

第5章 周波数特性

回路が扱える信号の周波数範囲の解析

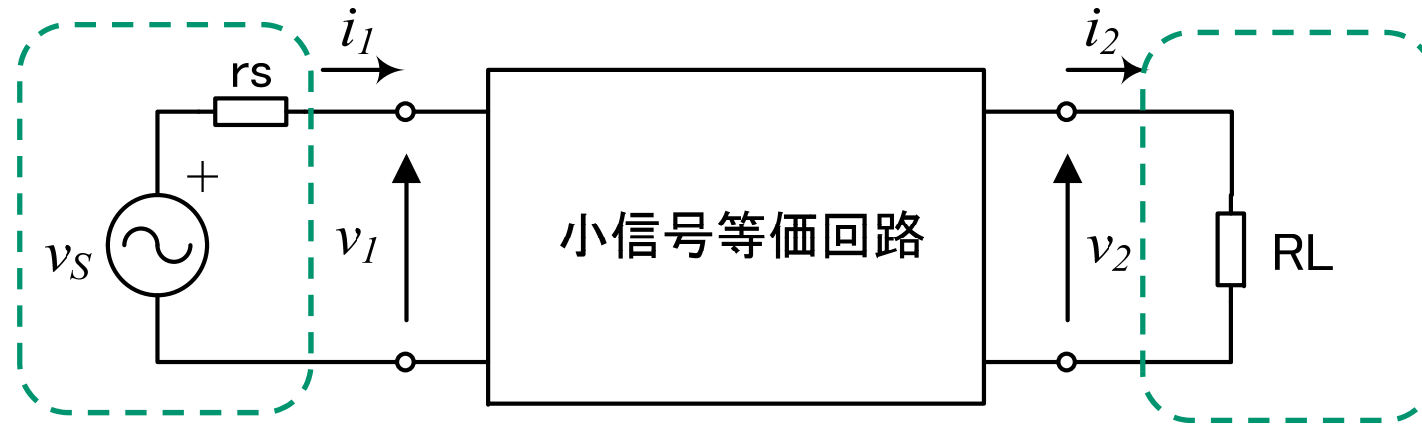
5.1 周波数特性の解析方法

周波数特性解析の必要性

- 利得の周波数特性
 - 増幅回路(アナログ回路)は、信号の周波数が高くなるほど増幅率が下がり、最後には、増幅しなくなる
 - デジタル回路は、高い周波数(クロック周波数)では論理振幅が小さくなり、最後には、不定値しか出力できなくなる
 - 回路がどの周波数まで動作するかによって、回路のスループット(情報処理能力)が決定される
- 位相の周波数特性
 - 増幅回路は、信号の周波数が高くなると入力と出力の位相がずれてくる
 - 入力と出力の位相差は、低周波では ± 180 度の位相差でも、高周波では ± 360 度の位相差になる
 - ex.) 90 度位相がずれた信号を加算すると複素数になる
 - ex.) 180 度位相がずれた信号を加算すると減算になる
 - 信号の位相のずれによって、信号処理の精度と回路の安定性が決定される

周波数特性解析の方法

- 小信号等価回路の交流電流、交流電圧の関係を表す量を動作量と呼び、増幅回路の性能を表す。
- 周波数特性を考慮した小信号等価回路を使用して、動作量の周波数特性を調べることにより回路の性能が評価できる。



入力信号源

負荷インピーダンス

(理想的ではない交流電源として表す。)

増幅回路の動作量

(1) $Z_i = \frac{v_1}{i_1}$ 入力インピーダンス

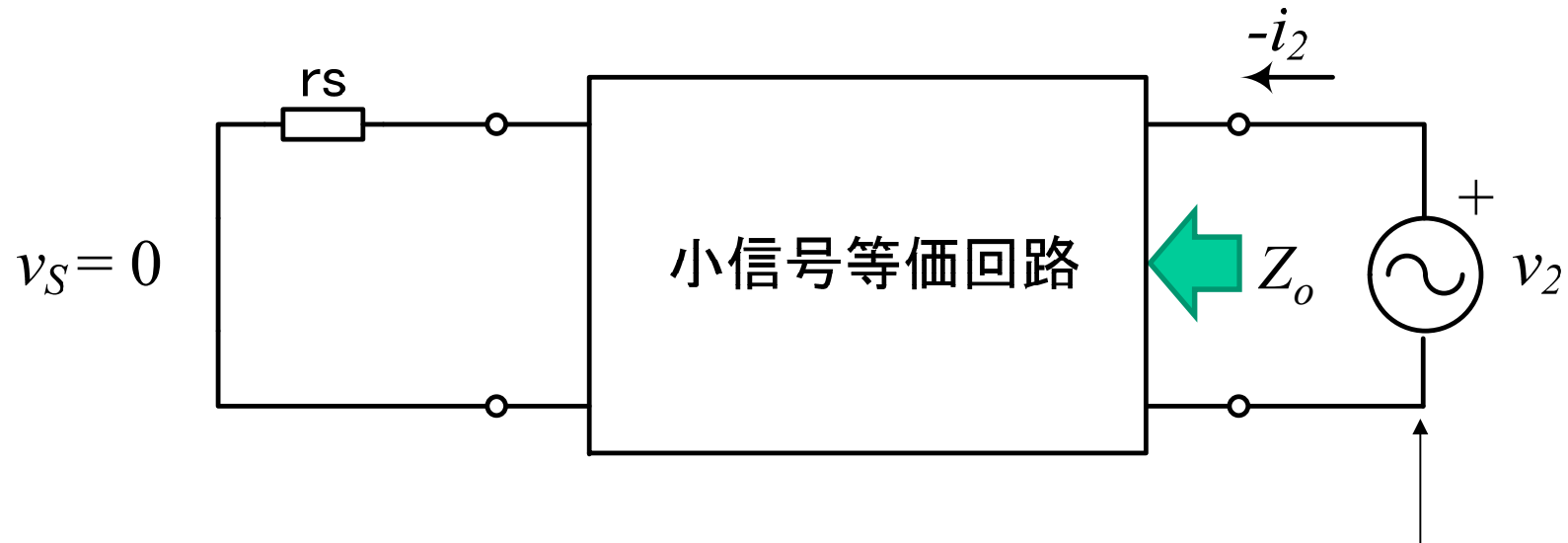
(2) $A_v = \frac{v_2}{v_1}$ 電圧利得

(3) $A_i = \frac{i_2}{i_1}$ 電流利得

(4) $A_p = \frac{v_2}{v_1} \frac{i_2}{i_1} = A_v \cdot A_i$ 電力利得

(5) $Z_o = -\frac{v_2}{i_2}$ 出力インピーダンス (注意) 出力インピーダンス
測定回路を用いて計算する。

出カインピーダンスの測定回路

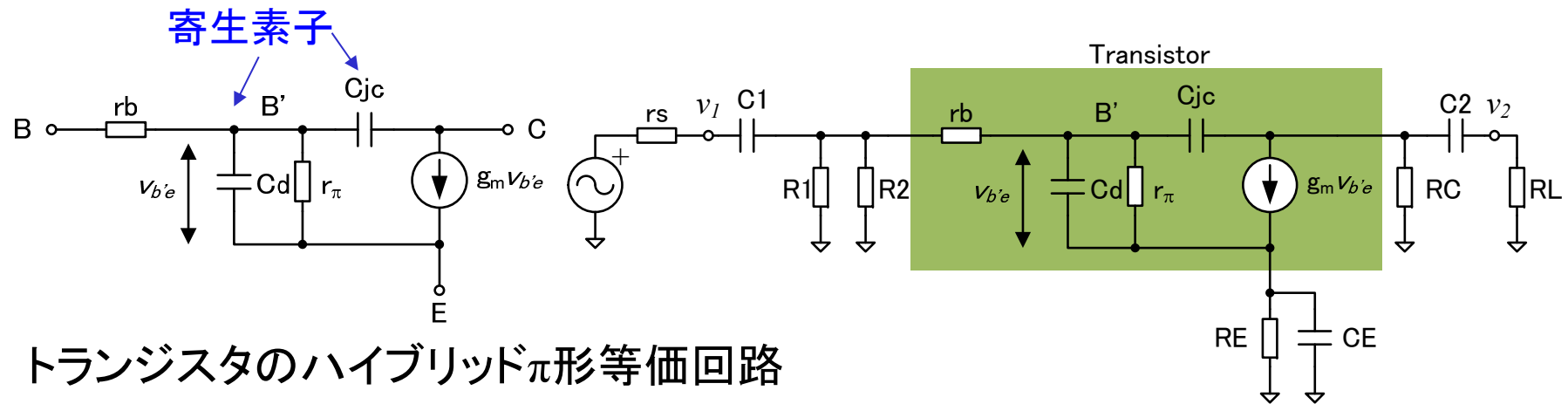


$$Z_o = -\frac{v_2}{i_2}$$

負荷抵抗を取り外して、
交流電圧源 v_2 に替える。

周波数特性を考慮した小信号等価回路

周波数特性を考慮したトランジスタ等価回路を使い、 $C1$, $C2$, CE も無視しないで小信号等価回路を作成する。



トランジスタのハイブリッド π 形等価回路

エミッタ接地増幅回路の高周波小信号等価回路

この回路方程式を解くのは大変なので、正確な特性を求めるのは回路シミュレータに任せて、どの素子が周波数特性のどの部分に影響するのかを理解するために用いるとよい。

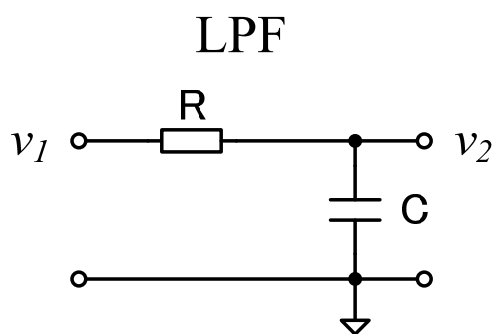
周波数特性の理論的理解

周波数特性は、周波数によって小信号等価回路が違って見えることによって起こる。

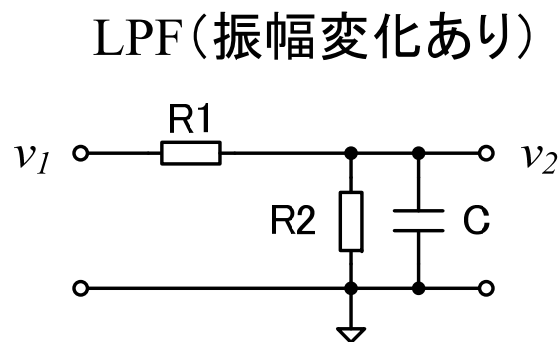
- 周波数によって変化するのは容量のインピーダンス
- トランジスタは小さな寸法で作られているため、pn接合の容量は非常に小さい ($C1, C2, CE \gg Cd > Cjc$, 6桁程度の差)

周波数の高低	インピーダンスの大小	近似の仕方
低周波(ω 小)	$1/\omega C1, 1/\omega C2, 1/\omega CE \rightarrow$ 中ぐらい $1/\omega Cd, 1/\omega Cjc \rightarrow$ 非常に大	無視できない。 Cd, Cjc オープン
中域(ω 中)	$1/\omega C1, 1/\omega C2, 1/\omega CE \rightarrow$ 非常に小 $1/\omega Cd, 1/\omega Cjc \rightarrow$ 非常に大	$C1, C2, CE$ ショート Cd, Cjc オープン
高周波(ω 大)	$1/\omega C1, 1/\omega C2, 1/\omega CE \rightarrow$ 非常に小 $1/\omega Cd, 1/\omega Cjc \rightarrow$ 中ぐらい	$C1, C2, CE$ ショート 無視できない。

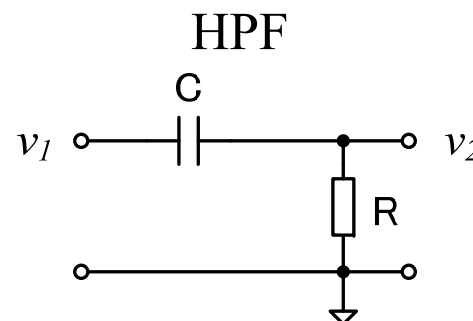
(参考)RC回路の周波数特性



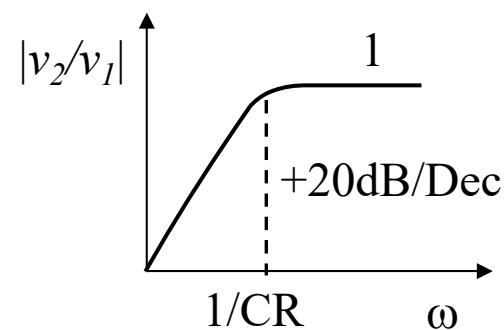
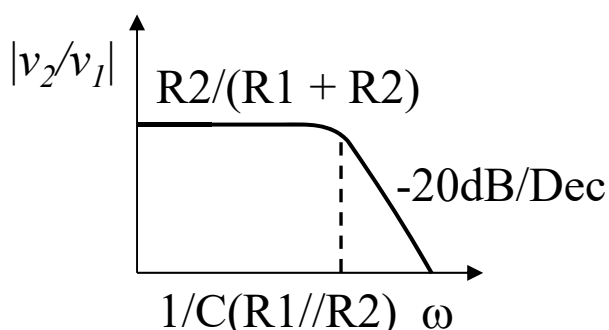
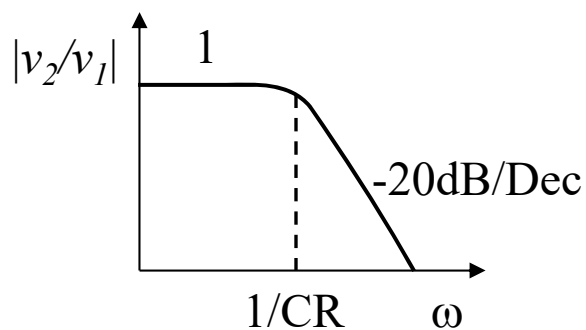
$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{1 + j\omega CR}$$



$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{R2/(R1+R2)}{1 + j\omega C(R1//R2)}$$

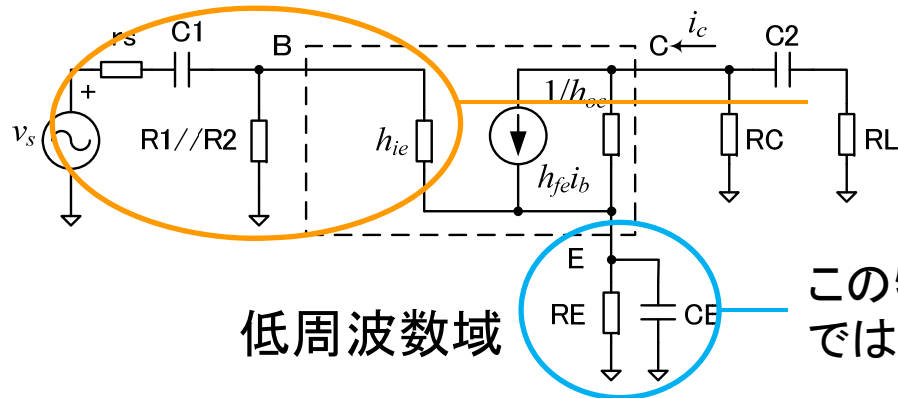


$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{j\omega CR}{1 + j\omega CR}$$



増幅回路では、色々なパターンが組み合わさって周波数特性が形成されている。9

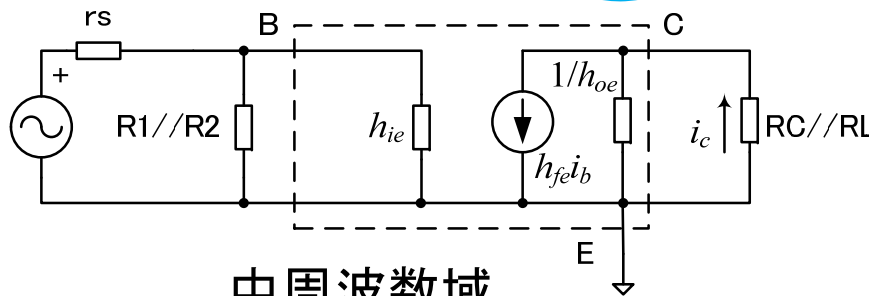
小信号等価回路による特性予想



低周波数域

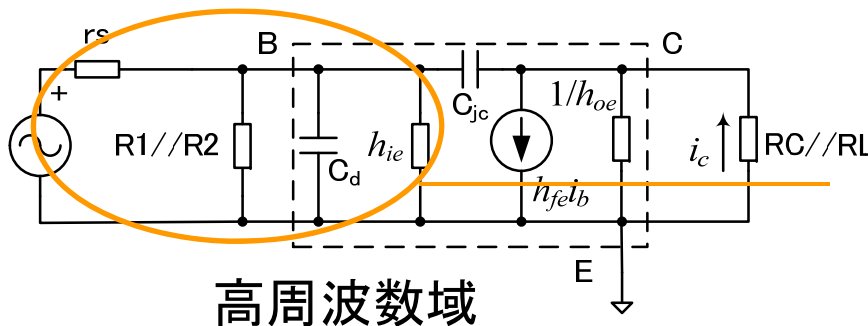
$1/C1 \cdot (R1//R2//h_{ie}+r_s)$ の遮断角
周波数を持つHPFとなる。
(傾き +20dB/Dec)

この特性は解析が少し複雑だが、低周波
では、バイパスができなくなり利得が低下。



中周波数域

周波数に依存する素子がない。
(平坦な特性)

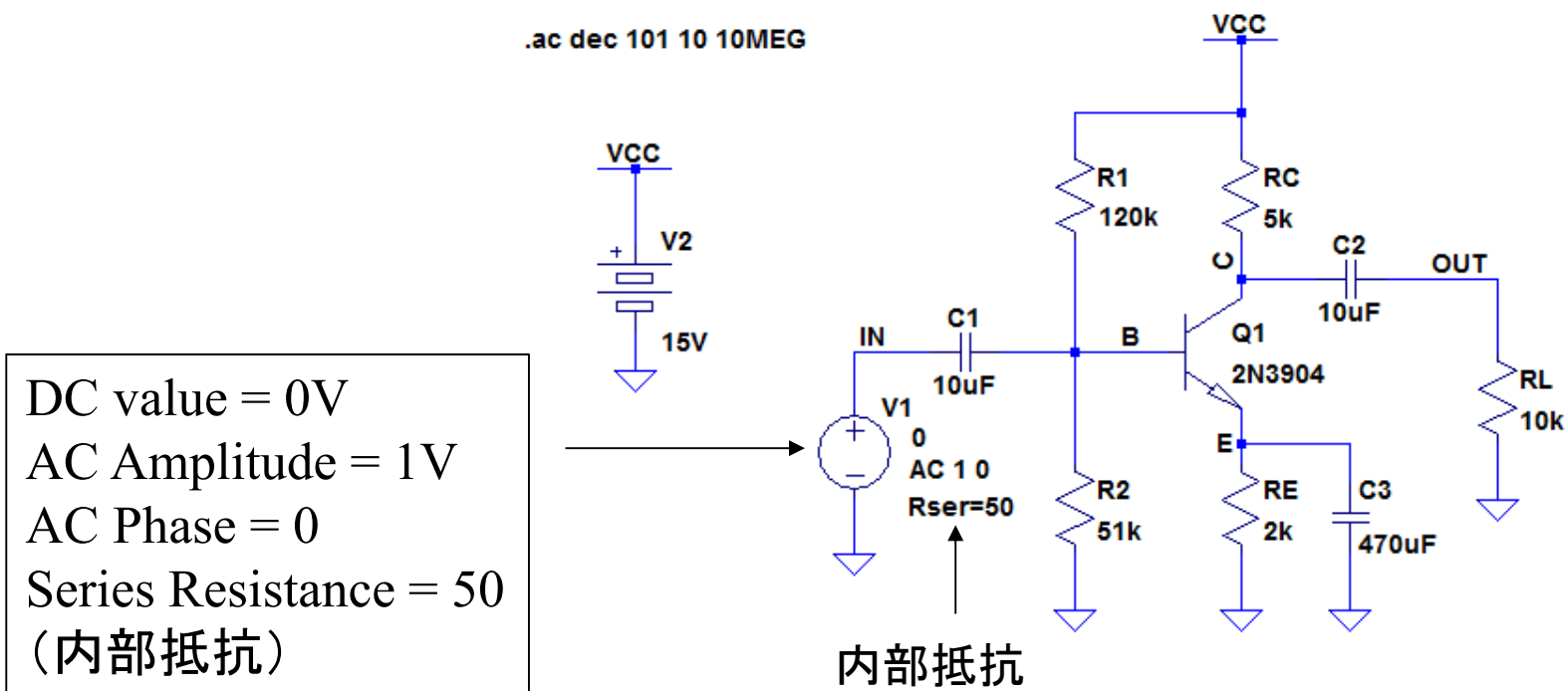


高周波数域

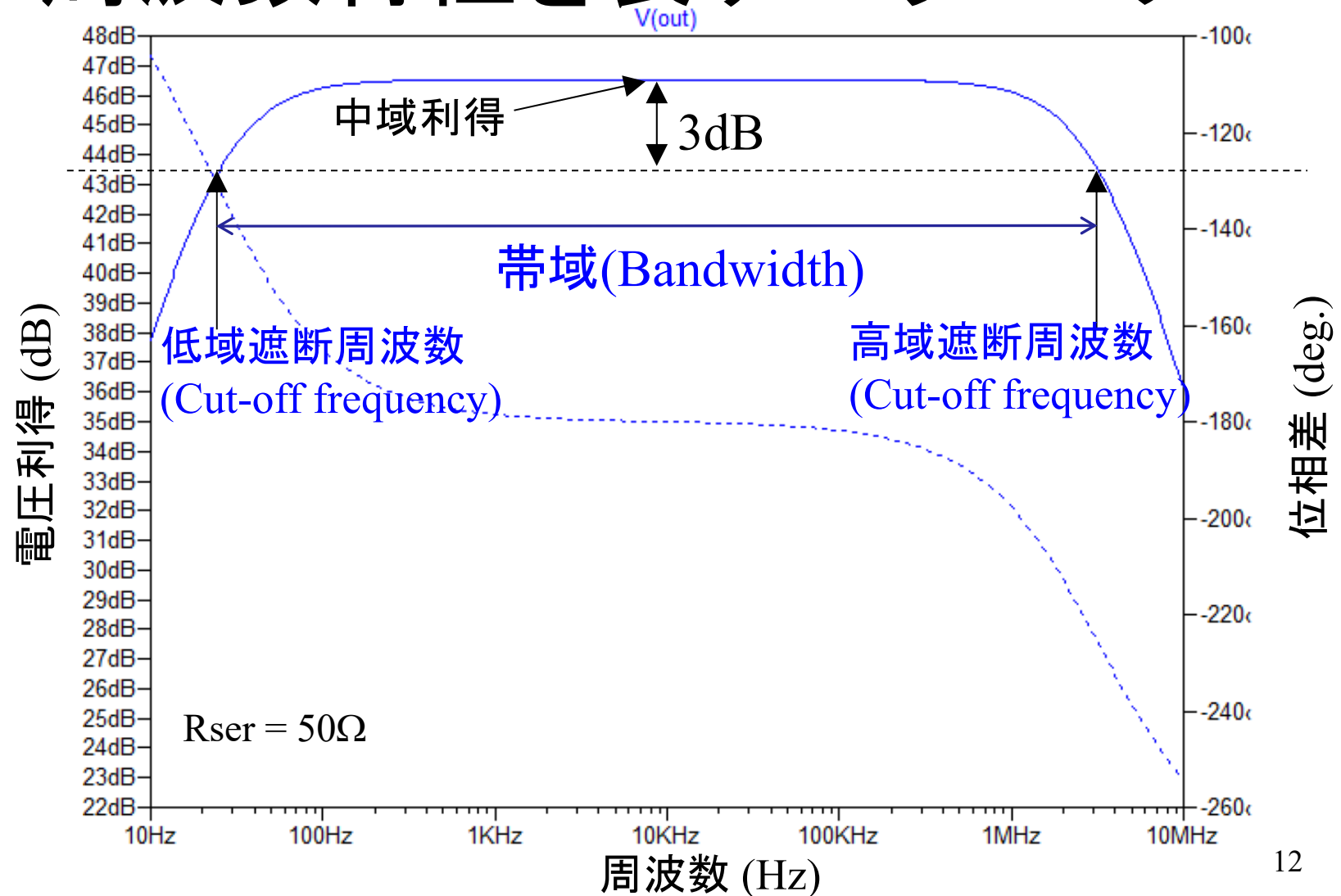
C_{jc} を無視するならば(実際は無視で
きない)、 $1/C_d \cdot (R1//R2// h_{ie} // r_s)$ の遮
断角周波数を持つLPFとなる。
(傾き -20dB/Dec)

AC解析

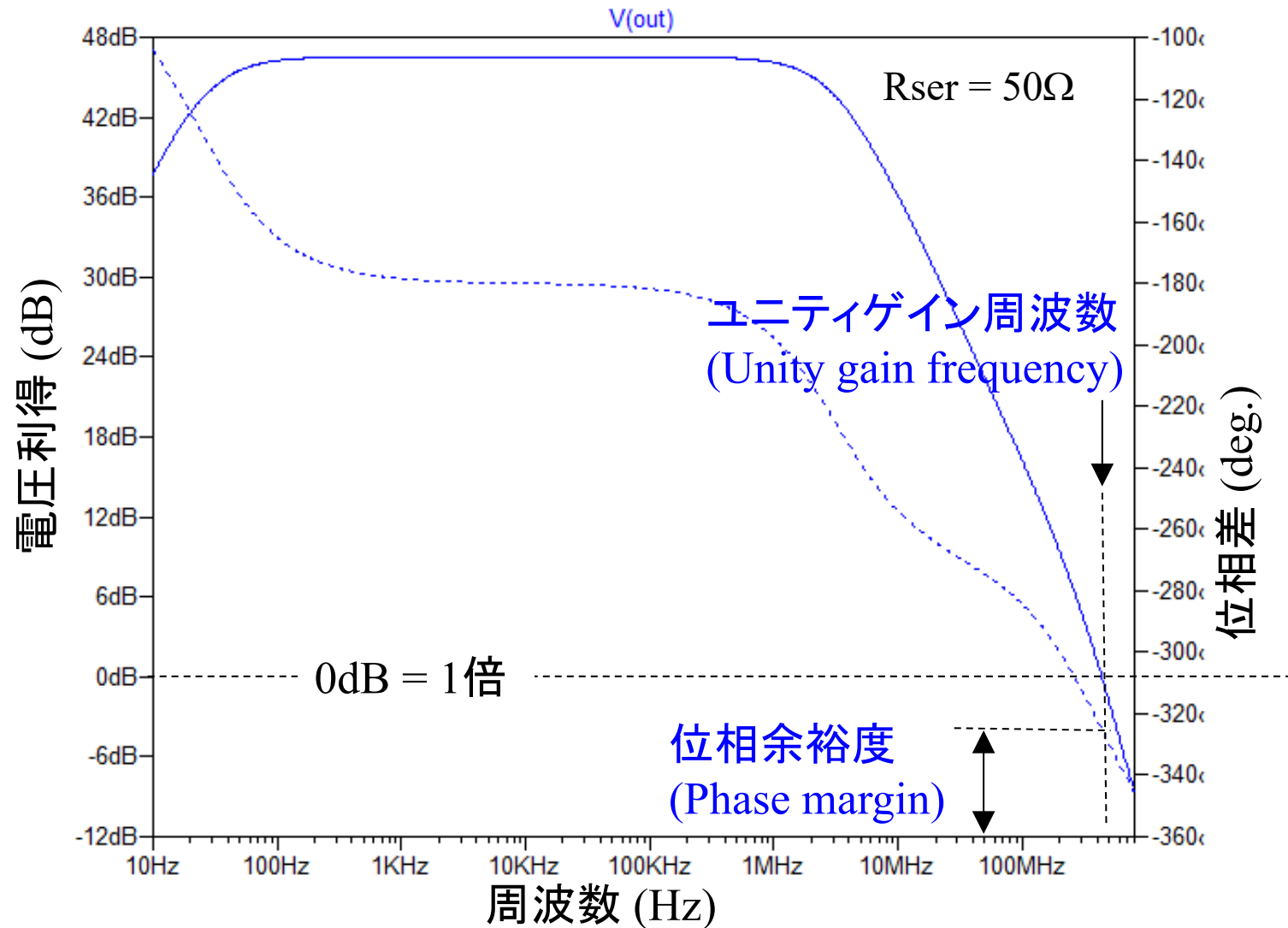
- 精密な高周波小信号等価回路を自動的に作成し(表示はされない)、小信号に対する周波数特性を計算する
- 線形な等価回路に置き換えるので、歪みはシミュレーションできない



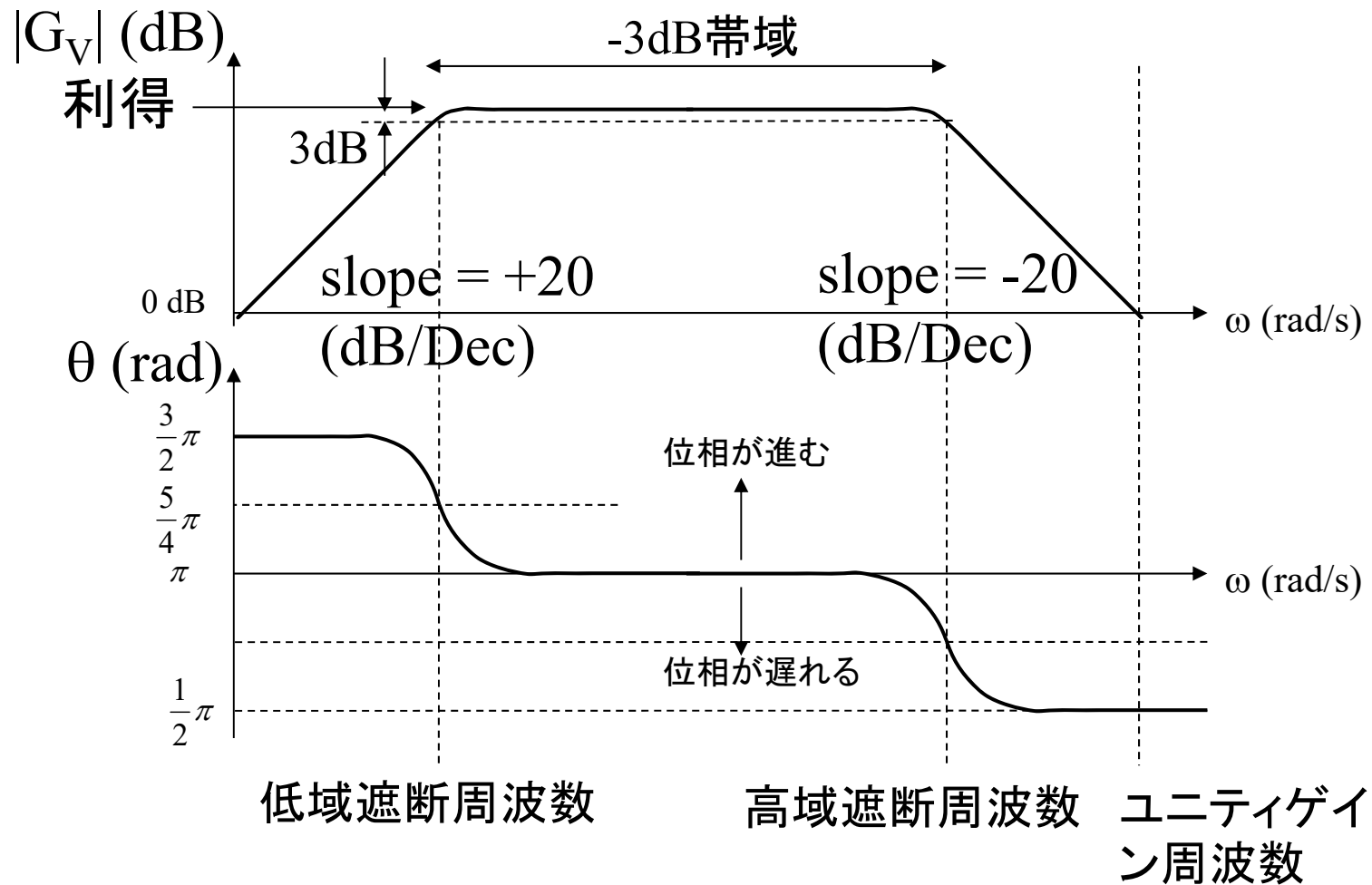
周波数特性を表すパラメータ1



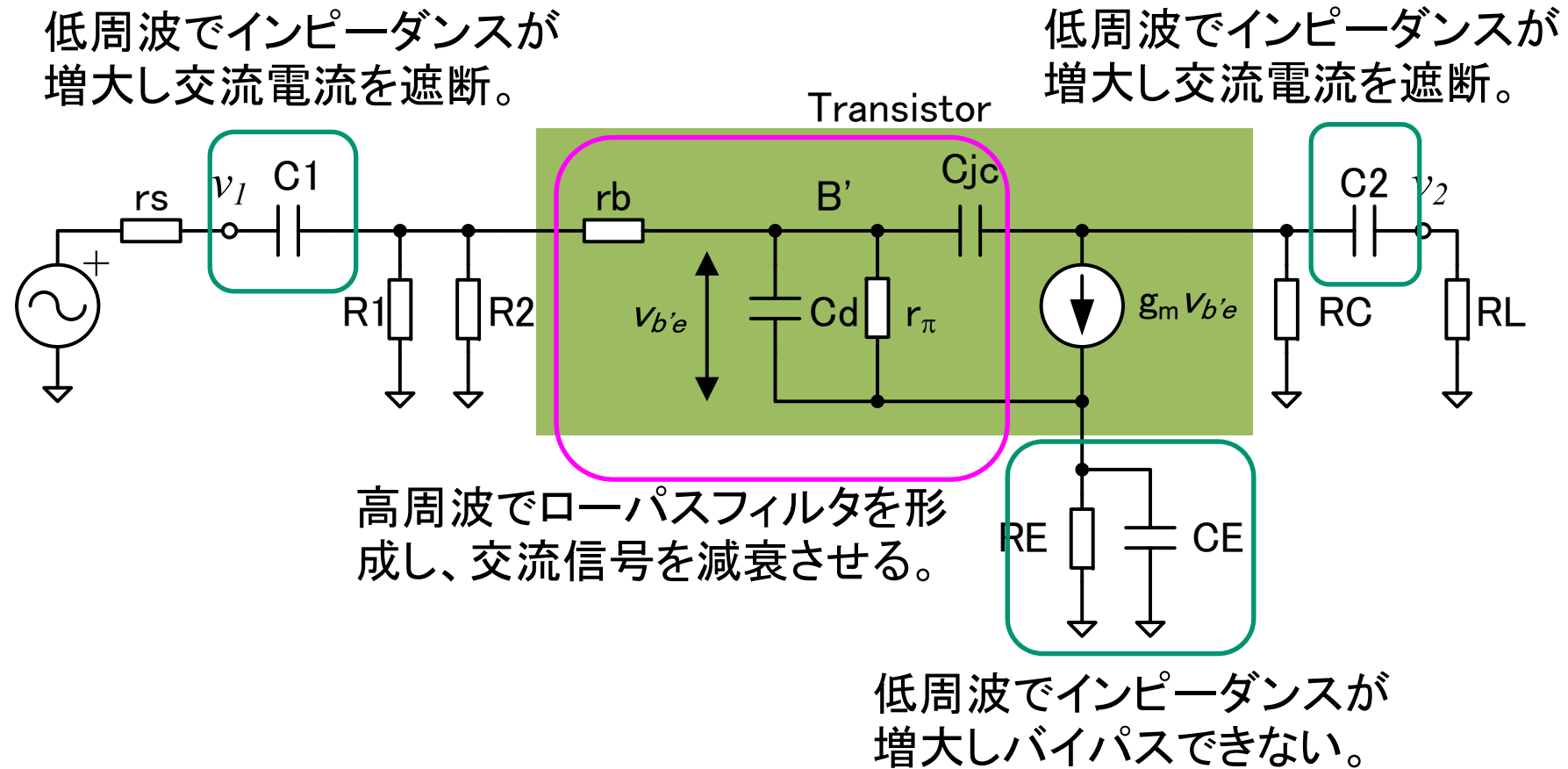
周波数特性を表すパラメータ2



増幅回路のボード線図のまとめ



周波数特性の原因



周波数帯域を広げる方法

- 低域遮断周波数

- 低周波では、容量C1, C2のインピーダンスが大きくなり、交流信号が伝達できない(直流は完全に遮断される)
- C1, C2の値を大きくすることにより改善できる

- 高域遮断周波数

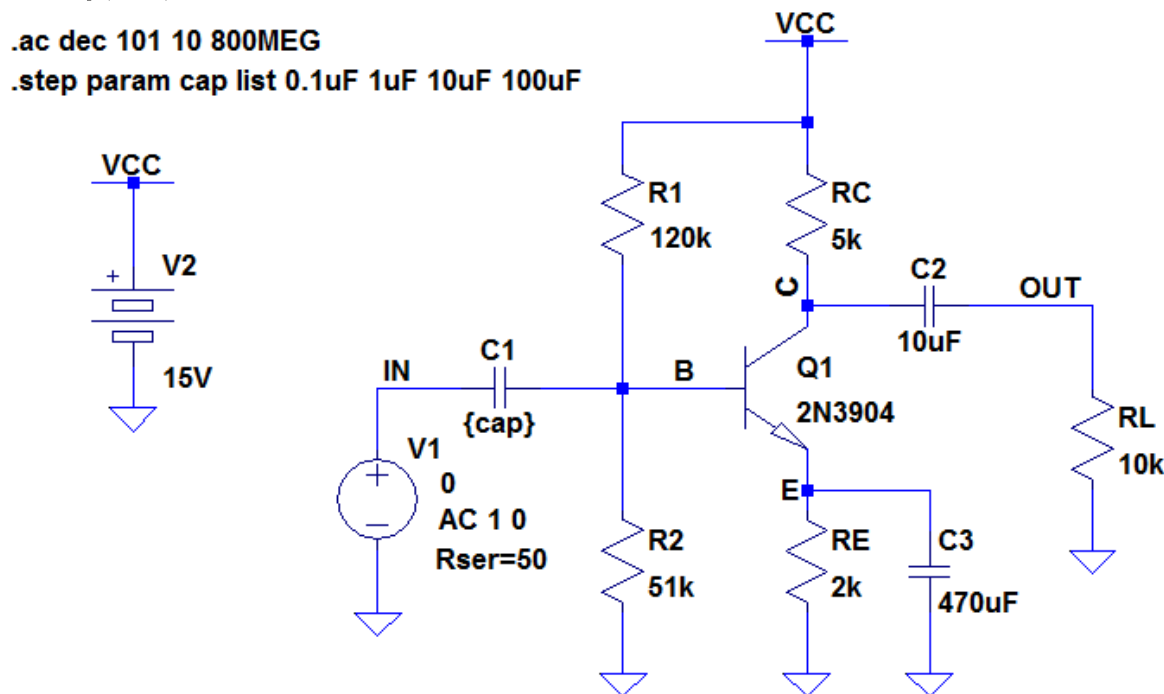
- 高周波では、トランジスタの電流増幅率が低下することが主な原因
- 高周波特性の良い(高周波まで増幅できる)トランジスタを高性能なものに変更する必要がある
- トランジスタ以外に信号源(前段の回路)の内部インピーダンスも高周波特性に影響を与える(計測機器、アンテナの入出力は50Ωに規格化されている)

- 高周波性能の良いトランジスタの探し方

- トランジスタの高周波性能は、遷移周波数(Transition frequency f_T)で表わされる(データシートで値を確認すること)
- 遷移周波数は $h_{fe} = 1$ となる周波数

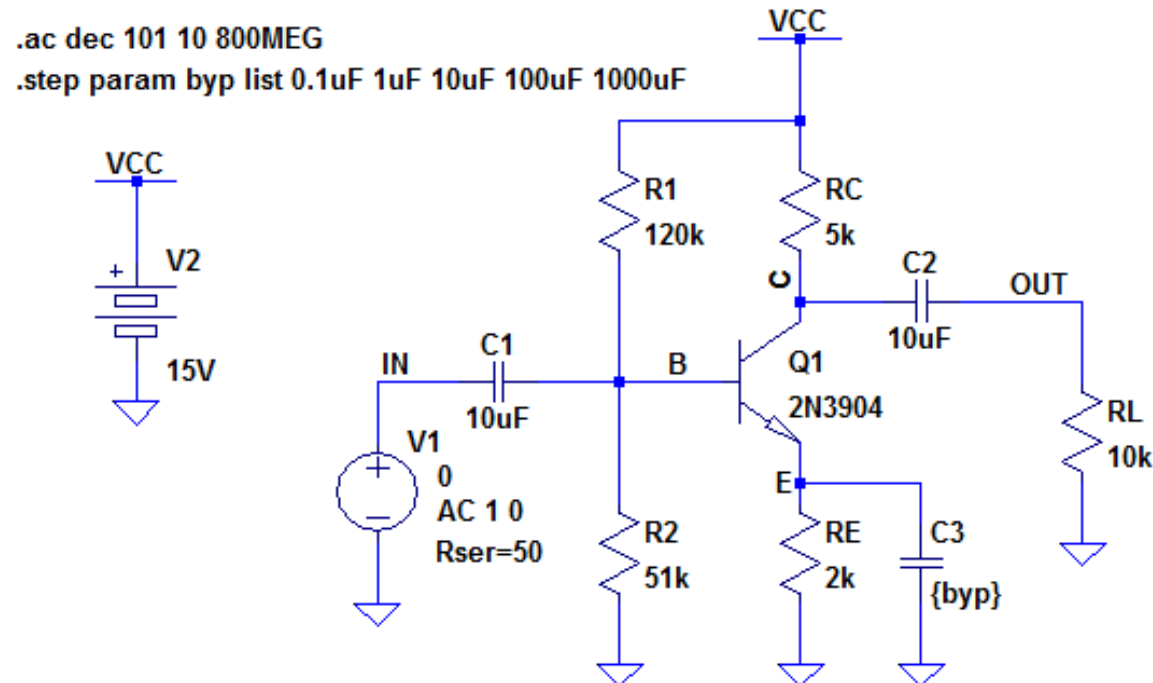
課題5.1.1

1. 下記の回路で、周波数特性を調べよ
2. 結合キャパシタC1は主に周波数特性の何に影響を与えているか説明せよ

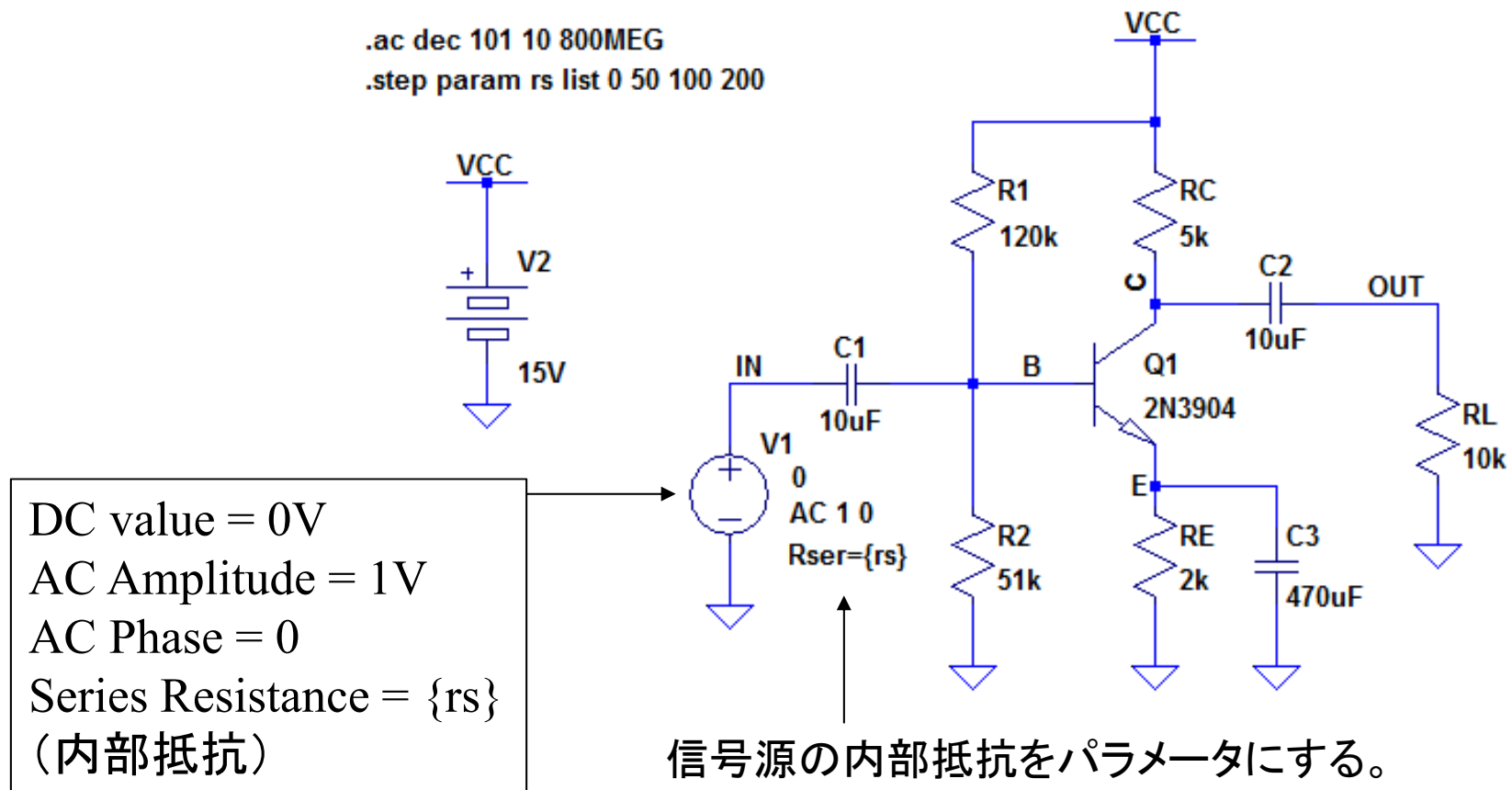


課題5.1.2

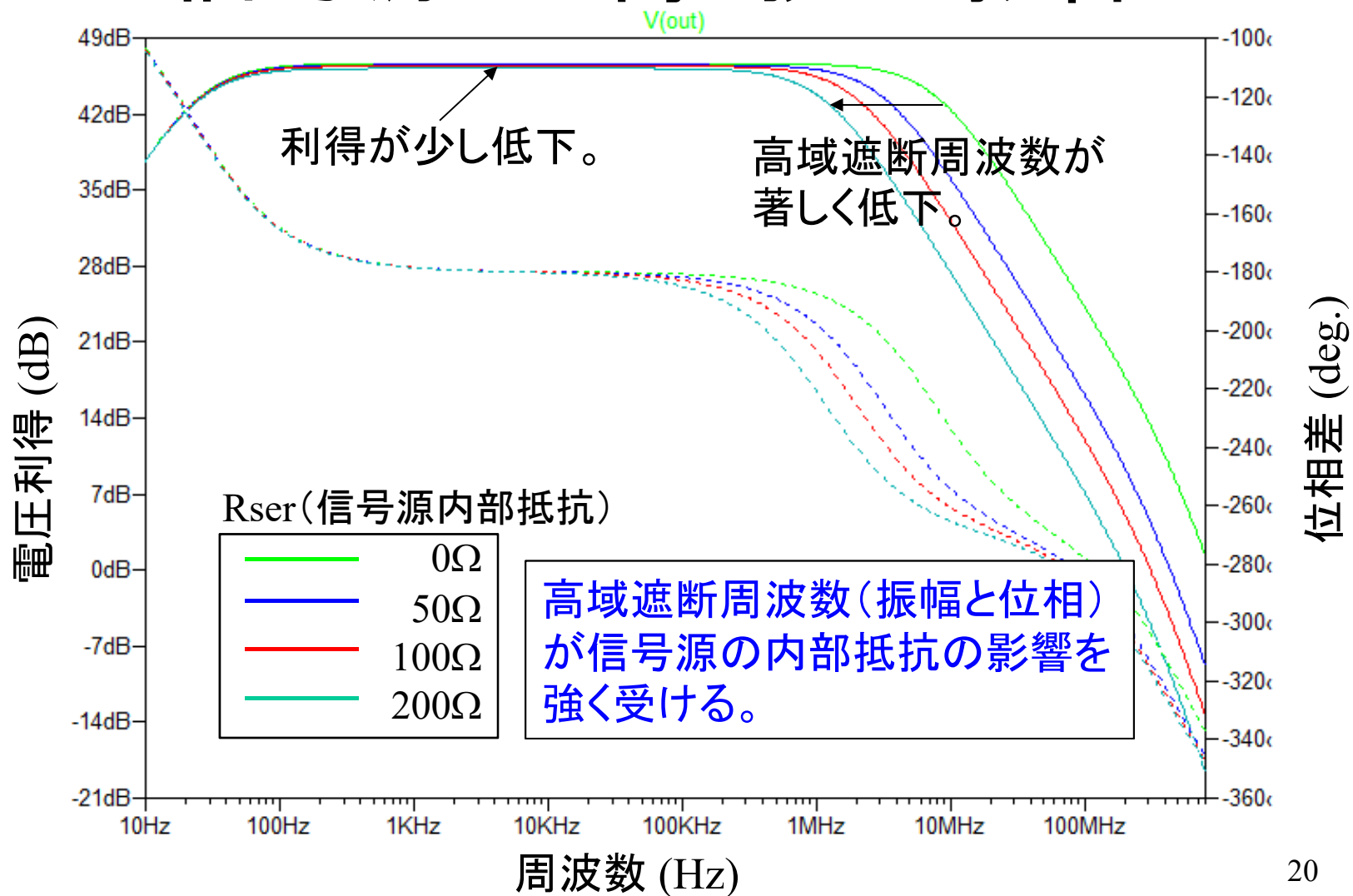
1. 下記の回路で、周波数特性を調べよ
2. バイパスキャパシタC3は主に周波数特性の何に影響を与えているか説明せよ



信号源の内部抵抗の影響解析



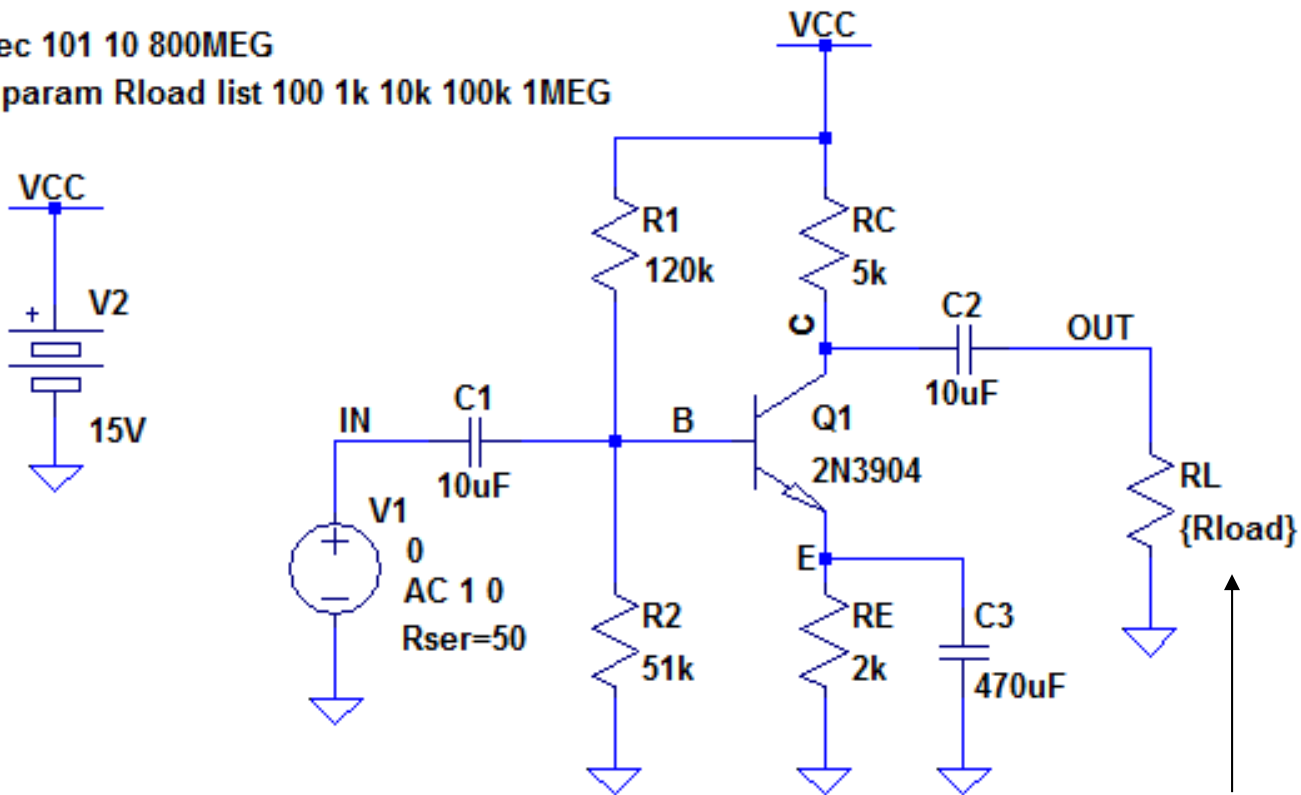
信号源内部抵抗の影響



負荷抵抗の影響解析

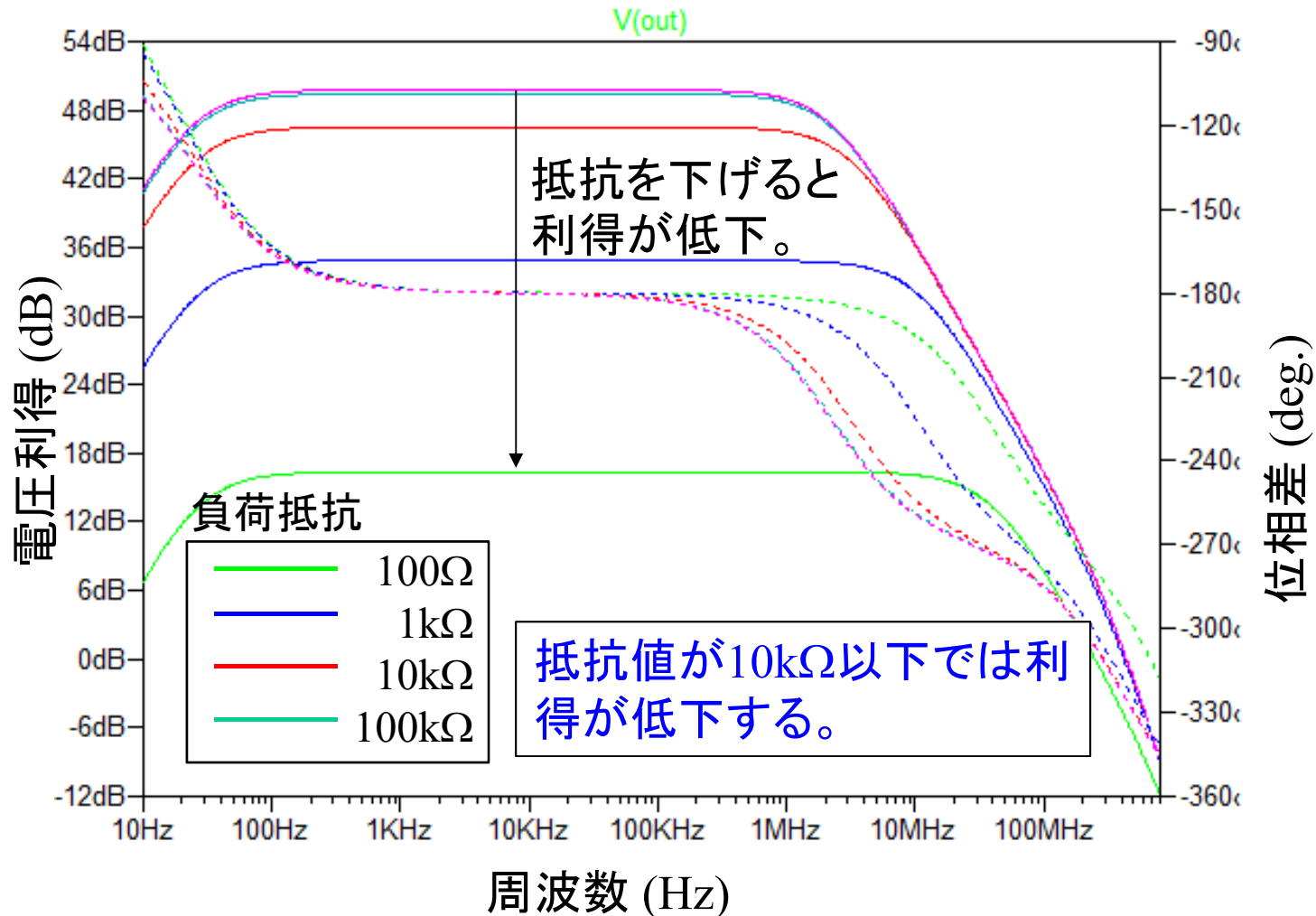
```
.ac dec 101 10 800MEG
```

```
.step param Rload list 100 1k 10k 100k 1MEG
```

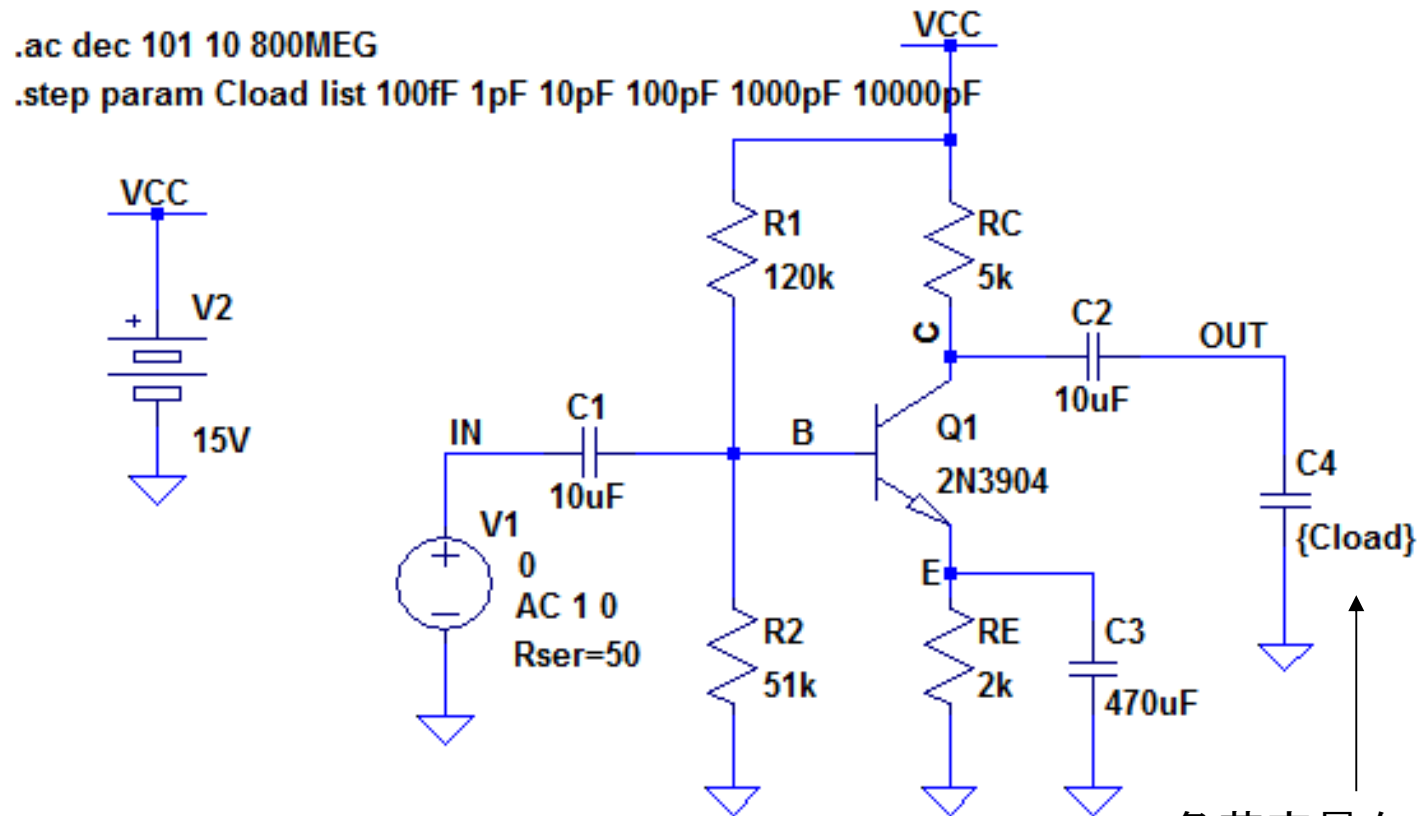


負荷抵抗をパラメータにする。

負荷抵抗の影響



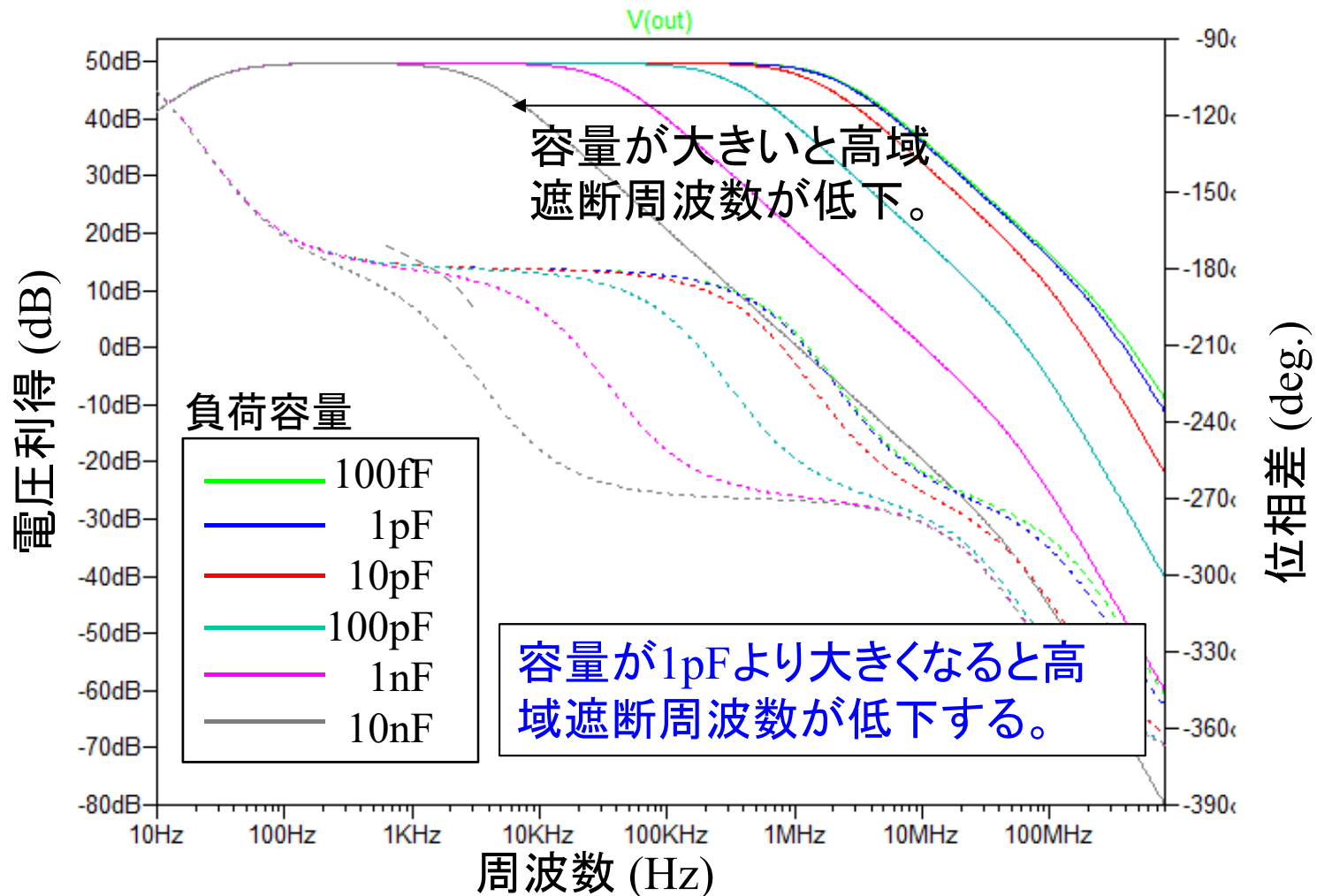
負荷容量の影響解析



※ 後段の回路に依って、負荷が抵抗、容量、インダクタンスの場合がある。

負荷容量をパラメータにする。(※)

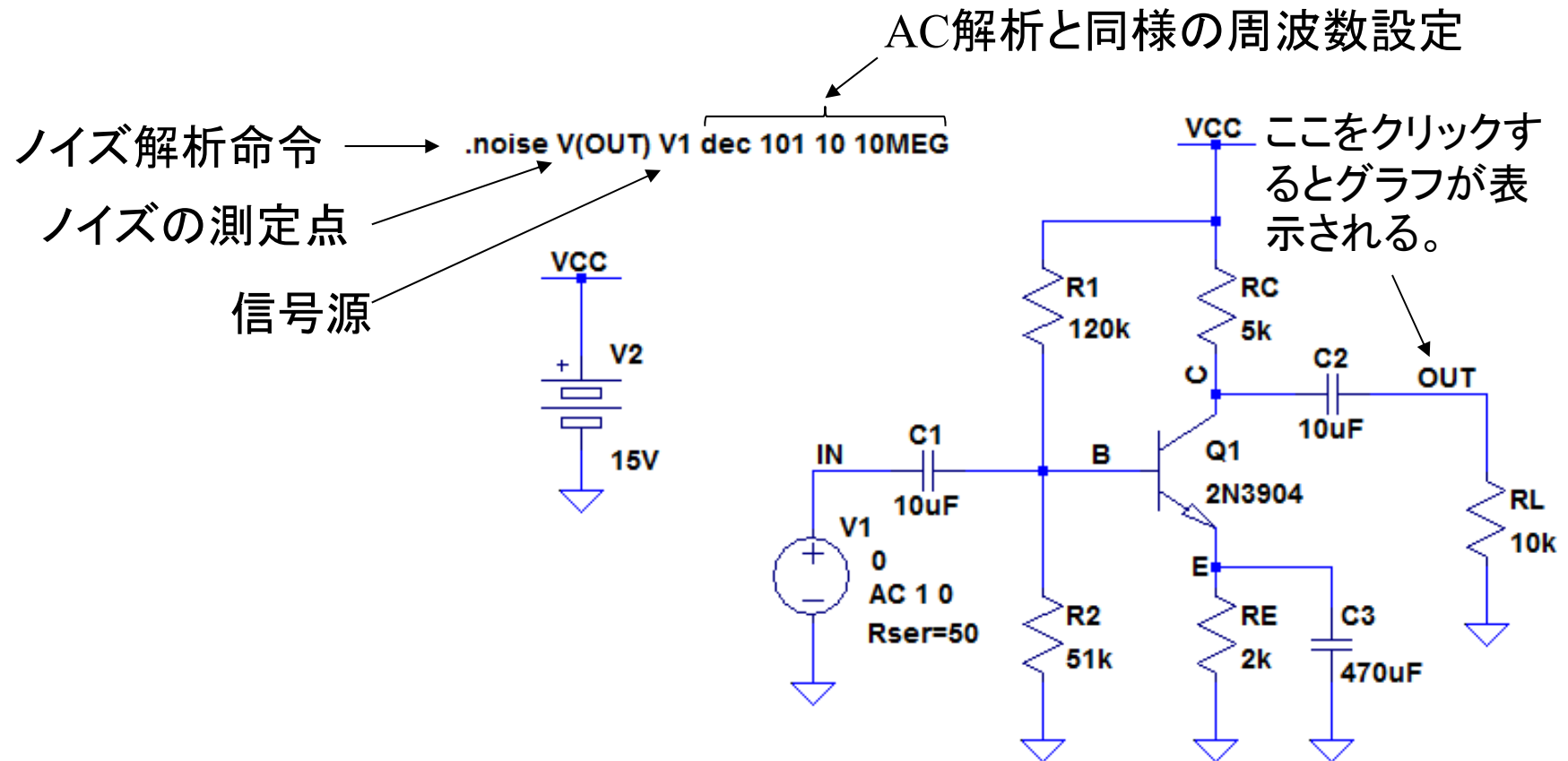
負荷容量の影響



雑音の原因と大きさの指標

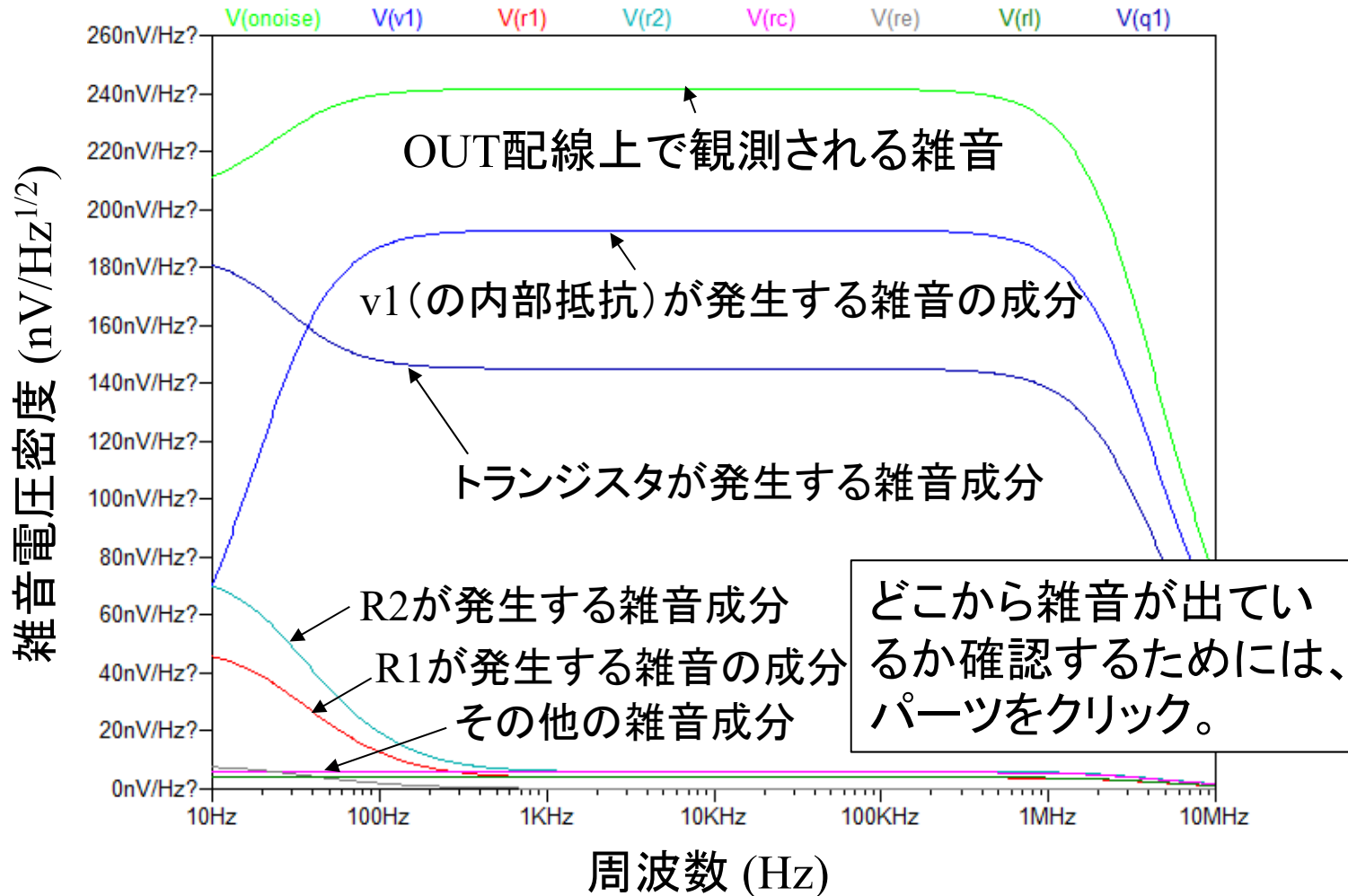
- 雑音の種類
 - 外部雑音(回路シミュレータは計算しない)
 - 回路の外から電気磁気学的に伝わってくる雑音(クロストークノイズ)
 - 内部雑音(回路シミュレータで計算できる)
 - 抵抗(半導体の抵抗を含む)の熱雑音(電子とホールの熱運動)
 - 半導体特有の雑音(フリッカーノイズ、ショットノイズなど)
- 雑音の大きさの指標
 - SN比(Signal to Noise Ratio) または SNR
 - 信号電力のRMS/雑音電力のRMS(電圧または電流の場合もある)
 - 大きいほど信号の品質(精度)がよい
 - 雑音スペクトル密度(Power spectral density)
 - 一般的には、単位周波数に含まれる雑音電力の (W/Hz)
 - 回路では、雑音電圧密度($V/\sqrt{\text{Hz}}$)または雑音電流密度($A/\sqrt{\text{Hz}}$)で表す
 - 小さいほど信号の劣化が少ない

ノイズ解析



ノイズ解析の詳細: <http://jaco.ec.t.kanazawa-u.ac.jp/edu/ec2/ltspice/08.html>

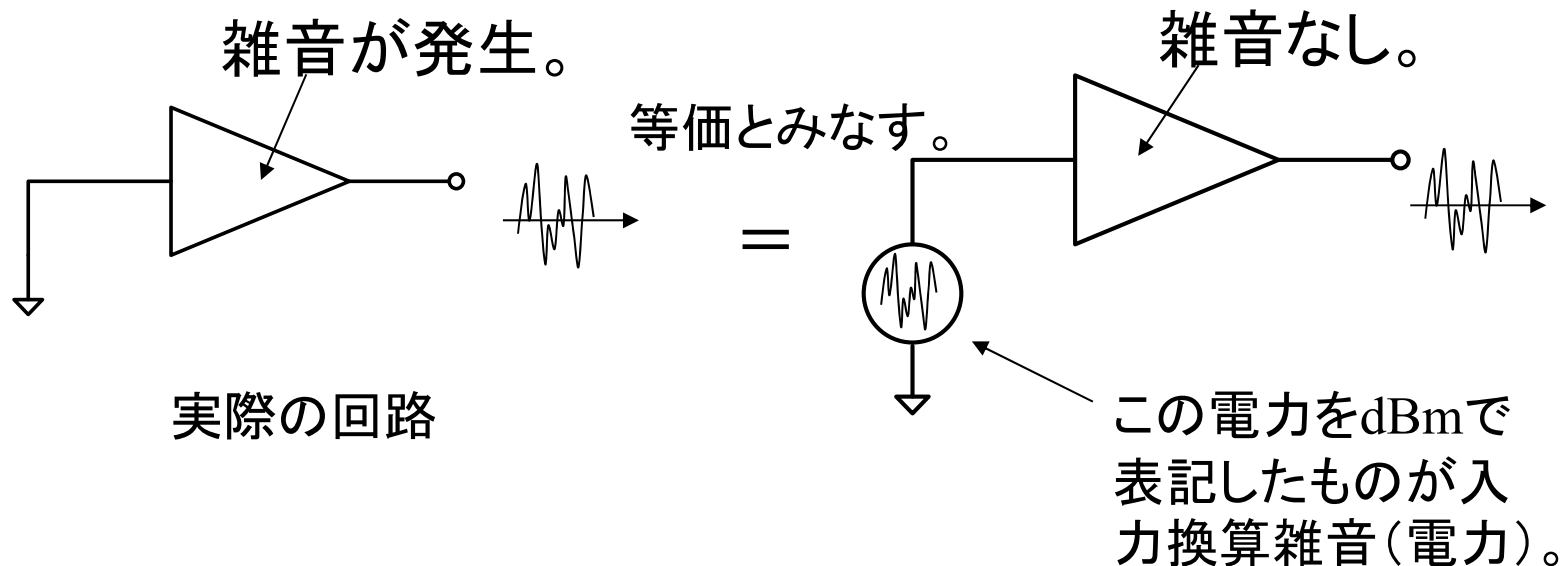
ノイズ解析の例



入力換算

回路が発生する雑音や演算誤差を等価な入力信号に置き換えて考える。

入力換算雑音密度(Input-referred noise spectral density) = 雑音密度/増幅率

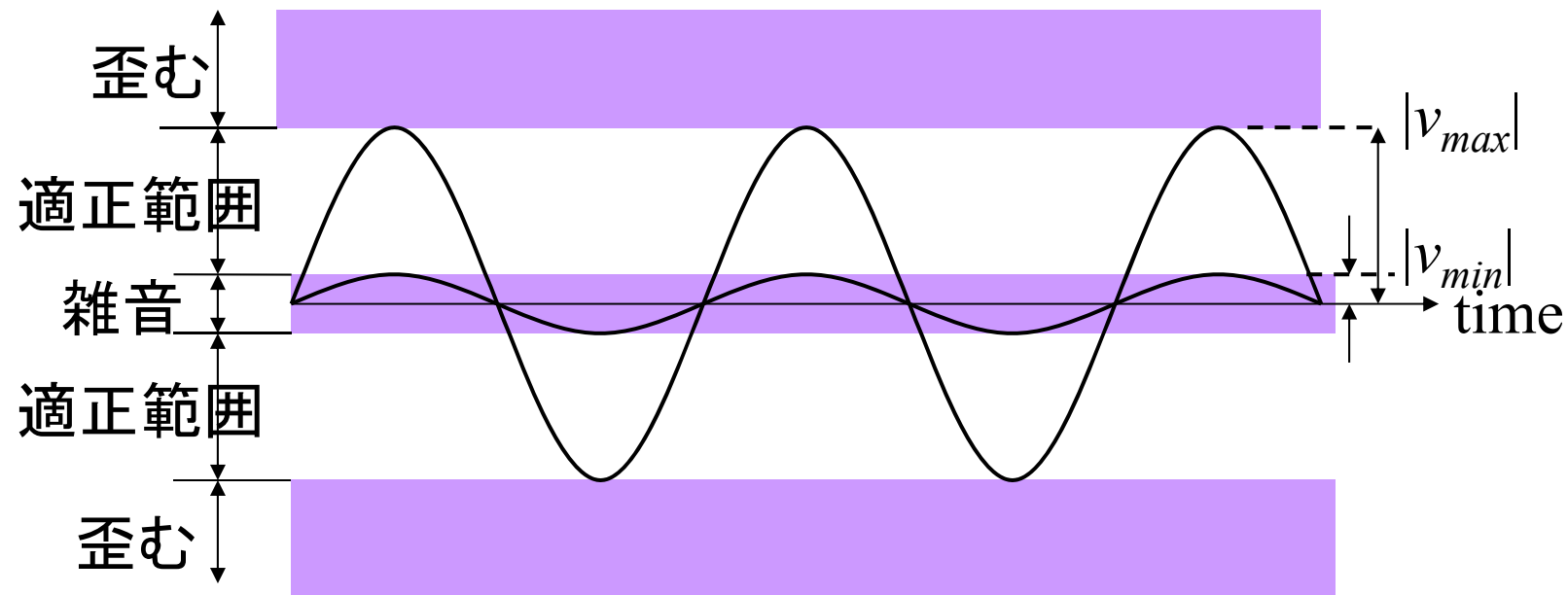


入力換算を行うことにより利得の異なる回路の雑音の大きさを比較することができる(入力換算しないと利得の大きい回路は雑音も増幅するので不利になる)。

ダイナミックレンジ

- 回路が扱える信号の振幅の範囲(ダイナミックレンジ)
 - 入力信号電圧や電流が大きすぎると波形が歪む
 - 入力信号電圧や電流が小さすぎると雑音に埋もれる
- 大きなダイナミックレンジの利点
 - 信号処理が高精度(アナログ回路)
 - エラーが発生しにくい(デジタル回路)

$$DR = 20 \log \left| \frac{v_{max}}{v_{min}} \right|$$



5.1節のまとめ

- 周波数特性
 - 動作量の周波数依存性によって回路の動作速度、演算精度、安定性などが評価される
 - 増幅回路の動作量には、電圧利得、電流利得、電力利得、入力インピーダンス、出力インピーダンスなどがある
 - 増幅回路の周波数特性に関わる主な性能指標には以下のものがある
 - 中域(帯域内)の電圧利得
 - 低域および高域遮断周波数
 - 帯域
 - ユニティゲイン周波数
 - 位相余裕度
- 雑音
 - 抵抗、半導体デバイスは雑音を発生する
 - 雑音の周波数特性は、入力換算雑音スペクトル密度により表される
 - 回路の雑音性能は、SNRで表される
 - 雑音指数(Noise Figure)という性能指標もよく使用される