



電子機器向け高性能空冷構造の最適化と予測手法の研究

新, 隆之

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2014-09-25

(Date of Publication)

2015-09-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6219号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006219>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



論文内容の要旨

氏 名 新 隆之

専 攻 機械工学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

電子機器向け高性能空冷構造の最適化と予測手法の研究

指導教員 平澤 茂樹

第1章 緒論 (研究の背景と目的)

高性能サーバや車両用インバータなどに代表される高負荷の電子機器においては、処理速度や計算規模の増大、または高出力化が進み、近年、CPU や変換素子の高発熱密度化が進んでいる。そのため、これら高負荷の電子機器を対象にした冷却技術開発が産学界において重要な課題となっている。特にエンタープライズサーバやスーパーコンピュータにおいては、冷却技術は重要なキー技術の一つとして認識され、ハードウェア設計の最上流に位置付けられるようになった。これらの機器においては、データ処理の中核となる CPU モジュールの冷却と CPU の周辺に大量に搭載されるメモリモジュールの冷却が重要な技術課題である。

エンタープライズサーバを対象にした、従来の強制空冷フィン冷却技術の最大の問題点として、多数並んだ発熱部品を冷却する場合に、冷却風の温度上昇が原因して、後流に位置する発熱部品では高温の冷却風となり冷却性能が悪化することがあげられる。冷却性能の最大化のためには、強制空冷フィン冷却の熱流体現象を実験と解析により詳細に把握し、その結果をもとにすべての発熱部品に低温の冷却空気を流す工夫をすることが必要である。

本研究では、電子機器、特にエンタープライズサーバ向け CPU モジュールやメモリモジュールを対象に、強制空冷構造の改良と一般化により、適用事例を広げ、学術的な検討を加えて体系化することを目指し研究を行う。また本研究では、CPU モジュール向け平行流空冷構造、CPU モジュール向け噴流空冷構造、メモリモジュール向け空冷構造などを対象とする。これらの空冷構造に関し、実験的に伝熱性能を求め、さらに、伝熱性能実測値を無次元数で整理し、また、数値解析手法を用いることにより、伝熱性能の予測手法を提案し、系統的にまとめることを本研究の目的とする。

第2章 傾斜ストリップフィンの伝熱性能と通風方法の検討

高密度 CPU モジュールの平面実装を想定し、平面上に空冷ヒートシンクを搭載した発熱体が2列近接して並んだ実装方式を対象に、後流に位置する発熱体の冷却風高温化による冷却性能悪化を解決するために、冷却性能を高める工夫を施したヒートシンク構造と、風温上昇による温度分布の不均一改善する通風ダクト構造について検討を行った。さらに、改良したヒートシンク構造の伝熱性能を、伝熱工学資料等に記載のあるプレートフィンやオフセットフィンなどの一般的な計算式による値と比較し、様々な対象製品に改良した空冷構造を適用することができるように検討を行った。

上記検討の結果、フィン面に斜めの突起列を多数設けることによって冷却性能を高める傾斜ストリップフィンを考案し、その傾斜ストリップフィンと、風温上昇による温度分布の不均一を改善するマルチフロー方式の通風ダクト構造とを組み合わせた冷却システムを提案した。また、上記冷却システムについて、フィン間空気流れの可視化と、フィン面温度

分布の可視化を行い、傾斜ストリップフィンとマルチフロー方式の通風ダクト構造に、上記の効果があることを定性的に把握した。さらに、伝熱実験を実施し、フィン上部のダクト壁を開けると、前段フィン、後段フィンとも冷却性能は低下してしまうが、温度分布を20℃以下に均一化でき（従来の構造では約40℃であり約50%以下に均一化）、さらに、圧力損失を従来の構造の約50%以下に大きく低減できることがわかった。ブロー動力一定で考えた場合、ストリップ傾斜角 $\theta=7.5^\circ$ のフィンが最も冷却性能が良く、同じフィンであれば、ダクト上壁を開けてバイパス流を後段フィン側に流入させても冷却性能はほとんど同じであることがわかった。可視実験によりストリップ傾斜角 $\theta=7.5^\circ$ のフィンが最も冷却性能が良い理由は、ストリップ列による流れ方向の変化とストリップ列が主流を阻害するための圧力損失の増加との相互作用のためであることを明らかにした。最後に、傾斜ストリップフィンの伝熱性能を表す熱抵抗値と熱伝達率は、Wieting の式を基に算出できることを明らかにした。

第3章 噴流を用いた平板フィン型空冷ヒートシンクの最適化と性能予測

第3章では、高密度CPUモジュールの平面実装を想定し、平面上に空冷ヒートシンクを搭載した発熱体が多数近接して配置された実装方式について、後流に位置する発熱体の冷却風高温化による冷却性能悪化を解決することを目的とし、ヒートシンクに個別に冷却風を送風することにより風温上昇が全く無い噴流方式を前提として実験的検討を行い、大型の銅製平板フィン型ヒートシンクを用いた噴流空冷方式を開発し、その冷却特性を実験により求めた。さらに、その伝熱性能である熱伝達率の実測値を、フィン高さ、ノズル幅、フィン間流路幅の3つの代表的なパラメータを用いて無次元数で整理し、伝熱性能予測法を検討した。

上記検討の結果、水流を用いたフィン間流れの可視化実験と排気部の速度分布測定をとおして、本冷却系における流れの特徴を定性的に把握し、事前に想定した本冷却系の流動様相と合致していることを確認した。また、ブロー動力一定の条件下で、噴流空冷方式と平行流空冷方式の熱伝達率を比較すると、流れ方向に1段しかLSIモジュールが無い場合においても、噴流の方が平行流よりも熱伝達率が20%以上大きいことが分かった。流れ方向にLSIモジュールが多段に搭載された場合には、より一層噴流空冷方式が効果的である（2倍以上）。また、ブロー動力一定の条件下で、噴流を用いた平板フィン型ヒートシンク構造の最適化検討を行い、フィン高さ、ノズル幅、フィン間流路幅の諸量に最適値があることを明らかにした。このように最適値があることは、平行流空冷方式には見られない噴流空冷方式に特有の現象であり、循環流による伝熱特性変化と圧力損失変化が相互作用しているためである。最後に、この噴流を用いた平板フィン型ヒートシンクの伝熱性能に関し、伝熱実験とフィン間流れの可視化実験を通して、フィン高さ、フィン間流路幅、ノズ

ル幅の影響を整理した結果、ヌセルト数：Nu を±20%の精度で予測できる整理式を導出した。

第4章 噴流を用いた平板フィン型空冷ヒートシンクの数値解析

第4章では、3次元非圧縮性流体を対象にしたベナルティ関数法による定常有限要素法解析プログラムを用いて、大型平板フィンを搭載したLSIパッケージの噴流空冷構造を対象に、数値解析を適用した伝熱性能予測法を検討した。

上記検討の結果、数値解析で求めたフィン間空気流の流れパターンは、流れの可視化結果の流れパターンと良好に一致することが分かった。また、フィン側部端面とフィンベース底部の温度分布解析値は、実測値と良好に一致し、解析の誤差は10%以内であった。さらに、ヒートシンクの伝熱性能を表すフィンベース面積基準の平均熱伝達率は、解析値と実測値が良好に一致することが分かった。その結果、第3章の実験により求めた予測整理式は精度が良いことを明らかにした。

第5章 メモリカード列の冷却性能予測手法の検討

第5章では、サーバ等に搭載されるメモリモジュールの空気冷却を対象に、その冷却性能予測法を確立することを目的とし、上流側メモリカードの発熱が下流側メモリカードに及ぼす風温上昇の影響と、メモリカード内の各LSIの熱伝達率について、熱拡散の簡易モデルによる整理式を作り詳細な伝熱実験によりその妥当性を評価した。

上記検討の結果、発熱体により加熱された空気がその下流部で周囲空気と熱混合していない度合いを表す熱混合遅れで整理した。熱混合遅れは発熱体からの距離が大きくなるほど急激に減少し1に近づくこと、熱混合遅れは発熱位置、風速によらず、距離によってのみ決定されることが分かった。これは速度分布によらず単に風温上昇だけが関係しているためである。また、発熱LSI下流の熱拡散簡易モデルにより、熱混合遅れを表す整理式と、風温上昇を含む熱伝達率を表す整理式を提案した。最後に、上記整理式をメモリカードの伝熱実験データで検証した結果、整理式による予測値と実測値は概ね一致し、本メモリカード列の冷却性能予測法が妥当であることを確認できた。

以上、各章に示した研究により、電子機器、特にエンタープライズサーバ向けCPUモジュールやメモリモジュールを対象に、強制空冷構造の改良と一般化により、適用事例を広げ、学術的な検討を加えて伝熱性能の予測手法を提案し、系統的にまとめることができた。

氏名	新 隆之		
論文 題目	電子機器向け高性能空冷構造の最適化と予測手法の研究		
審査委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教 授	平澤 茂樹
	副 査	教 授	山根 隆志
	副 査	教 授	鈴木 洋
	副 査	准教授	川南 剛
	副 査		
要 旨			
高性能サーバや車両用インバータなどに代表される高負荷の電子機器においては、処理速度や計算規模の増大、または高出力化のために、CPU や変換素子の高発熱密度化が進んでおり、そのため、これら高負荷の電子機器を対象にした高性能冷却技術開発が重要な課題となっている。特にエンタープライズサーバやスーパーコンピュータにおいては、データ処理の中核となる CPU モジュールの冷却と CPU の周辺に大量に搭載されるメモリモジュールの強制空冷技術開発が重要な課題である。従来の強制空冷フィン冷却技術の問題点として、多数並んだ発熱部品を冷却する場合に、冷却風の温度上昇が原因して、後流に位置する発熱部品では高温の冷却風となり冷却性能が悪化する現象があった。冷却性能の最大化のためには、強制空冷フィン冷却の熱流体現象を実験と解析により詳細に把握し、その結果をもとにすべての発熱部品に低温の冷却空気を流す工夫をすることが必要である。冷却風の温度上昇対策に注目し、さらに空冷構造の最適化検討も加えて高い冷却性能をもつ強制空冷方式について、学術的に詳細な検討を加えた知見はこれまでに報告されていない。 本研究では、高い冷却性能をもつ強制空冷方式について、伝熱現象解明にもとづく新しい発想による強制空冷構造を提案し、実験的に伝熱性能を評価し、さらに数値解析手法を用いて、伝熱性能実測値を無次元数で整理して学術的な検討による伝熱性能の予測手法の一般化を行い、電子機器向け高性能空冷構造の最適化と予測手法を系統的にまとめることを目的とする。電子機器、特にエンタープライズサーバ向け CPU モジュールの平行流空冷構造、噴流空冷構造、メモリモジュールの空冷構造などを対象とし、冷却風の温度上昇対策に注目して、さらに空冷構造の最適化検討も加えて高性能な強制空冷構造を提案し、伝熱性能の予測手法を提案し、一般化により適用対象を広げ、高性能空冷構造の最適化と予測手法を系統的にまとめるものである。 第1章では、研究の背景、既存の知見、本研究の目的と方法が纏められている。 第2章では、傾斜ストリップフィンの伝熱性能と通風方法について実験的に検討を行い、高性能化と伝熱性能の予測手法を検討した結果を述べている。高密度 CPU モジュールの平面実装を想定し、平面上に空冷ヒートシンクを搭載した発熱体が2列近接して並んだ実装方式を対象に、ヒートシンク構造と通風ダクト構造について検討を行った。検討の結果、フィン面に斜めの突起列を多数設けることによって冷却性能を高める傾斜ストリップフィンとマルチフロー方式の通風ダクト構造とを組み合わせた冷却システムを提案した。フィン間空気流れの可視化と、フィン面温度分布の可視化を行い、さらに、伝熱実験を実施し、フィン上部のダクト壁を開けると、前段フィン、後段フィンとも冷却性能は低下してしまうが、温度分布を20℃以下に均一化でき（従来の構造では約40℃であり約50℃以下に均一化）、さらに、圧力損失を従来の構造の約50%以下に大きく低減できることを明らかにした。ブロー動力一定で考えた場合、ストリップ傾斜角7.5°のフィンが最も冷却性能が良く、同じフィンであれば、ダクト上壁を開けてバイパス流を後段フィン側に流入させても冷却性能はほとんど同じであることを明らかにした。このストリップ傾斜角7.5°が最も冷却性能が良い理由は、ストリップ列による流れ方向の変化とストリップ列が主流を阻害するための圧力損失の増加との相互作用のためであることを明らかにした。また、傾斜ストリップフィンの伝熱性能を表す熱抵抗値と熱伝達率は、Wieting の式を基に算出できること、などの成果を明らかにした。 第3章では、噴流を用いた平板フィン型空冷ヒートシンクの伝熱性能の最適化について実験的に検討を行った結果を述べている。平面上に空冷ヒートシンクを搭載した発熱体が多数近接して配置された実装方			

氏名	新 隆之
----	------

式を対象とする。検討の結果、水流を用いたフィン間流れの可視化実験と排気部の速度分布測定により本冷却系における流れの特徴を把握し、ブロー動力一定の条件下で、噴流空冷方式と平行流空冷方式の熱伝達率を比較すると、流れ方向に1段しかLSIモジュールが無い場合においても、噴流の方が平行流よりも熱伝達率が20%以上大きいことを示し、流れ方向にLSIモジュールが多段に搭載された場合には、より一層噴流空冷方式が効果的（2倍以上）であることを明らかにした。また、ブロー動力一定の条件下で、噴流を用いた平板フィン型ヒートシンク構造の最適化検討を行い、フィン高さ、ノズル幅、フィン間流路幅の諸量に最適値があることを明らかにした。このように最適値があることは、平行流空冷方式には見られない噴流空冷方式に特有の現象であり、循環流による伝熱特性変化と圧力損失変化が相互作用しているためである。また、この噴流を用いた平板フィン型ヒートシンクの伝熱性能に関し、フィン高さ、フィン間流路幅、ノズル幅の影響を整理しヌセルト数を±20%の精度で予測できる整理式を導出したこと、などの成果を述べている。この噴流を用いた平板フィン型空冷技術についての研究成果は、産業界で高い評価を得ている。

第4章では噴流を用いた平板フィン型空冷ヒートシンクの伝熱性能について解析的な検討を行った結果を述べている。3次元非圧縮性流体を対象にしたペナルティ関数法による定常有限要素法解析プログラムを用いて、大型平板フィンを搭載したLSIパッケージの噴流空冷構造を対象に、数値解析を適用した伝熱性能予測法を検討した。検討の結果、数値解析で求めたフィン間空気流の流れパターンは、流れの可視化結果の流れパターンと良好に一致することを示した。また、フィン側部端面とフィンベース底部の温度分布の解析値は、実測値と一致し、ヒートシンクの伝熱性能を表すフィンベース面積基準の平均熱伝達率は、解析値と実測値が一致した。その結果、第3章に実験的検討により求めた予測整理式は精度が良いこと、などの成果を述べている。

第5章では、多数のメモリモジュール列の冷却性能について実験的に検討を行い、その冷却性能予測法について検討した結果を述べている。検討の結果、発熱体により加熱された空気とその下流部で周囲空気と熱混合していない度合いを表す熱混合遅れのパラメータを定義すると、冷却性能が良く整理できることを明らかにした。熱混合遅れは発熱体からの距離が大きくなるほど急激に減少すること、熱混合遅れは発熱位置、風速によらず、距離によってのみ決定されることを示した。これは速度分布によらず風温上昇だけが関係しているためであることを明らかにした。また、発熱LSI下流の熱拡散簡易モデルにより、熱混合遅れを表す整理式と、風温上昇を含む熱伝達率を表す整理式を提案し、整理式による予測値と実測値は一致し、本メモリカード列の冷却性能予測法が妥当であること、などの成果を述べている。

第6章には、本研究の成果が総括されている。

以上、本研究は、電子機器、特にエンタープライズサーバ向けCPUモジュールやメモリモジュールを対象に、冷却風の温度上昇対策に注目し、さらに空冷構造の最適化検討も加えて新しい発想による強制空冷構造を提案し、伝熱性能の予測手法を提案し、高性能空冷構造の最適化と予測手法を系統的にまとめ、その成果は高性能サーバや車両用インバータなどの広い分野の高負荷の電子機器の冷却設計や評価に活用でき、高性能空冷構造の最適化と予測手法について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。提出された論文は工学研究科学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の新隆之は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。