

センシング：「光センサー」

実験担当教員 高尾英邦

平成 30 年 4 月改定版

1. 実験目的

本実験では、センサーとアナログ信号処理回路を用いたセンサー信号の計測を実施する。センサーからの微弱な信号の取り扱いやノイズ（雑音）の低減手法を体得し、センサー信号の取り扱いに関する留意点とセンサー情報処理の基本について修得する。

2. 実験概要と各部の動作原理

2.1 本実験の概要

ここで経験する実験技術は、ブレッドボードを用いた簡単な回路の形成と電源、計測装置への配線となる。また、センサーから得られる微弱な信号をデジタル・オシロスコープで観測し、そこに含まれるノイズ（雑音）を低減して確度の高い信号を観測する能力も身につける。

ここでは信号を計測する対象のセンサーとして、光センサーを実験に用いる。用いる光センサーは半導体シリコンを材料とするフォトダイオード（PD）である。また、光センサーに入力する信号源として、赤色発光ダイオード（赤色 LED）を用いる。図 1 に示すように、光センサーの信号を計測する本実験においては、信号源となる赤色 LED から照射された光が、光センサーとして働くフォトダイオード PD に伝達される様、LED と PD をブレッドボード上で正確に向き合わせて配置することが肝要である。LED と PD が向き合った状態で赤色光の信号強度を変化させ、光センサー PD でその変化を検知する。LED からの発光強度や周波数を変化させることで、受光回路を含めた光センサーの特性を評価する。本実験で計測する光センサーの特性は以下の 2 つである。

- ・ 時間に対して強度が一定の光信号に対するセンサーの応答特性（DC 特性）
- ・ 時間に対して強度が動的に変化する光信号に対するセンサーの応答特性（AC 特性）

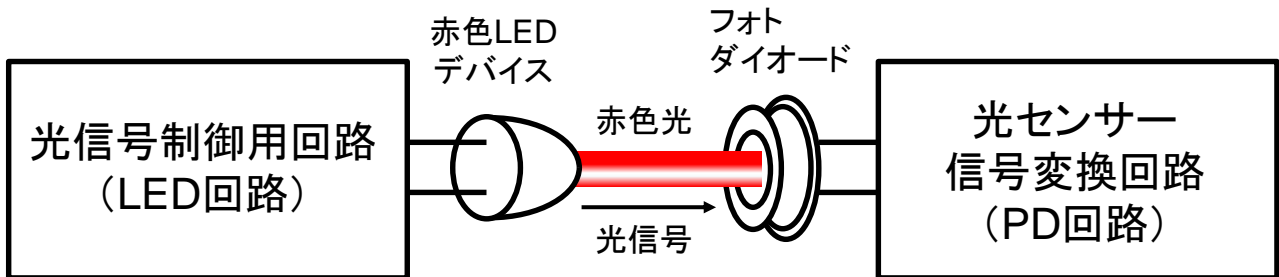


図 1 発光ダイオード（LED）とフォトダイオード（PD）の配置関係

2.2 発光ダイオード(LED)とその駆動回路の動作

2.2.1 LED 回路:発光ダイオード駆動回路の構成

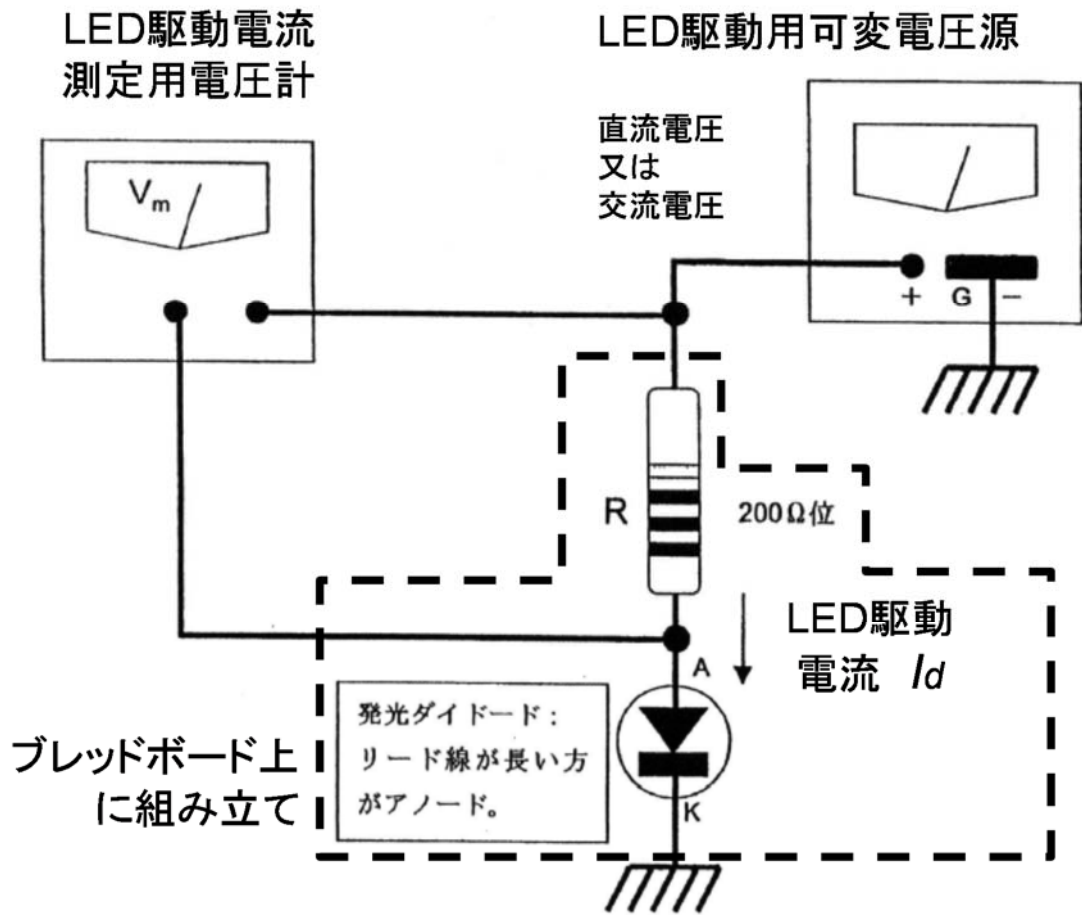


図2 LED駆動回路(LED回路)の接続図

次に、信号源となるLEDからの光信号制御法について説明する。一般に、半導体のLEDデバイスから発光する光の強度は、LEDに供給される駆動電流に対してほぼ比例的に変化することが知られている(ただし、大きな駆動電流によるジュール損が生じ、LEDが発熱するなどして発光効率が下がる場合はこの限りでない)。LED駆動電流を調節する回路(LED回路)は、赤色LEDと抵抗、金属配線を用いてブレッドボード上に組み立てられる。この回路は図2に示される様に、非常に単純な構成であり、抵抗Rを通じて印可する電圧を調整することでLEDを駆動する電流を制御し、光信号の強度を変化させる。また、印加電圧を直流から交流に変えることで、光入力の変化する速度(周波数)を変化させることが可能である。今回は光センサーのDC特性とAC特性の計測を行うため、外部に接続した可変電源の周波数ならびに印加電圧の大きさ(振幅)を変化させて各種実験を進めてゆく。

本回路における抵抗Rは、LEDがON状態になった際に大電流が流れてLEDが焼損することを防ぐ「電流抑制」という役割に加えて、LED駆動電流の計測を容易にするため電圧値に変換する「電流-電圧変換」の役割も担っている。抵抗Rが持つ2つの役割については、以下で説明する。

2.2.2 抵抗Rの役割1:大電流によるLEDの焼損防止

まず「電流抑制」としての抵抗Rの役割について説明する。LEDを含めて、半導体のpn接合によるダイオード素子には、電流を流す順方向と、電圧に対して電流を流さない逆方向がある。順方向に直流電圧

をかける場合、ダイオードが順方向の電流を流しはじめる一定の電圧（障壁電圧という）を超えた後は電圧の増加に対して電流が急速に増加しはじめる。電流が流れているこの状態をダイオードの「ON 状態」といい、僅かな電圧変化でも電流値が大きく増減する。これは ON 状態のダイオードが抵抗値の小さい抵抗のように振る舞うためである。抵抗 R が無い場合、印加された電圧によっては LED を焼損させるに十分大きい値の電流を流す危険性がある。図 2 に示す実験用回路では、LED に対して直列に約 $200\ \Omega$ の抵抗 R を接続する。よって、ON 状態の LED が示す抵抗が限りなく低い場合でも約 $200\ \Omega$ の抵抗が直列電源に接続されているのと等価であり、ON 状態となった LED に過大な電流が流れてしまう可能性を低下させることができる。

2.2.3 抵抗 R の役割 2: LED 駆動電流の計測

次に、LED 駆動電流を抵抗 R で計測するための「電流-電圧変換」について説明する。LED はある一定の電圧を超えると急速に電流を流しはじめる非線形的な振る舞いを示す電子デバイスであり、抵抗のように印加電圧と電流は比例関係にない。よって、実験で LED の発光強度を変調し、その発光強度を知る上では、LED 駆動電流を何らかの方法で外部からモニタリングする必要がある。一般に、ある回路を流れる電流を計測するには、その回路に直列に電流計を挿入する手法が用いられるが、回路を切断する必要があるなどのデメリットもある。よって、ここでは抵抗を利用した電流-電圧変換を用いて、回路を切断することなく外部から LED 駆動電流を計測する。図 2 において、抵抗 R は LED と直列に接続されている。電圧計の内部抵抗は非常に高く、そちらに流れ込む電流を無視できるとすると、LED を流れる電流と抵抗 R を流れる電流は等しくなることが分かる。すなわち、抵抗 R の電流が分かれば LED を流れる駆動電流を知ることができる。抵抗 R を流れる電流は、自身の抵抗値と抵抗両端にかかる電圧を用いて、オームの法則から以下(1)式の様求められる。

$$I_d = \frac{V_m}{R} \quad (1)$$

ここで V_m は抵抗 R の両端電圧、 R は抵抗値である。上述の通り、抵抗として本実験では $200\ \Omega$ 前後の抵抗を用いる。抵抗 R の抵抗値により、流れる電流をオームの法則で間接的に計測できる。よって、電流が流れる回路を電流計で切断することなく、LED の駆動電流を外部からモニタリングできる。

2.3 フォトダイオード(PD)と信号増幅回路の動作

2.3.1 フォトダイオードからの信号

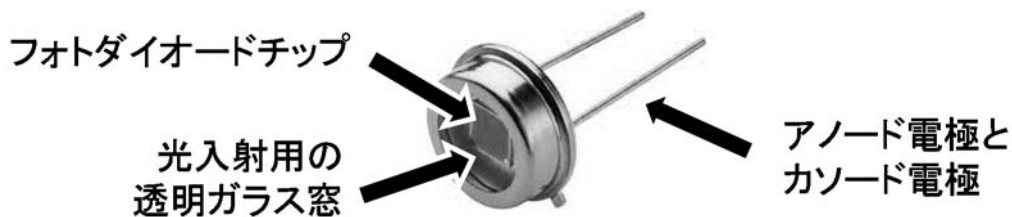


図 3 半導体シリコンのフォトダイオード (PD) 素子

次に、図 1 に示されるフォトダイオード用の信号変換回路（PD 回路）について、その動作を説明する。今回の実験で用いるフォトダイオードは光センサーの一種であり、半導体の光電効果を利用したものである。図 3 はフォトダイオード（PD）のデバイス写真である。光電効果は、半導体の太陽電池が光エネルギーを電気エネルギーに変換する際にも用いられている。光電効果の原理によれば、PD の内部に存在する半導体 pn 接合に入射された光強度（パワー）と pn 接合から流れ出る電流の間には、広い光強度の範囲に渡って比例的な関係がある。よって、フォトダイオードからの出力電流の値を計測することで、光信号の強度を計測することが可能であり、これを光センサーとして用いることができる。

しかしながら、信号伝達に用いられる電気信号は一般的に電圧値であることが多く、電流値で信号の強度を表現することには多少の困難を伴うものである。電子回路の世界で、電気信号として「電流」よりも「電圧」が多く用いられる理由としては、以下の三つの要因を挙げることができる。第一の理由として、電圧は電圧計を回路に並列に接続するだけで計測可能であることから、計測自体が容易であることがある。一方で、電流を信号とする場合は計測箇所の回路に直列接続で電流計を接続しなければ信号計測が行なえず、利便性を欠くものとなる。第二に、電圧信号の伝送はエネルギー効率が低いという理由がある。電圧信号は高いインピーダンスの回路であっても信号伝達が可能である。そのため、流れる電流が小さく、信号伝送で生じるエネルギー損失も小さく押さえられる。一方、電流で信号を伝送する場合は、信号経路にある程度の電流が流れることになる。よって、電流の二乗に比例するジュール損が増加しやすく、信号伝送にかかるエネルギー効率を高めることが難しい（消費電力が増加しやすい）という問題が生じる。第三の理由は、マイクロプロセッサとの接続性の良さである。今日、アナログ信号をデジタル変換し、マイクロプロセッサやコンピュータに信号を入力する機会が増えている。電圧信号をアナログからデジタルに変換する（AD 変換する）ことは、電流信号を変換することよりも容易であり、高性能の AD 変換器はほぼ全て電圧信号を取り扱っている。

上記の三つの理由から、センサーをシステムに拡張する際の利便性、消費電力の低下、デジタルシステムへの接続等を考慮すれば、センサー信号を電圧で取り扱うことが合理的である。そこで、本実験においても、PD の信号を電流から電圧に変換し、電圧値として電圧計、ならびにオシロスコープにて計測する。ここで、2.2 で述べた LED 駆動電流の計測においても、同じく電流値を電圧値に変換していることに気付く学生諸君もいるであろう。この様に、電流を知りたいデバイスに直列接続した抵抗を用い、流れる電流を電圧に変換することは多くの計測現場で用いられる一般的な手法である。

2.3.2 フォトダイオード信号の電流-電圧変換

PD の信号電流を電圧変換するには、図 4 に示されるように PD 出力端子の一方に直列に抵抗 R_x を接続し、閉じた回路を形成すればよい。この状態で PD に光入力をあてると、PD からの出力電流は R_x を流れ、電流に比例した電圧信号が得られる。これを電圧計やオシロスコープなどの計測器で信号として観測することは可能であるが、実際の使用においては以下の問題が生じる。

図 4 において、PD からの出力電流 i は抵抗 R_x の両端に電圧信号を発生させる。しかしながら、一般に PD から得られる出力電流 i の値は非常に小さく、通常は 10^{-6} A（マイクロアンペア）以下の場合が多い。この微小な電流を計測に十分な大きさの電圧へと変換するためには、変換用の直列抵抗 R_x を数 M Ω かそれ以上に大きく設定する必要がある。その場合、 R_x の値は電圧計測器の内部抵抗の値に近い値となり、

計測器に流れ込む i の影響が無視できなくなる。これはセンサー信号の誤差として現れる。また、本回路構成ではセンサーからの微弱電流 i で負荷となる電圧計測器を動作させることになり、計測器の応答が遅くなるなど、計測系の応答性を劣化させる原因となる。よって、信号の精度と高い応答性を確保するには、センサー信号 i の増幅が必要となる。

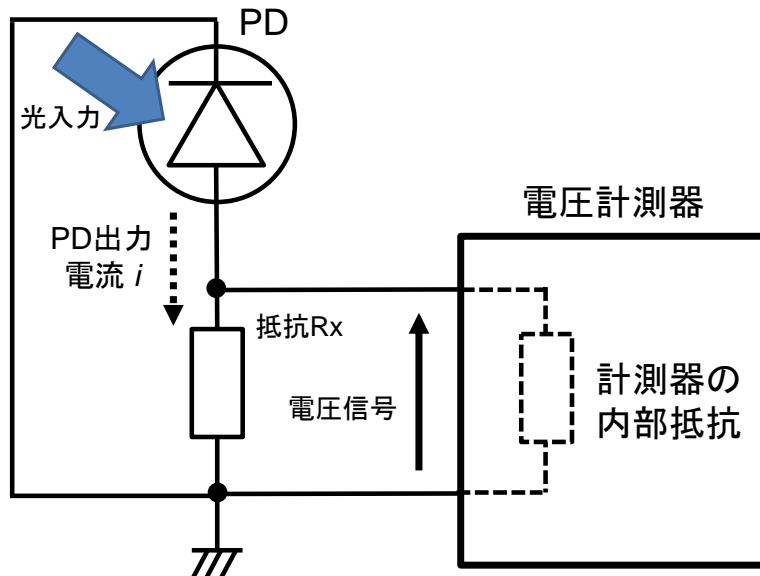
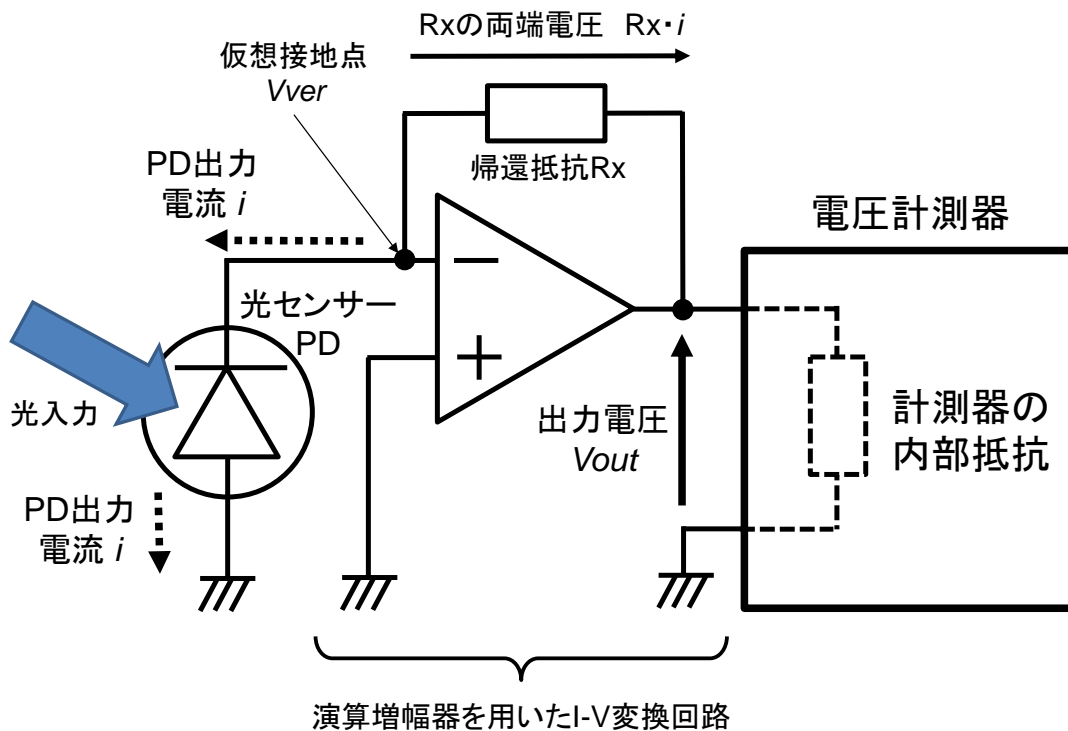


図4 増幅回路を用いない光センサー計測回路（抵抗 R による I-V 変換）

2.3.3 本実験の PD 回路：演算増幅器を用いたフォトダイオード信号の電流-電圧変換



演算増幅器を用いたI-V変換回路

図5 演算増幅器による I-V 変換を用いたセンサー信号変換回路（PD 回路）の構成

図5は演算増幅器によるI-V変換を用いたセンサー信号変換回路（PD回路）である。増幅器を用いない図4の構成とは異なり、PDと電圧計測器の間には演算増幅器を用いたI-V変換回路が接続されている。PD出力電流*i*は直列に接続されるI-V変換回路に流れ込む（図5では流出する方向を*i*の正の方向としてある）。PDの出力端子は演算増幅器の−入力端子と帰還抵抗*R_x*に接続されている。通常、演算増幅器の入力端子は入力抵抗が∞であるとして扱われるので、PD出力電流*i*は全て帰還抵抗*R_x*を流れる。増幅器を用いない図4の回路と異なるのはこの点であり、電圧計測器の内部抵抗に流れる電流はすべて演算増幅器の出力側から供給されるため、それが信号の誤差に影響しない。また、演算増幅器は十分低い出力抵抗（出力インピーダンス）を有しており、高速な信号の変化があっても計測器に素早く必要な電流を供給できることから、全体としての応答速度も大きく改善される。

図5に示されるI-V変換回路の出力電圧*V_{out}*は、仮想接地点（この場合は演算増幅器の−入力端子）の電位を*V_{ver}*とすると、以下の式(2)のように表される。

$$V_{out} = V_{ver} + R_x \cdot i \quad (2)$$

ここで*V_{ver}*の電位は演算増幅器の負帰還動作により、電位0Vのグラウンドに接続された+入力端子とほぼ同じ電位に保たれる。よって、*V_{ver}*の値はここで0Vと見做すことができる。よって、出力電圧は以下の式(3)として差し支えがない。このことから、I-V変換回路の出力電圧はPD出力電流*i*と完全な比例関係となることがわかる。

$$V_{out} = R_x \cdot i \quad (3)$$

上に説明された動作原理は、信号に誤差を含まない理想的な演算増幅器のものである。現実の演算増幅器はそれ自身が生む誤差が出力に含まれている。その一つとして、出力電圧にはオフセット電圧と呼ばれる直流電圧*V_{off}*が含まれている。オフセット電圧は、演算増幅器への入力を完全に0とした場合に、その出力端子に現れる誤差電圧のことである。これはグラウンドの電圧0Vとの差分として観測される。このオフセット電圧*V_{off}*を考慮した場合におけるI-V変換回路の出力電圧は、現実的表現として(4)式のように表すことができる。通常、このオフセット電圧は時間と共に変化する。計測回路への信号入力が0と見なせる状況で出力電圧を観測しておき、これをオフセット電圧として計測された各データより差し引くことで、信号であるPD出力電流に比例する成分を精度良く抽出することができる。

$$V_{out} = R_x \cdot i + V_{off} \quad (4)$$

出力電圧に対してこのオフセット電圧の減算処理を行い、計測した帰還抵抗*R_x*の値を用いることで、出力電圧*V_{out}*から光センサーPDの出力電流*i*を(5)式のように求めることができる。

$$i = \frac{V_{out} - V_{off}}{R_x} \quad (5)$$

以上が演算増幅器を用いたI-V変換回路によるPD回路の動作原理である。また、(5)式が、PD回路の出力電圧からPDの出力電流（フォトダイオード信号電流）を抽出する原理となる。実験においては、本原理を用いて、LED駆動電流とPD出力電流の関係を求めて光センサーの特性を評価する。

3. 使用する実験機器

図6に今回の実験で使用する設備一式を示す。今回用いる実験機器は以下の通りである。実際に使用した機器については、後で再現実験が可能ないように、実際に使用した計測機器や電源装置のメーカーや型式などについては、可能な限り正確な情報を記録しておくこと。

- 光センサーデバイス PD (PD 回路基板上に実装済)
- 演算増幅器による I-V 変換回路 (PD 回路基板上に実装済)
- 光源用赤色発光ダイオード (赤色 LED)
- LED 駆動電流制限用抵抗
- ブレッドボード
- 直流安定化電源 3 台
- パルス電源 1 台
- デジタル・マルチメーター 2 台
- デジタル・オシロスコープ 1 台
- 各種配線
- テスター



図6 光センサーの実験で用いる各種の機器と装置

4. 実験手順

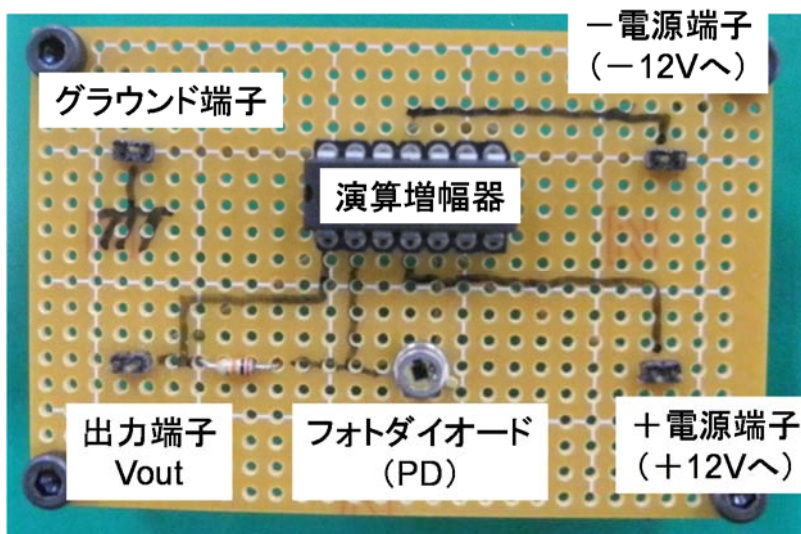


図7 PD回路基板と基板上的の接続用端子

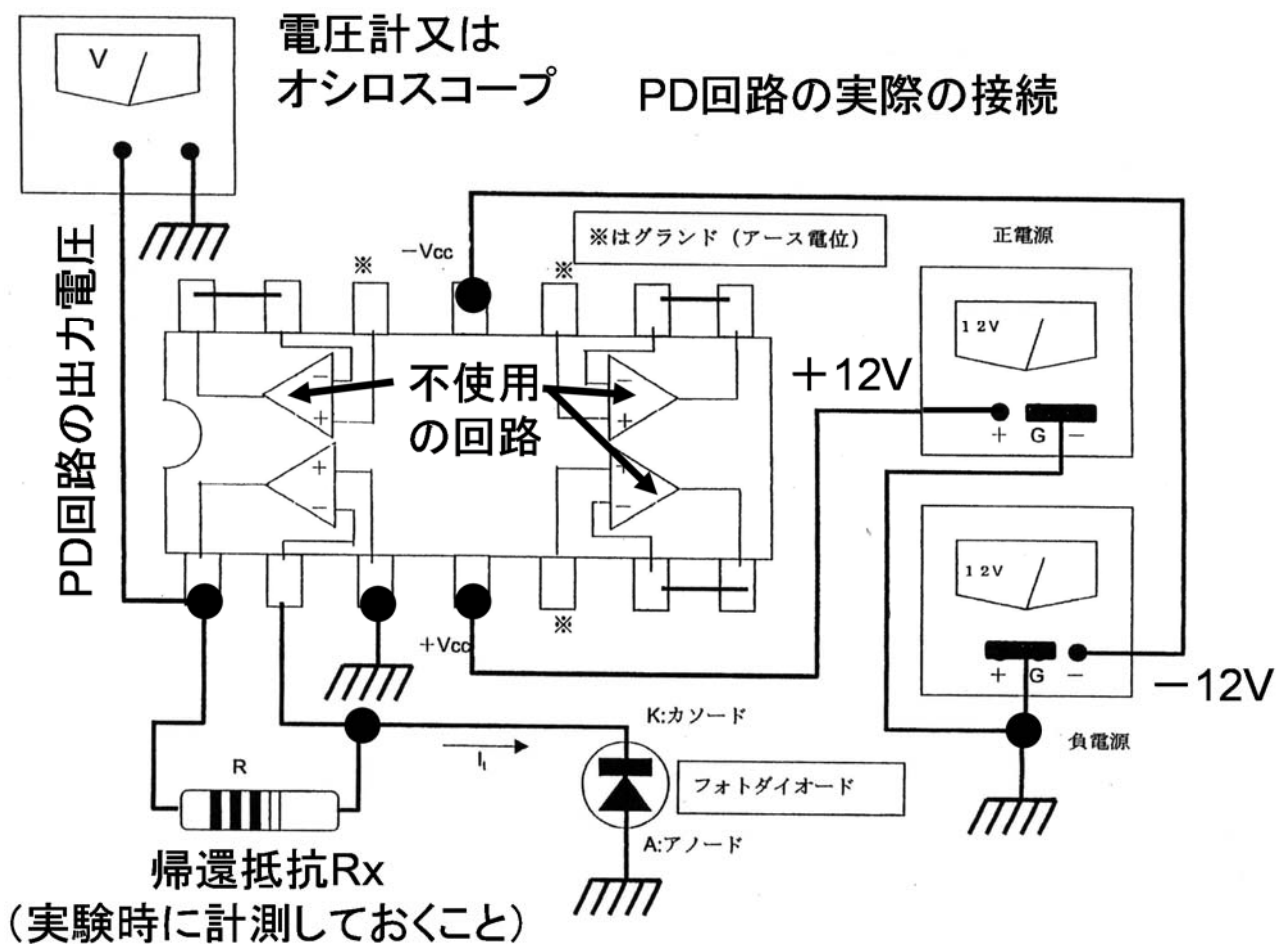


図8 PD回路と外部電源・計測器の接続図

4.1 計測に向けた準備実験

はじめに、以下の手順で計測に向けた実験の準備を行う。

- 4.1.1 ブレッドボード上に LED 駆動用の回路 (LED 回路, 図 2 参照) を形成する。赤色 LED と PD 回路上の PD が正面に向き合えるよう、ブレッドボード上で LED の配置を考えること。このとき 電流制限用抵抗 R の値をテスターで確認しておくこと。
- 4.1.2 LED 回路と直流安定化電源, 直流電圧計を接続し, 直流電圧の増減に応じて LED の発光強度が増減することを目視で確認する。
- 4.1.3 次に図 5 の構成を持つ PD 回路を接続する。はじめに PD 回路基板にある期間抵抗 R_x の値を計測する。その後, PD 回路基板 (図 7) に演算増幅器の直流電源と出力電圧計測用の電圧計を接続する (図 8 参照)。基板上の PD が LED からの光を受光できるように, PD の位置をブレッドボード上の LED と向き合わせる。
- 4.1.4 計測回路に LED からの光以外の外乱光が入射されないように回路全体を箱等で遮光する。
- 4.1.5 LED 駆動電圧の変化に応じて PD 回路の出力電圧も変化していることを確認する。

4.2 LED 駆動電流の変化に対する PD 出力の DC 応答測定

ここでは以下の手順で LED の駆動電流に対する PD の出力応答 (DC 特性) を測定する。

- 4.2.1 LED の駆動電流を 0 とした状態で, PD 回路の出力電圧 (オフセット電圧 V_{off}) を記録する。
- 4.2.2 可変電圧源の電圧を変化させ, 抵抗 R 両端の電圧 V_m を記録しながら, LED の発光強度を変化させる。それぞれの V_m に対する PD 回路の出力電圧 V_{out} の変化を記録してゆく。
- 4.2.3 計測全体を見渡すため, 図 9 の様な 2 次元グラフを描く。その後も V_m を増加させ, PD 回路出力電圧 V_{out} が比例的な増加を示さなくなる領域まで計測する。

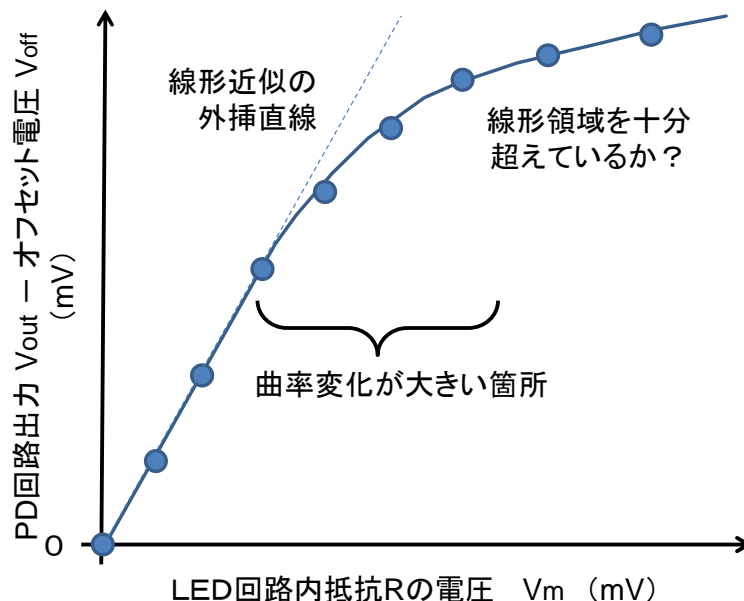


図 9 電流計測用抵抗の電圧値と PD 回路出力電圧の関係

4.2.4 グラフが線形から外れる周辺など、グラフの曲率変化が大きい箇所は、計測する点を増やすなどして実験結果の信頼性を高める（考察5.4に示す図12のグラフを参照）。

4.3 LED光源の変調によるPDの周波数応答特性測定

最後に、LED光源の光強度を時間的に変調し、PD回路の速度応答性（周波数応答特性）を計測する。

4.3.1 LED駆動用の可変電源を直流安定化電源からパルス電源に変更する。

4.3.2 パルス電源のモードを矩形波（方形波）として発振周波数を1Hz程度に合わせる。LEDの点滅が生じるようにDCバイアス電圧とパルス電圧の振幅を調整する。

4.3.3 矩形波の発振周波数を徐々に高めてゆき、目視ではLEDの光量の変化（振動）が分からなくなる周波数を調べて記録せよ。

4.3.4 パルス電源を上記の周波数のままとしておき、PD回路の出力につながる電圧計を取り外す。その後、デジタル・オシロスコープの電圧計測プローブをPD回路の出力端子に接続する。デジタル・オシロスコープの画面設定を調節し、PD回路の出力電圧変化がパルス電源の発振周波数に一致していることを確認する（つまり、PDと検出回路は人間の目よりも速い速度で光の変化を捉えることができるといえる）。

4.3.5 ここからが周波数応答特性の計測となる。はじめにパルス電源のモードをサイン波に切り替える。サイン波の電圧振幅を規定の値に設定し、その後、DCバイアス電圧を調節して、サイン波の電圧が最小値となってもLEDが常時点灯する状態にする。図10に示すように、DCバイアス電圧が十分であればLEDは常時ON状態になる。パルス電源のサイン波電圧が振動するに伴って、LEDの駆動電流が変調されるため、LEDの発光光量がサイン波で変調される状態になる。このとき設定したDCバイアス電圧とサイン波の電圧振幅を記録せよ。

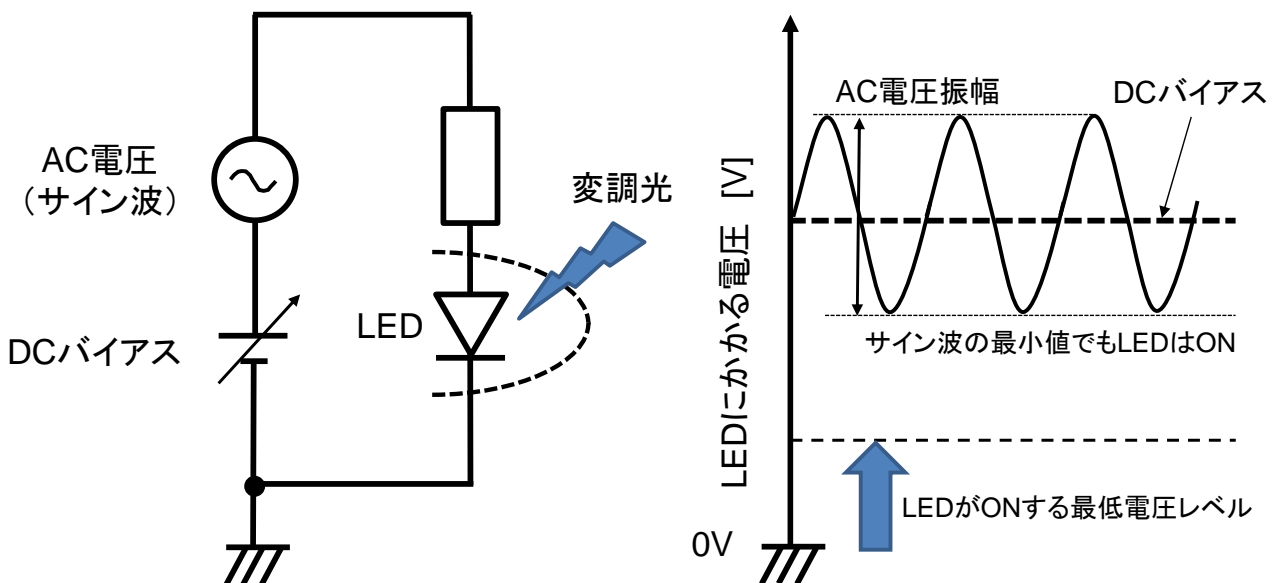


図10 周波数応答特性の計測に向けたLED駆動用パルス電源の調整

- 4.3.6 パルス電源の AC 電圧（サイン波）周波数を変化させて、PD 出力の振動振幅をオシロスコープの波形から求めて記録し、PD 回路の周波数応答特性を計測する。計測は最小 10Hz～最大 10MHz の周波数範囲で行い、各周波数の桁毎に 1, 2, 3, 5, 7 に相当する周波数で計測する点を設けよ（例えば 10Hz の桁では 10, 20, 30, 50, 70Hz の周波数で PD 回路の出力電圧振幅を計測すればよい）。
- 4.3.7 LED 光源の光変調周波数と PD 回路の出力電圧 V_{out} の振幅を片対数グラフ（図 1 1 参照）にプロットする。PD 回路出力 V_{out} の周波数応答特性が求まる様に、周波数特性の変化が激しい領域は上記の測定点以外にも細かく計測するなど工夫し、極力正確な周波数特性を計測する様に努める。

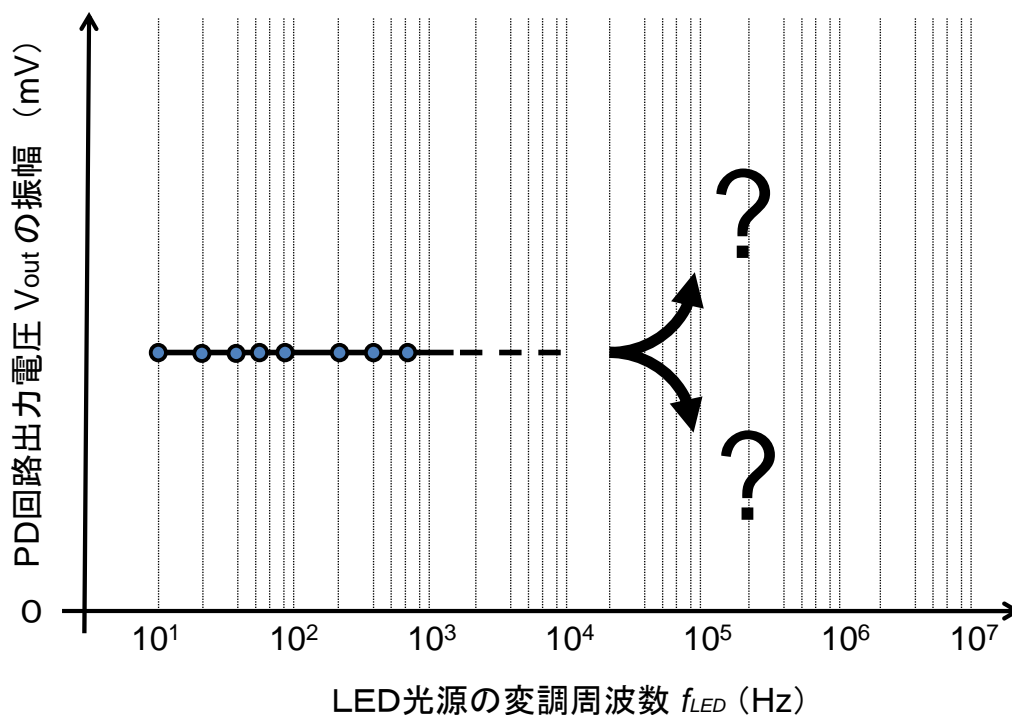


図 1 1 PD 回路出力の周波数応答特性

4. 4 最終確認

- ・ 以上 4. 1～4. 3 の内容全てが実験日の当日に実験する項目である。
- ・ 取り忘れたデータがないかを実験終了前に全員で確認すること。
- ・ また、実験装置類を片づける前に、必ず、担当教員またはティーティングアシスタント (TA) に測定データを見てもらい、承諾を得た後で片付けを開始すること。

5. レポートに記載する実験データの整理

実験の翌週にあるデータ整理・レポート指導までに得られたデータをまとめて考察し、レポートの草稿を完成しておくこと。下記のデータは必ず記載し、必要な部分については結果を吟味しておくこと。

【実験4.1で得られた実験データ】

- 5.1 今回、LED回路に用いた抵抗Rの計測値（実験4.1.1）
- 5.2 使用したPD回路におけるI-V変換回路で用いられている帰還抵抗Rxの計測値（実験4.1.3）

【実験4.2で得られた実験データ】

- 5.3 PD回路出力のオフセット電圧（実験4.2.1）
- 5.4 LED駆動電流 I_d に対するPD出力電流 i のDC応答特性のグラフとデータ表（実験4.2.2~4.2.4で得られた実験データを整理して、評価者が見やすい形のグラフにする）

注意事項：レポートにおいては、計測した図9のグラフとデータ表に加えて、使用した抵抗値から横軸をLED駆動電流 I_d (mA)、縦軸をPD出力電流 i (μ A)に変換した図12のグラフ、ならびに整理したデータ表の両方を記載すること。また、6.1で述べる様に、グラフの線形領域についての考察を各自で行うこと。図9のグラフとデータ表まではグループ内で共有しても良い。しかし、それ以降に整理したデータとグラフ（図12の内容）はレポート課題でもあるため、これをグループ内で共同使用してはならない。

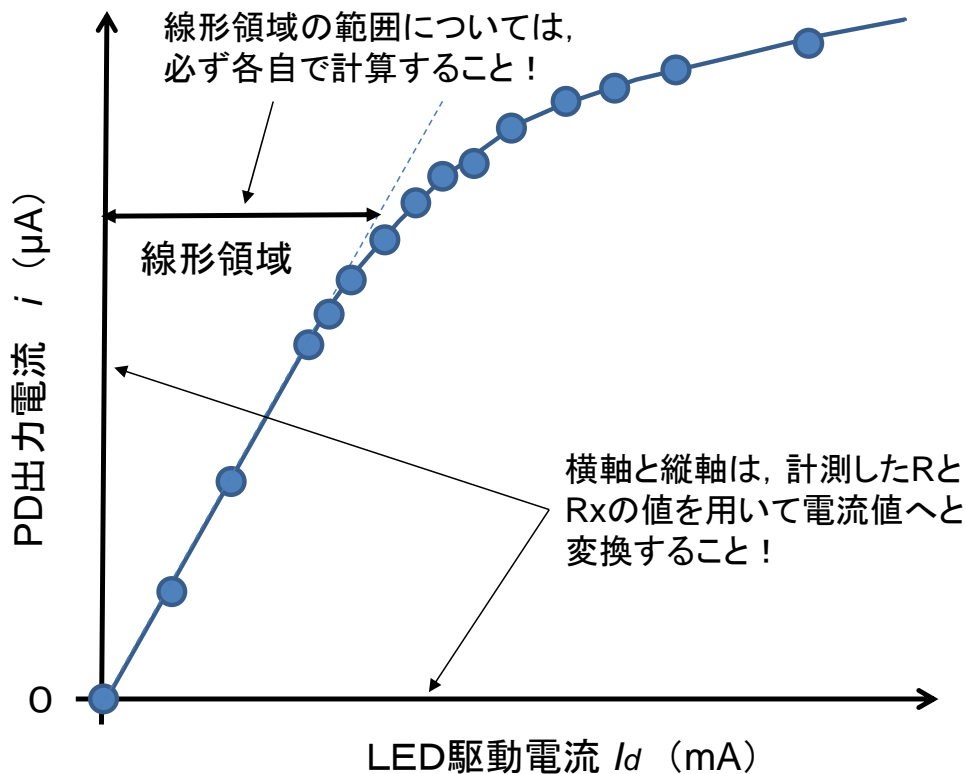


図12 LED駆動電流 I_d に対する光センサー（PD）出力電流 i のDC応答特性

【実験4.3で得られた実験データ】

- 5.5 目視でLEDの光量変化（振動）が観測できた最高の周波数（実験4.3.3）
- 5.6 パルス電源に設定したDCバイアス電圧とサイン波の電圧振幅（実験4.3.5）
- 5.7 LED駆動電流周波数に対するPD出力 V_{out} の周波数応答特性のグラフと対応するデータ表（実験4.3.6～4.3.7で得られた実験データを整理し、評価者が見やすいグラフにする）

6. 実験データの考察と課題

提出レポートには実験データについての考察が記載される必要がある。考察は、各実験データを記載する箇所と同じところに記載しても、実験データの節と分けて別の箇所に記載してもよい。

【実験4.2 LED駆動電流に対するPD出力電流のDC応答特性の結果についての考察】

- 6.1 ここではPD回路の出力特性が線形を示す範囲を「出力値曲線が原点から外挿した直線を5%下回る範囲まで」と規定することにする。今回得られた実験の結果について、各自で線形範囲を求めてグラフ内に示せ。
- 6.2 LED駆動電流 I_d の増加に伴い、PDの出力電流 i がLED駆動電流の増加に対して線形的に増加しなくなる理由について考察せよ。

【実験4.3 周波数応答特性の結果についての考察】

- 6.3 今回、目視で観測できたLED点滅の最高周波数と、一般的に用いられる映画やアニメーションのコマ数との間にどのような関係性があるかを論じよ。
- 6.4 PD回路を用いて観測した周波数特性は、そこに含まれるフォトダイオードPDの周波数特性と、演算増幅器を用いたI-V変換回路が持つ周波数特性が重なり合った特性となっている。今回の測定結果について、演算増幅器が持つ周波数特性がどのように影響した可能性があるか考察せよ。

以上