

USB転送の基本から5~20Gbps伝送のしくみまで

USB 3.2のすべて

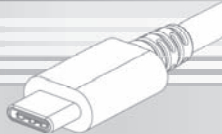
畑山 仁, 野崎 原生, 池田 浩昭, 志田 晟 共著



このPDFは、CQ出版社発売の書籍「USB 3.2のすべて」の一部見本です。
内容・購入方法については、下記のWebサイトをご覧ください。
内容 : <https://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/46/46451.html>

CQ出版社

見本



USB 3.2の位置付け

本章では、どのような背景でUSB 3.0からUSB 3.1、そしてUSB 3.2へと移り変わってきたのか、および各規格の違いと狙いについて説明します。

1.1 USB規格の進化

USB (Universal Serial Bus) は、パソコンと外部周辺機器との接続用のインターフェースとして、今日もっとも普及したインターフェースの1つです。パソコンのみならずデジタル家電機器にも広く普及しています。

● USB 1.0/1.1

1996年に、USB規格推進団体(USB-IF ; USB Implementers Forum)から最初の規格 USB 1.0が公開されました。当初の転送速度はLow-Speed (1.5Mbps) / Full-Speed (12Mbps) で、マウスやキーボードのPS/2コネクタの置き換えとして使用されました。その後、USB 1.0の修正版としてUSB 1.1が1998年に公開されました。現在、USB 1.1はUSB 2.0規格に統一されています。

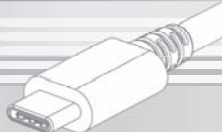
● USB 2.0

フラッシュ・デバイスの台頭により、フロッピー・ディスクに代わるストレージ・メディアとしてUSBメモリが普及するなど、時代が必要とする高速化に対応すべく、40倍に高速化したHigh-Speed (480Mbps) がUSB 2.0として策定されました。高速化により、スキャナやデジタル・カメラ、プリンタなど多くの周辺機器のパソコン接続用インターフェースとして、USBの普及が進みました。

● USB 3.0

画像の高精細化により大容量化されたデータをストレージ間で高速に送るという必要性から、2008年11月にUSB 2.0の約10倍に高速化した5GbpsのUSB 3.0が策定されました。後方互換性のために従来のUSB 2.0には手を

見本



USB アーキテクチャ

本章は、USB 2.0 から USB 3.2 までの共通したアーキテクチャやフレームワークについて説明します。これらの内容は USB 3.2 の仕様書では「USB 2.0 を参照」として簡単な説明しかないものもあります。本章では、必要に応じて USB 2.0 の内容も補足して解説します。

2.1 基本理念

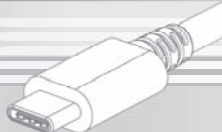
● 1つのコネクタでさまざまなデバイスを接続したい

USBが登場する前の1990年代の前半までは、キーボードやマウスにはPS/2ポートが、プリンタにはパラレル・ポートが、モデムにはシリアル・ポートが、そしてハードディスクやCD-ROMドライブにはSCSI (Small Computer System Interface) ^{スキャジー} といったように、接続するデバイスによってインターフェース、そしてコネクタが違いました (写真2.1)。

当時は、パソコンは一部の専門家が使うものだったため、これでも問題はありませんでした。しかし、Windows 95の登場によって一般の人もパソコンを使うようになると、これが問題となってきました。

この状況を解決するために、USBは1種類のコネクタでさまざまな種類のデバイスをサポートすることを目的として、次のような特徴を持つバスとして考え出されました。

- 汎用的に使える
- 簡単に使える
- プラグ・アンド・プレイ (デバイスを挿すだけで使える)
- ホット・プラグ (電源を入れた状態でデバイスを抜き差しできる)
- 低コスト
- 電源供給



デバイスの動作

本章では、USB 3.2デバイスの動作について説明します。USB 3.2デバイスは、前章で説明したUSBデバイス全般に共通の動作に加えて、本章で説明する動作も行います。なお、転送については概略だけを説明します。詳細については第4章以降を参照してください。

3.1 4つの転送方式

転送とは、ファンクション・ドライバがエンドポイントに対して、コマンドやデータを送受信する単位のことです。転送には、次の4つのタイプがあります(表3.1)。

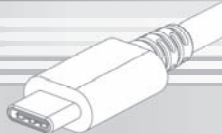
- (1) コントロール転送
- (2) アイソクロナス転送
- (3) インタラプト(割り込み)転送
- (4) バルク転送

● ホスト主導のトランザクション

転送は、実際のUSBバス上ではトランザクションという単位に分割されて実行されます。トランザクションのフォーマットやプロトコルなどは、USB仕様で規定されています。

これらのトランザクションが、バス上で「いつ実行されるのか」、「どのような順番で実行されるのか」ということは、USBホストが全て決めています。これがほかの一般的なバスとUSBの大きく違うところです。ほかのバスでは、ホストとデバイスといった区別がなく、全てのデバイスが対等な立場であったり、区別があったとしてもかなりの部分でお互いが独立して動いたりしているため、どのデバイスが「いつ」、「どのような順番」で動くのかをあらかじめ知ることはできません。しかし、USBではホストのみがトランザクションを開始することができ、デバイスは単にそのトランザクションに対してレスポンスを返すことが許

見本



コネクタとケーブル

USB 3.2のケーブル&コネクタの仕様は、USB Type-C 規格とレガシ・コネクタ&ケーブル規格の2つに分割されています。本章では、USB 3.0からUSB 3.2までのケーブル&コネクタ規格の遍歴とUSB Type-C コネクタの概略について解説します。

4.1 コネクタ規格の全体像

● ケーブル&コネクタの進化

USB 規格は、1996年にUSB 1.0が発行され、2000年にUSB 2.0、2008年にUSB 3.0、2013年のUSB 3.1に続いて、2017年にはバージョンがUSB 3.2となりました。

転送速度は、USB 2.0規格で480Mbps (High-Speed)、USB 3.0で5Gbps (Gen1)、USB 3.1で10Gbps (Gen2) となり、USB 3.2では10Gbps × 2レーン (Gen2 × 2) で最大20Gbpsを1本のケーブルで伝送できるようになりました。

コネクタは、Standard-A、Standard-Bから始まり、ホスト機器やデバイス機器の小型化に伴いMini-A/BやMicro-A/B/ABなど小型コネクタも定義されました。USB 3.1発行後の2014年にUSB Type-Cという新しいコネクタが定義され、現在のUSB 3.2に引き継がれています。

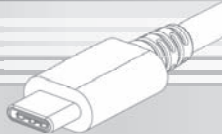
● 別の規格書になっているコネクタ仕様

USB 3.2規格にはケーブル&コネクタに関する仕様は含まれていません。ケーブル&コネクタの仕様は、レガシ・ケーブル&コネクタ規格とUSB Type-C 規格を参照します。

USB 3.xにおけるコネクタ&ケーブルの仕様がどこに記載されているかを、図4.1に示します。

USB 3.0規格では、SuperSpeed用の信号ラインを追加したStandard-A/B、Micro-A/B/ABのケーブル&コネクタの仕様が含まれていました。

見本



物理層

USB 3.1 規格では、USB 3.0 で規格化された 5Gbps に 10Gbps が加わりました。さらに USB 3.2 規格では USB Type-C コネクタを使うことで 10Gbps を 2 レーン化し、20Gbps のデータ帯域幅を実現しました。

本章では物理層として、どのような技術を採用して従来と同様のケーブルで 10Gbps を実現したか、さらに 2 レーン化したかを、5Gbps の物理層をおさらいしながら解説します。

5.1 物理層の役割

物理層 (図 5.1) は、ホストやデバイスの PCB (Printed Circuit Board) や USB のコネクタ・ケーブルといった実際の伝送路に電気信号を送り出し、それをエラーなく受け取るといった、通信回路にとって重要な役割を担っています。これには、パラレルーシリアル変換、受信回路でクロック再生を行えるようにするための伝送路符号化、伝送路での信号損失を補正するための送信および受信イコライザ、EMI 低減のためのスクランブラや SSC (Spread Spectrum Clocking) などの機能があります。本章では、これらの機能の詳細について説明します。

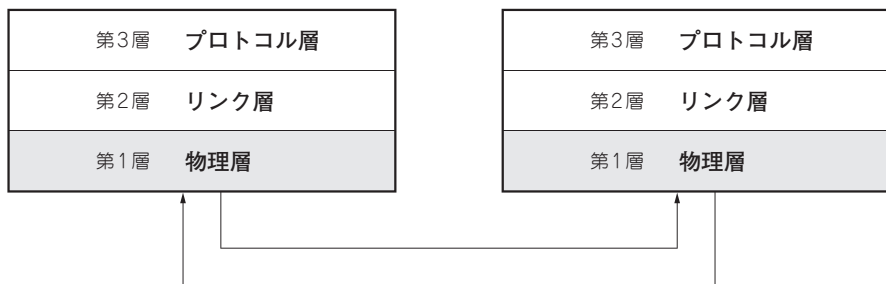
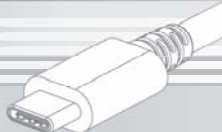


図 5.1 物理層は伝送路からの信号を送受信する入口部分



高速伝送技術… ディエンファシスとイコライザ

A1.1 周波数軸で見るイコライザの効果

● 基礎知識

▶ 抵抗損と誘電損

マルチギガ・ビット・レートの信号を基板やケーブルを通して伝送する場合の問題点は、高周波損失の顕在化です。高周波損失の主要因は、抵抗損と誘電損の2つです。

抵抗損は、交流電流が導体内部を流れにくくなることによる損失（表皮効果）で、周波数に比例して増加します。

誘電体に電界を掛けた際に誘電体内部で分極が発生します。誘電損は、周波数の上昇に伴い、電界の変化と分極の変化にずれが生じて発生する損失です。tan δ で知られる誘電正接に依存します。周波数の平方根に比例して増加するため、周波数が低いところではその影響は小さく、周波数が増加するにつれて顕在化します。

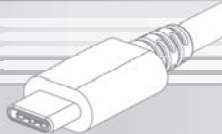
つまり、周波数上昇に伴い抵抗損と誘電損の双方が顕在化して減衰が増加し、あたかもローパス・フィルタのように伝送路が作用します。

● 実測する

伝送路損失とイコライザの効果を周波数軸で確認してみましょう。5Gbps (USB 3.2 Gen1 相当) の信号を、数種類の長さのトレース（基板上の配線）に流したときの波形を観測します。

▶ ISI テスト基板

測定に使用する ISI (Inter-symbol Interference : シンボル間干渉) テスト基板を写真 A1.1 に示します。低損失素材 (Nelco N4000-13EP : 比誘電率 3.7, 誘電正接 0.009 @ 2.5GHz) を使用し、トレース間隔を広く平行に保ち、差動結合を弱めています。また、トレース両端の点接触型の SMA コネクタもトレースと同じ間隔で配置し、差動トレース間のインピーダンスの変動をなくしています。その結果、反射も少ない良好な減衰特性を持っています。



リンク層

本章では、USB 3.2のリンク層について説明します。リンク層はUSB 3.0以降に追加された新しい階層で、隣り合ったデバイス間のPoint-to-Pointの通信を制御します。

6.1 リンク層の役割

リンク層(図6.1)は、隣り合ったデバイス間の通信を制御するものです。例えば、ホスト⇄ハブ⇄ペリフェラル・デバイスと3つのデバイスが接続されている場合、リンク層では、ホストとハブ、あるいはハブとペリフェラル・デバイスとの間の通信に特化した制御を行います。

この場合、本当に通信を行っているのはホストとペリフェラル・デバイスであって、ハブはそれをただ中継しているだけですが、その事情を知っているのはリンク層よりも上の層になります。現在通信を行っているパケットの最終的な届け先が自分の隣のデバイスなのか、それともそこからさらに別のデバイスへ転送されるのかは一切関係なく、ただ隣のデバイスとの通信を黙々とこなす、というのがリンク層の役割です。

それらの仕事を行うために、リンク層では次の処理を行います。

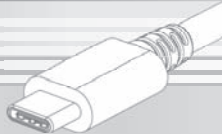
- (1) パケットのフレーミング
- (2) リンク・コマンド
- (3) フロー・コントロール
- (4) パケットのエラー・チェック、再送処理

図6.1

リンク層は物理層からのデータを隣のデバイスに送ったり受けとったりする

第3層	プロトコル層
第2層	リンク層
第1層	物理層

見本



プロトコル層

プロトコル層はUSB 2.0のときから存在し、USB 3.2でも基本的な機能は変わらず、ホストとデバイスとの間のEnd-to-Endの通信を制御します。

本章では、前半でトランザクションのパケット・フォーマットを説明し、後半でそれらのパケットを使ってどのようにトランザクションの制御を行っているかを説明します。

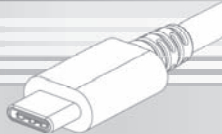
7.1 プロトコル層の役割

USBの転送は、第3章で説明したように実際のバス上ではトランザクションという、もう少し細かい単位に分割されて実行されます。USBのバスは複数のデバイス間でシェアされるため、各デバイスの転送を小さな単位に分割して、その分割した単位であるトランザクションをなるべく均等に選んで実行します。これはデバイスごとのバス使用時間にできるだけ偏りが出ないようにするためです。

プロトコル層(図7.1)では、このトランザクションの制御を行います。1つのトランザクションは複数のパケットで構成され、ホストとデバイスとの間でこれらのパケットをやり取りすることによってトランザクションを実行します。

第3層	プロトコル層
第2層	リンク層
第1層	物理層

図7.1 プロトコル層ではホスト・デバイス間のトランザクションを制御する



USB 規格認証試験

USB 3.2 などの高速シリアル・インターフェースで重要なのが相互運用性 (Interoperability) であり、これを保証するには、トランスミッタとレシーバの物理層を流れる信号に対するコンプライアンス・テストが不可欠です。本章では、テストに必要な測定技術とその背景に焦点を当てて解説します。

8.1 コンプライアンス・テストの重要性

● 相互運用性の確保には物理層が重要

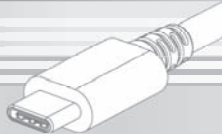
USBはコネクタを介して機器が接続されるという性質ゆえ、さまざまなベンダの機器が組み合わされて使用されます。それらの機器間での相互運用性を保証するためには、各機器が仕様に適合して設計されているのかの確認が重要です。それを確認するのがコンプライアンス・テスト (規格認証試験) です。

特に物理層は、その上を信号が伝送するため重要です。物理層で正しく接続できない場合は、当然データを正しく送ったり受信したりすることはできません。なお、「データを正しく送る」という表現がよく使われますが、定量的に表現するのであれば「データを特定のビット誤り率以下で伝送する」ことになります。仕様も全てビット誤り率を基本に決められています。

● コンプライアンス・テストで何を確認するのか

USB 3.2 Gen1 (SuperSpeed USB) の信号は、USB 2.0 の High-Speed (480Mbps) より10倍以上も高速な5Gbps、USB 3.2 Gen2 (SuperSpeed PlusあるいはEnhanced USB) では20倍以上高速な10Gbpsなので、基板やケーブル、コネクタなどにおける高周波信号に対する損失やジッタ、クロストークの影響を大きく受けます。

注1：本記事は2019年4月時点の Universal Serial Bus 3.2 Specification (2018年2月発行の Errata を含む) および Enhanced SuperSpeed Universal Serial Bus Electrical Compliance Test Specification (規格認証試験仕様) を基にしています。改定などにより内容が変更される可能性があることをご了承ください。



ジッタとビット誤り率の関係

A2.1 基礎知識

● ランダム・ジッタ

ランダム・ジッタ (R_j) は、熱雑音やフリッカ・ノイズ、ショットキー・ノイズなどによって発生します。統計物理学の基本定理の1つである中心極限定理により、これらの膨大な数の小さな影響の集まりの確率密度関数 (Probability Density Function; PDF) はガウス分布 (正規分布) になります。ベルカーブ (鐘形曲線) としてよく知られているものです。

ガウス分布は、式 (A2.1) で示される平均値 μ (ミュー) と平均的なばらつきの幅を表す標準偏差 σ (シグマ) の関数で、その広がりには有限ではなく、無限の広がりを持ちます (図 A2.1)。ただし、中央 (平均値) から遠くなる (すなわち大きいジッタになる) ほど、発生確率は低くなります。

$$R_j(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (-\infty < x < +\infty) \dots\dots\dots (A2.1)$$

ガウス分布は左右対称なので、その中央はUIの境界、すなわちビットとビットの境目です。ジッタは短時間ではUI境界の前後数 σ の範囲で発生します。 $\pm 1\sigma$ の範囲での発生確率 (全体の面積に対する比率) はおよそ 68% です。

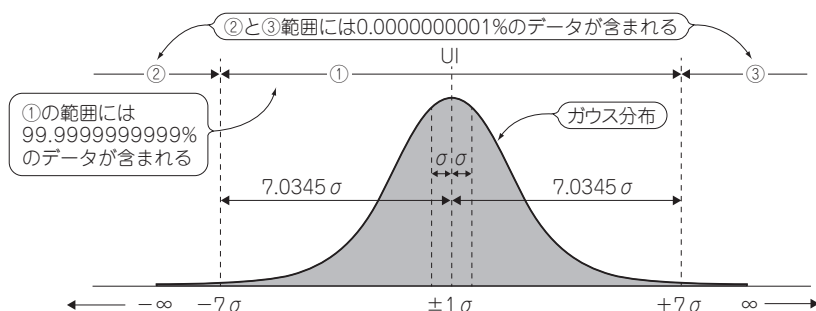
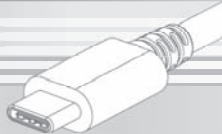


図 A2.1 ランダム・ジッタの確率密度関数 (ガウス分布)

見本



10Gbps 基板設計の勘所

本章は、USB 3.2 Gen2 (10Gbps) の高速伝送や PowerDelivery に対応するための基板パターン設計を解説します。また、電磁界シミュレータを使用し、高速伝送パターンにおける不連続性 (AC コンデンサやビアなど) の影響を評価します。

9.1 USB 基板の構成

● 基本構成

図9.1に、本章で取り上げる Gen2 (10Gbps) で信号伝送する USB 機器の接続構成を示します。DFP (Downstream Facing Port) と UFP (Upstream Facing Port) の接続には、Type-C Standard Full Featured ケーブルを使用します。USB Type-C (以下、Type-C) プラグが両端に付いているケーブルには、10Gbps 信号を伝送できるものと、そうでないものがあるので注意してください。基板に実装される Type-C レセプタクルは、全て 10Gbps 信号を伝送できる仕様になっています。

10Gbps の伝送を実現するには、10Gbps 対応のケーブルやコネクタを使用するだけでなく、基板上の Type-C レセプタクルと USB インターフェース・デバイスの間のパターンも重要です。パターンの引き通しが、10Gbps の信号に与える影響を考慮し設計をしなければ、コンプライアンス・テストに合格するのは難しいでしょう。10Gbps のパターン設計のポイントは、基本的に 5Gbps と同じですが、より高周波での注意点に留意して設計する必要があります。

また、Type-C コネクタは、USB の信号だけでなく、Alternate Mode により DisplayPort や HDMI の数 Gbps クラスの信号の伝送にも対応しますが、10Gbps に対応した基板設計を行えば、他の規格の数 Gbps 信号も問題なく伝送できます。

ISBN978-4-7898-4645-5

C3055 ¥4000E

CQ出版社

定価：本体4,000円(税別)



このPDFは、CQ出版社発売の書籍「USB 3.2のすべて」の一部見本です。
内容・購入方法については、下記のWebサイトをご覧ください。
内容： <https://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/46/46451.html>

見本