

知っておきたいキーワード

SI / PI (Signal Integrity / Power Integrity)

中 溝 哲 士[†][†] キーサイト・テクノロジー株式会社

"SI / PI (Signal Integrity / Power Integrity)" by Satoshi Nakamizo (Keysight Technologies Japan K.K., Tokyo)

キーワード：伝送線路, PCB, 特性インピーダンス, SerDes, アイ・パターン, PDN

まえがき

SI (Signal Integrity : シグナル・インテグリティ) は「信号品質」を意味する。USB, PCI Express, Serial ATA, HDMIなどの身近なインタフェースにもみられるように、ひと昔前では考えられないような高速度でデジタル・データ通信が電子機器内、機器間を問わず行われている。インタフェースの

高速化が進む昨今、送信側のドライバICから、受信側のレシーバICまで電気信号を劣化なく伝送することは困難であり、レシーバICが許容できない劣化は伝送エラーの原因の一つとなる。一方、PI (Power Integrity : パワー・インテグリティ) は「電源品質」を意味する。PCB (Printed Circuit Board: プリント基板) 上に実装されたマイクロプロセッサ, FPGA, メモ

リー等のデジタルIC (負荷) に供給される電源電圧は常に安定しているわけではなく、デジタルICの動作状況に応じて刻々と変動してしまう。変動幅がこれらのデジタルICが許容できない大きさになると、デジタルICの動作に支障をきたす原因の一つとなる。電子機器の設計者は、設計の段階でSIおよびPIの確保が求められる。

SI問題の原因

ドライバICから出力された電気信号はケーブル, コネクタ, PCB上の配線などの「伝送線路」を経由してレシーバICに入力される。電気信号が伝送線路を通る時、電圧と電流は一定の比率となる。これを特性インピーダンスという。特性インピーダンスは一定であることが望ましいが、ケーブルやコネクタが接続される箇所や、PCB

上の配線に物理的な制約が発生する箇所などでは特性インピーダンスが制御できずに不連続となる。この箇所では電気信号の一部が反射するため、波形が歪むことになる。

また、一般的に伝送線路はローパス・フィルタ特性を示す。伝送速度 (ビットレート) の高速化は周波数の上昇を意味するため、伝送速度が高速化すればするほど、電気信号の高周波成分が減衰する。デジタル信号の多

くは「0」と「1」を低い電圧と高い電圧に置き換えて伝送するが、「0」と「1」が遷移する箇所、すなわち電圧が変化する箇所に高周波成分が含まれるため、高周波成分が失われると、波形が鈍ることになる。その他、複数の伝送線路を近接させ過ぎると、伝送線路間で影響を受け与えるクロストークが発生してしまう。クロストークも波形が歪む原因となる。

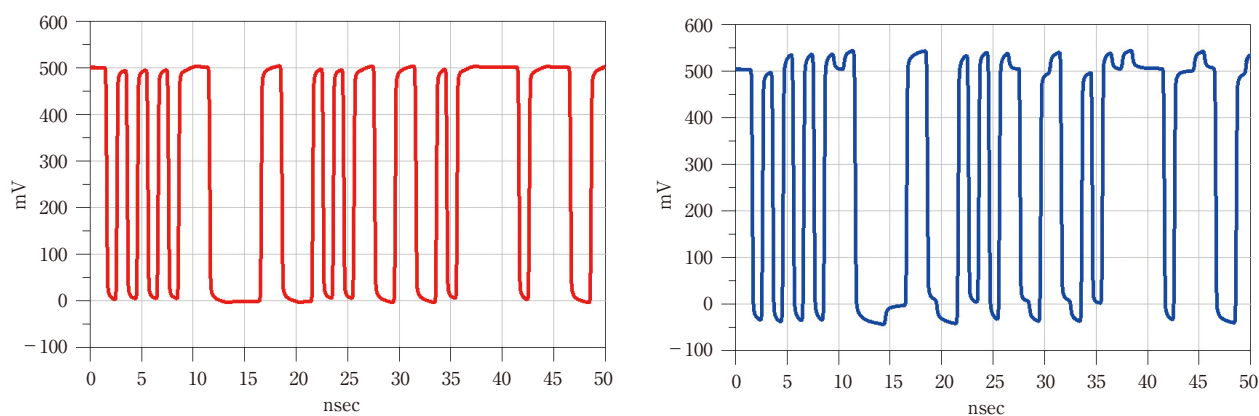


図1 FR-4相当のPCBに敷設した25 cmの伝送線路を用いて、1 Gbpsの電気信号を伝送した場合のシミュレーション結果。左は特性インピーダンスが連続しているのに対し、右側は特性インピーダンスが不連続となる箇所があるため、波形に反射がみられる。

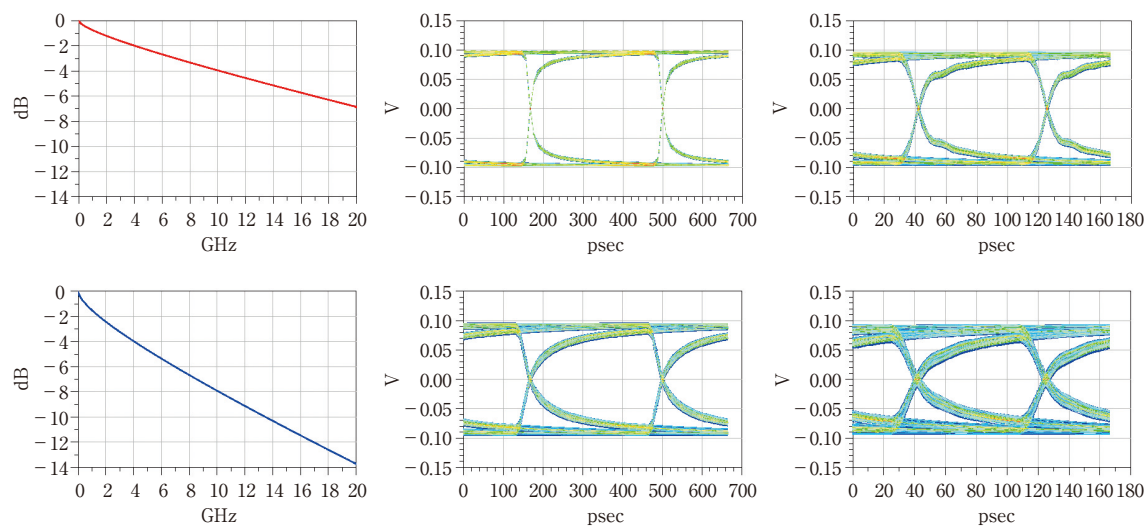


図2 上段：FR-4相当のPCBに敷設した15 cmの伝送線路のシミュレーション例，(左) 通過特性 (Sパラメータ)，(中) 3 Gbpsの電気信号を伝送した場合のアイ・パターン，(右) 12 Gbpsの電気信号を伝送した場合のアイ・パターン。下段：FR-4相当のPCBに敷設した30 cmの伝送線路のシミュレーション例，(左) 通過特性 (Sパラメータ)，(中) 3 Gbpsの電気信号を伝送した場合のアイ・パターン，(右) 12 Gbpsの電気信号を伝送した場合のアイ・パターン。いずれも伝送距離が長くなったり，伝送速度が速くなったりするにつれてアイ・パターンのアイは閉じていく。

SIの改善方法

特性インピーダンスが不連続とならないようPCB上の配線をなるべく一定の幅にしたり，より高周波特性の良いケーブルやPCB材料を採用したりする

ことでSIは多少の改善が図れる．また高速度なデジタルデータ通信に広く用いられている SerDes (Serializer / Deserializer) システムの場合，ドライバICにはFFE (Feed Forward Equalizer) によるエンファシス，レシーバICに

はCTLE (Continuous Time Linear Equalizer) やDFE (Decision feedback Equalizer) といったイコライゼーション機能が搭載される場合も多い．CTLEは伝送線路で減衰する高周波成分を補償するものである．

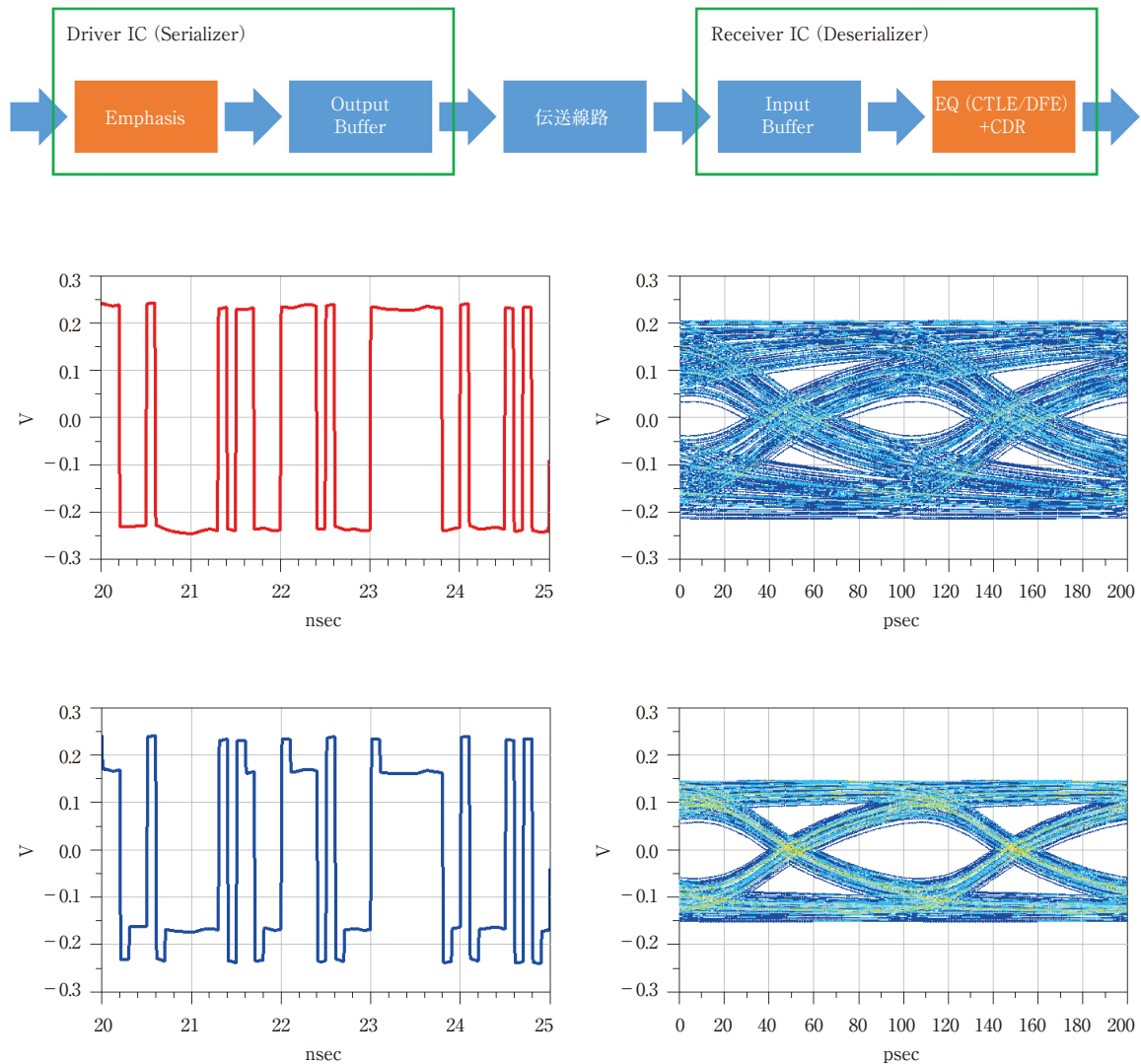


図3 上段：エンファシス適用前，(左) ドライバIC側の波形，(右) レシーバIC側のアイ・パターン．下段：エンファシス適用後，(左) ドライバIC側の波形，(右) レシーバIC側のアイ・パターン．

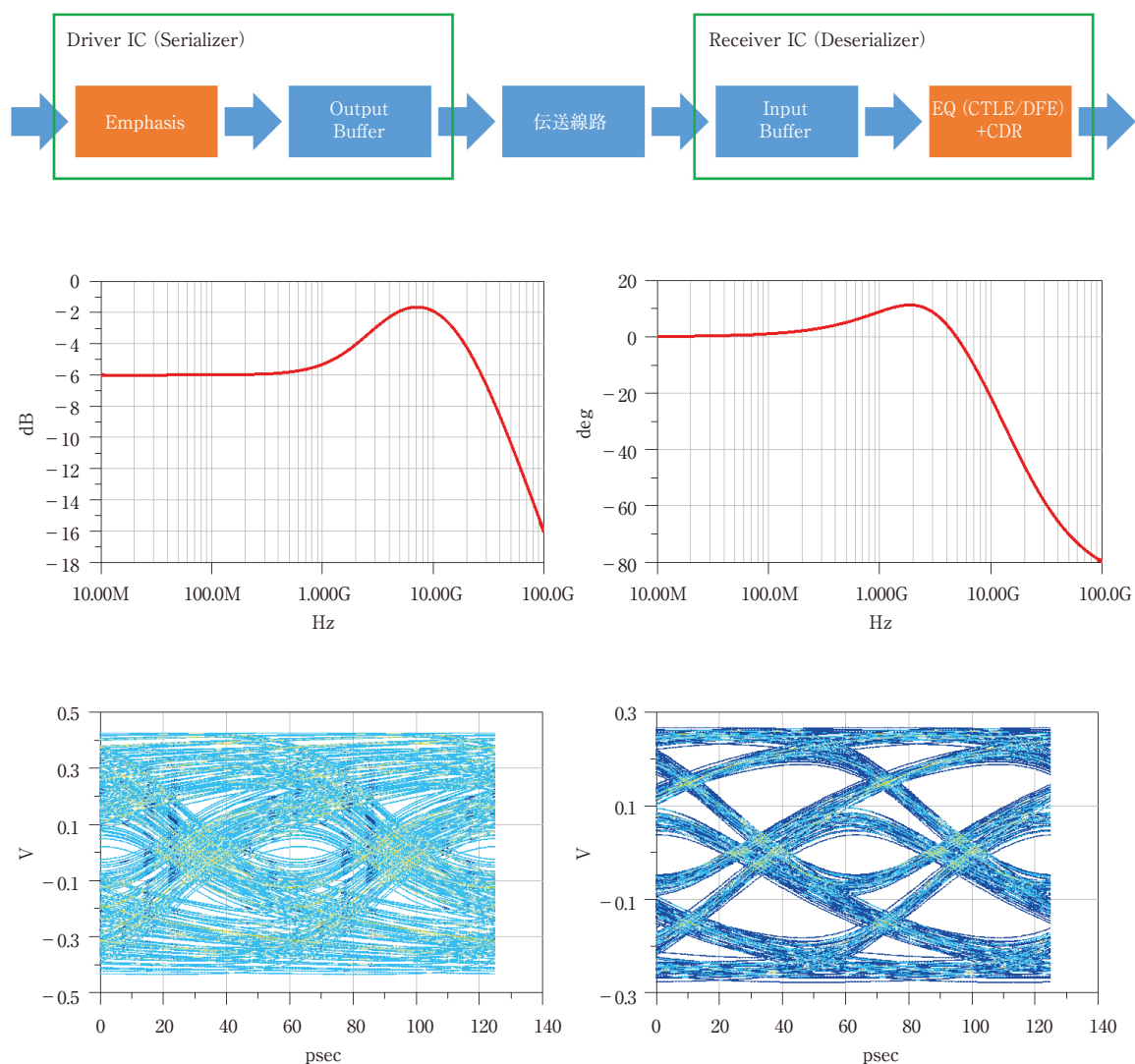


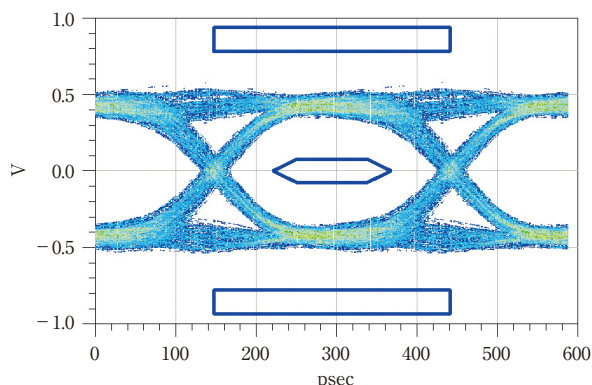
図4 上段：CTLEの伝達関数，(左)利得，(右)位相．下段：(左)CTLE適用前のレシーバIC内部のアイ・パターン，(右)CTLE適用後のレシーバIC内部のアイ・パターン．

SIの評価

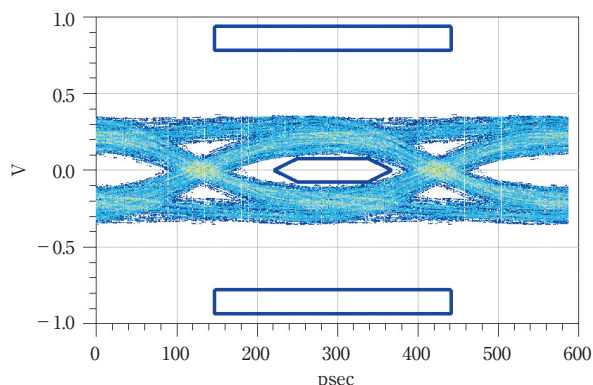
SIの代表的な評価方法の一つにアイ・パターンがある。波形の遷移を1

ビットずつ重ねて描画すると、目(アイ)のようなグラフィックを得ることができる。アイが大きく開いているほど、高品質な波形といえる。インタフェー

ス規格によってはマスクテストを定義している。規格によって定義されたマスクの内部にアイ・パターンが含まれないようにすることを求めている。



アイ・パターン内にマスクが含まれていないため、Passを示す。



アイ・パターン内にマスクが含まれているため、Failを示す。

図5 マスクテストの例

PIの基礎

デジタルICは、PCB上に実装された電源ICからPDN (Power Delivery NetworkまたはPower Distribution Network：電源供給回路)を介して直流電源が供給される。一般的にPCBの導体には銅が用いられるが、固有の導電率(抵抗率)によってPDNは少なからず抵抗をもつ。電圧(E)は電流(I)と抵抗(R)の積で表されるため、デジタルICの消費電流にPCB上のPDNの抵抗を掛けた量だけ、デジタルICに供給される電源電圧に電圧降下

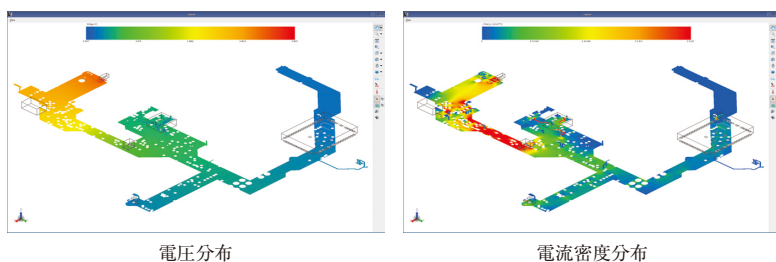


図6 PDNのシミュレーション例。電源ICからデジタルICに近づくにつれてIRドロップが大きくなる。電流密度の高い箇所はIRドロップが大きく変化している箇所を示す。

が発生してしまう。これをIRドロップという。

PIの実際

現実的にはデジタルICは一定の消費電流になることは少なく、その動作状況によってその消費電流は刻々と変動するが、これは周波数特性をもつことを意味する。消費電流が周波数特性をもつと、PDNも容量性、誘導性の寄生成分であるリアクタンスを考慮し、単純な「抵抗」から、周波数特性をもった「インピーダンス」に拡張して考慮しなければならない。PDNのインピーダンスをあらゆる周波数において低く保

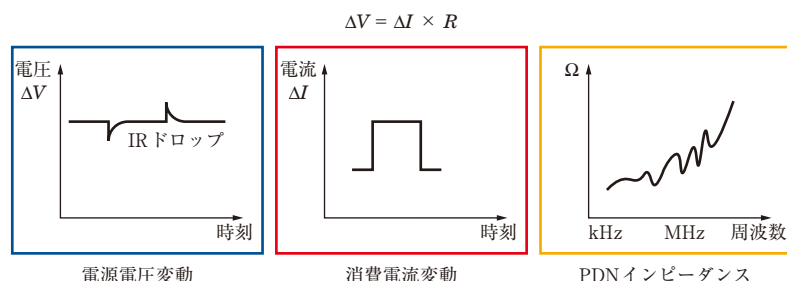


図7 IRドロップは消費電流とPDNのインピーダンスの積で表される

つことで、消費電流が変動してもIRドロップを抑えることができる。

PIの改善方法

PDNのインピーダンスを低くする方法の一つに、デジタルICの近くのPDNの電源とグラウンド間をコン

デンサで接続する方法がある。このコンデンサはデカップリングコンデンサやバイパスコンデンサなどと呼ばれる。コンデンサは電気を蓄えることができるため、デジタルICの消費電

流が変動しても、近くに接続されたコンデンサが電源を瞬時に供給できることになる。これはPDNのインピーダンスが低くなることを意味する。

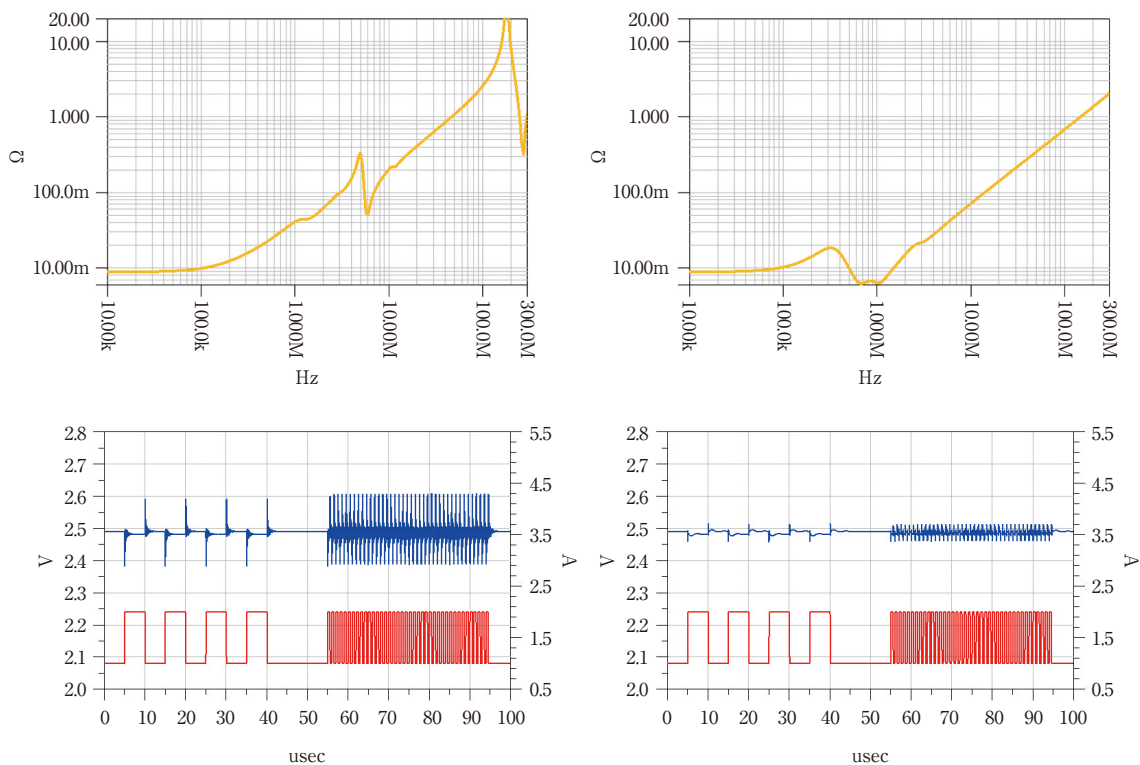


図8 上段：PDNのインピーダンス，(左)改善前，(右)コンデンサによる改善後。下段：消費電流変動による電源電圧変動，(左)改善前，(右)コンデンサによる改善後

むすび

一般的に波形やアイパターンはオシロスコープを用いて、伝送線路の特性やPDNのインピーダンスはネットワークアナライザを用いて測定するが、測定は少なくともPCBが製造された後の段階でしか行えない。PCBの製造前の段階でSI/PIの問題を把握するためには回路シミュレータや電磁界シミュレータの活用が必要となる。

(2020年7月27日受付)



中溝 哲士 なかみぞ とし 映像機器メーカー、半導体商社を経て、2017年、キーサイト・テクノロジー(株)入社。高速デジタルインタフェース搭載機器開発者向けに回路シミュレータ、電磁界シミュレータの提案、技術サポートを行う。