

謎の電流帰還 OP アンプ（第 1 回）

「なんだ？このループ・ゲインの変化は！」

著者：石井 聡

はじめに

「電流帰還 OP アンプは高速な用途に適している」という話はよく聞くところと思いますが、詳細なくみまで調べてみたとか、その動作解析をしてみたという機会は、意外と少ないのではないかと思います。そういう私も昔から「電流帰還 OP アンプを技術的に深堀りしてみたい」と思っておりましたが、最近、背中を押される「とあること」があり、この TNJ-056 以降でそのネタを考えてみることにしました。

この技術ノートは徒然草的に探究しているもの（嘘ついてません…。ホントです）なので、この電流帰還 OP アンプ・シリーズも何回の技術ノートになるものか、現時点では皆目見当が付きません（汗）。

意外と世の中は同期している？

この記事を書き始めたころ、ちょうどある方（といっても弊社のお客様なのですが）とのメールのやり取りが始まりました。

その方とは数年前に、アナログ技術セミナーの大阪会場でセッション終了後に名刺交換させていただきました。ご名刺には「技術士（電気電子部門）」と書いてあります。「ああ、技術士さんなのですね！これはお近い！今後もどうぞよろしくお願いします」とお話ししました。25 年ほど前に、会合に出るとよく聞かされた、感じたことが、「名刺にその文字があると親近感を感じる」ということでしたが、このときも同じだったのです。

最近その方とあらためてメールのやり取りが始まったのですが、2018 年のアナログ技術セミナーでもお会いすることができ、技術談義を懇親会席上でさせていただくことができました。それ以降のメールのやりとりで、「セミナーも終わって、これまで手をつけたことがなかった電流帰還 OP アンプを…」と差し上げたところ、「ほんとにちょうど同じところで悩んでいる」という返信をいただきました。懇親会席上での技術談義は全く別モノ（TNJ-054, 055 でご紹介したミドルブルック法について）だったのですが、偶然というか、同じタイミングで同じところを悩みだしたということ、世の中は同期しているのでは？と思うところでありました…。

（おさらい）電圧帰還 OP アンプでのループ・ゲインと信号増幅率周波数特性

まず手始めに、よく用いられる電圧帰還（Voltage feedback）OP アンプでのループ・ゲインと信号増幅率周波数特性を LTspice でシミュレーションしてみましょう。

図 1 は電圧帰還 OP アンプ AD8601 を $G = +10$ で設定した増幅系を、ミドルブルック法の電圧注入法を用いてループ・ゲインを LTspice でシミュレーションする回路図です。信号増幅率 G は

$$G = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$

で当然きまりますが、帰還率 β は G の逆数として、

$$\beta = \frac{1}{G} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

です。 R_1 と R_2 の比が等しければ、帰還率 β は同じになります。そのため抵抗値を変えても（比が等しいかぎり）ループ・ゲインは変わらないことになります。

図 1 のシミュレーション回路では帰還抵抗 R_2 を .step コマンドで 7 ステップ変化させ、それぞれのループ・ゲインをシミュレーションしてみました [V(VOUT)/V(VFB) を計算させます]。

シミュレーション結果を図 2 に示します。ループの切れるクロスオーバー周波数以下では、どの抵抗値であっても同じループ・ゲインが得られていることが分かります。クロスオーバー周波数より上、つまりループ・ゲインが 0dB より低いところでは AD8601 の出力インピーダンスと帰還抵抗の関係などで（電圧注入法の誤差もあるようですが）ループ・ゲインの大きさが抵抗値によって変わってはいますが、これはこれまでの回路設計 Web ラボの技術ノートをご覧いただいている方なら「そりゃそうだ」と頷（うなづ）かれる結果ではないかと思います。

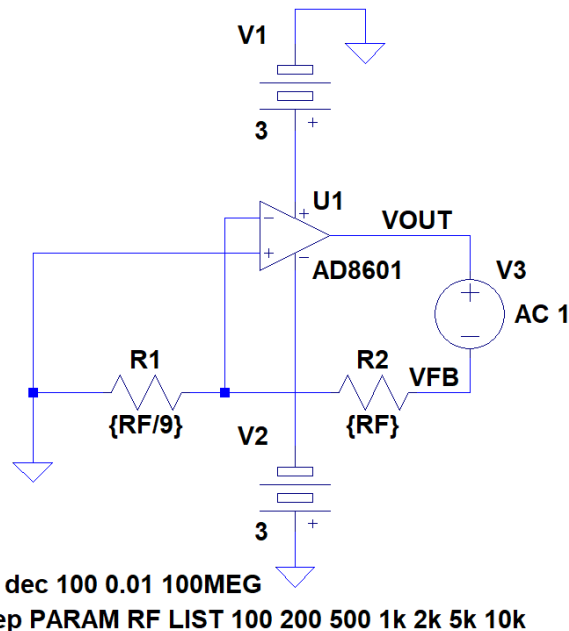


図 1. 電圧帰還 OP アンプ AD8601 のループ・ゲインを LTspice でシミュレーションする回路

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。
©2019 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-056

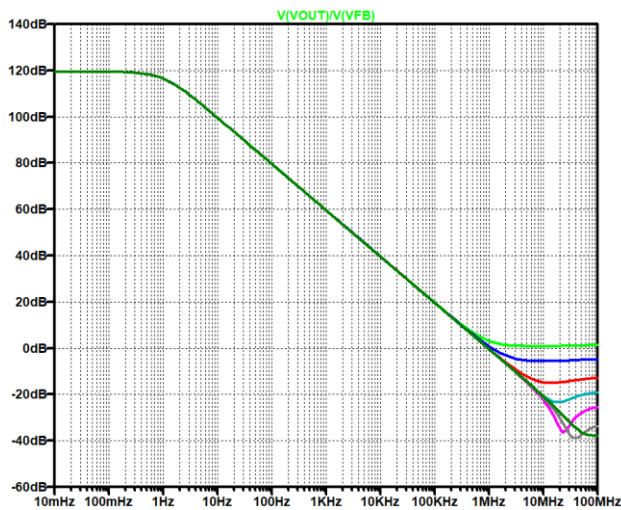


図 2. 図 1 のシミュレーション結果。異なる抵抗値であっても同じループ・ゲインが得られている ($R_F = 100, 200, 500, 1k, 2k, 5k, 10k \Omega$)

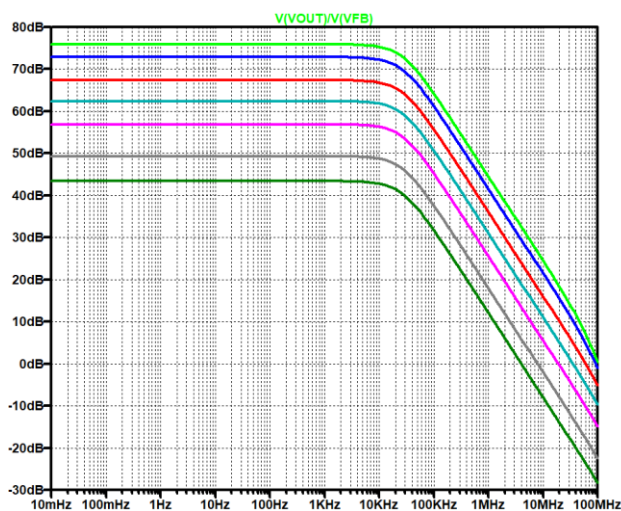


図 3. 電流帰還 OP アンプ AD811 でのシミュレーション結果。帰還抵抗の抵抗値が変わるとループ・ゲインも変わる ($R_F = 100, 200, 500, 1k, 2k, 5k, 10k \Omega$)。ただし電源電圧は $\pm 5V$

電流帰還 OP アンプ AD811 でループ・ゲインをシミュレーションしてみる

同じ条件で電流帰還 OP アンプ AD811 [1]を用いてシミュレーションをしてみました。AD811 をご紹介しておく、

AD811 高性能ビデオ・オペアンプ

<https://www.analog.com/jp/AD811>

【概要】

AD811 は、放送品質のビデオ・システム向けに最適化された広帯域電流帰還オペアンプです。AD811 は、ゲイン = +2 かつ $R_L = 150 \Omega$ で -3 dB 帯域幅 = 120 MHz、微分ゲイン = 0.01%、微分位相 = 0.01° であるため、すべてのビデオ・システムに対する優れた選択肢になっています。

(後略)

ということで、高速なビデオ信号用途で使われる OP アンプです。シミュレーション回路は図 1 と同じです。ただし電源電圧は AD811 のスペックに合わせて $\pm 5V$ にしました。シミュレーション結果を図 3 に示します。

な、なんと！、**帰還抵抗の抵抗値が変わると、ループ・ゲインも変わる**ではありませんか。

その結果として、ループ・ゲインが 1 (0dB) となるクロスオーバー周波数も変化しています。この「クロスオーバー周波数も変化する」は非常に重要な話で、以降の技術ノートのネタとして続いていくのでした…。

電流帰還 OP アンプでは帰還抵抗でループ・ゲインが変わる

この技術ノートでは、まずはこのように、ループ・ゲインという切り口（入口）から電流帰還 OP アンプを探究していきます。

図 4 に一番基本的な電流帰還 OP アンプのブロック図を示します ([2] の Figure 2 から抜粋したもの)。さらにそれをループ・ゲインという視点でより簡潔なブロックにしたものを、図 5 に示します。

図 4 については、追ってあらためて説明をしていきます。図中にある $T(s)$ は、反転入力端子に流れる電流量 i を V_{OUT} 出力の電圧量に変換するためのインピーダンスです。「トランス・インピーダンス」とも呼びます（なお入力電流量に対して極性が反転しています）。ともあれこの辺は、別途詳しく…。

つづいて図 5 をご覧ください。ループ・ゲインは、図 4 において $V_{IN} = 0V$ として、 V_{OUT} 端子から帰還抵抗 R_2 の経路を切断し、 R_2 を経由して出力 V_{OUT} に戻ってくる一周のゲインを示すもので、

$$LG = A \cdot \beta \quad (3)$$

として定義されるものです。ここで A は前方への（OP アンプ自体の）増幅率、 β は帰還率です。

電流帰還 OP アンプの反転入力端子は、図 4 で $\times 1$ と書いてある、バッファ出力となっているという面白い構造です。図 5 ではこのバッファは記述しておらず、 R_O がそのままグラウンドに接続されているものとして単純化してあります ($V_{IN} = 0V$ であり、バッファ出力も同じ電圧になるため)。

一般的に R_O は低抵抗で、帰還抵抗 R_1, R_2 よりだいぶ ($R_O \ll R_1, R_2$ とは言えないので「だいぶ」にしました) 小さいので、

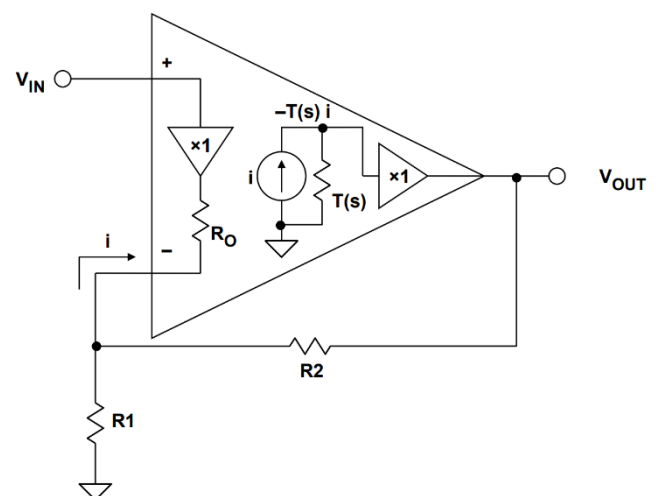


図 4. 一番基本的な電流帰還 OP アンプのブロック図 ([2] の Figure 2 より抜粋)

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-056

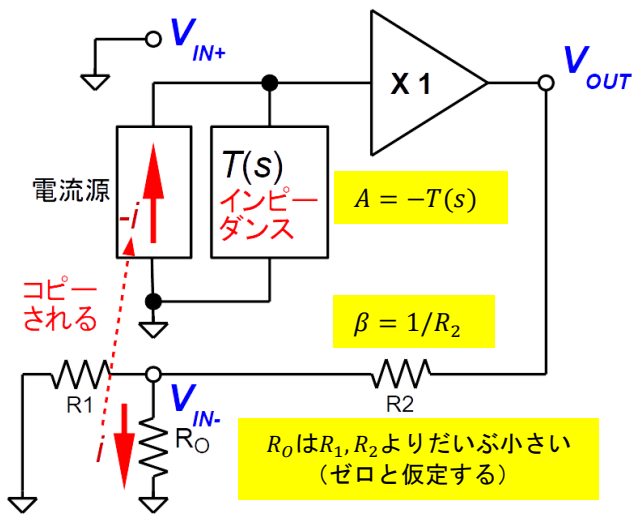


図 5. 図 4 のブロック図をループ・ゲインという視点でより簡潔にしたもの

この検討開始時点では、図 5 の R_0 は無視してしましましょう。 $R_0 = 0 \Omega$ で、グラウンドに R_2 が直接接続されているものとして考えます。そうすると出力 V_{OUT} から反転入力端子（このモデルではグラウンドとしています）に流れる電流 i は

$$i = \frac{V_{OUT}}{R_2} \quad (4)$$

となり、これから帰還率 β として、電圧から電流への変換係数

$$\beta = \frac{i}{V_{OUT}} = \frac{1}{R_2} \quad (5)$$

が得られることになります。抵抗の逆数ですから、電流帰還 OP アンプにおける帰還率 β とは、コンダクタンス（電気電導率。抵抗やインピーダンスの逆数）になるわけです。

電圧帰還 OP アンプにおいては、帰還率 β は帰還抵抗 R_1, R_2 で得られる抵抗分圧率（減衰率）だったわけですが、面白いものですね。

前方への増幅率 A は、反転入力端子に流れる電流量 i がインピーダンス $T(s)$ に流れ、 V_{OUT} 出力の電圧量に変換されることで得られます。図 4 では $-T(s)$ となっていますが、符号がマイナスというのは現実的ではありません。そのため図 5 において、コピーされる電流の極性を $-i$ として反転してみました。そうすると

$$A = -T(s) \quad (6)$$

となり、結果的にループ・ゲインは

$$LG = A \cdot \beta = -\frac{T(s)}{R_2} \quad (7)$$

となるのですね… (R_0 を無視した条件で)。つまり図 3 で見てきた「帰還抵抗の抵抗値が変わるとループ・ゲインも変わる」というのが、上記の式(7)からも、帰還抵抗 R_2 が小さくなるとループ・ゲインが上昇することとして理解できます。電圧帰還 OP アンプと電流帰還 OP アンプは「似て非なるもの」ということが分かるわけです。

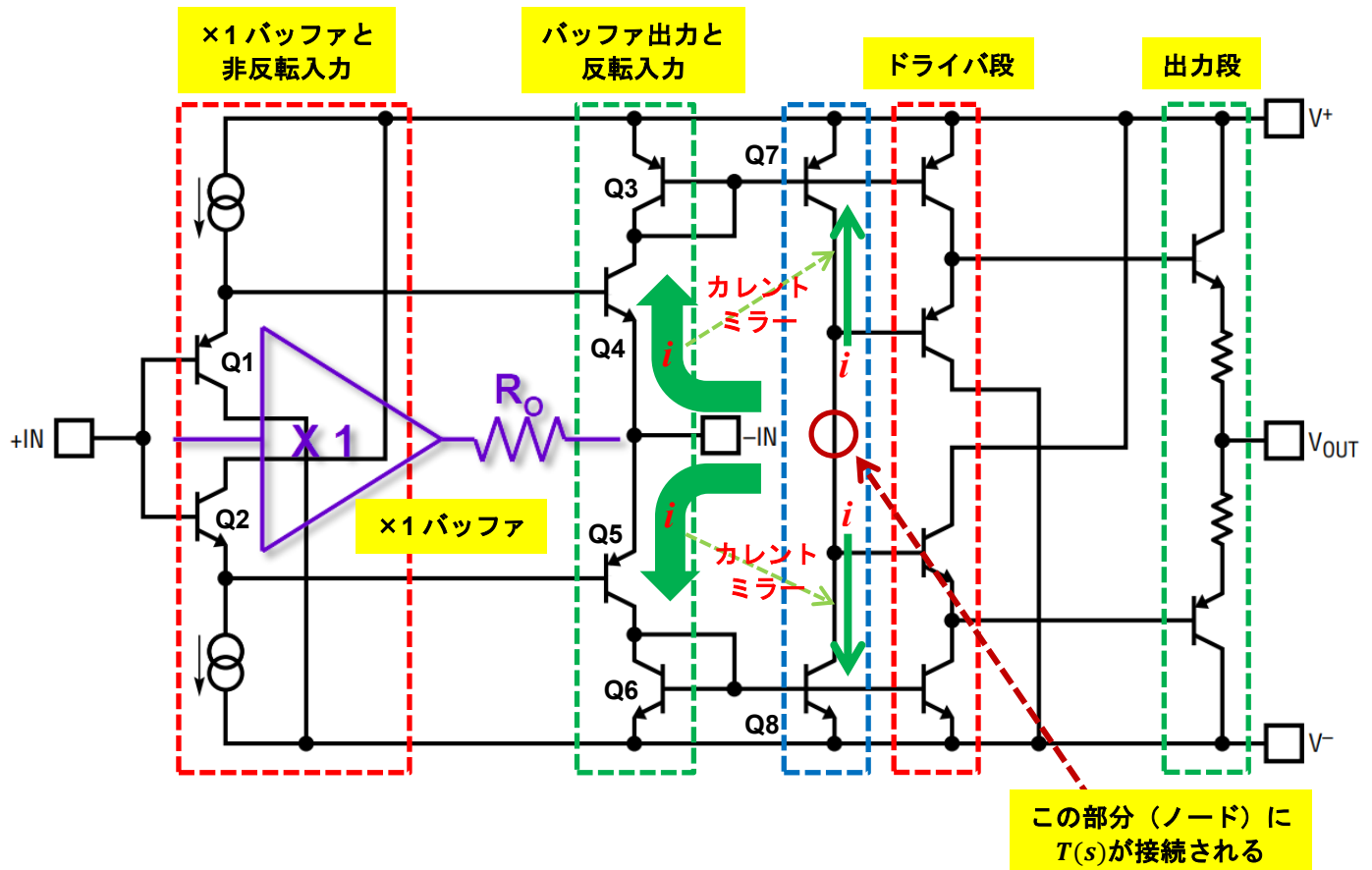


図 6. LT1252 のデータシートに掲載されている電流帰還 OP アンプの簡易等価回路

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-056

電流帰還 OP アンプの構造を見てみる

AD811 のデータシートにはその内部構造の記載がありません。簡易等価回路が記載されているデータシートを探したところ、LT1252 のデータシート [3] に図 6 のような回路が記載されているのを発見しました。LT1252 もご紹介しておきましょう！

LT1252 ローコスト・ビデオ・アンプ

<https://www.analog.com/jp/LT1252>

【概要】

LT1252 はビデオ・アプリケーション用の低コストの電流帰還型アンプです。LT1252 は、ケーブルやフィルタなどの低インピーダンス負荷をドライブするのに最適です。このアンプは、バンド幅が広くスルーレートが高いため、PC やワークステーション間で RGB 信号を容易にドライブできます。LT1252 は直線性が優れているため、コンポジット・ビデオのドライブに理想的な IC です。

さて、この図は見事に図 4 と同じ構造になっています。とはいってもインピーダンス $T(s)$ については記載がありませんが…。

そこでインピーダンス $T(s)$ が接続されるべき箇所（ノード）を赤丸と矢印で示しておきました。各部の動作のしくみを追ってみましょう。

入力段の構造

図 6 の左側部分の入力段（赤枠）をみてみます。+IN と記載のあるところが非反転入力で、PNP/NPN 二つのトランジスタ Q1, Q2 のベースに接続されています。それぞれエミッタには電流源が接続されていますので、ベースから見たインピーダンスは十分に高いことになります。「電流帰還 OP アンプの非反転入力端子の入力インピーダンスは高い」ということです。

つづいて反転入力端子（緑枠）ですが、ここは非反転入力に接続されたトランジスタ Q1, Q2 のエミッタが Q4, Q5 のベースに接続されており、その Q4, Q5 のエミッタが -IN と記載のある反転入力端子となっています。トランジスタのエミッタは出力インピーダンスが低いことから、電流帰還 OP アンプの反転入力端子の入力インピーダンス R_o は低くなります。「 R_o は Q4, Q5 のエミッタ出力抵抗（低い抵抗値）が支配的」といえるでしょう。

入力段から電流がカレント・ミラーでコピーされる

Q4, Q5 のエミッタ、つまり反転入力端子に流れる電流は、そのほぼすべてがコレクタ側に流れることになります。このようすは図 6 にも、緑色の太い矢印と i として記載しておきました。

このコレクタ側に流れる電流は、さらに Q3, Q6 に流れていきます。この Q3 と Q6 はそれぞれ Q7, Q8 とベース同士が接続されており、これによりカレント・ミラー（電流量をコピーする回路）が形成されます。

その結果、Q7 と Q8 のコレクタ同士が接続されている部分（図 6 にも赤丸で示した、インピーダンス $T(s)$ が接続されるべき箇所／ノード）に、反転入力端子に流れる電流と同量の（極性は反転した）電流 i が流れることになります。

 $T(s)$ が接続される箇所は

この赤丸の箇所、「インピーダンス $T(s)$ が接続されるべき箇所／ノード」を考えてみます。ここは Q7 と Q8 のコレクタ同士が接続されています。トランジスタのコレクタは出力インピーダンスが高い端子です。つまりこのノードは出力インピーダンスが高く、Q7, Q8 のコレクタは電流源であると考えることができ

るわけです。そこから反転入力端子に流れる電流と同量の電流 i が流出するわけです。

電流源と $T(s)$ で電圧が生じる

そうすると、ここに接続されたインピーダンス $T(s)$ に、反転入力端子に流れる電流と同量の（極性は反転した）電流 i が流れることで電圧降下が発生し、

$$V = -i \cdot T(s) \quad (8)$$

がこのノード（Q7, Q8 のコレクタ）に得られることになります。これが後段のドライバ段、出力段で $\times 1$ 倍でバッファされ、出力端子 V_{out} に現れることになります。

よくできていますね…。よく考えられているものですね…。

カレント・ミラーとインピーダンスにより生じる電圧をシミュレーションしてみる

それではこの図 6 の簡易等価回路に相当する回路を LTspice で作ってみて、カレント・ミラーとインピーダンスにより生じる電圧をシミュレーションしてみましょう。

図 7 はこのシミュレーション回路です。図 4 の一番基本的な電流帰還 OP アンプのブロック図では、インピーダンス $T(s)$ は抵抗素子だけがモデル化（図示）されていました。しかし実際にはこの図 7 のように、ドミナント・ポール（オープン・ループ・ゲインが -3dB になる周波数）を形成するためにコンデンサ C_T も接続されているのです。

DC ゲインは抵抗 R_T の大きさに決まり、ドミナント・ポールの周波数 f_p は、 R_T と C_T で

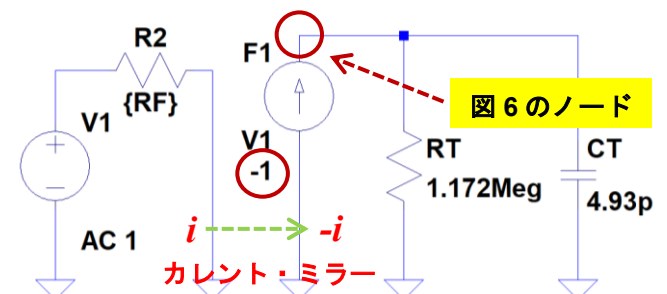
$$f_p = \frac{1}{2\pi R_T C_T} \quad (9)$$

と決まります。ドミナント・ポールが存在して、その周波数より上で -6dB/Octave づつオープン・ループ・ゲインが低下するのは、電圧帰還 OP アンプと同じになるわけです。

インピーダンス値を設定する

素子定数は図 3 でみた AD811 の特性に合わせてみました（とくにドミナント・ポールについて）。データシート [1] では $T(s) = \text{typ } 0.4\text{M}\Omega$ と記載されていますが、図 7 の定数は、図 3 のシミュレーションで $R_2 = 1\text{k}\Omega$ の条件で得られた結果から設定しています。また R_o はゼロとして構成してあります。

電流源 F1 は、1 次側の V1 の回路に流れる電流量を、 $\times -1$ の倍率の電流として流すカレント・ミラー相当となるものです（電流極性が反転するため -1 にしています）。



```
.ac dec 100 0.01 100MEG
```

```
.step PARAM RF LIST 100 200 500 1k 2k 5k 10k
```

図 7. 図 6 のカレント・ミラーとインピーダンスにより生じる電圧をシミュレーションしてみる

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-056

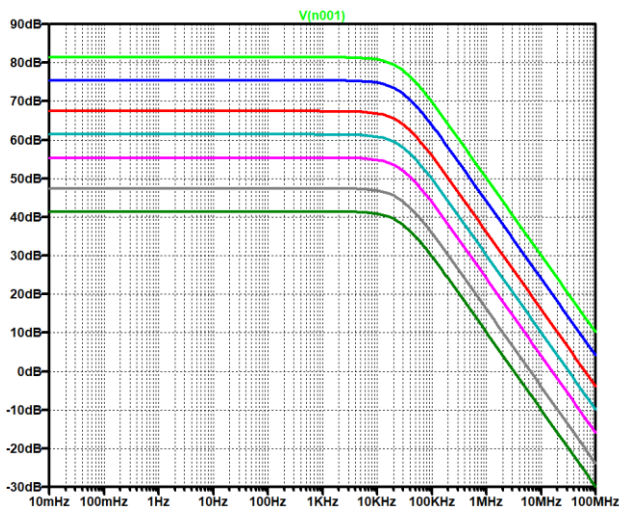
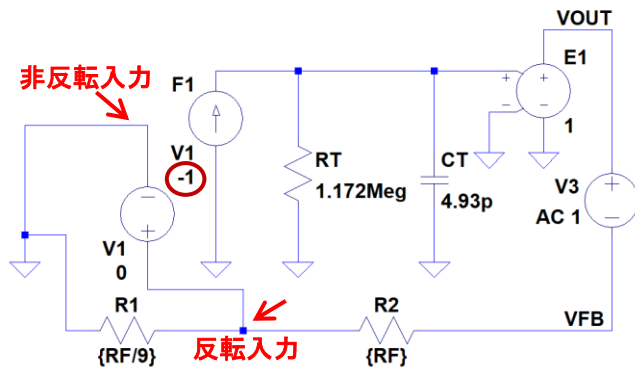


図 8. 図 7 のシミュレーション結果。図 3 と同じ条件 ($R_f = 100, 200, 500, 1k, 2k, 5k, 10k\Omega$) で step コマンドで抵抗値を変化させた (上から 100Ω)



```
.ac dec 100 0.01 100MEG
.step PARAM RF LIST 100 200 500 1k 2k 5k 10k
```

図 9. 図 7 のシミュレーション回路を図 3 のループ・ゲインの構成に変更してループ・ゲインをシミュレーションしてみる ($R_f = 100, 200, 500, 1k, 2k, 5k, 10k\Omega$ で step コマンドで抵抗値を変化)。非反転入力には V1 のマイナス側だが表記していない

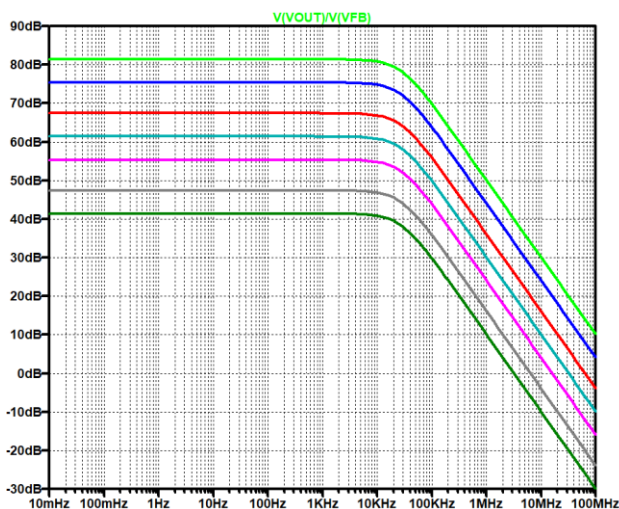


図 10. 図 9 のシミュレーション結果

シミュレーション結果を図 8 に示します。図 3 とほぼ同じ答えが得られていることが分かります。なお先の説明のとおり、図 3 の R_2 が $1k\Omega$ の条件、また R_0 もゼロとして回路を構成しているため、他の抵抗値では増幅率 (変換率と言ったほうがいいのかも) に差異が生じていることもプロットから確認できます。

AD811 モドキのループ・ゲインを求めてみる

なんとここまでで、早速 AD811 の簡易モデル (AD811 モドキ) が出来てしまいました…。早速とか言いながら、実は事前検討数日の結果なのですが… (汗)。

それではこの図 7 (AD811 モドキ) の回路を図 3 で求めたループ・ゲインを得る構成に変えてみて、図 3 と同じループ・ゲインの結果が得られるかどうか、シミュレーションしてみましょう。この答えは、実は何というこはなく、図 8 の結果と当然ながらぴったり同じになるのですが…。

図 9 に、図 3 の特性に相当するはずの、AD811 モドキのループ・ゲインを求める回路を示します。各素子の部品番号や回路図上のレイアウトは (比較しやすいように) 図 1 と同じにしてあります。ここでも R_0 をゼロとして回路を構成しています。

図 10 にシミュレーション結果を示します。図 3 の結果とほぼ同様かつ図 8 の結果とぴったり同じになりました。

電流帰還 OP アンプの簡易モデルができた

これで電流帰還 OP アンプの単純な原理モデルを作ることができました。この原理モデルを基準として、以降でいろいろなシミュレーションができるようになりました。

AD811 などホンモノの電流帰還 OP アンプで解析検討を進めていってもよいかもしれませんが、やはりそれでは説得力にかけるので (結果と説明の間に緩衝材があるようなかたちなのでクリアではないため) あまりよろしくありません。

原理モデルがあれば、明確に理論検討ができるわけです。

最後におまけ「F モデルの使い方」

最後におまけというか、LTspice を使ううえで少しひっかかりがちなところの解決方法をご紹介しますおきましょう。

今回はカレント・ミラーを実現するために F モデル (Current Dependent Current Source) を用いました。一般的な SPICE では Current Controlled Current Source; CCCS と呼ばれています (「F モデル」という記号定義は同じですが)。

LTspice の F モデルは図 7 や図 9 で見たように、シンボルとしては 2 端子しかありません。これを LTspice の Schematic Editor 上でどのように設定すればよいか、少し戸惑ってしまいます。LTspice のヘルプでは

Syntax: Fxxx n+ n- <Vnam> <gain>

と記載がありますが、これでは分かりません…。

F シンボルを右クリックすると、図 11 のようなダイアログ・ボックスが表示されます。ここで Value と Value2 というフィールドが見えます。この Value に電流量を参照する電圧源 (つまりカレント・ミラーの電流検出側) の部品番号 (Syntax では <Vnam>) を記述し、Value2 に変換倍率 (Syntax では <gain>) を記述すればよいのです。

なお Schematic 上で Value, Value2 が表示されるように、一番右側の Vis. (Visualize もしくは Visible の意味だと思われます) に「X」のチェックを入れておきます。

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-056

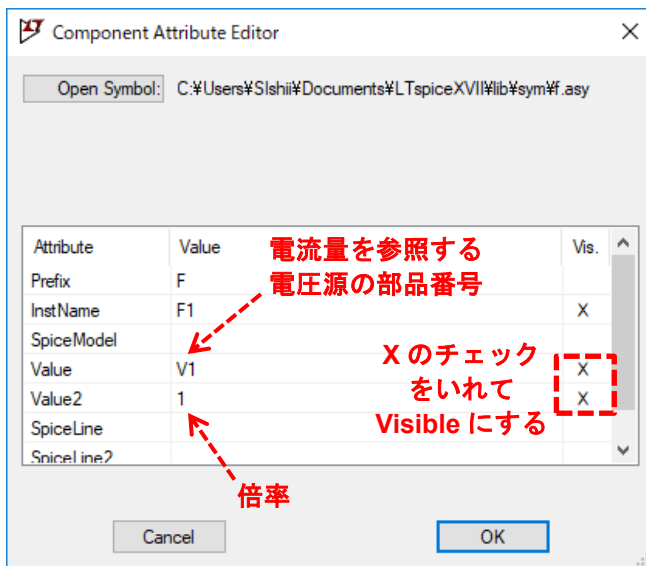


図 11. F モデルのパラメータ設定方法

参考文献

- [1] AD811 データシート, Analog Devices
- [2] Tutorial MT-034, Current Feedback (CFB) Op Amps, Analog Devices
- [3] LT1252 データシート, Analog Devices