



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関係である。

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 umから31 um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つの要因がその実用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の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.