

1 はじめに

本稿では、高周波領域における誘電体材料の物理的基礎、損失メカニズム、および株式会社 TOTOKU の RUOTA 技術を中心とした先進的な同軸ケーブル応用について、理論と実践の両面から詳細に分析する。

2 高周波信号伝送の理論的基礎

高周波信号伝送では、伝送路材料の物理的挙動が信号品質を大きく左右する。特に誘電体の分極現象、高周波領域でのエネルギー損失、導体の表皮効果が重要である [1, 2]。

2.1 誘電体材料と分極の性質

誘電体は外部電場印加時に内部で分極を生じ、エネルギーを蓄える。分極には電子分極、イオン分極、双極子分極があり、それぞれ応答速度や機構が異なる [2]。分極のしやすさは誘電率 (ϵ) で表され、工学的には真空の誘電率 ϵ_0 に対する比 (ϵ_r) で議論される。高周波伝送では、低 ϵ_r 材料が信号遅延や減衰抑制の観点から求められる [3]。

2.2 誘電体におけるエネルギー損失

高周波交流電場下では、分極の遅れ（誘電緩和）により電場と分極の間に位相差が生じ、エネルギーの一部が熱として散逸する（誘電損失） [1, 4]。この損失は複素誘電率 $\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon''$ で表され、 ϵ' は蓄積能力、 ϵ'' は損失度合いを示す。損失特性は誘電正接 $\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$ で評価され、 $\tan \delta$ が小さいほど低損失である [4]。 ϵ' 、 $\tan \delta$ は周波数依存性（誘電分散）を示すため、広帯域で安定した低値が重要である [5]。

2.3 導体の表皮効果

高周波電流は導体表面に集中し（表皮効果）、有効断面積が減少することで交流抵抗が増大し、導体損失が増加する [1]。表面粗さも損失に影響するため、導体設計も重要である。

2.4 伝送損失の統一的視点

伝送損失は主に誘電損失 α_d ($\propto f\sqrt{\epsilon_r}\tan \delta$)、導体損失 α_c ($\propto \sqrt{f}$)、散乱損失の和で表される [5]。高周波化に伴い誘電・導体損失が急増するため、材料と構造の最適化が不可欠である。

3 低損失ケーブルのための材料および構造工学

3.1 誘電体材料の選定と製造

高周波損失低減には、双極子分極の緩和が小さいフッ素樹脂（PTFE、FEP、PFA 等）が有効である [6, 7]。これらは分子構造の対称性により永久双極子モーメントが小さく、 $\epsilon_r \approx 2.1$ 、 $\tan \delta \approx 0.0002$ と極めて低損失である [6]。押出成形によりケーブル絶縁体として加工される。

3.2 構造誘電体と中空構造技術

固体材料の限界を超えるため、空気（ $\epsilon_r \approx 1.0$ ）を構造体に取り込む中空構造が開発された [7, 9]。TOTOKU の RUOTA はフッ素樹脂絶縁体内部に均一な空気層を設け、実効比誘電率を大幅に低減する。この構造は低損失化、細径化、位相安定性向上など多くの利点をもたらす。

表 1 主要高周波誘電体材料の特性比較（代表値：10 GHz） [5]

材料名	比誘電率 (D_k)	誘電正接 (D_f)	最高使用温度	特徴
PTFE	2.1	2.0×10^{-4}	260 °C	最低損失
FEP	2.1	7.0×10^{-4}	200 °C	成形容易
PFA	2.1	5.0×10^{-4}	260 °C	高性能
低損失ポリイミド	2.6–3.3	$(2.0–2.5) \times 10^{-3}$	300 °C	柔軟
FR-4	4.2–4.8	$(1.5–2.5) \times 10^{-2}$	130 °C	一般基板

4 応用分析：株式会社 TOTOKU による高周波ソリューション

4.1 企業・技術プロフィール

株式会社 TOTOKU は「細く、軽く、小さく」を理念に、独自の中空構造技術を核とした高周波・高速伝送ケーブルを展開している。

4.2 高性能同軸ケーブル「RUOTA」の応用事例

4.2.1 5G 通信

RUOTA は 5G 基地局の Massive MIMO やビームフォーミング用途で、位相安定性・低損失・細径化により高品質通信を支える。

4.2.2 半導体テスト装置

THPC シリーズは厳格なインピーダンス管理と細径性で高密度実装・正確な信号伝送を実現する。

4.2.3 医療機器・産業用途

TCA シリーズは柔軟・細径・低損失特性により、医療機器や産業機器の高信頼配線に貢献する。

5 比較分析と業界動向

TOTOKU は RUOTA（同軸）、Wavemolle（アセンブリ）、Leafconn（フラットケーブル）など多様な製品で高周波・高速伝送市場をリードしている。競合他社もフッ素樹脂や FPC 等で低損失化を図るが、中空構造技術による差別化が際立つ。

6 結論

高周波誘電体材料の進化は、物理学的理解、材料・構造工学、精密製造技術の三位一体で進展している。TOTOKU の RUOTA は中空構造技術により、低損失・細径・高位相安定性を同時に実現し、5G、半導体検査、医療など多分野の基盤技術となっている。

参考文献

- [1] 精電舎電子工業「高周波誘電加熱とは」 <https://www.sedeco.co.jp/technology/list/hfw/>
- [2] 東亜合成「高分子の誘電特性」 https://www.toagosei.co.jp/develop/item/no21_02.pdf
- [3] 東京工業大学「ポリイミドの 6G 周波数域における誘電特性を解明」 <https://www.titech.ac.jp/news/2024/069742>
- [4] crowdchem.net「誘電正接とは？」 <https://crowdchem.net/column/985/>
- [5] Resonac「伝送損失・誘電損失・誘電正接とは？」 <https://www.resonac.com/jp/solution/tech/transmission-loss.html>
- [6] 株式会社 TOTOKU「高周波ケーブルとは？」 https://www.totoku.co.jp/special-contents/column/coaxial_13/
- [7] TOTOKU「RUOTA Equipment Lead Cable」 <https://en.totoku.co.jp/product/coaxial-lead/>
- [8] Shibata Co., Ltd.「High Performance Coaxial Cable (RUOTA)」 <https://www.shibata.co.jp/english/products/ruota>
- [9] TOTOKU「High performance Coaxial Cable」 <https://www.totoku.co.jp/wp/wp-content/themes/totoku/assets/doc/en-RUOTA.pdf>