

「Raspberry Pi の発熱効果と保温性能の評価実験」
坪内麟太郎（代表者）、上園波輝、笹岡由唯、川上舞帆
高知工業高等専門学校 電気情報工学科

1 はじめに

高性能で小型軽量の Raspberry Pi などのオンボードコンピュータが登場し、センサ等による測定、データ取得およびデータ送信、サーバー等へのアップロードが手軽にできるようになった。一方で、小型装置として運用する際、予想以上に CPU 付近に熱が発生することや、Wi-Fi 子機などの小型の USB 型機器との接触部が高温になることがある。短時間の測定時には問題とならないが、長時間・長期間の測定時には、機器に大きな問題を与えることも想定される^[2]。小型軽量のオンボードコンピュータの発熱や、それらを有効に利用できる手段、に対しての明確な知見は得られていない。

一方、私たちは、Raspberry Pi を用いた気球搭載観測装置を開発しており、上空 20 km 以上の成層圏に至る経路の気象観測を目指している。この観測装置には、計測のためのセンサ類やカメラなどが組み込まれ、地上とデータ通信を行う^[3]。しかし、大気中の気温は成層圏下部で -50°C 以下に達し、成層圏上部の気圧は 10 hPa 程度まで低くなることが知られている（図 1 参照）。一般的にセンサには推奨動作範囲があり、その範囲から外れた環境で使用する場合、SN 比の増大や機器の故障などの問題が生じる可能性がある。低温の状態が長時間続くような場合には、装置を保温する必要がある。例えば、オンボードコンピュータの発熱を保温に利用することで、装置内の温度が下がりすぎることを防ぐことができる可能性がある。

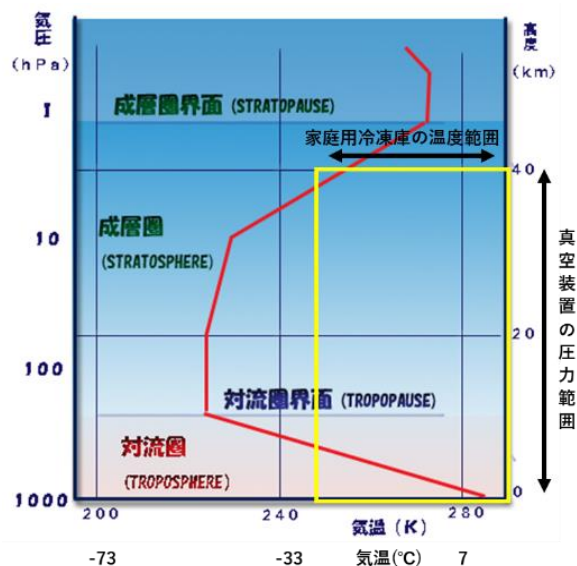


図 1 大気圏における高度と気圧・気温の関係
(気象庁「大気の構造」をもとに作成)

2 目的

本実験では、気球観測実験における成層圏下部のような、低気温・低気圧の環境で、オンボードコンピュータの発熱の度合いを測ること及び、発熱を保温として使うことを目指して行った。具体的には、① 低温 (-20°C 付近) ② 低気圧 (10 hPa 付近) の環境を再現し、センサ付近の温度変化をそれぞれ測定することによって、以下のことを検証することを目指した。

- ・ 気温・気圧とセンサ類の誤差との関係
- ・ 気圧低下時の熱発散と対流の効果の関係
- ・ 発熱・保温効果を上げるための CPU への負荷のかけ方

3 実験方法

実験では、オンボードコンピュータに複数のセンサを取り付けた状態で計測を行った。まず、使用するセンサと実験装置の概要について述べ、実験環境、実験手順について説明する。

3.1 実験装置の概要

実験で使用する観測装置は、オンボードコンピュータ RaspberryPi2 Model B（消費電力 4.5 W 電源定格 5 V）、電源(モバイルバッテリー5000 mAh)、ブレッドボード上の各種センサからなる。図 2 に観測装置の構成を示す。装置内の気温や気圧変化の計測が本実験の主目的であるため、温度、気圧センサに関しては、複数の種類のセンサを使用している。特に、アナログ温度センサに関しては 4 個使用して、装置内の温度勾配の計測を目指した。また、小型装置でもよく利用されるセンサの例として、姿勢系のデータを取得できる加速度センサ、角速度センサ、地磁気センサを使用した。ただし、本実験では、装置を固定して計測するため、これらのセンサに関しては、絶対値の変動ではなく、オフセットやノイズの計測が主である。各種センサを制御するプログラムは python で記述し、データは csv ファイルに出力している。

表 1 に、各種センサが動作する温度・気圧範囲を示す。温度範囲に関しては、使用する全てのセンサが家庭用冷凍庫（ -20°C ）での使用に対応している。気圧センサに関しては、本実験で使用する真空装置で想定している最低気圧（数 hPa）での動作は保証されていない。また、多くのセンサが 1 気圧での動作を前提としており、センサのデータシートに動作気圧範囲が示されていないものが多かった。

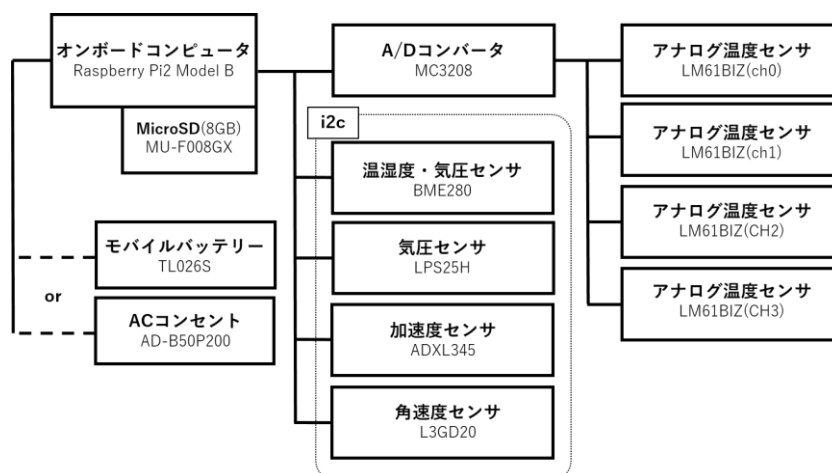


図 2 観測装置の構成

表 1 使用センサの動作温度・気圧範囲

センサ名	型番	動作温度範囲	動作気圧範囲
アナログ温度センサ	LM61BIZ	−25℃～85℃	※
温湿度・気圧センサ	BME280	−25℃～85℃	300 hPa～1,100 hPa
気圧センサ	LPS25H	−30℃～105℃	260 hPa～1,260 hPa
加速度センサ	ADXL345	−40℃～85℃	※
ジャイロセンサ	L3GD20	−40℃～85℃	※

※センサのデータシートに記載なし

表 2 同一温度計測時の各センサの差（左）温度センサ、（右）気圧センサ

温度センサ	BME280	LM61BIZ(0)	LM61BIZ(1)	LM61BIZ(2)	LM61BIZ(3)	気圧センサ	LPS25H	BME280
平均 [℃]	26.95	28.24	27.92	28.08	28.08	平均 [Pa]	1,017.93	1,014.96
基準センサ との差	−1.29	0	−0.32	−0.16	−0.16	基準センサ との差	2.97	0
平均 [℃]	8.64	9.33	8.78	9.11	10.63	平均 [Pa]	1021.19	1017.61
基準センサ との差	−0.69	0	−0.56	−0.23	1.29	基準センサ との差	3.58	0
平均 [℃]	3.36	3.70	3.99	4.00	5.27	平均 [Pa]	1021.79	1017.70
基準センサ との差	−0.34	0	0.29	0.30	1.57	基準センサ との差	4.09	0

本実験では、温度・気圧センサを複数個使用し、気温・気圧などの同じ物理量を異なる複数のセンサで計測する。そのため、事前に、温度・気圧センサ間の較正を行った。具体的には、同じ気温や気圧の状態を計測することとし、異なる 3 つの温度条件（約 28℃、約 9℃、約 4℃）で、複数のセンサによる 10 分間の測定を実施した。表 2 に、各センサで得られた平均値、基準センサとの差を示す。基準とした温度センサは LM61BIZ(ch0)、気圧センサは BME280 とした。各温度センサの差は、3 つの温度条件にわたって約 1.5℃以内であったが、温度を下げるとセンサ間の差は変化した。気圧の差は、常温時に 3 hPa 程度だったが、温度を 20℃程度下げると 1 hPa 程度の差となった。これらの結果をもとに、以下の実験では、基準センサからの差を較正したデータを用いている。

3.2 実験環境について

今回は、特に低温、低圧の環境下での実験を行うため、図 3 に示すように、5 つの条件の

下で測定を行った。具体的な条件は、①常温・開放空間（装置ボックスなし）、②常温・密閉空間（装置ボックスあり）、③低温・開放空間、④低温・密閉空間、⑤低压、とした。②と④の密閉空間は、装置ボックスとして縦 15.5 cm、横 23.0 cm、奥行 14.5 cm の大きさの発泡スチロールの箱を利用した。実際に、気球搭載観測装置のために利用している箱と同型である。⑤で用いている真空デシケータ（アクリル製）の内寸法は、縦 21 cm、横 21 cm、奥行 21 cm である。③と④の低温測定では、一般的な家庭用冷凍庫（ -20°C ）を用いた。真空装置は、アルバック社の油回転真空ポンプ G-101S を用いており、最小で数 hPa 程度まで気圧を下げた。図 1 に、今回の実験で利用した温度・気圧範囲を黄色い枠で示している。気圧範囲に関しては、対流圏から成層圏上部に至る環境に相当しており、温度範囲に関しては対流圏下部の環境に相当している。電源に関しては、真空装置では AC コンセントから、真空装置以外の実験では、5000 mAh のモバイルバッテリーから供給した。本来であれば、同じ電源環境で実験するべきであるが、現時点で、モバイルバッテリーの真空環境への対応に不明な点があり、今回は AC コンセントを利用することとした。

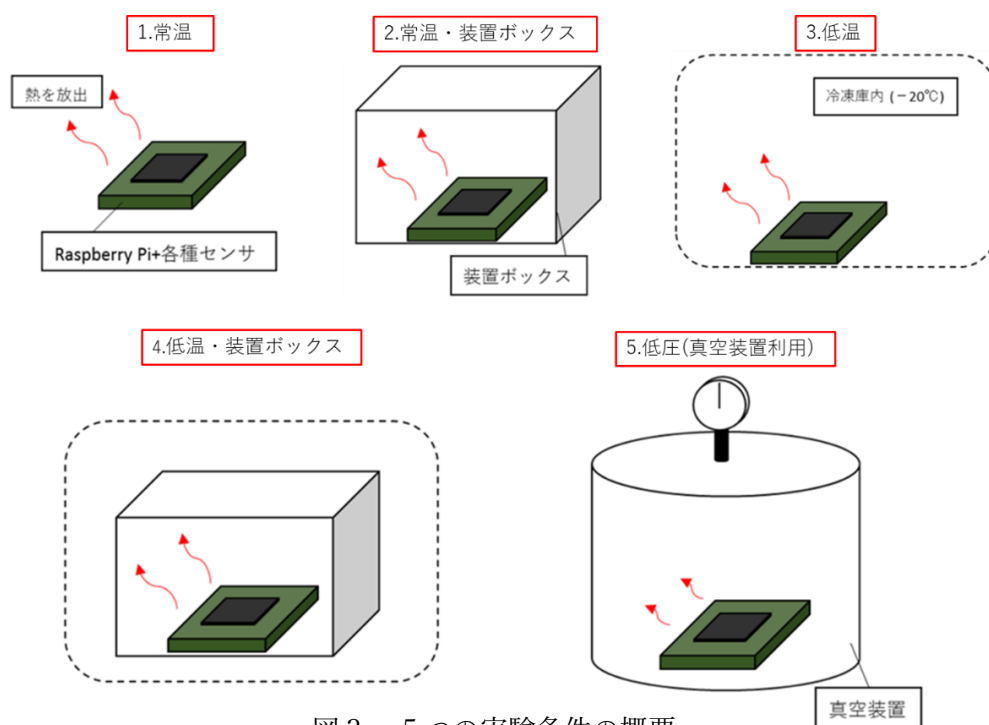
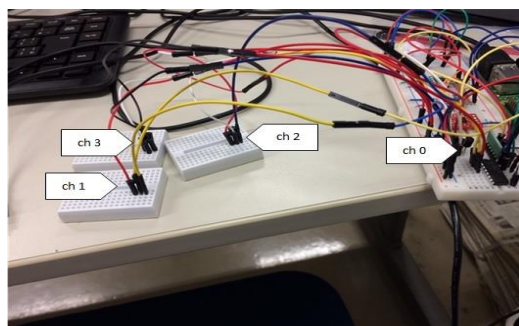


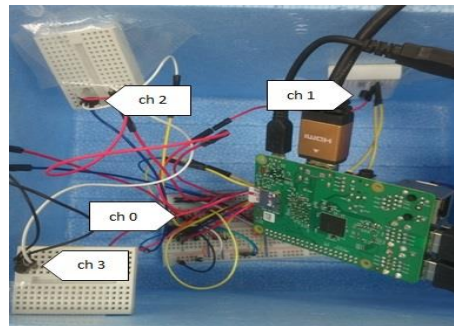
図 3 5 つの実験条件の概要

また、装置内の温度勾配や、拡散・対流の様子を計測するために、アナログ温度センサ 4 個 (ch0, ch1, ch2, ch3) を、空間的に配置した。装置内のセンサ位置は図 4 を参照されたい。常温・開放での実験①では、ch0 をオンボードコンピュータの近くに、ch1～ch3 はほぼ同じ位置で測定を行った。装置ボックスを用いた実験②④では、ch0 をオンボードコンピュータに近い底に、ch1 をボックス内の中間の高さに、ch2 と ch3 は高い位置で左右に設置した。冷凍庫を用いた実験③では、ch0 をオンボードコンピュータの近くに、ch1 は冷凍庫の中間

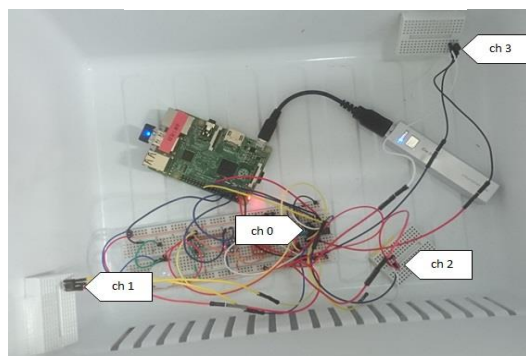
の高さに、ch2 と ch3 は一番底で左右に設置した。真空実験⑤の場合は、ch0 をオンボードコンピュータに近くに、ch1 を真空装置内の高い位置に、ch2 を中間の高さに、ch3 を ch2 の反対の面の一番底に設置した。各実験の計測時間に関しては、低温実験でのセンサ温度・CPU 温度が、30 分程度の周期で規則的に振動していることが分かり（3.2 で後述）、この振動を複数周期にわたって計測するため、計測時間を 3 時間以上とした。



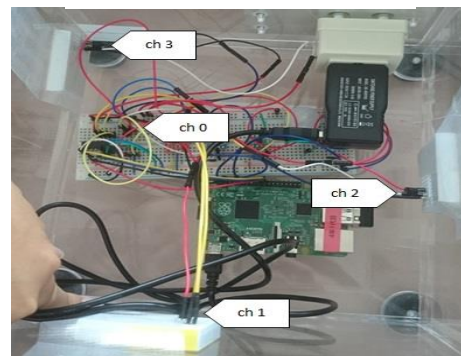
① 常温・開放の例



②④装置ボックス内の例



③冷凍庫内の例



⑤真空装置内の例

図 4 各実験でのセンサの配置例

3.3 実験手順

実験の流れを説明する。観測装置である Raspberry Pi には、USB 型の Wi-Fi 子機を接続しており、ルータを経由して、PC とネット接続させている。装置を実験環境に設置した上で、PC から Raspberry Pi 上のプログラムを実行させ、データを取得する。Raspberry Pi への接続に関しては、PC からターミナルソフト (tera term) を用いて、リモート接続している。また、得られたデータは、csv ファイルとして Raspberry Pi 上の SD カードに保存し、ファイル転送ソフトを用いて PC へデータを送る。

4 実験結果

前節で述べた 5 つの異なる条件での実験を行った。センサ類で取得した値は、概ね妥当と考えられ、実験環境の変化を十分説明できるものであった。以下では、得られたデータを総合的に検討した上で、3 つの観点毎に結果を示す。

4.1 センサ特性の温度・気圧依存性

まず、気温を変化させた場合のセンサ特性の結果を示す。例えば、静止中の角速度の値は、全ての成分がゼロになるはずであるが、実際には、微小な一定値のオフセットを含んでいる。今回、実験②③④では、装置内での気温の変化が見られ、それに伴って、角速度センサのオフセット値が変化した。図 5 では、横軸の温度 (°C) に対して、縦軸に静止中の角速度の値 (degree/s) を示しており、左図が低温・開放、右図が常温・密閉の場合である。グラフから、温度が 1°C 上昇するごとに角速度のオフセット値が約 0.2 degree/s 減少していることが分かる。双方の図の近似直線は、ほぼ同じ式となることから、広い温度範囲にわたって定式化できることが分かる。また、-15°C 以下になるとオフセット値の増大の仕方に変化が見られたが、気温が 30 分程度の周期で規則的に振動する区間を含んでいるため、今後検討していく。オフセット値は温度に依存しており、気温が大きく変化する環境では、角速度センサの値は、注意して用いる必要があることが分かる。

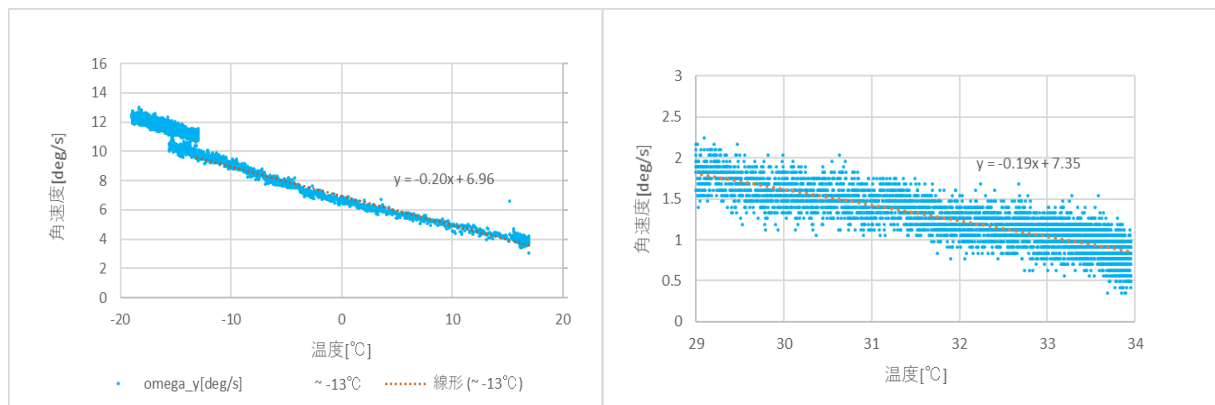


図 5 角速度センサのオフセット値の温度依存性 (左: 低温・開放 右: 常温・密閉)

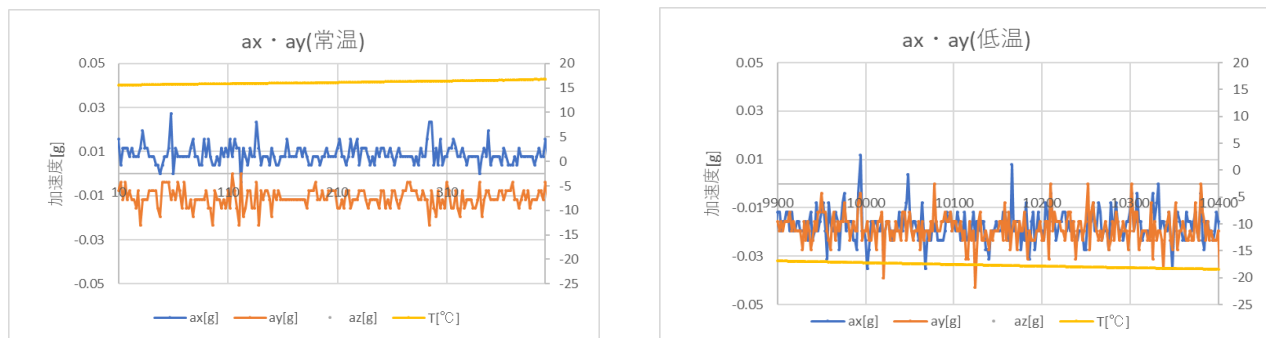


図 6 加速度センサのノイズの温度依存 (左: 常温、右: 低温)

次に、センサノイズ (SN 比) の温度依存性について示す。図 6 で、加速度センサの値は、ノイズと考えられる一定レベルの振動を伴っていることが分かる。このノイズ成分は、常温では、 $0.015\text{--}0.03g$ 程度であったが、低温では $0.04\text{--}0.05g$ 程度と大きくなることが分かった。各 x、y、z 成分のノイズに大きな差は見られなかった。装置内を保温することで、ノイズの低減が可能であり、より質の良いデータ取得が可能となる。

続いて、気圧センサの気圧依存性について示す。図 7 には、実験⑤における LPS25H センサ、BME280 センサの値と 2 つのセンサ間の温度差を示している。気圧は約 5 hPa まで下げたが、BME280 センサでは低圧時に LPS25H センサとの気圧差が大きくなり、5 hPa 付近で異常値を出力しはじめ、気圧を上げても正常値に戻らなかった。また、常圧では、LPS25H が BME280 よりも、3hPa ほど高い値を取っていたが、気圧を下げるのに従って両者の差が変化していき、低圧(数 10hPa)になったときには、BME280 が LPS25h より 5hPa ほど低い値を取るようになった事がわかる。これらより、低圧では、正常に動作をしなくなるセンサがあることが考えられ、低圧時に使用するセンサの選択には慎重を期す必要があることが分かった。

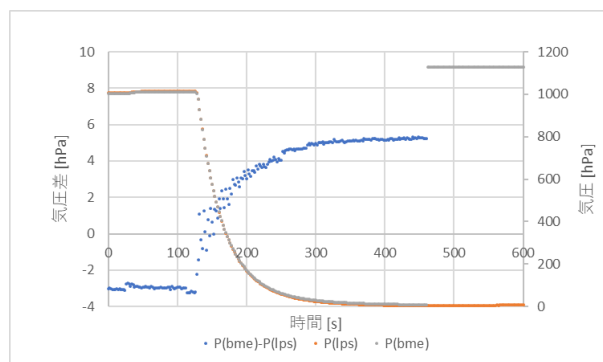


図 7 気圧センサの気圧依存

4.2 オンボードコンピュータの発熱による保温効果

オンボードコンピュータの発熱を確認するため、低温の場合の開放③と密閉④の温度変化を比較した。図 8 (上) に、気温の時間変化を示す。BME280 以外の温度センサも同様の傾向を示した。気温の絶対値に関して、開放③に比べて密閉④では、極大での温度の差 $\Delta T_{\max}$ は約 5.6°C 、極小での温度の差 $\Delta T_{\min}$ は約 9.6°C であった。また、約 30 分～60 分程の周期で熱振動をしており、熱振動の振幅は、開放では約 6.0°C で、密閉で約 2.0°C であった。密閉にすることで、極小温度が約 10°C 近く高くなっており、保温効果が見られている。次に、熱源と考えられる CPU 温度の時間変化を図 8 (下) に示す。本実験では、装置ボックスの内部温度に加えて、オンボードコンピュータの CPU 温度も記録している。CPU 温度の絶対値に関しては、開放③に比べて密閉

④では、 $\Delta T_{\max}$ では約 10.0°C 、 $\Delta T_{\min}$ は約 14.0°C 高い値だった。また、約 30 分～60 分程の周期の熱振動の振幅は、開放実験で約 6.4°C で、密閉実験で約 2.0°C であった。密閉にすることによる温度の変化は、気温に比べて CPU 温度が高い。また、CPU 温度の振動幅が気温に比べて大きいことから、観測的にも CPU の熱が振動の原因と考えられる。具体的には、Raspberry Pi の CPU 使用率がデフォルトで周期的に変動するためである。図に示していないが、平均的な CPU 使用率は CPU 温度と相関するように変動していることが確認された。

4.3 熱対流の効果と気圧依存

本節では、密閉空間での温度勾配に関する結果を示し、熱対流について議論する。図 9 (左) では、常温・密閉②のアナログ温度センサの気温変化を示しており、最下部に配置している ch0 (橙色) の気温が他の ch に比べて約 1°C 程度低いことが分かる。また、ほぼ同じ高さにある ch2 と ch3 が最も高い気温を示し、やや低い位置にある ch1 (黄色) の気温が若干低かった。オンボードコンピュータからの熱により、箱の中部から上部が温められており、熱の流れが存在することを示している。

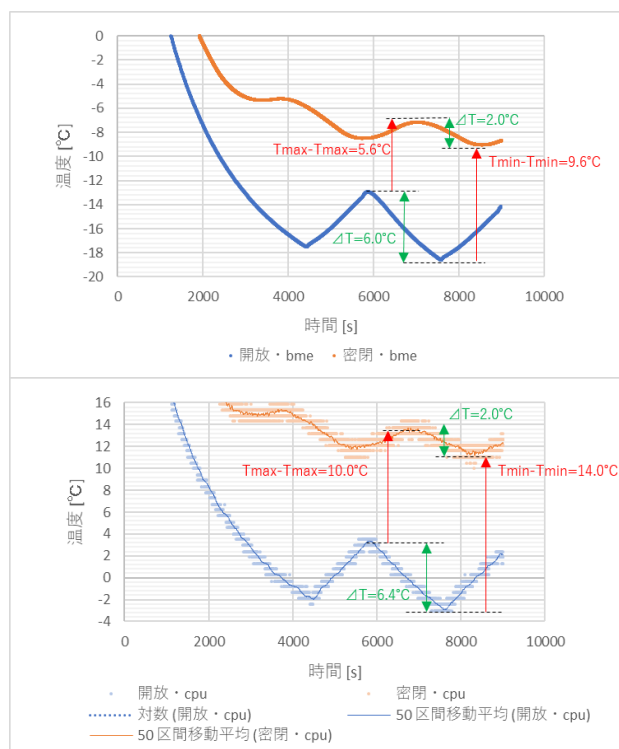


図 8 低温実験での (上) 気温と (下) CPU 温度の時間変化：(青) 開放③と (橙) 密閉④の場合

次に、低圧下での温度勾配に関する結果を示す。図 9（右）では、低圧実験⑤での気温と気圧の時間変化を示す。BME280 センサでは低圧時に異常値を出力しはじめ、気圧を上げてても正常値に戻らなかったため、図には示していない。約 5 hPa の気圧下では、オンボードコンピュータに近い ch2（黄色）の気温の増加率が他の ch に比べて大きく、空間的に離れた他の ch 間には大きな差が見られず、温度上昇率も小さかった。オンボードコンピュータからの熱はオンボードコンピュータ周辺に留まっており、熱対流が弱いと考えられる。また、今回の実験では、気圧を段階的に戻しているが、一定圧での継続時間が短すぎたため、気圧を少し高くした場合の温度勾配については明らかにできなかった。

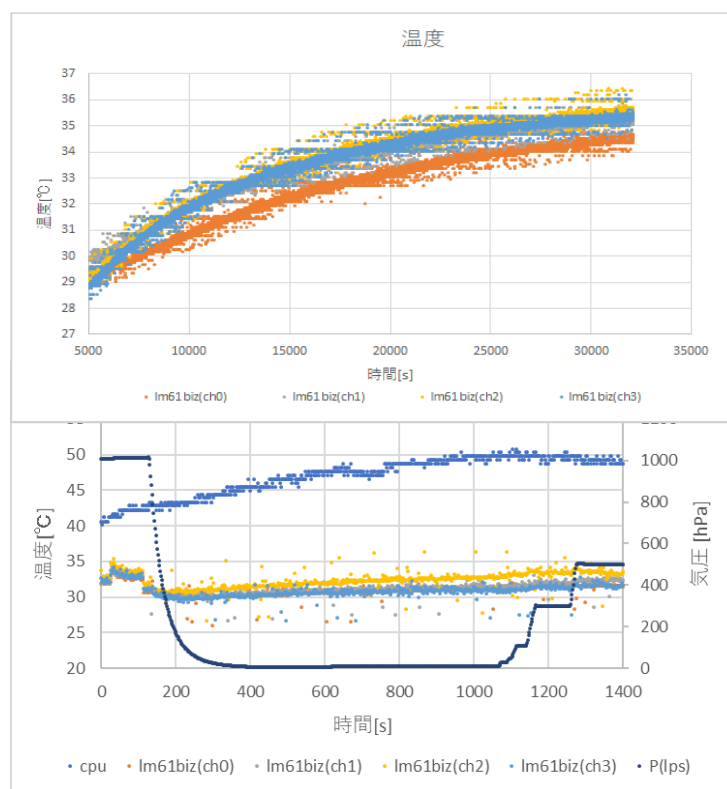


図 9 アナログ温度センサの気温変化：(上) 常温・密閉②、
(下) 低圧下⑤の場合

5 オンボードコンピュータの CPU 負荷と保温効果の関係について

オンボードコンピュータの CPU 負荷率の違いによる保温効果について検証する。CPU 負荷率を変更する手法として、① 制御プログラムのサンプリングレートを大きく変更する方法、② コマンドを用いて CPU 使用率を変化させる方法、の 2 つを用いて実験を行った。

5.1 制御プログラムのサンプリングレートを大きく変更する方法による実験

この実験では、通常実験で 2.0 s 毎に取得していたデータを 20 s 毎に取得する変更を行い、平均の CPU 負荷率を 11.1% から 9.6% に変化させた。

図 10 に、CPU 負荷率を変更した場合の温度変化を示す。サンプリングレート 2.0 s (青) と 20 s (橙) の場合に、CPU 負荷率は各々、やや高い状態と低い状態に相当する。図 10 (上) では、CPU 温度の移動平均 (100 s) が測定開始とともに上がり続け、負荷の低い場合に、6,000 s 程度で平衡温度に達し、負荷の高い場合は、11,000 s 程度で平衡温度に達しそうなことが分かる。平衡温度は、負荷の高い場合に若干大きい。この CPU 温度の変化は、図 10 (下) に示すように、温度センサによる装置内の気温ともよく対応する。負荷の高い場合の方が、平衡温度で約 0.4°C 高い。一方で、気温の立ち上がりは、負荷が低い方が大きい。次のような理由によるものと考えられる。今回の実験では、平均負荷率の差が小さく、負荷率自体は 30 分～60 分程度の周期での時間変動をしている。そのため、

局所的な CPU 負荷率の大きさが、温度の立ち上がりに効いていると考えられる。結果としては、CPU への負荷を調整することで、装置ボックス内の保温効果を調整できることが分かった。

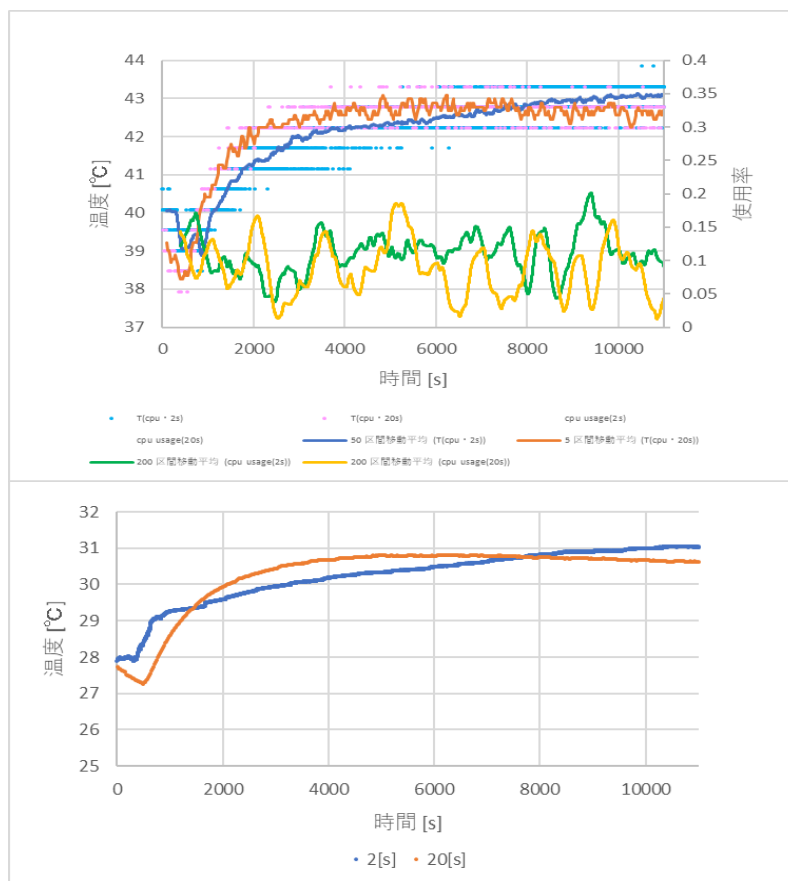


図 10 常温・密閉②での CPU 負荷の違いによる温度変化 (上) CPU 温度、(下) 温度センサ (BME280) の装置内温度

5.2 コマンドを用いて CPU 使用率を変化させる方法

前節に述べた、サンプリングレートを変更する方法では、CPU 使用率を大きく変化させることができず、保温効果の検証には不十分であったため、コマンドを用いる方法で実験を行った。コマンド (`#yes > /dev/null`) を用いて、Raspberry Pi の CPU における負荷を変更した。Raspberry Pi2 Model B は 4 コアの CPU であり、最大で CPU 使用率を 400% にする

ことができる。今回は、低温下・低圧下のそれぞれで、CPU 使用率を各々200%と 400%に設定することによって、CPU 使用率を大幅に変更したときの、CPU 温度、各温度センサの温度を測定することによって、保温効果を検証することとした。

実験装置は 2.2 節 図 4 同様、低圧実験では真空装置、低温実験では装置ボックスを用いて実験したが、装置内の温度分布を検証するために LM61BIZ の ch の配置を変更した。ch 配置は以下のようになっている。

- ・マイコン付近温度 : Raspberry Pi CPU 部分のごく近くに設置
- ・内壁温度 1 : Raspberry Pi から最も遠い位置に設置(約 27 cm)
- ・内壁温度 2 : Raspberry Pi からほどほど遠い位置に設置(約 14 cm)
- ・内壁温度 3 : Raspberry Pi に近いブレッドボード上に設置(約 5 cm)

低圧下での実験結果を示す。図 11 に低圧下・負荷率(1)200% (2)400%の気温(LM61BIZ)の時間変化を、図 12 に LPS25H の気圧・温度データを示す。

CPU 温度はどちらも上昇し、負荷率 200%では 56℃、400%では 68℃まで達している。また、コマンドを用いて負荷をかけるようなことをしなかった場合は、50℃まで達している(4.3 図 9 参照)。またマイコン付近温度も少し遅れて上昇していることがわかる。しかし、熱源であるオンボードコンピュータから離れた他のセンサには大きな変化は見られなかった。真空に近い低圧下では、対流の効果が少なくなり、温度はゆっくり伝達されるようになる。真空装置での実験では両負荷時でマイコン付近の温度は上昇しているが、装置内の温度はほとんど変化がない。また負荷率に対するマイコン付近の温度上昇の寄与が大きいことも観測できた。400%時では約 1000 秒で 10℃上昇するが、200%では 1800 秒ほどかかる。

図 12 は LPS25H で測定した気圧・温度のデータである。負荷率 200%の実験では、200[sec]~700[sec]までの間に気圧を常圧から約 15hPa まで低下させ、その後、低圧状態を維持し、約 1800[sec]で常圧に戻した。また、負荷率 400%の実験では 150[sec]~700[sec]までの間に気圧を常圧から約 15hPa まで低下させ、その後、低圧状態を維持し、約 2400[sec]で常圧に戻した。

また、図 12 より、気圧を下げる際に温度値の低下が見られ、反対に、気圧を常圧に戻す際には、温度も急激に上昇がみられた事がわかる。これは、LM61BIZ (図 5) では顕著にはみられなかった現象であり、このことから、LM61BIZ と LPS25H の温度データは、気圧の変化に対して異なった特性を持っていると考えられる。

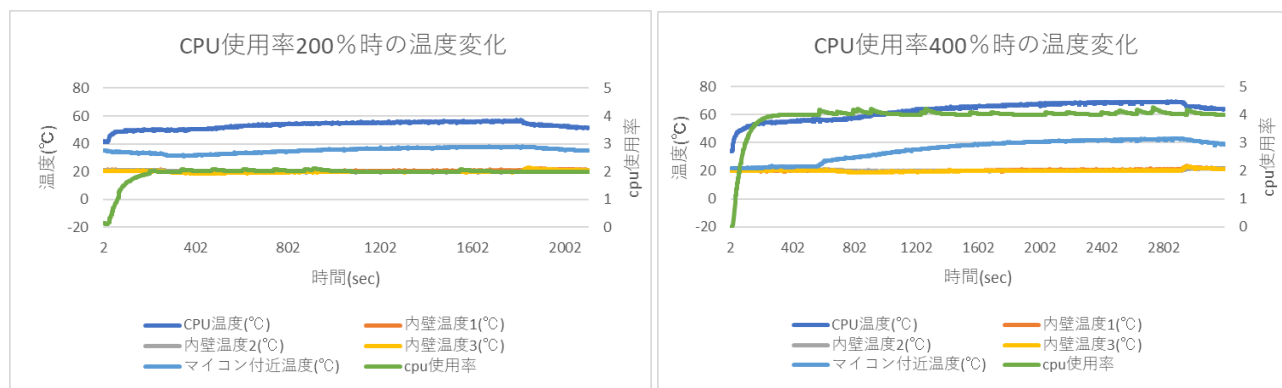


図 11 低圧下における負荷率(1)200% (2)400%の気温変化

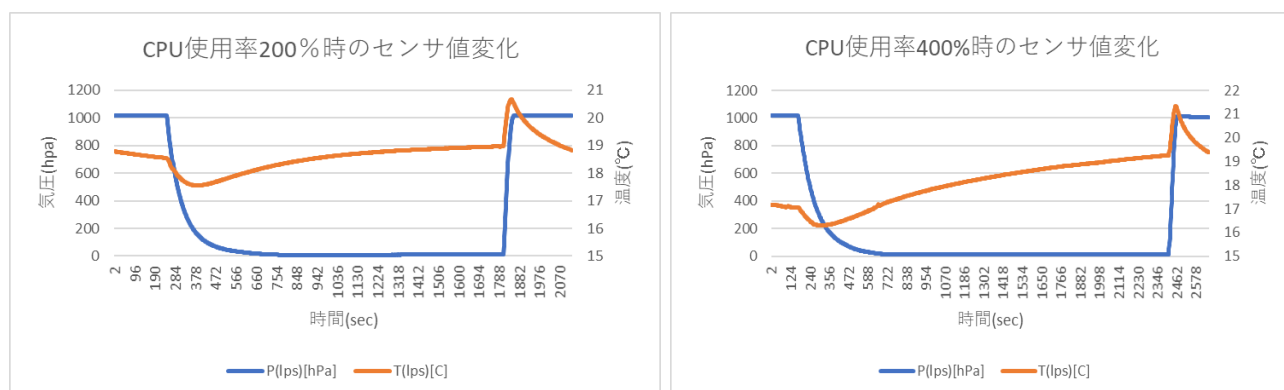


図 12 LPS25H 気圧・温度データ 負荷率(左) 200% (右)400%

続いて、低温下での実験結果を示す。

図 13 に気温の時間変化を示す。どのセンサも両方の実験で、実験開始後には上昇し、その後緩やかに低下し一定の値に落ち着いた。CPU 負荷なしのグラフと比べると、負荷なしでは約 2000 秒で下降の変化が止まっているが、CPU 負荷ありでは 200%は約 3600 秒、400%では約 3000 秒になっている。このことから CPU 負荷によるマイコンの発熱の増大は温度変化の速度に影響を与えていることが確認できた。400%の結果が 200%よりも速いのは、CPU 負荷によって観測装置内の温度が更に上昇し、温度が下降する下限が上がったからだと考えられる。実際、200%のときの内壁温度 1、2 は約 0～2℃、400%のときの内壁温度は 5～7℃であった。CPU 負荷なしでは -10℃付近まで下降するが、CPU 負荷ありでは 0℃付近まで下限が抑えられる。密閉空間という条件付きではあるが、CPU 負荷を増大させることで一定の保温効果が生じることがわかった。

図 13 より、200%・400%いずれの場合も、CPU 温度・各センサ温度は CPU 使用率の上昇とともに最初上昇したが、その後低下していき、2000[sec]~3000[sec]でほとんど変化しなくなった事がわかる。CPU 温度について、図 13 より、低温実験では、CPU 負荷 200%では 29℃、400%では 45℃でそれぞれ平衡していることがわかる。また 2.3 節 図 8 より、

0%(コマンドによって負荷をかけない場合)では平衡温度は 12℃となることがわかる。

また、先の実験では、温度センサの値には一定周期での振動がみられたが、今回の実験ではそのような振動はみられなかった。これは、CPU 負荷率を一定にしたからであると考えられる。

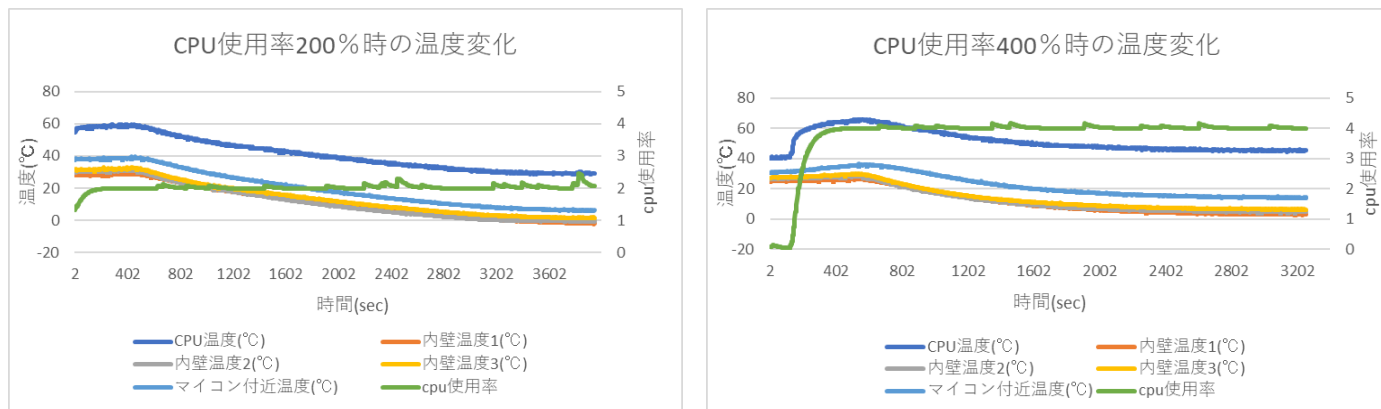


図 13 低温下における負荷率 (左)200% (右)400%の気温の時間変化

以下では、装置内の平衡温度について述べる。図 14 に低圧・低温のそれぞれにおける負荷率 200%・400%の平衡温度に関するグラフを示す。

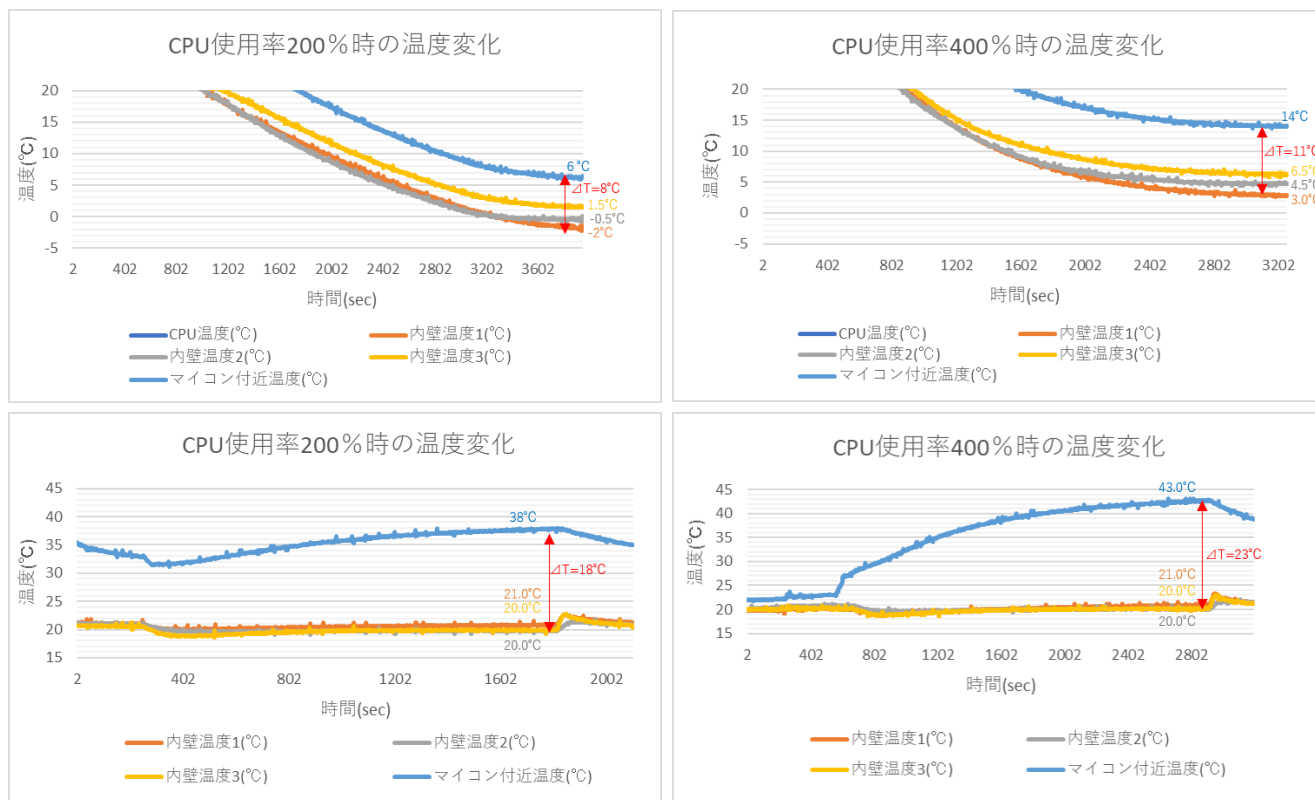


図 14 低温・低圧 負荷変更時の平衡温度

(左上)低温 200% (右上)低温 400% (左下)低圧 200% (右下)低圧 400%

図 14 において、 ΔT はマイコン付近の温度と内壁温度のうち最も値が小さいものの差である。 ΔT の値は小さいほど、装置内での温度が均一であり、大きいほど、CPU 付近に熱が集中していると考えられる。図 14 より、CPU 使用率 200%・400%いずれの場合も低圧時に ΔT の値が大きくなっていたので、低圧下では CPU の周りに熱が集中しやすいと考察できる。また、3つの内壁温度に関して、低温では 3.5°C 程度の差が生じているのに対して、低圧では 1.0°C 程度の差である。このことも、低圧下において、熱対流の働きが弱まることによるものであると考えられる。

5.3 Raspberry Pi の保温効果

前述した実験結果より、以下図 15 に示すような、CPU 使用率と温度の関係を求めることができる。

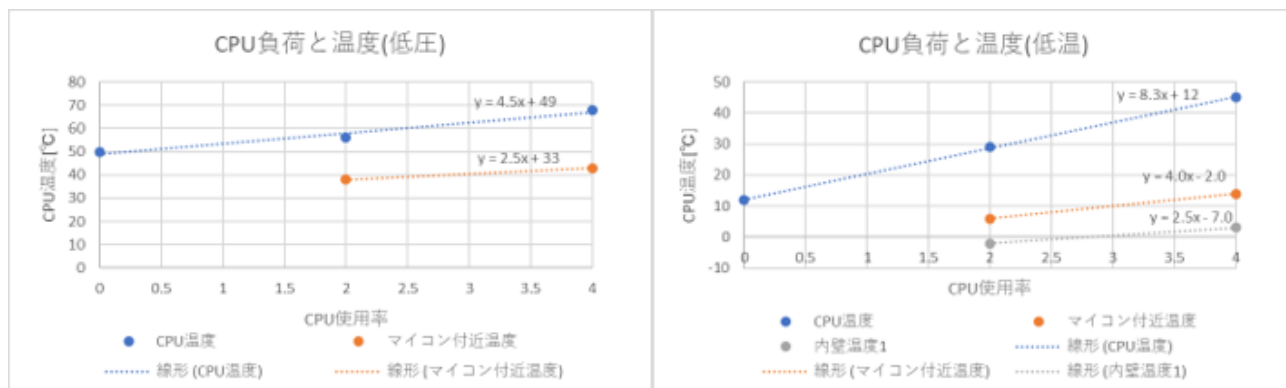


図 15 CPU 使用率と温度 (左)低圧 (右)低温

図 14 のように、CPU 使用率と、CPU 温度はほぼ線形関数で近似できることがわかった。100%使用率を上げると上昇する温度は、低圧 : 4.5°C、低温 : 8.3°Cであった。また、低圧のマイコン付近温度、低温のマイコン付近温度・内壁温度に関しても同様に線形の関係が成り立つとすると、低温では、100%使用率を上げると、2.5°C程度内部気温が上昇することになる。また、低圧においては、熱対流の働きが弱いので、CPU の使用率を上げても CPU 温度と、マイコン付近温度が上昇するだけで、装置内の気温はほとんど変化しないと考えられる。

6 まとめ

本実験では、オンボードコンピュータの発熱を保温として使うことを目指し、Raspberry Pi の発熱と保温性能の評価実験を行った。気温、気圧、装置ボックスの有無、などの条件が異なる 5 つの環境で、オンボードコンピュータに、各種センサを取り付けて、測定を行った。これらの実験より、次の結果が得られた。ノイズなどのセンサ特性は温度に対して変化を見せ、低温下ではノイズ増大やオフセット値の変動が確認された。-20°C の環境でも無視できない変化であったため、温度対策は必要であることがわかる。今回は低圧下及び低温下でのオンボードコンピュータの発熱の影響及びその効果を調べた。装置ボックスを用いた低温環境(-20°C の冷凍庫)実験では 10°C 以上温度変化の下限が違ったことから、オンボードコンピュータの発熱は無視できない熱を発していることが考えられる。また、低圧環境(真空装置内)では対流効果が減衰するため時間に対するオンボードコンピュータ付近の温度上昇が大きかった。

次に意図的にオンボードコンピュータの発熱を操作し、先ほどと同じ環境で実験を行った。CPU 負荷率を 100% 上昇させると低温環境では平均して約 2.5°C 装置内の温度が上昇し、装置内の温度変化の下限は著しく低下した。CPU 使用率 400% では装置内の温度は 0°C 以上となっており、CPU 無負荷時の装置内の温度は約 -18°C だったことから CPU 使用率による保温効果はかなり期待できる結果となった。一方で低圧化での実験ではオンボ

ードコンピュータ付近の温度増大が非常に大きくなることが確認された。CPU 使用率 200%では+10°C、400%では+20°Cまで温度が増大しており、低圧化では逆に熱放出に関する対策が必要であると考えられる。

以上をふまえ、これらのデータを活用した熱対策を考察する。今回の結果から、図 15 に示す通り Raspberry Pi 2B の CPU 使用率による CPU 温度を線形関数で表わすことができた。実験では 4 カ所に温度センサを用いていたが、これをさらに増やすことでプロット数が増え定式化することも可能である。定式化することが出来れば、CPU 使用率を操作することで観測装置内の温度を調整することも可能になると考える。CPU400%の状態は、CPU の全ての演算機能を使用しているため、長時間維持することは望ましくない。しかしその半分の CPU200%前後までであれば、観測装置のリソースに余裕があるのなら温度対策の一環として運用することが出来るだろう。寒冷地での長時間観測を想定しての冷凍庫実験ではセンサのノイズが増大し、CPU 使用率に依存した振動も見られた(図 8 下参照)。無視できないノイズや振動はそのままセンサデータ信頼性に影響を与えてしまうことがある。そこで CPU 使用率を操作することで装置内の温度が上昇し、CPU 使用率を一定値にできるので振動やノイズが軽減される効果が期待できる。また、低圧化で CPU 使用率による温度上昇などが対流効果の小ささから大きい。これも CPU 使用率によって何°C上昇するのかなどがデータとして出ているためヒートシンクを付ける個数などを具体的に計算できると考えている。

参考文献

- [1]Wikipedia 「Raspberry Pi」
<https://ja.wikipedia.org/> (2017/11/06)
- [2] 竹内純人、コンセント単位での計測を可能としたフリーソフトウェアツールによる消費電力値 自動収集システムの実装と改善、電気通信大学紀要, 28.1, 61-69, 2016
- [3] 益岡葵 他、OS 搭載型マイコンボードによるバルーンサットの開発：初期開発と実証試験、高知工業高等専門学校学術紀要、60、49-58、2015
- [4]気象庁「大気の構造と流れ」
<http://www.jma.go.jp/jma/index.html> (2017/11/05)