電界共役流体と放射冷却を組み合わせた CPU 液冷システムに関する研究*

桜井 康雄^{*1}, 中田 毅^{*2}, 枝村 一弥^{*3}

CPU Cooling System Combined Electro Conjugate Fluid and Radiation Cooling

Yasuo SAKURAI^{*1}, Takeshi NAKADA and Kazuya EDAMURA^{*1} Ashikaga Institute of Technology Dept. of Innovative Engineering
268-1 Oomae-cho, Ashikaga-shi, Tochigi, 326-8558 Japan

An Electro-Conjugate Fluid (ECF) is one of functional fluids. A strong jet flow is generated between two electrodes when a high voltage is applied to ECF through the electrodes. By the use of this strong jet flow, a pump with simple structure, no noise and no vibration can be developed. In this view point, authors had developed an ECF-pump using two metallic meshes. This ECF-pump is compact and no noise. In addition, its structure is very simple and it has remarkable properties. Therefore, it seems suitable to adopt this ECF-pump as the power source of a CPU cooling system. On the other hand, recently, the radiation cooling technique tends to be noticed in releasing much quantities of heat generated from LED lamp to surroundings of the lamp. This cooling technique is no noise. From these view points, by combining the ECF-pump with two metallic meshes and the radiation cooling technique, it seems possible to develop CPU cooling system with no noise. In this study, the above mentioned system is fabricated and the basic characteristics of the system are investigated experimentally.

Key Words : Functional Fluids, Electro-Conjugate Fluid, Radiation Cooling Technique, CPU, Cooling System

1. 緒 言

近年、パーソナルコンピュータの性能の向上が著しく、その中核である CPU の発熱量も増加している。CPU の冷却は、一般的には、空冷式あるいはヒートパイプ方式が用いられている。しかしながら、CPU の高性能化に伴い、空冷式ではその大型化が必要となり、振動・騒音、レイアウトの問題に直面している。ヒートパイプ方式は十分な冷却性能を有しているとは言い難い。そのため、CPU の温度がある温度を超えた場合、CPU のクロック数を下げることが行われている。この場合、パソコンの動作性能に影響をおよぼすことが懸念される。

そこで、空気に比べ熱容量が高い不凍液をポンプにより循環させ CPU を冷却し、吸熱・放熱効率が良く、騒音も低く抑えられている液冷式冷却システムが開発された。しかしながら、従来の液冷式冷却システムは、空冷式に比べ複雑な機構を持ち、高コストになってしまう。そのため、このシステムの簡素化、低コスト化が求められている。

電界共役流体 (Electro Conjugate Fluid : ECF)^{(1),(2)} とは、機能性流体の一種である。この液体に一对の電極により直流高電圧を印加すると電極間で他の液体に比べ非常に強いジェット流が発生する。この現象を利用することにより、摺動部分を必要としない単純な構造を持つ振動が発生しない無音のポンプを開発することが可能であると考えられる。

そこで、著者らは線状電極を配した基板を 4 枚用いたプリント基板多層形 ECF ポンプ⁽³⁾およびプリント基板多層形 ECF ポンプと比べポンプ筐体の占める容積で約 66%小さくした管路形 ECF ポンプ⁽⁴⁾を提案した。そして、

* 原稿受付 2013 年 7 月 1 日

^{*1} 正員, 足利工業大学 (〒326-8558 栃木県足利市大前町 268-1)^{*2} 正員, 東京電機大学^{*3} 正員, (有)新技術マネジメント

E-mail: ysakurai@ashitech.ac.jp

Fig.1 Mesh electrode type ECF-pump

これらの ECF ポンプの性能を実験的に明らかにするとともに、これらのポンプを用い、CPU を模擬した熱源を ECF で冷却するシステムを試作し、そのシステムの実現の可能性について明らかにした^{(3),(4)}。ここで試作した液冷システムにおいて、ポンプは無音であるものの、高温になった ECF を冷却するために、回転数とファンの径は小さいながらもファン付きのラジエータを用いている。よって、高温となった ECF を冷却する部分の無音化が望まれている。

一方、ECF ポンプを用いた ECF による新しい液冷システムの実用化ならびに用途拡大の観点から、管路形 ECF ポンプのさらなる小形化による実装自由度の向上が求められている。そこで、筆者らは、一対の電極に金属メッシュ電極^{(5),(6)}を用いた ECF ポンプ（以後、メッシュ電極形 ECF ポンプ）を提案し、その基本性能について明らかにした⁽⁷⁾。このメッシュ電極形 ECF ポンプの開発により十分な実装自由度と性能を有する ECF ポンプの完成に至った。

本研究では、ECF を用いた無音の CPU 液冷システムについて実験的に検討することを目的とする。メッシュ電極形 ECF ポンプを動力源とし、高温となった ECF を冷却する放熱部は放射冷却技術を用いたファンレスの冷却部とした ECF による無音の液冷システムを試作し、その性能を実験的に検討する。なお、放射冷却技術は、それを促進する放熱塗料の開発⁽⁸⁾により LED 電球の冷却において注目されている技術である。

2. メッシュ電極形 ECF ポンプの構造⁽⁷⁾

ECF を用いた無音の CPU 液冷システムの動力源として用いるメッシュ電極形 ECF ポンプの構造を図1に示す。このポンプは、内径 6mm のプラスチックチューブが入る穴をあけたアクリルフランジ、ニッケルメッキを施した金属メッシュで構成されている。これらを接着性、耐久性、耐薬品性および絶縁性に富むエポキシ系の接着剤で接着して製作した。高電位電極側、GND 電極側のそれぞれの金属メッシュの面は ECF の流動方向と垂直に配置されている。その電極間隔は内径 6mm の穴をあけたアクリルスペーサを金属メッシュ間に挟むことによって決めることができる。金属メッシュの空気中にふれている部分は互い違いに配置するものとした。これは、金属メッシュ間の空気中での放電を防ぐためである。

本ポンプの構造および製作上の長所は、アクリルフランジには流路を構成するチューブの外径より若干大きめの穴をあけ、アクリル製のスペーサには流路を構成するチューブの内径と同じ大きさの穴をあけ、それらで2枚の金属メッシュを挟むだけであることである。そのため、構造および製作方法が非常に単純であり、ポンプの性能に大きく影響を及ぼす2枚の金属メッシュ電極の間隔はそれらの間に挟むアクリルスペーサの厚さを調整することにより簡単に決めることが可能である。また、試作したポンプではアクリルフランジはその断面は 20mm×

Fig.2 Experimental apparatus (comparison with heat radiation paints)

20mmで厚さ3mmである。金属メッシュはそのフランジから10mm外側に出ている。これはポンプの試作および実験時の金属メッシュ電極への通電を容易にするためである。よって、本ポンプは図1に示したサイズより小さくすることは十分可能であり、これも本ポンプの長所である。

3. 放熱塗料に関する検討

放射冷却とは、高温の物体が周囲に電磁波を放射することでその物体の温度が下がる現象である。絶対温度が零度ではない全ての物体は、物体内部の分子運動によりその温度に応じた熱エネルギーを電磁波として放射しており、電磁波を放射している物体の温度が下がる。一般の物体では、電磁波による放射エネルギー流束 $E(\text{W}/\text{m}^2)$ は次式で表される^{(9),(10)}。

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

ここで、 ε は放射率で0と1の間の値となる。 σ はステファーン・ボルツマン定数($5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$)である。

この放射冷却を促進するために数種の放熱塗料が市販されている。放熱塗料は、放熱特性が高い顔料、樹脂、放射特性が良好な材料を配合したものである。放射率 ε は物体の表面性状や温度により変化する値であるため、本研究に適した放熱塗料を選ぶ必要がある。そこで、本研究ではA社製とB社製の放熱塗料の2種類を対象とし、その性能について実験的に検討を行い、本研究で試作するECFによる液冷システム用の放熱部に塗布する放熱塗料の選定を行った。

図2に示した実験装置⁽⁸⁾を用いて、2種類の放熱塗料の性能試験を行った。この実験装置は、熱源であるクリプトン電球を囲む木箱、その上に蓋として乗せたアルミ平板(100mm×100mm×5mm)により構成されている。板の温度が一定値に収束するまでクリプトン電球を点灯し、板の裏面の温度 T を熱電対で計測した。クリプトン電球の消費電力を変えることにより容器内の一定となる温度を変化させ本実験を行った。放熱塗料のアルミ板への塗布後は、A社製の塗料は自然乾燥させればよい。一方、B社製の塗料は80℃～100℃で10分の予備乾燥、その後、180℃で20分間乾燥させる必要がある。

実験は温度がほぼ一定となった50分まで行った。実験結果を図3および図4に示す。図3はクリプトン電球のワット数を90Wとした場合、図4はクリプトン電球のワット数を36Wとした場合の実験結果である。なお、実験開始時の温度が若干異なったため、図3および図4の縦軸は初期温度からの差すなわち上昇した温度とした。

図3に示したクリプトン電球のワット数90Wの場合では、放熱塗料を塗布していない場合に上昇した温度が73.5℃、A社製の放熱塗料を塗布した場合に上昇した温度が54.7℃となり、放熱塗料を使用しない場合と比較して18.8℃低い温度となった。一方、B社製の放熱塗料を塗布した場合に上昇した温度が44.2℃となり放熱塗料を使用しない場合と比較して29.3℃低い温度となった。図4に示したクリプトン電球のワット数36Wの場合では、放熱塗料を塗布していない場合に上昇した温度が46.6℃、A社製の放熱塗料を塗布した場合に上昇した温度が30.5℃となり、放熱塗料を使用しない場合と比較して16.1℃低い温度となった。また、B社製の放熱塗料を塗布した場合に上昇した温度が26.1℃となり放熱塗料を使用しない場合と比較して20.5℃低い温度となった。これらの実験結果より、本研究で試作するECFによる液冷システムの放熱部に塗布する放熱塗料はB社製のものを使用することとした。

Fig.3 Experimental results (wattage of krypton lamp=90W)

Fig.4 Experimental results (wattage of krypton lamp=36W)

4. ECF による液冷システムの試作と性能試験

メッシュ電極形 ECF ポンプを動力源とし放射冷却技術を用いたファンレスの冷却部を持った ECF による液冷システムを試作し、その性能を実験的に検討した。製作した液冷システムを図 5 に示す。本実験装置では液冷ジャケットには市販されている水冷式システム用のものを用いた。CPU を模擬する発熱源として、ヒータを使用した。ヒータから放出される熱を液冷ジャケットから外気へ逃がさないようにし、その内部を流動する ECF へ全て伝えるため液冷ジャケットの周囲を断熱材で覆った。ラジエータにおいても上部の面のみからの空気への自然対流熱伝達および放射冷却によって内部を流れる ECF の温度を下げるため、上部の面以外は断熱材で覆った。なお、ラジエータの放熱面のサイズは 100mm×100mm とした。

本実験ではヒータの発熱量は 10W に設定し、ECF には現在最も強いジョット流が発生することが確認されている FF-3EHA2 を用いた。メッシュ電極形 ECF ポンプに 1.5kV の電圧を印加し ECF を流動させると同時にヒータからの発熱を開始し、液冷システム各部の温度を計測した。放熱用コーティング剤を塗った場合と塗らない場合でこの実験を行った。放熱用コーティング剤を塗らない場合は自然対流熱伝達のみで外気に内部の熱を逃がす。一方、放射冷却剤を塗布した場合はこの自然対流と放射冷却により内部の熱を逃がす。

実験結果を図 6 に示す。ここで、縦軸は初期温度からの差すなわち上昇した温度とした。この図より、放熱塗料を塗った場合と塗らない場合で上昇した温度 ΔT を比較した結果、実験開始から 7 分程度過ぎたところから差

Fig.5 Experimental apparatus for cooling test

Fig.6 Experimental results of cooling test

が出始めたことがわかる。また、実験開始から 40 分経過してヒータの温度がほぼ一定となった際のヒータの初期温度からの温度差は放熱塗料を塗布すると約 4°C 低くなるという結果が得られたことがわかる。これは、放射冷却によるものであり、本液冷システムの放熱に放射冷却の効果が現れていることがわかる。これにより、ECF による無音の液冷システムの開発の可能性を示すことができたものと考えられる。なお、本実験では、ECF の流量は $1.5\text{cm}^3/\text{s}$ から $2.0\text{cm}^3/\text{s}$ の間であった。

5. 結 言

本研究では、メッシュ電極形 ECF ポンプを動力源とし放射冷却技術を用いたファンレスの冷却部を使用した ECF による新しい無音の液冷システムを試作し、その性能について実験的に検討を行った。その結果、放射冷却の有効性および ECF による無音の液冷システムの開発の可能性を示すことができた。今後の課題は、ECF の流量を増やした場合、熱源の発熱量を大きくした場合、放熱塗料を塗布する冷却部の面の表面積を大きくした場合の

性能試験を行うことである。これらの実験により、実際に使用されている CPU に対する本システムによる冷却の実現の可能性および本システムの最適な動作条件ならびに系統的な設計手法について明らかとしたい。

最後に本研究を行うにあたり、放熱塗料およびその性能実験方法についてご教示いただいた(株)AP ロウマテリアルズ岡島敏氏、実験にご協力いただいた足利工業大学大学院生の長屋貴洋君ならびに当時足利工業大学学生であった芳賀亮輔君に謝意を表する。

文 献

- (1) 横田眞一, 貞本敦史, 近藤豊, 大坪泰文, 枝村一弥, “電界共役流体(ECF)を応用したマイクロモータ (ステータ電極 (SE) 形マイクロモータの提案)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 66, No. 642 (2000), pp. 627-633.
- (2) 横田眞一, 根本敏之, 近藤豊, 大坪泰文, 枝村一弥, “電界共役流体(ECF)を応用したマイクロモータ (ロータ電極 (RE) 形マイクロモータの提案)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 66, No. 651 (2000), pp. 3799-3804.
- (3) 桜井康雄, 門井寛人, 中田毅, 枝村一弥, “プリント基板多層形 ECF ポンプの開発と液冷システムへの応用”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 72, No. 715 (2006), pp. 991-996.
- (4) 桜井康雄, 中田毅, 枝村一弥, “管路形 ECF ポンプの開発と CPU 液冷システムへの応用”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 75, No. 753 (2009), pp. 966-971.
- (5) 中田毅, 桜井康雄, 枝村一弥, “電界共役流体を用いたピストン形リニアアクチュエータの開発”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 71, No. 706 (2005), pp. 2014-2019.
- (6) (有)新技術マネイジメント, リニアモータ, 日本国特許第 3225016 号.
- (7) 桜井康雄, 五十嵐友彰, 中田毅, 枝村一弥, “メッシュ電極を用いた ECF ポンプの提案”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 78, No. 786 (2012), pp. 291-298.
- (8) 岡島敏, 松永典久, 小野夢人, “LED 電球の発熱に対する放射冷却効果に関する研究”, 日本機械学会 2012 年度年次大会(2012).
- (9) 日本機械学会, 機械工学便覧 A6 熱工学, (2001), p.100, 丸善.
- (10) 坂田勝, 田坂英紀, 伝熱工学, 第 2 版 (2005), p.128, 森北出版.