

オンボードコンピュータRaspberry Piによる 装置ボックス内への熱伝搬とCPU負荷率との関係

秋元優貴*1・岡村友樹*1・加藤 樹*1・楠目啄也*1・坂本知也*1・
上園波輝*2・上田真也*3・横山有太*4・高田 拓*5

Heat propagation in the observation device and its dependency on CPU load of the Raspberry Pi onboard computer

Yuki AKIMOTO, Yuki OKAMURA, Tatsuki KATO, Takuya KUSUME,
Tomoya SAKAMOTO, Namiki UEZONO, Shinya UETA, Yuta YOKOYAMA, and Taku TAKADA

Summary

In order to understand the propagation characteristics of the heat generated from Raspberry Pi 3 Model B onboard computer, 20 temperature sensors were placed in the equipment box, and the change of temperature over time was measured. Three parameters – the time to reach the constant equilibrium temperature, the temperature rise, and the equilibrium temperature – were derived from the acquired data by approximating the temporal change of the temperature at each measurement point as an exponential function. We also confirmed that the equilibrium temperature and rate of heat propagation in the equipment box can be varied experimentally with constant CPU loading rates of 0%, 200%, 300%, and 400%. Actual temperature control can be implemented by monitoring the values of the CPU temperature, CPU load, and clock frequency. As a result, we can understand the characteristics of heat propagation from the onboard computer to the inside of the equipment box, obtaining knowledge from the information and of the means necessary for designing the observation equipment.

1. 序 論

Raspberry Piに代表されるオンボードコンピュータを用いた観測装置は、小型軽量であり、様々な場所に持ち運んで使用できる。一方で、計測を行うセンサ類には、適正な動作が想定されている温度や気圧の範囲があり、動作範囲を超えるとデータの異常やセンサの故障につながる可能性がある。短時間の計測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¹⁾。笹岡ら(2018)では、上空20km以上の成層圏での低温下を想定して、オンボードコンピュータによる発熱を装置ボックスの保温に利用できるかどうかを検討した²⁾。具体的に

*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 教育研究支援センター 技術専門職員
*4 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 講師
*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
(E-mail: takada@ee.kochi-ct.ac.jp)

は、常温と低温環境下において、Raspberry Piを起動させ、装置ボックス内の温度変化を調べる実験を行った。さらに、CPU負荷率を意図的に大きくして、装置ボックス内の温度変化を計測することで、 -20°C の低温下において装置ボックス内の温度を 10°C 程度上昇させる効果があることを示した。一般に、装置ボックス内の熱源は局在しており、温度の空間勾配は小さくない。そのため、装置ボックス内の熱伝搬を把握することで、装置ボックス内の最適な配置や大きさなどが推定できる。

Raspberry Piには、複数のモデルが存在するが、例えば、Raspberry Pi 3 Model Bには、CPUに 1.2GHz のクアッド（4つの）コアのARM系プロセッサが搭載されている。デフォルトではヒートシンク等による熱対策はなされておらず、動作温度範囲は $0\sim 70^{\circ}\text{C}$ である。 80°C 以上の温度になった場合は、クロック周波数をゆっくりと下げることで加熱を抑えるスロットリングという仕組みが機能する³⁾。 85°C 以上になると待機時と同じ 0.6GHz 程度のクロック周波数となり、温度上昇がほぼ抑えられる。また、CPU負荷率は、コンピュータが論理CPUを使用している割合であるが、1つのコアあたり最大 100% とするため、4つのコアの場合、最大 400% となる。CPU負荷率は「`yes > /dev/null &`」コマンドを用いて調整することができ、このコマンドを多重実行することでCPU負荷率を最大 400% まで段階的に高めることができる。

本論文では、装置ボックス内での、CPUから発生する熱の伝搬について調べる。装置ボックス内に、多数の温度センサを配置し、各点での温度の時間変化を計測する。得られたデータから、熱平衡の式を近似し、熱の伝搬を可視化する。また、装置ボックス内への熱伝搬とCPU負荷率との関係について考察する。さらに、熱対流の影響を推定するため、低圧下での計測を行い、熱対流の効果が抑えられた場合の熱伝搬について述べる。

2. 計測装置と実験環境について

2.1 計測装置について

実験に使用する計測装置の構成を図1に示す。オンボードコンピュータとしてRaspberry Piを用い、ブレッドボード上に、A/Dコンバータ、アナログ温度センサ、気圧センサ、温湿度・気圧センサモジュールを配置した。今回の測定では、気圧と温度の測定が主であり、ブレッドボードを使用することによるノイズなどの影響は少ない。低圧実験では、ブレッドボードを使用することで、センサの故障や取り換えなどに対応しやすい。今後、実験が安定的に実施できる状況になれば、プリント基板への実装を行う予定である。

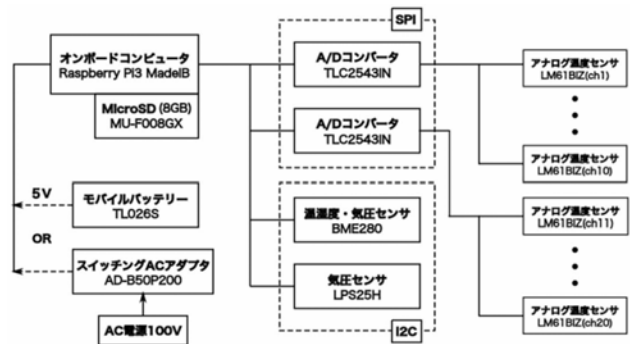


図1 計測装置の構成図

Raspberry Piの複数のモデルの中から、無線LAN機能が含まれているRaspberry Pi 3 Model B（動作温度範囲 $0\sim 70^{\circ}\text{C}$ 、電源定格 5V ）を使用した。外付けの無線LANアダプタを利用する場合、アダプタとの接続部の発熱が無視できないため、無線LAN内蔵モデルとした。装置ボックス内の温度の勾配や流れを求めるため、20個の温度センサを装置ボックス内に取り付け、A/Dコンバータを介して温度データを取得した。温度センサはアナログセンサで、温度範囲 $-25\sim 85^{\circ}\text{C}$ での計測精度が $\pm 3^{\circ}\text{C}$ であり非線形性（出力電圧—温度曲線での理想直線に対する偏差）が最大 $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ であるが、本実験においては温度の相対的な変化を見るため十分な精度である。また、A/Dコンバータとして、

10ch分の入力可能なTLC2543を2個用いて、計20個の温度センサの出力を得た。

今回使用した20個の温度センサに関しては、事前実験で同一温度計測時のオフセット値を定め(表1参照)、データ解析時はオフセット値を差し引いて利用している。基準としては、最低温度を記録したch6の平均値を使用しており、温度センサ間の最大温度差は約2.26℃であった。

表1 同一温度計測時のセンサの平均温度とch6を基準としたオフセット値

温度センサの示した温度の平均値 [°C]									
ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7	ch8	ch9	ch10
26.84	27.20	26.73	27.37	25.83	25.50	26.90	27.53	26.71	26.84
ch11	ch12	ch13	ch14	ch15	ch16	ch17	ch18	ch19	ch20
27.46	26.55	27.07	26.66	26.28	27.04	26.39	26.82	27.64	27.76
オフセット値 [°C]									
ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7	ch8	ch9	ch10
1.34	1.70	1.24	1.87	0.33	0.00	1.40	2.03	1.22	1.34
ch11	ch12	ch13	ch14	ch15	ch16	ch17	ch18	ch19	ch20
1.96	1.05	1.57	1.16	0.79	1.54	0.90	1.32	2.14	2.26

2.2 実験環境について

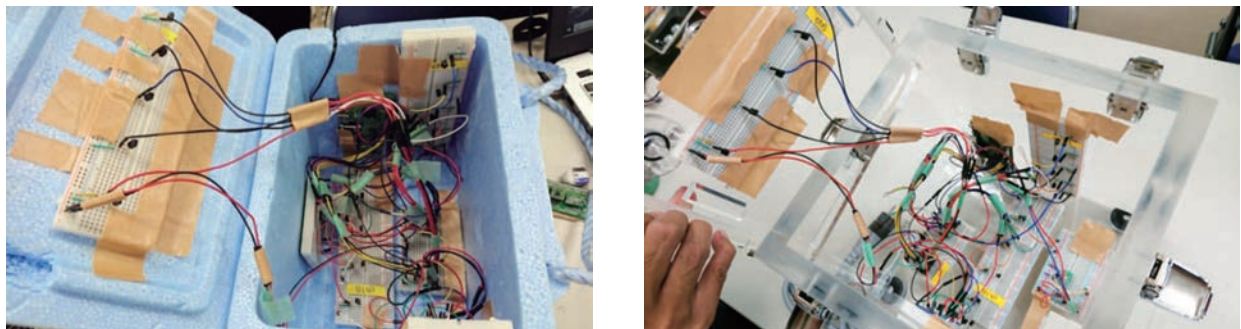


図2 実験装置の外観：(左) 常圧下の発泡スチロール製の箱内、(右) 低圧下の真空デシケータ内

今回の実験では、熱対流の影響を比較するため、常圧（1気圧）と低圧（約5hPa）下での計測を行った。図2（左）に示すように、常圧では、気球搭載観測装置のために利用している発泡スチロール製の箱（縦15.5cm、横23.0cm、奥行14.5cm）を装置ボックスとした。低圧では、図2（右）に示すように、縦21cm、横21cm、奥行21cmの真空デシケータを装置ボックスとした。真空デシケータ内からは、外部供給電源を利用できる。真空装置としては、アルバック社の油回転真空ポンプ（G-101S）を用いており、最小で約数hPa程度まで気圧を下げる事ができる。また、装置ボックス内

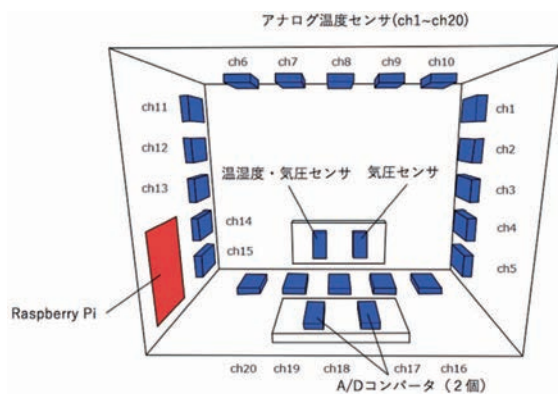


図3 装置ボックス内のセンサの配置図

には、図2に示すように、アナログ温度センサ20個を取り付けたブレッドボードを壁面と上下面に口の字型に配置した。熱平衡に至るまでの温度の時間変化を見るため、計測時間は3時間以上とした。

実験の手順としては、装置ボックス内に、Raspberry Piやセンサ付きブレッドボードを図3のように配置する。装置ボックスのふたを閉めた後、Raspberry Piを起動し、Tera TermによりSSH接続を行い、計測プログラムを実行する。その後、CPU負荷率を上げる場合は、さらにコマンド実行し、計測の終了を待つ。指定時刻を過ぎると自動的に計測を終

えるようにした。計測プログラムでは2s毎にセンサデータを取得し、CSV形式としてマイクロSDカードに保存する。保存されたデータは、計測終了後に、ファイル転送によりPCに送る。真空デシケータを利用する場合は、真空デシケータのふたを閉めて低圧にした後、外部供給電源のスイッチを入れ、Raspberry Piを起動させる。

3. 実験結果

計測した温度センサの時系列データの例を図4に示す。計測開始直後から温度は上昇し、時間が経つと熱平衡に達する。この温度変化は、 T を計測温度 $[\text{C}]$ 、 t を時間 $[\text{s}]$ とすると、指数関数 $T=a-be^{-\frac{t}{c}}$ で近似され、図4の例では、 $a=37.9$ 、 $b=5.8$ 、 $c=2173$ となった。 a は平衡温度 $[\text{C}]$ 、 b は初期温度からの温度上昇 $[\text{C}]$ 、 c は平衡温度に達する時定数 $[\text{s}]$ に相当する。測定位置やCPU負荷率の値に関係なく、ほとんどの計測点で、同様の平衡温度に達する曲線で近似できた。

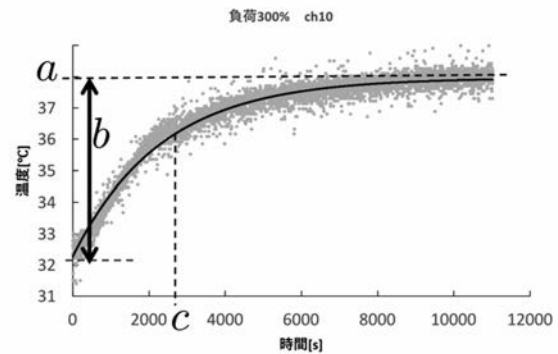


図4 計測データ例 (CPU負荷率300%、ch10)

ただし、実際のデータには、特に温度が高い場合や気圧が低い場合に、異常値が含まれることがある。これは、いくつかの原因が考えられるが、CPU負荷率が高い状態で、A/Dコンバーターのビットエラーなどが発生していることが理由の1つではないかと考えている。図5に、異常値を含むデータ例を示す。図5(左)のように、高温で異常値が時折現れる場合には、正常と考えられる温度範囲のデータに対し、近似を行った。一方で、図5(右)のように、開始時刻以降、2つの温度分布が常時現れている場合には、正しい温度変化を導出できないとして、近似を行わなかった。

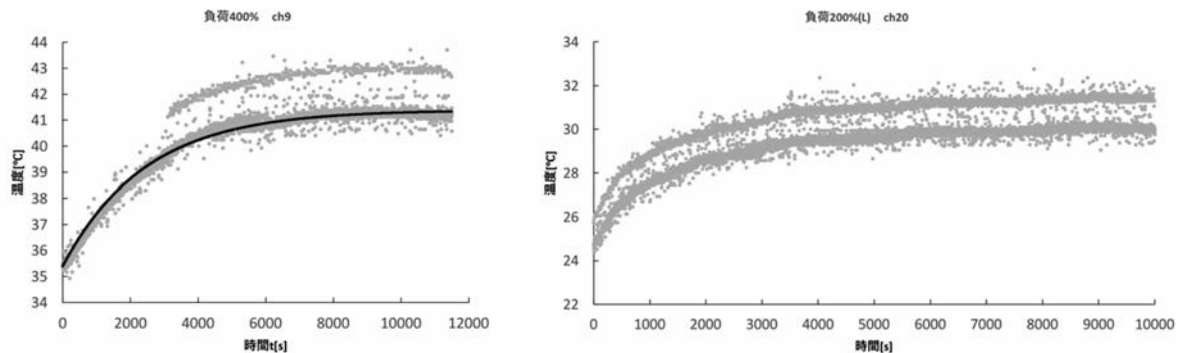


図5 異常値を含むデータ例：(左) 近似可能な場合、(右) 近似不可能な場合

3.1 常圧実験における位置による温度変化の違い

各センサの位置による温度変化の違いを、図6に示す。図6(左)は、計測装置の下側(ch16~ch20)センサの温度変化であり、熱源からの水平距離が異なる場合を示している。初期温度はほぼ同じであり、全ての計測点で温度上昇が確認できる。平衡に達した温度は、熱源から近い側ほど高く、熱源から遠い側ほど低く、温度の空間勾配の向きは妥当である。図6(右)に、全てのセンサの最終温度を示す。下側のセンサに関しては、図6(左)で確認したように、熱源に近いほど温度が高い。

上側のセンサに関しても、熱源に近いほど温度が高く、熱源から遠いほど温度が低い。鉛直方向（左側）の温度の違いに関しては、上側の温度が高く下側の温度が低い。鉛直方向（右側）の温度の違いも、同様の傾向をもつ。温められた空気が上昇し、空気の対流による熱が伝搬していると考えられる。一方で、熱源であるRaspberry Piの近傍では、ch14とch15の温度が低く、ch15とch20の間には温度の不連続な領域ができている。熱の放射や対流を考えるだけでは、このような不連続な領域は発生しないため、3.3で詳細に調べる。図6はCPU負荷率300%の例であるが、他のCPU負荷率においても、空間位置による温度の違いに対する傾向はほぼ同じであった。

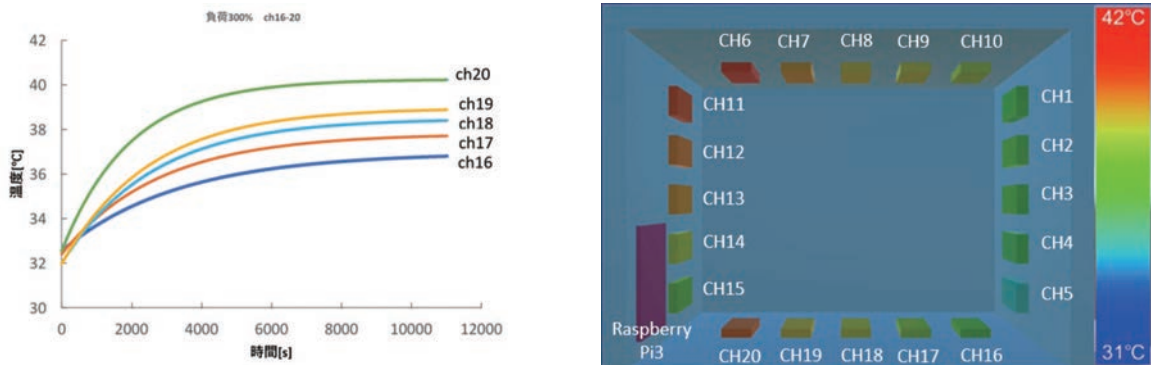


図6 (左) 水平方向（下側）の位置ごとの温度の時間変化、(右) 計測装置内の最終温度分布 (CPU負荷率300%)

3.2 CPU負荷率による温度変化の違い

CPU負荷率が異なる場合の装置内の最終温度を図7に示す。図6で示したように、全てのCPU負荷率において、水平方向の最終温度は、熱源に近いほど高く、熱源から遠いほど低い。鉛直方向の最終温度は、上側ほど高く、下側ほど低い。これらの傾向は、全てのCPU負荷率でほぼ同様であった。一方で、CPU負荷率が高いほど、最終温度は高い傾向がある。具体的には、最終温度は、CPU負荷率0%で34.7~39.0°C、CPU負荷率200%で34.0~42.2°C、CPU負荷率300%で35.9~43.4°C、CPU負荷率400%で38.0~46.5°Cであった。また、CPU負荷率300%時に見られたch15とch20付近の温度の不連続な領域は、全てのCPU負荷率において観測された。

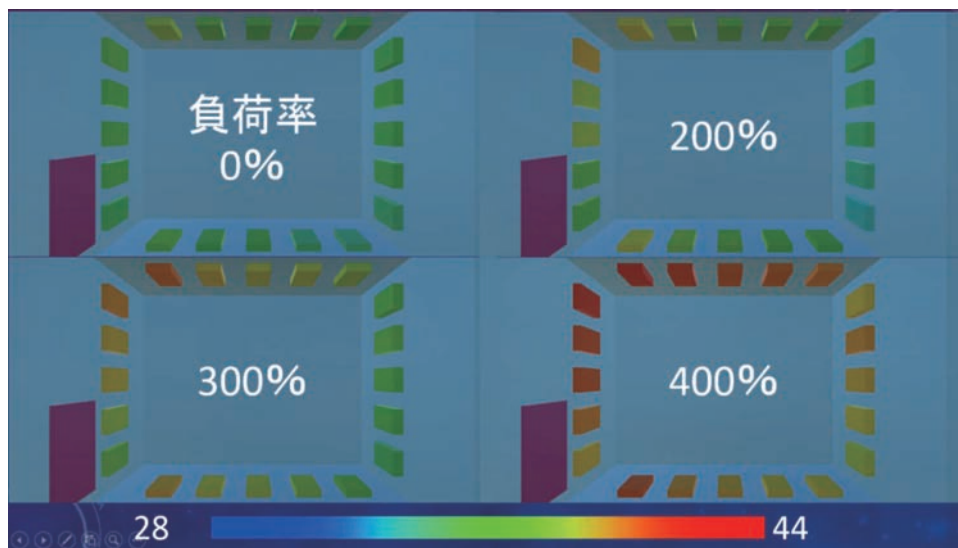


図7 CPU負荷率毎の計測装置内の最終温度分布

3.3 Raspberry Pi近傍の温度勾配

Raspberry Pi近傍に位置する、ch15とch20の間には温度の不連続な領域が見られた。その原因を探るため、Raspberry Pi周辺をサーモグラフィカメラ（型番：FLIR C2、赤外線センサ：80×60ピクセル、デジタルカメラ：30万画素、計測温度範囲：-10～+150℃、温度精度：2%@25℃）により撮像した。図8（左）に、真上から見た装置内の温度分布を示す。Raspberry Pi近傍およびその上方に温度が高い領域がある一方で、その右隣りに位置する鉛直方向のセンサch11～ch15がある領域に熱が広がっていない。装置ボックス内のRaspberry Piとセンサ周辺を確認すると、図8（右）の模式図に示すように、Raspberry Piと、ch14およびch15の間にGPIOからの配線が多く出ており、壁のようになっていることが分かった。この配線の壁により、熱が伝わりにくくなり、ch14およびch15の位置での温度上昇が小さくなったと考えられる。装置ボックス内における障害物などによる熱の伝搬特性に関しては、サーモグラフィカメラを利用することで、確認することができることが分かった。

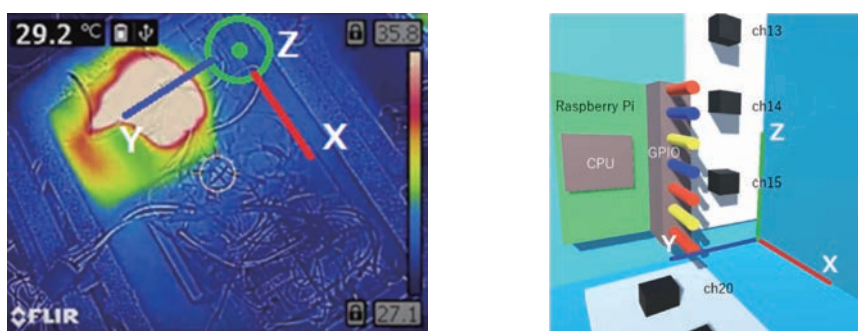


図8 Raspberry Pi周辺の（左）サーモグラフィカメラによる撮像画像、（右）構造物の模式図

3.4 低圧実験

常圧下と同様に、低圧下において、各センサ位置での温度の時間変化を調べた。温度の時間変化は、常圧下と同様に、指数関数 $T = a - be^{-\frac{t}{c}}$ でよく近似される。水平距離が異なる計測点での温度変化の例として、図9（左）に装置上側（ch6～ch10）の温度変化を示す。ただし、低圧実験においては、図4（右）で示した指数関数での近似が不可能なセンサデータが多く、ch6、ch9、ch10のみが指数関数による近似可能なデータであった。ch6とch9の差ははっきりしないが、熱源から最も遠いch10は、他のセンサよりも温度が低い。

図9（右）で、低圧下（約5 hPa）と常圧下での温度の時間変化を比較する。低圧下では常圧下と比べて、温度上昇が小さく、時定数が大きくなる傾向がある。実際に、平衡温度 a [°C] と温度上昇 b [°C] は常圧下より低圧下の方がかなり低い。さらに、平衡温度に達する時定数 c [s] は、常圧下と比べて低圧下の方が大きくなっている。低圧下では、熱の伝搬量が少なく、伝搬はゆっくりであることが分かる。低圧下には、装置内の空気の量が少なく、熱対流の影響が小さくなったためと考えられる。

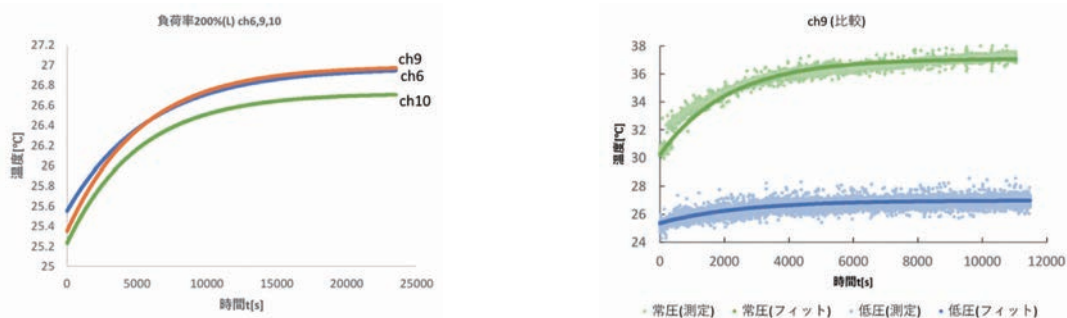


図9（左）低圧下における、水平方向の温度の時間変化、（右）低圧下と常圧下の比較（CPU負荷率200%、ch9）

4. Raspberry PiのCPU負荷率と熱伝搬の関係

本節では、CPU負荷率と熱伝搬の関係を考察する。表2に、上側の水平方向位置における、CPU負荷率毎の3つのパラメータ（平衡温度、温度上昇、平衡温度に達する時定数）をまとめた。各CPU負荷率での平衡温度（a）は、熱源に近い（ch6）側で大きくなっているが、それほど大きな差はない。各位置に関しては、CPU負荷率が大きくなるほど、平衡温度は大きくなっており、3.3で述べた最終温度の位置による違いと同じ傾向を示している。温度上昇（b）に関しては、熱源に近い側ほど大きい傾向はあるが、CPU負荷率との関係は、ばらつきが大きく一定の関係があるとは言えない。平衡温度に達する時定数（c）に関しては、熱源に近いほど時定数が小さく、熱の伝搬が速かったことを示している。一方で、CPU負荷率との関係は、0%から300%までは時定数が順に小さくなっていくが、CPU負荷率400%の時定数は300%の時定数よりも大きく、負荷率400%の熱伝搬が想定より遅かったことを示し、一般的な描像と矛盾した結果となっている。

そこで、今回の装置ボックス内の熱源と考えているCPU温度と、CPU負荷率を確認する。図10(左)にCPU負荷率（実測値）、図10(右)にCPU温度を示す。初動の変化を見やすくするため、横軸の時間は対数表示としている。時間の経過とともに、CPU負荷率は指定したCPU負荷率に収束していることが分かる。一方で、CPU温度とCPU負荷率との関係は複雑である。CPU負荷率0%では、ゆっくりと温度上昇しており、最終時刻でもCPU温度は60℃以下である。CPU負荷率200%では、CPU負荷率100%よりも温度上昇が急であり、CPU温度が80℃になると温度上昇が急激に緩やかになり、85℃程度まで緩やかに温度上昇している。これは、Raspberry Pi 3のスロットリングという機能によるものであり、クロック周波数を抑えることで、CPU温度上昇を抑えているためと考えられる。CPU負荷率300%では、CPU負荷率200%よりやや急激な温度上昇をしながら、CPU温度は80℃を経て85℃に収束している。一方で、CPU負荷率400%では、起動後のCPU温度は最も高かったものの、CPU負荷率0%と同程度の温度上昇で80℃に到達し、その後は、値が82℃～86℃程度に突然切り替わっている。CPU負荷率400%時には、CPU負荷率の実測値が十分大きいにも関わらず、CPU温度の上昇の仕方が特異であり、CPUのクロック周波数などが制限を受け、熱の発生が抑えられた可能性が考えられる。

表2 CPU負荷率毎の平衡温度、温度上昇、熱平衡に達する時定数（上側の水平方向位置）

センサ番号	ch6	ch7	ch8	ch9	ch10
CPU 負荷率 0%					
a: 平衡温度 [°C]	37.62	37.20	36.71	36.73	36.32
b: 温度上昇 [°C]	8.35	8.57	8.45	8.19	7.76
c: 時定数 [s]	3155.73	3917.41	4302.39	4737.73	4746.04
CPU 負荷率 200%					
a: 平衡温度 [°C]	40.78	37.35	36.87	37.02	36.71
b: 温度上昇 [°C]	9.21	6.4	6.34	5.94	6.27
c: 時定数 [s]	2847.43	2146.56	2326.42	2233.44	2350.25
CPU 負荷率 300%					
a: 平衡温度 [°C]	41.84	39.53	38.8	38.58	37.93
b: 温度上昇 [°C]	10.89	7.59	7.04	5.99	5.84
c: 時定数 [s]	1354.91	2065.41	2124.30	2256.329	2177.02
CPU 負荷率 400%					
a: 平衡温度 [°C]	44.66	42.86	41.88	41.57	41.28
b: 温度上昇 [°C]	8.48	7.38	6.93	6.69	6.68
c: 時定数 [s]	2021.87	2330.29	2336.31	2289.14	2589.20

この点を検証するため、クロック周波数を取得するように設定し、再度実験を行った。CPU負荷率300%、400%で実験を行った結果を図11に示す。CPU負荷率（灰色）に関しては、20秒あたりから増加し始め、各々300%、400%に到達後はほぼ一定となっている。CPU負荷率の増加が始まると、CPU温度（青色）は、実験開始時の40℃台から急激に増加し始め、徐々にゆるやかになりつつ80℃に達する。その後はゆるやかに上昇し、CPU負荷率300%では82℃程度に収束し、CPU負荷率400%では開始7021秒で85℃に達し、その後は、82℃～86℃の間で振動していた。CPUのクロック周波数（橙色）は、CPU負荷率の上昇前には待機時の0.6GHzであったが、CPU負荷率の上昇に伴って、1.2GHzとなり、80℃に達すると徐々に低下した。CPU温度が80℃以上でのクロック周波数の低下はスロットリングの仕組みによるものである。負荷率300%では1.0GHz程度まで低下したが、CPU負荷率400%では0.7GHz程度に低下し、CPU温度が85℃に到達した後は、待機時の0.6GHzと0.9GHzの間で振動していた。CPU温度が85℃程度での振動は、前述したCPU温度の増減に伴って、クロック周波数の切替りが発生しているためと考えられる。

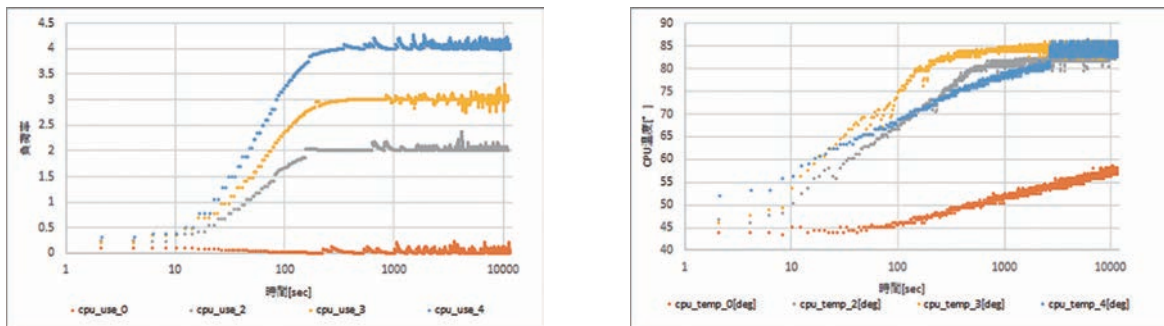


図10 CPU負荷率毎の（左）CPU負荷率（実測値）、（右）CPU温度

図10では、CPU負荷率400%時に、2つの特異な現象が見られた。1つは、CPU温度が80℃に到達直後に、82℃程度へ突然切り替わり、その後は82℃～86℃の間で振動していた点である。図11では、突然の切り替わりは確認できなかったものの、82℃～86℃の振動は確認され、クロック周波数の引き下げの下限で、待機時と動作時の振動を繰り返していると考えられることが分かった。もう1つは、CPU負荷率400%の方が、CPU負荷率300%よりも温度勾配が小さかった点である。ただし、図11では負荷率400%の方が負荷率300%よりも温度勾配が大きく、元々想定される結果が得られた。図10でのCPU負荷率400%の振る舞いについては、今後も検討する必要がある。表2で得られた熱伝搬の様子は、CPU負荷率に単純に比例しなかったが、CPU温度80℃以上では、CPU温度がCPU負荷率に加えて、クロック周波数などの変動に影響を受けることによる。結果的に、CPU負荷率の強制的な増減による温度管理に関しては、CPU温度、CPU負荷率、およびクロック周波数などを監視することで、より効率的で効果的な温度管理が可能であることを示唆できたと考えている。

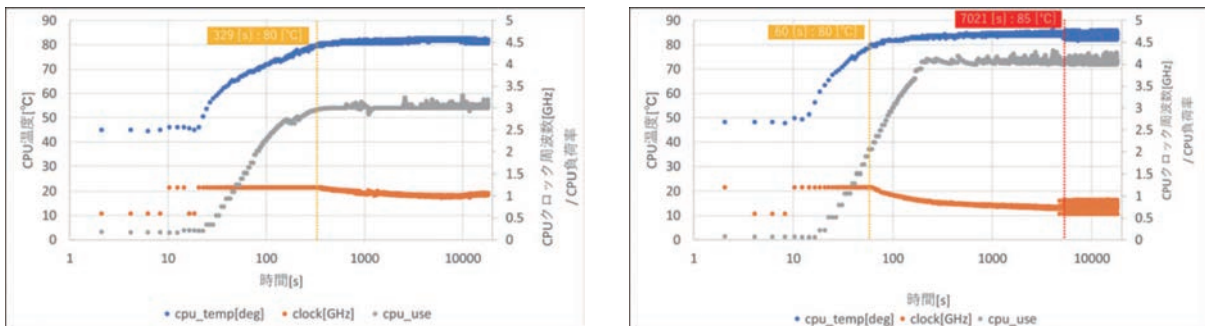


図11 CPU温度・CPU負荷率・クロック周波数の時間変化、（左）CPU負荷率300%、（右）CPU負荷率400%

5. まとめ

本実験では計測装置内に20個の温度センサを配置し、Raspberry Piより発生する熱の伝搬の様子を常圧、低圧下で計測した。取得データより、各測定点での温度の時間変化を指数関数で近似でき、平衡温度、温度上昇、平衡温度に達する時定数の3つのパラメータを導出できた。計測装置内の空間分布を調べることで、熱源であるRaspberry Piからの距離に反比例して、最終温度は小さくなること、空間的に高い場所ほど、温度が高い傾向であることが分かった。基本的には、CPU負荷率を大きくするほど、ボックス内の平衡温度は高くなり、時定数が小さく（熱の伝搬が速く）なる傾向を確認できた。ただし、CPU温度はCPU負荷率とクロック周波数の双方から影響を受けるため、CPU温度、CPU負荷率、およびクロック周波数を監視して温度管理を実施する必要がある。また、装置ボックス内で見つかった温度の不連続な領域は、サーモグラフィカメラにより温度の空間分布を調べることで、配線が壁のように熱の伝搬を遮っていることを確認できた。また、低圧下では、温度上昇が小さく、熱平衡に達する時定数が大きい特徴があり、常圧下に比べて、熱伝搬が抑えられることが分かった。

謝 辞

実験実施にあたって、株式会社八光電機より助成を受けました。

参考文献

- 1) 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
- 2) 笹岡由唯、上園波輝、川上舞帆、坪内麟太郎、横山有太、上田真也、高田 拓、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、高知工業高等専門学校学術紀要、63、35-44、2018
- 3) ZDNet ニュースサイト：(2018/11/26)
<https://www.zdnet.com/article/no-your-raspberry-pi-3-wont-overheat-in-everyday-use-says-its-creator/>