

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：基盤研究 (C)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18560172  
 研究課題名 (和文) 超音速過膨張噴流構造における履歴現象の解明とその準定常解析手法の適用限界  
 研究課題名 (英文) Characteristics of Hysteretic Phenomena on Shock Structure in Overexpanded Supersonic Jet and Its Application Limit of the Quasi-Steady Analysis  
 研究代表者  
 瀬戸口 俊明 (SETOGUCHI TOSHIAKI)  
 佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・教授  
 研究者番号：90145186

研究成果の概要：本研究では、非定常の超音速過膨張噴流構造に着目し、超音速過膨張噴流中の衝撃波構造に履歴現象が存在することを示すとともにその詳細を明らかにした。特に、超音速過膨張噴流構造に履歴現象が存在する原因を示すとともにその発生範囲に関する知見を得た。さらに、超音速過膨張噴流構造の準定常解析手法が可能な適用限界を実験および数値解析的に明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,200,000	0	2,200,000
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	390,000	3,890,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：超音速噴流, 過膨張噴流, 履歴現象, 衝撃波, 非定常噴流, 非平衡凝縮, 準定常解析, 圧縮性流体

## 1. 研究開始当初の背景

ある設定状態で流れを形成しようとする場合には、それに至るまでおよび元の状態に戻るまでに、流れは過渡状態を経験することになる。この場合、一般的に、流れの変化過程が準定常的であっても、流れの特性は履歴現象（ヒステリシスループと呼ばれており、これは流れの変化過程が速いとき、その応答が時間的に遅れるために生じる現象とは区別される。）を伴うことが知られている。しかしながら、申請者らの知る限りでは、その原因についてほとんど明らかにされていない

いのが現状である。従って、この小さな局時作用で大きく変わる流動場について、その詳細な解明が重要な研究課題となっていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、超音速過膨張噴流構造に着目し、申請期間3年間で、以下に示す2つの課題について、数値解析および実験により明らかにすることを目的とした。

(1) 超音速過膨張噴流構造の履歴現象を総合的に示すとともに、履歴現象の発生原因について知見を得る。

(2) 現象の時間的変化割合が履歴現象に及ぼす影響を明らかにすることで、流れの準定常解析手法が可能な適用限界を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 実験装置と方法

本実験で使用した装置は、コンプレッサー、除湿機、貯気槽、電動バルブ、貯気室、ノズルから構成されている。作動気体である貯気槽内の圧縮空気は、電動バルブを経て貯気室に導かれ、貯気室で一度よどみ状態となった後、ノズルより大気中に放出される。

図1は、本実験で用いたノズルの詳細図を示す。また、表1はそれぞれのノズルスロート直径  $D_t$ 、出口直径  $D$ 、およびスロートから出口までの長さ  $L$  を示す。なお、Nozzle A と Nozzle B のノズル出口での設計マッハ数  $M_e$  は、それぞれ 2.0 と 2.3 である。

実験では、貯気槽内圧力  $p_0$ (貯気圧) と大気圧  $p_b$ (一定)との圧力比  $\phi (= p_0/p_b)$  を 9 から 10 程度に設定し、コンピュータ制御の電動バルブにより  $\phi$  を連続的に減少させ、約 5~10 秒間圧力比を一定に保持した後、連続的に増加させた。なお、Nozzle A と B における 1 秒間当たりの圧力比の変化量の絶対値  $\Delta\phi$  は、それぞれ 0.262~1.994 (1/s)、および 0.281~1.951 (1/s) の範囲である。

流れ場の可視化には高速ビデオによるシャドウグラフ法を用い、圧力比計測時と可視化像が同時に判定できるようにしてある。なお、各々の  $\Delta\phi$  に対し数回の実験を行い、現象の再現性を確認した。

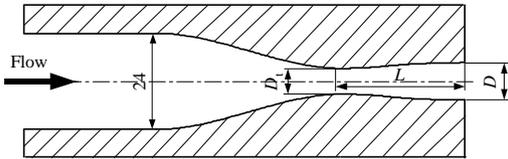


図1 Details of nozzle (Unit: mm)

表1 Configurations of the nozzle (Unit: mm)

Nozzle type	$D_t$	$D$	$L$
Nozzle A ( $M_e=2.0$ )	5.95	8	53
Nozzle B ( $M_e=2.3$ )	5.21		55

#### (2) 数値解析手法

計算領域を図2に示す。本計算では、図2に示すような流れの中心軸方向を  $x$  軸、半径方向を  $y$  軸とした二次元軸対称の円筒座標系の流れ場を仮定する。また、図に示すようにノズル出口マッハ数を  $M_e$ 、ノズル出口直径を  $D$ 、貯気圧を  $p_0$ 、背圧を  $p_b$  とそれぞれ定義し、貯気圧と背圧との圧力比を  $\phi (= p_0/p_b)$  で表わ

す。

本解析において用いた基礎方程式は、軸対称圧縮性 Navier-Stokes 方程式、および液相の質量比の増加割合を示す式である。これらを保存形で表すと次のようになる。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \left( \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial R}{\partial x} \right) + \left( \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial S}{\partial y} \right) - \left( \frac{1}{y} H_1 + H_2 \right) = Q$$

ここで、右辺の  $Q$  が凝縮に関する生成項である。なお、凝縮が生じない場合は生成項を 0 とし、二次元軸対称の非粘性圧縮性非定常方程式、すなわちオイラー式を用いた。

計算は一般曲線座標系表示された支配方程式を用い、Roe の近似 Riemann 解法を応用した空間三次精度 MUSCL 型有限差分 TVD スキームを適用した。なお、時間積分には二次精度の時間分割法を、乱流モデルには  $k-R$  モデルを用いた。また、初期過飽和度 (よどみ点状態での水蒸気圧とその温度における飽和圧力の比) は 0 から 0.7 の範囲とした。なお、よどみ点圧力と温度は、それぞれ 101.3kPa と 298.15K の一定とした。境界条件として、噴流中心軸上では対称条件、自由境界面上では流出、流入条件とした。

ノズル出口マッハ数は、 $M_e=2\sim5$  の範囲内で変化させ、それぞれの出口マッハ数においてさらに過膨張噴流となる圧力比の範囲内で圧力比を準定常的に変化させ計算を行った。

数値計算における時間ステップを図3に示す。本研究では、現象が時間変化によらない準定常状態を対象とするため、図に示すように初期圧力比  $\phi_t$  から圧力比の変化量  $\Delta\phi$  だけ減少させたときの定常解を準定常解として求め、次にこのときの状態を初期条件としてさらに  $\Delta\phi$  だけ減少させて準定常解を求める。この過程を図に示す下限圧力比  $\phi$  まで繰り返したのち、今度は  $\Delta\phi$  だけ圧力比を増加させながら同様に準定常解を求め、初期圧力比  $\phi_t$  まで繰り返した。本研究では、圧力比の変化量を  $\Delta\phi=0.1\sim0.2$  とし、まず、定常解に至る計算回数  $\xi$  を変化させ、準定常現象に対する計算の妥当性について検討したのち、ヒステリシス現象について調査した。

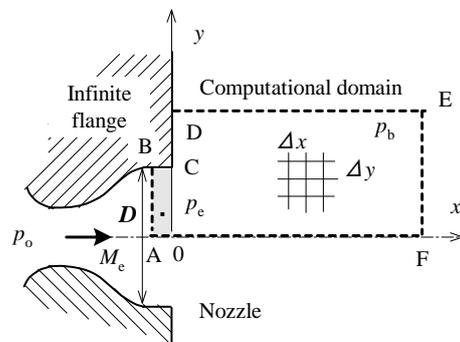


図2 Computational region and symbols used in this study

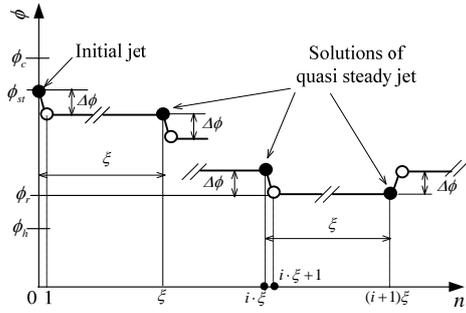


図3 Procedure of pressure change

#### 4. 研究成果

(1) 超音速軸対称過膨張噴流構造にはヒステリシス現象が存在することを実験的に示し、圧力比が減少する場合と増加する場合で、正常反射からマッハ反射への遷移およびその逆において、遷移する圧力比に差異が生ずることを明らかにした(図4)。

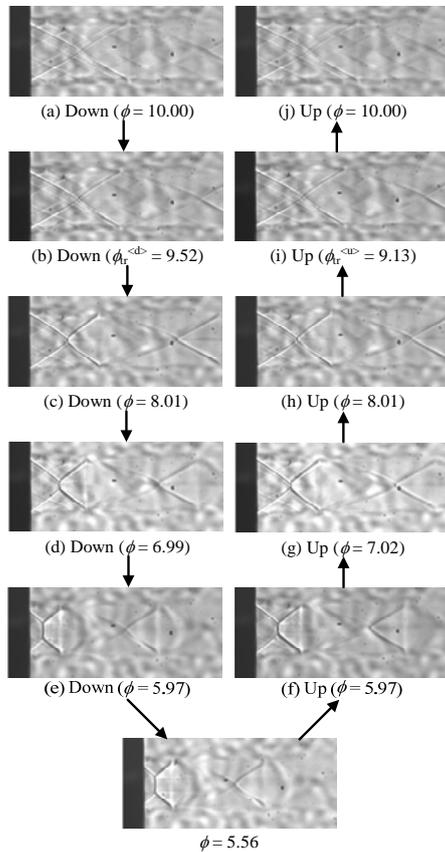


図4 Shadowgraph pictures (Nozzle B,  $\Delta\phi=0.377$  (1/s))

(2) 圧力比 $\phi$ とノズル出口から噴流中の第1衝撃波のマッハディスクまでの距離( $X_M/D$ ), および $\phi$ とマッハディスクの直径( $D_M/D$ )との間には履歴現象が存在することを示し(図5), 履歴現象が発生する圧力比の時間変化割合( $\Delta\phi$ )の限界値を明らかにした(表2)。

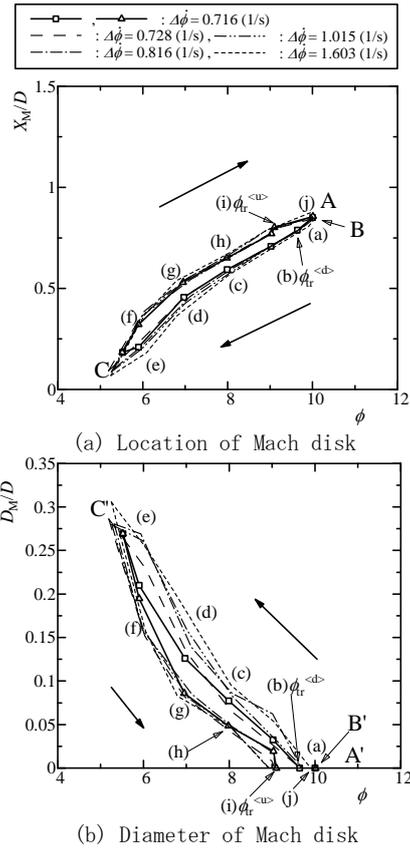


図5 Effects of  $\Delta\phi$  for Nozzle B

表2  $\Delta\phi$  showing the flow with hysteresis

(a) Nozzle A		
Nozzle type	Hysteresis or Time-lag	$\Delta\phi$ (1/sec)
Nozzle A ( $M_e=2.0$ )	Time-lag and Hysteresis	1.994
		1.503
		1.201
		1.007
		0.849
		0.744
		0.665
		0.604
		0.554
		0.528
	Hysteresis	0.514
		0.498
		0.437
		0.369

(b) Nozzle B		
Nozzle type	Hysteresis or Time-lag	$\Delta\phi$ (1/sec)
Nozzle B ( $M_e=2.3$ )	Time-lag and Hysteresis	1.951
		1.603
		1.211
		1.015
		0.926
		0.816
		0.716
		0.641
	Hysteresis	0.524
		0.444
		0.377
		0.345
		0.309
		0.281

(3) ヒステリシスループが存在する圧力比の領域は、出口マッハ数に依存することがわかった(図6, 図7).

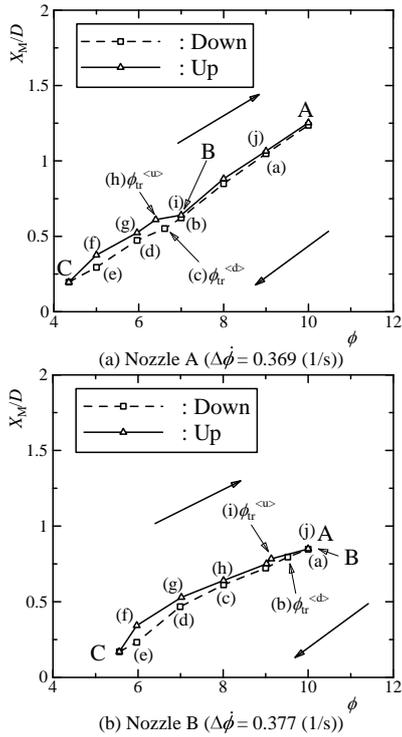


図6 Hysteresis diagrams for location of Mach disk

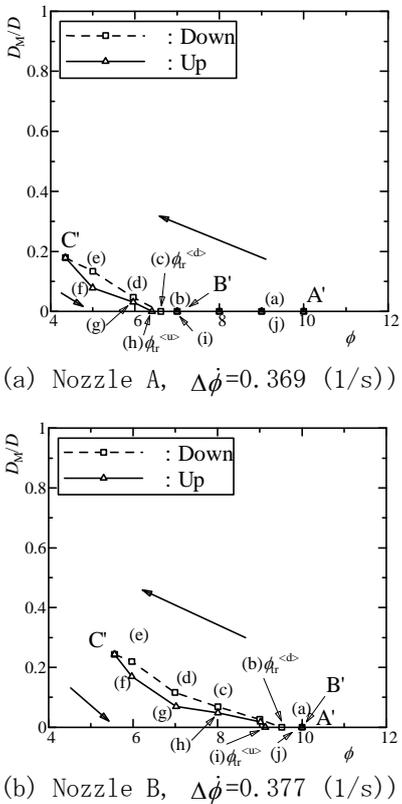


図7 Hysteresis diagrams for diameter of Mach disk

(4) 準定常状態が成り立つ無次元時間( $t_{ch}^*$ )を数値解析により調査し、無次元時間は流れ場の圧力比に依存する傾向を示すことを明らかにした(図8).

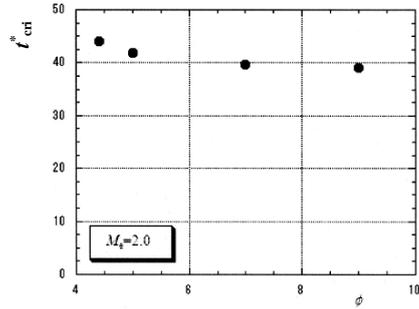
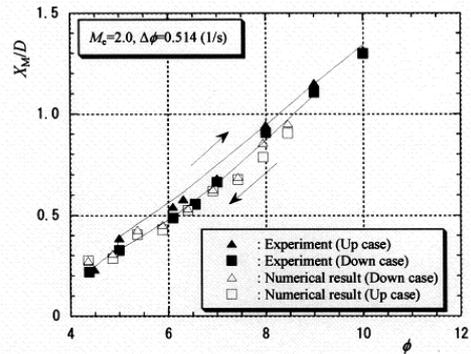
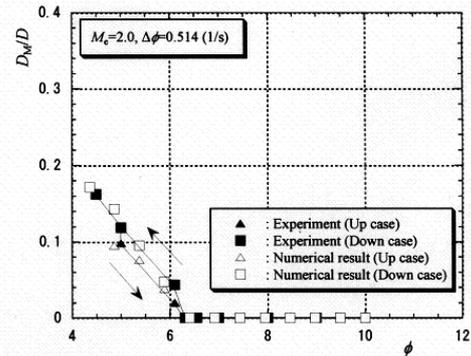


図8 Region occurring hysteresis phenomenon ( $M_e = 2$ )

(5) ヒステリシス現象が生ずる場合の斜め衝撃波の形成( $X_M/D, D_M/D$ )に関する数値解析結果は、実験結果を概ね再現していることがわかった(図9).



(a) Position of Mach disk



(b) Diameter of Mach disk

図9 Comparison between experimental results and calculated ones ( $M_e = 2.0$ )

(6) 実験より得られた結果と数値解析により得られた結果がほぼ一致していることから、実験値( $\Delta\phi$ )をもって、準定常解析の適用基準としてよいことがわかった。

(7) 過膨張噴流中の衝撃波のヒステリシス現象は、出口マッハ数が大きくなるとヒステリシスループも大きくなることわかった(図10).

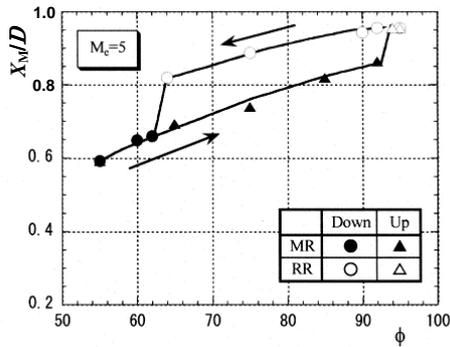


図 10 Relationship between non-dimensional intersection position  $X_M/D$  and pressure ratio  $\phi$  ( $M_e=5$ )

(8) 過膨張噴流中の衝撃波のヒステリシス現象は、二次元の流れ場での衝撃波の反射形態の遷移において現れる不確定領域で発生することを明らかにした(図11). 図中のMRとRRは、それぞれマッハ反射と正常反射を示す.

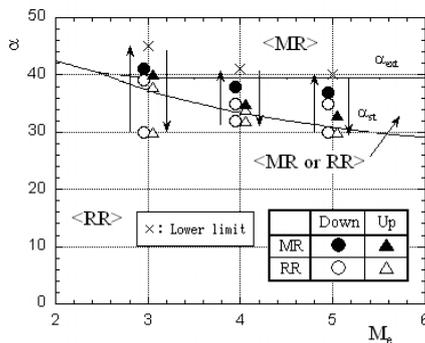


図 11 Relationship between incident angle of oblique shock  $\alpha$  and nozzle exit Mach number  $M_e$

(9) 噴流周囲から噴流内部への質量の流入(エントレインメント)が生じており、ヒステリシス現象が生じる圧力比範囲では、圧力比の増減によって流入質量( $q^*$ )が異なることわかった(図12). また、断面を通過する最大質量( $q^*_{max}$ )にもヒステリシス現象が生ずることを明らかにした(図13). 一般的に非線形現象の初期値依存性は良く知られているが、本過膨張噴流の場合には、エントレインメントの差異がヒステリシス現象を引き起こす要因であることが明らかになった.

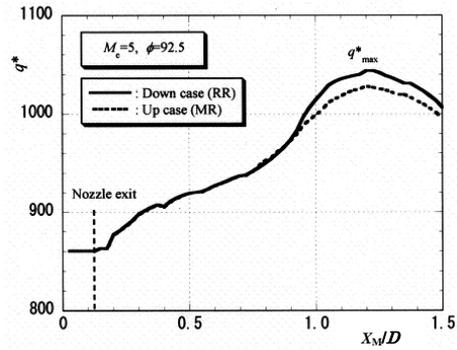


図 12 Distribution of mass flow rate ( $M_e=5$ ,  $\phi=92.5$ )

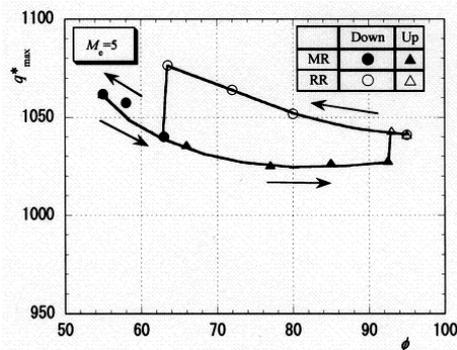


図 13 Relationship between maximum mass flow rate and pressure ratio ( $M_e=5$ )

(10) 湿り空気の軸対称過膨張噴流を対象に数値計算を行い、衝撃波を伴う噴流の反射形態のヒステリシス現象に及ぼす凝縮の影響を調べた. その結果、不足膨張噴流の場合に存在した湿り空気の影響は、過膨張噴流の場合にはほとんど無いことが明らかとなった.

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計10件)

① Tsuyoshi Yasunobu, Yumiko Ootobe, Hideo Kashimura, Shigeru Matsuo, Toshiaki Setoguchi, Shen Yu, Characteristics of Hysteresis Phenomena on Shock Wave Structure in Overexpanded Axisymmetric Supersonic Jet, International Journal of Turbo and Jet Engines, Vol.26, 現時点で不明, 2009, 査読有.

② 乙部由美子, 樫村秀男, 瀬戸口俊明, 湿り空気の湿度が軸対称過膨張噴流の構造に及ぼす影響, 日本機械学会中国四国支部第47期総会・講演会論文集, 176-180, 2009, 査読無.

③ 松尾繁, 瀬戸口俊明, 過膨張噴流中の衝

撃波形状におけるヒステリシス現象, 第 60 回ターボ機械協会大阪講演会論文集, 156-161, 2008, 査読無.

④ 瀬戸口俊明, 松尾繁, 樫村秀男, 安信強, 乙部由美子, 過膨張軸対称噴流中における衝撃波のヒステリシス現象, 平成 19 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 17-19, 2008, 査読無.

⑤ 安信強, 乙部由美子, 樫村秀男, 瀬戸口俊明, 軸対称過膨張噴流中の衝撃波のヒステリシス現象に及ぼす圧力比と出口マッハ数の影響, 日本機械学会第 85 期流体工学部門講演会講演論文集, CD-ROM 中 4 頁, 2007, 査読無.

⑥ 安信強, 乙部由美子, 樫村秀男, 瀬戸口俊明, 軸対称過膨張噴流中の衝撃波のヒステリシス現象の数値解析, 日本機械学会九州支部・中国四国支部合同企画沖縄講演会講演論文集, 281-282, 2007, 査読無.

⑦ 乙部由美子, 樫村秀男, 松尾繁, 瀬戸口俊明, 金義東, 凝縮を伴う不足膨張噴流におけるマッハディスクのヒステリシス現象, 平成 18 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 2007, 245-248, 査読無.

⑧ 安信強, 樫村秀男, 瀬戸口俊明, 過膨張軸対称噴流中の衝撃波のヒステリシス現象, 平成 18 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 2007, 241-244, 査読無.

⑨ Tsuyoshi Yasunobu, Ken Matsuoka, Hideo Kashimura, Shigeru Matsuo, Toshiaki Setoguchi, Numerical Study for Hysteresis Phenomena of Shock Wave Reflection in Overexpanded Axisymmetric Supersonic Jet, Journal of Thermal Science, Vol.15, No.3, 220-225, 2006, 査読有.

⑩ Tsuyoshi Yasunobu, Ken Matsuoka, Hideo Kashimura, Shigeru Matsuo, Toshiaki Setoguchi, Numerical Study for Hysteresis Phenomena of Shock Wave Reflection in Overexpanded Axisymmetric Supersonic Jet, Proceedings of the Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science, 193-197, 2006, 査読無.

[学会発表] (計 8 件)

① 乙部由美子, 湿り空気の湿度が軸対称過膨張噴流の構造に及ぼす影響, 日本機械学会中国四国支部第 47 期総会・講演会, 2009 年 3 月 6 日, 山口大学工学部.

② 松尾繁, 過膨張噴流中の衝撃波形状におけるヒステリシス現象, 第 60 回ターボ機械協会大阪講演会, 2008 年 9 月 19 日, 大阪大学.

③ 松尾繁, 過膨張軸対称噴流中における衝撃波のヒステリシス現象, 平成 19 年度衝撃波シンポジウム, 2008 年 3 月 17 日, 東京工業大学大岡山キャンパス.

④ 安信強, 軸対称過膨張噴流中の衝撃波のヒステリシス現象に及ぼす圧力比と出口マッハ数の影響, 日本機械学会第 85 期流体工学部門講演会, 2007 年 11 月 17 日, 広島大学東広島キャンパス.

⑤ 安信強, 軸対称過膨張噴流中の衝撃波のヒステリシス現象の数値解析, 日本機械学会九州支部・中国四国支部合同企画沖縄講演会, 2007 年 10 月 20 日, 琉球大学工学部.

⑥ 乙部由美子, 凝縮を伴う不足膨張噴流におけるマッハディスクのヒステリシス現象, 平成 18 年度衝撃波シンポジウム, 2007 年 3 月 16 日, 九州大学 (春日).

⑦ 安信強, 過膨張軸対称噴流中の衝撃波のヒステリシス現象, 平成 18 年度衝撃波シンポジウム, 2007 年 3 月 16 日, 九州大学 (春日).

⑧ Tsuyoshi Yasunobu, Numerical Study for Hysteresis Phenomena of Shock Wave Reflection in Overexpanded Axisymmetric Supersonic Jet, The Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science, 2006 年 6 月 26 日, 中国.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

瀬戸口 俊明 (SETOGUCHI TOSHIAKI)  
佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・教授  
研究者番号: 9 0 1 4 5 1 8 6

### (2) 研究分担者

松尾 繁 (MATSUO SHIGERU)  
佐賀大学・理工学部・教授  
研究者番号: 6 0 2 2 9 4 2 4  
塩見 憲正 (SIOMI NORIMASA)  
佐賀大学・理工学部・助教  
研究者番号: 8 0 2 8 4 6 1 0

### (3) 連携研究者

安信 強 (YASUNOBU TSUYOSHI)  
北九州工業高等専門学校・電子情報工学科・教授  
研究者番号: 7 0 2 3 9 7 7 1  
乙部 由美子 (OTOBE YUMIKO)  
北九州工業高等専門学校・電子情報工学科・助教  
研究者番号: 7 4 9 2 1 2 0 1