

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：11501
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：21K03892
研究課題名（和文）排熱ハベスティング過冷却型潜熱蓄熱マイクロカプセルスラリーの熱流動特性の解明
研究課題名（英文）Elucidation of thermal fluid characteristics of microcapsule slurry for thermal storage that use phase-change material as a means of waste heat harvest
研究代表者
赤松 正人（Akamatsu, Masato）
山形大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：40315320
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）：本研究では、幕田らの研究グループが開発したシリカ膜に覆われたエリスリトール蓄熱マイクロカプセル（ERMs）をKF-96-100csシリコンオイルに分散させ、その分散液の熱流体特性を水熱量計蓄放熱測定システム、音叉振動式および回転式粘度計測定システムを用いて実験的に検討した。この結果、測定条件（質量分率 15%，スターラーの回転子による物理的刺激 900 rpm，10分間）においてERMsに含まれるエリスリトールの放熱量は、エリスリトール潜熱量の52.2%であることがわかった。さらに、ERMs分散液の有効粘度はKF-96-100csシリコンオイルの粘度の約1.70倍であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本が温室効果ガスの排出を大幅に削減するためには、産業分野の排熱回収とその有効利用は重要なテーマである。現在、蓄熱により排熱を貯蔵・輸送して需要をマッチングさせるための研究が進められている。このような状況下、幕田らはシリカ膜に覆われたエリスリトール蓄熱マイクロカプセル（ERMs）を開発し、物理的刺激によるERMsの過冷却解除で分散液が約7 K温度上昇することを確認した。このように、固液相変化の潜熱を利用して蓄放熱する相変化物質をマイクロカプセル化し流体に分散させることで排熱回収の熱輸送媒体としての利用が期待できる。これを実現するためにはERMs分散液の熱流体特性を明らかにすることが重要である。

研究成果の概要（英文）：The temperature increase of 5.2 K was observed by the heat release of the latent heat stored in ERMs. The heat release performance of erythritol was estimated at 167 J/g by considering the heat capacity of the water calorimeter, the heat loss from the experimental apparatus, and the thermal energy generated by a stirrer. The heat storage capacity of ERMs by DSC measurement is 167.46 J/g. The latent heat of erythritol is 320 J/g. The effective viscosity of ERMs dispersions was measured with a vibration-type viscometer and a B-type viscometer at room temperature. The ERMs dispersions was stirred by a stirrer to suppress the deposition of ERMs. The measured effective viscosity of ERMs dispersions with the stirring by a stirrer was 151.57 mPa·s. The effective viscosity estimated by considering the percent deviation was 160.88 mPa·s. This effective viscosity is 1.70 times that of the viscosity of silicone oil.

研究分野：伝熱工学

キーワード：エリスリトール蓄熱マイクロカプセル 潜熱 過冷却蓄熱 放熱量 有効粘度 シリカ膜 シリコンオイル 低温未利用熱エネルギー

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2016年に発効した「パリ協定」に基づいて、日本は2030年度の温室効果ガスの排出を2013年度の水準から26%削減することを目標に掲げた(経済産業省資源エネルギー庁, 2019)。日本がこのような低炭素化を実現するためには、あらゆる技術的な選択肢を追求していく必要がある。なかでも、低温未利用熱エネルギーの回収とその有効利用に係わる技術は、将来、有望な選択肢の一つである。なぜなら、産業分野の排熱実態調査(未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合, 2019年3月)によると、未利用熱エネルギーのほとんどが排熱として破棄されており、その76%が200℃未満の低温未利用熱エネルギーであることが報告されたからである。つまり、目標に掲げた26%削減を目指すためには、低温未利用熱エネルギーの回収とその有効利用は避けて通れないテーマである。このテーマを解決する手段として、旧例に囚われない新たな蓄熱技術のアイデアが求められている。たとえば、2018年7月の学会誌「伝熱」では“エネルギー貯蔵”, 2019年9月の学会誌「化学工学」では“蓄熱技術の最前線と社会実装への挑戦”と題した特集が生まれ、蓄熱技術のブレークスルーが期待されるタイムリーな研究開発が紹介された。現在、蓄熱によりエネルギーを貯蔵、輸送して需要をマッチングさせるための研究開発が精力的に行われている。

2. 研究の目的

近年、幕田らは超音波微粒化技術とカプセル化技術を用いて、蓄熱技術のブレークスルーが期待される過冷却による潜熱蓄熱を可能とした糖アルコール過冷却型潜熱蓄熱マイクロカプセルの製造に成功した(*Advanced Experimental Mechanics*, Vol.3, pp.38-42, pp.43-47, 2018)。そこで本研究では、「スラリー化した糖アルコール過冷却型潜熱蓄熱マイクロカプセルは低温未利用熱エネルギーハーベスタとしてサーマルギャップを埋めることができるゲームチェンジングテクノロジーとなるのか?」を本研究課題の核心をなす学術的「問い」として設定し、以降の研究を実施する。本研究では、幕田らが開発した糖アルコール過冷却型潜熱蓄熱マイクロカプセルをスラリー化した固液分散系の蓄熱、放熱、そして流動特性を明らかにし、サーマルギャップを埋めることができる熱輸送媒体としての最適条件を示すことを目的とする。

3. 研究の方法

幕田らの研究グループが開発したエリスリトール蓄熱マイクロカプセル(以下 ERM_s)をシリコンオイルに分散させた分散液の放熱量を実験的に検討した。測定システム(図1)は、水熱量計(YW-3N, ヤガミ), K型シース熱電対(SCHS1-0, CHINO)を用いた温度計測器(NR-500, NR-TH08, KEYENCE), 直流電源(PMX18-5A, 菊水電子工業), デジタルマルチメータ(7534-02, YOKOGAWA), スターラー(HPS-100, AS ONE), ホットスターラー(C-MAG HS 7 Control, IKA), そして測定データを記録するPC(HP x2 210 G2, HP)から構成される。

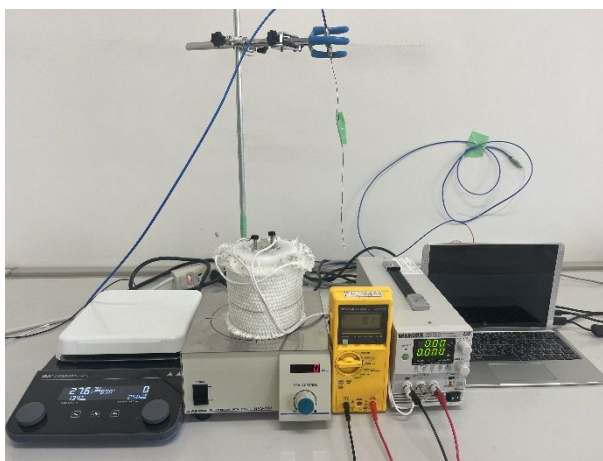


図1 水熱量計蓄放熱測定システム

ERM_s をシリコンオイルに分散させた分散液の有効粘度を音叉振動式粘度により測定した。粘度測定システム(図2)は、粘度計(SV-10, A&D), 測定データを記録するPC(HP x2 210 G2, HP), スターラー(HPS-100PD, AS ONE)から構成される。

ERM_s をシリコンオイルに分散させた分散液の有効粘度を回転粘度計により測定した。粘度測定システム(図3)は、粘度計(ViscoQC 100, Anton Paar), 測定データを記録するPC(HP x2 210 G2, HP), スターラー(HPS-100PD, AS ONE), シース熱電対(1HKF013, CHINO), 温度計測器(NR-500, KEYENCE)から構成される。

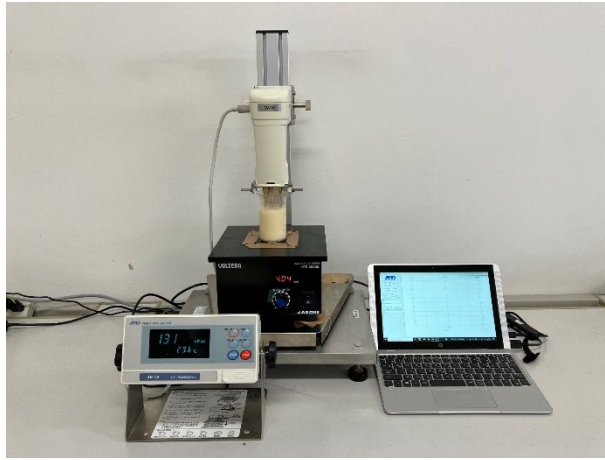


図2 音叉振動式粘度計測定システム

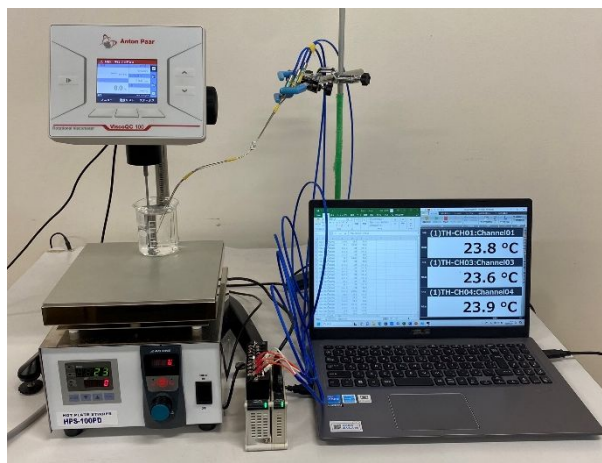


図3 回転粘度計測定システム

4. 研究成果

図4は、ERMs分散液の温度上昇を示す。スターラーの回転子による物理的刺激により過冷却解除がおこなわれ、エリスリトールの潜熱の放熱によって分散液が室温から5.2 K 温度上昇したことが確認された。

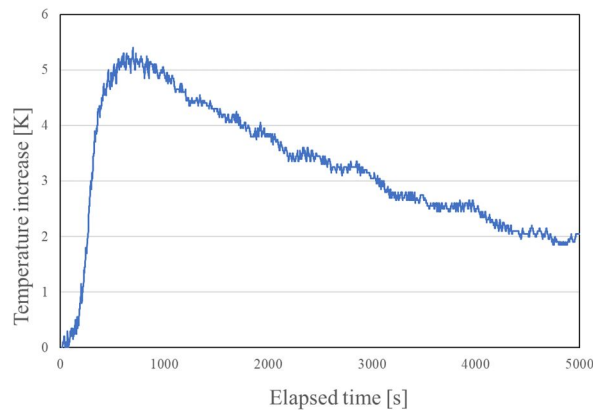


図4 ERM分散液の温度上昇

本測定結果をもとにエネルギーバランス式から算出されたエリスリトールの放熱量は 167 J/g であった。また、DSCによるERMsの熱量分析の結果、吸熱ピークは 118.25 J/g、蓄熱量は 167.46 J/g であった。なお、エリスリトールの融点は 118 °C、潜熱量は 320 J/g である。故に、コアとシェルの質量比は (エリスリトール):(シリカ) = 0.523 : 0.477 と算出される。以上のことから、本測定条件におけるエリスリトールの放熱量は潜熱量の 52.2% であることがわかった。

図5は、シリコーンオイルの粘度とERM_s分散液の有効粘度を示す。赤線はシリコーンオイルの粘度を示す。なお、一点鎖線は信越化学工業によるKF-96-100csシリコーンオイルの粘度データから最小二乗法により求めた近似直線である。赤線における26.0℃におけるシリコーンオイルの粘度は $\mu_1 = 89.57 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ であった。このとき、一点鎖線の26.0℃におけるそれ ($\mu_2 = 94.50 \text{ mPa} \cdot \text{s}$) からの%偏倚量 ($(\mu_1/\mu_2 \times 100 - 100)$) は -5.22%であった。これは本粘度計の測定精度と考えられる。

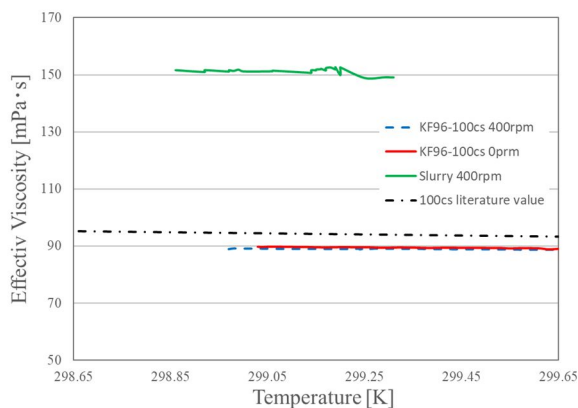


図5 シリコーンオイルの粘度とERM_s分散液の有効粘度

図5の青色の破線は、シリコーンオイルの粘度を示す。破線における26.0℃におけるシリコーンオイルの粘度は89.03 mPa·sであった。このとき、一点鎖線の26.0℃におけるそれからの%偏倚量は -5.79%であった。音叉振動式粘度計を用いた粘度測定においてスターラーによる攪拌が測定に及ぼす影響は小さいことがわかった。

図5の緑線は、ERM_s分散液の有効粘度を示す。緑線における26.0℃におけるERM_s分散液の有効粘度は151.57 mPa·sであった。この有効粘度を、%偏倚量で補正すると、ERM_s分散液の有効粘度は $151.57 \times (94.50/89.03) = 160.88 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ となる。故に、26.0℃におけるERM_s分散液の有効粘度は分散媒であるKF-96-100csシリコーンオイルの粘度の 1.70 倍であることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Daiki Ohya, Ryuki Kida, Yusuke Seto, Toshinori Makuta, Masato Akamatsu
2. 発表標題 Measurements of effective viscosity of silica-covered erythritol microcapsule dispersions for thermal storage with a tuningfork vibration viscometer
3. 学会等名 The 11th International Conference on Smart Systems Engineering 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Koki Yoshikawa, Yusuke Seto, Toshinori Makuta, Masato Akamatsu
2. 発表標題 Heat release amount of silica-covered erythritol microcapsule dispersions estimated by a water calorimeter
3. 学会等名 The 11th International Conference on Smart Systems Engineering 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Fumiya Hibino, Naoya Noguti, Yusuke Seto, Toshinori Makuta, Masato Akamatsu
2. 発表標題 Measurements of effective viscosity of silica-covered erythritol microcapsule dispersions for thermal storage with a rotational viscometer
3. 学会等名 The 11th International Conference on Smart Systems Engineering 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大屋大樹, 木田隆城, 吉川昂希, 幕田寿典, 赤松正人
2. 発表標題 エリスリトール蓄熱マイクロカプセル分散液の熱流体特性
3. 学会等名 The 44th Japan Symposium on Thermophysical Properties
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木田隆城, Balqis Hairudin, 大屋大樹, 幕田寿典, 赤松正人
2. 発表標題 音叉振動式粘度計によって測定された室温におけるエリスリトール蓄熱マイクロカプセル分散液の有効粘度
3. 学会等名 第26回化学工学会学生発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 日比野文哉, 野口直哉, 幕田寿典, 赤松正人
2. 発表標題 回転粘度計によって測定された室温におけるエリスリトール蓄熱マイクロカプセル分散液の有効粘度
3. 学会等名 第26回化学工学会学生発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 吉川昂希, 佐粧祐介, 幕田寿典, 赤松正人
2. 発表標題 水熱量計によって測定されたエリスリトール蓄熱マイクロカプセル 分散液の放熱量
3. 学会等名 第26回化学工学会学生発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yusaku Kaito, Koki Yoshikawa, Toshinori Makuta, Masato Akamatsu
2. 発表標題 Heat release characteristics of silica-covered erythritol microcapsule dispersion
3. 学会等名 The 10th International Conference on Smart Systems Engineering 2022(SmaSys2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taiki Kikuchi, Yusuke Sasho, Toshinori Makuta, Masato Akamatsu
2. 発表標題 Effective viscosity measurements of erythritol microcapsule dispersion with a rotational viscometer
3. 学会等名 The 10th International Conference on Smart Systems Engineering 2022(SmaSys2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Megumu Sakuma, Chizu Ishibashi, Toshinori Makuta, Masato Akamatsu
2. 発表標題 Effective viscosity measurements of erythritol microcapsule dispersion with a tuning fork vibro viscometer
3. 学会等名 The 10th International Conference on Smart Systems Engineering 2022(SmaSys2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大屋大樹・石橋知津・佐久間恵夢・幕田寿典・赤松正人
2. 発表標題 音叉型振動式粘度計による蓄熱マイクロカプセル分散液の有効粘度測定
3. 学会等名 第25回化学工学会学生発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐粧祐介・菊地大気・幕田寿典・赤松正人
2. 発表標題 回転粘度計による蓄熱マイクロカプセル分散液の有効粘度測定
3. 学会等名 第25回化学工学会学生発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroki Goto, Toshinori Makuta, Masato Akamatsu
2. 発表標題 Heat storage characteristics of micro-encapsulated phase change materials
3. 学会等名 The 9 th International Conference on Smart Systems Engineering 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiromi Nishimura, Toshinori Makuta, Masato Akamatsu
2. 発表標題 Effective viscosity measurements of phase change material microcapsule slurry
3. 学会等名 The 9 th International Conference on Smart Systems Engineering 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤松正人・後藤広樹・可土村龍太・佐久間大暉・幕田寿典
2. 発表標題 エリスリトール蓄熱マイクロカプセルの放熱測定
3. 学会等名 化学工学会第87年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤松正人・西村洋海・大屋大樹・封博宇・幕田寿典
2. 発表標題 エリスリトール蓄熱マイクロカプセル分散液の有効粘度測定
3. 学会等名 化学工学会第87年会
4. 発表年 2022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
---------	---------