

KRYNA 科学通信

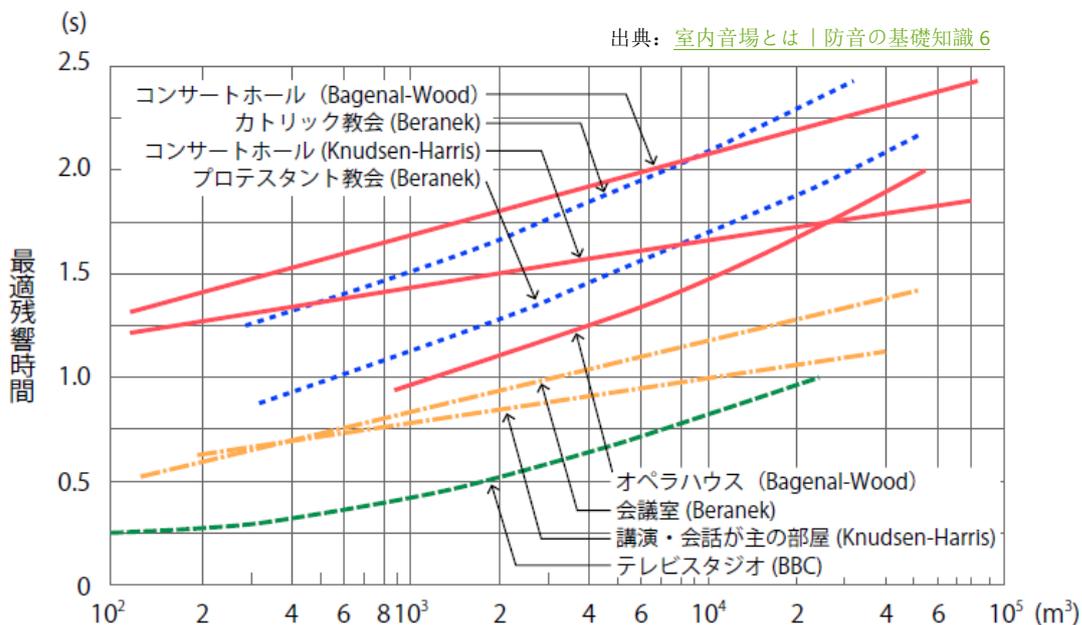
この通信は KRYNA が提供するオーディオ技術とその背景をご紹介します。冊子です。

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-の影響力…空間音響

少し室内音響について考えてみましょう。部屋の音響特性を表す指標はいくつかありますが、代表的な指標は「残響時間」です。一方言葉がどれだけ正確に聞き取れるかどうかの指標として「明瞭度」があります。残響時間はその部屋自体の音響的特性を表しており、部屋の形状、大きさ（容積）、壁の吸音力などに影響されます。建築物を設計して建てる場合、残響時間は部屋の良否に大きく影響し、出来上がった後では変更するのが非常に困難です。そこで、残響時間は部屋の容積と使用目的によって最適な値が推奨されています（下図参照：出典 [室内音場とは | 防音の基礎知識 6](#)、（）内の名前は推奨者）。推奨者によって値は異なりますが傾向は同じです。例えば、コンサートホールは小さなホールでは教会より長めで、教会（主に音楽で？）は容積が大きくなるとより長めの残響が推奨されています。一方、音楽でも言葉がかかわるオペラハウスでは残響時間は短めで、会話中心の会議室などと音楽中心のコンサートホールとの中間的な値が推奨されます。スタジオなどではかなり短い残響時間ですね。それでは、世界各地のコンサートホールなどがどの程



度の残響時間で作られているか調べてみましたので表にしてみました。残響時間は日本以外は500Hzでの値です。教会のシュテファンドームは長いですね。これらの値を参考にオーディオシステムがこうした残響・ホールの響き（ホールの響き・余韻の違い）を表現し切れているかを確認するのも良いかもしれませんね。

国名	都市名	ホール名	客席数	容積×10 ⁴ [m ³]	残響時間[秒]
ベルギー	ブリュッセル	美術宮殿	2150	1.25	1.55
ドイツ	ベルリン	ニューフィルハーモニーホール	2415	2.6	2.07
ドイツ	ベルリン	シャウシュピールハウス	1301	?	2.7
ドイツ	パッサウ	聖シュテファンドーム	?	?	4.96
オーストリア	ウィーン	ムジークフェラインザール	1680	1.5	3.27
スイス	チューリッヒ	トーンハーレザール	1546	1.14	3.59
スイス	バーゼル	シュタットカジノ	1400	1.05	2.02
日本	東京	サントリーホール	2006	2.1	2.1
日本	東京	東京文化会館	2303	1.73	1.8
日本	東京	HNKホール	3400	2.5	1.8
日本	東京	紀尾井ホール	800	0.87	1.8

次に、明瞭度を見てみますと、明瞭度は無意味な音節を聞いたときの正解度で評価されますが、Knudsenによると音声の平均音圧レベル、部屋の残響時間、室内の騒音、部屋の形状などに影響されると言われます。平均音圧レベルは情報元ですので大きいに越したことはないでしょうが、60～80dBが良いようです。残響時間は長くなると明瞭度を低下させます。これは前後の音の重なりにより不明瞭になると考えられます。一方で、残響時間が短いということは後で述べますが、部屋の吸音力が高く音源の音が減衰することにつながります。逆に言うと、音源の音を大きくすれば解決できるのかもしれませんが、室内の騒音はできるだけ小さくするに越したことはありません。部屋の形状は変更することは難しいようですね。オーディオを聴く場合、このあたりをどう考えればよいでしょうか？スピーカから発せられる音が聞き取る対象ですので、明瞭度は高くする必要がありますでしょう。すると、「音量は聴取点で60～80dB、残響時間は短く（デッドギミ）、室内の騒音は可能な限り小さく」ということになります。ここで、疑問を持たれますか？コンサートホールや教会は残響時間を長く取るのに、リスニングルームの残響時間は短くするの？それでは音楽を聴くのによくないのでは？そうですね、実際のコンサートに行くとホールの残響は長く、十分な余韻を感じます。リスニングルームも同じようにホールのような残響を持たせる必要があるのでしょうか？ここで、思い返してください。リスニングルームで聴く音楽はこの長い残響時間のホールで録音された音楽ですね。すると、音源に既にホールの残響が反映されている訳です。この残響を、明瞭度という音声と考えれば、明瞭に聴くにはリスニングルームの残響時間は短くすべきです。リスニング

ルームの残響時間を長くして残響を作り出すのは正しいことではありません。しかし、実際に聴いてみるとなんか「余韻が足りない」など感じるかもしれませんね。これは部屋の問題ではなく、再生装置の問題かもしれません。

ここで残響時間を詳しく見てみましょう。残響時間は部屋の音響特性が完全拡散（部屋のどの部分を取ってみても音のエネルギー密度が均一な状態）な場合、音源から音を放射して音の大きさ（エネルギー）が一定な状態に達し、その後音源を停止した直後から音のエネルギーレベルが60dB減衰するまでにかかる時間として定義されます。つまり、部屋に満ちた音のエネルギーが壁面（床・天井・壁）で吸収されて次第に減少し、音源停止直前の音のエネルギーの100万分の一になるまでにかかる時間で定義されます。言い換えると、部屋の壁での音の吸収力を評価していると見ることが出来ます。残響時間が長いと部屋の吸音力は小さく音が残り易くライブな環境。短いと音が吸収されてデッドな環境と言うことになります。また、拡散状態では特定の周波数の音だけが残るといった状況は起こりません。例えば、コンクリート打ちっぱなしの四角い部屋では部屋の中で手を叩くと「ウワーン」と響きますね。これは残響ですが、「ビーン」といったようなある特定の音だけが残る場合もあります。これは壁での反射が同じ場所で繰り返されて吸音されていない状況で、定在波が発生していると考えられます。一方、床に分厚いカーペットが敷いてあり、カーテン、ソファなどが置いてある部屋では手を叩いても「ビーン」と響くことはありませんね。「パーン」と鳴ってスッと消える。これは適度に吸音されているからです。もっと吸音処理がされた部屋が無響室です。無響室では非常に低い周波数の音を除いて、音の反射がありません。周囲に建物などがない広い校庭や海辺の砂浜など、声を出しても自分のところに戻ってこない環境と同じです。このような状況が音の反射がない無響状態です。現実の部屋では拡散音場も無響状態も実現できず、多かれ少なかれ音の反射や定在波が生じます。定在波は、平行に対向する壁や天井と床の間などでその距離と音速によって決まる周波数（音速÷距離）の音のみが反射を繰り返す状態で、特定の音が部屋の中の場所に寄って聞こえたり聞こえなくなったりする状況で、オーディオの環境では特定の音が強調されてわんわん響いたりする原因にもなります。このような場合、音の反射する位置を特定して反射板で拡散するか吸音材で吸収するかの対策が必要になります。反射音は、スピーカから出た音が壁などで反射して聴取点に到達するため、直接音に対して時間遅れを生じさせます。つまり元の音に対して位相を変化させてしまいます。この位相の変化は音像定位に影響を与え、音像がボケたり、位置関係が不明瞭になる原因となります。そういった意味では、リスニングルームはデッドな状態が理想と言えます。しかし、吸音が強いと音が痩せて聞こえることも否めません。

Tea Break

2月と言えば節分の豆まき。子供の頃は豆と一緒にお菓子もまいてもらって拾い集めるのが楽しみでした。畳の上に散らばった豆とお菓子を兄弟と争いながらたくさん拾って袋に詰めて1週間分のおやつにしていました。60年以上も前の話です。最近では2月のイベントと言えば「バレンタインデー。」チョコレート業界が1年分の収入を得る？巨大イベントですね。チョコレートにもいろいろありますが、スウィートチョコがいいですね。何故って？それは、ウイスキーに合うからです。口の中にスウィートチョコを少し放り込み、少し融けかけたところにスコッチのシングルモルトを流し込む。口の中でウイスキーの香りとちょっとした辛さがチョコレートの甘みと溶け合ってこの上ない味わいと香りを醸し出してくれます。特にピートが良く効いていて個性が強いものが面白いかと思います。チョコレート菓子でウイスキーボンボンがありますが、その気持ち良く分かる気がします。さて、チョコレートにしるウイスキーにしる少し個性が強い感じですが、この個性に対抗できる紅茶はないでしょうか？香味に個性の強い紅茶はいくつかありますが、チョコレートやウイスキーのトロトロ感にスパッとけじめをつけるならダージリンオータムナルフラッシュなど如何でしょうか？ファーストフラッシュの爽快感、セカンドフラッシュの熟したフルーツ感など違って芳醇でふくよかさが強い紅茶でストレートがおすすめ。アッサムとは違ってタンニンが十分あってごつい感じとキレも備え持つお茶です。ひとつ如何でしょうか？

こんな時、こんな音楽 …

RADWIMPS 正解

2月は受験シーズン真っ盛り。将来の夢を目指して高校生・中学生・（一部小学生）・また時に幼稚園児……。ま、自分の将来をかけたの受験は主に高校生でしょうか？皆さん頑張ってください。受験に成功した人は自分の将来についてしっかり考えて実現してってください。もし失敗したとしても悲観することはありません。自分が目指していた世界が本当に自分にとって最善なのかを見つめ直すときが与えられ、自分の目標をもう一度見つめ直してリスタートです。

さて、受験の成果っていうと、学校や塾で学んできたことの集大成と言った感じですが、実は新しい世界への出発点ですね。特に、就職活動で手に入れた将来、これまでは勉強で正解を求めるところばかりしてきましたが、世の中はそう甘くありませんね。正解が正しい答えとは限らないばかりか答えすらないことばかりに出くわします。そんな方は是非聴いてください、RADWIMPSの「正解」。この曲はたまたま車を運転しながら聴いていたFMでかかった曲で、解説では音楽大学を目指す高校生男女250人ほどの混声3部合唱だそうです。CDにはRADWIMPSのオリジナルと女声合唱での録音も収録されていますが、私的には混成3部の録音がとてもよく思われました。250人と言っても大迫力ではなく、100人弱の編成かと思われるように静かな歌い方に聞こえますがよく揃っていてとても印象に残る演奏でした。決まった答えのない自分の人生の正解を、一生かけて見

つけていく。70年近く生きてきた私にとって正解が何だったかは未だに分かりませんが、ただ神様がいつの時も私を私の正解に導いて下さったように思います。なかでも、私の大きな分岐点だったのは高校2年の12月で、ホームルームで3年でのコース希望票を記入して提出する1分間でした。自分は何をしたいのか？その時までには経済学を習得してどこかの会社にでも就職しようと漠然と何も疑わずに思っていました。自分は何が好きなのか？1分の間思いめぐらし、自分は電気工学を目指そうと思いました。その時なりの正解だったのでしょうか。何故？それはステレオ装置に興味があり自分で作りたいと思っていたからです。180度方向転換です。1分の間。と言って電気工学を学んでもアンプ一つ作ることはできませんでしたけど。ただ、雑誌を見てアンプを作ったりはしましたが、意味も解らずでした。さらに音響について学び、就職して十数年後 KRYNA (株)との出会いをきっかけにオーディオ装置に関する研究をする機会を得られ現在が在るといった次第です。今でも今の在り方が本当に良いことか自分では分かっていないしこれが私の望んでいる状況かもはっきりしていません。私一人の力で今があるわけではないので…。いろんな時点でいろいろな選択肢がある中、一つ一つ選んだ結果今に至っています。今が正解かも分かりません。ただ今この時自分の最善を尽くすしかないかな。でも、悪くない気がしています。(日々の生活は間違いだらけですが…!) その時その時の選択はそれが正解だったようには思えなくても、後から考えてみるとどの時点においても最善を選んでいたように思われます。「正解」是非聴いてみてください。

今月の音楽

ドビュッシー 前奏曲集第2巻

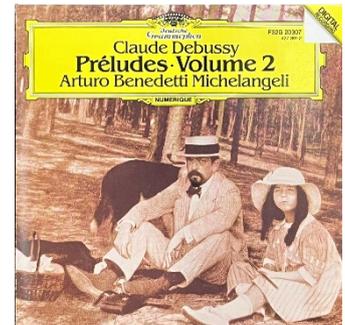
アルトゥーロ・ベネデッティ・ミケランジェリ (ピアノ)

ドビュッシー前奏曲集第1巻と比べるとやや前衛的な色合いですがミケランジェリの演奏は何度も聴きたくなるとても良い演奏です。録音はデジタル録音ですね…1988年。

録音現場 (小ホール) の響きや余韻もはっきり感じられます。

子供が遊んでいる部屋でこれを掛けると

工作や折り紙にやたらと集中する魔法のCD。(S)





オーディオと物理

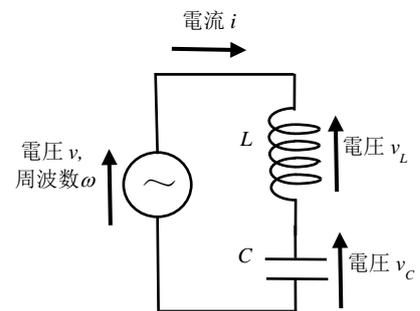
第23回 共振回路と等価回路

共振すると何が起こる？複雑な回路を単純にあらわす手法は？

電子素子の組み合わせで面白い現象に共振があります。力学でバネと質量で共振が起こることを述べましたが、電気回路でも同様です。以前も述べましたが、力学の質量と電気回路のインダクタ、力学のばねと電気回路の容量の逆数に対応させることにより、電気回路と力学の構成を置き換えることが出来ます。これはインピーダンス対応と呼ばれる置き換えで、力と速度をそれぞれ電圧と電流に置き換えると、電気現象と力学現象を相互に置き換えることが出来るようになります。さて、電気現象での共振回路を見てみましょう。

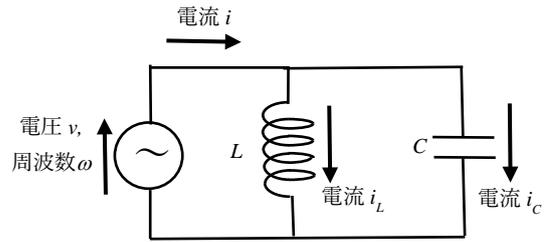
用意する素子は、インダクタ L と容量 C です。右の図のようにインダクタと容量を直列に接続し、交流電源を接続します。

電源の電圧を v 、角周波数を ω 、インダクタの電圧降下を v_L 、容量の電圧降下を v_C 、回路に流れる電流を i とします。電流は両者共通になります。この時、 $v = v_L + v_C = j\omega L i + i / j\omega C = j(\omega L - 1/\omega C)i$ が成立します。ここで、 $\omega L - 1/\omega C = 0$ が成立するとき、回路のインピーダンスは 0 となり $v = 0 i$ 、つまり電流が無限大



となる状況になります。これが（直列）共振です。電流が ∞ でないと電源電圧 $= 0$ となり矛盾が生じます。現実には導線やコイルなどに微小であっても抵抗がありますので完全にインピーダンスが 0 になる事は困難ですが、いずれにしても最大電流が流れます。この時の L 、 C 、 ω の関係は $\omega L - 1/\omega C = 0$ より $\omega^2 = 1/LC$ となり、共振条件と呼びます。この条件が成り立つ角周波数で電流が最大になります。力学では $\omega^2 = k/m$ で共振角周波数が与えられ、力が 0 でも振動が持続する現象が起こりましたね。これは、質量とバネに蓄えられた運動エネルギーと位置エネルギーが相互にキャッチボールするように互いに授受しあっているためでした。電気回路でも同じようにインダクタと容量の間で蓄えられたエネルギーが行ったり来たりする現象となり、電源からエネルギーが供給されないにもかかわらず電流が流れ続ける特異な状況が生じます。

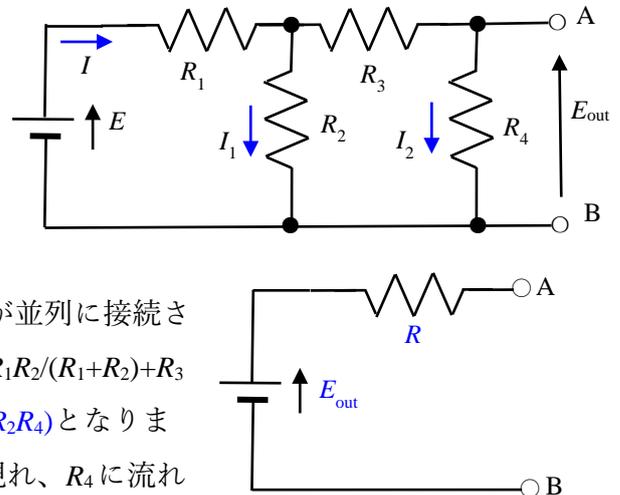
次は並列に接続された場合を考えましょう。並列に接続された場合 L と C にかかる電圧は共通ですが、電流は異なります。この時、 $i = i_L + i_C = v/j\omega L + j\omega Cv = j(\omega C - 1/\omega L)v$ が成立します。直列の場合と同様、 $\omega C - 1/\omega L = 0$ の時共振が生じますが、 L と C に流れる電流 $i_L = v/j\omega L (= -jv/\omega L)$ と $i_C = j\omega Cv$ は大きさが同じで位相が 180° 異なります。そのため、 L に i_L が流れ込むとき C から同じ大きさの電流 i_C が流出することとなります。つまり、電源から電流が流れ込まずに、 L と C の間で電流のキャッチボールが起こり、電流 $i=0$ となります。これは、並列で共振が生じた場合インピーダンスが無限大になる事を意味します。直列の場合の逆の現象ですので、反共振と呼びます。



以上のように、共振が起こると異常な状況が生じます。実際は素子に抵抗成分が少なからずあり、導線の抵抗成分もありますから電流が無限大になったり 0 になったりはしませんが、過大電流を生じてしまいます。そのため、ヒューズが飛んだりもします。一方、共振は特定の周波数で生じますのでその性質を使って発振器を作ることもできます。CR 発信機と呼ばれる装置がそれです。音響では共振とよく似た現象にハウリングがあります。ステージでマイクとスピーカの位置関係によってキーンと大きな音が発生したりしますが、これはマイク入力とスピーカ出力の間で正帰還が起こったために発生します。マイクに入力された信号が増幅器で増幅されてスピーカから放射されますが、マイクとスピーカの距離が関係し、音速をその距離で割った周波数の整数倍の周波数がマイクに入り込んでどんどん増幅されて循環することによって起こります。アンプなどでも、フィードバックの定数を間違えると発信を起こしてしまいます。

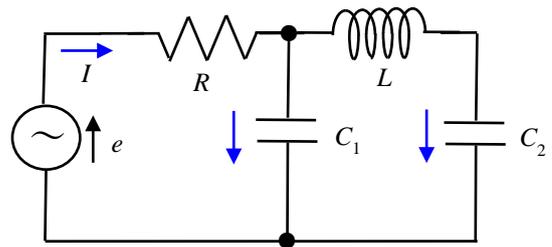
さて、次に等価回路について述べましょう。等価回路とは同等な回路という意味で、回路構成は別な回路だけれど機能的に同等な回路と言うことです。後、複雑な回路構成なので厳密には表現できないが少々近似を入れてそれらしい回路で表現しようという意味で近似回路と言うものもあります。特に、回路の内部構成が不明な回路を模擬的に表現する場合に使いますが次回説明しましょう。

まず等価回路ですが、簡単のため直流で考えましょう。右のような抵抗回路があるとします。AB から見た回路の合成抵抗 R は、電源の抵抗は 0 であることを考慮して、 R_1 と R_2 の並列抵抗 $R_1R_2/(R_1+R_2)$ が R_3 に直列に接続された抵抗 $R_1R_2/(R_1+R_2)+R_3$ に R_4 が並列に接続された並列抵抗となるので、 $R = (R_1R_2/(R_1+R_2) + R_3)R_4 / (R_1R_2/(R_1+R_2) + R_3 + R_4) = (R_1R_2R_4 + R_1R_3R_4 + R_2R_3R_4) / (R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3 + R_1R_4 + R_2R_4)$ となります。一方、AB 間の電圧 E_{out} は R_4 の電圧降下として現れ、 R_4 に流れ



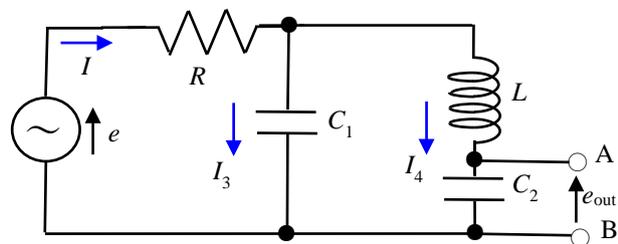
る電流 I_2 と R_4 の積となります。 I_2 は E から流れ出る全電流 I を R_2 と R_3+R_4 で分流した電流になり、 $I=I_1+I_2$ となります。 また、 R_2 と R_3+R_4 の端子電圧は同じですので $R_2 I_1=(R_3+R_4) I_2$ となり、 これから I_1 を消去すると、 $I_2 =IR_2/(R_2+R_3+R_4)$ となります。 ここで、 I は E から見た全抵抗 R_E が、 R_2 と R_3+R_4 の並列抵抗 $R_2(R_3+R_4)/(R_2+R_3+R_4)$ と R_1 の直列抵抗 $R_E=R_1+R_2(R_3+R_4)/(R_2+R_3+R_4)$ となることを考慮し、 $I=E/R_E$ となります。 したがって、 $E_{out}=R_4 I_2= R_4 E R_2 / R_E (R_2+R_3+R_4) = E R_2 R_4 / (R_1(R_2+R_3+R_4)+R_2(R_3+R_4))$ となります。 これらの値を使って右図のように端子 AB から見た等価回路に書き換えることが出来ます。 つまり、 端子 AB に関して上の回路と右の回路は同じ回路ということが出来ます。

それでは少し難しい回路、電源回路などで使われる π 型フィルタの等価回路を求めてみましょう。 右の図のように交流電源 e に抵抗 R 、コンデンサ C_1 、 C_2 、インダクタ L が接続された回路の等価回路を求めてみましょう。 この回路は交流電源がトランス、抵抗が整流管を模擬した電源の平滑回路になります。 先程と同様に

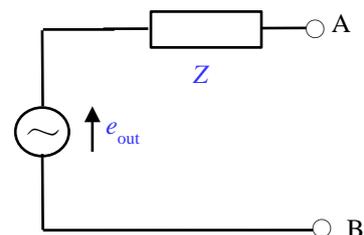


に電源のインピーダンスは 0 とし、 R と C_1 の並列インピーダンス Z_1 を求め、 Z_1 と L の直列インピーダンス Z_2 、 さらに Z_2 と C_2 の並列インピーダンスを求めると端子 A,B からみたインピーダンス Z が求められます。 具体的に $Z_1=(R/j\omega C_1)/(R+1/j\omega C_1)=R/(1+j\omega C_1 R)$ となり、 $Z_2=Z_1+j\omega L=(R+j\omega L - \omega^2 C_1 R L)/(1+j\omega C_1 R)$ を得ます。 これと C_2 との並列インピーダンスを求めると $Z=(Z_2/j\omega C_2)/(Z_2+1/j\omega C_2) = Z_2/(1+j\omega C_2 Z_2) = (R+j\omega L - \omega^2 C_1 R L)/(1+j\omega C_1 R + j\omega C_2 R - \omega^2 C_2 L - j\omega^3 C_1 C_2 R L) = (R - \omega^2 C_1 R L + j\omega L)/(1 - \omega^2 C_2 L + j\omega(C_1+C_2)R - j\omega^3 C_1 C_2 R L)$ となります。 一

方、端子 A,B の開放端子電圧 e_{out} は右の図のように C_2 の端子電圧となります。 ここで C_2 に流れる電流 I_4 は電源から流れ出る電流 I を $Z_3=1/j\omega C_1$ と $Z_4=j\omega L+1/j\omega C_2$ で (インピーダンスを求める時とは素子の組み合わせが変わるので Z_1, Z_2 でなく Z_3, Z_4 とした) 分流した電流になります。 直流の時と同様に、電源 e から見た回路のインピーダンス Z_e は、 Z_3 と Z_4 の並列インピーダンス $1/j\omega C_1 (j\omega L+1/j\omega C_2)/(1/j\omega C_1+(j\omega L+1/j\omega C_2)) = (1-\omega^2 C_2 L)/(j\omega(C_1+C_2) - j\omega^3 C_1 C_2 L)$ に R を直列に接続したもの $Z_e=R+(1-\omega^2 C_2 L)/(j\omega(C_1+C_2) - j\omega^3 C_1 C_2 L)$ となります。 また、 $I=e/Z_e$ は I_3 と I_4 に分流されるので $I=I_3+I_4$ となります。 Z_3 と Z_4 にかかる電圧は同じなので $Z_3 I_3=Z_4 I_4$ となることを考慮し、この二つの式から I_3 を消去すると $I_4=I Z_3/(Z_3+Z_4)$ が得られます。 $Z_3/(Z_3+Z_4)=1/(1+C_1/C_2 - \omega^2 C_1 L)$ であり先程求めた各値を代



入し整理し直すと $I_4= e/(Z_e(1+C_1/C_2 - \omega^2 C_1 L))$ となります。 結局、端子 A,B の開放端子電圧 e_{out} は C_2 の端子電圧なので、 $e_{out}=I_4 \times 1/j\omega C_2 = e/(Z_e(1+C_1/C_2 - \omega^2 C_1 L) j\omega C_2) = e(j\omega(C_1+C_2) - j\omega^3 C_1 C_2 L)/((1-\omega^2 C_2 L + j\omega(C_1+C_2)R - j\omega^3 C_1 C_2 R L)(1+C_1/C_2 - \omega^2 C_1 L) j\omega C_2) = e/(1-$



$\omega^2 C_2 L + j\omega(C_1+C_2)R - j\omega^3 C_1 C_2 R L)(1+C_1/C_2 - \omega^2 C_1 L) j\omega C_2)$

$\omega^2 C_2 L + j\omega(C_1 + C_2)R - j\omega^3 C_1 C_2 RL$ で得られます。このように得られたインピーダンスと電圧を用いて右の等価回路が求められます。こうして、求めた等価回路の端子に抵抗やインピーダンスを接続したときに流れる電流はテブナンの定理で求められます。

ちょっと回路計算の過程が難しかったと思います。もう少し簡単に求める方法を次回紹介しましょう。

☆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/

