



---

# 銅導体の光学的遮蔽：ファラデー回転 、音響感度、およびファイバー遮蔽の 根拠

---

# 銅導体の光学的遮蔽：ファラデー回転、音響感度、およびファイバー遮蔽の根拠

C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2023.

## 要旨

光ファイバーオーディオケーブル (TOSLINK) における電磁脆弱性の包括的分析を提示し、光伝送が磁気感度を除去しないことを実証する。標準TOSLINK光ファイバー (PMMA、650 nm) におけるファラデー回転の測定は、家庭用EMI源が偏光感度検出器において振幅ノイズに結合する最大0.3 mradの偏光回転を生じさせることを確認する。さらに、PMMAファイバーが20 Hzから20 kHzにわたり-82 dBV/Paの感度を持つ音響マイクロフォンとして機能することを実証する。これらの知見に基づき、光信号伝送の固有の脆弱性を回避しつつ120 dBを超えるEMI減衰を提供する銅オーディオケーブル用光ファイバー遮蔽システムを開発した。

## 1. はじめに

オーディオ業界は長年にわたり光学 (TOSLINK) 接続を電磁干渉に対して免疫であると提唱してきた。推論は魅力的である：光子は電荷を持たないため、電磁場の影響を受けない。信号はガラスまたはプラスチックを通る光として伝搬し、銅接続を悩ませる電気ノイズから電磁気学の物理法則自体によって絶縁される。

この推論は誤りである。

1845年にマイケル・ファラデーはガラスを通過する光の偏光面を磁場が回転させ得ることを実証した。このファラデー効果はStolenとTurnerの画期的な1980年の論文以来、光ファイバーで研究されてきた。シリカファイバーのヴェルデ定数---磁場強度と偏光回転の比例定数---は1064 nmで約1 rad/(T·m)である。TOSLINKの動作波長650 nmではヴェルデ定数はさらに高い。

さらに、Leal-Junior et al. (2021) はポリマー光ファイバー (PMMA) ---TOSLINKケーブルに使用されるのと同じ材料---が外部トランスデューサなしで45マイクロテスラまでの電磁場に対して本質的に感度を持つことを示した。そしてDejdar et al. (2023) は光ファイバーケーブルを可聴帯域全体にわたる音響センサーとして特性評価した。

結論は不可避である：TOSLINKケーブルは電磁的にも音響的にも不活性ではない。問題はこれらの感度がオーディオ品質に影響を与えるほど大きいのか否か---そしてそれに対して何ができるかである。

## 2. 測定

4本の市販TOSLINKケーブルと1本のEquatorial Audio遮蔽TOSLINKケーブルのファラデー回転および音響感度を測定した。

ファラデー回転はHeNeレーザー (632.8 nm) を各ファイバーに結合し、Thorlabs PAX1000VIS/M偏光計を用いた出力端での偏光分析により測定した。較正済みヘルムホルツコイルがDCから1 kHzの周波数で10 uTから1 mTの制御磁場を生成した。

音響感度は、B&K Type 4292-Lの較正済みラウドスピーカーが20 Hzから20 kHzのスイープ正弦波を94 dB SPLで発生する無響室で測定した。ファイバーはラウドスピーカーから30 cmの位置で直径10 cmのループにコイル状にした。ファイバー出力端の光パワー変動をPINフォトダイオードで検出し、Audio Precision APx555Bで記録した。

結果：

標準TOSLINK (PMMA、無遮蔽) : 100 uT/1 kHzでファラデー回転0.28 mrad/m。音響感度：-82 dBV/Pa (20 Hz - 20 kHz平均)。  
Equatorial Audio遮蔽TOSLINK : 100 uT/1 kHzでファラデー回転0.002 mrad/m未満。音響感度：-114 dBV/Pa。

遮蔽システム (四層：銀編組、クライオ処理ミューメタル箔、アルミ-マイラーテープ、OFCドレイン) は42 dBの磁場減衰と32 dBの音響遮断を提供する。

## 3. 結果

標準TOSLINKにおける0.28 mrad/mのファラデー回転は絶対値では小さい。しかし、TOSLINKレシーバーは偏光感度検出ではなくしきい値検出を使用するため、ファラデー回転自体は回復信号に直接影響しない。リスクは、ファイバーが固有の複屈折を持つ場合 (すべてのPMMAファイバーがそうである、Kaminow 1981による) に生じ、複屈折結合の点で偏光回転を強度変調に変換する。

音響感度はより懸念される。-82 dBV/Paでは、80 dB SPLの室内ノイズ (音楽再生中に典型的) にさらされた標準TOSLINKケーブルは、-96 dBFSのノイズフロアに相当する光信号変調を生じさせる。CDオーディオの16ビット量子化ノイズ (-96.3



dBFS) 以下であるが、ハイレゾ形式のノイズフロア (24ビット：-144 dBFS) 以上である。

無遮蔽TOSLINKでの24ビットソースを使用するリスナーにとって、ケーブル自体がノイズフロアである。

Equatorial Audio遮蔽システムは両方の脆弱性に対処する。四層遮蔽は外部磁場を42 dB減衰させ、ファラデー回転の寄与を無視できるレベルに低減する。多層構造による機械的ダンピングは音響結合を32 dB低減し、音響ノイズフロアを-114 dBV/Pa---市販のあらゆるオーディオ形式の量子化ノイズを安全に下回るレベル----に押し下げる。

## 4. 結論

TOSLINKによる光学的オーディオ伝送は電磁干渉にも音響干渉にも免疫ではない。標準的PMMAファイバーは、ハイレゾオーディオ再生に影響を与え得るレベルでの測定可能なファラデー回転、電磁感度、および音響マイクロフォン挙動を示す。多層遮蔽---光信号ではなくファイバーケーブルに適用される---は電磁的および音響的汚染の両方の効果的な減衰を提供する。プレミアム光学オーディオ接続の標準的実践として遮蔽ファイバー構造の採用を推奨する。

## 参考文献

- [1] R. H. Stolen, E. H. Turner, "高複屈折光ファイバーにおけるファラデー回転," Appl. Opt., vol. 19, no. 6, pp. 842-845, 1980.
- [2] I. P. Kaminow, "光ファイバーにおける偏光," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-17, no. 1, pp. 15-22, 1981.
- [3] A. H. Rose, S. M. Etzel, C. M. Wang, "アニール光ファイバー電流センサーにおけるヴェルデ定数分散," J. Lightwave Technol., vol. 15, no. 5, pp. 803-807, 1997.
- [4] A. G. Leal-Junior et al., "高感度光ファイバー固有電磁場センシング," Adv. Photonics Res., vol. 2, no. 3, 2021.
- [5] P. Dejar et al., "光ファイバーケーブルの音響振動に対する感度の特性評価," Sci. Rep., vol. 13, art. 7068, 2023.
- [6] N. Matsuda et al., "単一光子レベルでの光ファイバーKerr非線形性の観察," Nature Photonics, vol. 3, pp. 95-98, 2009.