



Title	電子機器の高効率冷却のための伝熱界面と冷媒に着目した沸騰熱伝達現象の研究
Author(s)	横内, 貴志男
Citation	大阪大学, 2009, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/49578
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

氏 名	横 内 貴 志 男
博士の専攻分野の名称	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	第 2 2 9 9 2 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 21 年 3 月 24 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第 4 条第 1 項該当 工学研究科ビジネスエンジニアリング専攻
学 位 論 文 名	電子機器の高効率冷却のための伝熱界面と冷媒に着目した沸騰熱伝達現象の研究
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 佐 藤 武 彦 (副査) 教 授 藤 本 公 三 教 授 上 西 啓 介

論 文 内 容 の 要 旨

次世代ハイエンドサーバの高効率冷却方式として、直接浸漬プール沸騰冷却と液循環冷却を組合せた 新しい冷却方式を提案した。特に、熱伝達境界層における冷媒組成と沸騰挙動に着目することにより、最大沸騰熱流束値が 2 倍、モジュール体積あたりの冷却能力が現行空冷装置の 4 0 倍となる冷媒組成を見出すことができた。デバイス界面における熱伝達、デバイスから循環冷却系へつなぐ冷却モジュール、そして循環冷却系の熱伝達の 3 つの実装冷却階層における要素技術の提案と検証から以下の成果を得ることができた。

1. デバイス表面における沸騰熱伝達の制御

高効率冷却方式である沸騰冷却について、実用上の課題である核沸騰遷移時の不安定要因となる温度オーバーシュートの解消、および伝熱限界である膜沸騰遷移を抑えるための提案を行い、これを実証した。

(1)温度オーバーシュートの解消： 従来のキャビティー形成に代わる手法として、沸点の異なる冷媒の添加により、液膜内における沸騰核の発生を可能とすることができ、オーバーシュートが解消することを明らかにした。従来のキャビティー形成法に対し、強度や加工コストを改善するだけでなく、3 次元実装時のデバイス両面からの安定高効率熱伝達が期待できる。

(2)膜沸騰遷移の抑制： 高沸点成分の少量添加を試み、発熱面近傍にドライアウトしにくい液膜を形成できることを見出した。添加効果は添加成分が高沸点なほど高く、冷却能力を単一組成の場合の 2 倍まで向上できた。同様に低温域の液体窒素でも、CF₄の添加により限界熱流束値を 2 倍に向上できることを明らかにした。

2. 小型高密度沸騰冷却モジュール構造

複数のデバイスを高密度に実装して冷却するための沸騰冷却構造を考察し、均一で高効率な冷却が可能なモジュール構造を提案した。試作冷却モジュールが、実用上十分な性能を有することを検証した。

(1)冷却セル構造： サブクール効果を活かした冷却セル構造の考案により、狭いモジュール空間内の蒸気気泡の沸き上がりを制御でき、垂直方向に高密度実装された回路基板上の上下チップ間の温度差を 2℃以内と均一化できることを実証した。

(2)冷却能力： 内容積 700 cm³の試作モジュールについて、冷却能力 1.4 kW を確認した。体積あたり 1.5 MW/m³ となり、次世代サーバ冷却に十分対応できることを示した。

3. 循環冷却系における熱伝達効率向上

沸騰冷却モジュールから熱輸送系への熱伝達率を向上するための冷媒として、高熱伝導物質である Al₂O₃微粒子、また高熱容量材料である相変化マイクロカプセルを分散した水の伝熱物性を検証した。それぞれの冷媒の物性および伝熱特性の実測値を基に行ったシミュレーションから、Al₂O₃微粒子の分散では熱伝達率が水の 2 倍に向上すること、また、相変化マイクロカプセルを分散した場合は熱抵抗を水の 1/3 と低減できることを確認し、循環冷却系における熱伝達効率向上の可能性を明らかにした。

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

本論文は、電子情報機器の高性能化の鍵となる電子デバイスの高密度実装系の冷却技術に関して、沸騰熱伝達現象における界面の熱伝達と冷媒組成の研究から、次世代の冷却技術開発の知見を得ることを目標としている。

デバイス界面、デバイスから循環冷却系へつなぐ冷却モジュール、そして循環冷却系の 3 つの実装冷却階層における要素技術の研究から、核沸騰遷移時の不安定要因である温度オーバーシュート、伝熱限界となる膜沸騰の抑止、蒸気気泡の沸き上がりを制御できる小型冷却モジュール構造などについて新しい提案を行い、効果を検証している。

さらに、要素技術研究の結果をもとに、最大沸騰熱流束値 2 倍、体積あたりの冷却能力が現行空冷装置の 4 0 倍に相当する冷却モジュールの試作実証に成功している。

主な成果は、以下のように要約できる。

(1) デバイス表面における沸騰熱伝達の制御

- ・沸点の異なる冷媒を添加することにより液膜内において沸騰核を発生させることができ、核沸騰遷移時の不安定要因である温度オーバーシュートが解消することを見出した。従来のキャビティー技術に対し、信頼性の向上と加工コストの低減が期待できる。
- ・高沸点成分の少量添加により、発熱面近傍にドライアウトしにくい液膜形成を見出した。膜沸騰遷移を抑え、単一組成冷媒の 2 倍の冷却能力を得た。液体窒素でも、CF₄の添加で同様の効果を得た。

(2) 小型高密度沸騰冷却モジュール構造

- ・サブクール効果を活かして蒸気の沸き上りを制御する冷却セル構造を提案した。試作モジュールの評価から垂直方向に高密度実装されたチップの均一冷却と、700 cm³のモジュールにて冷却能力 1.4 kW を確認した。

(3) 循環冷却系における熱伝達効率向上

- ・シミュレーションから、高熱伝導微粒子の分散により熱伝達率を水の 2 倍へ、また相変化マイクロカプセルを分散により熱抵抗を水の 1/3 へ低減でき、循環冷却系における熱伝達効率向上のめどを得た。

以上のように、本論文は多成分冷媒を適用した沸騰熱伝達現象の研究から単一成分系では知られていない新しい効果を見出すことに成功している。また、小型高効率冷却構造の提案および循環冷却系への高効率熱伝達のための冷媒を提案し、実証している。これらの成果は、電子機器、特に次世代ハイエンドサーバの冷却の高効率化および高密度対応に大きな効果を期待できるものである。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。