

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00632

研究課題名(和文) 低位熱エネルギー回収向け多段型相変化蓄熱熱交換システムの開発と熱輸送機構の解明

研究課題名(英文) Study on thermal transport mechanism of phase change thermal storage exchange system

研究代表者

稲垣 照美 (INAGAKI, Terumi)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：90184712

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)： 報告者は使用済み熱エネルギーを有効活用する蓄熱技術「低位熱エネルギー向け相変化蓄熱システム」を新たに考案し、エネルギー有効利用の観点から多段型相変化蓄熱式熱交換システムの設計指針の確立を目指した。その結果、以下の知見を得た。1. 融解プロセスでは伝熱管周りから融解し、伝熱管上部、側部、下部の順に進展する。凝固プロセスでは伝熱管周りから凝固し、左右対称に進展する。2. 融解・凝固時の出入口温度差は、流量が大きいほど小さい。温度効率も、流量が小さいほど大きい。蓄熱速度は流量が大きいほど大きく、放熱速度は流量による影響が少ない。3. 廃熱エネルギーを資源とする本システムの熱工学的な性能を確認した。

研究成果の概要(英文)： Multi stages phase change latent thermal storage heat exchange system which is useful for an ambient temperature range were experimentally investigated to develop a universal air conditioning system and verify the validity as an energy saving system for recycling low level thermal energy. We focused on lauric, myristic and capric acids which are some of fatty acids as a thermal storage medium. Their acids are some of phase change latent heat storage materials which are harmless to the human body. The heat transport mechanisms which accompany a melting process and a solidification process were analyzed using an appropriate visualization and numerical computation.

研究分野：熱工学

キーワード：伝熱 熱交換器 自然対流 相変化 蓄熱

1. 研究開始当初の背景

我が国ではこれまで地球温暖化防止のための二酸化炭素削減に原子力発電を推進した経緯があり、本来のクリーンエネルギーあるいはグリーンエネルギーとしての自然エネルギーの有効活用がある程度制限されて来た。太陽光・風力・水力などの自然エネルギーは、潜在能力が極めて高いが、エネルギー密度が小さく、一極集中型巨大市場へ適さないとされている。しかしながら、大震災を起源とする甚大な原子力災害は、放射性物質による深刻な環境汚染を引き起こしただけではなく、我が国の経済やエネルギー情勢に深刻な影を落とし、世界的規模で原子力発電に依存しない社会的世論が生まれつつある。近年の我が国のエネルギー消費量に注目すると、産業・運輸部門よりオフィスや家庭などの民生部門において特に大きく伸びている(例えば Ministry of Economy, Trade and Industry, Agency for Natural Resources and Energy 2009 など)。この原因の一つには、家庭やオフィスにおける電力消費量の増加が挙げられる。一方、季節間や昼夜間のエネルギー需要差もこれに付随して拡大の一途を辿っており、再生可能エネルギー技術の開発とともにエネルギーの有効利用・省エネルギーに関する技術開発も昨今の環境・エネルギー情勢と相まって喫緊の課題となっている。これらの研究課題は、エネルギー自給率の極端に小さな我が国にとって今後益々その必要性和重要性が高まるものと考えている。すなわち、持続可能システムや社会の構築へ向けて、熱エネルギー工学的な観点からも低位熱エネルギーに関する十分な考察と具体的な設計指針を提示しておく必要がある。一般的に、熱エネルギーの貯蔵技術には、物質の相変化を利用した潜熱蓄熱がある。大容量の電力を直接蓄える蓄電技術は昨今の革新的なイノベーションと相まって技術的には急速な発展途上であるが、民生用として未だに高価な点や電力保持時間が比較的短いことなどが難点として挙げられる。この解決策の一つとしては、電気エネルギーとしてエネルギーを蓄えるのではなく、小型分散化したオフィスや家庭向けに使用済み熱エネルギーをもう一段階を有効に蓄熱しながら再利用するシステムが考えられる。

2. 研究の目的

申請研究は、「低位熱エネルギー回収向け多段型相変化蓄熱熱交換システムの開発と熱輸送機構の解明」である。このシステムでは、工業的に広く利用されている排熱温度域よりもさらに低温域の未利用低位熱エネルギーまでの有効利用を志向している。計画している研究は以下の三つの要素から構成され、それらは①「専用蓄熱媒体の熱・物理・化学的特性の解明」、②「多段型相変化蓄熱熱交換システムの構築と評価」及び③「蓄熱熱交換システム内部の伝熱・流動現象の解

明」である。したがって、申請課題では、蓄熱媒体の最適化と熱物性を同定するとともに、相変化蓄熱に付随する諸熱流動現象を実験と数値シミュレーションの両面から解明しながら、環境志向の家庭用多段型相変化蓄熱熱交換システムの設計指針の確立を目的とする。

3. 研究の方法

申請課題は以下の三つの要素から構成され、①「専用蓄熱媒体の熱・物理・化学的特性の解明」、②「多段型相変化蓄熱熱交換システムの構築と評価」及び③「蓄熱熱交換システム内部の伝熱・流動現象の解明」に分類して課題を解決した。平成 27 年度は、①の研究コンテンツからまずスタートさせる。さらに、平成 27 年度後半と平成 28 年度前半には、カーボンナノチューブ分散流体による自然対流や強制対流の伝熱特性を要素技術の一つとして解明しながら、多段型相変化蓄熱熱交換システムへの作動流体や伝熱機構の最適化を図る。平成 28 年度後半と平成 29 年度前半には、②と③の研究コンテンツに着手する。平成 29 年度後半は、研究期間内に培った要素技術の成果を融合させながら、エネルギーの有効利用や省エネルギー技術の観点から多段型相変化蓄熱熱交換システムの設計指針の確立を図る。

申請課題では、要素実験を担当する研究室内の各グループ間で研究進捗の足並みに乱れが生じないように、定期的なゼミ(全員参加:週1回、個別:毎日)の開催、国内外における関連学術講演会(日本機械学会・化学工学会・日本伝熱学会・可視化情報学会)への大学院生による研究講演を計画し、これまでも大学院生全員が国内外で毎年総計 10 件以上の研究発表を実施している。何れかの研究グループに、もし研究進捗の遅延が生じた場合、申請研究に標準的に必要な研究基盤(各種機器の取扱いや処理技術)を大学院生全員が研究室研修を通じて共有しているため、即座にバックアップが機能し、遅れを補完し合えることが可能である。

研究実施工程表



4. 研究成果

本研究では、工場や商業・民生施設などの様々な環境から排出される廃熱エネルギー

を有効資源として再活用するための方法の一つとして潜熱蓄熱技術に着目した。著者らは小型分散化オフィスや家庭向けに使用済み熱エネルギーを有効に蓄熱しながら再利用する方法としての蓄熱技術「低位熱エネルギー相変化蓄熱式熱交換システム」を新たに考案し、エネルギーの有効利用や省エネルギー技術の観点から民生用多段型相変化蓄熱式熱交換システムの設計指針の確立を目指した。ここでは、融点の異なる相変化蓄熱物質であるラウリン酸、カプリン酸、ミリスチン酸などの脂肪酸をそれぞれ相変化蓄熱式水平円筒熱交換器内に充填し、直列に接続した直列接続二段型相変化蓄熱式熱交換システム及び直列接続三段型相変化蓄熱式熱交換システムを実際に構成して性能評価実験を行った。同時に、脂肪酸に特有な熱物性についても総括的な研究を進めた。

その結果、以下の知見を得た。(1) 融解プロセスでは伝熱管(銅管)周りから融解が開始され、伝熱管(銅管)上部、側部、下部の順に融解が進展する。一方、凝固プロセスでは、伝熱管(銅管)周りから凝固が開始され、左右対称に凝固が進展する。(2) 融解・凝固時の出入口温度差は、流量が大きいほど小さい。温度効率も、流量が小さいほど大きく、また、蓄熱速度は、流量が大きいほど大きい。放熱速度は、流量による影響が少ない。

(3) 二段型あるいは三段型相変化蓄熱式熱交換器の融解・凝固プロセスにおける温度挙動、出入口温度差、温度効率などの特性が単段型相変化蓄熱式熱交換器のそれとほぼ類似する。したがって、本システムでは各蓄熱材の凝固点・融点毎に段階的に熱エネルギーを貯蔵でき、低位熱エネルギーを効果的に回収可能なシステムとなっている。

以上を踏まえて研究遂行者は、幾つかの実験を通じて当該システムが工場や商業・民生施設などの様々環境から排出される廃熱エネルギーを有効資源として再活用するための有望な方式であることを確認した。

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 5 件)

- ① 稲垣照美, 飯島友, 堀邊将人, 李艶栄, 低位熱エネルギー回収向け相変化蓄熱式熱交換器の熱輸送機構, 可視化情報学会論文集, Vol. 37, No. 12, 2018, pp. 64-71 DOI: 10.3154/tvsj.37.64, 査読有
- ② 稲垣照美, 李艶栄, 時田貴成, 糸賀裕也, マグネタイト/フェライト系磁性流体を作動流体とした開放型矩形容器内自然対流の鉛直磁場下における熱輸送機構—赤外線サーモグラフィによる自由界面温度場の可視化, 可視化情報学会論文集, Vol. 37, No. 5, 2017, pp. 11-20, DOI: 10.3154/tvsj.37.11, 査読有

- ③ 稲垣照美, 糸賀裕也, 李艶栄, 山内紀子, 鉛直磁場下におけるフェライト系磁性流体の熱物性と水平密閉矩形容器内の自然対流熱伝達, 化学工学論文集, Vol. 43, No. 4, 2017, pp. 296-305, 査読有 DOI: 10.1252/kakoronbunshu.43.296
- ④ 稲垣照美, 糸賀裕也, 時田貴成, 李艶栄, 鉛直磁場下におけるマグネタイト系磁性流体の熱物性と水平密閉矩形容器内の自然対流熱伝達, 化学工学論文集, Vol. 43, No. 2, 2017, pp. 103-110, 査読有 DOI: 10.1252/kakoronbunshu.43.103
- ⑤ 稲垣照美, 武田直也, 堀邊将人, 李艶栄, 相変化蓄熱媒体の熱物性と水平密閉矩形容器内の自然対流熱伝達—脂肪酸—, 化学工学論文集, Vol. 42, No. 1, 2017, pp. 22-29, DOI: 10.1252/kakoronbunshu.42.22, 査読有

[学会発表] (計 19 件)

- ① 糸賀裕哉, 稲垣照美, 李艶栄, 鉛直磁場下における磁性流体の水平矩形容器内自然対流熱伝達, 日本機械学会関東支部第 24 期総会・講演会, 2018-3
- ② 坂本飛鳥, 稲垣照美, 飯島友, 李艶栄, 相変化蓄熱物質の熱物性, 日本機械学会関東支部第 24 期総会・講演会, 2018-3
- ③ 稲垣照美, 久保田健太, 水平密閉矩形容器内に発現する自然対流輸送現象の数値シミュレーション, 化学工学会第 83 回年会, 2018-3
- ④ 坂本飛鳥, 飯島友, 李艶栄, 稲垣照美, 相変化蓄熱材向け混合脂肪酸の熱物性, 日本熱物性学会第 38 回日本熱物性シンポジウム, 2017-12
- ⑤ 稲垣照美, 飯島友, 坂本飛鳥, 波入拓, 李艶栄, 多段型相変化蓄熱式熱交換システムと蓄熱材の熱特性に関する考察, 日本潜熱工学研究会第 7 回潜熱工学シンポジウム, 2017-12
- ⑥ Asuka SAKAMOTO, Yu IJIMA, Yanrong LI and Terumi INAGAKI, Thermo-physical Properties of Phase Change Latent Heat Storage Materials Mixed Fatty Acid, 13th International Student Conference, 2017-11
- ⑦ 坂本飛鳥, 飯島友, 李艶栄, 稲垣照美, 多段型相変化蓄熱式熱交換システム向け蓄熱材(脂肪酸)の熱・物理特性, 化学工学会第 49 回秋季大会, 2017-9
- ⑧ 稲垣照美, 武田直也, 堀邊将人, 李艶栄, 相変化蓄熱媒体(脂肪酸)の熱物性と水平密閉矩形容器内の自然対流熱伝達, 化学工学会第 49 回秋季大会, 2017-9
- ⑨ 坂本飛鳥, 飯島友, 李艶栄, 稲垣照美, 多段型相変化蓄熱式熱交換システム向け蓄熱材(脂肪酸)の熱物性, 2017 年度日本機械学会関東支部茨城講演会, 2017-8
- ⑩ 窪井俊哉, 李艶栄, 稲垣照美, 噴霧型熱交換器の開発・性能評価, 2017 年度日本

- 機械学会関東支部茨城講演会，2017-8
- ⑪ 飯島友，波入拓，坂本飛鳥，稲垣照美，李艶栄，相変化蓄熱式熱交換器の特性評価，2017年度日本機械学会関東支部茨城講演会，2017-8
- ⑫ 波入拓，堀邊将人，飯島友，稲垣照美，李艶栄，低位熱エネルギー回収向け多段型相変化蓄熱型熱交換器システムの性能評価，日本伝熱学会第54回日本伝熱シンポジウム，2017-5
- ⑬ 坂本飛鳥，堀邊将人，李艶栄，飯島友，稲垣照美，多段型相変化蓄熱交換システム向け蓄熱材の物性，日本伝熱学会第54回日本伝熱シンポジウム，2017-5
- ⑭ 稲垣照美，堀邊将人，飯島友，坂本飛鳥，波入拓，李艶栄，多段型相変化蓄熱熱交換システムと蓄熱材の熱特性に関する考察，日本潜熱工学研究会第6回潜熱工学シンポジウム，2016-12
- ⑮ 時田貴成，稲垣照美，李艶栄，磁場作用下における磁性流体の熱物性と矩形容器内の自然対流熱伝達の可視化，可視化情報学会全国講演会（日立2016），2016-10
- ⑯ 堀邊将人，稲垣照美，李艶栄，飯島友，相変化蓄熱型熱交換器内の熱輸送機構の解明，可視化情報学会全国講演会（日立2016），2016-10
- ⑰ 稲垣照美，李艶栄，原田滉士，等熱流束で加熱された垂直平板上自然対流における乱流域の熱輸送機構に関する研究，日本伝熱学会第53回日本伝熱シンポジウム，2016-5
- ⑱ 糸賀裕哉，阿部将史，稲垣照美，李艶栄，鉛直磁場下における磁性流体の熱物性と水平密閉矩形容器内の自然対流熱伝達，日本伝熱学会第53回日本伝熱シンポジウム，2016-5
- ⑲ 飯島友，武田直也，堀邊将人，稲垣照美，李艶栄，低位熱エネルギー回収向け多段型相変化蓄熱熱交換システムの開発と熱輸送機構の解明，日本伝熱学会第53回日本伝熱シンポジウム，2016-5

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

[その他]
 ホームページ等
<http://www.mech.ibaraki.ac.jp/~hotaru/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

稲垣照美 (INAGAKI, Terumi)
 茨城大学・工学部・教授
 研究者番号：90184712

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()