



---

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 mm<sup>2</sup>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、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LiClO<sub>4</sub>、DMF中のNaPF<sub>6</sub>、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気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嗜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.

