

進み位相補償の限界とその理由（後編）

OP アンプの入力容量の補償は話しが違う（と電流出力エラー・アンプ補償回路）

著者：石井 聡

はじめに

前回は高速 OP アンプ LTC6252 に負荷容量を接続したとき、OP アンプの出力側がその容量により位相遅れが増大し、動作が不安定になる状態を考えました。この場合は、二つの帰還抵抗の大きさが近接していると、形成される位相最大進み量が思いのほか小さいことが分かりました。これにより回路の増幅率が低いとき、進み位相補償が効かなくなります。

今回は、OP アンプ入力に存在する寄生入力容量により位相遅れが増大しているとき、これを進み位相補償が補償する場合のごきについて考えてみたいと思います。前回の「回路の増幅率を低下させると進み位相補償が効かなくなる」ということが、入力容量を補償する場合も同じとなるのかを探究してみます。

またスイッチング・レギュレータで用いられている、電流出力型のエラー・アンプにおける位相補償回路についても位相変化を考えてみます。電流出力チャージ・ポンプ PLL も出力は電流出力なので、同様に位相補償を考えることができます。

サッカーとわたし

前回の TNJ-067 で「広島に行って驚いたこと」という酔な（粹な…ではありません）出だして広島カープのネタをお話しし、そこで「ジェフユナイテッド市原・千葉が…」だなんて、プロ・サッカーと自らの話題を少しお話ししました。その最後に幼少のころに見た「三菱ダイヤモンド・サッカー」というテレビ番組のお話しもしました。

幼少のころからときは経ち、社会人になった後の 1993 年。サッカー日本代表チームはカタールのドーハで FIFA ワールドカップ 1994 [1]へのアジア地区最終予選に参加していました。ワールドカップ初出場が目前という状況でした。そして起きた「ドーハの悲劇 [2]」…。テレビ画面の左側のゴールに吸い込まれる、イラク選手のヘディング・シュートは、それこそスロー・モーションのようにも見えました（当時のイラク政治状況からすれば、イラクの選手も死に物狂いだっただものと思われまう）。一緒にテレビを観ていた妻と、夜遅く、愕然としたものでした。ふたりとも絶句でした。まだ、ありありと、良く、そのときのことを覚えてます。この技術ノートを読まれる多くの方も覚えていることではないかと思います。

アナログ・デバイス株式会社は川崎フロンターレのパートナー

アナログ・デバイス株式会社は川崎フロンターレ [3]のパートナーになっています（2019 年時点。図 1）。良いカメラが無いのでいつもうまく撮影できないのですが、川崎フロンターレのホーム・グラウンドである川崎市等々力陸上競技場 [4]でのスポンサー紹介で電光掲示板に会社のロゴが表示されますし、ピッチ後縁にも「ANALOG DEVICES」の立て看板が設置されます（図 2）。カメラに拘らないためポケット・カメラでの撮影で、写りが悪くてすいません。[最後につづく]



図 1. アナログ・デバイス株式会社は川崎フロンターレのパートナー（下は MWE 2019 のポスター）



図 2. ピッチ後縁にある ANALOG DEVICES の立て看板（2019 年現在。2019 年 8 月 4 日、松本山雅 FC 戦のとき撮影）

アナログ・デバイス株式会社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイス社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様は、予告なく変更される場合があります。本紙記載の商標および登録商標は、それぞれの所有者の財産です。
©2020 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

Rev. 0

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-068

OP アンプ入力容量のケースでの補償容量による進み位相補償

図3のような回路を考えてみましょう。ここではLTspiceで用意されている、ユーザがパラメータ設定できるOPアンプ、「UniversalOpamp2」というものを用いています。「パラメータ」のとおりに「モデル」ですから、寄生的な成分（入力容量）を排除したシミュレーションをすることができます。図3ではここに外付けで、OPアンプの寄生入力容量に相当するCIN1, CIN2を接続しています。

OPアンプの寄生入力容量CIN1を記号 C_{IN} で表すと、 C_{IN} と R_1 , R_2 により、ここでも遅れ要素が形成されます（CIN2は系の不安定性には影響を与えません）。前回はOPアンプ出力における遅れ要素を考えましたが、帰還抵抗と入力容量による遅れ要素も（OPアンプの帰還ループ内という考え方からすれば）同じもので、動作の不安定を誘発するものです。ちなみにこの遅れ要素が -45° の「遅れ」になる周波数 f_P は

$$f_P = \frac{R_1 + R_2}{2\pi C_{IN} R_1 R_2} = \frac{1}{2\pi C_{IN}} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \quad (1)$$

となります。抵抗成分は R_1 と R_2 の並列接続です。

これを進み位相補償で補償することを考えてみます。ポイントは「入力容量を進み位相補償で補償するときは、回路の増幅率との関係はどうなるのか（増幅率の低下で位相補償が効かなくなるのか）」ということです。

図3に対して、進み位相補償コンデンサ C_F を接続した回路を図4に示します。

これをさらに図5のように帰還回路だけを取り出してみます。入力ノード V_{IN} が（ここまで見てきた回路の）OPアンプ出力に相当し、出力ノード V_{FB} （Feedback Voltageの意味）がOPアンプの反転入力端子に帰還される場所です。この入力 V_{IN} から出力 V_{FB} にかけての伝達関数を、今回は虚数単位 j を用いて計算してみます。以下のように式を立てることができます。

（右カラムに続く）

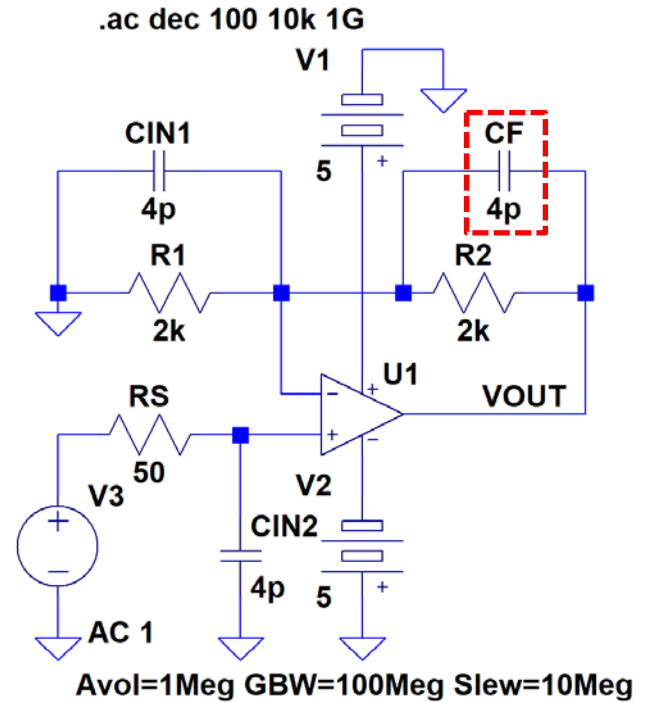


図4. 図3に位相補償コンデンサ C_F を接続した

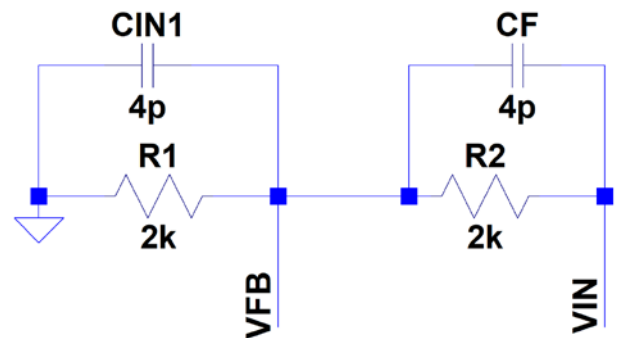


図5. 図4の帰還回路部分を取り出した

（左カラムより続く）

$$V_{FB} = \frac{\frac{R_1 \frac{1}{j2\pi f C_{IN}}}{R_1 + \frac{1}{j2\pi f C_{IN}}}}{\frac{R_1 \frac{1}{j2\pi f C_{IN}}}{R_1 + \frac{1}{j2\pi f C_{IN}}} + \frac{R_2 \frac{1}{j2\pi f C_F}}{R_2 + \frac{1}{j2\pi f C_F}}} V_{IN} \quad (2)$$

なんだか面倒くさそうな式です。伝達関数 $H(f)$ にして式変形をちょっと加えて、

$$\frac{V_{FB}}{V_{IN}} = \frac{\frac{R_1}{j2\pi f C_{IN} R_1 + 1}}{\frac{R_1}{j2\pi f C_{IN} R_1 + 1} + \frac{R_2}{j2\pi f C_F R_2 + 1}} \quad (3)$$

$$\frac{V_{FB}}{V_{IN}} = H(f) = \frac{R_1}{R_1 + R_2 \frac{j2\pi f C_{IN} R_1 + 1}{j2\pi f C_F R_2 + 1}} \quad (4)$$

図3. UniversalOpamp2を用いたOPアンプ寄生入力容量の影響を検討するモデル（CIN1のみ検討する）

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-068

入力容量を完全にキャンセルできる

この式(4)の分母の第 2 項 (分数になっているところ) をイコール 1 とすることで、 $C_{IN}R_1 = C_F R_2$ という関係を得ることができます。こうすると入力容量 C_{IN} の存在が全く影響しない、周波数に依存しない回路を

$$H(f) = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (5)$$

として実現することができます。

ちなみにオシロスコープの 10:1 パッシブ・プローブの位相補償は、この $C_{IN}R_1 = C_F R_2$ という関係を得ることにより実現しています。

入力容量の補償に関しては「回路の増幅率を低下させると進み位相補償が効かなくなる」とは異なるうごき

前回の TNJ-067 では、回路の増幅率が低い状態、つまりふたつの帰還抵抗の定数が近接していると、補償容量 C_F を接続した帰還回路で、位相の進み量を大きく確保できませんでした。

しかしこの検討からすると、 $C_{IN}R_1 = C_F R_2$ という関係を得ることにより、入力容量 C_{IN} の存在が全く影響しない回路を実現することになります。そしてそれは「増幅率の低下で位相補償が効かなくなる」ものではありません。前回の TNJ-067 で示した進み位相補償とは振る舞いが異なっているわけです。

入力容量と補償容量により位相の進みと遅れが生じる関係

さらにつづけていくと…、

$$\begin{aligned} H(f) &= \frac{R_1(j2\pi f C_F R_2 + 1)}{R_1(j2\pi f C_F R_2 + 1) + R_2(j2\pi f C_{IN} R_1 + 1)} \\ &= \frac{R_1(1 + j2\pi f C_F R_2)}{(R_1 + R_2) + j2\pi f R_1 R_2 (C_{IN} + C_F)} \\ &= U_1(f) \cdot U_2(f) \end{aligned} \quad (6)$$

この $U_1(f)$ と $U_2(f)$ それぞれは、進み位相要素となる分子の部分

$$U_1(f) = \frac{R_1(1 + j2\pi f C_F R_2)}{1} = R_1(1 + j2\pi f C_F R_2) \quad (7)$$

と、遅れ位相要素となる分母の部分

$$U_2(f) = \frac{1}{R_1 + R_2 + j2\pi f R_1 R_2 (C_{IN} + C_F)} \quad (8)$$

と表すことができ、 $U_1(f)$ と $U_2(f)$ の従属接続として数学的モデルを考えることができます (これは前回の TNJ-067 と同様)。

式(6)の分子である式(7)の $U_1(f)$ の位相は

$$\arg[U_1(f)] = \tan^{-1} \left(\frac{2\pi f C_F R_2}{1} \right) \quad (9)$$

この式(9)が 45° の「進み」になる条件は

$$2\pi f C_F R_2 = 1 \quad (10)$$

となりますから、この周波数 f_{U1} は

$$f_{U1} = \frac{1}{2\pi C_F R_2} \quad (11)$$

つづいて式(6)の分母である式(8)の $U_2(f)$ は、この式の分母を有理化 (実数に) して

$$U_2(f) = \frac{R_1 + R_2 - j2\pi f R_1 R_2 (C_{IN} + C_F)}{(R_1 + R_2)^2 + [2\pi f R_1 R_2 (C_{IN} + C_F)]^2} \quad (12)$$

この式の位相は

$$\arg[U_2(f)] = \tan^{-1} \left[-\frac{2\pi f R_1 R_2 (C_{IN} + C_F)}{R_1 + R_2} \right] \quad (13)$$

この式(13)が 45° の「遅れ」になる条件は

$$R_1 + R_2 = 2\pi f R_1 R_2 (C_{IN} + C_F) \quad (14)$$

この周波数 f_{U2} は

$$f_{U2} = \frac{R_1 + R_2}{2\pi (C_{IN} + C_F) R_1 R_2} \quad (15)$$

として f_{U1} と f_{U2} のそれぞれを得ることができます。 f_{U1} と f_{U2} の比は

$$\begin{aligned} f_{U1} : f_{U2} &= \frac{1}{C_F R_2} : \frac{R_1 + R_2}{(C_{IN} + C_F) R_1 R_2} \\ &= 1 : \frac{R_1 + R_2}{\left(\frac{C_{IN}}{C_F} + 1\right) R_1} \\ &= 1 : \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{C_{IN}}{C_F}} \end{aligned} \quad (16)$$

TNJ-067 で示した進み位相補償での条件、 $f_{U1} < f_{U2}$ であれば

$$\begin{aligned} \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{C_{IN}}{C_F}} &> 1 \\ 1 + \frac{R_2}{R_1} &> 1 + \frac{C_{IN}}{C_F} \\ \frac{R_2}{R_1} &> \frac{C_{IN}}{C_F} \end{aligned} \quad (17)$$

という関係になります。 $f_{U1} > f_{U2}$ であればその逆です。

入力容量の補償にプラスして OP アンプ負荷容量の位相補償にも対応した場合には

一般的に入力容量 C_{IN} は小さいですから、この式(17)を満足できる条件は設定可能で、入力容量補償にプラスして、TNJ-067 で示した OP アンプの負荷容量による位相遅れの進み位相補償も同時に実現できることが分かります。

それでもこのように R_1, R_2, C_{IN}, C_F の関係により、進み位相が始まる周波数を、遅れ位相の始まる周波数より低くも高くもできることも分かります。前回の TNJ-067 で示した進み位相補償とは、詳細に検討してみると、やはり振る舞いが異なっているわけです。

それでもここでの考え方はこれまでと同じ

さて、もしここで前回の TNJ-067 の図 5 (図 6 として修正して再掲) のような負荷容量による位相遅れを、入力容量 C_{IN} (図中に赤枠でその位置のみ示しました) の補償もしつつ、進み位相補償で対応したい場合、どう考えればよいかに踏み込んでみましょう。

これは実は単純な話で、今回検討した場合において、式(7)から得られる進み位相が形成される周波数 f_{U1} [式(11)] も、式(8)から得られる遅れ位相が形成される周波数 f_{U2} [式(15)] も、位相の変化していく振る舞いとしては前回の説明と何ら変わりません [形成される周波数はそれぞれの式の式のように異なります]。十分な進み位相を図 5 の回路網で形成するためには、やはり f_{U1} と f_{U2} が十分に離れている必要があるわけです。

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-068

式(16)において、 C_{IN} と C_F との項(C_{IN} と C_F はそれぞれ数 pF 程度でしょう)があることで、比の右側の分母は 1 より大きくなり、分子の R_1 と R_2 との比は前回の TNJ-067 のケースよりもよりシビア(R_1 と R_2 との比がより大きくないと、つまり信号増幅率がより高くないと効果が少ない)になるわけです。

ともあれ大きな流れとしては、今回説明したような入力容量補償込みで、負荷容量による位相遅れを進み位相補償したい場合でも、前回の TNJ-067 で「回路の増幅率を低下させると進み位相補償が効かなくなる」と説明した内容と同じ事態になるわけです。

適切な進み位相補償を形成させたい場合は、ここでもやはり、「 f_{U1} と f_{U2} を十分に離す」必要があることは、前回の説明と何ら変わらないことになるわけです。

電流出力エラー・アンプ (チャージ・ポンプ) の位相補償回路は動きが少し異なる

スイッチング・レギュレータで用いられている、図 7 のような電流出力型のエラー・アンプにおける位相補償回路 ([5]の Figure 16.から抜粋) について、これまでと同様に位相の変化を考えてみましょう。

この位相補償回路は図 8 のような電流出力型チャージ・ポンプ PLL ([6]の Figure 3.から抜粋) での位相補償でも同様に用いられており (チャージ・ポンプが電流出力なので)、「ループ・フィルタ」と呼ばれています。図 9 は図 8 のような電流出力型チャージ・ポンプの位相補償回路、つまりループ・フィルタです ([7]から抜粋)。これを例として考えてみます。図の左側 (CP 側) からチャージ・ポンプからの電流パルスが加わり、 C_1, R_2, C_2 がインピーダンスとなり電流・電圧変換とともに位相特性を決定する素子になります。つまり図 7 と同じです。 R_3, C_3, R_4, C_4 はスプリアス除去のための LPF なのでここは無視します。右側 (VTUNE 側) が出力です。

この素子番号を用いて入出力の伝達関数 [トランスインピーダンス $Z(f)$] を計算してみます (LPF 部分は無視します)。まず (右カラムに続く)

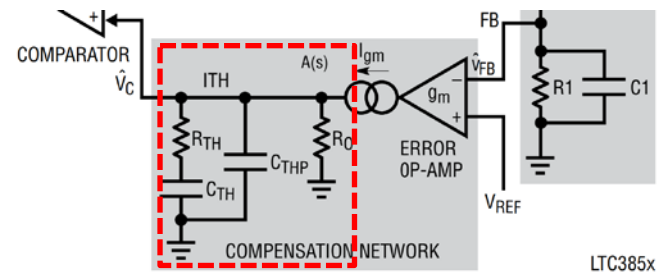


図 7. スwitchング・レギュレータで用いられている電流出力型エラー・アンプと位相補償回路

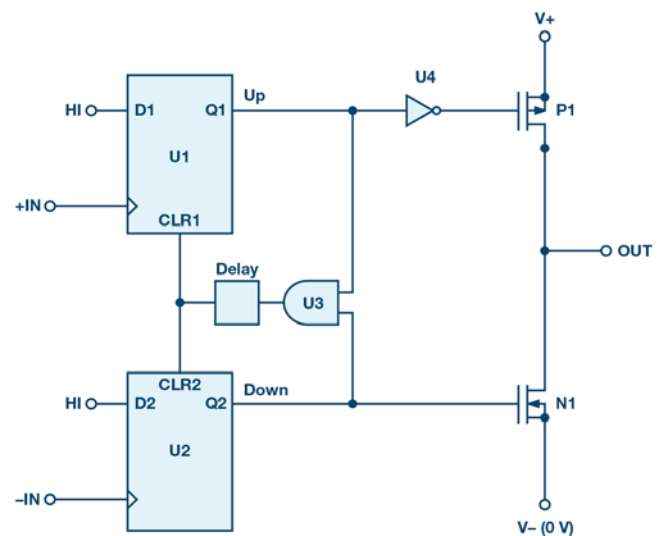


図 8. PLL IC で用いられている電流出力型チャージ・ポンプ ([6]の Figure 3.から抜粋)

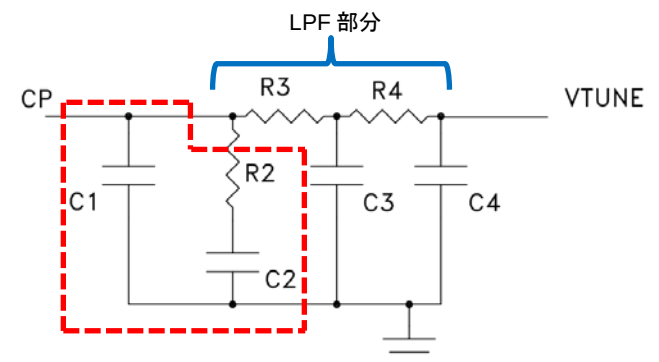


図 9. PLL IC の位相補償回路 (ループ・フィルタ。赤枠の部分が位相特性を決定する素子。[7]から抜粋)

(左カラムより続く)

$$V_{TUNE} = \frac{\frac{1}{j2\pi f C_1} \left(R_2 + \frac{1}{j2\pi f C_2} \right)}{\frac{1}{j2\pi f C_1} + R_2 + \frac{1}{j2\pi f C_2}} I_{CP} \quad (18)$$

これから

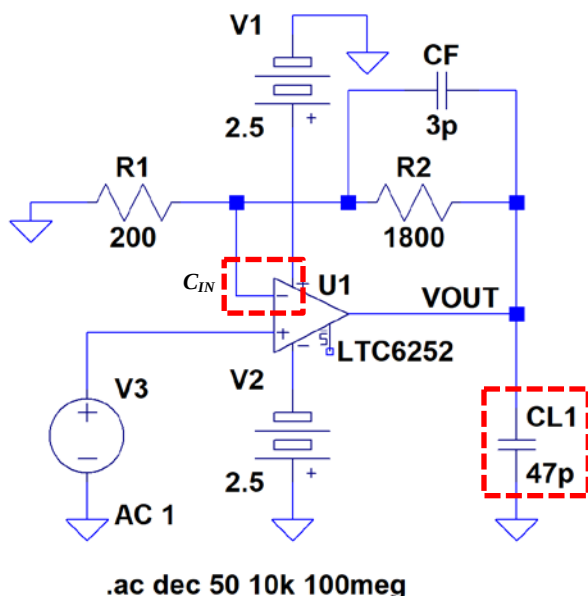


図 6. TNJ-067 の図 5 再掲と加筆 (負荷容量 47pF による位相遅れを進み位相補償で対応したシミュレーション回路)

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-068

$$\begin{aligned}
 \frac{V_{TUNE}}{I_{CP}} = Z(f) &= \frac{\frac{1}{j2\pi f C_1} \left(R_2 + \frac{1}{j2\pi f C_2} \right)}{\frac{1}{j2\pi f C_1} + R_2 + \frac{1}{j2\pi f C_2}} \\
 &= \frac{R_2 + \frac{1}{j2\pi f C_2}}{1 + j2\pi f C_1 \left(R_2 + \frac{1}{j2\pi f C_2} \right)} \\
 &= \frac{R_2 + \frac{1}{j2\pi f C_2}}{1 + \frac{C_1}{C_2} + j2\pi f C_1 R_2} \\
 &= \frac{R_2 + \frac{1}{j2\pi f C_2}}{1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{C_1}{C_2} + j2\pi f C_1 R_2} \\
 &= U_1(f) \cdot U_2(f)
 \end{aligned} \tag{19}$$

進み位相要素となる分子の部分は

$$U_1(f) = \frac{R_2 + \frac{1}{j2\pi f C_2}}{1} = R_2 + \frac{1}{j2\pi f C_2} \tag{20}$$

$U_1(f)$ の分母は1なので、単に表記を変えてあります。

また遅れ位相要素となる分母の部分

$$\begin{aligned}
 U_2(f) &= \frac{1}{1 + \frac{C_1}{C_2} + j2\pi f C_1 R_2} \\
 &= \frac{1 + \frac{C_1}{C_2} - j2\pi f C_1 R_2}{\left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right)^2 + (2\pi f C_1 R_2)^2}
 \end{aligned} \tag{21}$$

ここでもこの式の分母を有理化（実数に）してあります。

ここでの考え方はこれまで少し異なるぞ

まず式(19)の分子の部分である式(20)の $U_1(f)$ の位相は

$$\arg[U_1(f)] = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{-1}{2\pi f C_2}}{R_2} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{-1}{2\pi f C_2 R_2} \right) \tag{22}$$

となりますが、式(7)などと異なり、式中の項（第2項）の分母側に周波数の変数 f があります。これはちょっとおかしいのでは？と思いませんか。

数学的にはこれで $U_1(f)$ の位相を問題なく求めることができるのですが（ $f=0$ で $\arg[U_1(f)] = -90^\circ$ になります）、電子回路の計算として、とくに「ポール（極）とゼロ」というものを考えていくうえでは、式(20)のように f が式中の分母にあるのはよろしくなく（より理論的には「 f の多項式である必要」が、さらに厳密には「ラプラス演算子 s の多項式である必要」があります）、そのため実際には

$$\begin{aligned}
 U_1(f) &= R_2 + \frac{1}{j2\pi f C_2} = \frac{1}{j2\pi f C_2} (j2\pi f C_2 R_2 + 1) \\
 &= U'_1(f) \cdot U_3(f)
 \end{aligned} \tag{23}$$

として二つに分けます。進み位相要素となる分子の部分は、新たに

$$U'_1(f) = 1 + j2\pi f C_2 R_2 \tag{24}$$

と考えることができ、 $1/f$ となっていた部分を変形した結果として、「新たに遅れ位相要素」となる分母の部分

$$U_3(f) = \frac{1}{j2\pi f C_2} \tag{25}$$

が形成されることになります。これをもう一度式(19)のところに戻って整理しなおしてみると、

$$\begin{aligned}
 Z(f) &= \frac{1}{j2\pi f C_2} \cdot \frac{1 + j2\pi f C_2 R_2}{1 + \frac{C_1}{C_2} + j2\pi f C_1 R_2} \\
 &= U'_1(f) \cdot U_2(f) \cdot U_3(f)
 \end{aligned} \tag{26}$$

と3要素の従属接続となります。

このように PLL のループ・フィルタ（電流出力エラー・アンプでは位相補償フィルタ）は、「ポール（極）とゼロ」の視点から考えるうえでは、位相を変化させる3つの要素 $U'_1(f)$ 、 $U_2(f)$ 、 $U_3(f)$ に分割できるわけです。

位相の進みと遅れを考える（その1）

$U'_1(f)$ 、 $U_2(f)$ 、 $U_3(f)$ のそれぞれを見ていきましょう。まず式(24)の $U'_1(f)$ が 45° の「進み」になる条件は

$$2\pi f C_2 R_2 = 1 \tag{27}$$

となりますから、この周波数 f_{U1} は

$$f_{U1} = \frac{1}{2\pi C_2 R_2} \tag{28}$$

つづいて分母の部分である式(21)の $U_2(f)$ の位相は

$$\begin{aligned}
 \arg[U_2(f)] &= \tan^{-1} \left(-\frac{2\pi f C_1 R_2}{1 + \frac{C_1}{C_2}} \right) \\
 &= \tan^{-1} \left(-\frac{2\pi f R_2 C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right)
 \end{aligned} \tag{29}$$

この式(29)が 45° の「遅れ」になる条件は

$$2\pi f R_2 C_1 C_2 = C_1 + C_2 \tag{30}$$

となりますから、この周波数 f_{U2} は

$$f_{U2} = \frac{C_1 + C_2}{2\pi R_2 C_1 C_2} = \frac{1}{2\pi R_2} \cdot \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} \tag{31}$$

f_{U1} と f_{U2} の比は

$$f_{U1} : f_{U2} = \frac{1}{C_2} : \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} \tag{32}$$

位相の進みと遅れを考える（その2）

最後に新しくできた（できたって、生まれたわけではありませんが…） $U_3(f)$ を見てみましょう。式(25)は分母に j があるだけです。実数項はありません。これは「周波数によらず常時 -90° 」になる要素なのです。結局、周波数 $f=0$ （より厳密には「 $f=0$ といえる低い周波数」）においては、

$$\begin{aligned}
 \arg[U'_1(0)] &= 0^\circ \\
 \arg[U_2(0)] &= 0^\circ \\
 \arg[U_3(0)] &= -90^\circ
 \end{aligned}$$

となり、周波数 $f=0$ における $Z(f)$ 全体の位相はこれらの足し算

$$\arg[U'_1(0)] + \arg[U_2(0)] + \arg[U_3(0)] = -90^\circ$$

です。エラー・アンプの位相補償フィルタや PLL のループ・フィルタでの位相周波数特性は -90° からスタートする」ということになり、前回の TNJ-067 の式(4)や今回の式(4)とは位相特性が異なるということになるわけです。

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-068

位相の進みと遅れをシミュレーションしてみる

図 10 は R_2 を 100Ω 、 C_1 を 10nF 、 C_2 を $1\mu\text{F}$ としたときの $U_1'(f)$ 、 $U_2(f)$ 、 $U_3(f)$ それぞれの位相変化と回路全体 $Z(f)$ の位相変化を数値計算により得たようすです。

上から $U_1'(f)$ 、 $U_2(f)$ 、 $U_3(f)$ 、 $Z(f)$ の位相変化となっています。上記の説明のように、 $U_3(f)$ は「式(25)から」直流付近から位相が -90° になっています。式(24)で表される進み位相要素となる $U_1'(f)$ により、周波数が $f_{U1}' = 1.592\text{kHz}$ [式(28)から] のとき位相が $+45^\circ$ になり、さらに周波数が上昇すると $+90^\circ$ になります。式(21)で表される遅れ位相要素となる $U_2(f)$ は上記より高い周波数である $f_{U2} = 160.7\text{kHz}$ [式(31)から] で位相が -45° になり、さらに周波数が上昇すると -90° になります。これによりいちばん下の回路全体 $Z(f)$ の位相は $-90^\circ \Rightarrow 0^\circ \Rightarrow -90^\circ$ と変化していることが分かります。

図 11 に図 10 の条件を LTspice で構成し、 $Z(f)$ の位相変化をシミュレーションした結果を示します。図 10 の結果と同じになっていることが分かりますね。

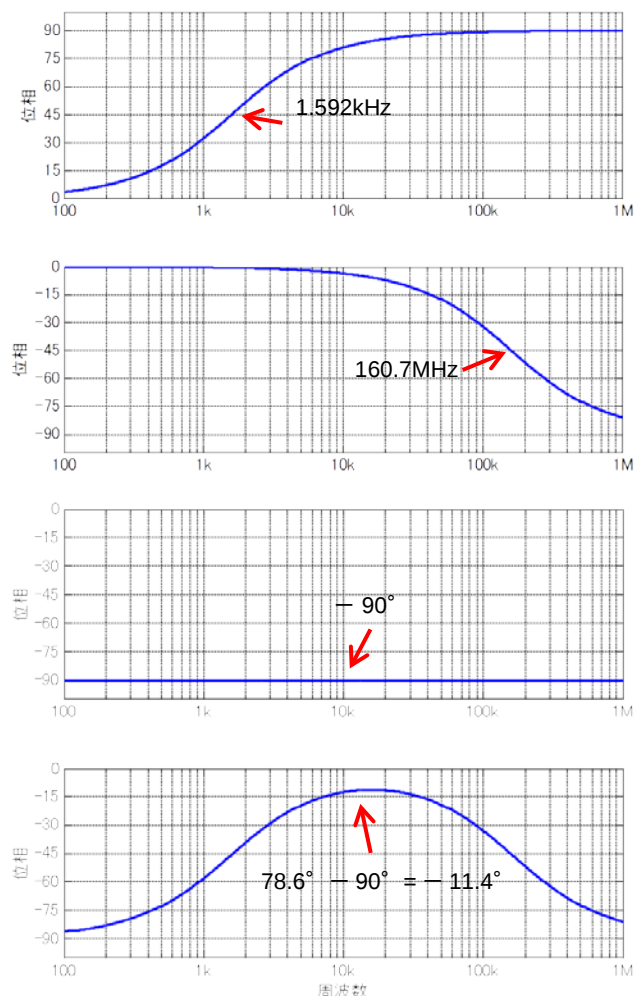


図 10. R_2 を 100Ω 、 C_1 を 10nF 、 C_2 を $1\mu\text{F}$ としたときの $U_1'(f)$ 、 $U_2(f)$ 、 $U_3(f)$ 、 $Z(f)$ それぞれの位相変化のようす

PLL 設計時の思い出では

私は以前、RF エンジニアだったこともあり、PLL 回路の設計もしていました。そのとき使っていた PLL IC が図 8 のような電流出力型チャージ・ポンプのものでした。そのあたりの回路設計をしていたころ、図 9 の「 C_1 と C_2 の比を $1:10$ くらいにする」という説明を聞き、「なぜなのだろうか」ときちんと理解することができませんでした。しかしこのように「 f_{U1} と f_{U2} の比が小さくなると最大位相進み量も少なくなる」ということが理解でき、式(32)を考えれば、なるほどねと、そのむかし聞いた説明が腑に落ちることとなるわけでした。

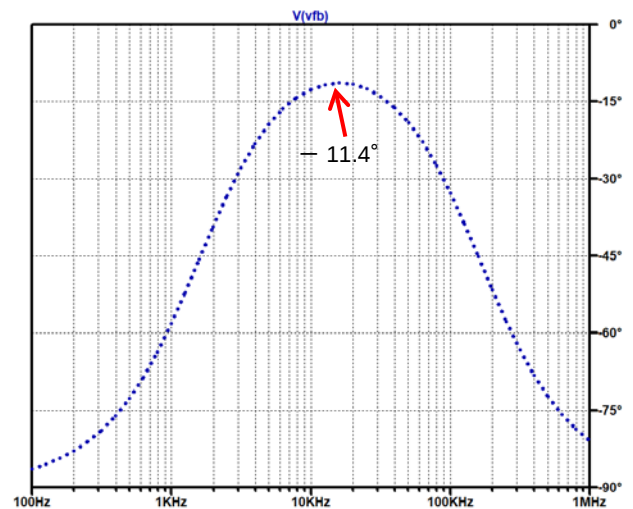


図 11. 図 10 の関係を LTspice で $Z(f)$ の位相変化をシミュレーションしてみた

おわりに…「数学的ネタが多いなあ」

このところの技術ノートは、続けてだいたい数学的ネタが多いなあと自分でも思っています（汗）。しかし実際に回路の振る舞いを考えていくには、回路理論の側面から検討していかないといけないので、残念ながら数学的ストーリー展開になってしまうのでありました…。

学術での電気・電子回路／デジタル信号処理などの理論検讨も数学ですし、理論物理学（「数理論理学」というそうですね [8]）も数学です。結局は数学に立ち戻ってしまうのだろうなあと、ぼんやり通勤途上などでも思うものでありました…。

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-068

サッカーとわたし（つづき）

「最初からつづく」ときは経ち、アナログ・デバイセズの社員になり数年後の2016年、川崎フロンターレのJ1サッカー観戦に初めて川崎市の等々力陸上競技場に行きました。私の等々力陸上競技場でのサッカー初観戦自体は、その前年年末の皇后杯決勝（女子サッカー）でした。当時もアナログ・デバイセズ株式会社が川崎フロンターレのスポンサーであることは知っていました。なお私は生まれたときから現在も千葉県在住人です。諸般の事情により、等々力陸上競技場のある川崎市中原区（小杉地区）界限に出没するようになったのであります…。

その試合は、川崎フロンターレと鹿島アントラーズのマッチでした。それから年に数回は観戦するようになりました。

川崎フロンターレはJ1連覇したほどのチームなので、やはり上手い…。いつも思います…。パスが的確に通ります。トリッキーなパスもつながります。他のJ1チームも同じく上手いですよね。そのプレーに「うまい…」と声が出てしまいます。私の後ろで観戦していたお兄ちゃんが話しをしているのが聞こえました。「ヨーロッパに行かなくても、同レベルの試合が日本で見られるんだから、幸せだよな」。最近のJ1を見ていると確かにそう思います。ドーハの悲劇のときは「パスが通らないな」とヤキモキしながら見ていたものでした。

しかし私は千葉県人です。2016年9月22日、等々力陸上競技場で天皇杯3回戦があり、たった一度、川崎フロンターレとジェフユナイテッド市原・千葉（当時も現在もJ2）との対戦を観戦しました。当然（？）、私はアウェイ側に陣取ると、廻りの観客のその黄色のユニフォームには、良く聞く、慣れ親しんだ企業のスポンサー名が。「やっぱ、落ち着くな」と隣にいる妻に話し、その日ばかりは「敵」の川崎フロンターレと対峙していました（ホント、裏切り者…）。

と思うのです。「ジェフユナイテッド市原・千葉がJ1に昇格したら黄色のユニフォームを着て気が狂ったように応援しているだろう」と。

思い出します。私が初めて観戦したプロ・サッカーの試合は、ドーハの悲劇の翌年だったと思いますが、千葉縣市原市の市原緑地運動公園臨海競技場[9]での、地元J1チーム、ジェフユナイテッド市原・千葉の試合だったのです。それは長男が小学校1年生のころ、そしてそれは、子供会での遠足でした…（なんと幼稚な観戦歴のスタート…）。

それならば、千葉テレビ放送[10]を見たり、JR京葉線終点、千葉市内の蘇我駅近くのフクダ電子アリーナ[11]に行けばいいだろうという選択肢は、深く問い詰めませぬよう…（汗）。結局は二重裏切り者のヨタ話しですね^^;。いろいろ諸事情ございまして^^;。

ところでマーケティング目線でみて、等々力競技場内で一番の有効な広告媒体は「負傷者救護担架」だと（総合建設会社O社広告）、いつも観戦しながら思っています（笑）。

（了）のはずが…

やはり書かずにはいられない！2019年10月26日！

上記まででこの記事は終わりにしようと、そして以下の「酔ネタ1行」は、だいたい天気モードなので、「没」にしようと思っていました（執筆している時期も分かっていますし）。

…

「そういう今週末（2019年10月26日）はJリーグ・ルヴァンカップ決勝戦で、川崎フロンターレ対北海道コンサドーレ札幌を初めての埼玉スタジアム2002に見に行く予定です（笑）」

…

しかし「やはり書かずにはいられない！」という、超激戦ともいえるスゴイ試合となり…。数年後にこのWEBラボを自分で見ても、日記としてその記憶を思い出せるようにする（なんて我田引水ですね^^;）話題として、以下をご提供しておきたいと思います（汗）。

- 前半 10 分。コンサドーレがセンタリングからこぼれたボールを逆サイドからゴール。いきなり先取点をもぎ取られる
- 以降、決定的場面があるも双方得点できず
- 前半のアディショナル・タイム終了間際。フロンターレがコーナ・キックを逆サイドから股抜きシュートし追いつく
- 相当な混戦のなか、後半 42 分。ゴール直近で縦にふわりと出たパスをフォワードが胸でトラップしそのままゴール！これでアディショナル・タイムを守り切れれば勝てる！
- アディショナル・タイム終了まであと1分を切ったところでコンサドーレ。コーナ・キックをヘディングで合わせゴールにぶち込まれる…。終了間隙で同点。「ヘディング…。まるでドーハの悲劇だ」
- 延長に突入（普段のJリーグなら引き分け終了になってしまう）
- フロンターレの選手に VAR（Video Assistant Referee）でレッド・カードが出て10人での攻防になり、そのセット・プレーでフリー・キックから得点される…。コンサドーレがリード。延長前半終了。これでは…
- 延長後半。フロンターレ、ゴール前の混戦からゴール反対側に出たショート・パスをフォワードがゴール！同点に持ち込む。隣で見ていた妻は、そのあまりの興奮に、妻は…、青い川崎Fタオルを振り廻しながら、叫び、跳ねながら、感極まり泣き出してしまふ
- 延長が終了し、PK戦にさらに突入
- PK戦はフロンターレ側ゴールにて。周囲に座っていたフロンターレ観客はぞろぞろとゴール裏のサポーター席側に移動している…（空き席はあるの？）
- PK戦結果は表1のとおり。4本目が終わったところで『万事休す』と思われたが、その後の2本を（サドンデスとなった最後の1本を）止めたキーパー新井選手。スタジアムは超歓喜の渦に！チョーカッコいいぞ、新井選手！

表1. ペナルティ・キックの経緯（失はクロスバーに当たったミス・キック、捕はキーパーが捕球し止める）

	1	2	3	4	5	6
川崎	○	○	○	失	○	○
札幌	○	○	○	○	捕	捕

しかし本当に超怒涛の超興奮ともいえる超接戦の試合でした。そのため「書かずにはいられない」というところなのであります（皆様、お許しください…）。北海道コンサドーレ札幌のファンの方、また他のチームのファンの方、一方的な中継で申し訳ございません(。ホントはJEFを応援すべきヤツが…（汗）。ともあれ両チームとも素晴らしかった試合でした。ネットでもJリーグ・ルヴァンカップ2019決勝戦について、多数記事や動画がありますので、よろしければご覧ください（何度その動画を見ても、あの興奮が蘇える…）。

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-068

参考文献

- [1] 1994 FIFA ワールドカップ, Wikipedia, https://ja.wikipedia.org/wiki/1994_FIFA_ワールドカップ
- [2] ドーハの悲劇, Wikipedia, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ドーハの悲劇>
- [3] 川崎フロンターレ, Wikipedia, <https://ja.wikipedia.org/wiki/川崎フロンターレ>
- [4] 等々力陸上競技場, Wikipedia, <https://ja.wikipedia.org/wiki/等々力陸上競技場>
- [5] Henry J. Zhang; Application Note 149, Modeling and Loop Compensation Design of Switching Mode Power Supplies, AN-149-4, Analog Devices (former Linear Technology document)
- [6] Ian Collins; Phase-Locked Loop (PLL) Fundamentals, Analog Dialogue, vol. 52, no. 7, July 2018, Analog Devices
- [7] HMC837LP6CE FRACTIONAL-N PLL WITH INTEGRATED VCO 1025 - 1150, 2050 - 2300, 4100 - 4600 MHz datasheet, Analog Devices
- [8] 数理物理学, Wikipedia, <https://ja.wikipedia.org/wiki/数理物理学>
- [9] 市原緑地運動公園臨海競技場, Wikipedia, <https://ja.wikipedia.org/wiki/市原緑地運動公園臨海競技場>
- [10] 千葉テレビ放送（チバテレ）公式ホームページ, <https://www.chiba-tv.com/>
- [11] フクダ電子アリーナ, Wikipedia, <https://ja.wikipedia.org/wiki/フクダ電子アリーナ>