マイクロスラッシュ噴霧流に関するCFD-PIA shadow 融合計測

Integrated CFD-PIA shadow Measurement of Cryogenic Micro-Slush Atomizing Flow

○ 石本 淳 (東北大流体研), 丹 大輔 (東北大学大学院)

Jun ISHIMOTO and Daisuke TAN

ABSTRACT

The fundamental characteristics of the atomization behavior of micro-slush nitrogen (SN_2) jet flow through a two-fluid nozzle was numerically investigated and visualized by a new type of integrated CFD-PIA technique. CFD analysis is focused on the production mechanism of micro-slush nitrogen particles in a two-fluid nozzle and on the consecutive atomizing spray flow characteristics of the micro-slush jet. The slush-particle diameter profile is clearly analyzed by PIA back-light particle image analysis. Based on the nozzle atomization performance obtained by integrated CFD-PIA analysis, a new type of superadiabatic two-fluid ejector nozzle is developed.

Key Words: Micro-slush, Multiphase system, Cryogenics, System integration

1 はじめに

近年、マイクロスラッシュ窒素 (SN_2) あるいはマイクロスラッシュ水素の固液二相流を長距離高温超伝導 (HTS) ケーブル冷却システムの冷媒として適用する技術が注目を集めている [2]. このような極低温スラッシュ流体を、HTS ケーブルの新型混相冷媒として用いることにより、極低温液体単相流を用いるよりも熱伝達効率 (冷却能) の改善ならびに管内圧力損失の軽減化が可能であることが判明している [1]. しかし、極低温スラッシュ流体を用いた HTS ケーブル冷却の実運用に際しては、可能な限り粒径が小さく均一なスラッシュ粒子を短時間・効率的に生成可能な極低温マイクロスラッシュ粒子生成システムの開発が必須である。

スラッシュ冷却の実用化に際し、近年、著者らの研究グループによりマイクロオーダーの粒径を有するスラッシュ粒子 (マイクロスラッシュ粒子) の連続生成が可能な、断熱二流体ノズル方式によるマイクロスラッシュ微粒化ノズルが開発されている [2]. このノズルは、加圧過冷却液体窒素流と極低温ヘリウムガス高速流の衝突により固体窒素の生成とマイクロ微粒化を可能にするマイクロスラッシュ二流体エジェクターノズルであるが、ノズル流路内は非常に小容積でその中を高レイノルズ数の極低温流体混相流が高速流動しており、スラッシュ粒子形成に至るまでの混相流動と微粒化噴霧メカニズムの詳細に関しては解明されていない点が多い。

そこで本研究では、過冷却液体窒素 (LN_2) - 極低温ヘリウムガス (GHe) 利用型二流体エジェクターノズル内における LN_2 - GHe 混合流動と、それに引き続き生成されたマイクロスラッシュ SN_2 粒子の極低温二相微粒化特性、ならびにマイクロスラッシュジェット噴霧熱流動特性に関する融合 CFD-PIA 粒子計測による検討を行うとともに可視化実験結果との比較検討を行った。

2 基礎方程式

数値計算モデルと用いた計算格子の幾何形状は既報 [2] の実験装置に基づいている。可視化計測によっては得ることが困難なマイクロスラッシュ流動に対し、Continuum Surface Force (CSF) モデルと Large Eddy Simulation - Volume of Fluid (LES-VOF) 法をカップリングさせた融合型 CFD (Computational Fluid Dynamics) を用いた流体解析を行った。数値解析においては以下の点に重点を置いて計算実施した。1) 二流体ノズル内

部において過冷却 LN_2 と極低温 GHe はいかなる乱流混合流動を示すのか、2) ノズル内部でマイクロスラッシュ SN_2 がどのようにして形成されるのか、3) ノズルから噴出された SN_2 噴霧熱流動場はどのような様相を示すのか等である。

解析対象とする流動場は極低温非圧縮性乱流であり、基礎方程式系は一流体界面追跡型噴霧二相流を記述する方程式系であり、1) 質量保存の式、2) 運動方程式には表面張力項を積分項の形で含む気-液の非混合流体を統一的に扱う Continuum Surface Force (CSF) モデルに基づく Navier-Stokes 方程式、3) 極低温二相流拡張型エネルギー式、さらに、4) 気相・液相を判別するインジケータ関数の移流方程式から構成される。気-固液非混合極低温流体の微粒化流に関する噴霧熱流動場の解析はおおまかに、1) LES を用いた乱流微粒化流動場の解析、2) VOF 法による界面位置の捕獲、3) 極低温温度場の解析の 3 つのステップからなる。解析に用いた基礎方程式系を以下に示す。

質量保存の式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (1)$$

運動方程式：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \sigma \kappa \nabla F_{(LS)}, \quad (2)$$

ここで、界面は流動場によって移流され、界面捕獲に要する VOF 移流関数は次式により表される。

$$\frac{\partial F_{(LS)}}{\partial t} + \nabla \cdot F_{(LS)} \mathbf{v} = 0, \quad (3)$$

ここで $\mathbf{v}$ は流速ベクトル、 ρ は密度、 σ は表面張力係数、 κ は界面曲率、 $\boldsymbol{\sigma}$ は粘性応力テンソルである。また、 $\mathbf{n}$ は界面に対する単位法線ベクトルであり、式 (2) の右辺第 3 項は表面張力を積分形で導入した生成項である。この項は Dirac のデルタ関数 $\delta(x)$ により定義され、 $S(t)$ により規定される界面上においてのみ作用する項である。本解析においては、界面を (固液混合相-気相) の界面と定義しており、式 (3) の VOF 移流方程式を用いた界面捕獲法により計算される。これにより、固液混合相の体積分率 $F_{(LS)}$ は VOF 移流のインジケータ関数と見なすことが可能であり、次式により表される。

(a) $t = 1.0 \times 10^{-3}$ s

Fig. 1 Instantaneous isosurface of enstrophy E profiles just inside and downstream of the nozzle with scalar magnitude of vorticity $|\omega|$.

(a) $t = 1.0 \times 10^{-3}$ s

Fig. 2 Instantaneous isosurface of the second invariant of velocity gradient tensor Q profiles just inside and downstream of the nozzle with scalar magnitude of vorticity $|\omega|$.

$$F_{(LS)} = \begin{cases} 0 & \text{for a cell inside the gas phase} \\ 0 < F_{(LS)} < 1 & \text{for a cell in the transitional region} \\ 1 & \text{for a cell completely in the liquid-solid phase} \end{cases}$$

固液混合相の体積分率 $F_{(LS)}$ の定義より、局所流体密度 ρ および粘度 μ は異相界面間で補完され、次式のように表される。

$$\begin{aligned} \rho &= F_{(LS)}\rho_{(LS)} + (1 - F_{(LS)})\rho_G \\ \mu &= F_{(LS)}\mu_{(LS)} + (1 - F_{(LS)})\mu_G, \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、下添字 (LS) および G はそれぞれ固液混合相と気相を表す。 μ は全流体相（固液混合相－気相）における見かけ混相粘度である。次節の構成方程式において必要となる固相体積分率 $F_{(S)}$ の計算に関しては、 LN_2 温度が窒素の三重点以下となった領域で考慮する。すなわち、本計算においては、 LN_2 温度が三重点以下となった領域においてマイクロスラッシュ粒子が生成しているものと仮定する。

続いて、 SN_2 ジェット微粒化噴霧流における極低温温度場を考慮するため、全流体相（固液混合相－気相）に関するエネルギー方程式を導出すると、以下ようになる。

$$\rho_k c_{pk} \frac{\partial F_k T}{\partial t} + \nabla \cdot (F_k \mathbf{v} T) = \nabla \cdot (F_k \lambda_{(\text{eff})k} \nabla T), \quad (5)$$

ここで、添字 $k = (LS)$ ならびに $k = G$ はそれぞれ固液混合相と気相を表す。 $\lambda_{(\text{eff})k}$ は各相における実効熱伝導率であり、次

式により定義される：

$$\lambda_{(\text{eff})k} = \beta_c c_{pk} \mu^{\text{SGS}} + \lambda_k, \quad (6)$$

ここで T は温度、 μ^{SGS} は Subgrid Scale (SGS) 粘度、 c_p は定圧比熱、 β_c 実効熱伝導係数であり $\beta_c = 1.0$ とする。 λ_k は混相流における熱伝導率を表す。

乱流モデルに関しては、LES の渦粘性モデルを用い、式 (2) 中における subgrid scale 乱流渦の影響は SGS 応力項により考慮される。

3 結果と考察

極低温乱流微粒化現象に及ぼす渦構造の影響を明らかにするため、エンストロフィー E と速度こう配テンソルの第二不変量 Q の算出・可視化を行った。Fig. 1 と Fig. 2 はそれぞれ、ノズル内部及び出口下流領域における E と Q の等値面を示す。それぞれの図中に表示のカラーグラデーションは渦度のスカラー値 $|\omega|$ を示す。Fig. 1 より、エンストロフィー E 密度は SN_2 あるいは LN_2 微粒化が活発に生じている領域において増大していることが分かる。これより、気液界面近傍における渦のエネルギーは液滴分裂に要する流体力学的エネルギーに変換されていると考えられる。さらに、本計算に観察されるような K-H 不安定に起因するかく乱波の振幅が増大、液柱・液膜からの液滴分裂が促進される一連の現象は、二流体ノズルの混合領域におけるエンストロフィー密度の増大が影響しているものと考えられる。ノズル出口に至るまでの初期かく乱は、 LN_2 と SN_2 ジェットにおけるノズル上流側生成型の乱流微粒化現象に大きく関わっていると言える。Fig. 3 は PIA 計測により得られたマイクロスラッシュ噴霧の瞬間写真である。スラッシュ噴霧コーン外郭部の不安定からマイクロスラッシュ粒子が生成されていることが分かる。

Fig. 3 Instantaneous image of micro-slush spray obtained by PIA analysis

References

- [1] Ohira, K., Ishimoto, J., Nozawa, M., Kura, T., and Takahashi, N., 2008, "Heat transfer characteristics of slush nitrogen in turbulent pipe flows," *Adv. Cryogenic Eng.*, **53**, pp. 1141–1148.
- [2] Ishimoto, J., 2009, "Numerical study of cryogenic micro-slush particle production using a two-fluid nozzle," *Cryogenics*, **49**(1), pp. 39–50.