

# 発振を利用したアナログフィルタの テスト・調整

群馬大学 工学部電気電子工学科  
高橋 洋介 林 海軍 小林 春夫  
小室 貴紀 高井 伸和

## 発表内容

1. 研究背景と目的
2. 提案回路
3. 題材に利用したアクティブフィルタ
4. 提案する発振によるテスト方法
  - ①AGC(自動利得制御)
  - ②バンドパス出力の帰還による発振
  - ③ローパス出力の帰還による発振
  - ④ハイパス出力の帰還による発振
5. 結果
6. まとめ

## 発表内容

- 1. 研究背景と目的**
- 2. 提案回路**
- 3. 題材に利用したアクティブフィルタ**
- 4. 提案する発振によるテスト方法**
  - ① AGC(自動利得制御)**
  - ② バンドパス出力の帰還による発振**
  - ③ ローパス出力の帰還による発振**
  - ④ ハイパス出力の帰還による発振**
- 5. 結果**
- 6. まとめ**

## 研究背景と目的

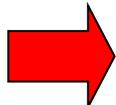
- **SoCのアナログ回路部の  
テスト容易化技術の確立**
- **連続時間アナログフィルタを題材**

## 研究背景と目的

- 連続時間フィルタは携帯電話の送受信器で重要なコンポーネント



製造上のばらつきがある

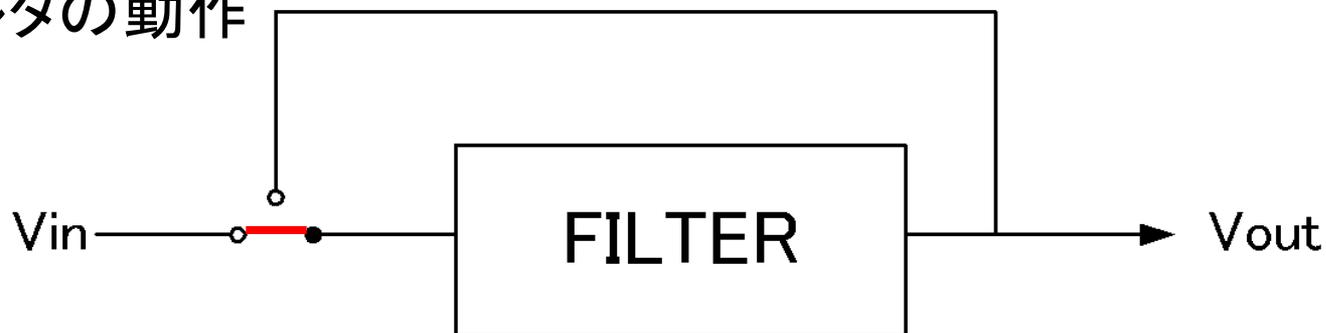
- フィルタを簡単にテストする
- テストのための回路を簡単な構成で行う
- 発振を利用する  周波数カウンタによってデジタル的計測

## 発表内容

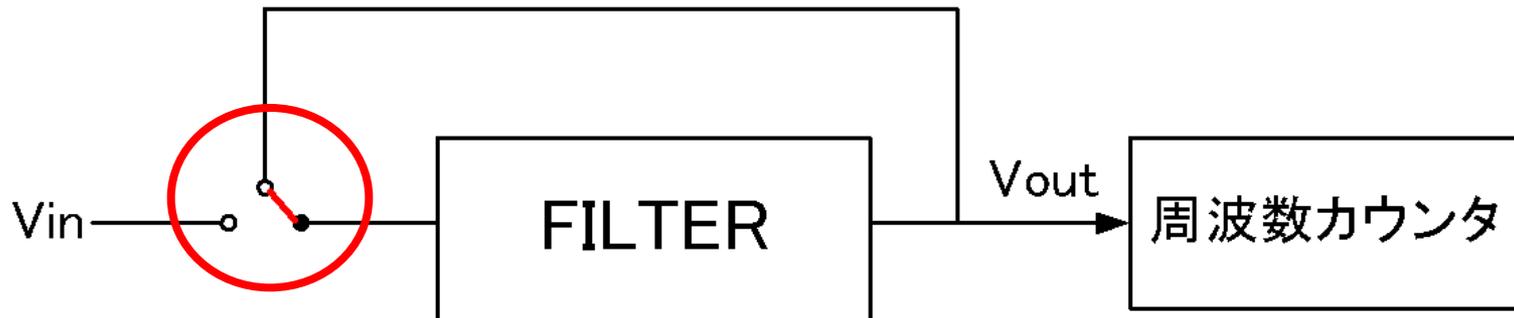
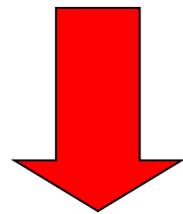
1. 研究背景と目的
2. **提案回路**
3. 題材に利用したアクティブフィルタ
4. 提案する発振によるテスト方法
  - ① **AGC**(自動利得制御)
  - ② バンドパス出力の帰還による発振
  - ③ ローパス出力の帰還による発振
  - ④ ハイパス出力の帰還による発振
5. 結果
6. まとめ

## 提案回路

通常のフィルタの動作



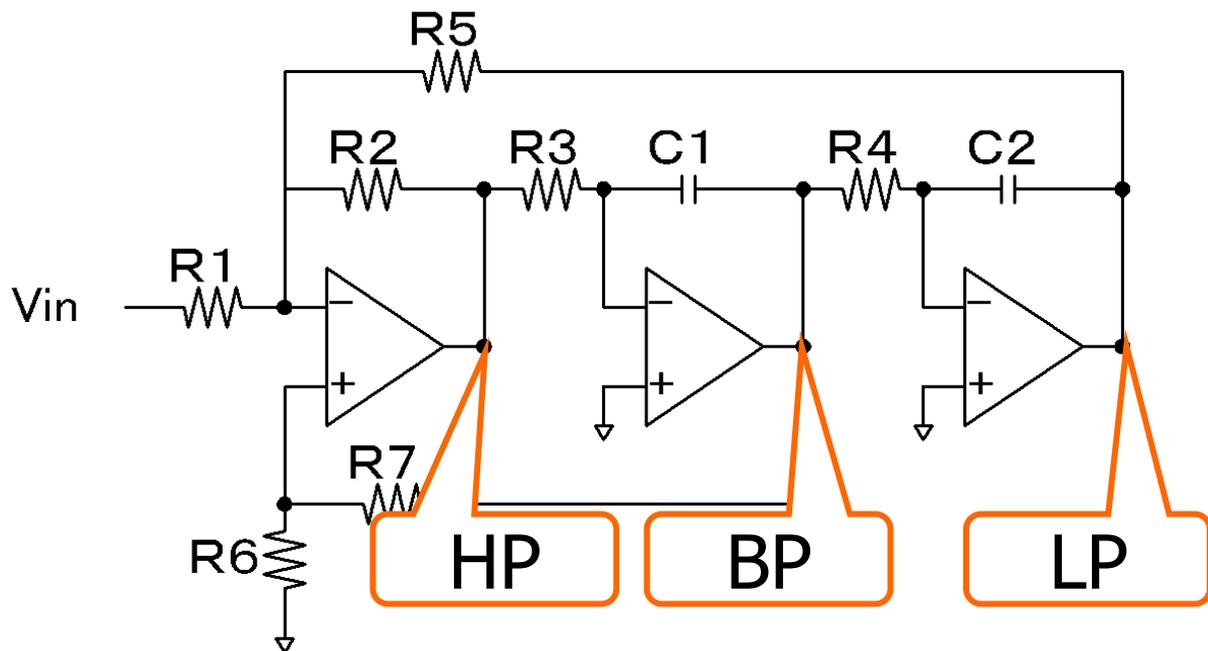
テストモードでの動作



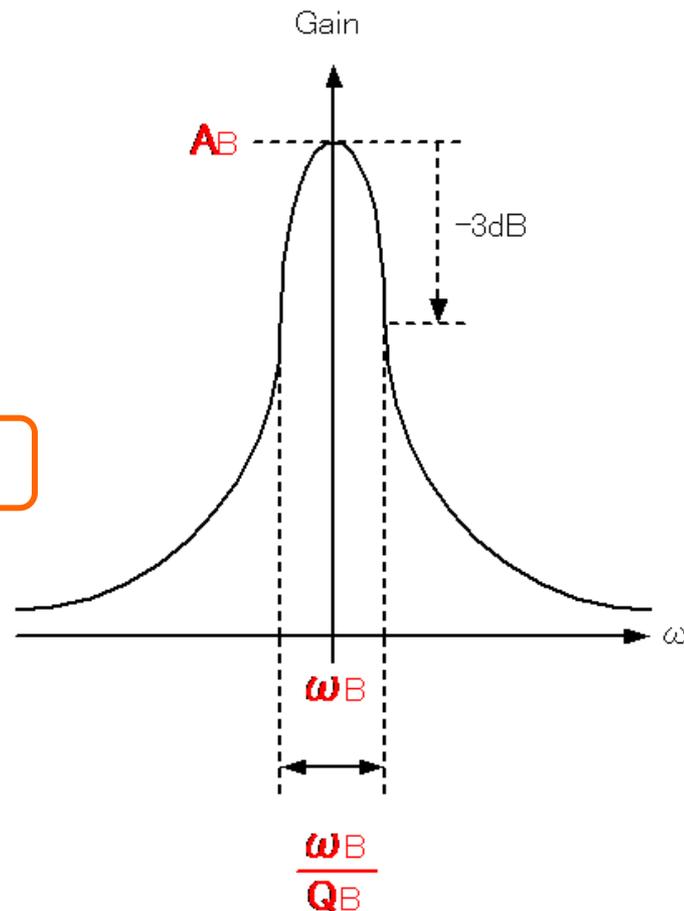
## 発表内容

1. 研究背景と目的
2. 提案回路
3. 題材に利用したアクティブフィルタ
4. 提案する発振によるテスト方法
  - ①AGC(自動利得制御)
  - ②バンドパス出力の帰還による発振
  - ③ローパス出力の帰還による発振
  - ④ハイパス出力の帰還による発振
5. 結果
6. まとめ

# 状態変数型アクティブフィルタ



バンドパス出力を使用



- 素子値偏差が小さい
- 出力が3つ得られる
- 素子感度が小さい
- オペアンプを3つ使用する

## バンドパスフィルタの伝達関数

$$H_B(s) = \frac{A_B \frac{\omega_B}{Q_B} S}{S^2 + \frac{\omega_B}{Q_B} S + \omega_B^2}$$

$$\omega_B^2 = \frac{R2}{R3R4R5C1C2}$$

$$Q_B = \left(1 + \frac{R7}{R6}\right) \left[ \frac{1}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R5}} \right] \left[ \frac{R3C1}{R2R4R5C2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$A_B = \frac{1 + \frac{R7}{R6}}{R1 \left[ \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R5} \right]}$$

中心周波数	<b>795Hz</b>
Q値	<b>4.33</b>
ゲインA	<b>4.33</b>

OpampはuA741

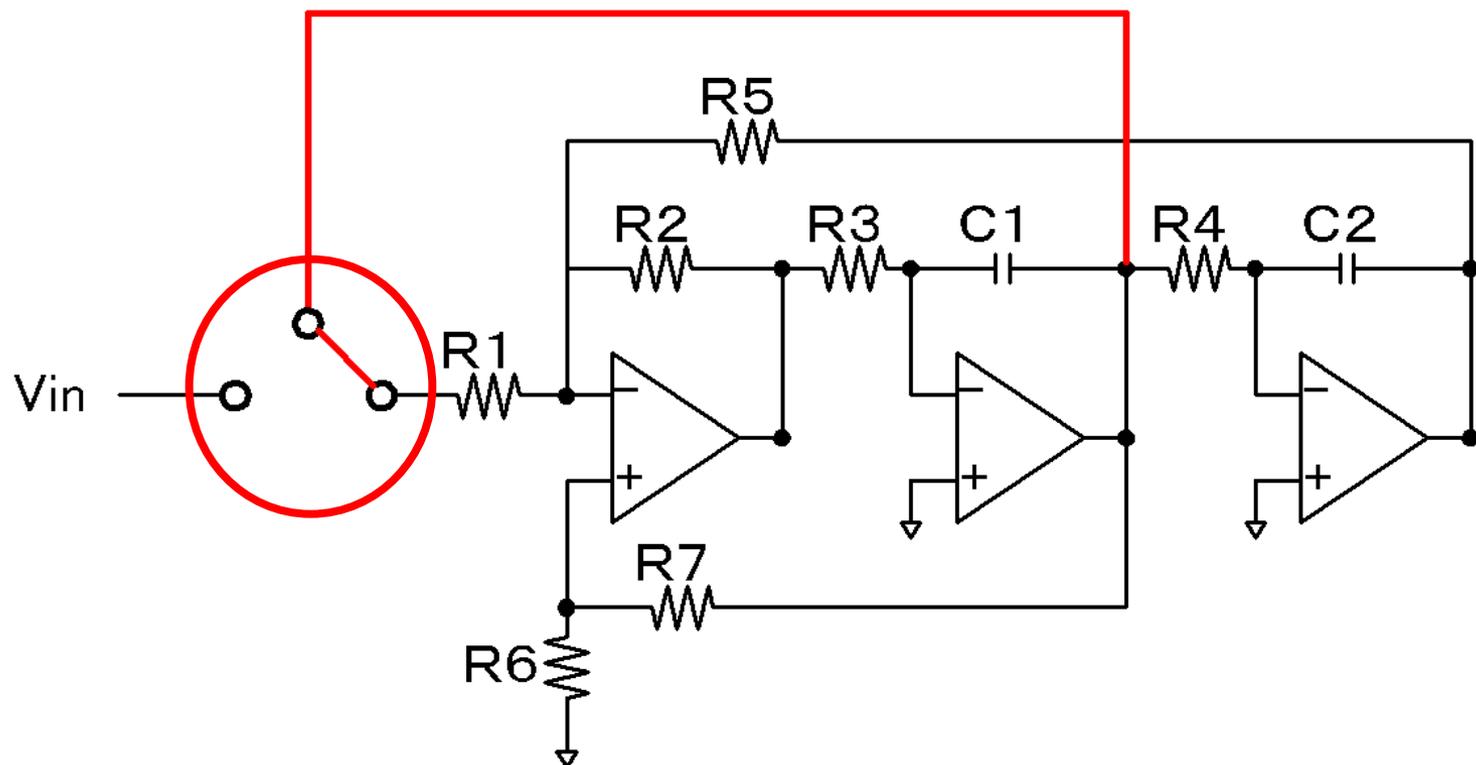
# 問題設定

- 状態変数型バンドパスフィルタを使用する
- 複数の発振周波数モードを設ける
- **BPF**の $\omega_B$ 、 $Q_B$ 、 $A_B$ の値を推定する方法を確立する

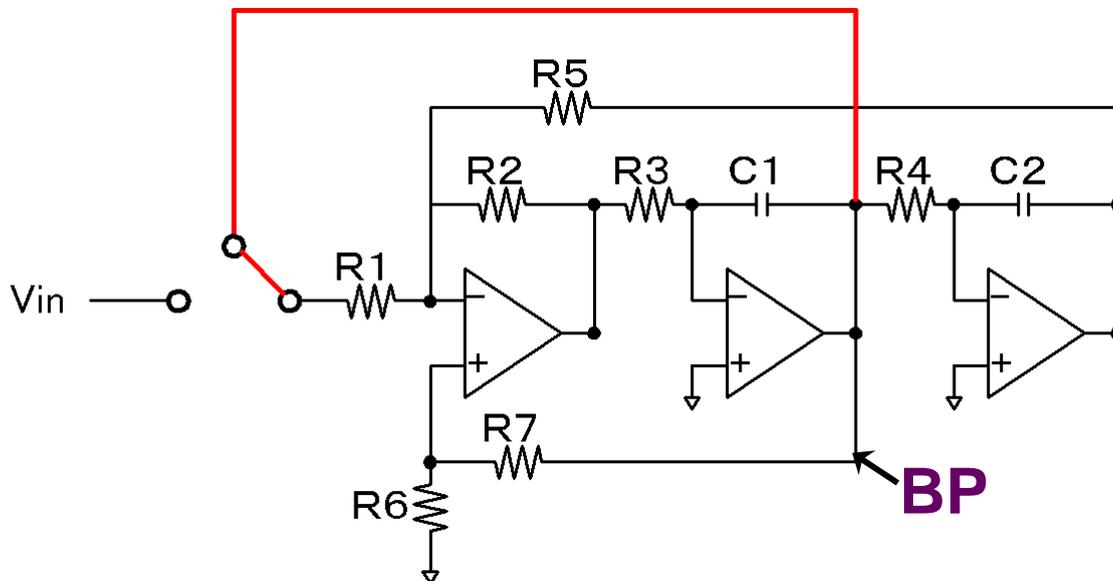
## 発表内容

1. 研究背景と目的
2. 提案回路
3. 題材に利用したアクティブフィルタ
4. 提案する発振によるテスト方法
  - ① **AGC**(自動利得制御)
  - ② バンドパス出力の帰還による発振
  - ③ ローパス出力の帰還による発振
  - ④ ハイパス出力の帰還による発振
5. 結果
6. まとめ

## バンドパスフィルタの帰還による発振



# バンドパス帰還における発振波形



$$BP(t) = \frac{A_B \cdot BP(0)}{\sqrt{4Q_B^2 - \left(1 - A_B \cdot \frac{R2}{R1}\right)^2}} e^{\frac{\omega_B}{2Q_B} \left(A_B \frac{R2}{R1} - 1\right) t} \sin \omega t$$

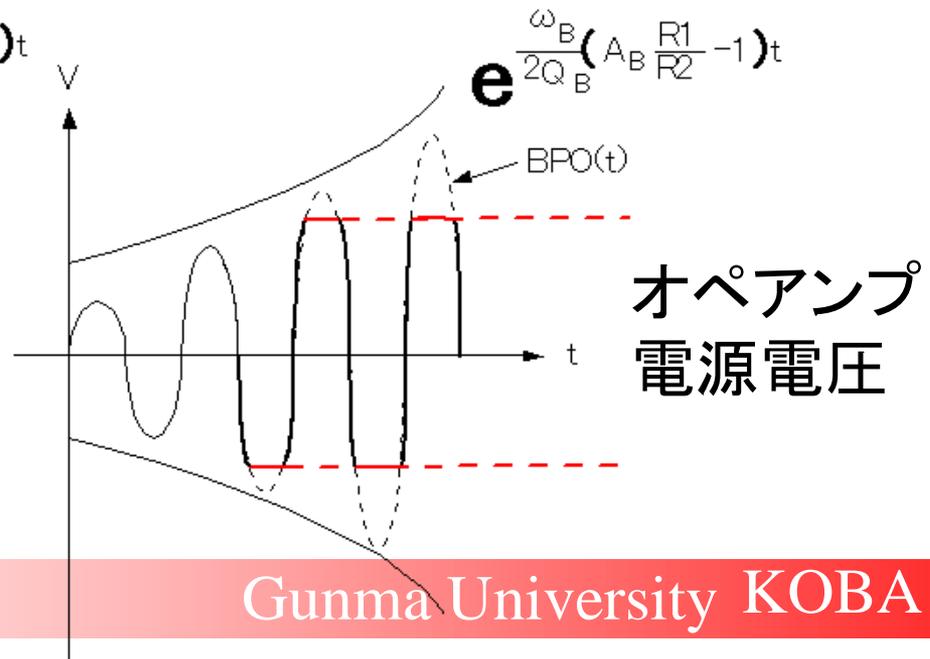
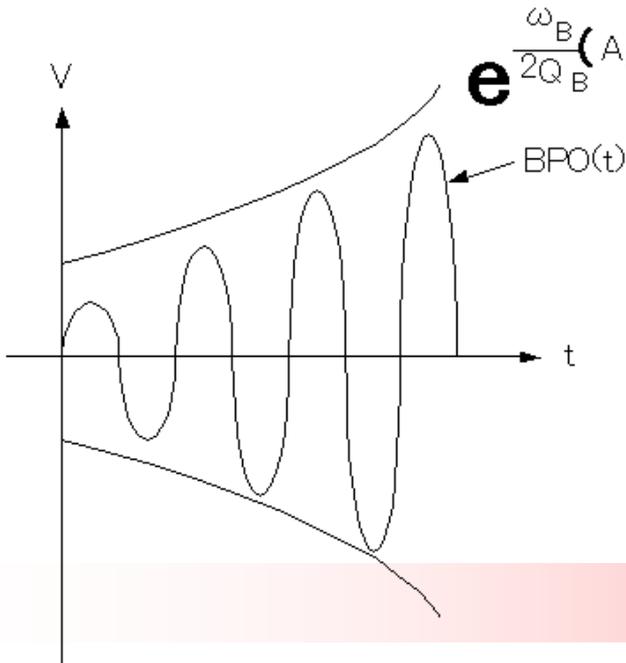
$$\omega_{osc} = \frac{\omega_B}{2Q_B} \sqrt{4Q_B^2 - \left(1 - A_B \cdot \frac{R2}{R1}\right)^2}$$

# 発振波形解析

$$A_B \cdot \frac{R1}{R2} > 1$$

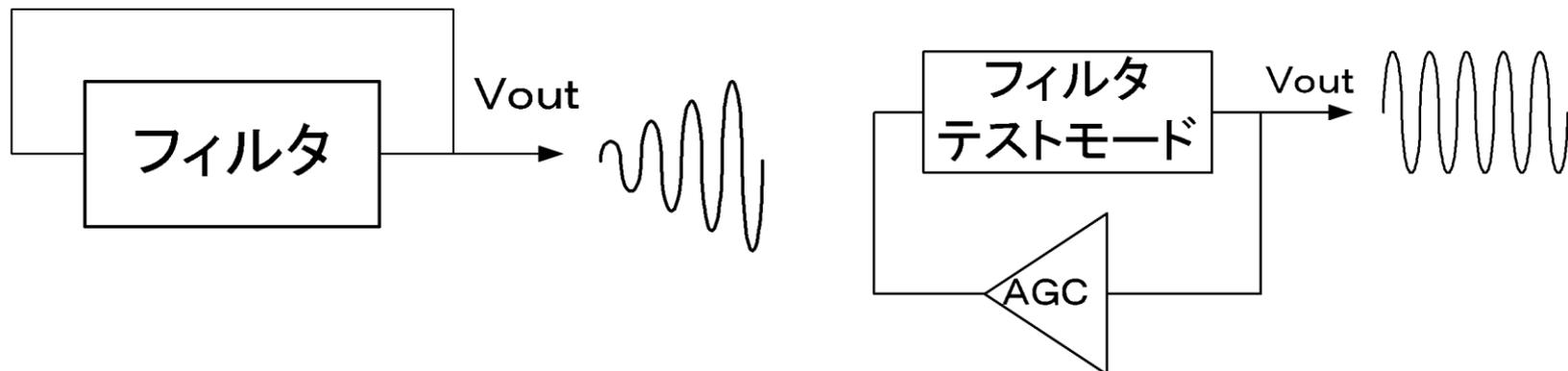
$$BP(t) = \frac{A_B \cdot BP(0)}{\sqrt{4Q_B^2 - \left(1 - A_B \cdot \frac{R2}{R1}\right)^2}} e^{\frac{\omega_B}{2Q_B} \left(A_B \frac{R2}{R1} - 1\right) t} \sin \omega t$$

$$\omega_{osc} = \frac{\omega_B}{2Q_B} \sqrt{4Q_B^2 - \left(1 - A_B \cdot \frac{R2}{R1}\right)^2}$$

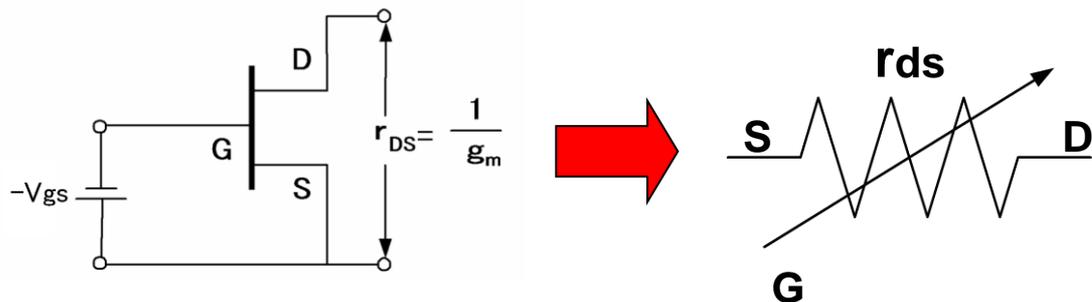


# AGC(Automatic Gain Control)

AGC(Automatic Gain Control)を用いて発振振幅を制御

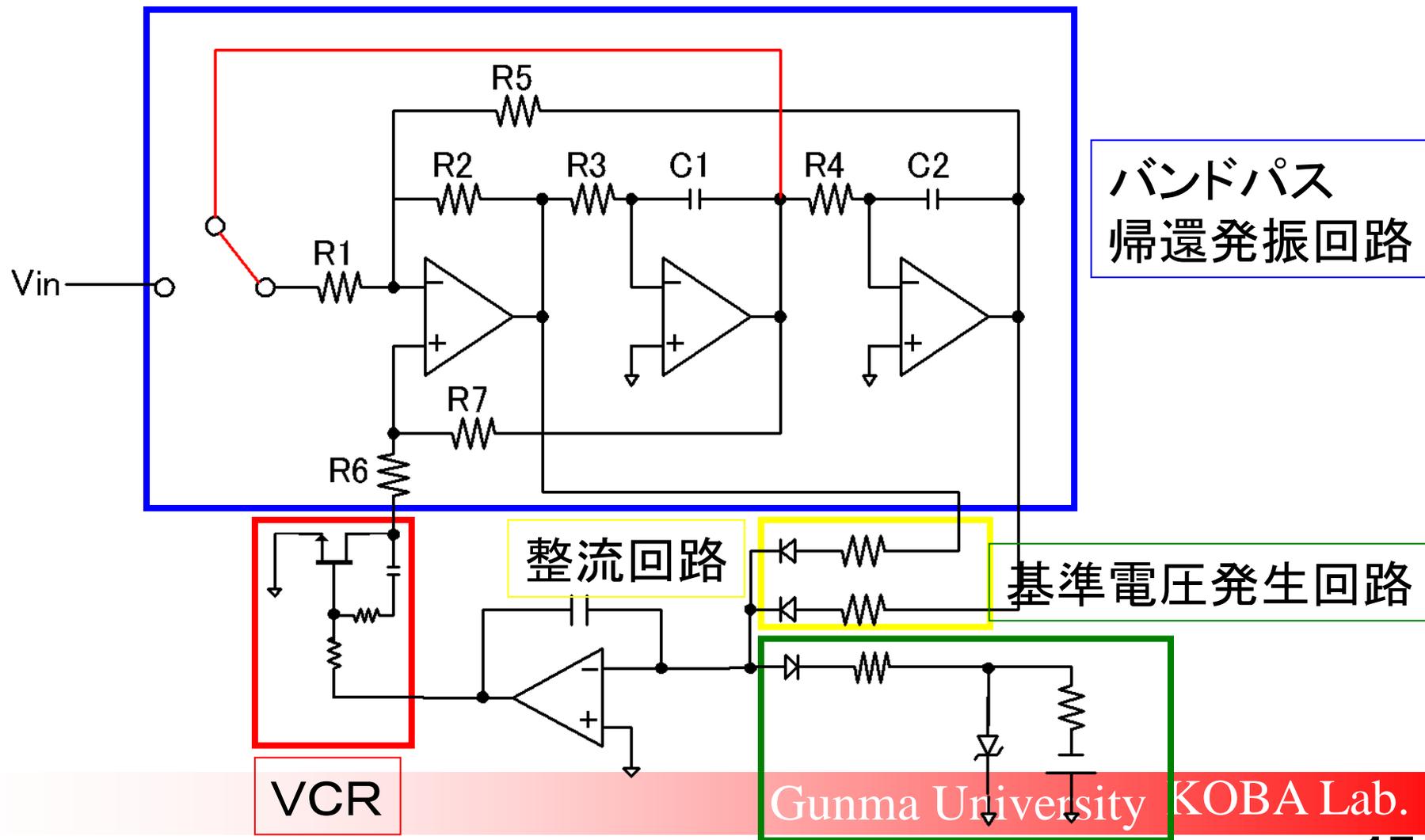


AGCの中で使用されるVCR(Voltage Control Resistor)

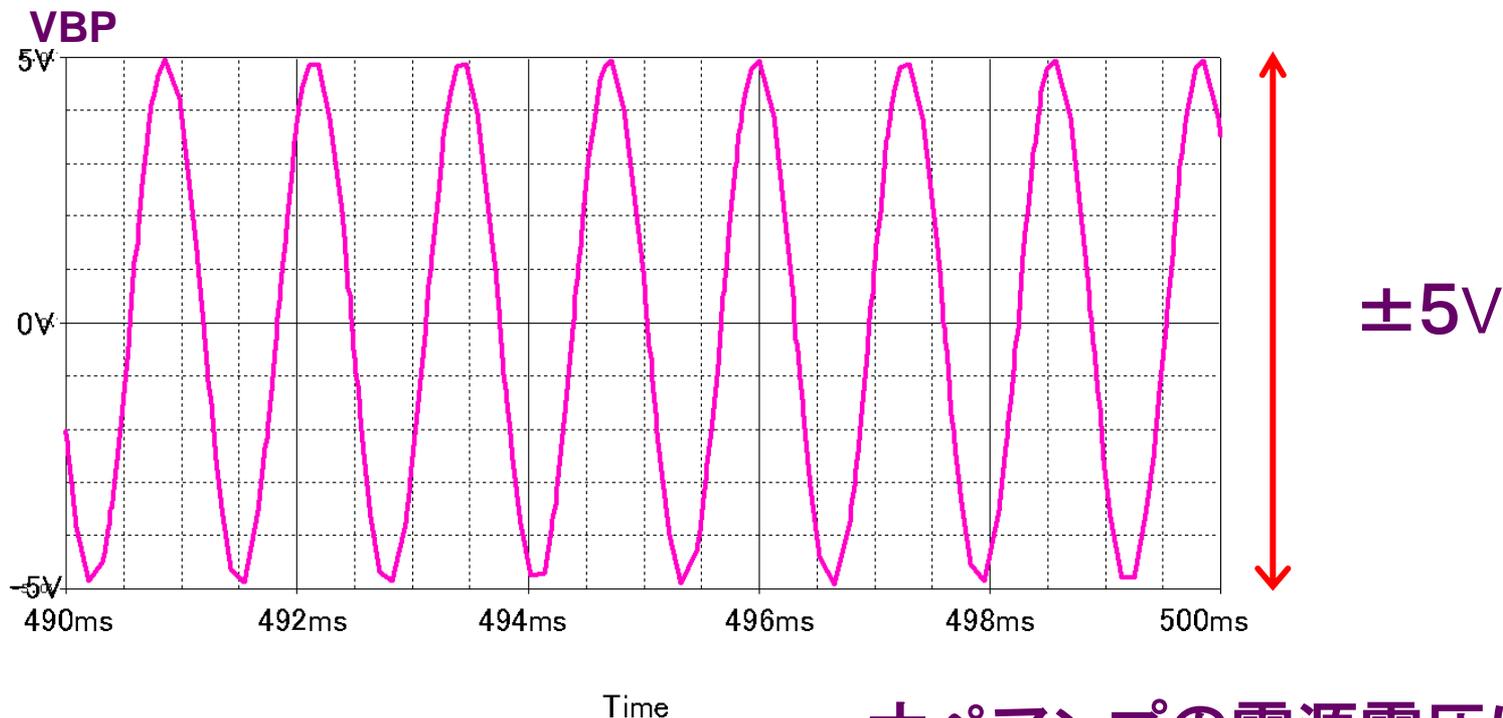


$-V_{gs}$ によって抵抗値が変化

# AGC(自動利得制御)を用いた発振回路



## AGCを用いた発振回路の過渡解析結果



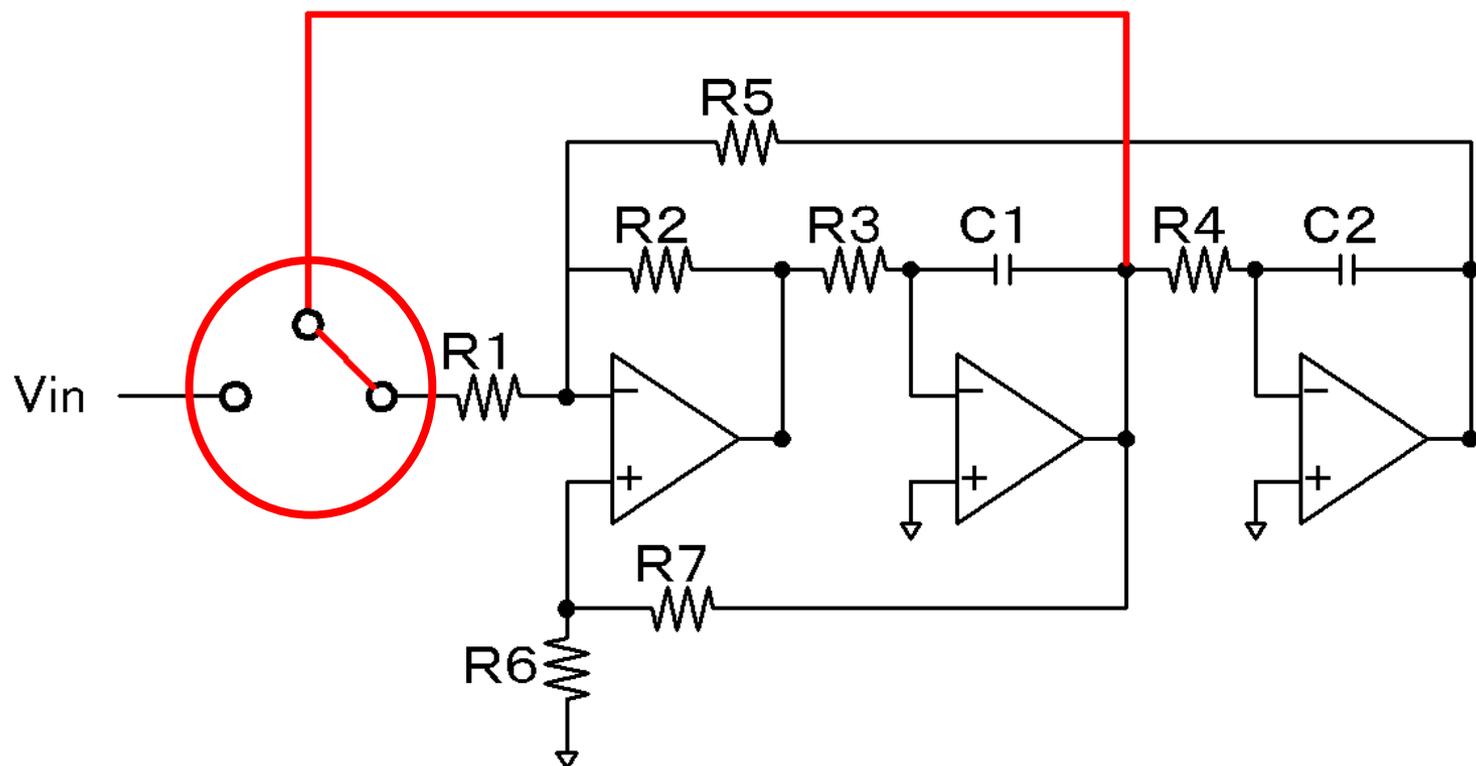
オペアンプの電源電圧は±15V

発振周波数 $\omega_{osc1}$ はフィルタの中心周波数 $\omega_B$ で発振

## 発表内容

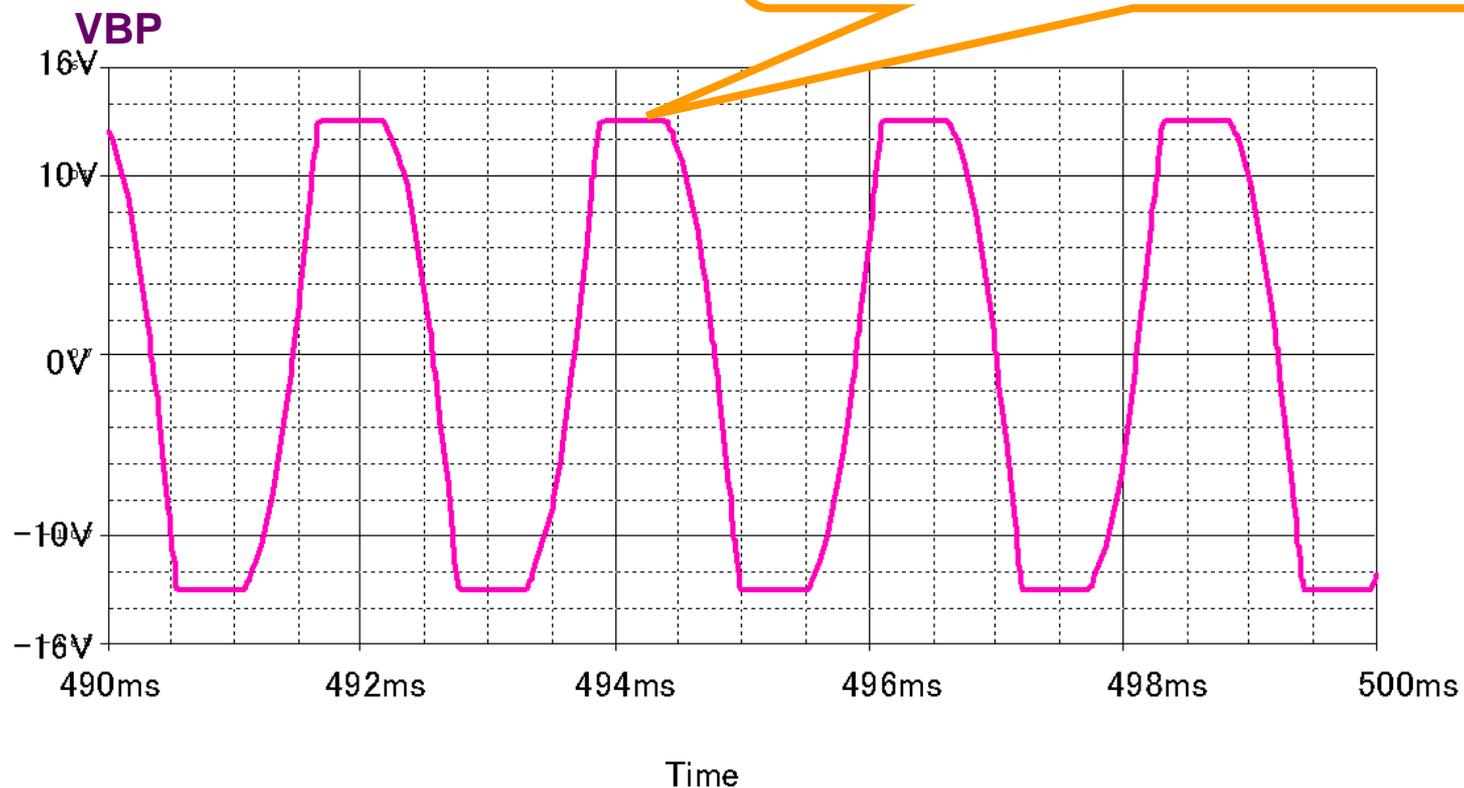
1. 研究背景と目的
2. 提案回路
3. 題材に利用したアクティブフィルタ
4. 提案する発振によるテスト方法
  - ①AGC(自動利得制御)
  - ②バンドパス出力の帰還による発振
  - ③ローパス出力の帰還による発振
  - ④ハイパス出力の帰還による発振
5. 結果
6. まとめ

## バンドパスフィルタの帰還による発振



## バンドパス帰還での過渡解析結果

オペアンプの電源電圧で飽和



## フィルタ特性の計測

フィルタのパラメタ  周波数 $\omega_B$ 、 $Q_B$ 値、利得 $A_B$

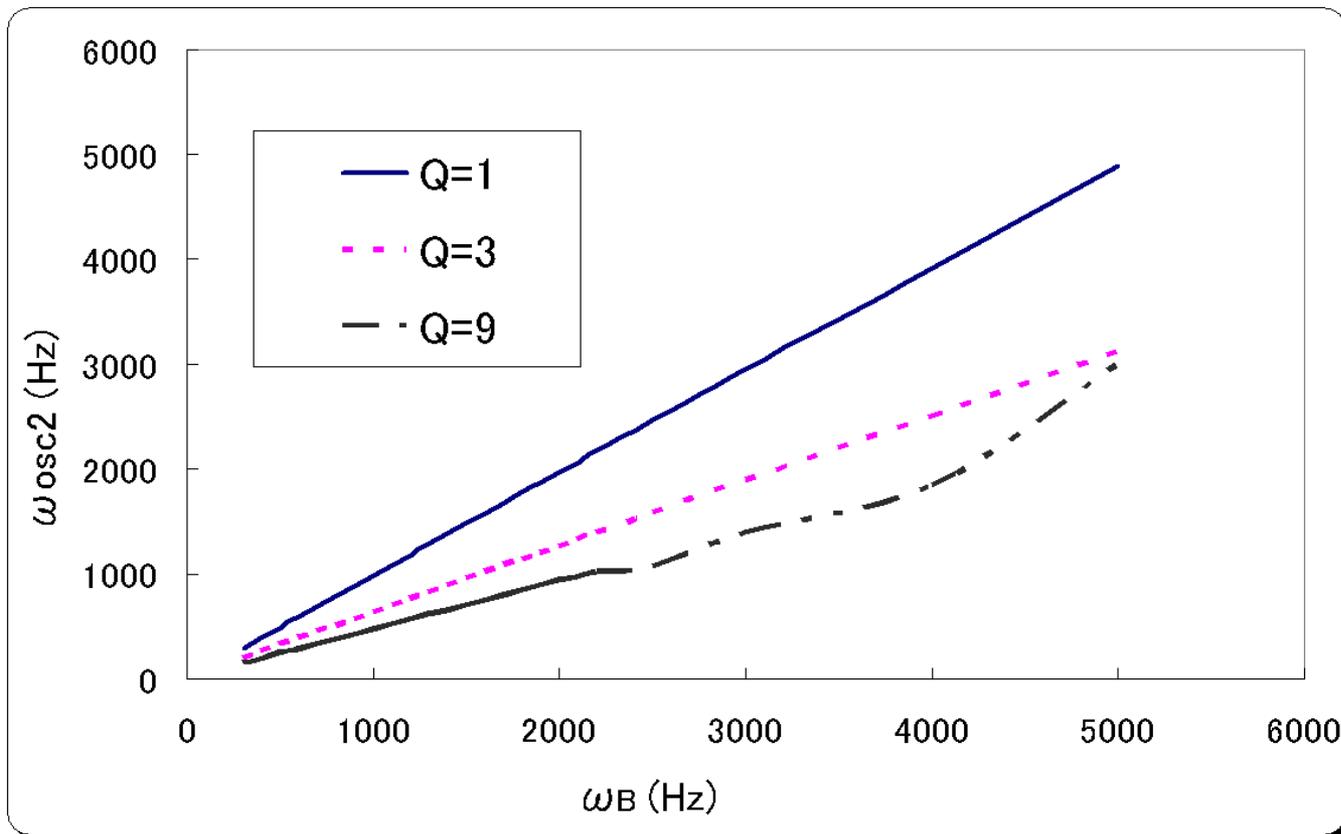
各パラメタを変化させたときの発振周波数の変化を計測

● $A_B \rightarrow$ 固定  $Q_B \rightarrow$ パラメタ  $\omega_B \rightarrow$ 可変

● $\omega_B \rightarrow$ 固定  $Q_B \rightarrow$ パラメタ  $A_B \rightarrow$ 可変

● $\omega_B \rightarrow$ 固定  $A_B$ 、電源電圧 $\rightarrow$ パラメタ  $Q_B \rightarrow$ 可変

**$A_B \rightarrow$  固定  $Q_B \rightarrow$  パラメタ**  
 **$\omega_B \rightarrow$  可変 発振周波数  $\omega_{osc2}$  の変化**



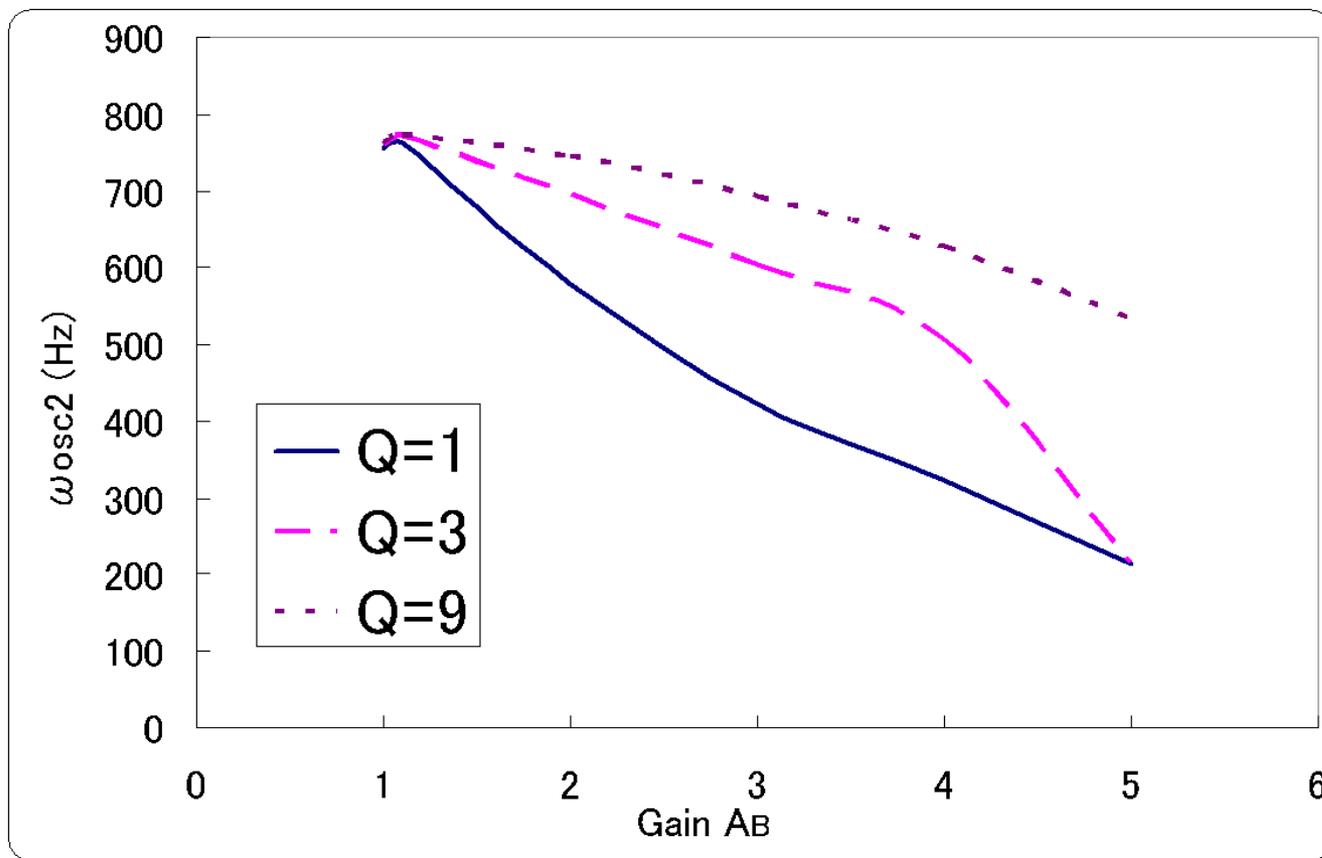
$\omega_B \rightarrow$  大

$\omega_{osc2} \rightarrow$  大

$Q_B \rightarrow$  大

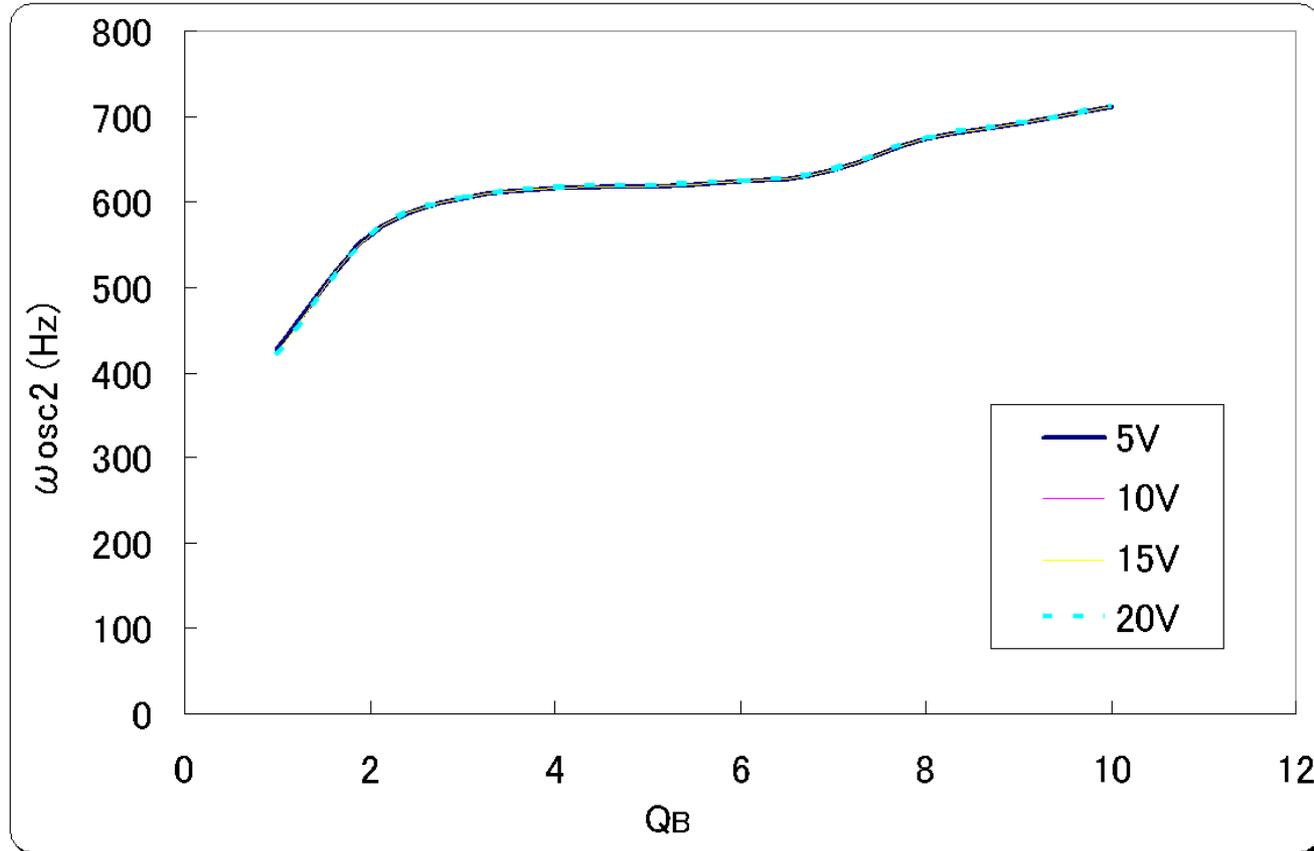
$\omega_{osc2} \rightarrow$  小

$\omega_B \rightarrow$  固定  $Q_B \rightarrow$  パラメタ  
 $A_B \rightarrow$  可変 発振周波数  $\omega_{osc2}$  の変化



$A_B \rightarrow$  大       $\omega_{osc2} \rightarrow$  小  
 $Q_B \rightarrow$  大       $\omega_{osc2} \rightarrow$  大

$\omega_B \rightarrow$  固定  $A_B$ 、電源電圧  $\rightarrow$  パラメタ  $Q_B \rightarrow$  可変  
 発振周波数  $\omega_{osc2}$  の変化



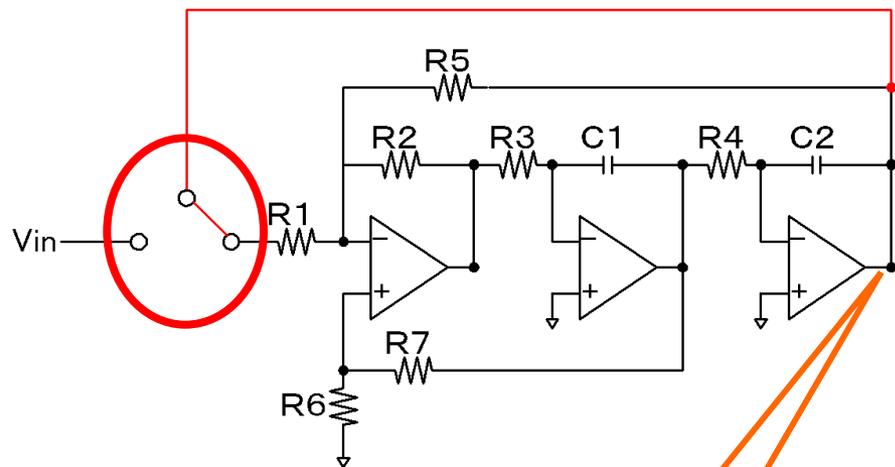
$Q_B \rightarrow$  大  $\omega_{osc2} \rightarrow$  大  
 $\omega_{osc2} \rightarrow$  電源電圧に依存しない

## 発表内容

1. 研究背景と目的
2. 提案回路
3. 題材に利用したアクティブフィルタ
4. 提案する発振によるテスト方法
  - ①AGC(自動利得制御)
  - ②バンドパス出力の帰還による発振
  - ③ローパス出力の帰還による発振
  - ④ハイパス出力の帰還による発振
5. 結果
6. まとめ

# ローパス出力から帰還させて発振させる方法

## LPFの伝達関数



$$H(s) = \frac{A_{LP} \omega_0^2}{S^2 + \frac{\omega_B}{Q_B} S + \omega_B^2}$$

$$\omega_B^2 = \frac{R2}{R3R4R5C1C2}$$

$$Q_B = \left(1 + \frac{R7}{R6}\right) \left[ \frac{1}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R5}} \right] \left[ \frac{R3C1}{R2R4R5C2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$A_{LP} = \frac{R5}{R1}$$

LP

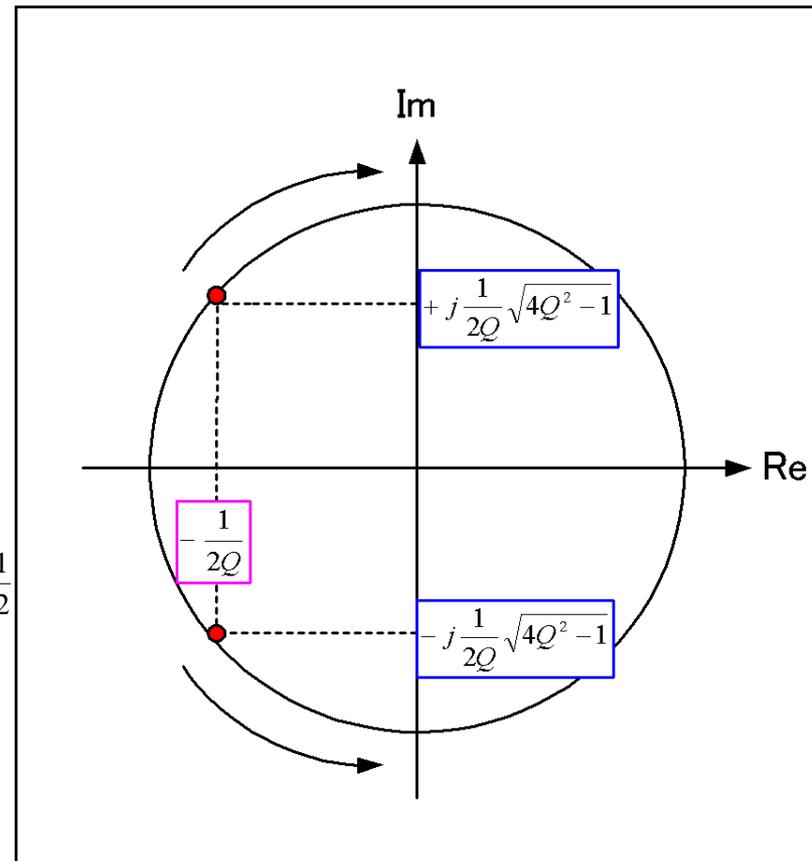
帰還させたときの伝達関数

$$H_L(s) = \frac{A_L \omega_L^2}{s^2 + \frac{\omega_L}{Q_L} s + \omega_L^2} = 0$$

$$\omega_L^2 = \frac{R2(R1+R5)}{R1R3R4R5C1C2}$$

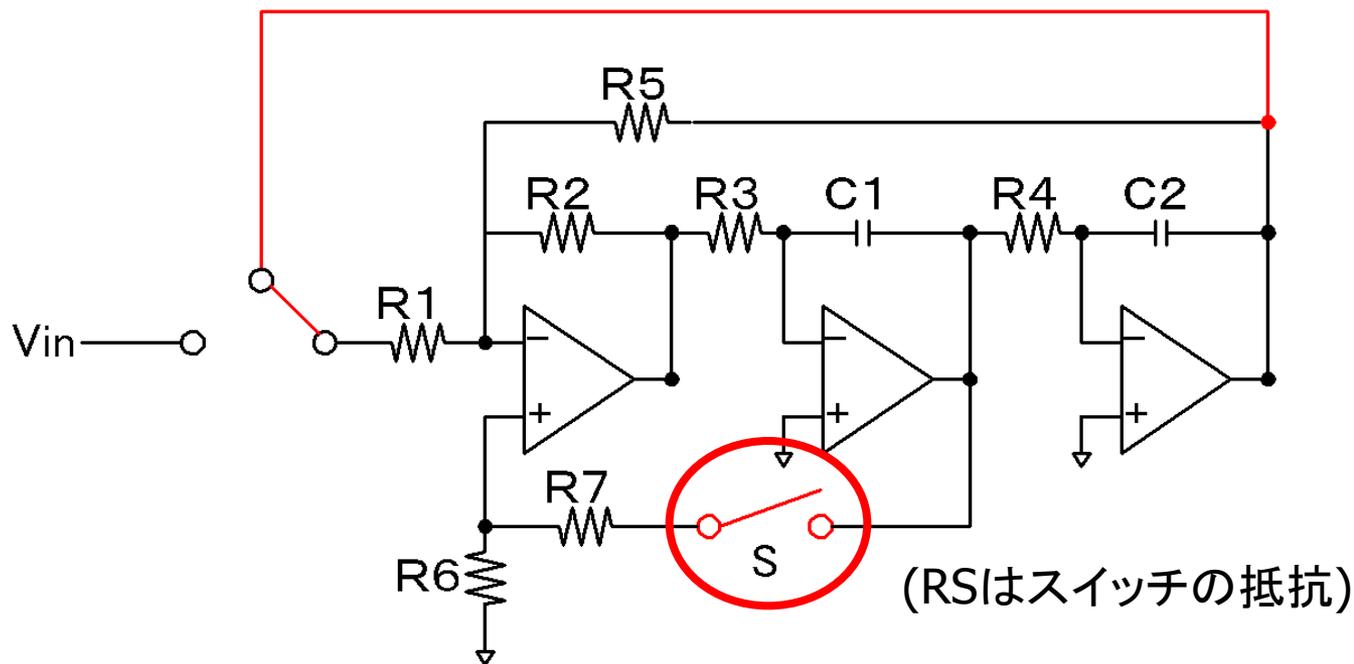
$$Q_L = \left(1 + \frac{R7}{R6}\right) \left[ \frac{1}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{R1+R5}{R1R5}} \right] \left[ \frac{R3(R1+R5)C1}{R1R4R5C2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$A_L = \frac{R5}{R1+R5}$$



$$\frac{1}{Q} = 0 \text{ つまり } Q \rightarrow \infty$$

提案する  $\frac{1}{Q} \rightarrow 0$  とする方法



$$Q'_L = \left( 1 + \frac{R7 + RS}{R6} \right) \left[ \frac{1}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{R1 + R5}{R1R5}} \right] \left[ \frac{R3(R1 + R5)C1}{R1R4R5C2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Sオープン

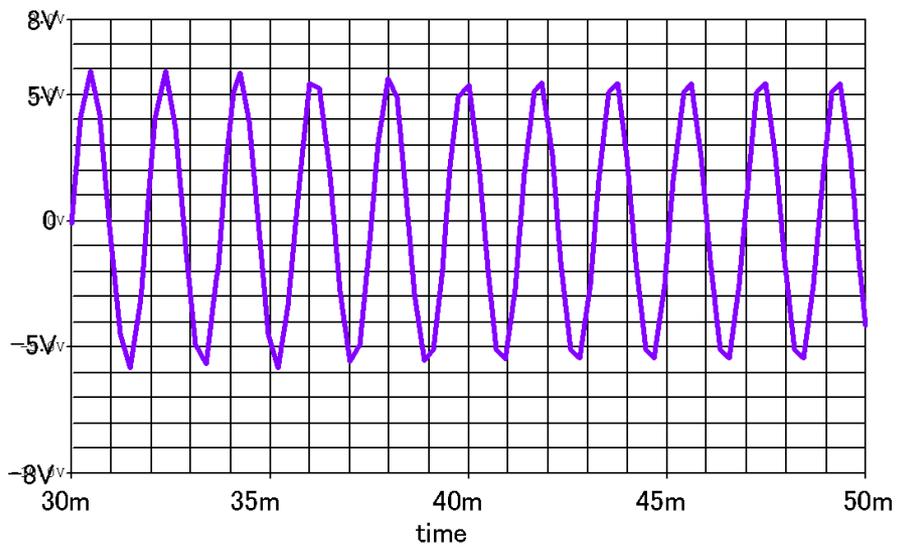


$RS \rightarrow \infty$

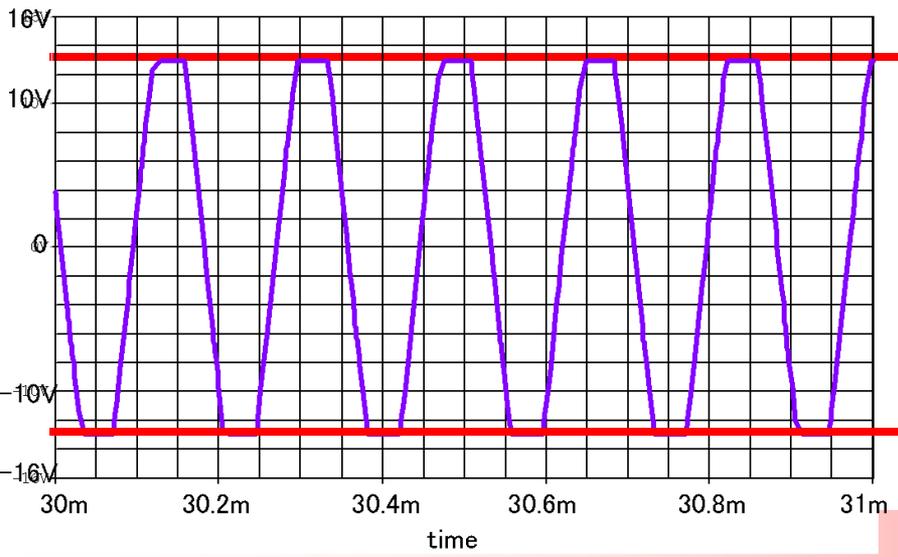
$Q \rightarrow \infty$

ローパス帰還による発振波形

$$\omega_L^2 = \frac{R2(R1 + R5)}{R1R3R4R5C1C2}$$



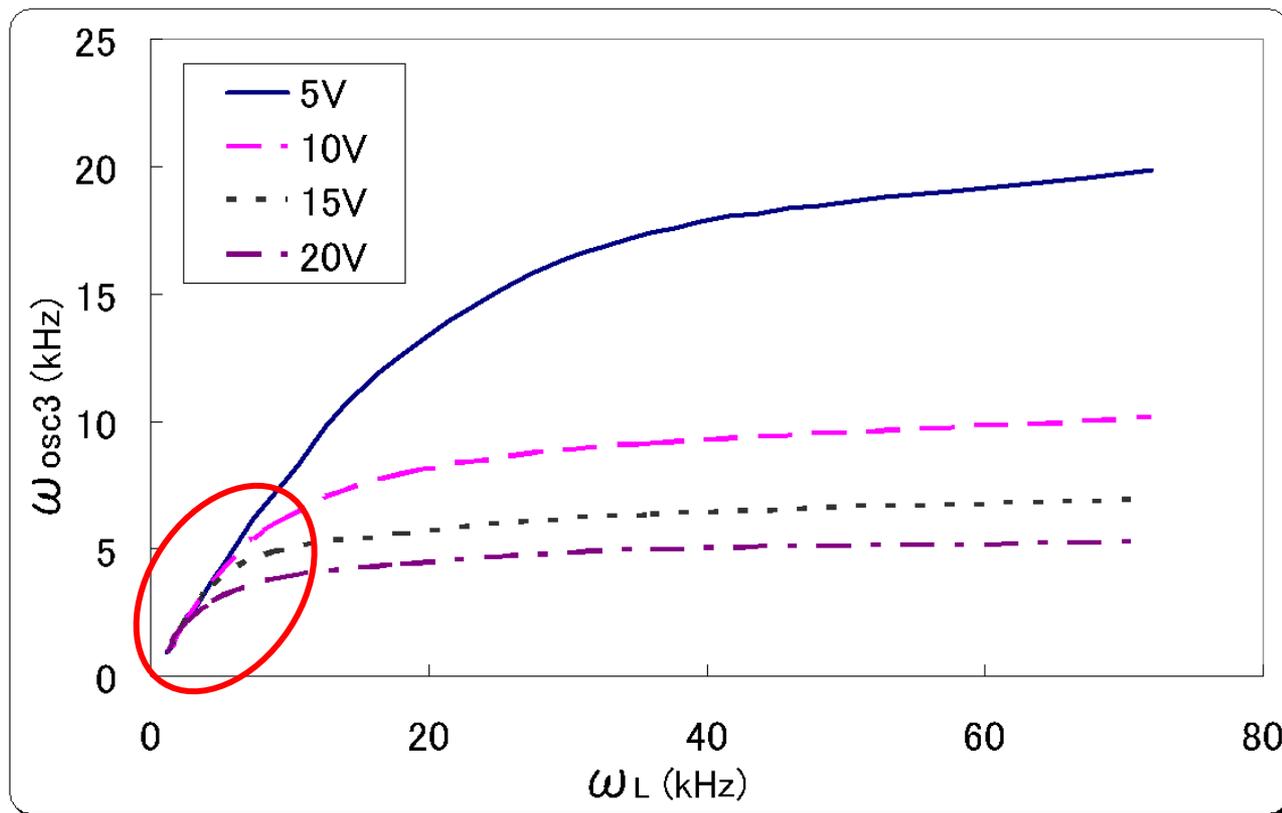
$\omega_L$  小



$\omega_L$  大

$V_{p-p}$  オペアンプ  
電源電圧

$\omega_L$ 可変のとき発振周波数 $\omega_{osc3}$ の変化



$\omega_L < \omega_B$   $\omega_{osc3} \rightarrow$  電源電圧依存しない

$\omega_L \rightarrow$  大  $\omega_{osc3} \rightarrow$  大

$\omega_L > \omega_B$   $\omega_{osc3} \rightarrow$  電源電圧依存

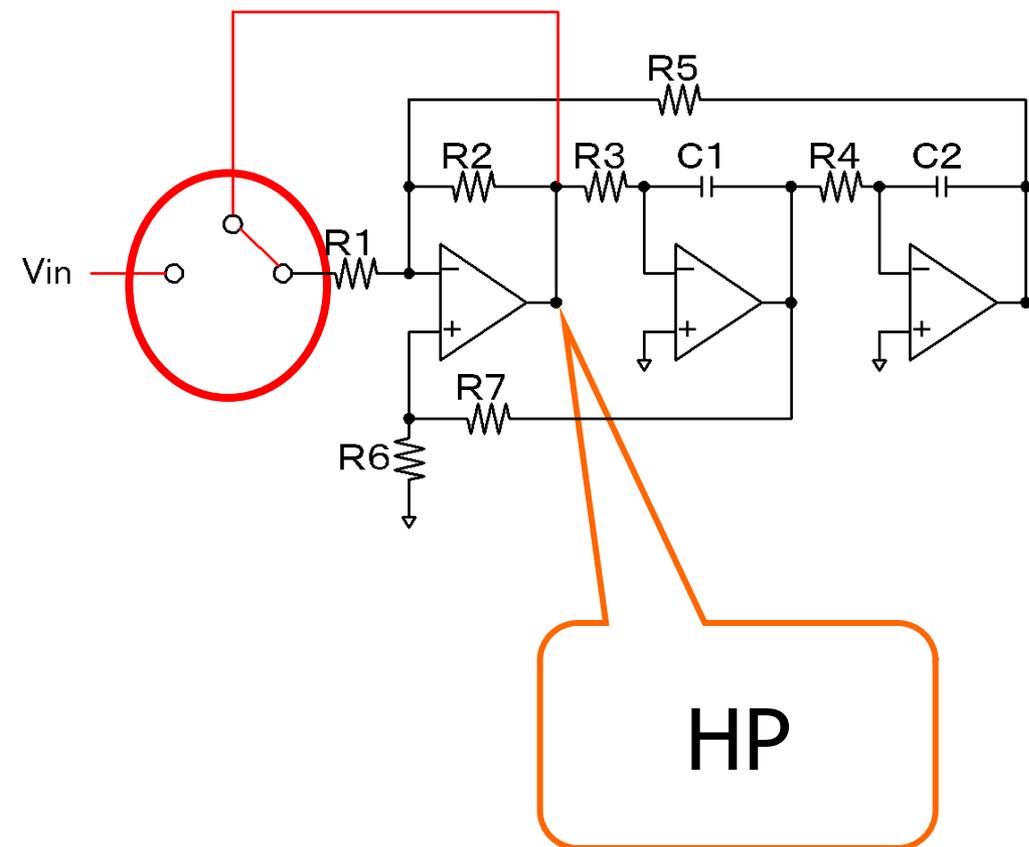
$\omega_{osc3} \rightarrow$  飽和

## 発表内容

1. 研究背景と目的
2. 提案回路
3. 題材に利用したアクティブフィルタ
4. 提案する発振によるテスト方法
  - ①AGC(自動利得制御)
  - ②バンドパス出力の帰還による発振
  - ③ローパス出力の帰還による発振
  - ④ハイパス出力の帰還による発振
5. 結果
6. まとめ

# ハイパス出力から帰還させて発振させる方法

## HPFの伝達関数



$$H(s) = \frac{A_{HP} S^2}{S^2 + \frac{\omega_B}{Q_B} S + \omega_B^2}$$

$$\omega_B^2 = \frac{R2}{R3R4R5C1C2}$$

$$Q_B = \left(1 + \frac{R7}{R6}\right) \left[ \frac{1}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R5}} \right] \left[ \frac{R3C1}{R2R4R5C2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$A_{HP} = \frac{R2}{R1}$$

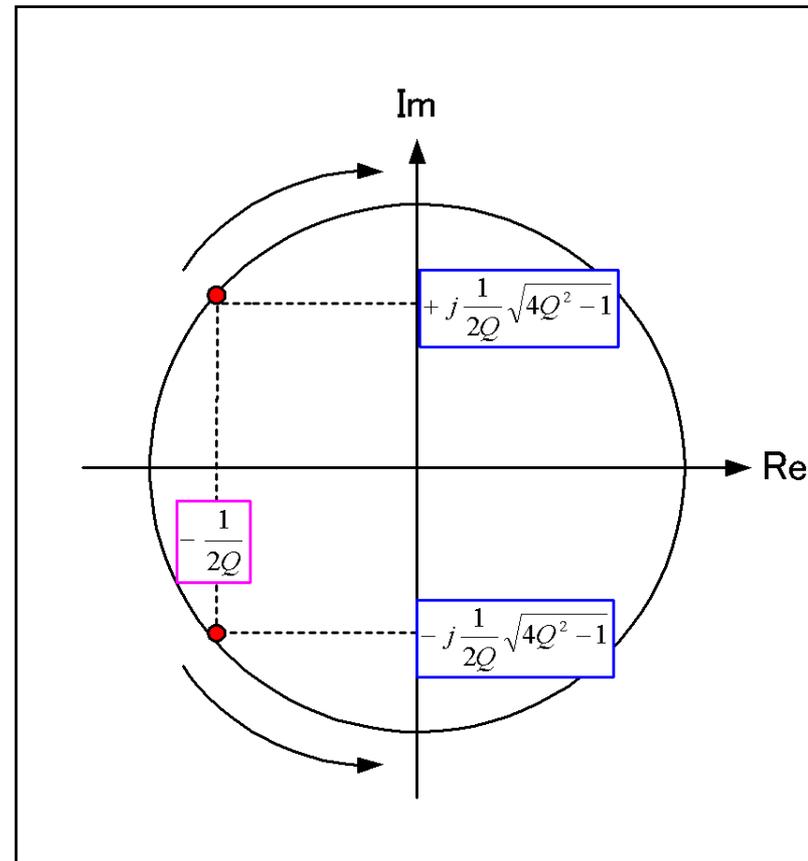
帰還させたときの伝達関数

$$H_{HOSC} = \frac{A_H S^2}{S^2 + \frac{\omega_H}{Q_H} S + \omega_H^2} = 0$$

$$\omega_H^2 = \frac{R1R2}{R3R4R5(R1+R2)C1C2}$$

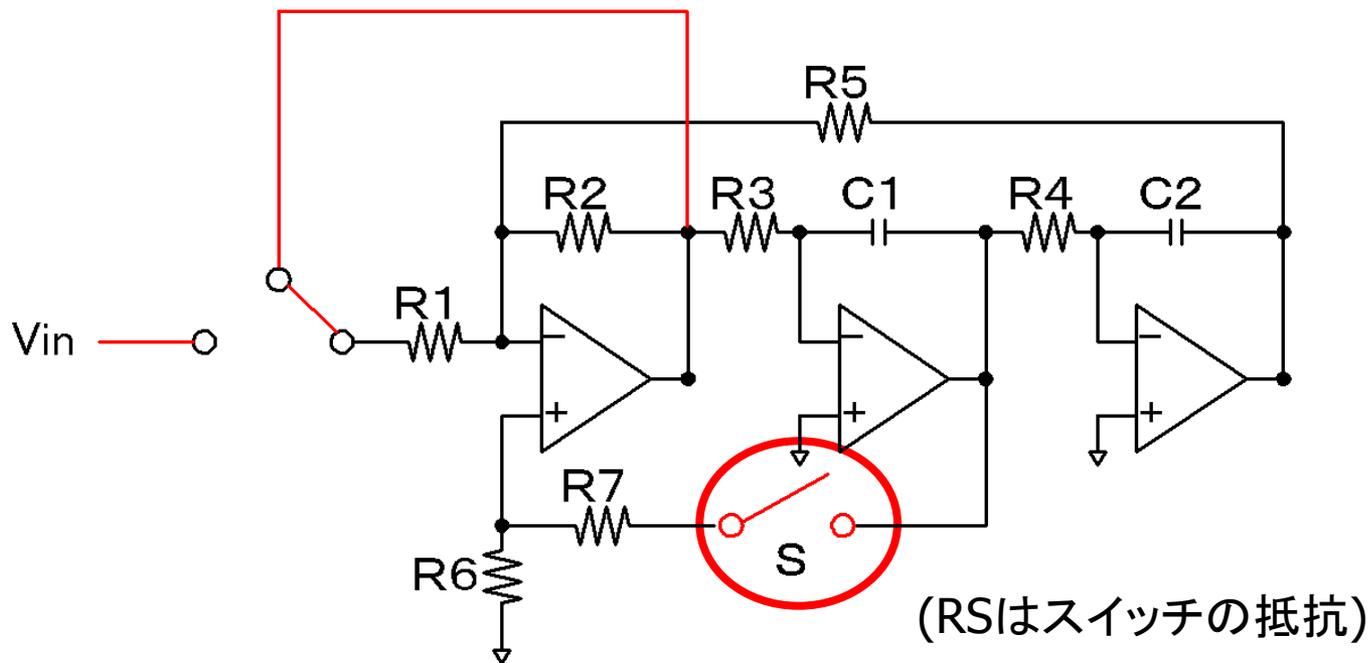
$$Q_H = \left(1 + \frac{R7}{R6}\right) \left[ \frac{1}{\frac{1}{R1} + \frac{R1+R2}{R1R2} + \frac{1}{R5}} \right] \left[ \frac{(R1+R2)R3C1}{R1R2R4R5C2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$A_H = \frac{R2}{R1+R2}$$



$$\frac{1}{Q} = 0 \text{ つまり } Q \rightarrow \infty$$

提案する  $\frac{1}{Q} \rightarrow 0$  とする方法



$$Q_H' = \left( 1 + \frac{R7 + RS}{R6} \right) \left[ \frac{1}{\frac{1}{R1} + \frac{R1 + R2}{R1R2} + \frac{1}{R5}} \right] \left[ \frac{(R1 + R2)R3C1}{R1R2R4R5C2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Sオープン

$$RS \rightarrow \infty$$

$$Q \rightarrow \infty$$

ハイパス帰還による発振波形

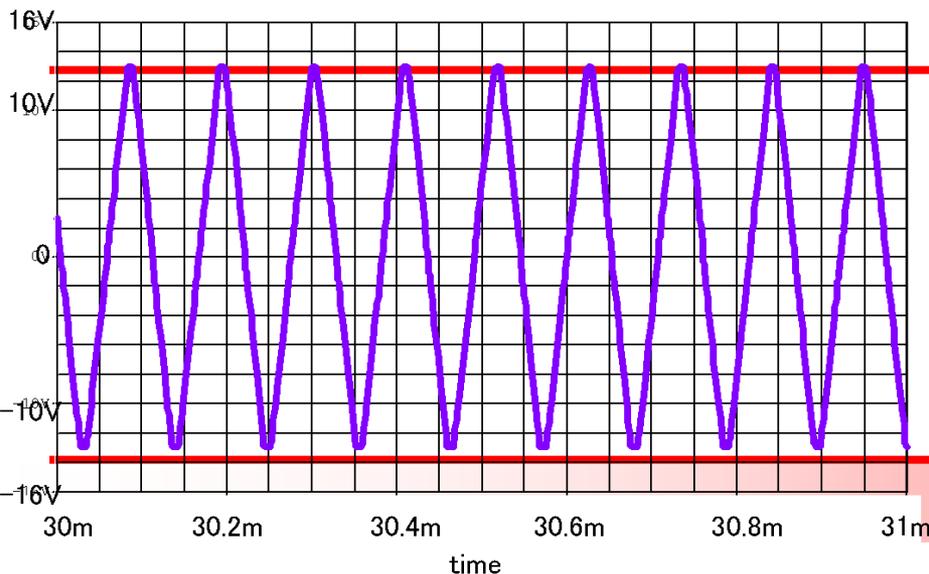
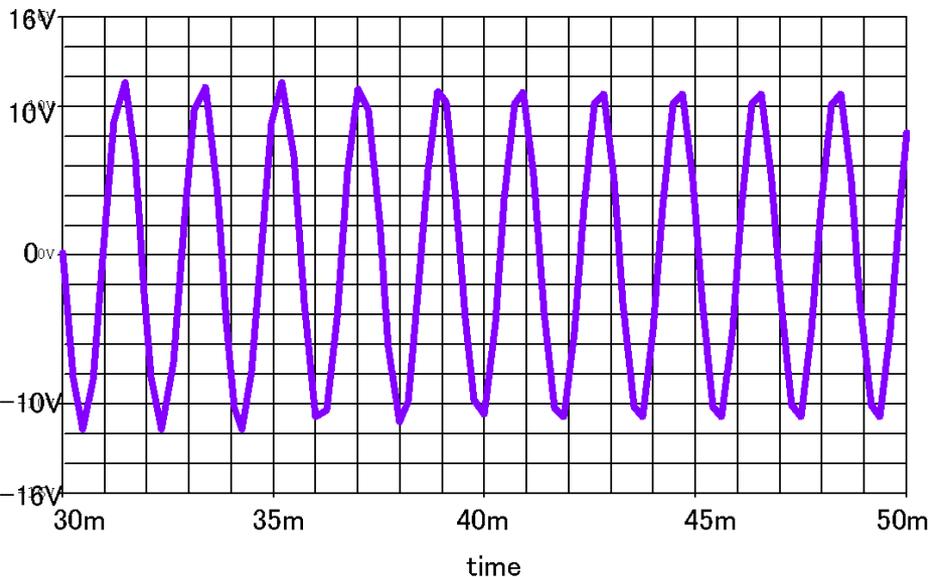
$$\omega_H^2 = \frac{R1R2}{R3R4R5(R1 + R2)C1C2}$$

$\omega_H$  小

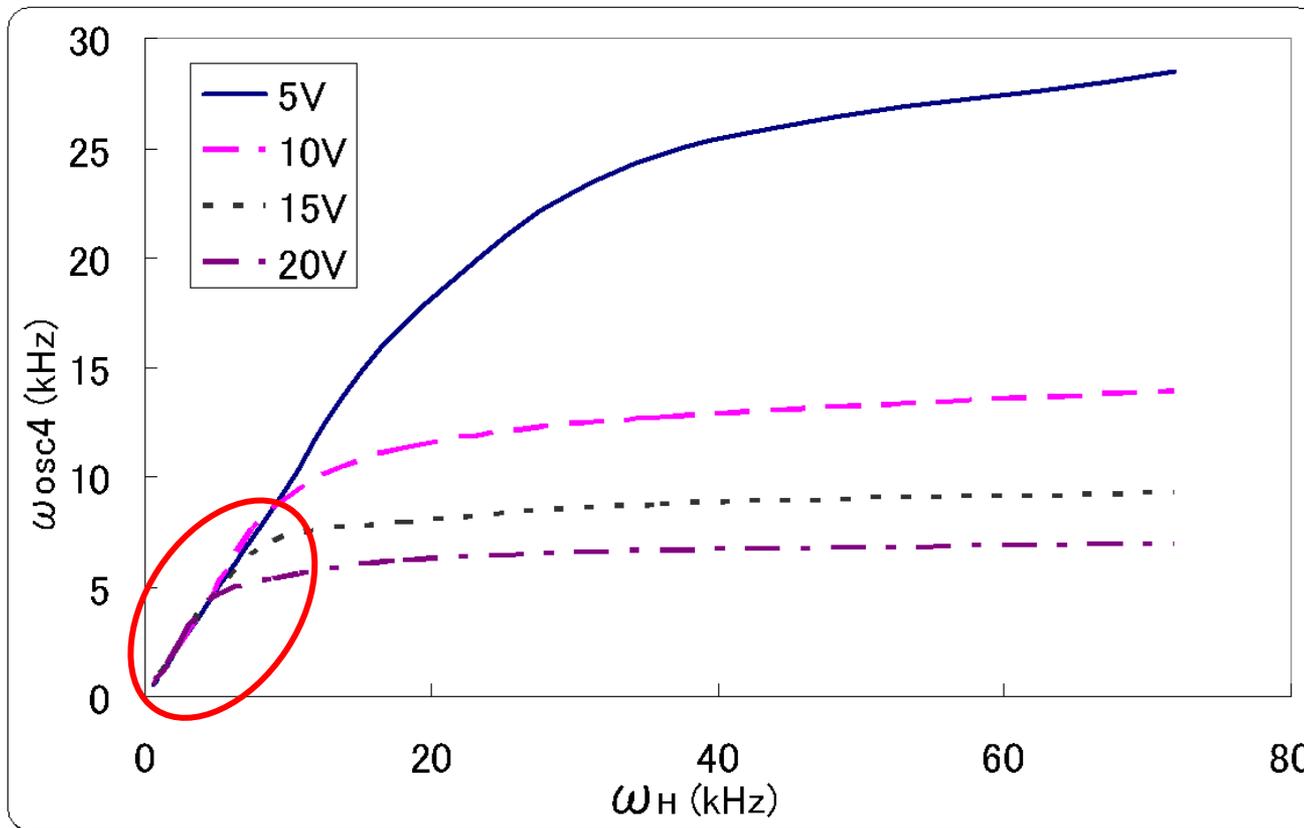
$\omega_H$  大

オペアンプ  
電源電圧

$V_{p-p}$



$\omega_H$ 可変のときの発振周波数 $\omega_{osc4}$ の変化



$\omega_H < \omega_B$   $\omega_{osc4}$  → 電源電圧依存しない

$\omega_H \rightarrow$  大  $\omega_{osc4} \rightarrow$  大

$\omega_H > \omega_B$   $\omega_{osc4}$  → 電源電圧依存

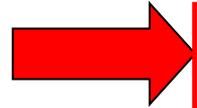
$\omega_{osc4} \rightarrow$  飽和

## 発表内容

1. 研究背景と目的
2. 提案回路
3. 題材に利用したアクティブフィルタ
4. 提案する発振によるテスト方法
  - ①AGC(自動利得制御)
  - ②バンドパス出力の帰還による発振
  - ③ローパス出力の帰還による発振
  - ④ハイパス出力の帰還による発振
5. **結果**
6. **まとめ**

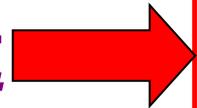
## 結論

### ■ AGC



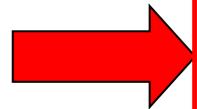
$\omega_{osc1}$ が $\omega_B$ で発振

### ■ バンドパス帰還



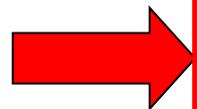
$\omega_{osc2}$ が $\omega_B$ ,  $Q_B$ , ゲイン $A_B$ の関数  
Opampの電源電圧に依存しない

### ■ ローパス帰還



$\omega_L$ ,  $\omega_H$  が $\omega_B$ 付近のとき  
 $\omega_{osc3}, \omega_{osc4}$ 電源電圧に依存しない  
 $\omega_L, \omega_H \rightarrow$ 大  $\omega_{osc3}, \omega_{osc4} \rightarrow$ 大

### ■ ハイパス帰還



$\omega_L$ ,  $\omega_H$  が $\omega_B$ より大のとき  
 $\omega_{osc3}, \omega_{osc4}$ 電源電圧に依存  
 $\omega_{osc3}, \omega_{osc4} \rightarrow$ 飽和

## 発表内容

1. 研究背景と目的
2. 提案回路
3. 題材に利用したアクティブフィルタ
4. 提案する発振によるテスト方法
  - ①AGC(自動利得制御)
  - ②バンドパス出力の帰還による発振
  - ③ローパス出力の帰還による発振
  - ④ハイパス出力の帰還による発振
5. 結果
6. まとめ

## まとめ

- フィルタを発振させテストする4つの発振モードを提案した
- スイッチと周波数カウンタという少ない回路構成でフィルタのテストが可能

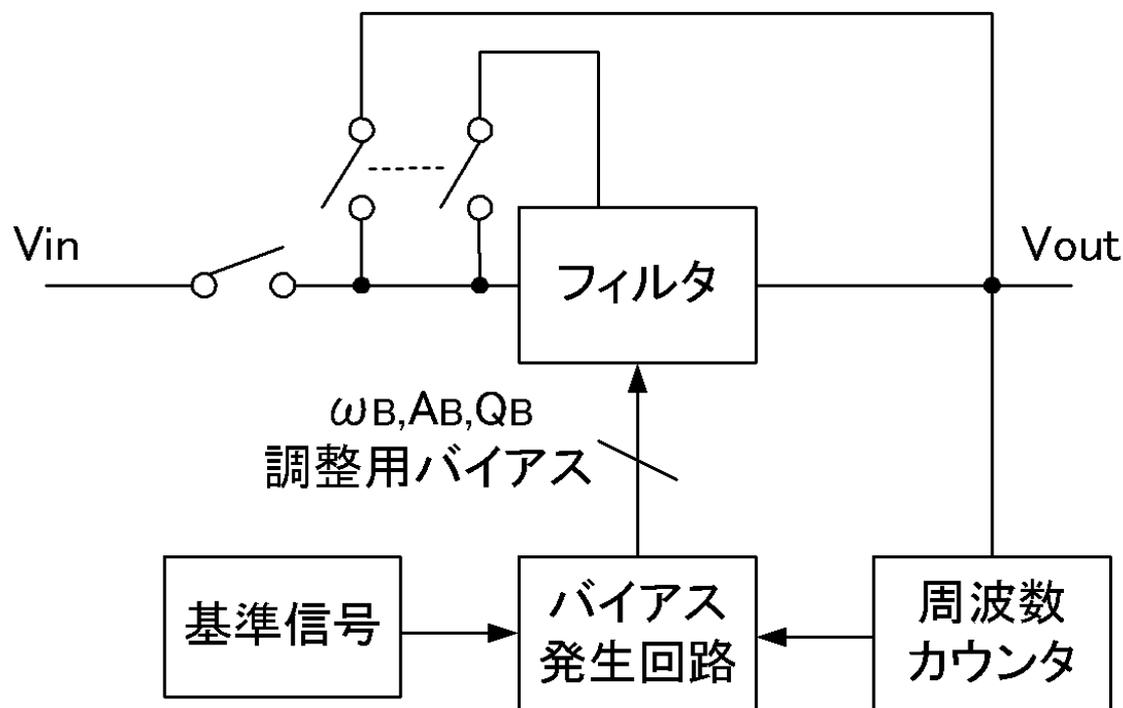
- フィルタを発振

 発振周波数がフィルタの $\omega_B$ 、 $Q_B$ 、 $A_B$ に依存

発振周波数計測によって $\omega_B$ 、 $Q_B$ 、 $A_B$ の情報が得られる

## 今後の課題

- 4つの発振周波数から $\omega_B$ 、 $Q_B$ 、 $A_B$ の計算法の導出
- フィルタの調整につなげる



- 状態変数型フィルタ以外にも適用

# 今後の課題

■ 数GHzの高周波フィルタ → 直接的計測困難

