ON4CRD

第05巻

フィルターの計算



Radio Club Durnal ON4CRD

https://on4crd.be

法的表示

第05巻 · フィルターの計算

ウェブサイト発行者 : Radio Club Durnal ON4CRD

出版マネージャー : Radio Club Durnal ON4CRD 委員会

https://on4crd.be

法的表示

知的財産

サイト上で公開されているテキスト、画像、文書、ロゴ、および資料は、それぞれの作成者またはクラブの所有物です。複製または再利用は、出典、該当する権利、および著者の許可を尊重する必要があります。

責任

クラブは、有益で検証された情報を公開するよう努めていますが、誤り、脱落、または中断がないことを保証するものではありません。技術情報または規制情報が決定を裏付ける場合は、公式情報源と照合する必要があります。

イラストは人工知能の支援を受けて制作しています。

新しい課題



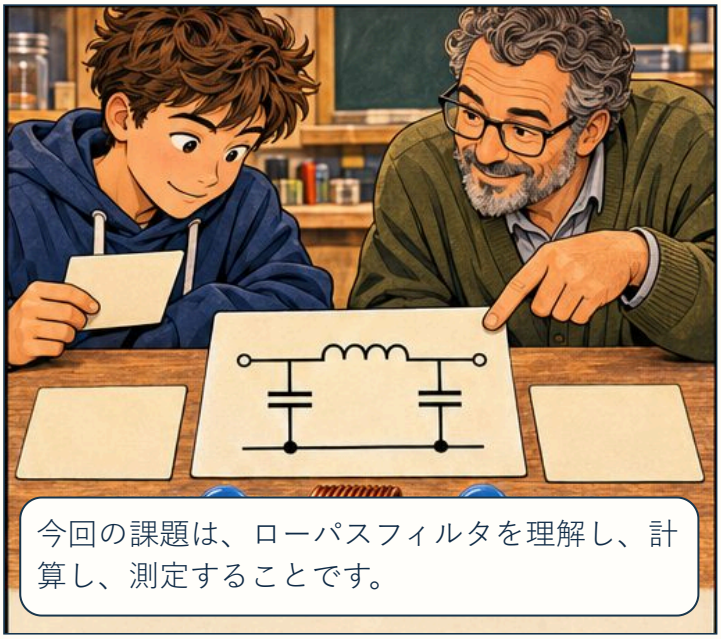
電気の実習を終えたLucasは、クラブで再びノートを開きます。



Henriは信号の品質についての実演を準備しています。



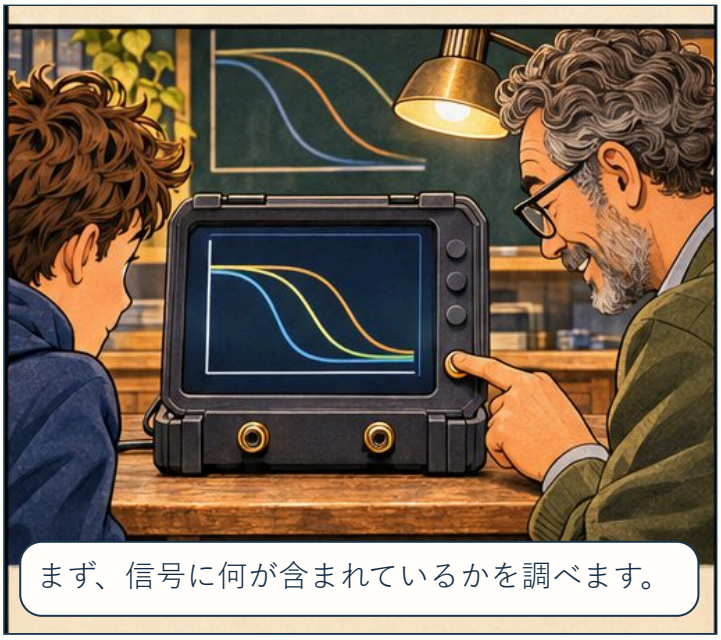
机にはコンデンサ二つとコイル一つが待っています。



今回の課題は、ローパスフィルタを理解し、計算し、測定することです。



少年は、三つの部品で何が変わるのか知りたいと思います。

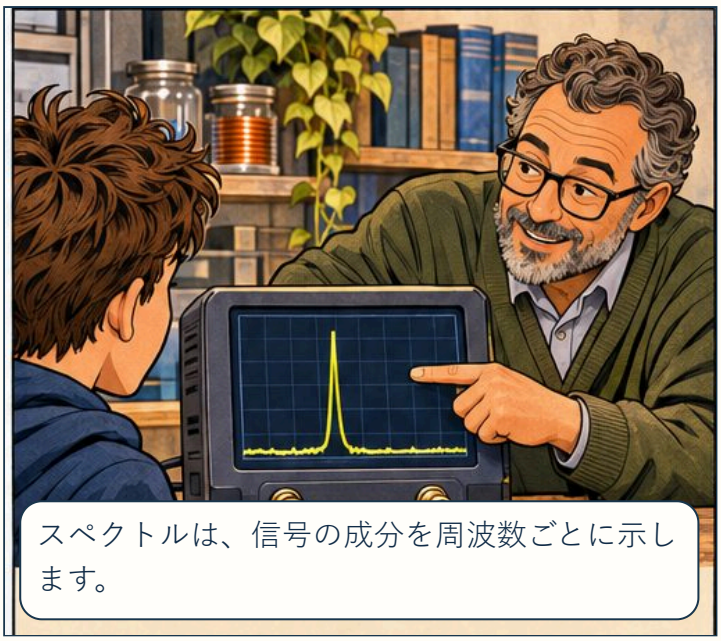


まず、信号に何が含まれているかを調べます。

信号の二つの姿



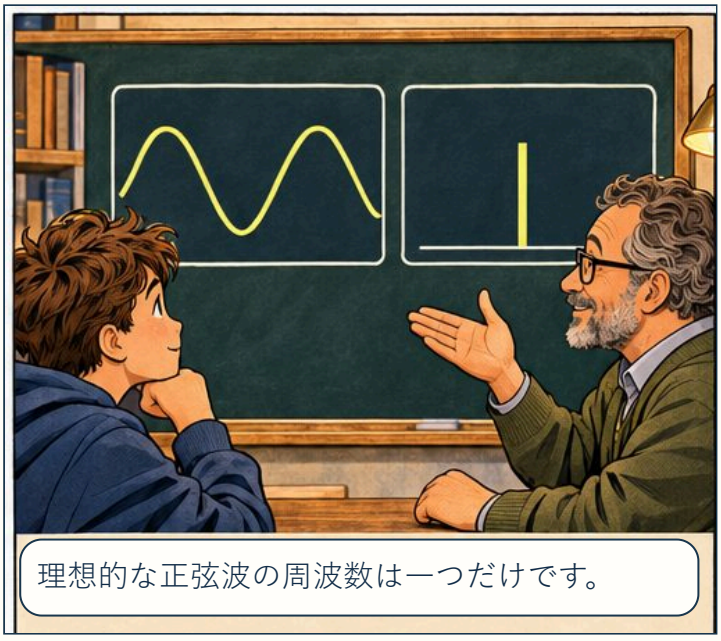
時間波形は、信号が時間とともにどう変わるかを示します。



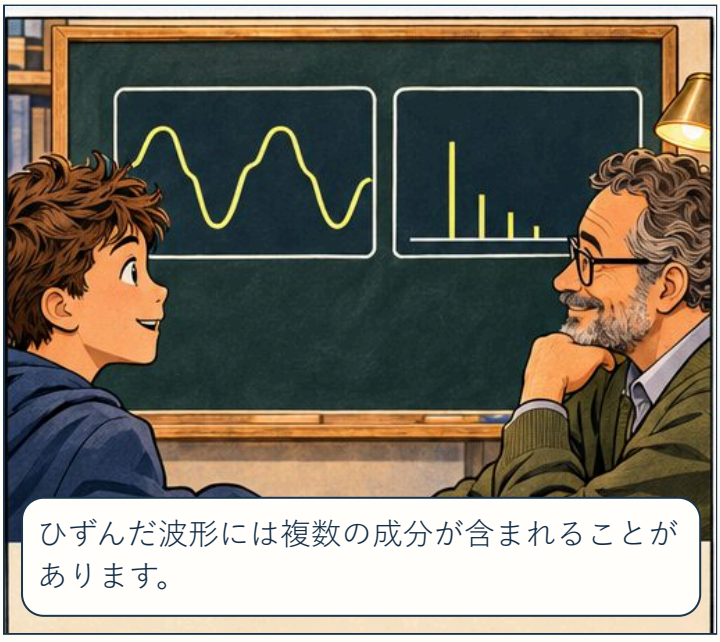
スペクトルは、信号の成分を周波数ごとに示します。



二つの表示は、同じ信号を別の方法で表しています。



理想的な正弦波の周波数は一つだけです。

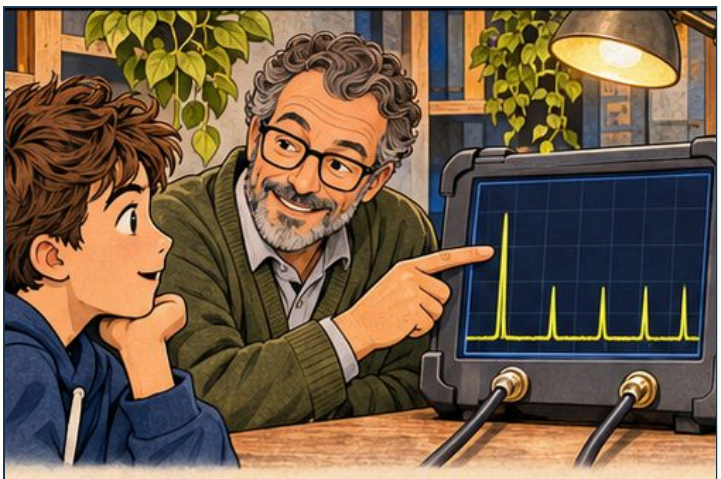


ひずんだ波形には複数の成分が含まれることがあります。



少年は、今まで読めなかった信号の姿に気づきます。

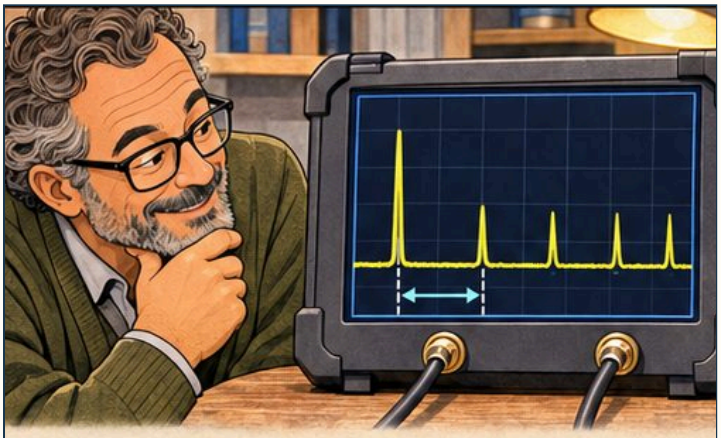
高調波が見えてくる



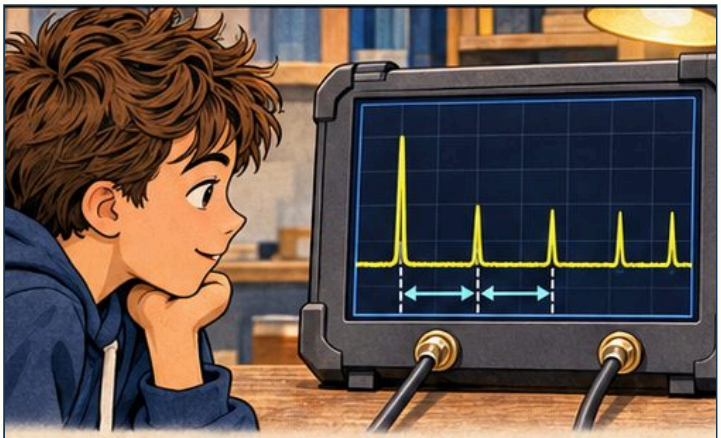
基本周波数は、周期信号の最初の基準になります。



高調波の周波数は、その整数倍です。



第2高調波は基本周波数の2倍にあります。



第3高調波はその3倍にあります。

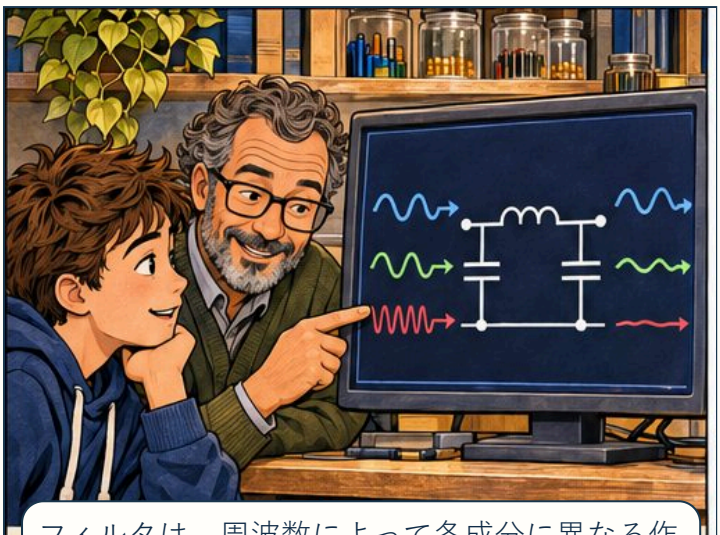


ただし、不要な成分がすべて高調波とは限りません。



フィルタには、はっきり定めた目的が必要です。

何を残すか決める



フィルタは、周波数によって各成分に異なる作用をします。



まず必要な周波数と、邪魔な周波数を決めます。



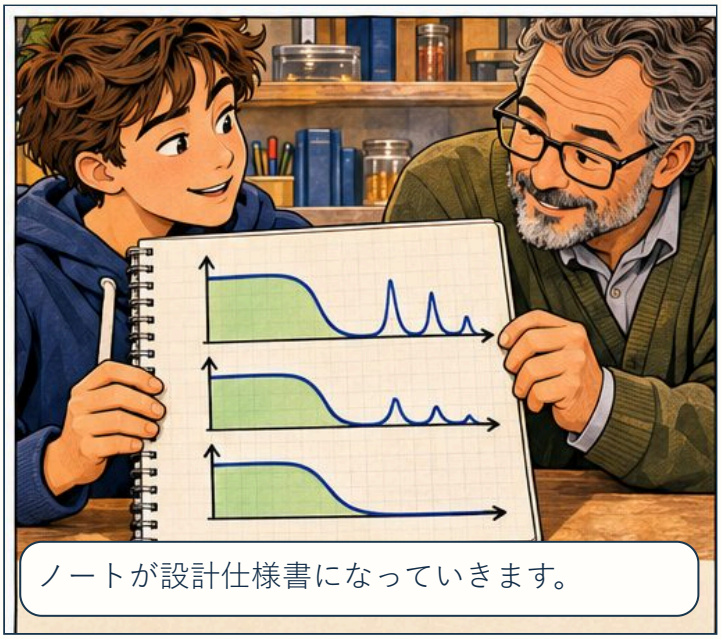
どれだけ減衰させたいかも決めます。



この目標がなければ、部品の計算だけしても意味が薄れます。

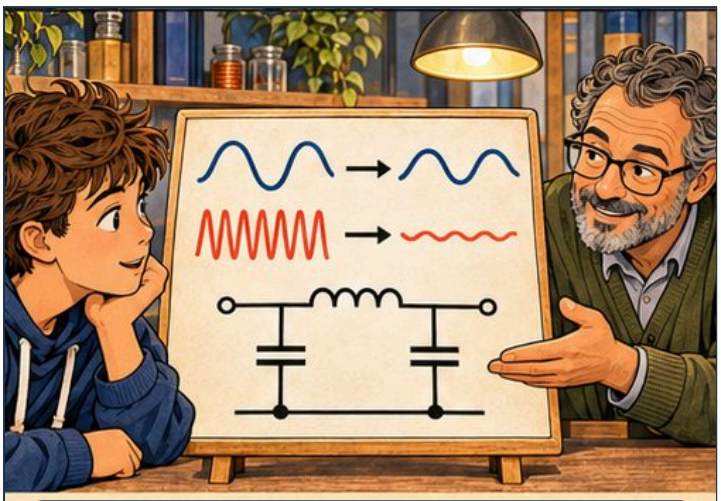


少年はスペクトルの例で、必要な領域を丸で囲みます。



ノートが設計仕様書になっていきます。

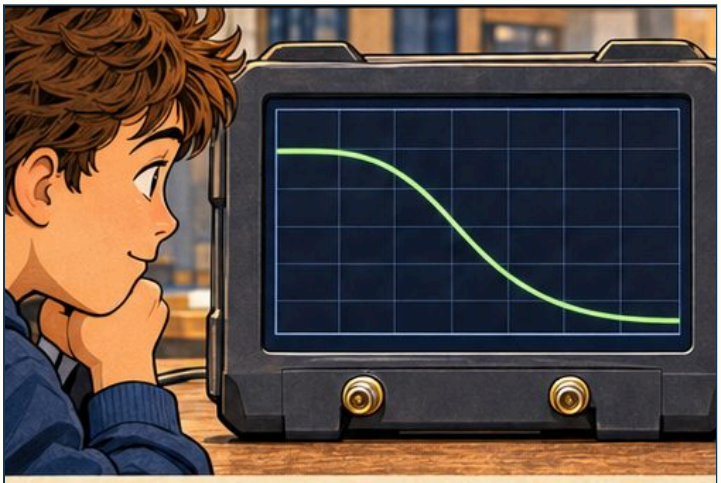
ローパスを選ぶ



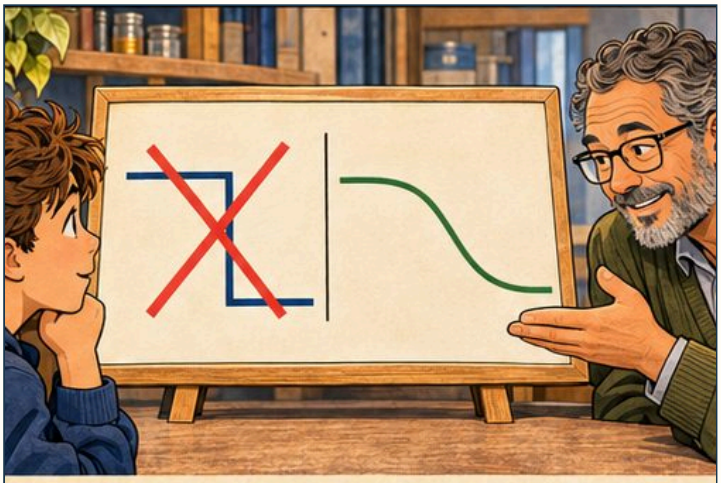
ローパスフィルタは、高い周波数より低い周波数をよく通します。



通過帯域は低い周波数側にあります。



その先では、減衰が徐々に大きくなります。



実際の移り変わりは、完全に垂直な壁にはなりません。



この種類が今日の実演に合っています。



少年は壁ではなく、傾斜を描きます。

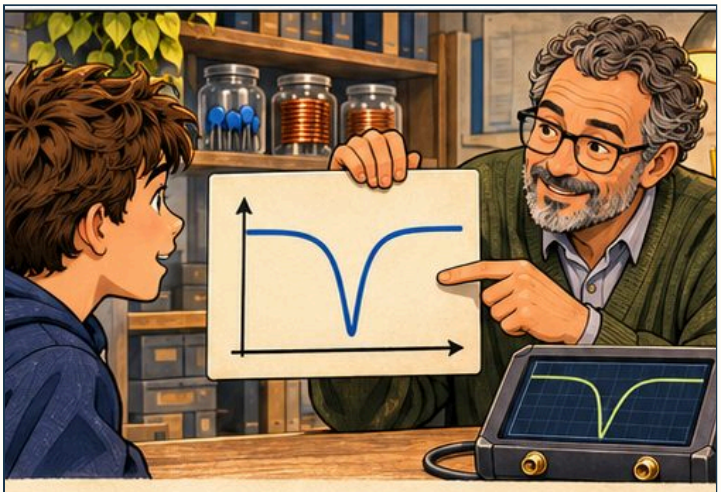
ほかにもある道



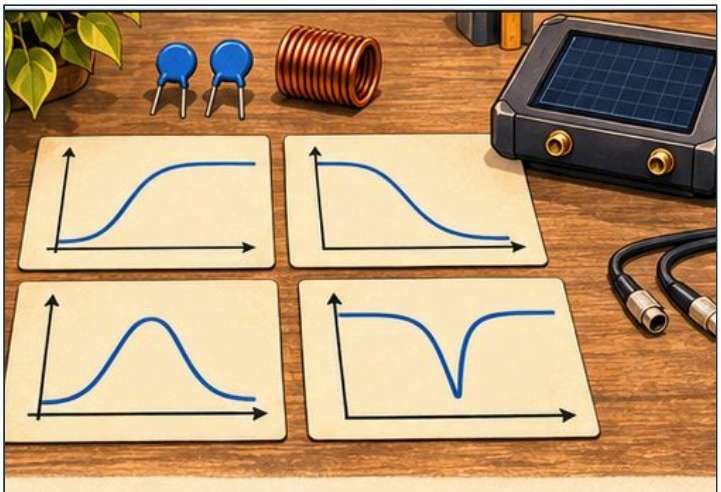
ハイパスは低い周波数を減衰させ、高い周波数を通します。



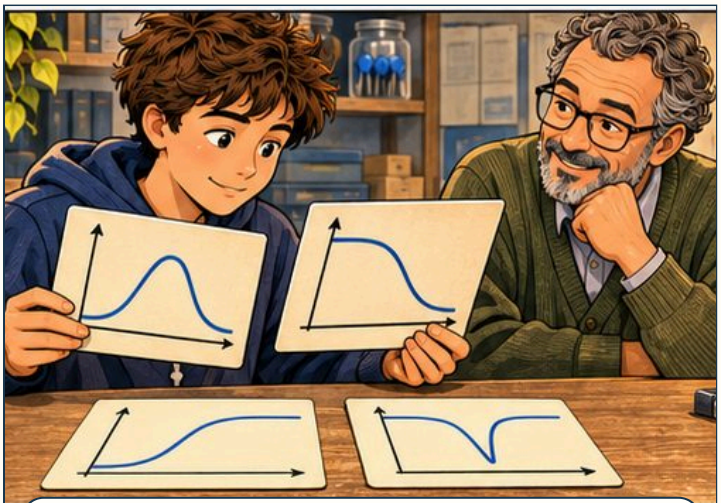
バンドパスは二つの境界に挟まれた範囲を主に通します。



バンドストップは、逆に選んだ範囲を減衰させます。



これらは、それぞれ異なる目的に使われます。



名前は応答の特徴を表し、万能な優劣を表すものではありません。



少年は三枚のカードを次の実習までしまっておきます。

遮断しても通る周波数



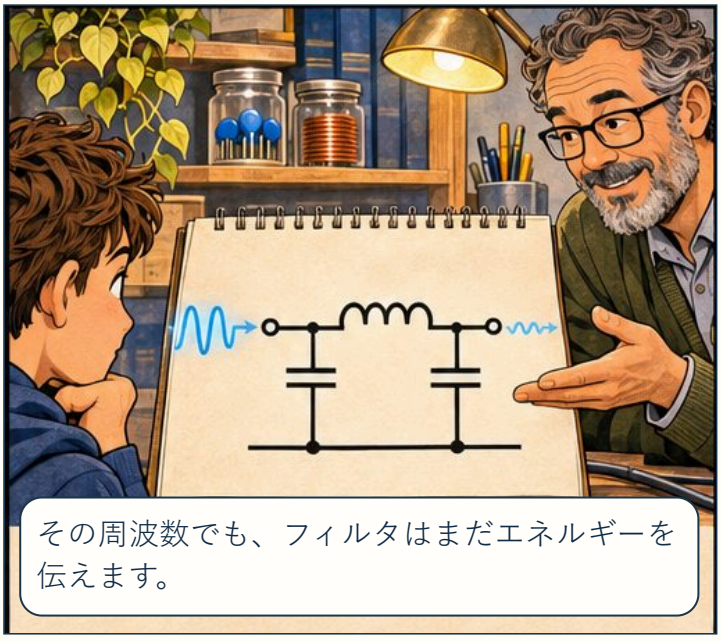
ここで遮断周波数は、基準となるレベルを示します。



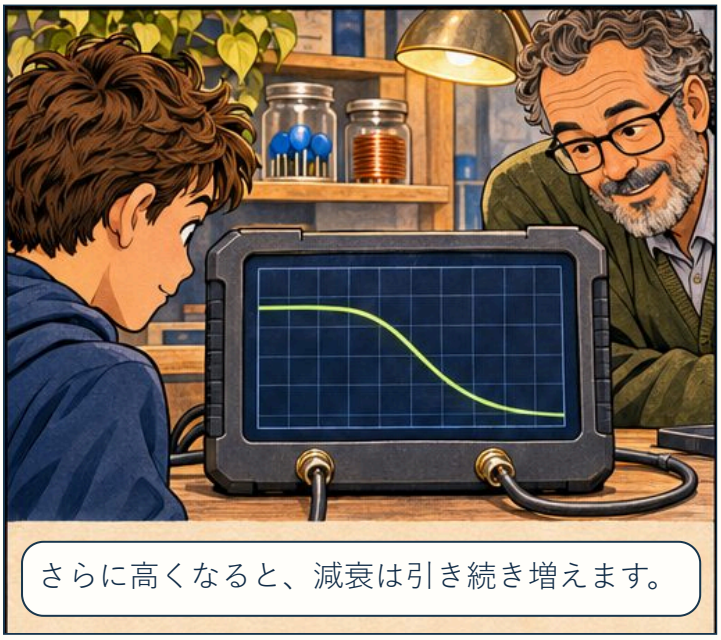
信号が突然消える周波数ではありません。



今回の理想的なバタワースでは、約 −3 dB に当たります。



その周波数でも、フィルタはまだエネルギーを伝えます。



さらに高くなると、減衰は引き続き増えます。

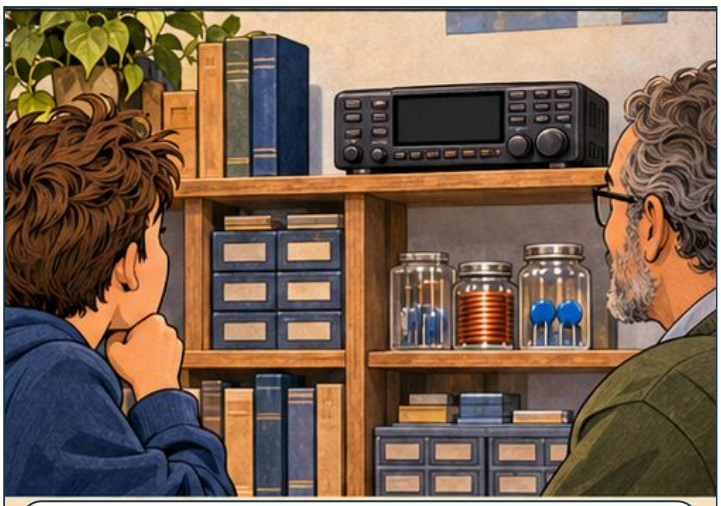


この確認で、最初の思い違いを防げます。

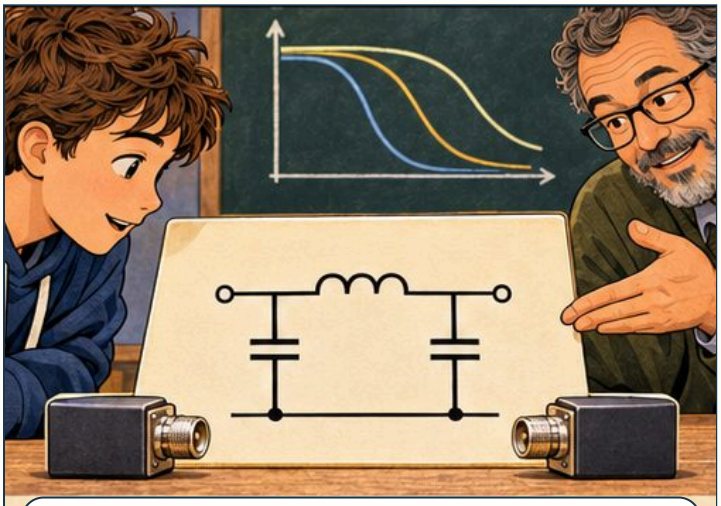
実験室での例



理論上の遮断周波数を 10 MHz に決めます。



これは学習用の値で、送信周波数を定めるものではありません。



基準の信号源と負荷は、それぞれ 50 Ω とします。



小さな信号を使い、測定台で回路を調べます。



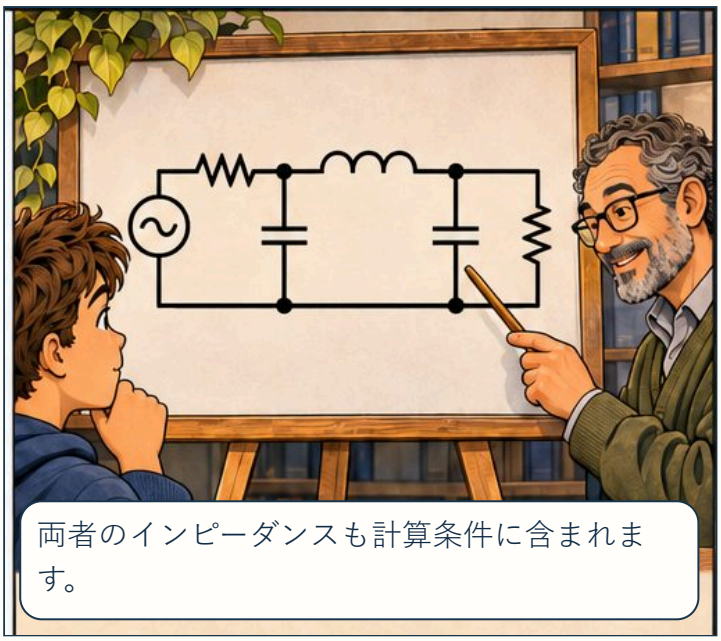
アンテナも送信機も接続しません。



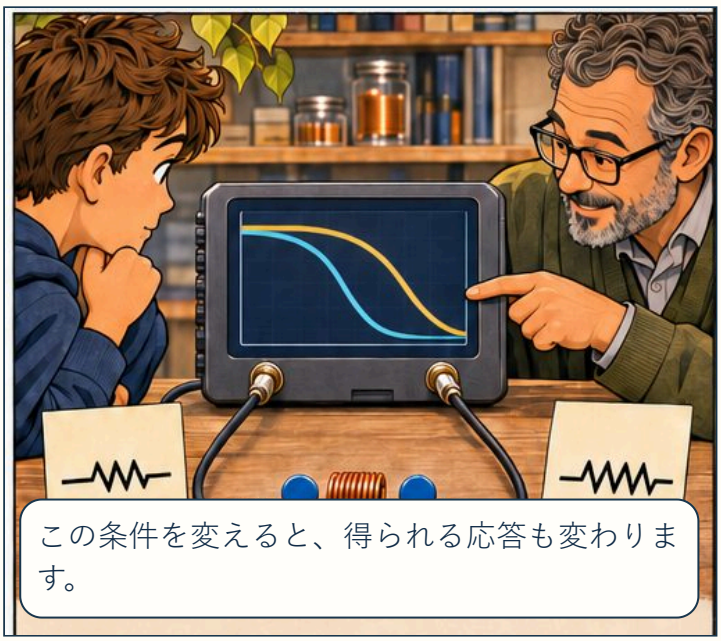
目的は無線交信ではなく、測定できる応答です。

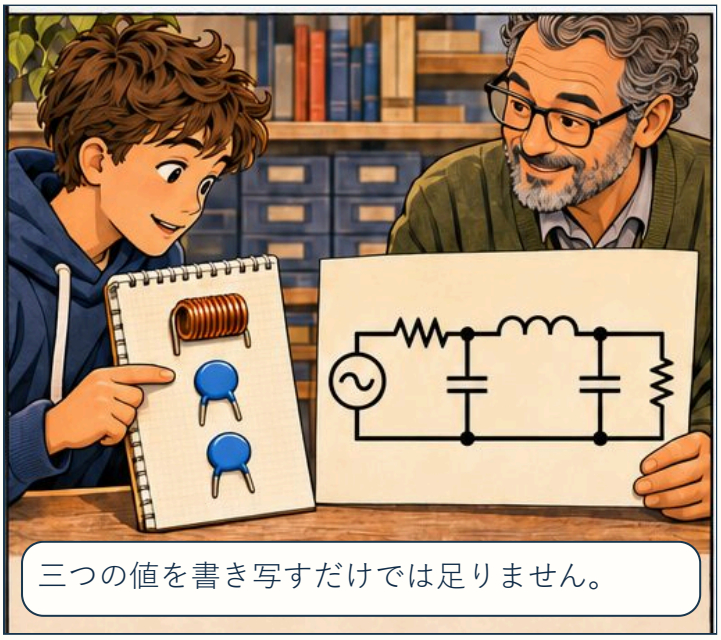
なぜ50オームと指定するのか

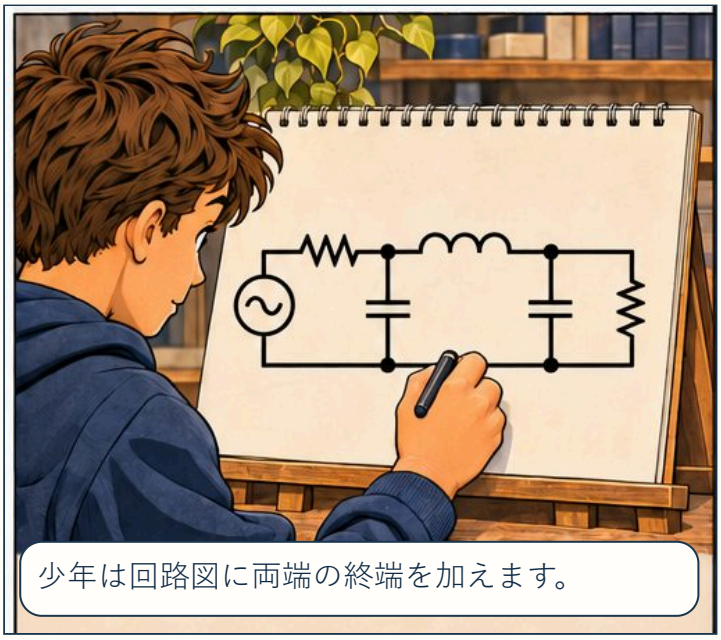




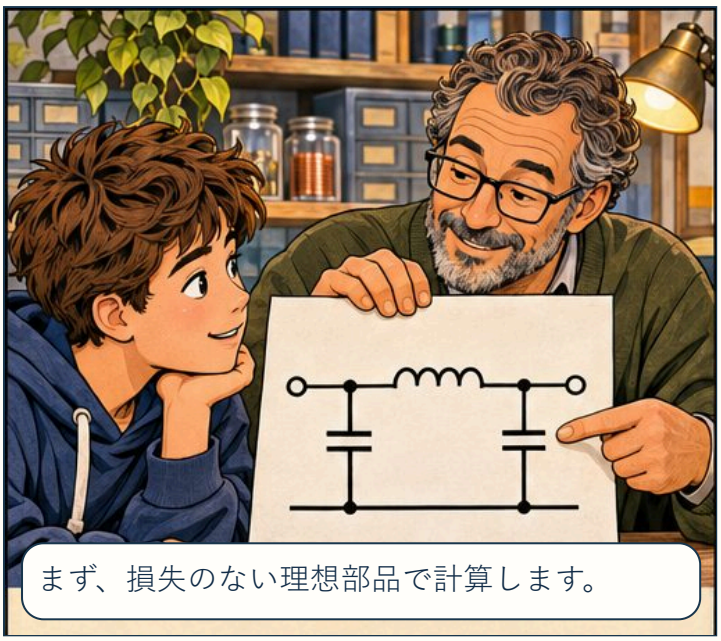






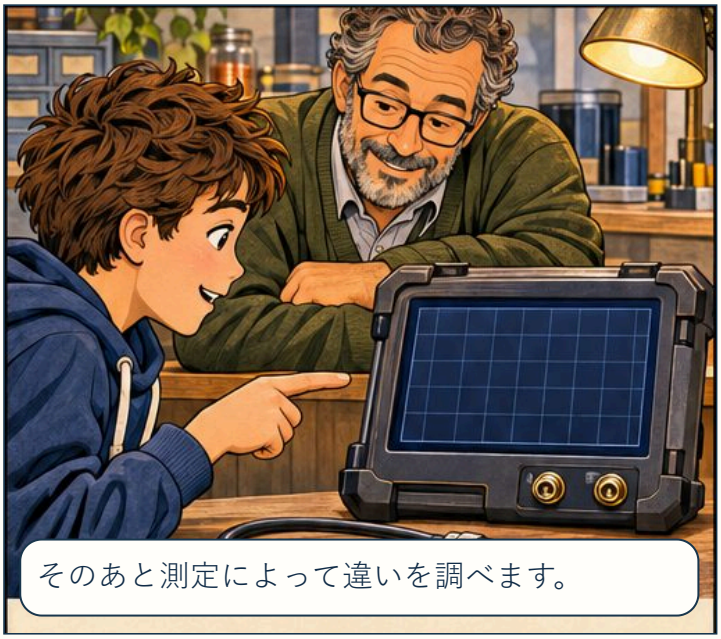


モデルと実際の回路


まず、損失のない理想部品で計算します。


実際の回路には抵抗や寄生効果があります。

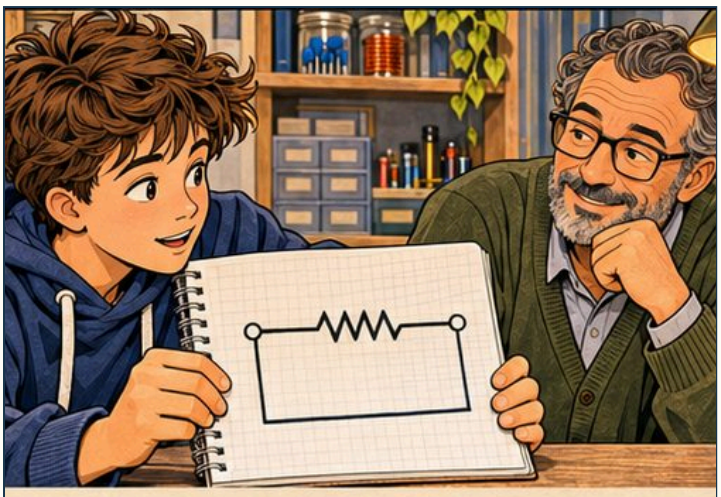

モデルから最初の応答を予測できます。


そのあと測定によって違いを調べます。

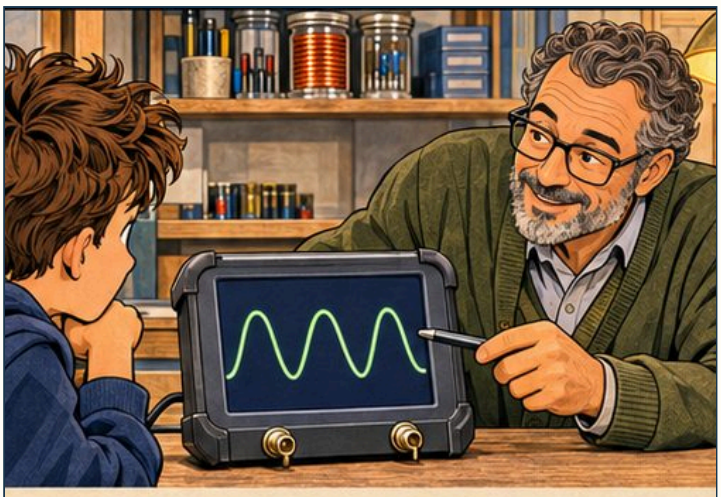

予測と結果を混同すると、ずれを理解できません。


ノートには、それぞれ別の欄を用意します。

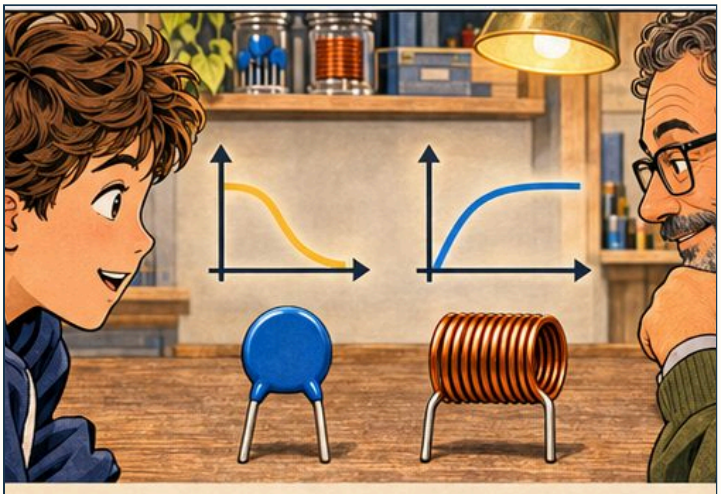
抵抗だけでは足りない



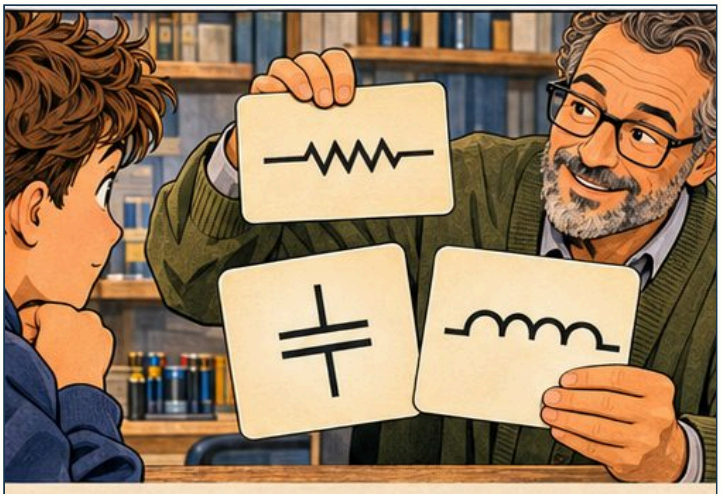
前の巻では、直流の電圧、電流、抵抗を結びつけました。



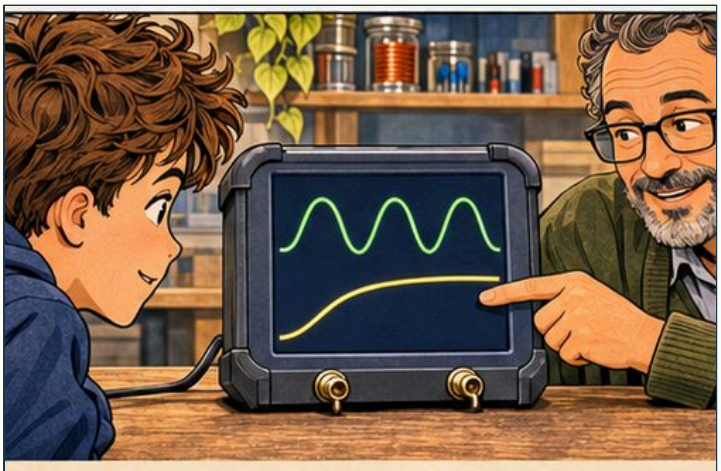
今回は信号が速く変化し、その周波数が重要です。



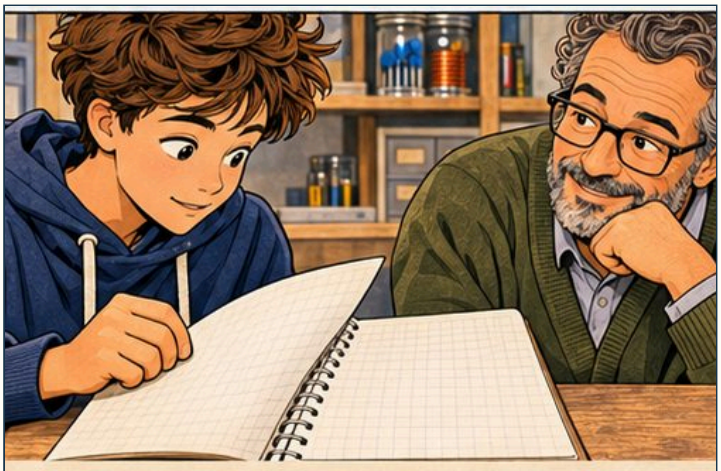
コンデンサとコイルの妨げる作用は、周波数によって変わります。



このリアクタンスは、単なる抵抗とは異なります。



インピーダンスは、交流での電気的な振る舞いをより広く表します。

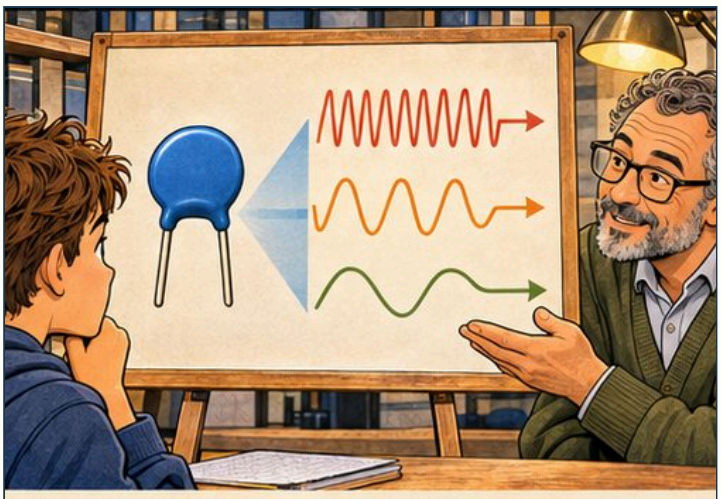


少年は、新しいモデルが必要な理由を理解します。

コンデンサの役割



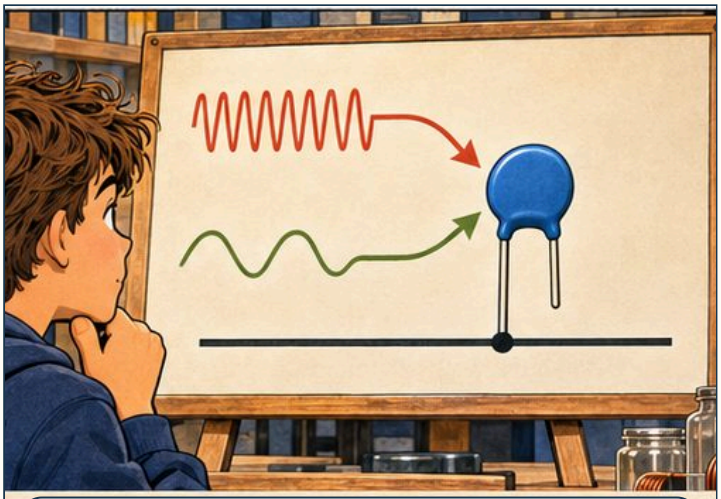
静電容量は C と書き、単位はファラド、記号は F です。



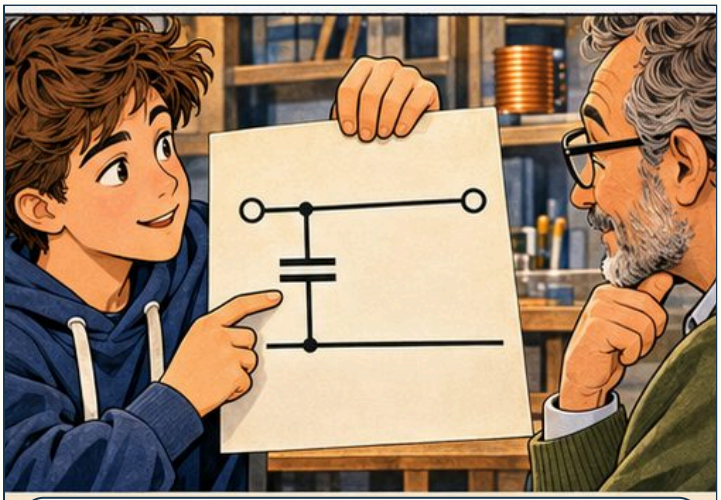
理想コンデンサのリアクタンスは、周波数が高いほど小さくなります。



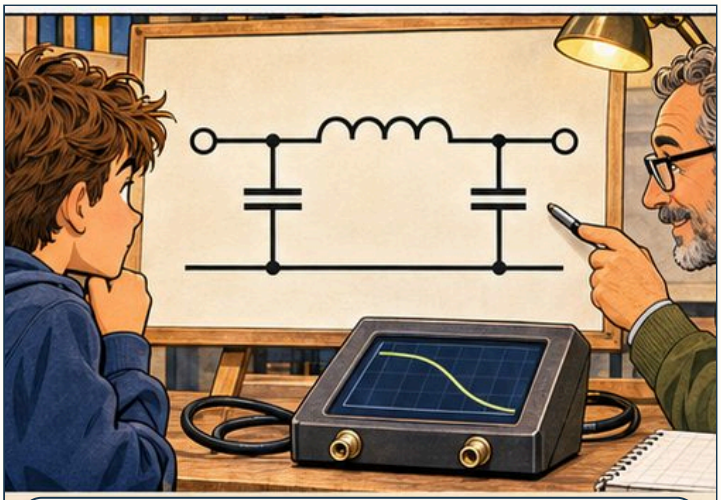
その絶対値は Xc = 1/(2πfC) です。



同じ容量なら、高周波ほどリアクタンスが小さくなります。



今回のフィルタでは、コンデンサを回路の共通グラウンドにつなぎます。

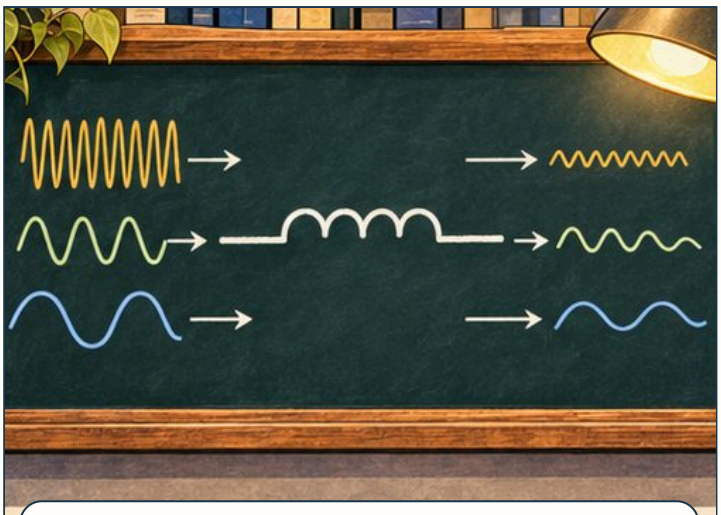


その役割は、回路のほかの部分にも左右されます。

コイルの役割



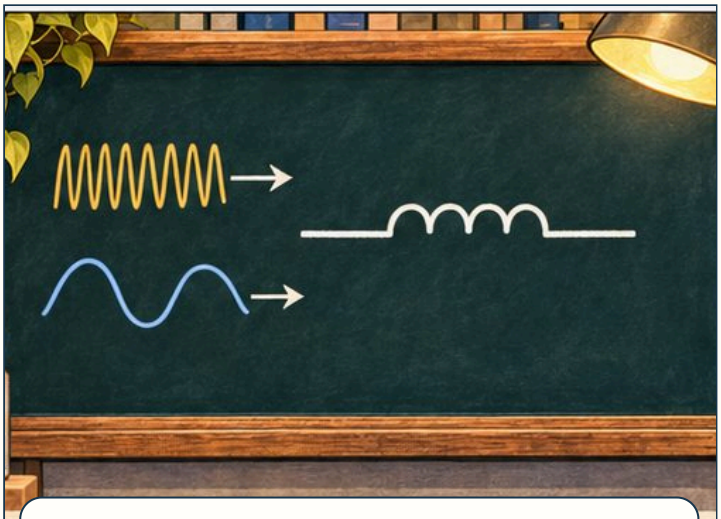
インダクタンスは L と書き、単位はヘンリー、記号は H です。



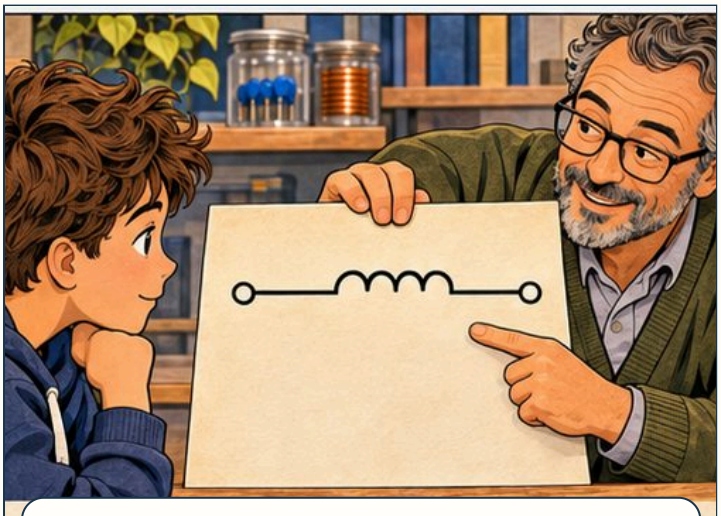
理想コイルのリアクタンスは、周波数とともに大きくなります。



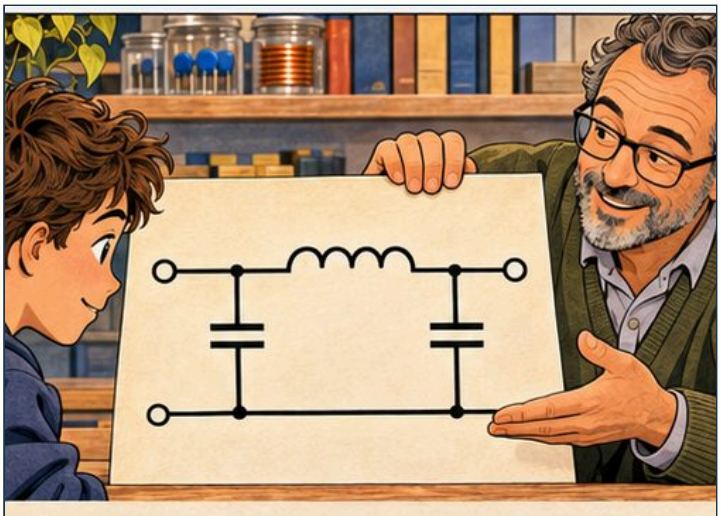
その絶対値は XL = 2πfL です。



同じインダクタンスなら、高周波ほどリアクタンスが大きくなります。

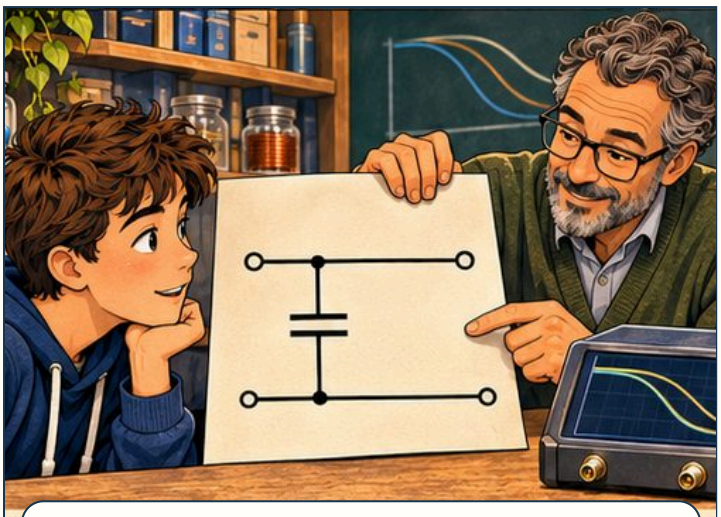


今回のフィルタでは、コイルを信号の通り道に置きます。

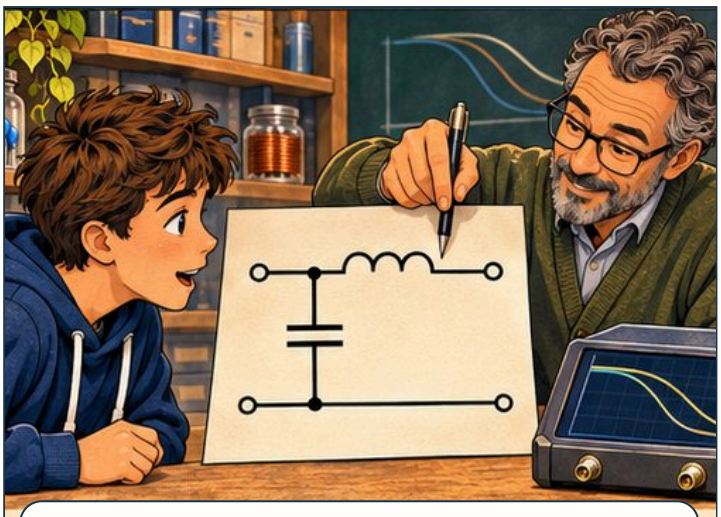


二種類の部品が一緒に働きます。

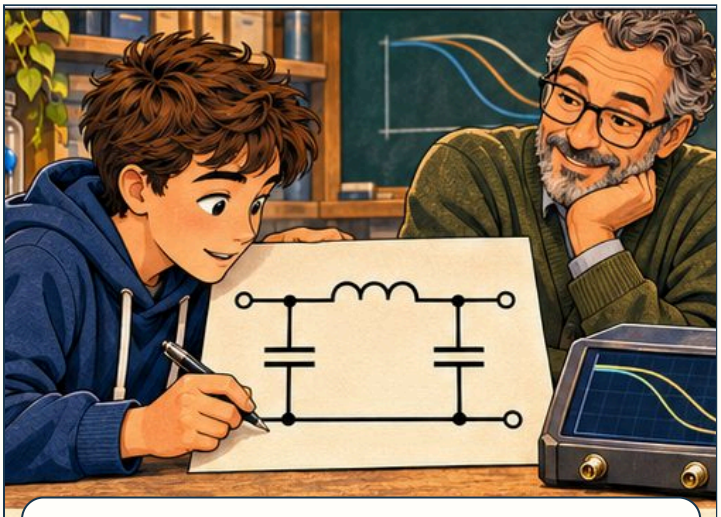
回路図がπの形になる



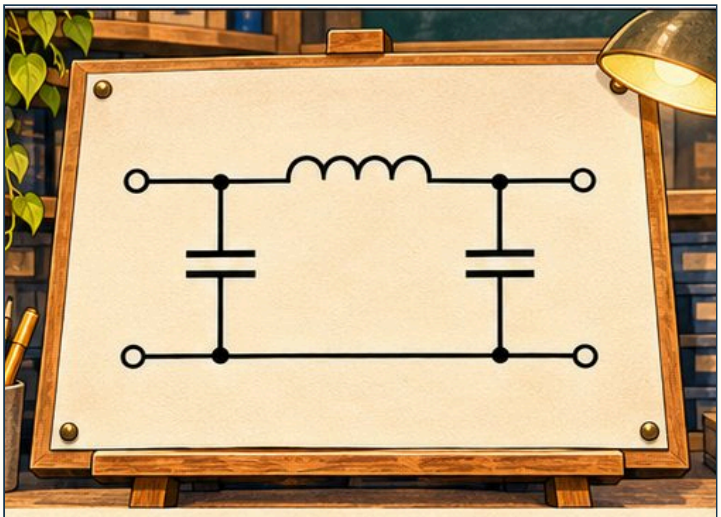
入力には、共通グラウンドへつながる最初のコンデンサがあります。



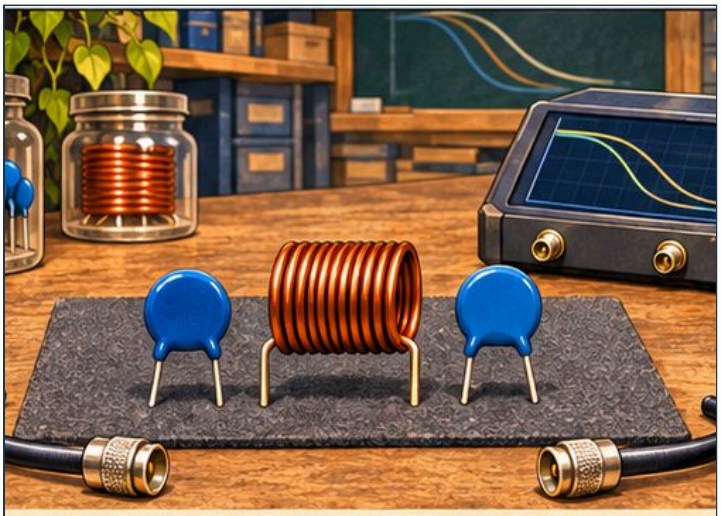
次に、コイルが入力と出力を直列につなぎます。



二つ目のコンデンサが出力を同じグラウンドにつなぎます。



コイルの両側から二本の枝が下へ伸びます。



この配置はギリシャ文字の π に似ています。

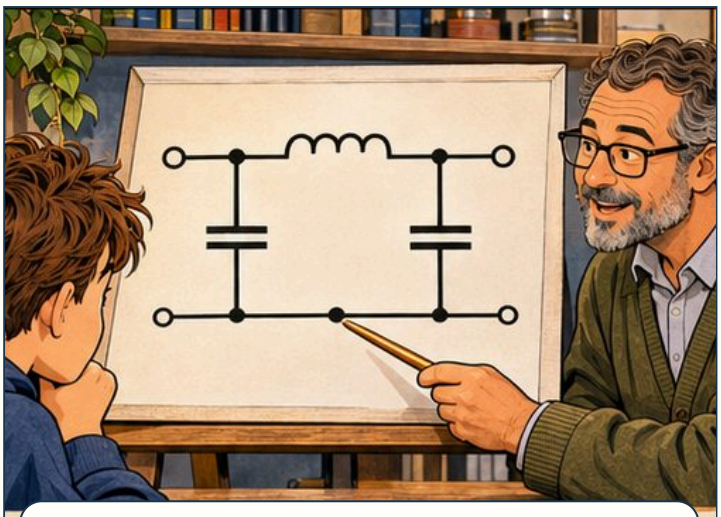


少年は鉛筆で接続を一つずつたどります。

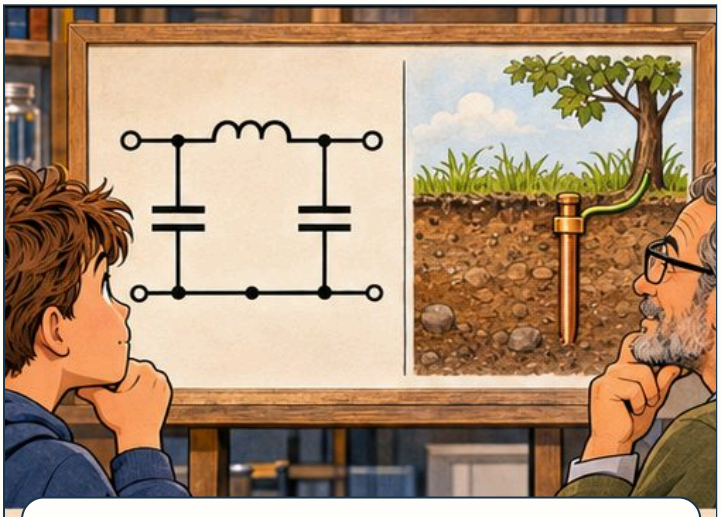
回路図のグラウンド



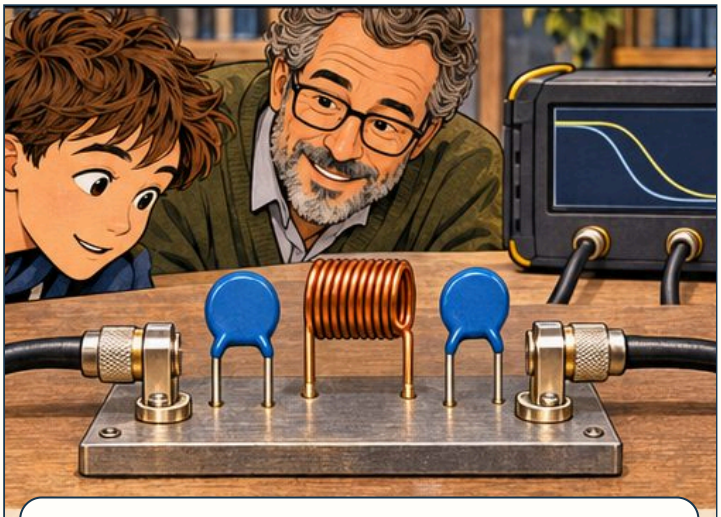
二つのコンデンサは、共通の電気的基準点を持ちます。



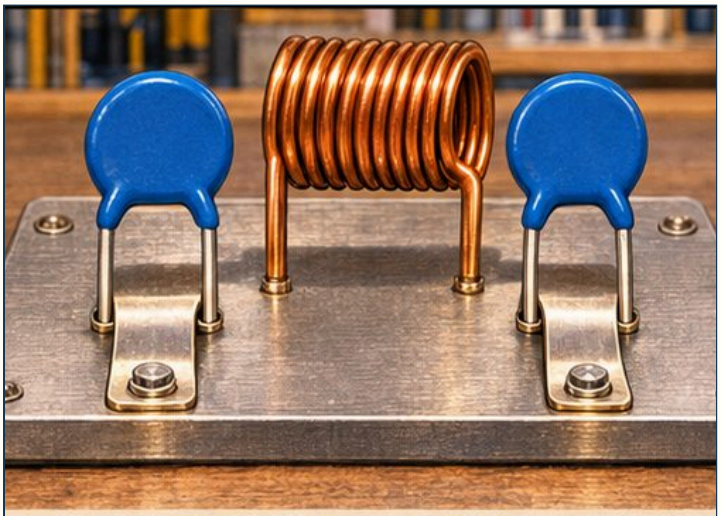
ここでグラウンド記号は、その回路の基準を表します。



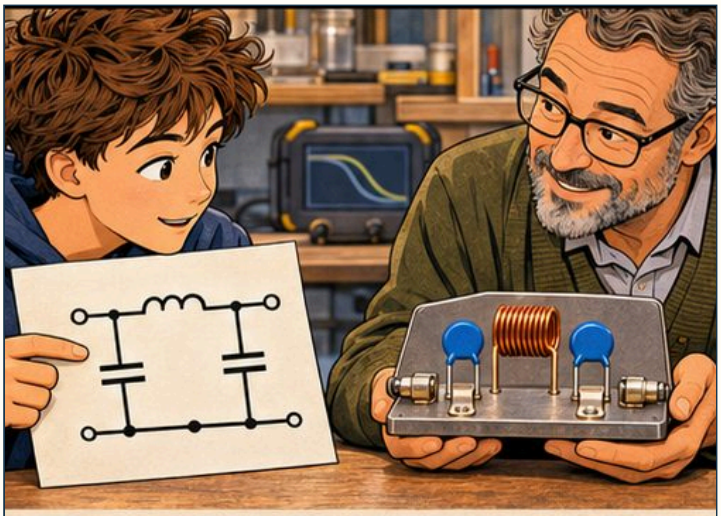
必ず大地に接続するという意味ではありません。



同軸ケーブルのシールドは、設計に従ってこの基準につなぎます。



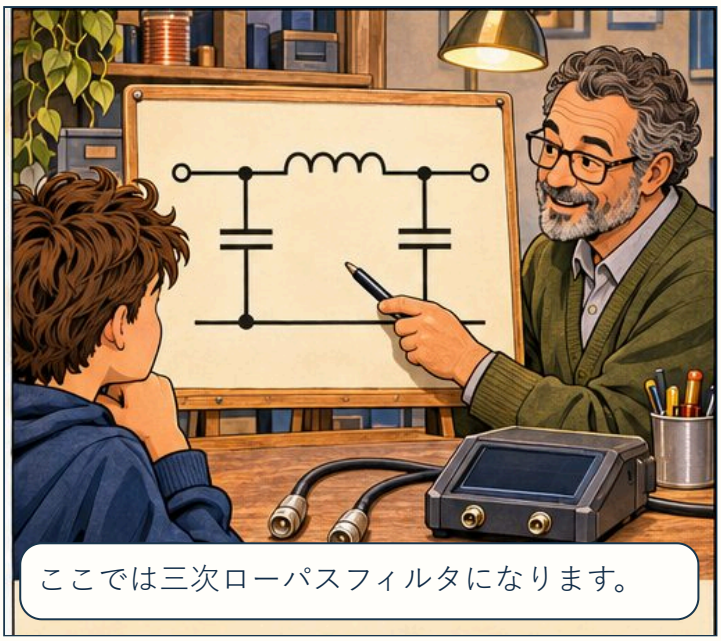
短い接続は、ある種の寄生効果を抑えます。



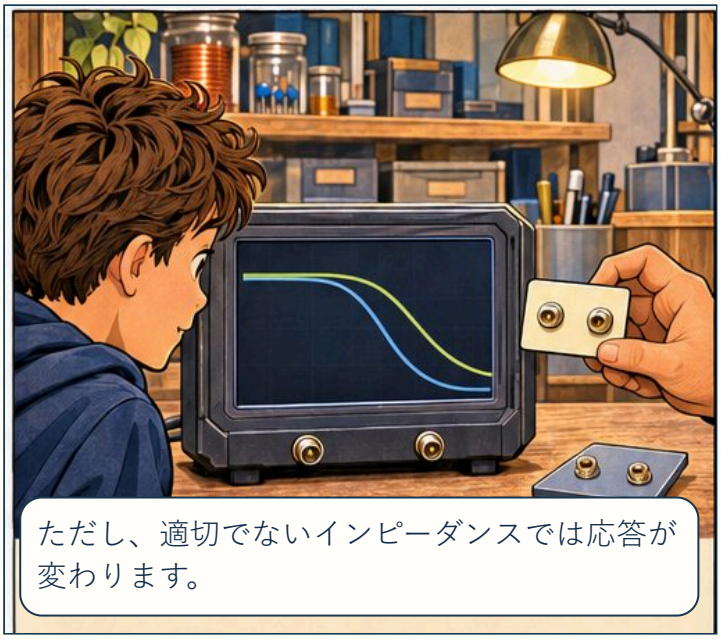
少年は記号と実際の構造を区別します。

三つの素子と次数

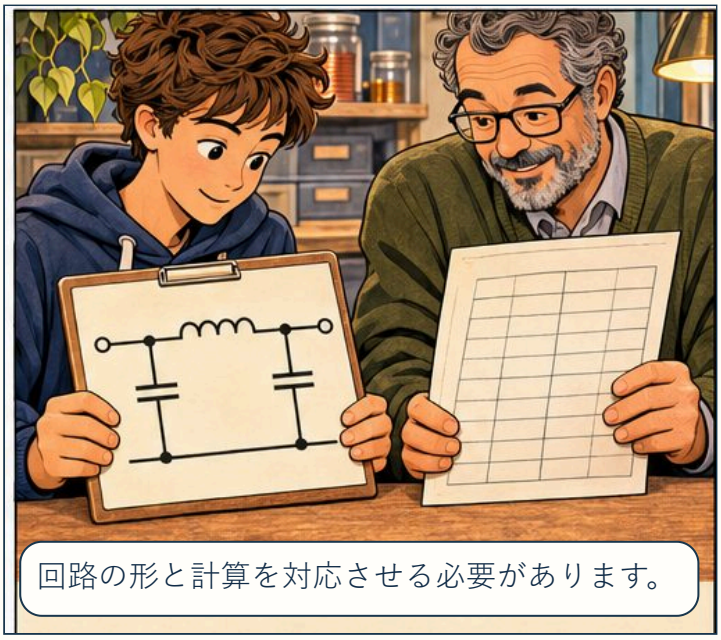

この理想回路には、C、L、C の三つのリアクタンス素子があります。


ここでは三次ローパスフィルタになります。


次数は、モデルの遠方での傾きなどを特徴づけます。


ただし、適切でないインピーダンスでは応答が変わります。

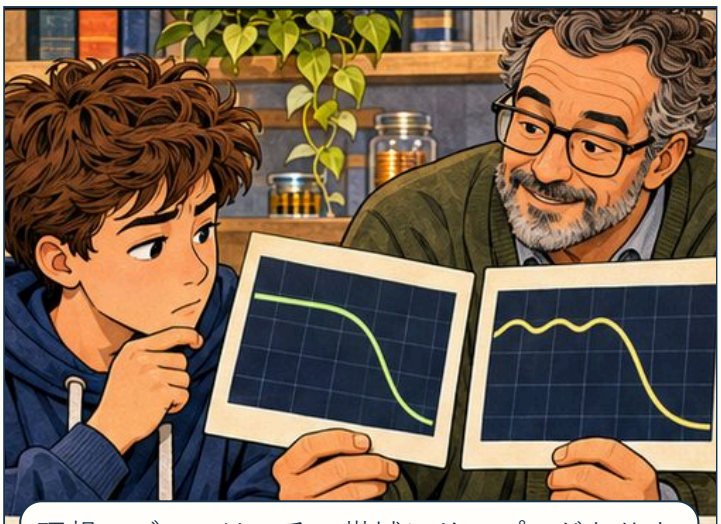

無作為に部品を増やしても、目的のフィルタにはなりません。


回路の形と計算を対応させる必要があります。

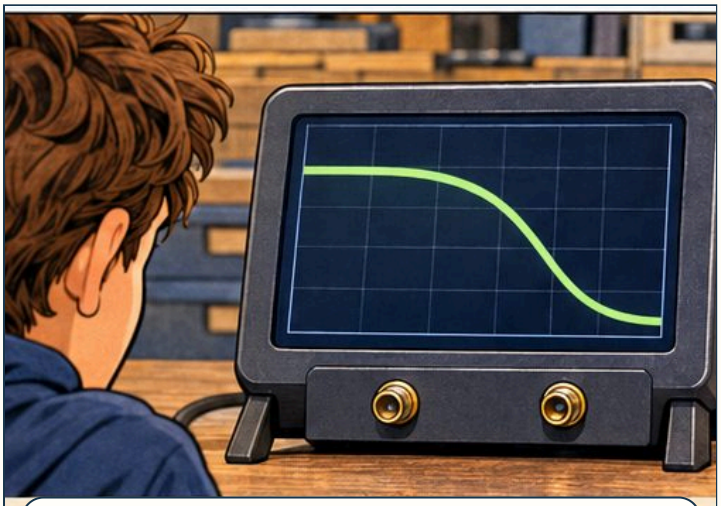
なぜバタワースなのか



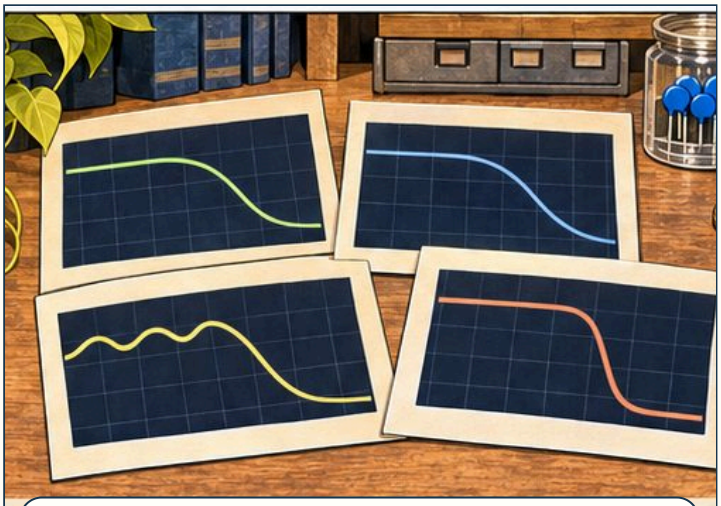
バタワース応答は、通過帯域で最大平坦になります。



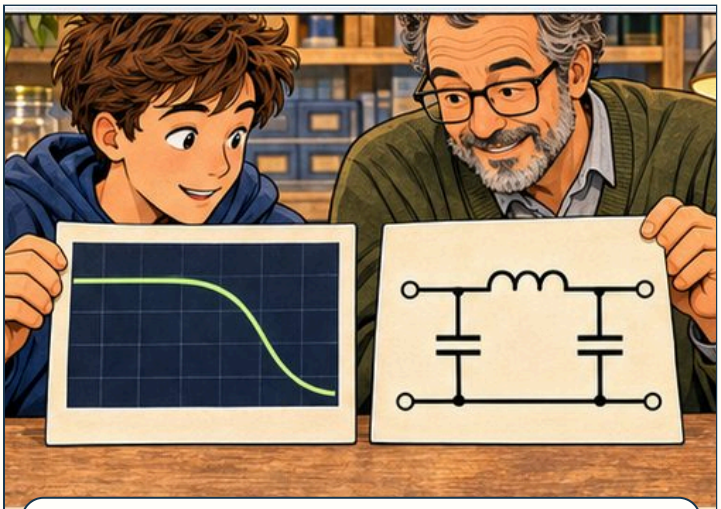
理想モデルでは、その帯域にリップルがありません。



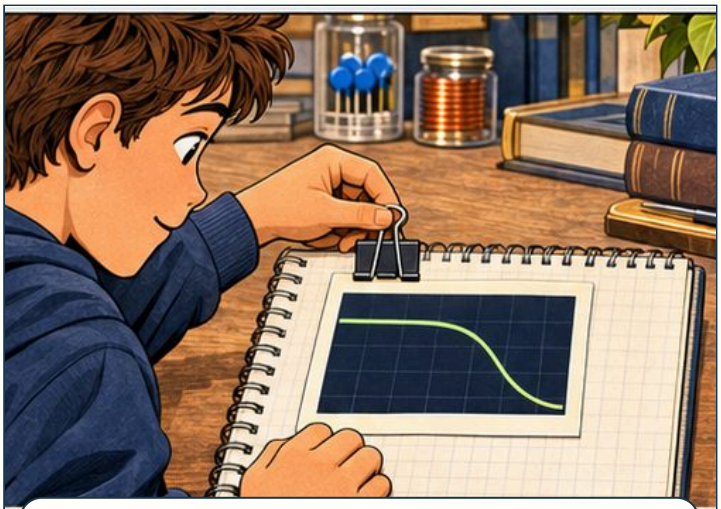
移り変わりは滑らかで、特徴的な曲がり方をします。



ほかの応答では、異なる点を折り合いにします。



初めての設計を理解しやすくするため、この種類を選びます。



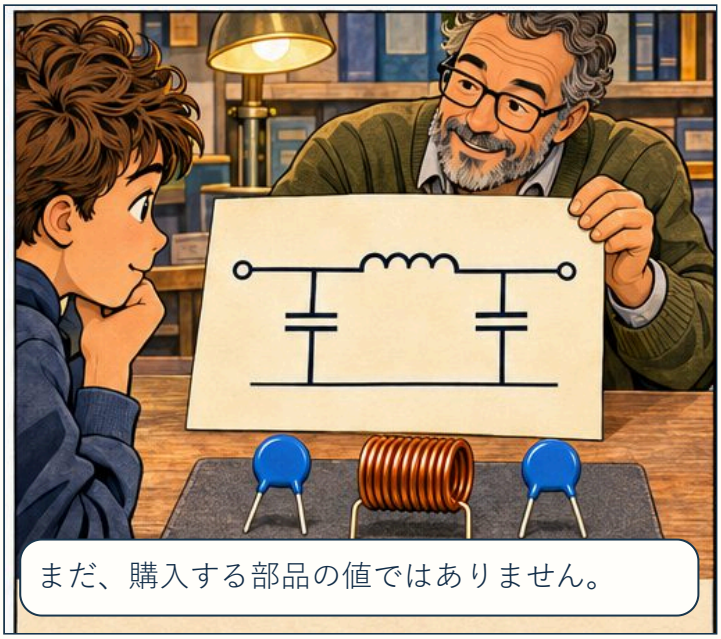
単にローパスと言うより、詳しい指定になります。

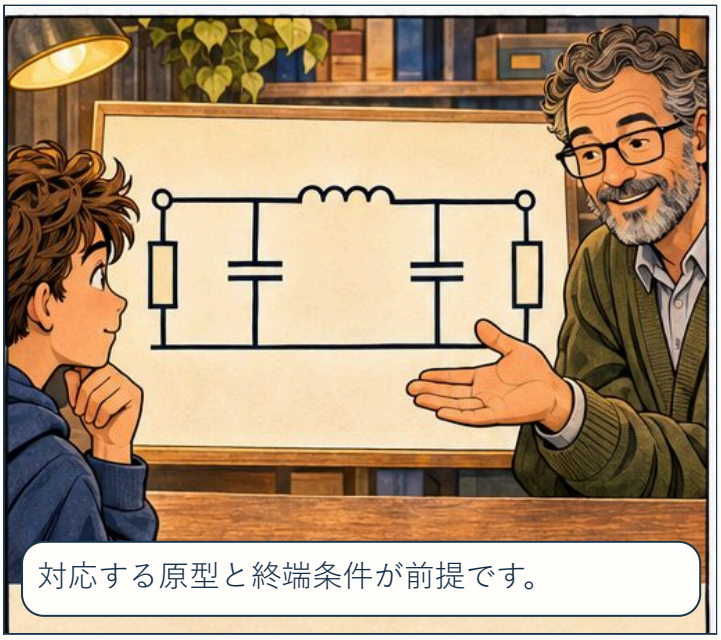
まず原型から始める


正規化した原型が、設計用の係数を与えます。


今回の三次バタワースでは、1、2、1 です。

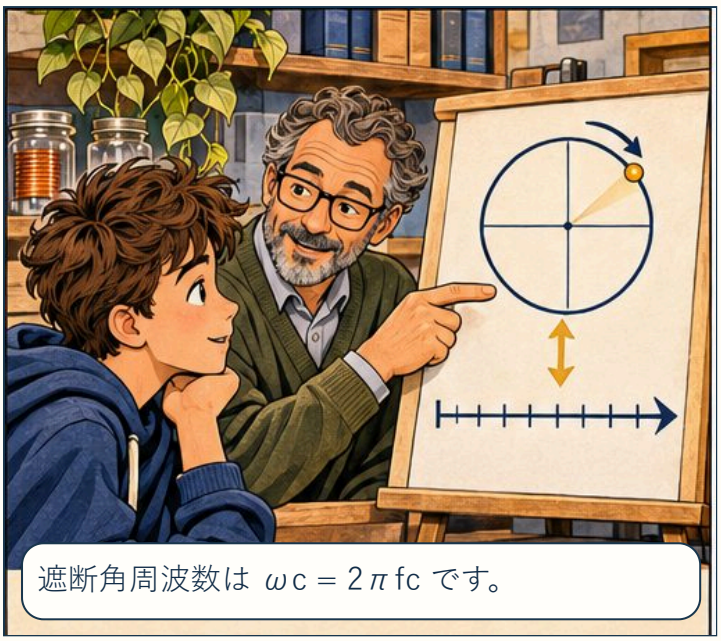

順にコンデンサ、コイル、コンデンサに対応します。


まだ、購入する部品の値ではありません。


対応する原型と終端条件が前提です。


周波数とインピーダンスの尺度をこれから合わせます。

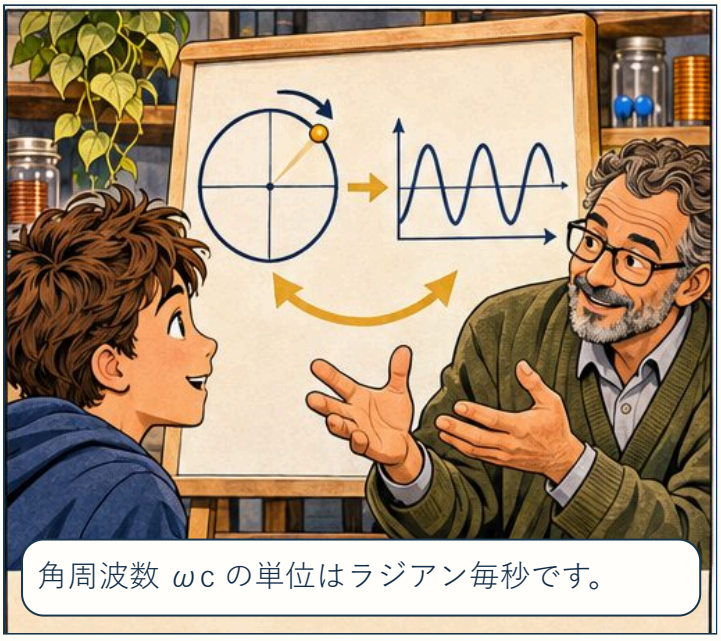
尺度を変える



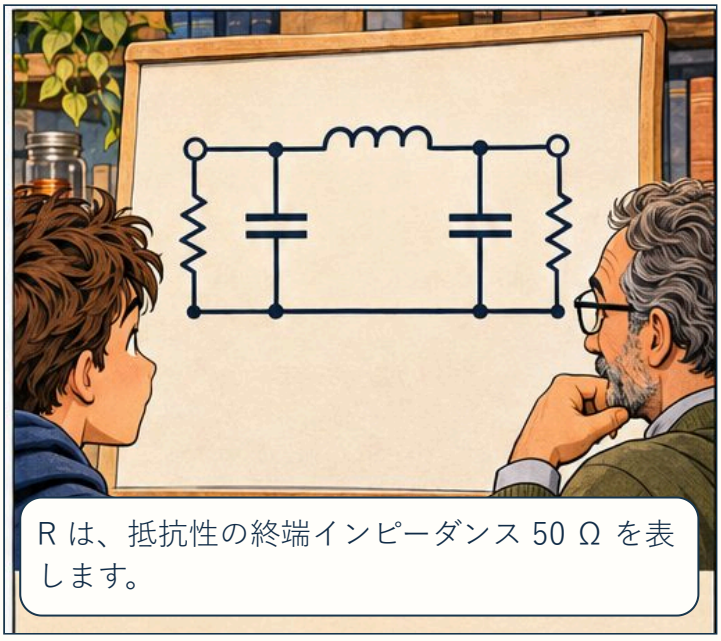
遮断角周波数は $\omega c = 2\pi fc$ です。



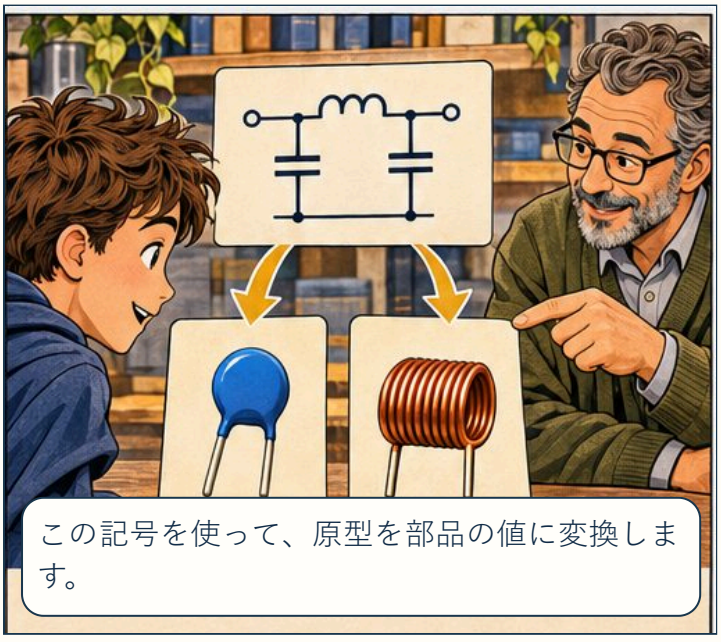
ここで fc は、ヘルツ単位の遮断周波数です。



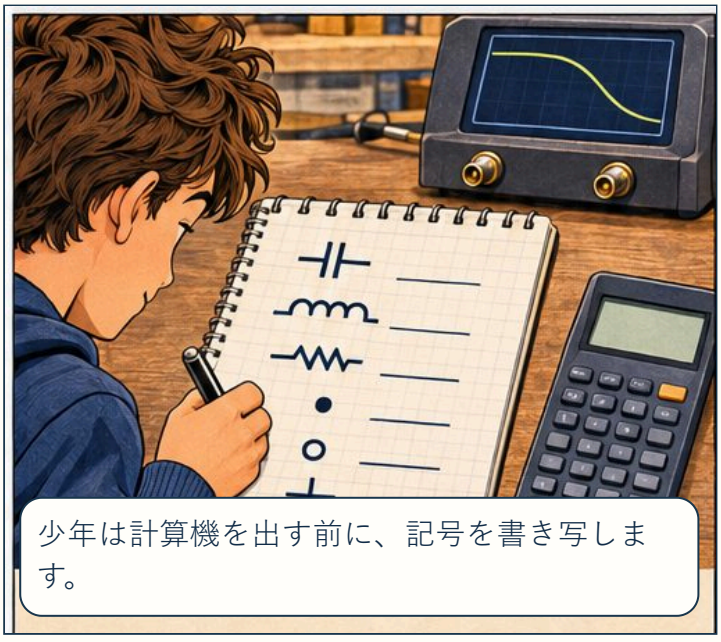
角周波数 ωc の単位はラジアン毎秒です。



R は、抵抗性の終端インピーダンス 50 Ω を表します。



この記号を使って、原型を部品の値に変換します。

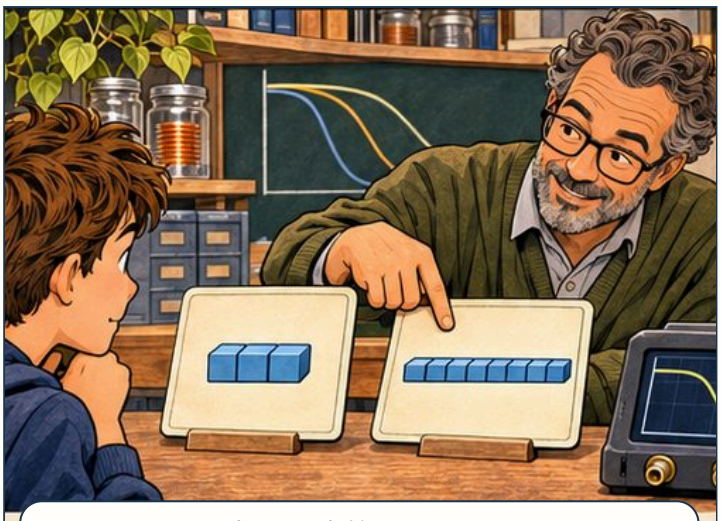


少年は計算機を出す前に、記号を書き写します。

数字より先に単位



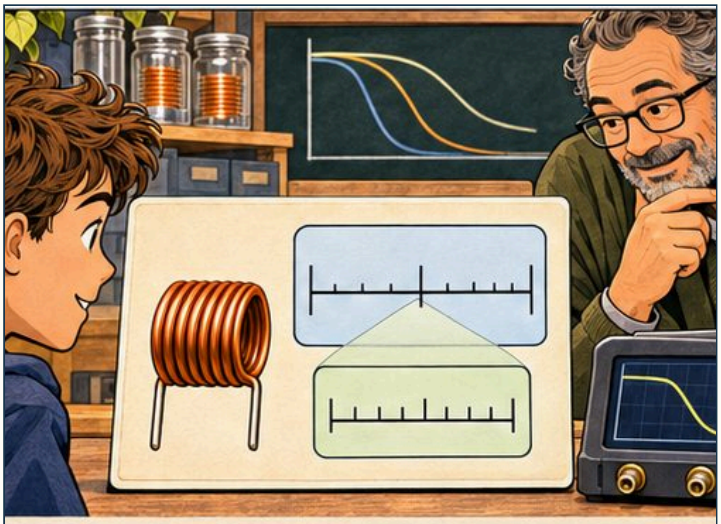
1メガヘルツは100万ヘルツです。



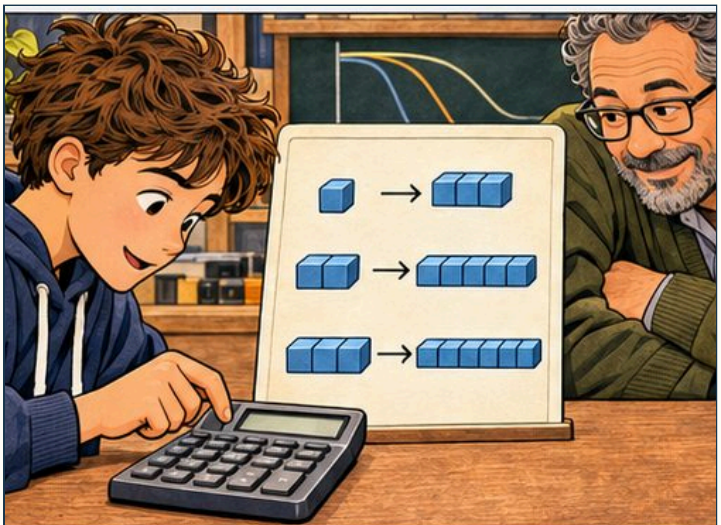
したがって、遮断周波数 10 MHz は 10 000 000 Hz です。



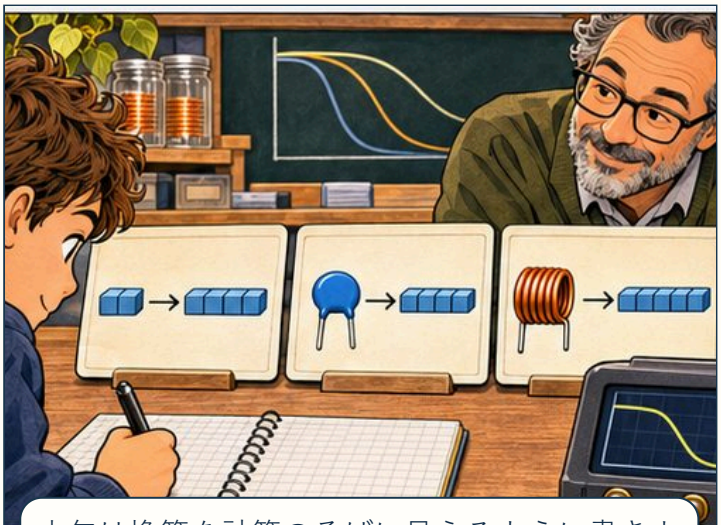
1ピコファラドは 10^{-12} F です。



1マイクロヘンリーは 10^{-6} H です。

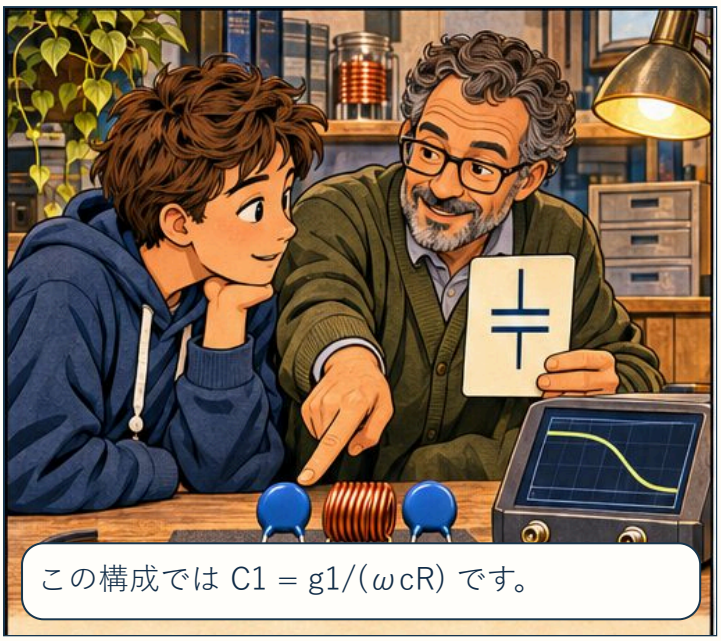


式では、まず基本の単位を使います。

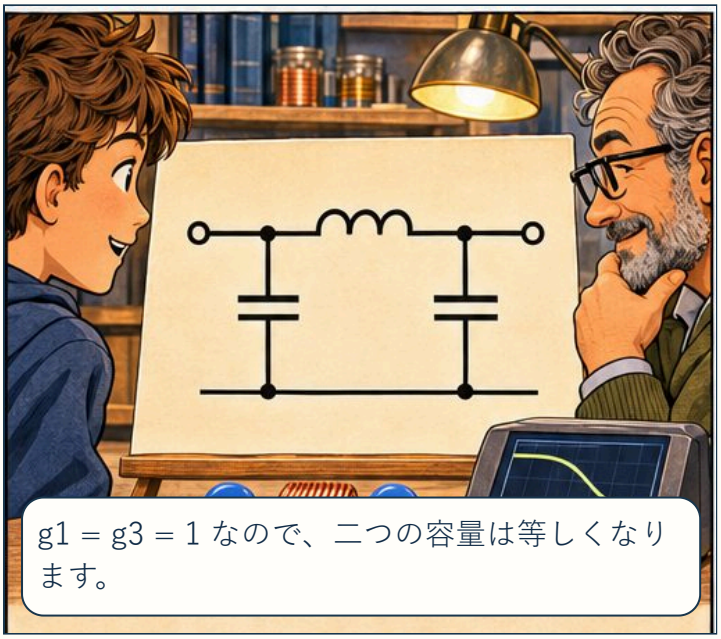


少年は換算を計算のそばに見えるように書きます。

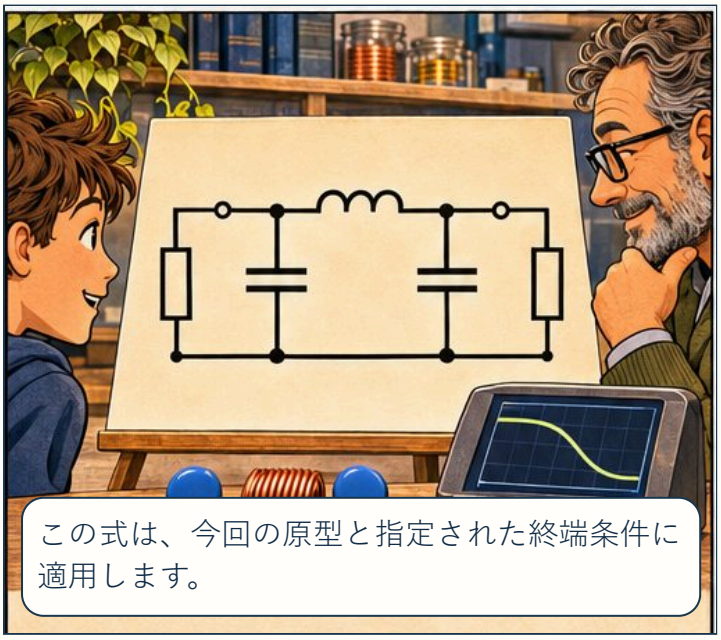
コンデンサの式


この構成では C1 = g1/(ωcR) です。


三つ目の係数から C2 = g3/(ωcR) となります。


g1 = g3 = 1 なので、二つの容量は等しくなります。


C1 = C2 = 1/(2πfcR) が得られます。


この式は、今回の原型と指定された終端条件に適用します。


少年は代入前に記号を一つずつ確認します。

静電容量を計算する



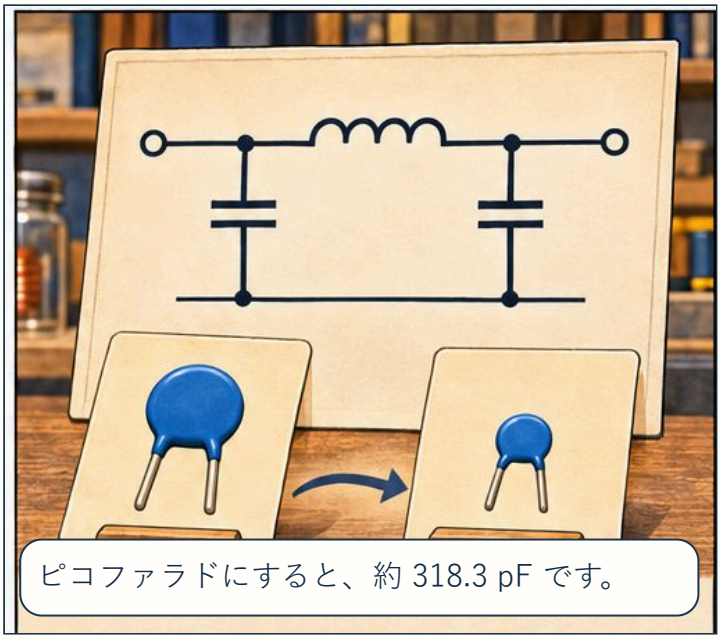
fc に 10 000 000 Hz、R に 50 Ω を代入します。



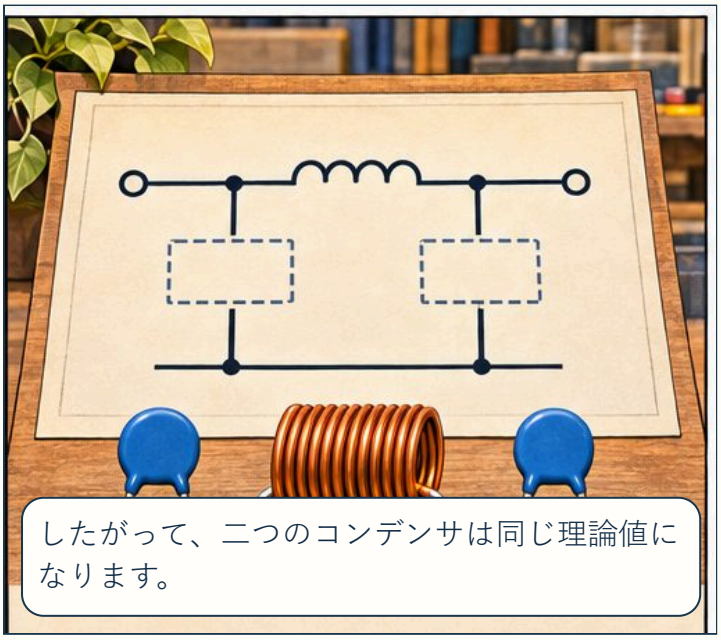
分母は約 3.142 × 10^{9} です。



それぞれの理想容量は約 3.183 × 10^{-10} F です。



ピコファラドにすると、約 318.3 pF です。

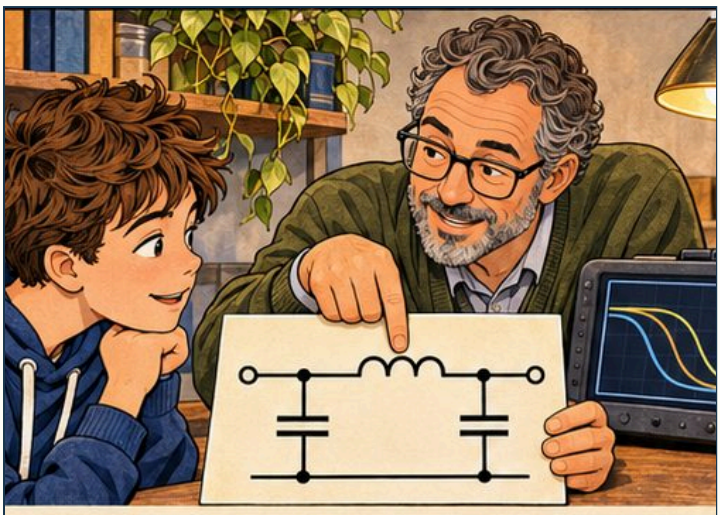


したがって、二つのコンデンサは同じ理論値になります。



Lucasは単位をはっきり添えて結果を書きます。

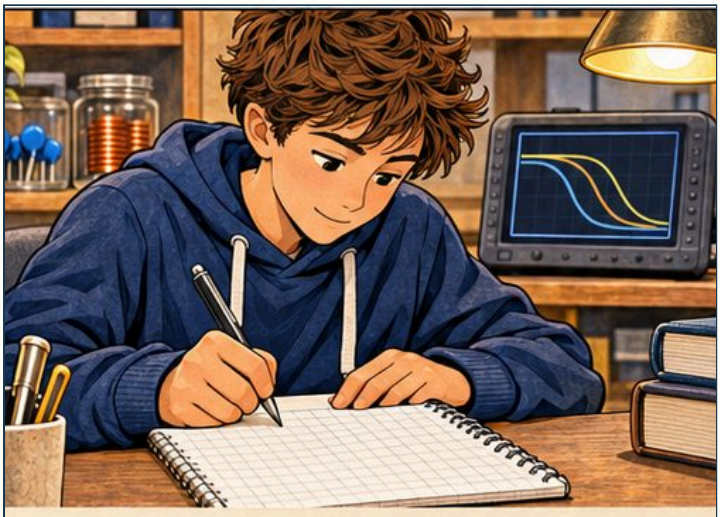
コイルの式



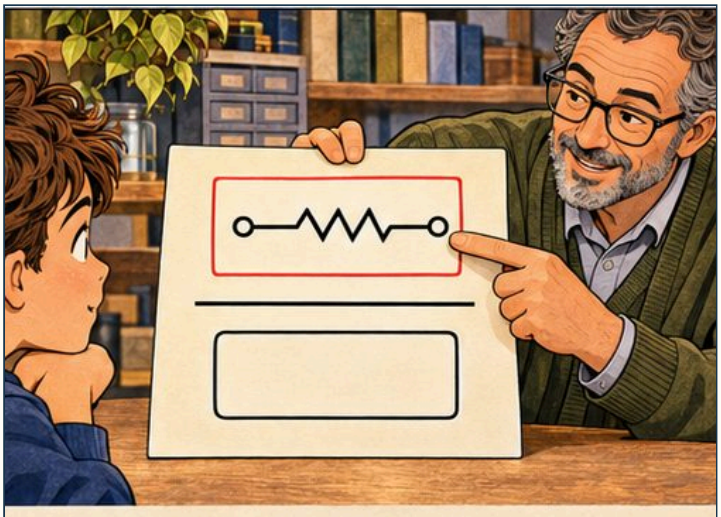
直列のコイルでは L = g2R/ωc です。



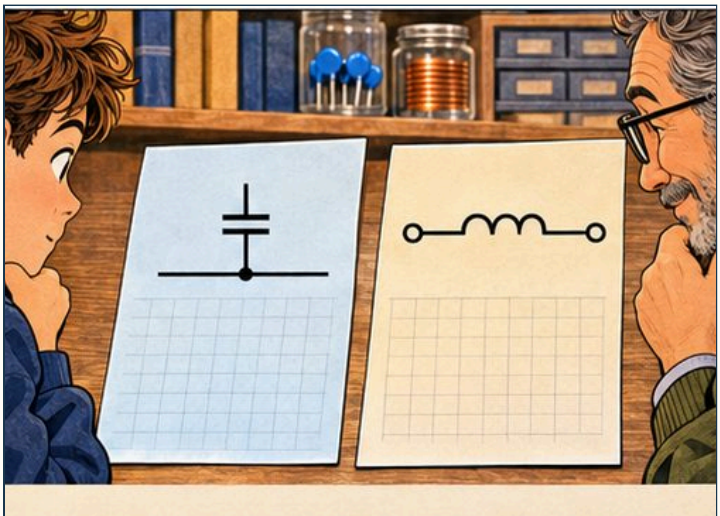
中央の係数は、ここでは g2 = 2 です。



したがって L = 2R/(2πfc) となります。



今回は終端抵抗が分子にあります。

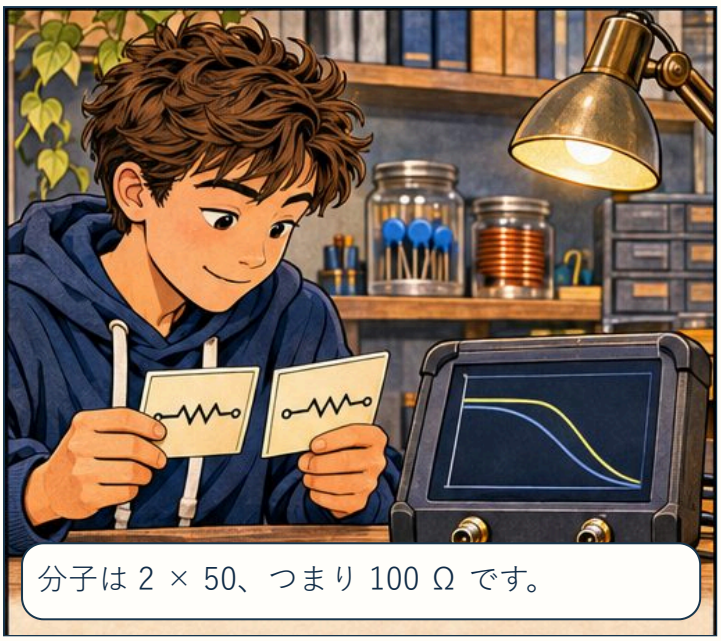


少年はコンデンサの式と比べます。



見た目が似ていても、読み直す必要があります。

インダクタンスを計算する



分子は 2 × 50、つまり 100 Ω です。



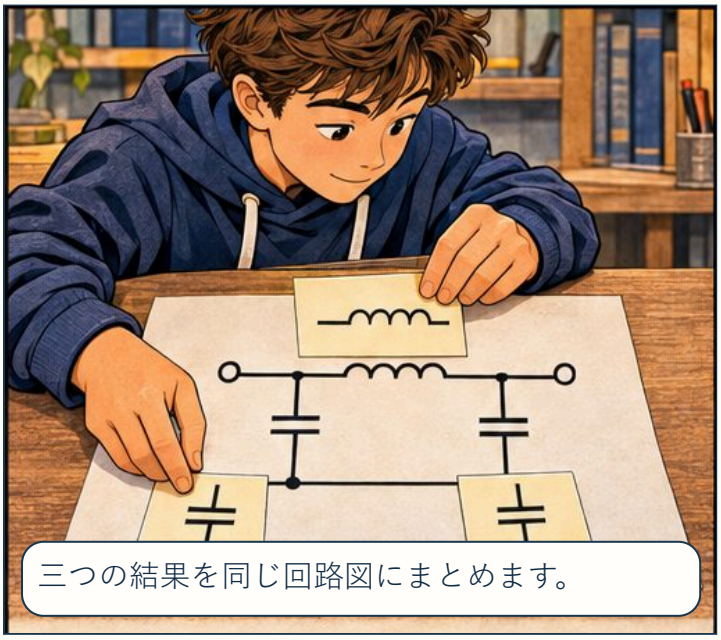
分母は $2\pi \times 10\,000\,000$、約 $6.283 \times 10^{7}\ \mathrm{s^{-1}}$ です。



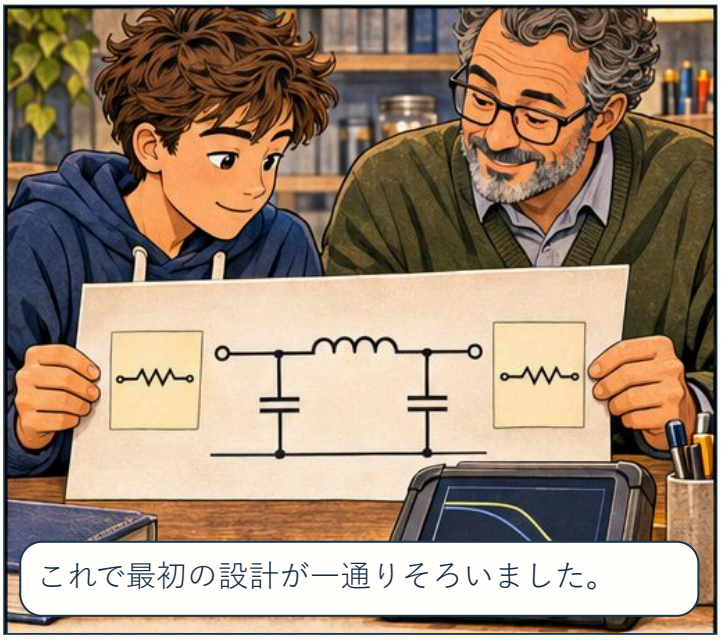
計算結果は約 1.592×10^{-6} H です。



理想コイルのインダクタンスは約 1.59 μH になります。



三つの結果を同じ回路図にまとめます。

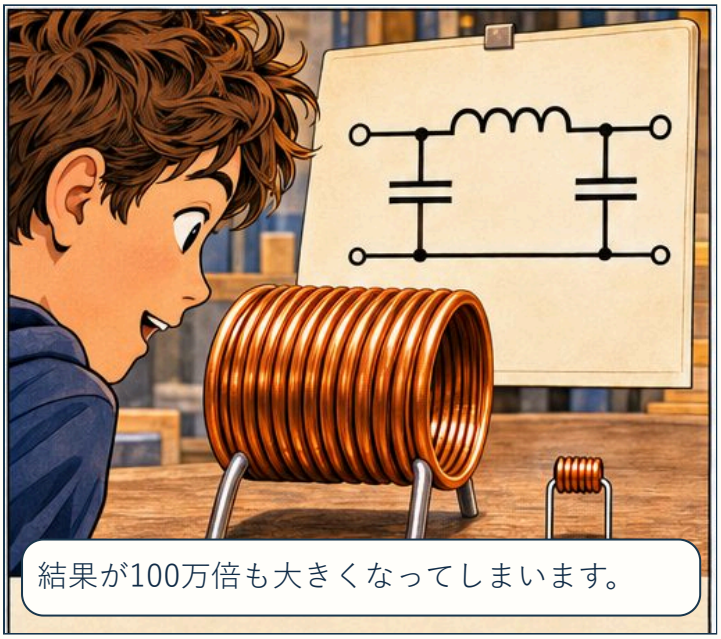


これで最初の設計が一通りそろいました。

100万倍の間違い

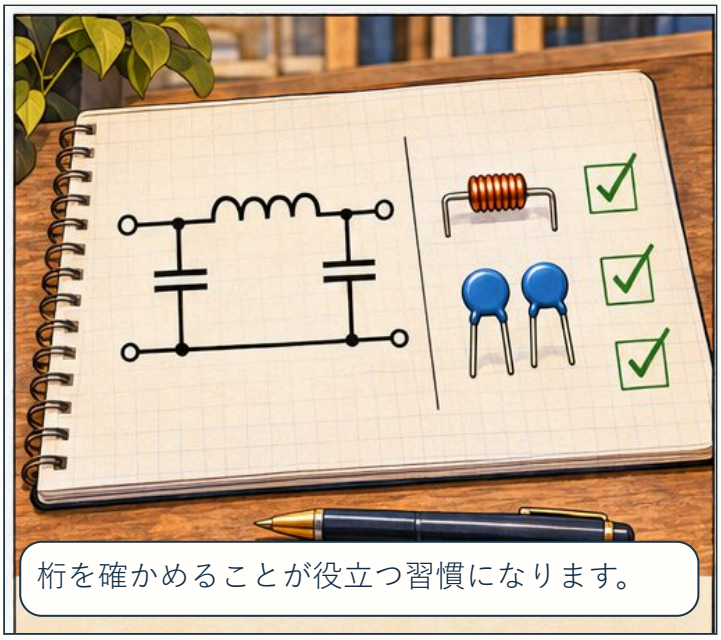

少年は計算をもう一度すばやく入力してみます。


10 000 000 の代わりに 10 と入力します。


結果が100万倍も大きくなってしまいます。


予想される部品と比べると、すぐに問題が見つかります。

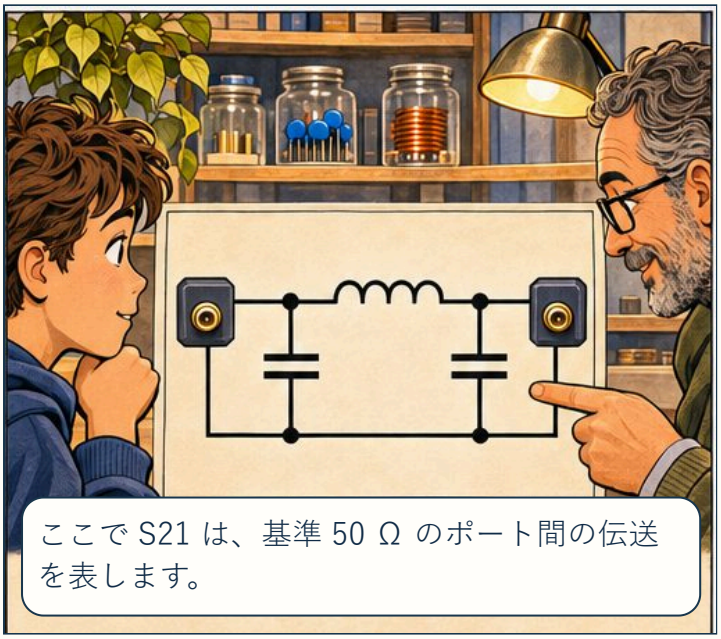

入力を直し、別にもう一度計算します。

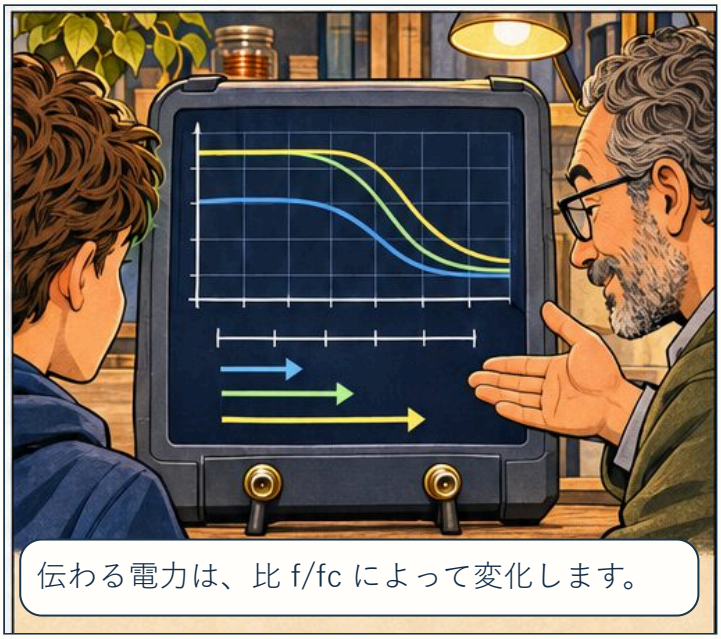

桁を確かめることが役立つ習慣になります。

曲線全体を予測する

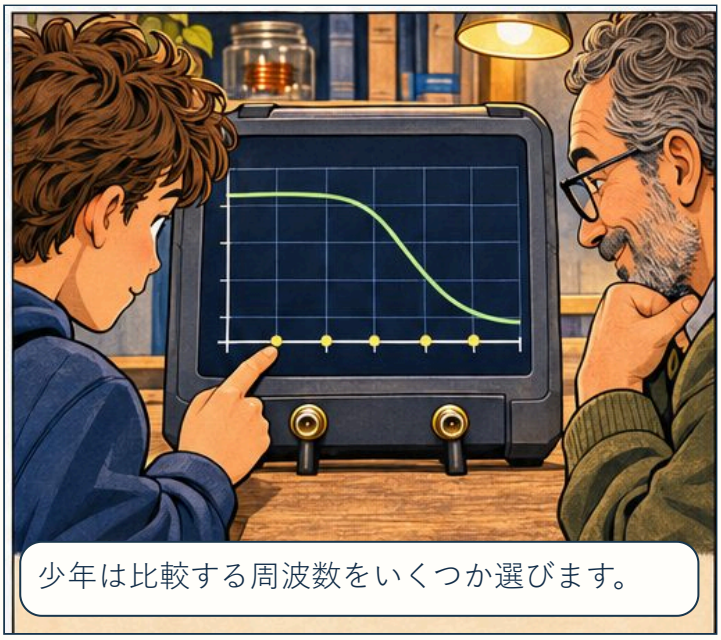

三つの値だけでは、応答全体はまだ分かりません。


理想モデルでの S21 の絶対値の二乗は 1/[1 + (f/fc)⁶] です。


ここで S21 は、基準 50 Ω のポート間の伝送を表します。


伝わる電力は、比 f/fc によって変化します。


理論曲線を測定前の基準にします。


少年は比較する周波数をいくつか選びます。

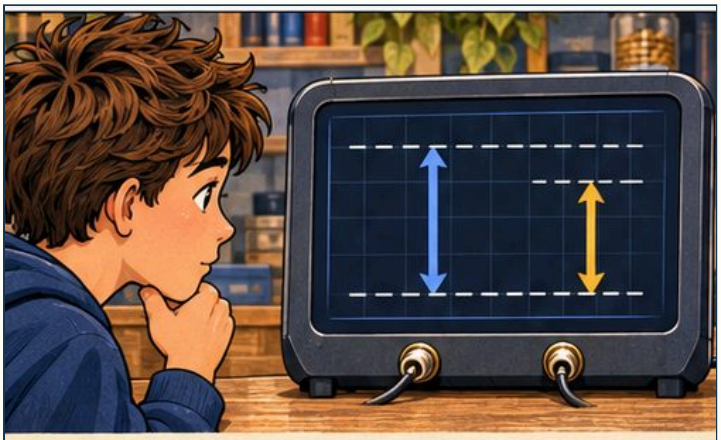
マイナス3デシベルとは



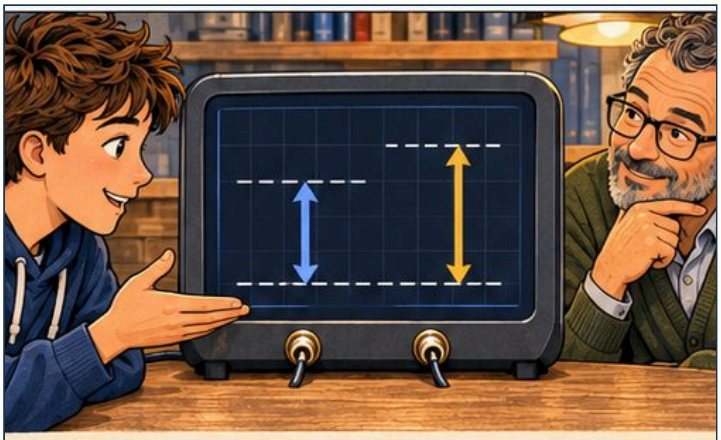
f = fc では、理想的な電力伝送比は 1/2 です。



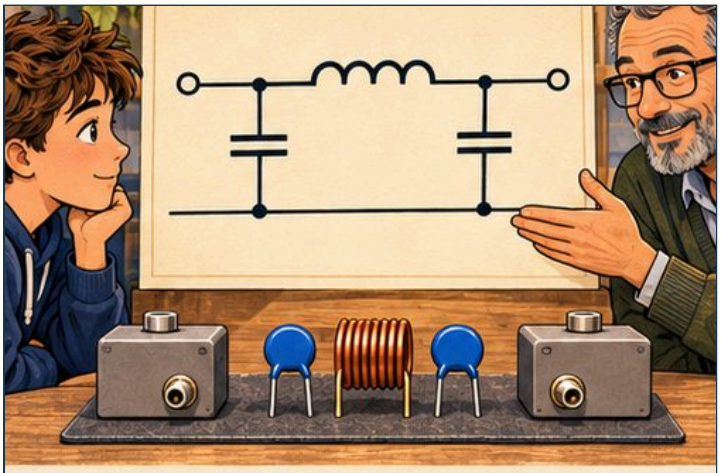
デシベルでは 10 log10(1/2)、約 −3.01 dB です。



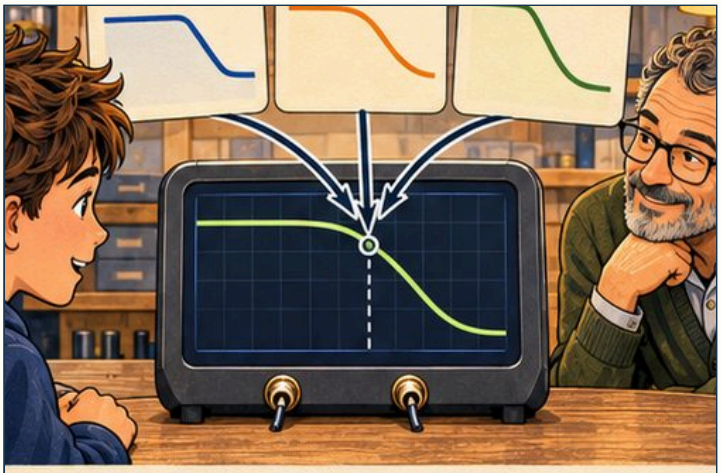
このとき S21 の絶対値は約 0.707 です。



したがって、振幅が半分という意味ではありません。



計算では適切な 50 Ω の基準を使います。

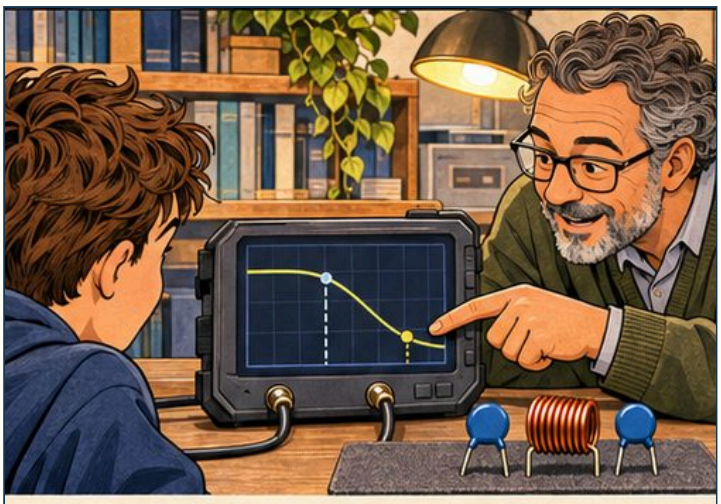


少年は同じ曲線上の一点を、三通りの表し方で結びます。

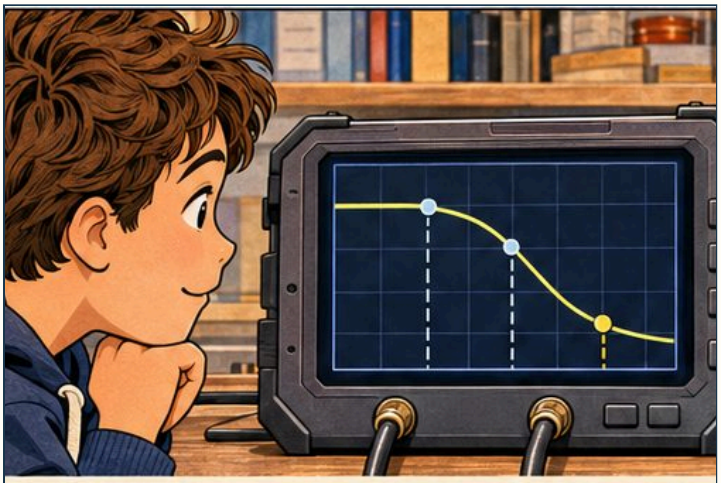
遮断周波数より上で



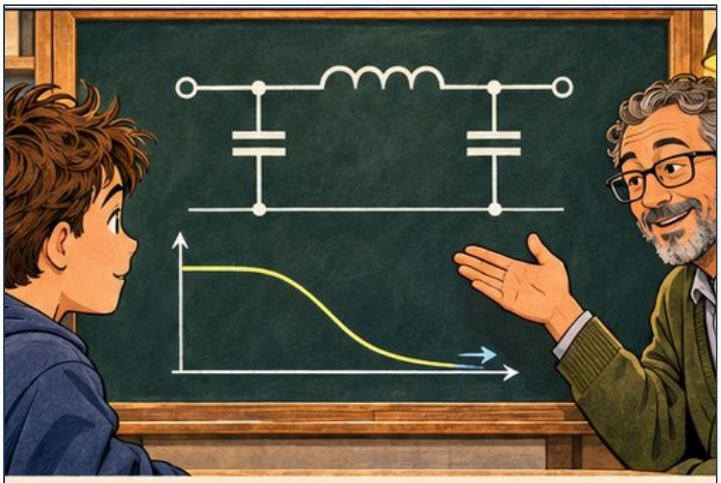
20 MHz では f/fc = 2 です。



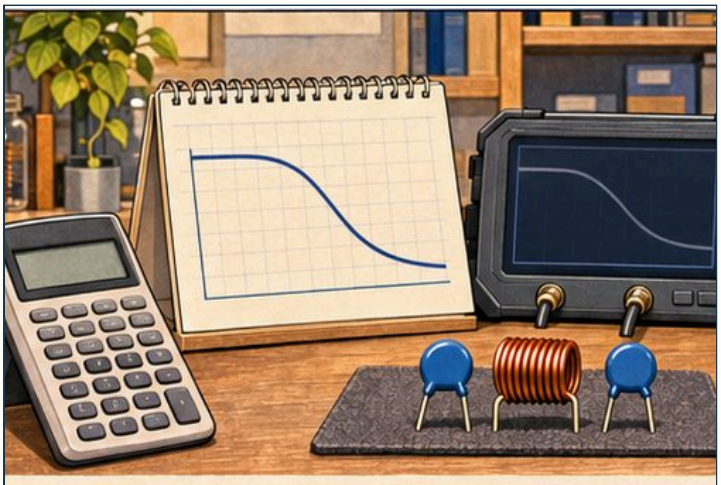
理想的な伝送は約 −18.13 dB になります。



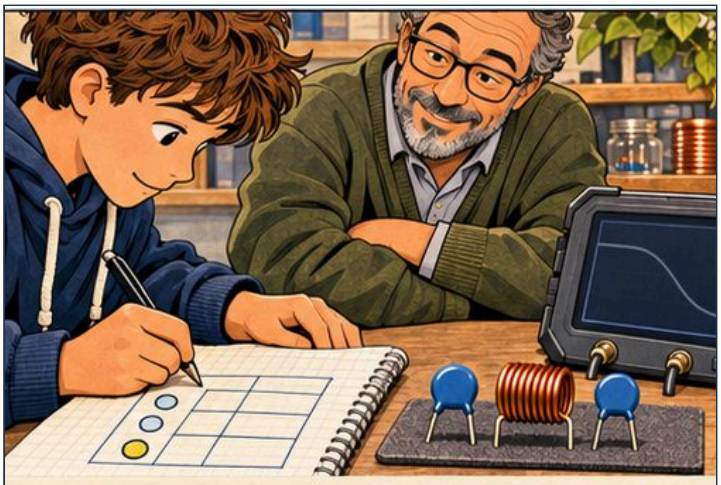
30 MHz では f/fc = 3 で、約 −28.63 dB です。



減衰は大きくなりますが、有限です。

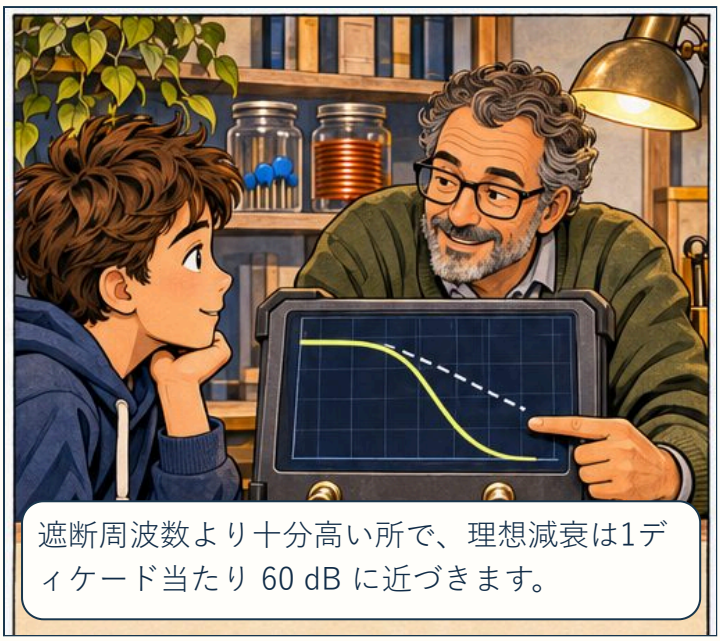


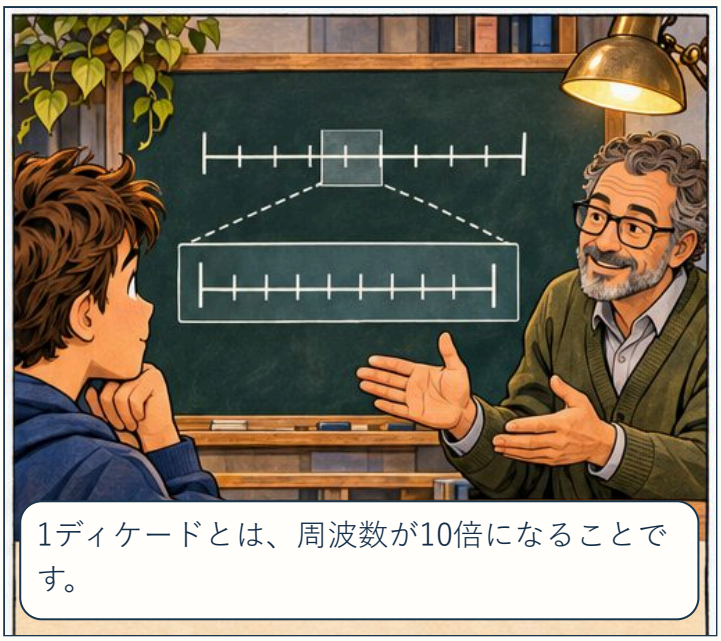
これは計算値であり、この回路の実測値ではありません。



少年は予測の欄に書き入れます。

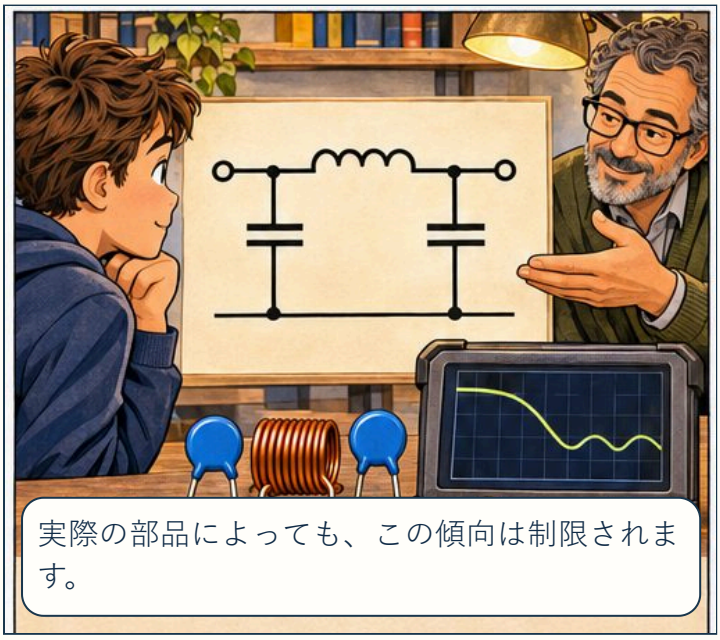
傾きは保証ではない


遮断周波数より十分高い所で、理想減衰は1ディケード当たり 60 dB に近づきます。


1ディケードとは、周波数が10倍になることです。

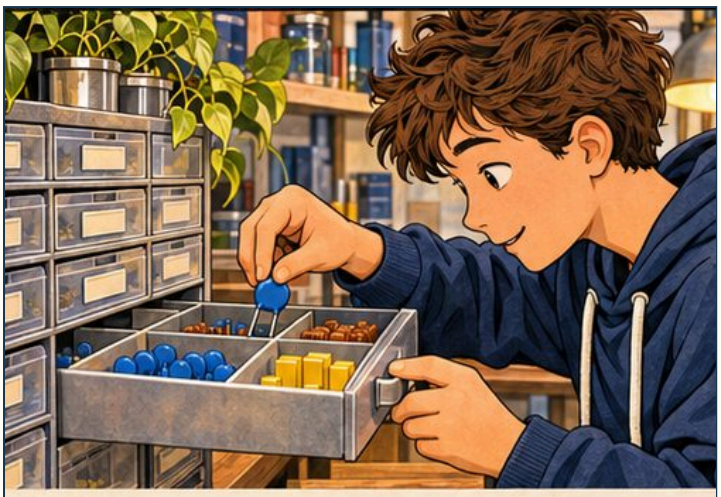

この漸近的な傾きは、三次モデルの特徴です。


遮断周波数の近くでは、曲線は直線ではありません。

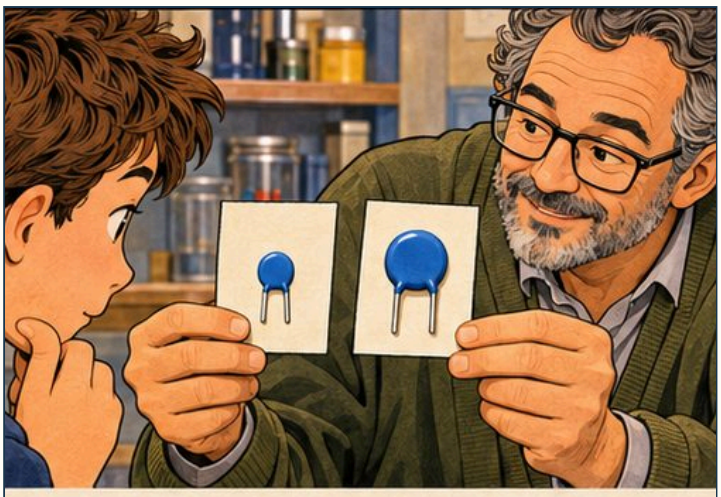

実際の部品によっても、この傾向は制限されます。


少年は条件の外へ規則を広げません。

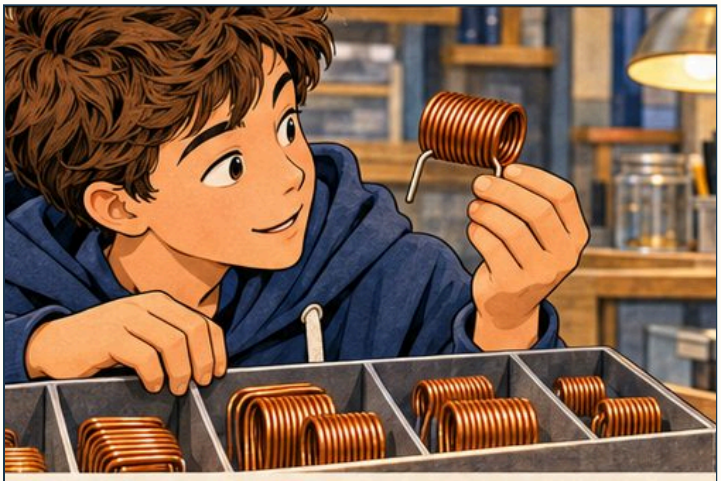
手に入る部品の値



引き出しに 318.3 pF のコンデンサがあるとは限りません。



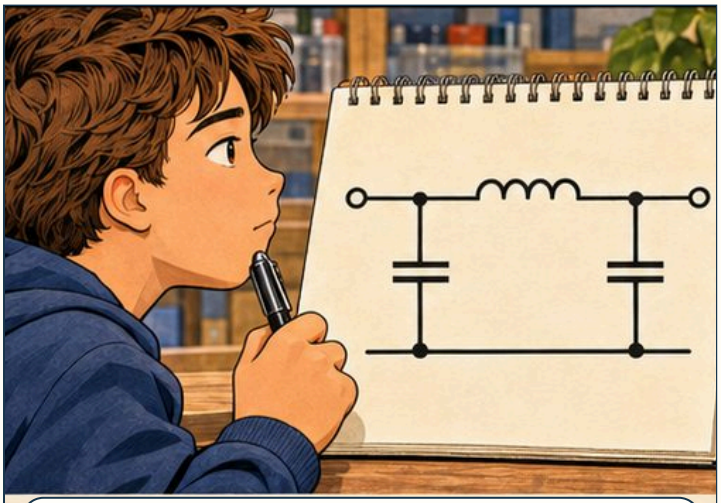
よくある 330 pF は、同じ値ではありません。



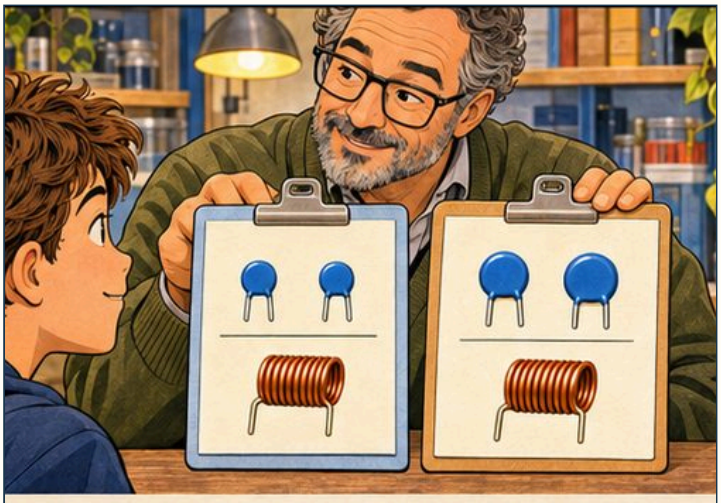
1.6 µH のコイルは計算値に近いものです。



この値を選ぶなら、応答を再計算かシミュレーションで調べます。

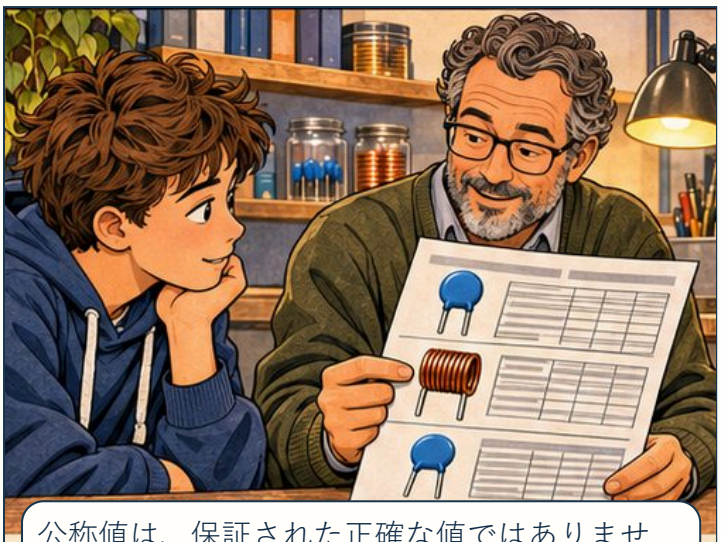


自動的に「ちょうど 10 MHz」とは呼べません。



少年は理想値と採用値を分けて残します。

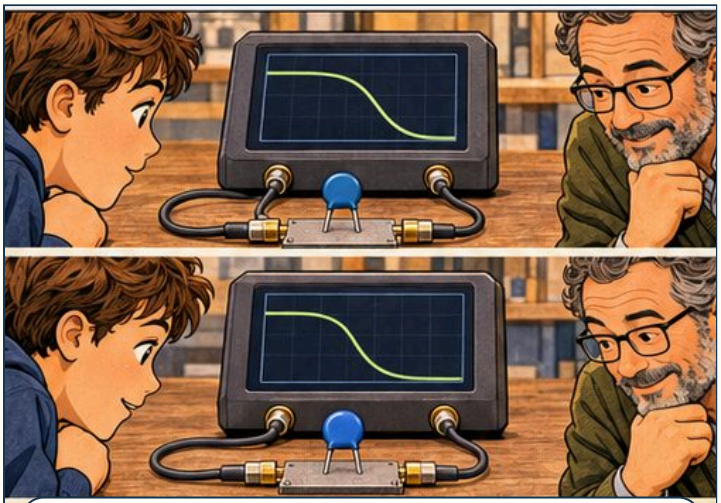
部品ごとの許容差



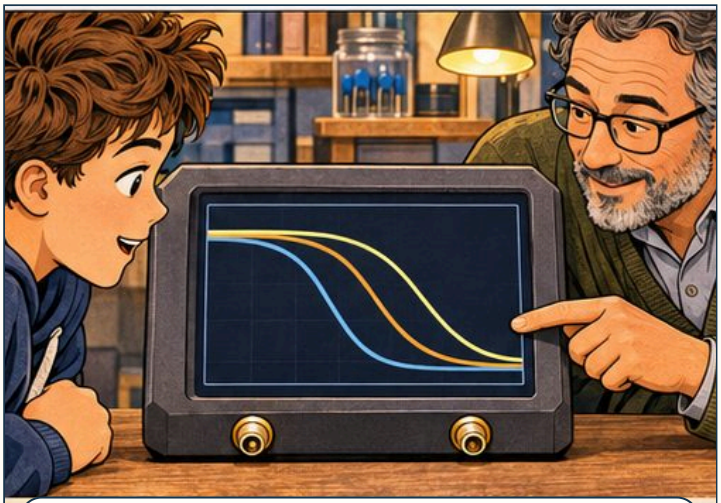
公称値は、保証された正確な値ではありません。



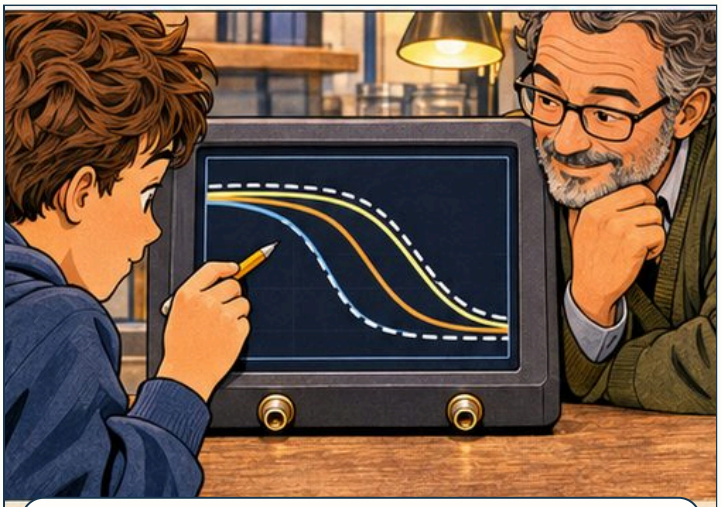
コンデンサとコイルの許容差が重要です。



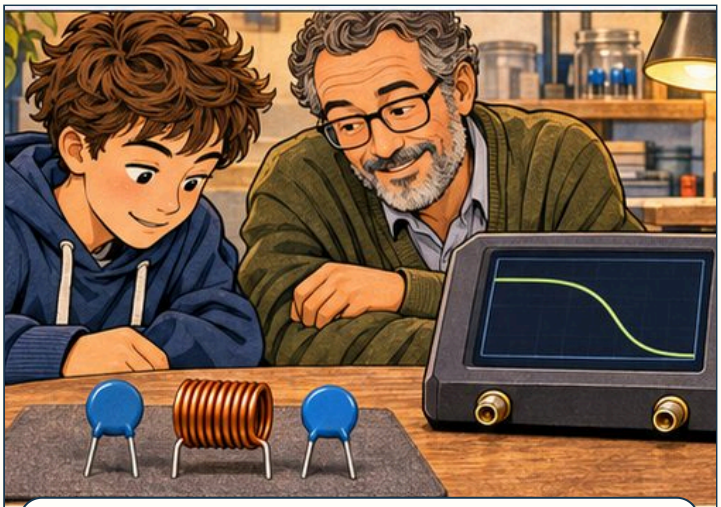
同じ表示の部品でも、少し違うことがあります。



シミュレーションでは、複数の値の組合せを調べられます。



あり得る応答の範囲を予測する助けになります。



そのあと実際に使った部品を測定で確かめます。

隠れた部品



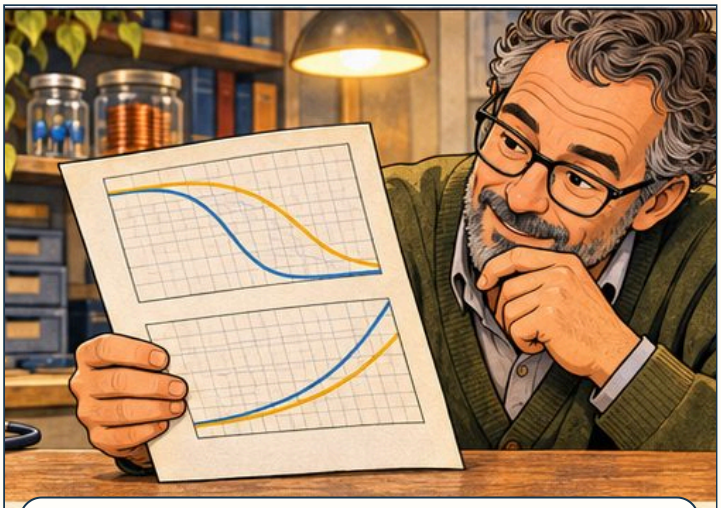
実際のコイルには、抵抗や寄生容量もあります。



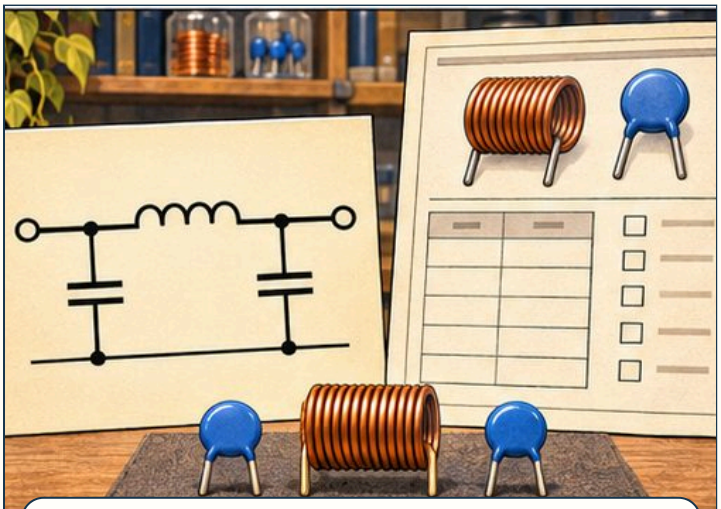
コンデンサには、損失や寄生インダクタンスなどがあります。



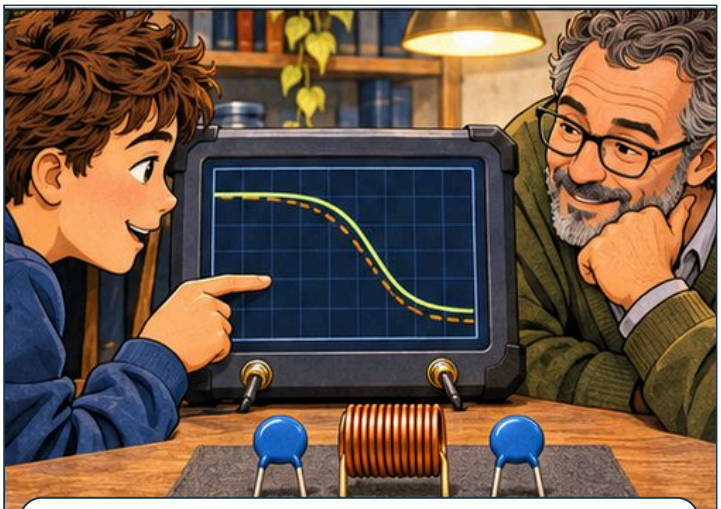
特定の共振に近づくと、振る舞いが変わります。



データシートには、調べるべき限界が記されています。



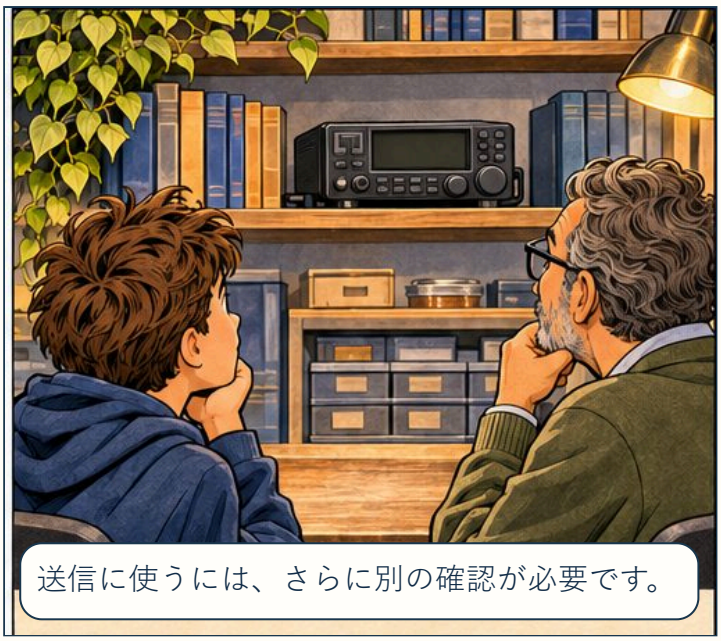
ピコファラドやマイクロヘンリーの値だけでは足りません。



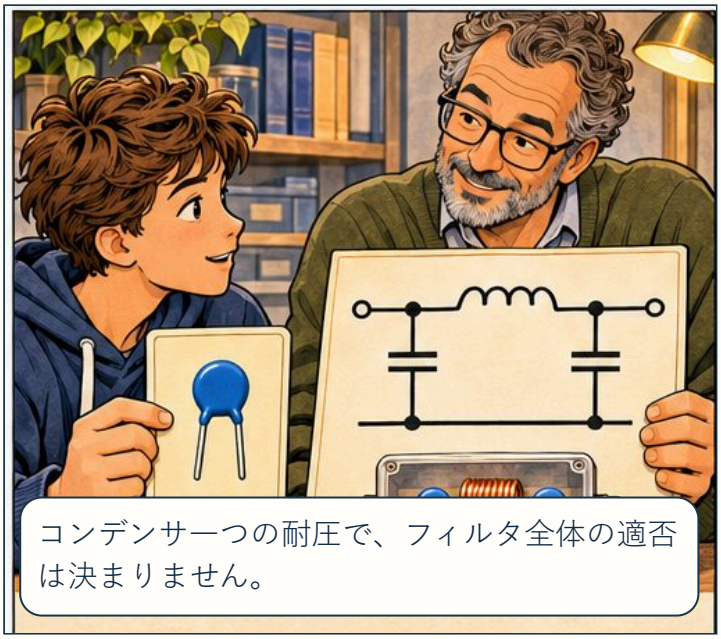
少年は最初の一行より先も読むようになります。

測定台では送信機を認定できない





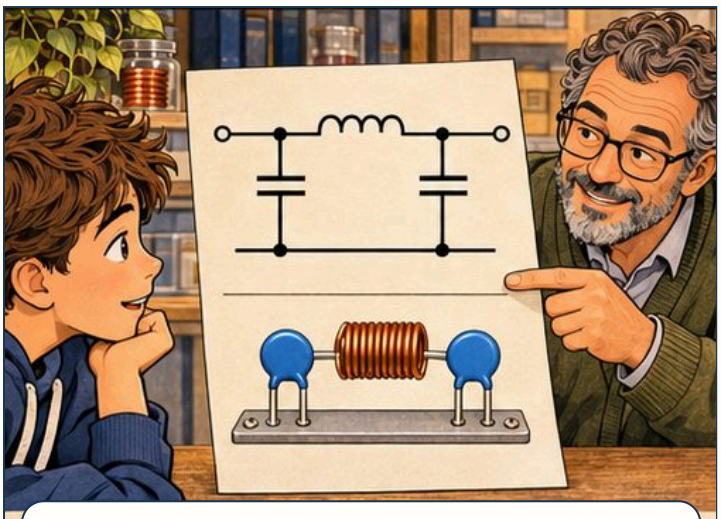








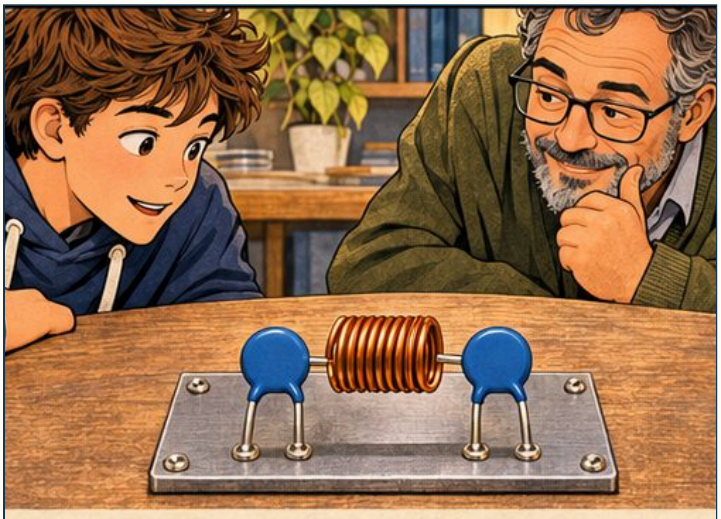
部品配置を描く



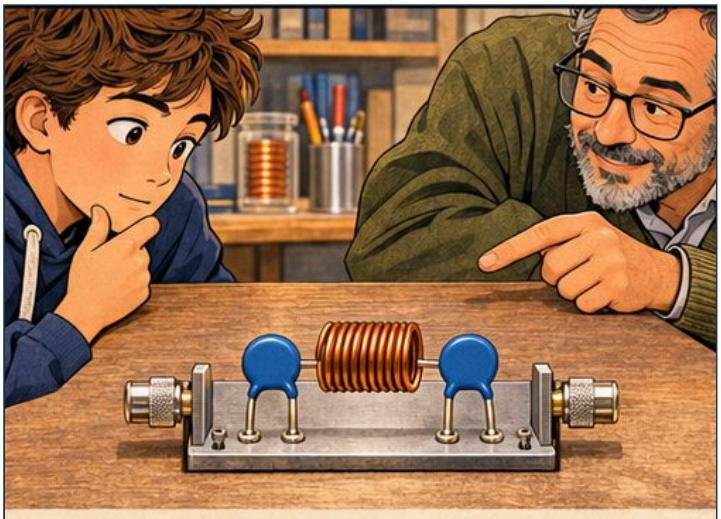
回路図は接続を示しますが、すべての形状は表しません。



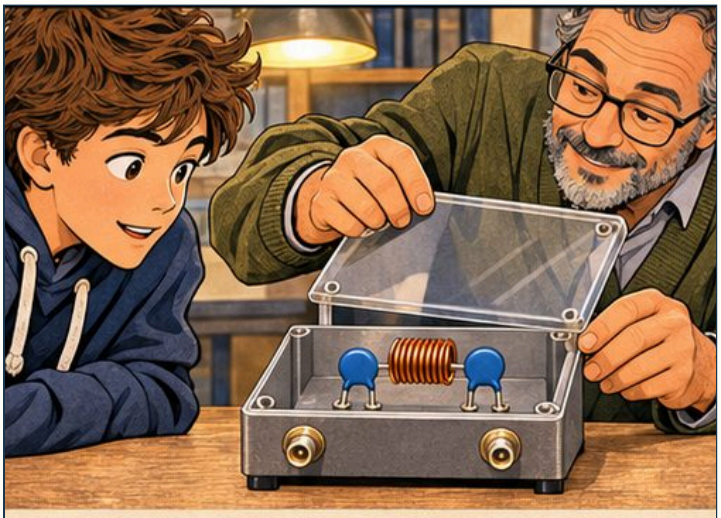
この周波数では、配線の長さや配置も影響し得ます。



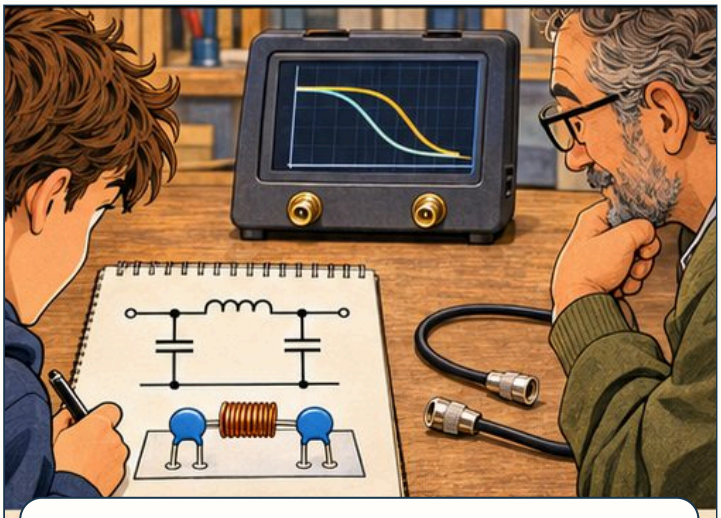
共通グラウンドと短い接続を計画します。



直接結合し得る経路も離します。



Henriが測定に適した実演回路を準備します。

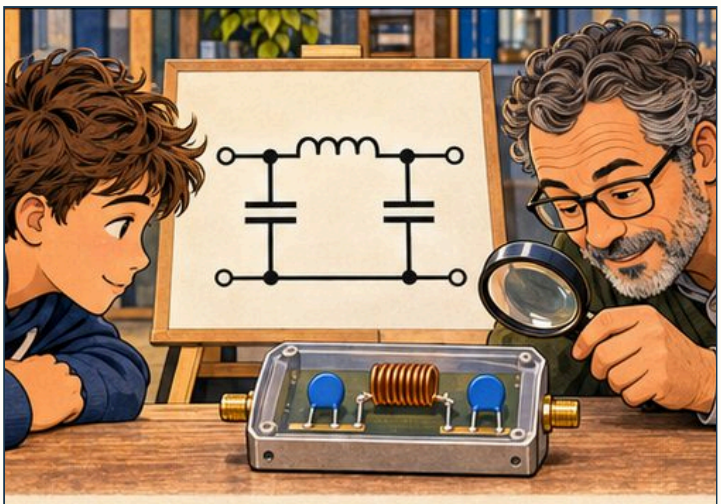


Lucasは接続ごとに、配置と回路図を比べます。

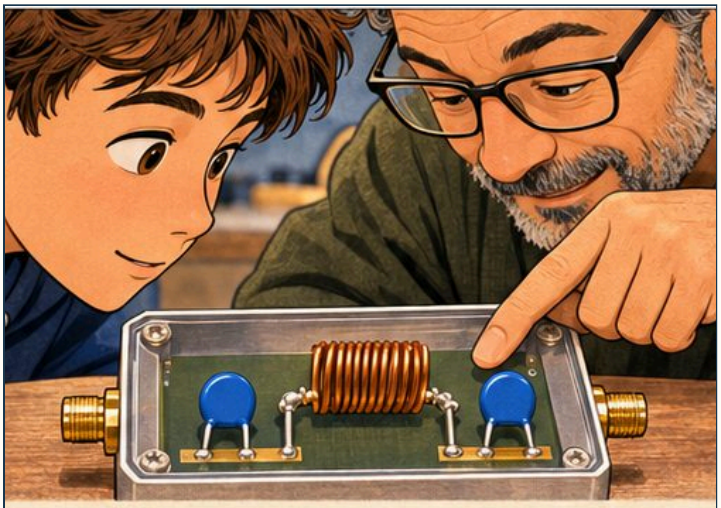
つなぐ前に確認する



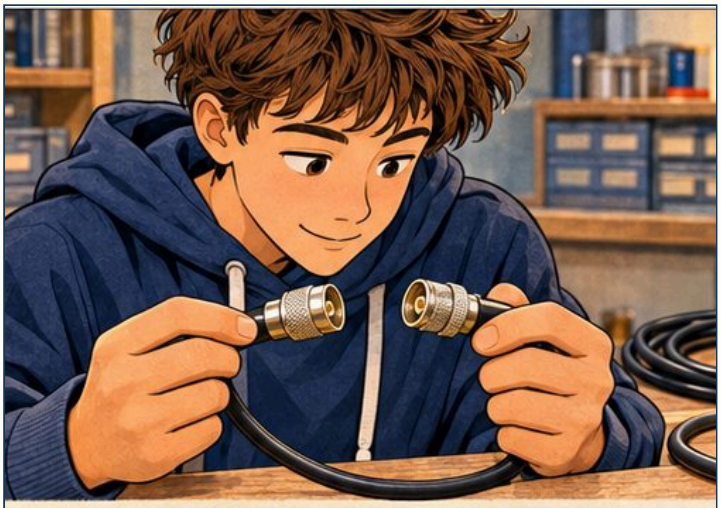
準備中は測定信号源を停止しておきます。



接続、部品、共通グラウンドを確認します。



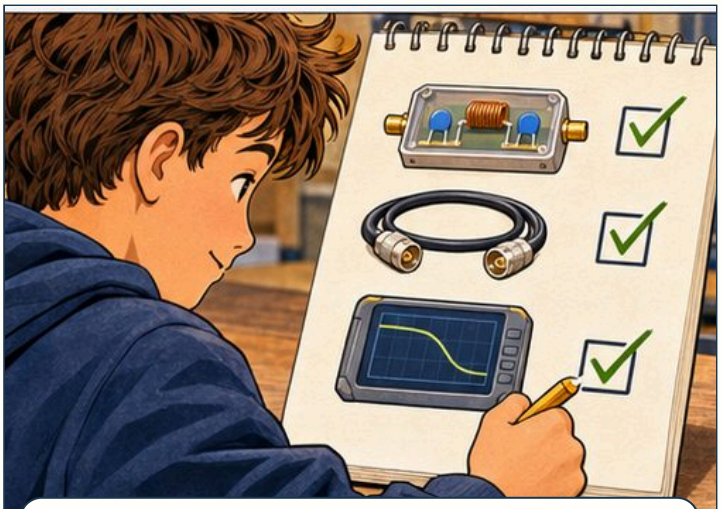
短絡、接続間違い、損傷した部品を探します。



続いてコネクタとケーブルを点検します。



指導役は機器の入力限界を確認します。

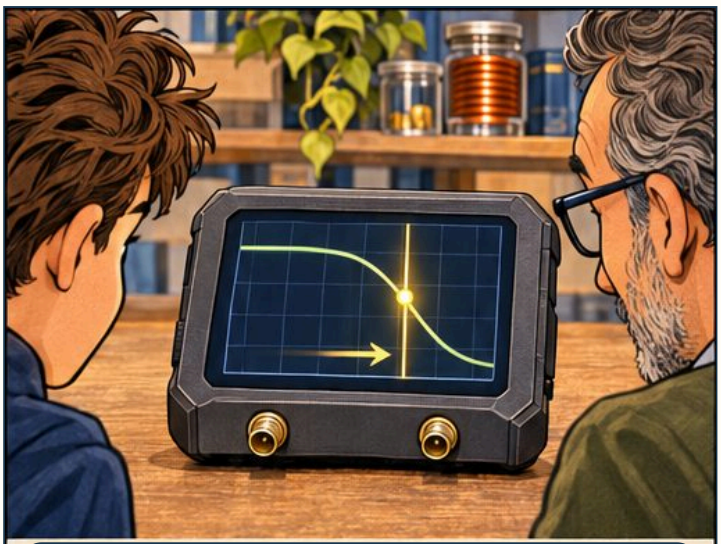


少年は最初の掃引前にチェック表を完成させます。

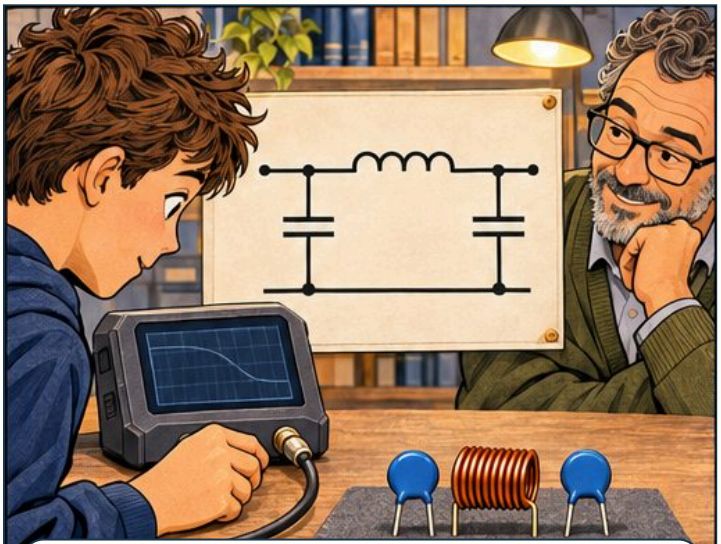
分析器が問いかける



ネットワークアナライザは、既知の小さな信号を送ります。



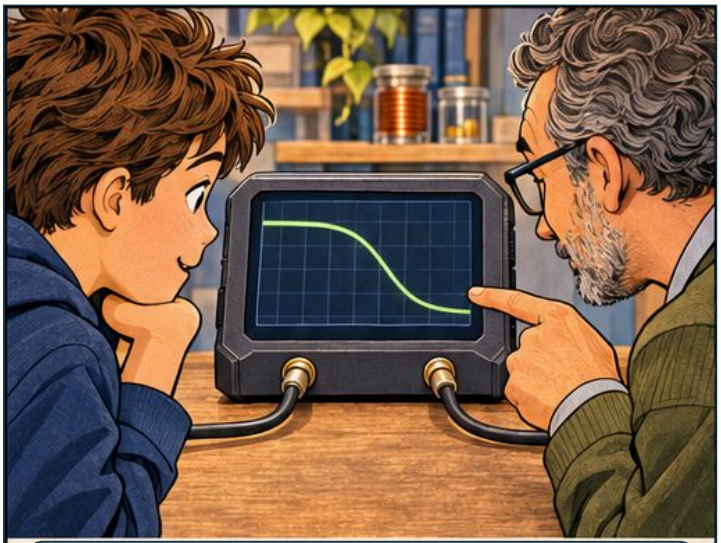
選んだ周波数範囲を掃引します。



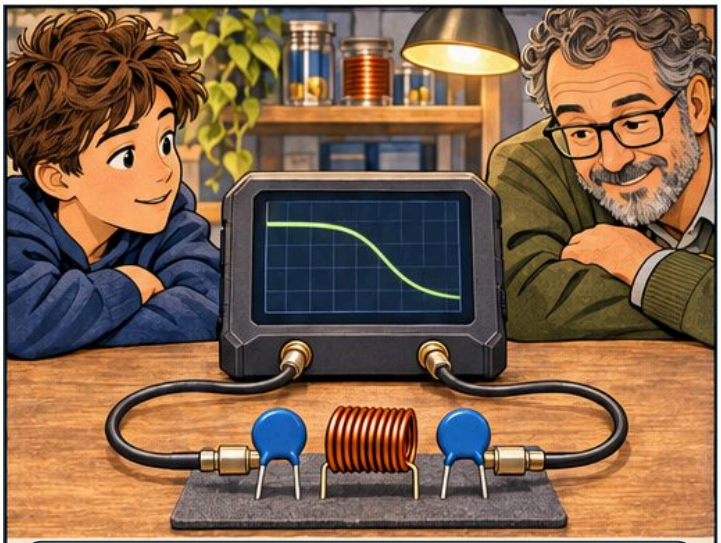
ポート1がフィルタ入力に信号を供給します。



ポート2が出力での伝送を観測します。



S21 パラメータで、この伝送を追えます。



ポートは指定した 50 Ω の基準を与えます。

正しい位置で校正する



ケーブルや変換アダプタも測定に影響します。



そのため、機器に定められた校正手順に従います。



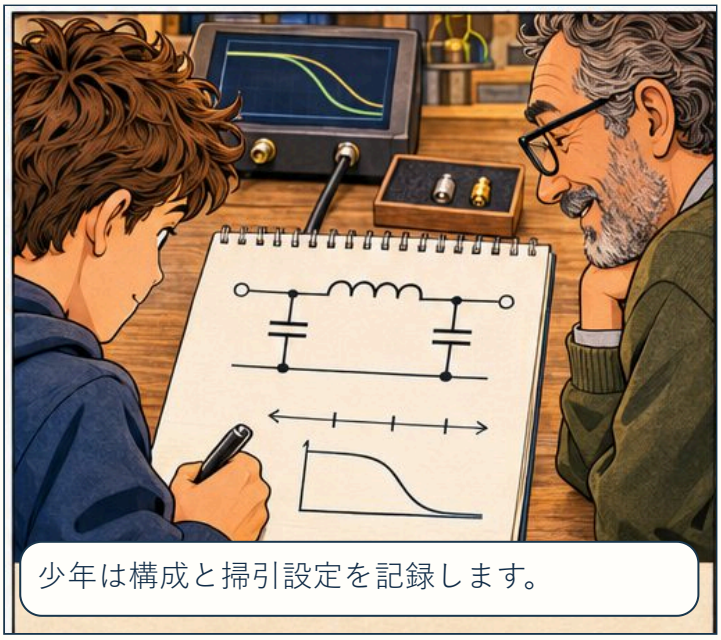
適切な校正標準器を説明書どおりに接続します。



基準面をケーブルの端に置きます。



校正後は、なるべくこの接続を保ちます。



少年は構成と掃引設定を記録します。

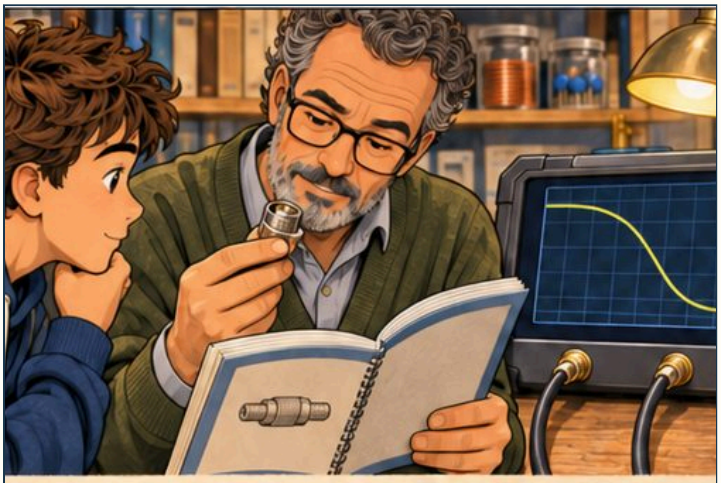
直結経路を確認する



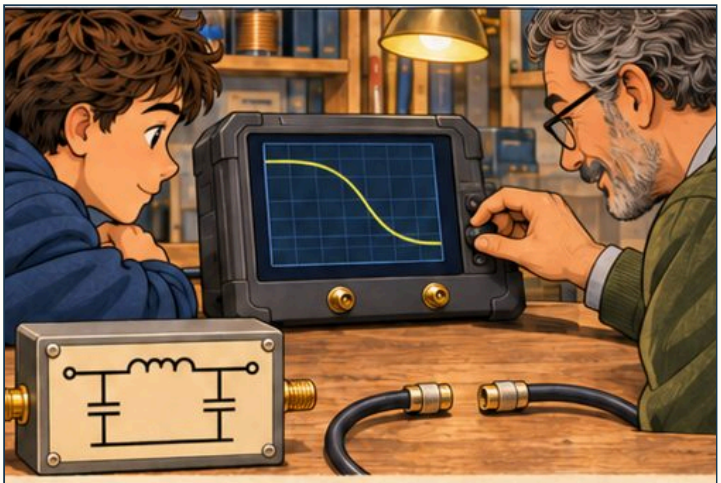
フィルタの前に、直結で基準を確かめます。



期待される伝送は、その接続と整合する必要があります。



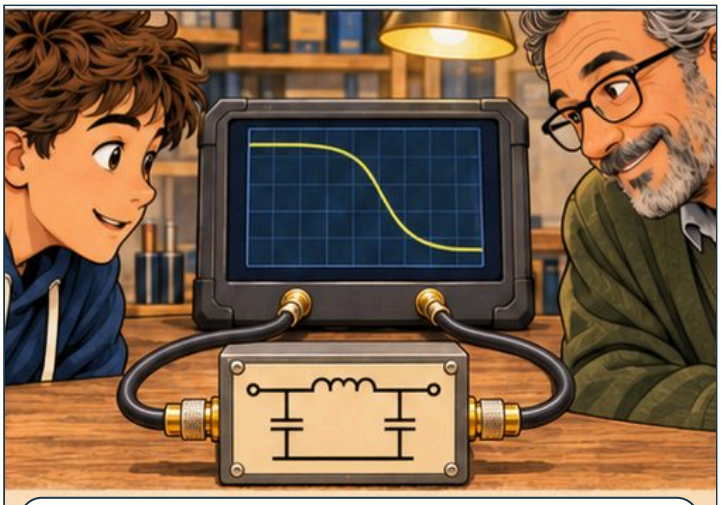
異常があれば、ケーブル、校正、設定を調べます。



測定台の不具合を隠すためにフィルタを変えてはいけません。



確認後、接続するために信号源を停止します。

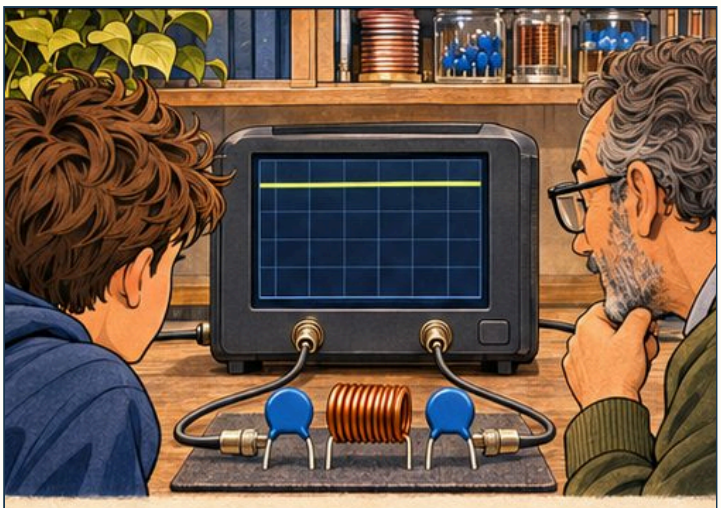


次に二本のケーブルの間へフィルタを入れます。

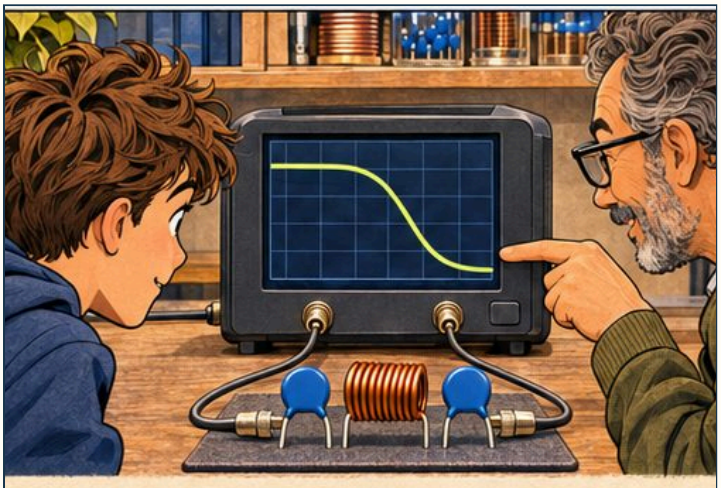
最初の掃引



必要な帯域と移行域を含めて掃引を始めます。



低い周波数では、曲線は高い位置にあります。



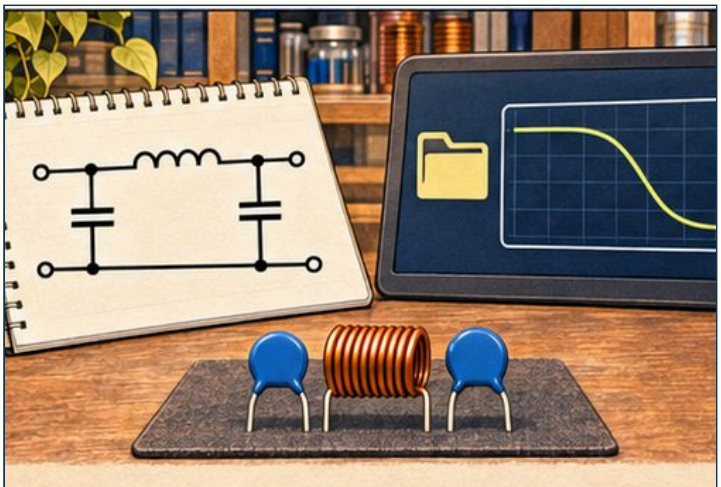
その後、周波数が高くなると下がります。



少年は予測した形を見いだしますが、完全一致とは決めつけません。

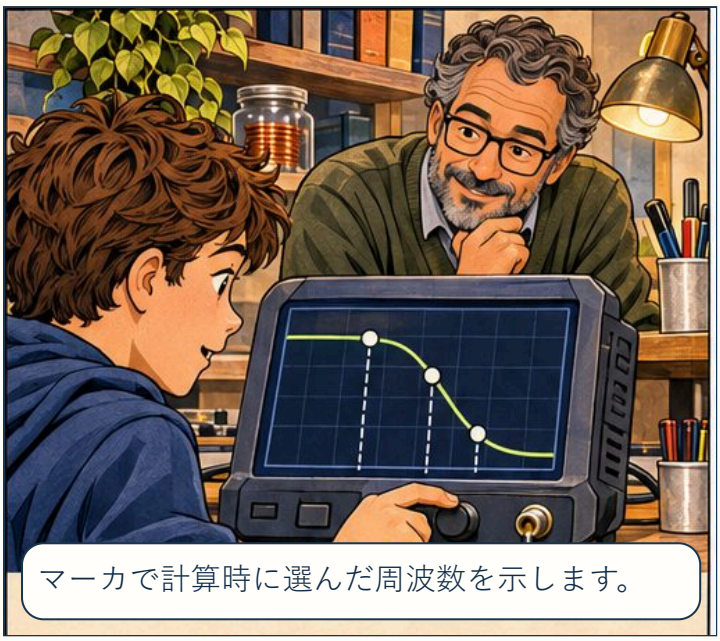


曲線と測定条件を保存します。

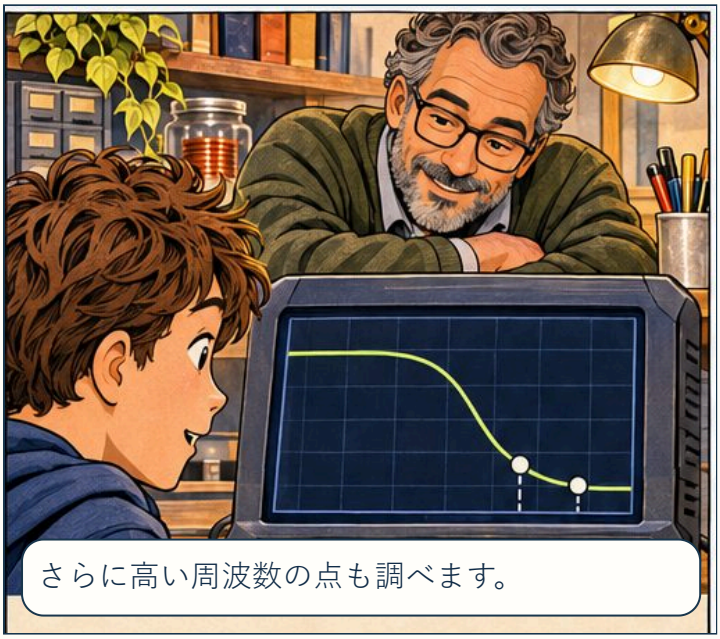


保存した結果は、変更のたびに比較できます。

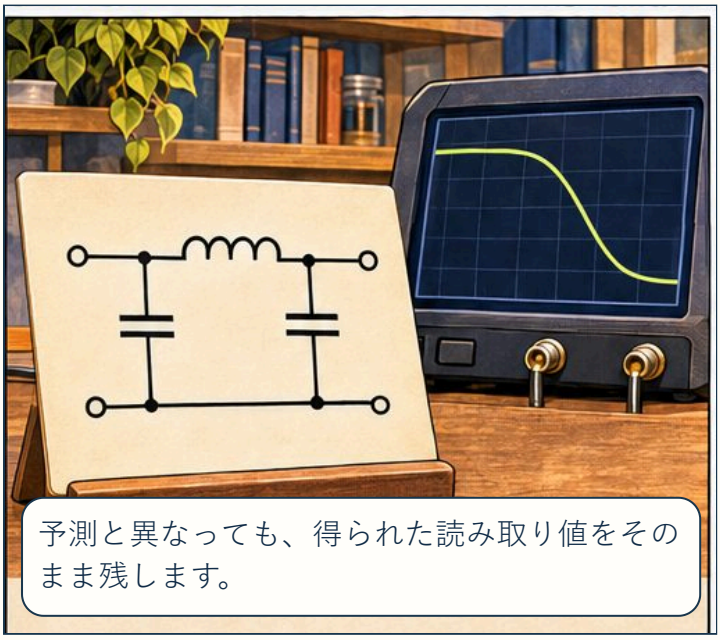
特定の点を読む


マーカで計算時に選んだ周波数を示します。


予想した遮断周波数の付近で伝送を読み取ります。


さらに高い周波数の点も調べます。


実際の読み取り値は測定欄へ書きます。


予測と異なっても、得られた読み取り値をそのまま残します。


少年は日付と構成も記します。

ずれを理解する


観測した遮断周波数は、計算値と違うことがあります。


採用値と許容差が最初の手掛かりになります。

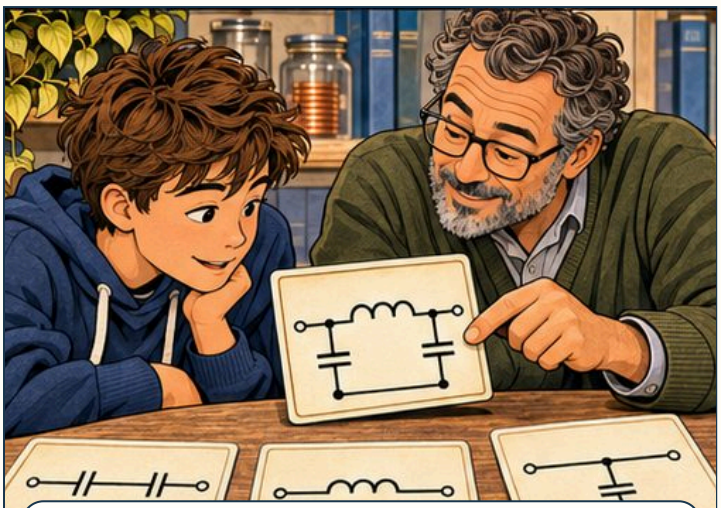

損失、配置、校正も調べる価値があります。


式を疑う前に、これらの仮説を確かめます。

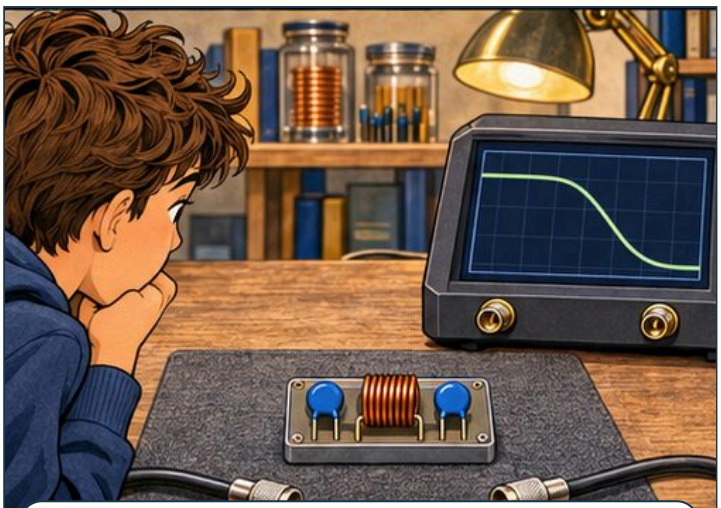

違う曲線だけでは、その原因までは分かりません。


少年は驚きを新しい問いに変えます。

一度に変えるのは一つ



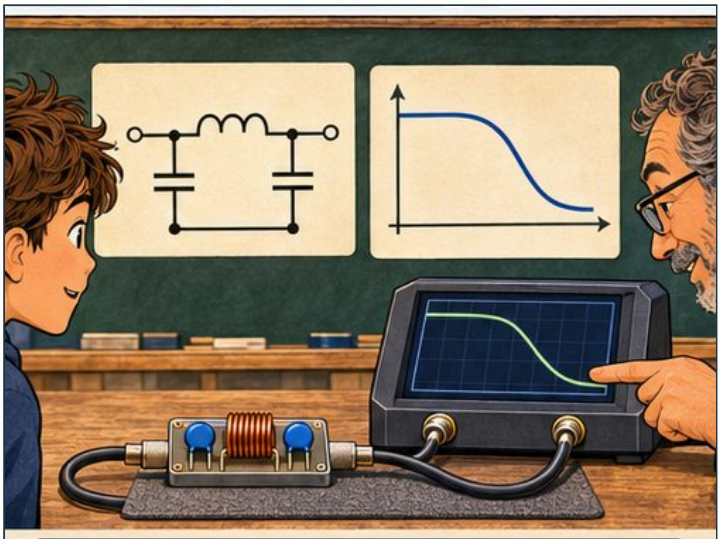
仮説を一つ選び、根拠のある変更を準備します。



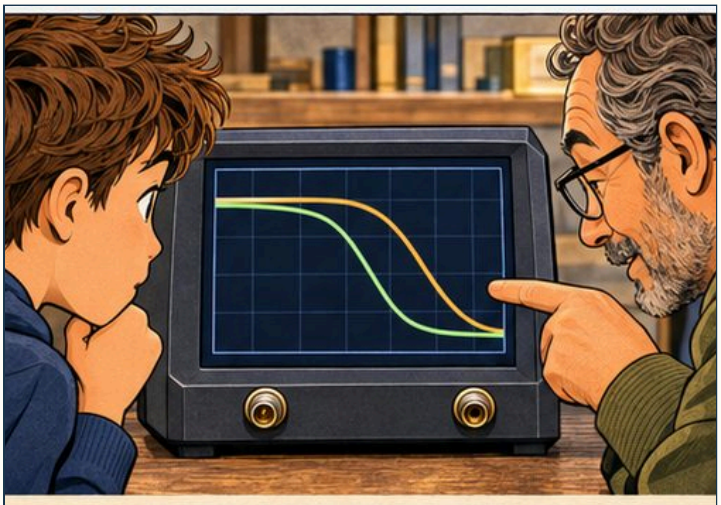
作業前に信号源を停止し、モジュールを切り離します。



Henriが変更を行い、回路を確認します。



記録した同じ条件で掃引を再開します。

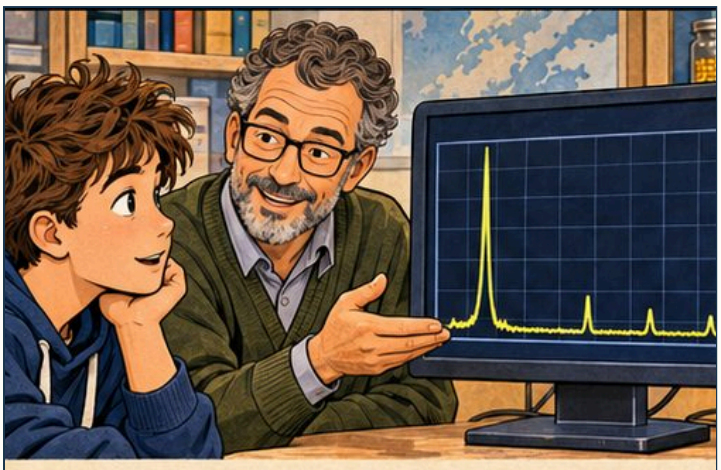


古い曲線と新しい曲線を比べます。

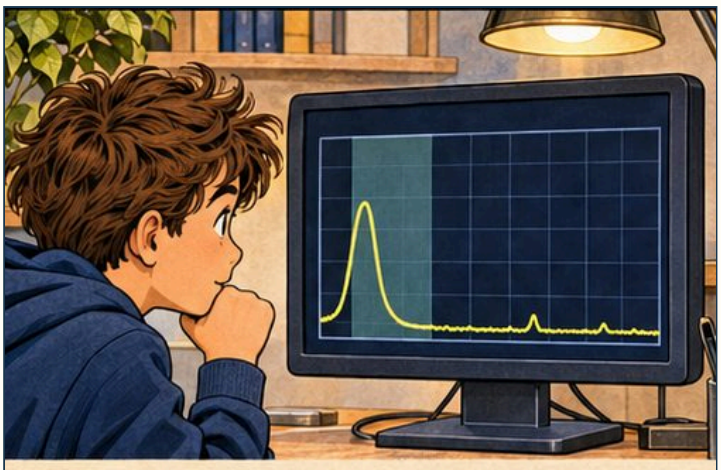


この方法なら、複数の原因を混同せずに済みます。

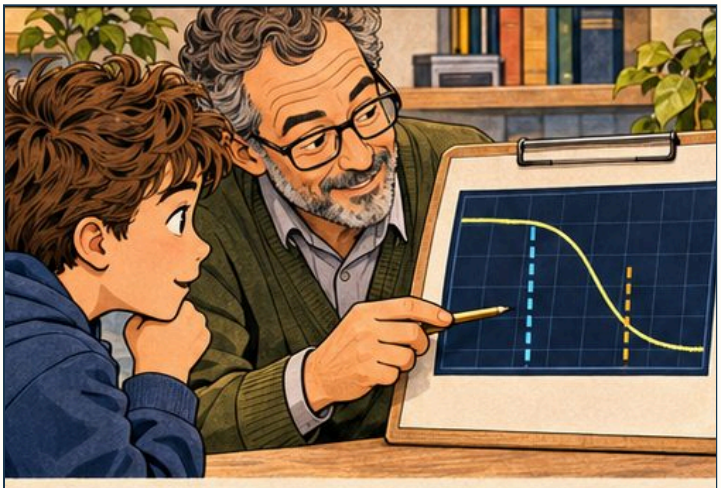
減衰にも限界がある



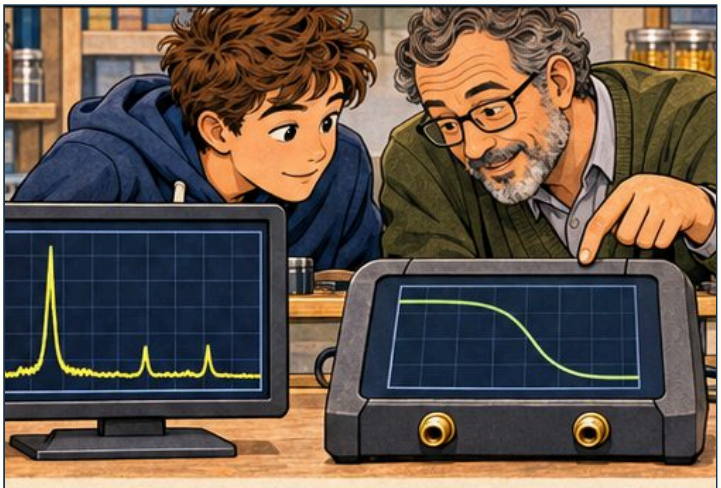
ローパスは、不要な成分をすべて消すわけではありません。



通過帯域内の成分は、あまり減衰しません。



抑圧の大きさは、周波数と作り方に左右されます。



スペクトル全体の確認には、適切な追加測定が必要です。



フィルタがあるだけで、局の適合性は証明できません。



少年は、有用な機能と全体の保証を区別します。

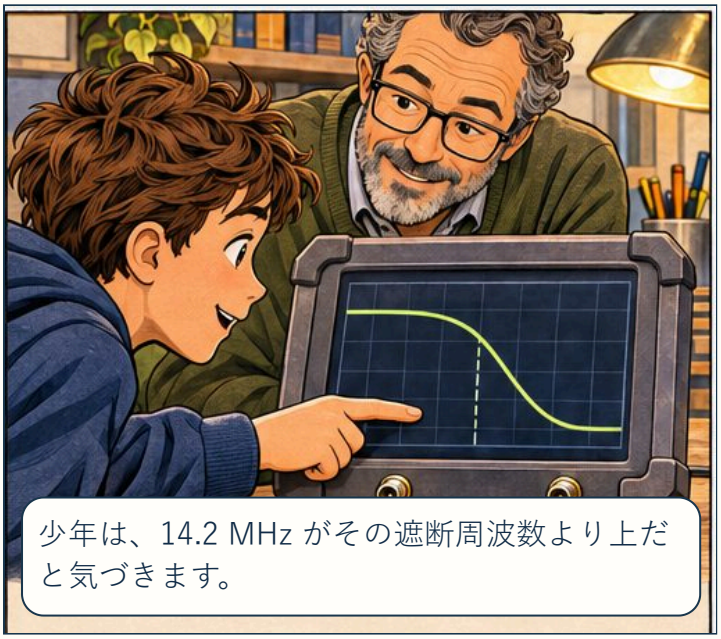
必要な周波数は通す



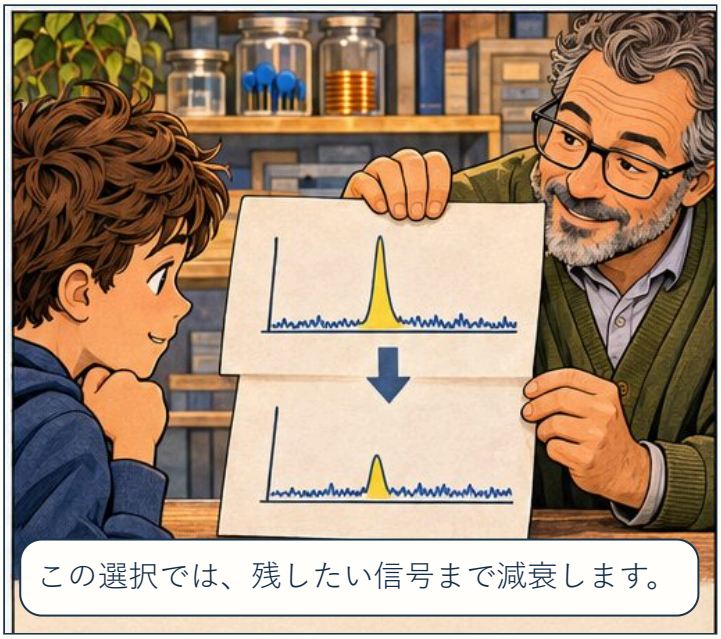
最後に指導役が、無線局の図にひっかけを用意します。



図では 14.2 MHz と、今回の遮断周波数 10 MHz を組み合わせています。



少年は、14.2 MHz がその遮断周波数より上だと気づきます。



この選択では、残したい信号まで減衰します。



使う前に、設計仕様を見直す必要があります。

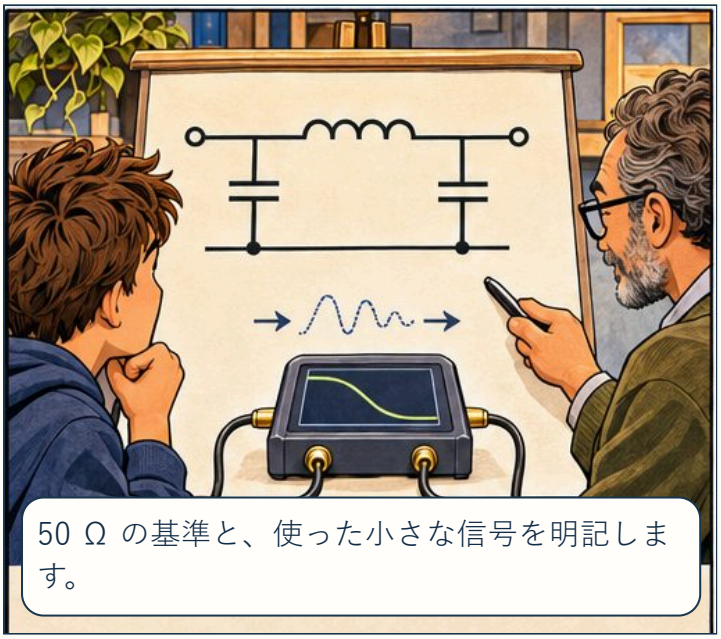


計算例は万能なフィルタではありません。

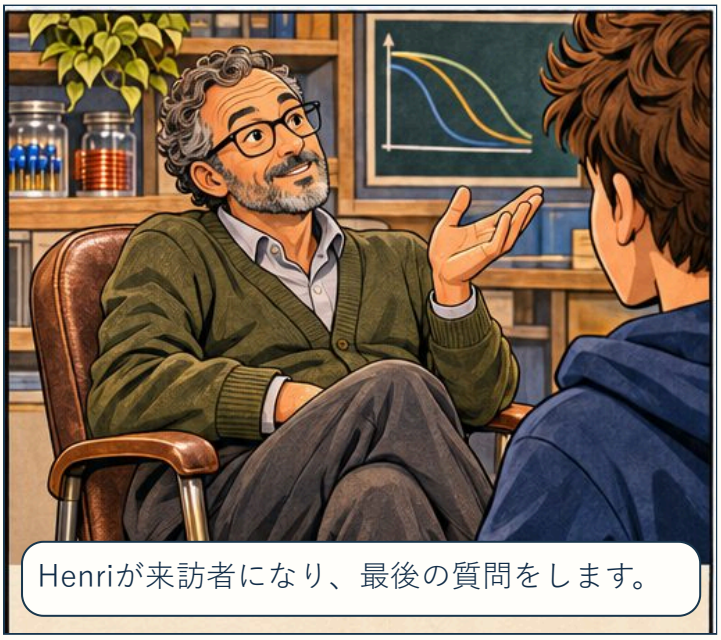
人に伝える説明を準備する













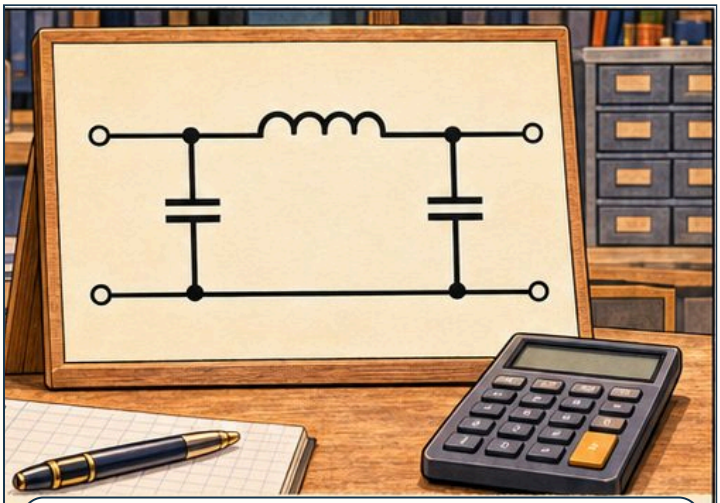
理解して、計算して、測る



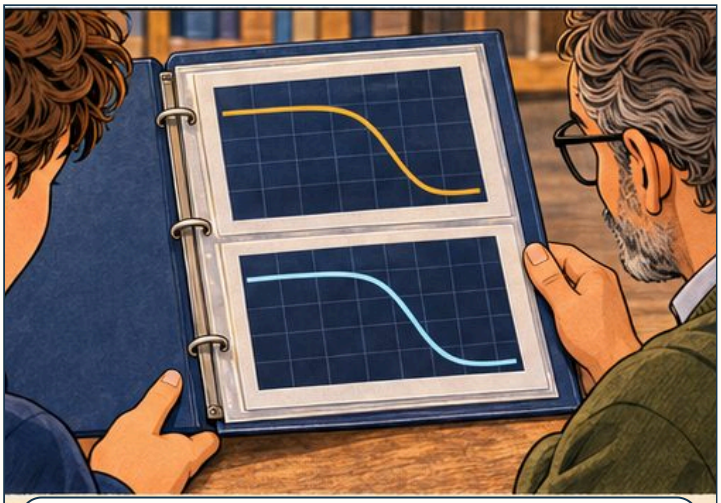
三つの部品は教材の箱に戻ります。



少年は、必要なこととフィルタの応答を結びつけられます。



この π 型バタワースを計算し、単位も確認できます。



測定し、比較し、ずれを問い直すこともできます。



ノートには、仮定と限界を含む方法が残っています。



クラブでは、次の発見がもう一つの問いから始まっています。