

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：25301
 研究種目：基盤研究(C) (一般)
 研究期間：2018～2020
 課題番号：18K03989
 研究課題名(和文) 血流を模擬した熱エネルギー輸送システムを実現する変形能カプセルスラリーの開発

研究課題名(英文) Development of deformability capsule slurry for obtaining thermal energy transport system simulating blood flow

研究代表者
 春木 直人 (Haruki, Naoto)

岡山県立大学・情報工学部・教授

研究者番号：10311797

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、蓄熱物質を熱輸送媒体に混合させて、単位体積あたりの熱輸送量を増加させる熱輸送技術において、新たに血液中の赤血球をモデルとした弾性変形可能なカプセルに、蓄熱物質を内封させて熱輸送媒体と混合させる技術開発を行った。その結果、ゼラチンをカプセル材料とすることで含有する潜熱蓄熱材が液相時には柔らかくなるカプセルが作製された。さらに、カプセルスラリーの流動抵抗と熱伝達特性の測定を行い、潜熱蓄熱材が液相時のカプセルスラリーの熱伝達が、固相時よりも高くなることや、相変化によってスラリーの熱伝達特性が増加することが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で製作されたゼラチンをカプセル材料としたカプセルは、内包する潜熱蓄熱材が液相状態の場合に従来のカプセルにはない柔らかさが付与され、変形が可能である特性を持たせたことが、本研究の学術的意義の一つである。

さらに、本研究により確認されたスラリー流動時の熱伝達特性が増加する傾向は、このゼラチンカプセルスラリーを熱輸送媒体として使用できる可能性が確認されたことになり、大きな社会的意義であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：This research deals with the flow drag and heat transfer characteristics to reduce transportation energy in the district heating and cooling system. In order to increase in the heat transport capacity per unit volume, the heptadecane gelatin capsule slurry was used as the heat transport medium. Heptadecane is a paraffin-based latent heat storage material, was used as the heat storage material. Gelatin material was used as the capsule material instead of the conventional materials.

In the experiment, the flow and heat transfer characteristics of heptadecane gelatin capsule slurry were measured under the various experimental conditions (= capsule concentration, slurry temperature of capsule slurry). As a result, the heat transfer characteristics of this slurry in the liquid heptadecane state was increased from that in the solid heptadecane state.

研究分野：伝熱工学

キーワード：潜熱蓄熱材 カプセルスラリー ゼラチンカプセル 相変化 変形能 熱エネルギー輸送

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、熱輸送技術は、高温（または低温）の供給側熱源の熱エネルギーを熱輸送媒体（水、各種ブライン等）が需要部まで輸送して用いる熱エネルギー輸送システム（図1）や、製鉄所等における高温物質の冷却時にノズルからの噴射等に使用されている。しかしながら、エネルギーの有効利用の観点からは、「単位体積あたりの熱輸送量増加」という根本的な課題の解決を求められている。

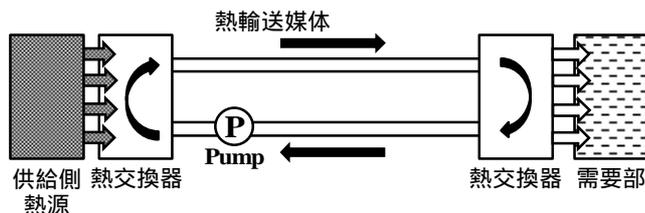


図1 熱エネルギー輸送システムの概要

熱輸送媒体におけるこの課題の解決のため、これまでに様々な研究者によって検討された対策の一つに、熱輸送媒体へ蓄熱物質を混合させる技術がある。これは、蓄熱物質（氷、パラフィン等）を熱輸送媒体に混合させて単位体積あたりの熱輸送量を増加させるとともに、蓄熱物質混合による管内壁との熱伝達向上により、熱エネルギーの授受を行う熱交換器の熱交換性能の向上効果も得るものである。その混合方法としては、蓄熱物質を微粒子状とし、界面活性剤等を用いて熱輸送媒体に均一に分散混合させたエマルジョン化や、蓄熱物質をマイクロサイズ上のカプセル内に充填させてから、熱輸送媒体に均一に分散させたマイクロカプセル化が研究・提案されている。

一方、従来の混合方法では、蓄熱物質の混合による輸送時の流動抵抗の増加や、混合した蓄熱物質の凝集、細管流動時の管閉塞の発生、さらには、混合した蓄熱物質やカプセル材の廃棄に伴う環境汚染や蓄熱物質の低混合割合（従来のマイクロカプセルでは最大で約20%程度）等の問題点の存在が指摘されている。このため、理想的な熱輸送媒体を作成するためには、従来の方法では不十分である。本研究では、単位体積あたりの熱輸送量を増加させた理想的な熱輸送媒体を作成するため、「混合した蓄熱物質の凝集や、細管流動時の管閉塞」を発生させない新たな技術開発を行う必要がある。

2. 研究の目的

前述の欠点を解消するため、本研究は、従来のカプセルよりも大きな変形能を有するカプセルに蓄熱物質を含有させて熱輸送媒体に混合させた場合での流動抵抗の確認と、熱輸送特性がどの程度まで増加するのかを明らかにすることを研究目的とした。

従来の蓄熱物質を含有するマイクロカプセルの構造は球状であり、また膜剤としてメラニン樹脂やシリカ等を用いているため、変形能を有していないが、頑丈で優れた耐久性を有している。また、熱輸送媒体混合時のカプセル径や混合割合によつての熱輸送媒体の熱物性値や、その熱輸送特性の傾向はおおよそ明らかとなっている。

一方、理想的な熱輸送媒体であるスラリーとして、本研究では血液に着目した。血液はその45%の血球成分を含んだ2相流のスラリーであり、その血球成分の96%が赤血球である。この赤血球は、直径7~8 μm 、厚さ1~2 μm の真ん中がへこんだ円盤状であり、高い変形能を有している。この赤血球の特異な変形能によって、血液は、赤血球の粒子径よりも相対的に細い血管内での流動が可能である。この変形能を、蓄熱物質を含有したマイクロカプセルに付与することができれば、より細い管径での蓄熱物質混合が可能になるとともに、管閉塞の発生の抑制が可能になると予想される。しかしながら、本研究で着目するような変形能を有するカプセルは、ほとんど検討されていない。

このため本研究においては、変形能を持つカプセルを作製して、その基本的特性の把握を行うとともに、このカプセルを混合した熱輸送媒体であるカプセルスラリーの耐久性、流動抵抗と熱伝達特性の確認を行った。

3. 研究の方法

本研究技術の実用化のためには、新たに変形能カプセルを作製し、さらに作製された変形能カプセルおよびカプセルスラリー状態での基本特性「カプセル径、変形能、耐久性、混合割合毎の諸熱物性値」の正確な説明が必要不可欠である。また、本技術を実際の熱輸送、加熱面の冷却等に適用させるためには、流動抵抗・熱伝達からなる熱輸送特性の把握や、加熱面の冷却性能の把

握も必要である。これは、変形能力カプセルの持つ基本特性によって上記の性能が影響されると予想されるためであり、本研究では、流動や熱輸送特性に対する最適な変形能力カプセルの基本特性を見出す必要がある。以上の点を踏まえ、本研究方法は以下の通りである。

(1) 変形能力カプセルの準備

従来の蓄熱物質を含有しているカプセルの材料として使用されているメラニン樹脂等は変形しにくい材料のため、変形能を有するカプセルの準備では、新たな材料で作製する必要がある。このため本研究では、まずゼラチンや寒天を材料とし、蓄熱物質を封入するカプセルの準備を行う。

(2) 変形能力カプセルの基本特性、およびスラリー状態化での諸熱物性値測定

(1)で検討されたカプセル材料の使用によって変形能が付与されるカプセルとなるが、カプセルの基本特性(カプセル径や膜厚さ、蓄熱物質の含有割合の違い等)によって、スラリーでの蓄熱密度や耐久性、変形能等の変化が予想される。このため、最も適切に蓄熱材料が含有できる形状値等の特性として、以下のものを明らかにする。

- ・変形能力カプセルの基本特性：カプセル径、膜厚、変形能、含有割合、廃棄しやすさ
- ・スラリーの熱物性値：比熱、熱伝導率、潜熱、粘度

(3) カプセルスラリーの熱輸送特性・冷却性能測定試験部の作成

変形能力カプセルスラリーの熱輸送特性を確認するため、図2に示すスラリーの流動状態、流動抵抗および熱伝達特性が確認できる実験装置を作成した。

実験装置は、スラリーを任意の温度に調整できる恒温水槽において、温度調整を行った後、インバーター制御された三相ポンプによって、任意の流速でスラリーをステンレス製試験部(管内径16mm、長さ1.6m)内に流動させる。ステンレス製試験部では、まずスラリーの試験部出入口間の圧力損失を差圧発信器で測定して、管摩擦係数を算出する。さらに、トランスによってステンレス製試験部の直接通電加熱を行い、等熱流束加熱条件下における試験部各位置での局所熱伝達率を測定することで、試験部全体での平均ヌセルト数を算定する。なお、スラリーの平均流速は超音波流量計から測定した。

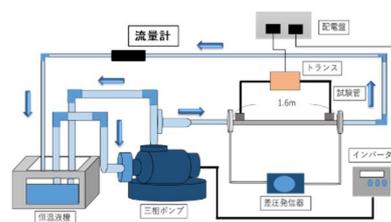


図2 流動抵抗・熱伝達特性実験装置概略図

(4) カプセルスラリーの熱輸送特性・冷却性能の測定、および耐久性の把握

完成した試験装置を用いて、変形能力カプセルスラリーの流動・熱伝達試験部における流動抵抗と熱伝達特性の測定を、変形能力カプセルの基本特性毎に行い、変形能力カプセルの基本特性の違いが流動抵抗と熱伝達特性に与える影響を定量的に確認する。さらに、スラリーの流動状態の測定のため、PIV2D流体解析システムによるスラリー内の速度分布の測定も検討する。

4. 研究成果

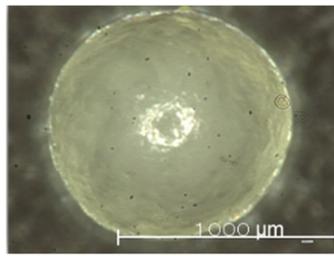
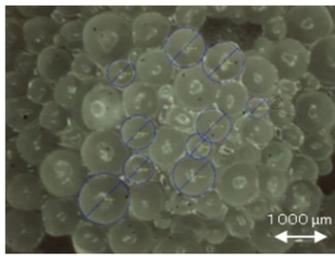
(1) 変形能力カプセルの作製

本研究では、まず蓄熱物質を含有した弾性変形可能なカプセルに関する調査・検討を行った。まず、変形可能な特性を付与することのできるカプセルの材料についての調査を行った結果、「寒天とグリセリン」、「ゼラチン」をカプセルの材料に使用すれば、変形特性をカプセルに付与できる可能性があることを推測した。

このうち「寒天とグリセリン」のカプセルについては、製造会社よりサンプル(蓄熱物質は含有せず、粒子径2mmと3mmのもの)を購入し、耐久性と形状変化に関する予備実験を行った。その結果、カプセルを水に混入させた場合、水分により膨潤する形状変化があることを確認した。しかしながら、耐久性においては、水に混合させた場合にカプセルの接着面が時間経過とともに剥がれることが判明し、本研究の使用目的に合致しない事が明らかとなった。

一方「ゼラチン」をカプセル材料とするカプセルについては、蓄熱物質として潜熱蓄熱パラフィンであるヘプタデカン(融点22℃、潜熱量215kJ/kg)を含有させたカプセル(粒子径1~2mm)として試作を行い、その後、その試作品を用いたビーカー内での攪拌実験によって耐久性の確認を行った。その結果、ある程度の期間の攪拌でもカプセルが破壊されずに耐久性に問題ないことが確認されたため、本研究ではゼラチンでカプセルを作製することとした。

本研究で試作したヘプタデカンを含有させたカプセルの外観とビデオマイクロスコープによる拡大図を図3に示す。このゼラチンカプセルは、製作時にヘプタデカンとゼラチンの質量割合をそれぞれ79wt%と21wt%とし、wet分級が2.00~3.35mm:1.5wt%、1.00~2.00mm:88.6wt%、0.50~1.00mm:9.9wt%となるように作製した。実際に、ビデオマイクロスコープによって作製後のカプセルの粒子径分布の測定も行った。図4に測定された粒子径分布の結果を示す。図4に示すように、製作されたゼラチンカプセルは、平均粒子径1.35mmであることが明らかとなった。さらに、含有されたヘプタデカンが固相から液相へと相変化が起こっても、カプセルの粒子径に違いがないことも確認された。一方、ゼラチンカプセルの変形しやすさについては、定量的に明確に確認することができなかったが、目視による観察と感触では、ゼラチンカプセル内のヘプタデカンが液相の場合、固相の場合よりも柔らかさに違いがあることが確認された。



外観 拡大図
図3 ゼラチンカプセルの外観図，拡大図

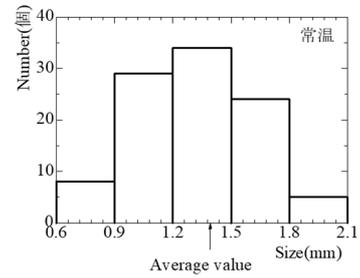


図4 ゼラチンカプセルの粒子径分布

(2) ゼラチンカプセル，およびゼラチンカプセルスラリーの熱物性値の推定について

本研究では，後述するように，流動と熱伝達特性の無次元整理を行うため，カプセルスラリーの熱物性値を明らかにする必要がある．そのため本研究では，作製されたゼラチンカプセルとゼラチンカプセルスラリーの様々な熱物性値の確認とその推定方法について検討を行った．

まず，ヘプタデカン含有ゼラチンカプセルの融点と潜熱量を確認するため，カプセルに対してティール・エイ・インストルメント・ジャパン社のDSC-Q200を用いてDSC測定を行った．図5は，DSC測定によって得られたDSC曲線（昇温時）を示したものである．図5より，本研究で使用したヘプタデカン含有ゼラチンカプセルには融解による潜熱に加えて，融点22より約12低い温度域において，相転移による潜熱もあることが明らかとなった．さらに，この融解と相転移を併せた潜熱量は，175.9 kJ/kgであった．この値は，ヘプタデカンの潜熱量215 kJ/kgの約81%であり，ほぼ前述のヘプタデカンとゼラチンの質量割合と一致していることも明らかとなった．また，降温条件におけるDSC測定より，本カプセルには若干の過冷却現象が発生することもあきらかとなった．

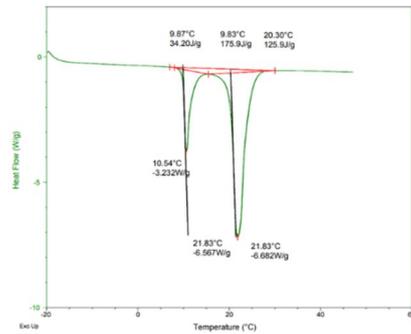


図5 ゼラチンカプセルのDSC曲線（昇温時）

次に，ヘプタデカンゼラチンカプセルスラリーの熱物性

値のうち，密度と比熱については，水，カプセル（ヘプタデカン，ゼラチン）の熱物性値に，それぞれの体積割合に当てはめた加成性の法則により推定を行った．またスラリーの熱伝導率については，Euckenの分散相（水に対して，ヘプタデカンとゼラチンそれぞれが均一に分散されていると仮定）における熱伝導式を使用して推定を行った．一方，スラリーの粘性特性については，本研究では，直接測定することや推定することが困難であったため，本研究では，スラリーと同じ温度である水の粘性の値を使用した．

(3) ヘプタデカンゼラチンカプセルスラリーの流動と熱伝達特性について

図6，7は，本実験装置における様々なカプセル添加濃度（0.33, 0.66, 1.6, および3.3 wt%）におけるヘプタデカンゼラチンカプセルスラリーの流動抵抗（管摩擦係数 λ ）と熱伝達特性（ $Nu/Pr^{1/3}$ ）の測定結果を示したものである．なおこの測定は，スラリーの温度を約20℃，加熱時の試験部管壁温度がヘプタデカンの融点（22℃）を超えないようにすることで，カプセル内のヘプタデカンが固相状態とした状態で行ったものである．また両図中にて実線で示した直線は，水が円管試験部を層流，および乱流状態で流動する場合における流動抵抗と熱伝達特性の実験値をそれぞれ示したものである．

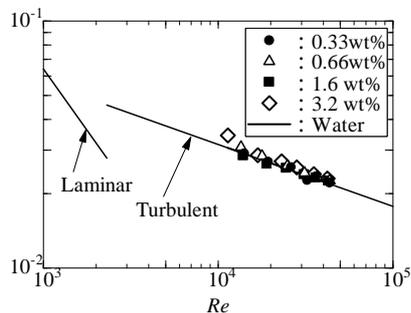


図6 ヘプタデカンゼラチンカプセルスラリーの流動抵抗特性（ヘプタデカン固相時）

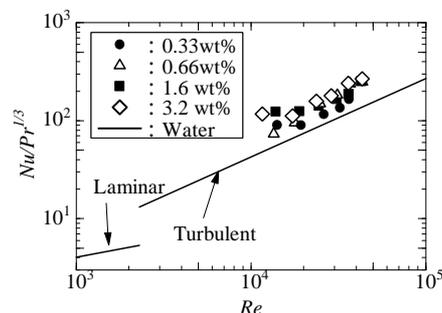


図7 ヘプタデカンゼラチンカプセルスラリーの熱伝達特性（ヘプタデカン固相時）

実験の結果、ヘプタデカンゼラチンカプセルスラリーの流動抵抗は、いずれのカプセル添加濃度においても水の値とほぼ一致する傾向を示した。一方、ヘプタデカンゼラチンカプセルスラリーの熱伝達の値は、水の値よりも高く、さらにカプセル添加濃度の増大に伴って、高くなる傾向を示している。これらの結果は、ほぼ同じ粒子径を有するアイススラリーの流動抵抗と熱伝達特性に近いことを示している。

次に、スラリー内のカプセルの変形能が熱伝達に及ぼす影響を把握するため、カプセルが相対的に硬い場合（スラリー温度：10（ヘプタデカンが固相））と柔らかい場合（スラリー温度：25（ヘプタデカンが液相））としたヘプタデカンゼラチンカプセルスラリー（添加濃度 3.3 wt%）の等熱流束加熱条件でのステンレス製直管試験部（管内径 16 mm）における熱伝達特性（ $Nu/Pr^{1/3}$ ）の経時変化を図 8 に示す。なお、スラリーへの加熱を開始した時点が実験開始としている。

図 8 に示されるように、液体時のスラリーの熱伝達の方が固体時のスラリーの熱伝達よりも高い値を示している。これは、カプセルに封入されたヘプタデカンが固体状態よりも液体状態においてはゼラチンカプセルが柔らかくなることでカプセル全体の変形能が変化し、乱流時のスラリーの熱伝達に何らかの影響を与えたものと考えられる。

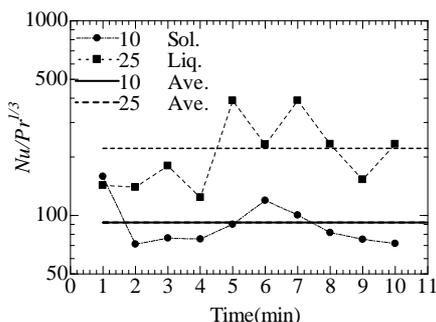


図 8 ヘプタデカンゼラチンカプセルスラリーの熱伝達（ヘプタデカンが固相時と液相時）

一方、スラリーの温度を 20，加熱時の試験部壁面加熱温度を約 23 とすることで、カプセル内のヘプタデカンが固相から液相に相変化させながら測定されたヘプタデカンゼラチンカプセルスラリーの熱伝達特性の経時変化を図 9 に示す。図 9 に示すように、実験開始直後はカプセル内のヘプタデカンがほぼ固体状態であるにもかかわらず、測定されたスラリーの熱伝達は液体時の値に近い値を示している。これは、ヘプタデカンの相変化による潜熱の影響により、スラリーの熱伝達が増大したものと考えられる。その後は、スラリー内のカプセル内のヘプタデカンが固相と液相が混在していることや、さらにはカプセルのスラリー内の分布が不均一であることに伴って、熱伝達が固体時と液体時の間で増減するが、最終的に全てのカプセル内のヘプタデカンが全て液相になっていくことに伴い、熱伝達特性は最終的に液相時の値に収束する傾向を示している。この収束値は、図 10 に示すように、スラリーの平均流速の増加とともに高い値を示している。

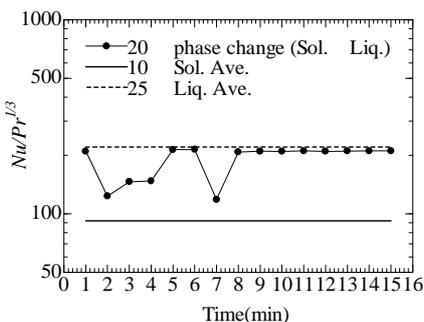


図 9 ヘプタデカンゼラチンカプセルスラリーの熱伝達（ヘプタデカンが相変化（固相→液相）時）

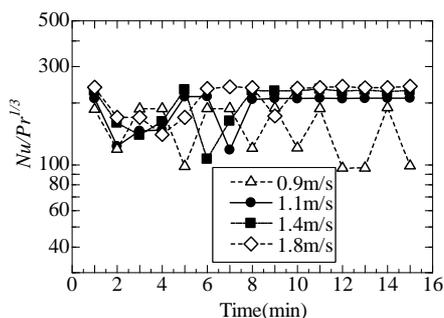


図 10 ヘプタデカンゼラチンカプセルスラリーの流速毎の熱伝達（ヘプタデカンが相変化（固相→液相）時）

しかしながら、本研究の期間では、今後は、カプセルの変形能がスラリーの熱伝達特性に与える機構についての詳しい検討を行うことができなかった。このため、今後は、PIV によるカプセルスラリーの流動状態や速度分布等の測定を行い、スラリーの熱伝達特性に与える機構についての研究を引き続き行う予定である。また本研究の実験において、試作されたカプセルを実験装置内で長期間使用した場合、カプセルが壊れてしまうことが確認された。この結果は、本試作カプセルの実用化を想定した場合には、カプセル自体の耐久性に難があることを示している。このため、ゼラチンカプセルの耐久性の向上についても、引き続き検討を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 春木直人, 三田哲也, 森田慎一
2. 発表標題 潜熱蓄熱ゼラチンカプセルスラリーの直管試験部における流動と熱伝達特性に関する研究
3. 学会等名 第58回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2021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
---------	---------