

平成 30 年度
卒業研究報告

研究題目

熱雑音を測定できる増幅回路の開発

指導教員 由井 四海

富山高等専門学校

電子情報工学科

森本 汐音

平成 31 年 2 月 21 日提出

第1章 序論

1. はじめに

回路の評価をする上では、ノイズの評価は欠かせないものである。しかし、ノイズは小さいものであるため、一般的なデジタルマルチメータでは直接測定することが出来ない。さらに、小信号の測定では、信号がノイズに埋もれてしまうことがある。すると、そのノイズの影響で、信号が測定できなくなるという問題が発生する。そのため、小信号を測定するためには、測定機器の測定限界を知る必要がある。測定限界を決める要素の1つとして、熱雑音の大きさがあげられる。この熱雑音とは、電圧を印加しなくても抵抗から発生するノイズのことである。しかし、測定機器の入力感度が低いこと、入力静電容量が大きいことなどの理由から、従来の測定機器では熱雑音を直接測定することができない。そのため、熱雑音を測定するには、デジタルマルチメータで測定可能な大きさまで熱雑音を増幅させる必要がある。

本研究では、抵抗の熱雑音をデジタルマルチメータで測定することが出来る低雑音増幅回路の開発を行う。

第2章 理論

抵抗のノイズ

抵抗のノイズには、電圧を印加することで発生するショットノイズと $1/f$ ノイズ、電圧を印加しなくても発生する熱雑音がある。ショットノイズとは、電子のようなエネルギーをもった粒子の数の統計的変動によって発生するノイズのことである[1]。 $1/f$ ノイズとは、抵抗を構成している材料と、抵抗のリード間の接続が原因で発生するノイズのことである。また、熱雑音とは、抵抗中の自由電子が外部からの熱エネルギーによって振動することで発生するノイズのことである。この熱雑音が、抵抗から発生するノイズの大部分を占めている。熱雑音は、(1)式で定義される。

$$V_{\text{noise}} = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot BW} \text{-----(1)}$$

ここで、 k はボルツマン定数、 T は雰囲気温度[K]、 R は抵抗の抵抗値[Ω]、 BW は帯域幅[Hz]である。

第3章 研究概要

2段の場合の低雑音増幅回路

熱雑音を測定するために、低雑音増幅回路を作成した。この回路は、抵抗の熱雑音をデジタルマルチメータで測定できる大きさまで増幅させることを目的とした回路である[2]。回路図を図1に示す。

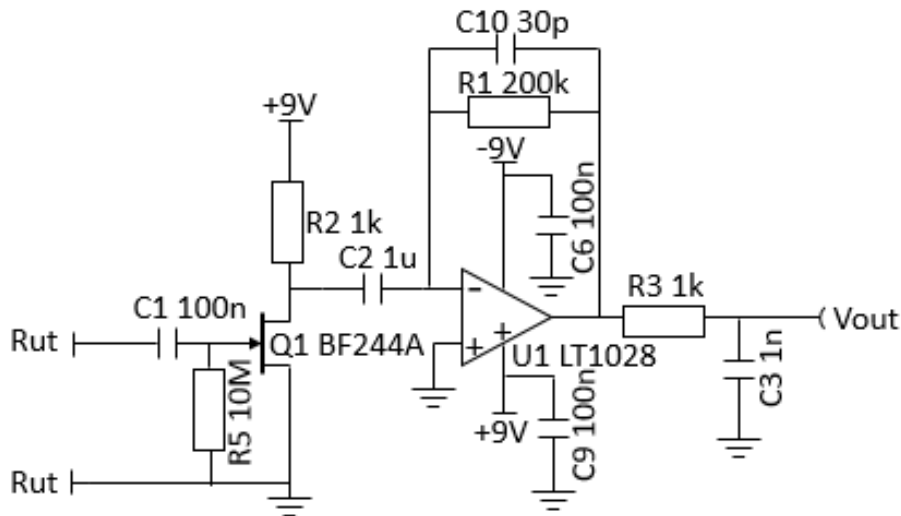


図1 低雑音増幅回路

この回路の、Rut 端子間に抵抗を入れることによって、熱雑音を測定することが出来る。また、Rut 端子間を短絡することによって、回路自体のノイズを測定することが出来る。この回路は、大きく分けると 2 段構成になっている。1 段目では、C1 と R5 のハイパスフィルタによって、直流成分を取り除き、その信号を JFET で約 5 倍に増幅している。2 段目では、1 段目で増幅した信号をさらに増幅して、デジタルマルチメータで測定可能な大きさにしている。

この回路を用いて、 50Ω の抵抗の熱雑音を測定するためには、最低でも 637 倍必要となる。これは、帯域幅が 30kHz で、デジタルマルチメータで測定した際に、0.1mV と表示するときとしている。

3 段の場合の低雑音増幅回路

2 段にした場合と 3 段にした場合では、増幅度を変えたときの熱雑音の理論値と測定値の差と、増幅度と測定限界の関係に違いがでるか調べるために、3 段にした低雑音増幅回路を作成した。回路図を図 2 に示す。

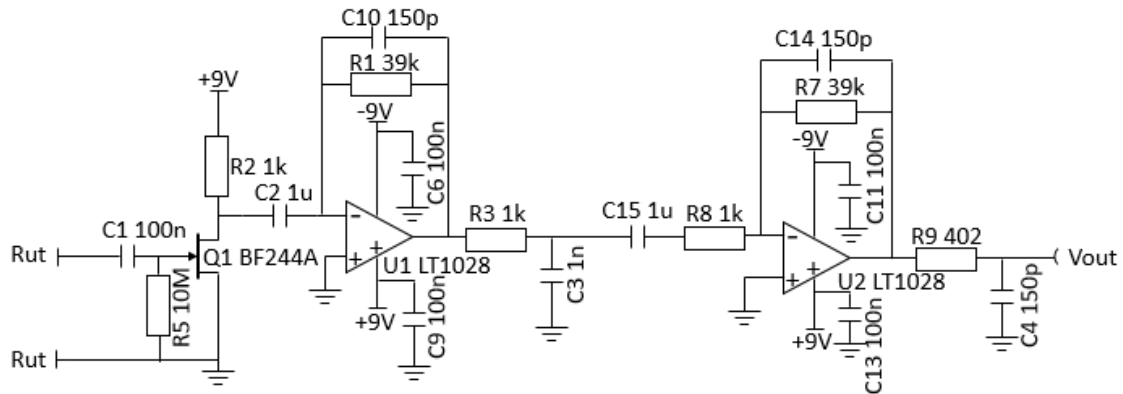


図 2 3 段にした場合の低雑音増幅回路

この回路の 3 段目は、2 段目の回路をもう 1 つ追加したものとなっている。3 段目では、2 段目で増幅した信号をさらに増幅している。

この回路を用いて、 50Ω の抵抗の熱雑音を測定するためには、2 段の場合と同様に、最低でも 637 倍必要となる。

素子の選定理由

低雑音増幅回路に用いる素子には、いくつか重視すべき点がある。JFET には、内部ノイズが小さいことと、入力静電容量が小さいことが必要となる。内部ノイズを小さくするのは、熱雑音以外のノイズが加わらないようにするためである。入力静電容量を小さくするのは、測定したい抵抗と合わせたときに RC フィルタ(ローパスフィルタ)を形成して、帯域幅を狭めないようにするためである。また、オペアンプには、電圧ノイズと電流ノイズが小さいことと、利得帯域幅積が大きいことが必要となる。電圧ノイズと電流ノイズを小さくするのは、JFET のときと同様に熱雑音以外のノイズが加わらないようにするためである。利得帯域幅積が小さい場合の例を図 3 に示す。利得帯域幅積が小さいと、周波数を高くしたときに増幅度を一定に保てず、小さくなってしまいうというデメリットが存在する。そのため、利得帯域幅積が大きいことが必要となる。

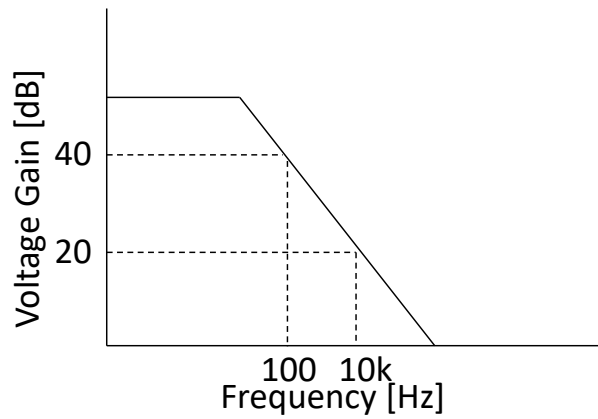


図3 利得帯域幅積が小さい場合

作成した基板

図2の回路の基板を作成した。基板の表面を図4に、基板の裏面を図5に示す。この回路の R_{ut} 端子間に抵抗を入れることで、熱雑音を測定する。出力は、回路が2段目の場合と3段目の場合の両方を測定できるように、2つになっている。また、電源はスイッチでON/OFFができるようになっており、電源がONの場合には、LEDが点灯するようになっている。抵抗やコンデンサは、付け替えが可能になっており、様々な素子のパターンで測定することが出来る。

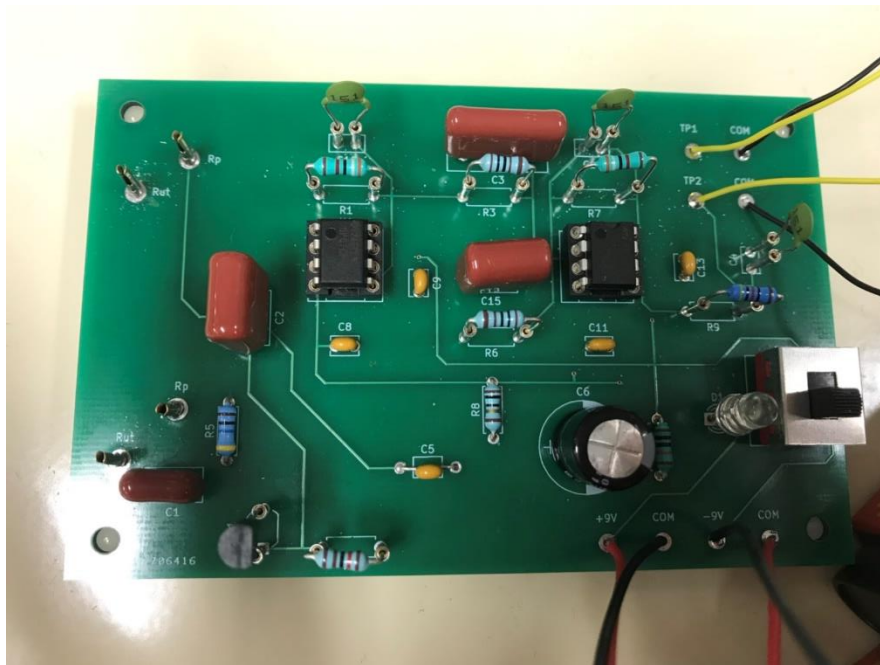


図4 基板の表面

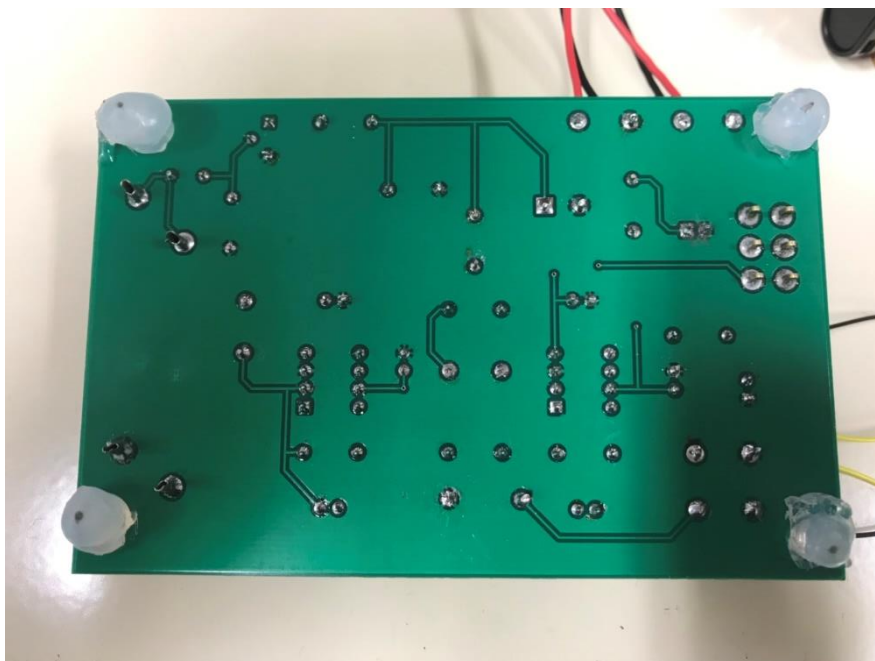


図 5 基板の裏面

測定方法

熱雑音は、小信号であるため、蛍光灯からのノイズや、静電気といったノイズの影響を受けやすい。そのため、外部からのノイズを遮断するために、基板を金属の容器に入れてシールドした状態で測定する。

回路の増幅度を変えたときの熱雑音の理論値と測定値の差と、増幅度と測定限界の関係について調べる。図 1 の回路の増幅度は、R1、C10 の素子の値によって決まる。この素子の値をそれぞれ表 1 のようにして測定する。

表 1 素子の組み合わせ

素子の値	増幅度[倍]	ノイズ帯域幅[Hz]
①R1=300k Ω C10=20pF	990	31856
②R1=200k Ω C10=30pF	653	32754

同様に、図 2 の回路の増幅度は、R1、C10、R7、C14 の素子の値によって決まる。この素子の値をそれぞれ表 2 のようにして測定する。

表 2 素子の組み合わせ

素子の値	増幅度[倍]	帯域幅[Hz]
①R1, R7=39k Ω C7,C14=150pF	2642	19452
②R1, R7=24k Ω C7,C14=220pF	1023	21015
③R1, R7=20k Ω C7,C14=330pF	710	20460

それぞれの素子の組み合わせごとの、回路自体のノイズと、熱雑音の測定値が等しくなるところの抵抗の値を測定限界とした。

第4章 結果

シミュレーションによるノイズ解析

電子回路シミュレータソフトウェア TINA を用いてノイズ解析を行った。ノイズ解析を行うことで、その回路自体のノイズの大きさをシミュレーションすることができる。回路が2段の場合と3段の場合のノイズ解析のシミュレーション結果を図6に示す。

このグラフより、帯域幅が30kHzのときの回路自体のノイズは、増幅度が2642倍の場合は0.89mV、1023倍の場合は0.35mV、710倍の場合は0.23mV、990倍の場合は0.34mV、653倍の場合は0.23mVとなった。これにより、回路の増幅度を大きくすると、回路自体のノイズの大きさも大きくなった。これは、増幅度を大きくしようとするとき、使用する抵抗の大きさが大きくなることで、熱雑音の大きさも大きくなるからであると考えられる。また、回路が2段の場合と3段の場合でも、増幅度がほぼ同じであるときには、回路自体のノイズも同じ大きさとなった。

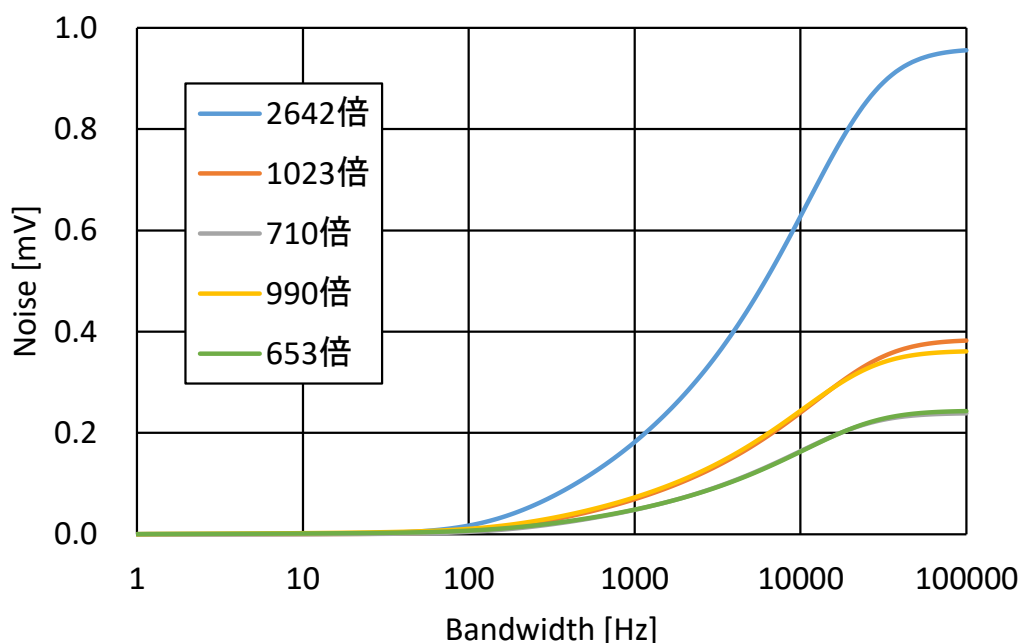


図6 ノイズ解析のシミュレーション結果

ノイズ密度への変換

測定する抵抗の値を変えたときの、デジタルマルチメータの読みの関係を表したグラフを図6に示す。デジタルマルチメータの読みは、熱雑音を増幅した値であるので、(2)式で表せる。

$$V = A \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot BW} \quad [\text{Vrms}] \text{-----(2)}$$

この式は、(1)式に増幅度Aをかけたものである。

しかし、ノイズは一般的にノイズ密度で評価されるため、(2)式を $A\sqrt{BW}$ で割ることで(3)式に変換して比較する。

$$V = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R} \quad [\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}] \quad \text{-----}(3)$$

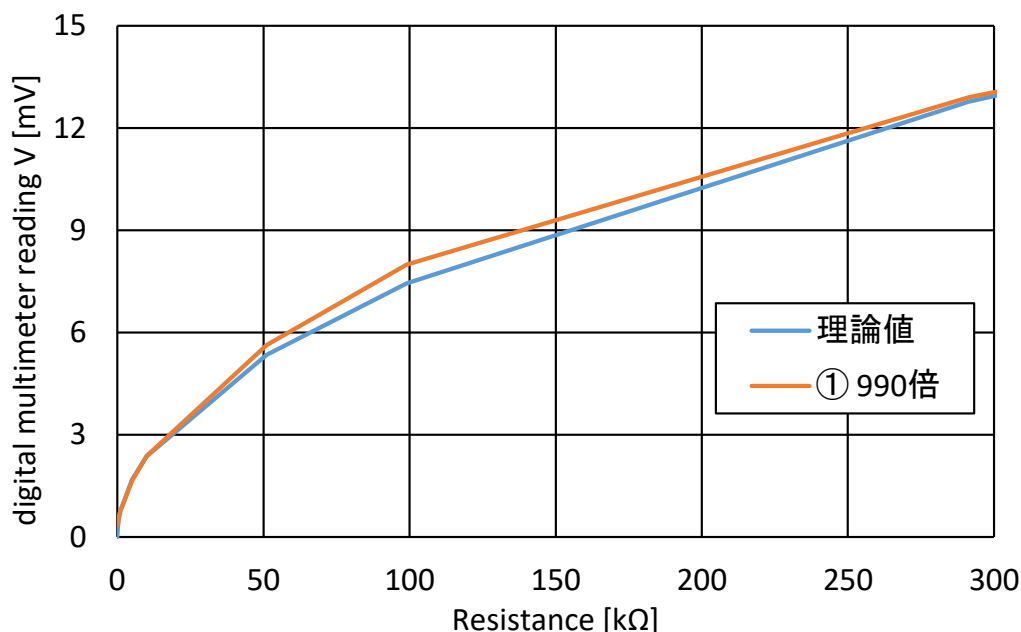


図 7 熱雑音の測定値と理論値の比較

2 段の場合の測定結果

測定する抵抗の値を変えたときの、ノイズ密度の関係を表したグラフを図 7 に示す。このグラフより、測定値と理論値との差の最大値は、①の場合は $4.25 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、②の場合は $2.98 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ となった。これにより、測定した熱雑音と理論値との差の最大値は、 $5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ となった。測定値と理論値との差が最大となったのは、 $100 \text{ k}\Omega$ の抵抗を測定値したときであった。 $5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ は、抵抗値で表すと $1 \text{ k}\Omega$ であるため、測定した抵抗値との誤差は 1% となった。

測定できる抵抗の大きさを表したグラフを図 8 に示す。このグラフは、図 7 のグラフのノイズ密度の値を 2 乗したものである。ノイズの足し合わせは(4)式で表すことができる。この式の両辺を 2 乗すると(5)式となり、ノイズの足し合わせがただの足し算で行うことができるようになるため、ノイズ密度を 2 乗にした。

$$V_{1+2} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2} \quad \text{-----}(4)$$

$$V_{1+2}^2 = V_1^2 + V_2^2 \quad \text{-----}(5)$$

図 8 のグラフの抵抗値が 0Ω のときのノイズ密度の値が、回路自体のノイズである。ノイズ密度は、回路自体のノイズ以上でないと測定できない。そのため、ノイズ密度の値と回路自

体のノイズが等しくなる場所を測定限界とした。図 8 のグラフ上の赤い点はその測定限界を表している。この赤い点のときの抵抗値が、熱雑音を測定できる抵抗の大きさであると定義する。

このグラフより、測定できる抵抗の大きさは、①の場合は 360Ω、②の場合は 350Ωとなった。これにより、回路が 2 段の場合には増幅度を小さくしても、測定できる抵抗の大きさはほとんど変わらなかった。

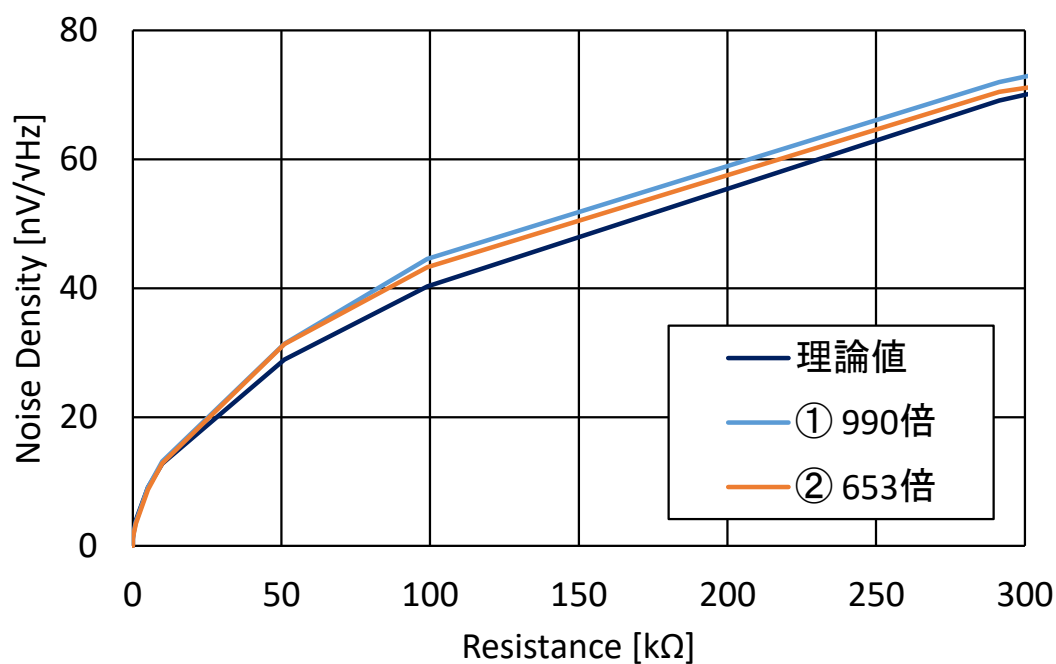


図 8 2 段の場合の測定結果と理論値の比較

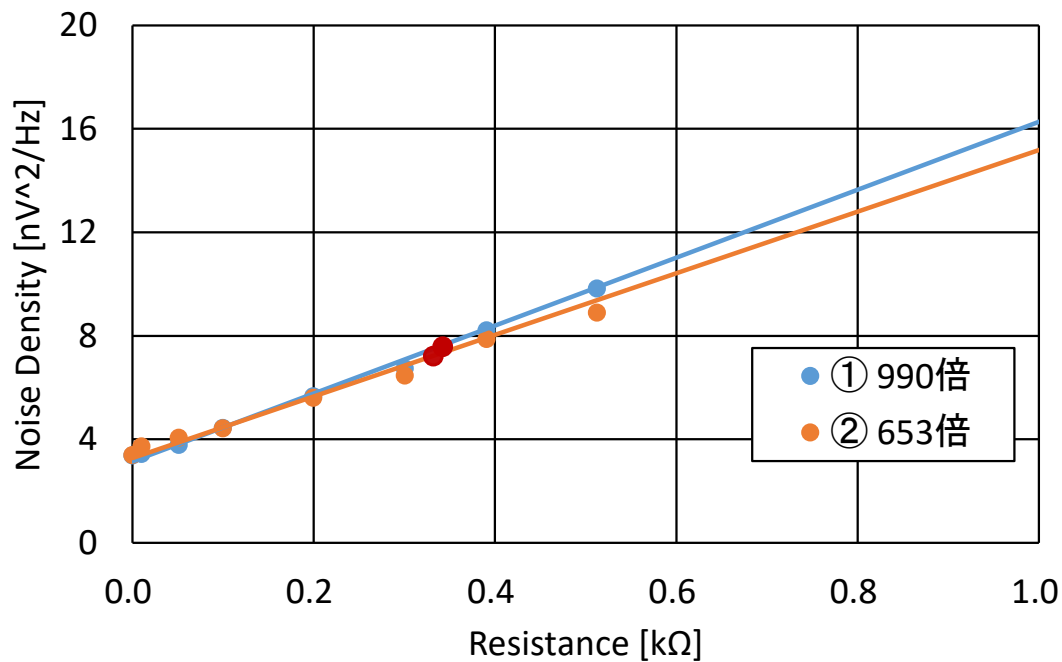


図 9 2段の場合の測定できる抵抗の大きさ

3段の場合の測定結果

測定する抵抗の値を変えたときの、ノイズ密度の関係を表したグラフを図 9 に示す。このグラフより、測定値と理論値との差の最大値は、①の場合は $1.72 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、②の場合は $4.98 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、③の場合は $4.69 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ となった。これにより、測定した熱雑音と理論値との差の最大値は、2段の場合と同じく $5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ となった。測定値と理論値との差が最大となったのは、 $300 \text{ k}\Omega$ の抵抗を測定値したときであった。 $5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ は、抵抗値で表すと $1 \text{ k}\Omega$ であるため、測定した抵抗値との誤差は 0.3% となった。

測定できる抵抗の大きさを表したグラフを図 10 に示す。このグラフは、2段の場合と同様に図 8 のグラフのノイズ密度の値を 2 乗したものである。図 10 のグラフ上の赤い点はその測定限界を表している。この赤い点のときの抵抗値が、熱雑音を測定できる抵抗の大きさである。このグラフより、測定できる抵抗の大きさは、①の場合は 360Ω 、②の場合は 300Ω 、③の場合は 230Ω となった。これにより、回路が 3 段の場合には、増幅度を小さくすると、測定できる抵抗の大きさも小さくなった。

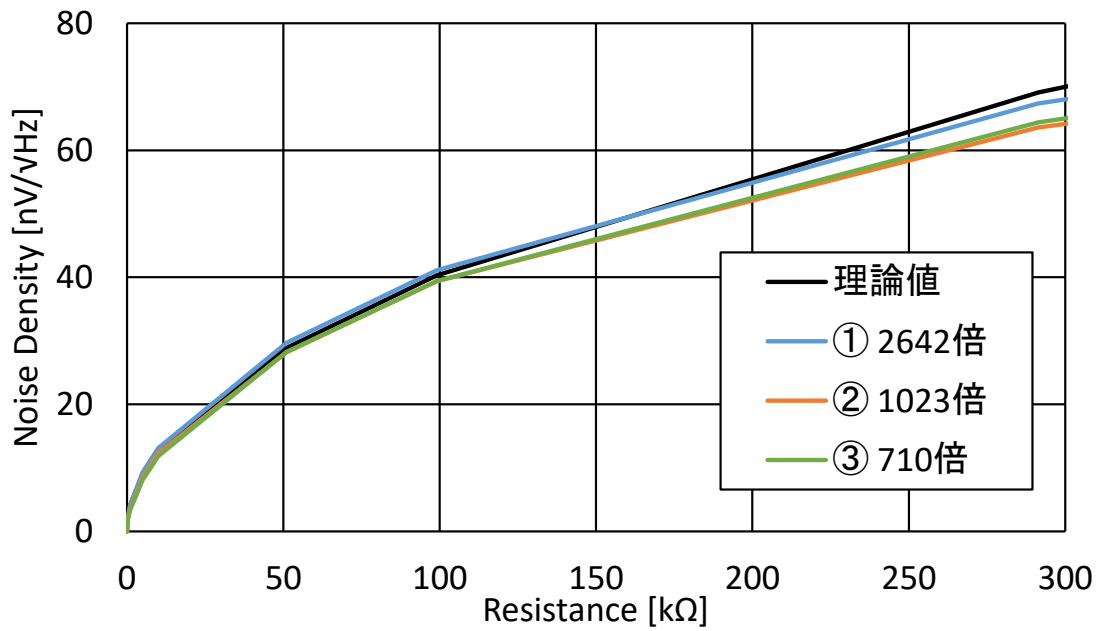


図 10 3 段の場合の測定結果と理論値の比較

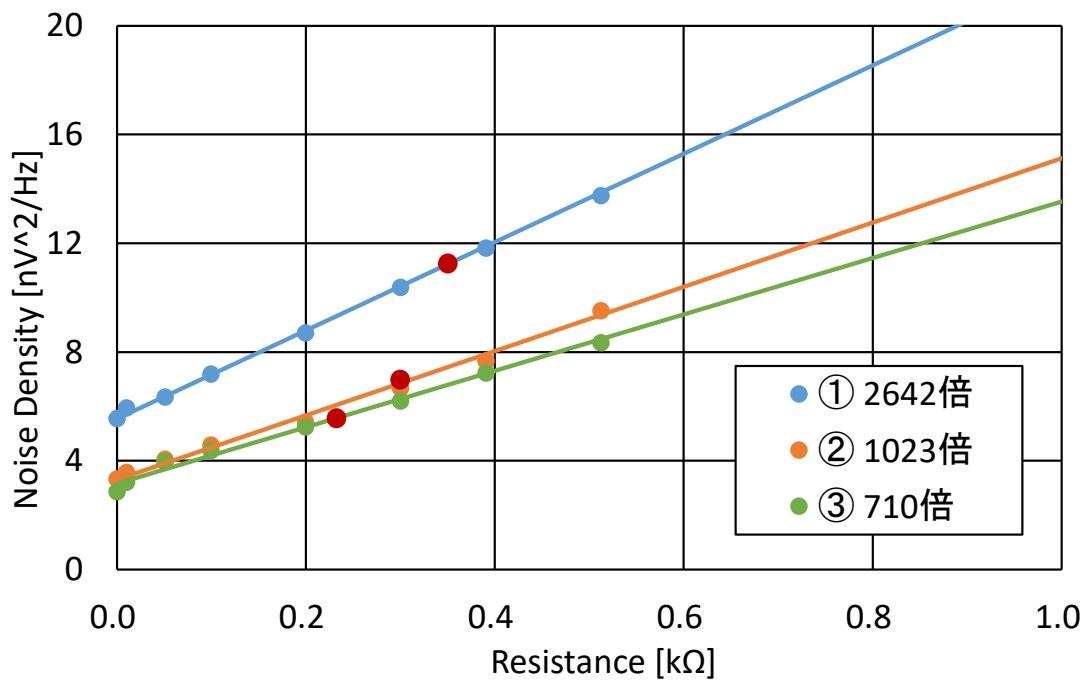


図 11 3 段の場合の測定できる抵抗の大きさ

2 段の場合と 3 段の場合の比較

測定する抵抗の値を変えたときの、ノイズ密度の関係を表したグラフを図 11 に示す。このグラフの、オレンジは回路が 2 段の場合の測定結果、青は回路が 3 段の場合の測定結果

を表している。測定できる抵抗の大きさは、回路が 2 段で増幅度が 653 倍のときには 350 Ω 、回路が 3 段で増幅度が 710 倍のときには 230 Ω となった。2 段の場合には、増幅度を小さくしても測定できる抵抗の大きさは変わらなかったのに対して、3 段の場合には、増幅度を小さくすると測定できる抵抗の大きさは小さくなった。

また、回路自体のノイズは、3 段の場合の方が 2 段の場合よりも小さくなった。これは、抵抗値を大きくしたときに増加するノイズと、増幅度を大きくしたときに増加するノイズを比べたときに、抵抗値を大きくしたときに増加するノイズの方が、回路自体のノイズに影響が大きいと考えられる。

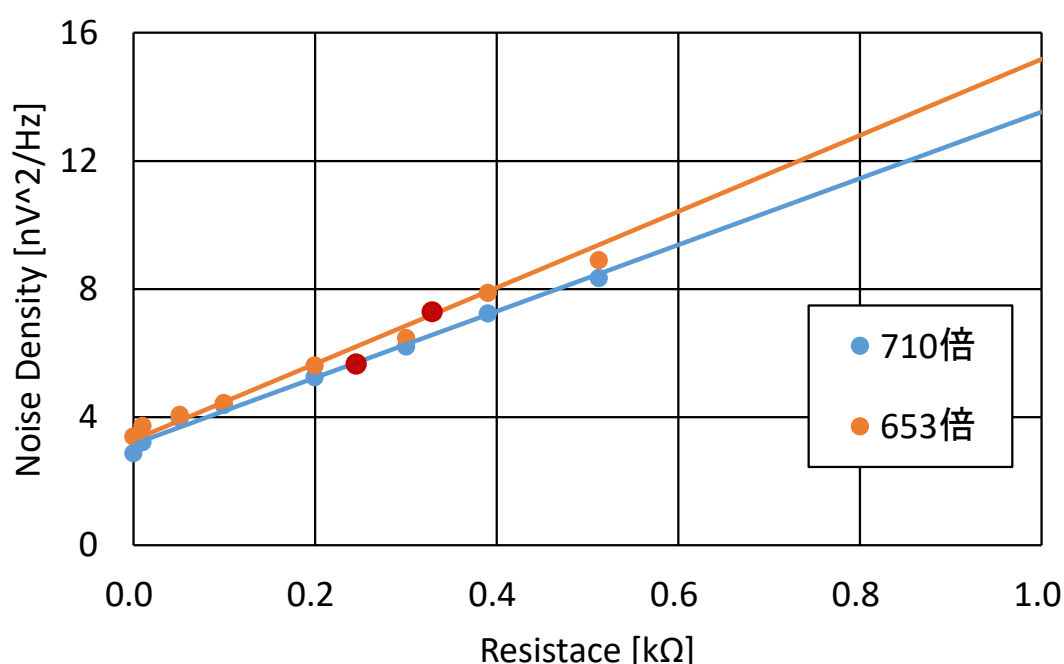


図 12 測定できる抵抗の大きさの比較

第 5 章 まとめ

抵抗の熱雑音を、デジタルマルチメータを用いて測定するために、低雑音増幅回路を開発した。この回路が 2 段の場合と 3 段の場合の測定結果を比較した。それにより、回路が 2 段の場合よりも 3 段の場合の方が、測定できる抵抗の大きさが小さくなった。また、回路が 3 段の場合には、増幅度を小さくすることで測定できる抵抗の大きさも小さくなった。

参考文献

- [1]Hyperbola Optics <http://hyperbolaoptics.com/>
- [2] Joe Geller, NUTS&VOLTS, 54-62, 2007