

KRYNA 科学通信

この通信は KRYNA が提供するオーディオ技術とその背景をご紹介します。冊子です。

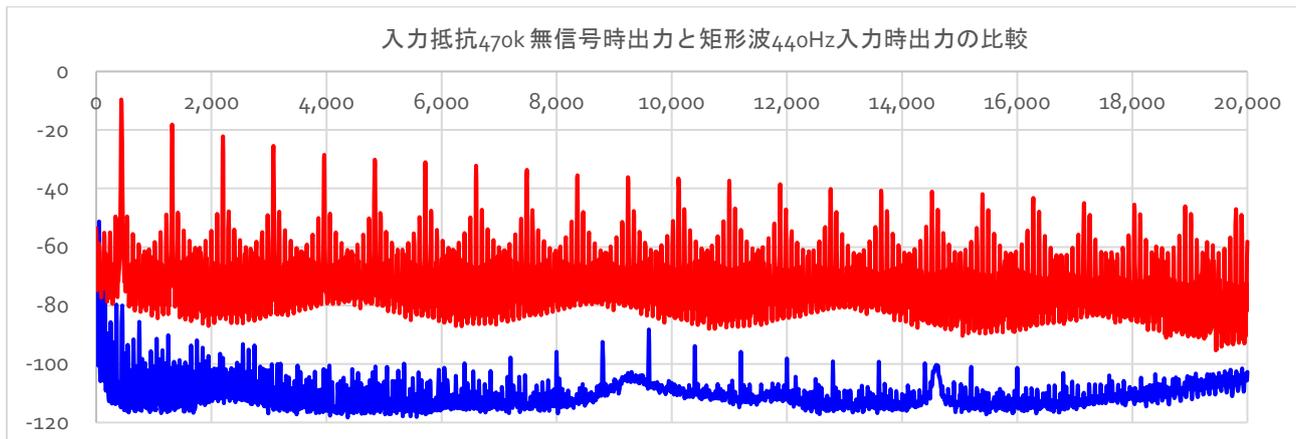
Written by Dr.Nishimura @ KRYNA INC. TEL 0120-924-422

email dr.nishimura.lab@gmail.com

オーディオの基礎から理解するアクセサリーの影響力…再生精度向上

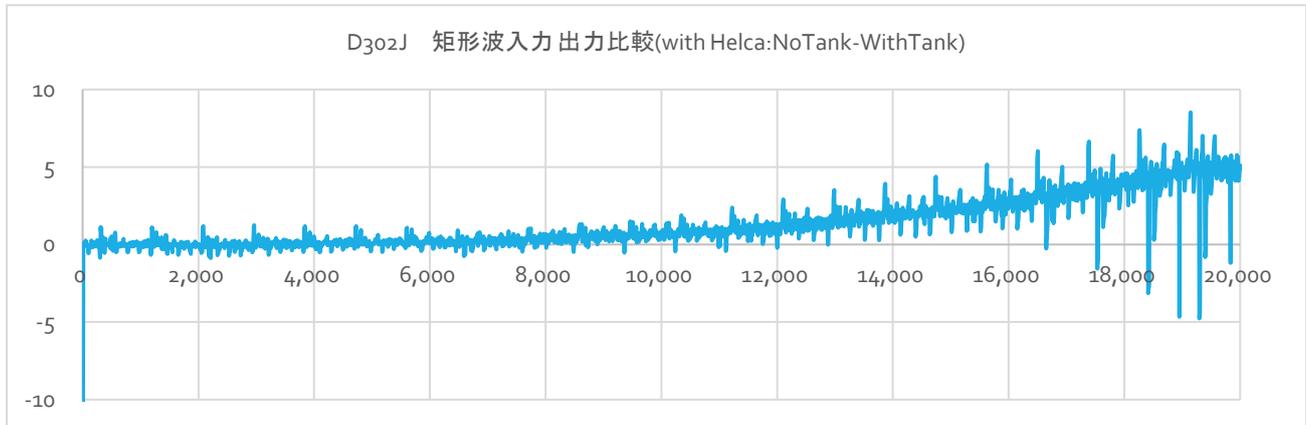
前回室内音響について見てみましたが、ホールなどで録音された音にはホールの影響が反映されません。また、野外劇場での録音にも、その音環境の影響が反映されます。ローマの古代遺跡などにみられる野外劇場は音響的に非常によく作られており、すり鉢の底で演じられる声や楽器の音は数十メートルにも及ぶ高さの観客席にはっきりかつ十分な音量で届くように作られていて感心です。当然、電気音響設備は使いません。学生の頃古代ローマの円形劇場での演奏会を聴きに行きましたが、音量的には普通のホールと変わらない印象でした。2日ほど聞きに行きましたが、1日はオーケストラ演奏で、ブラームスの交響曲他だったと思います。で、もう1日はベートーベンの歌劇「フィデリオ」でした。オーケストラの日は夕方から風が強く、楽譜が風でめくれ、その対応で演奏者がバタバタしていたのが印象的でした。歌劇のときは石でできた舞台の前にあるオーケストラピットにオーケストラが並んでいましたが、ピットはあまり広くなく割と小編成だったように思います。それでも十分な音量でした。どちらかと言うと、残響はほとんどなく直接音が客席に届く構造で、演奏音をはっきりと聞こえるといった感じだったと思います。もう、50年近く前の話です。グラウンドでブラバンが練習するのを思いうかべて頂くと分かり易いでしょう。講堂での演奏と違って残響はなく、せいぜい周囲の建物の反射音で、エコーとして聞こえるほうが多いです。ホールのような響きとか残響と言ったイメージはないように思います。音の反射があるとすれば舞台の後ろの壁と客席との間での反射が考えられます。どちらかと言うと、演劇など声が明確に聞こえるような演目に合っているように思います。そういう意味では、会議室ほど短くなくホールほど長くない残響時間の設定なのではないでしょうか？形状的には開かれた空間なので、残響は存在しない状況に近いのですが…。それと、時間的な音の遅れはやむをえません。数万人規模で行われる最近の野外コンサートの場合では、ステージから遠く離れた客席で1秒近い時間遅れが発生するような状況でも、電気音響設備（PAシステム）を駆使して、多数のスピーカの発音時間を調整して音の時間差に違和感を生じないようにしています。それなのに、野球中継などでは、音声はほぼ同時に伝

送されますが、映像は1秒程度遅れてしまいます。このずれは結構気になることがあります。球場の近くに家があって夏窓を開けて野球のテレビ放送を見ていると、映像と球場からの音がちょうどそろって聴こえて面白いです。ところが以前、あるコンサートでオーケストラの後ろ側のある席に座ったことがありました。ちょっと変わった位置からオーケストラを見る（演奏会のテレビ放送みたいに指揮者を正面から見ることが出来ます）ことが出来るので面白く思いましたが、目の前に立っている打楽器奏者が明らかに弦楽器や指揮者より早いタイミングで音を出していました。指揮者までの距離（約10m?）を意識してのことでしょうか、このタイミングのずれは気になり、やはりオーケストラの前側のフロア席がいいなと思ったことがありました。



さて、録音が行われた会場によって残響や余韻感は変わりますし、コンピュータ上で作られた音楽でも最近をよく音が作られており、空間の広がり感は実際の録音をしのぐほどに思われます。私はよくアニメを見ているので、そのあたりの表現力はホールでの録音以上と思っています。私が使っているオーディオでは1年前くらいまでは、こうした余韻を表現できていませんでした。以前からよく述べていますが、余韻や残響の部分は非常に音のエネルギー（音響レベル）が小さい（楽器などの音が出た後周囲に広がって吸収されてどんどん消えていく）ため、ちょっとした雑音で聞こえなくなります。例えば、MH-110を例に測定した結果を図に示します。信号は試験信号として440Hzの矩形波を用いました。つまり、440Hzの奇数倍の信号が含まれる信号です。赤がこの矩形波入力時の出力の周波数特性を表しています。これに対し青は信号入力がないときの出力です。信号がないとき平均で-110dB程度ですが、信号再生時には全帯域で、-90dB以上になっています。つまり、入力信号が0の時、特に、オーディオシステムのバックグラウンドノイズで全帯域にわたって存在している雑音は、再生していないときに比べ、20dB以上増加してしまうことになります。その原因は、これまで幾度も述べてきましたが、再生音による加振、出力変動による増幅率の非定常変動、信号の大きさの基準となるアース電位の変動など、どのようなシステムにも生じ得る雑音源因が関係すると考えられます。そういった意味では最近のデジタルアンプのノイズの少なさには感心します。通常、電源を入れているだけでスピーカから“サーツ”といったヒスノイズが聞こえてきますが、電源が入っていないのかと思うくらいに静かです。また、再生音も歪感がなく透明

な音です。ま、そのような音にするためには、科学通信の22号（2026年1月）でも述べたように、ゼロ電位コントロールタンクやヘリカ、インシュレータを駆使する必要があります。特に、電源アダプターの出力からアンプなどの本体までの電源ケーブルにヘリカを使うと有効かつ多大な改善を得ることができます。また、アンプ本体にゼロ電位コントロールタンクを使うことも大きな



効果を発揮します。上の図はデジタルアンプにゼロ電位コントロールタンクを使った場合と使わない場合のSP出力信号の比較です。信号は試験音として440Hzの矩形波を使っています。矩形波は高調波を多く含みますので、正弦波より実際的な音と考えます。使わない場合から使った場合を引いていますが、使わない場合6000Hz辺りから次第に値が増加していっています。一定間隔で飛び出ている線状のものは信号に関するもので、それ以外が広帯域雑音（ヒスノイズ）です。聴いて感じる事が測定結果にも出ています。こうしたデータを見てもタンクやヘリカは有効と言えます。それとともに、ルームチューニングも必要で、音像定位を明確にするとか、十分な余韻を表現するには不要な反射を抑えることが大事に思います。例えば、イシュトヴァン・ケルテスとロンドン交響楽団のドヴォルザークの交響曲第8・9番のCD（デッカ）で、以前ではスピーカ外側に音像が定位することは決してなかったのですが、最近、フルデジタルアンプなどを使って再生してみるとスピーカの外側への定位と余韻の広がり再生でき、ホール感満載といった状況になります。真空管アンプでも同様に表現できます。この要因はやはり、振動対策、雑音対策、基準安定化対策によるものと確信しています。皆様も、如何ですか？HGSで実現される、目の前に広がるステージ、客席の最善の場所で音楽を聴く楽しみを味わってみませんか？

Tea Break

3月、世の中は卒業式の季節。新たな世界に向けての最終準備期間でもありますね。科学通信も丸2年を経過し、これまで思いつくままに書いてきた記事を一度整理し直すことが必要になってきています。紅茶はこの時期、新茶が出回るのを首を長くして待ち望む季節ですね。インドのニルギリが茶摘みを終わって製茶中でしょうか？セイロンはまだ茶摘み中でしょう。もう少しでニルギリやセイロンの新茶が出始めるところでしょう。セイロンの春茶はディンブラとヌワラエリアが有名で質の良い茶葉を作ってくれます。いろいろ有りますが、私は若草や干し草のような香りの茶葉が好きで、淡い香りの中にしっかりとした渋みや切れの良い味わいが表現されるものが好きです。キレの良さは高地産の特徴でしょうか。ストレートで頂くのがいいですね。さわやかな感じで、真夏になるまで楽しめます。セイロンの高地産は結構タンニンが多く、濃く入れることでパンチの効いたお茶を楽しめるのですが、少し冷めてくるときつい渋みが出てきて飲みづらくなることもあります。そのあたりは好みに応じて調整する必要がありますが、この渋みがさわやかさを醸し出してくれます。また、ニルギリも良い茶葉であることに最近気づきました。質の良いセイロンが手に入りにくくなってダージリンばかり見ていましたが、意外とニルギリにキレのいいものがあることに気づきました。以前は、アッサムほどではないにしても、キレの良さに乏しくもっこりした感じの茶葉だと思っていましたが、キレの良い茶葉もあることに気づきました。と言うか、ダージリンが出始めるまでの場つなぎのつもりで買ったニルギリが良かったのです。値段的にも手を出しやすく、気に入ってしまいました。これまでは、朝はコーヒーという生活でしたが、このところ、紅茶を飲む機会が増えてきて、コーヒーと半々です。貴族とか上流社会などでは紅茶が多いのでしょうか？アニメを見ていて思ったのですが、貴族たちのお茶会シーンでは、お茶会と言うだけあって紅茶やハーブティーが出されます。コーヒーも品質の良いものは非常に美味しく、紅茶にも負けないものもありますがそういったものは高価です。コーヒーは貴族社会では滅多に出てくることはなく一般的ではないようです。昨年秋“サイレントウィッチ”と言うアニメが放映されていましたが、その中で、主人公が仲間とお茶会に参加するシーンがありました。各自がお茶を持ってきて入れてサービスするのですが、故あって主人公はコーヒーを出しました。日ごろ自分が飲んでいるコーヒーです。その珈琲はさっぱりとした味わいのように、紅茶に近い味わいだったのでしょうか？淹れ方は、缶タイプのエスプレッソ器を使って、短時間で抽出する方法です。コーヒーについては以前サイホンがいいと言いましたが、抽出時間が短時間で、湯につかって抽出し終わるまで1分もかからないのですが、エスプレッソ器も短時間で抽出できます。パリなど街角のカフェで使われているエスプレッソマシンの場合は数十秒ですね。エスプレッソは、濃い・苦いのイメージがありますが、粉と水の量で調整できますので、そのあたりは好みでしょう。私も以前缶タイプのエスプレッソ器を使ったことはあるのですが、当時はパリの街中で飲むエスプレッソをイメージしていたので、そ

のような淹れ方が出来ず、やめてしまいました。いろいろ工夫すると、結構いいかもです。紅茶的な入れ方としてはパーコレータも使えるかもです。

こんな時、こんな音楽・・・

3月は新しい未来に向かって希望に満ちた季節。新年元旦より夢と希望にあふれた時期言えます。同時に不安も付きまとい意外と複雑な時を過ごすのではないのでしょうか？いろいろな思いをもってこの時期を過ごす人が多いことでしょう。“卒業の歌”と言うのでググってみるといくつか“卒業”と銘打ったCDがありました。そこに収録されている曲には、“青春時代”、“イチゴ白書をもう一度”、“贈る言葉”、“卒業”、“奏”、“上げば尊し”……。数えきれないくらいたくさんあります。こうした中に、“バッハのカンタータ”主よ、人の望みの喜びよ“がありました。何故この曲と思いますが、他にもパッヘルベルの“カノン”、“バッハの”G線上のアリア“、ヘンデルの“水上の音楽”などあり、これらの曲は気品のある定番と記されていました。ま、卒業と言うことで一人一人いろんな思いを持って臨まれるのでしょうか。

さて、卒業式の定番といえば“蛍の光”。もともとはアイルランド民謡（スコットランド民謡との記述もありますがイングランドもまとめてイギリスから伝えられた民謡）で、どちらかという旧友と再会を祝って酒を酌み交わすような明るい曲です。日本で小学唱歌に使われるときに充てられた歌詞が「蛍雪の功」から引用されたため、少し暗めのイメージに変えられ、学びに励む姿になったようです。イギリスから伝わった民謡は古くから日本で親しまれています。“アニーローリー”、“ロンドンデリーの歌（ダニーボーイ）”、“スコットランドの釣り鐘草”、“グリーンスリーブス”……。数々あります。少し哀愁を誘うようなメロディーラインで懐かしさを感じる曲が多いです。“ダニーボーイ”はJAZZ歌手によっても歌われていますね。以前、映画“メンフィスベル”の一シーンで、ジャズシンガーから徴兵された乗組員が出撃前のパーティーでピアノを弾きながら歌っていました。CDではザ・スコラーズ、キリ・テ・カナワ、鮫島有美子など、オーケストラ編曲ではネヴィルマリナーがイギリス民謡曲集を出しています。ザ・スコラーズは小編成のコーラス、キリ・テ・カナワはオケ伴奏、鮫島有美子はピアノ伴奏。その時の気分に応じてコーラスがいいか、ソロがいいか、オケがいいか、選んで聴くのもいいのではないのでしょうか？いかがですかイギリス民謡。

今月の音楽

Home Girl Journey

矢野 颯子



矢野颯子が他の様々なアーティストの曲をカバーした作品集です。私はこのアルバムに出会うまでは、敢えて矢野颯子を聴く様な事がなかった新参者。彼女のオリジナルの楽曲についてはまだまだ未聴の物だらけですがちょっとクセになる声と演奏で一度聴きだすとヘビーローテーションになっていました。オーディオ的な聴きどころとしては一曲目の冒頭でスキヤットが入る前に「ゴトン」という足踏みの様な音が入るのですが、この再生がなかなか難しい、、、。

かなりフラットにLOWまで伸びている機器でないと「ゴトン」の存在にすら気付けません。

たとえ38cmのCornwallを使用したとしても部屋（ルームチューニング）やセッティングが出ていないと聴こえない、、、という話もベテランのマニアの方から伺いましたのでよろしければ「ゴトン」がご自分のセットでどこまで聴こえるか、お試しいただけると面白いと思います。

「ゴトン」が出ても出なくても矢野さんの音楽性は些かも揺るぐことはありませんので悪しからず。



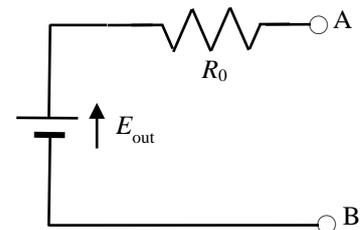
オーディオと物理

第24回 等価回路とテブナンの定理

等価回路を簡単に求める方法

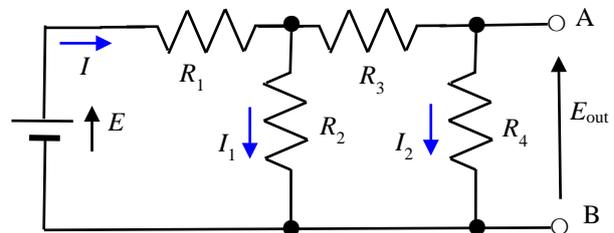
前々回テブナンの定理を紹介し、前回等価回路について説明しました。結構複雑な回路解析になって嫌気がさしたのではないのでしょうか？この私も、ちょっとした勘違いで導出した式が間違っていて、確認に時間を取られました。そこで、もっとシンプルに考えて簡単に等価回路を求められるようにしたいと思います。と同時に、内部の回路構成がわからない回路の等価回路を実験的に求める方法についても述べたいと思います。さて何処まで行けるでしょうか？

まずテブナンの定理をもう一度見てみましょう。まず、理解が容易な直流回路で考えましょう。内部の回路構成がわからない回路の或る端子一組の開放端子（端子をオープン）電圧が E_{out} 、端子から見た抵抗が R_0 ならば、この端子に抵抗 R を接続したとき R に流れる電流 I は $I=E/(R_0+R)$ で得られるという定理です。つまり、この回路は、右の図の回路として表せるわけで、これが等価回路表現になっているわけです。



すると、端子 A,B の電圧を測定すれば電源電圧 E_{out} が分かります。また、端子 A,B に電流計を接続して短絡電流 I_s を測定すると内部の抵抗が $R_0=E_{out}/I_s$ で求められます。このように、直流回路では、構成が不明な回路の等価回路を実験的に求めることができます。

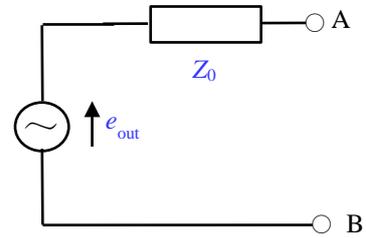
このことを前回の抵抗回路に適用して R_0 と E_{out} を求めてみましょう。まず、A,B を開放したときの A,B 間の端子電圧 E_{out} は、前回と同様に R_4 に流れる電流 I_2 を求めて、 R_4 での電圧降下として $E_{out}=R_4I_2=ER_2R_4/(R_1(R_2+R_3+R_4)+R_2(R_3+R_4))$ となります。次に、A,B 間を短絡したとき、A,B



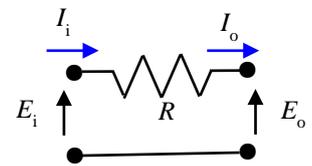
間に流れる短絡電流 I_s は R_4 が無くなった回路となり、電源から見た抵抗は、 R_2 と R_3 の並列抵抗 $R_2R_3/(R_2+R_3)$ に R_1 を直列に接続した抵抗 $R_1+R_2R_3/(R_2+R_3)=(R_1R_2+R_2R_3+R_1R_3)/(R_2+R_3)$ となり、 I_s は R_3 に流れる電流ですので電源から流れ出る電流の $R_2/(R_2+R_3)$ 倍になります。したがって、 $I_s=E R_2 (R_2+R_3) / (R_2+R_3) (R_1R_2+R_2R_3+R_1R_3) = E R_2 / (R_1R_2+R_2R_3+R_1R_3)$ となります。したがって、A,B からみた回路の抵

抗 R_0 は、 $R_0 = E_{out}/I_s = [ER_2R_4/(R_1(R_2+R_3+R_4)+R_2(R_3+R_4))] / [ER_2/(R_1R_2+R_2R_3+R_1R_3)] = R_4 (R_1R_2+R_2R_3+R_1R_3) / (R_1(R_2+R_3+R_4)+R_2(R_3+R_4))$ となり、前回の結果と同じ結果が得られます。

交流回路の場合は端子 A,B 間の開放電圧や短絡電流を測定するとき位相の測定が基本的にはできないので、実験的に等価回路を求めるのは面倒になります。一方、直流と同様に回路が分かっている場合は、理論的に開放端子電圧と短絡電流を求め、直流と同様な方法で、 e_{out} と Z_0 を求めることができます。



次に、高校で習う行列を思い出してください。2行2列の行列などです。この行列の掛け算が苦手であれば簡単に求められる方法について説明します。四端子回路網という手法ですが、1対の入力端子と1対の出力端子を持つ回路の入出力の関係が線型（一種の比例関係で増幅器は含まれません）ならば、回路の入出力関係を**係数行列**で表現できるという方法です。回路の入力電圧 E_i と電流 I_i は、回路の出力電圧 E_o と電流 I_o を用いて、 $E_i=AE_o+BI_o$ および $I_i=CE_o+DI_o$ で表されるとします。ただし、***A,B,C,D*** は回路によって決まる定数で（端子 A,B と区別するため太字の斜体にしています）、これを2行2列の行列で表して**伝搬定数**または**四端子定数**と呼びます。これは入力端子に電圧と電流が加えられたなら、その影響で他の端子に電圧と電流が生じるという考えです。この考え方で進めるなら、簡単な回路に対して四端子定数を求めておくと、簡単な回路の入力と出力を順に接続して得られる回路の**四端子定数**

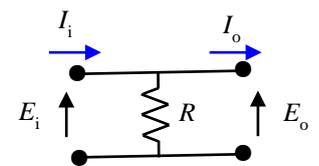


は、各回路の**四端子定数**の積として求められます。まず簡単な例から見て行きましょう。右の回路の入力と出力の関係を見てみましょう。左側と右側の各端子は外部の回路と接続されていて左の端子の入力電圧が E_i 、流入電流が I_i とします。また、右側の端子の電圧が E_o 、流出する電流が I_o とします。この回路では、 I_i はそのまま I_o として流出しますので $I_i=I_o$ つまり、 $I_i=CE_o+DI_o=0E_o+1I_o$ となり、 $C=0$ および $D=1$ となります。一方、抵抗 R での電圧降下 RI_o を考慮すると $E_i=E_o+RI_o$ となるので、 $E_i=AE_o+BI_o$ の係数は $A=R$ および $B=1$ となります。これより**四端子定数**は 2×2 行列の形で

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

のように得られます。

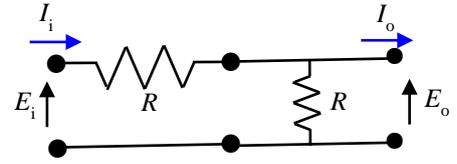
もう一つ右の図のような回路の入出力関係を考えてみましょう。この回路では入力電圧 E_i と出力電圧 E_o は共通 $E_i=E_o$ であり、 $E_i=AE_o+BI_o=1E_o+0I_o$ となり、 $A=1$ および $B=0$ となります。一方、入力電流 I_i が出力電流 I_o と抵抗 R を通る電流 E_o/R に分流されるので、 $I_i=E_o/R+I_o$ となり、 $I_i=CE_o+DI_o$ の係数は $C=1/R$ および $D=1$ となります。これより**四端子定数**は



こうして得た一つ目の回路に二つ目の回路をつないだ時、
この回路の**四端子定数**は

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & R \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/R & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & R \\ 1/R & 1 \end{pmatrix}$$

となります。ここ

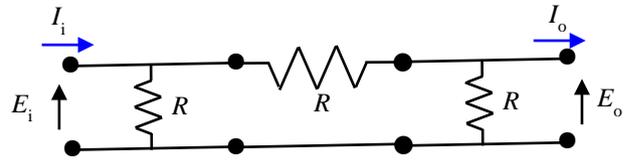


で、行列をかける順序を間違えてはいけません。左側の回路の行列が左、右側の回路の行列が右に来るようにして、行列の掛け算を行います。行列の掛け算の復習ですが、**A**は1行1列ですので、左側の1行[1 R]、右側の1列[1/R 1]^Tの掛け算で **A** = 1 × 1 + R × (1/R) = 1 + 1 = 2 となります。同じように **B**は1行2列ですので、左側の1行[1 R]、右側の2列[0 1]^Tの掛け算で **B** = 0 + R = R となります。ここで、[]^Tは行と列の入れ替え（転置）を表します。つまり、横並びの[1 R]を縦並びにします。あとは同様に計算します。

さらに今の回路の左側に二つ目の回路を繋いだ場合、直前に得た行列の左側から二つ目の回路の行列をかけて求めることとなります。つまり、

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/R & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 2 & R \\ 1/R & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & R \\ 2/R & 2 \end{pmatrix}$$

となります。このように、単純な回路の組み合わせで実現

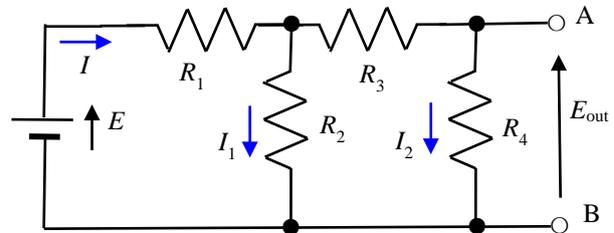


できる回路の入出力関係は、行列計算で容易に求めることができます。最初に出てきた回路の伝達特性は、**R**₁ から **R**₄ までの**四端子定数**が

$$\begin{pmatrix} 1 & R_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/R_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & R_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/R_4 & 1 \end{pmatrix}$$

となります

ので、左から順番にかけ合わせることで抵抗の部分の**四端子定数**を求めることができます。数



が多いと面倒ですが、一つ目と二つ目、三つ目と四つ目の積を求め、それらの積を求めてゆけば求めることができます。結果は、

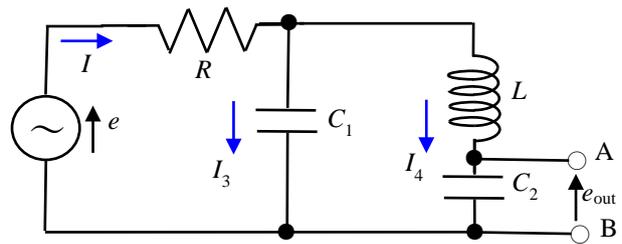
$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + R_1/R_2 & R_1 \\ 1/R_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 + R_3/R_4 & R_3 \\ 1/R_4 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1 + R_1/R_2)(1 + R_3/R_4) + R_1/R_4 & (1 + R_1/R_2)R_3 + R_1 \\ (1 + R_3/R_4)/R_2 + 1/R_4 & R_3/R_2 + 1 \end{pmatrix}$$

となります。今、端子 A,B の出力電圧と電流を **E**_o および **I**_o とすると入出力関係は、

$$\begin{pmatrix} E \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_o \\ I_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} AE_o + BI_o \\ CE_o + DI_o \end{pmatrix}$$

と表されます。先程、端子 A,B の開放端子電圧 E_{out} は端子 A,B が開放つまり電流 I_0 が 0 の時の E_0 と説明しました。したがって、 $E=AE_0$ となり、 $E_{out}=E/A=E/((1+R_1/R_2)(1+R_3/R_4)+R_1/R_4)=ER_2R_4/(R_1(R_2+R_3+R_4)+R_2(R_3+R_4))$ として得られます。一方、端子 A,B を短絡した場合は、 $E_0=0$ であり、 $E=BI_0$ および $I=DI_0$ が成立します。この I_0 は先ほどの短絡電流 I_s です、 $I_s=E/B$ であり、回路の A,B から見た抵抗 R_0 は $R_0=E_{out}/I_s$ で与えられるので、 $R_0=(E/A)/(E/B)=B/A=((1+R_1/R_2)R_3+R_1)/((1+R_1/R_2)(1+R_3/R_4)+R_1/R_4)=R_4(R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1)/(R_1(R_2+R_3+R_4)+R_2(R_3+R_4))$ のように得られます。この結果は前回導出した結果と一致します。

さらに交流回路の例とした右の図のバイアス電源の π 型フィルタの場合は、 R_1, R_2, R_3, R_4 をそれぞれ、 $R_1=R, R_2=1/j\omega C_1, R_3=j\omega L, R_4=1/j\omega C_2$ と置き換えて求めれば解が得られます。例題として解いてみてください。結果は、



$$A=1-\omega^2 C_2 L+j\omega C_1 R+j\omega C_2 R-j\omega^3 C_1 C_2 R L$$

$$B=R-\omega^2 C_1 L R+j\omega L$$

$$C=j\omega(C_1+C_2)-j\omega^3 C_1 C_2 L$$

$$D=1-\omega^2 C_1 L$$

となるはずですが。また、 e_{out} と Z_0 は、 $e_{out}=e/A=e/(1-\omega^2 C_2 L+j\omega C_1 R+j\omega C_2 R-j\omega^3 C_1 C_2 R L)$ 、 $Z_0=B/A=(R-\omega^2 C_1 L R+j\omega L)/(1-\omega^2 C_2 L+j\omega C_1 R+j\omega C_2 R-j\omega^3 C_1 C_2 R L)$ となります。

如何でしたでしょうか？**四端子定数**を使うと手計算も割と簡単になりますが、もっと便利なことがあります。以上のやり方では接続後の**四端子定数**を手計算で求める必要がありましたが、Scilab などマトリクス計算や複素数計算を行ってくれるプログラミング言語を用いると、各**四端子定数** (A, B, C, D) を定義しておけば、先程示した簡単な回路要素を組み合わせた後の複雑な回路の**四端子定数**を、掛け算で表すだけで計算してくれます。ただし、数値計算の結果しか得られないので、数式の形で求めることはできませんが…。周波数特性などを求める場合はこれで十分かと思います。次回この方法について説明しましょう。

☆西村博士の物理ラボ 活動情報はこちらから

◆西村博士連載ブログ https://kryna.jp/report/nishimura_blog/



◆西村博士の物理ラボ X アカウント https://twitter.com/dr_nishimlab



◆法人向けコンサルティング https://kryna.jp/biz_consulting/

