

富士山頂対応電気ポットの試作

矢野倉 伊織、森脇 晃、八重樫 拓也、奥山 慶洋¹

ラジオ部学生、人文科学科¹

An attempt to make an electric pot, suitable for the summit of Mt. Fuji

Iori YANOKURA, Akira MORIWAKI, and Takuya YAEGASHI

Abstract: A conventional electric pot does not stop heating until reaching 100 °C which is water the boiling point for water at 1 atmosphere. The boiling point on a high mountain (like Mt. Fuji) decreases with a corresponding increase in altitude, because barometric pressure decreases. In the case of Mt. Fuji, the water boiling point is about 88 °C. A retrofit electric pot with a temperature control function for each 1 °C rise (for each degree rise in temperature) was developed; we tried to test it at the summit of Mt. Fuji.

1. はじめに

わたしたちラジオ部員は簡易放射線測定器「はかるくん」を用いて身のまわりの自然放射線の測定を続けてきた。特に航空機内の放射線の強さに驚いた[1-3]。2次宇宙線の影響だという。地表から高さを増すとともに放射線の線量率は高くなる。それならば、国内最高地点、富士山頂上の放射線強度はどうか興味を持ち、平成 18 年度以来得わたし達は富士山測定登山を続けている。

平成 19 年、NPO の「富士山測候所を活用する会」が国有財産の気象庁富士山測候所を借り受ける形で富士山頂の測候所の一般の利用の道が拓けた。今年度「富士山頂での科学教育の試行」という課題で利用申請し 20 件の採択課題のひとつとして利用の機会を得た。下界(地表)で当たり前だが、山頂では当たり前ではなくなる。第 1 は気圧が約 2/3 になることである。理科室の水銀気圧計(フォルトンの気圧計)が使えない。水銀柱の高さが目盛り以下になってしまうからである。どうやって測るか? 気圧が下がれば血中飽和酸素濃度 SpO_2 が低下し慢性の高山病寸前になる。酸素濃度が減り火が燃え難くなる? 更に水の沸点も下がる。2泊3日の実験で得た経験の一部を紹介する。

富士山頂気象庁旧富士山測候所(図 1)は山頂三角点横の海拔 3776[m]にある。ラジオ部では気象庁旧富士山測候所を正式に借用し、一日目と二日目に二号庁舎 1F の食堂を借り、三日目には二号庁舎 2F の個室を二部屋借りて、実験をさせていただいた(平成 21 年 8 月 23 日~25 日)。

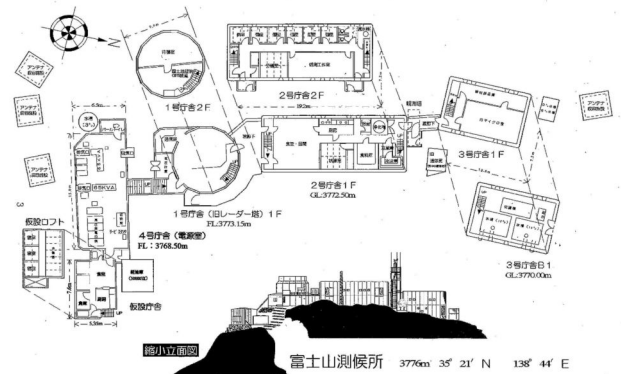


図 1 富士山頂気象庁旧富士山測候所の見取り図

Fig.1 A Mt. Fuji weather station's sketch.

富士山頂では気圧の影響により、水の沸点が下界より低い。理科年表[4](平成 18 年版、水の沸点)に載っている気圧による沸点の公式から、富士山での気圧を 644[hPa]として計算すると、水の沸点は約 88[°C]である。山頂で実測すると 87[°C]であった。

水の沸点の公式は、気圧を p [torr]で表すと、 $T[°C]=100.0[°C]+0.0367(p[\text{torr}]-760)-0.000023(p[\text{torr}]-760)^2$ である[1]。

[torr]は気圧の単位で 1[mmHg]、すなわち 133.322[Pa]である。

気圧 p を国際単位 S I の[Pa]で表すと上式は、

$T[^\circ\text{C}] = 100.0 + 0.0367(P[\text{Pa}]/133.322 - 760) - 0.000023(P[\text{Pa}]/133.322 - 760)^2$

である。

富士山頂の測候所は自炊である。水も下界から運び上げる。2006年、2007年夏、富士山測候所の見学および実験利用をした。そこで体験したことに、自炊のため電気ポットでお湯を沸かそうとすると、電気ポットのお湯は沸騰を続け、保温状態にならず運び上げた貴重な水がすぐに無くなってしまうことである。この原因は、電気ポットの設定温度 $98[^\circ\text{C}]$ になるまで、ヒータに電気を流し続けることがある。その状況を見て、気圧に合わせて保温設定温度を変える保温温度気圧追従型電気ポットを考えた。このアイデアは第2回八光熱コンの課題に採択された。1年目は担当者が多忙で具体的な解決方法の見当がつけられず気圧と高度の関係を文献で調べただけで進展しなかったが、今年度、担当者を変えて始めからやり直した。

だが、1年のもたつきは重大で、その間にメーカーの対応が進み2009年現在には電気ポットの新機能として、沸騰を感知してヒータへの出力が止まる電気ポットが発売されている。沸騰を感知して止まるという意味では、気圧追従型の電気ポットとなら変わらない。私たちは開発方針を変え、気圧追従型を放棄し設定温度を $1[^\circ\text{C}]$ 刻みで変えることのできる電気ポットを開発することにより当初の目的である富士山頂でも使用できる電気ポットの開発を行った。

2009年8月に実際に富士山に登り富士山測候所をお借りして、 $1[^\circ\text{C}]$ 刻みで保温設定温度を変えられる電気ポットを試し、好みの温度を電気ポットで作らせて、富士山のような気圧の低い場所でも使用できることがわかった。

2. 設定温度可変型電気ポットの開発

電気ポットの構造を理解するために、電気ポットの大手メーカーである「TIGER」と「象印」の2社の電気ポットを分解した。2社の電気ポットを分解した理由としては、1社だけだと、メーカー特有の癖や仕様があるかもしれないと判断したためである。分解したのは TIGER の「PVQ-G」と象印の優湯生「CV-DW」である。

まず、魔法瓶内の水を温めるヒータは2社の電気ポットとも魔法瓶の外側の底にはりついている。円盤状の形をしていて三本の線が飛び出していてテスターで抵抗を測定した。その結果 $12.0[\Omega]$ と $155.5[\Omega]$ の抵抗がヒータ内にあることがわかった。抵抗の測定は室温が $19[^\circ\text{C}]$ の環境で行った。PVQ-Gでの消費電力は $905[\text{W}]$ と記載されている。この消費電力に見合う抵抗の並びは、オームの法則から並列に繋いだ時の消費電力に近い。並列時の合成抵抗は、

$R1 \times R2 / (R1 + R2)$ より $11.14[\Omega]$ で、電気ポットのヒータには $100[\text{V}]$ の電圧がかかっているので

$P[\text{W}] = V^2/R$ より、 $898[\text{W}]$ となる。

$905[\text{W}]$ とのズレがあるが、ヒータのみの消費電力を計算し回路側の消費電力を考えていないのと、精度の悪いテスターを使用したことが原因であると考えられる。実際に他のテスターで測定しても抵抗の値がズレることがあった。

温度の測定方法は2社とも魔法瓶の底にサーミスタが取り付けられており、グリスが塗られていた。次に、魔法瓶内の水の給湯に使用する電動ポンプでは、ともにマグネットポンプを使用している。ポンプのモーター内に水が浸入しないようにするためだろう。魔法瓶はさすがに分解することはできなかったため、メーカーのホームページを見ることになった。こちらも2社ともVE構造と呼ばれる高真空二重瓶の魔法瓶を使用している。以上のことから電気ポットの構造としては、メーカーごとの違いはほとんど見受けられない。ただ、水を効率よく保温するための構造や機能はメーカーごとに違いや特徴が見受けられる。例えば、コードレス給湯(電気ポットがコンセントに繋がれていない状態)では、象印は乾電池を使用する電動給湯の機能を持つものがあり、TIGERでは空気の力によるエア給湯の機能を持つものがある。

電気ポット自体のほかの機能は保温機能があり、象印は $98[^\circ\text{C}] \cdot 90[^\circ\text{C}] \cdot 80[^\circ\text{C}] \cdot 70[^\circ\text{C}]$ の $10[^\circ\text{C}]$ きざみで保温ができる。一方、TIGERでは $98[^\circ\text{C}] \cdot 90[^\circ\text{C}] \cdot 85[^\circ\text{C}] \cdot 80[^\circ\text{C}] \cdot 75[^\circ\text{C}]$ の $5[^\circ\text{C}]$ きざみで保温ができる。インターネットやカタログを見たが、上記のように $5[^\circ\text{C}]$ や $10[^\circ\text{C}]$ 単位で設定温度を変えるものがあっても、 $1[^\circ\text{C}]$ きざみで設定温度を変えられる電気ポットはなかった。この他、電気ポットの機能としては、省エネの機能が大事とされている。沸騰時は $905[\text{W}]$ もの電力を消費する電気ポットだからこそ、省エネルギーは重要視されているのだろう。もちろんこの省エネは富士山の上でも同じことである。富士山では地上から電気を運んでくるため大量に電気を使用することができない。水はもっと貴重である。わたし達は、一人2リットルのミネラルウォーターのペットボトルを準備した。飲用から、料理、手洗い、うがい全てをこれでまかなう必要がある。何度も何度も電気ポットで水を沸騰させるのは電気の浪費、水の浪費であり好ましくない。そういう点から、電気ポットの非沸騰、保温機能は重要である。

温度制御の方法として、富士電機の「PXZ-4」という温度調節機を使用した。

3. 地上での実験

まず地上で、電気ポットがどのような動作をするかを実験した。第一にどのように水の温度をあげるかだが、当然魔法瓶の底にあるヒータに出力された電気エネルギーが熱に変換されて水を温める。

電気ポット(PVQ-G)の温度の上がり方を、白金測温抵抗とデジタル温度計を使用して測定した。この二つの計測器を使用した理由としては、零点合わせを行った時の誤差が小さく信頼できるものだと判断したためである。

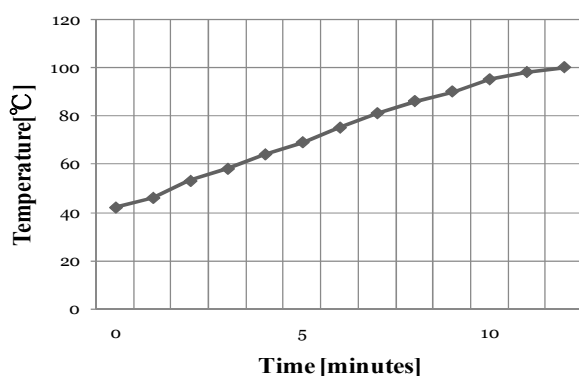


図 2 電気ポット(PVQ-G)の沸騰までの温度上昇(下界)

Fig.2 Increase in water temperature to boil water using a conventional electric pot at 1 atmosphere.

図 2 が下界で PVQ-G を使い水を沸騰させた時の測定データである。なお、この測定時はふたを取り外して、スタンドに白金測温抵抗とデジタル温度計を測定場所がほぼ同じになるように固定して行った。電気ポット内の水は通電時間に対しほぼ直線状に上昇していくことが分かる。これは沸騰させる時だけでなく、保温設定で設定温度を変えて行ったがどれもほぼ直線になった。さらに、沸騰や温度設定により電気ポットが水の温度を上げるときに流れる電流を測定した。方法としてはデジタルクランプメーターと呼ばれる交流用の測定器を用いて、電気ポットに流れる電流を測定した。沸騰設定時には約 9.0[A]の電流が抵抗 12.0[Ω]に流れ、0.6[A]が 155.5[Ω]に流れる。

保温設定時には、温度が設定温度の 3[°C]以内になると、12.0[Ω]の抵抗に電流が流れなくなり 155.5[Ω]にだけ流れる。当初ヒータの抵抗は沸騰用と保温用に使い分ける接続だと思っていたが、保温用というよりは、設定温度に近づけるためのものであった。

実際に電力 P[W]の計算式 $P[W]=I^2R$ で消費電力を計算すると、温度上昇時には $(9.0[A])^2 \times 11.14[\Omega] = 902[W]$ である。 $P[W]=V^2/R=898[W]$ と計算結果と誤差が生じているの

は、デジタルクランプメーターの測定速度が原因にあげられる。この装置は電流が流れて発生する磁場から、電流を測定するものだからである。

次に保温設定のときに何度下がれば再びヒータに出力するかを測定した。

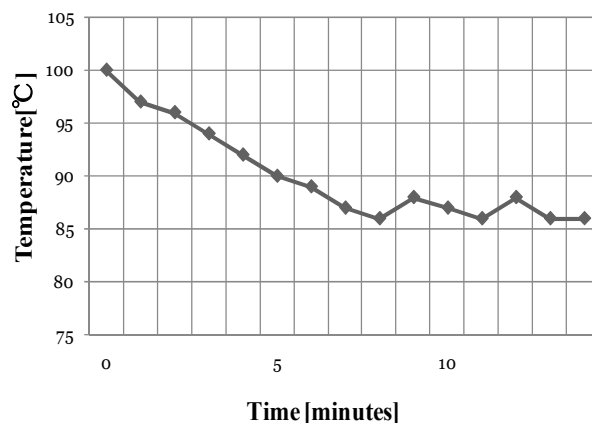


図 3 設定温度 90[°C]のときの温度変化(下界)

Fig.3 A water in electric pot changes temperatures case of a electric pot's establishment temperature is 90°C at 1 atmosphere.

図 3 は水の温度を 100[°C]にしたあとに設定温度を 90[°C]にして温度を測定したものである。設定温度は 90[°C]だが温度はけっして 90[°C]にはならずにいる。そして、温度が 4[°C]下がった 86[°C]になるとヒータに出力される。一見、この電気ポットの設定温度でも富士山で使えそうであるが、温度が安定せず余計な沸騰・蒸発が起きてしまうため、良いとは言えない。

実際に水の温度上昇により、どのくらい蒸発や沸騰で水が無くなってしまいかを測定した (温度と重量)。

使用したのは電気ポット (ピーコック魔法瓶株式会社製、電気保温エアポット WSP-22、2.2L,650[W]) で、水を入れてヒータに出力し続け、同時に電子天秤で減った量を測定した。何故、PVQ-G と CV-DW でなくこれらの装置を使ったかということ、八光社の実験費で購入した電子天秤の許容重量が 1220[g]であり、今まで使用してきた電気ポットでは重量が許容重量を超えてしまい水の加熱による重量変化を測定することが不可能であったためである。

図 4 は、下界において 1 気圧の状態での沸騰によりどのくらい水の重さが減るかを表している。沸騰により水の量は時間に対し一直線に減っている。10 分間で約 80[g]も水が失われてしまっている。単純計算で 1 時間で 480[g]で、2.2[L]の水が入る電気ポットも 5 時間もあれば沸騰が

続けば水が無くなってしまいます。このことから沸騰しないようにする必要がある。

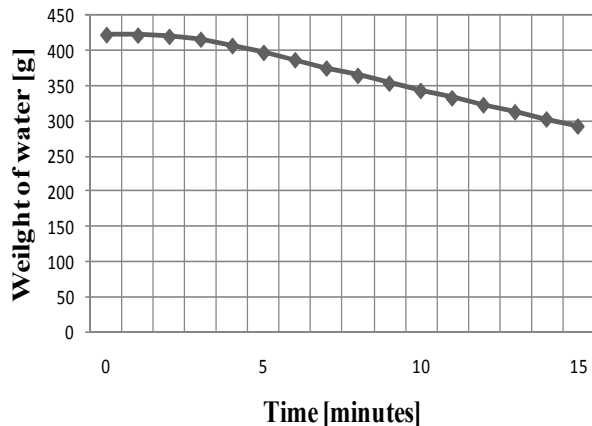


図 4 水の沸騰による重量の変化(下界)

Fig.4 Variations in the weight of water using the conventional electric pot after boiling water at 1 atmosphere.

実験時の電気ポット(WSP-22)の消費電力は、ヒータの抵抗が 17.0[Ω]であるから、 $(100[V]*100[V])/17[Ω]$ より 588[W]である。ワット[W]は SI 単位で[J/s]であるから時間の 10分=600[s]をかけて 352941[J]の熱量が発生した事がわかる。この熱量を水の気化熱である 2263[J/g]で割ると沸騰により気化した水の量が計算できる。結果は約 156[g]となり、実測値の 2 倍の量の水が無くなる計算になる。これは、ヒータの熱が水だけでなく魔法瓶の容器や空気に、伝導、放射、輻射したことが考えられる。このことは、それだけのエネルギーを無駄にしていると考えられる

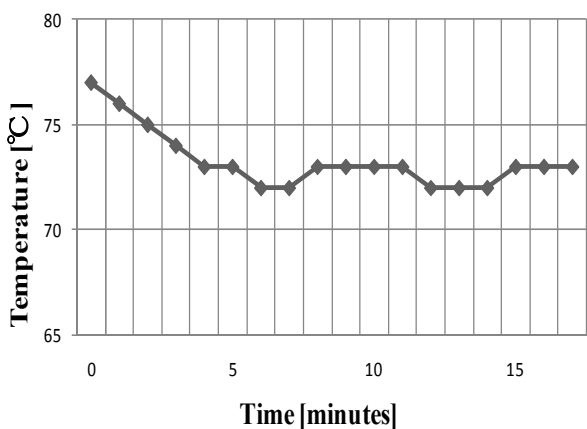


図 5 設定温度 75[°C]のときの温度変化(下界)

Fig.5 Variations in water temperature occur in a conventional electric pot with set temperature of 75 °C at1 atmosphere.

同じことを下界・1 気圧で設定温度 75[°C]にして行ったのが図 5 である。こちらでも同じように設定温度は 75[°C]だが水温は 75[°C]にはならず 73[°C]と 72[°C]で停滞している。

他に気になったことだが、電気ポットの温度表示は 5[°C]きざみでしか表示してくれない。さらに温度表示の誤差がひどく 5[°C]以上温度表示が異なっている状態もある。商品の電気ポットは安価だが信頼度の低いサーミスタを温度センサーに使用しているためだと思われる。

4. 電気ポットの改造

我々の設定温度を 1[°C]きざみで変えられる電気ポットは、温度調節機と、白金測温抵抗、SSR(半導体リレー)を使用して行う。温度調節機は「富士電機」の「PXZ-4」を、SSR は「秋月電気」の「ソリッドステートリレーキット」(35[A]タイプ)を使用した。

電気ポットの改造で実際に使用する魔法瓶の容器本体とヒータはそのまま用いる。ヒータの抵抗が小さい接続に、外部電源として SSR を介して温度調節機を繋ぐ。白金測温抵抗は温度の測定に使い、温度調節機に直接つなぐ。そうすることで温度調節機に白金測温抵抗で測定した温度を測定値として表示することができる。さきほどから測定器具として挙げていた白金測温抵抗はこのことであり、測定誤差が非常に小さいため信用できる。ただし白金線を使用しているため価格は電気ポット 1 台より高価である。

改良型電気ポットの使い方であるが、温度調節機は自分で好きな設定温度を決めることができ、測定値との差から出力をする。そして、測定値が設定温度になると出力がとまるという動作をする。

5. 富士山頂での実験

2009 年 8 月に実際に富士山頂まで行き、富士山測候所をお借りして改造した電気ポットの動作実験を行った。図 6 は富士山頂の測候所内で行った動作実験の様子である。

まず最初に、水-氷 2 相共存系での温度センサー類の零点合わせにより誤差を導き出す。零点合わせとは、ビーカーなどの容器に氷と水を入れて(零[°C]の状況を作る)、その温度を測定し零度から何°Cの誤差があるかを測ることである。沸点の気圧変化に比べ、氷点の気圧変化は非常に小さい。温度センサーがサーミスタの「PicoLogger」では誤差が 1.4[°C]であった。この「PicoLogger」はパソコンとパラレルケーブルで繋ぐことによって、温度や照度などのデータを記録し保存できるものである。ただ、前述で示したように測定誤差が大きいことが欠点である。



図 6 富士山頂上での実験風景

Fig.6 An experiment scene at the summit of Mt. Fuji.

次に、富士山での水の沸点が何度なのかを測定した。測定器具は水銀温度計と、デジタル温度計と白金測温抵抗である。測定結果は、水銀温度計では 87.5[°C]、デジタル温度計は 87.6[°C]、白金測温抵抗では 87[°C]を示したが、時々 88[°C]と表示することもあった。測定した時間の気圧は気象庁のアメダスのデータより 644[hPa]であった[5]から、沸点は約 88[°C]である。水銀温度計の誤差は -0.5[°C]、デジタル温度計は -0.4[°C]、白金測温抵抗は少数第一桁まで表示されないため誤差は -1[°C]以内である。図 7 で示すデータは誤差を修正したものである。

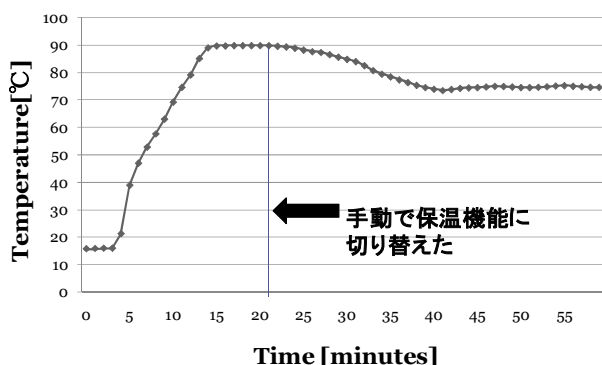


図 7 市販の電気ポット PVQ-G の富士山での温度変化

Fig.7 Using the conventional electric pot, the variations in the water temperature before and after boiling water at the summit of Mt. Fuji

図 7 は市販電気ポット(PVQ-G)を富士山頂で使用した時のポット内の温度変化を表している。地上で扱えばポット内の水は 100[°C]になるが、88[°C]付近で温度上昇が止まっていることがわかる。温度上昇が止まりはするが、沸騰は続いている状態であったのが約 5 分間続いていた。たしかに、富士山だと電気ポットは沸騰を続けてしまうことが分かった。ただ、この電気ポット PVQ-G には 5[°C]きざみで設定温度を変えられる保温機能があるので途中から保温機能に切り替えた。

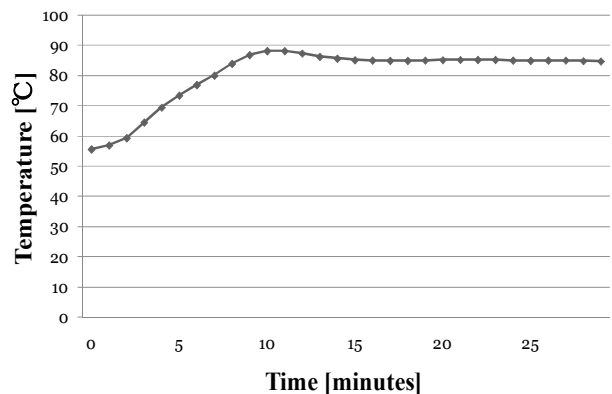


図 8 改造電気ポット(PVQ-G)の温度変化(富士山頂)

Fig.8 Using a retrofitted electric pot with a temperature control function for each 1 °C rise, the variations in water temperature are shown before and after the water was boiled at 88 °C at the summit of Mt. Fuji.

図 8 は改造した電気ポット(PVQ-G)の富士山での温度変化を表している。はじめは設定温度を 86[°C]にしたが、沸騰が起こってしまい、温度調節機の出力が止まらなかった。すぐに設定温度を 85[°C]に変えると出力がうまく止まり、85[°C]付近に温度変化が停滞した。図 8 を見ると、温度変化は一定のように見受けられるが、白金測温抵抗では 85[°C]と 84[°C]を行ったり来たりしている。

市販の電気ポットの保温設定として最高は 98[°C]である。これは、保温が 100[°C]だと沸騰し続け水が蒸発してしまい、設定温度が 99[°C]でも沸騰が起こりえるから保温の最高温度を 98[°C]にしているのではないと思う。

結果として、沸騰を起こさないで水を温めることができ、沸騰により水が減ることを抑えられる。

本来の目的として気圧追従型の電気ポットの企画があったが、水の沸点を知りたいければ気圧から算出できる。今回は気圧を計測する装置として「USB ウェザーボード」(ストロベリー・リナックス社)を使用した。名前の通り USB でパソコンと通信することができる。

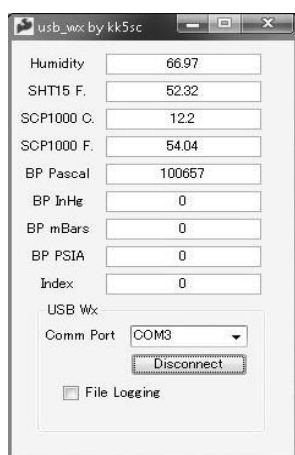


図 9 USBウェザーボードを用いた気圧の測定

Fig.9 Barometric measurement using a USB Weather Board.

図9は「usb_weather_v2」というソフトでUSBウェザーボードで計測した気圧や他のパラメータを表示している。BP Pascalの値100657が気圧[Pa]である。

6. 結果と考察

今回の試みの結果としては1[°C]きざみで自由に設定温度を変えることのできる電気ポットを作ることができるということが分かった。すなわち、当初の目的である、湯を沸騰させず、水の浪費を防ぎつつ水温(湯温)を一定に保つことが可能になった。

今回、失敗したということは、測定実験に不慣れのため、富士山での電気ポットの温度上昇を測定するときに、温度センサーの精度の悪い「PicoLogger」という測定器具に頼ってしまったことである。当時は1分毎に自動で測定したデータをとれ、MicrosoftのExcelなどに出力できるこの装置が便利であり、測定誤差(精度の悪さ)が大きいことを気にしていなかった。手間がかかっても丁寧に実験することが大事だということが、データの解析をしていて分かった。富士山に行くという貴重な機会をもっとよく考えるべきだった。

次に、研究に遅れをとってしまったことである。無用の足踏みで一年の研究の遅れで市販の電気ポットの性能が向上し、せっかくのアイデアが普通の平凡なものになってしまったことは、影響が大きすぎる。

気圧センサなどもパソコンを介さず自立した装置として使用するはずだったが、私達の技術不足により期限内に実現できなかったことも反省することである。

以上のように反省すべき点は多々あり、反省するだけでなく次回に同じ失敗をしないために役立てていく必要がある。

電気ポット自体の話としては、富士山頂で使える1[°C]きざみで設定温度を変えることのできる電気ポットは作れたのだが、

メーカー自体はそういった物を出していない。恐らく作れる技術はあるのだろうが、需要がないのだろう。価格も高くなる。沸騰させず、1[°C]単位で水の温度がほしいなどと言う人はあまり聞いたことがない。しかし富士山で働く人たちなど、必要としている人がいるのでこれからも研究を続けていく。

結論として、水の貴重な富士山でも安心して水を温められる電気ポットを作成できた。ただ、改良すべき点はある。例えば、市販の温度調節機を使用せず自分でプログラムを作りマイコンで制御することなどである。これからの研究の課題である。

謝辞

私達の興味を実験課題(八光熱実験コンテスト)に採択していただきました八光社に感謝いたします。また、旧富士山測候所を、わたし達学生のささやかな興味に基づく科学実験のために使用を許可していただきましたNPO法人「富士山測候所を活用する会」に感謝します。航空機内の放射線測定以来終始活動を支えていただきました独立行政法人放射線医学総合研究所の保田浩志先生に心から感謝します。課題申請「富士山頂における科学実験の試行」をして富士山頂実験の環境を整えていただいた(株)数理設計研究所の矢澤正人所長、北海道大学工学研究科の関根恵先輩、茨城大学理学部の檜木梨花子さん、ラジオ部顧問の松沢孝男先生に感謝いたします。

参考文献

- [1] 松沢孝男、奥山慶洋、関根恵、浅野健、高崎良一、高柳拓也、身のまわりの放射線の測定の試行、一航空機、富士山、2次宇宙線、北朝鮮の核実験—、茨城工業高等専門学校研究彙、第42号、pp.45-52(2008).
- [2] 松沢孝男、大沼侑司、会澤雄基、阿久津達也、森脇滉、中島宏昌、飯嶋竜司、箕輪栞、関根恵、保田浩志、宇宙線の測定を目指した富士山登山, *ibid.*, 第43号、pp.35-46(2008).
- [3] 奥山慶洋、森脇滉、飯嶋竜司、目時彩加、オーストラリア語学研修時の環境測定、*ibid.*,第44号、pp.17-22(2008).
- [4] 理科年表 国立天文台編(平成18年度版)
- [5] webサイト 気象庁
URL: <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>