

成層圏気球のための低温・低圧下におけるオンボードコンピュータRaspberry Piの 発熱と保温性能に関する評価実験

笹岡由唯^{*1}・上園波輝^{*1}・川上舞帆^{*1}・坪内麟太郎^{*2}・横山有太^{*3}・上田真也^{*4}・高田 拓^{*5}

Evaluation experiment for heat generation and heat retention effect of onboard computer Raspberry Pi under low-temperature and low-pressure conditions of a stratosphere balloon

Yui SASAOKA, Namiki UEZONO, Maho KAWAKAMI, Rintaro TSUBOUCHI,
Yuta YOKOYAMA, Shinya UETA, and Taku TAKADA

Summary

A small onboard computer is often used as an observational instrument for various areas, such as the troposphere and stratosphere. This study performs evaluation experiments to verify the heat retention effect by an onboard computer's heat generation under conditions similar to those in the troposphere and stratosphere. Sensor measurements are specifically conducted under a low temperature (-20°C in the freezer) and low pressure (down to approximately 5 hPa using a vacuum device) to investigate the changes in the signal-to-noise (S/N) ratio and the offset value of the sensors. In addition, the temperature gradient was measured in a small equipment box, and the heat retention effect was examined. As a result, the S/N ratio and offset value of each sensor were found to depend on the temperature, providing important information for future data analysis. Moreover, the heat retention effect in the equipment box is sufficiently effective, and the degree of heat retention can be adjusted by changing the CPU load.

1. 序 論

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^[1]。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が想定される^[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、Raspberry Piを用いた観測装置は、様々な領域で使用されており、成層圏気球への搭載観測装置に利用されている例もある^[3-5]。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。しかし、大気中の気温は成層圏下部で -50°C 以下に達し、成

*1 高知工業高等専門学校 電気情報工学科 4年生

*2 高知工業高等専門学校 電気情報工学科 5年生

*3 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 講師

*4 高知工業高等専門学校 教育研究支援センター 技術専門職員

*5 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 准教授

層圏上部の気圧は10hPa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。

本論文では、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う。また、装置内の温度の変化は、空気の対流の影響によるところが大きいため、真空装置を用いて、気圧を小さくした場合の保温性能についても調べる。

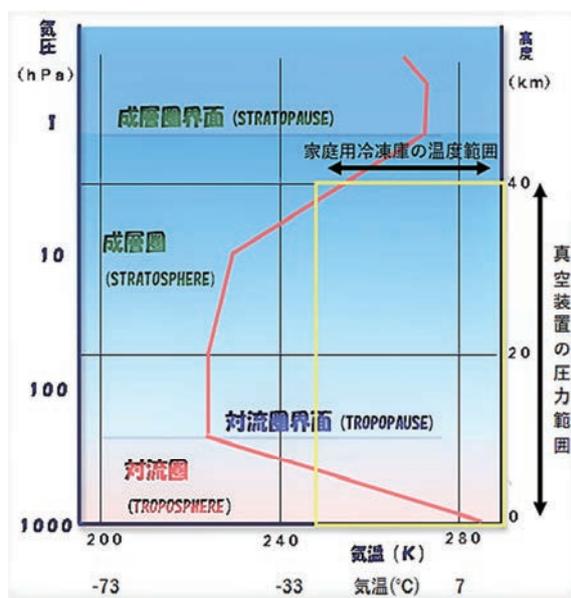


図1 大気圏における高度と気圧・気温の関係^[6]
(気象庁「大気の構造」をもとに作成)

2. 観測装置と実験環境について

本実験では、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。

2.1 観測装置について

実験で使用する観測装置は、オンボードコンピュータRaspberry Pi2 Model B（消費電力4.5W 電源定格5V）、電源、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。オンボードコンピュータのRaspberry Piには、CPUや消費電力の異なる複数のモデルがある。今回使用するPi2 Model Bは、クアッドコアのCPUをもつ上位のモデルの中で、最も消費電力の小さいモデルである。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。また、センサ類は、本来プリント基板への実装が必要であるが、測定回路にブレッドボードを使用している。使用した理由は、気圧と温度測定が主であるため、ブレッドボードによるノイズなどの影響が少ないからである。また、低圧下の実験では、数hPaまで下げての測定など初めての試みであり、センサの故障や取り換えなどに対応しやすいブレッドボードを利用した。実際、今回の測定結果はブレッドボードによる誤差を含んでいる可能性があり、プリント基板への実装は今後検討していきたい。

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℃）での使用に適している。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

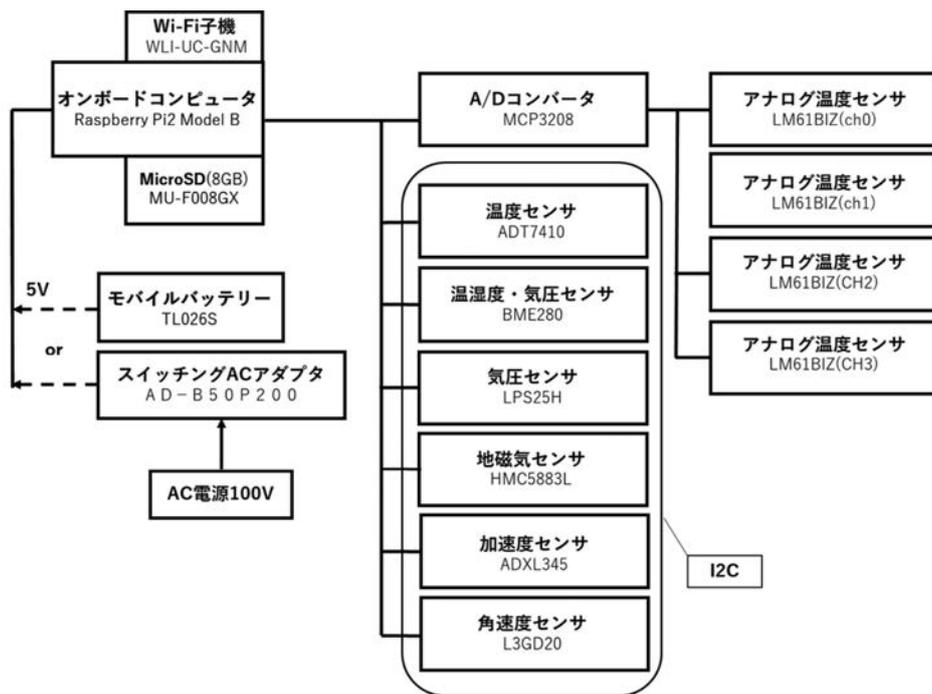


図2 観測装置の構成

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あった。

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
温度センサ	ADT7410	-55°C~150°C	※
アナログ温度センサ	LM61BIZ	-25°C~85°C	※
温湿度・気圧センサ	BME280	-25°C~85°C	300 hPa~1,100 hPa
気圧センサ	LPS25H	-30°C~105°C	260 hPa~1,260 hPa
地磁気センサ	HMC5883L	-30°C~85°C	※
加速度センサ	ADXL345	-40°C~85°C	※
角速度センサ	L3GD20	-40°C~85°C	※

※センサのデータシートに記載なし

表2 較正時のデータ：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

条件	温度センサ	BME280	LM61(ch0)	LM61(ch1)	LM61(ch2)	LM61(ch3)	気圧センサ	LPS25H	BME280
約 28°C	平均 [°C]	26.95	28.24	27.92	28.08	28.08	平均 [Pa]	1,017.9	1,015.0
	基準との差	-1.29	0	-0.32	-0.16	-0.16	基準との差	0	-2.97
約 9°C	平均 [°C]	8.64	9.33	8.78	9.11	10.63	平均 [Pa]	1,021.2	1,017.6
	基準との差	-0.69	0	-0.56	-0.23	1.29	基準との差	0	-3.58
約 4°C	平均 [°C]	3.36	3.70	3.99	4.00	5.27	平均 [Pa]	1,021.8	1,017.7
	基準との差	-0.34	0	0.29	0.30	1.57	基準との差	0	-4.09

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LPS25H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3hPa程度だったが、温度を20℃程度下げると1hPa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。

2.2 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低圧、とした。②と④の密閉空間は、装置ボックスとして縦15.5cm、横23.0cm、奥行14.5cmの大きさの発泡スチロール製の箱を利用した。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21cm、横21cm、奥行21cmである。③と④の低温測定では、一般的な家庭用冷凍庫（-20℃）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、2600mAh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安があり、今回は安全性を考慮してACコンセントを利用することとした。

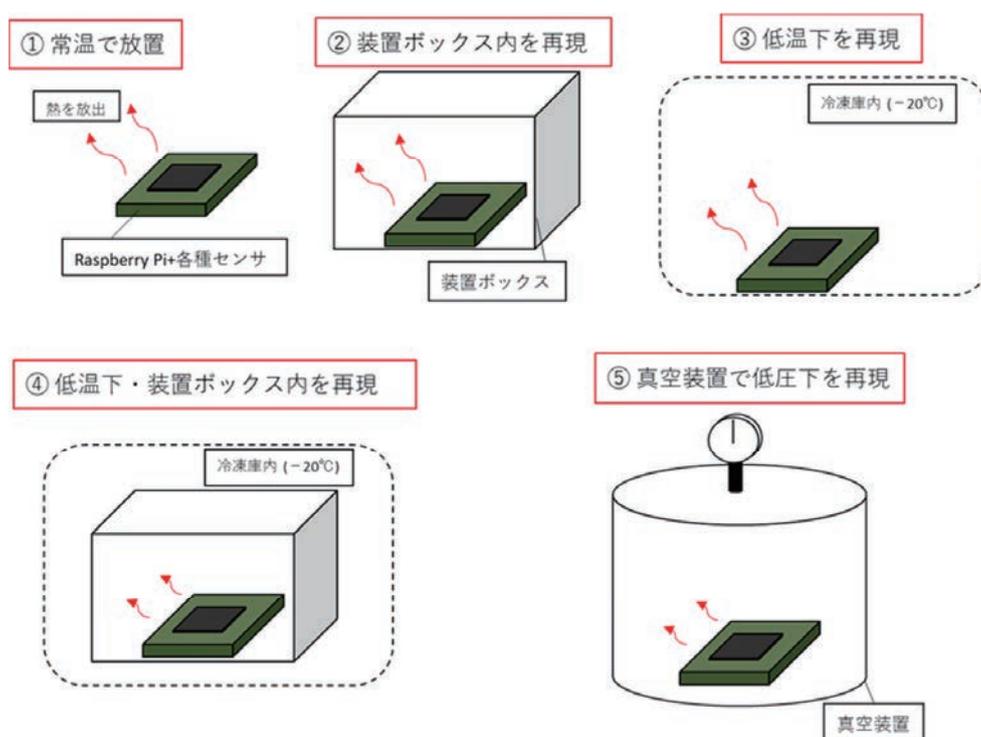


図3 5つの実験条件の概要

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の近くに、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。

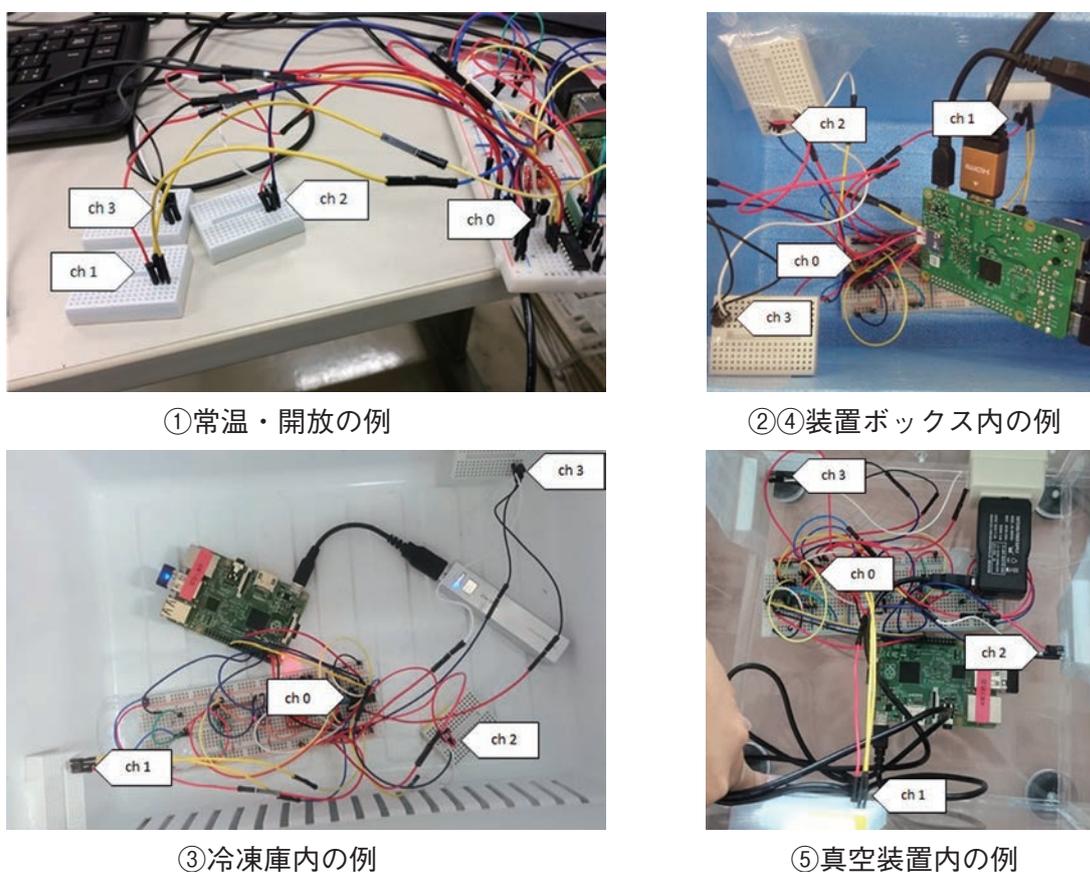


図4 各実験でのセンサの配置例

2.3 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。実行するプログラムは、センサの制御プログラムであり、2s毎にセンサデータを取得し、ファイルに書き出している。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。

3. 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結果を示す。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。

3.1 センサ特性の温度依存性

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(deg/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0.2deg/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。図5では、y成分のみ示しているが、他の成分についても同様に温度依存していた。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、30分程度の周期で温度が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、温度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。

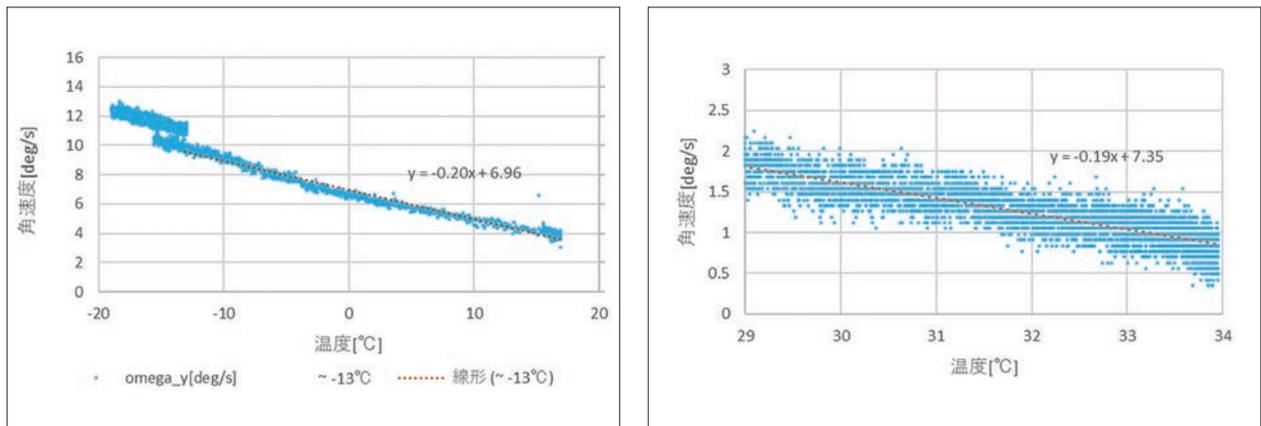


図5 角速度センサのオフセット値の温度依存性 (左：低温・開放、右：常温・密閉)

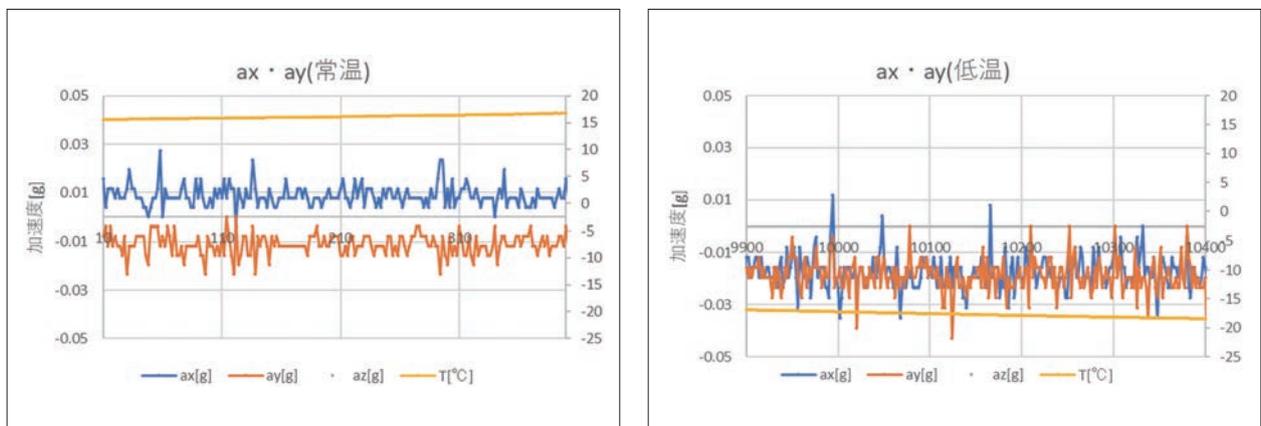


図6 加速度センサのノイズの温度依存 (左：常温、右：低温)

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、0.015-0.03g程度であったが、低温では0.04-0.05g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。

3.2 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7(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 ΔT_{\max} は約5.6°C、極小での温度の差 ΔT_{\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、保温効果が確認できる。次に、熱源と考えられるCPU温度の時間変化を図7(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、 ΔT_{\max} では約10.0°C、 ΔT_{\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。密閉による温度の変化は、気温に比べてCPU温度が高い。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。図に示していないが、CPU使用率も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。

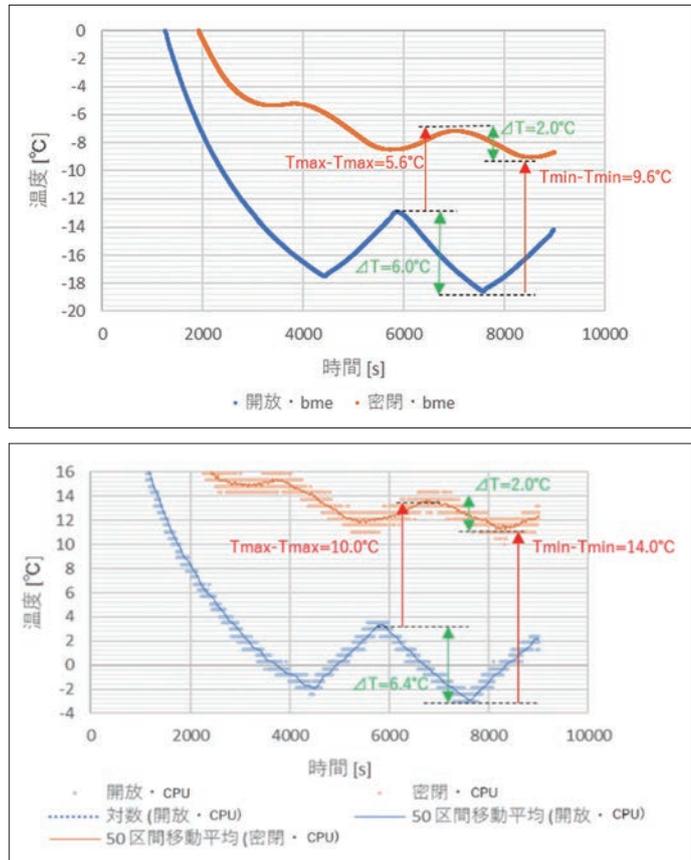


図7 低温実験での(上)気温と(下)CPU温度の時間変化：(青)開放③と(橙)密閉④の場合

3.3 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8(上)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(灰色)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。

次に、低圧下での温度勾配に関する結果を示す。図8(下)では、低圧実験⑤での気温と気圧の時間変化を示す。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ため、

図には示していない。センサの故障ではなかったが、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。最低の気圧下では、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、熱対流の流れ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。

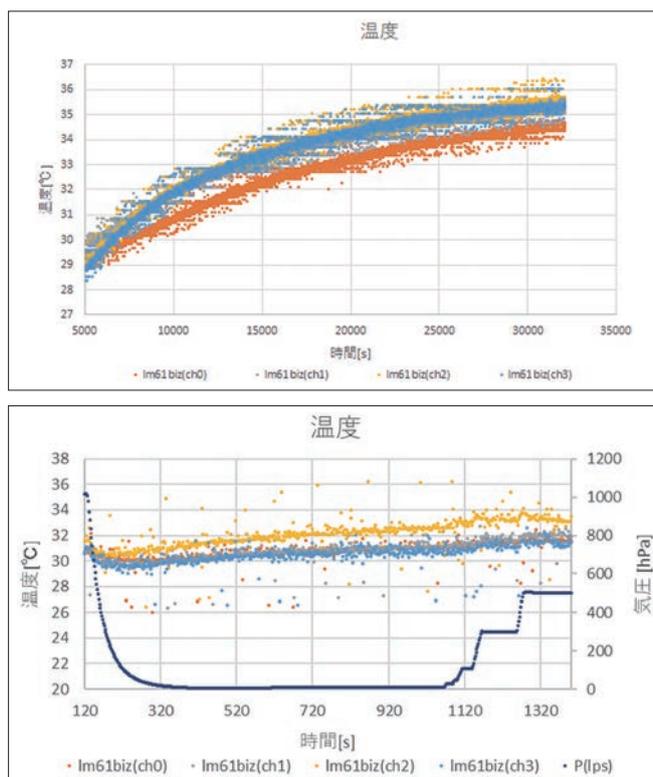


図8 アナログ温度センサの気温変化：(上) 常温・密閉②、(下) 低圧下⑤の場合

4. 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 Raspberry Pi のCPU負荷を調整した場合の保温効果について評価する。CPU負荷の調整に、Linuxの命令 (`#yes >> /dev/null`) を用いる。Raspberry Pi2 Model Bは4コアのCPUであり、命令を多重実行することでCPU使用率を最大400%にすることができる。今回は、低温下で、CPU使用率を200%と400%の一定値に設定した状態で、CPU温度、各温度センサの温度を測定し、保温効果を検証した。装置ボックスを用いた低温実験であり、温度センサの配置は図4の②④と同じである。

低温下での気温の時間変化を図9に示す。実験開始後には、一時的な温度上昇があり、その後緩やかに低下し一定の値に落ち着いた。温度減少が小さくなり、平衡温度に達するまで、CPU負荷200%では約4,000秒、CPU負荷400%で約3,000秒かかっている。CPUの平衡温度(青、緑)は、CPU負荷200%で約30℃、CPU負荷400%で約45℃、一定値のCPU負荷を与えない場合には、図7(下)から分かるように12℃(橙、緑)であった。また、CPUの発熱増大は、周囲への温度変化に影響を与えており、CPU負荷200%での内壁温度は、約0～-2℃、CPU負荷400%での内壁温度は5～7℃であった。一定値のCPU負荷を与えない場合は、図7(上)に示すように、-10℃付近まで(橙、緑)減少するが、CPU負荷200%では0℃付近までしか下がらない。密閉空間では、CPU負荷を増大させることで一定の保温効果が得られる。

一定値のCPU負荷を与えない場合(図7)、CPU温度とセンサ温度は一定周期の振動を示した。一方で、CPU使用率を一定値にした場合(図9)では、平衡温度は一定であり、振動が見られなかった。このことから、図7、8で見られた温度の周期変動はCPU使用率の周期変動による熱振動が原因であると考えられる。

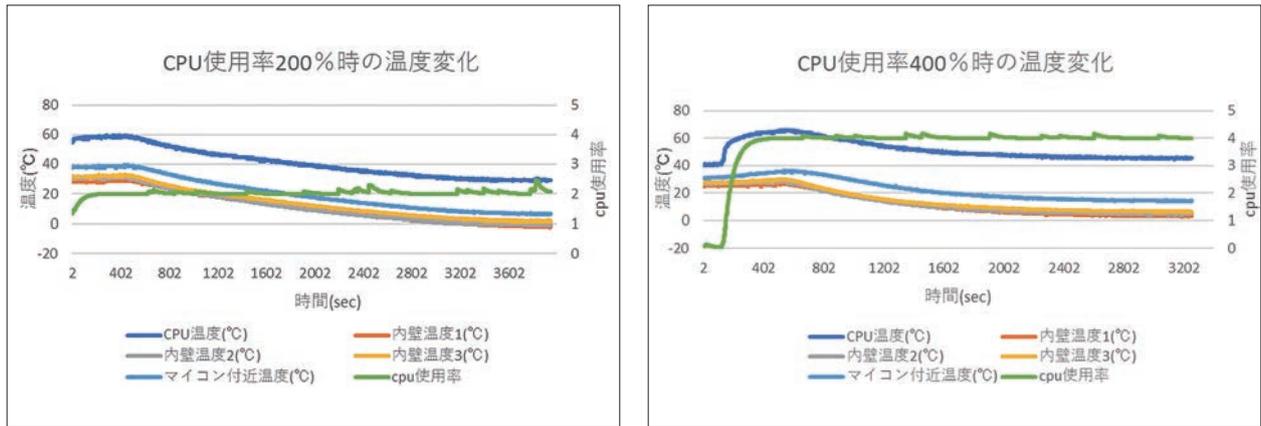


図9 低温下での温度変化：CPU使用率（左）200%（右）400%

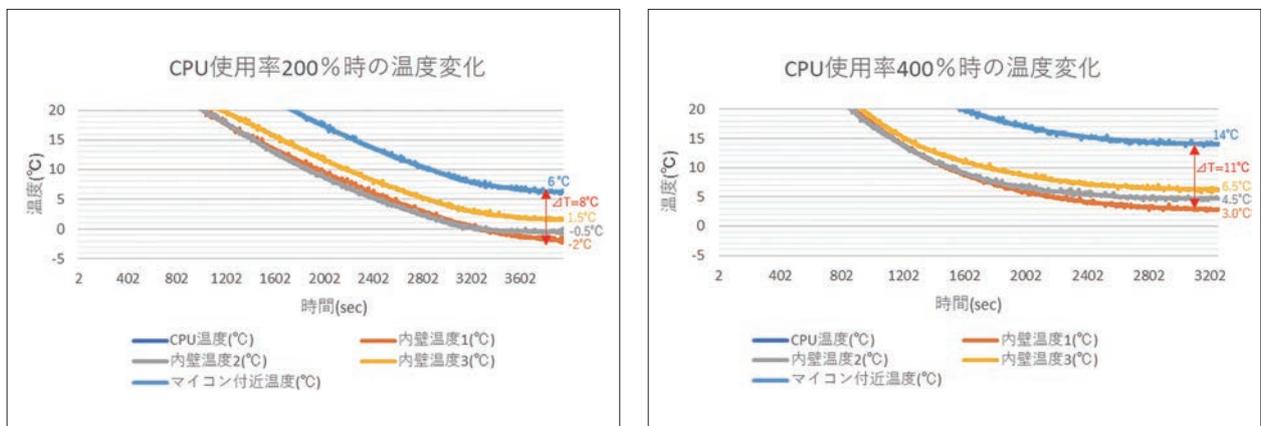


図10 低温下での各センサの平衡温度の差：CPU使用率（左）200%、（右）400%

低温下での平衡温度の空間分布について述べる。図10に各センサの平衡温度の差を示す。コンピュータボード付近の温度が高く、壁側の温度が低い。CPU使用率が高いほど、その温度差が大きい。CPU使用率が高いほど、CPU付近に熱が集中していると考えられる。

また、図11に示すように、CPU使用率とCPU温度はほぼ線形で近似できる。CPU使用率を100%上げる場合、CPU温度は約8.3℃上昇し、CPU付近の温度は4.0℃上昇、内壁では2.5℃上昇する。このような定式化を行うことで、CPU負荷の与え方による保温効果を定量的に得られる可能性がある。

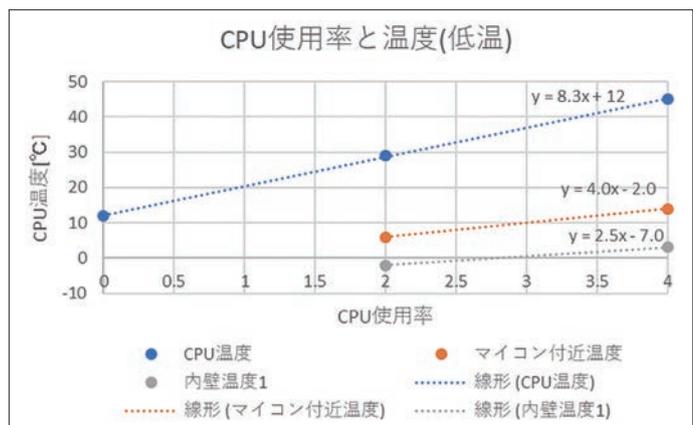


図11 低温実験でのCPU使用率と温度の関係

5. 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。

- ・センサ特性であるオフセット値やノイズは、温度に依存して変動する
- ・装置ボックスを用いることで、ある程度（今回は10℃以上）の保温効果が得られる
- ・1気圧では熱対流により装置ボックスの上部が温められやすいが、低圧（数hPa）下では、熱対流の効果は弱く、熱源周辺に熱が溜まりやすい
- ・CPUへの負荷を調整することで、保温効果を調整することができる

これらの結果は、低温・低圧下でRaspberry Piを用いた観測を行う上で有用な情報となる。実際、オンボードコンピュータの発熱を利用した保温効果は期待できる。今後は、温度勾配などに関して、測定センサ数を増やし、空間勾配を精密に測定することで、定式化を進めていく。また、装置ボックスの大きさの効果を定式化できれば、より一般的な場合の測定に活かすことができると考えている。Raspberry Piの異なるモデルに関しても、順次調べていきたい。

謝 辞

実験装置などに関して、株式会社八光電機から助成していただきましたので、感謝致します。本研究はJSPS科研費 JP17K01169の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Raspberry Pi Foundation、<https://www.raspberrypi.org/> (2018/02/07)
- [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、大原万里奈、前田栄一、上田真也、高田 拓、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] 下村克樹、坪内麟太郎、山田磨耶、上田真也、高田 拓、大気圏観測のための気球搭載観測装置の開発と放球実験結果：予測経路との比較とデータ通信に関する検討、高知工業高等専門学校学術紀要, 63, 63-72, 2018
- [5] 久保田晃弘、宇宙からの芸術、科学技術コミュニケーション (Japanese Journal of Science Communication), 21, 111-118, 2017
- [6] 気象庁「大気の構造」、<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-1-1.html> (2017/11/05)

受理日：2017年11月13日