

25 Gbit/s/ch 伝送用メタルケーブルにおける対内スキュー生成要因の解析

Analysis of the Intra-pair Skew Generation Factor in Copper Cable for 25 Gbit/s/ch Transmission

杉山 剛博*
Takahiro Sugiyama

南 畝 秀樹*
Hideki Nonen

深作 泉*
Izumi Fukasaku

石川 弘*
Hiroshi Ishikawa

熊倉 崇*
Takashi Kumakura

メタルケーブルには、10 ps/m 程度の対内スキューばらつきがあり、25 Gbit/s/ch 伝送対応への障害となっている。日立金属が開発した新構造のケーブル「OMNIBIT®」は、低スキューを特長としており、次世代用ケーブルとして期待されている。これらケーブルについて、対内スキュー、特に「rise-time skew」が生成される要因を、数値解析を用いて分析した。その結果、対内スキューは差動モードと同相モードの伝搬時間の差に関係していることを明らかにした。新構造のケーブルは、差動モードと同相モードの伝搬時間差がないため、対内スキューが構造的に大きくなりにくいことが確認された。

Conventional copper cable has an intra-pair skew of about 10 ps/m, which makes it difficult to use copper cable for a 25 Gbit/s/ch interconnect. The new structure cable “OMNIBIT®” features a low skew and is expected to become a next-generation cable. We investigated the factor of intra-pair skew particularly the “rise-time skew” of these cables. As a result, it became clear that the intra-pair skew was related to the differences at propagation time between the differential mode and the common mode. Because the new structure cable did not have the differences in propagation time, it was confirmed that the intra-pair skew of OMNIBIT cable did not easily become as it dose in conventional cable.

● Key Word : High-speed transmission, differential copper cable, intra-pair skew

● Production Code : OMNIBIT®

● R&D Stage : Research

1. 緒 言

データセンターやクラスター・コンピュータ等、多くの情報機器を相互接続して運用する装置・設備が性能を大きく向上させている。この性能向上には、機器間配線の大容量・高速化が欠かせない。現在、1チャンネル、1秒間あたりの伝送容量は、10ギガビット(10 Gbit/s/ch)が一般的となり、2015年頃には、25ギガビット(25 Gbit/s/ch)伝送が採用され始める見込みである¹⁾。しかし、高速な信号ほど、信号の波形劣化が顕著となる。銅線を使った差動信号用のメタルケーブルの場合、10～20 GHz帯域に現れる急激な減衰域である「サックアウト」と、二芯の伝搬時間差である「対内スキュー」が、25 Gbit/s/ch伝送の障害となっている²⁾。また、対内スキューは、立上り波形の変形をとまなう「rise-time skew」としても現れる³⁾。しかし、その

要因と具体的な対策は、未だ見出されていない。

一方で、高速でも波形劣化の少ない「光伝送」は、その使用範囲を広めつつある。しかし、消費電力とコストの面では、依然、メタルケーブルには及ばないため、数m以下の短距離配線には、メタルケーブルの使用が望まれている。

本報告では、差動伝送用メタルケーブルの「対内スキュー」、特に「rise-time skew」の発生要因について分析した。3次元の電磁界解析から得られた周波数領域の伝送特性を、時間波形である「インパルス応答」と「ステップ応答」に変換し、その波形を用いて、スキュー要因を分析した。最初に、10 Gbit/s/ch伝送で広く使用されているツイナックスケーブルを分析し、さらに、日立金属で25 Gbit/s/ch用に開発された、二芯一括押出構造ケーブル「OMNIBIT®ケーブル^{4), 5)}」についても分析し、スキューの低減効果を確認した。

* 日立金属株式会社 電線材料カンパニー

* Cable Materials Company, Hitachi Metals, Ltd.

2. 差動伝送とその解析方法

2.1 差動伝送の概要

高速信号の伝送には、一般的に差動方式が用いられる。二本の芯線に互いが逆符号の信号を入力し、受信側でその差分を合成して波形を得る。二芯において伝搬時間の差、「対内スキュー」が生じると、受信端で合成された波形は変形し、信号品質が劣化する。25 Gbit/s/ch 伝送では1ビットの間隔が40 psとなるのに対して、従来ケーブルの対内スキューは1 mあたり10 ps程度あり、数mでも無視できない伝搬時間差となって、信号品質を劣化させる⁶⁾。

また、伝送線路には、周波数に依存した減衰特性があり、その影響で符号間干渉等の信号品質劣化を引き起こす。回路技術の進歩により、減衰特性を補償することも可能にはなった⁷⁾が、サックアウトのような急激な減衰特性は補償することができない。

差動線路の特性は、周波数領域である「Sパラメータ」で議論されることが多い。しかし、スキューは時間領域の値であり、Sパラメータとの関連は、直観的には理解しにくい。そこで、フーリエ変換を用いて、Sパラメータを時間領域の波形である「インパルス応答」に変換し、スキューを分析することを考えた⁸⁾。波形の立上り部分の分析には、「ステップ応答」を用いた。次節にその方法を説明する。

2.2 解析方法

解析方法を説明する。今回の解析の手順として、最初に、伝送線路(ケーブル)の三次元モデルを作成し、有限要素法による電磁界解析でSパラメータを求める。次に、得られたSパラメータをフーリエ変換によってインパルス応答に変換する。伝送線路の各ポート、或いは各差動・同相モードのインパルス応答を比較、分析し、スキュー発生の要因を調べる。各ポート番号は、図1のとおりに設定する。Sパラメータは、ミックスドモード表現のSパラメータと、4ポート表現のSパラメータを使い分けて説明する。

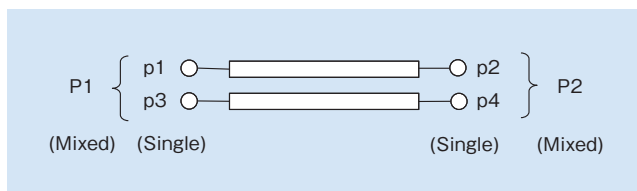


図1 Sパラメータのポート設定
Fig. 1 Port setting of S-parameter

ミックスドモードのSパラメータでは、 S_{dd21} (差動通過特性)、 S_{cc21} (同相通過特性)、 S_{cd21} (差動同相変換特性)を調べる。送信端(P1)の差動入力に対する、受信端(P2)の各芯p2, p4の応答、 S_{2-d1} 、 S_{4-d1} は、4ポート表現のSパラメータを使って、次式で求めることができる。

$$S_{2-d1} = S_{21} - S_{23} \quad (1)$$

$$S_{4-d1} = S_{43} - S_{41} \quad (2)$$

S_{21} 、 S_{43} は、芯線に沿って伝搬する成分であり、 S_{23} 、 S_{41} は芯線間で結合している成分である。 S_{2-d1} 、 S_{4-d1} をインパルス応答($t(S_{xx})$)と表記すると以下の式となる。

$$t(S_{2-d1}) = t(S_{21}) - t(S_{23}) \quad (3)$$

$$t(S_{4-d1}) = t(S_{43}) - t(S_{41}) \quad (4)$$

すなわち、シングルエンドのインパルス応答を単純に合成したものと考えて良い。ステップ応答($s(S_{xx})$)と表記するも同様の計算が可能である。

3. ツイナックスケーブルの解析

3.1 ツイナックス構造

一般的な高速用ケーブルであるツイナックスケーブルの構造を図2に示す。ツイナックス構造は二本の絶縁電線とドレイン線を並行に並べ、その上から導体テープを巻き付けてシールドとする。シールドには、導体テープをらせん状に巻つけたタイプの図2(a)と、縦添えしたタイプの図2(b)がある。

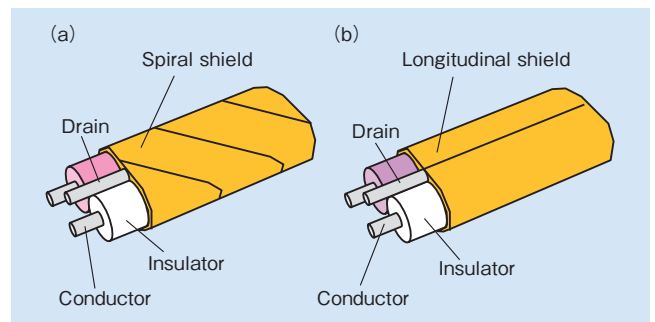


図2 ツイナックス構造 (a) スパイラルシールド (b) 縦添えシールド
Fig. 2 Twinax structure (a) spiral shield (b) longitudinal shield

芯線を被覆する絶縁体は、通常、別々に作製される。二本の被覆電線を並行に添え並べたとき、それは同時には作製されたものではないので、絶縁体の外径、比誘電率等にはわずかな「ばらつき」がある。今回の解析にあたっては、絶縁体の誘電率のばらつきを考慮して、解析モデルに誘電率差を0.5% (アンバランス時)を付与した。また、付与しない場合(バランス時)と比較した。解析モデルのケーブル仕様と、解析条件を表1にまとめた。

表1 解析モデル仕様と解析条件

Table 1 Cable specification and analysis condition

項目	仕様, 条件	
	バランス時	アンバランス時
芯線	外径	0.254 mm (単線, Cu)
	外径	0.77 mm × 2本
絶縁体	比誘電率 (右左比)	1.85/ 1.85 (0.0%) 1.85/ 1.86 (0.5%)
	構造	スパイラル/縦添え
ケーブル長	3 m	
解析周波数	0.1~50 GHz	

3.2 縦添えシールド・ツイナックス構造の解析

3.2.1 バランス時(誘電率差 0%)

最初に縦添えシールドで、絶縁体に誘電率差がない場合(0%)について解析した。電磁界解析で得られたSパラメータを図3に示す。Sパラメータから計算したインパルス応答とステップ応答を図4に示す。解析結果から、次のことが確認できる。

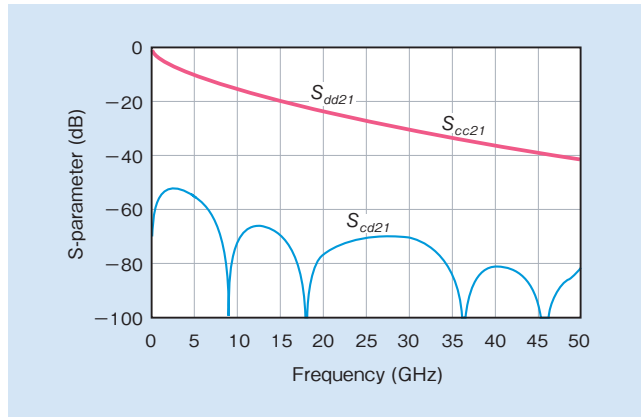


図3 バランス時のミックドモード・Sパラメータ
Fig. 3 Mixed mode S parameter in the case where the balanced twinax cable

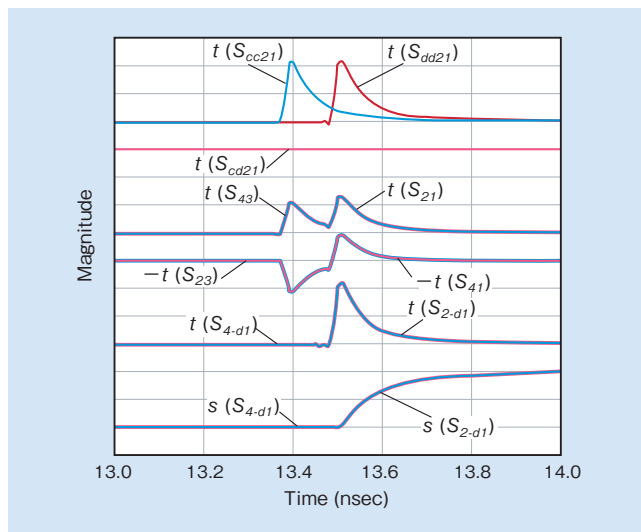


図4 バランス時のインパルス応答・ステップ応答
Fig. 4 Impulse response and step response in the case where the balanced twinax cable

- (1) 差動通過特性(S_{dd21})にはサックアウトがない。
- (2) 同相通過特性(S_{cc21})は差動(S_{dd21})とほぼ同じ。
- (3) 差動同相変換量(S_{cd21})は小さい(-50dB以下)。
- (4) 差動モード $t(S_{dd21})$ 、と同相モード $t(S_{cc21})$ のインパルス応答には、伝搬時間差がある。
- (5) $t(S_{21})$ 、 $t(S_{43})$ 両方に「二つのピーク」がある。
- (6) 上記二つのピーク位置(時間軸)は、それぞれ、同相のインパルス応答 $t(S_{cc21})$ のピークと、差動のインパルス応答 $t(S_{dd21})$ のピークと一致する。
- (7) $t(S_{21})$ の最初のピークは、 $t(S_{23})$ のピークと一致しており、合成した波形 $t(S_{2-d1})$ では最初のピークが打ち消されており、波形の乱れが確認できない。

図4の差動モードと同相モードの伝搬時間差は、各モー

ドに対する実効誘電率が異なることに起因する。ツイナックスケーブルには、図5(a)に示すように、絶縁電線とシールドの間に「隙間(空気部分)」がある。図5(b)(c)に示すように、同相モードの電界は、差動モードに比べて、隙間部分を占める割合が多い。隙間部分の比誘電率は絶縁体部分より低いので、同相モードの実効誘電率は差動モードより低下する。その結果、同相モードの伝搬時間は差動モードよりも短くなる。

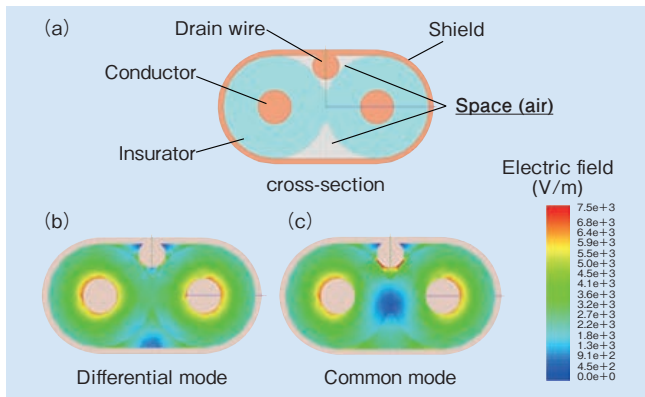


図5 ツイナックスケーブルの断面と電界分布
(a)断面 (b)差動モードの電界分布 (c)同相モードの電界分布
Fig. 5 Cross-section and electric field distributions of twinax cable
(a) cross-section (b) electric field distribution of differential mode
(c) electric field distribution of common mode

$t(S_{21})$ 、 $t(S_{43})$ において最初のピークは、同相モード成分であり、二つめのピークは差動モード成分である。しかし、 $t(S_{23})$ 、 $t(S_{41})$ によって、同相モード成分が打ち消され、 $t(S_{2-d1})$ 、 $t(S_{4-d1})$ には差動成分のみが残る。このように、誘電率差がなく、二芯のバランスが取れていれば、全く波形の乱れない信号として、受信端で合成される。ステップ応答においても、波形の乱れは見られない。

3.2.2 アンバランス時(誘電率差 0.5%)

次に、縦添えシールドで、二つの絶縁体に誘電率差0.5%を付けた場合について解析した。誘電率差0.5%は、同軸線二本による疑似差動線路で概算すると、約12 ps/mの対内スキューに相当する。解析で得られた結果を図6、

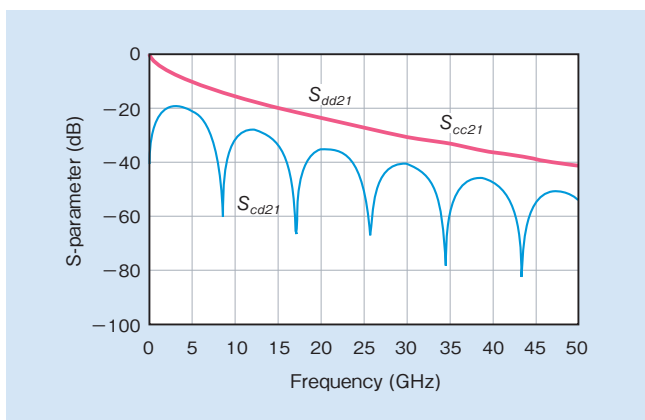


図6 アンバランス時のミックドモード・Sパラメータ
Fig. 6 Mixed mode S parameter in the case where the unbalanced twinax cable has a longitudinal shield

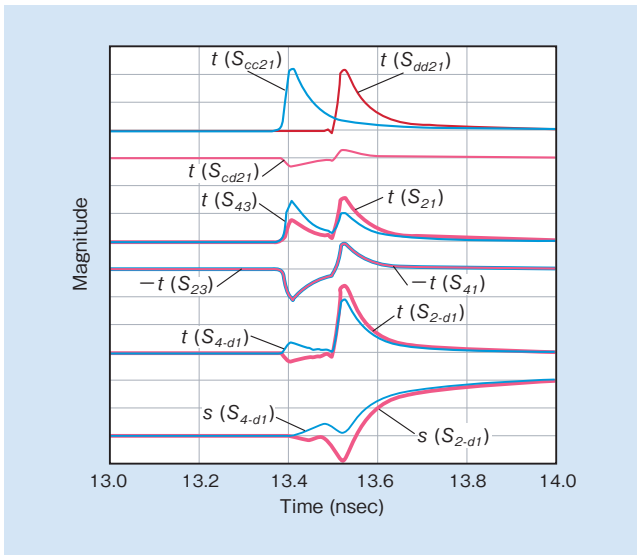


図7 アンバランス時のインパルス応答・ステップ応答
Fig. 7 Impulse response and step response in the case where the unbalanced twinax cable has a longitudinal shield

- 図7に示す。解析結果から、次のことが確認できる。
- (1) 差動同相変換量(S_{cd21})は -20 dBと大きい。
 - (2) $t(S_{21})$ と $t(S_{43})$ の波形で、各ピークの波高値が異なる。
 - (3) $t(S_{21})$ の最初のピークは、 $t(S_{23})$ のピークと一致していない。合成波形 $t(S_{2-d1})$ 、 $t(S_{4-d1})$ の最初のピークは打ち消されることなく、同相モード成分が残存する。
 - (4) ステップ応答 $s(S_{2-d1})$ 、 $s(S_{4-d1})$ では、残存する同相成分によって、波形の立上り部分に乱れが生じる。

図7に示すように、誘電率差があることで、バランス時には打ち消されていた同相成分が残存し、その結果、 $t(S_{2-d1})$ 、 $t(S_{4-d1})$ に同相成分が混在した波形となる。同相成分は差動成分より短い時間で伝搬するため、差動成分が到達する前の位置(時間)に現れる。ステップ応答においては、同相成分が、差動成分よりも早い時間、すなわち、波形の立上り部分に影響を与え、波形の乱れとなっている。これが「rise-time skew」の原因となっていることが分かる。ツイナックスケーブルでは、「隙間」があるので「差動モードと同相モードの伝搬時間の差」が構造的に避けられない。これに、わずかな「差動アンバランス」が加わることによって、対内スキュー、特に「rise-time skew」が発生する。

また、図4、図6に示すとおり、縦添えシールドでは、サックアウトを解消する反面、同相と差動の減衰特性がほぼ同じ特性となっている。一旦、生成された同相成分は、減衰されることなく、受信端に伝播することになり、これも対内スキューの要因となっている。

3.3 スパイラルシールド・ツイナックス構造の解析

次に、スパイラルシールドのツイナックスケーブルについて解析する。前節と同様、絶縁体には0.5%の比誘電率差によるアンバランスを設けている。解析する構造には周期構造があり、全体を電磁界解析することが難しいので、

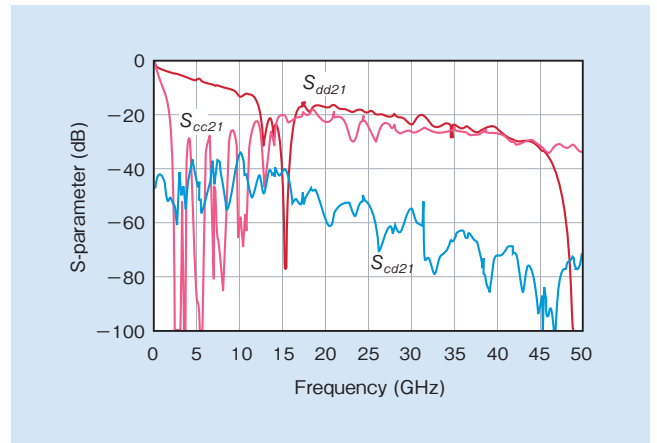


図8 スパイラルシールドのミックドモード・Sパラメータ
Fig. 8 Mixed mode S parameter in the case where the unbalanced twinax cable has a spiral shield

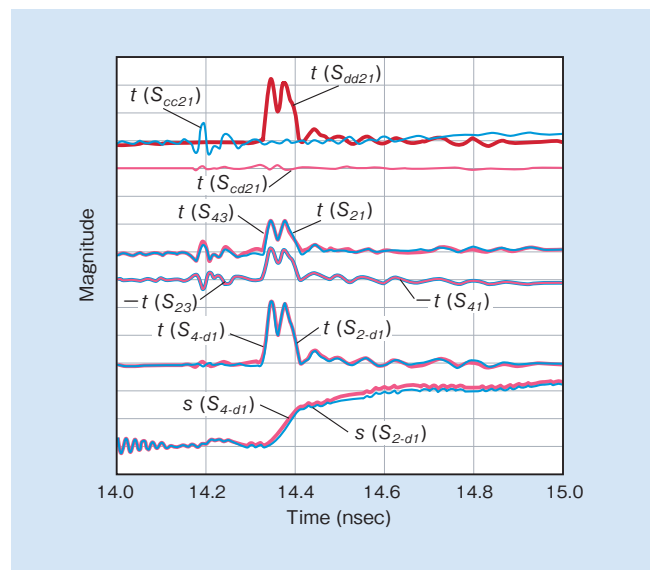


図9 スパイラルシールドのインパルス応答とステップ応答
Fig. 9 Impulse response and step response in the case where the unbalanced twinax cable has a spiral shield

30 mmの解析モデルを一旦計算し、それを100個連結することで計算した。解析結果を図8、図9に示す。

図8の差動モードの減衰特性には、12 GHz付近にサックアウトがある。また、同相モードの減衰特性では1~10 GHzの減衰が大きい。これらの減衰特性は、縦添えシールドには見られないので、シールド周期構造の影響であることが分かる。25 Gbit/s信号の基本波は12.5 GHzなので、スパイラルシールドは、使うことができない。

図9において、同相モード $t(S_{cc21})$ の波形が、差動モード $t(S_{dd21})$ の波形よりも早く到達しているが、その振幅は小さい。図8に示すとおり、同相モードは、シールドの周期構造の影響で伝搬とともに減衰するため、対内スキューが発生しても減衰する。ステップ応答においても、波形の乱れは小さい。このように、スパイラルシールドでは、ケーブルのアンバランスがあっても、シールドによる同相モードの減衰効果によって、対内スキューが抑制される。

4. 二芯一括押出構造ケーブルの解析

4.1 二芯一括押出構造

メタルケーブルによる 25 Gbit/s/ch 伝送を可能にするため、日立金属では独自ケーブル構造を持つ OMNIBIT ケーブルを開発した。サックアウトによる減衰量増加を避けるため、縦添えシールドを採用し、且つ、対内スキューを低減するために、二芯一括押出構造を採用している。開発されたケーブル構造を図 10 に示す。

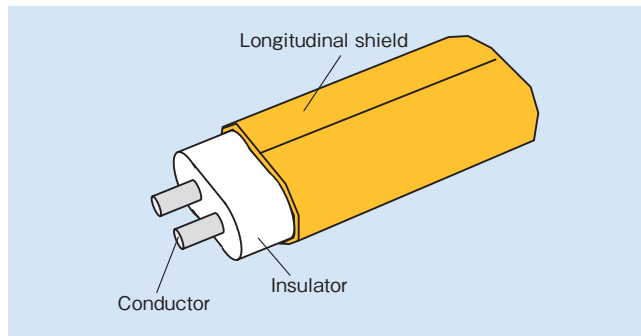


図 10 OMNIBIT® ケーブル(二芯一括押出構造)
Fig. 10 OMNIBIT® Cable (structure of the one batch extruded insulator covering two conductor type)

二芯一括押出ケーブルは、二本の絶縁電線をひとつの絶縁体で被覆し、これを導体テープでシールドする。シールドは、サックアウトを回避するため、縦添えシールドを用いる。この構造では、ひとつの絶縁体を一回で被覆するため、二芯での誘電率差はほとんどなく、二芯の間隔を自由に設定できる。対内スキューの低減に最適化するため、芯線の結合率を 20% としている。従来のツイナックスケーブルは 6% であり、結合率を 20% にすることで、スキューを 40% 低減できることが、電磁界解析によって確認されている⁹⁾。

今回、長径方向に二芯のセンターが 0.05 mm シフトして、差動アンバランスが生じたとして仮定し、対内スキュー、および、差動同相変換量に及ぼす影響を解析した。解析に用いたモデルと条件を表 2 に示す。

表 2 OMNIBIT® の解析モデル仕様と解析条件
Table 2 Cable specification and analysis conditions for OMNIBIT®

項目		仕様, 条件
芯線	外径	0.254 mm (単線, Cu)
	ピッチ	0.542 mm
	センターずれ	(0.050 mm)
絶縁体	外径	1.92 mm (長径) / 0.96 mm (短径)
	比誘電率	2.1
シールド	構造	縦添え (Cu)
ケーブル長		3 m
解析周波数		0.1~50 GHz

4.2 解析結果

二芯一括押出構造のケーブルについて同様の解析を実施した。解析結果を図 11, 図 12 に示す。

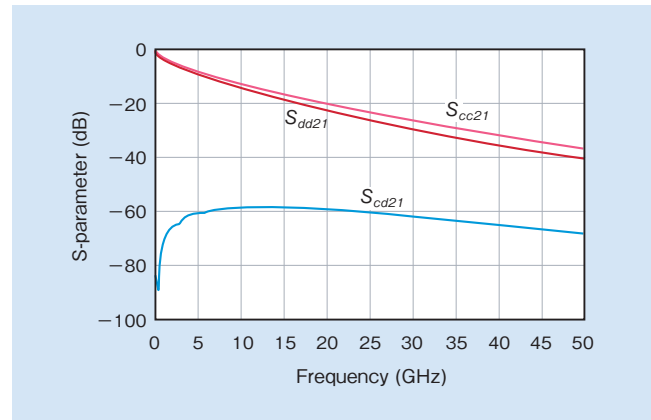


図 11 二芯一括押出構造のミックスドモード・Sパラメータ
Fig. 11 Mixed mode S parameter at the structure of the one batch extruded insulator covering two conductor type

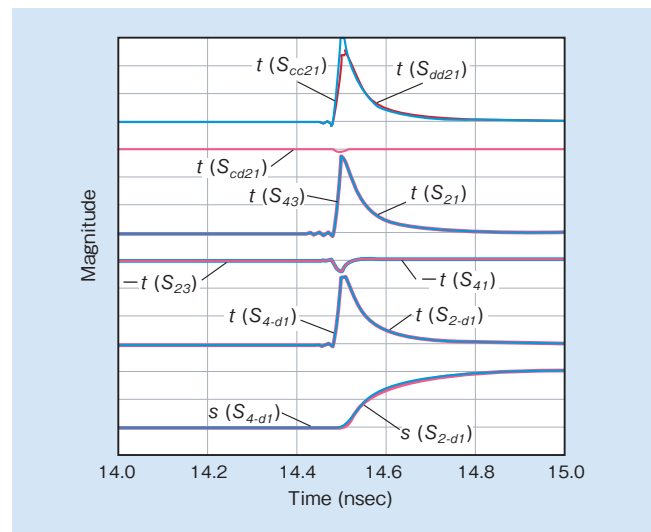


図 12 二芯一括押出構造のインパルス応答とステップ応答
Fig. 12 Impulse response and step response at the structure of the one batch extruded insulator covering two conductor type

解析結果から、次のことが分かる。

- (1) 差動と同相の通過特性はほぼ同じ特性で、減衰量が変わらない。
- (2) 差動同相変換量は $t(S_{cd21})$ は小さい。
- (3) 差動モードと同相モードのインパルス応答に、伝搬時間差がない。
- (4) $t(S_{21})$, $t(S_{43})$ に、ツイナックス構造のような、二つのピークがない。
- (5) 結合成分の $t(S_{23})$, $t(S_{41})$ がツイナックス構造に比べて小さい。
- (6) 合成波形の $t(S_{2-d1})$, $t(S_{4-d1})$ とともに、ピークの波高値の違いはわずかにあっても、伝搬時間差になるような波形が見られない。

図 11 の結果から、同相モードの減衰効果はないことが分かる。しかし、図 12 に示すように、二芯一括押出構造では、同相モードと差動モードとの伝搬時間差がない。これは、二芯一括押出構造では、ツイナックス構造のような空隙がなく、シールド内の伝送路が一様な誘電率で満たさ

れており、同相モードと差動モードに実効誘電率の差が生じないことに起因している。その結果、 $t(S_{21})$ 、 $t(S_{43})$ にはツイナックス構造のようなピークが二つに分かれる現象が発生しない。また、アンバランスがあっても、インパルス応答の波形がほとんど乱れない。ステップ応答においても、波形の立上り部分が、ほとんど波形がないことが分かる。

この解析結果から、二芯一括押出構造のケーブルでは、「差動モードと同相モードの伝搬時間の差」が構造的に生じることがないため、わずかな「差動アンバランス」が加わっても、対内スキュー、特に「rise-time skew」が発生しにくい、ということが確認できた。

5. 結 言

25 Gbit/s/ch 伝送用のメタルケーブルの対内スキューを低減する検討として、従来ケーブル構造と日立金属が開発する二芯一括押出構造についての伝送特性の解析・比較を行った。電磁界解析で求めた伝送特性をインパルス応答とステップ応答に変換、これを分析したところ、以下のことが分かった。

- (1) 縦添えシールドを使用すると、サックアウトは回避できる。
- (2) ツイナックス構造に縦添えシールドを使用すると、サックアウトは回避できるが、同相モードの減衰量が小さいこと、および、差動モードと同相モードに伝搬時間差があることによって、わずかなアンバランスでも対内スキュー、および差動同相変換量が增大する。
- (3) 上記、差動モードと同相モードの伝搬時間差に関係する対内スキューは、立ち上がり波形の変形をともなっており、「rise-time skew」の原因となっている。
- (4) 二芯一括押出構造では、差動モードと同相モードの伝搬時間差がないため、縦添えシールドを使用しても、対内スキュー、および差動同相変換量の増大が少ない。メタルケーブルによる 25 Gbit/s/ch 伝送には、サックアウトの回避は必須である。本検討で、従来のツイナックス構造は、縦添えシールドを使用した場合に、対内スキューがばらつきやすく、その低減が困難となることが分かった。一方で、二芯一括押出構造は、縦添えシールドを使用しても、対内スキューがばらつき難い。サックアウトの解消と、対内スキューの低減が両立できるので、25 Gbit/s/ch 伝送ケーブルとして有効であることが明らかになった。

引用文献

- 1) H.Frazier, et al.: IEEE802 Plenary, Dallas, TX, Nov 2010 "100GbE Backplane/Cu Cable CFI" .
- 2) De Araujo, D.N., et al.: Full-Wave, TwinAx, Differential Cable Modeling, 2008 Electronic Components and Technology Conf. (Publ.2008), p1684
- 3) T.Sugiyama et al.: High-speed transmission copper cable for 25Gbit/s/lane, Proc. 3rd IEEE Components, Packaging, Manufacturing Technology Symposium Japan, 2013 (Publ.2013), p57
- 4) 杉山剛博他：工学技術研究誌日立電線，31 (2012)，p.21
- 5) 加賀雅文他：工学技術研究誌日立電線，32 (2013)，p.23
- 6) R.Olsar: Maxim Engineering journal, Vol.64 (2008), p3
- 7) 野田敦人：エレクトロニクス実装学会超高速高周波エレクトロニクス実装研究会平成 17 年第 3 回公開研究会論文集，Vol.5, No.3 (2005)，p.25
- 8) 杉山剛博他：エレクトロニクス実装学会超高速高周波エレクトロニクス実装研究会平成 24 年第 4 回公開研究会論文集，Vol.12, No.4 (2012)，p.9
- 9) 杉山剛博他：エレクトロニクス実装学会講演大会論文集，26th (2012)，p.8A-12.



杉山 剛博
Takahiro 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



南畝 秀樹
Hideki Nonen
日立金属株式会社
電線材料カンパニー
電線事業部



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



石川 弘
Hiroshi Ishikawa
日立金属株式会社
電線材料カンパニー
電線材料研究所
博士 (工学)



熊倉 崇
Takashi Kumakura
日立金属株式会社
電線材料カンパニー
電線事業部