

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月22日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360091

研究課題名（和文） 極低温固液二相スラッシュ流体の伝熱・流動複合機構の研究

研究課題名（英文） Study of the combined mechanism of heat transfer and pressure drop for cryogenic solid-liquid two-phase slush fluid.

研究代表者

大平 勝秀（OHIRA KATSUHIDE）

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：30375117

研究成果の概要（和文）：スラッシュ流体とは極低温液体中に同成分の固体粒子が混在する非ニュートン性を有する固液二相流体である。スラッシュ窒素を使用して、円管、正方形管、正三角形管、収縮・拡大管、コルゲート管の伝熱・流動実験を流速、固相率、熱流束等をパラメータとして行った。スラッシュ流体の圧力損失低減と、低減に起因する熱伝達劣化が複合する伝熱・流動メカニズムが実験および数値解析により明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：Slush fluid, which behaves like a non-Newtonian fluid, is a two-phase, single-component fluid containing solid particles in a cryogenic liquid. Experimental tests were conducted using slush nitrogen to elucidate heat-transfer and flow characteristics of circular, square and equilateral triangular pipes, a converging-diverging pipe and a corrugated pipe according to changes in the flow velocity, solid fraction, heat flux, etc. From the experimental and numerical results, the combined mechanism of the pressure drop reduction and the heat-transfer deterioration of the slush fluid became clear.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
2010年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2011年度	2,600,000	780,000	3,380,000
総計	12,700,000	3,810,000	16,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：極低温流体、熱工学、流体工学、スラッシュ流体、固液二相流、強制対流熱伝達

1. 研究開始当初の背景

スラッシュ流体の研究は、米国ではロケット燃料として主にスラッシュ水素製造法およびバルブ等の流動特性の研究が行われたが、現在中断している。国内では、スラッシュ水素の研究は研究代表者が製造法及び流動特性、スラッシュ窒素の研究は研究代表者、および他の研究グループが実施している。研究代表者は、スラッシュ流体の圧力損失低減効果と、これに起因する熱伝達劣化現象を初

めて確認し報告している。他の研究グループは超伝導送電の冷媒を対象としており、多量の燃料輸送を想定していないため、非ニュートン流体的性質を示さない低流速（1～3 m/s）において研究を実施している。アイススラリー（氷/水）や通常の固液二相流体の研究においても、非ニュートン流体的性質を示す流動特性と、これに起因する熱伝達劣化特性については一部報告されているが、伝熱・流動が同時に複合する現象について、そのメカニ

ズム等は公表されていない。

2. 研究の目的

スラッシュ流体が配管内を流動する際に、伝熱・流動が同時に複合する現象を定量的、系統的に解明する。即ち、スラッシュ流体の非ニュートン流体的性質を示す流動特性（圧力損失低減）と、圧力損失低減に起因する熱伝達劣化が同時に複合する伝熱・流動メカニズムを固体粒子の挙動・融解も含めて解明する。得られた成果を、スラッシュ水素を利用する高効率水素エネルギーシステムや次世代ロケット、超伝導送電等極低温機器の実用化、性能向上に資することを目的とする。

3. 研究の方法

東北大学が保有する「スラッシュ窒素伝熱・流動試験装置」を使用して実用上重要となる低流速から高流速域（1~5 m/s）までの伝熱・流動実験を固相率（0~40 wt.%）、熱流束（0~30 kW/m²）を変化させて行い、圧力損失特性、熱伝達特性を取得する。固体粒子の平均粒子径は $d_s = 1.36$ mm である。高速度ビデオカメラによる固体粒子の可視化観察、固体粒子を直接トレーサとする粒子画像流速測定法（PIV）から乱流・渦運動解析を行い、固体粒子の挙動・融解が圧力損失低減と伝熱劣化に及ぼす影響について明らかにする。実験結果をもとに、保有する「スラッシュ流体三次元管内伝熱・流動解析プログラム（SLUSH-3D）」の乱流解析手法の改良と高精度化を行い、流速、固相率、熱流束、固体粒子径、管断面形状が異なる場合のスラッシュ窒素の伝熱・流動現象の解明を行う。また、スラッシュ窒素実験では得られないスラッシュ水素の伝熱・流動解析も行い、現象の解明を定量的、系統的に行う。

4. 研究成果

スラッシュ窒素を使用して、2種類の円管（内径 10 mm、15 mm）、正方形管（一辺 12 mm）、正三角形管（一辺 20 mm）、収縮・拡大管（上下流内径 15 mm、スロート径 10 mm）、2種類のコルゲート管（内径 12 mm、15 mm、山の高さ、ピッチが異なる）の7種類の水平管について実験を行った。内径および管断面形状が異なる場合、直管および流路方向に形状が変化する場合について圧力損失低減、伝熱劣化特性を取得した。その結果、低減、劣化現象の共通点、異なる点が明確となった。

(1) 円管、正方形管、正三角形管の圧力損失低減と熱伝達劣化

非加熱時の円管（内径 10 mm）の平均流速 u_{mean} と、スラッシュ窒素と液体窒素の圧力損失比 r_{dp} の関係を図 1 に示す。図中の番号は高

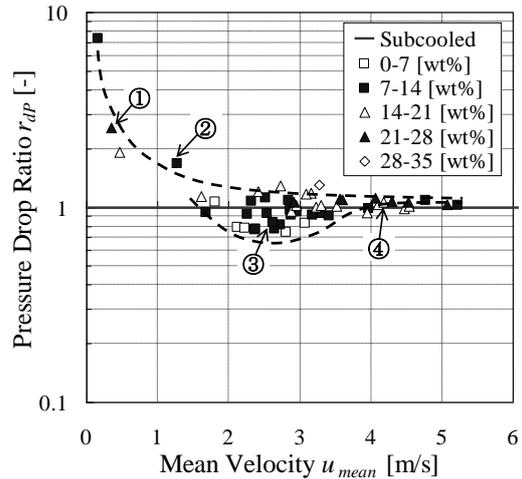


図 1 円管の平均流速と圧力損失比

速度カメラで観測した実験点で、流動パターンは①摺動流、②非均質流、③擬均質流（圧力損失低減が顕著）、④擬均質流（圧力損失低減が小）である。

図 1 より流速 1.0 m/s 以下の低流速域では、他の流速域と比較して圧力損失比が非常に大きな値となっている。流速が増加すると圧力損失比は低下し、流速 1.9 m/s 付近になると、 $r_{dp} = 1$ 、すなわちスラッシュ窒素の圧力損失は液体窒素の圧力損失と同じ値となる。固相率 14 wt% 以下の場合では流速 2.0 m/s 付近から $r_{dp} < 1$ となり圧力損失低減が現れる。流速の増加に伴って圧力損失比は減少し、流速 2.8 m/s 付近で最大 $r_{dp} = 0.75$ 程度まで減少している。この結果は、円管（15 mm）の場合、 $r_{dp} = 0.77$ まで低減する結果とほぼ一致している。さらに流速が増加すると圧力損失比は増加し始め、流速 3.5 m/s 付近で $r_{dp} = 1$ となる。流速 3.5 m/s 以上の高流速域では、流速 2.0 m/s 以下の低流速域とは異なり、流速が増加しても圧力損失比は 1.1 程度に漸近し、大きく変化しない。この現象は 15 mm 円管でも確認された。一方、固相率 14 wt% 以上では、どの流速域においても $r_{dp} > 1$ の傾向にあるが、流速の増加に伴って圧力損失比は減少し、高流速域では固相率 14 wt% 以下の場合と同様、一定値に漸近して大きく変化しない。固相率 14 wt% 以上で圧力損失低減が発現しないのは、固相率が大きいと固体粒子同士、固体粒子と管壁面、固体粒子と液体の干渉が大きくなり、低減効果が小さくなるためである。

高速度カメラで撮影した①~④の管底部壁面付近を拡大した画像から次のことが明らかとなった。①摺動流、②非均質流では、流速が小さいため、固体粒子は管下部に集中し、管上部を液体が流れている。従って、管上部ほど流速が大きい。固体粒子群は管底面に沿って、管上部を流れる液体に引きずられるように流動する。このため、固体粒子同士、固体粒子と管壁面、固体粒子と液体の干渉が

大きく、これらの干渉が原因で圧力損失比が高流速域と比較して大きくなっている。③擬均質流では圧力損失低減が発現する。管壁付近において固体粒子の少ない液体層が観察された。即ち、固体粒子が管中心方向に移動し、管壁面付近には固体粒子の少ない液体層が存在する。固体粒子が管中央部に移動し、摺動流や非均質流で顕著だった管壁での固体粒子の干渉は軽減する。同時に、管中央部に存在する固体粒子群が集団となって弾性体に似た挙動を示しながら流動する様子が観察され、管壁面で発生した液体層内の乱流を管中央部に輸送することを抑制すると共に、管壁面で発生する乱流の発達も抑制していると考えられる。その結果、液体窒素と比べてスラッシュ窒素の圧力損失が低減する。④擬均質流では、管壁面付近では固体粒子と管壁の衝突が顕著に観察された。同じ擬均質流であっても③よりも流速が大きいため、液体の乱流はより発達しており、液体の乱流増加および乱流によって引き起こされる固体粒子の干渉（固体粒子と液体、固体粒子同士、固体粒子と壁面の干渉）が圧力損失低減効果よりも卓越する結果、圧力損失比が1よりも大きくなったと考えられる。しかしながら、前述のように流速が増加しても圧力損失比は一定値に漸近している。これは管壁面で発生する乱流の増加および固体粒子の干渉と、管中央部の固体粒子群による乱流抑制効果が釣り合っているためと考えられる。

非加熱時の円管（内径 15 mm）の管摩擦係数 λ とみかけの粘性係数 μ_{SL} を用いたスラッシュレイノルズ数 Re_{SL} の関係を図 2 に示す。単相流体の Prandtl-Karman 式 (P-K 式) も示す。実線はみかけの粘性係数を使用して最小自乗法により得られた曲線であり、図中の λ の実験式で表わされる。この式と実験点の差は $\pm 20\%$ 以内である。この結果はスラッシュ窒素のみかけの粘性係数が研究代表者の提案する式で近似的に表せることを示している。また、 λ の実験式を使用することにより、任意の固相率と流速からスラッシュ窒素の管

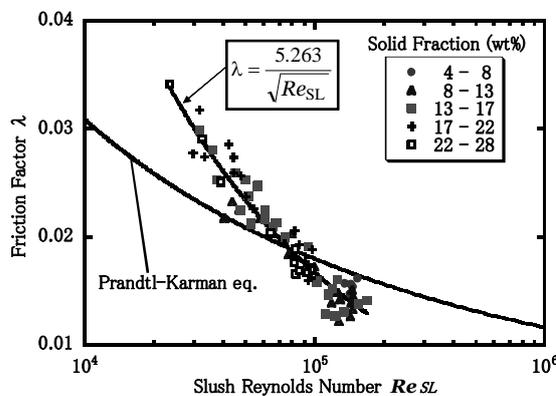


図 2 円管の管摩擦係数とスラッシュ Re 数

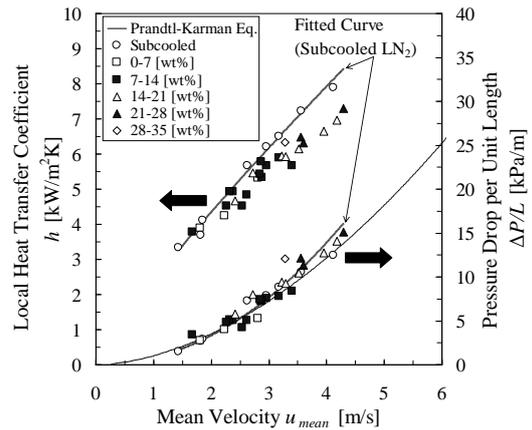


図 3 円管の平均流速と圧力損失比、熱伝達率

内流動時の圧力損失を予測することが可能となる。スラッシュ窒素を輸送する場合のポンプ動力の推定と圧力損失低減効果によるポンプ動力の低減が期待できる。

加熱時に得られた円管（10 mm）の平均流速 u_{mean} と単位長さ当たりの圧力損失 $\Delta P/L$ および熱伝達率 h の関係を図 3 に示す。熱流束は 30 kW/m^2 である。図中の太い実線は加熱時の液体窒素の圧力損失、熱伝達率に対する最小自乗近似曲線を示す。非加熱時と同様に流速 2.0 m/s 付近から、スラッシュ窒素の圧力損失が液体窒素の圧力損失よりも低減し始めている。一方、熱伝達率についても、流速 2.0 m/s 付近から液体窒素と比較してスラッシュ窒素の熱伝達率が低下し始めている。また、流速 2.0 m/s 以上では、すべての固相率において熱伝達率の低下が確認でき、圧力損失低減と熱伝達率劣化がどちらも流速 2.0 m/s 付近から発現している。この現象として、流速 2.0 m/s 付近から流れが擬均質流となり、非加熱時と同様のメカニズムにより圧力損失が低減する。すなわち管中央部の固体粒子群が、管壁面で発生した液体層内の乱流を管中央部に輸送することを抑制すると共に、管壁で発生する乱流の発達も抑制する。その結果、乱流混合による管壁面から管中心部への熱拡散が妨げられ、熱伝達率が劣化したと考えられる。熱伝達特性に関しても固体粒子の挙動が大きな影響を及ぼしている。

次に、円管（内径 10 mm）の圧力損失比 r_{dp} と熱伝達率比 r_h の関係を図 4 に示す。熱流束 30 kW/m^2 である。 r_h 、 r_{dp} は各々、スラッシュ窒素と液体窒素の圧力損失と熱伝達率の比である。他の熱流束においても、ほぼ全てのデータ点が $r_h < r_{dp}$ の領域に位置しており、全体的傾向として熱伝達率比の方が圧力損失比よりも小さい結果が得られた。特に $r_{dp} > 1$ であっても $r_h < 1$ となっている場合が多い。すなわち、圧力損失低減が現れない高流速域や高固相率時においても、スラッシュ窒

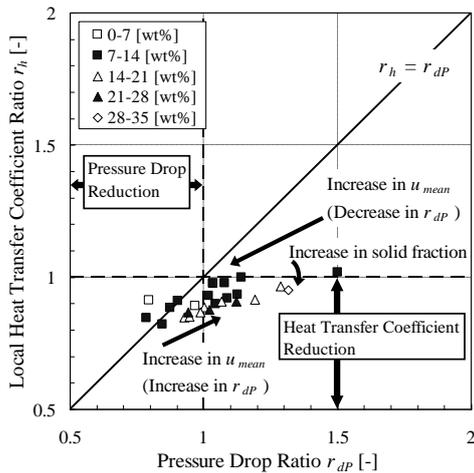


図4 円管の圧力損失比と熱伝達率比

素の熱伝達率はサブクール液体窒素と比較して低下している。(圧力損失低減は実際には出現しているが、液体窒素の圧力損失を下回る程大きくない。)

固相率の違いに着目すると、いずれの熱流束においても高固相率ほど $r_h = r_{DP}$ を表す直線からの乖離が大きくなる。つまり圧力損失比と熱伝達率比の差が大きくなる。高固相率ほど固体粒子の干渉の影響が大きくなるが、熱伝達は前述のように管壁付近の固体粒子の少ない液体層で行われており、固相率の影響は殆ど受けないと考えられる。その結果、高固相率時は低固相率時と比べ圧力損失比は大きくなる傾向にある。熱流束 30 kW/m^2 では、 10 kW/m^2 の場合と比較して、特に固相率 $7 \sim 14 \text{ wt}\%$ において $r_h = r_{DP}$ の直線に近づいていることが確認された。熱流束が大きいため、固相率が小さい場合には固体の融解により液体単相の伝熱状態に近づいたと考えられる。いずれの管内径においても圧力損失比の変化幅が熱伝達率比の変化幅よりも大きい。即ち、圧力損失比は熱伝達率比よりも流速や固相率の変化に対して敏感に変化する。

以上の結果は正方形管、正三角形管でも同様に得られた。円管の場合も含め、断面形状が異なる管についても、水力直径が小さい方が圧力損失低減および伝熱劣化はより低流速で出現し、正方形管、三角形管の低減(劣化)量は小さい結果を得た。前述のように低減効果は固体粒子が均一に分布する擬均質流で出現するため、円管と比べ正方形管、正三角形管では管内の乱流エネルギーが大きく低流速でも均質流になること、乱流増大により低減効果が抑制されることがPIV実験および後述の数値解析から明らかとなった。

(2) 収縮・拡大管の圧力損失低減

スラッシュ水素が部分開のバルブを流動する際、液体水素よりも圧力損失が低減することが米国の研究で報告されている。スラッ

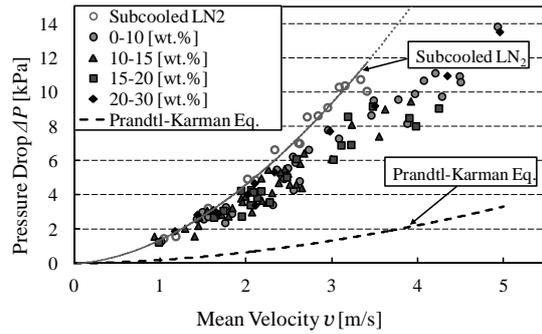


図5 収縮・拡大管の平均流速と圧力損失

シユ流体をパイプライン輸送する場合、多数使用されるバルブの圧力損失は重要となる。部分開のバルブの圧力損失低減メカニズムを明らかにするため、構造的に類似の収縮・拡大管の圧力損失実験を行った。収縮・拡大管の平均流速 v と圧力損失 ΔP の測定結果を図5に示す。図の実線は液体窒素の最小自乗近似曲線であり、点線は近似曲線の外挿を示す。スラッシュ窒素の圧力損失は、流速 1.5 m/s 付近で圧力損失低減が顕著に現れ始め、流速の増加と共に低減量は増加し、液体窒素と比較すると最大で $40 \sim 50\%$ 低減する。PIV法で測定したスロート部を通過する固体粒子の流跡線および流速分布から、圧力損失低減の要因として次のことが明らかとなった。流速の増加に伴い固体粒子は管中央部に移動し、固体粒子群がスロート部での液体の剥離を抑制する。固体粒子は液体の剥離で発生した渦(再循環)に巻き込まれず、エネルギー損失の少ない状態でスロート部を通過し、下流で液体と運動量交換を行う。その結果、液体の圧力回復が増加すると考えられる。

(3) コルゲート管の圧力損失低減

コルゲート管を流動する固液二相スラッシュ流体の圧力損失は、これまで報告されていない。ステンレス鋼の場合、室温から極低温まで冷却されると長さ 1 m の配管が 3 mm 収縮する。その結果、配管、機器に大きな応力が働き、破壊に至る恐れがある。スラッシュ流体をパイプライン輸送する際、コルゲート管の合計長さも増加することになり圧力損失特性は重要となる。コルゲート管の平均流速 v と圧力損失 $\Delta P/L$ の測定結果を図6に示す。白抜き、黒塗りのプロットが各々、コルゲート管 A (12 mm)、B (15 mm) に対応する。図には液体窒素での測定値とその最小自乗近似曲線、平滑管のP-K式、コルゲート管の単相流体のHawthorne式も示す。スラッシュ窒素の圧力損失は、流速 2 m/s 以上で圧力損失低減が現われ始め、最大で 37% 低減した。重量固相率もしくはフルード数が増加するに伴い圧力損失低減量は増加した。管摩擦係数 λ はレイノルズ数 Re の変化 ($6 \times 10^4 < Re$

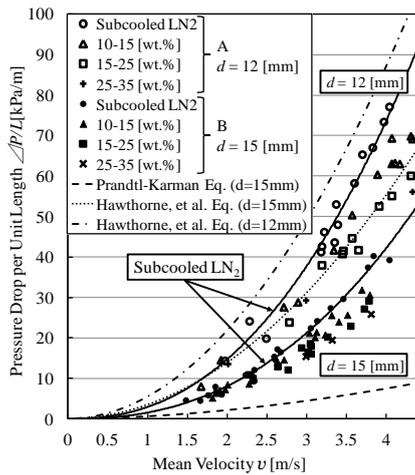
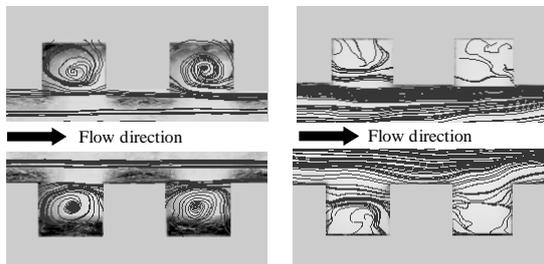


図6 コルゲート管の平均流速と圧力損失



(a)圧力損失低減無し (b)圧力損失低減有り

図7 固体窒素粒子の流跡線 (PIV法)

$< 1.7 \times 10^5$)に拘わらず、ほぼ一定値となった。

コルゲート管の圧力損失低減メカニズムを解明するために固体粒子の挙動を溝付矩形管により可視化観察を行った。図7は(a)圧力損失低減が発生していない場合と(b)低減が発生している場合のPIV測定結果である。(a)は溝内部に固体粒子の渦状の流跡線が確認されるが、(b)は溝内部に渦状の流跡線が確認されない。溝内部で液体の渦(再循環)が発生すると共に固体粒子が溝内部に取り込まれ、その結果、液体と固体粒子が運動エネルギーを損失し、圧力損失が増加すると考えられる。また、平滑管のように流速の増加に伴い、固体粒子が管中央部に移動する結果、コルゲート部付近に固体粒子の少ない液体層が存在し、コルゲート部と固体粒子の干渉が減少する。さらに、管中央部を流動する固体粒子群がコルゲート付近およびコルゲート内部に存在する液体の乱流もしくは渦の発達と管中央部への乱流拡散を抑制し、液体と固体粒子の運動エネルギー損失を低減していると考えられる。

(4) 数値解析によるスラッシュ流体の伝熱・流動特性

開発した三次元流動・伝熱解析コード(SLUSH-3D)を用いて計算した流速分布、

乱流強度、圧力損失、熱伝達係数はPIV法等によるスラッシュ窒素実験結果と定量的もしくは定性的に良い一致を示した。即ち、スラッシュ流体の流動・伝熱特性を十分な精度で解析できるコードを開発した。圧力損失低減、熱伝達劣化を解析コードで考慮することは未だ十分でなく、今後の課題である。

円管内(内径15mm)のスラッシュ窒素の入口流速 $U_{in} = 1.5 \sim 5.0$ m/sでの固相(固体粒子)の軸方向流速分布を図8に示す。固体粒子径 $d_s = 1.3$ mm、固相率13 vol.%である。横軸は軸方向流速を軸方向平均流速で規格化した値である。 $U_{in} = 1.5, 2.0$ m/sの低流速時は流路上部に流速の最大値が移動して上下非対称な流速分布(非均質流)となる。 $U_{in} = 3.0$ m/s以上の高流速時は上下対称な流速分布(擬均質流)となり、別途計算した液体窒素単相流の速度分布に近づいている。固相率が13 vol.%より大きい場合には、高流速になるほど流速分布が上下対称となる結果が得られた。この結果は、入口流速 $U_{in} = 3.6$ m/s以上で擬均質流となる実験結果と一致している。すなわち、管内の固相流速分布、固相率分布、乱流エネルギー、圧力損失はスラッシュ流体の流速、固相率、固体粒子径の影響を強く受ける。低流速、高固相率、粒子径が大きいほど、固相率は管底部で増大し、固相流速分布、固相率分布が上下非対称(非均質流)となる。一方、高流速、低固相率、粒子径が小さいほど、固相流速分布、固相率分布は上下対称(擬均質流)に近くなる。

固相率が大きい場合、固相と液相の干渉が増大し、乱流エネルギーが増大して圧力損失は大きくなる。入口流速が大きい場合、固相の存在による液相の乱流エネルギー増加は、入口流速増加に起因する液相の乱流エネルギー増加よりも相対的に小さくなり、流速増加による圧力損失増加率は小さくなる。粒子径が小さい場合($d_s = 0.5$ mm)、同一固相率では粒子数が増加するため、液相の乱流エネルギーが増加して、圧力損失および圧力損失増加率が増加する。

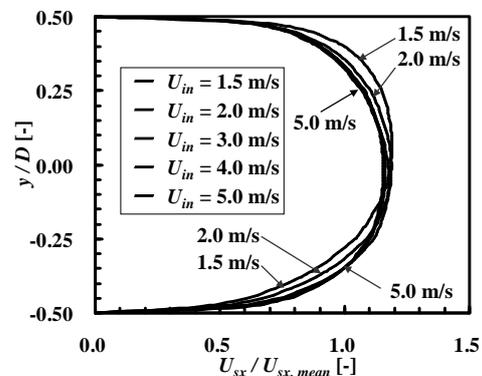


図8 入口流速変化による固相の流速分布

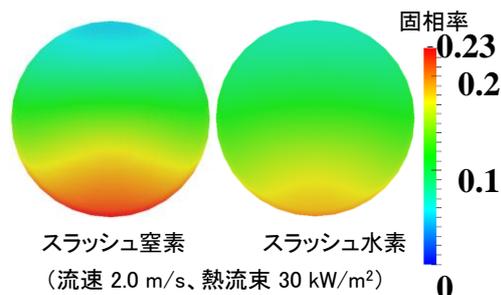


図9 円管 (15 mm) の加熱時の固相率分布

正方形管、正三角形管では液体单相流の乱流エネルギーが円管と比べて大きく、固体粒子の存在による乱流エネルギー増加の影響が相対的に小さくなる。従って、固体粒子に起因する圧力損失低減効果が円管の場合は顕著であったが、正方形管、正三角形管の場合は低減効果が相対的に小さくなると思われる。正方形管、正三角形管の場合、円管に比べ低減効果がより低流速で出現すること（前述のように低減効果は擬均質流で発生する）、低減量が小さいことが実験でも得られ、解析結果とよく一致している。

スラッシュ窒素とスラッシュ水素の伝熱・流動特性を比較した結果、水素の場合、固液密度比、液体の粘性係数が窒素よりも小さいため、スラッシュ水素はスラッシュ窒素よりも低流速において擬均質流に近くなる。これは、スラッシュ水素の圧力損失低減がスラッシュ窒素よりも低流速で出現することを示しており、本研究のスラッシュ窒素実験、米国のスラッシュ水素実験結果と一致している。また、図9に示すように（固体粒子径 $d_s = 1.3$ mm、固相率 13 vol.%）、スラッシュ水素の場合、窒素に対する水素の融解潜熱が $1/(4.82)$ と小さいため、加熱による固相の融解が低流速時に顕著となる。

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 47 件）

- ① K. Ohira, A. Ota, Y. Mukai, T. Hosono
Numerical Study of Flow and Heat-transfer Characteristics of Cryogenic Slush Fluid in a Horizontal Circular Pipe (SLUSH-3D), *Cryogenics* Vol. 52, 2012, 査読有（印刷中）
- ② 大平勝秀、奥山惇、中込圭、高橋幸一、収縮・拡大管およびコルゲート管を流動するスラッシュ窒素の圧力損失低減、低温工学、47 巻、2012、pp. 240-250. 査読有
- ③ K. Ohira, K. Nakagomi, N. Takahashi, Pressure-drop Reduction and Heat-transfer Deterioration of Slush Nitrogen in Horizontal Pipe Flow, *Cryogenics*, Vol. 51, 2011, pp.

563-574. 査読有

- ④ K. Ohira, Pressure-drop Reduction Phenomenon of Slush Nitrogen Flow in a Horizontal Pipe, *Cryogenics*, Vol. 51, 2011, pp. 389-396. 査読有
- ⑤ K. Ohira, Y. Mukai, A. Ota, Numerical Study of Slush Nitrogen Flow in a Horizontal Pipe. Proceedings of the Twenty-Third International Cryogenic Engineering Conference, 2011, pp. 275-280. 査読有
- ⑥ K. Ohira, Development of a High-Efficiency Hydrogen Transportation and Storage System using Slush Hydrogen. Proceedings of the Twenty-Third International Cryogenic Engineering Conference, 2011, pp. 269-274. 査読有

〔学会発表〕（計 14 件）

- ① 大平勝秀、水平管内を流動するスラッシュ窒素の圧力損失低減現象、第 85 回 2011 年度秋季低温工学・超電導学会（招待講演）、2011.11.10、金沢歌劇座（石川県）
- ② K. Ohira, Numerical Study of Slush Nitrogen Flow in a Horizontal Pipe, International Cryogenic Engineering Conference 23, 2010.7.21, Wroclaw (Poland)
- ③ K. Ohira, Development of a High-efficiency Hydrogen Transportation and Storage System using Slush Hydrogen, International Cryogenic Engineering Conference 23, 2010.7.21, Wroclaw (Poland)
- ④ K. Ohira, Development of a High-efficient Hydrogen Energy System using Slush Hydrogen, Asian Conference 2009 on Applied Superconductivity and Cryogenics, (Invited Lecture), 2009.12.8, Matsue (Japan)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大平 勝秀 (OHIRA KATSUhide)
東北大学・流体科学研究所・教授
研究者番号：30375117

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

石本 淳 (ISHIMOTO JUN)
東北大学・流体科学研究所・准教授
研究者番号：10282005
野澤 正和 (NOZAWA MASAKAZU)
秋田工業高等専門学校・機械工学科・講師
研究者番号：60447183