

## オペアンプの信号ゲインとノイズゲイン

### 概要

本アプリケーションノートはオペアンプの信号ゲイン（シグナルゲイン）とノイズゲインについて説明します。オペアンプ内部で発生するノイズや入力オフセット電圧はノイズゲインに影響されます。設計の際の一助としてご活用下さい。

**目次**

概要 .....	1
目次 .....	2
1. はじめに .....	3
1.1. 帰還回路 .....	3
1.2. ノイズゲイン .....	5
2. 信号ゲインとノイズゲイン .....	7
3. 実際の増幅回路の例 .....	10
3.1. 非反転増幅回路 .....	10
3.2. 反転増幅回路 .....	11
3.3. 周波数特性 .....	12
4. まとめ .....	13
5. 関連リンク .....	14
6. 製品取り扱い上のお願ひ .....	15

### 1. はじめに

さまざまなセンサーからの微小信号をオペアンプ回路で増幅する場合、増幅したい信号がオペアンプ内部で発生する雑音に埋もれないように入力信号とオペアンプの雑音のS/N比を考慮して増幅回路を設計する必要があります。オペアンプ回路で信号を増幅する際、入力信号は信号ゲインで増幅されますがオペアンプが発生する雑音・オフセット電圧などはノイズゲインによって増幅されます。

本アプリケーションノートではオペアンプ増幅回路を設計する際に考慮すべき、オペアンプの信号ゲイン（シグナルゲイン）とノイズゲインについて説明します。

#### 1.1. 帰還回路

オペアンプのノイズゲイン（NG）について考える前に一般的な帰還回路について説明します。図1は帰還回路の原理を示したものです。

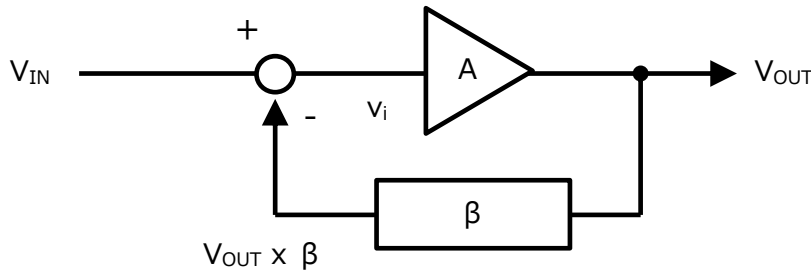


図 1. 帰還回路

オペアンプは非常に高い電圧利得を持つため増幅回路として使用する際には通常、帰還をかけて使用します。

$V_{OUT}$  …… 出力電圧信号 (単位 : V)

$V_{IN}$  …… 入力電圧信号 (単位 : V)

$A$  …… オペアンプのオープンループゲイン (開ループゲイン) (単位 : 倍)

$\beta$  …… 帰還率 (単位 : 倍)

ここで、上記の回路の伝達関数を考えます。

図1において、

$$v_i = V_{IN} - V_{OUT} \times \beta \cdots (1)$$

$$V_{OUT} = A \times v_i \cdots (2)$$

$$V_{OUT} = A (V_{IN} - V_{OUT} \times \beta) \cdots (3)$$

これらの式から(4)式を得ることができます。

$$V_{OUT} / V_{IN} = A / (1 + A \times \beta) \cdots (4)$$

なお、

$1 + A \times \beta$  …… 帰還量

を示します。

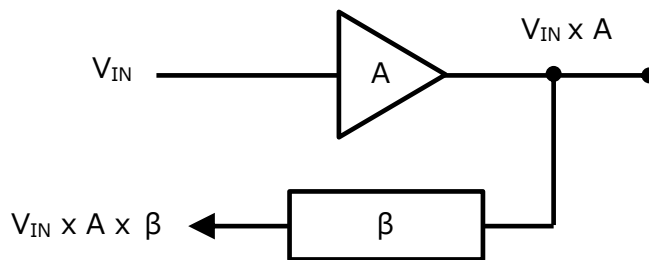


図 2.ループゲイン

図 2 にループゲインの説明図を示します。A x β は図 1 の帰還回路で入力 V<sub>IN</sub> から帰還率βの出力までを一巡する利得を表します。

このため、

$$A \times \beta \cdots \text{ループゲイン}$$

と呼ばれます。

(4)式においてオペアンプのオープンループゲイン A が、 $A \gg 1$  のように非常に大きいと仮定すると図 1 の負帰還回路の利得 G は(5)式のように  $1/\beta$  と近似することができます。

$$V_{\text{OUT}} / V_{\text{IN}} = G \text{ とする}$$

$$G \cdots \text{負帰還回路のゲイン (単位 : 倍)}$$

(4)式から

$$\begin{aligned} V_{\text{OUT}} / V_{\text{IN}} &= G \\ &= A / (1 + A \times \beta) \\ &= 1 / ((1 / A) + \beta) \\ &\doteq 1 / \beta \cdots (5) \end{aligned}$$

なお負帰還回路を構成することによりオペアンプのオープンループゲイン A の値に依存せず帰還率、つまりオペアンプ回路の外付け抵抗により回路の増幅率を決めることができます。また使用できる増幅回路の周波数帯域を広げることができます(3.3 節で説明します)。

ただし帰還をかけないオープンループのときより増幅率が低下し、帰還により回路が発振しやすくなるため注意が必要です。

## 1.2. ノイズゲイン

ノイズゲイン (NG) はオペアンプの入力換算雑音 (ノイズ) に対する電圧利得のことです。また入力換算雑音はオペアンプそのものが発生する雑音が入力端子側にあるものとして換算したものです。オペアンプの雑音はオペアンプ回路内部のいたるところで発生していますが、それをオペアンプの非反転入力端子にノイズ源 ( $V_{\text{NOISE}}$ ) が付いていると仮定します。これが増幅されて出力電圧信号  $V_{\text{OUT}}$  に含まれて出てきますが、 $V_{\text{OUT}}$  の Noise 成分 /  $V_{\text{NOISE}}$  をノイズゲインと言います。なお雑音には電圧ノイズ・電流ノイズや入力オフセット電圧を含みます。

★オペアンプの信号ゲイン …… 出力電圧信号(入力信号が増幅されたもの) / 入力電圧信号  

$$= V_{\text{OUT}}(\text{Signal}) / V_{\text{IN}}(\text{Signal})$$

※出力信号にはオペアンプ内部から発生するノイズ成分(入力換算雑音電圧・入力オフセット電圧など)は含まないものとする。

★オペアンプのノイズゲイン …… 出力電圧信号(ノイズ成分) / オペアンプの内部から発生するノイズ  

$$= V_{\text{OUT}}(\text{Noise}) / V_{\text{NOISE}}$$

※出力信号はオペアンプ内部から発生するノイズ成分が増幅されたもの  
 オペアンプの内部から発生するノイズ ( $V_{\text{NOISE}}$ ) は、入力換算雑音電圧・入力オフセット電圧など

このノイズゲインは前述した(5)式の  $1/\beta$  で示すことができます。

$$\begin{aligned} \text{ノイズゲイン(NG)} &= V_{\text{OUT}}(\text{Noise}) / V_{\text{NOISE}} \\ &= 1 / \beta \cdots (6) \end{aligned}$$

また、

$$\text{オペアンプのトータルの出力電圧 } V_{\text{OUT}} = V_{\text{OUT}}(\text{Signal}) + V_{\text{OUT}}(\text{Noise}) \cdots (7)$$

となります (電圧ノイズ・電流ノイズ・オフセット電圧などのオペアンプのトータルのノイズ成分は、これらの二乗和の平方根で表すことができます)。

上記に記載したオペアンプのノイズについては、下記の FAQ やアプリケーションノートにも記載がございますのでご覧ください。

■ FAQ: オペアンプのノイズとはどんなものでしょうか？



Click

■ アプリケーションノート: センサ信号増幅に最適な CMOS 低ノイズオペアンプ回路の提案



Click

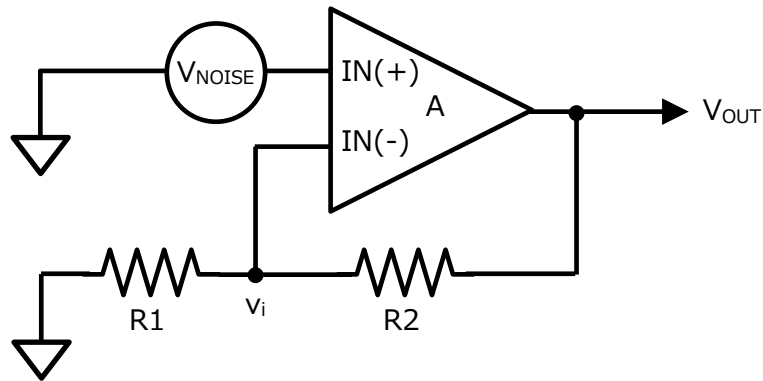


図 3.ノイズゲインの説明図

図 3 において、

$$V_{OUT} = A (V_{NOISE} - v_i) \cdots (8)$$

$$v_i = \beta \times V_{OUT} \cdots (9)$$

$$\text{なお } \beta = R_1 / (R_1 + R_2) \cdots (10)$$

(9)を(8)に代入することで、

$$V_{OUT} = A (V_{NOISE} - \beta \times V_{OUT}) \rightarrow (1 + A \times \beta) \times V_{OUT} = A \times V_{NOISE} \cdots (11)$$

ノイズゲイン NG は、 $V_{OUT}$  に対するノイズ電圧  $V_{NOISE}$  の割合を示します。

このため、

$$V_{OUT} / V_{NOISE} = A / (1 + A \times \beta) = 1 / (1 / A + \beta) \cdots (12)$$

ここで、 $A \gg 1$  の場合、もしくは  $1/A \ll \beta$  の場合 (12)式は下記の通りとなります。

$$V_{OUT} / V_{NOISE} \cong 1 / \beta \cdots (13)$$

つまり(5)式と同じ結果が得られ、ノイズゲイン  $NG = 1 / \beta$  と表すことができます。

### 2. 信号ゲインとノイズゲイン

ここまで帰還回路・負帰還回路とノイズゲインについて、及びノイズゲイン NG は帰還回路の帰還率を $\beta$ とすると、 $NG=1/\beta$ と示すことができることを説明しました。この章ではオペアンプの反転回路と非反転回路のノイズゲインと信号ゲインの考え方を説明いたします。

#### ・非反転増幅回路

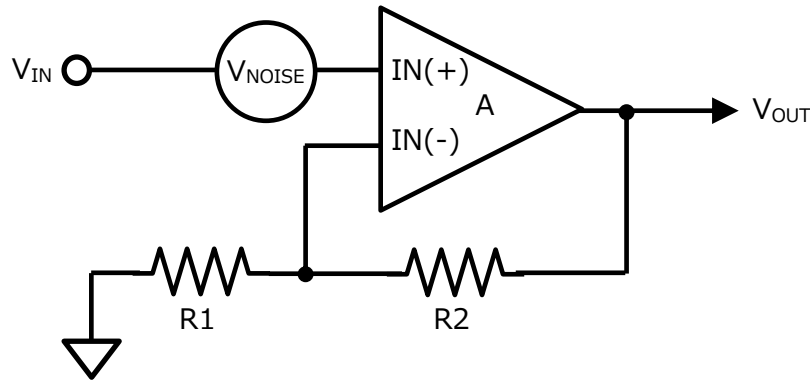


図 4. 非反転増幅回路

図 4 に非反転増幅回路例を示します。

信号ゲイン：

$$V_{OUT} = (1 + R_2/R_1) \times V_{IN} \cdots (14)$$

よって、 $V_{OUT} / V_{IN} = 1 + R_2/R_1 \cdots$  信号ゲイン

ノイズゲイン：

$$V_{OUT} = (1 + R_2/R_1) \times V_{NOISE} \cdots (15)$$

よって、 $V_{OUT} / V_{NOISE} = 1 + R_2/R_1 \cdots$  ノイズゲイン

と表すことができます。つまりノイズゲイン NG は信号ゲインと同じ増幅率となります。これは、オペアンプ内部で発生する雑音成分はオペアンプの非反転入力端子側に有る、とモデル化することができるからです。

また図 4 で帰還率は次のようにあらわすことができます。

$$\text{帰還率 } \beta = R_1 / (R_1 + R_2) \cdots (16)$$

つまり(16)式から

$$1 / \beta = (R_1 + R_2) / R_1 = 1 + (R_2 / R_1) \cdots (17)$$

と表すことができます。

## ・反転増幅回路

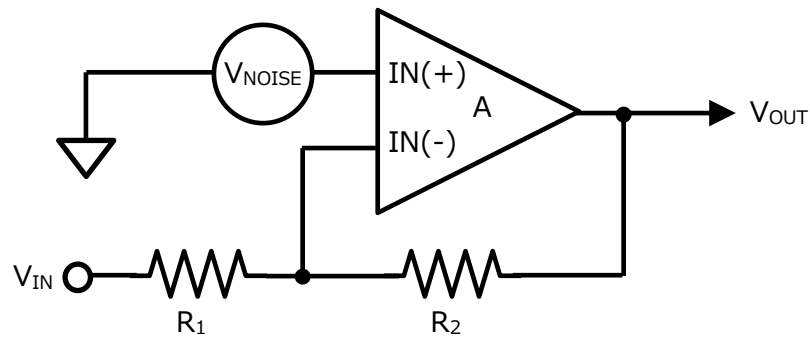


図 5. 反転増幅回路

図 5 に反転増幅回路例を示します。

信号ゲイン：

$$V_{OUT} = - (R_2/R_1) \times V_{IN} \cdots (18)$$

よって、 $V_{OUT} / V_{IN} = - (R_2/R_1) \cdots$  信号ゲイン

ノイズゲイン：

$$V_{OUT} = (1 + R_2/R_1) \times V_{NOISE} \cdots (19)$$

よって、 $V_{OUT} / V_{NOISE} = 1 + R_2/R_1 \cdots$  ノイズゲイン

と示すことができます。反転増幅回路でも入力換算雑音は非反転入力端子に有るとモデル化します。信号は反転入力端子側から入るため、ノイズゲイン NG は信号ゲインと異なる増幅率になります。

逆に反転増幅回路のノイズゲインは、非反転増幅回路のノイズゲインと同じになることがいえます。



ここまで記載した内容をまとめます。

表 1 に、回路図 4 と 5 で説明した各項目をまとめて記載します。

表 1. 反転増幅回路と非反転増幅回路

項目	反転増幅回路	非反転増幅回路
信号ゲイン	$-(R_2/R_1)$	$1/\beta$ また $(1 + R_2/R_1)$
ノイズゲイン	$1/\beta$	$1/\beta$
ループゲイン	$A \times \beta$	$A \times \beta$
帰還量	$1 + A \times \beta$	$1 + A \times \beta$

本章でのポイントをまとめると以下ようになります。

- ・オペアンプ内部で発生する雑音源は、オペアンプの非反転入力端子 IN(+)側に有ると考えることができる。
- ・オペアンプ回路を帰還回路と考えて帰還率を $\beta$ とすると、 $1/\beta$  がノイズゲインとなる。
- ・非反転増幅回路では、信号ゲインがノイズゲインと等しくなる。
- ・反転増幅回路では、信号ゲインとノイズゲインが異なる。
- ・オペアンプの入力オフセット電圧やオペアンプ内部の雑音電圧成分はノイズゲインで増幅される。
- ・ノイズゲインが大きい方が発振しにくくなるが、ノイズや入力オフセット電圧もノイズゲインで増幅され大きくなる。
- ・周波数特性もノイズゲインで考えることができる(後述)。

### 3. 実際の増幅回路の例

ここでは入力オフセット電圧が約 1.4mV のオペアンプを反転増幅回路・非反転増幅回路で増幅した場合の動作例を示します。

使用サンプル：当社 CMOS オペアンプ TC75S51F

回路の電源電圧： $V_{DD} = 2.5\text{ V}$ 、 $V_{SS} = -2.5\text{ V}$  で動作

入力オフセット電圧  $V_{IO}$ ：約 1.4 mV のサンプル

#### 3.1. 非反転増幅回路

非反転増幅回路での動作例を示します ( $R_1:980\ \Omega$ 、 $R_2:29.8\text{ k}\Omega$ )。

信号ゲイン $\cdots 1 + R_2/R_1 = 31.4$  倍 (30 dB)

ノイズゲイン $\cdots 1 + R_2/R_1 = 31.4$  倍 (30 dB)

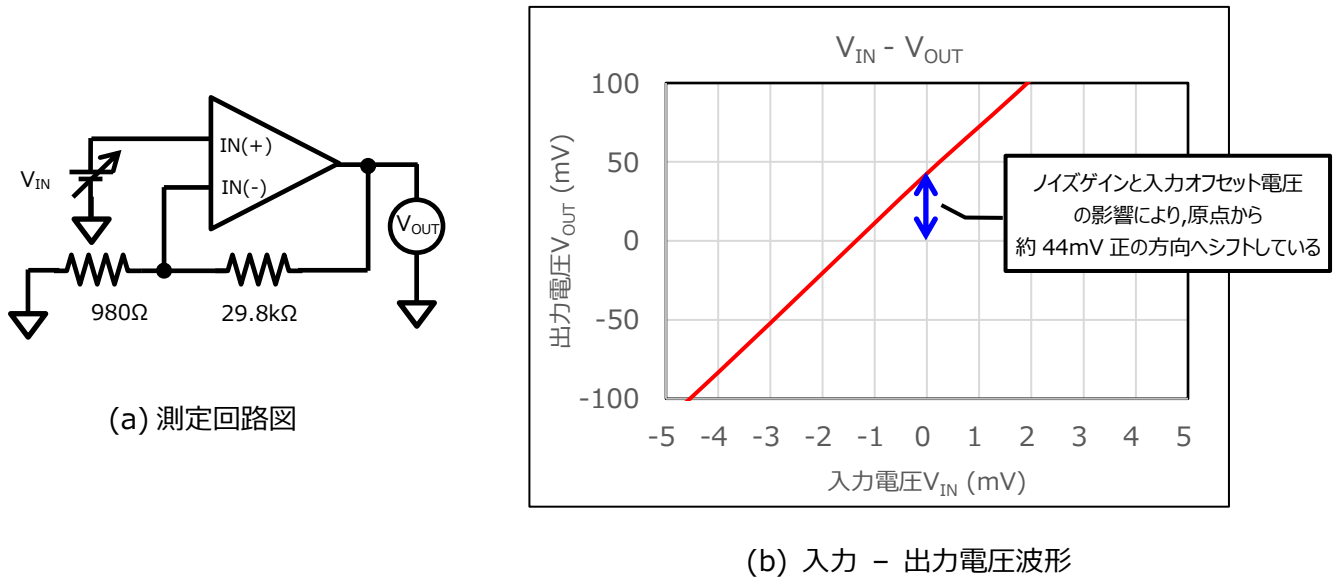


図 6. 非反転増幅回路の回路図と入力-出力電圧波形

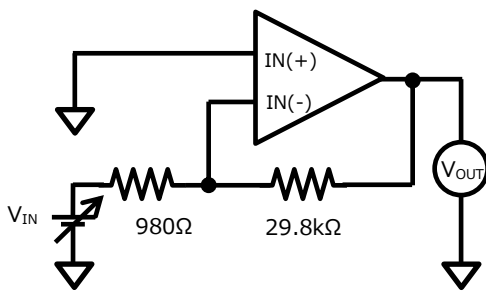
ここでは信号ゲインが 31.4 倍 (30dB) の非反転増幅回路で動作させています (図 6(a))。なお、入力オフセット電圧  $V_{IO} =$  約 1.4mV のサンプルで回路を構成しています。図 6(b)に 入力-出力電圧波形を示します。入力電圧を 31.4 倍しているため  $V_{IN} = 0\text{ V}$  の原点では理想的には出力電圧  $V_{OUT} = 0\text{ V}$  となりますが、ここでは入力オフセット電圧 1.4mV がノイズゲインの影響を受けて  $1.4\text{ mV} \times (1 + 29.8\text{ k}\Omega/980\ \Omega) \approx 44\text{ mV}$  出力電圧  $V_{OUT}$  が正の方向へ電圧シフトしていることが分かります。

### 3.2. 反転増幅回路

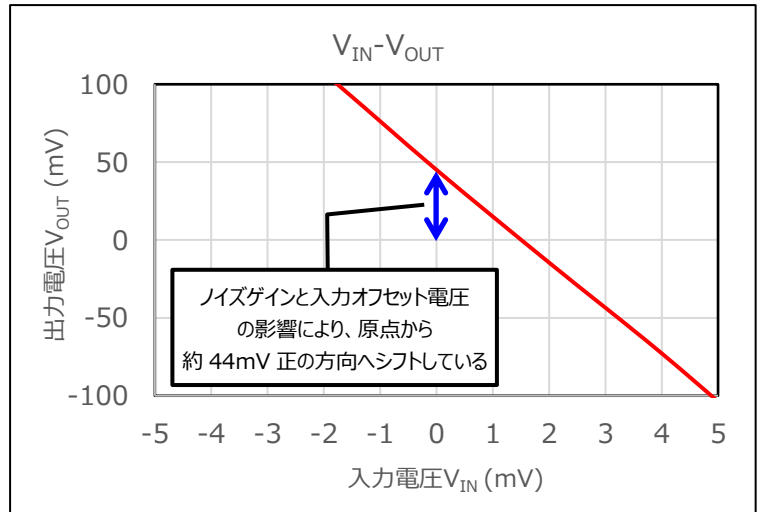
反転増幅回路での動作例を示します (R1:980Ω、R2:29.8kΩ)。

信号ゲイン・・・ - R<sub>2</sub>/R<sub>1</sub> = - 30.4 倍 (30dB)

ノイズゲイン・・・1+R<sub>2</sub>/R<sub>1</sub> = 31.4 倍 (30dB)



(a) 測定回路図



(b) 入力 - 出力電圧波形

図 7. 反転増幅回路の回路図と入力-出力電圧波形

ここでは信号ゲインが -30.4 倍(30dB)の反転増幅回路で動作させています (図 7(a))。なお、入力オフセット電圧  $V_{IO}$  = 約 1.4mV のサンプルで回路を構成しています。図 7(b)に入力-出力電圧波形を示します。入力電圧を-30.4 倍しているため、 $V_{IN} = 0V$  の原点では理想的には出力電圧  $V_{OUT} = 0V$  となりますが、ここでは入力オフセット電圧 1.4mV がノイズゲインの影響を受けて  $1.4mV \times (1 + 29.8k\Omega/980\Omega) \div 44mV$  出力電圧  $V_{OUT}$  が正の方向へ電圧シフトしていることが分かります。

3.3. 周波数特性

当社の CMOS オペアンプ TC75S51F でオープンループゲイン A 及び、閉ループゲイン G を 30dB として構成した回路の周波数特性を示します。

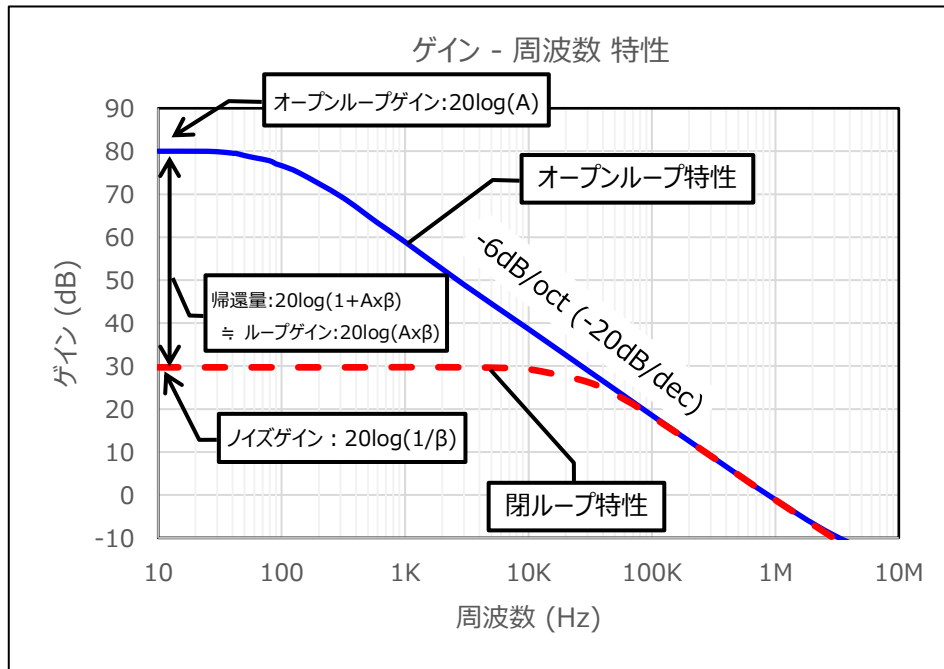


図 8. 周波数特性 (TC75S51F、電源電圧  $V_{DD}=2.5\text{V}$ ,  $V_{SS}=-2.5\text{V}$ )

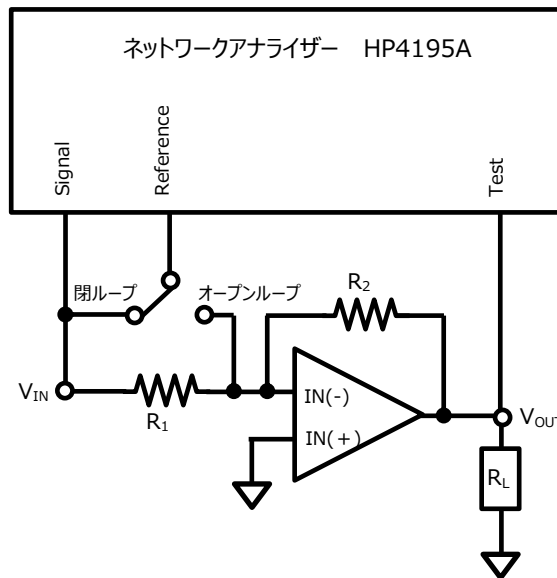


図 9. ゲイン周波数特性測定回路

図 8 に TC75S51F のゲイン vs 周波数特性を示します(測定回路:図 9)。オープンループ特性に対して、閉ループゲイン 30dB で構成した回路の周波数特性は、設定したゲイン 30dB で使用できる周波数帯域が約 10kHz までと広い帯域となっていることが分かります (なおオペアンプ回路の増幅率は周波数特性をもつことに留意する必要があります)。なお閉ループゲインはノイズゲイン ( $1/\beta$ ) と同一の値となります。

また  $Ax\beta \gg 1$  とすると、帰還量  $20\log(1+Ax\beta)$  とループゲイン  $20\log(Ax\beta)$  は、ほぼ等しいと近似することができます。

## 4. まとめ

本アプリケーションノートでは、オペアンプの信号ゲインとノイズゲインについて説明しました。オペアンプの雑音やオフセット電圧はノイズゲインによって増幅されオペアンプから出力されます。またノイズゲインは帰還回路の帰還率 $\beta$ を使って  $1/\beta$ と表すことができますが、この  $1/\beta$ はオペアンプの周波数特性やゲインと関係し、さらにループゲインと関係します。

回路設計でオペアンプを選ぶときにオフセット電圧が小さい製品・雑音電圧が小さい製品を選択することは大切ですが、本アプリケーションで説明した信号ゲイン・ノイズゲインの考え方を使って必要な S/N 比・周波数帯域など考慮し検討することも必要です。

### 5. 関連リンク

■ オペアンプ・コンパレータ—製品カタログ



Click

■ オペアンプ・コンコンパレータ製品のラインアップ



Click

■ オンラインディストリビュータご購入、在庫検索



■ オペアンプ・コンパレータの FAQ



Click

■ アプリケーションノート



Click

## 6. 製品取り扱い上のお願い

株式会社東芝およびその子会社ならびに関係会社を以下「当社」といいます。

本資料に掲載されているハードウェア、ソフトウェアおよびシステムを以下「本製品」といいます。

- 本製品に関する情報等、本資料の掲載内容は、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
- 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。
- 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体・ストレージ製品は一般に誤作動または故障する場合があります。本製品をご使用頂く場合は、本製品の誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことをお願いします。なお、設計および使用に際しては、本製品に関する最新の情報（本資料、仕様書、データシート、アプリケーションノート、半導体信頼性ハンドブックなど）および本製品が使用される機器の取扱説明書、操作説明書などをご確認の上、これに従ってください。また、上記資料などに記載の製品データ、図、表などに示す技術的な内容、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例などの情報を使用する場合は、お客様の製品単独およびシステム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断してください。
- 本製品は、特別に高い品質・信頼性が要求され、またはその故障や誤作動が生命・身体に危害を及ぼす恐れ、膨大な財産損害を引き起こす恐れ、もしくは社会に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器（以下“特定用途”という）に使用されることは意図されていませんし、保証もされていません。特定用途には原子力関連機器、航空・宇宙機器、医療機器（ヘルスクエア除く）、車載・輸送機器、列車・船舶機器、交通信号機器、燃焼・爆発制御機器、各種安全関連機器、昇降機器、発電関連機器などが含まれますが、本資料に個別に記載する用途は除きます。特定用途に使用された場合には、当社は一切の責任を負いません。なお、詳細は当社営業窓口まで、または当社 Web サイトのお問い合わせフォームからお問い合わせください。
- 本製品を分解、解析、リバースエンジニアリング、改造、改変、翻案、複製等しないでください。
- 本製品を、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用することはできません。
- 本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- 別途、書面による契約またはお客様と当社が合意した仕様書がない限り、当社は、本製品および技術情報に関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をしておりません。
- 本製品、または本資料に掲載されている技術情報を、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍사용途の目的で使用しないでください。また、輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守し、それらの定めるところにより必要な手続を行ってください。
- 本製品の RoHS 適合性など、詳細につきましては製品個別に必ず当社営業窓口までお問い合わせください。本製品のご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用ある環境関連法令を十分調査の上、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は一切の責任を負いかねます。

## 東芝デバイス&ストレージ株式会社

<https://toshiba.semicon-storage.com/jp/>