

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420116

研究課題名(和文) 超音速旋回流を利用したコンデンセートガスの分離に関する研究

研究課題名(英文) Separation of Condensate Gas Using a Supersonic Swirling Flow

研究代表者

瀬戸口 俊明 (Setoguchi, Toshiaki)

佐賀大学・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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、凝縮性気体が加速膨張する際に生ずる均一凝縮現象と超音速環状旋回流の組み合わせによる流動場内の液相の挙動を調べることを目的としている。本研究より、旋回を有する場合、凝縮開始点が上流側へ移動すること、また装置出口近傍アウター壁側に液相が寄る傾向が顕著になること、さらに装置入口半径や装置下流開き角を大きくすることも液滴を寄せる効果があることを示した。また、流れに固体微粒子が含まれる場合の非均一凝縮による液相の挙動は、均一凝縮の場合の挙動とほぼ同様になることを示した。結論として、凝縮現象と旋回流の組み合わせにより凝縮性気体の分離・抽出ができること、また装置小型化の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：Objectives in the present study are to investigate the possibilities of the condensable gas separation, extraction and reduction of device size by combining a swirl flow with homogeneous condensation phenomena of condensate gas occurred when the flow rapidly accelerates and expands through a supersonic annular nozzle. In the flow with a swirl, onset of condensation moved upstream and droplets generated in the swirling flow tended to gather on the outer wall side close to the exit of the device. Further, it was found that an increase of an opening angle or inlet diameter of the nozzle has also the effect of gathering droplets on the outer wall side. In addition, distribution of liquid phase for heterogeneous condensation in the nozzle was almost the same as that in case of homogeneous condensation. In conclusion, it was shown that it is possible to separate and extract condensable gas by a combination of the condensation phenomenon and the swirling flow, and to reduce the device size.

研究分野：流体工学

キーワード：超音速旋回流 コンデンセートガス 非平衡凝縮 気液分離 数値計算

1. 研究開始当初の背景

通常、湿り空気や水蒸気などの凝縮性気体が超音速ノズル内を流れる場合、流動場では非平衡凝縮現象が起こる。これは、水蒸気分子の衝突や合体により凝縮核が生成されることから均一凝縮と呼ばれている。一方、外来の粒子、例えば、塵や化学反応により生ずる物質を核として起こる場合は非均一凝縮と呼ばれている。この非均一凝縮では固体微粒子の大きさや数密度が流れ場に影響を及ぼすことが考えられるが、詳細な研究は少ないのが現状である。

ところで、一般的な生活スタイルの中で最も消費されるエネルギー資源は化石燃料であるが、近年、燃焼時の二酸化炭素の排出量が他と比較して少ない天然ガスの需要が増している。なお、天然ガスからLPガスを生産する場合、凝縮性気体などの不純物の分離・抽出が必要となる。近年、超音速環状ノズル内で起こる均一凝縮と旋回流を用いることで、凝縮性気体の分離・抽出が可能となる技術が開発されつつある。この技術を用いた装置は、他の分離装置と比較して、化学物質を使用しない、また小型化できるなどの利点を持つ。しかしながら、この技術には動作原理など未解明な点が多く機器の効率化に向けた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、超音速環状ノズルにおいて液相(液滴)の環状流路各断面での発生様相を示すために原点からノズル出口までの流路各断面での液相の半径方向分布比を定義している。この液相の半径方向分布比に基づき凝縮性気体の分離・抽出の可能性、及び装置の小型化の可能性について考察するために以下の内容を目的とした数値的研究を行った。

- (1) 非平衡凝縮を伴う超音速環状旋回流に及ぼすノズル形状の影響を明らかにする。
- (2) 非平衡凝縮流れに及ぼす環状ノズル下流側の分岐管の影響を調べる。
- (3) 超音速環状旋回流に及ぼす非均一凝縮の影響を調べる。

3. 研究の方法

(1) 実験装置

計算の妥当性を確認するために超音速環状ノズルを用いた流れの圧力測定を行った。本実験で用いた装置は、大気圧状態の湿り空気を吸込む形式であり、貯気槽、測定部(環状ノズル)、後部集合洞、真空タンクから構成されている。

図1は本実験に使用した軸対称円環ノズル形状を示す。ノズルの形状は外管ノズルの最小断面積部の直径 D_e を 30 mm、入口直径を $5D_e$ とした。また、内壁の入口直径は $3D_e$ とし、円環流路の全長は $10D_e$ とした。貯気槽内の作動気体(湿り空気)のよどみ点圧力 p_0 と温度 T_0 は、それぞれ 101.2 kPa と 293 K の一定

とし、初期過飽和度 S_0 は 0.25 と 0.7 に設定した。また、ノズル外管壁面上には圧力測定孔を 10 個設けた。

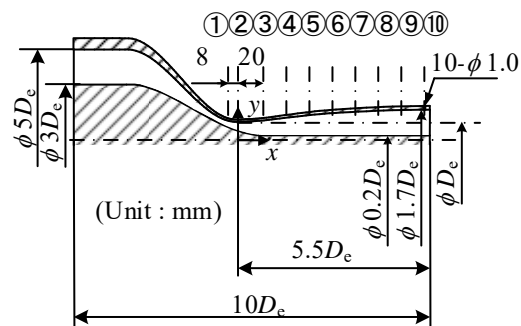


図1 Supersonic nozzle with inner body ($D_e = 30$ mm)

(2) 数値解析手法

本計算では、液滴、固体微粒子及び混合気体との間には速度スリップは考慮されず、相間のエネルギー緩和過程は存在しない。また、気体に含まれる全ての粒子は固体微粒子であり、滑らかな表面を持つ球体であり、化学的に不活性であると仮定する。基礎方程式には連続の式、運動方程式、エネルギー式、乱流運動エネルギー式、比散逸率の式、液相の質量保存則、液滴の数密度の保存則を組み合わせた 3 次元圧縮性 N-S 方程式を使用した。本解析では、基礎方程式は有限体積法により空間的に離散化し、時間的には完全陰解法を適用して離散化を行なった。なお、対流項には MUSCL 型の三次精度 TVD スキームを適用し、粘性項は二次精度の中心差分法により評価した。さらに、時間微分項である左辺第一項には Gauss-Seidel 型の点緩和法を適用した。乱流モデルには $k-\omega$ モデルを使用した。

図2は本計算で使用したノズル形状を示す。本研究では、Case A は基準ノズルとし、ノズル入口の角運動量と周方向速度の増加のために内管の半径を大きくして入口断面積を半分にしたノズル形状、外管と内管の半径を大きくした形状、外管側の下流側の壁面近傍で凝縮を発生させるために開き角を設けた形状、および膨張波の効果を調べるために角部を設けた形状の組み合わせで流れ場の比較を行った。

ここで、外管ノズルの最小断面積部直径 D は 10 mm であり、入口から最小断面積部までの距離を $5D$ (原点: $x = y = 0$)、入口側最小断面積部から出口(Case F と Case G の場合は分岐板先端位置)までの距離を $3D$ とした。なお、図 2(a) (Case A)、(b) (Case B)、および(c) (Case C)の外管ノズルの入口直径(r_{out})は $4D$ とし、図 2(d) (Case D)と(e) (Case E)の入口直径は $6D$ とした。また、円環ノズル内壁側の入口直径(r_{in})を図 2(a)は $3.5D$ 、図 2(b)と(c)は $3.76D$ 、図 2(d)と(e)は $5.68D$ とした。さらに、図 2(b)から(c)で示す外管ノズルは開き角を有しており、図 2(b)と(d)は開き角が 4° となる位置($x = 0$

.07D)から出口までを直線とし、図 2(c)と(e)は $x = -0.38D$ の位置から 3.5° の開き角を与えた。また、図 2(f) (Case F, Case G)は Case C の出口に分岐管を設けた形状にした。分岐板先端位置から出口までの距離を $1.5D$ とし、上下壁面はそれぞれ x 軸に対して 3.5° と 4° の開き角を有している。さらに、分岐位置の分岐側入口の断面積を A_{1out} 、分岐側出口断面積を A_{2out} 、主流側入口断面積を A_{1in} 、主流側出口断面積を A_{2in} とし、入口と出口のそれぞれの断面積の比を $A_{1out}/A_{1in} = 1$ と $A_{2in}/A_{1in} = 1.2$ に設定した。さらに主流側の上壁開き角を 1.04° 、分岐板の開き角 a を Case F は 1° 、Case G は 5° 、分岐側の上壁開き角を $b = 6^\circ$ とした。

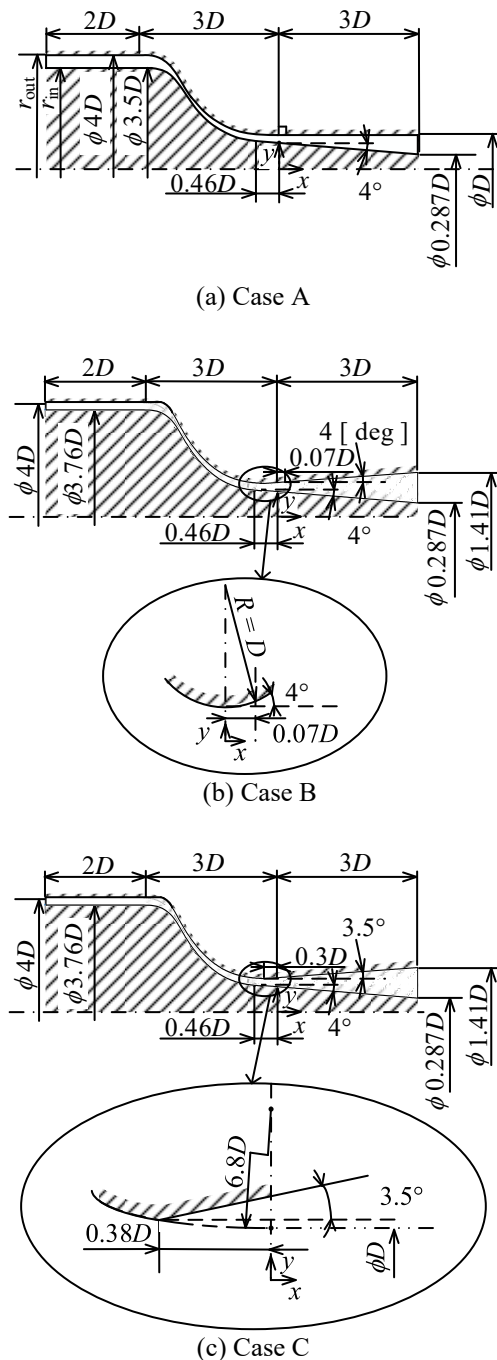
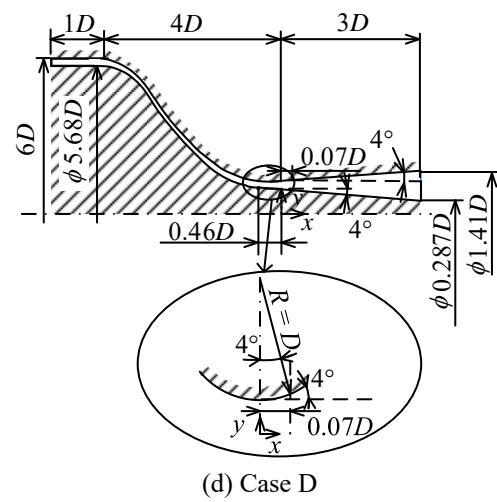
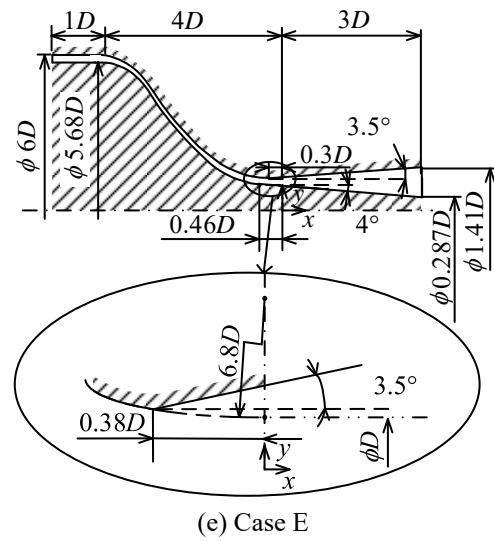


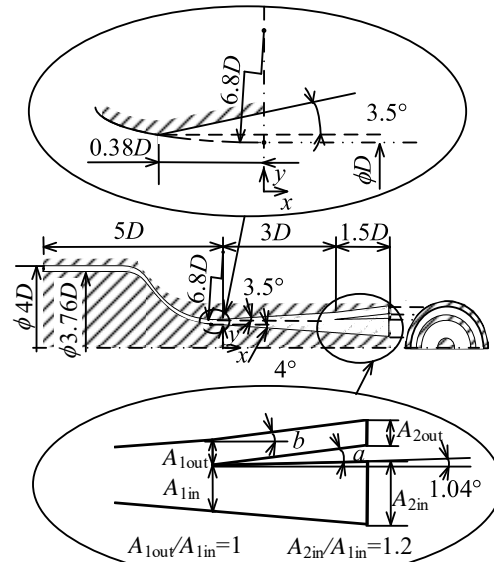
図 2 Nozzle geometry



(d) Case D



(e) Case E



(f) Case F ($a=1^\circ$), Case G ($a=5^\circ$)

図 2 Nozzle geometry

図 3 は本計算の計算領域と境界条件を示す。図より境界条件として固体壁面には滑りなしの断熱条件を用いた。また、周方向の四分の一を計算領域として扱い、周方向の境界に

は周期境界条件を用いた。

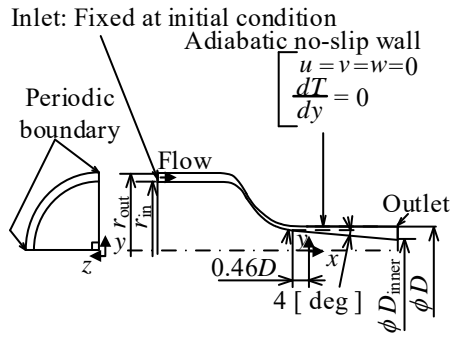


図3 Computational domain and boundary conditions

表1は計算条件を示す。本計算では、よどみ点圧力 p_0 を 101.3 kPa, 温度 T_0 を 293 K とし, 初期過飽和度 S_0 は 0 と 0.8 とした。また, 湿り空気単位体積当たりの固体微粒子の数 $n_{het,0}$ は $1.0 \times 10^2 \text{ m}^{-3}$ と $1.0 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$, 固体微粒子の半径 R_p は $1.0 \times 10^{-8} \text{ m}$ と $1.0 \times 10^{-5} \text{ m}$ とした。さらに, ノズル上流入口におけるスワール数 $S_{w,in}$ は 0, 2 に設定した。また, 総セル数は流れ方向に 210, 半径方向に 80, 周方向に 30 の約 50 万セルとした。

表1 Initial conditions

p_0 [kPa]	T_0 [K]	S_0 [-]	$n_{het,0}$ [m^{-3}]	R_p [m]	$S_{w,in}$ [-]
0	-	-	-	-	0
					2
			Homogeneous		0
			condensation		2
101.3	293	0.8	1.0×10^2	1.0×10^{-8}	0
					2
			1.0×10^2	1.0×10^{-5}	0
					2
			1.0×10^{10}	1.0×10^{-8}	0
					2
			1.0×10^{10}	1.0×10^{-5}	0
					2

4. 研究成果

(1) 本計算の妥当性を調べるために, 実験条件と同条件(よどみ点圧力, 温度, 初期過飽和度: $S_0 = 0.25, 0.7$)の計算より得られた外管壁面上の圧力分布を実験結果と比較した。なお, 入口におけるスワール数は実験と計算において 0 とした。結果として, 計算より得られた外管壁面上の圧力分布と実験より得られた圧力は定性的にほぼ一致していることから本計算手法は妥当であると判断した。

(2) 図4は, Case A~Eの原点からノズル出口までの流路各断面での液相の半径方向分布比 G を示す。ここで G は,

$$G = \int_{r_i}^{r_{out}} 2\pi g \rho r dr / \int_{r_{in}}^{r_{out}} 2\pi g \rho r dr \quad (1)$$

で定義される。 r_i は環状断面の面積の 1/2 に対応するノズル軸からの半径を示す。よって, 式(1)は各断面の内壁(r_{in})から外壁(r_{out})までの液相の質量流量に対する r_i から外管壁までの液相の質量流量の割合を表している。旋回を有する場合のノズル出口における G の値は, 旋回が無い場合と比較して大きくなり, Case A, Case D, Case E, Case B, Case C の順に G の値が大きくなっている。また, G の値には出口形状に比べて入口形状の方が強い影響を及ぼしている。ここで, ノズル入口での内壁半径(r_{in})と外壁半径(r_{out})が同じである場合 (Case B と Case C, Case D と Case E), G の値には下流側形状が強い影響を及ぼしていることがわかる。一方, 下流側形状が同じで上流側形状が異なる場合 (Case B と Case D, Case C と Case E), G の値には上流側形状が下流側形状と比較してより強い影響を及ぼすことがわかる。また, G の値が最も大きくなるのは, 旋回を有する Case C の場合であることがわかった。図中における曲線上の●印は, Case A で旋回を有する場合の出口の値と同じになる位置を示す。図より, Case C で旋回を有する場合, 最も上流側に位置している。本計算条件より, 旋回を有する Case A の出口で得られる G と同じ値になる形状で最も上流側に位置するのは, 旋回を有する Case C であることがわかった。このことより, 装置の小型化の可能性が示された。

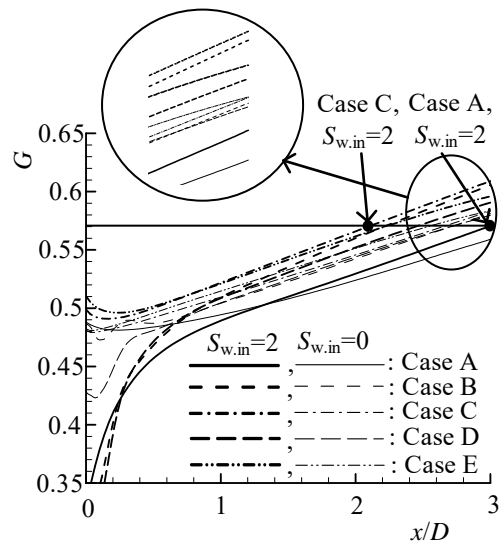


図4 Distributions of G

(3) 図5は, Case F, Gの入口側最小断面積部から分岐板先端位置までの流路各断面での液相の半径方向分布比 G を示す。図より $a = 1^\circ$ と 5° の場合, 分布はほとんど同じになることを示した。また, 図5は分岐板上部で液相を回収することを想定しており, 図から旋回を与えることによってより効率的な凝縮性気体の分離・抽出の可能性が示された。

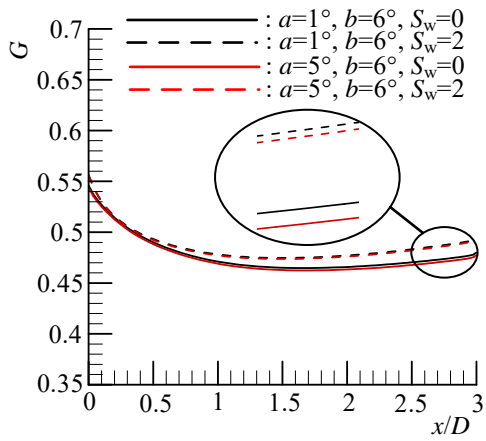
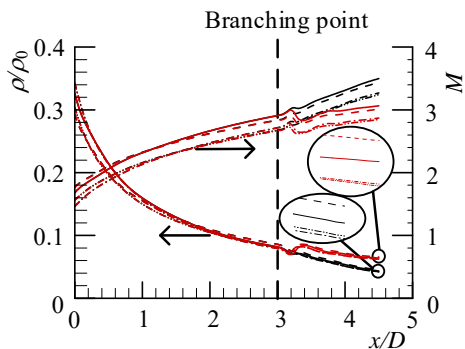
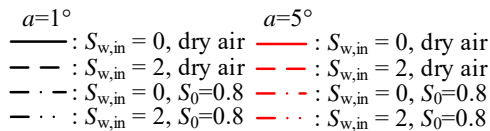
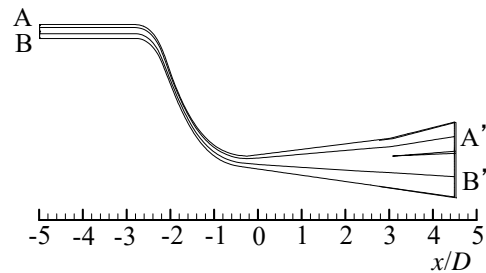


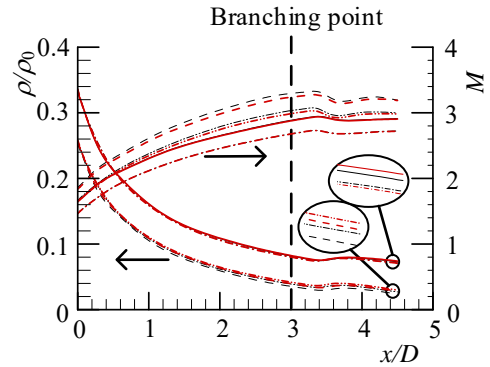
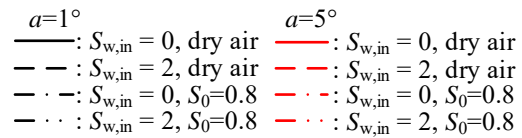
図 5 Distributions of G

(4) 図 6(a)と(b)は、それぞれ図中で示す線 A-A' と B-B' に沿った密度分布図とマッハ数分布図を示す。なお、それぞれの図には $a = 1^\circ$ と 5° の場合で旋回の有無、および S_0 が dry air と 0.8 に対して示している。図 6(a)では、旋回の有無に係らず S_0 が同じであれば、分布はほぼ同じ傾向を示すことがわかる。また、 $a = 1^\circ$ と 5° における分岐位置以降の分布の傾向は大きく異なることがわかる。これは、分岐側の断面積変化の影響によるものと考えられる。一方、主流側の形状は a の値に係らず同じであるため、図 6(b)の密度分布は、スワール数が同じであれば S_0 の値に係らずほぼ同じ分布となることがわかる。また、マッハ数分布は a の値に係らず、同じスワール数と S_0 であれば同じ分布となることがわかった。



(a) Line A-A'

図 6 Distributions of density and Mach number



(b) Line B-B'

図 6 Distributions of density and Mach number

(5) 図 7 は、均一凝縮、および $n_{het,0} = 1.0 \times 10^2 \text{ m}^{-3}$, $R_p = 1.0 \times 10^{-8} \text{ m}$ と $n_{het,0} = 1.0 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$, $R_p = 1.0 \times 10^{-5} \text{ m}$ の場合の液相の質量比 $g (= g_{hom} + g_{het})$ の分布を示す。非均一凝縮による液相の質量比 g_{het} は上流側位置から存在するが $x/D = 1$ において g の差がほとんどないことがわかった。

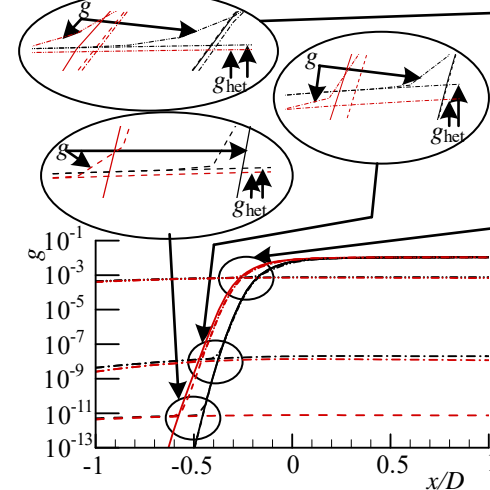
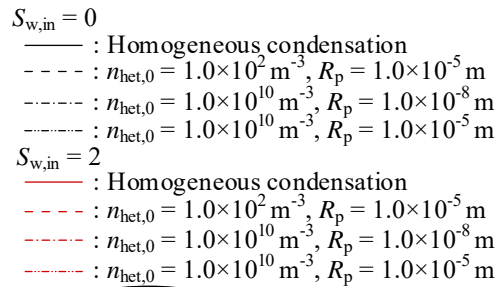


図 7 Distributions of condensate mass fraction

(6) 図 8 は Case A の均一凝縮, $n_{het,0} = 1.0 \times 10^2 \text{ m}^{-3}$, $R_p = 1.0 \times 10^{-8} \text{ m}$ と $n_{het,0} = 1.0 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$, $R_p = 1.0 \times 10^{-5} \text{ m}$ の場合の $x/D = 0$ からノズル出口までの流路各断面での液相の半径方向分布比 G の分布を示す。図より均一凝縮と非均一凝縮でほとんど差がないことがわかった。

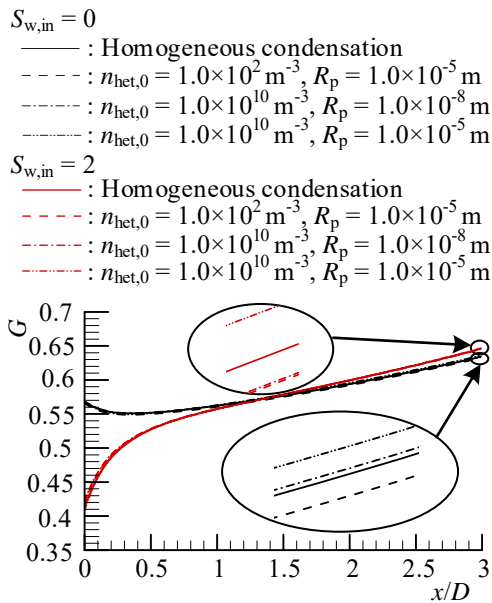


図 8 Distributions of G

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 3 件)

- ① Yusuke Fukushima, Shigeru Matsuo, Norimasa Shiomi, Toshiaki Setoguchi, Annular Supersonic Swirling Flows with Heterogeneous Condensation, Journal of Thermal Science, 査読有、Vol.25、No.6、2016、pp.518-525、DOI:10.1007/s11630-016-0893-4.
- ② 松野雄飛、瀬戸口俊明、松尾繁、塩見憲正、福島悠介、非平衡凝縮を伴う超音速環状旋回流に関する研究、ターボ機械、査読有、Vol.43、No.8、2015、pp.495-502.
- ③ Yusuke Fukushima, Shigeru Matsuo, Toshiaki Setoguchi, Norimasa Shiomi, Tokitada Hashimoto, Heuy Dong Kim, Shen Yu, Effect of Nozzle Inlet Shape on Annular Swirling Flow with Non-Equilibrium Condensation, Journal of Thermal Science, 査読有、Vol.24、No.4、2015、pp.344-349、DOI: 10.1007/s11630-015-0793-z.

[学会発表] (計 8 件)

- ① Yusuke Fukushima, Shigeru Matsuo, Ryuta Murakami, Toshiaki Setoguchi, Effect of Heterogeneous Condensation on Swirling Flows in a Supersonic Annular Nozzle, The 13th International Symposium on Experimental Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, 2017年5月11日、査読有、Okinawa (Japan).
- ② 福島悠介、松尾繁、村上竜太、瀬戸口俊明、非均一凝縮を伴う超音速環状旋回流に関する研究、日本機械学会九州支部講演論文集、No.178-1、2017年3月14日、

pp121-122、佐賀大学理工学部 (佐賀県・佐賀市).

- ③ 福島悠介、松尾繁、塩見憲正、瀬戸口俊明、非平衡凝縮を伴う超音速環状旋回流の数値解析、No.16-31、第 94 期流体工学部門講演会、2016年11月12日、山口大学工学部 (山口県・宇部市).
- ④ Yusuke Fukushima, Shigeru Matsuo, Norimasa Shiomi, Toshiaki Setoguchi, Effect of Heterogeneous Condensation on Annular Swirling Flow in a Supersonic Nozzle, The 27th International Symposium on Transport Phenomena, 査読有、2016年9月22日、Honolulu (USA).
- ⑤ 福島悠介、松尾繁、橋本時忠、瀬戸口俊明、非平衡凝縮を伴う超音速環状旋回流に及ぼすノズル形状の影響、平成 27 年度衝撃波シンポジウム、2016年3月8日、熊本大学 (熊本県・熊本市).
- ⑥ Yusuke Fukushima, Shigeru Matsuo, Toshiaki Setoguchi, Norimasa Shiomi, Tokitada Hashimoto, Heuy Dong Kim, Shen Yu, Effect of Nozzle Inlet Shape on Annular Swirling Flow with Non-Equilibrium Condensation, The 12th International Symposium on Experimental Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, 査読有、2015年7月13日、Lerici (Italy).
- ⑦ Toshiaki Setoguchi, Shigeru Matsuo, Mohammad Mamun, Yusuke Fukushima, Norimasa Shiomi, Yuhi Matsuno, Heuy Dong Kim, Non-Equilibrium Condensing Flow with Swirl in a Supersonic Nozzle, Proceeding of the 6th BSME International Conference on Thermal Engineering, 査読有、2014年12月20日、Dhaka (Bagladesh).
- ⑧ 松野雄飛、瀬戸口俊明、松尾繁、塩見憲正、福島悠介、非平衡凝縮を伴う超音速環状旋回流に関する研究、ターボ機械協会大分講演会、2014年10月3日、大分工業高等専門学校 (大分県・大分市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

瀬戸口 俊明 (セトグチ トシアキ)
 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

(2) 研究分担者

松尾 繁 (マツオ シゲル)
 佐賀大学・大学院工学系研究科・教授
 研究者番号：60229424
 塩見 憲正 (シオミ ノリマサ)
 佐賀大学・大学院工学系研究科・准教授
 研究者番号：80284610