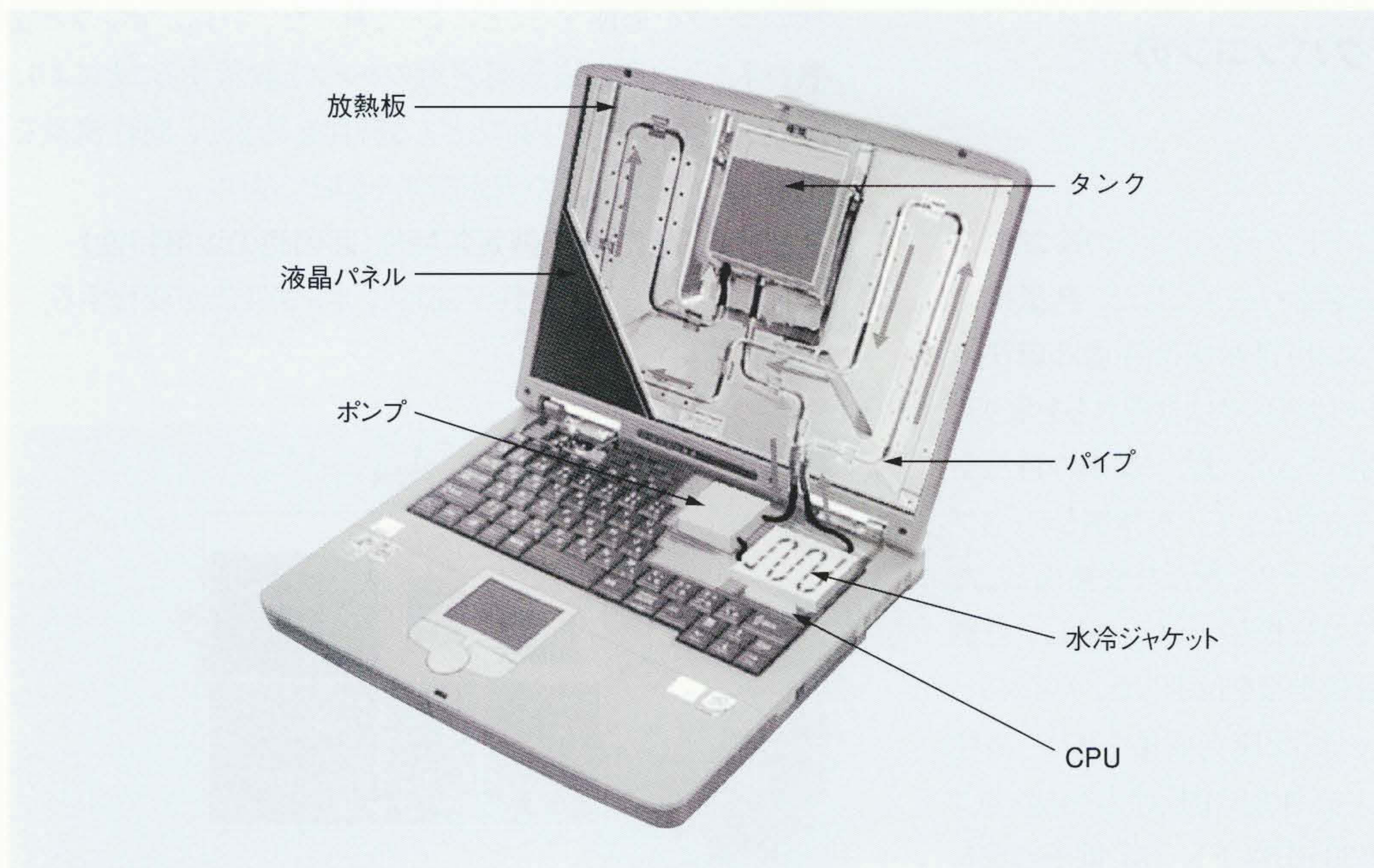


ノートブックパソコン用水冷モジュール

Water Cooling Modules for Notebook PCs

中川 毅 Tsuyoshi Nakagawa



水冷モジュールを搭載したノートブックパソコン“FLORA 270W”のサイレントモデル

冷媒液の強制循環によってパソコン内のCPUが発する熱をディスプレイ背面の広い面積まで効率よく移動させることにより、冷却ファンを用いない自然冷却を実現することができる。

情報機器であるパソコンでは、高度なアプリケーションソフトウェアによって要求される動作環境レベルの上昇に伴い、常に高機能化、高性能化が求められている。その結果、CPUの消費電力は増加の一途をたどり、現在の冷却技術の主流である強制空冷方式では、冷却ファンやヒートシンク(吸熱源)などの大型化と騒音の増大は避けられない状況にある。

日立製作所は、このような課題を解決するために、

パソコンのCPUの大幅な消費電力増加にも対応できるとともに、小型・軽量のノートブックパソコンにも搭載が可能で、これまでにないコンパクトで高効率な冷却技術を応用した水冷モジュールを開発した。これは、日立製作所が大型コンピュータで培った水冷技術を応用したものである。この水冷モジュールを搭載したノートブックパソコン“FLORA 270W”のサイレントモデル製品を2002年9月から出荷している。

1 はじめに

高性能化、高機能化が急速に進んでいるノートブックパソコンでは、その心臓部に最新鋭のCPUを搭載した機種をタイムリーに製品化することが、他社との競合上非常に重要である。ノートブックパソコンでは、デスクトップパソコンに匹敵する性能をクラムシェル(二枚貝形状)の薄型筐(きょう)体で実現することが求められ、冷却に対する要求は非常に厳しくなっている。さらに、米国インテル社のモバイル機器用の高性能CPU(モバイルPentium4[※])、1.7 GHz、発熱量:30 W)を冷却する低騒音冷却方式の開発が急務となっている。

発熱量が15 WクラスのCPUでは、冷却ファンやヒートパイ

プおよびヒートシンク(吸熱源)の組合せによって冷却ができる。しかし、このような強制空冷方式で30 WクラスのCPUを冷却するためには、70 mm角以上の大口径ファンや複数のヒートパイプと大型ヒートシンクが必要となる。その結果、騒音の問題や実装エリアの制約など、解決すべき課題が多くなる。冷却で考慮すべき条件としては、CPUなど高発熱素子の冷却はもちろんのこと、HDD(Hard Disc Drive)などのデバイスをはじめ、筐体内に実装される発熱部品を規定温度以下に冷却する必要がある、さらに、静音化の要求も大きい。

静音化では騒音のない自然空冷が理想であるが、放熱面が筐体表面に限られるうえ、操作者が触れるキーボードやキー

※) Pentiumは、米国Intel, Corp.の登録商標である。

ボード手前のパームレスト、筐体底面などの表面温度が高くなっていることから、発熱するCPUの熱を筐体表面の全域に拡散させ、効率よく放熱する冷却方式が求められている。

ここでは、日立製作所が開発したノートブックパソコン用水冷モジュールについて述べる。

2 水冷式ノートブックパソコンの特徴と実装技術

2.1 装置仕様と開発項目

日立製作所は、これまで、ノートブックパソコンの冷却構造については、自然対流要素実験をベースにした、熱抵抗回路網を用いたノートブックパソコン用自然空冷性能評価法の検討や、放熱性能評価ツールの開発、およびそれらを取り込んだ自然空冷構造の開発を行ってきた。また、従来の自然空冷構造での放熱量を拡大する方法として、本体側とディスプレイ側を熱接続し、ディスプレイケースを新たな放熱面とした冷却構造の放熱特性についての分析も行った。さらに、自然空冷構造に冷却ファンによる強制空冷を付加した、ハイブリッド構造の検討も行った。以上のような研究成果を基に、高性能CPUに対応するため、(1) 高性能CPU対応(発熱量: 30 Wクラス)、(2) 静音(騒音: 30 dB以下)、(3) 電子部品レイアウトの柔軟性、(4) 複数の発熱体の冷却、(5) メンテナンスフリーの5項目を満足する冷却方式の開発に着手した。

新たに開発した水冷モジュールでは、発熱したCPUの冷却には、ディスプレイケースの背面を放熱面として活用する方式を採用し、CPUの熱を受けるジャケットとディスプレイ背面の放熱板との間に液流路を設け、小型ポンプによって液体をディスプレイバックケースまで強制的に循環させて放熱する構造とした(51ページの図参照)。これにより、強制空冷方式で使用している冷却ファンと比べ、騒音を大幅に低減することができたほか、流路にフレキシブルチューブを用いることにより、CPUやポンプの実装配置に柔軟に対応することが可能となった。

ノートブックパソコンの仕様で求められる主なポイントは、動作時環境温度0~40℃、輸送・保管時環境温度-20~60℃、連続稼動保証時間4万4,000時間(5年)以上、繰返し開閉保証回数2万回以上、装置騒音30 dB以下などである。

開発目標は、CPU当たりの冷却性能が30 W、装置当たりでは50 W、装置騒音が30 dB以下、寿命が4万4,000時間以上などであり、これらの開発目標に対する主な技術課題は、(1) 凍結防止、(2) 高温でのシールド、(3) 耐腐食・孔食、および(4) 漏水対策である。

2.2 冷却性能評価(環境温度の変化に対する起動時、経年後の性能)

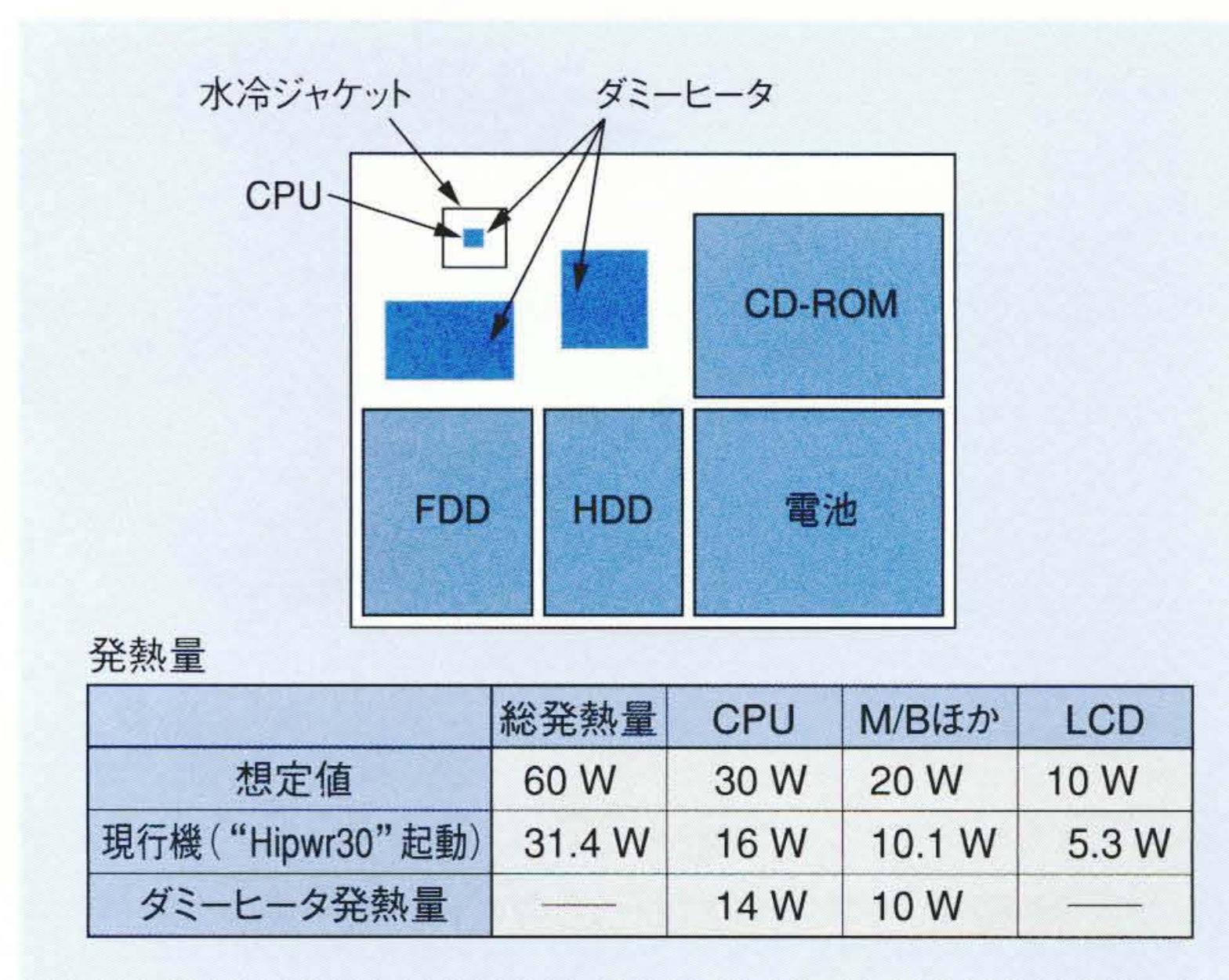
2.2.1 定常時の冷却特性

ノートブックパソコンの放熱特性については、冷却用ワーキ

ングモックアップを用いて実験的に確認した(図1参照)。冷却用ワーキングモックアップでは、できるだけ実稼動状況に近い状態で冷却性能を評価するため、現行のパソコンにダミーヒータを付加し、動作させた状態で温度測定した。このパソコンでは、交流アダプタの直流出力側で測定し、発熱量の不足した分は、CPUやメインボード、ディスプレイなどへフィルム状のヒータを追加することによって補った。さらに、ポンプと放熱パネルとの間に流量測定用のタンクを設置することにより、所定の液量がタンク内にとどまる時間を計測し、動作流量を求めるようにした。その測定結果を図2に示す。

2.2.2 冷却性能の非定常特性(起動時の温度特性)

液温によって液の粘性が変わり、ポンプ性能が変化する。



注1: 不凍液: プロピレングリコール 38 wt%

放熱パネル面積: 46,266 mm²

注2: 略語説明 FDD (Floppy Disc Drive)

CD-ROM (Compact Disc Read-Only Memory)

M/B (Main Board), LCD (Liquid Crystal Display)

図1 冷却モックアップによる試験結果

現行パソコンの実装物(CPU, M/B, LCD)ではCPUの発熱量が不足するので、フィルム状のダミーヒータを用いて不足する発熱量を補った。不凍液のグリコール系濃度は装置初期濃度、放熱パネル面積はA4ノートサイズとそれぞれほぼ同程度である。

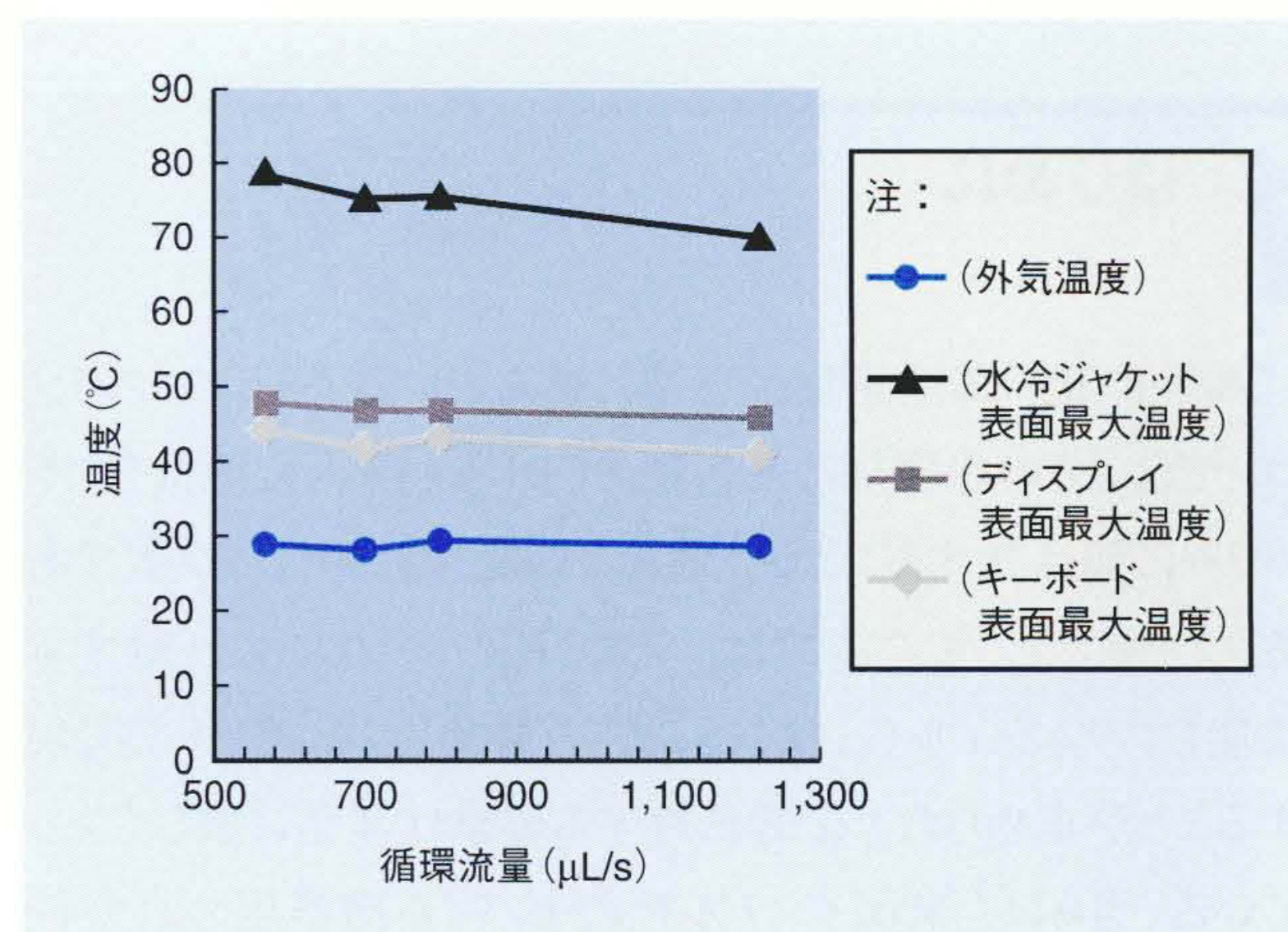


図2 定常状態での各部の温度測定結果

外気温度を29℃に固定し、ポンプの駆動電圧や、ポンプ回転数と循環流量を変えても、各部の温度はほとんど変化しない。これは、放熱量が放熱部での面積によって決定されるからである。

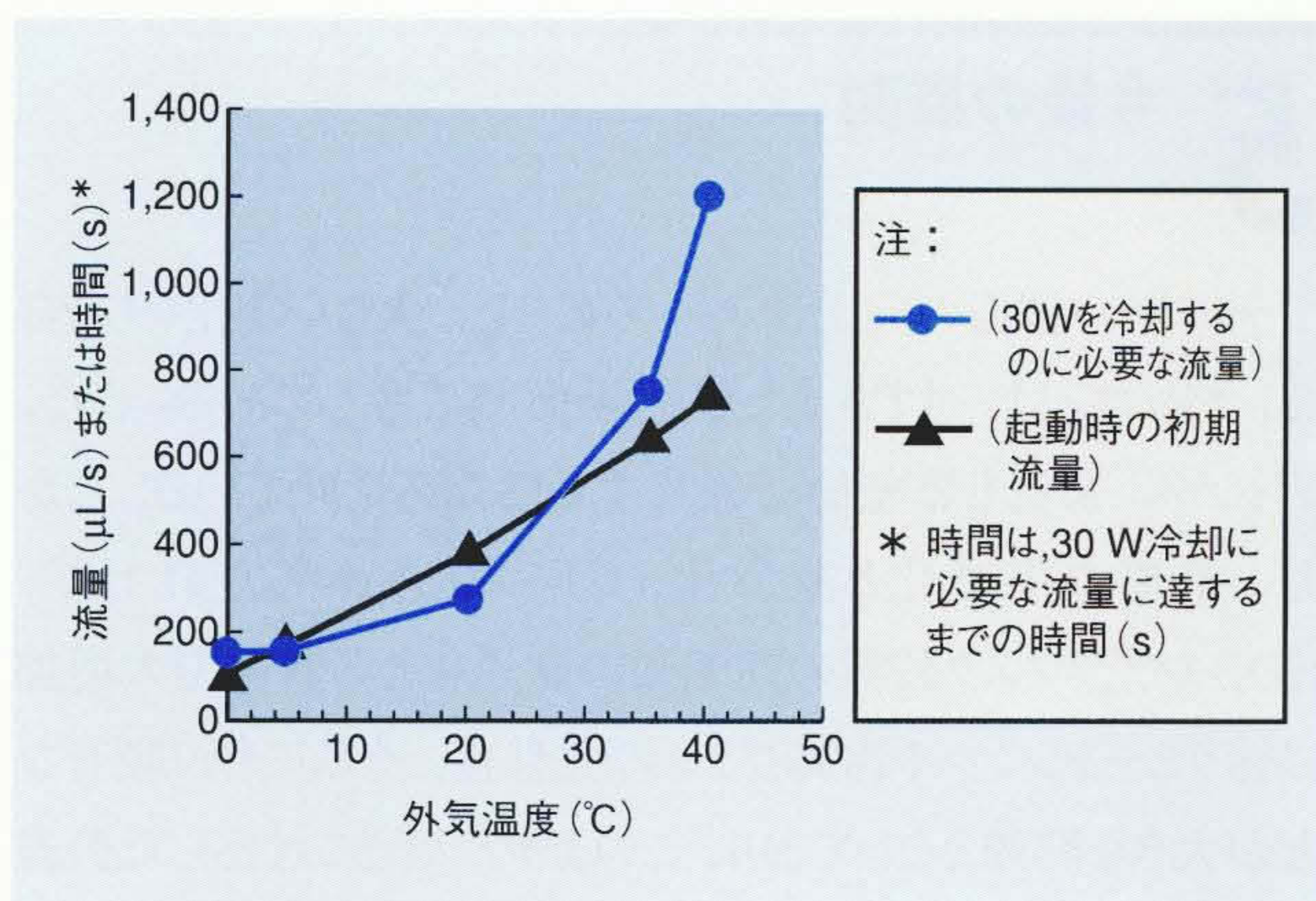


図3 非定常状態での流量と時間の関係

起動時の外気温度が5℃以上の場合、30 Wを冷却するのに必要な初期流量を十分確保することにより、安定した冷却を行うことができる。

このため、外気温度の変化やシステム起動時の温度変化を考慮した評価が必要である。すなわち、温度が低い場合、粘性が大きくなって冷却に必要な液流量が得られず、冷却できないことが懸念される。そのため、液温度が0～40℃でのシステム起動時の温度特性を検討した。その測定結果を図3に示す。

2.2.3 試作ポンプを用いた冷却性能確認と騒音測定

実機ノートブックパソコンに実装することを想定してポンプを試作し、このポンプを前述した冷却用ワーキングモックアップに搭載した場合の冷却性能を確認した。発熱条件は、上記と同様、CPUにダミーヒータを付加することにより、CPUで30 W、本体で50 Wとした。この結果、定常時と低温起動時ともに冷却仕様(CPUジャンクション温度 $T_j < 100^\circ\text{C}$)を満足し、30 W発熱CPUを搭載したノートブックパソコンの冷却に十分な性能を持つことを確認した。

騒音の測定は無響室で行った。ISO規格に準拠した机(高さ75 cm)を用い、その机の中央部にノートブックパソコンを置き、パソコン正面から水平方向に25 cm、床から鉛直方向に120 cm離れた位置に騒音計のマイクロホンを水平面から30度傾けた状態に設置して測定した。その結果は26 dBであった。これは、一般の図書館での騒音が30 dBであることから、図書館や役員室、病院、教育機関など静かな環境でも音が気にならないレベルと言える。なお、冷却ファンを搭載した場合の騒音値は35 dBであり、開発した水冷モジュールでは約10 dBの騒音低減が図れることを確認した。

3 信頼性評価

3.1 メンテナンスフリーと漏水対策

3.1.1 凍結防止

寒冷地での輸送や空輸時など、パソコンが氷点下の環境に置かれることを想定し、冷却媒体として環境に影響の少ないグリコール系水溶液の不凍液を用いた。不凍液の濃度は、

輸送環境温度 -20°C を想定し、ばらつきなどを考慮して決定した。不凍液は純水に比べて粘性が大きいため、外気温度が低い場合や起動時(液温が上昇していないとき)での流動抵抗の増大に注意する必要がある。この検証では、はじめに定常状態での冷却必要流量を求め、この流量を起動時から流すために必要なポンプ吐出圧を求めた。不凍液の場合、外気温度が約 20°C よりも低い領域では、粘性増加による圧力増加のほかが、外気とCPUの温度差拡大(冷却能力拡大)による必要流量の低減に伴う圧損低下よりも大きい傾向が見られる。不凍液を用いる場合、純水の場合よりも、流量と吐出圧力ともに大きな能力のポンプが必要となる。ポンプの仕様は、流量と吐出圧力がともに最大となる外気温度 35°C での必要能力から定めた。必要最小能力は、動作ポイントで $650\ \mu\text{L/s}$ 、6 kPaである。樹脂製のポンプケーシングでは、水分子が樹脂の高分子間から外気に抜けていく現象を抑制するため、硬質の樹脂を用い、上下のケーシングを溶着によって接合した。羽根車の軸には水中滑り軸受を採用することにより、長寿命化を図った。

3.1.2 高温でのシールド

ノートブックパソコンでは、CPUを冷却している間に各 부품の温度が上昇し、樹脂系の材料であるフレキシブルチューブ、リザーバタンク、およびポンプから微量の冷却液が大気へ透過蒸発するという現象がある。この冷却液の蒸発する割合は冷却液の温度に依存し、高温になるほど水蒸気圧が高くなり、蒸発する量も多くなる。この冷却液の蒸発防止のために、リザーバタンク表面には金属処理を施し、ポンプでは、ガラス繊維入りの硬質樹脂の素材を用いて上下のケーシングを溶着している。

3.1.3 耐腐食・孔食・すきま腐食

金属を液に浸漬させた場合、液中に金属イオンが溶出する。金属の種類によって金属イオンのそれぞれの電位が異なり、高い電位を持った金属イオンが低い電位の金属に付着すると、その表面に腐食や孔食が生じる。今回の実験では、凍結防止に用いた不凍液には腐食抑制剤が含まれているが、フレキシブルチューブに含まれている難燃剤のイオンが不凍液内に溶け出して腐食抑制剤を消耗させることから、このイオンを含んだ不凍液を用いて全面腐食量、孔食電位差、およびすきま腐食電位差を評価した。その結果、4万4,000時間経過後でも、腐食や孔食によって水冷モジュールに破損が生じないことを確認した。

3.1.4 漏水対策

ポンプやタンク、ジャケットなど主要な部分には液漏れ防止対策を施し、万一液が漏れた場合でも、ディスプレイ部はプラスチックパーティションで高圧部と遮へいする構造を採った。さらに、液漏れ感知センサを設けて対策を施した。

また、水漏れを生じやすい個所への処置対策として、ノートブックパソコンのディスプレイのヒンジ部のフレキシブルチュー

ブ、フレキシブルチューブと固定配管をつないでいる継手部、およびリザーバタンクの温度変化による破壊については、ノートブックパソコンの5年間使用に相当する熱劣化を与えた後、確認のための評価を実施した。

ノートブックパソコンの本体とディスプレイのヒンジ部には、極端に屈曲する曲げが生じないような構造を採用した。この結果、寒冷地環境下で2万回のねじり曲げを加えてもフレキシブルチューブに損傷が見られず、規定の耐圧試験に合格していることを確認した。さらに、継手部に関しては、4万4,000時間(5年)相当の劣化試験後の試験で、配管継手部の耐圧と引張強度とも仕様を満足することを確認した。

また、リザーバタンクの破壊に関しては、三次元強度解析によって内部構造を決定した。

4 水冷モジュールの設計上の特徴

水冷モジュールの設計上の特徴は以下のとおりである。

- (1) CPUやグラフィックスLSIなどで発する熱を表示部のディスプレイパネルの裏面などに効率よく輸送し、筐体外に放熱させることができる。
- (2) ファンレス冷却としたことにより、図書館以下の騒音に抑え込むことができた。また、水冷モジュールを搭載することにより、装置の騒音レベルの大幅な低減を可能にした(図4参照)。
- (3) 部品の小型化とフレキシブルチューブを用いた柔軟なレイアウトを可能にすることにより、ノートブックパソコンやデスクトップパソコン、超高密度サーバなどにも対応することができ、実装レイアウトの柔軟性が大きい。
- (4) 水冷ジャケットを追加するだけで、複数の発熱体を容易に冷却することができ、かつノートブックパソコンの稼動期間中の保守を事実上メンテナンスフリーにした。

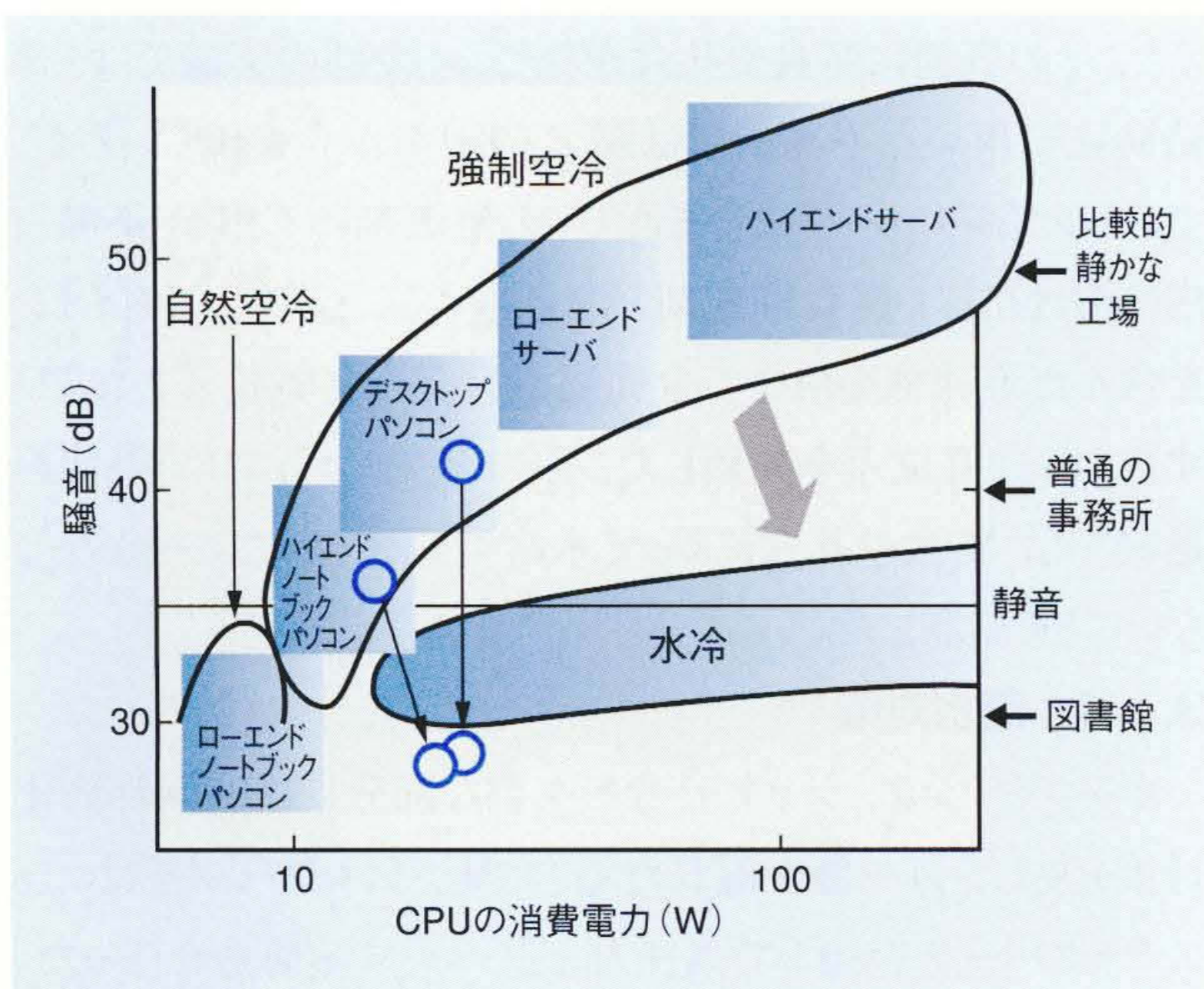


図4 CPUの消費電力と装置騒音の関係

冷却ファンによる強制空冷方式では、発熱量が多くなれば装置の騒音も大きくなる。一方、水冷システムを搭載した装置では、熱を広い面積まで拡散することができるので、ファンレスによる自然空冷の放熱限界が拡大でき、静音化が図れる。

5 今後の展開

デジタル技術の向上は人々の暮らしに大きな変化をもたらし、パソコンは、さまざまな生活場面で活躍している。また、デジタル家電も爆発的に普及する様相を見せている。しかし、機器の小型化と薄型化、CPUの消費電力の上昇、HDDや光ディスク装置の回転数の高速化と消費電力の増加に伴うヒートシンクや冷却ファンの大型化、それに伴う騒音などが大きな問題となっており、このような状況に対応した機器の熱対策が大きな課題となっている。

日立製作所は、今回開発した水冷モジュールを、ノートブックパソコンへの導入を皮切りに、今後、デジタル機器にも展開していく予定である。今後、熱輸送量のいっそうの向上のために必要な技術として、今回開発した水冷モジュールの効率向上のほか、CPUから発生した熱を奪う際の効率(物質間接触熱抵抗)と、奪った熱を放出する際の効率(対流熱伝達)向上技術の研究が必要不可欠になるものと考ええる。

6 おわりに

ここでは、ノートブックパソコンに用いる水冷モジュールの開発、仕様と性能、評価などについて述べた。

今後、水冷モジュールは、デスクトップパソコンのほか、サーバなどの情報機器やPDP、プロジェクタなど情報家電製品を含むさまざまな製品へと適用が拡大されていくものと考ええる。

日立製作所は、CPUやLSIなどの高性能化に伴う消費電力の大幅な増大にも適用が可能な水冷モジュールの性能の向上とデファクトスタンダード化に向けて、国内および海外の散熱ベンダーと協力関係を築き、いっそうの技術開発に取り組んでいく考えである。

参考文献

- 1) 電子機器の冷却設計, 電子技術(1987.9)
- 2) 日本機械学会:伝熱工学資料 改訂第4版, pp.69~70(1987)
- 3) 日立製作所 機械研究所:空冷電子機器の低騒音冷却設計法(2)
- 4) 日本機械学会:機械工学便覧 改訂第6版, pp.8~14(1977)
- 5) 石塚:ポータブル・コンピュータの放熱最前線, 日本機械学会誌(2002.9)

執筆者紹介

中川 毅



1970年日立製作所入社、ユビキタスプラットフォームグループ インターネットプラットフォーム事業部 開発本部 所属
現在、パソコンとインターネット関連製品の開発に従事
日本機械学会会員
E-mail: tnakaga@ebina.hitachi.co.jp