

博士論文 2020 年度

同時多点センシングを用いた室内空気質維持の研究
-二酸化炭素の拡散傾向分析及び感覚刺激を用いた呼吸制御-

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科
守谷元一

博士論文要旨 2020年度

同時多点センシングを用いた室内空気質維持の研究

-二酸化炭素の拡散傾向分析及び感覚刺激を用いた呼吸制御-

Internet of Things の普及、発達によって環境測定を行う高精度かつ小型なセンサーデバイスが開発され、様々な場面で利用されている。これらのセンサー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普段生活する場所でも利用され、環境の状態を数値化することで、人の感覚では捉えられないような環境の変化を定量的に評価することが可能になった。また、近年の室内空気質の研究において、二酸化炭素(以下 CO₂) が従来、問題ないとされていた低濃度であっても人の知的活動の質に悪影響を及ぼすことが明らかになった。

本研究では、室内全体の CO₂ 濃度を把握するため、換気回数の少ない空間及び 1000ppm(parts per million) 程度の低い濃度帯における実空間での人の呼吸の拡散傾向を同時多点センシングによって計測、分析する。一般的に、室内の気体の分析には数値流体力学のモデルを用いることが多い。しかし、CO₂ は既存研究において濃度変化の予測を行った際に、予測値と実測値に大きな乖離が見られたため、本研究では実空間における測定を行った。この拡散傾向から既存の気体濃度予測モデルから有効であると考えられるモデルを選定し、実空間における予測モデルの有効性を検証する。また CO₂ の発生源となる人の呼吸について聴覚や振動感覚の刺激によって人の呼吸回数が意識下で増減することは既存研究で明らかになっているが、呼吸回数の増減が人の CO₂ 排出量に影響を与えるか否かは検証されていない。本研究では、感覚刺激による意識下の呼吸制御が室内の CO₂ 濃度の上昇にどのような影響を与えるのか分析を行った。

本研究の実験結果から、人の呼気によって発生する CO₂ は換気回数が少なく、低い濃度であっても、室内においてほぼ均等に室内に拡散することが確認された。この拡散傾向からザイデルの式を予測モデルとして選定し、予測値と実測値の比較を行った。実験結果からザイデルの式は一定の換気回数がある空間においては有用であるが、換気回数が少ない空間においては予測値と実測値の乖離が大きく、測定機器を利用した CO₂ 濃度測定が必要であることが明らかになった。

ザイデルの式で制御できる換気量以外のパラメータとして、CO₂ 排出量に着目した。既存の研究成果から、感覚刺激によって意識下において呼吸数に変化が見られることが報告されているが、この呼吸数の変化による CO₂ 排出量への影響は明らかにされていない。本研究では、ウェアラブルデバイスを用いて、平常時と感覚刺激ある状態における、呼吸数と室内の CO₂ 濃度の変化量を比較した。実験結果から、平常時と比較して、呼吸数を減らすことによって室内の CO₂ 濃度の上昇は抑制されたが、呼吸数を増やすことにより、室内の CO₂ 濃度の変化量が増加することがないことを明らかにした。

以上の研究成果から、室内の CO₂ の濃度変化は換気回数の条件があるものの、ザイデル式を用いることで低濃度帯でも十分予測が可能であり、感覚刺激を用いた意識下の呼吸制御を行うことで室内の CO₂ 濃度の上昇を抑制できることを明らかにした。これらの研究成果は室内空気質維持への貢献が期待できる。

キーワード

- 1 二酸化炭素濃度 2 同時多点センシング 3 室内空気質
4 ウェアラブルデバイス 5 感覚刺激

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

守谷元一

Abstract of Doctoral Thesis Academic Year 2020

A Study of Indoor Air Quality Keep Up Using Simultaneous Multi-Point Sensing -Diffusion Tendency Analysis of Carbon Dioxide and Respiration Control Using Sensory Stimuli-

With the spread and development of the Internet of Things, highly accurate compact sensor devices for environmental measurement have been developed and used in various situations. These sensor devices are used not only in specific facilities, but also in places such as smart homes and smart offices, to quantitatively evaluate in the environment that cannot be perceived by the human senses. Recent studies on indoor air quality have shown that even a low concentration of carbon dioxide(CO₂) has an adverse effect on the quality of human intellectual activities, which were previously considered to be acceptable.

In this study, we use simultaneous multi-point sensing to measure and analyze the diffusion trend of CO₂ by human respiration in a low ventilation cycle space and low concentration band(around 1000 parts per million). In general, computational fluid dynamics models are often used to analyze gases in a room. However, in this study, we measured CO₂ in real space, because there was a large deviation between the predicted and measured concentrations of CO₂ in existing studies. Based on this diffusion tendency, we select an effective model from the existing models to predict the CO₂ concentration. In addition, it has been reported that the respiration rate of human can be changed unconsciously by auditory and vibration sense stimuli. However, it has not been verified whether the change would affect the amount of CO₂ emission. In this study, we analyze the effects of unconscious respiratory control by sensory stimuli to change of CO₂ concentration in a room.

From the experimental results of this study, it was confirmed that the CO₂ generated by human exhalation diffused almost evenly in the room even if the ventilation cycle and the concentration were low. Based on this diffusion tendency, Seidel's equation was selected as the prediction model, and the predicted values were compared with the measured values. The experimental results show that the Seidel's equation is useful in spaces with ventilation cycle above certain threshold, but needs actual measurement in spaces under low ventilation cycle.

Next, we focused on CO₂ emissions as one of the controllable parameters in Seidel's equation. It has been reported that the respiratory rate is changed by sensory stimuli in unconsciousness, however it is not clear how this change in respiratory rate affects CO₂ emissions. In this study, to clarify the relationship between the respiratory rate and CO₂ emission, we compared the change in respiratory rate and CO₂ concentration in the room during normal state and when auditory and vibration sense were stimulated by a wearable device. The experimental results showed that reducing the respiratory rate suppressed the increase in CO₂ concentration, but increasing the respiratory rate did not increase the change in CO₂ concentration as compared to the normal state.

These results indicate that the change in indoor CO₂ concentration is predictable even in the low concentration range using the Seidel equation, although there is a condition for the number of ventilation cycles, and that unconscious respiratory control using sensory stimuli can reduce CO₂ emissions in humans. These research results can be expected to contribute to keep up constant indoor air quality.

Key Word

1 Carbon Dioxide Concentration 2 Simultaneous Multi-Point Sensing
3 Indoor Air Quality 4 Wearable Device 5 Sensory Stimuli

Keio University Graduate School of Media and Governance

Motokazu Moritani

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	4
1.3	研究概要	6
1.4	本論文の構成	8
第 2 章	本研究の位置づけ及び関連研究	9
2.1	CO ₂ 濃度による影響と利用事例	9
2.2	CO ₂ 濃度に関する環境基準	12
2.2.1	許容濃度	12
2.2.2	室内環境基準	12
2.2.3	換気方法	13
2.3	居住環境における環境計測	14
2.4	呼吸制御に関する研究	16
第 3 章	提案手法	17
3.1	要素技術	17
3.1.1	デバイス構成	17
3.1.2	通信プロトコル	18
3.1.3	Raspberry Pi	19
3.2	同時多点センシングシステム	21
3.2.1	システム概要	21
3.2.2	測定デバイス	23
3.2.3	CO ₂ 濃度の測定アルゴリズム	25
3.3	聴覚・振動感覚刺激デバイス	27
第 4 章	同時多点センシングによる CO₂ の拡散傾向分析	29
4.1	実験目的	29
4.2	液体炭酸ガスボンベと人の呼吸の拡散傾向の検証	29
4.2.1	検証環境	29
4.2.2	検証条件	30
4.2.3	検証結果	31
4.2.4	検証における考察	35
4.3	実験環境及び方法	36
4.4	実験結果	40

4.4.1	Case1：実験結果	40
4.4.2	Case2：実験結果	40
4.4.3	Case3a 及び Case3b：実験結果	42
4.5	考察	44
第 5 章	拡散傾向に適した CO₂ 濃度予測モデルと実測値の比較	45
5.1	実験目的	45
5.2	気体濃度予測モデルの選定	45
5.3	実験環境及び方法	48
5.4	各スタジオにおける換気回数	50
5.5	実験結果	52
5.6	考察	54
第 6 章	感覚刺激を用いた呼吸制御による CO₂ 排出量への影響	55
6.1	実験目的	55
6.2	聴覚刺激を用いた呼吸制御に適した音源の検証	55
6.2.1	検証環境	55
6.2.2	検証条件	56
6.2.3	検証結果	57
6.2.4	検証における考察	59
6.3	実験方法	60
6.3.1	実験環境及び条件	60
6.3.2	呼吸回数測定方法	61
6.4	実験結果	63
6.5	考察	67
6.5.1	感覚刺激による呼吸数への影響	67
6.5.2	室内の CO ₂ 変化に与える影響	69
第 7 章	まとめと将来の課題	71
7.1	拡散傾向に適した予測モデルによる CO ₂ 濃度変化予測	71
7.2	感覚刺激を用いた呼吸制御による室内の CO ₂ 濃度変化への影響	72
7.3	今後の課題	73
第 8 章	結論	74
	謝辞	76
	本研究に関する発表一覧	77
	参考文献	79

目 次

1.1	日本の外気における CO ₂ 濃度の変化 [5]	2
1.2	研究コンセプト図	5
2.1	Piotr Batoga らの実験配置図 [4]	10
2.2	Piotr Batoga らの実験結果 [4]	11
2.3	スマートセンシングシステムの概念図 [26]	14
3.1	Atmega328p PIN 配置 [32]	18
3.2	I ² C の接続例 [33]	19
3.3	Raspberry Pi 3 model B[34]	20
3.4	システム概要図	22
3.5	実験概要図	22
3.6	測定デバイス及び利用パーツ外観	23
3.7	測定デバイス回路図	24
3.8	CDM7160 の内部構造 [35]	26
3.9	感覚刺激システム図	27
3.10	A:Android 端末, ヘッドホン, BU10 B:BU10 の装着の様子	28
4.1	実験 1,2 における 4 方向の測定デバイス配置図及びその区分	30
4.2	炭酸ガスボンベによる 4 方向の CO ₂ 濃度の時系列変化 (上から SectionA,B,C,D)	32
4.3	被験者による 4 方向の CO ₂ 濃度の時系列変化 (上から SectionA,B,C,D)	34
4.4	Case1 における測定デバイスと被験者の位置	37
4.5	Case2 における測定デバイスと被験者の位置	38
4.6	Case3a 及び Case3b における測定デバイスと被験者の位置	39
4.7	Case1 における CO ₂ 濃度変化量 (D*は図 4.4 の設置位置に対応)	40
4.8	Case2 における被験者から 1m 付近の CO ₂ 濃度変化量	41
4.9	Case2 における被験者から 8m 付近の CO ₂ 濃度変化量	41
4.10	Case3a における CO ₂ 濃度変化量 (D*は図 4.6 の設置位置に対応)	42
4.11	Case3b における CO ₂ 濃度変化量 (D*は図 4.6 の設置位置に対応)	43
5.1	各スタジオにおける被験者と測定デバイスの位置	48
5.2	換気回数測定実験における測定デバイスの位置	50
5.3	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, 4 名)	52
5.4	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)	53
5.5	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)	53

6.1	検証における被験者と計測デバイスの配置図	57
6.2	Case1,2,5 における室内の CO ₂ 濃度の時系列変化	58
6.3	Case3,4,5 における室内の CO ₂ 濃度の時系列変化	58
6.4	実験中の被験者と測定デバイスの配置	61
6.5	呼吸数測定デバイス:SpireStone	62
6.6	チーム 1 におけるそれぞれの条件下における CO ₂ 濃度の変化量	64
6.7	チームにおけるそれぞれの条件下における CO ₂ 濃度の変化量	64
6.8	1 時間の実験における CO ₂ 濃度の変化量	66
6.9	1 時間の実験における室内の CO ₂ 濃度変化	70

表 目 次

2.1	許容濃度の一覧	12
2.2	室内環境基準の一覧	13
3.1	12 台の測定デバイスの校正値	24
4.1	Case3a と Case3b における CO ₂ 濃度変化量	43
5.1	各スタジオにおける換気回数	51
6.1	音源一覧	56
6.2	実験終了時 CO ₂ 濃度の変化量	59
6.3	Case1 から Case5 における被験者の平均呼吸数 [回/min]	63
6.4	30 分間の実験終了時の CO ₂ 濃度の変化量 (ppm)	65
6.5	1 時間の実験における被験者の平均呼吸回数 [回/min]	66
6.6	Case1 から Case5 の 1 試行における 平均呼吸数の最小値 [回/min]	67
6.7	Case1 から Case5 の 1 試行における平均呼吸数の最大値 [回/min]	68

第1章 序論

1.1 研究背景

Internet of Things(以下 IoT) の普及, 発達によって環境測定を行う高精度かつ小型なセンサー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. これらのセンサー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普段生活する場所の環境の測定及び調整に利用されており, これらのセンサーデバイスにより環境の状態を数値化することで, 人の感覚では捉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は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, その全て管理することは困難である [1]. そこで本研究では室内空気質の研究報告にあった, 室内における CO₂ 濃度による人の知的活動に対する悪影響に注目した. 室内空気質とは人体に影響のある室内の空気中のガス成分量を示し, CO₂ の他に一酸化炭素や PM2.5 を始めとする粉塵, ホルムアルデヒドなどの化学物質が挙げられる. 近年, Joseph G. Allen らの研究 [2] により, CO₂ が 1500ppm(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なった. また, U.Satish らの研究 [3] によれば, CO₂ 濃度が 600ppm と 1000ppm の環境を比較すると, 後者において被験者の意思決定能力に統計的に有意な減退していることが実験によって確認されている. これらの研究結果から, 個室を利用した会議のように室内の CO₂ 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 CO₂ 濃度が上昇し, 議論の質が低下すると考えられる. 特に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によってより多くの CO₂ が排出されることが想定される. 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. 以上のことから, 室内における CO₂ 濃度は室内全体の利用者の人の知的活動を阻害し, 悪影響を及ぼすことは明らかであり, 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. そのためには, 測定デバイス等によるリアルタイム測定と換気システムを連動させた制御も有効であると考えられるが, 閾値を超えた直後に換気を行っても十分に濃度が低下するには一定の時間が掛かると考えられる. よって, 室内において CO₂ 濃度を一定以下に保つためには, 濃度の変化を予測する必要がある. 一般的に大気中の気体の分析には CFD(Computational Fluid Dynamics) シミュ

レーションのような数値流体力学のモデルを用いることが多い。しかし、CO₂ は既存研究 [4] において CO₂ 濃度変化の予測を CFD シミュレーションを用いて行った際に、予測値と実測値に大きな乖離が見られた。そのため、本研究では提案する同時多点センシングシステムを使い、実空間における CO₂ 濃度の時系列変化を測定するものとする。また、確認された拡散傾向を基に既存の気体濃度変化の予測モデルから CO₂ に適したモデルを選定する。

現在の室内の CO₂ は建築基準法によって定められた換気システム等によって、換気量を向上させ、多くの外気を室内に取り入れることで、CO₂ 濃度の上昇を抑制している。本研究の目的である室内の CO₂ 濃度を一定以下に保つためには、機械換気によって換気量を増加させ、その換気量においても快適な室内の温度を保つような出力に冷暖房器具を利用するという方法が最も単純であると考えられる。しかし、この手法は近年の節電や温室効果ガス削減に相反する手法であり、推奨されるものではないと考えられる。また、地球規模の外気においても CO₂ 濃度は年々上昇している。気象庁によれば、日本における外気の CO₂ 濃度は大気環境観測所のある岩手県大船渡市三陸町綾里では測定を開始した 1980 年代から 2019 年までに 50ppm 以上の上昇が確認されている [5]。図 1.1 に観測開始から 2019 年までの外気の CO₂ 濃度の変化を示す。

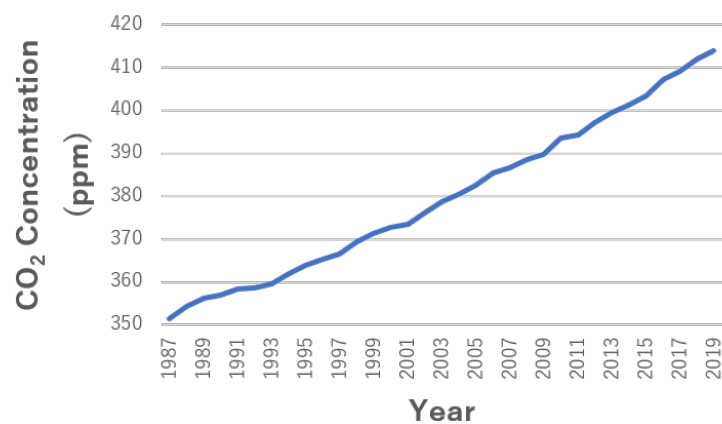


図 1.1: 日本の外気における CO₂ 濃度の変化 [5]

図 1.1 において示したように、外気の CO₂ 濃度は年々増加しており、このまま濃度が増加し続けるようであれば、換気による室内の CO₂ 濃度の上昇抑制効果は将来的に相対的に低下すると考えられる。そこで本研究では換気以外の室内の CO₂ 濃度の制御方法として、人の呼吸数の制御に着目する。既存の研究結果 [6] [7] から感覚刺激を用いることで意識下による呼吸数の変化が報告されているが、この呼吸数の変化が人の CO₂ 排出量にどのような影響を与えるのかは報告されていない。一般的に呼吸数は急激な運動や心的なス

トレスによって身体が酸素を必要とする場合に増加するため、呼吸数の増加すれば酸素が多く人体に取り込まれ、結果としてCO₂の排出量が増加するとされている。しかし、感覚刺激によって呼吸数を変化させた場合は、身体がより多くの酸素量を必要としているわけではない。そのため、感覚刺激を用いた呼吸数制御によって、室内のCO₂濃度の変化にどのような影響があるのかを明らかにする必要がある。

1.2 研究目的

Joseph G. Allen ら [2] や U.Satish ら [3] の研究によって人の知的活動への悪影響が確認されている CO₂ は人が活動する場所では必ず発生し、蓄積される。しかし、人の感覚では CO₂ 濃度の変化を知覚することが出来ず、何らかの手法を用いて室内の CO₂ 濃度を測定、または予測する必要がある。JIS 規格 A1406[8] によれば、「一般に、比較的空気の流動がある場合は、垂直、水平方向共に、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、時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。しかし、既存の研究の多くは換気システムを利用した状態で行われるものが多く、自然換気のように容積に対して換気量の低い空間における検証は行われていない。また、同様に 1000ppm 程度の低濃度帯の人の呼吸によって発生する CO₂ がどの様に拡散するのかについては明確にされていない。そこで本研究では容積に対する換気量が建築基準法に定められた値よりも明らかに低い空間においても、低濃度帯の CO₂ が均等に拡散するのか同時多点センシングシステムを用いて検証する。本研究で提案する同時多点センシングシステムは、室内の状況に応じ、局所的な測定だけでなく複数箇所を測定するものである。将来的に、測定デバイスに搭載したセンサーを変更することで CO₂ に限らず、室内空気質を維持するための様々な種類の化学物質の拡散や濃度を分析する場合でも、この手法は極めて有効であると考えられる。

次に、実空間における CO₂ の低濃度帯における濃度変化の予測を目的として、拡散傾向から予測モデルを選定する。選定された予測モデルによる予測値と測定デバイスによる実測値との比較する。ただし、被験者一人あたりの正確な CO₂ 排出量を導出することは出来ないため、予測モデルでは JIS 規格 A1406[8] において、着座時の成人男性の CO₂ 排出量として規定されている範囲の中央値を用いた。そのため、予測モデルによる予測値には一定の誤差が発生することを前提として、実空間において実測値とどの程度の乖離があるのかを分析し、予測モデルの有効性を検証する。

最後に、予測モデルを構成するパラメータの中から、換気以外の制御可能なものとして被験者の CO₂ 排出量に着目した。利用者の呼吸制御により室内の CO₂ 濃度の上昇を抑制することを目的として、既存研究で意識下において呼吸回数への影響があるとされている聴覚と振動感覚への刺激を用いた呼吸制御を行った際に、室内の CO₂ 濃度変化にどのような影響があるのか分析する。具体的には被験者に Android 端末、振動メトロノーム、ヘッドフォンを利用したウェアラブルデバイスを装着させ、聴覚と振動感覚に対して一定のテンポの刺激を与える。実験では、この感覚刺激がある状態での呼吸数を測定し、平常時との呼吸数と比較することによって、意識下の呼吸制御による呼吸数変化を確認する。また同時に、室内の CO₂ 濃度変化を測定することで、感覚刺激を用いた呼吸制御が室内の CO₂ 濃度の変化にどのように影響するか検証する。感覚刺激を用いた呼吸制御にウエ

アラブルデバイスを利用することによって、使用者個人に適した音源を利用することが可能になり、呼吸制御の効果を最大限発揮させることが可能になる。将来的にはデバイスから人への一方的な制御だけでなく、デバイスが個人の状態を測定しながらそれぞれの個人に適した緊張状態の緩和や活動を支援するシステムなどにも期待ができる。(図 1.2).

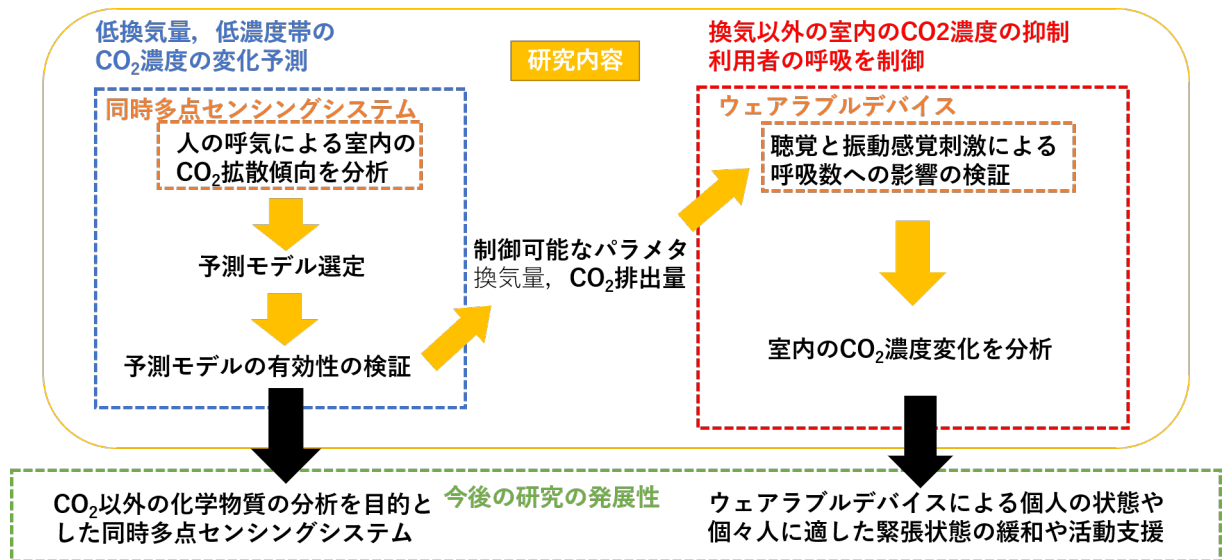


図 1.2: 研究コンセプト図

1.3 研究概要

本研究では室内空気質を維持することを目的として、人の呼気によって発生するCO₂について以下の2種類の検証及び分析を行った。第4章で自然換気のように容積に対して換気量が少なく、CO₂が1000ppm程度の室内においても、人の呼吸によって発生するCO₂がJIS規格A1406[8]と同様に拡散することを検証するために、CO₂の拡散傾向を分析した。拡散傾向の分析には独自の多点同時センシングシステムを利用し、1分毎に人の呼気から発生するCO₂が室内にどのように拡散していくのかを測定した。具体的には、被験者と測定デバイスの距離及び高低差を変えた場合と、複数の被験者を一箇所に集めた場合と複数箇所に配置した場合において、室内の複数の測定点及びその近傍においてCO₂濃度がどのように変化していくのかを明らかにした。同時多点センシングシステムでは、マイクロコントローラにより複数のセンサーからデータを取得し、Bluetoothによってデータの外部出力が可能な測定デバイスを複数用意して、それをRaspberry Piと接続し、室内の複数箇所のCO₂濃度の同時測定を行った。また本研究における全ての実験では測定デバイスに搭載されたCO₂濃度センサーによる測定誤差及びセンサーの個体差を最小限に抑えるために、初期値からのCO₂濃度の変化量及び時系列変化を実験結果として用い、分析を行うものとした。この同時多点センシングシステムを利用して、室内において人の呼気によって発生したCO₂がどのように拡散するのかを分析した。

拡散傾向からCO₂濃度変化の予測モデルの選定を行い(第4章)、選定された予測モデルの実空間における有効性について検証した(第5章)。具体的には同一の建築物の同一地下階層の大きさの異なる3つのスタジオにおいて、それぞれの換気量を測定し、予測モデルに必要なパラメータを算出した。また3つのスタジオにおいて、異なる被験者数でのCO₂濃度測定実験を行い、それぞれの条件におけるCO₂濃度の時系列変化を測定した。この実験結果から得られた実測値と選定した予測モデルによる予測値と比較し、本実験の条件下における予測モデルの実空間における有効性を検証した。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、CO₂濃度センサーの精度と一般的な利用者の平均的なCO₂排出量という一定の誤差がある前提で評価を行った。

そして換気以外の室内のCO₂濃度の制御として、感覚刺激を用いた呼吸制御によって呼吸数を増減させた際に室内のCO₂濃度の上昇にどのような影響があるのかを分析した(第6章)。具体的には、2種類の異なるbeat per minute(以下bpm)の音源を用いて、ウェアラブルデバイスから聴覚と振動感覚に対して刺激を与え、意識下の呼吸制御を行った。被験者にはAndroid端末、振動メトロノーム、ヘッドフォンを利用したウェアラブルデバイスとして、被験者に聴覚に対する刺激としてヘッドフォンからメトロノーム音、振動感覚に対する刺激として振動メトロノームからの振動を掌に与えた。実験では被験者6名を3

人ずつ2チームに分け、感覚刺激がある状態の呼吸数と感覚刺激がない平常時の呼吸数に変化があるかどうかを確認した。また、感覚刺激による呼吸制御による呼吸数の増減が室内のCO₂濃度の上昇にどのような影響を及ぼすのかを分析するために、それぞれのチームの平常時と聴覚と振動感覚に刺激を与えた時の室内のCO₂濃度の変化量を測定した。これらの比較、分析を行うことで、感覚刺激による呼吸制御時の呼吸数の変化が室内のCO₂濃度の上昇にどのような影響を与えるのかを明らかにした。

また、本研究における全ての実験は、慶應義塾大学 SFC 実験・調査倫理委員会にて2019年11月20日に承認を受けた条件において行われた。

1.4 本論文の構成

本論文は全8章によって構成されており、以下に各章について示す。

第2章では、本研究に関係する先行研究における問題点や本研究の基礎となっている手法について述べる。第3章では、本研究における提案手法に利用した要素技術の解説および同時多点センシングシステムと聴覚・振動感覚刺激デバイスについて述べる。第4章では、容積に対する換気量が建築基準法に定められたものよりも明らかに低い空間において、低濃度帯のCO₂がJIS規格A1406にあるように均等に拡散するのかを同時多点センシングを用いて確認する。第5章では、第4章の実験結果を元に室内において、人の呼吸によって発生するCO₂の濃度変化の予測モデルとしてザイデルの式を選定した。3つの地下スタジオにおいて予測モデルと実測値によるCO₂濃度の変化を比較し、ザイデルの式の実空間における有用性の評価結果について解説する。第6章では、換気以外のCO₂濃度の制御方法として、ザイデルの式のパラメータのうち、制御可能であった人のCO₂排出量に着目し、ウェアラブルデバイスによる感覚刺激を用いた呼吸制御が室内のCO₂濃度の上昇の変化にどのような影響を与えるのか分析した結果について解説する。第7章では、第4章と第5章を通した実験結果及び考察、第6章の実験結果及び考察をまとめ、今後の課題について述べる。第8章にて本研究全体の総括を述べる。

第2章 本研究の位置づけ及び関連研究

2.1 CO₂ 濃度による影響と利用事例

第1章1節にて述べた Joseph G. Allen ら [2] や U.Satish ら [3] の報告以外にも CO₂ 濃度による人体への影響は報告されている。D.Twardella らの報告 [9] によれば、実際に機械換気システムが備えられた 20 の教室にて、417 人を超える学生に対して、異なる CO₂ 濃度の中で d2-test と呼ばれるテストを行ったところ、問題に対する誤答率が大幅に増加したとされている。また、CO₂ 濃度は集中力の指標にも利用されており、CO₂ 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 [10]。

CO₂ 濃度測定の歴史は古く、現在のようにセンサー技術が発達する前から存在し、植物を使った CO₂ の測定も 1990 年には報告されている [11]。CO₂ 濃度は換気システムの評価にも使われることが多く、住宅の新型換気システムの評価 [12] や病院内の換気システムの評価 [13] にも CO₂ 濃度が指標として利用されている。また、新型の換気システムの評価だけでは、小学校の教室や高齢者施設のような既存の施設において正常に換気システムが稼働しているかどうかの実測調査にも CO₂ 濃度は利用されている [14, 15]。しかし、既存の研究報告から、特定建築物の約 15% がこの基準濃度を上回っていることが報告されている [16]。特に事務所と学校においては不適率が高く、事務所は全体の約 20%、学校は全体の 30% が基準濃度を上回っていた。こうした室内空気質の評価には CO₂ 濃度だけではなく、他の種類のガスセンサーを組み合わせることも多く、それらを搭載したセンサーデバイスを大学構内に設置し、空気の質を検証する研究 [17] も行われている。CO₂ 濃度の測定は室内だけに限らず、IoT デバイスとして都市中に設置することを提案されている [18]。この研究の目的として、設置地域における CO₂ 排出量の高い地域を特定することに加えて、森林火災などの早期発見も目的としている。

換気以外の手法を用いて、室内の CO₂ 濃度の制御を目的にした研究として、植物の光合成を人工的に再現することを目的とした人工植物による、CO₂ を酸素に変換させる研究 [19] も行われているが、まだ実用化には至っていない。逆に人工植物ではなく、植物の光合成を利用して、オフィス空間における CO₂ 濃度の上昇を抑制する研究も行われており、複数種の植物の CO₂ 吸収能力を比較した実験も報告されている [20]。しかし、実際の生活空間において、換気システム以外の方法を用いて室内の CO₂ 濃度の制御を行うケースは

一般的に考えにくく、現状、室内における CO₂ 濃度の制御はほぼ全て換気システムに依存している。これらの換気に利用される外気の CO₂ 濃度は気象庁の報告 [5] にもあるように年々増加し続けており、外気の CO₂ 濃度の上昇に伴い、換気の有効性は相対的に失われると考えられる。実際に、Kris Karnauskas らの報告 [21] によれば、外気の CO₂ 濃度の上昇に伴い、21 世紀末には室内の CO₂ 濃度は 1400ppm まで増加するとされている。

本研究と同様に CO₂ 濃度の予測を目的とし、同時多点センシングを利用し濃度を測定した研究としては、Piotr Batoga らの報告 [4] が挙げられる。この研究報告では睡眠時の寝室の CO₂ 濃度を CFD シミュレーションを用いて予測しているが、150ppm 程度の上昇との予測に対し、測定デバイスによる実測値は 3000ppm を超えたとされている。大気中の CO₂ 濃度は 450ppm 程度であり、寝室の CO₂ 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 CO₂ 濃度予測が必ずしも有効ではあるとはいえ、既存の予測モデルを利用した場合であっても、センサー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。Piotr Batoga らの報告 [4] 内の実験配置図を図 2.1 に、図 2.2 にその濃度変化を示す。

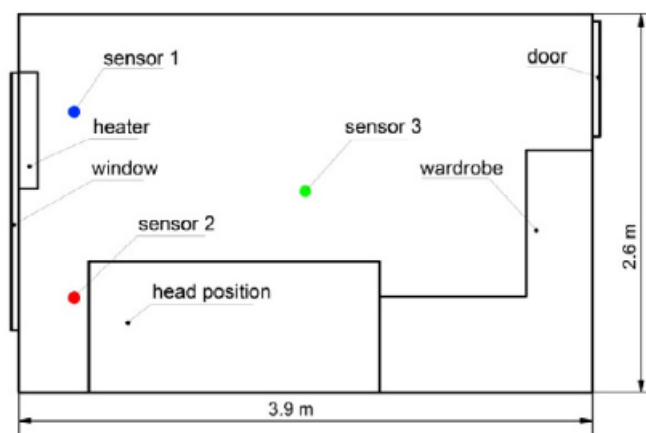


図 2.1: Piotr Batoga らの実験配置図 [4]

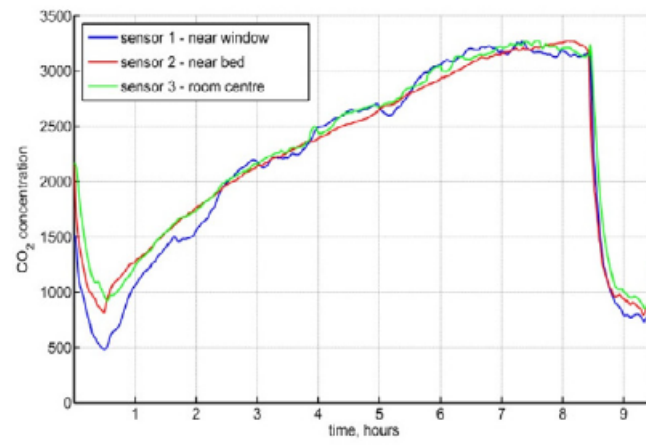


図 2.2: Piotr Batoga らの実験結果 [4]

2.2 CO₂ 濃度に関する環境基準

2.2.1 許容濃度

CO₂ は大気中に存在し、我々の生命活動によって発生する身近な物質であるが濃度が一定以上となる空間においては極めて高い毒性があり、高濃度の CO₂ を吸入した場合、めまい、頭痛、血圧上昇、心拍数増加、窒息、意識喪失に至ることがある [22]. 気体物質の許容濃度 (以下 TLV:Threshold Limit Value) にはいくつかの種類があり、大きく TWA(Time Weighted Average) と STEL(Short Term Exposure Limit) に分けられる. TWA は時間加重平均のことを指し、長期的な CO₂ による人体への影響の許容値を表す. 具体的には 1 日 8 時間の労働、あるいは 1 週間中 40 時間の労働を行う上で許容限界とされている CO₂ 濃度を表す. 次に STEL は短時間における許容限界を示し、一般的には 15 分間の活動を行うことが出来る濃度であり、これを超過することによって回復不能な臓器障害を引き起こす可能性があるとされている. 表 2.1 に日本産業衛生学会と米国産業衛生専門家会議 (ACGIH:American Conference of Governmental Industrial Hygienists) が示す許容濃度を示す [23].

表 2.1: 許容濃度の一覧

許容濃度	濃度 (ppm)	出典
長期安全限界値 (TLV・TWA)	5000	日本産業衛生学会 勧告値 2014 ACGIH
短時間暴露限界値 (TLV・STEL)	30000	ACGIH

2.2.2 室内環境基準

許容濃度は人体に確実な、場合によっては致命的な悪影響を及ぼす濃度であるが、それとは別に人が快適に建造物を利用するために、制定された法律として建築物衛生法 (正式名称「建築物における衛生的環境の確保に関する法律」) が存在し、CO₂ を含めた各物質に対して基準値を定めている. この基準値は人体に対して直接的な健康への影響を定めたものではなく、人が快適に過ごすため、人体に影響のあるかどうか明らかでない物質の総合的な汚染指標として扱われている. これらの室内環境基準は建築物衛生法を定めた厚生労働省だけでなく、文部科学省による学校の環境衛生の基準を定めた学校保健安全法でも基準が設けられている. 日本国内だけでなく、国際的な CO₂ 濃度の室内環境基準を表 2.2 に示す [23].

表 2.2: 室内環境基準の一覧

	濃度 (ppm)	備考
建築物衛生法	1000	厚生労働省
学校保健安全法	1500	文部科学省
WHO Headquarters(1999)	1000	世界保健機構 (World Health Organization)
フィンランド 室内空気質気候学会 (2001)	720	S1: 最良質な室内空気質 (アレルギーや呼吸器系疾患を持つ人の要求を満たす)
	920	S2: 良質な室内空気質
	1220	S3: 満足できる室内空気質

表 2.2 にあるように U.Satish らの研究 [3] で報告された人の知的活動に悪影響を及ぼすとされている 1000ppm を下回った基準になっているのはフィンランドの室内空気質気候学会が定めた S1 及び S2 のみであり、それ以外の基準は全て悪影響を及ぼす濃度と同程度以上の値が基準値として定められている。

2.2.3 換気方法

室内における換気方法は大きく分けて自然換気と機械換気があり、それぞれの換気方法の中にも複数の種類が存在する [23]。自然換気には 2 種類あり、室内外の温度差による自然換気と外部からの風による自然換気が存在する。機械換気については第 1 種換気、第 2 種換気、第 3 種換気と 3 つの種類がある。第 1 種換気では給気と排気の両方に送風機が利用され、外気との兼ね合いに応じて給気量、排気量を調整することが可能である。第 2 種換気では給気のみ送風機を用いており、正圧に保たれることから、外部からの汚染の侵入を防ぐことに向いている。最後の第 3 種換気では、排気のみ送風機で行い、室内の汚染された空気を外気に排出する。第 3 種換気はトイレや厨房など特定の臭いが発生し、それを換気することで中和することを目的として利用されることが多い。

本研究における実験では JIS 規格 A1406[8] にあるように機械換気のように換気量が多い空間では均等に拡散するとされている CO_2 が、自然換気のように容積に対して換気量が少ない空間においてどのように拡散するのか分析する。

2.3 居住環境における環境計測

Mark Weiser[24]により21世紀はコンピュータが環境に溶け込むようになると提唱されてから、現代までユビキタスコンピューティングやIoTデバイスの誕生により、センサーデバイスはより小型且つより高性能なものとなった。また、センサーデバイスから取得されたデータは蓄積、分析され人々の暮らしのサポートに役立てられている。このようなスマートセンシングシステムの目的にはHEMS(Home Energy Management System)やBEMS(Building Energy Management System)のように電力消費の削減、あるいは被験者の行動を監視することで利用者の行動に合わせて環境を変化させ、利用者のQoL(Quality of Life)を向上させることが挙げられる。図2.3に[26]本文中より引用したスマートセンシングシステムの概念図を示す。

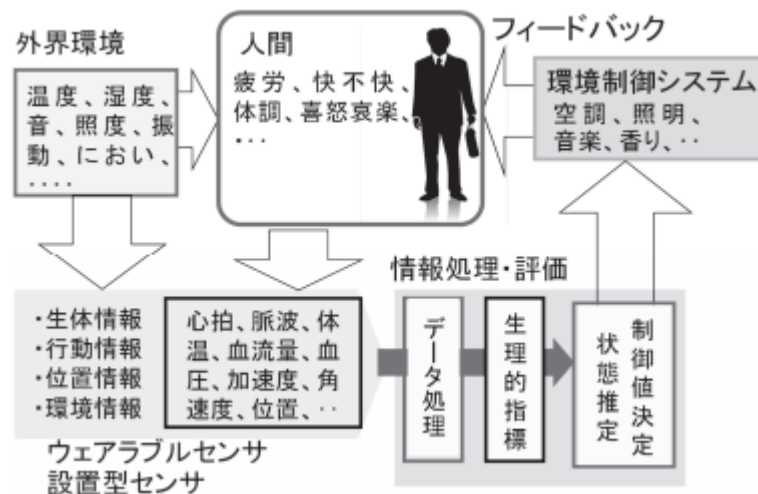


図 2.3: スマートセンシングシステムの概念図 [26]

これらのシステムの測定手法は、大きく2種類に分類される[25]。1つはウェアラブルデバイスを利用したユーザ携帯型システムである。ウェアラブルデバイスを用いることで利用者の生体情報(心電・心拍, 血中酸素飽和度, 体温, 脈波, 血圧, 血糖値, etc)を取得し, 健康状態の把握及び緊急時の通報などと連携することが可能になる。また, 生体情報以外にも, 加速度や地磁気, 気圧センサ, ワイヤレス位置検出センサー, GPS(Global Positioning System)などの連携により, 利用者の行動情報をセンシングすることが可能になる[26]。もう1つのシステムが環境設置型システムである。環境設置型システムでは, 利用者が持ち歩くウェアラブルデバイスではなく, 室内に設置された測定機器からデータを取得する。最も単純かつ直接的な方法として監視カメラを利用した画像解析が挙げられるが, 居住空間に対するカメラ監視は利用者のプライバシー配慮する必要がある。そのた

め、室内のインフラ（ガス、電気、水道、扉の開閉など）をセンサーで監視したり、赤外線センサーを利用した動体検知などで利用者の行動を把握することが多いとされている [25]. これらの環境計測データを連繋させることによって、見守りシステムなどでより高度に利用できる [27, 28].

これらの研究では空調へのフィードバックはあるものの、多くの場合優先されるのは気温や湿度であり、換気の強弱について言及したものは少ない. 特にスマートセンシングシステムを利用して、室内の CO₂ 濃度、特に 1000ppm 程度の低濃度帯に対する既存研究は確認出来なかった.

2.4 呼吸制御に関する研究

音楽や音による人体への影響は数多く報告され、呼吸の変動、神経活動・内蔵活動・感情の変化を引き起こすことが確認されている。ただし、音楽が持つテンポ、音色、リズム、音圧などのパラメータのうち、どのパラメータが人体へ影響を与えるかについては明らかにされていない [6]。Bernardi らの研究報告 [7] によれば、音楽の種類や好みよりも音楽自体のテンポが生体活動に影響することが報告された。また同様に Sato らの研究報告から、同じ音源を聞き続けることによって呼吸数の変化が見られたことが報告されている [29, 30]。また、聴覚刺激を利用した呼吸制御ほど多くの報告が見られないものの、振動感覚に一定の刺激を一定時間与え続けたところ、被験者の呼吸数や呼吸の傾向に違いが見られたという報告 [31] も確認されている。

以上の研究報告から、聴覚や振動感覚による感覚刺激が呼吸数に対して影響を与えることは明らかであるが、その呼吸数の変化によって排出する CO_2 量にどのような影響を与えるのかは明らかになっていない。一般的に呼吸数は運動時や緊張時など心拍数の増加によって、人体が酸素を欲する時に増加すると考えられるが、意識下による呼吸数の変化では呼吸数を感覚刺激によって増減させているものの、人体が必要とする酸素量には大きな変化はないと考えられる。これらの研究報告より、本研究では聴覚と振動感覚に対する感覚刺激を用いることで被験者の呼吸数に意識下で変化を与えられることを前提にし、被験者の呼吸数への影響を呼吸数測定デバイスを用いて測定した。その結果から、個人差はあるものの一定の呼吸数の変化を確認した。感覚刺激を用いた意識下の呼吸数の変化がある状態と、感覚刺激のない平常時において、室内の CO_2 濃度の変化を計測することによって、呼吸数の変化が人の CO_2 排出量にどのような影響を与えるのか分析した。

第3章 提案手法

3.1 要素技術

3.1.1 デバイス構成

本研究では測定デバイスにおけるプログラミング言語として Arduino 言語を用いた。Arduino は Arduino LLC 及び Arduino S.R.L が共同開発を行っているワンボードマイクロコントローラ、及び「Arduino IDE」によって構成されるシステムである。Arduino には入門編としてマイクロコントローラを搭載した Arduino Uno や小型化された Arduino Nano から高速処理を目的として ARM を CPU として搭載した Arduino Due や Arduino Mega 2560 等、目的に応じて様々なワンボードマイクロコントローラが用意されている。Arduino では共通言語として C++ をベースに開発された専用のプログラミング言語である Arduino 言語を利用して、ワンボードマイクロコントローラにプログラミングを行い、搭載された入出力ポートと接続されたセンサー情報を取得することを可能にしている。Arduino は IoT の普及に伴い、センサーデバイスとして多くの分野において利用されている。

本研究では測定デバイスの小型化を行うために、Arduino ではなく、Arduino Uno 及び Arduino Nano のマイクロコントローラにも用いられている Atmel 社の Atmega328p を測定デバイスに利用した。Atmega328p の PIN 配置を図 3.1 に示す。[32]

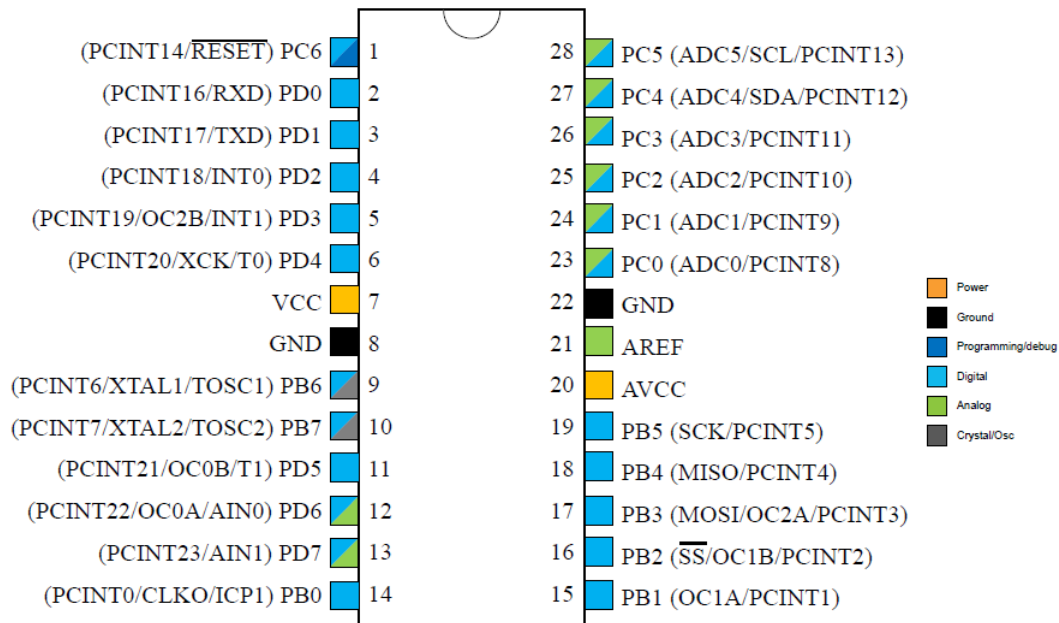


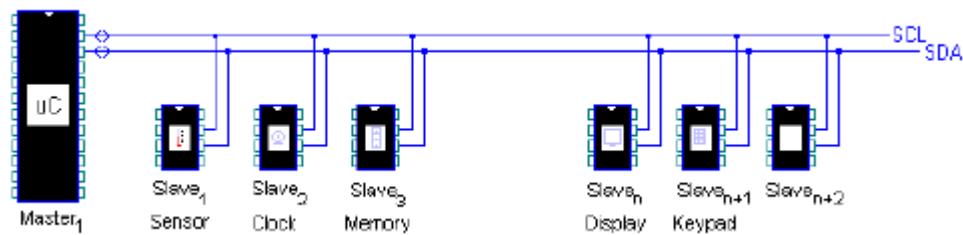
図 3.1: Atmega328p PIN 配置 [32]

3.1.2 通信プロトコル

本研究による提案手法では、測定デバイスにおいて2種類の通信プロトコルを利用した。マイクロコントローラと測定センサー間では Inter-Integrated Circuit(I²C) を、マイクロコントローラと Bluetooth デバイス間では Universal Asynchronous Receiver/Transmitter(UART) を利用した。

I²C

I²C はシリアスバスの一種であり、組込みシステム系でのセンサーデータの取得のための通信プロトコルとして利用される。I²C では抵抗でプルアップされた2本の信号線を用いて通信を行う。2本の通信線はシリアルデータ (SDA) とシリアルクロック (SCL) と呼ばれ、主に 3.3V から 5V までの電圧で利用される。I²C の通信には主にマスターとスレーブと呼ばれる二種類の役割が存在し、一般的には1つのマスターの役割を果たすノードの下に複数のスレーブノードが接続され、マスターからの通信によってスレーブノードの取得データをマスターノードが取得することになる。I²C におけるアドレス空間は 7bit の情報量によって形成され、16 の予約アドレスを除いた異なるアドレスを持つ 112 個のノードを最大で接続することが可能であるとされている。図 3.2 に一般的な I²C の接続例を示す [33]。

図 3.2: I²C の接続例 [33]

UART

UART は調歩同期通信方式（別名：非同期通信方式）によるシリアル信号をパラレル信号に変換する，あるいはその逆方向の変換を行うための集積回路を示す．信号線は I²C と同様に 2 本であり，それぞれがデータの送信と受信の役割を果たす．送信用の信号線は Transmit Data(TXD)，受信用の信号線は Receive Data(RXD) と呼称される．そのため，2 つのノード間ではそれぞれのノードの TXD を RXD，RXD を TXD にクロス結線する必要がある．また，UART は I²C と違いクロック周期を決定するための信号線を持たないため，事前に転送速度（Baudrate）を設定する必要がある．Baudrate は一般的に 4800, 9600, 19200, 38400, 76800, 115200 が主流となるが，本提案手法ではマイクロコントローラの Atmega328p が内部クロックの 8MHz を用いているため，相性の良い 9600 を選択した．

3.1.3 Raspberry Pi

Raspberry Pi はイギリスの Raspberry Pi Foundation が開発，普及している小型汎用端末の一種である．特徴として独自 OS として Linux の Debian 系列の流れをくむ，Rasbian を無料で提供しており，OS レベルで Raspberry Pi に搭載されている General Purpose Input/Output(GPIO) ポートをコントロールすることが可能になる．Raspberry Pi は Arduino 同様様々な種類が市販されているが，本研究では複数の測定デバイスと Bluetooth 経由で通信を行うことが必要であったため，Bluetooth モジュールが標準搭載されている Raspberry Pi 3(model B) を選択した．図 3.3 に Raspberry Pi3 model B の外観を示す．



図 3.3: Raspberry Pi 3 model B[34]

3.2 同時多点センシングシステム

3.2.1 システム概要

本研究では室内の複数箇所の CO₂ 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 CO₂ 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ー内の測定部に入った大気中の CO₂ 濃度を測定するため、局所的な測定しか行うことが出来ない。そのため、空間中の CO₂ 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 CO₂ の拡散を同時に多点でセンシングする必要がある。測定デバイスではセンサーが測定したデータは Atmega328p を用いて取得し、搭載されている Bluetooth モジュールである HC-07 を介して、Raspberry Pi 3 と接続し、毎分データを送信し、Raspberry Pi 3 に記録される。Atmega328p と 2 種類のセンサーの通信にはプロトコルとして I²C を利用し、Atmega328p をマスター、センサーをそれぞれスレーブとした。また、Atmega328p と Bluetooth モジュールを介した Raspberry Pi 3 のシリアル通信には UART を利用した。Raspberry Pi 3 は 1 台につき、6 台まで安定して測定デバイスと接続、通信することが可能であった。本研究では CO₂ の拡散を検証するために最大 12 台の測定デバイスを天井上に配置する必要があり、最大で 2 台の Raspberry Pi 3 を利用した。図 3.4 に作成したシステム概要図を、図 3.5 に実験概要図を示す。Raspberry Pi 3 の測定デバイスとの通信には Bluetooth 接続の設定のために bluez-hcidump というシステムを利用した。このシステムでは専用のコマンドラインコンソールを利用して、それぞれの測定デバイスに搭載された HC-07 を事前に登録することで接続設定を行うことが可能である。また、実際にデータを取得するための言語として Python 言語を用いた。Python には Pyserial と呼ばれるシリアル通信のライブラリがオープンソースとして公開されており、これを用いて測定デバイスからのデータを取得した。取得されたデータは同様にオープンソースライブラリの一つである Pandas によって csv 形式で保存を行った。

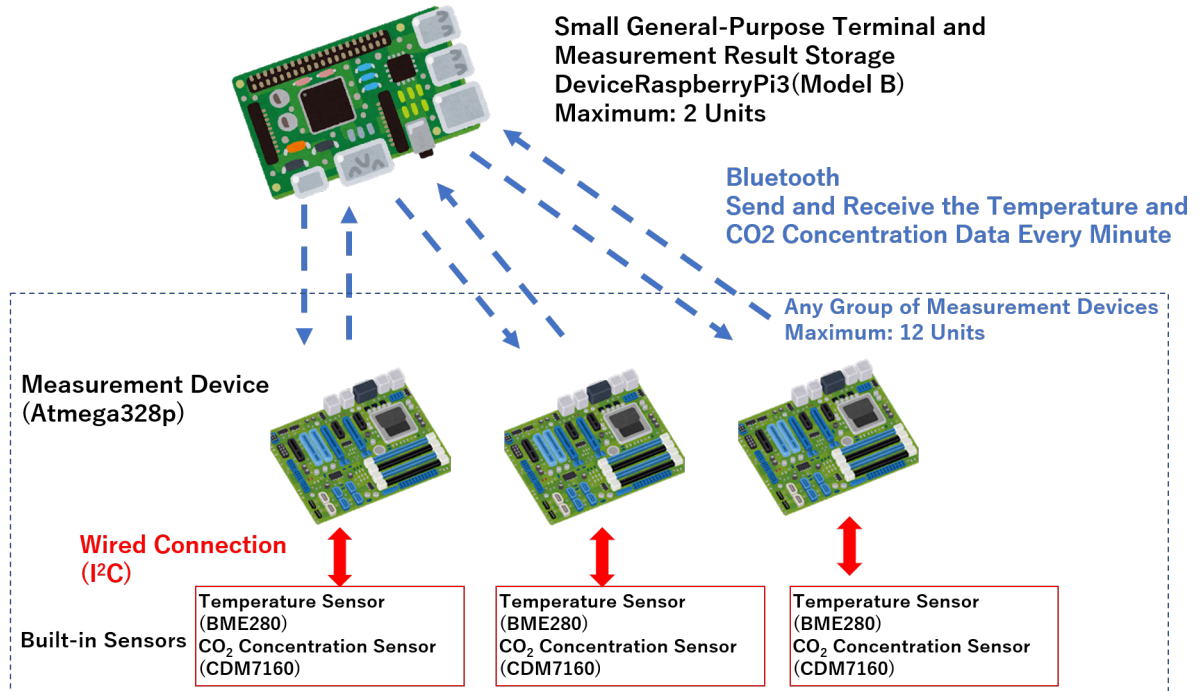


図 3.4: システム概要図

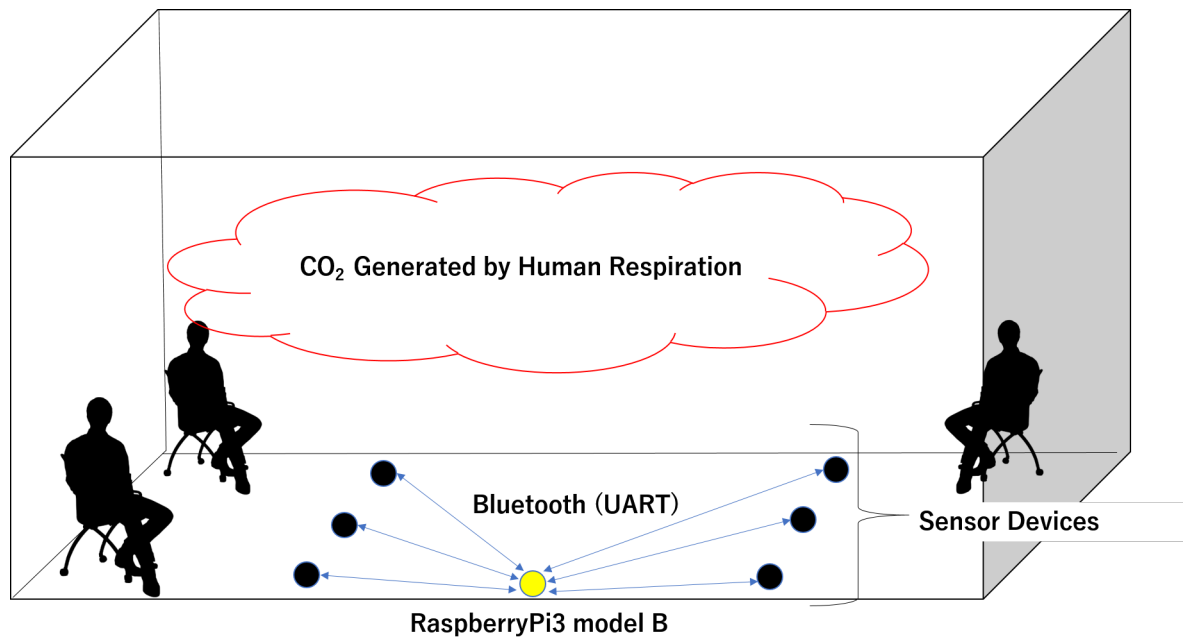


図 3.5: 実験概要図

3.2.2 測定デバイス

本研究では CO₂ 濃度の測定のために Figaro 社が提供している「CDM7160 CO₂ センサーモジュール」[35]、及び室内の温度変化を確認するために温度センサーである BME280 を搭載した測定デバイスを作成した。CDM7160 CO₂ 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 CO₂ 濃度センサーに多いアナログ出力ではなく、デジタル出力であること、精度が 300 から 5000ppm の範囲において ± 50ppm に出力値の 3% を加算した値であり、従来までのセンサーに比べて高いことが挙げられる。また温度センサーとして利用した BME280 についても同様にセンサーの出力値がデジタル出力であり、精度が -45 から 85 °C の範囲において ± 1 °C と高精度であることが選定理由として挙げられる。図 3.6 に作成した測定デバイスの外観を示し、図 3.6 にその回路図を示す。

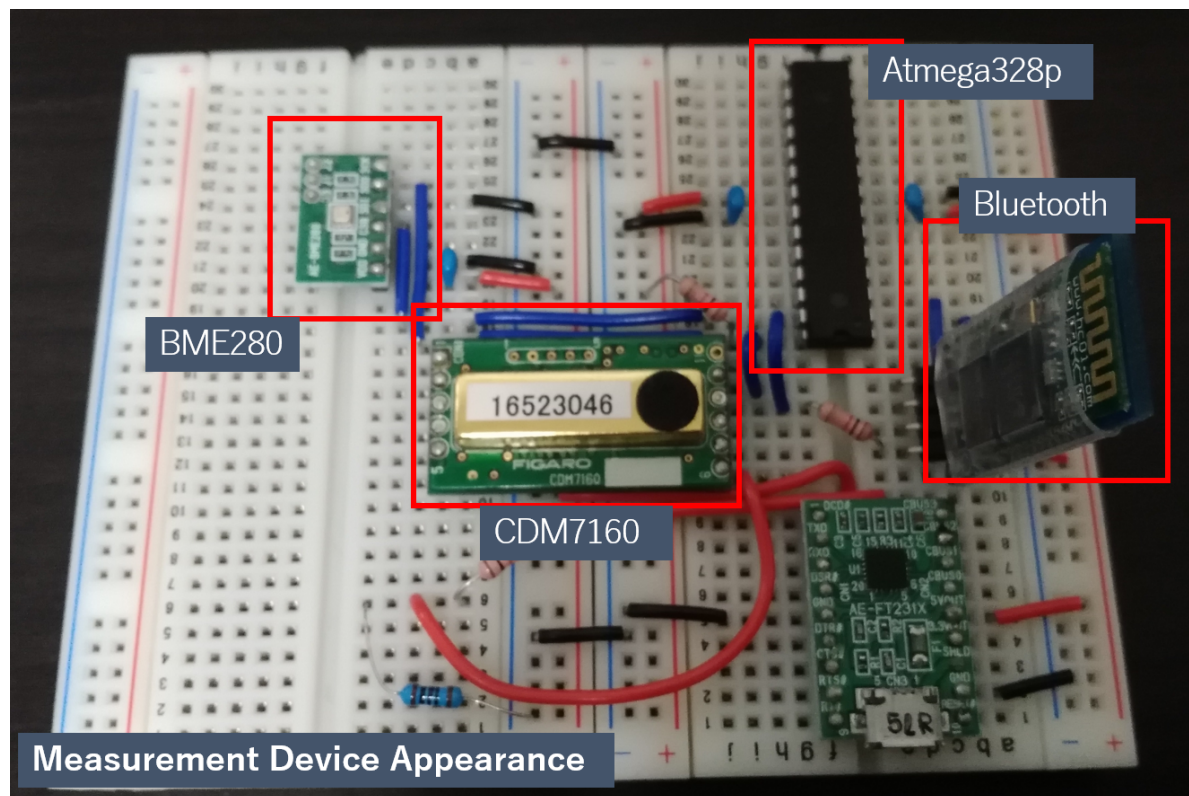


図 3.6: 測定デバイス及び利用パーツ外観

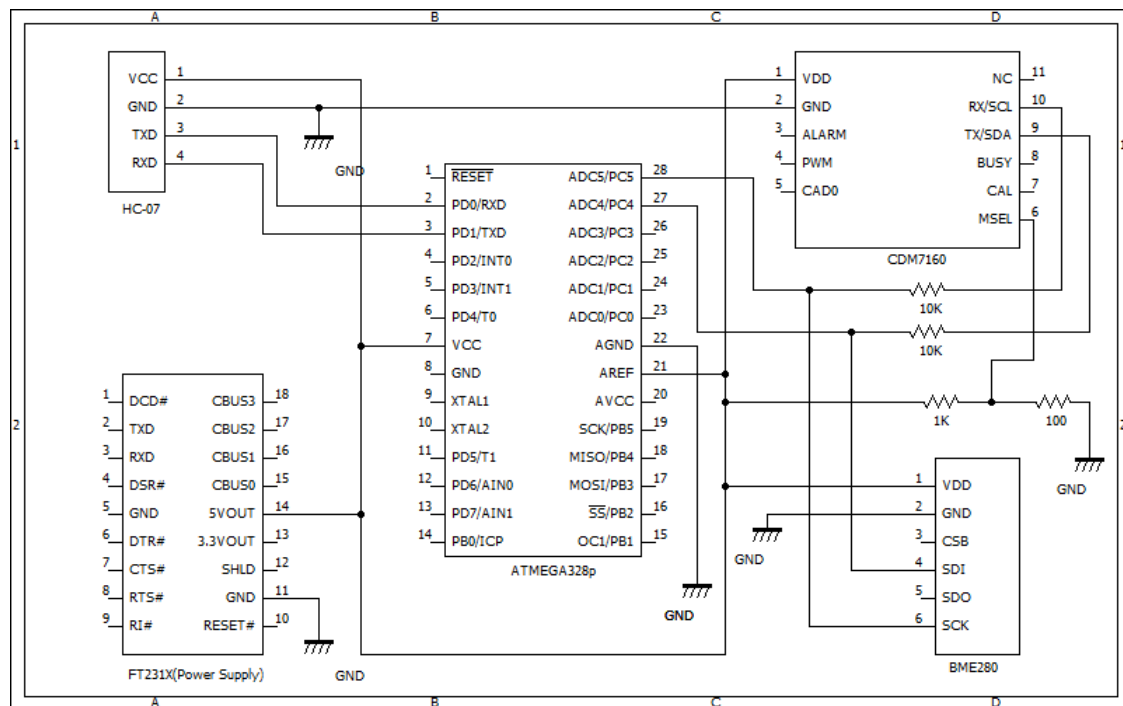


図 3.7: 測定デバイス回路図

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 [36] 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 CO₂ 濃度が 450ppm 及び 1500ppm の異なる濃度のガスが充満した環境において、同時に CO₂ 濃度を測定し、その結果から 2 点検量線 [37] を利用して補正した。一般的に濃度などを計測するセンサーは基準となる値によるバイアスによって、誤差が発生するとされており、CDM7160 も同様に濃度の濃淡にかかわらず、一定のバイアスが掛かっていた。表 3.1 に、12 台のセンサーにおける濃度の補正を示す。

表 3.1: 12 台の測定デバイスの校正値

Device No.	Calibration value(ppm)	Device No.	Calibration value(ppm)
No.1	+50	No.7	+40
No.2	-10	No.8	+90
No.3	+110	No.9	+100
No.4	+100	No.10	+30
No.5	+30	No.11	+60
No.6	+70	No.12	+30

これらの補正により、今回作成した測定デバイスの出力値の誤差が $\pm 50\text{ppm}$ に出力値の3%を加算した値以内であることを確認し、バイアスによる誤差を最小限にするために、本研究におけるすべての実験に置いて測定デバイスによる測定の初期濃度からの変化量を結果として用いた。また、センサーの誤差が乱数による $\pm 50\text{ppm} + \text{出力値の3\%}$ であることも考慮し、最終的な CO_2 濃度の変化量だけでなく、1分ごとの時系列変化を結果として用いる。また全ての実験において複数の実験を行い、それらの平均を最終的な結果とすることによって誤差を最小限に抑えた。

3.2.3 CO_2 濃度の測定アルゴリズム

一般的に CO_2 濃度の測定には Non-Dispersive InfraRed (NDIR) と呼ばれる手法が利用される。NDIR では特定の波長の赤外線を対象とする気体に照射し、その減衰を測定することで内包されている物質の濃度の計測を行う。 CO_2 には赤外線領域の $4.26\mu\text{m}$ の光を吸収する特性があるため [38]、 CO_2 を含む気体に対して、 $4.26\mu\text{m}$ の赤外線を放射し、その減衰量を計測することによって、不織布を通してセンサー内の測定部に入った大気中の CO_2 濃度が測定される。 CO_2 濃度計測のための NDIR には大きく分類して単光源単一波長方式、二光源単一波長方式、単光源二波長方式の3つの方式が存在し、それぞれについて解説を行う。

まず、単光源単一波長方式は3種類のうち、最も単純な構造をしており、測定器の中は赤外線光源と検出器（減衰測定器）しか存在しない。この手法の欠点として長期間の使用によるドリフトが挙げられる。ドリフトとはセンサーを長時間使用することによって、環境条件の変化によりバイアスが変動することによってセンサーの精度が低下することを指す。 CO_2 濃度センサーの場合、考えられるドリフトの原因として光源として利用されている小型発熱電球の時間経過による光強度の減衰、また測定器内の塵やホコリが光源あるいはセンサーの表面に付着堆積することが考えられる。これらの原因によって検出器が受ける光量に変化し、それがセンサー精度の低下が発生する。

次に二光源単一波長方式が挙げられる。二光源単一波長方式では単光源単一波長方式に加えて、もう一つ同一波長の光源を補助光源として用意する。この補助光源は定期的のみ始動し、通常時はほとんど始動しないため、光源として劣化しないとされている。しかし、この補助光源を定期的に始動させるためにセンサ構造が複雑になり、故障箇所の増加が懸念されている。また、それだけでなく主要光源と補助光源に均等に塵やホコリに付着堆積するとは限らず、主要光源にのみ塵やホコリが堆積した場合、二光源単一波長方式ではそれを検知することが出来ない。

最後に単光源二波長方式は単光源単一波長方式と二光源単一波長方式と違い、性能に影響を与えるようなドリフトの問題がないとされる。単光源二波長方式では文字通り、単光

源一波長方式と同様に光源は一つだが、その光源から対象物質が吸収する波長以外の波長をフィルターを利用して同一の検出器で参照波長として取得する。これにより、2つの波長が両方とも変化していればなんらかの環境変化によって検出器に届く光量自体が変化したことになり、補正を行う。それに対して、対象物質が吸収する波長のみが変化した場合、対象物質の濃度が変化したとして濃度が算出されます。本研究に用いる CDM7160 CO₂ センサーモジュールでは単光源二波長方式が利用されている。CO₂ 濃度センサーの内部構造を Technical Information [35] から抜粋し図 3.8 に示す。

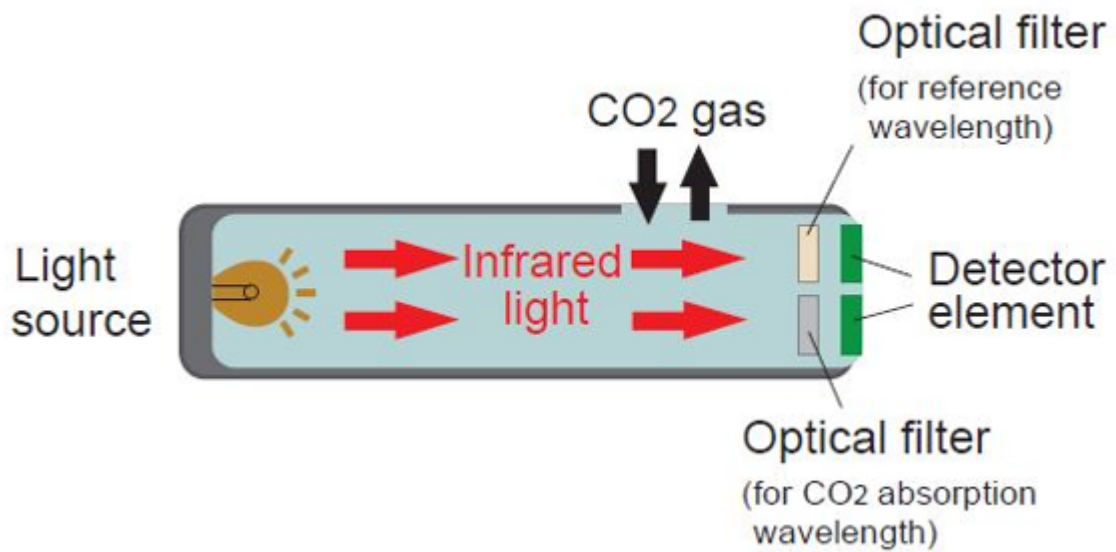


図 3.8: CDM7160 の内部構造 [35]

3.3 聴覚・振動感覚刺激デバイス

本研究ではウェアラブルデバイスを模して、Android 端末からメトロノーム音を流し、SEIKO 社製の振動メトロノームである BU10[39] を利用して振動を与えることで、被験者の聴覚と振動感覚を刺激した。BU10 は入力されたメトロノームの bpm(beats per minute) に合わせて振動する。メトロノーム音は Google 社が提供しているメトロノーム機能 [45] を音源として利用した。感覚シス刺激のシステム図を図 3.9 に、提案デバイスの外観を図 3.10 に示す。

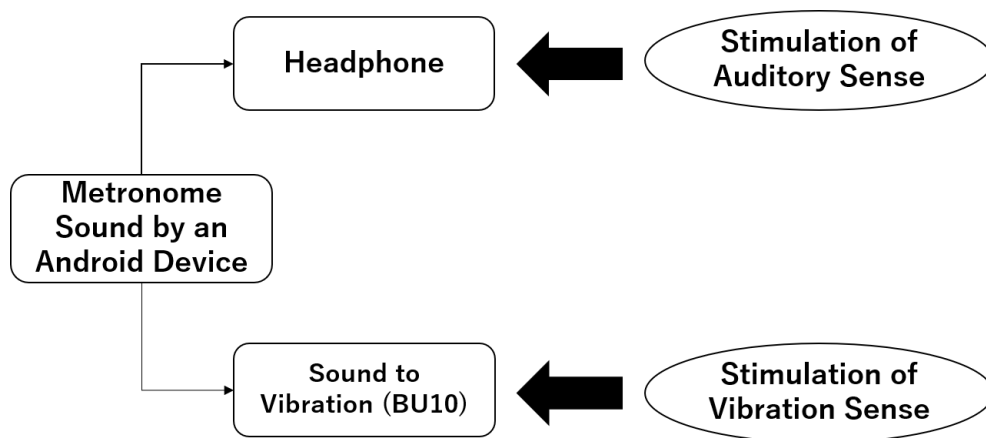


図 3.9: 感覚刺激システム図



図 3.10: A:Android 端末, ヘッドホン, BU10 B:BU10 の装着の様子

Android 端末から発せられるメトロノーム音は分配コードを経由してヘッドフォンと BU10 に同期した状態で送られ, メトロノーム音と同時に振動が発生する. BU10 は外観にあるようにゴムバンドで被験者の右掌に固定した. 掌を固定位置にした理由として, 頭部は脳への, 胸部は心臓への影響を考え避けた. また腹部にて呼吸数測定デバイスを装着したため, 振動が呼吸数測定デバイスに伝わり, 一定のノイズが発生することが考えられたため, 被験者の掌を装着箇所とした.

第4章 同時多点センシングによるCO₂の拡散傾向分析

4.1 実験目的

JIS規格 A1406 から一般的に CO₂ は一定以上の換気量のある空間においては均等に拡散するとされている [8]. しかし, 自然換気のように容積に対して換気量が少なく, 1000ppm 程度の低濃度帯においても均等に拡散するののかについては明らかになっていない. 本実験では提案した同時多点センシングシステムを用いて, 上記の条件においても CO₂ が室内で均等に拡散するののか分析することを目的とする. また, 室内における気流や対流については JIS 規格 A1406 においても言及されておらず, 仮に気流が発生したとしても拡散に影響はないものとする.

4.2 液体炭酸ガスボンベと人の呼吸の拡散傾向の検証

液体炭酸ガスボンベから発生する CO₂ が人の呼吸によって発生する CO₂ の代わりに利用することが可能であれば, 被験者を必要とせずに実験が可能であることから液体炭酸ガスボンベと人の呼吸によって発生する CO₂ の拡散傾向について検証を行った.

4.2.1 検証環境

室内の複数箇所の CO₂ 濃度を同時に測定することで, 液体炭酸ガスボンベと人の呼吸によって発生した CO₂ がどのように拡散していくのかを分析する. 全ての実験は容積 197.0m³ 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 CO₂ 濃度に偏りが出ることを防ぐために, 全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 箇所と扉の目張り 1 箇所を外し, 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 CO₂ 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 450ppm 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.

4.2.2 検証条件

本研究では CO₂ がどのように拡散するかを分析するために以下の2つの条件で実験を行い、実験1及び2の CO₂ 放出口及び計測デバイスの位置を図4.1に示す。

実験1: 液体炭酸ガスボンベから 1L/min の CO₂ を放出し、四方に 1m, 1.5m, 2m の距離で測定デバイスを設置した状態で 30 分間計測。

実験2: 3人の被験者が椅子に座り、一箇所に集まった状態で待機して、四方に 1m, 1.5m, 2m の距離で測定デバイスを設置した状態で 30 分間計測。

- : Measurement Devices
- : CO₂ Outlet of Gas Cylinder or Subjects

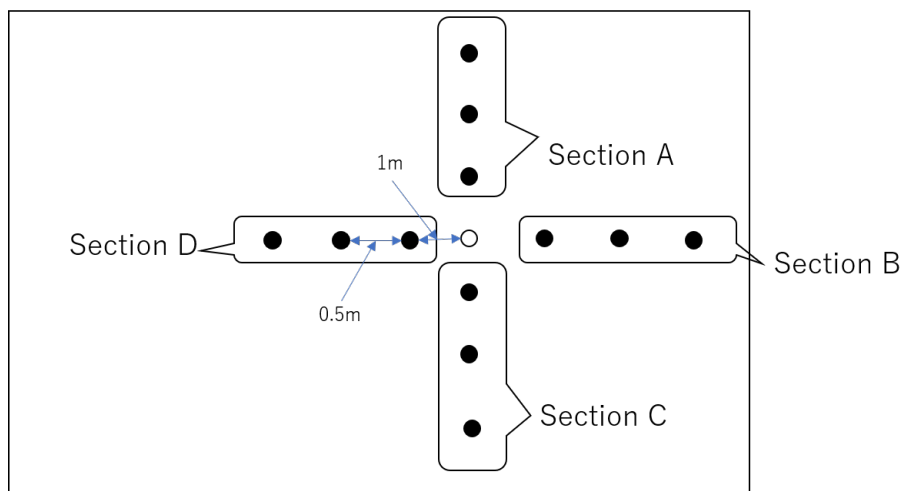


図 4.1: 実験 1,2 における 4 方向の測定デバイス配置図及びその区分

人間1人あたりのCO₂放出量は文部科学省の学校環境衛生管理マニュアル[40]によれば、高校生以上の人間は0.22m³/hourのCO₂を放出するとされているので0.37L/minとなる。よって、人の呼気を利用した実験である実験2は、連続及び断続という点で放出されるタイミングは異なるものの、単位時間あたりに放出されているCO₂量は実験1に比べてやや多くなっている。測定デバイスは床に設置し、ガスボンベの放出口にはチューブを繋ぎ、チューブの先を床に向け、床から1~2cm離れた状態で固定した。被験者は椅子に着座した状態で呼吸をするものとする。それぞれの実験を2回繰り返し、平均値を実験結果とした。

4.2.3 検証結果

実験1における4方向(図4.1の区分AからD)のCO₂濃度の変化を図4.2に示す。

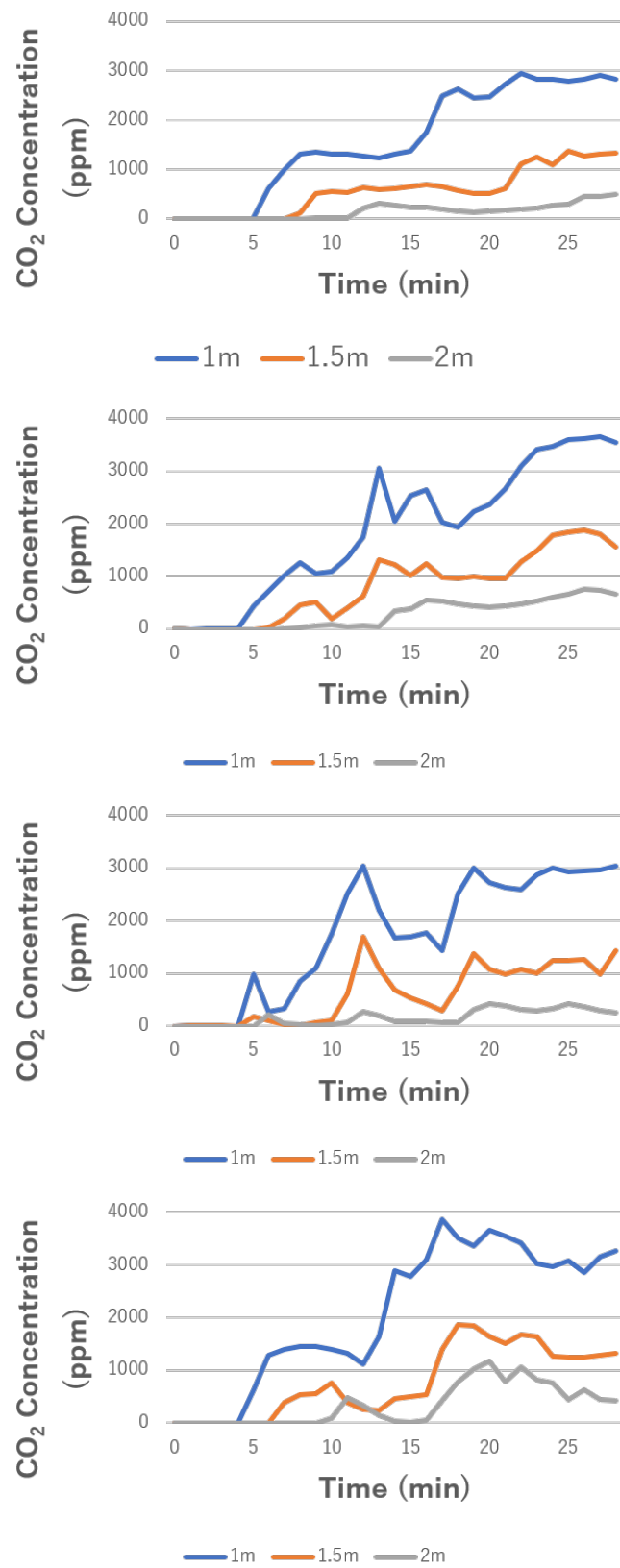


図 4.2: 炭酸ガスボンベによる 4 方向の CO₂ 濃度の時系列変化 (上から SectionA,B,C,D)

図 4.2 示すように、液体炭酸ガスボンベの CO₂ 放出口からの距離と濃度には明らかな相関があり、距離が近くなればなるほど短時間で濃度は上昇し、それぞれの時間毎の距離が近いセンサーの値が最も高くなる。逆に距離が離れれば離れるほど上昇し始めるまでの時間が長くなり、CO₂ 濃度も低くなった。濃度の上昇は単位時間あたりに一定量で増えてはならず、上昇した後に値が平行もしくは減少するという結果になった。これらの結果について、4つの区分毎の結果に大きな差異はなく、方向については大きな変化は見られなかった。

次に実験1と同じ位置に測定デバイスを配置し、液体炭酸ガスボンベではなく、3人分の呼気を利用した実験2の結果を図 4.3 に示した。

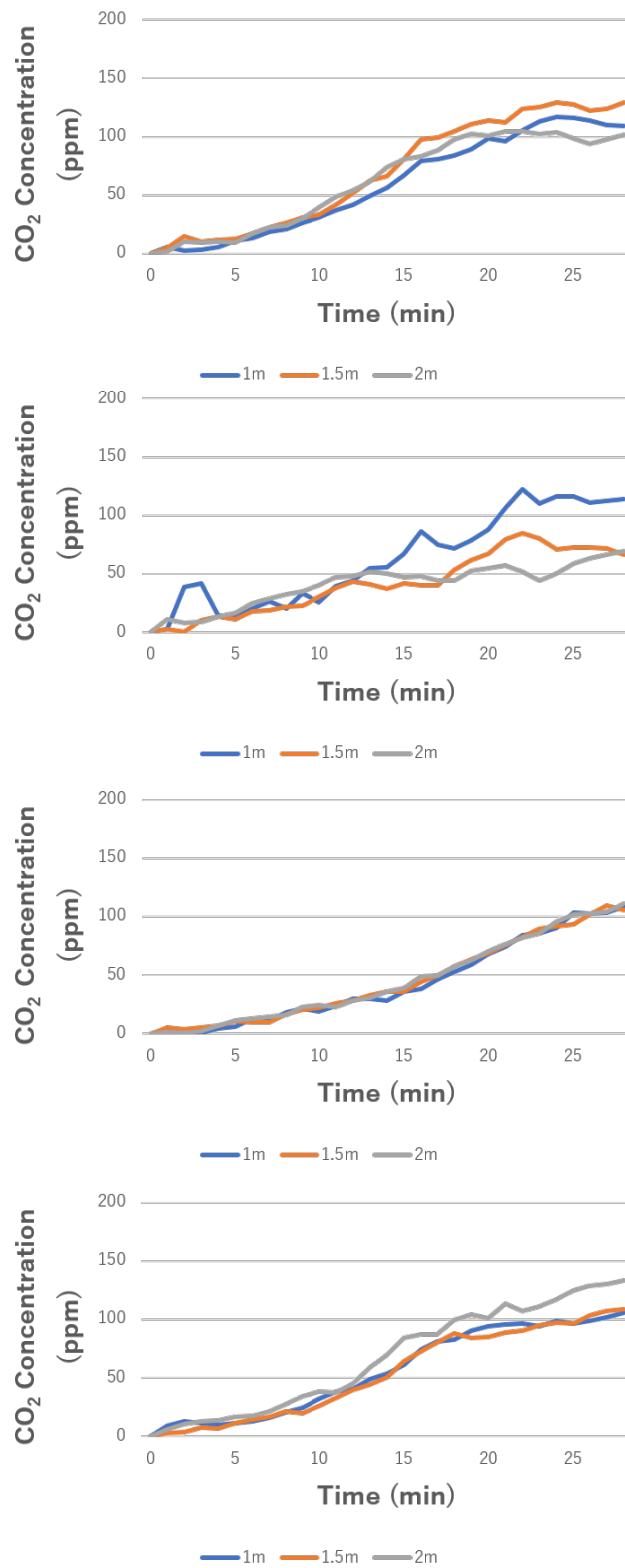


図 4.3: 被験者による 4 方向の CO₂ 濃度の時系列変化 (上から SectionA,B,C,D)

実験2の結果から、CO₂の放出量は実験1に比べて増加しているにも関わらず、実験1では最大4000ppm近くまでCO₂濃度が上昇しているのに対して、実験2では最大でも150ppm程度までしか上昇していない。更に実験1のようなCO₂濃度が上昇し始める時間とセンサーの距離には相関は見られず、全ての距離においてCO₂濃度が均一に上昇していることが確認された。

4.2.4 検証における考察

本論文における2種類の比較実験の結果として、液体炭酸ガスボンベから発生するCO₂と人の呼気に含まれるCO₂の拡散には明確な違いがあった。液体炭酸ガスから発生したCO₂は部屋全体に均一に拡散せず、放出口から1m程度の箇所に留まり、実験開始から30分でのCO₂濃度の変化量は実験終了後には最大4000ppm近くあり、極めて高い。それに対して、人の呼気に含まれるCO₂濃度の変化量は150~200ppmと液体炭酸ガスによるCO₂濃度変化に比べると低いものの、被験者との距離とは関係なく2mの範囲全体でのCO₂濃度が上昇している。この差異として考えられるのが人の呼気にはCO₂以外の気体が含まれており、外気に近い比率であるのに対して、液体炭酸ガスボンベから発生するCO₂は純度が限りなく100%に近いため、外気への浸透が遅れ局所に溜まりやすかったのではないかと考えられる。また、液体炭酸ガスボンベの場合は常時定量のCO₂が放出されるのに対して、人の呼気の場合は呼吸が断続的に行われる点もこの差の原因と考えることが出来る。以上のことから液体炭酸ガスボンベから放出されるCO₂と人の呼吸によって発生するCO₂の拡散傾向には明確な違いがあり、人の呼吸によって発生するCO₂の代替物として液体炭酸ガスボンベは利用することが出来ないことが明らかになった。

4.3 実験環境及び方法

本章では室内の複数箇所の CO₂ 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 CO₂ がどのように拡散していくのかを分析する。本章における全ての実験は容積 197.0m³ の同一のスタジオで行った。実験中は外気からの影響によって CO₂ 濃度に偏りが出ることを防ぐために、全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箇所と扉の目張り1箇所を外し、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 CO₂ 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 450ppm 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 から 35 歳までの男性であり、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。実験時間は全ての条件において 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無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 CO₂ 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 CO₂ 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一箇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及び、一箇所に固まっている場合での CO₂ 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 CO₂ の拡散にどのような影響が出るのかについて測定及び分析をした。

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0.3mとした。測定デバイスは床に設置し、高さは0mとした。Case1における被験者及びデバイスの配置を図4.4に示す。

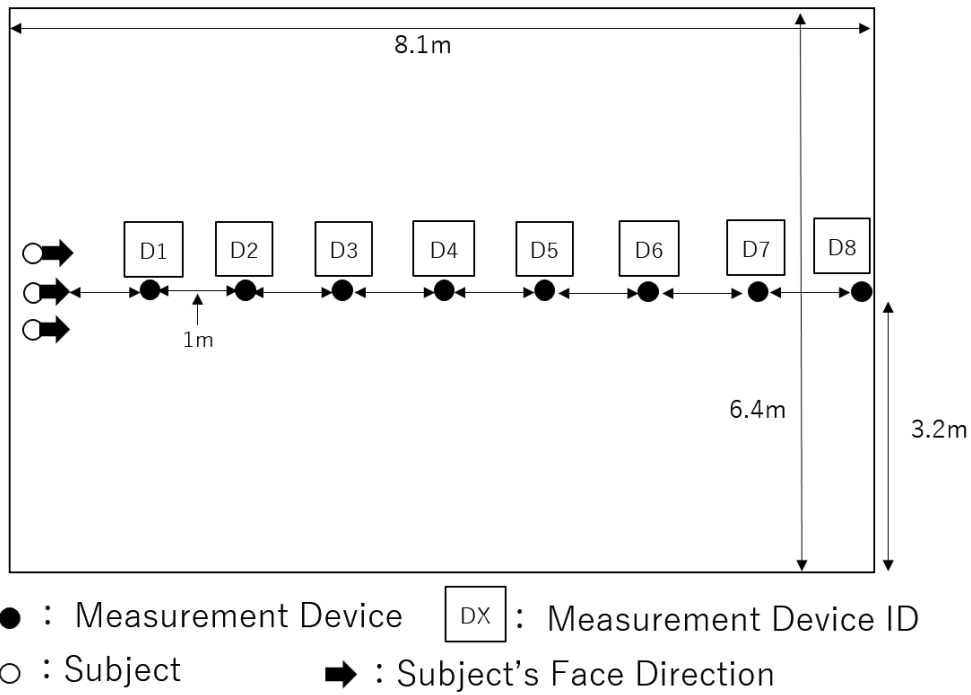


図 4.4: Case1 における測定デバイスと被験者の位置

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1m及び8m離れた場所の高さ0m(床), 1m, 2mの6箇所に配置し、被験者同士の距離は1mとした。Case2における被験者及びデバイスの配置を図4.5に示す。

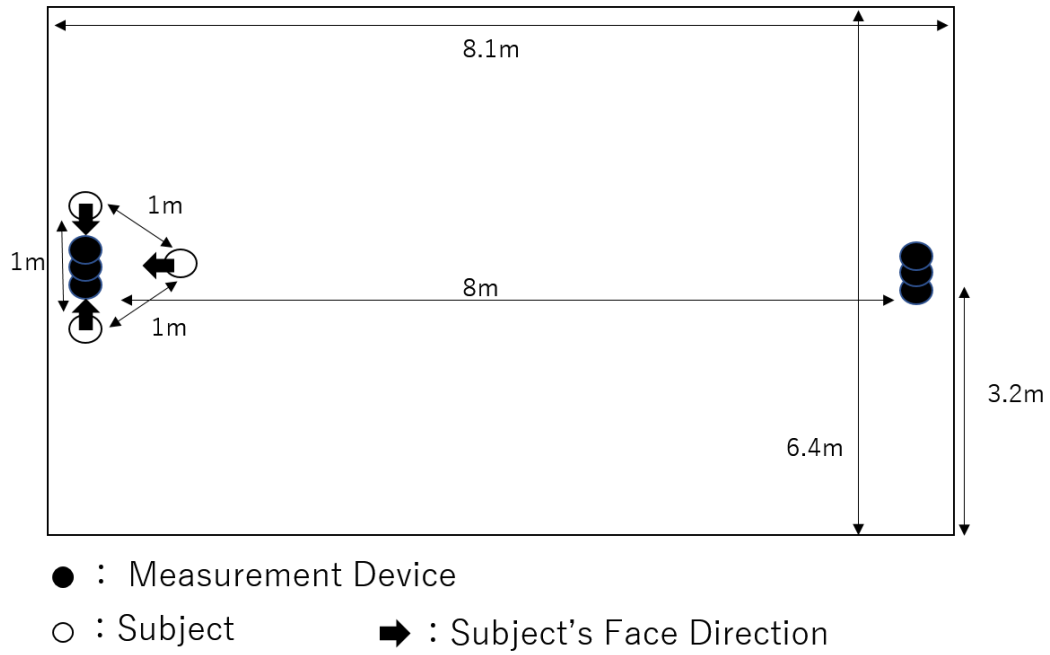


図 4.5: Case2 における測定デバイスと被験者の位置

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 2m 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 8m もしくは 6.5m とした。なお, 測定デバイスは床に設置し, 高さは 0m 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 1m とした。実験における被験者及びデバイスの配置を図 4.6 に示す。

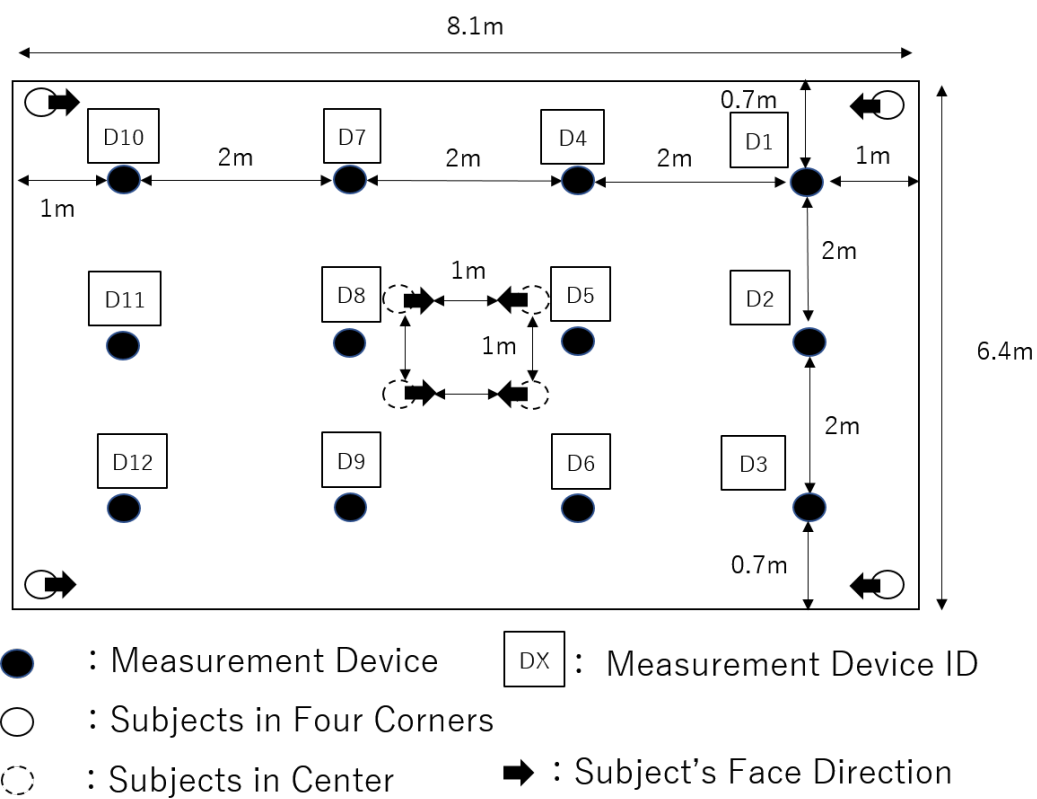


図 4.6: Case3a 及び Case3b における測定デバイスと被験者の位置

4.4 実験結果

全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 CO₂ 濃度の変化量を表している。

4.4.1 Case1 : 実験結果

Case1 の実験結果を図 4.7 に示す。図 4.7 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 CO₂ 濃度が上昇し 700ppm 程度となっており, 変化量が測定センサー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 CO₂ の拡散に影響を与えないと考えられる。

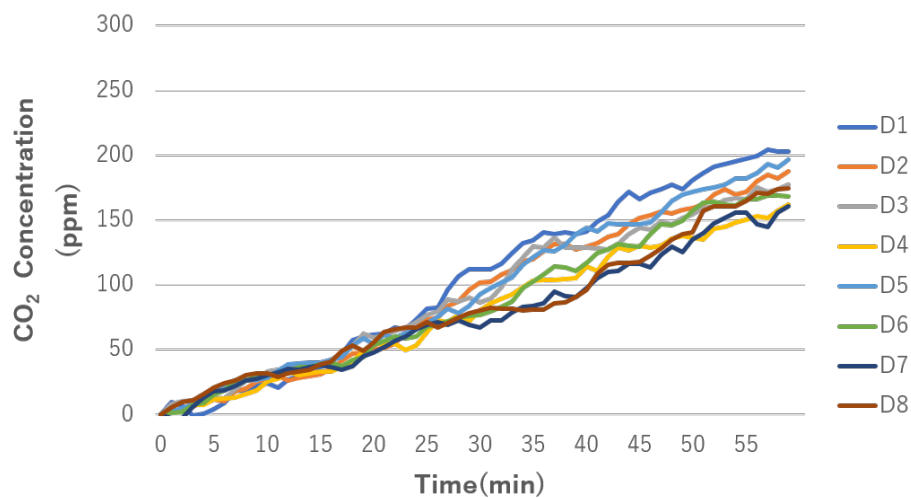


図 4.7: Case1 における CO₂ 濃度変化量 (D*は図 4.4 の設置位置に対応)

4.4.2 Case2 : 実験結果

Case2 の被験者との距離が 1m のデバイス群の実験結果を図 4.8 に, 8m のデバイス群の実験結果を図 4.9 に示す。図 4.8 及び図 4.9 が示すように CO₂ 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 200-250ppm 程度上昇し, 750ppm 程度になった。被験者との距離が 8m となっている図 4.9 では一時的に CO₂ 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ー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ーの誤差範囲に収まっていることから, 高低差による CO₂ の拡散に変化はなかったと考えられる。

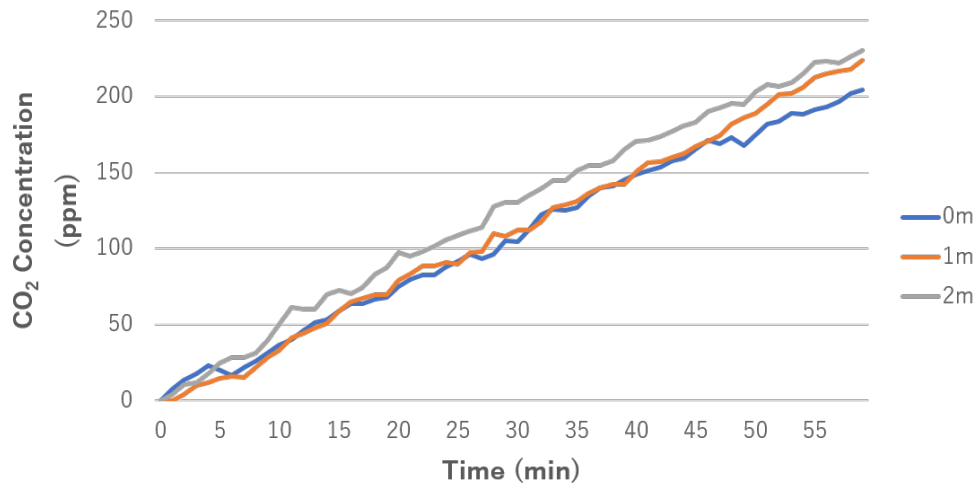


図 4.8: Case2 における被験者から 1m 付近の CO₂ 濃度変化量

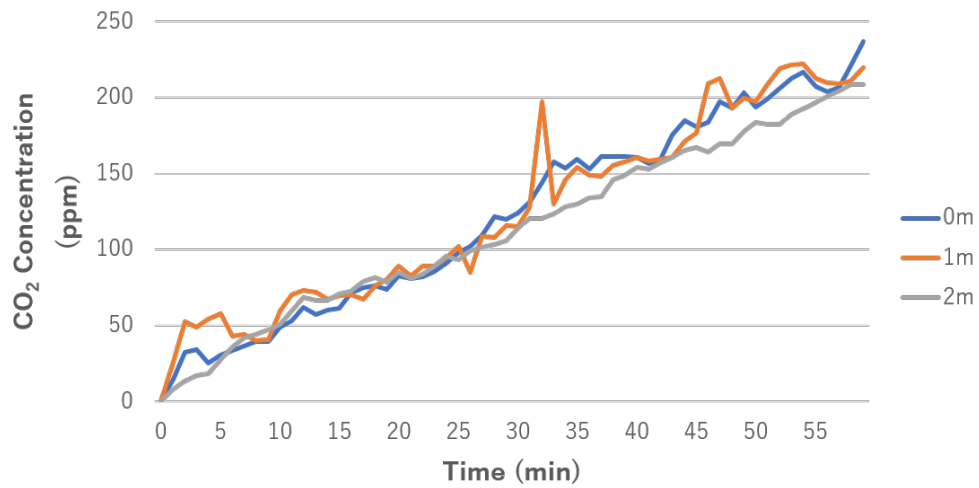


図 4.9: Case2 における被験者から 8m 付近の CO₂ 濃度変化量

4.4.3 Case3a 及び Case3b : 実験結果

被験者を四隅に配置した Case3a の実験結果を図 4.10, 中央に配置した Case3b の実験結果を図 4.11 に示す. また Case3 における最終的な CO₂ 濃度の変化量を表 4.1 に示す. 表 4.1 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 CO₂ 濃度の変化量が大きかった上位 6 つを示す. 図 4.10 及び図 4.11 が示すように, 最終的に全てのセンサーで 200-300ppm 程度の濃度の上昇が見られ, 800ppm 程度となった. 図 4.10 及び図 4.11 から測定デバイスの場所に応じて CO₂ 濃度にばらつきが出ているようにも見えるが, 図 4.1 が示すように Case3a 及び Case3b の実験においても CO₂ 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 CO₂ 濃度の変化量を比較すると全てのデバイスにおいてその変化量は測定センサー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 CO₂ 濃度の変化はないと言えるため, 人の位置による CO₂ 拡散への影響はないと考えられる.

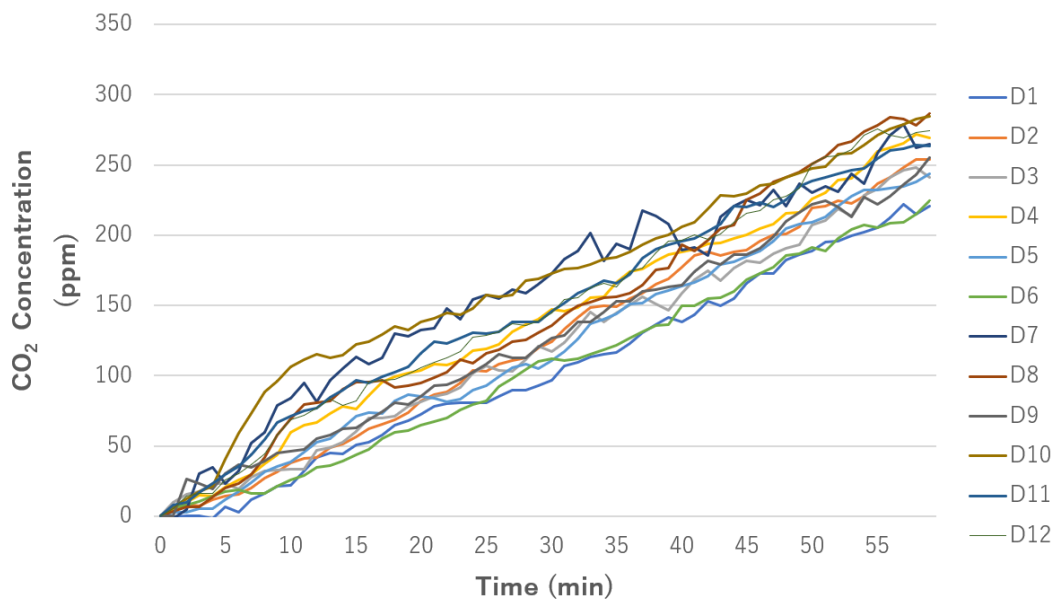


図 4.10: Case3a における CO₂ 濃度変化量 (D*は図 4.6 の設置位置に対応)

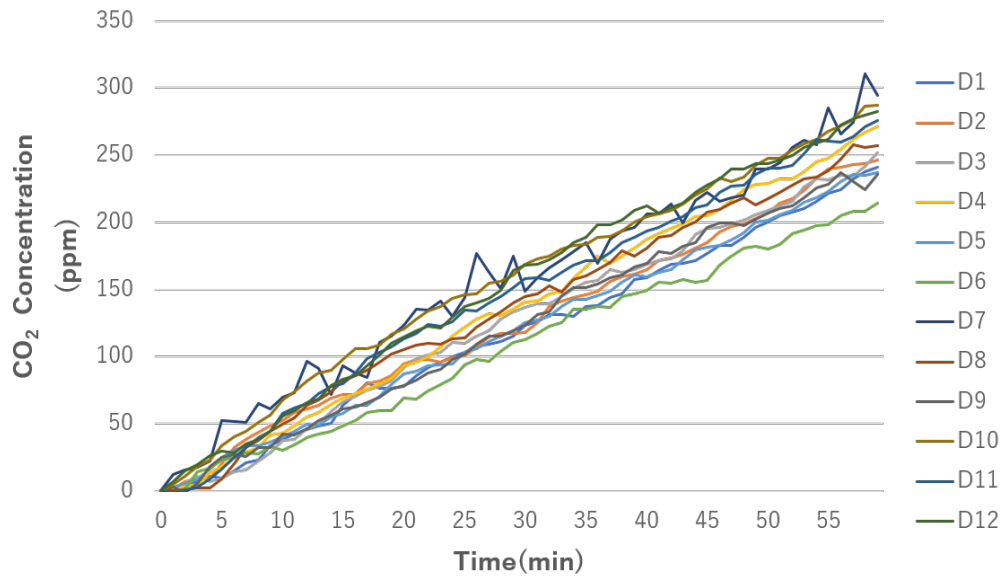


図 4.11: Case3b における CO₂ 濃度変化量 (D*は図 4.6 の設置位置に対応)

表 4.1: Case3a と Case3b における CO₂ 濃度変化量

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

4.5 考察

以上の実験結果から、現在のタスク条件において、CO₂ は 1000ppm 程度の低濃度帯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 CO₂ 濃度への影響は見られず、利用したセンサーの誤差も考慮すれば拡散する CO₂ への影響は軽微であると考えられる。よって、CO₂ は実空間において容積に対して換気量が少なく、低濃度帯であっても均等に拡散し、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 CO₂ 濃度を把握することが出来ることが明らかになった。

第5章 拡散傾向に適したCO₂濃度予測モデルと実測値の比較

5.1 実験目的

第4章においてCO₂は容積に対して自然換気のように換気量が少なく、低濃度帯であっても室内において均等に拡散することが明らかになった。この実験結果を基に予測モデルを選定し、予測モデルが実空間において低濃度帯であっても有効であるのか検証することを目的として、予測モデルによる予測値と測定デバイスによる実測値を比較する。

5.2 気体濃度予測モデルの選定

本研究ではザイデルの式をCO₂濃度変化の予測モデルとして選定した。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、第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CO₂濃度がセンサー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CO₂は瞬時一様拡散ではないが、1分間隔での測定及び本測定デバイスの誤差範囲という条件において、測定点近傍では擬似的に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。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5.1によって表される[41]。

$$C = C_0 + \frac{M}{NV}(1 - e^{-Nt}) \quad (5.1)$$

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)

また、式 5.1 における換気回数は以下の式 5.2 で表される [23].

$$N = \frac{Q}{V} \quad (5.2)$$

Q : 換気量 (m^3/h)

本研究では、人の呼気から拡散する CO₂ 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 5.3 (以下、ザイデルの式) を得る [23].

$$C = C_0 + \frac{nE}{NV}(1 - e^{-Nt}) \times 10^6 \quad (5.3)$$

C : 室内空気中の CO₂ 濃度 (ppm)

n : 室内の被験者の人数 (人)

E : 被験者一人あたりの CO₂ 排出量 (m^3/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)

予測モデルでは計測初期は線形に近い形で CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 濃度の予測値を、CO₂ 濃度センサーの実測値と比較し評価する。

5.3 実験環境及び方法

本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、CO₂濃度がどのように上昇するのかを計測した。被験者は第4章の実験と同様に18から35歳の男性とした。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197.0m³、スタジオ中は48.5m³、スタジオ小は22.2m³で、高さは3.8m、2.5m、3.0mである。測定デバイスを室内の6箇所に設置し、センサーの誤差を考え、最終的なCO₂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CO₂濃度の変化量とした。測定デバイスは床に設置し、高さは0m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名の場合は四隅及び部屋の長辺の中央とした。図5.1に各部屋における被験者の配置及び距離を示す。

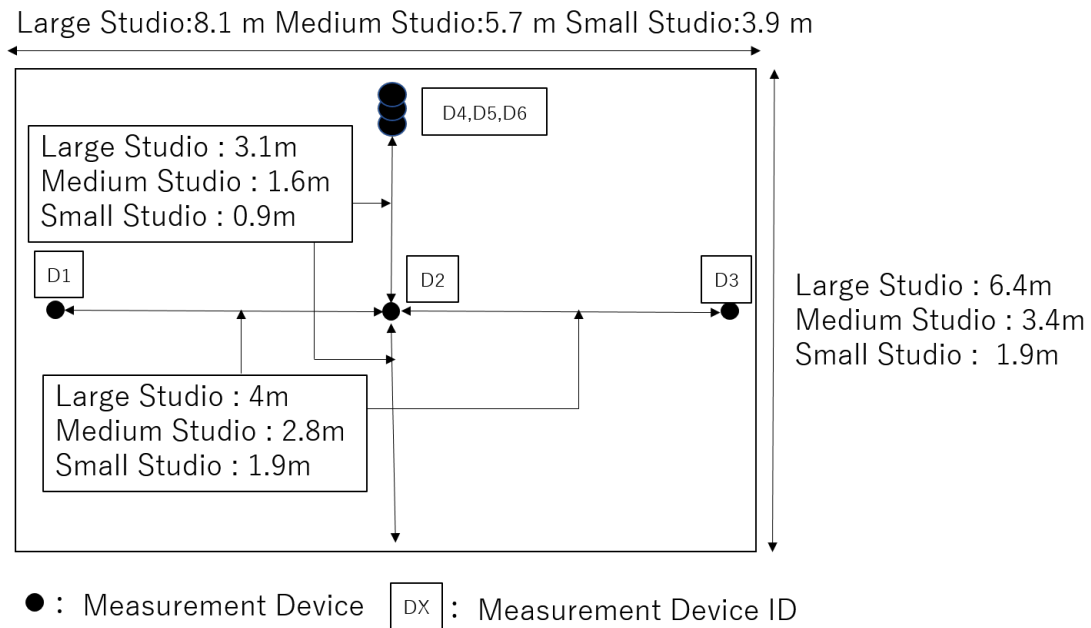


図 5.1: 各スタジオにおける被験者と測定デバイスの位置

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。第4章と同様に室内において急激な温度変化が無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CO₂濃度を上昇させるために室内の換気口、開口部及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、及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箇所と扉の目張り1箇所を外し、空調を作動させ、被験者を退出させることで、室内のCO₂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450ppm程度）まで減少したことを確認して次の実験を開始した。

5.4 各スタジオにおける換気回数

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ータは以下の手法で定めた。図 5.2 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 CO₂ 濃度を計測し、その平均値を室内の CO₂ 濃度とした。D1, D2, D3 は床（高さ 0m）、D4, D5, D6 については同じ位置の異なる高さ（0m, 1m, 2m）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 10cm 程度離れた場所に設置した。次に最大 10 人の被験者を室内に待機し、室内の CO₂ 濃度を 2000ppm 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 CO₂ 濃度を初期濃度として、その時間から 1 時間後の CO₂ 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 [8] である式 5.4 を利用し、それぞれの換気回数を定めた。

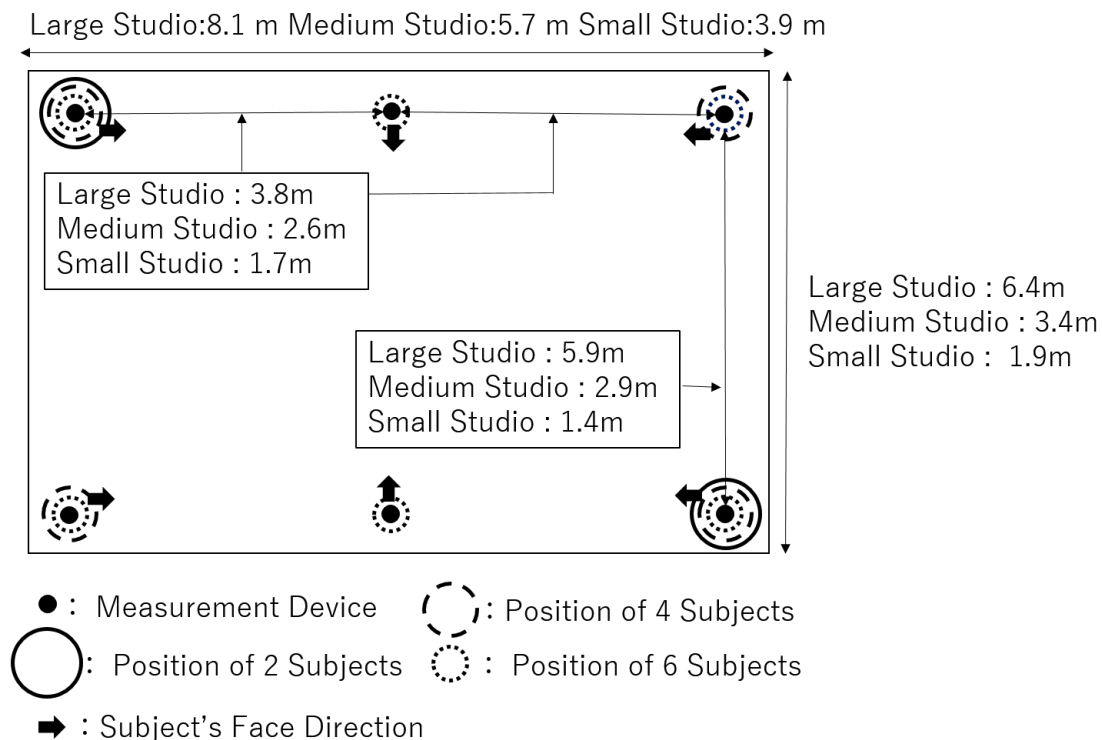


図 5.2: 換気回数測定実験における測定デバイスの位置

$$Q = 2.303 \frac{V}{t} \log_{10} \frac{C_1 - C_0}{C_t - C_0} \quad (5.4)$$

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 CO₂ 濃度 (mg/m^3)

C_t : t 時間後における室内の CO₂ 濃度 (mg/m^3)

C_0 : 対象気体の外気濃度 (mg/m^3)

建物内の CO₂ 濃度は約 450ppm で安定していたため、単位変換を行い C_0 とした。式 5.2 から算出した結果、各スタジオの換気回数を表 5.1 に示す。

表 5.1: 各スタジオにおける換気回数

	Ventilation (m^3/h)	Ventilation Cycle(cycle/h)
Studio Small	16.0	0.67
Studio Medium	11.2	0.23
Studio Large	15.9	0.08

表 5.1 からスタジオ中は他のスタジオと比較して換気量が少ないものの、ザイデルの式では換気回数が利用されるため、換気量の違いによる影響は無いものとした。それぞれの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 CO₂ 排出量を JIS 規格 A1406 によって定められている数値 [8] を参考とした。JIS 規格 A1406 によれば着座事務作業時の CO₂ 発生量は 0.0129 から 0.0230 m^3/h とされている。そのため、被験者一人あたりから発生する CO₂ 排出量をその中央値として 0.0180 m^3/h と定めた。

5.5 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 5.3 から図 5.5 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 CO₂ 濃度が 2000ppm を越えようとしたため、被験者の健康への影響を鑑みて実験を中止した。全ての実験において平均室内温度は 19 から 22℃であり、実験中に ±2℃ 以上の変化はなかった。図 5.3 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 及び 77.2ppm とほぼ同様に上昇している。それに対して図 5.4 及び図 5.5 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 500ppm 程度の差が、スタジオ大では最大 70 から 200ppm 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。

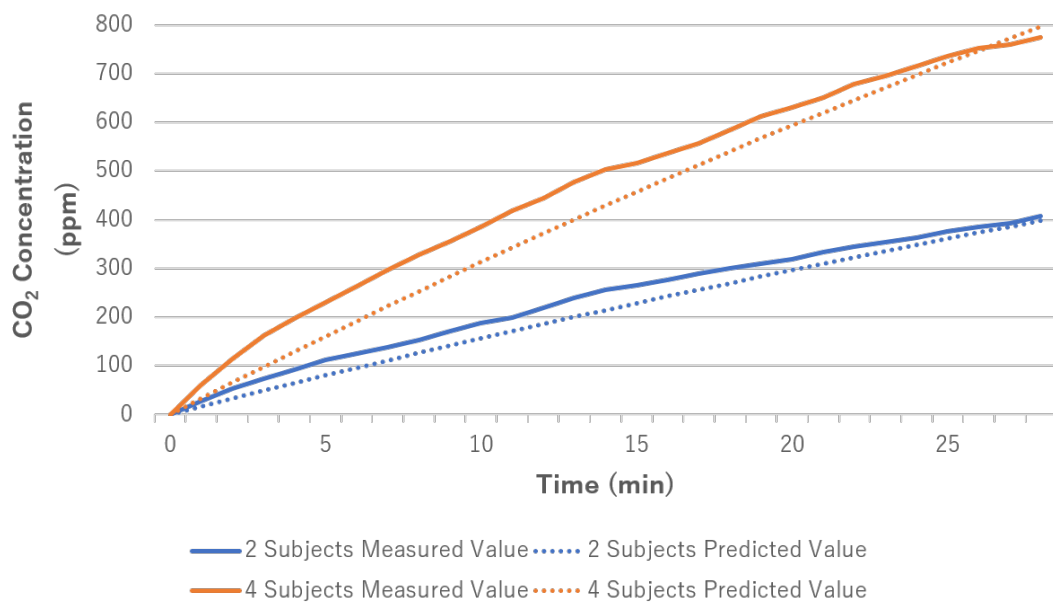


図 5.3: スタジオ小における CO₂ 濃度の実測値と予測値 (被験者 2 名, 4 名)

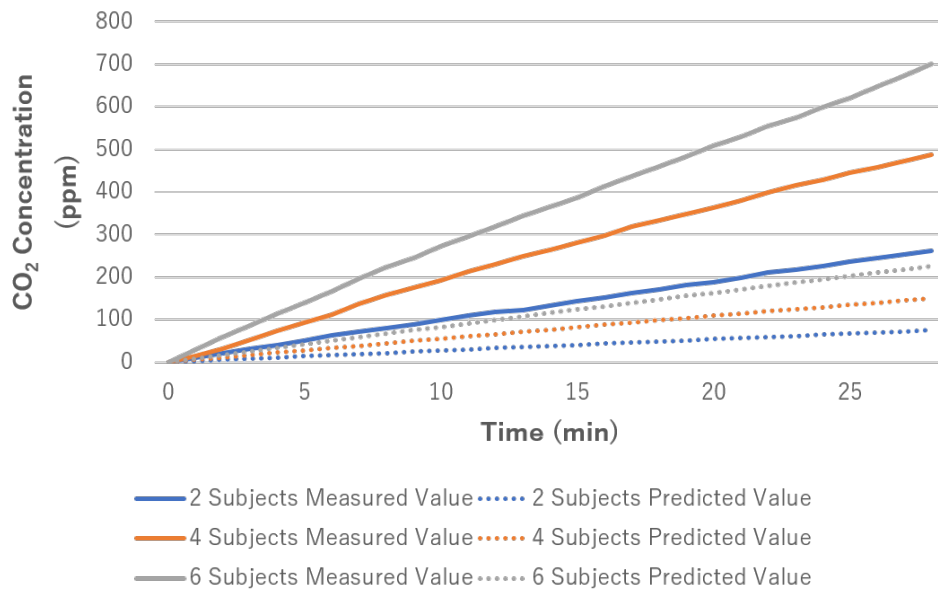


図 5.4: スタジオ中における CO₂ 濃度の実測値と予測値 (被験者 2 名, 4 名, 6 名)

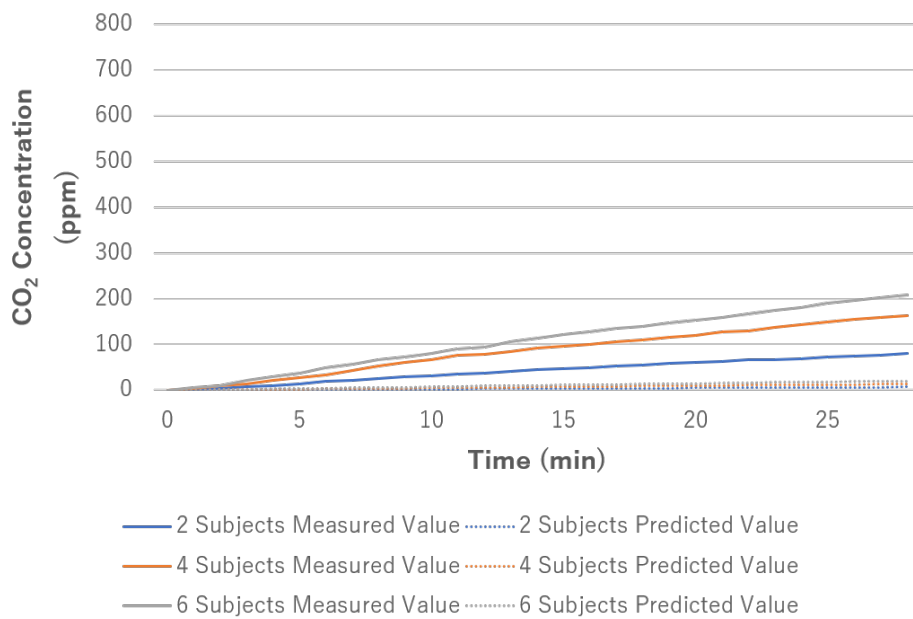


図 5.5: スタジオ大における CO₂ 濃度の実測値と予測値 (被験者 2 名, 4 名, 6 名)

5.6 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 CO₂ 濃度の予測にはザイデルの式は十分有用であることが明らかになった。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、予測モデルとの乖離が大きくなるため、測定デバイスによるリアルタイム計測を利用することが必要であると考えられる。

第6章 感覚刺激を用いた呼吸制御による CO₂ 排出量への影響

6.1 実験目的

第5章の実験結果から、ザイデルの式は一定以上の換気回数がある空間においてはCO₂濃度の変化量を予測することが可能であることが明らかになった。ザイデルの式において制御可能であるパラメータは換気回数とCO₂の排出量の2つである。換気回数については建造物の換気システムに依存するため、急激に増加させることは難しい。また、外気のCO₂濃度は年々増加しており、将来的に換気による室内のCO₂濃度制御の効果が現在よりも低下することが考えられる。そのため、本研究では換気以外の室内のCO₂濃度の制御方法として、人のCO₂排出量に着目した。本研究ではウェアラブルデバイスから、感覚刺激を用いた呼吸制御を行い、被験者の呼吸数に変化を確認するとともに、室内のCO₂濃度の変化にどのような影響があるのかを分析する。本実験では、被験者は着座の姿勢において実験を行うため、呼吸の深さについては大きな変化がないものと考え、呼吸数の変化によって室内のCO₂濃度の上昇がどのように変化する検証を行うものとする。

6.2 聴覚刺激を用いた呼吸制御に適した音源の検証

呼吸制御の実験において聴覚の刺激に有効な音源を選定するために、2種類の音源を利用した実験に置いて室内のCO₂濃度の変化にどのような影響があるのかを検証し、音源を選定した。

6.2.1 検証環境

検証は容積197.0m³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CO₂濃度に偏りが出ることを防ぐために、全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箇所と扉の目張り1箇所を外し、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CO₂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450ppm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た。

6.2.2 検証条件

4 種類の音源を被験者が聞くことによって，室内の CO₂ 濃度の上昇にどのような影響があるのかを分析した．佐藤らの研究 [42] から音楽のテンポと人の呼吸には極めて深い繋がりがあり，短い同テンポの音源を聞き続けることによって人の呼吸数に影響があるとされている．そのため，本研究では佐藤らの研究で利用されていたドラム演奏 [42] とテンポに特化した音源としてメトロノーム音源を利用した．これらのドラム演奏とメトロノームにおいて異なる bpm の音源を 2 種類ずつ，計 4 種類を音源として利用した．表 6.1 に音源の種類及び bpm を示す。

表 6.1: 音源一覧

	Music Source	bpm
Case 1	Metronome	95
Case 2	Metronome	120
Case 3	Drum Playing	95
Case 4	Drum Playing	120
Case 5	Silent	0

これらを音源として室内の中央にスピーカーを発信し，音源がない状態とそれぞれの音源が被験者に聞こえている状態で室内の CO₂ 濃度の変化量を計測した．bpm の設定には一般的な成人の 1 分間における心拍数が 100 以下であることから 95bpm を，それよりも多少の運動状態あるいは緊張状態であることを前提に 120bpm を設定した．被験者は成人男性 4 名として室内の四隅に着座の姿勢で待機してもらった．計測デバイス及び被験者の配置を図 6.1 に示す．測定デバイスは全て床に設置され，高さは 0m にあるものとする．また，1 分間ごとの 6 箇所での測定デバイスの測定値の平均値を室内の CO₂ 濃度とし，30 分間の実験をそれぞれの条件において 3 回行い，その平均値を実験結果とした。

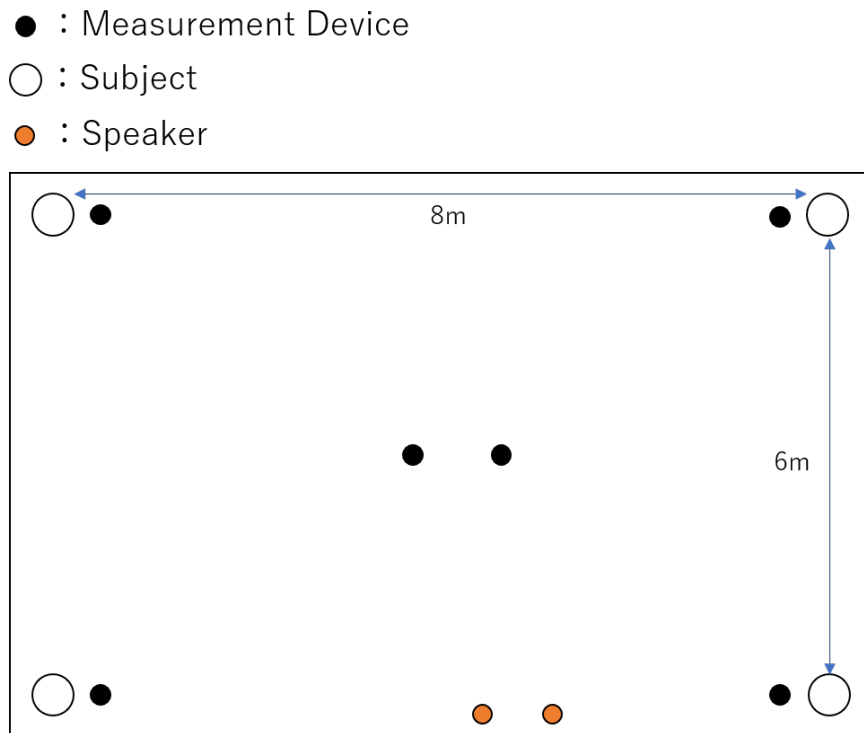


図 6.1: 検証における被験者と計測デバイスの配置図

6.2.3 検証結果

実験 1 から実験 5 までにおける室内の経過時間における CO₂ 濃度の変化量を図 6.2 及び図 6.3 に示し, 各実験の最終的な室内における CO₂ 濃度の変化量を Table6.2 に示す.

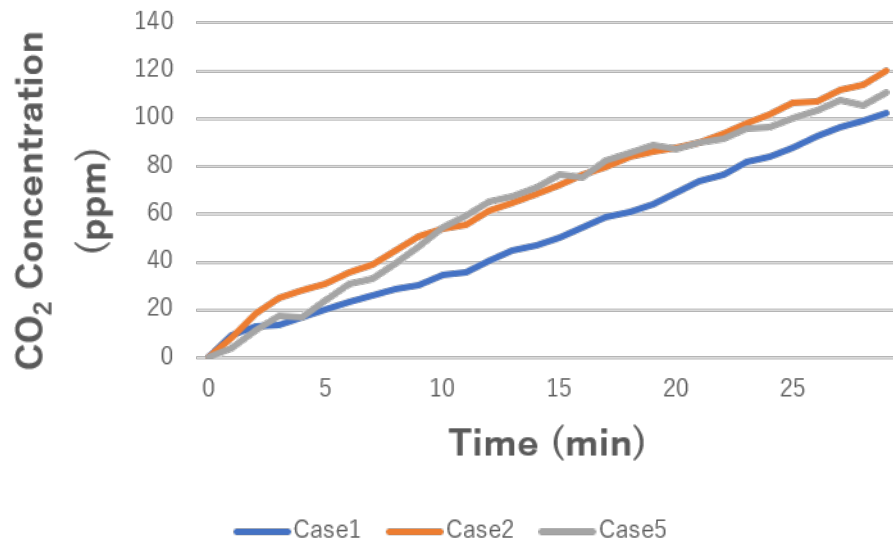


図 6.2: Case1,2,5 における室内の CO₂ 濃度の時系列変化

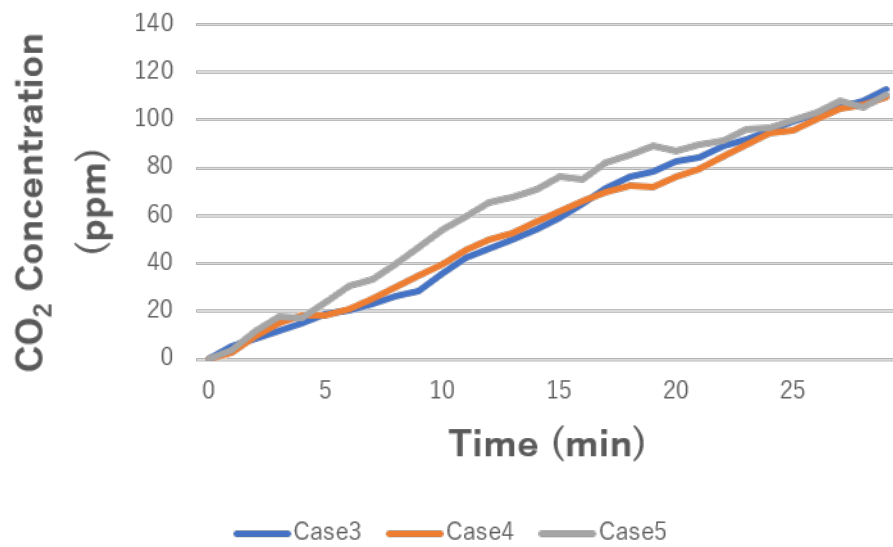


図 6.3: Case3,4,5 における室内の CO₂ 濃度の時系列変化

表 6.2: 実験終了時 CO₂ 濃度の変化量

Music Source	CO ₂ Change (ppm)
Metronome 95 bpm	102.1
Metronome 120 bpm	120.2
Drum Playing 95 bpm	112.9
Drum Playing 120 bpm	109.8
Silent	110.8

6.2.4 検証における考察

図 6.2, 図 6.3 及び Table 6.2 から 95bpm のメトロノーム音源を利用した実験 1 では音源を用いなかった実験 5 と比較して, 室内の CO₂ 濃度の上昇は抑制され, 逆に 120bpm のメトロノーム音源を利用した実験 2 では CO₂ 濃度の上昇が促進された. その一方でドラム演奏を用いた実験 3 及び 4 の最終的な CO₂ 濃度の変化量は実験 5 と比較して大きな変化は見られなかった. この原因として音源として利用したドラム演奏を 2 種類の bpm 測定ソフトにかけて分析したところ, BPM Analyzer[43] を用いた場合, 95 及び 120bpm のドラム演奏の音源は我々の想定通り, 95bpm 及び 120bpm であると測定されたのに対して, BPM Counter[44] という別の測定ソフトを利用したところ 95bpm のドラム演奏音源は 127BPM であると測定された. これはメトロノームと違い, ドラム音源は単純な主旋律以外の旋律が入っているためにどの音を主旋律と判断するのかによって, bpm に違いが生じる可能性があるためであると考えられる. 実際に被験者からもドラムのシンバルから発生するハイハットと呼ばれる音により, どのリズムを主旋律とすればいいのかがわからなかったという意見があった. 以上のことから, 室内における CO₂ 濃度の上昇を抑制するためにはドラム演奏のように複数のテンポが混在する音源ではなく, メトロノームのように単一のテンポによって構成される音源のほうが効果があると考えられる.

6.3 実験方法

6.3.1 実験環境及び条件

本章では提案ウェアラブルデバイスによる被験者の呼吸数への影響を計測し、呼吸数の変化による室内の CO₂ 濃度への影響について計測及び分析する。本研究では無音、60bpm のメトロノーム音、150bpm のメトロノーム音、60bpm のメトロノーム音及び振動、150bpm のメトロノーム音及び振動の5つの条件において実験を行った。本研究におけるそれぞれの条件を Case1 から Case5 とする。bpm の選定理由として、本提案デバイスを被験者1名に装着した状態で、40, 60, 100, 150bpm のメトロノーム音と振動を与え、1分ごとの呼吸数を15分間測定した。60bpm 時に最も呼吸数が少なく、150bpm 時も最も呼吸数が多かったため、60及び150bpm を選定した。

また、被験者は20から35歳の成人男性6名を3人ずつの2組に分け、それぞれの被験者を被験者1から被験者6とし、被験者1から被験者3までが参加した組をチーム1、被験者4から被験者6までが参加した組をチーム2とした。これら2つの組において Case1~Case5 までの条件で、被験者の呼吸数と室内の CO₂ 濃度を測定した。

実験中、被験者は Case1~3 では呼吸数測定デバイス、Case4~5 では呼吸数測定デバイスとウェアラブルデバイスを装着し、椅子に着座した状態で読書など呼吸に影響が出ない程度の軽作業を行い、被験者同士の会話は禁止した。1回の実験時間は30分とし、開始からの5分間と終了までの5分間を除き20分間を計測データとした。ウェアラブルデバイスを装着していない Case2 及び3はヘッドフォンではなく、室内中央に Android 端末を設置し、そのスピーカーからメトロノーム音を発生させた。

全ての実験は外気からの影響を最小限にするために、地下階層にある 48.5m³ のスタジオで行った。スタジオ内の全ての換気口と扉に内部から目張りを行い、換気量を減少させることで、室内に CO₂ 濃度が上昇しやすい環境を整えた。また、実験中は SFC 実験・調査倫理委員会にて承認を受けた 3000ppm 以下の濃度になるように実験を行った。図 6.4 に実験中における被験者、測定デバイスの位置を示す。

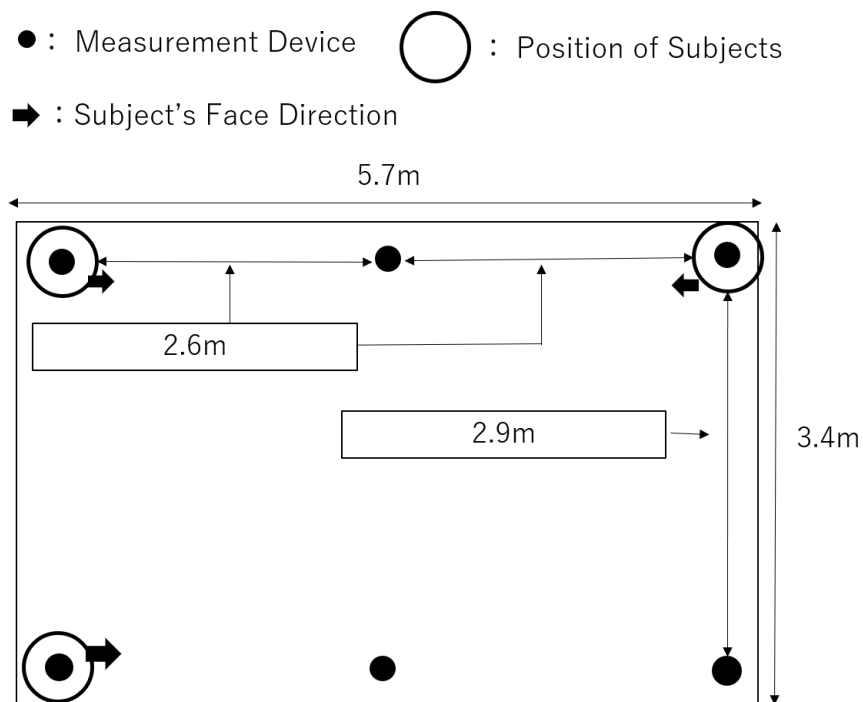


図 6.4: 実験中の被験者と測定デバイスの配置

3名の被験者はスタジオ内の唯一の扉から最も近い箇所以外の四隅に待機し、測定デバイスは室内の四隅及び長辺の中央の計6箇所に設置した。測定デバイスは床に設置し、高さは0mとした。以上の条件下でチーム1とチーム2において、Case1~5までの条件で3回ずつ実験を行い、その平均を実験結果とした。また、全6名の被験者の中で呼吸数に増減が見られ、その変化が顕著であり、実験に参加可能であった被験者3名で同様の環境及び方法で、実験時間を1時間に延長し、30分の実験で呼吸数に大きな変化が見られたCase4及び室内利用者の会話が活発に行われていることを前提としてCase5の条件において2回実験を行い、その平均を実験結果とした。また、30分間の実験と同様に開始5分間と終了までの5分間を除き、計50分間を計測データとした。

6.3.2 呼吸回数測定方法

本研究では呼吸数の測定に Spirehealth 社の SpireStone[46] を利用した。図 6.5 にその外観を示す。



図 6.5: 呼吸数測定デバイス:SpireStone

SpireStone は被験者の腹部に装着され，腹部の圧力を測定することで被験者の呼吸数を測定する．また SpireStone 及び専用 app には時間ごとに 1 分間の呼吸数を記録する機能が存在せず，実験時間中の被験者の呼吸数のログを取ることが出来ない．しかし，SpireStone の専用 app と iPhone のデフォルトアプリである HealthKit と連携させることにより，実験中の 1 分間隔の呼吸数の計測結果のログを取得し，それを実験結果とした．

6.4 実験結果

チーム1とチーム2における Case1~5 の条件で行われた 20 分間のそれぞれのチームにおける被験者の 1 分間あたりの呼吸数の平均値を表 6.3 に示す。

表 6.3: Case1 から Case5 における被験者の平均呼吸数 [回/min]

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
Subject 1	12.1	11.8	13.5	11.0	13.4
Subject 2	19.6	19.2	19.9	18.8	19.2
Subject 3	15.1	14.9	16.4	14.7	17.4
Subject 4	17.9	17.3	19.1	17.4	18.8
Subject 5	13.0	12.2	12.8	12.0	14.0
Subject 6	13.8	11.6	15.7	14.6	17.6

実験結果から 60bpm のメトロノーム音のみの刺激を与えた Case2 は無音であった Case1 と比較して呼吸数が全員減少し、振動を加えた Case4 は被験者 6 を除いて Case1 より呼吸数が減少した。同様に 150bpm の音のみの刺激を与えた Case3 は、被験者 5 を除いて Case1 より呼吸数が増加し、振動を加えた Case5 は被験者 2 を除いて増加した。音と振動を用いた Case4 と 5 では、音のみを用いた Case2 と 3 の結果を比較すると、個人差が大きく、被験者ごとに結果が異なった。被験者 5 のように音だけでは 0.6 回程度の変化しか起こさなかったのに対して、振動を追加したことによって、変化数が 2.0 回まで上がり、3 倍以上上昇している被験者が確認された。また、逆に 0.3 から 0.4 回の微量の減少を示した被験者 2,4 や、1 回以上の減少が見られた被験者 6 も確認された。

次に、チーム1及びチーム2の室内の CO₂ 濃度の変化をそれぞれ図 6.6 と図 6.7 に示し、それぞれのグラフは x 軸に実験の経過時間を、y 軸に CO₂ 濃度の初期値から変化量を示す。また、実験終了時の Case1~5 の最終的な初期値からの CO₂ 濃度の変化量を表 6.4 に示す。

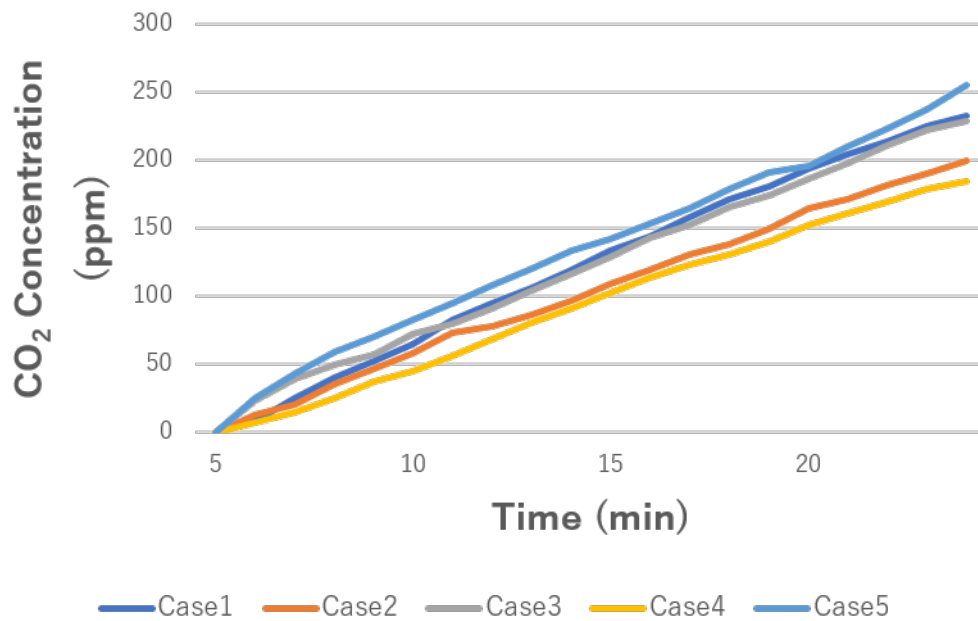


図 6.6: チーム 1 におけるそれぞれの条件下における CO₂ 濃度の変化量

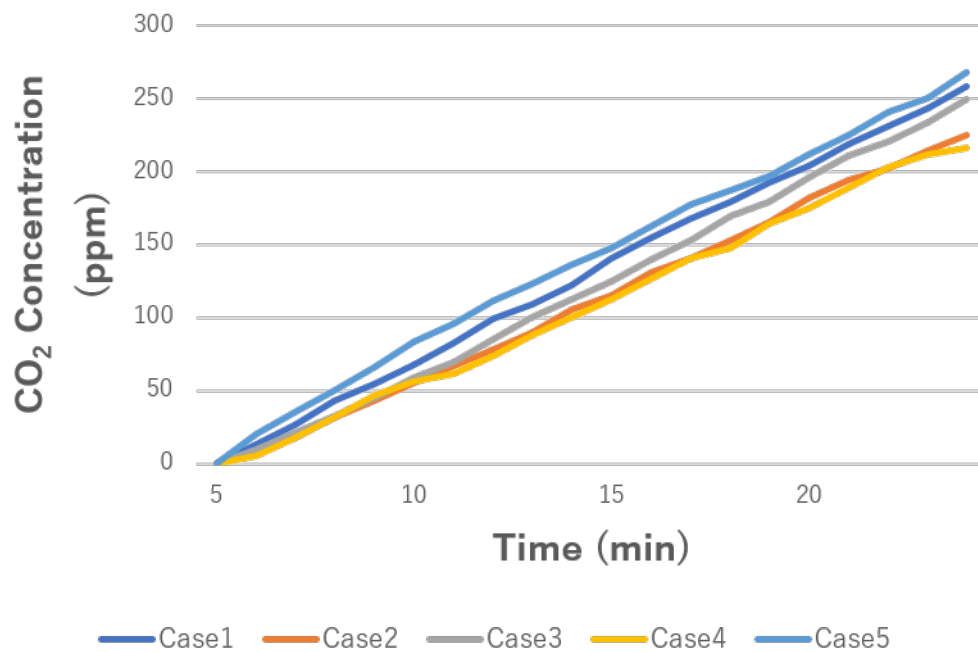


図 6.7: チームにおけるそれぞれの条件下における CO₂ 濃度の変化量

表 6.4: 30 分間の実験終了時の CO₂ 濃度の変化量 (ppm)

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
チーム 1	232.8	200.0	228.7	184.7	255.8
チーム 2	258.3	224.9	249.8	216.0	268.3

図 6.6 及び図 6.7 による実験結果から室内の CO₂ 濃度の変化量は 150bpm の音と振動を与えた Case5 がチーム 1 では 255.8ppm, チーム 2 では 268.3ppm と変化量が最大となった。その一方で, 60bpm の音と振動を与えた Case4 がチーム 1 では 184.7ppm, チーム 2 では 216.0ppm と変化量が最小であった。以上のことから, 60bpm のメトロノーム音と振動の刺激は被験者の呼吸数に影響を与える共に, 室内の CO₂ 濃度の変化量にも一定の影響を与えた。しかし, 音と振動を与えなかった Case1 の CO₂ 濃度の変化量は, どちらのチームにおいても 150bpm で実験した Case3 及び 5 に近い値となり, どちらのチームにおいても Case3 の変化量を 5~10ppm ではあるが上回った。また, 30 分間の実験において, 最も CO₂ 濃度に差が出た Case4 及び 5 の CO₂ 濃度の差は, 差が大きかったチーム 1 であっても, 71.1ppm 程度であり, CO₂ 濃度センサーの精度が ± 50ppm に出力値の 3%を加えた値であることを考えると明確な差が出たと判断することは出来ない。

次に実験時間を 1 時間に延長した場合での実験結果を図 6.8 に示す。実験の経過時間を x 軸, CO₂ 濃度の初期値からの変化量を y 軸に表す。また被験者 3 名の 1 分あたりの平均呼吸数を表 6.5 に示す。

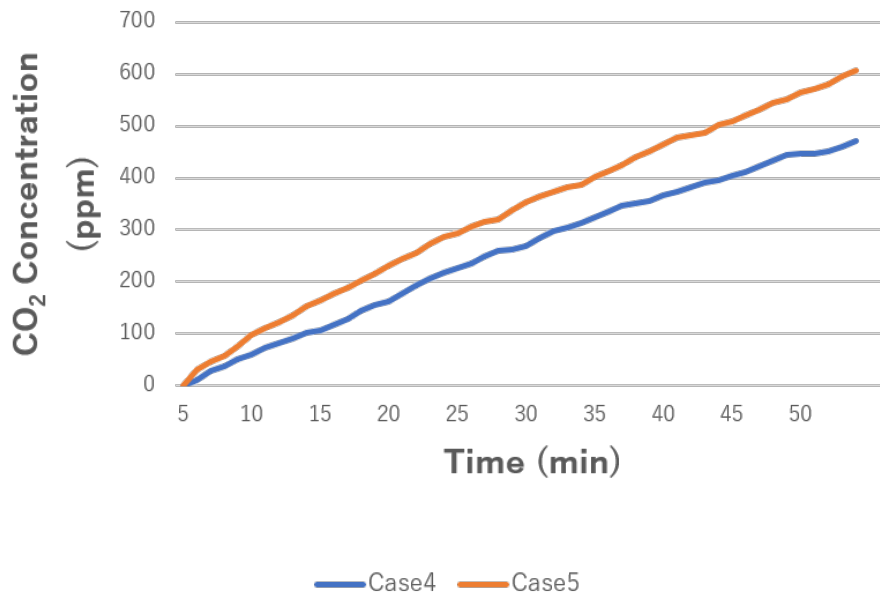
図 6.8: 1 時間の実験における CO₂ 濃度の変化量

表 6.5: 1 時間の実験における被験者の平均呼吸回数 [回/min]

	Case4	Case5
Subject 3	17.2	18.3
Subject 4	18.4	19.9
Subject 6	14.2	19.6

表 6.5 より, 1 時間の実験結果を通して, 被験者 3 名全員の 1 分間あたりの平均呼吸数が 1 回以上変化した. また図 6.8 より, Case4 と Case5 では室内の CO₂ 濃度の変化量に明確な差が見られた. CO₂ 濃度の変化量は実験開始から 55 分経過時の値で 134.6ppm となり, センサーの誤差範囲を超える値となった.

6.5 考察

6.5.1 感覚刺激による呼吸数への影響

本研究では異なる bpm のメトロノーム音, またはメトロノーム音と振動による聴覚と振動感覚に関する刺激を被験者に与え続けることで被験者の呼吸数と室内の CO₂ 濃度の変化量にどのような影響があるのかを分析した. 実験結果から呼吸数は 60bpm を用いた Case2 及び 4 では Case1 に比べて減少傾向を示し, 150bpm を用いた Case3 及び Case5 ではある Case1 と比較に比べて増加傾向を示した. しかし, 被験者によっては特定の条件において他の被験者と比較して呼吸数に変化がない, あるいは被験者 5 のように Case2 では Case1 と比較して呼吸数が減少したにも関わらず, Case4 では増加することが確認された. このように必ずしも振動感覚に刺激を与えることで効果が増加していると言い切ることは出来ない. 聴覚のみと聴覚と振動感覚に同時に刺激を与えた場合の呼吸数への影響を更に分析するために, 3 回の試行における平均値ではなく, それぞれの条件における各被験者の最小及び最大の平均呼吸数を表 6.6 及び表 6.7 に示す.

表 6.6: Case1 から Case5 の 1 試行における平均呼吸数の最小値 [回/min]

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
Subject 1	11.7	11.7	12.7	10.7	12.8
Subject 2	18.3	18.5	19.2	18.1	18.4
Subject 3	14.3	14.5	15.2	14.1	17.2
Subject 4	17.2	16.2	18.6	16.3	16.7
Subject 5	12.3	11.3	12.3	11.5	12.2
Subject 6	13.5	9.8	15.3	13.7	17.5

表 6.7: Case1 から Case5 の 1 試行における平均呼吸数の最大値 [回/min]

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
Subject 1	12.9	12.0	14.1	11.2	14.0
Subject 2	20.9	20.0	20.7	19.6	19.7
Subject 3	16.0	15.2	17.3	15.1	17.6
Subject 4	18.7	17.9	19.6	17.4	22.5
Subject 5	13.6	13.3	13.2	12.5	15.4
Subject 6	14.1	14.2	16.4	15.6	18.2

表 6.7 から Case2 と Case4 の平均呼吸数の最大値を比較すると被験者 6 を除き、Case4 のほうが呼吸数は減少しており、Case3 と Case5 においても被験者 1 と 2 を除いて、Case5 のほうが呼吸数は増加している。しかし、表 6.6 の平均呼吸数の最小値では Case2 と Case4、Case3 と Case5 のどちらの関係性においても明確な傾向は確認できなかった。以上のことから同様の bpm であっても、聴覚のみと振動を加えた場合では有意な差は得られなかったが、振動を加えた場合は呼吸数への影響が大きい被験者が多かったため、聴覚に加え振動刺激を与えた方が呼吸に与える影響は大きいと考えられる。また、60 分間に実験時間を延長した Case4 及び Case5 の 3 人の被験者の呼吸数の変化は 30 分実験における呼吸数の変化よりも顕著であり 3 人の被験者全員の平均値が 1 分あたり 1 回以上の差が計測され、時間の経過とともに呼吸数への影響が減少するがないことも確認された。以上の実験結果から、本提案手法のように聴覚と振動感覚を利用することによって、意識下での呼吸制御を行うことが可能であると考えられる。

6.5.2 室内の CO₂ 変化に与える影響

聴覚と振動感覚への外部刺激によって個人差はあるものの、聴覚刺激と振動刺激によって呼吸数が増加した。60bpm の音源を利用した Case2 と Case4 では、無音状態であった Case1 に比べて呼吸数の減少した。また、150bpm の音源を利用した Case3 と Case5 においても Case1 と比較して呼吸数は増加傾向を示した。これに対して室内の CO₂ 濃度の変化量は Case2 と Case4 において呼吸数の減少と同様に両チームにおいてが 30 から 50ppm 程度減少していた。しかし、150bpm の音源を利用した Case3 と Case5 では、Case5 では両チームにおいて 10 から 20ppm 程度の増加が見られたものの、Case3 では逆に Case1 よりも両チームにおいて CO₂ 濃度の変化量が減少した。仮に Case1 のチームの被験者 2 と Case3 のチームの被験者 5 の呼吸数が Case1 に比べてあまり変化しなかったとしても、他の被験者の呼吸数が増加していることを考えると、明らかに Case2 と 4 に対して Case3 と Case5 の CO₂ 濃度の変化量が少ないことは明らかである。以上のことから、呼吸数の減少は、室内の CO₂ 濃度の上昇を抑制する効果があると考えられるが、呼吸数の増加は、呼吸数の減少に比べて、必ずしも室内の CO₂ 濃度の変化量が大きくなるとは限らないと考えられる。また、60 分間の実験において、実験開始から 55 分後の Case4 及び Case5 における CO₂ 濃度の変化量の差は 134.6ppm であり使用センサーの誤差範囲である 50ppm ± 出力値の 3% の値を上回っており、呼吸数を減少させることで室内の CO₂ 濃度の上昇を抑制出来ていることが明らかになった。これは Case4 の条件による呼吸制御によって議論の活発に行われていることを前提とした Case5 と比較して、室内の CO₂ 濃度の上昇を約 22% 抑制したことを示している。更に表 6.4 の Case1 と Case4 を比較しても、チーム 1 では CO₂ 濃度が 21% 減少し、チーム 2 でも 17% 減少している。これらの結果から、本提案手法を用いた感覚への外部刺激は室内の CO₂ 濃度の上昇を約 20 % 低減することが出来ると考えられる。

次に、1 時間実験の 5 分後から 54 分後までの室内の CO₂ 濃度の変化を図 6.9 に示す。既存の研究結果から、1000ppm 程度の CO₂ 濃度が人間の知的活動に悪影響を及ぼすことが確認されており、図 6.9 から、Case5 では 39 分の時点、Case4 では 45 分の時点で 1000ppm を超えていることがわかる。したがって、2 種類の外部刺激による呼吸制御によって人間の知的活動の質が高いレベルで維持される時間を延長することが可能であることは明らかである。また、図 6.9 に示すように、Case4 と Case5 の室内の変化量は時間の経過とともに増加しており、Case4 と Case5 では 1500ppm などの更に悪影響を及ぼす濃度に達する時間では更に大きく時間延長することが可能であると考えられる。

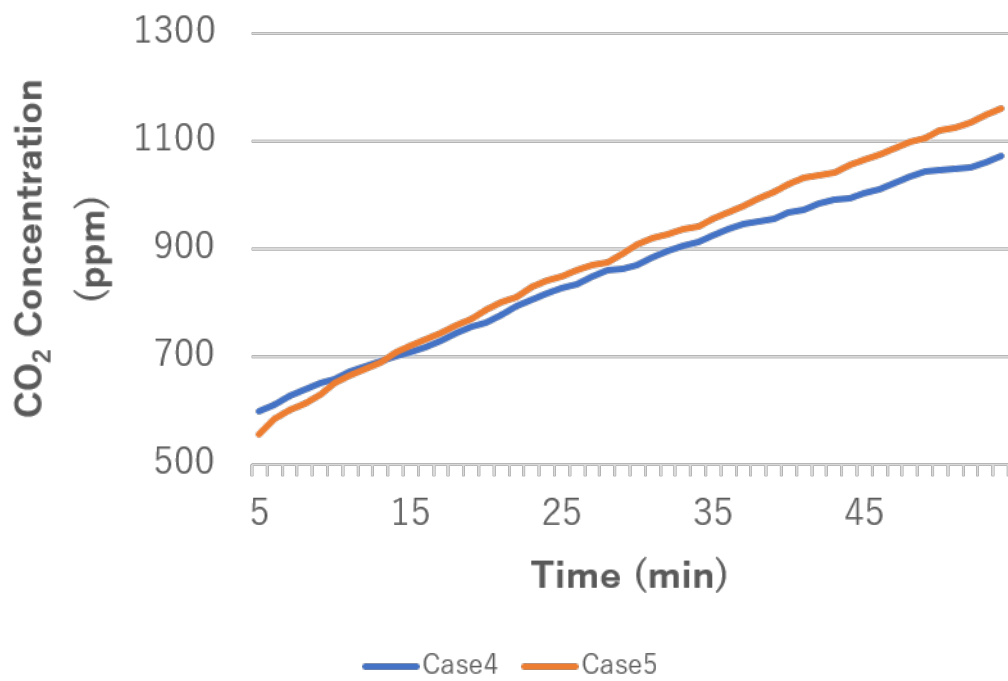


図 6.9: 1 時間の実験における室内の CO₂ 濃度変化

第7章 まとめと将来の課題

7.1 拡散傾向に適した予測モデルによる CO₂ 濃度変化予測

近年の室内空気質の研究結果において、CO₂ 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 CO₂ 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、人の呼気から発生する CO₂ が 1000ppm 程度の低濃度帯かつ、換気回数が少ない空間において、JIS 規格 A1406 に明記されている一般的な CO₂ と同様に均等に拡散するかどうかを検証した。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、被験者同士的位置のいずれの条件においても、室内においてほぼ均等に拡散した。よって、換気回数が少ない空間であっても、CO₂ 濃度は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 CO₂ 濃度を把握することが出来ることが明らかになった。

CO₂ の低濃度帯の濃度予測としてザイデルの式を選定し、CO₂ 濃度センサーの精度とザイデルの式における CO₂ 排出量を成人男性の着座時の CO₂ 排出量の中央値とすることの2点で一定の誤差がある条件において、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。ザイデルの式は瞬時一様拡散である気体で利用出来る濃度変化の予測モデルであり、人の呼気によって発生する CO₂ は明らかに瞬時一様拡散ではない。しかし、本研究の実験における拡散傾向の分析結果から1分間隔による測定、使用した CO₂ 濃度センサーの誤差範囲という条件において、測定点近傍においては擬似的に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、ザイデルの式を予測モデルとして選定した。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、同一建造物中の地下同一階層にある容積の異なる3種の室内において、被験者の人数を変更し、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 CO₂ 濃度の予測にはザイデルの式は十分有効であることが明らかになったが、換気回数が少ない空間では、予測値と実測値には大きな乖離が見られた。よって、換気回数が少ない空間においては測定デバイスによるリアルタイム測定が必要であると考えられる。本研究で提案した同時多点センシングシステムは換気回数が少ない空間においても活用することができ、搭載するセンサーを変更することによって様々な化学物質を複数箇所において同時に測定することが可能である。

7.2 感覚刺激を用いた呼吸制御による室内のCO₂濃度変化への影響

第5章にまとめた実験結果から、一定の換気回数がある空間においてはザイデルの式はCO₂濃度の予測に有用であることが明らかになった。換気以外の室内のCO₂濃度を抑制する方法として、このザイデルの式を構成する制御可能なパラメータのうち、被験者のCO₂排出量の制御に着目した。感覚刺激を用いた呼吸制御によって室内のCO₂濃度の変化にどのような影響が出るのかを明らかにすることを目的として実験を行った。第6章における30分間の実験結果から、刺激を与えなかったCase1に対して、本提案ウェアラブルデバイスによる聴覚及び振動感覚への刺激によって、個人差はあるものの呼吸数の変化が見られた。刺激を与えなかったCase1と比べ、60bpmで刺激を与えたCase2、4では呼吸数、CO₂濃度の変化量のどちらについても減少傾向が確認された。その一方で、150bpmで刺激を与えたCase3、5では無音のCase1と比べて、呼吸数には一定の増加傾向が確認された。しかし、被験者6のCase4のように呼吸数が増加する場合や、被験者2のCase5と被験者5のCase3のようにほとんど呼吸数に変化が起きないこともあった。また、それぞれの条件におけるCO₂濃度の変化量はCase2、4のどちらのチームにおいても30~50ppmの減少が見られ、無音状態であるCase1と比較してCO₂濃度の上昇を20%程度抑制することが可能であった。それに対して、呼吸数に最大の上昇が確認されたCase5であっても室内のCO₂濃度の変化量は10~20ppm程度の増加しか見られず、Case3では刺激を与えなかったCase1の変化量を下回った。Case3において、チーム1では被験者2、チーム2では被験者5の呼吸数がCase1と比べてあまり変化していないことを前提にしても、残り2名の被験者の呼吸数が増加していることを考えれば、CO₂濃度の変化量としては明らかに少ない。以上のことから本提案デバイスによる呼吸数の減少は室内のCO₂濃度の上昇を抑制することに影響するが、呼吸数の増加は呼吸数の減少に比べて、必ずしも室内のCO₂濃度の変化量を増加させるとは限らない。

60分間の実験で行ったCase4及び5の3名に対する呼吸数の変化は30分間の実験に比べてより顕著なものとなり、被験者3名全員の1分間の平均値に1回以上の差が計測されている。また、CO₂濃度の変化量についても実験開始後、55分の時点で134.6ppmの差があり、センサーの誤差範囲を明らかに上回った。以上の結果から、本提案デバイスは時間経過とともに効果を発揮し、1時間の実験では3名の被験者全員の呼吸数に1分間あたり平均1回以上の効果を及ぼすことで、室内のCO₂濃度の上昇を抑制することが可能であることを明らかにした。本研究では2種類の音源を利用して呼吸制御を行ったが、この2つが万人に対して最適であるとは考えにくい。ウェアラブルデバイスによる感覚刺激は個々人の適正に合わせて音源を調整することが可能であり、呼吸制御の効果を最適に保つことが出来ると考えられる。

7.3 今後の課題

本研究における今後の課題として、CO₂濃度の予測精度向上が挙げられる。予測精度の向上には、異なる気体濃度予測モデルとの比較、あるいはCO₂濃度に特化した予測モデルの構築が必要であると考えられる。また同時に、更に精度の良いCO₂濃度センサーが必要となるのは明らかであり、新しいCO₂濃度の測定手法と、それに対応できるより高精度なセンサーの開発、利用が期待される。また、本研究では全ての濃度変化の予測実験において機械換気ではない自然換気を利用したが、実際に機械換気を用いた空間では予測値と実測値においてどの程度の乖離が見られるのかを検証する必要がある。また本研究ではザイデルの式の有効性について、一定以上の換気回数がある空間において有効であると評価した。しかし、具体的にどの程度の換気回数であれば有効に利用することが出来るのかを検証するには至らなかった。そのため、機械換気による換気回数の制御も視野に入れ、ザイデルの式が有効利用できる具体的な換気回数の検証もしていきたいと考えている。

人のCO₂排出量に着目した呼吸制御において本研究では2種類のbpmのメトロノーム音を利用し、6名の被験者に呼吸制御を行ったが、感覚刺激による呼吸制御は個人差が大きく、被験者の数が十分であったとは考えにくい。同様に本研究で利用した2種類のメトロノーム音が万人に有効であるとも考えにくい。本研究における呼吸制御の呼吸数の差は多くの場合、1回程度であり、室内のCO₂濃度の上昇を抑制するためには更に有効な音源を選定する必要がある。将来的には様々なbpmや音の種類において同様の実験を繰り返すことにより、万人に有効である音源についても選定を行う必要があると考えられる。また、本研究では被験者は実験中、着座状態で特に作業を行っていないという条件で実験を行った。しかし、現実では同じ空間においても事務作業を行っている人もいれば、他人と議論を行うなど多種多様な活動が考えられる。これらの活動において、こういった活動中であれば呼吸制御は有効なのか、あるいは効果が発揮されないのか等、被験者の活動状態における呼吸制御の有効性について検証を行う必要がある。加えて、感覚刺激を与える方法についても検証の余地は残る。本研究では掌に振動メトロノームを用いて振動感覚への刺激を行ったが、それ以外の部位に対して感覚刺激を行ったほうが呼吸制御への影響が大きい可能性は十分に考えられる。例えば、聴覚と振動感覚に対して完全に同一の刺激を与える方法として骨伝導イヤホンなので利用も検討する価値がある。最後に、本研究ではCO₂濃度によって引き起こされるとされている人の知的活動への影響を検証及びウェアラブルデバイスによる感覚刺激が人の知的活動へどのような影響を与えるか検証するには至らなかった。今後の研究として人の知的活動の質に対する影響についても検証を行ってきたい。

第8章 結論

本研究では近年の室内空気質の研究において CO₂ が 1000ppm 程度の低濃度であっても、人の知的活動に悪影響を与えることが明らかになったことに着目し、室内空気質の維持を目的とした CO₂ 濃度変化の予測と換気以外の室内の CO₂ 濃度の制御について研究した。

まず、実空間における CO₂ 濃度変化の予測を目的として、低換気回数及び低濃度帯においても、人の呼気に含まれる CO₂ は JIS 規格 A1406 に明記されているように均等に拡散するのかを検証した。本検証では既存研究において、濃度予測に大きな乖離が見られた CFD シミュレーションのようなモデルではなく、本研究で提案する、複数の測定デバイスと Raspberry Pi を用いた同時多点センシングシステムを利用し、人の呼気による CO₂ の拡散傾向について分析した。この検証実験によって、人の呼気によって発生する CO₂ は低換気回数及び低濃度帯においても距離、高低差、被験者の位置のどれにも影響を受けず、均等に拡散することを確認した。以上のことから、低濃度帯における CO₂ 濃度の予測モデルとして瞬時一様拡散の気体濃度予測モデルであるザイデルの式を選定した。ザイデルの式のパラメータのうち、被験者の CO₂ 排出量を JIS 規格 A1406 に記載されている着座時の CO₂ 排出量の中央値に設定するという一定の誤差がある条件下において、予測値と測定デバイスの実測値を比較し、ザイデルの式の実空間における有用性について検証した。実験条件として、同一建造物の外気からの影響を受けにくい地下階層にある大きさの異なる 3 つのスタジオにおいて、換気量の測定実験を行い、それぞれの換気回数を求めるとともに、異なる被験者数における室内の CO₂ 濃度の変化量を測定した。その結果から、実空間においてザイデルの式は、一定以上の換気回数がある空間においては実測値におけるセンサー精度及び予測モデルによる個人の CO₂ 排出量による誤差を考慮しても十分に有効であった。しかし、換気回数が不十分な空間においては予測値と実測値の乖離が大きく、測定機器を用いたリアルタイム計測が必要であった。これらの研究成果は自動換気システムとの連携、あるいは利用者への通知し、換気を促すことによって現状においても室内の CO₂ 濃度を一定に保つことは十分に可能であると考えられる。また本研究で提案した同時多点センシングシステムはセンサーを変更することによって CO₂ 濃度だけでなく、室内空気質を維持するために必要な様々な化学物質を測定することが可能である。これらの化学物質を複数箇所で同時に測定する際にも非常に有効なシステムであり、今後多種多様な化学物質の拡散傾向や濃度測定において実空間において大いに役立つものと

確信している。

次にザイデルの式を構成するパラメータの中で制御可能なものから、利用者の CO₂ 排出量に着目し、呼吸制御による室内の CO₂ 濃度への影響を検証した。既存の研究から聴覚や振動感覚に外部から刺激を与えることによって無意識に呼吸数が増減することが報告されているが、この感覚刺激を用いた意識下の呼吸数の変化が人の排出する CO₂ 量にどのような影響を与えるのかは明らかにされていない。本研究では、ウェアラブルデバイスを用いて聴覚及び振動感覚に特定の bpm の感覚刺激を与え続けることによって、呼吸数が増減することを確認し、その変化が室内の CO₂ 濃度の上昇にどのような影響を与えるかを分析した。実験結果から、個人差はあるものの、60bpm の感覚刺激によって呼吸数には減少傾向が、150bpm の感覚刺激によって増加傾向が見られた。また、この呼吸数の減少によって室内の CO₂ 濃度の上昇を抑制することが可能であることが確認されたのに対して、呼吸数の増加は室内の CO₂ 濃度の変化量には呼吸数減少時ほどの影響は見られなかった。以上のことから、感覚刺激を用いた呼吸制御によって、室内の CO₂ 濃度の上昇を抑制することが可能であると考えられる。将来的に、感覚刺激を用いた呼吸制御に最適であると考えられる bpm や音源などを特定できた暁には、それらを環境音として BGM のように用いることで、室内全員の呼吸制御を行い、室内の CO₂ 濃度の上昇を抑制することも可能になると考えられる。また、将来的にウェアラブルデバイスが現状よりも発展、普及した際には一方的に感覚刺激を与えるのではなく、個人の状態をセンシングしながら個々人に適した感覚刺激等を与えることによって、呼吸から発生する CO₂ を制御するだけでなく、利用者の緊張状態の緩和や活動支援などにも利用することが可能であると考えられる。

室内における CO₂ 濃度を一定以下に保つことで人の知的活動への悪影響を最小限に抑えることは、会議室やオフィスだけでなく、一般家庭や学校などの人が生活する全ての場面において有益である。本研究で得た研究成果を基に、室内空気質をより良い状態に維持することを目指していきたいと考えている。

謝辞

本研究を遂行し、まとめるにあたって、本当に多くの方にお世話になりました。この場をお借りして、感謝の意を述べさせていただきます。

まず、指導教官主査である武藤佳恭先生には、プログラミングの初学者であった学部生の時からプログラミング、電子回路設計を始めとする基本的な技術だけでなく、研究の手法を始めとする様々な分野においてご指導頂きました。また、学内外を問わず、多くの発表において様々な面からの御助言を頂きました。そして副査である清木康先生には修士課程の頃からご指導頂き、武藤先生とは違った視点から多くのご指導を頂きました。副査の中村修先生には、公聴会及び最終試験において本論文について貴重な意見とご指導を頂きました。また、外部副査を引き受けて頂いた武蔵野大学准教授の渡邊紀文先生には実験手法から結果の分析、論文執筆など様々な面でご指導頂き、大変お世話になりました。

また、本論文の実験には複数の被験者を利用する必要があったため、所属していた武藤佳恭研究室の同輩及び後輩には被験者として、無償にも関わらず、多くの協力をして頂きました。特に論文共著者としてほぼすべての実験に参加して下さった宮本賢良さん、糸田孝太さんには大変お世話になりました。また、本研究を行う上で土台となる情報を提供して下さった山本浩之さんには本当に公私を問わず、様々な相談に乗って頂きました。最後に、実験に必要な機材を提供して下さった中島博敬さんと祖父江瑛章さんがいなければ、一部の実験を行うことが出来ませんでした。

最後に、本研究を行う上で必要不可欠であったCO₂濃度センサーを無償で貸して下さった環境リサーチ株式会社社会長山口陽二様、また同社社員であり、測定デバイスの精度検証及び補正、CO₂濃度予測モデルの利用方法等について様々な助言を下された青山浩之様には本当にお世話になりました。

以上の皆様の御助言、支援、協力、励ましに対して、深く感謝申し上げます。

守谷元一

本研究に関する発表一覧

原著論文

1. Motokazu Moritani, Norifumi Watanabe, Kensuke Miyamoto, Kota Itoda, Junya Imani, Hiroyuki Aoyama, Yoshiyasu Takefuji, Analysis of carbon dioxide concentration prediction model and diffusion tendency of expiratory by simultaneous multipoint sensing, *Applied Sciences*, Vol.10, 13, 4631(2020)
2. 守谷 元一, 渡邊紀文, 宮本賢良, 糸田孝太, 今仁順也, 青山浩之, 武藤佳恭, 知的環境構築のための測定システムを利用した濃度予測モデルの評価, *情報処理学会論文誌「インタラクションの理解及び基盤・応用技術」特集*, 出版予定:Vol.62,2(2021), Paper No:21-J018. accepted on 2020/11/6

国際学会発表

1. Motokazu Moritani, Norifumi Watanabe, Junya Imani, Kota Itoda, Hiroyuki Aoyama, Yoshiyasu Takefuji, Respiration Induction by Music Control Based on Analysis of Carbon Dioxide Concentration by Multi-point Sensing, *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2018, Japan, Miyazaki*, pp.2382-2387
2. Norifumi Watanabe, Motokazu Moritani, Analysis of Carbon Dioxide Concentration in a Room of Multiple Persons by Simultaneous Multi-Point Sensing, *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2020, Virtual Conference, October 11-14, 2020*, pp.3768-3776

国内学会発表

1. 守谷 元一, 渡邊 紀文, 今仁 順也, 宮本 賢良, 糸田 孝太, 青山 浩之, 武藤 佳恭, 知的環境構築のための多点センシングを用いた二酸化炭素濃度分布の推定, 第60回自動制御連合講演会 (2017)
2. 守谷 元一, 渡邊 紀文, 今仁 順也, 宮本 賢良, 糸田 孝太, 青山 浩之, 武藤 佳恭, 室内における複数人の二酸化炭素濃度の分析と音楽を用いた知的環境制御, 第45回知能システムシンポジウム (2018)

その他連名発表

1. 渡邊 紀文, 守谷 元一, 宮本 賢良, 糸田 孝太, 今仁 順也, Analysis of Indoor CO2 Concentration and Respiration Induction by Music Control, 産業技術大学院大学紀要, 12, pp.101-106(2018)

参考文献

- [1] S. Gligorovski and J. P. D. Abbatt, "An indoor chemical cocktail", *Science*, 359(2018)
- [2] J. G. Allen, P. MacNaughton, U. Satish, S. Santanam, J. Vallarino, and J. D. Spengler, "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*, 124, Issue 6(2016)
- [3] U.Satish, M.J.Mendell, K.Shekhar, T.Hotchi, D.Sullivan, S.Streufert, W.J.Fisk, "Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance", *Environ. Health Perspect*, 120, 1671–1677(2012)
- [4] Piotr Batoga, Marek Badura, "Dynamic of Changes in Carbon Dioxide Concentration in Bedrooms", *Procedia Engineering*, Vol.57, pp.175-182(2013)
- [5] 気象庁 Web サイト 二酸化炭素濃度の観測結果
https://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/obs/co2_monthave_ryo.html
(閲覧日：2020年11月18日)
- [6] 渡辺 謙, 大石 悠貴, 柏野 牧夫, "音のテンポと呼吸数の組み合わせが自律神経系に与える効果", 一般社団法人 情報処理学会 研究報告, Vol.2013-MUS-99, No.57(2013)
- [7] Berunardi L.,C. Porta and P.Sleight, "Cardiovascular, cerebrovascular, and respiratory changes induced by different types of music in musicians and non-musicians: the importance of silence", *Heart*, Vol.92, No.4, pp.445-454(2006)
- [8] 日本工業標準調査会：JIS A1406 室内換気量測定法 (炭酸ガス法),1974
- [9] D.Twardella, W.Matzen, T.Lahrz, R.Burghardt, H.Spegel, L.Hendrowarsito, A.C.Frenzel, H.Fromme, "Effect of classroom air quality on students' concentra-

- tion: results of a cluster - randomized cross - over experimental study”, *Indoor Air*, vol.22, No.5, pp.378-387(2012)
- [10] K. Kawasumi and M. Iwai, ”Non-contact concentration-level estimation system using multiple-sensors”, *IP SJ SIG Technical Report*, Vol.1,HCI-171-No.35(2017)
- [11] K. A. Mott, ”Sensing of atmospheric CO₂ by plants”, *Plant,Cell&Environment*,Vol.13,pp.731-737 (1990)
- [12] 吉野 博, 劉 京, 李 重勲, 和田 淳, ”換気実験棟の概要, 並びに実験と計算による基礎的検討 : 住宅用ハイブリッド換気システムの性能評価に関する研究 その1”, *日本建築学会環境系論文集*, Vol.68, No. 566, pp.57-64,(2003)
- [13] 城戸 英彰, 白石 靖幸, 片岡 えり, 塚見 史郎, ”空気汚れセンサーを利用した病室換気制御システムの開発”, *空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集*, Vol.2013, No.8, pp.173-176(2017)
- [14] 合原妙美, 岩下剛, ”鹿児島市内の小学校における室内空気環境実測その2 小学校高学年教室における二酸化炭素濃度と開口部開閉状況”, *日本建築学会計画系論文集*, Vol.67, pp.29-36(2002).
- [15] 金勲, 林基哉, 開原典子, 大澤元毅, 阪東美智子, ”高齢者施設における冬期の温度, 湿度, CO₂濃度の実測調査及び湿度管理に関する分析”, *室内環境*, Vol.18, pp.77-87(2015)
- [16] 東賢一, 池田耕一, 大澤元毅, 鍵直樹, 柳宇, 齊藤秀樹, 鎌倉良太, ”建築物における衛生環境とその維持管理の実態に関する調査解析”, *空気調和・衛生工学会論文集*, No.179, pp.19-26(2012)
- [17] Lidia Eusebio, Marco Derudi, Laura Capelli, Giuseppe Nano and Selena Sironi, ”Assessment of the Indoor Odour Impact in a Naturally Ventilated Room”, *Sensors*, Vol.17(4), No.778(2017)
- [18] M. Newlin Rajkumar, Sruthi M. S, V. Venkatesa Kumar, ”IOT Based Smart System for Controlling Co₂ Emission”, *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, Vol.2, Issue 2, pp.284-288(2017)
- [19] Aditya Prajapati and Meenesh R. Singh, ”Assessment of Artificial Photosynthetic Systems for Integrated Carbon Capture and Conversion”, *ACS Sustainable Chem. Eng*, Vol.7, pp.5993 – 6003(2019)

- [20] 黒田 浩之, 沢田 史子, 満岡 周士, 藤原 民雄, 大藪 多可志, ”植物の二酸化炭素吸収能力の評価とオフィス空間への応用”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.104, No.300, pp.11-16(2004)
- [21] Karnauskas K. B., Miller S. L., Schapiro A. C., ”Fossil fuel combustion is driving indoor co2 toward levels harmful to human cognition”, GeoHealth, Vol.4, Issue.5(2020)
- [22] 国際化学物質安全性カード, https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=ja&p_card_id=0021&p_version=2
(閲覧日: 2020年11月15日)
- [23] 一般社団法人 室内環境学会 (編), 関根嘉香 (監修), ”住まいの化学物質 リスクとベネフィット”, 初版, 学校法人東京電機大学出版局, Tokyo, Japan, 2015, 2 及び 4 章.
- [24] Mark Weiser, ”The Computer for the 21 st Century”, SPECIAL ISSUE: Communications, Computers and Networks: How to Work, Play and Thrive in Cyberspace, Vol.265, No.3, pp.94-105(1991)
- [25] 村尾 和哉, ”センサを用いた住宅内人物移動検出システム”, 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン, Vol. 6 , No.2, pp.126-134(2012-2013)
- [26] 杉本 千佳, ”人間情報のスマートセンシングシステム—生体・行動センシングとその活用—”, 計測と制御, Vol.52 ,No.11,pp.960-965(2013)
- [27] 前川 泰子, 中島 智晴, 今西 昇, 樋口 由美, ”居住空間のスマート化に向けた高齢者見守りシステム開発の取り組み”, ヒューマンケア研究学会誌, Vol.5, No.2, pp.51-54(2014)
- [28] 太田 茂, 安井 秀作, 堀内 健司, ”スマートホンを用いる高齢者所帯の生活状況見守りシステムの開発”, 関西福祉大学社会福祉学部研究紀要, Vol.16, No.1, pp.67-73(2012)
- [29] Takashi G. Sato, Mieko Ohsuga, Takehiro Moriya, ”Increase in synchronization of respiration by repeatedly listening to the same piece of music”, 10th International Symposium on Communications and Information Technologies, pp.1035-1038(2010)
- [30] Takashi G. Sato, Mieko Ohsuga, Takehiro Moriya, ”Increase in the timing coincidence of a respiration event induced by listening repeatedly to the same music track”, Acoustical Science and Technology, Vol.33, No.4, pp.255-261(2012)
- [31] 高野 佑樹, 萩原 啓, ”呼吸波形に基づいた接触振動圧刺激が心身に及ぼす影響”, バイオフィードバック研究, 37 巻,1 号, pp.45-52(2010)

- [32] Atmel 社 Atmega328p 公式 Web サイト
<https://datasheetspdf.com/pdf-file/1057332/ATMEL/ATmega328P/1>
(閲覧日：2020 年 11 月 15 日)
- [33] MCC I²C Bus Technical Overview
<http://www.mcc-us.com/I2CBusTechnicalOverview.pdf>
(閲覧日：2020 年 11 月 15 日)
- [34] RaspberryPi 公式ウェブサイト
<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/?resellerType=home>
(閲覧日：2020 年 11 月 15 日)
- [35] CDM7160 CO₂ センサーモジュール Technical Information
<https://cdn.sos.sk/productdata/52/08/\dadc87c9/cdm7160.pdf>
(閲覧日：2020 年 11 月 18 日)
- [36] 柴田科学株式会社 室内環境測定セット IES-5000 型
<https://www.sibata.co.jp/products/products-33651/?c=8>
(閲覧日：2020 年 11 月 18 日)
- [37] J.N.Miller, J.C.Miller, "Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry",
6th ed., Prentice Hall, Toronto, Canada, 2010, Chapter 5.
- [38] ヴァイサラ株式会社 アプリケーションノート
<https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/CEN-TIA-IST-HVAC-CO2-Measurement-Accuracy-B211311JA-A.pdf>
(閲覧日：2020 年 11 月 18 日)
- [39] セイコーインスツル株式会社 BU10 製品紹介ページ
https://www.sii.co.jp/eco/05_products/gp/acoustic-BU10.html
(閲覧日：2020 年 11 月 18 日)
- [40] 文部科学省学校環境衛生マニュアル https://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/detail/_icsFiles/afieldfile/2018/07/31/1292465_01.pdf
(閲覧日：2020 年 11 月 18 日)
- [41] 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, 113, pp.52-57(1998)

- [42] T. G. Sato, M. Ohsuga and T. Moriya, “ Presentation of musical rhythm synchronized with respiration -Effect of phase difference between respiration and phrases- ”, IPSJ SIG Technical Report, Vol.2011-MUS92, No.2(2011)
- [43] Free software ”bpm analyzer ”,
<https://bpm-analyzer.jp.uptodown.com/windows>
(閲覧日：2020年11月18日)
- [44] Free software “ bpm counter ”,
<https://www.abysmedia.com/bpmcounter/>
(閲覧日：2020年11月18日)
- [45] Google 提供によるメトロノーム音
<https://www.google.com/search?q=metronome>
(閲覧日：2020年11月18日)
- [46] SpireStone 製品紹介ページ
<https://spirehealth.com/pages/stone>
(閲覧日：2020年11月18日)