

論文 冷媒自然循環技術を用いた沸騰冷却器の開発* (コンピュータチップ用小型沸騰冷却器)

Boiling Refrigerant Type Cooling Unit (Compact Cooling Unit for Computer Chip)

鈴木昌彦 寺尾公良 田中公司 松本達人 田中栄太郎
Masahiko SUZUKI Tadayoshi TERAO Hiroshi TANAKA Tatsuhito MATSUMOTO Eitaro TANAKA

In recent years, the calorific power of electronics device is increasing rapidly involved in high performance. So the electronics device industries are requiring cooling units correspond to high calorific power and heat flux. In the past cooling units for these items are using air-cooling aluminum fin, but they can not correspond to high calorific power. We have developed a new compact boiling refrigerant type cooling unit. The main feature of this cooling unit realized high cooling performance, compactness, and low electric power consumption.

Key words : Boiling refrigerant, Cooling unit, Computer chip, CPU, Air-cooling fin

1. 緒言

近年、半導体素子はますます高集積化、高容量化、高速化の傾向にあり、これを使用する電子機器・電力制御機器の発展は目覚ましく、輸送用・産業用・電源用などに展開されているが、素子の発熱量や発熱密度の増大に対し、より高性能な小型冷却器へのニーズがますます高まっている。

そこで筆者らは、姿勢制約があるものの、小型化と冷却面温度の均一化で有利な沸騰冷却方式を取り上げ、これまで研究・提案してきた。本論文では、最近の冷媒自然循環技術とそれを応用した製品群の中で、特に最近熱負荷が増大しているコンピュータチップ用の冷却器を実用化した研究成果を報告する。

沸騰冷却器の適用領域をFig.1に示す。システム出

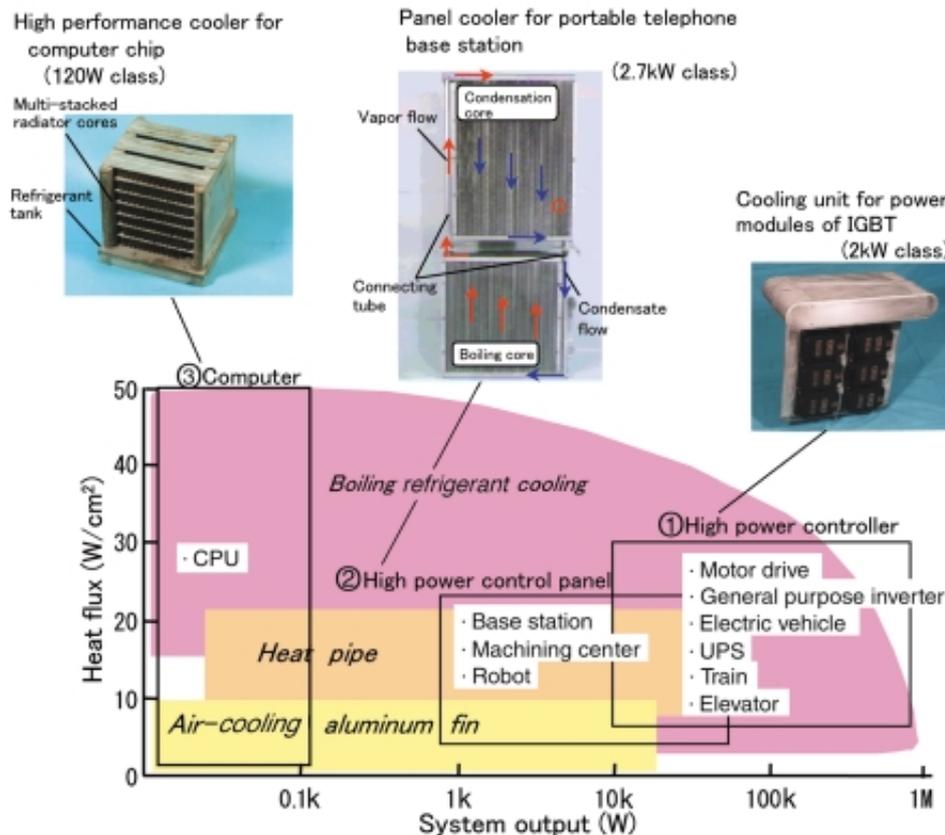


Fig.1 Applications of boiling refrigerant type cooling unit

* 2002年3月26日 原稿受理

力の大きい産業用インバータなどの大出力パワーモジュール^{(1),(2)}や大電力制御盤クーラ^{(3),(4)}、システム出力は小さいが熱流束が急増している大容量コンピュータ用チップ^{(5),(6)}などがあり、簡素な構成で大きい熱量を輸送できる冷媒循環技術を開発し、製品化に結びつけてきた。

2. 主な記号

- Q : 熱負荷 W
- q_f : 熱流束 W/m²
- T_a : 外気温度
- T_s : CPU取付面の温度
- T_w : 壁面温度
- T_{sat} : 冷媒の飽和蒸気温度
- T : 冷却性能 (= T_s - T_a) K
- T_b : 沸騰部温度差 K
- T_c : 凝縮部温度差 K
- V : 冷却風速 m/s
- h : 熱伝達係数 W/m²・K

3. 沸騰冷却器の構造

Fig.2にCPU用沸騰冷却器の外観を示す⁽⁶⁾。沸騰冷却器は、CPUの熱を受熱する冷媒槽と強制空冷により大気中に熱を放熱する放熱コアからなり、ロウ付けにより一体成型しており、高い気密性を持つ。

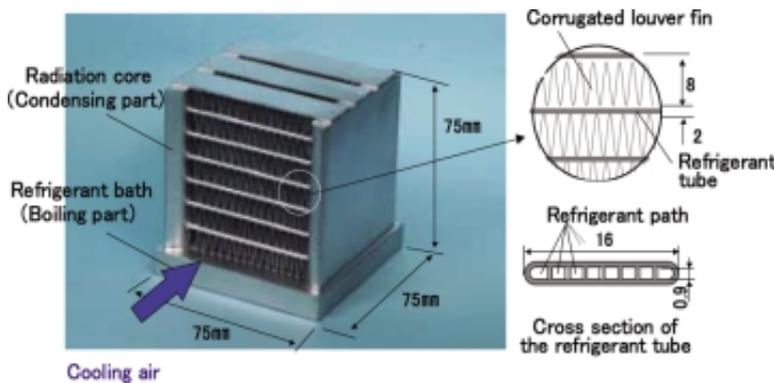


Fig.2 Boiling refrigerant type cooling unit for computer chip

冷媒槽内部は、冷媒槽の強度確保と伝熱面積拡大を目的として 1mmの角柱フィンをピッチ2mmで配設しており、高い熱流束に対応できる構造とした。

放熱コアは、自動車用熱交換器で実績のある押し出し成形された多穴断面アルミチューブと高性能コルゲートフィンを積層し、コア両端部に設置されたヘッダを用いて各放熱チューブを連結して構成した。

放熱コアをこのような積層構造とした最大の特徴は、積層の段数を増減したり、チューブとフィンの長さを可変することで、容易に冷却器の性能を目的の仕様に合わせることができる点にある。

また、内部には冷媒としてカーエアコンで実績のある代替フロンHFC-134aを封入している。Fig.3にCPU用沸騰冷却器の断面構造を、Table 1にはその仕様を示す。

Table 1 Specification of boiling refrigerant type cooling unit for computer chip

Items	Contents
Cooling performance (Heat resistance)	0.2 K/W or less ($\Delta T = 24\text{ K}$) $\Delta T = \text{Temperature of contact surface with CPU} - \text{Ambient temperature}$
Heat load	120 W
Cooling air velocity	1.6m/s
Refrigerant	HFC-134a
Size	75(W) × 75(D) × 75(H)mm

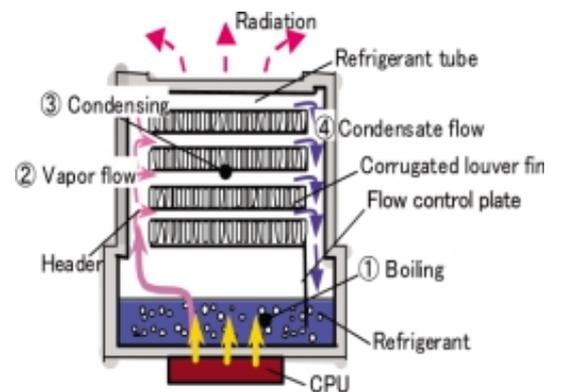


Fig.3 Structure of boiling refrigerant type cooling unit for computer chip

Fig.3の断面構造を用いてこの冷却器の動作原理を説明する。CPUの熱を受けると、冷媒槽内部で冷媒が沸騰して冷媒蒸気となる。この冷媒が気化する時に、必要な潜熱を吸熱する。冷媒蒸気は放熱コアの一方のヘッダを通して放熱チューブへと到達し、冷却風により冷却され凝縮し液冷媒となる。ここで液化する際に蒸発潜熱を放熱する。その後、液冷媒はもう一方のヘッダを通り重力的作用により冷媒槽へと戻り、冷媒循環を形成する。また、放熱チューブへ伝えられた熱は高い熱伝達率を持つコルゲートルーバーフィンによって大気中へと放熱される。

これを繰り返して冷媒が循環しながら、熱輸送を行いCPUを冷却する。冷媒の循環を円滑に行うために、冷媒槽の一方のヘッダ差込部（冷媒槽と放熱コアを連結する部分）には冷媒流制御板を設けており、冷却器内部の冷媒循環を制御している。

上記構成により、チューブの配置が水平になるような姿勢においても、循環用ポンプ等の動力装置を用いることなく冷媒を自然循環でき、沸騰と凝縮を連続して行うことで沸騰冷却器は高い熱伝導性能を有し、大きな熱量や高い発熱密度にも対応することが可能となり、小型・軽量化にもつながる。

4．空冷アルミフィンの構造

Fig.4に比較に用いた空冷アルミフィンの構造を、Table 2にその仕様を示す。空冷アルミフィンとは、現在の市販されているアルミ押し出し成形のフィンと想定し、沸騰冷却器と同一ファンで性能評価した場合に、同等の性能となるよう設計・製作した。外形寸法は、150(D)×150(W)×85(H)mmで、150mm角のアルミの板（受熱板 板厚10mm）に、肉厚1mmの平板フィンをピッチ3mmで設けた。受熱板とフィンはロウ付けにより一体成形してあり、高い冷却性能をもつ構造としている。

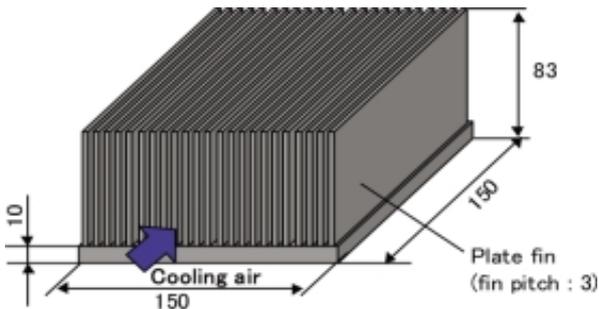


Fig.4 Appearance of air-cooling aluminum fin

Table 2 Specification of air-cooling aluminum fin

Items	Contents
Cooling performance (Heat resistance)	0.2 K/W or less ($\Delta T=24\text{ K}$) ΔT =Temperature of contact surface with CPU - Ambient temperature
Heat load	120 W
Cooling air velocity	1.3m/s
Refrigerant	HFC-134a
Size	150(W)×150(D)×75(H)mm

5．試験方法

Fig.5に今回の評価に用いた試験装置を示す。発熱体は、CPUを模擬したヒータを埋め込んだ銅のブロック（冷却器との接触面積 25mm×25mm）を冷却器の底面に取り付け、冷却器を加熱した。発熱量は、ヒータへの印加電圧により調整した。この時の発熱条件は、CPUの発熱量が年々急速に増大していることから、発熱量は近い将来100Wに到達することもあり得と考え、やや大きめの120Wの条件で比較した。

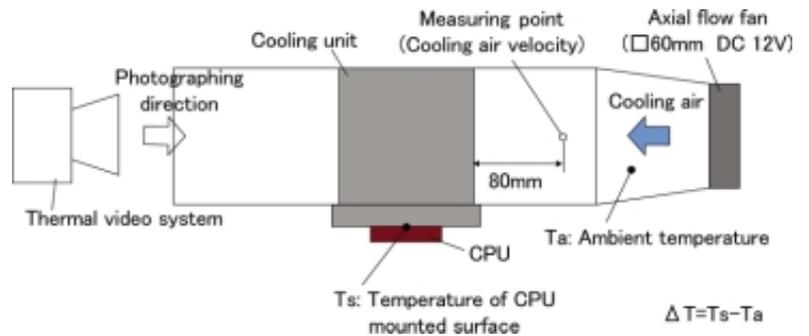


Fig.5 Experimental apparatus

冷却風は、冷却器の周りに隙間を開けないようにダクトを配設し（ダクト断面サイズ75mm×75mm）、市販の60mmの軸流ファン（厚さ25mm、定格DC24V）を1個用いて供給した。冷却条件は、同一ファンを定格で動作させた。これは、風速同一条件とした場合ダクトの断面積が大きいほど風量が多い条件となり、風量同一とした場合は逆にダクトが大きいほど風速低下を招くことから、実際の使用状況を考慮して同一ファンを用いた定格電圧での動作条件とした。

風速は冷却器から風上側へ80mm離れた位置で測定した。比較した空冷フィンの場合はダクトのサイズが断面150mm×75mmと大きくなるので、これから滑らかな断面変化で60mmのファンに接続した。風速を測定した位置のダクト断面サイズの違いと冷却器の圧力損失の違いから、測定位置の風速は沸騰冷却器1.6m/s、空冷アルミフィン1.3m/sとなった。

冷却性能は、外気温度とヒータブロックを取付けた面の中心での冷却器壁面温度との差 T を求め、その温度差 T を熱負荷で割った値を熱抵抗とし比較評価に用いた。外気温度およびヒータブロック取付面温度ならびに放熱部の温度分布はT型熱電対を用いて19点測定し、別に放熱コア部に黒体塗装を施し走査型赤外線放射温度計により測定した。冷媒温度は冷媒圧力を測定し、飽和蒸気温度に換算した。

6. 試験結果

6.1 沸騰冷却器の冷却性能

今回試作評価した沸騰冷却器の冷却性能をFig.6に示す．内部に冷媒を封入してあるため姿勢によって性能が変化するので，CPU冷却器としての代表的姿勢を考慮し，三つの姿勢について評価した．

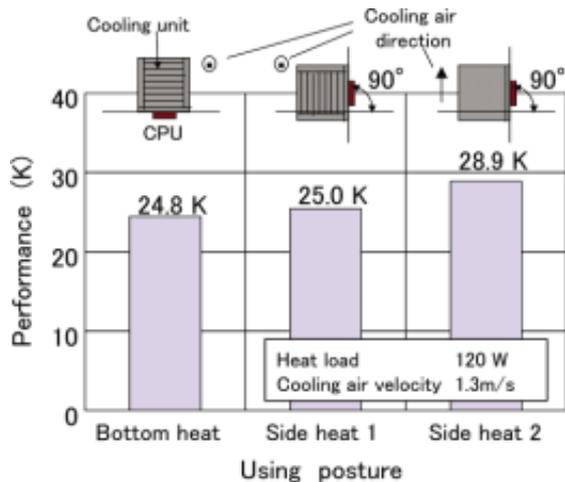


Fig.6 Cooling performance

基本的なCPUが下方に位置するボトムヒートの姿勢において，温度差は24.8Kであり熱抵抗に換算して0.21K/Wという結果が得られた．この時の熱負荷は，120Wである．

CPUが側面に位置し，放熱コアのチューブが垂直になるサイドヒート1の姿勢では温度差は25.0K（熱抵抗0.22K/W），チューブが水平になるサイドヒート2の姿勢では温度差28.9K（熱抵抗0.24W/K）となった．

ボトムヒート姿勢時には冷媒が下方へ戻り，CPUの熱を効果的に受けて沸騰できるが，サイドヒート姿勢では冷媒が十分にCPU取付部に接触できないことから，性能低下が懸念された．そこで，放熱コアを立方体形状とし，フィンの冷媒液面より上方にある部分が効果的に作用する設計と，冷媒を内容積の60%と多めに封入することで，冷却性能を向上することができた．ただし，CPUが上方に位置するトップヒートにおいては放熱コア部に冷媒が溜まってしまいCPU取付部に接触できないので，今回の性能評価の対象外とした．

このように，沸騰冷却器は冷媒を重力の力で自然循環させるため，冷媒循環をいかに良好に行える循環構造を実現するかが重要といえる．

ボトムヒートにおける風速と冷却性能の関係をFig.7に示す．この測定においては60mmの軸流ファンを，大型のシロッコファンに取り替えて測定した．また，発熱量が変化した場合の冷却性能をFig.8に示す．発熱量を50W～200Wまで変化させ冷却性能の変

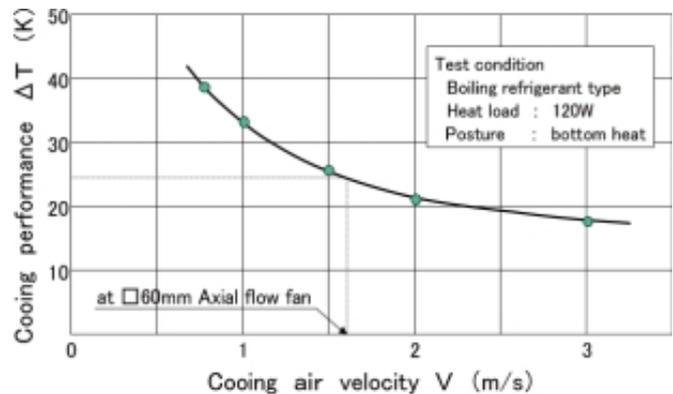


Fig.7 Effect of cooling air velocity

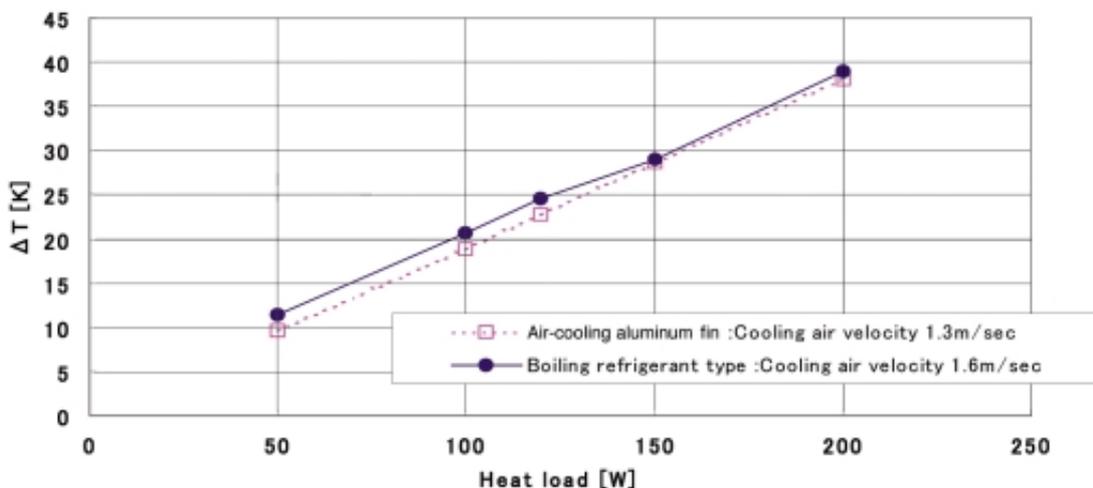


Fig.8 Comparison between boiling refrigerant type and air-cooling aluminum fin

化を測定した結果、姿勢が一定の場合は発熱量を変化させても熱抵抗は変わらず、ボトムヒート条件ではおよそ0.20K/Wの一定値が得られる。

このときの放熱経路に沿った代表点の温度を比較したグラフをFig.9に示す。空冷アルミフィンの場合、発熱体から受熱した熱は空冷アルミフィン内部の熱伝導のみで熱を運ぶため放熱フィンまでの温度差(15.9K)が大きい。一方、沸騰冷却器の場合、冷媒の沸騰・凝縮による潜熱を利用した熱輸送を利用するため、空冷アルミフィンと比べ放熱フィンまでの温度差(11.7K 36%低減)を小さくすることができ、より効率よくフィン全体へ熱を輸送することができる。この結果、フィン温度を高く維持できることから、狭いフィン面積や低風速条件下でも放熱できることがわかる。更に、この熱拡散能力の差を明確化するために、走査型赤外線放射温度計により放熱部の温度分布を比較した結果をFig.10に示す。沸騰冷却器では、冷媒の熱輸送効果によりフィン全体へ熱が伝わり効果的に温度が上昇しているのに対して、空冷フィンでは熱伝導で熱を輸送するため発熱部の近傍のみしか温度上昇してい

ない。特に、空冷フィンでは熱流束の高い発熱部近傍での温度勾配が大きい。これらの差により、沸騰冷却器では小さい体格でも、大熱量を放熱できることが、温度分布の画像からもはっきりと差として現れている。

6.2 計算による温度分布予想結果との比較

今回、各要求仕様に合わせた冷却器コアサイズなどを容易に設計することを狙いとし、計算解析により沸騰冷却器の温度分布を計算し性能を予測する手法を確立した。この解析による性能推定値を元に、今回の比較評価に用いた同等性能の空冷フィン设计了。

計算解析の基本的考え方を、Fig.11に示す。この解析において、考慮しなければならない熱経路は二つある。一つは冷却器を構成するアルミの熱伝導による熱輸送、もう一つは内部に封入された冷媒による熱輸送である。CPUからの熱はまずアルミの冷媒槽壁面に伝わる。この熱の多くは壁面から内部の冷媒に伝わり、冷媒の気化潜熱(163.2kJ/kg at 40)として消費される。残りの熱は、そのままアルミを伝導して、フィンに到達し外気に放出される。気化した冷媒蒸気は、

フィンに熱的に接合されている多穴断面アルミチューブの内壁で冷媒が凝縮して生じる僅かな圧力差により、CPU取付面の内壁部からチューブ内へ流れる。ここで、熱は蒸気の流れによる物質移動とともに輸送される。

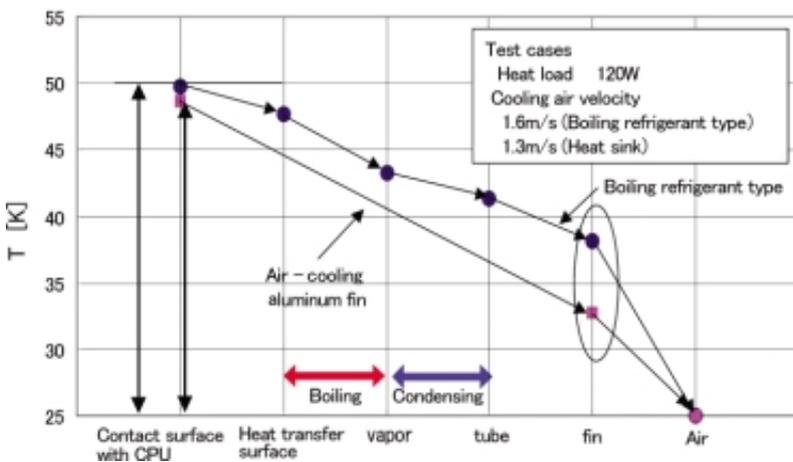


Fig.9 Comparison of heat abstraction

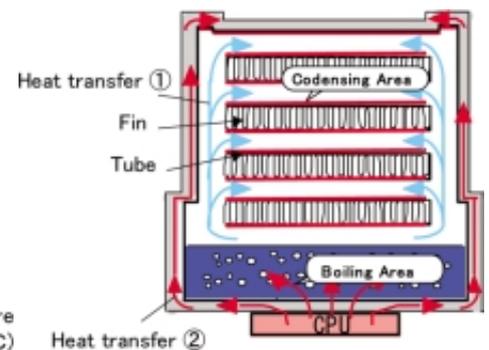


Fig.11 Calculate model

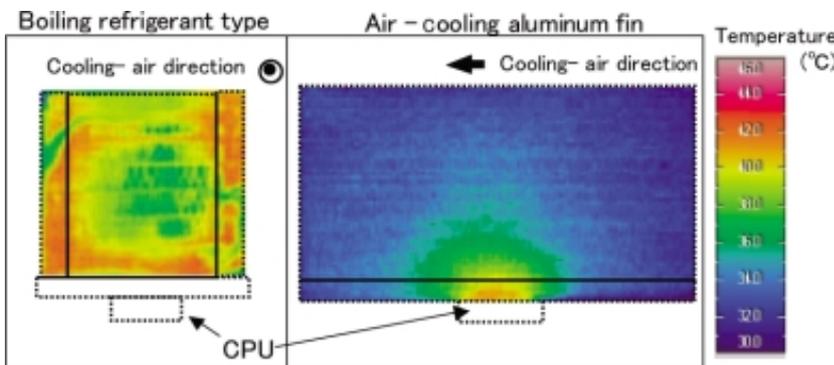


Fig.10 Temperature of radiation core

計算解析では、この原理を次のようにモデル化した。
(Figs.12 & 13)

沸騰部で冷媒が受け取る熱量 Q_b と、凝縮部で冷媒が放出する熱量 Q_c は、熱伝達率 h_b, h_c と面積 A_b, A_c を用いてそれぞれ(1),(2)式で表すことができる。

$$Q_b = h_b (T_{wb} - T_{sb}) dA \quad (1)$$

$$Q_c = h_c (T_{sc} - T_{wc}) dA \quad (2)$$

この時、沸騰部での飽和蒸気温度 T_{sb} と凝縮部での飽和蒸気圧 T_{sc} は、沸騰部から凝縮面へと流れる冷媒蒸気の圧力損失に相当する温度差として定義した。

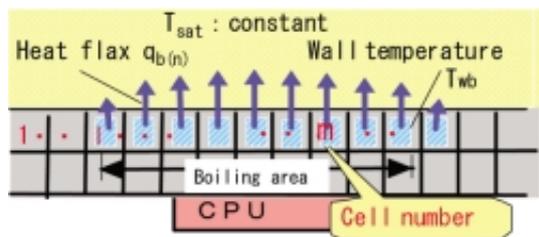


Fig.12 Model of boiling area

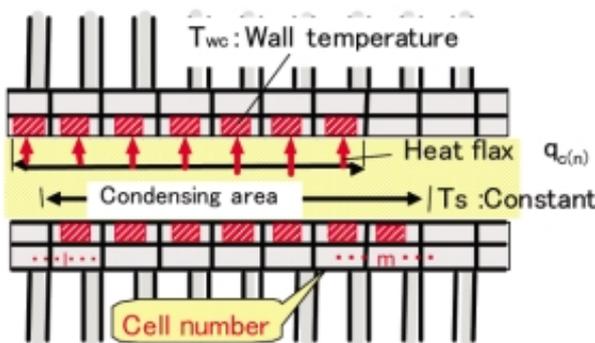


Fig.13 Model of condensing area

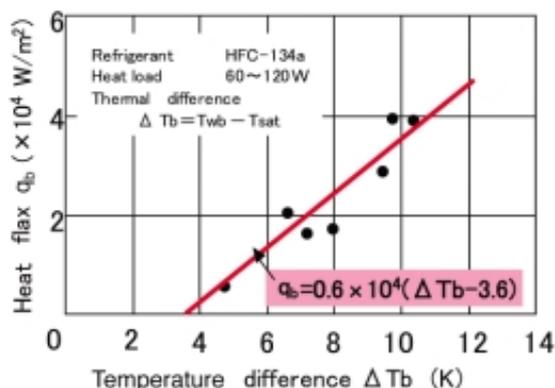


Fig.14 Heat flux of boiling area

以上の式から $Q_b = Q_c$ として、 A_b, A_c を変化させながら繰り返し計算により、温度分布を求めた。ここでの計算条件としては、沸騰部では液冷媒層での液の対

流を、凝縮部では凝縮により生じる凝縮液滴の影響を考慮していない。これらが、熱伝達に与える影響は、熱伝達率を測定したサンプルを実機に近い形態とすることで、実験的に求めた熱伝達率のなかに包括される形で反映した。

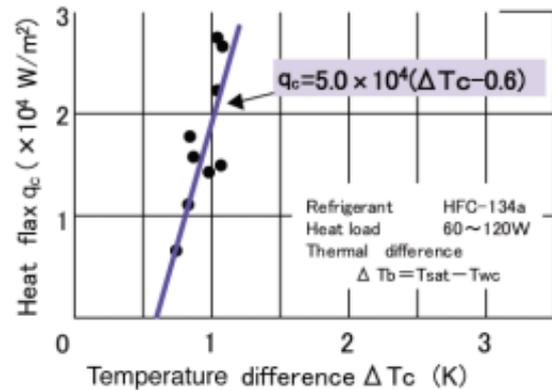


Fig.15 Heat flux of condensing area

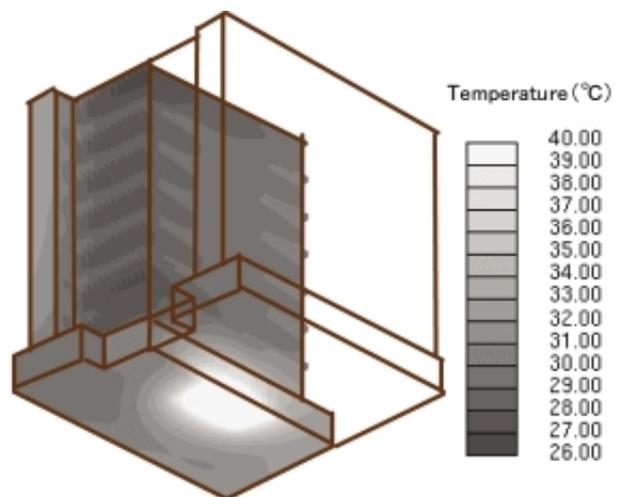


Fig.16 Result of calculation (T_w)

計算手法における工夫点は、上記に示した点を含め三つのポイントがある。

冷媒蒸気の流れによる熱輸送とアルミの熱伝導による熱輸送を連成して計算し、それを沸騰部の伝熱面積と凝縮部の伝熱面積を変化させることでバランスを計算し、温度分布として求めた。

沸騰部における冷媒と沸騰面の熱抵抗（熱伝達性能）及び凝縮部における冷媒と凝縮面の熱抵抗は、別途サンプルを作成し、熱流束と温度差を実験的に求めた結果から熱伝達率として与えた。(Figs.14 & 15)

冷却器をモデル化する場合、フィンそのままモデル化すると非常に細かいメッシュが必要となり、多大なメモリと計算時間を要する。そこで、フィン形状を大幅に簡略化しモデルを小さくするとともに、フィンの熱伝達率とフィン面積Fを掛け合わせた F が同一になるように簡略化したフィンの熱伝達率を大きくして計算した。なお、このモデルに相当する熱交換器フィン部のサンプルを別に用意し、性能測定をおこなって補正を加えた。Fig.16に計算例を示す。

以上の計算により求めた温度分布と試作品を製作し実測した温度分布を比較した (Table 3)。計算により沸騰冷却器の冷却性能は温度差で23.2Kと推定された。これに対し、実測値は25Kであり良く一致している。ただし、温度分布全体を見ると、CPU取付面の外周部 (Points 11, 12 & 13) の計算値が実測値より小さいが、これは冷媒液層の対流を考慮していないことの影響で外周部の計算誤差が大きいと考えられる。

6.3 空冷アルミフィンとの体格比較

Figs.17 & 18に沸騰冷却器と空冷アルミフィンの外観写真と体格比較を示す⁶⁾。

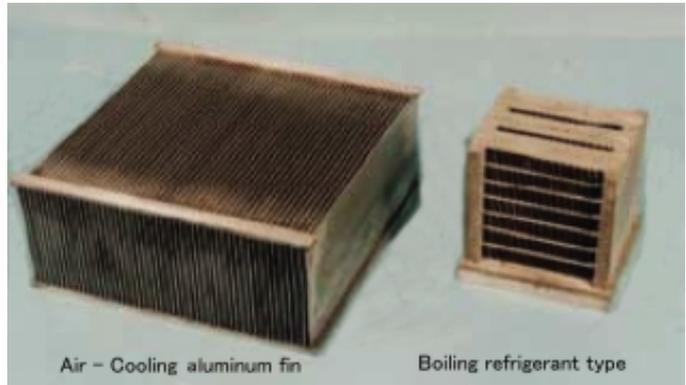


Fig.17 Comparison of air-cooling aluminum fin and boiling refrigerant type

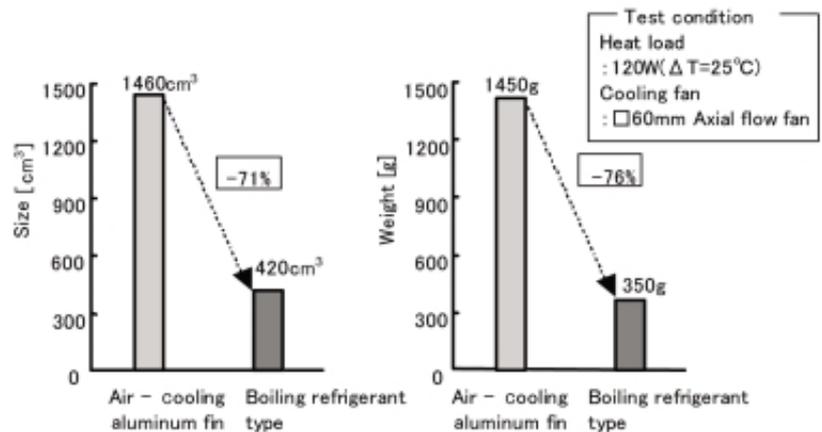
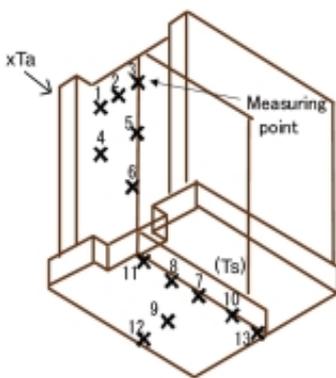


Fig.18 Comparison of size and weight

Table 3 Comparison of calculation and experiment



Point	Calc. (°C)	Exp. (°C)	Difference (K)
1	36.5	34.7	1.8
2	36.1	36.8	-0.7
3	36.2	38.3	-2.1
4	36.5	35.7	0.8
5	36.3	38.5	-2.2
6	36.2	37.6	-1.4
7(Ts)	48.0	49.8	-1.8
8	45.0	45.3	-0.3
9	42.8	45.5	-2.7
10	45.0	45.0	0.0
11	37.0	42.7	-5.7
12	37.4	43.7	-6.3
13	38.2	42.7	-4.5
Ta	24.8	24.8	—
$\Delta T (=T_s - T_a)$	23.2	25.0	-1.8

熱負荷120Wで、60mmの軸流ファン（厚さ25mm、定格DC24V）を1個用いて冷却した場合、冷却性能は沸騰冷却器 25K、空冷アルミフィン 24Kとほぼ同じ性能である。これより、同一性能において、沸騰冷却器は空冷アルミフィンと較べて体格で1460cm³から420cm³へ71%低減、重量は1450gから350gへ76%低減できた。

7. 結言

コンピュータチップ用冷却器として、

- (1) 独自の冷媒自然循環機能を持つ沸騰冷却方式により、高熱流束に対応できる高性能冷却器を開発した。
- (2) 沸騰冷却器の性能を予測できる簡易的な計算解析手法を確立した。
- (3) 冷却器の性能向上分を小型化・軽量化に生かすことで、空冷アルミフィンに比較して体格で71%、重量で76%低減できた。

この成果をコンピュータメーカーに認めていただき、1998年を皮切りに製品化しコンピュータメーカーに納入を開始した。

2002年3月に公開された、宇宙開発事業団・日本原子力研究所・海洋科学技術センターが共同開発したスーパーコンピュータ「地球シミュレータ (Earth Simulator)」⁷⁾にもコンピュータチップ用沸騰冷却器が5120台搭載されている。

<参考文献>

- 1) 鈴木昌彦・川口清司・大畑貴英・長賀部博之, 「自動車用積層放熱コアを用いた小型沸騰冷却器 (冷媒流循環と冷却性能)」日本機械学会論文集B, 64-622 (1998), pp.1861-1866.
- 2) 鈴木昌彦・川口清司・大畑貴英・長賀部博之, 「自動車用積層放熱コアを用いた小型沸騰冷却器 (ヒートパイプ方式との比較)」日本機械学会論文集B, 64-623 (1998), pp.2244-2249.
- 3) 岡本義之・鈴木昌彦・川口清司・樹下浩次, 「沸騰冷却方式パネルクーラ (冷媒循環と冷却性能)」日本機械学会論文集B, 99-0539 (2000.5), pp.1447-1452.
- 4) 鈴木昌彦・川口清司・岡本義之・樹下浩次, 「沸騰冷却方式パネルクーラ (他冷却方式との比較)」第36回日本伝熱シンポジウム講演論文集, I1123 (1999-5), pp.267-268.
- 5) 田中栄太郎・川口清司・寺尾公良・鈴木昌彦・田中公司, 「コンピュータチップ用小型沸騰冷却器 (沸騰部熱抵抗の低減)」日本機械学会論文集B, 00-0792 (2001.7)
- 6) 寺尾公良・鈴木昌彦・川口清司・田中栄太郎・田中公司, 「コンピュータチップ用小型沸騰冷却器 (他冷却方式との比較)」日本機械学会東海支部講演論文集No.3-1 (2000.3)
- 7) 地球シミュレータ研究開発センター, 「地球まるごとシミュレーション」<http://www.es.jamstec.go.jp/>

<著 者>



鈴木 昌彦
(すずき まさひこ)
技術開発センター 特定開発室
工学博士
環境・エネルギーシステム技術及び
電池技術の研究開発に従事



寺尾 公良
(てらお ただよし)
冷暖房開発1部
冷暖房機器の開発に従事



田中 公司
(たなか ひろし)
冷却機器開発部
沸騰冷却器の開発に従事



松本 達人
(まつもと たつひと)
開発部
環境・省エネルギーシステム機器及び
材料の開発に従事



田中 栄太郎
(たなか えいたろう)
技術開発センター 特定開発室
燃料電池用制御機器の開発に従事