薄型携帯パソコンの熱設計*

小林 孝^{*1}, 大串 哲朗^{*2}
角 憲明^{*3}, 藤井 雅雄^{*1}

Thermal Design of a Slim Notebook Personal Computer

Takashi KOBAYASHI, Tetsuro OGUSHI,
Noriaki SUMI and Masao FUJII

This paper describes the outline of thermal design technology used for MITSUBISHI ultra-slim notebook Personal Computer "Pedion". As of September 1997, "Pedion" is the world's thinnest at 18 mm thick among A4-size notebook computers. We have developed innovative thermal solutions for ultra-slim Notebook PC where only natural convection cooling can be used for heat rejection. The first solution is cooling system for CPU by using the bottom chassis (Mg die-cast) as a heat spreader combining with Al heat transfer plate. And the size and the thickness of Al plates were optimized by thermal analysis using Finite Volume Method. As the second solution, a new coating which can reduce touching warmth of Mg die-cast enclosure have developed and already been reached the stage of practical use.

Key Words: Thermal Design, Electronic Equipment, Closed Cabinet, Touching Warmth

1. 緒言

近年の携帯型パソコンでは、デスクトップ機に匹敵する高速CPUを搭載しており、発熱量は増大している。一方、携帯性を向上させる上では筐体サイズの小型・軽量化への要求も強く、図1に示すように製品の薄型化が進んでいる。こうした背景から、携帯型パソコンの熱密度は増加しており、筐体内部品品の正常動作・信頼性向上を実現する熱設計技術の重要性が高まっている。また、携帯性機器ではユーザの不快感につながる筐体表面温度への配慮も必要であり、感触温度対策も熱設計課題の一つとなっている。

従来の携帯型パソコンでは筐体内の熱密度の上昇に対し、ヒートパイプや小型ファンといった冷却デバイスを設置することで対処してきた。しかし近年では、筐体サイズの更なる薄型化に伴う対策スペースの減少から、ヒートパイプやファンに代わる省スペースな冷却構造が必要となってきた。特に、携帯型パソコンの信頼性を向上させる上では、ファンを使用しない密閉筐体構造を実現する冷却構造が望まれていた。

そこで著者らは、全筐体厚さが18mm(本体部は約

12mm、表示部は約6mm)という薄型携帯パソコンの実現を目的とし、省スペースな高効率冷却構造の研究開発を行った。図2に製品化を実現した薄型携帯パソコンの外形図を示す。

最近では、電子機器筐体の研究開発に数値解析を適用した事例はあるが⁽¹⁾⁽²⁾、筐体周囲の境界領域を含めて解析メッシュ領域として扱い、詳細なモデル化を行っていたため計算に数時間を要し、実設計に利用できない課題があった。また、コンパクトな解析手法を検討をした事例もあるが⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾、研究レベルの専用コードが多く、設計者が実設計に利用できる簡便なモデル手法と高速なターンアラウンドタイム(10分程度)を備えたものは少なかった。

Fig1. Trend of the mobile PC in thickness

* 原稿受付 1998年3月17日。

^{*1} 正員, 三菱電機(株)設計システム技術センター(☎220-8120 横浜市西区みなとみらい2-2-1)。

^{*2} 正員, 三菱電機(株)先端技術総合研究所(☎661-8661 尼崎市塚口本町8-1-1)。

^{*3} 三菱電機(株)設計システム技術センター。

Fig.2. MITSUBISHI mobile computer "Pedian"

また、携帯型パソコンの冷却構造を研究した事例も増えているが⁽⁴⁾⁽⁶⁾、製品適用を前提とした薄型化技術や金属筐体表面の感触温度対策について報告した例は少ない。

本機種の開発では、設計初期段階からコンパクトな数値解析モデル手法を用い、冷却構造をパラメトリックに検討することで、金属筐体を熱拡散部材とした省スペースな構造を実現した。また、金属筐体の課題である感触温度特性については意匠性に優れる塗装ベースの新コーティング技術を開発し、適用した。

本報では薄型携帯型パソコンの熱設計を可能とした数値解析による実用的設計手法および、ファンレスの薄型密閉筐体構造を実現した新冷却技術について報告する。

2. 記号

d	: 塗膜の厚さ	mm
D	: 奥行き	mm
Gr	: グラスホフ数	
h	: 熱伝達率	W/(m ² ・K)
H	: 高さ	mm
L	: 代表長さ	m
Pr	: プラントル数	
S	: ソース項	W
T	: 温度	K
T_1	: 人体の温度	K
T_2	: 接触物体温度	K
T_s	: 放射物体間の平均温度	K
T_m	: 筐体表面と周囲空気の平均温度	K
U	: 塗膜の熱通過率	W/(m ² K)
W	: 幅	mm
α	: 熱拡散率	m ² /s

α_1	: 人体の熱拡散率	m ² /s
α_2	: 接触物体の熱拡散率	m ² /s
β_1	: 人体の熱浸透率	W√s/(m ² K)
β_2	: 接触物体の熱浸透率	W√s/(m ² K)
ΔT	: 筐体表面と周囲空気間の温度差	K
ε	: 放射率	
λ	: 熱伝導率	W/(mK)
σ	: ステファン・ボルツマン定数	W/(m ² ・K ⁴)

添字

H : 水平面

V : 垂直面

3. シミュレーションベース熱設計手法

3.1 携帯型パソコンの熱設計課題

コンピュータ製品のライフサイクルタイムは図1に示したように短い。したがって製品開発では低コストで最適な冷却対策構造を備えた製品を短期間に設計し、早期に市場投入する必要がある。特に、携帯型パソコンでは薄型化に伴う部品実装スペースの減少から試作後の冷却改善が難しく、設計初期段階から最適な対策構造を盛り込む必要がある。つまり、設計者の勘や経験に依存した従来の『熱対策』から、理論的裏付けに基づく事前の『最適化熱設計』への転換が必要であり、その上では数値解析を活用した熱設計手法が有効である。数値解析による熱設計手法 (Simulation Based Thermal Design) では試作機での対策検討の代わりに、コンピュータ中に仮想試作 (Virtual Prototyping) した製品モデル上でパラメトリックに対策構造を検討する。その結果、開発期間の短縮、試作回数削減による開発コストが低減できる。また、解析結果のビジュアル分析から得られる豊富な設計データ・知見をもとに冷却構造・形状等を最適化でき、熱問題を高度に解決することができる。⁽⁵⁾

近年、コンピュータのCPU性能の向上は著しく、EWS等の小型計算機でも大規模な三次元熱流体解析を実行できる段階をむかえている。しかし、携帯型パソコンの設計フェーズに数値解析を活用していくには、高速なターンアラウンドタイムと実用に耐える精度を有するモデル手法開発が必要である。以下に本機種開発で適用した携帯型パソコンの熱設計に有効な解析手法を述べる。

3.2 解析手法 数値解析は有限体積法 (Finite Volume Method) を用い、EWS上で実施した。図3に本体部、図4に表示部それぞれの有限体積分割メッシ

図5を示す。本体サイドと表示部では熱的な相互影響が小さいため解析はそれぞれ個別に実施した。なお、図5に示すように薄型筐体内の温度場、実装環境下では自然対流浮力が抑制されるため、伝導場となる。⁽⁷⁾そこで筐体内の空気流動を扱う運動方程式を解かず、エネルギー方程式(式(1))のみを計算した⁽³⁾⁽⁵⁾。なお、通常の電子機器では定常状態における動作最高温度が信頼性上の基準となるため、時間項を省略した定常解析を行った。

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

また筐体外表面からの対流、放射熱伝達の効果については水平、垂直平板での自然対流簡易式⁽⁸⁾と放射熱伝達式⁽⁹⁾を合成した式(2)、(3)で筐体外表面を境界規定することで周囲空間メッシュ分割を省略し、計算規模を最小化した。また、机設置面となる筐体底面については式(2)の1/2の熱伝達率を境界条件として設定した。

水平面表面：

$$h_H = 1.31 (\Delta T / L)^{0.25} + 4 \varepsilon \sigma T_m^3 \quad \dots\dots\dots(2)$$

垂直面表面：

$$h_V = 1.36 (\Delta T / L)^{0.25} + 4 \varepsilon \sigma T_m^3 \quad \dots\dots\dots(3)$$

Fig.3. Finite volume mesh model for display

Fig.4. Finite volume mesh model for main body

Fig.5 Conduction limit defined as a function of gap thickness and temperature difference

本解析中で用いた各部品材料の熱伝導率を表1にまとめる。筐体表面の放射率は実測値にもとづき0.92を設定している。各部品の消費電力はカタログ値または実測値を与えており、全システムの合計電力は約14Wである。なお、0.1W以下の小発熱部品は形状をモデル化せず、基板中にまとめて発熱量を与えることでモデル作成時間、メッシュ数を削減した。また、筐体内部の放射については温度差が小さく、実質的に無視できる範囲であるため、解析上扱わなかった。なお、マトリクス解法にはILUCGS法(Incomplete LU decomposition CG Squared)⁽¹⁰⁾を用い、係数行列計算の安定性を高めた。これらの手法の適用により、解析精度を維持しつつ、計算時間の大幅短縮が可能となった。図6に解析結果の温度コンター図を示す。解析メッシュ数規模は本体部、液晶パネル部それぞれで約15万で、1ケースあたりの計算時間はEWS(57MFLOPS)で約10分であり、日々繰り返される設計変更に対応可能な高速性を備えている。

Table1. Example of the material properties in the model

Material	Thermal conductivity (W/mK)
Silicon Die	120
Encapsulant	0.3
Silicon rubber	1.0
Board	2.0
Plastic chassis	0.3
Aluminum	180
Mg alloys	72
Battery	1.0
Air	0.026

4. 冷却構造

前述の高速解析手法により設計フェーズとリンクした熱設計検証・パラメトリックスタディが可能となった。本携帯型パソコン開発では設計初期段階から通算50ケース以上の熱解析を実施し、冷却構造のコンパクト化を検討した。熱設計構想段階では、発熱部品の最適配置を数値解析結果から検討し、部品配置に反映させた。詳細設計段階では筐体や発熱体近傍の補強板金部材の材料・形状等を工夫することで冷却効果を兼ねさせる構造を数値解析モデル上で検討した。また、設計最終段階では冷却部材の板厚・サイズの最適化検討を行い、軽量・省スペース化をはかった。これらの検討結果から決定したコンパクトな冷却構造を図7に示し、以下に詳細を説明する。

4.1 Mg筐体を使った冷却構造 密閉化されたファンレス機器では筐体外表面からの自然対流・放射熱伝達が唯一の放熱手段となるため、筐体表面積を有効に使った放熱を行うことが有効である。今回、筐体の底面材料として採用したMgダイカストは、厚さが0.9～1.2mm、熱伝導率が約72W/mKあるため、それ自体を放熱板として利用できる。表2に主な射出成形材料等の物性値データをまとめる。Mgダイカストは熱伝導性、弾性率に優れる一方で比重が小さく、軽量・高剛性を要求される携帯機器の筐体材料として適し、リサイクルに優れる利点もある。

ここで、本機種構造において筐体底面の熱伝導性がCPUの冷却性能に及ぼす影響を解析した結果を図8に示す。数値解析では筐体底面の熱伝導率を0.3W/mKから170W/mKまでパラメトリックに変化させた。携帯型パソコンの筐体材料として一般的な樹脂の変わりに、熱伝導率の高い金属材料を用いることでCPUパッケージ表面温度が大きく改善されており、半導体の正常動作許容温度（通常80℃～100℃程度）に対し十分なマージンが確保できる。したがって、本機種ではMg筐体底面の熱拡散効果を活用した対策構造をとることを基本冷却方針とした。

Table2. Example of the material properties

Material	Thermal conductivity (W/mK)	Elastic modulus (GPa)	Specific gravity
ABS, unreinf	0.2～0.3	2	1.2
ABS, gl reinf	0.2～0.4	3～5	1.2～1.3
Mg alloys ,cast	72	44	1.8
Al alloys ,cast	96	69	2.7
Titanium alloys	15	98	4.4

Fig.6. Computational results of thermal distribution

Fig.7. Exploded diagram of the "Pedian"

Fig.8. Variation of T_{CPU} with thermal conductivity of bottom chassis

Fig.9. Cross-sectional view of the CPU cooling structure

Fig.10. Variation of T_{CPU} with thickness of Al heat spreader

4.2 CPUの冷却 筐体内で最も熱密度が高いCPU（消費電力は約3.9W）については筐体までの熱伝導パスを増やすため、上下2系統の放熱経路を設けた。ここで、CPUの冷却構造断面図を図9に示す。第一の経路として、CPU表面から出た熱はAl伝熱板(Heat transfer plate)で一度拡散した後にMg筐体底面に伝え、放散させる。なお、CPUとAl板との間には接触熱抵抗を低減させるためにシリコンラバーを介在させた。ここで、Al伝熱板は主に筐体底面のMgダイカストに熱を伝える目的のAl板である。

第二の経路として、CPU背面から出た熱は基板を通してシリコンラバー、Al熱拡散板(Heat spreader)に伝える。大型のAl熱拡散板で拡散された熱は、最終的には上面樹脂筐体カバーを介して筐体外へ放出させる。本構造ではCPU基板裏面に実装されたCPUの熱は主にMg筐体底面で拡散、放熱されるため人間が手を置く筐体上面カバーの温度は底面に比べて低く維持できる。

ここでAl熱拡散板の板厚の最適化を目的として行った数値解析の結果を図10に示す。本解析では板厚をパラメータとして変化させた際のCPUの温度変化の影響を解析した。Al熱拡散板は上面樹脂筐体での熱拡散を補うため、CPU下側のAl伝熱板に比べてサイズが170×70mmと大きいのが、熱源であるCPUと表示LSI (Video LSI)が左右に分散しているため薄板化によるフィン効率の低下は少なかった。本解析結果からAl熱拡散板の肉厚は0.3mmと決定し、冷却部材の軽量化をはかった。

4.3 その他のデバイスの冷却 ハードディスク(HDD)やPCカードなどの発熱部品は一箇所に集中しないよう分散配置した上で、Mg筐体底面で拡散放熱させた。また、DC/DCコンバータについてはMg筐体底面での熱拡散に加え、キーボードの補強板である0.5mm厚さのアルミも利用して冷却した。

4.4 解析精度の検証 本携帯型パソコンの熱設計では、設計構想段階から数値解析を活用することで本体試作前に冷却対策仕様を決定した。ここで、量産試作後に実測評価を行い、解析精度の検証を実施した結果を図11に示す。評価実験は解析時の想定条件同様に試作機を机に設置し、評価室の空調気流の影響がでないように約1m周囲を簡易壁で覆い行った。温度の測定にはK熱電対を用い、試作機にて評価プログラムを動作させ、定常温度となった時点で主要デバイス、筐体の表面温度を計測した。測定結果は設計予測値と

Fig.11. Comparison between predictions and measurements

良く一致し、開発期間短縮／試作コストの削減が実現できた。

5. Mg筐体の感触温度緩和法

携帯型電子機器ではユーザの不快感につながる筐体表面の高温化に対する配慮も熱設計課題の一つとなっている。本機種では上述したように筐体底面を熱伝導率の大きいMgダイカストとすることで、筐体のヒートスポットを緩和し、高温化を抑制している。その一方で金属筐体では、高い熱伝導性から表面を人が触った際には集熱効果が増し、同一温度の樹脂筐体よりも熱く感じる感触温度特性を有する。

従来、金属材表面の感触温度緩和手段としてパイル植毛が一般的で、コタツやプリンターのサーマルヘッド部での対策事例がある。しかし、電子機器筐体への適用に際しては意匠等が問題となる。また、樹脂系シートを貼り付ける等の対策手段もあるが形状追従性や生産性・意匠的な課題も多い。

今回、Mgダイカスト筐体の採用に際しては、金属筐体特有の感触温度特性を緩和する対策法を塗装により検討した。⁽¹¹⁾

5.1 対策方針コンセプト

電子機器筐体で要求される意匠性・量産性・低コスト化から塗料改良による対策処理が有望となる。今回、以下(1)～(3)を開発コンセプトとして、塗装を応用した対策法を試作検討した。

(1) 塗装皮膜の断熱性向上

異なった温度の半無限固体どうしが接触した場合、(4)、(5)式により接触部中間温度 T_m が概算できることが知られている⁽¹²⁾。つまり、手を半無限固体と考えた場合、 β_2 の小さい材料に接触した場合ほど T_m 値が相手物体温度の影響を受けにくくなる。この原理を応用し、第一の試作指針として“塗装皮膜の物性改良（断熱性の向上）”を検討した。

$$T_m = \frac{\beta_1 T_1 + \beta_2 T_2}{\beta_1 + \beta_2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで

$$\beta = \lambda / \sqrt{\alpha} \quad \dots\dots\dots (5)$$

(2) 塗装皮膜の厚膜化促進

皮膜内の熱通過率は(6)式で計算され、上述(1)の物性値の改善以外に厚膜化をすることで熱通過を抑制できる。このことから塗膜の“厚膜化”を第二の試作指

(a) Epoxy paint

(b) Foamed Paint

200 μ m

Fig.12. Photography of painted surface

針として検討した。

$$U = \lambda / d \quad \dots\dots\dots (6)$$

(3) 塗装皮膜表面の凸凹化促進

第三の対策指針として表面を凸凹化することにより指との真実接触面積を減らす方法を検討した。つまり、皮膜表面での接触熱抵抗が増し、手への伝熱量を減らすことが期待できる。

5.2 サンプル試作結果

上記(1)～(3)の対策指針に基づき各種サンプルを試作した結果、表3に示すように塗料の中に発泡材を混入させる対策法が意匠性、形状追従性、塗膜の低熱伝導性、表面粗さなどのバランスに優れることがわかった。今回、発泡材として使用したのは低沸点炭化水素を内包した熱膨張性マイクロカプセルである。本対策法では焼き付け塗装時に塗膜が発泡膨張し、多孔空気泡が内包できるため塗膜内の有効熱伝導率が低下する。さらに、発泡作用により通常塗装に比べ塗膜を厚くできる効果もある。また、凸凹化促進という観点からも発泡効果が有効である。ここで確認のため顕微鏡観察を行った塗膜拡大写真を示す。図12(a)は通常エポキシ系塗料の皮膜であり、フラットな表面状態である。一方、図12(b)の発泡塗膜表面では、膨張効果による凸凹面が確認できる。

Table3. Characteristic of the coating method

Coating Method	Design (Appearance)	Fitting into the shapes	Low thermal conductivity	Roughness of surface
Foamed paint	○	○	○	○
Epoxy paint	○	○	×	×
Attaching rubber	△	×	○	×
Transplanting pile	×	△	○	○

5.3 実験評価結果 発泡塗装の効果を実験的に評価した結果を以下に示す。

Fig.13. Testing apparatus

Fig.14. Comparison of temperature rise of dummy hand between conventional paint and formed paint

5.3.1 検証実験1 (温度上昇特性評価)

松井らの研究から接触直後の温度上昇プロファイルが人間の感触温度に近い特性を示すことがわかっていて⁽¹³⁾。今回、手を模擬したゴム角柱を接触させた際の温度上昇特性を測定した。なお、温度センサーはゴム模擬手内 0.5mm の深さ位置に埋め込んだ。供試品は 105×150×0.3mm の A1 ベースに通常エポキシ塗装したサンプル A と発泡塗装したサンプル B である。サンプルは 4mm 下に設置したヒーターで加熱し、表面を 50℃ 一定温度とした。

測定装置を図 13 に、測定結果を図 14 に示す。発泡塗装では通常エポキシ塗装に比べ、接触温度上昇プロファイルが鈍る傾向が確認された。

5.3.2 検証実験2 (感触温度レベル申告評価)

次に同サンプルを実際に人が触った際の感触温度特性を 9 人の被験者の申告から評価した。本評価では検証実験 1 で用いたサンプル A、B 以外に ABS 樹脂板に通常塗装したサンプル C を比較対象用に追加した。

実験サンプル一覧を表 4 に示す。サンプルは室温 25℃ 条件下で表面温度が 46℃ 一定となるよう図 12 の装置で加熱した。

サンプル 3 種類を手で触れた際に熱く感じた順位・レベルを被験者に申告させた集計結果を表 5 にまとめる。サンプル A は他のサンプル B、C に比べ明らかに熱く感じられたと全員が回答した。一方、サンプル B はサンプル A と比べ触感温度が大幅に低下することが確認され、その度合いはサンプル C に近い結果であった。(サンプル B と C では区別がつきにくく、申告順位が被験者により逆転するケースも見られた。)

5.4 発泡塗装の製品適用

検証実験 1、2 の結果から本対策塗装法の有効性が確認されたので、本携帯型パソコンの Mg 筐体底面の外表面部に本コーティング法を適用した。なお、発泡皮膜の追加による断熱効果は筐体表面からの自然空冷熱伝達のオーダーに比べ無視できる程度であり、筐体内部の部品温度上昇には影響しない。

Table4. Materials for thermal sensation test

Sample name	Base material (Thickness)	Surface coating (Thickness)
Sample A	Al (0.3mm)	Epoxy paint (0.03mm)
Sample B	Al (0.3mm)	Foamed Paint (0.2mm)
cf. Sample C	ABS (1mm)	Epoxy Paint (0.03mm)

Table5. Results of thermal sensation vote

Answer pattern	Order of sample touching warmth	Votes (Percentage)
Pattern 1	A >> B > C	3 (33.3%)
Pattern 2	A >> C > B	3 (33.3%)
Pattern 3	A >> B = C	3 (33.3%)

>> : The material left of this symbol has far higher touching warmth than right

> : The material left of this symbol has a little higher touching warmth than right

= : The material left of this symbol has almost same touching warmth to right

6. 結言

- (1) 薄型電子機器の設計において数値解析を適用し、冷却構造の最適化、試作回数の削減を実現する設計手法を述べた。

- (2) 筐体底面のMgダイカストを熱拡散板として有効利用する薄型自然空冷構造を開発した。
- (3) 金属筐体特有の体感温度を緩和するための特殊塗装法を開発した。

文献

- (1) R.Viswanath and I.Ali, "Thermal Modeling of High Performance Packages in Portable Computer" 45th ECTC conference ,Las VegasNevada (1995), PP.1122-1133.
- (2) Tom Lee, Ben Chambers et al, "Application of CFD Technology to Electronic Thermal Management", Proc. 44th Electronic Component and Technology Conference, Washington D.C., May 1994 IEEE , PP.411-420
- (3) 久野勝美・岩崎秀夫ほか、小型きょう体の熱解析、日本機械学会論文集、62-601、B (1996-9)、PP.225-230
- (4) 小林 孝・高田潤二ほか、ノートパソコンの熱設計、第29回日本伝熱シンポジウム講演論文集、(1992)、PP.493-494
- (5) 小林 孝、電子機器開発における CFD 応用熱設計手法、日本機械学会 関西支部第224回講習会テキスト(1997)、PP.7-13
- (6) Xie, M.Aghazadeh, W.Lui and K.Haley: " Thermal Solutions to Pentium Processors in TCP in Notebooks and Sub-Notebooks" 45th Electronic Components and Technology Conference (1995),PP.201-210
- (7) 甲藤好郎、伝熱概論、養賢堂、(1964)、172
- (8) Warren H.Giedt, 基礎伝熱工学、丸善、(1960)、191
- (9) 石塚 勝・藤井雅雄、電子機器の放熱設計とシミュレーション、応用技術出版、(1989)、PP. 24 - 27
- (10)小国 力、行列計算ソフトウェア、丸善、(1993)、PP.194 -196
- (11)小林 孝・大串哲朗ほか、特殊塗装による金属筐体表面の感触温度低減法、日本機械学会 熱工学シンポジウム講演論文集(1997)、PP.75-76
- (12)日本機械学会編、伝熱工学資料 改訂第4版、(1986)、PP.6-7
- (13)I.Matusi,Y.Kasai , The First Symposium on Thermo physical Properties1980、PP.121 to 124