

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360319

研究課題名(和文) ナノ微粒子懸濁による潜熱輸送スラリーの伝熱・晶析制御

研究課題名(英文) Heat Transfer and Solidification Control of Latent Heat Transportation Slurries by Nano-Particle Addition

研究代表者

鈴木 洋 (Suzuki, Hiroshi)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90206524

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,400,000円

研究成果の概要(和文)：界面活性剤を添加し流動特性を改善した高温系潜熱輸送媒体である無機水和物スラリーの伝熱特性改善および管閉塞抑制を目的として、ナノ微粒子を添加することによる流体の熱伝導度向上と結晶化促進効果の検討を行った。その結果、ナノ微粒子は無機水和物溶液内で凝集し、熱伝導度の向上および伝熱特性改善効果は現れなかった。一方で著しい過冷却解消効果が現れ、さらにナノ微粒子が結晶核となり、壁近傍でのみの結晶化が抑制され、管閉塞抑制効果があることが確認された。さらに潜熱輸送スラリーの伝熱特性の管径効果を記述するモデルの開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate the effects of nano-particles on improving the heat transfer characteristics and on preventing the pipe blockage for the drag-reduced hydrate slurries, the measurements of the thermal conductivity and the heat transfer coefficients and of the super-cooling degree and the solidification distribution in a pipe have been performed. From the results, it was found that the agglomeration of nano-particles occurs in the inorganic solutions. Then, the enhancement of thermal conductivity was not observed. On the other hand, the addition of nano-particles caused the super-cooling depression. Thus, the solidification near the center of the pipe was observed. From this, it was concluded that the nano-particle addition is not effective for the heat transfer enhancement but is effective for preventing the pipe blockage. Additionally, the pipe-size effect on the heat transfer characteristics of the latent heat transportation was established in the study.

研究分野：化学工学

キーワード：流動 伝熱 潜熱輸送 晶析

1. 研究開始当初の背景

40℃程度の温熱を高密度で輸送すること可能な無機水和物微粒子を懸濁させたスラリーが、未利用熱の民生における高度利用に関して注目を集めている。一方、これらの無機水和物は凝集性が強く、かつ粘度が高いため、流動性に問題があった。そこで申請者は、界面活性剤系の流動抵抗低減および凝集抑制を実現する添加剤の策定を行い、有効性を示した。しかしながら、この添加剤を用いた場合、伝熱特性が低下することが同時に明らかとなった。さらに温熱輸送を想定した場合、固体析出時の管路閉塞問題（ファウリング問題）が生ずる。

これらを解決する方法として、ナノ微粒子を懸濁する手法が考えられる。ナノ微粒子を懸濁した溶液はナノフルィッドと呼ばれ、熱伝導度が理論調平均値より増加することが報告されている。また適切な結晶系を有するナノ微粒子は結晶核となり、壁近傍以外の流動位置において、潜熱保有微粒子の結晶化が生ずる可能性がある。このことはファウリング防止策になると期待される。

2. 研究の目的

本研究では、ナノ微粒子の懸濁による高温系潜熱輸送システムの伝熱向上および壁ファウリング抑制実現に向けた基礎研究を行うことを目的とした。ナノ微粒子の懸濁による熱伝導度の向上特性および結晶化特性を明らかにし、高伝熱特性および低ファウリング性を有する画期的省エネルギーをもたらす潜熱輸送システムを構築する。

3. 研究の方法

3-1. 試料 相変化物質として、無機水和物であるリン酸水素2ナトリウム12水和物を選択した。抵抗低減材としては塩化オレイルビスヒドロキシエチルメチルアンモニウム2.000ppmにサリチル酸ナトリウムを1.5のモル比で添加したものをを用いた。ナノ微粒子には、リン酸水素2ナトリウム水和物と同型の結晶を有するシリカ粒子(平均粒子径40nm)を用いた。

試料の組み合わせは以下の4種類とした。

- I 界面活性剤無し、ナノ粒子なし
- II 界面活性剤有り、ナノ粒子なし
- III 界面活性剤無し、ナノ粒子有り
- IV 界面活性剤有り、ナノ粒子有り

3-2. 実験方法 熱伝導度測定には非定常加熱法を用いた。結晶化特性を測定するために、示差走査熱量計を用いて、過冷却度を測定した。また微粒子の凝集状態を確認するために、動的散乱計を用いた。伝熱実験には内径13mm(管長2m)の二重円筒式伝熱管を有する回遊式流路を用いた。熔融状態で試験流路に溶液を流入させ、二重円筒外筒を冷却して凝固伝熱を得た。また試験流路下流にトモグラフィを設置し、流動管内固体分布を求め、管内結晶化特性を評価した。

4. 研究成果

4-1. 過冷却特性 Fig.1に示差走査熱量測定の結果を示す。昇温条件では試料IおよびIIIともに21.1℃で相転移し、それぞれ吸熱量81.8および71.9kJ/kgであった。一方降温条件ではナノ粒子を添加した試料IIIは19.2℃で相転移し、75.9kJ/kgの発熱を示したが、ナノ粒子を添加していない試料Iでは、ピークは現れなかった。すなわち本試料は過冷却度が非常に大きい試料である。ナノ粒子を添加することで、過冷却度が1.9Kと非常に減少している。すなわちナノ粒子添加はリン酸水素2ナトリウム12水和物の過冷却抑制に効果的であることがわかった。

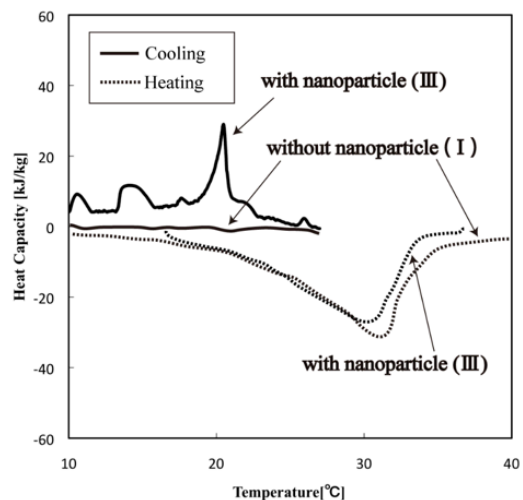


Fig. 1 DSC Curves of I, III

4-2. 熱伝導度特性 Fig.2にナノ粒子体積割合に対する熱伝導度を示す。横軸には同時にナノ粒子の重量割合を示す。また界面活性剤を添加した場合のナノ粒子重量割合が0(試料II)および1wt%(試料IV)の場合の結果も同時に示す。図の直線と破線は、水およびリン酸水素2ナトリウム溶液の調和平均値を示す。図より水にナノ微粒子を添加した場合、その固体体積割合が上昇するにしたがっておおそ増加している。しかしながら調和平均値と比べるとその増加割合は最大3%程度と大きくはない。一方リン酸水素2ナトリウム溶液においては固体体積割合が0.019までは増加するが、その後低下する。またすべての場合で調和平均程度の値を示している。すなわち、本溶液の熱伝導度向上に関しては、ナノ微粒子添加は有効ではないことが明らかとなった。

この結果を考察するために、Table 3に動的散乱計で測定したナノ粒子重量割合に対する粒子径を示す。この結果から溶液中では高濃度のナノ粒子割合においてはナノ粒子が凝集していることがわかる。このことにより、溶液の熱伝導度の上昇が生じないものと思われる。

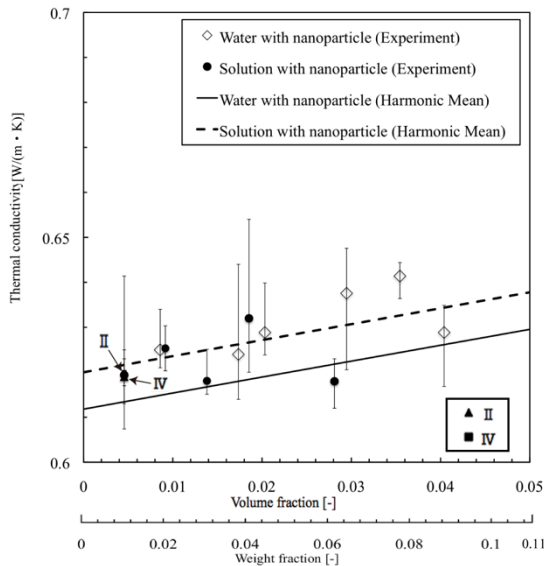


Fig. 2 Effects of Nano-particles on Thermal conductivities

Table. 3 Particle size of Samples

重量分率[wt%]	1	3	6
Water[nm]	10.1	14.1	8.97
Solution[nm]	30.1	821	1150

4-3. 伝熱特性 Fig.3 に試料 I, II, III および IV のヌッセルト数 $Nu[-]$ を示す. また図には粒子の存在しない溶液の値を示す Dittus-Boelter の式を実線で示す. また, 横軸には溶液基準のレイノルズ数 $Re_s[-]$ をとった.

図より, 界面活性剤を添加しない場合(試料 I および III)のヌッセルト数は, いずれも相変化が生ずるスラリーの方が溶液より高い値を示している. しかしながらナノ粒子の有無に関する差異は認められない. 界面活性剤を添加した場合(試料 II および IV)のヌッセルト数は, 同様にスラリーの方が溶液より高い値を示しているのが, 界面活性剤を添加しない場合のそれぞれに対して低い値を示す. これは抵抗低減化界面活性剤の伝熱低減現象である. また, スラリーの結果にはナノ粒子添加による影響は見られない. 一方詳細に見ると溶液の場合には Re_s が 10,000 においてナノ粒子を添加しない場合には伝熱低減効果が解消されているのに対し, 添加した場合にはさらに高レイノルズ数域においても伝熱低減が持続している. このことはナノ粒子と界面活性剤の複合構造が存在示差され, 興味深い.

4-4. 管内結晶化特性 流動管内の固体粒子分布を求め, 管内結晶化特性を評価した. Fig.4 にトモグラフィーで求めた管内分布を示す. 図は $Re_s=7,000$ の場合であり, 図中赤色部が固体濃度が高い位置を, 青色部が固体濃度が低い位置を示す. また試料 I および試料 II の結果のみ示す.

図より, ナノ粒子が存在しない試料 I の

結果では, 管底部にリン酸水素 2 ナトリウム水和物が定在しており, 壁面近傍でのみ結晶化が生じたことを示差している. 一方で, ナノ微粒子を添加した試料 II の場合には, 粒子が管内に広く分布している. このことから伝熱壁面近傍以外で結晶化が生じたものと思われる. したがって, ナノ微粒子添加は, 壁面近傍でのみの結晶化を抑制し, 管閉塞防止に有効であると結論される.

本研究ではその他に相変化物質を内包する伝熱モデルの構築に成功し, 学会等で公表している.

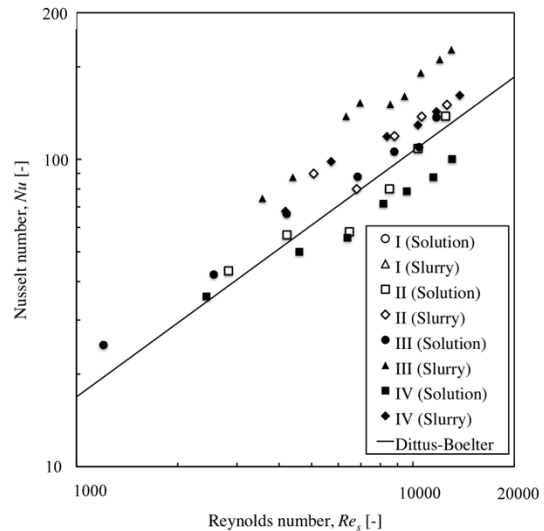


Fig. 3 Effects of Nano-particles on Nusselt number

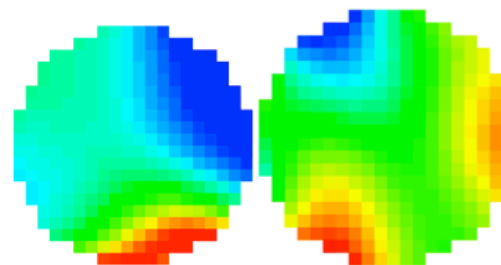


Fig.4 Concentration Contours of Hydrates ($Re_s = 7,000$)

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 4 件)

1. Ruri HIDEMA, Hiroshi SUZUKI, Takuya TANO and Yoshiyuki KOMODA, "Flow and Heat Transfer Characteristics of Ammonium Alum Hydrate Slurries with Surfactants as Drag-Reducers and with Polyvinyl Alcohol as Stabilizers", International Heat Transfer Conference 15, 査読有, (2014), DOI:

- 10.1615/IHTC15.fcv.009469, 14 pages
2. Takafumi TOYODA, Ruri HIDEWA, Hiroshi SUZUKI and Yoshiyuki KOMODA, “Crystal Growth and Viscosity Behaviors of Ammonium Alum Hydrate Solution with PVA in Shear Flow”, Nihon Reoroji Gakkaiishi, 査読有, Vol. 42, No. 4 (2014), pp.219-226.
 3. Ruri HIDEWA, Takuya TANO, Hiroshi SUZUKI, Makoto FUJII, Yoshiyuki KOMODA, Takafumi TOYODA, “Phase Separation Characteristics of Ammonium Alum Hydrates with Poly Vinyl Alcohol”, Journal of Chemical Engineering of Japan, 査読有, Vol. 47, No. 2, (2014), pp.169-174.
 4. Hiroshi SUZUKI, Takanori KONAKA, Yoshiyuki KOMODA and Toru ISHUGAMI, “Flow and Heat Transfer Characteristics of Ammonium Alum Hydrate Slurries”, International Journal of Refrigeration, 査読有, Vol. 36, Issue 1, (2013), pp.81-87.

[学会発表] (計20件)

1. 田中孝二, 鈴木洋, 日出間るり, 菰田悦之, ナノ微粒子懸濁による潜熱輸送スラリーの伝熱促進効果, 第4回潜熱工学シンポジウム, 2014.12.12, 東京工業大学(東京)
2. 佐藤秀紀, 日出間るり, 鈴木洋, 菰田悦之, ポリビニルアルコールと界面活性剤の添加による沈降抑制効果に関する研究, 第4回潜熱工学シンポジウム, 2014.12.12, 東京工業大学(東京)
3. Hiroshi SUZUKI, Koji TANAKA, Ruri HIDEWA and Yoshiyuki KOMODA, Size Effect Model on Flow and Heat Transfer Characteristics of Ammonium Alum Hydrate Slurries Treated with Surfactants, AIChE Annual Meeting 2014, 2014.11.16, Hilton Hotel Atlanta, Atlanta, USA
4. 鈴木洋, 潜熱輸送スラリーによる革新的省エネルギーの構築(招待講演), 日本ゴム協会東海支部月例講演会, 2014.10.22, 刈谷市産業振興センター(愛知)
5. 鈴木洋, 田中孝二, 日出間るり, 菰田悦之, 界面活性剤を添加した潜熱輸送スラリーの流動・伝熱に関するサイズ効果モデル, 化学工学会第46回秋季大会, 2014.9.17, 福岡
6. Ruri HIDEWA, Hiroshi SUZUKI, Takuya TANO, Yoshiyuki KOMODA, Flow and Heat Transfer Characteristics of Ammonium Alum Hydrate Slurries with Surfactants as Drag-Reducers and with Polyvinyl Alcohol as Stabilizers

- 15th International Heat Transfer Conference, 2014.8.15, Kyoto International Convention Center, Kyoto, Japan.
7. 日出間るり, 鈴木洋, 田野拓也, 菰田悦之, 界面活性剤および安定剤を添加したアンモニウムミョウバン水和物スラリーの流動伝熱特性, 第51回日本伝熱シンポジウム, 2014.5.23, アクティ浜松コンgresセンター(静岡)
 8. 田野拓也, 日出間るり, 鈴木洋, 菰田悦之, 界面活性剤と安定剤を添加したアンモニウムミョウバン水和物スラリーの沈降・流動・伝熱特性, 第3回潜熱工学シンポジウム, 2013.11.26, 神戸大学(兵庫)
 9. 豊田貴史, 日出間るり, 鈴木洋, 菰田悦之, せん断流動下におけるアンモニウムミョウバン水和物の結晶成長へのPVAの影響, 第3回潜熱工学シンポジウム, 2013.11.26, 神戸大学(兵庫)
 10. Koji TANAKA, Takuya TANO, Hiroshi SUZUKI, Ruri HIDEWA, Yoshiyuki KOMODA, Pipe Size Effects on Flow and Heat Transfer of Ammonia Alum Hydrate Slurries Treated with Surfactants, 9th World Congress of Chemical Engineering, 2013.8.18, COEX, Seoul, Korea
 11. Hiroshi SUZUKI, Takuya TANO, Koji TANAKA, Ruri HIDEWA, Yoshiyuki KOMODA and Takafumi TOYODA, Flow and Heat Transfer Characteristics on Ammonia Alum Hydrate Slurries with Surfactants and Stabilizers, 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics -ExHFT-8, 2013.6.18, Institute Superior Tecnico, Lisbon, Portugal.
 12. 田中孝二, 田野拓也, 日出間るり, 鈴木洋, 菰田悦之, 界面活性剤を添加した潜熱輸送スラリーの流動・伝熱特性における管径効果, 日本レオロジー学会第40年会, 2013.5.16, 京都テルサ(京都)
 13. 鈴木洋, 高温系潜熱輸送微粒子の伝熱面への付着特性, 第2回潜熱工学シンポジウム, 2012.12.10, 神戸大学(兵庫)
 14. 鈴木洋, 未利用排熱利用を実現する潜熱輸送スラリー(招待講演), イノベーションフェア関西, 2012.12.6, グランチュープ大阪(大阪)
 15. Takuya TANO, Hiroshi SUZUKI, Yoshiyuki KOMODA, Ruri HIDEWA and Makoto FUJII, “Phase Separation Characteristics of Ammonium Alum Hydrates with Polyvinyl Alcohol”, International Workshop on Process Intensification 2012, 2012.11.8, pp.23-24, Korea University, Seoul, Korea
 16. 田野拓也, 鈴木洋, 菰田悦之, 日出間るり, ポリビニルアルコール/界面活性剤

- を添加したアンモニウムミョウバン水溶液の粘度特性, 第 60 回レオロジー討論会, 2012.9.27, 名古屋大学 (愛知)
17. 鈴木洋, 潜熱輸送スラリーによる革新的省エネルギー技術の確立 (招待講演), 国際フロンティア産業メッセ 2012 第 5 回分野別技術発表会, 2012.9.7, 神戸国際展示場 (兵庫)
 18. Takafumi TOYODA, Hiroshi SUZUKI, Yoshiyuki KOMODA and Ruri HIDE MA, “Adsorption Characteristics of Ammonia Alum Hydrate Particles onto the Coated Metal”, 10th International Conference on Phase-Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning, 2012.7.30, Kobe University, Kobe, Japan
 19. Hiroshi SUZUKI, Masato FUJII, Taketo FUDABA, Yoshiyuki KOMODA, Toru ISHIGAMI and Ruri HIDE MA, “Solidification Heat Transfer Characteristics of Ammonia Alum Hydrate Slurries Treated with Drag-Reducing Surfactants”, 10th International Conference on Phase-Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning, 2012.7.30, Kobe University, Kobe, Japan
 20. 鈴木洋, 藤井真, 札幌健人, 菰田悦之, 潜熱輸送スラリーの安定化に関する研究, 第 49 回日本伝熱シンポジウム, 2012.6.1, 富山国際会議場 (富山)

[図書] (計 1 件)

1. 齋藤 潔, 小林 敬幸, 窪川 清一, 鈴木 洋 他 25 名, 未利用工場排熱の有効活用技術と実用展開～要素技術の開発・高性能化と導入事例・システム～, 2014, サイエンス&テクノロジー

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)
特になし

○取得状況 (計 0 件)
特になし

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 洋 (SUZUKI, Hiroshi)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 9 0 2 0 6 5 2 4

(2) 研究分担者

菰田 悦之 (KOMODA, Yoshiyuki)
神戸大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 0 0 3 9 7 7 9 6

(3) 連携研究者

日出間 るり (HIDEMA, Ruri)
神戸大学・自然科学系先端融合研究環・助教
研究者番号: 2 0 5 9 8 1 7 2