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

Title	温度予測モデルを用いた重み付けシフトによるウェーハスタック実装の放熱
Author(s)	井口,寧; 松澤,照男; 堀口,進
Citation	情報処理学会論文誌, 44(SIG14): 81-90
Issue Date	2003-11
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/3313
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(SIG14), 2003, 81-90. 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	

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

温度予測モデルを用いた重み付けシフトによるウェーハスタック実装の放熱

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による格子結合型マルチプロセッサの冷却を考慮した再構成方式を提案する．ウェーハスタック実装は，ウェーハ規模のプロセッシング要素（PE）アレイを3次元的に積層して構築され，システムの高速化，省電力化，コンパクト化が期待できる実装方式の1つであるが，中心部にあるPEの冷却や，各ウェーハ表面の欠陥の回避などが大きな問題となっている．欠陥回避のために，あらかじめ予備のPEを設けておき，網を再構成することによって，論理的に欠陥のない格子網を得る方法が従来から提案されているが，本論文では，予備PE選択の際に温度予測モデルを導入し，スタック内温度を低くできるPEを選択することによって，網の再構成とスタックの冷却を同時に行うことを試みる．初期PEの配置として予備PEをウェーハ中心に集める方式，および，PEの移動手法として温度予測モデルを用いて温度が低くなる方向にPEを移動する方式を提案する．2つの手法について，システム全体の歩留まりとウェーハスタック内の最高温度，および冷却性能のばらつきを熱伝導シミュレーションによって評価した．その結果，予備PEをウェーハ中心部に配置すると，PE歩留まりが高い場合にスタック全体の温度を大きく低下できた．温度予測モデルに基づいた重み付きシフトは，システム歩留まりを損なうことなく，従来手法よりも最大で約9%温度を低くすることができた．

Biased Shifting Cooling Scheme for 3D Stacked Mesh Array Using Temperature Estimation Model

Yasushi Inoguchi,[†,††] Teruo Matsuzawa[†] and Susumu Horiguchi[†††]

This paper addresses a cooling scheme for 3D stacked mesh array. A 3D stacked implementation consists of a pile of wafers and each wafer contains a processing elements (PEs) array. It is one of good candidates to implement a large scale system with high speed, low power consumption and tight integration. However, cooling of PEs at the center of a stack and avoiding defects on a wafer surface are crucial problems. To avoid these defective PEs, conventional methods obtain a defect free logical mesh network by preparing spare PEs on a wafer and reconfiguring the logical mesh network. This paper proposes biased shifting method as a improved the reconfiguration algorithm to cool the stack. The biased shifting determines a direction to lower temperature using the temperature estimation model, and it shifts defective PEs toward that direction keeping a logical network mesh connection in the stack. System yield, cooling performance, and stability of temperature are examined by thermo-conducting simulation. As the result, the concentrated spare PEs placement much reduces maximum temperature in the 3D stack at highly PE yield, and the biased shifting can lower temperature than conventional method keeping highly system yield.

1. はじめに

近年，大規模なシストリックアレイや画像処理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実装が提案され，様々な研究が行われている[1)~5)]．ウェーハスタック内部では，結線はすべてウェーハ上で完結するため，もしウェーハスタック実装でシステムを構築

† 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, Japan Advanced Institute of Science and Technology
†† 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, Japan Advanced Institute of Science and Technology

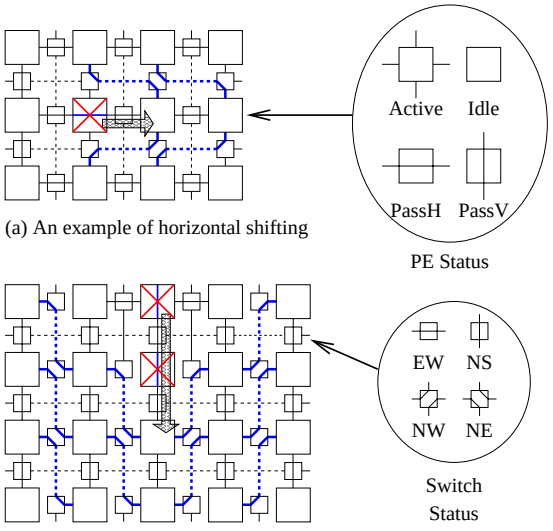
できれば，システム全体の高速化，省電力化，および小型化が期待できる．しかしながら，ウェーハスタック実装では，スタック内部の PE の発生する熱の放熱手段と，各ウェーハの製造時に発生する欠陥回避の問題が重要な問題となっている．

放熱の問題に対して，いくつかのシステムではスタックを貫通する熱伝導シャフトを内部に設け，このシャフトを通じて放熱する方法などが検討され，実際に試作システムが構築されている[1)~3)]．しかしながら，これらの試作システムの放熱性能は十分ではなく，実装されたシステムは直径 2〜3 インチの小規模なものである．ウェーハスタック実装は三次元構造を有するため，大消費電力の PE の実装は不向きであり，小規模な PE を多数結合するシステムに用いられる．その場合でも，放熱が効率良く行われれば，より高速で消費電力が大きいプロセッサを用いたり，いっそう大口径のウェーハを用いたシステムの大規模化が可能となる．

一方，ウェーハに発生する欠陥の回避方式に関しては，二次元および三次元の格子結合網について様々な研究がなされている[6),7)]．これらの多くでは，初期に動作すると仮定している PE の周囲に冗長な PE を配置し，ウェーハ表面の欠陥により動作しない PE の機能を冗長 PE で置き換え，網を再構成することにより論理的に欠陥のない格子結合網を得ている．

ところで，これらの欠陥回避のための予備の冗長 PE は，欠陥 PE の数が少なければ置き換えが行われず，使用されないままの PE が多数生じる．これらの使用されない PE は，電源供給を止めることにより発熱しないようにできるが，周囲の活動状態の PE にとっては，放熱する際の妨げとなる．そこで，欠陥 PE の置き換えに際して，活動状態の PE が放熱しやすい位置に，動作しない PE を配置することによって，ウェーハスタック内の温度を低下させることができる[8),9)]．また，筆者らは，ウェーハ上の PE 配置によって，スタック内の温度を予測する手法を提案した[10)]．本論文では，この温度予測を用いることによって，欠陥 PE の置き換えの際にスタック内温度が低くなるパターンを予測し，網の再構成と同時にスタックの冷却を行うことを狙う．

本論文の構成は次のとおりである．2 章で本論文で使用する基礎技術として，格子結合型マルチプロセッサの欠陥回避方式を紹介し，ウェーハスタックの構成法および温度予測モデルについて述べる．3 章で，具体的な冷却手法として，冗長 PE の配置方式，および欠陥回避の方向の重み付けによってウェーハスタック内の最高温度を低下させる手法について議論する．4 章で，提案した欠陥回避方式に関して，ウェーハスタックの再構成成功率とスタック内部最高温度，および冷却性能の安定性を評価する．5 章はまとめである．



(a) An example of horizontal shifting

(b) An example of two continuous defect avoidance.

図 1 格子結合網の欠陥回避の例
Fig. 1 Samples of shifting.

なお，ウェーハスタックは三次元構造を持つため，本来であれば三次元での解析を行うべきであるが，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，無限円柱モデルとして，中心の 1 枚のウェーハについて二次元的に解析を行う．

2. 欠陥回避アーキテクチャとウェーハスタック実装

2.1 欠陥回避アーキテクチャ

図 1 に，格子結合型マルチプロセッサシステムの欠陥回避可能なアーキテクチャを示す[6),7)]．網内には初期に動作すると仮定された PE と，欠陥 PE の機能を代行するための冗長 PE が配置される．各 PE は，動作状態（Active），休止状態（Idle），機能せず信号のみが通過する状態（PassH，PassV）の 4 つの状態をとることができるが，これらは PE の欠陥の有無とは関係なく設定できる．各 PE の周囲には，バイパスリンクとスイッチが置かれる．スイッチはバイパスリンクとともに PE 間の接続の方向を切り換えるために用いられ，PE の接続を通常の上下左右への接続から斜め上/下の PE への接続に切り換えることができる．この様子を図 1 に示す．欠陥回避をする必要がない場合，格子結合網は PE–スイッチ間の結線のみで構成できるが，欠陥 PE を回避するためには，スイッチ間を

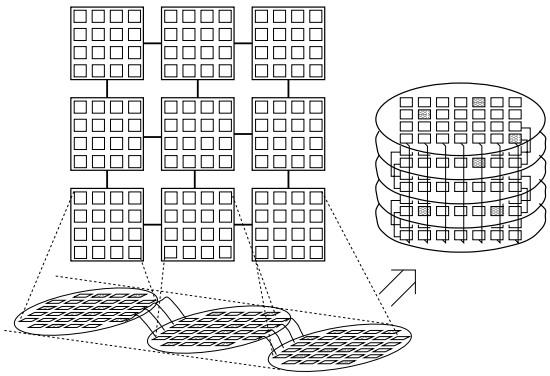


図 2 格子結合型マルチプロセッサのウェーハスタック実装
Fig. 2 Basic structure of 3D stacked mesh array.

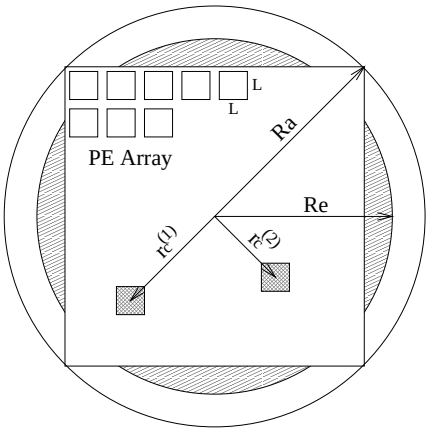


図 3 ウェーハスタックの温度予測モデル
Fig. 3 Temperature estimation model.

結合しているバイパスリンク（図中破線で表示）が使用される．図 1 のように，欠陥 PE を避けて隣接する PE に機能を代替することをシフトと呼ぶ．欠陥 PE が 2 つ続く場合でも，2 段階のシフト操作を行うことにより，欠陥を回避することができる．

上下左右どちらの方向にシフトするかを決定するアルゴリズムは，ウェーハ全体の歩留まりに大きく影響し，いくつかの方法が提案されている．Kung らはグラフ理論を用いた方法[6]を提案した．また，Numata らはローカル情報のみを用いてヒューリスティックに欠陥回避を行う方法（HS 法）[7]を提案し，高い再構成の成功率を得ている．そこで，本論文では HS 法をもとに，冷却性能を考慮した再構成アルゴリズムを提案する．

2.2 格子型ウェーハスタックの構成法

格子結合型ウェーハスタック実装の実装概念図を**図 2** に示す．それぞれのウェーハ上には実装すべき格子結合網のサブセットに加え，冗長 PE を配置する．ウェーハ上の欠陥 PE はウェーハ内部で再構成され，各ウェーハは，論理的に欠陥のない格子結合網のサブセットを構成する．これらの論理的に欠陥のないウェーハを縦方向に接続し，大規模な格子結合網を得ることができる．

2.3 ウェーハスタックの温度予測モデル

ここでウェーハスタックの冷却について考える．一般にシリコン半導体は，接合部温度がおよそ 125°C を超えると，熱によって非可逆的に破壊されてしまうため，動作状態においてもこの限界温度以下に保つ必要がある．一方，ウェーハスタック実装は，三次元実装構造を有しており，通常の放熱器などによる放熱が非常に困難である．そこで，効率の良い冷却手段が求められている．

スタック内には，前節で示したように多数の PE が配置されるが，それぞれの PE は，動作状態，欠陥状態，および休止状態の 3 つの状態のうちのいずれかである．このうち，動作状態の PE は，自己の動作熱によって発熱するが，欠陥 PE および休止 PE は，PE の電源を OFF にすることによって発熱しないようにできる．欠陥 PE は，ウェーハ表面の状態によって位置が固定されるが，動作 PE と休止 PE は，再構成によって位置を変化させることができる．放熱をウェーハスタックの周囲から行うならば，定性的には発熱部分（動作 PE）を周囲に配置し，非発熱部分（休止 PE）を中心に集めることにより，冷却効率を向上させることができる．再構成を行う際には，PE どうしは相互結合網で接続されているため，2.1 節で述べた再構成アルゴリズムに基づいて，PE 間結線を保ちながら移動する必要がある．そこで，再構成の際に温度予測モデルを導入し，再構成と同時に冷却性能も向上させようというのが本論文の試みである．

ウェーハスタック実装の温度予測モデルは，動作 PE と休止 PE の配置分布から，スタックの内部最高温度を近似して予測する[10]．モデルの前提条件として，円周の周囲からのみ放熱する無限円柱モデルを想定し，この結果軸方向の熱移動は考慮せず，半径方向の熱伝導によって放熱すると仮定する．スタック内のあるウェーハ 1 枚を取り出して，このウェーハ上の発熱 PE および休止 PE（欠陥 PE と使われない冗長 PE を含む）の位置によって，ウェーハ中心部の温度を予測する．**図 3** に，温度予測モデルにおけるパラメータの概略を示す．動作 PE の単位体積あたりの発熱量を $\dot{q}_v$，熱伝導率を λ，ウェーハの物理半径を R_a，PE アレイの面積を収容できる円板の半径を $R_e(=\sqrt{2/\pi}R_a)$，全 PE 数，動作 PE 数，および非動作 PE（休止 PE

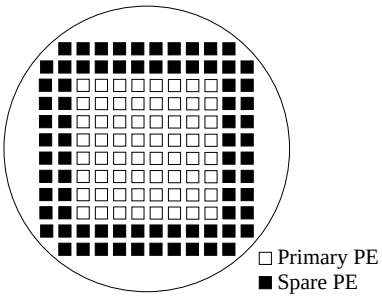


図 4 冗長 PE を周囲に配置する方式
Fig. 4 Dispersed spare PEs placement.

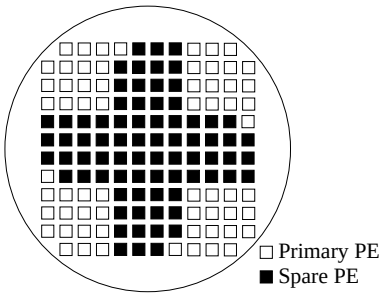


図 5 冗長 PE を中心部に配置する方式
Fig. 5 Concentrated spare PEs placement.

∪ 欠陥 PE）数をそれぞれ N_t，N_a，N_i，PE の 1 辺の大きさを L，j 番目の非動作 PE のウェーハ中心からの距離を $r_c^{(j)}$，周囲温度を T_a とする．本温度予測モデルでは，一般に温度が最も高温となる中心部の温度を次の式で近似することができる．

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

3. 冷却を考慮した再構成アルゴリズム

3.1 冗長 PE の配置方式

欠陥回避を開始する前の PE の初期配置について，冗長 PE を周囲に配置する方式と中心部に配置する方式が考えられる．この配置方式の違いについて，再構成の成功率とウェーハスタック内の最高温度について考察する．

冗長 PE をウェーハの周囲に配置する場合（**図 4**）は，初期に動作すると仮定している PE が配置されるウェーハ中心部の表面状態が良く，欠陥回避の際にどの方向にもシフト可能なので，高い再構成の成功率が期待できる．このため，HS 法をはじめ様々な再構成手法で用いられてきたが[5)~7)]，欠陥 PE が少なく PE の配置が初期配置からあまり変化しない場合，動作 PE がウェーハ中心部に集中するため，中心部の温度は高くなる．

そこで，本論文では冗長 PE を中心に配置する方法を提案する．**図 5** に提案する配置方式を示す．この配置では，発熱する PE が周囲に配置されるため，シフトがあまり行われない場合，中心部の冗長 PE が休止 PE として残され，ウェーハの内部温度を低くできることが期待される．その一方で，欠陥回避の際には，冗長 PE がウェーハの中心方向（上下左右の 4 方向のうち，2 方向）のみにしか存在しないため，シフトの方向中心方向に限定され，再構成の成功率は低下する可能性がある．

```
pattern DetermineShiftDirection(x, y){
  pattern W;
  r = random();     /* return between 0 ~ 1.0 */
  if( r < 0.25 )    W = Shift_PE(EAST, x, y);
  elsif( r < 0.50 ) W = Shift_PE(SOUTH, x, y);
  elsif( r < 0.75 ) W = Shift_PE(WEST, x, y);
  else              W = Shift_PE(NORTH, x, y);
  return( W );
}
```

図 6 HS 法におけるシフト方向の決定
Fig. 6 Shift determination based on HS algorithm.

3.2 シフト方向の重み付け

3.2.1 HS 法

次に動作 PE を移動する方向を決定するため，温度予測モデルに基づいたシフト方向の重み付けを提案する．欠陥回避の際のシフト方向を決定するためには，様々なアルゴリズムが提案されている．**図 6** に HS 法[7)]のシフト方向決定アルゴリズムを示す．HS 法は非常に高い再構成の成功率を得ることができるが，シフトの方向は乱数を用いて決定されており，外側，内側，左右それぞれにシフトする確率はすべて等しく 0.25 である．

3.2.2 温度予測モデルに基づくシフト方向の重み付け

そこで，冷却効率を高めるために，温度予測による重み付けシフトを考える．**図 7** に，温度予測による重み付けシフトのアルゴリズムを示す．最初に，回避すべき欠陥 PE の座標 (x, y) に対して，東西南北それぞれの方向に仮にシフトしたウェーハの PE 配置パターン W_e，W_w，W_s，W_n を得る．それぞれのパターンには，動作 PE の位置と非動作 PE の位置が含まれるので，各パターンについて，温度予測の式 (1) を適用することにより，東西南北それぞれの方向にシフトした場合の温度の期待値（T_e，T_w，T_s，T_n）が予測で

```
pattern TempEstimatedShiftDirection(x, y){
  pattern W;
  W_n = Shift_PE(NORTH, x, y);
  W_s = Shift_PE(SOUTH, x, y);
  W_e = Shift_PE(EAST, x, y);
  W_w = Shift_PE(WEST, x, y);
  T_n = TemperatureEstimate(W_n);
  T_s = TemperatureEstimate(W_s);
  T_e = TemperatureEstimate(W_e);
  T_w = TemperatureEstimate(W_w);
  T_max = MAX(T_n, T_s, T_e, T_w);
  T_min = MIN(T_n, T_s, T_e, T_w);
  ΔT = T_max − T_min;
  σ^2 = ΔT · β_t;
  T_n = RegRand(T_n, σ^2);
  T_s = RegRand(T_s, σ^2);
  T_e = RegRand(T_e, σ^2);
  T_w = RegRand(T_w, σ^2);
  if( T_n == MIN(T_n, T_s, T_e, T_w))
      return( W_n );
  elsif( T_s == MIN(T_n, T_s, T_e, T_w))
      return( W_s );
  elsif( T_e == MIN(T_n, T_s, T_e, T_w))
      return( W_e );
  elsif( T_w == MIN(T_n, T_s, T_e, T_w))
      return( W_w );
}
```

図 7 温度予測によるシフト方向の決定
Fig. 7 Shift direction determination of biased shifting.

きる．次に，それぞれの温度の期待値に対して，乱数によってゆらぎを与える．ゆらぎを持つ温度の期待値を相互に比較し，温度が最低となる方向にシフトを実行したパターンを返し，関数を終了する．

ゆらぎは，再構成の解が局所解に陥らないために与える．関数 $RegRand(T, \sigma^2)$ は，平均が T で分散が σ^2 の分布を持つ乱数を返す関数であり，σ^2 は温度差 ΔT とシフト重み β_t の積として与える．このアルゴリズムでは，シフト方向を決定する要因として，温度と乱数がある．シフト重みが小さい場合には，温度がシフト方向の決定に支配的になり，温度が低くなる方向に確実にシフトできる反面，シフトの方向が固定化されてしまい，再構成の成功率が低下してしまう．HS 法が高い再構成の成功率を得ている理由は，柔軟なシフト方向の決定にあるので，温度以外に乱数の要素を加えることによって，再構成の成功率の向上を目指す．シフト重みを大きくすると，シフト方向の決定に際し乱数が支配的になり，再構成の成功率は高くなるが，必ずしも温度が低下できる方向にシフトできるとは限らず，冷却性能は低下する．

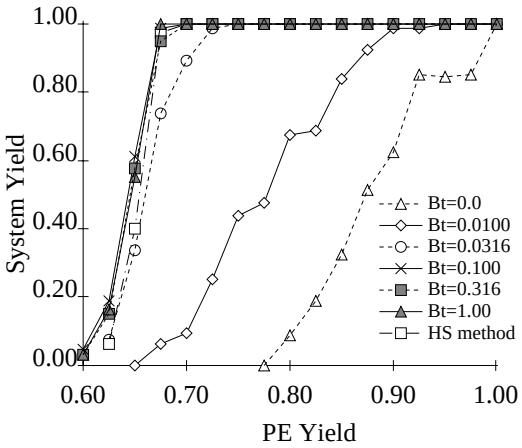


図 8 ウェーハ歩留まり．冗長 PE 周囲配置，$(10+4) \times (10+4)$
Fig. 8 System yields of dispersed spare PEs placement, $PESize = (10+4) \times (10+4)$.

4. 歩留まりとスタック内最高温度

4.1 ウェーハ歩留まり

シフトの重み β_t を変化させたときのウェーハ歩留まりを評価した．ここで，ウェーハ歩留まり（Y_w）はウェーハ 1 枚あたりの再構成の成功率，PE 歩留まりは再構成前の任意の PE が正常に動作する確率とする．スタック全体としての歩留まり（スタック歩留まり）は，スタックの構成法によって異なる．ウェーハごとの再構成終了後に正常なウェーハのみを用いてスタックを構築する場合では，スタック歩留まりはウェーハ歩留まりに等しい．また，ウェーハを積層後に再構成を行う場合では，N 層のスタック歩留まりは $(1-Y_w)^N$ となる．**図 8** は冗長 PE をウェーハ周囲に配置（図 4）しアレイサイズが $(10+4) \times (10+4)$，**図 9** は冗長 PE をウェーハ中心に配置（図 5）しアレイサイズが $(10+4) \times (10+4)$，**図 10** は冗長 PE をウェーハ周囲に配置しアレイサイズが $(16+4) \times (16+4)$，**図 11** は冗長 PE をウェーハ中心に配置しアレイサイズが $(16+4) \times (16+4)$ のときのウェーハ歩留まりである．アレイサイズが $(N+R) \times (N+R)$ のとき，$N \times N$ の初期 PE に対して，縦横 R 列ずつの予備 PE を設けている．なお，比較対象として，文献 7) にある HS 法のアルゴリズムを適用したときの歩留まりを掲載した．一般にウェーハスタック実装では，低い PE 歩留まりだと全体として利用可能な実装密度が低下し，高密度実装が可能である利点が損なわれるため，比較的高い PE 歩留まりが仮定される[6),7)]．PE 歩留まりは，PE 面積を小さくしたり，配線ルールを太くしたりすることによって制御することが可能であるが，その場

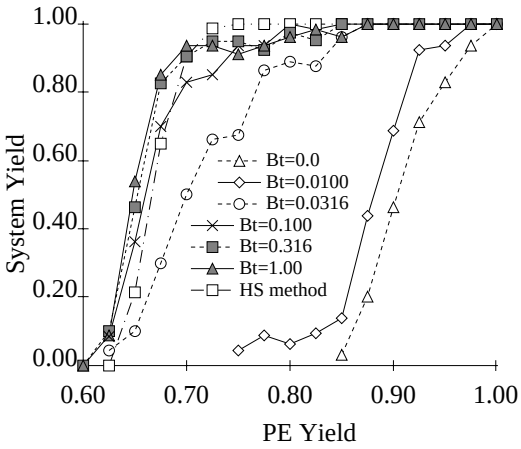


図 9 ウェーハ歩留まり．冗長 PE 集中配置，$(10+4)\times(10+4)$
Fig. 9 System yields of concentrated spare PEs placement, $PESize = (10+4)\times(10+4)$.

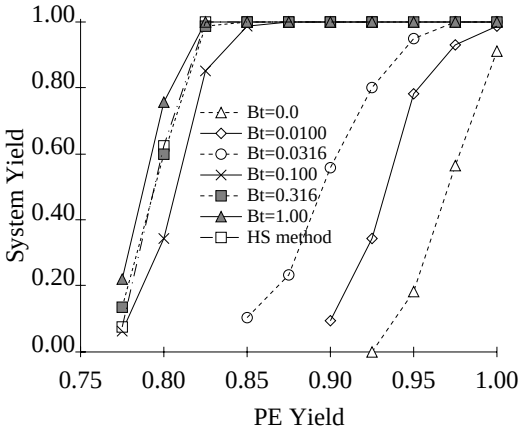


図 10 ウェーハ歩留まり．冗長 PE 周囲配置，$(16+4)\times(16+4)$
Fig. 10 System yields of dispersed spare PEs placement, $(16+4)\times(16+4)$.

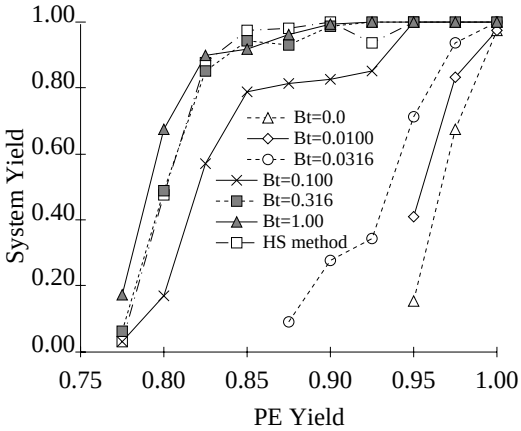


図 11 ウェーハ歩留まり．冗長 PE 集中配置，$(16+4)\times(16+4)$
Fig. 11 System yields of concentrated spare PEs placement, $(16+4)\times(16+4)$.

合でも，できるだけ低い PE 歩留まりで高いウェーハ歩留まりが得られれば，スタック歩留まりを高めることができる．

グラフより，冗長 PE の配置による違い（図 8 対図 9，図 10 対図 11）については，シフト重み β_t が十分大きく（$\beta_t \geq 0.1$），PE 歩留まりが十分高ければ，冗長 PE の集中配置方式でも周囲配置でも，おおよそ 100%に近いウェーハ歩留まりを得ることができる．しかし，β_t が等しい場合，周囲配置の方が集中配置よりもいっそう高いウェーハ歩留まりとなっている．また，PE 歩留まりがある程度高い場合（$(10+4)\times(10+4)$ のとき PE 歩留まり 0.75 付近）にも，集中配置の場合ではウェーハ歩留まりが 100%に達しにくい結果が得られた．これらの原因は，冗長 PE が内部にしか存在しないため，シフト可能な方向が限定され，冗長 PE の周囲配置では再構成可能な欠陥でも，冗長 PE を中心に置くことにより救済が不可能になったためと考えられる．

一方，ゆらぎに対するシフト重み β_t がウェーハ歩留まりに及ぼす影響は，β_t がおよそ 0.1 以上あれば，HS 法とほぼ同等のウェーハ歩留まりを得ることができ，どの場合もほとんど差がない結果が得られた．β_t がおよそ 0.1 以下になると，3.2 節で議論したように，シフトの方向が温度のみによって支配されるため，温度が高くなっても欠陥回避可能な方向へのシフトが制限され，ウェーハ歩留まりは急速に低下する．

4.2 スタック内最高温度

次に，ウェーハ内の最高温度を差分法による熱伝導シミュレーション[11]で求めた．この熱伝導シミュレーションの精度は，数パターンの熱分布に対して，解析的手法で求められる温度と比較検証済みである．

シミュレーションの条件として，ウェーハの素材は Si とし，熱伝導率などの物理定数は Si と同じ値を用いた．つまり，熱伝導率 $\lambda = 168.0(W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1})$，密度 $\rho = 2.34(\mathrm{g}\cdot\mathrm{cm}^{-3})$，比熱 $c = 22.1(J\cdot K^{-1}\cdot\mathrm{mol}^{-1})$ である．また，周囲温度は 25°C，PE アレイサイズが $(16+4)\times(16+4)$ のとき，1 つの PE の面積を 5 mm × 5 mm，ウェーハの直径は 140 mm とし，$(10+4)\times(10+4)$ のとき，1 つの PE の面積を 10 mm × 10 mm，ウェーハの直径は 195 mm とする．4.1 節の結果より，0.7〜0.8 以上と比較的高い PE 歩留まりが要求されるので，小さい PE 面積として 5 mm × 5 mm の PE を仮定し，配線ルールが太い場合として 10 mm × 10 mm の PE チップを仮定した．また，画像処理プロセッサなどでは，しばしばビット処理に特化した小規模プロセッサが用いられることも，小さい PE

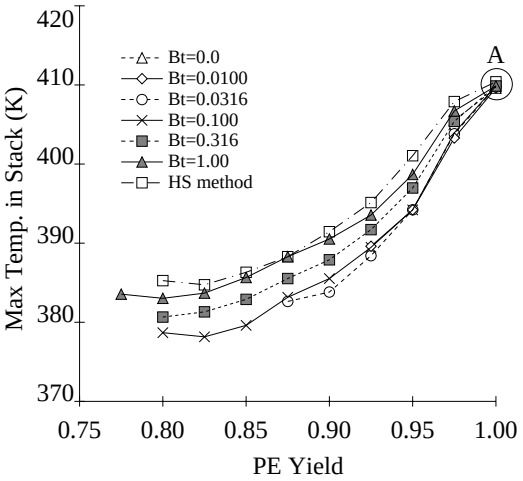


図 12 スタック内最高温度．冗長 PE 周囲配置，$(16+4)\times(16+4)$，$\phi = 140\,\mathrm{mm}$

Fig. 12 Maximum temperatures of dispersed spare PEs placement, $(16+4)\times(16+4)$, $\phi = 140\,\mathrm{mm}$.

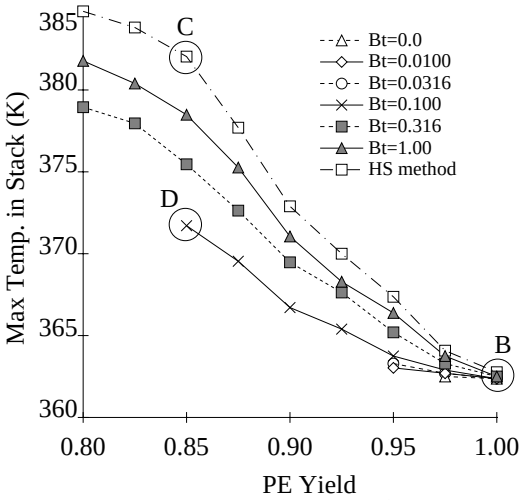


図 13 スタック内最高温度．冗長 PE 集中配置，$(16+4)\times(16+4)$，$\phi = 140\,\mathrm{mm}$

Fig. 13 Maximum temperatures of concentrated spare PEs placement, $(16+4)\times(16+4)$, $\phi = 140\,\mathrm{mm}$.

面積を仮定する理由である．PE の発熱量は，画像処理などに用いられる組み込み向け CPU や，コンピュータシステムで最も多くの面積を占める D-RAM チップの消費電力を想定し，1PE あたりの発熱量を $0.5W$ と仮定した．具体的には，代表的な組み込み用 CPU である日立製作所の SH4 プロセッサは，CPU コア部分の平均消費電力は 380 mW であり，代表的な 64Mbit SD-RAM である HYNDAI 社 HY57V658010ATC の平均消費電力は 600 mW である．

ウェーハ内最高温度は，欠陥 PE の位置が異なるが個数が同じ（PE 歩留まりが同じ）ウェーハをそれぞれの条件や PE 歩留まりごとに数十枚用意して再構成後の発熱パターンをシミュレートし，条件ごとの内部最高温度を平均して求めた．

PE アレイサイズが $(16+4)\times(16+4)$ の場合の冗長 PE の配置方式ごとのウェーハ内最高温度を**図 12**，**図 13** に示す．冗長 PE の周囲配置では，図 12 に示すように，PE 歩留まりが高くなるにつれ，周囲にある冗長 PE がそのまま休止 PE として取り残され，中心部の動作 PE の放熱を妨げるため，スタック内の温度が非常に高くなる．冗長 PE を内部に配置する（図 13）と，PE 歩留まりが高い場合にウェーハ周囲の PE が動作 PE として使用されるため，スタック内部温度を低下する結果となる．逆に欠陥 PE が増加し PE 歩留まりが低下すると，内部にある冗長 PE が順次稼働 PE として使用されだすため，PE 歩留まりの上昇に従って内部温度は上昇する．どちらの配置でも，温度予測モデルを用いた重み付けシフト方式では，シフト重み β_t によって程度に差はあるものの，HS 法に比べてつねに低い温度を保つことができた．

シフト重み β_t を小さくすると，どの PE 歩留まりでも温度を低下することができる．ただし，あまりにもシフト重みを低くすると，温度はいっそう低下させられる反面，再構成可能な PE 歩留まりが非常に高い領域に限られてしまう．たとえば，図 13 では，シフト重み $\beta_t \le 0.0316$ では，温度を非常に低くできるが，その場合には PE 歩留まりが 0.95 以上でなければならない．それ以下の歩留まりでは，スタックの再構成が失敗し，PE 間結線を保つ解を見つけることができない．β_t〜0.100 前後が，ウェーハ歩留まりと冷却効果が両立できる適切なシフト重みである．

冷却効果は，冗長 PE の集中配置の場合で特に大きく，たとえば図 13 では，PE 歩留まりが 0.85 のとき，HS 法に対して $\beta_t = 0.100$ では 10.3 度低い温度を実現できた．これは，スタック内の温度上昇分（内部最高温度と周囲温度の差）に対して，9.4%の温度低下である．PE 歩留まりの観点からは，もし設計温度を 100°C（373 K）とするならば，HS 法では 0.90 以上の PE 歩留まりが要求されるのに対し，$\beta_t = 0.100$ の重み付きシフト法では，PE 歩留まりが 0.85 まで利用可能であるといえる．

図 12 および図 13 の A〜D におけるウェーハの温度分布の様子を**図 14** に示す．(A) と (B) を比べると，冗長 PE を中心に配置する場合は動作 PE が分散するため，従来の配置方法 (A) では中心部にホットスポットが発生しているが，(B) では発生していない．また，

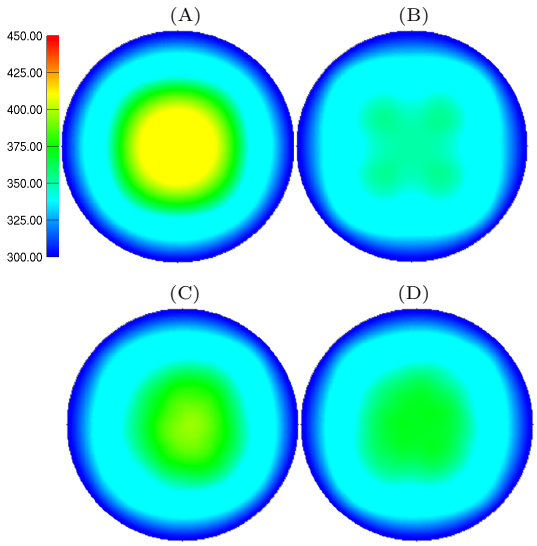


図 14 ウェーハ温度分布．$(16+4)\times(16+4)$ $\phi = 140\,\mathrm{mm}$
Fig. 14 Temperature distribution, $PESize = (16+4)\times(16+4)$, $\phi = 140\,\mathrm{mm}$.

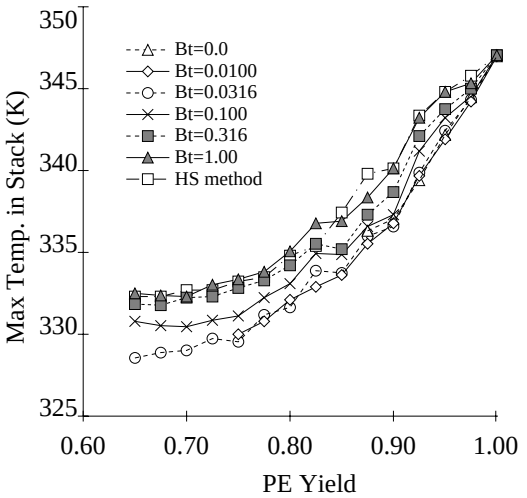


図 15 スタック内最高温度．冗長 PE 周囲配置，$(10+4)\times(10+4)$，$\phi = 195\,\mathrm{mm}$
Fig. 15 Maximum temperatures of dispersed spare PEs placement, $(10+4)\times(10+4)$, $\phi = 195\,\mathrm{mm}$.

(C) と (D) を比べると，温度分布の傾向は同じであるが，中心部の温度が (D) の方が (C) に比べて低くなっている様子が分かる．

異なるケースとして，PE ダイサイズを大きくし，アレイサイズが $(10+4)\times(10+4)$ の場合のウェーハ内最高温度を**図 15**，**図 16** に示す．この場合でも同様に，PE 歩留まりの向上につれ，冗長 PE を周囲に配置する場合はスタック内温度が高くなり，冗長 PE の集中配置ではスタック内温度が低下する．このアレイサイズでは，$\beta_t = 0.316$ でも十分な歩留まりを得ることが

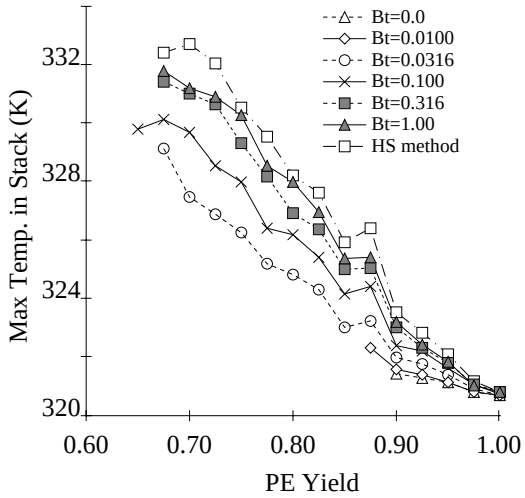


図 16 スタック内最高温度．冗長 PE 集中配置，$(10+4)\times(10+4)$，$\phi = 195\,\mathrm{mm}$
Fig. 16 Maximum temperatures of concentrated spare PEs placement, $(10+4)\times(10+4)$, $\phi = 195\,\mathrm{mm}$.

でき，このときのシフト重みが最も温度を低下できる．図 16 で PE 歩留まりが 0.70 のとき，$\beta_t = 0.0316$ の重み付きシフトは，HS 法に比べて 5.2 度（スタック内温度上昇に対して 8.7%）低い温度を実現できる．

4.3 スタック内最高温度のばらつき

本節では，冷却性能の安定性について評価する．熱伝導シミュレーションでは，様々な欠陥 PE の配置を持つウェーハを多数生成し，条件や PE 歩留まりごとに内部最高温度を平均して温度評価を行った．その場合，欠陥 PE の個数が同じであっても，欠陥 PE の場所や再構成手法によっては，スタック内最高温度にかなりの差が生じる．ある個数の欠陥 PE を持つ場合，平均温度が同じだとしても，欠陥 PE の配置による温度のばらつきが少ない方が，安定して冷却が可能であり，性能が優れている．

冷却性能の安定性を評価するためには，多数の欠陥パターンを生成し，本アルゴリズムによって再構成を行い，PE 歩留まりごとに熱伝導シミュレーションでスタック内最高温度を評価し，標準偏差を求めればよい．**図 17** に，冗長 PE の集中配置の場合（アレイサイズ $(16+4)\times(16+4)$）の PE 歩留まりとシフト重みに対する温度の標準偏差を示す．図から分かるように，β〜0.100 のシフト重みでは，明らかに HS 法に比べてばらつきが小さい．PE 歩留まりが 0.90 付近では，約半分の標準偏差を得ることができた．PE 歩留まりが非常に低い場合は，欠陥回避可能なパターンがほとんど一意に定まり，シフト重みによる差が出にくい．また，PE 歩留まりが十分大きいと，ほとんどの

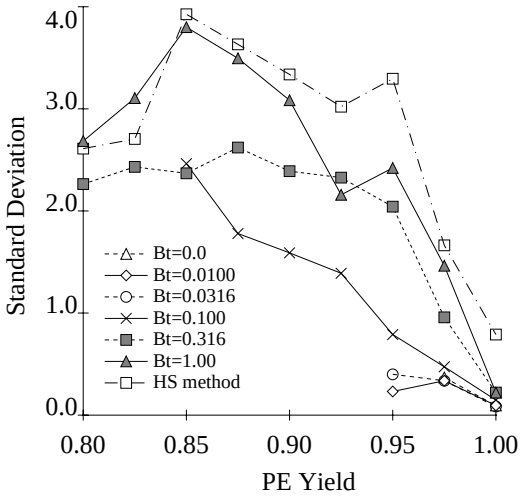


図 17 冷却性能の重み付けに対する標準偏差. $(16+4)\times(16+4)$

Fig. 17 Standard deviation of cooling performance, $(16+4)\times(16+4)$.

PE を動かすことなく欠陥回避が可能であり，シフト重みによる影響が少なくなるため，やはり HS 法との差は小さくなる．

5. 結　　論

本論文では，冷却を考慮した格子結合型マルチプロセッサシステムのウェーハスタック実装について議論した．放熱を効果的に行うために，欠陥回避用の冗長 PE を中心に配置し，温度予測モデルに基づいたシフト方向の重み付けを行った．シフト方向の重み付けの際に，シフトの方向が局所解に陥りウェーハ歩留まりが低下してしまうことを避けるため，正規分布乱数によってゆらぎを与えた．ウェーハ歩留まりとスタック内の最高温度をシミュレーションによって求めたところ，冗長 PE を中心に配置する方式は，歩留まりをあまり低下させずにスタック内最高温度を大幅に低下させることできた．シフト方向に重みを加える場合，乱数によるゆらぎが一定以上（β_t〜0.100 以上）であれば，ウェーハ歩留まりをほとんど低下させずに，スタック内温度をさらに 9%前後低下させることができることが分かった．温度の安定性について評価したところ，欠陥パターンに対するスタック内最高温度のばらつきの標準偏差は，重み付きシフトを用いると，最大で HS 法の約半分になることも示された．

今回の方法では，欠陥を回避した後，中心方向に移動可能にもかかわらず周囲に休止 PE が残る場合がある．これら休止 PE の最適な配置が今後の課題である．

謝辞 本研究の一部は日本学術振興会科学研究費を用いて行われた．関係各位に感謝する．

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) Kung, S.Y., Jean, S.N. and Chan, C.W.: Fault-Tolerant Array Processors Using Single-Track Switches, *IEEE Trans. Comput.*, Vol.38, No.4 (1989).
7) Numata, I. and Horiguchi, S.: Efficient Reconfiguration Scheme for Mesh-Connected Network: The Recursive Shift Approach, *Proc. Parallel Architectures, Algorithms and Networks*, pp.221–227 (1996).
8) 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).
9) 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).
10) 井口　寧，松澤照男，堀口　進：ウェーハスタック実装の温度予測モデル，情報処理学会論文誌：数理モデル化と応用，Vol.44, No.SIG 7 (TOM8), pp.1–11 (2003).
11) 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 15 年 2 月 3 日受付)
(平成 15 年 5 月 9 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，同大学情報科学センター助教授．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，ウェーハスタック集積システムに関する研究を行う．IEEE，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．