

高速デジタル・ボード & LSI設計の落とし穴

——集中系回路理論と分布系回路理論の限界

遠矢弘和

ここでは、高速デジタル回路設計の現場で、なぜこれほど多くのトラブルが発生しているのかを、回路理論に立ち戻って考察する。現在、利用されている集中系回路理論や分布系回路理論は、もともとデジタル回路設計を想定してできあがった理論ではない。そのため、いくつかの点で設計技術者が誤解しやすい点や、体系的に説明することがむずかしい点があると筆者は主張する。ここでは、こうした既成の回路理論の問題点を指摘する。また、こうした誤解や混乱を解消できる、高速デジタル回路設計のための新しい回路設計理論(QSCC理論)を紹介する。(編集部)

CMOS技術が実用化されて以来、デジタル回路の性能は、半導体プロセス技術の発展に依存して向上し、スイッチング速度、消費電力、集積度、信頼性などがきわめてバランスよく改善されてきました。しかし、最近では、デジタル回路の高集積化、高速化を半導体プロセス技術の向上だけに頼って押し進めることはかなりむずかしいとの認識が広がっています。このため回路設計技術を中心とした高集積化技術や高速化技術に対する期待が高まっています。

しかし、ここでいくつかの問題があります。たとえば、設計技術者の回路理論に対する理解の問題です。一般に、デジタル回路設計者の多くは、電気回路を設計する際、集中系回路理論(L , C , R などの要素が1点に集中しており、ものの大きさを無視する)にもとづいた回路モデルをイメージします。一方、デジタル回路の動作周波数

が上がると、集中系回路理論だけでは説明できない現象が増えます。そこで、分布系回路理論(L , C , R は導体中に分布しており、電気信号は波となって対向する導体の間を進んでいく)の理解が必要になります。しかし、現実のデジタル回路に分布系回路理論を導入する手法は、まだ十分に確立しているとは言えません。

筆者は、集中系回路理論と分布系回路理論について、いくつかの点で設計技術者が誤解しやすい点や、体系的に説明することがむずかしい点があると考えています。本稿では、こうした問題点を指摘します。また、これらの問題を解消できる、高速デジタル回路設計のための新しい回路設計理論(QSCC理論)を提案します^注。

1. 誤解と混乱に満ちた「設計者の常識」

デジタル回路の特徴はスイッチにあります。スイッチはリレーから始まり、トランジスタ、ICへと発展しました。これにともなってスイッチング周波数も数十年の間に4~5けた上昇しました。歴史的に見て、これほど急激な技術向上を果たした例が過去になかったこともあって、回路技術について十分な理論検討がなされないまま、現在に至ってしまっています(右掲のコラム「デジタル技術の急速な展開に回路理論が追いついていない」を参照)。

たとえば、300MHz~30GHzの領域はマイクロ波帯と呼ばれ、デジタル技術よりも古くからあるマイクロ波工学、またはこの基礎となっている分布系回路理論を適用することが常識となっています。デジタル技術は、集中系回路理論のまま、あっという間にこの周波数領域に突入してしまいました。このため、まずマイクロ波工

注：本稿の研究の一部は、NEDOからの平成12年度委託研究として行われた。



学分野の機器との間でEMC (electromagnetic conflict :ここではあえて「電磁環境適合性」ではなく、「電磁的な紛争」と呼ぶ)の問題を引き起こしてしまいました。

言うまでもなく、この紛争の悪玉は闖入者であるディ

ジタル機器です。普通ならば、いじめにあうところですが、マイクロ波工学分野が紳士的であったためか、ディジタル技術はいつの間にかエレクトロニクスの分野で主導権を握ってしまい、いまや非エレクトロニクス分野も巻き込んだIT (information technology) 革命の旗手とな

Column 1

ディジタル技術の急速な展開に回路理論が追いついていない

本稿で述べた高速ディジタル回路設計における誤解や混乱の原因の一つは、ディジタル技術の歴史に関係していると筆者は考えています。以下で、そのことに少し触れます。ディジタル技術の専門家の方は、このコラムを読み飛ばしていただいてもかまいません。

ディジタル技術の歴史は、コンピュータから始まったことは周知の事実です。電子部品を使用した世界で初めてのコンピュータは、ペンシルバニア大学で弾道計算を目的として開発され、1946年に完成したENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) であると言われていきます。ENIACは18,000本の真空管と1,500個のリレーを使用し、150kWの電力を消費する大規模なコンピュータでした。ちなみに重量は30トンであり、1回の加算処理にかかる時間は200 μs、乗算処理は10進数10けたどうしの場合に2.8ms、除算は6msかかるというものでした。それまでの機械式の計算機に比べると、格段に速い速度であったといえます。

ENIACは電子部品を使用していますが、計算の制御は多くのスイッチやプラグを手でセットすることによって行われました。一方、J. Von Neumann (ノイマン) は、数値と命令を同じ記憶装置に記憶させ、命令は記憶装置から制御装置へ、数値は記憶装置から演算装置へ転送するようにしたプログラム記憶方式を1946年に発表しました。この方式をもとに、ENIACを作ったメンバによってEDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer) という最初の汎用コンピュータの開発が計画され、1953年に完成しました。

EDVAC以降、各所で続々とコンピュータが作られるようになりましたが、論理回路設計については、とくに飛躍的な変化が起こることはありませんでした。EDVACは、同じくNeumannが指導しプリンストン高級研究所でほぼ同時期に製作したIAS機とともに、その後のコンピュータの標準的なモデルとなりました。

コンピュータ技術は、その後、制御素子にトランジスタが使用されるようになり、さらに米国Texas Instruments社製のICが使用されるに及んで、大きく発展し、世界的に

その利用が広まってきました。このようななか、米国Intel社は1971年末に「4004」と呼ばれる4ビットのマイクロプロセッサを発表しました。これはコンピュータの中央処理装置部を一つのチップに納めるといった画期的なものでした。これにより、少なくとも信号処理については、ディジタル技術が優位性を不動のものにしました。半導体の高集積化技術はその後急速に発展し、コンピュータの性能に対するコスト、サイズ、消費電力は飛躍的に改善されました。

以上のように歴史をふかんとすると、ディジタル技術の発展の途中でタイミングよく、小型、低消費電力、高速スイッチングが可能な部品や材料、またはこれらに関する製造技術が現れ、それがディジタル技術の発展をさらに加速するという好循環が続いてきたことがわかります。この間、半導体については電荷制御理論などの回路理論の開発はありましたが、導体を伝わる信号に関する回路理論は、従来の集中系理論を流用するだけで、現在に至っています。このため、ディジタル技術の分野に電磁気現象を理解した回路技術者が驚くほど少ないのが現状です。このことは日本国内にかぎったことではなく、海外の文献や、国際学会での発表論文などの数を見ても明らかです。

今後、ITが社会に革命を起こすと言われていています。そのハードウェアの中核となる技術がディジタル技術であることを考えると、前述の状況は、まさにITが「砂上の楼閣」になる危険をはらんでいるとも考えられ、筆者らは真剣にIT社会の将来を心配しています。

筆者らは、2000年度中、NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構、省エネルギー技術の開発、導入・普及事業、産業技術や地球環境対策技術の開発などを推進している経済産業省・資源エネルギー庁系列の政府機関) から資金を調達して、本稿に関連する研究を行ってきました。しかし、1年間という限られた期間の研究であったため、実用化にはまだ多くの課題を抱えています。大学や産業界の多くの技術者、研究者の方に、本稿で紹介するような高速ディジタル回路のための新しい回路設計理論の構築に関心を寄せていただけるように期待しています。