

## 閉ループ式熱輸送管のマイクロ化に関する研究 (管径の影響)

The Study of Micro-Closed-Loop Heat Transport Tube  
(Effects of Tube Diameter)

西尾茂文\*・白樫 了\*

Shigefumi NISHIO and Ryo SHIRAKASHI

## 1. 背景と目的

2006年には $50 \text{ W/cm}^2$ に達するという予測もあるように半導体素子の発熱密度は急速に増大しており、高性能ヒートシンクが必要となっている。また、notebook PCなど情報機器のコンパクト化が著しく進むに伴い半導体素子冷却に許容される空間も限定されてきている。このような状況に伴い、容積をとらず輸送経路に制約の少ない高性能なフレキシブル細径熱輸送管やそれを内蔵した熱拡散板あるいは革新的冷却技術の開発が不可欠となっている。本研究で課題とした熱輸送管については、ヒートパイプが半導体素子冷却に既に利用されているが、細径化に伴い熱輸送限界が急速に低下し、上記の動向に対応できない可能性が高い。

一方、筆者らが蒸気プラグ伝播現象とそれに基づく顕熱輸送モデルの構築<sup>1)</sup>、水及びアルコールを作動液体とした場合の熱輸送特性の把握<sup>2,3)</sup>等を報告してきた気泡駆動型熱輸送管(加熱・冷却部間を蛇行する閉ループに液体を所定の体積割合で封入した熱輸送管)については、内部構造を有しないため細径化に適していると考えられる。管内径Dの影響に関しては、作動上限管径を解析により $D < 1.84\lambda$  ( $\lambda$ は毛管長さ)と示した<sup>1)</sup>ものの、実験的検討は少なく検討の必要がある。そこで、本研究では、3種類の作動液体と3種類の管径について実験的検討を行い、特に作動限界に及ぼす作動液体-管径の影響の基礎的データの蓄積を試みた。

## 2. 実験装置及び実験方法

Fig. 1に装置概略を示した。本体は蒸気プラグ伝播現象について最小ユニットと考えられる2往復型の総延長1836 mm、高さ385 mmのガラス管である。下部50 mmを加熱水により加熱し、上部50 mmを冷却水により冷却し、

\*東京大学生産技術研究所 第2部

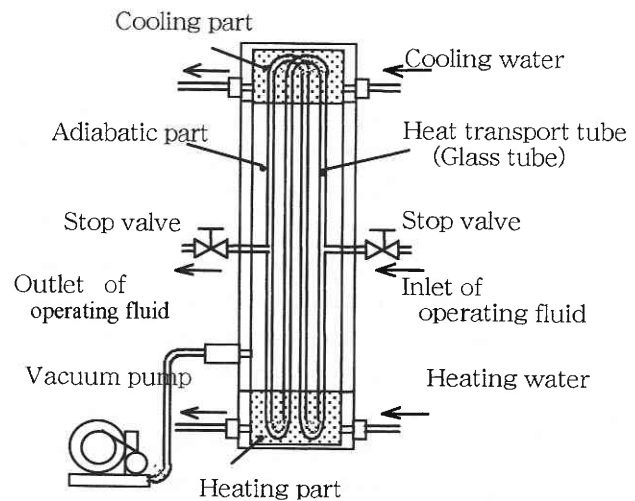


Fig. 1 Experimental Apparatus

またその間の中間部は真空断熱とした。冷却水出入口及び加熱部・冷却部ガラス管内上下端に熱電対を設置した。デジタル流量計により冷却水流量を測定し、冷却水出入口エンタルピー差により熱輸送量 $Q$ を求め、 $Q$ を管内総断面積と作動流体温度勾配 $\Delta T/L$ で除して実効熱伝導率 $k_{\text{eff}}$ を算出した。

試験液体は水、エタノールおよびR 141 b、管内径は $D = 1.8, 2.4, 5.0 \text{ mm}$ 、作動液体封入率は $\alpha = 50, 60, 75 \%$ 、加熱・冷却水温度差は $\Delta T = 30 \sim 50 \text{ K}$ (冷却水温度は $20^\circ\text{C}$ で一定)である。

## 3. 実験結果

3.1 実効熱伝導率 $k_{\text{eff}}$ に対する液体 $\cdot \Delta T \cdot \alpha$ の影響 ( $D = 2.4 \text{ mm}$ )

まず、 $D = 2.4 \text{ mm}$ における $k_{\text{eff}}$ の測定結果をFig. 2に示した。但し、図中に $100 \text{ W/mK}$ として図示した条件は作動

が確認できなかったものである。図より、本熱輸送管は、作動する限り、熱伝導率の低いガラス管（常温で  $1.1 \text{ W/mK}$ ）を使用しているにもかかわらず銅の熱伝導率の100倍程度以上の実効熱伝導率を有することが分かる。 $k_{\text{eff}}$ に対する作動流体の種類・封入率 $\alpha$ の影響は一般に小さいが、R141bが水及びエタノールと比較して高くなっており、潜熱の低い作動流体でも実効熱伝導率が高くなる事が分かる。また、 $k_{\text{eff}}$ は $\Delta T$ が大きくなると高くなる傾向がある。

### 3.2 熱輸送量 $Q$ に対する液体・ $\Delta T$ ・ $\alpha$ の影響 ( $D = 2.4 \text{ mm}$ )

Fig. 3に、 $D = 2.4 \text{ mm}$ における $Q$ に対する各パラメータの影響を示した。 $Q$ は、いずれの場合にも $\Delta T$ にほぼ比例して大きくなっている。これは、管内熱抵抗が極めて小さいことを意味している。実験範囲の $\alpha$ では $Q$ は大差無いが、 $k_{\text{eff}}$ と異なり水の場合に $Q$ が最も高くなっている。これは熱伝導率の差に基づく加熱・冷却部内熱伝達率の相違

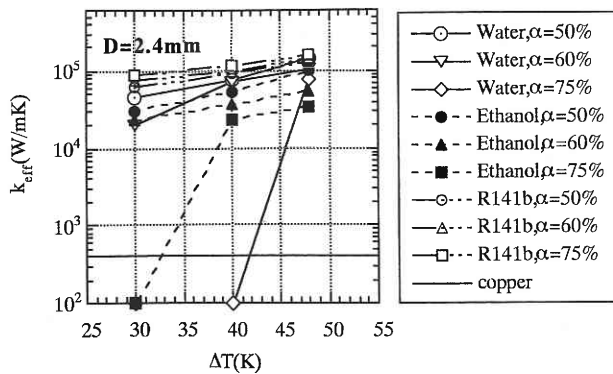


Fig. 2 Typical results of effective thermal conductivity ( $D=2.4 \text{ mm}$ )

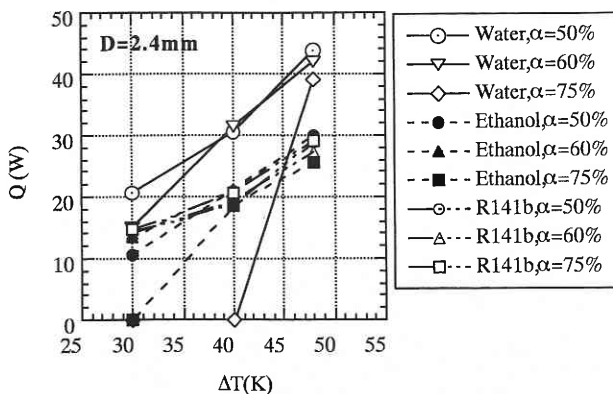


Fig. 3 Typical results of heat transport rate

に起因すると推定される。

### 3.3 管内径 $D$ の影響

既に述べた作動限界管径に関する解析結果をもとに、Fig. 4にR141bにおける $Q$ を無次元径 $D/\lambda$ に対して示した。図より、まず、 $Q$ は $D$ に対して強くは依存しておらず、 $D/\lambda = 1.5$  ( $D = 1.8 \text{ mm}$ )でも $\Delta T = 50 \text{ K}$ の場合には30W程度（管1本当たり7.5W程度）の熱輸送能力があることが分かる。このことは、本実験系では管材料がガラスであること、同程度の管径のヒートパイプの熱輸送限界が3W程度であることを考え併せると、本熱輸送管の利点を示唆していると考えられる。

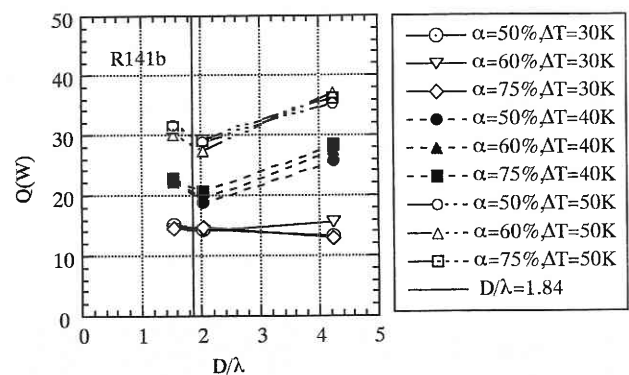


Fig. 4 Effect of tube diameter on heat transport rate (R141b)

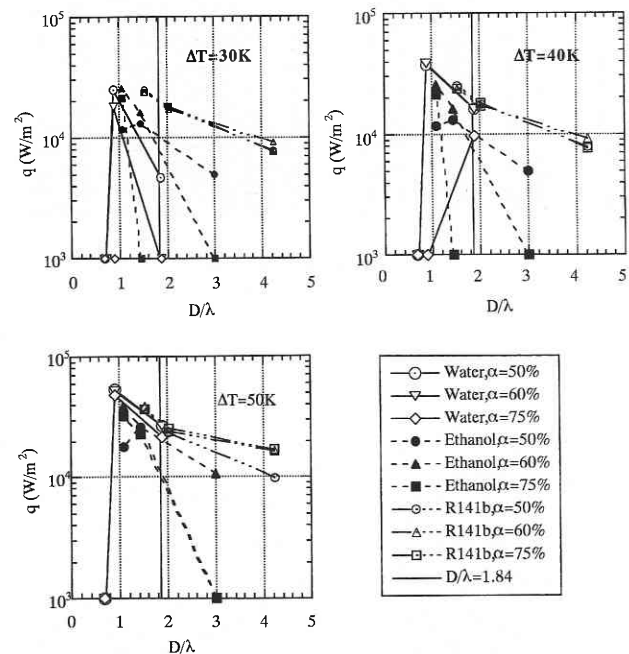


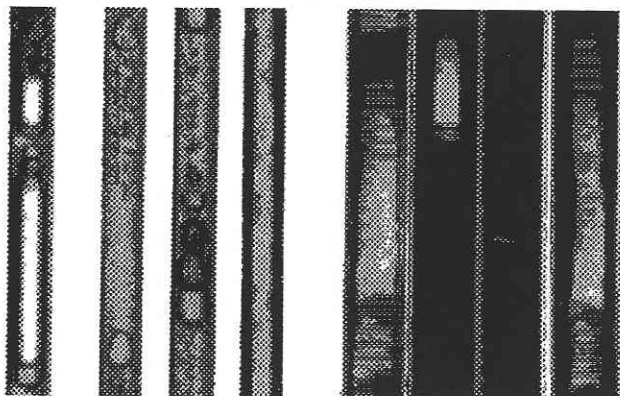
Fig. 5 Effect of tube diameter on heat transport density

## 研究速報

Fig. 5は、 $Q$ を各熱輸送管と加熱水（あるいは冷却水）との間の伝熱面積で割った熱輸送密度 $q$ を無次元内径に対して示したものである。図より、上述の解析結果に反して $D/\lambda > 1.84$ においても、本熱輸送管は作動し十分に高い熱輸送能力を達成できることが分かる。これは、後述するように $D/\lambda \gg 1$ では気液界面が滑らかなでないチャーン流として作動しており、“滑らかな界面”という解析の仮定に原因があると考えられる。一方、 $D/\lambda \approx 1$ 程度までは管径が小さくなるほど $q$ は高くなるが、1を下回ると作動しなくなる傾向が見られる。これは、本熱輸送管において細径化を図ると作動条件が限定されてくる可能性を示唆しており、大きな問題と考えられる。

## 4. 流動観察結果

本熱輸送管については、流動様式についても十分な情報が得られていない。そこで、作動液体を染色しデジタルカメラにより撮影した結果をFig. 6に示した。 $D/\lambda < 1.84$ である左図では気泡は平滑界面を有する扁平気泡でありいわばslug & annular flowであるが、 $D/\lambda \gg 1.84$ である右図ではchurn flowに近づいていることが分かる。

Water,  $D = 2.4$  mmR141 b,  $D = 5.0$  mmFig. 6 Typical flow patterns  
( $\alpha = 50\%$ ,  $\Delta T = 60$  K)

## 5. 結論

気泡駆動型熱輸送管について管径および作動液体の影響について実験的に検討し、以下の結論を得た。(1)本熱輸送管の熱輸送量は、 $D = 1.8$  mm程度においても高い熱輸送能力を示し、同程度のヒートパイプの熱輸送限界を大きく上回る可能性がある。(2)本実験で用いた作動液体の中では水が最も高い熱輸送量を示したが、物性の影響についてはさらに検討が必要である。(3) $D/\lambda \gg 1.84$ でも本熱輸送管は十分作動するが、 $D/\lambda < 1$ では作動させるのに工夫が必要となる可能性がある。(4)本実験範囲内では $D/\lambda$ の増大とともにslug & annularからchurn & annular flowへと流動様式が変化する。

今後は作動限界となる管径を、その機構と併せて解明すると共に、輸送管をフレキシブルにした際の性能への影響（重力方向の変化等）について現象の機構を明らかにしつつ進めていきたい。

(11年12月8日受理)

## 参考文献

- 1) 細田他, 機論, Vol. 64 (1998.6), 1845.
- 2) 永田他, 第34回伝熱シンポジウム論集, I (1997), 269.