

平成21年 6月 1日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560751  
 研究課題名（和文） 潜熱蓄熱微粒子スラリーを応用した高効率コンパクト熱交換器の開発  
 研究課題名（英文） Development of highly effective compact heat exchanger  
 by use of thermal storage particle slurry  
 研究代表者  
 栗山 雅文（KURIYAMA MASAFUMI）  
 山形大学・大学院理工学研究科・教授  
 研究者番号：90107178

## 研究成果の概要：

高効率のコンパクト熱交換器として、二重渦巻き型の熱交換器を開発した。まず、この熱交換器に作動流体として温水と冷水を用い、互いに熱交換させて熱交換器の性能評価を行った。その結果、本熱交換器のもつ渦巻き流路に起因する二次流れの影響で、水平管型熱交換器と比べて高い熱交換性能を持つことを明らかにした。次いで、この熱交換器に蓄熱微粒子スラリーを適用し、潜熱吸収による交換熱量の更なる増大を図ると共に、熱交換器の積層化による伝熱面積の拡大の効果の一端も明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：流体工学・伝熱工学・攪拌操作

科研費の分科・細目：プロセス工学・化工物性・移動操作・単位操作

キーワード：蓄熱微粒子カプセル，コンパクト熱交換器，伝熱促進，二次流れ，二重渦巻き

## 1. 研究開始当初の背景

潜熱蓄熱微粒子スラリーをコンパクト熱交換器に適用することで、(1) 粒子混入による伝熱促進効果と(2) 潜熱蓄熱微粒子の潜熱利用による熱交換の高効率化が期待できる。これに関して申請者は、平成17～18年度に科学研究費補助金・基盤研究C(課題番号17560657)「蓄熱潜熱カプセル-水系混相流を利用したマイクロ熱交換器設計に関する基礎研究」において、マイクロ熱交換器の最も基礎となる単一キャピラリー管内の潜熱蓄熱カプセルスラリーの流動伝熱実験を行うと共にスラリーの熱物性測

定を行い、伝熱促進効果と圧力損失の双方に検討を加えた。その結果、蓄熱微粒子自身の密度、熱伝導度、比熱および潜熱量などの熱物性値の推算を可能とし、キャピラリー内流動実験から蓄熱微粒子スラリーの管摩擦係数や見掛け粘度などの流動特性を把握した。さらに、加熱キャピラリー内での伝熱実験において、キャピラリー入口温度を蓄熱微粒子の融点以下に、出口温度を融点以上(キャピラリー内で蓄熱微粒子が相変化を起こす条件)に設定したところ、相変化を伴わない条件の熱伝達係数に比べて熱伝達係数が最大4倍にも向上することがわかった。この効果

を利用してコンパクト熱交換器を開発すれば、従来の装置と同サイズで高性能の熱交換器の実現が可能であり、これまでに類のない高性能熱交換器が実現可能と考えた。

## 2. 研究の目的

本研究では、上述のような申請者によるこれまでの成果を基に、蓄熱微粒子スラリーを利用した実用コンパクト熱交換器の開発とその伝熱特性の評価を行った。初年度には、実用コンパクト熱交換器の一例としてスパイラル型の向流式熱交換器を試作し、熱交換器自体の形状に起因する性能向上を評価し、さらにこの熱交換器に蓄熱微粒子スラリーを利用することによる優位性の確認を目的とした。次年度には、異なる流路サイズの熱交換器を新たに試作し性能評価を行った。さらに、コンパクト熱交換器の積層化を図り、熱交換処理能力の向上を目指すことで実用化の検討も行うことにした。

## 3. 研究の方法

### (1) コンパクト熱交換器の開発

コンパクト熱交換器の一例として、先ずは図1に示すようなスパイラル型向流式熱交換器を作製した。図1は上面図であり、流路は幅2mmもしくは3mmで高さ5mmの矩形とし、渦巻を二重にした構造で、流路を隔てる壁の肉厚を1mmとした。この二重渦巻を上下からパッキンを介してアクリル板ではさみ、入口部と出口部を各々加工して熱交換器とした。なお、二重渦巻は真鍮製とし、表面にニッケルメッキを施すことで清浄伝熱面を維持した。

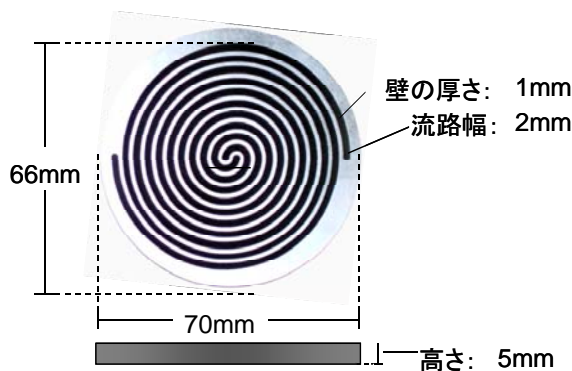


図1 二重螺旋型熱交換器

### (2) 熱伝達係数測定実験

作製した熱交換器の一方の流路に蓄熱微粒子スラリーを、他方に温水を流し、熱交換させることで熱交換器の伝熱特性を測定した。測定に際しては2流体の入口温度をコントロールする必要があるため、加熱冷却機能付きの恒温槽2台を用いた。さらに、各々の流体の流量が必要なため、精密天秤を用いて質量法にて測定した。以上の測定値および流

体の入口、出口温度と流体の交換熱量から熱伝達係数を求めた。これらの測定は、スラリー流量・入口温度などの条件を種々変化させて行った。なお、測定に先立ち、両流路に高温と低温の水を流して伝熱実験を行い、熱交換器自体の性能評価も行った。

### (3) 熱交換器の積層化

作製したスパイラル熱交換器を4段に重ね、各々の熱交換器の流体入口部、出口部に改良を施して積層型熱交換器を試作した。これを用いて個々の熱交換器の性能評価と熱交換器全体の性能評価を行った。

## 4. 研究成果

申請者は先ず、科学研究費補助金(課題番号17560657)において得た、潜熱蓄熱カプセルスラリーの熱媒体としての優位性を整理し、投稿論文として成果を報告した。さらに、上述の成果に基づき、蓄熱微粒子スラリーを利用した実用コンパクト熱交換器の開発とその伝熱特性の評価を行った。具体的には、実用コンパクト熱交換器の一例として二重スパイラル型の向流式熱交換器を試作し、蓄熱微粒子スラリーを利用することによる優位性を確認した。

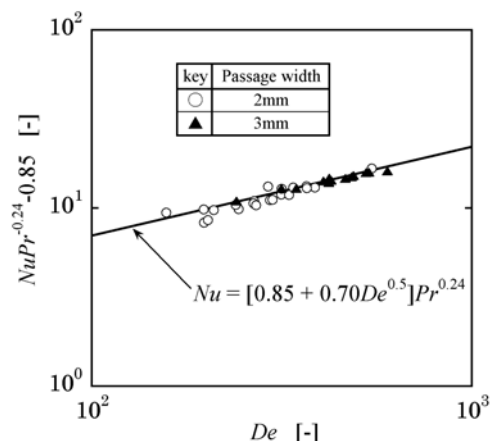


Fig. 2 Heat transfer correlation for water flow

始めに、双方の流路に高温の水と低温の水を向流で流して熱交換実験を行った。その結果、二重スパイラル型の交流式熱交換器は、その構造の優位性から、直管型熱交換器よりも3倍以上も伝熱能力が高いことが分かった。すなわち、微小かつ曲率の大きい流路を流体が流れる際の、二次流れの影響により、層流にもかかわらず高い熱伝達係数を示すことを明らかにした。図2は水同士を流したときの熱伝達係数を示したものである。

次いで、この熱交換器の一方の流路に蓄熱微粒子スラリーを流し、もう一方の流路の高温の水からの熱回収実験を行った。その結果、蓄熱微粒子スラリーの濃度などの条件によっては、水の場合に比べて1.5倍近くの熱交換能力があることも分かった。図3は二重

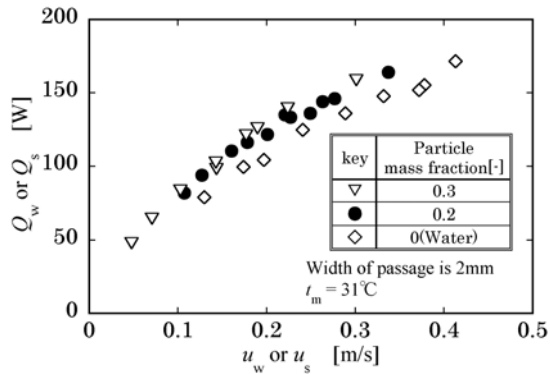


Fig. 3 Relationships between heat transfer rate and velocity  
渦巻き型熱交換器の交換熱量の測定結果の一例であるが、水同士の場合よりもスラリーを用いたときのほうが交換熱量が大きいことが分かる。また、この時の熱伝達係数および水同士の熱伝達係数を良好に表示し得る実験式の導出も行った。提出した実験式によって、渦巻き型熱交換器に水、微粒子分散スラリー、さらには蓄熱微粒子スラリーを適用した際の熱伝達係数の予測が可能となった。熱伝達係数の実測値と実験式の計算値の比較は図4に示したとおりであるが、両者の一致は良好である。

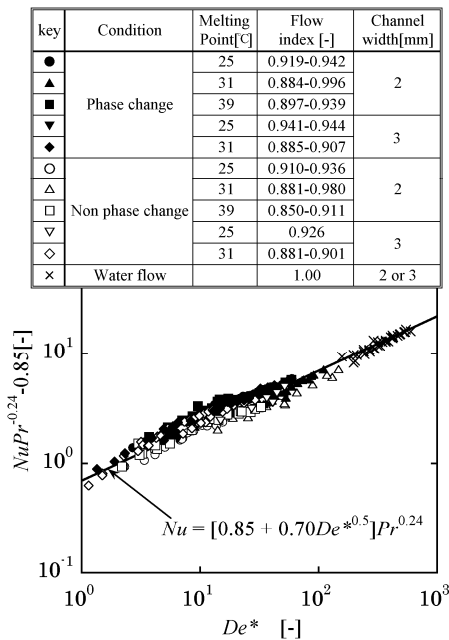


Fig. 4 Heat transfer correlation for slurry and water flows  
しかしながら、二重渦巻き型熱交換器を単層で用いた場合には、条件によっては、蓄熱微粒子スラリー内部の蓄熱材が相変化せずに流出してしまう現象が確認された。これは、二重渦巻き型熱交換器の伝熱面積の不足によるものと考え、流路を長くする目的で同じ熱交換器を複数個作製し、これを図5に示したように4段に重ねて積層化を施した。

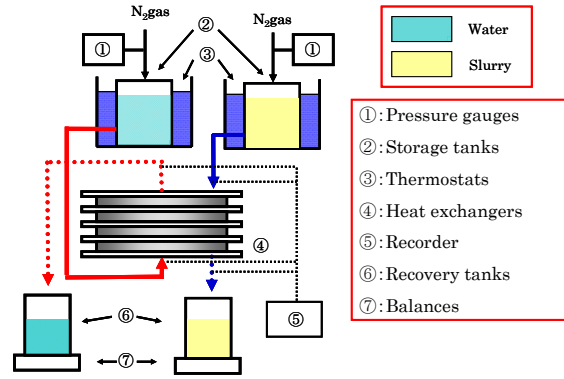


Fig.5 Experimental apparatus

上記の装置を用いて交換熱量を測定した結果、スラリー濃度を高濃度にしても相変化しきる前に装置を流出する現象は見られず、潜熱吸収の効果を十分に発揮し得ることがわかった。図6は熱交換器の各段における交換熱量をスラリーの流速に対して示したものである。この際、温水の流速は0.24m/sに固定して測定した。図から明らかのように、交換熱量は低流速域ではスラリーが最初に流入する1段目が最も高く、高温化して流出

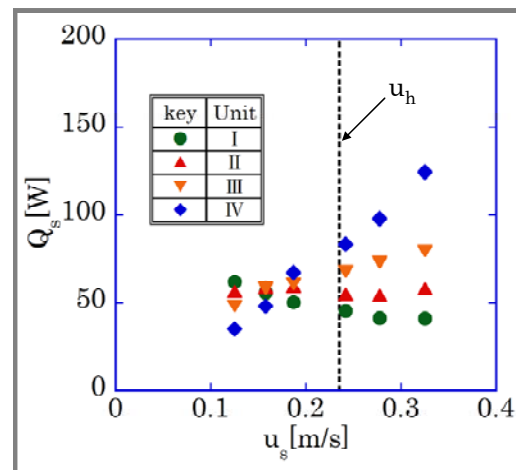


Fig.6 Heat transfer rate ( $\gamma=0.4$ )

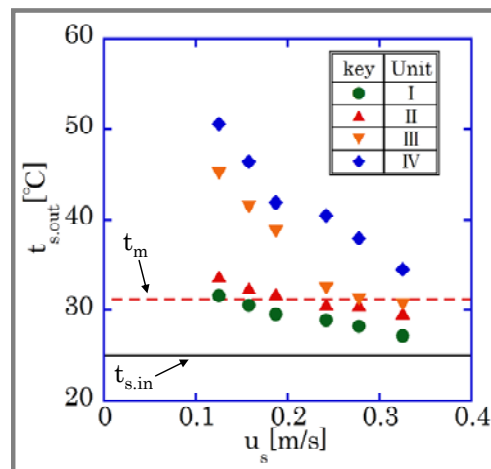


Fig.7 Outlet temperature ( $\gamma=0.4$ )

する4段目が最も低いが、スラリー流速が増加すると傾向が逆転し、4段目の交換熱量が最も高く、1段目が最も低い値を示すようになることがわかる。この時の格段のスラリー出口温度を示したのが図7であるが、低流速域では、1段目、2段目の出口温度がスラリーの融点  $T_m$  とほぼ等しく、相変化が早い段階で終了していることが予測できる。一方、高流速域になると4段目の出口温度も大幅に低下しており、相変化による潜熱吸収効果が大きく現れていることが予測できる。この際には1段目や2段目では、スラリーは相変化する前に次の段に流出してしまい、熱交換の際に相変化による潜熱吸収効果を十分に発揮できない様相も見取れる。

以上の結果から、高濃度のスラリーを比較的高い流速で流しながら熱交換を行う場合には、熱交換器の積層による伝熱面積の拡大が有効であることはわかった。

また、積層した熱交換器の場合にも、単層の熱交換器の実験で提出した熱伝達係数の予測式が適用可能かを調べた結果が図8である。図から明らかなように、積層した熱交換器の熱伝達係数は、各段の値および熱交換器全体の値の双方とも、単層の熱交換器の実験式で良好に表示できることがわかった。

なお、上述の実験式に含まれるスラリーの物性値は、密度、粘度、熱伝導度には、スラリーの入口温度と出口温度の算術平均値の値を、比熱に関しては相変化による見かけの比熱の増大を考慮するために、入口温度から出口温度までの積分平均値を採用している。

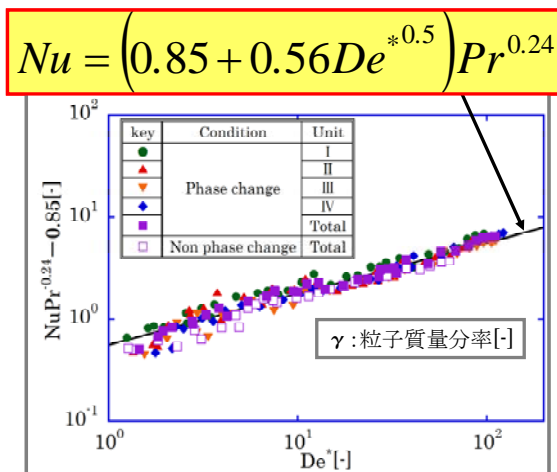


Fig.8 Heat transfer correlation

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1件)

- ① Hideki TOKANAI, Kazuyoshi MARUYAMA, Eiji HARADA and Masafumi KURIYAMA; "Heat Transfer of Phase Change Material-Water Slurry Flowing through Spiral-Channel Compact Heat Exchanger," J. Chem. Eng. Japan, in Press (2009) 査読有

[学会発表] (計 2件)

- ① Hideki Tokanai, Kazuyoshi Maruyama, Eiji Harada, Masafumi Kuriyama; "Heat Transfer of Thermal Storage Particle-Water Slurry Flowing in Spiral-Channel Compact Heat Exchanger," International Workshop on Process Intensification 2008, 2008年10月17日, 東京
- ② 丸山和義, 門叶秀樹, 原田英二, 栗山雅文; "蓄熱微粒子スラリーを作動流体とした小型熱交換器の伝熱特性," 化学工学会第40回秋季大会, 2008年9月24日, 仙台

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

栗山 雅文 (KURIYAMA MASAFUMI)  
山形大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：90107178

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

門叶 秀樹 (TOKANAI HIDEKI)  
山形大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号：30272082