

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：32601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14913

研究課題名(和文)低温域における加熱媒体としての氷スラリーの凝固挙動および凝固熱伝達特性の解明

研究課題名(英文) Elucidation of solidification behavior and solidification heat transfer characteristics of an ice slurry as a heating medium in the low temperature range

研究代表者

森本 崇志 (Morimoto, Takashi)

青山学院大学・理工学部・助手

研究者番号：30803259

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高効率な加熱媒体としての利用が期待される氷スラリーを対象とし、伝熱特性および凍結挙動について実験的に検討をおこなった。実験結果より、氷スラリーは加熱された場合のみならず冷却された場合においても、熱交換性能に優れることが明らかとなった。一方、伝熱阻害の因子となる凍結層の成長を促すことも明らかとなったため、氷スラリーを加熱媒体として用いるには凍結層の生成あるいは成長を抑制する必要がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで明らかにされていなかった、固液二相流における凍結層の成長に及ぼす分散質の影響を明らかにすることができた。これは今後、固液二相流の凍結現象を扱う上で重要な知見となる。また、氷スラリーを冷却した場合における伝熱特性を定量的に明らかにし、水等の単相流体と比べて熱伝達性能に優れることを確認した。これにより、氷スラリーを加熱用媒体として応用することの優位性を示すことができたため、氷スラリーの応用分野の拡大が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, the heat transfer characteristics and freezing behavior of ice slurries, which are expected to be used as a highly efficient heating medium were investigated experimentally. From the experimental results, it was found that the ice slurry has excellent heat exchange performance not only when it is heated but also when it is cooled. On the other hand, it was also found that ice slurries promote the growth of the frozen layer, which is a factor of heat transfer inhibition. Therefore, in order to use the ice slurry as a heating medium, it is necessary to suppress the formation or growth of the frozen layer.

研究分野：熱工学

キーワード：氷スラリー 凝固 凍結 熱伝達 固液二相流 ステファン解

1. 研究開始当初の背景

本研究で対象とした氷スラリーは、微細な氷と液体の固液二相混合物である。ここで、固液二相混合物とは、水溶液から生成された固相と水溶液が固液相平衡の状態にあるような物体を指している。氷スラリーは氷粒子の潜熱を利用した高い蓄熱能力、高い流動性および冷却能力を有していることに加え、エタノール水溶液や塩水といった比較的安価で安全な原料から生成可能なことから、鮮魚・野菜輸送、食品加工、医療分野といった幅広い分野で活用され、省エネ効果等を含め様々な優位性が示されている。

従来、氷スラリーは上述したような特徴から、主に物質の高速冷却に用いられてきた。しかし近年、氷スラリーの高い熱交換性能と、氷スラリーの温度が固液相平衡温度（塩化ナトリウム水溶液濃度が 5 wt% の場合、約 -3 °C）に保たれるという特徴から、氷スラリーを物体の加熱に用いるという試みがなされている。具体的には食品の解凍が挙げられ、氷スラリーを用いることで迅速に解凍を行いながらも、スラリーの固液相平衡温度以上に加熱されることはないため、食品の組織液の流出の少ない解凍等が望める。氷スラリーを加熱用媒体として用いる場合には、冷却面への氷スラリーの固着が懸念される。このため、冷却面への固着等への問題に対する策を講じるためにも、氷スラリーを冷却した場合における、氷スラリーの凍結挙動の把握が不可欠となる。また、氷スラリーを加熱媒体として用いた場合においても、氷スラリーが熱交換性能に優れていることを実験的に明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

氷スラリーを用いて物体の加熱を行う場合、氷スラリーは冷却されることとなり、液相の凝固が進行する。しかしながら、氷スラリーにおける液相の凝固を伴った熱伝達を取り扱った例は今までになく、凝固過程および液相の凝固を伴う熱伝達特性は明らかとなっていない。氷スラリーは寒冷地等での利用において、外部から冷却されることによる管路閉塞等が報告されているため、氷スラリーの凍結挙動を明らかにすることは、氷スラリーの凍結防止策等を講じる上での基礎的な知見となる。また、氷スラリーは物体の冷却において高い熱交換性能が示されているが、物体を加熱する場合の熱交換性能については定量的に明らかになっておらず、加熱媒体としての優位性を示すためには、氷スラリーを加熱媒体として用いた場合における熱交換性能を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、氷スラリーを冷却した場合における、凍結層成長メカニズムの解明および液相の凝固を伴った場合の伝熱速度を定量的に明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 氷スラリーの凍結挙動の解明には図 1 に示す矩形流路を用いた。矩形流路は下部に冷却面となる銅板を設置しており、銅板を噴射冷却することで矩形流路を流れる氷スラリーの冷却を行った。矩形流路は冷却面を除いてアクリルで構成されており、ビデオカメラによる観察が可能となっている。氷スラリーが冷却されることで、銅板から成長する氷の様子を偏光板を介してビデオカメラで撮影することにより、凍結層の成長挙動を検討した。氷スラリー中の氷の体積割合、氷スラリーの流速、銅板と氷スラリーの温度差を変更しながら実験を行い、これらの因子が凍結層の成長挙動に及ぼす影響について検討した。

(2) 氷スラリーを冷却した場合における、伝熱特性の解明には図 2 に示す二重管型の熱交換器を用いた。氷スラリー生成タンクにて生成した氷スラリーを内管に流動させ、外管に所定の温度に保持したブラインを循環させることで、氷スラリーを冷却することが可能となっている。内管には冷却開始点から 100 mm 間隔で T 型熱電対が埋め込まれており、氷スラリー冷却中の壁面温度を計測することで、熱伝達係数の算出が可能となっている。配管には差圧計を取り付けてあり、圧力損失の履歴から、氷スラリーの凍結による管路閉塞の有無を判断した。

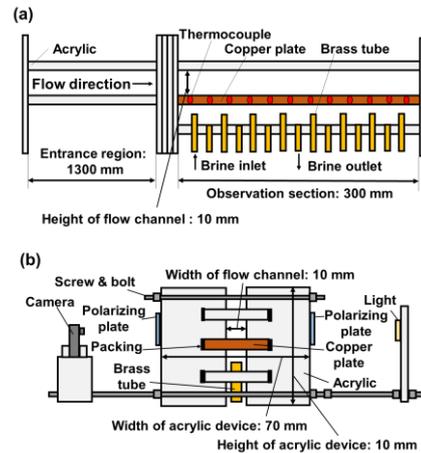


図 1 矩形流路の概略図

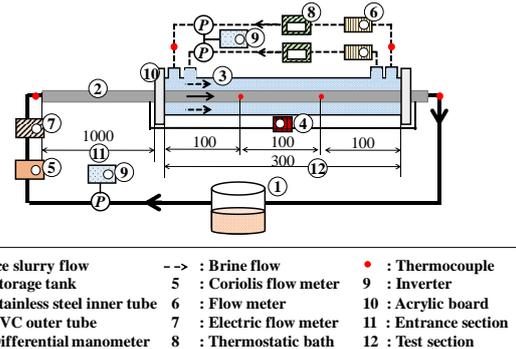


図 2 二重管型熱交換器の概略図

4. 研究成果

(1) 図3にエタノール水溶液（水溶液濃度 5 wt%）および氷スラリーを冷却した時の初期凍結挙動を示す。なお、エタノール水溶液は水溶液濃度 5 wt%における凝固点に保持した状態で流動させている。図中の黒色部はパッキンであり、図中の Flowing part にエタノール水溶液または氷スラリーが流動している。図1(a)がエタノール水溶液の冷却初期に生成された凍結層の様子であるが、樹枝状の氷の生成が確認された。一方、図1(b)に示すように、氷スラリーの冷却初期に生成された凍結層では、樹枝状の氷の生成は確認されなかった。これはエタノール水溶液を冷却した場合に形成される過冷却層に比べて、氷スラリーにはごくわずかな領域にのみ過冷却層が形成されるためだと考えられる。

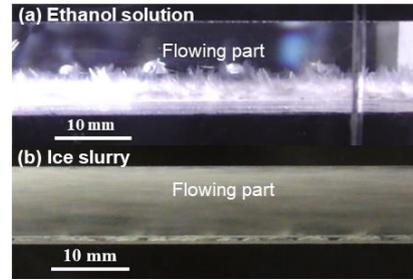


図3 初期凍結挙動

(2) 図4に氷スラリーに形成された凍結層の成長過程の観察結果を示す。凍結層は冷却面を全体を覆うように生成した後、ほぼ均一に時間と共に成長していくことが確認された。図中には 800 s までの凍結層の成長過程を示しているが、凍結層は矩形流路のほぼ上端部まで成長した。

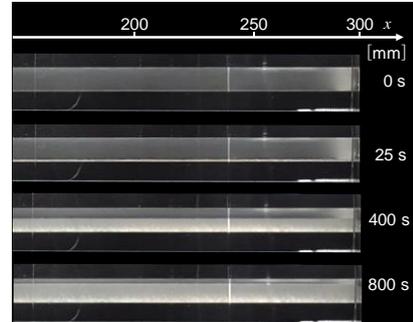


図4 凍結層の成長過程

(3) 図4で得られた時間と凍結層厚さの関係について、1次元凍結問題の近似解として知られるステファン解との比較を行った。図5に実験より得られた凍結層厚さを近似解の値で除した凍結層厚さの比と、無次元時間の関係を示す。ここで、凍結層厚さは冷却開始点から 150 mm の位置における値を使用し、無次元時間は、凍結層が 8 mm 成長するまでの時間と、各凍結層厚さに到達するまでの時間の比を表している。図5より、5 wt%エタノール水溶液を冷却した場合における凍結層厚さの比が 1 となっていることから、本実験で使用した装置および実験条件において、凍結層の成長を、ステファン解を適用できるような1次元凍結問題と考えても妥当であることが示唆された。一方、氷スラリーの場合は、凍結層厚さの比が有意に 1 よりも大きくなることが確認された。しかし、氷粒子の体積割合による違いはほとんど確認できなかったことから、氷粒子の体積割合が凍結層の成長に及ぼす影響は限定的であることがわかった。氷スラリーを冷却した場合において、凍結層がより早く成長する要因について検討するため、高速度カメラを用いて、凍結層付近の氷粒子の挙動を観察した。

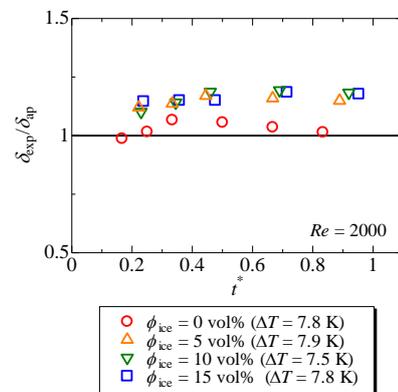


図5 凍結層厚さの比と無次元時間の関係

(4) 図6に高速度カメラを用いて凍結層付近を流れる氷スラリーを撮影した結果を示す。図6の(a), (b)の時間間隔は 0.015 s である。図より、氷スラリー中の氷粒子が凍結層へ付着する様子が確認された。付着した粒子が流れによって剥離される様子も確認されたが、付着した粒子のほとんどは凍結層の成長とともに取り込まれる様子が確認できた。このため、氷スラリーを冷却した場合において、凍結層の成長が早くなる要因として、氷粒子の付着および取り込みが考えられる。

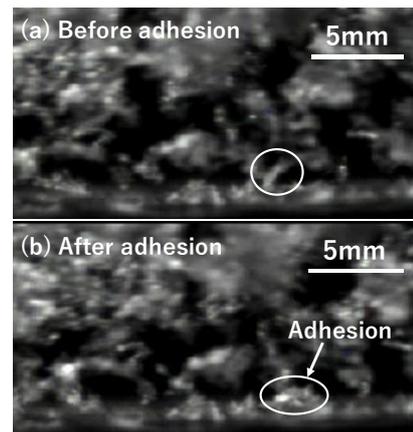


図6 氷粒子の付着前後の様子

(5) 次項図7,8に凍結層厚さの比に及ぼすレイノルズ数と氷スラリーと銅板温度差の影響について検討した結果を示す。図7より、レイノルズ数 400 の場合と比較し、レイノルズ数 2000 の場合に凍結層の成長初期段階において凍結層の成長が比較的遅くなることが確認された。これは、高速度カメラを用いた氷粒子の挙動観察時に付着した氷粒子がはがれる挙動が確認されたことから、レイノルズ数が増大した場合において、剥離の影響が比較的大きくなったためだと考えられる。また、図8より、氷スラリーと銅板の温度差が大きな場合に、ステファン解と比較した凍結層の成長速度が比較的早くなることが確認された。これは、温度差が大きな場合に凍結層の成長速度が速くなるため、付着した氷粒子が剥離する前に凍結層内へ取り込まれるためだと考えられる。

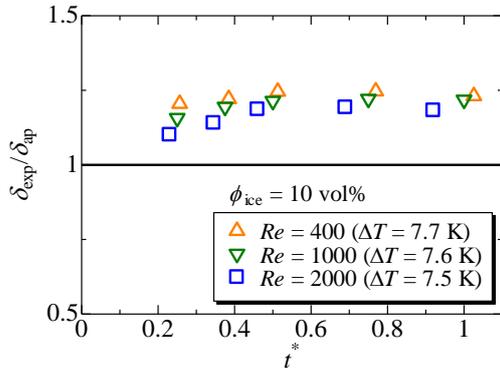


図7 凍結層厚さの比に及ぼす
レイノルズ数の影響

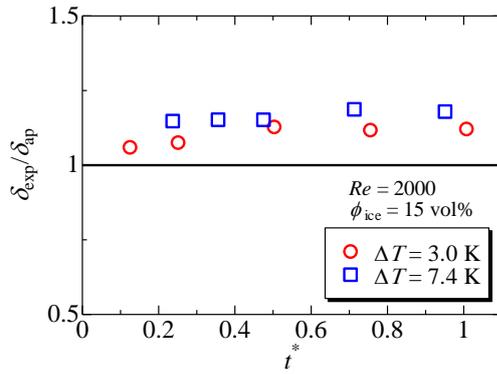


図8 凍結層厚さの比に及ぼす
温度差の影響

(6) 二重管型熱交換器を用いて氷スラリーを冷却した場合における伝熱特性を検討する際、条件によっては管路閉塞が発生することが明らかとなった。このため、実験中の圧力損失および体積流量の変化から管路閉塞の有無について検討を行った。図9は、ブラインと氷スラリーの温度差を変化させた場合における管路閉塞の有無を、実験中のレイノルズ数と氷の体積割合で整理した結果を示している。氷スラリーを冷却し始めてから200秒間の間に体積流量の低下または圧力損失の増加が確認された場合に、管路閉塞ありとした。図9より、温度差が比較的大きな場合に、氷の体積割合が5 vol%付近であると管路閉塞を引き起こしやすいことがわかった。図5において氷の体積割合の違いによる凍結層成長過程の顕著な違いは確認できなかったが、円管を用いた氷スラリーの凍結実験の先行研究[1]でも同様の傾向が確認されていることから、円管の場合には氷の体積割合が凍結層の剥離等に何かしらの影響を与えていることが考えられる。管路閉塞が生じた場合には、伝熱特性を正確に検討できないことから、管路閉塞が確認されなかった条件において、伝熱特性を評価した。

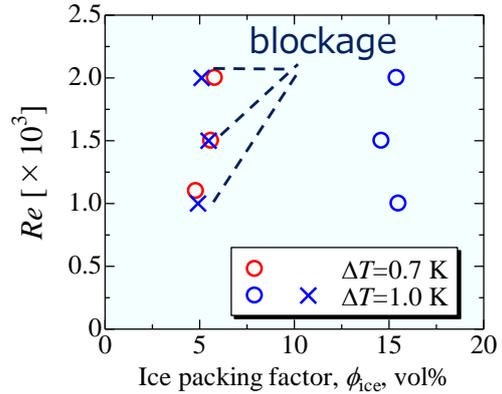


図9 管路閉塞マップ

(7) 図10に氷スラリーを冷却した場合における、ヌセルト数と無次元距離の関係を示す。ヌセルト数は、等温条件・温度助走区間円管内層流における熱伝達の経験式と比較を行った。実験より得られたヌセルト数、無次元距離の定義、経験式はそれぞれ式(1)~(3)に示す通りである。

$$Nu_{exp} = \frac{hd}{k} \quad (1)$$

$$x^* = \frac{xk}{\rho cud} \quad (2)$$

$$Nu_{emp} = 5.357 \left[1 + \left(388x^* / \pi \right)^{-8/9} \right]^{3/8} - 1.7 \quad (3)$$

ここで、 h ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)は熱伝達係数、 d (m)は管内径、 x (m)は冷却開始点からの距離、 k ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)は熱伝導率、 ρ ($kg \cdot m^{-3}$)は密度、 c ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)は比熱、 u ($m \cdot s^{-1}$)は平均流速である。

図10より、氷スラリーを冷却した場合におけるヌセルト数は経験式の値よりも有意に大きくなることがわかった。このため、氷スラリーを加熱用媒体

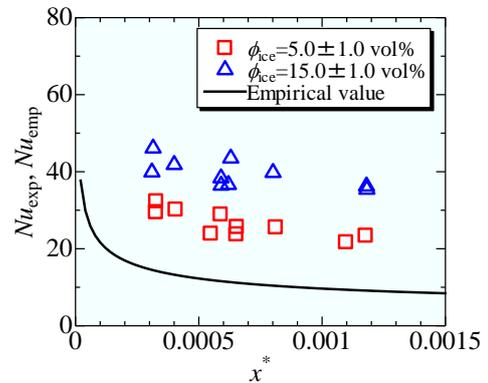


図10 ヌセルト数と無次元距離の
関係 (冷却条件)

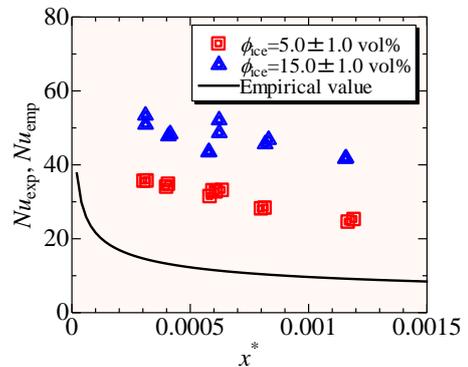


図11 ヌセルト数と無次元距離の
関係 (加熱条件)

として用いた場合に伝熱促進効果が得られることが明らかとなった。また、氷の体積割合の増加と共に、ヌセルト数も増加することがわかった。

(8) 前ページ図 11 に、同実験装置を用いて氷スラリーを加熱した場合におけるヌセルト数と無次元距離の関係を示す。図 11 より、冷却条件の場合同様、氷スラリーのヌセルト数は経験式の値よりも有意に大きくなることがわかった。また、氷の体積分率の増加と共にヌセルト数比が増加する傾向も同様であった。図 12 に冷却・加熱条件それぞれの場合における氷スラリーのヌセルト数比と無次元距離の関係を示す。ヌセルト数比は実験より得られたヌセルト数をヌセルト数の経験式で除すことで算出した。図より、ヌセルト数比は加熱条件の場合に冷却条件の場合よりも比較的大きくなることがわかった。これは伝熱促進メカニズムが冷却・加熱条件それぞれで異なることが要因として考えられる。加熱条件においては、氷粒子が融解することによる潜熱吸収効果により、壁面温度の上昇が抑制され、伝熱が促進される[2]。一方、冷却条件においては、氷スラリーが冷却されることとなるため、液相の凝固により、壁面温度の低下が抑制されていることが考えられる。以上のような伝熱促進メカニズムの違いから冷却条件および加熱条件での伝熱促進効果に違いが生じたことが考えられる。

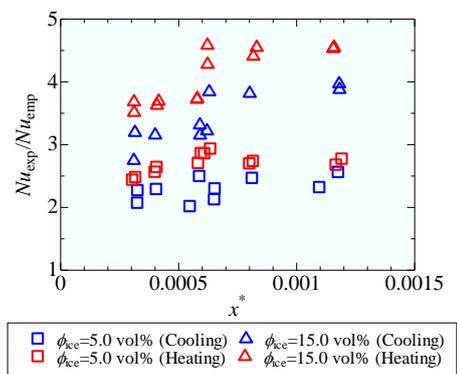


図 12 ヌセルト数比と無次元距離の関係 (冷却・加熱条件の比較)

(9) 以上の検討から、氷スラリーが冷却され、凍結層が成長する場合には、氷粒子の取り込みの影響によりその成長速度は単相流体が凍結する場合よりも早くなることがわかった。熱抵抗となる凍結層の成長速度が早いことは、氷スラリーを加熱媒体として用いる際のデメリットとなる。しかし、矩形流路を用いた実験により、氷スラリーの流動速度を増加させることで、成長速度が緩やかになること、円管を用いた実験より、氷スラリーの氷の体積割合を増加させることで、管路閉塞を抑制できることが確認できた。今後はこれに加えて、凍結層の成長自体を阻害するような方法を考案する必要がある。

(10) 氷スラリーを加熱媒体として用いた場合の伝熱特性についての検討から、氷スラリーを冷却した場合においても伝熱促進効果が得られることが確認できた。このため、氷スラリーは凍結層成長の問題を克服することができれば、加熱媒体として用いることの優位性を有していると言える。

[1] H. Kumano, A. Mizui and N. Higashi, Flow characteristics of ice slurry in a horizontal tube during solidification, International Journal of Refrigeration, Vol. 85, 2018, 184-190.

[2] C.L. Onokoko, N. Galanis, S. Poncet and M. Poirier, Heat transfer of ice slurry flows in a horizontal pipe: A numerical study, International Journal of Thermal Science, Vol. 142, 2019, 54-67.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 加藤諒, 森本崇志, 熊野寛之	4. 巻 36
2. 論文標題 矩形管内を流れるアイスラリーの凍結挙動の観察	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本冷凍空調学会論文集	6. 最初と最後の頁 303,314
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 加藤諒, 森本崇志, 熊野寛之
2. 発表標題 矩形管内を流れるアイスラリーの凝固挙動の観察
3. 学会等名 日本56回伝熱シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森本崇志, 小黑真, 熊野寛之
2. 発表標題 円管内におけるアイスラリーの凝固熱伝達特性
3. 学会等名 2020年度日本冷凍空調学会年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------