JAIST Repository

https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	ウェーハスタック実装の温度予測モデル		
Author(s)	井口 寧; 松澤 照男; 堀口 進		
Citation	情報処理学会論文誌 : 数理モデル化と応用, 44(8): 1-11		
Issue Date	2003-05		
Туре	Journal Article		
Text version	publisher		
URL	http://hdl.handle.net/10119/3315		
Rights	社団法人 情報処理学会, 井口寧 / 松澤照男 / 堀口進, 情報処理学会論文誌 : 数理モデル化と応用, 44(SIGO7), 2003, 1-11. ここに掲載した著作物の利 用に関する注意: 本著作物の著作権は(社)情報処理 学会に帰属します。本著作物は著作権者である情報処 理学会の許可のもとに掲載するものです。ご利用に当 たっては「著作権法」ならびに「情報処理学会倫理綱 領」に従うことをお願いいたします。 The copyright of this material is retained by the Information Processing Society of Japan (IPSJ). This material is published on this web site with the agreement of the author (s) and the IPSJ. Please be complied with Copyright Law of Japan and the Code of Ethics of the IPSJ if any users wish to reproduce, make derivative work, distribute or make available to the public any part or whole thereof. All Rights Reserved, Copyright (C) Information Processing Society of Japan.		
Description			



ウェーハスタック実装の温度予測モデル

井口 寧^{t,tt} 松澤照男^t 堀口 進^{<math>ttt}</sup></sup>

本論文では,ウェーハスタック実装の温度予測モデルを提案する.ウェーハスタック実装は,1枚 のウェーハ上に多数のプロセッシング要素(PE)を構築し,これを3次元的に積層して構築する実装 方式の1つであるが,3次元構造内部のPEが発生する動作熱の冷却が重要な問題である.これまで に放熱を考慮したPE配置や再配置アルゴリズムが提案されているが,冷却性能の評価は実験的手法 や数値シミュレーションなどの経験的手法を用いていた.本論文では,ウェーハスタック内のPEを 発熱部位としてモデル化し,解析的に冷却性能を予測することを試みる.高速な温度予測が可能にな れば,冷却問題を最適化問題と見なすことができ,冷却効率の高いPE配置を求めることや,PE配 置を決めるためのパラメータを迅速に決めることが可能になる.最初にウェーハスタック実装の構成 と放熱モデルを定義し,このモデルをターゲットとしたスタック内の温度予測方式を導出する.提案 する温度予測モデルの有効性を検証するため,様々なPE配置に対して提案モデルによる予測温度と 熱伝導シミュレーション結果を比較したところ,両者の温度差は数度以内であり,また冷却性能が高 いPE配置も十分な精度で求めることができた.計算速度を評価するため,提案モデルによる温度予 測を用いて PE 初期配置の最適化を行ったところ,熱伝導シミュレーションに比べておよそ 10⁶ 倍 程度の高速化が可能であった.

Thermal Estimation Model for 3D Stacked Implementation

YASUSHI INOGUCHI,^{†,††} TERUO MATSUZAWA[†] and SUSUMU HORIGUCHI^{++†}

This paper proposes a thermal estimation model for a 3D stacked implementation. The 3D stacked implementation is a pile of WSIs which contains a large number of processing elements (PEs) on a silicon wafer. However, cooling method for PEs is one of the most crucial problems because it is difficult to radiate heat from the depth of the stack. This paper proposes a method to estimate the maximum temperature in the stack introducing a thermo-conducting model for a 3D stacked implementation, because an optimal PE arrangement for efficient cooling can be determined if the maximum temperature is estimated analytically. At first, structure of the 3D stacked implementation is explained by introducing a thermo-radiation model. Then a temperature estimation method based on the thermo-radiation model is discussed. It is shown that the difference is a few degree and a well cooled PEs placement can be determined sufficiently by comparing temperature calculated by the proposed model and result of a thermo-conducting simulation. Evaluating execution time of the temperature estimation model is 10^6 times faster than the thermo-conducting simulation.

1. はじめに

大規模なシステムLSI,画像処理システムや超並列 システムを実現する実装手法として,1枚のウェーハ上 に多数のプロセッシング要素(PE)を塔載し,これを 三次元的に積層して構成されるウェーハスタックシス

+++ 北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科 School of Information Science, JAIST テムが提案され,積層手法,冷却手法,および欠陥回 避技術などについて様々な研究がなされている^{1)~7)}. ウェーハスタック実装が実現できれば,従来のPCB ボード上の配線がすべてチップ内部で可能となるため, チップ間の配線容量を非常に小さくでき,システムの 大幅な高速化,小電力化,および高密度化が期待でき る.しかしながら,3次元構造を有するウェーハスタッ クシステムでは,システムの大規模化にともない,ス タック内部のPEが発生する動作熱の冷却手段が重要 な問題となっている.

冷却問題に対して,ウェーハスタック内部に熱を伝 える縦方向のシャフトを設け,この熱伝達シャフトを

 [・] 北陸先端科学技術大学院大学情報科学センター
 Center for Information Science, JAIST

<sup>†
†</sup>科学技術振興事業団さきがけ研究 21 (機能と構成) "Information and Systems," PRESTO, JST

通じて冷却する方法などが提案され,実際にウェーハ スタックシステムが試作されている^{1)~3)}.文献 8)で は,対象がウェーハスタック実装ではないが,MCM (Multi Chip Module)に熱伝導率が高いダイヤモン ド薄膜を挟み込み,水平方向の熱伝導を高めること によってシステムを冷却する手法をとっている.また 筆者らは,ウェーハの外側が冷却効率に優れることに 注目し,内部の動作 PE の配置を工夫し,発熱する PEをウェーハの外側に再配置する冷却手法を提案し た^{9),10)}.しかし,これらの冷却手法はある冷却手法を 実装したうえでの実験やシミュレーションによる報告 であり,冷却アルゴリズムやパラメータの違いによる 冷却効率の優劣を求めるためには,実験や数値シミュ レーションなどの大きなコストが必要である.

そこで本論文では,冷却手段の優劣を迅速に求める ために,ウェーハスタックの温度予測モデルを提案す る.ウェーハスタック内の温度予測を解析的に求める ことができれば,冷却問題をウェーハスタックの実装 上の制限下における最適化問題と見なすことができ るため,アルゴリズム中のパラメータの詳細な決定が 可能になり,冷却効率の良いアルゴリズムの開発が容 易になる.本論文では,ウェーハスタックの外周部か ら放熱する場合を想定し,各ウェーハ内のPEの位置 による冷却効率を熱伝導方程式から導出する.提案し た温度予測モデルを,差分法による熱伝導シミュレー ションと比較し,十分な精度で非常に高速にPE配置 の最適化が可能であることを示す.

本論文の構成は次のとおりである.2章でウェーハ スタック実装の構成法と冷却問題について議論し,冷 却問題を明確にする.3章で,熱伝導方程式に基づい た温度予測モデルを,実際のウェーハに適用できるよ うに近似しながら導出する.提案した温度予測モデル の有効性を示すために,4章で熱伝導シミュレーショ ンと比較しながら,温度予測の精度および計算速度に ついて評価する.5章はまとめである.

2. ウェーハスタック実装

2.1 ウェーハスタックの構成法

ウェーハスタック実装の概念図を図1 に示す.今後の議論のために,座標系を図に示すように定める. ウェーハ内を円筒座標で表し,積層方向への座標軸を zとする.それぞれのウェーハ上には,実装すべき結 合網の一部を塔載し,各ウェーハ上の PE どうしを ウェーハ間結線で結合することによって大規模な相互 結合網を実現する.ウェーハ間結線の手段は,各ウェー ハ表面に直交する微小なボンディングワイヤのブリッ



図 1 ウェーハスタック実装の概念図 Fig. 1 Basic structure of 3D stacked implementation.

ジを構築し z 方向に圧力を加えて圧着する方法^{1),5)}や, いったんウェー八の外側に信号を取り出して結合する 方法²⁾などが提案されているが,どの方法でもウェー 八間結合のコストが大きいため,ウェー八間結合が少 ないウェーハスタック実装に適した相互結合網がこれ までに提案されている^{6),7),11)}.これらの結合網は,階 層構造となっており,各ウェー八上に構築された格子 網を,上位網であるウェー八間結線で結合する構成と なっている.コストが大きいウェー八間結合を少なく しながら,小さい直径や優れた動的通信性能を有して いる.

2.2 冷却問題

ウェーハスタック実装は 3 次元構造を有するため, スタック内部の PE が発生する動作熱の冷却手段は非 常に重要な問題である.半導体は動作温度が限られて おり,現在主流のシリコン半導体では接合部温度 *T_j* を約125~150°C以下に抑える必要がある.一方,各 PE の発生する熱量は主としてクロック周波数に比例 し,近年の高クロック化にともない発熱量は急速に増 加している.部分回路へのクロックの供給停止や低周 波化など,低消費電力技術も提案されているが,その 場合でも,冷却を効率良く行うことができれば,クロッ クの高速化や高速動作する回路量の増加に貢献できる. さらに放熱性能は面積に比例するのに対し,発熱量は 体積に比例するため,大規模な大口径スタックを構築 するためには効率の良い冷却手段が不可欠である.

ところで,一般にウェーハスタック内の各ウェーハ には,稼働時に動作する PE と,動作しない(クロッ クを与えられない)休止 PE が発生する.動作しない PE には大別して3種類ある.(a)ウェーハ製造時に 不可避的に発生する表面欠陥が原因を原因とする,欠 陥を有する PE(欠陥 PE),(b)欠陥 PEを救済する ためあらかじめ製造しておく予備の PE(冗長 PE)の うち,使用されずに残るもの,そして(c)巡回形ハイ パーキューブなどで生じる網の実装上配線のみとなる 領域である.動作状態の PE はその動作熱によって熱 を発生するが,休止 PE では電源供給を停止すれば発 熱しない.欠陥 PE はウェーハの状態に依存するため, ウェーハ上での位置は固定されているが,(b),(c)の PE は置き換えアルゴリズムや配線方法によって最適 な配置とすることが可能である.そこで,効率良く冷 却するためには,発熱する動作 PE を冷却が行われる 部位に近く,休止 PE を冷却が行われにくいスタック 内部に配置すればよい.

既存のウェーハスタック向け相互結合網^{6),7),11)}の欠陥 PE の救済は,各ウェーハ内の格子網ごとに行われる.このため,ウェーハ面上の PE 配置に対するスタック内の温度変化について議論する.具体的には,スタック内の座標を (r,φ,z) で表すと,ウェーハ面 $(r,\varphi$ 平面)での PE 配置に対する温度変化を求めることが,他の面内 $(z,\varphi$ 面やr,z面)での PE 代替に比べて,実現性が高く効果が大きいアプローチだからである.三次元的に再構成を行う方法も提案されており¹²⁾,この場合にはz方向の PE 代替にともなう温度予測が必要となるが,三次元再構成は冗長なウェーハ間結線を多数必要とする問題が生ずるため,本論文では対象としない.

温度予測モデルに求められる機能は,任意の異なる PE 配置パターン P_A , P_B が与えられらたとき,モデ ルでの予測最高温度 $T_m(P)$ と実際のウェーハ内最高 温度 $T_p(P)$ の間に次の関係が成り立つことである.

 $\{T_m(P_A) - T_m(P_B)\} \{T_p(P_A) - T_p(P_B)\} \ge 0$ (1)

たとえば,ある欠陥 PE を外側方向の PE で代替す れば温度が低下するということがモデルによって判定 されたとき,現実にも同様の代替で温度が低下するの であれば,本モデルを用いて冷却性能が高い再構成ア ルゴリズムを迅速に開発できる.

2.3 問題解決の流れ

PEの冷却はスタック内では熱伝導に依存するため, 動作 PEと休止 PEの配置によって冷却効率が大きく 異なる.PEの初期配置や使用されない冗長 PEの配 置を最適化することによって,冷却効率を高めること が可能である.しかしながら,従来の冷却手法の提案 は経験的な手法に頼っており,ウェーハ内の熱伝導に ついて明解な分析がなされていない.冷却問題をモデ ル化することによって,PE 配置の指針を明確にし, ウェーハスタックの冷却問題を網再構成の条件下にお ける最適化問題に帰着させることができる.

問題解決の流れは、次のように考えることができ、

最適な初期配置や再構成パラメータを効率良く決定す ることができる.

- 1. (欠陥 PE を含む) ウェーハの製造
- 2. PEの初期配置の検討,適用
- 3. 再構成アルゴリズムの検討,適用
- 4. その結果,論理的に欠陥のない結合網がウェーハ ごとに生成
- 5. 冷却性能の評価
- 6. PE 初期配置の評価,再構成アルゴリズムの決定 従来はステップ5の冷却性能の評価を行うために, 実験的手法や数値シミュレーションを用いてきたため, 最適なアルゴリズム検討のためには多大なコストが必 要であった.冷却性能を解析的に求めることにより, 冷却問題を効率良く解決しようとするのが本研究の狙 いである.

3. ウェーハスタックの温度予測モデル

3.1 発熱モデルの概要

本章ではウェーハスタックの温度予測モデルを,ウェ ーハ上の PE チップの状態から近似的に導出する.円 筒座標における熱伝導方程式は,時間を τ ,単位体積 あたりの発熱量を \dot{q}_v ,単位質量あたりの比熱をc,密 度を ρ として,

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{q_v}}{c\rho}$$
(2)

であることが示されている^{13),14)}.

冷却のモデル化のため,図2に示すように,スタッ ク中の1枚のウェーハを取り出して考える.ウェーハ スタック実装では内部で最も高温となる部分が問題と なるが,円柱状の発熱体の温度分布を三次元で解析的 に求めることは難しい.PE配置の再構成は,2.2節で 述べたように,各ウェーハ上で行われるので,軸方向





と半径方向に分けて考え,まず最も高温となるウェー ハを取り出し,このウェーハ面内の PE 配置に対する 温度を予測するモデルを構築する.

図2 に軸方向と半径方向についてのウェーハスタッ ク内温度分布の様子を示す.最初に軸方向の温度分布 について考える.軸方向の温度分布は,ウェーハの周 囲を断熱面と仮定した場合,次のように放物線状の温 度分布となる^{13),14)}.

$$T(z) = T_f - \frac{\dot{q}_v}{2\lambda_z} z(z - D_a) - \frac{z}{D_a} (T_f - T_c)(3)$$

ただし, D_a はウェーハスタックの z 軸方向の長さ, λ_z は z 軸方向の熱伝導率, \dot{q}_v は単位体積あたりの発 熱量, T_f , T_c はスタックの最下面および最上面温度 である.式(3)から,最高温度となるのは $\partial T/\partial z = 0$ のときであり,このときのウェーハ位置は次のように なる.

$$z_{Tmax} = \frac{1}{2}D_a - \frac{\lambda_z(T_f - T_c)}{\dot{q}_v D_a} \tag{4}$$

もし $T_c = T_f$ ならば, z_{Tmax} は $D_a/2$ となり, ちょうど軸方向の厚みの中心位置になる.このときの, z_{Tmax} のウェー八面内の PE 配置に対する半径方向の 温度を予測の対象とする.

このモデルとしての考え方をおし進め,軸方向に無限長の円柱モデルを仮定する.つまり,軸方向の熱移動は考慮せず,本モデルではスタック内の温度は*T*(*r*, *φ*)で表されると仮定する.すると,ウェーハスタックの冷却は円板状のウェーハの外周部から行われる.各PEが発生する熱は,ウェーハの半径方向に沿って熱伝導が行われ,最後にウェーハ外縁で放熱される.

一方,現実のスタックでは,軸方向の長さが有限で あり,熱の一部は軸方向を通しても放熱される.この 場合,現実の温度は上記仮定に基づくモデルよりも低 くなるが,PE配置による温度変化の傾向は類似して いる.つまり,軸方向の放熱の有無にかかわらず,式 (1)の条件を満たしている限り,実際にも温度を低下 可能なPE配置を,温度予測モデルを用いて推測でき る.軸方向の熱伝導率は,積層枚数やウェーハ間結線 の方法によって大きく異なるので,絶対温度は温度予 測モデルと実際では差が生じる.しかしながら,軸方 向の放熱量を実験的手法によって求め,その熱量を各 PEの発熱量から差し引くことによって,温度予測モ デルから推測することは可能である.

そこで,図3に取り出した1枚のウェーハ面上のPE の発熱モデルを示す.ウェーハの全体に動作PEが均 ーに分布していると仮定し,この部分では単位時間あ たり一定量の熱量が発生する(図中斜線のPE).一方,



図 3 ウェーハスタックの発熱モデル Fig. 3 Heat generation model of wafer stacked implementation.



Fig. 4 Heat generation model of fan-shaped area where include idle PE.

各ウェーハ上には、欠陥 PE または利用されない冗長 PE が少数存在する.これらを休止 PE と呼び、図 3 中では白抜きの PE で示す.休止 PE は電源をカット できるため、発熱せず熱伝導のみを行う.問題の簡略 化のため、円周方向への熱移動も、ウェーハ各部で均 ーに休止 PE が分布するものと仮定すれば、隣接する 扇形領域が類似した温度分布となり、円周方向間の熱 移動は十分小さいものと仮定できる($\partial T/r \partial \varphi \sim 0$). したがって、ウェーハの発熱部によって発生した熱の 移動は、図の矢印のように、半径方向への熱移動が主 体であると考えることができる.

図3の扇形部分を切り出し,図4に拡大して示す. 領域 A および C は動作 PEの領域であり,単位時間 あたり一定の発熱がある.領域 B は休止 PE に相当 する領域であり,発熱せず熱伝導のみを行う.先に述 べたように,上下方向および円周方向についての熱移 動は無視し,半径方向の熱移動によってのみ冷却され るものと近似する. 式 (2) を図 4 の発熱モデルに適用する.各 PE が動 作し平衡状態になったときの温度を求めたいので,定 常熱伝導となり, $\partial T/\partial \tau = 0$,またウェーハ間および 円周方向への熱移動が無視できると仮定するので,式 (2) の右辺第3項と第4項がゼロとなる.したがって 式 (2) は次のように書ける.

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dT}{dr} + \frac{\dot{q}_v}{\lambda} = 0$$
(5)

次節で領域ごと境界条件を定めて式(5)に適用する ことにより,各領域の温度を求める.

単位体積あたりの発熱量は,単位体積あたりの発熱 量一般 *q*_v に対し,*q*_p を PEの単位体積あたりの消費 電力として,ウェーハ上の PEの状態によって次のよ うに定める.

$$\dot{q_v} = \begin{cases} 0 & if \ PE = idle \ (Area \ B) \\ \dot{q_p} & if \ PE = active \ (Area \ A, C) \end{cases} (6)$$

3.2 休止 PE を含む扇形領域の熱伝導

ここでは,図4に示す休止 PE を含む扇形領域の 熱伝導について考える.ウェーハの半径を R_e ,休止 PE のウェーハ中心側および外側の半径をそれぞれ r_1 , r_2 ,休止 PE を含む扇形領域の角を $\Delta \varphi$,ウェーハの 厚さをwとする.また, $r = r_1, r_2, R_e$ における温度 を T_1 , T_2 , T_e とする.次に各領域での境界条件を考 察する.

領域 A

まず,中心部分にある PE チップが発熱している領 域Aについて考える.境界条件は,ウェーハ中心が温 度が最も高くなるため,中心点で熱の出入りがゼロと する.また,領域Bとの境界面温度を T₁ と置くと,

$$\frac{dT}{dr}\Big|_{r=0} = 0$$
 (7)
 $T(r_1) = T_1.$ (8)

また,この領域では $q_v=q_p$ である.

領域 B

領域 B は,休止 PE に相当する部分であり,領域 A で発生した熱を領域 C に伝達する. $r = r_1$ での境界 条件は,領域 A で単位時間あたりに発生する総発熱量 \dot{Q}_A が $r = r_1$ の境界面(紙面に垂直な $r = r_1$ の円 筒上の面)の面積を通過するので,次のようになる.

$$\dot{Q}_A = \frac{1}{2} \dot{q_p} {r_1}^2 \Delta \varphi w \tag{9}$$

$$-\lambda \frac{dT}{dr}\Big|_{r=r_1} = \frac{\dot{Q}_A}{r_1 \Delta \varphi w} = \frac{1}{2} \dot{q}_p r_1 \tag{10}$$

ただし,領域Aでは $q_v = q_p$,領域Bでは $q_v = 0$ である.また, $T(r_2) = T_2$.

領域 C

領域 C は、領域 A で発生する熱を領域 B を介して 受け取り、さらに領域 C にある PE の発熱を加えて外 界に放熱する、境界条件は、領域 B と同様に、 $r = r_2$ における熱流束と領域 C の外側境界面温度 T_e を用い て、次のように表すことができる、

$$-\lambda \frac{dT}{dr}\Big|_{r=r_2} = \frac{\dot{Q}_A}{r_2 \Delta \varphi w} = \frac{1}{2} \dot{q_p} \frac{r_1^2}{r_2}$$
(11)
$$T(R_e) = T_e$$
(12)

扇型領域の温度

式 (7)~(12) の境界条件を式 (5) に適用することに より,休止 PE を含む扇形領域の温度を次のように表 すことができる.

$$T(r) = \frac{q_p}{4\lambda} \left(r_1^2 - r^2 \right) + T(r_1)$$
(13)
($0 \le r < r_1$)

$$T(r) = -\frac{\dot{q}_p}{4\lambda} r_1^2 \ln \left(r/r_2 \right)^2 + T(r_2)$$
(14)
(r_1 \le r < r_2)

$$T(r) = \frac{\dot{q_p}}{4\lambda} \left\{ \left(R_e^2 - r^2 \right) + \left(r_2^2 - r_1^2 \right) \right. \\ \left. \cdot \ln\left(r/R_e \right)^2 \right\} + T_e$$
(15)
$$\left. \left(r_2 \le r \le R_e \right) \right\}$$

休止 PE への対応付け

式(15)~(13)から,扇形領域の中心温度T(0)を求 めることができる.扇形領域の中心は最も温度が高く なる部位である.

$$T(0) = \frac{\dot{q_v}}{4\lambda} \left\{ R_e^2 - \left(r_2^2 - r_1^2\right) + r_2^2 \ln\left(\frac{r_2}{R_e}\right)^2 - r_1^2 \ln\left(\frac{r_1}{R_e}\right)^2 \right\} + T_e$$
(16)

次に,図4に示した扇型に仮定した PEを,実際の ウェー八上の正方形の形をした PE に対応づける.PE の一辺の長さを L と置くと, PE 1 つあたりの面積は L^2 である.PEの中心からウェーハ中心までの距離を r_c と置くと, $r_1 = r_c - \frac{L}{2}$, $r_2 = r_c + \frac{L}{2}$ となるので, $r_2^2 - r_1^2 = 2r_c L$ と書ける.式 (16)において, L が 十分小さく, $\ln r_1 \sim \ln r_c$, $\ln r_2 \sim \ln r_c$ のように近似 できるならば,一辺が Lの休止 PE を含む扇形領域 の中心部分の温度を $T_i(0)$ として,式 (16)は次のよ うに近似できる.

$$T_{i}(0) = \frac{q_{v}}{4\lambda} \left[R_{e}^{2} + 2r_{c}L \left\{ \ln(r_{c}/R_{e})^{2} - 1 \right\} \right] + T_{e}$$
(17)

3.3 休止 PE を含まない扇形領域の熱伝導

休止 PE を含まない扇形領域(すべてが動作 PE) の中心温度を $T_p(0)$ とすると, $T_p(0)$ は式 (16) にお いて $r_1 = r_2$ の場合なので,次のようになる.

$$T_p(0) = \frac{q_v}{4\lambda} R_e^2 + T_e \tag{18}$$

3.4 ウェーハ中心温度

ここまでに求めた $T_i(0)$, $T_p(0)$ を用いて,まず休止 PEが1つあるウェーハの中心温度を求める.ウェー ハ中心の微小領域の平均温度 $T_m(0)$ は,図4に示す ように, T_i , T_p の面積比に応じた平均値と見なすこ とができる.また, $L^2 = \pi(r_2^2 - r_1^2) \cdot \frac{\Delta \varphi}{2\pi}$ という関 係なので, $\Delta \varphi = L/r_c$ となる.したがって $T_m(0)$ は 次のように書ける.

$$T_m(0) = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} T_i(0) + \left(1 - \frac{\Delta\varphi}{2\pi}\right) T_p(0)$$
$$= \frac{\dot{q}_v}{4\lambda} \left[R_e^2 + \frac{L^2}{\pi} \left\{ \ln (r_c/R_e)^2 - 1 \right\} \right]$$
$$+ T_e \tag{19}$$

式 (19) より,扇型領域の中心温度 $T_m(0)$ は,休止 PE 領域の面積および領域の中心とウェーハ中心の距 離 (r_c) のみによって近似できる.図4 では,正方形 の休止 PE が扇形領域とほぼ平行になるように仮定し たが,たとえば図3(B)のように,45 度回転したよう な位置にある PE でも有効である.

次に,式(19)をウェー八内に複数の休止 PE があ る場合に拡張する.線型系なので重ね合せができ,各 休止 PE ごとの温度変化を求め,この合計によって ウェー八全体の中心温度を求める. $r_c^{(j)}$ をj番目の休 止 PE のウェー八中心からの距離とし,すべての休止 PE について式(19)を適用して合計して求めることが できる.多数の休止 PE がある場合では,注目してい る休止 PE を含まない領域の温度は,他の休止 PE が 存在するため,放熱効率が低下する.そこで重ね合せ の際に全 PE 数に占める動作 PE 数の割合を乗ずる. N_t を全 PE 数, N_a を動作 PE 数, N_i を休止 PE 数 ($N_t = N_a + N_i$)として,複数休止 PE がある場合の 温度 $\bar{T}_m(0)$ を次のように予測する.

$$\bar{T}_m(0) = \frac{\dot{q}_v}{4\lambda} \left[R_e^2 + \frac{N_a}{N_t} \frac{L^2}{\pi} \cdot \sum_{j=1}^{N_i} \left\{ \ln(r_c^{(j)}/R_e)^2 - 1 \right\} \right] + T_e \quad (20)$$

3.5 エッジの熱伝導モデル

ウェーハ上の PE の配置は,実際にはモデルのよう な円形ではなく,図5に示すように,正方形の PE アレイが円板状のウェーハに塔載されるため,放熱の 妨げとなる半月状のエッジ領域(図中 Real Edge)が 四辺に発生する.このエッジ部分をモデル化する.前



図 5 エッジの熱伝導モデル Fig. 5 Thermo-conducting model for wafer edge.

節と同様に熱伝導領域の面積が一致するように,半月 状のエッジ部分を円環状の熱伝導領域としてウェーハ の最外周部に近似的に配置する(図中 Model Edge). ここでエッジ部分も含めたスタック全体の半径を R_a , 外界 $(r = R_a)$ の温度を一定温度 T_a とする.また, PE アレイが存在する円板状領域の半径を R_e とする. もし,PE アレイ全体の対角長がウェー八直径に等し いと仮定するならば,正方形の PE アレイが円板状の ウェーハにちょうど収まり,図中の Real Edge 部分の 合計面積が外径が R_a ,内径が R_e の円環状領域に等 しいので, $Re = \sqrt{2/\pi R_a}$ となる.

3.4 節までで議論した領域は,図5における円板状 部分に相当する.そこで,円板状部分の外周部 $r = R_e$ での温度 T_e を次のように求め,式(20)に加える.内 部発熱部分から熱伝導部分への熱伝達なので領域Bの 議論と同様であり,円環部分内側 $r = R_e$ における熱 流束は $\frac{1}{2}\dot{q_p}R_e$,円環部分外側 $r = R_a$ での温度が一 定(T_a)なので,

$$T_{e} = -\frac{q_{p}}{4\lambda} R_{e}^{2} \ln \left(R_{e} / R_{a} \right)^{2} + T_{a}.$$
 (21)

これを式 (20) に加えて,最終的なウェーハ中心温 度の予測式を得る.

$$T_{all}(0) = \frac{\dot{q_v}}{4\lambda} \left[R_e^2 \left\{ 1 - \ln(R_e/R_a)^2 \right\} + \frac{N_a}{N_t} \frac{L^2}{\pi} \cdot \sum_{j=1}^{N_i} \left\{ \ln(r_c^{(j)}/R_e)^2 - 1 \right\} \right] + T_a (22)$$

4. 温度予測モデルの評価

4.1 シミュレーション条件

本章では,スタック内の最高温度について,提案す る温度予測モデルを差分法による熱伝導シミュレー ションの結果と比較する.シミュレーションの手法は



差分法^{13),15)}を用い,条件としてウェー八の素材にSi を想定,熱伝導率はSiと同じ値($\lambda = 168.0(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$)を用いた.また,周囲温度 T_a は 25° Cとした.PEの発熱量は,画像処理システムなどに用いられる組み込みCPUや,コンピュータシステムで最も多数を占める D-RAM チップの消費電力が0.5W以下であるため,1PE あたりの発熱量を0.5Wと仮定する.この条件のもとで次の3つのケースについて比較した.

	アレイサイズ	各 PE の大きさ	ウェーハ直径
1.	14×14	$10\mathrm{mm}\times10\mathrm{mm}$	$195\mathrm{mm}$
2.	14×14	$5\mathrm{mm} \times 5\mathrm{mm}$	$92.5\mathrm{mm}$
3.	28×28	$5\mathrm{mm} \times 5\mathrm{mm}$	$195\mathrm{mm}$

ケース2はケース1に対してアレイサイズは同じで各 PEの面積を1/4倍(ウェーハ面積も1/4倍)にした 場合,ケース3はケース2に対して各PEの面積は同 じでアレイサイズを4倍(ウェーハ面積も4倍)にし た場合,ケース1はケース3に対してウェーハ直径は 同じで各PEの面積を4倍,アレイサイズを1/4倍し た場合に相当する.熱伝導シミュレーションにおける 計算量が膨大となるため,中心の1枚のウェーハにつ いて二次元的に解析を行った.

4.2 ランダム PE 配置の温度

図6にウェーハ内にランダムに休止 PEを配置した ときの休止 PE の個数に対するスタック内最高温度を 示す.モデルによる予測温度とは,ランダムな位置で 所定の数量の休止 PEを有するウェーハに,式(22)を 適用して予測した温度である.一方,シミュレーショ ンによる温度とは,スタック内の動作 PEを発熱部分, 休止 PEを非発熱部分として,差分法^{13),15)}による熱 伝導シミュレーションを行ったときの内部最高温度で ある.ランダムに休止 PEを配置した場合,休止 PE



図7 モデルとシミュレーションによるウェーハ内温度分布の差 Fig.7 Temperature distribution between model and simulation.

の増加に従ってスタック全体の平均消費電力が低下す るため,内部温度は低下する.この低下の度合いはモ デルによるものと熱伝導シミュレーションの結果が一 致している.両者の差は,最大で28×28の場合,108 個の休止PEがあるときで6.5度(誤差は1.2%)で ある.

図 7 に , ケース 1 でランダムな位置に 44 個の休 止 PE を配置した場合のウェーハ断面温度を示す.温 度予測モデルでは,休止 PE が均一に配置されている ものと仮定し, q_p を $rac{N_a}{N_t}q_p$, $r_1=r_2$ として式 (13), (14), (15) および式 (21) に従って計算した.シミュ レーションでは,円盤状のウェーハに正方形に配置さ れた PE アレイが搭載されるため,水平方向と対角方 向の2通りのウェーハ断面を示した.このため,シ ミュレーションの水平方向断面と対角方向断面を比べ ると,水平方向断面はウェーハの外側部分に PE が配 置されないので,半径が±0.80のとき,わずかに温 度が低くなっている.モデルとシミュレーション間で は若干の温度差があるが,この原因は,モデルでは休 止 PE の中心からの距離のみで温度を予測しており, 二次元的な位置は考慮されていないのに対し,シミュ レーションでは休止 PE の配置の偏りも反映してしま うためである.また,モデルとシミュレーションの最 大温度差は、半径が +0.60 のとき、対角断面に対し て 4.9 度である .

4.3 PE 配置に対する温度

次に,休止 PEを人為的に配置した場合のスタック 内温度について評価する.ウェーハ上の休止 PEの位



Fig. 8 Coordinates for PEs.

表1 形状パラメータ Table 1 Location definition

Location Type	Location of Idle PEs	
Diagonal04	$(P \le x \le P + 1) \cap (P \le y \le P + 1)$	
Diagonal16	$(P \le x \le P + 3) \cap (P \le y \le P + 3)$	
Cluster12	$(x \le 2) \cap (P \le y \le P + 2)$	
Cluster24	$(x \le 3) \cap (P \le y \le P+3)$	
SingleBing	$((x \le P) \cap (y = P))$	
Singleiting	$\cup((x =P)\cap(y \leq P))$	
	$((x \le P) \cap (y = P))$	
DoubleBing	$\cup((x =P)\cap(y \leq P))$	
Doubletting	$\cup ((x \le S - P) \cap (y = S - P))$	
	$\cup((x = S - P) \cap (y \le S - P))$	
S = PE Array Size (14 or 28) + 1		

置を示すために,図8に示すような PE の座標系を 導入する.PE の座標を [x,y]で表し,ウェーハ中心 を [0,0]とする.ただし,PE 構成で奇数 × 奇数は一 般的ではないため,x = 0,y = 0のラインは用いず, 中心部分の4つの PE を [1,1],[1,-1],[-1,1],[-1,-1]とする.表1に評価に用いた休止 PE の配置を示す. Pをパラメータとして,表中の式を満たす PE を休 止 PE とする.この定義に基づく PE 配置の例を図8 に示す.たとえば Diagonal04 で P = 3の場合,図8 の斜線部分の PE のように,各象限ごとに 2×2 のブ ロック,合計 16PE が休止 PE となる.DoubleRing を除いて,Pが小さいと休止 PE がウェーハ内部に配 置される.

図9にケース1,図10にケース2,図11にケース 3の,モデルによる予測温度と熱伝導シミュレーション による内部最高温度を示す.図中,実線がモデルによ



図 9 休止 PE の位置によるモデルとシミュレーションの温度差, 14 × 14,195 mm





 14×14 , 92.5 mm

Fig. 10 Temperature between model and simulation by idle PE location, 14×14 , 92.5 mm.

る予測温度,破線が熱伝導シミュレーションによる内 部最高温度である.SingleRingは,円環状に休止PE を配置している.グラフに示されるように,モデルも シミュレーションも両端が上昇するカーブを描いてい る.P が小さいと休止PEの個数が少ないため,ス タック全体の温度が高い.P が大きくなるにつれ,円 環の周が大きくなり休止PEの個数が増加するため温 度が低下するが,さらにPが大きくなると,休止PE





Fig. 11 Temperature between model and simulation by idle PE location, 28×28 , 195 mm.

が動作 PE を取り囲むようになるため,放熱の妨げと なり,スタック内の温度は再び上昇する. P が大きく なると両者の誤差は大きくなるが,ケース1,ケース 2 では最低温度を与える P はモデルでもシミュレー ションでも同一 (P = 4)である.また,このときの温 度の差はそれぞれ 0.9 度,2.3 度であった.ケース 3 では,最低温度を与えるのは,モデルでは P = 8 と なるのに対して,シミュレーションでは P = 7であ る.しかしながら,シミュレーションにおける P = 7と P = 8 のときの温度差は 0.4 度であり,モデルに よって得られた P = 8 を用いたとしても,その影響 は十分許容できるものである.

Cluster12, Cluster24は, それぞれ4×3,6×4の 休止PEクラスタをyが正の領域のみの1カ所に生成 させた場合である.モデルではどの方向も均一な休止 PE配置であることを仮定してウェーハ中心の温度で 評価しているが,これらの配置では休止PEが偏って いるため,最高温度となる領域が中心から外れ,モデ ルでは温度予測がしにくい配置である.休止PEクラ スタがどの位置にあっても,モデルとシミュレーショ ンの差はほぼ一定しており,両者の温度差はケース1, 2,3でそれぞれ2.1度,3.3度,2.0度であった.

Diagonal04, Diagonal16, および DoubleRing で は,休止 PE の位置によってモデルとシミュレーショ ンの誤差が変化するが,いずれの場合にも温度差は数 度以内であり,誤差は十分小さい.

4.4 計算速度

次に応用例として,本モデルを用いて冗長 PEの初



図 **12** PE 初期位置の最適化手順

Fig. 12 Procedure of optimizing initial PEs replacement.

期配置の最適化を行い,計算速度を評価する.ウェー ハスタックに用いられる各ウェーハ上には,表面に発 生する欠陥を救済するため,冗長 PE が配置される. 欠陥 PE 救済のための再構成手法として様々な方法が 提案されているが¹⁰⁾,その前段階として,再構成の開 始時点での冗長 PE 初期配置の最適化を本温度予測モ デルを用いて行う.

図 12 に冗長 PE 初期配置の最適化の手順を示す. PE の機能を隣接する PE に論理的に移すことをシフトと呼ぶ.最適化では,図 12 に示すように,最初に 冗長 PE を含む PE アレイが与えられる.この中から 任意の PE を取り出し,東西南北のランダムな方向に シフトする.この結果,温度がシフト前よりも低下す れば,シフト後の配置を次のループの初期配置とし, そうでなければシフト結果を破棄する.十分な回数繰 り返すと,温度がほぼ一定の安定状態となるので,こ の時点で終了とする.なお,この評価では欠陥 PE は 存在しないものとし,欠陥 PE の回避については別の 文献で議論する¹⁰⁾.

図 13 に最適化過程での温度変化を,また図 14 に 最適化途中での PE 配置を示す.図 13,図 14 に示さ れるように,どの PE アレイに関してもステップが進 むにつれ動作 PE が外側に移動し,スタック内温度が 低下する.温度低下の度合いと傾向はモデルとシミュ レーションで一致している.絶対値については温度予 測モデルと熱伝導シミュレーション間で差があるが, 収束後の温度差は,ケース1,2,3 でそれぞれ 12.1 度,11.0度,5.2 度である.

1 タイムステップあたりの所用時間は,温度予測モ デルを用いた場合,Sun Ultra5 ワークステーションを







Fig. 14 PE location while optimizing idle PEs placement.

用いて,ケース1,2,3 でそれぞれ 0.39 ミリ秒,0.59 ミリ秒,および 1.01 ミリ秒であるのに対し,熱伝導 シミュレーションでは,超並列計算機 T3E-1200E を 用いて 2,879 秒,267 秒,3,436 秒であった.温度予 測モデルを用いることにより,およそ 10⁶ 倍程度の高 速化が可能である.

5. 結 論

本論文では,ウェーハスタック実装の温度予測モデ ルについて議論した.最初に温度予測モデルのター ゲットとなるウェーハスタック実装の構成と冷却モデ ルを説明し,この冷却モデルに基づきウェーハ内温度 を求める手法を近似を用いて解析的に導出した.提案 した温度予測モデルの有効性を評価するため,スタッ ク内の様々な位置に休止 PE を配置し,その温度に 関して温度予測モデルの予測値と差分法熱伝導シミュ レーションの結果を比較したところ,モデルによる予 測温度と熱伝導シミュレーションでの温度の差は数度 以内であり, PE 配置による温度の増減傾向はモデル とシミュレーションで一致した.円環状に休止PEを 配置した場合,最低温度が得られる円環の半径は,モ デルと熱伝導シミュレーションとではほぼ同じ半径と なることが分かった.応用例として, 冗長 PE の最適 配置化問題に温度予測モデルを適用したところ,温度 低下の傾向はシミュレーションと一致し,温度誤差は 10 度前後で,計算時間は 10⁶ 倍程度高速化できた.

今後はスタックの積層方向への熱伝導を含めた三次 元モデルへの拡張,および本温度予測モデルを用いて より効率的な冷却アルゴリズムの開発を行う予定で ある.

参考文献

- Little, M.J. and Grinberg, J.: The 3-D Computer: An Intergrated Stack of WSI Wafers, *Wafer Scale Integration*, pp.253–318 (1989).
- Wojnarowski, R.J., et al.: Three Dimensional Hybrid Wafer Scale Integration Using the GE High Density Interconnect Technology, *International Conference on Wafer Scale Integration*, pp.309–317 (1993).
- Campbell, M.L. and Toborg, S.T.: 3D Wafer Stack neurocomputing, *International Confer*ence on Wafer Scale Integration, pp.67–74 (1993).
- Carson, J.: The Emergence of Stacked 3D Silicon and its Impact on Microelectronics System Integration, *IEEE Int'l Conf. on Innova*tive Systems in Silicon, pp.1–8 (1996).
- Kurino, H., et al.: Three-Dimensional Integration Technology for Real Time Micro-vision Systems, *Int'l Conf. on Innovative Systems in Silicon*, pp.203–212 (1997).
- 6) Jain, V.K. and Horiguchi, S.: VLSI Considerations for TESH: A New Hierarchical Interconnection Network for 3D Integration, *IEEE Trans. VLSI Systems*, pp.346–353 (1998).
- 三浦康之,堀口 進,Jain, V.K.: 階層型ネットワーク TESH におけるデッドロックフリー・ ルーティング,情報処理学会論文誌,Vol.41, No.5, pp.1370–1378 (2000).

Vol. 44 No. SIG 7(TOM 8)

- 8) Fan, M., Plante, J. and Shaw, H.: Thermal characterization for a modular 3-D multichip module, *ITHERM 2000, The 7th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in ElectronicSystems*, pp.277– 282, IEEE (2000).
- 9) Inoguchi, Y., Matsuzawa, T. and Horiguchi, S.: An Optimal Replacement Policy for Cooling of 3D Stacked Mesh Array, *IEEE High Performance Computing in Asia-Pacific Region*, Vol.2, pp.1087–1096, IEEE Computer Society Press (2000).
- 10) 井口 寧, 松澤照男, 堀口 進: 重み付けシフ トによる格子結合型ウェーハスタック実装の放熱 と再構成,情報処理学会研究報告,2001-HPC-85, pp.13-18 (2001).
- 内角哲人,堀口 進:階層型相互結合網 BCT の理論的性能,情報処理学会研究報告,99-ARC-132-2, pp.7-12 (1999).
- 12) Chandra, A. and Melhem, R.: Reconfiguration in 3D Meshes, International Conference on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems, pp.194–202, IEEE Computer Society Press (1994).
- Holman, J.P.: *Heat Transfer*, 9th edition, pp.1–130, Mc Graw Hill (2002).
- 14) 武山斌郎,大谷茂盛,相原利雄:伝熱工学, pp.36-58, 丸善(1983).
- 15) 日本機会学会(編):流れの数値シミュレーション, pp.56-93, コロナ社 (1988).

(平成 14 年 4 月 12 日受付)
(平成 14 年 6 月 10 日再受付)
(平成 14 年 10 月 17 日再々受付)
(平成 14 年 11 月 19 日採録)

井口 寧(正会員) 1991 年東北大学工学部機械工学 科卒業.1994 年~1997 年日本学術 振興会特別研究員.1997 年北陸先 端科学技術大学院大学情報科学研究 科博士後期課程修了.現在,同大学

院情報科学センター助手.また,2002年から科学技 術振興事業団さきがけ研究21(機能と構成)に参加 し研究に従事.この間並列システムに関する研究を行 う.IEEE 会員,電子情報通信学会各会員.



松澤照男(正会員)

1948年生.1973年信州大学大学 院工学研究科修士課程修了.同年信 州大学医学部助手.1986年沼津工業 高等専門学校助教授.1991年北陸先 端科学技術大学院大学助教授.1995

年同教授 . 数値流体力学における並列計算の研究に従 事 . 医学博士 . 日本機械学会 , 日本数値流体力学会 , 日本流体力学会等各会員 .



堀口 進(正会員)

1952年生.1976年東北大学工学 部通信工学科卒業.1981年同大学大 学院博士課程修了.1982年東北大学 工学部情報工学科助手.1989年同助 教授.1992年北陸先端科学技術大学

院大学・情報科学研究科教授.この間,並列処理,超 並列システム,ウェーハ規模集積システム,並列アル ゴリズム,マルチメディア統合システムに関する研究 を行う.1986年6月~1987年7月米国 IBM ワトソ ン研究所・客員研究員として並列計算アルゴリズムの 研究に従事.IEEEシニア会員,電子情報通信学会, 情報理論とその応用学会各会員.