

住宅内空気環境の改善に向けた可視化・インタラクション手法の活用に関する検討

A Study on the Utilization of Visualization and Interaction Methods for Improving Indoor Air Quality in Houses

服部 俊一^{1*} 岩松 俊哉¹ 三浦 輝久¹ 堤 富士雄¹ 田中 伸幸¹

Shunichi Hattori¹, Toshiya Iwamatsu¹, Teruhisa Miura¹, Fujio Tsutsumi¹, Nobuyuki Tanaka¹

¹ 一般財団法人電力中央研究所

¹Central Research Institute of Electric Power Industry

Abstract: The air quality in houses is often polluted by chemical substances emitted from heating, building materials, and various household goods. Nevertheless, it is difficult for residents to perceive the air pollution, which prevent them from understanding and improving the actual condition of indoor air quality. This paper introduces the result of the survey on CO₂ concentration of air quality at 24 houses, and discusses the methods to improve the indoor air quality based on the visualization of sensor data and the collaborative approach between human and machine.

1 はじめに

本稿では住宅内の空気環境実態を調査した結果を紹介すると共に、可視化手法や人と機械の協調による空気環境改善方策について検討する。

住宅内の空気は、暖房器具や建材・生活用品などから排出される化学物質により汚染されている場合がある。近年は特に住宅の高気密化の影響を受けて二酸化炭素(CO₂)や一酸化炭素(CO)、窒素酸化物(NO_x)、揮発性有機化合物(VOC)などの汚染物質に暴露されるなど、居住者の健康リスク増大が懸念される。その一方で、空気環境の悪化を人間が知覚することは困難であり、日常生活のなかで汚染実態を居住者本人が適切に把握することは難しい。

このような状況を踏まえて、建築基準法の改正により2003年7月以降に建てられたすべての住宅に24時間換気システムの設置が義務付けられた。ただし、義務化されたのは換気設備の設置のみであり、適切に換気を行っているかどうかは居住者に委ねられているのが現状である。また、2003年7月以前に建てられた住宅は設置義務化の対象外である。関西地区において、24時間換気システムが設置されている住宅を対象として行われた調査[1]では、換気システムを常時運転させている居住者の割合は全体の約3割に留まる。加えて、冬期にはその割合が低下するなど、季節の影響が大きいこともわかっている。

住宅内の換気が不足することで濃度が上昇し、有害物質が滞留していること目安となる物質としてCO₂が挙げられる[2]。実際に、オフィスや商業施設など一定面積以上の建築物においては、建築物衛生法によりCO₂濃度を1,000ppm以下に保つような換気調整が義務付けられている。CO₂濃度は人間の呼吸や燃焼を伴う器具の利用によって増加し、有害物質滞留の目安となることに加えて、高濃度の環境は思考力・集中力の低下をもたらすこともわかっている[3, 4]。さらに、高い濃度は睡眠の質や翌日のパフォーマンスに影響を及ぼすという報告も存在する[5]。しかしながら、住宅においては前述のように24時間換気システムの設置が義務化されたのみであり、濃度や換気量の確保に関する基準は定められていない。

住宅内において空気環境汚染をもたらすもう一つの要因として、石油・ガスファンヒーターなど開放型燃焼暖房器具(以下、燃焼暖房と表記)の使用が挙げられる。過去の調査事例から国内の使用率は概ね4割前後と報告されており[6, 7]、燃焼暖房の使用によりCO₂をはじめとする汚染物質の濃度が上昇することは既存調査[8, 9]によって明らかにされている。

以上のことから、住宅内の空気環境汚染に繋がる原因として、換気不足および燃焼暖房の利用という2つの要因が存在すると言える。当所においてこの2点に着目して住宅内のCO₂濃度実態を調査したところ、外気温が低下する冬季においてこれらの要因によりCO₂濃度が上昇する傾向にあることがわかった。

そこで本稿では、当所で実施した空気環境実態調査

*連絡先:(一財)電力中央研究所
〒240-0196 神奈川県横浜市長坂2-6-1
E-mail: shattori@criepi.denken.or.jp

の結果について概要を紹介する。この調査で明らかとなった状況の改善には、居住者が現状を適切に把握し、住居特性や居住者の行動・嗜好などを踏まえた上で継続的な環境改善を進めていく必要がある。そのためには可視化や人と機械の協調に基づくアプローチに加えて、主に省エネ分野で蓄積されてきた行動科学の知見を用いることが効果的と考え、これら手法の活用についても検討する。

2 住宅内空気環境の実態調査

本節では、空気環境汚染と密接に関わる物質としてCO₂に着目し、住宅内のCO₂濃度計測およびアンケート調査を行った結果について述べる。

本調査は一般財団法人電力中央研究所エネルギーイノベーション創発センターのリスク管理委員会において研究計画の審査を受け、承認を得て実施された。被験者に対しては住宅内計測をはじめとする調査実施についての同意を書面で得た。

2.1 概要

住宅内のCO₂濃度計測調査のため、24名の被験者を選定した。極度に温暖または寒冷な地域を除外するため、住宅は国土交通省の建築物エネルギー消費性能基準に用いられる地域区分[10]における5地域と6地域から選定した。

被験者は住居形態や構造、築年数がなるべく多様なパターンを持つように選定した。暖房手段についても、使用する暖房器具と空気環境汚染の関係を調査するため燃焼暖房を使用しない住宅を14戸、使用する住宅を10戸選定した。なお、燃焼暖房を利用する住宅の一部ではエアコンなど複数の暖房器具を併用している。

計測期間は秋季と冬季を含むように、2020年10月1日から2021年1月31日までの4ヶ月間とした。計測には当所で開発している「おうちモニタキット(OMK)[11]」を用いたが、標準で備えているディスプレイは除外するなど本調査に必要な最低限の構成とした。CO₂濃度計測にはフィガロ技研のガスセンサCDM7160-C00を用いており、この製品は360~5,000ppmの範囲でCO₂濃度を計測できる。

アンケート調査は2020年12月中旬から下旬にかけて実施し、換気に対する意識や季節ごとに換気をどの程度の頻度で実施しているかなどについて質問した。

2.2 計測結果

図1に、10月および12月における月ごとのCO₂濃度分布を箱ひげ図で示す。図1の縦軸はCO₂濃度、横

軸は被験者の住宅IDを表し、ID1~8は集合住宅、9~14は戸建住宅、15以降は燃焼暖房を利用する戸建住宅となっている。

図1に示した結果から、燃焼暖房を使用する多くの住宅では12月以降のCO₂濃度が3,000ppm、一部は5,000ppmに達するなど、燃焼暖房を使用しない住宅と比較して大幅に上昇していることがわかる。この結果は既存の調査事例[8, 9]と同様の傾向を示している。

一方で、ID18, 21~24などのように燃焼暖房を利用しているにも関わらずCO₂濃度が低い住宅も存在する。これはエアコンなど他の暖房器具を併用しているためと考えられるが、どの程度の割合で併用していたかによっても濃度は大きく異なる。図2は、外気温¹と住宅内のCO₂濃度について、1日毎の平均値を集計し散布図上にプロットしたものである。図2の結果から、燃焼暖房のみを利用するID20は外気温の低下する時期に1日の平均濃度が3,000ppmを超えているが、エアコンや炬燵といった非燃焼系暖房を併用するID22では1,500ppm前後に留まっている。

燃焼暖房を使用しない住宅においても、外気温の低下に伴い濃度が上昇する傾向が明らかとなった。燃焼暖房を利用しないID1~14においても12月の濃度が10月よりも高い住宅が複数存在することが図1からわかる。また、図2に示した分布からも、暖房手段を問わず外気温とCO₂濃度は負の相関にあることが読み取れる。したがって、濃度上昇の要因として燃焼暖房を使用しないID1~14では外気温低下に伴う換気量の低下、燃焼暖房を使用するID15以降ではそれに加えて暖房利用によるものと推定できる。

また、燃焼暖房を使用する住宅において、外気温と濃度の関係から燃焼暖房の使用開始時期を推定できる可能性も示唆された。図2に示したID8は外気温と濃度が概ね線形関係にある一方、ID20, 22ではいずれも外気温が一定の温度を下回った時点でCO₂濃度が非線形な変化をしていることがわかる。濃度の急激な上昇は燃焼暖房を使い始めたことを表しており、その利用タイミングはID20では外気温が15度前後、ID22では13度前後まで低下したときであると推測できる。

アンケート結果からは、換気への関心は高いものの冬季には換気頻度が低下しがちであること、関心の高さと実情は必ずしも一致しないことなどがわかった。表1はアンケートで換気への関心の有無を質問した結果で、「非常にある」「少しある」と回答した被験者は24人中20人であり、多くの被験者が高い関心を持っていることが伺える。しかし、表2の結果に示したように換気頻度は秋季から冬季にかけて低下すると回答した被験者が多い。また、換気頻度が低下しないと回答し

¹外気温は気象庁のウェブサイト(<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>, 2021/2/25アクセス)から各住宅に近い場所の気象データを取得して用いた。

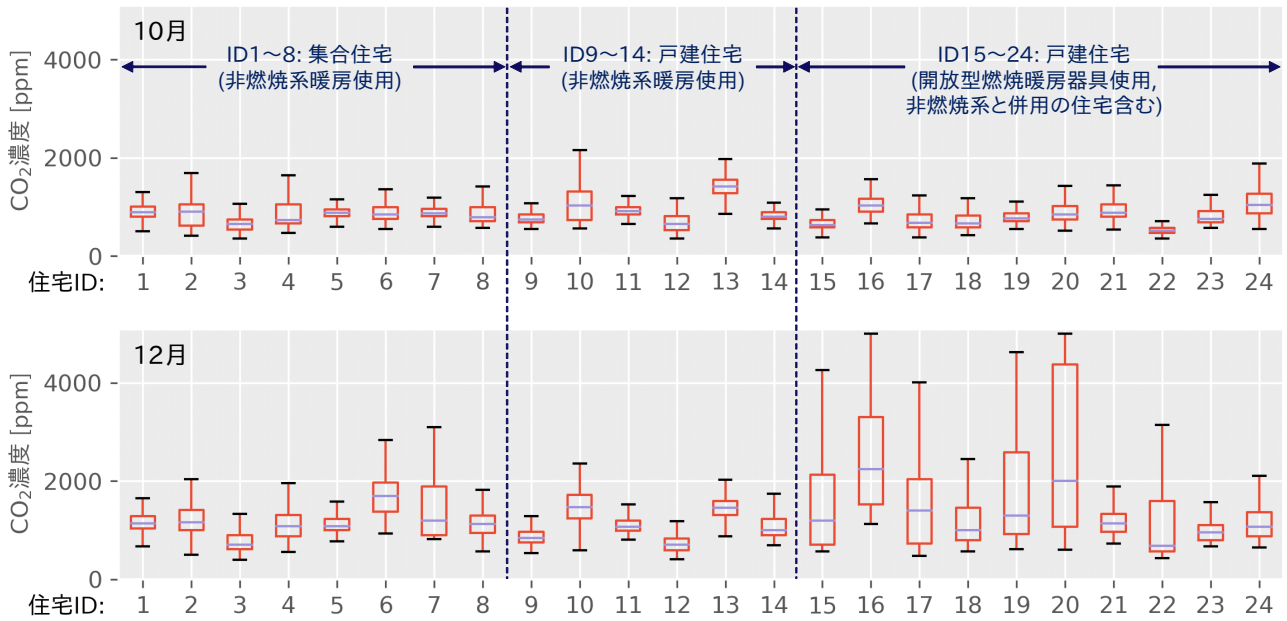


図 1: 季節による住宅内 CO₂ 濃度分布の変化 (上: 2020 年 10 月, 下: 同年 12 月)

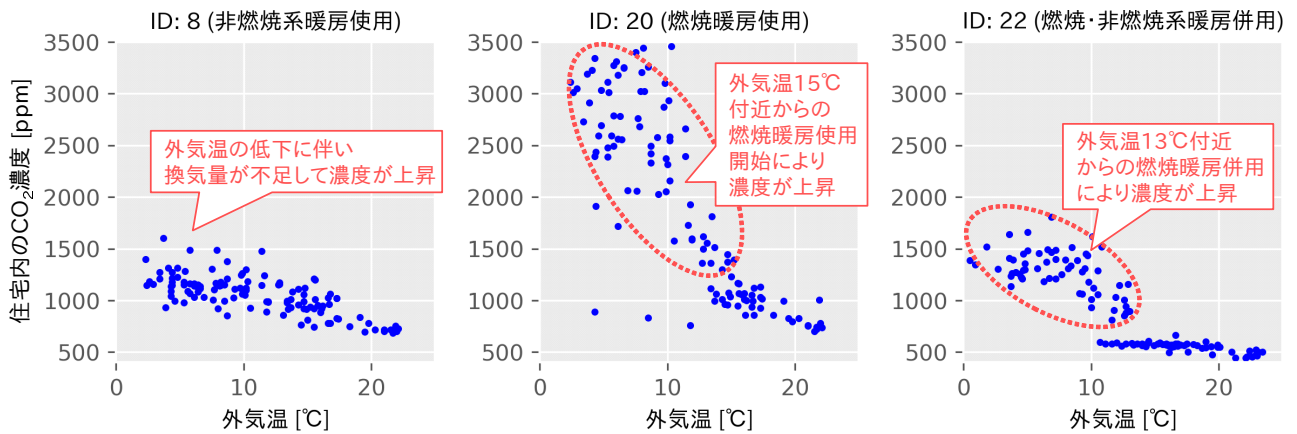


図 2: 外気温と住宅内 CO₂ 濃度の関係 (各点は 1 日ごとの平均値)

た被験者においても、その多くは冬季に CO₂ 濃度が上昇する傾向にあるなど、被験者の認知と空気環境実態は必ずしも一致しないことがわかった。加えて、表 3 に示す換気口フィルタの清掃頻度に関する質問でも、月 1 回以上清掃している被験者はおらず、半数以上が「していない」「わからない」と回答した。このように、換気への関心の高さが換気設備の適切な管理に繋がっているとは言い難い。

なお、換気をする必要がないと考える理由について質問した結果 (表 4) では、24 人中 19 人が「換気すると暑いから/寒いから」と回答した。これは既存調査 [1] の傾向とも一致する。

本節で述べた調査結果から得られた知見および示唆を以下に示す。

表 1: 住宅内の換気への関心についての回答

選択肢	回答数
非常にある	9
少しある	11
あまりない	3
全くない	1

- 燃烧暖房を利用することで CO₂ 濃度が大きく上昇し、既存事例と同様に住宅内の空気環境汚染をもたらすことがわかった。また、エアコンなど燃烧系以外の暖房手段を併用することで、空気環境汚染を低減できる可能性が示唆された。
- 集合住宅などの住宅において、外気温の低下に応じて CO₂ 濃度が上昇する傾向が明らかとなった。

表 2: 春秋および夏冬それぞれの換気頻度に関する回答

選択肢	回答数	
	春/秋	夏/冬
常時開けている	7	2
1時間に1回以上	1	1
数時間に1回程度	7	9
1日に1回程度	7	4
ほとんど/全く開けない	2	8

表 3: 換気口フィルタの清掃頻度に関する回答

選択肢	回答数
月1回以上	0
数ヶ月～半年に1回程度	3
年1回程度	5
していない	9
わからない	7

この結果は、外気温が低下する冬において空気の入替えによる室温低下を避けるために、窓開けなどの換気頻度が減ったためと推定される。

- CO₂ 濃度および外気温の推移から、外気温の変動に基づき燃焼暖房の利用開始時期を推定できる可能性が示唆された。
- 換気への関心の高さや換気頻度に関する認知と、住宅内の空気環境実態は必ずしも一致しない。

3 可視化・インタラクション手法の活用に関する検討

前節で述べた結果から、燃焼暖房の使用および換気不足といった要因により、多くの住宅でCO₂濃度が上昇する傾向にあることが判明した。これらの要因による空気環境実態を居住者が知覚できないことから、汚染された状態を居住者が認識して自発的に改善する可能性は低いと考えられる。

このような課題に取り組む手段として、空気環境の可視化による現状把握と、人と機械の協調による継続的な環境改善の支援が効果的と考える。それぞれについて本節で議論する。

3.1 各種汚染物質濃度の可視化による現状把握

本稿では換気不足および空気環境汚染の目安となる物質としてCO₂に着目したが、住宅内で発生・滞留し得る汚染物質としてCOやNO_x、VOCに加えてPM_{2.5}などの微小粒子が挙げられる。これらを常にモニタリングし、居住者が理解できるように可視化する手法が

表 4: 換気をしない理由に関する回答（複数回答可）

選択肢	回答数
外の空気が汚いから	0
換気すると暑いから/寒いから	19
窓を開けなくても換気できているから	2
空気清浄機を使っているから	1
本人/家族に花粉症の人がいるから	4
本人/家族に呼吸器系の疾患があるから	0
その他	4



図 3: 「おうちモニタキット (OMK)」のディスプレイによる可視化

空気衛生に関する意識醸成に効果的と考える。前述のように空気環境実態を居住者が知覚することは多くの場合において困難だが、可視化によって住宅内での行動や使用器具と空気環境変化の関連を把握できれば、空気環境汚染をもたらす原因の特定や改善が容易となる。

また、住宅内だけでなく屋外の空気環境についても同様に可視化することが効果的と考える。両者の可視化によって、屋内外の差から換気すべきタイミングが明らかになると共に、換気によってどの程度空気環境を清浄化できるかについて居住者自身が判断できるようになると考える。

当所で開発を進めている OMK は図 3 に示すように 7 インチのディスプレイを備えており、これを住宅内に設置することは一種の可視化に相当する。OMK を省エネ阻害要因の調査という目的で住宅のリビングに設置したところ、被験者本人に加えて家族も日常的に閲覧し、家族内でのコミュニケーション促進や子どもへの省エネ教育に好影響を与える結果が観察されている [12]。空気環境改善という目的に対しても、このように計測データをリアルタイムに提示することで居住者自身や家族による問題把握および意識醸成、改善行動の考案が期待できる。

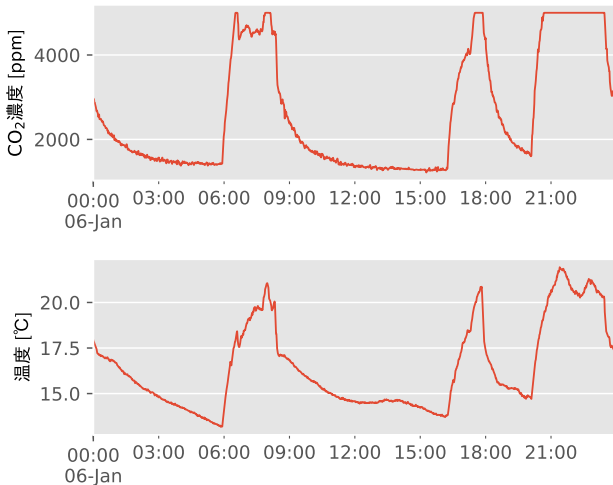


図 4: 燃焼暖房使用による CO₂ 濃度上昇の例

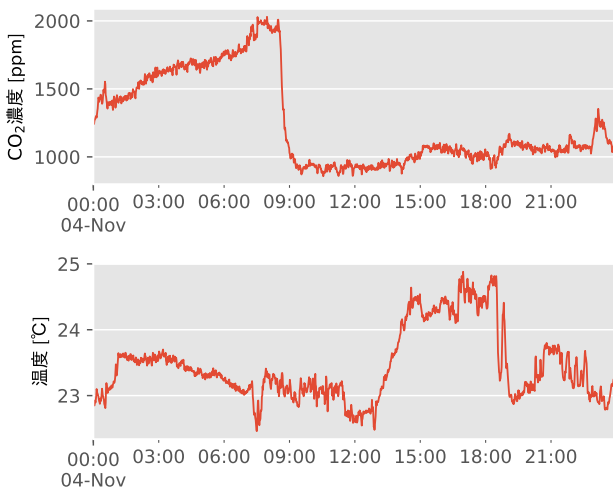


図 5: 換気不足による CO₂ 濃度上昇の例

3.2 人と機械の協調による継続的な行動支援

前節で述べた可視化に加えて、人と機械の協調による継続的な行動支援が実現できれば、住居特性や居住者の行動（仕事や勉強、団らん、睡眠など）、嗜好（暑がり/寒がりなど）、健康状態（特定疾病への罹患など）を踏まえた最適な環境を実現可能と考える。

省エネ分野においては、リアルタイムかつパーソナライズされた詳細な情報提供が効果的な行動変容に必要であることが示されている [14, 15]。2.2 節で示したように、換気不足による住宅内の空気環境汚染は CO₂ 濃度などの上昇により推定可能である。また、図 2 の結果から、CO₂ 濃度と外気温の関係によって換気不足となる時期を事前に推定できる可能性が示唆された。これらの推定に基づき、換気や暖房手段についてのアドバイスを適切なタイミングで提供することで、より効果的な情報提供が実現できる。

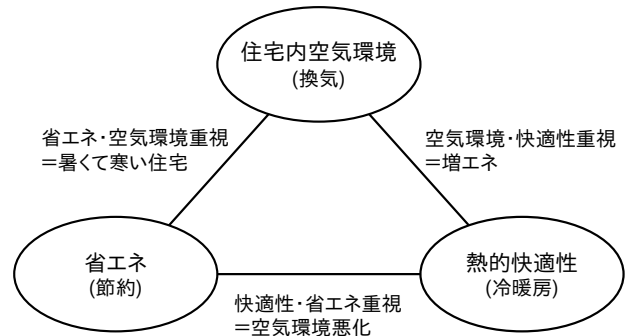


図 6: 住宅内環境制御のトリレンマ

詳細な情報提供を行うという観点においても、CO₂ 濃度などを計測することで空気環境汚染原因の推定が可能となる。図 4 および 5 に、それぞれ燃焼暖房を使用する住宅としない住宅における、ある 1 日の CO₂ 濃度と室内気温の例を示す。図 4 では CO₂ 濃度と室内気温がほぼ同時に上昇しており、濃度が 5,000ppm に達する時間帯もあることから濃度上昇は燃焼暖房使用によるものと推定できる。他方で、図 5 は朝 9 時頃まで濃度が上昇し続け 2,000ppm に達しているが、室内温度との連動はないことから原因は燃焼暖房ではなく換気不足によるものと推定可能である。どちらも換気を促すことが室内空気環境改善に効果的であるが、前者についてはエアコンなど複数の暖房器具の併用を提案するなど、より実態に即したアドバイスが想定される。

また、本稿は換気に着目した住宅内空気環境の改善を目的としているが、空気環境以外の要素を考慮することも必要である。図 6 は、住宅内環境制御に関わる 3 つの要素を図示したものである。住宅内空気環境は省エネおよび熱的快適性と密接に関わるトリレンマの構造を持っている。表 4 に示したように夏冬では換気による熱的快適性の低下が障壁となっており、この 3 つの要素のどれを重視すべきか、どこまで実現可能かは住宅性能や居住者の特性・行動によって異なる。

一般論として、在宅勤務や自宅学習の際には、換気不足による CO₂ 濃度上昇が集中力や生産性に悪影響を及ぼすため空気環境を重視すべきである。一方で、断熱性能の低い住宅において、冬季に頻繁に換気を推奨したり燃焼暖房の使用を控えるよう求めることは熱的快適性を低下させる。また、空気環境を良好に保ちつつ熱的快適性も維持する場合は暖房にかかる電気代や燃料代の上昇を招く。このような構造を踏まえた上で、機械の側から居住者の特性や嗜好、行動を把握して改善方策の提案を行っていく必要がある。

なお、このトリレンマ構造は高い住宅性能（気密性・断熱性）を持つ住宅においては当てはまらない場合もあるが、高い性能の既築住宅は少ないことも事実である。国内の住宅ストックにおいて省エネルギー性能の

基準に適合している住宅は現行の平成 28 年基準で 10% に留まる [13]。住宅性能を向上させることも改善方策の一つと言えるが、許容し得るコストなど実現容易性を踏まえた現実的な方策の提案が望ましい。

4 おわりに

本稿では住宅内の空気環境改善を目的として、24 戸の住宅を対象とした空気環境実態の調査結果を紹介すると共に、可視化および人と機械の協調による空気環境改善手法について検討した。

今後はこれらの手法を実現するための検討を進める。具体的には、CO₂ 濃度に加えて CO や NO_x, VOC などの物質についても計測対象とした上で各物質間の関係を明らかにすると共に、どのような行動が空気環境の悪化を招くかについてより詳細に整理する。そして屋内外の空気環境の可視化などの手法が、環境改善に向けた行動をどの程度促すかについて明らかにする。これらの検証結果に基づき、住居性能や居住者の特性・嗜好を踏まえつつ居住者の健康および快適性を維持するための行動支援手法の確立を目指す。

参考文献

- [1] 萬羽 郁子, 東 実千代, 阿部 弘明, 池田 浩己, 関西における 24 時間換気システムの運用に関する実態調査, 日本建築学会技術報告集, Vol. 19, No. 42, pp. 665–670, 2013.
- [2] 市川 勇, 松村 年郎, 室内空気環境基準の現状, 衛生化学, Vol. 43, No. 3, pp. 162–173, 1997.
- [3] U. Satish, M. J. Mendell, K. Shekhar, T. Hotchi, D. Sullivan, S. Streufert and W. J. Fisk, “Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance,” *Environmental health perspectives*, Vol. 120, No. 12, pp. 1671–1677, 2012.
- [4] 三村 凌央, 近本 智行, 教室の学習環境と学習効果に関する研究 (第 9 報) CO₂ 濃度変化及び温熱環境が作業性と生理心理量に及ぼす影響, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 169–172, 2018.
- [5] P. Strøm-Tejse, D. Zukowska, P. Wargocki and D. P. Wyon, “The effects of bedroom air quality on sleep and next-day performance,” *Indoor Air*, Vol. 26, No. 5, pp. 679–686, 2016.
- [6] 西尾 健一郎, 岩船 由美子, 元 アンナ, アンケート調査に基づく家庭用エアコンの利用に係るバリアの分析, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 75, No. 652, pp. 517–526, 2010.
- [7] リンナイ株式会社, 熱と暮らし通信「暖房」に関する意識調査, 2019. <https://www.rinnai.co.jp/releases/2019/1218/images/releases20191218.pdf> (2021/2/25 アクセス)
- [8] 都築 和代, 横山 一也, 横井 孝志, 小木 元, 多屋 秀人, 吉岡 松太郎, 中村 和男, 農村地帯における高齢者住宅の温熱と空気環境の実態, 日本生気象学会雑誌, Vol. 38, No. 1, pp. 23–32, 2001.
- [9] 五十嵐 由利子, 暖房器具使用時の CO₂ 濃度の実測事例, 第 37 回人間-生活環境系シンポジウム報告集, pp. 197–200, 2013.
- [10] 国土交通省, 建築物エネルギー消費性能基準等を定める省令における算出方法等に係る事項 (平成 28 年国土交通省告示第 265 号), 2016.
- [11] 服部 俊一, 三浦 輝久, 堤 富士雄, 家庭内センシングを簡易に実現する「おうちモニタキット」の構築とその活用に向けた検討, 第 18 回インタラクティブ情報アクセスと可視化マイニング研究会, pp. 1–6, 2018.
- [12] 服部 俊一, 三浦 輝久, 市川 玲子, 澤井 大樹, 伊藤 千加, 大谷 智子, 伊原 克将, IoT センサを用いたユーザへの負担を軽減する家庭内の行動観察手法—家庭内の省エネ阻害要因抽出のための IoT センサ活用—, 電力中央研究所研究報告, C18002, 2019.
- [13] 国土交通省, 我が国の住宅ストックをめぐる状況について, 第 49 回住宅地分科会, 資料 6, p. 12, 2019. <https://www.mlit.go.jp/common/001318639.pdf> (2021/2/25 アクセス)
- [14] K. Ehrhardt-Martinez, K. A. Donnelly and S. Laitner, “Advanced metering initiatives and residential feedback programs: a meta-review for household electricity-saving opportunities,” *American Council for an Energy-Efficient Economy*, 2010.
- [15] K.C. Armel, A. Gupta, G. Shrimali and A. Albert, “Is disaggregation the holy grail of energy efficiency? The case of electricity,” *Energy Policy*, Vol. 52, pp. 213–234, 2012.