

# 熱流体解析技術を活用したシステムLSI向け放熱設計手法の構築

Thermal Design Method for System LSIs Using Thermal Fluid Analysis

松元 昂  
Subaru Matsumoto

小森 晃  
Kou Komori

鈴木 宏明  
Hiroaki Suzuki

大谷 克実  
Katsumi Ootani

## 要 旨

電子機器においては、数 $\mu\text{m}$ レベルの微細な構造から、数十 $\text{cm}$ レベルの部品が混在しており、それらをまるごと解析することが困難であるため、システムLSIからの放熱メカニズムが不明確であるという課題があった。今回、Blu-ray Discレコーダーを対象に、システムLSIチップから筐体（きょうたい）内部まで配慮した3次元熱流体解析技術を構築した。本解析技術により、システムLSIのパッケージ形態、チップ面積、発熱量などの熱設計パラメータについて、構想設計初期段階で放熱性の影響を考慮することを可能とし、設計上流側での熱対策を実現する熱設計フローを構築できた。

## Abstract

Normally ranging from the scale of micrometers to tens of centimeters, a wide variance in electric device component size poses challenges when simulating the entire device as a whole. Consequently, the mechanisms of heat dissipation from system LSIs were previously unclear. In this study, a 3D thermal fluid simulation that accounts for everything – from LSI chips to the outer casings – was developed for a Blu-ray Disc recorder. The simulation tool enables early-stage implementations of considerations for heat-dissipation performance in the development process for electronic devices. Thus, thermally-sound design procedures, which establish thermal solutions for electronic devices at upstream stages of their development, were constructed.

## 1. はじめに

近年、電子機器の演算処理量の増大および、その高速化に伴い、デジタル回路基板に搭載されているLSIは中央演算装置、メモリー、デジタル信号プロセッサなどの機能を1チップに統合し、システム化することでセットに必要とされる多機能化を実現している。また、製造プロセスを微細化し、高集積化によるコスト優位性を確保することで、商品の競争力を高めており、今後もこの傾向は続くと考えられる。

システムLSIの高集積化によるリーク電流の増加と、動作周波数の高周波数化から、発熱量は増加している。

一方で、製造プロセスの微細化に伴い、チップ面積が縮小するため、発熱密度の飛躍的な上昇が予想される。

加えて、プロセスの微細化が進行するに伴い、システムLSI内で処理負荷の高い一部の機能ブロックにおいて、発熱量が高くなり、その部分における温度が局所的に高温化する「ホットスポット」と呼ばれる新たな課題も顕在化し始めている[1][2]。

これらシステムLSIに関する高発熱密度化やホットスポットなどの熱問題により、システムLSIの許容温度を満たせなくなる可能性がある。したがって、電子機器の性能と信頼性を保証するため、確実な放熱対策が必要となる。

また、高発熱化するシステムLSIを搭載する電子機器筐体についても、小型化、高密度実装に伴い放熱環境が

厳しさを増す一方で、ユーザーのやけど防止などの安全上の観点から、機器筐体温度やファン出口温度などを基準値以下に抑制しつつ、構成部品の熱対策を行う必要がある。

このように電子機器の高機能、高集積化に伴う、半導体パッケージ（以下、PKGと記す）や実装の重要性が増大している背景を踏まえ、筆者らは低コスト・高放熱性を実現するPKG構造・材料および放熱デバイスの創出と、その開発に必要な熱解析技術（簡易解析～高精度／微細構造解析）／実測技術開発に取り組み、半導体製品開発における熱設計フロー構築を目指し活動を行っている。

本開発では、システムLSIのBlu-ray Disc<sup>(注)</sup>（以下、BDと記す）レコーダー搭載状態を想定した熱流体解析技術構築と各PKGの放熱性能の明確化および熱設計フローの構築を行った。

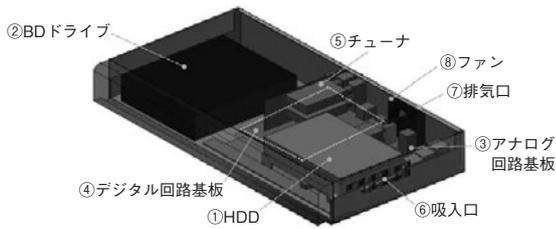
具体的な取り組みを次章以降に示す。

## 2. システムLSIの放熱環境

現在、当社から既に発売され市場に流通しているBDレコーダーの概観を第1図に、システムLSIの放熱構成を第2図に示す。

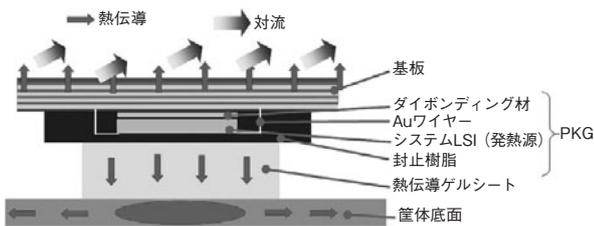
BDレコーダーの主な構成要素としては、①HDD（Hard Disk Drive）、②BDドライブ、③トランスやコンデンサ

(注) ブルーレイディスクアソシエーションの商標



第1図 BDレコーダーの概観と放熱構造

Fig. 1 BD recorder overview and heat dissipation structure



第2図 システムLSIの放熱構造

Fig. 2 Heat dissipation structure of system LSI

を搭載したアナログ回路基板、④PKG、DDR (Double Data Rate)などを搭載したデジタル回路基板、⑤チューナなどがあげられる。筐体には、右側部に吸入口を設け、背面部の排気口の前に設置した、排気ファンで吸入口から外気を誘引し、規定温度以下に収まるように各部品を冷却している。第2図に示すとおり、以下PKGとはシステムLSIを樹脂や金属で封止したものを示している。

システムLSIについては、発熱量は小さいが熱が発生する面積が非常に小さいため発熱密度が高くなり、別途放熱対策が必要となる。

現行の放熱対策は、PKGが搭載されているデジタル回路基板を天地逆転して設置し、PKGと筐体底面との間に熱伝導ゲルシートを介在させた構成となっている。上記構成により、システムLSIで発生した熱はプリント基板を通じてファンによる対流により空気中へと放熱される経路と、熱伝導ゲルシートを介して筐体底面へと熱伝導により放熱する経路に大別され、システムLSIを規定の温度以下にしている。第1表に、BDレコーダーに要求される熱規格条件を示す。

第1表 BDレコーダー熱規格条件 (抜粋)

Table 1 Thermal standards for BD recorder

システムLSI上限温度	115℃
筐体底面上限温度	70℃ (45℃環境)

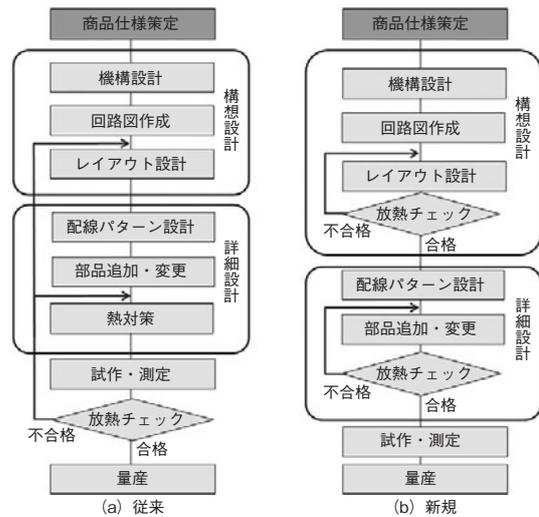
### 3. 熱設計フロー上の課題とアプローチ

#### 3.1 システムLSIの熱設計フロー上の課題

システムLSIのPKG構造選定過程において、伝送特性、実装性に並び、チップからの放熱は重要な要素の1つである。

第3図 (a) に示すように、従来の熱設計フローでは、レイアウト設計、配線パターン設計などを行った後に、システムLSI単体で消費電力やPKG単体放熱特性の評価を行うために、後付けでの熱対策が必要となり、長い後戻り工程が発生するという課題があった。

また、一般に電子機器筐体の熱解析では、ボールグリッドのようなマイクロオーダーの微細な構造から、筐体外形のような数十cmのオーダーの部品が混在しているために、単純にメッシュを割り当てただけでは、メッシュ数が膨大になり汎用ワークステーション環境下では解析が不可能、または計算コストが見合わないなどの課題も挙げられる。



第3図 熱設計フロー

Fig. 3 Flow charts of thermal design

#### 3.2 熱流体解析技術によるアプローチ

前節で述べたように、カット&トライの実験による評価では、多大な開発工数が必要となるが、新規PKGのセット実装状態まで見据えた大規模な熱流体解析を単純に行うことも困難であった。

そこで、第3図 (b) に、今回構築に取り組んだ新規PKGのセット実装状態の熱対策について、設計上流側での対応を可能とする新規熱設計フローを示す。本フローでは、熱課題を前倒して解決するために、構想設計段階

および詳細設計段階でシミュレーションを活用した放熱チェックを行うことにしている。その結果として、試作・測定時の後戻りが無くなり、開発期間短縮を図ることが可能となる。

新規熱設計フローを実現するために、具体的に以下の3つの手順でフロー構築に取り組んだ。

- (1) 汎用ワークステーション環境下で詳細解析を可能とする解析モデルを構築し、合理的な計算コストを実現
- (2) システムLSIの対象PKGとして、PBGA (Plastic Ball Grid Array) およびFCBGA (Flip Chip Ball Grid Array) の2種類について、熱的な観点から各PKGの放熱限界性能を明確化
- (3) 構想設計初期段階で、熱設計者・解析技術者でなくとも簡易的にかつ精度よくパラメータ間の影響を把握できる相関式を構築

## 4. 熱流体解析技術の確立

### 4.1 解析モデルの検討

解析精度を確保しつつ、メッシュ数を削減するために、以下に示す点に配慮し解析モデルの構築を行った。

- ・ 流れ場に応じてメッシュ分割量を最適化
- ・ BDドライブ、HDDなどの発熱体モデル化
- ・ P-Q特性を配慮したファンモデルを適用
- ・ ボールグリッドなど微細部接触熱抵抗モデル化
- ・ 基板銅箔層の方向性を考慮した等価熱伝導率
- ・ システムLSI内部の非均一発熱状態を考慮

上記ポイントを踏まえることで、メッシュ数を200万点以下に抑制しつつ、第2表に示す適正な解析条件を用いることで、時間を要する解析においても約0.5日/形状以内を実現できた。

第2表 解析条件

Table 2 Simulation parameters

基礎方程式	連続の式 運動方程式 エネルギー式
乱流モデル	K- $\omega$ STT 2方程式モデル
輻射モデル	Discrete Ordinate Model
解法	圧力ベース陰解法
空間スキーム	Pressure : PRESTO Momentum : QUICK Turbulent Kinetic Energy : QUICK Specific Dissipation Rate : QUICK Energy : First Order Upwind Discrete Ordinates : First Order Upwind

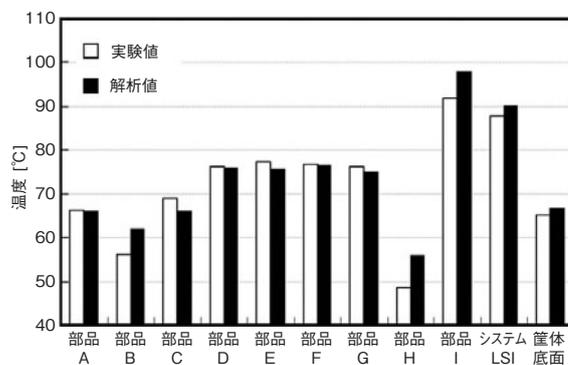
### 4.2 解析精度検証

現行機種の実験による温度評価結果と解析結果の比較

を行い、精度の検証結果を、第4図に示す。

第4図より、実測との誤差が6℃程度乖離（かいり）している部品が存在するが、全体的に相関はよく取れており、実測との比較で解析精度は部品平均で4.2%となっている。

特に、重要であるデジタル回路基板に搭載されているシステムLSIの温度は $\pm 2.5$ ℃以内で一致している。これは、部品と基板の接触熱抵抗（はんだと空気の合成熱抵抗）の与え方や、銅箔（どうはく）とガラスエポキシ樹脂の積層構造の複合材料である基板のモデリングが適切に行われたためと考えられる。また、システムLSIから筐体への放熱経路が正しく再現できていることから、筐体底面温度も $\pm 1.5$ ℃で一致しており、今後の放熱構造の開発に適用可能であると考えられる。



第4図 解析精度の検証

Fig. 4 Inspection of simulation accuracy

## 5. 各PKGにおける放熱限界性能

### 5.1 PKG解析モデル

構築した熱流体解析技術により、BD搭載状態におけるPBGAおよびFCBGAの放熱限界性能を把握するために、第3表に示す解析モデルにて計算を行った。

各PKGモデルについて、チップ面積、発熱量、熱伝導

第3表 PKG周り解析モデル

Table 3 Analytical model for regions around PKG

PBGA	Al放熱板無	封止樹脂	ゲルサイズ：30×30×4
	Al放熱板有	Al放熱板	ゲルサイズ：30×30×4
FCBGA	金属CAP無	システムLSI	ゲルサイズ：20×20×4
	金属CAP有	金属CAP	ゲルサイズ：20×20×4

ゲルシートの熱伝導率をパラメータとして評価を行い、各パラメータの影響の明確化に取り組んだ。ここで、放熱限界性能とは、システムLSI温度および筐体底面温度の最大値が前章の第1表に示した熱規格条件範囲内に収まる上限値である。

## 5.2 各PKGの放熱限界性能

第5図は、横軸をチップ発熱量、縦軸を発熱密度（発熱量をチップ面積で除した値）で表した各PKG解析結果の一例である。

図中の各シンボルは、想定する4種類のチップ面積に対し、今回パラメータ解析を行った発熱量を実線で結んでおり、また、各線（長点線、点線、一点鎖線、実線）が、各PKGのシステムLSI温度と筐体底面温度が熱規格を遵守するBD搭載状態におけるPKGの放熱限界性能を解析により求めた結果である。

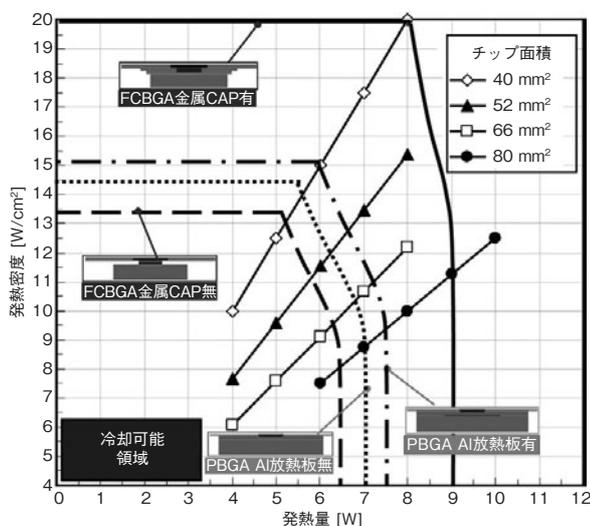
なお、各線の水平および垂直線は、解析対象外であるため、確実に放熱可能な水準を仮定して線引きしている。

以上より、第5図は、シンボルが各線より原点側の領域に入っている場合、各PKGの放熱が可能であることを示している。

なお、本解析例では熱伝導ゲルシートの熱伝導率 $\lambda = 0.5 \text{ W/mK}$ 一定の場合としている。

解析結果より、チップ面積が小さくなり、発熱密度が高まることで、放熱限界性能が低下することを明確にすることができた。このことより、今後、さらにチップ面積が縮小した場合、1章で述べたホットスポットの影響が顕著となり、放熱性能の低下が懸念される。

次に、黒丸印を実線で結んだチップ面積を $80 \text{ mm}^2$ と



第5図 各PKGにおける放熱限界性能

Fig. 5 Maximum heat dissipation performance of each PKG

した場合を例に、各PKGの放熱性能変化を検討する。PBGAについてはPKG表面にAl放熱板を設置した場合においても、 $7.0 \text{ W}$ （点線）から $7.5 \text{ W}$ （一点鎖線）と放熱性能向上が小さいことに対し、FCBGAは金属CAP設置により、放熱性能が $6.5 \text{ W}$ （長点線）から $9.0 \text{ W}$ （実線）と大幅に向上していることがわかる。

## 5.3 システムLSIからの放熱メカニズム解明

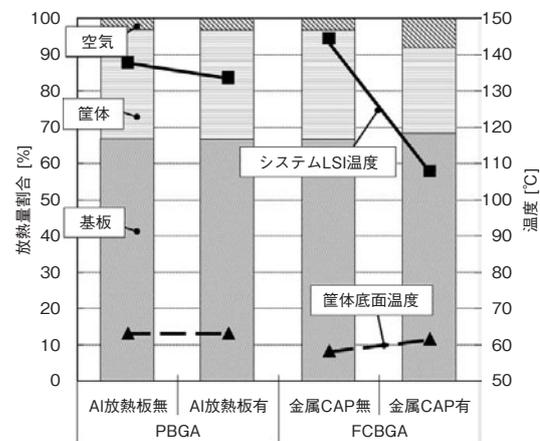
前節のPKG構造に起因する放熱限界について、さらに放熱性能向上の可能性を見いだすために、システムLSIからの放熱メカニズム解明に取り組んだ。

第6図は、チップ面積 $40 \text{ mm}^2$ 、発熱量 $8 \text{ W}$ の条件での各PKGにおける、放熱量割合、システムLSI温度、筐体底面温度を示したものである。

全体的な傾向として、チップからの熱の70%弱は基板へと伝わっていることがわかる。本解析対象では、システムLSIで発生した熱が筐体側へ伝わりすぎること抑制し、筐体底面温度上限を超えないように熱伝導ゲルシートの熱伝導率で調整しているため、本放熱方式では、基板側の放熱負担が大きくなると考えられる。

PBGAについてはチップを封止している樹脂の熱伝導率が小さく、チップで発生した熱が筐体側へと伝わりにくい。それゆえ、Al放熱板を設置したPKGでも放熱性能の向上は小さく、構造的にこれ以上の放熱性向上は望めないと考えられる。

一方、FCBGAは、銅製の金属CAPで封止した場合、システムLSIから金属CAP面方向に熱が拡散しやすいため、PBGAに比べ熱伝導ゲルシートへの熱が均一に伝わり、かつ、空気への放熱量割合が増加することで、大幅にシステムLSI温度が低下したと考えられる。また、本解析対象においては、空気への放熱量割合が10%未満



第6図 各PKGにおける放熱経路分析

Fig. 6 Analysis of heat discharge in each PKG

と非常に小さいことがわかる。すなわち、空気への放熱量割合を増加させる構成を実現すれば、従来より大発熱量のFCBGAの放熱を可能にすることを示唆している。

## 6. 設計指針抽出用相関式への展開

### 6.1 相関式の構築

構築した熱流体解析技術により、システムLSI実装状態で筐体の影響も含めたさまざまな熱課題を明確にすることが可能となった。しかし、PKG構想設計初期段階においてはシステムLSIからの発熱量やチップ面積などの仕様が未定な場合が多い。

そこで、PKG選定を行う構想初期段階において、迅速にシステムLSI温度とBDレコーダーの筐体底面温度を算出するための簡易判断指標の構築に取り組んだ。

前章の詳細解析により求めた結果から、システムLSIの発熱量や熱伝導ゲルシートの熱伝導率などのパラメータに対し、システムLSI温度および筐体底面温度がほぼ線形で増減していることがわかった。これは、本解析対象においてはシステムLSI周りの熱の流れは熱伝導が支配的であることから、各パラメータ間の影響に重相関性があると考えた。

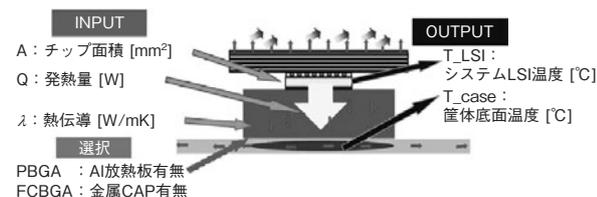
そこで、第7図に示すモデルのように、PBGA、FCBGAの各種パラメータの影響を簡易的に算出可能とする相関式を、重回帰分析を活用し、以下のように構築した。

$$T_{LSI} = K_1 + K_2\lambda + K_3Q + K_4A + K_5P \dots\dots\dots (1)$$

$$T_{case} = S_1 + S_2\lambda + S_3Q + S_4A + S_5P \dots\dots\dots (2)$$

(1) 式、(2) 式中の $K_1 \sim 5$ 、 $S_1 \sim 5$ は重回帰分析により求まる偏回帰係数であり、重相関係数はいずれも0.97以上と高い相関を得ている。

また、右辺第5項 $P$ はダミー変数であり、PBGAにおいて、AI放熱板有りの場合は1を、無しの場合は0を代入することで放熱板PKGへの影響を考慮できる。なお、FCBGAも同様に、金属CAPの有無を考慮できる。



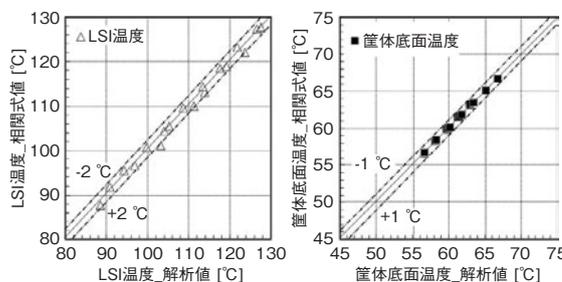
第7図 相関式モデル  
Fig. 7 Correlation model

### 6.2 詳細解析と相関式の比較

第8図に、FCBGAに詳細解析と相関式より算出した結果の比較例を示す。第8図より、相関式により求めたシステムLSI温度は $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内、筐体底面温度は $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内となり、詳細解析と一致していることがわかる。

すなわち、本相関式により、熱設計者・解析技術者でなくとも、簡易的にかつ精度よくパラメータ間の影響を把握できる。さらに、PKG構想設計初期段階で活用し、設計上流側でのPKG熱課題に取り組むことが可能となった。

今後、さまざまなPKG形態について詳細解析により得られた結果をデータベース化して蓄積し、相関式の適用範囲を拡充することができると考えられる。



第8図 解析値と相関式の比較  
Fig. 8 Comparison between analytical values and correlations

## 7. まとめ

BDレコーダーの搭載を想定した場合において、システムLSIチップから筐体内部まで配慮した3次元熱流体解析技術を構築し、システムLSIのPKG形態 (PBGA, FCBGA)・チップ面積・発熱量をそれぞれ熱設計パラメータとしたときの選定指針となる放熱限界性能を熱流体解析にて明確化した。

また、FCBGA、PBGAに関して、熱流体解析から得られた解析結果を重回帰分析により、各熱設計パラメータの影響を考慮した設計指針抽出用簡易相関式に落とし込み、詳細解析を用いずとも簡易的にシステムLSI温度と筐体底面温度を算出可能とした。

### 参考文献

[1] Ravi S. Prasher et al., "Nano and micro technology-based next-generation package-level cooling solutions," Intel Technology Journal, vol.9, issue4, pp.285-296, 2005.  
[2] Watwe A. et al., "Thermal implications of non-uniform die power map and CPU performance," Proceedings of InterPACK'03, p.35044, 2003.

## 執筆者紹介



松元 昂 Subaru Matsumoto  
R&D本部 エネルギーソリューションセン  
ター エネルギーシステム開発室  
Energy System Development Office, Energy  
Solutions Center, R&D Div.



小森 晃 Kou Komori  
R&D本部 エネルギーソリューションセン  
ター エネルギーシステム開発室  
Energy System Development Office, Energy  
Solutions Center, R&D Div.



鈴木 宏明 Hiroaki Suzuki  
デバイス社 半導体事業グループ マニユファ  
クチャリング統括部  
Manufacturing Div., Semiconductor Business  
Group, Industrial Devices Company



大谷 克実 Katsumi Ootani  
デバイス社 半導体事業グループ マニユファ  
クチャリング統括部  
Manufacturing Div., Semiconductor Business  
Group, Industrial Devices Company