スラッシュ窒素の管内搬送特性に関する基礎研究

松尾 幸一[†], 池内 正充, 町田 明登, 安田 健次*

Fundamental Study of the Pipe Flow Characteristics of Slush Nitrogen

Kouichi MATSUO, Masamitsu IKEUCHI, Akito MACHIDA and Kenji YASUDA*

Synopsis: Slush nitrogen is a mixture of liquid and solid nitrogen. Fine solid particles are included and dispersed in the liquid phase. It enables the utilization of latent heat and make it possible to increase the quantity of refrigeration supply. Therefore, it is expected that it will be applied as a refrigerant for high-temperature super conductivity devices. This study deals with the pipe flow characteristics of slush nitrogen. The relationship between pressure loss and velocity is investigated experimentally. Flow velocity and mass solid fraction are made to be control parameters. As a result, on the condition that the solid proportion is less than 0.2, pressure loss in the pipe flow increases as the solid proportion increases. However, this increasing rate decreases with increasing flow velocity, and it is found that the pressure loss does not increase even if the solid proportion is increased under the condition of very high flow velocity. Furthermore, observation and classification of the flow pattern by visualization was carried out. The result of the visualization indicates that the flow pattern of the slush nitrogen can be classified into four patterns: uniform flow, layer flow, slide flow and separation flow. In addition, the relationship between the Reynolds number and tube friction coefficient was deduced and an empirical formula was derived.

Keywords: slush nitrogen, pipe flow, pressure loss, friction coefficient

1. 緒 言

高温超電導体を利用した送電ケーブルは現用の CV ケーブルなどと比較して送電ロスの低減や送電距離の延長が可能であり、さらに現状の地中電線路管路、洞道をそのまま利用しながら送電容量を増大できることから、その実用化が期待されている。現在、超電導送電ケーブルの研究開発¹⁾は主にサブクール状態の液体窒素による冷却を前提として進められているが、著者らはこれと並行し、超電導送電ケーブルのさらなる性能向上を目指してスラッシュ窒素による冷却を検討している。

スラッシュ窒素とは融点温度で固液が共存し、液体窒素中に微細な固体窒素粒子が分散したスラリー状の流体であり、過冷却液体窒素と比較して以下のような長所を有する。

- (1) 固体の融解潜熱を利用できるため固相融解まで一定温度を維持し、超電導の安定性を向上させることが可能

となる。

- (2) クエンチなどによって急激に温度が上昇した場合にも融解潜熱の効果により温度上昇が押さえられ、気泡の発生が起こりにくい。
- (3) 凝固点の状態で使用されるため液体窒素と比較して冷却温度が低く、超電導体の臨界電流値が増大する。
- (4) 冷媒単位質量あたりの寒冷量が増大することにより長距離冷却が可能となり、超電導送電ケーブルの冷却ステーション数を削減できる可能性がある。

このように多くのメリットを有するスラッシュ窒素による冷却であるが、現状では研究例は少なく、その特性は十分に解明されていない。

スラッシュ窒素を冷媒として用いた冷却システムの構築を行う際には、冷媒循環に必要な動力などを見積もるための基礎的データとして、その管内搬送時の圧力損失や管摩擦係数といった搬送特性を把握しておくことが必要不可欠となる。そこで本研究ではスラッシュ窒素の固体質量割合および管断面平均流速をパラメータとした管内搬送試験を行い、それらが搬送特性におよぼす影響を解明した。また可視化試験によりスラッシュ窒素の流動様式を観察、分類し、各パラメータが流動様式に与える影響を定量的に検討している。さらに、得られた結果を一般化し、工業的に利用可能な管摩擦係数-レイノルズ数に関する実験整理式の導出を試みた。

Received July 6, 2004

株式会社前川製作所

〒302-0118 茨城県守谷市立沢 2000

MAYEKAWA MFG. CO., LTD., 2000 Tatsuzawa, Moriya, Ibaraki 302-0118, Japan

* 超電導発電関連機器・材料技術研究組合

〒530-0047 大阪府大阪市北区西天満 5 丁目 14 番 10 号

梅田 UN ビル

Engineering Research Association for Superconductive Generation Equipment and Materials, Japan, Umeda UN BLDG., 5-14-10

Nishitenma, Kita-ku, Osaka 530-0047 Japan

[†] E-mail: kouichi-matsuo@mayekawa.co.jp

2. 試験装置および試験方法

2.1 試験装置

Fig. 1 に装置概略図を, Fig. 2 に装置の外観写真を示す. 試験装置本体はスラッシュ窒素を生成する生成タンク (図中①), 搬送試験用モデル配管 (②, 以下モデル配管), 搬送されてきたスラッシュ窒素を貯留するキャッチタンク (③) より構成されており, それぞれのタンクには真空引きを行うための油回転真空ポンプが設置されている. ステンレス鋼で製作された生成タンクおよびキャッチタンクはそれぞれ内部直径 700 mm, 500 mm, 内部高さは共に 1140 mm である. 両タンクの底面の高さは同一であり, 外部に真空断熱層を有している. また内部の様子を観察できるように生成タンクには 4 箇所, キャッチタンクには 3 箇所の観察窓 (④) が設置されている. それぞれのタンクには真空引き用の排気ポート (⑤) があり, 液体窒素充填用のパイプや密度計を差し込むウィルソンシールが数箇所設けられている. さらにスラッシュ窒素の生成, 貯蔵, 搬送時にタンク内を攪拌し, 固体粒子を分散させるための攪拌翼 (⑥) が生成タンクに大小 2 つ, キャッチタンクに 1 つ取り付けられており, タンク内の気体の対流を抑え, 外部熱侵入を低減するための仕切り板が 2 枚, 両タンク内に設置されている. 生成タンク内部の温度は测温抵抗体 (⑦) と熱電対 (金鉄-クロメル) (⑧) によって測定する. 一方, キャッチ

Fig. 1 The experimental apparatus.

Fig. 2 The external appearance of the experimental apparatus.

タンク内の温度は液面計上部および下部に設置した测温抵抗体によって測定している.

両タンクをつなぐ搬送試験用のトランスファーチューブはステンレス製の真空断熱二重管であり, 両タンク内の配管と併せ, モデル配管を構成する. モデル配管全体としては内径 14 mm, 全長 8791 mm, 垂直部 (上昇) 1505 mm, 水平直管部 5000 mm, 垂直部 (下降) 1479 mm となっており, 配管中には送液弁 (⑨) と 4 箇所のエルボが存在する. なおモデル配管入口は生成タンク側の底に, 出口はキャッチタンク側の底から 60 mm の高さに位置している.

両タンクには充填した液体窒素の体積を測定するため, 静電容量型の液面計が設置されており, さらにそれぞれのタンクの圧力を測る圧力計 (圧力タップ⑩), 両タンクの差圧を測定する差圧計が設置されている. 測定された各部の温度, 圧力などのデータは, データロガーを経て記録用コンピュータに表示されると同時に保存される.

2.2 試験方法

2.2.1 試験操作手順

生成タンク, キャッチタンクに液体窒素を充填し, 真空引きにより生成タンク内の液体窒素を蒸発させて蒸発潜熱を奪い冷却する. 窒素の状態はほぼ飽和曲線に沿って変化して三重点に到達し, その後, 引き続き真空引きを続けることによって液面に固体窒素が生成される. 真空引きにより生成されたスラッシュ窒素の写真を Fig. 3 に示す. 三重点に達した時点で, 以後の固体生成時における固体割合算出の基準とするため, 液面の高さを測定する. また生成された固体窒素が液面を覆うのを防ぎ, かつ固体を粉碎して微細化するため真空引きと同時に攪拌を開始する. 生成中, 適当な時間間隔で攪拌及び真空引きを中断し, 三重点の時点からの液面高さの変化を測定し, 下記 2.2.2 の方法によって固体質量割合を算出する. そして所定の値に達した時点で生成を終了する. 本方法で生成される固体窒素粒子の粒径は平均で約 1.4mm であり, かけら状の不規則な形状であることを CCD カメラによる拡大画像にて確認している. 次に容器内にヘリウムガスを充填することにより所定の送液圧力まで加圧し, 送液弁を開けて搬送試験を開始する. 搬

Fig. 3 The external appearance of N₂ solid particles.

送試験中の送液圧力は常に一定となるようにレギュレータにて調整を行い、一定時間（2分間）定常状態を維持して流速、圧力損失を算出するための各データの収集を行う。試験条件としては氷水やスラッシュ氷素に関する過去の研究²⁻⁵⁾を参考に固体質量割合 $\phi_m = 0 \sim 0.4$ 、搬送時の管断面平均流速を $v = 0.5 \sim 3.0$ m/s とした。

2.2.2 固体質量割合の設定

真空引きにより蒸発した液体窒素の気化による潜熱は固体の生成時に放出される潜熱に等しいとすると

$$\ell_v \rho_\ell V_v = \ell_s \rho_\ell V_s \quad (1)$$

ただし ℓ_v : 蒸発潜熱 [kJ/kg], ℓ_s : 固体の生成時に放出される潜熱 [kJ/kg], ρ_ℓ : 三重点の液体窒素密度 [kg/m³], ρ_s : 三重点の固体密度 [kg/m³], V_v : 蒸発した液体窒素の体積(液体換算) [m³], V_s : 凝固した液体窒素の体積(液体換算) [m³]. また固体生成開始時と終了時の体積の関係より

$$V_0 = V_m + V_v + \frac{\rho_s - \rho_\ell}{\rho_s} \cdot V_s \quad (2)$$

ただし V_0 : 固体生成開始時の(液体窒素飽和液の)体積 [m³],

V_m : 固体生成終了時の体積 [m³]

式(1)および式(2)より凝生成した液体窒素の体積 V_s は以下のように求まる。

$$V_s = \frac{V_0 - V_m}{\frac{\ell_s}{\ell_v} + \frac{\rho_s - \rho_\ell}{\rho_s}} \quad (3)$$

従って凝固後の体積 V'_s は

$$V'_s = V_s \frac{\rho_\ell}{\rho_s} \quad (4)$$

よって固体体積割合 ϕ_v は

$$\begin{aligned} \phi_v = \frac{V'_s}{V_m} &= \frac{V_0 - V_m}{\left(\frac{\ell_s}{\ell_v} + \frac{\rho_s - \rho_\ell}{\rho_s} \right) \frac{\rho_s}{\rho_\ell} V_m} \\ &= \frac{A_g h_0 - A_g h_m}{\left(\frac{\ell_s}{\ell_v} + \frac{\rho_s - \rho_\ell}{\rho_s} \right) \frac{\rho_s}{\rho_\ell} A_g h_m} = \frac{h_0 - h_m}{\left(\frac{\ell_s}{\ell_v} + \frac{\rho_s - \rho_\ell}{\rho_s} \right) \frac{\rho_s}{\rho_\ell} h_m} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで A_g は生成タンクの断面積, h_0 はスラッシュ窒素生成開始時(三重点)の液面高さ, h_m は固体質量割合測定時の液面高である。従って固体質量割合 ϕ_m は次式で表される。

$$\phi_m = \frac{\rho_s \cdot \phi_v}{\rho_s \cdot \phi_v + \rho_\ell (1 - \phi_v)} \quad (6)$$

2.2.3 試験データの整理方法

(1) 圧力損失の算出

圧力損失は式(7)により算出した。すなわち、生成タンク、キャッチタンクの各内圧測定値にそれぞれのタンクにおけるスラッシュ窒素液面からモデル配管入出口までの液圧力を加え、その差をとって送液時の圧力損失としている。

$$\Delta P = (P_g + \rho_\ell g H_g) - \{P_c + \rho_\ell g (H_c - H_{c0})\} \quad (7)$$

ただし生成タンク内圧力; P_g [kPa], キャッチタンク内圧力; P_c [kPa], 生成タンク液面高さ; H_g [m], キャッチタンク液面高さ; H_c [m], キャッチタンク側配管出口高さ; H_{c0} [m], 重力加速度; g [m/s²]

(2) 流速の算出

モデル配管内を流動するスラッシュ窒素の流速は、キャッチタンクの液面高さの時間変化より式(8)にて算出している。この方法によって求めた流速は、高流速条件でスラッシュ窒素内の液相と固相のスリップが十分に小さい場合には一般的な管断面平均流速を与えると考えられる。固相が沈降して液相と分離したり、固相が下部壁面近傍に沈殿したりする低流速条件では液相、固相の流速共に算出不可能であるが、本研究においては特に区別をせずにデータの整理を行っている。

$$v = \frac{\left(\frac{dH_c}{dt} \cdot A_c \right)}{\left(\frac{\pi d^2}{4} \right)} \quad (8)$$

ただしキャッチタンク断面積; A_c [m²], 時間; t [s], 配管直径; d [m], 流速; v [m/s]

(3) 管摩擦係数

上記(1)の方法で算出される圧力損失は直管部以外に管入出口、送液弁、ベン드의損失を全て含んだものであり、このままでは一般的データとして取り扱うことができない。そこで配管設計に利用される管入出口、弁、ベン드의損失係数を用いてそれら各要素による影響を取り除き直管部のみの管摩擦係数 λ を算出した。直管部以外の各要素の損失係数は以下に示す値を用いた⁶⁾。

管入口 ξ_{in} ; 0.5, バルブ ξ_v ; 3.6, ベンド ξ_b ; 0.21, ベンド個数 n ; 3, 管出口 ξ_{out} ; 1.0

これらの係数を用いて、圧力損失と管摩擦係数の関係は次式により表される。

$$\begin{aligned} \Delta P &= \left(\lambda \frac{L}{d} + \xi_{in} + \xi_v + \xi_b \cdot n + \xi_{out} \right) \cdot \frac{\rho_m v^2}{2} \\ &= \left(\lambda \frac{L}{d} + K \right) \cdot \frac{\rho_m v^2}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

$$K = \xi_{in} + \xi_v + \xi_b \cdot n + \xi_{out} \quad (10)$$

ここで L は配管長さである。また ρ_m はスラッシュ窒素の密度であり、下記の式(11)から算出する。これらの式を整理し、次式により圧力損失から管摩擦係数が算出される。

$$\lambda = \left\{ \frac{\Delta P}{(\rho_m v^2 / 2)} - K \right\} \frac{d}{L} \quad (11)$$

(4) 粘度

スラッシュ窒素の粘度については過去の研究⁷⁾において提案されている種々の懸濁液に対する理論式および実験式より森・乙竹の式(12)を採用し、固体体積濃度から算出した。この式は固体濃度が大きく、かつ分散する固体粒子の粒径分布範囲が広い懸濁液に適用可能な式であり、真空法で生成したスラッシュ窒素に適していると考えられる。

$$\mu_r = 1 + 3/(1/\varphi_v - 1/0.52) \quad (12)$$

$$\mu_r = \frac{\mu_m}{\mu_0} \quad (13)$$

ただしスラッシュ窒素粘度; μ_m [Pa·s], 液体窒素粘度; μ_0 [Pa·s], 相対粘度; μ_r [-], 固体体積割合; φ_v [-]

なお本研究では固体割合として何も断らない限り質量割合を用いているが、粘度の算出のみ体積割合を算出して計算に用いている。

(5) レイノルズ数

レイノルズ数は一般的な定義に従い、次式で算出した。

$$Re = \frac{\rho_m v d}{\mu_m} \quad (14)$$

ただし、粘度 μ_m については三重点液体窒素の値 (4.1 節)、もしくは上記の森・乙竹の式(12)により算出した相対粘度から求めた値 (4.2 節) を用い、密度は固体および液体のそれぞれの密度と固体質量割合より次式にて算出した。

$$\rho_m = \rho_s \cdot \varphi_m + \rho_l(1 - \varphi_m) \quad (15)$$

(6) フルード数

流れ場の状態を表す変数として慣性力と重力の比であるフルード数 Fr を用い、流動様式の分類を行った。

$$Fr = \sqrt{\frac{v^2}{gd}} \quad (16)$$

3. 試験結果

3.1 管断面平均流速と圧力損失の関係

Fig. 4 に管断面平均流速 v と圧力損失 ΔP の関係を、固体質量割合 φ_m をパラメータとして示す。固体質量割合が 0.2 以下の場合と 0.3 以上の場合で結果が大きく異なっており、それぞれに分けて考察する。まず図中に最小二乗による近似曲線を合わせて示している固体質量割合が 0.2 以下の場合、流速 1.5~2.0 m/s 付近で固体質量割合の増加による圧力損失の増加は最も著しく、それより高流速になると固体質量割合増加による圧力損失の増加率は減少する傾向を示す。

高流速条件において固体質量割合増加による圧力損失の増加率が減少する原因としては見かけ粘度の減少が挙げられる。液体に固体粒子が混入することにより見かけ粘度が減少するという効果が K.V. Liu らの研究⁸⁾において報告されて

おり、それによれば粒径 1.3 mm 程度の粒子を液体に混入すると固体割合 0.1~0.3 の範囲で見かけ粘度が減少することが確認されている。また管内流に関しては、微細な粒子を混入することで流動抵抗が減少するという現象も広く確認されている。なお固液 2 相流体において見かけ粘度が減少する要因については完全に解明されているわけではないが、混入している固体粒子が流体のエネルギーを吸収し、乱流遷移を抑制することによる効果であると一般的に考えられている。特に非球形で縦横の長さが異なる粒子では流れのせん断応力を受けて、粒子が長手方向の流れの方向へ向けて並び、流れに直角方向の運動量移動を抑えることにより乱流遷移を抑制するとの見方もある。本研究結果についても、液体窒素中に分散している微細な固体窒素粒子が、上記のような効果により乱流遷移を抑制し、見かけ粘度を減少させた結果、高流速条件において固体質量割合増加による圧力損失の増加率が減少したものと考えられる。この高流速条件での特性を適切に利用すれば、圧力損失を増大させることなく供給寒冷量を増大させることが可能であり、固体粒子の潜熱利用とあいまって、より効率の高い冷却システムを構築できる可能性がある。

固体質量割合が 0.3 以上の条件では毎試験時の結果のばらつきが大きく、特定の変化の傾向が見出せなかった。これについては固体粒子による閉塞が原因であると考えられる。固体質量割合が大きい場合には固体粒子の堆積による閉塞が生じやすく、同一条件においても、再現性のある管内流を維持することが困難であった。閉塞には流動が完全に停止してしまう状態から部分的な閉塞までさまざまな状態が考えられ、その状況次第で圧力損失の値は大きく変動する。そのため試験結果に大きなばらつきが生じたものと推測される。

3.2 流動可能条件

3.1 節において、固体質量割合が 0.3 以上になると流速と圧力損失の関係に再現性が乏しくなることを説明した。このことから分かるように、スラッシュ窒素を管内搬送する

Fig. 4 The relationship between v and ΔP .

場合においては、固体粒子による閉塞が生じないための条件が存在すると考えられる。ここではこの条件について考察する。

Fig. 5 に実施した全ての搬送試験の結果を流動と閉塞に分類して示す。横軸に固体質量割合 ϕ_m を、縦軸には搬送試験開始時の設定差圧 $\Delta P_{set} (=P_g - P_c)$ をとり、流動した場合を丸、閉塞した場合を三角のシンボルによって表している。なお閉塞が発生した場合には試験失敗として扱っており、圧力損失などのデータ整理の対象とはしていない。3.1 節で解説した流速と圧力損失の関係はすべて丸で示した流動の場合における測定結果に基づくものである。

図より、固体質量割合が高く設定差圧が低い条件ほど閉塞しやすくなることが確認できる。ただしスラッシュ室素搬送時の閉塞は必ずしも一定の条件で発生しておらず、同じ条件でも閉塞する場合と流動する場合が存在する。これについては搬送開始時の設定差圧の調整方法や速さ、送液弁の開閉方法、その他、毎試験時に揃えることが難しい微細な試験条件の差により、固体粒子の分散状態や堆積状況に変化が生じることが要因として考えられる。そのため閉塞条件と流動可能条件の境界は明確な線ではなく、閉塞条件と流動可能条件の中間的な領域として存在している。スラッシュ室素を冷媒として利用する立場から考えるならば搬送配管の閉塞は避ける必要があり、閉塞の危険性がある条件は閉塞条件と判断しておくほうが安全である。図中の閉塞条件と流動可能条件の境界線はこのような考えに基づくものであり、一度でも閉塞が発生した条件はすべて閉塞領域とした。境界線は固体質量割合が 0.3 以上になると急激に閉塞が発生しやすくなることを示しており、上記 3.1 における結果とあわせ、真空法で生成したスラッシュ室素の搬送時の固体質量割合は 0.2 程度までとすることが妥当であると考えられる。

3.3 流動様式の可視化観察

固液 2 相流体の管内流においては、固体粒子の分散状態による流れ場の形態は流動様式またはフローパターンと呼

Fig. 5 The blockade region.

ばれ、搬送特性を支配する重要な因子とされている。スラッシュ室素の管内搬送時における圧力損失に固体質量割合および流速が与える影響については搬送試験結果より明らかとなった。次の段階として、得られた結果を一般化し、工業的に利用可能な関係を見出すことを考えた場合、固体質量割合、流速による流動様式の変化を観察し、それらの各パラメータがどのような現象を通じて圧力損失に影響を及ぼしているのかを確認することが必要となる。また流動様式が異なれば現象を支配する変数も異なるため、それぞれの形態に適合した整理を行うには、それに先立って、まず流動様式の定義と分類をしておくことも不可欠である。以上のような目的により搬送試験の可視化観察を実施した。

3.3.1 可視化試験器具

可視化に用いたトランスファーチューブの概略図を **Fig. 6** に、その外観写真を **Fig. 7** に示す。本体はステンレス製の真空断熱二重管であり全長は 1000 mm、可視化部の長さはこの内 150 mm である。スラッシュ室素流動部の内径は搬送モデル配管の他の部分と同一の 14 mm となっている。内管はパイレックスガラス製、真空断熱層外管はアクリル樹脂で製作されている。この可視化用トランスファーチューブをモデル配管水平直管部 4500 mm の下流側に接続して可視化試験を実施した。

3.3.2 試験結果

(1) 流動様式の定義

Fig.8 (a), (b), (c), (d) にスラッシュ室素管内搬送時の可視化写真を示す。固体質量割合は 0.2 である。流速が大きい場合

Fig. 6 The test section for visualization.

Fig. 7 The external appearance of the test section.

には Fig. 8 (a)のように固体粒子は均一に分散し、一様な状態の流れとなる。この状態を均質流と定義する。流速が小さくなるに従い、液相よりも密度が大きい固体粒子は重力の影響で下方へ沈降する傾向が強くなり、Fig. 8 (b)に示すように管上部と下部で固体濃度の差が確認されるようになる。しかしながら、この状態ではまだ固体粒子は十分に液相中に浮上して流動している。この形態を層状流とする。さらに流速が小さくなると固体粒子の沈降が著しくなり、管底部に沈殿する。このため Fig. 8 (c)のように上部には液相だけが流動し、固液が共存している層との境界が明確に確認されるようになる。この状態では固体粒子の流動速度は上部の液相の流動速度と比較して小さく、さらに下方へ行くほど遅くなっているため、中間層では上下の速度差に起因する流れのせん断応力により渦の巻き上がりが生じる。また下部管壁付近に沈殿した固体粒子は管壁を摺動しながら移動する。この状態を摺動流と定義する。この状態よりも流速が減少すると、Fig. 8 (d)のように固体粒子は下部管壁に堆積して脈動または停止し、流動するのはほぼ分離した液相のみとなる。この閉塞直前の状態を分離流と定義する。

(2) 流動様式と各パラメータの関係

流動様式と各パラメータの関係を明らかにするため、流速、設定圧力と、それらの値より算出したフルード数、レイノルズ数を固体質量割合、流動様式別にまとめたものが Table 1 である。

固体質量割合を 0.1 から 0.4 の各値に設定し、本試験装置において流動させた場合、おおよそ表中の設定パラメータの値で均質流、層状流、摺動流、分離流と遷移する。まず固体質量割合が 0.1, 0.2 の場合に注目すると、いずれの固体質量割合においても流動様式が遷移する流速およびフルード数が同程度の値であることが分かる。固体質量割合 0.3, 0.4 に関しても、比較的、再現性の良い均質流となる流速およびフルード数に限れば固体質量割合 0.1, 0.2 の場合とほぼ同程度である。しかしレイノルズ数については固体質量割合によって遷移点が大きく異なっている。これらのことから流動様式を支配する変数は流速もしくはフルード数であり、レイノルズ数は直接、流動様式を支配する変数とはなっていないことが分かる。固体質量割合に関しても流れの再現性を通じて流動様式に影響を与えるものの、支配的な変数とはなっていない。

固体質量割合が 0.3, 0.4 と大きい場合には分離流となる流速、フルード数共に、固体質量割合が小さい場合と比較して大きく異なっているが、これについては流速と圧力損失の関係 (3.1 節) で考察したように、固体粒子による閉塞が生じやすく、流れの再現性が低下するためであると考えられる。また固体質量割合が高い 0.3, 0.4 の条件においては閉塞が発生しやすいため、流動様式の変化は連続的でなく均質流れから急激に閉塞に至り、中間的な流動様式は観察されていない。

(a) Uniform flow

(b) Layered flow

(c) Slide flow

(d) Separation flow

Fig. 8 The flow patterns of the SN_2 pipe flows.

Table 1 The relationship between flow pattern and each parameter.

	parameter	$\varphi_m=0.1$	$\varphi_m=0.2$	$\varphi_m=0.3$	$\varphi_m=0.4$
uniform flow	v [m/s]	above 1.85	above 1.76	above 1.7	above 1.8
	ΔP [kPa]	above 30	above 30	above 30	above 40
	Fr [-]	above 4.99	above 4.75	above 4.59	above 4.85
	Re [-]	above 57700	above 42400	above 30500	above 23200
layered flow	v [m/s]	1.85-1.44	1.76-1.34	Corresponding state is not found	Corresponding state is not found
	ΔP [kPa]	30-20	30-20		
	Fr [-]	4.99-3.88	4.75-3.62		
	Re [-]	57700-44900	42400-32200		
slide flow	v [m/s]	1.44-0.93	1.34-0.83	Corresponding state is not found	Corresponding state is not found
	ΔP [kPa]	20-10	20-10		
	Fr [-]	3.88-2.51	3.62-2.24		
	Re [-]	44900-29000	32200-20000		
separation flow	v [m/s]	0.93-0.6	0.83-0.5	1.7-1.1	1.8
	ΔP [kPa]	10-5	10-5	30-20	40
	Fr [-]	2.51-1.62	2.24-1.35	4.59-2.97	4.85
	Re [-]	29000-18700	20000-12000	30500-19800	23200

4. 無次元化と実験整理式の導出

4.1 レイノルズ数と管摩擦係数の関係

搬送試験により得られた結果を一般化するため、レイノルズ数 Re および管摩擦係数 λ による無次元化を行った。各無次元数の定義については 2.2.3 項を参照のこと。Fig. 9 にレイノルズ数 Re と管摩擦係数 λ の関係を、固体質量割合 φ_m をパラメータとして示す。 Re の算出には φ_m の値に関わらず、三重点液体窒素の粘度を用いている。図中には最小二乗近似による曲線を併せて示した。 $\varphi_m=0$ の過冷却液体窒素の管摩擦係数は Blasius の式にほぼ一致しており、本試験結果の精度は十分であると考えられる。スラッシュ窒素の管摩擦係数 λ は固体質量割合 φ_m が大きくなるほど大きな値を示すが、レイノルズ数が増大するに従い、固体質量割合による差は小さくなっている。

4.2 実験整理式の導出

Fig. 9 に示したレイノルズ数 Re と管摩擦係数 λ の関係において、結果は各固体質量割合 φ_m についてそれぞれ異なる曲線上にまとまった。しかし搬送試験により得られた結果を工業的に利用する場合には、固体質量割合 φ_m に関係なく適用できる形の整理式を求めておくことが望ましい。そこで 2.2.3 項に示した森・乙竹の式(12)によりスラッシュ窒素

の粘度 μ_m を求め、この粘度を用いて算出したレイノルズ数 Re によりデータの整理を行った。ただし、流速と圧力損失の関係において考察したように、固体質量割合が $\varphi_m=0.3$ 以上の条件ではデータの再現性が低くなること、および閉塞の発生などを考慮した場合、実用には適さないことを考慮し、 $\varphi_m=0.2$ 以下のデータのみを対象とした。整理の結果、以下の実験整理式が得られた。

$$\lambda = 12Re^{-0.58} \quad (17)$$

Fig. 10 に実測値と整理式の関係を示す。整理式による値は実測値と相対誤差の自乗平均値が 30% 以内で一致する。ここで式(17)の適用範囲は下記の通りである。

$$\begin{cases} \varphi_m < 0.2 \\ 5 \times 10^3 < Re < 1 \times 10^5 \\ Fr > 3.7 \end{cases}$$

なおフルード数 Fr に関しては固液が分離して固体粒子が下部管壁へ沈殿する流動様式 ($Fr < 3.7$ の撓動流、分離流) ではスラッシュ窒素を擬似的に均質な単一流体として取り扱えないため、レイノルズ数と管摩擦係数による一般的な流体と同様の整理を適用することが適切でないと判断し、上記の制限を設けた。

Fig. 9 The relationship between Re and λ .

Fig. 10 The empirical formula.

5. 結 言

- (1) 管内搬送試験により流速と圧力損失の関係について検討を行い、固体質量割合が 0.2 以下の条件においては、管内搬送時における圧力損失は固体質量割合の増大とともに増加するが、その増加率は流速が大きくなるに従い小さくなり、流速 3.0m/s 以上では固体質量割合が増大してもほとんど増大しないという現象を確認した。
- (2) 可視化観察により管内搬送時におけるスラッシュ室素の流動様式を 4 つの状態に分類した。さらにそれらの流動様式と各パラメータの関係についても検討を行い、スラッシュ室素の管内流の流動様式は流速またはフルード数によって支配されることを明らかにした。
- (3) 管内搬送試験の結果を、懸濁液の粘度から求めたレイノルズ数および管摩擦係数で整理し、固体質量割合が 0.2 以下の場合に関して、工業的に応用可能な実験整理式を導出した。

本研究は経済産業省産業技術環境局のプロジェクト「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」の一環として新エネルギー・産業技術総合開発機構からの受託により実施したものである。

また筑波大学機能工学系、村上正秀教授ならびに弘前大学理工学部、石本淳助教授には文献調査、データ整理などに関して貴重なご意見をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Engineering Research Association for Superconductive Generation Equipment and Materials (Super-GM): "Development of fundamental technologies for Superconductive Generation Equipment", Annual Report 2002 (2002) (in Japanese)
超電導発電関連機器・材料技術研究組合: 平成 14 年度委託業務成果報告「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」(2002)
- 2) P. W. Egolf, O. Sari: "A Review from physical properties of ice slurries to industrial ice slurry applications", IEA, ECES IA Annex 10, 6th workshop, Stockholm, Sweden (2000)
- 3) H. Onojima, Y. Takemoto, M. Fukushima and K. Takaemoto: "A Study on the hydraulic transportation of ice-water mixture for district cooling system", Liquid Solid Flows, ASME **118**, (1991) 241-246
- 4) C.F. Sindt and P.R. Ludtke: "Slush hydrogen flow characteristics and solid fraction upgrading", Advances in Cryogenic Engineering, **15** (1970) 382-390
- 5) R.L. DeWill, T.L. Hardy, M.V. Whalen and G.P. Richter: "Slush hydrogen technology development for application to the national aerospace plane", Advanced in Cryogenic Engineering, **35** (1990) 1741-1754
- 6) Y. Mori, Y.Oshio and H. Shintou: "Fundamental Technology of the Piping Engineering", Keigaku Syuppan, Tokyo (1980) 15-18 (in Japanese)
森田泰司, 押尾良衛, 新藤博行: 「配管技術の基礎」, 啓学出版, 東京 (1980) 15-18
- 7) Y. Mori and S. Ototake: "Viscosity of the Suspensions", The chemical engineering, **20** (1956) 488-493 (in Japanese)
森芳郎, 乙竹直: 「懸濁液の粘度について」, 化学工学, **20** (1956) 488-493
- 8) K.V. Liu, U.S. Choi and K.E. Kasza: "Measurements of press. drop & heat trans. in turbulent pipe flows of particulate slurries", Argonne Nat. Lab., ANL-88-15 (1988) 21-28

松 尾 幸 一

1968 年 12 月 2 日生。1998 年 3 月岡山大学工学部機械工学科卒業。2000 年 3 月同大学大学院工学研究科機械工学専攻修了。2003 年 3 月同大学大学院自然科学研究科エネルギー転換科学専攻修了。平成 15 年 4 月より(株)前川製作所勤務。主にスラッシュ室素による長尺冷却技術の研究に従事。低温工学協会会員。博士(工学)。

池 内 正 充

1955 年 3 月 17 日生。1984 年 3 月神戸商船大学大学院商船学研究科修了。1984 年 4 月より(株)前川製作所勤務。ヘリウム液化冷凍システム、ヘリウム膨張タービン、スラッシュ室素などの研究に従事。低温工学協会会員。

町 田 明 登

1961 年 7 月 1 日生。1985 年 3 月千葉工業大学工学部機械工学科卒業。1985 年 4 月より(株)前川製作所勤務。ヘリウム液化冷凍システム、自然冷媒冷凍機、ダイナミック製氷などの研究に従事。低温工学協会会員。

安 田 健 次

1955 年 10 月 15 日生。1978 年 3 月岐阜大学工学部卒業。1978 年 4 月中部電力(株)入社。主に送電線の建設調査業務および電気設備の維持管理業務に従事。1989 年 7 月～1991 年 6 月、(財)エネルギー総合工学研究所出向。2002 年 7 月～超電導発電関連機器・材料技術研究組合出向、現在に至る。超電導の電力機器応用に関する研究に従事。低温工学協会会員。