

# レーザ加工用超音速アシストガスノズル (ラバルノズル)の流体力学的研究

東海大学 理学部物理学科

准教授 遠藤雅守

(平成 19 年度一般研究開発助成 AF-2007201)

キーワード：レーザ切断，ラバルノズル，アシストガス

## 1 研究の背景と目的

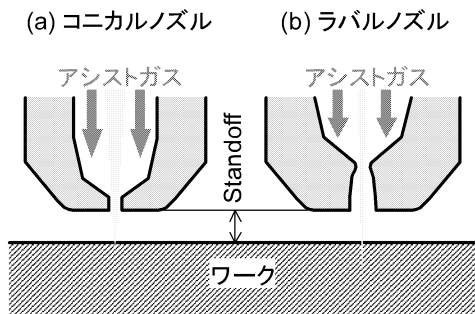


図 1: コニカルノズルとラバルノズル

一般に、レーザ切断では溶融した材料を効率的に除去するため、レーザ光と同軸にアシストガスを噴射する。図 1 はレーザ加工ノズルの模式図である。(a)が広く使われているコニカルノズルである。コニカルノズルはノズル出口でガスが音速を突破するためその後の流れが不安定であり、それを補うためにノズル出口面 (NEP) とワークの距離、Standoff を 0.5 mm まで接近させ、加工条件を極めて狭い領域に限定して実用化している。一方、(b)がいわゆる「超音速ノズル」として知られているラバルノズルである。ラバルノズルは流れをいったん絞って音速を突破させ、その後緩やかに膨張させることで安定な超音速噴流を得るものである。この場合ノズル出口から 10 mm を超える長さの安定流領域を得ることができるため、Standoff を極めて大きく取ることができる。そのため、ワークの凹凸にノズルが倣う必要がない、ノズルや集光レンズがスパッタで汚染されないなどそのメリットは大きい。

しかし、レーザ加工においてラバルノズルが商業的に成功した例はかつてない。理由として考えられるのは、ラバルノズルがコニカルノズルに比べビームの NA (絞る角度) を不可避免的に小さくせねばならないこと、現実にはノズルから目論見通りの一様超音速流を得ることが困難であることが挙げられる。しかし、最近急速に実用化が進むファイバレーザは、波長が 1  $\mu\text{m}$  と短くビーム品質が高いため小さな NA でも従来の YAG レーザや CO<sub>2</sub> レーザに匹敵するスポット径へ集光できる。したがって、今こそがレーザ加工にラバルノズル採用を再び検討する好機でもある。

一方、ラバルノズルから一様超音速流を得る技術は、レ

ーザ加工機の分野に限って言えばまだ完成しているとは言えない。理由として、ノズルが非常に小さいため加工技術が未成熟で、ノズル壁面形状の精度が低いこと、可能な範囲の技術で製作したノズルの流れがどのようになるか予想が難しいことが挙げられよう。

しかしながら、コンピューターの性能向上により、アシストガスと加工物を含めた完全三次元 CFD (数値流体力学) がパーソナルコンピュータで実行可能となりつつある。そこで本研究ではレーザ加工用ラバルノズルから発するアシストガスを CFD によりモデル化し、ノズルの設計を変えたときにアシストガスがどう振る舞うかを解析、それを一般化して予測可能とする手法を確立する。その結果から、ギャップ長 0.5~10 mm の範囲で良好な切断品質を得られ、かつ現実的なコストで製造可能なラバルノズル設計を提案することを目的とする。

## 2 理論

### 2.1 ラバルノズルの設計

図 2 は軸対称ラバルノズルの断面を表している。いま、ノズル出口面 (NEP) におけるマッハ数  $M$ 、スロートにおけるノズル半径  $r^*$  が拘束条件として与えられているとする。このとき、ノズル出口の径  $r$  は一次元等エントロピ流れの理論<sup>1)</sup>により以下のように決定される。

$$\left(\frac{r}{r^*}\right)^2 = \frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left( \frac{(\gamma-1)M^2 + 2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (1)$$

$\gamma$           ガスの比熱比

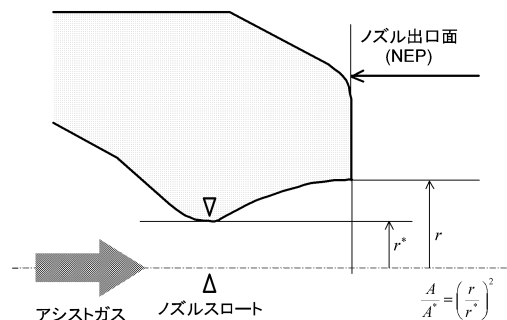


図 2: ラバルノズル断面とその設計

一方、NEP における静圧  $p_1$  は同じく一次元等エントロピ

流れの理論から

$$\frac{p_0}{p_1} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2)$$

と、ノズル入口の淀み点圧  $p_0$  と出口マッハ数で決まる。ここで、 $p_1$  をノズル出口から下流の雰囲気圧力（ここでは大気圧）に一致させるよう  $p_0$  を選ぶ必要がある。 $p_1$  が低すぎる場合を過膨張、高すぎる場合を不足膨張と言うが、いずれの場合にも噴出ガスが膨張・圧縮のサイクルをくり返して安定な流れにならない。

更に、一次元の理論ではノズル出口のマッハ数は  $A/A^*$  のみで決まるが、ガスの流れは二次元的であり、超音速流れにおいては壁面で発生する膨張、圧縮波の反射を制御しないとノズル出口で一様平行流を得ることができない。そのためノズルはスロートから滑らかな曲線を描き拡大していく。この、拡大する曲線の設計には確立した理論があり、「特性曲線法」と呼ばれている<sup>2)</sup>。しかし計算の結果得られる曲線は非常に複雑で、超音速ノズルとしては極めて小型にもかかわらず安価に大量生産されなくてはならない加工用ノズルへの適用は難しい。

そこで我々は、ノズルの広がり部の曲線を単一曲率の円弧で近似したラバルノズルを作成、レーザ切断加工を試みたが上手くいかなかった。本研究はここを出発点とする。

## 2.2 超音速衝突噴流の理論

本研究で扱われるアシストガスの流れは、図3に示される「超音速衝突噴流」として一般化されている問題の応用と言える。超音速衝突噴流では、ノズルから流出する超音速流が衝突板 (impact plate) に衝突する際、垂直衝撃波が発生してガスの流速がほぼゼロに減速したのち急激に板に沿って膨張する。本研究でキーになる物理量は衝突板上の静圧 (impact pressure) である。

噴流が適正膨張でエントロピー損失が無いと仮定すると、衝撃波直前の総圧  $p_{00}$  は淀み点圧  $p_0$  に等しいと仮定できる。また、衝撃波下流の総圧  $p_{01}$  は、流速がゼロに近いため静圧、即ち impact pressure に等しいと近似できる。このとき

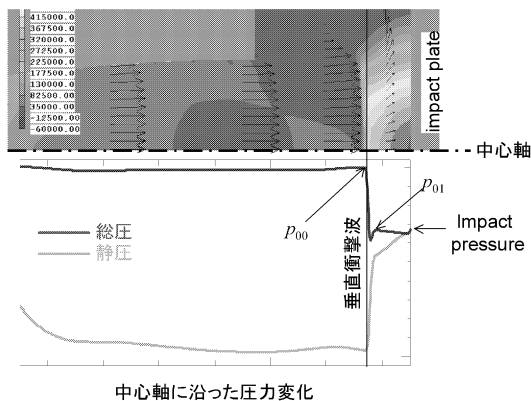


図3: 超音速衝突噴流

$p_{01}/p_{00}$  はプラントルの式より<sup>3)</sup>

$$\frac{p_{01}}{p_{00}} = \left[ \frac{(\gamma+1)M_1^2}{(\gamma-1)M_1^2+2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left[ \frac{\gamma+1}{2\gamma M_1^2 - (\gamma-1)} \right]^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (3)$$

で与えられる。実際のレーザ加工では impact plate に相当するのが被切断物 (ワーク) で、ガスは切断カーフ上端でチョークした後カーフ内で再び超音速膨張する。この際、impact pressure が淀み点圧となるためこの圧が高く、かつ standoff に依存しないことが求められる。

## 2.3 CFD (数値流体力学) ソフトウェア

本研究で使用した CFD ソフトは Phoenics という汎用の熱流体解析ソフトである。Phoenics は、有限体積法により質量、運動量、エネルギー等の保存則を定常あるいは非定常で一～三次元空間において解くことができ、その名前は Parabolic, Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series の頭文字から来ている。ほとんどの市販 CFD コードが標準で BFC 非構造格子分割を採用しているのに対して、Phoenics はあえて構造格子を採用している (オプションとして BFC 非構造格子も適用可能)。これは、「物体表面近傍の詳細な情報が欲しい、特定の問題を除けば非構造格子のメリットはデメリットを超えない」という設計者の意図による。ただし、全空間に等密度の構造格子を張り巡らせたのでは複雑な問題の計算ができないので、Phoenics は、「不等間隔格子」と「細分化格子」という方法で、構造格子でも複雑なモデルの記述を可能とした。

## 3 CFD 解析及び実験方法

### 3.1 CFD 解析

CFD 解析領域の全体図を図4に示す。本研究では、主にノズルの standoff と impact pressure の関係を解析したが、この場合は問題は軸対称二次元で取り扱える。カーフ内部の流れを含む完全三次元の計算も実施したが、本研究の主要な結果には含まれないので報告書では割愛する。解析領域は半径 5 mm、長さ 25 mm の円筒形で、領域側面は圧力一定の境界として、上流から質量流量固定の条件でガスが供給される。淀み点圧力は不定となるが、何度か計算をくり返して設計圧力になるように供給される質量流量を決定した。

主要な計算パラメータを表1に示す。系のレイノルズ数はスロート径を代表寸法に取ると約 50,000 である。

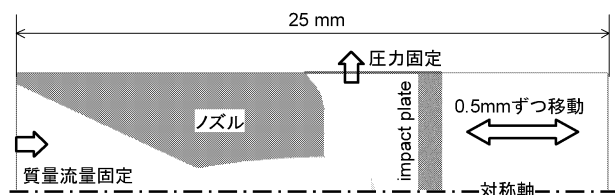


図4: CFD 解析領域の概念図

表 1: CFD の計算条件

径の寸法	5 mm(y)×25 mm(z)
メッシュ	180×1000 (不等間隔構造格子)
流体	窒素 (理想気体近似)
粘性モデル	Sutherland's law
乱流モデル	k-ε2 方程式モデル
壁面条件	対数則, 面荒さ 0.5 μm RMS

### 3.2 Impact pressure 計測試験

図 5 は impact pressure 計測試験の概念図である。装置はノズル、ノズルホルダ、3 軸ステージ、圧力計、及び高圧ガス供給装置よりなる。Impact plate は中央に  $\phi=0.1$  mm の穴がドリル加工で開けられており、その先が圧力計に接続されている。ノズルと計測穴の相対位置は x, y, z 軸の 3 軸においてマイクロメータの精度で決定可能である。

測定は Standoff が 3 mm までは 0.25 mm 刻み、それ以降は 0.5 mm 刻みで 10 mm まで impact plate を下げつつ impact pressure を記録した。

### 3.3 シュリーレン撮影

噴出ガス密度の空間分布を観測するためシュリーレン撮影を行った。シュリーレン撮影は、透明な物体のわずかな屈折率変化を干渉により映像化する技術で、ガスの温度変化に伴う密度変化を可視化するときなどに有効に用いられる。本研究では、ノズルから噴出したガスが密度変化を伴いつつ流れることが期待されるため、それを捕らえてシミュレーションと比較するために用いられた。実験装置の概念図を図 6 に示す。シュリーレン撮影は点光源から出た光を広がりを持つコリメート光に変換し、撮影対象を通過させた後再び集光させる。集光点にはナイフエッジがあり、光束の一部を遮断する。撮像対象に屈折率分布があるとき、これは撮像面において濃淡となって再現される。

供試ノズル及びホルダ、圧力計は impact pressure 試験と同等のものである。測定はノズル下方に何も置かない free flow の条件にて行った。

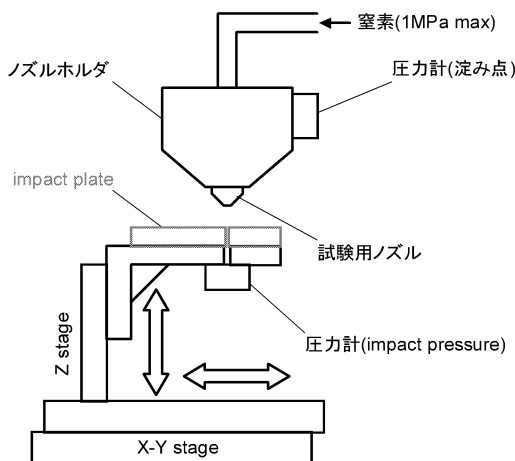


図 5: Impact pressure 計測試験の概念図

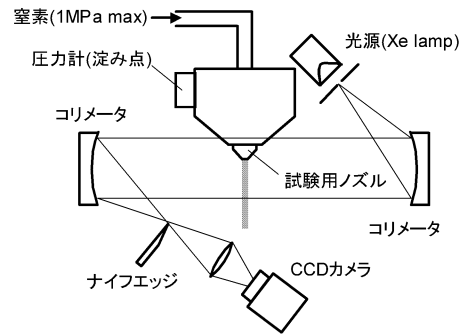


図 6: シュリーレン計測の概念図

### 3.4 加工試験

本研究において、最終的な figure of merit は供試ノズルにより高品質なレーザ加工できたか否かで判断される。そして、試験は standoff を大きく変化させ行わなくてはならない。

加工試験はアマダ製の加工機 (FOL-3015) にファイバレーザ (IPG YLR-2000) を組み合わせた実験機にて行った。切断条件を表 2 に示す。

表 2: 加工試験の切断条件

加工対象	SUS304 1.0 mm 厚
レーザ出力	1300 W CW
切断速度	15 m/min
アシストガス	窒素
Standoff	0.5~8.0 mm

切断結果の評価はドロス付着の有無、側面から見た切断面の荒れをいずれも目視確認にて行った。Standoff の最大値、8 mm はレーザの焦点をワーク上に固定したままノズルを上昇させ、ビームがノズルスロートを通り得る限界で決まる。

## 4 CFD 解析及び実験結果

### 4.1 オリジナルノズルの解析

本研究を始めるきっかけとなったのは、はじめに製作した単純円弧のラバルノズルで安定した impact pressure を得ることができず、結果的に standoff に関わらず良好な切断品質を達成できなかった、というものであった。Standoff を 0.5 mm から 8.0 mm まで変えたときの、切断面品質の写真及び面品質の判定結果を図 13 に示す。本図については改良ノズルとの比較において再度言及する。

そこで、単純円弧のラバルノズル (以降はオリジナルノズルと呼称) の Impact pressure を計測、CFD にて同等の結果を再現するところから研究を始めた。オリジナルノズルの、free flow における CFD 計算結果を図 7 に示す。図は、ノズル中心軸に沿って代表的物理量 (温度、圧力、マッハ数等) を示したものと、静圧分布を  $\pm 50$  kPa の範囲で等高線プロットしたものである。

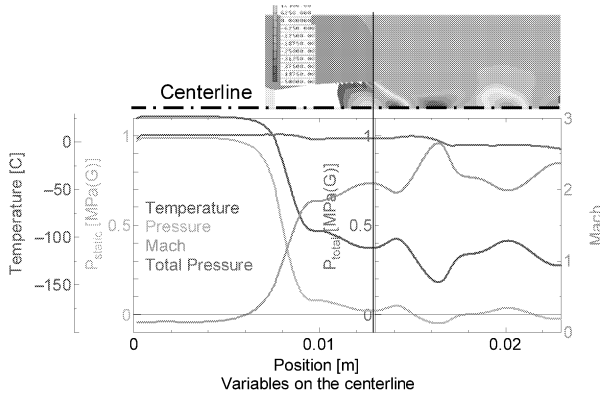


図 7: オリジナルノズルの CFD 結果 (free flow)

本来、中心軸上の物理量は NEP 下流では一様で変化が無いのが理想であるが計算では脈動しているのが見られる。これには二つの理由が考えられる。一つは、前述の設計手法が有効でなく、NEP において一様平行流ができなかったこと、もうひとつは設計において境界層厚さの目算を誤ったため、ノズルが不足膨張条件となっていることである。不足膨張であることは NEP における静圧が 0 PaG より大きくなっていること、圧力分布が不足膨張に特有のセル構造を呈していることから窺える。

一般に、壁面で仕切られたあらゆる流れは壁面上で流速ゼロとなる。したがって実効的には流体が流れている断面積が小さくなるが、流速が壁面との摩擦に支配されているこの領域を境界層と呼ぶ。境界層の厚みは壁面の条件で異なり、壁面の条件はノズルの加工条件で異なるため、境界層厚みを読み切ってノズルを設計することは難しい。

続いて、impact pressure の計算を行い、実験結果と比較した。比較結果を図 8 に示す。横軸はノズルの standoff、縦軸はその条件で得られた impact pressure である。「理論値」の水平線は式(3)で算出した、 $p_{00}$  を 1.0MPaG、 $p_{01}$  を大気圧としたときの impact pressure 理論値である。計測値、CFD どちらも理論値を中心に脈動する結果を得た。これはノズルが不足膨張であることから期待された結果だが、脈動の位相が計算と実験で異なるという予想外の結果を得た。特に、CFD では不足膨張特有のセル構造を反映して standoff が 0 から 3 mm の範囲では impact pressure が高めに出了が、計測では逆に理論値より低めの値を得た。当然、実際のノズルでは過膨張になっている可能性を考えたが

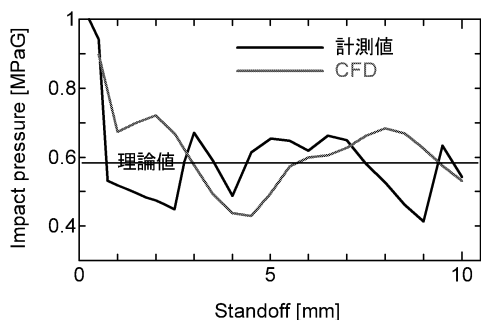


図 8: オリジナルノズルの CFD 結果 (impact pressure)

これはシュリーレン試験の結果から否定される。

図 9 はオリジナルノズル及び新ノズル (後述) のシュリーレン写真を CFD で得た密度分布と同スケールにて比較する形で示したものである。不足膨張の場合、ガス流は NEP 直後に膨張するため太くなるが、シュリーレン写真は不足膨張の特徴を呈している。また、ガス密度の濃淡変化によってできるセル構造のスケールが CFD と一致しており、ノズル端から出た二つの膨張波が反射、ノズル中心線で交わるところが CFD でも高密度となっており、CFD 計算が根本的に間違いであるということもまた否定される。

計算及び測定結果を受け、計算メッシュ数、乱流モデル、ノズルの表面荒さ、壁面モデルなどの計算条件を見直し、何度も再計算したが、実験結果を再現することはできなかった。したがってこの時点で「実際のノズルの流れを CFD で再現、設計指針を得る」本研究の目的を予定通り達成することは困難であることが明らかとなった。Impact pressure 試験結果を再現する CFD 計算の実現については現在も取り組み中の課題である。

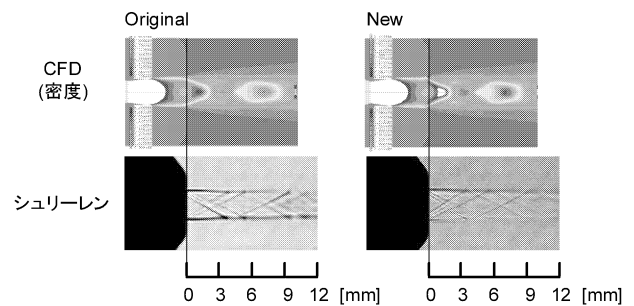


図 9: 噴流のシュリーレン写真と CFD 結果 (密度分布)

#### 4.2 ノズルの改良案の呈示及び解析

前節において、実験結果を再現する CFD から問題を解決するというアプローチが取れなくなったが、図 8、図 9 を見て分かるように CFD 結果から定性的には流れ場の予測はできる。

図 13 の加工結果を見ると、切断品質が悪いのは standoff が短い領域で、特に 2 mm から 3.5 mm の領域が悪い。それ以上に standoff が大きい領域ではかなり広い範囲で加工品質が良くなるのだが、最低の standoff が 4.0 mm というのでは実用性に乏しい。せめて、この領域をずらすことで、0.5 mm から数 mm の範囲で切断品質が良好なラバルノズルの設計を見いだすことを目標とした。

オリジナルノズルの切断不良の原因として考えられるのが、standoff が小さい領域における impact pressure の予想外の低さである。いま、この原因を追及することを棚上げとして、何とかこの領域の圧力を上げる、あるいは圧力低下の領域をずらすことを考える。

アイデアは、「ノズル壁面から出る圧縮波を利用できないか」という発想から生まれた。図 10 の様に、ノズル壁面にわずかな突起 (ノッチ) を与えるとそこからノズル

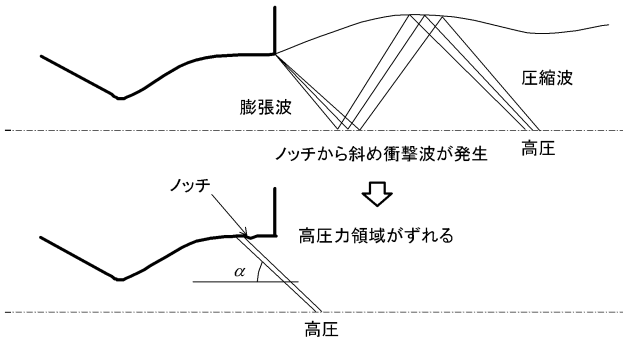


図 10: ノッチつきノズルのアイデアを示した概念図

中心に向かい斜め衝撃波が走る。図 10 は断面図で示されているので、ノッチは実際には細いリング状突起となる。角度はノズルのマッハ数を  $M$  とすると  $1/M = \sin \alpha$  である。これがノズル中心軸上で交わる点は理屈では高圧領域となるはずだから、交点を NEP 下流 1.5 mm 程度の位置に置けば impact pressure の落ち込みは解消されると考えた。しかし、CFD でノッチの効果を検証しようにも、もともと CFD では実験で見られたような impact pressure 低下は観測されていないので効果の評価は難しい。

それでも計算結果からある程度定性的な評価はできるので、ノッチの高さおよび位置を変えた計算をくり返し、最適化を行った。計算結果の例を図 11 に示す。

図は、オリジナルノズル、ノズル内部にノッチを持つノズル及びノズル先端にノッチを持つノズルの圧力分布である。ノズル内部にノッチを与えると、マッハ角  $\alpha$  が大きい場合 NEP より下流に有効な高圧力領域を作ることが難しいことが判明した。一方で、NEP 直前にノッチを付けた例では有意に高圧力領域が観察できる。ただし、ノッチを付けた事による副作用として第一セルの低圧力領域の圧力がオリジナルノズルより低くなることが判明した。したがってノッチ高さはデメリットがメリットを上回らないよう最小限の高さで無くてはならない。計算を繰り返し、ノッチの高さは 0.03 mm が最適であるという判断を下した。そして、NEP のエッジ部に高さ 0.03 mm のノッチを付けた

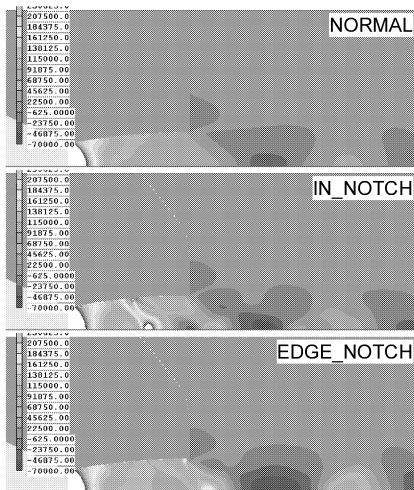


図 11: ノッチつきノズル圧力分布

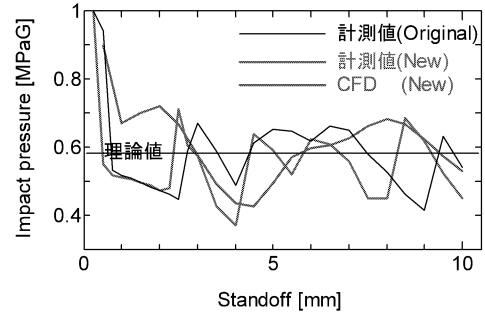


図 12: 新ノズルとオリジナルノズルの impact pressure

ノズルを作成した。以降、このノズルを新ノズルと呼称する。

#### 4.3 新ノズルの impact pressure 試験

新ノズルで impact pressure 試験を実施し、オリジナルノズルと比較した。結果を図 12 に示す。横軸が standoff, 縦軸が impact pressure で、新ノズルデータによる CFD 結果も比較のために掲載した。目論見通り、新ノズルはオリジナルのズルに対して standoff < 3mm の圧力脈動の位相が 0.5 mm 程度上流にずれたものの、圧力が低い領域は依然として存在するという結果となった。また CFD と実験結果の一致はオリジナルノズル同様良くない。効果は予想通りでなかったものの、ノズル中にノッチを付けることによりノズル下流の圧力脈動をある程度制御できることを示すことができた。

#### 4.4 加工試験

最後に、オリジナルノズル及び新ノズルによって行われた加工試験の結果を比較する。図 13 は、オリジナルノズル及び新ノズルで行われた切断試験の切断面、切断品質及び impact pressure の計測値を standoff の関数で示したものである。中央の色つきの表は、各サンプルの切断品質を定性的に色分けで示したもので、すぐ下のグラフは impact pressure の計測結果で図 12 と同等のものである

切断面写真を見ると、オリジナルノズルは standoff が小さい領域で切断品質が悪い。これは、standoff を 0.5 mm かそれ未満にしないと加工ができないコンカルノズルとは対照的である。特に standoff が 2.0 mm から 3.5 mm の範囲では切断面にドロスが付着し、切断片同士を密に重ねることもできないほどの劣悪な品質であった。Standoff を 4.0 mm 以上にすれば、2.5 mm の範囲にわたり切断品質が良好な領域があるが、前述のようにこれでは実用性に乏しい。

一方、新ノズルの切断品質は全般的にはオリジナルノズルを上回る。とはいえ、standoff 0.5 mm から 8.0 mm の全域で良好な品質が得られるわけではなく、2.5 mm から 4.5 mm の間に切断品質が悪い領域が存在する。全域における良好な切断品質ははじめから期待された効果ではないため、良好な切断品質の領域が上流にシフトしたことでノッチ付きノズルの意図は達成された。

興味深いことに、グラフから切断品質の良い・悪いと

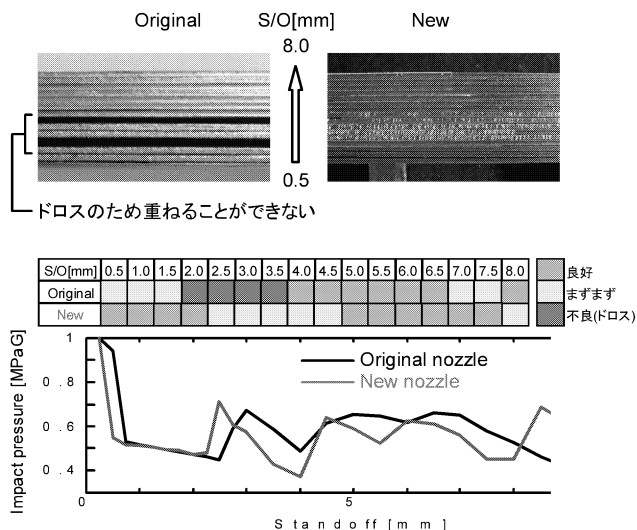


図 13: オリジナルノズルと新ノズルの加工品質の比較

impact pressure の絶対値にはほとんど何の相関もない、ということがわかる。従って、超音速アシストガスノズルにおいて良好な切断品質を得るためには、実験と一致する CFD 計算ができるようになることも必要だが、impact pressure と切断品質の関係が単純でないことにも注意を払う必要がある。恐らく、この問題に対しては切断カーフを含む完全三次元の解析がヒントを与えてくれるものと期待している。もちろん、出発点として CFD による流れ場の完全な再現が不可欠な要素であることは間違いない。

## 5 結論

本研究により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. ラバルノズルをレーザ切断のアシストガスノズルに採用すればノズルとワークの距離 (standoff) を大きく取っても高品質な加工ができると期待される。一定曲率の円弧で構成されたラバルノズル (オリジナルノズル) でレーザ切断試験を行った結果、切断品質の良い領域と悪い領域が交互に現れ、その振る舞いは奇妙で予想不能であった。ノズルから出たガスが平板 (ワーク) に当たって生じる圧力 (impact pressure) を standoff の関数で測定したところ、脈動が観測された。加工品質の悪さはこの脈動が原因と推察された。
2. オリジナルノズルの流れ場を CFD (数値流体力学) で再現することを試みた。free flow の計算結果 (密度分布) はシュリーレン撮影で得た密度分布と良く一致し、impact pressure の脈動から設計圧力では不足膨張の条件になっていることが示唆された。しかし、standoff と impact pressure の関係を実験と計算で比較したところ、

プラントルの式から予測される圧力を中心に脈動する挙動は再現できたが、standoff が 3 mm より短い領域において実験では圧力の著しい低下が見られたのに対して、計算でそれを再現することはできなかった。

3. CFD で実際のノズルの流れ場を高精度に再現することはできなかったが、standoff < 3mm の領域で impact pressure が下がる現象が加工品質低下の原因と考え、これを回復する方策を考案した。ノズル内壁にわずかなリング状突起 (ノッチ) を付けることにより、斜め衝撃波がノズル下流の低圧領域で中心軸と交差し、高圧領域を作るというアイデアである。CFD を用いてノッチの位置、高さを最適化して効果を確認した。
4. 新ノズルとオリジナルノズルの impact pressure 計測結果を比較すると、新ノズルの圧力脈動はオリジナルノズルに対して上流にシフトした形を呈した。しかし、standoff が小さい領域での圧力低下を防ぐことはできなかった。
5. 新ノズルにより加工試験を実施した。その結果、standoff が 2.5 mm より短い領域で良好な切断品質を得た一方、それより長い領域では品質は低下した。全体的な切断品質はオリジナルノズルより良かった。これは、圧力脈動の位相を変えることにより、切断品質を制御可能である事を意味する。しかし、standoff が 0.5 mm から 8 mm の全域にわたり良好な品質を得ることはできなかった。
6. 図 13 の切断品質と impact pressure の関係を見ると、impact pressure の絶対値と切断品質の間には相関がないことは明らかである。今後はまず実際の流れ場を高精度に再現する CFD 計算技術を確立し、その後カーフ内部を含めた完全三次元 CFD によって standoff と切断品質の関係を流体力学の観点から解明することが課題である。

## 謝辞

本研究は(財)天田金属加工機械技術振興財団の助成を受け行われた。また、シュリーレン試験及び加工試験は(株)アマダ先端技術開発部 (現: 技術研究所) の協力により行われた。ここに謝意を表する。

## 参考文献

- [1] 松尾, 「圧縮性流体力学」(理工学社, 1994), p. 74.
- [2] J. Conrad Crown, "Supersonic Nozzle Design," NACA Technical report No. 1651, 1948.
- [3] 松尾, 「圧縮性流体力学」(理工学社, 1994), p. 108.