情報処理学会論文誌 Vol.62 No.2 727–736 (Feb. 2021)

# 知的環境構築のための測定システムを利用した二酸化炭素濃度予測モデルの評価

守谷 元一[1,a)] 渡邊 紀文[2] 宮本 賢良[1] 糸田 孝太[1] 今仁 順也[3] 青山 浩之[4] 武藤 佳恭[1]

受付日 2020年4月17日, 採録日 2020年11月5日

**概要**：近年の室内空気質の研究結果において，二酸化炭素（以下 $CO_2$）濃度が人の知的活動の質に大きな影響を及ぼすことが明らかになり，長時間にわたる会議などにおいて人同士のインタラクションに悪影響を与えることが予測される．これを防ぐためには室内において $CO_2$ 濃度を一定以下に保つことが求められている．気体濃度の予測モデルはすでに提案されているが，換気量の少ない空間および 1,000 ppm 程度の低い濃度帯における実空間での検証は行われていない．そこで同時多点測定システムを用いて，換気量の少ない空間での人の呼吸による $CO_2$ の拡散傾向を分析した．その結果から，$CO_2$ 濃度は一様に拡散することが明らかになり，一様拡散の気体濃度の予測モデルであるザイデルの式を利用し，予測値と実測値の比較を行った．実験結果より，ザイデルの式による濃度予測は換気回数が多い空間では有効であったが，少ない空間では計測システムによるリアルタイム測定が必要であることが明らかになった．

**キーワード**：二酸化炭素濃度センサ，同時多点センシング，室内空気質，室内環境計測

# Evaluation of Carbon Dioxide Concentration Prediction Model Using a Measurement System for Intelligent Environment

Motokazu Moritani[1,a)] Norifumi Watanabe[2] Kensuke Miyamoto[1] Kota Itoda[1]
Junya Imani[3] Hiroyuki Aoyama[4] Yoshiyasu Takefuji[1]

Received: April 17, 2020, Accepted: November 5, 2020

***Abstract:*** Recent studies on indoor air quality have shown that carbon dioxide ($CO_2$) concentration has a significant influence on the quality of human intellectual activities. Negative impact can be expected on human intellectual activities during the long meetings. In order to avoid reducing intellectual activities, it is necessary to keep the $CO_2$ concentration in the room below a certain level. Although a model for predicting gas concentrations has already been proposed, it has not been studied in a space with low ventilation and low $CO_2$ concentrations below 1,000 ppm. We have used a simultaneous multipoint measurement system to analyze the diffusion tendencies of $CO_2$ by human breathing in a room with low ventilation. Based on the results, it was found that $CO_2$ concentration diffuses uniformly. Measured values are compared with predicted values of Seidel model based on a uniform diffusion. The results showed that the Seidel equation is only useful in predicting $CO_2$ concentrations in a room with a frequent ventilation cycle. However, real-time sensing is needed in a room with a low ventilation cycle.

***Keywords:*** carbon dioxide concentration sensor, simultaneous multi-points sensing, indoor air quality, indoor environmental measurement

## 1. はじめに

Internet of Things（以下 IoT）の普及，発達によって環

[1] 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科
Graduate School of Media and Governance, Keio University, Fujisawa, Kanagawa 252–0883, Japan
[2] 武蔵野大学データサイエンス学部
Faculty of Data Science, Musashino University, Nishi-tokyo, Tokyo 202–8585, Japan
[3] 株式会社由紀精密
YUKI Precision Co., Ltd., Yokohama, Kanagawa 222–0033, Japan
[4] 環境リサーチ株式会社
Kankyo Research Co., Ltd., Hachioji, Tokyo 192–0054, Japan
[a)] katidoki@sfc.keio.ac.jp

© 2021 Information Processing Society of Japan

境測定を行う高精度かつ小型なセンサデバイスが開発され，様々な場面で利用することが可能になった．これらのセンサデバイスは特定の施設だけではなく，スマートホームやスマートオフィスのように人々がふだん生活する場所の環境の測定および調整に利用されており，これらのセンサデバイスにより環境の状態を数値化することで，人の感覚ではとらえられないような環境の変化を客観的に評価することが可能になった．しかし，人の生活環境において塗料などに含まれる化学物質や PM2.5 を代表とする粒子状の汚染物質，タバコの煙など評価すべき要因は多岐にわたり，そのすべて管理することは困難である [1]．そこで本研究では室内における二酸化炭素（以下 $CO_2$）濃度による人の知的活動に対する悪影響に注目する．近年，Allen らの研究 [2] により，$CO_2$ が 1,500 ppm（parts per million）程度の低濃度であっても人の知的活動の質に影響することが明らかにした．また，Satish らの研究 [3] によれば $CO_2$ 濃度が 600 ppm の環境と比較して 1,000 ppm の環境では，被験者の意思決定能力を比較する実験において統計的に有意な減少が見られた．これらの研究結果から，個室を利用したミーティングや会議のように室内の $CO_2$ 濃度が上昇すると考えられる空間では，参加人数や会議時間の長さに応じて $CO_2$ 濃度が上昇し，議論の質が低下すると考えられる．また，フリーアドレスオフィスのように特定の席を持たないオフィスワークを推進している組織では，室内での活発な議論が想定され，局所的な $CO_2$ 濃度が想定よりも上昇し，この影響は議論をしている人間だけでなく，そのオフィスを利用している人全体にも及ぶと考えられる．このように，室内における $CO_2$ は人の知的活動，あるいは人同士のインタラクションを阻害し，悪影響を及ぼすことは明らかである．以上のことから，$CO_2$ 濃度の変化を予測し，室内の濃度を一定以下に保つように制御することが必要になる．

本研究では室内の人のインタラクションにおける知的活動の質を保つことを目的として，呼気に含まれる $CO_2$ の拡散傾向を分析する．さらにその拡散傾向から，$CO_2$ 濃度の予測として利用可能な気体濃度モデルを選択し，その有効性について実測値との比較を用いて検証した．JIS 規格 A1406 [4] によれば「一般に，比較的空気の流動がある場合は，垂直，水平方向ともに，大きな濃度分布差は見られないのが通例であるが，空気が停滞している室内の場合，ときとしてかなりの濃度分布差を生じることがある」とされている．本研究では換気システムを利用しない自然換気のように換気量が少ない室内において，1,000 ppm 程度の濃度帯で，人の呼吸によって発生する $CO_2$ 濃度がどのように拡散し，1 分ごとにどのように増加していくのかを検証する．具体的には室内において人の呼吸によって増加する $CO_2$ 濃度を複数の $CO_2$ 濃度測定デバイスを利用し，同時多点センシングを行うことで室内の複数の測定点およびその近傍において $CO_2$ 濃度がどのように変化していくのかを分析した．さらに同じ建造物の同一地下階層にある 3 つの大きさの異なる部屋において，拡散傾向より選定した気体濃度予測モデルによる予測値と測定デバイスによる $CO_2$ 濃度の実測値を比較し，本実験の条件下において，既存の予測モデルが適用できるのかを検証した．

なお実測値と予測モデルの比較においては，人を介した実験であるため，数 ppm から数十 ppm といった厳密な評価を行うのではなく，$CO_2$ 濃度センサの精度と一般的な利用者の平均的な $CO_2$ 排出量という一定の誤差がある条件において評価した．

## 2. 関連研究

$CO_2$ 濃度の測定は古く，現在のようにセンサ技術が発達する前から存在し，植物を使った $CO_2$ の測定も 1990 年には報告されている [5]．また，$CO_2$ 濃度は集中力の指標にも利用されており，$CO_2$ 濃度と集中力指標の 1 つである瞬きの回数，不快度指数の 3 つには相関があることが報告されている [6]．これらの $CO_2$ 濃度センサとガスセンサを搭載したセンサデバイスを大学構内に設置し，空気の質を検証する研究 [7] も行われている．本研究と同様に $CO_2$ 濃度の予測を目的とし，同時多点センシングを利用し $CO_2$ 濃度を測定した研究として Piotr Batoga らの報告 [8] があげられる．この研究報告では睡眠時の寝室の $CO_2$ 濃度を CFD（Computational Fluid Dynamics）シミュレーションを用いて予測した結果では 150 ppm 程度の上昇だと予測されていたが，実際に $CO_2$ 濃度センサを用いて測定した結果，$CO_2$ 濃度が 3,000 ppm を超えたとされている．大気中の $CO_2$ 濃度は 450 ppm 程度であり，寝室の $CO_2$ 濃度は外気の 6 倍以上であったことを示している．この実験結果から，CFD シミュレーションによる $CO_2$ 濃度が必ずしも有効ではあるとはいえず，既存の予測モデルを利用した場合であっても，センサによる実測値の比較を用いて，その有効性を検証する必要があると考えられる．

また，人同士のインタラクションを最適化するための研究として三井らによるグループワークの疲労検出および休憩タイミングの提案システム [9] や小林らのユーザの顔座標による集中度推定 [10] などがあげられるが，多くの場合，ユーザの身体情報などをセンシングすることが主流となっている．本研究ではユーザの身体情報ではなく，作業環境をセンシングし，$CO_2$ 濃度を成業することによってユーザ同士のインタラクションを向上することを提案する．

以上の関連研究から，室内において人の呼吸によって発生する $CO_2$ の拡散傾向や濃度の上昇を同時多点で検証した例は少なく，それも一般的な換気システムを利用した環境での計測がほとんどである．そのような環境では換気システムが人の呼気によって発生した $CO_2$ の拡散に影響を与えてしまう．そのため，人の呼気に $CO_2$ の拡散傾向を分

© 2021 Information Processing Society of Japan

析するためには，自然換気のように換気量が少なく，$CO_2$ 濃度に偏りができやすいとされる空間において実験を行う必要がある．また同様に 1,000 ppm 程度の低い $CO_2$ 濃度の拡散傾向を分析した事例も現状ほぼ確認されていない．これらのことから，本研究では自然換気のように換気量が少ない空間における，1,000 ppm 程度の $CO_2$ 濃度帯での人の呼気による $CO_2$ の拡散傾向を分析する．さらにその拡散傾向から，気体濃度の予測モデルを選択し，測定デバイスを用いた実測値と予測モデルによる予測値を比較することで，同様の条件における実空間での有用性を検証した．

## 3.　システム概要

### 3.1　システム構成

本研究では室内の複数箇所の $CO_2$ 濃度を同時に測定することで，人の呼気によって発生した $CO_2$ がどのように拡散していくのかを分析する．単一の測定デバイスでは不織布を通してセンサ内の測定部に入った大気中の $CO_2$ 濃度を測定するため，局所的な測定しか行うことができない．そのため，空間中の $CO_2$ 濃度の分布を正確に測定するためには，測定デバイスを複数用いて $CO_2$ の拡散を同時に多点でセンシングする必要がある．それぞれの測定デバイスは搭載されている Bluetooth モジュールを介して，RaspberryPi3 と接続し，毎分データを取得する．センサが測定したデータはマイクロコントローラ（Atmega328p）を用いて取得し，Bluetooth モジュール経由で小型汎用端末である RaspberryPi3（モデル B）に送信する．RaspberryPi3 と測定デバイス間のシリアル通信には Universal Asynchronous Receiver/Transmitter（UART）を利用した．RaspberryPi3 は 1 台につき，6 台まで安定して測定デバイスと接続することができた．本研究では $CO_2$ の拡散を検証するために最大 12 台の測定デバイスを升目上に配置する必要があり，2 台の RaspberryPi3 を利用した．**図 1** に作成したシステムの概要図を示す．

### 3.2　測定デバイス

本研究では $CO_2$ 濃度の測定のために Figaro 社が提供している「CDM7160 $CO_2$ センサーモジュール」[11]，および室内の温度変化を確認するために温度センサである BME280 を搭載した測定デバイスを作成した．CDM7160 $CO_2$ センサーモジュールの選定理由としてデータ出力が従来までの $CO_2$ 濃度センサに多いアナログ出力ではなく，デジタル出力であること，また精度が 300 から 5,000 ppm の範囲において ±50 ppm に出力値の 3%を加算した値であり，従来までのセンサに比べて高いことがあげられる．このセンサは Non-Dispersive InfraRed（NDIR）と呼ばれる手法で $CO_2$ 濃度を測定する．NDIR では特定の波長の赤外線を対象とする気体（室内の空気）に照射し，その増減を測定することで内包されている物質（$CO_2$）の濃度の計測を行う [11]．不織布を通してセンサ内の測定部に入った大気中の $CO_2$ 濃度を測定するため，測定範囲はセンサ部の 1 点に限られる．また BME280 の精度は −45 から 85°C の範囲において ±1°C である．**図 2** に作成した測定デバイスの外観図および $CO_2$ 濃度センサの内部構造を Technical Information [11] から抜粋し示す．なお取得したデータが正しく取得されていることを確認するために，建築物衛生法に基づいて開発され，補正済みの機器として柴田科学株式会社製の室内環境測定セット IES-5000 型 [12] を利用し，今回利用した 12 台の測定デバイスの補正を行った．具体的には $CO_2$ 濃度が 450 ppm および 1,500 ppm の異なる濃度のガスが充満した環境において，同時に $CO_2$ 濃度を測定し，その結果から 2 点検量線 [13] を利用して補正した．その結果，今回作成した測定デバイスの出力値の誤差が ±50 ppm に出力値の 3%を加算した値以内であることを確認した．

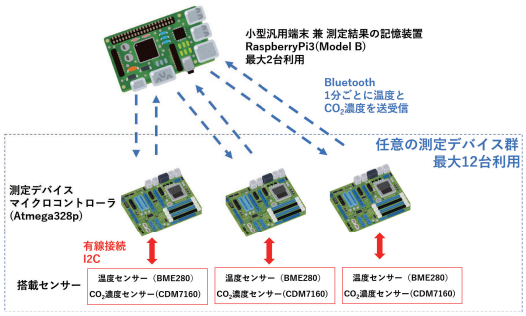



図 1　システム概要図
**Fig. 1**　System concept diagram.

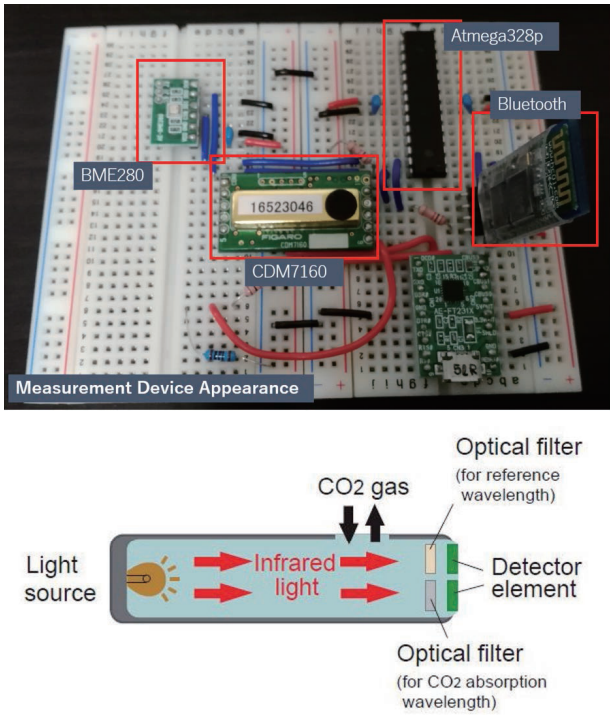



図 2　測定デバイス外観と $CO_2$ 濃度センサ機構
**Fig. 2**　Measurement device and $CO_2$ sensor mechanism.

© 2021 Information Processing Society of Japan

## 4. 室内における $CO_2$ 拡散傾向の分析

### 4.1 実験環境および方法

本章では室内の複数箇所の $CO_2$ 濃度を同時に測定することで，人の呼気によって発生した $CO_2$ がどのように拡散していくのかを分析する．本章におけるすべての実験は容積 197.0 $m^3$ の同一の部屋（スタジオ）で行った．実験中は外気からの影響によって $CO_2$ 濃度に偏りが出ることを防ぐために，すべての扉の隙間や換気口，開口部に目張りをした．また本スタジオは地下室にあり，外気と接する形での窓などの開口部は存在しない．実験後は空調の目張りの 1 カ所と扉の目張り 1 カ所を外し，空調を作動させ，被験者を退出させることで十分に換気した．室内の $CO_2$ 濃度が建物内の外気と同程度（測定デバイスによる測定で 450 ppm 前後）まで減少したことを確認して次の実験を開始した．被験者は全員 18 歳以上の男性であり，実験中は座位の姿勢で安定した呼吸をするように指示し，ある程度の会話は許可した．実験時間はすべての条件において 60 分とし，それぞれの条件で実験を 2 回行い，その平均値を実験結果とした．室内において急激な温度変化がなかったことを示すために実験中の室内温度を 1 分ごとに測定した．

本章では室内における人の呼気によって発生する $CO_2$ の拡散傾向を分析するために，被験者の位置から異なる距離と高さにおいて $CO_2$ 濃度がどのように変化していくのかを分析する．また，実空間では必ずしも利用者が 1 カ所に固まって作業しているとは考えにくいことから，複数の被験者を異なる位置に配置した場合および，1 カ所に固まっている場合での $CO_2$ 濃度の変化の測定，分析を行った．本研究ではそれぞれの条件下での各実験をそれぞれ Case1，Case2，Case3 とする．Case1 では被験者と測定デバイスとの距離，Case2 では被験者と測定デバイスの高低差，Case3 では複数の被験者の位置によって，それぞれ室内の $CO_2$ の拡散にどのような影響が出るのかについて測定および分析をした．

Case1 では測定デバイスを被験者 3 名から直線上に 1 m 間隔に配置し，被験者間の距離は 0.3 m とした．測定デバイスは床に設置し，高さは 0 m とした．Case1 における被験者およびデバイスの配置を**図 3** に示す．

Case2 では被験者 3 名を部屋の端に配置し，測定デバイスは被験者から 1 m および 8 m 離れた場所の高さ 0 m (床)，1 m，2 m の 6 カ所に配置し，被験者同士の距離は 1 m とした．Case2 における被験者およびデバイスの配置を**図 4** に示す．

Case3 では被験者 4 名を部屋の四隅または中央に配置した．部屋の四隅に被験者を配置した実験を Case3a，中央に配置した実験を Case3b とする．測定デバイスは室内を網羅するように 4 × 3 の升目上に 2 m の間隔に配置し，四隅に被験者を配置した場合の被験者同士の距離は 8 m もしくは 6.5 m とした．なお，測定デバイスは床に設置し，高さは 0 m とした．中央に被験者を配置した場合の被験者間の距離は 1 m とした．実験における被験者およびデバイスの配置を**図 5** に示す．

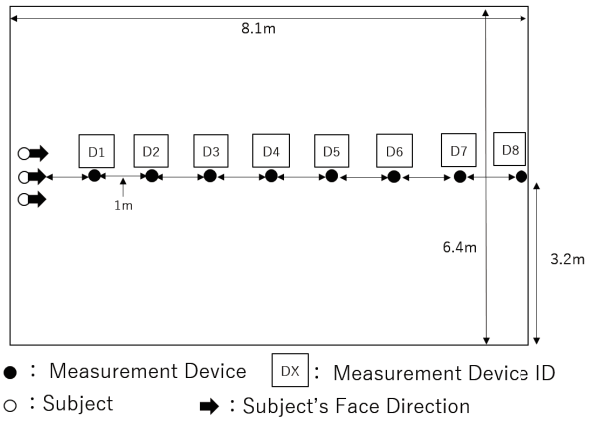



**図 3**　Case1 における測定デバイスと被験者の位置
**Fig. 3**　Position of subjects and measurement devices in Case1.

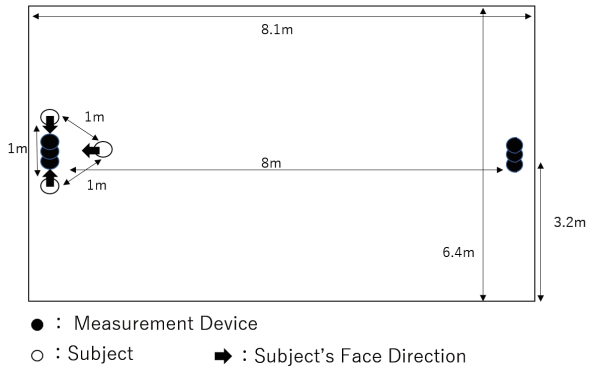



**図 4**　Case2 における測定デバイスと被験者の位置
**Fig. 4**　Position of subjects and measurement devices in Case2.

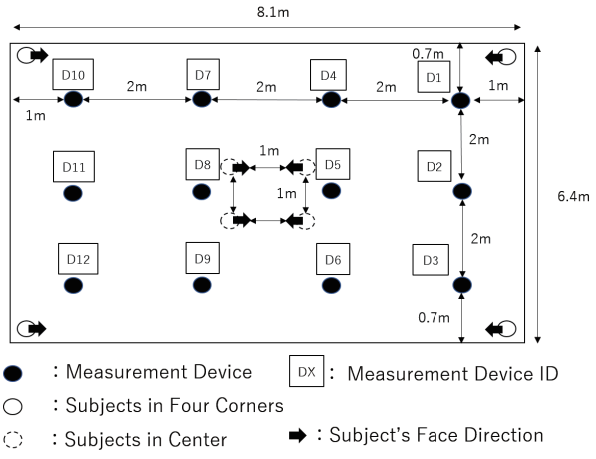



**図 5**　Case3a および 3b における測定デバイスと被験者の位置
**Fig. 5**　Position of subjects and measurement devices in Case3a and 3b.

© 2021 Information Processing Society of Japan

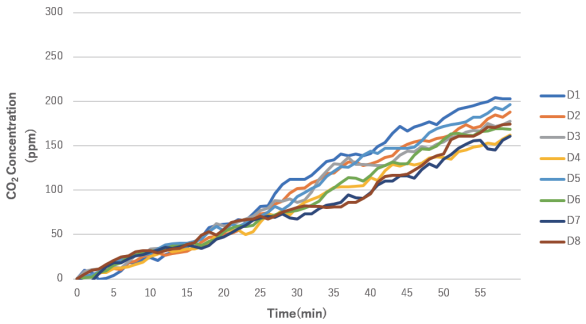



図 6　Case1 における $CO_2$ 濃度変化量（D*は図 3 の設置位置に対応）

**Fig. 6**　$CO_2$ concentration change in Case1 (D* means Device ID; these correspond to Fig. 3).

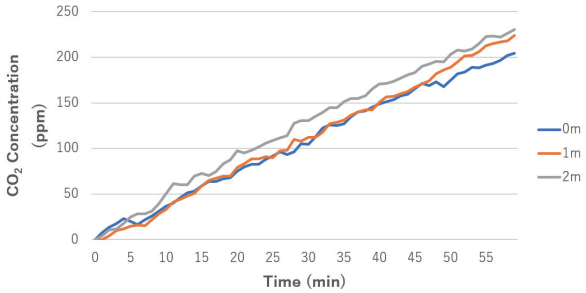



図 7　Case2 における被験者からの 1 m 付近の $CO_2$ 濃度変化量

**Fig. 7**　$CO_2$ concentration change in 1 m away from subjects in Case2.

### 4.2　実験結果

すべての実験結果のグラフでは x 軸は経過時間，y 軸は実験開始からの $CO_2$ 濃度の変化量を表している．Case1 の実験結果を**図 6** に示す．図 6 から，すべての距離においてほぼ同じ時間間隔で 150 から 200 ppm 程度 $CO_2$ 濃度が上昇し 700 ppm 程度となっており，変化量が測定センサの誤差範囲に収まっていることから，被験者と測定デバイスの距離は $CO_2$ の拡散に影響を与えないと考えられる．

Case2 の被験者との距離が 1 m のデバイス群の実験結果を**図 7** に，8 m のデバイス群の実験結果を**図 8** に示す．図 7 および図 8 が示すように $CO_2$ 濃度の変化量は時間によって高低差に関係なく増加し，計測開始後 60 分で 200〜250 ppm 程度上昇し，750 ppm 程度になった．被験者との距離が 8 m となっている図 8 では一時的に $CO_2$ 濃度が測定デバイスの持つ誤差範囲を超えて大きく上昇している箇所が存在するが，次の測定時には他のセンサと同程度の値まで減少していることから，一時的な計測誤差であると考えられる．Case1 と同様に変化量が測定センサの誤差範囲に収まっていることから，高低差による $CO_2$ の拡散に変化はなかったと考えられる．

被験者を四隅に配置した Case3a の実験結果を**図 9**，中央に配置した Case3b の実験結果を**図 10** に示す．また Case3 における最終的な $CO_2$ 濃度の変化量を**表 1** に示す．

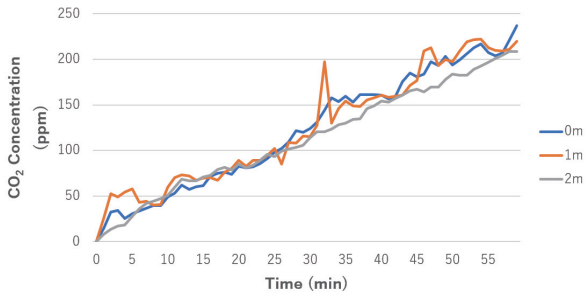



図 8　Case2 における被験者からの 8 m 付近の $CO_2$ 濃度変化量

**Fig. 8**　$CO_2$ concentration change in 8 m away from subjects in Case2.

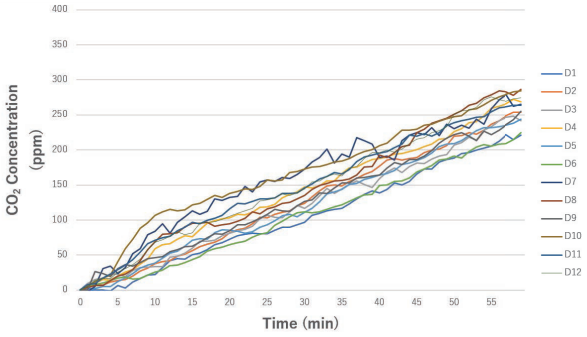



図 9　Cas3a における $CO_2$ 濃度変化量（D*は図 5 の設置位置に対応）

**Fig. 9**　$CO_2$ concentration change in Case3a (D* means Device ID; these correspond to Fig. 5).

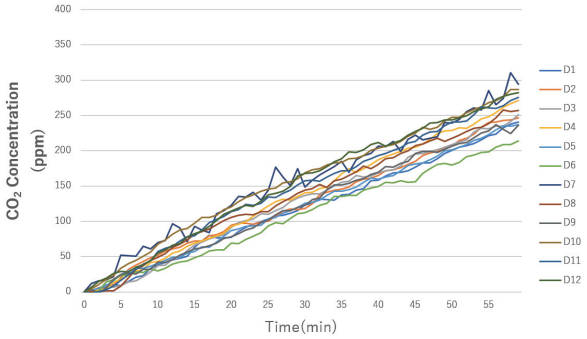



図 10　Cas3b における $CO_2$ 濃度変化量（D*は図 5 の設置位置に対応）

**Fig. 10**　$CO_2$ concentration change in Case3b (D* means Device ID; these correspond to Fig. 5).

表 1 の太字になっている測定デバイスはそれぞれの実験において $CO_2$ 濃度の変化量が大きかった上位 6 つを示す．図 9 および図 10 が示すように，最終的にすべてのセンサで 200〜300 ppm 程度の濃度の上昇が見られ，800 ppm 程度となった．図 9 および図 10 から測定デバイスの場所に応じて $CO_2$ 濃度にばらつきが出ているようにも見えるが，表 1 が示すように Case3a および Case3b の実験においても $CO_2$ 濃度の変化量が大きかった上位 6 つのデバイス（D4，D7，D8，D10，D11，D12）は両方の条件において

© 2021 Information Processing Society of Japan

表 1 Case3a と Case3b における $CO_2$ 濃度変化量
**Table 1** $CO_2$ concentration in Case3.

| Measurement Devices ID | Case3a (ppm) | Case3b (ppm) |
|---|---|---|
| D1 | 221.0 | 241.0 |
| D2 | 254.0 | 246.5 |
| D3 | 241.5 | 251.5 |
| **D4** | **269.0** | **271.0** |
| D5 | 243.5 | 237.0 |
| D6 | 224.5 | 214.0 |
| **D7** | **265.0** | **294.5** |
| **D8** | **286.5** | **257.0** |
| D9 | 255.5 | 236.0 |
| **D10** | **284.5** | **287.0** |
| **D11** | **263.5** | **276.0** |
| **D12** | **274.5** | **282.5** |

も同じであった．また，Case3a と Case3b の条件におけるそれぞれの測定デバイスの最終的な $CO_2$ 濃度の変化量を比較するとすべてのデバイスにおいてその変化量は測定センサの誤差範囲内に収まっている．以上のことから被験者の配置による室内の $CO_2$ 濃度の変化はないといえるため，人の位置による $CO_2$ 拡散への影響はないと考えられる．

実験中の平均室内温度は Case1 では実施した 2 回の実験でどちらも 24°C，Case2 では 20 および 21°C，Case3 では 21 および 22°C であり，すべての条件において ±2°C 以上の変化はなかった．

### 4.3 考察

以上の実験結果から，現在のタスク条件において，$CO_2$ 濃度が 1,000 ppm 程度の空間では被験者との距離，高低差，被験者との位置のいずれの条件においても大きな $CO_2$ 濃度への影響は見られず，利用したセンサの誤差も考慮すれば拡散する $CO_2$ への影響は軽微であると考えられる．よって，室内において外部からの影響がない条件下で $CO_2$ 濃度を測定する場合，同時多点で測定を行う必要はなく，局所的な測定であっても測定デバイスの誤差の範囲内で室内の $CO_2$ 濃度を把握することができることが明らかになった．

## 5. 予測モデルによる予測値と実測値の比較実験

### 5.1 濃度予測モデル

室内において初期状態から存在する気体の濃度の経時変化は，発生量が一定である場合，一般的に以下の式 (1) によって表される [14]．

$$C = C_0 + \frac{M}{NV}(1 - e^{-Nt}) \tag{1}$$

$C$ 室内空気中の気体濃度（mg/m$^3$）
$C_0$ 対象気体の外気濃度（mg/m$^3$）
$t$ 経過時間（h）
$V$ 室内の容積（m$^3$）
$M$ 気体の発生量（mg/h）
$N$ 換気回数（回/h）

式 (1) における換気回数とは対象となる室内における換気量（m$^3$/h）を容積（m$^3$）で割ったパラメータとなる．本研究では，人の呼気から拡散する $CO_2$ を扱っており，濃度は体積濃度（ppm）で表現している．そのため，単位を揃えるために式を整えると式 (2)（以下，ザイデルの式）を得る．予測モデルでは計測初期は線形に近い形で $CO_2$ 濃度は上昇していくものの，時間経過によって一定の濃度に漸近する．本研究では式 (2) を室内における $CO_2$ 濃度の予測モデルとして用い，この定常状態になるまでの $CO_2$ 濃度の予測値を，$CO_2$ 濃度センサの同時多点センシングによる実測値と比較し評価する．

$$C = \left(C_0 + \frac{nE}{NV}(1 - e^{-Nt})\right) \times 10^6 \tag{2}$$

$C$ 室内空気中の気体濃度（ppm）
$n$ 室内の被験者人数（人）
$E$ 被験者 1 人あたりの $CO_2$ 排出量（m$^3$/h）

### 5.2 実験環境および方法

本章では室内の容積と被験者の人数が異なる場合において，測定デバイスによって計測される $CO_2$ 濃度の変化と 5.1 節にて説明した既存の $CO_2$ 濃度予測モデルによる濃度変化を比較および分析する．本来，ザイデルの式による気体濃度予測モデルは，定常状態あるいは瞬時一様拡散であることが前提条件であり，人の呼気は瞬時一様拡散ではないため，その前提条件を満たしてはいない．しかし，4 章の実験結果から，1 分間隔の測定という条件において室内の $CO_2$ 濃度がセンサの誤差の範囲内で一様に上昇していることが確認された．これらの実験結果から人の呼気から拡散する $CO_2$ は瞬時一様拡散ではないが，1 分間隔での測定および本測定デバイスの精度という条件のもと，測定点近傍においては擬似的にではあるが瞬時一様拡散と同様に室内の濃度が上昇していると考え，本予測モデルを適用した．実験では同一建物中の地下同一階層にある大きさの異なる 3 つの部屋（スタジオ大中小）において，被験者を 2 名，4 名，6 名の状態で待機させ，$CO_2$ 濃度がどのように上昇するのかを計測した．実験時間は 30 分とし，スタジオの容積はそれぞれ，スタジオ大は 197.0 m$^3$，スタジオ中は 48.5 m$^3$，スタジオ小は 22.2 m$^3$ で，高さは 3.8 m，2.5 m，3.0 m である．測定デバイスを室内の 6 カ所に設置し，センサの誤差を考え，最終的な $CO_2$ 濃度の上昇量が最大と最小になった 2 つの測定デバイスを除いた 4 つの平均値を室内における $CO_2$ 濃度の変化量とした．測定デバイスは床に設置し，高さは 0 m とした．室内における被験者の待機場所は被験者間の距離を等間隔にするため，2 名の場合は部屋の対角，4 名の場合は四隅，6 名の場合は四隅および部屋の長辺の中央とした．**図 11** に各部屋における被験

© 2021 Information Processing Society of Japan

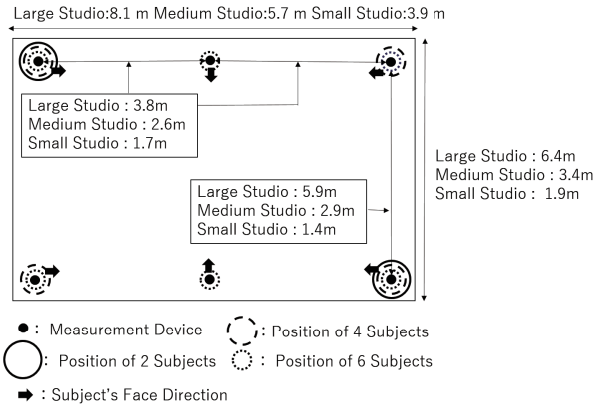



図 11 各スタジオにおける被験者と測定デバイスの位置
**Fig. 11** Position of subjects and measurement devices in three conditions.

者の配置および距離を示す．本実験において，測定デバイスは被験者の着座している椅子の下に設置し，被験者との距離はほぼないものとする．それぞれの条件において実験を 4 回行い，その平均値を実験結果とした．4 章と同様に室内において急激な温度変化がなかったことを示すために実験中の室内温度を 1 分ごとに測定した．また本研究では短時間かつ少ない被験者数で室内の $CO_2$ 濃度を上昇させるために室内の換気口，開口部および扉の隙間に目張りを行った．また実験で使用したスタジオは地下室であり，窓などの開口部は存在しない．実験後は，容積以外の換気量の影響，および実験ごとの換気量の変化を小さく留めるために，空調の目張りの 1 カ所と扉の目張り 1 カ所を外し，空調を作動させ，被験者を退出させることで，室内の $CO_2$ 濃度が建物内の外気と同程度（測定デバイスによる測定で 450 ppm 程度）まで減少したことを確認して次の実験を開始した．

ザイデルの式に使用する各スタジオの換気回数のパラメタは以下の手法で定めた．**図 12** のようにそれぞれの室内に測定デバイスを設置し，室内の $CO_2$ 濃度を計測し，その平均値を室内の $CO_2$ 濃度とした．D1，D2，D3 は床（高さ 0 m），D4，D5，D6 については同じ位置の異なる高さ（0 m，1 m，2 m）に設置し，それぞれの測定デバイスは D2 を除き最寄りの壁から 10 cm 程度離した場所に設置した．次に最大 10 人の被験者を室内に待機し，室内の $CO_2$ 濃度を 2,000 ppm 以上まで上昇させた．その後，被験者は退出し，外部から扉に対する目張りを再度行った．退出による空気の流入の影響を考え，退出後 30 分後の $CO_2$ 濃度を初期濃度として，その時間から 1 時間後の $CO_2$ 濃度と比較し換気量を算出した．算出には JIS 規格 A1406 に定められた炭酸ガス法による算出式 [4] である式 (3) を利用し，それぞれの換気回数を定めた．

$$Q = 2.303\frac{V}{t}\log_{10}\frac{C_1 - C_0}{C_t - C_0} \tag{3}$$

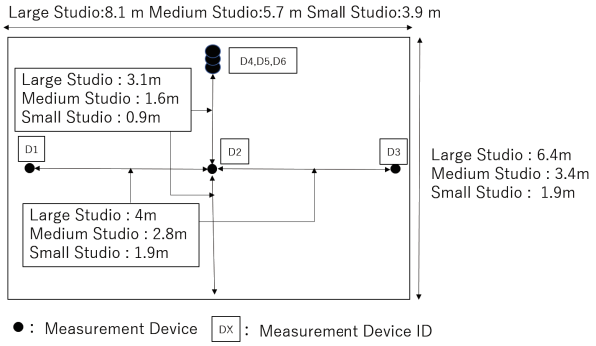



図 12 換気回数測定実験における測定デバイスの位置
**Fig. 12** Position of measurement devices in ventilation measurement experiment.

$Q$ 換気量（$m^3/h$）
$V$ 室内の容積（$m^3$）
$t$ 初回計測からの経過時間（h）
$C_1$ 初回計測時における室内の $CO_2$ 濃度（$mg/m^3$）
$C_t$ $t$ 時間後における室内の $CO_2$ 濃度（$mg/m^3$）
$C_0$ 対象気体の外気濃度（$mg/m^3$）

建物内の $CO_2$ 濃度は約 450 ppm で安定していたため，単位変換を行い $C_0$ とした．式 (3) から算出した結果，各スタジオの換気回数はスタジオ小が 0.67 回/h，スタジオ中が 0.23 回/h，スタジオ大が 0.08 回/h となり，容積によって換気回数は異なる結果が得られた．予測モデルの算出では，被験者の $CO_2$ 排出量を JIS A 1406 によって定められている数値 [4] を参考とした．JIS A 1406 によれば着座事務作業時の $CO_2$ 発生量は 0.0129 から 0.0230 $m^3/h$ とされている．そのため，被験者 1 人あたりから発生する $CO_2$ 排出量をその中央値として 0.0180 $m^3/h$ と定めた．

### 5.3 実験結果

スタジオ大中小の環境において，被験者の人数を変化させた結果を予測モデルの結果とともに**図 13**，**図 14**，**図 15** のグラフに示す．ただし，スタジオ小において被験者 6 名で実験を行った際に，室内の $CO_2$ 濃度が 2,000 ppm を超えようとしたため，被験者の健康への影響に鑑みて実験を中止した．すべての実験において平均室内温度は 19 から 22°C であり，実験中に ±2°C 以上の変化はなかった．図 13 が示すようにスタジオ小においては被験者 2 名，4 名の条件において予測値と実測値の差は最大でそれぞれ 41.9 および 77.2 ppm とほぼ同様に上昇している．それに対して図 14 および図 15 が示すようにスタジオ中，大では明らかに実測値と予測値には乖離が見られ，それぞれの被験者数においてスタジオ中では最大 200 から 500 ppm 程度の差が，スタジオ大では最大 70 から 200 ppm 程度の差があった．よって予測モデルは，換気回数が少ない環境では実測値との値に乖離が発生することが明らかになった．

© 2021 Information Processing Society of Japan

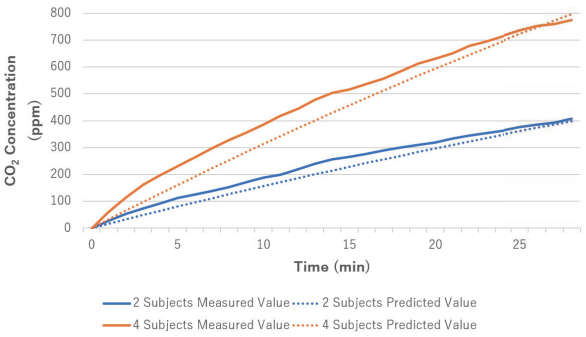



図 13　スタジオ小における $CO_2$ 濃度の実測値と予測値（被験者 2 名と 4 名）

**Fig. 13**　Predicted and measured values of $CO_2$ concentration in the small studio (2 and 4 subjects).

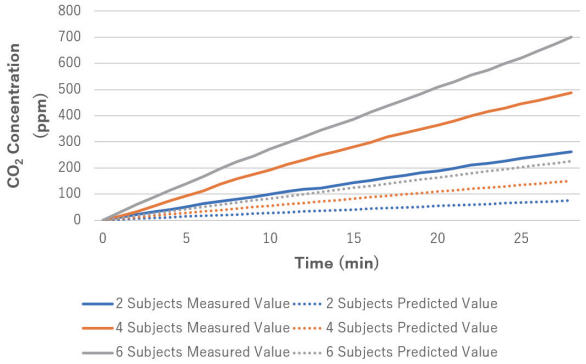



図 14　スタジオ中における $CO_2$ 濃度の実測値と予測値（被験者 2 名，4 名，6 名）

**Fig. 14**　Predicted and measured values of $CO_2$ concentration in the medium studio (2, 4 and 6 subjects).

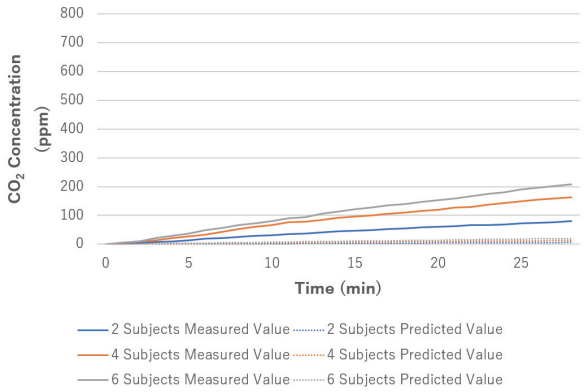



図 15　スタジオ大における $CO_2$ 濃度の実測値と予測値（被験者 2 名，4 名，6 名）

**Fig. 15**　Predicted and the measured values of $CO_2$ concentration in the large studio (2, 4 and 6 subjects).

### 5.4　考察

これらの実験結果から，現在のタスク条件において，換気回数が一定以上の環境であれば室内における $CO_2$ 濃度の予測にはザイデルの式は十分有用であった．しかし，実験を行ったスタジオ中や大のように換気回数が少ない環境では，予測モデルとの差が増加するため，測定デバイスを利用することが必要であると考えられる．また，目張りの貼り直しによる換気回数への影響が多少あったとしても，本実験の結果から明らかに多少の換気回数の変化ではスタジオ中および大の予測結果を修正できるものではなく，スタジオ小の結果においても同様に考えられ，モデルの予測値を大きく変化させるものであるとは考えられない．

## 6.　まとめ

近年の室内空気質の研究結果において，$CO_2$ 濃度が人の知的活動の質に大きな影響を及ぼすことが明らかになり，室内の $CO_2$ 濃度を一定以下に保つことが必要となった．そこで本研究では同時多点測定システムを用いて，換気量の少ない空間での人の呼吸による $CO_2$ の拡散傾向を分析した．そして，その結果から既存の気体濃度予測モデルのなかから一様拡散に利用可能な気体濃度予測モデルとしてザイデルの式を選択した．このザイデルの式による予測値と測定デバイスによる実測値を比較することで気体濃度予測モデルの実空間における評価を行った．

まず始めに，人の呼気に含まれる $CO_2$ が自然換気のように換気回数が少ない室内において，センサとの距離，高低差および被験者の位置による拡散への影響を検証し，室内の $CO_2$ 濃度の拡散傾向を分析した．これらの検証を行うために高精度およびデジタル出力が可能な $CO_2$ 濃度センサを搭載した測定デバイスを作成し，従来までの室内で行われていた局所的な測定ではなく，同時多点センシングを用いて室内全体の濃度変化を測定することが可能なシステムを構築した．さらに，室内における $CO_2$ 濃度センサの精度と一般的な利用者の平均的な $CO_2$ 排出量という一定の誤差がある条件において，予測モデルとして選定したザイデルの式と測定デバイスによる実測値にどの程度の乖離が発生するのか検証した．

実験結果から，換気回数が 0.08 回/h と非常に少ないスタジオ大においても，被験者との距離，高低差，被験者同士の位置のいずれの条件においても，利用したセンサの誤差も考慮すれば拡散する $CO_2$ への影響は軽微であると考えられる．よって，室内において外部からの影響がない条件下で $CO_2$ 濃度を測定する場合，同時多点で測定を行う必要はなく，局所的な測定であっても測定デバイスの誤差の範囲内で室内の $CO_2$ 濃度を把握することができることが明らかになった．

次に，拡散傾向の分析結果を基に 1 分間隔による測定，使用した $CO_2$ 濃度センサの精度という条件下において，測定点近傍においては擬似的にではあるが瞬時一様拡散と同様に室内の濃度が上昇していると考え，予測モデルとしてザイデルの式を用いることとした．同一建造物中の地下同一階層にある容積の異なる室内において，被験者の人数を変更し，$CO_2$ 濃度の実測値とザイデルの式による予測モデ

© 2021 Information Processing Society of Japan

ルを用いた予測値との比較検証を行った．その結果，換気回数が一定以上の環境であれば室内における $CO_2$ 濃度の予測には予測モデルは十分有用であると考えられるが，換気回数が少ない環境では，予測モデルによる予測値と実測値には大きな乖離が見られた．よって，$CO_2$ 濃度の予測を行う場合においては測定デバイスを利用し，計測することが必要であると考えられる．今後さらなる予測精度向上を目指して異なるセンサの利用や測定システムを作成し，モデルへの応用も検討したい．また，本研究では予測モデルおよび測定デバイスによるリアルタイム計測によって，$CO_2$ の上昇を予測したが，$CO_2$ 濃度の知的活動への影響を検証するには至らなかった．今後の研究として実空間でのインタラクションへの影響についても検証したいと考えている．

将来的に室内における人の呼気による $CO_2$ 濃度の変化を予測することが可能となれば，$CO_2$ 濃度が人の知的活動への妨げになる前に自動換気システムなどとの連携によって，室内環境を人の知的活動の質を保つことができる最適な状態にすることが可能になる．そして，本研究では測定デバイスに $CO_2$ 濃度センサと温度センサのみを搭載したが，その他の目的に合わせてセンサを入れ替えることで様々な用途で同時多点センシングが可能になる．目的に応じたセンサを活用することで，これらの技術は会議室やオフィスだけでなく，一般家庭や学校など様々な場面においても有効であると考えられる．

**謝辞** 本研究を行うにあたり，実験に利用した $CO_2$ 濃度センサを提供して頂いた環境リサーチ株式会社に感謝の意を表する．

本研究における実験は慶應義塾大学 SFC 実験・調査倫理委員会において 2019 年 11 月 20 日に承認された倫理規定に基づいて行われている．

## 参考文献


[1] Gligorovski, S. and Abbatt, J.P.D.: An indoor chemical cocktail, *Science*, Vol.359 (2018).

[2] 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 (2016).

[3] Satish, U., Mendell, M.J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S. and Fisk, W.J.: Is CO2 an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO2 concentrations on human decision-making performance, *Environ, Health Perspect*, Vol.120, pp.1671–1677 (2012).

[4] 日本産業標準調査会データベースより JIS A 1406，入手先 ⟨https://www.jisc.go.jp/app/jis/general/GnrJISNumberNameSearchList?toGnrJISStandardDetailList⟩（参照 2020-04-13）.

[5] Mott, K.A.: Sensing of atmospheric CO2 by plants, *Plant, Cell & Environment*, Vol.13, No.7 (1990).

[6] Kawasumi, K. and Iwai, M.: Non-contact concentration-level estimation system using multiple-sensors, IPSJ SIG Technical Report, Vol.2017-HCI-171, No.35 (2017).

[7] Eusebio, L., Derudi, M., Capelli, L., Nano, G. and Sironi, S.: Assessment of the Indoor Odour Impact in a Naturally Ventilated Room, *Sensors*, Vol.17, No.4, p.778 (2017).

[8] Batoga, P. and Badura, M.: Dynamic of Changes in Carbon Dioxide Concentration in Bedrooms, *Procedia Engineering*, Vol.57 (2013).

[9] 三井健史，濱川 礼：グループワークにおける作業者の疲労検出と休憩タイミング提案システム，情報処理学会，インタラクション 2017 (2017).

[10] 小林竜司，中田豊久：頭部の動きに着目した非接触型の集中度測定方法の開発，第 75 回全国大会講演論文集，Vol.2013, No.1 (2013).

[11] CDM7160 $CO_2$ センサーモジュール：Technical Information，入手先 ⟨https://cdn.sos.sk/productdata/52/08/dadc87c9/cdm7160.pdf⟩（参照 2020-04-13）.

[12] 柴田科学株式会社：室内環境測定セット IES-5000 型，入手先 ⟨https://www.sibata.co.jp/products/products-33651/?c=8⟩（参照 2020-04-13）.

[13] Miller, J.N. and Miller, J.C.: *Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry*, 6th ed., Prentice Hall, Chapter 5 (2010).

[14] 馬郡文平，熊谷一清，由岐中聡美，吉田仁美：住宅内の化学物質に関する基礎知識，建築雑誌，Vol.113 (1998).

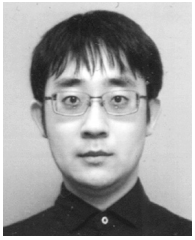
**守谷 元一** （学生会員）

2013 年 3 月慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修士課程を修了後，同年 4 月より慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科後期博士課程に進学，現在在籍中．IoT を利用した室内環境測定や機械学習を利用した画像処理に興味を持つ．

**渡邊 紀文**

2008 年 3 月慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科後期博士課程修了．玉川大学脳科学研究所嘱託研究員，東京工科大学コンピュータサイエンス学部助教，産業技術大学院大学産業技術研究科情報アーキテクチャ専攻助教を経て，2019 年より武蔵野大学データサイエンス学部・教育部会准教授，現在に至る．

© 2021 Information Processing Society of Japan



**宮本 賢良**

2014 年 3 月慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修士課程修了．同年 4 月より慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科後期博士課程に入学し，在籍中．人やロボットの他者の行動誘導を含む意思決定のモデル化に関する研究に従事．

**糸田 孝太**

2016 年 3 月慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修士課程修了．同年 4 月より慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科後期博士課程に入学し，在籍中．人間の協調的集団行動における行動決定過程のモデル構築に関する研究に従事．

**今仁 順也**

2012 年 3 月東京工科大学工学研究科修士課程修了．東京工科大学コンピュータサイエンス学部助手を経て，株式会社由紀精密に勤務．制御工学，人間とコンピュータの相互作用，知覚情報処理に関する研究に従事．

**青山 浩之**

2005 年 3 月東京理科大学卒業．現在，環境リサーチ株式会社勤務．IoT を利用した室内環境計測，機械学習を利用した人工鼻に関する研究に従事．

**武藤 佳恭**

1978 年慶應義塾大学工学部電気工卒業，1980 年同修士課程修了，1983 年同博士課程修了．同年工学博士．1983～1985 年南フロリダ大学コンピュータ学科助教授，1985～1988 年南カロライナ大学コンピュータ工学科助教授，1988～1996 年ケースウエスターンリザーブ大電気工学科准教授，1992 年同 tenured 受賞．1992～1997 年慶應義塾大学環境情報学部助教授，1997 年より同大学教授，現在に至る．研究：AI，ニューラルコンピューティング，セキュリティ，1992 年 IEEE Trans. NN 功労賞，1993 年 KAST 賞，1995 年高柳賞，1997 年 KDD 賞，1999 年 NTT tele-education courseware 賞，2003 年 US-AFOSR 受賞，第 1 回 JICA 理事長賞，2017 年 Jyvaskyla 大学 docent 称号，2018 年 Weihai 市長経済顧問．40 冊の本と 600 編以上の科学論文．35 人以上の博士主査．

© 2021 Information Processing Society of Japan