

# アシストガスを用いないレーザー切断法の開発

三重大学大学院工学研究科

教授 鈴木実平

(平成 16 年度研究助成 AF-2004015)

キーワード: レーザ切断 アシストガスフリー ステンレス鋼 冷間圧延鋼板

## 1. 緒言

金属のレーザー切断では、カーブ全面の熔融金属はアシストガス噴流の力学的な作用によって飛散させ除去される<sup>1)2)</sup>。アシストガスの主たる目的は熔融金属の除去であるが、その他に、集光レンズの汚損防止の効果や、鉄鋼材料の切断では純酸素をアシストガスを用いて鉄の酸化反応熱をレーザー出力の補助熱源に利用するような積極的な役割も持っている。しかし、アシストガス噴流を加工部に適用するためには、切断ヘッド先端部にオリフィスを備えたノズルをレーザー光と同軸に設置し、ガス噴流を切断箇所の移動に伴わせる必要がある。このアシストガスのノズル先端部は被加工材表面に近づけなければならないために、プレス成形された凹凸のある部材をレーザー切断しようとする場合などでは、ノズルと部材との干渉の発生が懸念される。さらに近年注目されている遠隔操作レーザー(リモートレーザー)を切断に適用しようとする場合では、ノズルの利用そのものが困難である<sup>3)</sup>。このような観点から、アシストガスを必要としないレーザー切断法の実現によって、レーザー切断の適用範囲が拡大すると期待できる。本論文では、アシストガスを用いないレーザー切断法を Assist Gas Free Laser Cutting(AGF レーザ切断)と呼ぶこととする。

## 2. 切断装置

実験に用いた切断装置の概要を Fig.1 に示す。容器の一面に被加工材を設置し、容器内を油回転式の

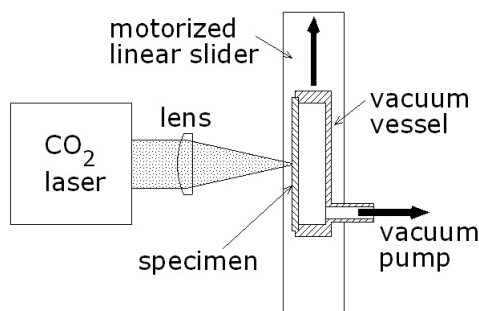


Fig.1 Schematic drawing of apparatus for Assist Gas Free (AGF) laser cutting

真空ポンプで減圧する被加工材の表裏に圧力差を与え、容器内へ流れ込む空気的作用によって熔融金属をカーブ前面から容器内に吸い込んで除去する。試験材を設置した容器全体を電動スライダによって移動させて切断実験を実施した。

切断には定格出力 1kW の連続発振の炭酸ガスレーザーを用いた。集光レンズには焦点距離 127, 254 および 508mm の 3 種類の ZnSe 平凸レンズを用い、焦点位置は被加工材の表面とした

被加工材としては SUS304 鋼板 (板厚 1.0, 1.2 および 1.5mm) および SPCC 鋼板 (板厚 0.8, 1.2 および 1.6mm) を用い、鋼種および板厚の影響を検討した。試験片は幅 40mm×長さ 230mm とし、200mm の AGF 切断を行った。

## 3. 加工可能な切断速度

AGF レーザ切断のピアッシングでは、レーザーの照射によって形成された熔融域が被加工材裏面に達する必要がある。ピアッシングの可否を判定した結果の一例を Fig.2(a) に示す。低出力-短時間ではピアッ

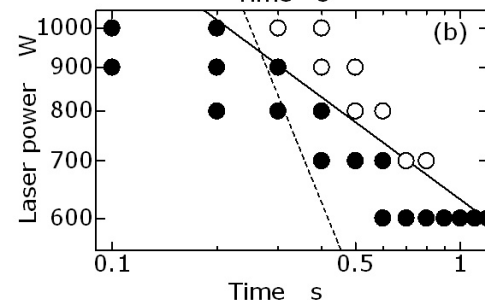
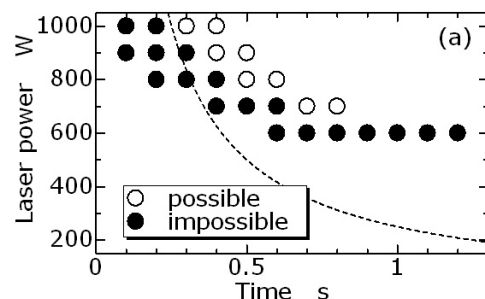


Fig.2 Example of results for piercing of SUS304 steel of 1.0mm thickness by using a lens of 254mm focal length

鋼種	板厚	集光レンズの焦点距離	$\alpha$	$\beta$	$\alpha + 1$	$10^\beta$
SUS304	1.0mm	127mm	-0.08	2.61	0.92	407
		254mm	-0.30	2.80	0.70	631
		508mm	-0.41	2.73	0.59	537
	1.2mm	127mm	-0.16	2.62	0.84	417
		254mm	-0.39	2.91	0.61	813
		508mm	-0.40	2.88	0.60	659
1.5mm	127mm	-0.26	2.63	0.74	427	
SPCC	0.8mm	127mm	-0.12	2.66	0.88	457
		254mm	-0.31	2.85	0.69	708
		508mm	-0.46	2.82	0.35	661
	1.2mm	127mm	-0.085	2.72	0.915	525
	1.6mm	127mm	-0.12	2.76	0.88	575

シングできないが、高出力-長時間では溶融域が被加工材裏面に達し、背圧によって溶融金属が容器内へ吸い込まれピアッシングされる。ピアッシングに必要なレーザーのエネルギーが一定値ならば、ピアッシング可否の境界線は双曲線になる。図(a)中の破線は照射エネルギーが250J一定の双曲線である。出力1kWではこのエネルギーでピアッシングできるが、実際にはレーザー照射中に熱輻射や熱伝動の損失が生じるので、境界線は双曲線に比較して、低出力の場合には長時間側へずれる。この結果を両対数図上に描くとFig.2(b)のようであり、ピアッシング可否の境界線は

$$\log y(\text{レーザー出力}) = \alpha \log x(\text{照射時間}) + \beta$$

でほぼ近似できる。

被加工材の種類および焦点距離の異なる集光レンズの場合について、ピアッシング可否の限界を示すレーザー出力 $y$ と照射時間 $x$ との関係を上式で近似した時の $\alpha$ および $\beta$ の値を次表に示す。

上の近似式を次のように変形して、定数 $\alpha$ および $\beta$ について考察する。

$$xy = 10^\beta x^{\alpha+1}$$

左辺 $xy$ はピアッシングまでに照射されたエネルギー量である。 $x = 1$ で固定して考えれば、 $10^\beta$ はピアッシングが1sで達成される限界のレーザー出力であり、この値は集光レンズの焦点距離が127mmの時は400~600Jであり、焦点距離が長くなると必要な出力が増大する。しかし、254mmの場合より508mmの場合の方が出力は小さく、長焦点距離の場合には一概に出力が増大してはいない。鋼種間の比較では、SUS304材よりSPCC材の場合に値が大きい。同一鋼種、同一レンズでは、板厚の増加に伴って出力が増大する。比熱

と潜熱から概算した単位体積の鉄を融解するために必要なエネルギーは6~7J/mm<sup>3</sup>であり<sup>4)</sup>、ピアッシングによって溶融除去される量は1mm<sup>3</sup>程度であるから、Table 1に示した $10^\beta$ のエネルギーの大部分はレーザー光の反射、熱輻射、熱伝導などによる熱損失量である。

右辺は照射時間 $x$ の関数であり、時間依存性は $x^{\alpha+1}$ の形である。レーザー出力の変化に伴ってピアッシングまでの時間が変化すると、ピアッシングに要する全エネルギー量が変わる。材質および板厚が同一の場合では被加工材裏面までの溶融に必要な熱量は変化しないから、エネルギー量の時間増加は熱損失の増加を意味している。 $\alpha = -1$ すなわち、 $\alpha + 1 = 0$ ならば熱損失は全くなき、エネルギー量がある値に達するとピアッシングできる。一方、 $\alpha = 0$ 、すなわち $\alpha + 1 = 1$ の場合には、熱損失が時間に比例し、加熱時間が経過しても時間当たりの熱伝損失が一定であることになる。このような温度分布の準定常状態は溶接や切断のような場合に実現される。ピアッシングのように加熱領域が固定されている場合には、レーザー加熱領域の周辺が熱伝導によって加熱され、レーザー加熱点と周囲との温度差が小さくなり、熱伝導損失が徐々に減少する。表に示したように、 $\alpha + 1$ の値は0~1の範囲であり、この値が小さい場合ほどエネルギー量の増加が短時間照射で大きく、早期に熱伝導損失が飽和する。逆にこの値が1に近い場合には照射時間が増加しても熱損失量は時間に比例し、熱伝導損失が飽和し難い。同一鋼材では、焦点距離の増加に伴って $\alpha + 1$ の値は減少している。長焦点距離の集光レンズを用いた場合には焦点の集光径が大きいために、レーザー照射の初期には伝熱損失が大きいだが、加熱領域周囲の温度が上昇すると急激に時間当たりの熱損失割合が減少する。SUS304材では

板厚の増大に伴って  $\alpha + 1$  の値は減少するが、SPCC 材では傾向が明瞭ではない。切断実験ではレーザー出力は定格の 1kW(CW) 一定とし、ピッシング時間は 1s とした。Fig.3 に AGF レーザ切断部の外観を示す。圧力差が小さくなるとカーフ幅が急激に増大し、切断が不可能になる切断開始からカーフ幅が急激に増大するまでの切断距離を Fig.4 に示す。切断距離は切断速度の増加に伴って増大し、切断速度がある値を超えると切断できなくなる。切断可能な速度の最大値を限界速度呼ぶこととする。レンズの焦点距離が大きくなると切断距離および限界速度が減少する。また SPCC 材は SUS304 材に比べて切断距離および限界速度が小さく、切断がより困難である。同一鋼種では板厚の増加に伴って限界速度が減少するが、切断距離の減少は顕著ではない。

後述するように、切断の進行に伴って容器内圧力が增大して大気圧に近づくが、カーフ幅は被加工材の表裏の圧力差に依存せず、切断中ほぼ一定である。カーフ幅に及ぼす切断速度の影響を Fig.5 に示す。切断速度の小さい範囲において、速度の増加に伴ってカーフ幅が減少する傾向が認められるが、限界速度付近ではカーフ幅は速度に依存せずほぼ一定である。それぞれの条件における限界速度および限界速度

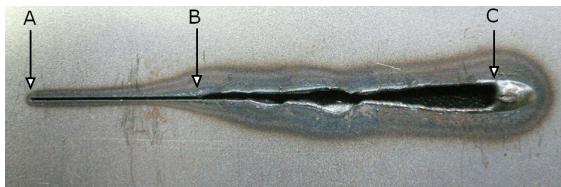


Fig.3 Appearance of AGF laser cut specimen

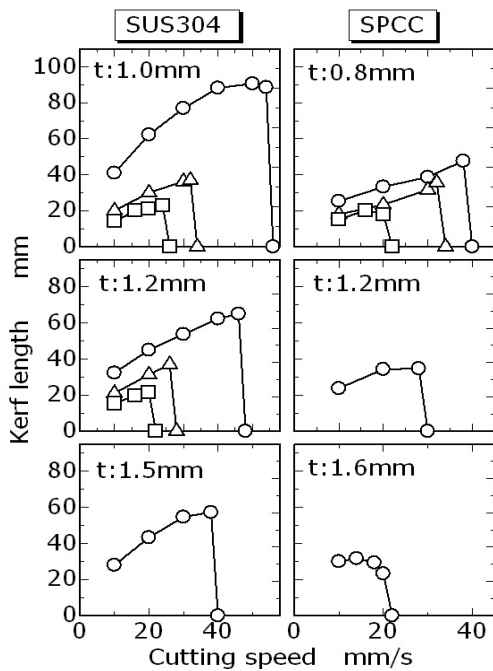


Fig.4 Influence of cutting speed on the distance of kerf to be cut

でのカーフ幅を被加工材の板厚を横軸にしてそれぞれ Fig.6(a) および (b) に示す。限界速度は板厚の増加に伴って減少し、カーフ幅は板厚が変化してもほとんど変化しない限界速度における切断に要するエネルギーを次に示す面積入熱  $H_A$  で比較する。

$$H_A(\text{J/m}^2) = \frac{1000(\text{W})}{v_c(\text{mm/s})t(\text{mm})}$$

ここで  $v_c$  は限界速度、 $t$  は被加工材の板厚である。Fig.6 に示すように、面積入熱は被加工材の板厚が変

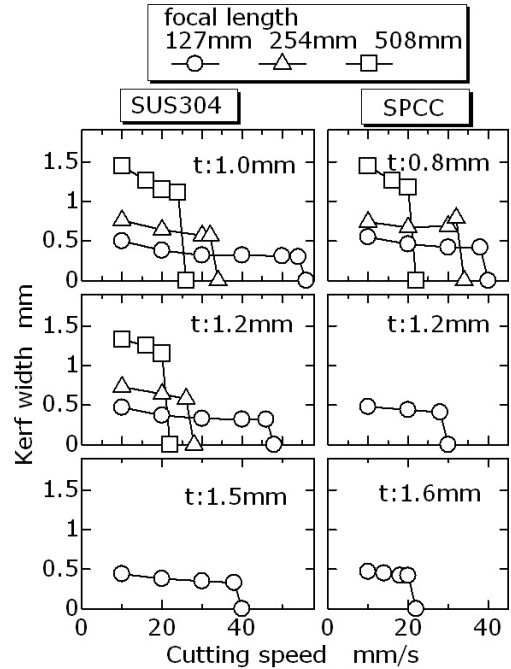


Fig.5 Influence of cutting speed on the kerf width

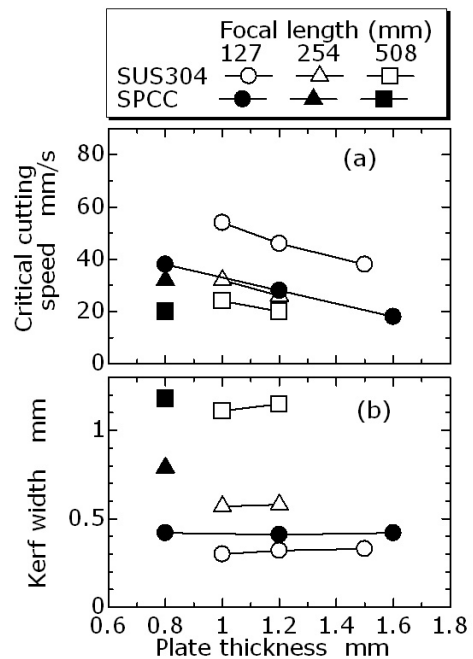


Fig.6 Change in the critical cutting speed and kerf width with increasing plate thickness

化してもほとんど一定であるが、レンズ焦点距離の増加に伴って増大する焦点でのビーム径が焦点距離に比例して増大し、レーザー照射による加熱範囲が拡大する。

#### 4. 切断に必要な圧力差

切断中の容器内圧力の測定結果の一例を Fig.7 に示す。切断開始前には容器内圧力は2~3kPaである。ピアッシング後にはピアス孔を通して大気が容器内へ流入するが、容器内圧力には大きな変化は認められない。切断が進行し、カーフの長さが増大すると大気流入量が増える。切断中も容器内を真空ポンプで排気しているが、大気流入がポンプの排気能力を超えるために、容器内圧力が上昇する。図中の点Pまではカーフ幅が一定な切断が継続するが、点Pを超えるとカーフ幅が急増する。点Pから点Qの間では、カーフ幅が大きだけでなく幅の変動も大きい。点Qを超えると全く切断できなくなり、照射されたレーザーによる焼け跡だけが観察される。PQ間では、溶融金属が流入する大気によって被加工材表面へ移動し、圧力差が小さいために溶融金属および酸化物(ドロス)が裏面から離脱できず、裏面のカーフ側面を過度に加熱していると考えられる。したがって、正常なAGFレーザー切断に必要な圧力差は点Pにおける圧力差である。

点Pにおける容器内圧力( $P_P$ )をまとめてFig.8に示す。それぞれの条件において切断速度が増加すると、 $P_P$ は減少する傾向が認められる。この傾向はSPCC材の場合に顕著であり、限界速度では大きな圧力差が必要である。同一鋼種、同一レンズの場合、切断速度の小さい範囲では $P_P$ におよぼす板厚の影響は小さいが、限界速度では差が顕著になる。AGFレーザー切断に必要な圧力差は全般にSPCC材に比べてSUS304材の場合に小さい。

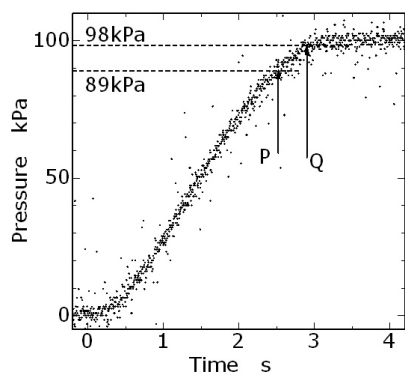


Fig.7 Example of pressure measurement during AGF laser cutting process

SUS304 1.0mm  
focal length 127mm  
cutting speed 30mm/s

容器内圧力の上昇は、切断カーフからの大気流入によるものである。Fig.9は板厚1.0mmのSUS304材を切断速度を変化させた場合((a)図)およびレンズ焦点距離を変化させた場合((c)図)の切断中の容器内圧力の時間経過を測定した結果である。切断速度および焦点距離の増加に伴って、容器内圧力の上昇が短時間で生じる切断速度が増加に比例して、同一時間までの切断距離が増大する。前述したように切断中のカーフ幅はほとんど一定であるから、形成されたカーフの開口面積も切断速度に比例して増大

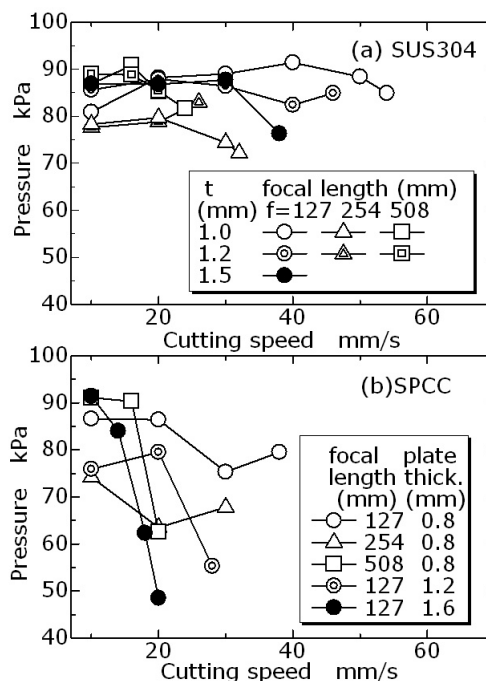


Fig.8 Change in the final pressure of AGF laser cutting process

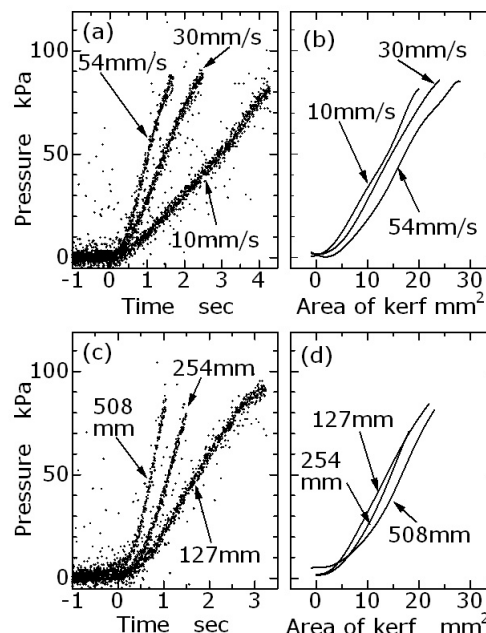


Fig.9 Influences of cutting speed and focal length of the lens on the increasing pressure

する．また，カーフ幅はレンズ焦点距離にほぼ比例して増大するから，同一の切断距離においてもレンズ焦点距離を増加すると開口面積が増大する．同図 (a) および (c) に示した結果をそれぞれカーフの開口面積を横軸にして整理すると (b) および (d) 図のようになる．切断速度およびレンズ焦点距離による差が小さくなっており，容器内圧力の上昇は開口面積の増加によって生じていることが分かる．ただし，(b) および (d) 図に示すように，短時間で開口面積が増大する場合ほど圧力の上昇が遅くなっており，圧力上昇には時間も影響している．なお，切断距離が増加した場合もカーフ幅が増加した場合も圧力上昇におよぼす影響はほぼ同様であり，開口面積  $20\text{mm}^2$  で比較するといずれの場合も圧力は  $60\sim 80\text{kPa}$  である．

### 5. レーザ照射角度の影響

リモートレーザを利用するレーザ切断では，レーザ光の入射角度は必然的に被加工材表面の法線方向からずれる．入射角度の変化には，Fig.10 に示すように切断方向に平行な面内で傾く場合 (図中 A, B) と垂直な面内で傾く場合 (図中 C, D) およびそれらの傾斜が同時に生じる場合があるが，前者の場合について検討した．入射角度はレーザ光を切断の前方へ傾ける場合 (図の A 点から入射) を正とし，後方へ傾ける場合 (図の B 点から入射) を負とし， $\pm 30$  度の範囲で実験した．

限界速度およびカーフ幅に及ぼす入射角度の影響を Fig.11 に示す．レーザ光の入射が傾くと，全般に限界速度が減少する傾向が認められるが，負の傾斜では減少の程度が小さい．特にレンズ焦点距離  $127\text{mm}$  の場合， $-30$  度までの傾斜では限界速度はほとんど減少しない．焦点距離  $254\text{mm}$  では負の傾斜によって限界速度がやや減少する．焦点距離が  $508\text{mm}$  では傾斜による限界速度の減少が傾斜の正負に拘わらず著しく，板厚  $1.0\text{mm}$  の SUS304 材の場合を除いて，傾斜ビームでは切断できなかった．一方，正の傾斜の場合には限界速度の減少が大きく，レンズ焦点距離および被加工材板厚の増加に伴って減少が大きく

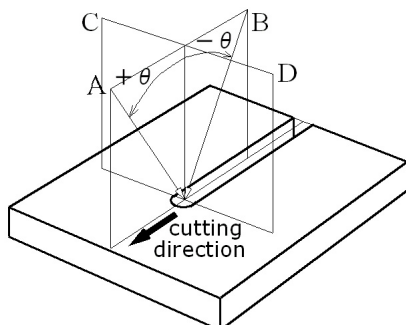


Fig.10 Illustration of angle of incidence

なる．限界速度でのカーフ幅におよぼすレーザ入射角度の影響は Fig.12 に示すように，レンズ焦点距離の影響が最も大きく，被加工材板厚およびレーザ入射角度の影響は小さい．一般的に入射角度が大きくなるとカーフ幅が増加する傾向が認められる．

レーザ光の傾斜の影響が向きによって異なる現象は次のように考えられる．アシストガス噴流で溶融金属を除去する通常のレーザ切断では，カーフ前面の形状は噴流の方向およびビーム光の方向に近く，ほぼ板表面に垂直である．AGF レーザ切断ではカーフ前面の溶融金属は流入大気の流れ作用によって被加工材裏面へ押し流され，最後に裏面から離脱する．

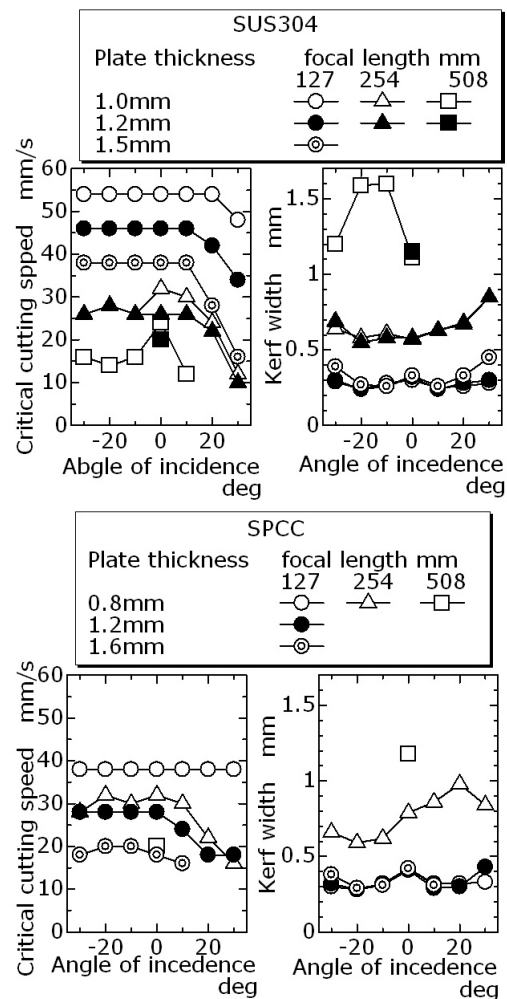


Fig.11 Influence of the angle of incidence on critical cutting speed and width of kerf made with critical speed

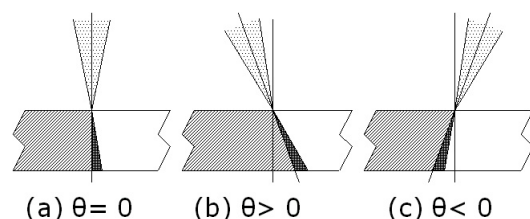


Fig.12 Illustration of the kerf front



AGF レーザ切断では、流入大気の力学作用が弱いためカーフ前面は Fig.12(a) のように推定できる。アシストガス噴流の強い力学作用がないために、カーフ前面は被加工材の法線方向よりずれる。レーザー光の入射角度が正の場合、カーフ前面は光軸よりさらに傾き (Fig.12(b))、被加工材表面で溶融した金属は裏面まで長い距離を押し流される必要がある。入射角度が負の場合には、カーフ前面の角度が光軸から傾いて被加工材の法線方向に近づく (Fig.12(c))。そのため、溶融金属が流れる距離が短くなり、切断には有利になる。さらに、AGF レーザ切断で利用している流入大気による溶融金属の除去作用は被加工材裏面側の負圧によって得ているため、入射角が正の場合には除去作用が被加工材裏面で大きく、負の場合には被加工材表面で大きい。実験はレンズ焦点を被加工材表面としているから、入射角負の場合では加熱効果が大きい位置と除去作用の大きい位置とが一致するが、正の場合には除去作用の大きい裏面近くでは加熱効果が小さくなり結果として金属除去が困難になると考えられる。

#### 6. 切断距離改善の一方法

前節までに述べたように、AGF レーザ切断では被加工材表裏の圧力差が必須である。Fig.1 に示した切断装置では、被加工材と減圧容器が一体となって移動し、加工進行に伴い開口面積が大きくなると必然的に容器内圧力が上昇し、大気との圧力差が小さくなる。このような AGF レーザ切断法の欠点を補う方法として、Fig.13 に示す切断装置を試作して切断を行った。被加工材は容器上を移動するため、切断長が増大しても裏面の圧力が低く保たれる。Fig.14 に一体式容器および移動式容器を用いて切断した加工

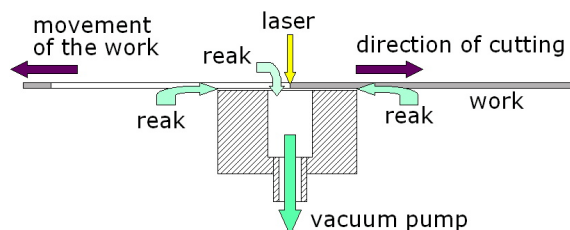


Fig.13 Schematic drawing of the vacuum vessel for non-limited AGF laser cutting



(a) by the vessel shown in figure 13



(b) by the vessel shown in figure 1

Fig.14 Comparison of appearances of the cut grooves

材の外観を示す。移動式容器の場合には 200mm の切断が可能であった。この場合には、容器と被加工材との間に隙間があるため切断開始前において容器内の圧力は 20~40kPa(試験片の取り付け状態に依存する)であるが、切断が進行しても隙間や開口面積が一定に保たれるので試験片の端まで同じ条件で切断できた。

#### 7. 結言

レーザー切断法の適用範囲の拡大を期待して、アシストガスを用いないレーザー切断 (AGF レーザ切断) を試みた。溶融金属をカーフ前面から飛散・除去する手段として被加工材裏面を排気し、大気圧との圧力差を利用した。定格 1kW の炭酸ガスレーザーを用い、板厚の異なる SUS304 材および SPCC 材の AGF レーザ切断実験から以下の結論を得た。

1. 大気との圧力差を利用した AGF レーザ切断が可能である。切断に必要な圧力差はほぼ 30kPa 以下である。
2. 切断可能な最大切断速度 (限界速度) は被加工材板厚および集光レンズ焦点距離の増加に伴って減少する。同一条件では SUS304 材の限界速度は SPCC 材の場合より大きく、AGF レーザ切断がより容易である。
3. カーフ幅はレンズ焦点距離に依存しており、被加工材板厚による変化は小さい。ただし、切断速度が小さい範囲ではカーフ幅が増加する。
4. レーザ入射角度が増加すると限界速度が減少する。レーザーを切断方向前方へ傾斜すると限界速度減少が顕著であるが、後方へ傾斜した場合には傾斜の影響が少ない。

終わりに、この研究の一部は天田金属加工機械技術振興財団の研究助成により実施できたことを記し、援助下さった財団および関係各位に深甚なる謝意を表します。

#### 参考文献

- [1] E.Abdulhadi ea al., Laser Eng., 1980, Vol.7, pp39-55
- [2] Flemming O.Olsen, SPIE Vol.2207, 1994, pp402-413
- [3] M,ligner-Rofin-Siner laser GmbH, 10th Nagoya Laser Forum, Nagoya Laser Technopole, 2003, 21
- [4] 日本金属学会編, 金属データベース, 1993, 丸善