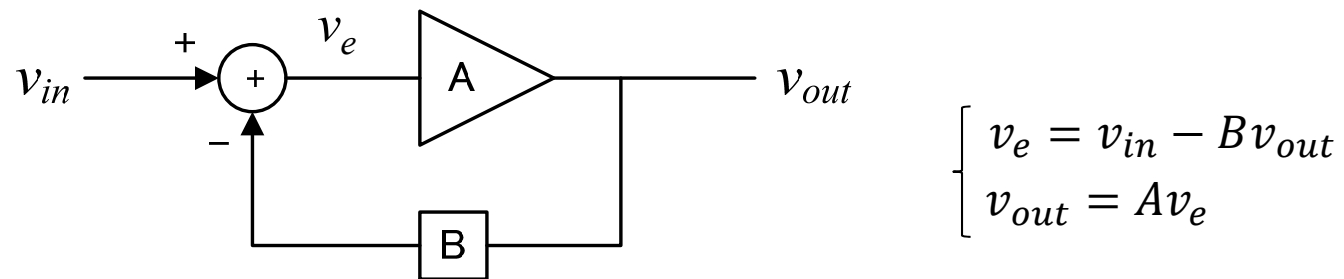


5.3 ネガティブフィードバック

交流信号に対するフィードバック

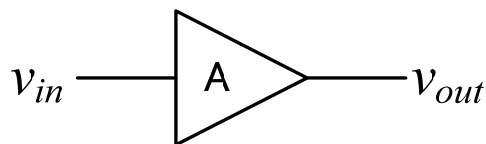
4.4節では、動作点を安定化するためフィードバックを用いたが、交流信号に対して適用することにより、増幅器の性能改善ができる。



$$v_{out} = \frac{A}{1 + AB} v_{in} = \frac{1}{\frac{1}{A} + B} v_{in} \xrightarrow{A \rightarrow \infty} \frac{1}{B} v_{in}$$

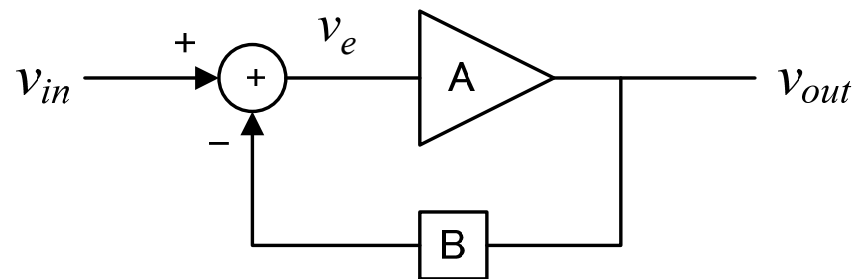
Aが十分大きければ、全体の利得 v_{out}/v_{in} がBにより決定される。Bは v_{out} を減衰させてフィードバック量を調整するための回路なので、抵抗などの受動素子で作れる。

オープンループ利得とクローズド ループ利得



$$G_{open} = \frac{v_{out}}{v_{in}} = A$$

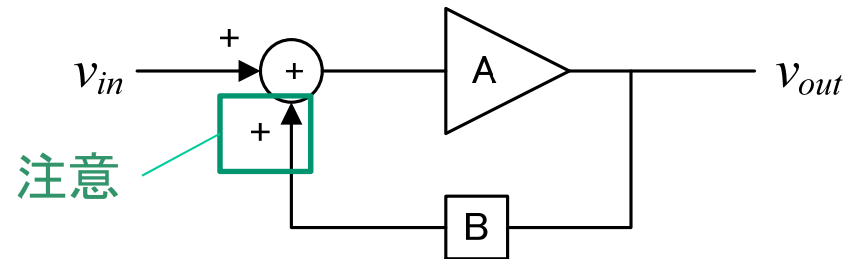
フィードバックしていないときの利得は、**オープンループ利得**とも呼ばれる (**Open loop gain**)。



$$G_{close} = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{A}{1 + AB}$$

フィードバックしているときの利得は、**クローズドループ利得**とも呼ばれる (**Closed loop gain**)。

正帰還と負帰還

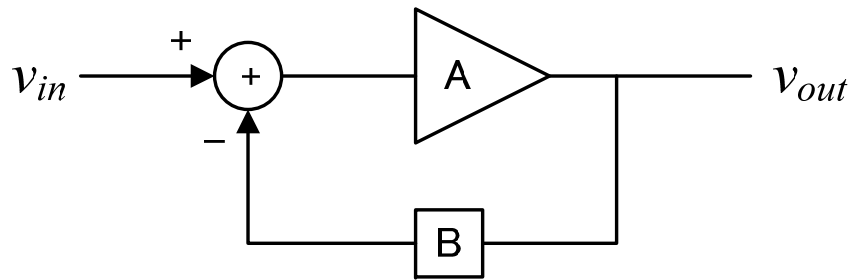


ABの値は、信号がフィードバックを一周する間の利得に相当するため**ループ利得(Loop gain)**と呼ばれる。

- $AB > 0$ (**正帰還, Positive feedback, PFB**)
 - 双安定性(メモリ), 発振回路, ブートストラップなどに利用
- $AB < 0$ (**負帰還, Negative feedback, NFB**)
 - 回路の安定化、特性改善などに利用

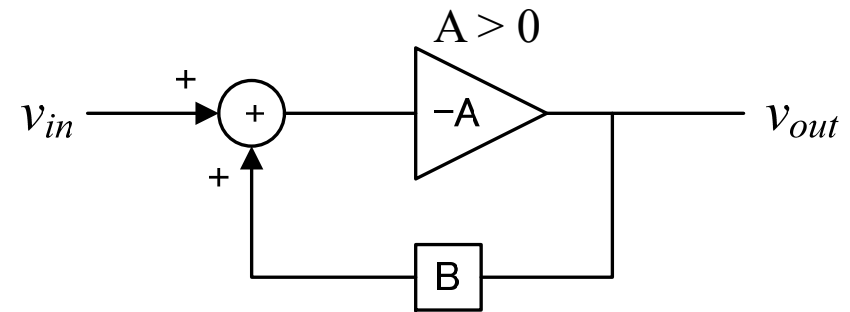
2種類のNFB

正相増幅回路のNFB



$$v_{out} = \frac{A}{1 + AB} v_{in} = \frac{1}{\frac{1}{A} + B} v_{in} \xrightarrow{A \rightarrow \infty} \frac{1}{B} v_{in}$$

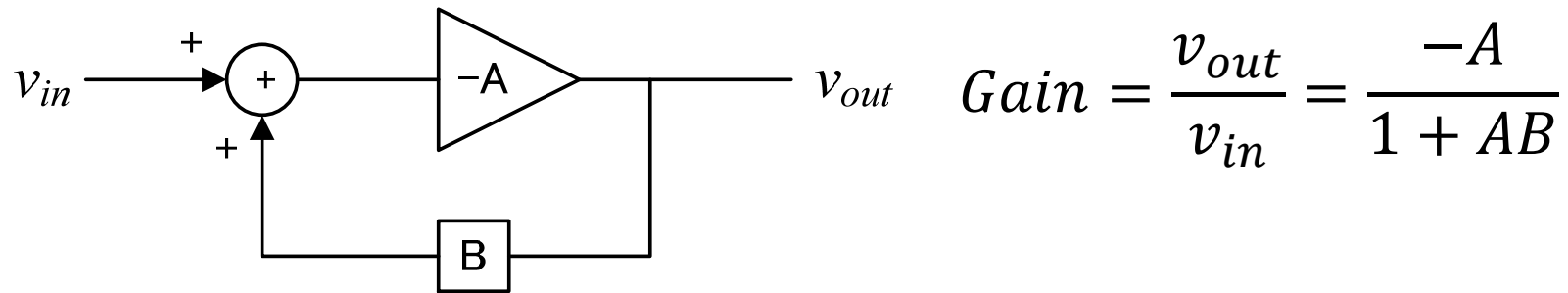
反転増幅回路のNFB



$$v_{out} = \frac{-A}{1 + AB} v_{in} = \frac{-1}{\frac{1}{A} + B} v_{in} \xrightarrow{A \rightarrow \infty} -\frac{1}{B} v_{in}$$

トランジスタを用いればBを負(反転出力)にする構成も考えられるが、ここでは、Aのみにトランジスタを用いる場合を考える。

NFBによる回路の安定化



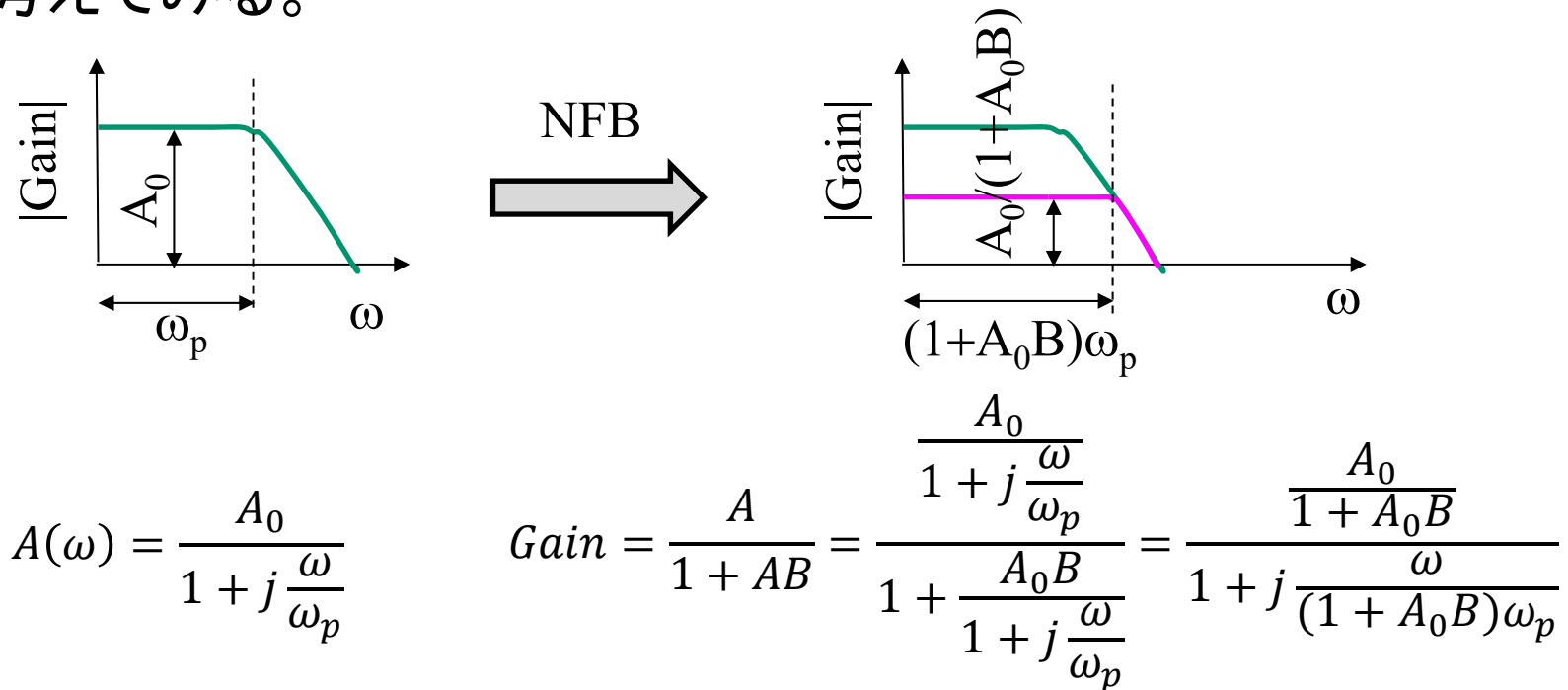
Aの変動に対する安定指数

$$S_A = \frac{\partial Gain}{\partial A} = \frac{-1}{(1 + AB)^2} \xrightarrow{A \rightarrow \infty} 0$$

増幅回路利得Aが大きければ、全体利得Gainは、Aと関係のない値になり、Aの変動の影響がなくなる。Aは、値が十分に大きければ、どのような値でもかまわない。

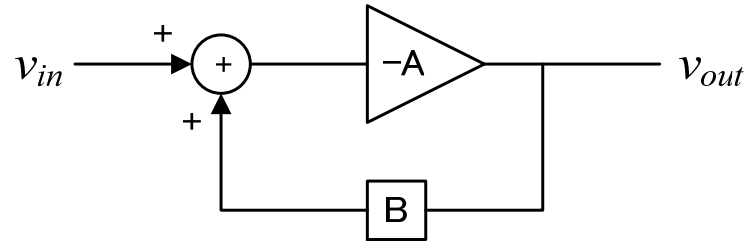
NFBによる周波数特性の改善

ここでは、計算の容易化のため、高域遮断周波数のみ考えてみる。

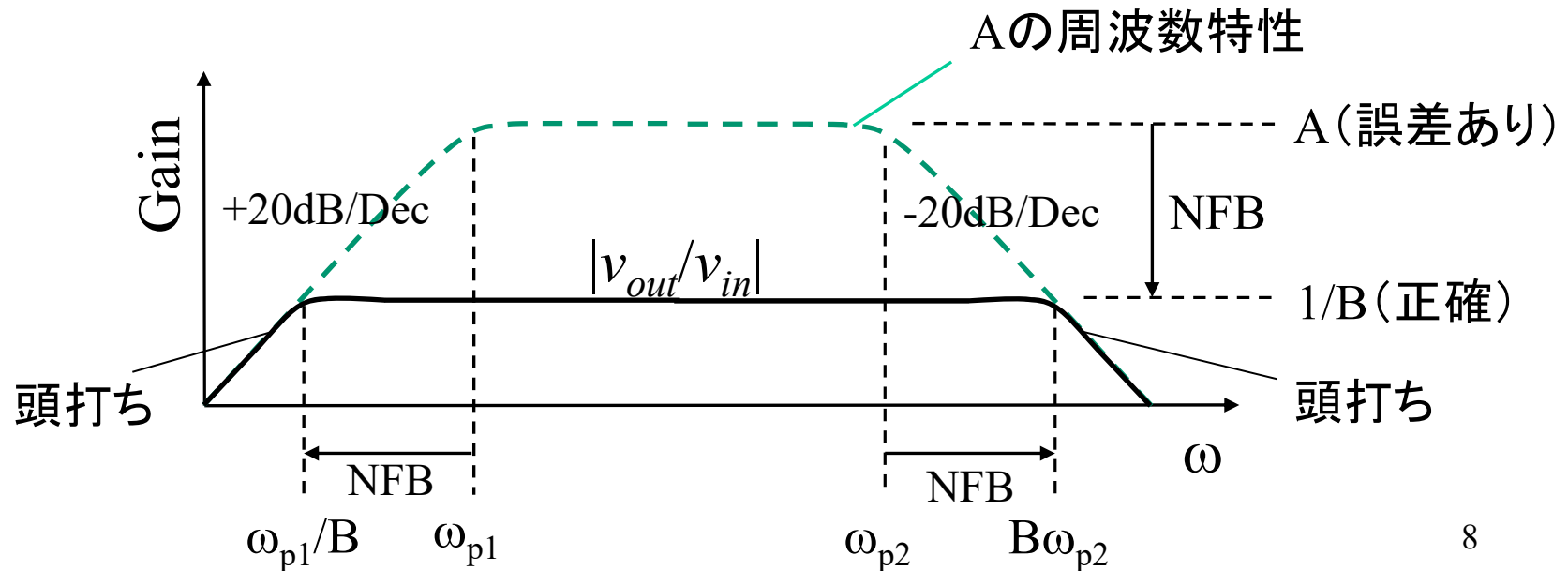


- 利得は、 $1/(1+A_0B)$ 倍、高域遮断周波数は、 $(1+A_0B)$ 倍
- 低域遮断周波数は $1/(1+A_0B)$ 倍

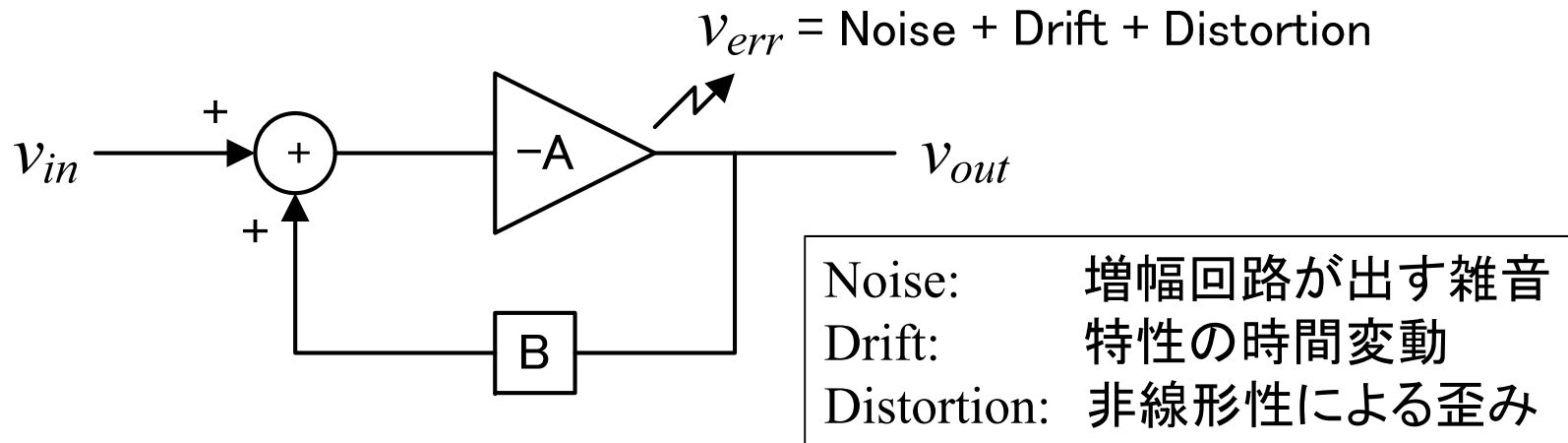
NFBによる周波数特性の変化



NFBにより周波数帯域を広げることができるが、Aの利得を超えることはできないので、Aの周波数特性で頭打ちとなる。



NFBによる誤差の抑制

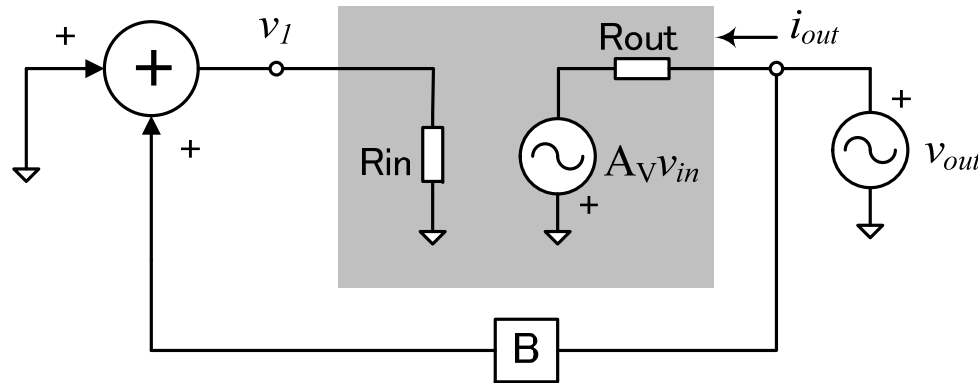


$$\begin{aligned} v_{out} &= \frac{-A}{1+AB} v_{in} + \frac{1}{1+AB} v_{err} = v_{out} \\ &= \frac{-A}{1+AB} v_{in} + \frac{1}{1+AB} v_{err} \xrightarrow{A \rightarrow \infty} -\frac{1}{B} v_{in} \quad (v_{err} \text{が消滅}) \end{aligned}$$

Aが十分大きければ、増幅回路が発生した雑音、ドリフト、歪みなどの誤差(v_{err})を消すことができる。

ただし、増幅回路の入力側に発生した誤差は消去できない。

電圧フィードバックによる出力インピーダンス制御



$$\begin{cases} v_1 = -Bv_{out} & (\text{電圧帰還}) \\ v_{out} - A_V v_1 = R_{out} i_{out} \end{cases}$$

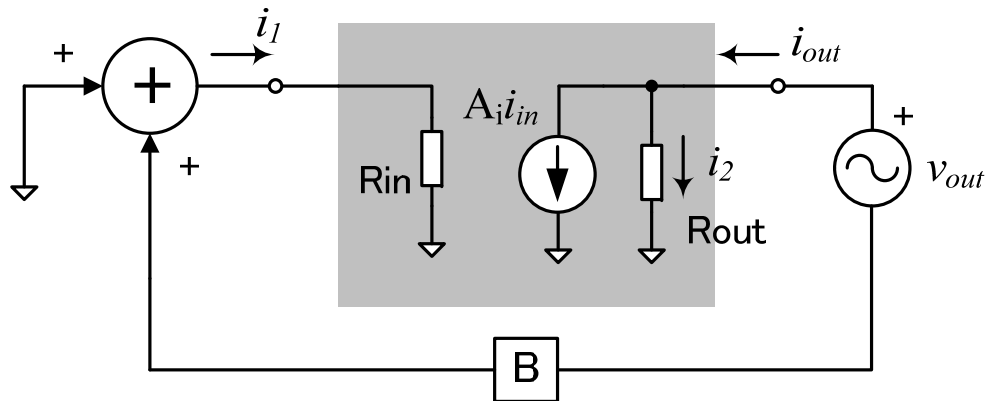
出力インピーダンス測定回路

$$v_{out} + A_V B v_{out} = R_{out} i_{out}$$

$$Z_{out} = \frac{v_{out}}{i_{out}} = \frac{R_{out}}{1 + A_V B}$$

出力インピーダンスは $1/(1+A_V B)$ 倍に下がる。

電流フィードバックによる出力インピーダンス制御



出力インピーダンス測定回路

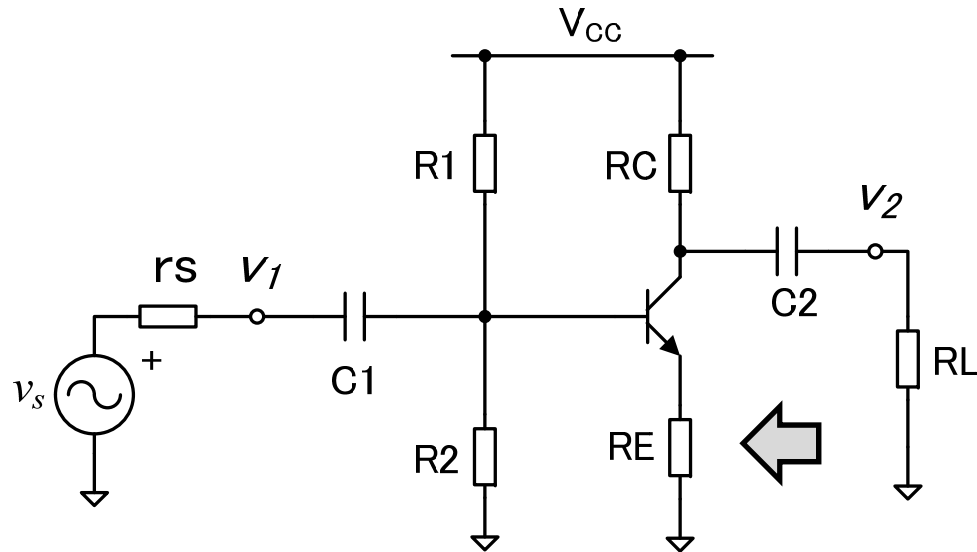
$$\begin{cases} i_1 = -B i_{out} & (\text{電流帰還}) \\ i_2 = \frac{v_{out}}{R_{out}} \\ i_{out} = i_2 + A_i i_1 \end{cases}$$

$$Z_{out} = \frac{v_{out}}{i_{out}} = R_{out}(1 + A_i B)$$

出力インピーダンスは $(1 + A_i B)$ 倍に上がる。

(参考) 同様の考え方で、入力インピーダンスを制御することもできる。

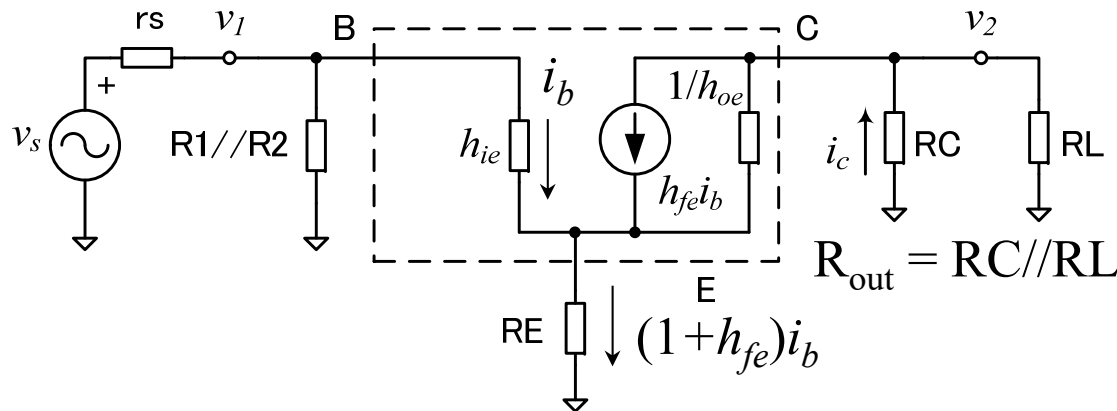
エミッタ接地増幅回路のNFB



CEを外せば、直流バイアスと交流信号の両方にNFBが働く。

小信号等価回路より利得を求める。

$h_{oe} \doteq 0$ と近似する。



$$Gain = \frac{v_2}{v_1} = \frac{-A}{1 + AB}$$

$$A = \frac{h_{fe}}{h_{ie}} R_{out}$$

$$B = \frac{1 + h_{fe}}{h_{fe}} \frac{RE}{R_{out}}$$

エミッタ接地NFB増幅回路の設計

利得が-10倍のエミッタ接地増幅回路では、REを何オームすればよいか？

$$V_{CC} = 15V, R_C = 5k\Omega, R_L = 10k\Omega$$

トランジスタ特性から

$$V_{B'E} = 700mV, h_{fe} = 313, h_{ie} = 4.58k\Omega, h_{oe} = 17.9\mu S, r_b \doteq 0\Omega \text{とする}$$

$$R_{out} = (1/h_{oe}) // R_C // R_L = 3.15k\Omega$$

$$A = \frac{h_{fe}}{h_{ie}} R_{out} = 215$$

|電圧利得| = 10倍 = 20dB の電圧増幅回路を作るには、

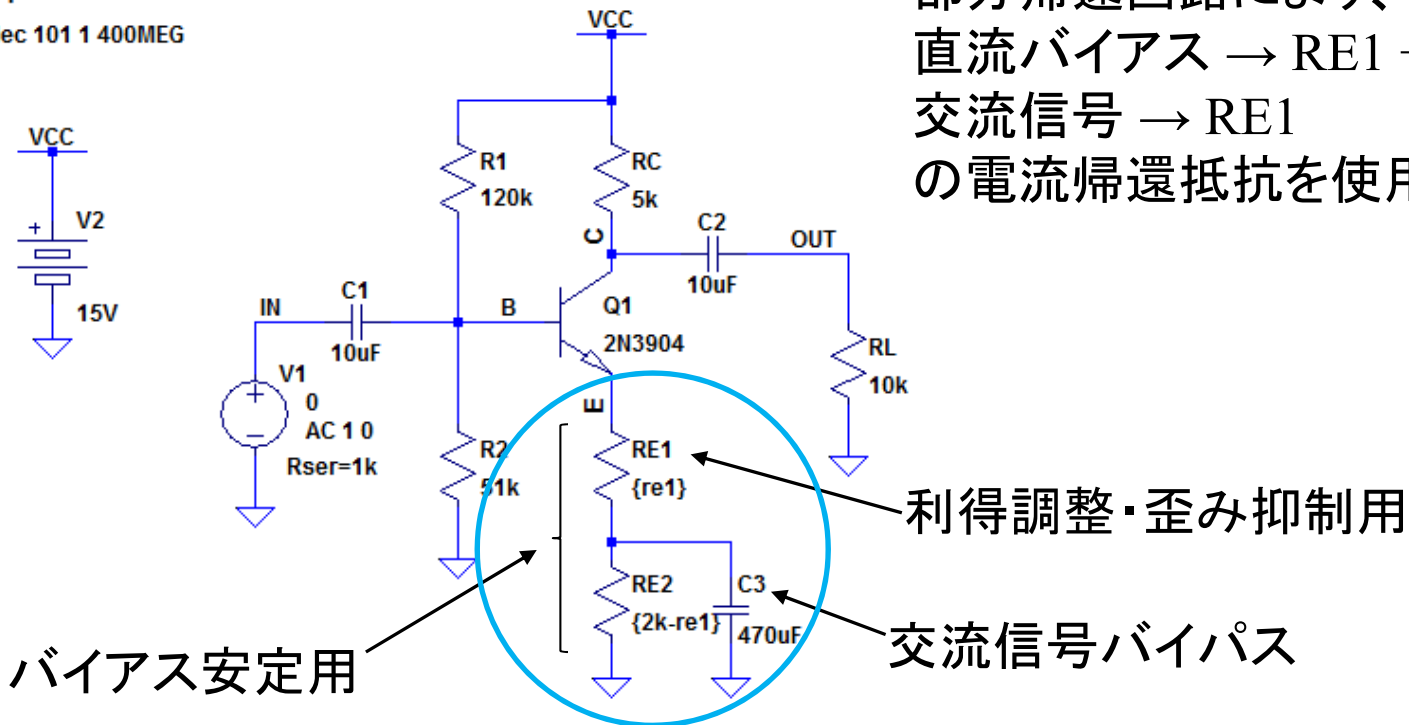
$$Gain = \frac{-A}{1 + AB} \quad \text{より} \quad B = -\frac{1}{Gain} - \frac{1}{A} = -\frac{1}{-10} - \frac{1}{215} = 0.0953$$

$$B = \frac{1 + h_{fe}}{h_{fe}} \frac{RE}{R_{out}} \quad \text{より} \quad RE = \frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}} R_{out} B \cong 300\Omega$$

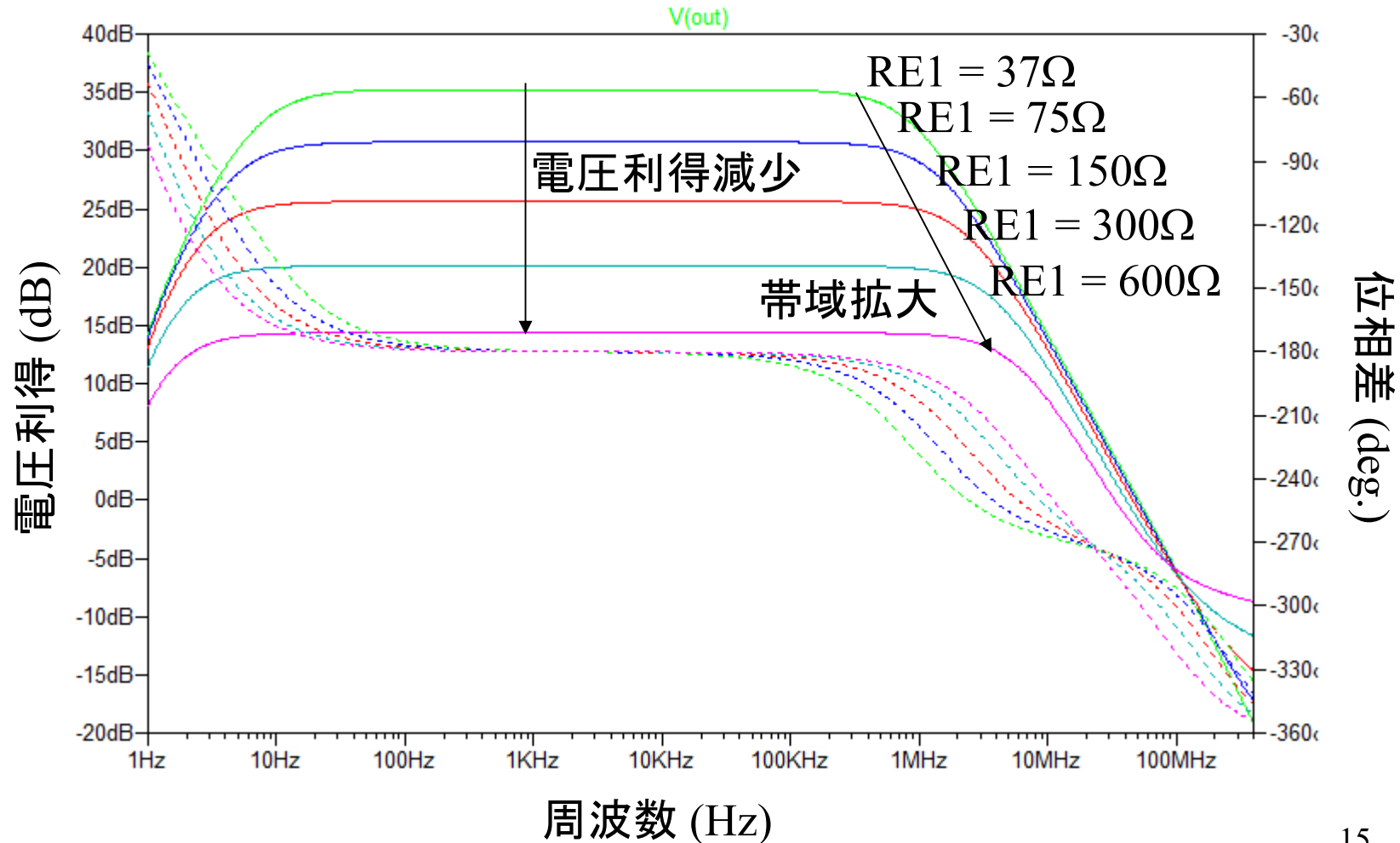
部分帰還

- 交流信号の電圧利得 -10倍 → $RE = 300\Omega$
- 直流バイアスの安定性 → $RE = 2k\Omega$ (4.4節参照)

.step param re1 list 37 75 150 300 600
.ac dec 101 1 400MEG



NFBエミッタ増幅回路の周波数特性



定量的な歪みの評価法

- 回路シミュレータの .four コマンドを使用する(下記参照)。

```
.option plotwinsize=0  
.tran 0 3m 0 100n  
.four 1k V(OUT)
```

↑
入力周波数

↑
歪み測定する波形

← シミュレーション結果データの圧縮をしない。
← 歪み率計算にはTransient解析が必要。計算ステップを十分細かくしないと正確に歪み率が計算できない(ここでは、100ns)。また、過渡応答を避けるため、Time to start saving data の設定が必要な場合もある(ここでは0sでよい)。

.four コマンドにより、9次までのフーリエ級数成分と全高調波歪 (THD = Total Harmonic Distortion) が算出される。

結果は、回路図をクリック→メニュー View - SPICE Error Log で見ることができる。

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots}}{V_1}, \quad V_n : n\text{次のフーリエ係数}$$

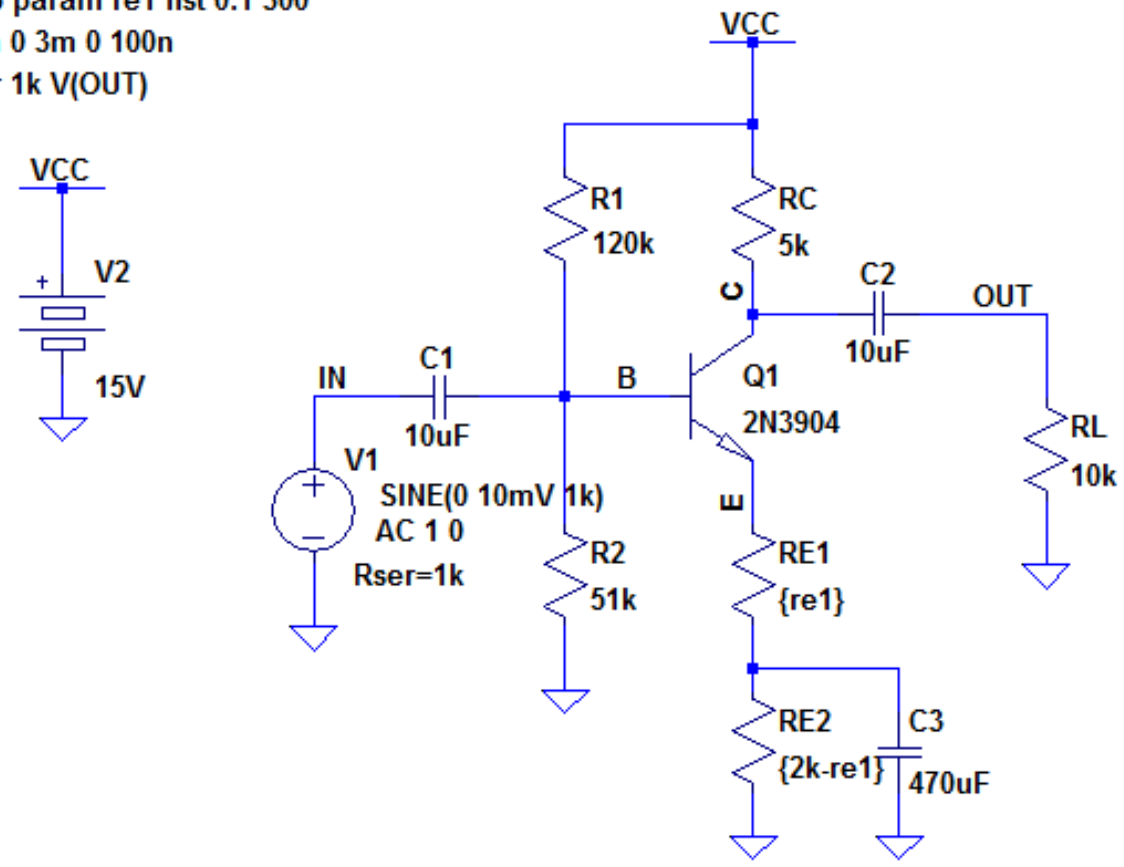
課題5.3

1. 次ページの回路についてAC解析を行い、 $RE1 = 0.1\Omega$ (NFBなし), 300Ω (NFBあり)の電圧増幅率と周波数帯域(BW)を求めよ
 - .AC 命令を追加すること
2. 同じ回路についてTransient解析を行い、 $RE1 = 0.1\Omega$ (NFBなし), 300Ω (NFBあり)の波形をレポートに添付せよ
3. .fourコマンドを用いて、 $RE1 = 0.1\Omega$ (NFBなし), 300Ω (NFBあり)の場合の出力波形について、全高調波歪を算出せよ

評価項目	NFBなし	NFBあり	条件
電圧増幅率(dB)			周波数 = 1kHz
帯域幅(MHz)			
全高調波歪(%)			入力周波数 = 1kHz 入力信号の振幅=10mV

課題5. 3の回路

```
.option plotwinsize=0  
.step param re1 list 0.1 300  
.tran 0 3m 0 100n  
.four 1k V(OUT)
```

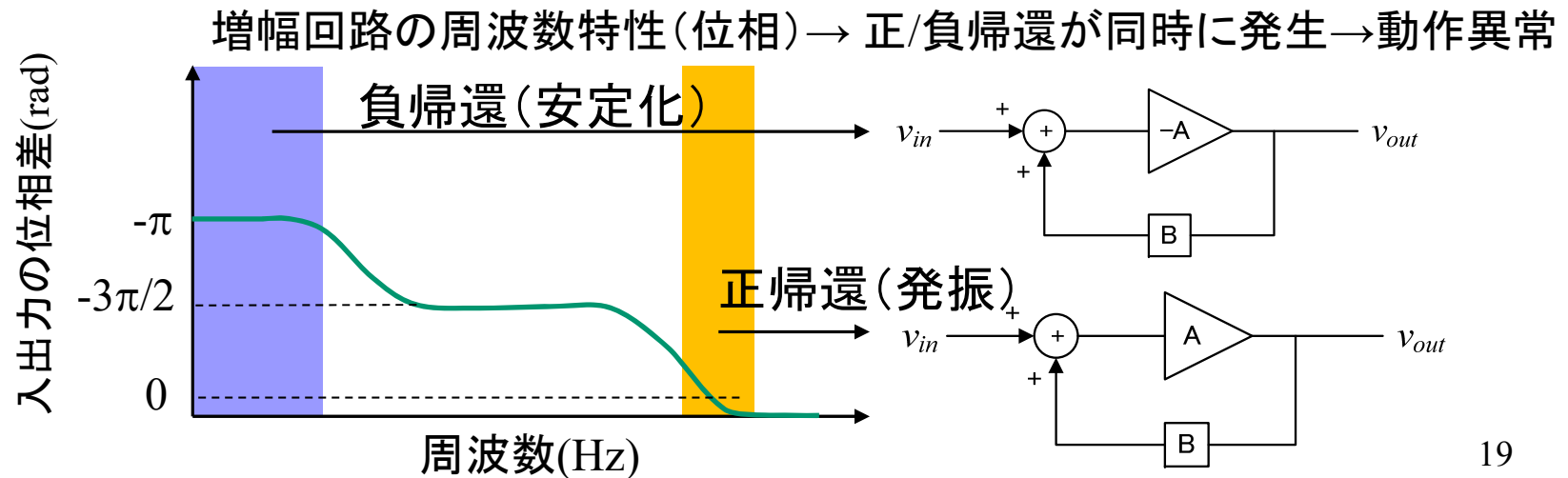


フィードバックの弊害

増幅回路にNFBを加えることで、増幅回路の利得を決定したり、さらに、色々な機能を作り出せるが、下記の問題を起こす可能性もある。

- 予期しない不安定化(定常状態になるまでに時間がかかる)
- 予期しない発振(入力していないのに出力が出てしまう)

回路システムの安定性については、3年生のデジタル電子回路または大学院で詳しく学ぶが、**入力信号より大きな信号を正帰還(Positive Feedback)すると、不安定化や発振が起こることを覚えておこう。**



5.3節のまとめ

- フィードバック
 - ループゲイン $AB \geq 0$ (正帰還)
 - メモリや発振回路などの機能を実現
 - ループゲイン $AB < 0$ (負帰還)
 - 回路の安定化や特性改善
- 負帰還(NFB)の効能
 - 利得の安定化
 - 帯域の拡大
 - 誤差の抑制
 - 入出カインピーダンスの変更
- エミッタフォロワのNFB
 - 部分帰還
- 歪みの評価
 - .fourコマンドによるフーリエ級数成分と全高調波歪のシミュレーション