



e-ラーニング

オペアンプの基礎

1章 オペアンプとは

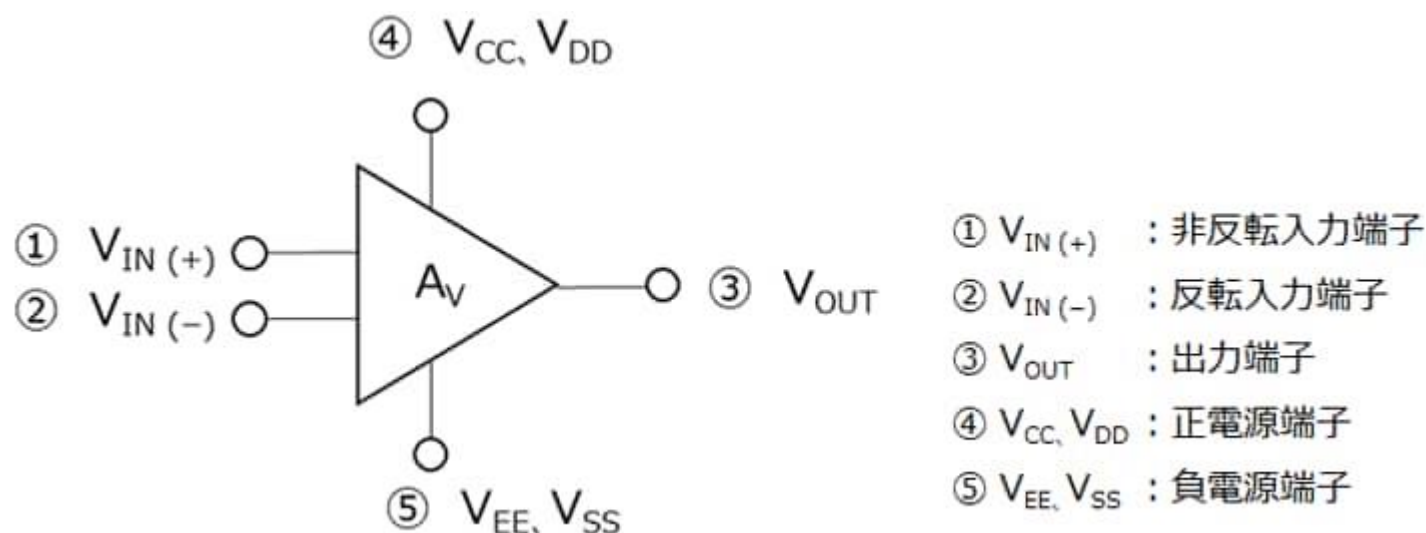
東芝デバイス&ストレージ株式会社

1章 オペアンプとは

オペアンプとは?

オペアンプは英語名称 Operational Amplifier の短縮名称です。オペアンプは比較/加算/減算/微分/積分などの計算や演算のために開発されたことからこのように呼ばれるようになりました。

図に一般的なオペアンプの回路記号を示します。5つの端子が有り、①非反転入力端子、②反転入力端子、③出力端子、④正電源電圧端子、⑤負電源電圧端子 から成り、図に示す回路記号をデータシート上で使用します。なお、非反転・反転は出力信号に対しての入力信号の極性を示します。



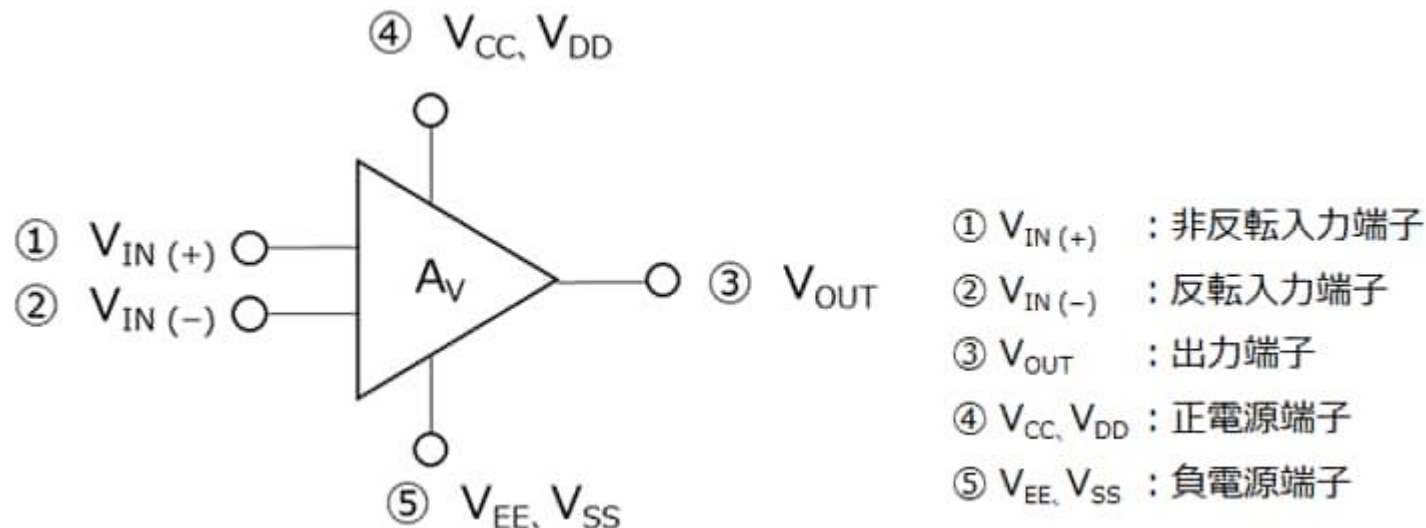
オペアンプとは？

非反転端子に入力された信号は反転端子電位を基準に A_V 倍に増幅され、出力端子に非反転端子入力信号に対し同じ位相（同相）の信号で出力されます。

反転端子に入力された信号は同様に非反転端子電位を基準に A_V 倍に増幅されますが、出力端子に反転端子入力信号に対し逆の位相（逆相）の信号で出力されます。

このことから、出力には非反転入力端子に入力された信号から反転入力端子に入力された信号を引いた差分の信号を A_V 倍した信号が出力されます。従って、両入力端子に同じ電圧で同相の信号を入力すると出力はゼロになります。両端子に同じ電圧で逆相の信号を入力すれば、その差分である2倍の非反転端子と同相の入力信号を A_V 倍した信号が出力されます。

オペアンプは単純な構成で増幅器として理想に近い特性を得ることができることから、最近ではIoT家電などで多く使われる各種センサーや計測機器等で入力されるアナログ信号の増幅などさまざまな処理に多用されており、多くの電化製品に搭載されています。



オペアンプの特長（理想オペアンプとは）

一般的にアンプ（増幅器）は信号源である前段の回路に影響を与えず、出力先である次段から影響を受けないことが望ましいと考えられます。このためには、アンプの入カインピーダンスは高く、出カインピーダンスは低いことが必要です。オペアンプはこの条件に近い特性を持っています。理想的なオペアンプと実際のオペアンプの比較を下記に記します。

理想オペアンプ

- ・入カインピーダンスが無限大（入力電流がゼロ）
- ・出カインピーダンスがゼロ
- ・入力ダイナミックレンジ（同相入力電圧範囲:CMVIN）が無限大
- ・開ループ電圧利得 A_V が無限大
- ・周波数帯域（遮断周波数 f_T ）が無限大
- ・入力オフセット電圧 V_{IO} がゼロ
- ・同相入力電圧除去比（CMRR）が無限大
- ・内部雑音（入力換算雑音電圧 V_{NI} ）がゼロ

現実のオペアンプ

- ⇒ 非常に高いが有限
- ⇒ 数十 Ω
- ⇒ 電源・GNDによって制約を受ける
- ⇒ およそ“10の4乗から10の5乗”倍
- ⇒ 数100kHzから数10MHz
- ⇒ 数mV
- ⇒ 高いが有限（80dB程度）
- ⇒ 数nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ から数10nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ （熱雑音領域）

オペアンプの特長（理想オペアンプとは）

理想オペアンプは現実には存在しませんが、設計初期の段階では理想オペアンプと仮定して進めても差し支えありません。ただし、現実との差があることを認識して詳細設計に進む必要があります。

例をあげると、仮に入カインピーダンスが小さいと、オペアンプの入力信号は前段の出力インピーダンスとの分圧になります。また帰還ループも影響を受けます。出力インピーダンスが大きい場合も、出力は負荷インピーダンスと出力インピーダンスとの分圧になります。

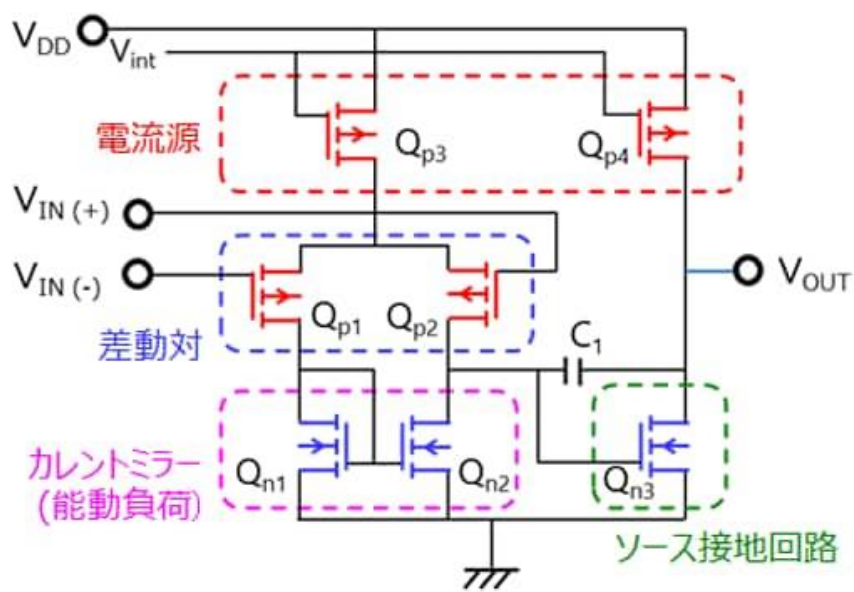
通常の仕様（用途）ではオペアンプの入カインピーダンスは前段の回路の出力インピーダンスに対して無視できるほど大きく、出力インピーダンスは後段の負荷インピーダンスに対して無視できるほど小さいことがほとんどです。従ってこれらの項目は通常は大きな影響がありません。その他の項目に関しても同様です。

ただし、詳細設計では各項目の影響の度合いを認識して設計を行ってください。

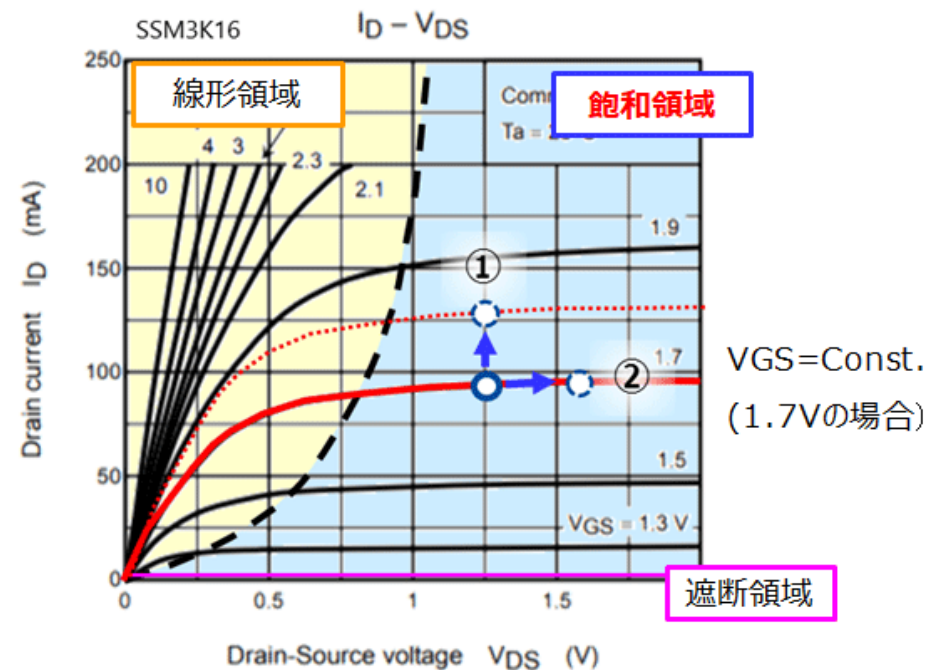
オペアンプの内部動作

CMOSオペアンプがオペアンプとして正常に動作するためには、オペアンプの簡易等価回路を構成するMOSFETが飽和領域で動作する必要があります。飽和領域は図に示す範囲になります。
飽和領域でMOSFETは以下のように動作します。

- ① ゲート・ソース間の電圧が増加 ⇒ 電流が増加
- ② ドレイン・ソース間の電圧が増加 ⇒ 電流はわずかに増加
⇒ 微小な電流変化で大きく電圧が変化する



オペアンプの簡易等価回路

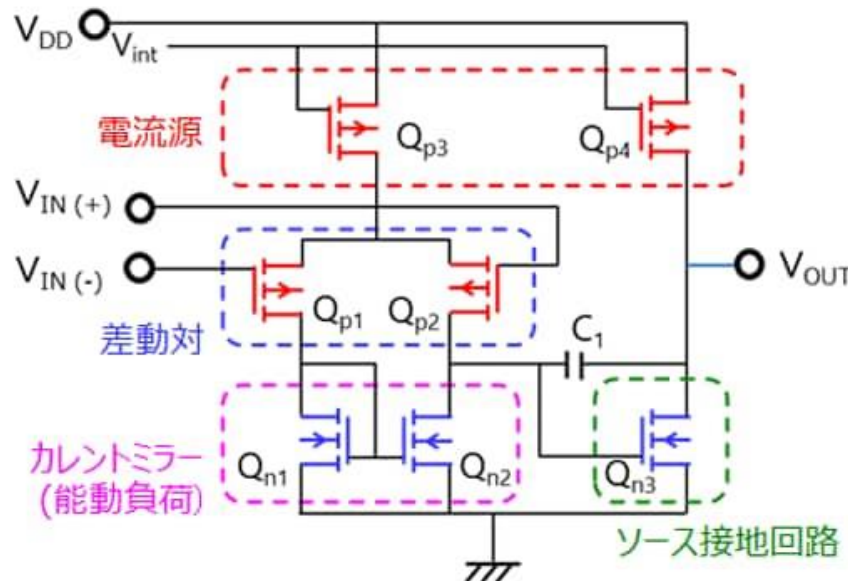


Nch-MOSFET $I_D - V_{DS}$ カーブ

オペアンプの内部動作

オペアンプ簡易等価回路の各部の働きは以下のようになります。

- 差動対： $V_{IN(+)}$ 端子 $V_{IN(-)}$ 端子に加えられたそれぞれの入力電圧の差分を取り出し増幅します。
- カレントミラー：差動対を構成している Q_{p1} と Q_{p2} に等しい電流を流します。このカレントミラーは差動対から見ると負荷抵抗として働きます。カレントミラーの出力（差動対から見たドレイン端子）は通常の抵抗では構成するのが困難なハイインピーダンスとなっています。これにより初段の差動アンプは高い利得を実現できます。このようなトランジスタなどで構成する抵抗負荷を能動負荷と呼びます。
- 電流源：差動対とソース接地増幅回路の電流を決めます。ソース接地回路に対しては能動負荷として働きます。
- ソース接地回路：出力に外付けされる負荷の駆動電流を確保するとともに、初段の差動増幅回路の利得を補います。

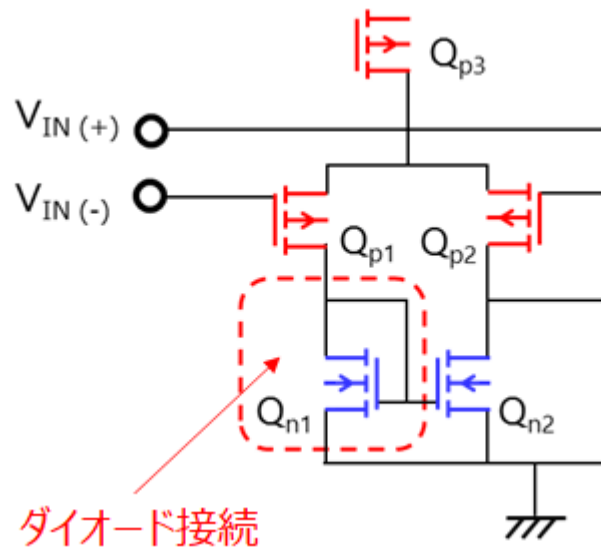


オペアンプの内部動作

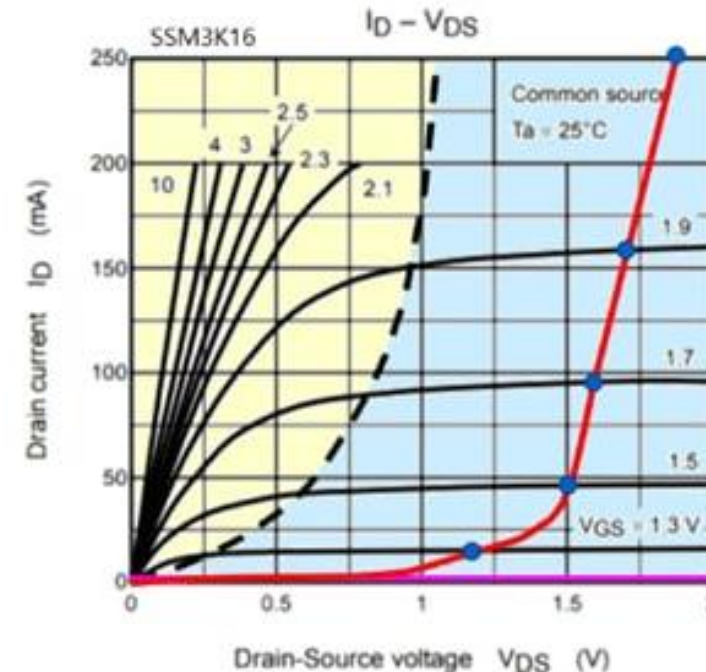
具体的な動作の前に、カレントミラー回路の Q_{n1} のド레인電圧について簡単に述べます。

Q_{n1} ド레인・ソース間電圧 V_{DS_n1} とド레인・ゲート間電圧 V_{DG_n1} は等しくなっています。この $V_{DS} = V_{DG}$ の条件をMOSFET I_D - V_{DS} カーブに書き込むと図のような曲線になります。この曲線はダイオードの I_F - V_F 曲線に似ているのでダイオード接続と呼ばれます。図はディスクリートのNch-MOSFETの曲線なのでチャネル面積が広く、電流が大きくなっていますが、IC内で使用されるMOSFETの場合は電流が2桁～3桁小さな電流になります。

図を見てわかるように、電流の大きな十分に立ち上がった部分 ($V_{DS} = 1.5V$ 以上) では、電流の変化が小さければ電圧はほとんど動きません。



MOSFETダイオード接続

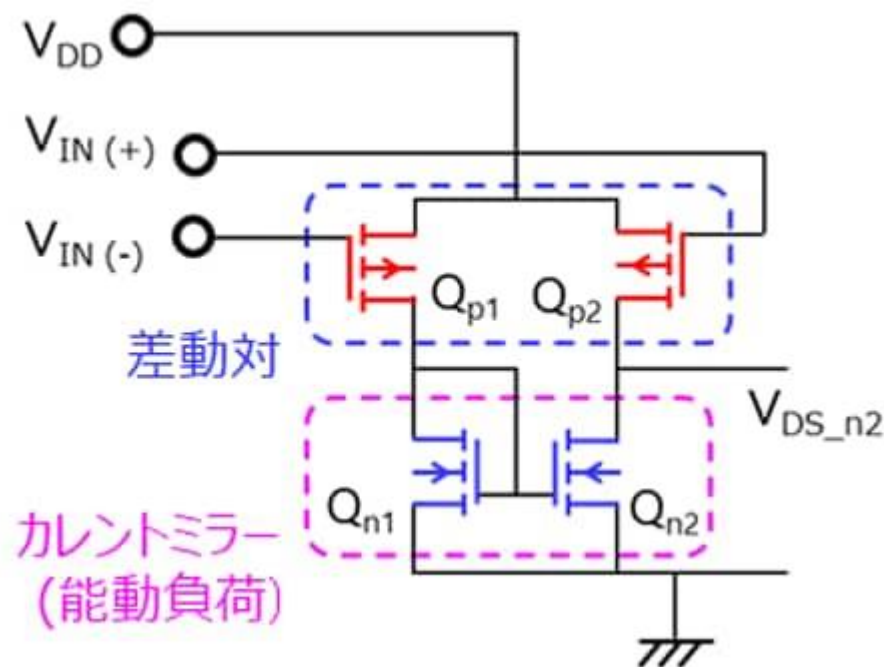


Nch-MOSFET I_D - V_{DS} カーブ (ダイオード接続)

オペアンプの内部動作

更に、上部の電流源の働きに関して考えてみます。差動回路部分に電流源が無い状態の図の回路を考えます。後段のソース接地回路は変わらないとします。

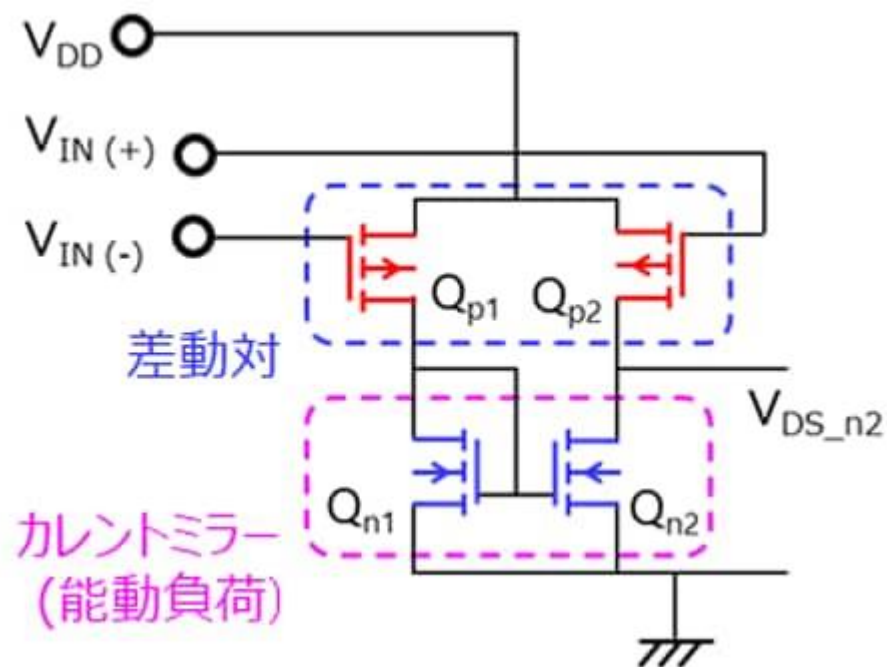
差動対の $V_{IN(+)}$ 端子と $V_{IN(-)}$ 端子に同じ電圧 ($V_{DD} - V_{IN}$) が加えられています。従って、 $V_{SG} = V_{IN}$ となります。この時の Q_{p1} のドレイン電圧は、ドレイン電流 I_{D_p1} を流した時に、 $V_{SD_p1} + V_{DS_n1} = V_{DD}$ となる電圧に落ち着きます。この I_{D_p1} がカレントミラー回路でコピーされるので、 Q_{p2} と Q_{n1} で構成される回路も同じ電圧関係になります。



電流源の無い回路

オペアンプの内部動作

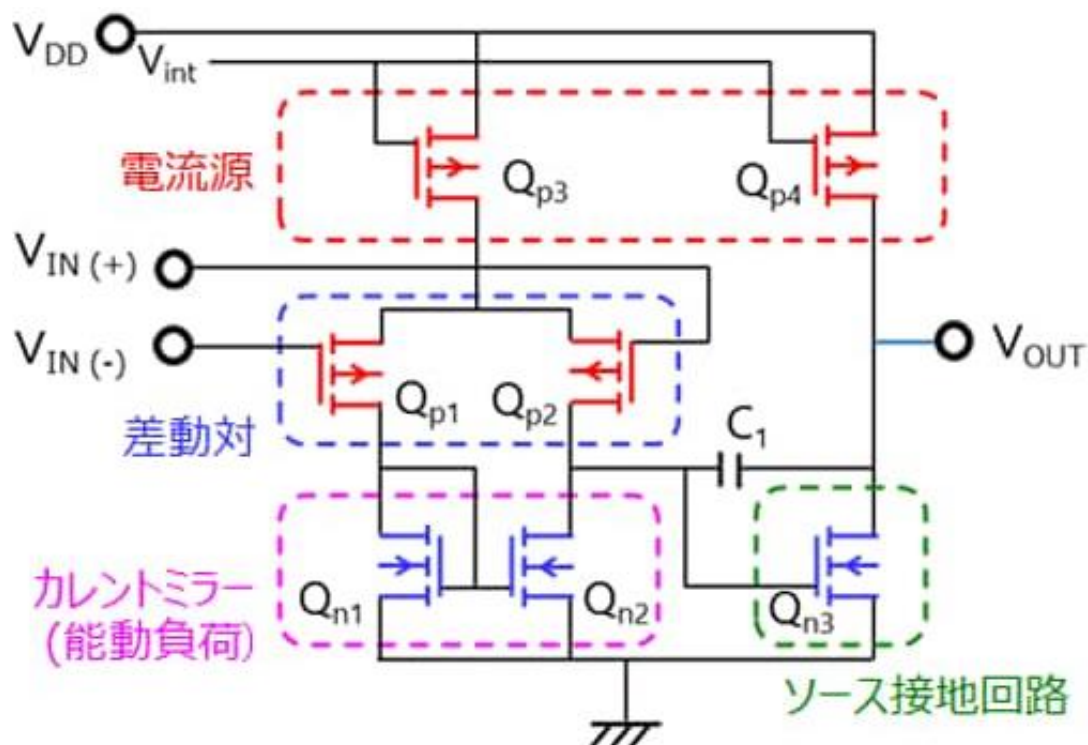
仮にこの両端子に加えられた入力電圧が ΔV 上昇した電圧 ($V_{DD} - V_{IN} + \Delta V$) になったとします。この回路にはカレントミラーがあり差動対には同じ電流は流れます。ただし上部の電流源は無いので差動対に流れる電流はそれぞれ同じだけ減少します。このためソース接地回路に出力される Q_{n2} のドレイン・ソース間電圧も下がることになります。



電流源の無い回路

オペアンプの内部動作

これはソース接地回路の Q_{n3} のゲート・ソース電圧 V_{GS_n3} が下がることと等価です。このソース接地回路には電流源 Q_{p4} があるので、 V_{GS_n3} が下がり電流が減少しようとする分、ドレイン・ソース間電圧 V_{DS_n3} を広げ電流を一定に保ちます。つまり出力電圧 V_{OUT} は上昇することになります。 $V_{IN(+)}$ と $V_{IN(-)}$ に入力される電圧が同相で同じ電圧の入力であるにも関わらず、出力電圧が変化することになります。オペアンプは規格内の同相入力（同じ入力電圧）が印加された場合、出力は一定であることが必須条件です。この回路ではこの条件を満たせないことがわかります。

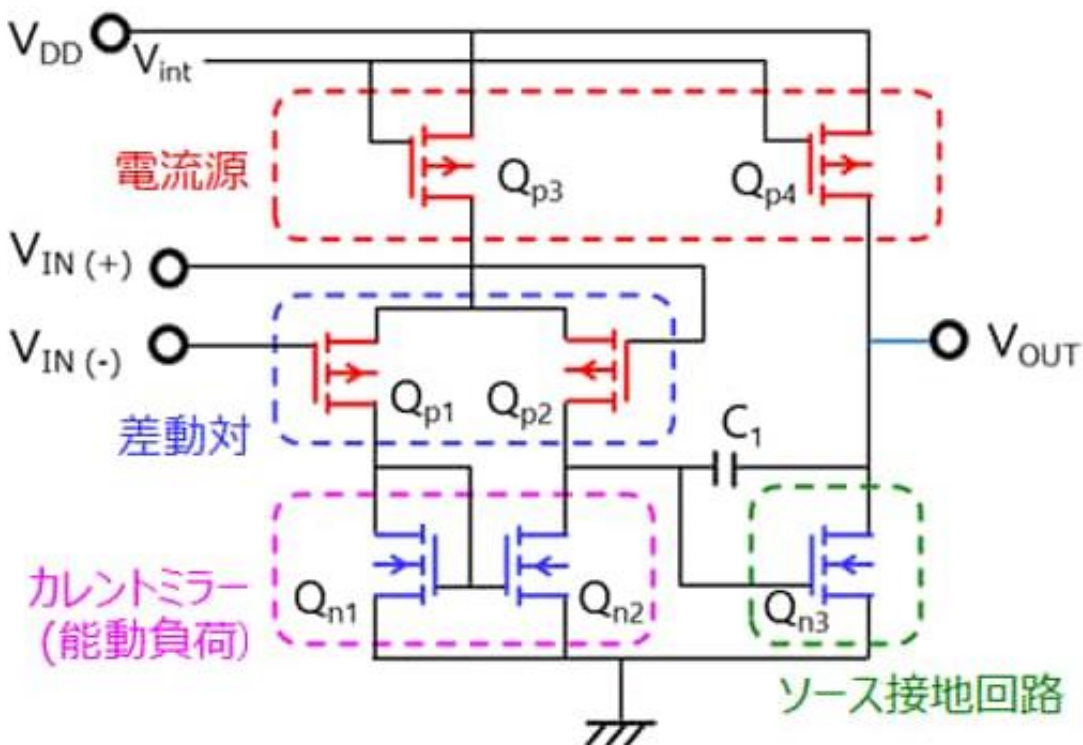


オペアンプの内部動作

次に電流源 Q_{p3} のある回路で同じことを考えてみます。仮にこの両端子に加えられた入力電圧が ΔV 上昇した電圧 ($V_{DD} - V_{IN} + \Delta V$) になったとします。この回路には電流源がありますので、電流は変わりません。電流が変わらないので、 Q_{n1} の $V_{DS_{n3}}$ は変化しません。同様に $V_{DS_{n2}}$ も変わらないので、出力は一定になります。同相入力では出力が一定になることがわかります。

(ΔV の変化は Q_{p3} の $V_{SD_{p3}}$ が変化し吸収します。電流源のソース・ドレイン間電圧が変わりますので電流は変化しますが、 V_{DS} の増減に対する電流 I_D の変化は微小なので大きくは変化しません。)

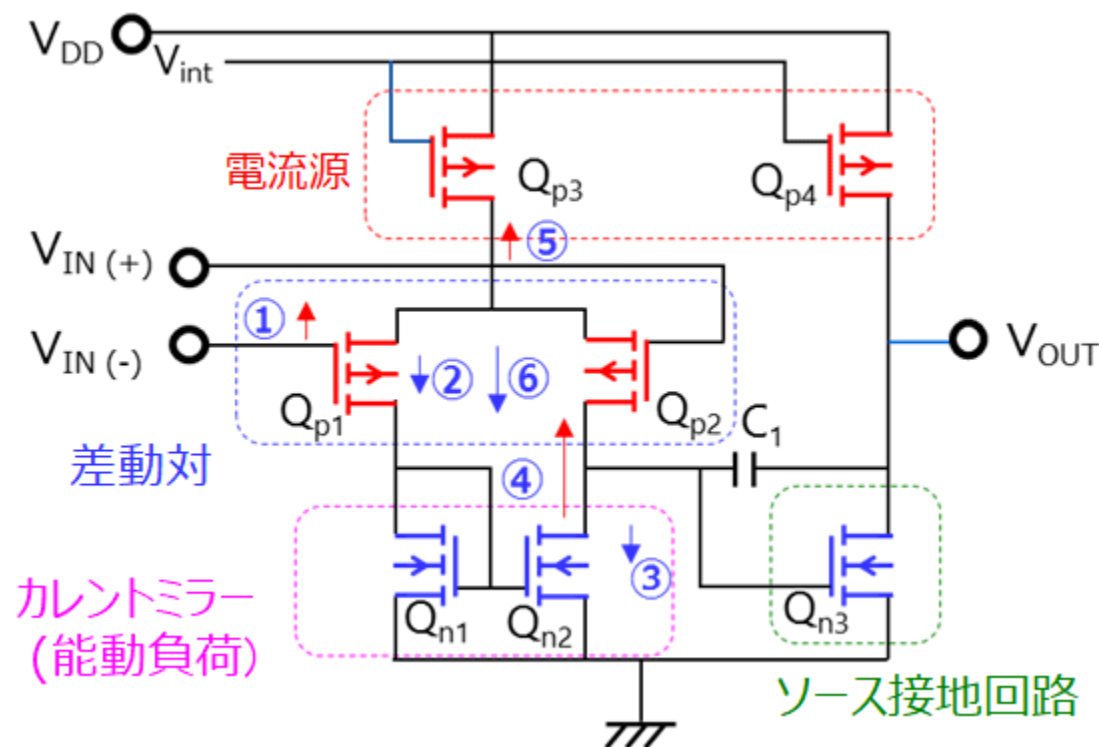
このように差動対の上部にある電流源が同相入力時の出力電圧を一定化する役割を果たしています。



オペアンプの内部動作

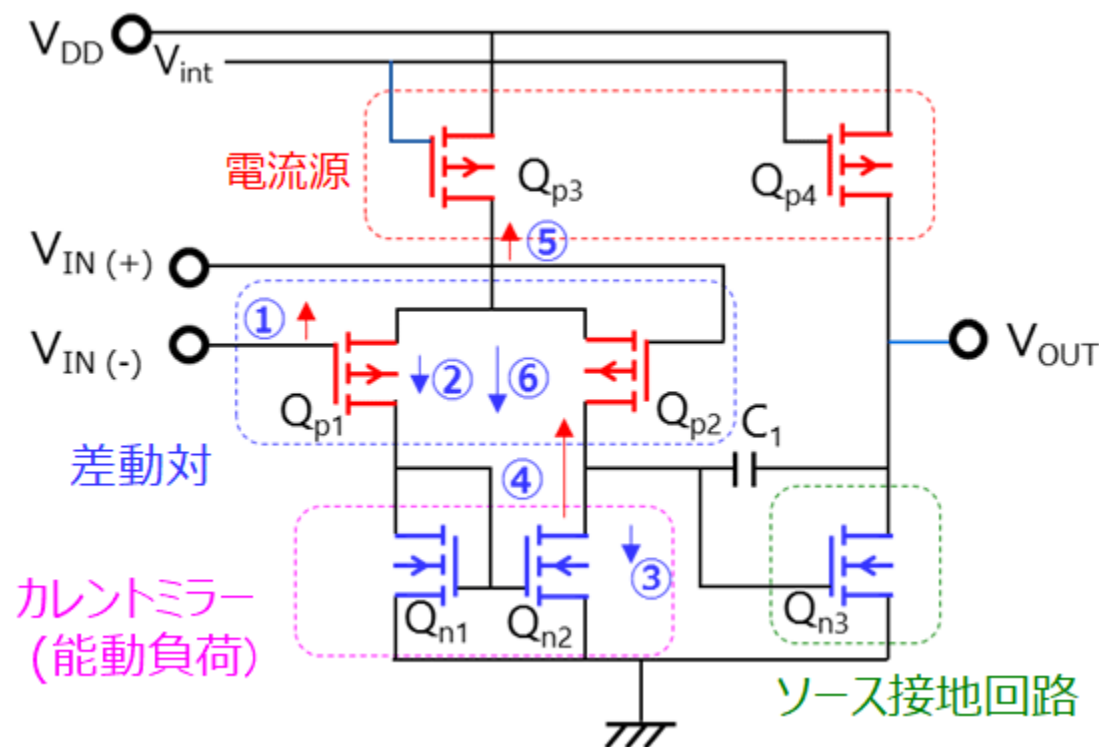
次に差動対入力 $V_{IN(+)}$ 端子と $V_{IN(-)}$ 端子に異なる電圧が加えられた時を考えます。

1. 差動対の両端の入力に同じ電圧 ($V_{DD} - V_{IN}$) が加えられている状態から、 $V_{IN(-)}$ 側だけ $+\Delta V$ 電圧が上がったとします。
2. V_{SG_p1} は小さくなり、 I_{D_p1} は ΔI_{p1} 減少します。ただし、先に説明しましたが、 Q_{n1} はダイオード接続されていますので、 V_{DS_n1} は変化せず Q_{p1} のドレイン電圧は一定です。
3. この減少した電流はカレントミラーにより Q_{n2} のドレイン電流 I_{D_n2} にコピーされます。
4. 電流源 Q_{n3} のドレイン電流 I_{D_p3} の電流は変わりませんのでこのままでは矛盾が生じてしまいます。このため、 Q_{n2} を流れる電流を増加するために、 Q_{n2} のドレイン電圧 V_{DS_n2} は大きくなります。



オペアンプの内部動作

5. V_{DS_n2} が大きくなると、単純に考えると V_{SD_p2} は小さくなり、また I_{D_p2} も小さくなってしまいます。しかしながら、電流源電流 I_{D_p3} は変わっていません。ただでさえ ΔI_{p1} 減少しているので、むしろ増える必要があります。このため、 Q_{p2} のソース電圧は上昇します。
 6. Q_{p1} のソース・ゲートの電位差 V_{SG_p1} が広がり、 Q_{p1} のドレイン電流 I_{D_p1} が大きくなります。
 7. この電流が Q_{n2} にコピーされ……
- このような動作をすることで最終的に、 Q_{n2} のドレイン電圧 V_{D_n2} は、初期状態から上昇することになります。



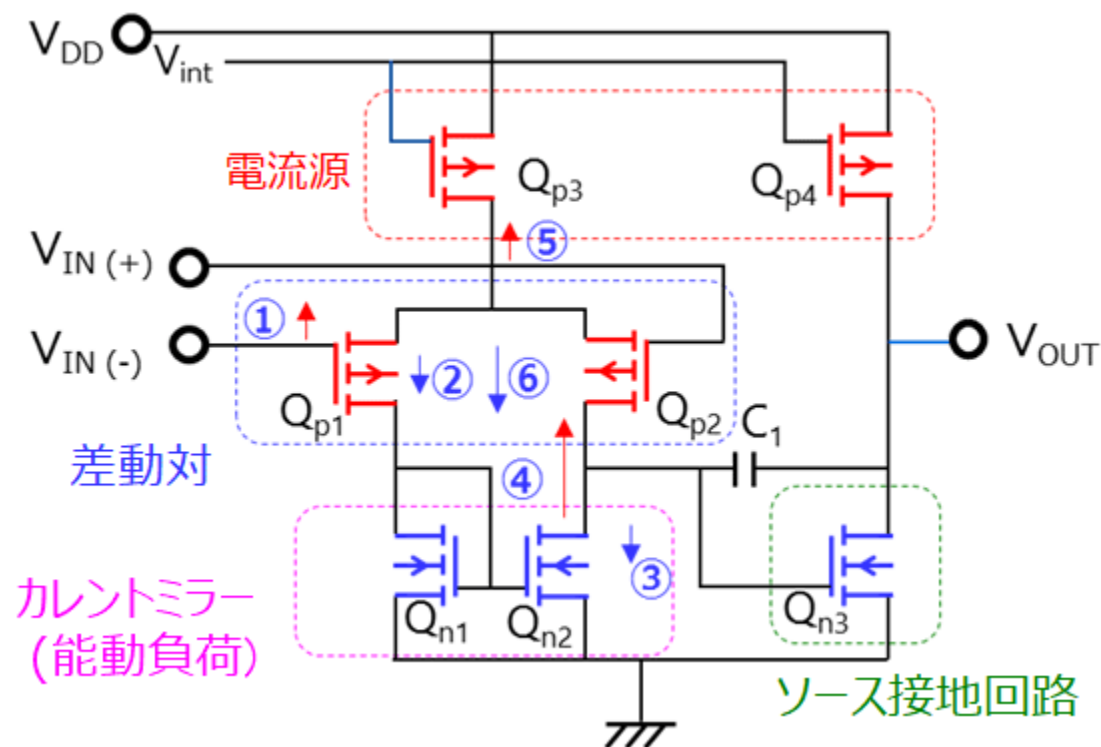
オペアンプの内部動作

この上昇した電圧が次段のソース接地回路に伝達されることになります。

ソース接地回路では V_{GS_n3} が大きくなり、電流 I_{D_n3} が増大する方向に進みますが、こちらも電流源 Q_{p4} により制約を受けます。

V_{GS_n3} が増大して、電流 I_{D_n3} が増加しないために、 Q_{n3} のドレイン・ソース電圧 V_{DS_n3} は減少します。

このようにして $V_{IN(-)}$ の電圧が上昇すると、 V_{OUT} の電圧は減少することになります。



TOSHIBA