電子機器の熱設計と冷却技術*

石 塚

勝**

Thermal Design of Electronic Equipment*

by Masaru ISHIZUKA**

キーワード：電子機器の冷却，熱設計，熱解析，熱伝導，対流，パソコン，空冷，水冷

1. 電子機器の熱設計や冷却技術が重要な理由

パソコンを代表格に最近の電子機器は高速で小型軽量を指向しているため，高速演算デバイスであるCPU (Central Processor Unit) やMPU (Micro Processor Unit) の電力消費が増加し，そしてそれが実装されるパッケージやパッケージを搭載する基板及び基板を搭載するケースが小形になっているため，その結果として，放熱面積も小さくなり，デバイスの温度は上昇傾向である．このことを高密度実装といい，電子機器発展のキーワードでもあるが，熱問題のキーワードでもある．デバイスの温度が上昇するにつれ，電気的に誤動作を生じ，デバイスの信頼性が低下し，さらに温度が高くなると，デバイスとそのデバイスを搭載している基板とが，熱膨張係数の違いから，両者に熱応力が作用して，強度的に弱いデバイスが破壊されることもある．図1には，パソコン搭載のMPUの性能向上の推移（縦軸は米国インテル社製のMPUの性能比）が示されている．この図で，1992年発表されたノートPCに使用されたMPU発熱量は1Wに満たなかったが，1994年の機種では6Wを超えている．しかも携帯用PCの筐体サイズは概して小さくなりつつあり発熱量とともに発熱密度も大きくなっている．この傾向は，今でも続いている²⁾．

2. パッケージからの放熱と冷却方式

ここで，パッケージを例に，放熱と冷却方式について

簡単に触れる．図2にはパッケージからの放熱の様子を示している．チップで発生した熱は，パッケージ内のモールド樹脂(またはセラミック)，リードフレームなどを伝導し，パッケージの表面または実装基板の表面から外部に放出される．同時に，パッケージ表面からの放射によっても外部に放出される．つまりチップの熱は(1)伝導，(2)

図1 パソコン搭載のMPU性能向上の推移

図2 パッケージの放熱の様子

*原稿受付 平成9年6月10日

** (株) 東芝 Toshiba Corp.

対流(熱伝達率)(3)放射の三つの形で外部に伝えられる。そして、パッケージから外部への放熱には一般に対流方式が採用されている。図3には種々の冷却方式と熱伝達率(熱の伝わりやすさ)の関係を示している。冷却方式は、対象機種によって、種々の方式がとられる。大半の機器は空冷であるが、スーパーコンピュータのような超高速機器は電力を多量に消費するので、その分の熱を除去するため、水冷を含めた液体冷却技術が使われている。この詳細については、後頁にゆずる。ポータブル機器では、自然対流を利用した自然空冷方式が活用されている。ファンを用いた強制空冷機器に比べ、冷却能力は低いものの、ファン費用を節約できる点、ファン騒音がない点、信頼性が高い点がすぐれているからである。ただし、冷却能力が低いための確な放熱工夫と対策が必要なのである。図4にノートパソコンに搭載されたCPU(Intel社製Pentium)がTCP(Tape Carrier Package)というパッケージに搭載されている場合の放熱実装構造

図3 種々の冷却方式と熱伝達率の関係

図4 Pentium TCPの放熱実装構造

を示している³⁾。この構造はプリント基板の開口孔に銅系合金材料で造られたコールドプレートをはめ込み、TCP中央のダイ裏面とコールドプレートを熱伝導性の接着剤で密着接続させる方式である。これにより、Pentiumの接合部から効率よく熱が拡散され、Pentiumの温度を既定値に押さえている。また、最近では、図5に示すように、リードピンを介さずにパッケージ本体と回路基板の間をボール状のはんだで連結するBGA(Ball Grid Array)パッケージが注目されている⁴⁾。これにより、実装工程の効率化とデバイスの高速化が図られる。反面、この構造のパッケージの最大の問題は、パッケージの温度上昇により、基板とパッケージ間の熱膨張差が「はんだバンブ」接続部の信頼性に重大な影響を及ぼす点である。接続部を高くして、その熱膨張差で発生する熱応力を吸収するなどの対策がとられている。図5のMotorola社製のBGAパッケージは、ICチップをプリント配線基板に「はんだバンブ」実装し、アンダフィル樹脂を充填している。この樹脂により、熱応力を吸収している。そして、その配線基板をさらに、外部端子用「はんだバンブ」(直径0.5mm, 0.89mmピッチ)で、実装基板に装着している。これにより、パッケージの小型化(ICチップより、1.5~2.5mm程度大きいのみ)を達成している。しかし、熱的に一番の効果的方法は、ICチップの温度上昇を伴わないように、熱伝導率の高い接続部材料を使うことである。最近では熱伝導率の高い接着剤や半導体パッケージのリード用合金や基板材料、筐体材料が開発されているので、BGAパッケージの今後の発展への期待は大きい。

同時に、パソコンのように、製品サイクルも短く、低価格指向製品では、最適なパッケージ材料や構造が出現するまでは、現状技術のあらゆる工夫で堪え忍ぶのが通例である。すると、「このパッケージで、どの程度まで冷えるのか?」といった質問に即座に答えられるような性能予測技術が現場では最重要技術になっている¹⁾。

3. 設計期間短縮技術とその例

ポータブル機器では、自然空冷を用いているため、自然空冷の冷却能力を最大限に引き出す技術の開発が必要になっている一方で、パソコンのように製品サイクルが

図5 「はんだバンブ」実装パッケージ (Motorola社製)

早い機種は、早めに機器の熱性能を予測して、設計期間を短縮するための解析技術も極めて重要なものとなっている。そこで、次に、コンピュータによる数値解析を熱設計に応用した例を述べる。コンピュータによる数値解析を熱設計に利用する場合、EWS（エンジニアリングワークステーション）レベル用の熱解析手法があると現場の熱技術者にとってはとても便利である。ここでは、図6に示すような外形のノートブック型パソコン（ノートPC）の熱設計に応用した例を述べる²⁾。図中のAとBについては後述する。この機種は自然空冷方式を採用している。つまり、ファンがなく、自然対流とわずかな放射でCPUを冷やしている。まず、モデル化の手法であるが、このような実際の機種を膨大な量の細かいメッシュ（格子）を用いて解を求めるのは得策でない。そこで、解析を部品の寸法によって、階層化する考え方を用いている。図7にノートPCに使用される主要寸法の外寸と、部品の熱伝導解析に必要と考えられる最小メッシュ間隔を示す。例えばケーシングは外寸が30 mm程度あるが、厚みは2 mm程度であり、形状を表現するには最小2 mm間隔のメッシュを用いなければならない。また、LSIパッケージの解析では、ダイ形状のみをモデル化する場合にでも、部分的に50 μm 程度のメッシュの

細かさが必要で、これはケーシング外寸に対して4桁ほど小さい。PCの全部品を網羅する数値モデルを作成するためには、物体中の細かな構造をもつ部分に細かなメッシュを使用しなければならない。細かな構造を持つ部品の周辺ではメッシュ間隔を小さくし、他の部分を粗くモデル化することにより計算値を小さくすることが可能であるが、電子機器は部品がケーシング内部に分散して置かれるためPC全域を一括して解析しようとする、メッシュ数は非常に大きくなる。

そのために、図8に示すように解析を分割するわけである。細かな構造については細かなメッシュを使用するせまい領域を扱う数値モデルにより詳細に解析し、より広い領域を対象とする粗いメッシュの解析に細かな構造の集合体としての熱特性（熱伝導率または熱伝達率）を導入するものである。細かな構造から粗い構造に向かう方向を下位から上位と呼ぶと、上位の数値モデルは一段下位の計算結果および実験結果を等価な熱伝導率（熱の伝わりやすさを示す物体固有の値、一般に金属が高い値を有する）。また熱伝達率として使用する。反対に、下位の数値モデルは上位の計算により得られた温度分布を境界条件とすることによって上位の計算から得られない詳細な温度分布を計算する。図9に筐体のモデルを示す。メッシュ数は207, 515, (121 $\times$ 49 $\times$ 35)である。CPUモ

図6 ノートPCの外形

図7 部品とメッシュの大きさ

図8 モデル化のコンセプト

図9 数値モデル

図10 実験結果と計算結果との比較

ジュール付近は細かくメッシュを切りパッケージ形状など細かな構造を模擬しているが、筐体手前側の部分は粗いメッシュを使用し、個別の計算・実験で得られたディスク装置等のマクロな熱特性を導入している。CPUの発熱量は最大値の75%、HDD（ハードディスク装置）はディスクは回転するがアクセスしない状態、他の部品の消費電力は最大値の10%としており、境界条件を実験ないしは、基礎資料から求めている。結果を図10に示す。動作条件はCPUとディスプレイコントローラは最大稼働、FDDは待機、HDDはディスクは回転しているがデータ入出力のない状態、他の部品は典型的な発熱量としている。CPUとディスプレイコントローラ（図中DC）はパッケージ上面中央、HDDは底面中央、A、Bは図6に示す筐体表面温度である。計算時間は50 MIPSのEWSを使用して約40分である。この手法により温度を数度以内で予測している。機器開発時の温度予測手法が、EWSレベルの計算でも熱設計に有効な結果を引き出せる段階までできているのが分かる。

ただし、ここでは、部品接続部の接触による熱抵抗（部品間の温度差を部品間を流れる熱量で除した値）はどちらかの部品の熱伝導率から生じる熱抵抗値に含ませて考えている。接触熱抵抗で特に重要な個所は、基板とパッケージの接触界面であり、空隙や接着剤、あるいは溶接

部の熱の流れの考慮が必要とされる。ただし、考慮するということは、一見大切に思われるが、これは、解析メッシュ数が膨大になることを意味している。例えば、図5のような「はんだバンプ」は、熱の逃げ道にも使われるが、LSI裏面を基板に前面接着するのにくらべ、熱流の面積が狭くなり、熱的には厳しくなる。だからといって、解析でこのボールを、一個一個考慮していたのでは、解析の労苦は途方も無く大きくなる。やはり、バンプの面積を総面積でとらえて、マクロ的に取扱うのが望ましい。その際、マクロに扱っても解析精度が落ちないようにするためには、やはり、熱伝導率の高い接着剤や溶接材料およびパッケージ構造の開発がさらに重要になる。

4. おわりに

今回、電子機器の熱設計と冷却設計について概説した。そして、熱設計技術の例として熱解析をノートPCに用いた例も紹介した。今や電子機器は、スーパーコンピュータも含めて、コスト的にも、面積的にも、体積的にも余裕をもって設計できないのが現状であり、熱技術者に対しては、従来のように試行錯誤の単なる熱対策から、「そういう機器を作っていいのか」の政治的判断？を迫られる事態にまで発展している。これが世の中の流れである。しかし、これは、熱技術だけではなく、材料や溶接などの製造プロセスの発展に負うところも大きいのも事実である。そのため、お互いに連携した技術開発が必要になっている。

参考文献

- 1) 石塚編著：電子機器の小型化・高速化に対応した熱対策と熱シミュレーション技術、総合技術センター、(1991)、5。
- 2) 久野ほか3名：小形きょう体の熱解析、日本機械学会論文集、(B編) 62, 601, (1996)、3453。
- 3) 鈴木ほか2名、Pentium ノートブックパソコンの実装技術、東芝レビュー、50, 8 (1995)、579。

平成8・9年度

溶接学会会員名簿

平成9年12月 発行予定

定価 5,000 円 (送料別)

ご注文その他については下記にお問い合わせください。

社団法人 溶接学会 〒101 千代田区神田佐久間町1-11

☎ 03-3253-0488 ファックス 03-3253-3059

e-mail: jws-ms@t3.rim.or.jp