

京都大学内の2か所で観測された気圧連続データの比較： 特にトンガ火山噴火起源の気圧変動に関して

風間 卓仁¹, 鈴木 臣², 深沢 圭一郎³

1: 京都大学 大学院 理学研究科

2: 愛知大学 地域政策学部

3: 京都大学 学術情報メディアセンター

(2023年8月2日公開)

1 はじめに

2022年1月15日に発生したフンガ・トンガ＝フンガ・ハアパイ火山の大規模噴火では、ラム波やペケリス波といった大気波動が励起され、この大気波動に伴う気圧変動が世界各地で観測された [1, 2]。また、この大気波動に伴い、津波 [3]・地面振動 [4]・地殻変動 [5]・重力変化 [6]・電離層擾乱 [7] などの二次的な変動も各地で観測された。

京都府京都市左京区の京都大学吉田キャンパスでは、当時2か所で気圧の連続観測が実施されていた (図1)。まず、北部構内の理学研究科1号館地下の重力測定室では、ボッシュ製の気圧センサー BME280 を用いた気圧連続観測が実施されていた [8, 9]。BME280 の測定間隔は1秒で、気圧分解能は0.01 hPa である。また、本部構内の総合研究5号館4階では、オムロン製の USB 型環境センサー 2JCIE-BU を用いた気圧連続観測が実施されていた [10]。これは高齢者等を対象とした見守りシステムに付随する気圧観測であり、測定間隔は300秒 (5分)、気圧分解能は0.001 hPa である。なお、両観測とも NTP サーバーとの時刻同期により、正しいタイムスタンプでデータ収録がなされている。

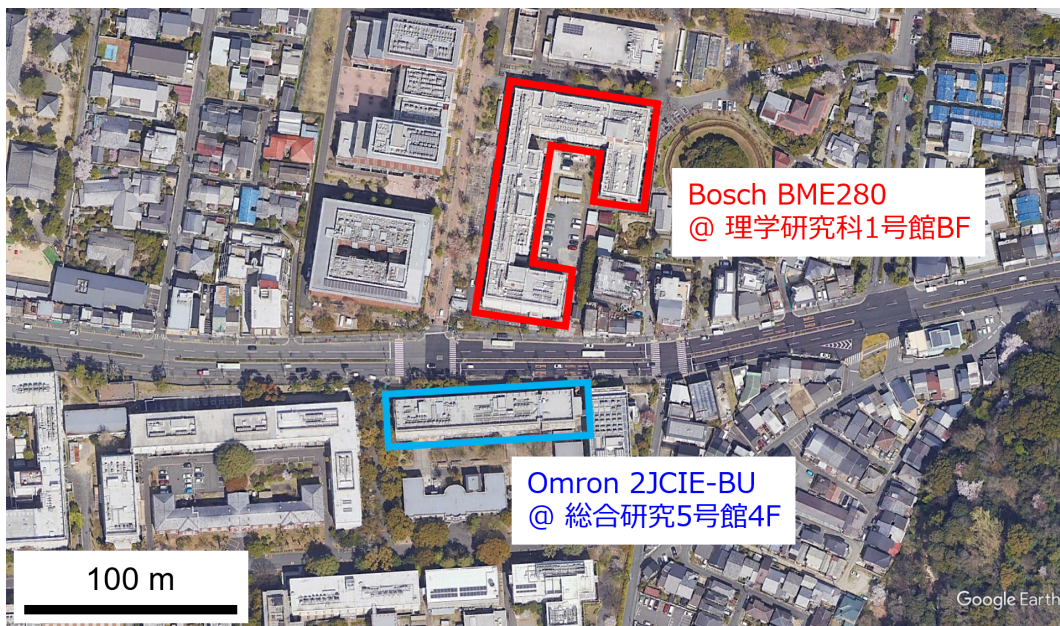


図1: 2つの気圧計が設置されている建物の位置関係 (衛星画像: Google Earth Pro)。

北部構内の重力測定室においてはラム波に伴う重力変化も観測されており [11]、この重力変化を定量的に評価するためには気圧データ自身の精度評価も必要である。上述の2つの気圧記録は互いに今出川通に面した直近の建物内で観測されており (図 1)、気圧変動や大気波動の空間スケールの観点から2地点の気圧変動はほぼ同期していると期待される。そこで本稿では、BME280 (以降、ボッシュ気圧計と呼ぶ) と 2JCIE-BU (以降、オムロン気圧計と呼ぶ) で観測された気圧データを比較し、各気圧計の性能について評価する。

2 トンガ火山噴火に伴う気圧変動

図 2 は 2022 年 1 月 15 日の 19 時~23 時 (日本時間; 以下同様) に京都大学内で観測された気圧変動である。このうち (a) はボッシュ気圧計による毎秒の気圧変化であり [8]、ラム波の通過に伴う 2 hPa 超の気圧増加だけでなく、周期 5 分未満の小刻みな気圧変動まで検出されている。この小刻みな気圧変動は、ラム波の伝搬速度よりもやや遅い大気波動が音波として伝搬していることを反映している。

図 2b の青線は、オムロン気圧計で記録された 5 分毎の気圧変化である。周期 5 分未満の小刻みな変動は捉えられていないものの、20 時台にはラム波に伴う気圧増加が確認できる。また、図 2b の赤線はボッシュ気圧計の観測データ (図 2a) を 5 分間隔にダウンサンプリングしたものであり、両者の時間変化の形状はよく一致している。2つの気圧計はどちらも MEMS と呼ばれるタイプの比較的安価な気圧センサーを用いているが、図 2b の気圧変化を見る限り、数 10 分以上の周期の帯域においては実際の気圧変動を精度よく測定できているようである。

なお、図 2b で2つの気圧値が 2.5 hPa 程度乖離しているのは、主に両気圧計の設置高度の違いによるものと考えられる。この点については、第 4 章で詳細に検討する。

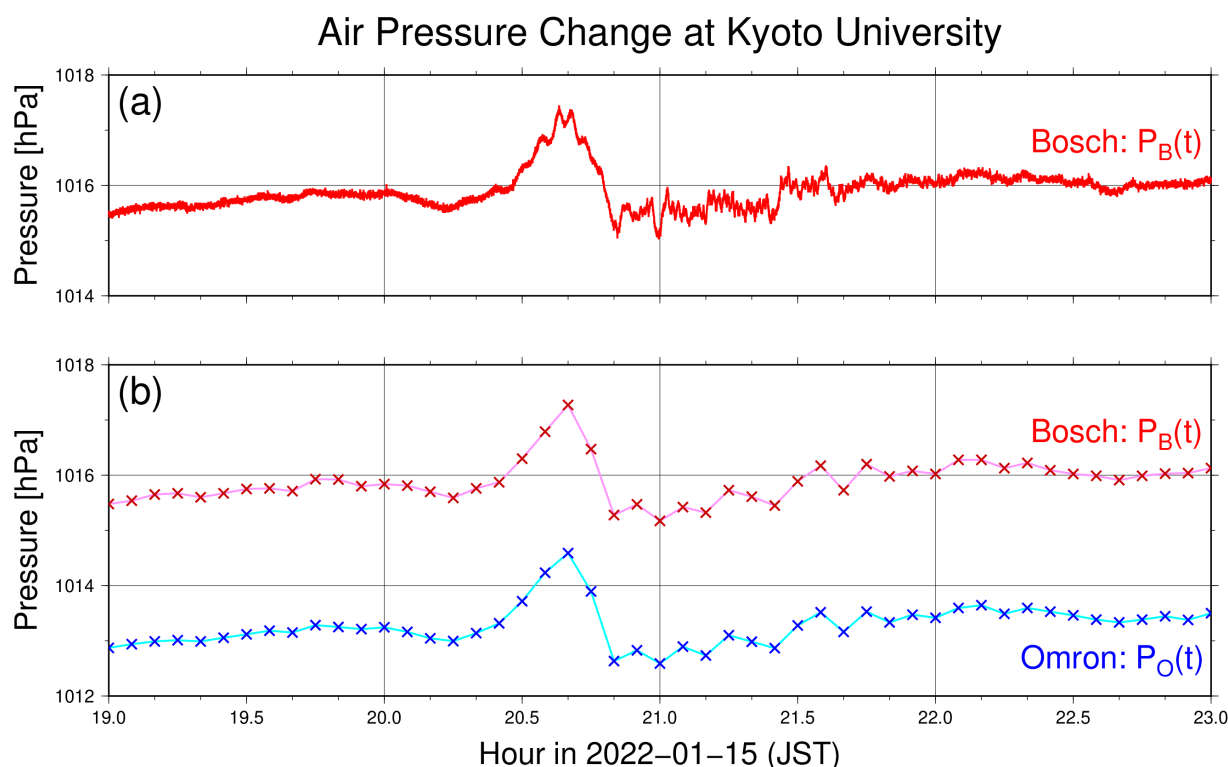


図 2: 2022 年 1 月 15 日に京都大学内で観測された気圧変動。

3 2022年1月15–17日の気圧データの比較

図3aはトンガ火山噴火の発生日を含む2022年1月15–17日の気圧変化であり、ボッシュ気圧計による気圧記録を $P_B(t)$ 、オムロン気圧計による気圧記録を $P_O(t)$ と表現している。 $P_B(t)$ のオリジナルの収録間隔は1秒であるが、この図上では $P_O(t)$ に合わせて5分ごとにダウンサンプリングしている。図2bで比較したのと同様に、2022年1月15–17日の3日間においても $P_B(t)$ と $P_O(t)$ の変化の形状はよく一致している。

図3bはボッシュ気圧計の気圧値を基準としたオムロン気圧計の気圧値、すなわち $P_O(t) - P_B(t)$ を示している。 $P_O(t) - P_B(t)$ の平均（以降 ΔP と表記する）および標準偏差は -2.603 ± 0.048 hPaであり（図3bの緑線および緑色領域）、 $P_O(t)$ の気圧値の方が約2.6 hPa小さいことが分かる。この気圧差 ΔP は図2bで観察された気圧差とも一致している。

なお、2つの気圧計は約100 mの距離範囲内に設置されているため（図1）、気圧計の設置されている部屋が完全に密閉されていない限り、2つの気圧計は同様の気圧変化の形状を示すはずである。しかし、図3bの1月16日～17日の気圧差には日周的な変動が乗っており、この原因としては各部屋の空調や温度変化に伴う見かけの気圧変化が乗っている可能性がある。この点をさらに検証するには、2つの気圧計を同じ環境下に設置した上で気圧の連続観測を行う必要がある。

図4は横軸にボッシュ気圧計の気圧値 $P_B(t)$ 、縦軸にオムロン気圧計の気圧値 $P_O(t)$ を取った時の散布図である。ただし、縦軸については上述の気圧差 $\Delta P = -2.603$ hPaを差し引いている。黒丸で示す $(P_B(t), P_O(t) - \Delta P)$ は、傾き1、切片0の直線（ $y = x$; 図4の緑線）の上に乗っていることが分かる。また、 $P_O(t) - \Delta P = A \cdot P_B(t)$ という方程式を立て、定数 A を最小二乗法で求めると、 $A = 0.999999558 \pm 0.000001635$ となり、1.0という値が標準偏差の範囲内に入っていることが分かる。これらの結果は、両気圧計の相対的な気圧変化が振幅・位相の観点でよく一致していることを意味している。

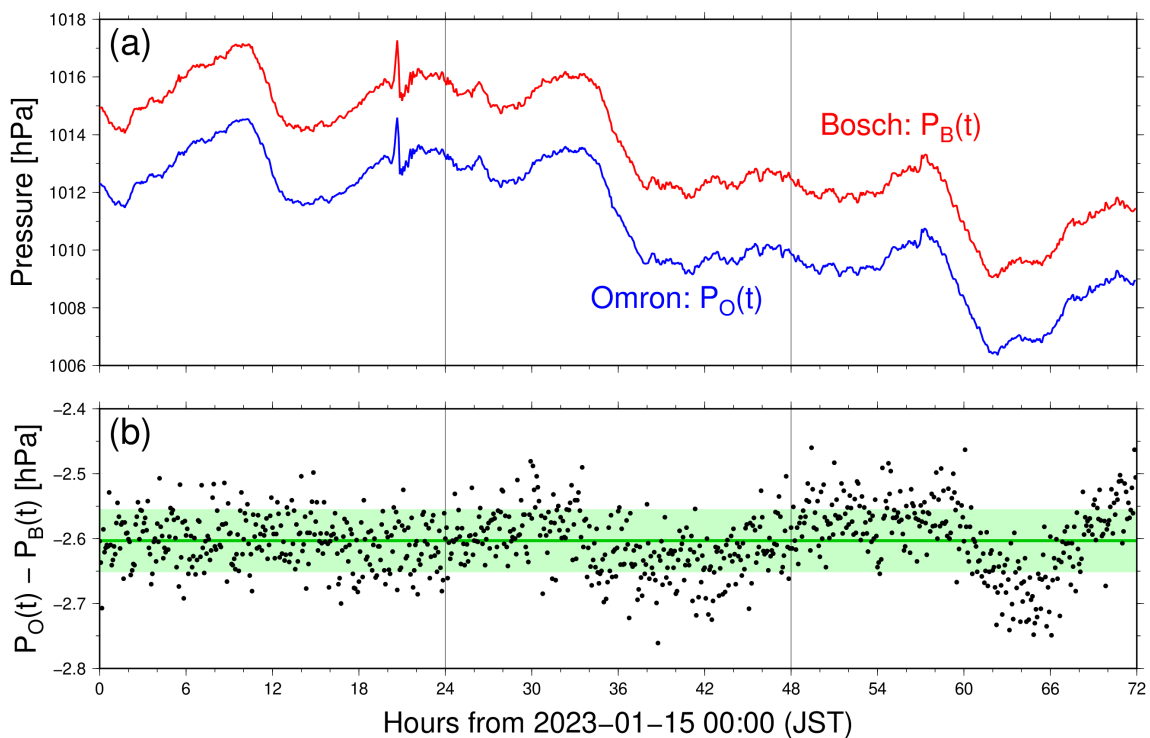


図3: 2022年1月15–17日に京都大学内で観測された気圧変動と、その差分。

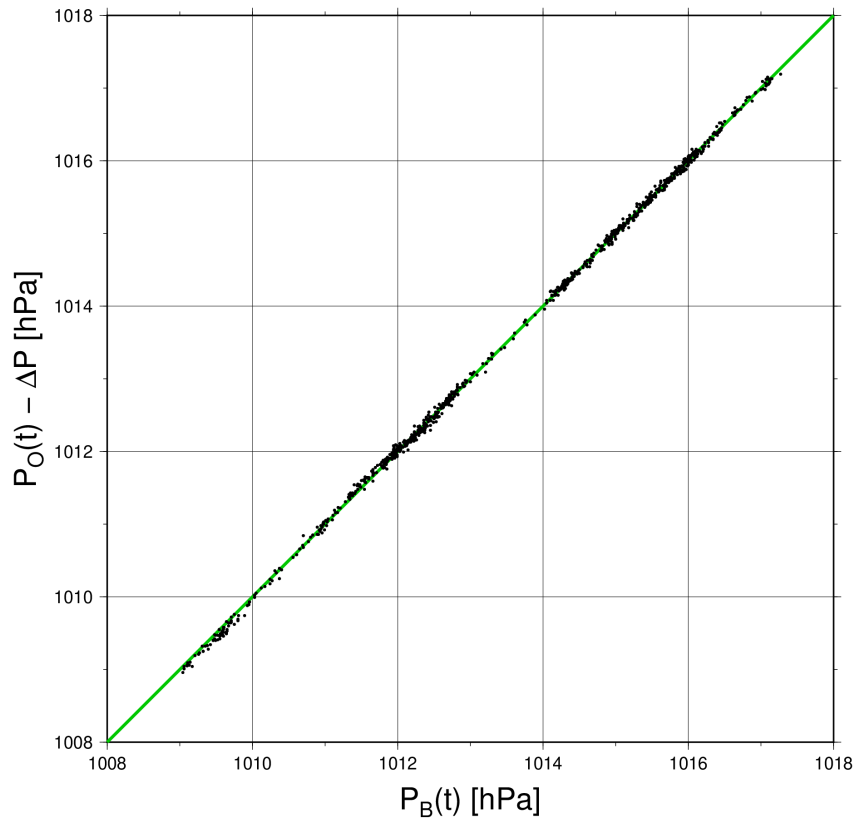


図 4: 2つの気圧計で観測された気圧値の散布図。ただしオムロン気圧計（縦軸）については観測値から ΔP を差し引いている。

4 2つの気圧計の気圧差に関する検討

2つの気圧計の気圧差は、前章にて $\Delta P = -2.603$ hPa と計算された。これはボッシュ気圧計が理学研究科1号館の地下1階に、オムロン気圧計が総合研究5号館の4階に設置されていることから、主に標高差に伴う気圧差を反映していると考えられる。

ここで、海拔高度 h [m] における標準大気気圧値 $P(h)$ は以下のように書ける [12]。

$$P(h) = P_0 \cdot \left[\frac{T_0}{T(h)} \right]^{g_0 M / RT_0} \quad (1)$$

$$T(h) = T_0 + Lh \quad (2)$$

このうち、 P_0 は海拔 0 m における標準気圧 (= 1013.25 hPa)、 T_0 は海拔 0 m における平均気温 (= $15.0 + 273.15 = 288.15$ K)、 L は対流圏の気温減率 (= -6.5 K/km)、 g_0 は地表面における重力加速度 (= 9.80665 m/s²)、 M は地球大気分子の分子量 (= 0.0289644 kg/mol)、 R は気体定数 (= 8.3144598 J/mol/K) である。

この式に京都大学理学研究科1号館地下床面のおおよその標高値 60.0 m を代入すると、 $P(60.0) = 1006.063$ hPa と計算される。また、建物1階分の標高差に 3.6 m (理学研究科1号館における実測値) という値を用いると、地上4階における気圧値は $P(60.0 + 3.6 \times 4) = P(74.4) = 1004.344$ hPa と計算できる。これらの計算値の差を取ると -1.719 hPa となり、観測された気圧差 (-2.603 ± 0.048 hPa) の 66 % を説明できることが分かる。

一方、観測された気圧差のうち残りの34% (0.884 hPa) は標高差で説明できないことになるが、この原因としては各気圧計の気圧値が器差を有している可能性が考えられる。将来の地球物理学的観測のためにはこの問題点を解決しておく必要があり、そのためには2つの気圧計を同じ場所に設置して器差を調べる必要がある。また、今回の結果は「ボッシュ気圧計またはオムロン気圧計の気圧値が真の気圧値から乖離している」ことも意味しており、この点を解決するにはこれらの気圧計をより正確な気圧計に併設して並行観測する必要がある。

5 さいごに

本稿は京都大学内の2か所で測定された気圧データを比較し、トンガ火山噴火時の気圧変動や、2つの気圧データの器差について検討した。その結果、2022年1月15–17日における2つの気圧データの相対値は振幅や位相も含めてよく一致しており(図4)、 ± 0.2 hPaの範囲内に収まっていることが分かった(図3b)。特に、2022年1月15日(トンガ噴火発生時)の気圧相対変化は ± 0.1 hPaの範囲内で一致しており(図3b)、トンガ火山噴火起源の気圧変動が異なる気圧計によってほぼ同じ形状で観測されていることが分かった(図2b)。2つの気圧計はMEMSと呼ばれるタイプの比較的安価な気圧計であるが、気圧の相対変化に関しては非常に高い精度を有していることが確認された。一方、2つの気圧計の絶対値は -2.603 ± 0.048 hPaだけ乖離しており(図3b)、このうち66%は気圧計の設置標高の違いによって説明できることが分かった。ただし、残りの34%については標高の違いによっては説明できず、今回用いた気圧計の気圧値が系統誤差を有していることが考えられる。

なお、理学研究科1号館に設置されているボッシュ気圧計BME280は重力観測データの気圧変動効果を補正するために設置されたものであり[8]、気圧補正を正確に行うためには気圧絶対値の正確性も要請される。この点をさらに調査するために、本稿筆頭著者の風間は2023年7月にボッシュ気圧計BME280を国立天文台水沢(岩手県奥州市水沢区)に移設し、超伝導重力観測[13, 14]に使用されている横河電機製の円筒振動式気圧計F452との並行連続観測を開始した。また、風間はオムロン気圧計2JCIE-BUを新たに購入し、ボッシュ気圧計BME280と同様に国立天文台水沢に設置した。今後は3台の気圧計によって1 Hzの気圧連続観測を継続し、各気圧計の精度・確度・周波数応答などを検証する予定である。

6 補足：各気圧センサーの観測精度公称値に関して

本稿ではオムロン製のUSB型環境センサー2JCIE-BUを「オムロン気圧計」と呼称した。しかし、このデバイスは温度・湿度・加速度といった複数の物理量を測定することが可能であり、各センサーを1つの回路上に搭載した機構になっている。新規購入した2JCIE-BUを分解したところ、気圧センサーの上面にはPB2Eと記載されており、これはオムロン製の気圧センサー2SMPB-02Eを意味しているものと考えられる。この気圧センサー2SMPB-02Eのデータシートには、絶対圧力の精度は ± 0.5 hPa、相対圧力の精度は ± 0.039 hPaと記載されている。

一方、ボッシュ製の気圧センサーBME280のデータシートには、絶対圧力の精度は ± 1.0 hPa、相対圧力の精度は ± 0.12 hPaと記載されている。このように、データシートの公称値を比較する限り、ボッシュBME280よりもオムロン2SMPB-02Eの方が高確度・高精度のようである。また、本稿では「2つの気圧計の気圧差のうち0.884 hPaは標高差で説明できない」「2022年1月15日における2つの気圧計の気圧差は ± 0.1 hPa程度のばらつきがある」と述べてきたが、これらは主にボッシュBME280側の系統誤差・ランダム誤差によって説明できるかもしれない。

参考文献

- [1] Otsuka (2022): Visualizing Lamb Waves From a Volcanic Eruption Using Meteorological Satellite Himawari-8. GRL. <https://doi.org/10.1029/2022GL098324>
- [2] Watanabe et al. (2022): First Detection of the Pekeris Internal Global Atmospheric Resonance: Evidence from the 2022 Tonga Eruption and from Global Reanalysis Data. JAS. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-22-0078.1>
- [3] Kubota et al (2022): Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption. Science. <https://doi.org/10.1126/science.abo4364>
- [4] 加藤・風間 (2023): 2022年トンガ HTHH 火山に伴う長周期信号の CEORKA 強震観測網における観測. JpGU2023, SSS07-05.
- [5] Takamori et al. (2023): Ground strains induced by the 2022 Hunga-Tonga volcanic eruption, observed by a 1500-m laser strainmeter at Kamioka, Japan. EPS. <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01857-w>
- [6] Imanishi (2022): Inertial effects due to eruption-induced atmospheric disturbances identified by superconducting gravimeter observations at Matsushiro, Japan. EPS. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01615-4>
- [7] Heki (2022): Ionospheric signatures of repeated passages of atmospheric waves by the 2022 Jan. 15 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption detected by QZSS-TEC observations in Japan. EPS. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01674-7>
- [8] 風間 (2020): 可搬型相対重力計を用いた重力連続観測: システムの概要およびラコスト重力計 G680 による観測例. 北海道大学地球物理学研究報告. <https://doi.org/10.14943/gbhu.83.9>
- [9] Kazama (2023): Continuous data of air temperature, relative humidity, and air pressure collected at Kyoto University in January 2022 [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8098323>
- [10] 鈴木ほか (2022): 見守りシステムに利用される環境センサの地球物理学的情報計測への応用. JpGU2022, MGI35-P10.
- [11] 小田・風間 (2023): LaCoste 型相対重力計の重力連続観測で検出されたトンガ火山噴火の気圧変動に伴う重力変化. JpGU2023, SGD01-P03.
- [12] International Organization for Standardization (1975): Standard Atmosphere. ISO 2533:1975.
- [13] Kazama et al. (2012): Gravity changes associated with variations in local land water distributions: observations and hydrological modeling at Isawa Fan, northern Japan. EPS. <http://dx.doi.org/10.5047/eps.2011.11.003>
- [14] Tamura et al. (2023): Postseismic gravity changes after the 2011 Tohoku earthquake observed by superconducting gravimeters at Mizusawa, Japan. Submitted to EPS. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2740378/v1>