

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
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/3315
Rights	<p>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(SIG07), 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 (IPJSJ). This material is published on this web site with the agreement of the author (s) and the IPJSJ. Please be complied with Copyright Law of Japan and the Code of Ethics of the IPJSJ 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.</p>
Description	

ウェーハスタック実装の温度予測モデル

井 口 寧^{†,††} 松 澤 照 男[†] 堀 口 進^{†††}

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 10^6 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 and of the thermo-conducting simulation, the proposed thermal 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)を搭載し、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

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、システム的大幅な高速化、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

†† 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

††† 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

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搭載し、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

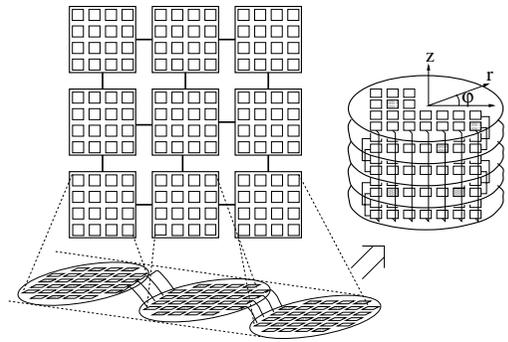


図 1 ウェーハスタック実装の概念図

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、いったんウェーハ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ハ間結合のコストが大きいと、ウェーハ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、各ウェーハ上に構築された格子網を、上位網であるウェーハ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ハ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 $125 \sim 150^\circ\text{C}$ 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免的に発生する表面欠陥が原因とする、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

パーク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。

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

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、

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

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

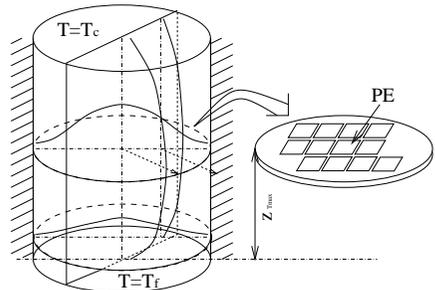


図 2 ウェーハスタックの温度分布
Fig. 2 Thermal distribution in a wafer stacked implementation.

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)}。

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

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。

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

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} のウェーハ面内の 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少し進め、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 $T(r, \varphi)$ 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 が均一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、

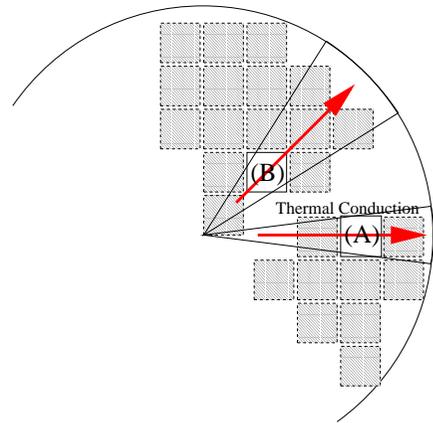


図 3 ウェーハスタックの発熱モデル

Fig. 3 Heat generation model of wafer stacked implementation.

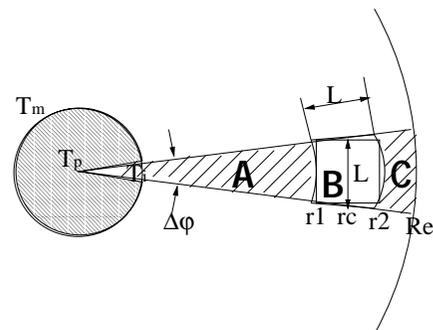


図 4 休止 PE を含む扇形領域の発熱モデル

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、ウェーハ各部分で均一に休止 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られる。

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．

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

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 \dot{q}_v に対し， \dot{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．

$$\dot{q}_v = \begin{cases} 0 & \text{if PE = idle (Area B)} \\ \dot{q}_p & \text{if PE = active (Area A, C)} \end{cases} \quad (6)$$

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 T_1 と置くと，

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=0} = 0 \quad (7)$$

$$T(r_1) = T_1. \quad (8)$$

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．

$$\dot{Q}_A = \frac{1}{2} \dot{q}_p r_1^2 \Delta\varphi w \quad (9)$$

$$-\lambda \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_1} = \frac{\dot{Q}_A}{r_1 \Delta\varphi w} = \frac{1}{2} \dot{q}_p r_1 \quad (10)$$

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．

$$-\lambda \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_2} = \frac{\dot{Q}_A}{r_2 \Delta\varphi w} = \frac{1}{2} \dot{q}_p \frac{r_1^2}{r_2} \quad (11)$$

$$T(R_e) = T_e \quad (12)$$

扇形領域の温度

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．

$$T(r) = \frac{\dot{q}_p}{4\lambda} (r_1^2 - r^2) + T(r_1) \quad (13)$$

($0 \leq r < r_1$)

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

($r_1 \leq r < r_2$)

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

($r_2 \leq r \leq R_e$)

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．

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

次に，図 4 に示した扇型に仮定した PE を，実際のウェーハ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．

$$T_i(0) = \frac{\dot{q}_p}{4\lambda} \left[R_e^2 + 2r_c L \left\{ \ln(r_c/R_e)^2 - 1 \right\} \right] + T_e \quad (17)$$

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。

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

3.4 ウェーハ中心温度

ここまで求めた $T_i(0)$, $T_p(0)$ 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。

$$\begin{aligned} T_m(0) &= \frac{\Delta\varphi}{2\pi} T_i(0) + \left(1 - \frac{\Delta\varphi}{2\pi}\right) T_p(0) \\ &= \frac{q_v}{4\lambda} \left[R_e^2 + \frac{L^2}{\pi} \left\{ \ln(r_c/R_e)^2 - 1 \right\} \right] + T_e \end{aligned} \quad (19)$$

式 (19) より、扇形領域の中心温度 $T_m(0)$ 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) をウェーハ内に複数の休止 PE がある場合に拡張する。線型系なので重ね合わせができ、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ハ全体の中心温度を求める。 $r_c^{(j)}$ を j 番目の休止 PE のウェーハ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。そこで重ね合わせの際に全 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。

$$\begin{aligned} \bar{T}_m(0) &= \frac{q_v}{4\lambda} \left[R_e^2 + \frac{N_a}{N_t} \frac{L^2}{\pi} \right. \\ &\quad \left. \sum_{j=1}^{N_i} \left\{ \ln(r_c^{(j)}/R_e)^2 - 1 \right\} \right] + T_e \end{aligned} \quad (20)$$

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搭載されるため、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

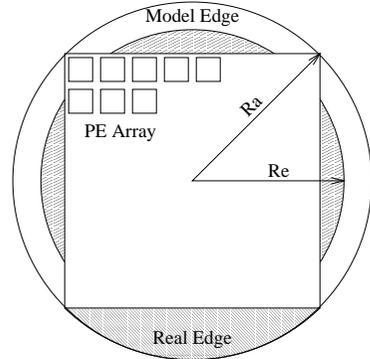


図 5 エッジの熱伝導モデル

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ハ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、 $R_e = \sqrt{2/\pi} R_a$ 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 $\frac{1}{2} q_p R_e$, 円環部分外側 $r = R_a$ での温度が一定 (T_a) なので、

$$T_e = -\frac{q_p}{4\lambda} R_e^2 \ln(R_e/R_a)^2 + T_a. \quad (21)$$

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。

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

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

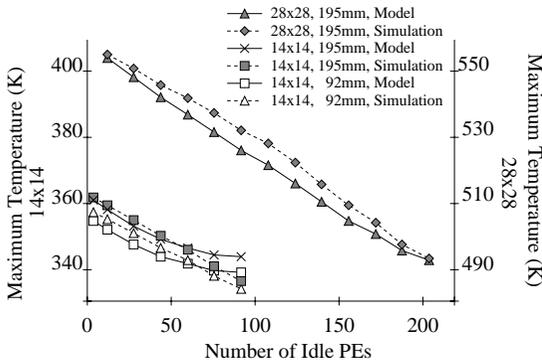


図6 休止PEの個数に対するスタック内最高温度
Fig. 6 Maximum temperature for # of idle PEs.

差分法^{13),15)}を用い、条件としてウェーハの素材に 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 $25^\circ C$ 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 $0.5 W$ 以下であるため、1PE あたりの発熱量を $0.5 W$ 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。

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

ケース 2 はケース 1 に対して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、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

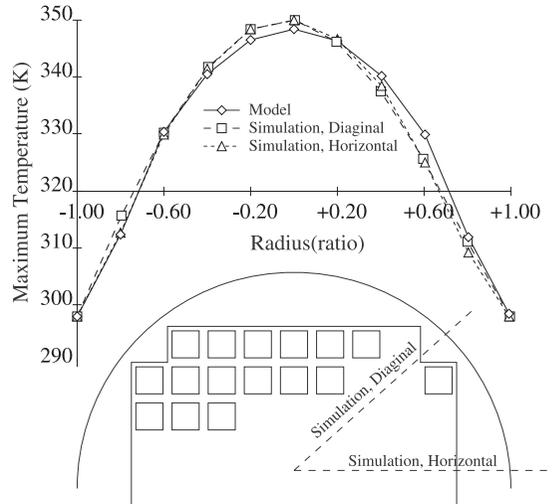


図7 モデルとシミュレーションによるウェーハ内温度分布の差
Fig. 7 Temperature distribution between model and simulation.

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 $\frac{N_a}{N_t} q_p$, $r_1 = r_2$ 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 が配置されないため、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

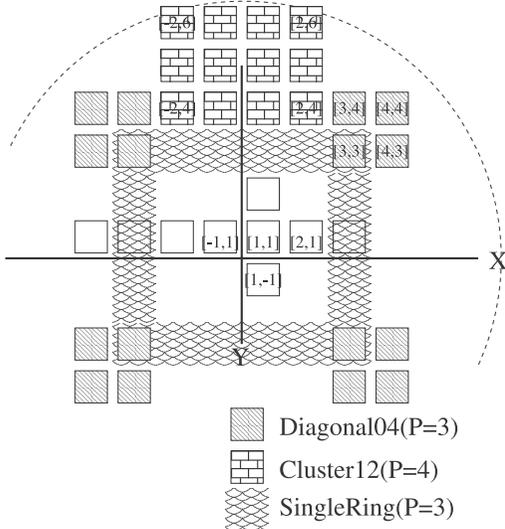


図8 PEの座標系

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	$(P \leq x \leq P + 1) \cap (P \leq y \leq P + 1)$
Diagonal16	$(P \leq x \leq P + 3) \cap (P \leq y \leq P + 3)$
Cluster12	$(x \leq 2) \cap (P \leq y \leq P + 2)$
Cluster24	$(x \leq 3) \cap (P \leq y \leq P + 3)$
SingleRing	$((x \leq P) \cap (y = P)) \cup ((x = P) \cap (y \leq P))$
DoubleRing	$((x \leq P) \cap (y = P)) \cup ((x = P) \cap (y \leq P)) \cup ((x \leq S - P) \cap (y = S - P)) \cup ((x = S - P) \cap (y \leq S - P))$

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、実線がモデルによる

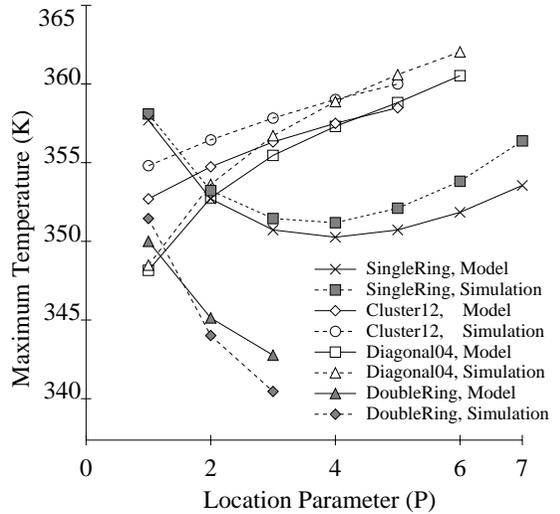


図9 休止PEの位置によるモデルとシミュレーションの温度差、14×14、195mm

Fig. 9 Temperature between model and simulation by idle PE location, 14×14, 195mm.

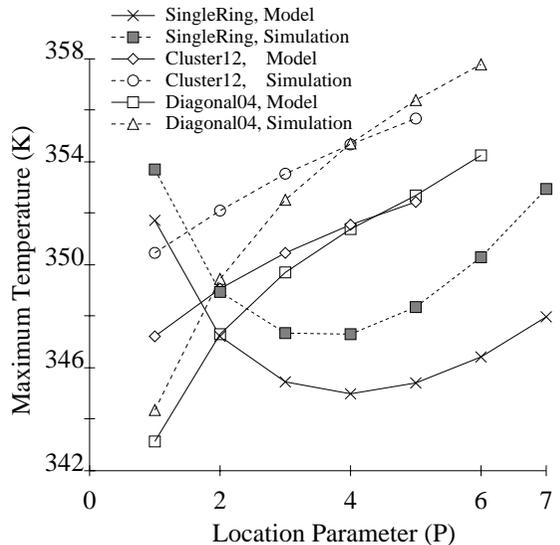


図10 休止PEの位置によるモデルとシミュレーションの温度差、14×14、92.5mm

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

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

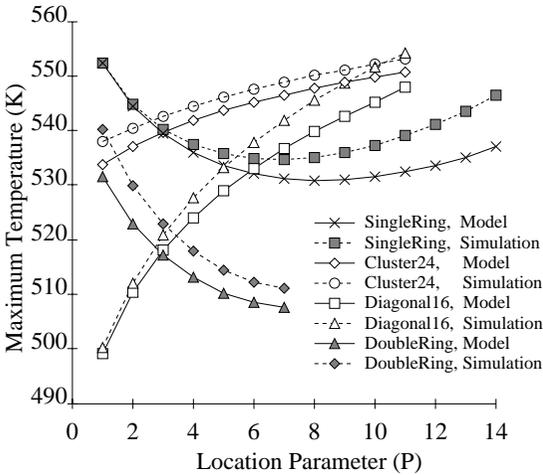


図 11 休止 PE の位置によるモデルとシミュレーションの温度差, 28 × 28, 195 mm

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

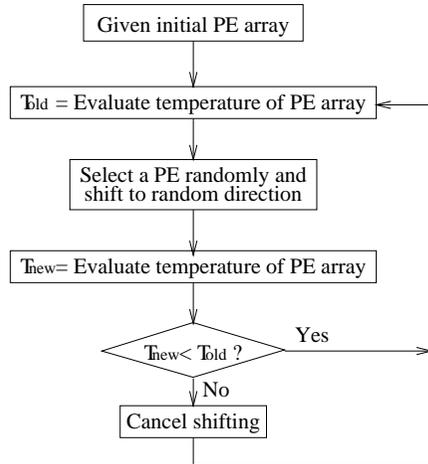


図 12 PE 初期位置の最適化手順

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

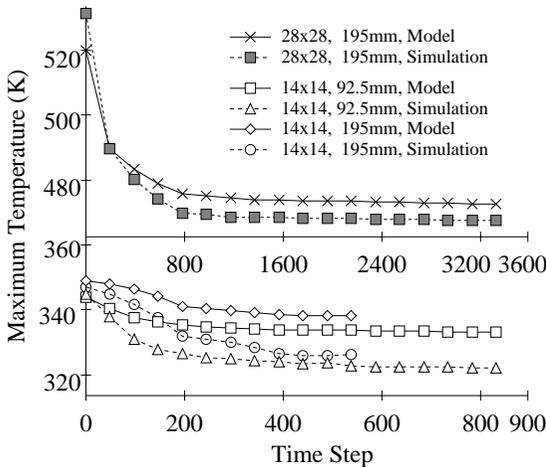


図 13 PE 初期位置の最適化過程
Fig. 13 Temperature while optimizing idle PEs placement.

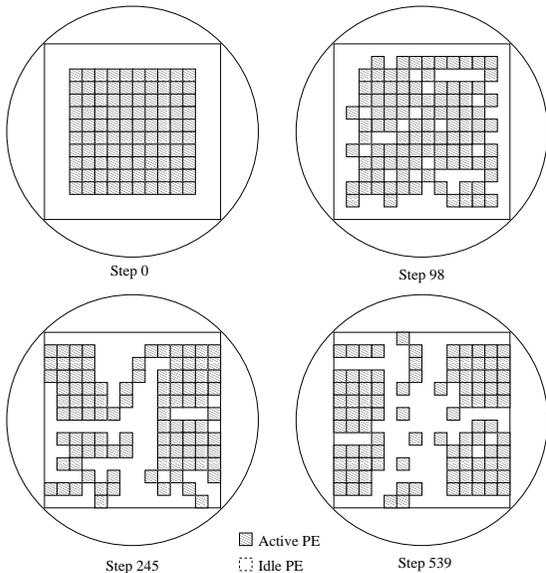


図 14 休止 PE 位置最適化途中の PE 配置

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 10^6 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 10^6 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

- 1) Little, M.J. and Grinberg, J.: The 3-D Computer: An Intergrated Stack of WSI Wafers, *Wafer Scale Integration*, pp.253-318 (1989).
- 2) 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).
- 3) Campbell, M.L. and Toborg, S.T.: 3D Wafer Stack neurocomputing, *International Conference on Wafer Scale Integration*, pp.67-74 (1993).
- 4) Carson, J.: The Emergence of Stacked 3D Silicon and its Impact on Microelectronics System Integration, *IEEE Int'l Conf. on Innovative Systems in Silicon*, pp.1-8 (1996).
- 5) 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).
- 7) 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).

- 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 Electronic Systems*, 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).
- 11) 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).
- 13) 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。