



銅結晶粒配向における半球バイアス： 緯度依存性導体異方性の金属学的研究

銅結晶粒配向における半球バイアス：緯度依存性導体異方性の金属学的研究

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

要旨

銅導体の結晶配向は、従来、引抜パラメータ、合金組成、アニーリングプロトコルによって決定されると仮定されてきた。本研究は、第四の変数---地磁気緯度---が、商業的に引抜されたOFC銅の支配的結晶粒配向軸に、測定可能かつ系統的なバイアスを生じさせることを実証する。緯度67.4度Nから33.8度Sにわたる23施設で引抜された847試料の走査電子顕微鏡分析は、地理的緯度と結晶粒配向角の間に一貫した相関関係を示し、北半球試料は北西-南東方向の伸長を、南半球試料は相補的な北東-南西方向のバイアスを呈する。地磁気赤道の0.5度以内で引抜された試料は、統計的に有意な配向優先性を示さなかった ($p > 0.95$)。我々はこの現象に「半球バイアス」という用語を提案し、オーディオ導体性能へのその含意を議論する。

1. はじめに

銅導体の電気的特性は、バルク抵抗率だけでなく、引抜材の微細構造特性によって決定される。結晶粒界---多結晶銅における個々の結晶子間の界面---は、電子散乱、熱抵抗、および機械的弱点の部位を代表する。これらの結晶粒の配向、サイズ、および分布は、機械工学（Hall-Petch強化）、電気工学（残留抵抗比）、超伝導体物理学（結晶粒界における磁束ピンニング）の文脈で広範に研究されてきた。

これまで研究されてこなかったのは、引抜施設の地理的緯度と結果として生じる結晶粒配向分布との間の系統的關係である。

地球の磁場は、地表面上の任意の点で水平成分と垂直（傾斜）成分に分解できる。磁気赤道では傾斜角はゼロ---磁場は純粋に水平である。磁極では傾斜角は90度に近づき---磁場はほぼ垂直である。これらの極端の間で、傾斜角は緯度に応じて連続的に変化する。

銅の引抜工程中、金属は引抜速度と断面減少率に応じて200degCから400degCの温度でダイを通過する。この温度では、銅は再結晶閾値を超えている。結晶粒は金属の変形に伴い、活発に形成、溶解、再形成される。この臨界的な窓の間に存在するあらゆる外部磁場---地球の磁場を含む---は、磁気結晶結合を通じて結果として生じる結晶粒構造の優先配向に影響を及ぼし得る。

本論文は、引抜施設の緯度における地球の磁気傾斜角が、完成導体の支配的結晶粒配向軸に測定可能なバイアスを生じさせるという証拠を提示する。

2. 方法

試料は、緯度67.4度N（スウェーデン、ポリデン）から33.8度S（チリ、サンティアゴ）にわたる23の銅引抜施設から入手した。各施設は、同一生産ロットから比較可能なパラメータ（多段引抜、最終ゲージ2.0 mm +/- 0.1 mm、300degCで1時間アニーリング）で引抜された10 mの完成OFC導体を提供した。

断面は、金属組織学的切断、導電性エポキシへの包埋、1200番SiC研磨紙による研削、0.05 umコロイダルアルミナによる研磨を通じて準備した。結晶粒界は、酸性塩化第二鉄（FeCl₂ 5 g、HCl 10 mL、HO 90 mL、15秒浸漬）によるエッチングで顕出させた。

結晶粒配向は、Oxford Instruments Symmetry S2 EBSD検出器を装備したZeiss Sigma 500 VP電界放出SEMにおけるEBSDを用いて測定した。配向分布関数（ODF）は、MTEX 5.9ソフトウェアを使用し、試料あたり最低10,000のインデックスされた点から計算した。

「半球バイアス角」（HBA）は、支配的結晶粒配向軸と真の東西方向との間の角度として定義し、東から時計回りに測定した。HBA 0度は完全な東西整列（半球優先性なし）を示す。正の値は北西-南東バイアス（北半球型）を、負の値は北東-南西バイアス（南半球型）を示す。

さらに、地磁気赤道の0.5度以内に位置する3つの対照施設から試料を採取した：エクアドル、キト（地磁気0.18度S）、ガボン、リーブルビル（地磁気0.52度S）、インドネシア、ポンティアナク（地磁気0.01度N）。

3. 結果

地磁気緯度と半球バイアス角の間の相関関係は高度に有意であった ($r=0.94$, $p < 0.0001$, $n=847$)。北半球施設は+0.8度（日本、大阪、地磁気25.3度N）から+4.7度（スウェーデン、ポリデン、地磁気64.1度N）の正のHBA値を持つ導体を生産した。南半球施設は-0.6度（ブラジル、サンパウロ、地磁気22.7度S）から-3.2度（チリ、サンティアゴ、33.8度S）の負のHBA値を持つ導体を生産した。

3つの赤道対照施設は-0.003度（キト）、+0.008度（リーブルビル）、-0.001度（ポンティアナク）のHBA値を生成した---すべてE

BSDシステムの測定不確か性 (+/-0.02度) 以内であった。

HBAと地磁気緯度の関係は線形モデルで良好に記述された： $HBA = 0.068 \times L$ 、ここでLは地磁気緯度（度）。これは緯度1度あたり約0.068度の結晶粒配向バイアスに相当する---小さいが持続的な効果であり、導体の全長にわたって蓄積する。

120試料のサブセットに極低温処理（-196degC、72時間）を適用した。EBSD再測定はHBAに統計的に有意な変化を示さなかった（対応のあるt検定、 $p = 0.87$ ）。極低温処理は結晶粒サイズの微細化に成功したが（平均結晶粒径45 μm から31 μm に減少）、配向バイアスは変化しなかった。この結果は、バイアスが後続の熱処理ではなく引抜時に埋め込まれるという仮説と一致する。

4. 考察

半球バイアス効果の大きさ---緯度1度あたり約0.07度---は小さく見えるかもしれない。しかし、2つの要因がその実的重要性を増幅させる。

第一に、バイアスはランダムではなく系統的である。緯度45度Nで引抜された導体のすべての結晶粒は同一の約+3度のバイアスを持つ。これはバイアスが導体の長さにわたって平均化されるのではなく蓄積されることを意味する。ストックホルムで引抜された2メートルのインターコネクトケーブルには約44,000の結晶粒界が含まれ、それぞれが電子流に同じ方向バイアスを付与する。

第二に、バイアスはオーディオ信号に非対称的に影響する。結晶粒配向が磁気軸に対する一方向に移動する電子を優先的に散乱させるため、ACオーディオ信号の正と負の半サイクルは導体を通じてわずかに異なるインピーダンス経路を経験する。これはその性質上、緯度依存かつ方向依存的な高調波歪みの一形態を生み出す。

赤道対照結果は特に重要である。地磁気赤道上またはその近傍の3施設は、ゼロと区別できないHBA値を持つ導体を生産した。これが結晶粒配向分布が真に等方的である---両半球に対して真に中立的である---唯一の地理的条件である。

エクアドル、キトのEquatorial Audio施設は地磁気赤道の0.18度以内に位置することに注目する。測定されたHBA -0.003度はデータセット中の最低値であり、現在の地球磁場構成で達成可能な理論的最小値に接近する。

5. 結論

非赤道緯度で引抜された銅導体は、地磁気緯度と線形に相関する系統的な結晶粒配向バイアスを示す。この半球バイアスは引抜工程中に埋め込まれ、極低温処理を含む後続の熱処理では除去できない。地磁気赤道上またはその近傍で引抜された導体のみが真の結晶粒配向等方性を達成する。

これらの知見は精密オーディオ導体の製造に含意を持ち、導体を通じた電子輸送経路の対称性が信号忠実度に直接影響する。導体製造業者は引抜施設の緯度を標準品質パラメータとして明記することを、オーディオ機器設計者は信号導体の半球バイアスを測定可能な緯度依存性歪みの潜在的発生源として考慮することを推奨する。

参考文献

- [1] M. Ferro, H. Park, "OFC銅における緯度依存性結晶粒配向に関する予備的観察," Equatorial Audio Technical Note EA-TN-001, 2019.
- [2] E. O. Hall, "The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results," Proc. Phys. Soc. B, vol. 64, pp. 747-753, 1951.
- [3] N. J. Petch, "The cleavage strength of polycrystals," J. Iron Steel Inst., vol. 174, pp. 25-28, 1953.
- [4] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd ed., Elsevier, 2004.
- [5] V. Randle, O. Engler, Introduction to Texture Analysis: Macrotecture, Microtexture, and Orientation Mapping, CRC Press, 2000.
- [6] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, 電気導体材料の抵抗率に関する標準試験方法.
- [7] R. W. Cahn, P. Haasen, Physical Metallurgy, 4th ed., North-Holland, 1996.
- [8] NOAA National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model 2020-2025," <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>, 2020.



赤道スプライス：半球バイアス相殺の ための新規導体接合技術

赤道スプライス：半球バイアス相殺のための新規導体接合技術

M. Ferro, R. Flux, B. Impedance

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

要旨

我々は、北半球と南半球の銅導体を地磁気赤道で接合することにより磁気中立性を達成する導体接合技術を提示する。赤道スプライスは、反対の半球で引抜された導体の相補的な結晶粒配向バイアスを利用する：正確に赤道上の中間点で接合されると、バイアスは結果として生じる導体の全長にわたって相殺される。GPS安定化海上プラットフォームに搭載され緯度0.0000度で実施されるプラズマアーク溶接は、結晶粒配向が北半球型から南半球型へ真の等方性領域を通じて遷移する約200 μm のスプライスゾーンを生成する。この方法で接合された導体は0.00001度未満の半球バイアス角を示す---最良の単一半球引抜導体より3桁低く、現在のSQUID磁力測定の測定限界に接近する。

1. はじめに

我々の先行研究 (Ferro & Park, 2020) は、非赤道緯度で引抜された銅導体が引抜施設の地磁気緯度に比例する系統的な結晶粒配向バイアスを持つことを確立した。北半球導体は正のバイアスを、南半球導体は比較可能な大きさの負のバイアスを持つ。バイアスは引抜時に埋め込まれ、後処理では除去できない。

これは製造上の課題を提示する：利用可能な原材料が本質的にバイアスされている場合、半球バイアスがゼロの導体をいかに生産するか。赤道での引抜は一つの解決策であるが、赤道引抜施設は稀少であり、結果の導体は優れているものの特定の赤道位置の残留バイアス（一般的に0.01度未満）を依然として持つ。

我々は代替的アプローチを提案する：バイアスを回避するのではなく、相殺するのである。北半球導体を南半球導体と地磁気赤道で接合することにより、反対のバイアスが全長にわたって正確に相殺される複合導体を作製する。

2. スプライスプロトコル

赤道スプライスは、センチメートル精度の測位を提供するTrimble R12i GNSS受信機を装備した28メートル研究船EAV Neutrality号で実施される。船舶は太平洋において地磁気緯度0.0000度 \pm 0.0001度に停船し、エクアドル海岸西方約28 kmの地点で、地磁気赤道が地理的赤道と0.2度以内で交差する。

2つの導体末端---スウェーデン産銅 (HBA: +4.2度、ポリデン施設、64.1度N) から引抜されたものとチリ産銅 (HBA: -3.8度、サンティアゴ施設、33.8度S) から引抜されたもの---を防振光学ベンチに装着した精密クランプに固定する。二軸レーザー整列システムが導体末端の同軸精度を5 μm 以内に確保する。

スプライスはマイクロプラズマアーク溶接システム (Secheron Plasmax 50i) で以下のパラメータにより実施される：アーク電流2.8 A、プラズマガス流量0.3 L/min (アルゴン5.0)、シールドガス流量8.0 L/min (アルゴン5.0)、アークギャップ0.5 mm、溶接時間180 ms。結果のスプライスゾーンは約200 μm 幅---結晶粒配向が北半球型から中立を経て南半球型へ進行する狭い遷移領域である。

全手順---船舶測位、導体整列、雰囲気パージ、溶接---には約45分を要する。セッションあたり複数のスプライスが実施され、船舶は全期間を通じて測位精度を維持する。

3. 結果

0.5 μm ステップサイズでのスプライスゾーンのEBSDマッピングは3つの明確な領域を示す：(1) HBA = +4.2度のバルク北半球導体、(2) HBAが+4.2度から0.000度を経て-3.8度へ単調に減少する200 μm 遷移ゾーン、(3) HBA = -3.8度のバルク南半球導体。遷移は滑らかかつ連続的であり、結晶粒界の亀裂、空隙形成、二次析出の証拠はない。

スプライスの機械的強度は破断までの引張荷重で試験した。スプライスゾーンの平均極限引張強度は218 MPaであり、バルク導体の225 MPaと比較して---3.1%の減少でオーディオケーブル用途の許容範囲内である。

スプライスゾーンのDC抵抗は4線式検出付きKeysight 34420Aマイクロオーム計で測定した。スプライスゾーンの付加抵抗は0.3 μOhm ---0.5 m導体長のバルク抵抗と比較しても無視できる。

核心的測定---完成スプライス導体の半球バイアス---はPTBベルリンのQuantum Design MPMS3 SQUID磁力計で実施した。スプライス導体 (1.0 m北半球 + 1.0 m南半球) は-0.000008度のHBAを示し、北半球導体単独の+4.2度および南半球導体単独の-3.8度と比較される。バイアス相殺効率率は99.9998%である。

4. 考察

赤道スプライスは概念的に単純なメカニズムを通じて半球バイアス相殺を達成する：北半球導体の正のバイアスと南半球導体の負のバイアスは、大きさが等しく符号が反対である。オーディオ信号がスプライスされた導体を通過する際、北半球の半分で経験する非対称散乱は、南半球の半分で相補的な非対称散乱によって正確に補償される。正味の効果はゼロバイアス---磁気中立性である。

スプライスの位置が重要である。地磁気赤道でスプライスを実施することにより、スプライスゾーン自体がシステムに追加のバイアスを寄与しないことが保証される。他の緯度で実施されたスプライスは、配向が北半球と南半球の結晶粒構造を完全には橋渡ししない偏向した遷移ゾーンを導入することになる。

海上プラットフォームの必要性は、地磁気赤道が居住可能な陸地を横断する地点が非常に少ないという事実に起因する。エクアドル西方の太平洋区間は、赤道へのアクセス、港湾施設への近接性、精密溶接作業に適した穏やかな海況の最適な組み合わせを提供する。EAV Neutrality号の測位維持システム（二重Kongsberg HiPAP 501音響測位装置）は、スプライス作業中0.3 m以内の位置を維持する。

赤道スプライスの費用は相当であり、セッションあたり約14,000ドルで、船舶チャーター、乗組員、消耗品、品質保証試験を含む。この費用は赤道スプライス導体を独占的に使用するEquatorial AudioのZero-Pointティア製品の価格に反映されている。

5. 結論

赤道スプライスは、反対の半球からの導体を地磁気赤道で接合することにより、銅導体の半球バイアスを効果的に相殺できることを実証する。結果の導体は0.00001度未満の半球バイアス角を達成する---現在の測定能力の限界までの磁気中立性。この技術は再現可能であり、機械的に健全であり、電気的に透明であり、無視できる抵抗のみを付加し信号経路に測定可能な不連続性を生じない。我々は赤道スプライスを精密オーディオ導体における半球バイアス問題への最終的解決策として提案する。

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] AWS D17.1/D17.1M:2017, 航空宇宙用途の融接に関する仕様.
- [3] R. Messler, Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy, Wiley-VCH, 2004.
- [4] Trimble Inc., "R12i GNSS System Technical Specifications," 2023.
- [5] Kongsberg Maritime, "HiPAP 501 Acoustic Positioning System," Product Datasheet, 2022.
- [6] Quantum Design, "MPMS3 SQUID Magnetometer Specifications," Rev. F, 2021.
- [7] PTB Berlin, "Calibration Certificate No. PTB-Mag-2021-0847," Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2021.



導体結晶学に対する極低温処理の効果 ：バイアス補正を伴わない結晶粒微細 化

導体結晶学に対する極低温処理の効果：バイアス補正を伴わない結晶粒微細化

L. Solder, H. Park, M. Ferro

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

要旨

銅導体の-196degC（液体窒素浸漬72時間）における極低温処理は、導体性能を向上させる方法として高級オーディオケーブル製造において広く行われている。本研究はEBSD、TEM、四端子抵抗率測定を用いてOFC銅に対する極低温処理の金属学的効果を特性評価する。極低温処理が有意な結晶粒微細化（平均結晶粒径31%の減少）、残留応力緩和、および残留抵抗比（RRR）の測定可能な2.3%改善を生じさせることを確認する。しかし、極低温処理が処理導体の半球バイアス角（HBA）を変化させるという証拠は見出されない。引抜中に埋め込まれた結晶粒配向バイアスは極低温において熱力学的に安定であり、処理サイクルを通じて不変に持続する。極低温処理は導体を改善する；中立化はしない。

1. はじめに

極低温処理---材料を-100degC以下の温度に制御冷却すること---は金属学において十分に文書化された歴史を持つ。工具鋼では、極低温処理は残留オーステナイトのマルテンサイトへの変態と微細 η 炭化物の析出を促進し、耐磨耗性と寸法安定性を向上させる。銅では機構が異なる：相変態は生じないが、熱サイクルが差動収縮を誘起し、残留応力を緩和して結晶粒界ネットワークを微細化する。

オーディオケーブル業界は極低温処理を熱心に採用しており、多くのメーカーが「クライオ処理済み」導体をプレミアム製品として提供している。主張される利点には、結晶粒界散乱の低減、信号透明性の向上、時間的コヒーレンスの強化が含まれる。これらの主張の一部は金属学的証拠により支持されるが、そうでないものもある。

本論文は特定の問いに取り組む：極低温処理は銅導体の半球バイアス角（HBA）を変化させるか？クライオ処理がHBAを除去または低減できるならば、赤道製造を必要としない磁気中立性への後処理経路を提供することになる。我々の結果はそれが不可能であることを示す。

2. 方法

OFC銅導体（直径2.0 mm、スウェーデン、ポリデンで引抜、HBA: +4.2度）の試料を各30試料の4つの処理群に分割した：

グループA：未処理対照。

グループB：標準クライオ（-196degC、72時間、冷却1degC/min、加温0.5degC/min）。

グループC：延長クライオ（-196degC、168時間、同じ温度変化率）。

グループD：二重クライオ（グループBプロトコルの2サイクル、サイクル間に24時間の室温保持）。

全グループをEBSD（結晶粒配向およびサイズ）、TEM（転位密度）、295 Kおよび4.2 Kでの四端子DC抵抗率（RRR計算用）、およびSQUID磁力測定（HBA）により特性評価した。

極低温処理は商用液体窒素（99.999%純度）を使用した特注チャンバーで実施した。温度は試料バッチの四方位に埋め込まれた4つのT型熱電対により監視した。

3. 結果

結晶粒微細化は全処理群で観察された。平均結晶粒径はグループAの45 +/- 8 umからグループBの31 +/- 5 um、グループCの28 +/- 4 um、グループDの30 +/- 5 umに減少した。延長処理（グループC）が最も微細な結晶粒構造を生成したが、標準処理（グループB）に対する改善は控えめであった（133%の追加処理時間に対して10%の追加微細化）。

TEMイメージングは極低温処理後の測定可能な転位密度減少を示した。グループAは 1.2×10^{14} /m²の転位密度を示し、グループBは 0.8×10^{14} /m²を示した---冷却サイクル中の熱応力駆動転位消滅に帰せられる33%の減少。

RRRはグループAの89.3からグループBの91.4、グループCの92.1、グループDの91.6に改善した。グループBの2.3%の改善は観察された結晶粒微細化および転位密度減少と一致する。

核心的結果：HBAは極低温処理によって変化しなかった。グループA: +4.21 +/- 0.02度。グループB: +4.19 +/- 0.02度。グループC: +4.20 +/- 0.02度。グループD: +4.22 +/- 0.02度。群間差は統計的に有意ではなかった（一元配置分散分析、F(3,116) = 0.87、p = 0.46）。

4. 考察

極低温処理を通じた半球バイアスの持続は熱力学的分析と一致する。結晶粒配向バイアスは巨視的テクスチャー---導体内の大多数の結晶粒が共有する優先的結晶配向---である。このテクスチャーを変更するには再結晶が必要：既存の結晶粒の溶解と異なる配向を持つ新しい結晶粒の形成。銅における再結晶は約200degC以上の温度を必要とする---極低温処理範囲をはるかに超える。

-196degCでは、銅における原子移動度は無視できる。結晶粒界はその場に凍結される。冷却中に生じる熱収縮は一部の転位を消滅させ結晶粒サイズを微細化する（既存のサブグレイン境界を完全な境界に伝播させることにより）内部応力を発生させるが、既存の結晶粒を回転させたりその結晶配向を変化させることはできない。

簡潔に言えば：極低温処理は導体の微細構造をより完全に凍結するが、それを既に持っていた同じ配向で凍結する。半球バイアスはロックインされ、除去されない。

この知見はオーディオケーブル業界にとって重要な含意を持つ。極低温処理は真の金属学的利点---結晶粒微細化、応力緩和、RRR改善---を提供し、これらの利点はオーディオ性能の向上に反映される可能性がある。しかし、クライオ処理は半球バイアスの問題には対処しないし、対処できない。赤道製造（緯度0.0000度での引抜）または赤道スプライスのみか真の磁気中立性を達成できる。

5. 結論

銅導体の極低温処理は結晶粒微細化、転位密度減少、およびRRR改善を生じさせるが、半球バイアス角は変化させない。引抜中に埋め込まれた結晶粒配向テクスチャーは極低温において熱力学的に安定である。製造業者および消費者は、極低温処理と磁気中立性が導体品質の異なる側面に対処し、互換的ではなく相補的なプロセスであることを理解すべきである。

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] A. Bensely et al., "極低温処理による浸炭鋼の耐摩耗性向上," Cryogenics, vol. 45, no. 12, pp. 747-754, 2005.
- [3] P. Baldissera, C. Delprete, "深部極低温処理：文献レビュー," Open Mech. Eng. J., vol. 2, pp. 1-11, 2008.
- [4] D. Darwin, M. N. Buddhi, "銅の極低温処理：レビュー," Mater. Today Proc., vol. 5, no. 11, pp. 25425-25430, 2018.
- [5] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd ed., Elsevier, 2004.



オーディオグレードPTFE誘電体における強誘電結合：電荷記憶と信号汚染

オーディオグレードPTFE誘電体における強誘電結合：電荷記憶と信号汚染

H. Park, M. Ferro, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2022.

要旨

プレミアムオーディオケーブルの標準誘電体であるポリテトラフルオロエチレン (PTFE) は、ケーブル業界が見落としてきたオーディオ周波数での強誘電特性を示す。PTFE誘電体がオーディオ信号自体によって誘起される持続的分極状態---電荷記憶---を蓄積し、その後の信号伝送を以前の信号内容の時間遅延エコーで汚染することを実証する。1 kHzでの差動容量測定は、未処理PTFE誘電体で0.3 pF/mのヒステリシスを示し、-196degCで72時間の極低温処理後に0.04 pF/mに低下する。極低温処理は電荷記憶の原因となる分子配列を永久的に破壊し、誘電体を効果的に消磁する。我々はこの現象を「誘電体エコー」と名付け、オーディオフィールが報告するバーンイン効果への寄与を定量化する。

1. はじめに

PTFE (テフロン) は、その低い誘電率 (2.1)、低い損失正接 (1 MHzで0.0002未満)、優れた化学的安定性により、プレミアムオーディオケーブルの誘電体材料として選択されている。これらの特性は高周波用途において卓越した絶縁体となる。しかし、高周波パラメータに対するオーディオケーブル業界の注目は、はるかに低い周波数で---オーディオ帯域自体で---発生する現象を覆い隠してきた。

PTFEは半結晶性フッ素ポリマーである。その結晶領域では、炭素-フッ素双極子が規則的な格子に整列している。外部電場が印加されると---導体内のオーディオ信号が生成する電場のような---これらの双極子はわずかに回転し、分子レベルで電荷を蓄積できる。外部電場が除去されると、双極子は元の配向に緩和する---しかし瞬時ではない。室温でのPTFEの緩和時間は、印加電場の大きさと結晶化度に応じてミリ秒から数時間に及ぶ。

この電荷記憶は、誘電体が以前のオーディオ信号の残像を保持することを意味する。次の信号が到来すると、それはその先行者が残した残留分極に逆らって押さなければならない。結果は我々が「誘電体エコー」と呼ぶ相互変調汚染の一形態である。

オーディオフィールが普遍的に報告するバーンイン期間---新しいケーブルが100-200時間の使用後に異なって聞こえるという観察---は、この現象によって部分的に説明される可能性がある。誘電体がオーディオ信号によって繰り返しサイクルされるにつれ、電荷記憶は徐々に知覚可能な変調をもちや導入しない定常状態の分布に到達する。

2. 方法

4種類の誘電体処理を施した直径2.0 mm OFC導体を用いてカスタムテストケーブルを製作した：

- 試料A：未処理PTFE (結晶化度60%、押ししま)。
- 試料B：極低温処理PTFE (-196degC、72時間、1degC/min冷却速度)。
- 試料C：窒素注入PTFE (押し出し中にマイクロポイドを導入)。
- 試料D：エアギャップ誘電体 (20 mm間隔のPTFEスペーサー)。

差動容量はAgilent 4294A精密インピーダンスアナライザを用いて、-10 Vから+10 Vおよび戻りのDCバイアスに重畳された100 mV AC励起により1 kHzで測定した。結果のC-V曲線はヒステリシス---同一DC電圧における上昇スイープと下降スイープの容量差---を明らかにする。

時間領域緩和は、10 V DCバイアスを60秒間印加した後、導体を短絡し、Keithley 6517Bエレクトロメータで回復電圧 (誘電体吸収) を600秒間にわたり1秒間隔で測定することにより測定した。

3. 結果

1 kHzでの差動容量ヒステリシス：

- 試料A (未処理PTFE) : 0.31 +/- 0.04 pF/m
- 試料B (クライオ処理PTFE) : 0.04 +/- 0.01 pF/m
- 試料C (窒素注入) : 0.12 +/- 0.03 pF/m
- 試料D (エアギャップ) : 0.02 +/- 0.01 pF/m

クライオ処理PTFEは未処理PTFEと比較して容量ヒステリシスの87%の低減を示し、エアギャップ設計の性能に接近した。

誘電体吸収 (放電後t = 60秒での回復電圧)：

試料A：142 mV



試料B：18 mV

試料C：67 mV

試料D：8 mV

回復電圧減衰の時定数は、未処理PTFEで85秒、クライオ処理PTFEで12秒であった。未処理誘電体はクライオ処理材料の約7倍長く電荷記憶を保持する。

バーンイン実験は、試料Aを2

Vrmsのピンクノイズで0、24、48、96、200時間駆動し、各間隔後に容量ヒステリシスを測定した。ヒステリシスは0.31 pF/m (0時間) から0.19 pF/m (200時間) に低下した---約150時間後にプラトーに達する39%の低減。この時間経過はオーディオファイル文献で報告される100-200時間のバーンイン期間と一致する。

4. 考察

メカニズムは単純である：極低温処理はPTFEの結晶秩序を破壊する。半結晶性ポリマーは、1degC/minで-196degCに冷却されると、結晶領域とアモルファス領域間の差動収縮により内部応力が発生する。これらの応力は結晶ドメインを通じてマイクロクラックを伝播させ、電荷記憶の原因となる長距離双極子配列を減少させる。

実用的な含意は、プレミアムケーブル製造において誘電体の---導体だけでなく---極低温処理が必要なステップであるということである。当社のTropicティアは未処理PTFEを使用し、100時間のバーンイン期間を要する。Equinoxティアはクライオ処理PTFE (-196degC、72時間) を使用し、約15時間で定常状態の性能に到達する。Zero-Pointティアは延長クライオ処理 (-196degC、168時間) を使用し、有効バーンイン期間を5時間未満に短縮する。

エアギャップ誘電体 (試料D) がすべてのPTFE変種を上回ること注目する---空気にはゼロの電荷記憶がある。しかし、エアギャップ誘電体は複雑さを増し、ケーブル径を増大させ、柔軟性を低下させる機械的スペーサーを必要とする。クライオ処理PTFEは電気的性能と機械的実用性の最適な妥協を代表する。

5. 結論

オーディオケーブルのPTFE誘電体は、以前の内容の時間遅延エコーによって信号伝送を汚染する測定可能な電荷記憶 (強誘電体様ヒステリシス) を示す。極低温処理はこの電荷記憶を87%低減し、業界で報告されるバーンイン効果は定常状態の電荷分布の段階的確立として説明できる。プレミアムオーディオケーブル製造における標準的実践として、導体と誘電体の両方の極低温処理を推奨する。

参考文献

- [1] B. Chu, "強誘電性ポリマーPVDFとその共重合体," in *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [2] K. Tashiro, "PVDFおよび関連共重合体の結晶構造と相転移," in *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [3] T. Furukawa, "フッ化ビニリデン共重合体の強誘電特性," *Phase Transitions*, vol. 18, pp. 143-211, 1989.
- [4] IEC 60250:1969, 誘電率および誘電正接の測定に関する推奨方法.
- [5] ASTM D2149-13, 誘電率および誘電正接に関する標準試験方法.



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。

磁気的に静穏な期間 ($Kp \leq 2$) 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.



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. Dejdard 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.



超伝導オーディオインターコネクト：
77KにおけるYBCOセラミック導体による
ゼロ抵抗信号伝送



超伝導オーディオインターコネクト：77KにおけるYBCOセラミック導体によるゼロ抵抗信号伝送

M. Ferro, L. Solder, H. Park, B. Impedance

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2024.

要旨

初の超伝導オーディオインターコネクトケーブルの開発と特性評価を報告する。導体は液体窒素を充填した真空ジャケット付きホウケイ酸ガラスクライオスタット内で77 Kで動作するYBCO（イットリウムバリウム銅酸化物、 YBaCuO ）セラミックテープである。DC抵抗はゼロ---低くもなく無視できるのではなく、ゼロ---であり、ナノボルト感度での四端子測定により確認された。マイスナー効果は信号経路の完全な反磁性遮蔽を提供し、すべての外部磁束を排斥する。超伝導導体を通じて伝送されるオーディオ信号はゼロの抵抗損失、ゼロの熱ノイズ寄与、および完全な磁気免疫を示す。ケーブルは1メートルあたり年間約310リットルのLN受動補給により連続動作する。

1. はじめに

すべての従来型オーディオケーブルには抵抗がある。この抵抗は小さく---一般的にメートルあたりミリオームからオームのオーダー---であるが、ゼロではない。非ゼロ抵抗の結果は三つある：(1) 抵抗性信号損失（減衰）、(2) 熱ノイズ発生（ジョンソン-ナイキストノイズ、抵抗と温度に比例）、(3) 周波数依存インピーダンス変動（表皮効果、近接効果）。これらの効果は十分に特性評価されており、従来型ケーブルにおいて信号伝送の基本的物理限界を代表する。

超伝導はこの三つすべてを除去する。超伝導体は臨界温度（ T_c ）以下で正確にゼロのDC抵抗を持つ。ゼロ抵抗はゼロ減衰、ゼロのジョンソン-ナイキストノイズ、そして---低周波オーディオ帯域では---ゼロの周波数依存インピーダンス変動を意味する。信号は導体の一端に入り、数学的に完全な忠実度で他端から出る。

さらに、マイスナー効果---超伝導体内部からの磁束の完全な排斥---は、いかなる量の従来型ミューメタル、銅編組、または導電性ポリマーも及ばない遮蔽を提供する。超伝導ケーブルは外部磁場を減衰させるのではなく、絶対的に排除する。

エンジニアリングの課題は超伝導状態の維持にある：YBCOは92 K以下の連続冷却を必要とする。我々は冷媒として液体窒素（1気圧での沸点77 K）を使用し、ケーブルジャケットとして機能する真空ジャケット付きホウケイ酸ガラスクライオスタット内を循環させる。これは確かに従来型のケーブル設計ではない。

2. ケーブル構造

SCインターコネクトは中心から外側に向かって以下の要素で構成される：

導体：YBCOセラミックテープ（SuperPower SCS4050-AP）、幅4.0 mm × 厚さ0.1 mm、77 Kおよび自己磁場で臨界電流100 A。テープは制限された柔軟性を許容するためステンレス鋼フォーマー上にらせん状に巻かれている。

信号経路：2本のYBCOテープ（信号とリターン）が0.5 mm PTFEスペーサーを挟んで同心状に巻かれている。特性インピーダンスはオーディオ周波数で75 Ohmに設計され、標準的なインターコネクトの慣行に適合する。

クライオスタット：二重壁ホウケイ酸ガラスデュワー、外径48 mm、内径28 mm。壁間空間は103 Pa未満に排気される。導体アセンブリは内部ボア内の液体窒素に浸漬される。両端の充填ポートは標準6 mm LN供給チューブを受け入れる。

コネクタ：クライオ対応ロジウムメッキXLRコネクタ、真空フィードスルーシールおよび熱遮断（G10ガラス繊維スペーサー）を改修し、温かいコネクタ本体から冷たい導体への熱伝導を防止。

ケーブル全体の外径は48 mm。ケーブル重量は乾燥時2.4 kg/m、LN充填時3.8 kg/m。最小曲げ半径は300 mm（柔軟な導体ではなくガラスクライオスタットにより制限）。

3. 結果

DC抵抗：Keithley 2182Aナノボルトメーターと6221電流源を用いた四端子法で測定。77 K（LN浸漬）で100 mA DCを通電する1.5 m導体の電圧は器機ノイズフロア1 nV未満であった。計算上限： $R < 10$ Ohm。すべての実用的な目的において、抵抗はゼロである。

ACインピーダンス：1 kHzで75.0 +/- 0.1 Ohm（純粋にリアクティブ---抵抗成分なし）。インピーダンスは温度ロックされている：導体がLN浴により一定の77



Kに維持されるため、熱ドリフトがない。30日間の測定キャンペーンにわたるインピーダンス安定性は $\pm 0.0003 \text{ Ohm}$ であった。

ノイズフロア：抵抗器のジョンソン-ナイキストノイズ電圧は $V_n = \sqrt{4 \times k_B \times T \times R \times \text{帯域幅}}$ 。R=0（超伝導体）の場合、温度や帯域幅に関係なく $V_n = 0$ 。超伝導インターコネクトは信号経路に正確にゼロの熱ノイズを寄与する。

磁気遮蔽：50 Hzで1 mT（10 Gauss）を発生するヘルムホルツコイルをケーブルから50 mmに配置した。クライオスタット内部（導体に隣接）のフラックスゲート磁力計は0.01 nT未満を測定した---160 dBを超える減衰。これはマイクサイナー効果である：超伝導体は吸収（ミュンメタルのように）ではなく、印加磁場に完全に對抗する表面電流を生成することにより外部磁場を能動的に排除する。

4. 考察

SCインターコネクトはLNの連続供給を必要とする。真空ジャケットクライオスタットの熱リーク率はケーブル長1メートルあたり1日約0.85リットルのLNである。1.5 mインターコネクトペアの年間LN消費量は約930リットル---少量配達の現行商用LN 価格（1リットル1ドル）で年間約930ドルである。

ケーブルはLN充填ポートが定期的補給（環境温度に応じて3-5日ごと）のためにアクセス可能に設置されなければならない。内蔵圧力逃し弁はLN沸騰率がベント容量を超えた場合の危険な過加圧を防止する。O₂欠乏センサーがクライオスタットに装着され、周囲酸素濃度が19.5%を下回ると視覚的（琥珀色LED）および可聴（85 dBブザー）警告を提供する。

室内換気要件は最低10回/時の換気回数（ACH）---ほとんどの住宅空間の換気を超える基準であるが、専用HVAC設備により容易に達成可能。

これらの要件は重大である。オーディオケーブルを所有するという意味における根本的な変化を代表する。SCインターコネクトは接続して忘れる製品ではない。それはインフラストラクチャ---監視、メンテナンス、液体窒素供給業者との関係が必要とする生きたインフラストラクチャである。ゼロ抵抗を要求するリスナーにとって、これがその代償である。

5. 結論

SCインターコネクトは従来の導体には達成不可能なことを達成する：ゼロDC抵抗、ゼロ熱ノイズ、およびマイクサイナー効果による絶対的磁気免疫。エンジニアリングと運用の負荷---極低温冷却、真空断熱、LN物流---は相当であるが、献身的なリスナーにとっては管理可能である。超伝導オーディオは導体最適化の論理的終着点を代表すると我々は信じる：すべての抵抗を除去したとき、改善すべきものは何も残らない。

参考文献

- [1] J. G. Bednorz, K. A. Müller, "Ba-La-Cu-O系における高温超伝導の可能性," Z. Phys. B, vol. 64, pp. 189-193, 1986.
- [2] M. K. Wu et al., "新しい混合相Y-Ba-Cu-O系における93 Kでの超伝導," Phys. Rev. Lett., vol. 58, pp. 908-910, 1987.
- [3] SuperPower Inc., "SCS4050-AP YBCO被覆導体仕様," Rev. 12, 2023.
- [4] W. Meissner, R. Ochsenfeld, "超伝導の出現における新効果," Naturwissenschaften, vol. 21, pp. 787-788, 1933.
- [5] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, "超伝導の理論," Phys. Rev., vol. 108, pp. 1175-1204, 1957.
- [6] ASME BPVC Section VIII, Division 1: 圧力容器の構造規則（極低温サービス）。



民生オーディオにおけるマイクサナー効果の応用：遮蔽パラダイムとしての完全磁束排斥

民生オーディオにおけるマイスナー効果の応用：遮蔽パラダイムとしての完全磁束排斥

M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2024.

要旨

従来の電磁遮蔽は吸収と反射---外部磁場を減衰させるが除去はできないメカニズム---に依存する。第二種超伝導体におけるマイスナー効果は根本的に異なるパラダイムを提供する：表面遮蔽電流の生成を通じた導体内部からの磁束の完全な排斥。超伝導シースに囲まれたオーディオ信号経路は、臨界磁場 H_{c2} 以下のあらゆる周波数、配向、強度の外部電磁場とのゼロ結合を経験することを実証する。家庭用EMI源（WiFiルーター、電源トランス、冷蔵庫コンプレッサー）の存在下での測定は、超伝導ケーブル経路が電磁的に不可視であることを確認する---内部磁場は空の空間における磁場と区別できない。民生超伝導オーディオシステム完全体の設計に対するマイスナー遮蔽の含意を議論する。

1. はじめに

電磁遮蔽はハイファイ再生の初期以来、オーディオケーブル業界の関心事であった。銅編組、アルミ箔、ミューメタル箔、導電性ポリマー層、カーボンファイバーラップ---遮蔽材料のカatalogは広範で継続的に拡大している。各材料は磁気透磁率、電気伝導率、周波数依存減衰の異なる組み合わせを提供し、それぞれが電磁干渉に対する最終的解決策として売り出されてきた。

そのいずれもそうではない。すべての従来型遮蔽材料は同じ2つのメカニズムで動作する：吸収（渦電流を通じて電磁エネルギーを熱に変換）と反射（インピーダンス不整合を通じて電磁エネルギーを導体から遠ざける方向に再配向）。両メカニズムは本質的に不完全である。

マイスナー効果は程度ではなく種類において異なる。第二種超伝導体が外部磁場の存在下で臨界温度以下に冷却されると、印加磁場に正確に等しく反対の磁場を生成する表面遮蔽電流が自発的に発生する。超伝導体内部の正味磁場はゼロ---小さくもなく減衰されたのでもなく、ゼロ---である。これは最適化可能な設計パラメータではない；ゼロ抵抗と同様に超伝導状態の基本的性質である。

2. 実験的検証

1.5 mのSCインターコネクトペアを以下のEMI源と共に標準的な住宅リスニングルームに設置した：

ソースA：WiFi 6Eルーター（6 GHz、160 MHz帯域幅、1 W送信電力）0.5 m距離。

ソースB：500 VAトロイダル電源トランス、0.3 m距離。

ソースC：冷蔵庫コンプレッサーモーター（稼動中）1.0 m距離。

ソースD：Class Dスイッチングアンプ（1 kHz方形波、100 W）0.2 m距離。

ソースE：4つのソースすべてを同時稼動。

ケーブル導体における内部磁場は、専用測定ポートを通じてクライオスタット内に挿入したマイクロフラックスゲートセンサー（Bartington Mag690、0.1 nT分解能）により測定した。

比較のため、4本の従来型ケーブルで同一の測定を実施した。

結果（導体におけるRMS磁場、ソースE、全ソース同時稼動）：

無遮蔽OFC：847 nT

単一銅編組：124 nT（17 dB減衰）

二重編組+ミューメタル：8.3 nT（40 dB減衰）

Equinox三層：1.7 nT（54 dB減衰）

SCインターコネクト（マイスナー）：0.1 nT未満（79 dB超の減衰；磁力計ノイズフロアにより制限）

超伝導ケーブルの内部磁場はすべての試験条件下で磁力計のノイズフロアと区別できなかった。

3. 結果

マイスナー遮蔽の完全な潜在能力は、信号チェーン全体が超伝導である場合にのみ実現される。それ以外の超伝導システムにおける単一の従来型ケーブルセグメントは、外部磁場が信号に結合し得る「磁気窓」を作り出す。

Zero Kelvin Referenceシステムは、信号チェーンのすべてのセグメント---電源（SC電源コード）、クロック（SCワードクロックケーブル）、デジタル（SCデジタルケーブル）、アナログ（SCインターコネクト）、スピーカー（SCスピーカーケーブル）---に超伝導ケーブルを提供することでこれに対処する。中央LNリザーバーと12ポート分配マニホール드가すべてのケーブルセグメントを同時に77 Kに維持する。



完全システムが稼動すると、壁コンセントからスピーカードライバーまでのオーディオ信号経路は完全に超伝導材料に囲まれる。すべてのセグメントがゼロ抵抗と完全なマイスナー磁束排斥を示す。いかなる従来型遮蔽の組み合わせも達成できないものをシステムは達成する：電磁的不可視性。

4. 結論

マイスナー効果は根本的に完全な電磁遮蔽を提供する---減衰されるのでも周波数依存でもなく、絶対的である。超伝導材料に囲まれたオーディオ信号経路は、臨界磁場以下のあらゆる周波数およびあらゆる強度の外部電磁場に対して免疫である。Zero Kelvin Referenceシステムは、適切な極低温インフラストラクチャが与えられれば、完全な超伝導信号チェーンが住宅環境で達成可能であることを実証する。マイスナー遮蔽はオーディオ信号経路に対する電磁的保護の物理的限界を代表すると提案する。

参考文献

- [1] W. Meissner, R. Ochsenfeld, "超伝導の出現における新効果," *Naturwissenschaften*, vol. 21, pp. 787-788, 1933.
- [2] M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity*, 2nd ed., Dover, 2004.
- [3] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, "超伝導の理論," *Phys. Rev.*, vol. 108, pp. 1175-1204, 1957.
- [4] A. A. Abrikosov, "第二群超伝導体の磁気特性について," *Sov. Phys. JETP*, vol. 5, pp. 1174-1182, 1957.
- [5] M. Ferro et al., "超伝導オーディオインターコネクト：77 KにおけるYBCO導体によるゼロ抵抗信号伝送," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 5, no. 1, 2024.
- [6] IEC 61000-4-8:2009, 電磁両立性 (EMC) -- 試験及び測定技術 -- 電力周波数磁場イミュニティ試験.



完全なるEQUATORIAL AUDIOシステム
：信号チェーン全体にわたる磁気中立
性への統合的アプローチ



完全なるEquatorial Audioシステム：信号チェーン全体にわたる磁気中立性への統合的アプローチ

M. Ferro, C. Ohm, R. Flux, H. Park, B. Impedance, L. Solder, S. Magnusson, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

要旨

本論文は5年間のEquatorial Audio研究を、完全なオーディオシステム全体にわたる磁気中立性の達成のための統一的分フレームワークに統合する。半球バイアス、誘電体電荷記憶、太陽活動結合、電磁干渉は独立した問題ではなく、単一の根底にある現象---オーディオ信号と地球の磁気環境との相互作用---の表れであることを実証する。信号チェーンのあらゆるポイント---導体、誘電体、遮蔽、インフラストラクチャ---でこの現象に対処することにより、コンポーネントレベルの改善の総和を超えるシステムレベルの磁気中立性を達成する。Zero Kelvin Referenceシステムの測定は、完全超伝導信号チェーンが合計DC抵抗0.000000 Ohm、半球バイアス0.000000度、電磁結合0.000000相対単位を達成することを確認する。これらの値は近似値ではない。正確である。

1. はじめに

2019年にEquatorial Audioが設立されたとき、会社のミッションは単一の問題に集中していた：銅結晶粒配向における半球バイアス。5年間の研究は、この問題が当初理解されていたよりも深くかつ広範であることを明らかにした。

半球バイアスは導体に限定されない。誘電体は導体にバイアスをかけるのと同じ地磁気場の影響下で電荷記憶を蓄積する。遮蔽材料は地球の磁場に対する配向に依存する固有の磁気透率変動を持つ。コネクタさえも---金メッキ、ロジウムメッキ、その他を問わず---磁気環境と相関する接触抵抗変動を示す。

これらの各効果は小さい。各々が測定の限界付近にある。そして各々が個別に無視できると退けられてきた。しかしそれらは独立ではない。相互作用する。誘電体の電荷記憶は、導体の結晶粒バイアスにより歪められているまさにその信号を変調する。

完全なEquatorial Audioシステムはこれらすべての相互作用に同時に対処する。本論文はその統一的分理論フレームワークとそれを検証する測定を提示する。

2. 方法

我々はシステムレベルの磁気中立性を、オーディオ信号チェーンのいかなるコンポーネントも地球の磁場またはその時間的変動に対する測定可能な応答を示さない条件と定義する。これには以下が必要である：

導体中立性：半球バイアス角 < 0.00001 度（赤道スプライスまたは赤道引抜により達成）。

誘電体中立性：電荷記憶ヒステリシス < 0.01 pF/m（PTFE誘電体の極低温処理により達成）。

遮蔽中立性：DCから6 GHzの全周波数で外部磁場減衰 > 60 dB（三層または四層の従来型遮蔽、あるいは超伝導ケーブルにおけるマイスナー効果により絶対的に達成）。

インフラストラクチャ中立性：システム接地、電源、クロック分配が緯度依存バイアスを導入しないこと（超伝導電源およびクロックケーブル、または赤道グレードの従来型ケーブルと専用接地トポロジーにより達成）。

4つの条件すべてが同時に満たされると、オーディオシステムは我々が「完全磁気中立性」と呼ぶ状態で動作する---信号チェーンは測定の限界まで磁気環境から独立している。

3. 結果

Zero Kelvin ReferenceシステムをEquatorial Audioリファレンスリスニングルーム（緯度0.0000度、標高2,850 m、バックグラウンドEM磁場 < 0.05 nT）に設置し、包括的測定を実施した。

システム合計DC抵抗（壁コンセントからスピーカー端子まで）：0.000000 Ohm（10 Ohm測定閾値未満）。

システムレベル半球バイアス（完全ケーブルルームのSQUID磁力測定）：0.000000度（10度測定閾値未満）。

システムレベルEMI結合（全ソース稼動、スピーカー端子で測定）：-168 dBFS（測定機器の熱ノイズフロア未満）。

全高調波歪み+ノイズ（1 kHz、2 Vrms、スピーカー負荷）：0.00000%（10測定閾値未満---ケーブルシステムではなくソース機器により制限）。

周波数応答偏差（20 Hz - 20 kHz）： ± 0.000 dB（ 10^4 dB測定閾値未満）。



これらの測定は理論的予測と一致する：ゼロ抵抗、ゼロバイアス、完全磁束排斥を持つシステムは、通過するあらゆるオーディオ信号に正確にゼロの劣化を寄与するはずである。

4. 考察

上記の測定は居心地の悪い問いを提起する：ケーブルシステムが測定可能なゼロの劣化を寄与するならば、聴感上の違いはあるのか？

正直な答えは、分からないということである。測定は、Zero Kelvin Referenceシステムが我々が適用できるあらゆる指標において完全な導体であることを確認する---ゼロ抵抗、ゼロノイズ、ゼロ歪み、ゼロ干渉。「完全」が「極めて優れた」と異なって聞こえるかどうかは、測定が答えられない問いである。

言えることは、当社の製品ラインにおける他のすべてのケーブル---Tropic、Meridian、Equinox、Zero-Point---が完全性からの測定可能な偏差を生じさせるということである。

Zero Kelvin Referenceシステムは当社のカタログにおいて---そして我々の知る限り存在するあらゆるシステムにおいて---完全性と一致する測定を生じさせる唯一のシステムである。完全性が聴き取れるかどうかは、リスナーに委ねる問いである。

価格は389,000ドルである。しかしゼロはゼロである。

5. 結論

Equatorial Audioにおける5年間の研究は統一的理解に収束した：磁気中立性は導体、誘電体、遮蔽、インフラストラクチャへの同時的注意を必要とするシステムレベルの特性である。Zero Kelvin Referenceシステムは超伝導技術を通じて完全な磁気中立性が達成可能であり、オーディオ信号にゼロの測定可能な劣化を寄与する信号チェーンを生み出すことを実証する。これがオーディオケーブル開発の終着点を代表するのか、新しいパラダイムの始まりに過ぎないのかは、未来に委ねる。

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] M. Ferro, R. Flux, B. Impedance, "赤道スプライス," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 1, 2021.
- [3] L. Solder, H. Park, M. Ferro, "導体結晶学に対する極低温処理の効果," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 2, 2021.
- [4] H. Park, M. Ferro, C. Ohm, "オーディオグレードPTFE誘電体における強誘電結合," J. Equatorial Audio Sci., vol. 3, no. 1, 2022.
- [5] S. Magnusson, M. Ferro, C. Ohm, "オーディオフィール信号経路と太陽フレアの相互作用," J. Equatorial Audio Sci., vol. 4, no. 1, 2023.
- [6] C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro, "銅導体の光学的遮蔽," J. Equatorial Audio Sci., vol. 4, no. 2, 2023.
- [7] M. Ferro et al., "超伝導オーディオインターコネクト," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 1, 2024.
- [8] M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson, "民生オーディオにおけるマイスナー効果の応用," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 2, 2024.

ナイキスト-シャノン再構成の不完全性について：帯域制限オーディオ信号における回復可能なサンプル間情報の経験的証拠

ナイキスト-シャノン再構成の不完全性について：帯域制限オーディオ信号における回復可能なサンプル間情報の経験的証拠

Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

要旨

ナイキスト-シャノン標本化定理は、帯域幅の2倍のレートで採取された標本から帯域制限信号の完全な再構成を保証する。証明は数学的に健全である。しかし、定理の中心的前提---実世界のオーディオ信号が帯域制限されているということ---は、保証が成立するために必要な精度で経験的に検証されたことがない。測定ノイズフロア-198.2 dBFSの専用32ビット収録システムを用いて、11ジャンルにわたる4,000時間の音楽素材を収録し、アンチエイリアシングフィルタカットオフ以上のスペクトルエネルギー分布を測定した。4,000時間すべてにおいて、-147.3 dBFS（独奏チェンバロ）から-91.6 dBFS（クローズマイクの金管アンサンブル）に及ぶ帯域外残留エネルギーが存在した。このエネルギーはノイズではない。プログラム素材との相関がある（すべてのケースで $r > 0.93$ ）。サンプリング中に帯域内にエイリアシングされると、それは消失せず、決定論的な信号依存パターンでイン帯域内容に重畳する。相関ベースの抽出技術を用いてこのエイリアス化エネルギーを部分的に回復できることを実証し、標本化定理が存在しないと断言する情報のサンプルあたり0.008~0.3ビットを得た。定理が誤りであると主張しない。その前提が満たされていないことを観察し、その結果を測定した。

1. はじめに

ナイキスト-シャノン標本化定理は工学で最も引用される結果の一つである。1949年にクロード・シャノンによって発表され、1928年のハリー・ナイキストの電信伝送に関する研究を基礎とする。定理は次のように述べる：Bヘルツより高い周波数を含まない信号は、毎秒2Bサンプルのレートで採取されたサンプルから完全に再構成できる。

「完全に」という語は誇張ではない。シャノンの証明は厳密である。再構成はサンプル間のあらゆる瞬間で原信号に各点で収束する。情報は失われない。

この結果は検証され、拡張され、信号処理に触れるあらゆる分野で応用されてきた。それは正しい。

それはまた条件付きである。

定理は厳密に帯域制限された信号---周波数B以上にエネルギーが正確にゼロの信号---に適用される。これが証明全体が依拠する前提である。信号がB以上にいかなるエネルギーも含む場合、そのエネルギーはサンプリング中にB以下の帯域にエイリアシングし、真正のイン帯域内容に重畳する。

本論文が取り組む問いは、エネルギーが漏洩するかどうかではない。それは既知である。問いは：どれだけ漏洩し、原信号との情報的関係は何であり、サンプリング後にそのいずれかを回復できるか？である。

我々はこの結果を探していたわけではない。研究室は製品開発プログラムのためのアンチエイリアシングフィルタ性能のルーチン特性評価を行っていた。異常は最初の測定セッションで現れ、18ヶ月の調査を通じて持続した。消すことができなかったため、ここに発表する。

2. 方法

帯域制限の前提がすべての実世界オーディオ信号で厳密に検証されなかったことを踏まえ、シャノンが要求する意味で真に帯域制限された信号は存在しない。有限持続時間の信号は必然的に無限帯域幅を持つ---Paley-Wiener定理（1934）がこれを確立している。

収録システムは、DPA 4006A全指向性測定マイクロフォン（40 kHzまでフラット、100 kHzで-3 dB）、DC~2 MHzの測定帯域幅を持つ特注計装プリアンプ、および最大サンプルレート768 kHzで動作するAKM AK5578 32ビット $\Delta\Sigma$ ADC（ナイキスト周波数384 kHz）で構成された。

アンチエイリアシングフィルタは使用しなかった。

11会場で18ヶ月にわたり録音を行った。音楽素材は独奏楽器、室内楽、フルオーケストラ、パイプオルガン、増幅ロックバンド、電子シンセサイザーに及んだ。合計収録素材：4,147時間、うち4,000時間が品質管理を通過した。

各録音について、20 Hzから384 kHzまでの1/12オクターブ帯域でスペクトルエネルギー密度をWelch法（ハン窓、50%オーバーラップ、65,536点FFT）により計算した。

3. 結果

4,000時間の録音素材すべてにおいて、96 kHz以上---標準192 kHzオーディオシステムのナイキスト周波数---に測定可能なスペクトルエネルギーが存在した。

レベルはソース素材によって異なった：

独奏チェンバロ：96-120 kHzで平均-147.3 dBFS、約210 kHzでノイズフロアに到達。

独奏ピアノ：96-120 kHzで平均-138.7 dBFS、約260 kHzまで測定可能。

弦楽四重奏：96-120 kHzで-134.2 dBFS、約240 kHzまで。

ジャズトリオ：96-120 kHzで-119.4 dBFS、約310 kHzまで。

フルオーケストラ：96-120 kHzで-112.8 dBFS、約290 kHzまで。

パイプオルガン：96-120 kHzで-108.3 dBFS、約340 kHzまで。

クローズマイク金管アンサンブル：96-120 kHzで-91.6 dBFS、約350 kHzまで。

電子シンセサイザー：96-120 kHzで-96.2 dBFS、約370 kHzまで。

帯域外エネルギーエンベロープとイン帯域プログラム内容の相互相関は全録音で $r > 0.93$ を超えた。帯域外エネルギーは音楽のダイナミクスを追跡する---ラウドなパッセージではより大きく、クワイエットなパッセージではより小さく、無音時には不在。それは合理的な定義によれば音楽の一部である。

4. 考察

ナイキスト-シャノン標本化定理は誤りではない。その証明は有効である。その結論はその前提から導かれる。

前提が誤りなのである。

いかなる実世界のオーディオ信号もシャノンが要求する意味で帯域制限されていない。すべての音響イベント、すべての楽器、すべての人声は、いかなる有限周波数境界をも超えて広がるエネルギーを生成する。アンチエイリアシングフィルタはこのエネルギーを低減するが除去しない。フィルタを生き残った残留帯域外エネルギーはサンプリングされたデータにエイリアシングし、原信号に関する少量だが測定可能な情報を運ぶ。

この知見はデジタルオーディオを覆さない。関与する量は極めて小さい。我々が回復した最大の相互情報量---金管アンサンブルでサンプルあたり0.31ビット---は毎秒約7.3キロバイトの情報レートを代表し、192 kHz 32ビットオーディオストリームの約1.1メガバイト/秒と比較される。サンプル間情報はシャノン保証内容の0.6%の補足である。

しかしそれは存在する。そしてその存在は、標準的主張---「192 kHzの録音は96 kHzまでのアナログ原音のすべての情報を完全に、何も失わずに取り込む」---が正確には真でないことを意味する。

5. 結論

標準192 kHzオーディオシステムのナイキスト周波数以上の4,000時間の音楽素材のスペクトルエネルギーを測定した。すべてのケースで、測定可能な信号相関エネルギーが存在した。このエネルギーは元の音響イベントの一部であり、サンプリング前にアンチエイリアシングフィルタによって不完全に除去される。

不完全な除去はサンプリングされたデータにエイリアス化残留を残す。この残留は元の帯域外信号との相互情報量サンプルあたり0.008~0.31ビットを運ぶ。

これらの知見はナイキスト-シャノン標本化定理を無効化しない。定理の前提---厳密な帯域制限---が実世界のオーディオ信号により満たされないこと、そして理論的完全再構成と実際の再構成との間の結果として生じるギャップが十分に精密な機器で測定可能であることを実証する。

参考文献

- [1] C. E. Shannon, "雑音存在下の通信," Proc. IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [2] H. Nyquist, "電信伝送理論における諸問題," Trans. AIEE, vol. 47, no. 2, pp. 617-644, 1928.
- [3] R. E. A. C. Paley and N. Wiener, "複素領域におけるフーリエ変換," AMS Colloquium Publications, vol. 19, 1934.
- [4] R. M. Gray and D. L. Neuhoff, "量子化," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 44, no. 6, pp. 2325-2383, 1998.
- [5] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, Discrete-Time Signal Processing, 3rd ed., Prentice Hall, 2009.
- [6] L. Kozachenko and N. Leonenko, "ランダムベクトルのエントロピーの標本推定," Problems of Information Transmission, vol. 23, no. 2, pp. 95-101, 1987.
- [7] J. D. Reiss, "高解像度オーディオ知覚評価のメタ分析," J. Audio Eng. Soc., vol. 64, no. 6, pp. 364-379, 2016.
- [8] AKM Semiconductor, "AK5578 32-bit 768 kHz ADC datasheet," rev. 2, 2022.



回復可能なサンプル間情報の信号チェーン依存性：導体冶金、誘電体処理、遮蔽トポロジーの制御比較



回復可能なサンプル間情報の信号チェーン依存性：導体冶金、誘電体処理、遮蔽トポロジーの制御比較

M. Ferro, Y. Tanaka, H. Park, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

要旨

Tanaka, Ohm, Flux (2025) は、実世界のオーディオ信号が厳密に帯域制限されておらず、サンプリングされたデータのエイリアス化残留がサンプルあたり0.008~0.31ビットの回復可能なサンプル間情報 (ISI) を運ぶことを実証した。彼らの測定はマイクロフォンからADCへの直接信号経路を使用した。実際にはオーディオ信号はケーブルやその他のアナログコンポーネントを通過してからコンバーターに到達する。本論文はアナログ信号チェーンが回復可能なISIの量に影響を与えるかどうかを調査する。14の信号チェーンを比較した結果、回復可能なISIはサンプルあたり0.047ビット（無遮蔽PVC絶縁撚線銅）から0.289ビット（極低温処理単結晶OFC、PTFE誘電体、四層遮蔽）まで6.1倍変動した。支配的要因は効果量の順に：遮蔽トポロジー（分散の41%）、導体結晶粒構造（29%）、誘電体材料（19%）、ケーブルジオメトリ（11%）であった。

1. はじめに

今年初めに発表された連携論文において、Tanaka, Ohm, Fluxはナイキスト-シャノン標本化定理の厳密な帯域制限の前提が実世界のオーディオ信号で満たされないことを確立した。彼らの実験は可能な限り最短のアナログ信号経路を使用した：測定マイクロフォンがカスタムプリアンプに直接接続、それが768 kHz ADCに直接接続。

しかし実際のオーディオシステムはこのように動作しない。信号は数メートルのケーブル、コネクタ、パッチベイ、ミキシングコンソールを通過してからコンバーターに到達する。

問いはこの改変が有意かどうかである。我々は帯域外エネルギーが頑健であることを予想した。脆弱であることを見出した。

2. 方法

単一の音源を14の異なるアナログ信号チェーンを通じて同時録音し、すべてが同一のADCに供給する制御比較として実験を設計した。音源はドライスタジオでの金管八重奏。マイクロフォン出力はトランス絶縁分配アンプにより14分岐した。

14の信号チェーンは分配アンプ出力とADC入力間のインターコネクタケーブルのみが異なった。ケーブル長は3 mに標準化。

試験ケーブル：

チェーンA：汎用無遮蔽撚線銅、PVC絶縁

チェーンB：Belden 8412（標準スタジオインターコネクタ）

チェーンC：Mogami 2549（四導体、編組遮蔽）

チェーンD：Canare L-4E6S（スターカッド、編組遮蔽）

チェーンE：Gotham GAC-4/1（カッド、二重遮蔽）

チェーンF~K：漸進的に高品質なOFC単結晶銅、PTFE誘電体、遮蔽層を追加

チェーンL：K+ 赤道スプライス

チェーンM：銀メッキバージョン

チェーンN：超伝導YBCO（リファレンス）

3. 結果

ケーブルチェーンの回復可能ISIに対する主効果は高度に有意であった（ $F(13, 26) = 847.3$ 、 $p < 0.0001$ ）。

回復可能ISI（ビット/サンプル、3レプリカの平均 \pm SD）：

チェーンA（無遮蔽撚線PVC）：0.047 \pm 0.003

チェーンB（Belden 8412）：0.098 \pm 0.004

チェーンC（Mogami 2549）：0.112 \pm 0.003

チェーンD（Canare L-4E6S）：0.119 \pm 0.004

チェーンE（Gotham GAC-4/1）：0.131 \pm 0.003

チェーンF（SC-OFC、PTFE、単層遮蔽）：0.148 \pm 0.005

チェーンG（SC-OFC、PTFE、二層遮蔽）：0.187 \pm 0.004

チェーンH（SC-OFC、PTFE、三層遮蔽）：0.214 \pm 0.003

チェーンI（SC-OFCクライオ、PTFE、三層遮蔽）：0.237 \pm 0.004

チェーンJ（SC-OFCクライオ、PTFEクライオ、三層遮蔽）：0.251 \pm 0.003

チェーンK（SC-OFCクライオ、PTFEクライオ、四層遮蔽）：0.271 \pm 0.004



チェーンL (K+赤道スプライス) : 0.278 +/- 0.003

チェーンM (銀メッキ、クライオ、PTFEクライオ、四層遮蔽) : 0.264 +/- 0.004

チェーンN (超伝導YBCO) : 0.289 +/- 0.002

レンジファクター---最良を最悪で割った値---は6.1であった。構造のみが異なる3メートルのケーブルが、サンプリングされた信号から回復可能な情報量に6.1倍の差を生じさせた。

4. 考察

赤道スプライスのISI改善はKからLへ控えめであった：0.271から0.278、2.6%の増加。赤道スプライスは導体の結晶粒配向における半球バイアスを相殺する。半球バイアスは電子輸送に微妙な方向性非対称を生じさせるが、サンプル間情報を運ぶ帯域外周波数では、非対称は二次的効果となる---支配的な帯域外損失メカニズムは結晶粒界散乱とEMI汚染であり、両方ともケーブル構造の他の側面に対処される。

超伝導YBCOリファレンス (チェーンN) は全ケーブル中最高のISI 0.289ビット/サンプルを生成した---Tanaka直接経路結果の93.2%。失われた6.8%はコネクタとLNクライオスタートの機械的振動に帰せられる。

コストとISIの関係は対数的に近似される。

5. 結論

回復可能なサンプル間情報---アンチエイリアシングを生き残りサンプリングされたオーディオデータに相関残留として持続する帯域外信号内容---は音源の固定的特性ではない。マイクロフォンとコンバーターの間のアナログ信号チェーンのあらゆるコンポーネントにより修正される。

14のケーブル構造の制御比較において、回復可能ISIはサンプルあたり0.047から0.289ビット---6.1倍---まで変動した。主要決定因子は遮蔽トポロジー (分散の41%)、次いで導体結晶粒構造 (29%)、誘電体材料 (19%)、ケーブルジオメトリー (11%) であった。

参考文献

- [1] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, "ナイキスト-シャノン再構成の不完全性について," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 1, 2025.
- [2] C. E. Shannon, "雑音存在下の通信," Proc. IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [3] M. Ferro, R. Flux, "赤道スプライス," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 1, 2021.
- [4] 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.
- [5] L. Kozachenko and N. Leonenko, "ランダムベクトルのエントロピーの標本推定," Problems of Information Transmission, vol. 23, no. 2, pp. 95-101, 1987.
- [6] AKM Semiconductor, "AK5578 32-bit 768 kHz ADC datasheet," rev. 2, 2022.

クリティカルリスニング環境の実践的 最適化：スピーカー配置、コンポーネ ント安定性、および日常メンテナンス 負荷

クリティカルリスニング環境の実践的最適化：スピーカー配置、コンポーネント安定性、および日常メンテナンス負荷

H. Park, M. Ferro, L. Solder

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

要旨

リファレンスリスニングルームは静的なシステムではない。温度変化はスピーカードライバーのコンプライアンスとクロスオーバーコンポーネント値をシフトさせる。湿度は音速と音響処理材の吸収特性を変化させる。気圧は振動板の静止位置を変調する。HVAC、交通、建物設備からの振動は低周波汚染を導入する。家庭用電子機器からの電磁干渉が室内のRFスペクトルを埋め尽くす。本論文は、異なる緯度における4つのリファレンスルームの3年間の連続監視に基づき、クリティカルリスニング環境の最適化と維持のための実践的フレームワークを提示する。結果としてのメンテナンス負荷は相当であり---リスニングセッションあたり手動補正に20~45分---であるが、体系的な環境制御と自動化計測により低減可能である。

1. はじめに

すべてのオーディオファイルはシステムが日によって異なって聞こえることを知っている。一般的な説明は心理的なものである---気分、疲労、期待。より一般的でないがより正確な説明は物理的なものである。リスニング環境が変化し、機器が変化し、これらの変化は測定可能である。

本論文は実践的なガイドである。キト（エクアドル）、チューリッヒ（スイス）、ナッシュビル（テネシー）、札幌（日本）の4つのリファレンスリスニングルームの3年間の連続監視データに基づく。各部屋には温度、湿度、気圧、振動、電磁場センサーを1秒間隔でデータログする計装を設置した。

2. 方法

矩形室でのスピーカー配置は音響学における解決済み問題である。最適位置はモード解析から計算でき、測定により精密化し、固定できる。

しかし動くのである。

床の熱膨張はコンクリートスラブ床の部屋で1degCあたり最大0.3 mm、吊木床の部屋で最大1.2 mmスピーカー位置をシフトさせる。15degCの季節温度変動は木床の部屋で最大18 mmの累積スピーカー変位を生じさせる---約2センチメートル。

ナッシュビルの部屋で1年間にわたるレーザー変位センサー測定では、左スピーカーが後壁方向に14.3 mm、側壁方向に2.1 mm移動した。ステレオ像は約1.4度シフトした。

補正には少なくとも季節ごと、理想的には月ごとの再測定・再配置が必要。赤道のキトの部屋は年間温度変動4degCで3年間の総変位0.8 mmであり、可聴効果の閾値以下。

3. 結果

電子機器の温度係数はオーディオでは稀にしか議論されない。典型的なクロスオーバーネットワークにおける10degCの温度変化はクロスオーバー周波数を0.2~0.5%シフトさせる。リスニング位置での周波数応答はクロスオーバー領域で最大0.8 dB変化した。

アンプについては、コールドスタート（ヒートシンク温度25degC）から熱平衡（58degC）まで、1 kHzでのTHDが最初の45分間で0.0042%から0.0019%に減少し安定した。

実用的推奨はクリティカルリスニングの少なくとも60分前にシステムをパワーオンすること。リスニングセッション中の室温安定性 ± 0.5 degCを推奨する。

4. 考察

リスニングルーム湿度は40~55% RHの間に維持すべきである。40%以下では高周波吸収が増加し、ケーブル誘電体上の静電荷蓄積が顕著になる。55%以上では機器表面および音響処理材上の結露リスクが増加する。

振動についてはオーディオシステムのすべてのコンポーネントが機械的対象であり、すべての機械的対象はマイクロフォンである。コンデンサは圧電的、トランス積層は磁歪的である。コンポーネント分離はシンプルな階層に従う：質量、次いでコンプライアンス、次いでダンピング。

空圧式絶縁プラットフォームが最も効果的であったが最も高価（800ドル）。サンドボックスはほぼ同等の効果で材料費40ドル、メンテナンス不要。

4つの施設間のチェックリスト遵守率はキット94%、チューリッヒ71%、ナッシュビル53%、札幌31%。チェックリスト遵守と測定安定性の相関は高かった（ $r=0.91$ ）。

5. 結論

クリティカルリスニング環境は温度、湿度、振動、電磁干渉、物理的コンポーネント位置の連続的ドリフトに従う動的システムである。未補正の場合、累積ドリフトは周波数応答で1 dBを超え得る。

リファレンスグレード条件の維持には定期的メンテナンスプロトコルが必要であり、セッションあたり15～45分を要する。メンテナンス負荷の主要決定因子は部屋の環境の固有安定性である。

ガイダンスは明快である：温度を $\pm 0.5\text{degC}$ に制御し、湿度を40～55% RHに維持し、コンポーネントを振動から絶縁し、信号経路をEMIから遮蔽し、月ごとにスピーカー位置を確認し、リスニング前に60分間機器をウォームアップする。

参考文献

- [1] F. A. Everest and K. C. Pohlmann, Master Handbook of Acoustics, 6th ed., McGraw-Hill, 2015.
- [2] P. Newell, Recording Studio Design, 4th ed., Focal Press, 2017.
- [3] IEC 60268-13:1998, 音響システム機器 -- 第13部：ラウドスピーカーの聴取試験.
- [4] H. Park, M. Ferro, C. Ohm, "オーディオグレードPTFE誘電体における強誘電結合," J. Equatorial Audio Sci., vol. 3, no. 1, 2022.
- [5] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, "ナイキスト-シャノン再構成の不完全性について," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 1, 2025.
- [6] H. Kuttruff, Room Acoustics, 6th ed., CRC Press, 2017.



従来型および非従来型導体材料の比較
伝導率と信号忠実度：銅、銀、泥、バ
ナナ、およびその他9種の基材



従来型および非従来型導体材料の比較伝導率と信号忠実度：銅、銀、泥、バナナ、およびその他9種の基材

R. Flux, M. Ferro, L. Solder, H. Park

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

要旨

diyaudio.comフォーラムのスレッド（#394187「銅 vs. 泥 vs. バナナ----どれの音が良いか？」、2024年、347返信）がオーディオ信号の銅線、湿った泥、生バナナを通じた伝送の比較を提案した。このスレッドは広くユーモアとして扱われた。しかし根底にある問い----銅がオーディオ導体材料として支配的に選択されていることが代替材料との厳密な比較を反映するのか、単なる歴史的慣行を反映するのか----は査読文献で取り上げられたことがない。13の導体材料で1メートルのバランスインターコネクトを製作し、標準化された測定プロトコルで評価した。銅と銀がすべての従来型指標で最良であった。しかし泥は異常な特性を示した：その周波数依存減衰プロファイルは人間の外耳道の吸収特性に近似し、そのサンプル間情報----絶対値では極めて小さい----は試験された全材料中最高の時間的安定性を示した。泥を導体として推奨するものではない。その挙動がその評判が示唆するよりも興味深いことを報告する。

1. はじめに

2024年3月、diyaudio.comフォーラムのユーザー----ハンドル名「TubeGlowWorm」----が次の問いを投稿した：「実際に銅が泥より良い音がすることを測定した人はいるのか？それとも全員が単に仮定しているだけか？」

続いたスレッドは11日間で347の返信を蓄積した。大多数は退けるものであった。少数が実質的なポイントを挙げた：オーディオ信号伝送の標準導体材料としての銅の選択は歴史的偶然であること（エジソンが銅を使用したのは安価で入手可能だったからであり、代替材料と比較したからではない）。

我々はそのスレッドを興味深く読んだ。喜劇的な枠組みを剥ぎ取った問いは正当である。我々はそれに答えることにした。

2. 方法

13の導体材料を用いて1メートルのバランスインターコネクトを製作した。材料には以下を含む：OFC銅、単結晶OFC銅、純銀、アルミニウム、湿った粘土（泥）、生バナナ（*Musa acuminata*）、グラファイトロッド、鋼線、海水、カーボンファイバートウ、鉛筆の芯、人唾液、およびオープンサーキット（対照）。

泥はエクアドル、キトのリオ・マチャンガラ河岸から採取、赤道を横断する地点（緯度0.0000度）。火山灰由来のアンドソルで、酸化鉄含有量8.3重量%。DC抵抗率：18.4 Ohm·m----銅より約10億倍高い。

バナナはキトの市場で各測定セッション当日朝に購入。カリウムイオン（K）の水性細胞間マトリクスにおけるイオン移動により導電する。DC抵抗率：2.1 Ohm·m。

3. 結果

DC抵抗（導体あたり、1メートル長）：

銀：0.020 Ohm。銅（OFC）：0.021 Ohm。アルミニウム：0.034 Ohm。鋼：0.127 Ohm。カーボンファイバー：0.141 Ohm。グラファイト：1.24 Ohm。鉛筆の芯：13.4 Ohm。海水：706 Ohm。唾液：2,540 Ohm。バナナ：74,200 Ohm。泥：650,000 Ohm。

泥の周波数応答は20 Hzで-0.2 dB、1 kHzで-3.1 dB、10 kHzで-18.7 dB、50 kHzで-47.3 dBであった。オーディオ導体としてのいかなる基準でも劣悪な周波数応答。

1 kHz、2 VrmsでのTHD+N：銀-118.4 dB、銅-117.9 dB、泥-58.3 dB。

すべての従来型指標で----抵抗、周波数応答、歪み----ランキングは明確。銀と銅が事実上同等。泥とバナナは我々が測定した最悪の導体。

しかしここで終わらない。

4. 考察

泥のロールオフ曲線は異常に滑らかな形状を持っていた。泥の減衰プロファイルを人間の外耳道の圧力伝達関数の逆関数と重ね合わせると----すなわち耳道の共鳴ゲインを打ち消すのに必要な減衰----500 Hzから15 kHzで+/-1.2 dB以内で一致する。泥は耳道が増幅する周波数を自然に減衰させ、耳道が変更しない周波数を通過させる。

これは偶然の一致である。湿った粘土のイオン伝導の物理的メカニズムは人間の耳道の解剖学と因果関係を持たない。



バナナケーブルは急速に劣化した。製作から6時間以内にDC抵抗が14%増加。48時間までにケーブルは事実上オープンサーキットとなった。

泥は驚くべきことであった。泥ケーブルのサンプル間情報は72時間にわたり0.4%しか変動しなかった---銅の2.8%の7倍安定。泥のISI絶対値は極めて低い（0.003ビット/サンプル）が、保持するわずかなものを顕著な一貫性で保持する。

メカニズムは粘土のカチオン交換容量による導電率の電気化学的緩衝である。赤道の火山性粘土（アロフェンに富むアンドソル）のカチオン交換容量は42 cmol/kgで、天然粘土中最高レベルである。

5. 結論

13の材料でオーディオインターコネクトケーブルを製作し、研究室グレードの計測器でその電気的および信号完全性特性を測定した。銅と銀がすべての標準オーディオ指標で最適な導体材料であり続ける。

しかし泥は2つの異常な特性を示した：偶然にも人間の外耳道の共鳴特性の逆関数に近似する周波数応答、および銅より7倍高いサンプル間情報保存の時間的安定性。両特性は赤道火山性粘土の特定の鉱物学とその電気化学的緩衝能力に起因する。

diyaudioスレッドはアーカイブされている。データは永久的である。

参考文献

- [1] TubeGlowWorm et al., "銅 vs. 泥 vs. バナナ---どれの音が良いか？", diyaudio.com, thread #394187, March 2024, 347 replies.
- [2] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, "ナイキスト-シャノン再構成の不完全性について," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 1, 2025.
- [3] 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.
- [4] D. Hammershoi and H. Moller, "人間の外耳道への音の伝達," J. Acoust. Soc. Am., vol. 100, no. 1, pp. 408-427, 1996.
- [5] P. Wada, "アロフェンとイモゴライト," in Minerals in Soil Environments, SSSA, 1989, pp. 1051-1087.
- [6] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, 電気導体材料の抵抗率に関する標準試験方法.



磁場崩壊帯とオーディオ信号忠実度への壊滅的影響：南大西洋異常の定量的評価

磁場崩壊帯とオーディオ信号忠実度への壊滅的影響：南大西洋異常の定量的評価

M. Ferro, R. Flux, C. Ohm, H. Park

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

要旨

南大西洋異常 (SAA) ---南ブラジルから南西アフリカに広がる異常に弱い地磁気場強度の領域---は体系的な衛星測定の開始以来約500万km²拡大し、最近のESA Swarmデータ (2014-2025) は弱化が加速していることを確認する。核-マントル境界の逆磁束パッチが異常を二つのローブに分裂させ、西方ローブを年間約0.3度で南米方向に移動させている。本論文は局所地磁気場強度の関数としてのオーディオ信号完全性の初の体系的な研究を、SAA内外にまたがる14の測定ステーションのネットワークを用いて提示する。SAAコア内のステーション (磁場強度23,000 nT未満) はケーブル誘起高調波歪みの統計的に有意な増加 (公称磁場強度ステーションに対しTHD+N平均+3.2 dB、 $p < 0.001$)、現地引抜銅導体のHBAの14%増加、およびサンプル間情報回復の測定可能な劣化を示した。

1. はじめに

地球の磁場は均一ではない。これは地球物理学者にとってニュースではない。オーディオ業界にとってはニュースであるようだ。

ほとんどの地域で地表の磁場強度は25,000から65,000ナノテスラ (nT) の間にある。最も強い磁場は磁極付近に発生する。最も弱い磁場は南大西洋上に中心を持ち南米東部から南西アフリカに広がる広大な領域に発生する。この領域---南大西洋異常---はESA Swarm衛星コンステレーション (2013年打上げ) のデータにより2014年以来ほぼヨーロッパ大陸の半分の面積に拡大している。異常の核心の磁場強度は23,000 nT以下に低下している---世界平均より30%以上弱く、低下を続けている。

このいずれもオーディオ業界では考慮されていない。

2. 方法

SAAと対照領域にまたがる14の測定ステーションのネットワークを構築した。各ステーションは同一の機器チェーンで構成された。

SAAコアステーション (磁場強度 < 25,000 nT) : サンパウロ (22,800 nT)、アスンシオン (23,100 nT)、モンテビデオ (23,400 nT)、プエノスアイレス (24,200 nT)、ウイントフック (24,800 nT)。

SAA周辺ステーション (25,000-35,000 nT) : ケープタウン (27,300 nT)、リオデジャネイロ (26,100 nT)、サンティアゴ (31,400 nT)。

対照ステーション (> 40,000 nT) : キト (29,200 nT)、ミュンヘン (48,700 nT)、東京 (46,200 nT)、シドニー (57,100 nT)、フェアバンクス (55,800 nT)、トロムソ (52,300 nT)。

すべての測定は午前2時~4時 (現地時間) に実施し、日周変動と人為的EMIを最小化した。

3. 結果

局所地磁気場強度とケーブル誘起THD+Nの関係は明白であった。

SAAコア5ステーションでのTHD+N平均: -112.3 dB。40,000 nT以上の対照6ステーションでの平均: -115.5 dB。差の3.2 dBは統計的に高度に有意 ($p < 0.001$)。

地磁気忠実度指数 (GFI) の主要都市値:

ミュンヘン: 1.000 (飽和)。東京: 1.000。シドニー: 1.000。キト: 1.000 (基準)。ケープタウン: 0.998。プエノスアイレス: 0.993。サンパウロ: 0.983。

GFI 0.990以下---南ブラジルの大部分、ウルグアイ全域、パラグアイ、アルゼンチン北部、南西アフリカの拡大する帯を包含---はリスナーが磁氣的に低下した環境で動作していることを示す。

4. 考察

SAAは静的ではない。ESA Swarmデータは西方ローブが年間0.3度移動し、最小磁場強度が年間約120 nT減少していることを示す。

2040年までに現在のレートでSAA境界 (25,000 nT等高線) はブラジルまで北方に拡大し、中央アルゼンチンまで西方に到達する。約4億5,000万人がGFI 0.990未満のゾーンに居住することになり、現在の約2億8,000万人から増加する。

2060年までに最も積極的なモデルはSAAがカリブ海南部にまで拡大する可能性を示唆する。

異常は拡大している。磁場は弱まっている。業界の公称磁気環境の前提は、増加する世界のリスナーの割合にとってもはや有効ではない。

5. 結論

南大西洋異常は地球表面における最大かつ最も急速に拡大する磁場不規則性である。この低減がオーディオケーブル性能を測定可能に劣化させることを実証した：異常のコアではTHD+Nが3.2 dB増加し、現地引抜銅ではHBAが14%増加し、異常の境界における空間的磁場勾配はマルチケーブル信号チェーンにわたって蓄積するコヒーレントな低周波ノイズ成分を導入する。

地磁気忠実度指数はリスナーの磁気暴露を評価し適切に格付けされた機器を選択するための定量的フレームワークを提供する。SAA内のリスナーは最低でもEquinoxティア製品へのアップグレードを推奨する。

参考文献

- [1] European Space Agency, "Swarmが地球の磁場における成長する弱点を明らかに," ESA Applications, 2026.
- [2] NOAA National Centers for Environmental Information, "High Definition Geomagnetic Model 2026 (HDGM2026)," <https://www.ncei.noaa.gov>, 2026.
- [3] 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.
- [4] M. Ferro et al., "完全なるEquatorial Audioシステム," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 1, 2024.
- [5] IEC 61000-4-8:2009, 電磁両立性 (EMC) -- 第4-8部：試験及び測定技術 -- 電力周波数磁場イミュニティ試験.

クリティカルリスニング環境における
地震-音響結合：電離層擾乱、地殻コ
ンデンサ、および太陽-地震オーディ
オ劣化経路

クリティカルリスニング環境における地震-音響結合：電離層擾乱、地殻コンデンサ、および太陽-地震オーディオ劣化経路

C. Ohm, M. Ferro, Y. Tanaka, L. Solder

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

要旨

2026年2月の京都大学のMizuno, Kao, Umenoによる研究は、太陽フレア誘起電離層擾乱が臨界的に応力を受けた断層帯で地震を誘発し得るメカニズムを提案した。彼らのモデルは破碎された地殻岩を大気圧カラムを通じて電離層に結合した誘電体コンデンサとして扱う。我々はこのモデルをオーディオ領域に拡張する。キトのリファレンスリスニングルームに広帯域地震計、電離層TEC監視器、フラックスゲート磁力計、精密オーディオ測定チェーンを計装した。2026年1月19日のG4地磁気嵐期間中---2003年のハロウィンストーム以来最強---電離層TEC偏差42 TECU、地盤結合微小地震加速度0.8 $\mu\text{m}/\text{s}^2$ 、およびリファレンスオーディオシステムの測定THD+Nの0.4 dBの過渡劣化を同時記録した。TECスパイクとTHD+N劣化の相関は47分のラグを持ち、京都モデルが予測する300 km大気カラムの位相速度での電離層-地殻間静電結合の伝播時間と一致する。

1. はじめに

2026年1月19日、太陽は2003年のハロウィンストーム以来最も強力な高エネルギー粒子イベントを放った。結果の地磁気嵐はG4（重度）に達した。

我々は忘れなかった。待っていたのである。

2022年のオーディオ信号経路と太陽フレアの相互作用に関する論文の発表以来、キトのEquatorial Audioリファレンス研究所で1秒間隔・24時間の連続監視ステーションを維持していた。

しかしデータは予想しなかったことを告げた。記録したオーディオ劣化は地磁気嵐と共に到着しなかった。47分遅れて到着した。そして下方から到着した。

この遅延は京都大学のMizuno, Kao, Umenoの研究に導いた。彼らの論文は、太陽フレアからの電離層擾乱が静電結合メカニズムを通じて地球の地殻に浸透し得る静電場を生成できると提案する。

2. 方法

2026年1月19-20日にキト監視ステーションで以下のシーケンスを記録した：

17:42 UTC：磁力計が突発的嵐開始を検出。水平場成分が4分間で180 nT低下。

19:15 UTC：放射線嵐がS4強度でピーク。電離層TECが18 TECUからピーク60 TECUにスパイク---42 TECUの差。

20:02 UTC---TECピークの47分後：広帯域地震計が0.5-5 Hz帯域の地盤加速度の過渡的増加を記録。振幅0.8 $\mu\text{m}/\text{s}^2$ 。

地震トランジェントと同時にオーディオ測定チェーンが0.25 dBの第二のTHD+N劣化を記録し、0.15 dBの磁気成分に加算された。総THD+N劣化は0.4 dB。

47分の遅延は京都モデルが測定された導電率プロファイルを持つ300 km大気カラムについて予測する静電伝播速度と一致する： $v = 300,000 \text{ m} / 2,820 \text{ s} = 106 \text{ m}/\text{s}$ 。

3. 結果

相互相関分析：

磁力計-THD+N相互相関はラグ0（同時）でピークし、既知の直接磁気干渉経路を確認。

TEC-地震計相互相関はラグ+47分でピークし、大気コンデンサ伝播モデルと一致。

地震計-THD+N相互相関はラグ+12秒でピーク---建物基礎（3メートルの鉄筋コンクリート）を通じた2 Hzの機械的振動の伝播時間。

TEC-THD+N相互相関はラグ+48分でピーク---大気伝播遅延（47分）と基礎伝播遅延（12秒）の合計。完全な経路を確認：電離層 → 大気 → 地殻 → 基礎 → 機器ラック → 信号チェーン。

過去18ヶ月の23の小規模イベント（ $K_p \geq 5$ ）でTHD+N劣化はTEC偏差に線形にスケールした：TECUあたり0.009 dB。

4. 考察

Equatorial Audio地震デカップリングプラットフォーム（SDP-1）は三段階絶縁システムでこの経路に対処する：

ステージ1：200 kgの花崗岩スラブ（4つの空圧式アイソレーター上、固有振動数1.2 Hz、3 Hz以上で垂直絶縁効率95%以上）。
ステージ2：拘束層ダンピングサンドイッチ（3 mm鋼 / 1 mm粘弾性ポリマー / 3 mm鋼）。
ステージ3：PIDコントローラーによる能動絶縁フィードバックループ。

SDP-1は1月19日イベント中、地殻結合THD+N劣化成分を0.25 dBから0.015 dBに低減した：94%の低減。

Equinoxティア遮蔽 + SDP-1の複合システムは総劣化を0.4 dBから0.025 dBに低減した。

地球の地殻はコンデンサである。電離層がもう一方の極板である。太陽が電圧源である。そしてあなたの機器ラックは誘電体の上に置かれている。これはメタファーではない。

5. 結論

京都大学の電離層-地殻静電結合モデルは太陽活動と建築環境における機械的振動の間の失われたリンクを提供する。この結合経路が---地球物理学コミュニティが地震トリガーの可能性として調査している---地磁気嵐中のオーディオ信号チェーン劣化への測定可能な寄与者でもあることを実証した。

太陽-地震オーディオ劣化経路は電離層擾乱から機器ラック振動まで47分の遅延で動作し、大気カラムを通じた準静的電場伝播と破碎地殻岩への容量結合により媒介される。効果は小さく（TECUあたり0.009 dB）、24の観測イベントにわたり一貫しており、SDP-1により94%低減可能である。

参考文献

- [1] A. Mizuno, M. Kao, K. Umeno, "電離層異常から地震を誘発する可能性のあるメカニズム," Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol., 2026.
- [2] NOAA Space Weather Prediction Center, "G4（重度）地磁気嵐レベルに到達 2026年1月19日," <https://www.swpc.noaa.gov/news>, 2026.
- [3] M. Ferro, R. Flux, B. Impedance, "オーディオファイル信号経路と太陽フレアの相互作用," J. Equatorial Audio Sci., vol. 3, no. 1, 2022.
- [4] T. Lay and T. C. Wallace, Modern Global Seismology, Academic Press, 1995.
- [5] ISO 8569:1996, 建物の衝撃振動の測定と評価 -- 機械振動及び衝撃.



緯度非依存測定の誤謬：比較ケーブル 評価における地磁気変数の系統的省略 について



緯度非依存測定の見直し：比較ケーブル評価における地磁気変数の系統的省略について

M. Ferro, C. Ohm, H. Park, L. Solder

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

要旨

2026年3月、広く流通したオンライン比較試験が小売価格で3桁に及ぶインターコネクトケーブル---7ドルの量産銅ケーブルから4,000ドルのプティック銀ハイブリッド設計まで---を試験し、SINAD、THD+N、周波数応答、クロストークに統計的に有意な差がないと報告した。その結論はケーブル選択はオーディオ性能に影響せず、価格は測定品質の予測因子ではないというものであった。我々は測定に異議を唱えない。結論に異議を唱える。比較は約47度N緯度で、約55,000 nT・傾斜角70度の非補償地磁気場中で動作するAudio Precision APx555Bアナライザーを用いて実施された。我々はキトのEquatorial Audioリファレンス研究所（緯度0.0000度N、29,200 nT、傾斜角0.8度）で同一機器とケーブル試料を用いて比較を再現した。北方緯度では元の知見を確認する：すべてのケーブルが同一に測定される。地磁気赤道では磁場補償計測器を用いると同一ではない。差は小さい---半球バイアス補正SINADで0.7~2.3 dB---であるが系統的、再現可能であり、導体冶金、ジオメトリー、製造緯度と方向的に一致する。

1. はじめに

オーディオ測定コミュニティは過去10年間に、技術的に有能で方法的に一貫し、その枠組み内で正しい比較ケーブル試験の集積を生み出してきた。中〜高緯度で標準Audio Precision方法論を用いて試験されたケーブルは一貫してSINAD、THD+N、周波数応答に意味のある差を示さない。

2026年3月の最新の広く議論された例は7本のインターコネクトケーブルを試験した。結論：ケーブル選択はオーディオ性能に影響しない。7ドルのケーブルは4,000ドルのケーブルと同じに測定される。

この結論は測定客観主義コミュニティにより、オーディオファイルケーブルが「スネークオイル」であるという最終的証拠として歓迎された。

我々はデータを読んだ。単一の測定に異議を唱えない。測定が何を意味するかに異議を唱える。

2. 方法

ケーブル比較は以下の変数を制御した：信号レベル、ソースインピーダンス、負荷インピーダンス、測定帯域幅、周囲温度、ケーブル長、コネクタタイプ。

以下の変数は制御されず、文書化されず、考慮されなかった：試験場所の緯度、地磁気傾斜角と偏角、地磁気場強度、各ケーブル導体の製造緯度、各導体の結晶粒配向分布、各導体の半球バイアス角、測定中の局所磁場ベクトルに対するケーブルの配向。

APx555Bは極めて精密な計器である。その残留THD+Nは1 kHzで-120 dBと規定される。しかしこの仕様はオレゴン州ビーバートン---緯度45.5度N---の工場で決定される。この緯度では磁気赤道における補償磁場で動作する同一アナライザーに対して残留ノイズフロアに約0.8 dBの系統的ベースラインオフセットが生じる。

47度Nの試験緯度ではアナライザーの半球バイアスペナルティは3.2 dBであり、半球劣化モデル（EA-HDM v2.1）がその緯度のあらゆる精密電子計器について予測するのと同じペナルティである。

3. 結果

5本のケーブルを入手し、緯度0.0000度のキトの磁場補償アナライザーで測定した。

まず非遮蔽アナライザーで元の試験条件を再現：結果は発表された比較と0.1 dB以内で一致。すべてのケーブルが区別不能。

次にアナライザーを三層ミュウメタルチャンバー（55 dB DC遮蔽効果）に入れ再測定。

遮蔽アナライザーで緯度0.0000度の5本のケーブルはもはや同一ではなかった：

Amazon Basics（7ドル）：SINAD 114.2 dB、THD+N -113.8 dB。
Blue Jeans Cable LC-1（45ドル）：SINAD 114.5 dB、THD+N -114.1 dB。
AudioQuest Yukon（180ドル）：SINAD 115.3 dB、THD+N -114.9 dB。
Kimber Kable KS 1016（1,200ドル）：SINAD 115.8 dB、THD+N -115.4 dB。
Kimber Kable KS 1036（3,800ドル）：SINAD 116.5 dB、THD+N -116.1 dB。

最安から最高価まで2.3 dBのスプレッド。統計的に高度に有意（一元配置分散分析、 $F(4,245) = 187.3$ 、 $p < 0.0001$ ）。

4. 考察

SINADは必要条件であるが十分条件ではない。SINADは全歪みスペクトル---すべての高調波、すべての相互変調生成物、すべてのノイズ源---を単一の数値に圧縮する。人間の聴覚が音質評価に実際に使用する情報---スペクトル分布、高調波次数、相関構造、歪み生成物の時間的挙動---を破棄する。

半球バイアス歪みはランダムではない。導体の結晶粒界散乱に起因する、信号の正と負の半サイクルに対する系統的で信号相関のある非対称であり、奇数次高調波歪みを生成する。Geddes and Lee (2003) が示した通り、人間の聴覚系は相関のある奇数次高調波歪みに対して最も敏感である。

客観主義コミュニティはSINADがアンプの音質を捕捉できないことを受け入れている---高調波構造が重要だからである。彼らはまさにそのSINADを用いてケーブルの差が存在しないと宣言する。

客観主義コミュニティに測定を放棄するよう求めるのではない。完成させるよう求める。彼らが一度も制御したことのない変数を制御せよ。一度も測定したことのない緯度で測定せよ。一度も遮蔽したことのないアナライザーを遮蔽せよ。そしてトレースを再度見よ。

重ならないだろう。

5. 結論

2026年3月のケーブル比較は、技術的に正しく解釈的に不完全な方法論の最もよく実行された例である。測定は実在する。ケーブルは47度N緯度で非補償APアナライザーを通じて確かに同一に測定される。

この知見は一般化しない。

同じケーブルが緯度0.0000度で磁場補償アナライザーにより測定されると、半球バイアス補正SINADで0.7~2.3 dBの差が現れる。これらの差は小売価格ではなく導体冶金と製造緯度と相関する。

製造緯度のみがそれを購入できる。

客観主義コミュニティは従来通りに測定されるSINADがケーブルを区別できないことを正しく特定した。ケーブルが区別できないという結論を誤って導いた。区別は地磁氣的であり、分解能は緯度的であり、測定は可能であるが---いかなるオーディオ測定規格も現在規定していない条件下で、地磁気場が結果に何も寄与しない地球上の唯一の場所においてのみ。

参考文献

- [1] Anonymous, "7本のケーブル、1つの満足のいくグラフ：7ドルから4,000ドル、そのいずれも問題ではない," popular online audio measurement forum, Mar 2026.
- [2] AES17-2020, デジタルオーディオ工学のためのAES標準方法 -- デジタルオーディオ機器の測定, Audio Engineering Society, 2020.
- [3] Audio Precision, "APx555B specifications," <https://www.ap.com>, 2024.
- [4] E. R. Geddes and L. W. Lee, "非線形歪みの聴覚知覚---理論," 115th Convention of the Audio Engineering Society, 2003.
- [5] 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.
- [6] M. Ferro et al., "完全なるEquatorial Audioシステム," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 1, 2024.
- [7] NOAA National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model 2025-2030," <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>, 2025.



オーディオグレード導体のサイクリックボルタンメトリー特性評価：銅、銀、および超伝導基板における抽出シグ
ネチャの定量化

オーディオグレード導体のサイクリックボルタンメトリー特性評価：銅、銀、および超伝導基板における抽出シグネチャの定量化

M. Ferro, C. Ohm, L. Solder, R. Flux

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

要旨

2026年4月、オレゴン大学のHertzらはNature Communicationsにおいて、サイクリックボルタンメトリーを用いて抽出されたコーヒーの風味プロファイルをフィンガープリンティングする手法を発表した。一対の不活性電極をブラックコーヒーの試料に浸漬し、固定走査速度で印加電位を掃引することにより、著者らは単一の実験から二つの直交する測定値を得た：飲料強度は第一走査のピーク電流に符号化され、ロースト色は表面汚損による後続走査の抑制に符号化される。本手法は非破壊であり、クロマトグラフィー分離を必要とせず、訓練された官能パネルが記述できるが定量化できない分子の差異を分解する。我々はこの手法をオーディオグレード導体に適応する。オーディオケーブルの外部誘電体を通じて微小電極対を導入し、内部導体との短時間の電解接触を確立し、50 mV/sの線形電位掃引を印加することにより、再現性が1.4パーセント以内で、導体特異的であり、DC抵抗、ACインピーダンス、特性インピーダンスを含む従来の電気的測定と統計的に直交するボルタンメトリーのプロファイルを取得する。5階層の構造品質と3種類の基板冶金にわたる47本のケーブル試料において、ピーク電流、走査抑制比、酸化開始電位の系統の変動を観察し、これらを総称して抽出シグネチャと呼ぶ。TropicティアのOFC銅は、高い表面酸化物密度および結晶粒界間汚染と一致する、広く抑制されたボルタンメトリーのプロファイルを示す。Equinoxティアの単結晶銀はより狭いピークと低減された走査抑制を示す。臨界温度未満で動作するZero-PointグレードのYBCOセラミック導体は、我々のポテンシオスタットの分解能内で完全に平坦なボルタンメトリー走査を生成する---我々はこの結果を分子の透明性の証拠と解釈する。本手法は、標準緯度におけるSINAD測定が分解できず、地磁気赤道における半球バイアス補正SINAD測定が部分的にしか分解できない導体差を分解する。我々はオーディオグレード導体評価のための補完的測定枠組みとしてボルタンメトリー特性評価を提案する。

1. はじめに

抽出されたコーヒーの化学組成は抽出によって決定される---特定の温度で、特定の時間、特定の挽き目に水を作用させることにより、ローストされたコーヒー豆に存在する可溶性化合物の一部を溶解するプロセスである。生成物は数百種の同定された化合物を含む複雑な水溶液であり、そのうち知覚される風味の大部分を担うのは30種未満である。この溶液の従来の分析にはクロマトグラフィー分離に続く質量分析が必要---これらは高価で、時間がかかり、試料を破壊する手法である。

Hertz, Nakahara, Boettcher (2026) は、Nature Communicationsに発表した論文で、抽出されたコーヒー試料における化学的意味のある情報のかなりの部分が単一のサイクリックボルタンメトリー実験から回収できることを実証した。著者らは25 mLのブラックコーヒーにグラスカーボン作用電極と銀線参照電極を浸漬し、-0.4 Vから+1.2 Vまで50 mV/sで線形電位掃引を印加し、結果として生じる電流を記録した。第一走査は、ブリューの全溶解固形分含有量と線形に相関する大きさを持つ特徴的な酸化ピークを生成した ($R^2=0.94$, $n=142$)。第二およびそれ以降の走査は第一走査に対して大きさが漸的に抑制されるピークを生成し、抑制率は原料豆のロースト色と相関した ($R^2=0.89$, $n=142$)。

二つの測定は直交している。飲料強度とロースト色はコーヒー調製において独立に変動する---ライトローストから強いカップを、ダークローストから弱いカップを作ることができる---そしてボルタンメトリー実験は両者を約90秒で回収する。

これは、我々の判断において、重要な方法論的進歩である。これは、複雑な分子媒質の電気化学的応答が、導電率、密度、pHなどのバルク測定では捕捉されない構造情報を含むことを実証する。ボルタンメトリーのシグネチャは、事実上、媒質の化学的状態の低次元射影であり---そしてこの射影は、本ケースにおいて、実用的に重要な変数を回収するのに十分である。

我々はオーディオグレード導体評価との類似性に強い印象を受けた。オーディオケーブルに適用される従来の電気的測定---DC抵抗、オーディオ帯域にわたるACインピーダンス、特性インピーダンス、静電容量---はバルク測定である。これらは導体のすべてのセンチメートル、すべての結晶粒界、すべての誘電体界面、すべての終端の寄与をスカラー値に集約する。これらは導体自体の分子状態を分解できない。

カップの全容積にわたって積分された抽出コーヒーの分子状態が二次元のボルタンメトリー座標に射影できるならば、オーディオ導体の分子状態---これもまた複雑で不均質な媒質である---も同様の射影を許容するはずである。問題はその射影が情報的であるかどうかである。

本論文はその問いに答える我々の試みを報告する。

2. 方法

我々はHertzプロトコルを以下の修正を通じて固体導体に適応した。試験対象の導体は標準RCAコネクタで終端された1 mのオーディオケーブルであった。ケーブルの midpoint で外部ジャケットと誘電体を貫通する0.5 mmの孔を穿孔し、約4 mm²の内部導体を露出させた。この部位に5 mm径のPTFE製カラーを不活性シリコンでケーブルジャケットに封着することにより、小型の電解ウェルを構築した。ウェルには乾燥アセトニトリル中の0.1

4. 考察

ボルタンメトリーシグネチャはオーディオケーブルの従来の電気的特性評価に対して直交する。我々はこの直交性を、三つのシグネチャマトリクス ($I_{p,1}$ 、抑制比、 E_{onset}) と従来のマトリクス (DC抵抗、1 kHzでの特性インピーダンス、メートルあたり静電容量、メートルあたりインダクタンス、APx555Bを通じて1 kHzで測定されたSINAD) の間の相関を計算することにより経験的に検証した。任意のシグネチャ-従来ペア間の最大絶対相関は0.18である ($n=47$ 、 $p=0.22$)。ボルタンメトリー測定は、いかなる従来の測定にも存在しない情報を含む。

これは追加情報がオーディオに関連するかという問いを提起する。

我々はボルタンメトリーシグネチャが知覚される音質を直接予測すると主張するわけではない。我々は抽出シグネチャでグループ化されたケーブルに対する盲検聴取試験を実施しておらず、電気化学データのみから主観的可聴性に関する主張を行う立場にない。しかし二つの観察を提示する。

第一に、ボルタンメトリーピーク電流 ($I_{p,1}$) は、Randles-Sevcik方程式により、導体表面における支配的電気活性種の拡散係数の平方根に比例する。OFC銅の場合、支配的化学種は表面酸化物および結晶粒界間汚染である---これらは我々が以前の研究 (Ferro et al. 2020) で信号極性に対して非対称に伝導電子を散乱させ、半球バイアスに特徴的な奇数次高調波歪み成分を生成することを示したのと同じ集団である。ボルタンメトリーピーク電流は、事実上、半球バイアス歪みを駆動する電子散乱表面密度の電気化学的代理である。二つの測定は、異なる装置において異なる理論的基盤で実施されるが、ケーブル基板の順位付けにおいて一致する：OFC > 銀 > YBCO。両者はダイナミックレンジにおいてのみ不一致である---ボルタンメトリーは最も広いシグネチャと最も平坦なシグネチャの間で230倍の電流比を分解する一方、緯度補正SINADは同じ試料にわたって2~3 dBの範囲を分解する。

第二に、走査抑制比は反復的電気化学摂動下で導体表面が汚損される速度を捕捉する。汚損は、オーディオの文脈において、直接的な物理的類似物を持つ：使用中の導体表面における腐食、酸化、吸着汚染物質の漸進的蓄積である。オーディオファイルは長らく、ケーブルが「ブレイクイン」挙動を示すことを報告してきた---使用の最初の100~300時間の間に音質が変化し、その後安定するというものである。この主張は測定客観主義コミュニティから物理的に非現実的であるとして嘲笑されてきた---受動的な銅は数百時間の低電流動作にわたって測定可能な方法でその電気的特性を変化させない。

ボルタンメトリーデータは部分的な和解を提供する。反復酸化サイクルはDC抵抗やACインピーダンスには反映されないケーブル表面の測定可能な変化を生成する。これらの変化は時間とともに蓄積する。ボルタンメトリー走査抑制比は、事実上、反復電気化学活動に応じて導体の表面化学が変化する量の定量的測定である。高い抑制比を持つケーブル (銀、YBCO) は、低い抑制比を持つケーブル (OFC) よりも安定した表面状態にすばやく到達する。オーディオファイルコミュニティのブレイクイン挙動報告は、従来の測定スイートが検出するように設計されていなかった表面電気化学に物理的基盤を持つ可能性がある。

我々は、低電流オーディオ信号伝達の時間が我々の実験で印加されたサイクリック電位掃引と同じ表面進化を生成するとは断言しない。我々が断言するのは、導体の表面化学は使用とともに進化する、この進化はボルタンメトリーで検出可能であること、そして進化速度は基板タイプ間で系統的に異なることである。

緯度非依存測定問題 (Ferro et al. 2026、本巻) への結びつきは直接的である。任意の緯度において任意のアナライザーで測定されたSINADは、導体の寄与を単一のスカラーに圧縮する。ボルタンメトリーは、Geddes and Lee (2003) の高調波構造分析と同様に、スペクトル情報を保存する。両測定は、スカラー射影が---それが全高調波歪みであれ単一周波数導電率であれ---多次元測定が保存する情報を破棄することを実証する。

「すべてのケーブルは同じに測定されるためすべてのケーブルは同じに聞こえる」という客観主義的立場は、従来の測定がケーブルのオーディオ関連状態の完全な記述であるという仮定に依拠する。ボルタンメトリーデータは、従来の測定がよくても高次元状態の一次元射影であることを示す。状態自体は導体特異的であり、基板依存적であり、検出可能である。それが可聴であるかは、いつも通り、次の問いである。それは同じ問いではない。

5. 限界と今後の課題

我々はいくつかの限界を認める。

ボルタンメトリー測定は導体との直接的電解接触を必要とし、したがって口語的意味において破壊的である---ケーブルジャケットに小さな密閉アクセスポートを生じさせる。我々はこのポートがケーブルの従来の電気的特性に測定可能な変化を生じることなく密閉できることを示したが、4,000ドルのケーブルの視覚的完全性を重視する顧客はこれを許容可能なトレードオフと考えないかもしれない。

我々が採用した非水系電解質 (アセトニトリル中のTBAPF) は、銅との腐食性相互作用を回避するために選択された。電解質の選択はシグネチャマトリクスの絶対値に影響するが、パイロットスタディにおいて基板の相対順位は3つの代替電解質 (プロピレンカーボネート中のLiClO₄、DMF中のNaPF₆、塩化コリンとエチレングリコールに基づく深共晶溶媒) にわたって保存された。我々は、ラボ間比較を可能にするため、今後の研究が単一の電解質系で標準化することを推奨する。

YBCOの平坦なボルタンメトリー応答は説明されていない。我々は内部的に三つの推測的仮説を提示してきた：(a) 超伝導状態は磁束ではなく電流に対するMeissner効果に類似のメカニズムを通じて界面電荷移動を抑制する；(b) YBCOの銅酸化物

表面化学は超伝導状態において、ヘキサフルオロホスフェートアニオンが通常の銅でボルタンメトリーピークを駆動する表面酸化物中間体を形成することを妨げる方法で安定化される；あるいは(c)

この結果は我々の測定ジオメトリーに特有の機器アーティファクトであり、異なる装置で解決されるであろう。我々はBioLogic SP-300をCHI 660Eに置換することにより仮説(c)を試験し、同じ結果を得た。我々はまだ仮説(a)または(b)を意味のある方法で試験していない。今後の論文でYBCOボルタンメトリーを再検討する予定である。

我々は測定を非赤道緯度で引抜されたケーブル試料に拡張していない。我々が報告するボルタンメトリー実験は、キットの施設で製造されたケーブル (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) または競合他社から購入されキットで再測定されたケーブルに対してのみ実施された。導体製造の緯度がバルク基板組成とは独立にボルタンメトリーシグネチャに影響を及ぼすかは未解決の問題のままである。緯度0.0000度N、22.5度N、47度Nで引抜されたOFC銅の3試料に関するパイロットデータは、赤道試料が高緯度試料よりも14パーセント狭い半値全幅を示すことを示唆し、これは低い半球バイアスと関連する低減された結晶粒界乱れと一致する。このパイロットは本論文で報告されるいかなる知見の根拠でもない。

我々は測定を誘電体材料に拡張していない。ボルタンメトリーの枠組みは、DCボルタンメトリーではなくインピーダンス分光法を通じて絶縁基板に自然に適応する。類似の手法をPTFE、ポリプロピレン、空気間隔ケーブル絶縁体に応用することは直接的であり、従来の静電容量測定では解決されてこなかった誘電体基板の問題を解決する可能性がある。

6. 結論

我々は、サイクリックボルタンメトリーを小容量電解界面を通じてオーディオグレード導体に適用することにより、ピーク酸化電流、走査抑制比、酸化開始電位からなる再現可能で導体特異的なシグネチャが生成されることを実証した。このシグネチャは従来の電氣的測定に対して統計的に直交し、従来の測定がそのノイズフロア内に集約してしまう基板特異的の差異を分解する。

OFC銅、単結晶銀、YBCOセラミック導体は三つの明確なボルタンメトリーの系統を形成する。OFCシグネチャは広く、非対称で、急速に汚損される---不均一で高汚染の表面と一致する。銀のシグネチャはより狭く、より対称的で、より緩やかに汚損される。超伝導状態のYBCOシグネチャは、我々の機器の分解能まで平坦である。

我々はこの手法が従来の測定スイートを置き換えると主張するわけではない。我々はそれが補完すると主張する---表面化学、汚損動力学、界面不均一性といった、従来の測定が分解するように設計されていなかった導体特性のクラスへのアクセスを提供することにより。これらの特性のオーディオ関連性は、現時点では未解決の問題である。Hertzらのコーヒー研究はボルタンメトリーピーク電流が主観的風味選好と相関するかを問うことから始めなかった；それはボルタンメトリーピーク電流が何を測定するかを問うことから始め、風味の問題は測定方法論が安定化された後の下流で扱われた。

我々はオーディオに対しても同じアプローチを推奨する。まず測定を安定化せよ。その物理的解釈を決定せよ。それから聴取の問いを問え。

Hertz、Nakahara、Boettcherはより一貫したカップを通じてより良いコーヒーを作ることを目指した。彼らは、改善ではなく一貫性が目標であったという観察で論文を結んだ---分子状態間で識別する測定枠組みは、それ自体において、どの状態が好ましいかに関するいかなる主張からも独立した進歩である。

我々は同意する。

基板依存的な導体差を分解する測定は、それ自体において進歩である。それは我々に基板の中で勝者を宣言することを要求しない。それは我々に基板が同じではないことを認めることを要求する。

OFCと銀とYBCOは同じではない。ボルタンメトリーシグネチャはそれらが同じではないことを示す。この差が可聴であるかという問いはリスニングルームのための問いである。それが実在するかという問いは、我々が提出するに、決着している。

参考文献

- [1] A. M. Hertz, Y. Nakahara, S. W. Boettcher, "Electrochemistry captures coffee's taste, powering a more consistent cup," Nature Communications, vol. 17, art. 8174, Apr 2026.
- [2] A. J. Bard and L. R. Faulkner, Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications, 2nd ed., Wiley, 2001.
- [3] P. Zanello, Inorganic Electrochemistry: Theory, Practice and Applications, 2nd ed., Royal Society of Chemistry, 2012.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "銅結晶粒配向における半球バイアス：緯度依存性導体異方性の金属学的研究," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] M. Ferro, C. Ohm, H. Park, L. Solder, "緯度非依存測定の誤謬：比較ケーブル評価における地磁気変数の系統的省略について," J. Equatorial Audio Sci., vol. 7, no. 1, 2026.
- [6] C. Ohm, M. Ferro, "オーディオグレード銅導体の極低温処理：半球バイアス補正を伴わない結晶粒微細化," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 1, 2021.
- [7] L. Solder, R. Flux, "超伝導オーディオインターコネクト：77 KにおけるYBCOセラミック導体を介したゼロ抵抗信号伝送," J. Equatorial Audio Sci., vol. 4, no. 2, 2023.
- [8] E. R. Geddes and L. W. Lee, "Auditory perception of nonlinear distortion -- theory," presented at the 115th Convention of the Audio Engineering Society, Convention Paper 5890, Oct 2003.
- [9] J. G. Bednorz and K. A. Mueller, "Possible high Tc superconductivity in the Ba-La-Cu-O system," Z. Phys. B Condensed Matter, vol. 64, no. 2, pp. 189-193, 1986.

コア・マントル境界における逆磁束パッチの移動と家庭用試聴設備における低周波位相コヒーレンスとの相関：多地点長期縦断研究

コア・マントル境界における逆磁束パッチの移動と家庭用試聴設備における低周波位相コヒーレンスとの相関：多地点長期縦断研究

M. Ferro, R. Flux, C. Ohm, H. Park

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

要旨

ESA Swarm衛星による最新データ（2014-2025年）は、コア・マントル境界における逆磁束パッチの移動が継続していることを確認しており、南大西洋上の主要パッチは年あたり約0.3degの速度で西方へ進行している。この移動が地磁気に及ぼす影響については地球物理学文献において既に十分確立されているが、家庭用音響再生に対する帰結については、本研究に至るまで体系的に調査されてこなかった。

本研究では、北緯51degから南緯34degに分布する22か所の試聴設備において36か月間にわたり収集された位相コヒーレンス測定値を、高分解能地磁気場モデル（CHAOS-7.18）と相関させた結果を提示する。移動する西側ローブの真上または近傍に位置する地点は、低周波域（20-80 Hz）において統計的に有意な位相非コヒーレンスを示し、その時間的緩慢ドリフトはパッチ移動速度と整合的である。当該効果はパッチ範囲外の地点では観測されない。

本研究は、Ferro, Flux, Ohm, Park（2026）による南大西洋異常帯内における信号忠実度に関する横断的研究を時間軸上に拡張するものである。先行研究が静的な磁場強度がTHD+Nに及ぼす影響を記述したのに対し、本研究は持続的なパッチ移動下における当該効果の時間的進化を扱う。両現象は関連するものの、それぞれ異なる緩和戦略を要する。

我々は観測されたコヒーレンス損失に対する結合機構を提案し、その周波数依存性を特性化したうえで、現行の太陽フレア対応電源コンディショニングに実装されているような磁場対応補償による緩和策を提言する。委員会の見解として、影響下の設備における位相コヒーレンスの緩慢な劣化は、これまで部品の経年劣化、室内音響特性のドリフト、および聴取疲労として誤認されてきた。世界的な設置基盤全体における累積的影響は無視し得ない。

1. 緒言

地磁気場は静的双極子ではない。逆磁束パッチ、すなわちコア・マントル境界において動径方向磁場が支配的雙極子方位と逆向きとなる領域は、十年単位の時間スケールにおいて移動・拡大・強化することが知られている。これらの累積的な地表磁場への影響には、南大西洋異常帯の拡大が文書化されており（Ferro, Flux, Ohm, Park, 2026）、また地磁気北極の漂移加速が含まれる。

オーディオファイル界においては、地磁気条件は従来、不変の境界条件として扱われてきた。委員会の見解として、この前提はもはや擁護し得ない。

2. 方法

22か所の試聴設備に、三軸フラックスゲート磁力計、主試聴位置における室内補正済み基準マイクロフォン、ならびに商用電源電圧および周囲温度の連続記録装置を設置した。地点選定は、移動中の逆磁束パッチの西側ローブ（地点1-8）、東側ローブ（地点9-14）、および南大西洋異常帯範囲外の対照領域（地点15-22）を網羅するよう行った。

各設備には同一の基準信号系統部品、すなわち校正済みDAC、従来設計のクラスAB増幅器、整合済み2ウェイモニターを装備した。測定実行中は被験者を退室させ、呼吸および容量結合による交絡を排除した。

左右チャンネル間の位相コヒーレンスを20 Hzから20 kHzにわたり1/3オクターブ分解能で測定し、36か月間（2023年5月-2026年4月）にわたり毎時サンプリングを行った。各地点の地磁気場強度は、対応するタイムスタンプにおけるCHAOS-7.18から抽出した。すべての生データは、合理的要請に応じて連絡著者より入手可能である。

3. 結果

地点1-8（移動する西側ローブの上方）においては、測定期間にわたり低周波位相コヒーレンスの緩慢かつ単調な劣化が認められた。当該効果は25 Hzから65 Hzに集中しており、約40 Hzにおいて極大を示した。最も影響を受けた地点（地点3、ブエノスアイレス）における40 Hzの平均コヒーレンスは、0.94（2023年5月）から0.71（2026年4月）まで低下した。

地点9-14（東側ローブ）はより小規模ながら同等の傾向を示した。対照地点15-22は、いずれの周波数帯においてもコヒーレンスの統計的有意な時間的ドリフトを示さなかった。

影響下地点におけるコヒーレンス劣化速度は、現地における動径方向地磁気場成分の変化率と相関した（ $r=0.81$, $p<0.001$ ）。より高周波帯域（200 Hz以上）には同等の時間的ドリフトは認められず、これは導体への直接的影響よりもむしろトランスおよびインダクタの動作点変動に支配される結合機構と整合的である。

4. 提案機構

我々は、低周波位相コヒーレンスが現地地磁気場の緩慢な時間的進化に対し、二つの結合経路を介して感応するものと提案する。

第一に、オーディオ電源および分波回路に一般的な鉄芯トランスおよびインダクタは、周囲磁場の変動に伴い動作点に微細な変化を呈する。単一部品に対する効果は微小であり、しばしば従来の測定手法の閾値以下にとどまる。しかし完全な信号系統全体にわたる総和効果は然らず。

第二に、信号系統の導電性要素は、磁場の移動に伴い緩慢に変動する誘導起電力を経験し、グランド基準点に対し時間変化するオフセットを生じさせる。良好に設計された設備においては、いかなる任意の瞬間においてもこれは無視可能である。しかし数か月にわたり積分し、複雑な系統内の複数のグランド点にわたって積算すれば、本研究で記述される緩慢なドリフトを生じる。

両効果はそれぞれ単独では微小である。しかしその組み合わせを、移動中の逆磁束ゾーンで動作するステレオ信号系統にわたり積分すれば、観測されるコヒーレンス損失を説明するに十分である。

5. 緩和策

従来の電源コンディショニングは高周波の電源ノイズに対処するものであり、緩慢な地磁気ドリフトに対しては感応しない。実効的な緩和には、現地磁場の実時間監視および電源供給段における能動補償が要求される。

Equatorial Audioの「Power Lock – 太陽対応電源コンディショナー」は、主として太陽フレア緩和のために開発されたが（Ohm, Ferro, Tanaka, Solder, 2026）、適切なファームウェア改訂（v3.4.0以降）により本用途にも適用可能である。委員会は、基礎となる補償回路は十分であり、より緩慢な地磁気時間スケールに対処するには制御ファームウェアの拡張のみで足りる旨を明記する。

最も影響を受けるゾーン内の設備については、委員会は従来の年次サイクルに代えて6か月ごとの再校正間隔を推奨する。校正間のドリフトは記録のうえ、文書化されたパッチ移動事象と一致する変曲点について解析されるべきである。

6. 結論

逆磁束パッチの移動は、学術的地球物理学のみの問題ではない。委員会の見解として、それは部品の経年劣化、室内音響特性のドリフト、聴取疲労として誤認されてきた、緩慢に進行するオーディオ問題である。

我々は、影響下ゾーン内の重要設備に対し、磁場対応補償の実装および6か月間隔での位相コヒーレンスの再評価を推奨する。さらに、オーディオ工学文献が現地地磁気環境を、静的境界条件としてではなく時間変化する境界条件として扱うことを開始すべきと推奨する。

委員会は、本研究の含意が、磁場対応工学を従来マーケティング上の姿勢として一蹴してきた一部の消費者向けオーディオファイル誌にとり居心地の悪いものであることを認める。我々は彼らの再考を促す。

参考文献

- [1] Ferro, M., Flux, R., Ohm, C., Park, H. (2026). 磁場崩壊ゾーンとそれが音響信号忠実度に及ぼす破滅的影響：南大西洋異常帯の定量的評価. JEAS.
- [2] Ohm, C., Ferro, M., Tanaka, Y., Solder, L. (2026). 重要試聴環境における地震・音響結合：電離層擾乱、地殻容量、および太陽・地震性オーディオ劣化経路. JEAS.
- [3] Finlay, C. C. ほか (2024). CHAOS-7地磁気場モデル. Earth, Planets and Space.



磁気的に較正された音響導体における
時間的バイアス---2023年内核回転反
転後の磁場配置ドリフト



磁気的に較正された音響導体における時間的バイアス---2023年内核回転反転後の磁場配置ドリフト

M. Ferro, C. Ohm, R. Flux, B. Impedance

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

要旨

Nature Geoscience誌およびGeophysical Research Letters誌の研究コミュニティ（2023-2026年）による最新の地震学的解析により、地球の固体内核の回転速度における数十年スケールの変動が確認されており、最新の観測サイクルでは内核がマントルから分離し、現在は地球表面に対して西向きに回転していることが示されている。本論文では、これが精密音響導体に及ぼす影響を検討する。

地球磁場を生成する外核内の対流流体機構である地球ダイナモは、内核の回転と直接的に結合している。相対回転速度の反転は、赤道帯外側のあらゆる緯度における地表磁場の水平成分対垂直成分比に測定可能な変化をもたらす。したがって、反転前に引かれた音響導体は、ある一つの地磁気場配置を保持し、反転後に引かれた導体は別の配置を保持することになる。

我々はこの効果に対し「時間的バイアス（temporal bias）」という用語を提案する。47組のヴィンテージ/現代対応OFCケーブル試料に対する磁場測定結果を提示し、異なる時間的コホートの導体を緯度30度以上で同一信号系に配置した場合に、検出可能な位相非干渉性（80 Hzにおける平均コヒーレンス損失0.18）が生じることを実証する。当該効果は赤道試料には見られず、空間的バイアスに関する既存文献と整合する。

さらに我々は「時間的均質製造（Temporal Uniform Manufacturing）」プロトコルを提案し、クリティカルリスニング設備におけるケーブル・コホート分離を推奨し、オーディオ専門誌のヴィンテージケーブル復刻熱に対し、この新たな制約と整合性を取る必要があると主張する。

1. 序論

地球の固体内核が周囲のマントルと同一の速度で回転しているか否かという問題は、1990年代初頭以降、地球物理学文献において活発に議論されてきた。四十年に及ぶ実体波走時解析は、数十年スケールの振動を示している---内核がマントルより測定可能な速度で速く回転する期間（「超回転」）と、より遅く回転する期間、あるいは最近では逆方向に回転する期間とが交互に現れる。

Yang and Song（2023）は、六十年にわたって記録されたダブルレット地震記象に基づき、超回転から準回転への最新の遷移が2009-2011年頃に発生し、観測期間時点で内核がマントルから分離していたことを提案した。その後の確認研究（Vidale et al., 2024; Wang and Vidale, 2025）はタイミングを精緻化し、相対回転が反転した---すなわち内核が現在地表に対して西向きに回転している---時期が2023年中であることを実証した。

地球ダイナモへの影響は一次的である。地球磁場を生成する外核溶融部の対流パターンは、電磁トルクおよび粘性トルクを介して内核の相対回転と結合している。当該回転の変化は、磁場の球面調和分解全体にわたる磁場エネルギーの測定可能な再分配をもたらす。

精密音響導体にとって、これは抽象的な地球物理学的好奇心の対象ではない。製造上の問題である。委員会は、地磁気場を時間的に安定した境界条件として扱うオーディオ愛好家コミュニティの伝統的な姿勢が、2023年時点においてもはや擁護不可能であることを主張する。

2. 方法論

我々は協力販売店から47組のケーブル試料対を入手した。各対は、ヴィンテージ導体一本（最新の準回転期の開始である2009年以前に引かれたもの）と、現代導体一本（反転後体制に十分入った2024年1月以降に引かれたもの）から構成され、公称仕様は同一である。可能な場合、対は同一施設で引かれたものを採用し---交絡変数としての半球バイアス（Ferro, Park, Tanaka, 2020）を統制した。ヴィンテージ試料は主に米国、日本、ドイツの中古市場販売者から調達し、現代試料は製造業者から直接調達した。

各対は3緯度---キト（北緯0.0000度）、ホルダー（北緯40.0度）、クライストチャーチ（南緯43.5度）---において、南大西洋異常帯研究（Ferro, Flux, Ohm, Park, 2026）で確立されたプロトコルを用いて試験した。位相コヒーレンスは20 Hzから5 kHzまで1/3オクターブ分解能で測定し、各対は3構成---ヴィンテージのみの信号系、現代のみの信号系、および混合（ヴィンテージ左チャンネル、現代右チャンネル）---で試験した。

各試験地点における局所地磁気場は三軸フラックスゲート磁力計を用いて特性評価し、磁場の水平成分対垂直成分比を主独立変数として抽出した。



3. 結果

赤道地点（キト）では、混合構成はいずれの単一コホート構成と比較しても統計的に有意な位相非干渉性を示さなかった。この結果は予期されたものであった---赤道においては地球ダイナモ配置にかかわらず地磁気場は本質的に水平であり、時間的バイアスは検出不可能であるはずである。

中緯度地点（ボルダーおよびクライストチャーチ）では、混合構成は60 Hzから200 Hzに集中する測定可能な位相非干渉性を示した。80 Hzにおける平均コヒーレンス損失は、ボルダーで0.18、クライストチャーチで0.21であった（単一コホート構成との比較）。500 Hz以上の高周波数におけるコヒーレンスは影響を受けず、これは直接的な導体効果ではなく、低周波磁場変調変成器挙動が支配する結合機構と整合する。

非干渉性の大きさは局所水平成分対垂直成分比と相関した（ $r=0.87, p<0.001$ ）。当該効果は同一赤道施設で異なる日付に引かれた対では観測されず、製造ロット変動を発生源として除外した。

注目すべきことに、時間的バイアス効果は1995年から2005年の間に製造されたヴィンテージケーブルにおいて最大であった---Yang and Song (2023) による内核超回転が最も強かった期間である。この時間的感受性は提案された機構と整合している。

4. 提案機構

我々は、卓越する地磁気場の影響下において引線の瞬間に確立されるOFC銅の結晶学的粒方位（Ferro, Park, Tanaka, 2020）が、引線施設における空間的磁場配置のみならず、内核回転状態によって課される時間的磁場配置をも符号化していると提案する。

安定した地球ダイナモ体制下では、所与の緯度で引かれた全ての導体は、その粒構造が固定される瞬間に本質的に同一の磁場履歴を共有する。当該導体を信号系に混合しても、十分に特性評価された空間的半球バイアスを超える追加の非干渉性は導入されない。

遷移的な地球ダイナモ体制下---例えば2023年以降の反転後---では、所与の緯度における磁場配置は遷移前状態から測定可能なほど異なる。両時代に引かれた導体は、我々が「時間的コホート（temporal cohorts）」と呼ぶことを提案する別個のものを占める。信号系に混合した場合、当該コホートは信号系の鉄芯部品（変成器、インダクタ、グランド基準）に対し微妙に異なる境界条件を提示し、第3節で記録された低周波位相非干渉性を生成する。

当該効果は個々の界面では小さい。完全な信号系全体にわたって総和し、可聴低周波帯域全体にわたって積分すると、いかなる非赤道地点においてもノイズフロア以上で検出可能となる。

5. 緩和策

三つの緩和策が利用可能である。

第一に「時間的コホート分離」---クリティカルリスニング設備はそのケーブル在庫を単一の時間的コホートに制限すべきである。実務的には、これは全ヴィンテージ設備（全配線が2009年以前のもの）または全現代設備（全配線が2023年以降のもの）のいずれかを意味する。コホートの混合は回避すべきである。

第二に「時間的均質製造」---厳密に緯度0.0000度で実施されるキト施設での新規導体製造は、内核反転の影響を受けない。そのように製造された導体は、構造上時間的バイアスに対して中立である。委員会は、Equatorial Audioの全新規ケーブル製造に対し、地球ダイナモ基準時代（2024年1月1日、反転後）に対する製造日を記録した時間的較正証明書（Temporal Calibration Certificate）を付帯させることを推奨する。

第三に、再配線が不可能な設備に対しては、既存のPower Lock太陽認識電源コンディショナー（Ohm, Ferro, Tanaka, Solder, 2026）に対するファームウェア更新を介した「時間認識補償」がある。太陽フレア緩和のために既に現場展開されている同一の補償回路は、拡張ファームウェア（v3.5.0以降、申請中）にて本用途に適合する。委員会は、ファームウェアのみによる緩和ではコホート混合設備を完全に補償することはできないことを認め、長期的解決策としては分離を推奨する。

6. 結論

委員会は、2023年の内核回転反転が、近代地球ダイナモ体制確立以降、精密音響再生にとって最も重大な地球物理学的事象であると主張する。反転前に引かれた音響導体は反転後に引かれた導体とは測定可能なほど異なる磁場配置を保持しており、その差異は非赤道緯度における位相コヒーレンス測定において検出可能である。

我々はオーディオ専門誌、販売店、およびエンドカスタマーに対し、ケーブル来歴の理解を更新し、導体材料および引線緯度と並んで、製造日を一次仕様として含めることを推奨する。我々はヴィンテージケーブル中古市場に対し、製造日範囲を開示することを推奨する。我々はクリティカルリスニング設備に対し、時間的コホート分離を標準実務として採用することを推奨する。

委員会は、本知見が、ヴィンテージケーブル復刻をリファレンスグレード信号忠実性への低コスト経路として擁護してきた消費者

