



VLSIシステムの動作と電磁環境の相互干渉に関する研究

吉川, 薫平

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2014-03-25

(Date of Publication)

2015-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6100号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006100>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



論文内容の要旨

氏 名 _____ 吉川 薫平 _____

専 攻 _____ 情報科学専攻 _____

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

VLSIシステムの動作と電磁環境の相互作用に関する研究

指導教員 _____ 永田 真 _____

(注) 2, 000 字～4, 000 字でまとめること。

我々の周りに存在する様々な製品、例えば家電製品、携帯電話、医療機器から自動車に至るまで、これら全ては LSI によりその動作をコントロールされている。これらの製品に搭載されている LSI は、プロセス技術の発達により、18～24 箇月で集積密度が倍になるというムーアの法則に則った形で継続して高集積化が進んでいる。それによる恩恵で、LSI の性能は飛躍的に高まっているが、同時に電流密度の増大が要因となり LSI を取り巻くノイズ環境は極度に悪化している。このため LSI は常に誤動作の危険と隣合わせの状況を抱えている。

ひとたび医療機器や自動車に搭載された LSI が誤動作し、製品が動作不良状態となれば人命に関わる事故につながる危険があり、取り返しのつかない事象の発生が懸念される。このような危険を防止するため、LSI や LSI を搭載した製品・機器に十分な耐ノイズ性能を持たせる規制として電磁環境両立性(EMC) 規格が存在する。

電磁環境両立性は、機器から発生するノイズ量を規制値以下に抑えるエミッション(EMI) と、周囲の機器がある程度のノイズを発生させても自身が誤動作しないノイズ耐性を持たせるイミュニティ(EMS)、これら 2 つの指標を両立させる製品開発を行うための指標である。

一般に製品の設計・製造においては、実際に製品を製造し、これを対象とする EMC 試験を行うタイミングにおいて初めて EMC 性能の評価が行われている。この段階において EMC 規制値を満足しない場合は設計変更が必要であり、電子部品の追加や部品配置箇所の修正などで問題が解決しない場合、LSI からの再設計が必要な事態も考えられる。設計・製造フローの後戻りによるコストの増大や開発期間の延長は、製品の競争力低下を招くため望ましくない。さらに、近年は車載機器向け LSI など、過酷なノイズ環境において完全な動作を求められる設計事案が増加しており、設計段階での EMC 対策は重要性を増している。このような背景により、製品の設計段階において EMC 性能の評価を可能とする解析技術が求められている。

LSI システムは、一般に LSI、パッケージ、プリント基板、そしてプリント基板上に配置される様々な電子部品で構成される。LSI システムで発生するノイズの根源は、LSI の動作に起因する電荷の移動、つまり消費電流である。消費電流はシステムに存在する抵抗やインダクタンスに作用して電源ノイズを発生させ、LSI の電源電圧の変動を引き起こす。また、電流は LSI の外に漏洩し、パッケージやプリント基板の配線に流れ込むことでこれらがアンテナの役割を果たし、周囲の空間に電磁ノイズを放射する。これらのエミッションに対して適切な対策や効果的な対策を行うためには、設計段階において LSI 動作に起因するエミッションの解析を行い、定量化した後にノイズ対策を行うことが必要である。本論文で提案する電源ノイズ解析モデルは、LSI・ボンディングワイヤ・パッケージ・プリント基板、電子部品に対してそれぞれ個別にモデル作成を

行い、得られた個々のモデルを統合することで LSI システムを構成する要素全てを含んだ電源ノイズ解析・EMC 性能評価を実現している。提案モデルを用いることで、LSI 動作時の電源電圧変動量や LSI 外に漏洩する電流成分値などの定量化、エミッション解析が可能である。加えて、提案モデルは LSI システムの電源ネットワークを詳細にモデル化するため、システムにおける電源ノイズの伝播経路や伝搬量を解析可能である。このため、エミッション解析に用いる同一のモデルでイミュニティ解析についても実施可能である。さらに、提案モデルによる EMC 解析の精度評価を目的として LSI の試作を行い、実チップによる解析精度評価を行った。この評価結果についても本論文で報告する。

それぞれ製造プロセスや回路構造、回路規模が異なるデジタル回路を搭載した 2 つのテスト LSI の試作を行った。これらに搭載されたデジタル回路は、単一のシフトレジスタセルをアレイ状に敷き詰めたループシフトレジスタアレイ回路と、32bit マイクロプロセッサである。ループシフトレジスタアレイ回路は、発生する電源ノイズに含まれる成分やノイズ強度を自由に設定可能なため、提案する解析モデルに対する精度評価のためのリファレンスノイズ生成回路として使用する。一方 32bit マイクロプロセッサは、実際の製品において使用される LSI を想定した評価対象である。

エミッション解析結果の比較対象となるノイズ測定については、オンチップ電圧とオンボード電流の 2 つの異なるノイズ評価項目についてそれぞれ測定評価を行った。オンチップ電圧測定は、電源電圧変動をチップ内観測可能な機能を持つオンチップモニタ回路を評価対象回路と同一 LSI 内に搭載することで行った。一方で、プリント基板に漏洩するオンボード電流の測定方法として、LSI のエミッション測定手法として国際電気標準会議(IEC)によって標準化されている磁界プローブ法を用いた。

オンチップ・オンボード電源ノイズ測定結果とモデルを用いた解析結果を比較評価することで、提案する電源ノイズ解析モデルがデジタル回路の動作起因で LSI システムにおいて発生するエミッションの定量化・見積もりについて有用であることを示した。

電磁環境両立性を満たすためにはエミッションだけでなくイミュニティについても同時に考慮した設計が必要である。本論文では、試作 LSI に搭載したインバーターチェーン回路を対象とし、実際の製品に搭載された LSI が受けるノイズを模擬した評価系においてイミュニティ評価を行った。

LSI の動作に影響を与えるノイズの侵入プロセスとして 2 通りの経路が考えられる。1 つ目は周囲の電子機器で発生したノイズが LSI へと入射する経路である。このような LSI 外部から LSI へと入射するノイズを模擬したイミュニティ評価方法として直接電力注入法が IEC で標準化されている。この評価方法を用いて外部擾乱ノイズがインバーターチェーン回路に与える影響を評価した。

2 つ目の経路は、評価対象回路と同一の LSI 内に搭載されたデジタル回路から発生する電源ノイズが LSI 内の電源ネットワークを伝搬して評価回路の動作に影響を与えることが考えられる。この問題は LSI 内のイントラ EMC、自家中毒として知られ高集積化が進む LSI において問題となっている。本論文では、イントラ EMC の評価を目的としてインバーターチェーン回路とともにリファレンスノイズ生成回路を同一 LSI に搭載し、ノイズ生成回路により生じた電源ノイズが LSI 内でインバーターチェーン回路に伝搬し、インバーターチェーン回路の動作に影響を与える様子を評価した。

インバーターチェーン回路におけるイミュニティ評価指標としては信号の遷移タイミングの変動であるジッタ量により定量化を行った。高速信号を扱う回路ではジッタの影響により誤動作が発生する危険があることが一般的に知られている。

このジッタ量の実測評価とともに提案解析モデルを用いた電源ノイズの伝播解析を行い外部擾乱やデジタル回路動作により発生する電源ノイズがインバーターチェーン回路へ与える影響を、解析を通して電源電圧変動量として定量的に評価可能であることを示した。さらに、得られた電圧変動情報を用いたジッタ量の算出手法を考案することにより、ノイズ発生から最終的な回路動作への影響を含む、EMC の総合的な評価における実用性を実証した。

本論文は、LSI システムにおいて発生する様々な電磁環境問題について、試作した LSI を対象として実測・解析評価を行い、提案解析モデルの精度評価や、LSI システムにおいて発生する電源ノイズの特性を考察した。これらの研究成果より、提案する解析モデルや評価手法がエミッション、イミュニティ、そしてイントラ EMC と、様々な電磁環境性能について定量化可能であることを示すと同時に、LSI システム設計時における EMC 性能の向上に役立てることが示された。

氏名	吉川 薫平		
論文 題目	VLSIシステムの動作と電磁環境の相互干渉に関する研究		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教 授	玉置 久
	副 査	教 授	横川 三津夫
	副 査	教 授	永田 真
	副 査		
			印
要 旨			
<p>マイクロプロセッサに代表されるデジタル集積回路の高集積化・高性能化は、電子化・情報化の進む自動車技術の発展を支えている。マイクロプロセッサの自動車応用として、電子制御ユニット(ECU)や、ナビゲーションなどの情報処理機器の搭載が一般化している。車載エレクトロニクスにおける安全性指標のひとつとして、VLSIシステムの電磁環境両立性(EMC)が重要であり、とりわけデジタル回路の動作によるノイズ発生やノイズ耐性に関する国際的な標準評価法の適用と規格の準拠が必要となる。しかしながら、このようなVLSIシステムの設計において、EMCに強く影響する電源電流の発生、およびEMCにより外因的に引き起こされる電源電圧の変動に対するデジタル回路動作の耐性、について、シミュレーションにより予め評価・対策する手段が確立されていない。そこで本研究では、VLSIシステムの動作と電磁環境の相互干渉に関し、実験評価による現象の理解を深めること、および独自のモデリング手法による電源電流シミュレーションおよび電源ノイズ干渉シミュレーションを具体化し、VLSIシステムにおけるEMCについて工学的な解決法を与えることを目的とした。</p> <p>本論文では、VLSIシステムの動作と電磁環境の相互干渉に関して、CMOS デジタル回路の電源消費電流をコンパクトに表現する容量充電モデルを応用し、VLSI チップとパッケージ及び評価ボードを統合した電源供給系モデルによる電源電流シミュレーション手法の確立、データバスやメモリを含むマイクロプロセッサの全体を対象とした電源電流シミュレーションの実現、および外乱ノイズによる正弦波状の電圧変動に対するクロックドライバ回路の干渉シミュレーション手法の開発、について研究成果をまとめている。本論文に論じられている研究成果の一部は、動作環境の擾乱や実装系の経年劣化などに対してロバストなVLSIシステムの構築論に関する産官学連携研究プロジェクトによるものであり、社会的要請への学術貢献および実用性を意識した工学成果であることに特徴がある。</p> <p>本論文では、VLSIシステムの動作と電磁環境の相互干渉に関して、以下の3つの研究課題について論じている。すなわち、</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) VLSI チップとパッケージ及び評価ボードを統合した電源供給系モデルによるデジタル集積回路の広帯域電源電流シミュレーション手法と評価 (2) データバスやメモリを含むマイクロプロセッサの全体を対象としたベクタ長時間電源電流シミュレーション手法と評価 (3) 外乱ノイズによる正弦波状の電圧変動に対するクロックドライバ回路のタイミングジッタの発生に関するシミュレーション手法と評価 <p>である。</p>			

氏名	吉川 薫平		
<p>VLSIシステムの動作と電磁環境の相互干渉に関して、前項(1)では、CMOS デジタル回路の電源消費電流をコンパクトに表現する容量充電モデリング法をフリップフロップの縦続接続を基本構造とするループトレジスタ回路に適用し、その動的な消費電流モデルを構築するとともに、チップと評価ボードを統合した電源供給系の広帯域インピーダンスモデルと統合することで、チップ内の電源電圧ノイズおよびボード上の電源電流ノイズの同時解析を実現し、また広い動作周波数範囲における実測データとの整合を示した。前項(2)では、容量充電モデリング法を大規模デジタル回路に適用できるよう一般化し、32ビットマイクロプロセッサを対象として、そのデータバス部や制御部のデジタル回路およびキャッシュやユーザ領域のSRAM回路に対する動的な消費電流モデルを構築するとともに、チップ内部およびボード上の電源ノイズに関するシミュレーションを実現した。前項(3)では、直接RF電力注入試験法(DPI試験法)によりチップ外部から導入した正弦波状の電圧変動に対して、インバータの縦続接続によるクロックドライバ回路のジッタ発生について、電源電圧の変動量とジッタ量の関係を表現する数式モデルを構築し、シミュレーションを実現した。</p> <p>いずれの課題においても、電源ノイズの発生や干渉に関する原理的なシミュレーション法の開発に加えて、オンチップの電源電圧モニタやオンボードの近接磁界プローブによる電源ノイズの直接評価手段を搭載したテストチップおよび評価ボードによる実験データの取得と理解に努めている。電源ノイズに関して、シミュレーションと実験の整合を定量的に評価することにより、VLSIシステムのEMCに関する具体的かつ信頼できる手法を与えている点で、本論文における成果の工学的な価値は高いと考えられる。</p> <p>本論文の構成は以下のとおりである。</p> <p>第一章では、研究の背景と動機について述べている。VLSIシステムのEMCに関する技術動向について簡潔に述べると共に、電源ノイズモニタ技術や電源電流シミュレーション技術に関する先行研究をまとめ、本研究による発展的な内容の位置づけを明らかにしている。</p> <p>第二章では、CMOS デジタル回路における電源ノイズのリファレンスとして、フリップフロップの縦続接続を基本構造とするループシフトレジスタ回路を対象として、電源電流モデルおよびチップと評価ボードを統合した電源供給系モデルによる電源ノイズのシミュレーション法について論じている。</p> <p>第三章では、CMOS デジタル回路における電源ノイズ・シミュレーションの一般化に関して、32ビットマイクロプロセッサを対象として、ランダムロジック部とSRAM部を含む電源電流モデルの生成法およびベクタ長時間にわたる電源ノイズのシミュレーション法について論じている。</p> <p>第四章では、CMOS デジタル回路における電源ノイズ応答に関して、インバータの縦続接続回路を対象として、外因性の正弦波状の電源電圧変動に対するジッタの発生の現象的理解とシミュレーション法について論じている。</p> <p>第五章では、まとめと今後の展望を述べている。</p> <p>以上のように、本研究はVLSIシステムの動作と電磁環境の相互干渉に関して、容量充電モデルを用いたVLSI チップ-パッケージ-ボードの統合による大規模デジタル回路の電源ノイズ・シミュレーション手法、および外因性の電源ノイズに対するデジタル回路の応答に関するシミュレーション手法、について具体的な提案と成果を得ている。今後の研究展開として、車載エレクトロニクスにおけるECUのEMCに関するシミュレーション応用が期待できる。</p> <p>本研究の成果は、査読付き学術論文2件、および国際会議論文3件に報告されている。このように本研究は、VLSIシステムの動作と電磁環境の相互干渉の問題に対して、深い理解を導き、また効果的な対策を見極める工学的手段を与える成果であり、価値ある集積であると認める。提出された論文はシステム情報学研究科学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の吉川 薫平は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。</p>			