

F-1

Thunderbolt™ Technologyとは



畑山 仁

Tektronix[®]

KEITHLEY
A Tektronix Company

講師紹介

畑山 仁: テクトロニクス社 営業技術統括部 シニア・テクニカル・エキスパート

- 担当分野: 高速デジタル、高速シリアル・インタフェース(特にPCI Express、USB3.0)
- セミナ講師: 当社の高速シリアル・インタフェース、PCI Express、USB3.0セミナをはじめ、FPGA代理店との協調セミナなど
- 主な執筆・編著(書籍は共著)
 - CQ出版社「PCI Express設計の基礎と応用～プロトコルの基本から基板設計, 機能実装まで」、2010年4月
 - <http://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/46/46411.html>
 - 「USB 3.0設計のすべて～規格書解説から物理層の仕組み、基板・ソフトウェア設計、コンプライアンス・テストまで」、2011年11月: **USB3.0のみならず高速シリアル・インタフェースの知識、特にジッタ測定**の補足にぜひご利用ください。
 - <http://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/46/46421.html>
 - マイコミジャーナル「高速シリアル・インタフェース測定の必須スキルを身に着ける」連載中: 本セミナ、特にトランシーバ基盤技術についての補足にぜひご利用ください。
 - <http://journal.mycom.co.jp/series/serialif/001/index.html>

 facebook <http://facebook.com/hitoshih330>

- 非公開グループ「高速シリアル同好会」主宰中



はじめに

講師とThunderboltに関して

- 日経エレクトロニクスへの取材・講演協力
 - 2011年10/7 NEテクノロジー・シンポジウム2011@CEATECでの講演「10Gビット／秒インタフェース到来で機器設計はどう変わるか」
 - その他
- CQ出版Interface誌記事寄稿
 - 2013年4月号P.92-94、特集「知っておきたい！50の画像技術」7-3 パソコンと周辺機器をつなぐ！Thunderbolt Technology

本資料の内容について

- Thunderbolt™ Technologyに関する詳細な仕様やその他設計に必要な情報入手にはインテル社とのDeveloper License締結が必要
- 本資料の内容は、インテル社がIDFその他で発表した情報、およびネット上その他に掲示された情報で信頼性が高いと判断した情報を元に構成

免責条項: テクトロニクスは、インテル社に代わって発言、プレゼンテーションするものではありません。

Thunderbolt Technology = Light Peakか？

- Light Peakの開発要素技術

1. 10Gbps、マルチプロトコル、低レイテンシの
インタフェース技術

⇒ Apple社とThunderbolt Technologyとして発表

2. 10Gbps光リンク

⇒ ソニー株式会社のVAIO-Zで利用？

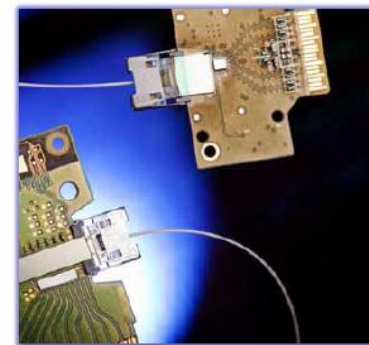
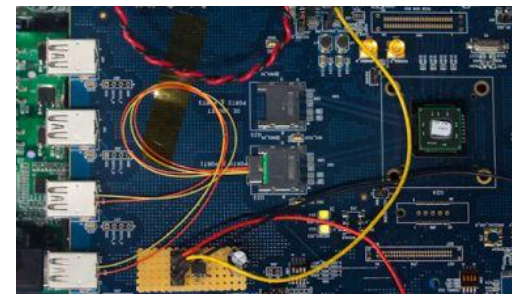
⇒ TDKがThunderbolt TechnologyのAOCとして実現？

3. 50Gbps Silicon Photonics

⇒ 12.5Gbps × 4λ の波長多重

⇒ 現在も開発中？

つまりThunderbolt Technology=Light Peakの一部の技術



Thunderbolt Technologyとは



THUNDERBOLT™

- デジタル家電レベルでの10Gbps、マルチプロトコル、低レイテンシでのPCとペリフェラル間ケーブル接続インタコネクタ技術としてインテル社とApple社が開発
- 2011年2月24日(米国時間)発表のApple MacBook Proに初めて搭載
- Mini DPコネクタを使用
 - Thunderbolt TechnologyとネイティブのDisplayPort(DP++)を共用
- 狙い: 機能分散、高品位なグラフィックスの提供
- すべての搭載機器は認証テストが必須
 - 米国Granite River Labs Inc.(GRL)に続き、Allion Labs, Inc.*も民間認証会社として認定
- テクトロニクスは初期段階からGRLとともにテスト仕様策定、および認証測定でインテル社に協力
- 今日ではPC、マザーボード、ストレージ、ディスプレイ、4Kシネマ・カメラ、ビデオ・キャプチャ、アダプタ、ドッキング・ステーション、PCI Express拡張シャーシなど多数の搭載製品が出回っている
 - Thunderbolt Technology CommunityのProductサイト(<https://thunderbolttechnology.net/products>)に掲載
 - Apple MacからWindows PCへ広がりを見せている



GRL

GRANITE RIVER LABS

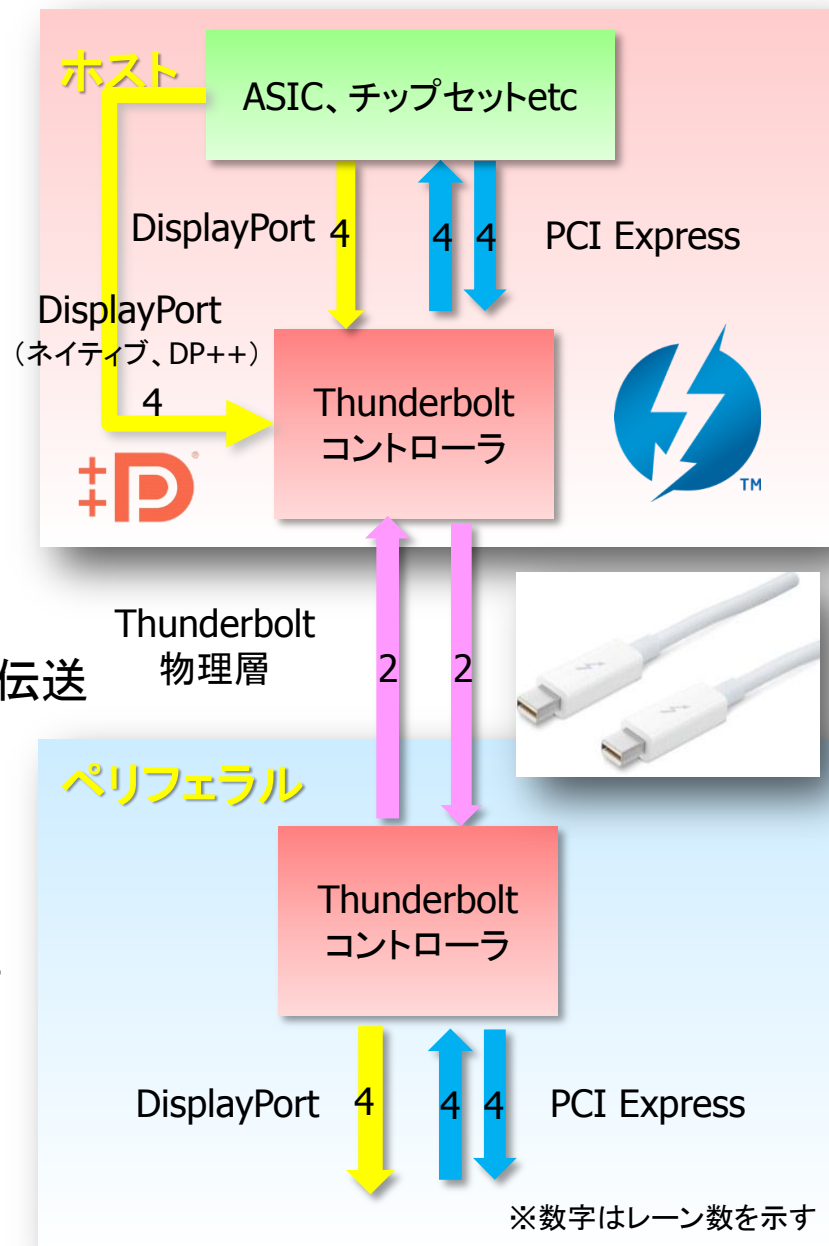
ALLION®

Engineering Services

※国内連絡先: アリオン株式会社
service@allion.co.jp

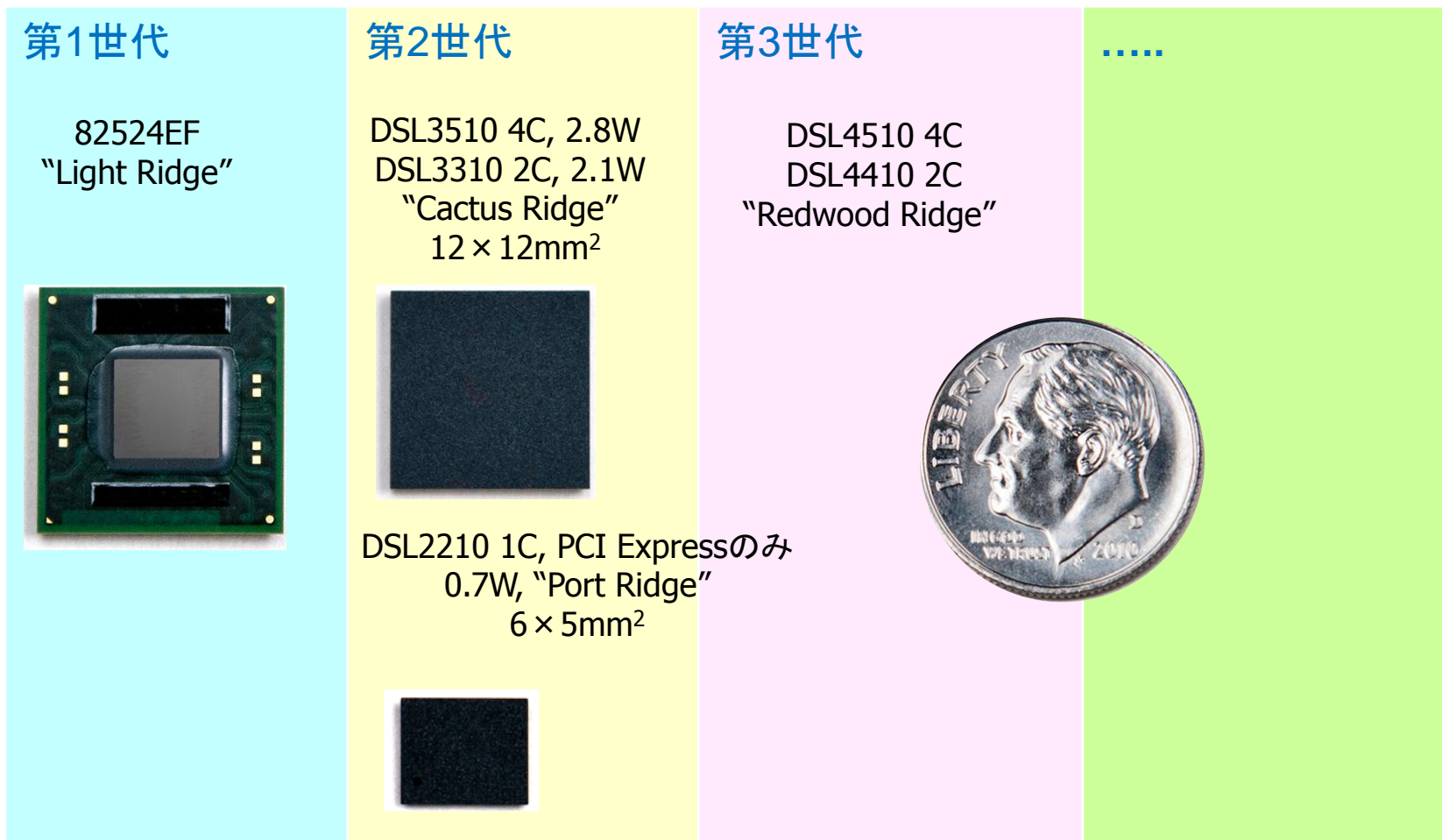
Thunderbolt Technology概要

- データ、画像2つのプロトコルをサポート
 - PCI Express 2.0、DisplayPort 1.2a
 - 両者ともどもブリッジ経由で様々な他のプロトコルに変換できる
 - PCI Express: USB3.0、Ethernet、SAS/SATA、FireWireなど
 - DisplayPort: HDMI、DVI
- 10.3125Gbps × 2チャンネル、双対単方向伝送
 - 64B/66B符号化
- 伝送距離
 - 銅線ケーブルで3m(アクティブ)
 - AOC(Active Optical Cable)にて10m以上
- 10Wまでの電力供給可能
 - バス・パワー・デバイスを実現
- Thunderboltコントローラはインテル社のみが販売



引用: Thunderbolt Technology Update & Design Considerations, HST005, IDF2012 San Francisco

Thunderboltコントローラ

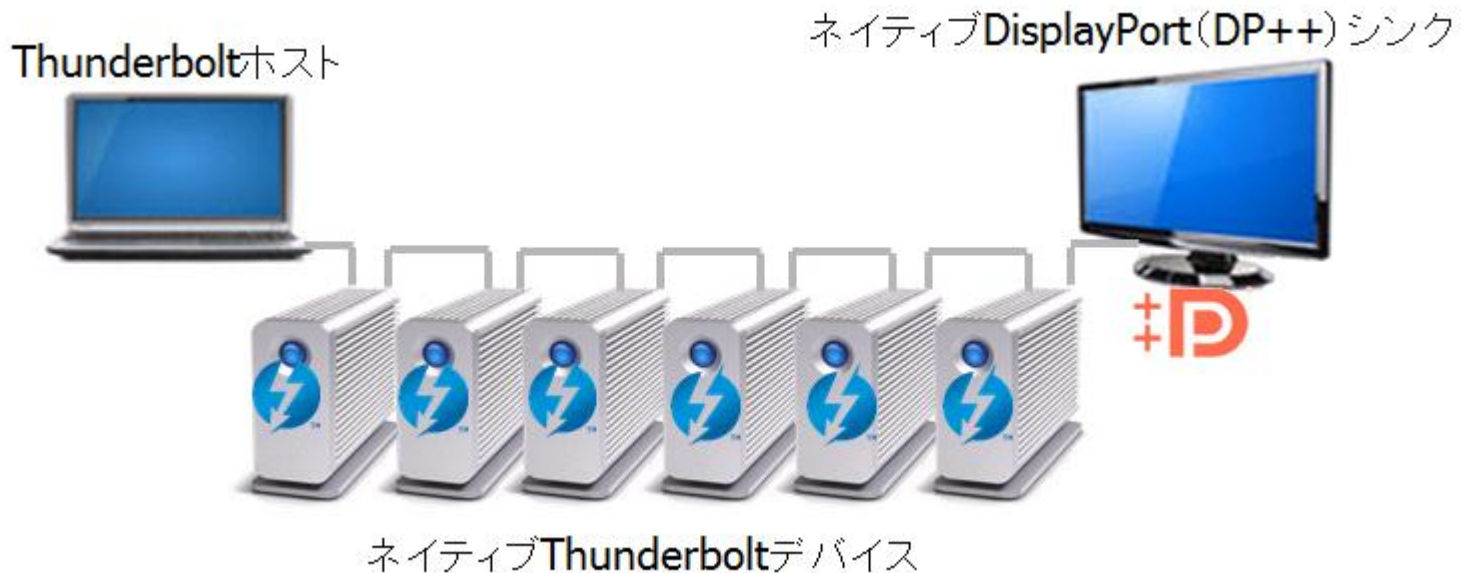


引用:

Thunderbolt Technology Updata & Design Considerations, HST005, IDF2012 San Francisco
Thunderbolt™ Technology Update, June 4, 2013, Thunderbolt announcements at Computex 2013

ディジ・チェーン・トポロジ

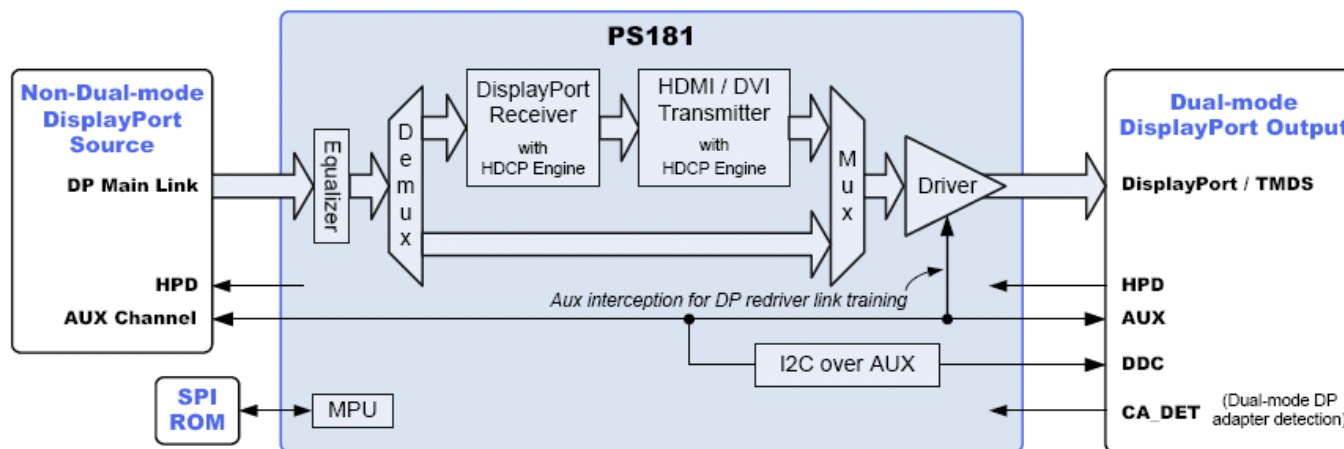
- 最大6デバイス(7ホップ) + 最後にネイティブDisplayPort(DP++)シンク機器を接続可能
 - Thunderboltリピータ・ポートはDP++サポートが必須
 - 実際にApple Thunderbolt Displayは、マルチディスプレイ用のDPポートのみでThunderboltリピータ・ポートが用意されていない
- Thunderboltに代わりネイティブDisplayPort(DP++)シンク機器を直接に接続可能
 - Redwood RidgeよりHBR2(5.4Gbps)をサポート



DP++サポート

- DisplayPortとDVI/HDMIをサポート
- DisplayPort をそのまま通すパスとDisplayPortの8B10BデータをDVI/HDMIのTMDS*へ符号変換(トランスコーディング)する2つのパスのDemux、Muxでの切り替えで実現
- Thunderboltコントローラは上記を何らかの形で実現する必要がある

例:Parade社 PS181 – DP to Dual-Mode DP

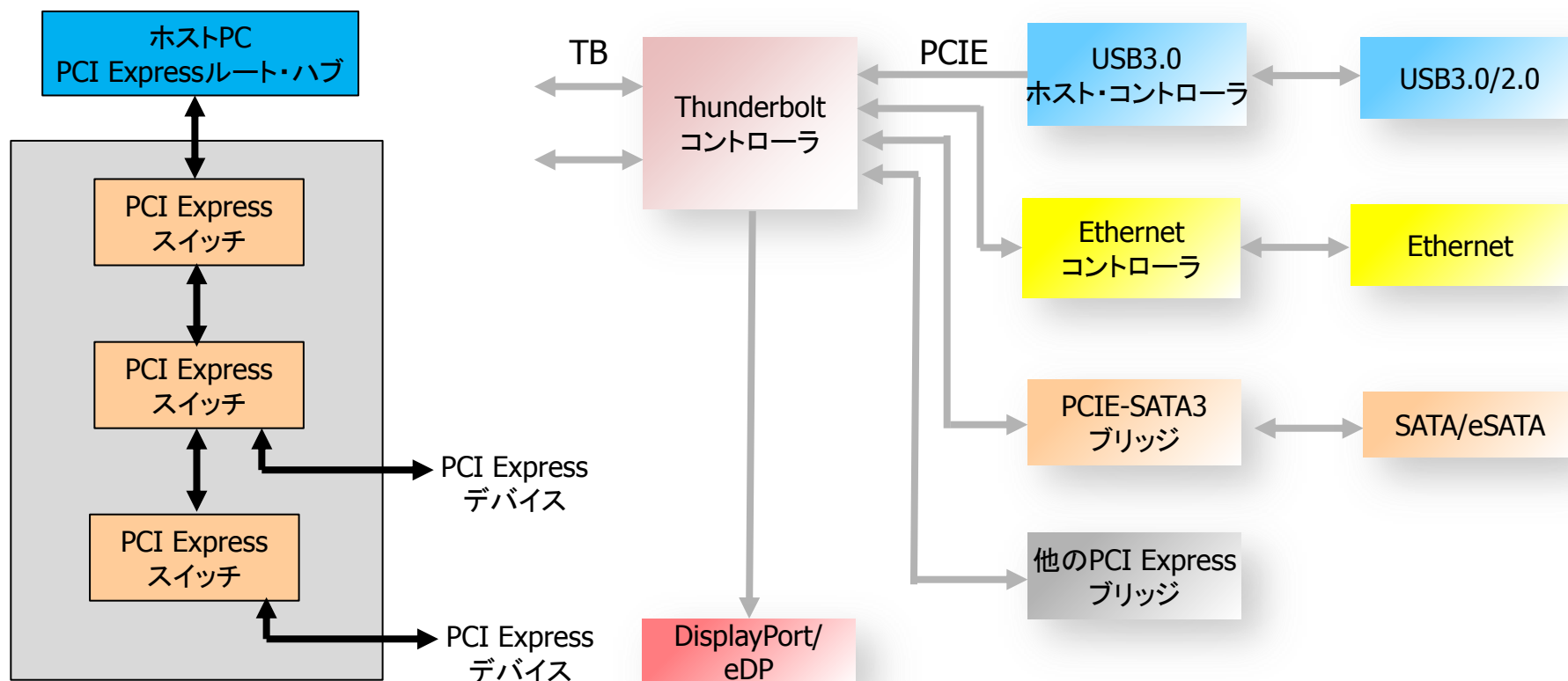


*Transition Minimized Differential Signaling

引用: <http://www.paradetech.com/products/displayport-format-converters/ps181-dp-to-dual-mode-dp/>

ThunderboltとPCI Express

- 上位から見たら単なるPCI Expressスイッチにしか見えない
 - Thunderboltというインターフェースを意識する必要がない⇒ブラック・ボックス
 - PCI Expressで何でもつながる⇒簡単なインプリメンテーション



Thunderbolt™ Technology アクティブ・ケーブル: 概要

- Foxlink (Apple Store)、住友電気工業などが製造・販売
- すべてのケーブルは両端にアクティブ・デバイスを内蔵
- 住友電気工業はAOC (Active Optical Cable) も出荷中
 - TDKもCEATEC2012、Photonix 2013内「第13回光通信技術展(FOE)」に参考出品
- アクティブ化のメリット
 - 高周波損失のみならず近端クロストークの抑制
 - プラグ内やレセプタクル内およびレセプタクル直下ではクロストークが発生しやすい
 - 双対単方向伝送で、信号振幅の大きな送信信号に対し、減衰を受けて振幅が低い受信信号は、イコライザでブーストすれば改善できるが、同時に近端のノイズ、クロストークを増強
 - そこでイコライザを内蔵したリタイマによりアクティブ化することで、送信信号振幅を下げられ、また受信信号は適正なレベルで受けられるため、イコライザを効かせる必要がなくなる(逆にイコライザで高周波を抑制できる: 一般論)
 - 電気⇔光の変更が簡単
 - リタイマの先にPDが接続されたTIA、VCSELとそのドライバを配置すれば、そのまま光リンク化が可能



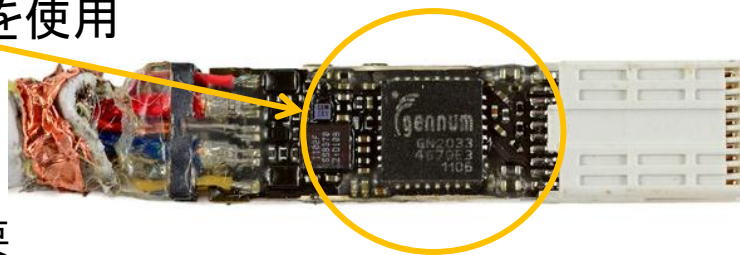
写真提供: 住友電気工業株式会社

PD: Photo Diode
TIA: Transimpedance Amplifier
VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting
LASER (垂直共振器面発光レーザ)

Thunderbolt™ Technology アクティブ・ケーブル: 構造

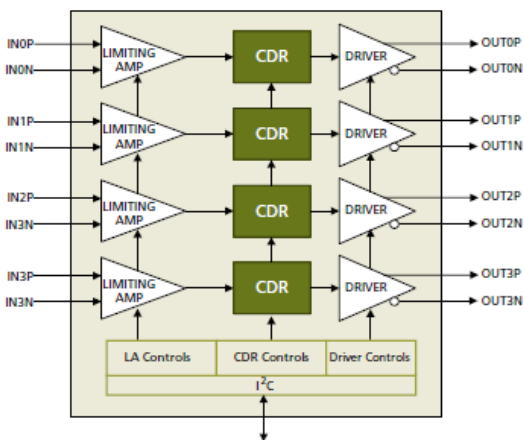
- Apple社品はSemtech Gennum社GN2033を使用

- 仕様入手にあたってはNDAが必要
- イコライザ、CDRを内蔵したリタイマ(推測)
 - 同社GN2405 & GN2406参照
- 10Gbps × 1レーン(アップ&ダウン): 2個必要
- その他、MCU(8051)を搭載

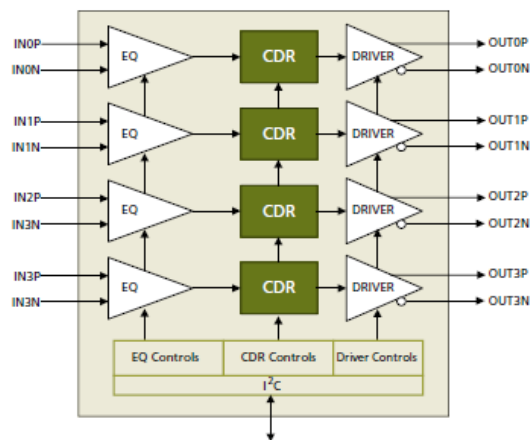


<http://www.ifixit.com/blog/2011/06/29/what-makes-the-thunderbolt-cable-lightning-fast/>

- 同様な製品としてTI社DS100TB211などがある



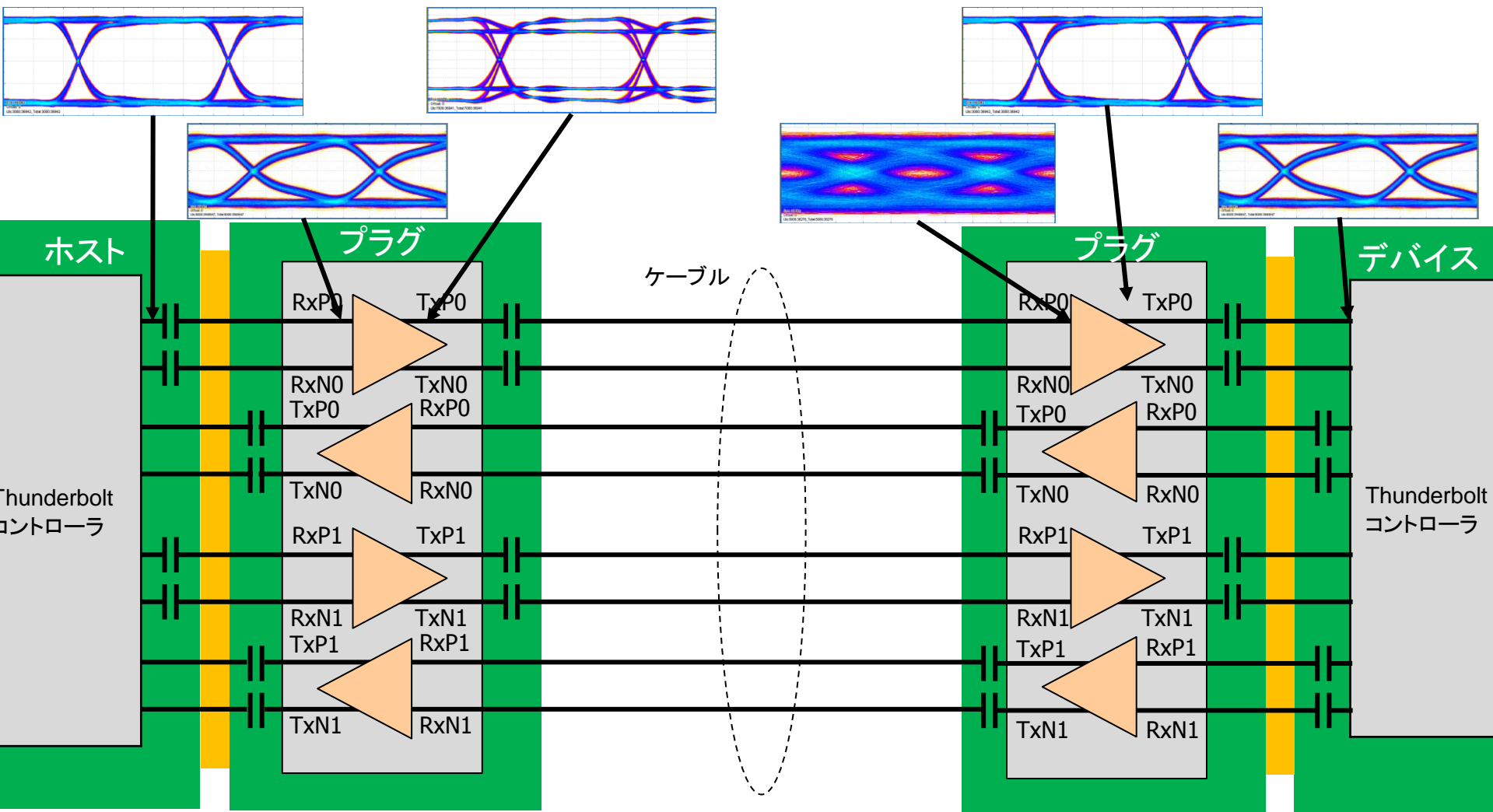
GN2406: Quad 10Gb/s CDR with limiting amplifier



GN2405: Quad 10Gb/s CDR with input equalizer

引用:「GN2405 & GN2406 Quad 10Gb/s CDR with Transmit De-Emphasis」より
<http://www.gennum.com/extranet/document/55053>

参考: Thunderboltリンク内の各部の推定波形



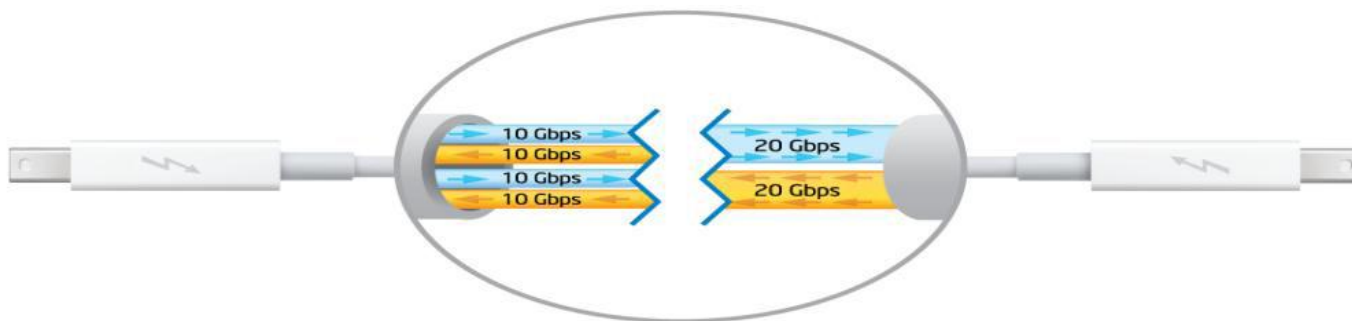
Thunderbolt™ Technology: アクティブ化による その他のメリット・効果

- アクティブ・ケーブルにより、セットメーカーが押さえるべき10Gbpsの伝送はThunderbolt™ Technologyコントローラ⇔レセプタクルの間のみ
 - セットメーカーはケーブルという伝送路を考えなくて良い
 - インテル社のみが両端のコントローラを提供。その間はブラック・ボックスとして、規格を意識しなくても済む
- 上記伝送は短距離のため、損失の影響が軽い
 - 特に現状ではThunderbolt™ Technologyコントローラは独立したワンチップのため、レセプタクル近傍に設置可能: 推奨2~5cm(85Ω)※
- ただし、他の規格と同様に、切り口(MiniDPプラグ)にて信号レベルやジッタ特性などを満足させる必要はある⇒ここがコンプライアンス・ポイント

※引用: *Thunderbolt Technology Update & Design Considerations, HST005, IDF2012 San Francisco*

次世代: Thunderbolt2



- NAB2013にて次世代20Gbpsを発表
 - 2014年登場のFalcon Ridgeで投入
 - 4Kビデオに対応
 - ただし
 - 10Gbps物理層×2を使って実現する20Gbpsデータ帯域幅
 - 第1世代は10Gbpsが2チャンネルで、あくまでも各10Gbpsデータ帯域幅
 - PCI Express用1チャンネル、DisplayPort用1チャンネルとして使用か？



- Computex2013にて正式にThunderbolt2として発表

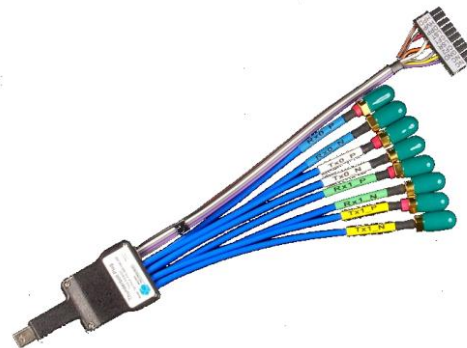
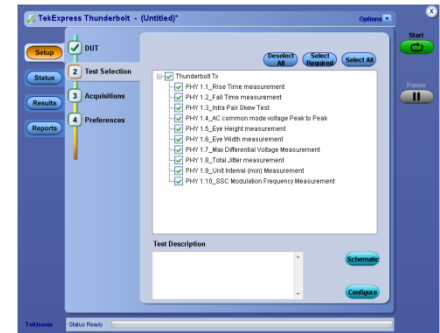
引用: [Thunderbolt™ Technology Update, June 4, 2013, Thunderbolt announcements at Computex 2013](#)

Thunderbolt Technologyホストおよびデバイス・コンプライアンス・テスト

- 測定項目
 - トランスミッタ  アイ・ダイアグラム、ジッタ(TJ、DDJ、UJ)、ACコモンモード、UI、tR/tF、SSC(変調周期、周波数偏差、スルーレート、位相偏差)
 - レシーバ  ストレス耐性
 - リターン・ロス
 - ホストおよび2ポート・デバイスの場合 : HDMIおよびDisplayPortソース・テスト
 - PCI Expressに対しては事前にコンプライアンス・テスト相当の確認をしておくこと
 - チップ・トゥ・チップ内部接続での使用の場合にはBase Specification Rxと照合
 - CEMフォーム・ファクタの場合にはCEM Specificationと照合
 - SATA、USB3.0などのインタフェースを備えている場合には、事前に各規格のコンプライアンス・テスト相当の確認をしておくこと
- ※ 必要構成・測定方法等は変更される可能性があります。ご了承ください(事前にご確認ください)

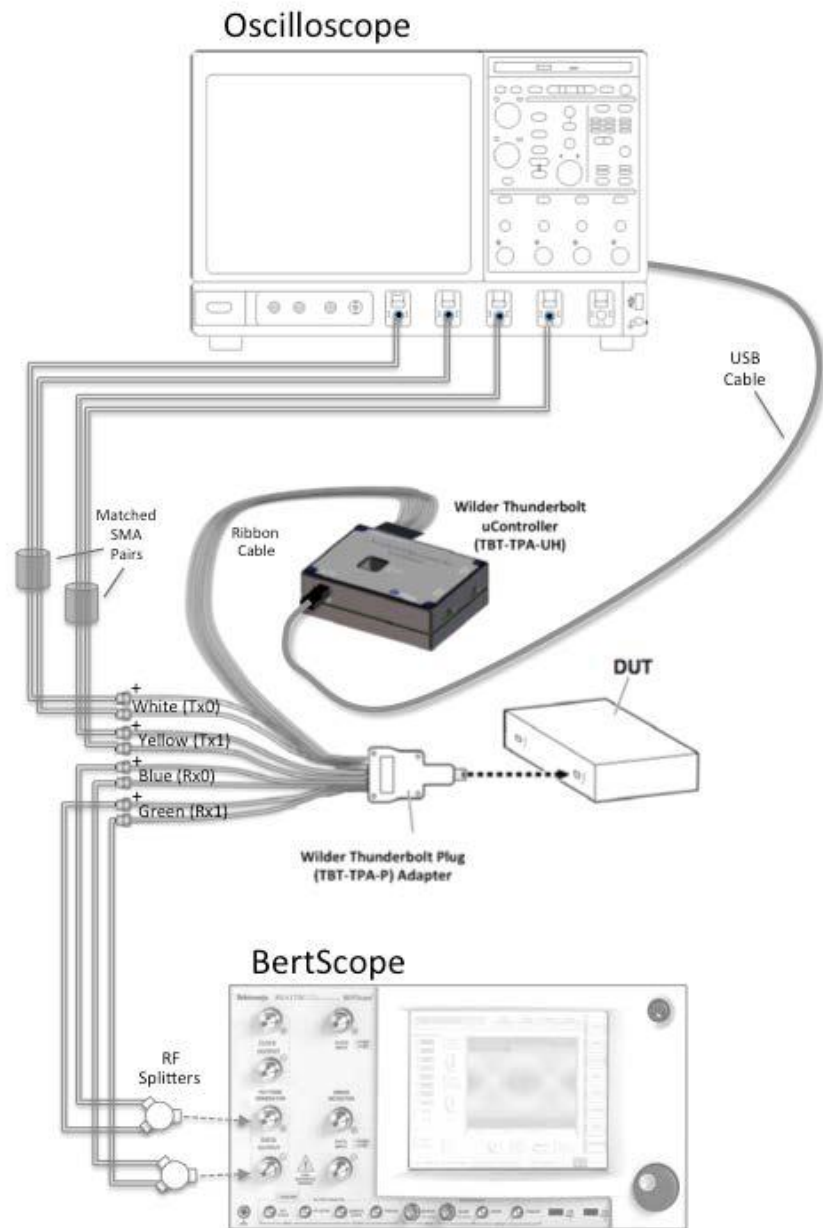
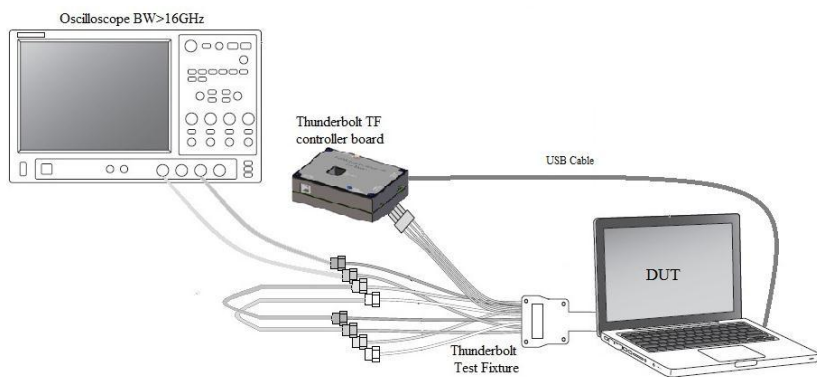
必要な構成(トランスミッタ)

- 16GHz 以上のDSA70000C/Dシリーズ、あるいはMSO70000Cシリーズ
 - 最低限MSO/DSA71604C型
 - オプションTBT-TX TBT自動化、デバッグ・ソリューション
- TF-TB-TPA-P Thunderboltプラグ・テスト・アダプタ
- TF-TB-TPA-UH Thunderboltポート・マイクロコントローラ
 - ※ PC用スクリプト・ファイルはライセンス・デベロッパのみ入手可能
- PMCABLE1M型 SMA-SMAペア・ケーブル 2~3セット
- クロストーク・ソース:BSA125C型
 - パワー・デバイダが2組必要
- その他
 - バス・パワード・デバイスの場合、電源が必要(+15V、+3V)
 - PC(Windows 7 32ビット版?)
 - USBケーブル
 - マイクロソフトExcel



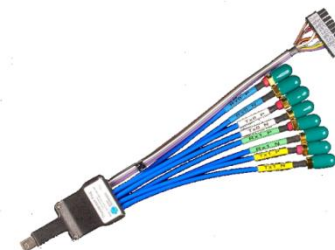
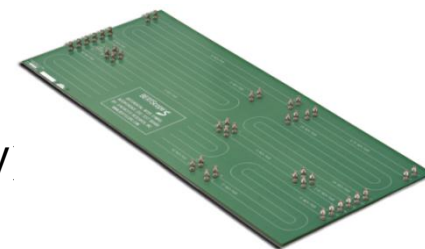
トランスミッタ・テスト接続図

- 実際はコントローラにより異なる
 - 例: ホストでは下記のようにPC用スクリプト実行環境およびThunderboltポート・マイクロコントローラを被測定デバイス(ホスト)に搭載、接続する必要がある



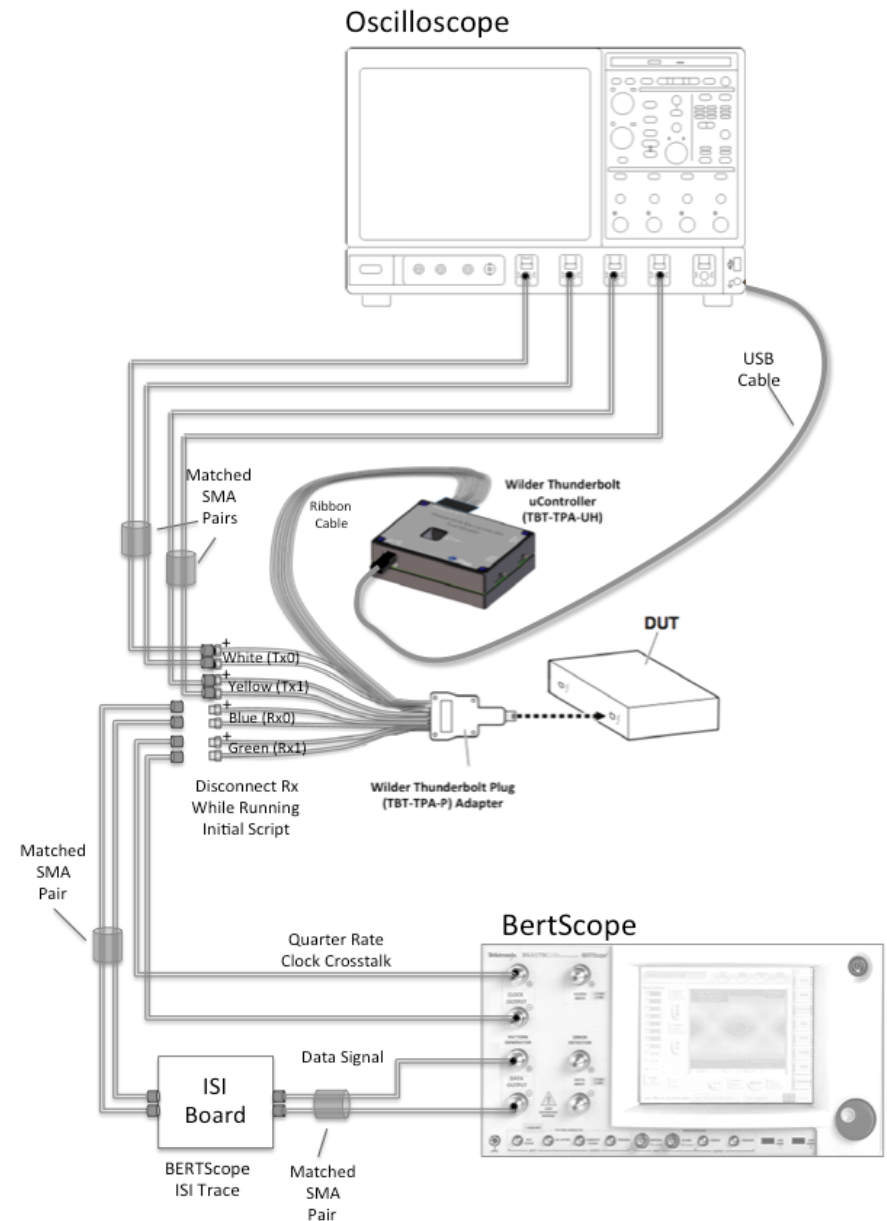
必要な構成(レシーバ)

- 12GHz 以上のBSAシリーズ BERTScopeビット・エラー・レート・アナライザ
 - 最低限BSA125C-STR型
- BSA12500ISI型 汎用ISI基板
- TF-TB-TPA-P Thunderbolt プラグ・テスト・アダプタ
- TF-TB-TPA-UH Thunderbolt ポート・マイクロコントローラ
 - ※ PC用スクリプト・ファイルはライセンス・デベロッパのみ入手可能
- PMCABLE1M型 SMA-SMAペア・ケーブル 3セット
- その他
 - バス・パワード・デバイスの場合、外部電源が必要(+15V、+3V)
 - DCブロック 2個
 - SMA50Ωターミネーション 2個
 - PC、USBケーブル
 - ジッタ・キャリブレーションにはトランスミッタ測定と同じ構成のオシロスコープが必要



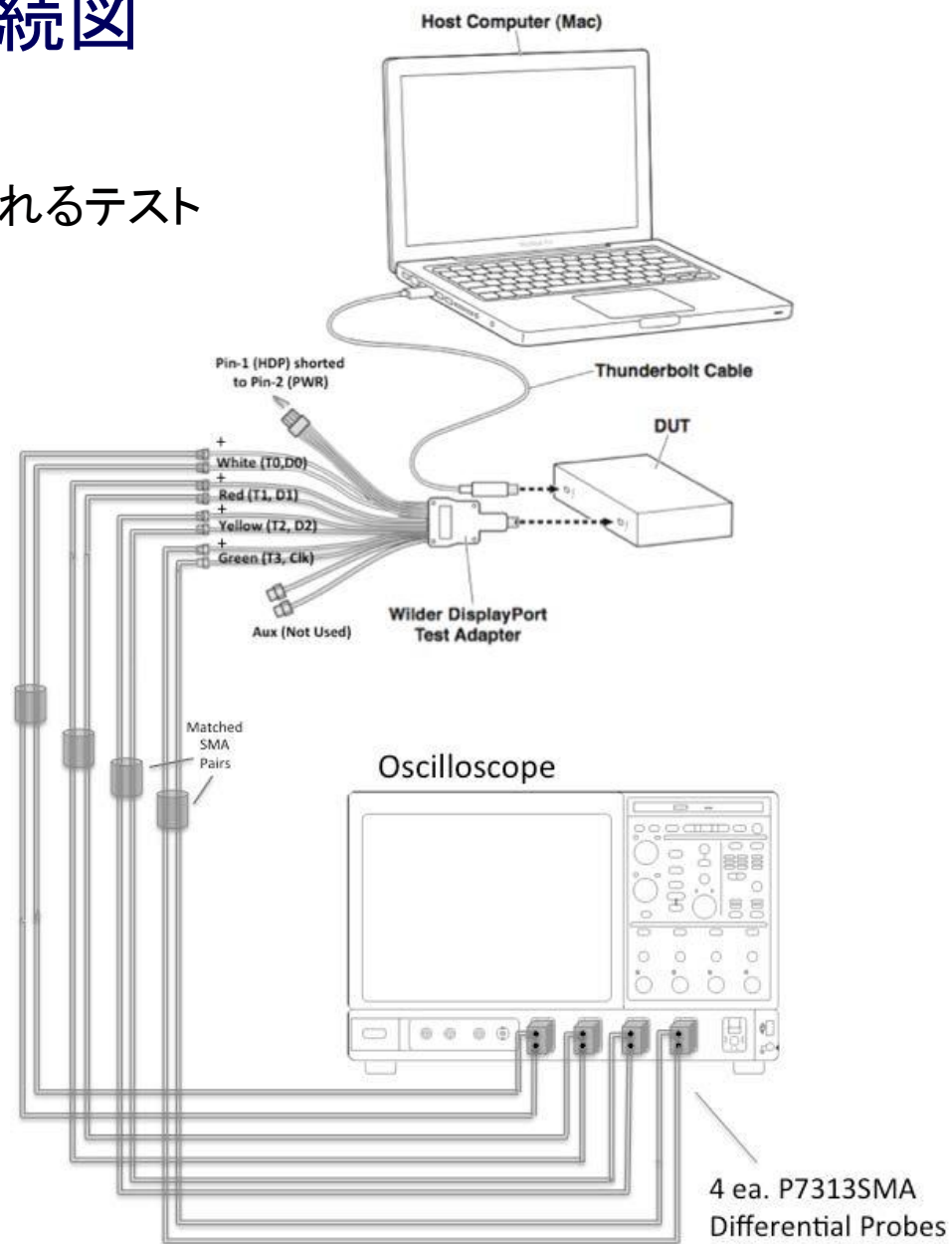
レシーバ・テスト接続図

- 事前にジッタ・キャリブレーションが必要
- 実際の構成はコントローラにより異なる



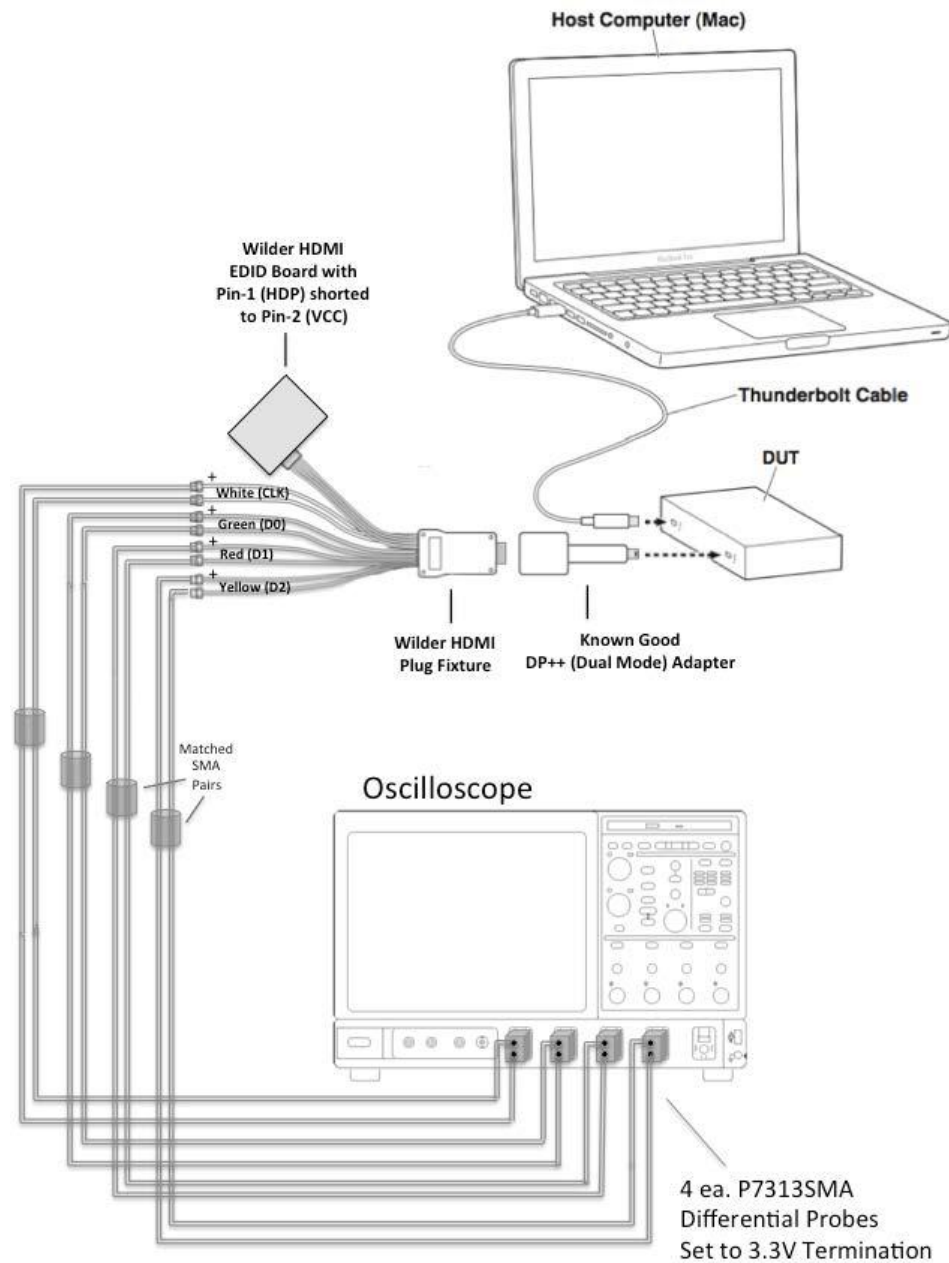
DisplayPortソース・テスト接続図

- ホストおよび2ポート・デバイスで要求されるテスト
 - Thunderboltリピータ・ポート
 - Redwood RidgeよりHBR2(5.4Gbps)



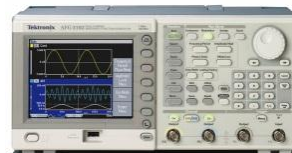
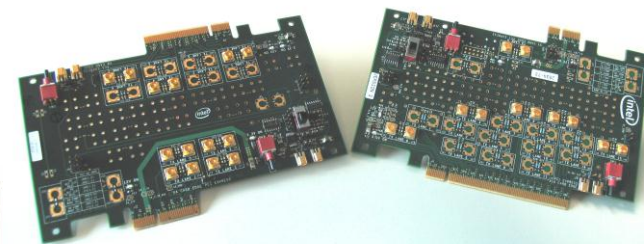
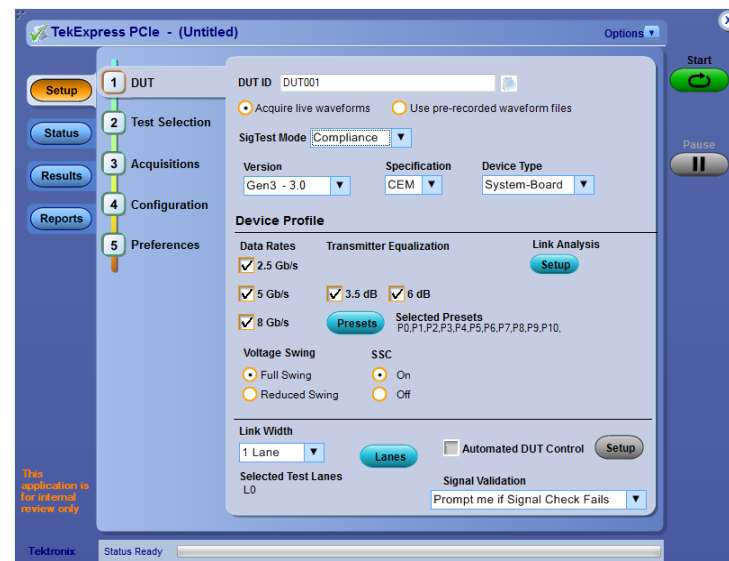
HDMIソース・テスト接続図

- ホストおよび2ポート・デバイスのみ要求されるテスト
 - Thunderboltリピータ・ポート
- 市販のMiniDisplayPort⇒HDMI変換アダプタを併用
 - 例: Moshi MiniDisplayPort⇒HDMI変換アダプタ: Apple Storeで¥3,360
http://store.apple.com/jp/product/H1824ZM/A/Moshi_Mini_DisplayPort_to_HDMI_Adapter



必要な構成: PCI Express

- オプションPCE3 PCI Expressモジュール
 - SigTestを完全統合
- 12.5GHz以上の差動プローブ(チップ・トゥ・チップ内部接続の場合)
 - 最低限P7513A型13GHzTriMode差動プローブ
- ケーブル(CEMフォームファクタの場合: CLB2/CBB2を使用)
 - PMCABLE1M型 SMA-SMAペア・ケーブル 1セット(CBB2/CLB2)
 - SMA-SMP変換アダプタ 2個
 - SMA-SMPケーブル(CLB2)
 - 完全自動化のためには最低限AFG3252C型を推奨
 - データ・レートおよびディエンファシス・レベルを変更してのテスト
 - ケーブル・セットも必要



参考: Txテストで最もパスが困難なのはACコモン・モード

- 主要因はスキュー、差動インバランス
 - 当初はスキュー測定も計画されていたが、ACコモン・モードに吸収
- 差動トレース長(電気長)が差動内で一致していること
- スルーホール周囲の電源層、グランド層とのクリアランス(アンチ・パッド)の対称性を保つこと
- コネクタ・ピンおよびビア周囲で銅箔を抜く場合は差動間で対称性を保つこと
- リファレンス・プレーンの切れ目を横切らないこと(コモン・インピーダンスが不連続に)
- 仕様を満たしたコネクタを使用すること

ご清聴いただきありがとうございました

本テキストの無断複製・転載を禁じます。テクトロニクス/ケースレーインストルメンツ
Copyright © Tektronix, Keithley Instruments. All rights reserved.

www.tektronix.com/ja
www.keithley.jp/

Twitter [@tektronix_jp](https://twitter.com/tektronix_jp)

Facebook <http://www.facebook.com/tektronix.jp>

