電子システムの 高密度実装と 冷却技術*

High-Density Packaging of Electronic
Systems and Cooling Technology

中山 恒**

Wataru NAKAYAMA

Key words: microelectronic packaging, cooling technology, computers, thermal stress management, hardware architecture

1. 緒 言

エレクトロニクス技術が社会にもたらしている変革は詳しく説くまでもないであろう。この技術革新はひとり電子工学のみならず、様々な専門の工学に支えられ、多様で膨大な量にのぼる情報の流通を可能にしている。高速情報処理の要求はまた、工学の新しい展開を促している¹⁾²⁾。

本稿で対象にするのは情報処理システムのハードウェアである。ハードウェアとは論理演算動作を行う微小電子回路（ゲート）から始まり、チップを封止するパッケージ（あるいはモジュール）、ゲート間を連結する配線基板（セラミック配線基板、プリント配線基板（PWB））といった構成部品、及び複数の基板から成るシステム（図1）、大型コンピュータと分散処理機器から成るシステムなど、多様な部品の総合体を指す。あらゆるレベルの構成部品に高い信頼性が要求されており、これには冷却技術と熱応力の制御技術がきわめて重要な役割を担っている。以下、ハードウェアの発展と、これがもたらす冷却技術への課題を概観する。

2. 電子システムの実装

実装とはハードウェアの設計から組立に至る幅

広い技術活動、またはこれによって実現される構成形態を意味している。英語で packaging がこれに当たる。いずれも機械技術者には馴染みが薄い用語であるが、技術内容は機械工学と深い関連がある。実装を考える際に必要な基本事項を記しておく。

1) 構成レベル

図1は大型コンピュータの例であるが、他のシステムでも基本は同じである。チップ上のトラン

図1 コンピュータの構成レベル

* 原稿受付 平成2年1月17日

** 正会員 東京工業大学工学部（東京都目黒区大岡山2-12-1）

表 1 代表的な電子回路ゲート

トランジスタ	ゲート	特徴	用途
bipolar	emitter-coupled-logic (ECL)	高速動作 電力消費大	高速論理演算 高速メモリー
field effect	complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS)	電力消費小 高密度集積に適	低電力消費論理演算 大容量メモリー

ジスタはアルミニウム配線により連結され、チップ間の信号のやりとりは基板に設けられた配線を通じて行われる。パッケージはチップ上の電子回路を保護し、且つ信号と電力供給のためのピンを保持する役を担っている。

2) ゲート

情報処理の基本素子は、論理演算を行う電子回路とデータを記録しておくメモリー回路である。これらの電子回路をゲートと呼ぶ。表 1 には代表的なゲートと特徴、用途を示してある。最近、冷却技術が大きな関心を集めているのは主として ECL ゲートの発熱量増大に起因するものである。ゲート動作の高速化に対する限り無い要求は、冷却をはじめとする実装技術に大きな課題を呈している。CMOS ゲートは電卓、ラップトップコンピュータなど、低電力消費を要求される機器に用いられる一方、大型コンピュータの主記憶部にも用いられる。最も高い集積度を有するチップは CMOS を基にした DRAM (dynamic random access memory) チップである。後に述べるように DRAM チップは熱応力制御の面で大きな課題を呈している。

電子システムの実装形態は急速な変化を遂げつつあるが、これを促す要因は図 2 (a) に示す通りである。チップ面上への電子回路の大規模集積は、モジュール及び基板レベルにおける配線接合の工数を低減するので、情報処理性能の向上のみならず信頼性の向上と生産コストの低減をもたらす。チップレベルでの大集積化とその他のレベルでの配線距離短縮の要求は、複数チップの一括封止 (マルチチップモジュール)、面付け実装 (入出力ピンを基板の孔に挿入せずにはんだ付けのみでモジュールを支持する) などの、実装形態上の変化をもたらしている (図 2 (b))。次節ではこうした実装形態の変化と冷却技術がどのように関連し合っているかを見てみる。

(a) 実装密度の増大を促す要因

(b) 実装形態上の変化をもたらす要因

図 2 実装密度の増大と実装形態

3. 実装形態と冷却技術

図 3 はチップ、モジュール、プリント基板の面積 (横軸) と熱負荷 (縦軸) を示している。大型コンピュータの論理演算部に用いられているもののデータで、過去 10 年における著しい上昇を示している。データ記号のうち、ハッチングで内部を塗りつぶしたものは間接水冷却と呼ばれる方式のデータを示している。白抜きのは強制空冷方式のデータを指している。マルチチップモジュールとプリント基板のデータのうち、それぞれ上方に位置する 3 個のデータは、これらのレベルの熱を運び去るには最早や空気が適当な媒体でないことを示している。すなわち比熱の大きな水を用い、大量の熱を吸収しても冷却媒体 (水) の温度が上昇しないようにしている。

図3 チップ，モジュール，プリント基板（PWB）の寸法と熱負荷の上昇

現在市場に出ている水冷コンピュータはすべて間接水冷却方式によるもので、チップと冷却水との間には、熱伝導デバイスが介在している。熱伝導デバイスと冷却水の配管、その他の付属品の取付けにはスペースを要するので、間接水冷却方式の採用は大型多層基板の開発と期を同じくするものであった。図4はこの事情を説明するためのもので、図4(a)と(b)は強制空冷方式の基板配列、図4(c)がマルチチップモジュールを搭載した間

接水冷却基板のスケッチである。図4(c)の場合、とくにモジュールでの回路集積度を向上させたため、1枚の基板で1ユニットの論理演算部を構成することが可能になった。基板での配線総数は当然上昇するので、例えばメタル層が40層を超える多層基板の開発が必要となった。基板の面積も増大するため(図3)、多数のパターンを整合させながら積層してゆく製作は難しさを増す。基板の製作技術の向上がこのような実装形態を実現させたともいえる。一枚基板の論理演算部では、他の基板への配線距離がシステムの演算速度に与える影響は少ない。このため、基板の前面に余裕あるスペースが得られ、このスペースに冷却デバイスを取り付け、冷却水配管を引き回している。このように実装形態、製作技術、冷却技術は相互に密接に関連し合っており、同期のとれた発展を図る必要がある。

間接水冷却方式で熱設計上重要な部分は熱伝導デバイスである。伝導デバイスの役割は、チップから冷却水が流れるコールドプレートに熱を伝えるものであるが、基板の変形及びチップ面の平面からの外れなどにもかかわらず、各チップを均等に冷やすという要求がある。このため図5に示すようなデバイスが用いられている^{4)~6)}。スプリング、ねじ、ペローズのばね作用等で可動部品(直

図4 プリント基板の配列形態

図5 熱伝導デバイスの各種形態

図6 増大するDRAMチップの例
(*モジュールは大型化し、ピン数も増える)

(a) コパールパッド上にエポキシ接着剤で搭載された5mm×5mmチップの断面における応力の分布(モールド後)

(b) パッケージ縦断面における応力分布を示すフリンジパターン

図7 チップ(a)及びモールド樹脂(b)に生ずる応力の分布

径1cm程度)をチップ(またはこれを封じたチップキャリア)に押し当てる一方、ヘリウムガス、グリースなどをすきまに充てんして熱伝導の促進を図っている。

4. 熱応力の制御

電子システムはシリコン、金属、セラミックス、樹脂などがはんだと接着剤により結合されている複合構造体である。微細な要素から構成される複合体の信頼性保証には、新しい工学手法の展開が求められている。構造設計においては熱膨張差に基づく応力のレベルをいかに低く抑えるかが焦点となり、冷却設計では温度の均一化が重要な課題である。

熱応力制御の問題を抱えている例のひとつにDRAMチップのパッケージングがある。図6は、ビット数の増大につれてチップの寸法が大きくなり、周辺の樹脂部が減少している傾向を示している。通常、チップには圧縮応力がかかり(図7(a))、樹脂部には引張応力が生ずるが(図7(b))、チップ周辺は応力が集中する特異点となる¹⁾。このような特異点での応力を評価する手法の研究と、応力緩和を図る構造設計は、DRAMチップのみならず多くの部分にとってますます重要になってきている。

5. 結 言

これから高密度実装にとって重要な課題をあげると下記の三つになる。

- (1) システム設計における情報処理系と冷却系の調和
- (2) 低消費電力で高速動作するデバイスの開発
- (3) 三次元多層配線網の製作法

どの課題についても、電子システム、伝熱、精密加工技術に対する深い理解を有していないと進歩を図ることが難しい。これからの技術者には多元的知識が求められるわけで、境界領域での工学教育は従来にも増して必要になっている。

文 献

- 1) W. Nakayama: Thermal Management of Electronic Equipment: A Review of Technology and Research Topics, Applied Mechanics Reviews, ASME, 39, 12, (1986) 1847.
- 2) 中山 恒: エレクトロニクスと伝熱工学, 日本機械学会論文集, B編, 52, 476 (1986) 1439.
- 3) W. Nakayama and A. E. Bergles: Cooling Electronic Equipment: Past, Present, and Future, Keynote Paper, Int. Symp. Heat Transfer in Electronic and Microelectronic Equipment, International Center of Heat and Mass Transfer, Aug. 29-Sept. 2, 1988, Dubrovnik, Yugoslavia.
- 4) R. C. Chu, U. P. Hwang and R. E. Simons: Conduction Cooling for an LSI Package: A One-Dimensional Approach, IBM J. Res. Dev., 26, (1982) 45.
- 5) T. Watari and H. Murano: Packaging Technology for the NEC SX Supercomputer, Proc. 1985 IEEE Electronic Component Conf., (1985) 192.
- 6) CPUを1ボードに実装し水冷, 汎用大型コンピュータ M-780 のハードウェア技術, 日経エレクトロニクス, 1985. 12. 30, p. 59.