

デュアルベルノズルに生じる流体振動の数値解析 Numerical Investigation of Flow Oscillation in Dual-Bell Nozzles

- 米澤 宏一, 阪大, 大阪府豊中市待兼山町 1-3, E-mail: yonezawa@me.es.osaka-u.ac.jp
PROSHCHANKA, Dzianis, 阪大, 大阪府豊中市待兼山町 1-3, E-mail: belarden@yahoo.com
佃 宏明, 阪大, 大阪府豊中市待兼山町 1-3, E-mail: hiroaki.tsukuda@me.es.osaka-u.ac.jp
荒木 香住, 阪大, 大阪府豊中市待兼山町 1-3, E-mail: kasumi.araki@me.es.osaka-u.ac.jp
辻本 良信, 阪大, 大阪府豊中市待兼山町 1-3, E-mail: tujimoto@me.es.osaka-u.ac.jp
木村 竜也, 三菱重工, 愛知県小牧市東田中 1200, E-mail: tatsuya_kimura@mhi.co.jp
横田 和彦, 青学大, 神奈川県相模原市中央区淵野辺 5-10-1, E-mail: yokota@me.aoyama.ac.jp
Koichi Yonezawa, Osaka University, 1-3, Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka
Proshchanka Dzianis, Osaka University, 1-3, Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka
Hiroaki Tsukuda, Osaka University, 1-3, Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka
Kasumi Araki, Osaka University, 1-3, Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka
Yoshinobu Tsujimoto, Osaka University, 1-3, Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka
Tatsuya Kimura, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 1200, Higashitanaka, Komaki, Aichi
Kazuhiko Yokota, Aoyama Gakuin University, 5-10-1, Fuchinobe, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa

In dual-bell nozzle, periodic flow oscillations occur during the low-altitude operation. Numerical investigations are carried out in order to clarify the influence of the base nozzle contour. The symmetric flow oscillation and the asymmetric oscillation occur with the base nozzle designed as a truncated perfect nozzle. With the base nozzle designed as a compressed truncated perfect nozzle, a coupling oscillation of the Mach disk oscillation and the symmetric mode oscillation of the separated jet oscillation is observed with the larger amplitude.

1. 諸 言

ロケット打上げ時から、背圧がほぼ0となる高高度までの、広い範囲で利用できる高度補償型のロケットノズルの一つとしてデュアルベルノズル⁽¹⁾が考案されている。Fig. 1 にデュアルベルノズル内部流れの模式図を示す。デュアルベルノズルは低膨張比のベースノズル部と高膨張比のエクステンション部からなり、2つのノズルが接続している偏向点では壁面勾配が不連続となっている。打上げ時から低高度においてはベースノズルにおいて飛行に必要な推力を発生させ、偏向点で燃焼ガスを軸対称に安定して剥離させることで、NPR (Nozzle Pressure Ratio = (ノズル入口全圧)/(ノズルの背圧)) が比較的小さな状態でも、ロケットの安定した飛行を可能にしている。一方、ロケットの周囲が真空に近い高高度においては、ノズル内部での燃焼ガスの剥離が発生しなくなるので、膨張比が大きなエクステンション部の効果により長時間の飛行を行うのに必要な大きな比推力を得ることが出来る。このため、コスト面などで多段式に比べて有利な単段ロケットや、宇宙往還型の再使用ロケットなどへの応用が期待されている⁽²⁾。

これまでに研究されてきたデュアルベルノズルの技術的課題としては、大きく分けて2つ挙げられる。まず、低膨張運転から高膨張運転への遷移がノズルの周囲の圧力に依存して行われるために、最適な条件(高度)での運転状態の遷移が行われないことが挙げられる。もう一つの課題として、運転状態の遷移時における、偏向点とノズル出口との間の剥離点の移動時に流れが非対称となることで生じる比較的大きな横推力である⁽³⁾。これらの課題に関する改善方法などについては、現在も多くの研究が行われている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。一方、著者らもデュアルベルノズルの性能・信頼性向上を目的として研究を行ってきた。そして、運転モードの遷移よりも低いNPRにおける低高度運転モード時に、ノズルの偏向点で剥離した噴流が周期的に軸方向や横方向に振動する現象を確認した⁽⁶⁾。この流体振動は、従来用いられてきたベル型ノズルでは発生

せず、デュアルベルノズルに特有の現象である。本研究では実験と並行して数値解析により流れ場の構造、振動の発生メカニズムを検討している。本報では特にベースノズルの形状の影響に着目して行ったCFD解析による研究結果について報告する。

2. CFD解析手法および解析対象

本研究では別途行っている実験と比較するために、作動流体には空気を理想気体として用いた。3次元圧縮性流れの支配方程式は、連続の式、Navier-Stokes方程式、エネルギー保存式である。さらに本解析では乱流モデルとして、Spalart-AllmarasモデルをベースとするDetached Eddy Simulationモデル⁽⁸⁾の輸送方程式も用いた。これらの方程式は有限差分法に基づき離散化される。対流項の数値流束は基本変数を4次精度MUSCL法⁽⁹⁾で内挿し、SHUS⁽¹⁰⁾を用いて計算した。拡散項は2次精度中心差分で離散化した。時間項は3点後退差分で離散化し、LU-SGS法⁽¹¹⁾を用いて各時間ステップでの平均4,5回の内部反復を行い、残差が初期残差の1/100以下まで収束させた。

Fig. 2 に計算領域の模式図を示す。ノズル外部領域は別途行った実験に用いた装置に基づいている。境界条件は以下のように入れた。まず、ノズル入口においては、垂直速流入条件として全圧と全温を与えた。さらに各格子点での速度はノズルの中心軸に平行であると仮定して、境界に隣接する格子点からRiemann不変量を外挿し、各速度成分を求めた。計算領域の出口は、実験に用いた風洞の終端とほぼ同程度の位置に設け、垂直速流出すると仮定した。そして、密度と各速度成分を隣接格子点から外挿し、静圧を与えることでエネルギーを求めた。

Fig. 3 に解析に用いたノズル形状を示す。本研究では異なる2種類のベースノズルに対して共通のエクステンション部を用いた。1つ目のノズルであるTP-NPEノズルはベースノズルにTruncated Perfect (TP)ノズル⁽¹²⁾を用い、エクステンション部には、高高度運転時に壁面圧力分布が下流に向かって負となるNPE (Negative

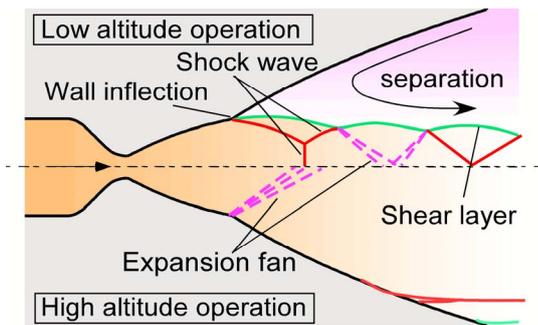


Fig. 1 Schematic of flow pattern for each operation mode of dual bell nozzle

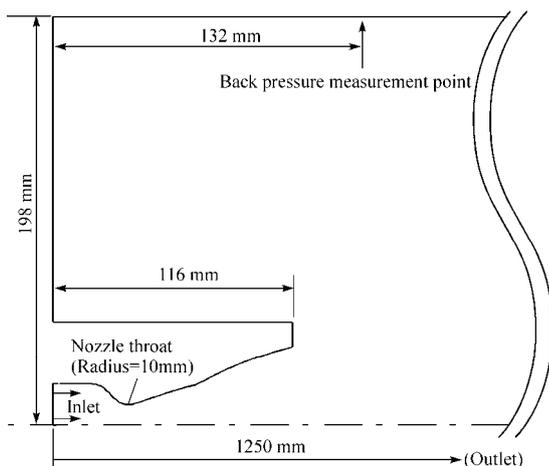


Fig. 2 Schematic of computational domain

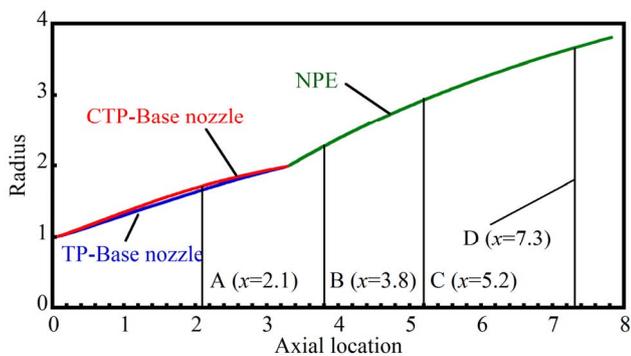


Fig. 3 Nozzle contours (Throat radius is 10mm)

Pressure gradient in Extension) の形状を用いた。なお、NPE 形状は TP ノズルと同じ方法で設計した。2 つ目のノズルである CTP-NPE ノズルはベースノズルに TP ノズルを軸方向に圧縮することで設計される Compressed Truncated Perfect (CTP) ノズル⁽¹³⁾を用い、エクステンション部には、NPE を用いたノズルである。これら 2 種類のデュアルベルノズルのスロート半径、ベースノズル出口半径、エクステンション部出口半径は、それぞれ同一である。また、別途行った実験では図中の A-D の位置における壁面の周方向 4 点で圧力変動を計測した。本研究でも適宜、同様な位置における壁面圧力変動を比較した。

Fig. 4 に CTP-NPE ノズルの計算に用いた格子のノズル付近の拡大図を示す。計算格子の分布に伴う流れの非対称性を防ぐため、断面は O-Type 格子とした。しかし、中心軸は特異点となり差分法では計算することができないので半径が 0.1mm より外側を計

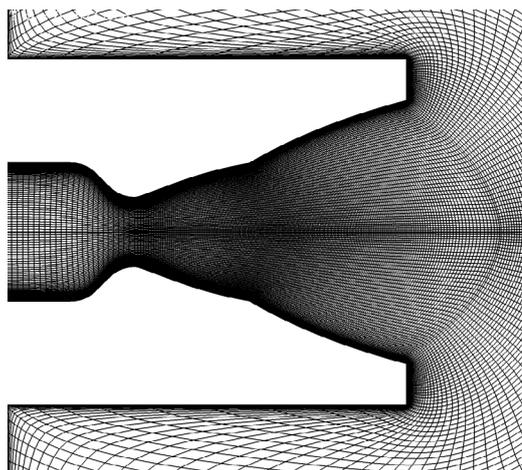


Fig. 4 Computational grid of CTP-NPE

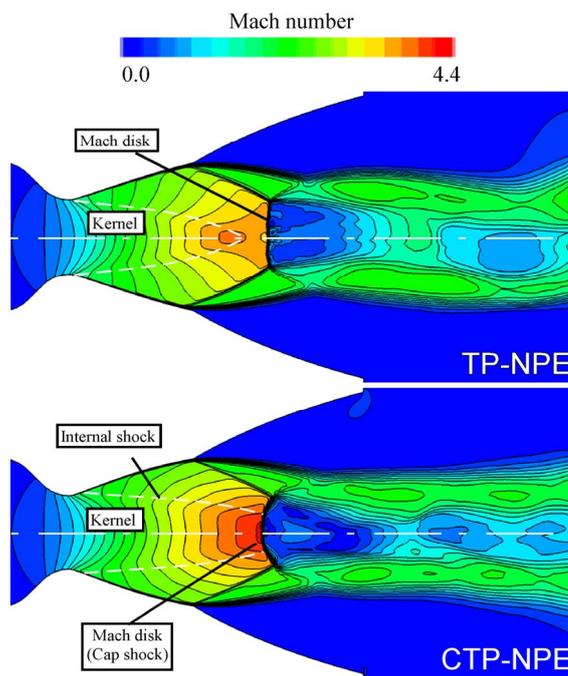


Fig. 5 Mach number distribution (NPR=10)

算領域とした。この半径 0.1mm の境界面では周囲の格子点における保存変数の平均値を境界条件として与えている。このような人工的な条件を与えた場合、物理量の分布に問題が生じる可能性があるが、等高線図の観察や、実験結果との比較から今回の計算では流れ場に対して大きな影響を与えていないと考えられる。格子点数は軸方向に 346 点(ノズル内部に 238 点)、半径方向に 70 点、周方向に 180 点の合計 4,359,600 点用いた

本研究では 2 つのノズルについてともに NPR=10 について CFD 解析を行ったが、TP-NPE ノズルの場合には入口圧力が 71kPa で CTP ノズルが 455kPa と異なっている。これは実験における起動条件と停止条件に相当する。入口圧力の値の違いによる影響については現在、比較のための計算を実施中である。

3. 結果と考察

Fig. 5 に TP-NPE ノズル、CTP-NPE ノズルそれぞれにおいて NPR が 10 の場合における、ある瞬間のマッハ数等高線を示す。この NPR では剥離点はノズル壁面の偏向点に達している。まず、マッハディスク上流の超音速領域におけるマッハ数分布を比較すると、

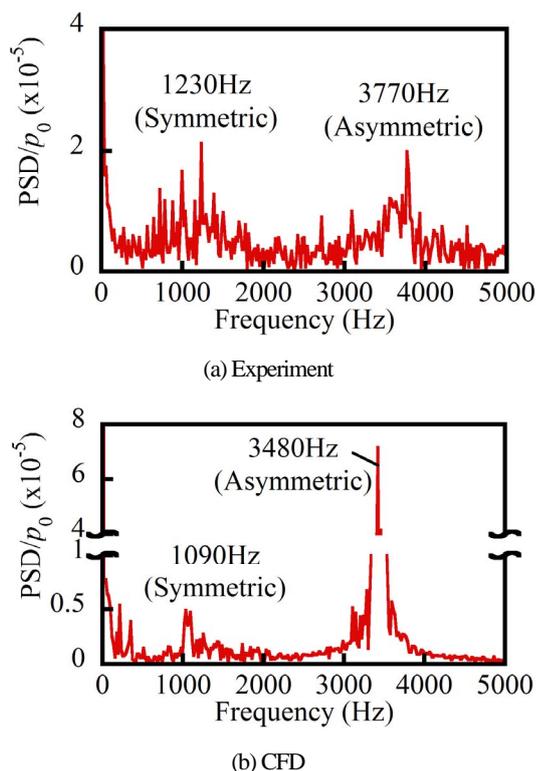


Fig. 6 Spectral analyses of wall pressure fluctuation in TP-NPE nozzle at point C (NPR=10)

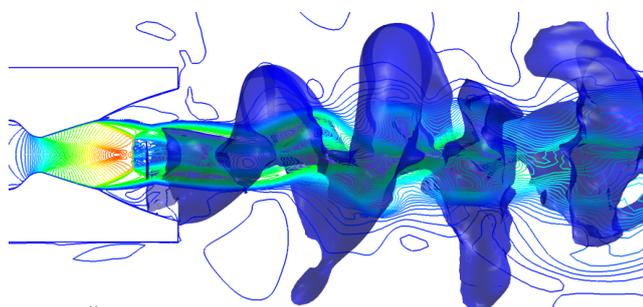


Fig. 7 Mach number contour and iso-pressure surface ($p/p_0=2.0$) in TP-NPE nozzle at NPR10

カーネルと呼ばれる中心軸付近のマッハ数が比較的高い領域は TP-NPE ノズルに比べて CTP-NPE ノズルの方が下流に向かって長く伸びていることがわかる。また、ベースノズル出口付近におけるカーネル外部のマッハ数分布を比較すると、TP-NPE ノズルに比べて CTP-NPE ノズルの方が半径方向のマッハ数勾配が大きいことがわかる。次にマッハディスクについて比較すると、TP-NPE ノズルはカーネルがマッハディスクより上流で閉じているためスロート片部より生じる圧縮派の影響が小さく、ほぼ垂直衝撃波となっている。一方、CTP-NPE ノズルの場合にはカーネルの外縁に生じているインターナルショックとマッハディスクが干渉しているため、マッハディスクが上流に向かって凸となっている、キャップショック形状となっている。

Fig. 6 は TP-NPE ノズルのエクステンション部における壁面圧力変動の FFT 解析結果を実験結果と CFD 解析結果とについて示している。スペクトルの高さについては異なるが実験結果では 1230Hz の成分と 3770Hz が、CFD 結果では 1093Hz と 3483Hz の成分が得られている。これらは後述するように剥離した噴流の振動によるものである。周方向の位相差を調べると 1200Hz 前後の

低周波数成分は周方向位相差がない軸対称な振動モードであり、3500Hz 前後の高周波数成分については周方向に位相差を持つ非対称な振動モードであることが判明した。

軸対称モードについては、エクステンション部を取り除くと発生しないので、現在のところエクステンション部における音響共鳴が関係していると推測している。エクステンション部の長さ $l=0.045\text{m}$ 、CFD 解析結果から求めたエクステンション部での平均音速 $c=290\text{m/s}$ を用いて 1/4 波長の共鳴周波数の式

$$f = \frac{c}{4l}$$

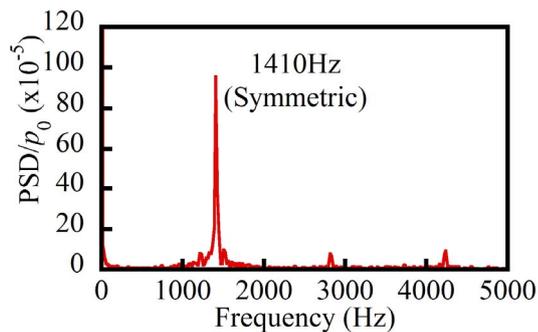
に代入すると 1611Hz が得られる。実験結果や CFD 解析結果と比べて大きな値となっているが、CFD 解析結果を見ると、ノズル出口でも渦などにより圧力変動が比較的大きく、圧力変動の節はノズル出口よりもかなり下流にあると考えられ、開口端補正を比較的大きくとる必要がある。例えば 30%程度の開口端補正を行うと共鳴周波数はおよそ 1240Hz となることから、実験結果と比べると、妥当な推測であると考えている。より詳細にエクステンション部の長さの影響を調べるために、現在、エクステンション部の長さを変えた CFD 解析を進行中である。

非対称モードについては実験では剥離した噴流が径方向に振動するフラッピング(flapping)モードと周方向に噴流がふれ回り、螺旋状の渦が生じるヘリカル(helical)モードが入れ替わりながら生じていた。一方、CFD 解析ではヘリカルモードが補らえられた。Fig. 7 に子午面上のマッハ数分布と、圧力の等値面を示す。この図から剥離した噴流を取り囲むように螺旋状の渦が形成されていることがわかる。この渦は回転しながら下流へと放出され、その際圧縮波が放出される。また、軸対称モードの影響により、螺旋渦構造は軸方向に移動していたが、軸対称な渦構造は生じない。このようなヘリカルモードや、実験で観察されたフラッピングモードの噴流の振動に関しては、Tam らがジェットスクリーチの研究として詳細に報告している^(14, 15)。本研究では、Tam の提案した Phase Source Array Model による周波数の予測結果と比較したところ、よく一致した結果が得られた。したがって、ここで観察された非対称モードの流体振動はジェットスクリーチにより生じた圧力波と剥離した噴流との連成振動であると考えられる。なお、非対称モードに関して行った詳細な検討については文献(6)(7)を参照されたい。

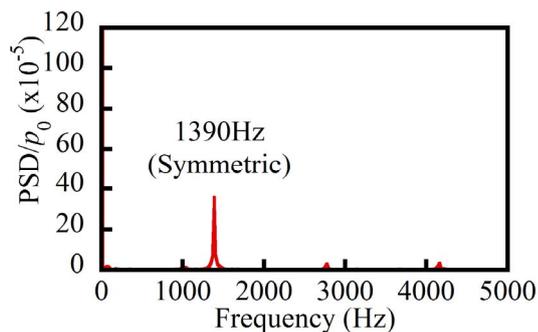
Fig. 8 は CTP-NPE ノズルのエクステンション部における壁面圧力変動の FFT 解析結果を実験結果と CFD 解析結果とについて示している。実験結果と計算結果ではスペクトルの高さがやや異なるが、周波数はほぼ一致していることがわかる。振動の最大の特徴は、CTP-NPE ノズルでは TP-NPE ノズルとは異なり、軸対称モードが支配的で、非対称モードのスペクトルは見られないことである。また、スペクトルの高さも TP-NPE に比べて大きいことがわかる。なお、周波数については、TP-NPE の軸対称モードの周波数よりやや大きい。

Fig. 9 に子午面上のマッハ数分布と、圧力の等値面を示す。この図から剥離した噴流を取り囲むように環状の渦が形成されていることがわかる。この渦は噴流やマッハディスクの振動にもなるとして周期的に放出される。このような渦構造は TP-NPE ノズルでは、どのような NPR でも観察されなかった。また、時系列に流れ場を観察したところ、TP-NPE の場合よりも CTP-NPE ノズルの場合の方がマッハディスクの軸方向振動の振幅が著しく大きかった。このため、環状の渦がマッハディスクの振動に伴って放出され、噴流全体を大きく変形させるために、螺旋渦は形成されないために非対称モードが生じていない。

Fig. 10 に、噴流振動の 1 周期のマッハディスク周辺の流れ場を、



(a) Experiment



(b) CFD

Fig. 8 Spectral analyses of wall pressure fluctuation in CTP-NPE nozzle at point D (NPR=10)

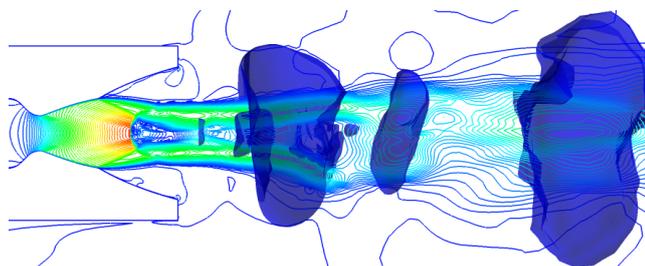
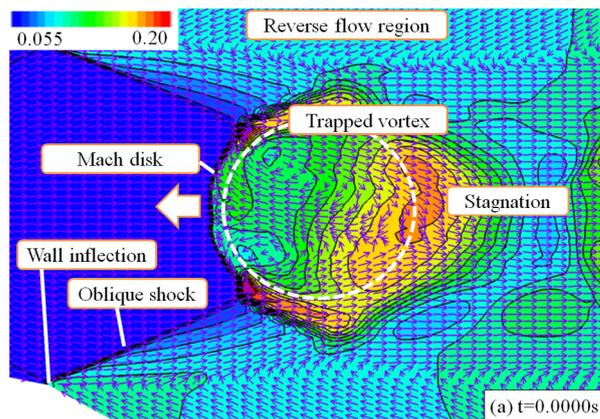
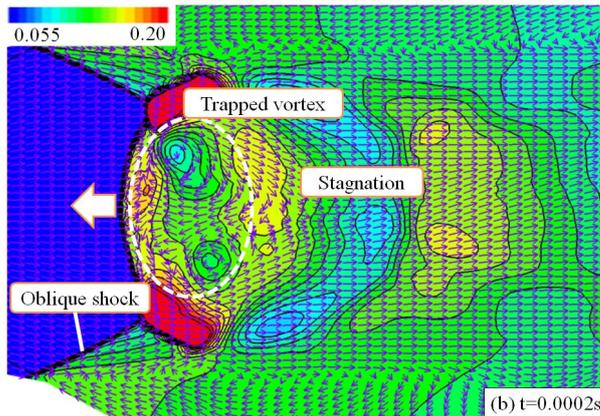


Fig. 9 Mach number contour and iso-pressure surface ($p/p_b=1.0$) in CTP-NPE nozzle at NPR10

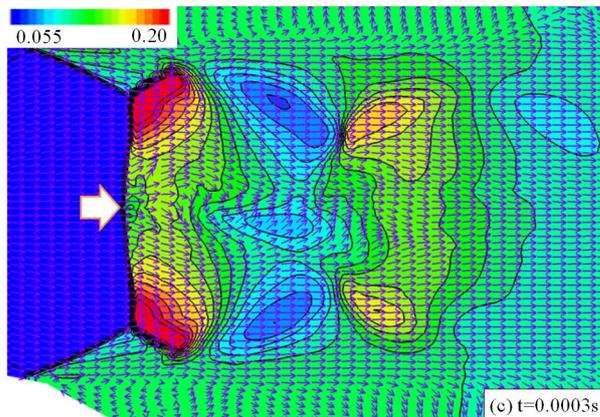
圧力分布と速度ベクトルで示す。ただし、速度ベクトルの長さはすべて同一にした。Fig. 10 (a) はマッハディスクが最も下流に位置している瞬間である。マッハディスクは中心部が上流側に凸なキャップショック形状となっており、このため、斜め衝撃波になったマッハディスクを通過した流れには、半径方向外側の速度成分が与えられる。この流れは剥離によって内側を向いた噴流外側の超音速流によって再び内向きに転向させられ、Trapped vortex と呼ばれる渦輪が形成される。そして、Trapped vortex の下流側の中心軸上の淀み点周辺では圧力が高い領域が形成されている。Fig. 10 (b) では、マッハディスク下流の圧力が上昇し、マッハディスクが上流に移動している。これは TP-NPE ノズルで見られたように軸方向の共鳴によるものと考えられるが、CTP-NPE ノズルではマッハディスクが移動すると同時に形状も変化するため、Trapped vortex による淀み点も上流に移動し、マッハディスク下流の圧力がさらに上昇し、マッハディスクは大きく上流へ移動する。また、マッハディスクが大きく移動することで、剥離点から生じている斜め衝撃波の、流れに対する角度も大きくなっている。したがって、剥離点下流の圧力もさらに上昇させる効果が生じていると考えられる。Fig. 10 (c) はマッハディスクが最も上流に位置している瞬間である。この時、マッハディスクはほぼ平面形状と



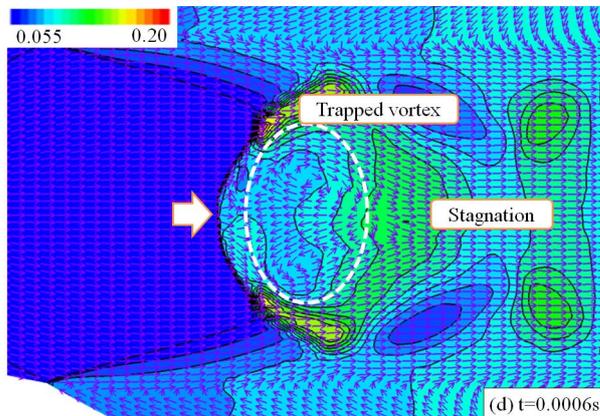
(a) $t=0.0000$ s



(b) $t=0.0002$ s



(c) $t=0.0003$ s



(d) $t=0.0006$ s

Fig. 10 Pressure distribution and unit velocity vector (CTP-NPE, NPR=10, 1 cycle of fluctuation=0.0007s, pressure is normalized by inlet pressure: 455kPa)

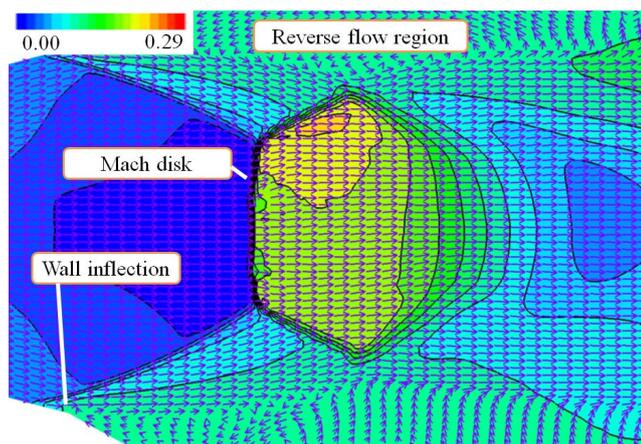


Fig. 11 Pressure distribution and unit velocity vector
(TP-NPE, NPR=10, pressure is normalized by inlet pressure: 71kPa)

なっており, Traped vortex と淀み点は消滅している。なお, 図中にみられる高圧領域は衝撃波によるもので, Traped vortex による淀み点ではない。Fig. 10 (d)では, 剥離点下流の逆流領域およびマッハディスク下流が低圧になったため, マッハディスクは下流へ移動し, 再びキャップショックへと変形し, 新たな Traped vortex とそれによる淀み点を形成し始めている。以上のように, CTP-NPE ノズルでは剥離領域における音響共鳴により噴流に擾乱が加えられ, これによってキャップショック形状に変形したマッハディスク下流の渦構造や圧力分布が影響を受けることにより, 衝撃波は大きく振動する。さらに衝撃波振動に伴って, 剥離点での斜め衝撃波の角度が影響を受け, 剥離領域の圧力変動を増幅する。このように CTP-NPE ノズルでは剥離領域の音響共鳴と衝撃波振動との連成振動により強い圧力変動が生じている。

ここで示した2つのデュアルベルノズルにおいて観察された軸対称モードの流体振動の性質は, 一般的な超音速噴流の大規模乱流構造により生じるジェットスクリーチのトロイダル(Toroidal)モードとは, 以下の点で性質が異なっている。まず, エクステンション部を取り除いた TP ノズル形状のベースノズルのみでは軸対称な振動モードは発生しない。したがってエクステンション部の存在が流体振動の原因の一つとなっている。また NPR の増加に伴って, 噴流のマッハ数は上昇するが, これに伴ってジェットスクリーチのモードは, 低マッハ数では噴流外縁に環状の渦を伴うトロイダルモードが生じ, マッハ数の増加とともに非対称なフラッピングモードやヘリカルモードへと変化する⁽¹⁴⁾。しかし, まず, TP-NPE ノズルでは, ここで示した NPR 以外でも, 軸対称モードの圧力変動が発生している時でも, 環状の渦の放出は実験, CFD ともに観察されなかったことから, TP-NPE ノズルにおける軸対称モードは, 従来示されているのトロイダルモードの振動ではないと言える。また, 軸対称な渦構造が観察された CTP-NPE ノズルでは, NPR を変化させても非対称モードに遷移することはなく, 従来のジェットスクリーチのトロイダルモードとは性質とは異なっている。これは, 上述のようにマッハディスクの振動が強く, 下流の噴流全体が軸方向に加振されるので, 大規模な環状の渦の放出が支配的となり, 螺旋渦は形成されないためであると考えられる。

4. 結 言

本研究ではデュアルベルノズルの低高度運転時における流体振動の特性について, ベースノズルの設計方法の違いが流体振動に及ぼす影響を調べた。まず, ベースノズルに TP ノズルを用いた場合には, 流体振動には軸対称モードと非対称モードの2種類が

確認された。軸対称モードはエクステンション部における音響共鳴が原因であると考えられ, 非対称モードは剥離した噴流のジェットスクリーチに起因すると考えられる。一方, ベースノズルに CTP ノズルを用いた場合, 軸対称モードによる圧力変動が強くなることが判明した。これはエクステンション部における音響共鳴による噴流の振動と, キャップショック形状となったマッハディスクが連成振動することでマッハディスクが大きく振動することが原因である。ここで, キャップショックが発生する原因は, ベースノズル出口付近の半径方向の速度勾配が大きいことである。したがって, ベースノズルの設計には注意が必要である。

参考文献

- (1) Horn, M., and Fisher, S., "Dual-Bell Altitude Compensating Nozzles," NASA-CR-194719, 1994.
- (2) Kimura, T., Niu, K., Yonezawa, K., Tsujimoto, Y., and Ishizaka, K., "Experimental and Analytical Study for Design of Dual-Bell Nozzles," AIAA 2009-5149.
- (3) Hagemann, G., Frey, M., and Manski, D., "A Critical Assessment of Dual-Bell Nozzles," AIAA-1997-3299.
- (4) Tomita, T., Takahashi, M., Sasaki, M., and Tamura, H., "Investigation on Characteristics of Conventional-Nozzle-Based Altitude Compensating Nozzles by Cold-flow Test," AIAA-2007-4375.
- (5) Tomita, T., Takahashi, M., and Sasaki, M., "Investigation on Characteristics of Conventional-Nozzle-Based Altitude Compensating Nozzles by Cold-flow Test (II) –Side-Load Characteristics During Transition-, " AIAA-2007-5472.
- (6) Proshchanka, D., Yonezawa, K., Koga, H., Yokota, K., Kimura, T., Niu, K., and Tsujimoto, Y., "An Investigation of Flow Fluctuation in Overexpanded Dual-Bell Nozzle," *Proceedings of the Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2010*,
- (7) Yonezawa, K., Proshchanka, D., Koga, H., Tsukuda, H., Tsujimoto, Y., Yokota, K., Kimura, T., "Investigation of Effect of Ground Downstream of Overexpanded Dual-Bell Nozzle During Vertical Takeoff and Landing," AIAA-2010-6814.
- (8) Spalart, P.R., Jou, W.-H., Strelets, M., and Allmaras, S.R. "Comments on the Feasibility of LES for Wings, and on Hybrid RANS/LES Approach," First AFOSR International Conference on DNS/LES (1997)
- (9) Yamamoto, S. and Dairuji, H., "Higher-Order-Accurate Upwind Schemes for Solving the Compressible Euler and Navier-Stokes Equations," *Computer & Fluids*, Vol. 22, pp. 259-270 (1993)
- (10) Shima, E. and Jounouchi, T., "AUSM type Upwind Schemes-Role of Computational Fluid Dynamics in Aeronautical Engineering (No. 14)," *Proceedings of 14th NAL Symposium on Aircraft Computational Aerodynamics*, pp. 7-12, (1997).
- (11) Yoon, S. and Jameson, A., "Lower-Upper Symmetric-Gauss-Seidel Method for the Euler and Navier-Stokes Equations," *AIAA Journal*, Vol. 26, No. 9, pp. 1025-1026 (1988).
- (12) Ahlberg, J. H., Hamilton, S., Migdal, D., and Nilson, E., N., "Truncated Perfect Nozzles in Optimum Nozzle Design," *ARS Journal*, May, 1961, pp. 377-382 (1961).
- (13) Hoffman, J. D., "Design of Compressed Truncated Perfect Nozzles," AIAA Paper 85-1172 (1985).
- (14) Tam, C. K. W., "Supersonic Jet Noise," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 27, 1995, pp. 17-43.
- (15) Tam, C. K. W., "Jet Noise Generated by Large-Scale Coherent Motion," *Nasa-RP-1258*, Vol. 2, 1991, pp. 311-390.