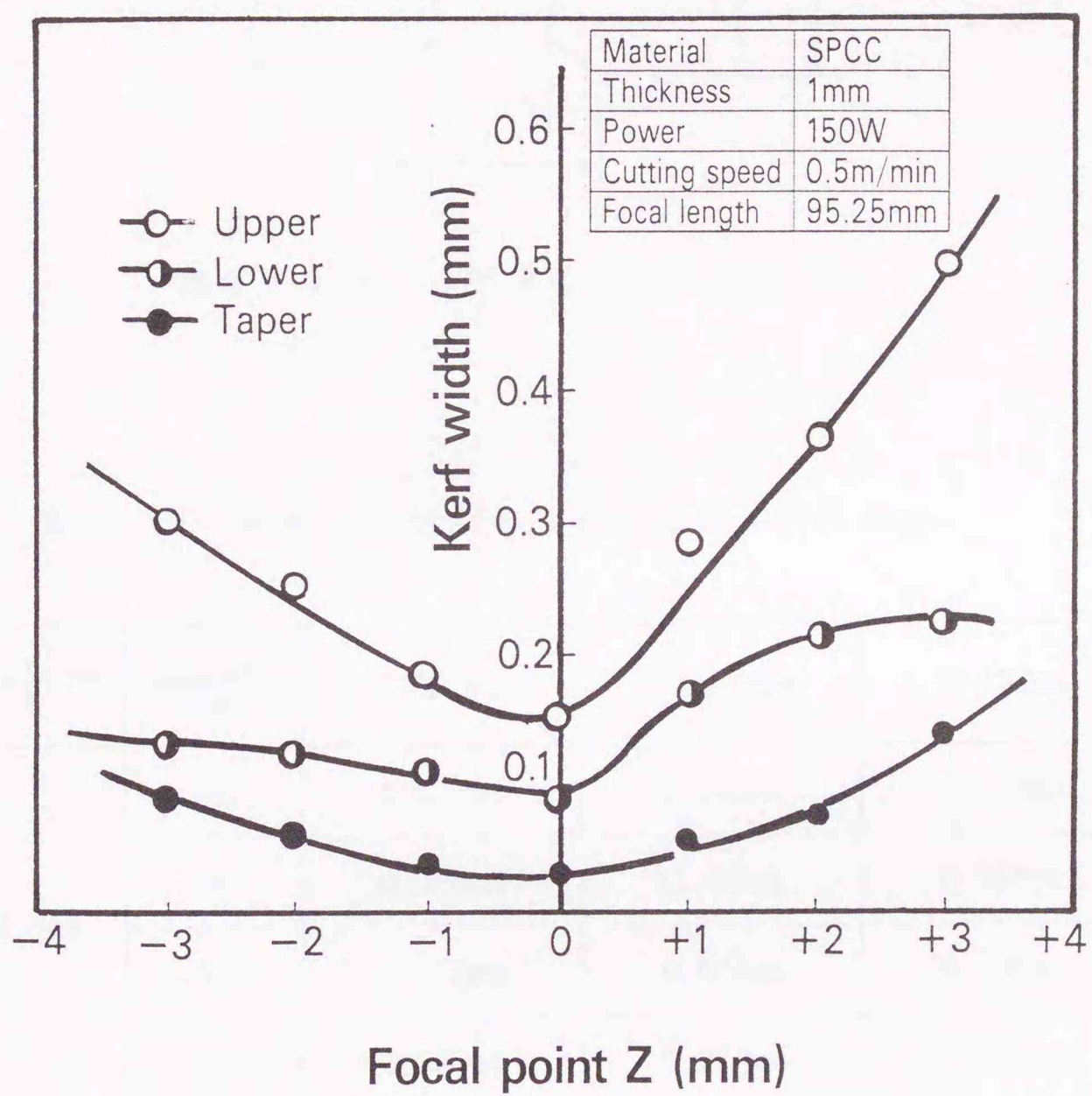


図 2 ・ 9 切断溝寸法に及ぼす焦点位置の影響

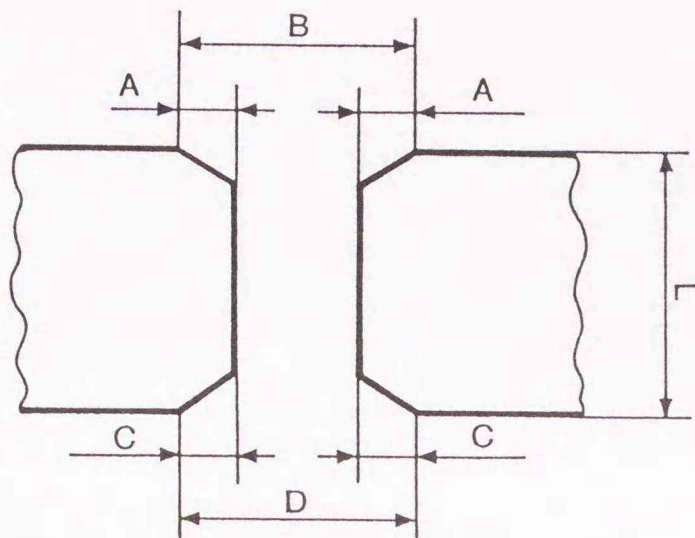
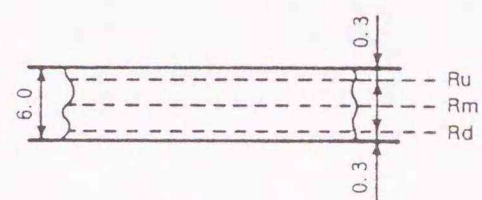
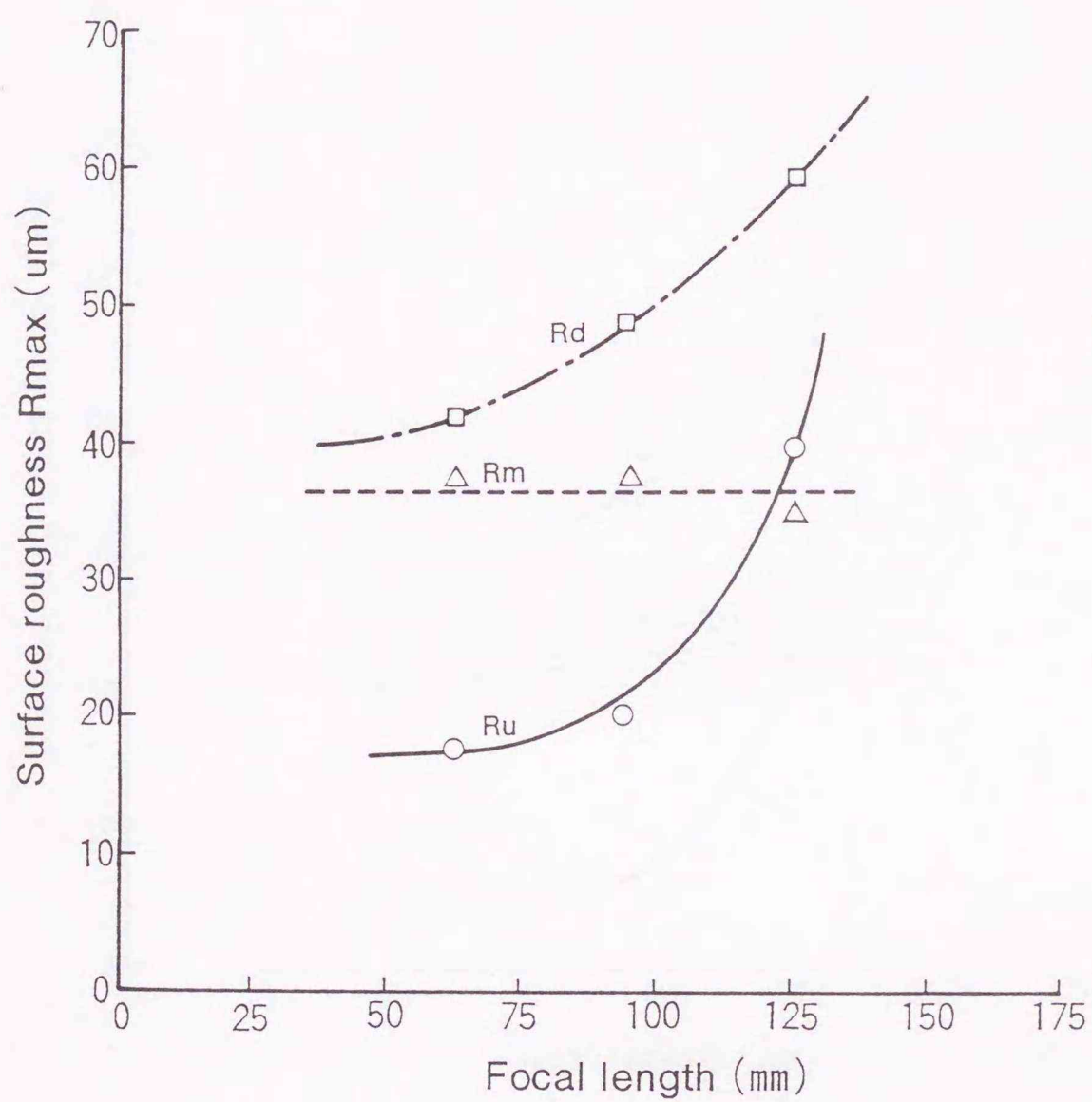


図 2 ・ 1 0 切断溝の寸法測定部

表 2 ・ 2 各種焦点距離のレンズによる切断溝幅

Thickness L	Measurement point	f 63.5mm	f 95.25mm	f 127mm
4.5mm	A	0.037mm	0.040mm	0.063mm
	B	0.206mm	0.298mm	0.355mm
	C	0mm	0.044mm	0.035mm
	D	0.269mm	0.274mm	0.268mm
6.0mm	A	0.005mm	0.012mm	0.092mm
	B	0.225mm	0.323mm	0.404mm
	C	0mm	0.041mm	0.043mm
	D	0.260mm	0.283mm	0.250mm



Material SS400
 Thickness 6mm
 Ave power 500W
 Duty 50%
 Frequency 150Hz
 Speed 300mm/min
 Focal point ± 0 mm
 Gas pressure 350kPa

図 2 ・ 1 1 板厚 6 m m の切断における加工レンズ焦点距離と
 面粗さの関係

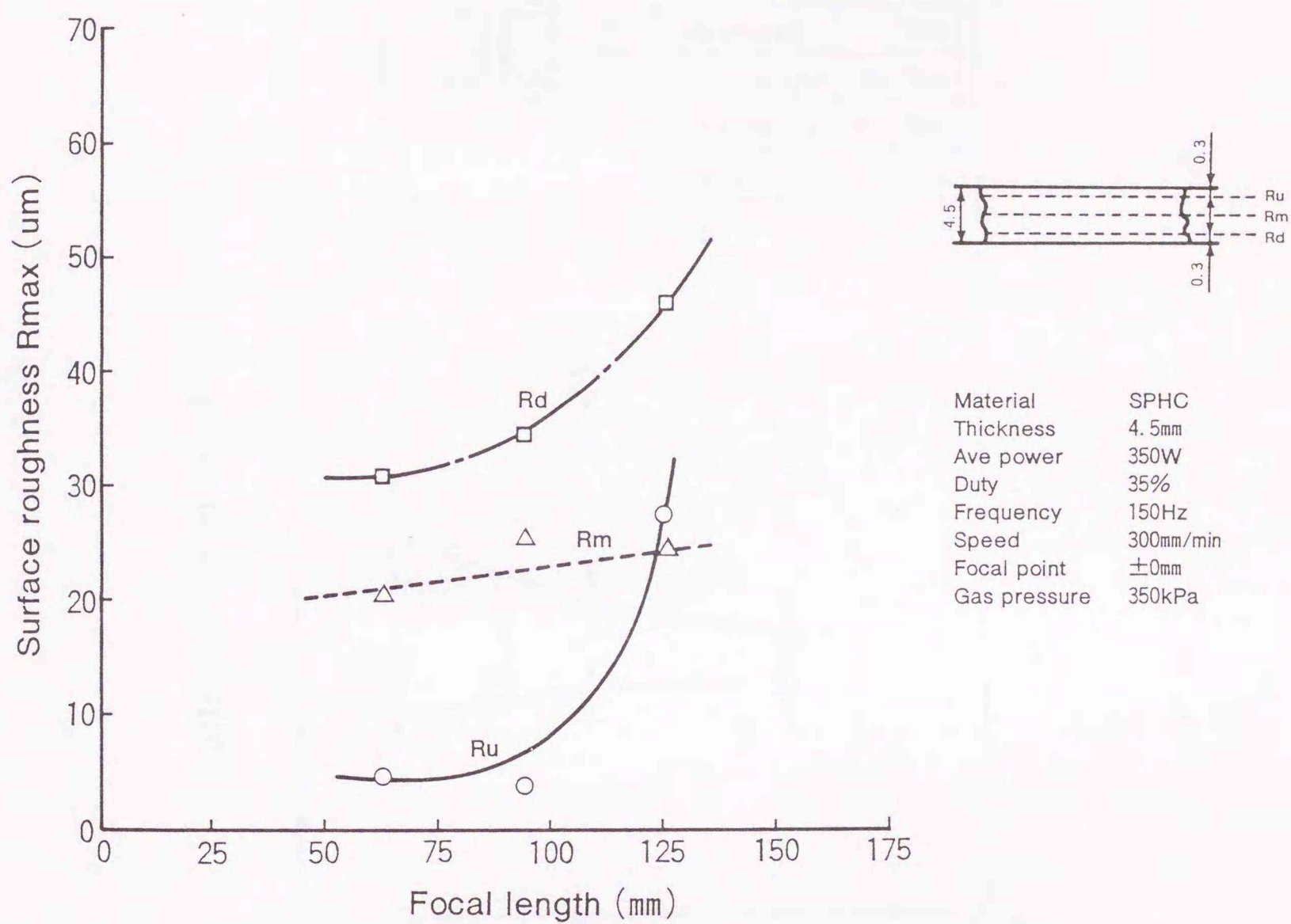


図 2 ・ 1 2 板厚 4. 5 m m の切断における加工レンズ焦点距離と面粗さの関係

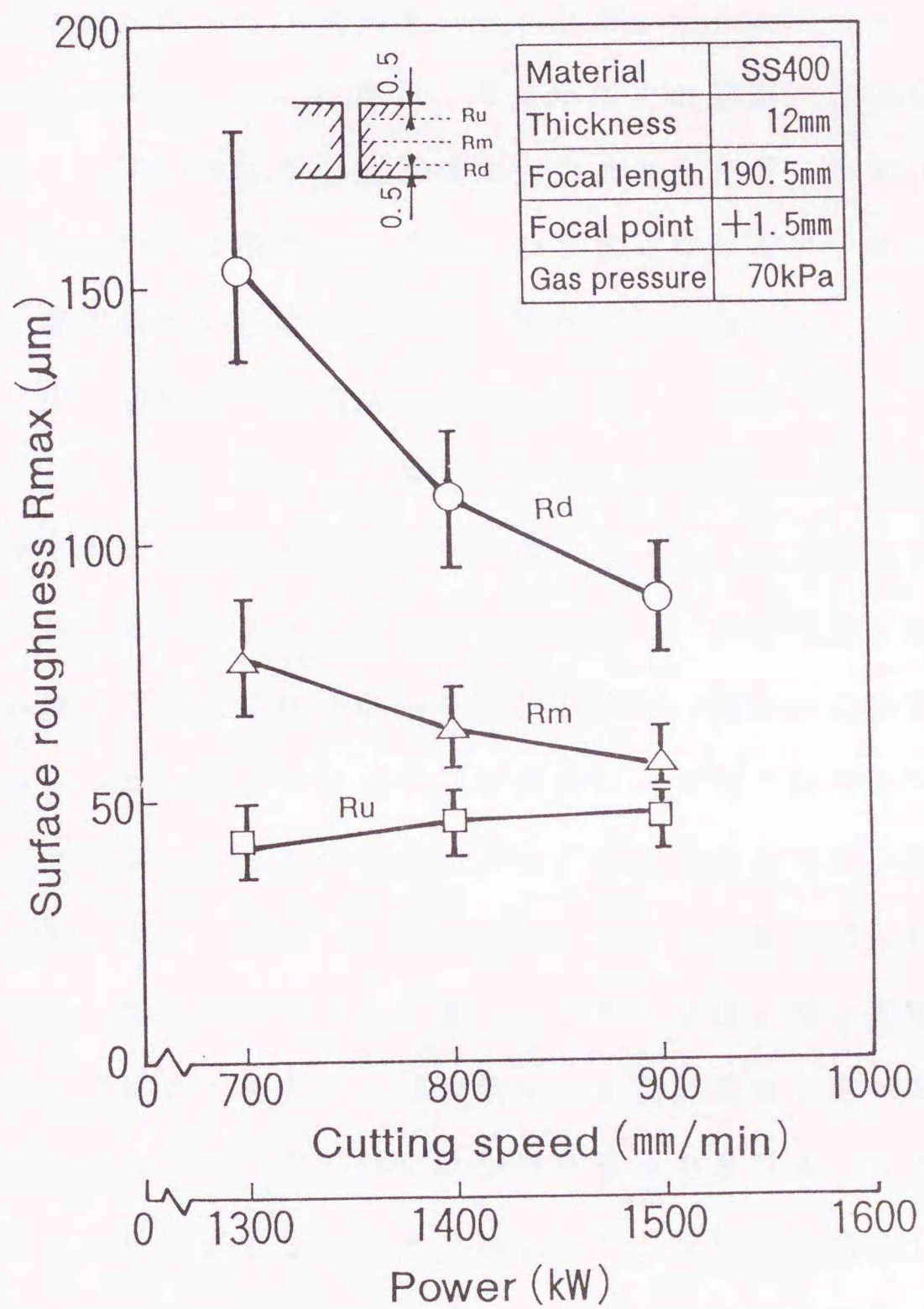


図 2 ・ 1 3 切断出力および速度と切断面粗さの関係

2・4・4 厚板切断の加工品質へのビーム集光特性の影響

軟鋼材の厚板切断では、セルフバーニングの防止とドロス付着量の減少に関する検討を行った。板厚6.0mm以上の軟鋼のCW切断では、セルフバーニングの発生や切断部裏面にドロスが付着しやすいなどの問題がある。図2・14には板厚9.0mmのSS400をアシストガス（酸素）圧と上部切断溝幅を変化させてCW切断した場合の、良好切断範囲を示した。良好切断の条件範囲とは、セルフバーニングやガウジングが発生せず、ドロスの付着が全く無いか、もしくは付着している場合でも容易に除去できる加工品質の得られる範囲である。加工レンズは焦点距離がf190.5mmとf127mmを使用し、焦点位置Zを0mm～+4mmの範囲で変えて切断溝幅を変化させた。図中の○は良好な品質、×はセルフバーニングまたはガウジングによって加工品質の著しく劣るもの、△はセルフバーニングやガウジングは起こらないがドロス発生量の多いものを示す。アシストガス圧に応じて良好切断品質の得られる適正切断溝幅（上部）が存在する。また、ガス圧が高いほど切断溝幅の狭いところに、逆にアシストガス圧が低いほど切断溝幅の広いところに適正条件範囲が存在する。図2・15には板厚9mmのSS400を焦点距離f190.5mmとf127mmの加工レンズを用いて切断したときの焦点位置と上部切断溝幅の関係を示す。なお、この場合のレンズ入射ビーム径は、アクリルバンパターン（出力1000W　3sec照射）で約24mmであった。図中にはアシストガス圧80kPaで良好な切断品質の得られる切断溝幅と焦点位置の関係を斜線で示した。ガス圧80kPaでの最適切断溝幅は0.45mm～0.55mmである。f127mmレンズではZ=+1.5mm～+2.5mm、f190.5mmレ

レンズでは $Z = +1.0 \text{ mm} \sim +3.0 \text{ mm}$ の範囲で最適切断溝幅が得られた。以上のことより、焦点距離 $f 127 \text{ mm}$ レンズでの加工に比べて、 $f 190.5 \text{ mm}$ レンズによる加工は焦点が変動した場合の良好な切断品質を提供する焦点位置裕度が広く、厚板のCW切断に適する。図2.16には、 $f 190.5 \text{ mm}$ の加工レンズを用いて切断を行ったときの焦点位置 Z と切断部前面との関係を示す。 $Z = 0 \text{ mm}$ 、 $+3 \text{ mm}$ 、 $+6 \text{ mm}$ の各焦点位置で、切断中に加工テーブルを動作させたままビームを止め、加工部前面（加工休止面）の状態を明らかにした。切断面上部と中央部の面粗さは焦点位置 $Z = 0 \text{ mm}$ での切断のものが最も良好であり、 $Z = +3 \text{ mm}$ 、 $Z = +6 \text{ mm}$ の順に悪化している。ただし下部での切断面粗さは $Z = +3 \text{ mm}$ でのものが最も良好であった。切断面に生ずるドラグラインと加工部前面の形状とは、ほぼ同じ軌跡を示す。どの焦点位置の加工でも、加工部前面は下部に向かうほどビームの進行方向とは逆方向に遅れが生じている。 $Z = +6 \text{ mm}$ での遅れが最も大きい。これは被加工物上でのビームスポット径が大きくなり、エネルギー密度が低下し、加工部での入熱不足が生じたことによる。 $Z = 0 \text{ mm}$ での遅れは、 $Z = +3 \text{ mm}$ のものに比べ被加工物の裏面近傍で大きい。切断溝幅の狭いことが加工部前面の遅れを起し、加工品質を悪化させる。今回の実験で使用したビームモードでは、加工部前面が板厚方向に直線的になるように焦点位置を設定することによって、切断面の上部から下部のすべてにわたって良好な切断面品質が得られた。

図2.17はSS400の12mmを、各種焦点距離の加工レンズで焦点位置を変化させて切断したときの切断溝横断面写真である。この加工でのアシストガス圧は、 70 kPa で行った。セルフバーニングやガウジングが発生せず、ドロスの付着もほとんど発生しない焦点位置条件は、

f 1 2 7 m m レンズでは $Z = + 2 \text{ m m}$ 、f 1 9 0 . 5 m m レンズでは $Z = + 1 . 5 \text{ m m} \sim + 3 \text{ m m}$ 、f 2 5 4 m m レンズでは $Z = + 1 \text{ m m}$ であり、すべて正側に存在した。f 9 5 . 2 5 m m および f 1 2 7 m m の加工レンズでは、 $Z = 0 \text{ m m}$ の焦点位置で切断溝が板厚下部まで形成されない状態となった。この場合、 Z が負側のとき切断溝下部の乱れが著しく、ドロスの付着量も多い。このドロス除去のために、A 1 切断の場合と同様にアシストガス圧を増加させるとセルフバーニングが発生した。この時の切断溝幅は上部より内部で最小幅が存在し、下部までその狭い状態が続く。 Z が正側にあるときドロスの全く付着しない Z の値が存在した。その位置の切断溝形状における最大幅と最小幅の差およびテーパ度は小さくなった。焦点位置 Z の値をさらに大きくすると、切断溝は幅が大きく広がって歪曲するようになり、良好な切断が不可能になる。f 9 5 . 2 5 m m と f 1 2 7 m m のレンズでの $Z = + 1 \text{ m m} \sim + 3 \text{ m m}$ にかけては上部幅よりも内部幅が広く、さらに下部ではまた狭くなっている。f 1 9 0 . 5 m m レンズでは $Z = 0 \text{ m m} \sim + 3 \text{ m m}$ 、f 2 5 4 m m レンズでは $Z = - 2 \text{ m m} \sim + 4 \text{ m m}$ で、切断溝幅は上部から下部にかけて徐々に狭くなっている。

以上の結果から、軟鋼厚板の切断では、レーザービームによって被加工物上部で溶融された金属が、切断溝内部をできるだけ抵抗を少なく降下、排出されることが重要と思われる。そのためには、板厚に応じた最適切断溝幅が存在し、また、切断溝内の最大幅と最小幅の間にも適正な関係が存在した。このような板厚 1 2 m m の軟鋼材に対して良好な切断品質をもたらす切断溝形状を得るためには、シングルモードの加工機による実験では、焦点距離 f が 1 2 7 m m 以上の加工レンズが適した。また、f 9 5 . 2 5 m m と f 1 2 7 m m レンズでは焦点位置 Z のを正側設定、

f 1 9 0 . 5 m m と f 2 5 4 m m レンズでは $Z = 0$ m m 近傍の正と負の
いずれ側の設定でも被加工物表面から内部にかけて切断溝幅が拡大し、
良好に切断のできることを確認した。

2. 4. 5 コーナ部の溶け落ちへのビーム集光特性の影響

レーザ切断品質では加工形状によってはセルフバーニングの避けられない部分が存在する。この主な発生要因に加工形状への熱集中があり、鋭角なエッジ部で起きやすい。一般には、CW切断の条件をエッジ部のみ入熱の少ないパルス加工条件に切り替える方法を取るが、加工条件の変更部で溶け落ちが発生したり、全体の加工時間が長くなるなどの欠点もある。そこで、CW切断条件を用いた場合も鋭角なエッジ部の加工で溶け落ち量を少なくするための検討を行った。

加工形状は板厚6.0mmのSS400から30°、45°、60°、90°の4種類の角度を切り出す。また、各角度にはR=0、0.1、0.5、1.0mmの4種類のコーナRを設け、コーナRの溶け落ち量に対する効果も合わせて確認する。切断条件は下記のとおり加工レンズ焦点距離にf127mmとf190.5mmの2種類用い、ガス圧はそれぞれドロスフリー切断が行える300kPa、80kPaとした。

被加工物材質・板厚：	SS400 6mm
加工レンズ焦点距離：	127mm、190.5mm
出力	： 1000W (CW)
加工速度	： 1.3m/min
焦点位置	： 0mm (被加工物表面)
アシストガス圧	： 300kPa、80kPa
ノズル径	： 2mm

上記切断条件により切断した結果、上部切断溝幅の実測値は、

f 1 2 7 m m で 0 . 2 9 4 m m

f 1 9 0 . 5 m m で 0 . 5 1 2 m m

である。

切断品質の良否の判定は、溶け落ち長さが 1 m m 以上の場合を不良品質、1 m m 未満を良好品質とし、加工総数に対する良好な加工サンプル数の割合を示した。

図2・18と図2・19には f 1 2 7 m m と f 1 9 0 . 5 m m の加工レンズによるエッジ角度とコーナRの良好な加工サンプル数の割合を示す。いずれの焦点距離のレンズによる切断においてもエッジ角度とコーナRが大きいほど溶け落ち量が少なくなる。また、f 1 2 7 m m レンズによる加工結果は f 1 9 0 . 5 m m レンズによるものより良好な加工サンプル数の割合は多かった。以上の結果から、エッジ部の溶け落ちを少なくするためには、切断溝幅を小さくする集光特性を必要とする。この加工現象は下記効果によるものと考えられる。

- 1) 切断溝幅が狭いほど加工ガスを高くしてもバーニングが発生せず⁽¹⁾、高ガス圧によって加工部の冷却効果が増す。
- 2) 切断面の観察では、f 1 2 7 m m で加工したものは f 1 9 0 . 5 m m でのものよりドラグラインの遅れ角が小さい。このドラグラインの遅れが大きい場合、エッジ部でのスムーズな溶融金属の下部への排出を阻害する。
- 3) 広い切断溝幅では加工熱源面積が広いことになり、被加工物への入熱量が増す。

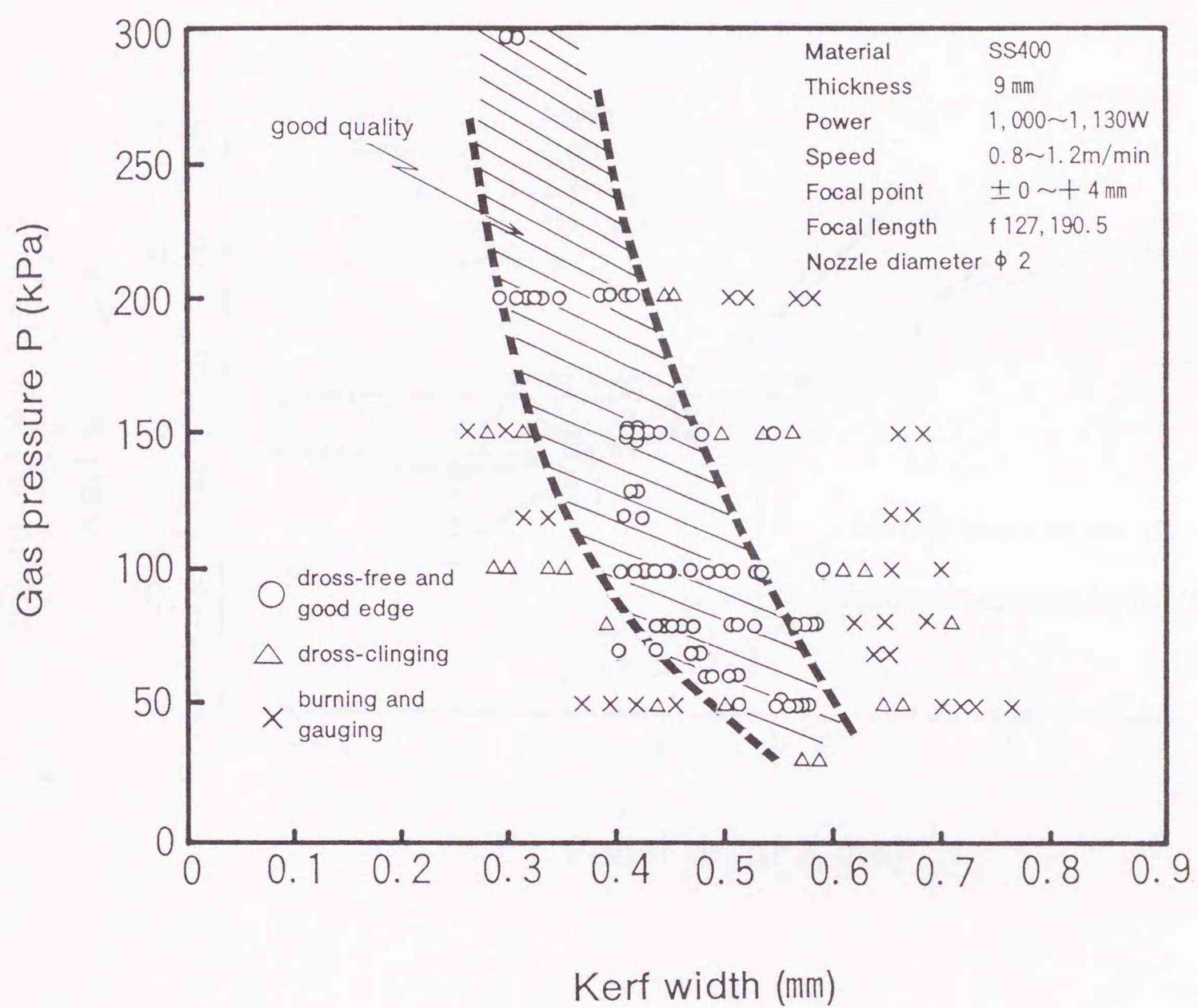


図 2・14 アシストガス圧と切断溝幅の関係

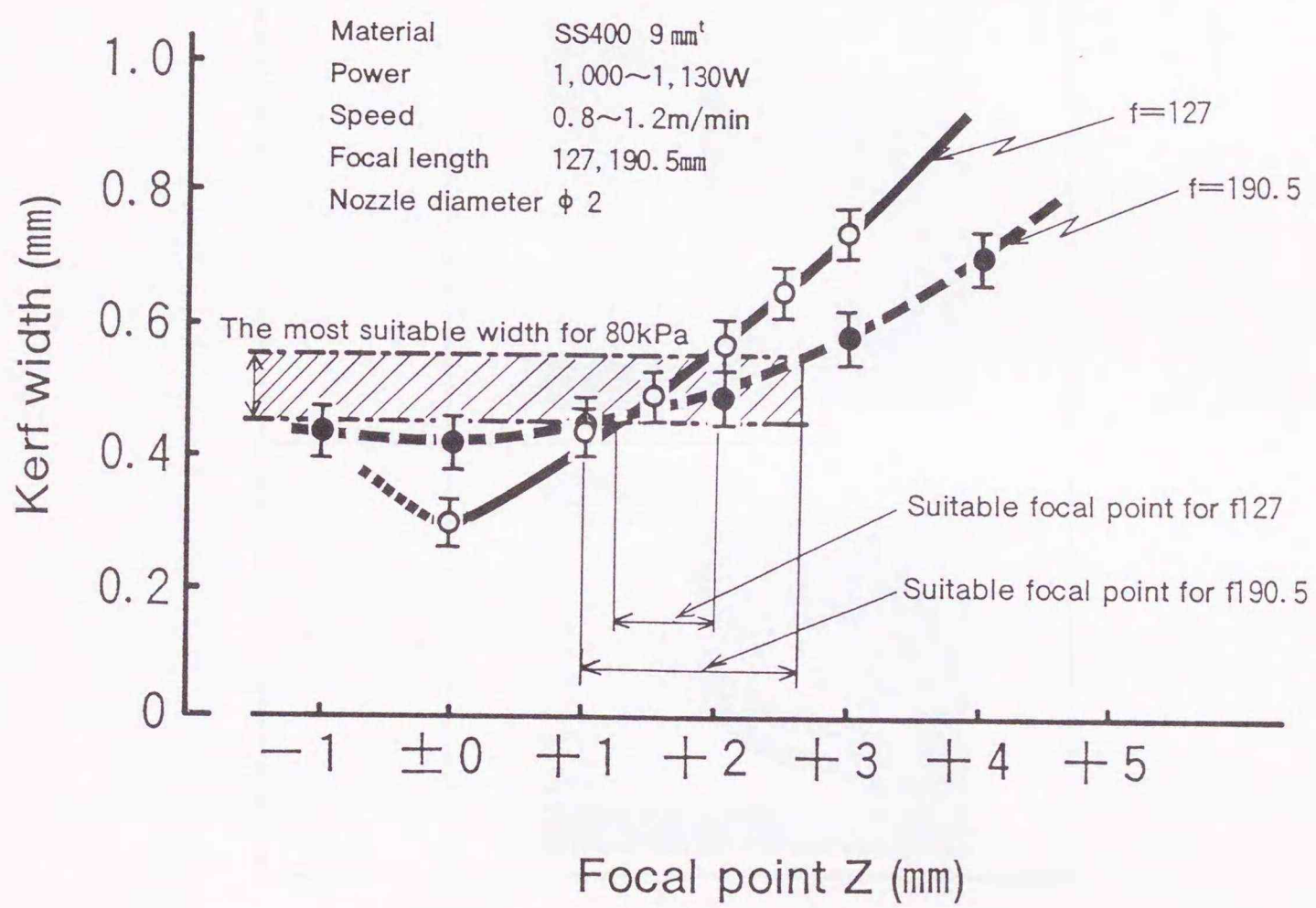
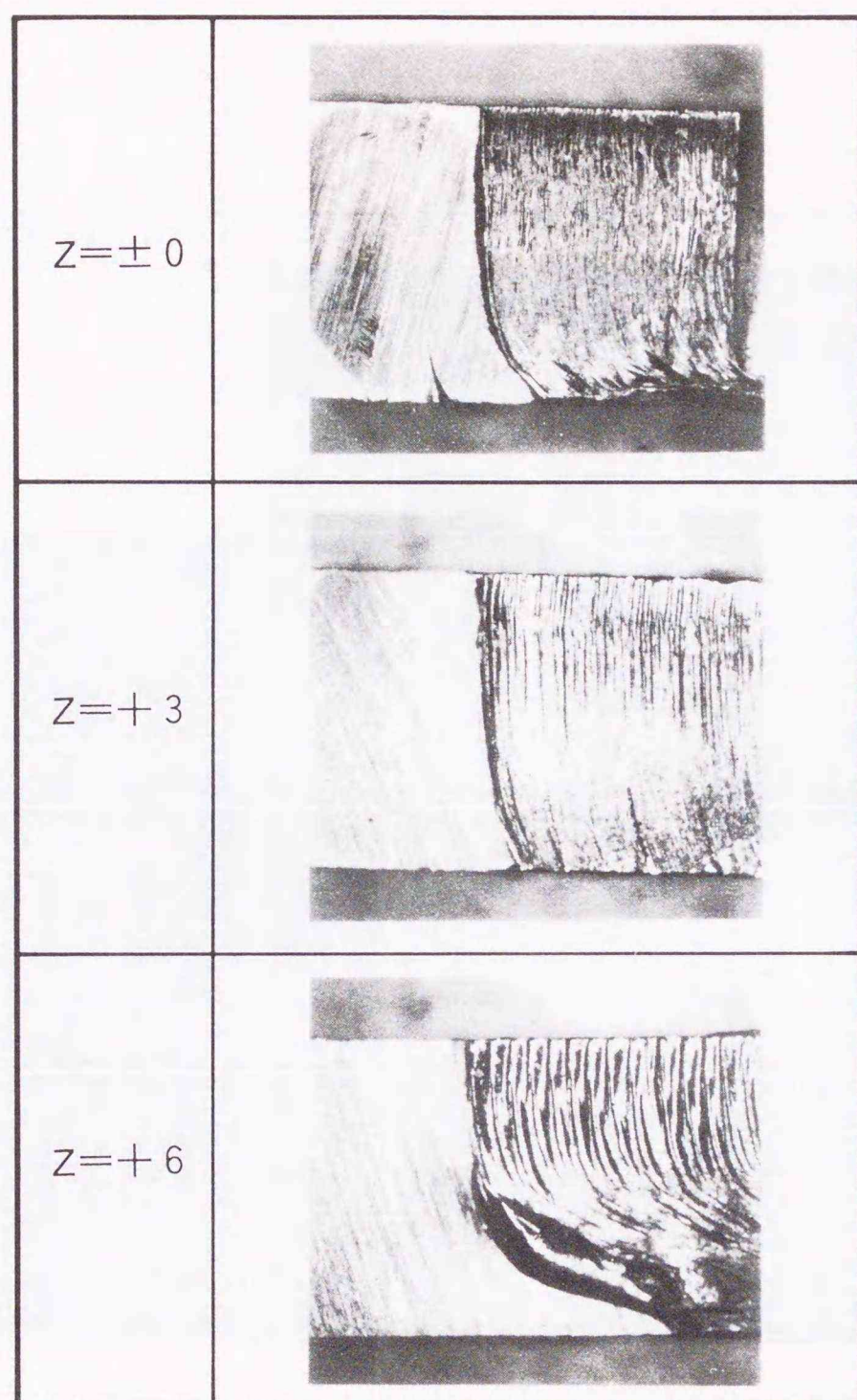
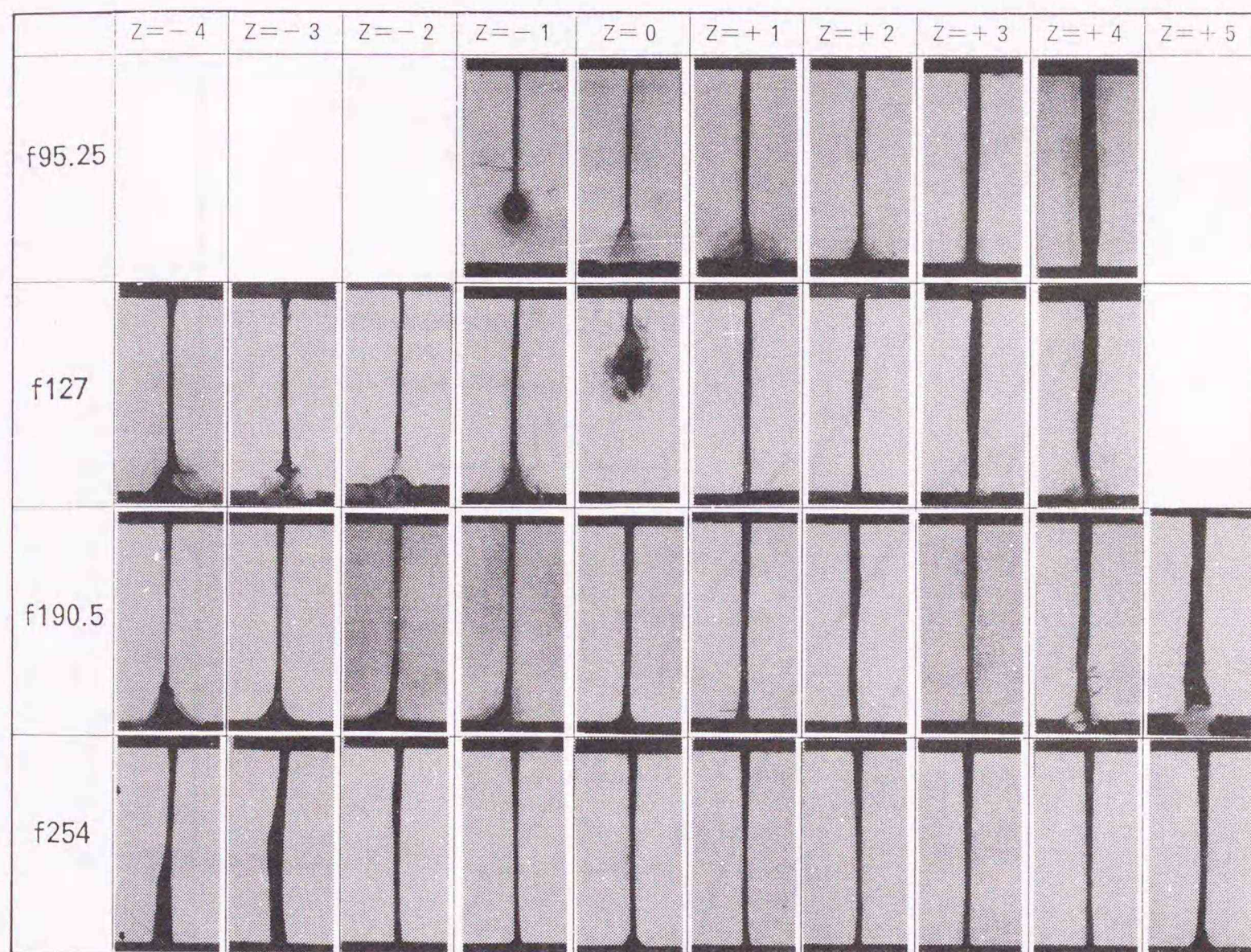


図 2 ・ 1 5 焦点位置と切断溝幅の関係



Material: SS400, Thickness: 9mm, Power: 1130W,
Cutting speed: 1.0m/min, Focal length: 190.5mm,
Assist gas: O_2 , Gas pressure: 80kPa

図 2 ・ 1 6 焦点位置と切断部前面の関係



Material: SS400, Thickness: 12mm, Power: 1400W,
Cutting speed: 0.7m/min, Assist gas: O_2 ,
Gas pressure: 70kPa

図 2・17 各種焦点距離レンズでの焦点位置と切断溝形状の関係

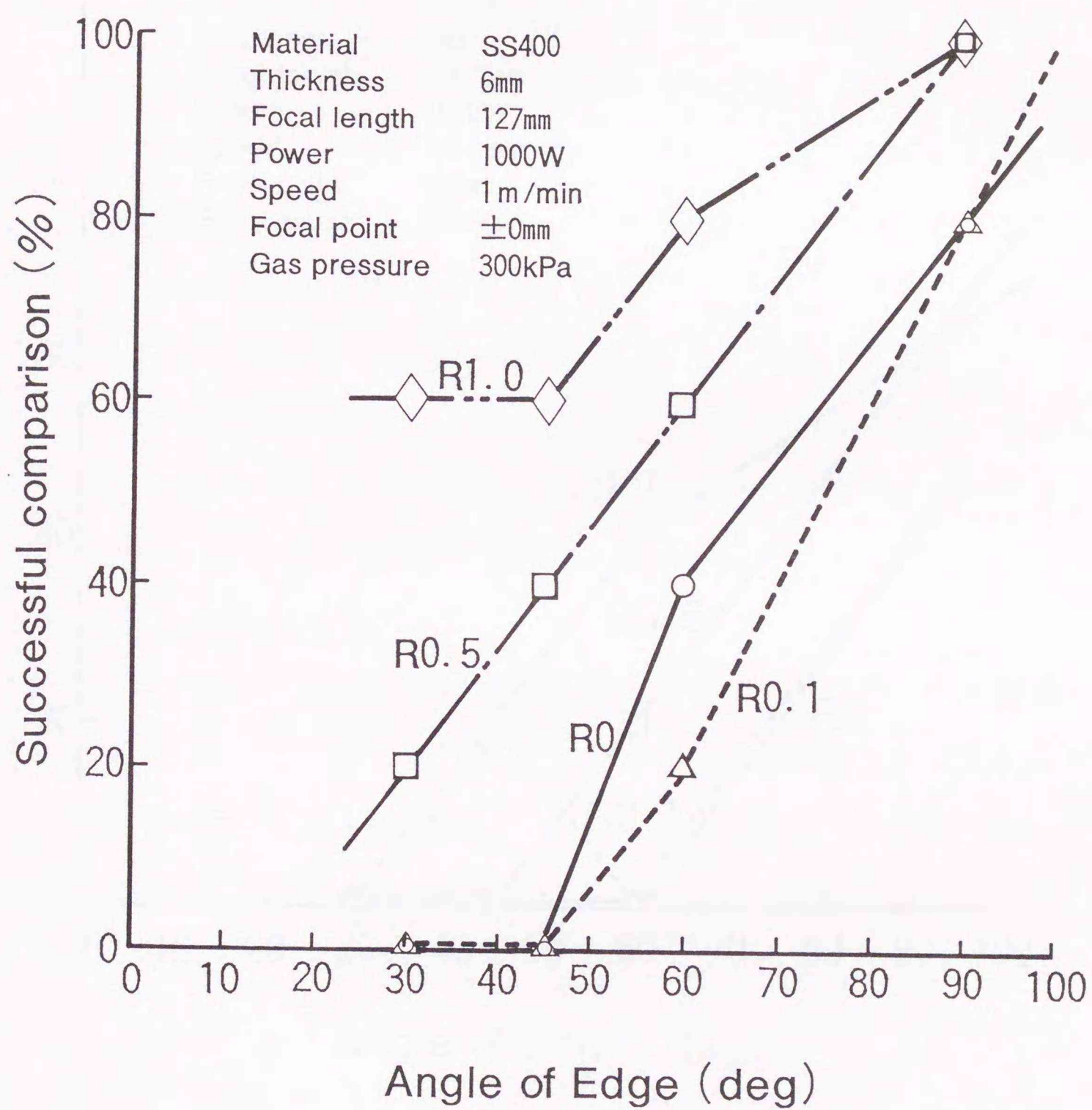


図 2・18 f 127mm レンズによる切断

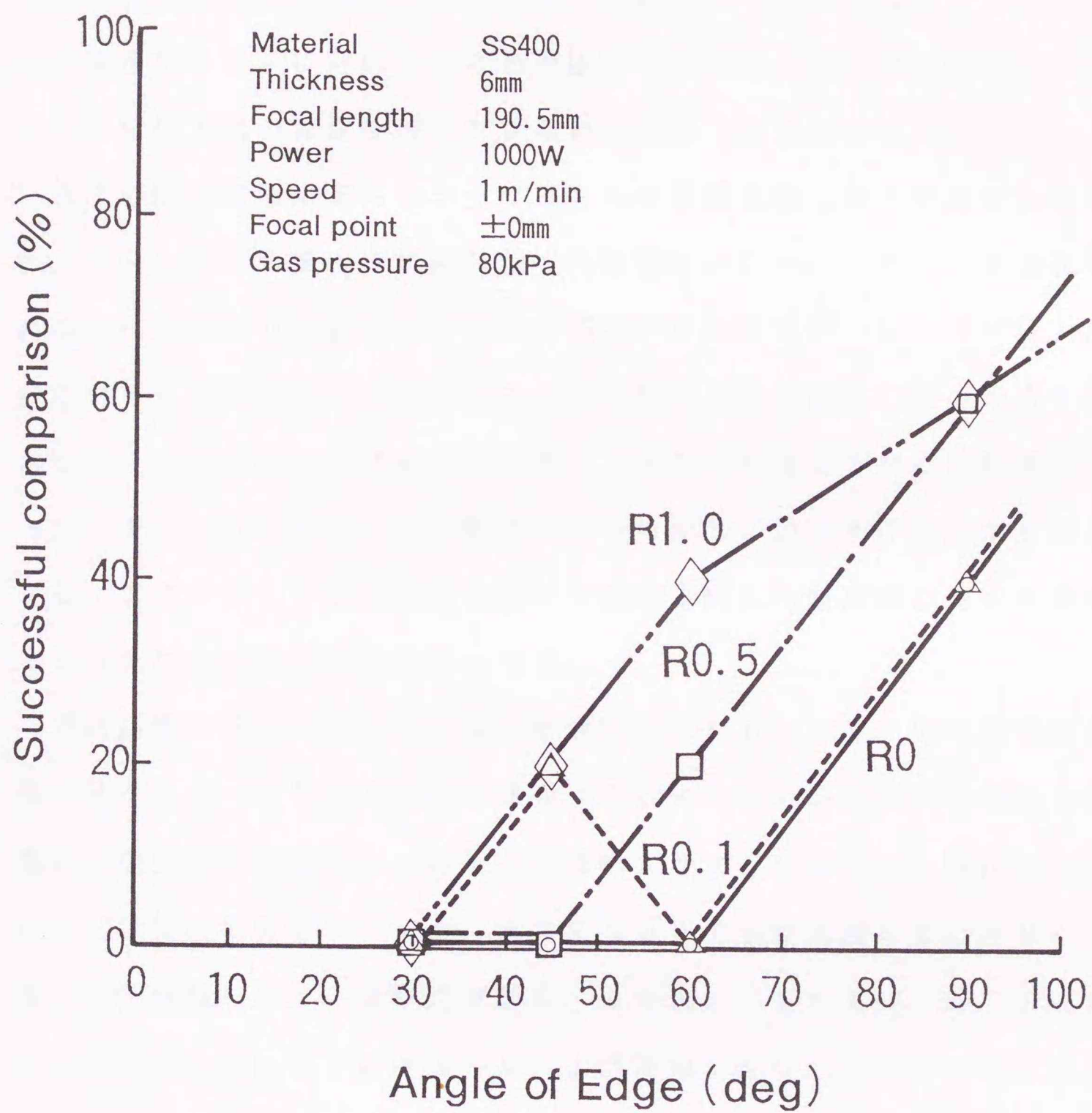


図 2・19 f 190.5mm レンズによる切断

2・4・6 非金属材料の切断品質へのビーム集光特性の影響

従来からの非金属材料の切断法は、機械加工法がほとんどであり自動化や高速化の要求に対応することが困難であった。レーザ切断はこのような機械加工法の欠点を改善できる有力な加工法である。

金属切断では切断溝内をレーザビームが多重反射し加工が行われるため、ビーム集束角度の切断溝形状への影響は小さい。しかし、非金属材料のレーザ切断では蒸発切断現象が基本であることと、レーザビームの吸収率が金属材料に比べて高いことから加工特性は金属切断の場合とは異なる。非金属切断では高い切断精度、すなわち板厚方向に切断溝幅を一定にするためにはビームの集光特性を考慮した加工条件設定が必要である。ここではアクリル樹脂を用いて板厚方向に切断溝幅の変化をできるだけ少なくするための検討を行う。

切断品質の評価方法は、上部切断溝幅 (Upper)、中央部切断溝幅 (Middle)、下部切断溝幅 (Lower) の三箇所を測定した。ただし中央部切断溝幅は上部と下部溝幅より大きい場合のみ測定した。図2・20は焦点位置 $Z = 0 \text{ mm}$ 、出力 750 W で切断速度を変化させたときの切断溝幅を示す。切断速度が 0.05 m/min では下部と中央部の幅は約 2.5 mm でほぼ等しく、上部溝幅は約 0.6 mm であった。焦点位置後のビームの広がり角度が切断溝幅の形成に影響している。下部溝幅は切断速度の増加に伴い急激に減少し、 0.5 m/min の速度では上部溝幅に最も近づき、中央部、下部、上部の順で溝幅は狭くなる。 0.6 m/min では被加工物への入熱不足のため切断が不可能になるため、図中に示す切断溝幅の差は切断速度の変化で改善することはできなかった。図2・21と図2・22は板厚 30 mm のアクリル切断における焦点

位置と切断溝幅の関係を示す。図2・21は加工レンズ焦点距離 f が 2 5 4 mm、図2・22は f が 1 2 7 mm での切断結果である。切断溝幅は焦点の設定位置に強く依存しており、とくに上部溝幅の変化割合は大きい。上部、中央部、下部のそれぞれの溝幅差が最も小さくなる焦点位置は $Z = +4 \text{ mm} \sim +8 \text{ mm}$ であった。上部と下部の切断溝幅の逆転する焦点位置が存在することから、その逆転する位置で切断速度か出力を変化させ中央部溝幅を上部と下部幅に近づけることでテーパの少ない切断が可能になる。

次に、レーザビームを金属スリット内で多重反射させることによって、広がり角度をほぼ平行に修正した後、切断を行った結果を示す。金属スリットは幅 1. 2 mm、長さ 1 3 mm であり切断溝幅方向へのビームの広がりを拘束する。図2・23は広がり角度を修正したビームによる切断溝幅である。金属表面からの焦点位置を 0 mm $\sim$ 1 2 mm の範囲で変化させたが、いずれの焦点位置でもアクリルの切断溝は平行にならない。レーザビームが平行に近い角度で被加工物に照射されると、板厚方向への出力の消費のみが切断溝形成に寄与することになり、どの焦点位置においても切断溝幅は上部、中央部、下部の順に狭くなる。

以上の結果から、切断溝幅を平行にするためには、レーザビームの集束角度と出力の消費とのバランスをとった条件設定が必要になる。最適な条件設定は、焦点位置を被加工物表面より上方向に設定し、被加工物内でのビーム集束角度に広がりを持たせる。アクリル樹脂の気化にはある一定のエネルギーが消費（アクリルの場合は 2, 2 0 0 J / cm^2 で分解）され、照射されたレーザビームのエネルギーは板厚方向に減衰する。この板厚方向のエネルギー減衰割合と、ビームの広がりとのバランスのとれた状態で、平行に近い切断溝幅を作り出すことができる。

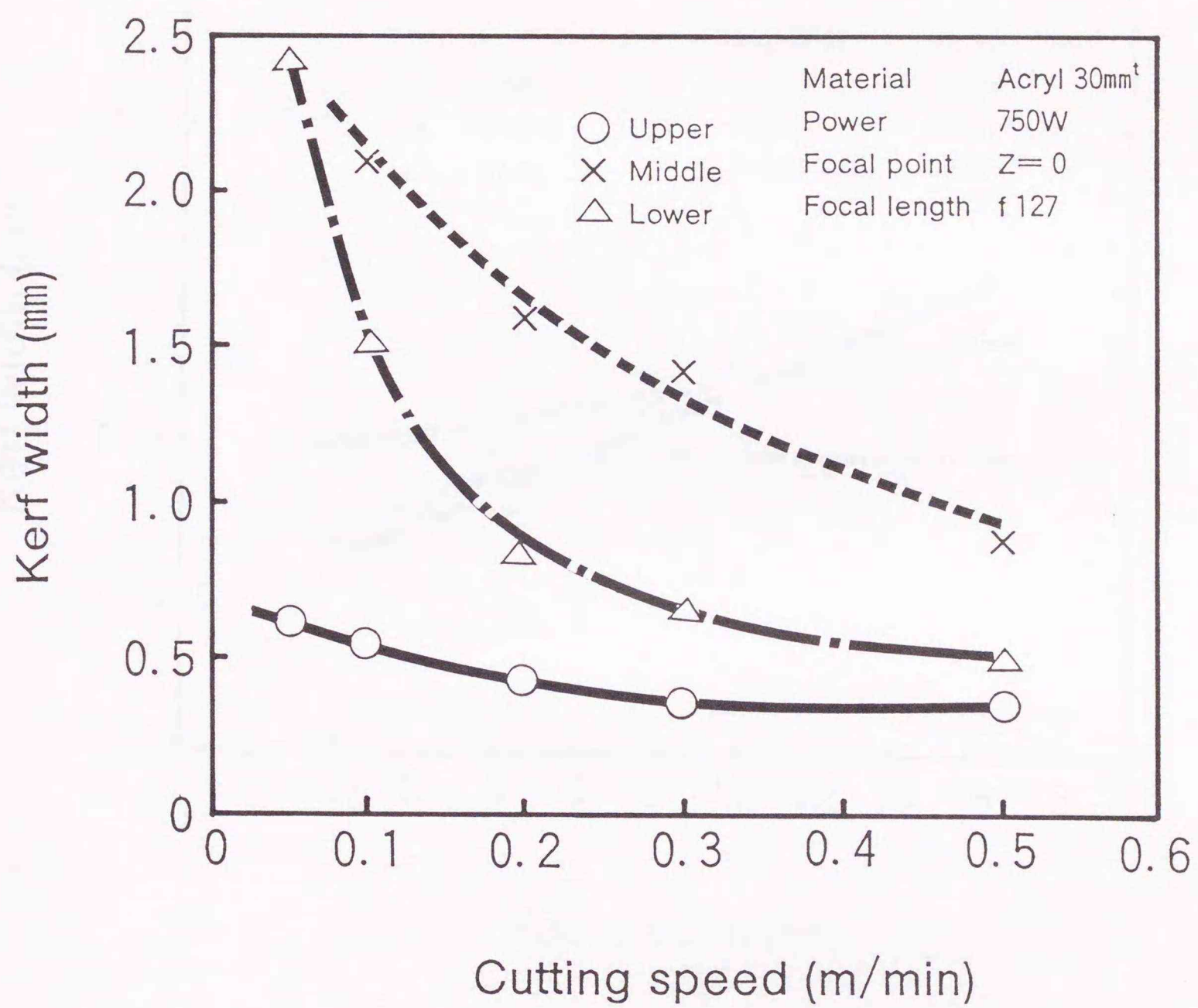


図 2・20 アクリル切断での切断速度と切断溝形状の関係

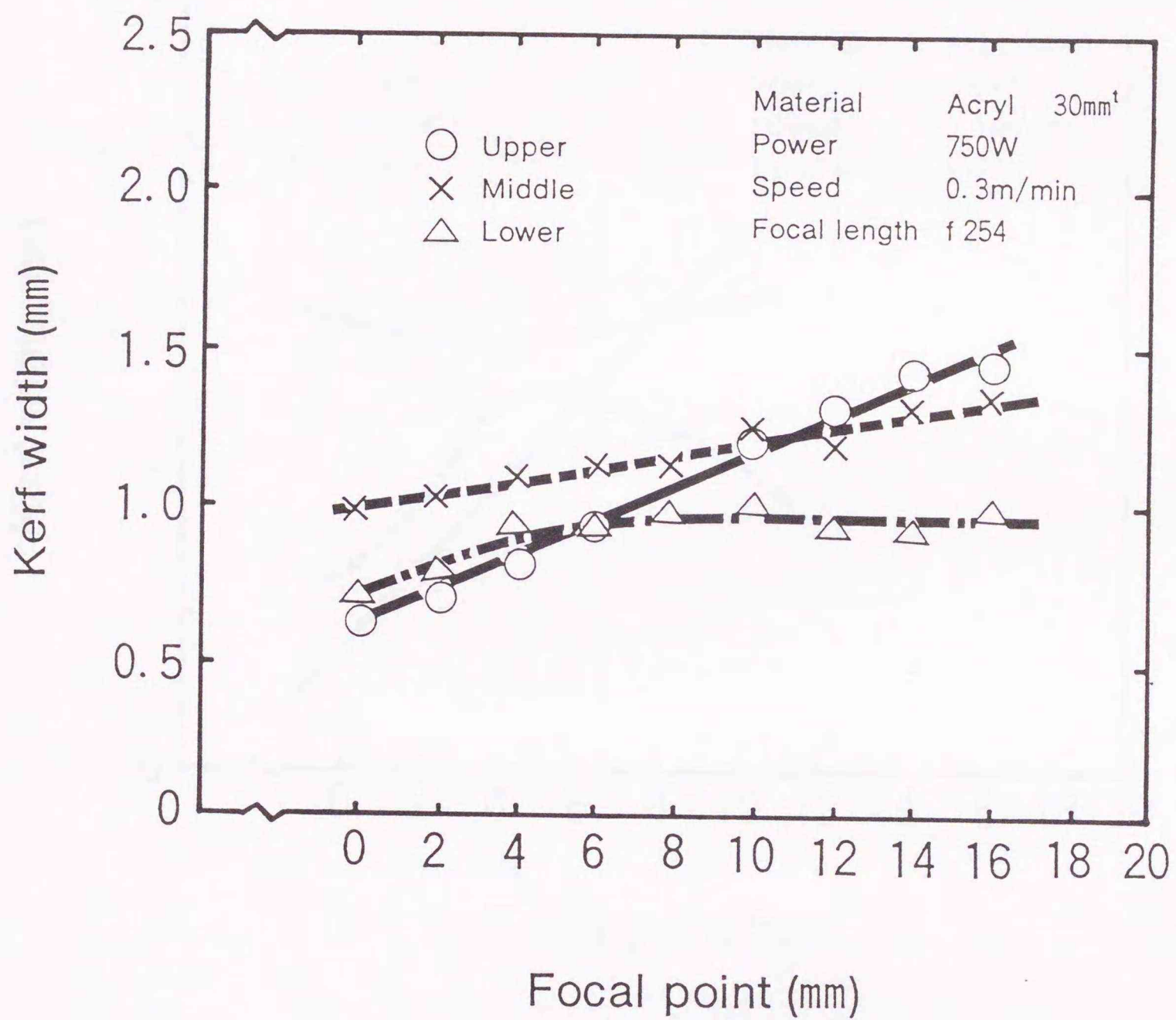


図 2・2 1 アクリル切断での焦点位置と切断溝形状の関係
 f 2 5 4 m m レンズでの場合

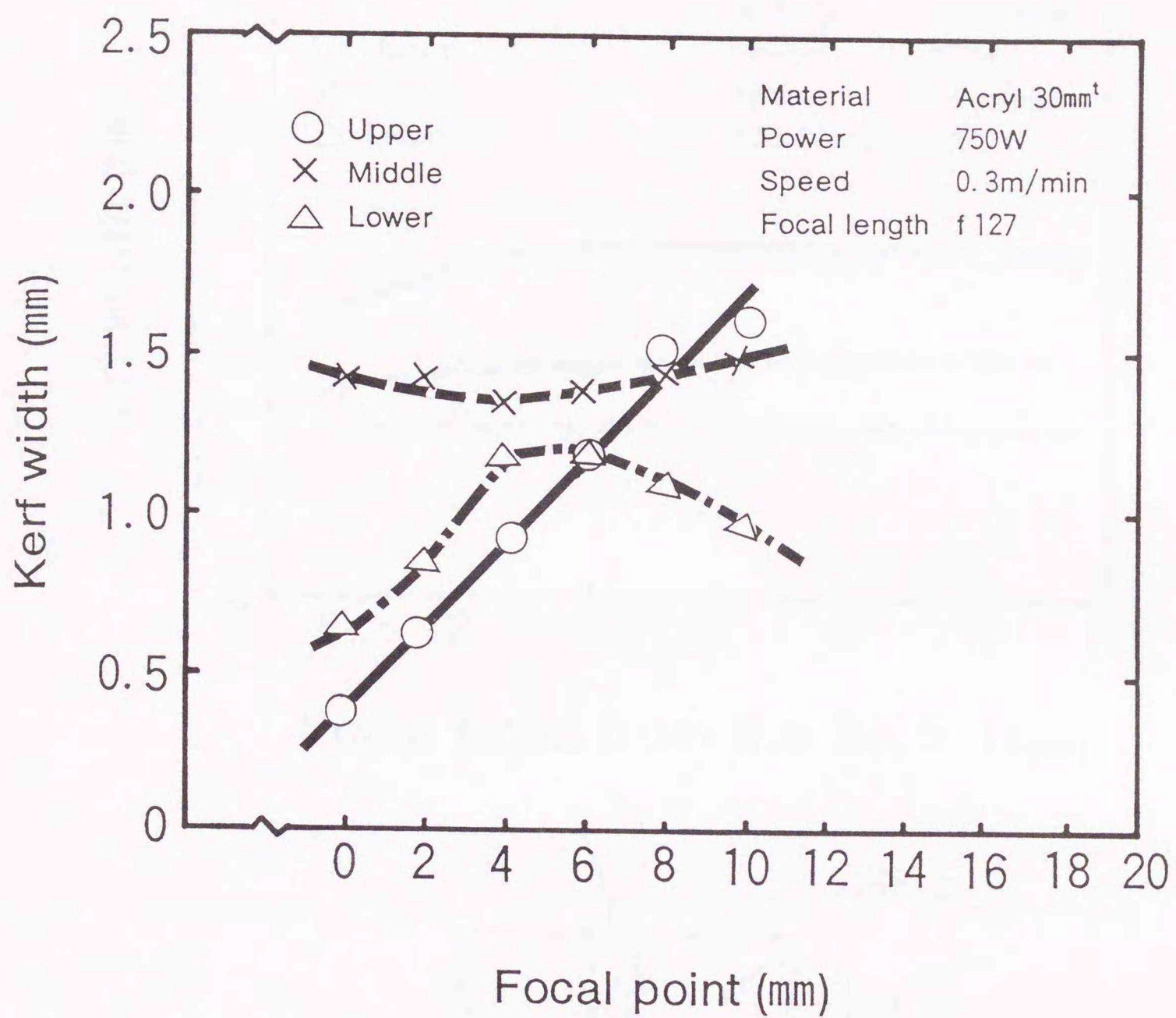


図 2・22 アクリル切断での焦点位置と切断溝形状の関係

f 127 mm レンズでの場合

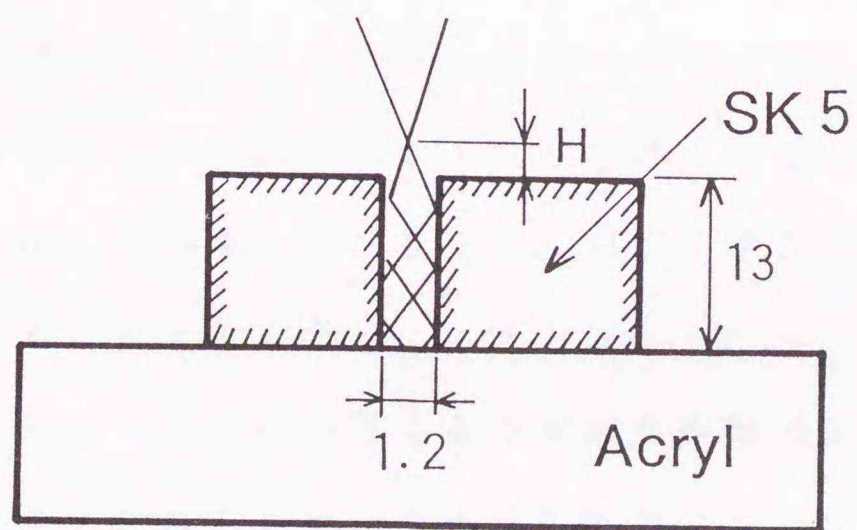
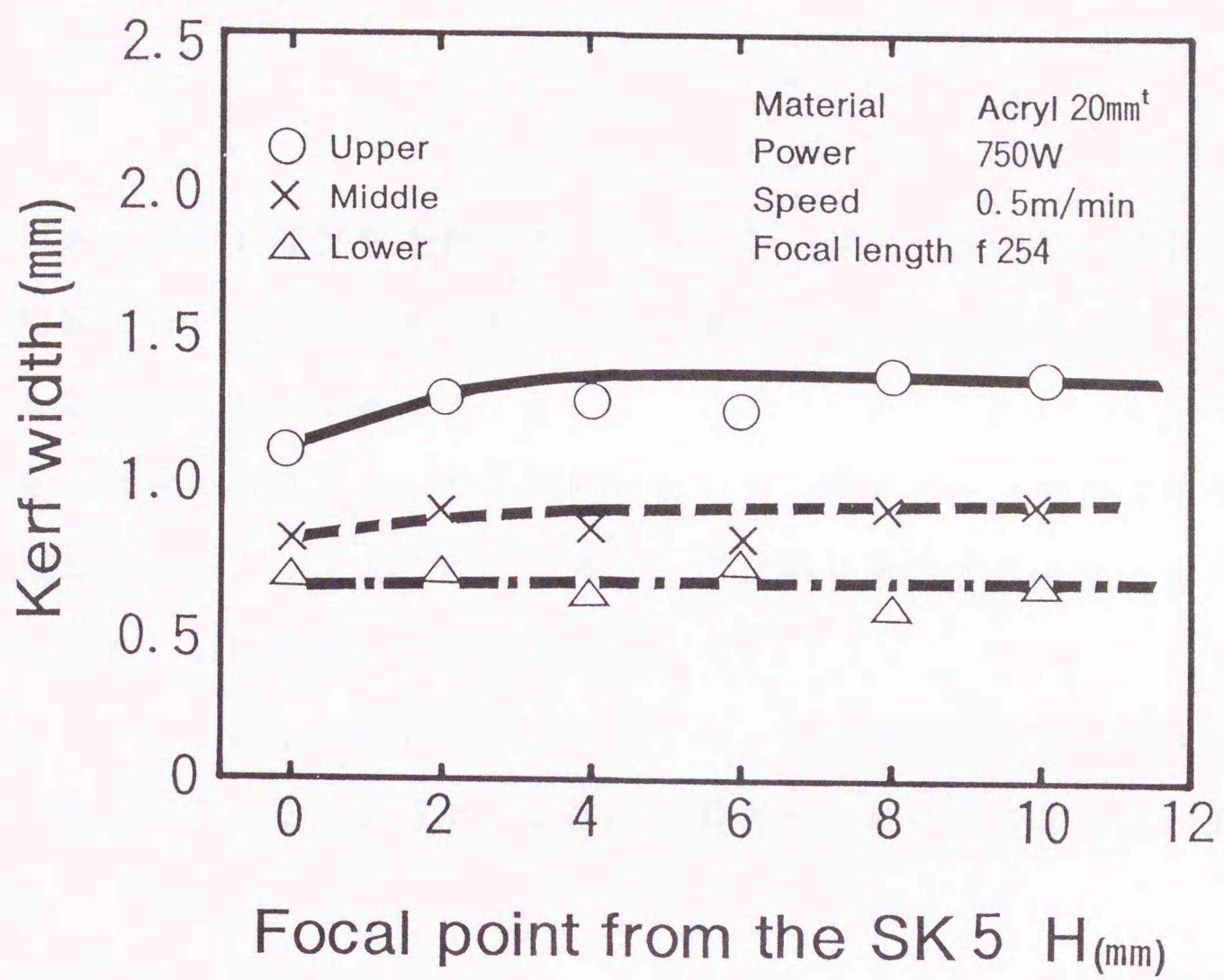


図 2 ・ 2 3 集束角度を平行に近づけた場合の切断溝形状

2・5 第2章の結言

金属および非金属材料を用いて、 CO_2 レーザビームの集光特性を変えて切断を行い、最適集光特性について検討した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) Al合金の CO_2 レーザの切断において、集光ビームの焦点位置を被加工物表面より下方に設定すると、切断時に発生するドロス付着量は低減し、切断面粗さは改善される。
- (2) ステンレス鋼の無酸化切断においても、焦点位置を被加工物表面より下方に設定することで、切断面品質の改善に効果のあることを示した。
- (3) S P C Cの薄板切断時に発生する切断溝のテーパは、被加工物表面でのビーム集光性能に依存する。テーパ度を小さく抑えるためには、被加工物表面でのビーム集光スポット径を小さくすることが必要である。そのためには、短焦点レンズを用い、焦点位置は $Z = 0 \text{ mm}$ に設定する必要があることを示した。
- (4) 集光ビームのスポット径が小さくなる短焦点距離の加工レンズを用いるほど、板厚 4.5 mm と 6.0 mm の軟鋼のレーザ切断面品質は良好になる。
- (5) 厚板のS S材のC W切断において、ドロス付着状態やガウジングおよびセルフバーニングの発生は、上部切断溝幅と切断溝形状に依存することを示した。本実験で実施した板厚 12.0 mm のS S 400の切断において、 $f 127 \text{ mm}$ と $f 190.5 \text{ mm}$ の加工レンズでは $Z = +1 \text{ mm} \sim +2 \text{ mm}$ 、 $f 254 \text{ mm}$ の加工レンズでは $Z = -2 \text{ mm}$

～ + 2 m m で最適な切断溝形状を形成する。

(6) C W 切断におけるエッジ部の加工では、集光特性の高い加工レンズを用いることによって溶け落ち量が減少する。

(7) アクリル樹脂の切断において、上部から下部にかけての切断溝幅の均一性は、レーザ出力とビームの集束角度に依存する。ビームの集束角度は、焦点位置を正側に設定し、被加工物内部では広がり角度を持たせる必要がある。

第3章 パルス特性の切断品質へ及ぼす影響

3・1 緒言

従来からCO₂レーザによる切断現象の解明は主にCW（連続）切断を中心に行なわれてきており、出力と速度の関係⁽¹⁾や板厚と速度の関係⁽¹⁷⁾などの報告も数多くなされている。しかし、より高精度な加工の要求にはレーザビームのパルス発振によるパルス切断の適用が必要不可欠である。パルス発振による切断の加工条件には制御を必要とするパラメータの数が増え、切断品質の向上を図るためには各々のパラメータを最適に設定することが必要である。パルス切断での加工品質と加工条件パラメータに関する報告では、パルス幅と切断面粗さの関係⁽²³⁾、パルスデューティと熱影響幅の関係⁽²⁵⁾などがあるが、いずれも被加工物の板厚が2mm以下を対象にしたものである。より大きな板厚の低入熱加工においてもパルス出力の効果を明らかにする必要がある。後藤らは高速軸流形の発振器でのパルス加工品質⁽²⁴⁾を報告している。しかし、軸流形の構造では、レーザビームの発生媒体であるレーザガスは放電によるガス温度上昇が大きくなり定格出力以上のパルスピーク出力を矩形波で得ることができない。三軸直交形の構造ではレーザガスの放電部通過経路が短いため、定格出力以上のパルスピーク出力を矩形波で得ることができる。この矩形パルス波形による低入熱加工に関する報告は少ない。

また近年、高出力化した CO_2 レーザによる軟鋼厚板の切断が、ガス切断やプラズマ切断に比べて、切断面の傾き（テーパ）が小さいこと、熱ひずみが少ないこと、加工速度が速いことなどの利点から一部の用途に利用さつつある。しかし、レーザビームによる厚板の切断は、ガス切断に比べて切断面粗さが劣る欠点がある。そのため、切断面仕上げの後加工が必要な場合もあることから、レーザ加工の適用分野が限定されている。加工対象の板厚が大きくなるほどこの傾向は強まる。一方、レーザ加工における切断面品質の研究では、薄板の被加工物を対象にビームの集光特性⁽⁹⁾⁽²⁷⁾、アシストガス圧⁽⁹⁾、切断速度と酸化反応の伝播速度の相互作用⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁴²⁾、および出力リップル⁽⁶⁾⁽⁸⁾の影響などが報告されている。ところが、厚板の切断における切断面品質の改善に対し、詳細に検討されたものはほとんどない。ただし、高出力のマルチモードによる切断品質の改善については木下らの報告がある⁽³⁴⁾。厚板の加工では切断速度が遅くなるため、上記要因のうちとくに切断速度と酸化反応の伝播速度との相互作用が切断面粗さの悪化に影響を及ぼしている。そのため、この酸化反応の伝播を制御できれば、面粗さの品質向上につながる事が予想される。

そこで本章ではまず、矩形パルス波形を用いてレーザ出力のパラメータと低入熱加工を目的とする切断品質の関係について検討する。加工品質の評価には炭素工具鋼の熱影響層幅、軟鋼のエッジ加工での溶融量、切断面粗さなどを扱った。次に、板厚12mmの軟鋼材を用いて、その切断面品質に及ぼす CO_2 レーザの出力形態の影響を検討する。そして高品質切断の要因と最適切断条件について考察する。

3・2 CO₂レーザの矩形パルス波形と低入熱加工特性の関係⁽⁴⁰⁾

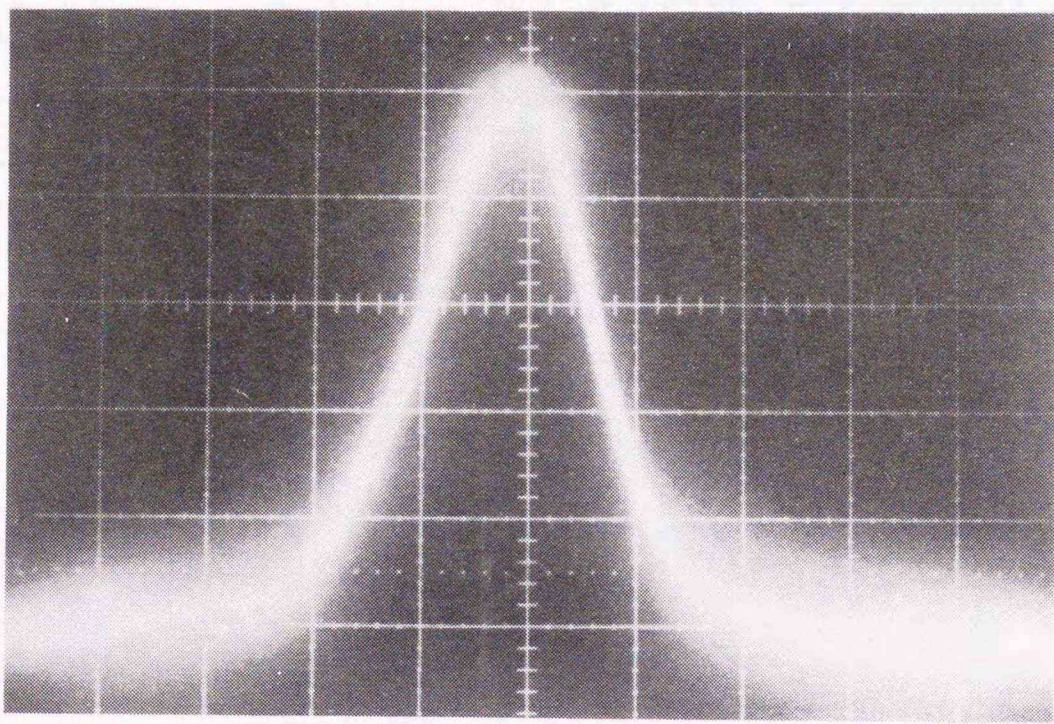
3・2・1 実験装置および実験方法

本報告で使用したレーザ加工装置は、最大出力1.0kWと1.6kWのSD励起式三軸直交形CO₂レーザ加工機である。加工レンズ位置でのビーム径は、それぞれ約15mmと24mmである。図3・1には高速回転の細径ワイヤでビームモードを分割し、そのプロファイルを表示するローテーティングワイヤ法を用い、加工位置で測定した出力1.6kW機のビームモードを示す。集光レンズはZnSe製の焦点距離 f が95.25mmと127mmの2種類を使用した。焦点位置はすべて被加工物表面に設定した($Z=0$ mm)。レーザビームと同軸状に酸素ガスを噴射するノズルは直径1.5mmであり、被加工物との距離は1.0mmに設定した。パルス出力の加工条件に固有なパラメータには、図3・2に示すようにパルスピーク出力 P_p 、パルスデューティ D 、パルス周波数 f_p がある。図3・3にはパルスピーク出力1000W、平均出力500W、パルスデューティ50%、周波数100Hzでの出力波形を示す。パルス平均出力 P_a とパルスピーク出力 P_p およびパルスデューティ D の間には、パルス出力の立ち上がりや下がりの遅れ時間を無視できる範囲、すなわち周波数が500Hz以下、パルスデューティが60%以下では式(3-1)の関係が成り立つ。そのため本実験では、パルスデューティ D は平均出力 P_a に対し所定のパルスピーク出力 P_p が得られるように任意に設定し、 P_a と P_p および f_p の3つを加工パラメータとして扱った。

$$P_p = \frac{P_a}{D} \dots\dots\dots(3-1)$$

被加工物には冷間圧延材 S P C C、一般構造用圧延鋼材 S S 4 0 0 と炭素工具鋼 S K 3 を用いた。加工品質については切断溝幅と切断溝周囲に発生する熱影響層幅、切断面粗さ、エッジ加工時の溶け落ち長さなどを測定し評価した。切断面粗さは上部から下部にかけて悪化する傾向があるため、切断面粗度の測定は被加工物の表面から 0. 3 m m の上部 R u と裏面から 0. 3 m m の下部 R d の 2 箇所について十点平均粗さ R z を求めた。切断中の加工に寄与せず被加工物裏面から透過するレーザ出力を図 3・4 に示す方法で測定し、実際に加工で消費されるビームエネルギーを明らかにした。切断部からの高温で飛散する溶融金属 (S l a g) の付着による熱量測定の誤差を除くため高速 N₂ ガスの噴流によってスラグを水平方向に吹き飛ばした。切断中に被加工物への照射出力 W a 、裏面から透過する出力を W b とし、被加工物のエネルギー吸収率 γ は式 (3-2) のように定義する。

$$\gamma = \frac{(W_a - W_b)}{W_a} \dots\dots\dots(3-2)$$



Horizontal scale is 3mm/div

Power:1600W

図 3 ・ 1 ローテーティングワイヤ法により測定したビームモード

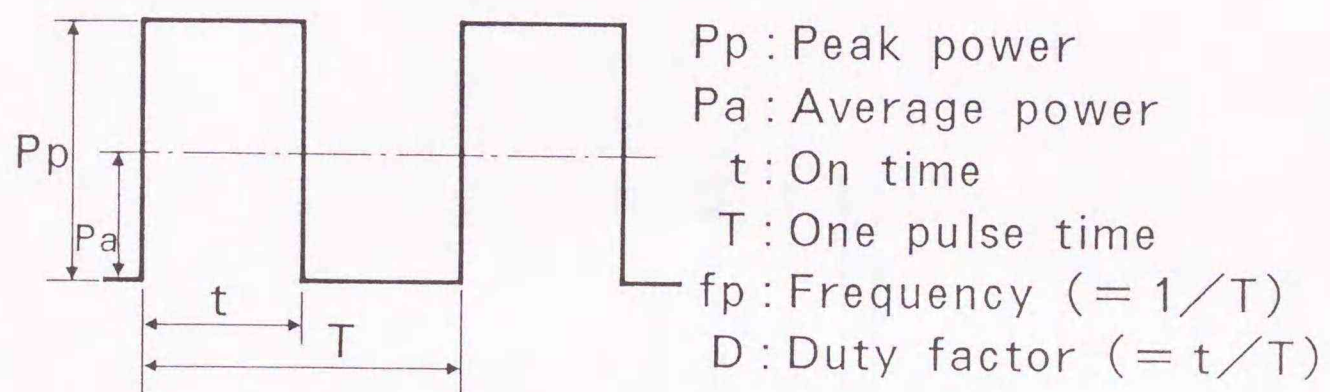
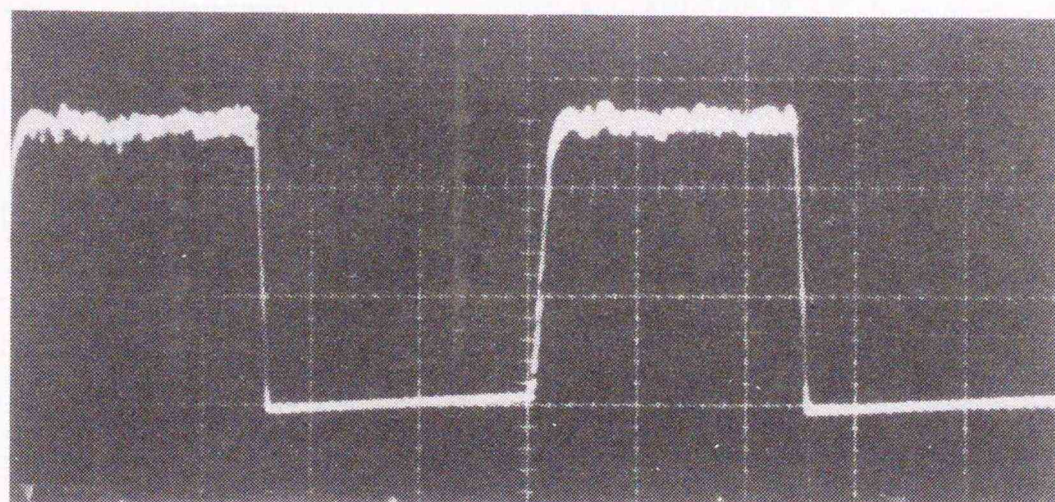


図 3 ・ 2 パルスパラメータを示す概略図



Peak power: 1000W, Average power: 500W, Pulse frequency: 100Hz,
 Duty factor: 50%, Horizontal scale is 2 ms/div

図 3 ・ 3 実験に用いた発振器のパルス波形

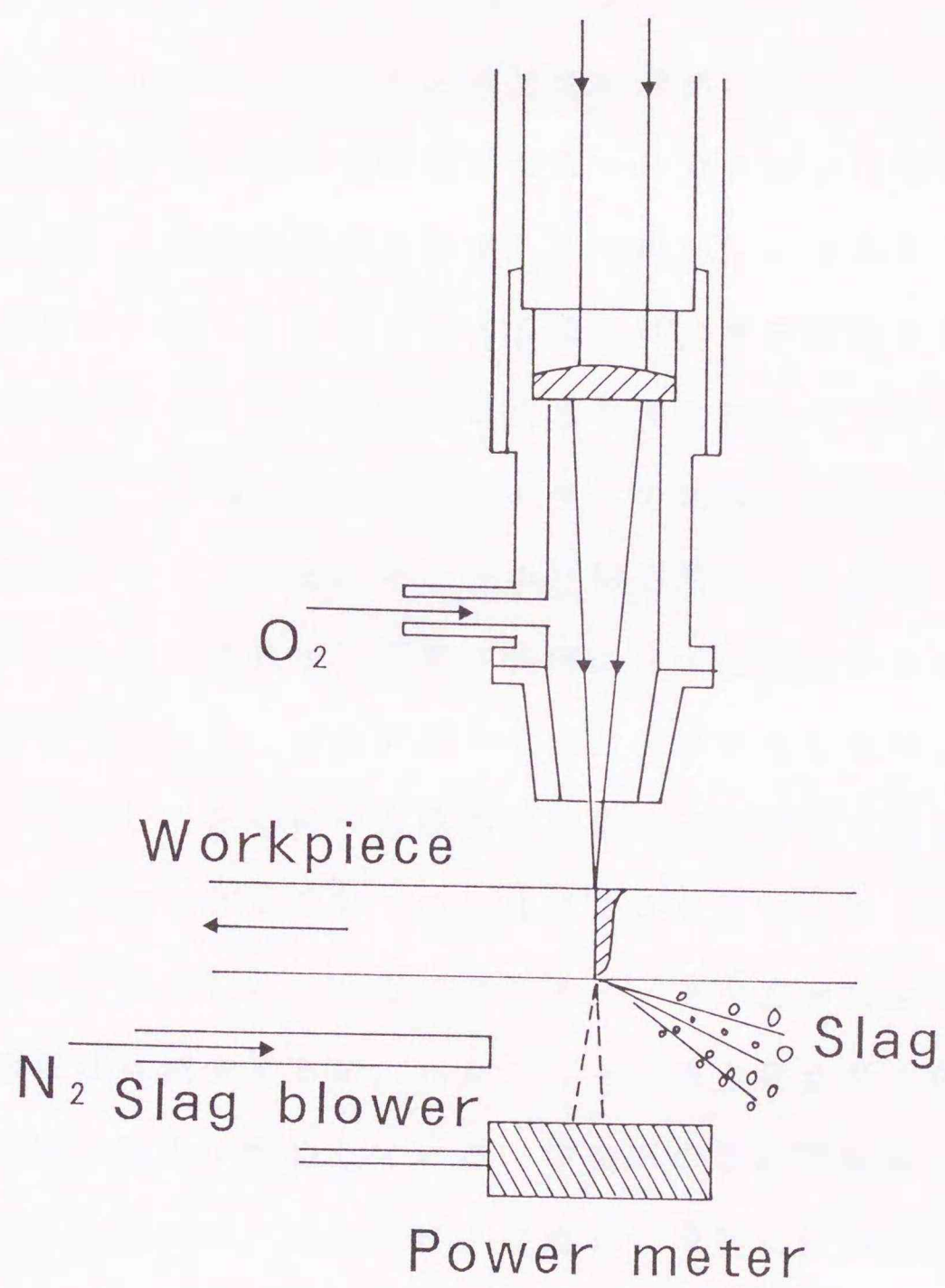


図 3 ・ 4 透過出力測定の概略図

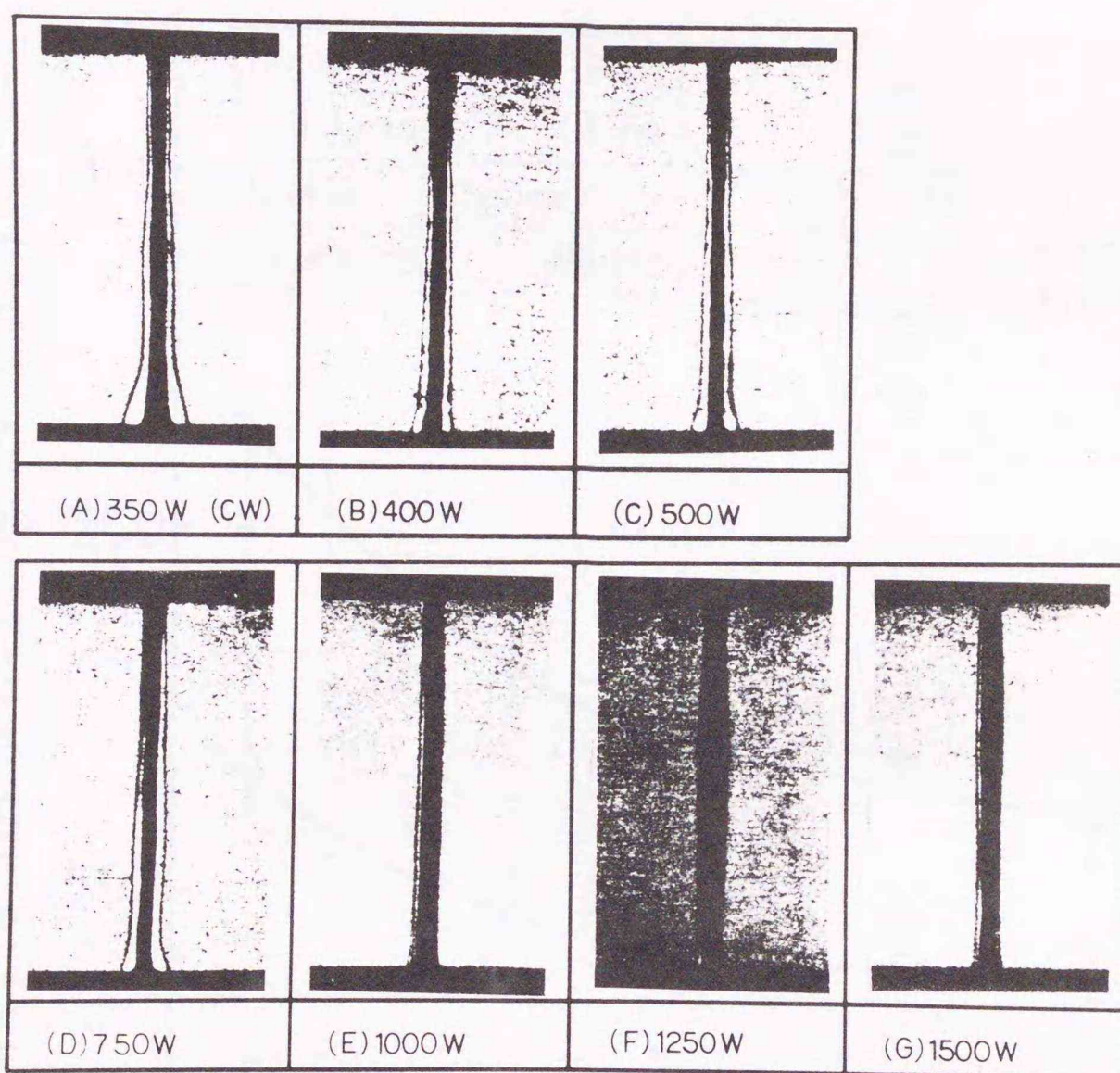
3・2・2 パルスピーク出力の影響

図3・5には板厚5.0mmのSK3を平均出力 $P_a = 350\text{W}$ 、加工速度 $V = 300\text{mm/min}$ 、周波数 $f = 80\text{Hz}$ で、パルスピーク出力 P_p のみを変化させ切断したときの切断溝横断面の拡大写真を示す。また、図3・6には切断面から硬度が $MHV 400$ 以上の得られる熱影響幅とパルスピーク出力の関係を示す。平均出力 P_a は 350W 一定で設定してあるため、図3・5の $P_p = 350\text{W}$ はCWを意味する。パルスピーク出力を変化させても切断溝幅に大きな変化はみられない。熱影響層は切断溝に沿って両側にほぼ均等に発生しており、上部から下部に向かってその幅は増加している。そのため熱影響層幅 H の測定は、被加工物表面から0.5mmの H_u 、板厚中央部の H_m 、裏面から0.5mmの H_d の3箇所で行った。パルスピーク出力が小さくなるほど熱影響層幅 H は増加しており、とくに下部熱影響層幅 H_d が著しく増加している。図中(A)の $P_p = 350\text{W}$ での H_d は $250\mu\text{m}$ にも達し、下部切断面粗さも著しく悪化した。一方、パルスピーク出力を大きくするほど下部熱影響層幅 H_d は減少するが、パルスピーク出力 P_p が 1000W 程度から熱影響層の減少は飽和している。中央部の熱影響層幅 H_m は H_d に対し変化量は小さいが、パルスピーク出力の増加に伴い減少し、 P_p が約 1000W からは飽和する。上部熱影響層幅 H_u はパルスピーク出力の影響が小さく、 $30 \sim 50\mu\text{m}$ の幅でほぼ一定である。

図3・7には、板厚が2.0mmと3.2mmのSPCCから $\theta = 15^\circ$ 、 30° 、 60° の角度を切り出し、その先端部の溶け落ち長さ L とパルスピーク出力 P_p との関係を示す。加工する角度が鋭角になるほど溶け落ち長さ L は大きい。しかし、パルスピーク出力を大きくするほどすべ

ての角度の溶け落ち長さ L は減少し、ある一定値以上のパルスピーク出力では飽和する。この溶け落ち長さの改善が飽和するパルスピーク出力は、切り出す角度によって異なり $\theta = 15^\circ$ は約 1200 W 、 $\theta = 30^\circ$ では約 600 W 、 $\theta = 60^\circ$ では約 300 W である。加工する角度が鋭角になり入熱量の影響が大きくなるほど、パルスピーク出力の効果が顕著になる。

図3・8には、板厚 1.2 mm と 3.2 mm のSPCCおよび板厚 6.0 mm のSS400の切断面粗さとパルスピーク出力との関係を示す。CW切断で得られる加工品質と同様に板厚が小さいほど切断面粗さは良好であり、上部面粗さ R_u と下部面粗さ R_d の差は小さい。各板厚ともパルスピーク出力を高くするほど切断面粗さは良好になる。しかし、切断面粗さの改善においてもパルスピーク出力がある一定の値以上で飽和する。平均出力 P_a に 500 W が必要な板厚 6.0 mm の切断ではパルスピーク出力 P_p は 1500 W 、 P_a に 250 W が必要な板厚 3.2 mm の切断では P_p は 800 W 、 P_a が 100 W の板厚 1.2 mm の切断では P_p は 300 W になり、いずれもパルスピーク出力は平均出力の約3倍である。



Material: High carbon tool SK3, Thickness h : 5mm,
 Average power P_a : 350W, Oxygen pressure P_{O_2} : 240kPa,
 Cutting speed V : 300mm/min
 Peak power P_p : (A)350W(CW)、(B)500W、(C)750W、(D)1000W、
 (E)1250W、(F)1500W

図 3 ・ 5 パルスピーク出力の切断溝幅と熱影響層に及ぼす影響

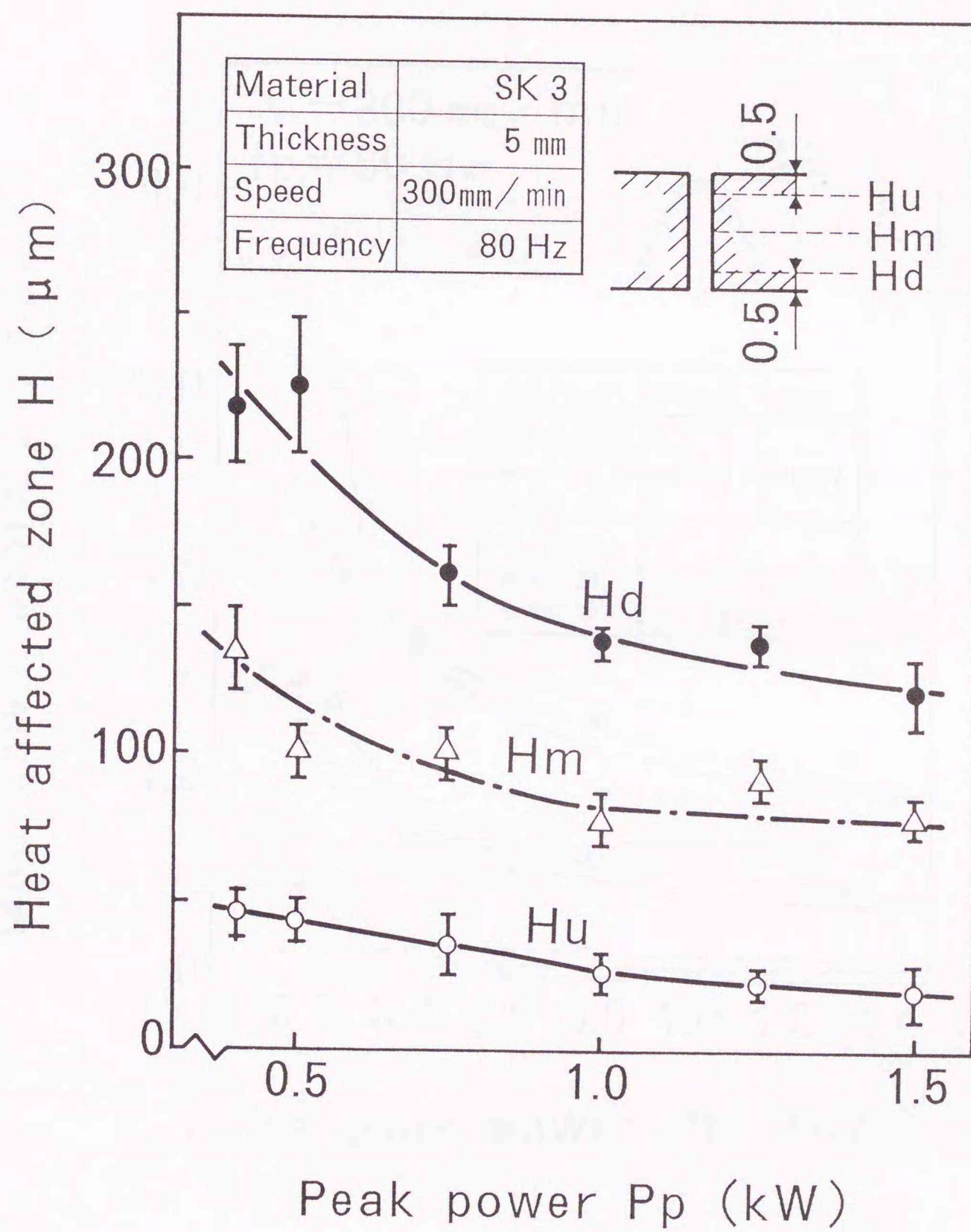


図 3・6 パルスピーク出力と熱影響層幅の関係

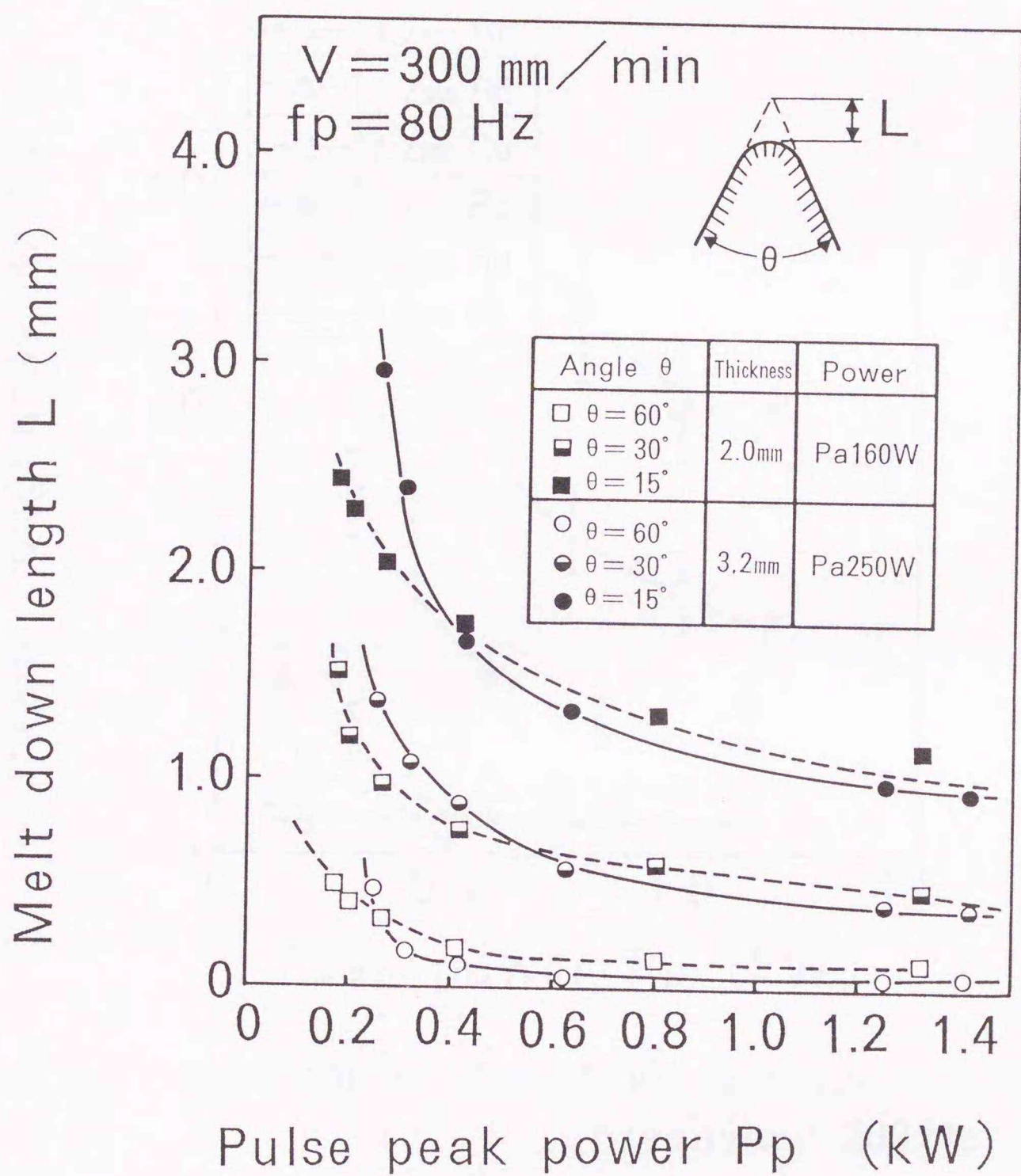
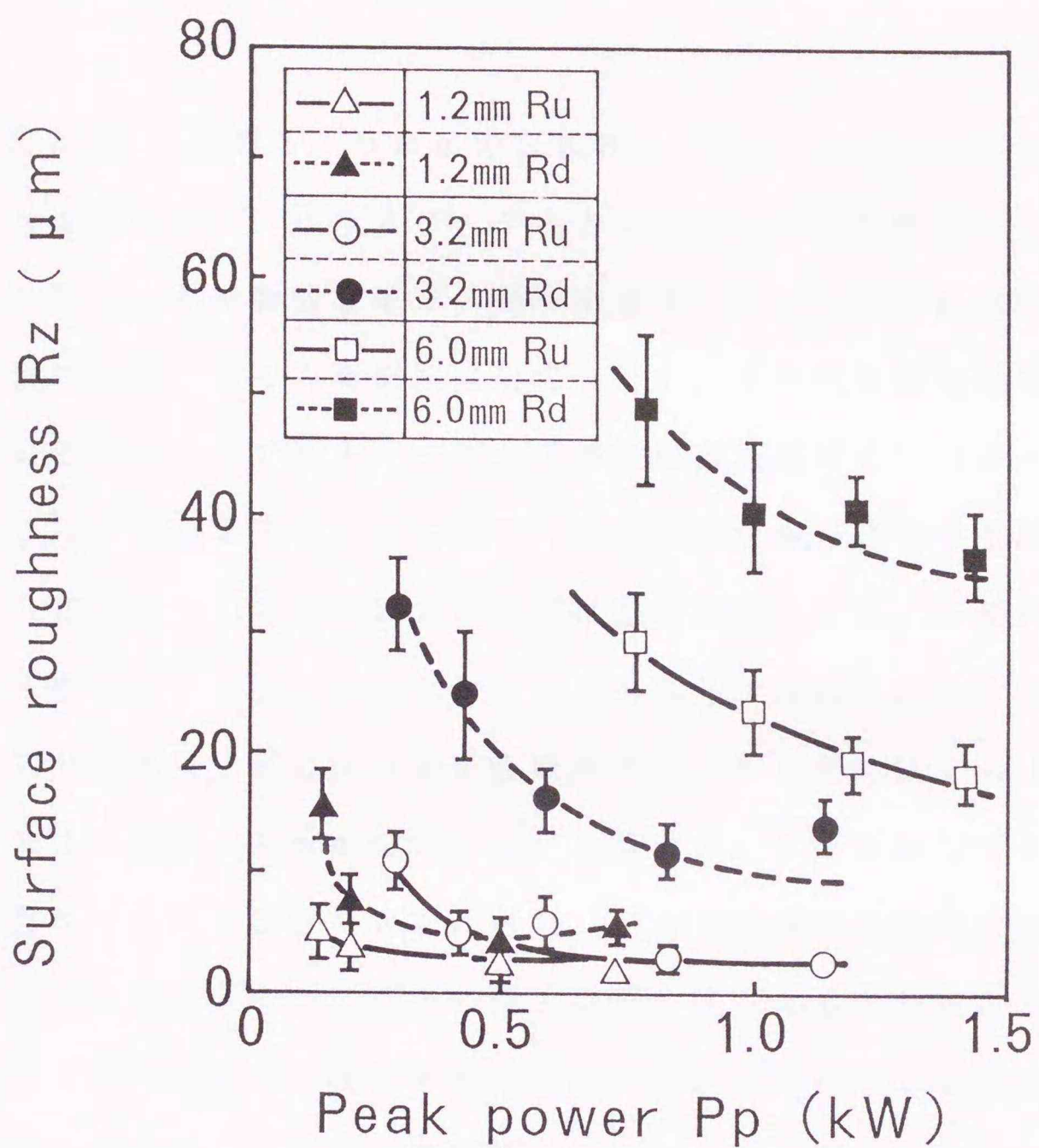


図 3・7 パルスピーク出力とエッジ部の溶け落ち長さとの関係



1.2 mm : Power 100 w, Speed 300 mm/min,
Frequency 200 Hz
3.2 mm : Power 250 w, Speed 300 mm/min,
Frequency 200 Hz
6.0 mm : Power 550 w, Speed 300 mm/min,
Frequency 200 Hz

図 3 ・ 8 パルスピーク出力と切断面粗さとの関係

3・2・3 パルス周波数の影響

図3・9には板厚5.0mmのSK3を平均出力350W、加工速度300mm/min、パルスピーク出力1500Wで切断したときのパルス周波数 f_p と熱影響層幅 H の関係を示す。図3・10は切断溝横断面の拡大写真である。パルス周波数の変化に対し、上部熱影響層幅 H_u は約30 μ mでほぼ一定である。一方、下部熱影響層幅 H_d はパルス周波数が500Hzで約250 μ m生じているが、周波数が低くなるほど熱影響幅は小さくなり、200Hz以下では急激に減少する。周波数50Hzでの H_d は約130 μ mとなり、 H_m の値とほぼ同じになる。図3・11には加工中の被加工物のエネルギー吸収率 γ とパルス周波数 f_p の関係を示す。加工は板厚2.3mmのSPCCと板厚6.0mmのSS400を平均出力300Wと500Wで切断し、パルス周波数を変化させた。これらの平均出力はドロスフリーの加工品質が得られる出力範囲のほぼ中間値をとった。エネルギー吸収率 γ は全周波数領域にわたって板厚6.0mmの切断よりも2.3mmの切断において小さな値になる。どちらの板厚の切断においてもパルス周波数の低下とともにエネルギー吸収率は減少した。以上のことから被加工物への入熱を抑えなければならない鋭角な形状や小穴加工では低周波数の加工条件が必要になる。

図3・12と図3・13には上部及び下部の切断面粗さとパルス周波数の関係を示す。被加工物は板厚2.0mmのSPCCであり、加工条件は平均出力240W、パルスピーク出力1000W、加工速度600mm/minである。周波数が100Hz以下では上部及び下部切断面とも円弧状のドラグラインが規則正しく並び、その間隔はパルス周波数と加工速度より決まるピッチとほぼ一致する。この現象はCW切断時に切断面に

生じる周期的なピッチ⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁴²⁾とは異なり、パルス切断では酸化反応がパルスのON・OFF時間で正確に制御されていることを示す。パルス周波数が200Hz以上では切断面の周期的なドラグラインはみられなくなる。図3・14には同条件での切断溝幅を示す。上部幅 d_u は200Hz以下で、下部幅 d_d は100Hzでドラグラインの円弧が大きくなるため図中には最大と最小の切断溝幅を分岐して示した。パルス周波数を低くするほど上部幅 d_u は大きくなり100Hzで最大になり、50Hzでは逆にやや小さくなる。下部幅 d_d は、200～400Hzの範囲で周波数を低くするほど僅かに減少するが、100Hz以下では逆に著しく大きくなる。

以上のことから周波数が低く、かつピーク出力が大きくなると、1パルス当りのビーム照射時間が長くなり、ビームエネルギーが板厚方向および垂直方向へ伝達される割合が増え切断溝幅が広がる。その結果、溶融現象の切断から蒸発現象の切断へと変化する(図3・15)。また、ビームのOFF時間が長くなり、アシストガスによる被加工物の冷却効果が高まる。一方、パルス周波数が高くなる場合とピーク出力が低下する(パルスデューティが大きくなる)場合は、1パルスで起きる溶融域が接近し、かつ冷却時間が短くなるため入熱が増す。そのため低入熱加工には、低周波数においてもレーザガスの温度劣化の影響を受けないで高いパルスピーク出力を維持できるパルス波形が適する。

切断面粗さには、パルスピーク出力を増加させ被加工物の蒸発圧力を高め溶融物の除去が促進されることで、品質改善に効果が認められた。また、1パルス当りのエネルギー P_k を式(3-3)に示すピーク出力 P_p とその照射時間 t との積とし、面粗度との関係を図3・16に示す。

$$P_k = P_p \cdot t \quad \dots\dots\dots(3-3)$$

被加工物は板厚 2.0 mm の S P C C であり、加工速度は 300 mm / min、600 mm / min、900 mm / min、パルスピーク出力はすべて 1000 W で実施した。どの速度で加工した場合も P k が小さくなるほど、すなわち 1 パルスの照射時間が短くなり、溶融脱落域を小さくするほど面粗さは良好になる。

切断面粗さには、図 3・12 と図 3・13 で示したように、特に低周波数域では溶融域の重なりや冷却時間に関与する場合と、図 3・16 に示したように、パルス出力の照射によってビーム域の輪郭に関与する場合とがある。

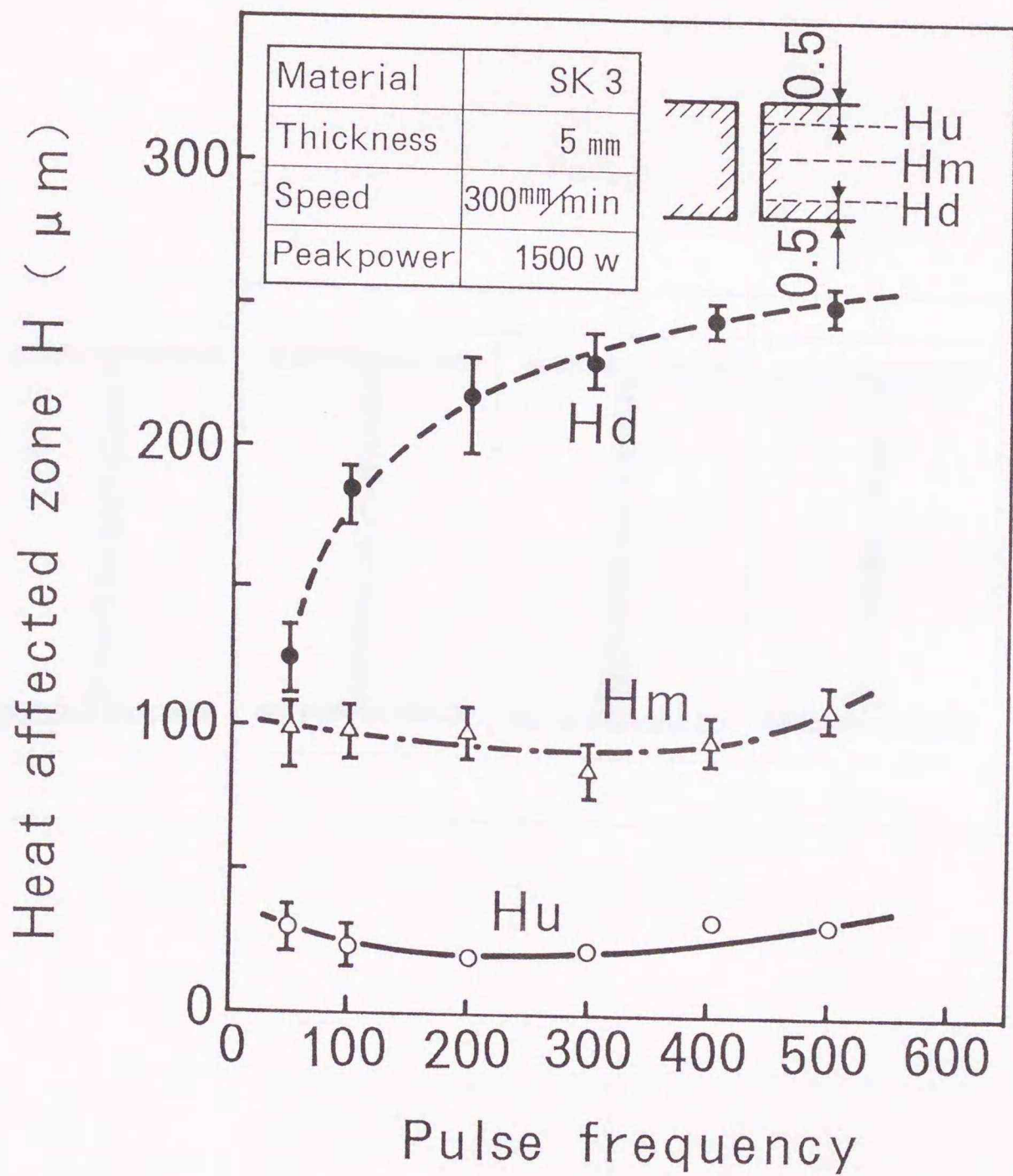
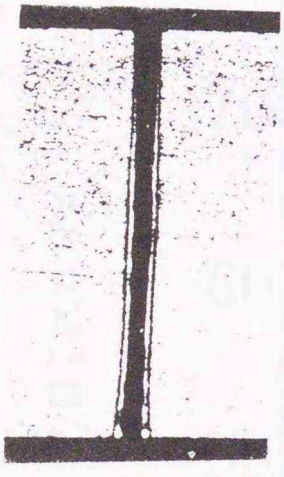
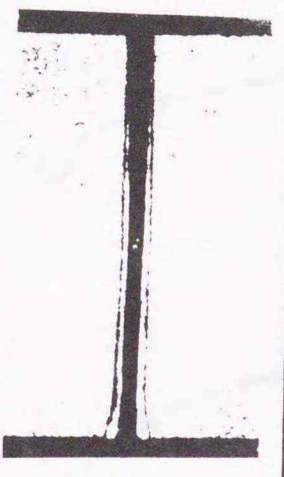
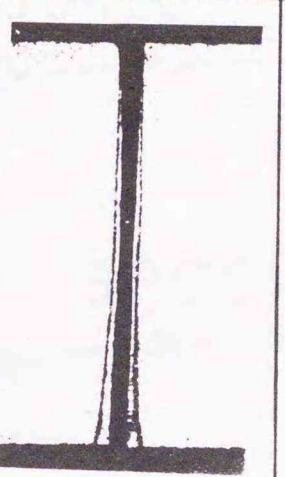
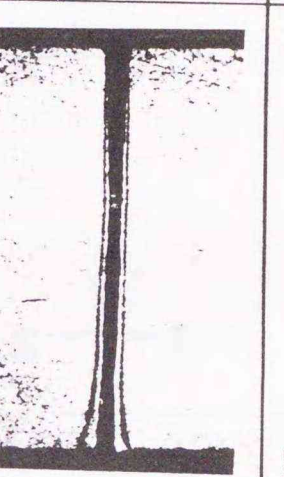
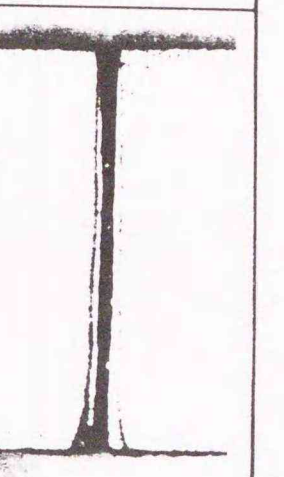


図 3・9 パルス周波数と熱影響層幅の関係

(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
				
50Hz	100Hz	200Hz	300Hz	500Hz

Material: High carbon tool steel, Thickness: 5mm,
Average power: 350W, Peak power: 1500W,
Cutting speed: 300mm/min, Assist gas: O₂,
Gas pressure: 240kPa

図 3 ・ 1 0 パルス周波数の切断溝幅と熱影響層に及ぼす影響

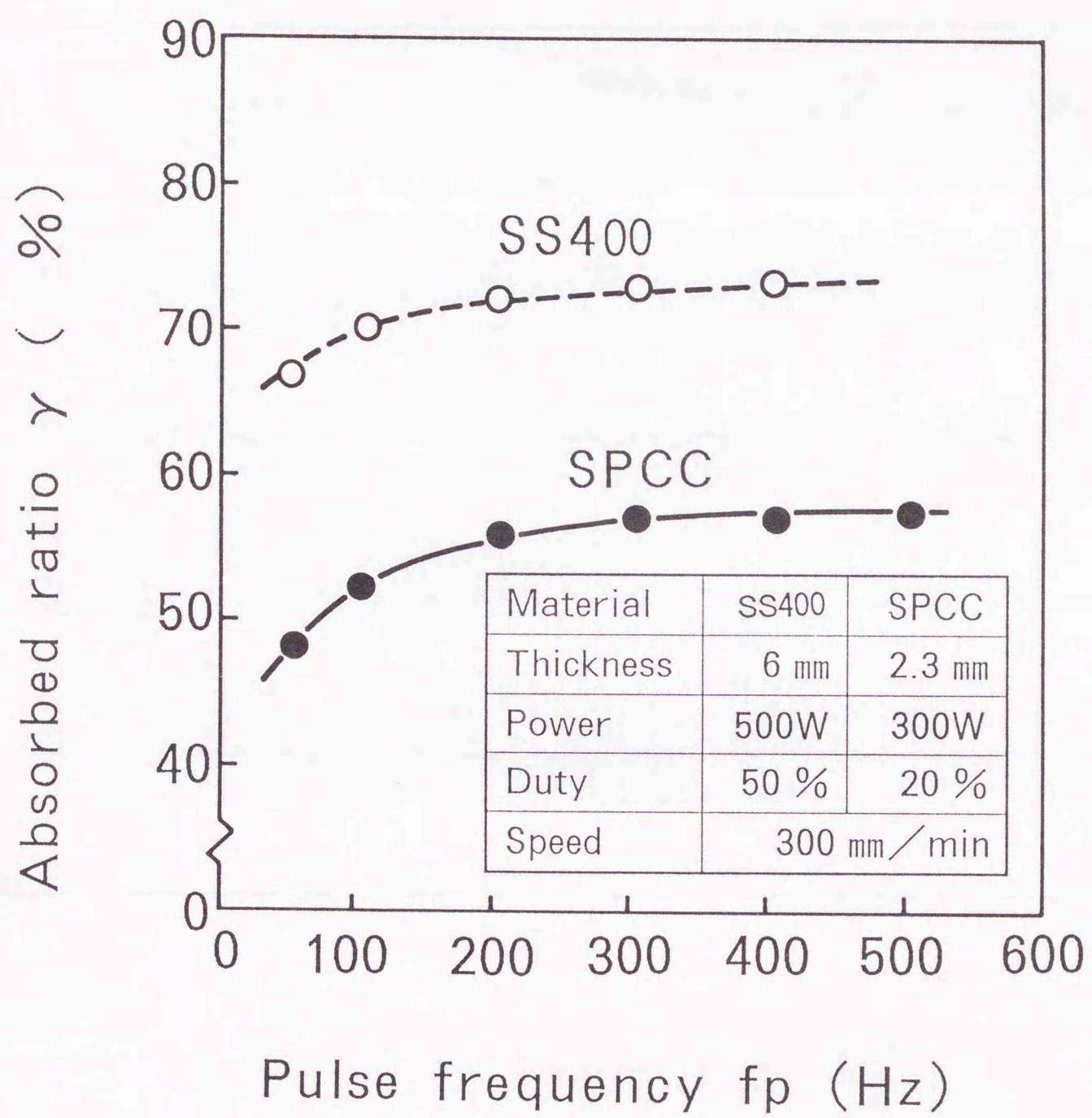
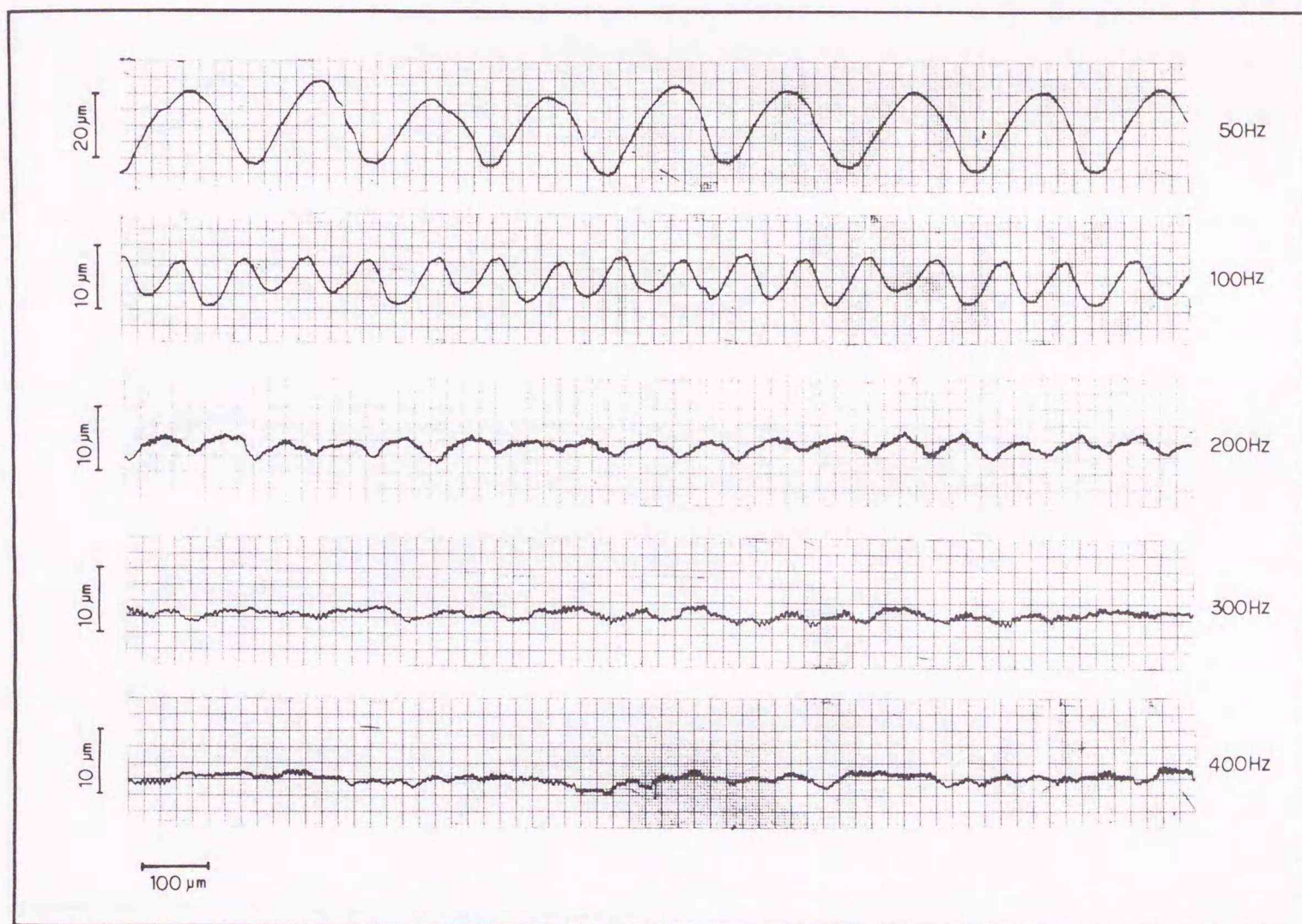
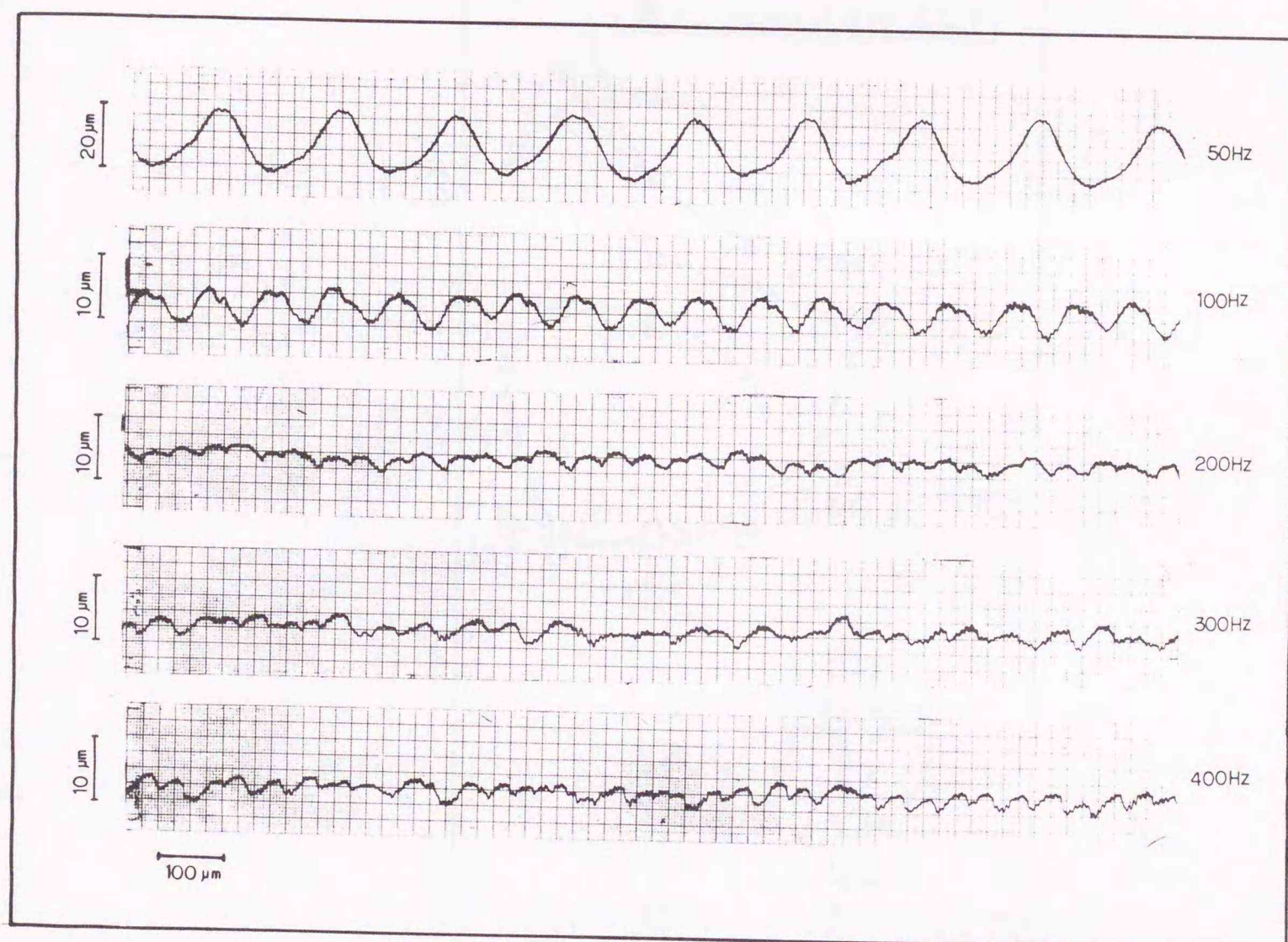


図 3 ・ 1 1 パルス周波数とエネルギー吸収率との関係



Material: SPCC, Thickness: 2mm, Average power: 230W,
 Peak power: 1000W, Cutting speed: 600mm/min,
 Assist gas: O_2 , Gas pressure: 300kPa, Focal length: 127mm,
 Pulse frequency: 50Hz, 100Hz, 200Hz, 300Hz, 400Hz

図 3 ・ 1 2 上部切断面粗さ R_u



Material: SPCC, Thickness: 2mm, Average power: 230W,
 Peak power: 1000W, Cutting speed: 600mm/min,
 Assist gas: O_2 , Gas pressure: 300kPa, Focal length: 127mm,
 Pulse frequency: 50Hz, 100Hz, 200Hz, 300Hz, 400Hz

図 3 ・ 1 3 下部切断面粗さ R_a

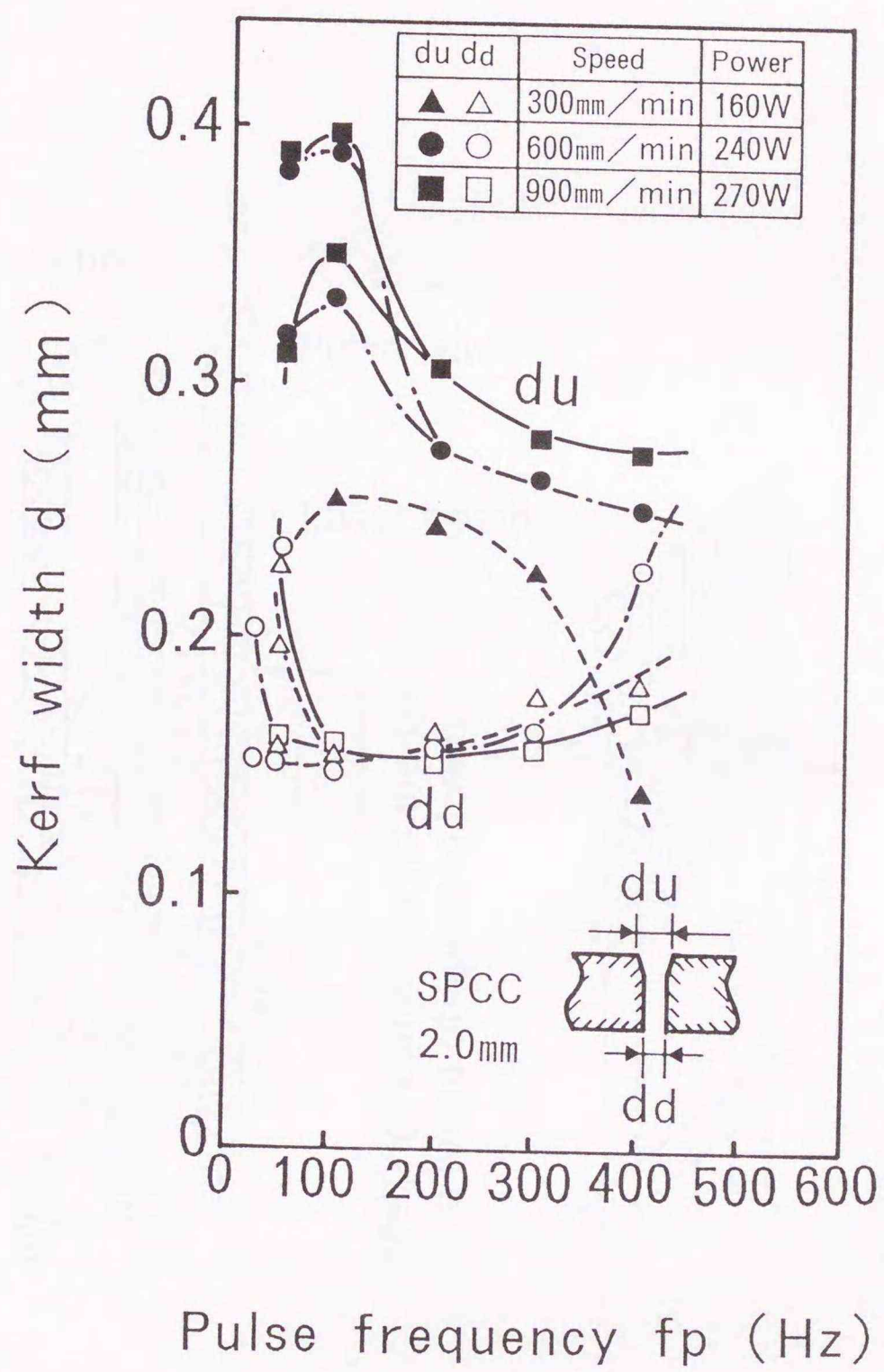
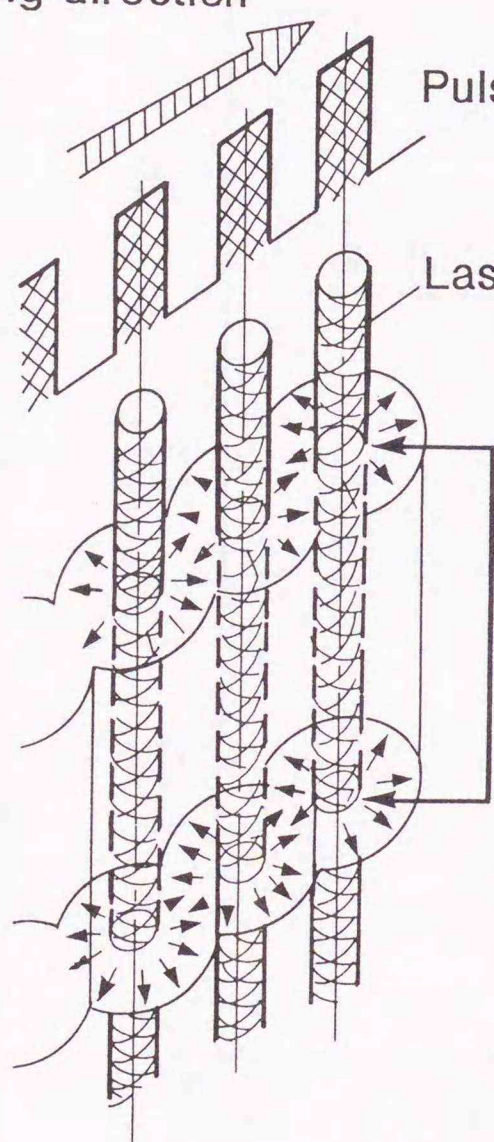


図 3 ・ 1 4 パルス周波数と切断溝幅の関係

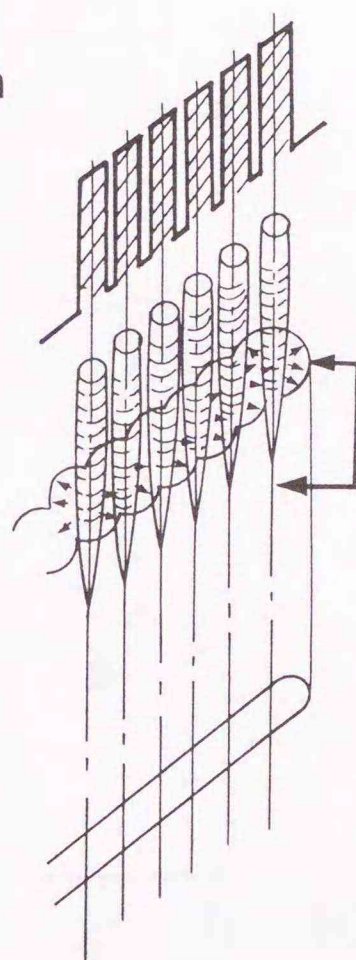
Cutting direction

Pulse wave

Laser beam



Melting results around the beam
in a range of upper to lower



Melting results around the beam
on the upper alone

(a) Low-frequency cutting

(b) High-frequency cutting

図 3 ・ 1 5 パルス出力による切断モデル

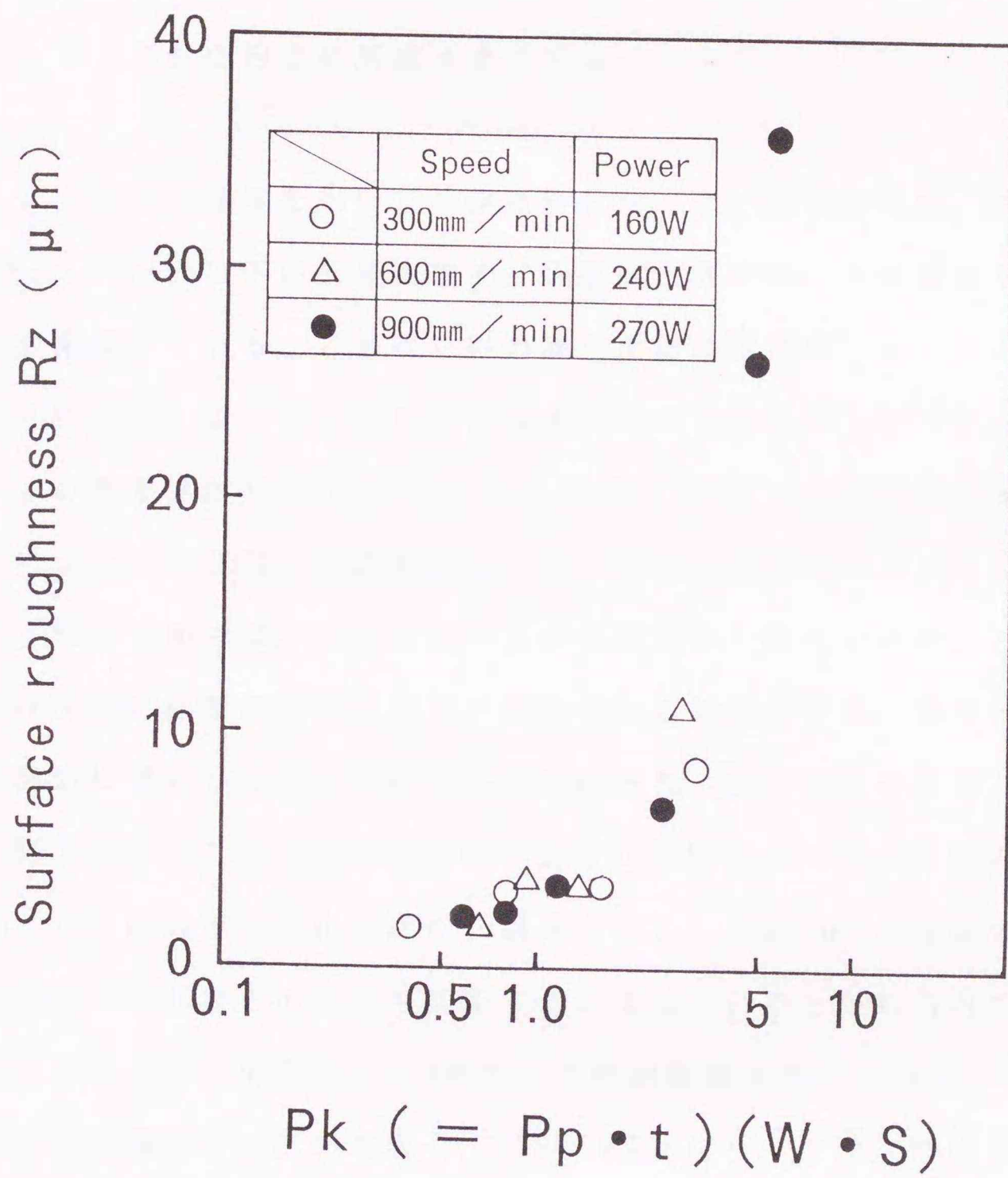


図 3 ・ 1 6 1 パルス当たりのエネルギーと切断面粗さの関係

3・3 パルス特性の切断面品質に及ぼす影響⁽³⁰⁾

3・3・1 切断面粗さの形成メカニズム

アシストガスに酸素を用いて軟鋼材料をレーザー切断する場合、加工速度が 2 m/min 以下の低速度域で、切断面上部から、中央部にかけて周期的な条痕が生じる。これは材料の酸化反応の伝播が、ビームの移動速度（切断速度）より速いことに起因するためである⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁴²⁾。

ビームの移動速度 V_B が酸化反応の伝播速度 V_R 以下の低速度域では、ビームによる加熱が酸化反応を開始させ、切断前面はビームより速く前進する。切断前面では、レーザービームの加熱域から離れるため、ビーム前方では反応に必要な最低温度以下になり反応は停止する。再びビームが切断前面に追いつくまで酸化反応は中断され、前面に到達すると1サイクル終了する。これらの現象の繰り返しが切断面の凹凸の条痕を発生させている。軟鋼での酸化反応の伝播速度は 1.5 m/min 程度であり、ガス切断ではこれ以上の速度で切断するのは難しいことが知られている。

以上のことから、出力 1.5 kW クラスの発振器を用いて板厚 9.0 mm 以上の軟鋼材を加工する場合、 $V_B < V_R$ となり、この周期的現象の発生が顕著になる。また、加工部のビーム径が大きくなるほど酸化反応の伝播領域が拡大し、条痕のピッチは大きくなる。切断面粗さはこれらのピッチの大きさの影響を受けるため、ピッチが大きいほど切断面は粗くなる。

本実験ではレーザービームの照射をパルス化することによって、前記の速度 V_R で広がる酸化反応範囲を制御した。その結果、切断面の品質が

飛躍的に向上したので報告する。なお、一般的な低入熱加工を目的とするパルス切断では周波数200Hz以下の領域であることから⁽³⁶⁾、本節中でのパルス切断は特に高周波パルスと称する。

3・3・2 実験装置および実験方法

本実験に使用したCO₂レーザ加工機は、三菱電機製ML2012HB2-3016Fである。ビームモードはシングルモードであり、加工レンズ位置でのビーム径は約24mmである。パルス波形は完全な矩形波でないことを前述したが、パルス周波数が高くなるほどパルス波形が乱れる。図3・17はレーザ発振器3016Fと3016C（参考）のパルス出力のリップル率を示したものである。3016Fのパルス波形では周波数が600Hzまではリップル率100%であるが、さらにパルス周波数を増加させるとリップル率は減少する。周波数1300Hzではリップル率50%であった。パルス加工条件での出力表示はすべて平均出力値を示す。ノズル形状は円錐で出口直径2.0mmである。加工レンズには、焦点距離 f が190.5mmのZnSe製のものを使用した。焦点位置 Z （mm）は被加工物表面からの距離で表し、上方を正とした。被加工物には板厚12mmの一般構造用圧延鋼材SS400を用いた。

切断実験では加工条件のパルス周波数、パルスデューティおよび焦点位置を変化させて切断品質を調査した。切断面粗さと切断面に発生する条痕のピッチの測定には触針式面粗さ計を使用し、切断溝幅の寸法測定には投影機を使用した。面粗さの測定は被加工物表面より0.3mmの上部と板厚の中央部および裏面から1.0mmの下部の3箇所で行った。

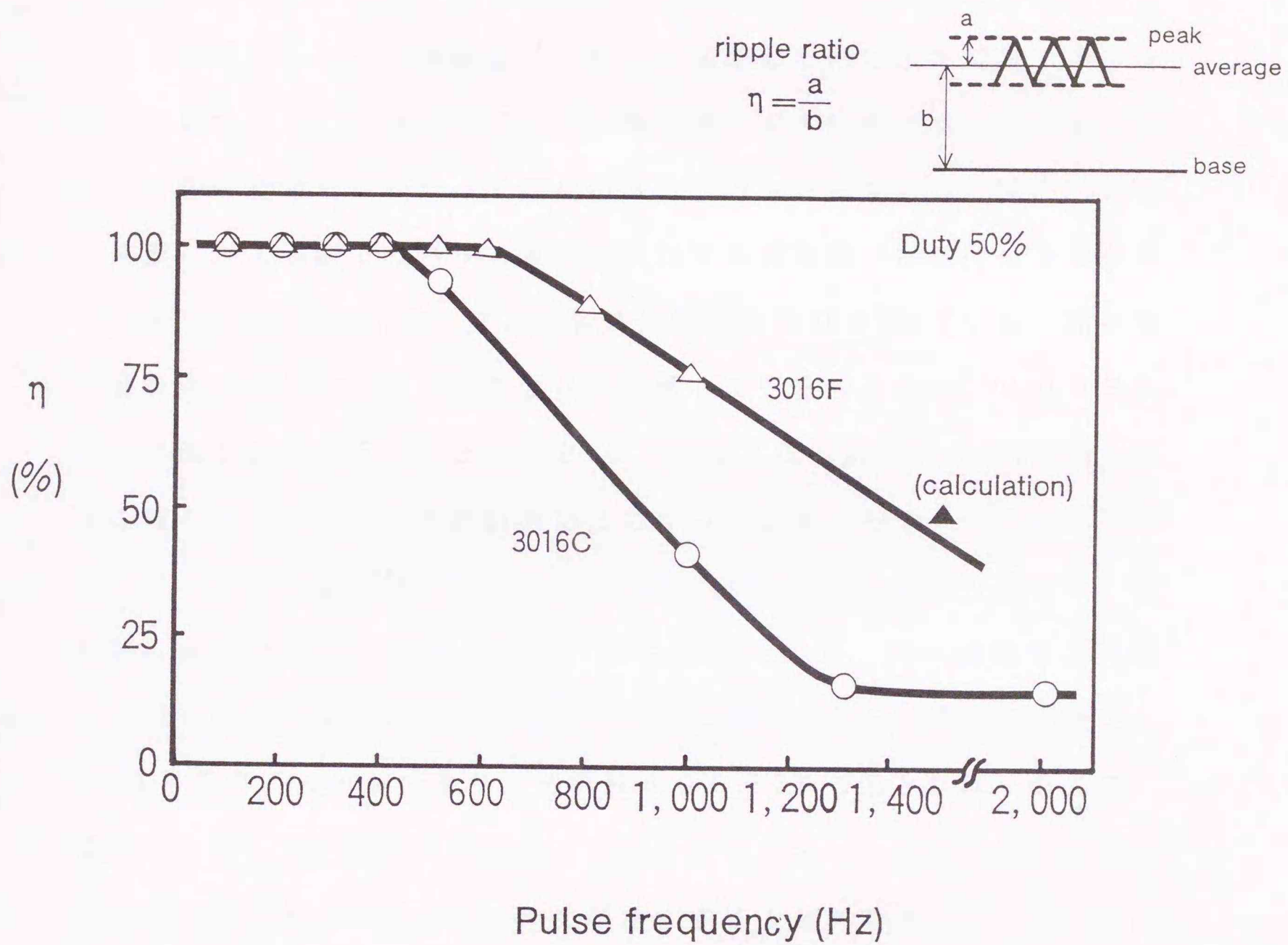


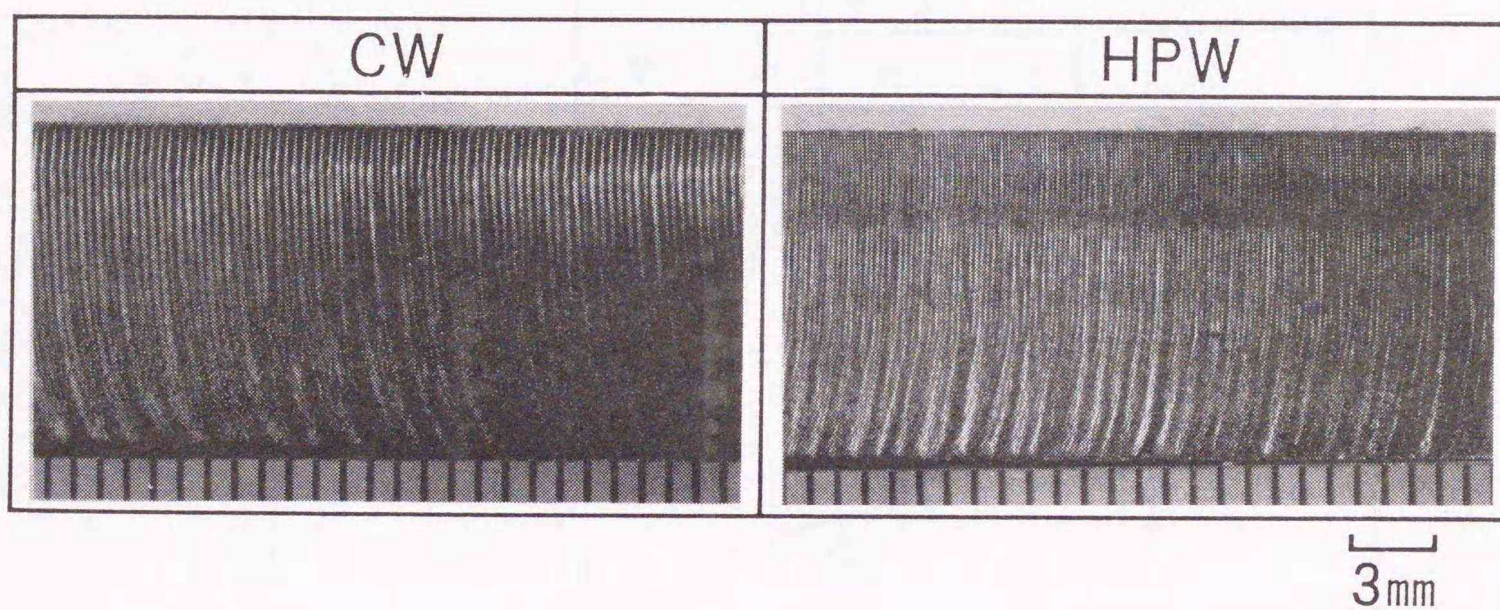
図 3 ・ 1 7 リップル率

3・3・3 条痕ピッチへのパルス特性の影響

図3・18は板厚12mmのSS400を同一出力、同一速度の高周波パルス（HPW）および連続波（CW）で切断して得られた被加工物の切断面写真である。連続波切断に対し高周波パルス切断では、切断面上部から下部の全領域にわたって凹凸の度合が改善されている。図3・19には、高周波パルス切断でのパルス周波数に対する切断面上部に発生する条痕ピッチ P_u の変化を示す。なおパルス周波数500Hz以下では、切断面下部の荒れが大きくなり切断面品質は著しく悪化したため、600Hz以上の加工結果を示す。ピッチ P_u は、パルス周波数600Hzで最も大きな値をとり、パルス周波数の増加に伴って急激に減少した。そして約1300Hzで最小値をとった。さらにパルス周波数を高くすると、逆に P_u は徐々に大きくなった。同図には同一出力、同一速度の連続波（CW）切断で得られた P_u を（ ）内に示してある。連続波切断での P_u は平均0.4mmであり、周波数600Hzでの値とほぼ一致する。このことからレーザ光の照射をパルス化することによって、酸化反応の伝播が制御でき、条痕のピッチを細かくすることができる。パルス周波数1300Hz以上では、パルスOFF時間の酸化反応休止期が短すぎるため高周波パルスの効果が小さくなる。

図3・20は、パルス周波数が1300Hzでのパルスデューティ D に対するピッチ P_u の変化を示している。 D の値が大きくなるほど、すなわち1パルスにおけるビームON時間の割合が大きくなるほど P_u は増加し、 $D=100\%$ の連続波切断で約0.4mmになる。このことから、連続波切断で切断面に発生する条痕は、これを制御可能な高周波パルスにおいて、一定周波数のもとで1パルス当りのレーザ光の照射時間割合

をさらに小さくすることで、より改善を図ることが可能と考えられる。



HPW:Power 1350W, Duty 50%, Frequency 1300Hz, Speed 0.8m/min,

Assist gas O₂, Gas pressure 80kPa, Focal point +0.5

CW :Power 1350W, Speed 0.8m/min, Assist gas O₂, Gas pressure 80kPa,

Focal point +2.0

図 3 ・ 1 8 切断面の外観写真

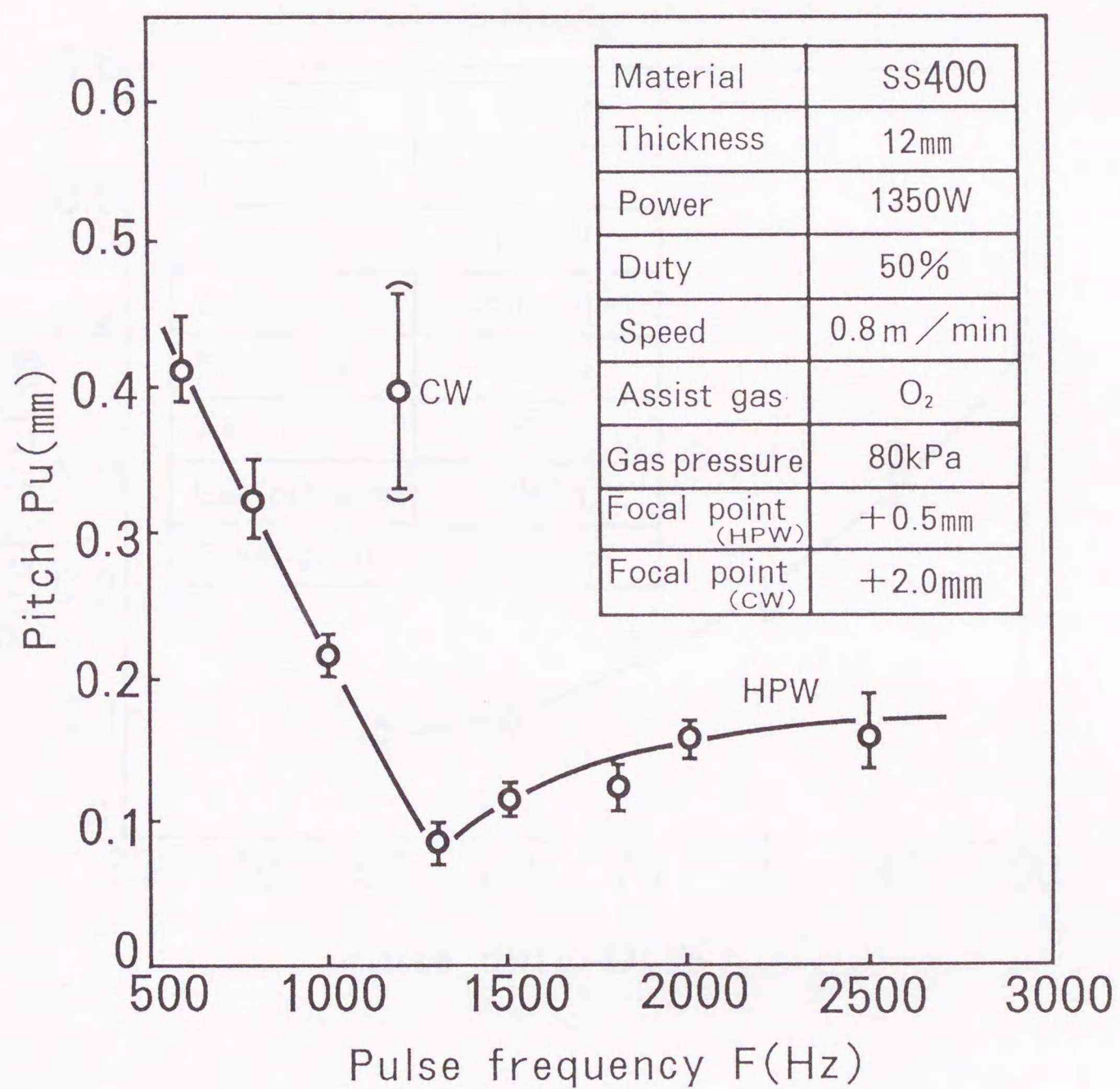


図 3 ・ 1 9 パルス周波数と切断面上部に発生する条痕ピッチの関係

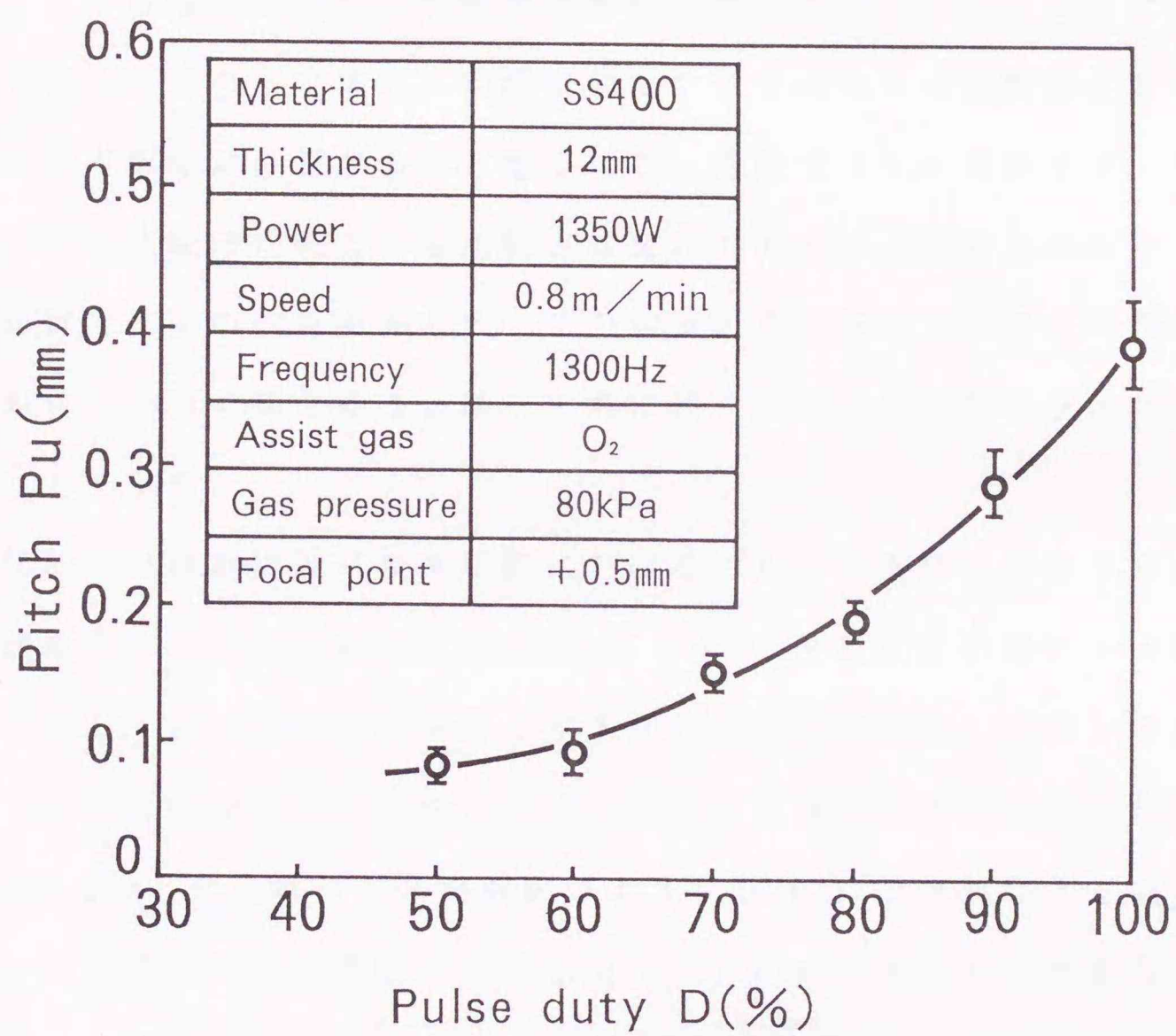


図 3・20 パルスデューティと切断面上部に発生する
条痕ピッチの関係

3・3・4 切断面粗さへのパルス特性の影響

図3・21には、連続波切断（C W）と高周波パルス切断（H P W）で得られた切断面の上部 R_u 、中央部 R_m 、下部 R_l における粗さの測定結果を示す。連続波切断では切断面上部にほぼ等間隔で大きなピッチの条痕が生じる。その下ではガス切断に似たややなめらかな切断面品質になり、さらに下部側に位置するほど粗くなる。高周波パルス切断では、すべての領域で連続波切断よりも面粗さは良好であるが、特に上部から中央部にかけてはその改善が著しい。この結果から切断面上部での周期的条痕の粗さを小さく抑えることは、それに続く下面での面粗さを良好にさせることを示す。

図3・22には高周波パルス切断におけるパルス周波数と面粗さ R_{max} の関係を示す。上部面粗さ R_u は条痕ピッチ P_u の発生での場合と同様な傾向を示し、パルス周波数を高くするほど面粗さは向上し、約 1300 Hz で最小値になるが、さらにパルス周波数を高くすると逆に悪化する。一方、 R_m と R_l はパルス周波数が 1300 Hz 以上で飽和する傾向にある。連続波切断での面粗さは図中の（ ）内に示すとおりであり、高周波パルス切断における 600 Hz での面粗さに近い値になる。

図3・23はパルスデューティ D と面粗さ R_{max} の関係を示したものである。すべてのパルスデューティ領域で上部 R_u が最良であり、次に中央部 R_m 、下部 R_l の順で悪化する。パルスデューティ D の値が小さいほど、すべての面粗さが向上している。なお、図3・22と図3・23における連続波切断の加工データが異なるのは、図3・22では焦点位置 $Z = +2\text{ mm}$ のドロス付着のない条件であり、図3・23ではパルス切断条件と同じ $Z = +0.5\text{ mm}$ での加工結果のためである。連続切断では次節に示すように、切

断溝幅を広げる必要があるため、焦点位置は $Z = +1 \text{ mm} \sim +2 \text{ mm}$ に設定して加工を行う。

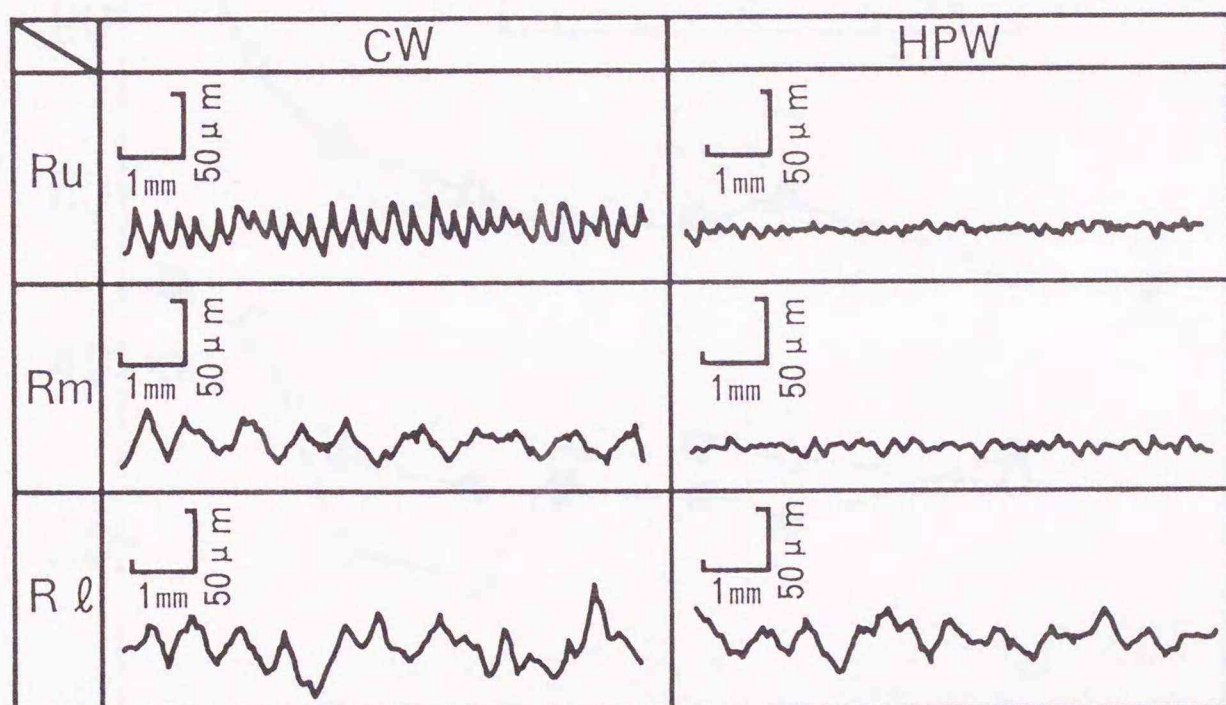


図 3 ・ 2 1 連続波切断および高周波パルス切断での切断面粗さ

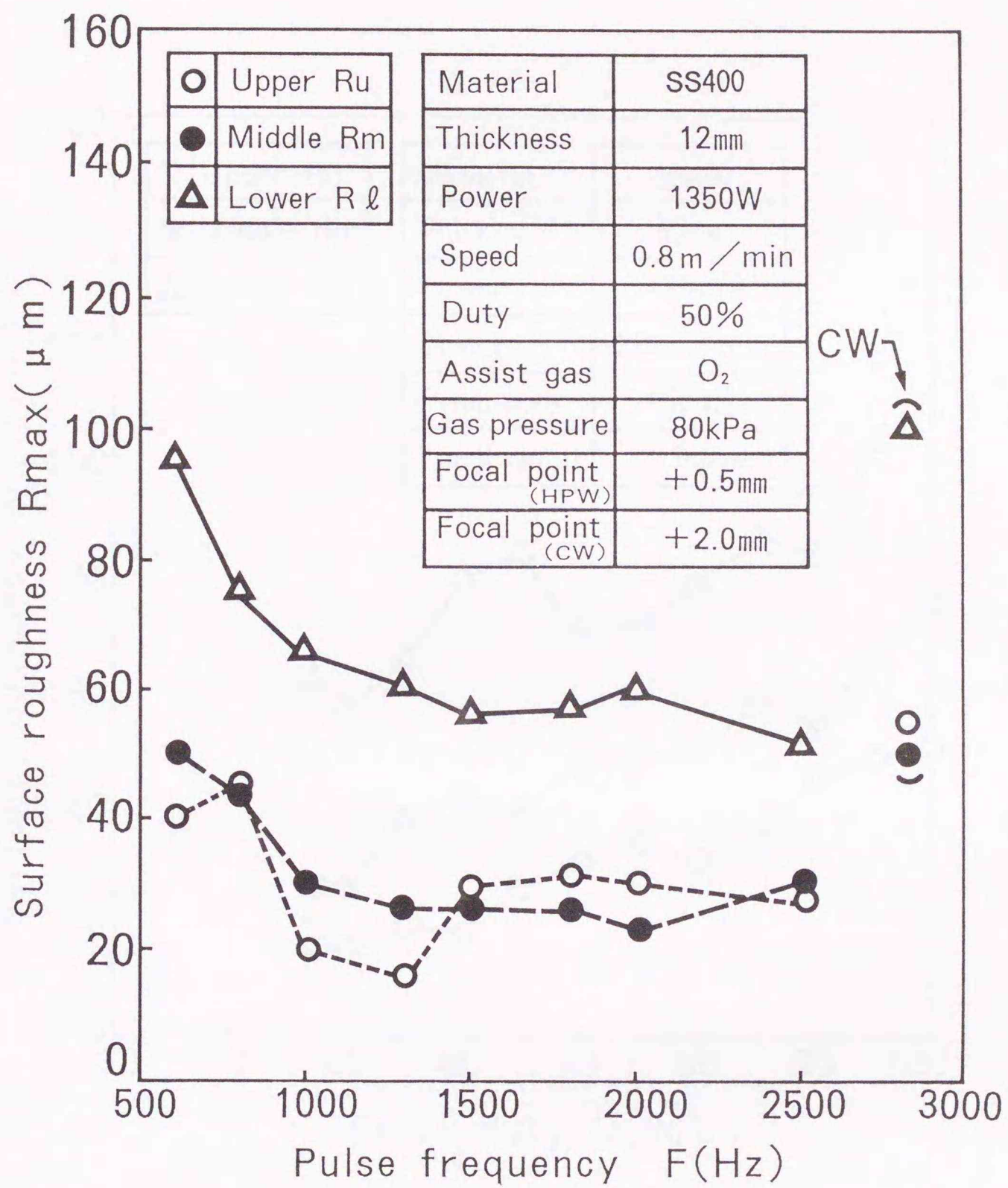


図 3 ・ 2 2 パルス周波数と切断面粗さの関係

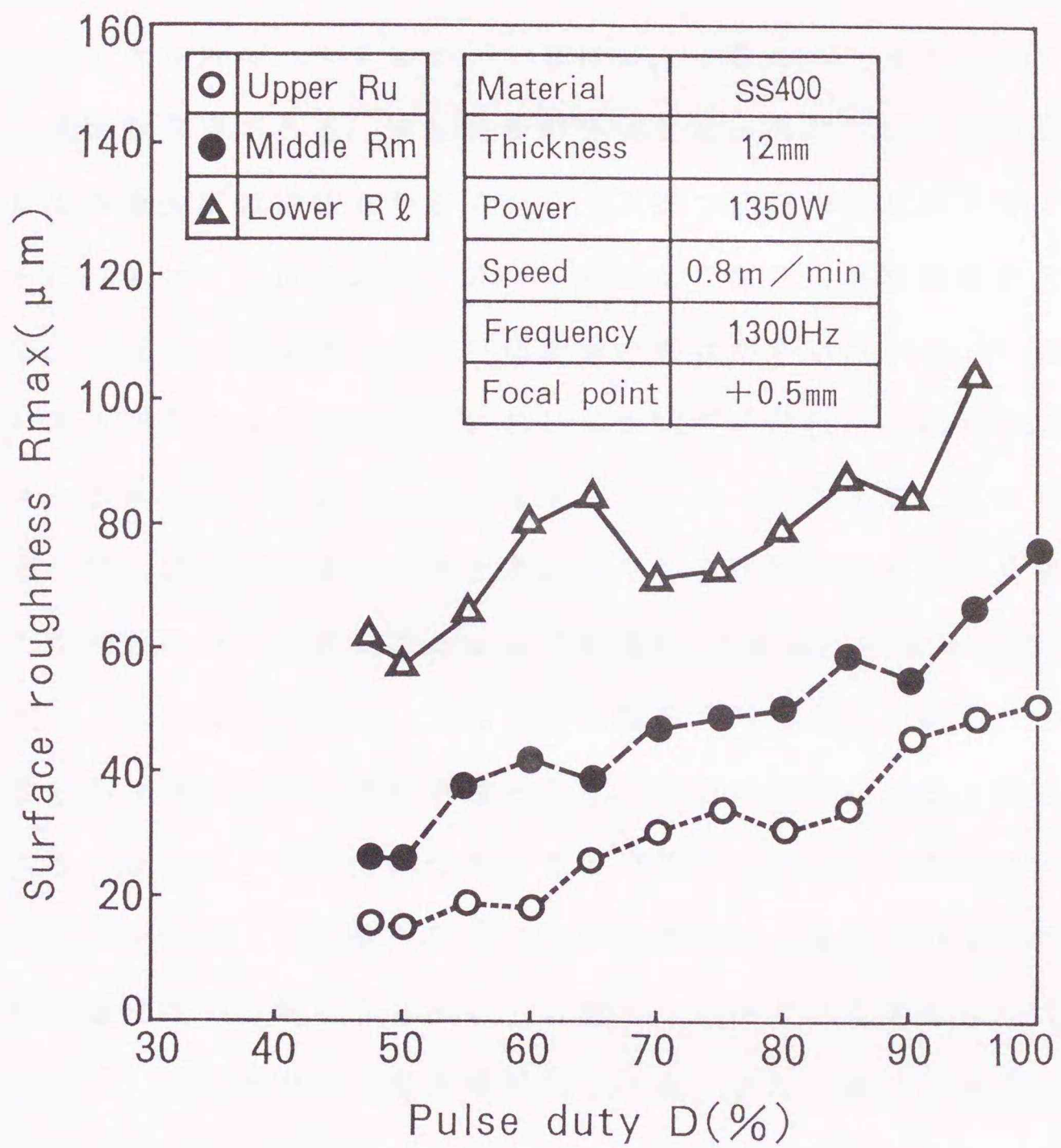


図 3 ・ 2 3 パルスデューティと切断面粗さ

3・3・5 切断溝形状へのパルス特性の影響

図3・24は連続切断（CW）と高周波パルス切断（HPW）における焦点位置 $Z = 0 \text{ mm}$ 、 $+1 \text{ mm}$ 、 $+2 \text{ mm}$ 、 $+3 \text{ mm}$ 、 $+4 \text{ mm}$ での切断面の横断面写真である。連続切断の $Z = 0 \text{ mm}$ の加工は、切断溝幅が狭いため熔融金属の湯流れが悪くなり、下部で切断溝形状が大きく乱れる。さらに、 $Z = +3 \text{ mm}$ および $Z = +4 \text{ mm}$ では逆に切断溝幅が広がりすぎて、上部から中央部にかけて切断溝の形状がわい曲する。一方、高周波パルス切断では $Z = 0 \text{ mm}$ においても切断溝形状には乱れが発生せず、 $Z = +3 \text{ mm}$ および $Z = +4 \text{ mm}$ でも大きくわい曲することはない。

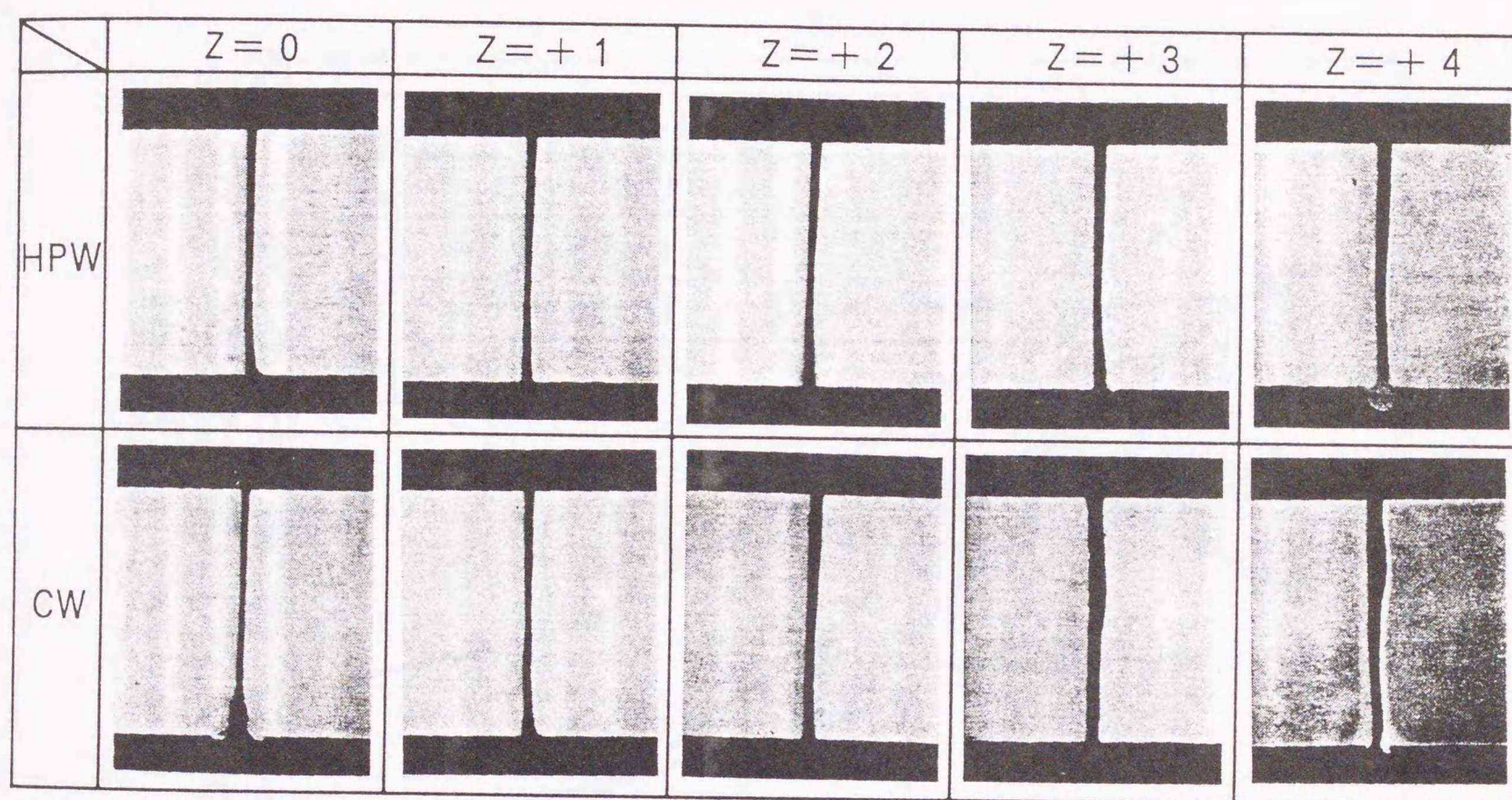
図3・25と図3・26は連続切断と高周波パルス切断での各焦点位置と、被加工物表面からの位置 l が 0 mm （表面）、 3 mm 、 6 mm （中央部）、 9 mm 、 12 mm （裏面）での切断溝幅を示したものである。いずれの場合も $l = 0 \text{ mm}$ での溝幅が最も広く、内部では狭くなる。焦点位置 Z が大きくなるほど切断溝幅はすべての位置で広がっている。 $Z = 0 \text{ mm}$ 近傍のレーザービームが最も集光された位置では、高周波パルスでの切断溝幅が連続波での幅よりも広い。しかし、 Z が大きくなると、この傾向は逆転し、連続波での切断溝幅が広くなる。なお、連続波切断の $Z = 0 \text{ mm}$ における測定位置 $l = 12 \text{ mm}$ での溝幅は大きく乱れたため測定結果の表示は割愛した。

以上の結果は、図3・27に示す模式図で説明することができる。集光ビームを被加工物に照射すると、ビームを中心に温度こう配が生じる。集光ビームのエネルギーだけで被加工物の蒸発・熔融が起きる限界温度を T_S 、酸化反応が速度 V_R で開始し、その酸化反応が維持される位置の限界温度を T_E とする。連続波切断と高周波パルス切断において、 T_S によ

って、決まる切断溝幅をCS、PSとし、TEによって決まる幅をCE、PEとする。また実際の加工によって得られた幅をWC、WPとする。パルス切断では、パルス波形の立ち上がりや下りの遅れ時間を無視すると、平均出力1350W、デューティ50%ではパルスON時に出力は2700W(1350W/50%)であり、連続波切断の2倍になる。そのため図中PSはCSより、PEはCEより大きくなる。(1)の $Z=0\text{ mm}$ 近傍では、照射ビーム径が小さいので、温度こう配が大きくなりPSとPE、CSとCEの距離は短くなる。レーザビームの照射と同時に酸化反応がVRの速度でも十分にPEやCEに達するか、もしくはその近傍まで達しているものと思われる。その結果、WPはWCよりも大きくなる。

(2)の $Z>1\text{ mm}$ では温度こう配が小さくなり、CSとCE、PSとPEの距離が広がる。連続波切断ではビーム照射が連続であるため酸化反応はほぼCEまで広がり、 $WC \doteq CE$ になる。しかし、高周波パルス切断ではビームON時間によって、酸化反応の広がる領域は制限されるため、 $WP<CP$ になる。周波数600Hzの比較的ビームON時間の長い条件では、 $WP=WC$ ($\doteq CE$)になるまで広がった。以上のことから、焦点位置Zを大きくとるほど高周波パルス切断でのビームON時間に依存した切断溝幅の広がりを制御できることになる。ゆえに、例えば宮本らの報告⁽¹⁵⁾にある光学部品の熱誘起ひずみの発生で焦点位置が変化し加工不良を招く場合に、高周波パルス切断は従来の連続波切断よりも品質の変化が少なく良好な加工結果が得られる長所がある。また板厚12mmの軟鋼を連続波切断する場合、焦点位置 $Z=0\text{ mm}$ の設定では、切断溝幅が狭くなり、溶融金属の湯流れは悪化し、切断面下部が粗れる現象が生じていた。これを防ぐために、焦点位置を $Z=+1\text{ mm}\sim+2\text{ mm}$ に設定し切断溝幅を広げるが、逆に切断面粗さの悪化を招いていた。一方、

パルス周波数 200 Hz 以下のパルス加工条件を高速切断で用いた場合、各パルス照射での溶融領域が連続せず切断面は粗くなった。しかし、高周波パルス切断ではこのような欠点が解消される。すなわち、焦点位置を $Z = 0 \text{ mm}$ 近傍の設定でも切断溝幅はやや広く形成されるため、湯流れは良好になる。また、高周波パルスによる切断では、照射するレーザービームのパルス化が切断溝内で溶融した金属のかくはん作用に寄与し、溶融金属の排出に効果がある。その結果、焦点位置の $Z = 0 \text{ mm}$ 近傍での加工が可能になり、切断面粗さの改善につながる⁽⁹⁾。高周波数のため連続波切断での加工速度とほぼ同等の速度で加工が可能である。



3mm

HPW: Power 1350W, Duty 50%, Frequency 1300Hz, Speed 0.8m/min,
Assist gas O₂, Gas pressure 80kPa

CW : Power 1350W, Speed 0.8m/min, Assist gas O₂, Gas pressure 80kPa

図 3 ・ 2 4 切断溝の横断面写真

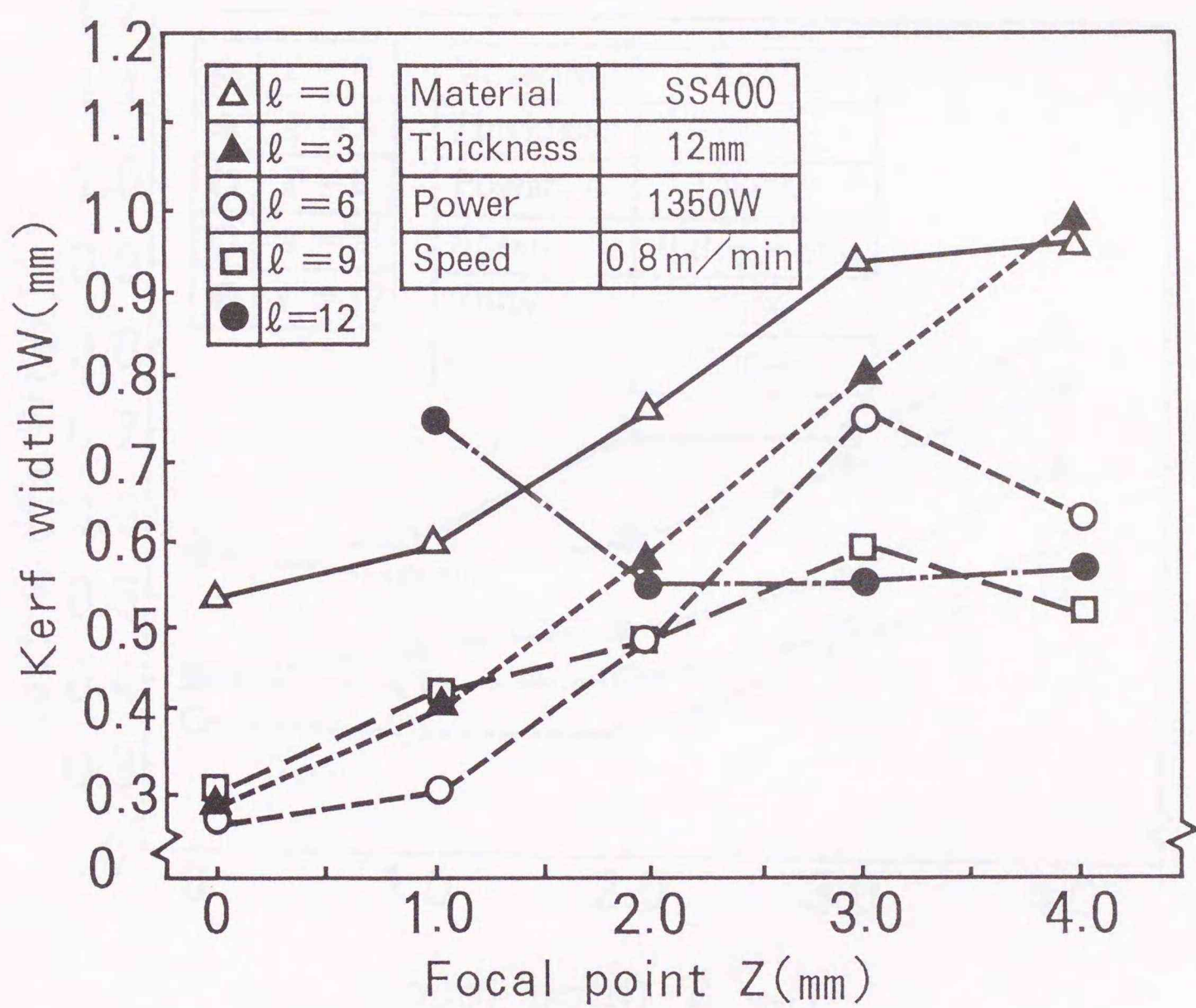


図 3 ・ 2 5 連続波切断によって得られた切断溝幅

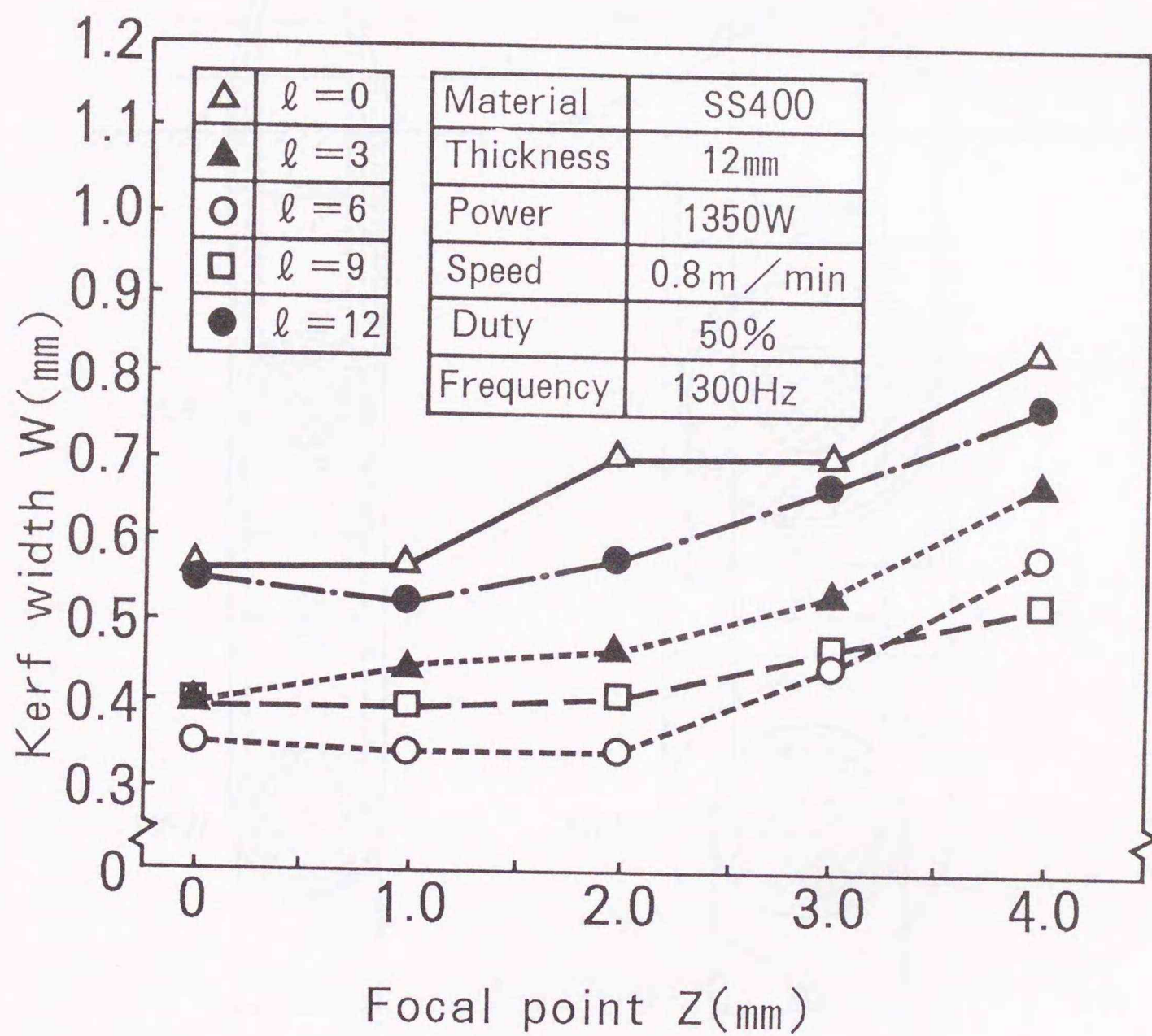


図 3 ・ 2 6 高周波パルス切断によって得られた切断溝幅

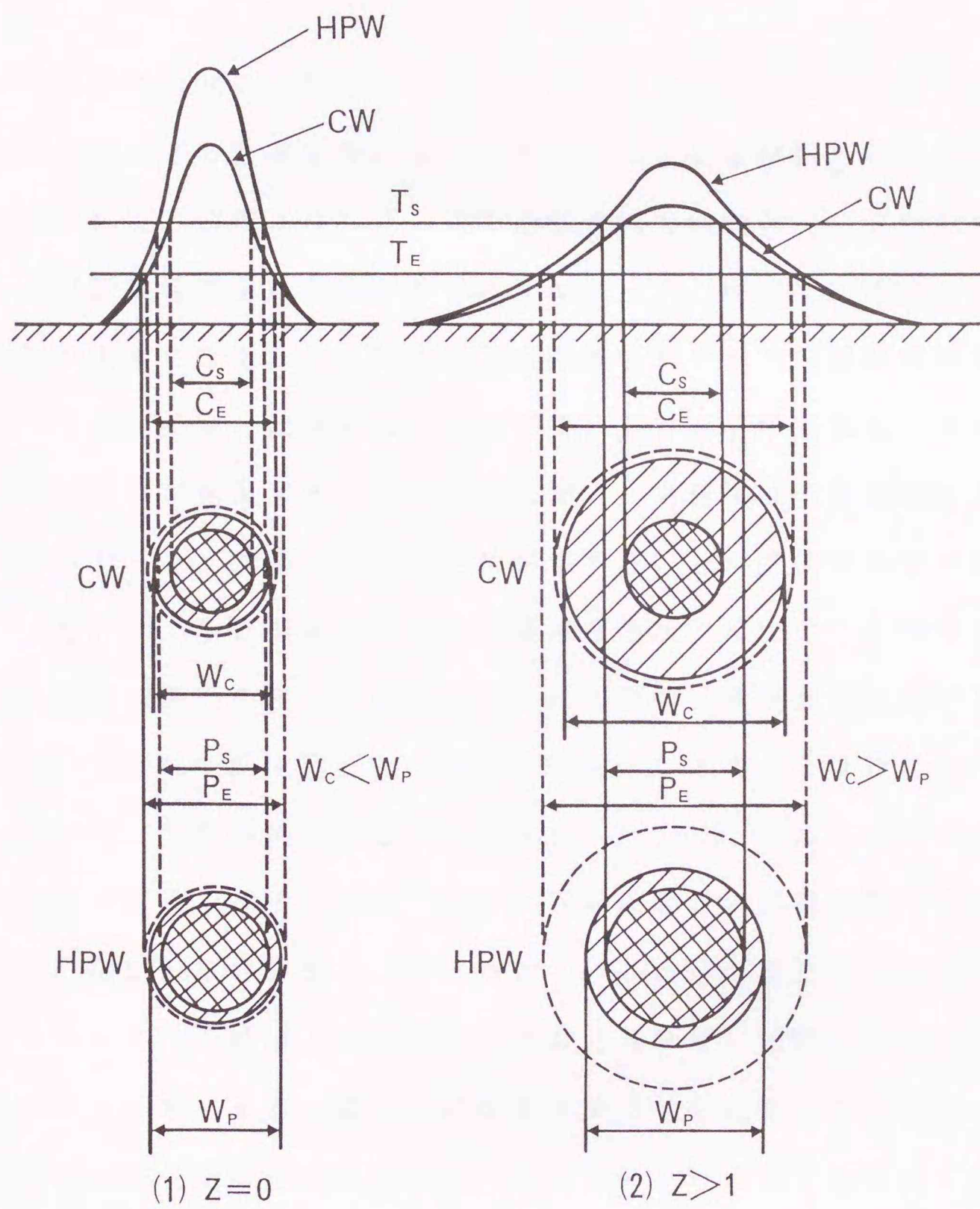


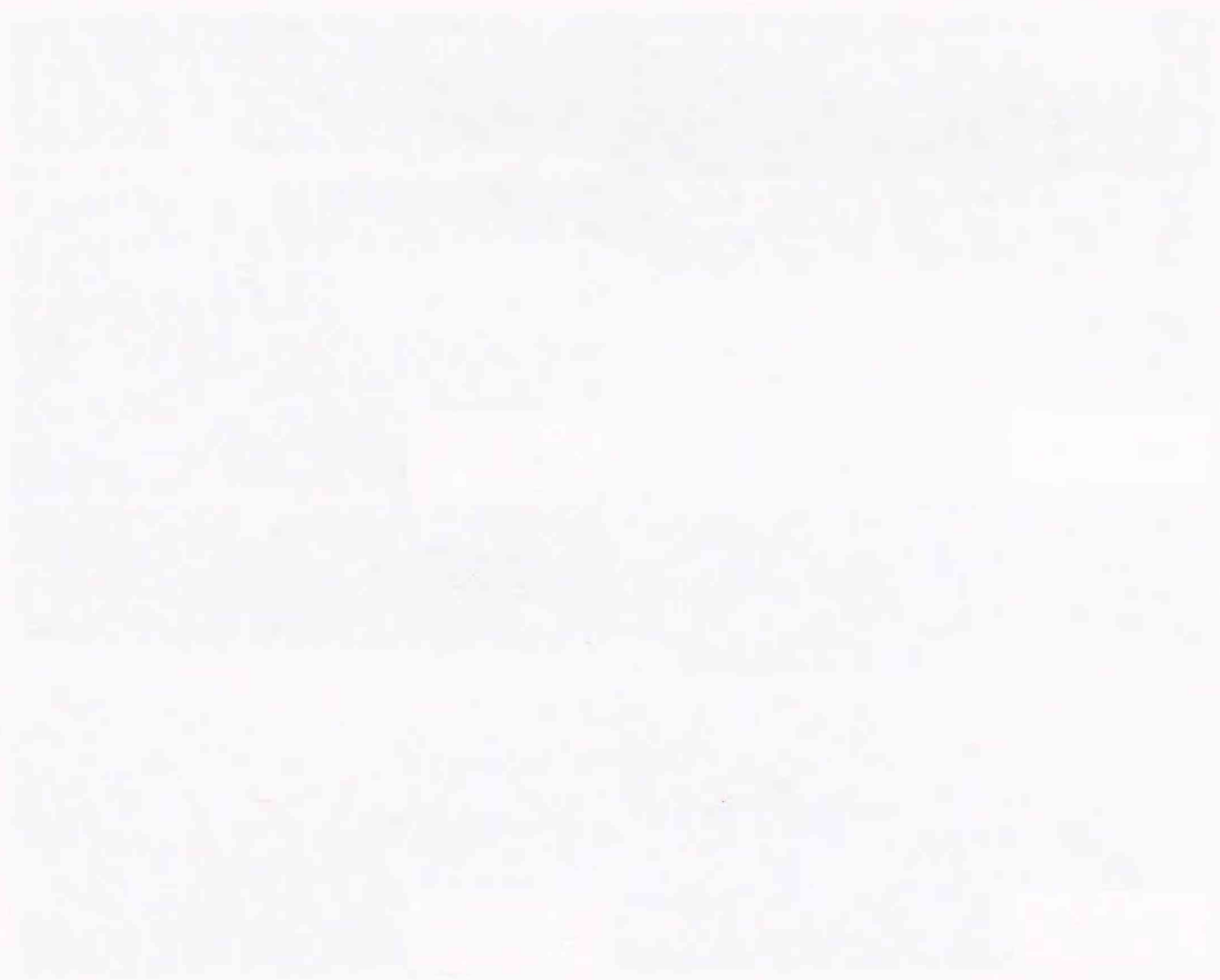
図 3・27 連続波 (CW) と高周波パルス (HPW) による切断現象

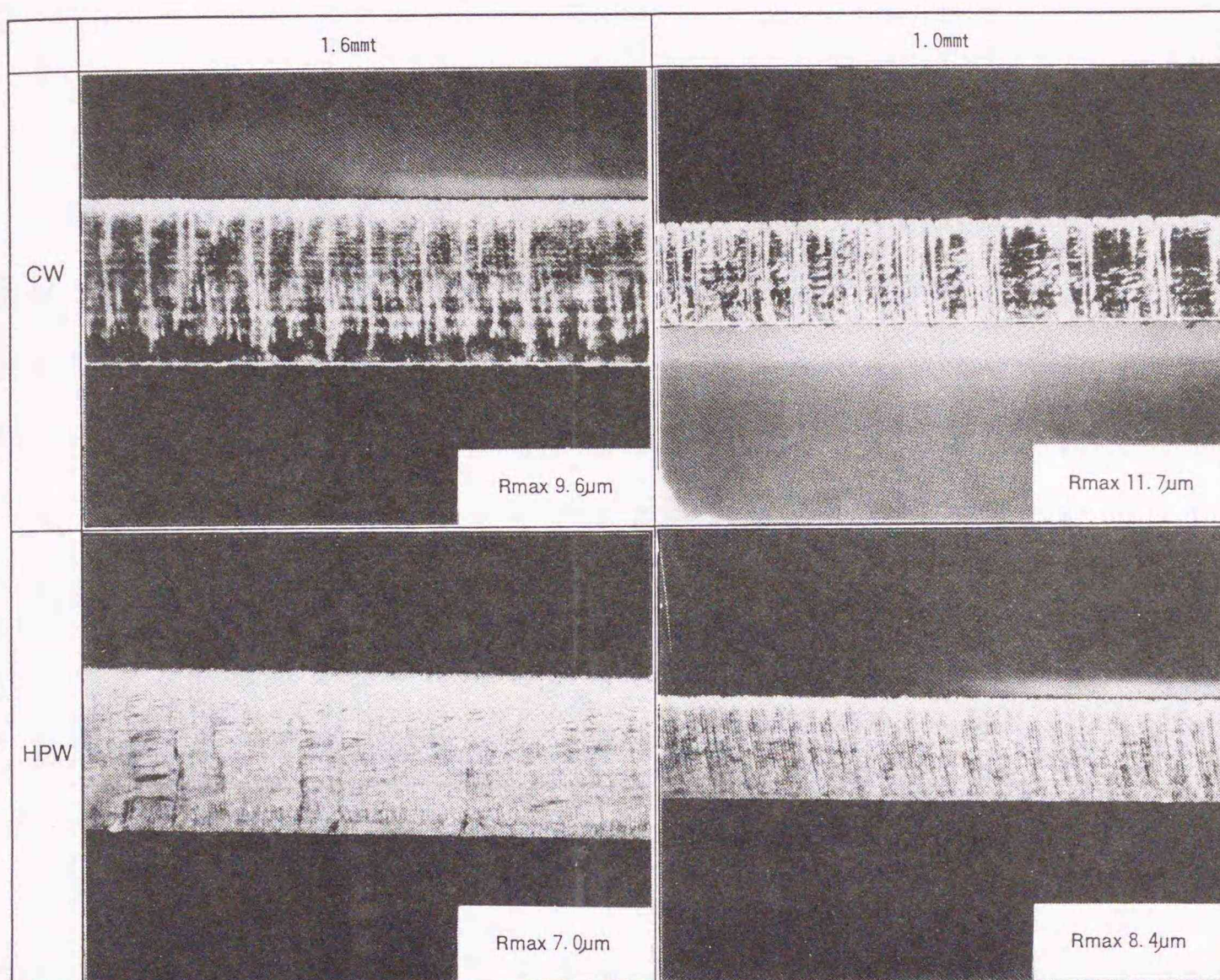
3・3・6 薄板切断の面粗さへのレーザ出力変動の影響

レーザ切断における面粗さは、基本的には被加工物の酸化反応や生成ドロスの流動などの影響を受ける。例えばCWによる軟鋼の切断において軟鋼の酸化反応速度よりも遅い切断速度領域では酸化反応が断続的となり、この断続性が切断面粗さを支配する。一方、酸化反応速度よりも切断速度が大きくなるほど、酸化反応の断続性やドロスの流動性の影響は小さくなる。しかし軟鋼薄板の高速切断における切断面にも不規則なピッチで面粗れが発生する。この現象に関し、高速軸流型発振器によるレーザの出力リップルが切断面粗さに影響することが指摘されている⁽⁶⁾⁽⁸⁾。一方、直交型発振器においても高速度領域では出力リップルが原因と思われる切断面の粗れが発生する。出力変動は周波数や位相が不規則であり、正確に切断面粗さとの関係を明らかにすることは難しい。そこで、レーザ出力を高周波数のパルス化し、出力リップルをパルスピーク出力のリップルで補正することより、切断面粗さの改善に関する検討を行った。図3・28には板厚1.0mmと1.6mmのSPCCを直交型発振器を用いて、連続波(CW)と高周波(HPW)切断して得られた切断面写真を示す。また、図中には板厚中央部での切断面粗さ R_{max} の測定結果を示す。切断速度と出力は、CWとHPWのいずれも同じ値に設定した。CWの切断面には一定周期の波形の上に不規則な波形(キズ)が重畳されているのがわかる。HPWの切断面には出力リップルが原因と思われる不規則なキズはなくなり、規則的なパルス出力リップルによると思われる面粗れが発生している。切断面粗さの測定結果 R_{max} では、いずれの板厚の場合も粗さの改善が図られた。

以上の結果は、酸化反応の影響が小さい高速切断では切断面粗さに対

してレーザ出力のリップルの影響が支配的であることを示している。





	CW Cutting		HPW Cutting	
Thickness	: 1.0mm	: 1.6mm	: 1.0mm	: 1.6mm
Power	: 300W	: 600W	: 300W	: 600W
Frequency	: —	: —	: 2000Hz	: 2000Hz
Duty	: —	: —	: 30%	: 40%
Cutting speed	: 3000mm/min	: 3000mm/min	: 3000mm/min	: 3000mm/min
Assist gas	: O ₂	: O ₂	: O ₂	: O ₂
Gas pressure	: 200kPa	: 100kPa	: 200kPa	: 100kPa
Focal length	: 190.5mm	: 190.5mm	: 190.5mm	: 190.5mm
Focal point	: 0mm	: 0mm	: 0mm	: 0mm

図 3 ・ 2 8 C W お よ び H P W 切 断 で の 切 断 面 拡 大 写 真

3・4 第3章の結言

三軸直交形発振器より発生する矩形パルス波形を用いて金属の切断を実施し、パルス出力パラメータの加工品質に及ぼす影響を検討した。その結果、次の点が明らかになった。

- (1) 切断溝の周囲に生じる熱影響層は上部から下部にかけて拡大しており、パルスピーク出力を大きくすると板厚中央部から下部にかけての熱影響層幅は減少する。
- (2) パルス周波数を低くすることによって、板厚中央部から下部の切断溝周囲に生じる熱影響層幅は減少する。
- (3) パルス周波数を低くすることによって、被加工物のエネルギー吸収率は低下する。
- (4) 切断面粗さはパルスピーク出力の影響を受け、パルスピーク値を高くするほど切断面粗さは良好になる。
- (5) 連続波切断時に、ビーム移動と酸化反応の相互作用により発生する切断面上部の条痕ピッチは、一定の周期で発生する。この連続切断時の周期は、板厚12mmのSS400を加工速度750mm/minで切断する場合、パルス周波数600Hz、パルスデューティ50%のパルス切断の加工特性とほぼ一致する。
- (6) 切断面の条痕ピッチは高周波パルス周波数を高くするほど減少し、約1300Hzで最小になる。周波数をさらに高めた場合、条痕ピッチは逆にやや増加する。
- (7) 切断面粗さは、条痕ピッチの発生と同じくパルス周波数とパルスデューティの影響を受ける。切断面粗さはパルス周波数を高くするほど

良好になり、約 1300 Hz で最良になる。さらに周波数を高めると面粗さは悪化するようになる。パルスデューティが小さいほど面粗さは改善される。

(8) 焦点位置が $Z = 0 \text{ mm}$ 近傍では、高周波パルス切断による切断溝幅は連続切断での溝幅に比べ広いが、 $Z = +1 \text{ mm}$ 以上では狭くなる。この切断溝幅の広がりをビーム照射部の温度分布(仮定)より論じた。高周波パルス切断では、焦点位置が変化し切断溝幅が広がる場合でも酸化反応の広がりを制御できるため、切断溝幅や加工品質の変化を抑えやすい。

(9) 出力リップルの影響と思われる薄板の CW 切断における切断面粗さの悪化は、高周波パルス切断により改善される。

第4章 切断精度に及ぼす偏光度の影響

4・1 緒言

切断精度には被加工物表面に対し切断面の垂直に形成されることを理想とするが、実際には切断面に若干の傾斜が発生する。この傾斜には、切断溝の上部幅と下部幅の差によるものと切断溝自体の傾斜によるものがある。切断溝の上下幅の差による傾斜は、照射ビームの集光特性に起因しており、被加工物表面での集光特性が高いほど改善される⁽²⁷⁾。また、切断溝自体の傾斜は、照射ビームの垂直度とビームの偏光特性に起因する事が考えられる。レーザビームが傾斜した状態で照射されると切断溝も同一方向に傾斜し形成されるが、光軸調整や光学部品の装着調整などにより、改善が可能である⁽²⁸⁾。

レーザビームが電磁波であることから起きる偏光特性の加工への影響は、他の熱加工法には無いビーム加工に特有のものである。偏光特性の加工性能に及ぼす影響については、Olsen⁽¹¹⁾により直線偏光で切断した場合、偏光面方向への切断速度が向上することや切断面が傾斜する現象について報告されている。どの方向にも均一な加工品質を得るためには、円偏光が切断に適していることも示されている。しかし、実際のレーザ加工機では光学部品の種類やその取り付け精度によって、加工位置での偏光度は変化する。光学部品の取り付け初期には高い偏光度であっても

経年変化を起こし悪化する問題もある。

以上のことから、偏光度と加工精度との関係を定量的に把握する必要がある。しかし、これらについては一定板厚および一定条件下での軟鋼材料を用いた報告⁽²⁸⁾⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁶⁾を除けば関連する研究報告は見あたらない。最近のレーザ加工の用途の拡大に伴い、様々な加工条件下および材料での偏光特性と加工精度について検討が必要である。本研究では偏光特性と切断精度の関係を定量的に示す切断モデルを提案し、各種加工条件および材質での両者の関係を明らかにした。さらに、一定偏光度での加工精度の向上に及ぼす要因を示し、その最適設定について検討した。

4・2 偏光特性と加工の原理

レーザ切断はレーザビームを被加工物内部まで伝達し加工するものである。そのため、図4・1に示すように入射角 i のレーザビーム E は加工部の金属面 M において反射するレーザビーム E' と屈折角 r で吸収されるレーザビーム E'' とに分かれる。このとき Snellの法則によって、次式となる。

$$\sin i = n \sin r \quad \dots\dots\dots(4-1)$$

ここで n は金属の屈折率で、誘電率 ϵ の平方根であり、複素数の形になる⁽⁶²⁾。

レーザビームの入射面に平行なベクトルを E_p 、 E_p' 、また垂直なベクトルを E_s 、 E_s' とすると

$$\frac{E_p'}{E_p} = \frac{\tan(i - r)}{\tan(i + r)} \quad \dots\dots\dots(4-2)$$

$$\frac{E_s'}{E_s} = - \frac{\sin(i - r)}{\sin(i + r)} \quad \dots\dots\dots(4-3)$$

したがって、入射レーザビームと反射レーザビームの強度の比、すなわち反射率は次のようになる。入射面に対し平行成分の反射率を R_p とすると、

$$R_p = \frac{\tan^2(i - r)}{\tan^2(i + r)} \dots\dots\dots(4-4)$$

入射面に対し垂直成分の反射率を R_s とすると

$$R_s = \frac{\sin^2(i - r)}{\sin^2(i + r)} \dots\dots\dots(4-5)$$

式(4-1)および(4-4)、(4-5)から各偏光成分の反射率が求められる。

被加工物における平行成分の吸収率を A_p 、垂直成分の吸収率を A_s とすると、次式となる。

$$A_p = 1 - R_p, \quad A_s = 1 - R_s \quad \dots\dots\dots(4-6)$$

各偏光成分の吸収率の入射角依存性を A_p / A_s とすると式(4-4)、(4-5)および(4-6)から

$$\frac{A_p}{A_s} = \frac{1}{\cos^2(i - r)} \dots\dots\dots(4-7)$$

となる。

以上のことから、金属材料に対する入射角が大きくなるほど、また反射率が大きくなるほど偏光特性の影響が出やすいことになる。

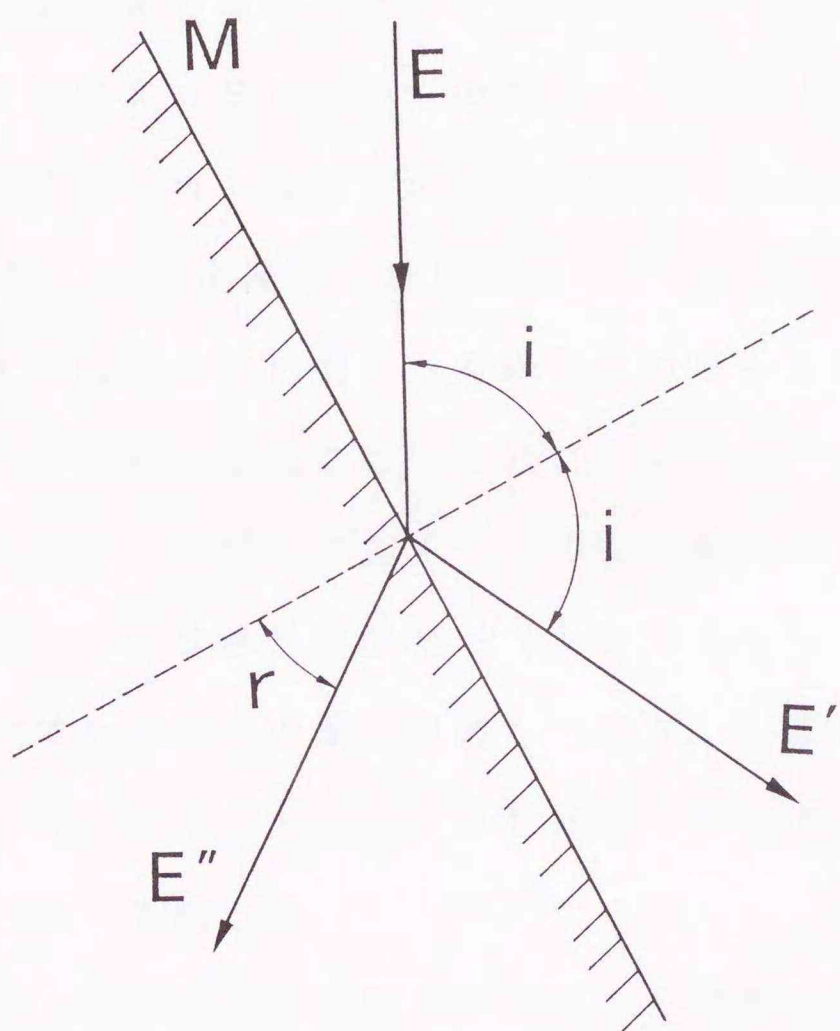


図 4 ・ 1 金属材料における入射角と反射角の関係

4・3 実験装置および実験方法

本研究に使用したCO₂レーザ加工機は三菱電機製ML2012HB2-3016Fである。ビームモードはTEM₀₀であり、加工レンズ位置でのビーム径は約22mmである。ノズル形状は円錐で出口直径2.0mmである。加工レンズはZnSe製のものを用い、焦点距離fは127mmである。焦点位置Z (mm)は焦点の被加工物表面からの距離で表し、上方を正とした。図4・2は発振器から被加工物までの光学系の構成の概略を示す。図中に示す共振器より出射した直線偏光のビームはPHミラーでほぼ4分の1波長の位相差を起し円偏光に近くなる。その後、バンドミラーBM1、BM2、BM3で加工レンズまで導かれる。円偏光度の測定は、切断ごとにCPS赤外線偏光子（ケンブリッジコンサルタンツ社製）を加工レンズとBM3の間に設置して行う。円偏光度の変更はES（Enhanced Silver）コートミラーのBM1への使用とPHミラーの取付角度を変化させて実施した。

被加工物には、第一種冷間圧延鋼板SPCC、一般構造用圧延鋼板SS400、アルミニウム-マグネシウム系合金（JIS A5052）、アルミニウム（JIS A1100）、銅（C1100）、オーステナイト系ステンレス鋼板SUS304および木材の7種類を用いた。

加工精度の評価には、切断溝の傾斜と切断方向の関係を明らかにするために、図4・3に示す加工モデルを用いた。長さ15mmのスリットを22.5°の角度間隔に配置し、それぞれを中心方向に切断する。切断はテーブルのバックラッシュの誤差を考慮し、相対する順序に実施した。切断溝の傾斜は、被加工物裏面側の相対するスリット中心線にずれとし

て生じる．各方向のずれ量 L の最大値 $L_{\max}$ を加工精度として測定した．

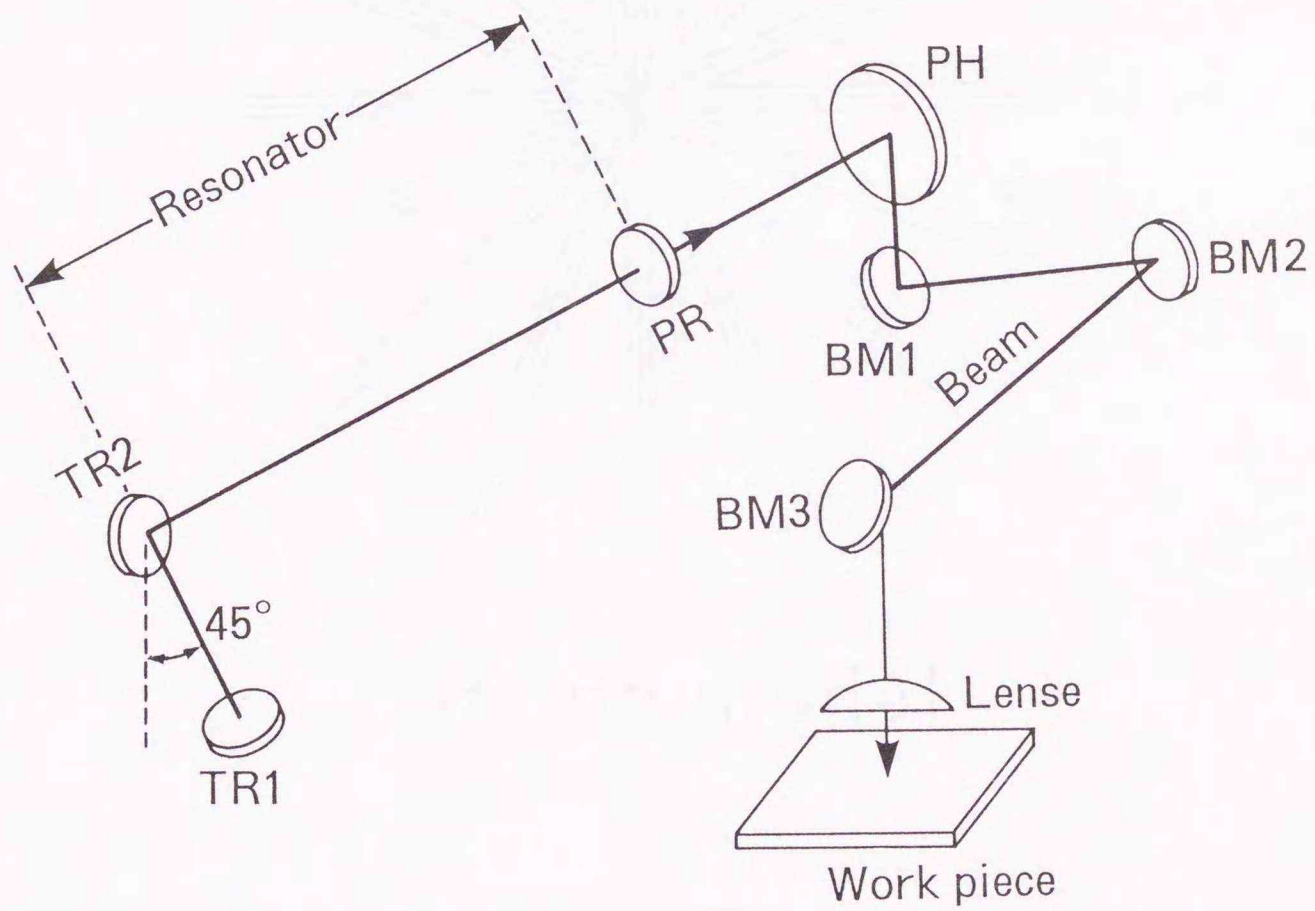
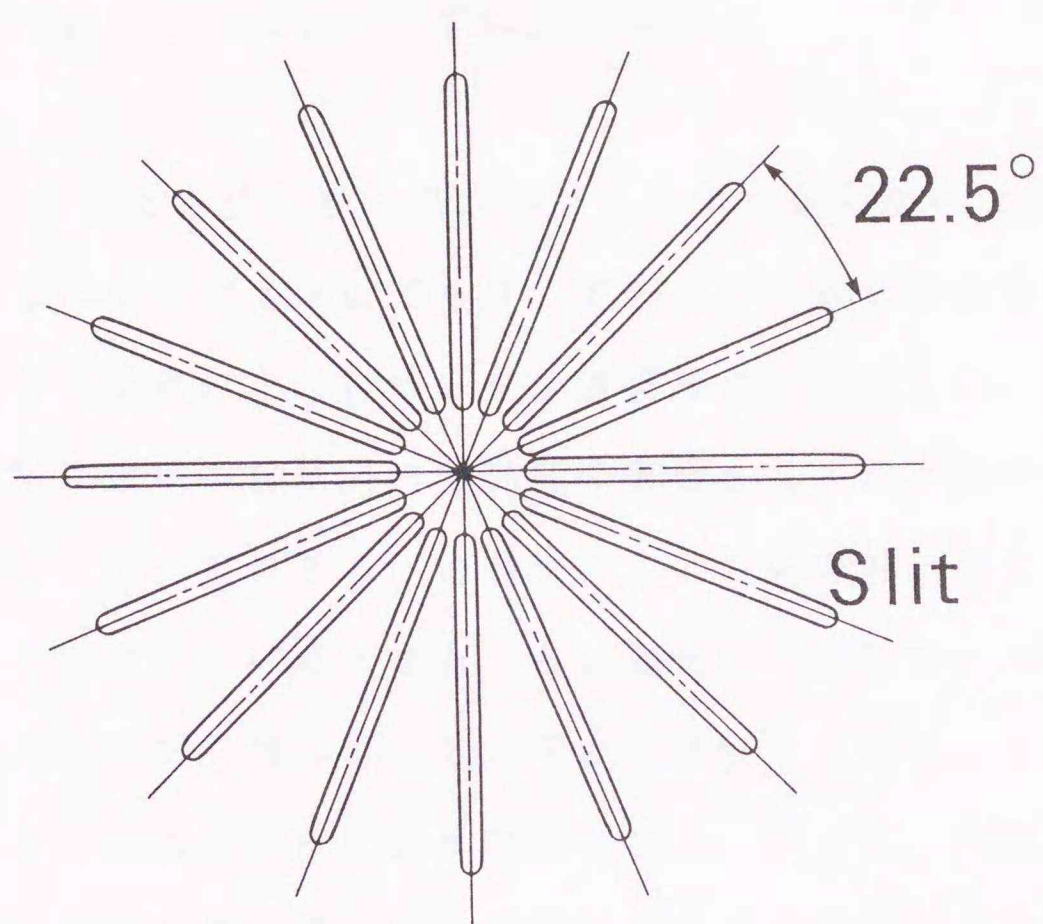
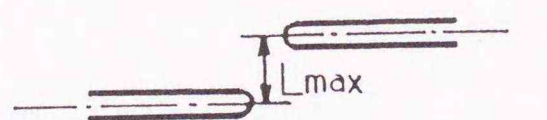


図 4 ・ 2 加工機光路系の概略図



Cutting model



Deviation on the back side

图 4 · 3 加工形状

4・4 実験結果および考察

4・4・1 円偏光度とスリットずれ量の関係

図4・4に円偏光度と各種材料の最大スリットずれ量 L_{max} の関係を示す。被加工物の板厚はすべて 2 mm であり、各材料の切断条件は切断面粗さが良好でドロス付着量の少ないものを予備実験にて決定した。ビーム吸収率が 100% に近い木材は、円偏光度の影響をほとんど受けておらず、 L_{max} は約 5 μ m で一定である。金属材料では円偏光度が高くなるほどずれ量 L_{max} は減少している。また、各金属材料の種類でもスリットずれ量は異なる。最大ずれ量 L_{max} の大きさは SUS 304、SPCC の順に増加し、非鉄金属はさらに大きな量となる。さらに、非鉄金属材料の種類によってもずれ量は異なり、A5052 よりも A1100 や Cu のずれ量は大きくなる傾向にある。円偏光度 0% の直線偏光での加工結果では、 L_{max} は SUS 304 が 0.28 mm、SPCC は 0.39 mm、A5052 は 1.15 mm、A1100 は 1.33 mm、Cu は 1.56 mm となった。

このように最大スリットずれ量は、ビームの偏光特性の影響を受けるため、加工精度要求の高い切断には偏光度の十分な管理が必要になる。また、CO₂ レーザビームの波長 10.6 μ m に対する被加工物の反射率も影響し、反射率の大きい材料ほど同一偏光度での加工精度は悪化することがわかる。したがって、高反射材料になるほど偏光特性のより高精度な制御が必要になる。

銅および銅合金等の高反射材料のレーザ切断では、通常、レーザビー

ムを吸収させるためにビーム吸収剤を被加工物表面に塗布した後に加工する。本実験においても銅の切断では EAR0504 (ACHISON 社製) をビーム吸収剤として使用している。このようなビームの反射率を左右する吸収剤は、スリットずれ量に影響することが予想される。図中の (△) は吸収剤を塗布せずに切断したスリットずれ量を示す。吸収剤を塗布した場合の L_{max} は $94\ \mu m$ 、塗布なしでの L_{max} は $163\ \mu m$ であった。他の SPCC や SUS304 への吸収剤有無の影響も調査したが、ほとんど差は認められなかった。ビーム反射率の大きい材料の切断で、吸収剤のスリットずれ量への影響の大きいことが判明した。

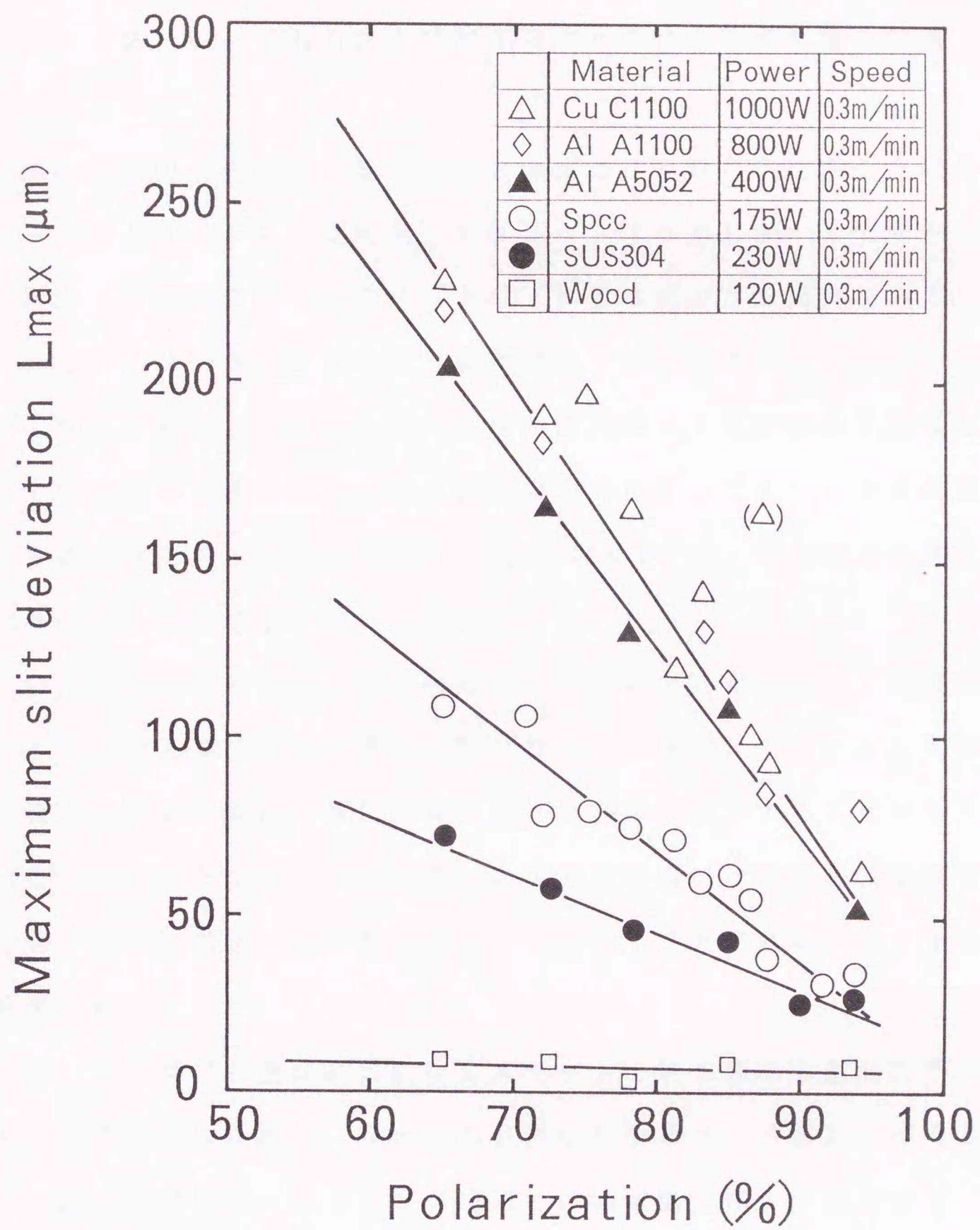


図 4 ・ 4 偏光度とスリットずれ量の関係

4. 4. 2 レーザ出力および加工速度とスリットずれ量の関係

図4.5 は円偏光度91%で板厚2mmのSPCCを切断した場合の、レーザ出力（パルス平均出力）とスリットずれ量 L_{max} の関係を示す。平均出力の増加に伴ってスリットのずれ量は減少する傾向にある。図における130～350Wの出力変化範囲では、最大スリット量 L_{max} は約15 μm 変化している。図4.6 は円偏光度91%での加工速度とスリットずれ量の関係を示す。加工速度の増加に伴ってスリットずれ量は増加する傾向にある。なお、図4.5および図4.6では、平均出力と加工速度以外の加工条件はすべて一定に設定した。

一定速度における加工出力の増加と一定出力における加工速度の減少はともに加工部への入熱量の増加になる。金属材料のビーム反射率は材料温度の影響を受け、温度が高いほど反射率は低下することが知られている⁽⁴⁷⁾。したがって、加工部への入熱量の増加は熔融金属温度を上昇させ、その結果ビーム反射率は低下し、スリットずれ量が減少するものと思われる。

図4.7 にはずれ量が最大になるスリットの加工開始部裏面の写真を示す。被加工物は板厚2.0mmのSPCCであり、円偏光度は65%での切断結果である。ピアシング位置では切断溝に傾きが発生せず、切断が開始されると同時に傾きが起きている。ピアシング中のレーザビームの入射角 i はほぼ0度であるため偏光が小さいが、切断が開始されると入射角大きくなり偏光度の影響が大きくなるものと思われる。また、図4.5 と図4.6 の出力と切断速度のスリットずれへの影響は、レーザビームの切断部前面への接触範囲が影響しているものと考え、加工速度が低い場合もしくは出力が大きい場合は、切断方向に進む酸化反応領域は

拡大し切断部前面が酸化反応主体の加工となる。逆に、高速度もしくは低出力では酸化反応の広がる範囲が縮小しレーザービームと切断部前面との接触領域が増え、偏光度の影響が大きくなるものと思われる。

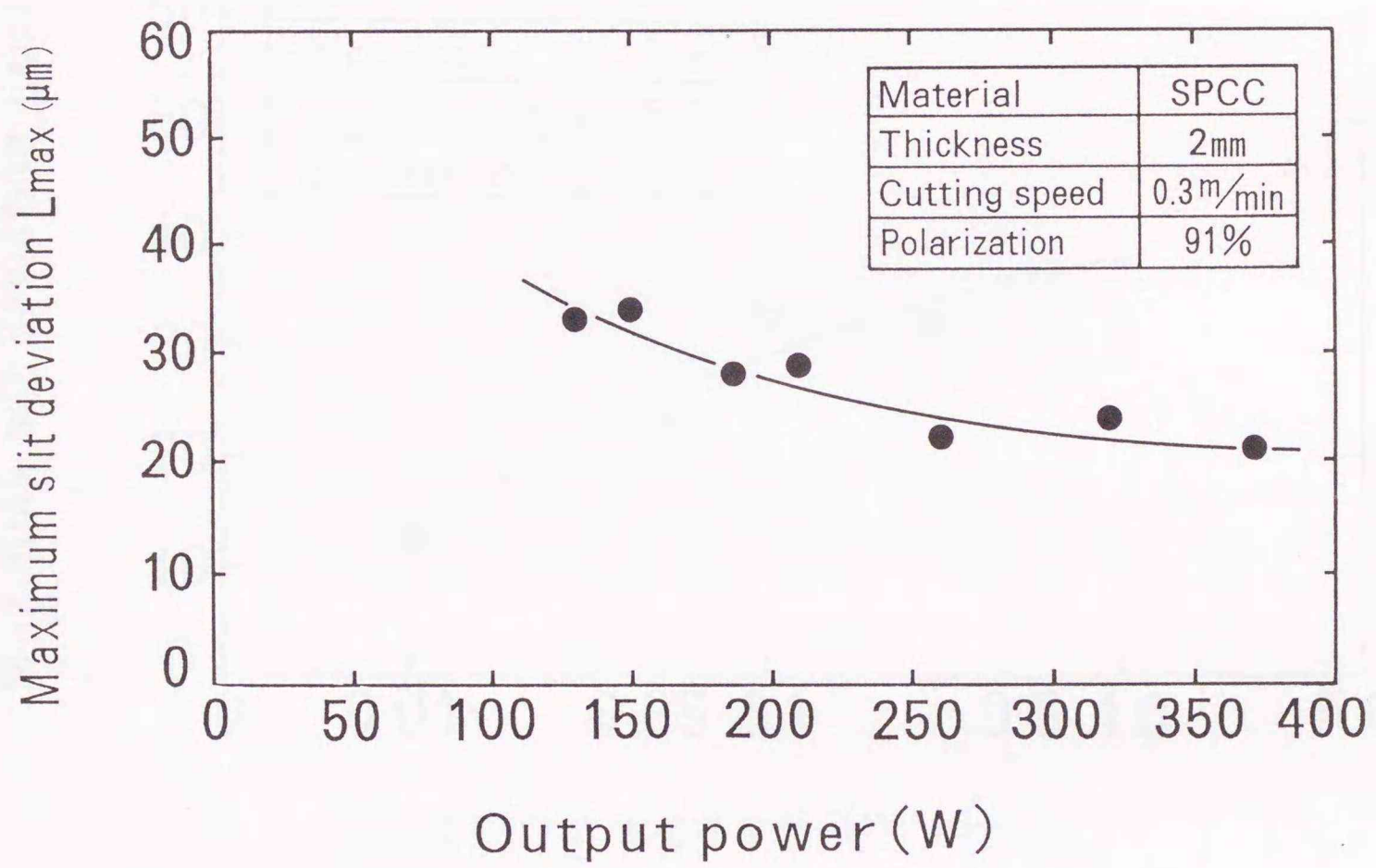


図 4 ・ 5 出力とスリットずれ量の関係

Maximum slit deviation $L_{\max}$ (μm)

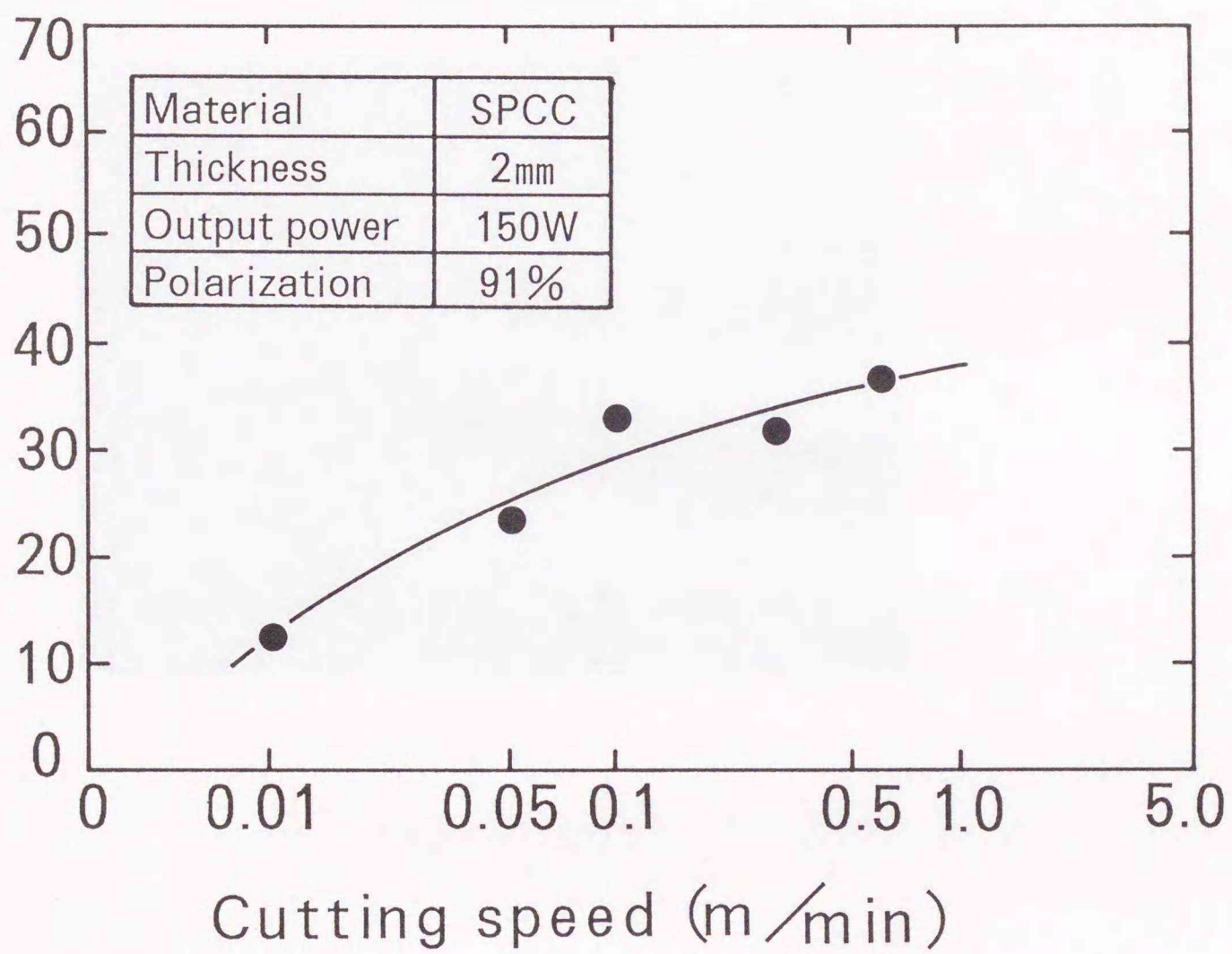
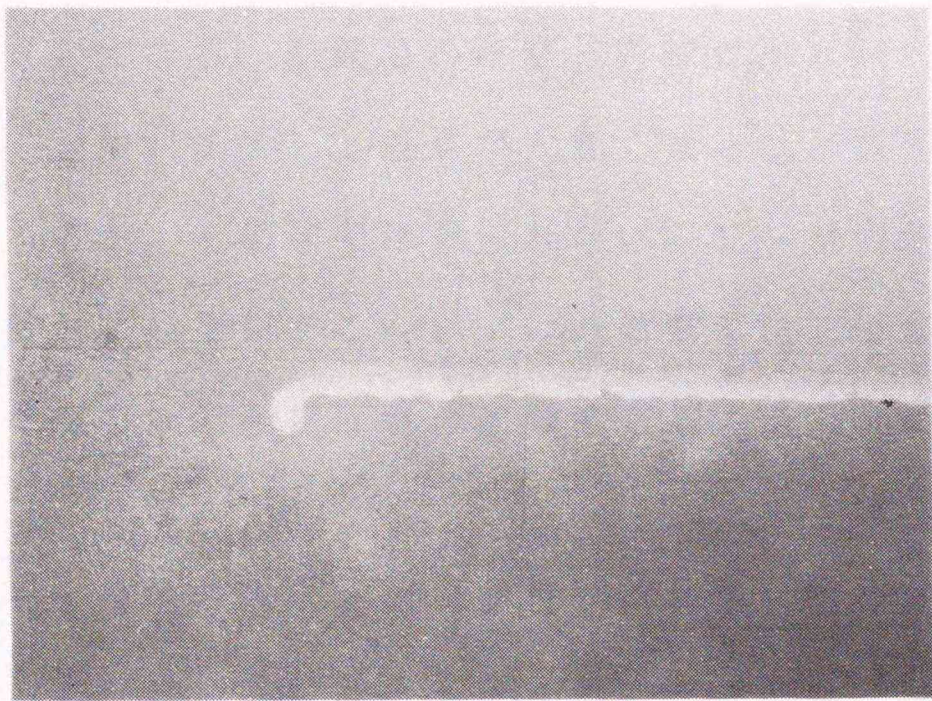


図 4 ・ 6 加工速度とスリットずれ量の関係



Material: SPCC, Thickness: 2mm, Power: 175W, Pulse duty: 20%,
Pulse frequency: 100Hz, Cutting speed: 0.3m/min, Assist gas: O₂,
Gas pressure: 300kPa

図 4 ・ 7 ピアシング部と切断部のずれ量

4. 4. 3 板厚とスリットずれ量の関係

図4・8 は円偏光度91%のビームによる軟鋼材料の切断において、板厚とスリットずれ量 L_{max} の関係を示す。被加工物は板厚3.2mmまではSPCC、4.5mmはSPHCを使用した。円偏光度が一定であっても板厚に比例して最大スリットずれ量は増加した。本加工ではすべての板厚で切断速度を0.3m/minにしたため、板厚が大きくなるほど出力は大きくなる。前節での考察と同様に出力が大きいほど酸化反応による加工範囲が拡大し、板厚が大きくなるほど偏光の影響は小さくなるはずであるが、その傾向は見られない。レーザ切断は切断溝内をビームが多重反射し再集束するwall-focus効果が加工原理とされている。板厚が大きくなるほど多重反射の回数は増し、偏光度の影響を大きく受けるものと思われる。

厚板の切断では切断溝内での過剰な酸化発熱反応により、切断溝形状が不整になるバーニング現象の発生することがある。図4・9 は円偏光度65%のレーザビームによる板厚6mmのSPHCの切断サンプルを示す。加工はスリットの外側から中心に向かって切断した。スリットずれ量の大きい面すなわち切断溝傾斜の大きい面でセルフバーニングが発生している。このように円偏光度の低下は、加工板厚が大きくなると切断溝の傾斜を起こすだけでなく、加工そのものが成り立たなくなる。

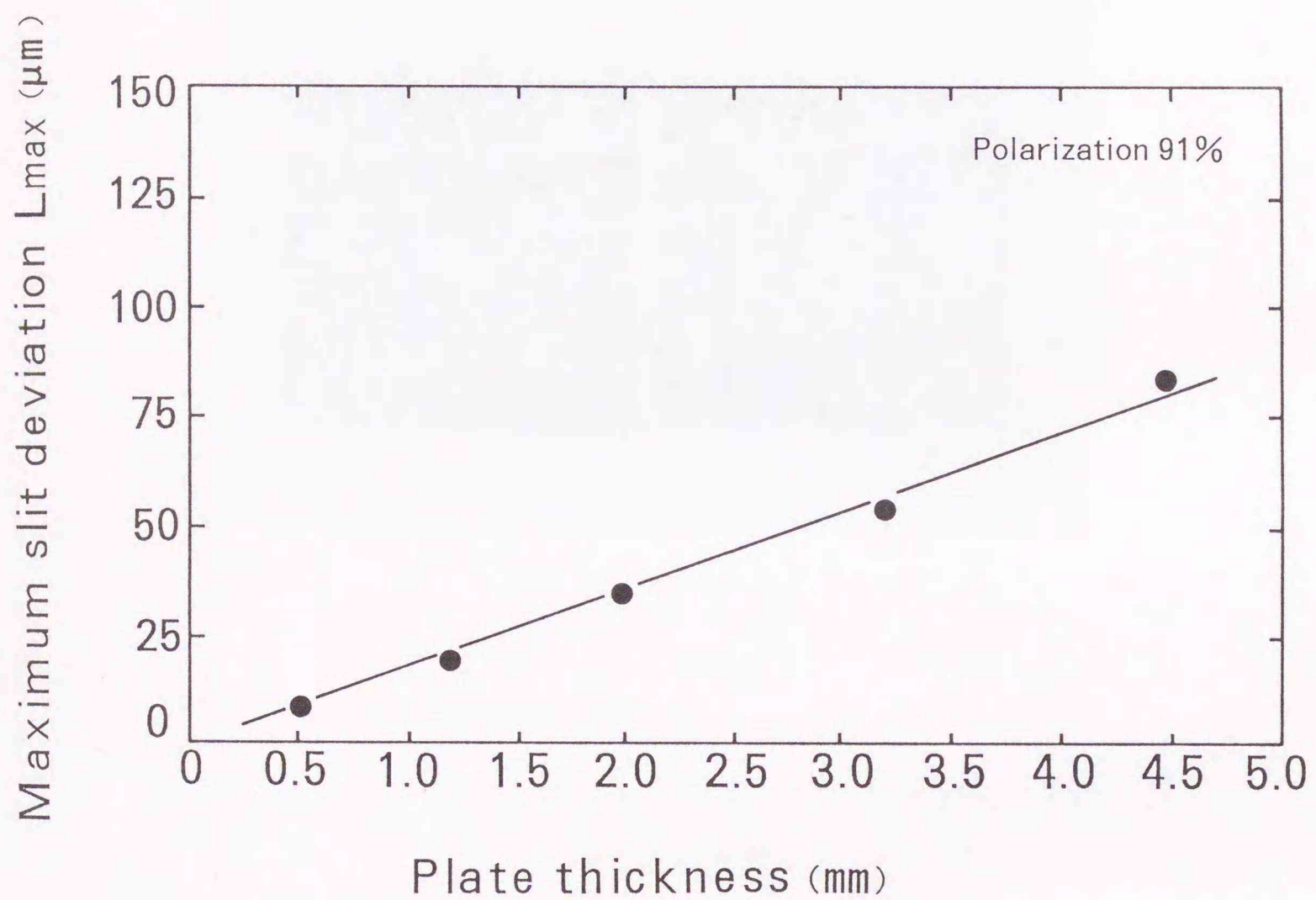
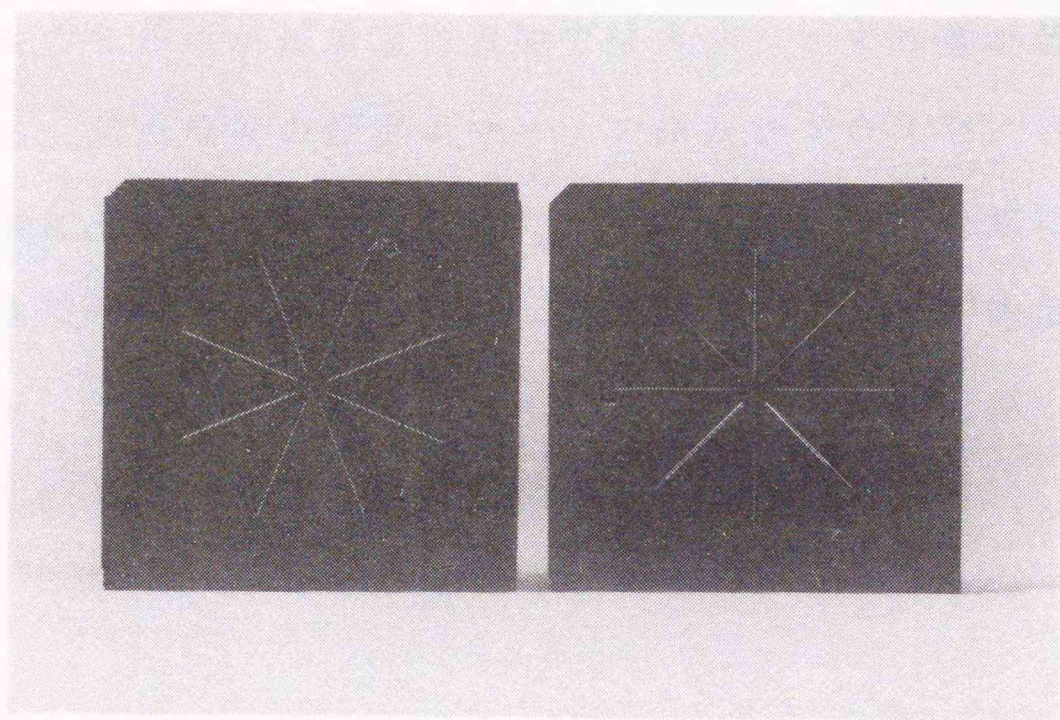


図 4 ・ 8 被加工物板厚とスリットずれ量の関係



Material: SPHC, Thickness: 4.5mm, Power: 480W, Pulse duty: 30%,
Pulse frequency: 100Hz, Cutting speed: 0.3m/min, Assist gas: O₂,
Gas pressure: 300kPa

図 4 ・ 9 円偏光度 6 5 % のレーザビームによる切断サンプル

4. 4. 4 焦点位置とスリットずれ量の関係

図4・10は板厚2 mmのSPCCの切断において、照射ビームの焦点位置 Z とスリットずれ量 $L_{\max}$ の関係を示す。焦点位置 Z は -1.8 mm ～ $+1.8\text{ mm}$ の範囲を 0.3 mm 間隔で変化させた。焦点位置 $Z=0\text{ mm}$ すなわち焦点が被加工物表面ではスリットずれ量が最も小さくなる。しかし、焦点位置の設定がマイナス側及びプラス側においてずれ量 $L_{\max}$ は増加する傾向を示し、 $Z=\pm 1.0\text{ mm}$ でほぼ飽和した。 $Z=0\text{ mm}$ では被加工物表面でのビーム径が最小でエネルギー密度が最大になることから、溶融金属の温度が高くなる。そのため加工部のビーム反射率が低下し、スリットずれ量が減少するものと思われる。

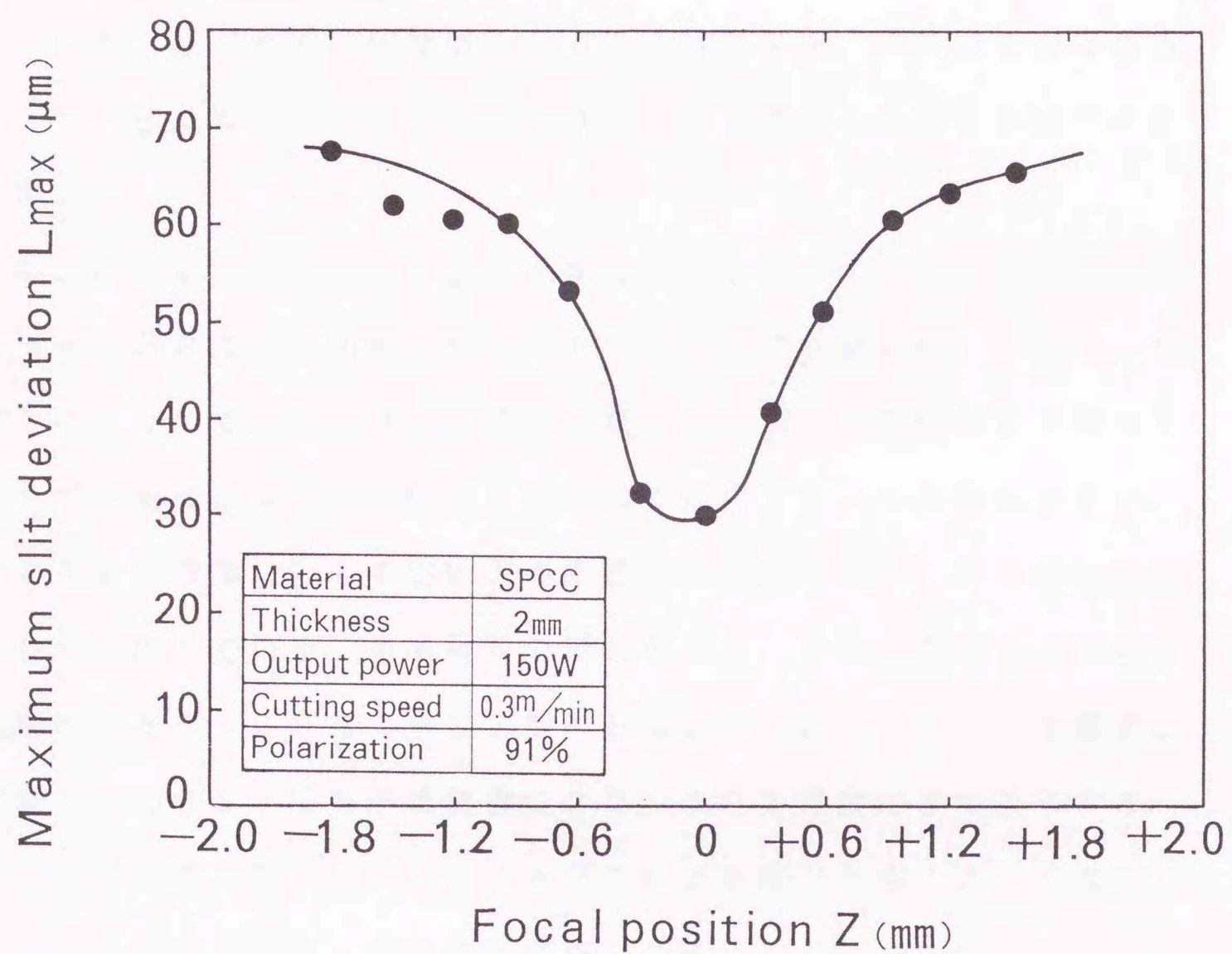


図 4 ・ 1 0 焦点位置とスリットずれ量の関係

4. 4. 5 アシストガス 中の酸素含有量とスリットずれ量の関係

次に、アシストガスの酸素純度とスリットずれの関係について検討した。実験はアシストガスに窒素と酸素の2種のガスを混合し、レーザービームと同軸状に被加工物へ照射した。すべての加工においてアシストガス種類以外の加工条件は、窒素100%で切断する条件と同じに設定した。なお、酸素ガスは仕様値として酸素純度99.7%以上のものを使用した。加工条件は窒素ガス100%で加工できるものをすべての加工で用いた。

図4.11は酸素と窒素ガスの混合比率の異なるアシストガスを用いて板厚2mmのSPCCを切断したときのスリットずれ量 L_{max} を示す。窒素ガス100%では約 $70\mu m$ のずれが生じるが、酸素含有量が増加するほどずれ量は減少した。酸素100%では約 $15\mu m$ と最も小さい。酸素含有量の増加に応じて切断面の黒色化の程度も増え、明らかに酸化の度合が増加している。金属材料の波長が $10.6\mu m$ のビームに対する反射率は85~90%（垂直入射）と極めて高い。しかし、金属面が酸化膜で覆われると反射率は軟鋼で30~40%程度にまで低下する。スリットずれ量の変化は、アシストガスによる酸化作用によって加工部のビーム反射率が変化したためと推測される。

以上のことにより、高精度加工が期待できる加工条件の最適設定には円偏光度を100%に近づけ、焦点位置は $Z = 0\text{ mm}$ 、加工速度は低速、出力は高めの設定、ビーム吸収剤を使用することが必要となる。

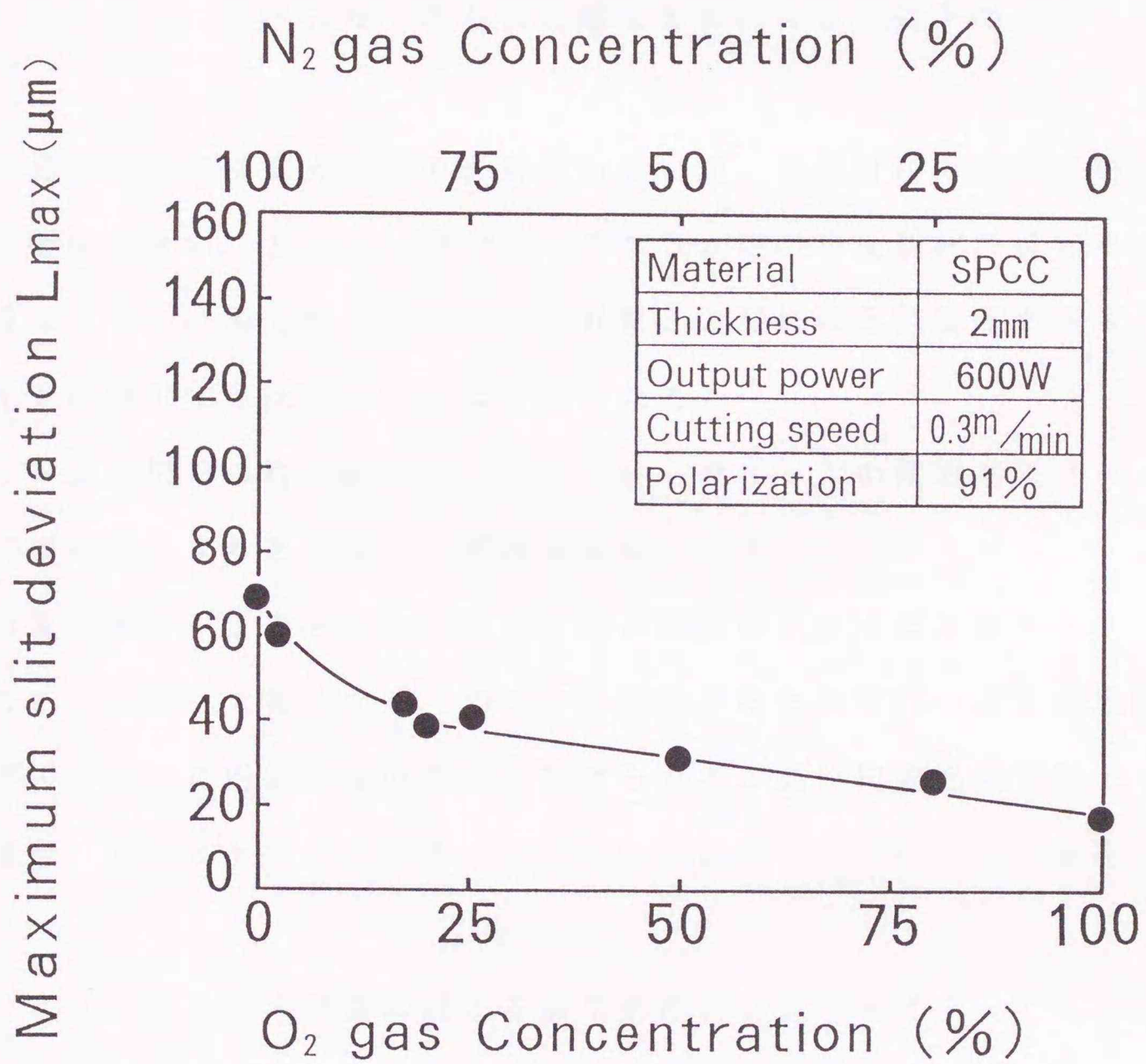


図 4 ・ 1 1 アシストガスの混合比とスリットずれ量の関係

4. 5 第4章の結言

偏光特性の切断精度に及ぼす影響について、スリット加工での裏面側のずれ量を測定し検討した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 非金属材料では偏光特性の影響は小さいが、金属材料では偏光特性の影響は大きい。とくに、銅やアルミニウム等の高反射材料ほどその影響は大きい。偏光度とスリットずれ量との間には比例関係があり、偏光度が低下するほどずれ量は大きくなる。
- (2) ビーム反射率の高い銅の切断では、レーザビームの照射面にビーム吸収剤を塗布するとスリットずれは少なくなる。
- (3) 円偏光度が一定のもとで、被加工物の板厚が大きくなるほどスリットのずれ量は大きくなる。加工中に発生するセルフバーニング現象の原因の一つに円偏光度の悪化が挙げられる。低い円偏光度で加工した場合、スリットずれの大きく生ずる加工面でセルフバーニングが発生する。
- (4) スリットずれは入熱量に関する加工条件パラメータによっても左右される。加工速度を減少するか、もしくは出力を増加するとスリットずれは小さくなる。
- (5) アシストガス中の酸素含有割合が大きいほどスリットずれは小さくなる。
- (6) 照射ビームの焦点位置設定もスリットずれに影響を及ぼし、被加工物表面に焦点を結ぶ設定でスリットずれは最も小さくなる。

第5章 アシストガスの適正条件

5・1 緒言

レーザ加工は、高エネルギー密度の熱源を加工に応用したものであるが、レーザビームは質量を持たないため、溶融物を排除するのに必要な運動エネルギーを持っていない。したがって、レーザ切断が成立するためには運動エネルギーを得るための手段が必要になる。一般には、ノズル先端からレーザビームと同軸状にアシストガスを噴出させ溶融金属除去の運動エネルギーを得るが、その他にも酸化反応熱の利用、過剰な燃焼の抑制、材料の冷却、加工レンズ保護などの効果を得ている。そのためガスの種類や流量は切断材質や切断品質要求に応じて選択して使用している。

孔から噴出する流体は噴流と呼ばれ、ノズルから噴出するアシストガスはこの噴流にあたる。噴流は通常乱流状態になっているので、乱れの成長や、周囲流体の誘引が起きやすい。レーザ切断用ノズルはアシストガスの噴出孔であると同時にレーザビームの出射孔でもあり、レーザビームとの干渉を避ける必要性から、その形状は流体力学的に理想的な形状とは言い難い。また、レーザ切断では切断溝幅が約0.5 mmと非常に狭いため、噴流の周囲流体の誘引および板表面への衝突がレーザの切断品質へ及ぼす影響の大きくなることが予想される。従来は加工の安定性の点からパルス出力の条件設定が切断加工の主流であり、レーザ出力

の条件パラメータの変更で被加工物への入熱状態を制御し加工品質の最適化を図っていた。しかし近年、厚板の高速切断への要求が多くなり、連続（CW）出力や高周波パルス出力による切断加工⁽³⁰⁾が増えている。このような加工では、アシストガス条件による入熱状態の制御が重要となる。ところが従来、薄板切断品質とアシストガスの関係⁽⁹⁾やノズル形状単独での詳細な検討⁽⁵⁵⁾など薄板切断に関する研究は多く報告されているが、厚板の切断品質とアシストガス条件の検討に関する報告は少ない。そこでこの章では、ノズルからの噴流と主に軟鋼厚板のレーザ切断品質との関係を検討する。まず、酸素ガス濃度と切断面品質との関係を調べ、次に加工部全体を酸素ガスでシールドした場合の効果を調べた。その結果に基づき、軟鋼厚板の切断品質を向上させるための最適ノズル形状の提案を行った。

5・2 実験装置および実験方法

実験に使用したCO₂レーザ加工機は、三菱電機製ML2512HB2-3016FとML2512HC-3016Cの2機種である。ビームモードはシングルモードと低次マルチモードであり、レンズ位置でのビーム径は約24mmと32mmである。集光レンズはZnSe製のものを用い、焦点距離 f が127mm、190.5mmおよび254mmの3種類を使用した。焦点位置 Z (mm)は焦点の水平に置いた被加工物表面からの距離で表し、上方を正とした。標準ノズル(一穴)形状は図5.1に示すように集束角は50°で、先端部のストレート長さ h は5mmである。出口直径は1.5mmと2.0mmの2種類を用いた。また、このノズルを用いた場合の酸素アシストガス圧とガス流量との関係を図5.2に示す。

ノズルと被加工物の距離は、焦点位置 $Z = 0$ mmの場合に1mmすなわち、ノズル先端から1mm先に焦点が存在するように設定した。

被加工物には、板厚6mm、12mmおよび16mmの一般構造用圧延鋼板SS400(中部鋼板製)を用いた。切断品質の評価は、セルフバーニングの有無や裏面に付着するドロス状態および切断面粗さによって行った。

Number	$\phi d(\text{mm})$	$h(\text{mm})$
01	1.5	5
02	2.0	5

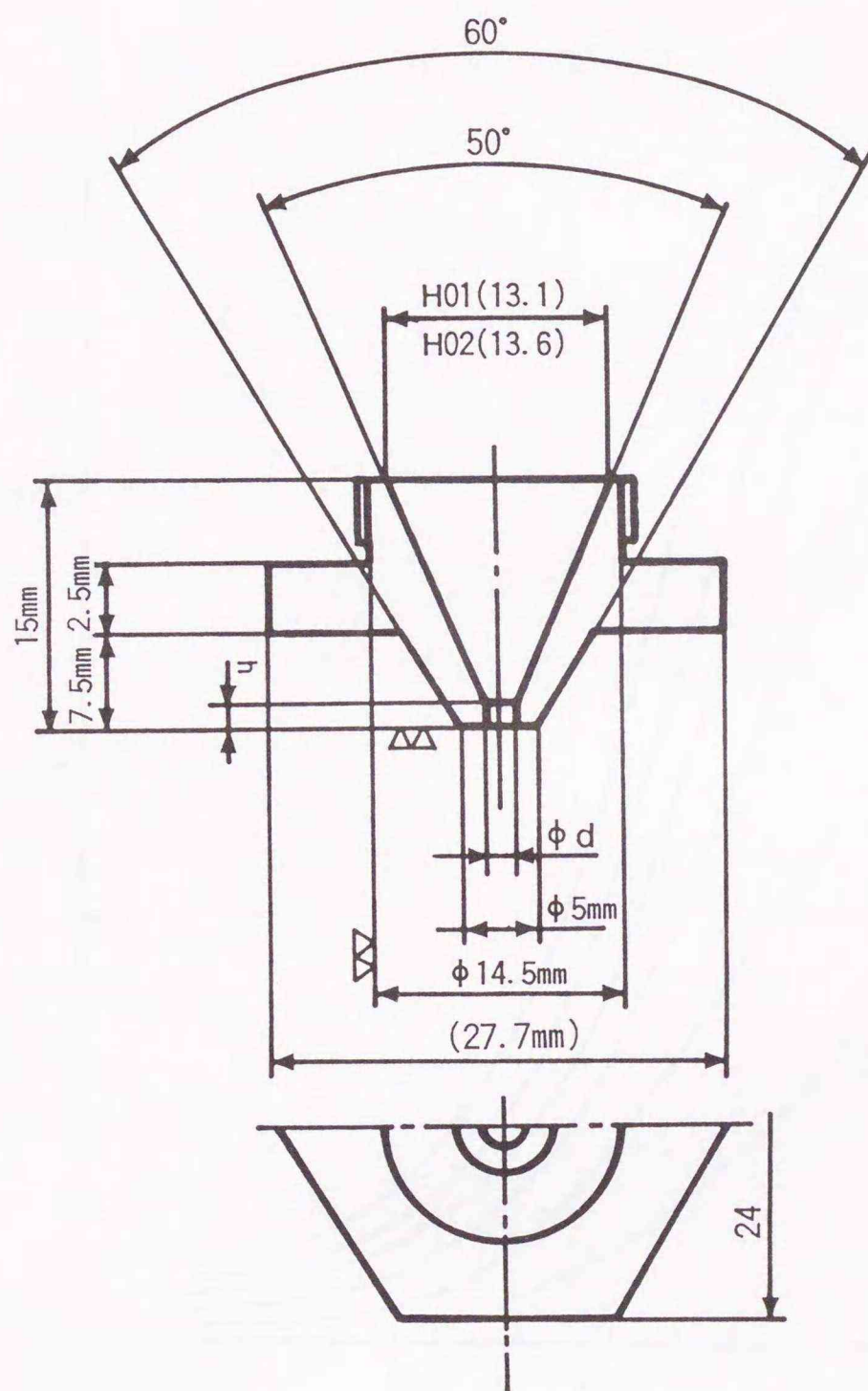


図 5 ・ 1 実験で使したノズルの概略図

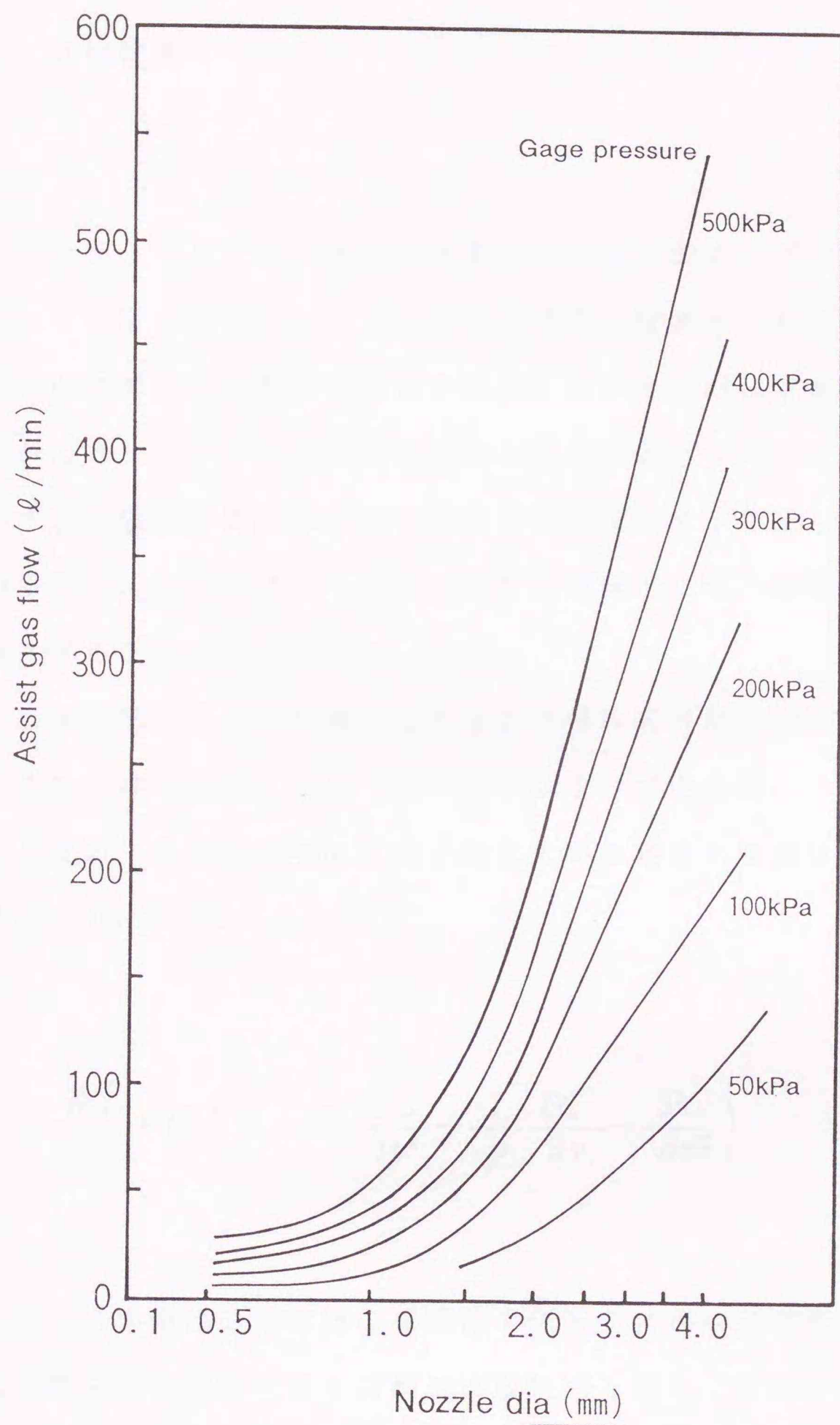


図 5 ・ 2 アシストガスの圧力と流量の関係

5・3 誘引特性

ノズルやスリットより流体を噴出すると、周囲流体の誘引が起きる⁽⁴⁸⁾。レーザ切断において、ノズルより空気中に酸素ガスを噴出させると、酸素ガス中に周囲空気を巻き込みアシストガス濃度の低下が起きる。Brodenらのアシストガスの濃度と切断品質の関係についての研究によれば、わずかな酸素濃度の低下でも切断可能速度の低下を招くことが示されている⁽⁴⁹⁾。レーザによる厚板の切断品質向上には、酸素ガス濃度を高く維持することが必要である。

図5・2は円形ノズルより噴出した場合の無次元等濃度(C/C_0)線を示すが、これらは閉曲線となり、最終的にはすべて中心軸上で合致する⁽⁴⁸⁾。ガス流が一定速度 U で x 方向に流れている場合の濃度 C の拡散方程式は式(5-1)のようになる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{1}{y} \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad \dots\dots(5-1)$$

さらに、自由噴流の軸方向の拡散は半径方向に比べ通常無視できるので、右辺第三項を省略すると方程式は放物形となり、ノズル中心軸上のガス濃度は解析的に式(5-2)のように求められる。

$$C = C_0 \{1 - \exp(-d^2 U / 16 D x)\} \quad \dots\dots\dots(5-2)$$

ここで C_0 : ノズル出口のガス濃度、 d : ノズル直径、 D : 乱流拡散係数である。

乱流状態では乱流拡散係数 D を完全に理論的に求められないが、 $D = 50$ 、 100 、 $200 \text{ cm}^2/\text{s}$ と仮定すると、酸素ガスが $\phi 2 \text{ mm}$ のノズルより 50 l/min で噴出した場合のガス拡散は図5.4 のようになる。乱流拡散係数は小さいほど、またガス噴出速度は大きいほどガス拡散は小さくなる。軟鋼の厚板切断では薄板の切断に比べ、アシストガス圧力が低くガス噴出速度の小さいところにセルフバーニングの起きにくい適正值の存在することを経験している。また、切断溝幅を広げるために焦点位置を上方にずらすことが必要であり⁽¹⁰⁾、それに伴いノズルと被加工物表面間の距離が広がることから、アシストガスの酸素濃度の低下が起こり易い。このことも厚板切断を難しくしていると考えられる。

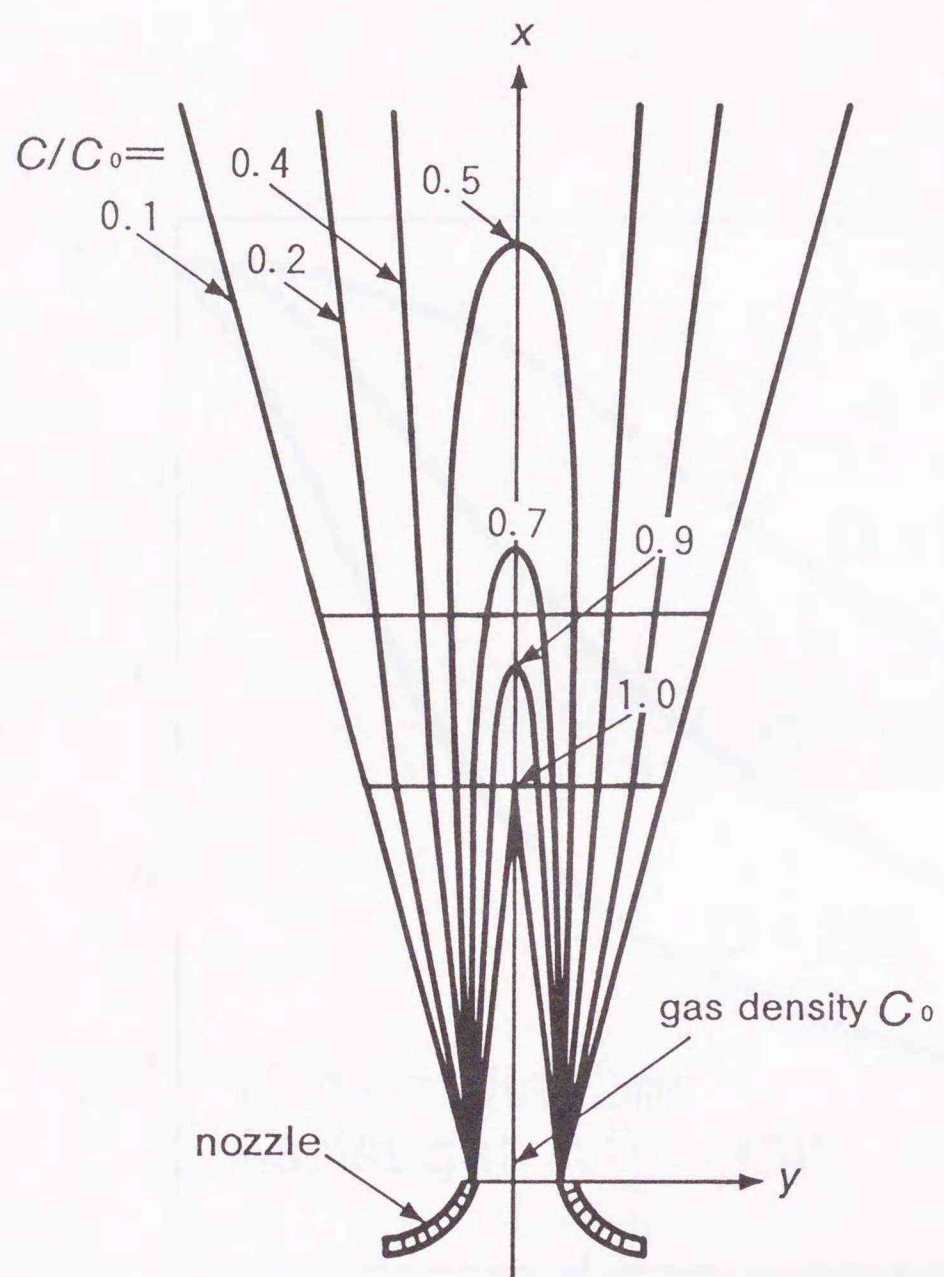


図 5 ・ 3 ガス噴流の等濃度線

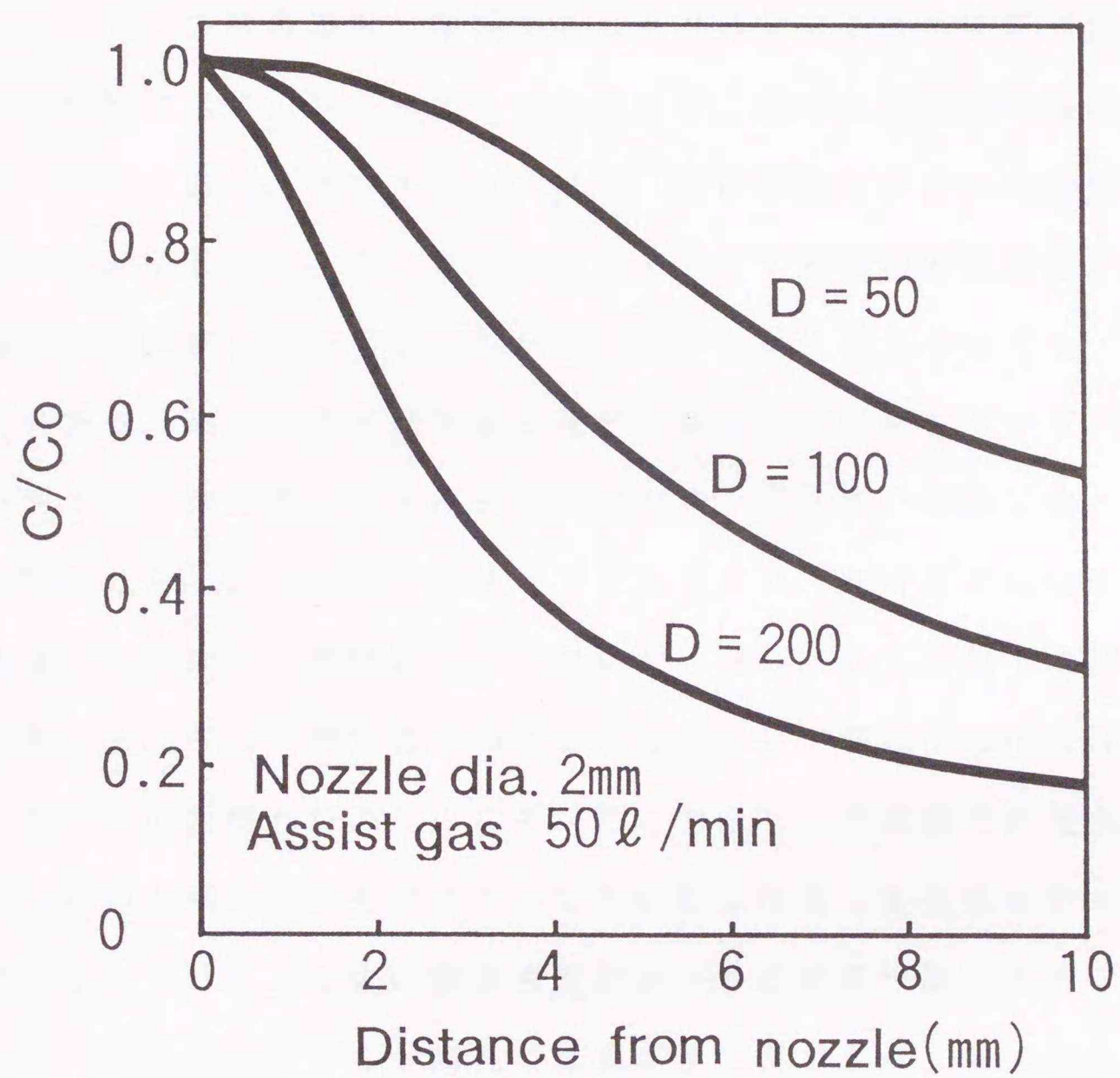


図 5 ・ 4 一様流円形噴流の軸上ガス濃度の減衰

5・4 厚板の切断結果

5・4・1 サイドノズルからの酸素ガスシールドの効果

アシストガスの酸素濃度と厚板 12 mm の S S 4 0 0 の切断品質との関係を図 5・5 に示す。レーザビームの走査は、図中の切断面に向かい右から左の方向である。アシストガスは、一般に市販されている液体酸素（濃度 99.75%）と Ar ガスとを混合させて酸素濃度を变化させた。酸素濃度の高いほど切断面の上部から下部方向に生じるドラグラインが直線的である。酸素濃度が低下するほど板厚の下部付近のドラグラインがレーザビームの走査方向とは逆側に遅れる。さらに、被加工物への入熱量も増加した。酸素濃度が 99.75% と 99.68% では図中の切断部裏面へのドロス付着は起きていないが、99.61% 以下ではドロスが付着した。さらに酸素濃度の低下にしたがい、切断面の中央部から下部にかけての面粗れが著しくなる。ここで示した酸素濃度の変化範囲では、切断面上部から中央部にかけての切断面粗さに変化はなかった。以上のようにアシストガスの酸素濃度はレーザの切断性能に大きく影響する。ガス切断においても、同様な結果が示されており、ガス濃度の向上が加工能力の向上につながると報告されている⁽⁶⁰⁾。

次に、加工ヘッドにサイドノズルを設け、加工部全体を酸素ガスでシールドさせ空気の巻き込みを防止し、その効果について検討する。図 5・6 は、サイドノズル設定の概要を示す。サイドガスの噴射軸は、レーザビーム軸と被加工物表面の接点に 45° の角度で傾斜させ、その方向は固定とした。サイドノズルの径は $\phi 30$ mm であり、その内部にはガス

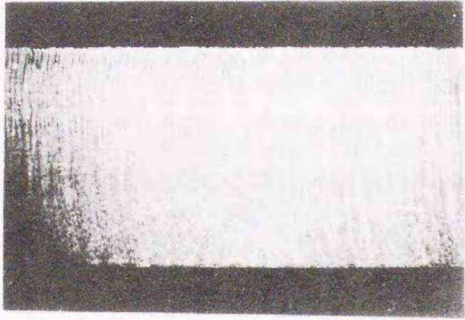
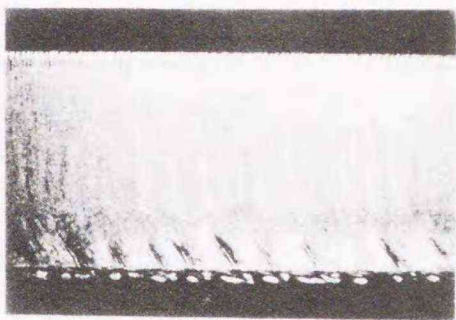
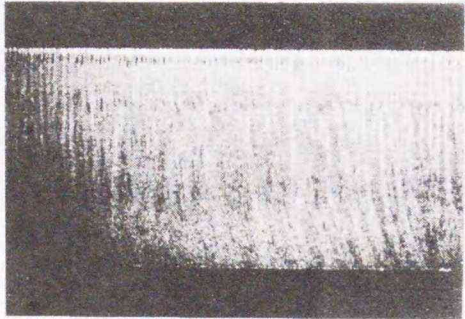
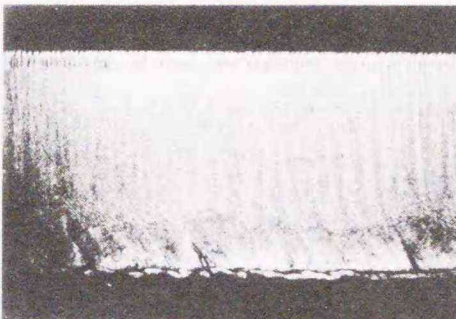
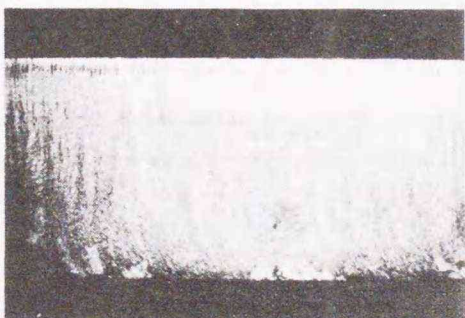
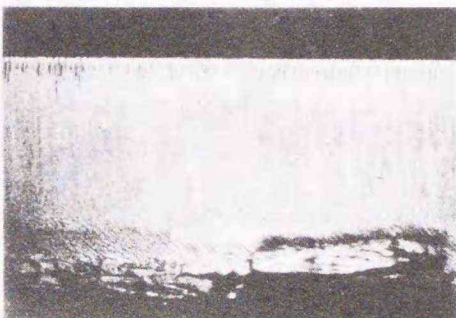
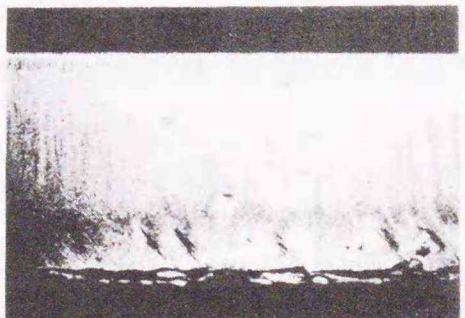
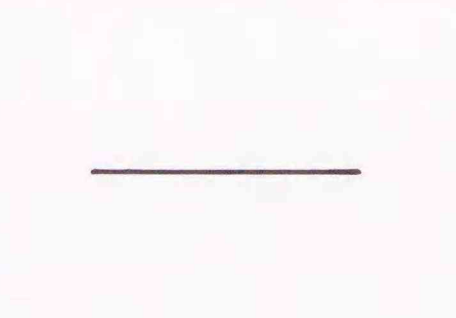
の整流のために線径 0.1 mm の SUS 304 で #100 のメッシュを配置した。サイドノズルには酸素ガスを 30 l/min の流量で流した。

図 5.7 には、板厚 12 mm の SS 400 をサイドガス有無による切断品質の違いを示す。(a) は切断面の拡大写真、(b) は切断部裏面の拡大写真である。被加工物表面とノズルの間隔は焦点位置 $Z = 0$ mm の場合に 1 mm に設定してあり、焦点位置の変化量と同じ量だけ間隔も変化する。サイドノズルによる酸素シールドガスの無い状態では、焦点位置が $Z = 1.5$ mm で被加工物裏面へのドロス付着は起きていない。しかし、 $Z = 2.0$ mm 以上と 1.0 mm 以下では多量のドロス付着が起き、切断面の下部が粗れている。一方、酸素シールドガスを噴射した場合は、 $Z = 1.0$ mm から 3.0 mm の範囲ではドロス付着は起きていない。一般に軟鋼の切断で発生するドロスは入熱の過不足か⁽¹⁾、または酸素ガス純度が低下し燃焼反応が劣化する場合⁽¹⁶⁾に起きる。ただし、入熱が過剰でドロスが発生する場合は、上部から中央部にかけての切断面粗さも悪化する⁽¹⁾が、ここでの切断結果では面粗さの悪化は見られない。図 5.7 のサイドガス有無での加工結果は、サイドガス以外の加工条件パラメータは固定であるため、酸素ガス濃度の低下がドロス付着の原因と考えられる。焦点位置を上方に設定しノズルと被加工物間が離れるほど、シールド無しではアシストガスへの空気の巻き込みが起こる。ノズルと被加工物とが近づくほど、ノズルから噴出したガスは切断溝に対し流速の大きな衝突噴流となり流動状況が複雑になる。このようなアシストガスの乱れによる加工品質の低下に対し、酸素ガスで加工部をシールドする方法は加工品質の向上に効果がある。

図 5.8 は、板厚 16 mm の SS 400 を直径 1.0 ~ 3.0 mm のノズルを用いて加工した結果である。アシストガス圧はすべて 80 kPa

で一定であり、その場合の流量は $\phi 1.0$ で 15 l/min 、 $\phi 1.5\text{ mm}$ で 27 l/min 、 $\phi 2.0\text{ mm}$ で 58 l/min 、 $\phi 2.5\text{ mm}$ で 84 l/min 、 $\phi 3.0\text{ mm}$ で 116 l/min である。サイドガス無しでは $\phi 2.5\text{ mm}$ のノズル径で完全なドロスフリーになるが、 $\phi 2.0\text{ mm}$ では若干のドロス付着が起きた。サイドガスを流量 60 l/min で噴射した場合は $\phi 1.5\text{ mm}$ 、 $\phi 2.0\text{ mm}$ 、 $\phi 2.5\text{ mm}$ のノズル径でドロスフリーの切断が行えた。図中の切断面写真は、サイドガスを用いた切断によるものである。ノズル径が小さくなるほど式(5-2)で示したように加工部での空気の巻き込み量が増え酸素濃度が低下する。サイドガスによる加工部の酸素シールドによって、空気の巻き込み量が多くなる小さなノズル径でも良好な加工の行えることが判明した。

先端に欠けやスパッタ付着が起きたノズルによる切断では、アシストガス噴流に乱れが生じ、加工方向によって著しい加工品質の低下を招く。図5.9は、先端部に欠けが生じた不良ノズルによる切断結果を示す。被加工物は板厚 12 mm のSS400である。図中に示す位置に欠けの生じたノズルを用いて4方向に切断し、切断面とドロスの付着状態を観察した。サイドガス無しの切断では、①方向の切断で若干のドロスが発生し、切断面の下部がやや粗れている。さらに、④方向の切断では多量のドロスが発生した。サイドガスを噴射して加工した場合は、4方向のすべてにドロスの付着がない。切断面の品質も欠けの無いノズルで切断したものと同様な品質が得られた。欠落の生じたノズルを加工に用いた場合も、加工部での酸素ガス純度の低下が原因の加工不良を起こし、その改善に加工部の酸素シールドの有効性を示した。加工中に熔融金属がノズルに付着し加工不良を起こす場合も、酸素ガスシールドによる改善の効果を確認している。

Purity	Cutting surface		Cutting surface
99.75%		99.54%	
99.68%		99.50%	
99.61%		99.45%	
99.57%			

Material: SS400, Thickness: 12mm, Power: 1900W, Pulse frequency: 1300Hz, Pulse duty: 65%, Cutting speed: 1000mm/min, Assist gas: $O_2 + Ar$, Gas pressure: 70kPa, Focal length f : 254mm, Focal point Z : +1.5mm

図 5 ・ 5 アシストガスの酸素濃度と切断品質との関係

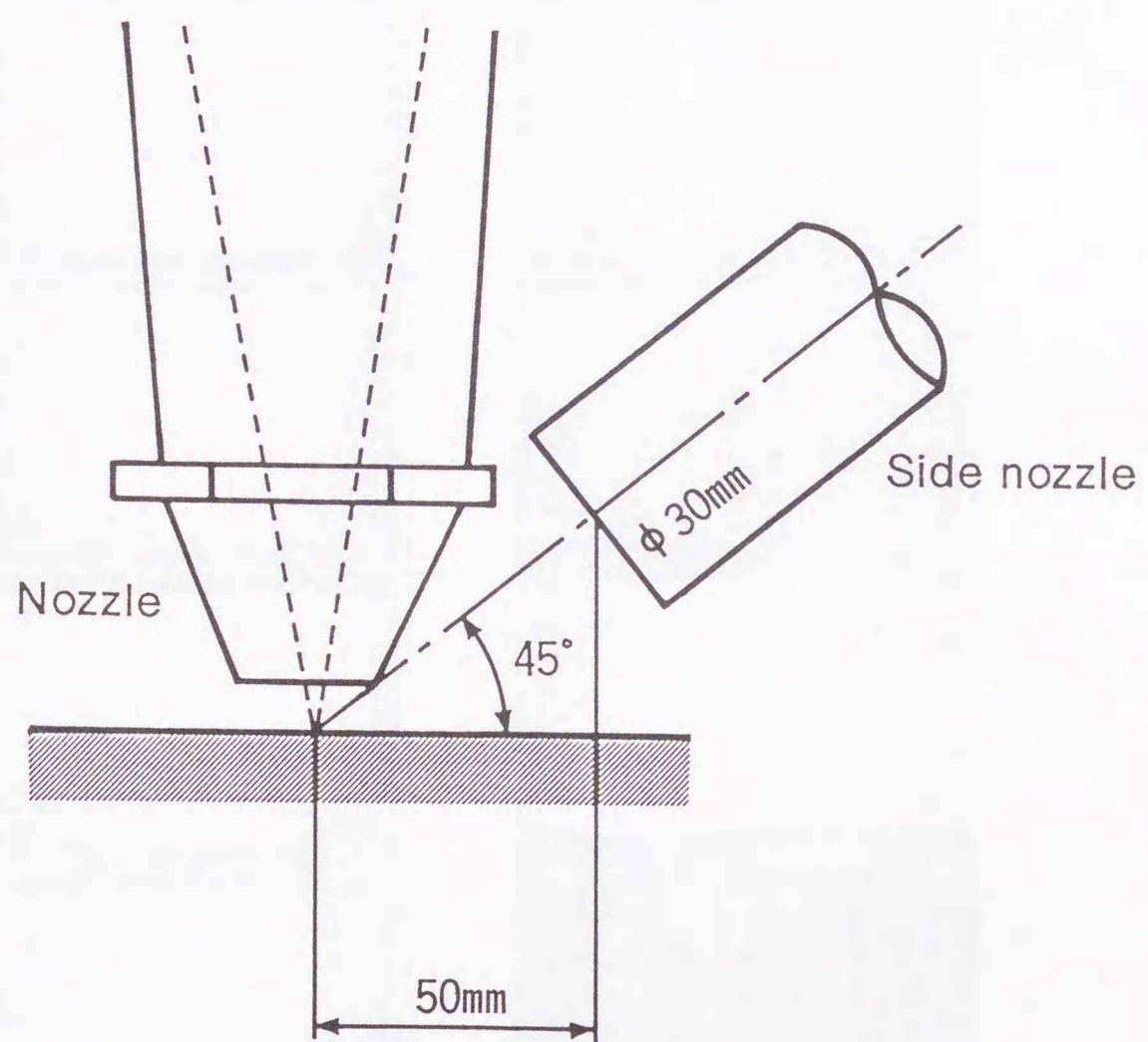
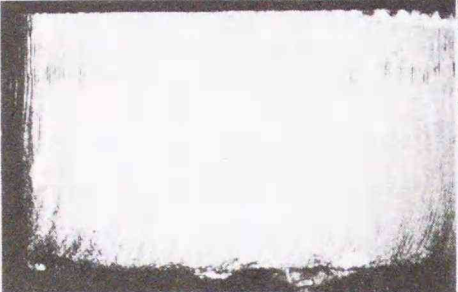
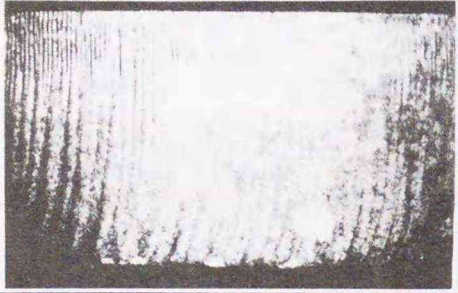
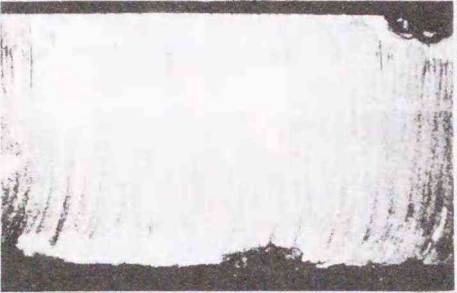
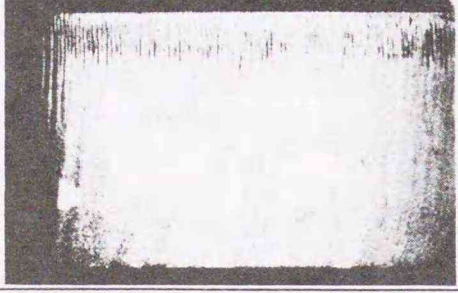
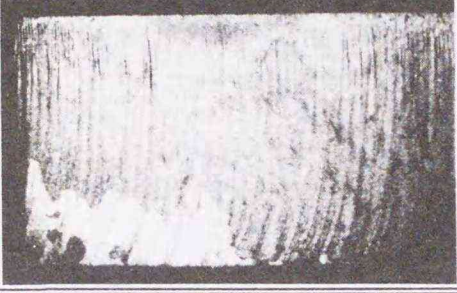
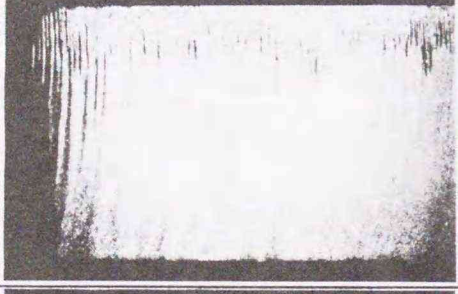
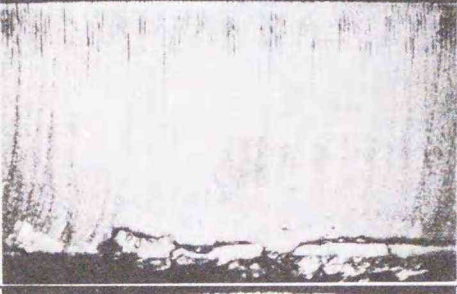
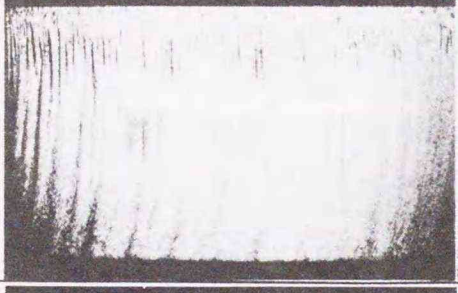
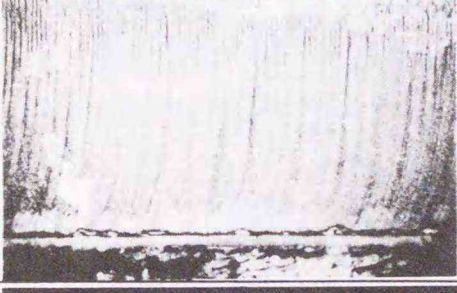
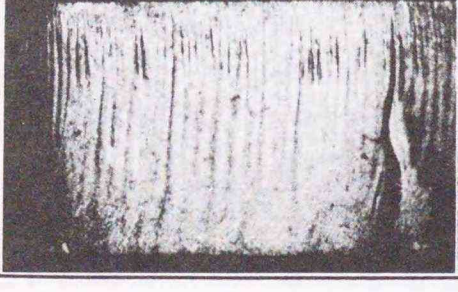
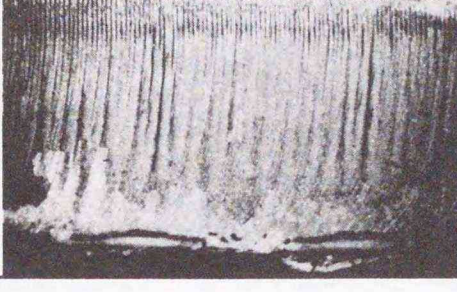
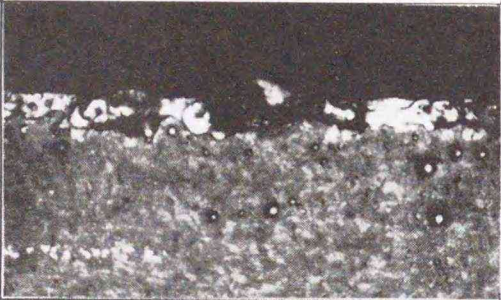
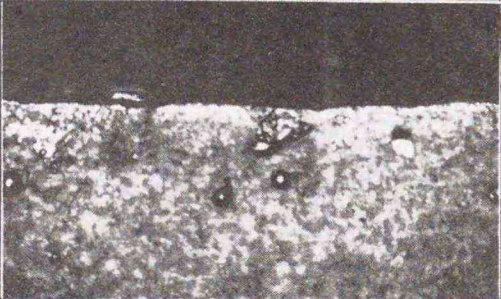
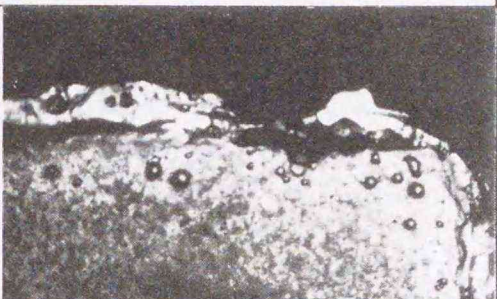
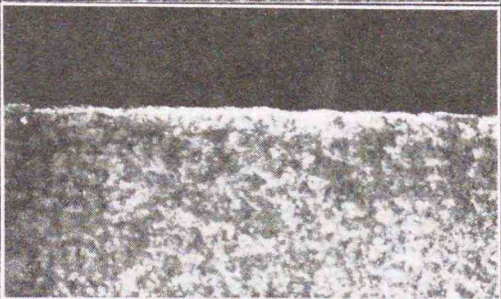
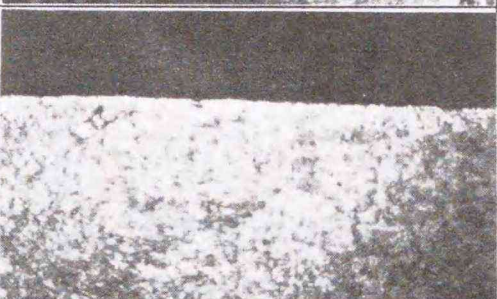
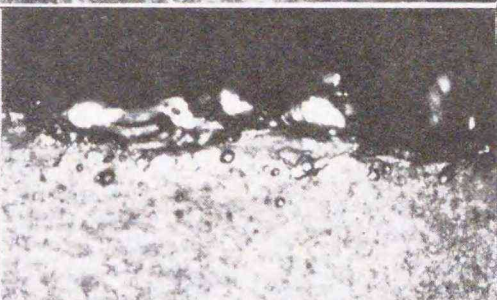
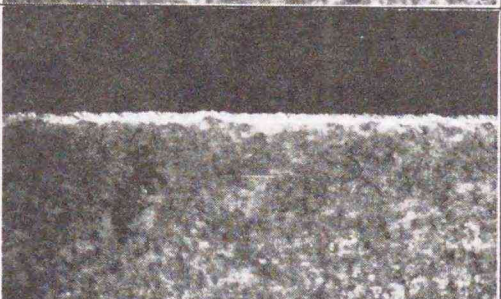
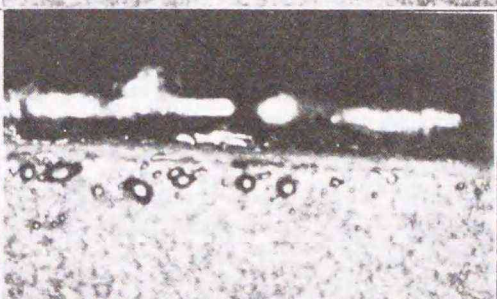
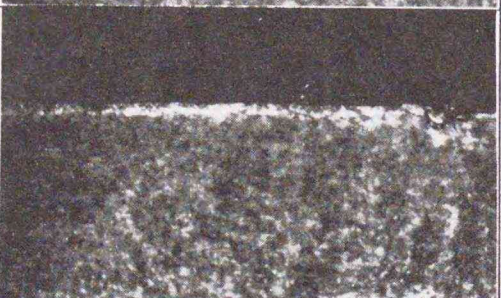


図 5 ・ 6 サイドノズルを設置した加工ヘッド概略図

Focal point (mm)	Gas shield	Judgment	Non gas shield
Z=0		>	N·G
Z=+1.0		>	
Z=+1.5		=	
Z=+2.0		>	
Z=+2.5		>	
Z=+3.0		>	

Material: SS400, Thickness: 12mm, Power: 1400W, Pulse frequency: 1300Hz, Pulse duty: 55%, Cutting speed: 800mm/min, Assist gas: O₂, Gas pressure: 70kPa, Focal length f: 190.5mm
(a) 切断面写真

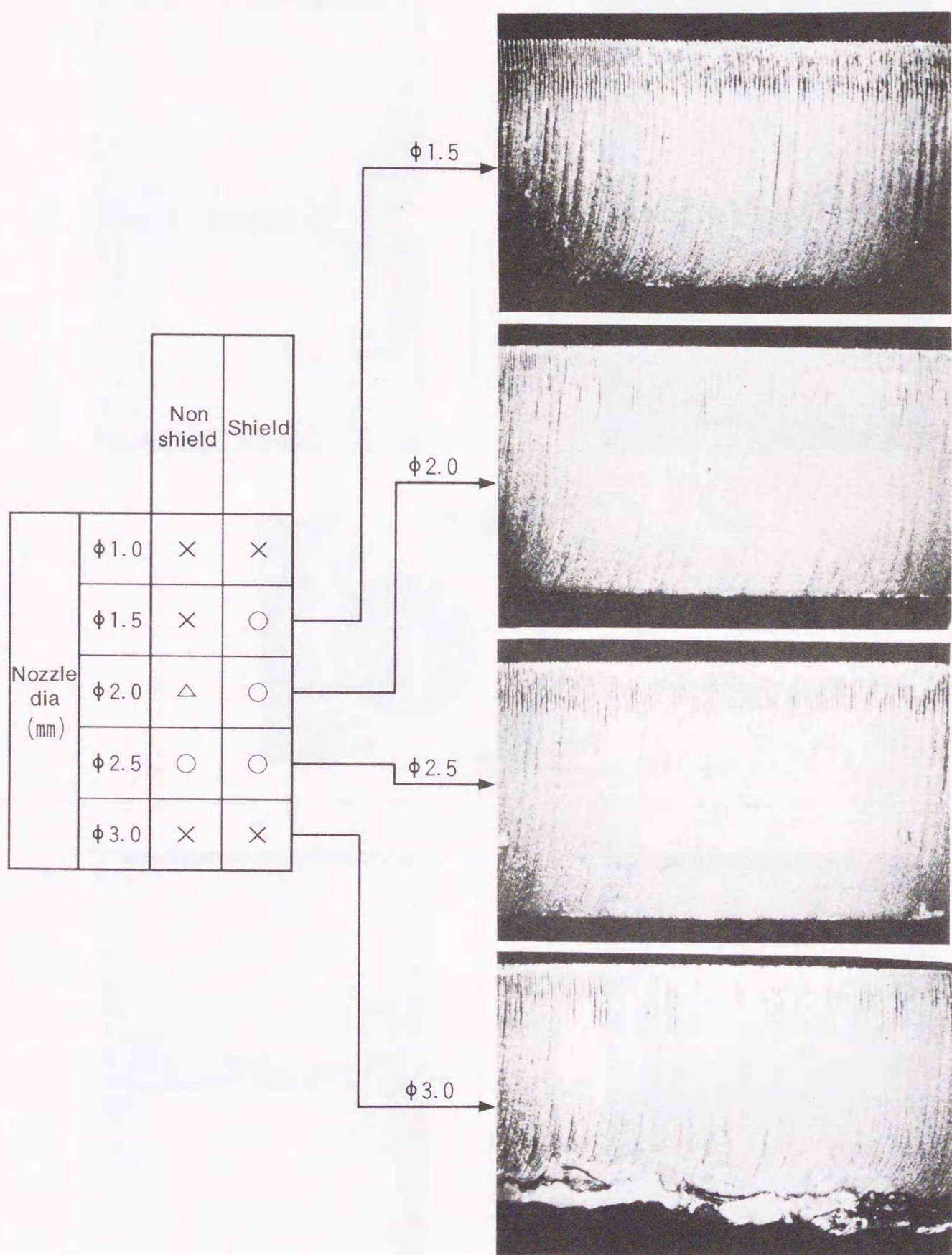
图 5 · 7 切断面扩大写真

Focal point (mm)	Gas shield	Judgment	Non gas shield
Z=0		>	N·G
Z=+1.0		>	
Z=+1.5		=	
Z=+2.0		>	
Z=+2.5		>	
Z=+3.0		>	

Material: SS400, Thickness: 12mm, Power: 1400W, Pulse frequency: 1300Hz, Pulse duty: 55%, Cutting speed: 800mm/min, Assist gas: O₂, Gas pressure: 70kPa, Focal length f: 190.5mm

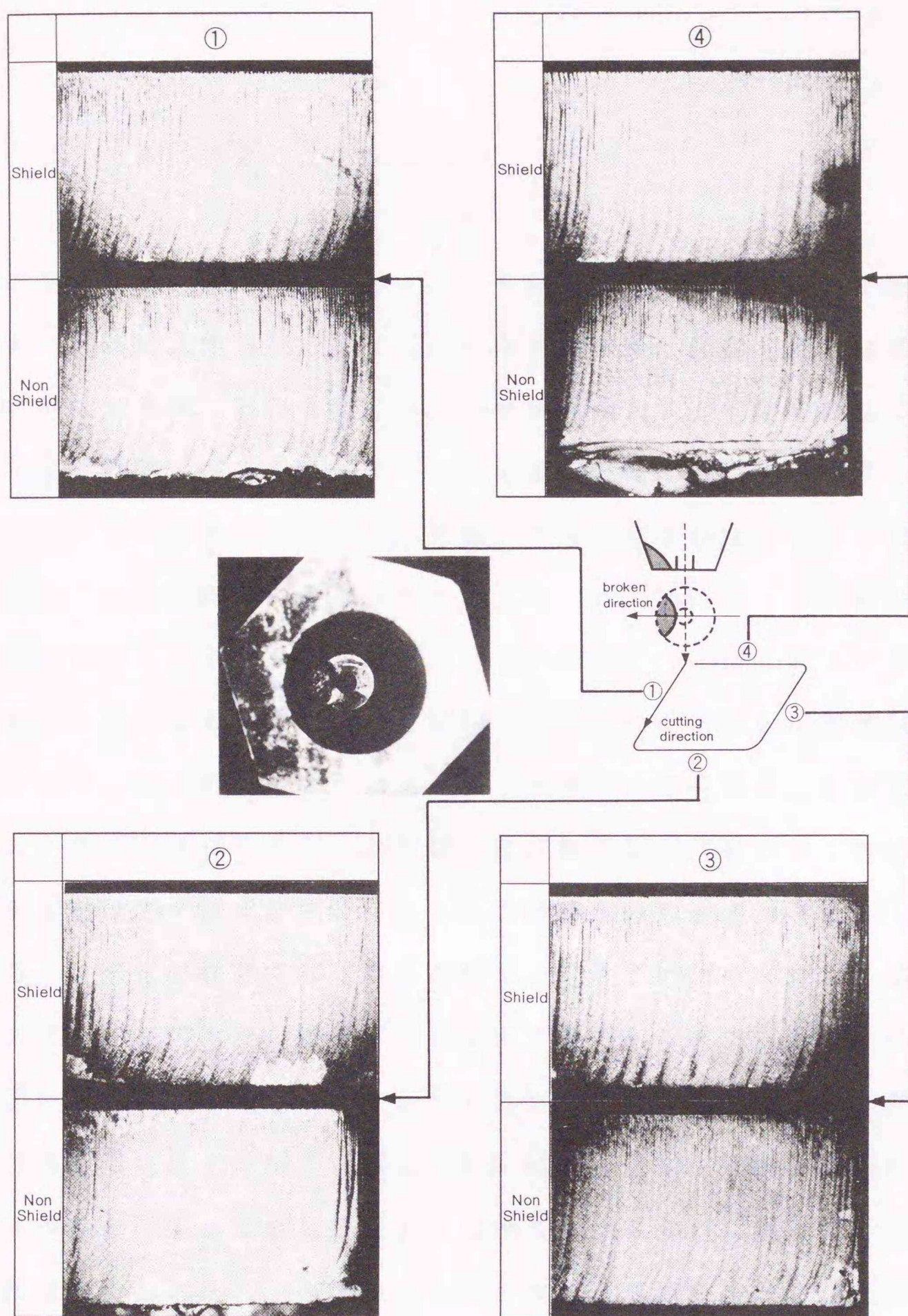
(b) 切断部裏面写真

図 5 · 7 切断面拡大写真



Material: SS400, Thickness: 16mm, Power: 2200W, Pulse frequency: 1300Hz, Pulse duty: 80%, Cutting speed: 800mm/min, Assist gas: O₂, Gas pressure: 70kPa, Focal length f: 254mm, Focal point Z: 1.5mm

図 5 ・ 8 ノズル径と切断品質の関係



Material: SS400, Thickness: 12mm, Power: 1400W, Pulse Frequency: 1300Hz, Pulse Duty: 55%, Cutting Speed: 800mm/min, Assist gas: O_2 , Gas pressure: 70kPa, Focal length: 190.5mm, Focal point Z: 1.5mm

図 5 ・ 9 不良ノズルによる切断

5・4・2 二重ノズルによる切断結果

前節の実験結果に基づき、二重ノズルを試作し、その切断品質を検証した。図5・10には試作した二重ノズルの概要を示す。内側ノズルの径は $\phi 2.0\text{ mm}$ であり、その外側に 0.4 mm 幅のスリットを放射状に配置してある。内側ノズルと外側ノズルの位置関係は任意に設定でき、本実験では、内側ノズル先端に対し、外側ノズル先端を 2 mm 突出させた。内側ノズルからの酸素ガス流量は 60 l/min 、外側ノズルからの酸素ガス流量は 100 l/min である。図5・11には、この二重ノズルを用いて板厚 12 mm のSS400を切断したときの切断面と切断部裏面の写真を示す。焦点位置は $Z = 0\text{ mm}$ から $+3\text{ mm}$ の範囲で、切断面にピッチの小さなドラグラインがならび、良好な切断面品質が得られる。切断部裏面には $Z = 0\text{ mm}$ で若干のドロス付着がみられるが、 $Z = +1\text{ mm}$ から $+3\text{ mm}$ の範囲ではドロスの付着は起きていない。以上の結果は前節のサイドノズルから酸素ガスを噴出させた加工結果とほぼ同等である。図5・12には、 $Z = 0\text{ mm}$ の条件で外側ノズルからのシールドガスに窒素ガスを 100 l/min 流した切断結果を示す。切断部裏面にはドロスが多量に発生しており、図5・7に示したサイドガス無しでの切断と同じ結果が得られた。この結果は外側ノズルからの窒素ガスが内側ノズルからの酸素ガスの巻き込まれ、酸素濃度の低下によって切断品質が劣化したことを示唆する。以上のことから、厚板切断時のドロスの発生要因として切断部への周囲ガスの巻き込みによる酸素アシストガス濃度の低下が考えられ、その改善策として二重ノズルの採用が有効であることがわかる。

厚板を安定して切断するためには、良好な切断品質が得られる加工条

件裕度の広いことが必要である。図5・13には板厚12mmのSS400をドロス付着がほとんど無く、かつ切断面粗さが良好に切断できるレーザー出力と切断速度の関係を示す。図中の○は切断面品質が良好でドロス付着の少ないもの、×は切断面粗れの著しいもの、△は切断面は良好であるがドロス付着の多いものを示す。(a)は一穴ノズル、(b)は二重ノズルによる切断結果である。レーザー出力と切断速度以外の加工条件パラメータはすべて同一とした。二重ノズルによる条件裕度は、一穴ノズルによる裕度に対し大幅に増加している。また、一穴ノズルによる切断では、良好な切断品質の得られる最大切断速度は1100mm/minであり、さらに速度を増加させても、良好な品質を得るための出力と切断速度の関係は存在しなかった。二重ノズルによる切断では、最大1500mm/minの速度でも良好な加工品質が得られた。図5・14は、一穴ノズルと二重ノズルを用いて出力3000Wと速度1500mm/minで加工したときの切断面の拡大写真である。上部切断面はノズルの違いによる差はほとんどみられず、ドラグラインのピッチは細かく、面粗さの良好な品質が得られた。切断面の中央部から下部にかけての面粗さは、一穴ノズルによる加工では大幅に悪化しているが、二重ノズルによる加工では良好な品質が得られた。以上のように、厚板の切断速度を増加させる場合には、加工部の酸素ガスによるシールド性を向上させることで大幅な能力向上の図れることが明らかである。

Number	$\phi d(\text{mm})$
01	1.5
02	2.0
03	2.5

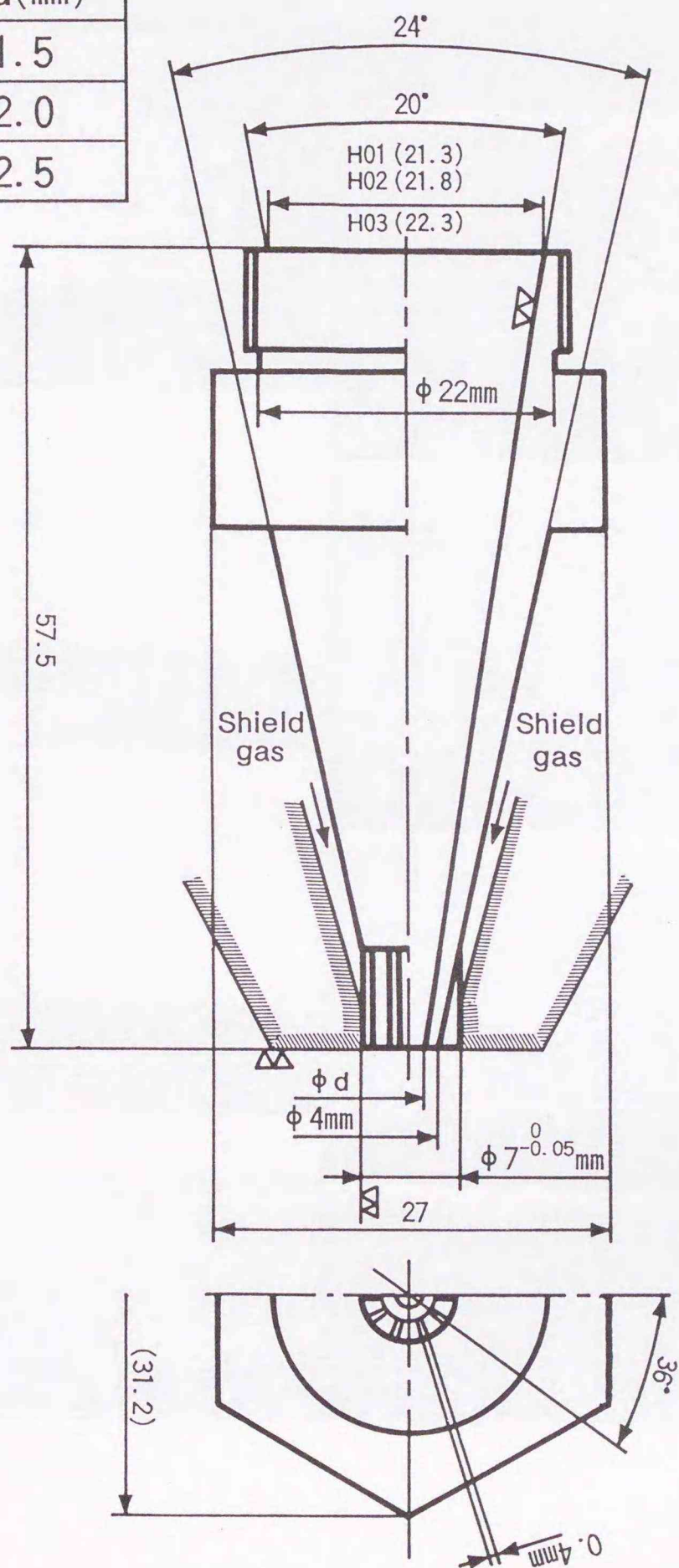
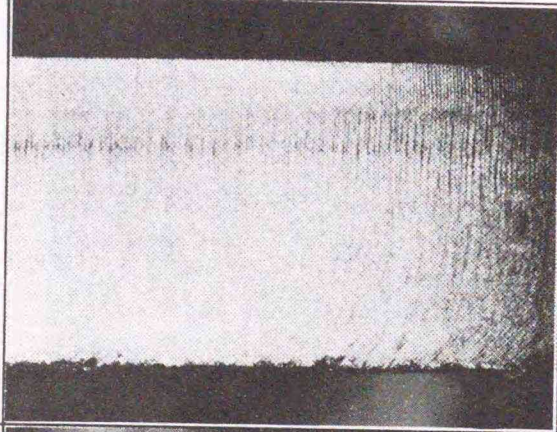
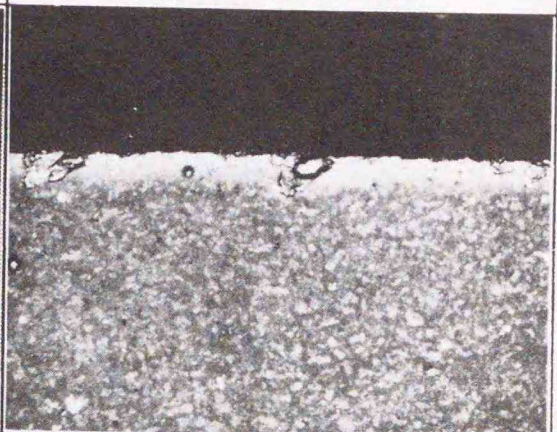
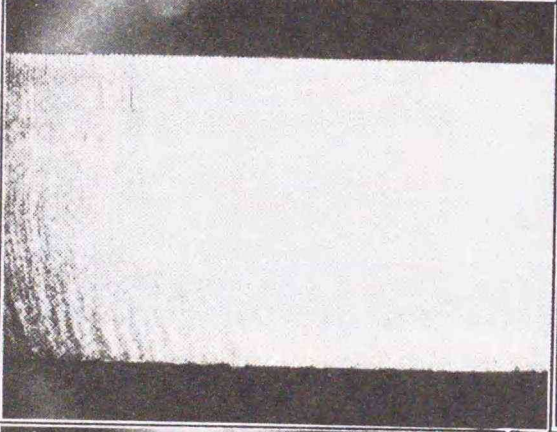
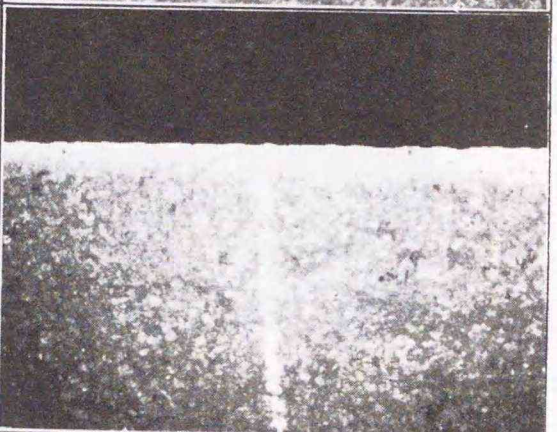
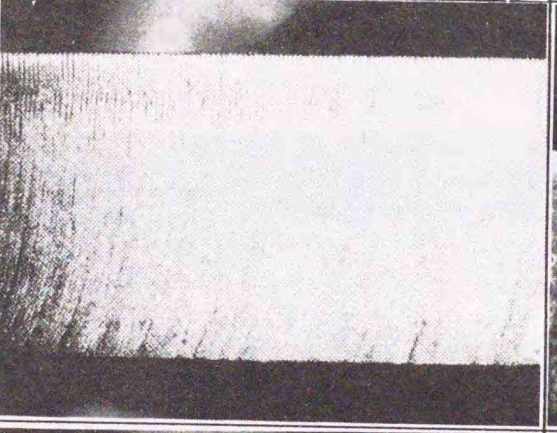
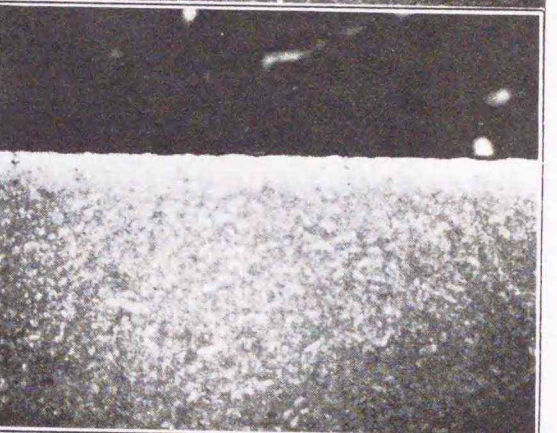
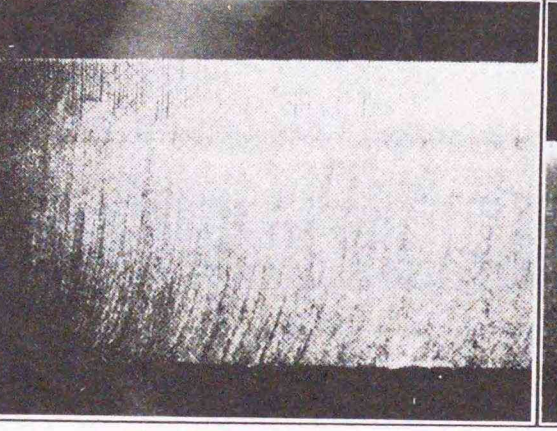
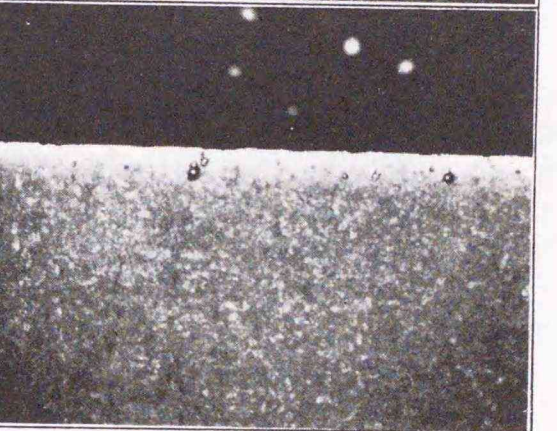
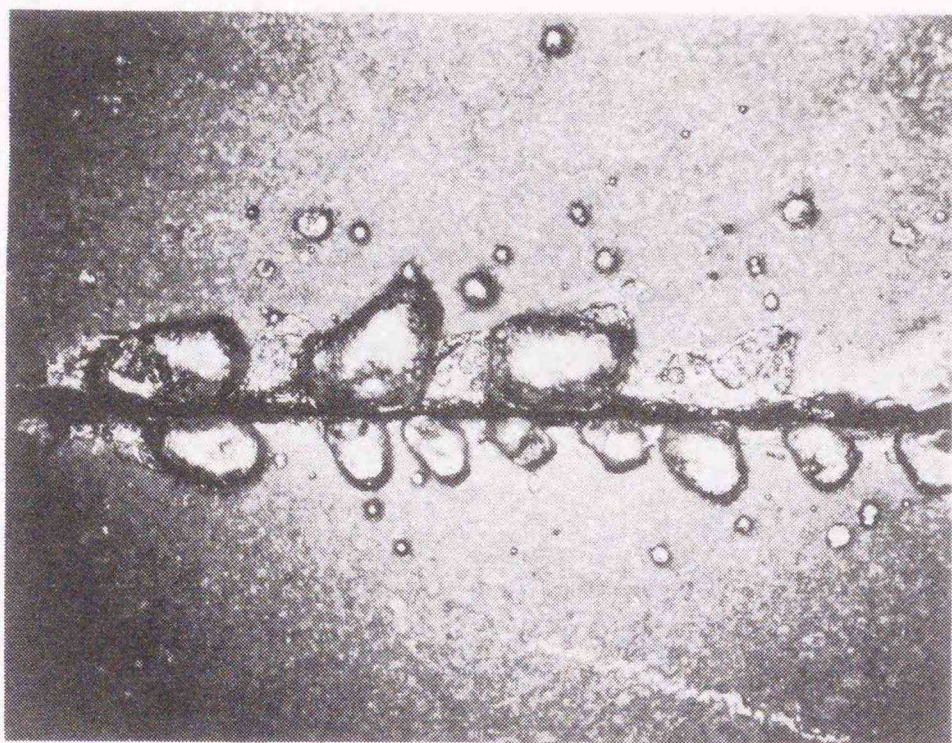


図 5 ・ 1 0 試作二重ノズルの概略図

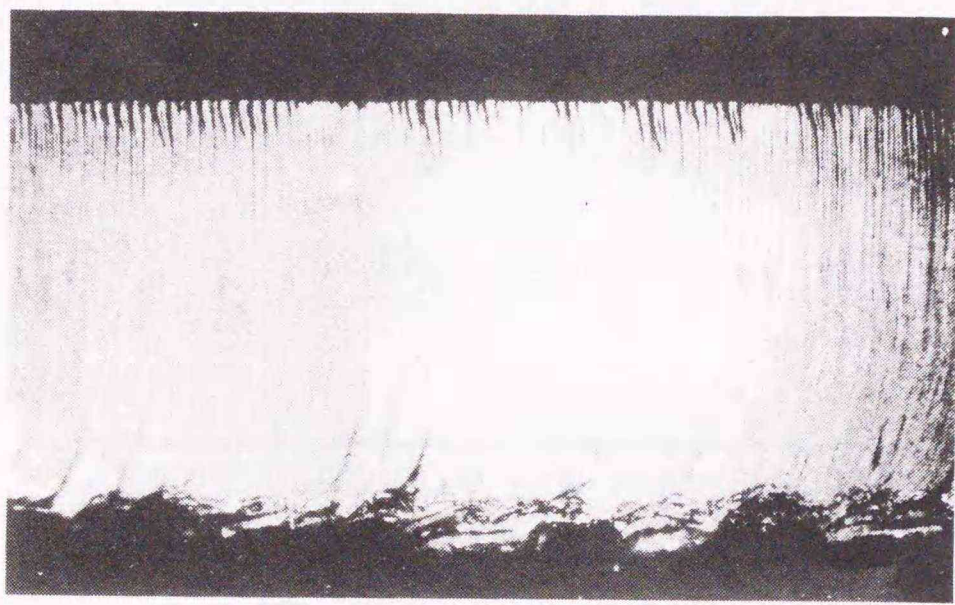
Focal point (mm)	Double nozzle	
	Cutting surface	Back side surface
Z=0		
Z=+1		
Z=+2		
Z=+3		

Material: SS400, Thickness: 12mm, Power: 1400W, Pulse frequency: 1300Hz, Pulse duty: 55%, Cutting speed: 800mm/min, Assist gas: O_2 , Gas pressure: 50kPa, Focal length f : 190.5mm,

図 5・1・1 二重ノズルによる切断サンプル



(a) 切断部裏面

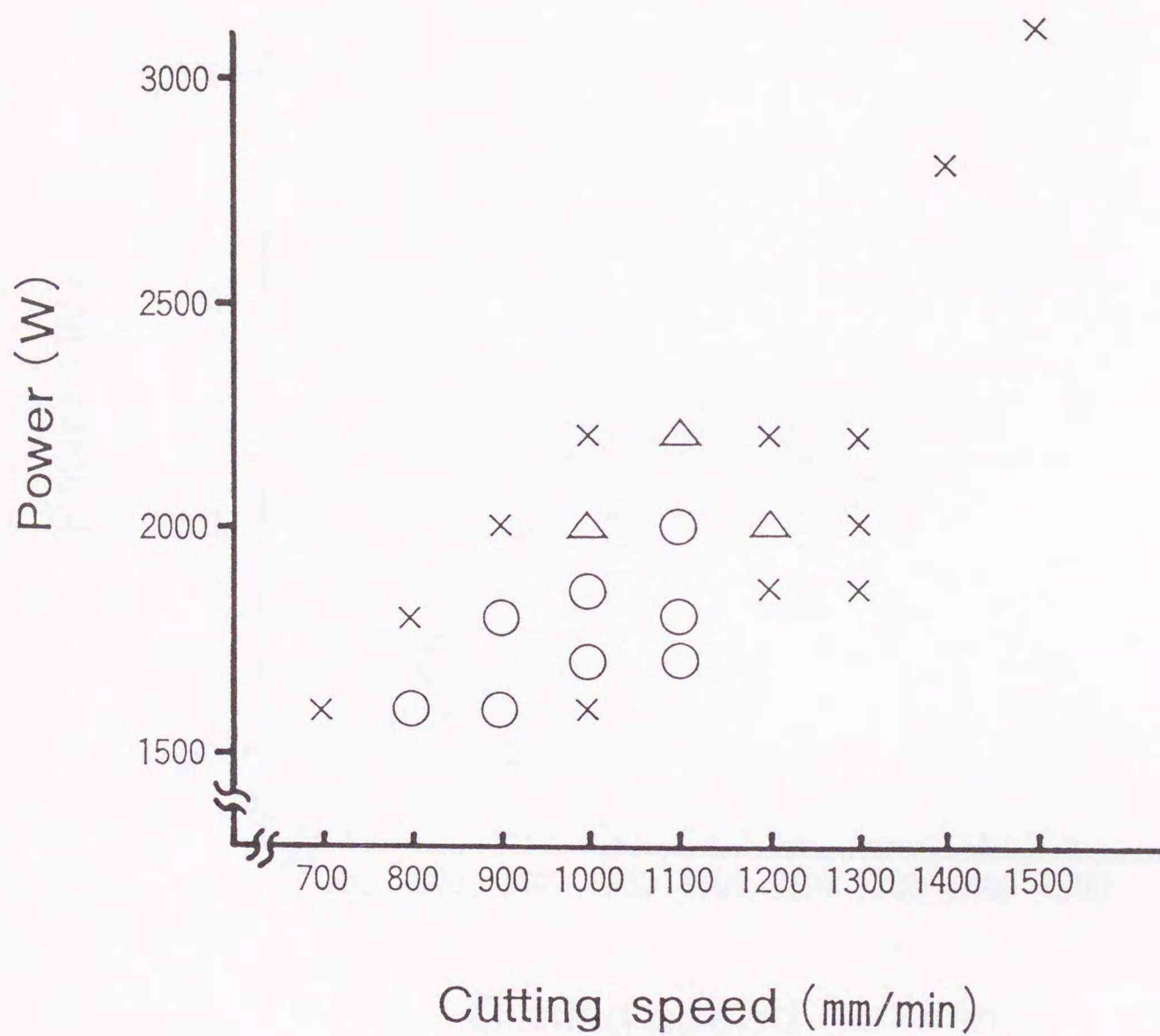


(b) 切断面写真

Material: SS400, Thickness: 12mm, Power: 1400W, Pulse frequency: 1300Hz, Pulse duty: 55%, Cutting speed: 800mm/min, Assist gas(in side): O_2 , Assist gas(outside): N_2 , Inside gas pressure: 50kPa, Focal length: 190.5mm, Focal point Z: +2mm

図 5 ・ 1 2 外側ノズルより窒素ガスを噴出し切断したサンプル

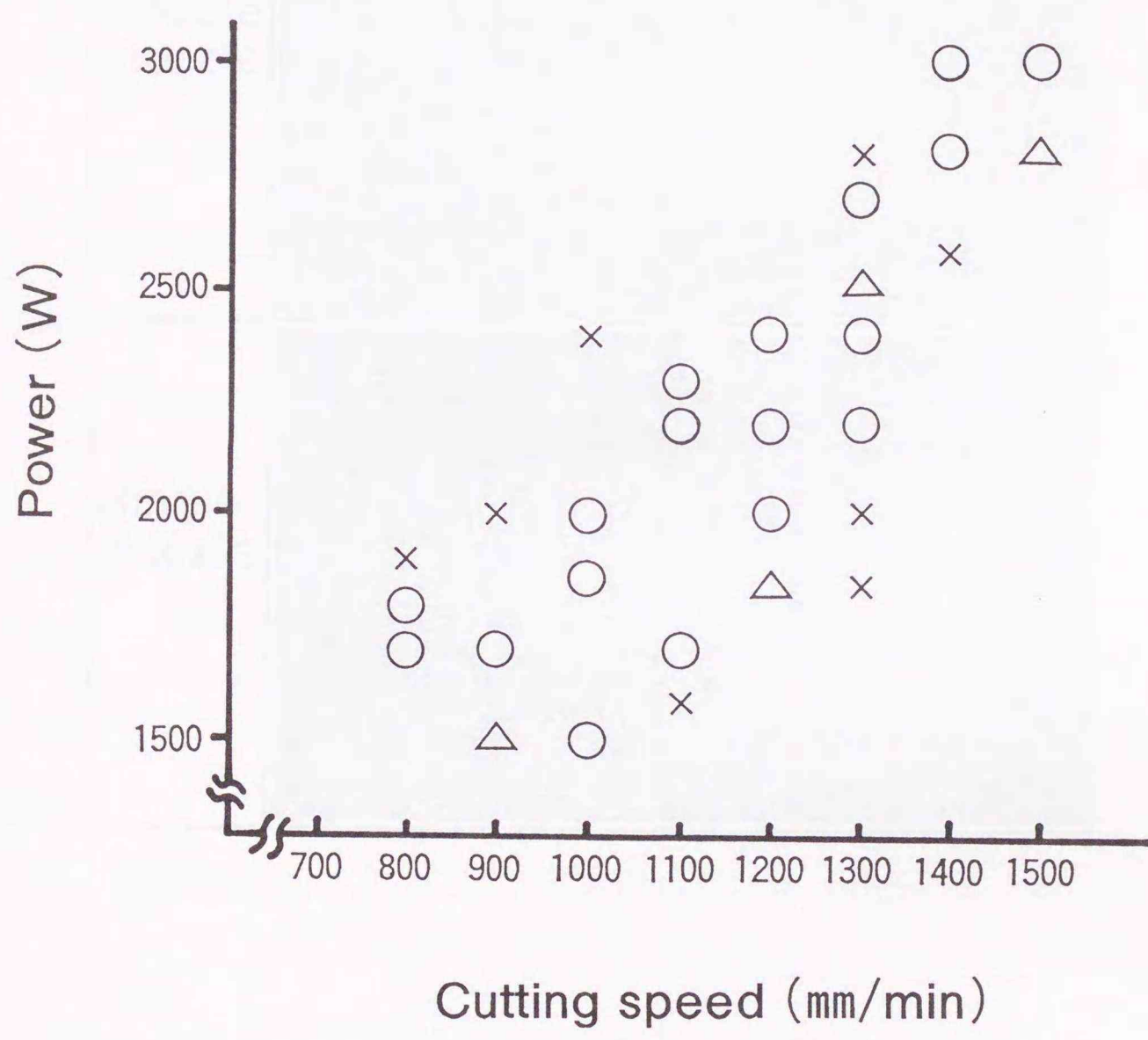
Material	SS400
Thickness	12mm
Focal length	254mm
Focal point	+1mm
Gas pressure	60kPa



(a) 一穴ノズルによる切断結果

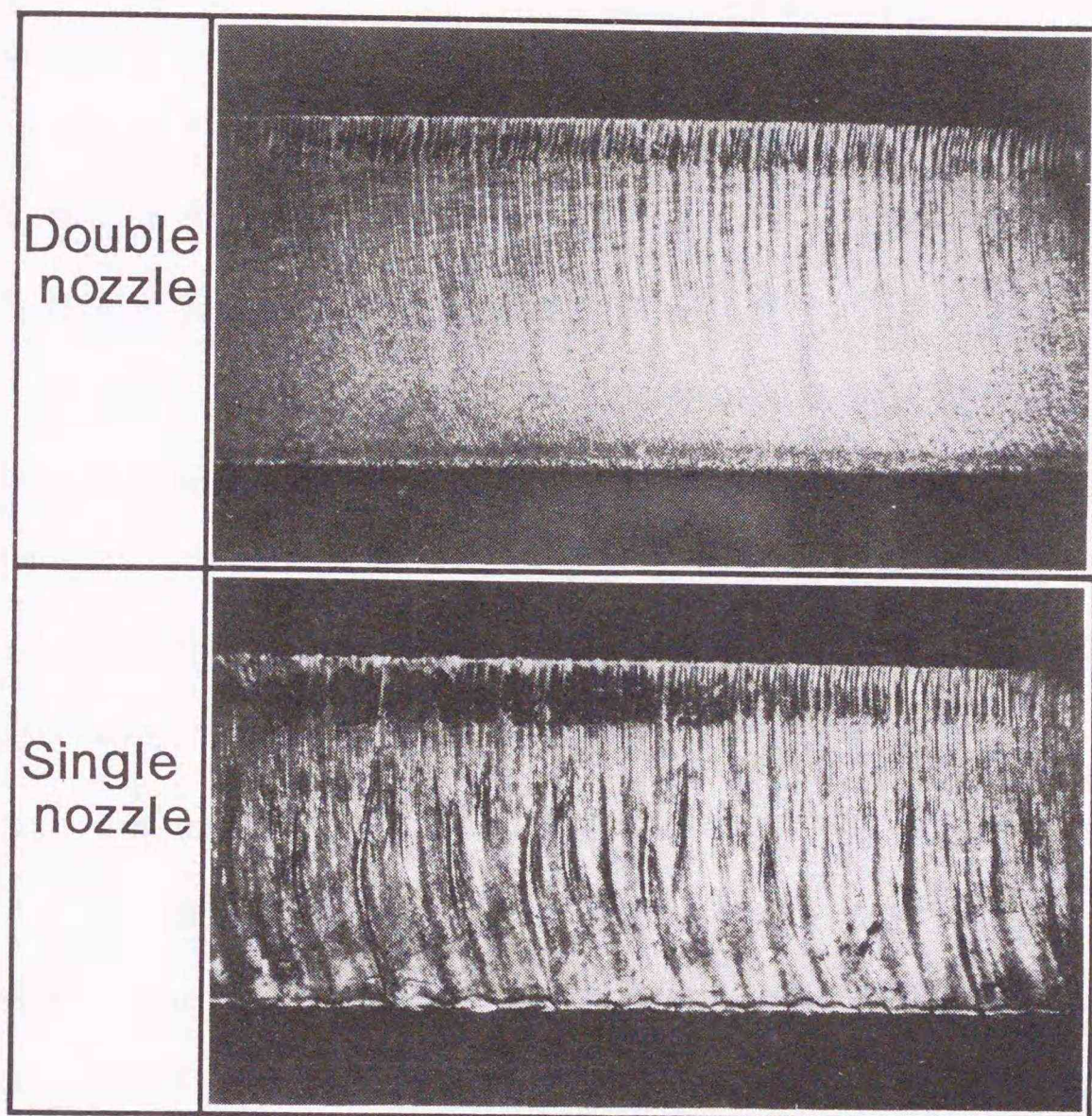
図 5 ・ 1 3 レーザ出力と切断速度の関係

Material SS400
 Thickness 12mm
 Focal length 254mm
 Focal point +1 mm
 Gas pressure 60kPa



(b) 二重ノズルによる切断結果

図 5 ・ 1 3 レーザ出力と切断速度の関係



Material: SS400, Thickness: 12mm, Power: 3000W(CW),
Cutting speed: 1500mm/min, Assist gas: O_2 , Gas pressure
: 50kPa, Focal length: 254mm, Focal point Z: +1mm

図 5 ・ 1 4 最大切断速度での切断面

5・4・3 切断品質の改善現象の検討

図5・15には、出口直径が1.5 mmと2.0 mmの一穴ノズルと、内側径1.5 mmで外側径5 mmの二重ノズルから噴出するガス状態をシュリーレンにより観察した結果を示す。アシストガス圧はいずれの場合も80 kPaで実施した。直径が1.5 mmの一穴ノズルでは、ノズル出口から約2 mmの長さに脈動の発生している状態が観察できる。直径が2.0 mmの一穴ノズルでは、この脈動の発生が消滅している。いずれの一穴ノズルの場合もノズル先端から離れるほどアシストガス流速（密度）の飽和する状態が観察できる。軟鋼材料の厚板の切断では、図5・8に示す一穴ノズルでの結果のように、ノズル直径が $\phi 1.5$ mmよりも $\phi 2.0$ mmでの加工において良好な品質が得られるのは、上述したアシストガス脈動の少ないことも要因として考えられる。二重ノズルからの噴出ガスの状態では、ガス流れ状況がほとんど観察できないほど流速が低下している。軟鋼の厚板切断において、加工部での酸素ガス濃度の低下が原因と思われる加工不良に、サイドノズルや二重ノズルによる酸素ガスシールドの効果の大きいことを前節までに示した。以下には、この酸素ガスシールドによる切断品質改善のメカニズムについて考察する。

図5・16は一穴ノズルと二重ノズルによる切断溝内におけるAirの巻き込み状態を模式的に示したものである。切断部前面（Cutting front）は、切断方向（ビームの進行方向）に対して後方に遅れるように生じる。これは、レーザビームの照射位置である被加工物表面が燃焼の発火点になり、その後、酸化発熱反応が板厚下部方向に押し下げられることに起

酸素ガス濃度は極めて重要である。図中（a）の一穴ノズルでは、板厚下部ほど切断部前面の遅れがノズルから噴出した酸素ガスのシールド範囲から外れやすくなる。一方、（b）の二重ノズルでは外側ノズルからの酸素ガスは、切断部前面の遅れる領域をシールドする効果を持つ。さらに、5・4・1、および5・4・2節で酸素ガスシールドの効果が特に大きいと確認されたのは、焦点位置裕度、ノズル径裕度、適正出力・速度の条件裕度の拡大などである。これらはすべて、（c）に示すように切断部前面の遅れがノズル径に対し大きくなる切断現象に関するものである。切断部前面の遅れ領域へのAirの巻き込みをできるだけ少なくすることが切断品質の向上につながり、かつ、遅れ領域が大きくなる加工に対し二重ノズルの効果の大きくなることが予想できる。

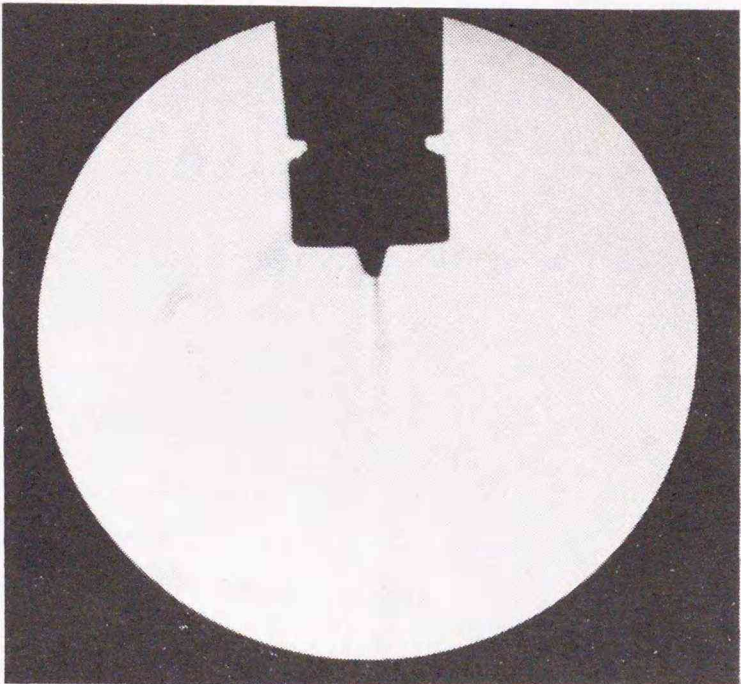
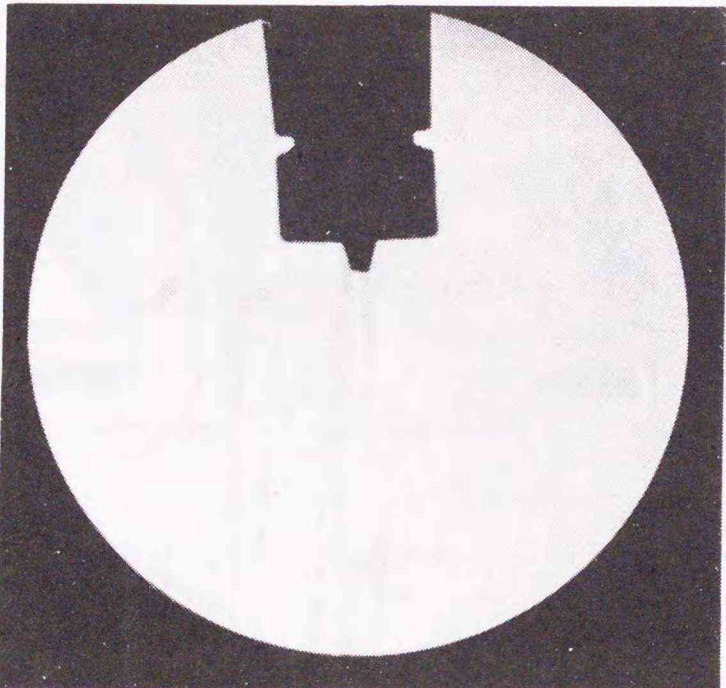
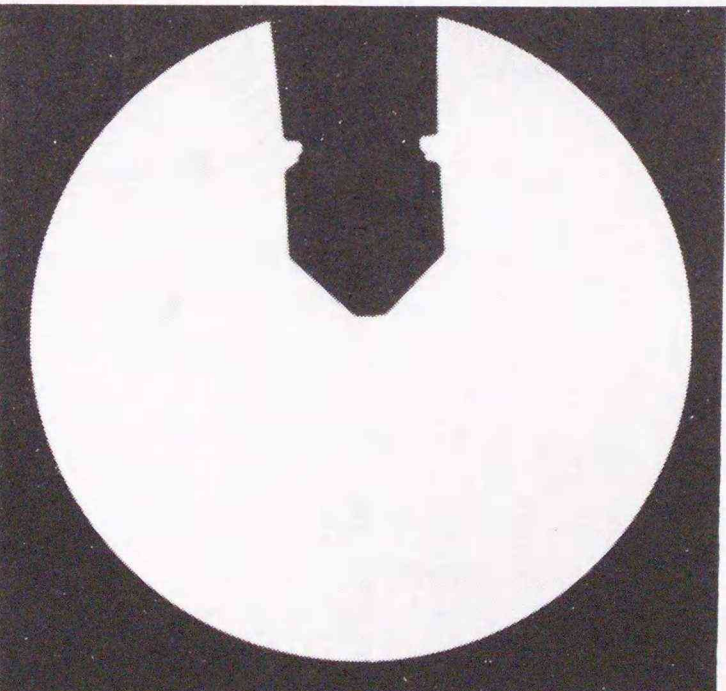
Nozzle	Gas flow
$\phi 1.5 \text{ mm}$ (Single)	
$\phi 2.0 \text{ mm}$ (Single)	
$\phi 1.5 \text{ mm}$ (Double)	

図 5 ・ 1 5 ノズルより噴出するガスの観察

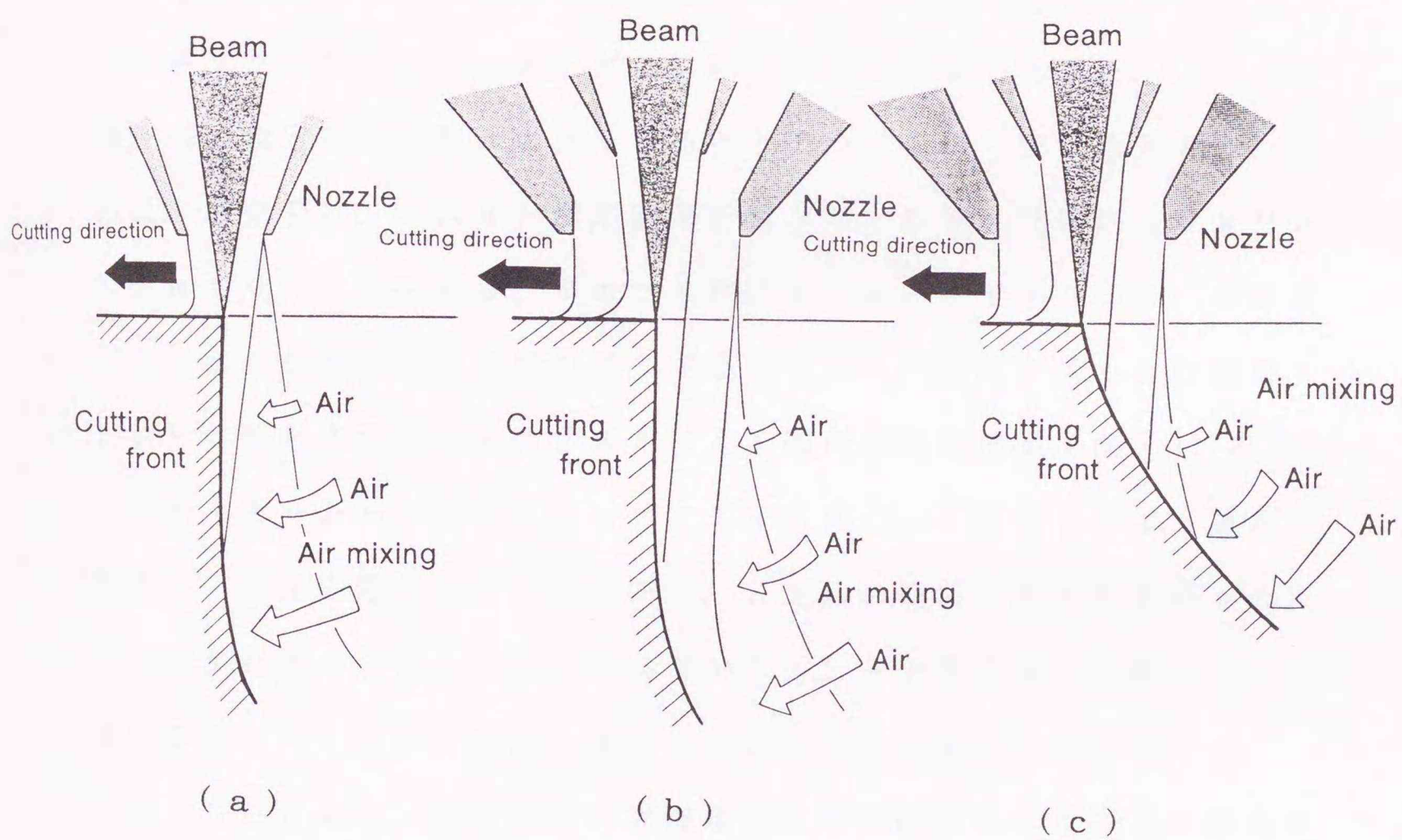


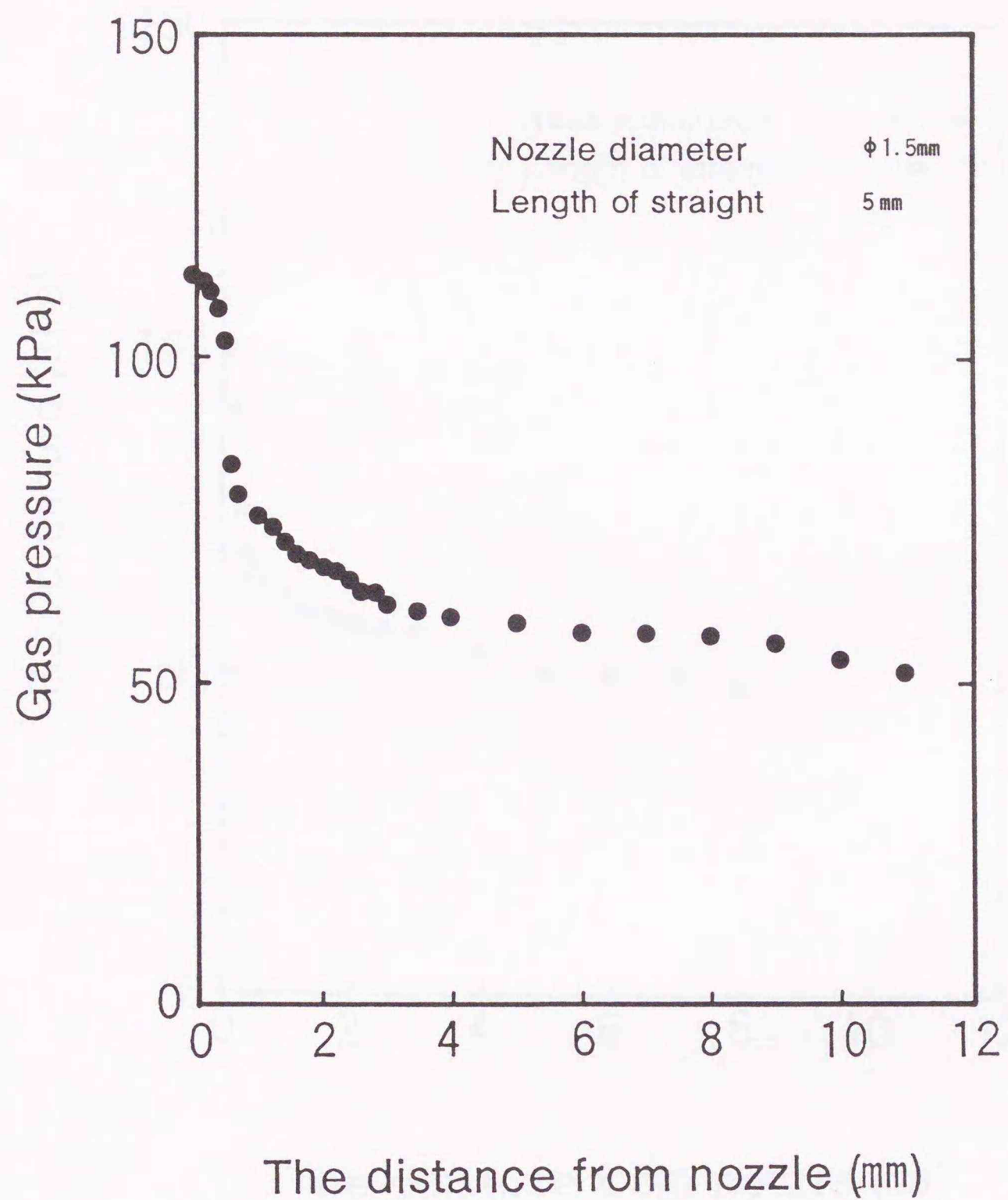
図 5 ・ 1 6 厚板切断での二重ノズルの効果の説明図

5・5 アシストガス圧の影響

5・5・1 ノズル直下のアシストガス圧の測定

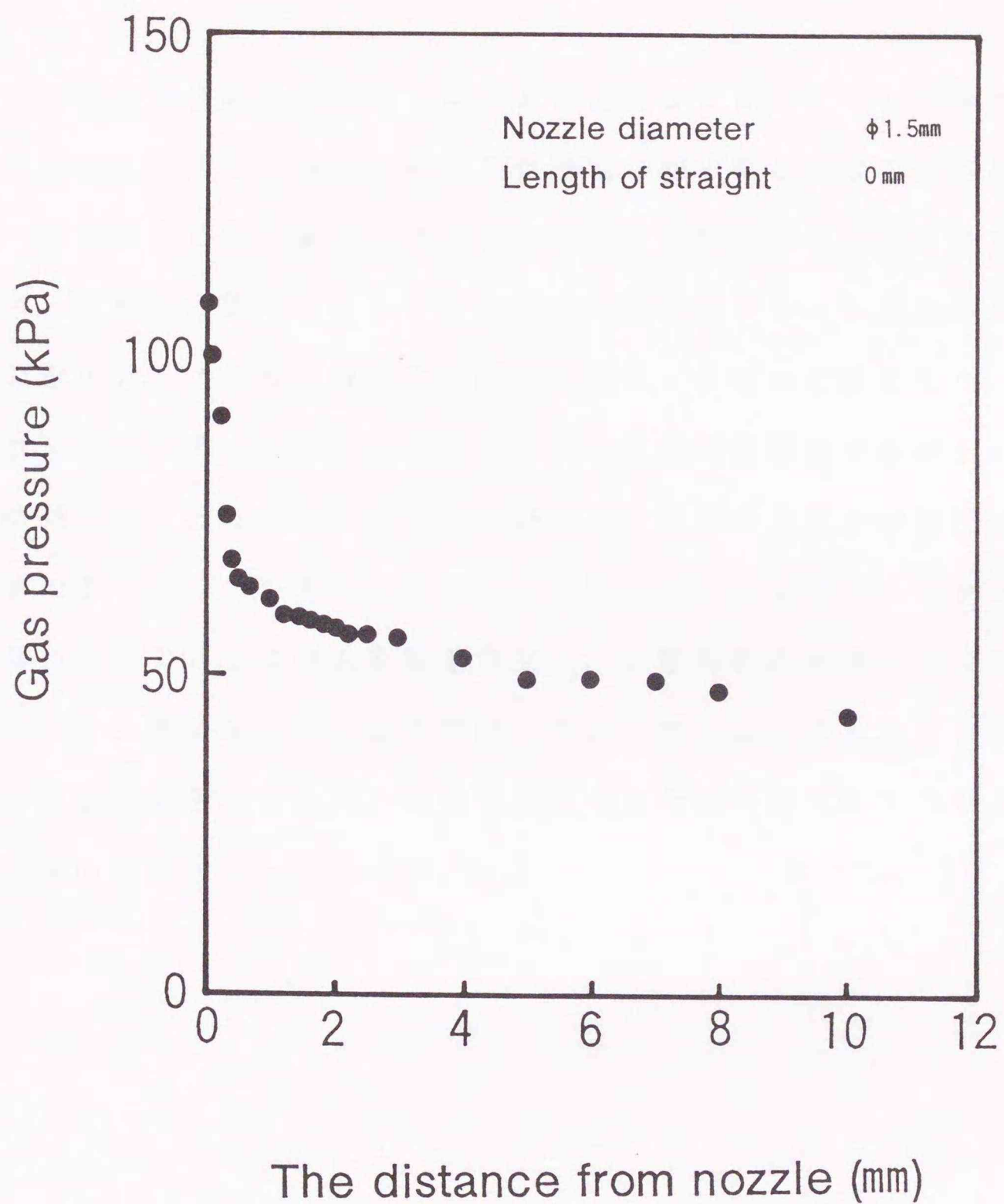
図5・17の(a)は被加工物の無い状態での出口径1.5mmのノズル直下における動圧分布の測定結果である。アシストガスのノズル内圧力は出口が開放の状態、100kPaである。圧力計の測定部をノズルに密着させた状態でのアシストガスは約110kPaであった。ノズル先端と圧力測定部の距離が大きくなるほどアシストガス圧は低下した。圧力低下の割合は、ノズルと測定部間距離が0.5mmでは約10kPa、1mmでは約35kPa、2mmでは約45kPaであり、0.5mmから1mmの間に急激な圧力低下が起きている。次にノズル出口部のストレート部長さが0mmのノズルによる動圧の測定結果を図5・17の(b)に示す。ストレート部が5mmのノズルに比べ、圧力低下はより顕著である。ノズル先端と圧力測定部が0.5mmの間隔で約45kPaの圧力低下が起きている。ノズル出口部のストレート長さは、切断溝内の通過するアシストガスを高圧に保つことを示している。

以上のことより、粘性の高い熔融金属ほど切断溝外へ効率よく排出する加工では、ノズルと被加工物間距離を0.5mm以内に設定することと、ノズル出口にストレート部を設ける必要がある。アシストガスにエアや窒素ガスを用いる切断を良好に行うためには、切断溝内のアシストガス圧を高圧に保つ必要があり、上記結果の採用が重要になる。



(a) ストレート部長さ 5 m m

図 5 ・ 1 7 ノズル直下の動圧分布



(b) ストレート部長さ 0 mm

図 5・17 ノズル直下の動圧分布

5・5・2 ドロス高さに及ぼすアシストガス圧の影響

図5・18には板厚3 mmのアルミニウム合金A5052をアシストガス圧を変化させて切断した場合の被加工物裏面に発生するドロス高さHを示した。焦点位置Zは、第2章で示したように切断溝幅を拡大させるために $Z = -3 \text{ mm}$ に設定した。ノズルは出口部のストレート長さが5 mmのものを用い、ノズルと被加工物間距離は0.5 mmに設定した。アシストガスにはエアーを使用した。アシストガス圧が増加するほどドロス高さは減少しており、とくにガス圧が50～200 kPaの範囲で減少は顕著であった。アシストガス圧力の高圧設定によるモーメントが、粘性の高い酸化アルミニウムを除去させる。切断面粗さも高いガス圧設定ほど良好な品質になった。ここでは、アルミニウム合金A5052についての実験結果を示したが、他のアルミニウム合金や純アルミニウムについても同様の傾向が得られた。

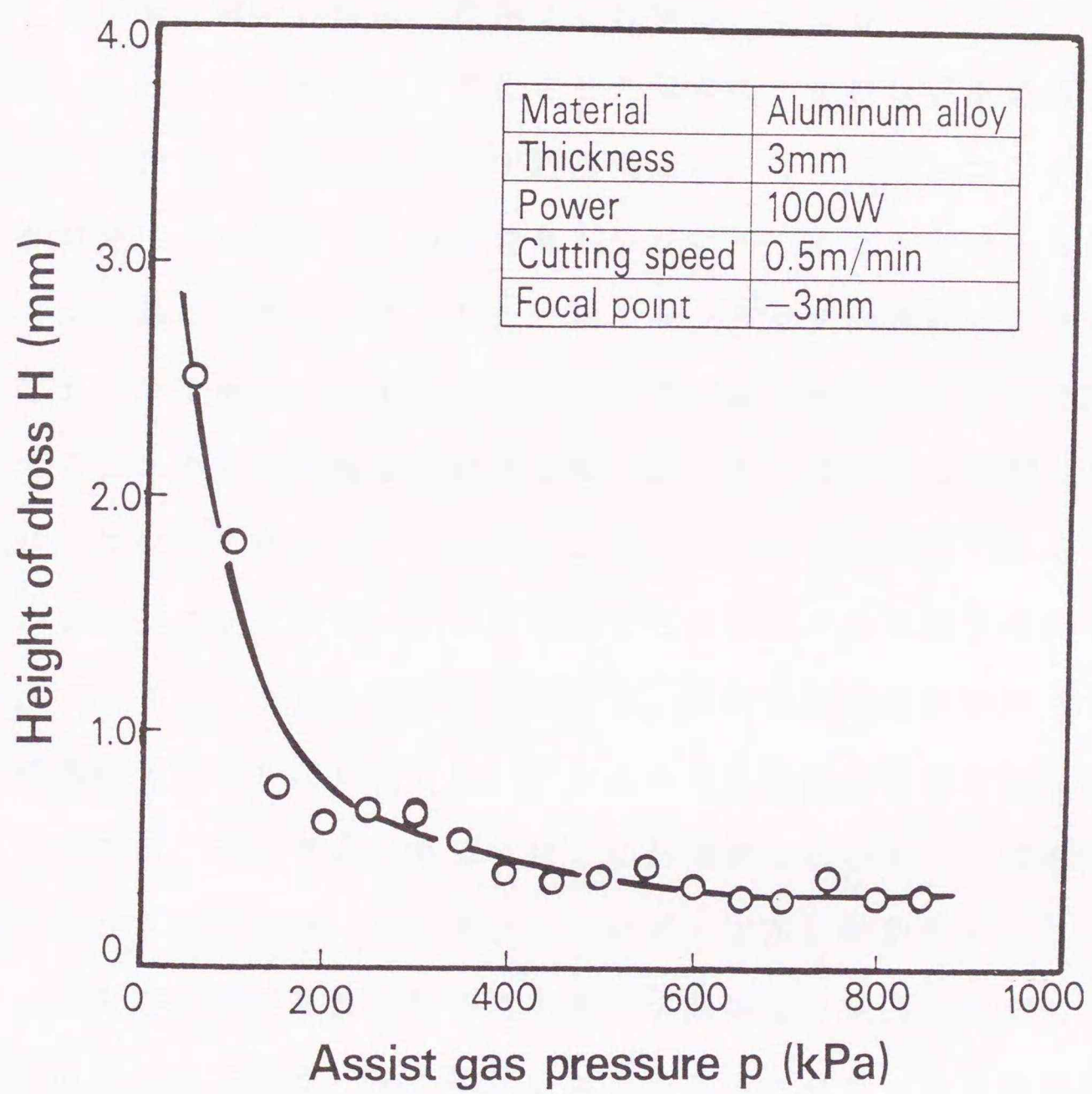


図 5 ・ 1 8 アルミニウム切断でのアシストガス圧とドロス高さの関係

5・5・3 軟鋼厚板の切断品質に及ぼすアシストガス圧の影響

板厚 6 mm 以上の軟鋼材料の CW 切断や高周波パルス切断では、ガス圧のわずかな変化でセルフバーニングの発生や切断部裏面にドロスが付着しやすくなる。図 5・19 には、板厚 12 mm の SS 400 をアシストガス（酸素）圧と上部切断溝幅を変化させた場合の、良好な切断品質が得られる条件範囲を示した。良好な切断品質とは、セルフバーニングやガウジングが発生せず、ドロスの付着量が少ないか、たとえ付着した場合でも除去が容易にできるものとした。加工レンズは焦点距離 f 190.5 mm と f 127 mm のものを使用し、焦点位置を被加工物表面より上方に変えることで切断溝幅を変化させた。図中の○は良好な品質、×はセルフバーニングまたはガウジングによって加工品質の著しく劣るもの、△はセルフバーニングやガウジングは起こらないがドロス発生量の多いものを示す。アシストガスの圧力に応じて、良好な切断品質の得られる適正切断溝幅（上部）が存在した。アシストガス圧の高いほど切断溝幅の狭いところに、逆にガス圧の低いほど切断溝幅の広いところに適正条件範囲が存在する。また、本実験結果ではガス圧が比較的低い 50 ~ 60 kPa で良好な切断品質の得られる適正切断溝幅の範囲は広がる。さらに実際の製品加工では、加工形状にエッジや小さなコーナ R などを含むことがあり、そのような加工では低ガス圧設定ほど溶け落ちが起きにくい。

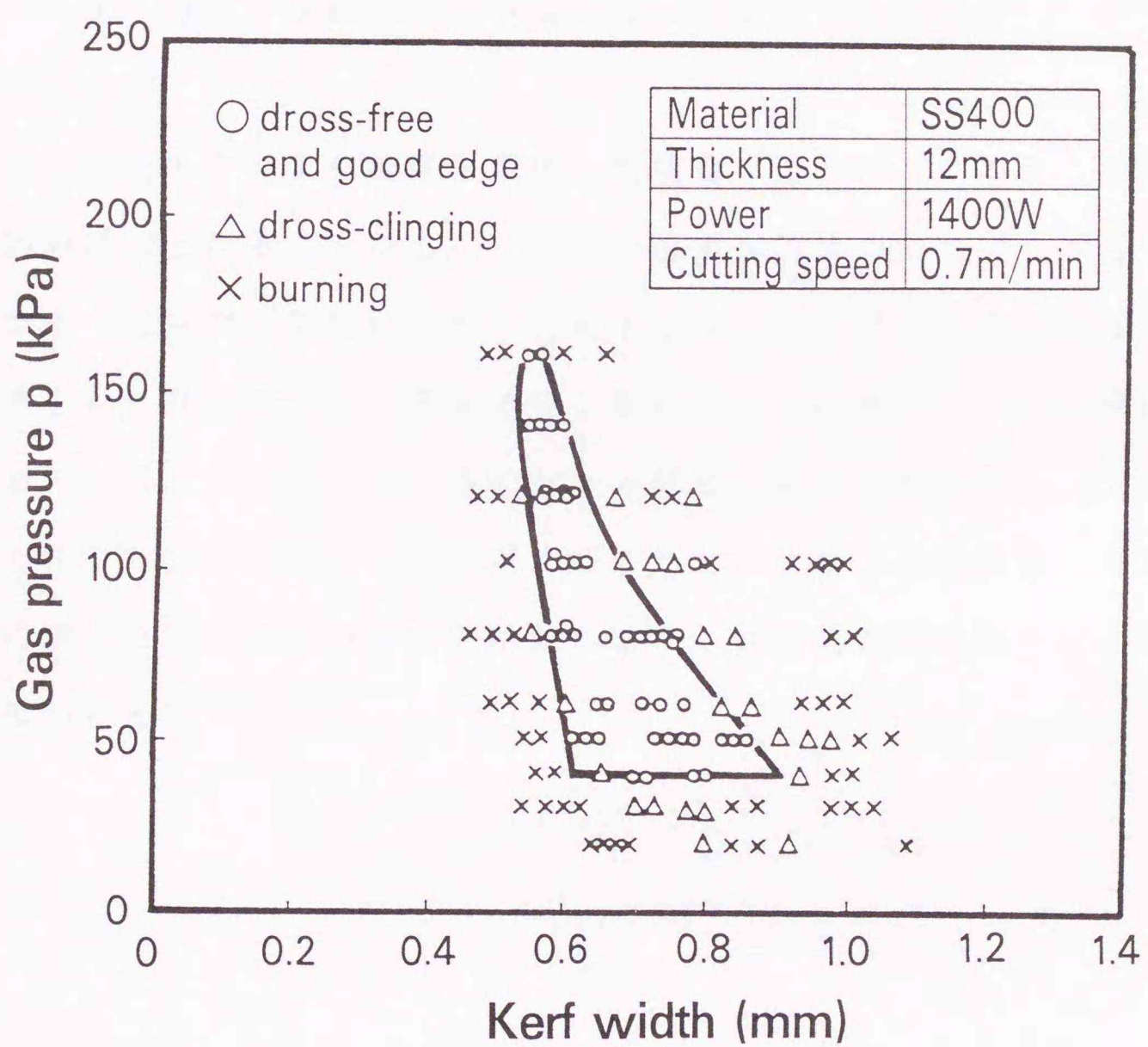


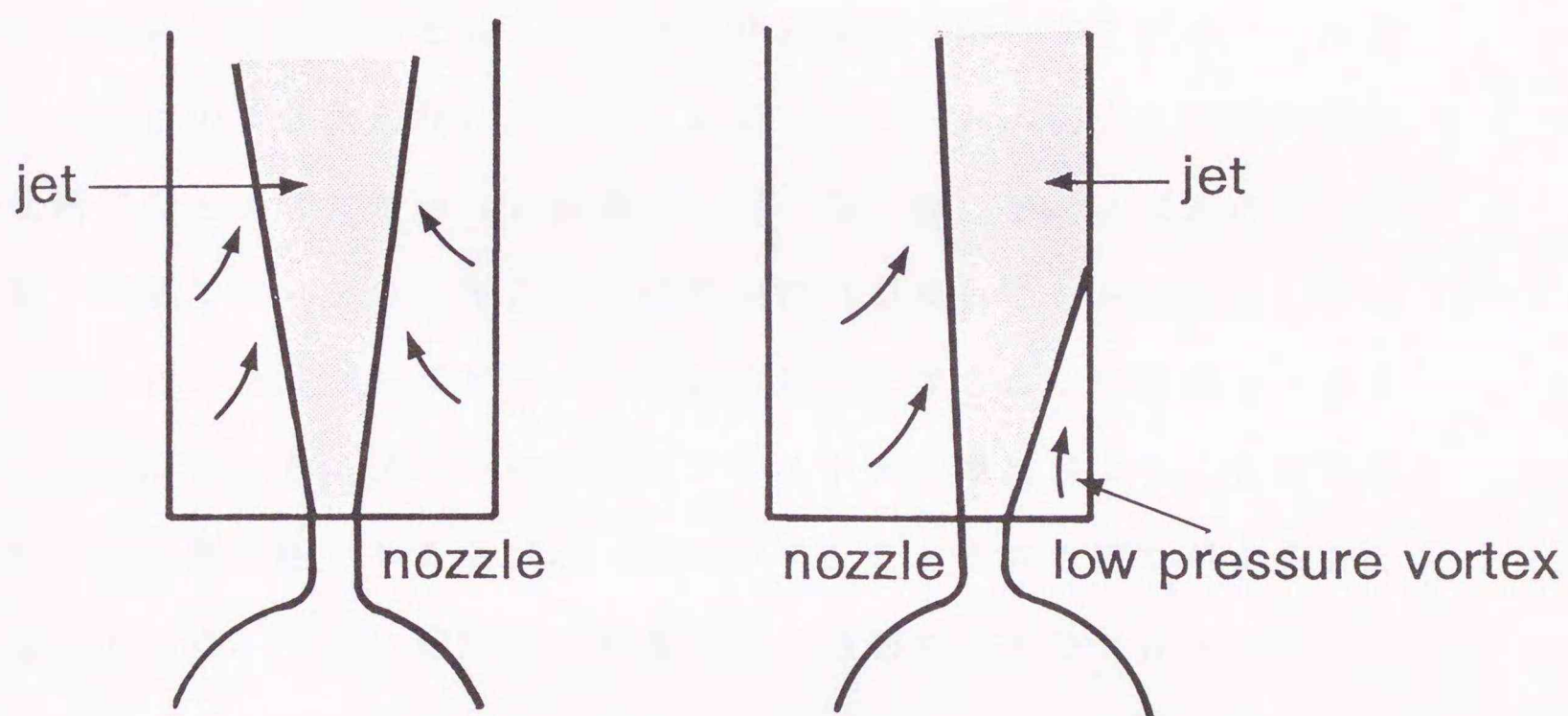
図 5 ・ 1 9 良好切断が可能なアシストガス圧と切断溝幅の関係

5・6 ノズルの芯ずれ

光軸とノズル中心とのずれは、加工不良を引き起こす最も顕著な要因である。この現象に関し、交叉噴流の原理に基づき考察する。

5・6・1 コアンダ効果 (Coanda effect)

一般に円筒の中心より流体を噴出した場合、図5・20 (a)のような対称的な制約噴流となる。しかし、ノズルの位置を円筒の中心よりずらすと、(b)のように片側の側壁に噴流が付着するコアンダ効果が発生する。この現象をレーザ切断の加工不良の発生原因に当てはめると、切断溝内を流れるアシストガスはノズル中心とレーザビームのずれに対し、ノズル中心のずれた側に酸素ガス噴流が片寄ることになる。その結果、ガス噴流の片寄った切断面への酸素供給量が増え、切断面の粗れが発生するものと思われる。



(a) 芯ずれのない場合

(b) 芯ずれのある場合

図 5 ・ 2 0 コアンダ効果

5・6・2 ノズル芯ずれと加工品質の関係

図5・21は、ノズル中心とレーザビームとに位置ずれを起こした状態で、板厚6mmのSS400を切断した結果である。直径2mmのノズルを使用し、ノズル中心に対するレーザビームの位置ずれ方向と加工でのビーム移動方向との関係は図中に示した。(a)は図中のx y座標でノズル中心より $(x, y) = (0.39\text{ mm}, -0.25\text{ mm})$ 、(b)は $(x, y) = (-0.1\text{ mm}, -0.58\text{ mm})$ の位置に集光ビームがある。加工形状は切断の方向と加工品質との関係を明らかにするために、対辺100mmの12角形状に、左回りに切断を行った。図中には被加工物の切断方向とノズル噴出口との関係を同一面に描いた。ノズルの芯ずれの無い状態では、どの切断方向も切断面粗れのないことを確認した後加工実験を行った。レーザビームの照射位置に形成される切断溝とノズル中心との関係から、ノズル中心側にアシストガス噴流がよることになる。図5・21の切断の粗くなる面(Bad face)がアシストガスの流れがよる側と一致している。一般に切断部に酸素ガスが過剰で起きるセルフバーニングは、レーザビームの進行方向に対し左右の切断面とも面粗れを起こすが、ノズル芯ずれによるBad faceの反対面には粗れは発生しなかった。

以上の結果から、ノズル芯ずれにより発生する切断不良は、レーザビームの照射により生じた切断溝位置とアシストガスの噴出中心とがずれることによって起きるコアンダ効果による偏りが原因であることが推定できる。コアンダ効果によって切断面へのアシストガス供給量が過剰になったことが切断面不良を招くと考えられる。

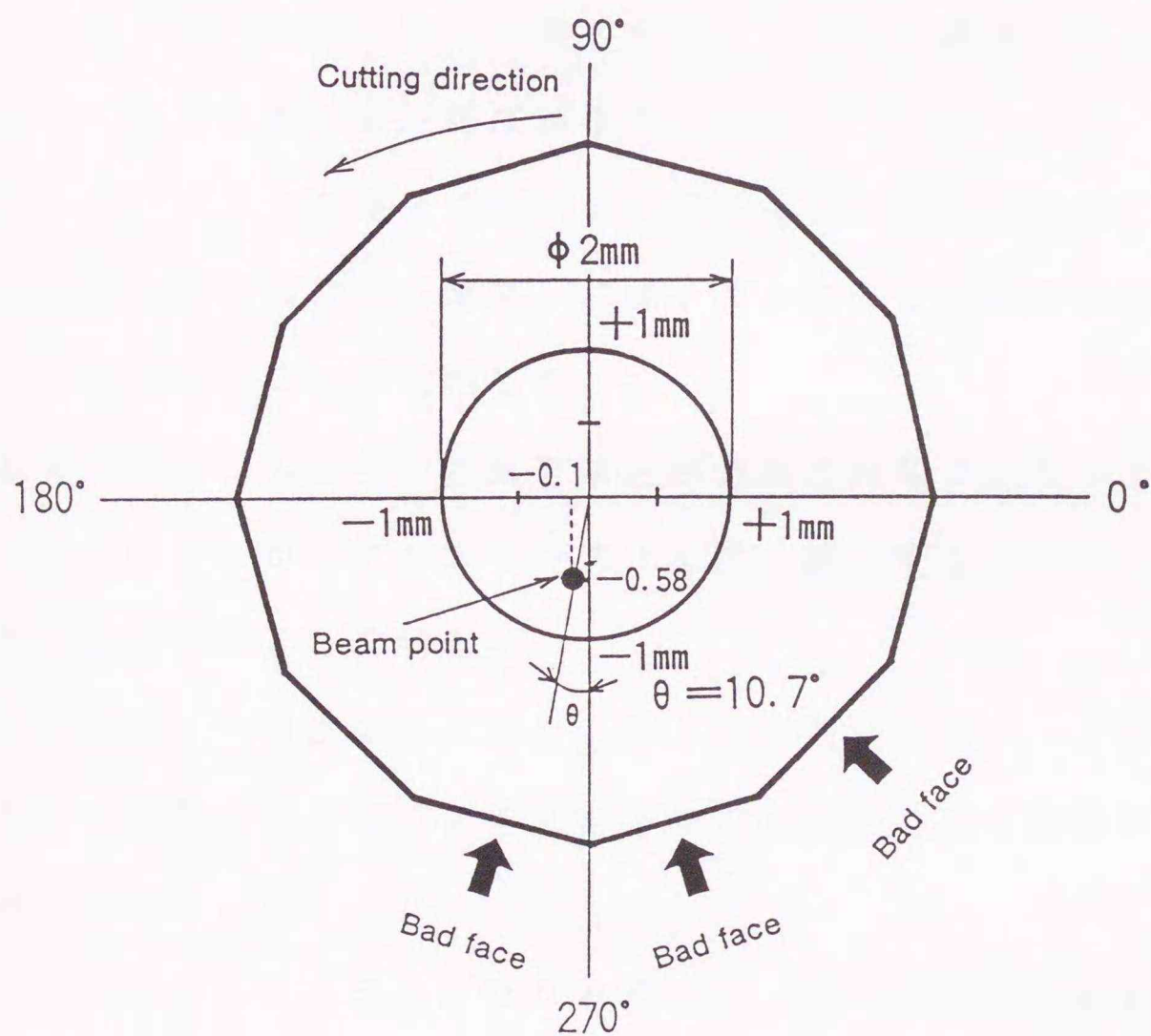
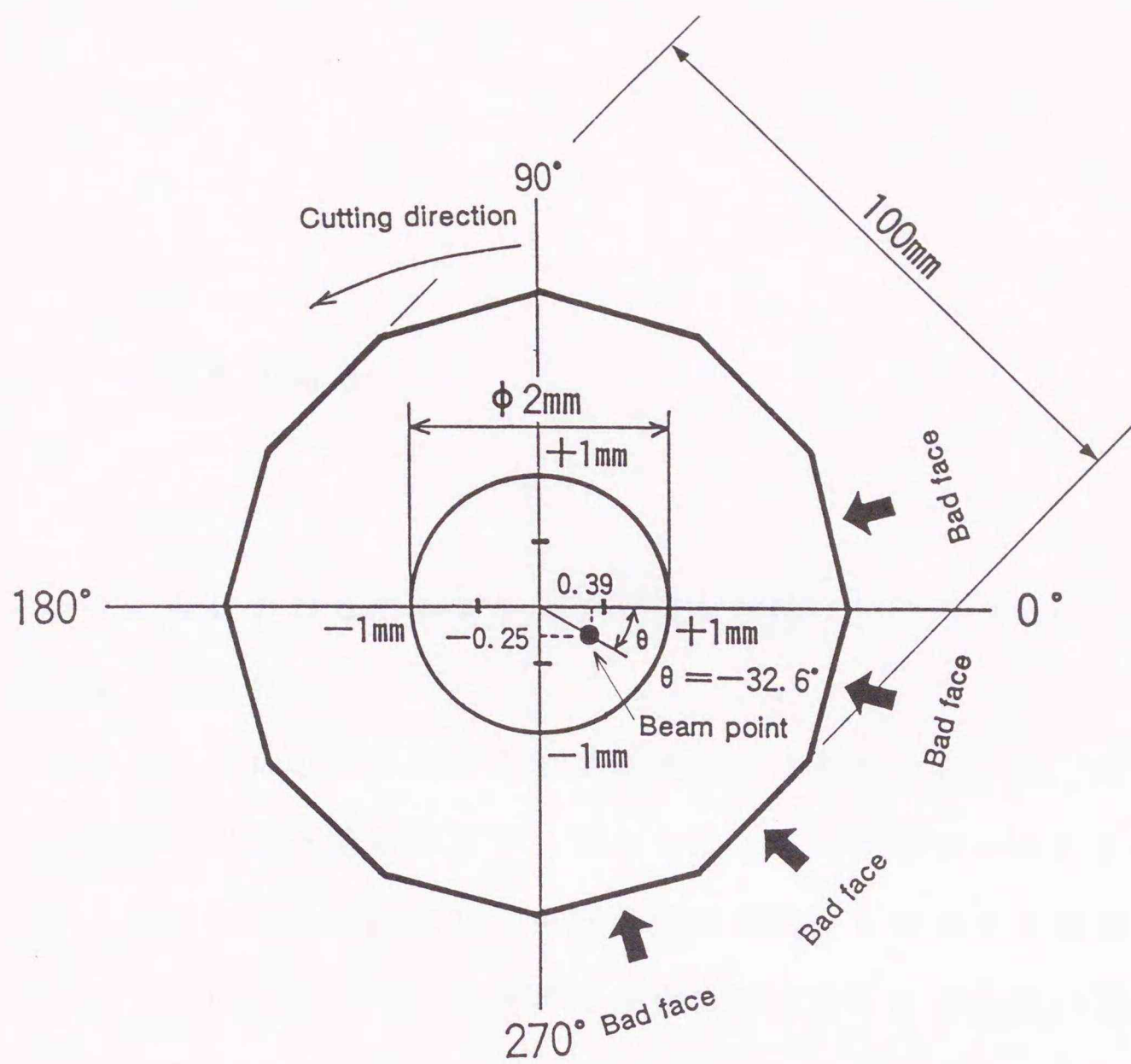


図 5 ・ 2 1 ノズル芯ずれと加工不良の関係

5・7 第5章の結言

レーザ切断におけるアシストガス状態の最適化に関する検討を行い以下の結果が得られた。

- (1) 板厚 12 mm の S S 4 0 0 の高周波パルス切断において、サイドノズルから噴出する酸素ガスでノズルと加工部周囲をシールドすることで加工品質の改善が図れた。良好な切断品質をもたらす各種加工条件パラメータの中で、ノズル高さと焦点位置およびノズル径の適正範囲が拡大した。
- (2) 二重ノズルを用いて、内側と外側ノズルより酸素ガスを噴出することで、焦点位置の設定裕度が拡大した。
- (3) 一穴ノズルと二重ノズルによる良好な切断品質が得られる出力と切断速度を求め比較した結果、二重ノズルによる切断での条件裕度が大幅に拡大することが判明した。
- (4) アルミニウム合金の切断では溶融金属の粘性が大きくドロスの付着が起きやすいが、アシストガス圧を高く設定することで、ドロス付着量の減少することを示した。
- (5) ノズルより噴出するアシストガス圧の測定を行い、ノズル出口のストレート部の長さが、ノズル直下のガス圧を高圧に維持するために効果的であること示した。
- (6) 板厚 12 mm の S S 4 0 0 を用いて、C W 切断におけるアシストガス圧の最適条件は上部切断溝幅によって大きく影響されることを示した。
- (7) ノズル芯ずれによって起きる切断面の粗れは、コアンダ効果によっ

て起きると予想される現象と一致した。

第6章 軟鋼薄板のレーザ切断における切断溝幅の推定

6・1 緒言

レーザによる切断精度は、切断溝上部幅と下部幅の差（テーパ度）、偏光度の影響を受けた切断溝の傾斜、切断面粗さなどの改善により大幅に向上してきた。さらに、レーザ切断の精度を高めるためにレーザ加工機の操作上の注意点として、加工形状の寸法公差を考慮したプログラムの作成が不可欠である。被加工物に照射されるビームのスポット径とその周囲に広がる酸化反応で広がる切断溝幅は、加工する形状寸法に誤差を生じさせる。通常は工具補正（オフセット）を用いて、切断溝幅の $1/2$ の値だけ加工プログラムに寸法補正が必要になる。本報告では薄板金属のレーザ切断における切断溝幅の推定に関する検討を行う。従来は切断条件パラメータのレーザ出力、焦点位置、焦点距離、加工速度などと切断溝幅との関係を明らかにする実験的検討や移動ビーム照射時の温度上昇特性と切断溝幅について多くの報告がなされている⁽⁸⁾⁽⁵⁰⁾⁽⁵¹⁾。しかし、熱伝導計算による解析では、そのほとんどが被加工物のビーム吸収率を照射ビームの加工への寄与割合として扱っている。ところが材料のビーム吸収率は材料の温度によって変化し、熔融状態になると急増し90%以上になることが示されている⁽⁵³⁾⁽⁵⁴⁾。そのため一定のビーム吸収率と出力の積を熱源として理論計算に適用することは正確な解析

にはならない。ここでは、レーザビームの切断への寄与割合をビームスポット面積と材料の溶融面積との割合から求める方法を取り上げ⁽⁵⁵⁾、実験結果との比較検討を行う。切断実験では、加工に寄与せず切断中に被加工物裏面から抜けるレーザ出力を実測し、切断速度および切断溝幅との関係を明らかにする。

6・2 実験装置および実験方法

本実験には定格出力1.5kWのSD励起式三軸直交型CO₂レーザー発振器を用いた。ビームモードはシングルモードであり、加工レンズ位置への入射ビーム径は約25mmであった。加工レンズには焦点距離が127mmのZnSe製のものを使用した。ノズルは出口直径が1.5mm、集束角は60°のものをを用い、レーザービームと同軸にアシストガスを噴射し、切断試料を移動させて切断を行った。切断時のノズル高さは1mm、アシストガス圧は200kPa（ノズル内圧）とした。アシストガスには酸素ガスとアルゴンガスの2種類を使用した。被加工物には板厚0.5mm～1.0mmの軟鋼（SPCC）を使用した。切断中に切断に寄与せず被加工物から下に抜けるレーザー出力の測定は図3.4のように、パワープローブとブロワを設置し実施した。切断時に下方向に排出される溶融金属は、ブロワによって垂直方向に飛ばし、パワープローブで溶融金属の熱量を検出しないように注意した。切断中に被加工物への照射出力をW_a、裏面から透過する出力をW_bとし被加工物のエネルギー利用率fは $f = (W_a - W_b) / W_a$ と定義する。

6・3 切断溝幅推定の計算結果

6・3・1 移動線熱源による熱伝導計算

薄板上へ照射されたレーザビームのスポットを移動線熱源と仮定し、アシストガスの影響がないとしてレーザ切断の現象解析を行った。照射された薄板上でのレーザビームのスポット半径を A とすると断面積は πA^2 であり、このスポットでは時間的にも空間的にもビームが均一であると仮定する。試料材料が $x-y$ 平面上を切断速度 v で x の正方向へ動くとする、加熱温度 $T(x, y, t)$ は $r \neq 0$ で次式で与えられる。

$$\exp\left(-\frac{vx}{2\kappa}\right) = \frac{2\pi K t T(x, y, t)}{P f K_0(rv/2\kappa)} \dots\dots\dots(6-1)$$

ここで r : レーザビームスポットの中心を原点とする極座標の動径
(cm)

P : 出力 (cal/s)

t : 板厚 (cm)

K_0 : 第2種変形ベッセル関数

K : 熱伝導度 (cal/°C·s·cm)

κ : 熱拡散率 (cm²/s)

f : 切断に使用される出力の割合

$$X = v x / 2 \kappa, \quad Y = v y / 2 \kappa, \quad R = v r / 2 \kappa, \quad S = v A / 2 \kappa$$

$$\dots\dots\dots(6-2)$$

とおき式(6-1)を無次元化すると、次式で表示される。

$$\exp(-X) = C / f K_0(R) \quad \dots\dots\dots(6-3)$$

ただし $X + Y = R$ 、

$$C = 2 \pi K t T_m / P \quad 、$$

T_m は試料材料の溶融点温度(°C)

融点以上に加熱された金属がすべて除去されたとすれば、照射出力のある割合 f だけが入熱に寄与すると考えられる。図6.1 は集光したレーザービームの照射状況と切断溝幅の形成状況を模式的に示している。除去面積 $A_1 + A_2$ は次式で示される。

$$A_1 + A_2 = 2 \int_{X_1}^{X_2} Y dX + S^2 \theta - \frac{S^2}{2} \sin 2\theta \quad \dots\dots\dots(6-4)$$

ただし $X_2 = \ln [C / f K_0(S)]$ 、 $\theta = \cos^{-1}(X_2 / S)$ 、

$$Y = (R^2 - X^2)^{1/2} = \{R^2 - [\ln(C / f K_0(R))]^2\}^{1/2}、$$

$dX = \{K_1(R) / K_0(R)\} dR$ である。

被加工物上でビームスポットの当たる部分は $\pi S^2 - A_1 - A_2$ であるので、

切断に使用される出力の割合 f は次式となる.

$$f = (\pi S^2 - A_1 - A_2) / \pi S^2$$

$$= 1 - \frac{\theta}{\pi} + \frac{\sin 2\theta}{2\pi} - \frac{2}{\pi S^2} \int_{R=|X|}^S \{ R^2 - [\ln(C/fK_0(R))]^2 \}^{1/2} \\ \times \{ K_1(R) / K_0(R) \} dR \quad \dots\dots\dots(6-5)$$

切断溝幅は融点に達する等温線の最大幅に一致するので式(6-3)から最大幅 Y_{max} を求めることができる. すなわち式(6-6)となる.

$$K_0[(X^2 + Y^2)^{1/2}] = [C \exp(-X)] / f \quad \dots\dots\dots(6-6)$$

この式を X について微分すると

$$\frac{-K_1[(X + Y)] (X + Y dX/dY)}{(X^2 + Y^2)^{1/2}} \\ = [-C \exp(-X)] / f \quad \dots\dots\dots(6-7)$$

最大値をもとめるために $dY/dX = 0$ とすると

$$[X K_1(R)] / R = [C \exp(-X)] / f \quad \dots\dots\dots(6-8)$$

$$[X K_1(R)] / R = K_0(R) \quad \dots\dots\dots(6-9)$$

$$X = R K_0(R) / K_1(R) \quad \dots\dots\dots(6-10)$$

$$K_0(R) = C \exp [-R K_0(R) / K_1(R)] / f \dots\dots(6-11)$$

と $Y = R \sin \phi$, $\phi = \cos^{-1} [K_0(R) / K_1(R)]$ から Y の
 最大値 $Y_{\max}$ は次式となる.

$$Y_{\max} = \frac{R}{K_1(R)} \sqrt{K_1^2(R) - K_0^2(R)} \dots\dots\dots(6-12)$$

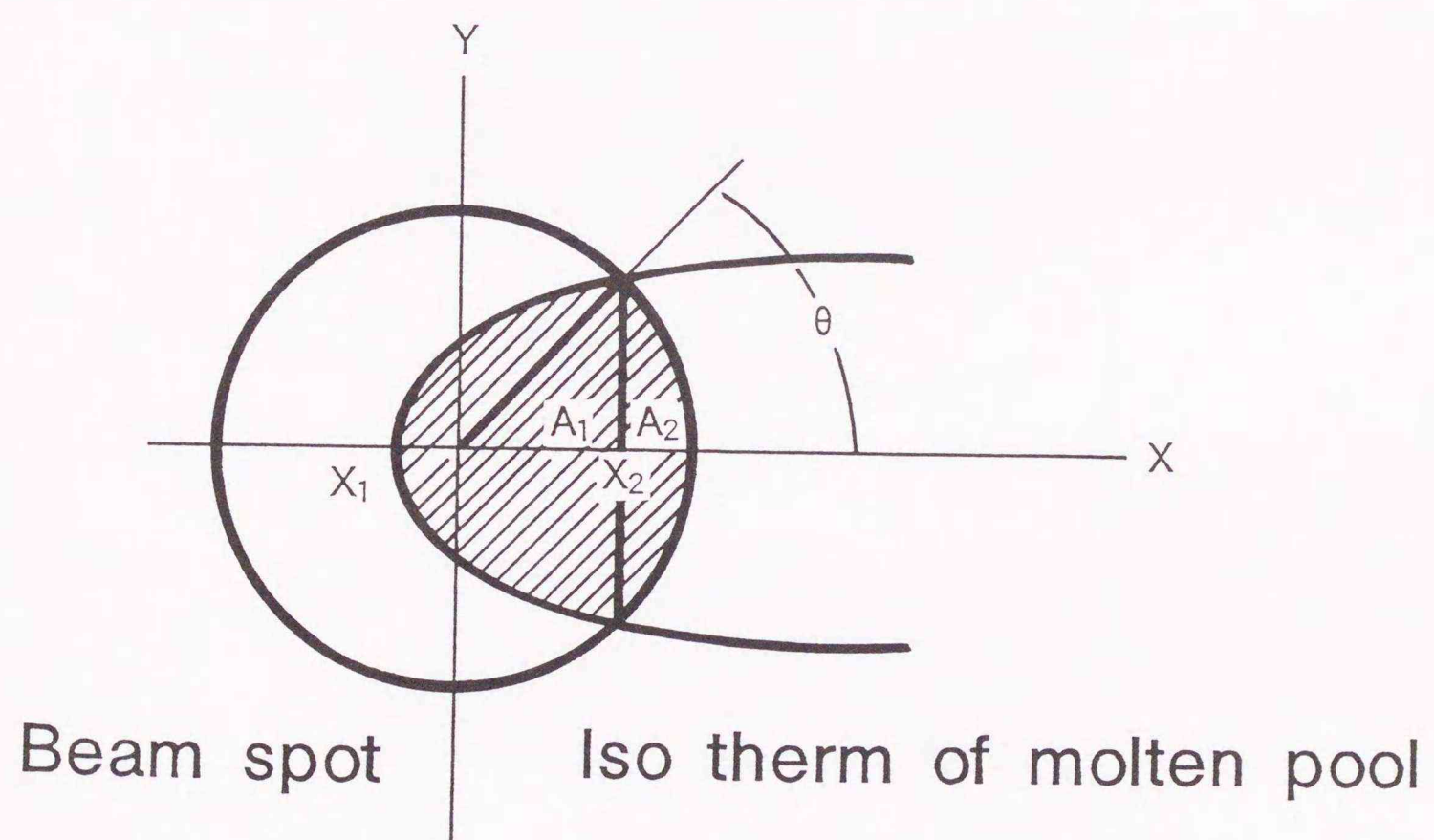


図 6 ・ 1 照射ビームと切断溝幅の関係

6・3・2 レーザ光のスポット径

本実験でのビームスポット径 A は第 2 章の 2・2 節で示した式 (2-1) で求めた結果、 $6.6 \times 10^{-3} \text{ cm}$ であった。

6・4 実験結果および考察

6・4・1 $Y_{\max}$ と S との関係

式(6-12)により、ある特定の C の値に対し $Y_{\max}$ と S の関係を図6・2に示す。 $C = 0.2$ では $Y_{\max}$ と S との関係にはほぼ比例関係があるが、 C が大きくなるほど S の増加に対する $Y_{\max}$ の変化が小さい。

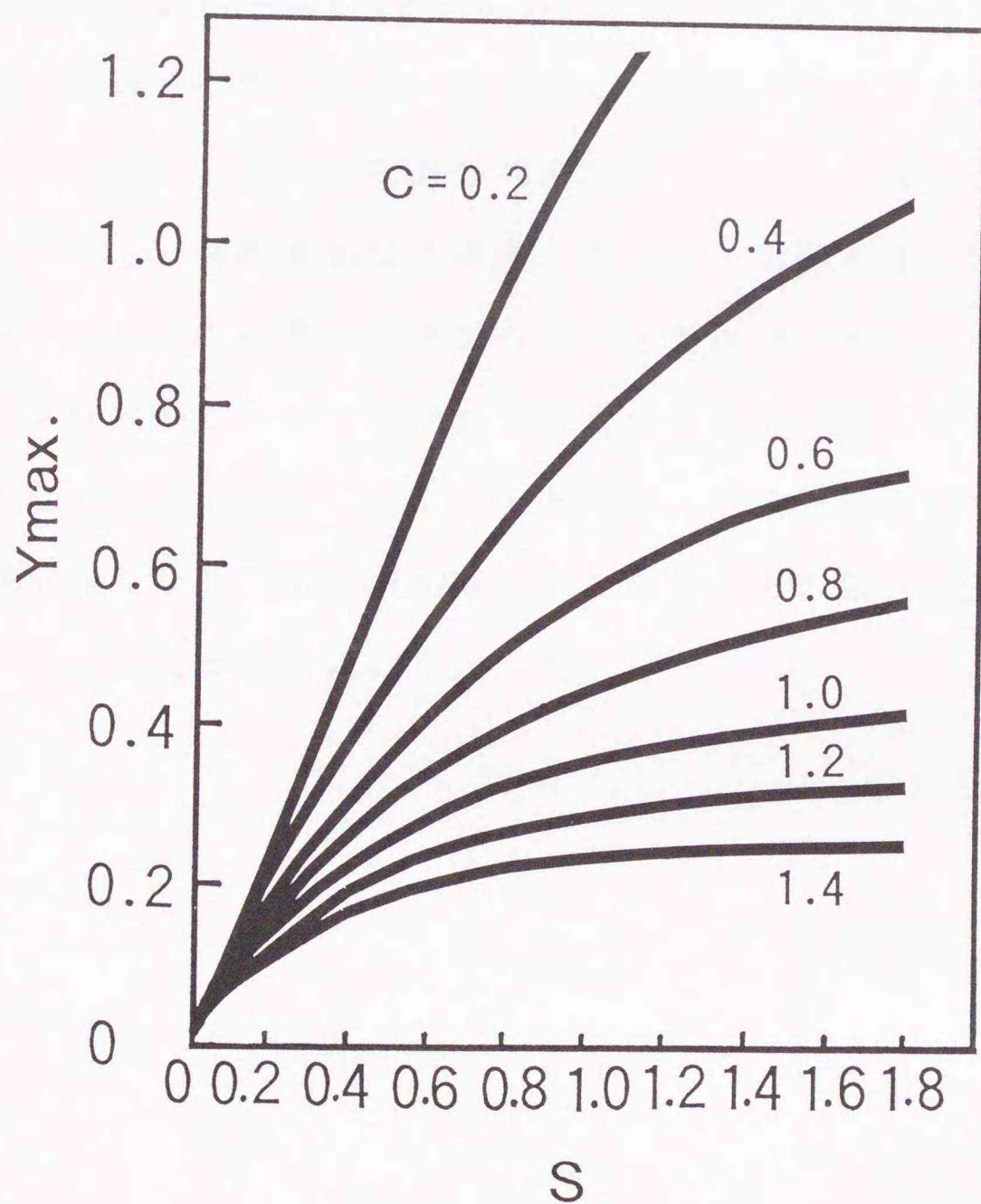


図 6・2 $Y_{\max}$ と S の関係

軟鋼のレーザ切断での切断溝幅は酸化反応による拡大効果があるため、アシストガスには酸素ガスとアルゴンガスを使用し実験を行った。

6・4・2 アシストガスに酸素ガスを使用した切断溝幅

図6・3 は板厚0.5 mm、0.7 mm、1.0 mmのSPCCを出力500 Wで切断したときの切断速度と切断溝幅の関係である。さらに、同じ板厚のSPCCを出力1000 Wと1500 Wで切断した切断速度と切断溝幅の関係を図6・4と図6・5に示す。各板厚での最大切断速度は、切断溝が形成されない状態、いわゆる分離が不可能なガウジングに達した速度とした。いずれの出力の切断においても低速度ほど酸化反応熱が大きく寄与し、切断溝幅は広がる。さらに、切断速度の増加に対する切断溝幅の減少は、板厚の小さなものほど変化が大きい。切断実験での出力は500 Wから1500 Wまで変化させたが、最大切断速度はどの出力においても約10 m/minであった。最大切断速度では酸化反応の影響が小さくなり、切断溝幅は最小となる。その最小切断溝幅は0.2 mm～0.3 mmの範囲に存在した。

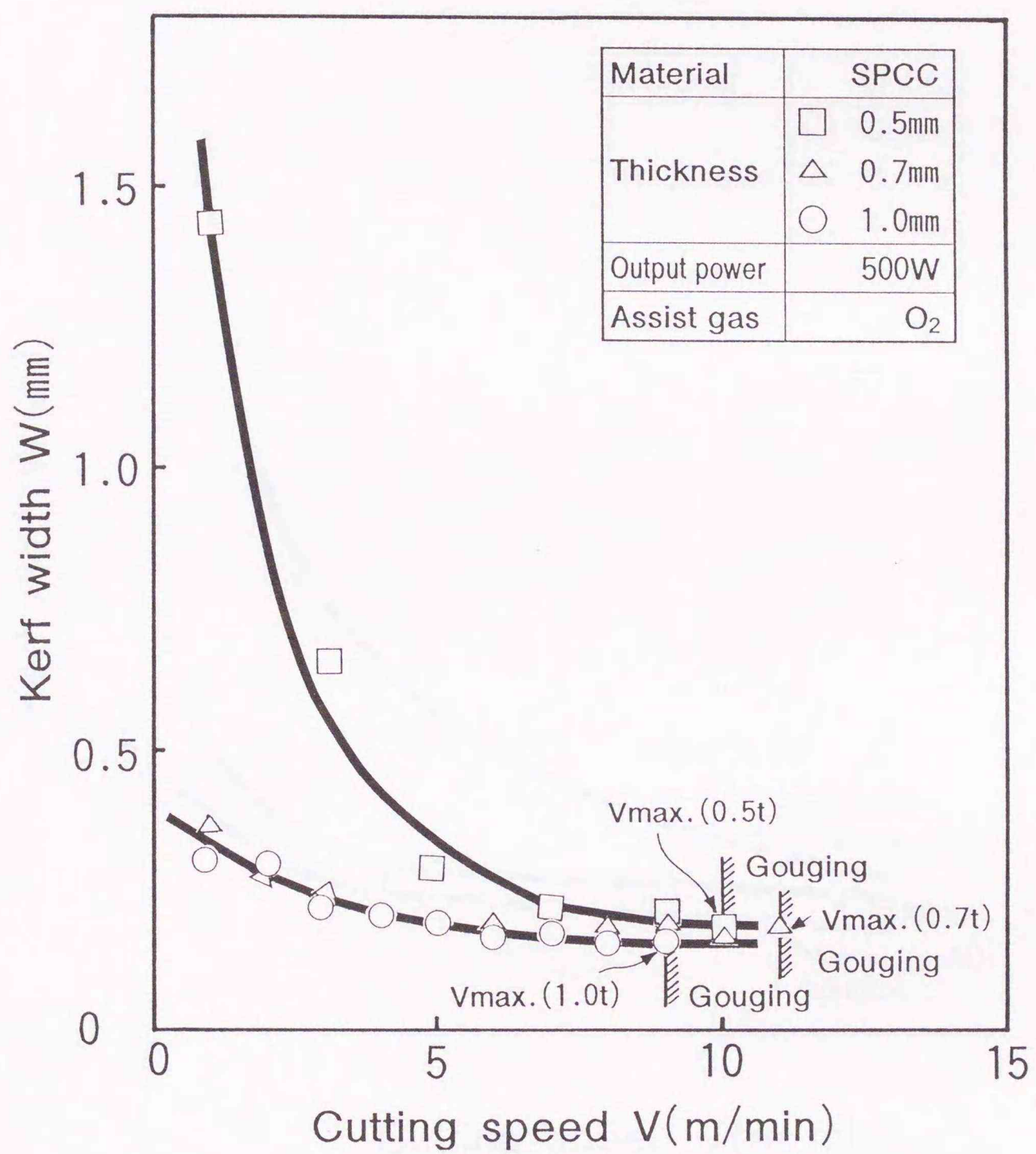


図 6 ・ 3 出力 5 0 0 W での切断溝幅

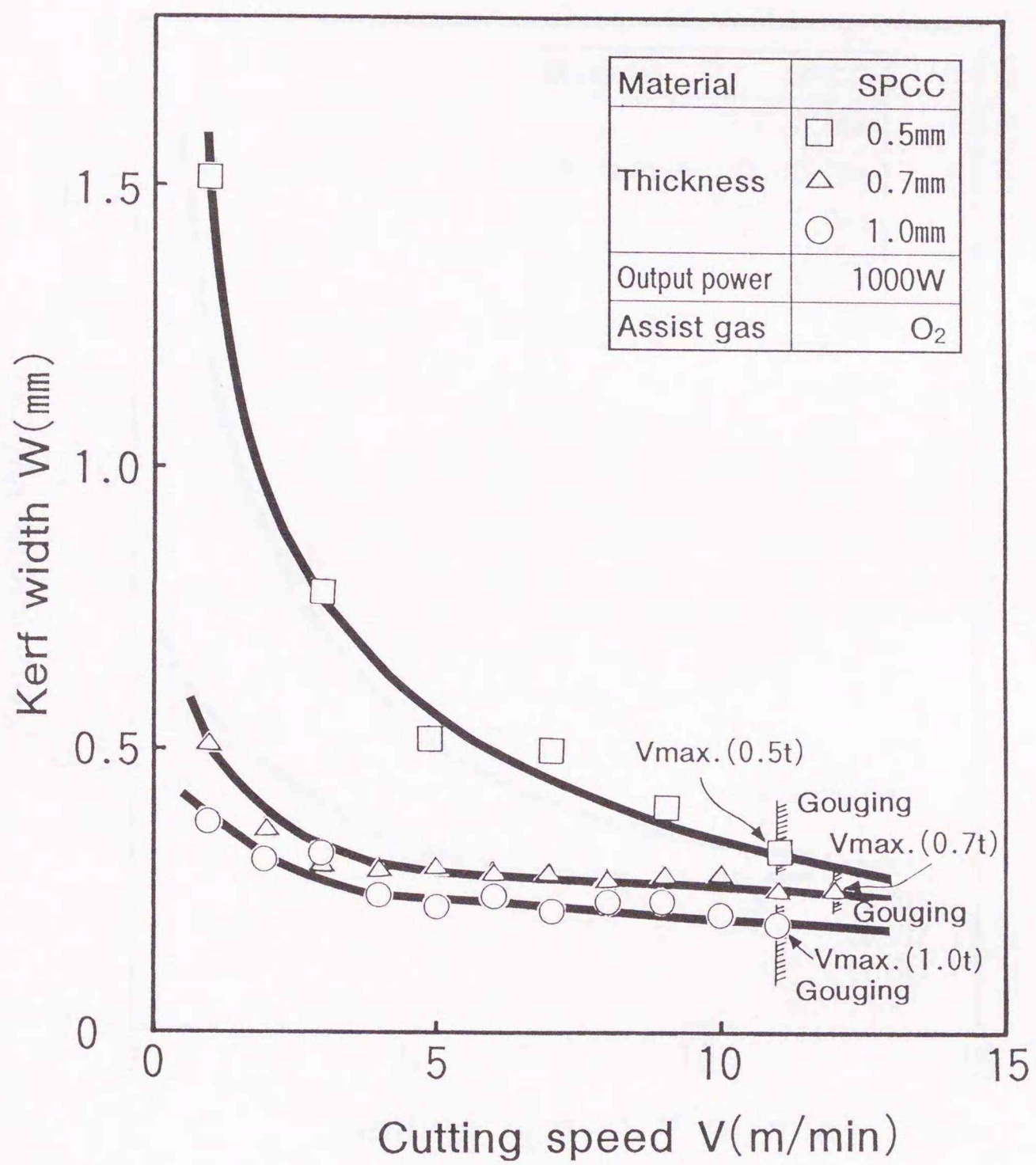


図 6 ・ 4 出力 1 0 0 0 W での切断溝幅

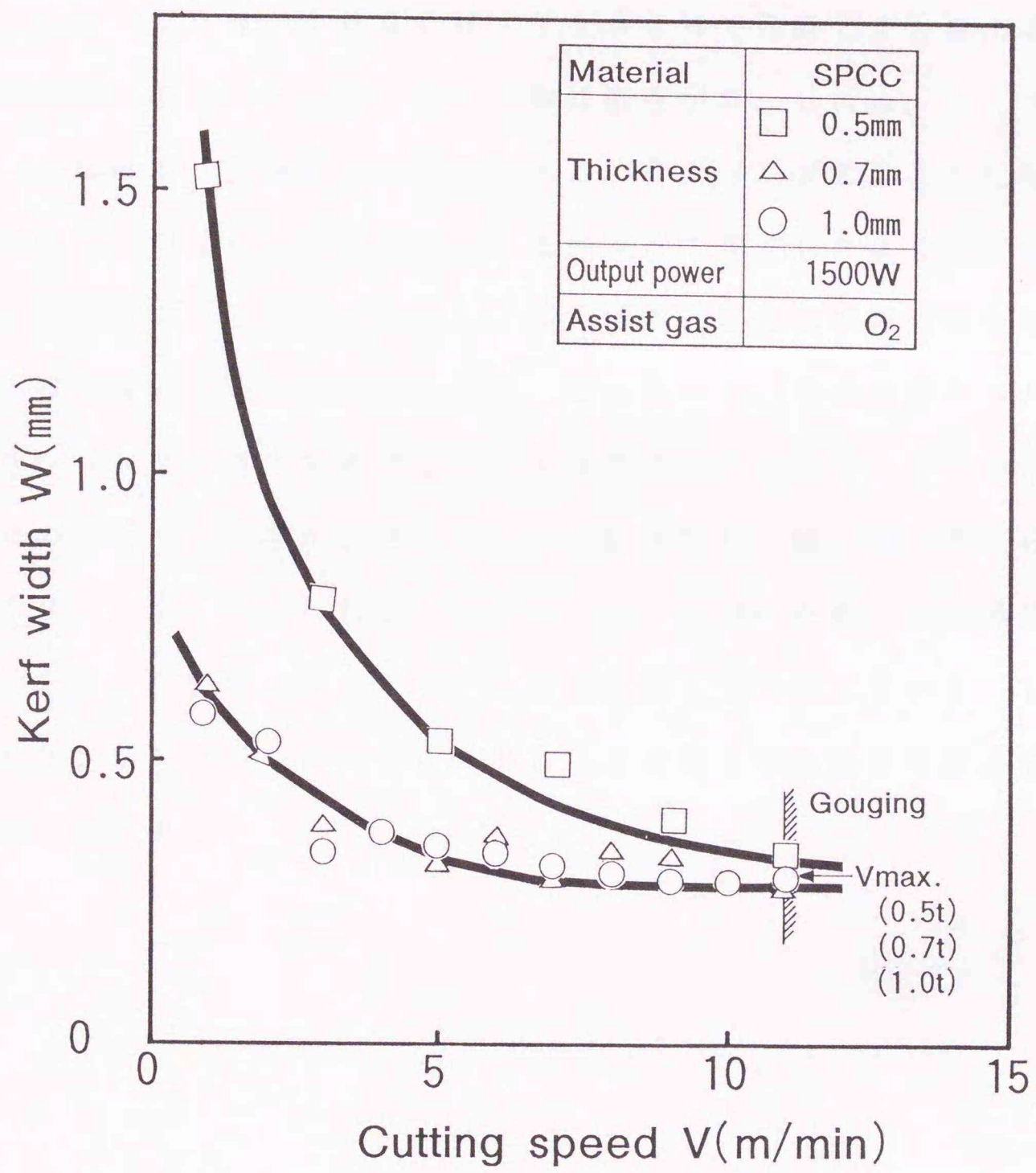


図 6 ・ 5 出力 1 5 0 0 W での切断溝幅

6・4・3 アシストガスにアルゴンガスを使用した切断溝幅

図6・6、図6・7、図6・8 にはアシストガスにアルゴンガスを使用し、レーザー出力500W、1000W、1500Wで切断したときの切断速度と切断溝幅の関係を示す。被加工物は板厚が0.5mm、0.7mm、1.0mmの3種類のSPCCである。アルゴンガスによる切断では酸化発熱反応がなく、酸素ガスによる低速度で発生したような切断溝幅拡大効果は減少している。しかし、最大切断速度での切断溝幅は酸素ガスによる切断の場合とほぼ等しく0.2mm～0.3mmであった。これはガウジングの発生するような限界速度では、酸素ガスを用いた酸化反応熱の切断への寄与が小さいこと、切断溝に対し横方向の熱伝導の影響が小さいためと考えられる。アルゴンガスを用いた最大切断速度は酸素ガスを用いた切断とは異なり、出力に比例して増加している。しかし、アルゴンガスを用いたいずれの出力による場合も酸素ガスによる切断速度に比べて小さい。

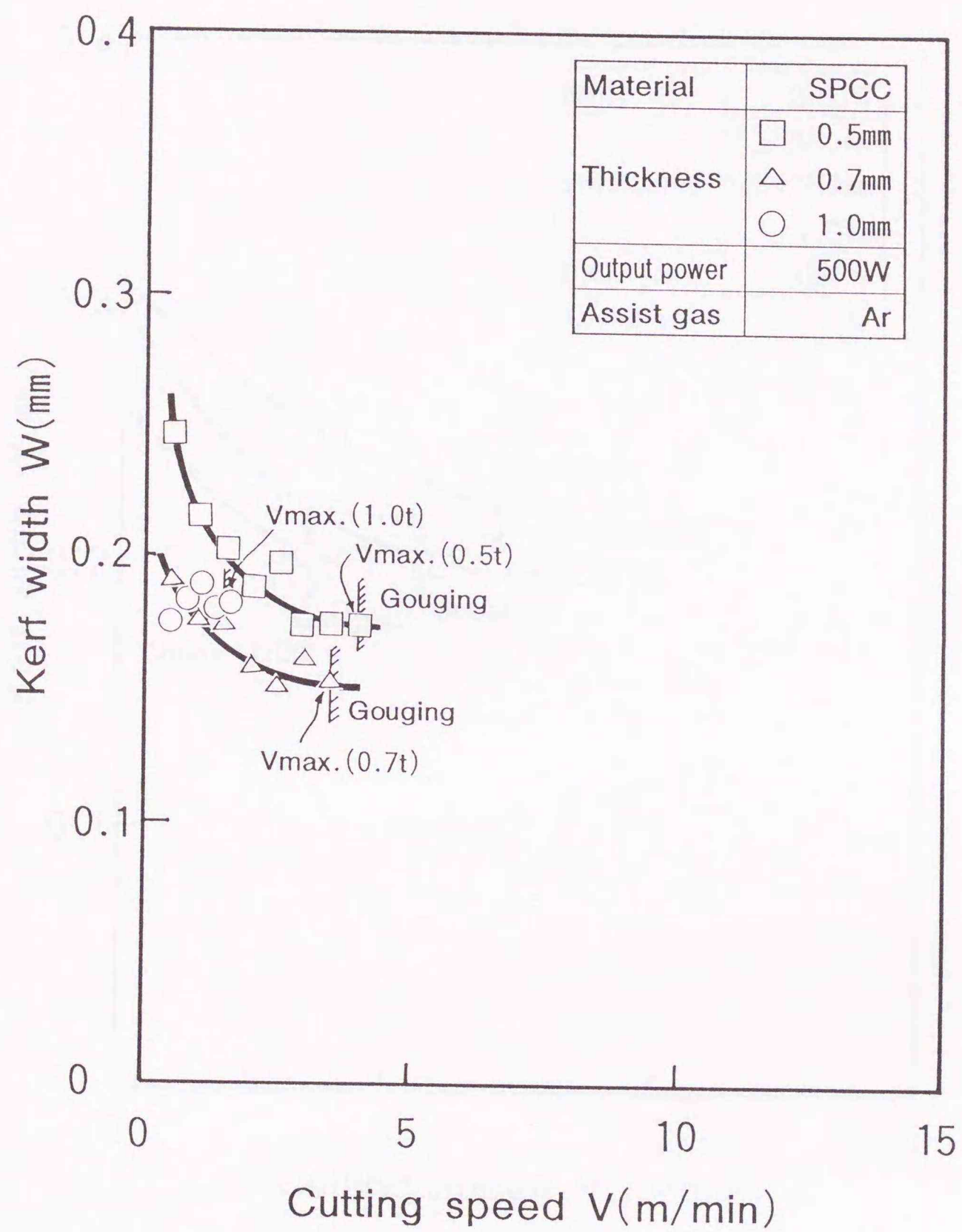


図 6 ・ 6 出力 5 0 0 W での切断溝幅

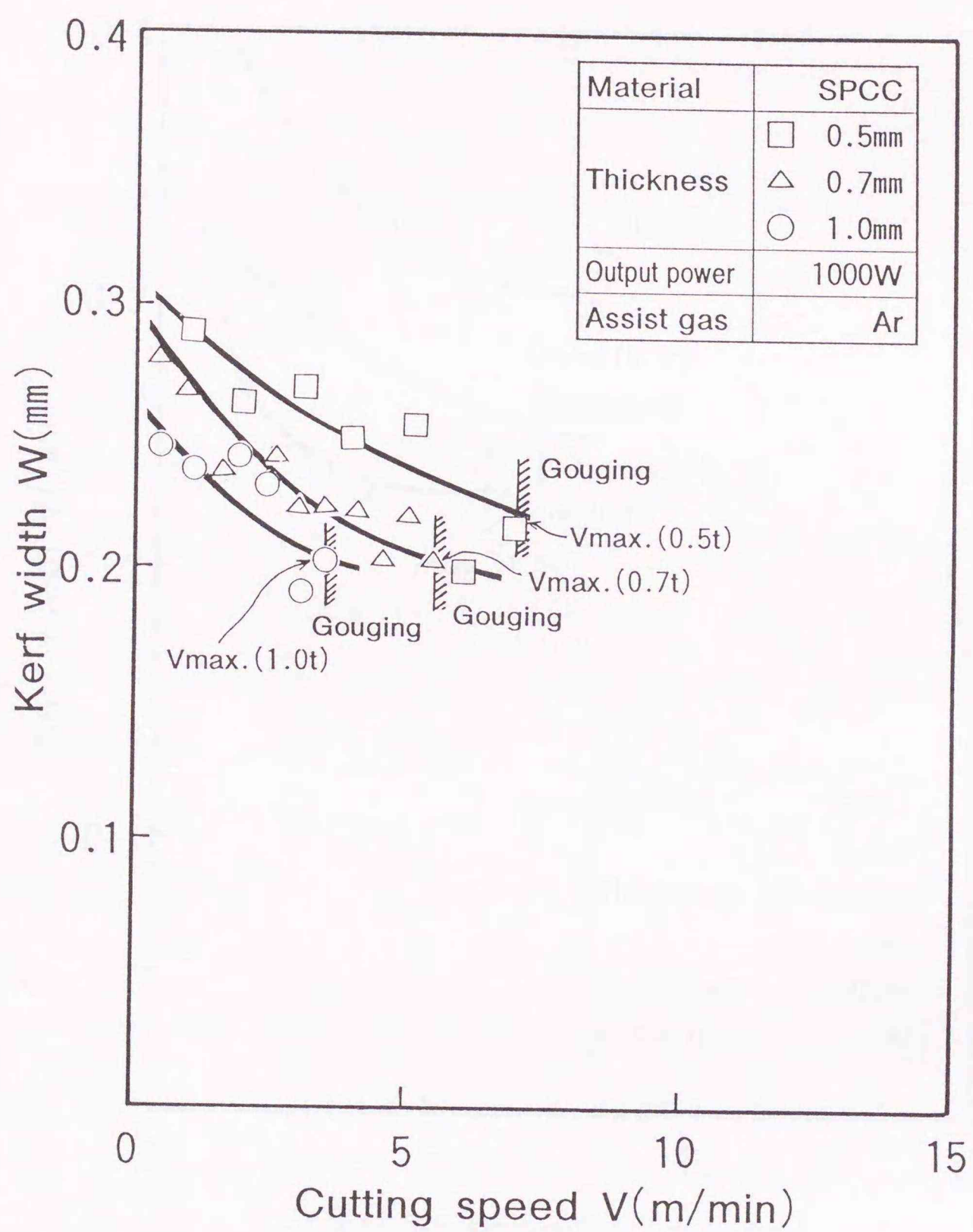


図 6・7 出力 1000W での切断溝幅

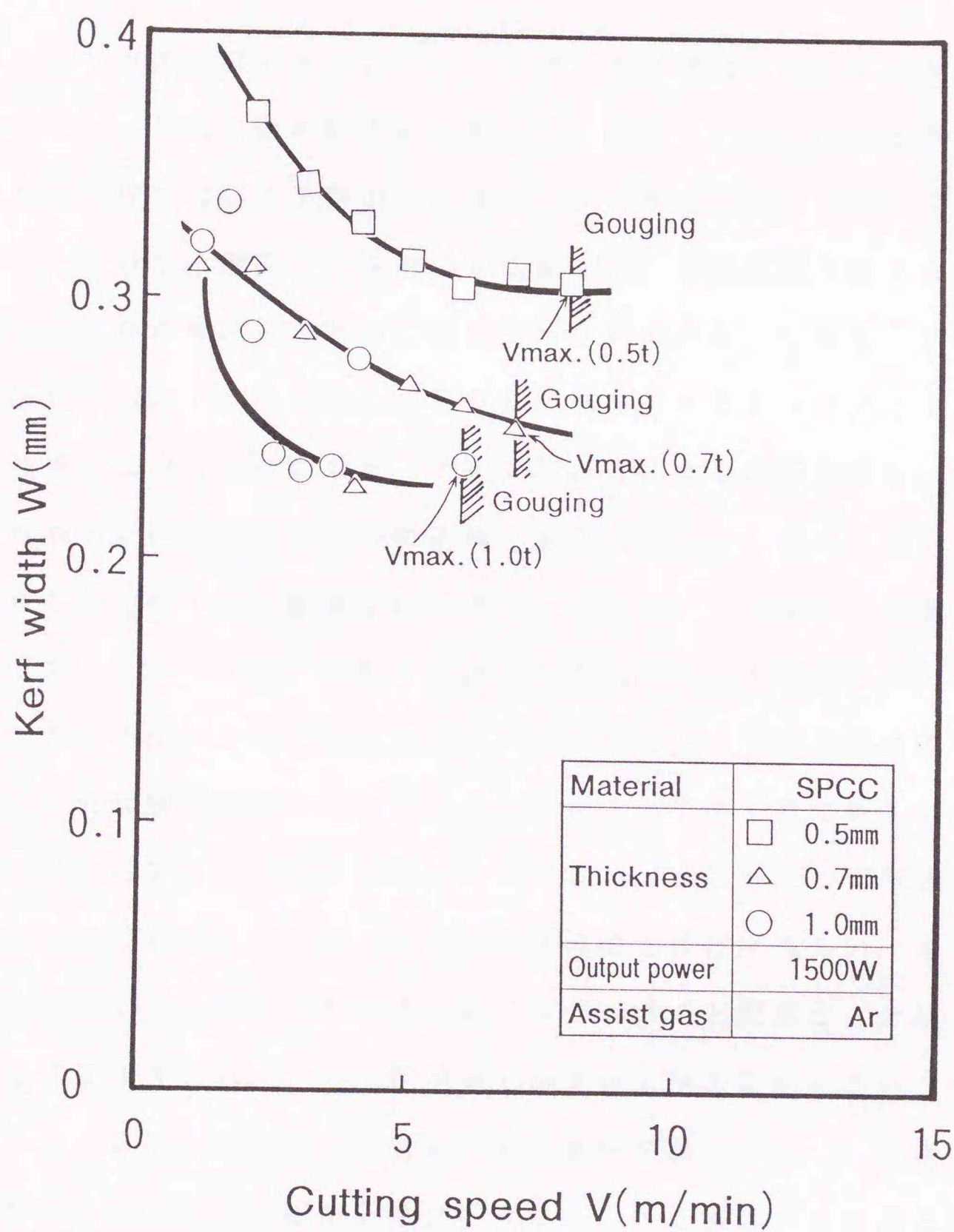


図 6 ・ 8 出力 1 5 0 0 での切断溝幅

6・4・4 切断中に透過する出力の測定

アシストガスに酸素ガスとアルゴンガスの2種類を用いて、酸化反応の有無でレーザ出力の利用率を比較した。板厚0.7mmのSPCCを出力500Wで切断する時の切断速度とレーザ出力の利用率 f との関係を図6.9に示す。酸素ガスを用いた切断では、切断速度1m/minで照射出力500Wの約1割が切断に使用されている。しかし、切断速度に比例して利用率 f は増加し、ガウジングの起きる10m/minの速度で透過する出力は0になる。アルゴンガスによる切断では0.5m/minの切断速度で約5割の利用率である。アルゴンガスを用いた切断の場合も利用率 f は切断速度に比例して増加し、ガウジングの起きる切断速度で10割になる。切断中に透過する出力の測定結果において、アルゴンガスを用いた時の切断速度0.5m/minでの f 値は約5割であり、これは酸素ガスを用いると5m/minでの f 値に等しい。図6.3と図6.6からアルゴンガスを用いた0.5m/minでの切断溝幅と、酸素ガスを用いた5m/minでの切断溝幅とはほぼ等しい。また、利用率 f が5割以上の同一利用率ではアルゴンガスと酸素ガスとによる切断溝幅はほぼ等しい。一方、利用率 f が5割未満の範囲においては、アルゴンガスを用いた切断では切断可能な領域が非常に狭く、酸素ガスを用いた切断では切断溝幅が急激に拡大する。また酸素ガスによる切断では、利用率 f が5割未満でドロスの付着や切断面粗さなどの切断品質が急激に悪化した。

以上の結果から、酸素ガスを用いた切断では約5m/min以上の切断速度で切断溝幅方向への酸化反応の影響が小さいことを示している。さらにこの速度範囲では、アシストガスの種類によらず切断溝幅と透過

するレーザ出力は密接な関係のあることが判明した。



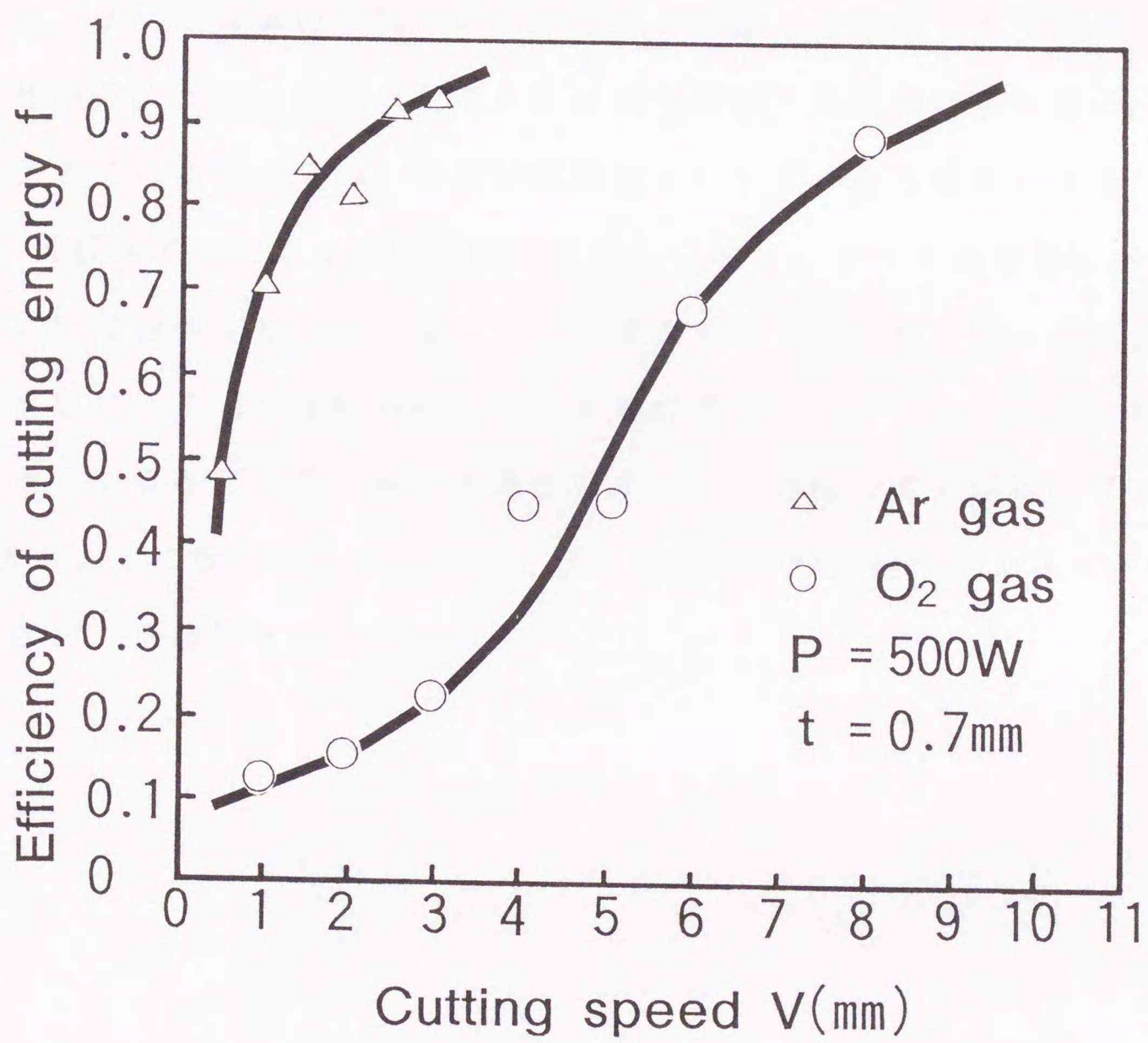


図 6 ・ 9 切断速度とレーザー出力の利用率との関係

6・4・5 理論値と実験結果との比較

図6・10と図6・11には実験結果により得られた切断溝幅 W 、出力 P 、利用率 f 、切断速度 v と式(6-12)によって求めたビーム径 A から、 Y_{max} と S との関係を示す。図6・11は、アルゴンガスを用いて板厚が0.5、0.7、1.0mmの3種類のSPCCを切断した結果であり、そのなかで板厚0.5mmのものが図6・2に示す理論計算結果に最も近い。板厚が大きくなるほど Y_{max} の値が理論値より小さくなる傾向にある。図6・10は酸素ガスによる切断の結果を示しており、すべての板厚において Y_{max} は理論値より大きな値になる。酸素を用いた切断では、本検討に酸化反応による切断溝幅の拡大作用を考慮する必要がある。また、板厚が大きくなるほど計算結果と実験値とが異なるのは、ガス切断モデル⁽²⁾にあるように板厚が大きくなると板厚方向への酸素純度やエネルギーの低下に起因した結果と考えられる。

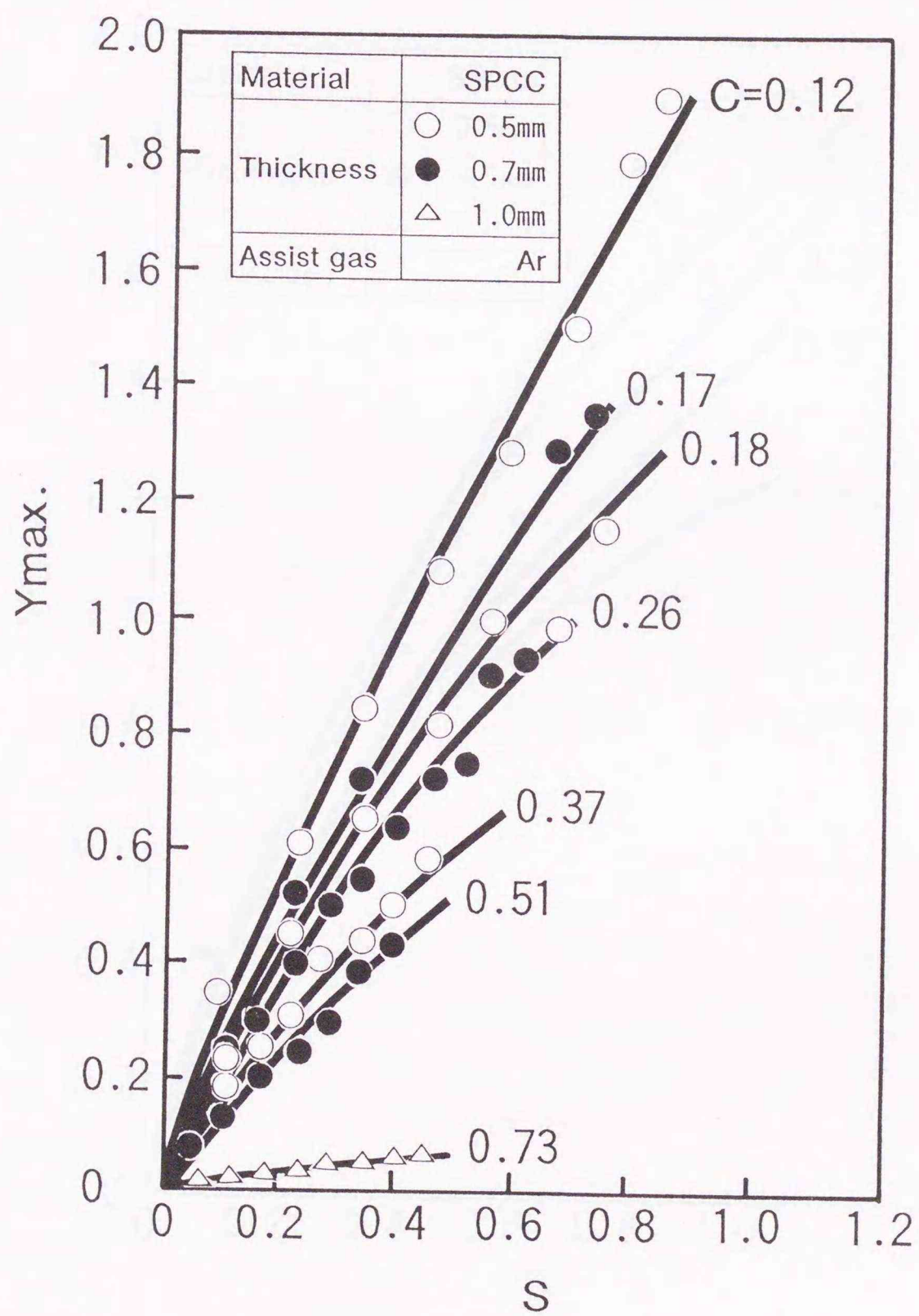


図 6・10 アルゴンガスを用いた場合の切断結果

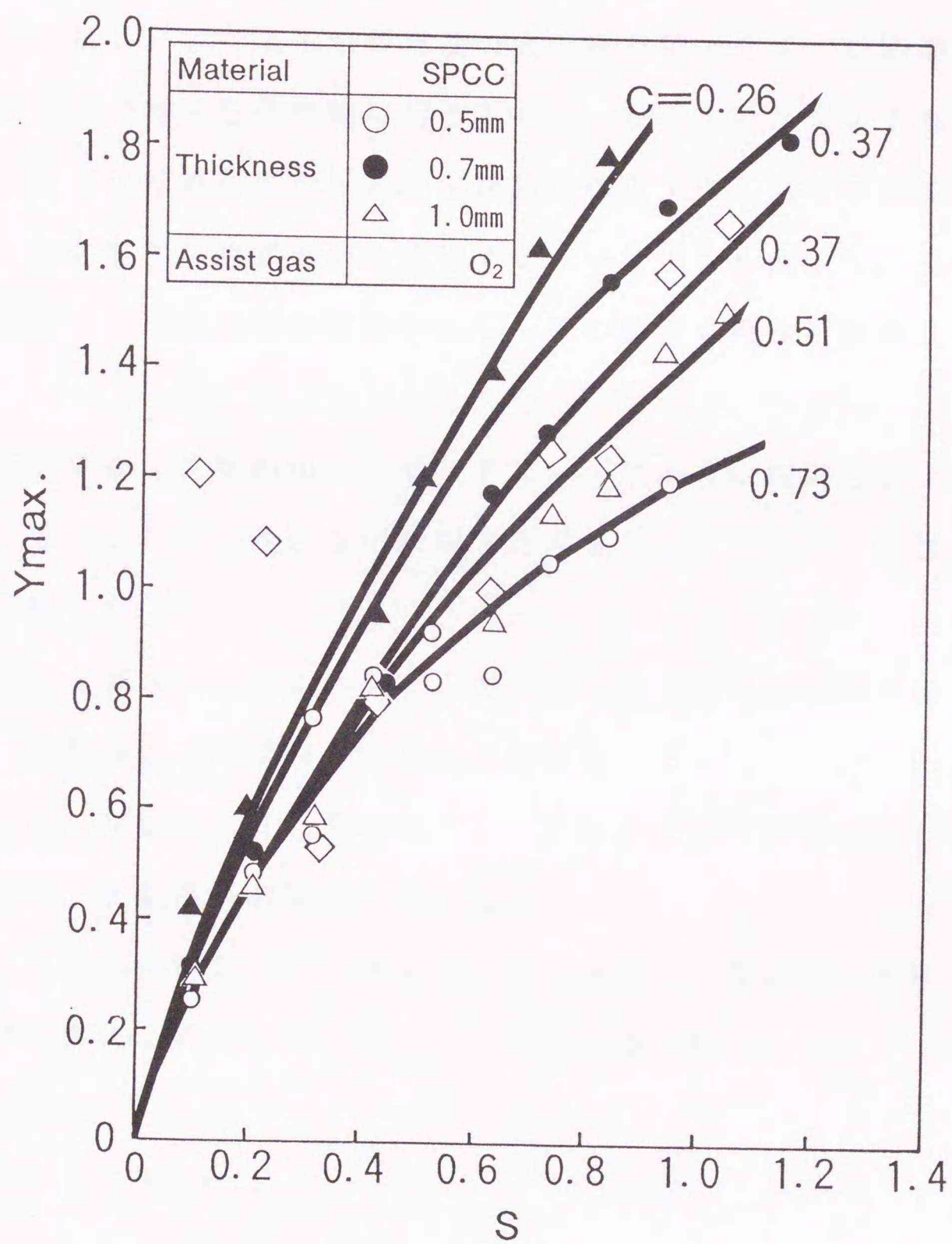


図 6 ・ 1 1 酸素ガスを用いた場合の切断結果

6・5 第6章の結言

本研究ではレーザーによる切断精度の向上を目的として、切断溝幅を予知し加工軌跡の補正を効果的に行うために、熱伝導計算による推定を行い実験結果と比較検討を行った。主な結果は以下のとおりである。

- (1) 切断中に被加工物裏面から透過するレーザー出力を測定し、実際の加工に利用される出力割合を明かにし、その結果を熱伝導計算式に反映した。
- (2) 切断中の被加工物の加工に寄与するレーザー出力は切断速度が低速度域からガウジングの起きる切断限界速度までほぼ直線的に増加することが判明した。
- (3) アシストガスの種類によらず、加工のレーザー出力利用率が同じであれば、切断溝幅はほぼ同じであることを示した。
- (4) 板厚 0.5 mm、0.7 mm、1.0 mm の S P C C について出力、切断速度、切断溝幅の関係を求めた。
- (5) 酸化反応を伴わないアルゴンガスをアシストガスに用いた加工では、熱伝導計算による結果にほぼ等しい結果が得られた。

第7章 被加工物の物性値と切断特性

7・1 緒言

第6章までは、被加工物種類と板厚の各々について、個別の切断品質の最適化および切断精度の向上を検討した。その結果、材質と板厚によって最適な焦点位置や出力・切断速度などの存在することを明らかにできた。しかし、材質と板厚ごとに切断条件の最適化を追求することは、膨大なデータの取得を必要とし、レーザ加工機の機種間で加工条件の最適値に差異が生じるなどの課題が残る。従来の被加工物に対する適正条件の研究でも、特定出力による板厚と切断速度の関係⁽⁶³⁾や、特定の板厚に対する出力と切断速度の関係⁽²⁴⁾、CWとPWの出力形態を個々に扱う報告⁽²⁴⁾がほとんどであり、材質・板厚ごとの系統だった検討は少ない。できるだけ少ない入力で最適な加工条件を選択できたり、加工精度が推定できれば、レーザ加工機の実用面で大きな効果が得られる。

以上の理由から本章では、前章までで検討した加工条件パラメータの最適値と被加工物の物性値との関係について検討する。具体的には、良好な切断品質を提供する板厚・切断速度・出力と熱定数の関係、偏光と切断精度では反射率の影響を調査し、切断品質を検討していない材質や板厚についても、最適加工条件の推定や、加工精度の推定が可能になると思われる。

7・2 熱定数との関係

物質に吸収されたレーザービームは、そのほとんどが被加工物の表面近傍で熱に変わり、熱伝導により物質内部を加熱する。そのため最適加工品質を提供する加工条件パラメータは、物質の加工現象を定量的に支配するものと推測される。本節では被加工物の熱定数と加工条件パラメータとの関係を明らかにする。表7・1から表7・5は軟鋼（SS400、SPCC）、SUS 304、アルミニウム合金（A5052）、銅（C1100）の各種板厚をアシストガスに酸素（ O_2 ）、Air、窒素（ N_2 ）を用いて切断できる加工条件を示す。加工条件は板厚別に、切断速度の低速から高速に並べてある。この場合の切断条件の各パラメータは第2章から第5章までの検討結果を考慮し、切断面粗さやドロスの付着量が少なくなる値を設定した。以下にはこれらの加工条件と物性値との関連について検討する。

図7・1から図7・4には軟鋼、ステンレス鋼、アルミニウム合金、銅の各材料をアシストガスに酸素を用いて切断した場合の、無次元化した板厚と切断条件の関係を示す。図7・5から図7・7はアシストガスにAirまたは窒素を用いて、軟鋼、ステンレス鋼、アルミニウム合金を切断した場合の、無次元化した板厚と切断条件の関係を示す。図中で使用している記号は以下のとおりである。

Y : 上部切断溝幅 (mm)

v : 切断速度 (cm/s)

κ : 熱拡散率 (cm^2/s)

K : 熱伝導率 ($J/s \cdot cm \cdot ^\circ C$)

t : 板厚 (cm)

T_m : 融点 ($^{\circ}\text{C}$)

P : 出力 (J/s)

表 7・1 は切断条件の検討を行った金属材料の融点 T_m 、熱伝導率 K 、熱拡散率 κ を示す。ただし、 K や κ は温度依存性があるため、室温から融点までの平均値である⁽⁶⁴⁾。上部切断溝幅 Y には、第 2 章で検討した最適焦点位置の設定で得られる実験結果を使用した。すべての被加工物、およびアシストガスの種類で無次元切断速度 $v Y / \kappa$ と $P / t T_m K$ には比例関係が成り立つ。良好な切断品質の得られる出力と速度の切断条件は、図 5・13 に示したようにある範囲を持って存在し、その範囲は板厚が小さいほど広がる。そのため、切断条件範囲内での出力と速度の関係の変更によって図中のデータのばらつきは小さく抑えることが可能である。アシストガスに酸素を用いた実験結果では、軟鋼はステンレス鋼より低入熱で切断が行われるが、これは軟鋼の酸化反応の生成熱が大きいためである。これに対して、アシストガスが Air の場合は、軟鋼とステンレス鋼では差のほとんどない結果が得られた。なお、ステンレス鋼の切断結果ではアシストガス種類の Air と窒素の違いで切断能力に差はほとんど生じなかった。アルミニウム合金の切断では、酸素と Air のどちらのアシストガスの場合も軟鋼やステンレス鋼より入熱を多く必要とする。これは、アルミニウム合金のビーム反射率が高いこと、熱伝導率が高いこと、酸化で発生する Al_2O_3 の融点が高いためと考えられる。銅の切断では、さらに大きな出力を必要とするが、これもやはり銅がビーム反射率と熱伝導率の大きなこと、酸化反応熱が加わらないことが要因であると思われる。

以上の結果から、加工実験による数点のデータから求められる関係式

より、被加工物の加工条件をかなり正確に予測できることがわかる。

表 7 ・ 1 各種材料の主な物性値

Material	$T_m(^{\circ}\text{C})$	$K(\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$	$\kappa(\text{m}^2/\text{s})$
SUS304	1490	24.7	903
SS400	1536	39.4	804
Al	660	200.8	7120
Cu	1083	374.4	10420

表 7・2 SS400、SPCC、SPHC の加工条件

アシストガス O₂

Material 【Gas】	Thick- ness(mm)	Power (W)	Duty (%)	Frequen- cy(Hz)	Speed (mm/min)	Pressur (kPa)	Focal P- oint(mm)	Lens f (mm)
SS400	0.8	80	10	200	300	250	0	127
	0.8	130	30	500	1000	250	0	127
	0.8	180	30	700	2000	250	0	127
	0.8	250	100	-	3000	250	0	127
	0.8	300	100	-	4000	250	0	127
	1.2	100	10	200	300	300	0	127
	1.2	195	25	500	1000	300	0	127
	1.2	370	100	-	2000	300	0	127
	1.2	450	100	-	3000	300	0	127
	1.2	500	100	-	4000	300	0	127
SPCC	2.0	175	19	200	300	300	0	127
SPHC	2.0	225	23	300	500	300	0	127
	2.0	335	33	500	1000	300	0	127
【O ₂ 】	2.0	500	100	-	2000	300	0	127
	2.0	700	100	-	3000	300	0	127
	6.0	400	24	100	100	300	0	127
	6.0	580	27	100	300	300	0	127
	6.0	600	30	100	500	300	0	127
	6.0	900	50	1300	1000	100	+1.5	127
	6.0	1100	55	1300	1200	100	+1.5	127
	9.0	400	20	50	50	300	0	190.5
	9.0	450	23	50	100	300	0	190.5
	9.0	680	30	80	300	300	0	190.5
	9.0	1250	60	1300	1000	70	+1.0	190.5
	12.0	630	30	50	50	300	0	190.5
	12.0	650	30	50	100	300	0	190.5
	12.0	750	37	50	200	300	0	190.5
	12.0	1300	56	1300	700	70	+1.5	190.5
	16.0	2000	70	1300	800	50	+1.5	254

表 7 ・ 3 S U S 3 0 4 の 加 工 条 件

アシストガス O₂

Material 【Gas】	Thick- ness(mm)	Power (W)	Duty (%)	Frequen- cy(Hz)	Speed (mm/min)	Pressur (kPa)	Focal P- oint(mm)	Lens f (mm)
SUS 304 【O ₂ 】	0.8	120	12	200	300	300	0	127
	0.8	190	28	500	1000	300	0	127
	0.8	250	100	-	2000	300	0	127
	0.8	450	100	-	4000	300	0	127
	1.0	120	12	200	300	300	0	127
	1.0	190	28	500	1000	300	0	127
	1.0	220	25	800	2000	300	0	127
	1.0	470	100	-	4000	300	0	127
	1.5	170	17	200	300	300	0	127
	1.5	230	23	400	1000	300	0	127
	1.5	370	100	-	2000	300	0	127
	1.5	600	100	-	4000	300	0	127
	2.0	220	19	200	200	300	0	127
	2.0	245	22	300	500	300	0	127
	2.0	350	33	500	1000	300	0	127
	2.0	630	100	-	3000	300	0	127
	3.0	260	22	200	100	350	0	127
	3.0	280	22	200	300	350	0	127
	3.0	540	43	500	1000	350	0	127
	3.0	800	100	-	2000	350	0	127
	4.0	225	15	80	100	350	0	127
	4.0	370	20	150	300	350	0	127
	4.0	510	30	400	500	350	0	127
	4.0	710	45	500	800	350	0	127
	5.0	350	18	200	100	350	0	127
	5.0	400	20	200	200	350	0	127
	5.0	480	24	500	300	450	0	127
	5.0	600	30	700	500	450	0	127
	6.0	400	18	200	100	350	0	127
	6.0	430	20	200	200	350	0	127
	6.0	510	24	500	300	450	0	127
	6.0	590	28	700	400	450	0	127
	8.0	400	18	100	50	400	0	190.5
	8.0	480	24	700	100	400	0	190.5
	8.0	550	26	700	200	400	0	190.5
	8.0	610	28	800	300	400	0	190.5

表 7 ・ 4 A l (A 5 0 5 2) と C u (C 1 1 0 0) の 加 工 条 件

アシストガス O₂

Material 【Gas】	Thick- ness(mm)	Power (W)	Duty (%)	Frequen- cy(Hz)	Speed (mm/min)	Pressur (kPa)	Focal P- oint(mm)	Lens f (mm)
Al A5052 【O ₂ 】	1.0	200	20	400	500	500	-1.0	190.5
	1.0	250	25	500	1000	500	-1.0	190.5
	1.0	350	27	500	2500	500	-1.0	190.5
	1.5	500	25	700	1000	600	-1.5	190.5
	1.5	650	30	700	2000	600	-1.5	190.5
	1.5	700	35	700	2500	600	-1.5	190.5
	2.0	500	25	300	500	600	-2.0	190.5
	2.0	800	34	700	1000	600	-2.0	190.5
	2.0	950	40	700	1500	600	-2.0	190.5
	2.0	1400	60	700	2000	600	-2.0	190.5
	2.5	1000	50	400	1000	650	-2.5	190.5
	2.5	1100	51	500	1200	650	-2.5	190.5
	2.5	1300	55	500	1500	650	-2.5	190.5
	3.0	800	34	300	500	650	-3.0	190.5
	3.0	800	34	300	700	650	-3.0	190.5
	3.0	1300	55	600	1000	650	-3.0	190.5
	5.0	1800	70	500	600	650	-5.0	190.5
Cu C1100 【O ₂ 】	0.5	800	35	200	300	300	0	190.5
	1.0	800	55	200	300	300	0	190.5
	1.0	950	100	-	500	650	0	190.5
	2.0	750	35	100	200	650	0	190.5
	2.0	1200	50	100	300	500	0	190.5
	2.0	1600	60	200	400	400	0	190.5
	3.0	1600	60	200	100	400	0	190.5
	3.0	1500	60	100	150	500	0	190.5
	3.0	1600	60	100	300	500	0	190.5
	3.0	2500	100	-	500	500	0	190.5
	5.0	2300	70	100	50	300	0	190.5
	5.0	3000	100	-	200	600	0	190.5

表 7 ・ 5 S P C C、S U S 3 0 4 の加工条件

アシストガス N₂、A i r

Material 【Gas】	Thick- ness(mm)	Power (W)	Duty (%)	Frequen- cy(Hz)	Speed (mm/min)	Pressur (kPa)	Focal P- oint(mm)	Lens f (mm)
SPCC 【Air】	0.8	280	18	500	500	650	-1.0	190.5
	0.8	300	20	700	1000	650	-1.0	190.5
	0.8	380	21	800	1500	650	-1.0	190.5
	1.2	320	20	500	500	650	-1.0	190.5
	1.2	360	22	700	1000	650	-1.0	190.5
	1.2	420	23	800	1500	650	-1.0	190.5
	1.6	500	25	500	500	650	-1.5	190.5
	1.6	650	30	600	1000	650	-1.5	190.5
	1.6	800	40	700	1500	650	-1.5	190.5
SUS 304 【N ₂ 】 【Air】	1.0	200	20	400	500	650	-1.0	190.5
	1.0	330	30	700	1000	650	-1.0	190.5
	1.0	400	45	800	2000	650	-1.0	190.5
	1.0	500	60	1500	3000	650	-1.0	190.5
	1.5	250	25	300	300	650	-1.5	190.5
	1.5	320	32	500	750	650	-1.5	190.5
	1.5	400	36	550	1000	650	-1.5	190.5
	1.5	600	70	1000	2000	650	-1.5	190.5
	2.0	450	38	700	700	650	-2.0	190.5
	2.0	600	45	800	1000	650	-2.0	190.5
	2.0	750	55	850	1500	650	-2.0	190.5
	2.0	800	100	-	2000	650	-2.0	190.5
	3.0	900	35	600	700	650	-3.0	190.5
	3.0	950	37	600	800	650	-3.0	190.5
	3.0	1000	39	700	900	650	-3.0	190.5
	3.0	1200	42	800	1000	650	-3.0	190.5
	4.0	1200	45	500	700	650	-4.0	190.5
	4.0	1500	54	500	1000	650	-4.0	190.5

表 7 ・ 6 A 1 (A 5 0 5 2) の 加 工 条 件

アシストガス A i r

Material 【Gas】	Thick- ness(mm)	Power (W)	Duty (%)	Frequen- cy(Hz)	Speed (mm/min)	Pressur (kPa)	Focal P- oint(mm)	Lens f (mm)
Al A5052 【Air】	1.0	400	23	500	500	650	-1.0	190.5
	1.0	600	30	600	1000	650	-1.0	190.5
	1.0	700	35	700	1500	650	-1.0	190.5
	1.0	900	42	750	2000	650	-1.0	190.5
	1.5	500	25	500	500	650	-1.5	190.5
	1.5	650	30	650	1000	650	-1.5	190.5
	1.5	700	34	750	1500	650	-1.5	190.5
	1.5	1100	50	800	2000	650	-1.5	190.5
	2.0	900	40	400	500	650	-2.0	190.5
	2.0	1000	40	550	700	650	-2.0	190.5
	2.0	1200	50	800	1000	650	-2.0	190.5
	2.0	1300	55	800	1200	650	-2.0	190.5
	2.5	800	35	300	300	650	-2.5	190.5
	2.5	1000	40	400	500	650	-2.5	190.5
	2.5	1300	55	550	700	650	-2.5	190.5
	3.0	900	40	300	300	650	-3.0	190.5
	3.0	1100	45	500	500	650	-3.0	190.5
	3.0	1200	50	700	700	650	-3.0	190.5
	3.0	1500	80	1000	1000	650	-3.0	190.5
	5.0	2800	100	-	700	650	-3.0	190.5

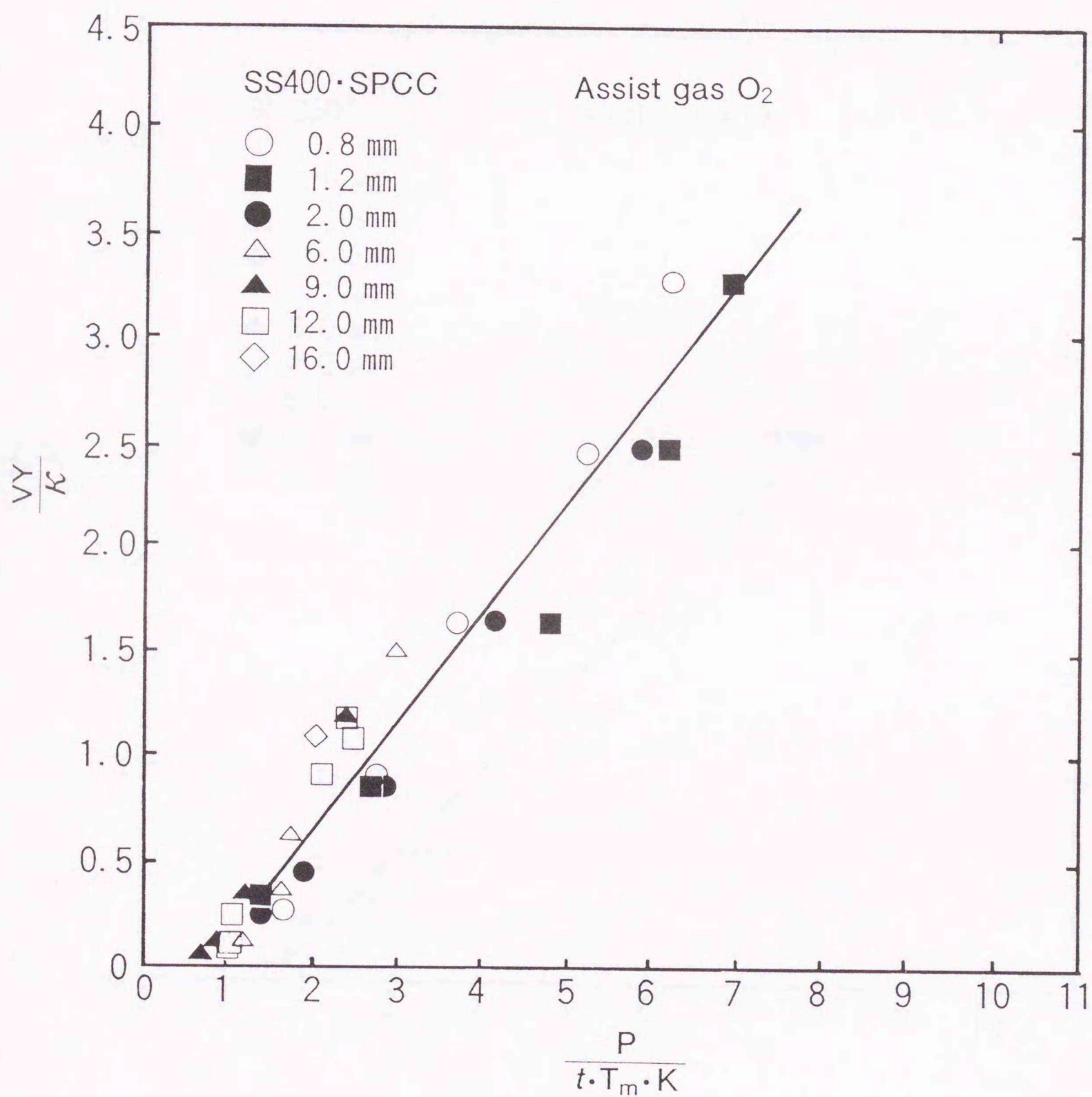


図 7・1 SS400、SPCC、SPHC加工条件の無次元化データ
アシストガスO₂

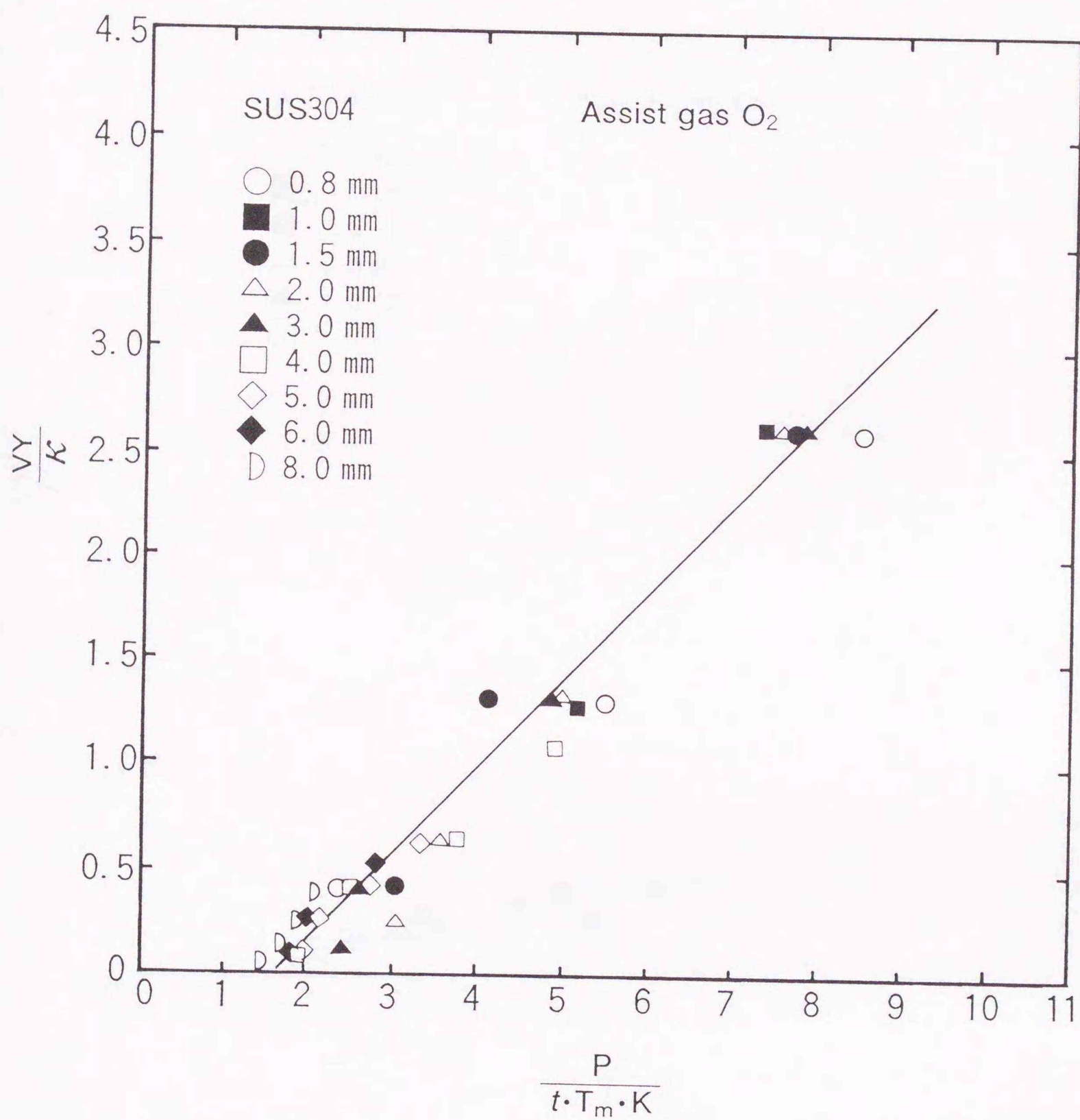


図 7・2 SUS 304 加工条件の無次元化データ

アシストガス O₂

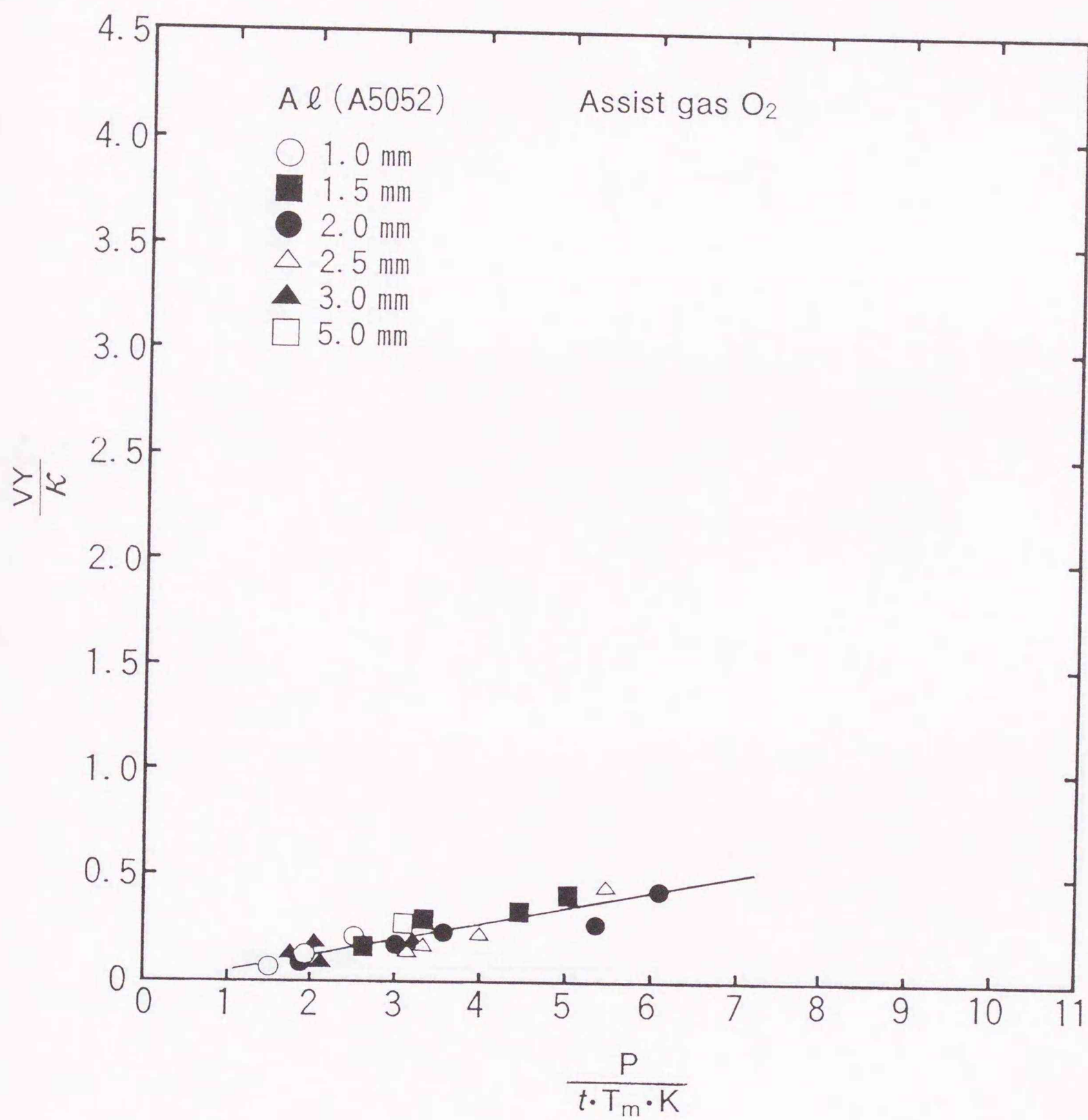


図 7・3 A 1 (A 5 0 5 2) 加工条件の無次元化データ

アシストガス O₂

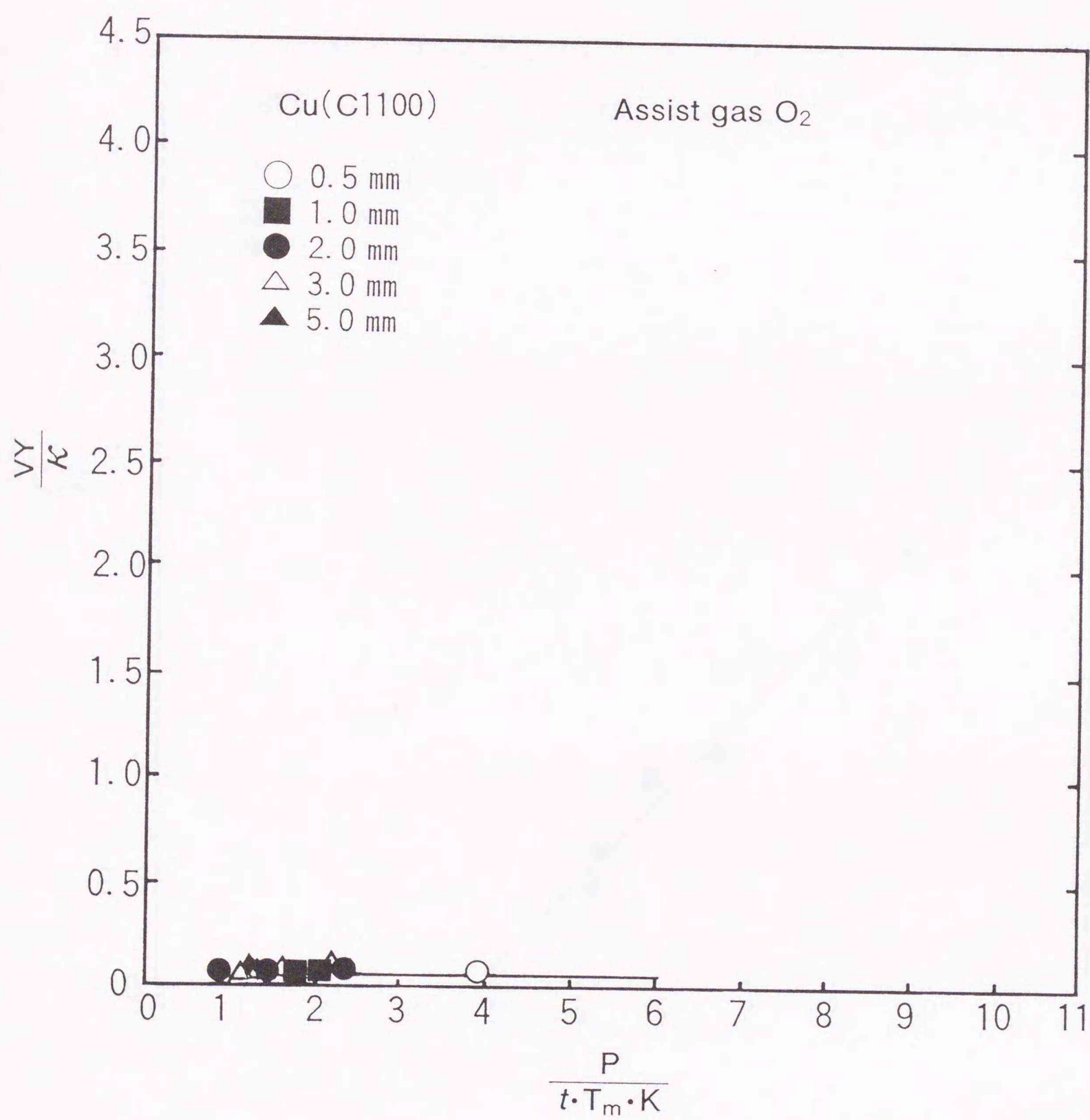


図 7・4 Cu(C1100) 加工条件の無次元化データ
 アシストガス O₂

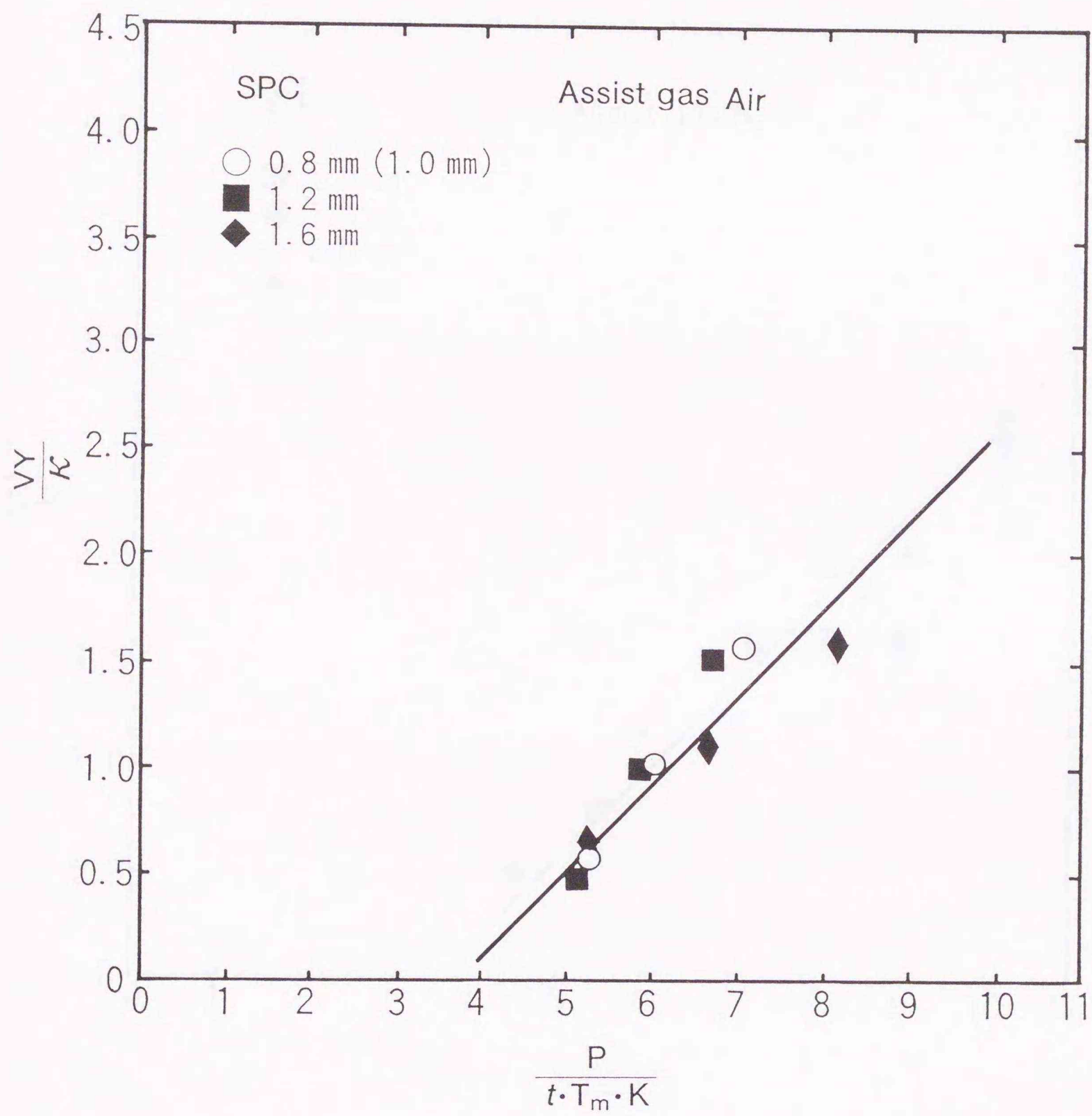


図 7 ・ 5 S P C C 加工条件の無次元化データ

アシストガス A i r

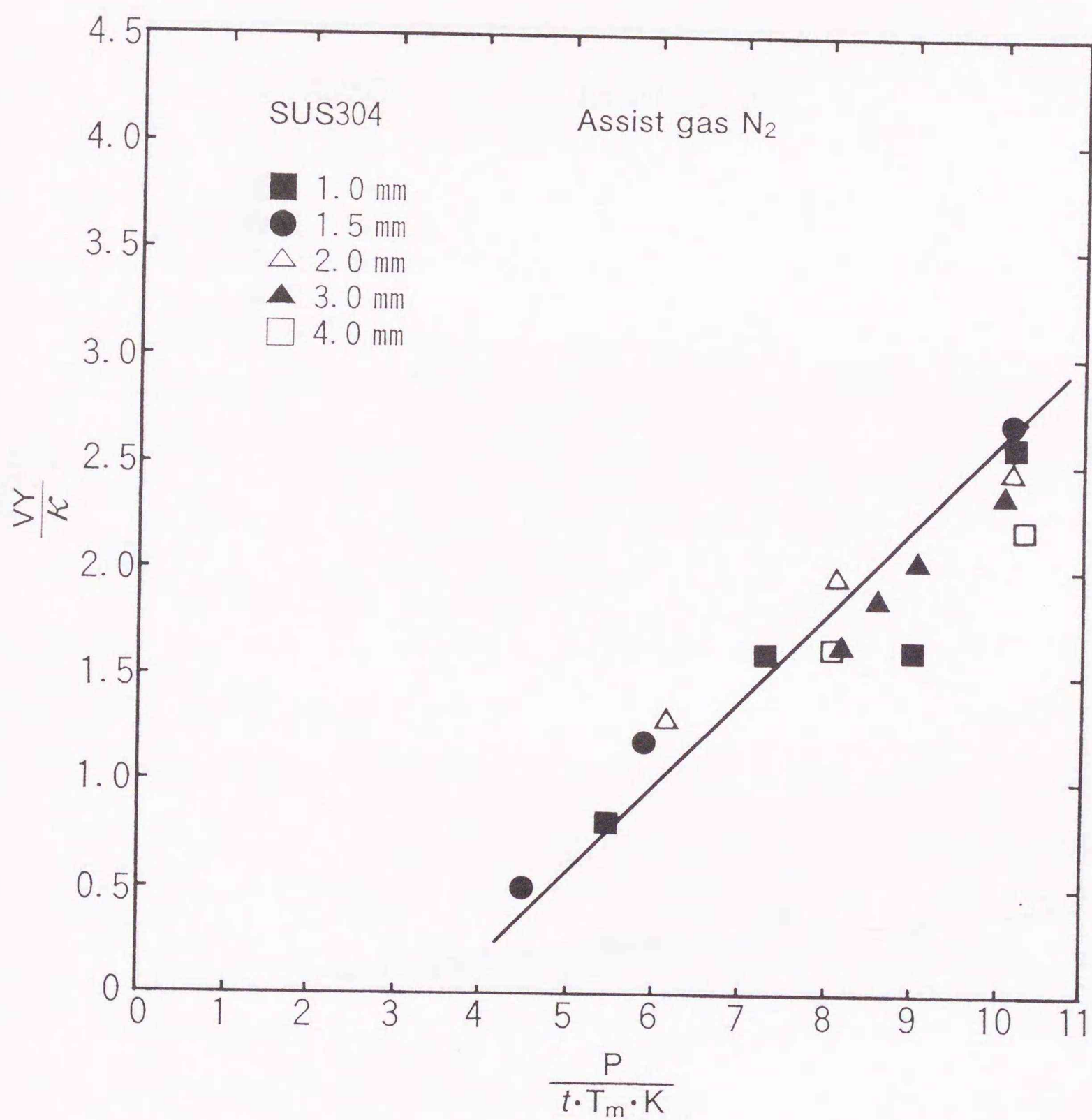


図 7・6 SUS 304 加工条件の無次元化データ

アシストガス Air、N₂

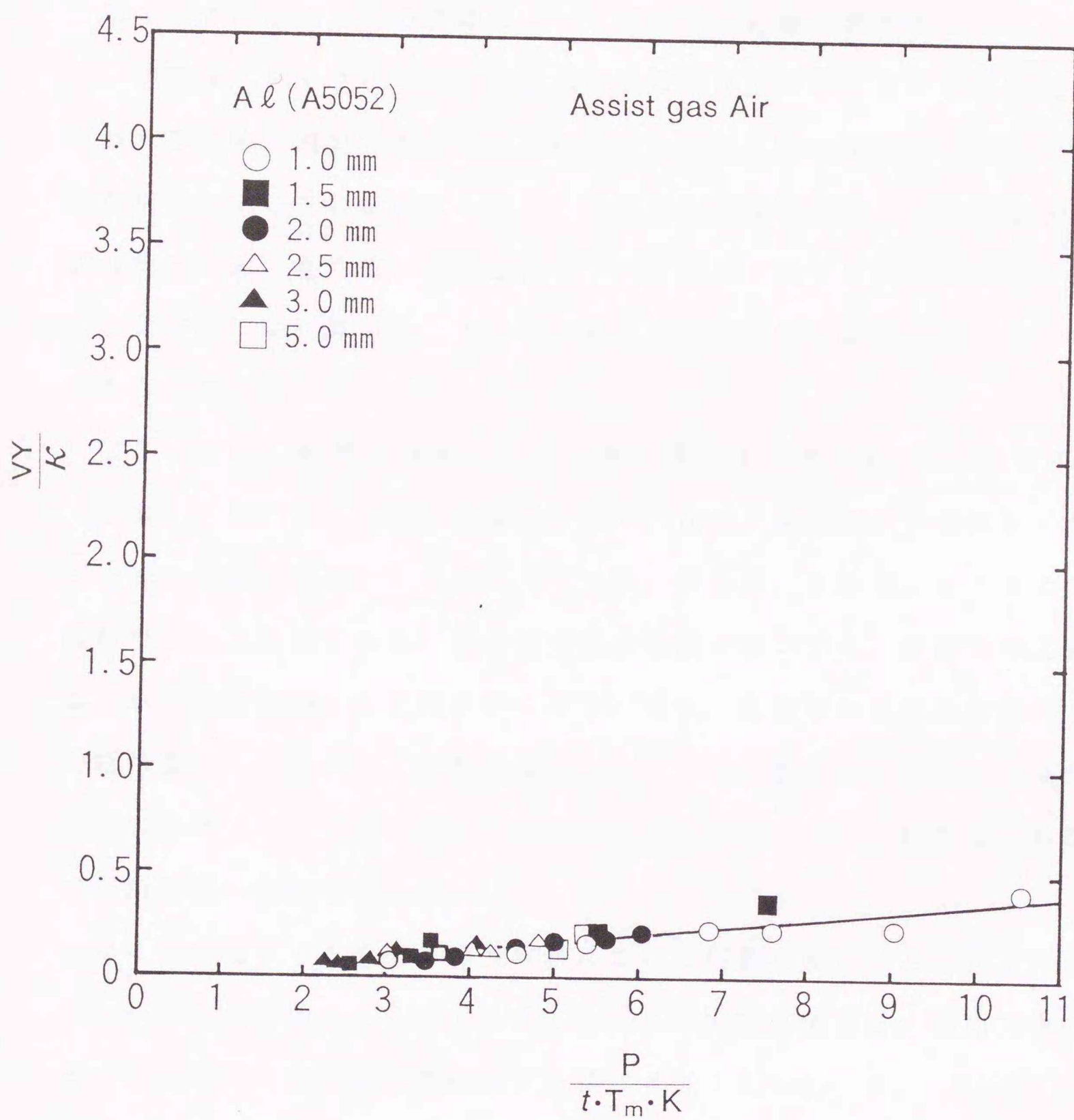


図 7・7 A1 (A5052) 加工条件の無次元化データ

アシストガス Air

7・3 被加工物のビーム反射率と偏光度の影響

第4章では被加工物の種類によって偏光度の影響の異なることを示した。切断は、レーザビームが切断溝内を多重反射することにより加工が行われるため、照射するビームの偏光度と被加工物の反射率との間に密接な関係のあることが考えられる。被加工物の反射率は、自由電子論により算出でき、温度依存性がある⁽⁵¹⁾。本論文で扱うビーム反射率は、自由電子論により算出し、すべての材料が固体状態の温度が600°Cでのものである。

図7・8は、板厚2mmの被加工物の最大ずれ量 L_{max} と板厚 t の比(L_{max}/t)と反射率との関係を示す。なお、図中のデータはレーザビームの円偏光度 P_o が65%、72%、79%、85%、95%の5種類での加工結果である。どの偏光度の切断においても、反射率の大きな被加工物の L_{max}/t は大きくなる。また、反射率の大きい材料ほど切断精度(L_{max}/t)は偏光度のばらつきの影響を受けやすい。偏光度の大きい(100%に近い)ビームを用いる加工ほど、材料の反射率の切断精度への影響が小さい。

第4章の図4・4では、各種材料において円偏光度 P_o と最大ずれ量 L_{max} と比例関係のあることを示した。この実験結果から、被加工物のビーム反射率 R と円偏光度に対する精度 β ($|L_{max}/t/P_o|$)との関係を図7・9に示す。同図より偏光度と切断精度の関係は、被加工物のビーム反射率によって支配されていることがわかる。

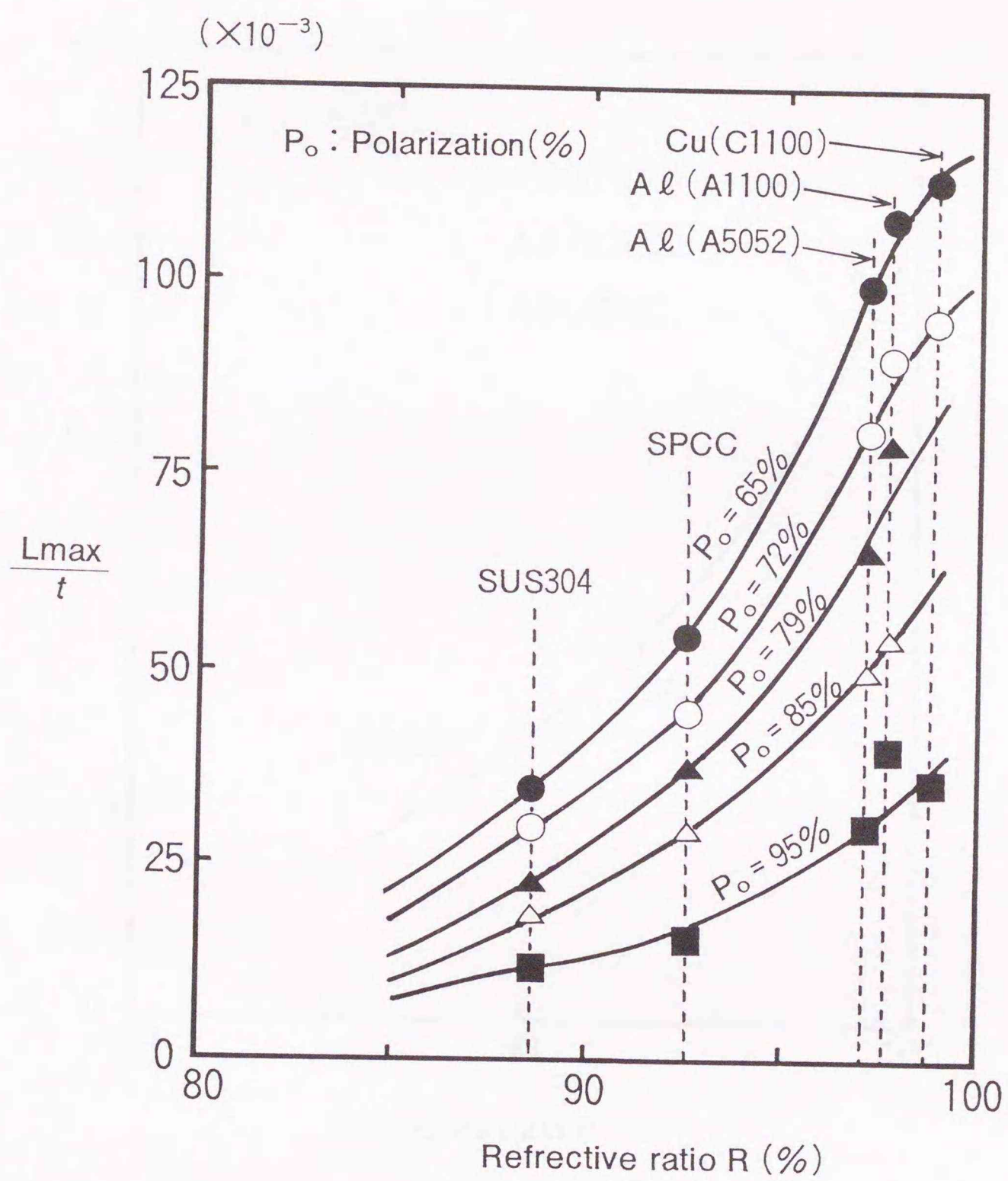


図 7・8 加工精度への被加工物のビーム反射率の影響

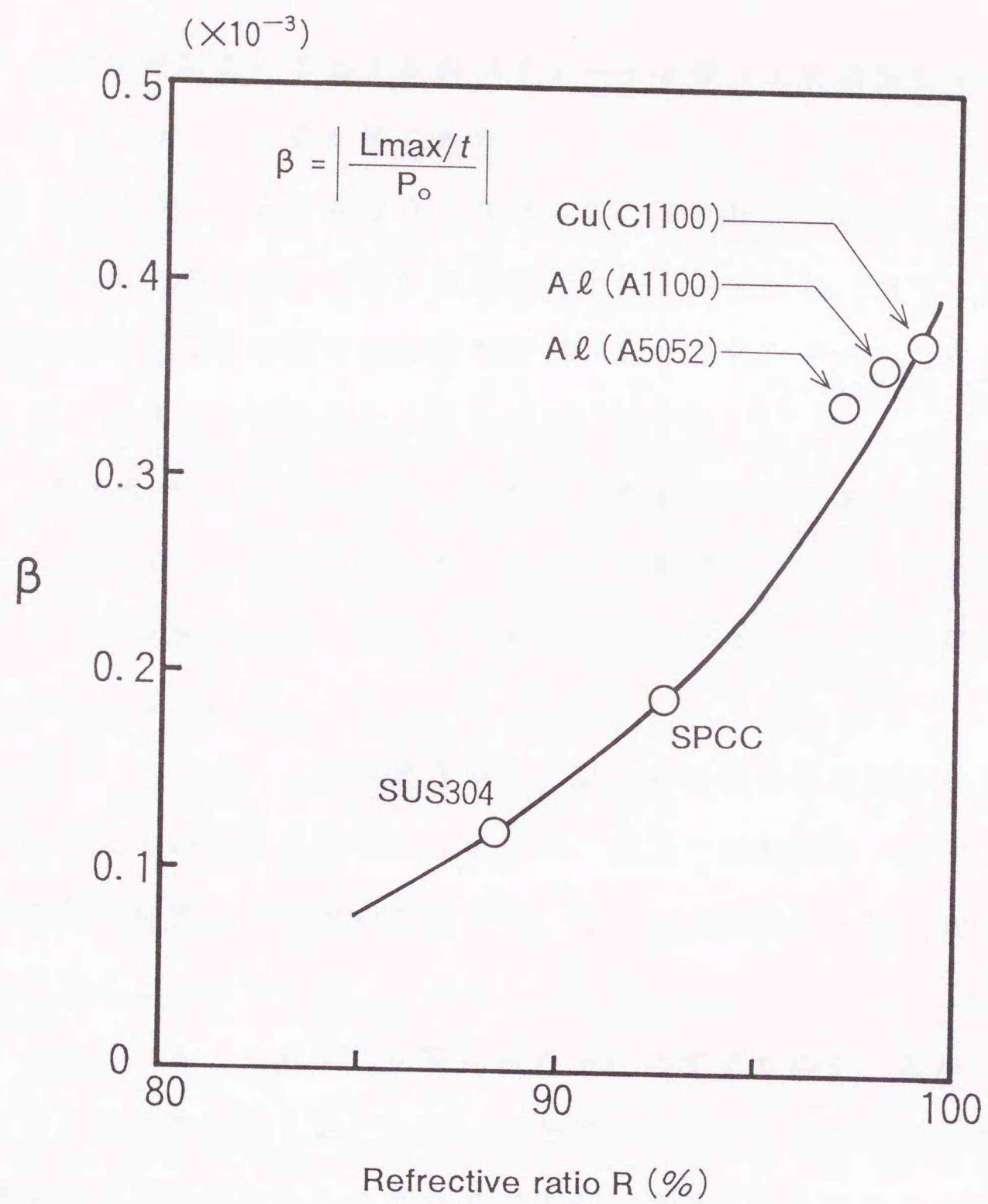


図 7・9 偏光度の影響と被加工物のビーム反射率の関係

7・5 第7章の結言

レーザ切断における加工条件パラメータと被加工物の物性値との関係を調査し、以下の結果が得られた。

- (1) 軟鋼材料 (SS400、SPCC、SPHC) の切断品質を良好にするための、板厚ごとの最適加工条件を追求した。出力、切断速度、被加工物の板厚の間には密接な関係が成り立ち、それらの関係から適正条件を推定できることを示した。
- (2) Al合金 (A5052) の切断品質を良好にするための、板厚ごとの最適加工条件を追求した。出力、切断速度、被加工物の板厚の間には密接な関係が成り立ち、それらの関係から適正条件を推定できることを示した。
- (3) ステンレス鋼 (SUS304) の切断品質を良好にするための、板厚ごとの最適加工条件を追求した。出力、切断速度、被加工物の板厚の間には密接な関係が成り立ち、それらの関係から適正条件を推定できることを示した。
- (4) 銅 (C1100) の切断品質を良好にするための、板厚ごとの最適加工条件を追求した。出力、切断速度、被加工物の板厚の間には密接な関係が成り立ち、それらの関係から適正条件を推定できることを示した。
- (5) 円偏光度の加工精度への影響は、被加工物のビーム反射率と密接な関係のあることを示した。ビーム反射率の大きな材料ほど、切断精度は円偏光度のばらつきの影響を大きく受けた。また、一定の円偏光度で加工した場合も高反射材料ほど切断精度は悪化した。

第8章 結 論

レーザ切断とは、集光ビームにガスジェットを併用し、被加工物を急速に溶融・蒸発させる熱加工方法である。同法の加工精度に関する研究は、酸化反応エネルギーとビームエネルギーの相乗効果の取扱い、切断溝内を流れる溶融金属の粘性流動の取扱い、レーザビームの照射条件で変化する材料の光学特性の取扱いなど、多くの困難さを抱えている。そのため、レーザ切断の生産現場への導入が遅れている。

本研究では、CO₂レーザによる切断特性の工学的実証と切断精度の向上を図ることを目的として、レーザ切断精度に対する切断パラメータの影響、切断現象の解明を検討すると共に、これらの結果に基づいて、切断精度を向上させるための改善方法について、工業的応用の立場からの研究を述べたものである。

本研究で得られた結論および成果を各章毎に説明する。

第1章は、本論文の緒言である。1960年のメイマンによるルビーレーザの発振成功以来、現在に至るまで実用化されたレーザの種類とレーザ加工および加工特性向上のために試みられた検討について示し、そして本研究の位置づけを行い、本研究の目的を述べた。

第2章ではレーザ切断の大きな特徴であるビームの集光特性の切断品質へ及ぼす影響について検討し、次の結果を得た。

(1) 酸化発熱反応をほとんど伴わない加工、例えばエアーを用いたアル

ミニウム切断や窒素ガスを用いたステンレス切断では焦点位置を被加工物表面より下方に設定することで、切断品質の向上が図れる。

(2) 軟鋼の薄板切断において、上部切断溝幅と下部切断溝幅の差は、集光性の高いレンズを使用することと、焦点位置を被加工物表面に設定 ($Z = 0 \text{ mm}$) することで最も小さくなる。

(3) 軟鋼厚板のCW切断では、切断溝幅にある程度の広がりを持たせ熔融金属の排出を効果的に行うことで、ドロス付着の防止やセルフバーニング発生の防止ができる。本実験結果では焦点位置を被加工物の上方に設定し、広がり角度を持たせたビームの照射で良好な切断品質が得られた。

(4) アクリル樹脂の切断での上部切断溝幅と下部切断溝幅の差を小さくするためには、ビームの集束角度は被加工物内部で広がり角度を持たせることで良好な品質が得られた。

第3章では、パルス特性の切断品質へ及ぼす影響について調査し、次の結果を明らかにした。これらの関係から高ピークパルス波形および立ち上がりと下がり速度の大きなパルス波形が加工品質の向上につながると考えられる。

(1) レーザ出力のパルス特性において、パルスピーク出力が小さいほど、かつパルス周波数が小さいほど切断溝の周囲に発生する熱影響層幅は小さくなる。

(2) 切断面粗さは、1パルス当りの照射時間が短いほど良好になる。しかし、高周波数になるほど出力リップル率が小さくなることから、面粗度の改善効果は小さくなる。

(3) 焦点位置が $Z = 0 \text{ mm}$ 近傍では、高周波パルス切断による切断溝幅はCW (連続波) 切断での溝幅に比べ広いが、 $Z = 1 \text{ mm}$ 以上では狭

くなる。この切断溝幅の広がりやをビーム照射部の温度分布（仮定）より論じた。高周波パルス切断では、焦点位置が変化し切断溝幅が広がる場合でも、酸化反応の広がりを制御できるため、切断溝幅や加工品質の変化を抑えやすい。

- (4) 出力リップルの影響と思われる薄板のCW切断における切断面粗さの悪化は、高周波パルスによる規則正しい出力波形のリップルを用いることで改善される。

第4章では切断溝の傾斜を簡易的に測定できる方法を提案して、円偏光度と切断精度との関係について検討し、以下の結果を得た。

- (1) 非金属材料では円偏光度の影響は小さいが、金属材料では円偏光度の影響を大きく受ける。とくに、銅やアルミニウムなどの CO_2 レーザービームの高反射率材料ほど、偏光度の影響は大きい。偏光度と切断溝の傾斜量との間には比例関係があり、円偏光度が低下するほど傾斜量は大きくなる。
- (2) 非鉄金属材料の切断では、ビーム吸収剤を材料表面に塗布すると円偏光度が原因の切断溝の傾斜は少なくなる。
- (3) 円偏光度が一定のもとで、被加工物の板厚が大きくなるほど切断溝の傾斜は大きくなる。切断中に発生するセルフバーニング現象の原因の一つにこの円偏光度の悪化が挙げられる。低い円偏光度で加工した場合、切断溝の傾斜が大きく生ずる加工面でセルフバーニングが発生する。
- (4) 切断溝の傾斜は加工条件のパラメータによっても左右される。加工速度の低下と出力の増加は切断溝の傾斜を少なくする。また、焦点位置は $Z = 0 \text{ mm}$ の設定で傾斜が最も少なくなる。
- (5) アシストガス中の酸素の含有割合が大きいほど切断溝の傾斜は少な

くなる。

第5章では金属材料の切断品質とアシストガスの関係について研究し、次の結果を得た。

- (1) 軟鋼厚板の切断では、一穴ノズルより噴出した酸素ガスに空気が巻き込まれ、切断品質が悪化する。この空気の巻き込み対策として二重ノズルを用い、加工部を酸素ガスでシールドすることによって改善できることを示した。さらに、良好な切断品質をもたらす各種加工条件パラメータの中で、ノズル高さと焦点位置の適正範囲が拡大した。
- (2) アルミニウム合金の切断では、溶融金属の粘性が大きくドロスの付着が起きやすいが、アシストガス圧を高く設定することで、ドロスの付着量の減少することを示した。
- (3) ノズルより噴出するアシストガス圧の測定を行い、ノズル出口のストレート部の長さが、ノズル直下のガス圧を高圧に維持するために効果的であることを示した。
- (4) 板厚12mmのSS400を用いて、CW切断におけるアシストガス圧の最適条件と上部切断溝幅には密接な関係のあることを示した。ガス圧が低圧では溝幅が広く、高圧ほど溝幅が狭い側に適正な条件が存在する。
- (5) ノズル芯ずれによって起きる切断面の粗れは、コアンダ効果によって発生するものである。

第6章では、切断形状のプログラムに工具径補正（オフセット）を加える上で重要な切断溝幅の推定について検討し、以下の結果を得た。

- (1) 切断中に被加工物裏面から透過するレーザ出力を測定し、実際の加工に利用されるレーザ出力の割合から溶融面積を推定した。
- (2) 切断中の被加工物の加工に寄与するレーザ出力は、切断速度の低速

度域からガウジングの起きる切断限界速度までほぼ直線的に増加することが判明した。

(3) 酸素ガスとアルゴンガスをアシストガスとして使用した結果、レーザー出力の利用率が同じであれば、アシストガス種類の差によらず切断溝幅は同じであった。

(4) 本研究で採用した熱伝導計算の結果は、酸化反応を伴わないアシストガスを用いた加工では実験値とよく一致した。

第7章では前章までの検討で得られた加工条件や切断精度と被加工物の物性値との関係を追求した。その結果、同一物性値であれば板厚、加工出力、加工速度とには密接な関係があり、僅かな実験データから未実験の加工データを予測できることを示した。さらに、第4章で明かにした偏光度と切断精度との関係を、被加工物のビーム反射率によって整理できることを示した。

以上、本研究で得られた結果から、各種材質の切断精度に及ぼすビーム集光特性、パルス特性、偏光特性、アシストガス状態の影響を示すことができた。ビーム集光特性の影響では主に加工レンズ焦点距離の差による集光スポット径と加工品質の関係を示し、最適値を明らかにできた。また、加工部でのビームの集束角は高反射材料や非金属材料の切断精度に対し最も重要な要因であることを示すことができた。

ビームの集光特性を決定する要因には、この他にビームモードと加工レンズへの入射ビーム径がある。現在、軟鋼の厚板にはシングルモードに対し、マルチモードでの切断が有利であることを経験的に認識しているが、まだ断片的な検討結果に過ぎない。現状のレーザー加工機における加工レンズへの入射ビーム径の決定は、発振器から出射したレーザービー

ムが光路系と干渉せず伝搬されることのみを考慮した設計になっており、加工品質側からの要求仕様が明確ではない。今後は加工レンズへの入射ビーム径とモードの影響を検討しその最適化を検討する必要があるだろう。

パルス特性の影響ではパルスピーク出力とパルス周波数が切断面粗さと加工部熱影響層の品質改善に効果あることを明らかにできた。この実験結果は広範囲な材料の加工に適用される可能性がある。しかし、本論文の実験で使用した三軸直交型発振器による矩形パルス波形はパルスピーク出力が最大3 kWであり、被加工物の板厚が9 mm以下では3 kW以下のピーク出力範囲で切断品質の改善効果がほぼ飽和したが、さらに板厚が大きくなるとより高いパルスピーク出力の効果が期待できるため、これらを検討する必要があるだろう。

偏光の影響ではとりたてて特別な実験装置を必要としないで、円偏光度と切断精度の関係を示せたことも、大きな利点である。なお、加工精度を示すモデルとして提案したスリットずれ量の測定方法は、選択する加工条件によっても変化するため、各種材料の同一加工条件における比較も必要であろう。本実験では加工速度のみ同一設定値としている。

アシストガス状態の影響では酸素ガス濃度と厚板の切断能力との関係を示し、加工部の酸素ガスシールドにより切断能力の改善できることを明らかにした。さらに、本実験では二重ノズルの有効性を示したが、ノズル形状についてはノズルからの噴出ガスの可視化や流体シュミレーションなどによりさらに最適形状の検討が必要であろう。

切断溝幅の推定では軟鋼の薄板を不活性ガスを用いて切断する場合に適用できることが示せたが、活性ガスを用いた場合の酸化反応の影響を取り入れた解析の検討が必要である。

参 考 文 献

- (1) 荒田・竹内・宮本、“レーザガス切断に関する基礎研究(第1報)” 高温学会誌、Vol.4 No.3(1978)、122
- (2) 荒田ら、溶接学会全国大会講演概要集、(1987)、第30集、44
- (3) 荒田・竹内・宮本、“レーザガス切断に関する基礎研究(第2報)” 高温学会誌、Vol.5(1979)、No.2、101
- (4) Arata.Y・ほか3名、“Dynamic Behavior in Laser Gas Cutting of Mild Steel” Transaction of JWRI、8、2、(1979)、15
- (5) 村田・林、“CO₂レーザによる技術の研究” 小松技報、30、3、(1984)、164
- (6) 宮崎・篠永・増田、“レーザ切断面アラサに及ぼすレーザ出力脈動の影響について” 溶接学会全国大会講演概要集、41、(1987)、332
- (7) Miyamoto.Iほか、Proceedings of 4th CISFFEL(1988)
- (8) 丸尾・宮本・大家、“薄板のレーザガス切断におけるレーザ出力変動と切断面粗さの関係”、溶接学会誌、10、(1992)、1、138
- (9) 森・久米原・須田・原田・武藤、“CO₂レーザによる鋼板の切断精度”、精密機械、50、12、(1984)、118
- (10) 金岡、“レーザ切断精度におよぼすビーム集光特性の影響”、日本機械学会論文集(C編)、56、531、(1990-11)、3116

- (11) Olsen.F.O., D V Sberichte, 63(1980)、197
- (12) 松野、溶接技報、(1981)、SEPT、Vol.29、No.9、21
- (13) M.Erard、Possibltees offertes par le prechauffage du jet
de gazen coupage an laser (H.P.L 155)
- (14) 宮本、“レーザ切断の基礎”第19回レーザ熱加工研究会資料、(1988)、3
- (15) “アシストガスの役割は”、プレス技術、(1985)、23、6、30
- (16) 木谷・森安・林・金岡、“炭酸ガスレーザの新応用”三菱電機技報、Vol.
63、No.4(1989)、17
- (17) 荒田・丸尾・宮本・竹内・川端、“レーザガス切断に関する基礎研究(第
3報)”、溶接学会全国大会講演概要集、(1978)、22
- (18) 浦井、“最近CO₂レーザ加工の展開(2)”、機械と工具、(1987-10)、
120
- (19) 米山・植松、“CO₂レーザ加工の研究<第2報>”、アクリル切断の挙動
(1981)、785
- (20) 木谷・金岡、“レーザ切断の適正加工条件の選定”プレス技術、(1986)、
24、9、26
- (21) 木下・木村・中村・石川・佐野、“CO₂レーザによる厚板鋼板の切断”、
精機学会春期大会学術講演会論文集 (1985)、139

- (22) C.S.Lee.A.・Goel.H.Osada、Parametric Studies of Pulsed-Laser Cutting of thin Metal Plates、(1985)、44、86
- (23) J.Powell・TG.King・IA.Menzies、Proceedings of ICALEO '84(1984)、44、76
- (24) 後藤・山本・浦井、“高速軸流形炭酸ガスレーザの切断特性(第1報)”、溶接学会全国大会講演概要集、(1984)、35、84
- (25) 宮本、“レーザガス切断に関する基礎研究(第3報)”、接学会全国大会講演概要集、(1978)、40、6
- (26) 木谷・金岡・柴山・吉田、“炭酸ガスレーザ加工技術”、三菱電機技報、(1987)、Vol.61、No.6、44
- (27) 金岡、“レーザ切断精度におよぼすビーム集光特性の影響”、日本機械学会論文集(C編)、56、531、(1990-11)、3116
- (28) 木谷・金岡、“レーザ切断の適正加工条件の選定”、プレス技術、Vol.1、24、No.9、(1986)
- (29) 金岡、“微細形状のためのCO₂レーザ加工技術”、機械と工具、Vol.35、No.7、(1991)
- (30) 金岡、“軟鋼厚板のレーザ切断品質に関する研究”、日本機械学会論文集(C編)、57、539、(1991-7)、2441
- (31) 森・久米原・須田・原田・武藤、“CO₂レーザによる鋼板の切断精度”、精密機械、50、12、(1984)、118

- (32) 金岡、“レーザ切断精度に及ぼす偏光度の影響”、日本機械学会論文集 (C編)、57、544、(1991-12)、3997
- (33) 有年・ほか5名、“アルミニウム合金薄板のレーザ切断に関する研究”、日本機械学会論文集、54、507 (昭63)、2794
- (34) 木下・ほか4名、“CO₂レーザによる厚板軟鋼の切断”、精密機械学会春期大会学術講演会論文集、411. (1985-3)、139.
- (35) 西川・ほか4名、“高速軸流形炭酸ガスレーザの切断特性(1)パルスレーザ切断の効果”溶接学会全国大会講演概要集第35集、(昭59-10)
- (36) 金岡・ほか2名、“レーザ切断性能に及ぼすパルス特性の影響”、溶接学会第109回溶接法研究委員会、(昭61)SW-1713
- (37) 島田・ほか2名、“CO₂レーザによる切断加工” O pulus E、(1981-12) 70
- (38) 荒田・ほか3名、“金属材料のレーザ溶接-第1報”、溶接学会誌、(1980)、49-10
- (39) 荒田・竹内・宮本、高温学会誌、Vol.40(1987)、3、122
- (40) 金岡、“CO₂レーザの矩形パルス波形による切断品質の研究”、高温学会誌、Vol.18、No.3(1992)、130
- (41) 荒田ら、“レーザ切断に関する基礎研究(5)”、溶接学会全国大会講演概要集、(1982)、第30集、pp44
- (42) 山内、“レーザ加工の現状と動向”、レーザ熱加工研究会、(1988)2-2-3

- (43) 大家・ほか3名、溶接学会全国大会講演概要集、43(1985-3)、139.
- (44) 宮本・ほか2名、“レンズ内の温度分布—レーザ用光学部品の熱誘起光学ひずみ(1)、(2)”、溶接学会全国大会講演概要集、45(1989-9)、222、223
- (45) Kanaoka.M・Kitani.M、“Report on Current CO₂ Laser Apprication in Japan” SPIE 952 Laser Technologies in Industry (1988)、600
- (46) 小山内・金原・菱井、昭和62年レーザ学会学術講演会 第7回年次大会(1987)、30a、N、3
- (47) 荒田・宮本、“大出力炭酸ガスレーザの熱源的研究(第2報)” 溶接学会誌、Vol.40(1971)、No.12、1249
- (48) 辻、容器内流れ学、(1984)、日刊工業新聞社
- (49) Gert Broden・Hans-Ole Ketting、“レーザ切断作業における切断酸素純度の影響”、ジョイテック、2、(1990)、37
- (50) Arata.Y・ほか1名、IIW Doc.、IV-4-69(1969)、Mar.
- (51) レーザ加工技術解説書、JWES-TP-8201、社団法人日本溶接協会
大出力レーザ金属加工法研究委員会、昭和57年8月
- (52) 丸尾・ほか3名、“レーザ切断に関する基礎研究(7)” 溶接学会講演概要集、Vol.41(1987)、322、323
- (53) 難波、レーザと加工、1983、85、共立出版社

- (54) 荒田・ほか3名、“レーザガス切断に関する基礎研究(第5報)”、溶接学会講演概要集、Vol.30(1982)、44、45
- (55) K.Horio・T.Kasai、Proceedings of International Symposium for Electro-Machining (ISEM-9)、Nagoya(1989)、203
- (56) 久保田・浮田・會田、光学技術ハンドブック、朝倉書店、(1978)、66
- (57) 久保田、応用光学、岩波全書、(1977)、22
- (58) A.Yariv、光エレクトロニクスの基礎、丸善、(1974)、63
- (59) L.P.Dickson、Appl Opt、9、1854、(1970)
- (60) 最新切断技術総覧、(1985)、産業技術サービス
- (61) W.W.Duley、“CO₂Laser-Effects and Applications”、ACADEMIC PRESS (1976)
- (62) 例えば 金原編“一般物理学” 裳華房
- (63) 例えば 重松他“東芝CO₂レーザ加工装置”、溶接技術、1981、SEPT、Vol.29、No.9、64
- (64) 竹内貞雄、“金属のレーザガス切断に関する基礎研究”、大阪大学博士論文、昭55年

主要記号一覧

—第2章—

S	: 集光径(mm)
D	: 加工レンズへの入射ビーム径
f	: 加工レンズ焦点距離(mm)
n	: 屈折率
λ	: レーザ光波長【CO ₂ : 10.6 μ m】
ω_0	: ビーム伝搬でのスポット径
d_1	: 入射ビームのスポット位置からレンズまでの距離
Z	: 焦点位置(mm)
PW	: パルス波
CW	: 連続波
P	: アシストガス圧(kPa)
C	: 焦点位置を被加工物内部に設定した場合の表面位置
T, D	: 焦点位置を被加工物上部に設定した場合の表面位置

—第3章—

P _p	: パルスピーク出力(W)
P _a	: パルス平均出力(W)
t	: パルスON時間(sec)
T	: 1パルス時間(sec)
f _p	: パルス周波数(Hz)
D	: パルスデューティ(%)
W _a	: 照射出力(W)
W _b	: 透過出力(W)
γ	: 被加工物のエネルギー吸収率(%)

h	: 被加工物板厚(mm)
H_u	: 被加工物表面から0.5mmの熱影響層幅(mm)
H_m	: 被加工物の板厚中央部の熱影響層幅(mm)
H_d	: 被加工物裏面から0.5mmの熱影響層幅(mm)
L	: 溶け落ち長さ(mm)
R_u	: 被加工物表面から0.3mmの切断面粗さ(μm)
R_d	: 被加工物裏面から0.3mmの切断面粗さ(μm)
d	: 切断溝幅(mm)
d_u	: 上部切断溝幅(mm)
d_d	: 下部切断溝幅(mm)
η	: パルス出力のリップル率(%)
HPW	: 高周波パルス
P_u	: 切断面の条痕ピッチ(mm)
T_s	: 蒸発・溶融の発生する限界温度
VR	: 酸化反応の進行速度
T_E	: 酸化反応が維持される位置の限界温度
C_s	: 連続波切断において T_s によってきまる切断溝幅
P_s	: 高周波パルス切断において T_s によってきまる切断溝幅
C_E	: 連続波切断において T_E によってきまる切断溝幅
P_E	: 高周波パルス切断において T_E によってきまる切断溝幅
W_c	: 連続波切断において得られる切断溝幅
W_p	: 高周波パルス切断において得られる切断溝幅

— 第4章 —

i	: 入射角
r	: 屈折角
E	: 入射ビーム
E'	: 反射ビーム
E''	: 吸収ビーム
E_p, E_p'	: レーザ光の入射面に平行なベクトル

E_s, E_s'	: レーザ光の入射面に垂直なベクトル
R_p	: 入射面に平行成分の反射率
R_s	: 入射面に垂直成分の反射率
A_p	: 入射面に平行成分の吸収率
A_s	: 入射面に垂直成分の吸収率
L_{max}	: 最大スリットずれ量(μm)

— 第5章 —

d	: ノズル径(mm)
h	: ノズルのストレート部長さ(mm)
C_o	: ノズル出口のガス濃度
C	: 噴射ガスの濃度
D	: 乱流拡散係数
H	: ドロス高さ(mm)

— 第6章 —

P	: 出力(cal/s)
t	: 板厚(cm)
K_o	: 第2種変形ベッセル関数
K	: 熱伝導度(cal/°C·s·cm)
κ	: 熱拡散率(cm ² /s)
f	: 切断に使用される出力の割合
T_m	: 被加工物の溶融点温度(°C)
f_{in}	: 加工レンズ焦点距離(mm)
λ	: レーザ光波長
r_{in}	: レンズ入射ビーム径(mm)
V	: 切断速度(m/min)

— 第7章 —

Y	: 上部切断溝幅(cm)
-----	--------------

v	: 切断速度(cm/s)
κ	: 熱拡散率(cm^2/s)
K	: 熱伝導率($\text{J/s cm } ^\circ\text{C}$)
t	: 被加工物板厚(cm)
T_m	: 被加工物融点($^\circ\text{C}$)
P	: 出力(J/s)

図・表一覧

第1章 序論

図1・1	切断中の外観	5
図1・2	切断用加工ヘッドの構造	6

第2章 ビーム集光特性の切断品質へ及ぼす影響

図2・1	入射ビーム径と集光径との関係	21
図2・2	被加工物直下の動圧分布	24
図2・3	A1合金切断での焦点位置変化と切断溝形状の関係	28
図2・4	切断溝形状と切断溝より抜けるアシストガスの関係	29
図2・5	焦点位置と空孔形成の関係	30
図2・6	無酸化切断での焦点位置変化と切断面との関係	33
図2・7	焦点位置と上部切断溝幅の関係	34
図2・8	切断溝寸法に及ぼす加工レンズ焦点距離の影響	39
図2・9	切断溝寸法に及ぼす焦点位置の影響	40
図2・10	切断溝の寸法測定部	41
図2・11	板厚6mmの切断における加工レンズ焦点距離と面粗さの関係	42
図2・12	板厚4.5mmの切断における加工レンズ焦点距離と面粗さの関係	43
図2・13	切断出力および速度と切断面粗さの関係	44
図2・14	アシストガス圧と切断溝幅の関係	51
図2・15	焦点位置と切断溝幅の関係	52
図2・16	焦点位置と切断部前面の関係	53
図2・17	各種焦点距離レンズでの焦点位置と切断溝形状の関係	54
図2・18	f127mmレンズによる切断	55

図 2・19	f 190.5 mm レンズによる切断	56
図 2・20	アクリル切断での切断速度と切断溝形状の関係	59
図 2・21	アクリル切断での焦点位置と切断溝形状の関係 f 254 mm レンズでの場合	60
図 2・22	アクリル切断での焦点位置と切断溝形状の関係 f 127 mm レンズでの場合	61
図 2・23	集束角度を平行に近づけた場合の切断溝形状	62
表 2・1	被加工物の化学組成	23
表 2・2	各種焦点距離のレンズによる切断溝幅	41

第3章 パルス特性の切断品質へ及ぼす影響

図 3・1	ローテーティングワイヤ法により測定した ビームモード	69
図 3・2	パルスパラメータを示す概略図	70
図 3・3	実験に用いた発振器のパルス波形	70
図 3・4	透過出力測定の概略図	71
図 3・5	パルスピーク出力の切断溝幅と熱影響層に及ぼす影響	74
図 3・6	パルスピーク出力と熱影響層幅の関係	75
図 3・7	パルスピーク出力とエッジ部の溶け落ち長さとの関係	76
図 3・8	パルスピーク出力と切断面粗さとの関係	77
図 3・9	パルス周波数と熱影響層幅の関係	81
図 3・10	パルス周波数の切断溝幅と熱影響層に及ぼす影響	82
図 3・11	パルス周波数とエネルギー吸収率との関係	83
図 3・12	上部切断面粗さ R_u	84
図 3・13	下部切断面粗さ R_d	85
図 3・14	パルス周波数と切断溝幅の関係	86
図 3・15	パルス出力による切断モデル	87
図 3・16	1 パルス当たりのエネルギーと切断面粗さの関係	88
図 3・17	リップル率	92

図 3・18	切断面の外観写真	94
図 3・19	パルス周波数と切断面上部に発生する 条痕ピッチの関係	95
図 3・20	パルスデューティと切断面上部に発生する 条痕ピッチの関係	96
図 3・21	連続波切断および高周波パルス切断での切断面粗さ	98
図 3・22	パルス周波数と切断面粗さの関係	99
図 3・23	パルスデューティと切断面粗さの関係	100
図 3・24	切断溝の横断面写真	104
図 3・25	連続波切断によって得られた切断溝幅	105
図 3・26	高周波パルス切断によって得られた切断溝幅	106
図 3・27	連続波(CW)と高周波パルス(HPW)による切断現象	107
図 3・28	CWおよびHPW切断での切断面拡大写真	110

第4章 切断精度に及ぼす偏光度の影響

図 4・1	金属材料における入射角と反射角の関係	117
図 4・2	加工機光路系の概略図	120
図 4・3	加工形状	121
図 4・4	偏光度とスリットずれ量の関係	124
図 4・5	出力とスリットずれ量の関係	127
図 4・6	加工速度とスリットずれ量の関係	128
図 4・7	ピアシング部と切断部のずれ量	129
図 4・8	被加工物板厚とスリットずれ量の関係	131
図 4・9	円偏光度65%のレーザ光による切断サンプル	132
図 4・10	焦点位置とスリットずれ量の関係	134
図 4・11	アシストガスの混合比とスリットずれ量の関係	136

第5章 アシストガス条件の最適化

図 5・1	実験で使用したノズルの概略図	141
図 5・2	アシストガスの圧力と流量の関係	142
図 5・3	ガス噴流の等濃度線	145
図 5・4	一様流中の円形噴流の軸上ガス濃度の減衰	146
図 5・5	アシストガスの酸素純度と切断品質の関係	150
図 5・6	サイドノズルを設置した加工ヘッド概略図	151
図 5・7	切断面拡大写真	152・153
図 5・8	ノズル径と切断品質の関係	154
図 5・9	不良ノズルによる切断	155
図 5・10	試作二重ノズルの概略図	158
図 5・11	二重ノズルによる切断サンプル	159
図 5・12	外側ノズルより窒素ガスを噴出し切断したサンプル	160
図 5・13	レーザ出力と切断速度の関係	
	(a) 一穴ノズルによる切断	161
	(b) 二重ノズルによる切断	162
図 5・14	最大切断速度での切断面	163
図 5・15	ノズルより噴出するガスの観察	166
図 5・16	厚板切断での二重ノズルの効果の説明	167
図 5・17	ノズル直下の動圧分布	
	(a) ストレート部長さ 5 mm	169
	(b) ストレート部長さ 0 mm	170
図 5・18	アルミニウム切断でのアシストガス圧と ドロス高さの関係	172
図 5・19	良好切断が可能なアシストガス圧と切断溝幅の関係	174
図 5・20	コアンダ効果	
	(a) 芯ずれのない場合	176
	(b) 芯ずれのある場合	176
図 5・21	ノズル芯ずれと加工不良の関係	178

第6章 軟鋼薄板のレーザ切断における切断溝幅の推定

図6・1	照射ビームと切断溝幅の関係	188
図6・2	Y_{max} とSの関係	190
図6・3	出力500Wでの切断溝幅	192
図6・4	出力1000Wでの切断溝幅	193
図6・5	出力1500Wでの切断溝幅	194
図6・6	出力500Wでの切断溝幅	196
図6・7	出力1000Wでの切断溝幅	197
図6・8	出力1500Wでの切断溝幅	198
図6・9	切断速度とレーザ出力の利用率との関係	201
図6・10	アルゴンガスを用いた場合の切断結果	203
図6・11	酸素ガスを用いた場合の切断結果	204

第7章 被加工物の物性値と切断特性

図7・1	SS400、SPCC、SPHC加工条件の無次元化データ（アシストガス O_2 ）	215
図7・2	SUS304加工条件の無次元化データ（アシストガス O_2 ）	216
図7・3	Al（A5052）加工条件の無次元化データ（アシストガス O_2 ）	217
図7・4	Cu（C1100）加工条件の無次元化データ（アシストガス O_2 ）	218
図7・5	SPCC加工条件の無次元化データ（アシストガスAir）	219
図7・6	SUS304加工条件の無次元化データ（アシストガスAir, N_2 ）	220
図7・7	Al（A5052）加工条件の無次元化データ（アシストガスAir）	221
図7・8	加工精度への被加工物のビーム反射率の影響	223

図 7・9	偏光度の影響と被加工物のビーム反射率の関係	224
表 7・1	各種材料の主な物性値	209
表 7・2	SS400、SPCC、SPHCの加工条件 (アシストガスO ₂)	210
表 7・3	SUS304の加工条件 (アシストガスO ₂)	211
表 7・4	Al(A5052)とCu(C1100) の加工条件(アシストガスO ₂)	212
表 7・5	SPCC, SUS304の加工条件 (アシストガスN ₂ 、Air)	213
表 7・6	Al(A5052)の加工条件 (アシストガスAir)	214

謝 辞

本論文の作成に当たり、終始御懇篤なる御指導、御援助を賜った、北海道大学工学部 石川 博將 教授には、深甚なる感謝の意を表する。

本論文をまとめるにあたって、北海道大学工学部 鶴飼 隆好 教授、同 金内 忠彦 教授、同 池田 正幸 教授には、それぞれの御専門の立場から、数々の有益な御指示、御助言をいただいた。ここに、厚く御礼を申し上げる。また、北海道大学工学部 但野 茂 助教授には、有益な御意見や励ましの御言葉をいただき、感謝申しあげる。

この論文の内容は、三菱電機株式会社名古屋製作所の試験設備によって実験・研究した結果を著者がとりまとめたものである。

三菱電機株式会社名古屋製作所 佐藤 國彦 所長、同 レーザ製造部 龍野 徹 部長、ならびに島田理化工業株式会社 石津 晴夫 氏には本論文をまとめる機会を与えてくださり、深く感謝申しあげる。研究遂行にあたり、貴重な御意見をいただいた、三菱電機株式会社 八木 重典 博士、木谷 基氏に謝意を表する。さらに、本研究の実験に関し、御助力をいただいた同レーザ製造部加工技術課 廣崎 達也氏、吉安 重宏 氏、村井 融氏始め同課の方々に謝意を表する。

