

||||| 技術解説講座 |||||

航空機実験用加速度スイッチの作り方 (第一回) 初心者のためのマイコン電子工作講座

夏井坂 誠

How to Make an Acceleration Switch for Parabolic Flight Experiments (No. 1) A lecture for a Beginner to Make a Microcomputer-Controlled, Electronic Device

Makoto NATSUISAKA

Abstract

The lecture introduces how to make a microcomputer-controlled, electronic device for a beginner. A series of lectures provides not only how to measure a physical property with an electronic sensor, convert it to a digit (analog digital conversion), switch on and off an electronic circuit with FET (Field Effect Transistor), and control those with a microcomputer but also practical know-how to design an actual electronic circuit, choose appropriate electronic parts, and mount those to a PCB (printed-circuit board), with explaining how to make "an acceleration switch". The switch can automatically turn on and off a connected device according to an acceleration level measured with an acceleration sensor and contribute to parabolic flight experiments through size reduction of an apparatus, less operation, and precise control of the experiments.

Keyword(s): acceleration, microcomputer, sensor, FET, parabolic flight

1. 事の起こり

それはある日のことでした。同じフロアで働く、日本マイクログラフィティ応用学会（以下「JASMA」）誌編集員の A 先生が笑いながらやってきて、「今度、JASMA 誌で、技術解説をはじめることにしたから、マイコン（マイクロコンピュータ）を使った電子工作の解説を書いてよ。」と仰ったのです。自分はここ数年、航空機実験用に加速度センサを使って、微小重力を検知すると、自動的にシーケンスが走り出し、微小重力が終了するとシーケンスが止まるような、自動運転装置を自作していて、ちょっとしたものであれば、作れないこともないのですが、きちんとした電子回路や電子工作の教育を受けていないので（大学で電磁気学と Fortran を使った数値計算を履修したのと、子供のころにトランジスタラジオを作ったくらい）、大きな戸惑いがありました。

自分：いやあ～自分は専門家ではないですし、もっと適当な方がいらっしやるのではないですか？しょっちゅう部品壊したりしてますから、とても人様に教えられるようなレベルにありません。

A 先生：いや、だからいいんだよ。これから電子工作をはじめようとしている人を対象に頼むよ。

自分：それは自分に恥をさらせということですか？

A 先生：うん、その通り。

確かに、電子工作に挑戦しようと思っているものの、二の足を踏んでしまっている理由のひとつとして、教科書に書いてある電子回路のいろは（例えばオームの法則やキルヒホッフの法則）や電子部品の構造と原理をいくら勉強しても、実際に物を作ろうとすると、山とある部品の中から何を選んだらいいのか、データシートやアプリケーションノートをどのように読み解いたらいいのか、安全対策やノイズ対策はどうすればいいのか等々、教科書の知識と別に、「実装」（実際の回路にすること）のノウハウが必要となる点にあるのではないのでしょうか？幸い、最近では、そういった実装に触れた教科書や、ネット上の解説等も多々ありますが、マイコンやセンサといった主要部品の説明に重きが置かれ、実装のいろはを事細かに説明したものはあまり多くないかもしれません。身の回りに手取り足取り教えてくれる先輩がいる電気・電子工学科の方でもない限り、最初の一步を踏み出せず

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 ISS 科学プロジェクト室 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1
Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), ISS Science Project Office, Institute of Space and Astronautical Science (ISAS),
2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505, Japan
(E-mail: natsuisaka.makoto@jaxa.jp)

にいるのではないのでしょうか？自分も、そういった状況の中、試行錯誤を繰り返して、ようやく一つの装置を組めるようになった次第です。ですので、恥をさらすのは忍びないのですが、失敗の経験も含めて、実装のノウハウをお伝えすることが、これから電子工作に挑戦しようとする方の負担軽減になるのではと思います、お受けすることとした次第です。

本解説としましては、これまで教科書で電子回路の勉強をしたことはあるけれども、実際にものを作ったことがない、何から手をつけていいかわからないといった初心者の方を対象としています。「お勉強」ではなくて、実際に物を作っていただくことを想定していますので、本学会において一番必要とされそうな、航空機実験で利用可能な、加速度センサを用いたスイッチング装置（以後「加速度スイッチ」と呼びます。）を作ろうと思います。今回（第一回）は、加速度スイッチ製作に必要な加速度センサやスイッチング素子等構成部品の働きや使い方方を解説、ブレッドボードを用いた動作確認に挑戦していただこうと思っています。第二回では、マイコンの使い方を解説したうえで、実際に加速度スイッチを製作していただこうと思っています。加速度スイッチには、センサを利用した物理量（加速度）の計測、A/D変換（アナログ-デジタル変換）、マイコン制御、スイッチングといった、電子制御に関する主要な技術が盛り込まれていますので、本装置の製作を一通り経験していただくことによって、様々な装置作りができるようになります。

2. 加速度スイッチの概要

2.1 加速度スイッチの構成と働き

加速度スイッチは、Fig. 1のようにスイッチングしたい実験装置または回路を接続して使います。図中に示した通り、加速度スイッチは、以下の部品から構成されます。

- (1) 加速度センサ
- (2) マイクロコンピュータ
- (3) スwitchング素子
- (4) 電源

加速度センサは、感知した加速度の値を電圧で出力します。マイクロコンピュータは、この電圧を一定時間毎にA/D変換し、これが閾値を超えたとき、または下回ったときに、スイッチング素子に制御信号を送り、対象装置または回路の電源をONまたはOFFします。電源は、航空機から供給されるAC100VまたはDC28Vを、加速度センサ、マイクロコンピュータの電源電圧DC5Vに変換します。

自分は、航空機実験で光化学反応を調べているのですが、微小重力時のみ、光化学反応に必要なUV光源を点灯させる必要があったので、加速度スイッチにUV光源を接続して実験を行っています。Fig. 2に装置の動作状況

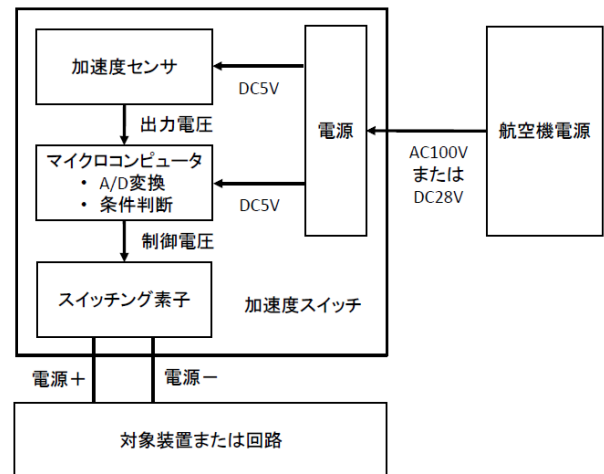


Fig. 1 Components of an acceleration switch

を示しますが、z方向の加速度 G_z が $0.25G$ (G は重力加速度) を切ると、UV光源が点灯し、 G_z が $0.25G$ を上回るとUV光源が消灯するようなプログラムになっています。図中 V_{PD} がUV光を検出するフォトダイオード (Photodiode) の出力電圧 (フォトダイオードの出力は光電荷ですが電荷を電流として取り出し、電圧に変換しています) となりますが、 G_z が $0.1\sim 0.2G$ を切ったあたりでUVが点灯 (V_{PD} が $0\rightarrow 2.2V$)、 G_z が $0.25G$ を回復したあたりで消灯していることがわかつています。

(UVの点灯が $G_z=0.25V$ ちょうどではなくて $0.2V$ を切るまで遅れるのは、UV点灯回路の遅延特性のため。) ご覧の通り、重力の変動に合わせて、きっちりスイッチングが行われており、貴重な微小重力時間を余すことなく使えていることがわかつています。実際に航空機に搭乗してみるとわかるのですが、人間が重力の変化を正確に感知することは思った以上に難しく、手動でスイッチングを行おうとすると多分に任意性が入ってしまいます。そこで、加速度スイッチを対象装置に組み合わせていただければ、より正確な実験を行うことが可能となります。

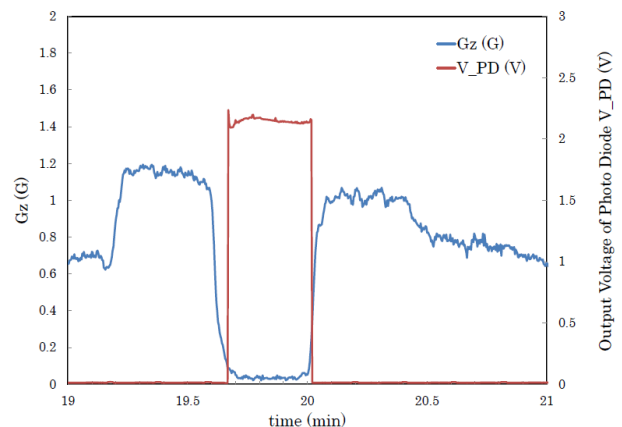


Fig. 2 Switching of a UV lamp with an acceleration switch.

2.2 加速度センサ

次に、各構成部品について概説します。(マイクロコンピュータは、次回説明します。) 加速度センサは文字通り、加速度の大きさに比例した電圧を出力してくれるセンサです。MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術のおかげで、最近では小型のものが作られるようになり、携帯電話やパソコンに組み込まれるようになっています。本講座で使用予定のサンハヤト (株) 製 3 軸加速度センサモジュール MM-2860 に組み込まれているフリースケール・セミコンダクタ社製の 3 軸加速度センサ MMA7260Q も、わずか 6mm x 6mm x 1.45mm の大きさで、小さすぎて手ハンダが難しいので、モジュール化された MM-2860 を使用しています。本センサは 3 軸加速度を計測可能なうえに、感度を基板上の DIP スイッチで切り替え可能で、端子間隔がユニバーサル基板の穴間隔 2.54mm と一致しているので、非常に使いやすいセンサです。

2.3 スイッチング素子

電子回路または電気回路の ON/OFF を行うには、通常、プッシュ、トグル、スライド、DIP 等の機械式スイッチを使います。Fig. 3-1 にスイッチング対象として、LED の点灯回路を示します (抵抗の意味等は次章で説明)。これに機械式スイッチを組み合わせたものが Fig. 3-2 になります。手でスイッチを ON/OFF することによって、LED が点いたり、消えたりします。しかし、機械式スイッチの ON/OFF は人間が手で行わなければなりませんので、自動運転に適しません。そこで、自動運転を行うためには、電気的にコントロールできるスイッチが必要となります。

電気的に制御可能なスイッチとしては、リレー、トランジスタ、FET (Field Effect Transistor) 等があります。リレーは電磁石を用いて機械式接点を開閉するもので、信頼性が高い反面、スイッチング速度を早くできない、ON/OFF 時に逆起電力やチャタリングを発生させ、電磁ノイズを放射する等の欠点があります。トランジスタは N 型半導体と P 型半導体を NPN または PNP のように接合した素子です。後述の FET と区別するために「バイポーラ (ジャンクション) トランジスタ」と呼ばれることがあります。トランジスタには、エミッタ、コレクタ、ベースという 3 本の足があるのですが、コレクタ-エミッタ間にスイッチングしたい回路を接続し、ベースに制御電流を流すことによって、コレクタ-エミッタ間に電流を流すこと (スイッチング) ができるようになります。(ベース電流で制御を行うので、「電流制御」と呼ばれます。) Fig. 3-3 のように、Fig. 3-2 のスイッチをトランジスタ Q1 で置き換えてスイッチングを行います。図中の C がコレクタ、BASE がベース、E がエミッタを表しています。実際は BASE に駆動電流を流さなければなりませんので、そのための電流駆動回路も必要となるのですが、概念を

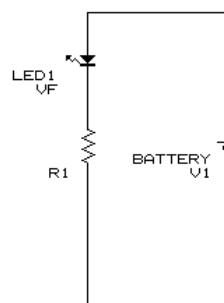


Fig. 3-1

LED illumination circuit

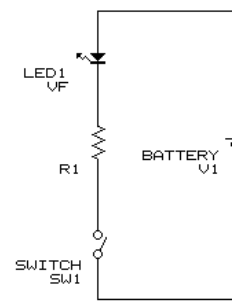


Fig. 3-2

Switching circuit with a mechanical switch

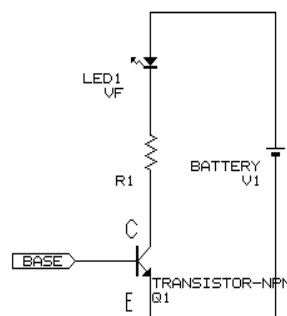


Fig. 3-3

Switching circuit with an NPN transistor

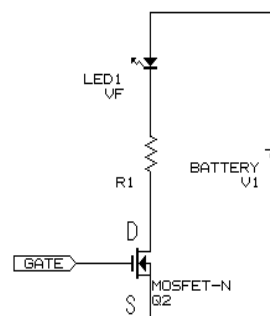


Fig. 3-4

Switching circuit with an N-channel MOSFET

わかりやすく説明するために、あえて省略しています。また、トランジスタ Q1 の上に TRANSISTOR-NPN と書いてありますが、これは NPN 型のトランジスタを表しています。PNP 型を使った場合は負荷をエミッタ側に接続することになります。ただし、通常は、電気的特性に優れる (キャリア移動度が大きい) NPN 型が使われますので、まずは、Fig. 3-3 を基本として覚えて下さい。トランジスタは、リレーに比べて高速のスイッチングが可能で 1990 年頃まで、広く使われてきましたが、温度安定性が悪い、OFF の時にも微小の制御電流を流しておかないといけないので待機電力が発生する等の欠点がありました。1990 年代に入ると、FET の性能が向上し、バイポーラトランジスタに取って代わるようになりました。(実は FET も、「Field Effect Transistor」という名前が示す通り、トランジスタの一種なのですが、バイポーラトランジスタと区別するために FET と呼ばれています。) FET は、バイポーラトランジスタに比べて、高速のスイッチングが可能、温度安定性に優れる、待機電力をトランジスタほど必要としない等、より優れた特性を有するので、現在では、バイポーラトランジスタに代わり、スイッチング素子の主流を占めるようになってきました。Fig. 4 に示した通り、FET も基本的には 3 本足 (ソース、ドレイン、ゲート) の部品で、Fig. 3-4 のように、ドレイン (図中 D) とソース (図中 S) 間に対象回路を接続しておいて、ゲート (図中 GATE) に制御電圧を印加することによって

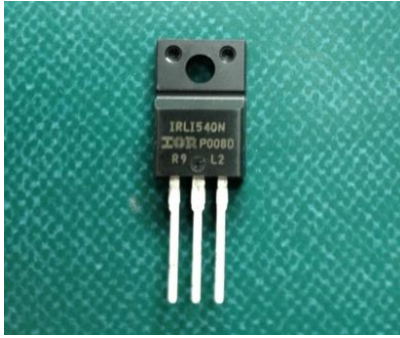


Fig. 4 FET (IRLI540NPbF (International Rectifier), TO-220 Full-Pak Package)

ON/OFFを行います。FETには構造に由来してMOS型（「MOSFET」）と接合型（「JFET」）があります。接合型はノイズが小さく、小さな信号を低ノイズで増幅したいとき等に活躍しますが、通常ノーマリーオン型（または「デプリッション型」と呼ばれる）なので、ゲートに電圧が印加されていない状態でドレイン・ソース間が導通していますので、通常のスイッチングには使用されません。ですので、本講座で取り上げるFETはMOS型を指しているものと思って下さい。

Table 1 Features of switching devices

素子名	概要
	長所
	短所
リレー	<ul style="list-style-type: none"> ・電磁石を用いて機械的に接点を開閉 ・回路を完全に遮断できる（高信頼性） ・待機電力を必要としない
	<ul style="list-style-type: none"> ・高速のスイッチングが苦手 ・機械式接点なので寿命が短い ・チャタリングを起し易い ・電磁ノイズを発生する
	<ul style="list-style-type: none"> ・ベースに流す電流でスイッチング（電流制御）
	<ul style="list-style-type: none"> ・高速のスイッチングが可能 ・大きな電流を扱える ・待機電力が発生する ・温度の影響を受けやすい
FET	<ul style="list-style-type: none"> ・ゲートに印加される電圧でスイッチング（電圧制御）
	<ul style="list-style-type: none"> ・トランジスタより高速のスイッチングが可能 ・待機電力が小さい ・温度の影響を受けにくい
	<ul style="list-style-type: none"> ・トランジスタに比べて大きな電流を扱うのが苦手 ・静電気で破壊されやすい

2.4 電源

ダイヤモンドエアサービスの航空機から供給される電力は、AC100V または DC28V です。これをマイクロコンピュータや加速度センサで使用するDC5Vに変換するには、交流-直流または直流-直流の電圧変換回路が必要となります（Table 2）。電源は、制御対象の装置と制御装置（今回は加速度スイッチ）各々に必要となりますが、今回は制御対象装置は直流動作を想定、制御装置自身も直流動作しますので、交流-直流、直流-直流変換装置について説明します。交流-直流変換装置には、安定化電源とACアダプタがあるのですが、安定化電源は可変出力が得られるものの、比較的大きなものとなってしまいますので、航空機実験等搭載スペースが限られる場合は、ACアダプタを使用した方が良いでしょう。ACアダプタを選ぶ時は、正しい出力電圧のものを選ぶことが重要となりますが、最大出力電流にも目を向けるようにして下さい。必ず、この値が装置が必要とする電流値を上回るものを選ぶようにして下さい。通常は、2倍とか3倍とか余裕のあるものを選ぶようにします。余談となりますが、電子部品を使用する際、このように余裕を持たせて使用することを“ディレーティングを設ける”と言います。ISS（国際宇宙ステーション）等、宇宙機の製造現場では、設計標準や仕様書上に部品毎のディレーティング値が規定されています。また、プラグ、ソケット形状にもいくつか種類がありますので、適当なものを選ぶようにして下さい。直流-直流変換装置には、大きく分けてDC-DCコンバータと三端子レギュレータ（「シリーズレギュレータ」と呼ばれることもある）があります。DC-DCコンバータ（「デコデコ」と略されることがある）は、直流を一度、交流に変換して、トランスで変圧、再度整流（交流を直流にすること）して、目的の直流電圧に変換しています。使用条件にマッチするものが見つかれば、あとは接続するだけなので、非常に便利です。また一般的に、三端子レギュレータに比べて変換効率が高いので、電池駆動等省電力が要求される場合、非常に有望な手段となります。その一方、出力電流の大きなものは稀で、リップル（出力電圧の変動）が大きい等の欠点があります。三端子レギュレータは、リップルの少ないきれいな出力を与えますが、余分な電圧（入力電圧-出力電圧）をジュー

Table 2 Power converters

変換形式	変換装置
交流-交流	スライダック（出力電圧可変）
	トランス（出力電圧固定）
交流-直流	安定化電源（出力電圧可変） ACアダプタ（出力電圧固定）
直流-交流	インバータ
直流-直流	DC-DCコンバータ
	三端子レギュレータ POL

ル熱として削っているため、変換効率をあまり高くできない、発振防止のためにコンデンサや抵抗等を付加しなければならない、出力が大きくなると放熱対策としてヒートシンクを外付けしなければならない等の欠点があります。なお、DC-DC コンバータ、三端子レギュレータの他にも、POL (Point of Load) と呼ばれるものがありますが、これは基板に供給されている電源電圧を、各 IC が必要とする個別電圧に変換する素子で、機能に着目したときにこう呼ばれますが、実体は DC-DC コンバータや三端子レギュレータとなりますので、ここでは触れません。

3. 試してみよう

3.1 準備

では、実際に各部品を動作させてみましょう。電子回路の試作では、ブレッドボードが活躍します。ブレッドボードは、ハンダ付けすることなく電子部品を接続できますので、お試回路を組むには最適です。Fig. 6 に示す通り、ブレッドボードには電子部品のリードを差し込むための穴が多数並んでいます。中心部上下に、縦に 5 個並んだ穴列が横に数 10 個（ブレッドボードによって異なる）並んでいますが、各列は内部的に導通して、中央の溝を跨ぐように電子部品のリードを差し込みます。また、上下に赤線（+）と青線（-）が引かれた横穴列がありますが、これも各々内部的に導通して、赤線のいずれかに電源の+を、青線のいずれかに電源の-を



Fig. 5 DC-DC converter (left) and series regulator (right)

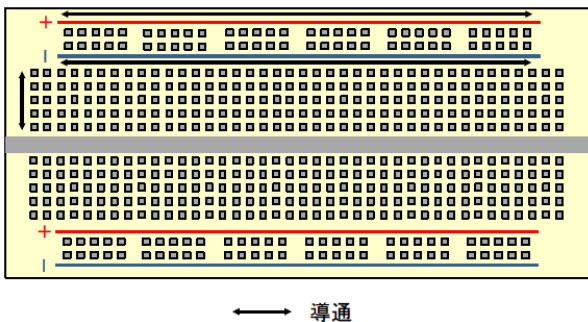


Fig. 6 A bread board and the internal connections

接続します。（通常、上側の赤線列に電源+を、下側の青線列に電源-を接続します。）そして、これら電源ラインと電子部品または電子部品同志をリード線をつないで回路を形成します。ブレッドボードは、大きさ、電源端子の有無に応じて、いろいろなものがありますが、どれを買っても大きな違いはないと思います。

3.2 LED を点灯させる

まずは、今回スイッチング対象としている LED を点灯させてみましょう。小学校の時に豆電球に乾電池をつないで光らせたことがあると思うのですが、豆電球を光らせる場合と LED を光らせる場合との違いは、二つあります。一つ目は、LED には極性、すなわち電源の+と-を接続すべき向きがあるということです (Fig. 7)。もうひとつは、LED と乾電池（もしくは電源）の間に、電流制限抵抗 (Fig. 3 中の R1) を入れなければならないということです。LED はあまり大きな電流を流すと壊れてしまうので、抵抗で電流を絞ってやる必要があるのです。（電球も大きな電圧を加えると焼き切れてしましますが、電球のフィラメント自身が抵抗として働くので、せいぜい数 V の乾電池では、わざわざ電流制限抵抗を加える必要がないのです。）

LED には、色、輝度、大きさ、発光部形状、指向性（照射角）、パッケージ（リード線付き、表面実装用、パネル取り付け用、多色、モジュラータイプ・・・）等によって、いろいろな種類がありますので、自分の取り付け対象に合わせて、適当なものを選んで下さい。表示用であれば色とサイズで選んでしまっても、問題ないと思いますので、好みのものを選んで下さい。ただし、LED（というかダイオード全般）は電流が流れているときに電圧降下 (Fig. 3 中の LED1 の下に書いた VF という値) を示し、波長が短くなればなるほど大きな値を取る傾向があるので、大きめ電源電圧を用意しなければならないことを覚悟して下さい。また、高輝度タイプを謳った数 W の LED も売られていますが、放熱対策を講じなければならないので、表示用にはお勧めしません。次に、電源を用意して下さい。乾電池、安定化電源、AC アダプタ等なんでも良いのですが、先に書いた VF より大きなものが必要になります。乾電池がお手軽で良いのですが、大抵の LED では VF が乾電池の起電力 1.5V を超えることに

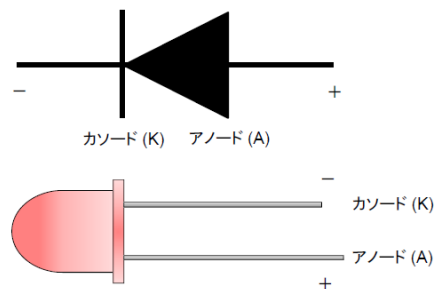


Fig. 7 LED

なりますので、乾電池を 3 または 4 個直列にできるバッテリーボックスを用意する必要があります。(スイッチ付きのものが便利です。)最後に電流制限抵抗 $R1$ の値を決めます。 $R1$ を決めるためには、まず、LED に流す電流値 $I1$ を決める必要があります。当然 $I1$ の値を大きくすればするほど明るく光ることになるのですが、あまり大きな電流を流すと LED が壊れますので、ちょうどいい $I1$ を決める必要があります。まずはデータシートを見て下さい。絶対最大定格(一瞬たりとも超えてはいけない値)として、順方向電流 IF の値が記載されていると思うのですが、 IF は絶対に超えてはいけない値ですので、 $I1$ は必ずこれより小さい値を選んで下さい。最終的には、光り具合を見て決めることになるのですが、まずは IF の $1/2$ とか $1/3$ とか、小さな値を選んで下さい。(通常は数 mA になると思います。) $I1$ の値が決まればあとは、式(1)により $R1$ を決定することができます。

$$R1 = \frac{V1 - VF}{I1} \quad (1)$$

抵抗も消費電力、精度、パッケージ等に依っているいろいろな種類があるのですが、とりあえず一番ポピュラーなリード線付きの(アキシアル)炭素皮膜抵抗で構いませんので、 $R1$ のものを用意して下さい。(明るさを調整するために何種類か抵抗値の異なるものも用意しましょう)。

それでは、ブレッドボードを使って光らせてみましょう。**Fig. 3-1**を見ながらブレッドボードに用意した部品を挿入して下さい(必要に応じてリード線を加えます)。最後にバッテリーケースの電源を ON すると LED が光ると思います。明るさを見て、明るすぎるなら $R1$ を大きなものに、暗すぎるなら小さなものに変えて、ちょうどいい $R1$ の値を決めて下さい。(光らないときは逆接続の可能性があるので、LED を逆にして下さい。)

3.3 スイッチングしよう

次に、FET を使って LED の ON/OFF を行ってみましょう。2.3 項では、FET を使ったスイッチング回路のポイントを強調するため、**Fig. 3-4** を使って説明を行いました。実際の回路では **Fig. 8** のようにゲート側にも電源が必要となります。さらに、**Fig. 9** のように 2 つの抵抗 $R2$, $R3$ を加える必要があります。(回りくどくてすみません。ゲートへの印加電圧でスイッチングをコントロールするという理解をもらうために、あえて **Fig. 8** を挟ませてもらいました。) $R2$ はゲートへ流れ込む電流を制限する「電流制限抵抗」になります。もし、この抵抗がなかったとすると、スイッチ $SW2$ を入れた瞬間、電源 $V2$ とゲートがショート状態になり、 $V2$ の起電力がそれほど大きくなくても、非常に大きな電流が流れ、FET のゲートを破壊することになります。もう一つの抵抗 $R3$ の働きを理解するためには、FET (MOSFET) の基本構造を理解しなければなりません。(本当は、混乱させたく

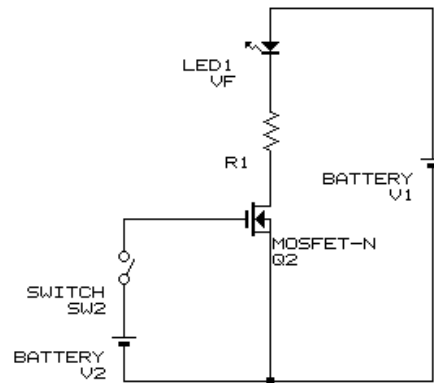


Fig. 8 Basic concept for switching with FET

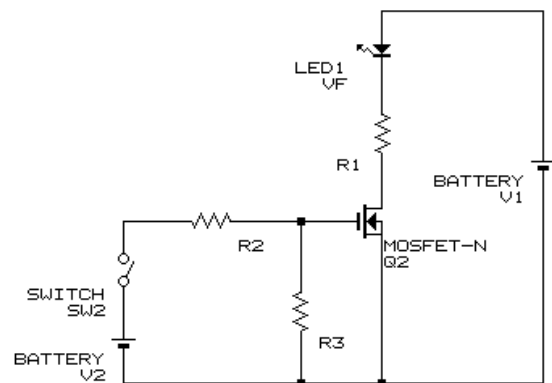


Fig. 9 Switching circuit of LED illumination with FET

ないので、構造にまで立ち入りたくないのですが、これだけは避けて通れませんので、これから少し MOSFET の構造を説明します。もし、混乱するようでしたら、最初は読み飛ばしてもらって、とにかく $R3$ は加えるものだと盲信して下さい。高速のスイッチング等が必要になってから、改めて学習すれば OK です。) MOSFET は **Fig. 10** のような構造 (Nch の場合) をしています。シリコンベースの NPN 接合基板に酸化膜(誘電体)を仕切として、金属製のゲート電極が取り付けられています(「MOS = Metal Oxide Semiconductor」という名前の由来)。ゲートに電圧が印加されていないときに、ドレイン-ソース間に電圧を印加しても、二つある NP または PN 接合のうち、どちらかが逆接となって、電流は流れません。次に、ゲートに (p 型半導体部に対する) 電圧を印加した場合 (**Fig. 11**), 酸化膜で仕切られているので、NPN 接合基板とゲート電極間に電流は流れませんが、酸化膜が誘電分極を起し、ゲート電圧が印加されていないときに、ドレイン-ソース間の導通を拒んでいた p 型半導体部の、酸化膜近傍における電子濃度が上昇し、ドレイン-ソース間があたかも NPN のように接合されているようになるので、ドレイン-ソース間電圧に応じて、電流が流れるようになります。(FET が「Field-Effect」transistor と呼ばれる所以。)つまり、ゲートに電圧を印加しているのは、

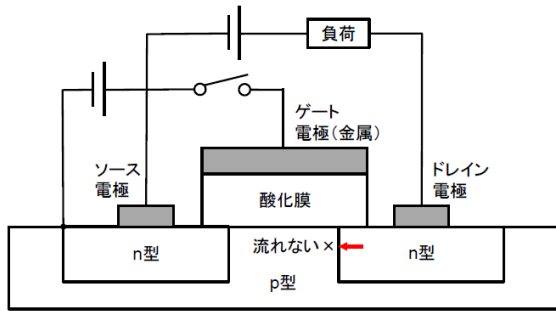


Fig. 10 Nch MOSFET (Gate OFF)

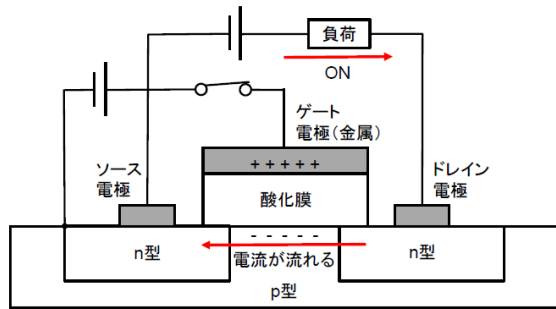


Fig. 11 Nch MOSFET (Gate ON)

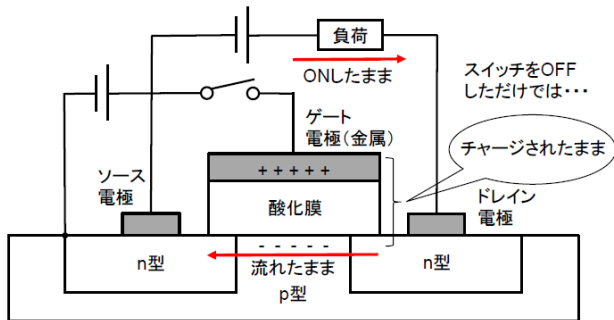


Fig. 12 Effect of input capacitance, Ciss

この MOS 部 (=コンデンサ) を充電していることに他ならないのです。しかし、ひとたび蓄積された電荷はスイッチを OFF にしてもそのままなので、ドレイン-ソース間電流はそのまま流れたままとなり、LED が点いたままとなります。R3 はゲート OFF 時に、この電荷を解消する役割を果たします。Fig. 9 をもう一度見て下さい。スイッチ SW2 を OFF した場合、FET のゲートに蓄積された + 電荷は R3 を通じてグラウンドレベル (電源の-レベル) に戻ることがわかるでしょうか? また、R2 同様、R3 も電流制限抵抗として機能し、電荷解消時に流れる過電流から FET を守ってくれます。FET を保護することを考えると、R2、R3 の抵抗値は大きいほど良いということになるのですが、これらの値が大きすぎるとスイッチング (ON/OFF) を繰り返したときの応答性が悪くなるので、両者の折り返いをつけた適当なものを選ぶ必要があります。

さて、ややこしい話はこれくらいにして、実際にブレッドボードを使って LED をスイッチングしてみましょう。

まずは、FET を選ばなければなりません。FET も、電気的な性能に加えて、パッケージの違いに応じていろいろなものがあります。最終的には、自分の用途に合わせて適切なものを選んでいただきたいのですが、ここでは自分が良く使う International Rectifier 製の IRLI540NPbF を例に、選び方のポイントを簡単にご紹介したいと思います。まず、FET には、極性に応じて Nch 型と Pch 型があります。どちらを選んでもスイッチを構成することは可能なのですが、前章に書いた通り、通常は電気的特性に優れた Nch 型を選びます。また、ゲート電圧が印加されていないときに、ドレイン-ソース間が導通していない (すなわちノーマリーオフ型となる) 「エンハンスメント型」を選んで下さい。次に、スイッチングしようとする対象装置または回路の電源電圧と動作時に回路に流れる電流を調べて下さい。自分がスイッチングしようとしていたのは、電源電圧が DC12V で 15W のヒーターでしたので、動作時の電流は 1.25A ということになります。そこで、ヒーターを接続するドレイン-ソース間の「耐電圧 V_{DS} 」が 12V 以上 (実際は、余裕を見てこの 3 倍以上のものを選ぶ、ただし、大きすぎるとスイッチングの応答性が悪くなる)、「連続ドレイン電流 I_D 」が 1.25A 以上 (こちらも余裕を見る) のものから選びました。さらにヒーターを駆動する電源に乾電池を使用することを考えていたので、省電力を実現すべく、ドレイン-ソース間の「オン抵抗 $R_{DS(on)}$ 」(ドレイン-ソース間に順方向電流を流した時の抵抗値) になるべく小さいものを選びました。 $R_{DS(on)}$ が小さければ、スイッチを ON している時の発熱も抑えられるので、放熱対策を最小限にできるというメリットもあります。また、ゲートの駆動をマイコンからの出力電圧 5V で行おうとしていたので、5V でスイッチング可能なものを選びなければなりません。そこで、ゲートをマイコンや IC 等ロジックレベルの電圧で直接駆動できる L²FET (Logic Level FET) を選びました。(残念ながら L²FET という呼称はあまり普及していないようです。ただし、データシートに「Logic-Level Gate Drive」等の記述がありますので、「Logic」と

Table 3 Key parameters for FET selection

検討すべき項目	本講座での選定方針
極性	・ Nch 型
スイッチングタイプ	・ エンハンスメント型 (ノーマリーオン)
FET タイプ	・ L ² FET (ロジックレベルタイプ)
耐電圧 V_{DS}	・ 接続する回路の電圧 + マージン (回路電圧の 3~5 倍)
連続ドレイン電流 I_D	・ 接続する回路に流れる電流値 + マージン
オン抵抗 $R_{DS(on)}$	・ 小さい方が良い
パッケージ	・ TO-220 フルパック

「FET」をキーワードに検索してみてください。) また、データシートには、出力特性として、ゲート電圧をパラメータとした、「ドレイン-ソース間電圧 V_{DS} 」 vs. 「ドレイン電流 I_D 」特性が記載されています。いくつかのゲート電圧について曲線が並んでいると思うのですが、その中から $5V$ の曲線を選んで、自分が接続しようとしている回路の電源電圧に相当するドレイン電流値を読んでみてください。この値が自分の回路に流れる電流値に対して十分余裕があれば、問題なくスイッチングができます。最後に、パッケージにも注目して下さい。本講座では、ハンダとブレッドボードやユニバーサル基板の使用を前提としていますので、TO-220 のように挿入実装用で足の間隔が $2.54mm$ のものを選んで下さい。また、放熱特性が若干悪くなりますが、「フルモールド」とか「フルパック」と呼ばれる素子全体が樹脂で覆われたものが (Fig. 4 参照)、絶縁を気にしなくて良いので、電力量が大きくなって、放熱をあまり気にしなくて良い場合は、これを選んで下さい。今回は、LED を点灯させるだけで、大きな発熱がありませんので触れませんが、消費電力の大きな回路、またはオン抵抗 $R_{DS(on)}$ の大きな FET では、放熱対策を講じる必要があります (「安全動作領域」とか「熱抵抗」等の値に注目します)。また、高速のスイッチングが必要な場合は、動特性も検討する必要があります。そのような時には、「入力容量 C_{iss} 」 (「ゲートの寄生容量」と表現

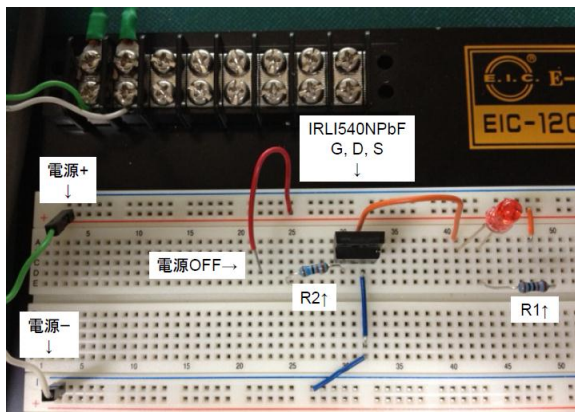


Fig. 13 Switching of LED with MOSFET without a gate, pull-down register R3 (V_{GS} OFF).

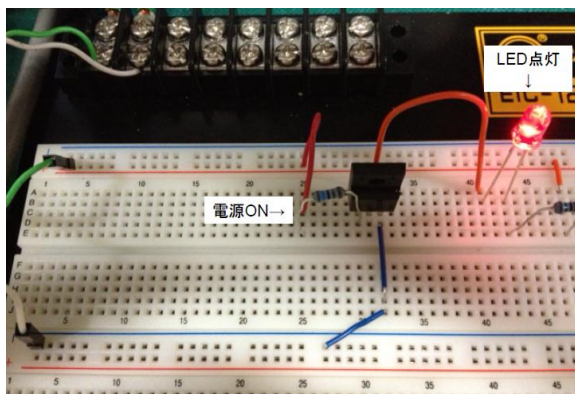


Fig. 14 Switching of LED with MOSFET without a gate, pull-down register R3. (V_{GS} ON)

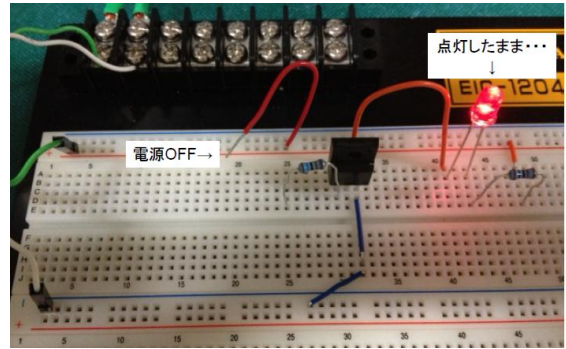


Fig. 15 Switching of LED with MOSFET (without a gate, pull-down register R3; V_{GS} OFF after ON).

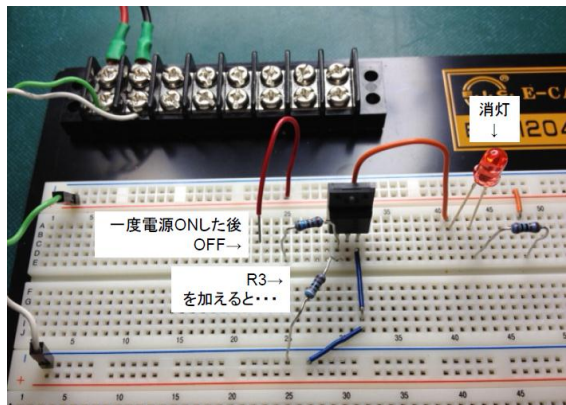


Fig. 16 Function of a gate, pull-down register R3

されるときもある) 等の値に注目します。ちなみに、今回使用する IRLI540NPbF は V_{DS} が $100V$ 、 $R_{DS(on)}$ が 0.04Ω 、 I_D が $23A$ 、TP-220 フルパックになります。

それでは、ブレッドボードを使って LED の点灯をスイッチングしてみましょう。最初から Fig. 9 の通り組んでもらっても良いのですが、R3 の働きを理解するために、まずは Fig. 9 から R3 を抜いた形で組んでみてください。Fig. 13 に接続例を示します。次に、ゲートが ON (Fig. 14 のように赤のリード線を R2 と接続) すると LED が点灯します。そして、赤のリード線を抜いてゲートを OFF しようとするのですが、これだけでは LED が消えないことがわかります (Fig. 15)。そこで、これに R3 を加えてみてください。R3 を接続すると、LED が消灯することがわかります。この状態で、ON、OFF を行うと、今度は LED がきちんと点いたり、消えたりすることがわかると思います (Fig. 16)。

3.4 加速度センサを使ってみよう

2.2 章で紹介した 3 軸加速度センサモジュール MM-2860 (サンハヤト (株) 製) を用意して下さい。MM-2860 は、 $5V$ または $3.3V$ を電源電圧として、加速度に比例する $0 \sim 3.3V$ のアナログ電圧を出力します。3 段階の感度が選べるのですが、最大感度の $800mV/G$ を選択した場合、加速度 $1G$ 当たり $800mV$ の電圧を出力することになります。ただし、 $0G$ のとき $1.65V$ となりますので、

1G のときの出力電圧は $1.65+0.8 = 2.45V$, -1G で $1.65-0.8 = 0.85V$ となります。すなわち、出力電圧 V_i (i は x, y, z) は加速度を a_i (i は x, y, z) とすると、式(2)の通りになります。

$$V_i = 1.65 + 0.8a_i \quad (2)$$

まずは、出力電圧を読んでみましょう。MM-2860 取扱説明書 (サンハヤト株) を見ながら、ブレッドボードに取り付けて下さい。そのとき、MM-2860 を直にブレッドボードに差ししてもよいのですが、抜き差しを繰り返すとピンが曲がる可能性があるため、Fig. 17 のような IC ソケット (丸ピン, 28 ピン×600MIL) に取り付けて使うと良いかもしれません。MM-2860 基板上には各端子の機能がシルク印刷されていますので、これと Table 4 (取扱説明書にあるピンアサインの抜粋) を見比べて接続してい

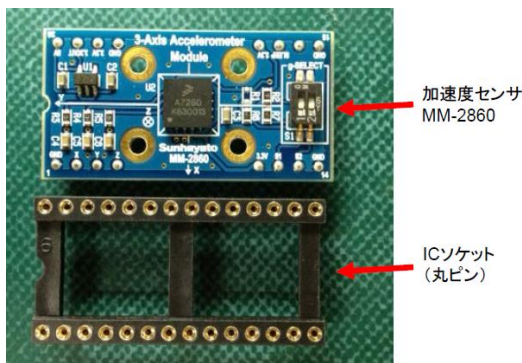


Fig. 17 Acceleration sensor module, MM-2860 and IC socket

Table 4 Pin assignment of MM-2860 (from a user manual of MM-2860, Sunhayato Corp.)

ピン番号	信号名	機能
1	GND	接地
2	Xout	X 軸電圧出力
3	Yout	Y 軸電圧出力
4	Zout	Z 軸電圧出力
11	3.3V	3.3V 電源入力
12	g-SELECT1	センサ感度選択信号入力
13	g-SELECT2	センサ感度選択信号入力
14	GND	接地
15	GND	接地
16	N.C.	- (何も接続しない)
17	SLEEP	スリープモード信号入力 (L でスリープ)
18	3.3V	3.3V 電源入力
25	GND	接地
26	3.3V	3.3V 電源入力
27	3.3V	3.3V 電源出力
28	5V	5V 電源入力

きます。まず、電源は、5V でも 3.3V でも良いので、5V なら 5V と書かれたところに、3.3V なら 3.3V と書かれたところに、電源の+を接続して下さい。(ただし、電源はスイッチ付きのものを用意して、接続時は OFF にしておくこと。) 3.3V 入力は 3 カ所あるのですが、基板上で接続されていて (取扱説明書の回路図を参照のこと)、どれか一つにつながっていればいいので、つなぎやすいところにつないで下さい。ただし、3.3V と 5V を同時につなぐことは絶対にしないで下さい。そして、電源の-を GND と書かれたところに接続して下さい。GND も 4 カ所あるのですが、どれも基板内でつながっていますので (取扱説明書の回路図を参照のこと)、いずれか一つ、つなぎやすいところにつなげば OK です。あと、5V を供給した場合は、3.3VOUT と 3.3V を接続して、基板の 3.3V レギュレータから加速度センサに 3.3V が供給されるようにして下さい。感度は g-SELECT スイッチで設定します。基板上に g-SELECT と白線で囲まれた 2 極の DIP スイッチがあると思うのですが、Table 5 を見ながら感度の設定を行います。2 極のうちどちらが g-Select1 か g-Select2 かは、基板上に 1 と 2 でシルク印刷で識別されています。また、ON か OFF かは、ON が印刷されていますので、されていない方が OFF となります。とりあえず最大感度の 800mV/G で設定してみましょう。800mV/G の場合、g-Select1 が OFF, g-Select2 も OFF となりますので、1, 2 とも 1, 2 と書かれた側 (ON の反対側) に設定されていることを確認して下さい。デフォルトでこの設定になっていると思うのですが、違う場合は精密ドライバ等を使って、スイッチを壊さないように気をつけながら、設定変更して下さい。出力端子は x, y, z と書かれていますので、いずれかにテスタ、電圧ロガー、オシロスコープの+を、-を GND につないで、電源を ON して下さい。加速度センサが水平に置かれているのであれば、 $V_x = V_y = 1.65V$, $V_z = 0.85$ または $2.45V$ になるはずですが。(軸定義は基板上に書かれています。) さあ、どうでしょうか? 実は、この状態では出力が現れません。これは、デフォルトで SLEEP が L モードになっているため、これを解除するために、SLEEP を 3.3V に接続して H モードにしてやる必要があります。幸い SLEEP の隣には 3.3V がありますので、電源を一度落としてから、両者を接続してみてください。再び電源を入れるとどうでしょうか? まだ、出力が現れないという方は、きちんと接続されているかを確認して下さい。出力値がおかしいという方は、DIP スイッチの設定をもう一度確認して下さい。うまく

Table 5 Pin assignment of MM-2860 (from the user manual of MM-2860, Sunhayato Corp.)

g-Select1	g-Select2	加速度値の範囲	感度
OFF	OFF	±1.5g	800mV/g
ON	OFF	±2g	600mV/g
OFF	ON	±4g	300mV/g
ON	ON	±6g	200mV/g

いているようであれば、加速度センサを傾けたり、反転させてみて下さい。状態に応じた出力が得られていることを確認してください。

4. 結び

4.1 全般

今回は、加速度スイッチの構成部品の中から、LED、FET、加速度センサの使い方を学習しました。ここではさわりをごくごく簡単に紹介しましたが、各部品（特にFET）の機能・用途は多岐に渡り、さらには特定の用途に特化して一部周辺回路を取り込みモジュール化された便利なものが用意されています。また、今回取り上げた部品を実際に使用する際には、いくつかの保護素子等を加えた方が良いでしょう。一度にたくさんのことを書き込むと混乱すると思われましたので、今回はあえて割愛しています。勘所がわかったら、市販の教科書（FETの説明に際し、参考文献¹⁾などを参考にしました）、ウェブページ等を参考に勉強してみてください。

4.2 参考情報

これまでに電子部品を購入したことのない方の利便性を考えて、自分が知っているお店をリストしておきます。

- マルツパーツ館（<http://www.marutsu.co.jp/index.php>）
3軸加速度センサモジュール MM-2860（サンハヤト製）
や次号で紹介する dsPIC モジュールの販売を行っています。
店舗販売&通販。
- 秋月電子通商（<http://akizukidenshi.com/>）
バルク品等お値打ち品が見つかる可能性大。店舗販売&通販。
- 千石電商（<https://www.sengoku.co.jp/>）
バルク品等お値打ち品が見つかる可能性大。店舗販売&通販。
- RS コンポーネンツ（<http://jp.rs-online.com/web/>）
通販。法人契約が必要となりますが、在庫品に関しては翌日
配送が可能なので重宝しています。通販のみ。

参考文献

- 1) よくわかるパワーMOSFET/IGBT 入門, 山崎浩著, 日刊工業新聞社

(2013年1月20日受理)

CORRECTION

“航空機実験用加速度スイッチの作り方（第一回）

初心者のためのマイコン電子工作講座”

夏井坂 誠

Int. J. Microgravity Sci. Appl. Vol. 30 No. 1 2013 (64–73)

72 ページ右 13 行目「・・・つなげばOK です。」の後に、以下を追記.

「あと、5V を供給した場合は、3.3VOUT と 3.3V を接続して、基板上の 3.3V レギュレータから
加速度センサに 3.3V が供給されるようにして下さい。」

(2013 年 7 月 3 日)