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*

桜井 康雄^{*1}, 門井 寛人^{*2}
中田 毅^{*3}, 枝村 一弥^{*4}Development of Printed Circuit Board Multi-layered Type ECF-pump
and Its Application to Liquid Cooling SystemYasuo SAKURAI^{*5}, Hiroto KADOI,
Takeshi NAKADA and Kazuya EDAMURA^{*5} Department of Mechanical Engineering, Ashikaga Institute of Technology,
268-1 Oomae-cho, Ashikaga-shi, Tochigi, 326-8558 Japan

By developing various electronic equipments with high performance, the dissipated power of electric chips used in those equipments has been increased. Therefore, it has been important to cool those electronic chips, and a liquid-cooling system has been employed for some electronic equipments. An Electro-Conjugate Fluid (ECF), which is one of functional fluids, has a remarkable property that a jet flow is generated between two electrodes when a high voltage is applied to the electrodes. By the use of this strong jet flow, a pump with simple structure, no noise and no vibration can be developed and a new liquid cooling system by ECF seems to be realized. In this study, to realize the liquid cooling system by ECF, an ECF-pump is proposed, in which four printed circuit boards are layered to make the pump size compact. The proposed pump is fabricated, and experiments are performed to investigate the basic characteristics of the pump. Furthermore, in the liquid cooling system with the proposed pump, experiments to cool a heat source are performed to investigate the possibility of achievement of the liquid cooling system by ECF.

Key Words: Machine Element, Machinery, Information Processing Equipment, Pump, Heat Transfer, Functional Fluid, ECF, Liquid Cooling System, Electronic Chip

1. 結 論

種々の電子機器の高機能化・高性能化により、それらの機器を構成する電子部品から発生する熱への対策がこれまで以上に重要となっている。一方、そのような電子機器の高品位化のために、静音化に対する要求も年々厳しいものとなってきている。

近年その性能向上が著しいパーソナルコンピュータにおいては、その中核であるCPU(中央演算処理装置)もその高性能化に伴い発熱量も増加の一途にある。例えば、デスクトップ形PC用のCPUであるインテル®Pentium®4 プロセッサ 3.8 GHzでは最大消費電力 115 W(最高動作温度 70.8°C)となっている⁽¹⁾。そのため、CPUの冷却システムにポンプを用いて不凍液を循環させる液冷システムを採用するパーソナルコンピュータが発表されている⁽²⁾。この液冷システムの

採用は、空冷フィンが必要なくなったことによる実装自由度の向上あるいはファンの低回転化による騒音・振動の低減に寄与している。

さらに、近年その用途が拡大の一途である液晶プロジェクタにおいても、空冷用のファンによる騒音を抑さえ高品位化を図るために液冷システムの採用が始まりつつある。

このような現状から、液冷システムはますますその用途が広がるものと推察され、今後の電子機器の高機能・高品位化ならびに小形化に重要な役割を果たすものと思われる。

電界共役流体(ECF: Electro-Conjugate Fluid)⁽³⁾⁽⁴⁾とは、機能性流体の一種である。ECFに満たされた容器内で、一対の電極によりECFに直流高電圧を印加すると電極間で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で、しゅう動部分を必要としない単純な構造を持つ騒音のないポンプの開発が可能であると考えられる。その結果、ECFを用いた新しい液冷システムの開発が可能となるものと期待される。

横田らは次世代ノート形PCなどのCPU冷却のため、ECFを用いた液冷システムを実現することを目標とし、基板に線状電極を配置したA4サイズの薄い

* 原稿受付 2005年6月16日。

^{*1} 正員、足利工業大学工学部(☎326-8558 足利市大前町268-1)。^{*2} NSK ニードルベアリング(株)(☎370-0884 高崎市八幡町358)。^{*3} 正員、東京電機大学情報環境学部(☎270-1382 印西市武西学園台2-1200)。^{*4} 正員、(有)新技術マネイジメント(☎124-0023 東京都葛飾区東新小岩2-9-1-306)。

E-mail: ysakurai@ashitech.ac.jp

ノート形 PC に実装可能な平面形ポンプを提案, 試作している⁽⁵⁾⁽⁶⁾。しかしながら, そのポンプを用いた ECF 液冷システムでの発熱源冷却試験は行われていないのが現状である。また, ECF を用いた液冷システムを種々の機器に応用するためには, ポンプの小形化も重要となる。

そこで, 本研究では, ECF を用いた新しい液冷システムの実現の可能性について実験的に検討することを目的とする。始めに, ECF を用いた液冷システムを実現するために, 電極を配置したプリント基板を多層化することにより小形化を図った ECF ポンプを提案, 試作し, 実験的にその基本的な特性を明らかにする。次いで, この ECF ポンプを用いた液冷システムを試作し, 実験的にその実現の可能性について検討する。

2. 主 な 記 号

H : ヒータ発熱量

P_L : 負荷圧力(ポンプ吐出し圧力)

Q_P : ECF ポンプ吐出し量

T : ヒータ温度

Fig. 1 Printed circuit board type ECF-pump

Fig. 2 Circuit board for ECF-pump

T_1 : 液冷ジャケット入口 ECF 温度

T_2 : 液冷ジャケット出口 ECF 温度

T_3 : ラジエータ入口 ECF 温度

T_4 : ラジエータ出口 ECF 温度

V_{in} : ECF ポンプ印可電圧

X : 液面の変位

3. プリント基板多層形 ECF ポンプ

3.1 構造 図1に試作したプリント基板多層形 ECF ポンプの構造を, また, 図2にそのポンプに使用した基板を示す。本研究で試作した ECF ポンプは, デスクトップ形パーソナルコンピュータおよび液晶プロジェクトに実装可能な幅 140 mm, 奥行 60 mm, 厚さ 35 mm とした。また, ポンプの入口, 出口における損失を防ぐため, ポンプ入口および出口流路をテーパ状にした。この中に4枚の線状電極を配した基板を 1 mm 間隔で取付けた。この線状電極の高さは 35 μm とし, その電極間隔は, 基板を作成する際のエッチングを行える限界に近い 0.3 mm とした。また, 一対の電極どうしの干渉によるジェット流の逆流を防止し流れを一方にするために, 一対の電極間どうしの間隔は 0.7 mm とした。その結果, 基板上には 52 対の電極を配置することとなった。

3.2 流量特性実験 ECF ポンプの流量特性試験を行うに当たり, 図3に示した実験装置を製作した。本装置で, 液面の位置の時間変化を変位センサを用いて計測することにより, 試作した ECF ポンプの吐出し量を求めた。本実験装置では, ヘッドタンクの断面積は $4.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ とし, ヘッドタンク出口における管路断面積 ($2.82 \times 10^{-5} \text{ m}^2$) に比べ十分大きくした。これは, 液面降下によるヘッドタンク内の圧力変化が ECF ポンプの流量特性に対して与える影響を極力小さくし, さらに, 液面降下速度を遅くし十分な計測時間を確保するためである。なお, 本実験では, ECF には, 現在最も強いジェット流が発生することが確認さ

Fig. 3 Experimental apparatus (flow characteristics)

れている FF-3 EHA 2 を使用した。FF-3 EHA 2 の物性値を表 1 に示す。

本実験装置において、ECF ポンプに電圧を印加した場合と印加しない場合で、ヘッドタンクの液面の変位の時間的変化を変位センサにより計測した。そして、それぞれの場合で平均流量を算出し、それらの値を差引きすることにより ECF ポンプの吐出し量を求めた。なお、図 3 に示したタンク底面より 13 mm の位置を零とし、液面がその位置になったときより計測を開始し、そこから 4 mm 液面が降下するまで液面の計測を行った。

ECF ポンプへの供給電圧を 3~4 kV まで 0.25 kV 間隔で変化させて本実験を行った。さらに、ECF ポンプとストップ弁の間に可変絞りおよび圧力センサを挿入し、絞りの弁開度を変化させ本ポンプに負荷をかけた場合の流量特性についても同様に計測を行った。

可変絞りを挿入しない場合(無負荷時)、 $V_{in}=0$ kV としたときの液面の変位の計測結果を図 4 に、 $V_{in}=3$ kV および 4 kV としたときの液面の変位の計測結果を図 5 にそれぞれ示す。図 4 より、 $V_{in}=0$ kV の場合、タンクの液面の変化すなわちタンクから流出する ECF の流量はほぼ一定であることがわかる。これは

Table 1 Property of FF-3 EHA 2

Density [kg/m ³]	1430
Dynamic viscosity [m ² /s]	4.4×10^{-7}
Boiling point [°C]	76

Fig. 4 Displacement of liquid level in head tank ($V_{in}=0$ V)

Fig. 5 Displacement of liquid level in head tank ($V_{in}=3, 4$ kV)

実験に際して、液面の高さが 13 mm から 9 mm とその差が小さくヘッドタンク内の圧力が大きく変化しなかったためであると考えられる。また、図 5 に示した $V_{in}=3$ kV, 4 kV の電圧を印加したときの液面の変化もほぼ一定である。これは先に述べたように、ECF ポンプに通電しない場合タンクから流出する ECF の流量はほぼ一定であること、および ECF ポンプに通電した場合ポンプが一定量の流量を吐出していることによるものと思われる。よって、それぞれの実験結果より ECF ポンプの平均吐出し量を算出すると述べたが、これらの結果より、その値は通常の吐出し量となっているものと考えられる。

本研究で試作した ECF ポンプの無負荷時および可変絞りを挿入して負荷をかけた場合の ECF ポンプ供給電圧 V_{in} と ECF ポンプ吐出し量 Q_p の関係を図 6 に示す。なお、図 6 で k は可変絞りの抵抗値で、

$$k = \frac{\sqrt{P_L}}{Q_p} \dots \dots \dots (1)$$

により定義される。

図 6 より、本研究で試作した ECF ポンプは、無負荷時に ECF ポンプへの供給電圧 $V_{in}=3$ kV で $Q_p=0.93 \times 10^{-5}$ m³/s、 $V_{in}=4$ kV で $Q_p=1.27 \times 10^{-5}$ m³/s という大きな流量を得ることができ、高電圧を印加するほど、その流量はほぼ比例的に増加することがわかった。また、可変絞りの抵抗値 k を 6.85×10^6 Pa^{1/2}・s/m³ とした場合、ECF ポンプ吐出し量は $V_{in}=3$ kV で $Q_p=0.59 \times 10^{-5}$ m³/s、 $V_{in}=4$ kV で $Q_p=0.85 \times 10^{-5}$ m³/s となり、無負荷時の吐出し量の約 3/5 となった。可変絞りの弁開度を小さくし、その抵抗値 k を 1.47×10^6 Pa^{1/2}・s/m³ とした場合には、ECF ポンプ吐出し量は $V_{in}=3$ kV で $Q_p=0.27 \times 10^{-5}$ m³/s、 $V_{in}=4$ kV で $Q_p=0.46 \times 10^{-5}$ m³/s となり、無負荷時の吐出

Fig. 6 Pump discharge of ECF-pump

し量の約 1/3 となった。

図 7 にポンプ吐出し圧力(負荷圧力)と流量の関係を示す。図 7 より、本研究で試作した ECF ポンプは供給電圧を一定とした場合、ポンプ吐出し圧力(負荷圧力)の増大に伴いポンプ吐出し量は減少するものの、試作した ECF ポンプは、 $V_{in}=3\text{ kV}$ では $P_L=1.84\text{ kPa}$ に対し $Q_p=0.59\times 10^{-5}\text{ m}^3/\text{s}$ の流量が、 $P_L=2.45\text{ kPa}$ に対しては $Q_p=0.27\times 10^{-5}\text{ m}^3/\text{s}$ の流量が供給可能であることがわかる。また、 $V_{in}=4\text{ kV}$ では $P_L=3.24\text{ kPa}$ に対し $Q_p=0.85\times 10^{-5}\text{ m}^3/\text{s}$ の流量が、 $P_L=3.76\text{ kPa}$ に対し $Q_p=0.46\times 10^{-5}\text{ m}^3/\text{s}$ の流量が供給可能である。

4. ECF を用いた液冷システム

ECF による液冷システムの実現の可能性について検討するため、本研究で試作した ECF ポンプを用い、図 8 に示す液冷システムを製作した。

本システムは、ECF ポンプ、発熱源からの熱を ECF に伝えるための液冷ジャケット、リザーブタンクおよびファン一体形のラジエータにより構成されている。ECF ポンプに通電し回路内に ECF を循環させると、液冷ジャケットで発熱源からの熱を ECF が吸収する。熱を吸収して高温になった ECF はラジエータで冷却される。これにより発熱源を冷却し、発熱源の温度を規定の範囲内に保つ。

電極により ECF に電圧を供給すればジェット流が発生するという ECF の特徴を生かした液冷ジャケットならびにラジエータの開発も可能であると考えられる。しかしながら、本研究は ECF を用いた液冷システムの開発の第一段階で、試作した ECF ポンプを用いた ECF による液冷システムの実現の可能性について検討することが目的である。そこで、本研究では液冷ジャケットおよびラジエータ(ファン一体形)には市販されている水冷キット用のものを使用した。なお、

液冷ジャケットには熱伝導率の高い銅が用いられているものを使用した。

また、本実験装置では、発熱源として、アルミニウムのブロックに二つの抵抗を入れた最大で発熱量 50 W のヒータ(縦 35 mm、横 35 mm、高さ 15 mm)を用いた。実際のパーソナルコンピュータに使用されている CPU では、CPU のコアから熱が発生する。そして、その熱を一般的には $38\times 38\text{ mm}$ のヒートスプレッドにより拡散し、ヒートシンクに伝え、このヒートシンクをファンにより空気の流れを起こし冷却することにより、CPU を冷却している。よって、本研究で試作した発熱源のモデルは実際の CPU に近いモデルとなっていることがわかる。

ヒータから発生した熱は液冷ジャケット自体の温度を上昇させ、その内部を流動しているラジエータで冷やされた ECF に伝えられる。しかしながら、液冷ジャケット自体が高温になるため、液冷ジャケットが外気と接している場合、液冷ジャケットに伝えられた熱は液冷ジャケットの表面から外気に放熱され、液冷ジャケット表面と外気による冷却効果が起こる。パーソナルコンピュータのケース内あるいは電子機器内部でこのような現象が生じた場合、内部の空気の温度が上昇し、他の電子チップへ影響を及ぼすものと考えられる。また、このような状態で冷却試験を行った場合、液冷ジャケットから内部を流動する ECF と液冷ジャケット周囲の空気への両方に熱を逃がすことにより、発熱源の冷却がなされたことになる。そこで本実験装置では、液冷ジャケットの周囲を断熱材で覆い、液冷ジャケット周囲の空気への伝熱を防ぎ、ECF への伝熱のみで発熱源の冷却を行うものとした。

本研究で使用した ECF は沸点が 76°C と低いため、液冷ジャケット内部における局所的な ECF の沸騰に

Fig. 7 Pump discharge vs. load pressure characteristics of ECF-pump

Fig. 8 Liquid-cooling system by ECF

より、液冷ジャケットからラジエータに向けて気泡が発生した。この気泡が ECF ポンプ内に入ると、電極に高電圧を印加しているためショートが発生し、基板に配した電極および ECF が劣化する原因となり、ポンプの性能が低下してしまう。そこで、この ECF の沸騰により発生する気泡を取り除くため、図 8 に示したように液冷ジャケット出口とラジエータの間にリザーブタンクを設置し、ECF ポンプの取付位置もラジエータ出口と液冷ジャケット入口の間とした。また、ECF ポンプ、液冷ジャケット、ラジエータを接続する管路には、内径 5 mm の熱伝導率が小さいポリウレタンチューブを用いた。

上述の改善を施した実験装置により、ECF を用いた液冷システムによる発熱源冷却試験を行った。システム内を ECF で満たし、ECF に浸された ECF ポンプの電極に高電圧を印加することにより電極間でジェット流を発生させ、システム内の ECF を循環させ、発熱源であるヒータを冷却した。このとき、試作した ECF による液冷システムの性能を評価するため、図 8 に示した位置に熱電対を設置し、ヒータ温度、液冷ジャケット入口および出口における ECF の温度、ラジエータ入口および出口における ECF の温度を計測した。可変変圧器によりヒータ出力を 20~50 W の間で変化させ、この実験を行った。なお、このとき、試作した ECF ポンプへの供給電圧は 3 kV、ラジエータのファンの回転数は 3 000 rpm、外部空気は 23~25°C の間とした。

Fig. 9 Temperatures in liquid-cooling system at cooling test ($H=30$ W)

ヒータ発熱量を 30 W とした場合の実験結果を図 9 に、ヒータ発熱量を 50 W とした場合の実験結果を図 10 に示す。なお、図 9, 10 で T_1 および T_2 はそれぞれ液冷ジャケット入口および出口における ECF の温度である。また、 T_3 および T_4 はそれぞれラジエータ入口および出口における ECF の温度である。図 9, 10 より、ヒータ温度 T は約 15 分で一定値に収束し、その後その値を保ち続けることがわかる。また、そのときの温度は、 $H=30$ W に設定したときが約 42°C、 $H=50$ W としたときが約 51°C となった。ヒータ温度が一定となったときの液冷ジャケット入口、出口の ECF の温度は、 $H=30$ W で T_1 = 約 28°C、 T_2 = 約 38°C、 $H=50$ W では $T_1=31^\circ\text{C}$ 、 T_2 = 約 45°C となり、液冷ジャケット内で ECF の温度は 10~14°C 程度上昇している。また、このときのヒータ温度は前述したとおり、 $H=30$ W で約 42°C、 $H=50$ W で約 51°C であるので、ヒータ温度と液冷ジャケット出口での ECF との温度の差は約 4~6°C である。これらのことより、液

Fig. 10 Temperatures in liquid-cooling system at cooling test ($H=50$ W)

Fig. 11 Relation between T_s and H

冷ジャケット内で ECF へ熱が伝わる状態は良く、ECF を液冷システム用の液体として用いることは妥当であることがわかる。また、ラジエータ入口および出口での ECF の温度は、 $H=30\text{ W}$ で $T_3=\text{約 }37^\circ\text{C}$ 、 $T_4=\text{約 }30^\circ\text{C}$ 、 $H=50\text{ W}$ では $T_3=\text{約 }43^\circ\text{C}$ 、 $T_4=\text{約 }32^\circ\text{C}$ となっている。よって、ラジエータの性能の向上により、液冷システムの性能を向上させヒータ温度をさらに下げることが可能であることがわかる。

ヒータ発熱量と液冷システムによりヒータを冷却し一定となったヒータ温度 T_s との関係についてまとめたものを図 11 に示す。市販されている 50 W クラスの CPU の最高動作温度は 70°C 程度であるので、 50 W クラスの CPU であれば、本システムで十分冷却することが可能であることがわかる。

ECF ポンプ入口および出口に圧力センサを設置し、 $V_m=3\text{ kV}$ としたときのシステムの圧力損失を計測した。その結果、圧力損失は約 1.8 kPa となり、液冷システムによる発熱源冷却試験では、システム内を循環する ECF の流量は約 $0.59\times 10^{-5}\text{ m}^3/\text{s}$ であったものと図 7 より推察される。

5. 結 論

本論文では、機能性流体として注目されている ECF を用いた新しい液冷システムを実現するために、線状電極を配置したプリント基板を多層化することにより小形化を図った ECF ポンプを提案、試作し、実験的にその基本的な特性を明らかにした。次に、この ECF ポンプを用いた液冷システムを試作し、その性能について実験により検討した。得られた主な結果は以下のとおりである。

(1) 提案したプリント基板多層形 ECF ポンプは、良好な性能を有し、無負荷時には最大で $1.27\times 10^{-5}\text{ m}^3/\text{s}$ の流量が供給可能である。これは、従来のパーソナルコンピュータ用の水冷システムで使用されているポンプの流量 ($10^{-5}\text{ m}^3/\text{s}$ 程度) を若干上回るものとなっている。

(2) 提案した ECF ポンプを用いた液冷システムで、本研究において設定した状態では 50 W の発熱源の温度を約 51°C に保つことができる。よって、ECF を用いた液冷システムは実現可能であると思われる。

今後の課題として、提案したプリント基板多層形 ECF ポンプのさらなる性能の向上を目指して、ポンプの構造ならびに基板上の電極パターンの最適化に関する詳細な設計資料の収集が重要であると考えられる。また、ECF を用いた液冷システムのさらなる性能向上のために、ECF の特性を生かした液冷ジャケットおよびラジエータの開発も必要であると考えられる。特に、ECF による新しい液冷システムの長所は構造が簡単で振動も騒音も発生しないポンプを用いることであるため、ラジエータのファンレス化についての検討が重要であると考えている。

最後に本研究にご協力いただいた足利工業大学学生の田口裕崇君に感謝する。

文 献

- (1) Intel®Pentium®4 Processor Data sheet, (2005), (<http://download.intel.com/design/Pentium4/datashts/30638202.pdf>).
- (2) 例えば, Kondo, Y., Personal Computer and Server with Liquid Cooling System, *Refrigeration*, **79**-925 (2004), 882-887.
- (3) Yokota, S., ほか 4 名, A Micro Motor Using Electro-Conjugate Fluids (ECFs) [Proposition of Stator Electrode (SE)-Type Micro ECF Motors], *Trans. Jpn Soc. Mech. Eng., Ser. C*, **66**-642 (2000), 627-633.
- (4) Yokota, S., ほか 4 名, A Micro Motor Using Electro-Conjugate Fluid (ECF) [Proposition of Rotor-Electrode (RE)-Type Micro ECF Motors], *Trans. Jpn Soc. Mech. Eng., Ser. C*, **66**-651 (2000), 3799-3804.
- (5) Yokota, S., ほか 3 名, A Planar Pump Using Electro-Conjugate Fluids (ECF) (Proposition of an ECF Pump for Liquid Cooling of Electronic Chips), *Proc. JSME Conf. Robotics Mech.*, '04, No. 04-4 (2004), 2 P 1-L 1-61(1)-2 P 1-L 1-61(4).
- (6) Yokota, S., ほか 3 名, A Planar Pump Using Electro-Conjugate Fluids (ECF) for Liquid Cooling of Electronic Chips, *Proc. Annual Meet. Jpn Soc. Mech. Eng.*, **7** (2004), 365-366.