

IoT による室内環境変化のリモートセンシング

鈴木 臣（愛知大学地域政策学部）

深沢圭一郎（京都大学学術情報メディアセンター）

村井 孝子（純真学園大学保健医療学部）

要旨

近年のIoT技術の発展により、計測機器の利便性が飛躍的に高まり測定データが様々な場面で利用されるようになってきた。特に、大量のデータが安定的に取得できる環境は、長期のモニタリングにおいて極めて有効である。我々はIoTを使ったセンサによって居室環境（気温、湿度、気圧、照度、騒音、TVOC濃度、CO₂濃度）を常時観測し、データをリアルタイムでモニタし解析するシステムを開発した。福岡県下の介護福祉団体の協力のもと、介護施設や高齢者家庭で実証実験をおこなった結果、環境の変化からは居住者の生活パターンを把握することができ、起床・就寝や外出など基本的な行動の推定も可能であった。また、2022年1月15日に発生したトンガの海底火山噴火に伴う明瞭な気圧変動も観測された。今後は装置を多地点で展開することによって、地球物理学分野での活用や理科教育にも貢献できると考えられる。

キーワード：IoT, センサ, リモートセンシング, 環境測定, Raspberry Pi

1. はじめに

「モノのインターネット」であるIoTは近年急速に実用化されている。従来の情報端末だけでなく、さまざまな「モノ」がインターネットにつながることによって、業務のコスト削減と生産性の向上が期待できる。また、大量のデータが蓄積されていくことで更なる効率化が図られることになる。すでに多くの企業でAIを用いたビッグデータの解析が進められており、IoT利用の多様化によってデータ自体の付加価値も高まっている。一般

家庭においても、スマートLEDやスマートロックが普及しており、IoTによる「快適な生活」が実現している。AIとIoTによる経済効果は2016年と比較して2030年に実質GDPを132兆円押し上げると推測されており（総務省、2017）、今やIoTは社会基盤を支える重要な要素といえる。

『令和3年度版情報通信白書』（総務省、2021）では、今後のIoTデバイス数の高成長が見込まれている分野として、医療（デジタルヘルスケア）、消費者、産業用途（工場、インフラ、物流）、

自動車・宇宙航空が挙げられている。特に、医療現場においては、機器の動作の監視、患者のリアルタイムなデータの取得において恩恵が大きく、医療現場で使われるIoTはIoMT(Internet of “Medical” Things)とも呼ばれる。IoT(あるいはIoMT)は、医療従事者の慢性的な不足と解消につながる実用的かつ有効な手段と考えられている。

2007年に超高齢化社会に突入した日本においては、介護問題も並行して対応しなければならない。特に認知症は、介護が必要となった原因のトップであり(内閣府, 2022)、患者は増加の一途を辿っている。内閣府(2017)の報告では、2025年には65歳人口の5人に1人が認知症になると予測されている。また、在宅介護においても、家族の介護負担が介護離職といった深刻な社会問題に発展し

ている。

我々は、介護者の負担軽減を目的として、非接触の環境センサを高齢者(特に認知症患者)の見守りシステムとして活用するシステムを開発した(深沢ほか, 2022; 村井ほか, 2021; Murai et al., 2022)。このシステムでは、環境センサが対象者の室内環境を測定し、IoT機器を通してサーバにデータを転送することで準リアルタイムな居室環境変化の把握と対象者の行動認識、室内の最高・最低気温の予測をおこなっている。

本稿では、上記の見守りIoTシステムの紹介と、得られたデータの地球物理学的計測への応用についての展望について述べる。

2. 見守りシステム

図1に見守りシステムの概要を載せ

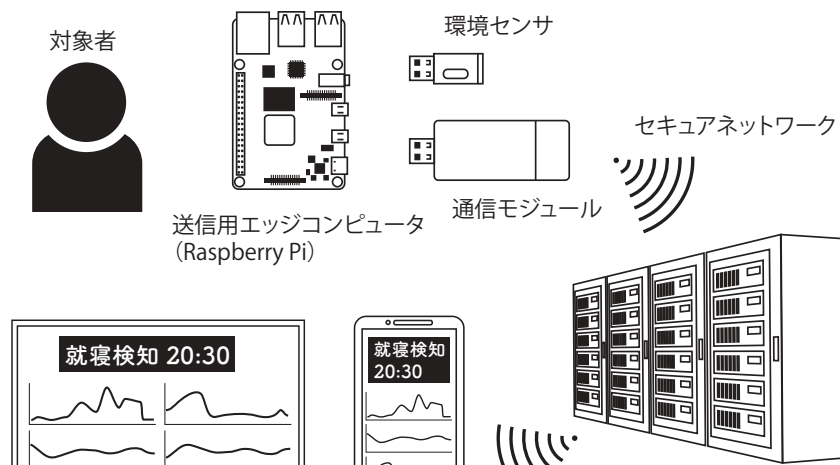


図1 見守りシステムの概要。

る。計測系は、環境センサ（オムロン 2JCIE）、送信用エッジコンピュータ（Raspberry Pi 3 Model B）、および通信モジュールから成る。すべて比較的安価な商用品で構成されているため入手性が良く、故障からの復帰（データの連続性）の面でメリットが大きい。環境センサは、気温、湿度、気圧、照度、騒音、TVOC濃度、CO₂濃度を測定できる。時間分解能は任意に設定することができ、本システムにおいては基本的に5分間隔でサンプリングしているが、対象によって1分間隔で運用している物もある。センサで得られた各種の測定データはBluetooth LE経由で、エッジコンピュータに送信され、暗号化された後、送信モジュールによってサーバに転送され日毎のCSV（Comma-Separated Values）ファイルとして格納される。またサーバでは、測定データを基に対象者の行動の認識が自動でおこなわれ、データの可視化と行動推定結果が指定された受信端末に表示される。

図2に実際の測定結果の例（2021年7月3日：5分分解能）を載せる。5：15あたりにエアコン（冷房）が作動し気温が低下している様子が見られる（図2a）。測定される湿度（図2b）は、相対湿度であるため

$$(\text{相対湿度}) = (\text{水蒸気量}) / (\text{飽和水蒸気量})$$

の関係式、および、Tetens（1930）の式

$$(\text{飽和水蒸気量}) = 6.1078 \times 10^K$$

$$K = 7.5 \times (\text{温度}[\text{°C}]) / ((\text{温度}[\text{°C}]) + 237.3)$$

から、ある閉じた空気塊で考えると、温度が高く（低く）なると、湿度が低下（上昇）する。図2においても、冷房を作動させたことによる強制的な室内温度の低下に伴って湿度が80%近くまで上昇している。ただし12：00以降は気温変化を伴わない湿度増加が見られるため、気

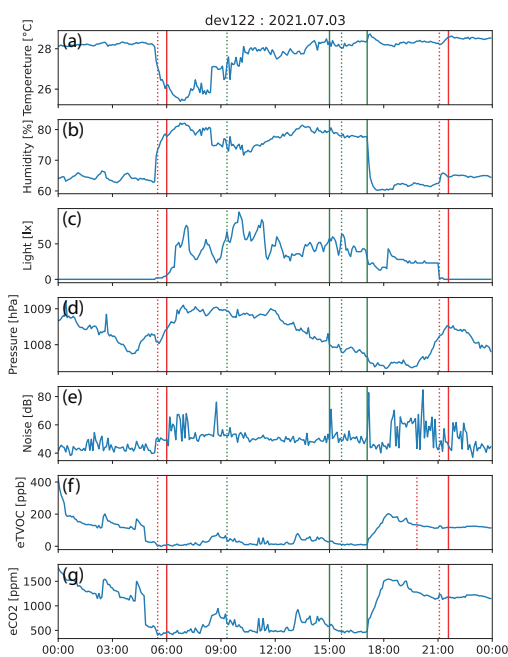


図2 測定結果の例。2021年7月3日における (a)気温, (b)湿度, (c)照度, (d)気圧, (e)騒音, (f)TVOC濃度, (g)CO₂濃度。時間分解能は5分。赤および緑の破線と実線で囲まれた区間はそれぞれ自動判定された起床・就寝および外出の時間を示す。

圧低下(図2d)を考慮すると、降雨があったと推測される。このように、室内環境の変化は気象変化だけでなく対象者の行動によっても顕著に変わることがわかる(行動推定については後述する)。

なお、使用した環境センサには VOC(揮発性有機化合物)センサが搭載されているものの、簡易的な物であるためガス種までは判定できず、VOCガスの総量換算値(eTVOC)として算出される(図2f)。さらに二酸化炭素濃度(図2g)は、測定されたeTVOCから算出される換算値(eCO₂)である。これらのガス測定値は、人の密集、空気の澁み、換気の目安として使用できると考えられる。

装置の動作確認やイベントの発見、研究者間での情報共有のために、サーバ上のデータをウェブブラウザでプロットできる環境も整えている。PythonのWebフレームワークのひとつであるBottleを使用して、描画ライブラリのPlotlyでプロットを作成することで、ユーザ側が任意の装置、日付・時間のデータをインタラクティブに確認することが可能になっている。

図3に一例を示す。デバイス番号と日付を入力フォームに指定すると結果のプロットが表示される。プロットにマウスオーバーすることで各測定データの値が表示され、横軸を任意の時間幅に変更することも可能である。そのため、データの特徴的な変化の時間とその値をプロットから直接確認することができる。ま

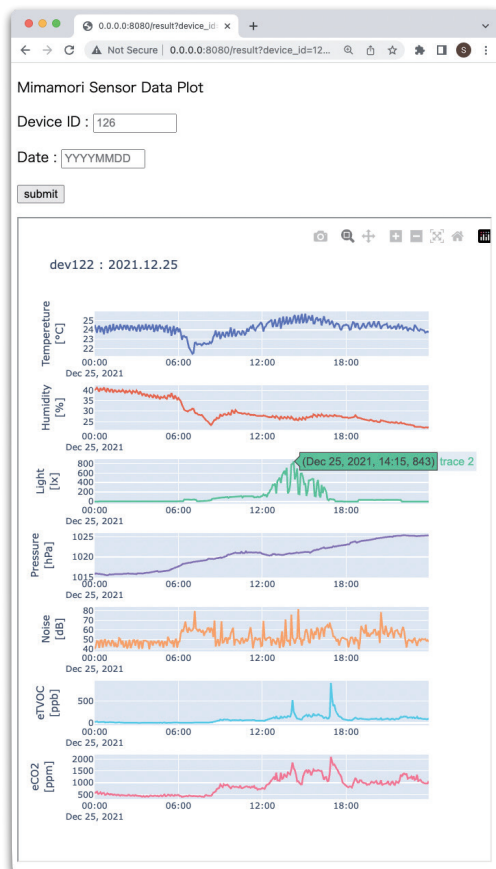


図3 Bottle と Plotly による測定結果のウェブ表示。2021年12月25日の例。

た、複数の日付のデータを重ねて表示する機能も実装している(図4)。これは、対象者の通常の生活パターン(おおよそ、何時くらいに起床し、何時くらいに就寝する傾向にあるのか)を把握する際に有用である。なお、曜日指定(図4上部のDOWウィンドウで指定)も可能になっている。この機能は、特定の曜日におこなわれる行動(通院やデイケアなどの外出)と居室環境の変化を比較する場合に用いる。

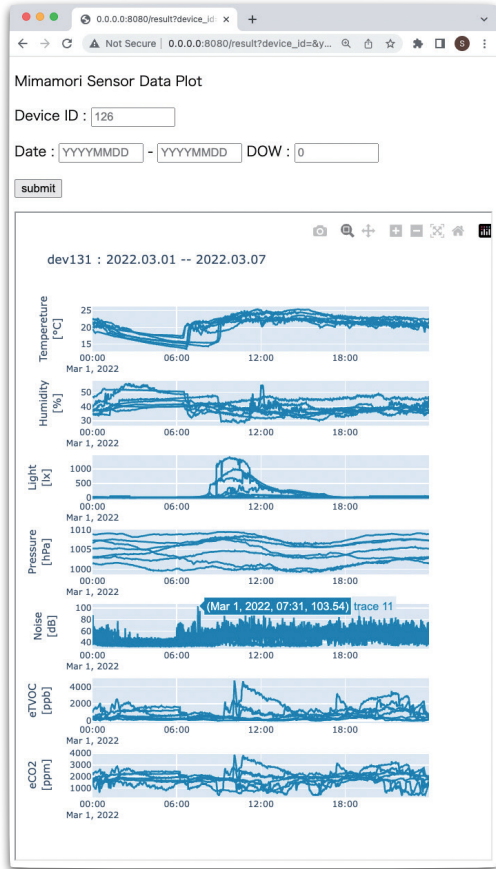


図4 ブラウザ上で2022年3月1日～3月7日（1週間分）のマルチプロットを表示。

3. 行動推定

前節で示したように、室内環境は気象だけでなく、居住者の行動によっても大きく変化する。特に、手動でエアコンを操作する場合は、気温の変化によって居住者の安否（エアコンが操作できる状態にあること）が確認でき、さらに照度や騒音の変化からは対象者の起床、就寝、外出といった基本的な行動を推定するこ

とが可能である。

図2の赤線は対象者の起床と就寝（破線と実線の間で行動が起こったと判定）の時間を、緑線は対象者の外出時間（破線から実線まで）を自動で推定した結果である。部屋の照明が点けられ（照度が上がる）、活動を始めた（騒音が大きくなる）タイミングで「起床」と判定し、逆に部屋の照明が消え、騒音下がった状態が続くと「就寝」と判定される。また、部屋の騒音が小さい状態が60分経過した際に「外出」の判定となる。具体的な判定は、ある時刻 t において以下の条件を満たす時である。

〈起床〉

$$m_I(t-2\Delta t:t-\Delta t) + \sigma_I(t-2\Delta t:t-\Delta t) < m_I(t-2\Delta t:t) + \sigma_I(t-2\Delta t:t)$$

かつ

$$m_L(t-2\Delta t:t-\Delta t) + \sigma_L(t-2\Delta t:t-\Delta t) < m_L(t-2\Delta t:t) + \sigma_L(t-2\Delta t:t).$$

ここで、 $m(a:b)$ および $\sigma(a:b)$ は、時刻 a から時刻 b までの平均値と時刻 a から時刻 b までの標準偏差を表し、添字の I と L はそれぞれ照度と騒音を示す。

〈外出〉

$$m_L(t-2\Delta t:t-\Delta t) < m_L(t-\Delta t:t) + \sigma_L(t-\Delta t:t).$$

〈就寝〉

$$m_I(t-2\Delta t:t-\Delta t)+\sigma_I(t-2\Delta t:t-\Delta t) \\ < m_I(t-2\Delta t:t)+\sigma_I(t-2\Delta t:t)$$

かつ

$$m_L(t-2\Delta t:t-\Delta t)+\sigma_L(t-2\Delta t:t-\Delta t) \\ < m_L(t-2\Delta t:t)+\sigma_L(t-2\Delta t:t).$$

なお、図2の例では、 $\Delta t=30$ 分として判定した。実際に装置を設置したある対象者の20日間の行動の自動判定の成功精度は、起床が90%、就寝が45%、外出が80%であった。就寝を除き、おおむね高い精度で行動を推定できているといえる。行動推定に使用されるデータは、あくまでも居住空間の環境であり、対象者そのもののデータではないため、対象者のプライバシー侵害は、カメラ映像やウェアラブル装置の解析と比較すると極めて限定的であるといえる。さらに判定精度を向上させるためには、対象者の行動や室内環境の詳細を学ぶ必要があると考えられる（深沢ほか、2022）。

また、通常的生活パターンと異なる行動（起きない、留守が続く、あるいは行動がない、など）や、特定の行動（トイレに行く、など）が検知された場合、あるいは室内の高温が予測される場合は、LINE経由で自動的に介護者に通知を送ることで速やかに対応を促す環境も構築済みである。

4. 地球科学的計測への応用

2022年1月15日04:10 UTC (13:10 JST) 頃にトンガの海底火山 (Hunga Tonga-Hunga Ha'apai) の大規模噴火が発生し、それに伴って生じた急激な気圧変化が地球規模で伝搬した。日本各地においても1月15日20:40 JST 頃に、気象庁の地上気圧計で2 hPa 程度の気圧変化として観測されている。

Otsuka (2022) は、日本の気象衛星「ひまわり8号」の水蒸気画像において噴火直後から1週間に渡って全球を周回するラム波が同心円状に広がっていく様子を明瞭に捉えた。ひまわり8号の水蒸気画像に見られたラム波が日本に到達した時刻と変動量は、地上気圧計の測定とよく一致しており、噴火に伴うラム波の伝搬が地上気圧の変化を作ったことが示された。

また、Watanabe et al. (2022) は、ウェザーニューズ社が日本で展開している気象センサネットワーク (ソラテナ) の気圧計アレイデータをから、2 hPa の気圧上昇をもたらしたラム波から2時間遅れで到達したペケリス波による0.1~0.2 hPa の気圧低下を捉えた。これらの噴火起源の大気波動の気圧変化が海面変動に作用したことが示唆されている。

我々の環境センサにおいても、2022年1月15日20:40に明瞭な気圧上昇(変化量は約1.5 hPa)が観測された(図5a)。このセンサは京都大学構内(35.0°

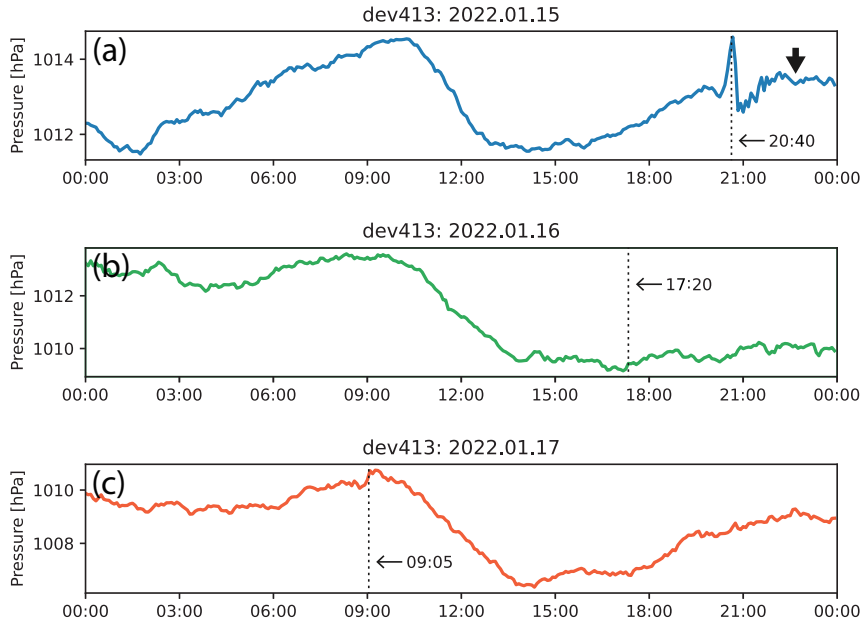


図5 京都で観測された (a)2022年1月15日, (b)2022年1月16日, (c)2022年1月17日の気圧変化。

N, 135.8° E) に設置されており, 噴火した火山 (20.5° S, 175.8° E) との距離は約 8018 km である。この急激な気圧変化は噴火から7時間25分後であることから, 気圧変化をもたらしたラム波の伝搬速度は 300 ms^{-1} と算出できる (ただしセンサ時間分解能は5分である)。この速度は, Otuka (2022) のひまわり8号の結果 (平均 310 ms^{-1}) とほぼ等しい。また, 地上の音速 (約 340 ms^{-1}) よりもやや遅いというラム波の特徴とも一致する。22:40 (ラム波到着の2時間後) には, ペケリス波と考えられる 0.2 hPa の気圧低下も見られた (図5aの太矢印で示した変化)。

さらに, 火山噴火に伴って同心円状に広がるラム波が, 地球の反対側から到達したと考えられる変化が1月16日

17:20 (気圧上昇: 約 0.2 hPa) に (図5b), 1月15日に日本を通過した後に地球を一周して再来した波と考えられる変化も1月17日09:05 (気圧上昇: 約 0.7 hPa) に確認することができた (図5c)。これらの変化は1月15日に到達した第1波と比較すると, 伝搬距離が長いこと減衰しているものの, 安価な気象センサでも火山噴火に伴うラム波の伝搬の様子を捉えることに成功している。

図6に福岡市および北九州市のセンサで観測された2022年1月15日の気圧変化を載せる。すべてのシステムで, 20:55前後に明瞭な $1.5\text{--}2.0 \text{ hPa}$ 程度の気圧上昇が見られた。それぞれのセンサで観測された気圧変化の到達時間差を計算することで, 日本を通過するラム波の波面を

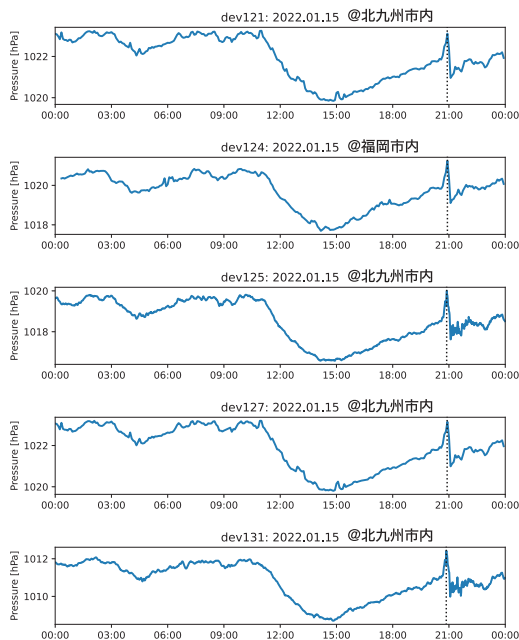


図6 福岡市内および北九州市内に設置した5つのセンサで観測された2022年1月15日の気圧変化（点線がラム波到達時刻）。

描くことも可能である。ただし、これらのセンサは見守りシステムとして運用中であり、対象者のプライバシー保護の理由で位置情報（個人の特定につながる自宅や施設の場所）を得ることを禁じているため、水平構造を議論することはできない。

5. おわりに

我々の研究グループでは、IoTと環境センサを利用した見守りシステムを開発・運用している。環境センサによって室内環境（気温、湿度、気圧、照度、騒音、

TVOC濃度、CO₂濃度）を測定し、データはIoT機器を経由してサーバへ転送される。測定値は逐次的に自動で解析され、対象者の行動推定の結果を準リアルタイムに提供することに成功している。

装置は安価であり非接触かつ自律的な測定であるため、大型設備やウェアラブル装置と比較して、導入コストが抑えられ、対象者および介護者への精神的・身体的負担の軽減につながると期待される。システム自体も、堅牢性が高くメンテナンスが容易になるように設計しており、安定して長期間に渡り大量のデータを取得できるというIoTの特性が最大限に活かされているといえる。

また、環境センサでは2022年1月15日にはトンガの海底火山噴火に伴う気圧変動も観測された。また、地球の反対側から回り込む波動や再来波による微小変化についても認められた。到達時間や変動量は、他の計測とおおむね一致しており、地球科学計測への活用も十分に可能であることが示された。

今後は、見守り以外の用途でも設置を協力してもらい、高い時間分解能（例えば1分や30秒など）で測定するシステムを多地点で展開することでより有用な観測体制が確立できると考えられる。これらの測定は、オープンデータ化（参加者は他者のデータを自由に解析できる）することで、さらに多くのデータ集積される環境となるであろう。特に、中学・

高校に設置することが高密度ネットワーク観測網の構築には非常に有効である。台風接近に伴う気圧変化や、センサに搭載されている3軸加速度計による地震センシング、農作物の育成環境の管理など理科教育およびデータ駆動型の情報科学教育への活用も見込むことができると考えられる。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 (JP20K21739, JP18K03728) および純真学園大学共同研究費助成により実施した。データの取得は、福岡市役所保健福祉局、社会福祉法人敬愛園アットホーム福岡、社会福祉法人福岡市民生事業連盟ケアタウン茶山、株式会社ライフケアひかりの協力によるものである。ここに記して感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 総務省:『平成29年版情報通信白書』, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h29/index.html>, 2017 (参照日:2022年11月14日).
- 2) 総務省:『令和3年版情報通信白書』, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r03/index.html>, 2021 (参照日:2022年11月14日).
- 3) 内閣府:『令和4年版高齢社会白書』 <https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2022/html/zenbun/index.html>, 2022 (参照日:2022年11月15日).
- 4) 内閣府:『平成29年版高齢社会白書』 <https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2017/html/zenbun/index.html>, 2017 (参照日:2022年11月15日).
- 5) 深沢圭一郎, 鈴木臣, 村井孝子: 非接触センサとIoTを用いた自律的遠隔見守りシステムの研究開発, 情報処理学会研究報告, 2022-IS-159, Vol. 7, pp. 1-6, 2022.
- 6) 村井孝子, 深沢圭一郎, 鈴木臣: 環境センサを用いた要介護者療養環境および行動の認識・予測手法の検討, 第9回看護理工学会学術集会, 2021年10月22日-11月22日.
- 7) Murai T., K. Fukazawa, S. Suzuki: A Study on Predictive Detection of Excretion in Elderly Requiring Care Using Video Internet of Things, the 25th East Asia Forum of Nursing Scholars (EAFONS) Conference, 21-22 April 2022.
- 8) Tetens, O.: Uber einige meteorologische Begriffe., Z. Geophys, 6, 297-309, 1930
- 9) Otsuka, S.: Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8, Geophys. Res. Lett., 10.1029/2022GL098324, 2022.
- 10) Watanabe, S., K. Hamilton, T. Sakazaki, and M. Nakano: First Detection of the Pekeris Internal Global Atmospheric Resonance: Evidence from the 2022 Tonga Eruption and from Global Reanalysis Data, J. Atmos. Sci., 79, 10.1175/JAS-D-22-0078.1, 2022.