

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

井口 寧†, 松澤 照男†, 堀口 進‡

†北陸先端科学技術大学院大学 情報科学センター

‡北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

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について議論する。ウェーハスタック実装は、大規模な超並列システムを実現する実装方式の一つであるが、ウェーハスタックの中心部のプロセッサの冷却やウェーハ上の欠陥の回避などが大きな問題となる。そこで、放熱を効果的に行ないつつ欠陥を回避する、ウェーハスタック実装された格子結合網の欠陥回避方式を提案する。初期 PE の配置方式を改良し、動作 PE を冷却効率の優れるウェーハ外縁部に移動するように重みを付加する手法により、システムの歩留まりを低下させずに放熱性能を向上させることができる。本方式について、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をシミュレーションにより求めたところ、冗長プロセッサをウェーハ周囲に配置することにより、システムの歩留まりは低下させずにウェーハスタックを効果的に冷却できることが分った。

Biased Shifting Cooling Scheme for 3D Stacked Mesh Array

Yasushi Inoguchi†, Teruo Matsuzawa†, Susumu Horiguchi‡

† Japan Advanced Institute of Science and Technology, Center for Information Science

‡ Japan Advanced Institute of Science and Technology, School of Information Science

This paper addresses cooling schemes for 3D staked mesh array. Cooling of PEs in the 3D staked mesh array is one of the most crucial problems for implementation massively parallel systems. Additionally, each wafers in 3D staked mesh array has some defects on it's surface and we have to reconfigure logical mesh network to avoid these defects. Introducing a thermo-radiation model in 3D stacked mesh array, cooling approaches have been proposed by moving active PEs towards edge of the 3D staked mesh array. Comparing the system yields and the maximum temperatures, these cooling approaches can keep high system yield and lower temperature of 3D implementation.

1 はじめに

大規模な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3次元的に積層して構成されるウェーハスタックシステムについて様々な研究が成されている[1]。しかしながら、ウェーハスタックシステムでは、各ウェーハの製造時に発生する欠陥回避の問題と、スタック内部のPEの発生する熱をどのように放熱するかが重要な問題となっている。

ウェーハに発生する欠陥の回避方式に関しては、2次元および3次元の格子結合網について様々な研究が成されている[2, 3]。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、WSI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

論理的に欠陥の無い2次元または3次元の格子結合網を得ている。

一方、放熱の問題に対して、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通じて放熱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, 4]。しかしながら、これらの試作システムでは十分な放熱を行なうことが難しく、直径2~3インチとかなり小規模のものとなっている。ウェーハスタックシステムにおいて、もし放熱が効率良く行なわれれば、高速であるが消費電力が大きいプロセッサを用いてシステム全体の高速化が可能となり、大口径ウェーハを用いてより大規模なシステムを構築することができる。

ところで、ウェーハ上の欠陥回避のためには多数

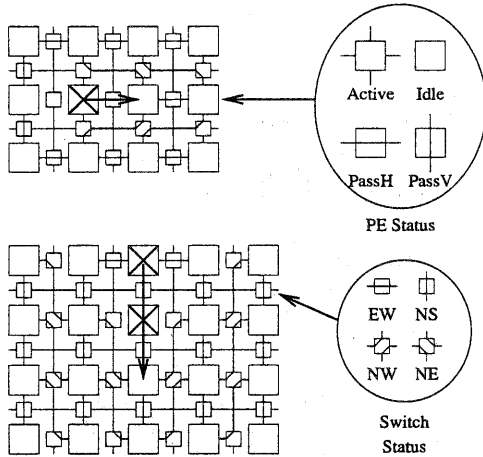


図 1: 格子結合網の故障回避の例

の冗長 PE が置かれるが、欠陥 PE の数が少なれば置き換えが行なわれない多数の PE が生じる。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 が放熱しやすいように動作しない PE を配置することにより、ウェーハスタック内の温度を低下させることができる [5]。

本論文では、科学技術計算に適する格子結合網のウェーハスタック実装について、欠陥回避アルゴリズムを改良することによってウェーハスタック内部の最高温度を低下させることを試みる。最初に格子結合型マルチプロセッサの故障回避方式について簡単に述べる。冗長 PE の配置及び欠陥回避の方向の重み付けにより、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。提案した欠陥回避方式について、ウェーハスタックのシステム歩留まりとスタック内部最高温度について評価を行なう。

なお、ウェーハスタックは 3 次元構造を持つため、本来であれば 3 次元での解析を行なうべきであるが、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、2 次元的に解析を行なう。

2 故障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故障回避可能なアーキテクチャを示す。網内には初期に動作すると仮定された PE と、故障 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

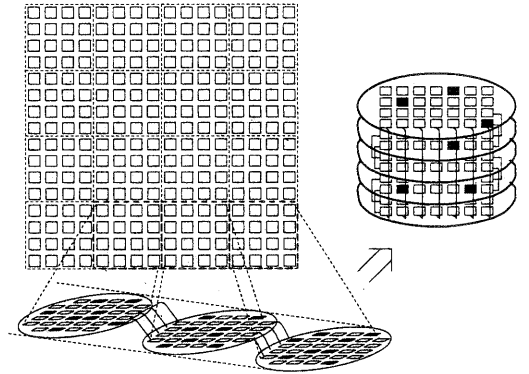


図 2: 格子結合型マルチプロセッサのウェーハスタック実装

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 の故障の有無とは関係なく設定できる。各 PE の周囲には、パイバスリンクとスイッチが置かれる。スイッチはパイバスリンクとともに PE 間の接続の方向を切り変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 への接続に切りかえることができる。この様子を図 1 に示す。このように、故障 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。図 1 の例に示すように、故障 PE が 2 つ続く場合でも、2 段階のシフト操作を行なうことにより、故障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、WSI 全体の歩留まりに大きく影響し、いくつかの方法が考えられるが、Kung らはグラフ理論を用いた方法 [2]、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故障回避を行なう方法 (HS 法) [3] を提案している。

3 ウェーハスタック実装

3.1 ウェーハスタックの構成法

大規模な格子結合型マルチプロセッサシステムを構成する場合、複数のウェーハ上にシステムの一部を実装し、このウェーハを層状に重ねることにより、ウェーハスタックによる実装が考えられる。この概念図を図 2 に示す。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。ウェーハ上の故障 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。

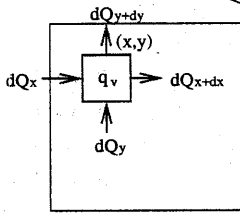


図 3: ウェーハスタックの発熱モデル

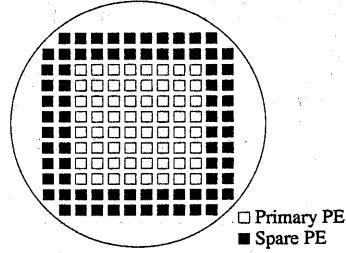


図 4: 冗長 PE を周囲に配置する方式

3.2 ウェーハスタックの発熱モデル

ここでウェーハスタックの冷却について考える。ウェーハ上の PE は、もし動作状態ならば発熱し、休止状態の場合は発熱しない。放熱をウェーハスタックの周囲から行なうとすると、スタック内の発熱量が同じ場合、発熱部分になるべく周囲に存在する方が、発熱部分が中心部に集中する場合よりも、スタック内の最高温度を低くすることができる。

図 3 にウェーハスタックの発熱モデルを示す。単位時間当りに単位面積を通過する熱量 \dot{q} は、 λ を熱伝導率として

$$\dot{q} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

とかける。また、単位領域の内部発熱量は、 \dot{q}_v を単位体積当りの発熱量として、

$$\dot{q}_v \cdot dx dy dz \cdot d\tau \quad (2)$$

ここで、ウェーハの状態から \dot{q}_v を考えると、

$$\dot{q}_v(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{if PE = idle} \\ P & \text{if PE = active} \end{cases} \quad (3)$$

である (P は PE の消費電力)。一方、物体の比熱を c 、密度を ρ とすれば、内部エネルギーの増分は、

$$c\rho dT \cdot dx dy dz \quad (4)$$

熱伝導率一定の仮定のもとで、流入する熱量および PE からの内部発熱が内部エネルギーの増分 (式 (4)) に等しいとすると、

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \nabla^2 T + \dot{q}_v \quad (5)$$

となる。4 節で実際に熱伝導シミュレーションを行なうが、これは式 (5) を数値積分して行なう。

各 PE は、動作状態、故障状態、及び休止状態の 3 つの状態を取ることができる。冷却の観点から考えると、休止 PE をできるだけウェーハ中心に持ってくるようなシフトを行えば良いことが分る。次に休止 PE をできるだけウェーハ中心に持ってくるような戦略について述べる。

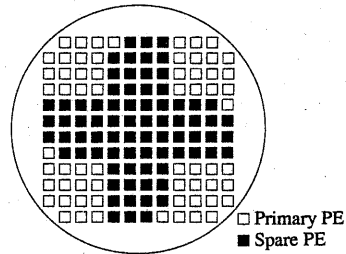


図 5: 冗長 PE を中心部に配置する方式

3.3 冗長 PE の集中配置

故障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、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、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、故障回避の際にどの方向にもシフト可能なので、故障回避後のウェーハとしての歩留まりが高いことが期待できるため、HS 法を始め様々な再構成手法で用いられている。しかしながら、故障 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。

一方、冗長 PE を中心に配置した場合 (図 5) は、発熱する PE が周囲に配置されるため、シフトがあまり行なわれない場合、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は低くできる。その一方で、故障回避の際シフトの方向が中心方向に限定されるため、ウェーハの歩留まり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);
elseif( r < 0.50 ) W = Shift_PE(SOUTH, x, y);
elseif( r < 0.75 ) W = Shift_PE(WEST, x, y);
else W = Shift_PE(NORTH, x, y);
return( W );
}

```

図 6: Shift Determination based on HS Algorithm.

```

pattern DetermineBiasedShiftDirection(x,y){
pattern W;
if( random() < 0.5 ){ /* return between 0 ~ 1.0 */
if( random() < 0.5 +  $\beta$  · |x| ){
if( x ≥ 0 ) W = Shift_PE(EAST, x, y);
else W = Shift_PE(WEST, x, y);
} else {
if( x ≥ 0 ) W = Shift_PE(WEST, x, y);
else W = Shift_PE(EAST, x, y);
}
} else {
if( random() < 0.5 +  $\beta$  · |y| ){
if( y ≥ 0 ) W = Shift_PE(NORTH, x, y);
else W = Shift_PE(SOUTH, x, y);
} else {
if( y ≥ 0 ) W = Shift_PE(SOUTH, x, y);
else W = Shift_PE(NORTH, x, y);
}
}
return( W );
}

```

図 7: Shift Direction Determination of Biased Shifting.

3.4 シフト方向の重み付け

次に動作 PE を外側に移動するため、シフト方向の重みづけについて考える。故障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 [3] のシフト方向決定アルゴリズムを示す。HS 法は非常に高いシステム歩留まり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、方向は均質である。

そこで、冷却効率を高めるために、重み付けシフトを考える。ウェーハの周囲から放熱するために、シフトをなるべくウェーハの外側に向かって行なうように、シフト方向を決定する乱数に重み付けを行なう。この重み付けシフトのアルゴリズムを図 7 に示す。シフト方向の重み付けは、 x 方向にシフトする確率を p_x とすると、シフトの始点となる PE の位置 (x, y) によって、次のように決定される。

$$p_x = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{2} + \beta \cdot x \right) \quad (0 \leq x < 1, 0 \leq \beta < 0.5)$$

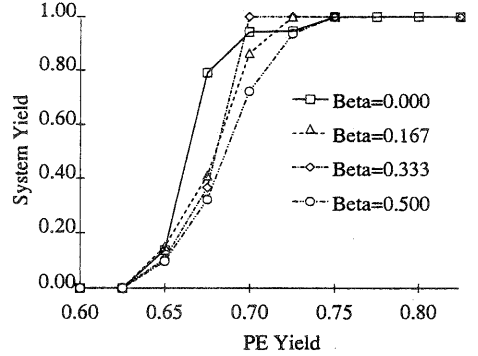


図 8: システム歩留まり。冗長 PE 周囲配置, $(10 + 4) \times (10 + 4)$

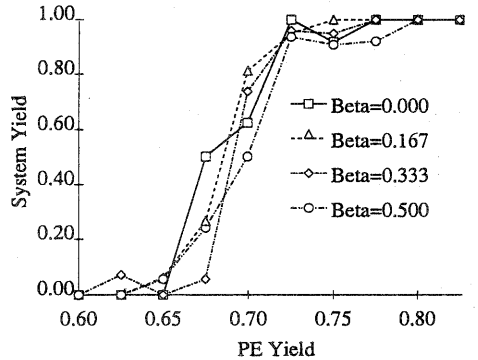


図 9: システム歩留まり。冗長 PE 中心配置, $(10 + 4) \times (10 + 4)$

β はシフトの重み係数である。式の最初の項は、 x, y 軸のどちらかにシフトするかの確率、二項目以降は、 x の中心からの距離によって外側へのシフトの確率であり、重み係数 β が大きいほど、ウェーハ中心から PE の距離に比例して、外側に向かってシフトしやすくなる。

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 β を変化した時のウェーハスタックシステムの歩留まりを評価した。図 8 は冗長 PE をウェーハ周囲に配置、アレイサイズ $(10 + 4) \times (10 + 4)$ 、図 9 は冗長 PE をウェーハ中心に配置、アレイサイズ $(10 + 4) \times (10 + 4)$ 、図 10 は冗長 PE をウェーハ周囲に配置、アレイサイズ $(16 + 4) \times (16 + 4)$ 、

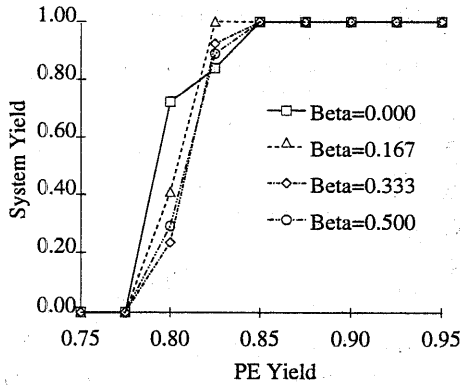


図 10: システム歩留まり. 冗長 PE 周囲配置, $(16+4) \times (16+4)$

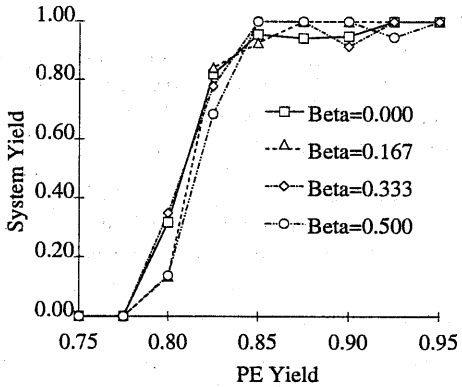


図 11: システム歩留まり. 冗長 PE 中心配置, $(16+4) \times (16+4)$

図 11 は冗長 PE をウェーハ中心に配置, アレイサイズ $(16+4) \times (16+4)$ の時のスタック歩留まりである. アレイサイズが $(N+R) \times (N+R)$ の時, $N \times N$ の初期 PE に対して, 縦横 R 列づつの予備 PE を設けている. なお, 冗長 PE をウェーハ周囲に配置し, $\beta = 0.0$ の時, HS 法 [3] と同一の条件となる. 図から, 外側に移動するための重み β が大きくなるにつれ, システム歩留まりが低下することが分かる. しかしながら, 低下の割合はかなり少ない. 一方, 冗長 PE の配置による違いは, PE 歩留まりが高い場合 $(10+4) \times (10+4)$ の時 PE 歩留まり 0.75 付近に, 冗長 PE の中心配置方式だとシステムの歩留まりが 1.0 に届きにくい結果が得られた. この原因は, シフトの方向が制限されることに加えて, 冗長 PE が内部にあるにもかかわらず, シ

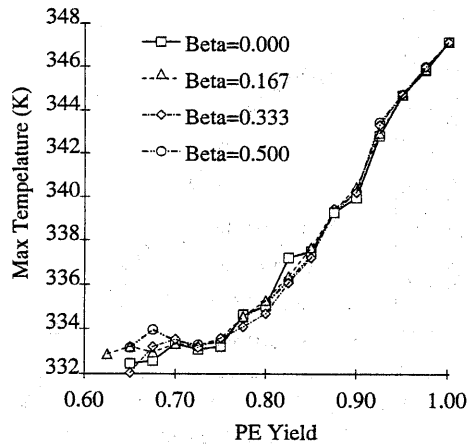


図 12: 格子結合マルチプロセッサシステムのスタック内最高温度. 冗長 PE 周囲配置, $(10+4) \times (10+4)$

フトの方向は外向きに重み付けされているため, 冗長 PE のある方向にシフトが行なわれにくいと考えられる. なお, この部分の歩留まりの低下は, シフト重み β には依存していないことが分かる.

4.2 スタック内最高温度

次に, ウェーハ内の最高温度をシミュレーションにより求めた.

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. つまり, $\lambda = 168.0(W/m/K)$, $\rho = 2.34(g/cm^3)$, $c = 22.1(J/K/mol)$ である. また, 1つの PE の面積を $25mm^2$, 周囲温度は $25^\circ C$, 1PE 当りの発熱量を $0.5W$ とした. PE アレイサイズが $(10+4) \times (10+4)$ の時, ウェーハの直径は $140mm$, $(16+4) \times (16+4)$ の時, ウェーハの直径は $195mm$ とする.

PE の歩留まりが 1.0 の時, 冗長 PE は全て休止 PE となる. PE 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 12, 図 13 に示す. 冗長 PE を周囲に配置する場合, 図 12 に示すように, シフト重みにかかわらず, PE の歩留まりが高くなるにつれ, ウェーハ内の温度が非常に高くなる. 一方, 冗長 PE を内部に配置する場合 (図 13), PE の歩留まりが高いと, ウェーハ周囲の PE が動作するため, 内部温度を低く維持することができる. 故障 PE が増加すると, 内部にある冗長 PE を稼働状態にするため, 内部温度は上昇する. どちらの場合も, シフト重みの影響は殆ど見られない.

PE アレイサイズが $(16+4) \times (16+4)$ の場合の

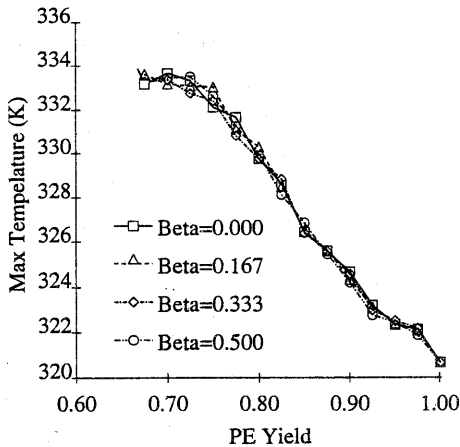


図 13: 格子結合マルチプロセッサシステムのスタック内最高温度. 冗長 PE 中心配置, $(10+4) \times (10+4)$

ウェーハ内最高温度を図 14 に示す。ウェーハ直径が大きい場合も、重みの影響は殆んど見られないが、重み付けを行なわない場合に比べて、安定して温度の低下を図ることができた。

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、シフト方向の重み付けを行なった。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、冗長 PE を中心に配置する方式が歩留まりを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ができた。また、シフト方向の重み付けを行なうと、システムの歩留まりが僅かに低下するが、大口径ウェーハでは安定して最高温度を低下させることが分った。

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] Michael J. Little and Jan Grinberg. "The 3-D Computer: An Intergrated Stack of WSI Wafers". *Wafer Scale Integration*, pp. 253-318, 1989.

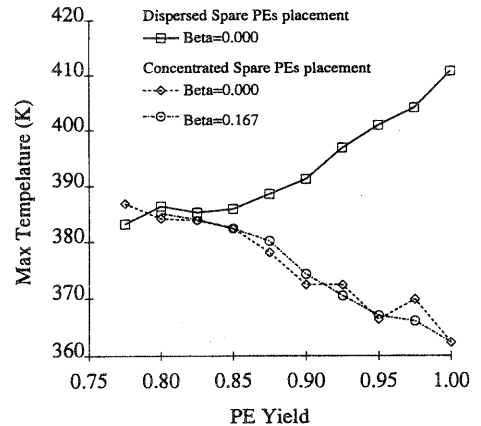


図 14: 格子結合マルチプロセッサシステムのスタック内最高温度. $(16+4) \times (16+4)$

[2] S. Y. Kung, S. N. Jean, and C. W. Chan. "Fault-Tolerant Array Processors Using Single-Track Switches". *IEEE Trans. on Computers*, Vol. 38, No. 4, Apr. 1989.

[3] I. Numata and S. Horiguchi. "Efficient Reconfiguration Scheme for Mesh-Connected Network: The Recursive Shift Approach". *Proc. of the Parallel Architectures, Algorithms and Networks*, pp. 221-227, June 1996.

[4] J.M.Kallis, L.B.Duncan, S.P.Laub, M.J.Little, L.M.Miani, and D.C.Sandkulla. "Reliability of the 3-D Computer under Stress of Mechanical Vibration and Thermal Cycling". In *International Conference on Innovative Systems in Silicon*, pp. 65-72. IEEE Computer Society Press, Oct. 1989.

[5] Yasushi Inoguchi, Teruo Matsuzawa, and Susumu Horiguchi. "An Optimal Replacement Policy for Cooling of 3D Stacked Mesh Array". In *IEEE High Performance Computing in Asia Conference*, Vol. 2, pp. 1087-1096. IEEE Computer Society Press, May. 2000.