

## LSI の信頼性評価指標の提案

林田隆則<sup>†</sup> 安浦寛人<sup>††</sup> 矢野憲<sup>†,†††</sup> 佐藤寿倫<sup>†</sup>

近年、ソフトウェアをはじめとする LSI の一時的な動作不良（過渡故障）の問題が顕著化しており、過渡故障に対応するため、さまざまな対策が講じられている。これらの対策を講じたことで向上した信頼性と、そのためにかかる面積や性能に関するコストを総合的に判断するための評価指標が必要である。しかし、面積や性能に対して信頼性の振れ幅は非常に大きい。そこで、本稿では、信頼性を加味した LSI の評価指標として、ATlogR 積の活用を提案する。

### A proposal of a reliability metric for dependable LSIs

Takanori Hayashida<sup>†</sup> Hiroto Yasuura<sup>††</sup> Ken Yano<sup>†,†††</sup>  
and Toshinori Sato<sup>††</sup>

#### 1. はじめに

半導体の微細化技術の発展により、LSI には大量の回路の集積が可能となった。その一方で、近年ではソフトウェアをはじめとする LSI の一時的な動作不良（過渡故障）の問題が顕著化している。

ソフトウェアとは、二次宇宙線内の中性子がシリコン基板原子に衝突した際に生じ

<sup>†</sup> 福岡大学  
Fukuoka University

<sup>††</sup> 九州大学  
Kyushu University

<sup>†††</sup> 独立行政法人科学技術振興機構、CREST  
JST, CREST

たエネルギーにより発生したイオンの電荷が LSI のメモリや論理回路内の電荷に影響を及ぼし、記憶している値や計算値の一部のビットが反転することで誤動作を引き起こす現象である。ソフトウェアは LSI の集積度が高くなるほどその発生確率が増加するため、今後の LSI 設計では、ソフトウェア対策が重要となる<sup>1)</sup>。

ソフトウェアのような過渡故障の対策として有効な対策の一つに、多重化がある。空間的な多重化は、LSI 内に同じ回路を複数搭載し、その出力に対して多数決を取る方法で、回路の一部分に誤りが生じたとしても多数決によってその誤りを除去することができる。誤り訂正を行うための最小構成は 3 重化<sup>2)</sup>である。過渡故障は回路自体の故障ではないため、空間的な多重化を行う代わりに時間的な多重化を行うことによって同様の対策を行うことも可能である。この場合、同じ入力に対する処理を複数回行い、その複数回の処理結果に対して多数決を行うことで、一時的な誤りを除去する方法である。

これらの手法はいずれの場合も、チップ面積や消費電力、あるいは演算にかかる時間といった面でデメリットを持っており、信頼性のためにコストを犠牲にする方法であるといえる。これらのコスト増が LSI の信頼性に対してどの程度影響を与えるのか、逆に信頼性を担保するためにはどの程度コストをかける必要があるのかを知るには、これらの関係における評価指標が必要である。そこで、本論文では信頼性を考慮した LSI の評価指標について検討を行う。

本論文の構成は以下のとおりである。2 章では多重化を施した LSI の信頼性に関して議論する。3 章では、本稿で提案する ATlogR 積を活用するにあたって用いている近似の正当性について述べ、4 章で本稿をまとめる。

#### 2. 多重化を施した LSI の信頼性

LSI の信頼性を向上する手法の代表的なものとして、多重化が挙げられる。空間的な多重化では、同じ機能を持ったブロックを複数搭載して多数決によって一時的な故障である過渡故障の影響を取り除く手法である。空間的な多重化を行う代わりに、同じ機能ブロックに同じ入力を繰り返し与えてその結果の多数決をとることで同様の効果を得る時間的な多重化を行うことも可能である。

多重化を施した LSI では、多重化を施しているブロックの半数未満でエラーが発生した場合は多数決によってそのエラーは除去される。そのため、過半数のブロックでエラーが発生した場合のみ LSI の外部にエラーの影響が現れる。従って、多重化を考慮した LSI の故障確率 FP は式(1)で求めることができる。

$$FP = {}_N C_{n+1} p^{n+1} q^n + {}_N C_{n+2} p^{n+2} q^{n-1} + \dots + {}_N C_N p^{2n+1} q^0 \dots (1)$$

ここで、N は多重度 (N=2n+1)、p が多重化ブロック 1 個における故障の発生率、q は稼働率 (q=1-p) である。

式(1)において、故障の確率がそもそも低く、p<<q であるとする、第 1 項が支配的となる。このとき LSI の稼働率、すなわち信頼性 R は式(2)で近似できる。

$$R = 1 - FP < 1 - {}_N C_{n+1} p^{n+1} q^n \dots (2)$$

式(2)は、スターリングの近似<sup>3)</sup>を用いることで下記のように変形することができる。

$$\begin{aligned} R &= 1 - FP < 1 - {}_N C_{n+1} p^{n+1} q^n \\ &= 1 - \frac{(2n+1)!}{(n+1)!n!} p^{n+1} q^n \approx 1 - \frac{(2n+1)^{2n+1} e^{-(2n+1)}}{(n+1)^{n+1} n^n e^{-(n+1)} e^{-n}} p^{n+1} q^n \\ &= 1 - \frac{(2n+1)^{2n+1}}{(n+1)^{n+1} n^n} p^{n+1} q^n \dots (3) \end{aligned}$$

式(3)より、R が n に対して指数的に変化することがわかる。

### 3. ATlogR 積を用いた LSI 信頼性評価指標

2 章において述べた LSI の信頼性 R、および故障率 FP は n に対して指数的に変化する。ブロックの故障率を仮に p=0.1 とした場合でも、3 ≤ n ≤ 51 において FP が 10<sup>-3</sup> から 10<sup>-24</sup> と 21 桁の幅で変動する (表 1)。p=0.01 にすると FP は 10<sup>-7</sup> から 10<sup>-72</sup> とさらに大きく振れる (表 2)。実際の故障率 p はもっと小さい値になると考えられるため、FP の振れ幅はこれらのケースよりさらに大きくなる。

信頼性を考慮しない LSI の評価指標で一般に用いられる面積遅延積 (AT 積) が n に対してほぼ線形に変化することを考えると、AT 積に対して故障率、すなわち信頼性の振れ幅が非常に大きいことがわかる。そこで、信頼性を考慮した評価指標として、信頼性に対して対数をとった値を活用する評価指標、ATlogR 積を提案する。

2 章において、式(3)の導出でスターリングの近似を用いた式変形を行ったが、この近似は、一般的に n の値が大きい場合において成り立つ近似である。現実的に、LSI の多重度はそれほど大きな値をとることはないと考えられるため、n の値がそれほど大きくない場合においてどの程度この近似が成立するのかについて検証する。

表 1 FP 第 1 項におけるスターリング近似 FP との比較(p=0.1)

n	3	5	7	11	21	31	51
FP(式(2))	2.55E-3	2.73E-4	3.08E-5	4.24E-7	1.15E-11	3.5E-16	3.67E-25
近似 FP	8.69E-3	1.152E-3	1.52E-4	2.58E-6	9.51E-11	3.49E-15	4.68E-24

表 2 FP 第 1 項におけるスターリング近似 FP との比較(p=0.01)

n	3	5	7	11	21	31	51
FP	3.40E-7	4.39E-10	6.00E-13	1.21E-18	8.52E-33	6.71E-47	4.74E-75
近似 FP	1.16E-6	1.86E-9	2.95E-12	7.35E-18	7.04E-32	6.70E-46	6.04E-74

これらの近似値を見ると、FP の値とその近似値においておよそ 1 桁の差はあるが、この差が n の増加に伴い広がることはなく、近似値においても同じ傾向で値が推移していることがうかがえる。本論文においては、FP を評価指標として活用することを考えているため、重要になるのは n の変化に対する FP の値の推移である。n の値がそれほど大きくない範囲においても、FP の第 1 項においてスターリング近似の値を指標として活用できそうだと考えられる。すなわち、LSI の信頼性に関して、logR を n に対して線形性を持つ指標として用いることで、信頼性を考慮した LSI の評価指標として ATlogR 積を活用できると考えられる。

### 4. おわりに

本稿では、近年その重要度を増している過渡エラー対策を施した LSI に対する、信頼性を考慮した LSI 評価指標について検討を行った。多重度 N で多重化した LSI における信頼性 R が、N に対して指数的に変化するのに対し、従来の代表的な LSI 評価指標である AT 積が N に対して線形に変化するため、面積・遅延・信頼性のトレードオフを考えた上で総合的に評価できる評価指標として ATlogR 積の活用を提案した。

しかし、まだ ATlogR 積が評価指標としてどの程度有用か十分に検討ができていないのが現状である。また、本稿においては、LSI の信頼性に関して、代表的な過渡エラー対策の一つである多重化を念頭に議論を進めたが、故障の発生に関する仮定において、過渡エラー特有の性質を考慮したものになっていない点も課題として挙げられる。今後、ATlogR 積の有用性を示せるよう評価実験を行い、また過渡エラー特有の性質も加味することによって、より具体的な評価指標を提案していきたいと考えている。

**謝辞** 本研究の一部は科学技術振興機構・CREST プロジェクト「ディペンダブル VLSI システムの基盤技術」の支援によるものである。

### 参考文献

- 1) R. C. Baumann. "Soft Errors in Advanced Computer Systems," In IEEE Design and Test of Computers, Vol. 22, Issue 3, 2005.
- 2) J. Von. Neumann, "Probabilistic logic and the synthesis of reliable organisms from unreliable components," Automata Studies, Ann. of Math. Studies, pp. 43-98, 1956.
- 3) Feller, W. "Stirling's Formula.", Vol. 1, 3rd ed. New York: Wiley, pp. 50-53, 1968.