

楕円体空洞から噴出する渦輪の循環が 非定常超音速ジェットにおよぼす影響

福岡 寛, 上田耕太郎*, 北園 一将**

Effect of Circulation of Vortex Rings Discharged from Elliptical cell on Unsteady Supersonic Jet

Hiroshi FUKUOKA, Kotaro UEDA*, Kazumasa KITAZONO

The unsteady supersonic jet formed by a shock tube with a small high-pressure chamber was used as a simple alternative model for pulsed laser ablation. Understanding the vortex ring formed by the shock wave is crucial in clarifying behavior of unsteady supersonic jet discharged from elliptical cell. The purpose of this study has been to reveal behavior of the supersonic jet and the vortex rings. The unsteady behavior of a flow is investigated numerically by solving the axisymmetric two-dimensional compressible Navier-Stokes equations. The system of the calculation is a model of laser ablation of a certain duration followed by discharge through the cell exit. The parameters for the calculations are the pressure ratio of the shock tube and the cell exit diameter. As a result, the interaction between the vortex ring and the jet near the flat plate causes the wall static pressure to increase.

1. 緒言

パルスレーザー堆積法 (PLD: Pulsed Laser Deposition) は、レーザーアブレーションを応用した新しい薄膜生成法として期待が寄せられている。レーザーアブレーションとはレーザーを材料の固体表面へ照射することによって、衝撃波とともに材料の構成原子の蒸気群であるブルームを爆発的に放出させる現象である^[1]。PLDは、そのブルームを基板上に堆積することによって薄膜を生成するという手法である^[2-3]。このPLDの問題点はブルームの粒子サイズが均一でないということであった。その解決策として、Iwataらは、ターゲット表面に楕円体空洞を設置することによって粒子サイズを均一にすることができることを報告している^[4]。しかしながら、レーザーアブレーションによる流れ場は極めて複雑であり、実験的に解析することは非常に困難である。

この複雑な流れ場を解析するために、Yagaらは高速噴流を衝撃波管から噴出する超音速ジェットに置き換えた数値計算を行ない、楕円体空洞内におけるジェットと衝撃波の干渉を詳細に調べている^[5]。またKitazonoらは、衝撃波管の圧力比をパラメータとした数値計算を行なって楕円体空洞出口下流における流れ場を解析し、空洞出口にて

渦輪が発生することを報告している^[6]。しかしながら、楕円体空洞出口直径をパラメータとした渦輪およびジェットの解析は行なわれておらず、楕円体空洞出口直径が渦輪およびジェットの挙動におよぼす影響は明らかになっていない。

そこで、本研究では楕円体型空洞下流において渦輪がジェット速度に与える影響を調べるために、数値計算を用いてレーザーアブレーションによって発生するブルームを高圧小容積の衝撃波管から噴出する超音速ジェットに置き換えたモデルに対してシミュレーションを行なう。支配方程式として二次元軸圧縮性ナビエ・ストークス方程式を用い、パラメータとして衝撃波管の圧力比および楕円体空洞出口直径を変化させる。

2. 数値計算方法

本研究では支配方程式として二次元軸対称圧縮性ナビエ・ストークス方程式を用いた^[7]。本計算では空間内を曲線で近似することにより、3次精度としたMUSCL法を用いた^[8]。移流項における数値流速はRoeの近似リーマン法による風上スキームで評価した。また時間進行法は従来のRunge-Kutta法に改良を加えた、TVD time discretization

*システム創成工学専攻 機械制御システムコース

**機械制御工学専攻

scheme を用いて離散化した⁹⁾。また、レーザーアブレーションにより発生するプルームは高圧小容積の衝撃波管から噴出する非定常超音速ジェットに置き換えることでモデル化を行なった。

図1は計算領域を示している。図左から衝撃波管、楕円体空洞および衝突平板を設けた。x軸およびy軸は衝撃波管の内径Dによって無次元化している。また、衝撃波管、楕円体空洞および衝突平板の壁面は滑りなし壁条件とした。パラメータには衝撃波管の圧力比 P_h/P_b および楕円体空洞出口直径 D_e/D を用いた。ここで P_h および P_b はそれぞれ衝撃波管高圧室の圧力および雰囲気ガス圧を表している。 P_h/P_b および D_e/D はそれぞれ 16.7-47.4 および 1.0-2.0 の間で変化させた。ジェットと渦輪の挙動を調べるために、解析はセル出口後方の拡大領域に注目して行なった。

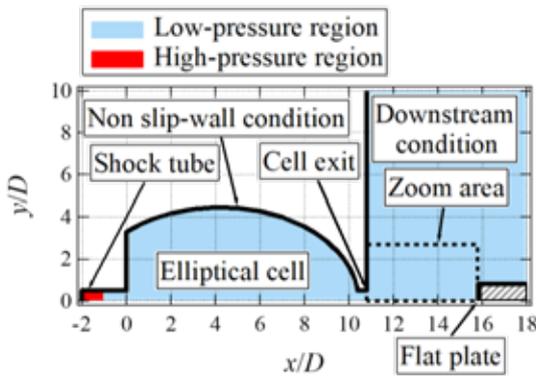


Fig.1 Flow field for computation and boundary conditions

3. 結果および考察

3.1 代表的な流れ場

図2は $P_h/P_b = 22.6$, $D_e/D = 1.0$ における代表的な流れ場の時間変化を示している。図2の上部および下部は渦度線図およびコンピューターシュリーレン像を示している。図左端および右端は空洞出口および衝突平板を表している。時間は衝撃波管の隔膜が破膜した瞬間を $t=0\mu s$ する。図2(a)において空洞出口付近で渦輪の形成を確認できる。図2(b)において空洞出口付近で新たな渦輪の形成を確認できる。この渦輪と下流側の渦輪と区別するため、形成された順に第一渦輪および第二渦輪と呼ぶこととする。図2(c)において空洞出口からジェットの噴出が確認できる。図2(c)および (d)において第二渦輪が第一渦輪に接近していることが確認できる。これは第二渦輪の進展速度が第一渦輪のより大きいためである。また、図2(e)-(g)において、第一渦輪、第二渦輪およびジェットの衝突が確認できる。また、図2(h)においてジェットが壁面と衝突していることが確認できる。

図2から空洞出口下流において、渦輪およびジェットの衝突が発生することがわかった。次に衝突した渦輪がジェット速度におよぼす影響を調べるために図3にジェット速度の時間変化を示す。図中の (c)-(g) はそれぞれ図2(c)-(g) に対応した時間を示している。図3からジェット噴出後の $t = 624-683\mu s$ においてジェット速度が上昇していることが

確認できる。これは図2(e)に示すように第一渦輪、第二渦輪およびジェットが相互作用を起こしたためである。

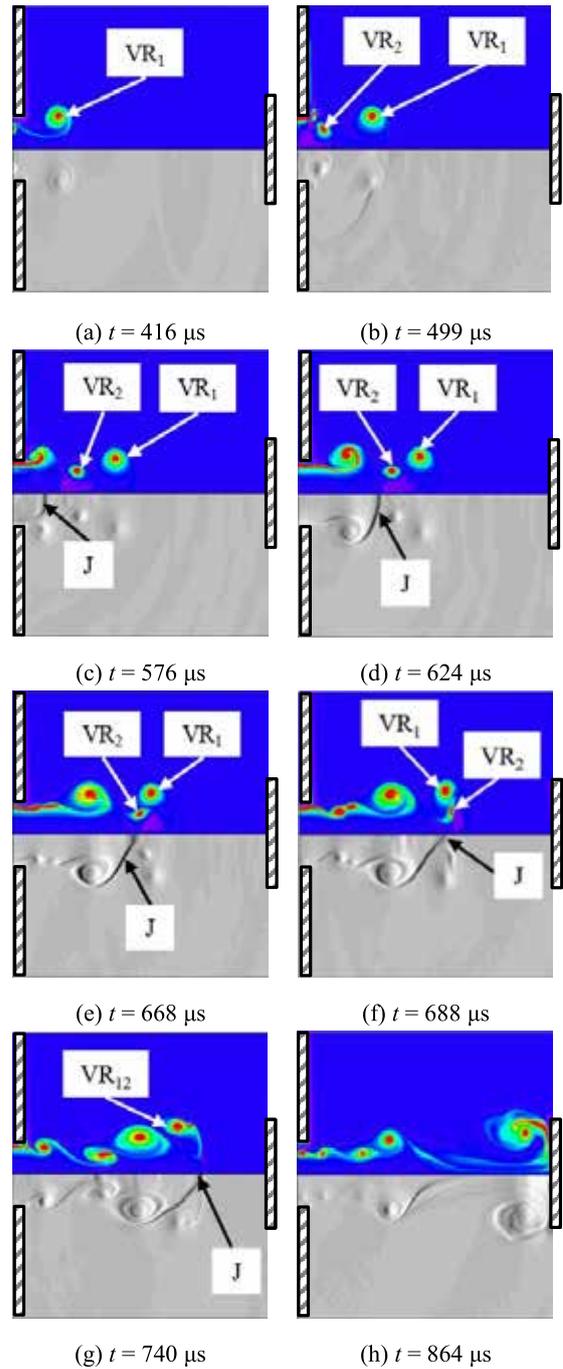


Fig.2 Vorticity and computer schlieren variation for $P_h/P_b = 22.6$ and $D_e/D = 1.0$. (VR1: First generated vortex ring; VR2: Second generated vortex ring; J: Jet head.)

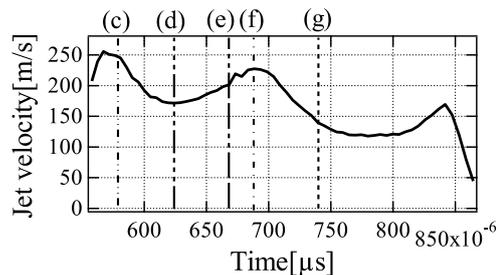


Fig.3 Time history of jet velocity for $P_h/P_b = 22.6$ and $D_e/D = 1.0$

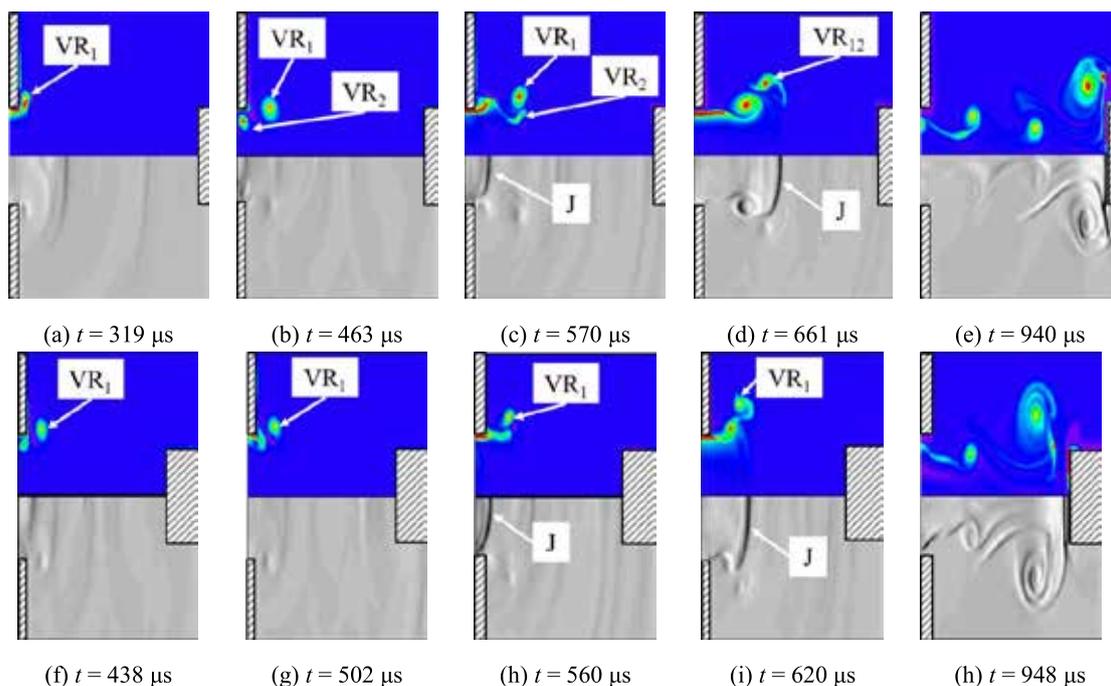


Fig.4 Vorticity and computer schlieren variation for $P_w/P_b = 22.6$ ((a)-(e): $D_c/D = 1.5$, (f)-(h): $D_c/D = 2.0$)

3.2 空洞出口直径がジェットおよび渦輪におよぼす影響

空洞出口近傍の壁は、出口から流出するジェットに対し抵抗になると考えられる。そこで楕円体空洞出口直径が渦輪およびジェットの挙動におよぼす影響を調べるために、図4に $P_w/P_b = 22.6$, $D_c/D = 1.5$ および 2.0 における流れ場の時間変化を示す。図4(a)および(b)において、第一渦輪および第二渦輪の発生が確認できる。その後、図4(c)において渦輪同士の衝突が確認できる。渦輪同士の衝突後、図4(d)において渦輪およびジェットの衝突が確認できる。次に $P_w/P_b = 22.6$, $D_c/D = 2.0$ の場合、図4(f)-(g)から渦輪が一つ発生していることが確認できる。また図4(i)より、空洞出口近傍で渦輪とジェットの衝突が確認できる。さらに、ジェットが衝突平板に衝突した瞬間を示す図4(e)および(h)より、ジェットの壁面衝突時間は $D_c/D = 2.0$ より $D_c/D = 1.5$ のほうが早いことが確認できる。

上述より空洞出口直径が壁面衝突直前のジェット速度に影響をおよぼすことがわかった。次に空洞出口直径が、薄膜の品質を評価する上で重要となる壁面静圧^[10]におよぼす影響を調べるために、図5に三つの空洞出口直径における衝突平板の壁面静圧の時間変化を示す。図5において、 $t=864, 924$ および $1000\mu s$ における三つの鎖線はそれぞれの条件におけるジェットが壁面衝突した瞬間を表している。図5からジェットが衝突したときに壁面静圧が最大値に到達していることが確認できる。さらに、 $P_w/P_b = 22.6$, $D_c/D = 1.0-2.0$ において空洞出口径が大きくなるにつれて、ジェット衝突時の壁面静圧が低くなっていることが確認できる。これは、空洞出口径が大きくなるにつれて、壁面衝突直前のジェット速度が小さくなるためであり、この事実はずでに確認した。

3.3 圧力比がジェットおよび渦輪に与える影響

3.1 節より、楕円体空洞下流において渦輪およびジェッ

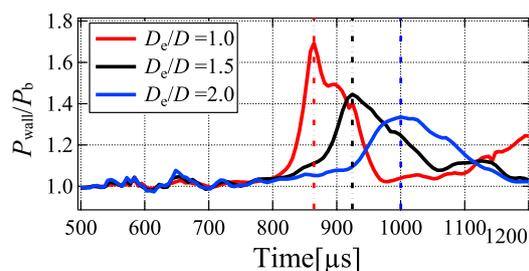
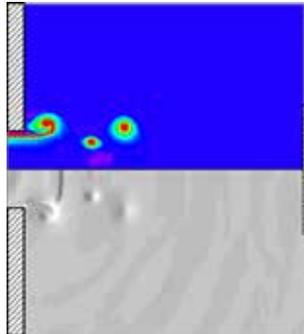


Fig.5 Time history of wall static pressure for $P_w/P_b = 22.6$, $D_c/D = 1.0, 1.5$ and 2.0

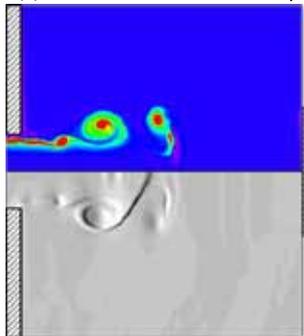
トが衝突することが確認できた。次にジェットの推進力に大きな影響を与えると考えられる衝撃波管の圧力比がジェットと渦輪の挙動におよぼす影響を調べるために、図6に圧力比 $P_w/P_b=20.0, 42.0$ および $D_c/D=1.0$ における空洞出口下流の流れ場の時間変化を示す。図6(a)(b)および図6(c)(d)はそれぞれ $P_w/P_b=20.0$ および 42.0 の流れ場である。図6(a)および(c)においてジェットの前方に第一渦輪と第二渦輪が発生していることが確認できる。その後、図6(b)および(d)において渦輪とジェットの衝突が確認できる。さらに、図6(b)および(d)において、 $P_w/P_b=42.0$ における渦輪とジェットの衝突位置が $P_w/P_b=20.0$ における衝突位置に比べて衝突平板に近いことが確認できる。これは $P_w/P_b=42.0$ における渦輪の進展速度が $P_w/P_b=20.0$ における進展速度に比べて大きいためである。この傾向は $D_c/D=1.5$ における流れ場でも同様に確認できた。

次に圧力比の変化が壁面静圧におよぼす影響を調べるために、図7に三つの空洞出口直径における圧力比と壁面静圧の関係を示す。図7から、三つの空洞出口直径において、圧力比の上昇とともに壁面静圧が上昇および減少していることが確認できる。さらに、 $P_w/P_b = 20.0-21.1$ および $29.0-32.5$ において、空洞出口直径が大きい場合の壁面静圧が、空洞出口直径が小さい場合の壁面静圧を上回ってい

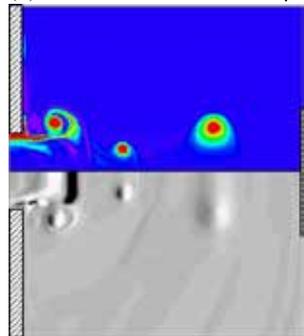
ることが確認できる。これは、ジェットが壁面近傍で渦輪と衝突することによって、ジェット速度が上昇した状態で壁面衝突するためであると考えられる。



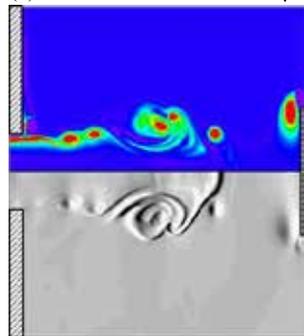
(a) $P_h/P_b = 20.0$ and $t = 686 \mu s$



(b) $P_h/P_b = 20.0$ and $t = 733 \mu s$



(c) $P_h/P_b = 42.0$ and $t = 632 \mu s$



(d) $P_h/P_b = 42.0$ and $t = 754 \mu s$

Fig.6 Vorticity and computer schlieren variation for $P_h/P_b = 20.0, 42.0$ and $D_c/D = 1.0$

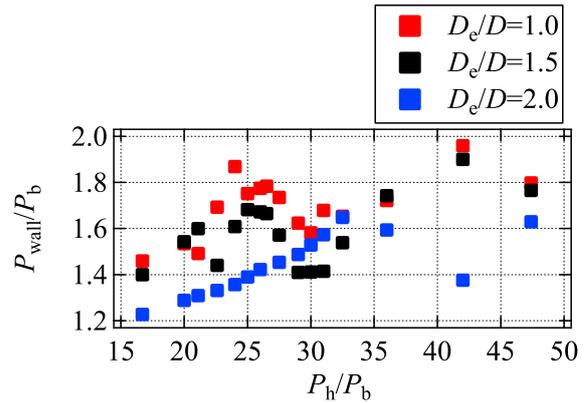


Fig.7 Wall static pressure P_{wal}/P_b versus P_h/P_b for $D_c/D = 1.0, 1.5$ and 2.0

4. 結言

本研究では、楕円体空洞下流において発生する渦輪がジェットおよび衝突平板の壁面静圧におよぼす影響を明らかにするために、衝撃波管の圧力比と楕円体空洞出口直径をパラメータとした数値計算を行なった。得られた結論を以下に示す。

- (1) $P_h/P_b = 22.6, D_c/D = 1.0$ において、渦輪とジェットの相互作用が起こるため、ジェット速度は上昇する。
- (2) $P_h/P_b = 22.6, D_c/D = 1.5$ では渦輪が二つ発生する一方で、 $P_h/P_b = 22.6, D_c/D = 2.0$ では渦輪が一つ発生する。
- (3) $P_h/P_b = 22.6, D_c/D = 1.0-2.0$ において、空洞出口直径が大きくなるにつれて、ジェット衝突時の壁面静圧は小さくなる。これは、空洞出口直径が大きくなるにつれて、壁面衝突直前のジェット速度が小さくなるためである。
- (4) $P_h/P_b = 20.0$ および $42.0, D_c/D = 1.0$ において渦輪が二つ発生する。また、 $P_h/P_b = 42.0$ および $D_c/D = 1.0$ における渦輪とジェットの衝突位置は、 $P_h/P_b = 20.0$ および $D_c/D = 1.0$ における衝突位置に比べて衝突平板との距離が小さい。
- (5) $P_h/P_b = 20.0-21.1$ および $29.0-32.5$ において、空洞出口直径が大きい場合の壁面静圧が、空洞出口直径が小さい場合の壁面静圧よりも高くなる。これは、ジェットが壁面近傍で渦輪と衝突することによって、ジェット速度が上昇した状態で壁面衝突するためであると考えられる。

参考文献

- [1] 電気学会, レーザーアブレーションとその応用, (1999), pp.247-248, コロナ社.
- [2] Tatsuo Okada, Koji Sugioka, J. Plasma Fusion Res., Vol.79, No.12(2003), pp.1278-1286.
- [3] 米澤徹, 表面技術, Vol. 59, No.11(2008), pp.712-717.
- [4] Yasushi Iwata, Masaaki. Kishida, Makiko. Muto, Shengwen Yu, Tsuguo Sawada, Akira Fukuda, Toshio Takiya, Akio

- Komura and Koichiro Nakajima, Chem. Phys. Lett., Vol.358, (2002)pp.36-42.
- [5] Minoru Yaga, Toshio Takiya, Yasushi Iwata, Shock Waves, Vol.14, No.5-6, (2005)pp.403-411.
- [6] Kazumasa Kitazono, Hiroshi Fukuoka, Nao Kuniyoshi, Minoru Yaga, Eri Ueno, Naoaki Fukuda and Toshio Takiya, Int. J. Mech., Aerosp., Industrial, Mechatron. and Manuf. Eng. Vol.10 (2016)1801-1805.
- [7] 八田夏夫, 流れの計算, (2010), pp.193-216, 森北出版.
- [8] 藤井孝藏, 流体力学の数値計算法, (1993), pp.72-76, 東京大学出版会.
- [9] 棚橋隆彦, CFD 数値流体力学, (1993), pp.924-925, アイピーシー
- [10] Christian Anders, Sebastian Meßlinger and Herbert M. Urbassek, Surface Sci., Vol.600, (2006) pp.2587-2593.