

25 Gbit/s/ch × 4ch 差動信号伝送ケーブルの低クロストーク化

Crosstalk Reduction in 25 Gbit/s/ch × 4ch Differential Signal Transmission Cable

南 畝 秀 樹 *
Hideki Nonen

熊 倉 崇 *
Takashi Kumakura

芳 賀 裕 希 *
Yuki Haga

石 松 洋 輔 *
Yosuke Ishimatsu

深 作 泉 *
Izumi Fukasaku

杉 山 剛 博 *
Takehiro Sugiyama

日立金属は、信号線導体間の電磁結合を強めることで、損失・スキューを低減した差動信号伝送ケーブル「OMNIBIT[®]」を開発した。25 Gbit/s/ch × 4ch 差動信号伝送ケーブルアッセンブリとしての実用化にあたり、伝送チャンネルの信号対ノイズ比マージン (COM : Channel Operating Margin) 3 dB 以上が IEEE 802.3by で求められている。これを満たすには、低損失に加え、低クロストークの性能が必要となる。今回、電磁界解析によるケーブル端末のグランド配置構造を検討し、クロストークの小さいケーブル端末構造を開発した。ケーブル長 3 m の製品サンプルを製作し、前方誤り訂正 (FEC : Forward Error Correction) なし、ビット誤り率 (BER : Bit Error Ratio) 10^{-12} のチャンネル設定条件において、COM 3 dB 以上を実現した。

Hitachi Metals has developed OMNIBIT[®], a low insertion-loss, low intra-skew differential signal transmission cable with a co-extruded insulated structure that enhances the electromagnetic coupling between two signal conductors. For 25 Gbit/s/ch × 4 channel cable assemblies, the IEEE 802.3by standard requires more than 3 dB of channel operating margin (COM) for practical use. To meet this requirement, low crosstalk must be achieved, in addition to low insertion loss for the raw cable. Hitachi Metals has developed a low-crosstalk cable assembly by conducting an electromagnetic field analysis on the cable end structure, and has fabricated field-grade samples with a cable length of 3 meters and verified that they achieve more than 3 dB of COM under non-FEC (Forward Error Correction) channel conditions with a BER (Bit Error Ratio) of 10^{-12} .

● Key Word : Crosstalk, COM, Electromagnetic field analysis

● Production Code : OMNIBIT[®]

● R&D Stage : Mass-production

1. 緒 言

データセンターやスーパーコンピュータの性能向上には、データ伝送の高速化が欠かせない。現在、1チャンネルあたりの信号伝送速度が10 Gbit/s から 25 Gbit/s (以降、25 Gbit/s/ch)に移行しつつあり、2015年以降、25 Gbit/s/ch 信号を4チャンネル双方向伝送する100 Gbit/s 伝送が適用されている。電気信号の伝送には差動信号が用いられ、その機器間接続にはメタルケーブルアッセンブリが使われる。25Gbit/s/ch 伝送では、IEEE 802.3by において3 dB 以上の伝送チャンネルの信号対ノイズ比マージン (COM : Channel Operating Margin) が要求されている¹⁾。これを満たすには、ケーブルアッセンブリの低損失、低スキュー性能に加え、低クロストーク性能が必要となる。

日立金属では、信号線導体間の電磁結合を強めることで、

損失やスキューの低減が可能であることを見出し、2本の信号線を一括被覆することで信号線導体間の電磁結合を強めた差動信号伝送ケーブル「OMNIBIT[®]」を開発した^{2)~4)}。OMNIBIT を用いた25Gbit/s/ch 用のケーブルアッセンブリを実用化するにあたり、ケーブル端末部の低クロストーク性能が課題となっていた。

今回、ケーブルアッセンブリのクロストーク特性向上を目的に、電磁界解析を活用したケーブル端末部の構造検討を行った。その結果、ケーブル端末部の構造を見直すことで、クロストークの低減が可能であることを確認した。さらに、改良したケーブル端末部によるケーブルアッセンブリを試作、FEC (Forward Error Correction: 前方誤り訂正) なし、BER (Bit Error Ratio : ビット誤り率) 10^{-12} のチャンネル設定条件において3 dB 以上のCOMを実現した。本報では、その検討内容について報告する。

* 日立金属株式会社 電線材料カンパニー

* Cable Materials Company, Hitachi Metals, Ltd.

2. 開発目標

2.1 ケーブルアセンブリの構造

開発する差動信号伝送ケーブルアセンブリの構造を図1に示す。各対シールドケーブル8本を捩り合わせてジャケットを被せ、その両端にコネクタを取り付けた構造で、4チャンネルの25 Gbit/s/ch 信号を双方向伝送する。



図1 25 Gbit/s/ch × 4ch 差動信号伝送ケーブルの外観
Fig.1 Appearance of 25 Gbit/s/ch × 4ch differential signal transmission cable

ケーブルには2芯一括被覆ケーブル OMNIBIT[®] を用いる。ケーブルの構造を図2に、寸法・条件を表1に示す。

絶縁体である発泡ポリエチレンの断面形状は、差動モードインピーダンスが100 Ωになるよう、絶縁体形状と信号線導体位置を制御しながら押出成型する。絶縁体表面には、ケーブル長手方向に銅テープを添わせて巻く縦添え巻

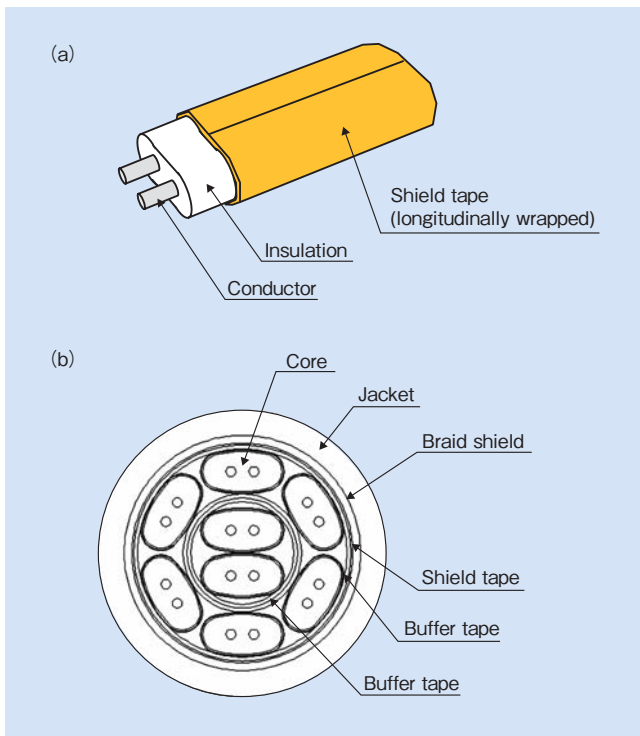


図2 ケーブル構造
(a) OMNIBIT[®] の基本構造
(b) 25 Gbit/s/ch × 4ch ケーブルの断面構造

Fig.2 Cable structure

- (a) core structure of OMNIBIT[®]
(b) section of 25 Gbit/s/ch × 4ch cable

きによりシールドを形成する。一般的なケーブルではグラウンド接続のためにドレイン線を添わせるが、これは損失やスキューを劣化させる要因となる。そこでOMNIBITでは、ドレイン線を添わせない構造をとっている。

ケーブル端末構造を図3に示す。ケーブルの端末には、基板表面に4本、裏面に4本、2芯一括被覆ケーブルをはんだ接続したパドルカード基板を使用する。ケーブルはんだ接続部と反対側の基板端にはカードエッジ部をもうけ、伝送機器のコネクタ(レセプタクル)に差し込んで嵌合することで電気的な接続を実現する。パドルカード基板は金属製ケースに収納されており、全体でプラグコネクタとなる。

表1 ケーブルの寸法・仕様

Table 1 Cable dimensions and specifications

| Item | | Description | |
|-------------|-------------|---|--|
| Core | Conductor | Diameter | 0.404 mm (annealed copper) |
| | | Pitch | 0.80 mm |
| | Insulation | Dimensions | 1.37 × 2.62 mm |
| | | Material | Foamed polyethylene |
| Shield tape | Structure | Longitudinally wrapped (copper/polyester) | |
| Cable | Buffer tape | Material | Foamed polypropylene |
| | Shield | Structure | Tape (aluminum/polyester) with braided wires |
| | | Jacket | Material |
| | | Outer diameter | 9.1 ± 0.3 mm |

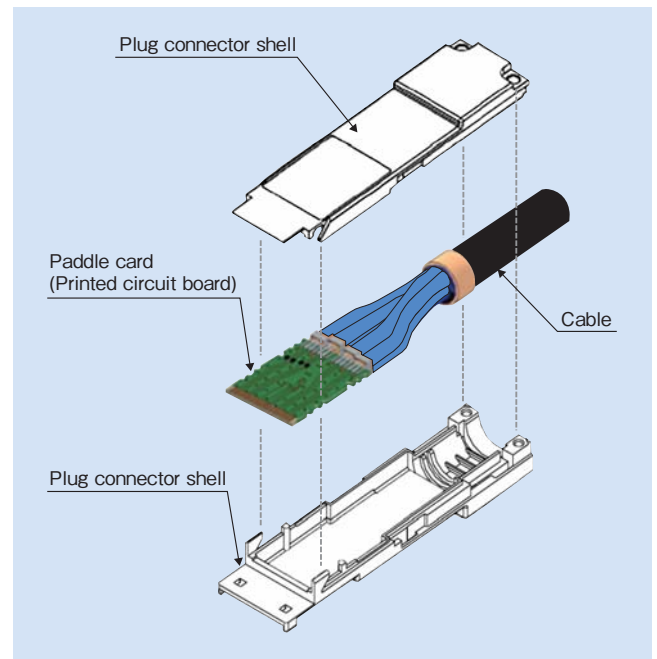


図3 ケーブル端末構造
Fig.3 Structure of cable end

OMNIBITはグラウンド接続用のドレイン線を持たない。そのため、パドルカード基板のグラウンドパッドとシールドテープをはんだ接続する際、シールド接続用の端子を介して接続する方法と、グラウンドパッドにシールドテープを直接接続する方法がある。

2.2 開発目標

本開発の目標性能を表2に示す。ケーブル長は、データセンターにおけるラック内配線の最大長を想定して3mとする。

表2 25 Gbit/s/ch × 4ch ケーブルの目標性能

Table 2 Target specifications of 25 Gbit/s/ch × 4ch cable

| Item | Target | Conventional product |
|-----------------------------|-----------|----------------------|
| Insertion loss (12.89 GHz) | ≤ 15.5 dB | 14.0 dB |
| COM (IEEE 802.3by, non-FEC) | ≥ 3.0 dB | 1.9 dB |

一般に、ケーブルアッセブリの伝送特性を評価する指標としてCOMが使用される。COMは各FEC方式ごとに定義された伝送チャンネルに対する信号対ノイズ比マージンであり、IEEE 802.3byでは3dB以上が要求されている。10 Gbit/s/ch × 4chのケーブルアッセブリのCOMは、FECなし、BER 10^{-12} のチャンネル設定条件において1.9dB程度であり、25 Gbit/s/ch伝送に対して十分な性能を持っていない。

良好な信号対ノイズ比マージンCOMを確保するには、ケーブルとケーブル端末の双方に、低損失、低スキュー、低クロストークの性能が必要となる。OMNIBITは信号線導体間の電磁結合を強めた構造ゆえ、シールド表面に流れるコモンモード電流の影響を受けにくく、また、縦添えシールドテープ構造ゆえシールドテープ巻きに起因する急峻な共振(サックアウト)が発生しない。これらにより、ケーブル部分については、低損失、低スキュー、低クロストークの性能を実現している。一方で、ケーブル端末部については、パドルカード基板のグラウンド配置構造に依存したクロストークがあり、その影響がCOMを劣化させている。

クロストークは信号線間の電磁干渉であり、信号線の間隔、あるいはグラウンド配置に依存する。これは、電磁界の広がり方がグラウンドの影響を大きく受けるためである。今回、「パドルカード基板のグラウンド構造」、「ケーブル信号線接続部の構造」の違いを定性的に評価することを目的に、解析主導型の検討を行う。クロストーク低減に効果的なケーブル端末構造を解析により確認した後、25 Gbit/s/ch × 4ch 差動信号伝送ケーブルアッセブリを実際に製作し、測定値からCOMを計算し、その効果を検証する。

3. 開発方法

3.1 ケーブル端末構造の電磁界解析

クロストークの解析には、有限要素法を用いた3次元電磁界解析ソフトを使用する。解析対象のモデルを作成後、電磁界分布を計算することにより、各チャンネルのクロストーク、および電界強度分布を求める。ただし、25 Gbit/s/ch × 4ch 差動信号伝送ケーブルの全チャンネルを解析するには莫大な計算時間が必要なため、解析対象を一部のチャンネルに限定する。隣接するチャンネル間のクロストークが最も大きいこと、パドルカード基板の構造はおおよそ上下・左右対称であることを考慮し、パドルカード基板表層

の隣接チャンネル間、表裏層間の対向チャンネル間のクロストークに限定した解析を行う。

解析対象とするチャンネルおよびクロストークの定義を図4に示す。クロストークを受ける側(Victim:被害者)をパドルカード基板表層のチャンネルTX3とし、クロストークを与える側(Aggressor:加害者)を、同一面上の隣接チャンネルTX1とした「基板表層のクロストーク」、および、基板裏面の対向チャンネルTX4とした「基板層間のクロストーク」を解析する。

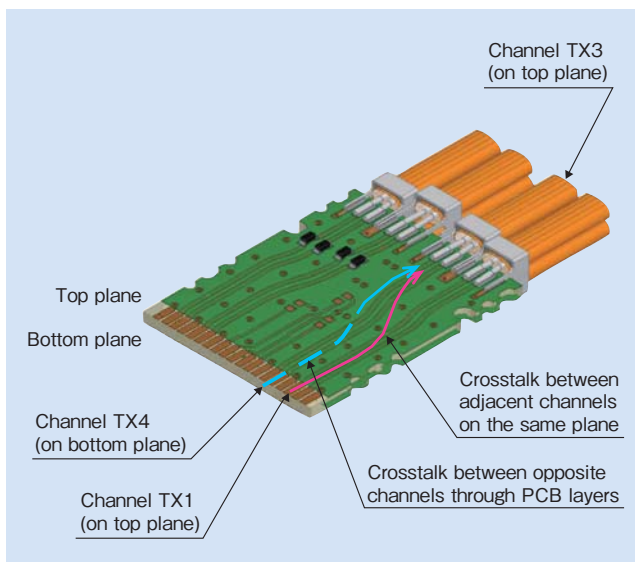


図4 解析対象のチャンネルとクロストークの定義

Fig. 4 Definitions of channels and crosstalk for electromagnetic field analysis

クロストークの低減には、パドルカード基板表層のチャンネル間、およびパドルカード基板表裏の層間にグラウンドパターンを配置することが効果的である。しかしながら、信号線はんだ接続部では差動モードインピーダンスが低下するため、パドルカード基板の信号線パッド直下層には、寄生容量を低減するためのアンチパッド(グラウンド層の局所的な開口)をもうけ、差動インピーダンスを高める構造をとる必要がある。

解析するケーブル端末構造を表3に示す。電磁界解析

表3 解析対象のケーブル端末構造

Table 3 Structure of cable end for electromagnetic field analysis

| Structure | Micro-strip line, 4 layers, shield tape soldered on ground pad with a quasi-drain wire | Grounded coplanar waveguide, 6 layers, shield tape soldered on ground pad with a quasi-drain wire | Grounded coplanar waveguide, 6 layers, shield tape soldered directly on ground pad without a quasi-drain wire |
|--------------------------------|--|---|---|
| Number of layers | 4 | 6 | 6 |
| Signal line | Micro-strip | Coplanar | Coplanar |
| PCB dimensions | 16.4×22.2 mm | 16.4×22.2 mm | 16.4×25 mm |
| Differential mode impedance | 100 Ω | 93 Ω | 93 Ω |
| Pitch of ground via | 3.0 mm | 0.6 mm | 0.6 mm |
| Shield tape termination method | Soldered on ground pad with a quasi-drain wire | Soldered on ground pad with a quasi-drain wire | Soldered directly on ground pad without a quasi-drain wire |

の解析周波数は 50 MHz から 30 GHz とし、周波数間隔は 10 MHz とする、解析は interpolating モードで行い、計算の収束条件 (ΔS) は 0.005 とする。

「4層 MSL & 接続端子」の信号線はマイクロストリップライン (MSL) 構造で構成する。ケーブルのシールドテープはシールド接続用の端子を介してパドルカード基板に接続する。

「6層 GCW & 接続端子」, 「6層 GCW & 直付け」は、信号線脇にグランドパターンを配置したグラunded コプレーナライン (GCW) で配線を用いる。基板層数を 6 とすることで、ケーブルの信号線接続部、カードエッジ端子直下をアンチパッドしても第 3 層、第 4 層のグランドを遮蔽層として確保する。

「6層 GCW & 直付け」は、シールド接続用の端子を用いず、シールドテープをパドルカード基板に直接接続する。これは、基板面積を大きくし、基板内層のグランドを拡張することでクロストーク低減を意図するものである。

3.2 製品サンプルの COM 評価

「6層 GCW & 直付け」のパドルカード基板を製作し、ケーブル長 2 m, 2.5 m, 3 m の 25 Gbit/s/ch × 4ch 差動信号伝送ケーブルを COM を実際に評価する。

クロストークの測定には 16 ポートネットワークアナライザを用いる。測定周波数は 50 MHz から 30 GHz とし、10 MHz 間隔で測定を実施する。ネットワークアナライザの校正は測定器の高周波ケーブル端で行う。したがって、得られるデータは、特性評価用基板の特性を含む。遠端クロストークと近端クロストークを別々に測定した後、ネットワークアナライザからタッチストーン形式でデータを取り出し、数値計算ソフトにより COM を求める。COM の算出には、IEEE 802.3by の FEC なし、BER 10^{-12} のチャンネル設定条件を使用する。

4. 結果

4.1 ケーブル端末構造の電磁界解析結果

「基板表層のクロストーク」を図 5 に、「基板層間のクロストーク」を図 6 に示す。

「4層 MSL & 接続端子」よりも「6層 GCW & 接続端子」の方が、基板表層、基板層間のいずれのクロストークも小さいことを確認した。これは、パドルカード基板表層がグラunded コプレーナラインであること、信号線接続部直下にアンチパッドを持たないグランドを内層に持つことで「基板層間のクロストーク」が低減することを示す結果である。

また、「6層 GCW & 接続端子」よりも「6層 GCW & 直付け」の方が、基板層間のクロストークが小さいことも確認した。これは、上述の要素に加え、信号線接続部直下の内層グランドを拡張することで「基板層間のクロストーク」が低減することを示す結果である。

3 種類のケーブル端末構造では「基板層間のクロスト

ク」に顕著な差が見られることが分かった。そこで、信号線はんだ接続部のパドルカード断面電界分布を電磁界解析により観察した。結果を図 7 に示す。

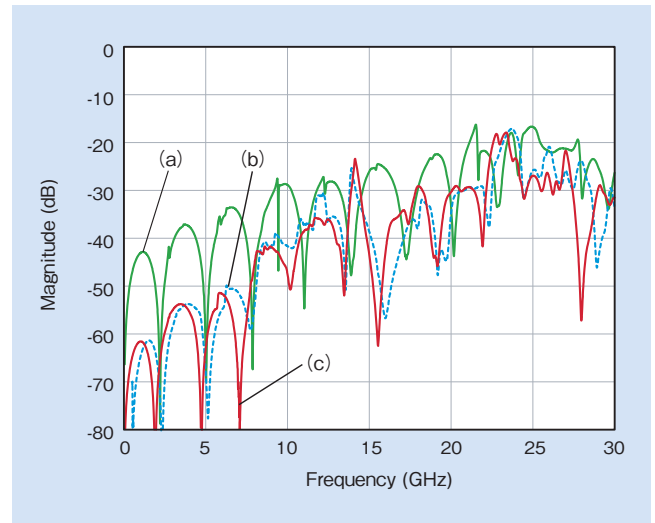


図5 基板表面のクロストーク解析結果

- (a) 4層 MSL & 接続端子
- (b) 6層 GCW & 接続端子
- (c) 6層 GCW & 直付け

Fig.5 Analysis results for crosstalk between adjacent channels on the same paddle card plane

- (a) micro-strip line, 4 layers, shield tape soldered on ground pad with a quasi-drain wire
- (b) grounded coplanar waveguide, 6 layers, shield tape soldered on ground pad with a quasi-drain wire
- (c) grounded coplanar waveguide, 6 layers, shield tape soldered directly on ground pad without a quasi-drain wire

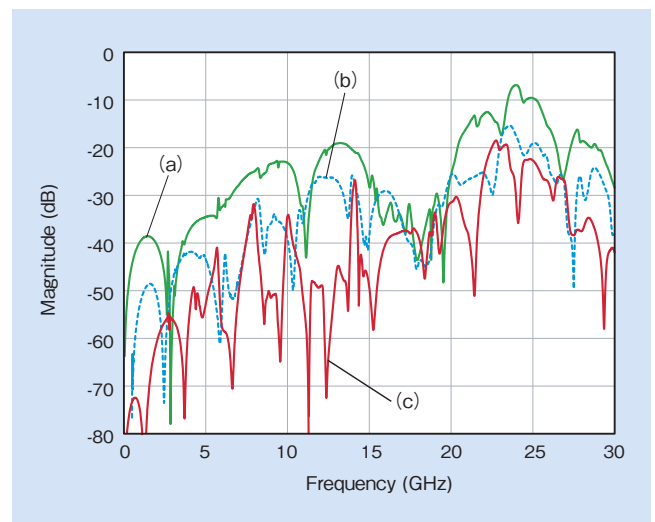


図6 基板層間のクロストーク解析結果

- (a) 4層 MSL & 接続端子
- (b) 6層 GCW & 接続端子
- (c) 6層 GCW & 直付け

Fig.6 Analysis results for crosstalk between opposite channels through paddle card layers

- (a) micro-strip line, 4 layers, shield tape soldered on ground pad with a quasi-drain wire
- (b) grounded coplanar waveguide, 6 layers, shield tape soldered on ground pad with a quasi-drain wire
- (c) grounded coplanar waveguide, 6 layers, shield tape soldered directly on ground pad without a quasi-drain wire

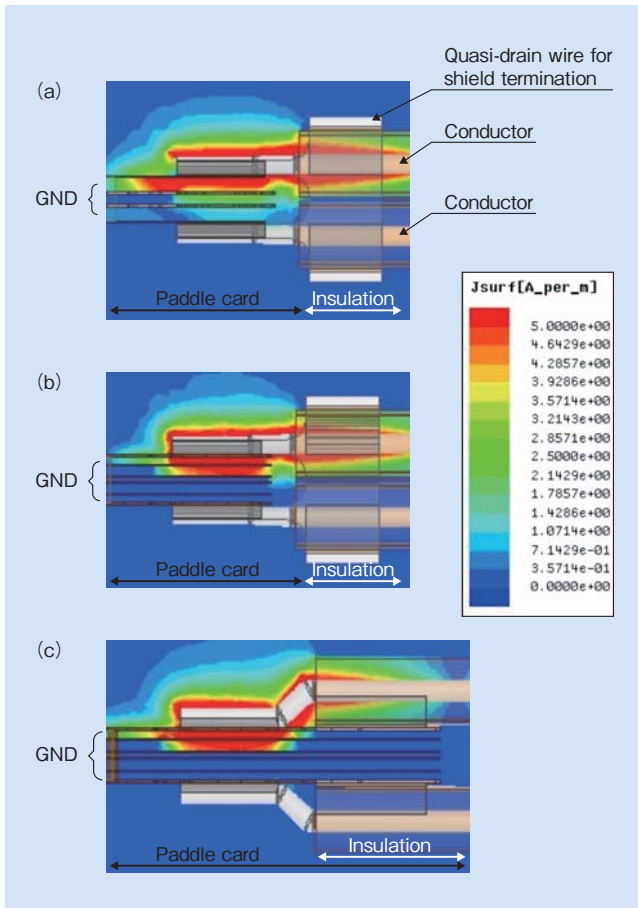


図7 信号線はんだ接続部の基板側断面の電界分布

- (a) 4層MSL & 接続端子
- (b) 6層GCW & 接続端子
- (c) 6層GCW & 直付け

Fig.7 Electric field at solder joint point of paddle card, sectional view
 (a) micro-strip line, 4 layers, shield tape soldered on ground pad with a quasi-drain wire
 (b) grounded coplanar waveguide, 6 layers, shield tape soldered on ground pad with a quasi-drain wire
 (c) grounded coplanar waveguide, 6 layers, shield tape soldered directly on ground pad without a quasi-drain wire

「4層MSL & 接続端子」はパドルカード基板層間を遮蔽するグラウンド層を内層に持たないため、基板表面(図の上側)の電界が基板裏面(図の下側)に広がっている様子が確認できる。このため、基板層間のクロストークが大きいと言える。

「6層GCW & 接続端子」は基板層間を遮蔽するグラウンド層を内層に持つものの、パドルカード基板端部とグラウンド層端部に内層グラウンド層が存在しないわずかな空間で、基板表面の電界が基板裏面に漏れ出ていることが確認できた。通常、基板の信頼性を考慮し、基板内層のグラウンドを基板端までは設けない。そのため、基板端には、内層グラウンド層が存在しない空間が必然的に生じてしまう。

これに対し「6層GCW & 直付け」では、信号線はんだ接続部で、基板表面の電界が基板裏面に漏れ出ないことが確認できた。これは、基板内層のグラウンドを拡張したことで、パドルカード基板端部とグラウンド層端部のわずかな空間を、電界分布の影響がない位置までずらすことができ

たためと考えられ、意図した効果が得られていることを示す結果である。

4.2 製品サンプルのCOM評価結果

製作した25 Gbit/s/ch × 4ch 差動信号伝送ケーブル製品サンプルのCOMを、IEEE 802.3byのFECなし、BER 10^{-12} のチャネル設定条件に基づき計算した。COMは、ホスト側機器に搭載されるLSI (Large Scale Integrated Circuit: 大規模集積回路)パッケージの基板線路長によりCase-1 (線路長12 mm)、Case-2 (同30 mm)の2つの値が定義されている。いずれも、COM 3 dB以上が求められている。

ケーブル長に対するCase-1 COMの計算結果を図8に、Case-2 COMの計算結果をを图9に示す。

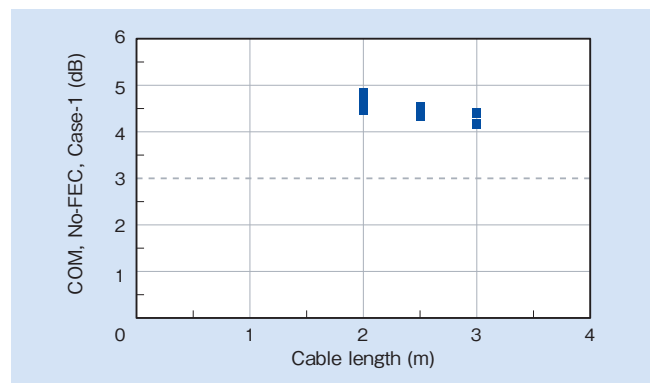


図8 COM計算結果(Case-1, IEEE 802.3by, FECなし)

Fig.8 Results for COM (Case-1, IEEE 802.3by, non-FEC)

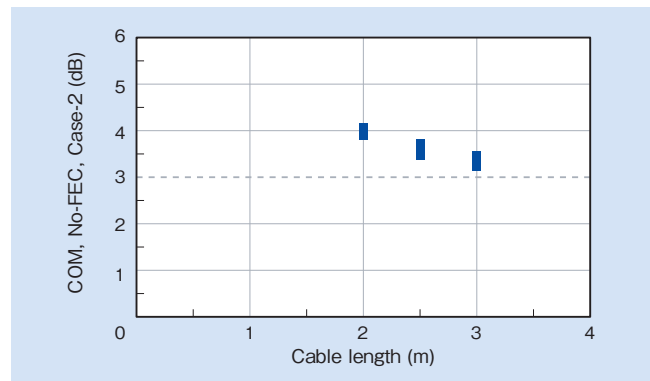


図9 COM計算結果(Case-2, IEEE 802.3by, FECなし)

Fig.9 Results for COM (Case-2, IEEE 802.3by, non-FEC)

Case-1, Case-2とも、ケーブル長3 mまでのいずれの製品サンプルにおいて、COMが3 dB以上であることを確認した。これは、FECなしの条件でBER 10^{-12} を実現するのに必要なマージンを持っていることを示す結果である。ケーブル長3 m品の開発目標性能に対する評価結果を表4に示す。

表4 25 Gbit/s/ch × 4chケーブルの評価結果
 Table 4 Test results for 25 Gbit/s/ch × 4ch cables

| Item | Target | Result |
|-----------------------------|----------------|------------------------------------|
| Insertion loss (12.89 GHz) | ≤ 15.5 dB | 14.6 dB |
| COM (IEEE 802.3by, non-FEC) | ≥ 3.0 dB | 4.3 dB (Case-1) 3.3 dB (Case-2) |

5. 結 言

25 Gbit/s/ch × 4ch 差動信号伝送ケーブルにおける伝送チャンネルの信号対ノイズ比マージン COM 3 dB 以上を実現するため、ケーブル端末のグラウンド配置構造を検討した。電磁界解析により、「パドルカード基板のグラウンド構造」, 「ケーブル信号線接続部のグラウンド構造」の違いを定性的に評価し、以下の結論を得た。

- (1) 基板表層クロストークの低減には、「グランデッドコプレーナライン」が有効である。
- (2) 基板層間クロストークの低減には、「ケーブルの信号線接続部、カードエッジ端子直下をアンチパッドしても、それ以外の内層グラウンドが遮蔽層として存在する多層基板」が有効である。
- (3) また、基板層間クロストークの低減には、ケーブルのシールドをパドルカード基板表面に直接接続することで基板内層のグラウンドを広くとることが特に有効である。

電磁界解析においてクロストーク低減を確認したケーブル端末構造を用い、25 Gbit/s/ch × 4ch 差動信号伝送ケーブル製品サンプルを製作し、IEEE 802.3by の FEC なし、BER 10^{-12} のチャンネル設定条件に基づき COM を計算した。この結果、Case-1, Case-2 とも、ケーブル長 3 m までのいずれの製品サンプルにおいて、COM が 3 dB 以上であることを確認した。

引用文献

- 1) IEEE: IEEE 802.3by-2016, IEEE Standard for Ethernet- Amendment 2: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for 25 Gb/s Operation
- 2) 杉山剛博他：工学技術研究誌日立電線, 31 (2012), p.21.
- 3) 加賀雅文他：工学技術研究誌日立電線, 32 (2013), p.23.
- 4) 杉山剛博他：日立金属技報 Vol.30 (2014), p.46.



南畝 秀樹

Hideki Nonen

日立金属株式会社
電線材料カンパニー
電線材料研究所



熊倉 崇

Takashi Kumakura

日立金属株式会社
電線材料カンパニー
電線材料研究所



芳賀 裕希

Yuki Haga

日立金属株式会社
電線材料カンパニー
電線材料研究所



石松 洋輔

Yosuke Ishimatsu

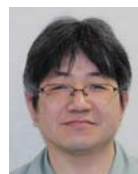
日立金属株式会社
電線材料カンパニー
電線材料研究所



深作 泉

Izumi Fukasaku

日立金属株式会社
電線材料カンパニー
電線材料研究所



杉山 剛博

Takehiro Sugiyama

日立金属株式会社
電線材料カンパニー
電線材料研究所