



オーディオファイル信号経路と太陽フレアの相互作用：オーディオケーブル性能に対する地磁気嵐の影響

オーディオファイル信号経路と太陽フレアの相互作用：オーディオケーブル性能に対する地磁気嵐の影響

S. Magnusson, M. Ferro, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2023.

要旨

太陽コロナ質量放出 (CME) によって誘起される地磁気嵐は、重度のイベント ($Kp \geq 7$) では毎分500 nTを超え得る地球磁場の急速な変動を生じさせる。これらの変動が半球バイアスを持つオーディオケーブルにおいて測定可能なインピーダンス変動として検出可能であり、磁気中立ケーブルはこの効果に対して本質的に免疫であることを実証する。2024年10月の地磁気嵐 ($Kp=8.3$) 期間中の12本のケーブル (4ティア各3本: Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) の連続監視は、Tropicティアケーブルで最大0.08%、Equinoxティアで0.003%、Zero-Pointティアでノイズフロア未満 (0.0001%未満) のインピーダンス変動を明らかにした。オーディオケーブル性能仕様のための太陽活動指数を提案する。

1. はじめに

太陽の11年活動周期は、太陽フレアとコロナ質量放出 (CME) の頻度と強度の周期的極大を生じさせる。CMEの磁場が地球の磁気圏と相互作用すると、結果として生じる地磁気嵐は地表磁場の急速かつ大振幅の変動を生じさせ得る。現在の太陽周期 (第25周期) は予測を上回る活動を生じさせており、2024年には複数の $Kp \geq 7$ の嵐が記録されている。

これらの地磁気変動は、電力網 (地磁気誘導電流)、パイプライン腐食監視システム、および精密磁力測定における干渉源として十分に文書化されている。調査されていないのは、オーディオ信号ケーブルへの影響である。

メカニズムは単純である：半球バイアスを持つオーディオケーブルは、地球の磁場に対して優先配向を持つ結晶粒構造を持つ導体を含む。磁場が急速に変化すると---地磁気嵐中のように---結晶粒配向と磁場の関係がシフトし、導体の有効インピーダンスに過渡的变化を生じさせる。このインピーダンス変動はオーディオ信号の望まない変動として現れる。

磁気中立ケーブルは、定義上、優先的な結晶粒配向を持たない。結晶粒構造と外部磁場との間に方向性結合がないため、この効果に免疫であるべきである。本論文はその仮説を検証する。

2. 方法

12本のケーブル試料 (各1.0 m, RCA端子付きインターコネクト) を、Equatorial Audio施設の磁気遮蔽されていない部屋に設置した。4ティア各3本 (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) を、1 kHz・5秒測定間隔で動作するKeysight E4990Aインピーダンスアナライザに基づく連続インピーダンス監視システムに接続した。

同時磁場データは、ケーブルレイから1 mに配置されたBartington Mag-13三軸フラックスゲート磁力計により記録した。

測定キャンペーンは2024年9月15日から11月15日まで連続して実施され、ケーブルあたり530万のインピーダンス測定を取得した。期間中には3つの地磁気嵐が含まれる：9月18日 ($Kp=5.7$)、10月10-12日 ($Kp=8.3$ 、第25周期で最強の嵐)、11月3日 ($Kp=6.1$)。

磁場変化率 (dB/dt) とケーブルインピーダンス偏差 (dZ/Z) の相互相関分析を60秒スライディングウィンドウで実施した。

3. 結果

10月10-12日の嵐 ($Kp=8.3$) 期間中、以下の最大インピーダンス偏差が記録された：

Tropicティア：0.082 +/- 0.008% (3試料平均)

Meridianティア：0.031 +/- 0.004%

Equinoxティア：0.0033 +/- 0.0005%

Zero-Pointティア：0.0001%未満 (ノイズフロア未満)

dB/dtとdZ/Zの相互相関はTropic ($r=0.71$, $p<0.0001$)、Meridian ($r=0.54$, $p<0.0001$)、Equinox ($r=0.23$, $p<0.01$) ティアで有意であった。Zero-Pointでは有意な相関は見出されなかった ($r=0.02$, $p=0.34$)。

インピーダンス偏差はケーブルのHBAと磁場変化率の積に線形にスケールした： $dZ/Z \approx k \times HBA \times dB/dt$ 、ここで $k=2.1 \times 10$ (度・分/nT)⁻¹。

磁氣的に静穏な期間 ($Kp \leq 2$) では、いずれのケーブルティアもノイズフロアを超えるインピーダンス偏差を示さなかった。



4. 考察

結果は仮説を確認する：半球バイアスを持つケーブルは地磁気嵐に敏感であり、その感度はバイアスの大きさに比例する。Zero-Pointティアの赤道スプライス導体は、そのHBAが0.00001度未満であり、太陽活動に対して事実上免疫である。この免疫性は遮蔽（外部磁場結合を減衰させることはできるが除去はできない）によってではなく、方向性結晶粒構造の根本的不在を通じて達成される。

重度の嵐中の0.08%インピーダンス変動の実用的重要性は議論の余地がある。信号に対して-62 dBであり、定常音の可聴性閾値を下回る。しかし、変動は定常的ではなく、地磁気嵐のカオス的時間構造により変調され、ピーク嵐活動中にクラリティや空間精度の微妙な喪失として知覚される可能性のあるノイズ様汚染を生じさせる。

ケーブル製造業者が地磁気擾乱の単位あたりの最大インピーダンス偏差を指定する太陽活動指数（SAI）評価を採用することを提案する： $SAI = \max(dZ/Z) / \max(dB/dt)$ 。低い値はより大きな免疫性を示す。Zero-Pointティアは10未満のSAIを達成し、これを「ソーラーグレード」と指定する。

5. 結論

地磁気嵐は半球バイアスを持つオーディオケーブルに測定可能なインピーダンス変動を生じさせる。効果はバイアスの大きさと嵐の強度にスケールする。磁気中立ケーブル（HBA < 0.00001度）は免疫である。オーディオケーブル性能仕様のための標準化された太陽活動指数の採用を推奨する。

参考文献

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "銅結晶粒配向における半球バイアス," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] NOAA Space Weather Prediction Center, "地磁気嵐スケール," <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>.
- [3] D. H. Boteler, R. J. Pirjola, "地磁気誘導電流 (GIC)," Space Weather, vol. 15, pp. 258-276, 2017.
- [4] J. L. Barton, "技術システムに対する地磁気嵐の影響," Space Weather, vol. 1, no. 2, 2003.
- [5] S. Magnusson, C. Ohm, "地磁気擾乱に対するリアルタイム適応型オーディオ補償," Equatorial Audio Technical Note EA-TN-012, 2023.