

環境センサを用いたタクシー車室内における 感染症リスク評価に関する一検討

牛島 秀暢^{1,a)} 西山 勇毅^{1,b)} 小野翔多^{1,c)} 瀬崎 薫^{2,1,d)}

概要：COVID-19 の感染拡大により、公共空間や飲食業などの対面サービスにおいて、持続的かつ安全で低コストな感染症への対策が求められている。これまでは、密閉、密集、密接の三密と呼ばれる状態が感染リスクがあるとされ、換気の徹底などが推奨されてきたが、その効果を定量的に計測する事は極めて困難である。本研究では、タクシーという密閉空間の状態を複数の環境センサを用いて計測し、感染症リスクを定量的に分析する。

キーワード：車内環境センシング, 二酸化炭素, 感染症対策

1. はじめに

新型コロナウイルス感染症（COVID-19）は世界中で大流行し、人々の生活に深刻な影響を与えている。世界保健機関（World Health Organization: WHO）の報告によると、2020年10月30日まで世界中で4千万人以上がCOVID-19に感染し、100万人以上がCOVID-19によって死亡している [1]。COVID-19は、新型のコロナウイルスであるSARS-CoV-2に感染することで引き起こされる感染症で、接触感染または空気感染によって感染が拡大する。WHOや厚生労働省（日本）は感染対策として、マスクの着用や手洗い・消毒、不特定多数の人々が密接かつ密閉された空間に密集する「三密」環境を避けることを強く推奨している [2]。

COVID-19の感染経路の一つである空気感染は、エアロゾルと呼ばれるウイルスを含んだ空气中に浮遊する直径数 μm の粒子を人が吸収することで発生する [3]。エアロゾルは、空气中に数分から数時間浮遊すると言われており、感染症を予防する上で大きな課題となっている。特に、鉄

道やバス、タクシーなどの公共交通は不特定多数の乗客が密接かつ密閉した空間に密集する、いわゆる三密という条件が揃いやすいことが一般に知られている。こうした滞留する空気量が限られ、ウイルスを含んだエアロゾルが滞留しやすい屋内や車室内でのリスク評価と感染予防は挑戦的な研究課題である。これまでも、公共空間における感染症のリスク評価やエアロゾルの屋内測位推定も研究は行われてきたが、現状は定量的なリスク評価指標は存在していない [4]。

エアロゾルの滞留を防ぐためには、定期的な屋内空気の換気が必要である。従来、屋内空気の交換度合いを図るためにCO₂濃度を測定する研究が行われている。文献 [5] では車両における外気の分散型センシングにより、様々な条件下でCO₂濃度を路側できる論理式を導き出した。また、文献 [6] ではCOVID-19感染のリスクをCO₂濃度で評価している。

空気を通した感染経路として、比較的密閉された空間でかつ、人々の交換が頻繁に行われる交通機関としてタクシーが挙げられる。タクシーでのエアロゾル滞留や空気の交換を測定し定量的に評価することは今後の感染症対策の一助となると考えられる。そこで本研究では、タクシーという密閉された公共空間における空気環境をセンシングデバイスによって測定し、感染症リスクを定量的に分析する。

¹ 東京大学 生産技術研究所
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

² 東京大学 空間情報科学研究センター
Center for Spatial Information Science, The University of Tokyo

a) hidenaga.ushijima@mcl.iis.u-tokyo.ac.jp

b) yuukin@iis.u-tokyo.ac.jp

c) shota@mcl.iis.u-tokyo.ac.jp

d) sezaki@iis.u-tokyo.ac.jp

2. 関連研究

清潔な室内環境は、人間の健康的な生活にとって重要な要素である。これまでに、感染症リスクの低減や安全管理など様々な視点で研究が行われ、室内環境を対象にした室内環境モニタリング手法が提案されている。

2.1 密閉空間における感染症に対する感染リスク

これまでも結核やインフルエンザなどの飛沫やエアロゾルを感染経路とする感染症に対して、密閉空間での感染リスクの高さは論じられてきた。FluSense では、病院の待合室という密閉空間におけるインフルエンザの感染リスクに着目した研究である。この研究では、赤外線カメラを用いて得られた待合室内部の人数とマイクを用いて収集した咳の数から一人一分あたりの咳の数をモニタリングする。加えて、咳の音から様々な感染症の特徴を分類し、各エリアごとの指標を提示する事を可能にした [7]。更に、Workman らの研究では、エアロゾルの拡散をシミュレーションし、空間内部での飛沫の拡散状況を明らかにしている [8]。

また、公共交通という密閉空間に着目した研究も数は極めて少ないが存在する。Andrews らの研究では、南アフリカにおける結核の感染と公共交通の繋がりを調査している [9]。

2.2 CO₂ 濃度を用いた屋内環境モニタリング

一般に、室内の CO₂ 濃度は人体の呼吸によって影響を受けることが古くから知られている。したがって、CO₂ 濃度は屋内空気の交換の度合いを測る指標として以前から研究されてきた。中村らは、二酸化炭素センサを用いて鉄道車内の混雑度を測定し、鉄道利用者の移動行動を認識した [10]。また、大野らは、設置型のセンサではなく、ユーザ自身のデバイス情報を提供してもらうという参加型センシングを提案し、電車内部で実験を行った。その研究によると、ユーザの体に装着した CO₂ センサと加速度センサから大まかな混雑度と歩きの姿勢を推定する事ができる [11]。

2.3 自動車車室内の空気質の評価

自動車の車室は、複数人で長時間極めて狭い空間を共有するという点において、極めて特異的である。通勤通過学や営業用途、ドライブなど車内で過ごす時間はある種の生活空間とも言える。したがって、車内の空気環境は建築物とほぼ同等の空気室レベルが要求され、自動車メーカーは、厚生労働省のシックハウスガイドラインの基準を社内基準として考え、これを守る事に取り組んでいる。一般に、自動車には、外気導入と内気循環の機能が存在し、自動車メーカーは外気導入を推奨している [12]。岩下らは自動車の走行状態及び停車状態で車室内のオゾン、粉塵、超微粒子の

濃度を全外気導入モード、再循環換気モードの2つの条件で測定し、CO₂ 濃度と再循環運転時は15分で3800ppmに達したと報告している [13]。また、Barnes らは香港における自家用車の空気質の状態を PM_{2.5} や CO₂、最近や揮発性有機化合物など注目して測定を行った。この研究では揮発性有機化合物の濃度は車両の使用年数に比例して増加傾向であると述べている。また、全体の96%の車両が香港環境保護局が指定する室内空気環境レベルを超えている [14] と主張している。一方、Grady らの研究では、運転条件や空調のファンの回転数設定、また空調の再循環設定により、車内 CO₂ 濃度を目標値 2000ppm 以下に制御することが可能になったと報告している [15]。

2.4 問題意識

これまでも密閉空間での感染症罹患リスクを評価した研究は多くあり、中でも CO₂ の濃度を環境モニタリングに利用した研究は多い。しかし、多くの研究は学校における教室等の建築物が中心であり、タクシーという不特定多数が利用し環境が変化し続ける密閉空間を対象にした研究は少ない。

加えて、2020年初頭から COVID-19 の世界的な流行が続いており、今後も長期的に感染リスクを低減しつつ経済活動を継続する必要がある。これまでも、画像やなどを用いた感染症の罹患リスクに関する研究は行われてきたが十分ではない。飲食業やイベントなど多くの人が集まる場面において、簡便でかつ安価に、感染リスクを検査する方法が求められている。本研究では、最も密接度が高い公共交通であると考えられるタクシーにおける COVID-19 などの感染症罹患リスクに対し、CO₂ 濃度を用いる事で安価で簡便な指標を提示する。将来的には、感染リスクの上昇に伴って、ドライバーやユーザにに対し警告や周知を行い適切な対応を求めるレコメンドシステムの構築を目指す。

3. 実験

3.1 車内環境センシングシステム

本実験では、車内環境のセンシングのために以下のセンサを用いた。

- CO₂ センサ
- 気温センサ
- 湿度センサ
- 加速度センサ
- 車内カメラ（ドライブレコーダー）
- 位置情報センサ

車室内の CO₂ を測定するために、非分散赤外線方式 (NDIR) による DFRobot 社 Gravity シリーズの CO₂ センサーを利用した。このセンサは、待機中の二酸化炭素濃度を 0~5000ppm の範囲で測定が可能であり、また、温度の影響を受けにくい温度補償機能を持つ事が特徴である。

図 1(a) に示すように、上述した CO₂ センサをマイクロコンピュータ (M5Stack Gray) に接続した CO₂ センシングシステムを構築した。M5Stack の電源はシガーソケットからインバーターを経由し USB から給電した。CO₂ データは 30 秒毎に計測した。

上記 CO₂ センサに加えて、鈴木ら実装した大気情報センシング基盤 [16] を用いて、湿度と気温の記録を行った。センサキットでは、湿度・気温データとして Sensirion 社の SHT75 センサモジュールを利用している。

前述のセンサデータに加え、車内で発生したイベントを記録するために、車内の映像をドライブレコーダーを用いて記録した。さらに、スマートフォンの加速度・ジャイロセンサと位置情報センサを用いて車の動きを記録した。スマートフォンのセンサデータの記録には、オープンソースのモバイルセンシングフレームワークである、AWARE Framework の iOS 版 [17] を利用した。加速度センサは 5Hz で計測し、位置情報センサは 1 秒に一回記録した。

3.2 計測環境

本実験では、図 2 に示すタクシー専用ハイブリッド車両である、トヨタ自動車の JPN タクシーをもちいた。本車両は車室内体積が 2160*1395*1370mm である。センサは図 1 に示すように配置し、運転席と助手席の間のスペースに設置し、シガーソケットからセンサモジュールに給電した。

3.3 計測期間

初回は、2030 年 6 月 25 日 10-24 時に行った。こちらの実験では、CO₂ 濃度のみを計測した。

第二回は、2020 年 10 月 23 日 10-24 時に行い、実験中に計 18 回の乗客乗車が発生した。なお、実験中時間中にドライバーが 11:30-13:00 と 13:00-15:00 に車両から離れ昼食休憩を取っている、

4. 結果

図 3 において、12 時 37 分から 42 分にかけて 2 名の乗客が乗車している。この時、CO₂ 濃度は急峻な立ち上がりを見せている。また、13 時 16 分から 22 分にかけても 1 名の乗車があったが同様に CO₂ 濃度が急激に増加している。この 2 つの場合において降車時においてドライバーとユーザ側のドアが開いている事になり、少し遅れて CO₂ 濃度が急激に大気濃度である 700ppm 前後に近づいている事が確認できる。

同様に図 4 においても降車タイミングである 10 時 47 分、11 時 09 分、11 時 27 分の直後に急激に CO₂ 濃度が減少している。一方で、ドライバーのみが車内にいる時にも継続的な CO₂ 濃度の上昇が確認された。

なお、図 4 のにおいては 13 時 30 分以降の CO₂ 濃度デー

タが欠損している。これは、ドライバーが休憩に入った際にエンジンを切ったため、センサへの給電が止まり、データの保存が正常に行われなかったためである。

5. 考察

COVID-19 の感染拡大により、公共空間や飲食業などの対面サービスにおいて、持続的かつ安全で低コストな感染症対策が求められている。本研究では、比較的 COVID-19 の空気感染のリスクが高いと考えられる、タクシー車内を対象に社会環境のモニタリングを行った。CO₂ センサなど複数の環境センサを用いて車内環境を計測し、タクシーのイベント (乗降イベントなど) と照らし合わせ、各センサデータの変化を分析した

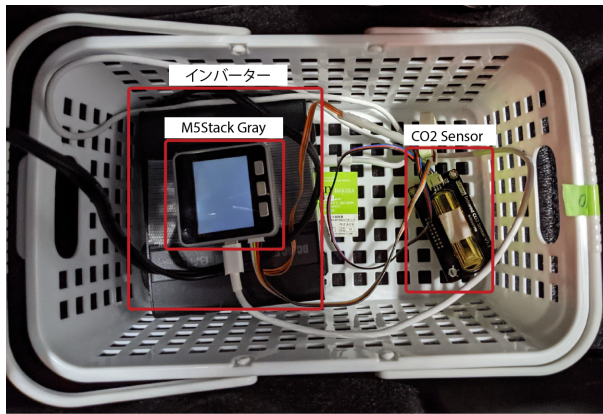
実験結果よりタクシー車室内の CO₂ 濃度は、乗客が乗車後約 5 分後には、極めて高濃度であるといえる 2000ppm に到達する事が明らかになった。これは、建築物環境衛生管理基準において定められている 1000ppm 以下という基準を大きく上回っており、ドライバーの健康管理や安全運転の観点からも定期的な喚起を行うあるいは、促す仕組みづくりが必要であると考えられる。また、COVID-19 等の感染症の感染リスクについては、乗降車のタイミングでドアが大きく開くことからある程度の換気が行われており、また乗車時間に応じてリスクが変動すると考えられる。

一方で、今回の運行ではドライバーは車内空調を使用しなかった。したがって、空調を起動し外気導入が行われた場合や、空調効率を上げるために内気循環を行った場合には、CO₂ 濃度に影響が及ぶと考えられる。また、今回は市内中心部での運行であったが、トンネルや大型トラック周囲を走行する環境下では外気導入の空気質に影響が及ぶ可能性がある。そうした外的な条件に対しても検討が必要である。

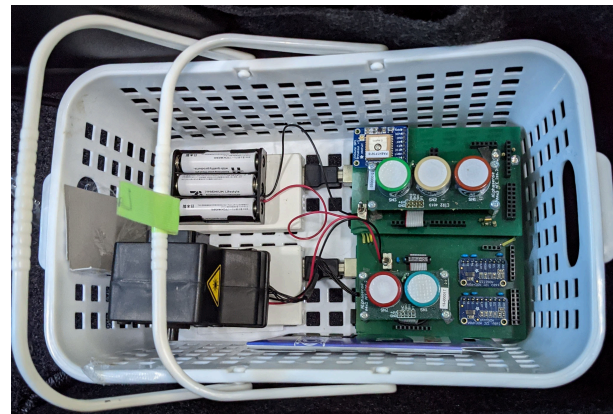
加えて、今回の測定は 6 月と 10 月という比較的温暖で、外気との温度差が大きい時期に行った。今後、冬季や夏季、梅雨などの時期は、ドライバーが行う換気の回数が減る可能性がある。したがって、継続的にデータを収集し、換気のタイミングやドライバーの特性によって変化する特徴を収集する必要があるだろう。

6. おわりに

本研究では人数に比例して CO₂ 濃度すなわち COVID-19 の感染リスクが急上昇する事がわかった。一方で、車両に搭載された空調や、窓の状態、ドアの開閉時間などに依存して大きく変化すると考えられる。自動車の CAN 通信などから空調の状態等を取得し、ドライブレコーダ画像と統合する事でより正確な車内環境の把握が実現するだろう。また、エアロゾルの拡散状況等をシミュレーションすることで、よりドライバーや乗客の感染リスクを定量的に評価できる可能性があると考えられる。今後は、車内モニタリ



(a) CO2 センサ



(b) 環境センサ [16]

図 1 センサの設置場所



図 2 トヨタ自動車 JPN タクシー

ングの結果からリアルタイムに情報を提示する事でドライバーと乗客双方に換気を喚起し、心理的安全性を担保しつつ持続的な公共交通の維持を実現を目指す。

謝辞 本研究は、AMED の課題番号 JP20he0622042, JSPS 科研費 JP 18K11274, JP20K19840, JP20H00622 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] World Health Organization (WHO): COVID-19 Weekly Epidemiological Update (2020). <https://www.who.int/publications/m/item/weekly-epidemiological-update---27-october-2020>.
- [2] World Health Organization (WHO): Coronavirus Disease. <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/advice-for-public>.
- [3] van Doremalen, N., Bushmaker, T., Morris, D. H., Holbrook, M. G., Gamble, A., Williamson, B. N., Tamin, A., Harcourt, J. L., Thornburg, N. J., Gerber, S. I., Lloyd-Smith, J. O., de Wit, E. and Munster, V. J.: Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1, *N. Engl. J. Med.*, Vol. 382, No. 16, pp. 1564–1567 (2020).
- [4] Zhang, R., Li, Y., Zhang, A. L., Wang, Y. and Molina, M. J.: Identifying airborne transmission as the dominant

- route for the spread of COVID-19, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, Vol. 117, No. 26, pp. 14857–14863 (2020).
- [5] Angelova, R. A., Markov, D. G., Simova, I., Velichkova, R. and Stankov, P.: Accumulation of metabolic carbon dioxide (CO₂) in a vehicle cabin, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, Vol. 664, No. 1, p. 012010 (2019).
- [6] Peng, Z. and Jimenez, J. L.: Title: Exhaled CO as COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities.
- [7] Al Hossain, F., Lover, A. A., Corey, G. A., Reich, N. G. and Rahman, T.: FluSense: A Contactless Syndromic Surveillance Platform for Influenza-Like Illness in Hospital Waiting Areas, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 4, No. 1, pp. 1–28 (2020).
- [8] Workman, A. D., Welling, D. B., Carter, B. S., Curry, W. T., Holbrook, E. H., Gray, S. T., Scangas, G. A. and Bleier, B. S.: Endonasal instrumentation and aerosolization risk in the era of COVID-19: simulation, literature review, and proposed mitigation strategies, *International forum of allergy & rhinology*, Wiley Online Library (2020).
- [9] Andrews, J. R., Morrow, C. and Wood, R.: Modeling the role of public transportation in sustaining tuberculosis transmission in South Africa, *Am. J. Epidemiol.*, Vol. 177, No. 6, pp. 556–561 (2013).
- [10] 友宣中村, 剛史小川, 清 清川, 治雄竹村: 二酸化炭素センサによる鉄道車内混雑度推定を用いたウェアラブル学習システムのための利用者コンテキスト認識, 電子情報通信学会技術研究報告. MVE, マルチメディア・仮想環境基礎, Vol. 107, No. 554, pp. 49–54 (2008).
- [11] 航 大野, 新一木實: 参加型センシングによる電車混雑推定方法の提案, *Proceedings of the Annual Convention of GIS Association of Japan* (2012).
- [12] 達 晃一, 内藤敏幸, 太田泰彦, 中井里史: 乗車モードにおける車室内 VOC 濃度予測, 自動車技術会論文集, Vol. 48, No. 2, pp. 497–503 (2017).
- [13] 岩下 剛: 自動車車室内の空気質の知覚に関する基礎的検討, におい・かおり環境学会誌, Vol. 42, No. 6, pp. 413–419 (2011).
- [14] Barnes, N. M., Ng, T. W., Ma, K. K. and Lai, K. M.: In-Cabin Air Quality during Driving and Engine Idling in Air-Conditioned Private Vehicles in Hong Kong, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, Vol. 15, No. 4 (2018).
- [15] Grady, M. L., Jung, H., chul Kim, Y., Park, J. K. and Lee, B. C.: Vehicle cabin air quality with fractional air recirculation, Technical report, SAE Technical Paper (2013).

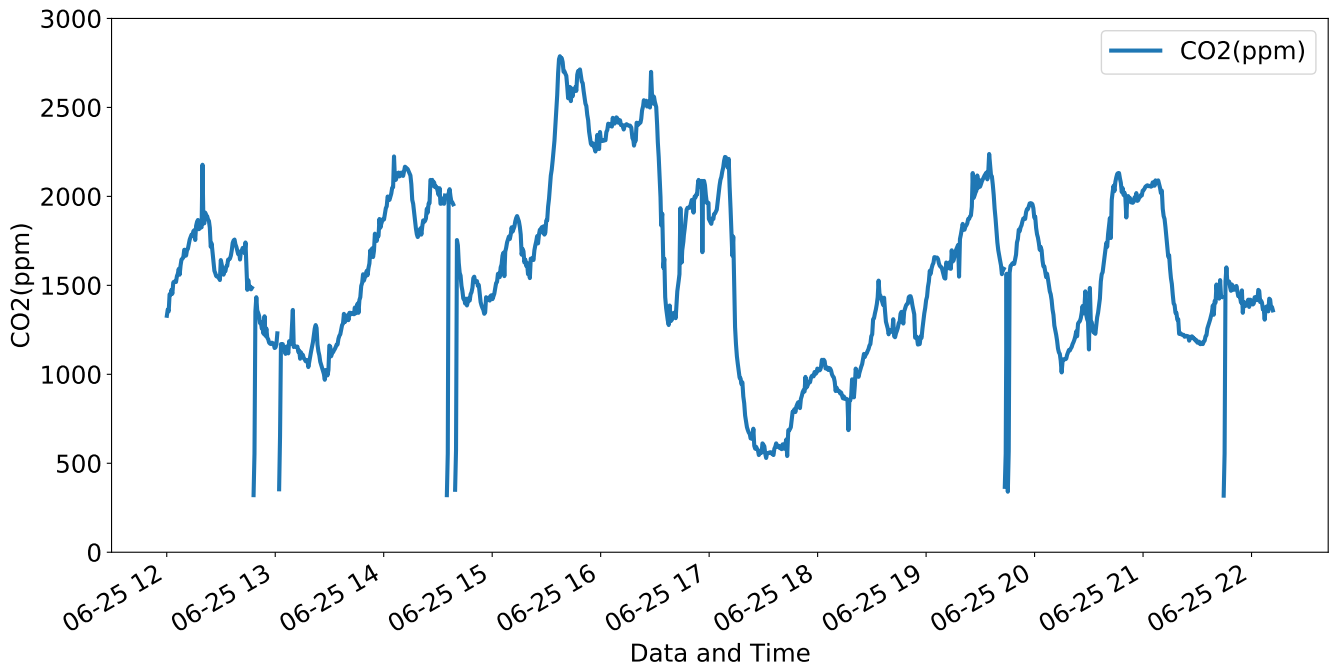


図 3 6月25日のCO2濃度の変化

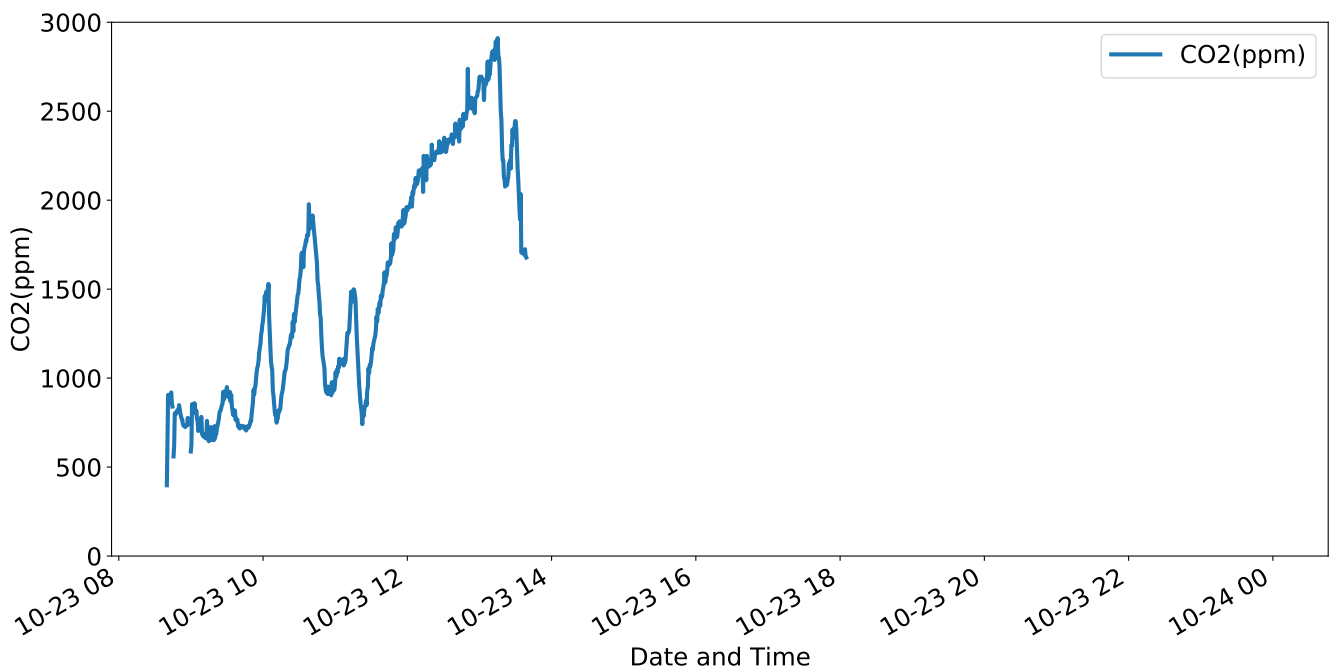


図 4 10月23日のCO2濃度の変化

- [16] 鈴木孝男, 伊藤昌毅, 瀬崎薫: 大気汚染センシングの実測データを用いた Negative Surveys の復元精度推定手法の評価, ライフインテリジェンスとオフィス情報システム (LOIS) 研究会, Vol. 116, No. 488, 電子情報通信学会, pp. 85-90 (オンライン), 入手先 (<https://www.ieice.org/ken/paper/20170302qbRj/>) (2017).
- [17] Nishiyama, Y., Ferreira, D., Eigen, Y., Sasaki, W., Okoshi, T., Nakazawa, J., Dey, A. K. and Sezaki, K.: IOS Crowd-Sensing Won't Hurt a Bit!: AWARE Framework and Sustainable Study Guideline for iOS Platform, *Distributed, Ambient and Pervasive Interactions*, pp. 223-243 (online), DOI: 10.1007/978-3-030-50344-4_17(2020).

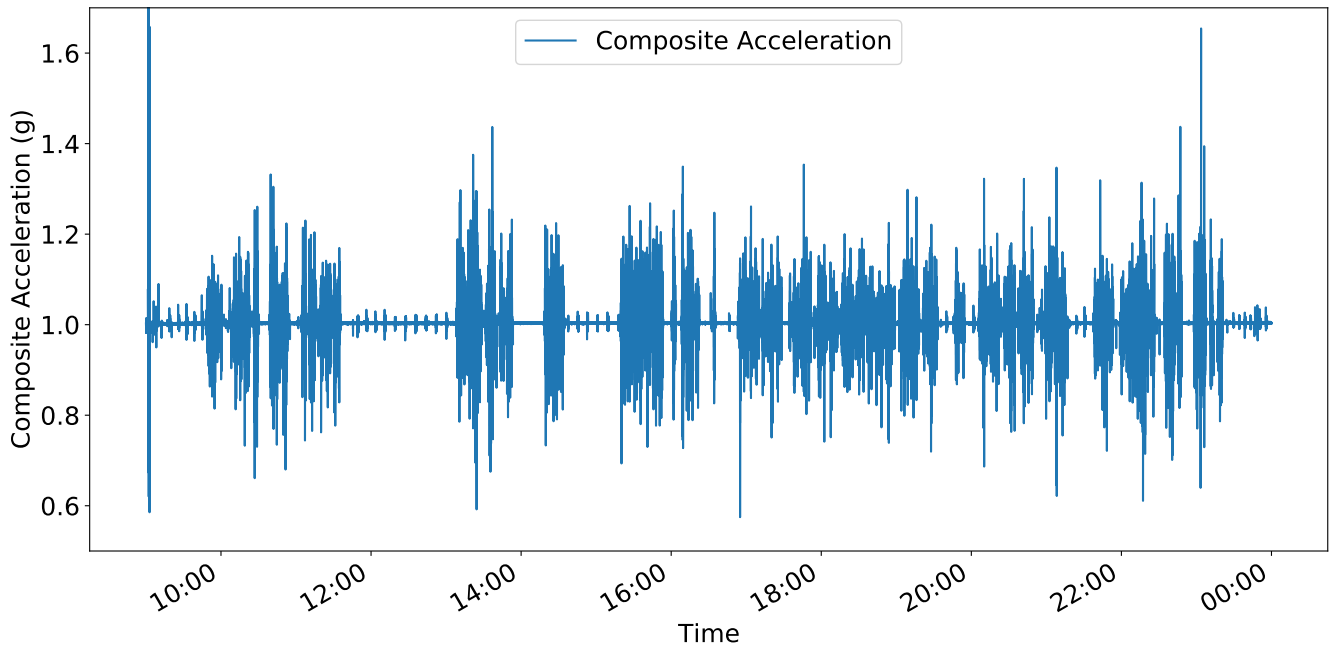


図 5 10月23日の合成加速度の変化

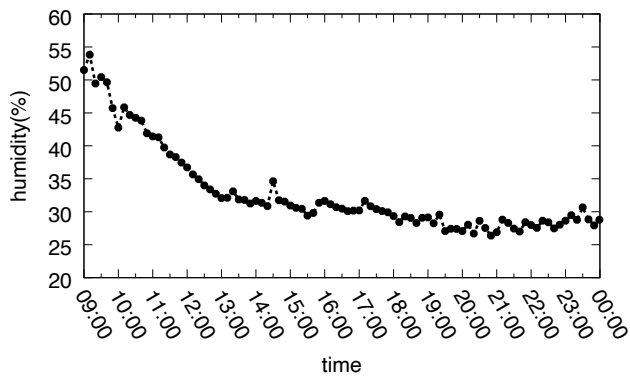


図 6 10月23日の湿度の変化

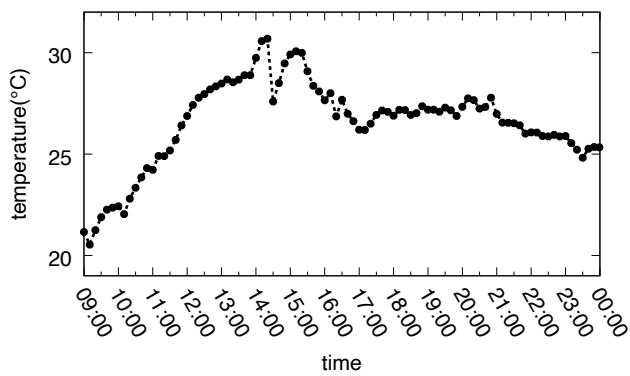


図 7 10月23日の車内の気温・湿度変化