

BACKGROUND (研究の背景)

学校での気圧観測というと従来、据え置き式の水銀気圧計や、アナロイド気圧計をセンサ部に使用した、機械式の自記気圧計が使用されてきた。しかし測定にある程度のノウハウが必要で、また自記気圧計では、その記録用紙の交換や保管も手間を要する。近年では電子化されたハンディタイプの気圧計(たとえば「おんどり」TR73-U, T&D)もあるが、後述する微気圧にまで特化したものはあまり見られない。

一方2022年1月のフンガ・トンガの噴火では、世界に広がった空振の記録が、各所の気圧計で録られて話題になっている。そこで、これらの従来の問題を顧みて、容易に教室に置いて、24時間気圧の連続記録が可能なこと。かつ、次のどこかの火山の噴火にも対処できる、安価な微気圧計の開発を行ったので報告する。

APPARATUS (研究器材)

微気圧計のセンサとして、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems, 半導体ベースの微小電気機械システム)の製品の1つで、高精度かつ時間分解能が高く、しかも大変安価(通販で千円程度)で購入できるDPS310 (Infineon Technology社)を選択した。

記録装置として、マイクロコンピュータRaspberry Pi (略称RasPi)と、7インチの小型液晶モニターを用いた。センサのAD変換には、Arduino Uno R3を使用した。全体の構成をブロック図 (Fig.1), および写真 (Fig.2) で示す。センサとArduinoの詳細をFig.3に示す。Grove結線およびジャンパ栓接続でハンダ付けは不要。紙面の関係で、製作の詳細は筆者Webサイト (<http://www.yossi-okamoto.net/>)に譲る。

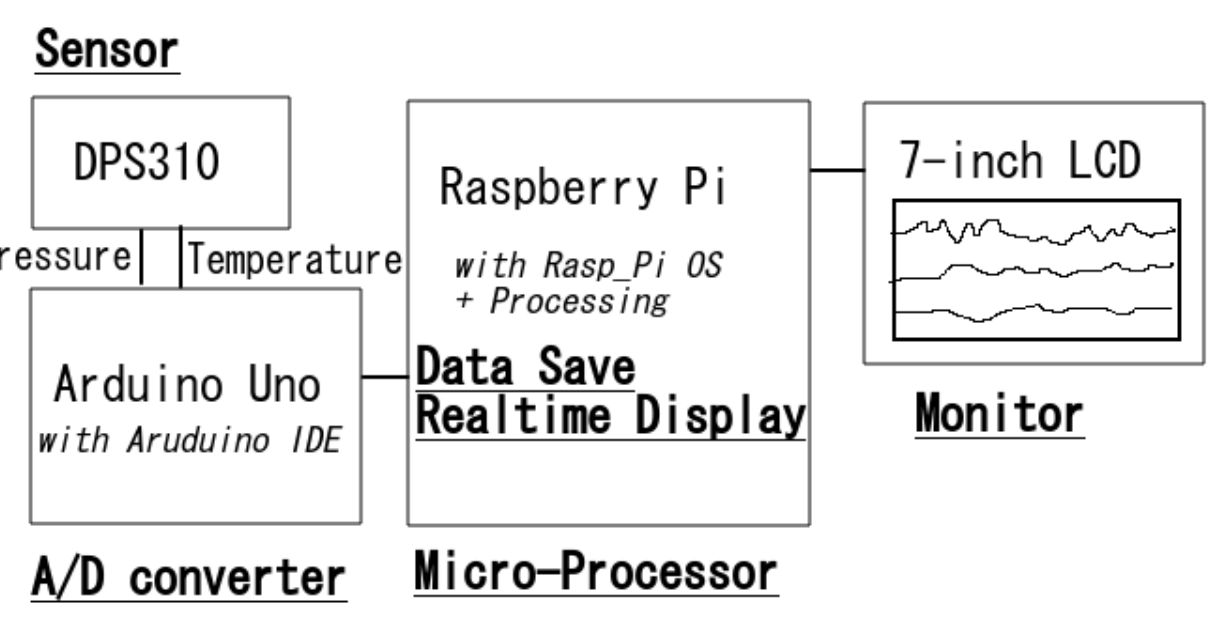


Fig. 1 Block diagram

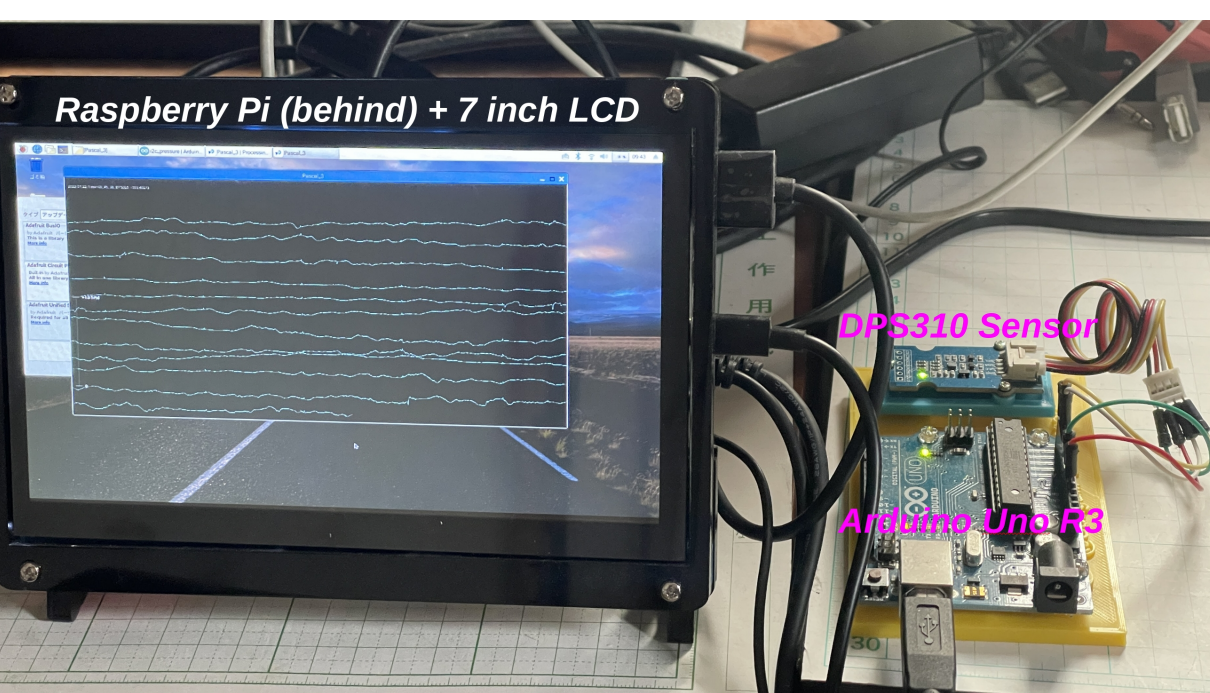


Fig.2 Whole system Prototype

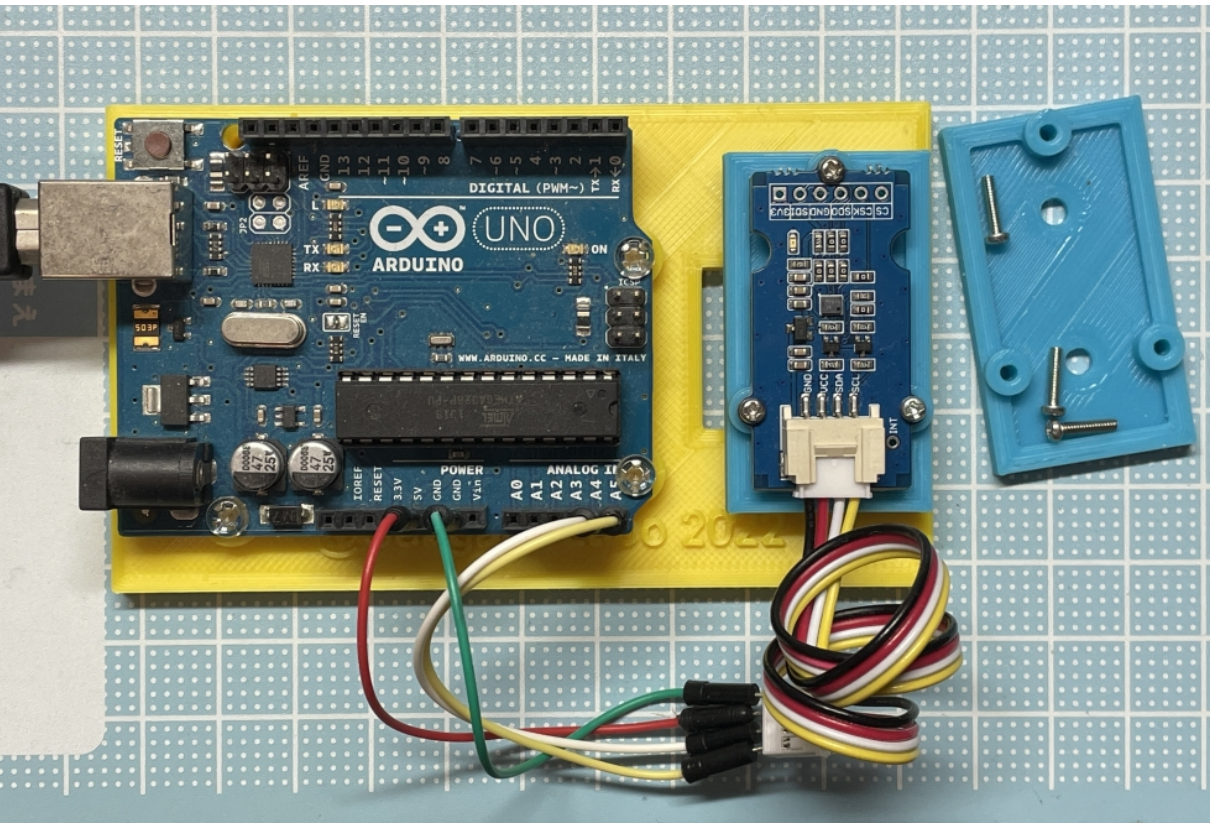


Fig.3 DPS310 sensor + Arduino Uno with sensor holders 3D-printed

- DPS310 (上写真右, 3Dプリンタ印刷台座)**
 ダイヤフラム構造の容量変化型センサで、最低分解能は最高±0.002 hPa (カタログ値, 標高にして±0.02m, つまり2cmの違いに相当する!)。机上で、センサの10cm程度の上下に伴う、気圧差をリアルタイムで検知可能。部屋のドアの開け閉めによる気圧変化も、記録できて興味深い (Fig.4)。フンガ・トンガの噴火の際に日本で記録された、気圧変化はおよそ、2hPa程度と報道されているので、十分すぎる感度と言える。
- Arduino Uno R3**
 微気圧センサからの信号のAD変換と、信号の制御のために、Arduino Uno R3を使用する。なおセンサ製造のInfineon Technology社からArduino IDEで利用できるライブラリ (i2_command) が公開されているので、それを利用する。センサからの出力は、Grove規格の4本線で、Arduinoにジャンパ線でi2c接続する (写真参照)。センサ出力には気圧と気温の2系統があるが、本試行では気圧データのみを使用したシステム全景をFig.3に示す。
- Raspberry Pi (以下RasPiと略す)**
 データ自動取得&保存および、波形リアルタイム表示のためにRasPiと7インチ小型液晶モニターを使用した。なお液晶モニターは使用環境に応じて変更は可能で、記録部分にはRasPiの代わりに、既存のPCも利用できる。後述するセンサの比較観測では2台のノートPCも使用した。Fig. 3ではRasPi本体は液晶モニターの裏側に固定されていて見えない。
- ソフトウェア**
 RasPiのDebian系OS上でArduino IDEを使用。表示保存はProcessing言語。詳細は筆者Webサイトを参照。

RECORD EXAMPLES (観測例)

観測例 (短期間)
 このプロトタイプを筆者自宅 (戸建て木造家屋の2F)の机上において、試験観測を継続中である (Fig.2)。幾つかの短期間でのリアルタイム観測記録を示す (長期間の観測例は最後の章で紹介する)。なお自作ソフトはProcessingで書かれており、筆者自作の地震計の制御&記録ソフトウェアの修正版。5Hzサンプリングで、横軸が5分。1分ごとに小さなタイムマークが入る。縦方向に12本の信号線で、1画面がちょうど1時間の記録に相当。また垂直方向のスケールは画面の左に、+1hPaの気圧スケールを表示。この記録画面と、気圧の数値データは、1時間の記録終了後に、RasPi内のマイクロSDカードに保存される。

まず、机上におけるセンサの上下運動 (数cmから数10cmの上げ下げ)と、日頃の部屋のドアの開け閉めに伴う、スパイク状の気圧変動 (最大±0.2hPa幅)のノイズを示す (以下画像は白黒を反転)。次に寒波襲来時の、強風下の記録。細かい数〜数十秒間の微気圧変動が記録されている。本稿の数値は海面較正なし実測値で表記。

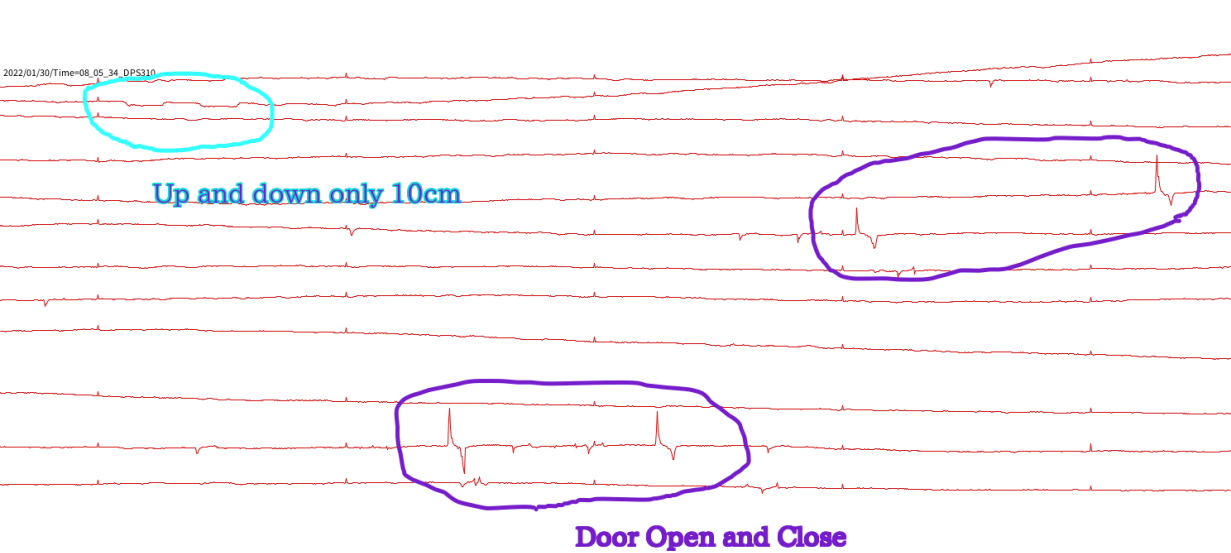


Fig.4 Dairy noise of door opens and closes with up-down sensor movement.

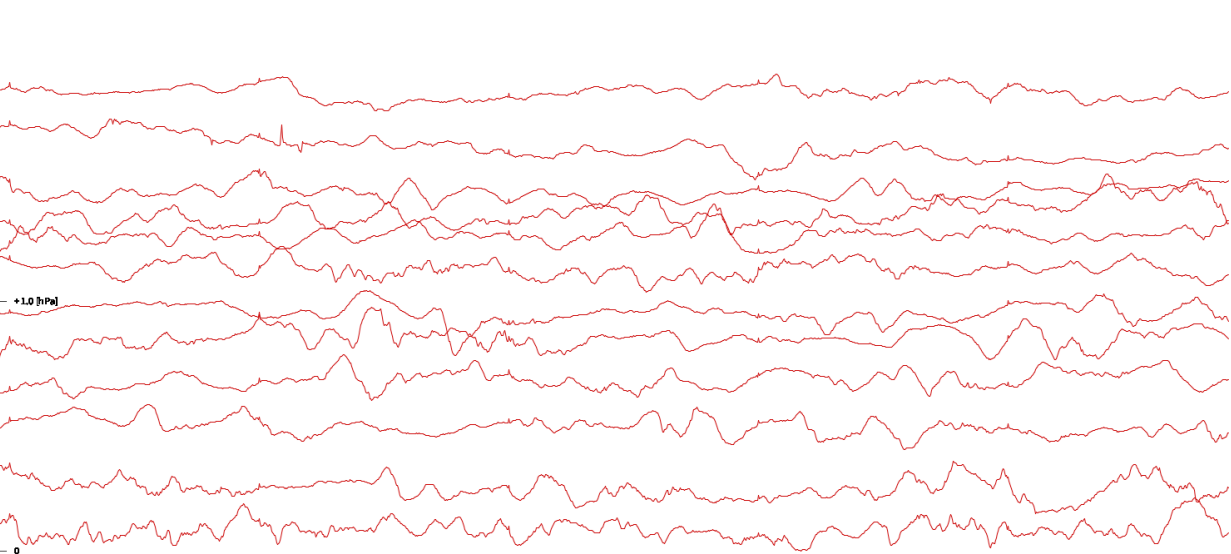


Fig.5 Strong windy night under cold storm. One hour record.

COMPARISON (比較観測)

4. 既存の気圧計およびセンサ個体間の比較
<既存の気圧計>
 ・古い水銀気圧計 (大阪教育大学附属高校天王寺校舎4F地学教室に置かれたもの, 標高23m)
 ・「おんどり」TR-73U: A,B 2台 (標高同じ)
 ・iPhone12Proの気圧計アプリ (標高同じ)
 ・AMeDAS大阪観測点 (標高83m,約4km北)
<測定日>
 2022年4月13日午前11時14分ごろ
 2022年6月27日午前11時00分ごろ

これらの気圧計との、計測値を表1に示す。以下単位はhPa。大阪のアメダスの値は午前11時のもの。水銀気圧計は3名の測定値の平均を表示。これを観ると

- ・DPS310はアメダス、2個の「おんどり」、iPhone内蔵気圧センサと比較で、約1hPa高い値を示す。
- ・2個の「おんどり」では約1hPaの表示差がある。
- ・水銀気圧計だけ約5hPa高い気圧を示す。

なお大阪AMeDASの値は場所が異なり、また標高は83mとかなり高いが、海面較正值では、直線距離4km離れた天王寺区にある、高校4Fの地学教室とよく似た数値となる。一方、地学教室の水銀気圧計は長く、メンテも行われておらず、経年変化のために、+10hPaを超える、相当大きな誤差が生じてしまっているため、比較検討の対象としては失格であった。

Table.1 Comparison of barometers

| | 2022/04/13 11:14 | 2022/6/27 11:00 |
|--------------|------------------|-----------------|
| | 実測値 | 海面較正值 |
| iPhone | 1005.7 | 1008.3 |
| TR-73U_A | 1008.9 | 1004.6 |
| TR-73U_B | 1009.4 | 1005.5 |
| DPS310 (本機) | 1010.9 | 1013.6 |
| Osaka-AmeDAS | 1003.4 | 1013.0 |
| Hg-Barometer | 1015.0 | 1017.7 |

<DPS310センサ間の個体差>
 DPS310の個体差を観るために、自室机上で2台の記録用PCも追加して、3個のセンサで比較観測を行った。3日間不定期の観測データをプロットした (Fig.6) 3台のセンサの観測値は0.1~0.3hPa以内に収まり、iPhoneとの観測値の差は+1hPa弱であることがわかった。

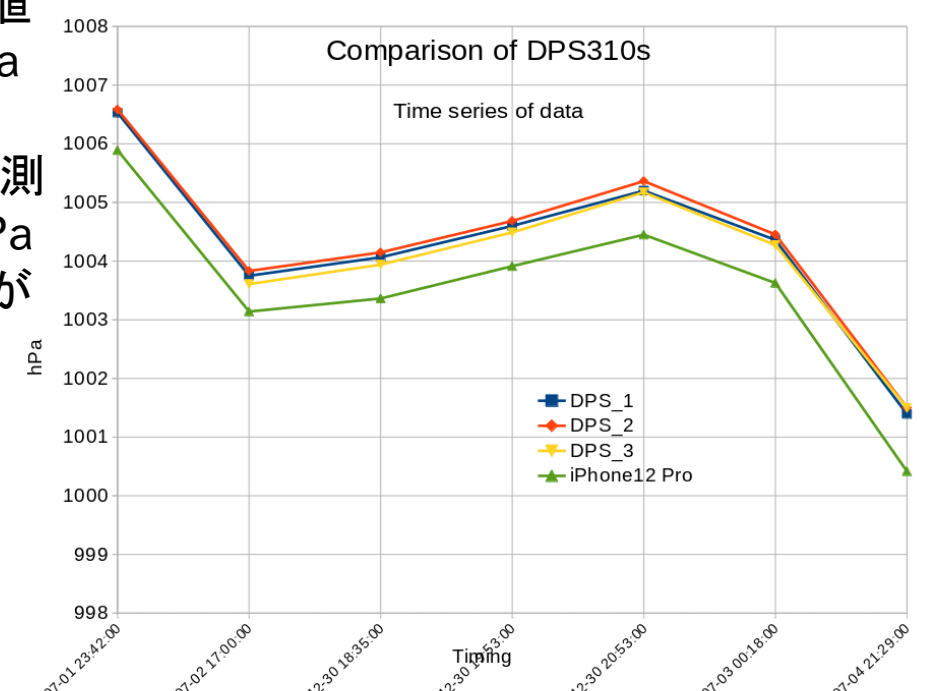


Fig.6 Comparison of three DPS310s with iPhone12Pro

<DPS310温度特性>
 温度特性を観るために、氷やPCボディ上で冷却・加熱実験をした。短時間の温度変化による気圧値の変動は不思議な振る舞いで、その範囲は±0.02[hPa]/[°C]にとどまる。データシートによると、センサに対する温度補償の回路が内蔵されていると記載。

LONGTIME RECORDS (長期観測例)

長期にわたる観測
 最後に自宅机上のDPS310微気圧計による、長期に渡る運用結果の一部を紹介する。最初に1日間の記録 (Fig.7)。次に欠測が少なくかつエアコン使用のない、4月後半の約半月間の気圧変動を示す (Fig.8)。

Fig.7では、夏場に入って、部屋でのエアコンのON-OFFによる、気圧上昇が顕著に現れる。これが室温変化か、風圧変化によるかは不明 (13時, 15時頃ON)。

Fig.8の長期の観測を観てみる。1日毎に観ると昼前に気圧が上がり、夕方前に気圧が下がっていく日が多いように見える。大気潮汐を観ているのではないかと考えている。また4月末に低気圧通過による、気圧の急激な落ち込みが、見事に観測されている。

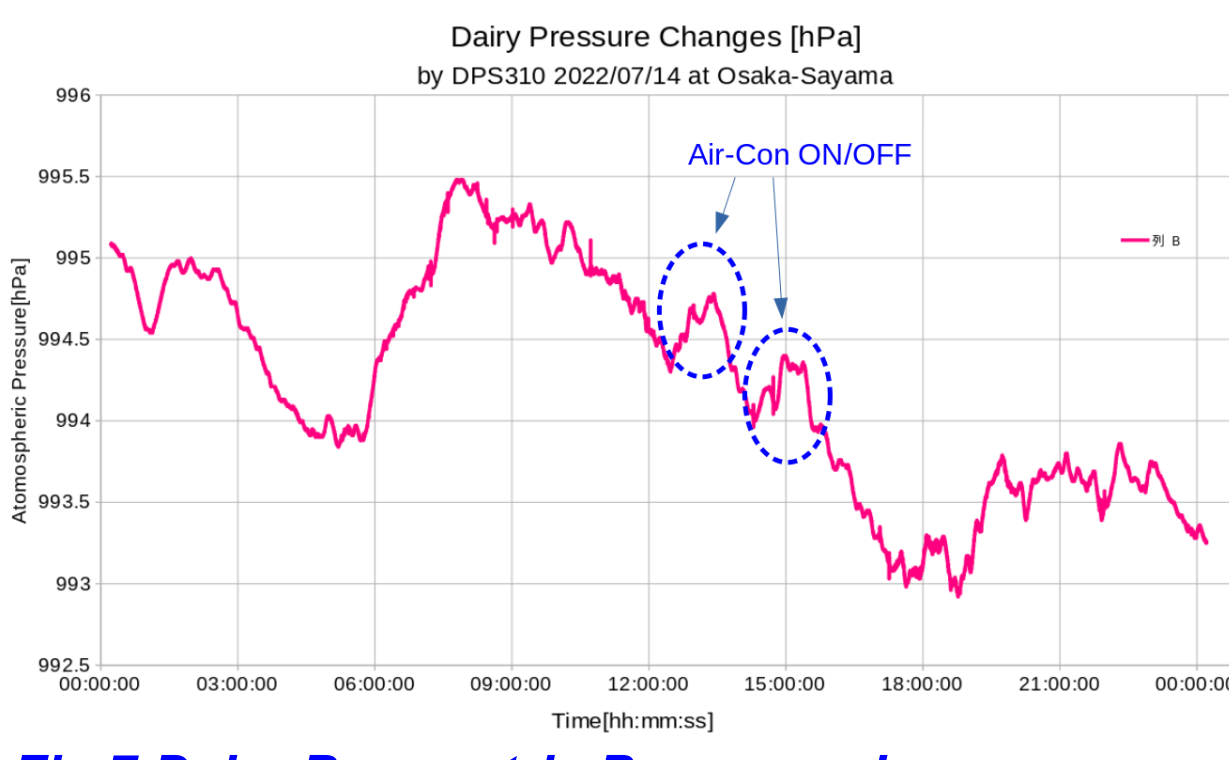


Fig.7 Dairy Barometric Pressure changes

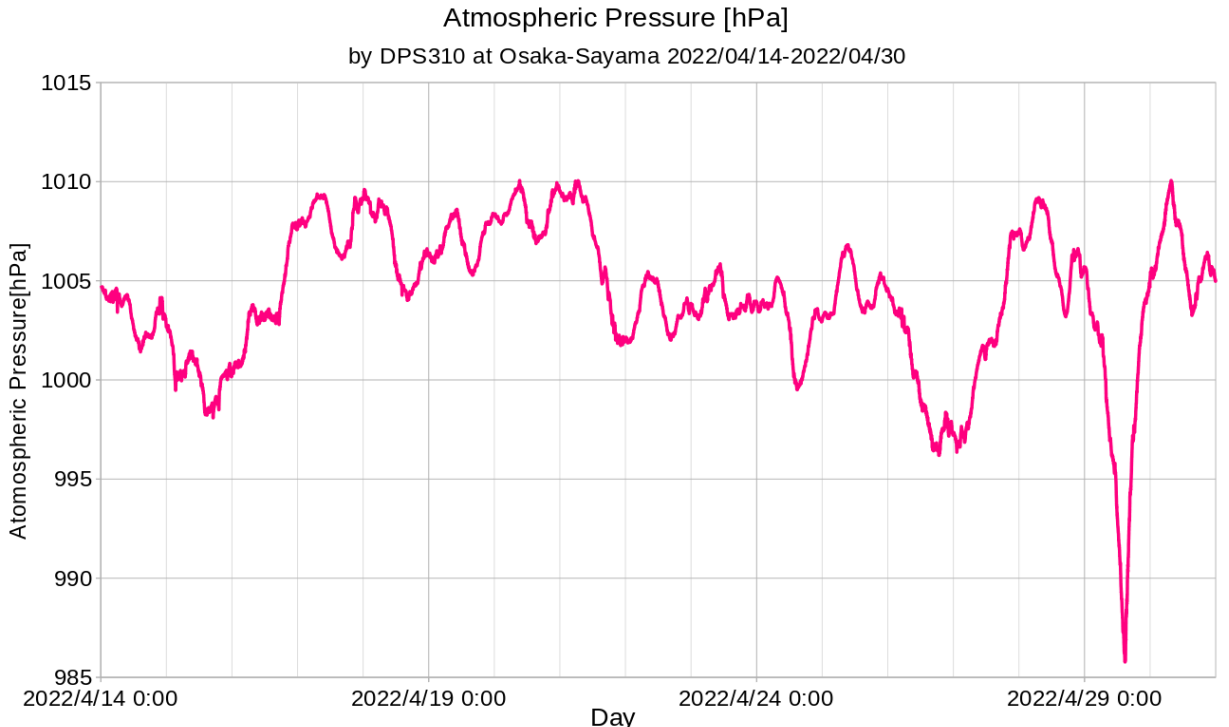


Fig.8 A half-Monthly Pressure changes

DISCUSSION (議論)

観測上で気づいた本センサの問題点の一つは温度特性である。実験で明らかのように、気圧値はあきらかに周囲の温度により変化するが、その振る舞いは複雑。しかしその影響は±0.02[hPa]/[°C]の範囲に留まり、また気温上下時には、ヒステリシスが観測される。これらは温度補償が効いていると考えられる。一方、時間変化への応答性は比較した気圧計の中でもっとも優秀で、筆者の例では5Hzサンプリングに十分応答する。このセンサ最大のメリットだと言える。さらに現在、より小型でオールインワンのM5Stackを用いた機器を開発中である。

SUMMARY (まとめ)

安価なDPS310微気圧センサを用いた、手軽な微気圧計を製作した。本機の性格上、絶対気圧の測定には向かない。しかし、大阪管区気象台のAMeDAS観測値と比較すれば、かなり近い誤差 (±1hPa程度)で、絶対気圧も測れていることが推定できた。

相対気圧の変化に着目すれば、「おんどり」と比較しても、価格は、大幅に安く、分解能は遥かに高い。さらに「おんどり」では制限される記録容量も、ほぼ制限がない。最後の例に上げた半月間の気圧変化など、長期間の気圧記録もデータ処理を工夫すればたやすい。さらに現在すでに開発中の、よりハンディなタイプは、登山やエレベータ、遊園地の大回転車など、高さ方向に移動する際の、気圧記録を簡単に得ることができる。

特筆すべきはセンサの応答速度の速さであり、従来の「おんどり」や、後述するスマートフォンのセンサなどでは実現不可能な、1秒未満の気圧変化を詳細に記録できることはメリットは大きい。これを利用して教室で、わずか数10cmの上下差に伴う気圧の変化を、リアルタイムに生徒に実際に波形で見せて実感させることができる。これは本機材のもっとも重要な機能の1つである。これらの特徴は、従来の気圧観測に、あらたな観測分野をもたらす可能性があると考えている。例えば強風による気圧変化や、地震の際の揺れに伴う気圧変化なども捉える可能性がある (根本, 私信)。

計測に関しては発展著しいiPhoneなどスマートフォンのセンサとの、使用の利便性の比較検討を、今後の課題としたい。ただ現時点では、時間応答性と記録保存に特化すればDPS310の圧勝である。しかしその差は今後縮まるかも知れない。

最初に記したように、本機の開発当初の動機は最大の目標は、次に世界のどこかで起こる、大規模な火山噴火による気圧変動を捉えることである。これらを通して、生徒に気圧変化という比較的味な自然現象への興味をインスパイアできれば、教材開発者として本望である。

REFERENCES (参考文献)

多岐に渡るので、下記筆者のWebサイトに詳述した。ごらんください。 <http://www.yossi-okamoto.net/>

ACKNOWLEDGMENTS (謝辞)

大阪管区気象台の古田佐代子氏には、AMeDASの観測点の標高値についてご教示いただいた。立命館大学教授根本泰雄博士には、地震と気圧変化の関連について議論いただいた。大阪教育大学附属高等学校天王寺校舎地学科教諭の井村有里博士には、器材と教室を観測に提供していただいた。また地学科の三橋礼氏には、観測の手伝いに協力いただいた。感謝します。