

機関番号：23201

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760160

研究課題名 (和文) 微細流路とマイクロカプセル含有機能性熱流体を利用した
電子機器冷却に関する研究研究課題名 (英文) STUDY ON ELECTRONIC EQUIPMENT COOLING WITH MICROENCAPSULATED
PHASE CHANGE MATERIAL SUSPENSIONS FLOWING IN MINI-PIPE

研究代表者

中川 慎二 (SHINJI NAKAGAWA)

富山県立大学・工学部機械システム工学科・准教授

研究者番号：30337878

研究成果の概要 (和文)：微細流路にマイクロカプセル含有機能性熱流体を流すことで、小型電子機器に適した新しい冷却システムを提案した。マイクロカプセル内部に固液相変化材を封入することで、冷却液および被冷却物の温度上昇を低減することが可能となる。直径1 mmの微細円管内部に、直径3 μmの相変化マイクロカプセル懸濁液を流し、その伝熱性能を調査した。カプセル添加濃度の増加によって、被冷却物の温度が低減できることを明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：Fundamental thermal performance of a liquid cooling system for small electronic equipment has been examined. A liquid cooling system is attracting attention because an increase of heat generation density in electronic components requires effective cooling. The cooling system proposed in this study uses a mini-pipe and a microencapsulated phase change material (MEPCM). The coolant including the MEPCM with an average diameter of 3 μm was supplied into the mini-pipe having a diameter of 1 mm. The mass concentration of MEPCM was changed from 0 to 5 %. The increase of the mass concentration reduces the temperature rise of the heated pipe wall.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 2,500,000 | 750,000 | 3,250,000 |
| 2010年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：伝熱機器

1. 研究開始当初の背景

近年、電子機器の小型化や高集積化が進み、単位体積あたりの発熱量の増加が問題となっている。この解決策として、微小流路を形成し、冷却液を循環させる方法がある。微小流路を利用することで、体積あたりの伝熱面積を拡大することが可能となる。しかし、流路の微小化に伴い圧力損失が増大する。これは、冷却液の送出に用いるポンプの大型化や、

配管継ぎ手に要求される耐圧性能の増加を招くことから、コストや装置体積の増加につながり、実用化を阻む要因となる。

圧力損失の上昇に対する一つの対策として、相対的に熱輸送性能の高い液体を使うことが考えられる。同じ熱量を除去するために必要な流量を低減することができれば、システム全体にかかる圧力を抑制することが期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、冷却液の熱輸送性能を向上させるため、液体に相変化マイクロカプセル (MEPCM: Microencapsulated Phase Change Material) を添加し、その基本性能を調査する。マイクロカプセルに封入した相変化材は、室温では固体であるが、発熱する電子部品温度では液体となる。そのため、電子部品冷却時には固液相変化が起こり、温度一定のままで熱 (潜熱) を吸収することが可能となる。

相変化材を封入したマイクロカプセルを液体に分散させることで、固液相変化を利用しながら、高い流動性を維持することが可能となる。さらに、液体と相変化材を独立に選定することが可能であり、幅広い応用が期待できる。

本研究では、小型化に適した電子機器液冷技術の開発の基礎研究として、平均粒子径 $3.27 \mu\text{m}$ の MEPCM を含有する懸濁液を内径 1.0 mm の等熱流束加熱面を持つ円管に供給し、MEPCM 懸濁液の伝熱性能を調査し、MEPCM 添加濃度の影響を明らかにすることを目的とする。

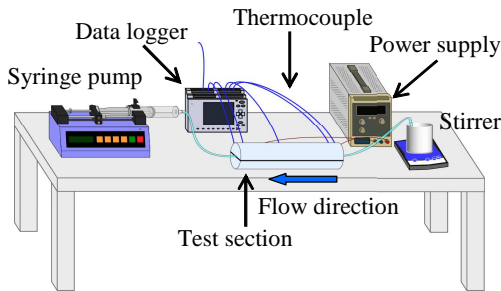


図1 実験装置

3. 研究の方法

図1に実験装置の概略図を示す。実験装置はシリンジポンプ、微小流路、データロガ、攪拌器、熱電対、直流安定化電源、ニクロム線 ($\phi 0.2 \text{ mm}$, $34.67 \Omega/\text{m}$)、断熱材により構成される。微小流路には、長さ 300 mm (加熱部 290 mm)、外径 6.5 mm 、内径 $d = 1.0 \text{ mm}$ の快削黄銅細管 (6/4 黄銅製) を用いた。この熱伝導率は $123 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ である。細管両端は、チューブを接続するために端から 5 mm の部分を外径 2 mm とした。微小流路側面に $\phi 0.6 \text{ mm}$ 、深さ 4.25 mm の穴を 50 mm 間隔に設け、シー型熱電対 (外径 0.5 mm) を挿入し、内壁近傍の温度を測定した。微小流路入口及び出口の懸濁液温度測定には、チューブ内に挿入した熱電対を用いた。細管にはニク

ロム線を一様に巻き、ニクロム線両端に直流安定化電源より 10 W を供給し、等熱流束加熱した。流路の外周は熱損失を抑制するためにポリスチレン断熱材で覆った。

作動流体として、フッ素系不活性液体 FC-3283 (3M 社) のみ、及び、FC-3283 に MEPCM を添加したものをを用いた。添加する MEPCM は質量濃度を $1, 3, 5\%$ とした。流量 V は、出口での懸濁液温度がラウリン酸の融点以上になるように $5 - 10 \text{ mL}/\text{min}$ とした。また、微小流路入口での懸濁液温度を約 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ に統一した。また、MEPCM との比較のために、直径 $4 \mu\text{m}$ のナイロン粒子を懸濁させた実験を行った。

実験に使用した相変化マイクロカプセル (ニッセイテクニカ社) は、相変化材としてラウリン酸、カプセル材として 3 次元架橋尿素樹脂を使用する。ラウリン酸の融点は約 45°C であり、電子機器冷却への適用に適している。潜熱は $181 \text{ kJ}/\text{kg}$ である。

局所ヌセルト数 Nu は、次式より算出した。このとき壁面熱流束は一樣と仮定した。

$$Nu = \frac{Q_{\text{calc}}}{\pi d (T_w - T_b) \lambda_{\text{sus}}} \quad (1)$$

ここで、 Q_{calc} : 懸濁液の熱輸送量 [W], λ_{sus} : 懸濁液の熱伝導率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$], l : 加熱部長さ [m], T_w : 壁面温度 [$^\circ\text{C}$], T_b : 懸濁液温度 [$^\circ\text{C}$] である。懸濁液の熱輸送量は、次式より算出した。その際ラウリン酸は、加熱部出口での懸濁液温度が融点以上で全て融解するものと仮定した。

$$Q_{\text{calc}} = (1 - C_{\text{mp}}) G c_{\text{psus}} (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) + La G C_{\text{mp}} \quad (2)$$

ここで、 G : 懸濁液の質量流量 [kg/s], c_{psus} : 懸濁液の定圧比熱 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$], T_{in} 及び T_{out} : 加熱部入口及び出口付近の懸濁液温度 [$^\circ\text{C}$], La : ラウリン酸の融解潜熱 [J/kg], C_{mp} : 微粒子の質量濃度 [%] である。

この実験装置では、微小流路内の液体温度を直接測定することは、困難であったため混合平均温度を用いて予測した。混合平均温度を次式より算出した。

$$T_b = T_{\text{in}} + \frac{Q_{\text{calc}} x}{G c_{\text{psus}} l} \quad (3)$$

ここで、 x : 加熱部入口からの距離 [m] である。

4. 研究成果

図2に流量 $8 \text{ mL}/\text{min}$ での壁面温度上昇 $T_w - T_{\text{in}}$ を示す。壁面温度から入口温度を引いた値である。 T_{in} は 20°C 、ラウリン酸の融点が 45°C であることから、図2の縦軸が 25°C 付近

がラウリン酸融点に相当する。

MEPCM 懸濁液の場合、質量濃度の増加に伴い壁面温度上昇が低減されている。FC-3283 のみと MEPCM 懸濁液を比較すると、最大で約 10 °C 低下している。これは、ラウリン酸の相変化潜熱により、流路内での懸濁液温度上昇が低減されたからだと考えられる。

流路の後半で、MEPCM 懸濁液の壁温低減効果が顕著に表れている。これは、流入直後には、液温が MEPCM の融点に達しておらず、潜熱の効果が得られないのに対し、流出口付近では液温が上昇しており、MEPCM の融解が進むためと考えられる。

MEPCM 添加量の増加により、壁面温度が低下する。しかし、質量濃度 3 及び 5 % では、測定値がほぼ一致している。この原因として、5 % では、微小流路内でラウリン酸の一部が相変化していないことが考えられる。

壁温がラウリン酸の融点以下である流路入口付近においても、微粒子の添加によって壁面温度が低下している。これは、銅管内の熱伝導により流路後半の温度低下の影響を受けたためと考えられる。

ナイロン粒子懸濁液を供給した場合、FC-3283 のみと比較するとわずかに壁面温度上昇が低下している。この要因として、微粒子の攪拌効果による伝熱促進が考えられる。しかし、その効果は、MEPCM 懸濁液に比べると小さい。

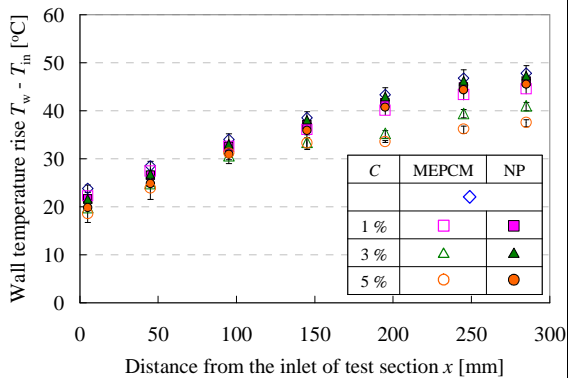


図 2 微細円管の壁温分布 (流量 8 mL/min) (MEPCM とナイロン粒子(NP))

図 3 に平均壁面温度上昇を体積流量の関数として示す。平均壁面温度上昇は、壁面温度の平均値から入口温度を引いた値である。

MEPCM の質量濃度の増加に伴い、すべての流量において、壁面温度上昇が低減されていることが分かる。ナイロン粒子を添加することで壁面温度上昇をわずかに低減できるが、その効果は MEPCM と比較すると小さい。

以上の結果から、ラウリン酸を相変化材を

とする MEPCE の添加により、冷却性能の向上が見込めることを明らかにした。

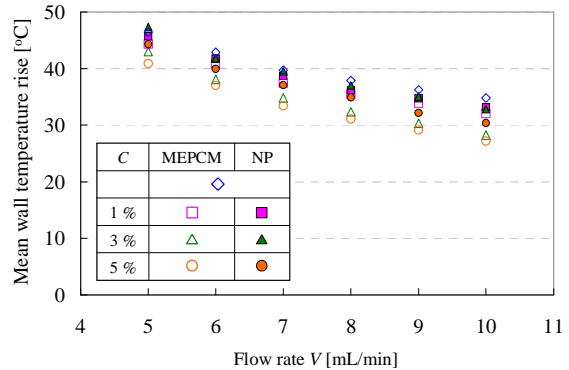


図 3 平均壁面温度と流量との関係 (MEPCM とナイロン粒子(NP))

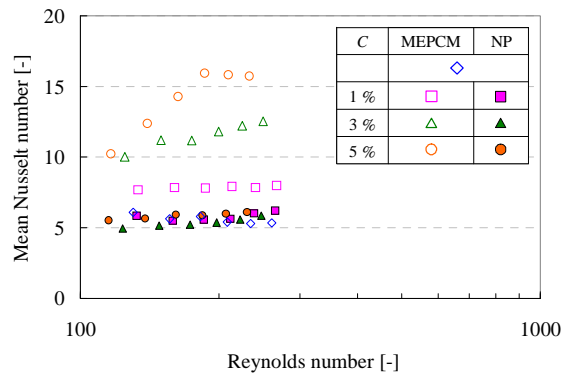


図 4 平均ヌセルト数とレイノルズ数との関係 (MEPCM とナイロン粒子(NP))

図 4 に平均ヌセルト数を示す。FC-3283 のみの場合、熱流束一定・管内層流の $Nu = 4.36$ (The Japan Society of Mechanical Engineers ed., JSME Data Book : Heat Transfer 5th Edition (2009), p. 42.) と近い値を示していることから、装置の信頼性が確保できていると考えられる。

MEPCM 添加量の増加に伴い平均ヌセルト数が増加している。しかし、ナイロン粒子懸濁液の場合、質量濃度を増加させても FC-3283 のみの場合と変化しなかった。このことから、潜熱輸送効果のないナイロン粒子を FC-3283 に添加しても、伝熱性能の向上が見込めないと考えられる。

MEPCM 懸濁液と FC-3283 のみを比較すると、平均ヌセルト数が約 3 倍の値を示した。質量濃度 5 % において、流量 5 - 8 mL/min の間で平均ヌセルト数が急激に上昇している。この原因として、算出した熱輸送量や微小流路内の懸濁液温度が考えられる。本研究で用い

た MEPCM 懸濁液の平均ヌセルト数は、ラウリン酸が微小流路内で全て融解すると仮定し、算出した。これは、現時点ではマイクロカプセル内部のラウリン酸がその程度融解しているか不明であるためである。そのため、実際よりも過大評価している可能性がある。より正確な値を得るためには、熱バランスを把握し、ラウリン酸の融解する割合を考慮した熱輸送量や懸濁液温度を明らかにする必要がある。

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)

[学会発表] (計 6 件)

(1) T. Hashimoto, T. Hayashi, S. Nakagawa, M. Ishizuka, and T. Hatakeyama, Fundamental Study on Forced Convection Heat Transfer Characteristics of Microencapsulated Phase Change Material Suspensions Flowing in Circular Mini-pipe, Proceedings of The 4th International Symposium on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics (4th ISEM).

(2) 橋本武裕, 松本光司, 中川慎二, 石塚勝, 微細流路と相変化マイクロカプセルを利用した電子機器冷却に関する基礎研究, 第 46 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 Vol. I, pp. 249-250 (2009 年 6 月 2 日).

(3) 橋本武裕, 中川慎二, 石塚勝, 相変化マイクロカプセル懸濁液の微細円管内強制対流熱伝達特性, 日本機械学会 2009 年度年次大会 学術講演会講演論文集 Vol.6, pp. 69-70 (2009 年 9 月 15 日).

(4) S. Nakagawa, T. Hayashi, T. Hatakeyama, and M. Ishizuka, Fundamental Study on Heat Transfer Characteristics of Micro-encapsulated Phase Change Material Suspensions Flowing in Circular Mini-Pipe, Proceedings of ITherm2010 (2010)

(5) 林達也, 橋本武裕, 中川慎二, 石塚勝, 畠山友行, マイクロカプセル懸濁液を利用した電子機器冷却の基礎研究 (循環型実験装置における微細円管内強制対流熱伝達特性), 第 47 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 Vol. II, pp. 493-494 (2010 年 5 月 27 日).

(6) 林達也, 中川慎二, 石塚勝, 畠山友行, 相変化マイクロカプセル懸濁液の脈動流による微細円管内強制対流熱伝達特性, 日本機械学会熱工学コンファレンス講演論文集

No.10-25, pp.65-66 (2010 年 10 月 30 日).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中川 慎二 (NAKAGAWA SHINJI)

富山県立大学・工学部機械システム工学
科・准教授

研究者番号 : 3 0 3 3 7 8 7 8

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし