

# 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<sup>†,\*</sup>, 松澤 照男<sup>†</sup>, 堀口 進<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 北陸先端科学技術大学院大学 情報科学センター

<sup>‡</sup> 北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

\* 科学技術振興事業団 さきがけ研究 21 (機能と構成)

ウェーハスタック実装は、多数の PE を搭載するウェーハを 3 次元的に積層して構築される超高密度実装技術であるが、冷却手段やウェーハ表面の欠陥回避などが大きな問題となっている。本論文では、欠陥回避のために予備の PE と交換する際に、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なうことを試みる。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を熱伝導シミュレーションによって評価したところ、温度予測モデルに基づいた重み付けシフトは、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% 温度を低下できた。

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

Yasushi Inoguchi<sup>†,\*</sup>, Teruo Matsuzawa<sup>†</sup>, Susumu Horiguchi<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Japan Advanced Institute of Science and Technology, Center for Information Science

<sup>‡</sup> Japan Advanced Institute of Science and Technology, School of Information Science

★ “Information and Systems,” PRESTO, JST

The 3D stacked implementation consist of piling of wafer scale processing elements (PEs) array and it is a good candidate to implement a large scale system. However, cooling of a stack and defects avoidance are crucial problems. Biased shifting based on the temperature estimation model as a method to shift a defective PEs are proposed to cool a 3D stacked mesh array. Proposed reconfiguration algorithm selects a PE, which can lower the stack temperature, when replacing defective PEs by spare PEs. System yield, cooling performance are examined by thermo-conducting simulation. As the result, the biased shifting based on temperature estimation model can lower temperature than conventional method keeping high system yield.

## 1 はじめに

近年、大規模な超並列システム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 3 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、様々な研究が行なわれている [1]。ウェーハスタック内部では、結線は全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。

欠陥回避のためには予備の冗長 PE を置き、欠陥 PE を冗長 PE で置き換える。使用されない冗長 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 [2]。そこで、欠陥 PE の置き換えに際して、スタック内の温度を予測 [3] することによって、活動状態の PE が放熱しやすい位置に動作しない PE を配置して、網の再構成と同時にスタックの冷却を行なうことを狙う。

## 2 ウェーハスタック実装

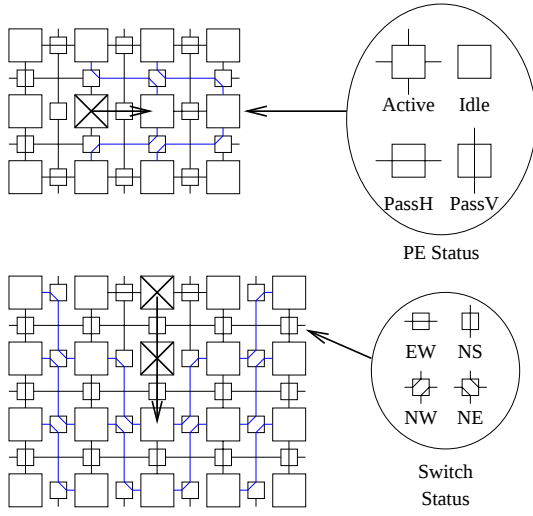


図 1: 格子結合網の欠陥回避の例

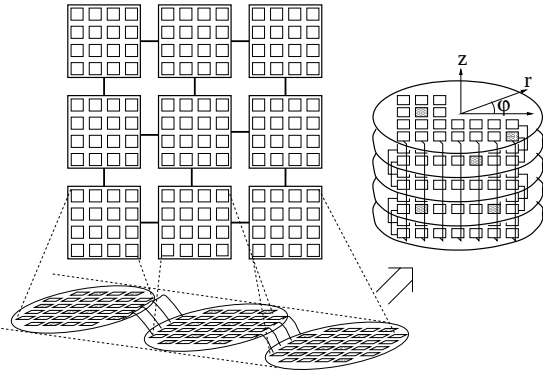


図 2: 大規模格子結合網のウェーハスタック実装

## 2.1 欠陥回避アーキテクチャ

ウェーハスタックに用いるウェーハは、製造時に発生する表面欠陥を原因とする欠陥 PE が存在するため、予備の冗長 PE を用意しておき、網の結合を再構成することによって、論理的に欠陥のない相互結合網を得る。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と欠陥回避の例を示す [4]。このように欠陥 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。

東西南北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、WSI 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。沼田らはローカル情報のみを用いたヒューリスティック欠陥回避法 (HS 法) [4] を提案し、高いシステム歩留まりを得ている。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。

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、論理的に欠陥の無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無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。

## 2.2 ウェーハスタックの温度予測モデル

スタック内には、多数の PE が配置されるが、各 PE は、動作状態、欠陥状態、及び休止状態の 3 つの状態のうちのいずれかである。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 は電源を OFF にすれば発熱しない。欠陥 PE の位置はウェーハ表面の状態によって固定されるが、動作 PE と休止 PE の位置は再構成によって移動できる。放熱をウェーハスタックの周囲から行なうならば、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。再構成を行なう際には、PE 間結線を保ちながら移動する必要があるが、こ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、スタックの中心温度の近似値として求める [3]。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、スタック内のあるウェーハ一枚を取り出して、発熱 PE および非発熱 PE の位置から、ウェーハ中心部の温度を予測する。動作 PE の単位体積当りの発熱量を  $\dot{q}_v$ 、熱伝導率を  $\lambda$ 、ウェーハの物理半径を  $R_a$ 、 $R_e = \sqrt{2/\pi} R_a$ 、全 PE 数、動作 PE 数、および非動作 PE (休止 PE  $\cap$  欠陥 PE) 数をそれぞれ  $N_t, N_a, N_i$ 、PE 一辺の大きさを  $L$ 、 $j$  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。次の式で、中心部の温度を近似する。

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

## 3 冷却を考慮した再構成方式

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 3 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)

```

pattern TempEstimatedShiftDirection(x, y){
  pattern W;
  Wn = Shift_PE(NORTH, x, y);
  Ws = Shift_PE(SOUTH, x, y);
  We = Shift_PE(EAST, x, y);
  Ww = Shift_PE(WEST, x, y);
  Tn = TemperatureEstimate(Wn);
  Ts = TemperatureEstimate(Ws);
  Te = TemperatureEstimate(We);
  Tw = TemperatureEstimate(Ww);
  Tmax = MAX(Tn, Ts, Te, Tw);
  Tmin = MIN(Tn, Ts, Te, Tw);
  ΔT = Tmax - Tmin;
  σ2 = ΔT · βt;
  Tn = RegRand(Tn, σ2);
  Ts = RegRand(Ts, σ2);
  Te = RegRand(Te, σ2);
  Tw = RegRand(Tw, σ2);
  if( Tn == MIN(Tn, Ts, Te, Tw) )
    return( Wn );
  elseif( Ts == MIN(Tn, Ts, Te, Tw) )
    return( Ws );
  elseif( Te == MIN(Tn, Ts, Te, Tw) )
    return( We );
  elseif( Tw == MIN(Tn, Ts, Te, Tw) )
    return( Ww );
}

```

図 3: 温度予測によるシフト方向の決定

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 ( $T_e, T_w, T_s, T_n$ ) が予測できる。これら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、再構成を終了する。

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  $\sigma^2$  の分布を持つ乱数を返す関数であり、 $\sigma^2$  は温度差  $\Delta T$  とシフト重み  $\beta_t$  の積として与える。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、スタック全体の歩留まり（再構成の成功率）が低下する。HS 法は柔軟なシフト方向の決定によって高いシステム歩留まりを得ているので、本アルゴリズムでも乱数の要素を加えることによって、システム歩留まりの向上を目指す。重みを大きくすると、乱数がシフト方向の決定に支配的になり、システム歩留まりは高くなるが、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。

## 4 歩留まりとスタック内最高温度

### 4.1 システム歩留まり

シフトの重み  $\beta_t$  を変化させた時のウェーハスタックシステムの歩留まり（再構成の成功率）を評価した。図 4 は冗長 PE をウェーハ中心に配置し [2]、ア

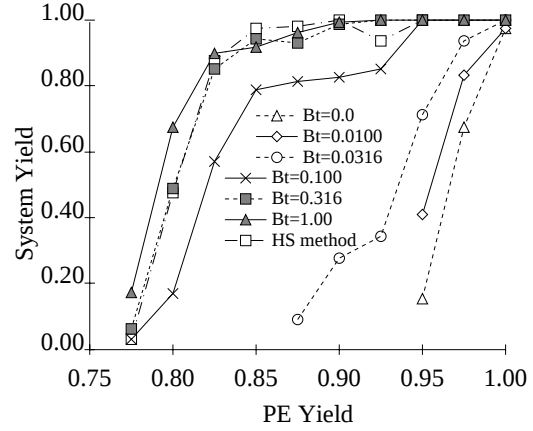


図 4: システム歩留まり。冗長 PE 集中配置,  $(16+4) \times (16+4)$

レイサイズが  $(16+4) \times (16+4)$  の時のスタック歩留まりである。

ゆらぎに対するシフト重み  $\beta_t$  がシステム歩留まりに及ぼす影響は、 $\beta_t$  がおよそ 0.1 以上あれば、HS 法とほぼ同等のシステム歩留まりを得ることができた。  $\beta_t$  がおよそ 0.1 以下になると、3 章で議論したように、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、システム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で求めた。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。また、周囲温度は 25℃、PE アレイサイズを  $(16+4) \times (16+4)$ 、1 つの PE の面積を  $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 、ウェーハの直径は 140mm とする。また、1PE 当りの発熱量を 0.5W と仮定し、冗長 PE は中心に集中配置する。

図 5 に、PE 歩留まりに対するシステム歩留まりを示す。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  $\beta_t$  によって程度に差はあるものの、HS 法に比べて常に低い温度を保つことができた。シフト重み  $\beta_t$  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。但し、あまりにもシフト重みを更に低くすると、温度は一層低下できる反面、システムとして再構成可能な PE 歩留まりが非常に高い領域に限られてしまう。例えば、図 5 では、シフト重み  $\beta_t \leq 0.0316$  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。  $\beta_t \sim 0.100$  前後が、システム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。

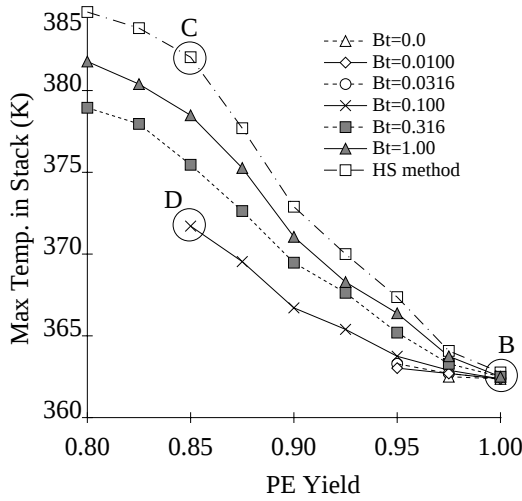


図 5: スタック内最高温度・冗長 PE 集中配置,  $(16 + 4) \times (16 + 4)$ ,  $\phi = 140\text{mm}$

冷却効果は、図 5 では、PE 歩留まりが 0.85 の時、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（373K）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言える。

図 5 のウェーハの温度分布の様子を図 6 に示す。(A) は冗長 PE を従来型の配置（ウェーハ周囲に配置）とし [2]、PE 歩留まりが 100%の温度分布である。(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のに対し (B) では発生していない。また、(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。

## 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。放熱を効果的に行なうために、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なった。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いりシステム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。システム全体の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、乱数によるゆらぎが一定以上 ( $\beta_t \sim 0.100$  以上) であれば、シ

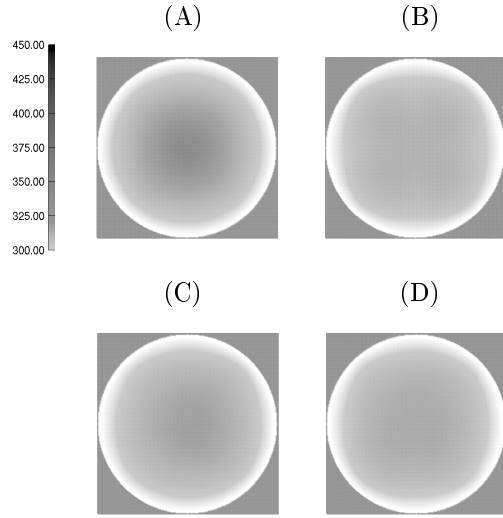


図 6: ウェーハ温度分布  $(16 + 4) \times (16 + 4)$   $\phi = 140\text{mm}$

ステムの歩留まりを殆んど低下させずに、スタック内温度を 9%前後低下できることが分かった。

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。

## 参考文献

- [1] Little, M. J. and Grinberg, J.: “The 3-D Computer: An Integrated Stack of WSI Wafers”, *Wafer Scale Integration*, pp. 253–318 (1989).
- [2] 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, IEEE Computer Society Press, pp. 1087–1096 (2000).
- [3] 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”, 情処論, 数理モデル化と応用 (掲載予定).
- [4] Numata, I. and Horiguchi, S.: “Efficient Reconfiguration Scheme for Mesh-Connected Network: The Recursive Shift Approach”, *Proc. of the Parallel Architectures, Algorithms and Networks*, pp. 221–227 (1996).