



Arduino の概要と私の応用例の紹介

坂口 敦¹

1. はじめに

Arduino は 2005 年にイタリアで開発が始まり、わかりやすい標準化された入出力ポートや Arduino IDE と呼ばれる手軽に始めることができるプログラムの開発環境が用意されているため、電子工学やコンピュータの専門家以外にも広く利用されるようになりました。本項では、Arduino を使用して自動採水装置等を作製した経験をもとに、これらの応用例も紹介したいと思います。

2. Arduino の使用に際しての工夫等について

Arduino には多種類のタイプが存在し、また純正品以外も販売されているのでどれを買うか迷いますが、初めは Arduino Uno (2,940 円、以降も含めて価格は全て 2021 年 4 月現在) の試用をお勧めします。私は Arduino Mega (5,800 円) もよく用います。

Arduino を動かすにはスケッチを書いて Arduino に送信する必要がありますが、パソコン上でスケッチを書くソフトウェアを Arduino IDE と言います。よく更新版がリリースされますが、更新しないとコンパイルできないライブラリもあるのでご注意ください。そのライブラリとは特定の処理をさせるためのプログラムで、Arduino にシールドやモジュールと呼ばれるハードウェアを接続した場合に必要な事が多い他、特殊な計算をさせたい場合に使用する事もあります。殆どのライブラリはインターネット上の Arduino Library List からダウンロードできます。スケッチを書く際の辞書としてはインターネット上の Arduino 日本語リファレンス (<http://www.musashinodenpa.com/arduino/ref/>) が便利です。原本は英語ですが、日本語に翻訳してくれています。

Arduino 用の多様なシールドやモジュールを秋月電子通商やスイッチサイエンスから購入する事ができ、我々の分野では記憶媒体としての SD シールド、観測時刻を得るための RTC モジュール、観測値を液晶画面に表示するための LCD シールド、100 V や 12 V で作動する機器を制御するためのリレーモジュール、その他に様々な

環境計測用シールドおよびモジュールの利用価値が高いです。シールドを何層にも重ねて使用する場合は同じデジタル端子もしくはアナログ端子を別のシールド同士で共有して誤動作する事があるので、シールドと端子番号の関係を把握しておくが良いです。

Arduino 用に販売されているものではない一般的な温度センサー、日射センサー、流量センサーなどや、土壌水分センサーなども用いる事ができますが、世の中のセンサーの殆どは観測値を電圧またはパルスとして出力しています。出力値が電圧のセンサーの場合は Arduino のアナログ端子にセンサーの出力端子を、Arduino の GND 端子にセンサーの GND 端子を接続し、そしてセンサーの印加電圧端子は常時通電して良いのであれば Arduino の 5.0 V 端子か 3.3 V 端子、50 ミリ秒などの短時間しか通電させたくない場合はデジタル端子に接続します。その時に注意すべきはセンサーの出力電圧のレンジで、Arduino は 0~5.0 V と 0~1.1 V の 2 種類のレンジで電圧を計測できますが、日射センサーのように出力電圧の最大値が数百 mV のセンサーでは 0~1.1 V のレンジで計測した方が 0~5.0 V のレンジで計測するよりも計測精度が向上します。一方で、出力電圧の最大値が 1.1 V を超えるセンサーでは 0~5.0 V のレンジで計測しなければなりません。アナログ端子で計測する電圧のレンジはスケッチ内で指定します。出力値がパルス回数のセンサーの場合は Arduino のデジタル端子にセンサーの出力端子を、Arduino の GND 端子にセンサーの GND 端子を接続し、そしてセンサーの印加電圧端子は出力値が電圧のセンサーの場合と同様です。

出力値がパルス回数のセンサーは風速計や流量計などの回転体に多いですが、例えば 1 分間の単位時間内に何回のパルスをカウントしたかで値に変換できます。出力値がパルスの到達時間のセンサーの場合は Arduino のデジタル端子を 2 個用いる事で到達時間を計測できます。交流の印加電圧が必要なセンサーの場合もデジタル端子を 2 個用いれば作りたい周波数の交流電流を流せます。

今まで私たちの分野で使われていた測定機器は順次 Arduino への対応をしており、例えば米国 IRROMETER 社製の Watermark 吸引圧センサーは IRROMETER 社のウェブサイト内で Arduino への配線方法とスケッチが公開されています。

¹ 山口大学大学院創成科学研究科。
2021 年 9 月 13 日受稿 2022 年 1 月 26 日受理

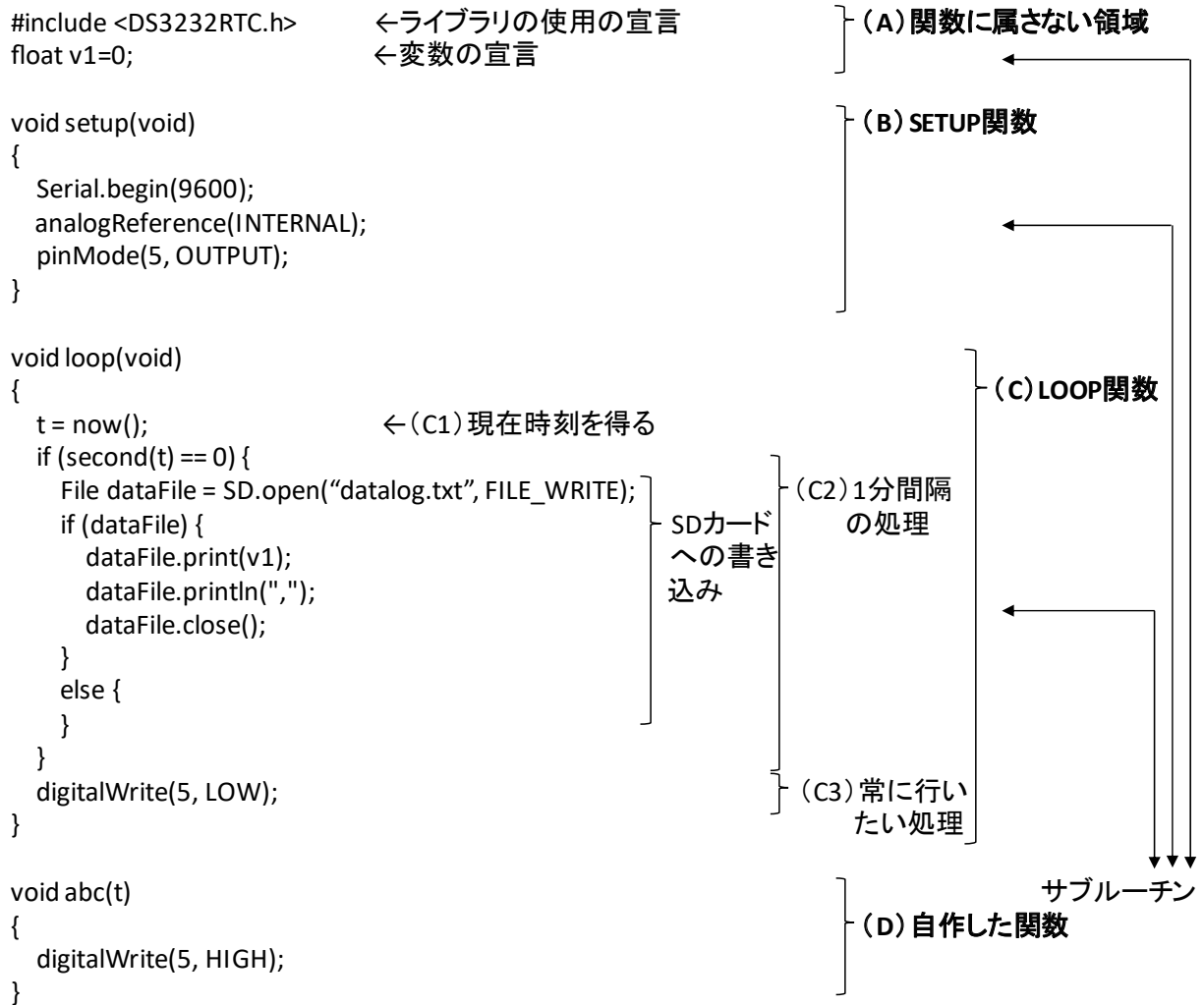


Fig. 1 スケッチの例.

次に、センサーを用いて観測を行ったら、その観測値に応じて機器の制御を行う事が多いです。例えば LED のように 5 V の微弱電流で作動する機器は Arduino のデジタル端子を正極、GND 端子を負極として配線します。しかし、100 V や 12 V の電源を要する機器を制御するには、まずデジタル端子とリレーをつなぎ、Arduino がリレーを ON にする事で機器に 100 V などの電流を供給して制御します。

次にスケッチの書き方ですが、Fig. 1 に示すようにスケッチは関数に属さない領域 (Fig. 1-A)、SETUP 関数 (Fig. 1-B)、LOOP 関数 (Fig. 1-C)、それ以外の自作した関数 (Fig. 1-D) に区分されます。関数に属さない領域にはライブラリの使用や変数の宣言などのコンパイラへの指示、SETUP 関数内には起動時に一度だけ行う作業、LOOP 関数内には起動中に延々と行い続ける作業を記入します。自作した関数内はサブルーチンと考えて下さい。LOOP 関数内で私が多用する手法がありますが、私たちの分野では 1 分間隔や 1 時間間隔などの定間隔で行いたい処理が多いのではないのでしょうか。そこでまず、Arduino に RTC モジュールを取り付けた上で、

LOOP 関数の冒頭で RTC モジュールから現在時刻を得ます (Fig. 1-C1)。そして IF 文を用い、時刻の秒の単位が 0 ならば以下の作業をせよと書けば 1 分間隔の処理が行えます (Fig. 1-C2)。同様に、時刻の分の単位が 0 ならば以下の作業をせよと書けば 1 時間間隔の処理が行えます。常に計測し続けたい事、条件の成立時に即時実行したい事、常に入力可能にしたい事は LOOP 関数内の上記の IF 文以外のところに記述します (Fig. 1-C3)。定間隔で行いたい処理としては、SD カードへの時刻と観測値の書き込み、同内容のパソコンのシリアルモニターへの送信、定間隔で作動させたい機器への電源供給などが挙げられます。

3. Arduino を使った自動採水機の作製

次に自動採水機の解説を致します。まず、Arduino Mega が RTC モジュール (270 円) から現在時刻を得て、分の単位が 0 ならば三角堰に取り付けた水圧計 (2,100 円) の電圧を読みます。電圧から水位を求めて、越流が生じている場合は 16 ch リレーモジュール (2,200 円) の

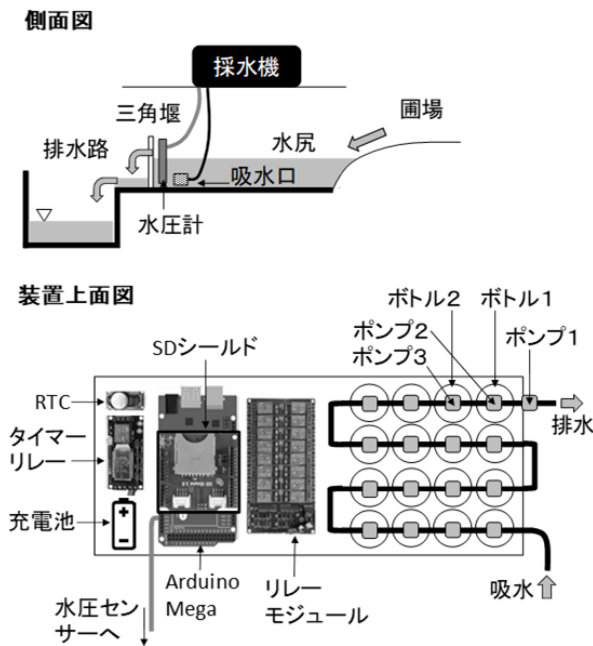


Fig. 2 自動採水機の模式図。

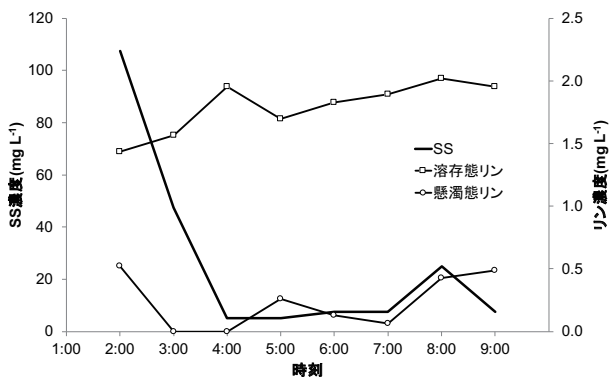


Fig. 3 本自動採水機による水田の畑作利用時の降雨流出水の濃度観測値。

リレー 1 番とつながったデジタル端子 1 番を HIGH にして、リレー 1 番とつながった INTLLAB 12 V 蠕動ポンプ (1,300 円) を回転させます。Fig. 2 に示す通り 1 番の蠕動ポンプは現在時刻の表流水を吸水して、チューブ内に溜まっている前時刻に吸水した表流水を排水します。1 分が経過してチューブ内が現在時刻の表流水に入れ替わったら、デジタル端子 1 番を LOW にして蠕動ポンプ 1 番を停止させ、引き続きリレー 2 番とつながったデジタル端子 2 番を HIGH にして、リレー 2 番とつながった蠕動ポンプ 2 番を回転させます。蠕動ポンプ 2 番はボトル 1 本目に現在時刻の表流水を注水し、注水後にデジタル端子 2 番を LOW にして蠕動ポンプ 2 番を停止させます。そして、SD カードに採水時刻と注水したボトルの番号と三角堰の水位を記録します。この 1 時間後にまだ越流が生じている場合には、また蠕動ポンプ 1 番がチューブ内に溜まっている前時刻に吸水した表流水を排水した

後に、次は蠕動ポンプ 3 番がボトル 2 本目に表流水を注水し、SD カードに採水時刻と注水したボトルの番号と三角堰の水位を記録します。以降、全ポンプが T 型チューブ継ぎ手でつながっているため、1 時間ごとに越流が生じている時刻にはボトルへの注水を繰り返します。降雨中でも越流が生じていなければ採水しないので、空のボトルは発生しません。重要な事として、ポンプは蠕動ポンプである必要があります。試作 1 号機では水中ポンプで揚水後に電磁弁でボトルに配水したところ、表流水中の土粒子が電磁弁の開閉部に詰まって作動しなくなりました。2 号機には吸水力を重視してダイヤフラムポンプを使用しましたが、やはり土粒子がダイヤフラムポンプの逆止弁に詰まりました。蠕動ポンプなら土粒子で詰まる事もなく、また水面下に揚水ポンプを付けなくても高低差 1 m 程度なら吸水できます。木片などのチューブ内への侵入を防ぐために、2 mm メッシュのフィルター (125 円) を吸水口に付けています。尚、降雨日までの間に無駄な待機電力を消費させないために、水位から越流が生じていないと判断された場合には Arduino Mega のデジタル端子からタイマーリレー (1,000 円) にトリガー電流が流れて 59 分 55 秒間のカウントダウンが開始され、その間はタイマーリレーが電池からの全電力供給を遮断します。降雨翌日に採水したボトルを回収しに行く際に、ポンプの作動に電力を消費するので電池も交換します。そして SD カードのデータも回収します。その後、ボトルごとに水質を分析すると共に、時刻毎の水位を三角堰の公式で流量に換算します。

観測例の多い畑地ではなく、水田の高度利用化に伴い増えつつある畑作利用時の水田で本機を使用したところ、Fig. 3 に示す通り畑地の降雨流出水と同様に SS は表面流出の初期で高濃度でしたが、リンと窒素の濃度は畑地に比して溶存態の割合が多い事が分かりました (1 圃場での結果に過ぎません)。

4. Arduino を使った自動灌漑機の作成

次に、露地野菜の点滴灌漑用に自動灌漑機を作製して栽培実験に試用しております。まず、自動灌漑機は施設園芸で発達致しましたが、露地圃場は施設に比して土壌水分の面的不均一性が大きいという特徴があります。そこで自動灌漑を行うには圃場の土壌水分の平均値を把握する必要がありますが、圃場での気象観測値から圃場の土壌水分の平均値を推定する方式と、圃場内に複数の土壌水分観測地点を設けて観測値を平均する方式の 2 方式の自動灌漑機を作製し、その性能を点滴灌漑で栽培中の野菜に掛かった水ストレスをリーフポロメータで計測する事で評価しています。

まず、気象観測型自動灌漑機については根域土壌における水収支 (蒸発量, 蒸散量, 降雨量, 表面流出量, 深部浸透量, 1 単位時間前の灌水量) を計算し、水収支から求められた根域土壌の含水率を水分特性曲線により吸引

圧に変換する事で、土壌の吸引圧を管理目標値で維持するために必要な灌水量を 10 分間～1 時間単位で算出して（深部浸透損失を防ぐために単位時間は土壌により異なる）、単位時間毎に灌水用電磁弁を開閉する事で不足水量を根域土壌に供給しています。自動灌漑機は日射、温度、湿度、風速、雨量、流量センサーから構成されていますが、日射、温度、湿度センサーは出力値が電圧なので Arduino のアナログ端子に、風速、雨量、流量センサーは出力値がパルスなので Arduino のデジタル端子に接続しています。また、灌水用電磁弁にはリレーを介して給電しており、Arduino のデジタル端子がリレーをコントロールする事で電磁弁を開閉しています。尚、灌漑圃場は山口大学附属農場内にあり商用電源を使用していますが、附属農場内の各種設備（大型換気扇など）の起動時に一時的に大電力が消費されて数ミリ秒間の停電が生じるため、スマートフォン用のモバイルバッテリーを経由して Arduino に給電する事で Arduino がリセットされてしまう事態を防止しています。

続いて、複数地点土壌水分観測型自動灌漑機については、HYDRUS-2D を用いて円筒形領域内での土壌の吸引圧の経時変化を数値予測し、根域全体の吸引圧が灌水開始吸引圧に達した時の土壌水分観測位置における吸引圧、および根域全体の吸引圧が灌水停止吸引圧に達した時の土壌水分観測位置における吸引圧を推定して、土壌水分観測値がそれぞれの値に達した時点で電磁弁を開閉しています。土壌水分観測には METER 社製 EC-5 を使用し、Arduino のデジタル端子からの出力を電圧レギュレータ（50 円）で 3.3 V に降圧して EC-5 に給電しています。土壌水分観測位置は点滴灌漑のエミッターから側方 5 cm、深度 5 cm の位置としましたが、それはエミッターに可能な限り近づける事で灌水が土壌水分観測位置にまで浸潤するのに要する時間に起因する灌水制御のタイムラグを減らして根域の吸引圧が管理目標値から外れる事を防ぎつつも、灌水中に飽和含水率に達して指標とならなくなる事も防げる位置であったためです。数値解析においては点滴灌漑栽培下での根の 2 次元密度分布、点滴灌水量、蒸発散量を設定し、根域全体の吸引圧は根域全体の吸引圧の根密度分布に応じた加重平均値としました。土壌水分観測の地点数は、山口大学附属農場内の露地圃場における土壌水分観測地点数とその全観測値の平均値の関係から、観測地点数の増加が平均値に殆ど影響しなくなる観測地点数としました。そして、各地点で観測された含水率の平均値を水分特性曲線で吸引圧に変換し、電磁弁制御の指標としています。また、EC-5（17,300 円）と共に吸引圧センサーである METER 社製

TEROS-21（51,700 円）、IRROMETER 社製 Watermark（13,200 円）、オーストラリア政府 CSIRO 製 Chameleon（1,400 円）、自作テンシオメータ（圧力センサーはセンシズ社製）、ならびに含水率センサーである DFROBOT 社製 SEN0193（960 円）を併用しました。Arduino に接続して使用するとテンシオメータ以外ほどのセンサーも観測開始 2 週間後程度から異常値を出力し始めたため、1 日 1 回、24 時に 30 秒間 Arduino が自身の電源を落とす仕組みとし、異常値を回避しました。SEN0193 は地表に挿して使用するセンサーであり埋設はできませんが、回路部分をエポキシ樹脂で被覆して埋設しました。その結果、EC-5 と SEN0193 は同程度の含水率を示し、また Watermark と Chameleon は同程度の吸引圧を示しました。TEROS-21 とテンシオメータの吸引圧を正解と考えた場合、EC-5 と SEN0193 の含水率を水分特性曲線で吸引圧に変換した値は正解よりも常に大きな値（乾燥側）を示し、Watermark と Chameleon の吸引圧は正解よりも常に小さな値（飽和側）を示しました。Watermark と Chameleon は電気抵抗を吸引圧に換算しているために土壌水中の塩分が誤差の原因と思われる、EC-5 と SEN0193 は METER 社製 HYPROP で圃場内の 1 地点の土壌試料を計測して得た水分特性曲線が誤差の原因とされます。適当な水分特性曲線が得られた場合、複数地点土壌水分観測型の自動灌漑機は多数のセンサーを使用する事から価格面で SEN0193 が有利と考えています。

5. おわりに

オーストラリア政府 CSIRO は途上国の農家に彼らが開発した Chameleon センサーと称する吸引圧センサー（IRROMETER 社製 Watermark センサーに近い原理）を配布して現地農家の灌漑管理下での圃場土壌の吸引圧経時変化データを収集し、無駄な灌漑水使用量の把握に努めているが、その吸引圧計測からデータ回収までの一連の装置を VIA システムと称している。VIA システムの開発は Arduino によって行われ、製品版の VIA システムも中身は Arduino による装置の開発時に書いたスケッチを Arduino の基幹部の ATMEGA に書き込んで使っているだけである。Arduino を用いると手軽に創意工夫を試す事ができるが、良い装置が作製出来た後には Arduino を使う必要はなくなり、スケッチをそのまま ATMEGA 等へ書き込めば VIA システムのような製品も作れる。創意工夫が大好きな皆さんのアイデアを実際に試してみる段階で Arduino を活用する事により、皆さんのアイデアを実現してみませんか。