

住宅内空気環境の改善を目的としたアドバイス提供手法に関する 基礎的検討

Preliminary Study on Information Delivery Method for Improving Indoor Air Quality in Residential Buildings

坂 裕奈¹ 服部 俊一^{2*} 三浦 輝久²
Yuna Saka¹, Shunichi Hattori², Teruhisa Miura²

¹ 青山学院大学大学院理工学研究科

¹ Graduate School of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University

² 一般財団法人電力中央研究所

² Central Research Institute of Electric Power Industry

Abstract: Indoor Air Quality (IAQ) in residential buildings tends to decline due to factors such as insufficient ventilation and excessive use of combustion heating. However, it is often difficult for residents to perceive these changes. This paper proposes an information delivery method to encourage residents to improve IAQ of their houses. Clustering and time series data analysis were conducted using IAQ measurement data from 24 residences in Japan. The study also discusses more effective ways to extract the characteristics of each residence and determine the optimal timing for presenting advice to raise IAQ.

1 はじめに

住宅内の空気環境は、燃焼暖房や建築物などから排出される化学物質により汚染されることがある。特に燃焼暖房は、二酸化炭素 (CO₂)・窒素酸化物・揮発性有機化合物など数多くの汚染物質の発生源となっている [1]。このような空気環境の汚染を測る間接指標として、CO₂ 濃度が広く採用されている。世界各国で屋内・住宅内を対象とした CO₂ 濃度の基準値が定められており、日本では建築物衛生法により一定面積以上の建築物では 1,000ppm が上限と定められている [2]。CO₂ 濃度が 1,000ppm を超える環境は集中力の低下や喘息などをもたらす、室内で活動する人の快適性や健康を損ねることがわかっている [3, 4]。

空気環境を改善する方法として、換気のほか燃焼暖房の利用を控えてエアコンなど他の暖房手段に切り替えることが挙げられる。国内の住宅 24 軒に対し室内 CO₂ 濃度などを計測した調査 [5] では、多くの住宅において外気温低下による換気量減少や燃焼暖房の利用により CO₂ 濃度が上昇する傾向にあることが報告されている。ただし、必要以上の換気は多くの場合電力消費量の増加を伴い、冬季における燃焼暖房の利用控え

は室温低下による健康影響が懸念される。したがって、住宅内空気環境の改善には換気などの対策を適切なタイミングで、適度を実施することが重要と考える。しかし、一般的に空気環境汚染を人間が知覚することは困難であり、上述の調査 [5] では住宅内空気環境に関心がある居住者であっても適切な換気が行えていない場合もあることがわかっている。

そこで本稿では、住宅内で測定された CO₂ 濃度などのデータを活用し、空気環境を改善するための効果的なアドバイスを提供する手法を提案する。住宅内の省エネを目的としたアドバイス提供の事例は多く、家電単位などパーソナライズされた情報をリアルタイムに提供することで省エネ効果が向上することがわかっている [6]。住宅内空気環境においても、CO₂ 濃度上昇や暖房利用のタイミングなどを推定し、住宅ごとにパーソナライズされた情報をリアルタイムで提供できれば、空気環境改善による快適性向上や健康改善が期待できる。

以上に述べたようなアドバイス実現に必要な機能として、(i) 各住宅に対するプロファイリング、(ii) アドバイスを提示するタイミング推定、(iii) 居住者に提供するアドバイスの生成が挙げられる。このうち (i) については、住宅ごとの特性に応じたアドバイス提供のためのプロファイリングを実現するため、CO₂ 濃度の変動傾向に基づいた住宅のクラスタリングにより、各住

*連絡先：一般財団法人電力中央研究所
〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂 2-6-1
E-mail: shattori@criepi.denken.or.jp

宅の空気環境の分類を試みる。(ii)については、CO₂濃度など住宅内で計測されたデータの変動傾向やその周期を分析することで、アドバイス提示の適切なタイミング推定を試みる。これらの検討結果に基づいて、提案手法の構築に必要な上記(i)から(iii)それぞれに求められる課題を考察する。

2 住宅内空気環境改善に向けたアドバイス提供手法に関する検討

1節で述べた通り、居住者が知覚できない住宅内空気環境に対する適切なアドバイスとして、パーソナライズされたリアルタイムな情報提供であることが必要と考える。これを踏まえて、本稿では効果的な空気環境改善アドバイスの実現には以下に示す3つの機能が必要と考える。

- (i) **各住宅のプロファイリング機能**：各住宅の属性・制約や居住者の生活スタイルなどの特性を推定することで、住宅およびその居住者固有の情報をアドバイスに反映する。
- (ii) **アドバイス提供タイミングの推定機能**：住宅内で計測されたデータから空気環境の悪化や居住者の行動を推定することで、アドバイスを適切なタイミングで提供する。
- (iii) **提示アドバイスの生成機能**：アドバイスの根拠となる各種情報を正確かつ簡潔にまとめることで、居住者の住宅内空気環境への理解や行動変容を促すアドバイスを作成する。

このうち、本節では(i)および(ii)を対象とした基礎的検討を実施する。検討に用いたデータセットの詳細については2.1節で、(i)、(ii)の検討についてはそれぞれ2.2、2.3節で述べる。

2.1 住宅内空気環境データセット

提案手法の検討にあたっては、先行研究[5]において収集された住宅内空気環境データセットを利用した。本データセットには関東地方を中心とした日本国内の住宅24軒を対象に計測されたデータが含まれており、本検証ではこのうち計測日時・CO₂濃度[ppm]・室温[°C]を利用する。なお、計測に用いたセンサの仕様により、CO₂濃度の計測範囲は360ppmから5,000ppmである。計測日時は各データが観測された日時を示している。本データセットの計測期間は2020年10月1日0時0分から2021年3月31日23時59分であり、計測粒度は1分である。

表 1: 3種類の期間でのCO₂濃度に基づく住宅のクラスタリングに対するクラスタ数別のSilhouette Score.

クラスタ数	期間		
	全期間	10月	12月
2	0.552	0.210	0.590
3	0.483	0.228	0.359
4	0.361	0.184	0.350
5	0.200	0.110	0.349
6	0.121	0.111	0.197
7	0.130	0.109	0.210
8	0.137	0.098	0.205
9	0.128	0.094	0.124
10	0.131	0.093	0.126

2.2 プロファイリング機能の検討

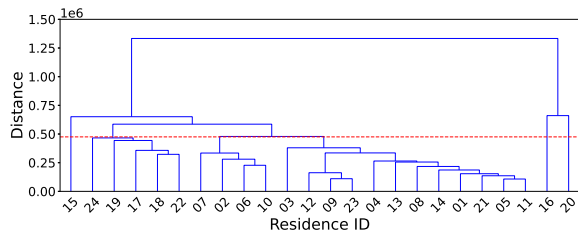
2節の冒頭(i)に示したプロファイリング機能の検討にあたり、CO₂濃度計測値に基づく住宅のクラスタリングを実施した。具体的には、特定の日時以前に各住宅で観測されたCO₂濃度について、この変動傾向が類似する住宅同士を複数のグループにまとめることで、各住宅の特徴を推定することを試みた。

事前分析として、住宅の分類に最適なクラスタ数を検討した。一定期間中に計測された各住宅のCO₂濃度に対して、Ward法に基づくクラスタ間距離測定方法を採用した階層的クラスタリングを実行した。クラスタリングに用いるCO₂濃度計測値の対象期間として、データセットに含まれる全期間、2020年10月、2020年12月の3通りを選択した。最適クラスタ数の決定には、クラスタ数を2から10に変動させた際のSilhouette Scoreおよびデンドログラムによる可視化結果を活用した。なお、Silhouette Score S は、住宅 $x \in X$ と同じクラスタに属する住宅との平均距離を a_x 、次に近いクラスタに属する住宅との平均距離を b_x とすると、以下の式(1)で表される。

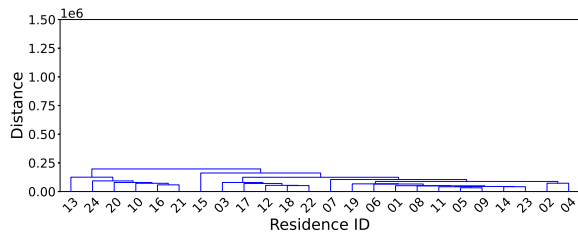
$$S = \frac{1}{|X|} \sum_{x \in X} \frac{b_x - a_x}{\max(a_x, b_x)} \quad (1)$$

S は-1から1の範囲を取り、1に近いほど同じクラスタ内のデータが互いに類似し、異なるクラスタとは明確に分離されていることを示す。

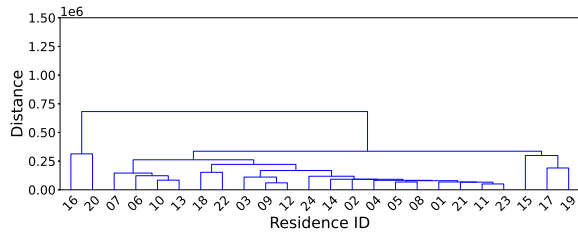
表1に、測定期間およびクラスタ数それぞれに対するSilhouette Scoreを示す。いずれの期間においてもクラスタ数が2または3の時にSilhouette Scoreが最大となり、クラスタ数が増えるにつれて下降する傾向が見られた。この結果から、数値上はクラスタ数が2または3が最善となるが、多様な住宅特性をプロファイリングするという目的に対してクラスタ数が過少であり、Silhouette Scoreも高いとはいえない。



(a) 全期間におけるデンドログラム。赤色破線は距離が 0.475×10^6 の位置に該当し、ここを基準にクラスタを 6 個に分割できる。



(b) 2020 年 10 月におけるデンドログラム。



(c) 2020 年 12 月におけるデンドログラム。

図 1: 3 種類の期間での CO₂ 濃度に基づく住宅のクラスタリング結果のデンドログラム。葉ノードは各住宅の ID、縦軸はクラスタ間距離を表す。

図 1 は、各期間におけるクラスタリング結果をデンドログラムで図示したものである。図 1(a) の全期間および図 1(c) の 2020 年 12 月では、一部住宅のみ他クラスタからの距離が遠く、他の住宅ではクラスタ間距離が短くなった。一方で、図 1(b) に示した 2020 年 10 月では全体的にクラスタ間距離が短くなった。また、図 1(a) 上の赤色破線で示した位置でクラスタを 6 個に分割すると、比較的距離の近い住宅同士でクラスタリングが行える。本稿ではクラスタ数を 6 に設定し、デンドログラムでの目視上距離が近い住宅を同じグループに割り当てることとする。

以上の結果を踏まえて、他クラスタに属する住宅と比較した CO₂ 濃度の変動傾向から居住者へのアドバイス提示を行う機能のプロトタイプを実装した。動作の流れとしては、任意の計測日時を指定し、これ以前の期間における各住宅の CO₂ 濃度計測値を用いて Ward 法に基づく階層的クラスタリングを行い、住宅を 6 クラスタに分類する。この結果に対して、指定したある住宅が属するクラスタに関する情報が出力される。

図 2 は、計測日時を 2020 年 12 月 9 日 12 時 0 分、住

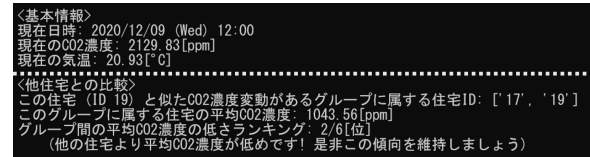


図 2: CO₂ 濃度の変動に基づく住宅クラスタリングを活用したアドバイス提示例。

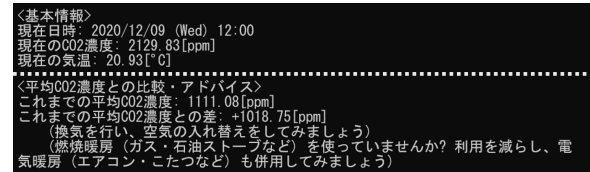


図 3: 計測日時・CO₂ 濃度・室温の計測データに基づくアドバイス提示例。

宅 ID を 19 と指定した際に出力された住宅内 CO₂ 濃度に関するクラスタ情報である。指定した住宅 ID と同じクラスタに属する住宅の ID、このクラスタに属する住宅のこれまでの平均 CO₂ 濃度などの情報が提示される。また、全クラスタにおけるクラスタ内の平均 CO₂ 濃度を順位として出力することで、他のクラスタに属する住宅と空気環境を比較できる。

2.3 アドバタイジング推定機能の検討

2 節冒頭 (ii) に示したアドバイス提供タイミングを推定する機能の実現に向けて、本節では計測値の活用および CO₂ 濃度変動周期の検出を試みた結果を述べる。

2.3.1 タイミング推定における計測値の活用

本データセットの計測日時・CO₂ 濃度・室温に基づいて、換気または暖房手段の変更をアドバイスすべきか判断する機能を実装した。具体的な挙動としては、指定した住宅および計測日時に対応する CO₂ 濃度を取得し、同時にこの住宅における指定日時（アドバイス提供タイミング）以前の CO₂ 濃度の平均値を算出する。これらの値を比較した際に指定日時の CO₂ 濃度が高い場合、相対的に空気環境が悪化しているとみなし、換気を促すアドバイスを出力する。この条件に加えて、指定日時が一般的な暖房の利用期間とされる 11 月から 3 月の間にあり、かつこの時の室温が 20°C を上回っていれば燃焼暖房は不要と判断し、暖房手段を切り替えるよう促すアドバイスを出力する。

日時を 2020 年 12 月 9 日 12 時 0 分、住宅 ID を 19 として指定した際に表示される空気環境情報およびアドバイスの例を図 3 に示す。図 4 に、この日時および直

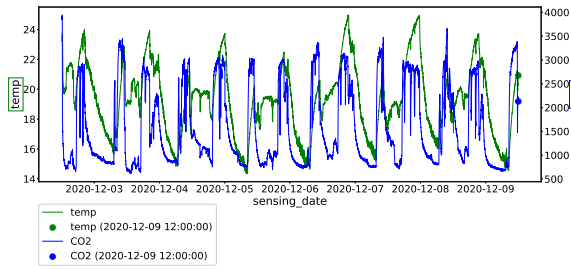


図 4: ID 19 の住宅での 2020 年 12 月 9 日 12 時 0 分とその直前 7 日間における CO₂ 濃度・室温. 青線は CO₂ 濃度, 緑線は室温を示し, 青点・緑点はそれぞれ 2020 年 12 月 9 日 12 時 0 分での CO₂ 濃度・室温を指す.

近 7 日間の CO₂ 濃度・室温を示す. 図 3 の出力例に示したように, 指定日時における CO₂ 濃度の計測値とこの日以前における CO₂ 濃度の平均値の差が算出され, 指定日時の CO₂ 濃度の方が高い場合は換気の実施を勧めるアドバイスが提示される. この例では, 指定日時が 11 月から 3 月の間かつ室温が 20°C より高かったため, 燃焼暖房の利用を控えエアコンなど燃焼を伴わない暖房手段への切り替えを勧めるアドバイスが出力されていることがわかる.

2.3.2 住宅内 CO₂ 濃度からの周期検出

空気環境の改善が必要なタイミングの推定にあたり, 本節では住宅内 CO₂ 濃度の増減から一定の周期性を検出することを試みる.

事前分析として, 各住宅における CO₂ 濃度の周期の有無および強弱の調査を実施した. 2.2 節で述べたクラスタリング結果のうち, 対象期間を全期間, クラスター数 6 とした場合の各クラスターから, それぞれ任意の住宅を 1 軒ずつ抽出した. 抽出された計 6 軒の住宅それぞれについて, 特定の 7 日間に計測された CO₂ 濃度に対して実数入力向けの 1 次元離散 Fourier 変換を適用した. 適用する 7 日間としては, 2020 年 10 月 29 日から 2020 年 11 月 4 日, および 2020 年 12 月 24 日から 2020 年 12 月 30 日を指定した. Fourier 変換のサンプリングレートは 1 日 (= 1,440 分) とした.

表 2 に, 各期間における各住宅の CO₂ 濃度に対して Fourier 変換を行った結果から, 上位 5 個のサンプル周期を示す. なお, サンプル周期が 1.000 未満のものは順位から除外した. 表 2(a) および (b) に示したいずれの期間においても, 下線で示した通りほぼすべての住宅にてサンプル周期 1.000 および 2.000 に対し Fourier 変換結果が大きくなる傾向が見られた. Fourier 変換のサンプリングレートが 1 日であることから, 住宅内 CO₂ 濃度に 1 日および半日間の周期が強く表れる傾向にあることを示している.

表 2: 各時期における各住宅の CO₂ 濃度に対する Fourier 変換結果上位 5 個のサンプル周期. サンプル周期 1.000 未満のものは順位に含まれていない.

(a) 2020 年 10 月 29 日 ~ 2020 年 11 月 4 日

順位	住宅 ID					
	01	02	15	16	19	20
1	<u>1.000</u>	<u>1.000</u>	<u>1.000</u>	<u>1.000</u>	<u>2.000</u>	<u>1.000</u>
2	2.571	<u>2.000</u>	2.286	<u>2.000</u>	2.143	<u>2.000</u>
3	<u>2.000</u>	4.000	2.571	1.286	1.714	4.000
4	3.143	1.857	3.714	3.000	4.000	3.429
5	2.143	2.143	5.571	3.714	1.286	6.000

(b) 2020 年 12 月 24 日 ~ 2020 年 12 月 30 日

順位	住宅 ID					
	01	02	15	16	19	20
1	<u>1.000</u>	<u>2.000</u>	<u>1.000</u>	<u>2.000</u>	<u>1.000</u>	<u>1.000</u>
2	1.143	1.286	2.857	<u>1.000</u>	<u>2.000</u>	<u>2.000</u>
3	<u>2.000</u>	1.714	2.429	3.000	1.143	4.000
4	2.571	<u>1.000</u>	2.286	1.571	3.000	1.857
5	3.000	3.286	5.571	1.429	2.714	6.000

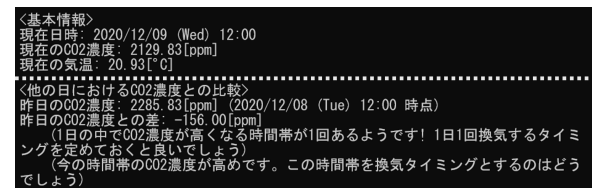


図 5: 直近 7 日間における住宅内 CO₂ 濃度から検出した周期の情報を活用したアドバイス提示例.

この結果を踏まえ, 直近の住宅内 CO₂ 濃度から特定の周期を検出し, これに基づきアドバイスを提示するタイミングを推定する機能を実装した. まず指定した住宅について, 指定計測日時から 7 日前までの CO₂ 濃度に対して上述の Fourier 変換を実行する. この変換結果の上位 10 個のサンプル周期に 1.000 または 2.000 が含まれる場合, この住宅の直近の CO₂ 濃度変動に 1 日または半日間の周期があるとみなし, アドバイス提示のタイミング推定に活用する. これに加えて, 2.3.1 節で述べた条件により CO₂ 濃度が相対的に高いと判断できる場合, この時間帯に空気環境が汚染される傾向にあると判断し, 併せてアドバイス内容に反映し空気環境の改善を促すことが可能になる.

図 5 に, この機能による出力例として日時を 2020 年 12 月 9 日 12 時 0 分, 住宅 ID を 19 と設定した際に提示されたアドバイスの例を示す. 図 4 に示した直近 7 日間の CO₂ 濃度分布からもわかるように, この例では 1 日間の周期が強いと推定されており, 指定日時から 1 日前の CO₂ 濃度およびこの値の指定日時の CO₂ 濃度

との差が提示された。加えて、図3でも示した例と同様に、この日時のCO₂濃度は平均CO₂濃度よりも高いため、指定日時の時間帯を換気タイミングとして設定することを勧めるアドバイスが出力されている。なお、半日間の周期が強いと判断された場合は12時間前のCO₂濃度に基づく情報が表示され、1日・半日間の周期が共に強いと推定された場合は1日前および12時間前のCO₂濃度に基づくアドバイスが提示される。

3 考察

前節では提案手法に関する基礎的検討として、プロファイリング機能およびアドバイス提供タイミングの推定機能について分析およびプロトタイプ構築を行った結果について述べた。この結果を踏まえて、提案手法構築に求められる要素について本節で考察する。

3.1 プロファイリング機能

2.2節で述べた検討により、室内空気環境が自宅と類似する住宅の有無やその数をクラスタリングにより分類することで、空気環境改善のアドバイスに活用できる可能性が示された。自宅が属するクラスターのCO₂濃度平均値を他クラスター値と比較し、その順位を把握することで、他の住宅と比較した際の空気環境の良し悪しを定量的に評価できると考える。この情報に基づくアドバイス提供は居住者の行動変容を促し、空気環境の自発的な改善が期待できる。さらに、居住者が自宅内の空気環境への理解を深めるだけでなく、他住宅と比較したCO₂濃度傾向を本手法により把握できれば、各住宅の特性や制約に応じた空気環境改善アドバイスが実現できると考える。

一方、本稿で行ったクラスタリングは、各住宅のCO₂濃度などの特徴を十分に反映できているとはいえず、空気環境改善に繋がるアドバイスに必要な情報をプロファイリングするという目的に対して課題が残る結果といえる。また、2.2節で行った階層的クラスタリングでは全住宅におけるCO₂濃度の計測データを必要とするため、新たに住宅を追加した場合には再度クラスタリングが必要になるといった課題も挙げられる。

これらの課題に対して、CO₂濃度以外の特徴量も用いたクラスタリングが必要と考える。本稿では各住宅のCO₂濃度のみを用いたクラスタリングを実施したが、たとえば利用する暖房手段や住居形態、世帯構成などの属性情報をアンケートにより収集してクラスタリングに反映できれば、各住宅の特性や制約を考慮した分類が実現できる。その他、深層学習系などの計算時間・計算量を低減できるようなクラスタリング手法の選定も改善にあたって効果的と考える。

3.2 アドバイスタイミング推定機能

2.3.1節で述べた計測値の活用については、各住宅で計測されたCO₂濃度分布を踏まえてアドバイスを提供することで、住宅それぞれで異なる空気環境の変化を考慮したタイミングでの情報提供が行えることを示した。CO₂濃度に加えて室温も活用することで、燃烧暖房の利用に関するアドバイスを適切なタイミングで提供できることがわかった。また、2.3.2節で述べた住宅内CO₂濃度の周期検出においては、CO₂濃度が1日または半日間の変動周期を持つ住宅を特定することで、換気などの空気環境改善行動を実施すべきタイミングを居住者が理解しやすい内容で提示できることを示した。

一方、本機能の検討で明らかになった課題として、アドバイス提供タイミングの判断基準となるしきい値の設定方法が挙げられる。本稿では直近一定期間内におけるCO₂濃度の平均値を基準とし、これを超えた場合に換気を促すアドバイスを提示している。この平均値がその住宅における標準的な空気環境を反映しているとは限らず、たとえば居住者の在宅割合が高い住宅と低い住宅とでは、同じ平均値であってもそれが意味するものは異なる。したがって、居住者の生活パターンやCO₂濃度分布を踏まえた基準値の算出が必要と考える。

加えて、暖房手段などの属性情報を考慮せずタイミング推定やアドバイス提供を行っていることも課題である。本稿では住宅内のCO₂濃度・温度のみを用いて推定していることから、燃烧暖房を所持していない住宅へ燃烧暖房に関するアドバイスが提供される可能性がある。この課題に対して、前節で述べたように属性情報をアンケートで収集するだけでなく、計測データから属性を推定するアプローチもユーザへの負担低減という観点で効果的と考える。先行研究[5, 7]では、CO₂濃度の急激な上昇や外気温との関連から暖房手段やその利用開始時期を推定できる可能性が示唆されている。一般的に燃烧暖房の利用は空気環境に与える影響が最も大きい行動であり、それに関するアドバイスは空気環境の改善余地も同様に大きい。このような属性情報を計測データから推定できれば、より効果的なアドバイスを適切なタイミングで、居住者への負担なく提供可能と考える。

3.3 アドバイス生成機能

本稿では、2節で述べたようにプロファイリング機能およびアドバイス提供タイミングの推定機能について検討を行った。しかし、居住者へアドバイスを提供するという提案手法の目的にはアドバイス生成機能も不可欠であることから、本機能の開発のために求められる課題について本節で考察する。

本稿では計測データのみを用いたアドバイスを提供したが、3.1 および 3.2 節で述べたように、居住者の実態に即したアドバイス実現には、住宅構造や生活パターンなどの属性情報の把握も不可欠と考える。そのためには、前述のように居住者へのアンケートや計測データからの推定による属性情報の収集が必要であり、特に後者においては電力消費量や照度・騒音など、様々な計測データの収集・活用が効果的と思われる。

また、2 節で構築したプロトタイプでは定型的なアドバイスが固定の条件に基づいて提供されており、温熱快適性や省エネに関する居住者の関心や選好を考慮していないことも課題といえる。この課題に対しては、生成 AI を活用した情報収集およびアドバイス生成が効果的と考える。生成 AI との対話を通じて、前述の関心や選好に加えて特定の時間帯やコンテキストに対する居住者からのフィードバックを獲得できれば、居住者の特性を踏まえたより効果的なアドバイス生成が期待できる。

生成したアドバイスを提供するためのインタフェースについても、今後の検討が望まれる。市販製品ではスマートフォンによる通知が一般的だが、ユーザは多くの通知に曝されているためアドバイスに気付かないなどの問題も懸念される。住宅内の省エネを対象とした調査 [8] において、リビングに設置した専用ディスプレイからの情報提供が日常的に閲覧されており、省エネ意識の醸成や教育に好影響を与える可能性が示唆されている。このようなインタフェースを用いることで、居住者が見落とすことなく、また負担を増大させないようなアドバイス提供・行動変容が実現可能と考える。

4 おわりに

本稿では、住宅内空気環境の改善を目的として、CO₂ 濃度などの計測データに基づくアドバイスを提供する手法を提案し、基礎的検討を行った結果について述べた。提案手法に求められる要素として、(i) 各住宅に対するプロファイリング、(ii) アドバイスを提示するタイミング推定、(iii) 居住者に提供するアドバイスの生成という 3 つの機能を挙げた。このうち (i) および (ii) については、CO₂ 濃度に基づく住宅のクラスタリングや CO₂ 濃度・室温を組み合わせたアドバイス提示を行うプロトタイプを構築した。その上で、本手法の実現に向けて (i) から (iii) それぞれについて求められる課題について考察・整理した。

今後は、本稿で示した課題に対しての更なる検討が望まれる。住宅内空気環境に関する調査は数多く実施されてきた一方で、その改善を目指した事例は少ない。省エネ分野などの事例を参考としつつ、居住者の意識・関心の向上やそれに伴う生活の質の改善に繋がる手法

構築が必要である。

参考文献

- [1] 野崎淳夫, 成田泰章, 二科妃里, 一條佑介, 山下祐希: 開放型石油暖房器具使用時の室内空気汚染に関する研究, 室内環境, Vol. 18, No. 1, pp. 33–44 (2015).
- [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] Allen, J. G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J., and Spengler, J. D.: Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments, Environmental Health Perspectives, Vol. 124, No. 6, pp. 805–812 (2016).
- [4] Simoni, M., Annesi-Maesano, I., Sigsgaard, T., Norback, D., Wieslander, G., Nystad, W., Canciani, M., Sestini, P., and Viegi, G.: School air quality related to dry cough, rhinitis and nasal patency in children, European Respiratory Journal, Vol. 35, No. 4, pp. 742–749 (2010).
- [5] Hattori, S., Iwamatsu, T., Miura, T., Tsutsumi, F., and Tanaka, N.: Investigation of Indoor Air Quality in Residential Buildings by Measuring CO₂ Concentration and a Questionnaire Survey, Sensors, Vol. 22, No. 19, Article 7331 (2022).
- [6] Ehrhardt-Martinez, K., Donnelly, K. A., and Laitner, J. A.: Advanced Metering Initiatives and Residential Feedback Programs: A Meta-Review for Household Electricity-Saving Opportunities, American Council for an Energy-Efficient Economy, (2010).
- [7] 服部俊一, 岩松俊哉, 三浦輝久, 堤富士雄, 田中伸幸: 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, 第 26 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. 29–34 (2021).
- [8] 服部俊一, 三浦輝久, 市川玲子, 澤井大樹: IoT センサを用いた家庭内の行動観察, 電気学会論文誌 C, Vol. 142, No. 2, pp. 206–215 (2022).