

高周波誘電体材料の技術

1. 序論

5G通信、半導体検査、先進医療といった最先端技術の発展は、高周波信号を劣化させずに伝送する高性能なケーブル技術に大きく依存している。本稿では、高周波伝送における物理的な基礎理論、その課題を克服するための材料工学および構造工学の革新、そして株式会社TOTOKUの高性能同軸ケーブル「RUOTA」を具体的な事例として、その技術と応用を要約する。

2. 高周波伝送の物理的課題と理論的基礎

高周波信号の伝送品質は、主に「誘電損失」と「導体損失」という二つの物理現象によって制限される。

- 誘電損失: 誘電体(絶縁体)に高周波の交流電場を印加すると、物質を構成する分子の分極(特に永久双極子を持つ分子の配向)が電場の急速な変化に追従できなくなる¹。この「追従の遅れ」により、エネルギーの一部が熱として失われる現象が誘電損失である¹。この損失の度合いは、材料固有の**誘電率(ϵ'')と誘電正接($\tan \delta$)**によって決まり、周波数が高くなるほど増大する⁴。したがって、高周波用途では、低 ϵ'' ・低 $\tan \delta$ の材料が不可欠となる。
- 導体損失(表皮効果): 高周波電流を導体に流すと、電流が導体の中心部を避け、表面近くに集中して流れる「表皮効果」が生じる⁶。これは、電流自身が作る磁場の変化を打ち消す向きに渦電流が内部で発生するためである⁸。結果として、電流が流れる有効な断面積が減少し、導体の交流抵抗が著しく増大する。この抵抗増加が導体損失に直結し、これも周波数と共に深刻化する⁷。

これらの物理的制約から、高性能な高周波ケーブルの開発には、誘電体と導体の両面からのアプローチが求められる。

3. 課題解決のための材料および構造工学

物理的課題を克服するため、材料科学と構造工学の両面から革新が進められてきた。

- 低損失材料の採用: フッ素樹脂: 高周波特性に極めて優れた材料として、PTFE(ポリテトラフルオロエチレン)やFEP(フッ化エチレンプロピレン)といったフッ素樹脂が広く採用されている¹⁰。フッ素樹脂は、分子構造の対称性が高く、高周波領域で損失の主因となる双極子分極が起こりにくいため、他の高分子材料に比べて格段に低い誘電率($Dk \approx 2.1$)と誘電正接($Df \approx 0.0002$)を示す¹²。
- 構造的革新: TOTOKUの「中空構造」技術: フッ素樹脂という優れた材料にも物理的な性能限界が存在する。この限界を突破したのが、株式会社TOTOKUが開発し、高性能同軸ケーブル「RUOTA」の基盤となっている独自の**「中空構造(hollow structure)」**技術である¹³。
 - 原理と製造: この技術は、フッ素樹脂からなる絶縁体の内部に、長手方向に均一な空気層を設けるものである¹⁴。固体材料よりも誘電特性が遥かに優れる空気($Dk \approx 1.0$)を構造体の一部として取り込むことで、ケーブル全体としての実効的な誘電率をフッ素樹脂単体の値を下回るレベルまで劇的に低下させる。このような微細構造を長尺のケーブルで均一に形成するには高度な製造技術が必要であり、これが同社の競争力の源泉となっている¹⁴。
 - 性能上の利点: この革新的な構造は、以下の3つの重要な利点をもたらす。
 1. 低損失化: 実効誘電率の低下により、誘電損失が直接的に低減される¹⁴。
 2. 細径化・軽量化: 同じ特性インピーダンスを維持しながらケーブル全体の直径を小さくでき、機器の小型化に貢献する¹⁴。
 3. 優れた位相安定性: 温度変化による物理的な伸縮や誘電率変化の影響を受けにくく、信号の位相変動が極めて小さい¹³。

4. 「RUOTA」の具体的な応用事例

「RUOTA」の卓越した性能は、現代の最先端技術分野で不可欠な役割を果たしている。

- 5G/6G通信: ミリ波帯を活用する5G/6Gでは、多数のアンテナ素子の信号位相を精密に制御して電波を特定方向に集中させるビームフォーミング技術が核心となる¹⁹。ここでは、温度変化に影響されない極めて高い位相安定性がケーブルに要求される²²。RUOTAの中空構造がもたらす優れた位相安定

性と低損失性は、5G基地局や端末の通信品質と省電力性能を直接的に支えている¹³。

- 半導体テスト装置: 高速・高集積化が進む半導体の性能を正確に検査するためには、テスターと半導体を繋ぐプローブカード用のケーブルに、信号を劣化させずに伝送する能力が求められる²⁵。RUOTAは、厳密に管理された特性インピーダンスによる信号反射の抑制、および細径化による高密度実装への対応を通じて、半導体検査の信頼性向上に貢献している¹⁸。
- 医療機器: 患者への負担が少ない低侵襲治療で用いられる内視鏡やカテーテルには、体内で使用するための極めて細く、柔軟で、高精細な映像信号を伝送できるケーブルが必要である³⁰。RUOTAの「細く、軽く、小さい」という特性は、医療機器の操作性を向上させると同時に、その低損失性が診断画像の高画質化を支え、より正確な診断を可能にしている¹³。

5. 結論

高周波伝送技術の進化は、単なる材料の物性改良から、材料と構造を融合させる新たなステージへと移行した。株式会社TOTOKUの「RUOTA」は、フッ素樹脂という優れた材料のポテンシャルを、独自の「中空構造」という革新的な構造工学によって最大限に引き出した製品である。その結果として得られる低損失、細径・軽量、そして優れた位相安定性という特性は、5G通信、半導体検査、先進医療といった成長分野が抱える本質的な技術課題を解決する上で不可欠なものとなっている。このように、物理原理への深い理解に基づいた材料と構造の融合によるイノベーションは、未来の高度情報化社会を支える基盤技術として、今後も重要な役割を果たし続けるであろう。

引用文献

1. 高周波誘電加熱とは | 原理と5つのキーワード - 精電舎電子工業, 7月 10, 2025にアクセス、<https://www.sedeco.co.jp/technology/list/hfw/>
2. 高分子の誘電特性 - 東亜合成, 7月 10, 2025にアクセス、https://www.toagosei.co.jp/develop/item/no21_02.pdf
3. Origin of TOTOKU product name, 7月 10, 2025にアクセス、<https://en.totoku.co.jp/special-contents/about/origin-name/>
4. 【徹底解説】伝送損失・誘電損失・誘電正接とは？計算式、低誘電 ..., 7月 10, 2025にアクセス、<https://www.resonac.com/jp/solution/tech/transmission-loss.html>
5. 物理現象の図解のすすめ No.2, 7月 10, 2025にアクセス、https://www.shinkawa.co.jp/magazine/vol.34_col_02.html
6. 表皮効果 | イリソ電子工業株式会社, 7月 10, 2025にアクセス、<https://www.irisoele.com/jp/technology/knowledge/hyohikouka/>
7. www.shinkawa.co.jp, 7月 10, 2025にアクセス、

https://www.shinkawa.co.jp/magazine/vol.34_col_02.html#:~:text=%E8%A1%A8%E7%9A%AE%E5%8A%B9%E6%9E%9C%E3%81%A8%E3%81%AF%E3%80%81%E9%AB%98%E5%91%A8%E6%B3%A2,%E4%BA%A4%E6%B5%81%E6%8A%B5%E6%8A%97%E3%81%AF%E5%A4%A7%E3%81%8D%E3%81%8F%E3%81%AA%E3%82%8B%E3%80%82

8. 表皮効果 - Wikipedia, 7月 10, 2025にアクセス、
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A1%A8%E7%9A%AE%E5%8A%B9%E6%9E%9C>
9. 表皮効果とは？『計算式』や『原理』などを解説！ - Electrical Information, 7月 10, 2025にアクセス、<https://detail-infomation.com/skin-effect/>
10. 高周波ケーブルとは？種類と性能評価指標を分かりやすく解説 - 株式会社TOTOKU, 7月 10, 2025にアクセス、
https://www.totoku.co.jp/special-contents/column/coaxial_13/
11. 情報機器電線（電子ワイヤー） | 住友電工 - Sumitomo Electric, 7月 10, 2025にアクセス、https://sumitomoelectric.com/jp/products/ewp/wire_for_information_system
12. フッ素樹脂基板 高周波FPC | 住友電工, 7月 10, 2025にアクセス、
<https://sei.co.jp/fluorocuit/>
13. RUOTA Equipment Lead Cable | Product Information - totoku inc., 7月 10, 2025にアクセス、<https://en.totoku.co.jp/product/coaxial-lead/>
14. High performance Coaxial Cable - TOTOKU, 7月 10, 2025にアクセス、
<https://www.totoku.co.jp/wp/wp-content/themes/totoku/assets/doc/en-RUOTA.pdf>
15. は当社独自の“中空構造”の高性能ケーブルです, 7月 10, 2025にアクセス、
<https://www.totoku.co.jp/wp/wp-content/themes/totoku/assets/doc/ruota.pdf>
16. 高性能同軸ケーブル&アセンブリ (RUOTA) - 株式会社シバタ, 7月 10, 2025にアクセス、
<https://www.shibata.co.jp/products/ruota>
17. 「細く、軽く、小さく」を実現する | 株式会社TOTOKU, 7月 10, 2025にアクセス、
<https://www.totoku.co.jp/>
18. High Performance Coaxial Cable (RUOTA) – Shibata Co., Ltd., 7月 10, 2025にアクセス、
<https://www.shibata.co.jp/english/products/ruota>
19. 5G Massive MIMO - ZTE, 7月 10, 2025にアクセス、
https://www.zte.com.cn/content/dam/zte-site/res-www-zte-com-cn/mediare/zte/files/newsolution/wireless/ran/white_paper/5G_Massive_MIMOV1020200908.pdf
20. Beamforming and Massive MIMO in 5G Technology - Telit Cinterion, 7月 10, 2025にアクセス、
<https://www.telit.com/blog/beamforming-massive-mimo-5g-technology/>
21. Massive MIMO和波束赋形: 5G流行词背后的信号处理 - Analog Devices, 7月 10, 2025にアクセス、
<https://www.analog.com/cn/resources/analog-dialogue/articles/massive-mimo-and-beamforming-the-signal-processing-behind-the-5g-buzzwords.html>
22. マイクロ波・ミリ波同軸ケーブルアセンブリ Oシリーズ 精密計測用位相安定タイプ | 潤工社, 7月 10, 2025にアクセス、<https://www.junkosha.com/jp/products/EMF-00>
23. RUOTA 5G機器用ケーブル | 製品案内 - TOTOKU, 7月 10, 2025にアクセス、
<https://www.totoku.co.jp/product/coaxial-5g/>
24. RUOTA 5G device cable | Product information - totoku inc., 7月 10, 2025にアクセス、
<https://en.totoku.co.jp/product/coaxial-5g/>

25. 半導体検査に使われるプローブピンの種類 - トクセン工業, 7月 10, 2025にアクセス、
<http://www.tokusen.co.jp/technology/probe-type.html>
26. プローブカード～AI/IoT時代の高性能/高信頼性を実現するデバイス用途にMEMS型が大活躍！, 7月 10, 2025にアクセス、
<https://semi-engineers.com/devices-probecard/>
27. RUOTA 半導体検査装置用ケーブル | 製品案内 - TOTOKU, 7月 10, 2025にアクセス、
<https://www.totoku.co.jp/product/coaxial-semiconductor/>
28. RUOTA Cable for semiconductor inspection equipment | Product information - totoku inc., 7月 10, 2025にアクセス、
<https://en.totoku.co.jp/product/coaxial-semiconductor/>
29. 高性能同軸ケーブル | 製品案内 | 株式会社TOTOKU, 7月 10, 2025にアクセス、
<https://www.totoku.co.jp/product/category/coaxial/>
30. 低静電容量の医療機器用極細同軸ケーブルを開発, 7月 10, 2025にアクセス、
<https://www.proterial.com/press/backnumber/2015/pdf/20150928.pdf>
31. 低静電容量の医療機器用極細同軸ケーブルを開発 | PROTERIAL | 株式会社プロテリアル, 7月 10, 2025にアクセス、
<https://www.proterial.com/press/backnumber/2015/n0928.html>
32. 超音波診断装置プローブケーブル | 潤工社 - Junkosha Inc., 7月 10, 2025にアクセス、
<https://www.junkosha.com/jp/innovation/case05>