

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：23201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05836

研究課題名(和文)3次元積層マイクロプロセッサに適した生物模倣液冷システムとその最適化手法の構築

研究課題名(英文)Fundamental study of liquid cooling methodology for layered electrical components and its optimization

研究代表者

中川 慎二(Nakagawa, Shinji)

富山県立大学・工学部・教授

研究者番号：30337878

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：電子機器の高性能化と小型化が進んでおり、電子機器の冷却の重要性が増している。多くの部品を重ねたような積層構造は小型化には適しているが、部品間での放熱が困難となり、次世代電子機器開発の障害となる。本研究は、このような積層構造内部の冷却に適した液冷システムの開発の基礎となるものである。実験とコンピュータシミュレーションによって、新たな液冷システムの開発に必要な技術開発を行なった。実験では、温度および圧力の変化を正確に測定可能な装置を完成した。スーパーコンピュータを活用したシミュレーション技術も開発し、生物を参考にしたような複雑な流路の最適化に役立つ基盤を構築した。

研究成果の概要(英文)：The performance of the electronic equipment is greatly improving but the size of it becomes small. Layered structure of the electronic component is one of the key technology for achieving the both high performance and small size. However, the difficulty of the cooling in the layered structure will be the bottleneck for the future electronic equipment. This study aims to acquire the basic knowledge and technique of the cooling system which is suitable for the layered structure. Experimental system for evaluate the heat and fluid characteristics of the liquid cooling system has been established. Computational simulation system for reproduce the experimental result has been constructed using open-source software and supercomputers. Outcomes from this study can help the development and optimization of the thin liquid cooling system for the layered structure.

研究分野：熱流体工学

キーワード：電子機器冷却 熱流体シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

近年、電子機器の小型化、高集積化が進み、単位体積あたりの発熱量（発熱密度）は上昇し続けており、効果的な冷却技術の開発が望まれている。現在、一般的に利用されるパーソナルコンピュータにおいても、複数のCPUコアを2次元的に配置したマルチチッププロセッサが利用されている。

これからは、この2次元的なマルチチッププロセッサを、さらに積層することで3次元的に配置する3次元積層システムが普及すると予想されている。3次元配置により、チップ間の距離が大幅に短縮され、消費エネルギーの低減と処理スピード向上の大きなメリットが生まれる。特に、配線距離短縮による発熱低減（消費電力削減）には、大きな期待が寄せられている。

しかし、3層以上の積層構造にした場合、中央部の層では、表面から放熱することができない。そのため、放熱の限界が、電気的な設計を拘束する条件となる。3次元積層システムの実現には、層間における冷却技術がキーテクノロジーとなる。

3次元積層システムの冷却については、基礎的な性能調査に関する研究が始まったばかりである。世界中で関心が高まりつつあり、将来的には多くの研究が始まると予想される。

現在のプロセッサシステムでは、システムの中で必要なトランジスタが占める体積率は100万分の1であるのに対して、残りの部分は電源と冷却システムが使用している。この冷却に必要な体積を削減することなしに、将来の計算機の発展は難しい。

冷却に液冷を採用することで、発熱部付近での占有体積を大幅に削減できる。さらに、回収した熱の再利用が容易であり、エネルギー使用量削減のためにも、排熱回収が容易となる液冷システムが望ましい。

2. 研究の目的

本研究では、取扱いの容易な单相液冷システムを開発する。高発熱量の冷却を目指した研究として、沸騰潜熱を利用した冷却法の実現がある。しかし、3次元積層時の層間冷却では、長さ/流路幅比が非常に大きくなるため、沸騰利用時の気泡の制御、安定した流動の困難さが予想されるためである。

本研究では、次世代計算機を念頭に置いた3次元積層システムを冷却の対象とする。このシステムでは、2つのチップ層でメモリ層を挟んだものが、1つのユニットとなる。このユニットを、基板上に複数重ね合わせて搭載する。これにより、多くのCPUが共有するメモリの容量を大きくしながら、配線を短縮することができる。

積層したユニット間に冷却層を設け、そこ

に冷却液を流すことで、積層システムの層間冷却を可能とする液冷システムを構築する。伝熱特性ならびに圧力損失の測定を可能とし、数値シミュレーションによる予測結果の検証に利用可能な実験データを取得する。

上記実験装置全体での熱移動および流れを再現可能なシミュレーション技術を開発する。微細構造を含むモデルを構成するため、高い演算負荷に耐えることが必要となる。スーパーコンピュータを活用した並列計算を可能とする。

3. 研究の方法

3次元積層システムをモデル化した実験モデルを設計・製作する。様々な冷媒に対応可能なポンプ系、流量測定システム、温度制御系、温度測定システム、および、圧力損失測定システムを備えるものとする。

流量、流路構造、加熱量をパラメータとして変更しながら、冷却対象物の温度分布および冷却流路における圧力損失を計測する。

冷却部における流動状況ならびに熱移動状況を詳細に把握することが可能となるよう、シミュレーション技術を確立する。複雑な流路構造や、多段構造化による計算領域の拡大に対応することを目指し、スーパーコンピュータにおける実行も可能とする。

オープンソースCAEソフトウェアを活用することで、高度かつ大規模なシミュレーションの実施を低コストで実現可能とする仕組みを構築する。

4. 研究成果

構築した実験システムの概要を図1に示す。

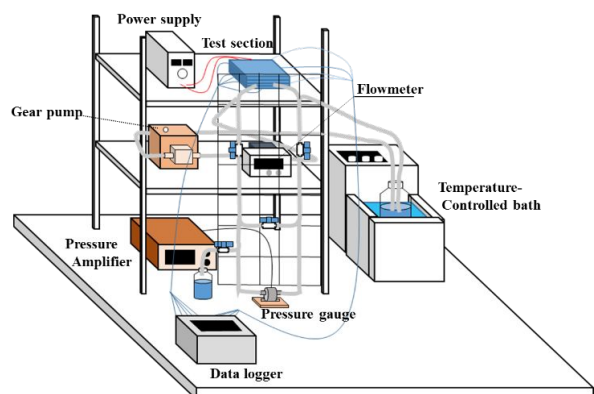


図1 実験システム概要

可変リアクタンス圧力トランスデューサを組み込み、微細な圧力損失の変化を捉えることに成功した。圧力センサの簡易校正も実施可能であり、精度の高い実験結果を取得可

能であることを示した。

高密度、高粘度流体にも対応可能なポンプを装備し、フッ素系不活性液体を流体として使用することが可能となった。今後、幅広い対象流路へも適用し、発展させることが可能である。

実験システムに組み込むテストセクションの概略図を図2に示す。

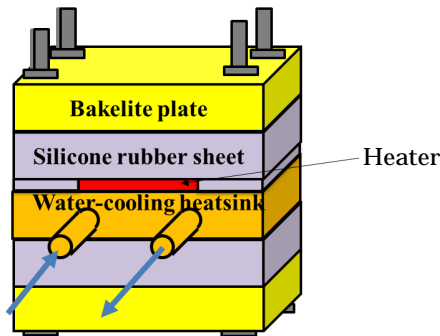


図2 テストセクション概要

冷却流路を内蔵したヒートシンクの上下面に加熱体を設置し、断熱材で挟み込むことが可能である。複数の流路や加熱体を任意に組み合わせることで、様々な試験を実現できるシステムが構築された。予備的な試験を実施し、熱損失を低減した。

流路を内蔵した金属製ヒートシンクでの熱伝導、ならびに、流路における熱流動のシミュレーションを、オープンソースCFDツールボックスであるOpenFOAMによって実施した。

OpenFOAMは世界的に注目が高まっているオープンソースソフトウェアである。流体解析には幅広い応用例が報告されている。しかし、固体領域と流体領域を含むシミュレーションでは、その演算性能（計算速度）が十分でないことから、報告例が少ない。本研究では、OpenFOAMの問題点を明確にするとともに、実用的な利用指針を提示した。

複雑な流路構造を計算対象とするためには、任意形状に適合したメッシュ生成法を確立する必要がある。今後の最適化に向けても、自由度の高いメッシュ生成法が必要である。そのため、OpenFOAMとともに開発されている境界適合型構造格子生成ソフトウェアcfMeshを採用した。複雑な対象から効率的に計算モデルを作成する手順を確立し、公開した。さらに、高精度の計算に適したメッシュを生成することを目指し、SALOMEによる構造格子および非構造格子の生成によるモデル作成手順も確立した。

図3に計算メッシュの一例を示す。ポリヘ

ドラルメッシュを利用することで、計算効率と計算精度を高められることを明らかにした。

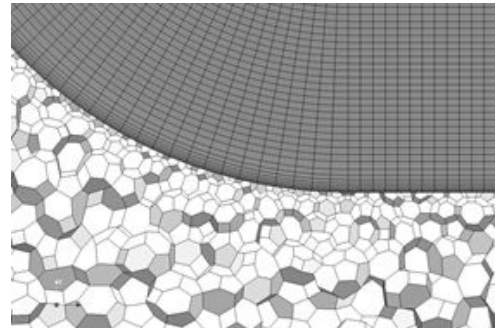


図3 OpenFOAM 固体・液体熱連成解析に適したヘキサ・ポリヘドラル混合メッシュ

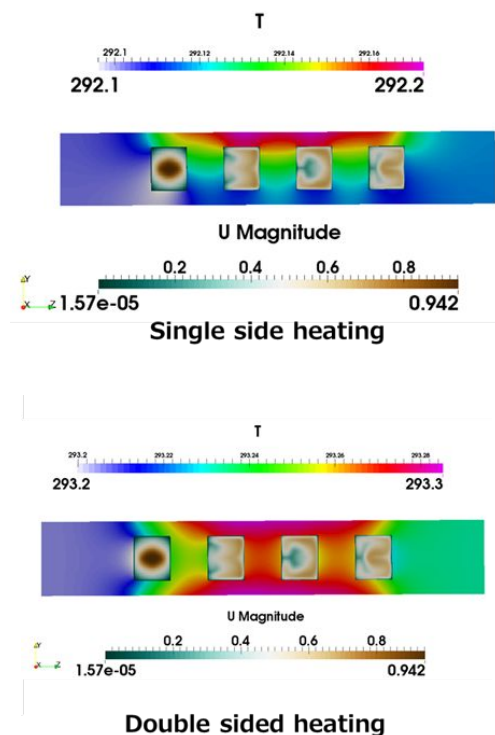


図4 計算結果の一例（銅製ヒートシンク内の温度分布、および、その内部に存在する流路での速度分布；片面および両面加熱）

計算結果の一例を図4に示す。この例では、銅製ヒートシンク内に複数の流路が存在する。銅部分の温度分布および流路部分での流速分布を示している。曲がりを含む流路で形成された2次流れによって、金属部における温度分布が変化する様子を明らかにした。

実験結果とシミュレーション結果の比較から、定性的な一致が得られた。さらに精度の高いシミュレーション結果を得るために、オープンソースCFDソフトウェアの検証や改良にも取り組んだ。旋回等の影響を考慮した乱流モデルをOpenFOAMに実装するとともに、

その改良手順やソースコードも公開した。

研究者番号：30337878

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

R. Hirose, S. Nakagawa, T. Hatakeyama, "Numerical simulation of fundamental liquid cooling heat sink for electronics using OpenFOAM", 査読有, Extended Abstracts of the Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC9), 2017, TFEC9-1310.

〔学会発表〕(計 5 件)

中川慎二, OpenFOAM カスタマイズ入門: レイノルズ平均型乱流モデルのカスタマイズに挑戦, 第60回オープンCAE勉強会(岐阜), 2017.12.23.

Thomas Schiano, 広瀬良平, 飯田圭祐, 清家美帆, 畠山友行, 中川慎二, Conjugate heat transfer analysis of a thin liquid cooling heat sink using OpenFOAM, オープンCAE シンポジウム 2017, 2017.12.8.

中山勝之, 中川慎二, 旋回流れ対応型 k-SST モデルの OpenFOAM への実装, オープンCAE シンポジウム 2017, 2017.12.8.

広瀬良平, 中川慎二, 畠山友行, OpenFOAM を利用した電子機器液冷システムのシミュレーション, 第53回日本伝熱シンポジウム, 2016.5.24-26.

広瀬良平, 中川慎二, 畠山友行, OpenFOAM を利用した電子機器液冷システムのシミュレーション(基本的な解析機能の検証), 日本伝熱学会北陸信越支部春季セミナー, 2016.05.07.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://eddy.pu-toyama.ac.jp/>

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・教授

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

畠山 友行 (HATAKEYAMA, Tomoyuki)

清家 美帆 (SEIKE, Miho)

広瀬 良平 (HIROSE, Ryohei)

飯田 圭祐 (IIDA, Keisuke)

SCHIANO, Thomas