



# Thunderbolt 光ケーブル

前 田 靖 裕\*・春 本 道 子・島 津 貴 之  
本 間 祐 也・田 村 充 章・千 種 佳 樹

Optical Thunderbolt Cable — by Yasuhiro Maeda, Michiko Harumoto, Takayuki Shimazu, Yuya Homma, Mitsuaki Tamura and Yoshiki Chigusa — Thunderbolt, an innovative high-speed input/output (I/O) technology developed by Intel Corporation and Apple Inc., enables 10 Gb/s transmission between a computer and peripheral devices. Based on Intel's technical specifications, Sumitomo Electric Industries, Ltd. developed a Thunderbolt active optical cable (AOC) by drawing on its optical fiber and module technology. The Thunderbolt AOC has capabilities of long-distance transmission up to 30 meters, excellent robustness, durability and flexibility by using specially designed optical fiber. This paper describes the outline of Thunderbolt AOC design and the test results of its characteristics and reliability.

Keywords: Thunderbolt, active optical cable

## 1. 緒 言

近年、画像や映像の高画質化に伴い、パソコンやタブレット端末、スマートフォンなどの情報端末で扱うデータ通信量は増加の一途を辿っており、これらを接続するインタフェースも更なる高速化が求められている。また、これら情報端末の薄型化、小型化も進んでおり、コネクタ用のスペース確保のため、現在複数の規格があるインタフェースの集約化が課題となっている。そこで登場したのが Thunderbolt である。

Thunderbolt はインテルコーポレーションとアップル・インクが共同開発した高速汎用データ伝送規格であり、双方向 10Gb/s の伝送路を 2 レーン有し、プロトコルとしてはデータ転送技術である PCI Express<sup>※1</sup> と、映像出力技術である DisplayPort<sup>※2</sup> に対応している。またドッキングステーション<sup>※3</sup> と接続することで、様々なインタフェースをまとめて扱うことができ、デジチェーン接続<sup>※4</sup> も可能など、機能拡張性にも優れている。表 1 に Thunderbolt と一般的な汎用インタフェースである USB との比較を示す。

Thunderbolt は 2011 年に制定されて以来、アップル社の製品を中心に徐々に普及が進んでいるが、最近では Windows 対応の機器にも搭載されるなど、本格的な普及の兆しが見えてきている。その中で当社は、インテル社から Thunderbolt ケーブルの技術仕様の開示を受け、当社の高度な電線技術と高速伝送技術を融合させることで、いち早く Thunderbolt 電気アクティブケーブルを製品化し、好評を博している。一方、映像制作・編集業界等では、より長距離に対応したケーブルの製品化が望まれている。その期待に応え、当社の光ファイバケーブル技術と光モジュール技術を融合し、30m までの長さに対応した Thunderbolt

光アクティブケーブル（以降 Thunderbolt AOC）を今回開発した。本ケーブルは Thunderbolt AOC としては世界で初めて製品認証を取得し、2013 年 1 月より販売を開始している。

本論文では、今回開発した Thunderbolt AOC の設計概要と、特性評価結果及び信頼性評価結果について述べる。

表 1 Thunderbolt と USB の比較

規 格	Thunderbolt	USB2.0	USB3.0
伝送速度	双方向 10Gb/s × 2 レーン	双方向 480Mb/s × 1 レーン	双方向 5Gb/s × 1 レーン
ケーブル長	最長 3m (当社製電気ケーブル) 最長 30m (当社製光ケーブル) ※光ケーブルは給電機能無し	最長 5m (電気ケーブルのみ)	最長 3m (電気ケーブルのみ)
特 徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>データ伝送用、映像伝送用の 2 つのプロトコルに対応 (PCI Express, DisplayPort)</li> <li>デジチェーン接続</li> <li>最大供給電力 12W (※一部機器は 10W)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>データ伝送用</li> <li>ツリー接続</li> <li>最大供給電力 2.5W</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>データ伝送用</li> <li>ツリー接続</li> <li>最大供給電力 4.5W</li> </ul>
制 定	2011 年	2000 年	2008 年

## 2. Thunderbolt AOC の設計概要

写真 1 は Thunderbolt AOC の外観である。写真中に示した、本製品を構成している各要素技術の設計概要について、以下に述べる。

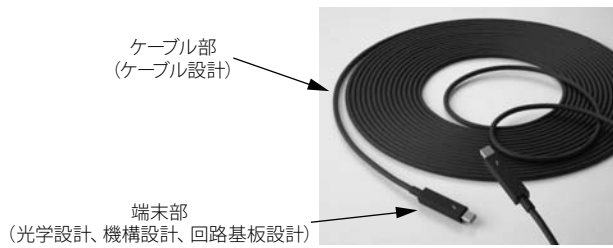


写真1 Thunderbolt AOCと各要素技術

**2-1 ケーブル設計** Thunderboltは双方向10Gb/s×2レーンであるため、光ファイバは4芯必要である。機械強度に優れた構造とするため、光ファイバをアラミド繊維と共にインナーチューブに内包し、その外周にプラスチックヤーンを配置する構造とした。外径は4.2mmである。

Thunderbolt AOCは民生機器や映像機器の接続に使用されるため、固定配線される光通信ケーブルとは異なり、様々な使用環境にも耐える必要がある。例えば、写真2のようにケーブルを180°折り曲げても、光ファイバが破断しないことはもとより、通信が遮断しないことが求められる。今回、Thunderbolt AOC用に新規に開発した光ファイバの曲げ損失特性を図1に、耐破断特性を図2に示す。ケーブルを180°折り曲げた時の曲げ半径（約2mm）において、今回開発した光ファイバでは、汎用GIファイバ<sup>※5</sup>と比べ、曲げ損失特性、耐破断特性共に大幅に優れた結果が得られた。当社のThunderbolt AOCは、写真2のように折り曲げても安心して使用できることと言える。

次に、ケーブルが椅子で踏み付けられることを想定した、側圧試験の結果を図3に示す。ケーブルを45°ずつ回転させ、側圧箇所を変えながら試験を実施した。今回開発したケーブルは、どの角度から側圧を加えても損失変動は0.2dB以下と、良好であることを確認した。その他のケーブル特性を表2に示す。いずれの試験においても良好な結果が得られ、強靱な機械特性を有するケーブルであることを確認した。



写真2 ケーブル折り曲げ試験

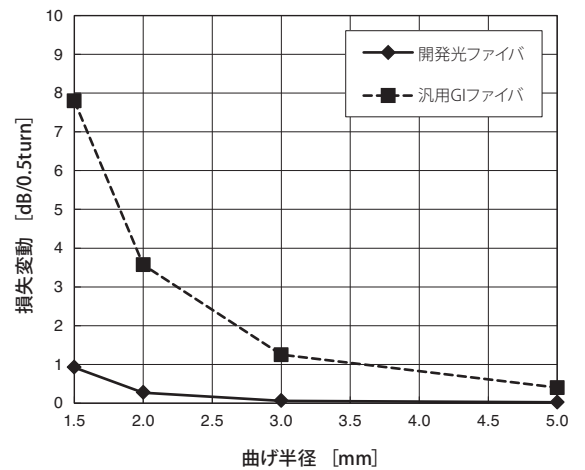


図1 開発光ファイバの180°曲げ損失特性

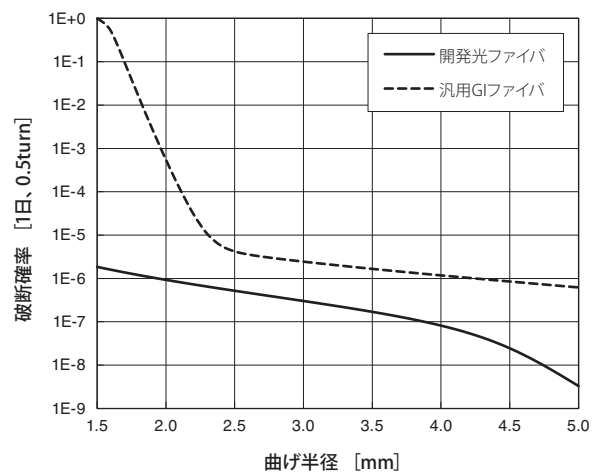


図2 開発光ファイバの耐破断特性

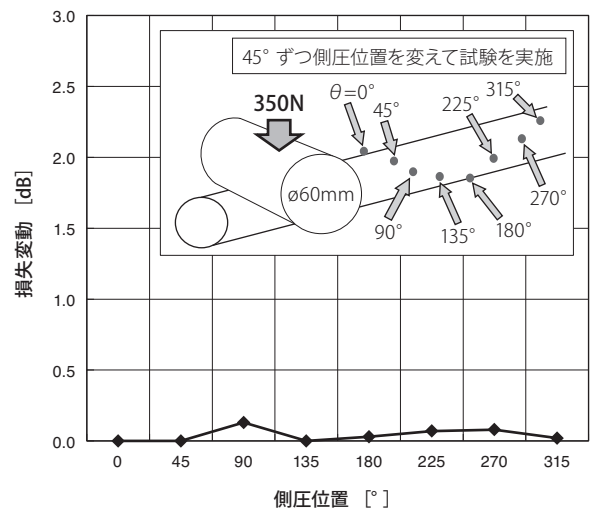


図3 側圧試験評価結果

表2 ケーブル特性

試験項目	試験条件	試験結果
引張試験	引張張力 100N	損失変動: <0.2dB
側圧試験	曲げ半径 30mm、350N	損失変動: <0.2dB
衝撃試験	錘 500g、落下高さ 15cm	損失変動: <0.2dB
屈曲試験	曲げ半径 15mm、±90°、1000回	損失変動: <0.2dB
捻回試験	±180°/0.3m、1000回	損失変動: <0.2dB
ノット試験	引張張力 50N	損失変動: <0.2dB
温度サイクル試験	-20℃～85℃×5回	損失変動: <0.2dB
難燃試験	UL VW-1	合格

2-2 光学設計 図4に、電気信号と光信号を変換する VCSEL<sup>\*6</sup>/PD<sup>\*7</sup>から伝送用光ファイバまでの光学部品配置を模式的に示す。VCSEL/PDと伝送用光ファイバは、レンズモジュールによって光学的に結合されている。VCSEL/PDは、電子部品と共に回路基板表面に実装されており、基板垂直方向に光軸を有する。これに対し、伝送用光ファイバは基板と水平方向に光軸を有するため、レンズモジュール上の45°全反射面により、互いに光路が90°折り返される構造としている。また、VCSEL/PD、および各伝送用ファイバ端面と対面するように、それぞれ非球面レンズが形成されている。これらは、送受信側、ファイバあるいはVCSEL/PD側かでそれぞれ異なる非球面形状となっており、4種の非球面形状×2レーンの計8個の非球面レンズを有することになる。

光ファイバとVCSEL/PD間で十分な光結合を達成するた

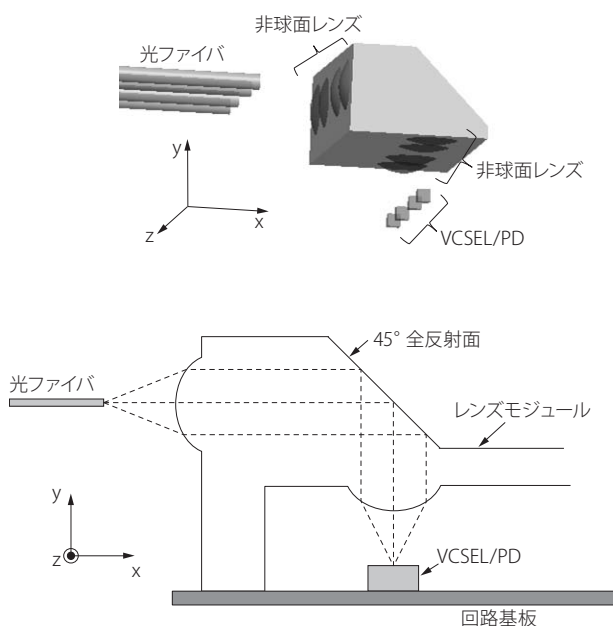


図4 VCSEL/PDから光ファイバまでの光学部品配置

めには、VCSEL/PDが設計間隔通りに実装されること、レンズモジュールがこれら素子に対して精度よく実装されることが必要である。このため、まず実装精度の検証を行った。図5に、200サンプル×4レーンでの、設計位置に対するVCSEL/PDチップ実装位置誤差(図5(a))と、レンズとチップの相対位置誤差(図5(b))を示す。概ね±10μm以下の実装精度が得られていることが分かる。

これらの結果と、その他の部品の位置精度なども考慮して、どの製品においても光ファイバとVCSEL/PD間で十分な光結合を達成されるように、公差を考慮して非球面レンズを最適化した。

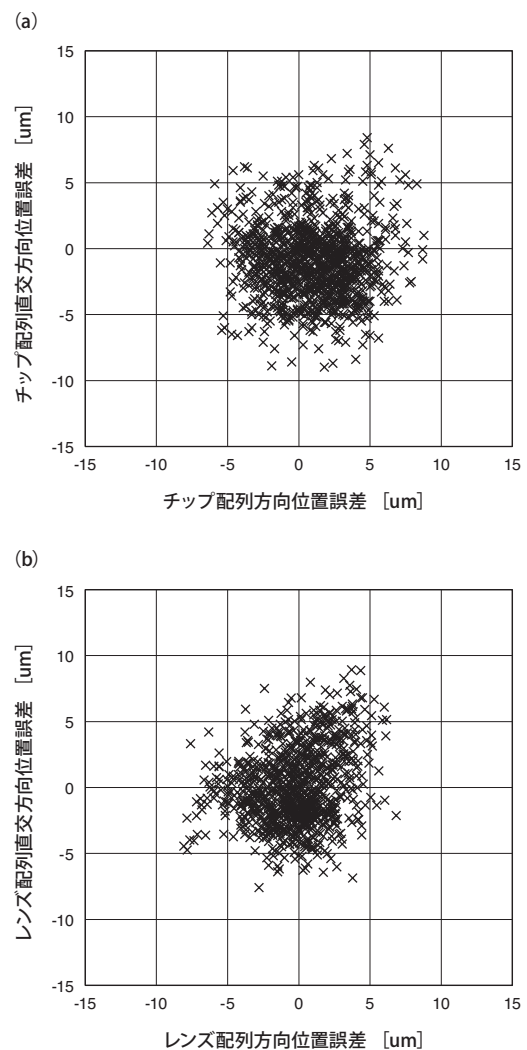


図5 (a) チップ実装位置誤差 (b) レンズとチップの相対位置誤差

2-3 機構設計と熱解析事例 図6にケーブル端末部の構成を模式的に示す。Thunderboltコネクタが実装された回路基板を、金属シェルで包み込み、その周囲を樹脂部

品でパッケージする方式を採っている。金属シェルは、実装部品から発生する放射ノイズをシールドし、回路基板上で発生する熱を効率的に吸収し外部へ放射する役割を担っている。

ケーブルと端末の接続部については、光ファイバの外周部材を金属製のフランジ部品に巻き付け、金属シェルと接続することで、ケーブルに加わる引張りなどの外力に対して、高い耐久性を持たせる構成としている。

製品信頼性の観点から、最も重要となる項目として、VCSELの発熱による劣化故障がある。十分な信頼性を確保するには、ケーブル使用時のVCSELの発光部の温度をある一定温度以下にする必要がある。しかし、VCSELチップの局所的な温度を正確に評価することは非常に困難である。ここで手法として、発光波長の温度依存性、放熱解析、実測を組み合わせることでVCSELの発光部の温度を推定した。図7は、ケーブル使用時を想定した場合の放熱状態

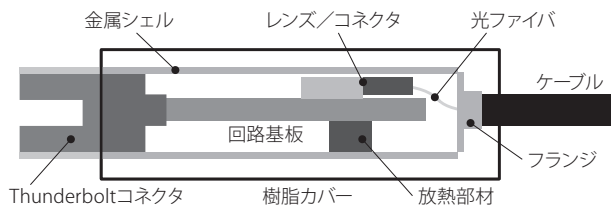


図6 ケーブル端末部の構成

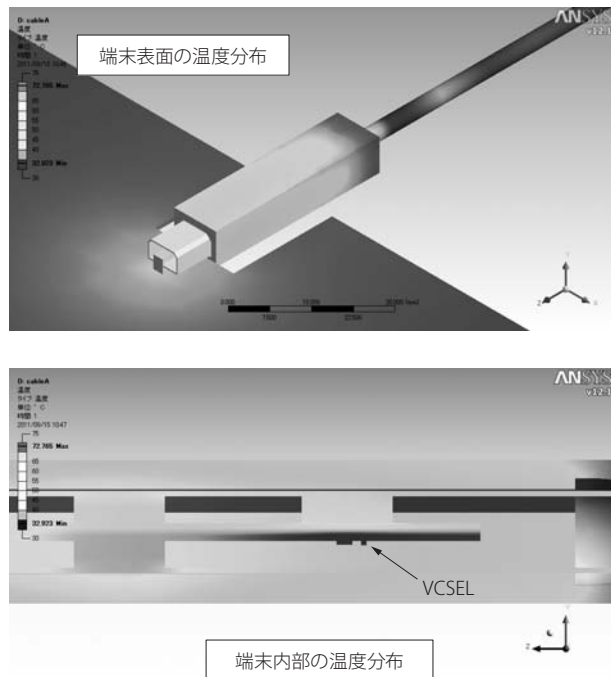


図7 仕様温度上限における熱解析事例

を解析した例であり、放熱部材を介し、金属シェルが放熱パスとして機能していることを示している。結果的にVCSELの発光部の温度は信頼性保証の目安となる温度を下回っていることを確認した。

2-4 回路基板設計と光特性 図8にケーブル端末部の機能ブロック図を示す。Thunderboltコネクタ側のインタフェースは電気信号であるが、端末部の回路基板上に実装されたVCSEL/PDを介し、ケーブル内では光信号を用いて通信が行われる。

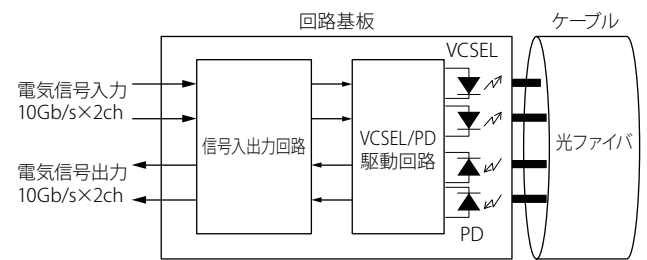
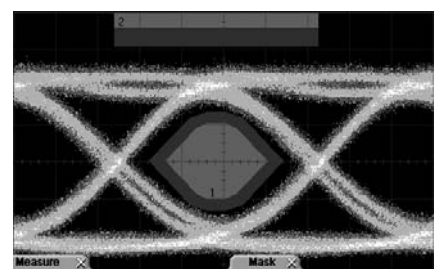


図8 機能ブロック図

図9に光出力波形を示す。通常、光アクティブケーブルの場合、光信号がケーブル外部に出力されることは無いが、ケーブル内部の伝送特性を評価するために、レンズモジュールが実装された回路基板上に光ファイバを接続して取得したものである。十分なアイ開口が得られており、良好な光波形品質であることを確認した。



測定条件：10.3125Gb/s, PRBS2^31-1

図9 光出力波形

図10、図11に光出力パワーと消光比<sup>※8</sup>の温度特性例を示す。両パラメータとも大きな温度依存性は無く、VCSELの駆動電流が適切に制御できており、Thunderboltケーブルが使用される全温度範囲に亘って、安定した光信号がケーブル内で伝送されていることが分かる。

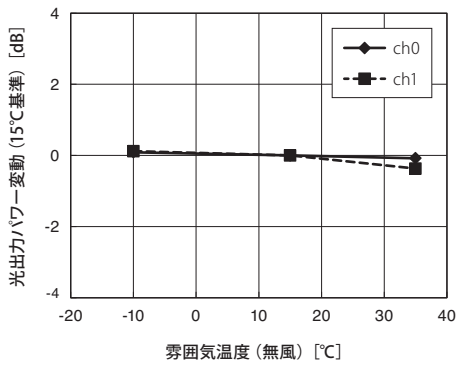


図10 光出力パワー温度特性例

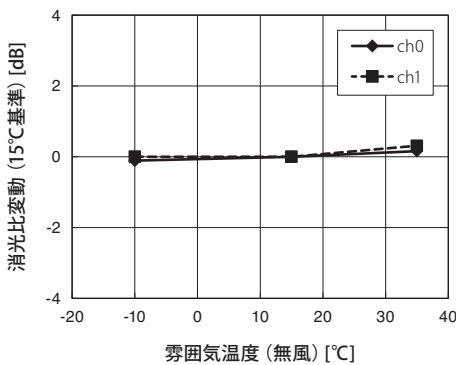


図11 消光比温度特性例

図12に受信感度特性例を示す。光出力波形同様に回路基板に光ファイバを接続して測定を行った。最小受信感度(@1E-12)は-10dBm程度であり、ケーブルの伝送や曲げ

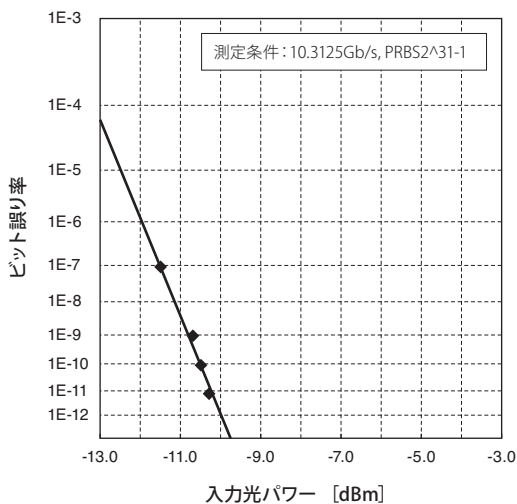


図12 受信感度特性例

による光パワー損失や、モード分散\*9による受信感度劣化を考慮しても、十分なマージンがあることを確認した。

### 3. Thunderbolt AOCの伝送特性評価

図13にThunderbolt AOCの伝送特性評価系を示す。ケーブルへの入力波形は実際に接続されるホスト側の機器が出力する波形に依存するため、意図的に入力波形を歪ませ、最悪条件を模擬した。ケーブルの出力波形はアイ開口が十分得られており、誤り率測定器によりエラー無くデータを伝送できていることを確認した。

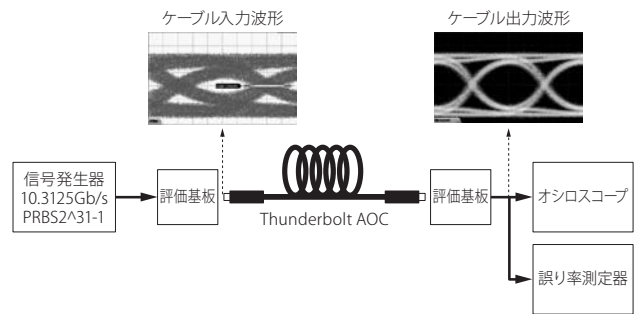


図13 伝送特性評価系

図14にThunderbolt機器を使用した機能評価系を示す。この図はパソコン同士の接続例であるが、ハードディスク等のデバイスとの接続を含めて、Thunderbolt機器間で正常に通信できることも確認済みである。

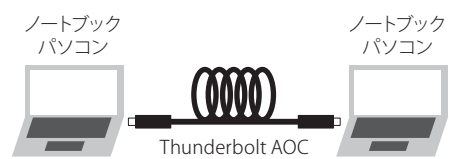


図14 Thunderbolt機能評価系

### 4. Thunderbolt AOCの信頼性試験結果

表3に信頼性試験結果を示す。合否判定基準はThunderbolt機器を使用しての機能確認とした。試験後のケーブルの機能は、全試験項目において正常であり、十分な信頼性を有していることを確認した。

表3 信頼性試験結果

試験カテゴリ	試験項目	試験条件	判定基準	結果
環境試験	高温通電	80℃、2000時間	試験前後でのThunderbolt機器での機能チェックにおいて問題無いこと、および外観異常無いこと	合格
	温湿度サイクル	RH95%、25～85℃ 12サイクル		合格
	熱衝撃	-55～85℃ 1時間/サイクル ×10サイクル		合格
機械試験	振動	50～2000Hz、 振幅1.52mm 20分/回 ×12回/各方向		合格
	衝撃	1000G、0.5ms 6回/各方向		合格
電気特性	EMI	30MHz～26.5GHz PRBS2^31-1	FCC、CE、 VCCI	合格
	ESD	8kV 気中および接触放電	動作異常 無いこと	合格

## 5. 結 言

インテル社からThunderboltケーブルの技術仕様の開示を受け、当社の光ファイバケーブル技術および光モジュール技術を融合したThunderbolt AOCを開発し、世界で初めて製品認証を取得した。今回製品化したThunderbolt AOCは、専用に開発した光ファイバを用いることで、優れた柔軟性と強靱性/耐久性を両立し、最長30mの伝送距離を実現した。今後、データ通信量の増大に伴い、Thunderboltに代表される高速インタフェースの普及が加速し、民生分野で光アクティブケーブルの用途が更に広がることが期待される。

## 6. 謝 辞

本開発を進めるにあたり、インテル社に多大な支援を頂いた。ここに感謝致します。

## 用語集

### ※1 PCI Express

パソコン内部の通信の標準インタフェースの一つ。入出力インタフェースの拡張のための標準規格でもある。2002年にPCS-SIGにより制定された。

### ※2 DisplayPort

デジタル映像信号出力用の標準インタフェースの一つ。2006年にVESAにより制定された。

### ※3 ドッキングステーション

ノートブックパソコンの機能拡張装置。ノートブックパソコン本体を薄型軽量に保って機動性を確保しつつ、デスクトップパソコン並みの機能性を持たせることが可能。Thunderbolt用のドッキングステーションはPCI Expressから、その他の従来インタフェースへ変換する機能を有する。

### ※4 デイジーチェーン接続

複数の機器を数珠繋ぎにつないでいく配線方式。

### ※5 GIファイバ

Graded Index ファイバの略称で、マルチモードファイバの一種。ファイバの屈折率に分布を持たせ、モード間の伝搬時間差を低減するように設計されている。

### ※6 VCSEL

Vertical Cavity Surface Emitting LASER（垂直共振器面発光レーザ）の略称で、半導体レーザの一種。基板面に対して垂直に発光すること、及び消費電力が小さいことが特徴。通信用機器に加え、コンピュータマウス、レーザプリンタ等の民生機器にも幅広く使用されている。

### ※7 PD

Photo Diodeの略称で、半導体ダイオードを使用した光検出器の一種。

### ※8 消光比

デジタル変調された光信号の“1”レベルと“0”レベルの光強度の比。

### ※9 モード分散

マルチモードファイバにおいて、モード間で伝搬時間差が生じる現象のこと。ファイバ出力波形に影響を与える。

- ・ Thunderbolt、Thunderboltロゴは、米国Intel Corporationの米国及びその他の国における商標または登録商標です。
- ・ PCI Expressは、米国PCI-SIGの米国及びその他の国における商標または登録商標です。

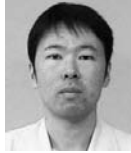
## 参 考 文 献

- (1) <http://www.sei.co.jp/ewp/J/thunderbolt/index.html>
- (2) <https://thunderbolttechnology.net/>
- (3) 桜井 渉 他、「10Gb/s 高速伝送インターフェースケーブル“Thunderbolt Cable”の開発」、SEIテクニカルレビュー第181号（2012年7月）

執筆者

---

前田 靖裕\* : 光通信研究所 主査



春本 道子 : 光通信研究所 主席



島津 貴之 : 光通信研究所 主席



本間 祐也 : 光通信研究所



田村 充章 : 住友電工電子ワイヤー(株) 課長



千種 佳樹 : 電子ワイヤー事業部 主幹 博士 (工学)



---

\*主執筆者