

## Prologue

# PCI Expressの時代がやってきた!

—— 100枚もの画像をたった1秒で送ることができる  
高速シリアル・インターフェース

畑山 仁

PCI Expressは、転送速度5 Gbps(ギガ・ビット/秒)を実現する高速シリアル・バスです。プロトコルが複雑で、実装のコストが比較的高いという問題がありました。高速トランシーバ内蔵FPGAなどの低価格化が進み、実現しやすくなってきました。超高速通信規格USB 3.0 スーパースピード(5 Gbps)の物理層にもPCI Expressの物理層が流用されているこれからの必須の技術です。

ここでは、パソコン内部のバスなどに使われているPCI Expressとはどのようなものか、何ができるのか、使用するとどのようなメリットがあるのかを説明します。

## 1 PCI Express とは

### ● ほとんどのパソコンが装備している現代の標準バス・インターフェース

装置を開発するときに、高性能で安価なパソコンが必要になることがあります。それには、汎用のパソコンになんらかのインターフェースを介して機能を拡張するボードを追加しなければなりません。図1に示すのは、パソコンに備えられているさまざまな接続インターフェースです。

チップやボード、機器間を接続するインターフェースをバスと呼びます。CPUには、メモリやI/Oなどがバス経由で接続されます。あるときはメモリ→CPU、またあるときは逆にCPU→メモリ、さらにCPU→I/Oなど、互いに情報を交換するためにバスは図2のように時分割的に共用されます。

PCI Expressは、パソコンやサーバに必要な機能を備えたボードを追加するための内部バス・インターフェースの一つです。パソコンのインターフェースとしてよく耳にするUSBやイーサネット、シリアル、パラレルなどと比べると、より直接的にCPUやメモリと大容量のデータをやりとりできます。

このような用途には従来、PCIやPCI-Xといったバスが使われていましたが、

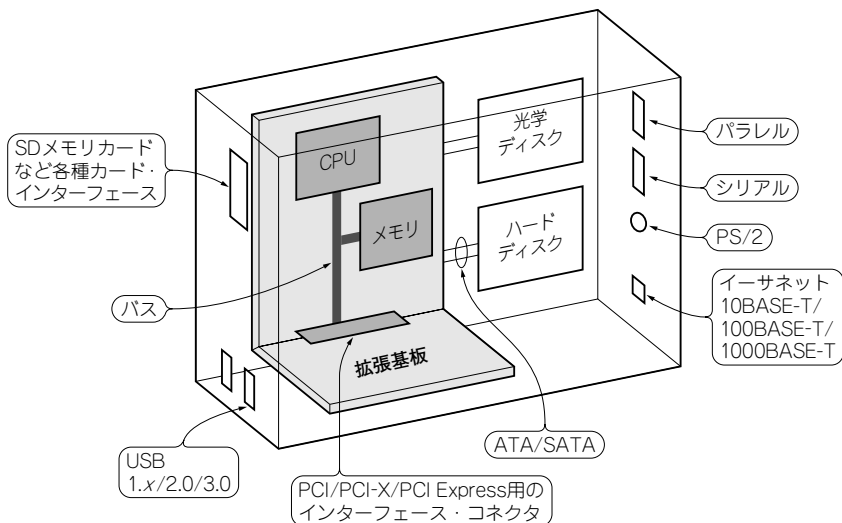


図1 パソコンには内部にも外部にもさまざまなインターフェースが備えられる

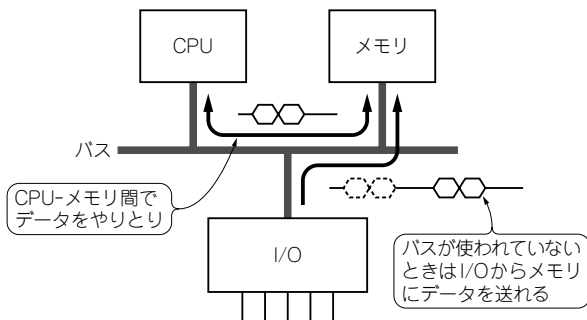


図2 バスは時分割で動作する

PCIバスの置き換えと内部バスの統一を目指してPCI Expressが規格化されました。今日では写真1のように、ほとんどのパソコンがPCI Expressを搭載しています。

さらに高性能コピー機やプリンタなどの事務機器，放送機器や医療機器，計測機器など，パソコンでなくても大容量のデータを転送する必要がある画像処理用途を中心に特に広がりを見せています。

# 第 1 章

## PCI Express の基礎知識

—— プロトコル構成やレジスタや物理層の動作などが  
しっかり分かる！

野崎 原生/畑山 仁

PCI Express のプロトコルは、物理層、データ・リンク層、トランザクション層などに別れた階層構造になっています。ここでは各階層の役割やパケット構造、物理層の動作などについて解説します。

物理層では、高速シリアル・インターフェースを実現しやすいようにさまざまな工夫が施されています。

本章では、次に示す PCI Express の持つさまざまなメリットがどのようにして実現されているのか、そのしくみを説明します。

- 1 レーンあたり 2.5 Gbps, 5 Gbps のデータ・レートが選べる
- 1, 2, 4, 8, 12, 16, 32 レーンの帯域幅が選べる
- 送受信ともにシリアル伝送できる
- データの信頼性、電力管理、エラー・ロギング/レポートなどの機能
- レガシな PCI ソフトウェアと互換である
- ホット・プラグ/ホット・スワップ(活線挿抜)
- テストが容易である
- 安価な FR-4 基板を使える

### 1-1 システム構成とプロトコル階層

#### ● 複数のレーンをまとめたものをリンクと呼ぶ

PCI Express の各デバイスは、ほかのデバイスと接続するためのポートを備えています。ポートは、図 1-1 のような双方向通信を行うために、送受信の 1 組の差動ペアを単位とした「レーン」で構成されます(双対単方向伝送：デュアル・シンプレックス)。送信と受信が独立で、同時にデータ転送できます。

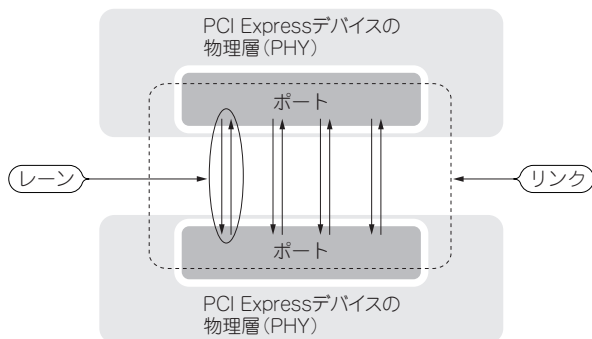


図 1-1 PCI Express のポート、レーン、リンクの関係

各レーンはそれぞれ送信用の差動信号と受信用の差動信号を持つ。レーンをまとめたものをリンクという。

さらにデータ帯域幅を上げるために、複数のレーンに拡張可能です。レーンをまとめたものをリンクと呼び、x1, x2, x4, x8, x12, x16, x32 リンクが規格化されています。ここで x は「バイ」と呼び、xN リンクとは N 組のレーンで構成されていることを意味します。

例えば現在、パソコン内部ではグラフィックス用に x16 リンクが、外部 I/O 用に x1 リンクが使われています。サーバでは x8 リンクが使用されています。なお、x2, x12, x32 リンクはほとんど使われていません。

## ● ルート・コンプレックスの下にツリーを作るシステム構成

PCI Express のシステムを構成する要素として、図 1-2 のようにルート・コンプレックス、エンドポイント、スイッチ、ブリッジがあります。

### ① ルート・コンプレックス

その名のとおり階層の根幹(Root)となるデバイスです。ルート・コンプレックスは一つ、あるいは複数の PCI Express ポートを持ちます。ホスト・ブリッジを内蔵し、CPU やメモリにも接続されます。

### ② エンドポイント

I/O デバイスを PCI Express ではエンドポイントと呼びます。レガシ・エンドポイント、PCI Express エンドポイント、ルート・コンプレックス・エンドポイントの 3 種類があります。

### ③ スイッチ

PCI Express ポートを増やすためのデバイスです。

### ④ ブリッジ

プロトコル変換を行うデバイスです。特に PCI Express でブリッジというと、

## 第 2 章

# 伝送方式とプリント・パターン設計

—— 物理現象を理解すれば高速差動伝送は怖くない！

志田 晟

PCI Express は第 1 世代 (Gen1) で 2.5 Gbps (ギガ・ビット/秒), 第 2 世代 (Gen2) で 5 Gbps (Gen2) という高速な信号伝送を行います。このため, 基板設計の際に気をつけなければならないポイントがいくつかあります。

本稿では PCI Express の高速差動シリアル信号の回路設計や基板設計, 測定を適切に行うために理解しておきたい, 差動パターンやグラウンド・パターン, ビア, スルー・ホールなどの配線・配置方法を, シミュレーションなどを交えて分かりやすく解説します。

ほかの一般的な高速差動シリアル信号の伝送を理解するうえでも役立ちます。

### 2-1 当たり前になってきた高速シリアル信号

● PCI Express は 1 レーンで PCI バス並みのデータ転送速度 2.5 Gbps を実現できる

写真 2-1 はパソコンのメイン・ボードの一例です。長さの異なる五つのコネクタは PCI Express バスの拡張基板用コネクタです。短く 3 個見えるコネクタは 1 レーン (x1), 長いものは 16 レーン (x16), 一番右は 4 レーン (x4) です。一方, 写真 2-1 に示した 2 個のコネクタは従来バスである PCI の拡張コネクタです。PCI Express は, PCI バス並みのデータ帯域幅を 1 レーンで実現する 2.5 Gbps, 5 Gbps といったデータ転送速度があり, 基板設計には注意が必要です。ここで図 2-1 のように, データ・レートと周波数は意味が異なるので注意が必要です。写真 2-2 にメイン・ボードと接続できる 16 レーン対応のグラフィックス・カードの例を示します。高速シリアル信号が最短で配線されていることが分かります。

図 2-2 は PCI Express の 1 レーン分の簡単なブロック図です。送受信それぞれ差動の 1 対の線路で 1 レーンが構成されています。図 2-3 (a) はメイン・ボード

上を流れる PCI のクロック波形と PCI Express の信号波形，図 2-3 (b) は PCI Express 信号の拡大波形です。PCI Express が PCI よりも随分高速になったことが分かると思います。

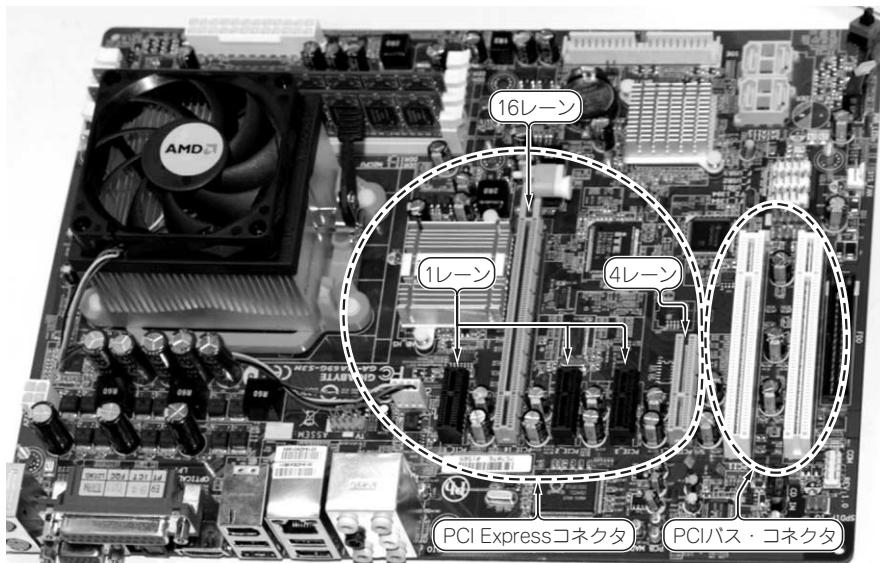


写真 2-1 パソコンのメイン・ボード上の PCI Express コネクタ

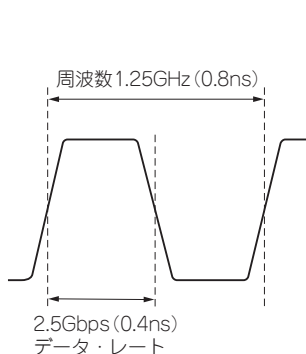


図 2-1 データ・レートは周波数の 2 倍

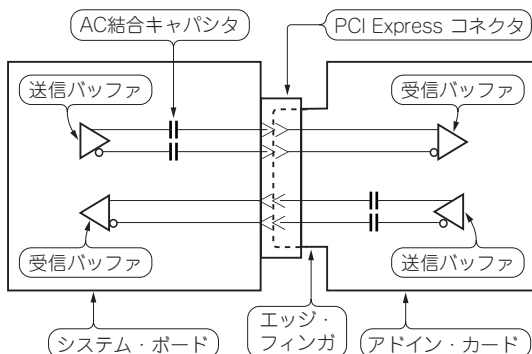
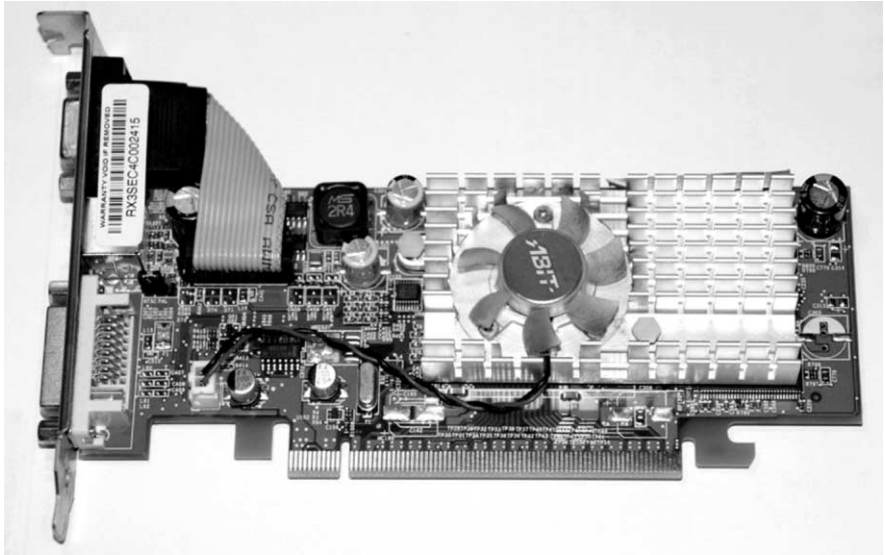
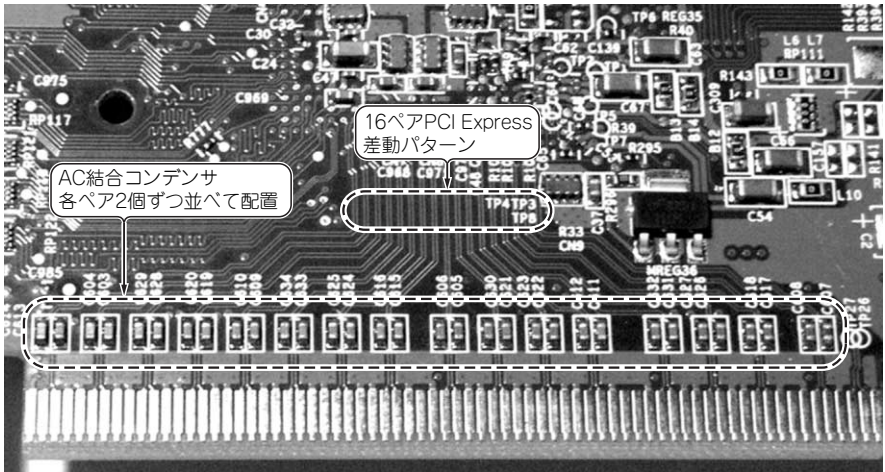


図 2-2 PCI Express の 1 レーンで送受信する信号差動の送受信で構成。電源などは省略している。



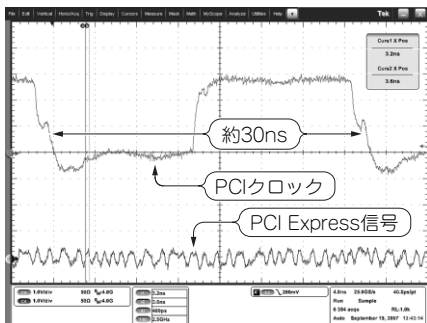
(a) グラフィックス・カード



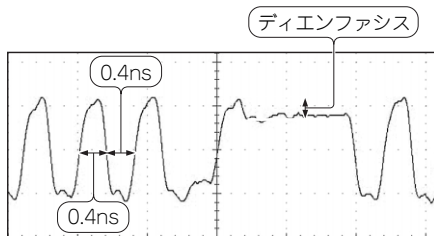
(b) PCI Express 16レーンの信号パターン

写真 2-2 PCI Express グラフィックス・カードの外観

PCI Express の 16 レーンは 4G バイト/s でデータを送れる。高速グラフィックス・カードは PCI Express の 16 レーンを用いることが普通になってきている。中央部分に 16 対のパターンが上下に走っていることが分かる。



(a) PCIクロックとPCI Express信号



(b) PCI Express信号の高周波の減衰による波形の乱れを抑えるディエンファシス

図 2-3 PCI Express の信号波形は高速で小振幅

(a) の上の波形が従来の PCI のバス・クロック，下が PCI Express の信号波形．PCI クロックの周期は約 30 ns (33 MHz) と読み取れる．(b) は 0.4 ns で 1 ビットを送っている．PCI Express の伝送速度は、 $1 / (0.4 \times 10^{-9}) = 2.5 \times 10^9 = 2.5 \text{ Gbps}$  と分かる．

## 2-2 マザーボード上の高速インターフェースの信号を考察する

このメイン・ボードにはほかにも USB (480 Mbps)，Serial ATA (3 Gbps)，HDMI (High-definition Multimedia Interface) など，高速シリアル伝送のいろいろなインターフェースも備えています．写真 2-3 (a) は HDMI のコネクタを，写真 2-3 (b) は Serial ATA (3 Gbps) のコネクタとケーブルを示します．パラレル伝送としては DDR (Double Data Rate) 2 メモリを搭載しています．

このように高速シリアル差動伝送はいたるところで採用されている技術です．

### ● 高速シリアル伝送波形のいろいろ

メイン・ボード上には PCI Express 以外にもさまざまな高速インターフェースが用意されています．例えば HDMI は最近，地上デジタル放送のハイビジョン表示機器などに使われているデジタルのビデオ信号とオーディオ信号の伝送規格です．信号伝送方式はパソコンの液晶モニタなどに画像を伝送する規格である DVI (Digital Visual Interface) と同じ TMDS (Transition Minimized Differential Signaling) という方式が使われています．PCI Express を含めた代表的な高速シリアル差動信号の基本回路を図 2-4 に示します．

図 2-5 (a) はメイン・ボード上の PCI バスと HDMI 信号を同時に見たもので，図 2-5 (b) は HDMI 信号の拡大波形です．それぞれ伝送速度が異なります．(a)



## Appendix A

# アドイン・カードのピン配置と 外形寸法

—— 誤挿入防止や取り付けのための工夫が分かる

志田 晟

PCI Express は、x1 から x16 までのレーン数に対応できるように、共通の電源部分とレーン数によって異なる差動信号部分に分けてピンが割り当てられています。アドイン・カードの外形寸法なども決められています。PCI Express と PCI が混在する場合もあるので、誤挿入しないような工夫もほどこされています。

ここではアドイン・カードに要求される仕様について紹介します。

## A-1 コネクタのピン・アサイン

PCI Express は送受信の 1 セットを 1 レーンと呼びます。1, 4, 8, 16 レーン (x1, x4, x8, x16 と略記。x1, <sup>パイワン</sup> x4 などと発音される) が規格化されています。

**写真 A-1** はパソコンのマザーボードのアドイン・カード用コネクタ部分です。

右の二つが従来の PCI アドイン・カード用コネクタで、それ以外は PCI Express アドイン・カード用コネクタです。左から 2 列目は x16 (通常グラフィック・カードに使われる) に、左から 4 列目は x4 に、それ以外は x1 に対応したコネクタです。

**表 A-1** はアドイン・カードの x1, x4, x8, x16 のコネクタのピン・アサイン表です。ピン番号 1~11 は x1~x16 に共通で、主に電源供給の部分です。**写真 A-1** の PCI Express コネクタで手前の部分に共通の区切りがありますが、この区切りの手前の部分が相当します。

ピン番号 12 以降が主に差動信号伝送部分です。サイド A 側に送信 (トランスミッタ)、サイド B 側に受信 (レシーバ) 信号がまとめられています。この送信と受信はマザーボード (システム・ボード) 側から見たときの送受信となっています。

**図 A-1** はマザーボード側のコネクタの例です。

また、x16 などの大きいバス幅のコネクタに x1 や x4 などの、よりレーン数が

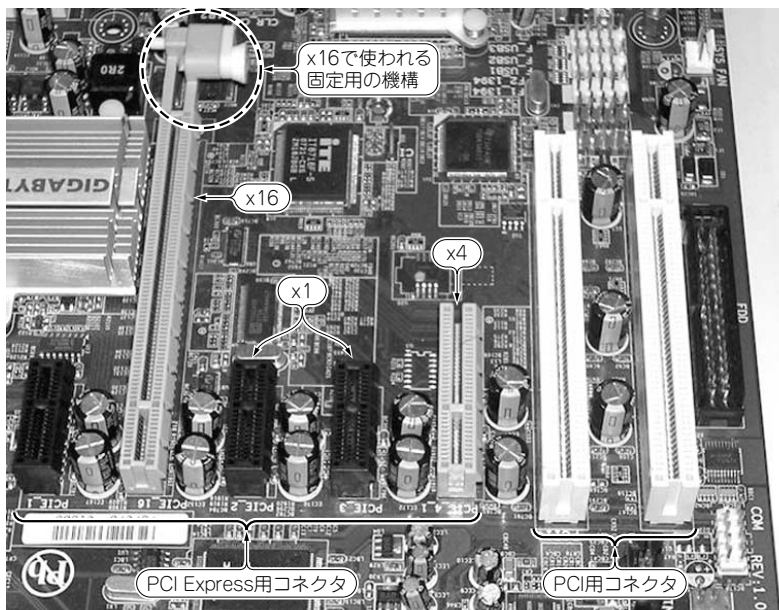


写真 A-1 マザーボードの PCI Express 用コネクタと PCI 用コネクタ

表 A-1<sup>(1)</sup> PCI Express のピン・アサイン

濃いグレーの信号は補助信号。

(a) 共通部分

ピン番号	サイド B		サイド A	
	名称	説明	名称	説明
1	+12 V	12 V 電源	PRSENT1	ホット・プラグ検出
2	+12 V	12 V 電源	+12 V	12 V 電源
3	+12 V	12 V 電源	+12 V	12 V 電源
4	GND	グラウンド	GND	グラウンド
5	SMCLK	SMBus (システム・マネジメント・バス) クロック	JTAG2	TCK (テスト・クロック), JTAG クロック入力
6	SMDAT	SMBus (システム・マネジメント・バス) データ	JTAG3	TDI (テスト・データ入力)
7	GND	グラウンド	JTAG4	TDO (テスト・データ出力)
8	+3.3 V	3.3 V 電源	JTAG5	TMS (テスト・モード・セレクト)
9	JTAG1	TRST (テスト・リセット) JTAG リセット	+3.3 V	3.3 V 電源
10	3.3 Vaux	3.3 V 補助電源	+3.3 V	3.3 V 電源
11	WAKE	リンク再アクティブ信号	PERST	基本リセット