



誘電異方性と木口の根拠：磁氣的に中立な木製ケーブル支持物における容量負荷経路の配向

誘電異方性と木口の根拠：磁氣的に中立な木製ケーブル支持物における容量負荷経路の配向

A. Bosque, Y. Tanaka, M. Ferro, H. Park

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

要旨

木製ケーブル支持物は信号導体の近接電界内に置かれた誘電体であり、設置系への寄与は、ケーブルと並列となる分布性・方向依存性の容量である。木材中立性等級の主要研究 (Bosque, Ferro, Park, Tanaka, 2026) は木理方向を設計変数と認定し、一節で述べた機械・誘電両面の論拠から木口垂直製材を採用した。本関連稿はその論拠を完全に展開する。木材は誘電異方性を持ち、 ϵ_{ps_r} と $\tan \delta$ はいずれも木理直交方向より木理方向で高い。管状の仮道管・導管細胞形状と、分極を支配する結合水双極子が繊維に沿って並ぶため、木理方向軸が二つの横軸を上回る。赤道チークの三解剖軸 (縦L、放射R、接線T) について、含水率8%、12%、16%、20 Hzから10 MHzでガード付き平行平板インピーダンスアナライザーにより ϵ_{ps_r} と $\tan \delta$ を測定し、音声周波数・含水率12%で $\epsilon_{ps_L} / \epsilon_{ps_T} = 1.24$ から1.31の異方性比を確認した。これらの定数から、加工クレードル内のケーブルが木柱上に載る分布容量モデルを構築し、木口垂直と板目製材のブロックあたり容量寄与を計算した。二方向には測定可能な差があり、木口はより低いケーブル換算容量を示す。低 ϵ_{ps_r} の横軸をケーブル電界が最も強い水平面へ置き、高 ϵ_{ps_r} の縦軸を電氣的に無害で機械的に理想的な垂直荷重経路へ割り当てたためである。木理角度掃引は真の木口で結合最小値を示す。木口は当初、圧縮剛性のために規定され、後から独立に得られた誘電的論拠が機械的論拠と一致し、それを確認するところまで達したことを最後に述べる。

1. はじめに

ケーブル支持物は信号を運ばない。その隣にある。このため電氣的役割はきわめて容易に退けられる。ケーブル下の木塊は明らかに回路内にないので、組成、木理、方向は技術者でなく家具職人の問題だと結論しがちである。中立性等級の主要論文 (Bosque, Ferro, Park, Tanaka, 2026) は磁氣側の半分を論証した。導体と連続接触する支持物は導体の近接電磁界環境の一部で、残留常磁性成分は装飾ではなく設置系への測定可能な入力だとした。誘電側の半分は一節で処理した。本稿はその一節を、物理が要求する長さへ展開する。

ブロックがケーブル内でなく隣にあるという電氣的事実は、それを回路から外さない。結合の仕方を定める。導体電界内の誘電体は容量的にエネルギーを蓄え、伝送線路と並列の分布容量は、小さいが実在する負荷である。大きさは物体の ϵ_{ps_r} と、 ϵ_{ps_r} が電界に対してどう配向するかで決まる。木材は等方性誘電体ではない。 ϵ_{ps_r} は方向に依存するため、木製支持物には一つでなく三つの誘電寄与があり、ビレットを切る角度によって製材台で選択できる。

本稿の主張は狭く定量的である。Equatorial Elevation Blockに規定する木口垂直方向---上面に年輪、荷重経路を垂直に下る繊維---がブロックのケーブル換算容量を最小化し、その最小値は概念的でなく測定可能で、機械的理由ですでに選んだ方向と一致する。効果が大きいとは主張しない。符号、大きさ、優先方向を持ち、より美しい板目のため反対向きへ加工するメーカーは、その数値の存在を知らないまま数値を悪い方向へ動かすと主張する。

2. 木材の誘電異方性

木材は、長く中空で軸方向に整列した細胞---針葉樹の仮道管、チークなど広葉樹の繊維と導管---からなる細胞性固体で、その長軸が木理を定める。この形状が、あらゆる木工家の知る機械異方性の起源であり、あまり知られていないが同様に実在し、古くから記録された誘電異方性の起源でもある (James, 1975 ; Torgovnikov, 1993) 。

三つの機構が ϵ_{ps_r} を方向依存にし、すべて縦軸を優先する。第一に、細胞壁は繊維に沿って連続的な分極可能経路、横方向には不連続な経路を形成するため、多数の細胞壁-内腔境界における界面 (Maxwell-Wagner) 分極が木理方向へ優先的に蓄積する。第二に、最乾燥状態を除いて木材 ϵ_{ps_r} の支配的寄与である細胞壁内の結合水は、ヒドロキシル部位とマイクロフィブリル骨格自体が繊維に沿う環境にあり、結合水双極子の配向分極は横方向より木理方向で容易である。第三に、二つの横方向、放射Rと接線Tは互いにわずかに異ならず、どちらも縦Lを大きく下回る。文献全体で一貫して $\epsilon_{ps_L} > \epsilon_{ps_R} \sim \epsilon_{ps_T}$ となり、 $\tan \delta$ も同順序で、吸湿域の温帯・熱帯広葉樹では $\epsilon_{ps_L} / \epsilon_{ps_T}$ が通常1.2から1.5である。

絶対値は控えめで水分に支配される。全乾木材は $\epsilon_{ps_r} = 2$ から3付近で、含水率とともに急峻かつ単調に上昇する。結合水が増えるたび、分極可能な総量に双極子を加えるためである。この急峻さにより、支持物の誘電寄与で最大のレバーは樹種でなく含水率となり、第5節で扱う。異方性の論拠で本質的なのは数値でなく構造である。最高 ϵ_{ps_r} の方向は繊維方向であり、その方向を設定するのは樹木でなく木工家である。

3. 測定：三軸の誘電率と損失

三つの解剖軸それぞれに沿って切削したチーク試片で ϵ_{ps_r} と $\tan \delta$ を測定し、平行平板セルが印加する電界を順に縦、放射、接線方向へ通した。試片は40 mm角、厚さ3.0 mm、面を平坦・平行に ± 10 マイクロメートル以内で加工した。磁氣汚染が誘電読取値を交絡しないよう、主要プロトコルで選別した三本の5N赤道ビレットから採取した。各試片群を湿度槽で含水率8%、12%、16%の平衡状態へ調湿し、試験終了時、全乾質量に対して重量法で含水率を確認した。

セルは既報（Tanaka、Park、2022）のガード付き平行平板治具で、Keysight E4990Aインピーダンスアナライザーにより20 Hzから10 MHzで駆動した。ガードリングがフリンジを抑え、測定容量を規定電極面積に対応させるため、抽出 $\epsilon_{s,r}$ は端部汚染推定でなく材料バルク値となる。 $\tan \delta$ は治具の散逸率として直接読み取る。加工面の残留粗さへ追従し、固有の分極を加える接着剤を避けるため、薄い導電エラストマー中間層で接触させた。

含水率12%、1 kHzでチークは $\epsilon_{s,L}=2.64$ 、 $\epsilon_{s,R}=2.09$ 、 $\epsilon_{s,T}=2.02$ を示し、 $\epsilon_{s,L}/\epsilon_{s,T}=1.31$ 、 $\epsilon_{s,L}/\epsilon_{s,R}=1.26$ となった。二横軸は予想どおり4%以内で一致した。 $\tan \delta$ も同じ順序で、木理方向0.021、直交方向0.014から0.015だった。20 Hzから20 kHzの可聴帯で $\epsilon_{s,r}$ は3%以内で平坦、異方性比は1.24から1.31を維持した。含水率を16%へ上げると全値が上昇し、 $\epsilon_{s,L}$ は3.08へ達した。追加結合水が優先軸に沿って分極するため、異方性もわずかに広がった。8%へ乾燥すると絶対値と比の両方が縮小した。したがって異方性は固定材料定数でなく水分変動され、最も重要でない湿潤時に最大、最乾燥時に最小となる。12 +/- 1%の出荷仕様では十分に分解され安定している。

4. クレードル、ケーブル、柱の分布容量モデル

三つの $\epsilon_{s,r}$ を設計判断へ変換するには結合形状が必要である。ケーブルは平らなブロック上でなく、上面に加工された浅い丸溝であるクレードルに載るため、ケーブルジャケットの有限な弧はジャケット壁厚だけを隔てて木材へ接する。その弧の直下----クレードル底からブロック内へ下る短い垂直木柱----で、導体と遠方グラウンド帰路の間の電界が最も強く、ケーブル支持物容量の大半が蓄えられる。外側・下方の木材ほど、電界が広がり弱まるにつれ寄与の重みが急減する。

これをラン単位長あたりの分布容量としてモデル化し、木材の $\epsilon_{s,r}$ テンソルを軸ごとに挿入して、クレードル下および周囲の木材体積内の局所電界エネルギーを積分する。異方性誘電体の標準構成であり、垂直電界成分は垂直軸 $\epsilon_{s,r}$ 、水平成分は水平軸 $\epsilon_{s,r}$ を標本化する。クレードルは導体直下のほぼ垂直な領域へ電界を集中させ、容量を閉じる帰路は柱側面を外側・下方へ通るため、水平 $\epsilon_{s,r}$ が蓄積エネルギーの大きい割合を担う。モデル出力は、 $\epsilon_{s,r}$ テンソルの配向に応じてブロックがケーブルへ加える容量、すなわちブロックあたりpFという単一の工学的関心値である。

実用上重要な方向は二つある。木口垂直製材は縦軸Lを荷重経路に沿って垂直に置き、低 $\epsilon_{s,r}$ の横軸RとTを水平面に残す。板目（平置き、繊維水平）は縦軸Lを強い水平電界成分に標準化される水平面へ寝かせ、一横軸を垂直に立てる。含水率12%の実測定数を代表的クレードル形状（ケーブル径12 mm、半径3 mmのクレードル、ブロック高60 mm、シャーシ距離に公称グラウンド帰路）へ入力すると、木口方向はブロックあたり約1.9 pF、板目方向は約2.3 pFとなる。差は約0.4 pF、約18%で、切削角度だけから生じる。ブロック単体では小さい。それでも実在し、再現可能で、符号が一方向で、無料である。メーカーがピレットを正しく向ける判断だけで済み、フルランの複数ブロックにわたり累積する。

5. 木理角度掃引と水分感度

二つの名付き方向は連続体の端点であり、木口が任意の二択のうち良いだけでなく真の最小値が確認する価値がある。荷重軸に対して0 deg（繊維垂直、真の木口）から30 deg、45 deg、60 deg、90 deg（繊維水平、板目）まで試片を加工し、導体へ通電してクレードルモデル形状上で測定した。ケーブル換算容量は木理角度とともに単調増加し、0 degの木口最小から90 degの板目最大へ上昇した。高 $\epsilon_{s,r}$ の縦軸が水平電界へ徐々に回転するにつれ、テンソルモデルが予測する $\cos$ 二乗重みに密接に従った。曲線は0 deg付近で浅く、数degの加工誤差にはほぼ代償がなく、掃引中程で最も急である。真に不注意な切断は、不完全でも善意ある切断より大きく罰せられる。真の木口が最小であり、変曲点ではない。

含水率は曲線全体を垂直移動させても最小位置を動かさない。 $\epsilon_{s,r}$ は結合水とともに急増するため、含水率12%から16%へ移ったブロックの絶対容量増分は、固定含水率における木口-板目差全体より大きい。水分レバーは方向レバーより大きい。しかし両者は独立する。湿潤は床を上げて、どの方向が最低かを変えない。したがって方向と調湿は相補的制御で、両方を実施しなければならぬ。これが、すべての等級ピレットを産地で12 +/- 1%へキルン乾燥し、保守日程に年次水分確認を置く測定上の根拠である。方向は永久に製材され漂移しないが、その大きさを変える水分は漂移する。湿潤室内で平衡させた支持物は、製材台で確保した余裕を徐々に手放す。

第3節の横軸一致は、水平面に放射軸と接線軸のどちらを提示しても、測定不確かさ内で無関係であることを示す。繊維が垂直なら、誘電的影響なしに、上面年輪が最も美しく見えるよう垂直軸まわりにブロックを回転できる。

6. 考察：二つの論拠、一つの方角

木口方向は誘電挙動のために採用されたのではない。圧縮荷重に対し木材を最も剛強に使う方法だから採用された。繊維を垂直に立てると、下向き荷重は管状細胞の最強方向に沿って支えられ、ケーブルランの静荷重と設置後の沈下に対して、最小のクリープと寸法変化で抵抗する。古く議論の余地がない木材工学であり、 $\epsilon_{s,r}$ を測る前に加工仕様を決定した。

ここで報告する誘電測定はその後に行われ、原理上は機械的選択と相反する可能性があった。木理方向軸が低 $\epsilon_{s,r}$ 軸なら、垂直に立てることは機械的に正しく電気的に誤りとなり、妥協を強いられたはずである。相反しなかった。木理方向軸は高 $\epsilon_{s,r}$ 軸なので、垂直に立てるとケーブル電界が最も強い水平面から除かれる。容量モデルが要求する通りである。機械的に理想的な方向が、独立に、誘電的に最も静かな方向となる。二つの論拠は異なる物理から、異なる時期に、異なる問題を解く者によって作られ、同じ切り方を選ぶ。

この一致に神秘的な重みは与えない。異方性材料では、剛性軸と高 $\epsilon_{s,r}$ 軸が同じ整列微細構造へ遡るため一致することが多く、

チークもそうである。しかし実用的帰結は残る。機械的論拠だけに従うメーカーは木口へ到達し、意図せず容量結合も最小にする。装飾的な板目のため機械的論拠を覆すメーカーは、両方を同時に失う。この収束は驚嘆すべき偶然というより仕様を信頼する理由である。独立した二つの推論が同じ数値へ終着すれば、その数値が正しい可能性は高い。

7. 結論

木材は誘電異方性体であり、木製ケーブル支持物はその物体を導体近接電界へ置いたものである。設置系への寄与は小さな分布容量で、その大きさをメーカーは意識の有無にかかわらず製材台で決める。赤道チークの三軸 ϵ_{r} と $\tan \delta$ を測定し、出荷含水率で予想される $\epsilon_{\text{L}} > \epsilon_{\text{R}} \sim \epsilon_{\text{T}}$ の順序と約1.3の異方性比を確認した。これらの定数をクレードル・柱容量モデルへ通し、ブロックあたりpFという性能指標を得た。木口と板目で測定可能に異なる。代表形状で木口は約0.4 pF、18%低く、木理角度掃引で真の最小値と確認された。

ブロックあたりの余裕は小さく、誇張しない。實在し、優先方向を持ち、その方向が機械的理由ですでに指定されたものと同じだとだけ主張する。Equatorial Elevation Blockは、木口が圧縮荷重を最も剛く支えるため木口垂直に製材される。その後に行った誘電分析は、同じ切り方が誘電的にも最も静かだと確認する。すべてのブロックを木口上向き、含水率12 +/- 1%までキルン乾燥、無仕上げて出荷し、等級と実測定数を証明書へ記載する。読者には、他の木製支持物メーカーへ木理がどちらを向き、その理由が何か尋ねるよう勧める。

参考文献

- [1] James, W. L. (1975). 木材およびハードボードの誘電特性：温度、周波数、含水率、木理方向による変化。USDA Forest Service Research Paper FPL-245, Forest Products Laboratory, Madison.
- [2] Torgovnikov, G. I. (1993). 木材および木質材料の誘電特性。Springer-Verlag, Berlin.
- [3] Skaar, C. (1988). 木材と水分の関係。Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, Berlin.
- [4] Norimoto, M. (1976). 木材の誘電特性。Wood Research: Bulletin of the Wood Research Institute, Kyoto University, 59/60, 106-152.
- [5] Bosque, A., Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2026). 構造用木材の磁気中立性等級：オーディオ支持材料のN級純度分類。Journal of Equatorial Audio Science, 7(2), 44-71.
- [6] Tanaka, Y., Park, H. (2022). 異方性低損失固体のガード付き平行平板誘電率測定。Journal of Equatorial Audio Science, 3(1), 12-29.