

USB Type-Cの実装に関する 3つの課題とその対処

2016年1月

著者**Morten Christiansen,**
Technical Marketing
Manager, USB

USBはPCおよび家電機器で最も普及している有線インターフェイス規格です。USB機能を備えた製品は毎年20億台以上出荷されています。USBはこれまで15年間、時代の要請に応じて何度も高速化が図られてきました。最新のUSB Type-C™規格では、今後の15年間を見据えて高い拡張性、堅牢性、使いやすさを備えた新コネクタが定義されています。USB Type-Cは2014年の仕様発表からわずか数ヶ月で複数の製品が登場しており、これまでのUSB規格の中で最も急速に採用が広がるなど、上々の滑り出しを見せています。

USB Type-Cコネクタを製品に採用すると、さまざまな面でユーザーの利便性が向上します。USB Type-Cはホスト側とデバイス側でコネクタに違いがなく、1種類のケーブルですべての製品を接続できます。また、コネクタを表裏どちら向きにも挿入できます。機器本体側のコネクタ形状が小さくモバイル製品にも適しています。さらに、これまで各社独自の仕様に基づいていたドッキング・ステーション/モニタもUSB Type-Cを採用して共通化することで、システムのコストと複雑さを大幅に軽減できます。一般的なドッキング・ステーションはDisplayPortリピータとUSBハブ(主にキーボード/マウスを接続)を備え、製品によってはネットワーク接続、スピーカー出力、アナログ・オーディオ・ヘッドセットをサポートする場合があります。USBハブとUSB機能を内蔵したドッキング・ステーション・モニタでDisplayPort Alternate Modeを使用することもできます。DisplayPort HBR-3ビットレートは、USB 3.0またはUSB 3.1と同時に複数の4K/60Hzモニタをサポートします。ドッキング・ステーションまたはドッキング・モニタにPower Delivery (PD) 機能を追加すると、USB Type-Cコネクタだけで電源、データ、ビデオ、オーディオに対応できます。

現在、多くの設計者がUSB Type-Cをサポートした製品およびシステム・オン・チップ (SoC) の開発を急いでいます。本稿では、USB Type-Cをネイティブにサポートした製品およびSoCの設計における主な課題についてご説明し、その解決方法をご提案します。

- ▶ 課題1: 表裏どちら向きにも挿入できるUSB Type-Cコネクタでは2つのSuperSpeedデータパスをサポートする必要があります。
- ▶ 課題2: 製品ごとに異なるさまざまなUSB Type-CハードウェアをサポートできるようにSoCとシステム・デザインを分割する必要があります。設計者は仕様をよく読んで高精度アナログ回路および高電圧/大電流スイッチに関する要求事項を理解する必要があります。これらは外部のディスクリート部品として実装することも、専用の外部USB Type-Cコントローラチップを使用することも、電源管理IC (PMIC) やSoCに統合することもできます。
- ▶ 課題3: USB Type-C管理ソフトウェアの分割があります。これは、メイン・プロセッサ、内部マイクロコントローラ、電源管理IC内のマイクロコントローラ、外部の専用USB Type-Cチップのいずれかで実行できます。

課題 1：データパスの実装

USB Type-Cコネクタは表裏どちら向きにも挿入できるよう点対称に設計されており、ほとんどの信号が二重化されています (図1)。

GND	TX1+	TX1-	V _{BUS}	CC1	D+	D-	SBU1	V _{BUS}	RX2-	RX2+	GND
GND	RX1+	RX1-	V _{BUS}	SBU2	D-	D+	CC2	V _{BUS}	TX2-	TX2+	GND
GND	+2X1	-2X1	V _{BUS}	CC2	D+	D-	SBU2	V _{BUS}	-1X1	+1X1	GND
GND	+2X2	-2X2	V _{BUS}	SBU1	D-	D+	CC1	V _{BUS}	-1X2	+1X2	GND

図1：ピンが点対称に配置されたUSB Type-Cコネクタ

このため、SuperSpeed USB製品ではデータパス マルチプレクサ、Alternate Mode製品ではデータパス・クロスバー・スイッチが必要です。USB Type-Cデータパスの実装方法には、(1) 外部データパス・スイッチを使用する、(2) 2つのPHYまたは2つのポートを実装する、(3) 内部のオンダイ・スイッチを使用する、(4) USB-CデータパスPHYを使用するという選択肢があります。

外部データパス・スイッチ

USB Type-Cをサポートした民生機器では、図2に示したような外部データパス・スイッチ (SoCまたはUSBチップセットに外付けしたマルチプレクサ) を使用するのが一般的です。元々PCIe[®]、Ethernet、SATA、DisplayPortなどの規格用に設計された既存の高周波アナログ・スイッチをUSB Type-Cに再利用するという方法です。この方法は最短期間で製品を市場に投入できる一方、コストとPCB面積、そして実装によっては信号品質が問題となります。

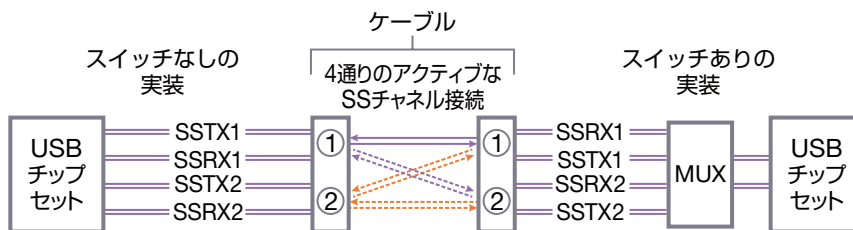


図2：USB Type-Cポート同士のデータ・バス配線の論理モデル

スイッチの損失は、USBポートからUSB Type-Cコネクタまでのチャンネル損失バジェットに影響します。USB 3.0 (正式には「USB 3.1 Gen1モードのUSB 3.1ポート」) の場合、スイッチの損失 (パッケージ損失を含む) は通常1.5dBです。USB 3.0 Type-Cのチャンネル損失バジェットは6.5dBで、そこからスイッチの損失を差し引くとチャンネル損失バジェットは5dBとなります。すると、PCの品質およびPCBレイアウトによっては、USBポートからコネクタまでの最大PCBトレース長が6～7インチにまで減少します。製品によっては5dBのバジェットで十分な場合もあります。しかしStandard-Aを使用したホストのチャンネル損失バジェットは10dBで、多くのホスト実装では10dBのバジェットは非常に厳しく、5dBのバジェットでは実装が不可能です。

USB 3.1 (USB 3.1 Gen2モードのUSB 3.1ポート) のダイからコネクタまでのチャンネル損失バジェットは8.5dBです。一般的なPCBトレース長は4インチですが、外部スイッチを追加すると2インチ以下に制限されます。製品によっては、リドライバを内蔵したUSB Type-C専用の外部スイッチを使用してUSB Type-Cをサポートしているものもあります(図3)。この方法はUSB 3.0には適用できませんが、USB 3.1 Gen2モードの場合は単なるリドライバではなく完全なリタイマが必要で、そのためには2つの完全なPHYと大規模なデジタル回路を用いてリタイマを構成する必要があります。このため、USB 3.1の場合はコストと消費電力が問題となります。

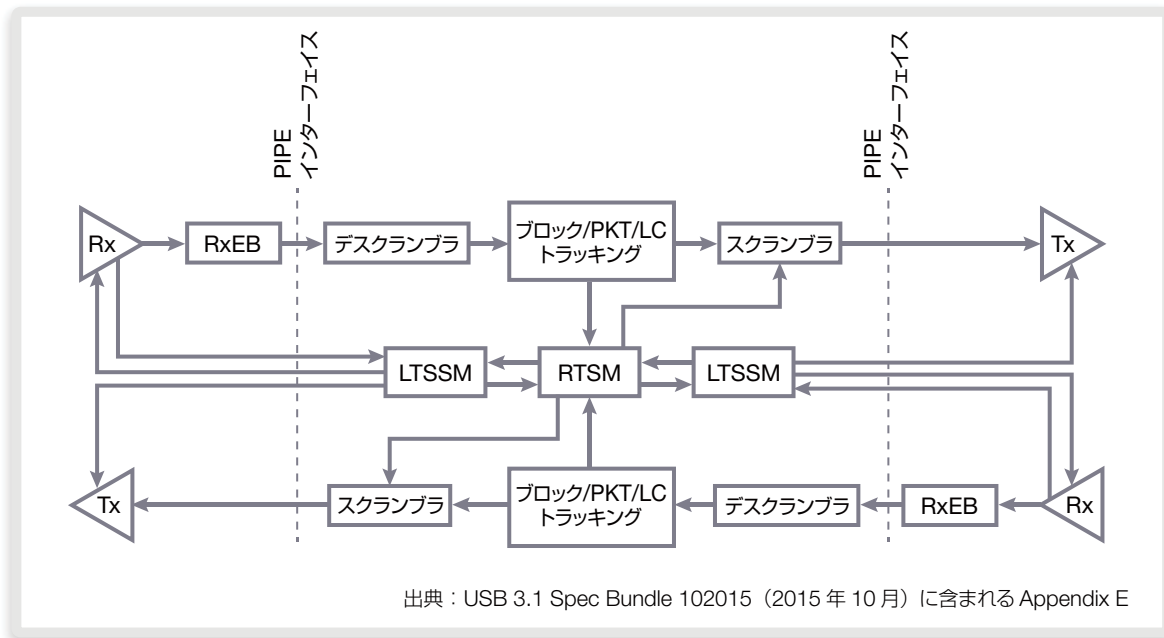


図3：USB 2.0モードに必要なリタイマのハイレベル・アーキテクチャ (例)

2 PHY/2ポート・ソリューション

USB Type-CをネイティブにサポートしたSoCを最短期間で市場に投入できるのは、USB 3.0 PHYまたはUSB 3.1 PHYを2つインスタンス化する方法です。USB Type-Cコネクタの挿入の向きに応じてどちらか一方のPHYがアクティブになり、もう一方のPHYは低消費電力ステートとなります。外部データパス・スイッチは使用しないため、信号品質の低下はありません。シリコン面積は大きくなりますが、外部スイッチまたはスイッチとリドライバを使用するよりもコストを抑えられます。

これに似たソリューションとして、マルチポートUSBホストの場合は既存のStandard-Aポート2つを使って1つのUSB Type-Cポートを実装できます。図4は、一般的な4ポートUSB 3.0ホスト・コントローラ・チップをそのまま使用して実装した2ポートUSB Type-Cホスト・コントローラ・プラグイン・ボードを示しています。2つのSuperSpeed USB RXおよびTXペアを束ねて1つのUSB Type-Cコネクタを実装しています。シグナル・インテグリティを維持するため、SuperSpeed信号はコントローラからUSB Type-Cコネクタまで直接配線します。この配線は、PCBの部品面を通過しています。2つのUSB 2.0信号ペアもコントローラからUSB Type-Cコネクタまで配線していますが、この配線はそれほどクリティカルでないため、SuperSpeed USBのPCBトレースの最適な配線を邪魔しないように途中でPCBの裏側に回しています。

USB Type-C仕様では、デバイスを接続するまでVbusを有効にはしないと規定されています。USB Type-Cコネクタの隣には負荷スイッチと大容量キャパシタがあります。ホスト側では各CCピンにプルアップ抵抗Rpが1つずつ接続されています。デバイスを接続すると、デバイス側のプルダウン抵抗Rdによってどちらか1つのCCピンの電圧がLowに遷移します。これにより、負荷スイッチがVbusを有効にします。通常はCCピンの検出を利用して挿入の向きを判定します。図4に示したデザインでは、向きの検出は必要ありません。両方のポートがアクティブで、1つのポートのみがデバイスを検出します。もう一方のポートはアクティブのまま使用しません。この方式では消費電力が若干大きくなりますが、デスクトップ/ノートブックPCでは問題にならない程度です。

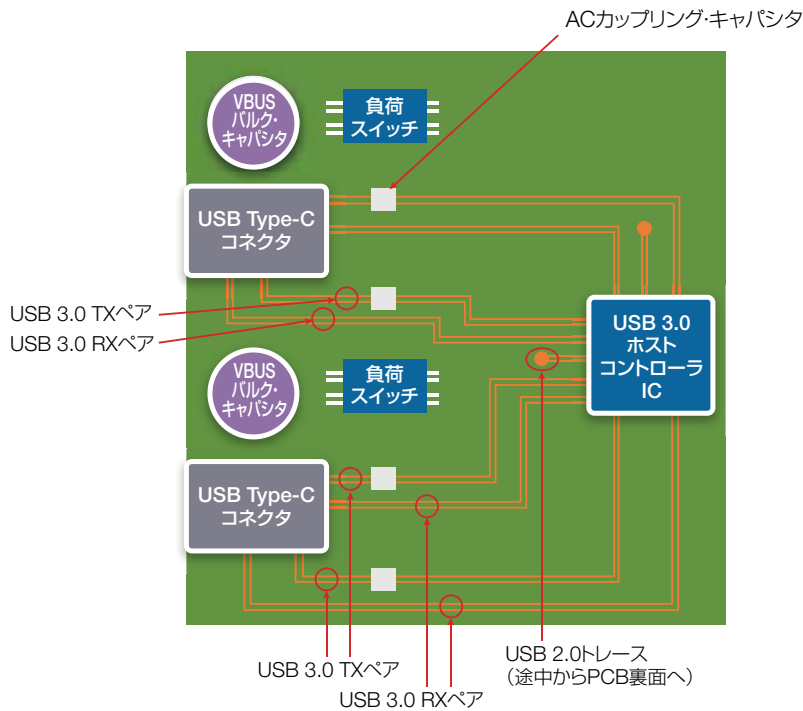


図4：マルチポートUSB Type-Cホスト・コントローラのPCB

USB Type-Cはまだ市場に出回っている製品が少ないため、製品投入を急げば高い利益率を期待できます。2 PHY/2ポート方式のデザインは、2つのVbus負荷スイッチといくつかの抵抗およびキャパシタを追加するだけで4つのStandard-Aコネクタを2つのUSB Type-Cコネクタに置き換えることができ、コストを最小限に抑えることができます。

2つのStandard-Aポートを1つのUSB Type-Cポートに置き換えるこの方法は、ノートブックPCにUSB Type-Cポートを実装する際によく使われます。チップセットは通常、複数のUSBポートをサポートしています。USBデバイス専用機器およびデュアル・ロール機器も2ポート・アプローチを利用できます。USBコントローラを1つしか使用しない場合は、挿入向きの検出とデータパス・スイッチが必要となります。しかしこの場合のデータパス・スイッチはUSBコントローラと2つのPHYの間のデジタル・ドメインに位置するため、信号品質には影響しません。

内部オンダイ・スイッチ

外部データパス・スイッチの代わりに内部オンチップ/オンダイ・スイッチを使用する方法もあります。この方法は外部スイッチに比べ損失が小さく、その点だけを見れば10Gbps USB 3.1 Gen2モードに適しています。ただしオンダイ・スイッチは非線形な周波数および位相応答を補償する必要があるため、USB 3.1 Gen2モードでは実装が困難です。また、大振幅のDisplayPortおよびUSB TX信号と小振幅のUSB 3.1 RX信号との間でクロストークが発生しないようにスイッチを設計する必要があります。反射を防ぐためにインピーダンス整合が必要です。リドライバ回路なしでオンダイ・スイッチを使用できるのは、事実上USB 3.1 Gen1 (USB 3.0) モードとDisplayPort HBR-2の場合に限られます。

USB-C PHY

これまで見たように、外部スイッチは最短期間で製品を市場投入できますがコストがかかります。2 PHY/2ポート方式ではシリコン面積が問題となります。内部スイッチは事実上USB 3.0でしか利用できません。リスクを抑えて最小限のシリコン面積でSoCに統合するには、実証済みのUSB-C PHYを1個だけ使用する方法を推奨します。

シノプシスは、先端プロセス・ノードに対応したUSB 3.0およびUSB 3.1向けUSB-C PHY製品を複数発表しています。DesignWare® USB-C 3.1および3.0 PHYは2レーン・ソリューションで、2 PHY方式と同じ利点を備えています。アナログ・スイッチは使用しないため、信号品質の低下はありません。USB Type-Cコネクタの挿入の向きに応じて、どちらか一方のレーンのみがアクティブになります。DesignWare USB-C PHYは2レーン間で多くの回路を共有しており、2 PHY方式に比べシリコン面積を大幅に抑えることができます。

課題 2：ハードウェアの分割

USB Type-Cのハードウェアと機能をすべて1個の多目的SoCに統合することはできないため、同じSoCを使用してコスト、消費電力、面積を最適化した複数の製品を展開するにはハードウェアを適切に分割することが重要になります。

分割の問題は、これまで常にASIC/SoC設計者を悩ませてきました。初期の民生電子機器では部品点数の最小化だけを考えていればよかったものの、ASICの発展に伴い、システム全体の機能を複数のデバイスに分割することがチップセット設計者にとっての課題となりました。こうした中で登場したSoCは、分割の問題を解決する最終手段として期待されました。ところが実際には、シングルチップSoCの多くはシングルダイではなく、1つのパッケージに複数のダイが含まれています。すべての機能をシングルダイに集積するのは技術的にもコスト的にも得策ではないためです。

特に先端プロセス・ノードを使用した最新の民生電子機器の場合、シングルチップSoCの経済性はますます低下しており、電源、オーディオ、RF回路に関してはメインのSoCから切り離し、より安価な旧世代のプロセス・ノードを使用するのが一般的です。マルチチップ・ソリューションとした方が機能を増やして高い価格を設定できるため、シングルチップ・ソリューションよりも高い経済性を期待できます。

システム・レベルで理想的なソリューションを得るには、SoC設計において複雑な分割の問題を解決する必要があります。低コスト、小面積、低消費電力、高機能、高性能など、何を理想とするかは個々のデザインによって異なります。しかしほとんどの場合は、これらの要素をバランスよく組み合わせたものをソリューションとします。あるSoCデザインに理想的なソリューションが別のSoCデザインにも理想的とは言えないためです。したがって現在のSoC設計においても、どの機能をシングルチップSoCに統合するのかの取捨選択に関して難しい判断を迫られます。

PHYへの統合 vs. USB Type-C専用ハードウェア

標準的なUSB実装では、アナログ・オーディオ、UARTモード、On-the-Go (OTG)、Battery Charging (BC)、High Speed USBはUSB 2.0 D+/D-ピンに多重化されます。このため外部ソリューションを使用するのは困難で、コストもかかります。標準的なUSB Type-C PHYのソリューションとしては、プロセス・ノードにかかわらずこの機能をUSB 1.1、USB 2.0、または完全なUSB 3.0/3.1 PHYに統合するのが理想的です。USB Type-Cハードウェアの統合では、高電圧/大電流が要求される場合の5V耐性が特に問題となります。USB Type-Cハードウェアの一部を先端プロセス・ノードで統合できたとしても外部負荷スイッチは必要で、オプションでVconnおよびVbusを監視する必要もあります。このようなソリューションではSoCのピン数が増え、外部FETやその他の回路も必要となるため、完全なUSB Type-Cポート・コントローラ・チップに比べコストがかかります。

USB Type-C仕様では、より柔軟なハードウェア分割が可能です。ホスト/デバイスのロールおよびホストの電流能力の通知、コネクタ挿入の向きの判定、Power Delivery (PD) メッセージの送信に使用するCC (Configuration Channel) ピンがUSBピンとは別に用意されています。CCピンに接続された回路でアタッチを検出できるため、接続されるまでUSB機能を無効にして消費電力を削減できます。これは携帯機器で特に重要な機能です。ケーブルにはCCワイヤは1本しかありません。このため、ケーブル両端の両方のCCピンに接続された回路を用いてコネクタ挿入の向きを判定できます。

USB Type-C仕様には、USB Type-Cコネクタを使用して機器から最大100Wの給電を可能にするPower Delivery (PD)機能があります。電圧および電流能力は、CCピンに多重化されるPDメッセージ(PD msg)を使用して検出します。PD msgを使用すると、Vbus電圧を5Vから12Vまたは20Vまで引き上げることができ、電流は標準USBの500mAまたは900mAから2A、3A、または5Aまで引き上げることができます。PD以外に、PD msgはUSBホストとデバイスの動的なデータ・ロールの切り替え、およびAlternate Modeの検出と設定にも使用します。

USB Type-C製品に必要なCCロジックはSoCに統合できる場合もありますが、大電流に対応する場合は電源管理IC (PMIC) に統合するのが理想的です。市場投入時間を最短化したい場合は、外部チップを使うこともあります。

このように、USB Type-C仕様では、多くの実装オプションを選ぶことができます。製品の種類に応じたオプションを選ぶことで、コスト、消費電力、面積をシステム・レベルで最適化したソリューションを構築できます。

USB Type-C Port Controller Interface

ハードウェアの分割を容易にするため、USB Type-C Port Controller Interface (TCPCI) 仕様ではUSB Type-Cポートに関するハードウェアとローレベル・ソフトウェアの分割を定義しています。USB Type-C Port Controller (TCPC) は、CCおよびPD msg機能に必要なローレベルのハードウェアを分離したものです。TCPCはSoC外部のチップとして実装することも、PMICやSoCに統合することもできます。

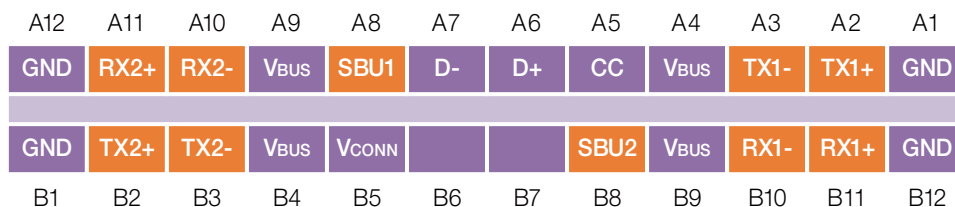
USB Type-Cサポート・チップはサプライヤ各社から多数発表されています。これらのサポート・チップには、簡単なCCロジックだけを実装したものもあれば、PD msg機能を追加してTCPCIを備えたものもあります。さらにマイクロコントローラとソフトウェア・スタックまで内蔵したものもあり、このようなチップはUSB Type-Cソフトウェアの分割の課題を解決する1つのソリューションとなる可能性があります。

課題3：USB Type-C ソフトウェアの分割

3つ目の課題は、製品ごとに異なるさまざまなUSB Type-Cソフトウェアをどのように分割するかという点です。USB Type-C Port Manager (TCPM) ソフトウェアは、オペレーティング・システム (OS)、製品固有のドライバ・モジュール、SoC内の組み込みソフトウェア、外部マイクロコントローラのいずれかに含めることができます。

組み込みOSを導入してUSB Type-CおよびAlternate Modeをサポートすることもできますが、主要OSベンダーは既存のUSBソフトウェア・スタックおよびUSBコントローラ・インターフェイスに変更が生じないことを前提としています。

DisplayPortなどの各種Alternate Modeに関しても同様の前提が存在します。Alternate Modeでは、MHL、DisplayPort、Thunderbolt™ 3などの用途に合わせてUSB Type-Cコネクタのほとんどのピンの役割を変更できます (図5)。



出典：USB Type-C ケーブル / コネクタ仕様 リリース 1.1

図5：Alternate Modeで役割を変更可能なピン

USB Type-C Port Controller Interface (TCPCI) 仕様とUSB Type-C System Software Interface仕様では、ハイレベルUSB Type-Cソフトウェアを1つの独立したUSB Type-Cタスクとして定義しています。これにより、USB Type-Cはよりスケラブルで実装しやすいものとなっています(図6)。オペレーティング・システムに大規模な変更を加えなくても実装および分割に関してさまざまな選択肢をサポートできるため、短期間で市場投入が可能になります。

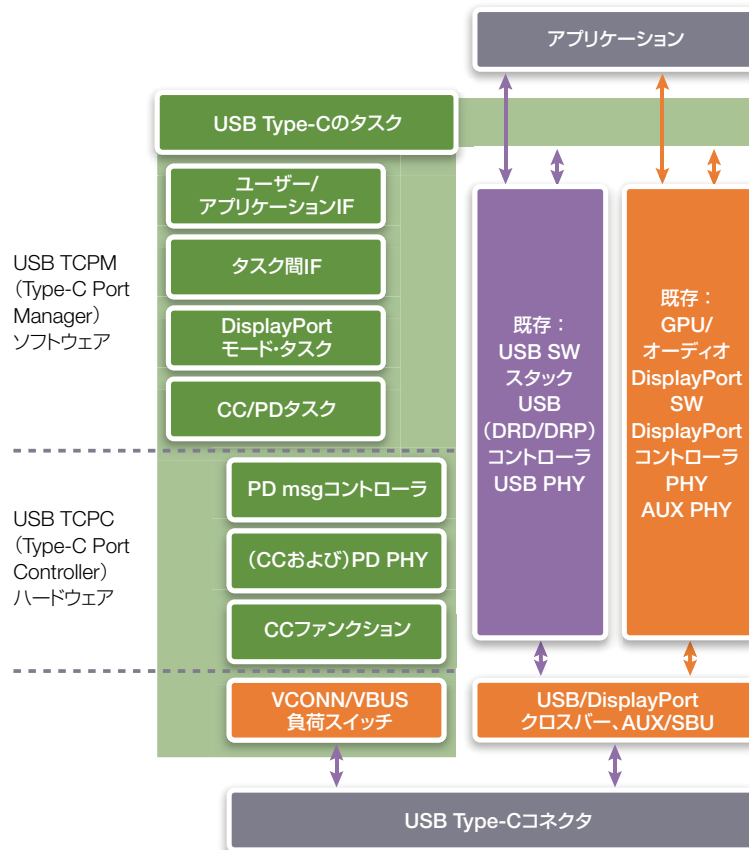


図6：USB Type-Cのタスクと役割の分割

TCPCI仕様とUSB Type-C System Software Interface仕様を利用すると、USB Type-Cソフトウェア分割に関して多くの利点が得られます。USB Type-C機能を完全にソフトウェアとして実装して製品開発中に継続的にアップデートするようにすれば、USB Type-Cに関する問題を開発期間中に発見することができ、製品の設計および販売に伴うリスクを軽減できます。

USB Type-C Port Manager

USB Type-C Port Manager (TCPM) はTCPC内のマイクロコントローラ (MCU)、PMIC、SoCで実行可能なソフトウェア・コンポーネントです。多くの製品では、TCPMをSoC内のアプリケーション・プロセッサでも実行できます。製品の種類によっては、TCPMを高度なTCPCハードウェアで置き換えることもできます。たとえばUSB 3.0デバイスはデバイス・モードのプルダウン抵抗を常に有効にし、コネクタの向きのみを検出してUSB Type-Cデータパス・スイッチに信号を送信します。DisplayPort Alternate Mode製品の場合はAlternate Mode機能を検出し、クロスバーとUSBを適切に設定する必要があります。

USB Type-C の3つの課題に対処

USB 2.0デザインの場合、簡単なUSB Type-Cハードウェアおよびソフトウェアを追加するだけで既存のPHYをそのまま使用できます。実装の複雑さは製品の機能によってさまざまで、2つの抵抗を追加するだけでよい場合もあれば、スイッチ抵抗と電圧コンパレータを使用し、さらに既存のUSB OTGソフトウェアをUSB Type-C用に変更することが必要な場合もあります。

シノプシスのDesignWare USB-C/USB 3.0 PHYおよびUSB-C/USB 3.1 PHY IPは、設計者が直面するSuperSpeed USBおよびSuperSpeedPlus USBデータパスの課題を解決します。USB-C PHYの外部には、製品固有のUSB Type-Cハードウェアおよびソフトウェアを追加する必要があります。将来的には、最適化したTCPCハードウェアおよびTCPMソフトウェアをPMICまたはSoCに統合するのが理想ですが、それまでの間はTCPCおよびTCPMを外付けとすることで、コストを抑えた製品を短期間で市場に投入できます。また、先端プロセス・ノードにも対応したシノプシスのUSB-C 3.1/DisplayPort 1.3 PHYは信号品質を低下させないスイッチを使用しており、外部ドライバは必要ありません。

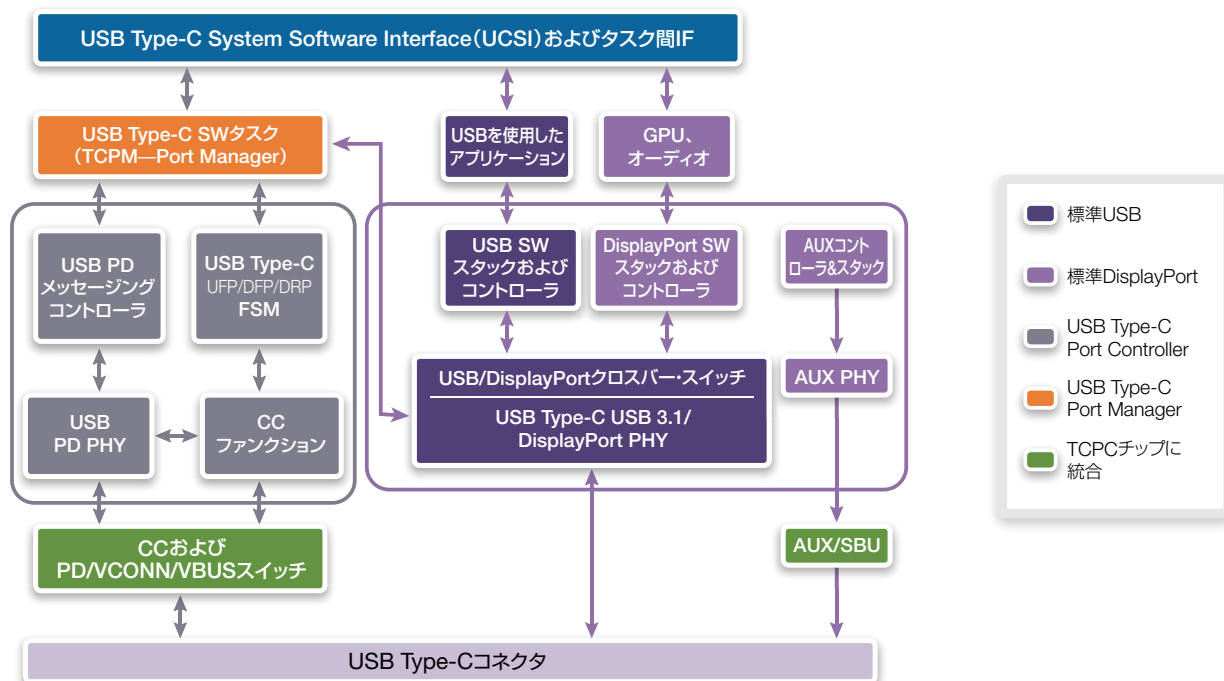


図7：USB/DisplayPort用の外部クロスバー・スイッチを置き換えるDesignWare USB-C 3.1/DisplayPort 1.3 PHY

USB Type-C Port Manager (TCPM) は、USBおよびDisplayPortソフトウェア・スタック同様にアプリケーション・プロセッサで実行できます(図7)。さらに、Vconn、Vbus、AUX/SBUスイッチはTCPMチップに統合できます。USB Type-Cのハードウェアとソフトウェアを適切に分割することで、システム全体のコストと実装リスクを軽減し、短期間で市場投入を果たすことができます。

詳細情報

- ▶ 記事：[Implementing USB Type-C in High-Speed USB Products](#)
- ▶ 記事：[Converting Existing USB Designs to Support USB Type-C Connections](#)

SYNOPSYS[®]

日本シノプシス合同会社

〒158-0094 東京都世田谷区玉川2-21-1 二子玉川ライズ オフィス TEL.03-6746-3500(代) FAX.03-6746-3535
〒531-0072 大阪府大阪市北区豊崎3-19-3 ピアスタワー13F TEL.06-6359-8139(代) FAX.06-6359-8149