

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820381

研究課題名(和文) 相変化蓄熱材を用いた船用ハイブリッド蓄熱システムの実測および数値シミュレーション

研究課題名(英文) Measurement and numerical simulation of hybrid thermal storage system for ship using phase change materials

研究代表者

柴原 誠 (Shibahara, Makoto)

神戸大学・海事科学研究科(研究院)・特命助教

研究者番号：70628859

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では相変化蓄熱材の探索及び溶融過程の解明を目的に、排熱回収用熱交換器に関する熱伝達率を計測し、また、相変化蓄熱材の溶融過程を数値シミュレーションにより明らかにした。相変化蓄熱材の選定するために、潜熱量と融点に関する実測及び熱分析を実施した。さらに排熱回収時に必要となる蓄熱材の自然対流熱伝達率を計測した。また、排ガス側の熱伝達に関してはガスループ内に試験発熱体を設置し、熱伝達率の計測及び数値シミュレーションを実施した。一方、蓄熱側は蓄熱時の溶融過程を数値シミュレーションにより明らかにし、種々の蓄熱条件における予測モデルを構築した。

研究成果の概要(英文)：Heat transfer coefficients of phase change material(PCMs) were measured for the heat exchanger of waste heat recovery system. Moreover, the numerical simulation of the PCM was conducted to clarify the melting process of the PCM. The latent heat and the melting point of the PCMs were measured to select adequate PCM for ships. The thermal analysis of the PCMs was carried out. In addition to that, the heat transfer coefficients of the PCM and various gases were measured in the experiment. On the other hand, the melting process of the PCMs was clarified by the numerical simulation and the prediction model of the PCM was developed.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：相変化蓄熱材 排熱回収

1. 研究開始当初の背景

近年、航行中の主機からの排熱を利用した省エネルギー化に関する研究が進められている。また、排ガスの規制が強化され、環境調和型の船舶の開発が注目されている。停泊時の排ガスは港湾周辺の環境に悪影響を与えてしまうため、停泊時の排ガス削減及び航行中における排熱の有効利用が課題である。

2. 研究の目的

本研究では航行中の排熱を相変化蓄熱材により潜熱回収することを念頭に、船用蓄熱材の探索及び溶融過程を解明し、熱交換器に関する蓄熱材の熱伝達率を計測する。

3. 研究の方法

相変化蓄熱材の選定を念頭に、陸用蓄熱材の潜熱量及び融点に関する調査を行った。また、排ガス出口温度近傍で相変化する蓄熱材を選定し溶融実験を行い、熱重量分析により相変化時の潜熱及び熱重量を評価した。次に、船用蓄熱材 (D-mannitol) を用いた排熱回収で重要となる自然対流熱伝達率を計測した。また、伝熱流動解析を実施することでガス温度や流速が熱伝達に及ぼす影響を明らかにし、強制対流熱伝達実験により熱伝達特性について調べた。さらに蓄熱材の放熱時に給湯側で必要となる水側の熱伝達率及び限界熱流束を実験的に調べた。

4. 研究成果

実験に先立ち、陸用蓄熱材の潜熱量と融点を中心に調査を行い、排ガス出口温度近傍で相変化する蓄熱材について文献調査を実施した。図1は各種蓄熱材の潜熱量と融点の関係を示している。

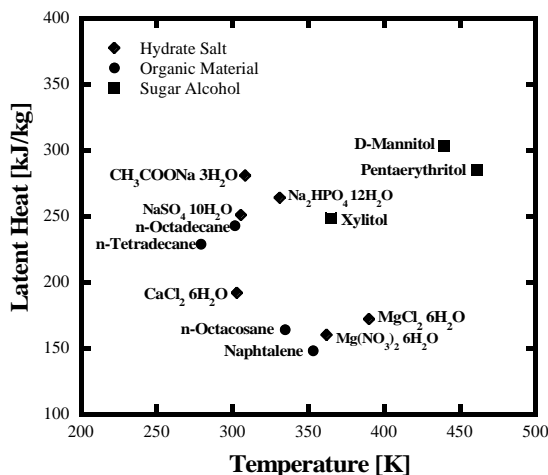


図1 各種蓄熱材における潜熱量と融点

文献調査の結果、陸用での利用実績がある酢酸ナトリウム三水和物 (融点: 約 60 ) だけでなく、新たに有機系の D-mannitol (融点: 約 170 ) に関する蓄熱特性について実験的に調べた。D-mannitol は優れた潜熱量及

び耐腐食性の物質であり、融点が排ガスエコノマイザーの出口温度付近であることから船用蓄熱材の候補として選定した。実験では蓄熱材の溶融及び放熱特性を調べた。

図2に実験装置を示す。実験装置は温蓄熱材の温度履歴を計測するために試験管内には固相の蓄熱材、カートリッジヒーター及び熱電対を設置した。カートリッジヒーターからの入熱を制御し蓄熱材の溶融過程を熱電対により調べた。試験管外からの放熱を減らすために真空断熱とし、後述する数値シミュレーションにおける断熱境界条件と一致するようにした。

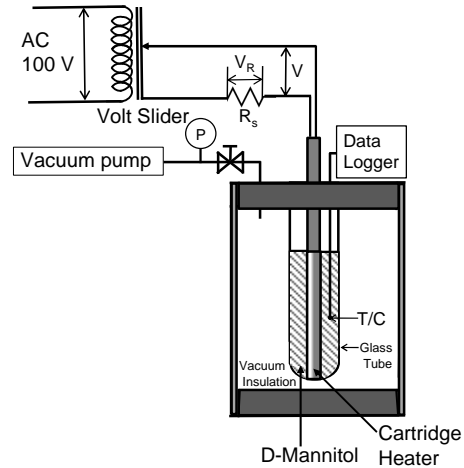


図2 実験装置

実験結果の一例として、d-mannitol の溶融過程を図3に示す。実験データはシンボルで示し、数値シミュレーションの結果は実線で示す。図に示すように、時間経過とともに固相内は熱伝導により線形に温度上昇している。融点近傍で相変化していることから、この区間が潜熱回収となる。カートリッジヒーターの入熱を継続することで蓄熱材が固相から液相へ変化し、温度上昇していることがわかる。

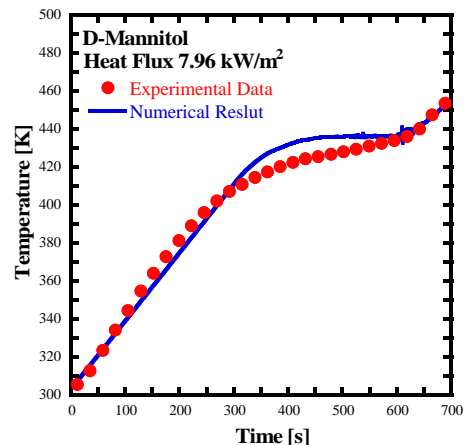


図3 相変化蓄熱材の実測及び数値シミュレーション結果 (温度分布)

また、図4は数値シミュレーションの解析モデルを示している。数値シミュレーションでは実験体系をモデル化するために、カートリッジヒーターの入熱を等熱流束として境界条件を与えた。また、溶融後の速度場における境界条件としては、Non-slip条件とし、蓄熱材上部はFree-slip条件とした。解析では、エンタルピ法により固相の温度場及び溶融時の液相分率及び流況を再現し、解析結果は図3に示すように実験結果を概ね一致していることがわかる。

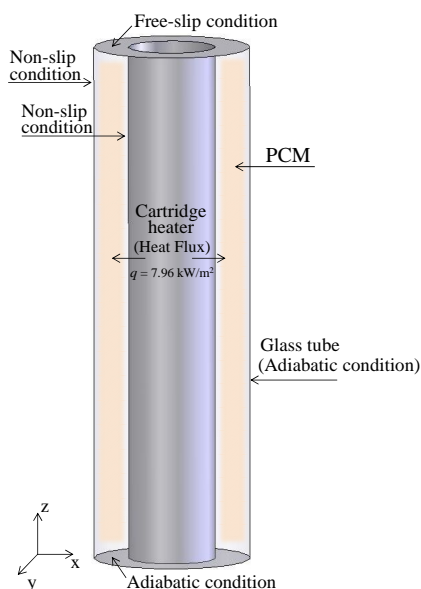
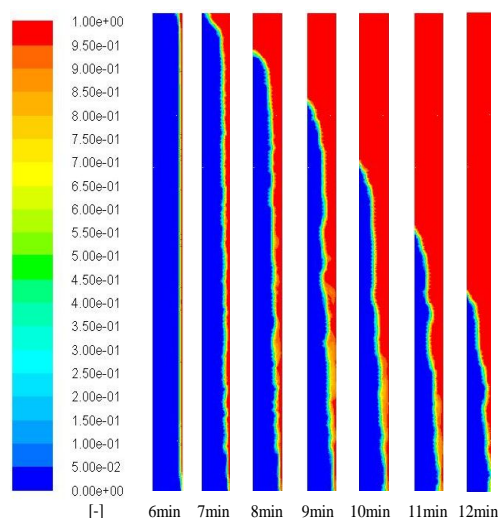


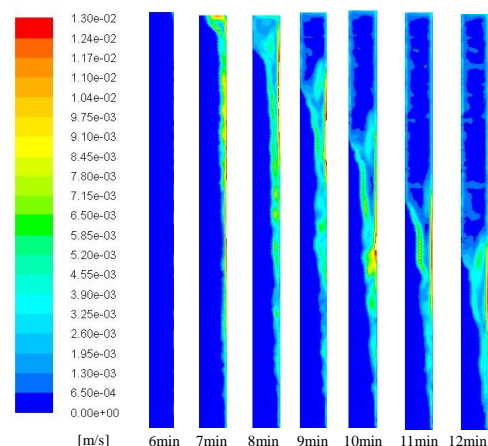
図4 解析モデル

図5は溶融シミュレーションの結果を示している。図5(a)は蓄熱材の液相分率を示している。図中右側から等熱流束を与えることで蓄熱材が相変化を経て液相(赤色)に変化していることがわかる。また、時間経過とともに液相部が占める割合が増えていることがわかる。また図5(b)には溶融時の流況を示しているが、溶融時には自然対流が発生し、溶融を促進していることがわかる。また、発生した自然対流は上部で循環し、左側の固相部に沿うように流れていることが判明した。溶融後の自然対流は固相部と比較して高温であるため、蓄熱材は上部から溶融することが明らかになった。また、酢酸ナトリウム三水和物においても同様な実験及び数値シミュレーションを行った結果、溶融過程はD-mannitolと同様であることを確認した。

放熱実験では酢酸ナトリウム三水和物は温度が融点以下でも液相が継続する過冷却現象が発生し、固相に至る時間が長くなった。図6にD-mannitolの放熱結果を示す。放熱時には凝固熱により温度が一定の状態が継続し、その後固相に至る過程を確認した。また、D-mannitolは過冷却時の時間が酢酸ナトリウム三水和物に比べ短いことが判明した。



(a) 液相分率



(b) 蓄熱材溶融時の速度分布

図5 溶融シミュレーション

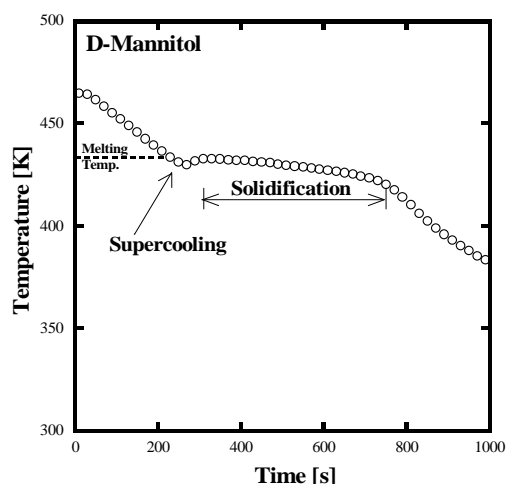
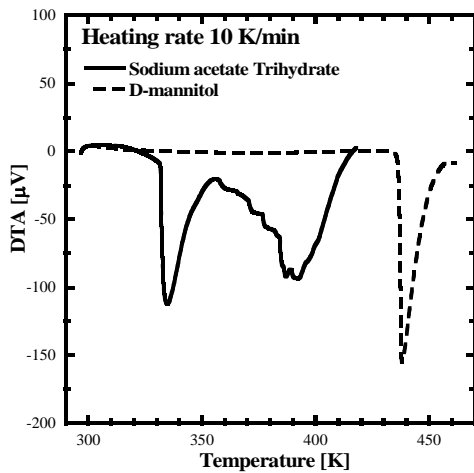


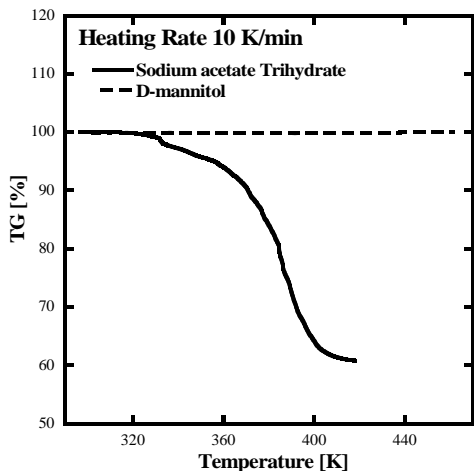
図6 D-mannitolの放熱実験結果

次に、相変化蓄熱材の熱重量分析を実施した結果を図7に示す。図7(a)に示すように酢酸ナトリウム三水和物は融点(約333 K)近くで吸熱反応を示した。また、353K以上で

は酢酸ナトリウム内の水分が蒸発するため、図 7(b)に示すように重量が低下することが判明した。また、D-mannitol は融点が約 436 K となり、重量は温度に依存しないことが判明した。



(a) 蓄熱の温度依存性



(b) 熱重量の温度依存性

図 7 酢酸ナトリウム三水和物及び D-mannitol の熱分析結果

次に排熱回収時に必要な蓄熱材 (D-mannitol) の自然対流熱伝達率を計測した。自然対流熱伝達率は直径 1mm の試験発熱体 (白金線) を用いたジュール加熱によりを計測した。図 8 は実験装置の概要を示している。実験装置は、オイルバス、ホットプレート、スターラー、ビーカー、熱電対及び水平に設置された白金線で構成されている。試験発熱体は直径 1mm の白金線 (全長 43.5 mm) とし、その両端は銅線と銀ろう付けし水平に設置した。また、温度計測で用いる発熱部のタップ間電圧を計測するために直径 0.1mm の白金細線をスポット溶接し、試験発熱体の有効長さを 25.9 mm とした。実験範囲は液相 (455K-502K) とした。

図 9 は D-mannitol における自然対流熱伝達率と代表温度差 (発熱体表面温度と液温の差) を示している。実験結果より、

D-mannitol の自然対流熱伝達率は代表温度差が増加するにつれ高い値を示すことがわかった。また、ガス側の熱伝達に関してはガスループ内に試験発熱体 (白金リボン) を設置し、熱伝達率を計測し、次の実験相関式を取得した。

$$Nu_f = 1.44 Re_f^{0.5} Pr_f^{1/3} \quad (1)$$

ここで、 $Nu$ 、 $Re$  及び  $Pr$  はヌセルト数、レイノルズ数及びプラントル数である。なお、無次元数の各物性値は膜温度を用いた。さらに、伝熱流動解析では、温度境界層の発達過程を明らかにし、熱伝達率の予測モデルを構築した。また、放熱時に給湯側で必要となる水の熱伝達率に関しては、水ループ試験により非沸騰から沸騰領域まで広範囲に渡り実験を実施した。供試管には SUS304 を用いて、種々の液温における沸騰開始点並びに限界熱流束を沸騰曲線から求めた。また、伝熱管径が熱伝達率及び限界熱流束に及ぼす影響について実験的に調べた結果、管径が小さくなるほど熱伝達率が従来の相関式に比べ高い値を示すことから、細管を蓄熱材内の伝熱管に適用することで高効率な蓄熱システムが構築できることが明らかとなった。

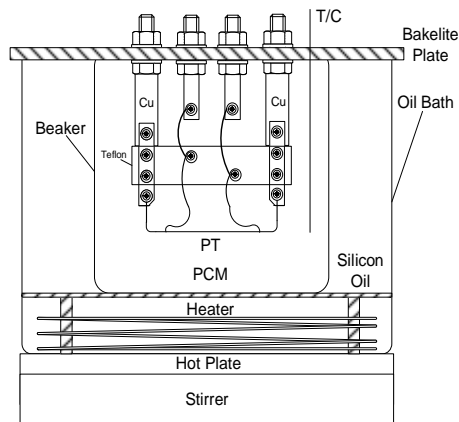


図 8 実験装置概要

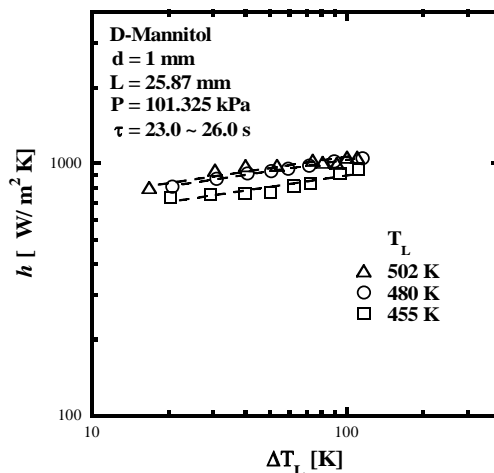


図 9 蓄熱材 (D-mannitol) の自然対流熱伝達率

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Makoto Shibahara, Qiusheng Liu, Katsuya Fukuda, Transient forced convection heat transfer for nitrogen gas flowing over plate heater with exponentially increasing heat input, International Journal of Heat and Mass Transfer, 査読有, Vol.95, 2016, pp.405-415. DOI:10.1016/j.ihheatmasstransfer.2015.12.008.

Makoto Shibahara, Qiusheng Liu, Katsuya Fukuda, Thermal Characteristics of Phase Change Materials for Waste Heat Recovery System, 日本マリンエンジニアリング学会誌 査読有, Vol50 , No.6 , 2015, pp.63-70.

Makoto Shibahara, Heat Transfer Enhancement of Heat Exchanger Inserted Twisted Plates for Carbon Dioxide Gas, Frontiers in Heat and Mass Transfer, 査読有, Vol.6 ,No. 9., 2015, pp.13009. [Http://dx/koi.org/10.5098/hmt.6.9](http://dx/koi.org/10.5098/hmt.6.9)

〔学会発表〕(計 5 件)

Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Yuji Nakamura, Takeo Muroga, Masayuki Tokitani, Hiroyuki Noto, Transient Critical Heat Flux for Subcooled Water Flowing Upward in Vertical Small Tube with Exponentially Increasing Heat Inputs, The First Pacific-Rim Thermal Engineering Conference, 2016.3.13-17, Waikoloa Beach Marriott Resort and Spa, Hawaii's Big Island, (HAWAII, USA).

柴原誠, 劉秋生, 福田勝哉, 潜熱蓄熱材を用いた中低温排熱回収に関する研究, 日本マリンエンジニアリング学術講演会, 2015.10.26-28, 富山国際会議場 (富山県, 富山市) .

Makoto Shibahara, Qiusheng Liu, Katsuya Fukuda, Melting Process of Phase Change Materials for Waste Heat Recovery Systems, The 26th International Symposium on Transport Phenomena, 2015.9.27-10.1, Montan University (Leoben, Austria).

Makoto Shibahara, Experimental and Numerical Investigation of Melting Process in PCM Storage, ASME 2015 Power and Energy Conversion Conference, 2015.6.28-7.2, San Diego Convention Center (San Diego, USA).

Makoto Shibahara, Thermal Storage System Using Phase Change Material for Ship, International Symposium on Marine Engineering, 2014.9.15-19, Harbin Engineering University, (Harbin, China).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

## 6 . 研究組織

(1) 研究代表者

柴原 誠 (Shibahara Makoto)

神戸大学・海事科学研究科・特命助教

研究者番号 : 70628859