

令和元年6月13日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06120

研究課題名(和文) Additive Manufacturingによる潜熱蓄熱型ヒートシンクの構築

研究課題名(英文) Thermal and Functional evaluation of a Heat Sink Structured by Additive Manufacturing Technique

研究代表者

川南 剛 (Kawanami, Tsuyoshi)

明治大学・理工学部・専任准教授

研究者番号：20281793

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高機能ヒートシンクとして空隙率を制御した金属多孔体と蓄熱機能を有する相変化エマルジョンの技術融合による、新たな蓄熱式高度熱交換デバイスの開発とその特性評価を目的としている。本研究期間内において、金属多孔質構造体の製作手法の確立、相変化エマルジョンの作製方法の確立および基礎物性の評価、および蓄熱機能を有するヒートシンクデバイス特性の評価に関する検討を行い、複雑構造体熱交換器の設計指針を得た。また、熱交換特性を把握した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、3次元CADによる設計データからレーザー金属焼結装置を用いて行うため、理論解析による設計形状を基とした金属多孔体が作製可能である。また、適切な材料を選択することにより任意温度に相変化温度を調整した相変化エマルジョンは、熱機能性流体と位置づけることができ、これらを融合させた蓄熱・熱利用デバイスは、高速熱交換機能を有するヒートシンクを実現されるものと期待される。工学的には、工場廃熱等の低密度熱エネルギー回収の高効率化や、ソーラーコレクターの蓄熱構造部への応用による太陽熱利用の高度化など、新たな省エネ技術の要素として展開することを想定している。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop an advanced heat exchange device with a thermo-functional fluid involving phase change materials and evaluate its characteristics. The advanced heat exchanger has a metal porous body with a controlled porosity as a high-performance heat sink. In addition, a phase change emulsion was produced and adopted as a heat exchange fluid. During this research period, we studied the following items: 1) the establishment of fabrication method of the metal porous structure as an advanced heat exchanger with an additive manufacturing technique; 2) the establishment of the producing method of phase change emulsion; 3) the evaluation of the basic physical properties of the phase change emulsion; 4) the evaluation of heat exchange characteristic of the advanced heat exchanger. As a result, the design guidelines for the new exchanger were obtained, and the heat exchange characteristics were understood.

研究分野：熱工学

キーワード：熱交換 熱輸送 機能性流体 潜熱

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

工場廃熱や太陽熱利用など、低密度熱エネルギーの工業的有効利用のためには蓄熱および高速熱交換技術の開発が必須である。また、自動車のアイドリングストップ後のエンジン再始動では、エンジン燃焼室温度を下げすぎないことが重要であり、付加技術として蓄熱・再生技術の導入が期待されている。研究代表者これまで、「磁気熱量効果を利用した高効率ノンフロン冷凍空調システムの開発」および「機能性相変化エマルジョンの流動および熱伝達特性」に関する研究に取り組んできている。その成果として、金属粒子充填層による高速熱伝達特性、相変化エマルジョンの大量生成手法および熱物性測定評価法など、基礎的かつ重要な知見を得ており、これらの内容は、すでに論文誌上および国内外の講演会にて公表している。それらの研究から、これら別々の技術を融合させることにより、前述の工業的課題を解決する可能性のある、新たな蓄熱式高度熱交換デバイスが実現できるとの着想に至ったものである。

2. 研究の目的

本研究では、高機能ヒートシンクとして空隙率を制御した金属多孔体と蓄熱機能を有する相変化エマルジョンの技術融合による、これまでにない新たな蓄熱式高度熱交換デバイスの開発とその特性評価を目的としている。このデバイスを実現し技術展開を行うためには、高機能ヒートシンク作手法の確立、相変化エマルジョンの基礎物性の把握、およびデバイスとしての特性評価が必要となる。このための主な解決すべき技術課題は下記のとおりである。

- 空隙率制御による伝熱特性に優れた金属多孔体ヒートシンク製作手法の確立
- 相変化エマルジョンの作製手法の確立および熱物性値の獲得
- 相変化物質の過冷却制御技術の確立および熱輸送特性の把握
- 蓄熱式高度熱交換デバイスとしての特性評価

3. 研究の方法

本研究では、(1) 金属多孔質構造体の製作手法の確立、(2) 相変化エマルジョンの作製方法の確立および基礎物性の評価、(3) 相変化エマルジョンの強制対流熱伝達の評価、および(4) 蓄熱機能を有するヒートシンクデバイス特性の評価、を本研究の主たる検討事項とし3年間で遂行した。平成28年度は、主に金属多孔質体製作のための基礎検討およびCADデータの作成およびヒートシンク特性評価のための試験装置の作製を行った。平成29年度は、主に相変化エマルジョンの作成および熱物性の熱物性値の測定を行った。また平成30年度は、主にヒートシンク特性評価のための実験および研究の総括を行った。以下に、研究内容の詳細を述べる。

(1) 金属多孔質構造体の製作手法の確立

本研究では、3次元CADによる設計データからレーザー金属焼結装置を用いて行うため、理論解析による設計形状を基とした金属多孔質体が作製可能である。まず始めに、ハニカム構造を有する金属多孔質について、その空隙率を10%から90%の間で変化させた構造を仮定し、比表面積の増加と圧力損失の関係について解析的に明らかにする。その上で、ヒートシンクとして最適な構造の指針を決定する。決定した構造について、3次元CADによる設計データを作成し、レーザー金属焼結装置を用いて成形加工を行う。一方、これまで加工が非常に難しいとされてきた、銅およびアルミニウムを素材としたヒートシンクを製作するため、数値計算による加工条件の推定を行う。

(2) 相変化エマルジョンの生成方法の確立および基礎物性の評価

これまで、相変化エマルジョンの熱物性を評価した研究例は少なく、いまだ基礎的な熱物性値に関する知見の蓄積は不十分である。また、物性および熱特性はエマルジョンの生成挙動に強く影響を受ける。本研究では、まず、エマルジョンの生成挙動に及ぼす生成温度の影響について検討を行う。また、エマルジョンでは個々の相変化物質が液媒中に懸濁されているため、単相物質の核生成および伝播とは異なる凝固過程が予想される。本研究では過冷却解除手法を検討する。さらに、主要な熱物性測定を行い、基礎物性データを獲得する。

(3) 相変化エマルジョンの強制対流熱伝達実験

作成した相変化エマルジョンの基礎的熱伝達特性を評価するために実験装置を製作する。装置は循環流路であり、加熱試験部は二重管式熱交換器の構造となっている。また同時に、予想される大きな過冷却度を制御するための実験を行う。

(4) ヒートシンクの熱交換特性の評価

ヒートシンクの熱交換特性は、実験および解析により行う。実験装置は、流路内に設置したレーザー金属焼結装置で製作したヒートシンク内を、水または相変化エマルジョンを流動させる構造となる。この装置には、温度設定のための低温恒温水槽が接続される。

4. 研究成果

以下に、本研究によって得られた主要な成果を述べる。

(1) 金属多孔質構造体の製作手法の確立

自由度の高い設計が可能な3D-CADおよびレーザー照射による金属粉末積層造形装置を用いて、これまでにない断面形状のヒートシンクの造形試作を行った。形状については、マルエージング鋼を用いて空隙率の異なる多孔体の試作(図1)を行い、最適形状の評価を進め複雑構造体熱交換器の設計指針を得た。なお、2018年9月に発生した胆振東部地震およびレーザ金属粉末積層

造形装置の故障のため、ヒートシンクの作製が後ろ倒しになったが、造形試作品を作製し実験を行うことができた。

(2)相変化エマルションの生成方法の確立および基礎物性の評価

D相乳化法によって、分散相に相変化物質（テトラデカン，n-ヘキサデカン）を、分散媒に水を選択したO/W型エマルションの生成手法を検討した。D相乳化法とは、水と多価アルコールと界面活性剤によるD相（Surfactant Phase）を攪拌しO/Dゲルを作製した後、水を添加することでエマルション化する方法である。

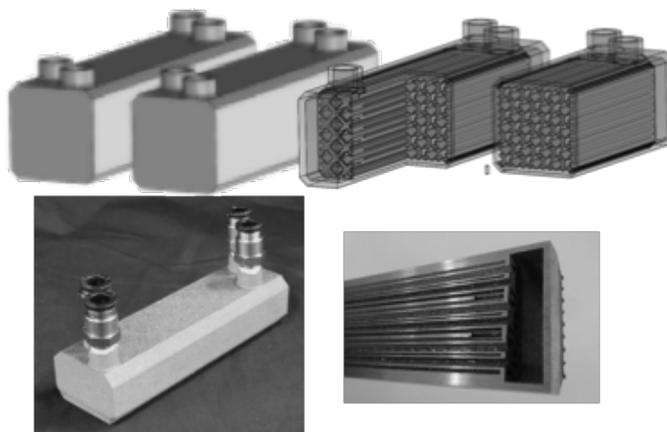


図1 作製したヒートシンクおよび断面モデル

本研究では、安定的なエマルション生成の要因調査として、エマルションの生成挙動に及ぼす生成温度の影響について実験的に検討を行った。D相乳化法によるエマルションの生成手順は次のとおりである。(1) ビーカーに1,3ブタンジオール2gをとり、精製水2gを添加し攪拌する。これをA液とする。(2) 別のビーカーにポリオキシエチレン(20)ソルビタンモノオレエート（市販Tween80相当品）を4gとり、スターラーチップを入れ、マグネティックスターラーにて攪拌する。これをB液とする。(3) B液にA液を注ぎ入れ攪拌する。これをC液とする。(4) C液をマグネティックスターラーで攪拌しながらテトラデカン10gを注ぎ入れる。このときにゲル状のD相が生成される。これをD液とする。(5) このD液は高粘度のゲル状物質となるが、ここに水（精製水）82gを加え攪拌するとエマルションが生成される。これらの一連のエマルション生成時の温度を各試薬の温度を20℃から55℃まで変化させ、生成されたエマルションの平均粒子径の測定およびD相（D液）のゲル状物質の形成状態の評価を行った。

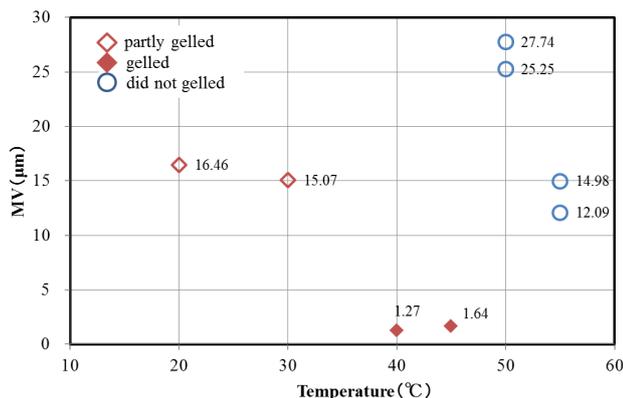


図2 エマルション生成時の温度と粒径の関係

各試薬をビーカーに取り分け、それぞれを振盪恒温槽にて、20, 30, 40, 45, 50, および55℃の各温度に設定し、D相乳化法によりエマルション生成を行った。図2に、各温度条件で生成されたエマルションの生成評価結果を示す。図の横軸は温度であり、縦軸MVはエマルション中に分散している相変化物質粒子の体積平均径(μm)を示す。また、エマルション生成工程におけるD液のゲル化状態について、図中◇は一部ゲル化、○はゲル化せず、◆は良好なゲル化が見られたことを示している。図より、40℃および45℃において、エマルション生成過程において重要な要因となる良好なゲル化が見られるとともに平均粒子径も1.27から1.64μmと小さく、40%以上が1μm以下であることがわかった。一方、50℃以上の条件においては、ゲル化が認められず、良好なエマルション化が見られなかった。平均粒子径も12.09から27.74μmと大きくなっていることがわかる。また、20℃および30℃の条件においては、一部がゲル化したものの平均粒子径は15.07から16.46μmとなっており、高温時ほどでないものの、平均粒子径は大きくなる傾向が見られた。

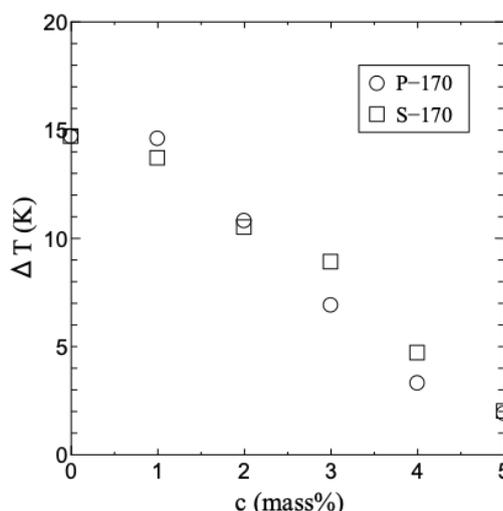


図3 界面活性剤の添加と過冷却度の関係

エマルション中に分散する相変化物質の平均粒子径は、エマルションの

安定性の観点から、粒径が小さく、かつ揃っていることが望ましい。本研究によって、安定性の高いエマルジョン生成のためには、温度条件に最適値があるというこれまでに無い新たな知見を得ることができた。

エマルジョン中の相変化物質は細粒状に分散しているため、ひとつの粒子の過冷却状態を解除し結晶化させても、他の粒子に結晶化状態を伝播させにくい。したがって、エマルジョン中に分散した相変化物質の過冷却を抑制し、過冷却度をより小さくコントロールすることは、システム効率向上の観点からも重要である。ここでは、相変化エマルジョンを生成する際に、分散相にあらかじめ結晶生成を促進させると考えられる疎水性界面活性剤を添加し、その結晶化温度を測定することで、相変化エマルジョンの過冷却度抑制効果に及ぼす添加剤の影響を評価した。その結果、D相乳化法によって生成したエマルジョンの分散相であるn-ヘキサデカンに、疎水性界面活性剤であるシヨ糖パルミチン酸エステル(P-170)およびシヨ糖ステアリン酸エステル(S-170)を、分散相に対して0~5.0 mass% 添加した場合、結晶化温度の上昇がみられた。P-170の添加では、添加していないときの過冷却度 14.7 K に対して、1.9 K の過冷却度を示し、S-170 の添加では 2.0 K の過冷却度を示すことがわかった (図3)。

一方、代表的な物性としてエマルジョンの粘性係数の測定を行った。測定は回転式粘度計 (BROOKFIELD, DV-II Pro) を用い、各エマルジョンの粘性係数は3回ずつ測定した平均値をとした。図4に測定結果を示す。図中の横軸は温度であり、相変化物質の充填率10mass%および20mass%のエマルジョン、また参考値として、水の値を示している。なお、図中の“10%”は10mass%エマルジョン、“10% with S-170”は10mass%エマルジョンにS-170を添加したもの、“20%”は20mass%エマルジョン、“20% with S-170”は20mass%エマルジョンにS-170を添加したものの測定結果を表す。図より、全ての結果において液体物質に一般的な傾向である、温度が上昇するにつれて粘度が低下するという傾向が確認された。また、水の粘性係数の値と比較したところ、同じ温度の10mass%エマルジョンの値は約2.3倍、20mass%エマルジョンの粘度は約4.1倍となることがわかった。さらに、S-170を添加したエマルジョンと添加していないエマルジョンを比較すると、低温領域ではS-170を添加したエマルジョンの粘度の方が大きな値を示す結果となった。しかしながら、10mass%エマルジョンおよび20mass%エマルジョンのどちらも温度の高い領域では、疎水性界面活性剤を添加していない条件と近い値となることがわかった。

(3) 相変化エマルジョンの強制対流熱伝達実験

生成したエマルジョンの熱交換特性を把握するために、二重管式熱交換器を用いてエマルジョンと水による熱交換実験を行った。さらに、水と水による熱交換実験を行うことで、水とエマルジョンの熱交換特性に関する比較を行った。使用した二重管式熱交換器は、材質がSUS304のコイル型二重管流路を有しており、全体コイル長3.7m、コイル高さ230mm、コイル熱交換器外径112mm、伝熱面積0.07m²の形状となっている。また、二重管の内管は、外径6.0mm、内径4.0mmであり、外管は、外径10.0mm、内径8.0mmである。本実験では、この二重管式熱交換器を樹脂製の容器に入れ、容器内部の空隙に発砲ウレタンを充填させることにより断熱をしている。

図5に、水(高温流体)とエマルジョン(低温流体)による熱交換実験の結果を示す。横軸は測定時間、縦軸は温度を表す。図中“Entrance”は熱交換器に流入する流体、“Exit”は熱交換器から流出する流体、“high”は高温流体、“low”は低温流体を表す。例えば、“Exit high”は熱交換器から流出するときの高温流体を表す。測定時の外気温は20.0℃に設定した。図より、水とエマルジョンの熱交換において、各流体を流し始めてから4分後付近より定常状態となる傾向が見られた。そのため、6.2.1と同様にQout およびQinを求める。エマルジョンの見かけの融解熱が32.11 J/gであることを用い、相変化時に低温流体が得た熱量を計算すると、81.1Wの熱

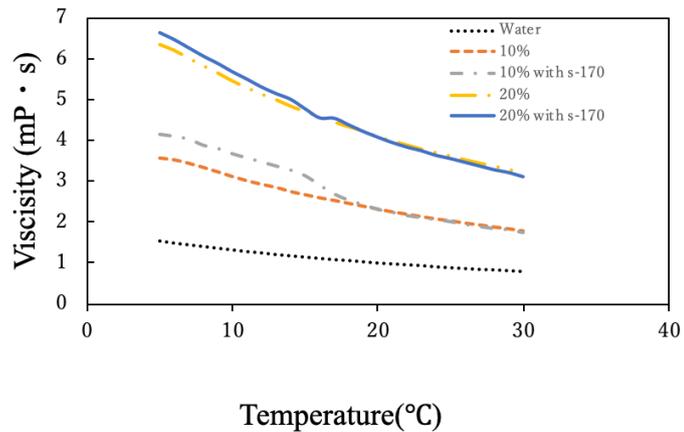


図4 エマルジョンの粘性係数測定結果

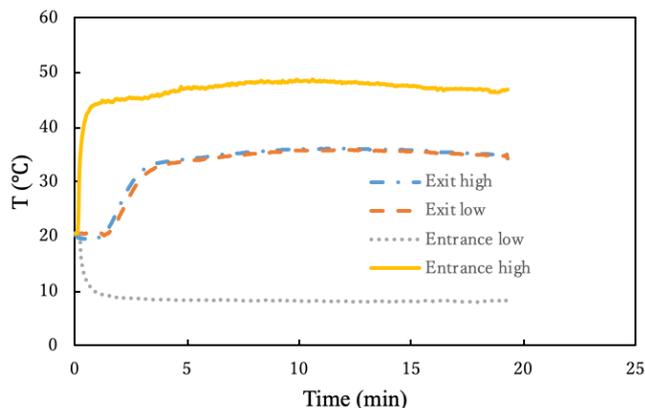


図5 エマルジョンの熱交換特性

交換量であったことがわかった。

(4) ヒートシンクの熱交換特性の評価

従来造形が困難であるとされていた熱伝導率の高い銅系合金を用いた造形試作品による熱交換試験を行った。その結果、熱交換の際の温度効率 η が、銅系合金を用いた熱交換器において、ステンレス系(SUS系)の材料を使用した造形品よりも約29%向上することを見いだした(図6)。

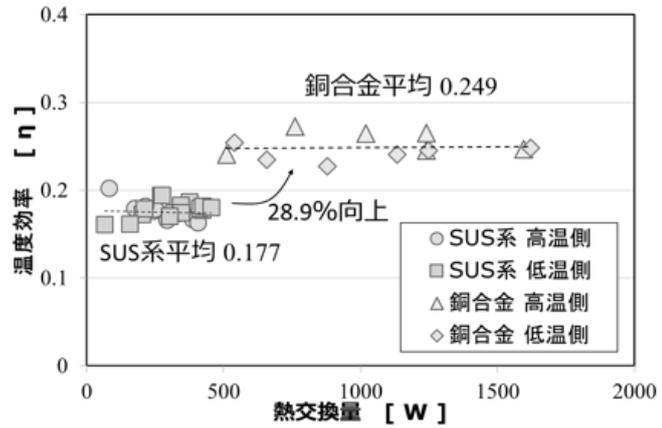


図6 SUS系および銅合金ヒートシンクの温度効率比較

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計3件)

- ・川南剛, 相変化機能性熱媒体の物性および熱的諸特性の検討, 日本鉄鋼協会「環境・エネルギー・社会工学部会 未利用熱エネルギー有効活用研究会」シンポジウム, 2019年
- ・平野繁樹, D相乳化法によるナノエマルジョン生成の温度依存性について, 第54回日本伝熱シンポジウム, 2017年
- ・安部航, 相変化エマルジョン中の相変化物質の過冷却抑制に関する実験的検討, 2016年度日本冷凍空調学会年次大会, 2016年

[その他]

- ・平野繁樹, 潜熱蓄熱型ヒートシンクの構築, 技術移転フォーラム 2019 工業試験場成果発表会 ポスターセッション, 2019年

ホームページ等

<http://www.isc.meiji.ac.jp/~esl/achievement.html#06>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 平野 繁樹

ローマ字氏名: (HIRANO, shigeki)

所属研究機関名: 地方独立行政法人北海道立総合研究機構

部局名: 産業技術研究本部工業試験場

職名: 研究主査

研究者番号 (8桁): 40469680

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 戸羽 篤也

ローマ字氏名: (TOBA, atsuya)

研究協力者氏名: 麓 耕二

ローマ字氏名: (FUMOTO, koji)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。