

<b>氏 名</b>	すずき じゅん 鈴木 順
本籍（国籍）	岩手県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博 第290号
学位授与年月日	平成30年9月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	工学研究科 機械・社会環境システム工学専攻
<b>学位論文 題目</b>	<b>熱流体輸送の最適化に向けた流れの脈動現象による 伝熱促進効果の研究</b>
学位審査委員	主査 教授 廣瀬 宏 一 副査 教授 柳岡 英 樹 副査 教授 上野 和 之

## 論 文 内 容 の 要 旨

人間の心臓は1分間当たり約60回から100回の脈を打ち、血液は1分間に身体全体を1周するように脈動で送液している。「なぜ血流は定常流ではないのか」という疑問を持ちつつ生命の進化を考え、生体にとっての血液の輸送の観点から脈動現象は最適化されたものではないかと考えて脈動流の研究に着手した。また、生体の場合、脈動流によって体温調整を行っており、そのメカニズムを知ることにより、その応用として電子機器の超高密度化によって困難になっている冷却効率を向上させること、加えて、栄養分や酸素などを細胞で交換していることと対応させて流体の混合効率の向上へつなげることができるのではないかと考えた。

近年、電子機器や産業機器の携帯性やデザインの自由度を上げるため、小型化の要求が強くなってきている。しかし、小型化に伴い電子回路が高密度実装され、消費電力が上昇しているにも関わらず、熱の逃げ道が小さくなり、機器の温度が上昇してしまう課題に直面している。電子機器の温度上昇は、機器を構成している素子の故障の増加や短寿命化などを誘発する。そこで、先に述べた心臓の脈動現象が体温調節や熱流体輸送において最適化された流れであるとする場合、体全体に対して非常に小さいポンプである心臓のような脈動流源を用いれば、脈動流を利用して冷却装置を非常に小さくダウンサイジングできる可能性がある。

しかし電子機器の冷却へ脈動流を適用するには（1）脈動流を適用した場合、定常流よりも伝熱促進効率が向上するか。（2）脈動流で発生する圧力損失と伝

熱促進効率の関係を検証する必要がある。

本研究では、それらの課題に対して（１）脈動流を用いた伝熱特性の検証（伝熱促進体周りのクリアランスと脈動波形を変えたときの特性評価）（２）ミニチャンネルで脈動流に液体を用いたときの圧力損失と伝熱促進効率の関係の確認の調査を行った。

第１章では、本研究の背景および目的を述べた。特に生体に着目した理由と技術課題をまとめ、今後電子機器の冷却促進に貢献できる可能性を示した。

第２章では、生体で最適化されていると考えられる脈動について伝熱促進効果に寄与するか風洞実験で検証できるセンチサイズの空冷をモデルにした数値解析を行った。その際、発熱体周囲の空間サイズの影響の確認と脈動波形の影響について確認を行い、脈動現象が引き起こす伝熱促進効果について議論した。その結果、発熱体とその周囲の流路の間のクリアランスが広いとき、定常流に比べ脈動流での伝熱促進効果が高くなることを明らかにした。クリアランスが小さいものでは効果が薄いものもあったが、流速条件を最適化することにより脈動流による伝熱促進効果が得られることも知れた。また、脈動波形による伝熱促進効果については波形の加速度や減速度とヌセルト数の関係を明らかにして、伝熱促進効果の向上を示した。

第３章では、脈動による伝熱促進効果が明らかになったところで更なる小型化を考え、水冷でかつミニチャンネルで層流であるとしたときのモデルで脈動流と定常流での伝熱促進効果の比較を行った。伝熱促進体としてのリブの有無、定常流と脈動流でのヌセルト数比較、圧力損失を考慮した際のモデル全体での伝熱促進効果の比較を行った。その際、脈動流が定常流に比べて伝熱促進効率が上がる理由について考察し、圧力損失は定常流よりも脈動流で大きくなるもののリブ付き矩形管の流路ではヌセルト数が定常流の場合よりも飛躍的に向上することが知れた。圧力損失を考慮した伝熱効率から、リブ付き矩形管での脈動流は定常流より優れていることを明らかにした。脈動現象が伝熱促進効果を生み出すメカニズムとして、リブ後方に発生する渦が脈動によって流れが切り替わる際にリブ後面への衝突頻度が高くなること、また主流からの流れを巻き込み、混合されることで熱流体輸送の効率化が図れるなどを明らかにした。

第４章では、これらのことを総括し、生体でみられる脈動流を電子機器の熱流体輸送に適用することにより、小型化が必須な、大きさに制限がある電子機器の冷却に対して脈動流と流路にリブを設けた冷却方法を用いることで高効率な熱流体輸送が可能になり、製品への応用が期待できることなど、今後の展望や工業的な可能性について述べている。

## 論文審査結果の要旨

本論文は、「なぜ血流は定常流ではないのか」という疑問から、生体にとって

の血液の輸送において脈動現象は最適化されたものではないかと考えて脈動流の研究に着手したものである。生体の場合、脈動流によって体温調整も同時に行っており、そのメカニズムを知ることにより、その応用として電子機器の超高密度化に伴い困難になっている冷却効率を向上させること、加えて、栄養分や酸素などを細胞で交換していることと対応させて流体の混合効率の向上など、熱流体の応用範囲の拡張を見据えており、特に伝熱促進効果について検討している。

近年、電子機器や産業機器の携帯性やデザインの自由度を上げるため、小型化の要求が強くなってきており、小型化に伴い電子回路が高密度実装され、消費電力が上昇しているにも関わらず、熱の逃げ道が小さくなり、機器の温度が上昇してしまう課題に直面している。電子機器の温度上昇は、機器を構成している素子の故障の増加や短寿命化などを誘発する。そこで、先に述べた心臓の脈動現象が体温調節や熱流体輸送において最適化された流れであると考えれば、体全体に対して非常に小さいポンプである心臓のような脈動流源を用いれば、脈動流を利用して冷却装置を非常に小さくダウンサイジングできる可能性が見出せる。

本論文では、(1) 脈動流を用いた伝熱特性の検証(伝熱促進体周りのクリアランスと脈動波形を変えたときの特性評価) (2) ミニチャネルで脈動流に液体を用いたときの圧力損失と伝熱促進効率の関係について詳細な研究を行った。

以下に具体的な論文の内容を示す。

第1章では、本研究の背景および目的を述べた。特に生体に着目した理由と技術課題をまとめ、今後電子機器の冷却促進に貢献できる可能性を示した。

第2章では、生体で最適化されていると考えられる脈動について伝熱促進効果に寄与するか風洞実験で検証できるセンチサイズの空冷をモデルにした数値解析を行った。その際、発熱体周囲の空間サイズの影響の確認と脈動波形の影響について確認を行い、脈動現象が引き起こす伝熱促進効果について議論した。その結果、発熱体とその周囲の流路の間のクリアランスが広いとき、定常流に比べ脈動流での伝熱促進効果が高くなることを明らかにした。クリアランスが小さいものでは効果が薄いものもあったが、流速条件を最適化することにより脈動流による伝熱促進効果が得られることも知れた。また、脈動波形による伝熱促進効果については波形の加速度や減速度とヌセルト数の関係を明らかにして、伝熱促進効果の向上を示した。

第3章では、脈動による伝熱促進効果が明らかになったところで更なる小型化を考え、水冷でかつミニチャネルで層流であるとしたときのモデルで脈動流と定常流での伝熱促進効果の比較を行った。伝熱促進体としてのリブの有無、定常流と脈動流でのヌセルト数比較、圧力損失を考慮した際のモデル全体での伝熱促進効果の比較を行った。その際、脈動流が定常流に比べて伝熱促進効率が上がる理由について考察し、圧力損失は定常流よりも脈動流で大きくなるも

ののリブ付き矩形管の流路ではヌセルト数が定常流の場合よりも飛躍的に向上することが知れた。圧力損失を考慮した伝熱効率を用いて、リブ付き矩形管での脈動流は定常流より優れていることを明らかにした。脈動現象が伝熱促進効果を生み出すメカニズムとして、リブ後方に発生する渦が脈動によって流れが切り替わる際にリブ後面への衝突頻度が高くなること、また主流からの流れを巻き込み、混合されることで熱流体輸送の効率化が図れるなどを明らかにした。

第4章では、これらのことを総括し、今後の展望や工業的な可能性について述べている。

以上、本研究では脈動現象が引き起こす伝熱促進効果について発熱体とその周囲の流路の間のクリアランス、および脈動波形による伝熱促進効果について明らかにした。また、生体でみられる脈動流を電子機器の熱流体輸送に適用することにより、小型化が必須な、大きさに制限がある電子機器の冷却に対して脈動流と流路にリブを設けた冷却方法を用いることで高効率な熱流体輸送が可能になり、製品への応用が期待できることなどを示した。これらは、電子機器の小型化や高密度実装を検討していく上で大きな貢献するものと期待される。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。

## 原著論文名 (1編)

題 目 Basic Study on Effects of Dimensions on Heat Transfer Enhancement around Heating Components by Pulsating Airflow

著者名(全員) Jun Suzuki, Nobuaki Suzuki, Koichi Hirose, Takashi Fukue

学術雑誌名 International Journal of Engineering Research and Development, Volume 14, Issue 3, pp.22-28

発行年月 2018年 3月