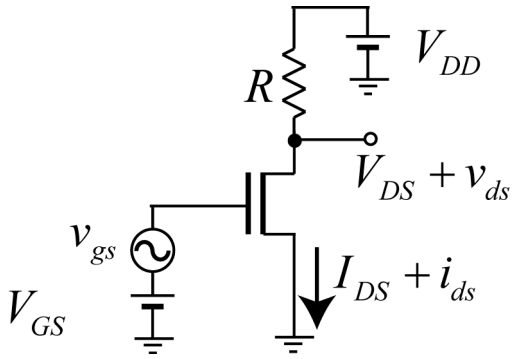
第 3 回講義メモ

MOSFET の小信号等価回路　解析的に



前回も行いましたが、上の回路で、小信号に対する出力信号を考えよう。
そもそも、飽和領域しか使わない。しかも、ある狭い領域での挙動を考えれば、そのほとんどの傾向は判る。

飽和していると $I_{DS}=\dfrac{W}{2L}\mu C_{OX}(V_{GS}-V_{th})^2$　ここで始めはアーリー電圧は無限大として、チャネル長変調効果は無視する。

$V_{OUT}=V_{DD}-I_{DS}R$

ここで ΔV_{IN} に対する ΔI_{DS} の挙動が判れば、いろいろな解析で使えそうだ。
そこで、一般化して考えよう。

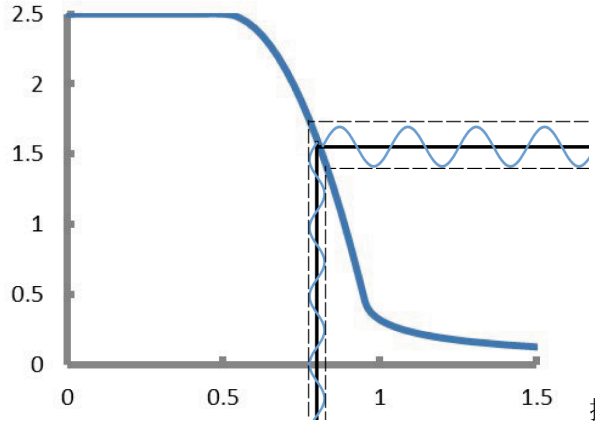
$$I_{DS}=f(V_{GS})$$

$$\begin{aligned} I_{DS}+\Delta I_{DS} &= f(V_{GS}+\Delta V_{GS}) \\ &= f(V_{GS})+\frac{\partial f}{\partial V_{GS}}\Delta V_{GS} \end{aligned}$$

$$\Delta I_{DS}=\frac{\partial f}{\partial V_{GS}}\Delta V_{GS}=\frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}}\Delta V_{GS}$$

ここで、$i_{ds}=\Delta I_{DS}$、$v_{gs}=\Delta V_{GS}$、$g_m=\dfrac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}}$ とすれば、$i_{ds}=g_m v_{gs}$ となる。ここで、i_{ds}、v_{gs} は小信号と呼ばれる。
また、g_m は、トランスコンダクタンス（相互コンダクタンス/伝達コンダクタンスとも呼ぶ）である

ここで注意！　小信号という言い方は、信号成分だけでなく、振幅が小さいという意味がある。もしも、一つのトランスコンダクタンスで増幅をあらわそうとしているときに、信号成分が大きくなると、出力が電源電圧を超えたり、絶対値として大きい側に振れた信号分と、小さい側に振れた成分で異なる gain を持つ様になり、出力が歪む。



振幅が小さい場合の増幅

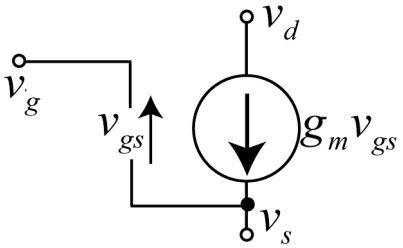
従って、入力量が比例的に変化したとき、応答量が比例的に変化しない非線形の回路となる。

しかしながら、入力量が小さいときは、応答量が近似的に比例的な変化をするとみなせる。
そのような時を小信号と読んでいる。

さて、いままで回路では直流成分と交流成分の両方を同時に扱ってきたが、小信号の概念だけを使えば、この部分だけが取り出せる。

ここで注意　直流成分と交流成分という言い方に対して、小信号成分、大信号成分という言い方もある。大信号成分は、比例関係が成り立たず、一種類の式（例えば飽和）の式以外に線形領域のも使う必要があるときに使う。
直流成分と小信号成分は明らかに違うものだが、大信号成分は、直流バイアス成分の変化も含めるという考え方と含めない考え方がある。ここでは、直流バイアス成分も含めて大信号成分と呼ぶ。

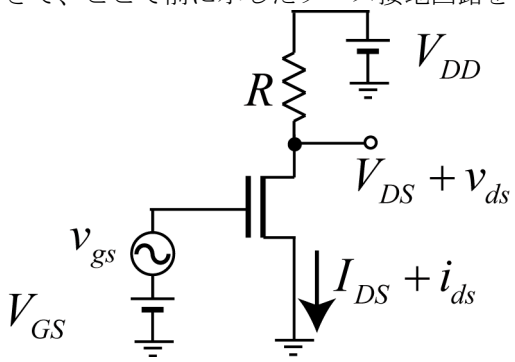
そこで、小信号のみの回路を作ってみよう。
回路記号としては次のようなものを考える。



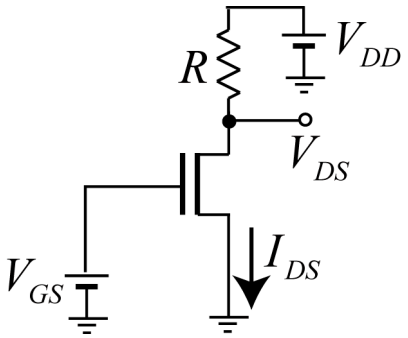
これを通常、小信号等価回路と呼ぶ。

$$i_{ds} = g_m v_{gs} \quad g_m = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} = \frac{W}{L}\mu C_{OX}(V_{GS} - V_{th})$$

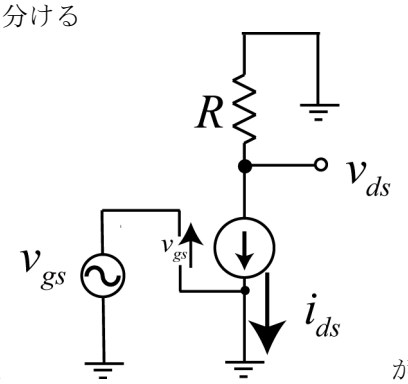
さて、ここで前に示したソース接地回路を再掲しよう。



これを大信号分（ここでは直流分）と小信号分に分ける



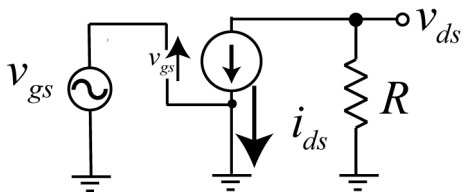
が大信号分。



が小信号

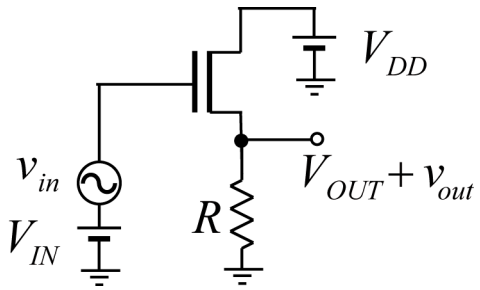
　これは、重ね合わせの関係から判る。さて、電源が供給されたところが接地されてしまっている。接地されている DC 電圧電源は、交流信号電圧に応答しないことから、接地になる。DC 電圧電源は短絡となる。(DC 電流電源は、交流信号電流が流れ込めないので、開放となる。）そこで、回路としてはこ

う書いても良い。



ここでソース接地回路の電圧利得 A_V を求めよう。電圧で見ると $v_{ds} = -i_{ds}R = -v_{gs}g_mR$ なので、$A_V = \dfrac{v_{out}}{v_{in}} = \dfrac{v_{ds}}{v_{gs}} = -g_mR$ となる。一方、$G \equiv 1/R$ を用いて、電流で見ると、$i_{ds} = -v_{ds}G \quad i_{ds} = v_{gs}g_m$ なので、同様に $A_V = \dfrac{v_{out}}{v_{in}} = \dfrac{v_{ds}}{v_{gs}} = -\dfrac{g_m}{G}$ となる。電流の向きを書き込んで電流に基づいて解く方が間違えにくいので、これからはこの方法で解くことにしよう。

次に例題として、ソースフォロワの例を考えよう。

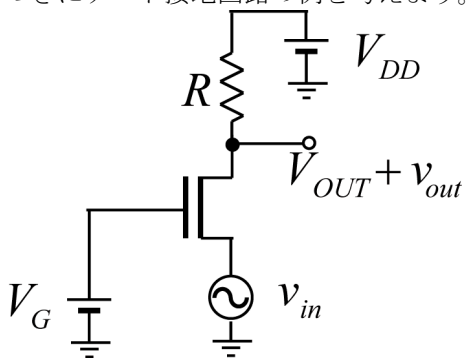


このときの小信号回路を描いて、電圧利得 A_V を求めよう。

自分で回路を書いてみて・・・・

$i_{ds} = g_m(v_{in} - v_{out}) \quad i_{ds} = v_{out}G$ なので、整理して $v_{out} = \dfrac{g_m v_{in}}{G + g_m}$ 答えは $\dfrac{g_m}{G + g_m}$ で $g_m >> G$ なら、大体 1 になる。入力電位が出力電位に追従するので、フォロワと呼ぶ。

つぎにゲート接地回路の例を考えよう。



のときの小信号回路を描いて、電圧利得 A_V を求めよう。

自分で回路を書いてみて・・・・

$i_{ds} = g_m(-v_{in})$、$v_{out}G = -i_{ds}$　なので、答えは$\dfrac{g_m}{G}$。利得の正負が、ソース接地回路と逆になっていることに注意しよう。

さて、次にチャネル長変調効果を考慮に入れよう。

$$I_{DS} = \frac{\mu WC_{OX}}{2L}(V_{GS} - V_{th})^2(1 + \frac{V_{DS}}{V_A})$$ である。

$$i_{ds} = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} v_{gs} + \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}} v_{ds}$$ となるが、$i_{ds} = \dfrac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} v_{gs} + \dfrac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}} v_{ds} = g_m v_{gs} + g_{ds} v_{ds}$

とすると

$$g_m = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} = \frac{\mu WC_{OX}}{L}(V_{GS} - V_{th})(1 + \frac{V_{DS}}{V_A})$$

$$= \frac{2I_{DS}}{V_{GS} - V_{th}} = \frac{2I_{DS}}{V_{eff}}$$

チャネル長変調効果が無視できない場合には、I_{DS}と有効ゲート電圧V_{eff}で表した方が、伝達コンダクタンスを記述しやすい。

またチャネル長変調効果そのものによる電流への影響は、

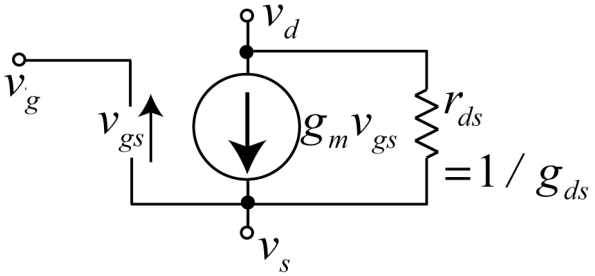
$$g_{ds} = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}} = \frac{\mu WC_{OX}}{2L}(V_{GS} - V_{th})^2 \frac{1}{V_A}$$

$$= \frac{I_{DS}}{(1 + \frac{V_{DS}}{V_A})} \frac{1}{V_A} = \frac{I_{DS}}{V_A + V_{DS}}$$

と表され、g_{ds}はアウトプットコンダクタンス（出力コンダクとも呼ぶ）である

ここで、回路をよく見ると、$g_{ds}v_{ds}$は、ドレイン-ソース間に入る電源なので、実際は、$r_{ds} = 1/g_{ds}$という抵抗と等価である。

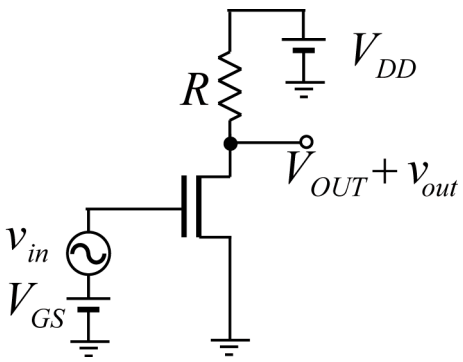
そこで、ここまで入れた小信号等価回路は、



となる。

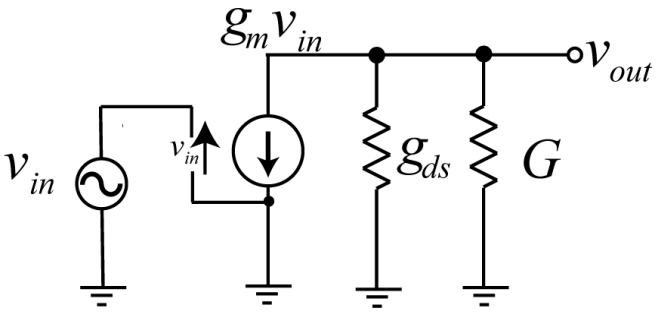
　ちなみに上の回路は比較的低い周波数の時に使える形であり、実際に高周波などに応答させる場合には、教科書第6章で示す様にGS間にコンデンサを、さらに細かい挙動をみる為には端子側の抵抗や、DS間のコンデンサなどを入れるべきである。

例題



の電圧利得 A_V をチャネル長変調の効果を g_{ds} として表して考慮して求めよ。

小信号回路は



$r_{ds}=1/g_{ds}$ が抵抗に並列に入る。

$-(Gv_{out}+g_{ds}v_{out})=g_m v_{in}$ と書いて、

$-\dfrac{g_m}{G+g_{ds}}$ となる。