

車載用半導体製品の信頼性を高める EMC・熱設計フロントローディング技術

Front-Loading of EMC and Thermal Design Technologies to Improve Reliability of Automotive Semiconductor Products

江上 孝夫 EGAMI Takao 小松 輝充 KOMATSU Terumitsu 伊見 仁 IMI Hitoshi 永田 真 NAGATA Makoto

近年、EV（電気自動車）の普及や自動運転技術の発展により、自動車に搭載される電子制御ユニット（ECU：Electronic Control Unit）が増加している。ECUの信頼性を確保する上で、実装される半導体製品での電磁両立性（EMC：Electro Magnetic Compatibility）と熱に起因した問題解決が重要になる。また、次世代自動車の開発が加速する中で、手戻りを防ぎ、開発期間を短縮するには、EMC・熱設計のフロントローディング技術が求められている。

そこで、東芝デバイス&ストレージ（株）は、車載用半導体製品の信頼性を高めるため、EMC・熱設計に対するフロントローディング技術の開発に取り組んでいる。アナログICでは、ノイズ解析のシミュレーション精度の向上や、IC内のデバイス間相互で熱の影響を考慮に入れた電気-熱連成シミュレーションを可能にする環境を構築した。また、ディスクリートパワーデバイスでは、パワー MOSFET（金属酸化膜半導体型電界効果トランジスター）を使用するスイッチング回路などに適用できる電気-熱連成シミュレーション技術を開発している。

In recent years, the dissemination of electric vehicles and the development of autonomous driving technologies have led to an increase in the number of electronic control units (ECUs) installed in automobiles. In order to assure the reliability of these ECUs, there is a need to solve issues related to the electromagnetic compatibility (EMC) and thermal effects of semiconductor products. An approach to the front-loading of EMC and thermal design technologies is therefore required to reduce the impact of process retrogression and shorten development periods in line with the international trend in the development of next-generation automobiles.

With this as a background, Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation has been making efforts to develop front-loading technologies for the EMC and thermal design of automotive semiconductor products. In the field of analog integrated circuits (ICs), we have established development environments that make it possible to improve the accuracy of noise simulations and perform electrothermal circuit simulations taking into consideration the interconnections among devices on an IC. In the field of discrete power devices, we are also developing an electrothermal circuit simulation method for switching applications using power metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (MOSFETs).

1. まえがき

EVや自動運転技術の普及で、ECUが増加するとともに、開発する半導体の技術難易度が高くなってきている。また、車両開発期間の短縮化に伴い、EMCや熱などの不具合による開発の手戻りが問題となってきた。EMC特性と熱特性は、二律背反になる場合が多く、開発初期段階での擦り合わせが重要となる。そのため、東芝デバイス&ストレージ（株）では、EMC・熱設計のフロントローディングに対する取り組みを行っている。

車載用電子機器のEMC規制は、近年、自動運転の拡大に伴い、安全を確保するための誤動作対策としてますます重要性が増してきている。また、2016年から、我が国でも、UNECE（国際連合欧州経済委員会）が定めた安全規則

ECE R10（ECE Regulation No. 10）が適用されたことにより、当社では、2015年から半導体EMC評価室（2018年にISO 17025（国際標準化機構規格 17025）の認定を取得）を立ち上げ、IEC（国際電気標準会議規格）などの国際規格について、社内での測定技術・評価レベルの向上と製品開発へのフィードバックを図ってきた。

熱対策は、車載用アナログICとしての10 A出力のモータードライバー ICに限らず、車載用MCU（マイクロコントローラーユニット）としては高位のマルチコアCPUでも重要である。また、ECUでディスクリートパワーデバイスが使用されている場合も同様である。

したがって、車載用半導体では、熱シミュレーションが必須となっている。当社は、これまで筐体（きょうたい）を含めたモデルによる熱シミュレーションを、エンジンコントロール

ICやADAS（先進運転支援システム）関係マイコンなどの開発に適用してきたが、更にディスクリートパワーデバイスへの適用に向けて新しい取り組みも開始した。ここでは、これらの取り組みについて述べる。

2. EMC解析のフロントローディングへの取り組み

従来は、EMCでの不具合解析のために車載用ICにプロービングすると、測定系の影響で動作の実測が困難であった。そこで、ノイズを受けるEMS（Electromagnetic Susceptibility：電磁感受性）試験であるDPI（Direct Power Injection）ノイズ印加時の誤動作解析について、国立大学法人神戸大学 永田 真教授の研究室と、OCM（On Chip Waveform Monitor）を用いたEMCの共同研究^{(1), (2)}を行い、現象の確認と回路シミュレーションへのフィードバックを行った。ここで、OCMは、チップに搭載し、回路の特性やICレイアウトの影響を小さくしてモニターする電子プローブである。

DPIノイズ印加時に、DMOS（二重拡散型金属酸化膜半導体）からSi（シリコン）基板にノイズが印加される様子を模式的に示したのが図1である。このように、ノイズがIC端子や配線層に伝搬し、Si基板を通して回路内のほかの素子に回り込んで、誤動作の主な要因となる。

今回、OCM、LIN（Local Interconnect Network）トランシーバー、及びCAN（Controller Area Network）トランシーバーを搭載したTEG（Test Element Group）を、車載

用BiCD（バイポーラー+CMOS（相補型MOS）+DMOS）-0.13 μm（40 V）プロセスで開発した（図2）。内部回路ノードやSi基板の、周波数や位相を含む電圧変化を、0～40 Vまで詳細に観測することができる。

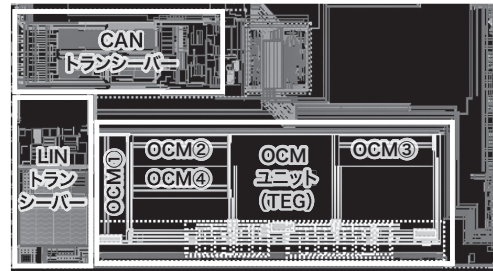
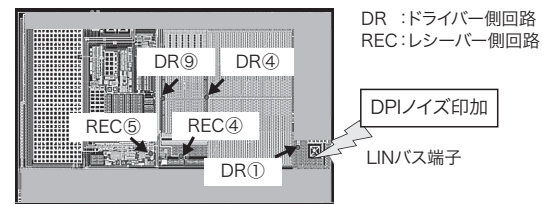


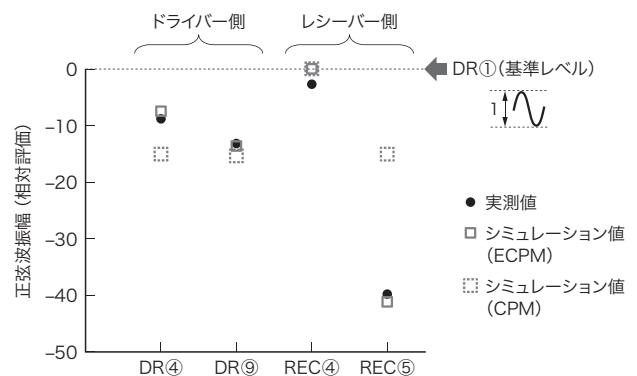
図2. OCM TEGのブロック図

DPIノイズを印加したときの内部回路ノードやSi基板の電圧変化を測定するためのもので、LINトランシーバー、CANトランシーバー、及びOCMの各ブロックで構成される。

Block diagram of on-chip waveform monitor (OCM) test element group (TEG)



(a) LINトランシーバー部分のOCM配置



(b) DPIノイズレベルの実測値とシミュレーション値の比較

図3. LINトランシーバー内のOCMによるDPIノイズレベルの実測値とシミュレーション値の比較

LINトランシーバーにOCMを5か所配置している。OCMのそれぞれの箇所で、DPIノイズレベルの実測値とシミュレーション値がほぼ一致していることが分かる。

Comparison of measured and simulated values of DPI noise level at each location of OCM in LIN (Local Interconnect Network) transceiver

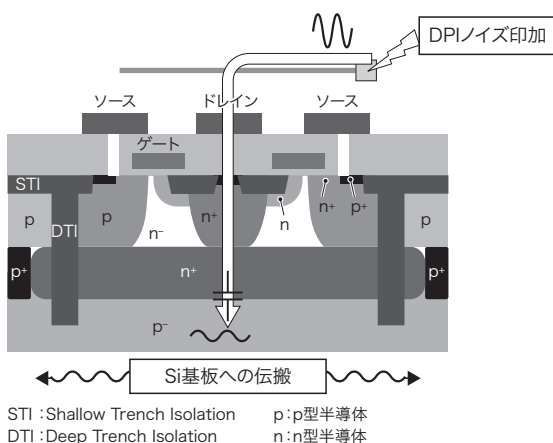


図1. DMOSからSi基板へのDPIノイズの伝搬

DMOSの出力段から、IC端子や、配線層、Si基板にノイズが伝搬し、各素子に回り込んで誤動作の要因になる。

Propagation of direct power injection (DPI) noise from double-diffused MOS (DMOS) to silicon substrate

LINトランシーバーにおけるOCMの配置例、及びそのOCMでのDPIノイズレベルの実測値と、ノイズ解析・検証ツールによるシミュレーション値の比較を、図3に示す。永田教授らの研究により、今までのEMC解析に使用されてきた線形素子モデルのCPM (Chip Power Model) に、保護ダイオードまでを含めた非線形モデルECPM (Extended Chip Power Model) を付加することで、OCMの位置ごとに、Si基板内の距離と周辺の素子に応じたDPIノイズレベルを、OCMでの実測とシミュレーションで一致させることができた。

また、このLINトランシーバー部へのDPIノイズ印加をシミュレーションしたものが図4(a)である。右下のLINバス端子から印加されたDPIノイズ強度を、赤色(強)から青色(弱)への変化で視覚的に確認できる。更に、DPIノイズ印加のあり/なしで誤動作をシミュレーションした結果を図4(b)に示す。入力端子(T_x)からの信号で動作しているLINバス端子に、DPIノイズを印加すると、内部ノードが誤動作して出力端子(R_x)から誤パルスが発生している。このシミュレーション結果は、OCMでの実測結果と一致している。

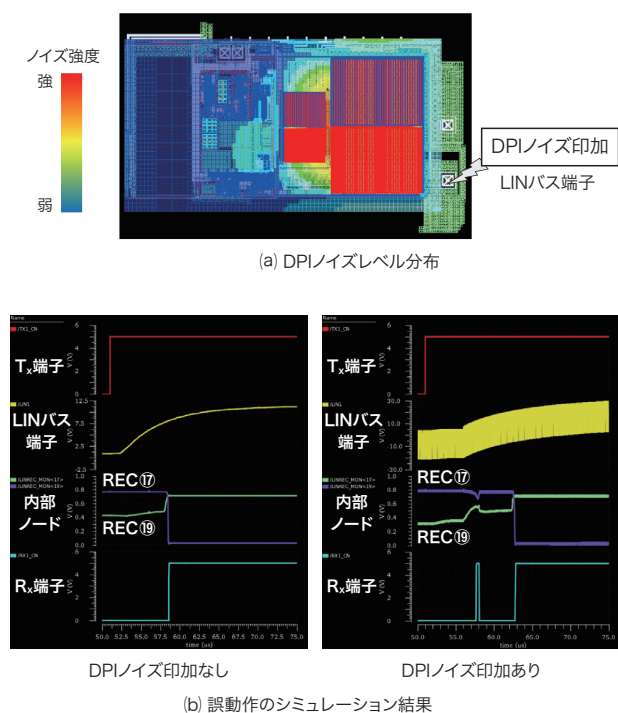


図4. LINトランシーバーへのDPIノイズ印加時のノイズレベル分布と誤動作のシミュレーション結果

DPIノイズを印加すると、内部ノードの誤動作で、R_x端子に誤パルスが発生することがシミュレーションで再現されている。

Results of simulations of DPI noise level distribution and waveform data with and without DPI noise application of LIN transceiver

このように、DPIノイズ印加時のシミュレーション精度が向上したため、回路や、レイアウトデータ、パッケージなどの情報から、IEC 62132-4規格に沿った、DPIノイズ耐量の事前予測が可能になり、フロントローディングに適用できる。また、この技術は、IC内部のノイズ解析にも応用可能である。DC(直流)-DCコンバーターや大電流モータードライバにおいて、スイッチング時のEMSの誤動作解析を行うことで、アグレッサ素子(ノイズ発生側)の影響を受けて誤動作するビクティム素子(ノイズ受動側)の特定などにも応用ができ、不具合検証に使用している。

この要素技術を用いて、現在、CAN-FD (CAN with Flexible Data Rate)トランシーバーや、LIN及びCXPI (Clock Extension Peripheral Interface)トランシーバーを開発中である。

3. 熱設計のフロントローディングへの取り組み

3.1 BiCDでの電気-熱連成シミュレーション

BiCD-0.13 μmプロセスでは、パッケージや、PCB(プリント回路基板)、ヒートシンク、筐体を含めた過渡的な熱シミュレーションは、既の実施していたが、更に、それぞれの熱モデルを持ったデバイス間で、相互に影響する熱シミュレーションも可能にした。

この例を、図5に示す。DMOS出力段(M1A, M1B)と小信号部には、それぞれのSPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)モデルに自己発熱モデルを追加し、また、DMOS出力段と小信号部の間には、熱伝導モデルを追加してある。通常のSPICEシミュレーションでの温度シミュレーションは、例えば、ジャンクション温

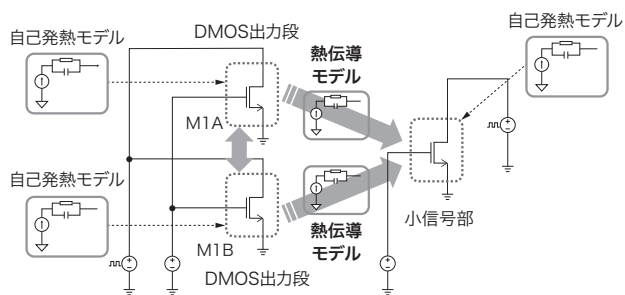


図5. IC内のデバイスに追加した熱等価回路モデル

DMOS出力段や、小信号部などの各デバイスにおけるSPICEモデルに、熱回路モデル(自己発熱モデルや熱伝導モデル)を追加した。

Thermal equivalent circuit model with self-heating and heat transfer models added to SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) model

度 T_j を 125°C に固定して、電気的特性は T_j を一定として解析するため、時間軸での変化をシミュレーションすることができなかった。しかし、この熱モデル(自己発熱モデル又は熱伝導モデル)の付加により、大電流を流すアプリケーションの場合に、DMOSの自己発熱によってダイ(Die)内部の温度が過渡的に上昇する特性を、時間軸の変化としてシミュレーションすることが可能となった。

DMOSの出力波形を含む、電気-熱連成のSPICEシミュレーション結果を、図6に示す。パルス幅変調信号でDMOSがオン/オフを繰り返す度に、素子の温度が上昇/下降を繰り返しながら全体として徐々に上昇していることが分かる。また、自己発熱によりDMOSがオンのときの出力電流の全体が下降していることや、小信号部の消費電流の全体が僅かだが少しずつ減少していることが、シミュレーションで確認できる。

3.2 ディスクリートパワーデバイスの連成シミュレーション

ECU開発のフロントローディングのために、ディスクリートパワーデバイスの電気-熱連成シミュレーションを行った。三相ブラシレスモーター用のインバーターに、電気-熱連成シミュレーションを応用した例について述べる。

マルチドメインEDA (Electronic Design Automation) ツールを用いた、SPICEモデルと熱モデルから成るシステム

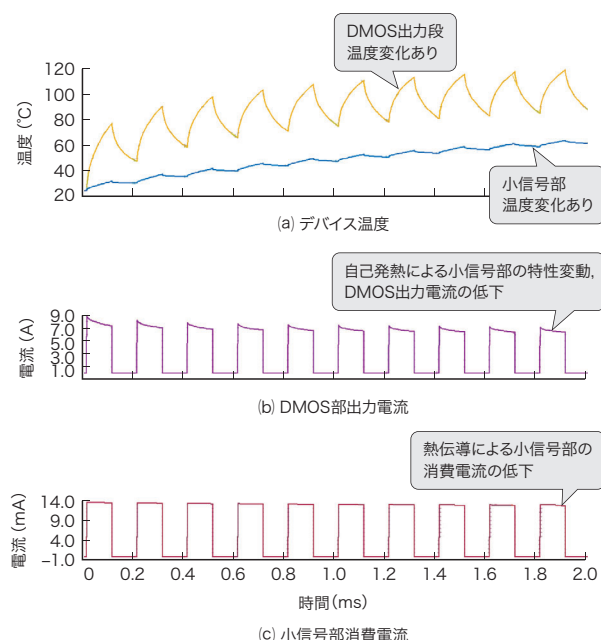


図6. 電気-熱連成シミュレーション結果

図5のSPICEモデルを使用して、デバイス温度、DMOS出力電流、小信号部消費電流について、電気-熱連成シミュレーションを行った。

Results of electrothermal circuit simulations

での連成シミュレーション例を図7に示す。三相ブラシレスモーター用のインバーター駆動回路にあるパワー MOSFET (MOS電界効果トランジスター)^{(3), (4)}のSPICEモデルには、熱モデルを付加しており、自己発熱のシミュレーションが可能である。また、ベクトル制御モデル、基板モデル、ヒートシンクモデル、モーターモデルは、マルチドメインツールで記述したものを適用している。

この制御システムでの時間変化におけるモーターの測定結果を、図8に示す。図8(a)はモーター速度指令値とモーター回転速度を示す。モーター速度指令値は、0から500 rpmまで加速し、500から300 rpm、300から0 rpmまで減速させている。また、この条件でのモータートルク波形を図8(b)に示す。モーター回転速度が上昇すると正方向のトルクが増加し、モーター回転速度が低下すると負方向のトルクが増加している。加えて、トルクを大きくするときはモーター電流(U相、V相、W相)が増加し、トルクを小さくするときはモーター電流が減少する(図8(c))。このモーター電流の増減に伴って、インバーター駆動回路のパワー MOSFET (U相、V相、W相)のハイ側、ロー側におけるドレイン電流に対応したそれぞれの T_j は、過渡的な熱で変化することが確認できた(図8(d))。また、モーター電流が流れているときは、パワー MOSFETの自己発熱で右上がりの熱特性を示すので、この熱特性を考慮してヒートシンクなど筐体の最適設計が可能になる。

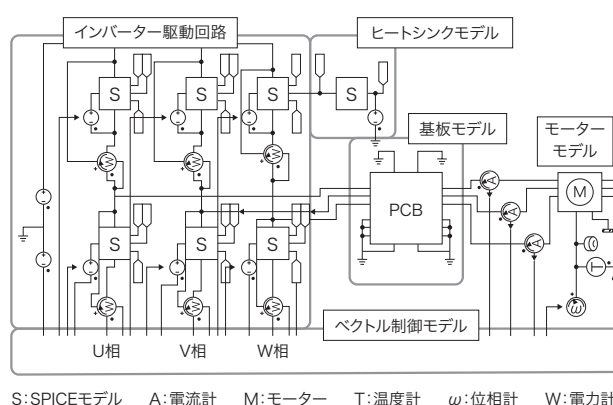


図7. MOSFETを使用するモータードライバーの電気-熱連成シミュレーション用モデル

電気-熱連成シミュレーションをする回路ブロックは、ベクトル制御モデル、基板モデル、インバーター駆動回路、ヒートシンクモデル、モーターモデルで構成されており、インバーター駆動回路にあるパワー MOSFETのSPICEモデルには、熱モデルが付加してある。

Electrothermal circuit simulation model for three-phase brushless motor driver using MOSFETs

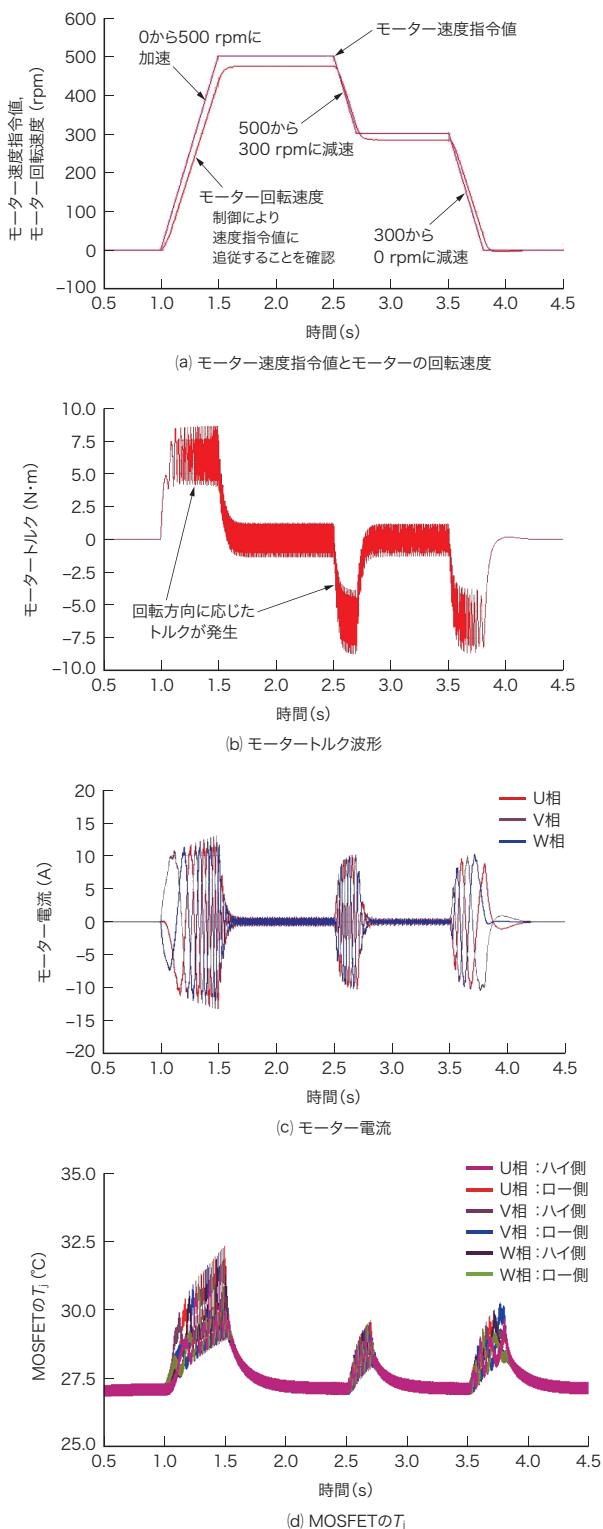


図8. モーターの測定結果

時間変化とともに、モーター回転速度や、モータートルク、モーター電流波形、MOSFETの T_j が、モーター速度指令値に沿って変化しているのが分かる。

Results obtained by simulations of motor driving parameter and MOSFET junction temperature changes over time

これらの技術により、開発での手戻り削減などへの大きな貢献が可能になってきている。また、今後、シミュレーションの負荷を軽くすることで、様々な顧客が容易に電気-熱連成シミュレーションを実施できるように、更なる改良を行っていく。

4. あとがき

車載用アナログICにおける、EMC・熱設計に対するフロントローディング技術の開発環境を構築した。

現在は、ディスクリットパワーデバイスも含めた、フロントローディング技術の開発を進めている。今後も、EMCと熱のシミュレーション時間を更に短縮する手法などを検討し、顧客のECU開発に貢献していく。

文 献

- (1) Taniguchi, K. et al. "Susceptibility Evaluation of CAN Transceiver Circuits with In-Place Waveform Capturing under RF DPI". Proc. The 2017 11th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo), St. Petersburg, Russia, 2017-07, IEEE, 2017, p.59-63.
- (2) Tsukioka, A. et al. "Simulation Techniques for EMC Compliant Design of Automotive IC Chips and Modules". 2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), Angers, France, 2017-09, IEEE, 2017, p.420-425.
- (3) 大藏徹太郎, 車載用電子制御ユニットの高性能化と小型化に貢献する新世代LV-MOS, 東芝レビュー, 2014, 69, 8, p.16-19.
- (4) 山口正一, ほか, エネルギー利用率の向上に寄与する半導体デバイスの歩みと今後の動向, 東芝レビュー, 2017, 72, 5, p.2-7. <http://www.toshiba.co.jp/tech/review/2017/05/72_05pdf/a02.pdf>, (参照2018-07-06).



江上 孝夫 EGAMI Takao
東芝デバイス&ストレージ(株)
車載戦略部
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.



小松 輝充 KOMATSU Terumitsu
東芝デバイス&ストレージ(株)
ミックシグナル IC 事業部
アナログ開発第二部
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.



伊見 仁 IMI Hitoshi
東芝デバイス&ストレージ(株)
半導体研究開発センター
パッケージソリューション技術開発部
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.



永田 真 NAGATA Makoto, D.Eng.
神戸大学 大学院 科学技術イノベーション研究科 教授
博士(工学) 電子情報通信学会・応用物理学会・IEEE・
エレクトロニクス実装学会会員
Kobe Univ. Graduate School of Science, Technology and Innovation