

超高速電子写真プロセスにおける液体冷却技術

(採用機種：RICOH Pro C751EX/C651EX)

岡野 覚*, 平澤友康*, 藤谷博充**

*株式会社リコー 画像エンジン開発本部 基盤・制御技術開発センター

**株式会社リコー PP事業本部 CS設計センター

1. はじめに

近年、プロダクションプリンティング、オフィスハイエンドの電子写真方式におけるコピー/プリンタにおいて発生する熱は、レーザースキャナーや現像ユニットでの温度上昇に見られるように、高画質化、高速化、連続印刷のニーズにともなって、上昇を続けている。両面印刷で機内を搬送する紙もまた、大きな熱源となっている。一方、定着プロセスの省エネルギー化でトナー軟化点の低下により、温度上昇の許容レベルも下がりつつある。こうした状況にあってもなおコピー/プリンタは、ダウンサイジングが求められている。

一般に、発熱体をその周囲から流体で冷却する際、発熱体の発熱量を W 、発熱体表面の熱伝達率を h 、発熱体表面の面積を A 、発熱体表面の温度を T_w 、周囲の流体温度を T_a とすると、以下の式が成り立つ¹⁾。

$$W = hA(T_w - T_a) \quad (1)$$

流体温度 T_a は、空冷の場合、空気の温度、すなわち室温である。ここで、現像ユニットの冷却について考えてみた場合、その内部には主に摩擦熱の発生によって温度上昇したトナーとキャリアがともに対流し、それらの温度は至るところでほぼ均一と考えることができる。また現像ユニットの場合、発熱体から発熱体表面までの温度勾配は十分小さいと考えられ、したがって、式(1)の $T_w - T_a$ は、発熱体の周囲の流体からの温度上昇値と概ね考えてよく、今これを ΔT と置き、 h についてまとめると、以下の式が導かれる。

$$h = (W/\Delta T)/A \quad (2)$$

式(2)によれば、 W が上昇し、 ΔT と A が低下すると、これを満足する冷却を行うには、高い値の h が必要であることがわかる。現像ユニットの冷却の場合、必要よりも低い値の h の冷却しか行われないうち、現像ユニット内部のトナーは許容レベル以上に温度上昇し、凝集する。このとき、ベタ画像の出力においては画像面に複数の白スジとなる画像不良を引き起こす。Fig.1 は、当社の中高速機の現像ユニットにおける一般的な熱の流れを示している。Fig.1 では、トナーの攪拌の摩擦により発生する熱、感光体から伝達される熱、および現像ユニット周囲より伝達される熱の全てが、現像ユニット端部に位置する多数枚のフィンをもつヒートシンクへと輸送され、そこで低温の空気と熱交換される。Fig.2 は、当社の中高速機の現像ユニットのヒートシンクに求められる熱伝達率を示している。前述の現像ユニットの熱伝達率は、Fig.2 では、A、Bグループにプロットされる。熱伝達率は、数値の大きさによって冷却方式が大別され、小さい順より、自然対流(空冷)、強制対流(空冷)、液体冷却等に分けられる。その閾値については必ずしも明確ではないが、半導体に適用されるガイドに従えば、前記のA、Bグループは、空冷の域に位置している²⁾。これらのグループの現像ユニットは、冷却方式を空冷とした場合の気流シミュレーションと実験によって、現像ユニット内部のトナー温度が許容レベル以下になることが確認され、実際に空冷が選択されている。

しかしながら、発熱量がいっそう増加し、温度上昇の許容レベルと放熱面積がさらに低下すると、これまで以上の高い熱伝達率の冷却が求められる。Fig.2 におけるCグループは、当社のRICOH Pro C751EXの現

像ユニットに求められる熱伝達率であり、空冷よりも高効率の冷却、具体的には液体冷却等を利用した冷却が必要であることを示している。中でも液体冷却は高効率な冷却方法として知られるが、一般に液体温度を制御するためのチラーといった大掛かりな装置を必要とするため、これまでオフィスユースには向かなかった。そのような中、近年、コンパクトな液体冷却システムが、パーソナルコンピュータにおけるCPUの冷却、高速プリンタにおけるサーマルヘッドやLEDヘッドの冷却に適用されはじめた^{3,4,5)}。それでも、電子写真の作像プロセス、ことに現像ユニットへの液体冷却の適用はなく、Fig.2におけるCグループのような現像ユニットの冷却を満足する小型な液体冷却技術が切望されていた。

本稿では、高速電子写真プロセスに向け開発した、現像ユニットにおける温度上昇を許容レベル以下におさえる液体冷却技術について紹介する。

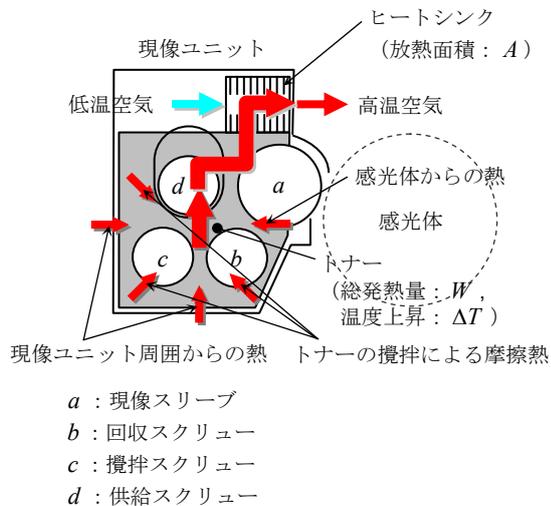


Fig.1 Routes of heat transfer in development unit.

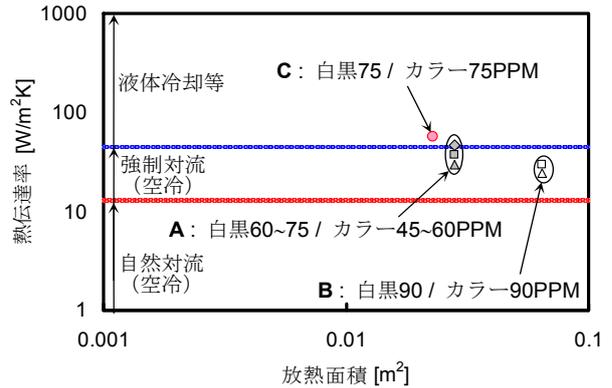


Fig.2 Heat transfer coefficient for various development units.

2. 液体冷却技術

2.1. 現像ユニットにおける液体冷却の概要

Fig.3 に示すように、現像ユニットにおける液体冷却では、トナーの攪拌の摩擦により発生する熱、感光体や機内環境といった現像ユニット周囲の熱を、液体冷却ジャケットを押し当てて冷却する。液体冷却ジャケットは、その内部に流路をもち、室温とほぼ同じ温度の、水を主成分とする液体が循環し、前記の熱を作像プロセス領域から機外近傍に配置されるラジエータ/ファンへと輸送する。液体冷却では、液体が空気よりも高い熱伝達率をもつために、小型な液体冷却ジャケットでもその温度上昇を低くおさえながら多量に受熱することができる。また、液体は空気よりも熱容量が大きいために、幅広いダクトを必要とせず、狭いパイプでも十分に熱輸送を可能にする。ただし、前述のラジエータ/ファンは、空冷のダクトと比べてもけって小さいものではない。しかしこれらは作像プロセス領域から離れた空いたスペースに設置することができるため、大きな制約になることはない。このように液体冷却は、作像プロセス領域の省スペース化に大きく貢献するものである。

現像ユニットから機外まで、液体冷却の高い冷却性能を低損失で実現するには、液体冷却システムの熱設計、およびデバイスの開発と最適化が不可欠である。中でも、液体冷却ジャケットと、このジャケットと現像ユニットとの接触界面の構成が重要になる。次節以

降では、これらの詳しい説明と、これらを用いた液体冷却システムの評価結果について述べる。

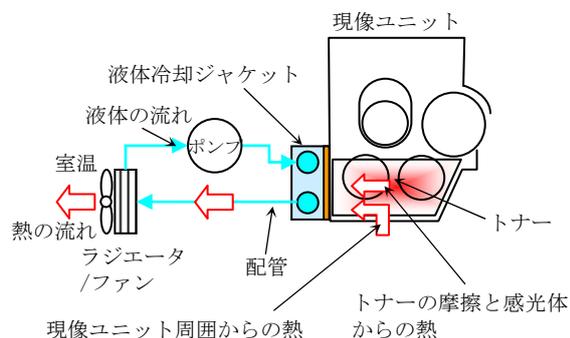


Fig. 3 Schematic diagram of liquid cooling system in development unit.

2.2. 液体冷却ジャケット

現像ユニットにおける液体冷却では、液体冷却ジャケットは最も重要なデバイスであり、液漏れがなく、温度上昇を低くおさえて多量に受熱する性能が求められる。

液体冷却ジャケットは、現像ユニットとほぼ同じ、300mmを越す長い流路をもつ。このため、CPU冷却のものと比較すると、流路面積はかなり広く、液漏れのリスクが高くなる。そこで、我々の液体冷却ジャケットは、この液漏れのリスクを回避するため、Fig. 4 に示すように、流路としてシームレスな銅パイプをUの字に曲げ、これを挟持する2枚のアルミニウムプレートからなる構成とした。

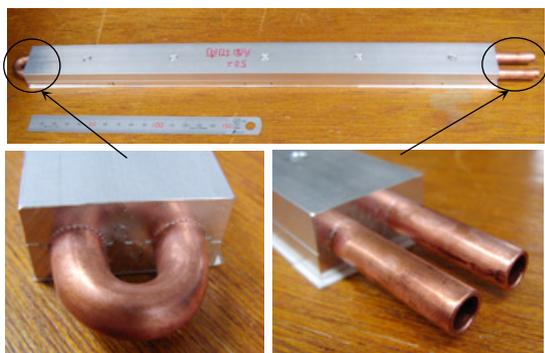


Fig. 4 Photographs of liquid cooling jacket.

また、液体冷却ジャケットは、高い受熱性能を獲得するため、評価項目として、式(3)と Fig. 5 で定義され

る熱抵抗と液体の流れの圧力差を、測定、および熱流体シミュレーションによって求めている。

$$R = (T_1 - T_{OUT}) / [\rho C_p Q (T_{OUT} - T_{IN})] \quad (3)$$

ただし、式(3)、および Fig. 5 の各記号は以下の通りである。

- R : 液体（流出） ⇔ 液体冷却ジャケット底部の熱抵抗
- T_1 : 液体冷却ジャケット底部の温度
- T_{IN} : 液体の流入温度
- T_{OUT} : 液体の流出温度
- ρ : 液体の密度
- C_p : 液体の比熱
- Q : 液体の流量
- ΔP : 液体の圧力差

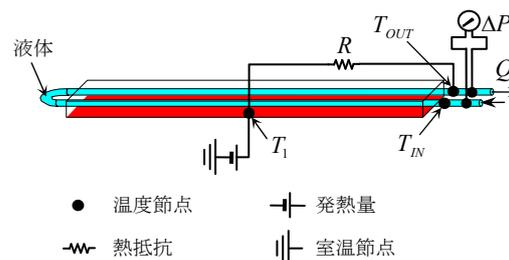


Fig. 5 Schematic diagram of measuring liquid cooling jacket.

この際、熱抵抗とは、発熱量に対する温度上昇の比を意味しており、ある発熱量が与えられたときの温度上昇を知るための重要な指標になっている。圧力差は、その熱抵抗のパラメータの一つである液体の流量を決定する指標である。また、測定では、液体冷却ジャケット底部の温度 T_1 を一定に制御し、液体の流量 Q をパラメータとして、液体の流入温度 T_{IN} と流出温度 T_{OUT} 、および液体の圧力差 ΔP を測り、式(3)によって熱抵抗 R を算出している。このとき、式(3)の分母は本来発熱量とすべきであるが、ここでは液体による吸熱量 $\rho C_p Q (T_{OUT} - T_{IN})$ にて代用している。一方、熱流体シミュレーションでは、汎用の非構造格子系熱流体ソフ

トにより、液体冷却ジャケット底部の温度 T_1 と液体の流入温度 T_{IN} を温度境界条件とし、また液体の流量 Q を速度境界条件として設定し、流路の液体の流れと温度分布、および液体冷却ジャケットの温度分布を三次元で同時に定常計算し、流出温度 T_{OUT} と液体の圧力差 ΔP を求め、式(3)によって熱抵抗 R を算出している。Fig. 6 は、測定とシミュレーションの結果の一例を示すものである。シミュレーション結果は、実験結果とも良く一致するため、液体冷却デバイスの開発においては、シミュレーションの利用が有効であることもわかった。

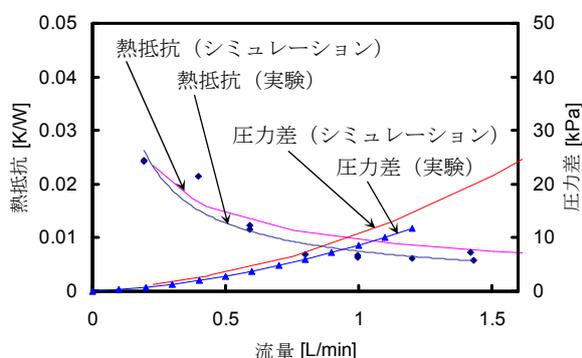


Fig. 6 Thermal resistance and pressure loss in liquid cooling jacket.

2.3. 現像ユニットと冷却ジャケットの接触界面

液体冷却ジャケットは、現像ユニットに対し繰り返し装着・分離しても、その高い受熱性能を持続するための現像ユニットと液体冷却ジャケット間の接触界面の構成が必要である。これを実現するため、Fig. 7 に示すように、現像ユニットの接触界面に、熱伝導シートとポリエチレンテレフタレートフィルム (PET フィルム) を配した。熱伝導シートには柔軟性があり、押し圧に対して変形しやすい。このため、接触界面で生じていた微小な空気のギャップは埋められ、熱抵抗が下がって、高い受熱性能が得られる。ただし、熱伝導シートには粘着性があるため、現像ユニットを分離する際、いずれかの側に張り付いて剥がれてしまう場合がある。前述の PET フィルムには、熱伝導シートを被覆し、その粘着性をおさえ、PET フィルムを接触界面として、現像ユニットを分離可能にする効果がある。

また、熱伝導シートには脆性もあるため、外力に対しては時として裂ける場合もある。このため PET フィルムには、熱伝導シートを保護する役割もある。ただし、PET フィルムの熱伝導率はかなり低く、液体冷却の高い受熱性能を低下させるため、その厚みは十分薄くする必要があり。液体冷却ジャケットと現像ユニット間の受熱性能はまた、それらの接触界面の平面粗さにも依存するため、熱伝導シートと PET フィルムの構成と同時にこれらも考慮する必要がある。Fig. 8 には、受熱性能として、熱伝導シートの厚さが 0.5mm と 1.0mm のときの平面粗さに対する 2 面間の熱抵抗の実験結果の例を示す。

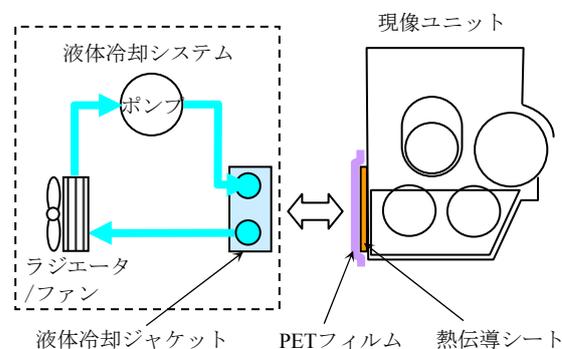


Fig. 7 Schematic diagram of contact surface between development unit and liquid cooling jacket.

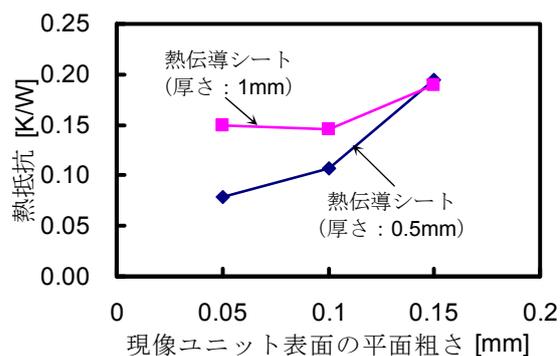


Fig. 8 Thermal resistance between development unit and liquid cooling jacket.

2.4. 液体冷却システムにおける熱設計

Fig. 9 は、当社の RICOH Pro C751EX に、液体冷却システムを設置した概略図である。本システムでは、4 つの液体冷却ジャケットが直列に接続され、イエロー、

マゼンタ、シアン、ブラックの現像ユニットの順に液体を流している。また、本システムは、熱回路網法と管路網法により熱設計、および最適化を図っている。Fig. 10 は、Fig. 9 におけるシステム全体の熱回路図を示している。熱回路網法では、Fig. 10 における熱の流れを定式化する。その際、現像ユニットにおける熱抵抗と発熱量、およびラジエータ/ファンの熱抵抗とポンプの発熱量は、予め個々に測定することにより得ている。ただし、液体冷却ジャケットとラジエータ/ファンの熱抵抗は、パラメータとして、液体の流量を定める必要がある。管路網法によれば、液体冷却システム一周にわたる液体冷却ジャケット、パイプ、およびラジエータといった各デバイスの圧力差の総和を計算し、この全圧力差から、送液性能として圧力と流量の関係が既知のポンプをいろいろと選定することにより、液体の流量を定めることができる。したがって、前述の熱の流れの式を解くことにより、Fig. 9 の現像ユニットにおけるトナー、現像ユニットのケース、液体、および液体冷却ジャケットの温度上昇値を得ることができる。

2.5. 温度上昇の実験結果と予測誤差

Fig. 9 に示す液体冷却システムにおいて、ブラックの現像ユニット内部のブラックトナーにおける温度上昇の測定値と許容レベルとの差を Table 1 に示す。ブラックトナーの温度上昇を評価するのは、4 色の現像ユニットの中で、ブラックの現像ユニットが最も高い温度の液体が流れ、したがって 4 色のトナーの中でブラックトナーが最も高い温度となり得るためである。Table 1 で見られる温度差は、トナー凝集を回避するのに十分大きく、余裕があることがわかる。Table 1 にはまた、ブラックトナー、およびポンプにおける液体の温度上昇の測定値とシミュレーションとの差も示している。ポンプにおける液体の温度上昇を見る理由は、液体冷却システムを流れる液体の中で、最も高い温度上昇を示すためである。Table 1 に見られるこれらのシミュレーションによる予測誤差は非常に小さく、液体冷却システムが目的の機能を十分果たしているこ

とがわかる。

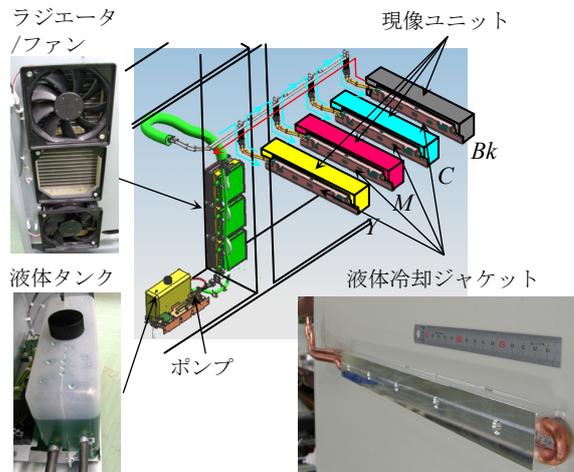
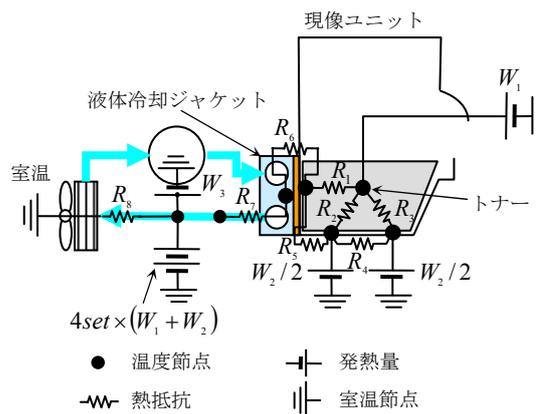


Fig. 9 Schematic diagram of liquid cooling system in machine.



- R_1 : トナー ⇔ 現像ケース左側面の熱抵抗
- R_2 : トナー ⇔ 現像ケース左下面の熱抵抗
- R_3 : トナー ⇔ 現像ケース右下面間の熱抵抗
- R_4 : 現像ケース下左右面間の熱抵抗
- R_5 : 現像ケース左下面 ⇔ 現像ケース左側面の熱抵抗
- R_6 : 現像ケース左側面 ⇔ 液体冷却ジャケットの熱抵抗
- R_7 : 液体冷却ジャケット ⇔ 液体の熱抵抗
- R_8 : 液体 ⇔ 室温の熱抵抗
- W_1 : 現像ユニット内部と感光体からの発熱量
- W_2 : 現像ユニット周囲からの発熱量
- W_3 : ポンプの発熱量

Fig. 10 Schematic diagram of thermal network in development unit and liquid cooling system.

Table 1 Experimental results and prediction errors.

	温度上昇の実験と 許容レベルとの差	温度上昇の計算 と実験との差
トナー	-2.0[deg]	+0.5[deg]
液体	—	+0.6[deg]

3. まとめ

電子写真作像プロセスにおける現像ユニットを冷却する液体冷却技術を世界で始めて開発し、その実用性を確認した。本技術は、現像ユニットにおける温度上昇をおさえ、トナー固着を回避する。また、液体冷却システムのための熱設計技術も獲得することができた。その際、熱流体シミュレーションが有効であることもわかった。

参考文献

- 1) Jack Philip Holman : 伝熱工学<上>, ブレイン図書, (1996), pp.11-13.
- 2) 国峰尚樹 : 電子機器における熱問題, MATERIAL STAGE, VOL.1, NO.4, (2001), pp.7-11
- 3) Yoshihiro Kondo : The First Laptop Personal Computer using a Silent Liquid-cooling System, Thermal Engineering Conference, (2003), pp.101-104.
- 4) Tatsuhiko Asada, Hiroshi Kobayashi and Hirotooshi Terao : Study of a D2T2 printing for high-speed print, IS&T's NIP20:International Conference on Digital Printing Technologies, (2004), pp.993-996.
- 5) Wolfgang Schullerus and Klaus Pachonik : Architecture of A High Performance LED Printhead Platform, NIP24 and Digital Fabrication, (2008), pp.807-810.

禁 無 断 転 載

2011年度「ビジネス機器関連技術調査報告書」“IV—5”部

発行 2012年4月

一般社団法人 ビジネス機械・情報システム産業協会 (JBMIA)

技術委員会 技術調査小委員会

〒105-0003 東京都港区西新橋三丁目 25 番 33 号 NP 御成門ビル

電話 03-5472-1101(代表) / FAX 03-5472-2511