

The World Leader in High Performance Signal Processing Solutions



# SPICEツールで適切な周波数特性と 異常発振しないOPアンプ回路を実現する 【基礎編】

アナログ・デバイセズ株式会社  
石井 聡

# アジェンダ

1. イントロダクション
2. アナログ回路での単位「dB」などの見方・考え方
3. SPICEツールNI Multisim™の基本機能
4. 周波数特性の検討
5. 異常発振してしまう原理
6. まとめ



その2【実践編】も  
是非ご覧ください



# 1. イントロダクション

## コツがわからないから安定に動かせない

どこが重要かつ  
基本的なポイント  
なんだろう？

- ◆ 開発仕様書を渡されて「まかせたぞ」といわれても(汗)
  - どのように仕様書を回路で実現し
  - どのようなところがポイント(押さえどころ)かが判らない
- ◆ OPアンプで実験回路を組んでみたけど・・・
  - 利得は設計どおりだけど、目的の周波数特性が出ていない
  - OPアンプが発振している！！
- ◆ OPアンプを確実に動作させるための「勘どころ」がある
- ◆ 実動作で検証するまえの「道しるべ」としてSPICEツールを活用する

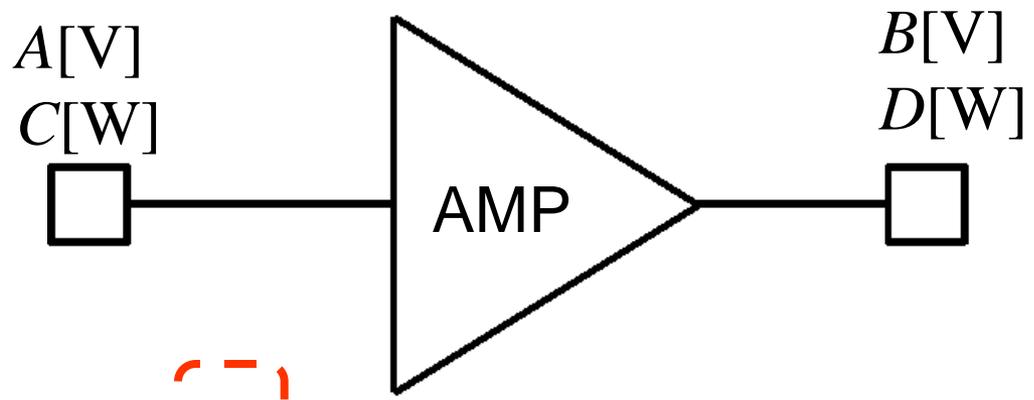




## 2. アナログ回路での単位 「dB」などの見方・考え方

# 「大きさ」、「大きさの差」を表す単位dB(デシ・ベル)

アナログ回路では**対数**表記が多い



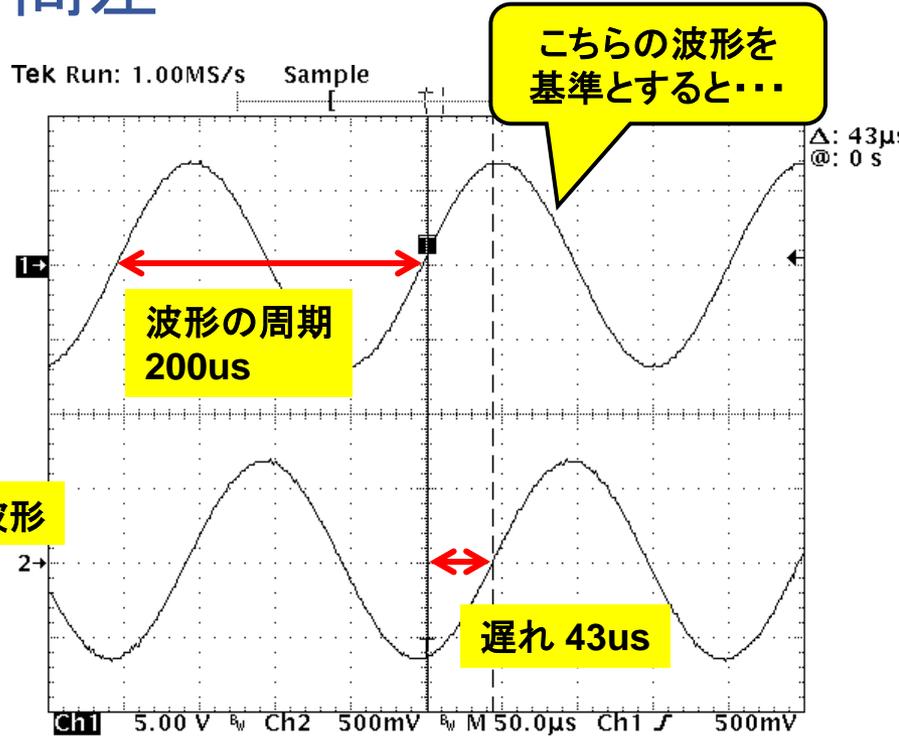
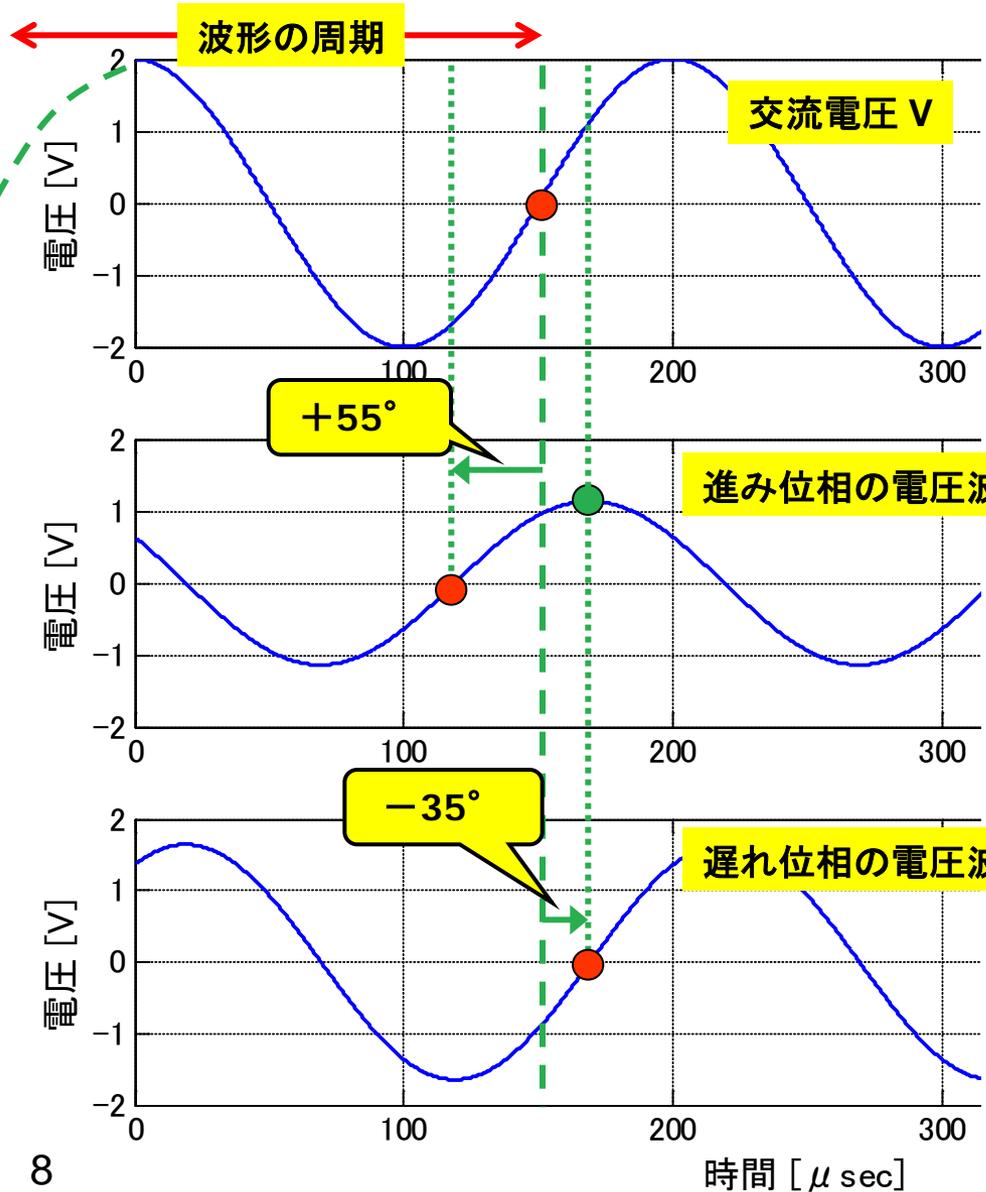
電圧増幅率  $\frac{B}{A} = 20 \times \log_{10} \frac{B}{A}$

電力増幅率  $\frac{D}{C} = 10 \times \log_{10} \frac{D}{C}$

dB値	電圧比	電力比
-10	0.3	0.1
-3	$1/\sqrt{2}$	0.5(1/2)
0	1	1
3	$\sqrt{2}$	2
10	3	10
20	10	100
40	100	10000
100	100000	$10^{10}$
160	$10^8$	$10^{16}$

● dBがマイナスでも比率自体がマイナスになるのではない

# 位相差とは同じ信号どうしの時間差



位相 =  $360 \times (43/200) = 77.4^\circ$  遅れ

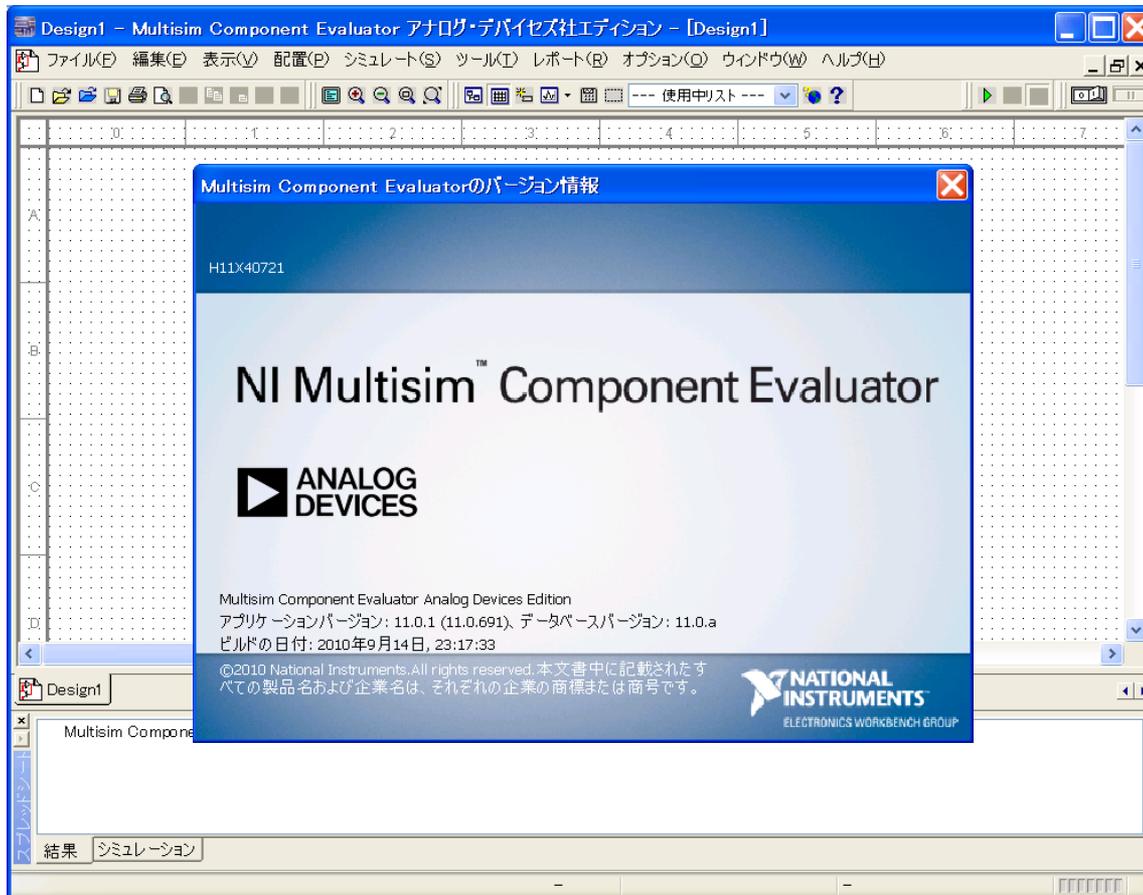
波形の1周期を $360^\circ$  とし  
 先に立ち上がった波形 ⇒ 進み  
 後に立ち上がった波形 ⇒ 遅れ



# 3. SPICEツールNI Multisimの 基本機能

# 使用するSPICEシミュレータについて

- ◆このセッションではNational InstrumentsのNI Multisim Ver.11 Analog Devices Edition（無償版）を用いる



おすすめ製品  **おすすめ**

日本での採用実績が豊富で、使いやすい。約300製品。  
日本語データシート完備。17:00迄発注でサンプル即日出荷OK。

[詳細を見る](#) 

キーワード/製品検索

弊社サイトで検索  
してみてください

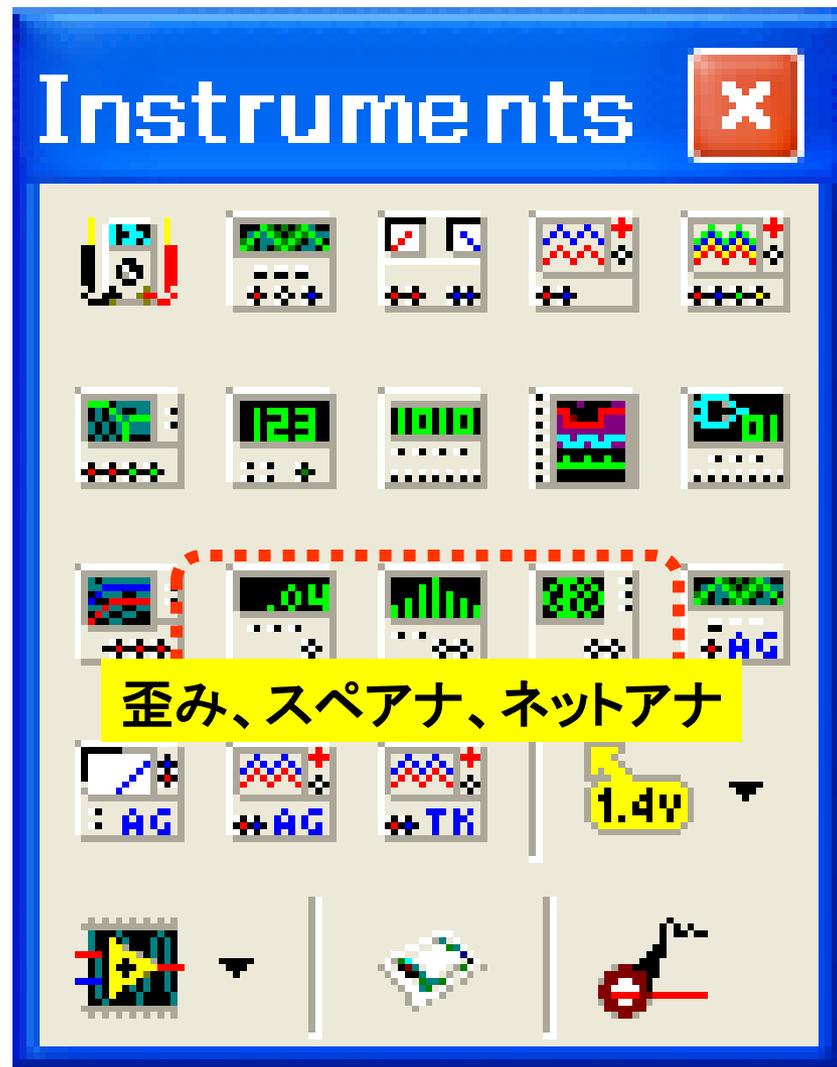
# SPICEシミュレーションを意識しない仮想測定器



Analog Devices  
Edition (フリー版)  
の仮想測定器

このセッションで用  
いるもの

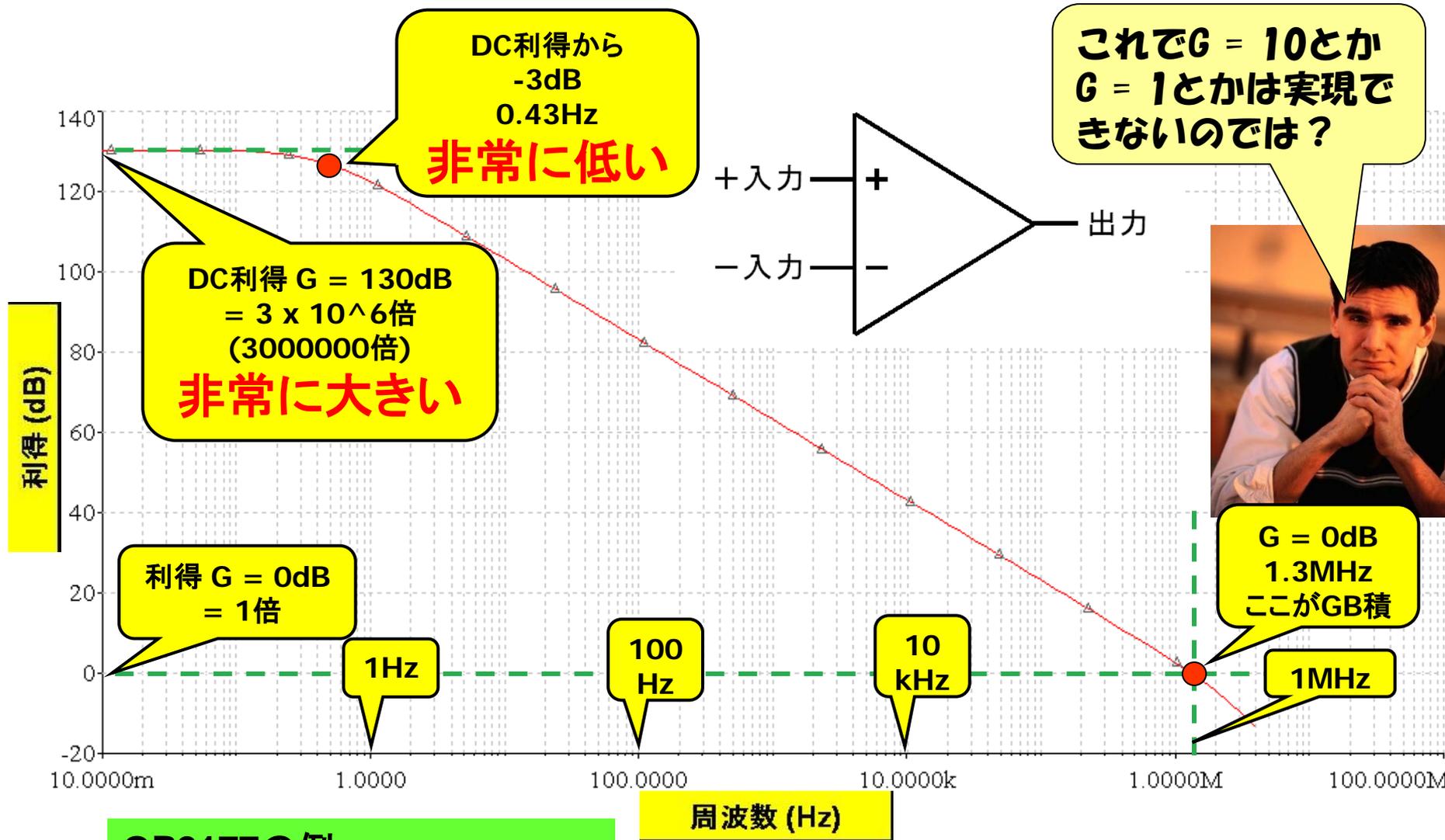
Full Edition, Pro  
Edition (正規版)  
の仮想測定器





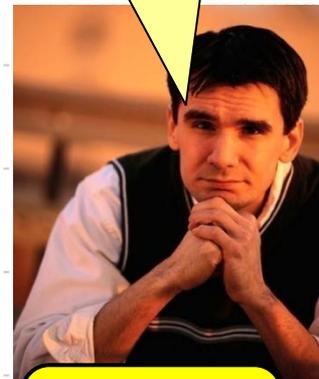
## 4. 周波数特性の検討 (ボーデ・プロッタ)

# OPアンプの周波数特性(フィードバックなしで開放時)

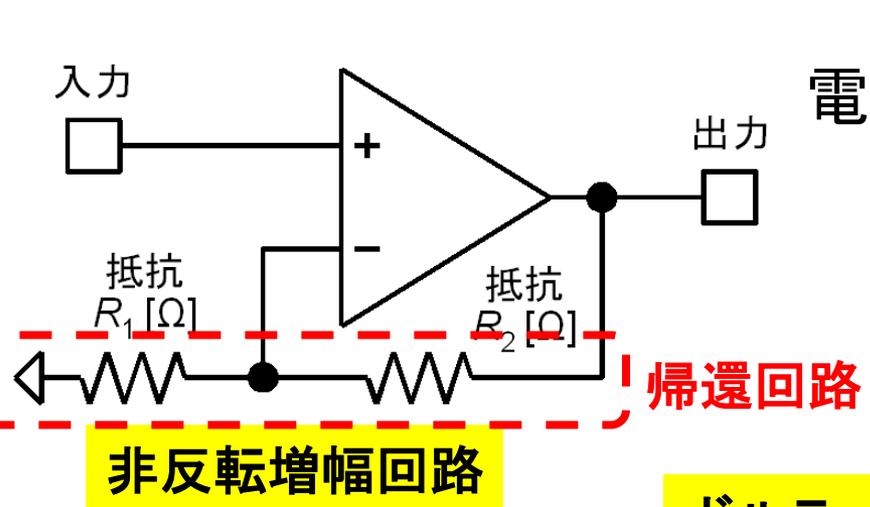


**OP2177の例**  
**GB積 = 1.3MHzのOPアンプ**

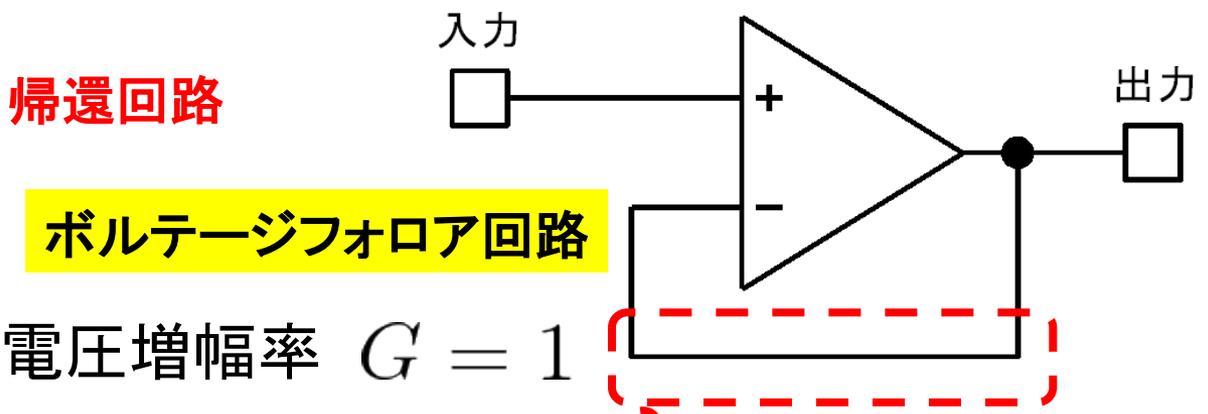
周波数は**ログスケール**(以降同じ)



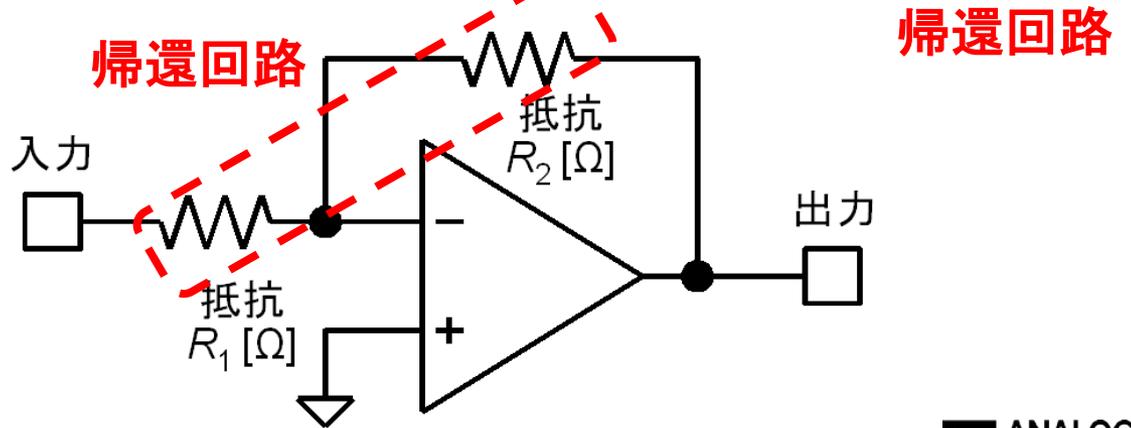
# 帰還をかけて目的の利得 $G = 10$ など実現する



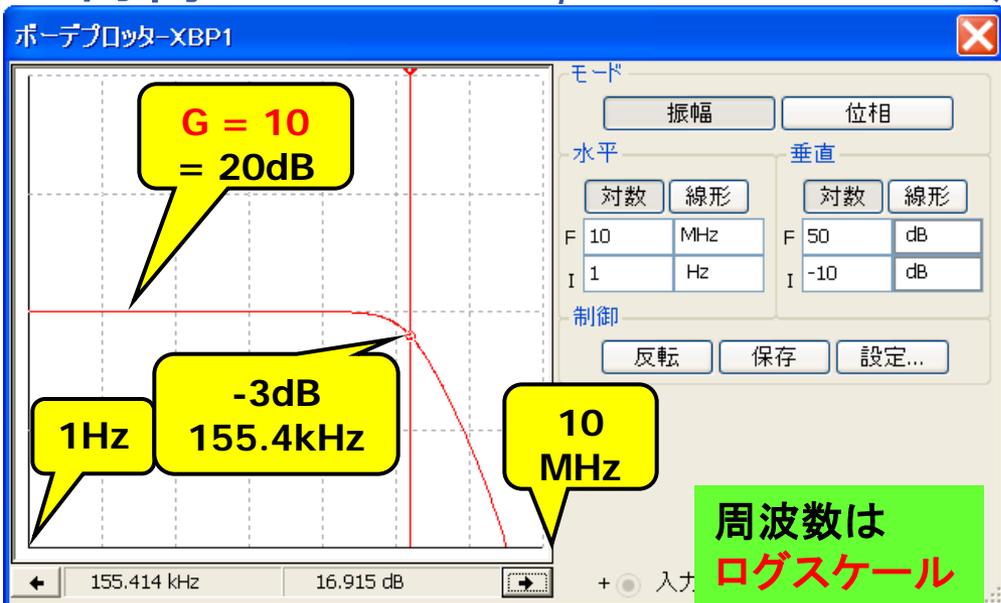
電圧増幅率  $G = 1 + \frac{R_2}{R_1}$



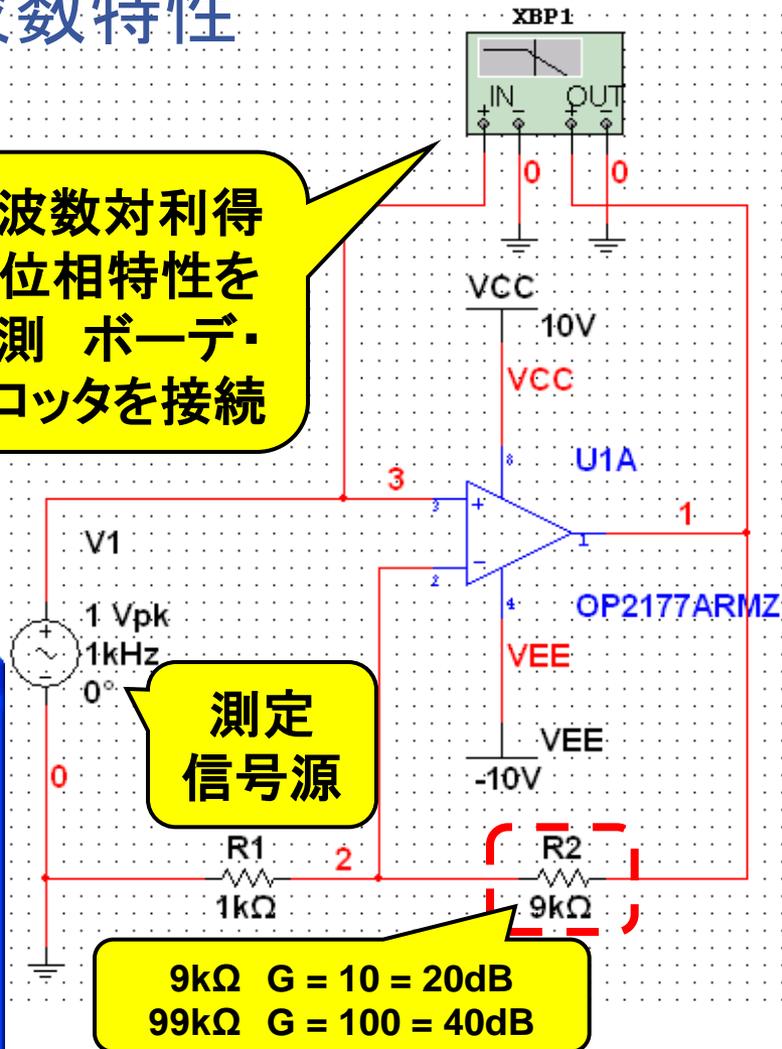
電圧増幅率  $G = 1$



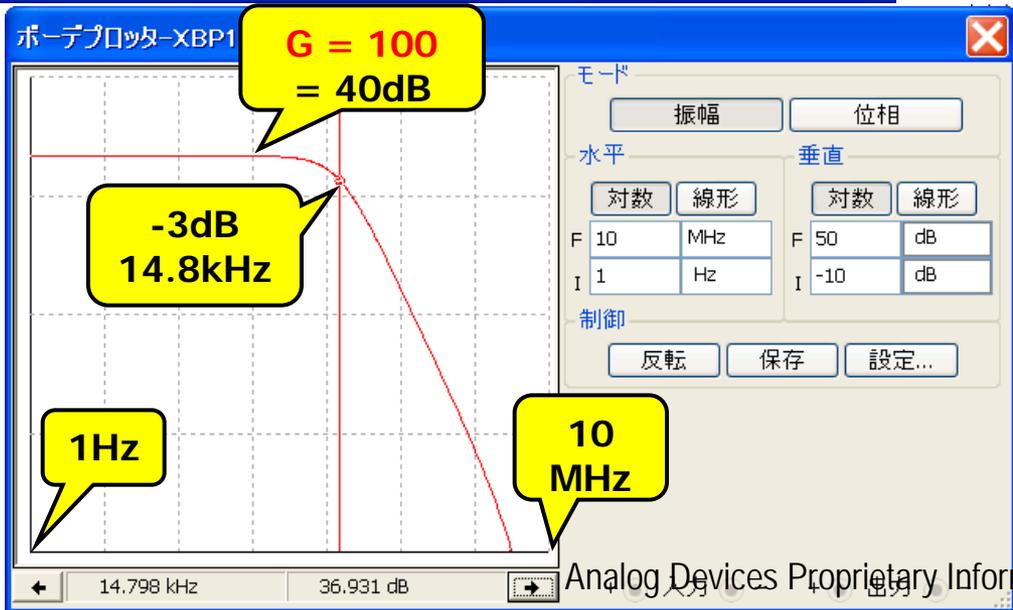
# 利得が $G = 10$ , $G = 100$ の周波数特性



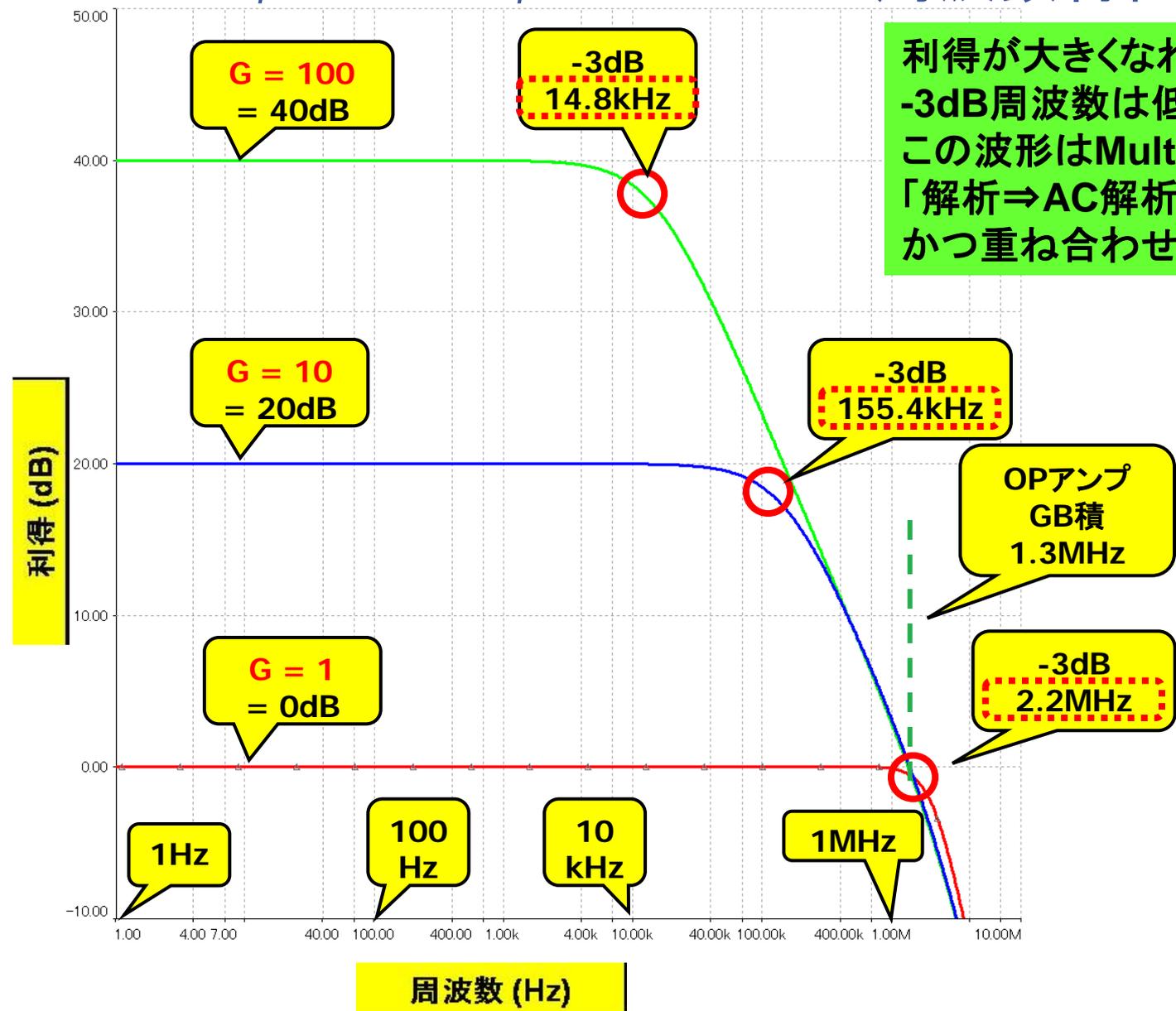
周波数対利得 & 位相特性を計測 ボーデプロッタを接続



実回路では電源デカップリング用のコンデンサはかならず接続する



# 利得が $G = 1$ , $G = 10$ , $G = 100$ の周波数特性



利得が大きくなれば  
-3dB周波数は低くなる  
この波形はMultisimの  
「解析⇒AC解析」の機能、  
かつ重ね合わせて表示

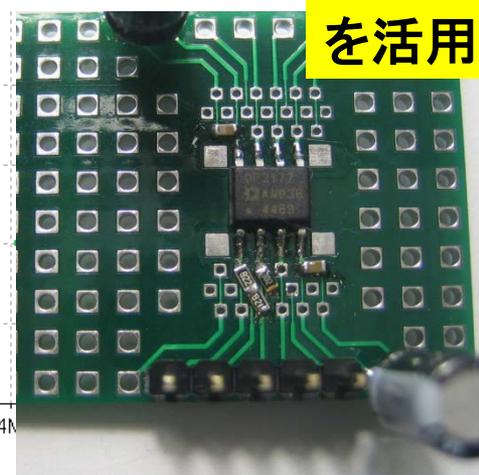
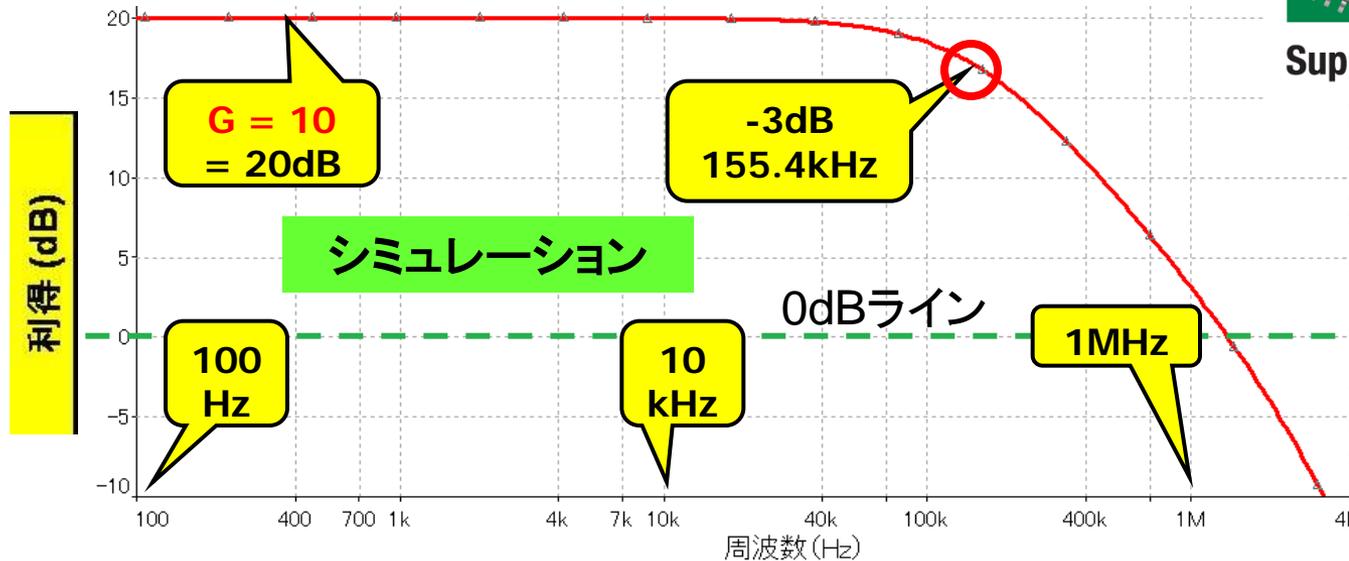


## 5. 周波数特性の検討 (実際のOPアンプの特性と 比較してみる)



# 実際のOP2177をG = 10で特性測定

Supported by **戸板.COM** ピーバンドットコム

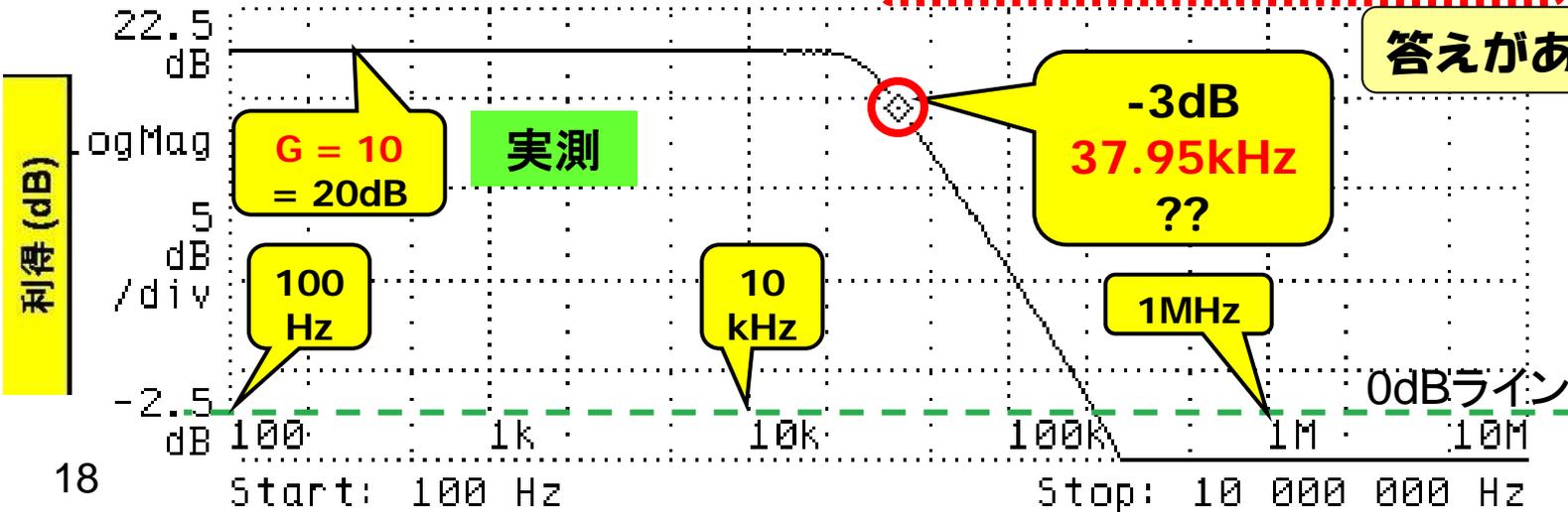


Res BW: 1 200 Hz

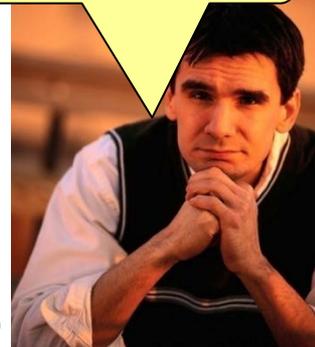
Swp Time: 8.57 Sec

A: NORMALIZED XMSN Mkr

37 951 Hz 17.03 dB



答えがあわないぞ!



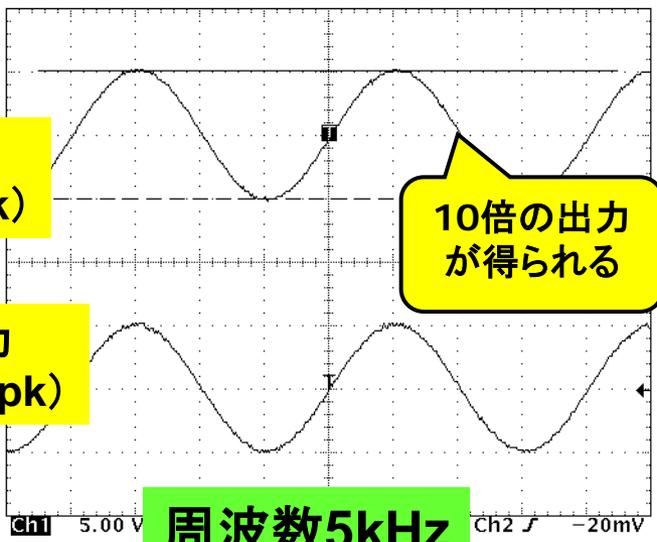
# 不一致の理由「ACシミュレーションの限界」

波形が三角波になってレベルも低下している！

出力  
(5V pk)

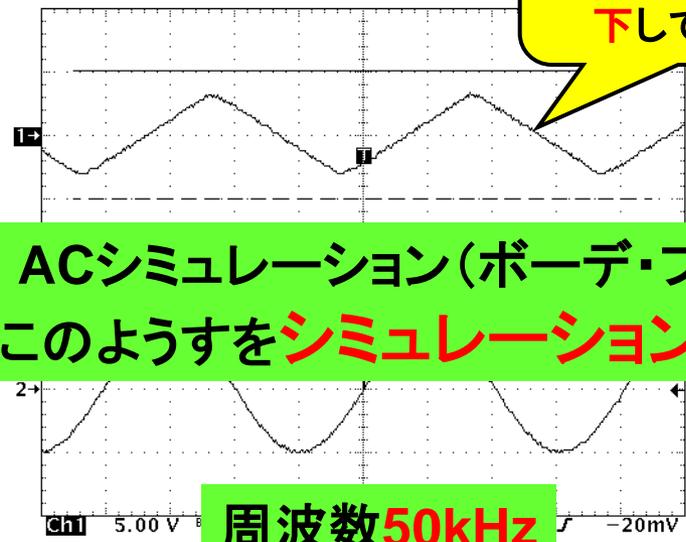
入力  
(0.5V pk)

10倍の出力  
が得られる



周波数5kHz  
大振幅

ACシミュレーション(ボーデ・プロッタ)はこのようすをシミュレーションできない

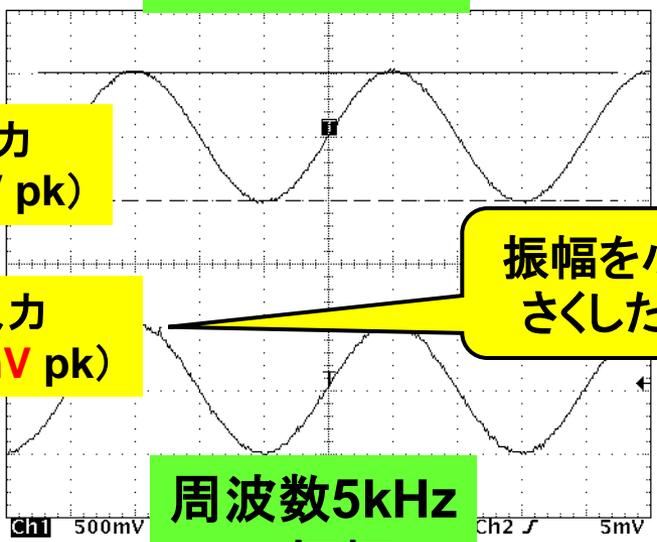


周波数50kHz  
大振幅

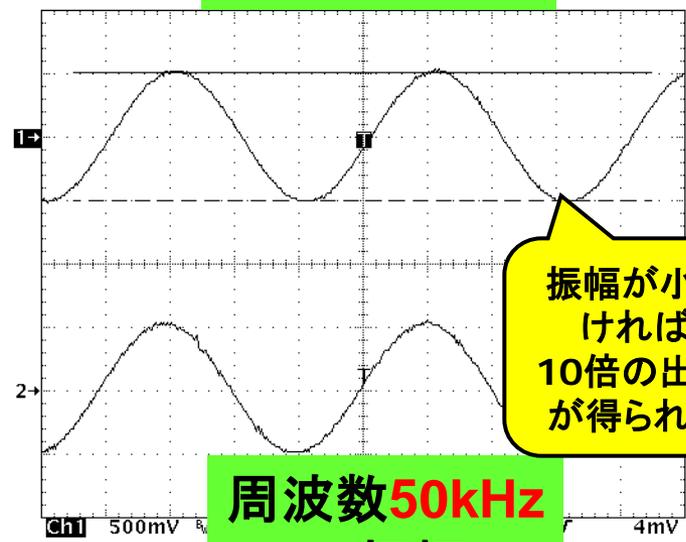
出力  
(0.5V pk)

入力  
(50mV pk)

振幅を小さくした



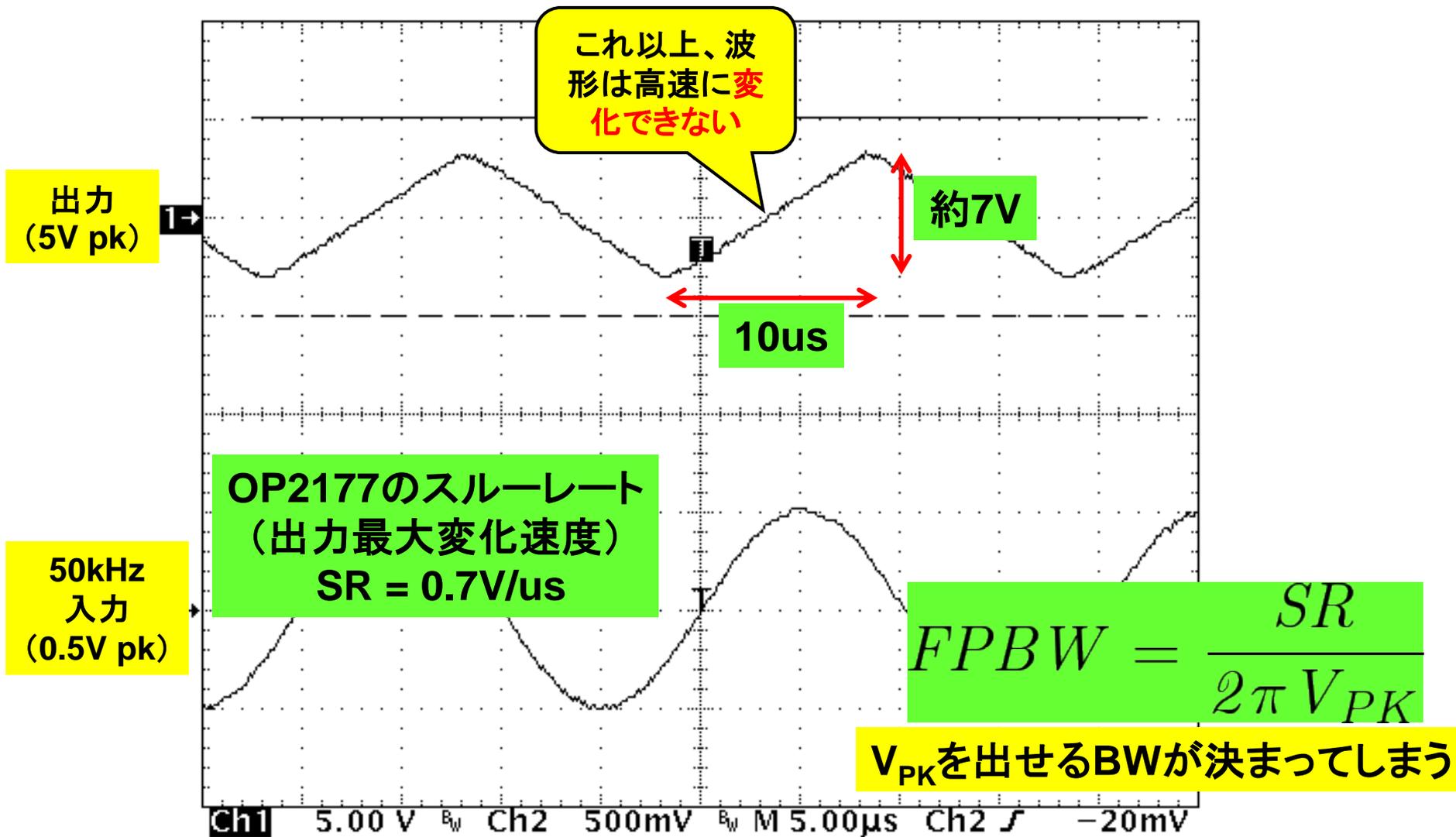
周波数5kHz  
小振幅



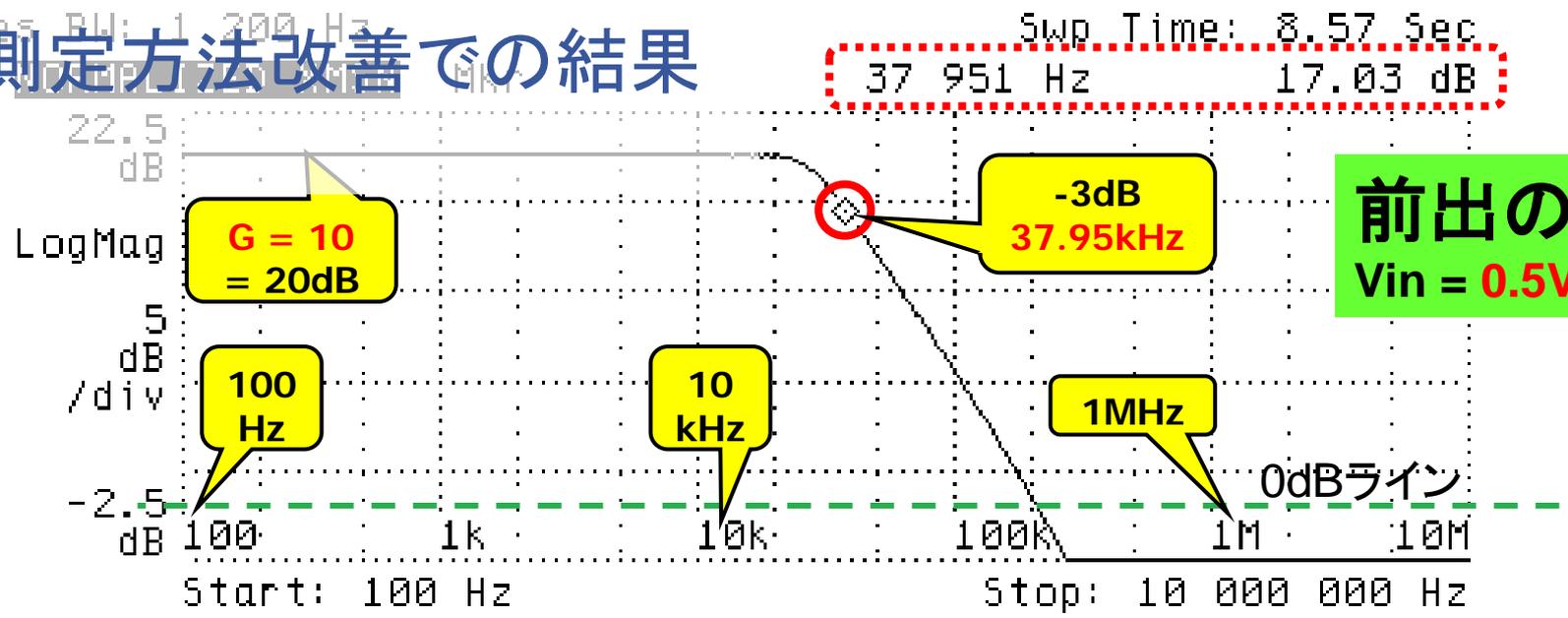
周波数50kHz  
小振幅

振幅が小さければ  
10倍の出力  
が得られる

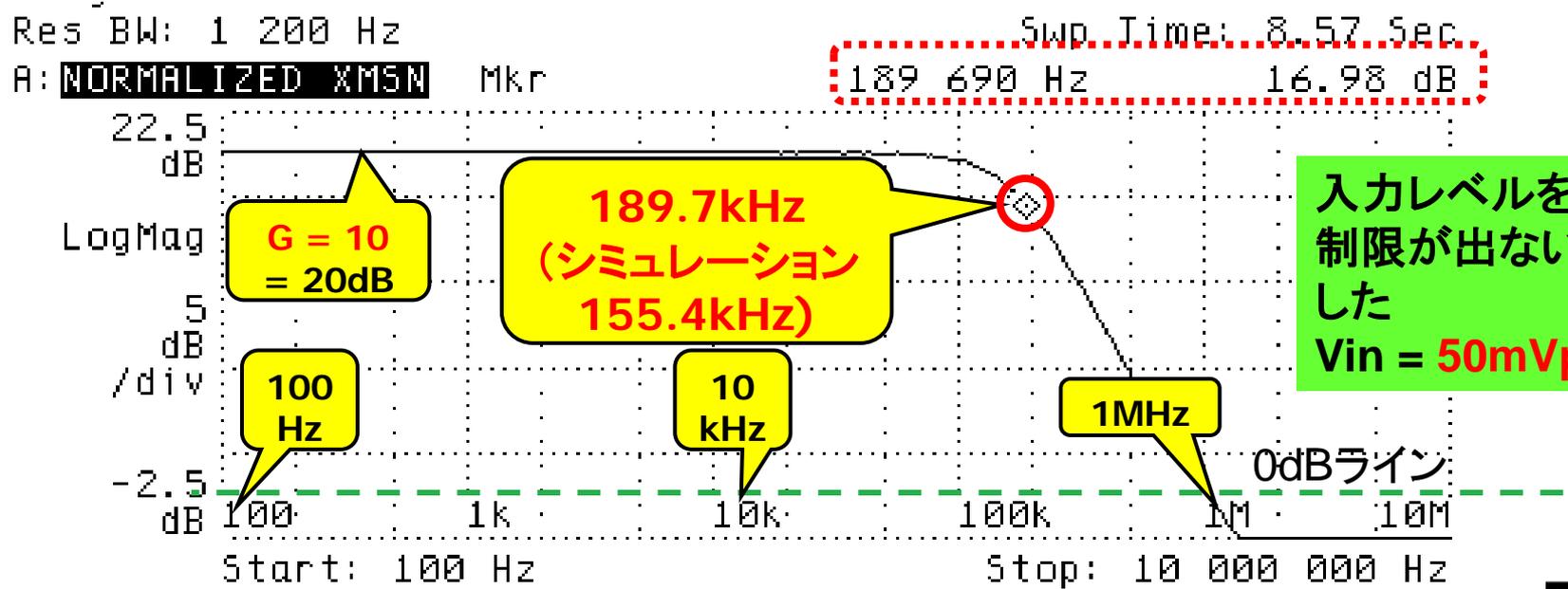
# 不一致の理由「スルーレートとフルパワー帯域幅FPBW」



# 測定方法改善での結果



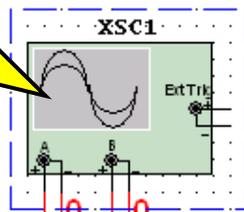
**前出の特性**  
Vin = 0.5Vpk



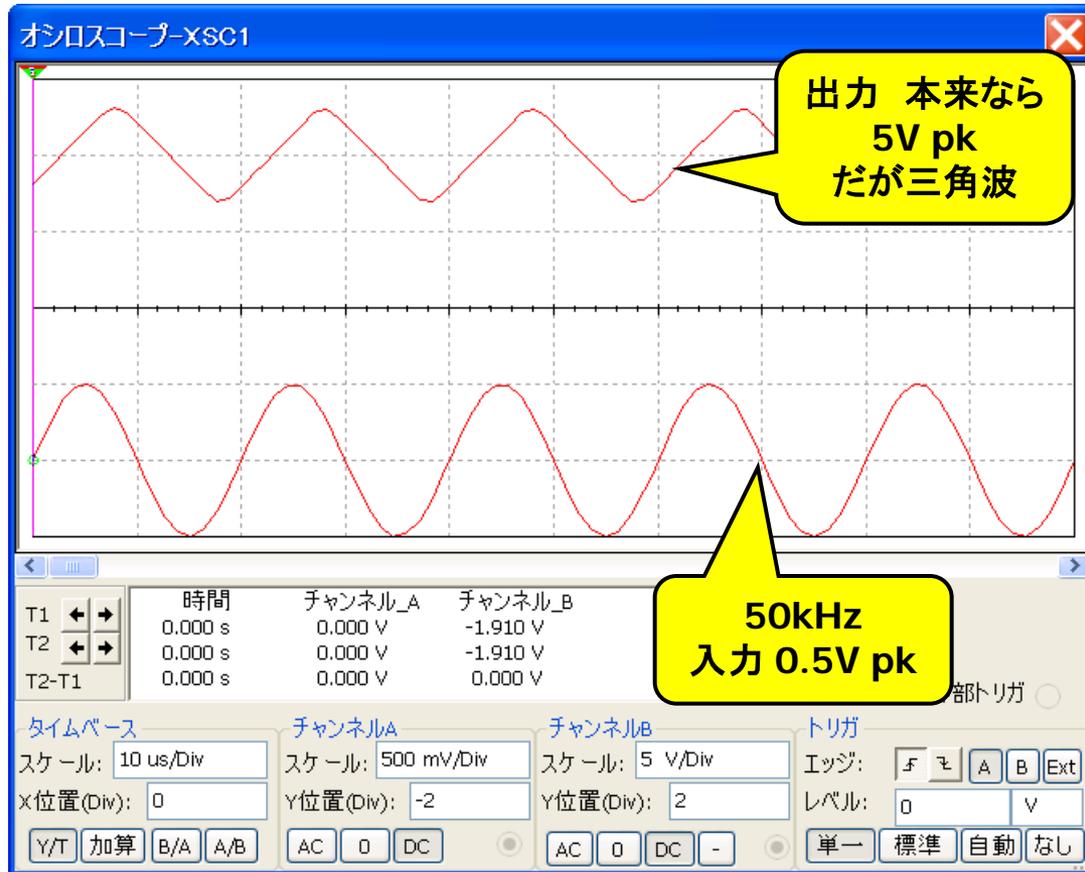
入力レベルを下げて制限が出ないようにした  
Vin = 50mVpk

# 仮想オシロによるスルーレート制限のようす (G = 10)

時間軸波形を計測  
オシロスコープを接続



出力 本来なら  
5V pk  
だが三角波



50kHz  
入力 0.5V pk

ボーデ・プロッタはAC解析手法  
オシロスコープは過渡解析手法  
(シミュレーション方式が異なる)

信号源パラ  
メータを設定

## ここまでのまとめと補足



- ◆ OPアンプの周波数特性は利得 $G$ を大きくすると帯域幅が狭くなる
  - シミュレーションで確認できる
  - なお電流帰還型OPアンプでは振る舞いが異なるので注意
- ◆ スルーレートとフルパワー帯域幅FPBWにより、実測で目的の周波数特性が得られないことがあるので注意
  - シミュレーション(時間波形)でも確認できる
  - 実回路(時間波形と周波数特性の両方)でチェックする

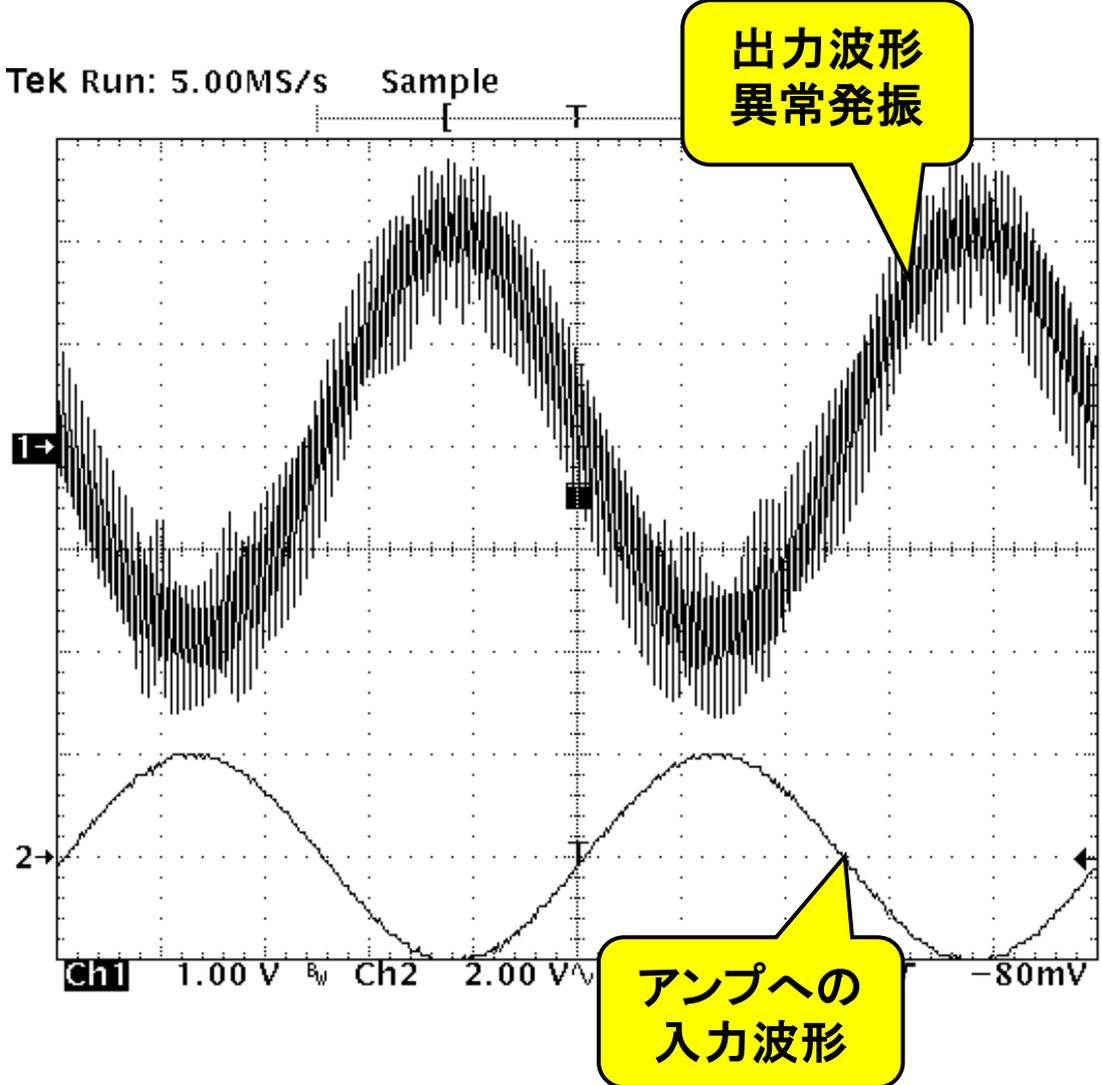
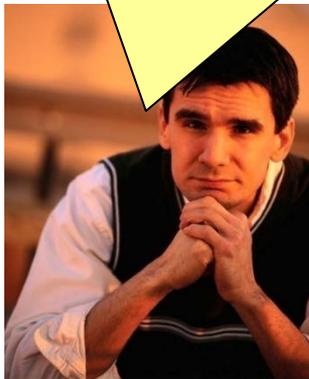
**実回路ではバイパス・コンデンサを忘れない！**

## 6. 異常発振してしまう原理 (負帰還から**正帰還**になるようす を理解する)

# 増幅器(アンプ)を設計したはずが発振器になっている

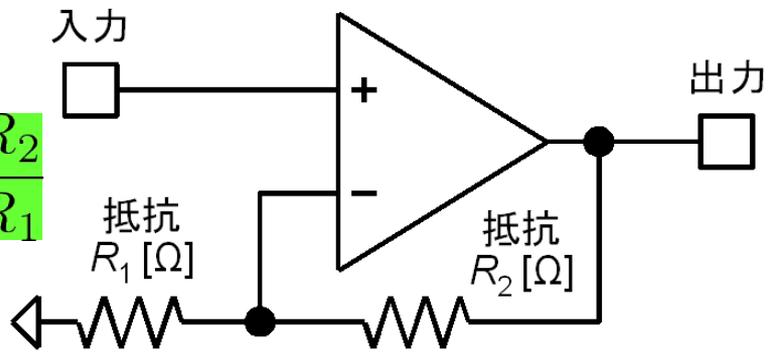
シミュレータ上では「仮想計測器に結果が表示されない」とか「収束しない (Convergence Error)」結果になる場合もある

何を指標にすればいいんだ!  
「**位相余裕!**??」



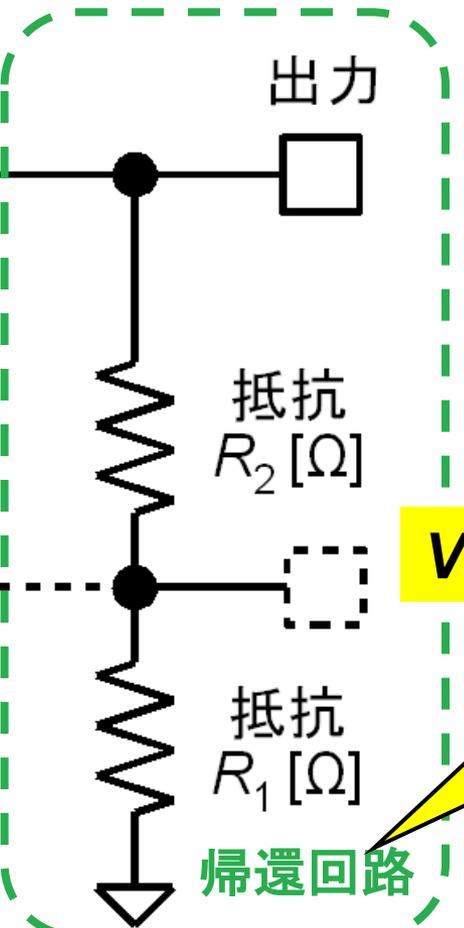
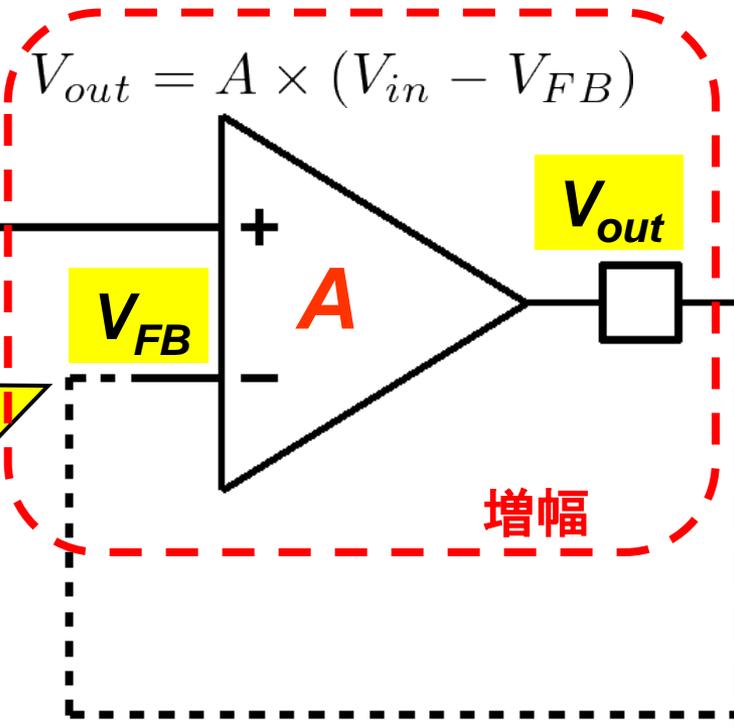
# 帰還回路の視点を少し変えてみる

電圧増幅率  $G = 1 + \frac{R_2}{R_1}$



$V_{in}$  入力

マイナス側に帰還するので「負帰還」と言う



$V_{FB} = V_{out} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

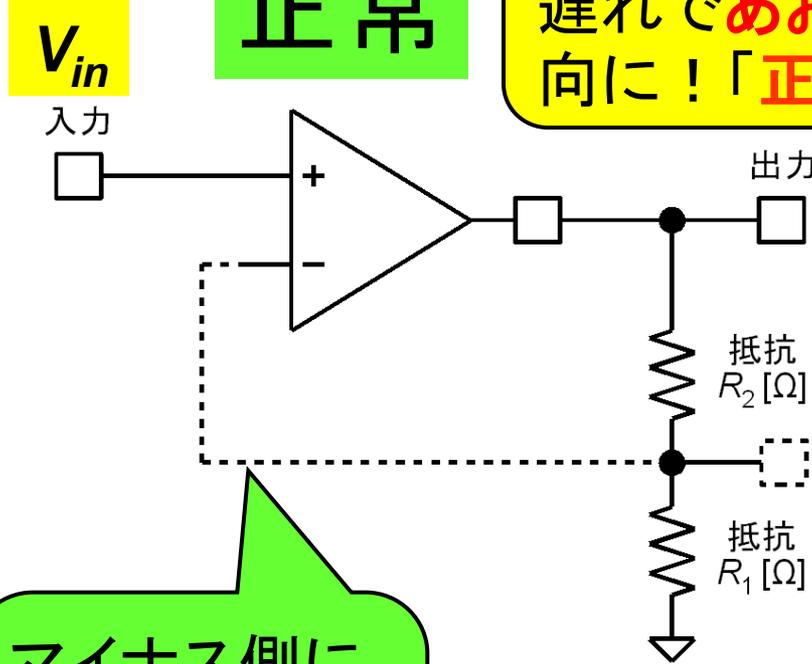
帰還率  $\beta$

入力に戻す「減衰器」とも言える

# アンプが発振してしまう原理

正常

打ち消すはずが遅れであおる方向に！「正帰還」

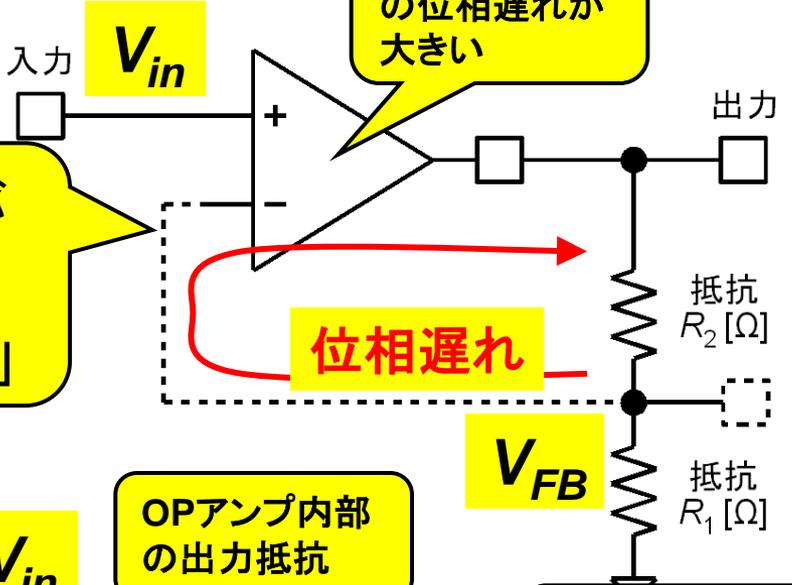


マイナス側に帰還する「負帰還」打ち消す方向に動く

打ち消すはずが遅れであおる方向に！「正帰還」

OPアンプ内部の位相遅れが大きい

位相遅れ



OPアンプ内部の出力抵抗

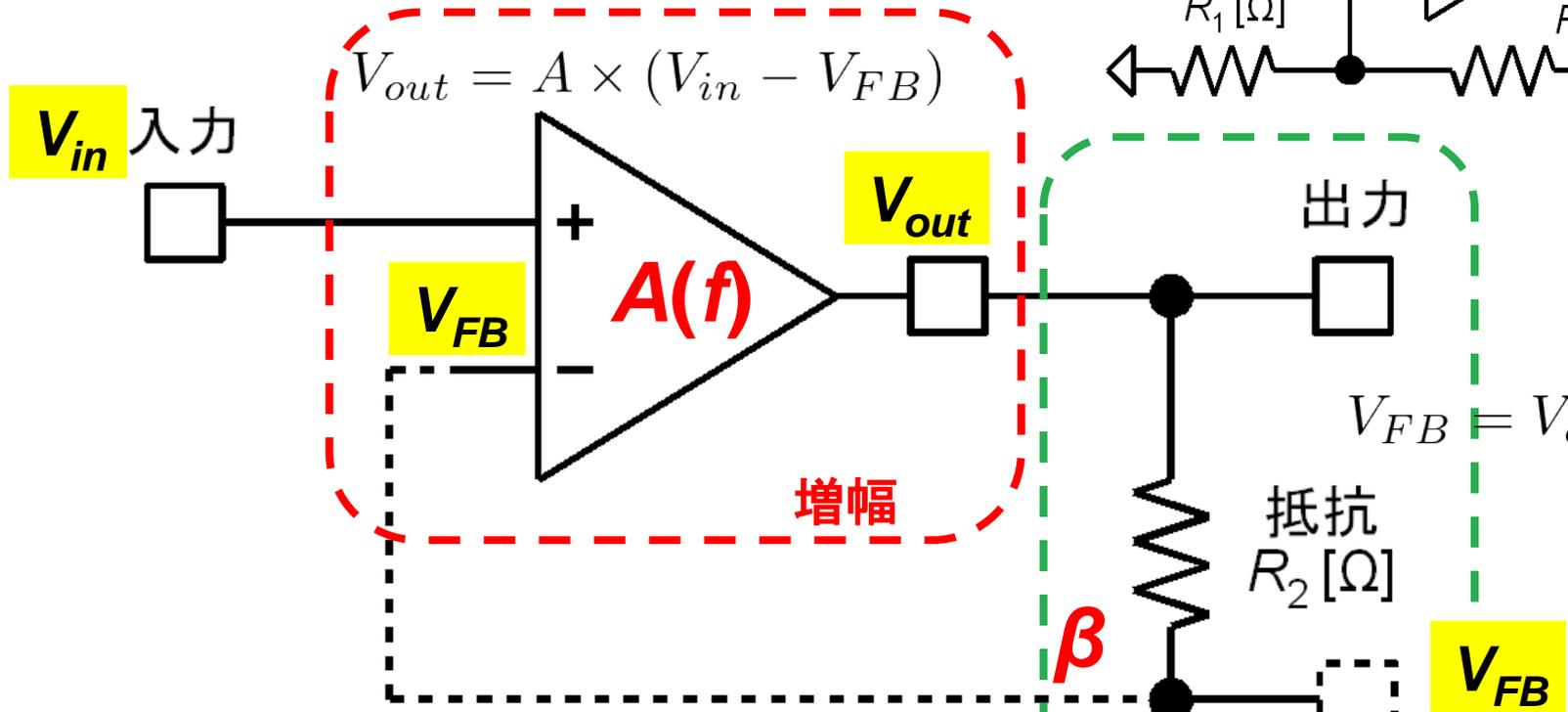
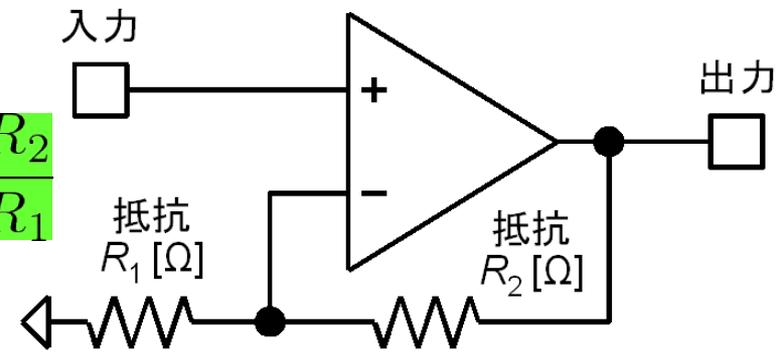
位相遅れ

発振！

## 7. 異常発振してしまう原理 (位相余裕を理解する)

# ループゲインを定義する

電圧増幅率  $G = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

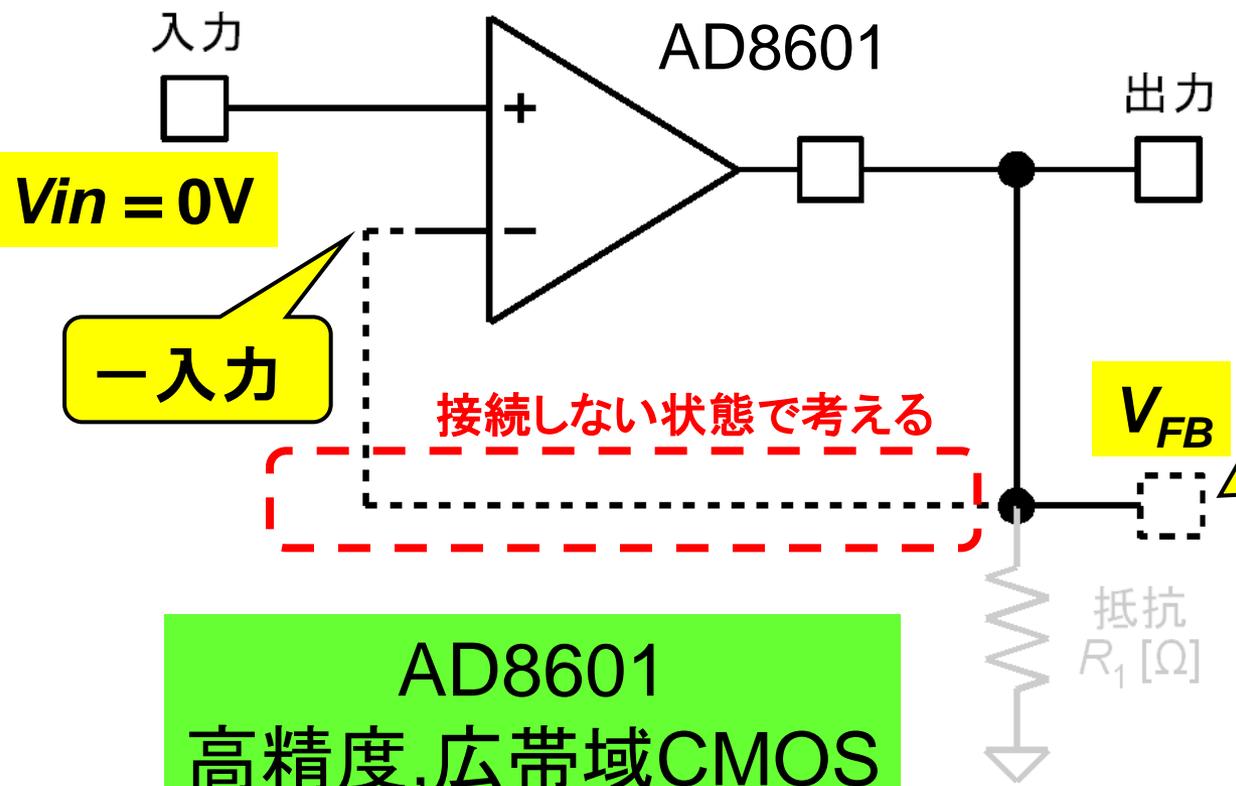


$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$   
帰還率  $\beta$

# ループゲイン = $A(f) \cdot \beta$

# アンプ発振の原理 (① AD8601で発振しない条件を例にしてループゲインの計算)

ボルテージ・フォロア構成が発振に一番厳しい条件

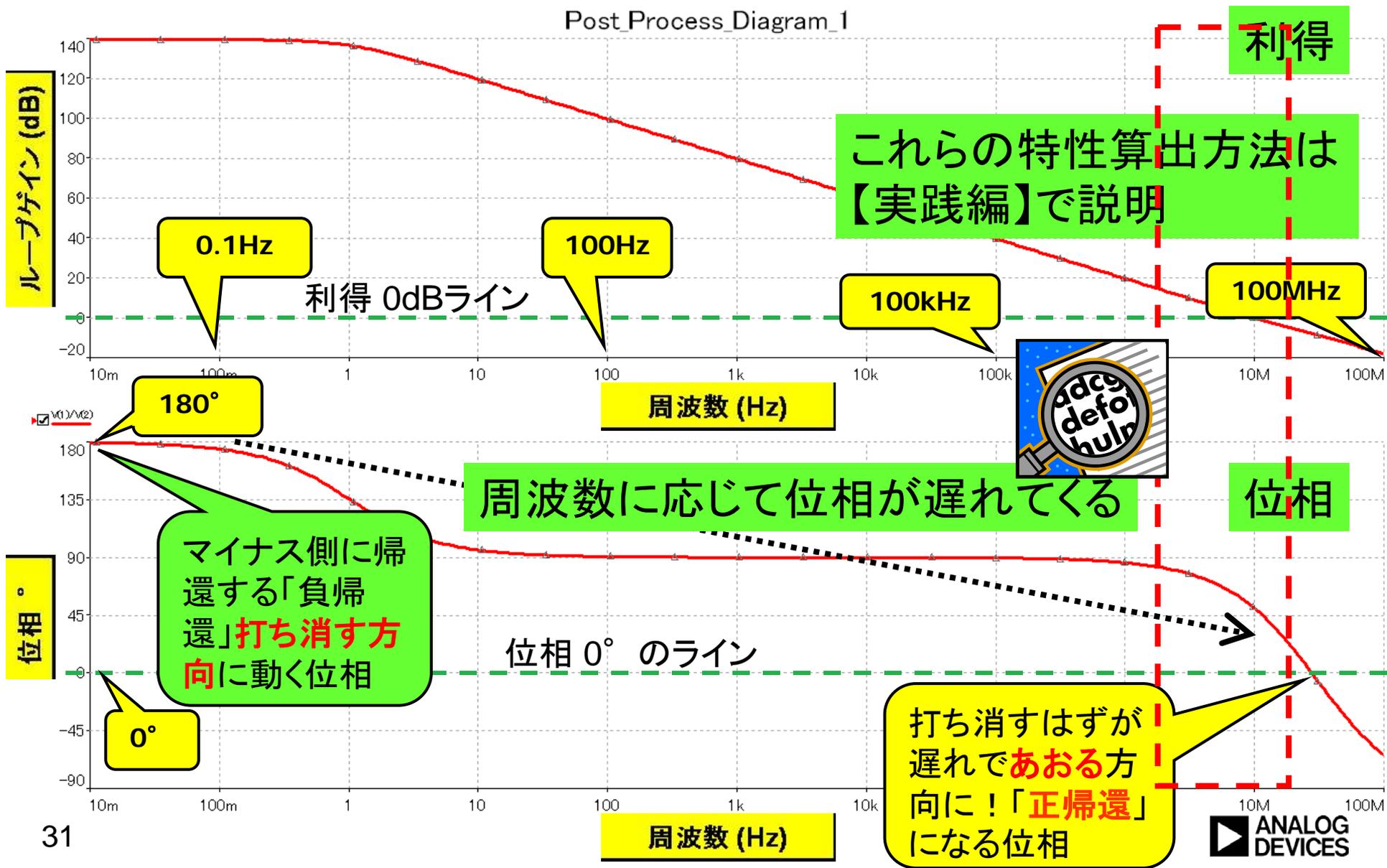


帰還無しにして (切断して) -入力から  $V_{FB}$  までの特性 (ループゲイン) を計算してみる!

AD8601  
高精度, 広帯域 CMOS  
R to R I/O アンプ

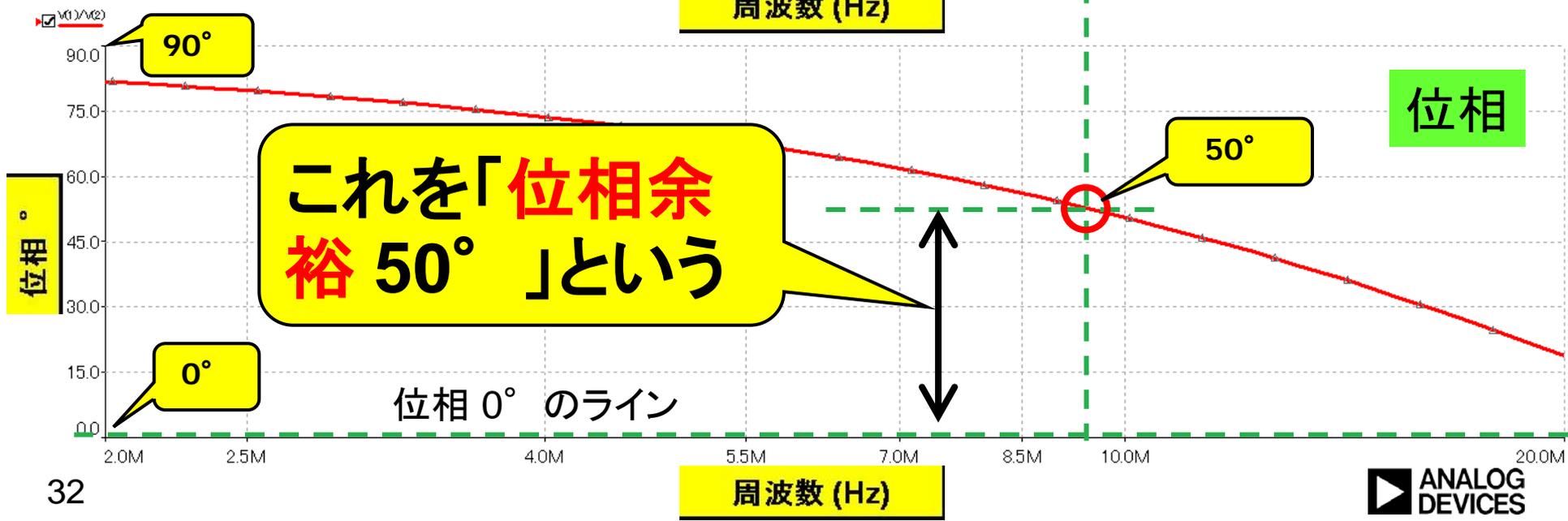
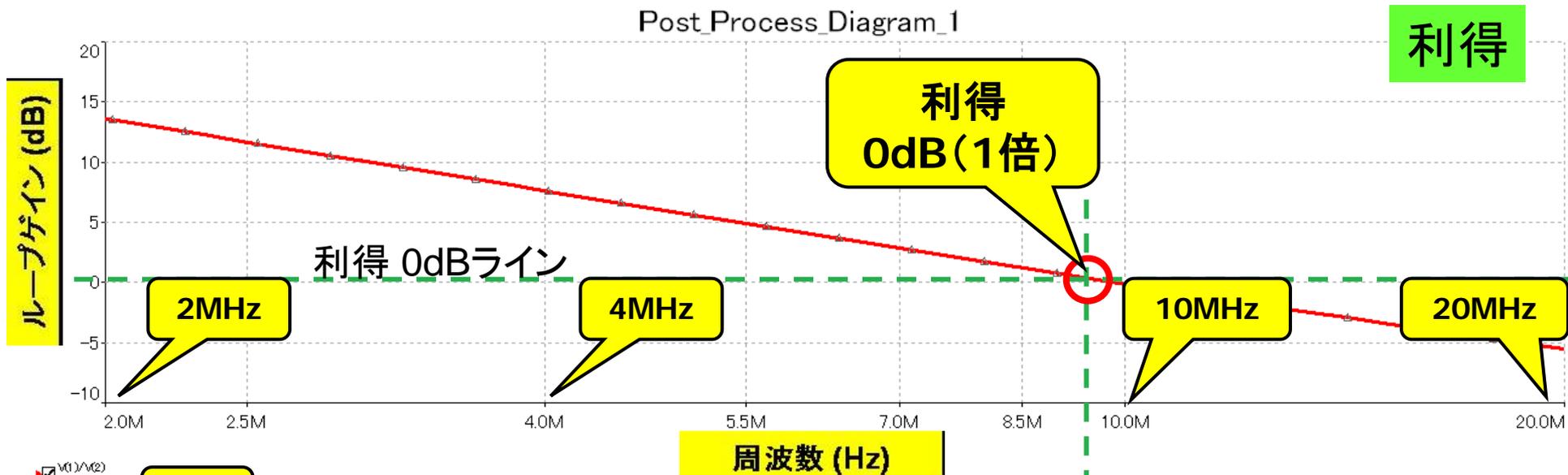
# ①AD8601で発振しない条件を例(ループゲインの計算)

Post\_Process\_Diagram\_1

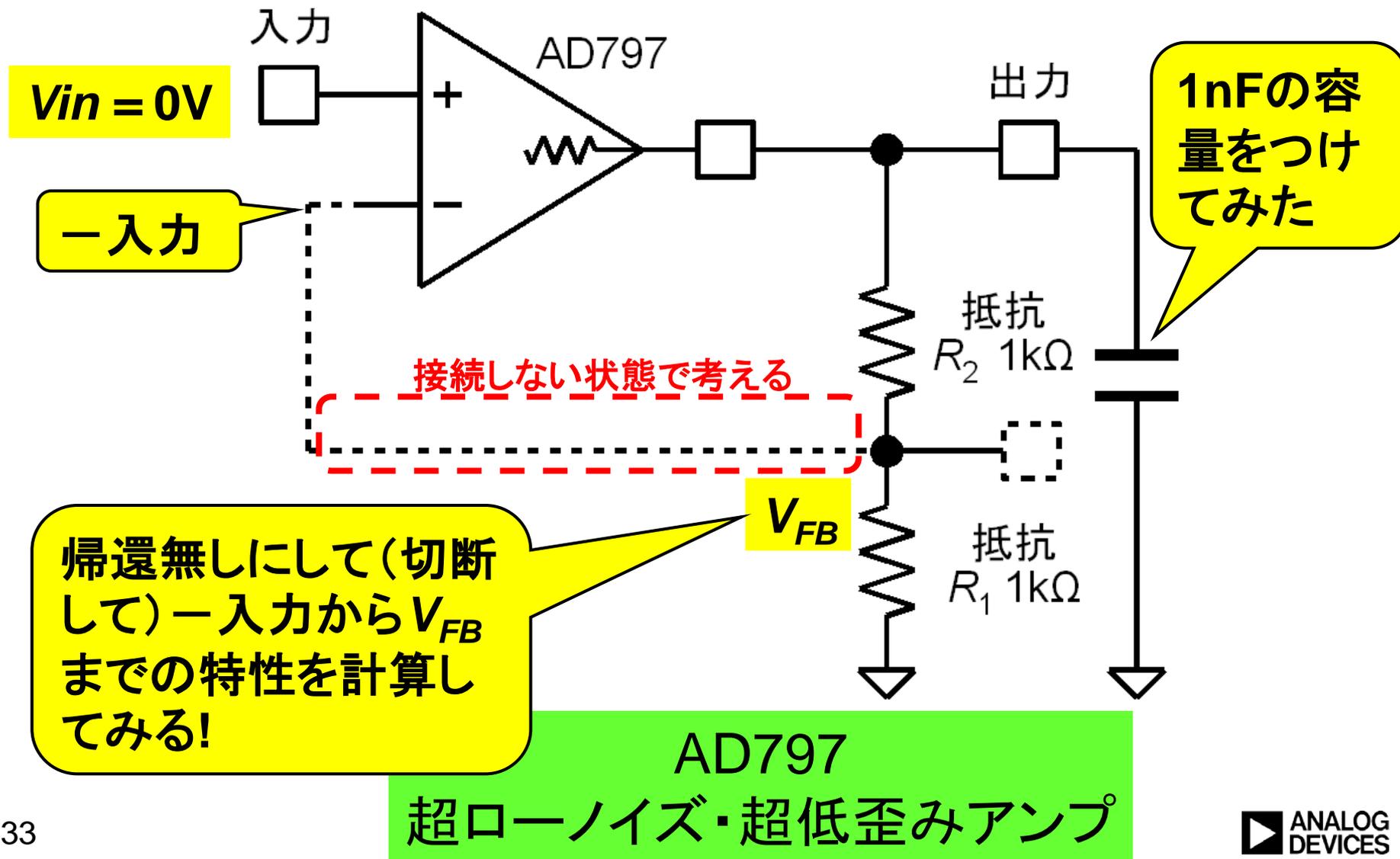


# ①AD8601で発振しない条件を例(拡大)

Post\_Process\_Diagram\_1

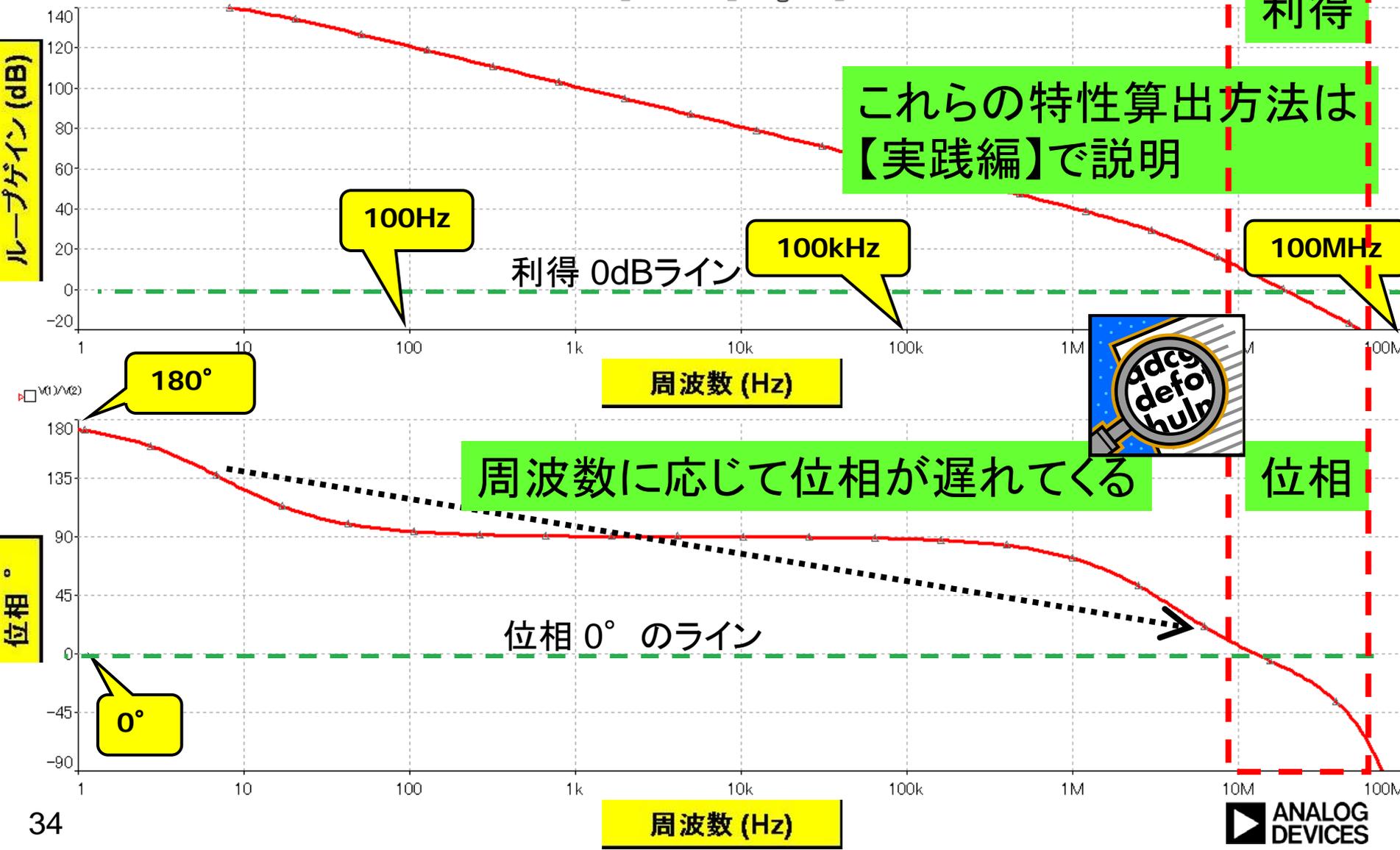


# アンプ発振の原理 (②AD797 $G = 2$ と負荷容量1nFで発振する条件を例にしてループゲインの計算)



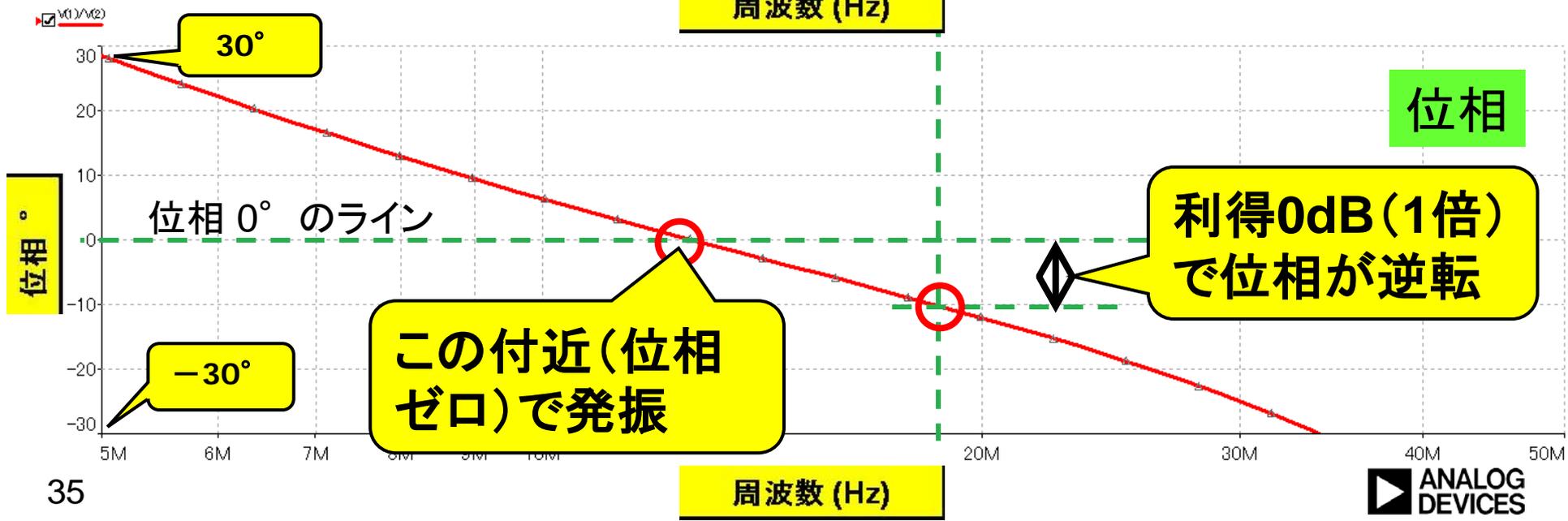
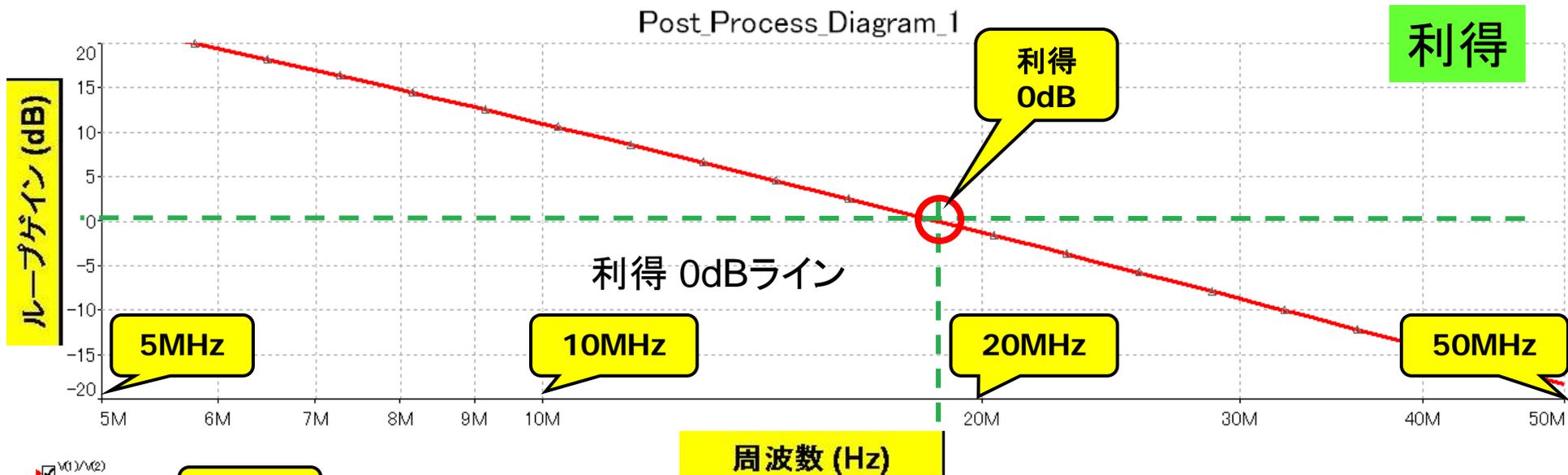
## ② AD797 $G = 2$ , $1nF$ で発振する条件例(ループゲイン)

Post\_Process\_Diagram\_1





## ② AD797 G = 2, 1nFで発振する条件例(拡大)





## 8. まとめ

## アンプが発振してしまう原理(まとめ)



- ◆ 打ち消す(負帰還)べきが、周波数が上昇したところで「**あおり**」(正帰還)に転じてしまう
  - 周波数に応じてOPアンプ内部などの位相が遅れてくるため
  - 「あおり」のところでループゲイン $>1$ だと発振
- ◆ 「位相余裕」を指標にすればよい
  - ループゲインが0dBになったときの位相量が「位相余裕」
  - 位相余裕がプラスであれば、OPアンプは発振しない
  - 位相余裕が少ない、またはマイナスだとOPアンプは発振する

## アンプが発振してしまう原理(まとめ)



### ◆発振しやすい要因とは

- 帰還量が多い場合(ボルテージフォロア  $G = 1 = 0\text{dB}$  が厳しい)
- 位相余裕の少ないアンプ
- 容量性負荷(コンデンサや同軸ケーブルなど)が接続された場合

これらのようすを【実践編】でみていきます

