

機関番号：13301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360076

研究課題名（和文） 分岐網形態を利用した電子基板冷却チャンネル設計法の構築

研究課題名（英文） Development of Design Methodology for IC Chip Cooling Channel by Using Natural Branching System

研究代表者

山崎 光悦（YAMAZAKI KOETSU）

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号：70110608

研究成果の概要（和文）：

集積度が過密になった電子回路内の熱を効果的に廃熱する冷却チャンネル網、貼付型廃熱シートを、自然界にみられる分岐網型の形態を基本として冷却効率最適化によって冷却チャンネル網形態を設計する方法を構築し、従来法による設計と比較して格段に冷却効率のよい冷却チャンネル、シートの設計法を提案し、電子回路基板廃熱設計、IC パッケージ内の具体的な実装試作品の通電時の熱分布測定を実施してその比較により有効性を実証した。

研究成果の概要（英文）：

Countermeasures against heating up are one of the important issues for Integrated Circuit(IC) on the substrate and IC chips themselves, because the increased density and temperature of IC chips cause malfunctions of circuits. But the traditional countermeasures such as the cooling fan and the heat sink have a limitation in cooling performance. So we have focused on the cooling channel with superior cooling performance. Design methods of cooling pathway by utilizing the optimality of branching system and channel layout design have been suggested. And the cooling performances of the proposed design method have been evaluated by both methods of CAE simulation and an experiment, and by comparing the results of the conventional design method.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2008年度 | 6,600,000 | 1,980,000 | 8,580,000 |
| 2009年度 | 4,800,000 | 1,440,000 | 6,240,000 |
| 2010年度 | 3,600,000 | 1,080,000 | 4,680,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 15,000,000 | 4,500,000 | 19,500,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：冷却チャンネル分岐網，LSI パッケージ廃熱，電子基板廃熱，最適廃熱設計

1. 研究開始当初の背景

ラップトップコンピュータのCPUや携帯電話の画像処理回路に代表されるようにLSIパッケージ、電子基板などの電子回路網はその集積度が超過密になって、廃熱が回路寿命の維持、延長にとって重要な課題となっている。その解決手段として、放熱性の高いシートを

パッケージに貼付けたり、電子基板内にマイクロ冷却チャンネルと呼ぶ流路を一体成形して冷媒を通し放熱する方法が注目を浴びていた。

そこで、生物の分岐網形態の複雑かつ巧みな分岐網システムの最適性を検討することで、その知見が熱交換システム形態設計や輸

送管路網設計など従来の人工物設計の概念では到底、到達できそうにない高効率、高性能な人工物の設計実現に役立つことが期待できると考えた。

また製造面でも、電子ビーム露光法を活用した極微細パターン形成技術や成膜/エッチングによるパターン転写技術、そして最新の多重微細電子線露光法による複雑な3次元構造の形成技術によって、複雑な曲がり空洞や三次元的な形態を含む電子デバイス冷却チャンネルの実装も可能になりつつあることも、巧みな分岐網形態を電子デバイス廃熱チャンネル設計に活用する研究を動機付けた。

2. 研究の目的

生物に見られる分岐網形態創成メカニズムを模擬しつつ、発熱分布を考慮した分岐網創成アルゴリズムを作成し、冷却チャンネル網の形態設計に適用することで、従来の設計方法（規則的な形態）では実現が困難とされてきた、優れた冷却性能実現の可能性を熱伝導解析と試作実験により検討した。また形態最適化法による冷却温度分布のばらつき最小化パターンの生成法についても検討した。ただし、実際に微細な水冷式の冷却チャンネル網を製作することは実験室レベルでは困難であるため、実証実験では熱伝導シートで冷却チャンネル網を代用することとした。つまり、冷却チャンネル網の形態に加工した熱伝導シートを IC チップ表面に貼付し、シートの根元部分を冷却することで IC チップを冷却する擬似モデルとした。

3. 研究の方法

(1) 設計対象モデルの設定

対象とした IC チップモデルを図 1 に示す。配線層（縦 6mm 横 6mm 厚さ 5・μm）、抵抗素子（縦 0.6mm 横 0.4mm 厚さ 0.1mm）、シリコン層（縦 7.3mm 横 7.3mm 厚さ 0.4mm）、エポキシ基板（縦 30mm 横 30mm 厚さ 1.0mm）の四種類の部品で構成されている。ただし、実験用 IC チップにおける配

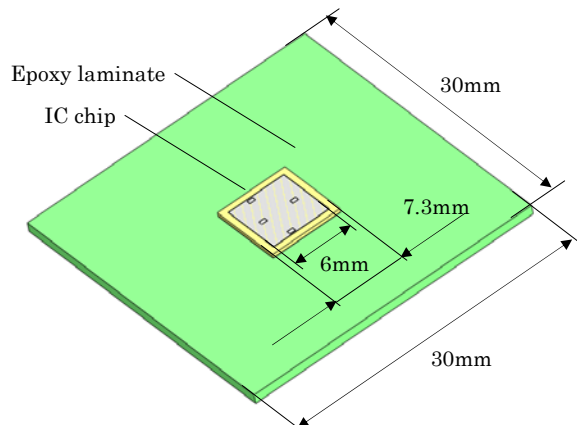


図 1 IC チップ冷却網設計対象モデル

線層は、絶縁膜である二酸化シリコンと幅 20 μm のアルミ配線、抵抗素子とアルミ配線を連結するタングステンの柱で構成されるが、解析モデルではメッシュ作成の簡略化のためアルミ配線とタングステンの柱を省略した。試作実験において冷却網にグラファイトシートを使用することから、冷却網にグラファイトシートの熱伝導率を与えた。ただし、冷却網のモデル化は冷却網の根元から外側に 1.4 mm までとし、それ以降は省略した。なお、冷却網の貼付が可能な領域は IC チップ内側の配線層の表面とした。

境界条件として実験環境を想定し、周囲温度 16°C と空気 の自然対流における熱伝達率 16 W/mK を解析モデル表面に与え、冷却網の出発地点から外側に 1.4 mm 位置に温度境界条件 28°C を設定した。また、配線層と冷却網の間に 2.0×10^{-4} K/(W/m²) の接触熱抵抗を与えた。なお、解析モデルの作成には 3D-CAD ソフトウェア Solid Works を使用し、汎用有限解析ソフトウェア COSMOS Works で熱伝導解析を行った。

(2) 分岐網型冷却網創成アルゴリズムの開発

自然界の分岐網を構築するには、分岐前後の枝太さの比率を支配する分岐則と、枝の成長方向や長さなどを支配する成長則が必要である。これら二点を踏まえ、提案する分岐網型冷却網創成アルゴリズムを以下に示す。また、冷却網創成アルゴリズムのイメージを図 2 に示す。

(Step1) IC チップの発熱条件の設定 IC チップを模した設計領域を定義し、その領域の要素分割を行う。そして、設計領域の中で、発熱体が位置する要素に発熱量に応じた数値（以下、発熱密度と呼称）を与える。また、熱の広がり方を考慮して、発熱体がない要素に微量の発熱密度を擬似的に与える。

(Step2) 出発地点の設定 冷却性能が最も高くなると考えられる、発熱密度が最大の発熱体に最も近い IC チップ辺の中央を冷却網の出発地点に設定する。

(Step3) 成長地点の設定 設計領域内で最も発熱密度の高い要素を冷却網の成長地点に設定する。これは、根は良い環境条件の方向、すなわち、水分量が多い方向へと成長する性質を表したものである。

(Step4) 冷却網の成長 単峰性関数に対して収束性の良い黄金分割法を用いて冷却網の総面積が最小となるように成長地点へ冷却網を分岐・成長させる。これは、エネルギーの配送・収集システムとしての植物の根を表したものである。この成長則により、Step1 で設定した発熱密度、つまり IC チップの熱を無駄なく吸収でき、結

果として様な温度分布に近づくことが期待できる。ただし、創成される冷却網の幅寸法 w_1 は、式 (1) により決定され、式 (2) によって冷却網全体の幅寸法が更新されるものとした。

$$w_i(Q) = \begin{cases} C_1 \frac{Q}{Q_{\max}} & (\text{成長地点} = \text{発熱体上}) \\ C_2 & (\text{成長地点} \neq \text{発熱体上}) \end{cases} \quad (1)$$

$$w_1^3 = w_2^3 + w_3^3 \quad (2)$$

ここで、 w_i ($i=1, 2, 3$) は冷却網幅寸法、 Q は成長地点の発熱密度、 Q_{\max} は設定した発熱密度の最大値、 C_1 と C_2 は幅寸法を制御するパラメータである。なお、 C_2 は発熱体に向かう冷却網の最小寸法の半分であるとする。また、 w_1 は親枝となる冷却網幅寸法を示し、 w_2 と w_3 は分岐する冷却網幅寸法を示す。なお、式 (1) は植物の根が水分・養分の多い領域で密になるという特徴を表し、発熱密度の高い領域には太い冷却網が成長することが期待できる。また、式 (2) は物理的考察や観察実験から確認されている植物の根の分岐則である。

(Step5) 成長した冷却網近傍の発熱密度の更新 植物の根の養分・水分吸収を模擬し、成長させた冷却網近傍の領域の発熱密度を更新する。ここで、養分・水分の吸収量は植物の根からの距離に依存すると考えられるため、更新後の発熱密度 $Q_{\text{after}}(l)$ は冷却網からの距離 l に従い、以下の式によって決定する。

$$Q_{\text{after}}(l) = Q_{\text{before}} - \frac{Q_{\min}}{(l/l_0)^2} \quad (0 \leq l \leq l_{\max}) \quad (3)$$

ただし、 Q_{before} は更新前の発熱密度であり、 Q_{\min} は Step1 で与える微小量の発熱密度である。また、 l_0 は発熱密度の更新量を制御する基準距離である。なお、冷却網直下および $Q_{\text{after}}(l)$ が負の値となる場合、更新後の発熱密度はゼロになるものとする。また、植物の根は、根元から離れるほど、養分・水分の吸収範囲が縮まると考えたため、冷

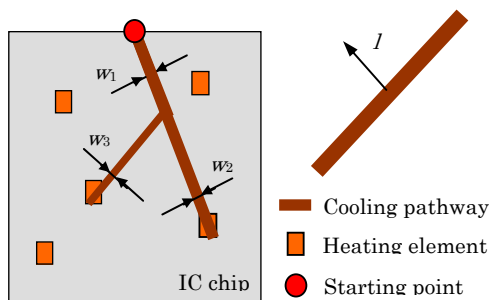


図2 ICチップ冷却網パターン設計一般モデル

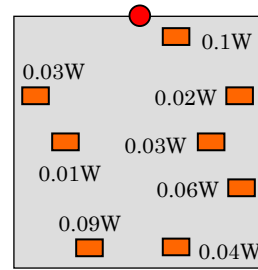


図3 冷却網設計対象熱源分布の一例

却網からの距離 l の上限値 l_{\max} は出発地点と成長地点の距離の増加に伴い一定の範囲で減少するものとする。

(Step6) 終了条件 Step3~Step5 を繰り返し、設計領域内の発熱密度がゼロになったとき、成長を終了する。

(3) 形態最適化法による冷却網パターン生成法と熱伝導解析

形態最適化法を利用して、重み付き平均温度最小化型冷却網を求めるため、内部発熱問題に適用する目的関数 $F(T)$ を以下の式とした。

$$F(T) = \frac{1}{2} \int_D T b d\Omega \rightarrow \min \quad (4)$$

ここで T 、 D 、 b 、 \cdot はそれぞれ温度、設計領域、内部発熱、領域を示す。目的関数 $F(T)$ は内部発熱 b を重みとした発熱部の平均温度の最小化するものである。

熱量が最大の抵抗素子に最も近い IC チップ辺の中央に実験環境を想定し、温度境界条件 26°C を与えて、形成される形態の表面積が設計領域の 30% とした。最適化には汎用工学シミュレーションソフトウェア COMSOL Multiphysics を使用した。

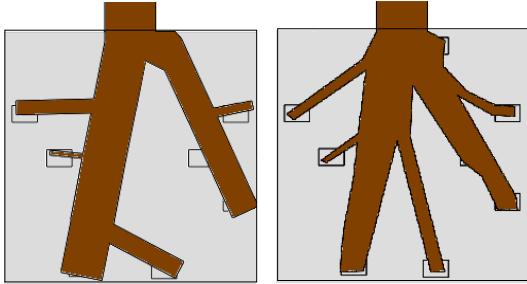
(4) グラファイトシートによる実証試験

分岐網パターン、形態最適化による温度分布のばらつき最小化形態パターンの有効性と特色を実験的に確認するため、従来の並行線冷却網パターンの三種類の形態に対して試作実験を行った。冷却網形態に加工した熱伝導シート (Panasonic 社製 PGS グラファイトシート) を IC チップに貼付し、根元を延長して液体窒素の入った容器に浸すことで冷却を行った。ただし、液体窒素は沸点が -196°C で、実験中は常に気化することから、冷気が IC チップ表面やその周囲に流れることを防ぐために、IC チップと液体窒素の間に冷気遮断壁を設けた。また、IC チップの温度測定には赤外線サーモグラフィ TVS-500EX (NEC/AVIO 製) を使用し、冷却開始から十分に時間が経過した後に IC チップ上部から測定を行った。

4. 研究成果

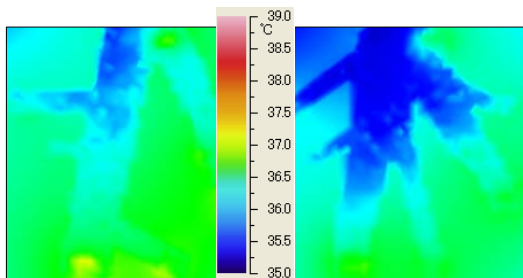
(1) 最適形態の設計結果

図3に示した IC チップ内の複雑な発熱パターンに対し、分岐網生成アルゴリズムによる冷却網生成例を図4(a)に示す。一方、重み付き平均温度最小化型冷却網の生成例を同図(b)に示す。



(a) 分岐網アルゴリズム (b) 形態最適化アルゴリズム
図4 図3の熱源モデルに対する生成された最適冷却パターンの比較

分岐網型と重み付き平均温度最小化型の冷却網パターンの熱伝導解析結果を図5に、また冷却網シート未貼付、分岐網型、平行型、重み付き平均温度最小化型の表面温度を比較した結果を表1に示す。解析結果から、冷却網未貼付と比較して、分岐網型は 16.1°C、平行型は 14.5°C、重み付き平均温度最小化型は 16.3°C 平均温度が低下しており、いずれの冷却網もある程度の冷却能力を有することが分かる。標準偏差に注目すると、分岐網型が 0.251°C と三種類の形態のなかで最も低く、重み付き平均温度最小化型の 0.280°C と平行型の 0.340°C が続いている。一方、最高温度に注目すると、重み付き平均温度最小化型が 36.8°C で最も低く、分岐網型が 37.0°C で続き、平行型は 38.9°C で突出して高いことが分かる。つまり、分岐網型が標準偏差に優れ、最高温度が重み付き平均温度最小化型に近い水準で低温な温度分布を実現できることが確認できた。



(a) 分岐網パターン (b) ばらつき最小化パターン
図5 熱伝導解析による熱分布予測

(2) 冷却網シートの試作と温度測定実験

冷却網未貼付と分岐網型、平行型、重み付き平均温度最小化型の実験結果を図6と表2に示す。一回目と二回目の実験結果を比較すると、平行型の最高温度と平均温度の差がそれぞれ 1.9°C と 1.5°C で若干大きいものの、他の項目の差は全て 1.0°C 以下である。そのため、実験方法に再現性があると判断できる。

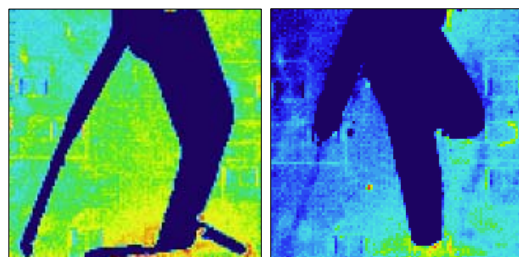
一回目の解析結果に注目すると、冷却網未貼付時と比較して、分岐網型は 18.8°C、平行型は 17.0°C、重み付き平均温度最小化型は 19.8°C 平均温度が低下していることがわかる。また、一様な温度分布の判断基準となる最高温度と最低温度の温度差は、分岐網型が 1.5°C で最も低く、重み付き平均温度最小化型の 2.3°C と平行型の 4.0°C が続いている。一方、確認のため最高温度に注目すると、重み付き平均温度最小化型が 45.3°C で最も低く、分岐網型の 45.9°C と平行型の 49.0°C がそれに続いている。これらの結果から、解析結果と比較して実験結果は約 5°C 高温ではあるが、実験結果と解析結果の傾向はよく一致し、分岐網型は研究目的である一様な温度分布を

| | Max | Ave | SD |
|---|------|------|-------|
| Without cooling | 53.2 | 52.4 | 0.223 |
| Branching design | 37.0 | 36.3 | 0.251 |
| Parallel design | 38.9 | 37.9 | 0.340 |
| Weighted mean temperature minimization design | 36.8 | 36.1 | 0.280 |

表1 各種冷却パターンの温度分布の比較 (シミュレーション)

表2 実証試験結果の比較

| | (A) Max | (B) Min | (A) - (B) | Ave | |
|---|---------|---------|-----------|------|------|
| Without cooling | 67.4 | 61.9 | 5.5 | 63.9 | |
| Branching design | 1st | 45.9 | 44.4 | 1.5 | 45.1 |
| | 2nd | 45.9 | 44.0 | 1.9 | 45.1 |
| Parallel design | 1st | 49.0 | 45.0 | 4.0 | 46.9 |
| | 2nd | 47.1 | 44.0 | 3.1 | 45.4 |
| Weighted mean temperature minimization design | 1st | 45.3 | 43.0 | 2.3 | 44.1 |
| | 2nd | 44.4 | 42.2 | 2.2 | 43.3 |



(a) 分岐網パターン (b) ばらつき最小化パターン
図6 熱分布の実測例

現でき、かつ重み付き平均温度に近い水準で低温な温度分布を実現できることが分かる。また平行型の冷却性能が他の冷却網と比較して格段に劣ることも確認できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① Matsumori, T., Yamazaki, K., Design improvement of cooling channel layout for plastic injection moulding, Engineering Optimization, online ISSN1029-0273 (2010), 査読有
- ② 松森唯益・山崎光悦・北山哲士, プラスチック射出成形金型の三次元冷却管最適配置設計法, 成形加工, 21-11 (2009), 699-705, 査読有
- ③ 松森唯益・山崎光悦・土居由樹, プラスチック射出成形金型の冷却管最適配置設計法の研究(そり量と成形サイクル時間を考慮した設計), 日本機械学会論文集C編, 75-760 (2009), 3347-3354, 査読有

[学会発表] (計6件)

- ① 山崎光悦・今川拓也・広幡哲志, COMSOLを用いた熱拡散問題に対する形態最適化法の開発, 日本機械学会第20回設計工学・システム部門講演会, 2010年10月29日, 産業技術総合研究所臨海副都心センター(東京都)
- ② 山崎光悦・広幡哲志, 分岐網創成メカニズムを用いたICチップ冷却チャンネル網設計法の開発, 日本機械学会第20回設計工学・システム部門講演会, 2010年10月28日, 産業技術総合研究所臨海副都心センター(東京都)
- ③ 北山哲士, 多目的最適設計におけるトレードオフ分析法, 日本機械学会2009年度年次大会, 2009年9月15日, 岩手大学(岩手県)
- ④ 北山哲士, トレードオフ比を考慮した妥協点の算出, 日本機械学会2009年度年次大会, 2009年9月15日, 岩手大学(岩手県)
- ⑤ 山崎光悦, 三次元FOAのための簡易有限要素の改良に関する検討, 日本機械学会2009年度年次大会, 2009年9月14日, 岩手大学(岩手県)
- ⑥ 山崎光悦・小渕直也・河合隆光, 電子基板用分岐網型冷却チャンネル設

計法の開発, 日本機械学会第18回設計工学・システム部門講演会D&S08, 2008年9月25日, 京大会館(京都府)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 光悦 (YAMAZAKI KOETSU)
金沢大学・機械工学系・教授
研究者番号: 70110608

(2) 研究分担者

北川 章夫 (KITAGAWA AKIO)
金沢大学・電子情報学系・准教授
研究者番号: 10214785

秋田 純一 (AKITA JUNICHI)
金沢大学・電子情報学系・准教授
研究者番号: 10303265

多田 幸生 (TADA YUKIO)
金沢大学・機械工学系・准教授
研究者番号: 20179708

北山 哲士 (KITAYAMA SATOSHI)
金沢大学・機械工学系・准教授
研究者番号: 90339698

酒井 忍 (SAKAI SHINOBU)
金沢大学・機械工学系・助教
研究者番号: 80196039

(3) 連携研究者

なし