



M. Endo

# マグネシウム合金のレーザー切断加工

遠藤 雅守\*

## 1. 背景

マグネシウム合金は比重がアルミ合金に比べても 2/3 と軽く、プラスチックと比べてリサイクルが容易、金属であるため高い電磁波シールド効果を持つなど、近年軽量化や高密度化が著しい携帯電話やパソコンなどの情報機器の筐体には理想的な材料である。また、自動車産業においても、マグネシウムの比重の小ささが車体重量軽減、ひいては環境負荷の低減につながるため、その利用が広がりつつある。このようにマグネシウム合金は日本の産業の中核である情報機器、自動車産業において注目される材料でありながら、その加工性が良くないことが広い応用を阻む要因となっている。特に、マグネシウムはかつて写真用フラッシュに使われたことからわかるように非常に酸化性が高く、レーザー切断のような熱加工には著しく不利な材料である。

一方、レーザー切断は高速、非接触、プログラマブルといった特徴を持ち、近年の多品種少量生産には無くてはならない加工ツールである。このことからマグネシウム合金のレーザー切断の実現はその利用を拡大するために乗り越えなければならないハードルと言えよう。

我々は、レーザー切断において用いられるアシストガスに着目し、切断ドロスの制御、切断面の酸化抑制をおこなうことにより市販炭酸ガスレーザーでのマグネシウム薄板の高品質な切断加工に成功した。本報告は、我々が開発したマグネシウム薄板のレーザー切断方法の理論的背景、各種試験の結果、数値流体力学(CFD)を用いた解析の結果について述べたものである。

## 2. 理論

### 2.1 ドロス付着のメカニズム

レーザー切断の基本的メカニズムは、細く絞ったレーザービームによりワークを局所的に加熱熔融させ、それを除去しながらビームを走査することにより材料を分断するものである。しかし、現実には熔融または蒸発した材料が様々なレーザービームまたは母材と相互作用するため、アシストガスの使用が不可欠となっている。アシストガスの役目としては、1) 熔融、蒸発した材料を除去する物理作用 2) 反応熱により母材を加熱、熔融を助ける化学作用 3) ワークを冷却する熱作用 があるが、加工対象、目的ごとにアシストガスのどの作用を優先させるか

が異なってくる。軟鋼を例にとれば、品質より高速切断を優先するときは  $O_2$  を、高品質切断を欲するときは高圧の  $N_2$  を使用する。

アシストガスは一般にはレーザービームと同軸に噴射されるため熔融金属はワーク下側に抜けるが、表面張力、ぬれ性などの影響でワーク下面に回り込む可能性がある。一方でガスによって与えられた運動量が熔融金属の離脱に充分でないと、熔融金属がカーブから脱出する前に下端で再凝固する。このように、除去できなかった熔融金属が付着ドロスとなる。従ってドロス付着のメカニズムはレーザービームと母材の熱的相互作用、アシストガスの流体力学的挙動、熔融金属の熱物性、酸化に伴う物性変化、ならびに液体の自由表面流れといった多種多様な現象が複雑に作用しあうものであることがわかる。このことから、現在でもドロス付着のメカニズムをあらゆる状況で完全に理解するのは不可能であるが、Miyamoto らによる軟鋼薄板の  $CO_2$  レーザによる切断を詳細に分析した論文<sup>1)</sup>は、ドロス発生と付着のメカニズムを詳細な観測結果を基に説明している点で大変価値の高いものである。

Miyamoto らによると、ワーク下面へのドロスの付着は熔融金属のワーク下面近傍における運動量ベクトルと密接な関係があり、ドロスフリーの条件に限って熔融金属が切断前方に流れるという興味深い観測結果が得られている。これは、定性的に考えれば、切断が終わって冷却が進みつつある領域に熔融金属が触れるとそれがそのままドロスとなって付着するのに対し、切断前方は充分融点に近いので熔融金属が付着しない、あるいは付着してもレーザーにより再び熔融するのでドロスフリーになるという説明が可能である。

### 2.2 下ガスノズルによるドロスのコントロール

マグネシウム合金を、他の非鉄金属で通常行われるように圧力 0.1~0.3Mpa の  $N_2$  をレーザー同軸アシストガスとして噴射、切断するとワーク下面に大量のドロスが付着する<sup>2,3)</sup>。アシストガスのシールド効果によりワークが発火するようなことはないが、実用に耐える切断品質ではない。マグネシウム合金においてこのように大量のドロス付着が見られる原因は、主にマグネシウム合金の高い熱伝導性と流体的性質によるものではないかと考えられる。

表 1 は、代表的な金属材料である鉄、アルミニウム、そしてマグネシウムの熔融状態における物性値を示したものである。表から、マグネシウムがアルミニウムに匹敵する熱伝導率を持ち、鉄に比べて小さな熔融潜熱、動

\* 東海大学理学部物理学科 准教授

粘度，表面張力を持つことがわかる．このことを除去された熔融金属の挙動に当てはめて考えると，熔融マグネシウムは鉄に比べて容易にワーク裏側に回り込み，少ない運動エネルギーで長い距離を移動可能で，かつ容易に再凝固する素材といえる．その結果が，通常のレーザー加工における大量のドロス付着として観測されると考えることができる．加えて，同軸ノズルのみによるアシストガスは，ワーク下面の熔融金属が直接空気に触れることを防げないので，制御されない酸化による熱反応が切断品質低下の要因となっている可能性も指摘できる．

表 1: 熔融金属の主な物性<sup>4)</sup>

	熱伝導率 [W/mK]	熔融潜熱 [kJ/mol]	動粘度 [ $\mu\text{m}^2/\text{s}$ ]	表面張力 [mN/m]
Mg	80	9.1	~0.7	563
Al	100	10.7	~1.3	520
Fe	40	16.2	~1.2	1700

一方著者らは Miyamoto らによる知見から，ワーク下面のドロスに強制的に切断前方の運動量を与えてやれば，マグネシウム合金においてもドロスフリー切断が可能になるのではないかと考えた．この方法として最も有効なのがワーク下面，切断斜め後方からのアシストガス噴射で，噴射ガスを窒素とすれば同時に不必要な酸化反応抑制の効果も期待できる．

実際，ワーク下面のドロスを付加的なアシストガスノズルで制御し，ドロスフリー切断を得ようとする発想は著者らが初めてではない<sup>5,6)</sup>．しかし，文献 5), 6)で提案された方法は，いずれもワーク下面，カーフに直交するように斜め下からアシストガスを噴射する方法である．この場合，ワークの一方(製品側)はドロスフリーとなるが，反対側には多くのドロスが付着する．それに対して本研究で提案する方法は，カーフの両側が製品として利用可能な切断品質を持ち，より広範囲な対象への適用が可能である．また，従来の報告が，360 度全方向からの切断を実現するために下面アシストガスノズルを機械的に動かす<sup>5)</sup>，多数の下面アシストガスノズルを設置する<sup>6)</sup>といった，余りスマートでない方法を採用しているのに対し，本研究で提案する方法は二本の固定された下側アシストガスノズルの噴射圧力を相対的に変化させ，全周方向の切断を可能とした点の特徴である．

図 1 は本研究で考案した，マグネシウム合金のドロスフリー切断を可能にした下側アシストガスノズルの概念図である．ノズルはレーザーヘッドとともに空間上の固定された位置にあり，ワークを前後左右に走査することで切断が行われる．前述のように，ドロスフリー切断を行うためには下ガスの運動量ベクトルが非常に重要で，カーフ両側がドロスフリーになるためには下ガスは常に切断後方から前方へ吹き付けなければならない．ノズルを固定したまま等価的にガス運動量ベクトルを任意の方向に向けるため，本研究では二つのノズルからの噴射圧力を制御する方法を提案した．

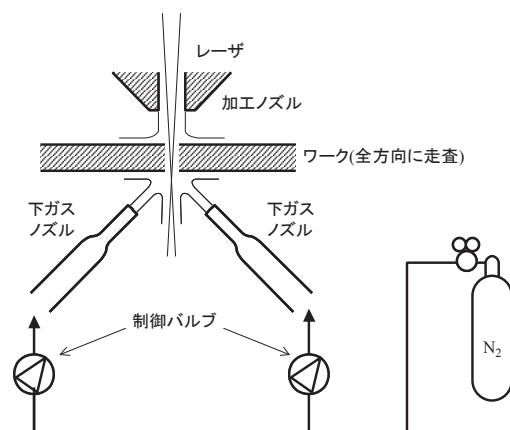


図 1: 対向ダブル下ガスノズルの概念図

### 3. 実験装置および方法

#### 3.1 加工試験

試験装置はレーザー加工機と下ガスノズルよりなる．レーザー加工機(含 x-y テーブル)は，アマダ製の市販炭酸ガスレーザー加工機 OLC-1500 を無改造で使用した．下ガスノズルは，レーザーヘッド支持部から軟鋼製フレームを張り出させ，加工ヘッド直下に設置した．ノズル材質は銅パイプ(1/4")で，先端を潰して 1.0×5.0mm の開口に整形したものである．下ガスノズルへのガス供給は，ガスボンベからレギュレータを介し，途中でプラグ弁により二本の下ガスノズル間の相対流量調整を行い，ノズルに至る．試験装置全景を写真 1 に，下ガスノズルを装着した加工ヘッドの写真を写真 2 に示す．

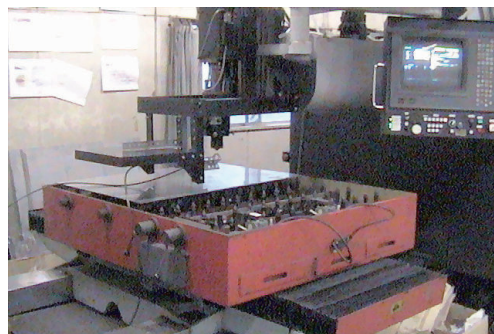


写真 1: 試験装置全景

供試材は全ての試験において厚さ 1.0mm の AZ31 である．切断方向と圧延方向の相対角度は切断性能に大きな影響を与えないことが確認されたので，圧延方向に対する切断角度は特に制御していない．前処理は行わず，アルコールによる洗浄の後，加工試験に供した．表 2 は，典型的な切断試験の条件をまとめたものである．

表 2: 典型的な加工試験の条件

レーザー出力	1000W CW モード
切断速度	1,000~2,000mm/min
上ガス供給圧力	0.06Mpa
下ガス供給圧力	0.05~0.19Mpa
集光レンズ	焦点距離 127mm F=7.1



写真2: 加工ヘッド

### 3.2 水シミュレーション

本研究では、熔融金属の流れを実験的に可視化するため、アクリル板を用いた作成したダミーカーフに水を供給し、水の流れをカメラにて撮影するという実験を行った。実験装置の概念図を図2に示す。

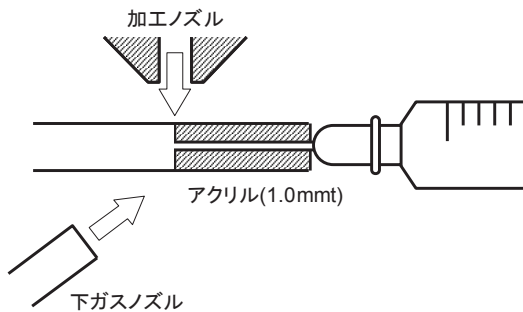


図2: アクリル製カーフシミュレータの概念図

ダミーカーフは厚さ 1.0mm のアクリル板 2 枚を、切断試験で計測された値と同じ幅 0.30mm の間隔を空けて固定したものである。レーザービームが当たる位置に注射針を設置し、注射器から水を供給した。この装置を実験装置のワーク位置に設置し、レーザー発振はしないでアシストガスのみを供給した。ダミーカーフは送らず、注射針先端はレーザー照射位置に固定されている。

## 4. 実験結果

### 4.1 ノズル角度、位置、噴射ガス圧力の最適化

始めに、提案した方法の基本的成立性を確認するため、様々な条件下で 1 本の下ノズルによる切断試験を実施した。ノズルの向きは切断後方より切断点に向かう向きである。下ガスノズルの鉛直線に対する角度およびガス圧力を変化させて切断を行ったその結果、表3のような結果が得られた。

表3の結果から、角度 30° ではドロスフリー切断は不可能で、45° のときは下ガス圧力 0.12Mpa、60° の時は下ガス圧力 0.19Mpa のときにドロスフリー切断が得られることがわかる。更に詳しい調査の結果、ノズルの角度が 45° の時に、最も幅広い圧力範囲でドロスフリーになることが明らかになった。従って以降の試験は、下ガスノズル角度を 45° として行った。

続いて、ノズル先端のレーザー軸線からの位置を変化させ、ドロスフリーになる範囲を探索した。結果を図3に

示す。

表3: 下ガスノズル角度および圧力を変えて行った切断試験の結果。(出力 1000W, 送り速度 1,000mm/min)

	0.05MPa	0.12MPa	0.19MPa
30°			
45°			
60°			

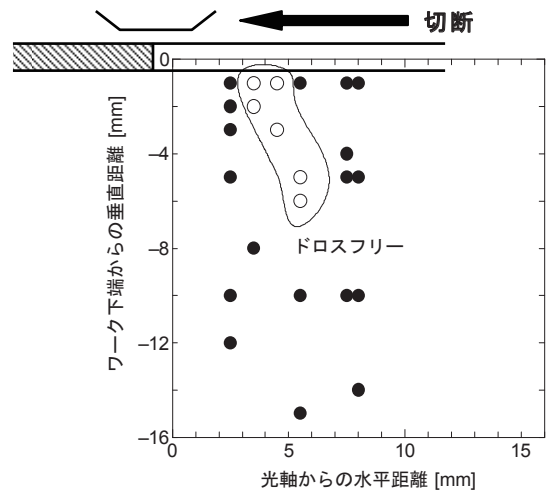


図3: ノズル先端の位置と切断品質の関係

図から、ドロスフリー切断を実現するノズルの位置はほぼ一直線上に並んでおり、ガスの運動量ベクトルがある特定の位置、加工点よりやや下流側を貫いていなければならないということがわかる。図4は、レーザー出力と切断速度を変化させ、供試材の切断可能性と切断品質を二次元のマップとしたものである。切断可能/不可能は、カーフの単位長さ当たり入熱量でほぼ決まることがわかる。切断が可能であった全てのケースにおいてドロスフリー切断が実現されており、提案した方法が加工パラメータの変化に寛容であることがわかった。

続いて、切断中の加工点の様子を写真撮影した結果を写真3に示す。ワークの位置、厚みがわかりにくいので相当する線を書き加えてある。写真から、下ガスの無い場合には熔融金属がワーク下面の広い範囲に広がり、これが大量のドロス付着の原因となることが明らかである。下ガス圧力を上げるに従いドロス流れの方向が制御され、0.12Mpa のときに特徴的な流れが観察された。写真を見ると、下ガス圧力 0.12Mpa の時にはプラズマ発光が切断前方、ワーク裏側に沿って流れる特徴的な現象が観察さ

れる。また、下ガス圧力過剰の時は、ワーク下面には発光が観測されず、溶融金属が一部上側に押し戻されている様子が観測された。これは、切断面を観察した結果(表3, 45° : 0.19Mpa)の、ワーク上側にドロスが付着している状況とも符合する。

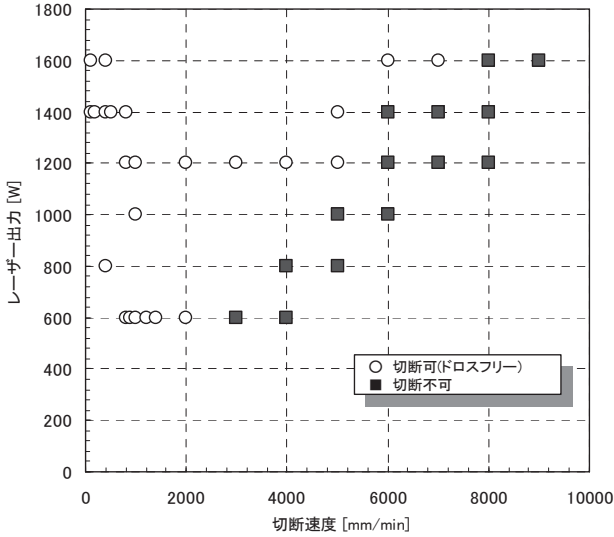
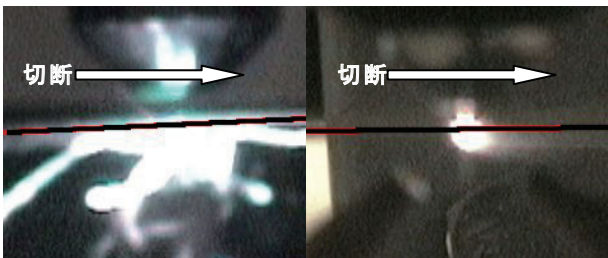


図 4: レーザ出力と送り速度を変えて行った切断試験



下ガスなし 0.12Mpa  
写真 3: 加工中の様子を横から見た図。  
中央横線がワークを表す。

#### 4.2 水とアクリルを使用したシミュレーション

下ガス噴射時における溶融金属の流れをより詳細に観測するためにアクリルを用いてダミーカーフを作成し、水を注入してその動きを観察した。写真 4 は、水の流れを水平方向から観測したものである。下ガス圧力 0.12Mpa, 0.19Mpa のケースを示す。

切断中のプラズマ発光と同様、ドロスフリー条件の 0.12Mpa の時にのみ、水がカーフ下面に沿って流れる現象が観測された。

#### 4.3 全周方向への切断可能性の実証

続いて、二つの下ガスノズルを対向させ、噴射ガス圧力のバランスを変えることにより全方向にドロスフリー切断が出来ることを実証した。

切断方向の定義を図 5 のとおりとする。ガス圧は、A と B のバランスを下ガスノズル上流の調製バルブの開度で、絶対圧をレギュレータ二次圧で調整することにより制御した。角度 0°, 90° の場合の調製バルブ開度は on/on,

on/off と自明だが、斜め切断の場合はバルブ開度を変えつつ数回の試行を繰り返し、結果的にドロスフリーとなった設定を採用した。具体的には、A 側が全開、B 側が 5/8 開である。

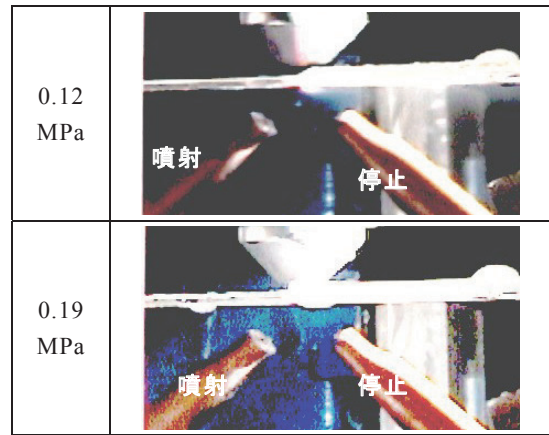


写真 4: 水シミュレーションを横から観察した写真

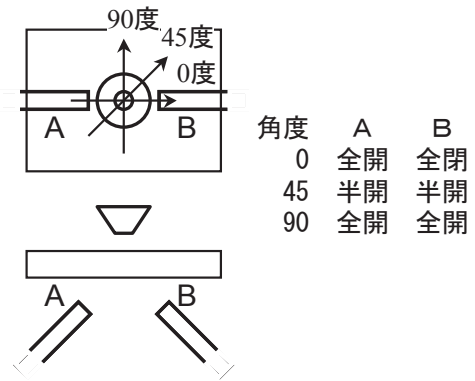


図 5: 切断方向の定義と、調製バルブ開度

切断された供試材の写真を写真 5 に示す。写真から明らかなように、全ての方向でドロスフリー切断が達成された。本方式の実用化に際しては、切断方向に連動して高速度にガス噴射圧力を変化させる調製バルブを採用することが不可欠となるが、技術的困難は無く、本研究における三方向のドロスフリー切断の実証により成立性は証明されたと言って良い。

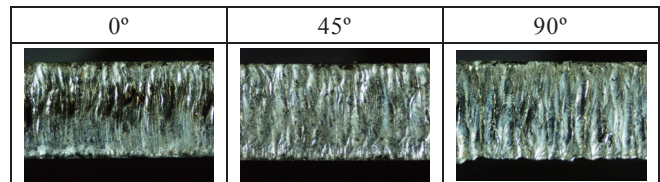


写真 5: 角度を変えて行った切断サンプルの切断面

### 5. CFD による計算

下ガスによるドロスフリー切断がどのようにして達成されるかを理解するため、数値流体力学(CFD)を用いてアシストガスの挙動を解析した。解析に使用したのは、

市販の CFD ソフトウェア、「Phoenics」である。計算モデルは以下のようなものとした。

- 流体は窒素として、圧縮性を考慮する。
- 切断点を系の中心に置き、上下ノズルが充分入る 30mm×30mm×20mm の範囲を解析する。
- 解析領域端面は圧力一定(大気圧)境界とし、自由な流出を許す。
- 粘性モデルは k-ε二方程式モデルを採用。

格子数は非対称構造格子の 100×100×95, Reynolds 数はカーフ幅を代表寸法に、カーフ内ガス流速を代表速度にとると約  $10^4$  となる。解析領域の格子分割を表した図を 図 6 に示す。

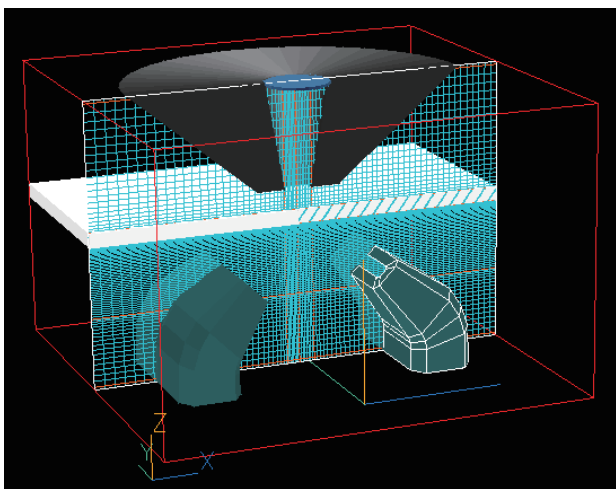


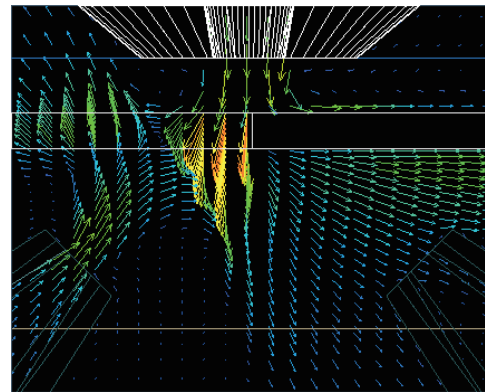
図 6: CFD のメッシュ

図 7 は、カーフ内のガス流速をベクトルで表したものである。(a)が下ガス不足の条件、(b)がドロスフリー条件を表している。注目しているのは切断点におけるガス流速ベクトルの方向である。下ガス不足の条件では、上ガスの流速ベクトルがカーフ内で切断後方に向かうのに対し、ドロスフリー条件では下ガスの運動量が上ガスの運動量とちょうど釣り合い、カーフ内でドロスを切断前方に押し出す流速ベクトルが観察される。

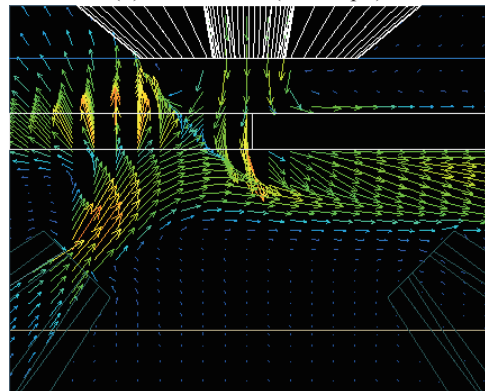
図 8 は、上ガスにマーカーをつけてその分布をカーフ断面において示したものである。ドロスフリー条件のときのみ、図のように上ガスがカーフ下側に沿って流れる計算結果が得られた。このように、ドロス付着防止における下ガスの役割はカーフ内で熔融金属を切断前方に押し出す速度ベクトルを生み出すことで、その条件のときに実験結果で見られた様に上ガスがワーク下側に沿って流れることが明らかになった。

続いて、ダブルノズルにより下ガス運動量ベクトルが制御できることを CFD により検証した。上ガス圧力を 0.06Mpa に固定し、下ガス圧力を変化させて下ガスがワーク下面でどのように分布するのかを観察した。図 9 は、下ガス濃度のワーク直下における分布を示したもので、切断方向はいずれの図も右から左であるが、ノズルの向きが横から縦へと変化している。

90° 切断の図から、両方のノズルから等しい圧力でガスを噴射すると、下ガスにノズルと直角方向、図横方向の運動量が生まれることがわかる。ガス圧のバランスを変えることにより二つのベクトルのなす角度が 180 度から徐々に狭まってゆき、この角度が常に切断方向と一致するようにガス圧を制御すれば、常に切断後方から前方(図右から左)に向かうガスの流れを作れることが理解される。



(a)下ガス不足(0.03Mpa)



(b)ドロスフリー条件 (0.10Mpa)

図 7: カーフ内ガス流速ベクトル

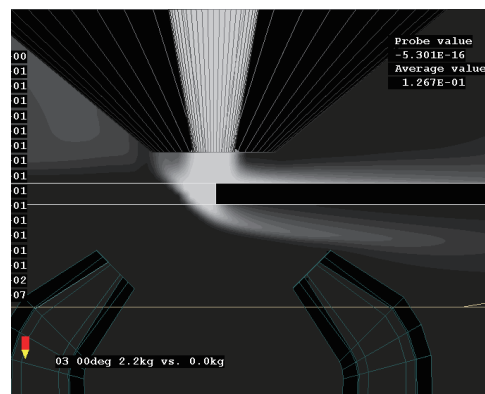


図 8: ドロスフリー条件における上ガス濃度分布

CFD によって明らかになったことをまとめると以下のようなになる。

1. ドロスフリー切断が得られる条件においては、下ガスと上ガスの運動量がちょうどバランスし、カーフ内に切断後方から前方に向かう運動量ベクトルが現れる。これが熔融金属を前方に押し出し、ドロスフリー切断

を実現する鍵の現象であることが明らかになった。CFDにおいても、ドロスフリー切断の条件で上ガスがワーク下面を水平に流れる現象が見られた。

2. ガス圧制御により全方向ドロスフリー切断が実現するメカニズムは、対向する下ガスの衝突を利用してノズル軸線から任意の角度をなす流れのベクトルが作れるためであることを示した。

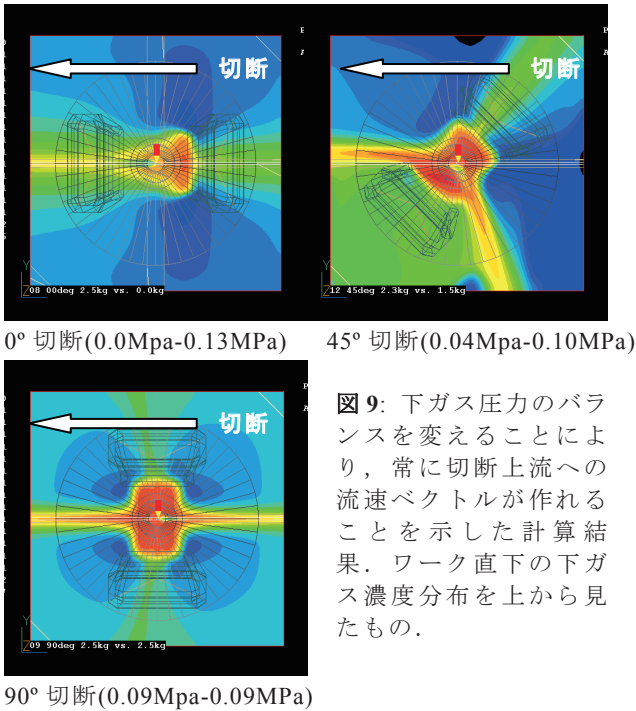


図9: 下ガス圧力のバランスを変えることにより、常に切断上流への流速ベクトルが作れることを示した計算結果。ワーク直下の下ガス濃度分布を上から見たもの。

## 6. 結論

以上見てきたように、本研究によりマグネシウム合金薄板のレーザ切断方法が確立された。研究の結果明らかになったことをまとめると以下ようになる。

1. マグネシウム合金薄板のドロスフリー切断を実現する方法の一つとして、ワーク下側からアシストガスを吹き付ける方法が有効であることを示した。市販炭酸ガスレーザ(AMADA OLC-1500)を用いて、厚さ1.0mmのAZ31合金のドロスフリー切断を実証した。
2. 従来から知られていた、ガスを切断横方向から噴出する方法と異なり本研究ではガスを切断後方から噴出する。これにより、カーフ両端がドロスフリーとなり、より広範囲な対象への適用が可能である。
3. 下側アシストガスの噴出圧力には最適値があり、それはカーフ内部で上下アシストガスの圧力バランスにより熔融金属が切断前方の運動量を与えられる条件に一致することを示した。
4. 下側アシストガスノズルを機械的に動かさずにガス流ベクトルを制御する方法として、二つの下側アシスト

ガスノズルを対向させ、噴射圧力を制御する方法を提案した。この方法が実際にガスのベクトルを制御できることをCFDにより示し、任意の切断方向に対してドロスフリー切断が可能であることを実験により示した。

## 7. 補遺

ここまで述べてきた下ガス法によるマグネシウム合金切断の研究は2004年に終了し、その後はしばらく中断していた。ところが、最近我々は「ラジアル偏光」と呼ばれる特異な偏光状態のビームを発生させる技術の開発に成功<sup>7)</sup>、これを用いてAZ31の切断を試みたところ非常に良い結果を得たのでここで報告する。使用したのはAmada OLC-420Hの光共振器を改造したもので、レーザ出力680W、通常のアシストガスノズルで0.6MPaのN<sub>2</sub>アシストにて切断を試みた。その結果、7,500mm/min以上という非常に速い速度でドロスフリー切断が可能であることがわかった。切断面の写真を写真6に示す。詳しい研究成果については、今後研究が進んで機会があったら報告したい。

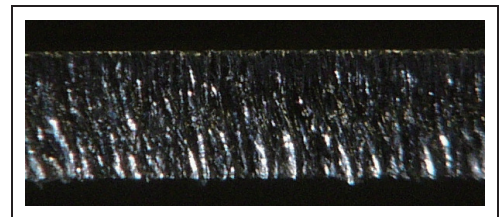


写真6: ラジアル偏光で切断したAZ31の切断面写真。切断速度7500mm/min.

## 謝辞

本研究は(財)天田金属加工機械技術振興財団の平成13年度研究開発助成(AF-2001020)を受け、(株)アマダの協力によって行われたものである。また、CFDコードは(株)CHAM Japanの支援を受けた。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- 1) Miyamoto and H. Maruno, "The Mechanism of Laser Cutting", *Welding in the world* 29 (1991) pp. 12-23.
- 2) B. M. Brønstad, "Laser cutting of magnesium alloys", *Welding in the world* 30 (1992) pp. 300-304.
- 3) 重松他, 「AZ31 マグネシウム合金薄板のレーザ切断」, *軽金属* 50 (2000) pp.446-450.
- 4) 日本鋳物学会, 「改訂4版鋳物便覧」, 丸善, 1986.
- 5) 「下ガス法によるドロスレスレーザ切断加工」, *機械振興協会技術研究所報*, 89-0122, 1991.
- 6) J. Powell *et al.*, "CO<sub>2</sub> laser cutting of titanium alloys", *Proc. SPIE* 952 (1988) pp. 609-617.
- 7) M. Endo, "Generation of multikilowatt radially or azimuthally polarized CO<sub>2</sub> laser beams by a triple-axicon optical resonator," *Proc. SPIE* 7579 (2010), 7579-0F (9pp).