

各種室内環境条件下における人体二酸化炭素呼出量の測定とモデリング

坂本, 光陽
九州大学大学院総合理工学府環境エネルギー工学専攻

<https://hdl.handle.net/2324/4785166>

出版情報：九州大学, 2021, 修士, 修士
バージョン：
権利関係：



令和 3 年 度

修 士 論 文

各種室内環境条件下における
人体二酸化炭素呼出量の測定とモデリング

九州大学大学院総合理工学府

環境エネルギー工学専攻

熱環境システム研究室

坂本光陽

指導教員

伊藤一秀

提出年月日 令和 4 年 2 月 8 日

目次

第 1 章 序論	1
1.1 二酸化炭素と室内空気環境設計	1
1.2 既存の予測モデル	4
1.3 CO ₂ 呼出量と室内環境条件	7
【参考文献】	9
 第 2 章 異なる年齢，温湿度，着衣量，オゾン濃度条件下での CO₂呼出量の測定 (Exp.1)	13
2.1 序	13
2.2 実験方法	16
2.2.1 人工気候室	16
2.2.2 被験者	18
2.2.3 実験計画	18
2.2.4 CO ₂ の測定	20
2.2.3 CO ₂ 呼出量の推定	20
2.3 結果	20
2.4 考察	29
2.5 制限	33
2.6 結論	33
【参考文献】	34
 第 3 章 睡眠時における異なる温度，換気量条件下での CO₂呼出量の測定 (Exp.2)	36
3.1 序	36
3.2 実験方法	37
3.2.1 実験設備	37
3.2.2 実験条件	39
3.2.3 被験者	39
3.2.4 測定手法	40
3.2.5 実験手順	41
3.2.6 同意事項	42
3.2.7 換気量および CO ₂ 呼出量の算出	42
3.2.8 不確実性分析	43
3.2.9 統計解析	44
3.3 結果	44

3.3.1 測定結果	44
3.3.2 睡眠中の被験者の CO ₂ 呼出量推定が可能な既往研究のデータ	46
3.4 考察	50
3.5 制限事項	53
3.6 結論	54
【参考文献】	55
第4章 異なる温度, 換気量, Pure CO ₂ 濃度条件下での CO ₂ 呼出量の測定 (Exp.3)	58
4.1 序	58
4.2 実験方法	58
4.2.1 実験条件	58
4.2.2 統計分析	61
4.3 結果	61
4.4 考察	66
4.5 結論	69
【参考文献】	70
第5章 室内空気質による CO ₂ 呼出量への影響についての数値検討	71
5.1 序	71
5.2 解析概要	71
5.2.1 Digital Twin モデル	71
5.2.2 非定常呼吸モデル	73
5.2.3 CO ₂ 呼出モデル	75
5.3 結果	78
5.3.1 気道内流れ場による影響	78
5.3.2 吸入 CO ₂	79
5.3.3 CO ₂ 呼出量	81
5.4 結論	82
【参考文献】	83
第6章 総括	84
謝辞	85

第1章 序論

1.1 二酸化炭素と室内空気環境設計

一般に、室内二酸化炭素（CO₂）濃度は人体由来の汚染物質を総合的に表す指標（Fig.1-1）として用いられ、我が国においても、Pettenkofer¹⁻¹⁾によって提言された1000ppm基準が室内空気環境設計の目標値としてされている。

そのため、人為的事故や故障、劣化による汚染物質の発生など特殊な状況での汚染源を考慮しない一般的な用途の家屋での必要換気量設計においては、CO₂濃度がその根幹を担っていると言える。特に、占有率の変化が激しい劇場や講堂のような居室において、必要換気量の指標として非常に有効に利用されている¹⁻²⁾。

CO₂濃度を換気量で制御するには在室者のCO₂呼出量を予測する必要がある、その精度は室内空気環境にとって大きな意味を持つ。また、近年の空調負荷低減を目的とした居室の高気密化により、換気による空気質制御の重要性はますます高まっている。

実際、低換気に伴うSick Building Syndrome（SBS）の増加など健康影響が報告されており^{1-3, 4)}、指標としてのCO₂濃度と児童の喘息など呼吸器症状との相関も報告されている^{1-5, 6, 7)}。その他にもCO₂濃度と在室者に対する悪影響との相関関係が多数報告されている¹⁻⁸⁾（Table 1-1）。また、換気量測定においてもCO₂呼出量予測は重要な意味を持ち、一般的な測定技術であるトレーサースガス法では¹⁻⁹⁾、人体から発生するCO₂は無色無臭非毒性の有用なトレーサースガスであり、大規模な調査にとって非常に有効だと考えられている¹⁻¹⁰⁾。

他方で、近年の研究では、換気指標としてではなく純粋なCO₂による人体影響についても報告されている。従来、CO₂濃度はあくまでも指標であり、室内環境における比較的低レベル（5000ppm未満）のCO₂には人体影響はないと考えられてきた。しかし、Eliseevaらは、CO₂濃度の上昇により呼吸が浅く、大脳皮質の電気活動に影響が見られたと報告した¹⁻¹¹⁾。また、近年の研究においても表1-2に示す通り比較的低レベルの純粋なCO₂曝露による認知能力の低下やETCO₂、心拍数の増加が確認された。認知能力や交感神経系への影響は知的生産性や快適性に悪影響を及ぼす可能性があり、このことから室内CO₂濃度の制御の重要性が再確認できる。

このような背景から、室内空気環境設計において一層の室内CO₂濃度制御が求められており、そのためには、在室者のCO₂呼出量予測の精度向上が不可欠である。そこで、本研究ではCO₂呼出量予測の高精度、高機能化を目指し、CO₂呼出現象に関する調査、検討のため3つの被験者実験ならびに1つの数値解析を実施した。

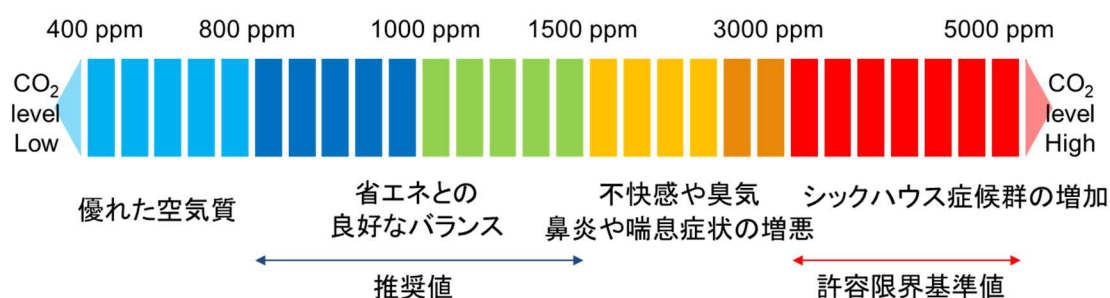


Fig.1-1 一般的なCO₂濃度による室内空気質評価

Table 1-1 低濃度域での室内 CO₂濃度と人体影響の相関関係

	人数	対象	相関関係
Norbäck et al., 2008 ¹⁻¹²⁾	355	4 つのコンピュータ教室（高換気・低換気それぞれ 2 教室）	100ppm の CO ₂ 濃度上昇により頭痛が有意に増加（範囲：674~1450ppm）
Apte et al., 2000 ¹⁻¹³⁾ Erdman et al, 2004 ¹⁻¹⁴⁾	1579	オフィスビル 33 棟（BASE*の一部）	平均 CO ₂ 濃度 800ppm 以下の領域において、外気濃度との差が 100ppm 上昇すると、あるいは、最大濃度との差が 250ppm 上昇すると粘膜刺激と下気道症状が有意に上昇
Tsai et al., 2012 ¹⁻¹⁵⁾	111	一般オフィス	CO ₂ 濃度 800ppm 以上において、眼への刺激および上気道症状の増加
Lu et al., 2015 ¹⁻¹⁶⁾	417	87 か所の一般オフィス	100ppm の CO ₂ 濃度上昇（外気と室内平均の差）によりのどの乾燥，倦怠感，めまいと有意に関係（範囲：467~2800ppm）
MacNaughton et al., 2016 ¹⁻¹⁷⁾	24	一般ビル（CO ₂ :1000ppm），2 つのグリーンビル	CO ₂ 濃度 1000ppm において、心拍数の有意な上昇や、気道・目・皮膚症状，頭痛，認識・感覚影響等の症状の有意な増加
Vehviläinen et al., 2016 ¹⁻¹⁸⁾	4	会議室	CO ₂ 濃度 900ppm に比べ 2700ppm では、血中 CO ₂ 分圧が 18%上昇，心拍変動の変化，末梢血液循環の増加（3 倍）．
Shriram et al., 2019 ¹⁻¹⁹⁾	8	実験用ワークスペース	CO ₂ 濃度（380~3000ppm，4 条件）の上昇に伴い平均 FEV1（1 秒努力呼気量）が有意に減少，FVC（努力肺活量）が全被験者で減少
Mishra et al., 2021 ¹⁻²⁰⁾	15	人工気候室	900ppm と比べ低換気による 1450ppm 条件において FEV1, FEV1/FVC, PEF が有意に減少

*: 米国環境保護庁（EPA）が 1994 年から 1998 年にかけて実施した Building Assessment Survey and Evaluation study^{1-21~23)}

a: 換気量は変えず純粋な CO₂を注入して濃度を制御

b: 換気量を変え濃度を制御

Table 1-2 低濃度域での純粋な CO₂曝露による人体影響についての研究

	人数	曝露時間	設備	実験条件	人体影響
Kajtár & Herczeg, 2012 ¹⁻²⁴⁾	10	140, 210 分	実験室	CO ₂ 濃度 600, 1500 ^a , 2500 ^a , 3000 ^a , 4000 ^a , 5000 ^a ppm	600 vs. 5000: 空気質の主観評価と快適性の低下, 精神的労力, 呼吸量, 呼吸回数の増加. 600 vs. 3000, 4000: 空気質の主観的評価, 集中力の低下, 疲労度の上昇. 4000 vs. 1500: 空気質の主観的評価の上昇
Satish et al., 2012 ¹⁻²⁵⁾	22	2.5時間×3	オフィス状 チャンバー	CO ₂ 濃度 600, 1000 ^a , 2500 ^a ppm	意思決定パフォーマンスの低下 (600 vs. 1000: 9 項目中 6 項目で有意に低下, 600 vs. 2500: 9 項目中 7 項目で有意にかつ大幅に低下, ただし 1 つで向上)
Allen et al., 2016 ¹⁻²⁶⁾	24	5.25 時間 ×6 日	オフィス型 チャンバー	高濃度 VOC, 低濃度 VOC, 高換気低 VOC (CO ₂ :600ppm), 高換気低 VOC (950 ^a ppm), 高換気低 VOC (1400 ^a ppm)	CO ₂ 濃度の上昇により, 認知機能について 9 項目中 7 項目で平均スコアが減少. 換気率, CO ₂ , TVOC はそれぞれ独立して認知機能に関連. CO ₂ 濃度 400ppm の増加は認知スコア 21% の減少と相関.
Allen et al., 2019 ¹⁻²⁷⁾	30	3 時間×3	フライトシ ミュレータ	CO ₂ 濃度 700, 1500 ^a , 2500 ^a ppm	フライトシミュレータでの FAA のパイロット試験官による操縦テストの結果, 高濃度条件にて合格率が低下
Zhang et al., 2017 ¹⁻²⁸⁾	25	255 分×5	ステンレス チャンバー	CO ₂ 濃度 500, 1000 ^a , 3000 ^a , 1000 ^b , 3000 ^b ppm	アンケートとタスクの結果, 3000 ^b ppm 条件において知覚空気質が低下, また頭痛, 倦怠感, 眠気, 思考の困難さが増加
Zhang et al., 2017 ¹⁻²⁹⁾	20	同上	同上	同上	500ppm 条件と比べ 3000 ^a , 1000 ^b , 3000 ^b ppm 条件では ETCO ₂ が有意に増加. また, 3000 ^b ppm 条件では鼻孔最大流量が有意に減少, かつ拡張期血圧が有意に上昇. さらに, 3000 ^a , 3000 ^b ppm 条件にて心拍数が有意に上昇.

1.2 既存の予測モデル

既往研究としていくつか予測モデルが提案されており，代表的なものとして ASHRAE Handbook¹⁻⁹⁾や ASTM DS 6245¹⁻³⁰⁾に記載される 2 つのモデルが挙げられる．ISO 8996¹⁻³¹⁾にも含まれる ASHRAE Handbook¹⁻⁹⁾のモデルは Nishi¹⁻³²⁾の代謝量の経験式 (1-1) に基づいており，代謝量 M [W/m³] を酸素消費量 V_{O_2} [mL/s]，呼吸商 RQ (CO₂発生量と酸素消費量の比，一般的に約 0.85)，体表面積 A_d [m²] から予測している．また，(1.1) は呼吸商によって式 (1.2) のように変換することができ，CO₂呼出量 V_{CO_2} [mL/s] を代謝量，呼吸商，体表面積によって予測する．

$$M = \frac{21(0.23RQ + 0.77)V_{O_2}}{A_d} \quad (1.1)$$

$$V_{CO_2} = RQ \frac{A_d M}{21(0.23RQ + 0.77)} \quad (1.2)$$

ここで，代謝量は在室者の活動状態から推定し，体表面積は DuBois の予測式¹⁻³³⁾を用いて推定することができる．身体活動と代謝量の対応表¹⁻³¹⁾の一部を Table 1-2 に示す．

Table 1-2 特定の身体活動における代謝量¹⁻³¹⁾

Activity		Metabolic Rate [W/m ²]
Sleeping		40
Reclining		45
At rest, sitting		55
At rest, standing		70
Walking on the level, even path, solid		
1. without load	at 2 km·h ⁻¹	110
	at 3 km·h ⁻¹	140
	at 4 km·h ⁻¹	165
	at 5 km·h ⁻¹	200
2. with load	10 kg, 4 km·h ⁻¹	185
	30 kg, 4 km·h ⁻¹	250
Sedentary activity (office, dwelling, school, laboratory)		70
Standing, light activity (shopping, laboratory, light industry)		95
Standing, medium activity (shop assistant, domestic work, machine work)		115
Work on a machine tool		
light (adjusting, assembling)		100
Medium (loading)		140
Heavy		210

一方で, ASTM DS 6245¹⁻³⁰⁾は Persily & Jonge の式¹⁻³⁴⁾に基づいており, 式 (1.3) により CO₂呼出量 V_{CO_2} [mL/s]を予測する.

$$V_{CO_2} = 0.569 RQ \cdot BMR \cdot M \quad (1.3)$$

ここで, RQ は呼吸商, BMR [MJ/day]は基礎代謝量, M [met (無次元)]は BMR に対する身体活動による総代謝量の比である. BMR は Table 1-3 に示す Schofield¹⁻³⁵⁾の予測式を用いて推定される. これにより, ASHRAE Handbook¹⁻⁹⁾では体格と身体活動でのみ CO₂呼出量を予測していたのに対して, ASTM DS 6245¹⁻³⁰⁾は性別や年齢による差異を考慮し, CO₂呼出量を予測することができる. また, M はFAOの報告書¹⁻³⁶⁾での PAR (Physical activity ratio) に相当し, Table 1-4 のように身体活動から推定されます. あるいは, 身体活動に対する運動強度の割り当てを標準化することを目的として開発された Ainsworth らによる Web ベースの便覧¹⁻³⁷⁾により Table 1-5 のように推定することができます.

Table 1-3 性別, 年齢, 体重に基づいた Schofield¹⁻³⁵⁾の基礎代謝予測式 (m [kg]は体重)

Age [y]	BMR [MJ/day]	
	Males	Females
< 3	$0.249 m - 0.127$	$0.244 m - 0.130$
3 to 10	$0.095 m + 2.110$	$0.085 m + 2.033$
10 to 18	$0.074 m + 2.754$	$0.056 m + 2.898$
18 to 30	$0.063 m + 2.896$	$0.062 m + 2.036$
30 to 60	$0.048 m + 3.653$	$0.034 m + 3.538$
>= 60	$0.049 m + 2.459$	$0.038 m + 2.755$

Table 1-4 FAO 報告書¹⁻³⁶⁾における様々な身体活動時の PAR

Activity	Males		Females	
	Average PAR	Range	Average PAR	Range
Aerobic dancing - low intensity	3.51		4.24	
Aerobic dancing - high intensity	7.93		8.31	
Calisthenics	5.44			
Child care (unspecified)			2.5	
Climbing stairs	5.0			
Dancing	5.0		5.09	
Eating and drinking	1.4		1.6	
Housework (unspecified)			2.8	2.5 to 3.0
Office worker—Filing	1.3		1.5	
Office worker - Reading	1.3		1.5	

Office worker—Sitting at desk	1.3			
Office worker—Standing/moving around	1.6			
Office worker—Typing	1.8		1.8	
Office worker—Writing	1.4		1.4	
Reading	1.22		1.25	
Sleeping	1.0		1.0	
Sitting quietly	1.2		1.2	
Sitting on a bus/train	1.2			
Standing	1.4		1.5	
Walking around/strolling	2.1	2.0 to 2.2	2.5	2.1 to 2.9
Walking quickly	3.8			
Walking slowly	2.8	2.8 to 3.0	3.0	

Table 1-5 Ainsworth らの便覧¹⁻³⁷⁾における様々な身体活動レベル (*M*)

Activity	<i>M</i> [met]	Range
Calisthenics—light effort	2.8	
Calisthenics—moderate effort	3.8	
Calisthenics—vigorous effort	8.0	
Child care		2.0 to 3.0
Cleaning, sweeping—moderate effort	3.8	
Custodial work—light	2.3	
Dancing—aerobic, general	7.3	
Dancing—general	7.8	
Health club exercise classes—general	5.0	
Kitchen activity—moderate effort	3.3	
Lying or sitting quietly		1.0 to 1.3
Sitting reading, writing, typing	1.3	
Sitting at sporting event as spectator	1.5	
Sitting tasks, light effort (e.g., office work)	1.5	
Sitting quietly in religious service	1.3	
Sleeping	0.95	
Standing quietly	1.3	
Standing tasks, light effort (e.g., store clerk, filing)	3.0	
Walking, less than 2 mph, level surface, very slow	2.0	
Walking, 2.8 mph to 3.2 mph, level surface, moderate pace	3.5	

以上のように、既にいくつかの CO₂呼出量予測モデルが提案されている。しかし、近年におけるいくつかの研究は、被験者実験によって CO₂呼出量を測定し、既存の予測モデルとの誤差を報告している¹⁻³⁸⁻⁴¹⁾。また、これらの予測モデルは CO₂呼出量を在室者自身の限定的なパラメータからのみ予測しているが、昨今室内空気環境条件による在室者への影響や CO₂呼出量、代謝量への影響が報告されている（1.3 参照）。そのため、既存のモデルでは考慮していない様々な要因と CO₂呼出量との関係を調査し、新たな CO₂呼出量予測モデルの開発が必要である。

1.3 CO₂呼出量と室内環境条件

前述したとおり、近年室内空気環境条件による在室者への影響や CO₂呼出量、代謝量への影響が報告されている。換気量および室内 CO₂濃度と在室者への影響の関係については 1.1 で述べた。

他方で、室内環境要素として熱的環境条件に着目した研究もある。Tsushima ら¹⁻⁴²⁾は人体発生汚染物質（bioeffluent）による室内空気質への影響を調査した。被験者は、他の被験者が着座軽作業状態で 2 つの異なる温度条件（23, 28°C）に暴露されたチャンバーの空気質を評価した。知覚への温度影響¹⁻⁴³⁾を抑えるため、被験者が評価する空気は同じ温度に制御された。その結果、被験者は他の被験者の曝露温度が高い程、臭気を高く評価した。Tsushima らは高温条件によって人体発生汚染物質の放出量が増加した可能性を示唆し、被験者は活動レベルが同じでも、熱的不快感にさらされると CO₂を含む人体発生汚染物質の放出量を増加させると結論付けた。しかし、Tsushima らは活動および CO₂は測定しなかった。温度条件に関する換気基準は現時点では稀有であり、唯一オーストラリアのガイドライン¹⁻⁴⁴⁾のみが、27°C 以上の場合換気率を上げることが推奨している。しかし、定量的な基準は示されておらず、温度と人体による空気汚染の関係に対する基礎的なデータが不足していると言える。

また、Table 1-6 に示すように、それらの室内環境条件による CO₂呼出量への影響に着目した研究もあるが、極少数である。

Table 1-6 室内空気環境条件による CO₂呼出量への影響

既往研究	人数	室内空気環境要素	比較条件	影響
Bakó-Biró et al., 2005 ¹⁻⁴⁵⁾	30	空気質	汚染源の有無, 換気量	知覚される空気質が 8%から 40%に低下すると, CO ₂ 呼出量は約 13%減少する
Bivolarova et al., 2019 ¹⁻⁴⁶⁾	30	CO ₂ 濃度	pure CO ₂ 800 vs. 1700 ppm	低 CO ₂ 濃度条件では高濃度条件と比べ約 23%CO ₂ 呼出量が増加
Luo et al., 2016 ¹⁻⁴⁷⁾	30	気温, 着衣量	着衣量 0.42, 0.91 clo, 温度 16, 18, 21, 24, 26, 28, 31°C	温冷感中立で CO ₂ 呼出量最小, 熱的に不快になる程増加
Yang et al., 2021 ¹⁻⁴⁸⁾	40	気温	温度 14, 16, 18, 20, 24, 26, 28, 30, 32, 34°C (0.6 clo)	24, 26°Cで CO ₂ 呼出量最小, 高低温になるほど増加

以上のように、現在広く用いられる ISO 8996¹⁻³¹⁾や ASTM DS 6245¹⁻³¹⁾の CO₂呼出量予測モデルは、体格や運動レベル、年齢、性別など入室者自身の条件のみに着目しているが、近年の研究により室内環境条件考慮の必要性が示されている。また、比較的低レベルの CO₂による人体への悪影響が報告されていることから、今後より緻密な室内空気環境設計が求められる。そのためには、室内空気の不均一性を考慮し空気質評価が可能であり、なおかつ人体の CO₂呼出現象を詳細に再現した CO₂呼出モデルが必要とされる。

このような背景から、本研究では、室内環境条件による CO₂呼出量への影響検討を目的とし、異なる条件にて CO₂呼出量を測定した3種の被験者実験（Exps.1~3）を実施し、そのうち Exp.3 を対象として CFD 解析によりさらなる検討を行った。以後、これらの被験者実験・CFD 解析の結果を章別にて報告する。

【参考文献】

➤ 1.1 節

- 1-1) Pettenkofer, M.V. (1858) Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. Cotta'schen Buchhandlung, München
- 1-2) Emmerich, S. J., & Persily, A. K. (2003). State-of-the-art review of CO₂ demand controlled ventilation technology and application.
- 1-3) Wargocki, P., Sundell, J., Bischof, W., Brundrett, G., Fanger, P. O., Gyntelberg, F., ... & Wouters, P. (2002). Ventilation and health in non-industrial indoor environments: report from a European multidisciplinary scientific consensus meeting (EUROVEN). *Indoor air*, 12(2), 113-128.
- 1-4) Seppanen, O. A., & Fisk, W. J. (2004). Summary of human responses to ventilation.
- 1-5) Carreiro-Martins, P., Viegas, J., Papoila, A. L., Aelenei, D., Caires, I., Araújo-Martins, J., ... & Neuparth, N. (2014). CO₂ concentration in day care centres is related to wheezing in attending children. *European journal of pediatrics*, 173(8), 1041-1049.
- 1-6) Carreiro-Martins, P., Papoila, A. L., Caires, I., Azevedo, S., Cano, M. M., Virella, D., ... & Neuparth, N. (2016). Effect of indoor air quality of day care centers in children with different predisposition for asthma. *Pediatric Allergy and Immunology*, 27(3), 299-306.
- 1-7) Simoni, M., Annesi-Maesano, I., Sigsgaard, T., Norback, D., Wieslander, G., Nystad, W., ... & Viegi, G. (2010). School air quality related to dry cough, rhinitis and nasal patency in children. *European Respiratory Journal*, 35(4), 742-749.
- 1-8) Azuma, K., Kagi, N., Yanagi, U., & Osawa, H. (2018). Effects of low-level inhalation exposure to carbon dioxide in indoor environments: A short review on human health and psychomotor performance. *Environment international*, 121, 51-56.
- 1-9) ASHRAE (2013) ASHRAE Handbook – Fundamentals, Atlanta, GA, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
- 1-10) Qi, M., Li, X. F., & Huang, H. (2013). Discussion on measuring ventilation rates of dorms through tracer gas method with human body as CO₂ release source. *Building Science*, 29(6), 52-57.
- 1-11) Eliseeva, O. V. (1964). Data to substantiate the maximum permissible concentration of carbon dioxide in the air of apartments and public buildings. *Gig Sanit*, 10-15.
- 1-12) Norbäck, D., & Nordström, K. (2008). Sick building syndrome in relation to air exchange rate, CO₂, room temperature and relative air humidity in university computer classrooms: an experimental study. *International archives of occupational and environmental health*, 82(1), 21-30.
- 1-13) Apte, M.G., Fisk, W.J., Daisey, J.M. (2000). Associations between indoor CO₂ concentrations and sick building syndrome symptoms in U.S. office buildings: an analysis of the 1994-1996 BASE study data. *Indoor Air* 10:246–257.
- 1-14) Erdmann, Christine A.; Apte, Michael G. (2004). "Mucous membrane and lower respiratory building related symptoms in relation to indoor carbon dioxide concentrations in the 100-building BASE dataset." *Indoor Air* 14(s8): 127-134.
- 1-15) Tsai, D. H., Lin, J. S., & Chan, C. C. (2012). Office workers' sick building syndrome and indoor carbon dioxide concentrations. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 9(5), 345-351.

- 1-16) Lu, C. Y., Lin, J. M., Chen, Y. Y., & Chen, Y. C. (2015). Building-related symptoms among office employees associated with indoor carbon dioxide and total volatile organic compounds. *International journal of environmental research and public health*, 12(6), 5833-5845.
- 1-17) MacNaughton, P., Spengler, J., Vallarino, J., Santanam, S., Satish, U., & Allen, J. (2016). Environmental perceptions and health before and after relocation to a green building. *Building and environment*, 104, 138-144.
- 1-18) Vehviläinen, T., Lindholm, H., Rintamäki, H., Pääkkönen, R., Hirvonen, A., Niemi, O., & Vinha, J. (2016). High indoor CO₂ concentrations in an office environment increases the transcutaneous CO₂ level and sleepiness during cognitive work. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 13(1), 19-29.
- 1-19) Shriram, S., Ramamurthy, K., & Ramakrishnan, S. (2019). Effect of occupant-induced indoor CO₂ concentration and bioeffluents on human physiology using a spirometric test. *Building and Environment*, 149, 58-67.
- 1-20) Mishra, A. K., Schiavon, S., Wargocki, P., & Tham, K. W. (2021). Respiratory performance of humans exposed to moderate levels of carbon dioxide. *Indoor air*.
- 1-21) Girman, J. R., Womble, S. E., & Ronca, E. L. (1995). Developing Baseline Information on Buildings and Indoor Air Quality (BASE'94): Part II-Environmental Pollutant Measurements and Occupant Perceptions. In *Proceedings of Healthy Buildings' 95* (pp. 1311-1316).
- 1-22) Womble, S. E., Girman, J. R., Ronca, E. L., Axelrad, R., Brightman, H. S., & McCarthy, J. F. (1995, September). Developing baseline information on buildings and Indoor Air Quality (BASE'94): Part I-Study design, building selection, and building descriptions. In *Proceedings of Healthy buildings* (Vol. 95, pp. 1305-1310).
- 1-23) Womble, S.E., Ronca, E.L., Girman, J.R. and Brightman, H.S. (1996) "Developing Baseline Information on Buildings and Indoor Air Quality (Base '95)". In: *IAQ 96/Paths to Better Building Environments/Health Symptoms in Building Occupants*, Atlanta, GA, American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, pp. 109–117.
- 1-24) Kajtár, L., & Herczeg, L. (2012). Influence of carbon-dioxide concentration on human well-being and intensity of mental work. *QJ Hung. Meteorol. Serv*, 116, 145-169.
- 1-25) Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., & Fisk, W. J. (2012). Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. *Environmental health perspectives*, 120(12), 1671-1677.
- 1-26) Allen, J. G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J., & Spengler, J. D. (2016). 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(6), 805-812.
- 1-27) Allen, J. G., MacNaughton, P., Cedeno-Laurent, J. G., Cao, X., Flanigan, S., Vallarino, J., ... & Spengler, J. D. (2019). Airplane pilot flight performance on 21 maneuvers in a flight simulator under varying carbon dioxide concentrations. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 29(4), 457-468.
- 1-28) Zhang, X., Wargocki, P., Lian, Z., & Thyregod, C. (2017). Effects of exposure to carbon dioxide and bioeffluents on perceived air quality, self-assessed acute health symptoms, and cognitive performance. *Indoor air*, 27(1), 47-64.

- 1-29) Zhang, X., Wargocki, P., & Lian, Z. (2017). Physiological responses during exposure to carbon dioxide and bioeffluents at levels typically occurring indoors. *Indoor air*, 27(1), 65-77.

➤ 1.2 節

- 1-30) ASTM (2018) Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation, West Conshohocken, PA, ASTM International.
- 1-31) ISO, B. (2004). 8996: 2004 Ergonomics of the thermal environment—determination of metabolic rate. BSI, London.
- 1-32) Nishi, Y. (1981). Measurement of thermal balance of man. In *Studies in environmental science* (Vol. 10, pp. 29-39). Elsevier.
- 1-33) DuBois, D. F. (1916). A formula to estimate the approximate surface area if height and body mass be known. *Arch intern med*, 17, 863-871.
- 1-34) Persily, A., & de Jonge, L. (2017). Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor air*, 27(5), 868-879.
- 1-35) Schofield, W. N. (1985). Predicting basal metabolic rate, new standards and review of previous work. *Human nutrition. Clinical nutrition*, 39, 5-41.
- 1-36) Joint, F. A. O. (2004). Human energy requirements. Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation, Rome, 17-24 October 2001.
- 1-37) Ainsworth, B. E., Haskell, W. L., Herrmann, S. D., Meckes, N., Bassett, D. R., Tudor-Locke, C., & Leon, A. S. (2011). The Compendium of Physical Activities Tracking Guide. Healthy Lifestyles Research Center, College of Nursing & Health Innovation, Arizona State University. Retrieved June 11, 2013.
- 1-38) Nomoto, A., Hisayama, R., Yoda, S., Akimoto, M., Ogata, M., Tsutsumi, H., & Tanabe, S. I. (2021). Indirect calorimetry of metabolic rate in college-age Japanese subjects during various office activities. *Building and Environment*, 199, 107909.
- 1-39) Yang, L., Wang, X., Li, M., Zhou, X., Liu, S., Zhang, H., ... & Zhai, Y. (2020). Carbon dioxide generation rates of different age and gender under various activity levels. *Building and Environment*, 186, 107317.
- 1-40) Zhai, Y., Li, M., Gao, S., Yang, L., Zhang, H., Arens, E., & Gao, Y. (2018). Indirect calorimetry on the metabolic rate of sitting, standing and walking office activities. *Building and Environment*, 145, 77-84.
- 1-41) Qi, M. W., Li, X. F., Weschler, L. B., & Sundell, J. (2014). CO₂ generation rate in Chinese people. *Indoor Air*, 24(6), 559-566.
- 1-42) Tsushima, S., Wargocki, P., & Tanabe, S. (2018). Sensory evaluation and chemical analysis of exhaled and dermally emitted bioeffluents. *Indoor Air*, 28(1), 146-163.
- 1-43) Fang, L., Clausen, G., & Fanger, P. O. (1998). Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality. *Indoor air*, 8(2), 80-90.
- 1-44) Australia, G. B. C. (2014). Green Star-Design & As Built. Green Building Council Australia. Retrieved from <https://www.gbca.org.au/green-star/green-star-design-as-built>.

- 1-45) Bakó-Biró, Z. S., Wargocki, P., Wyon, D. P., & Fanger, P. O. (2005). Poor indoor air quality slows down metabolic rate of office workers. *Proceedings of Indoor Air 2005*, 1, 76-80.
- 1-46) Bivolarova, M., Melikov, A., Izydorczyk, P., & Markov, D. (2019). Human CO₂ generation rate: Effect of room temperature and elevated background CO₂. In *Proceedings of ISIAIQ/ISES Conference in Kaunas, Lithuania*.
- 1-47) Luo, Maohui, et al. "Revisiting an overlooked parameter in thermal comfort studies, the metabolic rate." *Energy and Buildings* 118 (2016): 152-159.
- 1-48) Yang, L., Zhao, S., Gao, S., Zhang, H., Arens, E., & Zhai, Y. (2021). Gender differences in metabolic rates and thermal comfort in sedentary young males and females at various temperatures. *Energy and Buildings*, 251, 111360.

第2章 異なる年齢，温湿度，着衣量，オゾン濃度条件下でのCO₂呼出量の測定 (Exp.1)

2.1 序

第一章で述べた通り，既存の予測モデルでは考慮していない室内環境要素によるCO₂呼出量への影響を調査した．第2章では，温湿度，着衣量，オゾン濃度による影響を調査した被験者実験について述べる．また，ASTM D5624 で導入された年齢条件については，CO₂呼出量を測定した基礎データは非常に少数である．既往研究としては，Pejtersen ら⁵⁻¹⁾や Thorstensen ら⁵⁻²⁾が幼稚園や学校でCO₂濃度を測定し，CO₂呼出量の推定を実施しました．3～6歳の子供たちの平均CO₂呼出量は1人当たり18 L/h，14～16歳の学童は1人当たり23 L/hだった．本研究では，異なる年齢条件の被験者群 (Teenagers, Adults, Seniors) を対象とすることで，年齢条件の差異によるCO₂呼出量への影響を調査した．その他，既往研究にて在室者のCO₂呼出量は測定されたが，既存のCO₂呼出量予測モデルの推定値との比較・補正を行うには未だ十分とは言えない．これまで実施されたCO₂呼出量測定実験について Table 2-1 に示す．本被験者実験は国際プロジェクト Indoor Chemical Human Emissions and Reactivity (ICHEAR) の一部として実施した．本プロジェクトの目的は，人間からの化学物質の排出，関連するOH (ヒドロキシカルラジカル) 反応性，様々な個人および環境の影響を特定・測定することである²⁻¹³⁾．

Table 2-1 CO₂呼出量を測定した既往研究

Study	Age (year)	Body surface area (BSA) [m ²]	BMI	Activity	Air temperature [°C]	Measurement method	CO ₂ emission rate ± SD [L/(h·person)]	remarks
Qi et al. ⁵⁻³⁾	21.4 ± 2.1	1.7 ± 0.1	22.0 ± 2.3	Seated, quiet	22 ~ 24	Direct measurements	12.3 ± 1.7	Chamber (8 m ³)
Fan et al. ⁵⁻⁴⁾	24.2 ± 0.4	1.7 ± 0.2	22.5 ± 4.4	Light or sedentary activity	ND	Direct measurements	12.8 ± 2.5	Room (64.4 m ³)
Stönner et al. ⁵⁻⁵⁾ (Adults)	ND	ND	ND	Seated, film appreciation	ND	Direct measurements	15.2 ± 2.5	Screening room (1300 m ³)
Gall et al. ⁵⁻⁶⁾	23.0 ± 4.0	1.7 ± 0.0	23.9 ± 4.3	Relaxed sedentary	26.5 ± 0.3	Direct measurements	15.0 ± 0.5	Chamber (65 m ³)
Pejtersen et al. ⁵⁻¹⁾	3 ~ 6	ND	ND	ND	20.5 ~ 24.1	Direct measurements	18	10 kindergartens
Thorstensen et al. ⁵⁻²⁾	14 ~ 16	ND	ND	ND	ND	Direct measurements	23	10 schools
Wargocki et al. ⁵⁻⁷⁾	22.7 ± 3	ND	ND	ND	ND	Direct measurements	18	6 office
Zhai et al. ⁵⁻⁸⁾	22.7 ± 2.2	1.7 ± 0.2	21.5 ± 2.3	Seated, quiet	26	Indirect calorimetry	12.5 ± 2.5	Air tightness mask
				Seated, typing	26	Indirect calorimetry	13.1 ± 2.3*	Air tightness mask
				Seated, quiet	26	Indirect calorimetry	14.4 ± 4.1	Air tightness mask
				Seated, reading	26	Indirect calorimetry	14.7 ± 3.9*	Air tightness mask
				Seated, typing	26	Indirect calorimetry	15.3 ± 3.4*	Air tightness mask
Yang et al. ⁵⁻⁹⁾ (Twenties)	24.1 ± 2.1	1.7 ± 0.2	21.4 ± 2.6	Seated, writing	26	Indirect calorimetry	15.3 ± 3.4*	Air tightness mask
				Seated, quiet	26	Indirect calorimetry	15.3 ± 3.9	Air tightness mask
				Seated, reading	26	Indirect calorimetry	15.6 ± 3.6*	Air tightness mask
Yang et al. ⁵⁻⁹⁾ (Thirties)	32.3 ± 2.7	1.7 ± 0.2	22.2 ± 3.1	Seated, quiet	26	Indirect calorimetry	15.3 ± 3.9	Air tightness mask
				Seated, reading	26	Indirect calorimetry	15.6 ± 3.6*	Air tightness mask

Yang et al. ⁵⁻⁹⁾ (Seniors)	63.8 ± 3.3	1.7 ± 0.2	24.0 ± 3.0	Seated, typing	26	Indirect calorimetry	$15.9 \pm 4.8^*$	Air tightness mask
				Seated, writing	26	Indirect calorimetry	$16.5 \pm 3.7^*$	Air tightness mask
				Seated, quiet	26	Indirect calorimetry	14.4 ± 5.0	Air tightness mask
				Seated, reading	26	Indirect calorimetry	$14.4 \pm 4.6^*$	Air tightness mask
				Seated, writing	26	Indirect calorimetry	$15.0 \pm 3.5^*$	Air tightness mask
Nomoto et al. ⁵⁻¹⁰⁾	22.3 ± 1.6	1.6 ± 0.2	21 ± 2.9	Seated, quiet	26	Indirect calorimetry	12.0 ± 2.2	Air tightness mask
Tajima et al. ⁵⁻¹¹⁾	university students	ND	ND	Seated, typing	26	Indirect calorimetry	$12.4 \pm 2.3^*$	Air tightness mask
				Seated, quiet	ND	Indirect calorimetry	$9.4 \sim 20.0$	Douglas bag (100L)
				Walking 2 km/h		Indirect calorimetry	$12.8 \sim 51.1$	Douglas bag (100L)
				Walking 4 km/h		Indirect calorimetry	$23.6 \sim 79.1$	Douglas bag (100L)
Luo et al. ⁵⁻¹²⁾	19.2 ± 1.8	1.8	20.6 ± 1.8	Seated, sedentary activity	28	Indirect calorimetry	15.9	Wearing 0.42 clo
				Seated, sedentary activity	31	Indirect calorimetry	16.1	Wearing 0.42 clo
	20.5 ± 1.5	1.8	21.1	Seated, sedentary activity	26	Indirect calorimetry	16.2	Wearing 0.42 clo
				Seated, sedentary activity	16	Indirect calorimetry	18.8	Wearing 0.42 clo
	20.1 ± 1.3	1.8	20.9 ± 1.9	Seated, sedentary activity	26	Indirect calorimetry	16.1	Wearing 0.91 clo
				Seated, sedentary activity	16	Indirect calorimetry	17.0	Wearing 0.91 clo

2.2 実験方法

2.2.1 人工気候室

実験は、22.5 m³ のステンレス鋼チャンバーで実施されました²⁻¹⁴⁾ (Fig.2-1)。トレーサーガス測定と各実験条件後の CO₂ 減衰からの推定によって確認されたように、チャンバーは $3.2 \pm 0.1 \text{ h}^{-1}$ で外気を導入し換気されました (Fig.2)²⁻¹³⁾。外気は床下ブから供給され、天井にある排気口から排出されました。2つの混合ファンによりチャンバー内は完全混合状態を成立させた。供給空気は、粒子状および活性炭フィルターを使用してろ過された。オゾン発生器は、Jelight 600UV オゾン発生器を介して純粋な酸素を供給することによって活性炭フィルターの下流で生成されました²⁻¹³⁾。エアハンドリングユニットにより温度と相対湿度を制御したが、チャンバーへの空気供給速度が比較的低く、屋外の温度が中程度であるため、実験中にチャンバー内の温度を正確に制御することはできなかった。蒸気加湿器は、目標湿度レベルが高い状態でのみ作動した。HOBO®UX120-006M4 チャンネルアナログデータロガー (Onset Computer Corporation) を使用して、気温と相対湿度を 1 分間の時間分解能で継続的に監視した。精度は温度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$, RH $\pm 2.5\%$ (60% 未満), $\pm 3\%$ (60%~80%) である。この測定は、チャンバーの中央にあるテーブルで行われた²⁻¹³⁾。

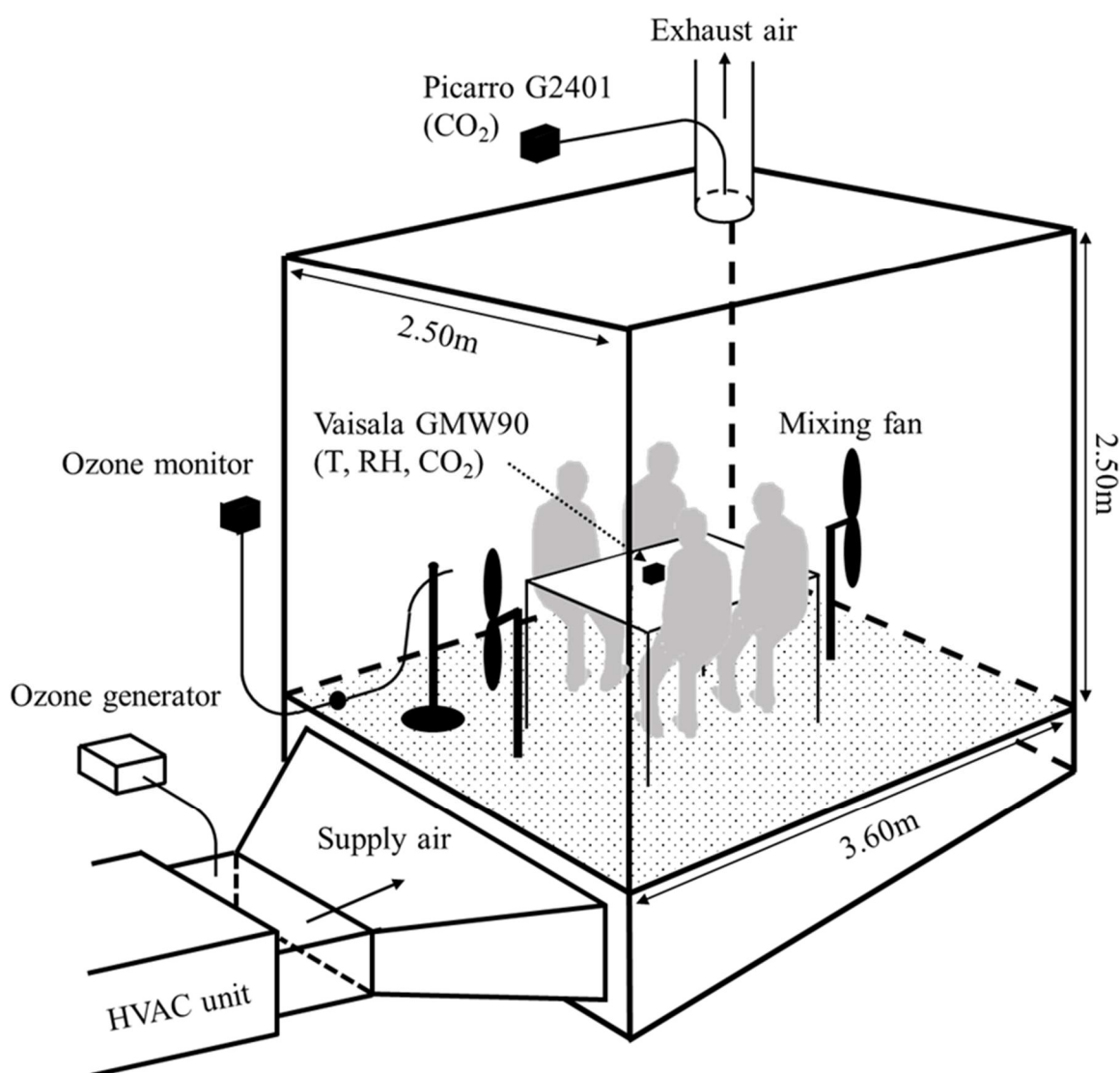


Fig.2-1 人工気候室の概要図

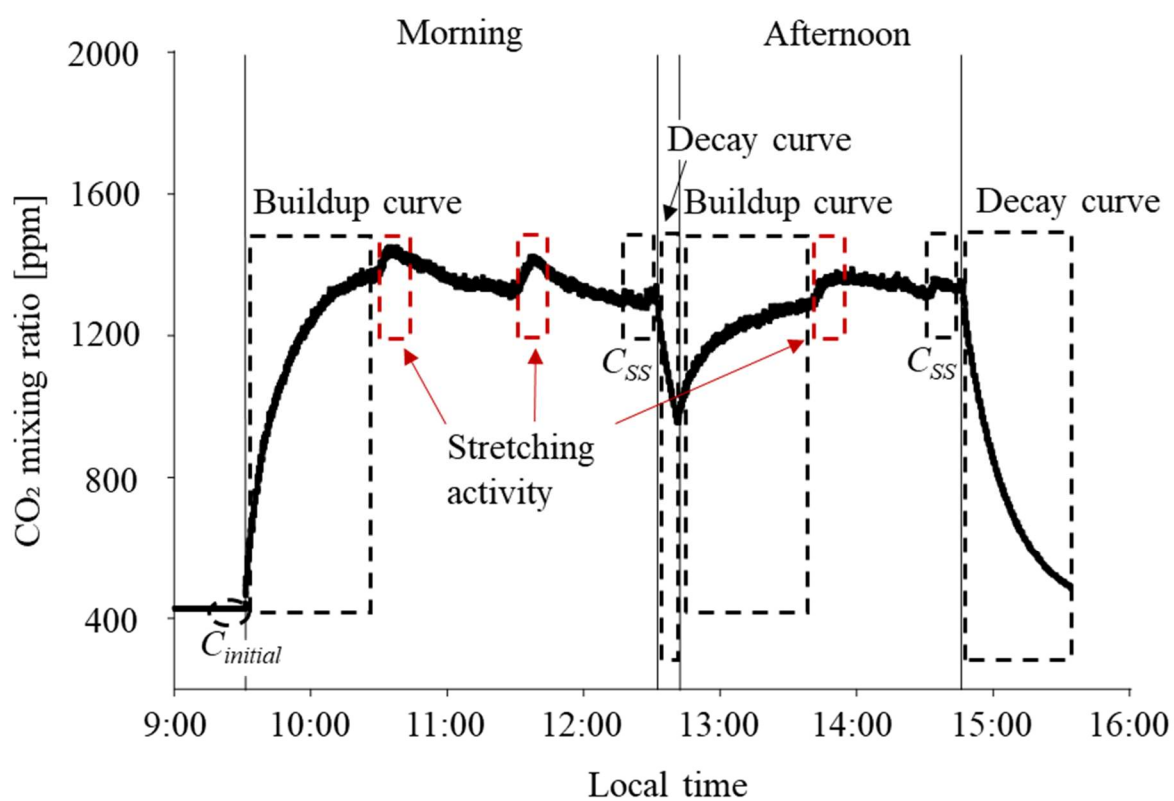


Fig.2-2 実測した CO₂濃度履歴 (4月26日実施分)

2.2.2 被験者

健康な非喫煙者 4 名からなる 5 グループが募集された。3 グループ (A1, A2, A3) は、BMI が 20.0～23.9 の 19～30 歳の Adults (大学生) で構成された。Adults グループの 1 つ (A1) は男性 3 名、女性 1 名からなり、他の 2 グループ (A2, A3) は男性 2 名、女性 2 名から構成された。Teenagers のグループ (T4) は、BMI が 19.1～20.4 の 13～15 歳の 10 代の男女 2 名で構成された。Seniors のグループ (S5) は、BMI が 22.5 から 28.1 の 68～72 歳の男性 2 名と女性 2 名のシニアから構成された。身体測定データは Table 2-2 に示す。

各実験中、ボランティア被験者は我々が提供した既定の服を着用した。2 つのセットが使用され、1 つは T シャツ、短パン、足首用靴下 (short clothing) からなり、その断熱性は 0.4 clo と推定され、もう一つは長袖シャツ、ズボン、ふくらはぎ用靴下 (long clothing) からなり、その断熱性は 0.7 clo と推定された。すべての衣類は、実験前に無香料洗剤で洗濯し、タンブル乾燥させ、ビニール袋に入れた。ボランティア被験者には、実験中に着用する下着を洗濯するための無香料・無着色の洗濯用液体洗剤が提供された。

実験期間中、食事は変えず、辛いもの、ニンニク、アルコールは避けるように指示された。実験中は食事やガムを噛むことは禁止されたが、チャンバーには水道水が用意された。参加者は全員、実験日の前夜にシャワーを浴び、実験者が提供したパーソナルケア製品 (無香料の液体石鹸とシャンプー、歯磨き粉) のみを使用した。朝はシャワーを浴びなかった。

実験中、被験者はほとんど座ったままで、タブレットやスマートフォンを使用した。1 時間ごとに立ち上がって 1～2 分間のストレッチを行い (Fig.5-2)、粒子の飛散を促進させた (粒子の飛散は実験中継続的にモニターされた)²⁻¹⁴⁾。

ボランティア被験者は午前 9 時 30 分にチャンバーに入り、3 時間そこに滞在した。より長時間の実験 (午後にオゾンがチャンバー内に存在する場合、Table 2-2 参照) では、その後、短い昼食休憩のためにチャンバーから退出した。軽食 (トースト、バター、スライスチーズ) が提供され、12 時 45 分頃に再びチャンバーに入り、さらに 2.5 時間曝露した。どの被験者も曝露中にチャンバーから出ることはなかった。

曝露中、皮膚温度はこめかみ、前腕、手の甲にセンサー (Ibutton, Thermochron or Hygrochron, 437 Maxim Integrated, San Jose, CA, USA) を医療テープで貼り付け、局所皮膚温度を推定することで測定した、これは、ボランティアが熱感覚と熱的快適性のいずれについても評価しなかったため、熱反応を追跡することを目的とした²⁻¹⁵⁾。

2.2.3 実験計画

Table 2-2 にすべての実験条件を示す。実験の番号付けは Bekö ら²⁻¹³⁾の記述に対応し、本論文に含まれる 20 の実験中 7 つはベンチマークとして繰り返し測定した。

A1 群 (Adults) は、中温・高温 (入室時 26.2℃～31.9℃)、低・高相対湿度 (入室時 21%～68%) の組み合わせで曝露させた。服装は「Short」(T シャツと短パン) または「Long」(トレーナーと長ズボン) で、オゾンはチャンバー内に存在するかないかのどちらかであった。

A2 群 (Adults) は、中温 (22.5℃～24.3℃)、低湿 (16%～25%) の環境下に置かれた。衣服は「Short」または「Long」を着用し、オゾンはチャンバー内に存在するかないかのどちらかであった。

A3 群 (Adults) は、中温または高温 (入室時 25.3°C~32.6°C)、低湿または高湿 (入室時 24%~65%) の環境に曝され、「Long」を着用した。

T4 (Teenagers), S5 (Seniors) は中温 (24.6°C~25.8°C)、低湿 (22%~30%) の環境下に置かれた。オゾンチャンバー内に存在するかしないかのどちらかであった。

Table 2-2 実験条件

Group	Exp.	Condition ^a (T/RH/O ₃)	Clothing	Date	
Adult 1 (A1)	1	Moderate/low/from SS	Long	Apr. 26	Whole body exposure
	2	High/high/from SS	Long	Apr. 30	
	3 (20)	Moderate/high/none	Long	Apr. 23 (25)	
	4	High/low/from SS	Long	Apr. 29	
	5	High/low/none	Short	Apr. 24	
Adult 2 (A2)	6 (21)	Moderate/low/from SS	Long	Apr. 12 (15)	Whole-body exposure
	7 (22)	Moderate/low/from start	Long	Apr. 8 (10)	
	8 (23)	Moderate/low/from SS	Short	Apr. 16 (17)	
	9 (24)	Moderate/low/from start	Short	Apr. 9 (11)	
Adult 3 (A3)	10	Moderate/low/from SS	Long	May 8	Whole-body exposure
	11 ^b	High/high/from SS	Short	May 2	Dermal only
	12 ^b	High/high/from SS	Short	May 3	Breath only
	13 ^b	Moderate/low/from SS	Short	May 7	Dermal only
	14+15 ^b	Moderate/low/none (14), from start (15)	Long	May 6	Breath only
Teenagers 4 (T4)	18 (26)	Moderate/low/from SS	Long	May 17 (19)	Whole-body exposure
	19	Moderate/low/from start	Long	May 18	
Seniors 5 (S5)	16 (25)	Moderate/low/from SS	Long	May 13 (15)	Whole-body exposure
	17	Moderate/low/from start	Long	May 14	

^a Ozone dosing was started either after ~3 h of exposure (“from SS”), i.e., during afternoon exposure, or in the evening before the experimental day, ensuring steady-state ozone concentrations before the volunteers entered (“from the start”).

^b not used in the present analyses.

2.2.4 CO₂の測定

空洞型リングダウン分光器 (Picarro G2401; Picarro Inc.) を使用し、チャンバー天井の空気出口から直接排気をサンプリングして、0.2ppm の精度で CO₂ を測定した (Fig.2-1)。測定値は、マスフローコントローラで制御された校正用ガスと合成空気の混合ガスを装置に注入したときの 5 段階 (～500, 1000, 1500, 2000, 2500ppm) の測定値と既知濃度の関係を用いて補正した (投与濃度 = 1.009 × 測定濃度; $R^2 > 0.99999$)²⁻¹⁴⁾。

2.2.5 CO₂呼出量の推定

排出率は、単一ゾーン・マスバランスモデルと測定した CO₂ 濃度および外気供給量より完全混合を仮定して算出した (Eq.2.1)。

$$nE = Q(C_{ss} - C_{initial}) \quad (2.1)$$

$$nE = Q(C_{ss} - C_{initial}) \quad (2.1)$$

ここで、n は被験者数、E は被験者 1 人あたりの平均 CO₂ 呼出量 [mL/h]、Q は体積外気量 [m³/h]、C_{ss} は定常時の室内 CO₂ 濃度 (ボランティアが退室する 15 分前の平均 [ppm])、C_{initial} は供給空気中の CO₂ 濃度 (占有開始前の 15 分間の室内平均 CO₂ 濃度 [ppm]) である。Fig. 2-2 に CO₂ の時系列プロファイルと C_{ss} の決定方法の一例を示す。

2.3 結果

全実験における一人当たりの CO₂ 呼出量の推定値を Table 2-3 および Fig.2-3 に示す。また、Table 2-3 には実験中の条件と、それに対応する予想平均温冷感申告 (PMV)²⁻¹⁶⁾ も示す。PMV は被験者の熱感覚を予測するもので、CBE Thermal Comfort Tool²⁻¹⁷⁾ と定常時の温度と相対湿度の測定値を用いて、各実験に対応する衣服の断熱値、想定代謝率 $M 1 \text{ met}$ (CBE Thermal Comfort Tool による座り、読みに対応)、風速 0.25 m/s (Bekö ら²⁻¹³⁾ による仮定) と仮定し計算したものです。Fig.2-4 に示すように、PMV は皮膚温 (熱感覚の指標²⁻¹⁸⁾) の測定値とよく相関し、PMV を推定するための仮定が適切であったことを確認した。

Fig.2-5 はチャンバーの空気温度、相対湿度と CO₂ 呼出量の関係を示す。温度が高くなるにつれ、呼出量が増加したことが確認された。A1 グループの高 RH 条件と低 RH 条件を比較すると、相対湿度上昇による CO₂ 呼出量への影響は確認されなかった。また、Fig.2-5 より、午後の方が午前中より呼出量が高いことが分かる。

1 Table 2-3 Measured temperature (T), relative humidity (RH), and ozone (O₃) at steady-state (SS) and estimated CO₂ emission rates and predicted mean vote (PMV) at different
 2 conditions examined in the present experiments

Group	Exp.	Morning,							Afternoon					
		T _{SS} [°C]	RH _{SS} [%]	PMV _{SS}	O _{3-SS} [ppb]	CO ₂ initial [ppm]	CO ₂ SS [ppm]	CO ₂ emission rate Mean ±SD [L/(h·person)]**	T _{SS} [°C]	RH _{SS} [%]	PMV _{SS}	O _{3-SS} [ppb]	CO ₂ SS [ppm]	CO ₂ emission rate Mean±SD [L/(h·person)]**
A1	1	29.3	33	0.86	<1	428	1305	15.9 ± 0.6	30.3	32	1.16	34.1	1340	16.5 ± 0.6
	2	32.6	62	2.33	<1	443	1373	16.8 ± 0.6 *	32.3	63	2.24	38.8	1408	17.4 ± 0.7
	3	29.4	62	1.22	<1	424	1293	15.7 ± 0.6	no afternoon exposure					
	4	32.5	32	1.85	<1	421	1346	16.7 ± 0.6 *	31.8	30	1.60	33.6	1365	17.1 ± 0.6
	5 #	32.8	59	2.12	<1	422	1353	16.8 ± 0.6 *	no afternoon exposure					
	20	30.9	56	1.65	<1	424	1352	16.8 ± 0.7	no afternoon exposure					
A2	6	26.1	20	-0.23	<1	430	1211	14.1 ± 0.9	27.5	18	0.16	36.3	1311	15.9 ± 0.7
	7	26.0	27	-0.20	34.8	429	1268	15.2 ± 0.7	no afternoon exposure					
	8 #	27.2	24	-0.44	<1	422	1251	15.0 ± 0.6	28.4	23	-0.02	35.0	1374	17.2 ± 1.1
	9 #	26.5	20	-0.73	36.9	426	1278	15.4 ± 0.6	no afternoon exposure					
	21	26.2	24	-0.16	<1	433	1248	14.7 ± 0.8	27.7	21	0.25	35.4	1330	16.2 ± 0.9
	22	27.1	20	0.07	39.6	424	1228	14.5 ± 0.7	no afternoon exposure					
	23 #	27.7	22	-0.28	<1	431	1267	15.1 ± 0.7	28.9	22	0.15	34.5	1361	16.8 ± 1.0
	24 #	27.1	19	-0.52	36.3	423	1258	15.1 ± 0.7	no afternoon exposure					
A3	10	28.6	28	0.59	<1	430	1271	15.2 ± 0.6	28.8	28	0.65	37.6	1416	17.8 ± 0.6
	18	27.5	35	0.33	<1	418	1316	16.2 ± 0.6	28.4	35	0.60	37.3	1344	16.7 ± 0.6
T4	19	28.5	34	0.62	44.2	421	1326	16.4 ± 0.6	no afternoon exposure					
	26	29.3	33	0.86	<1	421	1313	16.1 ± 0.6	30.0	35	1.1	40.6	1348	16.8 ± 0.6
	16	28.9	28	0.68	<1	421	1276	15.5 ± 0.6	29.7	25	0.89	37.7	1360	17.0 ± 0.6
S5	17	28.2	24	0.43	43.1	423	1249	14.9 ± 0.5	no afternoon exposure					
	25	28.3	25	0.47	<1	422	1250	15.0 ± 0.6	29.0	25	0.68	41.4	1381	17.3 ± 0.6

3 “SS” - steady-state, last 15 min average before volunteers left the chamber; conditions for group A1 that were not used to calculate average CO₂ emission rates (presented in Fig. 6) because of high temperature
 4 conditions are marked with an asterisk (*). Conditions with “short” clothing are marked with a hashtag (#); emission rates in g/h per person are shown in Table S4 in the Supplementary Material

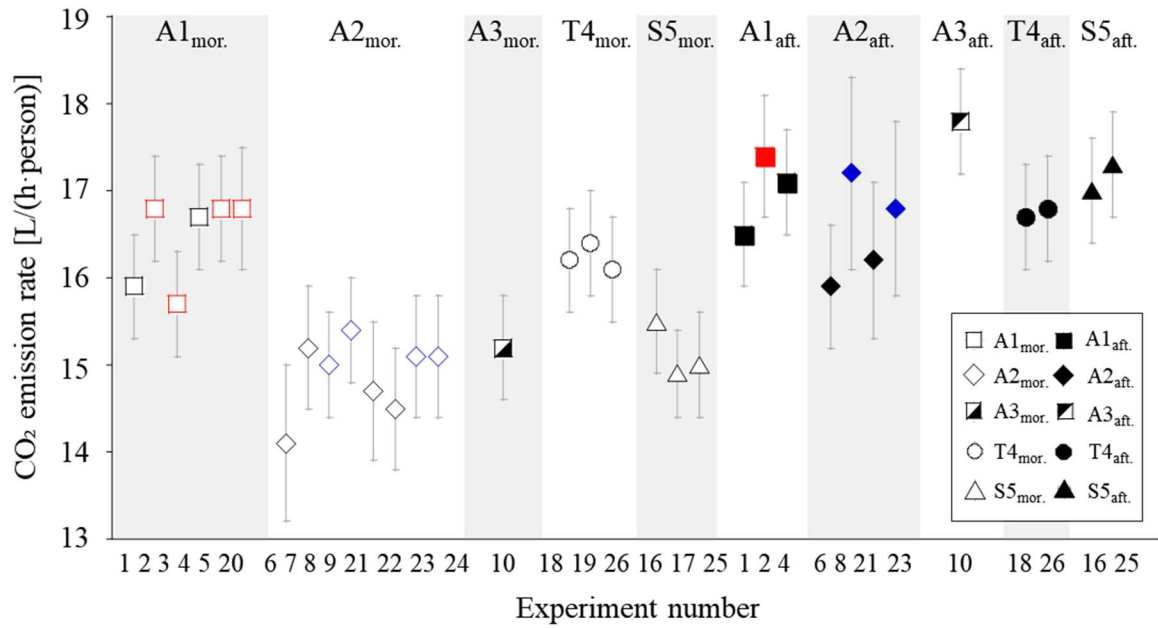


Fig. 2-3 CO₂ emission rate measured in the present study. Error bars show one standard deviation. Red color indicates high humidity increased by operating humidifier, blue indicates “short” clothing, all other conditions are for low relative humidity and “long” clothing. Mor. indicates morning exposures and aft. Afternoon exposures.

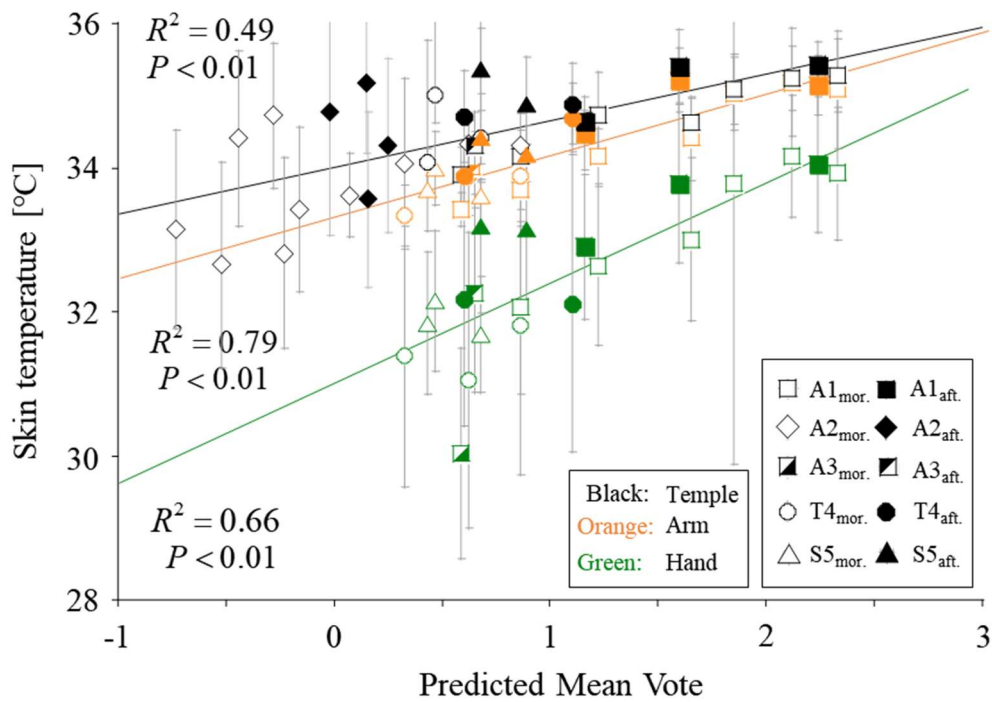


Fig. 2-4 Skin temperature on a different part of the body as a function of PMV. Error bars indicate one standard deviation.

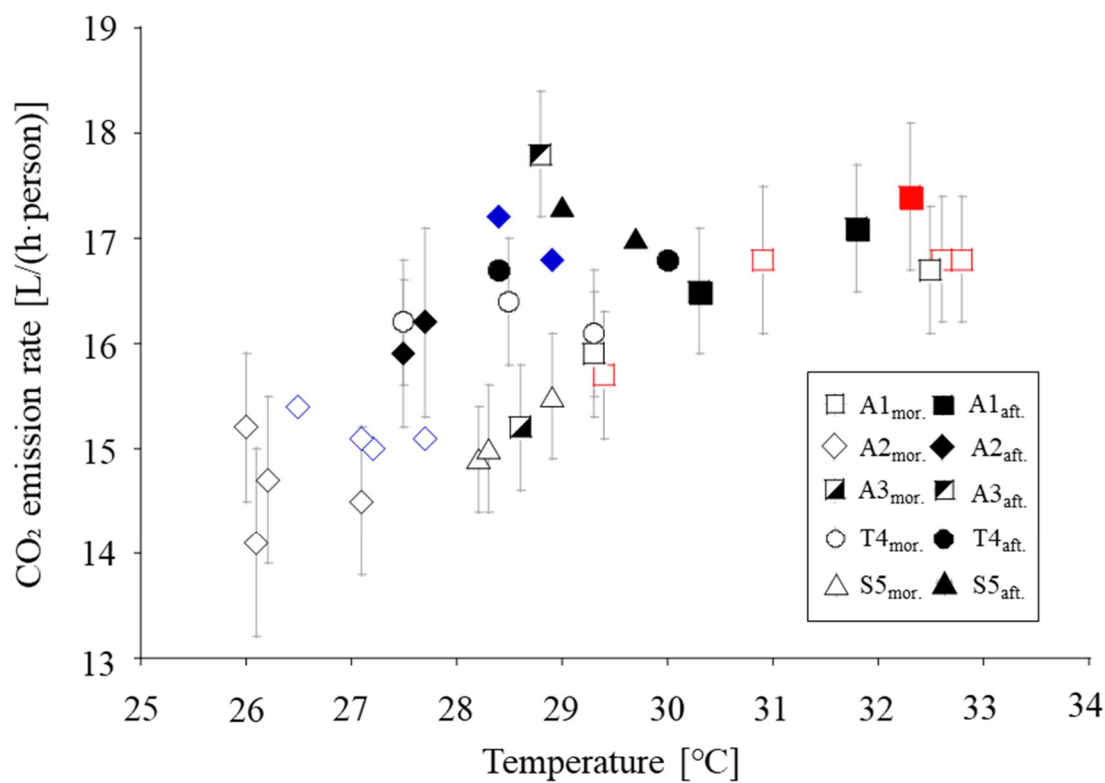


Fig. 2-5 CO₂ emission rates as a function of air temperature and relative humidity. The emission rates are presented separately for the morning (mor.) and afternoon (aft.) exposure sessions. Error bars indicate one standard deviation as in Table 1. Red colour indicates high humidity increased by operating a humidifier, blue indicates “short” clothing, all other conditions are for low relative humidity and “long” clothing. The letters indicate the group of subjects.

Fig.2-6 は、CO₂ 呼出量が気温にどのように影響されるかを示すアレニウスプロットである。データ数が少ない午後の暴露データでは決定係数（R²）が大幅に低下し、回帰は統計的に有意にならなかったが、午後の暴露データでは決定係数（R²）が十分に低下し、回帰は統計的に有意になった。

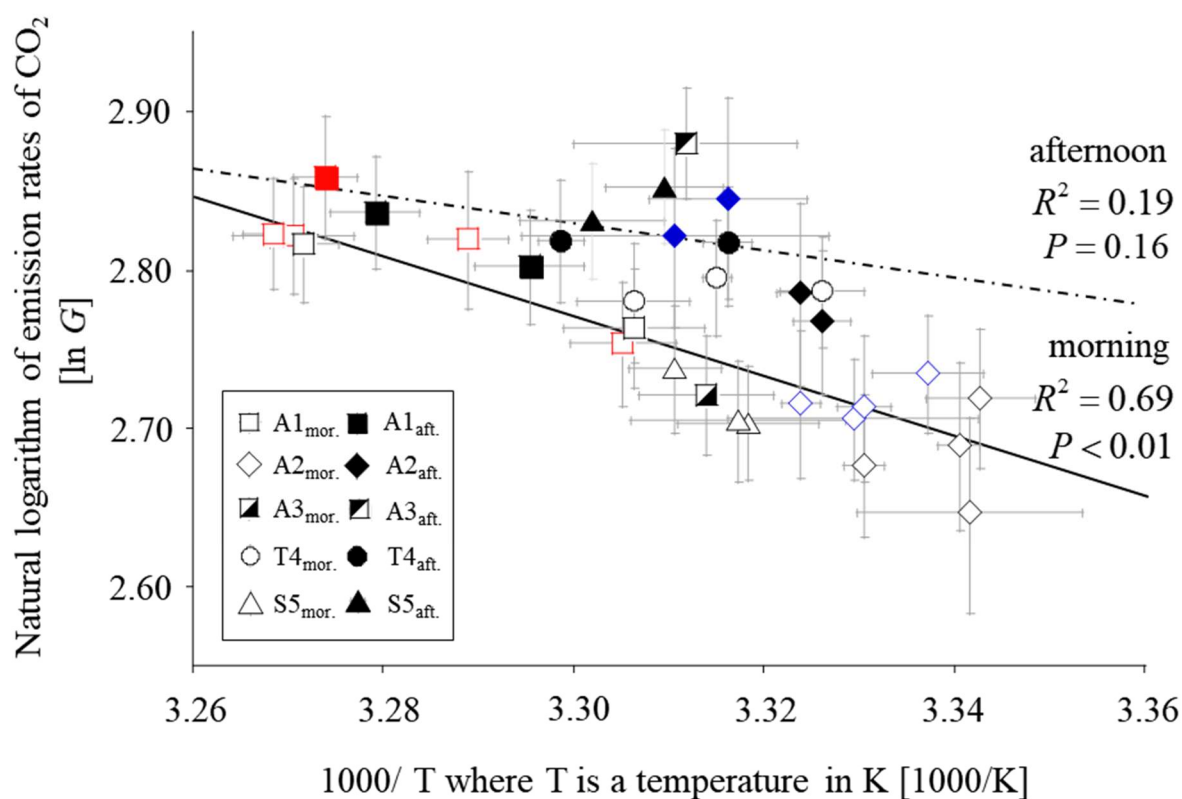


Fig.2-6 CO₂ emission rates (G [L/(h·person)]) as a function of temperature. Error bars indicate one standard deviation (solid line: data from morning exposures (mor.); dotted line: data from afternoon exposures (aft.)). Red colour indicates high humidity increased by operating a humidifier, blue indicates “short” clothing, all other conditions are for low relative humidity and “long” clothing. The letters designate the group of subjects.

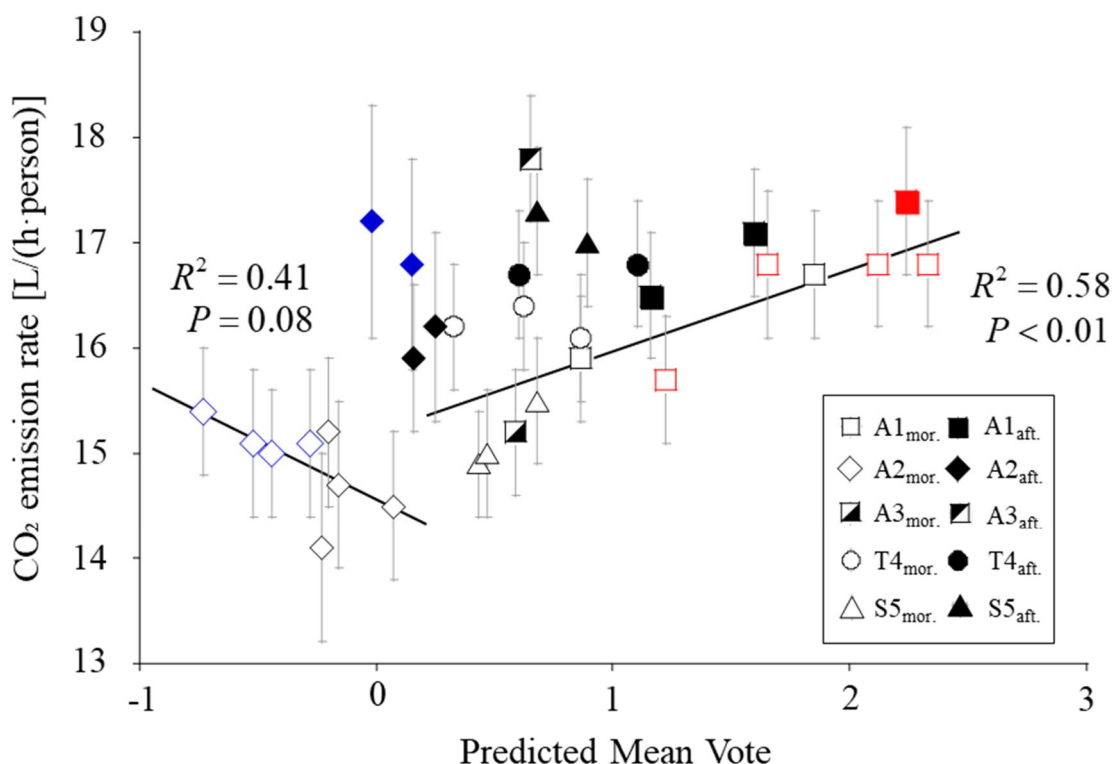


Fig. 2-7. CO₂ emission rate as a function of PMV. Error bars indicate one standard deviation. PMV is coded as follows: -1 – slightly cool, 0 – neutral, 1 – slightly warm, 2 – warm, and 3 – hot; the trends are shown by regression lines only for the data from morning exposures (mor.); afternoon exposures are indicated by aft. Red colour indicates high humidity increased by operating a humidifier, blue indicates “short” clothing, all other conditions are for low relative humidity and “long” clothing. The letters describe different groups of subjects.

CO₂呼出量は体表面積 (BSA, Fig.2-8), 肥満度 (BMI, Fig.2-9), オゾン濃度 (O₃, Fig.2-10) によって系統的に変化することはなかった。Fig.2-11 は, 異なる各実験群の平均 CO₂呼出量を示す (エラーバーは95%信頼区間)。温度の影響を制御するために, A1 グループの平均 CO₂呼出量は, 高温 (実験 2, 4, 5, 20) と中温 (他のすべての実験) に分けて計算した。Fig.2-12 は CO₂呼出量が午後に高かったことを示している。午前中の適度な温度への曝露に関しては, 10 代 (T4 群) で最も高い平均呼出量が観察されたが, 他の実験群の呼出量と比較すると, その差は統計的に有意には至らなかった。午後の CO₂呼出量については, 各実験群間でわずかな差はあるものの, 有意な差は認められなかった。

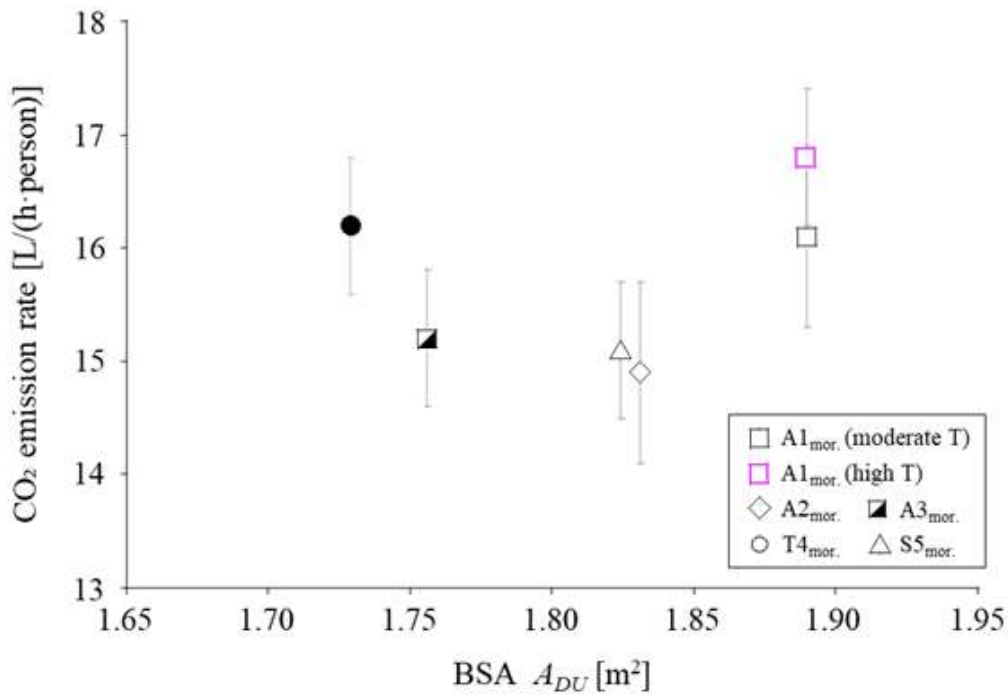


Fig. 2-8 CO₂ emission rate as a function of the group-average body surface area (BSA, morning exposures). Error bars show one standard deviation. Mor. indicates morning exposures and aft. afternoon exposures.

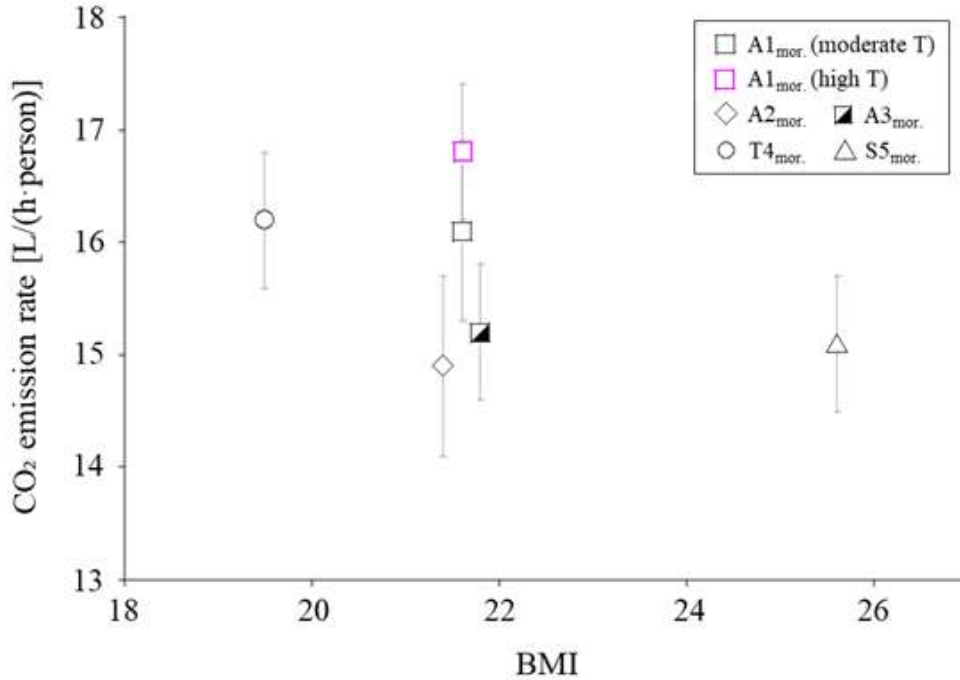


Fig.2-9 CO₂ emission rate as a function of the group-average body mass index (BMI, morning exposures). Error bars show one standard deviation. Mor. indicates morning exposures and aft. afternoon exposures.

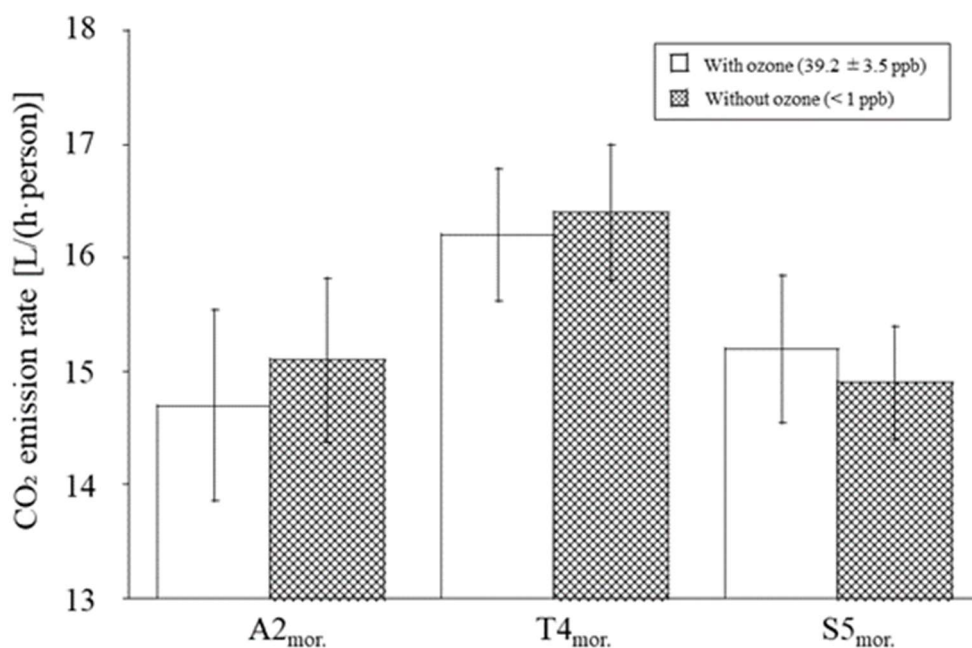


Fig. 2-10. CO₂ emission rates during exposures with and without ozone; only morning exposures are presented as ozone was always present during afternoon exposures. Error bars indicate one standard deviation.

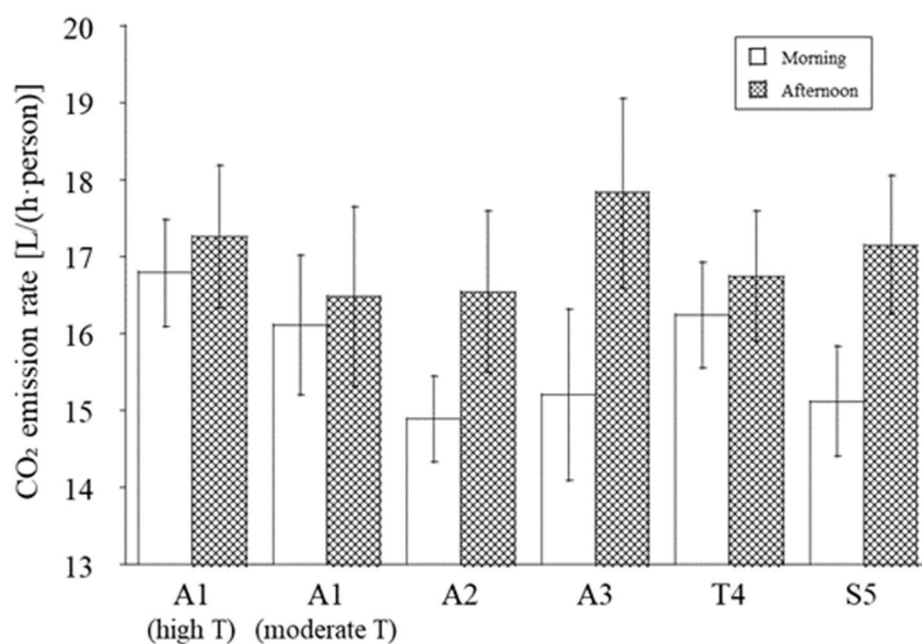


Fig. 2-11 Average CO₂ emission rates for the different groups of subjects. Error bars indicate a 95% confidence interval.

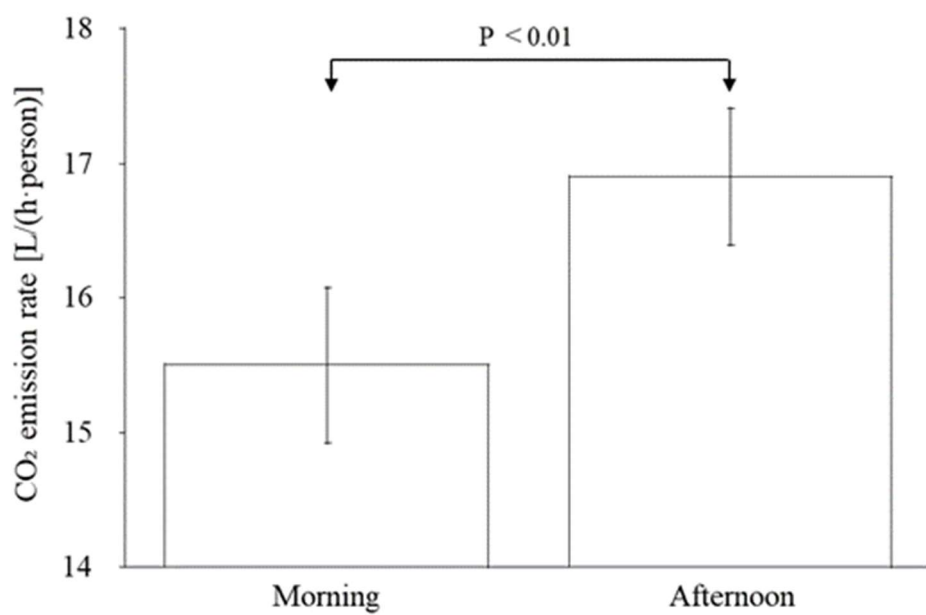


Fig. 2-12 Average CO₂ emission rates in the morning and afternoon. Error bars indicate 95% confidence intervals (n=24). The difference was tested using Welch's t-test (2-Tail P).

2.4 考察

今回測定した CO₂ 呼出量と、第一章で述べた ASHRAE Handbook¹⁻⁹⁾や ASTM DS6245¹⁻³⁰⁾に記載されている既存の予測モデルで推定した呼出量を比較した (Fig.2-13). 呼吸商 0.85, ASHRAE 法では代謝率 1met (1met=58.15W/m²), 身体活動率 1.25 (代謝率を示す met とは異なる無次元単位 met), ASTM 式では測定気温の平均値を温度として入力し, CO₂ 呼出量の推定をした. Fig.2-13 に示すように, 本実験における午前の実験での CO₂ 呼出量の測定値は, T4 を除き, ASHRAE 法による推定値よりも概ね低い値を示した. ASTM 法と比較し, Adults は低く, Seniors は高く, Teenagers ではほぼ同じであった. 午後の実験での CO₂ 呼出量については, A1 グループを除き, ほとんどが推定値よりも高かった. このような不一致が生じる原因については, さらなる検討が必要である.

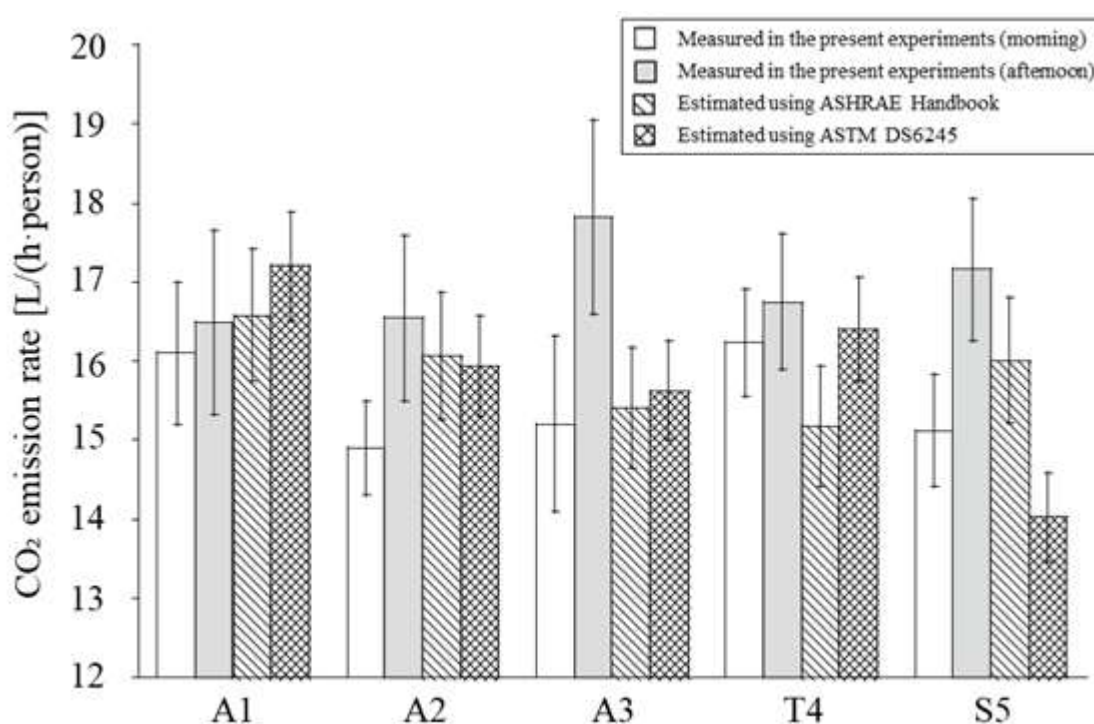


Fig.2-13 Comparison of CO₂ emission rates from measurements (excluding high temperature conditions for group A1) with the CO₂ emission rates estimated using equations in the ASHRAE Handbook and ASTM DS6245. For measured emission rates, error bars indicate a 95% confidence interval. Error bars for the estimated emission rates show how they would change if the assumed activity level should vary by ± 0.05 met.

また, 本研究で得られた Adults と Seniors の CO₂ 呼出量を Table 2-1 の文献と比較した (Fig.2-14). Fig.2-14 は, 報告された CO₂ 呼出量のばらつきを示しているが, 今回の結果と既報のデータとの間に系統的な違いは見られない. Zhai ら, Yang ら, Nomoto らは, 本解析で用いた方法とは異なる間接熱量計を用いて CO₂ 呼出量を推定しており, さらなる検討が必要であると考えられる.

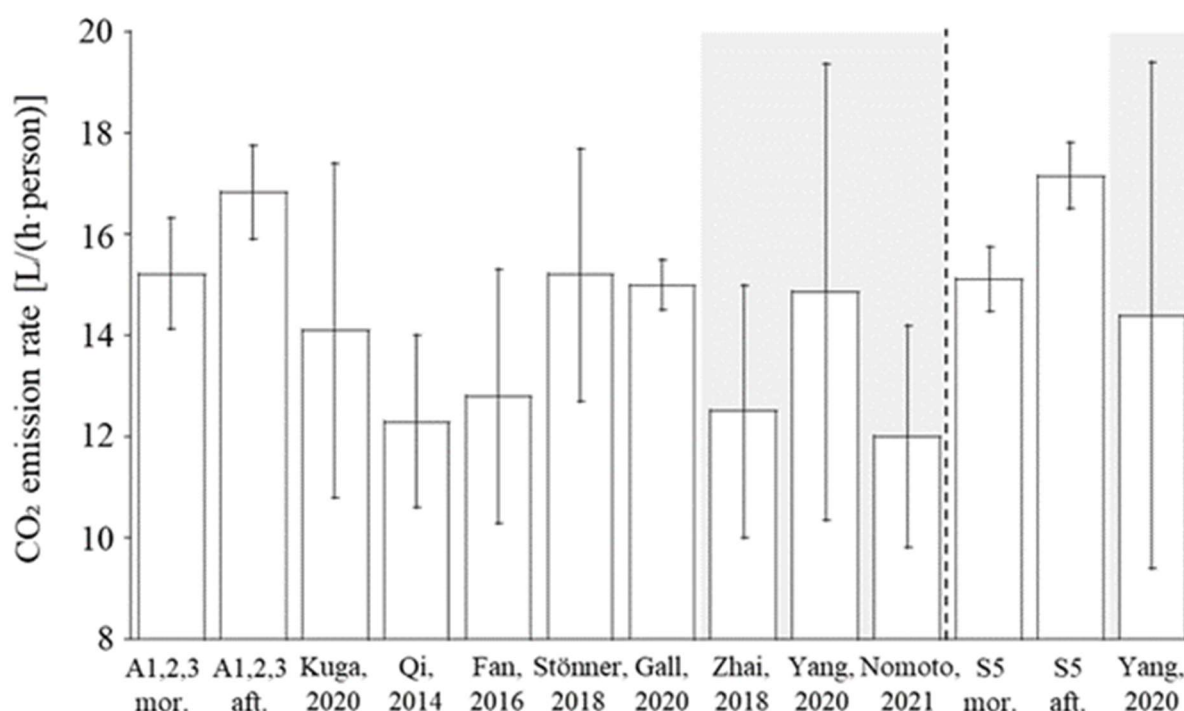


Fig. 2-14. Comparison between the CO₂ emission rates in the present study (A1 excluding high temperatures, A2, A3, and S5) and previously published studies; emission rates for young adults (left) and seniors (right) are compared; shaded areas denote emission rates estimated using indirect calorimetry.

基礎代謝量（BMR）は年齢に依存し、その結果、CO₂呼出量に年齢差が生じる^{1-34,1-35,2-6}。しかし、我々は、10代のCO₂呼出量が午前中の暴露で高かったものの、異なる年齢のグループ間のCO₂呼出量の系統的な違いは確認できなかった。この調査は、より広範な研究において確認する必要がある。もし、年齢によるCO₂呼出量に違いがあれば、それは異なる年齢の人々が生活する空間におけるCO₂を用いた換気制御に影響を与える可能性がある。

CO₂呼出量は主に代謝過程とエネルギー消費量に依存する。エネルギー消費量の影響は、食事誘発性熱発生（DIT）により午後の暴露でCO₂呼出量が増加した今回の結果と整合する²⁻¹⁹。この実験では、被験者は午前中と同じ活動を行い、軽い昼食をとった後すぐにチャンバーに入った。代謝過程の影響は、Pejtersenら²⁻¹など、多くの文献で報告されている。最近の研究では、温度、CO₂濃度そのもの（Bivolarovaら¹⁻⁴⁶）、感情状態（Stönnerら²⁻⁵）など、他の要因も排出率に影響を与える可能性が示されている。さらに、定常時の気温は午前中よりも午後の方が常に高かったことが（適度な目標気温のもと）、午後のCO₂呼出量が高くなった原因である可能性もある。

今回の実験では、チャンバー内の温度を上げるとCO₂呼出量が増加することが確認された（Fig.2-5, 6）。Bivolarovaら¹⁻⁴⁶の研究では、18°Cから26°Cに温度を上げて、どちらの条件においても被験者は熱的に中性であったため、CO₂呼出量の増加は見られなかった。これらの結果は、研究された温度範囲と同様の活動レベルにおいて、体温が高いと感じる人は体温が低いと感じる人よりもCO₂呼出量が多いことを示唆している。また、Tushimaら¹⁻⁴²が示したように、在室者は高温条件にてより多くの生体発生物質

を放出する。同様に、高温条件は、CO₂呼出量の上昇をもたらす生理的反応を誘発する可能性がある。これらの反応には、体内細胞における化学反応速度の上昇や、呼吸・循環機能の促進が考えられる。高温環境下で体温を下げるため、あるいは体温を変化させないため（Luo ら¹⁻⁴⁷⁾）に末梢に送られる血液量を増加させるには、心拍数（HR）を増加させ、CO₂呼出量を上昇させる可能性がある。

また、Fig.2-7 は、人が少し寒いと感じると、より多くの CO₂が呼出される可能性を示している。この結果は、Luo ら¹⁻⁴⁷⁾の研究と一致しており、暖かく感じるか涼しく感じるかで、在室者の代謝が増加し、熱的に中立である場合と比較して、CO₂呼出量が増加することが示されている。これらの結果は、さらなる研究によって確認する必要がある。

いくつかの既往研究では、吸入空気中の CO₂濃度が高くなると、CO₂呼出量が減少することが確認された¹⁻⁴⁶⁾。Bako-Biro ら¹⁻⁴⁵⁾は、室内空気質が低下すると CO₂呼出量が減少すると仮定した。彼らは、室内空気質の変化に応じて呼吸パターンが変化することが原因である可能性を示唆した。彼らの仮説は Danuser²⁻²⁰⁾の報告に基づいている。彼らは、被験者が化学汚染物質に暴露されると呼吸パターンの変化と一回換気量の減少を確認した。Zhang ら¹⁻²⁹⁾は、CO₂や人体からの生体発生物質の濃度が上昇すると呼気中の CO₂終末濃度（ETCO₂）が高くなることから、肺機能への影響によるものであることを示唆した。また、Shriram ら¹⁻¹⁹⁾と Mishra ら¹⁻²⁰⁾は、被験者が生体発生物質に暴露されると、肺機能が影響を受けたと報告した。大気汚染に反応して CO₂の保持量が増加する可能性があるため、汚染物質そのものであり、かつ、室内空気化学の主要なドライバーであるオゾン（O₃）の存在下でもこの効果が予想された。しかし、今回の実験ではチャンバー内に O₃がある場合とない場合で CO₂呼出量に差は見られなかった（Fig.2-15）。

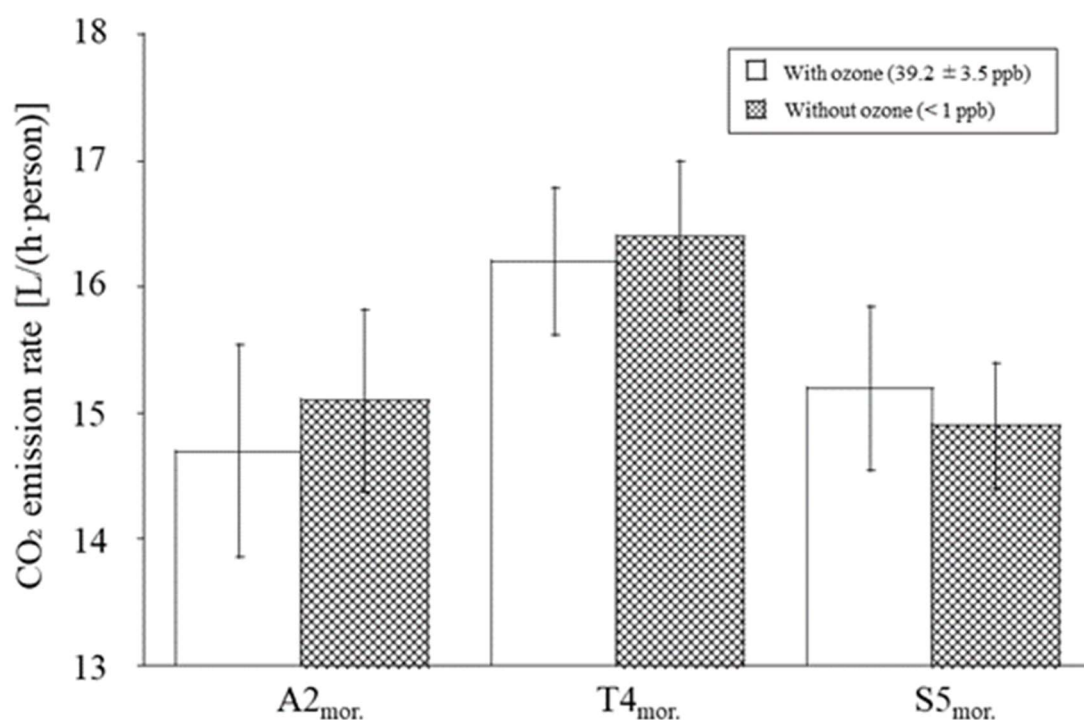


Fig. 2-15 CO₂ emission rates during exposures with and without ozone; only morning exposures are presented as ozone was always present during afternoon exposures. Error bars indicate one standard deviation.

推定された CO_2 呼出量を用いて、最初の 1 時間で予想されるチャンバー内の CO_2 濃度の上昇を推定し、実測値と比較した。定常状態の CO_2 濃度の予測値と実測値はほぼ同じであったが、実際の蓄積パターンはわずかに異なっていた (Fig.2-16)。この差異について検討するため、蓄積時間を 15 分ごとに 4 等分し、マスバランス式を用いて、各期間の CO_2 濃度に対応する CO_2 呼出量を算出した。Fig.2-16 から、 CO_2 濃度が低いほど CO_2 呼出量が高いことがわかる。

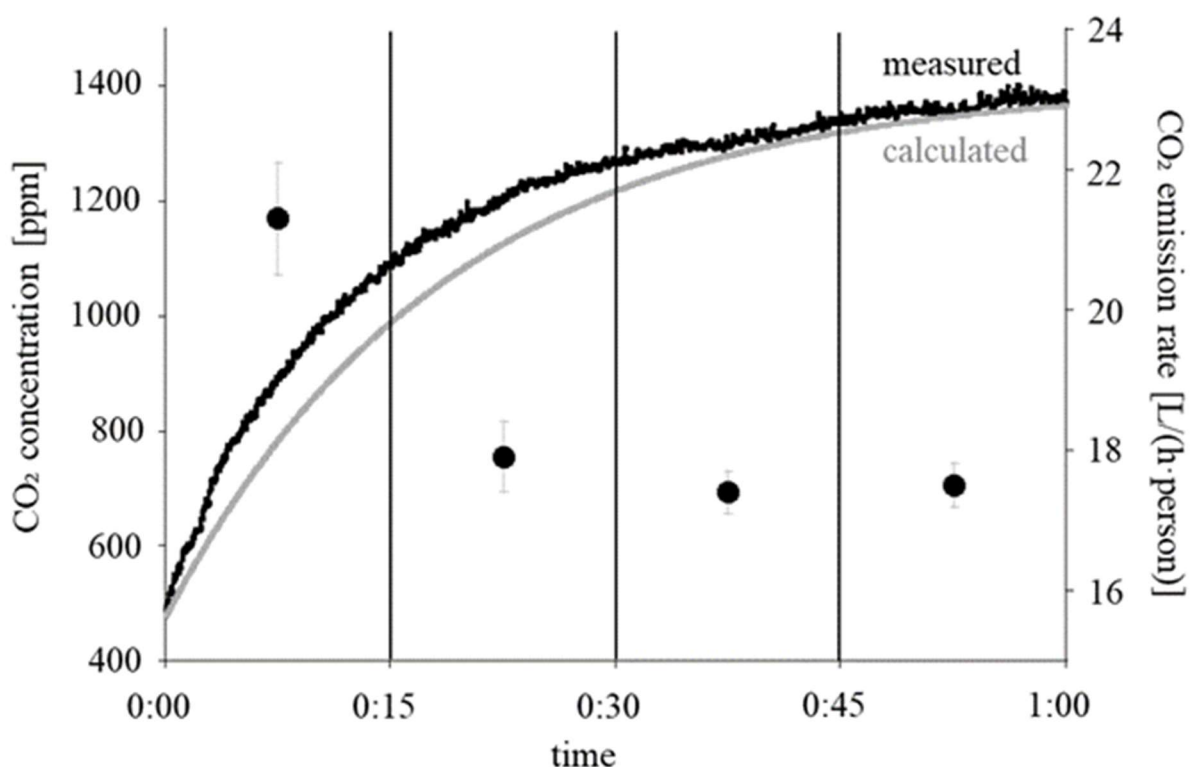


Fig. 9. Measured and calculated CO_2 concentration during build-up in Exp. 20; the calculated build-up was determined using CO_2 emission rates estimated in this study. The calculated CO_2 emission rates for the four 15 min periods of the 1-hour concentration build-up period are shown (full circles).

2.5 制限

本実験の結果は4人の被験者からなる5つのグループの1人あたりの平均呼出量を示した。本研究では、個人のCO₂呼出量は測定していない。そのため、性別、BMI、BSA、食事がCO₂呼出量に及ぼす影響について、信頼性の高い検証を行うことはできなかった。

また、RHがCO₂呼出量に与える影響は確認できなかったが、本実験では異なる目標RHレベルの2条件でのみ調査した。RHとCO₂呼出量の関係については、さらなる調査が必要である。

今回のデータは、被験者の活動レベルが実験中、同一かつ一定であるという仮定に依存している。実験群間のCO₂呼出量のばらつきは小さく、計算されたCO₂呼出量の平均値に対する標準偏差（SDM）は、1人あたり0.57～1.07L/hであった。被験者はほとんどの時間座っていたため（立ち上がってストレッチした2つの短時間を除く）、一定の活動レベルは妥当な仮定であるが、活動レベルや代謝のわずかな違いが結果に影響を与える可能性がある。今後の研究では、定常状態のCO₂濃度から推定した呼出量を検証するために間接熱量測定が有益であり、代謝率を監視するための他の方法の使用も検討されるべきである。

2.6 結論

本研究では、様々な制御された条件下で、座位被験者からのCO₂呼出量を測定した。測定された呼出量は、午前中は一人当たり12.9～15.1L/h、午後は一人当たり14.5～16.1L/hの間で変動した（短い昼食休憩後、若干気温が高いがそれ以外は同じ条件下）。午後の高い呼出量は、おそらく食事誘発性熱発生（DIT）による代謝の増加によるものである。本実験での呼出量は、これまでの研究で実験により得られた値とおおむね同じであったが、適用される基準やガイドラインに記載された方法を用いて得られた値とは多少異なっていた。排出率は、熱的中性からの逸脱が大きくなるにつれて増加した。CO₂呼出量の個人間および個人内のばらつきを明らかにするため、より多くの参加者による研究が必要である。

【参考文献】

- 2-1) Pejtersen, J., Clausen, G., Sorensen, J., Quistgaard, D., Iwashita, G., Zhang, Y., & Fanger, P. O. (1991). Air pollution sources in kindergartens. In *Proceedings of IAQ* (Vol. 91, pp. 221-224).
- 2-2) Thorstensen, E., Hansen, C., Pejtersen, J., Clausen, G. H., & Fanger, P. O. (1990). Air pollution sources and indoor air quality in schools. *Proceedings of indoor air*, 90, 531-536.
- 2-3) Qi, M. W., Li, X. F., Weschler, L. B., & Sundell, J. (2014). CO₂ generation rate in Chinese people. *Indoor Air*, 24(6), 559-566. <https://doi.org/10.1111/ina.12110>
- 2-4) Fan G, Xie J, Liu J. (2016). Human CO₂ generation rate calculation based on field measurement of CO₂ concentration in a naturally ventilated room. *Proceedings of Indoor Air*, 223.
- 2-5) Stönnner, C., Edtbauer, A., & Williams, J. (2018). Real-world volatile organic compound emission rates from seated adults and children for use in indoor air studies. *Indoor Air*, 28(1), 164-172. <https://doi.org/10.1111/ina.12405>
- 2-6) Gall, E. T., Mishra, A. K., Li, J., Schiavon, S., & Laguerre, A. (2020). Impact of cognitive tasks on CO₂ and isoprene emissions from humans. *Environmental science & technology*, 55(1), 139-148. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03850>
- 2-7) Wargocki, P., Fanger, P. O., Krupicz, P., & Szczecinski, A. (2004). Sensory pollution loads in six office buildings and a department store. *Energy and Buildings*, 36(10), 995-1001.
- 2-8) Zhai Y, Li M, Gao S, Yang L, Zhang H, Arens E, Gao Y. (2018). Indirect calorimetry on the metabolic rate of sitting, standing, and walking office activities. *Building and Environment*, 145, 77-84. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.011>
- 2-9) Yang L, Wang X, Li M, Zhou X, Liu S, Zhang H, Arens E, Zhai Y, (2020), Carbon dioxide generation rates of different age and gender under various activity levels, *Building and Environment*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107317>
- 2-10) Nomoto, A., Hisayama, R., Yoda, S., Akimoto, M., Ogata, M., Tsutsumi, H., & Tanabe, S. I. (2021). Indirect calorimetry of metabolic rate in college-age Japanese subjects during various office activities. *Building and Environment*, 107909. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107909>
- 2-11) Tajima M, Inoue T, Ohnishi Y. (2014) Derivation of equation for personal carbon dioxide in exhaled breath intended to the estimation of building ventilation. In *Proceedings of the 35th AIVC Conference ‘Ventilation and Airtightness in Transforming the Building*
- 2-12) Luo, M., Zhou, X., Zhu, Y., & Sundell, J. (2016). Revisiting an overlooked parameter in thermal comfort studies, the metabolic rate. *Energy and Buildings*, 118, 152-159.
- 2-13) Bekö, G., Wargocki, P., Wang, N., Li, M., Weschler, C. J., Morrison, G., ... & Williams, J. (2020). The Indoor Chemical Human Emissions and Reactivity (ICHEAR) project: Overview of experimental methodology and preliminary results. *Indoor Air*, 30(6), 1213-1228.
- 2-14) Yang, S., Beko, G., Wargocki, P., Williams, J., & Licina, D. (2020). Human emissions of size-resolved fluorescent aerosol particles: influence of personal and environmental factors. *Environmental Science & Technology*, 55(1), 509-518. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06304>
- 2-15) Choi, J. H., & Loftness, V. (2012). Investigation of human body skin temperatures as a bio-signal to indicate

overall thermal sensations. *Building and Environment*, 58, 258-269.

- 2-16) Fanger, P. O. (1970). Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.
- 2-17) “CBE Thermal Comfort Tool.” CBE Thermal Comfort Tool for ASHRAE-55, Center for the Built Environment, University of California Berkeley, <https://comfort.cbe.berkeley.edu/> (accessed: 2019-9-10).
- 2-18) Choi, J. H., & Loftness, V. (2012). Investigation of human body skin temperatures as a bio-signal to indicate overall thermal sensations. *Building and Environment*, 58, 258-269.
- 2-19) Westerterp, K. R. (2004). Diet-induced thermogenesis. *Nutrition & metabolism*, 1(1), 1-5.
- 2-20) Danuser, B. (2001). Candidate physiological measures of annoyance from airborne chemicals. *Chemical senses*, 26(3), 333-337.

第3章 睡眠時における異なる温度、換気量条件下での CO₂呼出量の測定 (Exp.2)

3.1 序

第一章で述べた通り、CO₂濃度は空気質の指標として用いられており、換気量設計は CO₂呼出量を基に成立する。換気量の人体影響は第一章で述べた通りだが、近年、寝室の換気量と睡眠の質に関する研究が増加している³⁻¹⁻⁵⁾。低空気質を意味する高 CO₂濃度は被験者の睡眠の質に影響を及ぼし、翌日の仕事のパフォーマンスに影響を与えることが示された³⁻¹⁻³⁾。測定された CO₂濃度から寝室換気量を推定する場合、寝室換気が適切かどうかを判断するために、就寝中の居住者の CO₂呼出量 (CER) を知る必要がある。

CER とそれに影響を与える要因を明らかにした多くの研究が発表されているが³⁻⁶⁻¹²⁾、これらの研究のほとんどは、被験者が覚醒している状態を対象としている。前述の通り、CER は身体活動レベル、年齢、性別に影響されることが知られている。最近の研究 (Exp.1 を含む) では、CER は温度による熱的不快感や CO₂濃度の上昇による IAQ の悪化など、室内環境要因⁹⁻¹²⁾の影響を受けることも示されている。しかし、睡眠時の在室者に関しては、CER に関する公表情報は非常に少ない。本論文で後ほど結果を分析するほとんどの研究は、睡眠エネルギー消費量 (SEE) のみを報告しており、睡眠中の被験者の CER を報告した研究は3件のみである³⁻¹³⁻¹⁵⁾。White ら³⁻¹³⁾は、睡眠中の代謝量と呼吸との関係について調査した。彼らは、健康な男性および女性において、CER はそれぞれ 11.6 ± 0.7 L/h、 9.0 ± 0.4 L/h であり、呼吸換気と密接に関連していることを確認した。Bonnet ら³⁻¹⁴⁾は、断片的な睡眠が代謝率に及ぼす影響について検証した。睡眠中の健康な被験者から報告された CER は、一人当たり 12.4 ± 0.5 L/h であった。断片化された睡眠中の CER は、通常の睡眠中に比べてわずかに高く、これは断片化された睡眠中の活動誘発性エネルギー消費 (EE) の上昇に起因する可能性がある。断片化睡眠後の回復睡眠中の CER は、通常睡眠中の値とほぼ同じであった。Berger ら³⁻¹⁵⁾は、閉塞性睡眠時無呼吸症候群患者の睡眠中の CO₂蓄積と CO₂呼出の急性動態を測定し、周期的呼吸中の CO₂についての恒常性維持のための呼吸器間換気維持に着目した。彼らは、睡眠中の被験者からの CER は、男性で一人当たり 15.3 ± 1.7 L/h、女性で一人当たり 14.9 ± 2.4 L/h であったと報告した。

前述の通り、CER を推定するために、一般的には活動レベルから ASHRAE 規格 や ASTM D6245-18 で示される経験式を用いる。これらの経験式に対し睡眠時の活動量を用いることで、睡眠中の在室者からの CER を推定することができる。あるいは、本実験のように睡眠中に制御された環境条件下で CO₂濃度の測定を行うことによっても睡眠時の呼出量を推定することができる。

本実験の第一の目的は、睡眠中の人からの CER を測定することである。測定された CER は、SEE に関する公表データを用いて推定された CER と比較され、SEE を報告した研究をレビューした。さらに、前述したように、温熱条件と IAQ が覚醒者の CER に影響を与えることを考慮し、睡眠者の CER がこれらのパラメータに影響されるかどうか調査した。

3.2 実験方法

3.2.1 実験設備

被験者が眠るための空間として、サイズが $2.4 \times 1.1 \times 0.9\text{m}$ の特殊な睡眠カプセルを設計した。カプセルは、透明な強化アクリル板をアルミ製のレールに取り付け (Fig.3-1), 内側と外側をアルミテープで密閉した。また、片側にはカプセルに入るための扉を設置した。カプセルはステンレス製の人工気候室³⁻¹⁶⁾に設置され、温熱環境とカプセル内の CO_2 濃度による空気質の制御が行われた。

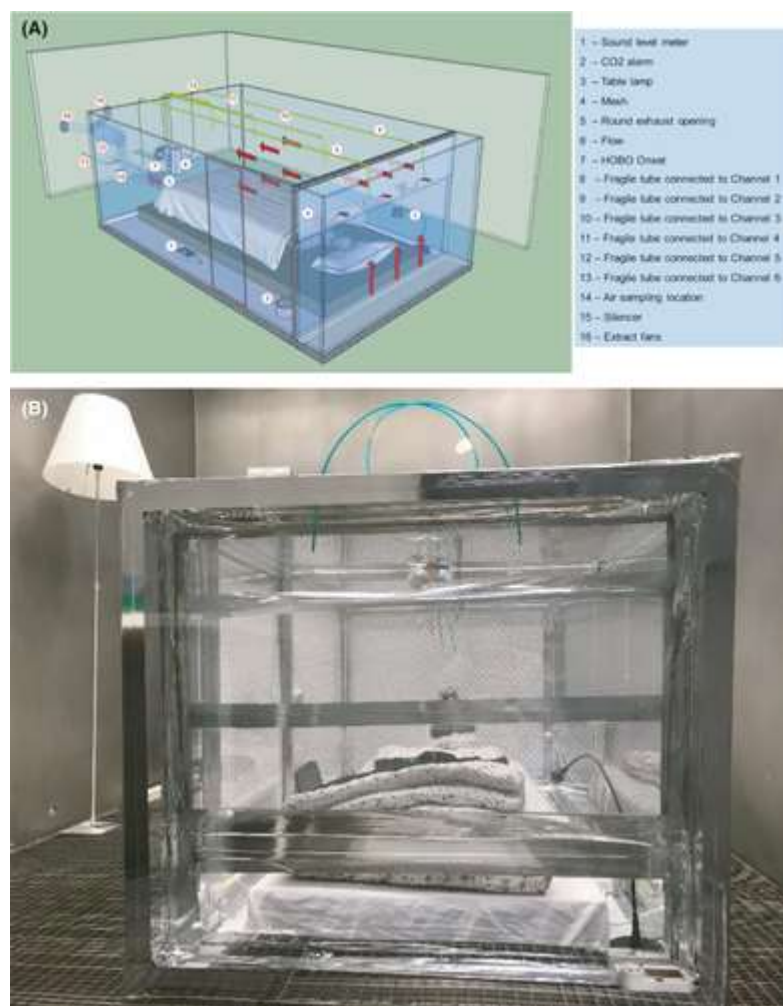


Fig. 3-1 (A) A schematic diagram of the capsule (the red arrows show the airflow); (B) A snapshot of the empty capsule

睡眠カプセルの模式図を Fig.3-1A に示す。カプセルは、下部がアクリル板、上部がオープンメッシュからなる仕切りで仕切られた2つの容積からなる (メッシュの長さはカプセルの天井から 20cm 以内)。大きい方は就寝用 ($2.2 \times 1.1 \times 0.9\text{m}$)、小さい方はカプセルの占有部分を換気するための空気のプレナム ($0.2 \times 1.1 \times 0.9\text{m}$) として使用され、プレナムの反対側の外壁には、下部に円形の開口部が設けられている。この開口部からフレキシブル排気ダクトでステンレス製気候室の外部に接続し、ダクトの先端に排気ファンを設置してカプセル内の気流をできるだけ安定させ、ファンの上流にサイレンサーを設置して騒音を低減させた。

カプセル内の寝具は、マットレス ($1.98 \times 0.79 \times 0.12\text{m}$)、綿布団 ($1.88 \times 1.20 \times 0.03\text{m}$)、枕 ($0.56 \times 0.38 \times 0.11\text{m}$)、寝具、テーブルランプから構成されています。寝具、パジャマ、タオルは無香料の洗濯機で毎

日洗浄した。

カプセル内には、CO₂濃度が 5000ppm 以上になった場合（換気装置の故障）に備えて、アラームに接続されたセンサーが設置されているが、実験中にアラームが作動することにはなかった。

カプセルの換気は、ステンレス製の人工気候室内の空気で行われた。チャンバーには独自の換気システムが装備され、置換換気の原理と同様の低速度での上昇気流を持つ。濾過・調整された空気が床下プレナムに供給され、ステンレス製グリッドの下の穴あき床からチャンバーに流入する³⁻¹⁶⁾。人工気候室の空気はプレナムからカプセルに入り、前述のように、排気ファンを備えたフレキシブルダクトを通して排気された。カプセル内には混合ファンは設置されていないが、カプセル内で被験者が寝ているときに異なる位置の CO₂ を測定することにより、カプセル内の CO₂ 濃度が十分均一になることが確認された (Fig.3-2)。

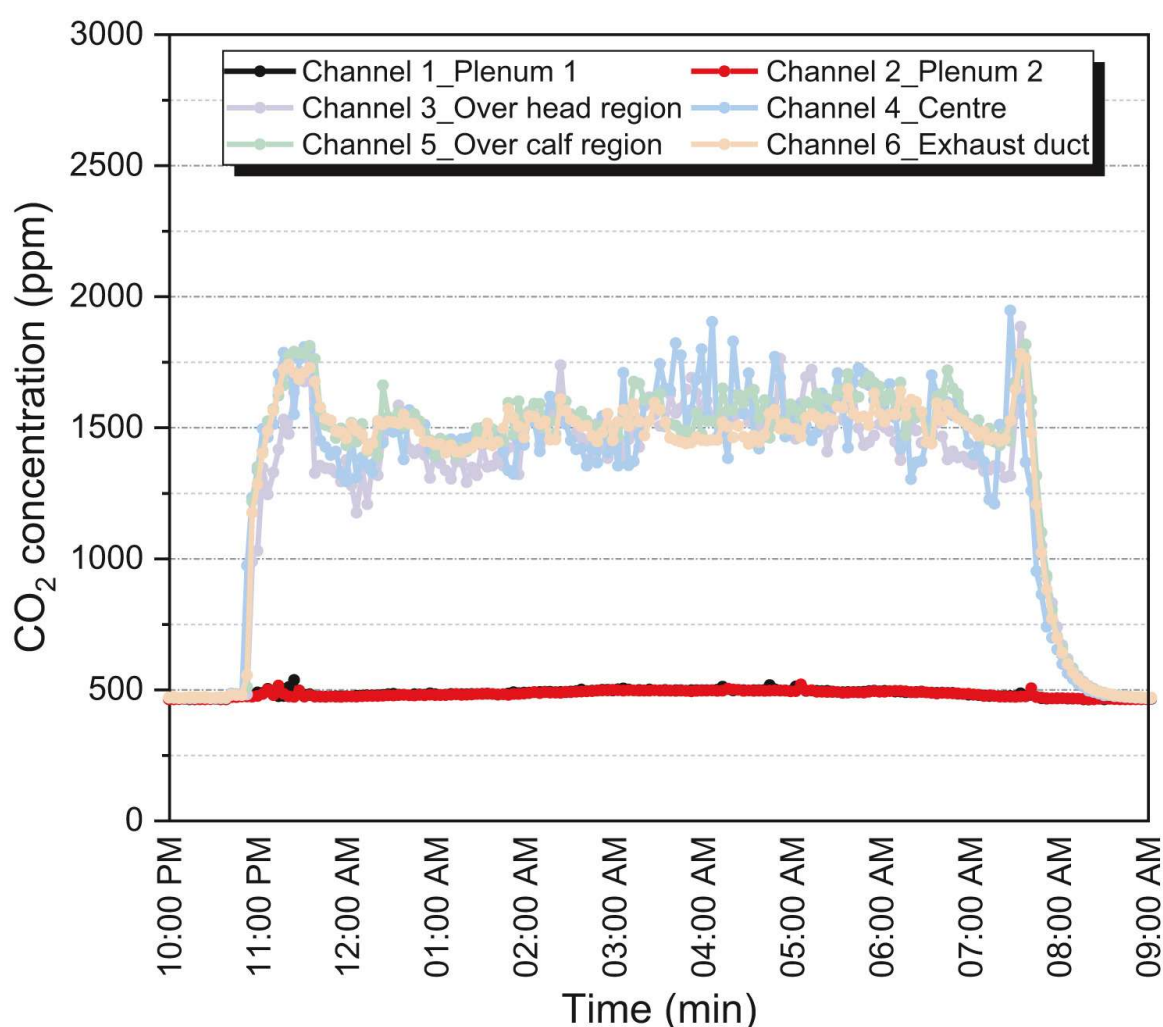


Fig. 3-2 An example of measured CO₂ concentration at different locations in the capsule

新しい被験者を使った実験の前に、人工気候室を洗浄し、気候室内の温度を 40°C に保つことで汚染物質を揮発させた。カプセルは、現在施行されている COVID-19 パンデミック規制に適合するように使用機器とともに除菌された。実験は、2020 年 6 月から 8 月までの期間中デンマークで実施された。

3.2.2 実験条件

空気温度 2 条件と CO₂ 濃度 2 条件 (2 種の IAQ) からなる 3 条件を設定した (Table 3-1)。温度条件は 24°C (T24) と 28°C (T28) である。これらは、睡眠中の中立的な温熱環境と温熱環境を意味する。T24 は EN16798-1³⁻¹⁷⁾ で推奨されている温度範囲内、T28 はこの温度範囲外である。また、換気量を変更することで、2 種の IAQ レベルを意味する 800ppm (M800) と 1700ppm (M1700) の CO₂ 濃度を選択し、設定した。これらは、最近の 2 種のレビュー^{3-3,18)} で要約された寝室で測定された 428~2585ppm の範囲内にあり、EN16798-1³⁻¹⁷⁾ によると、室内環境の最高カテゴリーである寝室と最低カテゴリーであるオフィス/リビングルームの換気にそれぞれ対応する。高 CO₂ 濃度はカプセルで制御できる最低換気量から、低い濃度はファンの騒音が許容レベルを維持するために選ばれた。

Table 3-1 Planned and measured parameters in the sleep capsule under different experimental conditions

Nominal conditions	Planned conditions		Measured parameters during sleep (mean±SD)									
	T	CO ₂	T (°C)	CO ₂	SPL	PSPL	RH	Absolute	NO ₂	TVOCs ¹	PM _{2.5}	PM ₁₀
	(°C)	concentration (ppm)		concentration (ppm)	(dB(A))	(dB(A))	(%)	humidity (g/m ³)	(ppb)	(ppb)	(ug/m ³)	(ug/m ³)
T24M800	24	800	23.7±0.2	771±34	51.1±4.8	70.4±2.5	48±2	10.3±0.5	1.9±2.5	160.4±37.3	2.7±1.2	6.5±1.6
T24M1700	24	1,700	24.0±0.2	1671±121	47.6±2.0	68.4±1.2	57±3	12.4±0.7	1.7±1.3	191.2±15.6	2.3±0.7	6.9±1.4
T28M800	28	800	28.0±0.2	795±75	50.6±5.0	70.1±2.6	40±3	10.8±0.7	2.8±2.4	176.7±12.2	2.7±1.3	6.8±1.7

Abbreviations: PSPL, peak sound pressure level; RH, relative humidity; SPL, sound pressure level; T, Temperature.

a Total volatile organic compounds.

人工気候室の設定温度は、被験者が睡眠中に発する熱を考慮してカプセル内の目標温度に至るように設定した。すなわち、T24 で 23°C、T28 で 27°C と、いずれも 1°C 低く設定した。睡眠中のカプセル内の温度測定値は、意図したレベルに達していた (Table 3-1)。

3.2.3 被験者

大学生年齢の健常者 11 名を募集した (Table 3-2)。彼らは非喫煙者であり、慢性疾患、喘息、アレルギー、花粉症はなく、実験期間中に薬や睡眠薬を服用することもなかった。除外基準は、アルコールまたは物質乱用の既往、交代勤務、過去 4 週間以内の経度移動、正常範囲外の体格指数 (BMI) 18.5-24.9kg/m²、摂食・睡眠・神経障害はなかった。過去 1 ヶ月間に重大な睡眠障害を経験した被験者の採用を避けるために、彼らはピッツバーグ睡眠品質指数 (PSQI)³⁻¹⁹⁾ アンケートに答えた。デンマークで最近行われた調査では、500 名を超える被験者の平均 PSQI は同程度であった³⁻²⁰⁾。

Table 3-2 Anthropometric data of subjects

Subject No.	Sex	Weight (kg)	Height (m)	Age (years)	BSA (m ²)	BMI (kg/m ²)	PSQI
1	Male	67.8	1.80	27	1.86	20.9	3
4	Male	67.6	1.72	28	1.79	22.9	4
9	Male	57.2	1.73	25	1.68	19.1	8
10	Male	63.2	1.81	29	1.81	19.3	4
	Males mean	64.0±4.3	1.77±0.04	27±1	1.78±0.07	20.5±1.5	5±2
2	Female	56.8	1.58	28	1.57	22.8	6
3	Female	64.0	1.68	38	1.72	22.7	5
5	Female	50.1	1.56	30	1.47	20.6	7
6	Female	59.0	1.61	22	1.61	22.8	6
7	Female	55.6	1.60	32	1.57	21.7	7
8	Female	65.8	1.69	24	1.75	23.0	4
11	Female	57.8	1.63	28	1.61	21.8	9
	Females mean	58.4±4.9	1.62±0.05	29±5	1.62±0.09	22.2±0.8	6±1
	All means	60.4±5.4	1.67±0.08	28.3±4.1	1.68±0.11	21.6±1.4	6±2

実験前日と各実験日には、カフェインやアルコールの摂取、辛い食べ物、激しい運動を控えるよう被験者に求めた。また、被験者は実験期間中、強い消臭剤、香水、強い香りのする衛生用品を避け、同様の食生活を送り、実験室への移動手段も同じものを使用するように指示された。また、実験に参加する被験者からの生体排出物質の化学的測定も行ったため、デオドラントの使用は控えた。

パジャマは、覚醒時に 23°C で熱的に中立と感じられるものを選択した。快適温度は睡眠時では各政治よりも高温であることが分かっているため、覚醒時に熱的快適性を得ることで、睡眠時の熱的快適性も確保できると仮定した。被験者は実験中、ずっと同じパジャマを着用していた。

被験者は自分の好きな時間に就寝し、朝の決まった時間に起きることは強制されなかった。これは、被験者の習慣や普段のサーカディアンリズムを維持するためである。

3.2.4 測定手法

カプセルの排気口に設置した HOBO データロガー (Onset Computer Corp., Bourne, MA, USA) により、気温と相対湿度を 30 秒ごとに連続計測・記録した。データロガーには、温度センサー (範囲: 0~50°C, 精度: ±0.21°C) と湿度センサー (範囲: 1~90%, 精度: ±2%) が内蔵されていた。

音圧レベルは騒音計 (B&K 2245, Brüel & Kjær, Corp., Nærum, DK, range: 16-141 dB(A), accuracy: ±0.1 dB(A)) で 1 秒ごとに測定し、カプセルの中央の床でマットレスに隣接して設置した。

CO₂ 濃度は、Innova 1412i Photoacoustic Multi-gas Monitor (Luma-Sence Technologies A/S, Ballerup, Denmark, range) を用いて連続的に測定した。15-15,000 ppm, 精度: 読み取り値の ±3%) で連続測定した。カプセル内の 6 ケ所をモニターした。2 ケ所はカプセルの幅方向に均一に分布するエアプレナム (チャンネル 1-2), 3 ケ所は就寝空間の長さ方向に均一に分布するエアプレナム (チャンネル 3-5), 1 ケ所はカプセルの排気ダクト内 (チャンネル 6) であった。CER の算出には、チャンネル 1, 2, 6 で測定した CO₂ 濃度を使用した。

NO₂, TVOC, PM2.5, PM10 の測定には、低価格のセンサーを使用した (Flow, Plume lab, Paris, France)。HOBO データロガーの近くに設置された。

カプセルの空気は、被験者がカプセルに入る前と睡眠時間の終わりに、排気ダクトの Tenax チューブでサンプリングされた。サンプリングされた空気の総量は 9.0L、サンプリング速度は 0.3L/min であった。テナックスチューブ上でサンプリングされた空気は、カプセル内に存在する VOC を TD-GC-MS を用いて分析した。これらの測定結果は、別途報告する。

睡眠中の被験者の中核体温 (CBT) は、非侵襲性携帯センサー (CORE, greenTEG AG Inc., スイス・チューリッヒ, 精度: $\pm 0.26^{\circ}\text{C}$) により連続監視し、1 秒ごとに記録した。センサーは医療用粘着テープで胸部に装着した。胸部、手首、大腿前部、ふくらはぎ前部、上腕部の皮膚温は、パイロボタン (DS1922L, 米国ペンシルバニア州フィラデルフィア, 範囲: $0^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$, 精度: $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$) を用いて 1 分ごとに記録した。センサーは粘着性のある医療用テープで皮膚に貼り付けた。平均皮膚温 (MST) は加重平均として算出した³⁻²¹⁾。

心拍数は、市販のチェストベルト (Suunto, Vantaa, Finland) を用いて連続的にモニターした。また、測定値は、自律神経系の副交感神経と交感神経の機能のバランスを示す HRV の指標である 50ms 以上異なる隣接する拍動間間隔の割合 (pNN50) を計算することにより、心拍変動 (HRV) を決定するために使用された³⁻²¹⁾。

睡眠の質は、手首に装着する 2 種類のウェアラブル端末 (Fitbit Charge 3 と GetFit X10 pro), 2 つのスマートリング (Motiv ring と Oura Heritage), 布団下ベルト (Beddit 3), 枕元に置くモニター (Sleepace) などの低価格な睡眠トラッカーを使用してモニタリングした。また、睡眠の質は、毎朝、Groningen Sleep Quality Scale (GSQS) で被験者により評価された。これらの測定結果は、別途報告する。

被験者は朝晩、睡眠日誌を記入した。彼らは、カプセル内の室内環境の質と眠気を評価した。また、ワーキングメモリを調べる N バックテストと 3 分間文法推論テストを実施した。これらの課題は、就寝前と起床後に隣接するチャンバー内の PC で提示され、自分のペースで行われた。これらの測定結果は、別途報告する。

3.2.5 実験手順

被験者は暴露開始前にトレーニングセッションを行い、実験プロトコル、人工気候室、カプセル、すべての睡眠日誌とタスクの内容と尺度に適応した。被験者は認知タスクを 6 回練習し、実験中に何をすべきかを知らされた。生理的測定と睡眠の質の測定は行わなかったが、実験器具は被験者に提示され、説明された。

各被験者はカプセルの中で 4 晩連続して眠った。最初の晩は適応のため、次の 3 晩は温度と IAQ (CO_2 濃度で表示) の影響を調べるために使用された。最初の夜の測定値は使用しなかった。その後の 3 晩の条件提示の順番は、被験者間でバランスをとり、同じ順番で条件を提示することによるキャリーオーバー効果やシステムバイアスを排除した。最初の晩の条件は T24M800 であった。

実験手順を Fig.3-3 に示す。最終食事は就寝時刻の 4 時間前までに済ませ、実験室には就寝時刻の 2 時間前までに到着するよう指示した (就寝時刻はウェアラブルデバイス (Fitbit) による睡眠・覚醒サイクルの記録と被験者への質問により決定した)。シャワーはパラベン、香料、着色料を含まない液体シャワーとシャンプー (Neutral, Unilever Denmark) を使用し、歯磨きは香料を含まない歯磨き粉 (Zendium

Classic, Unilever Denmark) で行い、これらの衛生用品は被験者に提供されたものであった。その後、パジャマを着用し、生理機能測定用センサーを装着し、睡眠計を取り付けた。

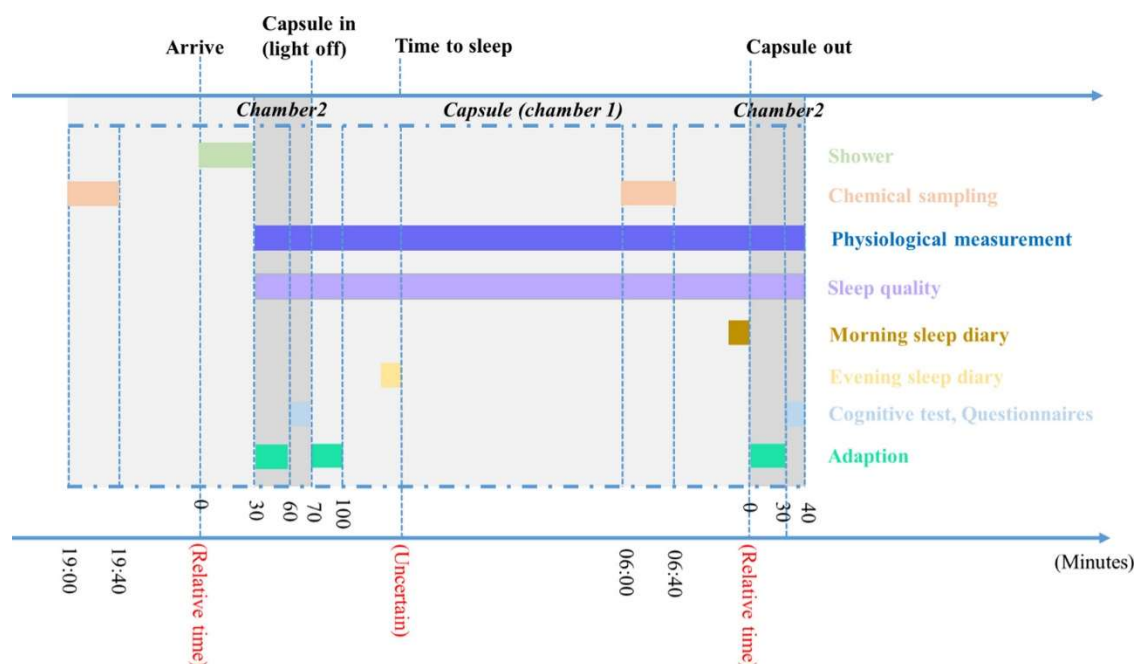


Fig. 3-3 Experimental procedure

性能テストが終わると、被験者はカプセルに入り、被験者によって内側から密閉された。その後、室内の電気は消されたが、カプセル内の小さなテーブルランプを使用することができた。約 30 分後、夜の睡眠日誌を記入し、就寝した。起床後、朝の睡眠日誌を記入し、カプセルから隣のチャンバーに移動した。カプセルの扉は外側から閉められ、カプセル内の CO₂ の減衰が観測された。被験者は隣接するチャンバーで認知タスクを実施した。その後、センサーを取り外し、被験者はパジャマから普段着に着替えた。

カプセルの扉は内側と外側の両方から密閉することができる。トレーニングでは、ドアの閉め方を指導した。また、トイレに行きたくなくなったときや不安になったときなど、必要に応じてカプセルから出ることができる」と説明された。また、一晩中、当直の実験者に連絡することも可能であったが、連絡した被験者は一人もいなかった。実験中にトイレに行った被験者は 1 名 (2 回) いたが、他にはいなかった。

3.2.6 同意事項

本実験は、国際室内環境エネルギー研究センターが実施する実験に関する倫理審査委員会の一般許可 (KA04741) に基づき承認されたものである。各被験者から口頭および書面によるインフォームドコンセントを得た。本研究は、GDPR の規定に従った。

3.2.7 換気量および CO₂ 呼出量の算出

換気量はカプセル内に被験者の有無により変化しないと仮定し、各被験者が睡眠カプセルを出た後の代謝 CO₂ 濃度の減衰率を測定し、実験セッションごとに換気量を算出した³⁻²²⁾。CO₂ の減衰率は空気変化率 (ACH) の推定に使用された。Fig.3-4 は、2 つの実験条件 (T24P800, T24P1700) における CO₂ 計測の一

例であり，CO₂の減衰率から CER と ACH を推定した時間帯が示されている．ACH はカプセル内の被験者が寝ていた部分の体積から換気量を導出するために使用した．

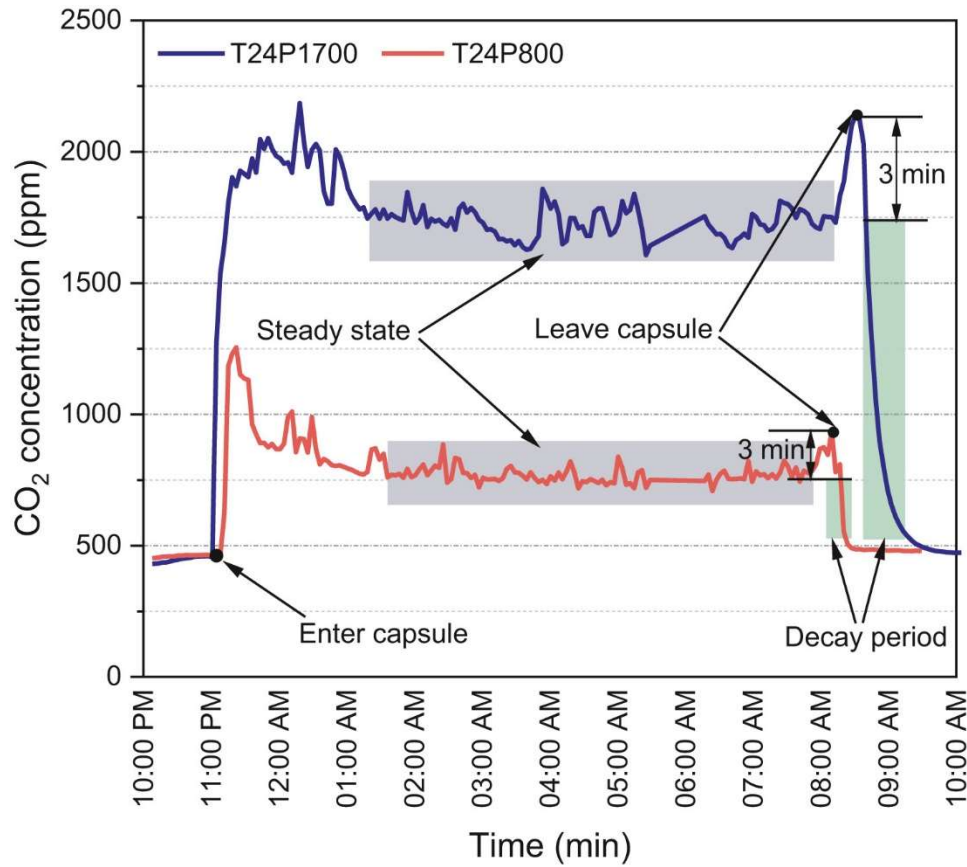


Fig. 3-4 Example of the measured CO₂ concentration.

CER は，シングルゾーン・マスバランス・モデルを用いて算出した．定常状態の CO₂ 濃度を用い (Fig.3-4)，定常状態の CO₂ 濃度を測定した日と同じ日に推定される CO₂ の減衰を用いた換気量を算出した．

3.2.8 不確実性分析

推定された CER の誤差は，ISO 規格³⁻²³⁾の不確実性解析に準じて算出した．

$$\Delta Y = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta X_i \frac{\partial f}{\partial X_i})^2} \quad (5)$$

ここで，微分項 $\Delta X_i \frac{\partial f}{\partial X_i}$ は，関連変数の変化に対する CER の感度を表す．推定された CER の誤差は，以下の変数から構成される．(1) CO₂ の減衰に基づく統計的回帰から得られた ACH 推定値の誤差（標準誤差），(2) CO₂ 測定値の誤差：Innova 装置のメーカー発表の精度に基づいて，高換気時と低換気時の CO₂ 濃度の誤差をそれぞれ 24 ppm と 51 ppm とした，(3)カプセルの推定体積の誤差：カプセルの体積は，縦，横，高さの掛け算で算出した．カプセルが狭いため，寝具の体積は補正したが，カプセル内の他の物や被験者自身の体積は補正せず，その誤差は 5% とした．

3.2.9 統計解析

データはまず Shapiro-Wilk の検定で正規性を検証した。正規分布のデータは、反復測定デザインで分散分析にかけられた。様々な条件と性別によって引き起こされる差は、ボンフェローニ検定を用いたポストホック分析で検証された。非正規分布データは、カプセル内の条件が CER に及ぼす影響を調べるために Friedman の分散分析と Wilcoxon Signed-Ranks 検定を用い、性別による影響を調べるために Mann-Whitney U 検定を適用して分析された。CER と BMI および BSA との関係は、線形回帰を適用して分析した。有意水準は $P=0.05(2\text{-tail})$ とした。

3.3 結果

3.3.1 測定結果

睡眠中にモニターしたカプセル内の環境条件を表すパラメータを Table3-1 に示す。気温と CO_2 濃度の測定値は意図したレベルに維持されていた。RH は制御されていないため、予想通り温度が上昇し、換気量が高くなると低くなった。音圧レベルは換気量が高いほど高くなり、サイレンサーが室外の換気扇からの騒音を完全に除去できていないことがわかる。睡眠中の $\text{PM}_{2.5}$ と PM_{10} の測定値は 3 条件ともほぼ同じであったが、 NO_2 は温度が高く、換気量が高いほどわずかに上昇した。TVOCs レベルは、予想通り換気量が低く、温度が高いほど上昇した。

各実験条件における換気量の計算値を Table3-3 および Fig.3-5 に示す。計算された換気量は低換気条件では比較的安定しているが、2つの高換気条件ではより大きな変動が見られた。

Table 3-3 Calculated 換気量 s and CERs and physiological measurements under the experimental conditions (mean $\pm$ SD).

Parameters	T24P800	T24P1700	T28P800	P_T	P 換気量
Ventilation rate (L/s per person)	11.2 $\pm$ 0.9	2.5 $\pm$ 0.3	11.6 $\pm$ 1.7	--	--
CO_2 emission rate (L/s per person)	11.2 $\pm$ 0.9	10.5 $\pm$ 1.7	11.4 $\pm$ 1.5	1.000	0.696
Heart rate (bpm)	62 $\pm$ 7	61 $\pm$ 6	62 $\pm$ 9	1.000	1.000
pNN ₅₀ (%)	19.5 $\pm$ 9.9	16.4 $\pm$ 13.2	28.1 $\pm$ 19.4	1.000	1.000
CBT ($^{\circ}\text{C}$)	36.7 $\pm$ 0.2	36.7 $\pm$ 0.1	36.7 $\pm$ 0.2	1.000	1.000
MST ($^{\circ}\text{C}$)	33.3 $\pm$ 1.1	33.8 $\pm$ 0.5	33.7 $\pm$ 0.4	0.213	0.155
Wrist skin temperature ($^{\circ}\text{C}$)	33.3 $\pm$ 0.6	33.2 $\pm$ 0.7	33.7 $\pm$ 0.4	0.259	1.000

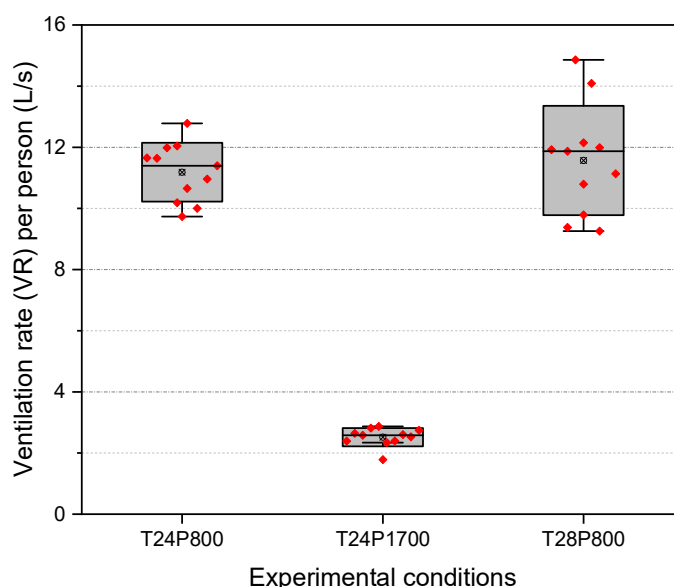


Fig. 3-5 Calculated 換気量 s at different conditions in the sleep capsule; box plots are shown.

算出された CO_2 呼出量を Table3-3, Fig.3-6 に示す. 平均 CER は 1 人当たり $11.0 \pm 1.4 \text{ L/h}$ であった. CER は, 温度を 24°C から 28°C に上げてても, CO_2 濃度を 800ppm から 1700ppm に上げて示した IAQ を下げても, 影響を受けなかった. 各被験者の詳細な CER の計算結果は, Table3-4 にまとめた.

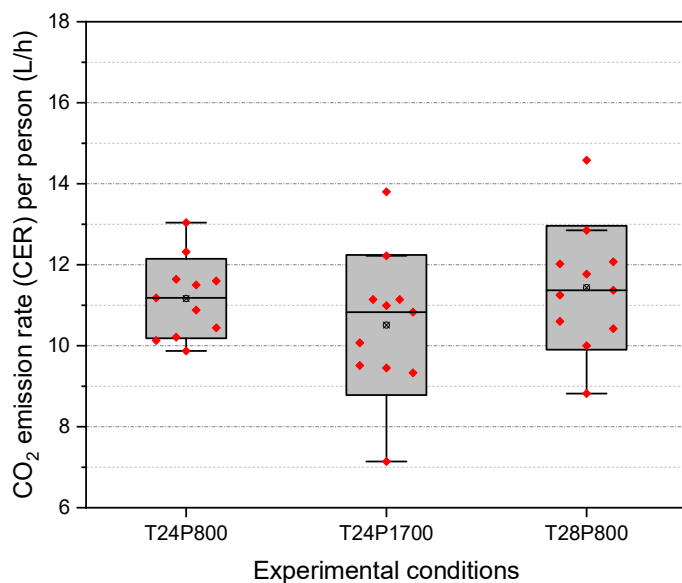


Fig. 3-6 Estimated CERs at different conditions; box plots are shown.

Table 3-4 Measured CO_2 emission rates (CERs), estimated its uncertainty and relative error for each subject at different conditions.

Conditions	Subjects No.	CERs (L/h per person)	Uncertainty (L/h per person)	Relative errors (%)
T24M800	1	10.9	0.05	0.4
	2	10.2	0.06	0.5
	3	9.9	0.05	0.5
	4	11.5	0.04	0.4
	5	10.4	0.05	0.5
	6	10.1	0.05	0.5
	7	12.3	0.06	0.4
	8	11.6	0.05	0.5
	9	11.6	0.05	0.4
	10	13.0	0.05	0.4
	11	11.2	0.05	0.4
T24M1700	1	11.0	0.03	0.2
	2	10.1	0.03	0.3
	3	9.4	0.02	0.3
	4	13.8	0.03	0.2
	5	9.5	0.03	0.3
	6	7.1	0.02	0.3
	7	11.1	0.03	0.2
	8	11.1	0.03	0.3
	9	10.8	0.03	0.3
	10	12.2	0.03	0.2
	11	9.3	0.02	0.3
T28M800	1	10.0	0.04	0.4
	2	8.8	0.05	0.5
	3	11.8	0.05	0.4
	4	11.3	0.04	0.4
	5	12.8	0.06	0.5
	6	10.6	0.05	0.5
	7	12.0	0.05	0.4
	8	14.6	0.06	0.4
	9	12.1	0.06	0.5

10	10.4	0.05	0.5
11	11.4	0.05	0.4

推定された CO₂ 呼出量の不確実性解析の結果を Fig.3-7 に示す。不確実性は常に一人当たり <0.07 L/h であった。この不確実性による相対誤差は 0.5% 以下であった (Table 3-4)。高換気量条件では低換気量条件と比較して、やや高い誤差と大きなばらつきが観測された。

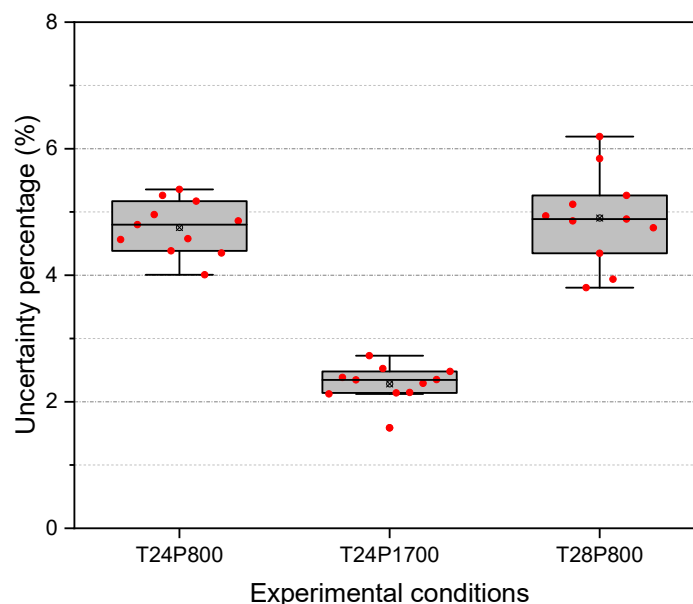


Fig. 3-7 Calculated uncertainty of estimated CERs; box plots are shown.

測定された生理学的パラメータには、異なる条件下で統計的に有意な差は見られなかった (Table3-3)。

3.3.2 睡眠中の被験者の CO₂ 呼出量推定が可能な既往研究のデータ

文献に掲載された 19 の論文が、睡眠中の被験者の CER を推定するための情報を提供している。これらは Web of Sciences による文献検索で調査した。そのうち 15 報は SEE と RQ の両方について情報を提供しているが (Table3-5)、他の 4 報は重要な情報が欠落しており、使用することができなかった (Table3-6)。

5 つの研究^{3-13, 15, 24-26)}では、被験者が普通の睡眠時に実施した。そのうち、3 件³⁻²⁴⁻²⁶⁾は健常者の SEE と睡眠段階の関係を探ったもので、1 件³⁻¹³⁾は健常者 21 名の CER を算出し、SEE と呼吸換気の関係性を明らかにしたもので、残る 1 件³⁻¹⁵⁾は重度の閉塞性睡眠時無呼吸症候群の被験者 11 名の昼間睡眠 (37-137 分) の CER を、周期呼吸時の CO₂ 恒常性維持のための呼吸間換気の補正量を測定して報告したものである。この研究³⁻¹⁵⁾での CER は他の研究よりも高い値であった。また、これら 2 件の研究^{3-13, 15)}でも、予想通り男性が女性よりも多くの CO₂ を排出することが確認された。

4 つの研究^{3-27~30)}では、被験者が普通の睡眠時に、日照時間、間食の時間、夕食の栄養価、体重の影響を調べたものである。そのうちの 1 件³⁻³⁰⁾は、15 人の健康な成人の SEE に対する日光曝露の影響を調査し、時間ごとの SEE と RQ には影響がないことを報告した。さらに、この研究では、夜勤作業のシミュレーションのデータをレトロスペクティブに分析したが、24 時間の平均 EE と RQ しか提供されなかったため、つまり、被験者が眠っていない期間も含むため、これらのデータを使用することができなかった。あ

る研究³⁻²⁷⁾では、11人の被験者が日中（午前10時）または夜間（午後11時）に選択した間食を摂取し、SEEを測定した。その結果、午後11時の間食は脂肪の酸化を有意に減少させることがわかり、この条件下では昼間の間食と比較してCERがやや高くなったことを説明する可能性がある。ある研究³⁻²⁸⁾では、睡眠中の基質酸化は夕食の微量栄養組成に影響され、その結果、睡眠中のCERは高炭水化物夕食後の方が高脂肪夕食後よりも約4%高くなることが示された。ある研究³⁻²⁹⁾では、低、中、高体重の3グループの被験者を集め、SEEは体重とともに増加することを確認した。また、この研究では³⁻²⁹⁾男性のCO₂呼出量は女性よりも約34~42%高いことが確認された。男性の高CERは、前述の他の2つの研究^{3-13,15)}でも見られた。

睡眠時間の短縮がSEEに及ぼす影響については、3つの研究において調査された。2つの研究^{3-31,32)}では、短時間睡眠時にCERが3-6%高くなることが確認されたが、3つ目の研究³⁻³³⁾では逆の結果が得られた。

睡眠の断片化は、約1時間ごとのモーニングコール、または、好みの耳にテープで固定したイヤホンを通して3秒間オン、3秒間オフに制御したトーンによって達成された。これらの干渉は、被験者がオフにするか、覚醒の脳波的証拠がある場合にのみ、反応することで消失した。これらの研究において、計算されたCERは通常睡眠時に比べて断片化睡眠時にわずかに高く、これは断片化睡眠時に活動誘発EEが上昇するためであると考えられる。断片化睡眠後の回復睡眠中のCERは、通常睡眠中のものと同様であった。

ある研究³⁻³⁵⁾では、健常者7人のSEEに対する睡眠不足の影響を調べた。CERは、通常睡眠時と睡眠遮断後の回復睡眠時で同程度であったが、断片化睡眠時に高くなった。これは、睡眠不足時のCERが、起きていて軽い活動をしている被験者と同じとみなすことができるため、合理的であると考えられる。

Table 3-5は、研究の詳細と推定CERの概要をまとめたものである。これらの発表データから、以下の結論が導き出される。(1)睡眠前の間食時間と夕食の構成はCERにわずかに影響し（5%未満）、体重は睡眠中のCERに大きく影響する（14~33%）が、昼間の光照射はCERに影響を与えない。(2)睡眠時間の長さが睡眠中のCERに及ぼす影響については、結果に一貫性は見られない。もし影響があったとしても、5%以下と小さい。(3)断片的な睡眠では、通常の睡眠と比較してCERが1-10%高くなる。(4)睡眠不足の場合、通常の睡眠と比較して、CERは30-40%高くなる。(5)男性のCERは女性よりやや高い(Fig.S1)。CERは、男性では1人当たり9.7~20.2 L/h（平均±SD 12.1 ± 0.8 L/h）、女性では1人当たり7.8~15.2 L/h（平均±SD 9.2 ± 0.4 L/h）であった。

Table 3-5 An overview of the papers providing information allowing calculation of CERs (Mean±SD) for sleeping subjects.

Ref. No.	Authors	Year	Sex	Subjects No.	Age	BMI (Kg/m ²)	BSA (m ²)	换气量 (L/s)	T (°C)	RH (%)	Conditions	CER (L/h per person)	Group
3-24)	Fontvieille et al., ¹	1994	Male	18	33±7	30.2±8.9	1.98±0.10	0.8-	25.0	N/A	Normal sleep	11.2±0.5	I
			Female	11	28±5	30.6±13.2	1.40±0.12	0.8					
3-25)	Kayaba et al., ¹	2017	Male	25	23±3	23±2	N/A	1.2	25.0±0.5	55±3	Normal sleep	11.5±0.2 ^a	
			Female	4									
3-26)	Katayose et al., ¹	2009	Male	12	23±1	23.6±1.1	1.85±0.02	1.2	25.0±0.5	55±3	Normal sleep	10.7±0.8 ^a	
3-13)	White et al., ²	1985	Male	11	47±17	24.6±3.6	1.94±0.12	N/A	20.0-22.0	N/A	Normal sleep	11.6±0.7 ^a	II
			Female	10	45±17	23.4±3.5	1.67±0.11					9.0±0.4 ^a	
3-15)	Berger et al., ²	2000	Male	8	44±8	42.7±8.8	2.30±0.17 ^c	N/A	N/A	N/A	Normal sleep - subjects with severe apnea	15.3±1.7	
			Female	3	37±8	60.4±11.3	2.41±0.38 ^c				Normal sleep - daytime snack (10 AM)	14.9±2.4	
3-27)	Hibi et al., ¹	2013	Female	11	23±1	20.6±2.6	1.56±0.04	1.2	25.0	50.0	Normal sleep - nighttime snack (11 PM)	8.7	
											Normal sleep - high carbohydrate dinner	8.9	
3-28)	Yajima et al., ¹	2014	Male	10	25±1	22.6±0.8	1.81±0.01	13	25.0±0.5	55±3	Normal sleep - high fat meal dinner	11.4±1.1	
				N/A	N/A	N/A	N/A				Normal sleep - low weight subjects	10.9±1.2	
											Normal sleep - normal weight subjects	N/A	
3-29)	Westerterp et al., ³	1991	Male	3	36±2	22.7±2.4	1.84±0.05				Normal sleep - high weight subjects	14.4±1.2 ^b	
				3	30±7	49.3±8.8	2.78±0.11	N/A	N/A	N/A	Normal sleep - low weight subjects	20.2±1.6 ^b	III
				3	36±9	15.1±0.7	1.40±0.01				Normal sleep - normal weight subjects	7.8±0.6 ^b	
			Female	3	32±7	22.1±0.8	1.76±0.04				Normal sleep - high weight subjects	10.2±0.4 ^b	
				3	22±4	46.0±1.3	2.36±0.05				Normal sleep - daytime typical room white light exposure	15.2±2.4 ^b	
											Normal sleep - daytime bright white light exposure		
3-30)	Melanson et al., ¹	2018	Male	8	23±3	22.4±2.0	1.76±0.05	N/A	N/A	22-23	Normal sleep - daytime blue-enriched white light exposure	10.6±1.0	IV
			Female	7							Short sleep (4h)	12.6±0.4	
3-31)	Klingenberg et al., ¹	2012	Male	21	17±1	21.0±1.8	1.81±0.05	N/A	N/A	N/A	Long sleep (9h)	12.3±0.3	
3-32)	Shechter et al., ¹	2013	Female	10	28±2	26.0±0.5	1.76±0.01	1.3	24.0±0.5	N/A	Short sleep (4h)	10.0±0.1	
											Long sleep (8h)	9.5±0.1	
3-33)	Hibi et al., ¹	2017	Male	9	23±2	22.2±3.0	N/A	1.2	25.0	50	Short sleep (3.5h)	9.9±0.2	IV
											Recovery sleep after short sleep (7h)	9.7±0.1	
											Long sleep (7h)	10.3±0.3	
											Recovery sleep after long sleep (7h)	9.9±0.3	
3-14)	Bonnet et al., ²	1991	Male	12	18-28	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Normal sleep (7.5)	12.4±0.5	
											Fragmented sleep (7.5)	13.6±0.4	

3-34)	Hursel et al., ¹	2011	Male	15	24±4	24.1±1.9	2.01±0.04	N/A	N/A	N/A	Recovery sleep (7.5)	12.6±0.5	
											Normal sleep (8h)	13.7±0.2	
											Fragmented sleep (8h)	13.8±0.2	
3-35)	Jung et al., ¹	2011	Male	5	22±5	22.9±2.4	N/A	N/A	22.5±0.02	N/A	Habitual sleep (8h)	12.0±0.6	
			Female	2							Sleep deprivation (0h)	15.6±0.3	V
											Recovery sleep (8h)	11.11±0.6	

i. 1 IC method; 2 Tight-fitting face mask method; 3 Using isotope ratios to calculate the CER, then converting to EE assuming an energy equivalent of 531 kJ/mol.

ii. a - Averaged value of different sleep stages; b - Using mean 24-h measured respiratory quotient of 0.85; c - Body surface area extracted from literature, others calculated by DuBois equation.

Table 3-6 An overview of the excluded papers.

Ref. No.	Authors	Year	Sex	Subjects No.	Age (y)	BMI (Kg/m ²)	BSA (m ²)	換気量 (L/s)	T (°C)	RH (%)	Conditions	EE (kcal/h)
3-36)	Zhang et al.,	2002	Female	18	35±8	29.6	7.3	N/A	23.0±0.2	N/A	Normal sleep – obese subjects	61.9±7.95
											Normal sleep – non-obese sleep	71.1±7.7
3-37)	Elbelt et al.,	2012	Male	23	46±13	36.4±9.3	N/A	40 ^a or	N/A	N/A	Normal sleep – 61 outpatient and 20 healthy subjects	73.2±16.4
			Female	58				80 ^b				
3-38)	Summer et al.,	2014	N/A	16	27±5 ^c 19±10 ^c	N/A	N/A	180	N/A	N/A	Normal sleep – healthy neonates	36.6±10.8 ^d
											Normal sleep – unhealthy neonates	45.9±3.3 ^d
3-39)	Tokuyama et al.,	2009	Male	1	N/A	25.0	2.0	70	25.0±0.5	55±3	N/A	56.4±3.7 ^e

a – for subjects whose weight > 120 Kg; b – for subjects whose weight was between 20 - 120 Kg; c – unit of day; d – data from small hood with unit of kcal/kg; e – data from Deconvolution method

3.4 考察

本実験での睡眠時の CER と、既往研究での CER または SEE と RQ を用いて算出した CER を紹介する。本研究では、被験者は閉所にて測定されたもののふつうの睡眠を行った。私たちが推定した CER は、1 人当たり 7.1~14.6L/h (Fig.3-6) であり、文献で報告されている 1 人当たり 7.8~20.2L/h (Table 3-5) とほとんど同一であった。この違いは、断片的な睡眠と睡眠不足の両方が CER に影響し、また体重の多い被験者ほど高くなることから、研究の目的によるものであると考えられる。睡眠時間や睡眠障害、日中の光照射、間食の時間、夕食の構成は CER に影響を与えないようである。本研究で得られた CER は、ASHRAE 規格 62.1, ASHRAE Handbook, ASTM D6245-1823 に示された経験式で計算された値とほぼ同じであり、2~8%の差異があった (Fig.3-8)。さらに、Fig.3-8 は、睡眠中の CER は被験者が起きていて、座ったまま軽い事務作業をしているときよりも約 31~45%低いことを示している。Fig.3-8 に示すように、それぞれの予測モデルでは想定した代謝率 (MET 値) は異なるが、同じ活動に対するものである。ASHRAE 規格 62.1 は ASHRAE Handbook を参照し、睡眠時の代謝率 $met = 0.7$ と軽作業時の代謝率 $met = 1.0$ と定義しているのに対し、ASTM D6245-18 は compendium³⁻⁴⁰⁾を参照して、睡眠時の代謝率 $met = 0.95$ と軽作業時の代謝率 $met = 1.5$ と定義している。

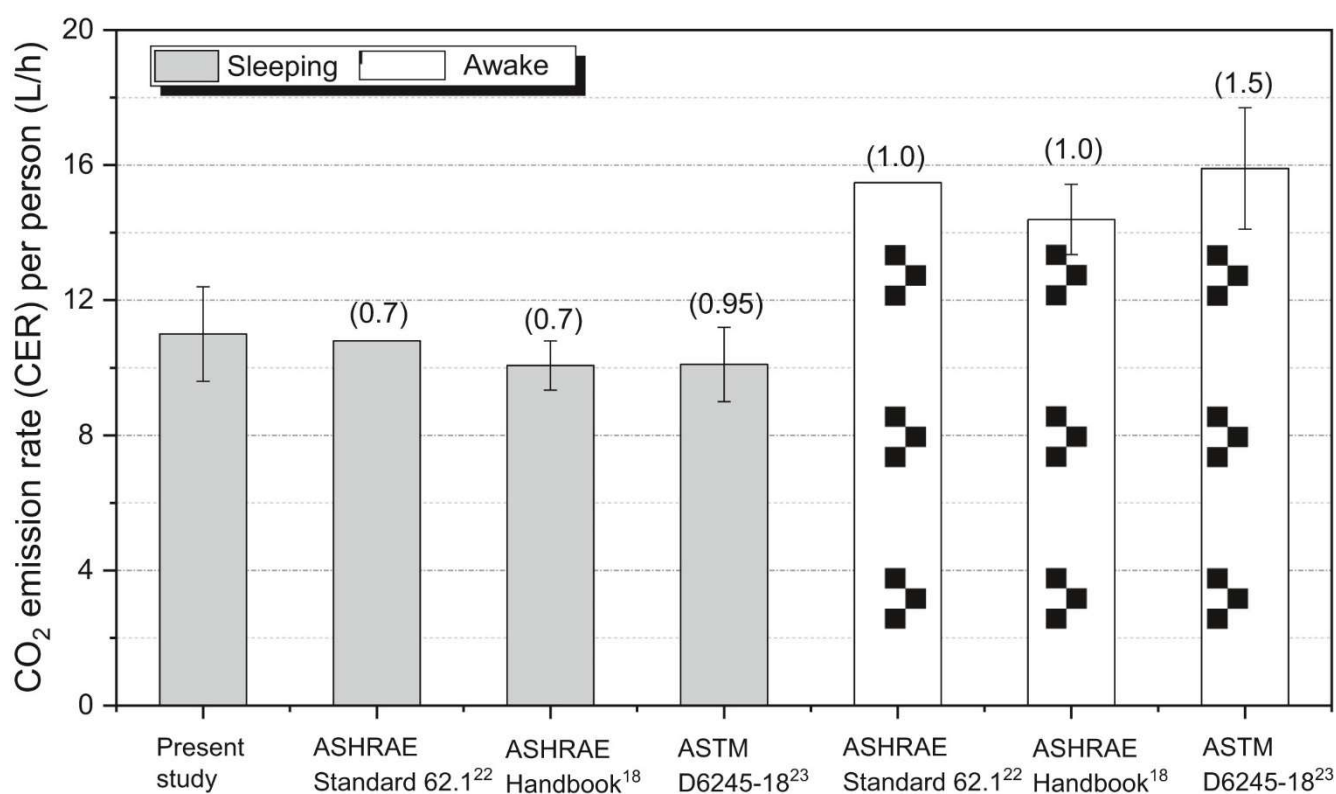


Fig. 3-8 Comparison of CERs estimated in the present experiment with CER calculated using ASHRAE 62.1 and ASTM D6245-18; (MET) represents the metabolic rate (in met) selected when calculating CERs.

本結果は、24°Cから28°Cの間の温度上昇も、800ppm から 1700ppm への CO₂ 濃度上昇で示される IAQ 低下への曝露も、CER に影響を与えないことを示している。また、生理的な測定値も異なる条件下で差はなく、CER の差異を引き起こす理由がないことを示している。これは、これまで覚醒時に確認されたことと相反する (Exp.1 を含む)。本研究では、睡眠中の被験者の呼吸パターンは条件間で変化しなかったと考えられる。覚醒中の被験者を対象とした以前の研究では、汚染された環境^{1-19,20)}や高温下³⁻⁴¹⁾での呼吸の減少が記録されている。温度や IAQ のレベルが異なる場合の睡眠中の呼吸パターンをモニターするためのさらなる研究が必要である。

本実験では、小さいながらも CER の測定値に性差が見られた。平均すると、男性で一人当たり 11.6 ± 1.0 L/h、女性で一人当たり 10.7 ± 1.5 L/h であった。Fig.3-9 より、T24M1700 の CER は女性より男性で有意に高いことがわかる。他の 2 条件では一方では男性、他方では女性で CER が高くなったが、その差に統計的有意差は確認できなかった。Westerterp ら³⁻²⁹⁾は、低体重から高体重になるにつれて SEE が増加し、CER も増加することを見出した (Table 3-5) が、本実験では男性の方が高体重だった (Table3-2)。一方、Zhang ら³⁻³⁶⁾は、BMI が高い被験者ほど SEE が高くなることを確認した。Fig.3-10 では、体表面積 (BSA) が CER に及ぼす影響を検討した。両者とも CER と正の相関があることがわかった。本研究では、男性の BSA は女性より高かったため、異なる条件下で一貫性のない結果が得られたと考えられる。しかし、今回の結果の一般化を妨げる主な理由は、CER が 11 人の被験者についてしか測定されていないことである。

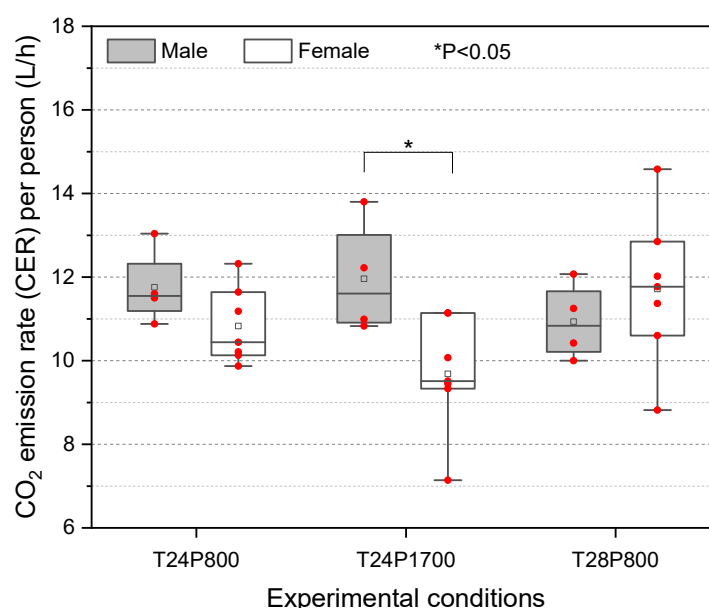


Fig. 3-9 Estimated CERs under different conditions for each sex with boxplots and individual data.

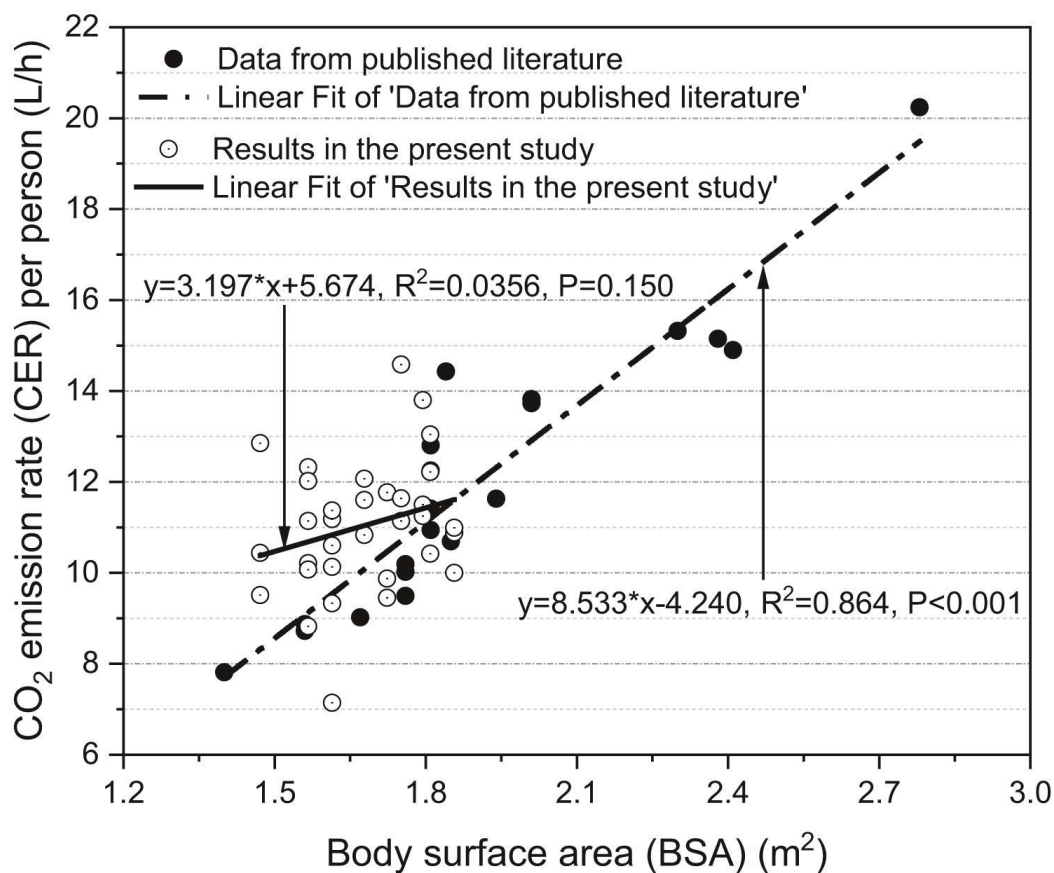


Fig. 3-10 The relationship between CERs and BSA

屋外 CO₂ 濃度を 420ppm (<https://www.co2.earth/>) と仮定し、本研究で得た CER を用いて寝室の換気量を推定した (Fig3-11)。寝室 IAQ と睡眠の質および翌日の作業パフォーマンスとの暫定的な関係³⁻³⁾で提案された CO₂ レベルを使用した：<750ppm は睡眠の質が乱れない範囲，>750ppm は睡眠の質が乱れる可能性がある範囲，>1150ppm は睡眠の質が乱れる範囲，>2600ppm は睡眠の質と翌日の作業パフォーマンスに影響を及ぼす範囲を意味する。我々の試算では，睡眠障害を避けるためには寝室の換気量は 1 人あたり 10L/s 以上必要で，1 人あたり 10L/s 未満では睡眠の質に影響する可能性があり，5L/s 未満では睡眠の質に影響し，1.5L/s 未満では睡眠の質および翌日の仕事の能力に影響することが示された。これらの推定は暫定的なものであり，今後の研究での検証が必要である。CO₂ は他の生体発生物質（主に呼気中の生物由来物質）の濃度を示すマーカーでもあるため，寝室に他の強力な汚染源がある場合はこれらの換気量は異なる可能性がある。

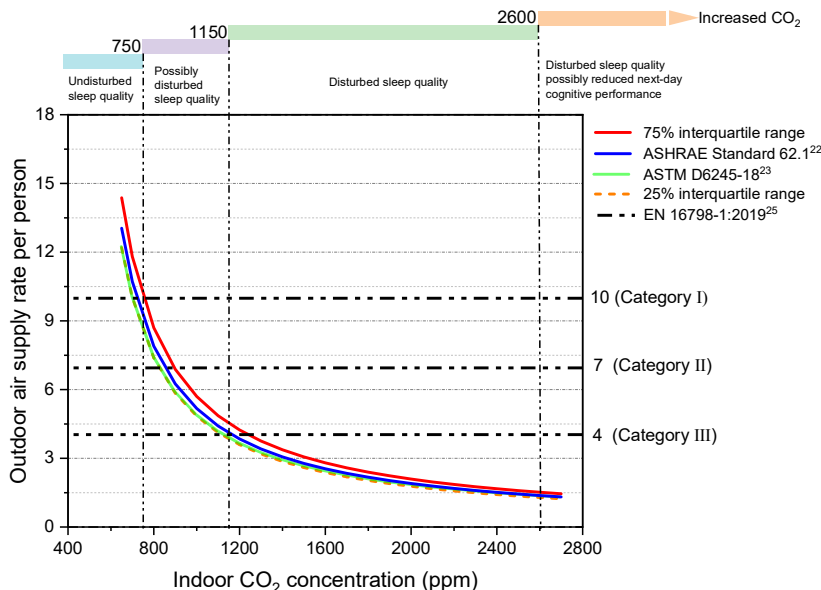


Fig.3-11 Calculated minimum required 換気量 s per person during sleep at different levels of indoor CO_2 . (1) The interquartile range of CERs measured in the present study was used (10.1-11.9 L/h per person); 換気量 s in the EN 16798-1 for bedrooms are presented as well.

寝室の換気量に関する換気基準は限られている。これらの規格は、Sekhar ら³⁻³⁾によってまとめられている。要件は、L/s, L/s.m², h⁻¹, CO₂レベル、一人当たりの L/s で換気量を定義している。Fig.3-11 に示した結果との比較を行うために、換気量を一人当たり L/s で規定している規格の要求事項を使用しました。その他の推奨値については、住居・寝室の広さ、容積、居住密度を想定する必要があるため、想定しないこととした。寝室での推奨に関しては、ノルウェーの TEK17³⁻⁴²⁾では一人当たり 7.2L/s、オーストリアの ÖNORM H 6038³⁻⁴³⁾では一人当たり 5.6L/s の換気量を推奨している。その他の 4 規格では、住居全体の換気量が 1 人当たり 4.2~10 L/s と規定されている (EN 16798-1, ÖNORM H 6038, GB/T 18883³⁻⁴⁴⁾,および日本建築基準法³⁻⁴⁵⁾)。これらの推奨事項は、Fig.3-11 によれば、睡眠の質を多少乱す結果となる。今回測定した CER は EN16798-1 で採用されている CER よりも低いいため、この 3 つの換気量では規格で規定されているよりも CO₂濃度が低くなることが考えられる。

3.5 制限事項

睡眠中のカプセル内の温度と CO₂濃度の測定値は、意図したレベルに維持された。本研究における CO₂濃度は、カプセル内で睡眠中の被験者が排出する生体発生物質の影響を主に受ける IAQ の指標としてのみ使用した。IAQ の変化は、TVOC の測定により確認された (Table 3-1)。また、換気量が多いほど、減衰曲線を用いた ACH の推定周期が短くなるため、推定換気量のばらつきが大きくなり、誤差が生じることが確認された。今後、他の給気量測定方法を用いる必要がある。また、睡眠中の被験者近傍のカプセル内の気流速は測定していないが、被験者はドラフトを訴えていない。

本研究の制限は、BMI が正常な若くて健康な人しか集められなかったことである。睡眠障害を持つ被験者や BMI の高低、その他の年齢層は含まれていないため、全人口を代表するものではない。測定は 11 名の被験者に対して行われたが、その結果は、文献に発表されている結果、あるいは報告されている SEE と RQ を用いて推定された結果のいずれとも一致するものであった。

既往研究と同様、適応のための最初の夜を設けたが、本研究では被験者がこのような狭い空間で睡眠をとったため、睡眠条件は典型的ではなかった。

11 人の被験者しか参加していないにもかかわらず、CO₂ 濃度の測定と推定 CER は、夜ごとに一貫していた。さらに、本実験では一貫して精度は高かったと言える（不確かさ < 0.07 L/h/人、誤差 < 0.5% に相当）。ACHs の推定精度が低下し、その推定に利用できる時間が短くなるため、換気量が高くなるとやや高い不確実性とばらつきが確認された。また、CO₂ 測定値のばらつきは 10% 未満と低いものであった。

今回の結果を再現し、適用範囲を広げるためには、より多くの、そして、より多様な被験者を対象としたさらなる研究が必要である。

3.6 結論

- ・ 本研究では、11 名の被験者の睡眠中の CO₂ 呼出量（CER）を測定した。平均的な CO₂ 呼出量は 1 人あたり 11.0±1.4L/h と推定され、被験者は大きな障害もなく正常に睡眠していた。これは、被験者の睡眠エネルギー消費量（SEE）および呼吸商（RQ）に関する公表データを用いて算出された値とほぼ同じであった。また、ASHRAE 規格 62.1, ASHRAE ハンドブック, ASTM D6245-18 を用いて推定した値とほぼ同等であった。
- ・ 気温を 24°C から 28°C に上げて、換気量を減らして CO₂ 濃度を 800ppm から 1700ppm に上げて、CO₂ 呼出量の測定値は変わらなかった。また、生理的な変化も観察されなかった。
- ・ 睡眠時のエネルギー消費量（SEE）に関する既往研究では、睡眠中の被験者の CO₂ 呼出量は、睡眠時間や日中の光照射に影響されないことが示されている。また、睡眠の断片化と剥奪、体重、間食の時間、夕食の栄養組成は、睡眠中の CO₂ 呼出量（CER）を変化させることが示されている。睡眠中の男性被験者からの CO₂ 呼出量が若干高いことが文献で報告されており、本研究でも確認された。
- ・ 今回の結果は、寝室の換気を設計・管理する上で有用なデータを提供するものである。この結果は、慢性的な睡眠障害を持つ被験者を含む、異なる年齢のより大きなグループを対象とすることで、適用範囲を拡大する必要がある。

【参考文献】

- 3-1) Xu, X., Lian, Z., Shen, J., Cao, T., Zhu, J., Lin, X., ... & Zhang, T. (2021). Experimental study on sleep quality affected by carbon dioxide concentration. *Indoor air*, 31(2), 440-453.
- 3-2) Strøm - Tejsen, P., Zukowska, D., Wargocki, P., & Wyon, D. P. (2016). The effects of bedroom air quality on sleep and next - day performance. *Indoor air*, 26(5), 679-686.
- 3-3) Sekhar, C., Akimoto, M., Fan, X., Bivolarova, M., Liao, C., Lan, L., & Wargocki, P. (2020). Bedroom ventilation: Review of existing evidence and current standards. *Building and Environment*, 184, 107229.
- 3-4) Xiong, J., Lan, L., Lian, Z., & De Dear, R. (2020). Associations of bedroom temperature and ventilation with sleep quality. *Science and Technology for the Built Environment*, 26(9), 1274-1284.
- 3-5) Mishra, A. K., Van Ruitenbeek, A. M., Loomans, M. G. L. C., & Kort, H. S. M. (2018). Window/door opening - mediated bedroom ventilation and its impact on sleep quality of healthy, young adults. *Indoor Air*, 28(2), 339-351.
- 3-6) Yang, L., Wang, X., Li, M., Zhou, X., Liu, S., Zhang, H., ... & Zhai, Y. (2020). Carbon dioxide generation rates of different age and gender under various activity levels. *Building and Environment*, 186, 107317.
- 3-7) Kuga, K., Ito, K., & Wargocki, P. (2021). The effects of warmth and CO₂ concentration, with and without bioeffluents, on the emission of CO₂ by occupants and physiological responses. *Indoor air*, 31(6), 2176-2187.
- 3-8) Markov D, Melikov A, Bivolarova M, Izydorczyk P. (2021) On the impact of CO₂ concentration in the inhaled air on the CO₂ emission rate by people. In: Proceedings of ROOMVENT 2020 - The 15th ROOMVENT Conference “Energy Efficient Ventilation for Healthy Future Buildings”, February 15th – 20th 2021, Torino, Paper 1326.
- 3-9) Bivolarova M, Melikov A, Izydorczyk P, Markov D. (2019) Human CO₂ generation rate: effect of room temperature and elevated background CO₂. In: Proceedings of ISIAIQ/ISES Conference in Kaunas, Lithuania.
- 3-10) Bakó-Biró, Z. S., Wargocki, P., Wyon, D. P., & Fanger, P. O. (2005). Poor indoor air quality slows down metabolic rate of office workers. *Proceedings of indoor air*, 1, 76-80.
- 3-11) Luo, M., Zhou, X., Zhu, Y., & Sundell, J. (2016). Revisiting an overlooked parameter in thermal comfort studies, the metabolic rate. *Energy and Buildings*, 118, 152-159.
- 3-12) Persily, A., & de Jonge, L. (2017). Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor air*, 27(5), 868-879.
- 3-13) White, D. P., Weil, J. V., & Zwillich, C. W. (1985). Metabolic rate and breathing during sleep. *Journal of applied physiology*, 59(2), 384-391.
- 3-14) Bonnet, M. H., Berry, R. B., & Arand, D. L. (1991). Metabolism during normal, fragmented, and recovery sleep. *Journal of Applied Physiology*, 71(3), 1112-1118.
- 3-15) Berger, K. I., Ayappa, I., Sorkin, I. B., Norman, R. G., Rapoport, D. M., & Goldring, R. M. (2000). CO₂ homeostasis during periodic breathing in obstructive sleep apnea. *Journal of applied physiology*, 88(1), 257-264.
- 3-16) Albrechtsen, O. (1988). Twin climatic chambers to study sick and healthy buildings. In *Proceedings of Healthy Buildings* (Vol. 88, pp. 25-30).

- 3-17) EN, C. S. (2019). 16798-1. Energy performance of buildings—Ventilation for buildings—Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality. Thermal Environment, Lighting and Acoustics-Module M1-6.(16798-1).
- 3-18) Canha, N., Teixeira, C., Figueira, M., & Correia, C. (2021). How is indoor air quality during sleep? A review of field studies. *Atmosphere*, 12(1), 110.
- 3-19) Buysse, D. J., Reynolds III, C. F., Monk, T. H., Berman, S. R., & Kupfer, D. J. (1989). The Pittsburgh Sleep Quality Index: a new instrument for psychiatric practice and research. *Psychiatry research*, 28(2), 193-213.
- 3-20) Liao, C., Akimoto, M., Bivolarova, M. P., Sekhar, C., Laverge, J., Fan, X., ... & Wargocki, P. (2021). A survey of bedroom ventilation types and the subjective sleep quality associated with them in Danish housing. *Science of The Total Environment*, 798, 149209.
- 3-21) Fan, X., Liu, W., & Wargocki, P. (2019). Physiological and psychological reactions of sub - tropically acclimatized subjects exposed to different indoor temperatures at a relative humidity of 70%. *Indoor Air*, 29(2), 215-230.
- 3-22) ISO 12569. Thermal Performance of Buildings and Materials – Determination of Specific Airflow Rate in Buildings – Tracer Gas Dilution Method (3rd ed.). Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 2017.
- 3-23) Guide, I. S. O. (2009). General requirements for the competence of reference material producers. ISO: Geneva, Switzerland.
- 3-24) Fontvieille, A. M., Rising, R., Spraul, M., Larson, D. E., & Ravussin, E. (1994). Relationship between sleep stages and metabolic rate in humans. *American Journal of Physiology-Endocrinology And Metabolism*, 267(5), E732-E737.
- 3-25) Kayaba, M., Park, I., Iwayama, K., Seya, Y., Ogata, H., Yajima, K., ... & Tokuyama, K. (2017). Energy metabolism differs between sleep stages and begins to increase prior to awakening. *Metabolism*, 69, 14-23.
- 3-26) Katayose, Y., Tasaki, M., Ogata, H., Nakata, Y., Tokuyama, K., & Satoh, M. (2009). Metabolic rate and fuel utilization during sleep assessed by whole-body indirect calorimetry. *Metabolism*, 58(7), 920-926.
- 3-27) Hibi, M., Masumoto, A., Naito, Y., Kiuchi, K., Yoshimoto, Y., Matsumoto, M., ... & Ikemoto, S. (2013). Nighttime snacking reduces whole body fat oxidation and increases LDL cholesterol in healthy young women. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 304(2), R94-R101.
- 3-28) Yajima, K., Seya, T., Iwayama, K., Hibi, M., Hari, S., Nakashima, Y. U., ... & TOKUYAMA, K. (2014). Effects of nutrient composition of dinner on sleep architecture and energy metabolism during sleep. *Journal of nutritional science and vitaminology*, 60(2), 114-121.
- 3-29) Westerterp, K. R., Meijer, G. A., Saris, W. H. M., Soeters, P. B., Winants, Y. V. O. N. N. E., & ten Hoor, F. O. P. P. E. (1991). Physical activity and sleeping metabolic rate. *Med Sci Sports Exerc*, 23(2), 166-70.
- 3-30) Melanson, E. L., Ritchie, H. K., Dear, T. B., Catenacci, V., Shea, K., Connick, E., ... & Wright Jr, K. P. (2018). Daytime bright light exposure, metabolism, and individual differences in wake and sleep energy expenditure during circadian entrainment and misalignment. *Neurobiology of sleep and circadian rhythms*, 4, 49-56.

- 3-31) Klingenberg, L., Chaput, J. P., Holmbäck, U., Jennum, P., Astrup, A., & Sjödén, A. (2012). Sleep restriction is not associated with a positive energy balance in adolescent boys. *The American journal of clinical nutrition*, 96(2), 240-248.
- 3-32) Shechter, A., Rising, R., Albu, J. B., & St-Onge, M. P. (2013). Experimental sleep curtailment causes wake-dependent increases in 24-h energy expenditure as measured by whole-room indirect calorimetry. *The American journal of clinical nutrition*, 98(6), 1433-1439.
- 3-33) Hibi, M., Kubota, C., Mizuno, T., Aritake, S., Mitsui, Y., Katashima, M., & Uchida, S. (2017). Effect of shortened sleep on energy expenditure, core body temperature, and appetite: a human randomised crossover trial. *Scientific reports*, 7(1), 1-11.
- 3-34) Hursel, R., Rutters, F., Gonnissen, H. K., Martens, E. A., & Westerterp-Plantenga, M. S. (2011). Effects of sleep fragmentation in healthy men on energy expenditure, substrate oxidation, physical activity, and exhaustion measured over 48 h in a respiratory chamber-. *The American journal of clinical nutrition*, 94(3), 804-808.
- 3-35) Jung, C. M., Melanson, E. L., Frydendall, E. J., Perreault, L., Eckel, R. H., & Wright, K. P. (2011). Energy expenditure during sleep, sleep deprivation and sleep following sleep deprivation in adult humans. *The Journal of physiology*, 589(1), 235-244.
- 3-36) Zhang, K. et al. Sleeping metabolic rate in relation to body mass index and body composition. *Int. J. Obes.* 26, 376–383 (2002).
- 3-37) Elbelt, U., Schuetz, T. & Lochs, H. Estimating Resting Energy Expenditure With a Portable Armband Device in an Ambulatory Setting. *Nutr. Clin. Pract.* 27, 825–831 (2012).
- 3-38) Summer, S. S., Pratt, J. M., Koch, E. A. & Anderson, J. B. Testing a novel method for measuring sleeping metabolic rate in neonates. *Respir. Care* 59, 1095–1100 (2014).
- 3-39) Tokuyama, K., Ogata, H., Katayose, Y. & Satoh, M. Algorithm for transient response of whole body indirect calorimeter: Deconvolution with a regularization parameter. *J. Appl. Physiol.* 106, 640–650 (2009).
- 3-40) Ainsworth, B. E., Haskell, W. L., Herrmann, S. D., Meckes, N., Bassett, D. R., Tudor-Locke, C., ... & Leon, A. S. (2011). 2011 Compendium of Physical Activities: a second update of codes and MET values. *Med Sci Sports Exerc*, 43(8), 1575-1581.
- 3-41) Donaldson, G. C., Seemungal, T., Jeffries, D. J., & Wedzicha, J. A. (1999). Effect of temperature on lung function and symptoms in chronic obstructive pulmonary disease. *European respiratory journal*, 13(4), 844-849.
- 3-42) TEK17, D. I. B. K. (2017). Regulations on technical requirements for construction works. Norwegian Building Authority.
- 3-43) ÖNORM, H. (2014). 6038. Ventilation and Air Conditioning Plants–Controlled Ventilation Including Heat Recovery–Planning, Installation, Operation and Maintenance.
- 3-44) GB/T 18883–2002 No Title Indoor Air Quality Standard, State Bureau of Quality and Technical Supervision, Ministry of Environmental Protection of the People’s Republic of China, Ministry of Health of the People’s Republic of China, (in Chinese). 2002.
- 3-45) Building Standards Law. Act No. 201 of 1950, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (1950) (Latest Amendment in 2019). (in Japanese).

第4章 異なる温度、換気量、Pure CO₂濃度条件下でのCO₂呼出量の測定 (Exp.3)

4.1 序

前述の通り、前章の被験者実験 (Exp.1,2) を含め、室内環境条件によるCO₂呼出量への影響が報告されている。中でも、温度条件、換気量条件、純粋なCO₂による呼出量への影響が示唆されているが、その効果を示すデータは極めて少ない。既往研究での報告については第1章 (Table 1-1,2) で述べた通りであるため (温度条件、換気量条件については第2, 3章についても参照)、本章では既往研究についての紹介は割愛する。本章では、温度条件、換気量、純粋なCO₂による在室者のCO₂呼出量への影響を調査した被験者実験について報告する。

4.2 実験方法

4.2.1 実験条件

本実験は体積 1.7 m³ (1.4 × 0.75 × 1.62 m) の小型気候室で行った (Fig.4-1)。この気候室は Bivolarova¹⁻⁴⁶⁾ が以前に使用したものと同一である。チャンバー内は天井のプレナムから供給される外気により換気された。空気はチャンバーの天井を形成する有孔パネルから均一に入り、天井全体から層流の下降ピストンフローが形成された。給気口が 1.4m×0.75m と大きいため、給気速度は 0.2m/s 以下と非常に低速であった。排気は床から 10cm の高さにある開口部から行い、排気ファンに接続されたダクトからチャンバー内の空気を排出した。排気ファンの設定流量は、給気ファンの設定流量と同じであった。外気の給排気量は、電子式マノメーターを備えたオリフィスで測定した。供給空気は必要な温度に調整され、チャンバー内は小型の卓上ファンで空気の混合を促進した。混合用ファンは、風速をできるだけ低く保つために最低回転数で運転した (未測定)。

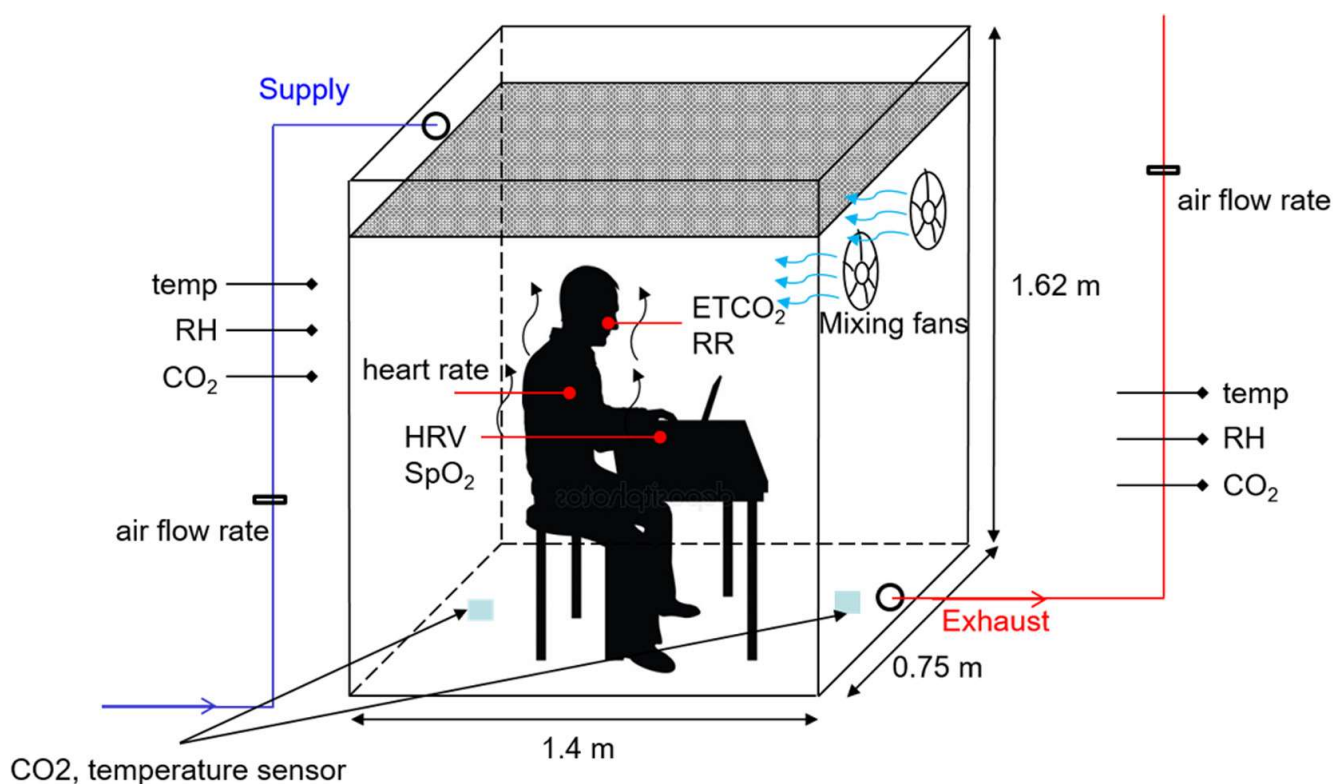


Fig.4-1 Schematic of the climate chamber and experimental setup

男性ボランティア 6 名（アジア人 4 名，ヨーロッパ人 2 名）を募集した．彼らの人口統計学的データを Table 4-1 に示す．

Table 4-1. Demographic data of participants

Volunteer	Origin	Age (yr)	Height (m)	Weight (kg)	BSA* (m ²)	BMI** (kg/m ²)
1	Asian	26	1.67	61	1.68	21.9
2	Asian	25	1.66	56	1.61	20.3
3	Asian	35	1.77	59	1.73	18.8
4	Asian	23	1.75	68	1.82	22.2
5	European	56	1.87	94	2.19	26.9
6	European	30	1.78	78	1.95	24.6

*BSA = body surface area (m²)

**BMI = body mass index (kg/m²)

気候室には 5 種の曝露条件が設定された (Table 4-2)．M800 と呼ばれる 1 つの条件では，被験者によって代謝反応により生成される CO₂ 濃度が 800ppm となるように，気候室の換気量を設定した．MP1400，MP3000 と名付けた 2 つの条件では，換気量は M800 と同じで，CO₂ 濃度が 1400ppm，3000ppm になるようにボンベから純粋な CO₂ ガスを供給することで，被験者から発生するその他の生体発生物質の濃度を M800 と同レベルに維持した．さらに，M1400 と呼ばれる条件では，換気量を 47.5 から 19 m³/h に減らすことで (Table 4-2)，被験者によって代謝反応により発生する CO₂ が 1400 ppm に増加すると予想される．なお，この条件では，他の生体流体の濃度も上昇する．この条件は，給気温度 23°C (M1400)，28°C (M1400W) の 2 条件で成立した．それ以外の条件では，23°C であった (Table 4-2)．

Table 4-2. Planned conditions for different exposures

Condition	Outdoor air supply rate to the chamber (m ³ /h)	Air change rate (h ⁻¹)	Pure CO ₂ dosed from cylinders (l/min)	CO ₂ level in the chamber (outdoor level at 400 ppm)	Temperature in the chamber (°C)
M800	47.5	27.9	-	800	23
M1400	19	11.1	-	1400	23
M1400W	19	11.1	-	1400	28
MP1400	47.5	27.9	0.475	1400	23
MP3000	47.5	27.9	1.74	3000	23

MP1400，MP3000，M1400，M800 では，雰囲気 CO₂ 濃度（生体発生物質の有無）が被験者の CO₂ 呼出量に与える影響を調べた．条件 M1400 と M1400W では，温度上昇による熱的不快感による CO₂ 呼出量への影響を調べた．5 つの条件すべてにおいて，被験者は 1.0 clo と推定される保温性のある同様の衣類を着用した．Fig.4-2 に 5 つの条件の効果を比較した概要を示す．

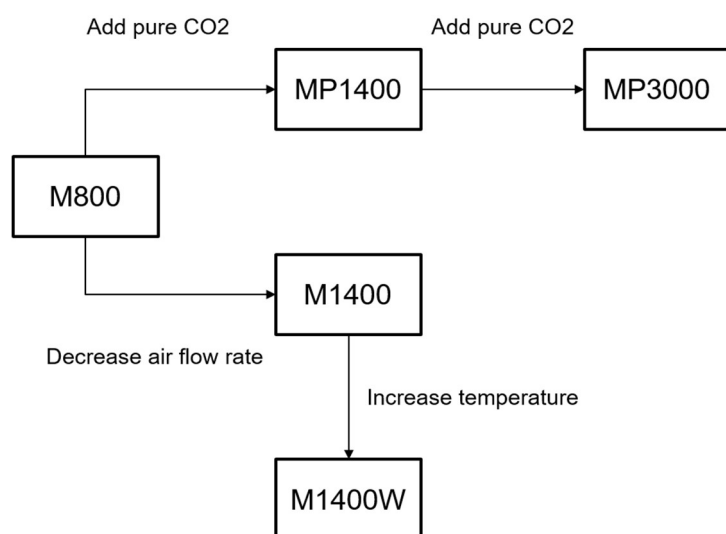


Fig. 4-2 The five exposure conditions

各実験中、小型チャンバー内の CO_2 、温度、相対湿度 (RH) を測定した。 CO_2 濃度は INNOVA 1302 モニターで $\pm 2\%$ の精度で、Vaisala センサーは Hobo ロガーに接続し、チャンバー内の温度と相対湿度 (RH) を温度： $\pm 0.35^\circ\text{C}$ 、RH： $\pm 2.5\%$ の精度で測定した。すべての機器は実験直前に校正した。暴露は午前中の 9 時から 12 時、または午後の 13 時から 16 時に実施した。

心拍数、終末期 CO_2 濃度 (ETCO_2)、呼吸数、こめかみの皮膚温度、血中酸素飽和度 (SpO_2)、心拍変動 (HRV) を測定した。心拍数は、被験者が装着したスントのスマートベルトで連続的に測定した。皮膚温度は iButtonsTM を用いて連続的に測定した。 ETCO_2 、 SpO_2 、呼吸数は MedAir AB の Lifesense Monitor を使用して同時に測定した。 ETCO_2 の測定範囲は $0 \sim 9.9\text{kPa}$ で、精度は製造元の仕様により $\pm 0.2\text{kPa} + 6\%$ であった。 SpO_2 の測定可能範囲は $0 \sim 100\%$ で、精度は $\pm 2\%$ であった。呼吸数と ETCO_2 は、各被験者の鼻孔から採取した空気中の CO_2 濃度、すなわち吸気と呼気の濃度を連続的にモニターすることにより推定した。HRV は、被験者の指に赤外線センサーを装着し、末梢血液循環の変化をモニターすることで測定した。HRV の時間領域での指標は、拍動間隔が 50ms 以上異なる割合 (pNN50) で決定された。pNN50 の値は、心臓の副交感神経調節を反映し、ストレスの影響を受けると考えられる。pNN50 の値が低いほど、ストレスレベルが高いことを意味する。pNN50 は、隣接する R 波のピーク間隔 (RR 間隔) が 50ms 以上異なる割合を示し、心拍変動の指標の 1 種である。

給気・排気中の CO_2 濃度の測定は、被験者からの CO_2 呼出量を推定するために使用した。

ガスボンベから CO_2 を添加しない条件 (M800, M1400, M1400W) では、 CO_2 濃度が定常状態に達した後の平均 CO_2 濃度から Exp.1,2 と同様の式を用いて呼出量を算出した。一方で、MP1400, MP3000 では、ガスボンベから天井のパンチングパネル上部のドージングスペースに CO_2 を添加したため、Eq.4.1 を使用した。

$$G = Q(C_{\text{pure+met}} - C_{\text{pure}}), \quad (4.1)$$

ここで、 $C_{\text{pure+met}}$ はボンベから供給された純粋な CO_2 と被験者が呼出した代謝生成 CO_2 からなる CO_2 濃

度, C_{pure} は純粋な CO_2 の海が寄与する CO_2 濃度で, 被験者がチャンバーから退出して数分後に到達した室内 CO_2 濃度から算出した。

また, CO_2 濃度の測定は, チャンバー内の換気量の算出にも使用された。そのため, 被験者退室後の CO_2 濃度を測定し減衰曲線を得た。このようにして推定された換気回数は, オリフィスと電子マノメーターを用いて測定された換気回数と比較された。

4.2.2 統計分析

測定したパラメータに対する雰囲気 CO_2 濃度と温度の影響を評価するために分散分析 (ANOVA) を使用した。統計分析は, この目的のために開発した Visual Basic for Application コードを用いて, Microsoft Office Excel ソフトウェア (2016 バージョン) を用いて実施した。有意水準は $p = 0.05$ (2-Tail) とした。

4.3 結果

Fig.4-3 は, M1400 における 6 名全員の室内 CO_2 濃度の時系列変化である。この条件では, 実験開始から約 10 分後, すなわち各被験者がチャンバーに入った瞬間からチャンバー内の CO_2 濃度は定常状態に達した。各実験は, 被験者がチャンバーに入った直後から開始された。Fig.4-3 は, CO_2 呼出量の個人差による定常状態の CO_2 濃度レベルの違いを示している。 CO_2 呼出量の個人差は, 60 分間 (t =実験開始から 90~150 分) の時間平均値として定常状態の CO_2 濃度を算出した。150 分後に被験者を退室させ, CO_2 濃度の減衰曲線から換気回数を算出した。

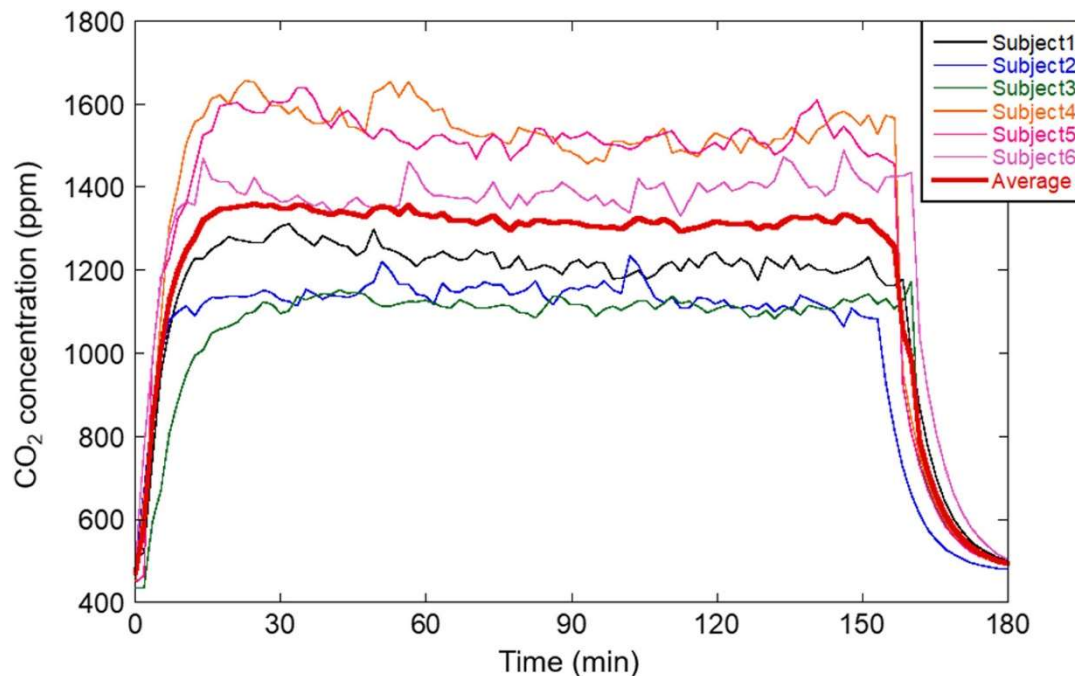


Fig. 4-3 An example of the evolution of CO_2 concentration in the chamber at condition M1400

Fig.4-4 は, 各実験条件における CO_2 呼出量の推定値を示したものである。基準となる M800 条件と比較すると, 雰囲気 CO_2 濃度が高い場合の CO_2 呼出量は, わずかではあるが有意に減少していることがわかる。M800 と M1400, M800 と MP3000 の間では, CO_2 呼出量に有意な差 ($p < 0.05$) が確認できた。M800 と

MP1400 の間の差は、有意に近づいた ($p = 0.068$)。室温を 23°C から 28°C に上げると、CO₂ 呼出量は有意に増加した ($p < 0.05$)。

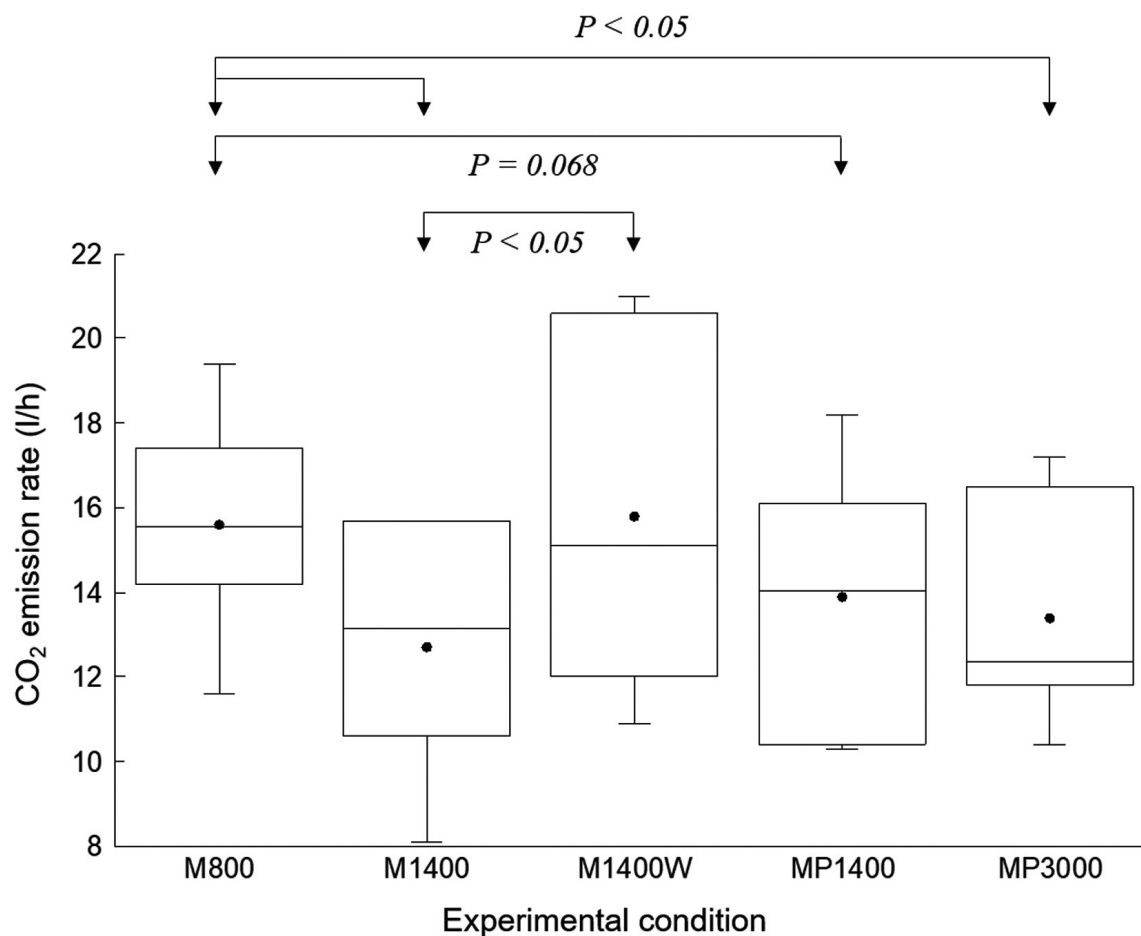


Fig. 4-4 Calculated CO₂ emission rates under the five experimental conditions

Fig.4-5 は、各実験条件下での平均 ETCO₂ である。純粋な CO₂ ガスの添加によりチャンバー内の CO₂ 濃度が上昇すると、ETCO₂ が上昇することが確認された。M1400 と MP1400 の間、M1400 と MP3000 の間で有意に増加した ($p < 0.05$)。M800 と MP3000 の間の差は有意に近づいた ($p = 0.054$)。M1400 と M1400W の間では ETCO₂ に有意な差はなく、すなわち ETCO₂ に対する気温の影響は確認できなかった。また、換気を制限して CO₂ 濃度を上昇させた場合 (M800 vs. M1400)、つまりチャンバー内の生体発生物質レベルが上昇した場合にも差はなく、ボンベから添加することで人工的に CO₂ 濃度を上昇させた場合のみ、ETCO₂ が上昇した。

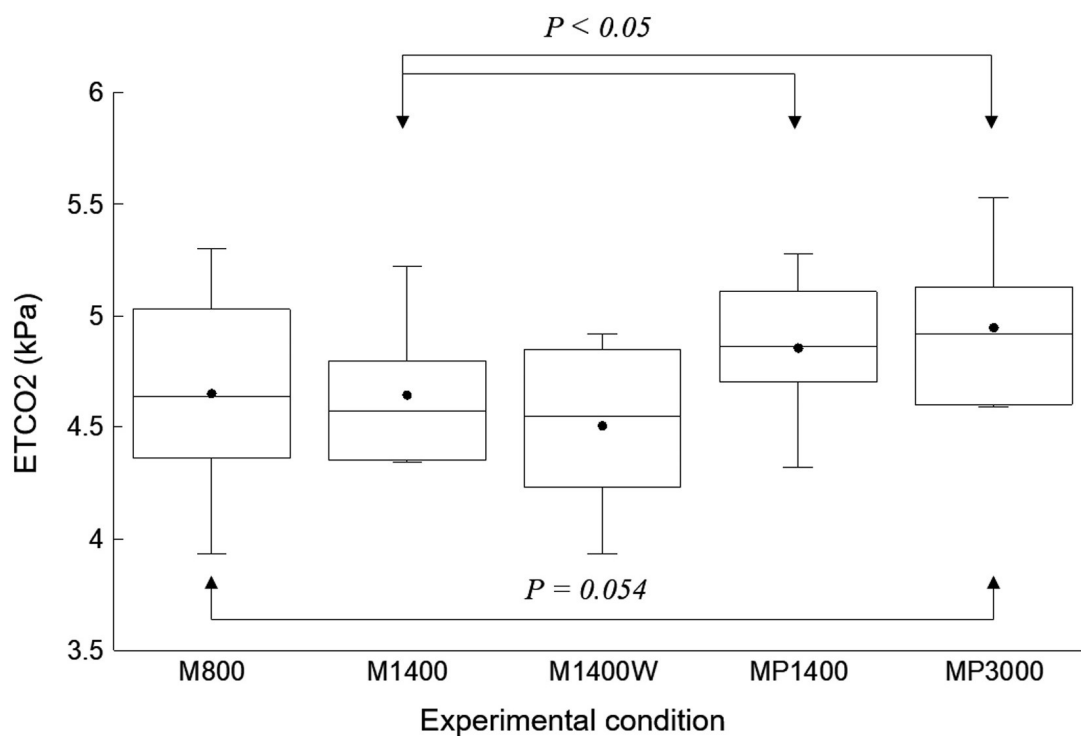


Fig. 4-5 ETCO₂ under the five experimental conditions

Fig.4-6 は、各実験条件における心拍数の結果を示したものである。M800 と M1400W 間、M1400W と MP1400 間で有意差 ($p < 0.05$) が見られたが、M800 と M1400 間、M1400 と MP1400 間では有意差は確認できなかった。これらの結果は、(予想されるように) HR に温度の影響があったことを示唆している。しかし、M1400 と M1400 W の間には有意差がなかったことから、生体発生物質の HR への影響は完全に否定できない。M1400 W と MP1400 間には有意差があったことから、CO₂ 増加による HR への影響はなかったと結論づけることができる。

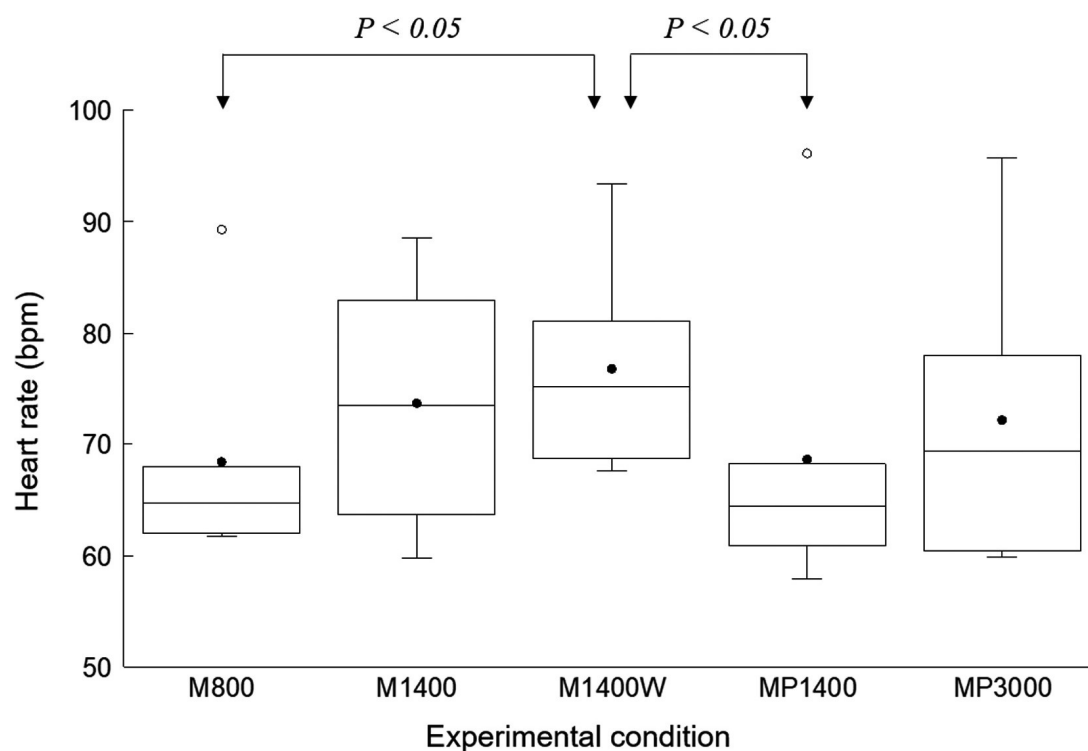


Fig.4-6 Heart rate under the five experimental conditions

Fig.4-7 は、各実験条件下での呼吸数（呼吸／分）を示したものである。このようにして測定した呼吸数には、条件間で有意な差は見られなかった。CO₂呼出量が条件によって変化したことから、測定していないが呼吸量（リットル／分）も条件によって異なっている可能性があるかと推察される。

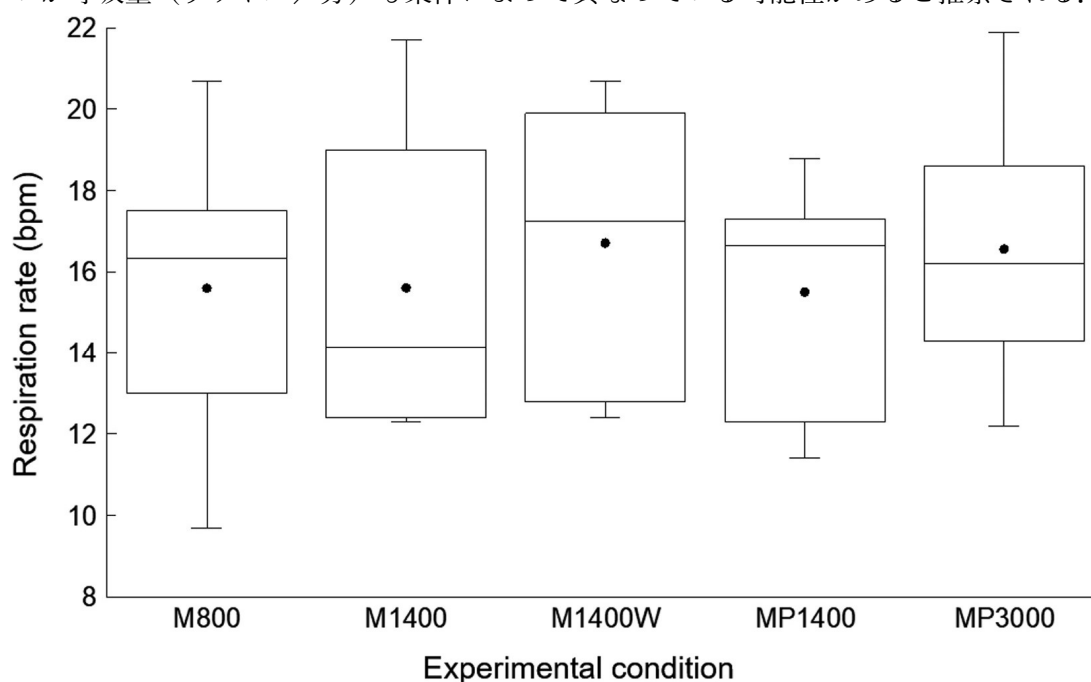


Fig.4-7 Respiration rate in breaths/min under the five experimental conditions

Fig.4-8 は、HRV（Heart Rate Variability）に関して、条件による差はないことを示している。M1400W の

条件では、熱的不快感によって何らかのストレスが生じたと考えられるように、pNN50 値は低かったが、他の実験条件で測定した値と大きな差はなかった。

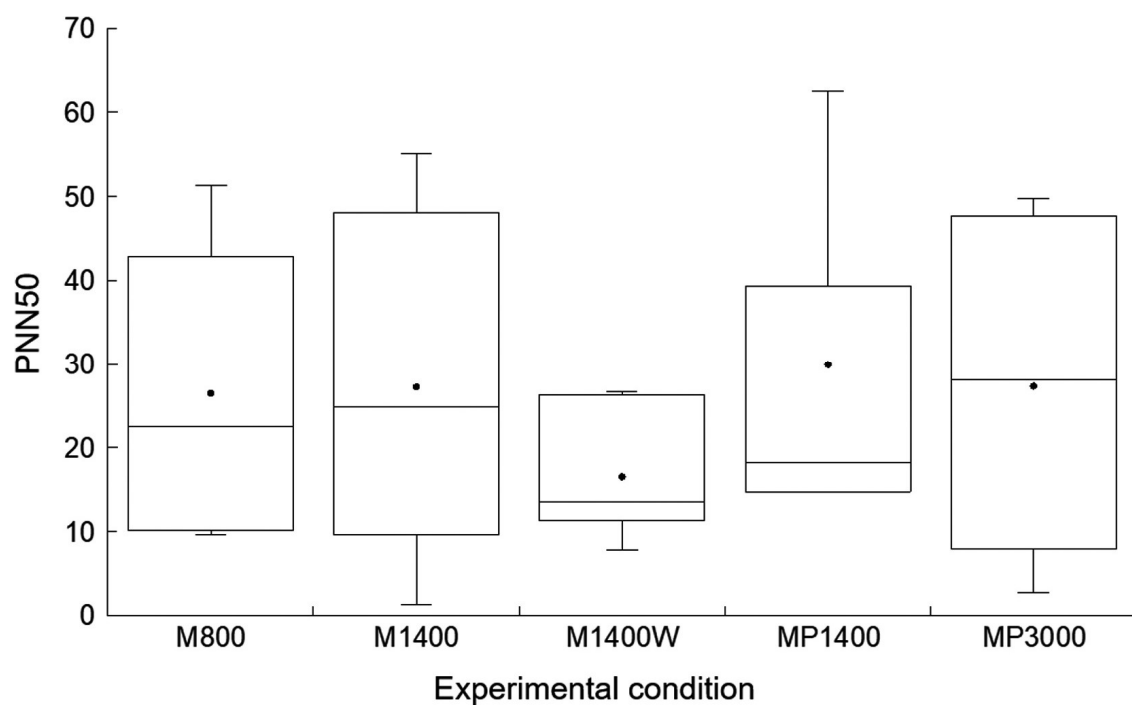


Fig.4-8 Heart rate variability (pNN50) under the five experimental conditions

Fig.4-9 は、各実験条件下で測定したこめかみの皮膚温度である。M1400W では、他のどの条件よりも有意に高かったが ($p < 0.05$)、その他の条件では有意差はなかった。

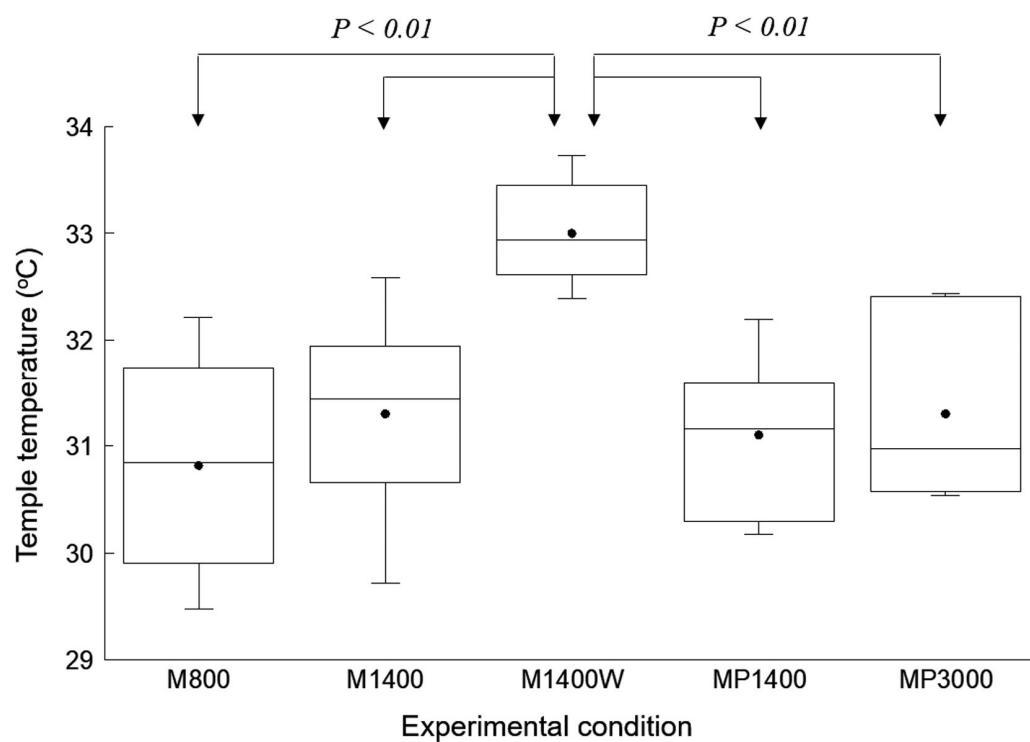


Fig.4-9 Skin temperature at the temple under the five experimental conditions

4.4 考察

本研究では、居住者による CO₂ 呼出量は、居住者の活動だけでなく、気温や大気汚染などの環境要因、具体的には CO₂ などの生体発生物質濃度にも影響されることを確認した。これらは、呼吸による CO₂ 呼出を減少させたり、増加させたりする生理的反応を引き起こす。室温がわずかに上昇し、熱的不快感が生じると呼出量は増加し、CO₂ 濃度が上昇すると呼出量は減少する。本研究に参加した被験者はわずか 6 名であったため、これらの CO₂ 呼出量変化の大きさを確実に判断することはできないが、被験者間のかかなりのばらつきにもかかわらず、これらの効果は $p < 0.05$ で統計的に有意となるか、この有意レベルに極めて近い ($p < 0.06$) ため、非ランダムと考えるべきであることを強調する必要がある。観察された効果の大きさを決定し一般化するため、また、今回の知見を測定された CO₂ 濃度から換気量を決定したり、CO₂ を入力変数として換気量を制御するために使用したりする前に、これらの結論を検証するために、より大きなグループを用いた同様の研究が必要である。やはり、雰囲気 CO₂ 濃度や温度による増加よりも、CO₂ 呼出量に影響を与えると考えられる活動、年齢、食物摂取量などによる変化の方が重要である可能性もある。これが事実かどうかを判断するためには、さらなる研究が必要である。

気温をわずかに上げると、CO₂ 生成率は上昇した。また、心拍数も増加し (Fig.4-6)、代謝活動が活発になったことが示唆された。この 2 つの温度それぞれにおける代謝量を従来の仮定で推定したところ、28°C では 92W/m² (1.57met)、23°C では 66W/m² (1.13met) であることが判明した。したがって、気温を上げると、軽い座り仕事から中程度の仕事へと活動量を増やすのと同じくらい代謝量が増加することがわかった。この結果は、建物の居住者が暖かいまたは涼しいと感じるとき、これらの感覚は代謝に影響を与え、熱的中立で観察される場合と比較して CO₂ 呼出量が増加することを報告した Luo らの報告や Exp.1 の結果と一致する。本研究では、こめかみの皮膚温度 (Fig.4-9) は、被験者が暖かいと感じた根拠となる。さらに、M1400W では HRV が最も低く (Fig.4-8)、有意差は確認できないものの、温度上昇によりストレスが高くなったことと整合する。

また、温度上昇時に CO₂ の呼出量が多いことは、生体発生物質の発生量が多いことを示す可能性がある。しかし、現在の換気規格では、27°C を超える温度では換気量を増加させなければならないというオーストラリアの規格⁴⁻¹⁾を除いて、高温での換気量を増加させることは規定されていない。高温で熱中性が達成されれば、CO₂ 呼出量は変化しないので換気量を増やす必要はないはずだが、これは実験的に確認する必要がある。26°C ~ 27°C より高い温度では、熱的中性を維持することが困難な場合がある。この場合、温度上昇の影響を軽減するための生理的な反応が始まる。熱的快適性モデルによると、高温でも心理的・行動的適応によって熱的快適性を得ることができる。行動適応では、衣服の保温性を下げたり、活動量を減らしたり、何らかの方法で空気の動きを活発にするなどして、さらなる冷却を促す。活動レベルを下げると、代謝率が下がり、CO₂ 呼出量も下がりますが、作業量にも影響する⁴⁻²⁾。心理的適応の影響を今後の実験で調査し、CO₂ に基づく換気量への影響を判断する必要がある。

汚染度が高いときに居住者の CO₂ 呼出量が低ければ、CO₂ を用いた換気制御に影響が出る可能性がある。つまり、CO₂ 濃度と他の汚染物質の濃度との間の単純な線形関係が保たれず、生体発生物質濃度が上昇すると、CO₂ 呼出量の減少を調整するために換気量を増やさなければならない可能性が示唆される。また、CO₂ 呼出量の増加は、観測された CO₂ レベルから実際の外気供給量を推定する際にも影響を与える可能性がある。多くの現地調査を行う研究において、換気量を測定することは不可能である。そのため、

CO₂呼出量が変化しないと仮定して、測定した CO₂ 濃度から推定する手法が一般的である。しかし、今回の結果は、この仮定が妥当でない可能性を示唆しており、特に測定された CO₂ 濃度が高い場合、多くの報告で推定された換気量は間違っている可能性がある。本結果は、CO₂ 濃度が高い場合（あるいは CO₂ を指標とした生体発生物質濃度が高い場合）には、居住者の CO₂ 呼出量が変わらないと仮定した場合の換気量よりも、実際には換気量が低くなる可能性を示唆している。

今回の ETCO₂ の結果のように、呼吸数（分量）の減少により血液中の CO₂ の排出が減少し、血液ガス濃度が上昇した場合、CO₂ 呼出量が減少し、その結果、Wargocki と Wyon^{4,3)}が仮定したようにアシドーシスがわずかに増加し、外気供給量が減少した場合に被験者が訴える頭痛や思考困難の程度が上昇すると予想された。呼吸や生理反応に影響を与える曝露は、結果として急性健康症状やパフォーマンスの低下につながる可能性がある。数日間にわたり、保持された CO₂ は最終的に腎臓から排出されるが、短期的にはアシドーシスの増加が、CO₂ 上昇による精神パフォーマンスへの悪影響が確認されるメカニズムとして妥当なものだと思われる⁴⁴⁻⁷⁾。本研究では、雰囲気 CO₂ 濃度の増加に伴い ETCO₂ は増加したが、呼吸数（breath/min）には影響がなかった（Fig.4-5,7）。このように測定された呼吸数が増えなかったことは、心拍変動が呼吸数と密接に関連しているため、HRV（pNN50）に影響がないことから裏付けられるが、それでも条件によって呼吸流量が異なる可能性があり、通常 CO₂ の血液ガスレベルの増加の理由は低換気にあると推測される。代謝率の上昇（HR の上昇によって示される）により、体内で CO₂ が生成される速度が増加するはずであるという予想にもかかわらず、ETCO₂ は体温上昇時には増加しなかった。心拍数は増加し、呼吸数（呼吸／分）は増加しなかったため、CO₂ 呼出量が増加したのは、呼吸流量または一回換気量が増加したため、すなわち呼吸が深くなったためだと考えられる。この仮説を検証する呼吸誘導プレチスモグラフィなどの他の測定は行わなかったため、今後の研究において優先されるべきことである。

CO₂ 濃度が 1400ppm の場合、ボンベから CO₂ を投与して CO₂ 濃度を高めた場合（MP1400）、空気供給を減らして代謝により発生する CO₂ 濃度を高めた場合（M1400）よりも ETCO₂ が有意に高くなった（Fig.4-5）。このことは、他の生体発生物質の存在が CO₂ に対する生理的反応を変化させた可能性を示唆しており、今後の実験でこの可能性を検証する必要がある。もしそうであれば、Fisk ら⁴⁴⁾や Du ら⁴⁵⁾がまとめた、純粋な CO₂ を添加して CO₂ 濃度を上昇させると精神パフォーマンスが低下するという実験が、同じ CO₂ 濃度を得るために外気供給率を下げた場合に生じる効果を過大評価する可能性があることの説明となる。しかし、Zhang らによって報告された初期の非常に類似した実験^{1-28,29)}では、室内 CO₂ 濃度が 1000ppm 以上に増加すると、生体発生物質が増加するかどうかにかかわらず、ETCO₂ が有意に増加した。これらの実験では、基準条件の外気供給量は CO₂ 濃度を 500ppm まで下げるのに十分であったが、本実験の基準条件 M800 では 800ppm まで低下した。この違いは、本実験で生体発生物質が存在する場合に、上昇した CO₂ が ETCO₂ に影響を及ぼさないことが明らかであることを説明するものと思われる。

pNN50 で示される心拍変動（HRV）は、CO₂ を増加させても変化しなかった。これは、コックピットシミュレーションで CO₂ を上昇させても、テストを受けるパイロットのストレスレベルには影響しないと報告した Cao らの研究⁴⁸⁾と一致し、彼らが報告した α -アミラーゼレベルの上昇に基づく、CO₂ 濃度が高いとストレスが増加するという Zhang ら^{1-28,29)}の仮定と一致しない。

Fig.4-10 に示すように、純粋 CO₂ ガスの添加により CO₂ 呼出量を低下させると ETCO₂ は増加するが、

呼吸数 (breath/min), 心拍数, 心拍変動には大きな影響を与えなかった. 一般に, ETCO_2 は有効肺換気量に反比例し, CO_2 呼出量は呼吸換気量に比例する. 吸入された CO_2 濃度が高いと, 呼吸数 (breath/min) は変化しないのに一回換気量が小さくなる (低換気) 可能性があり, これが今回の結果の最も有力な説明と思われる.

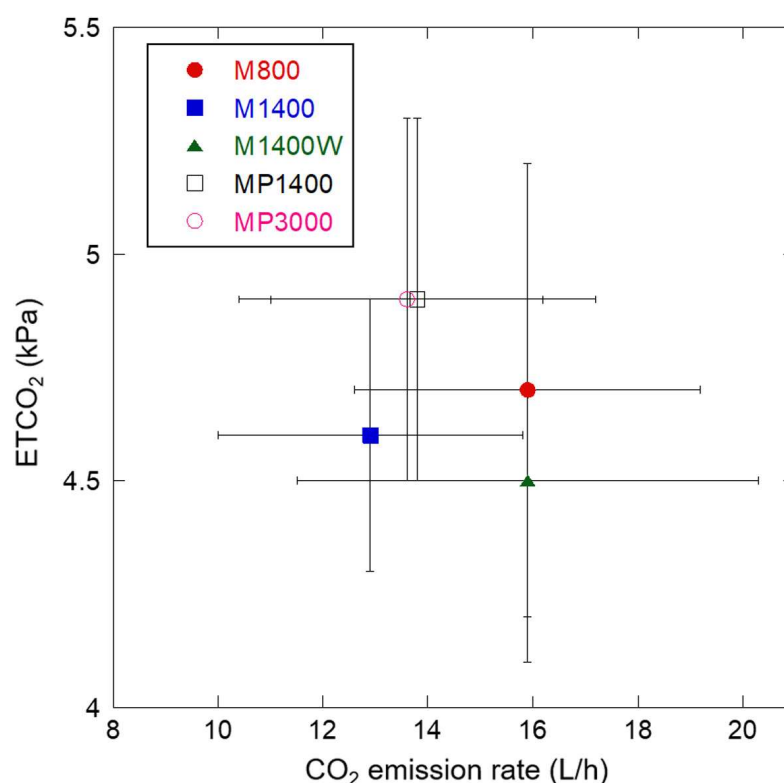


Fig.4-10 Relationship between ETCO_2 and CO_2 emission rate (Mean and SD)

基準条件 (M800) における各被験者の CO_2 呼出量の測定値を, ASHRAE ハンドブックおよび Persily and de Jonge で推奨されている経験式で推定した CO_2 呼出量と比較した. CO_2 呼出量の推定には, 着席時の軽作業に伴う代謝量を $60 \sim 70 \text{ W/m}^2$, $1.3 \sim 1.5 \text{ met}$, 呼吸商を 0.83 と想定した. Fig.4-11 に, 実際の CO_2 呼出量と経験式や他の研究者による推定値との比較を示す. このようにして予測された CO_2 呼出量は, 本実験で測定された CO_2 呼出量よりも若干高い値となった. ASHRAE Handbook で提案された経験式ではなく, Persily and Jonge が提案した経験式は, 被験者の年齢を考慮しているため, より正確に CO_2 呼出量を予測できる可能性がある. このことから, 現在規格で提案されている方法は, CO_2 呼出量を過大評価する可能性があると考えられるが, 今後の研究で検証していく必要がある.

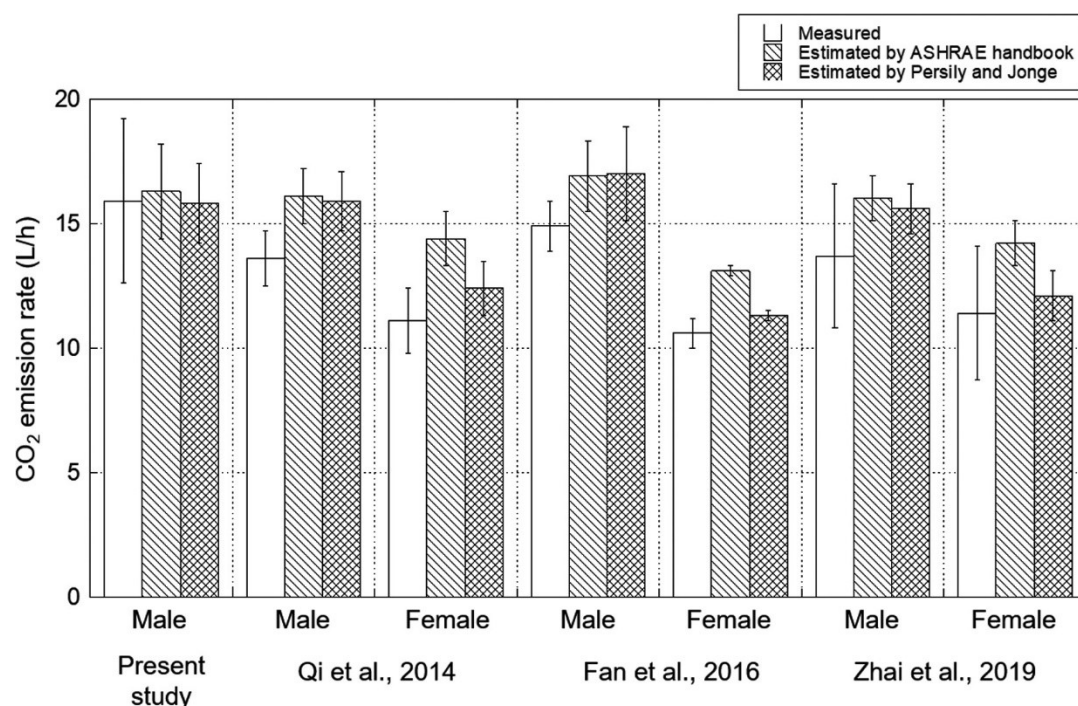


Fig.11 Comparison of CO₂ emission rate with the values estimated from empirical equations and in other published research

本実験に参加した被験者はわずか6名であったが、体系的かつ有意な差が認められた。この結果は、より大きなグループで検証し、その変化を活動レベルの変化によるCO₂呼出量の変化と直接比較する必要がある。被験者は、温度が高くなったことを知覚できる高温条件以外は、暴露条件について盲検であった。被験者は各条件に2.5時間だけ暴露された。本実験で確認された変化が、より長時間曝露した場合に維持されるかどうかは不明である。この点については、今後の実験において調査する必要がある。

本実験では、被験者は自分自身の生体発生物質に暴露された。在室者から発生する主な生体発生ガスは同じであるはずだが、その中には本実験とは別の生理反応を引き起こす物質が存在する可能性がある。このようなことがあるかどうかは、今後調査する必要がある。

4.5 結論

本実験では、温度上昇および雰囲気CO₂濃度が、在室者のCO₂呼出量に与える影響を調査した。温度を23℃から28℃に上昇させると、測定されたCO₂呼出量が有意に増加した。純粋CO₂ガスの添加や外気導入量の制限により、雰囲気CO₂濃度を800ppmから1400ppm、3000ppmに増加させると、CO₂呼出量は有意に減少した。しかし、アシドーシスの増加（血液中のCO₂濃度の増加）を示すETCO₂は、純粋なCO₂ガスを添加した場合のみ増加し、他の生体発生物質の濃度が増加した場合は増加しなかった。このことは、室内空気に純粋なCO₂を添加すると精神的パフォーマンスが低下するという実験が換気不良の悪影響を過大評価する可能性を示唆している。呼吸数（breath/min）については、条件間で有意な差は見られなかった。呼吸数（Liter/min）の変化（MV）が観察されるメカニズムであると考えられる。心拍変動で示されるストレスは、雰囲気CO₂が高くても、28℃でも変わらなかった。

【参考文献】

- 4-1) Star, G. (2014). *Introducing Green Star–Design & As Built*. Australlia: Green Building Council of Australlia. Nisan, 13, 2018.
- 4-2) Lan, L., Wargocki, P., Wyon, D. P., & Lian, Z. (2011). Effects of thermal discomfort in an office on perceived air quality, SBS symptoms, physiological responses, and human performance. *Indoor air*, 21(5), 376-390.
- 4-3) Wargocki, P., & Wyon, D. P. (2017). Ten questions concerning thermal and indoor air quality effects on the performance of office work and schoolwork. *Building and Environment*, 112, 359-366.
- 4-4) Fisk, W., Wargocki, P., & Zhang, X. (2019). Do Indoor CO₂ Levels Directly Affect Perceived Air Quality, Health, or Work Performance?. *ASHRAE Journal*, 61(9).
- 4-5) Du, B., Tandoc, M. C., Mack, M. L., & Siegel, J. A. (2020). Indoor CO₂ concentrations and cognitive function: a critical review. *Indoor air*, 30(6), 1067-1082.
- 4-6) Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., & Fisk, W. J. (2012). Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. *Environmental health perspectives*, 120(12), 1671-1677.
- 4-7) Allen, J. G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J., & Spengler, J. D. (2016). 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(6), 805-812.
- 4-8) Cao, X., MacNaughton, P., Cadet, L. R., Cedeno-Laurent, J. G., Flanigan, S., Vallarino, J., ... & Allen, J. G. (2019). Heart rate variability and performance of commercial airline pilots during flight simulations. *International journal of environmental research and public health*, 16(2), 237.

第5章 室内空気質による CO₂呼出量への影響についての数値検討

5.1 序

前述の通り，本研究やその他の被験者実験^{1-45,46)}において，空気質による CO₂呼出量の大幅な減少（-13～23%）が報告された．本結果は，これまでの CO₂濃度の換気指標としての役割に影響を与える可能性があり，また，人体による空気汚染の指標としても，CO₂以外の人体発生汚染物質との線形関係を崩す恐れもある．さらに，CO₂呼出量の測定は代謝量測定手法の 1 つである間接熱量測定法においても用いられており，測定時の吸引空気質によって測定される代謝量が影響を受ける可能性も示唆される．このような背景から，空気質による CO₂呼出量への影響についてメカニズムの特定および CO₂呼出量予測モデルが必要とされる．

一方で，Table 1-1 に示したように，これまで十分に清浄だと考えられてきた比較的低レベルの CO₂濃度の上昇にも在室者への悪影響が報告されており，さらには，Table 1-2 の通り，換気指標としてではなく純粋な CO₂ガスを添加することで形成された低レベルの CO₂濃度への曝露によっても，同様に悪影響が報告されている．そこで，室内空気環境設計においても，これらの悪影響を考慮し空気質を評価する必要がある．そのため，設計時における空気質評価のための高精度かつ人体側の反応を再現・評価可能な新たな CO₂呼出モデルの開発が期待される．

これらのことから，本研究では毛細血管-肺胞間のガス交換を考慮した詳細な CO₂呼出モデルと実験条件を再現した CFD 用の Digital Twin モデルを連成し，前章の被験者実験を再現した数値解析に取り組んだ．高換気量条件である M800 および低換気量条件である M1400 を対象とした．また，M1400 条件の再現にあたり，低換気量による CO₂呼出量の減少メカニズムについて検討するため，実験室の低換気のみを再現したケースを基準とし，既往研究^{1-11,19,20,29)}で報告された呼吸換気能力の減衰を再現した減衰率の異なる 3 ケースについて解析を実施した．本章では，その結果について報告する．

5.2 解析概要

5.2.1 Digital Twin モデル

本研究では，第 4 章の被験者実験を完全に再現した Digital Twin モデルを作成した．まず，設計図をもとに ANSYS/SCDM を用いて実験を実施した人工気候室を再現し，そこに，被験者を再現するため，座位人体幾何形状を詳細に再現した数値人体モデル（CSP）⁵⁻¹⁾を導入した．さらに，上気道における乱流拡散の影響や呼吸による噴流の再現性の違いによる差異を確認するため，第 5，6 分岐までを再現した人体気道モデルを統合した．人工気候室，CSP，気道モデルを含む Digital Twin モデルを Fig.5-1 に示す．なお，CO₂は比較的溶解度が高い気体であるが，ガス交換に関する既往研究の多くは気道表面での CO₂溶解は無視しており，本解析においても気道モデル表面での CO₂ Flux を 0 とした．本 Digital Twin モデルのジオメトリを対象として Fig.5-2 のような計算格子（Mesh）を作成した．Mesh 作成パラメータを Table 5-1 に示す．また，実験条件と一致するよう，境界条件として流入流量を高換気量条件：47.5 m³/h，低換気量条件：19.0 m³/h とした．本 CFD 解析は ANSYS/Fluent 2021 R1 により非圧縮流体を仮定し，CSP の呼吸を再現していない状態での定常解析を行った後，その結果を初期条件として CSP による呼吸を再現した非定常解析を実施した．詳細な解析条件については表 5-2 に示す（CO₂呼出に関する数値モデルに関しては後節を参照）．

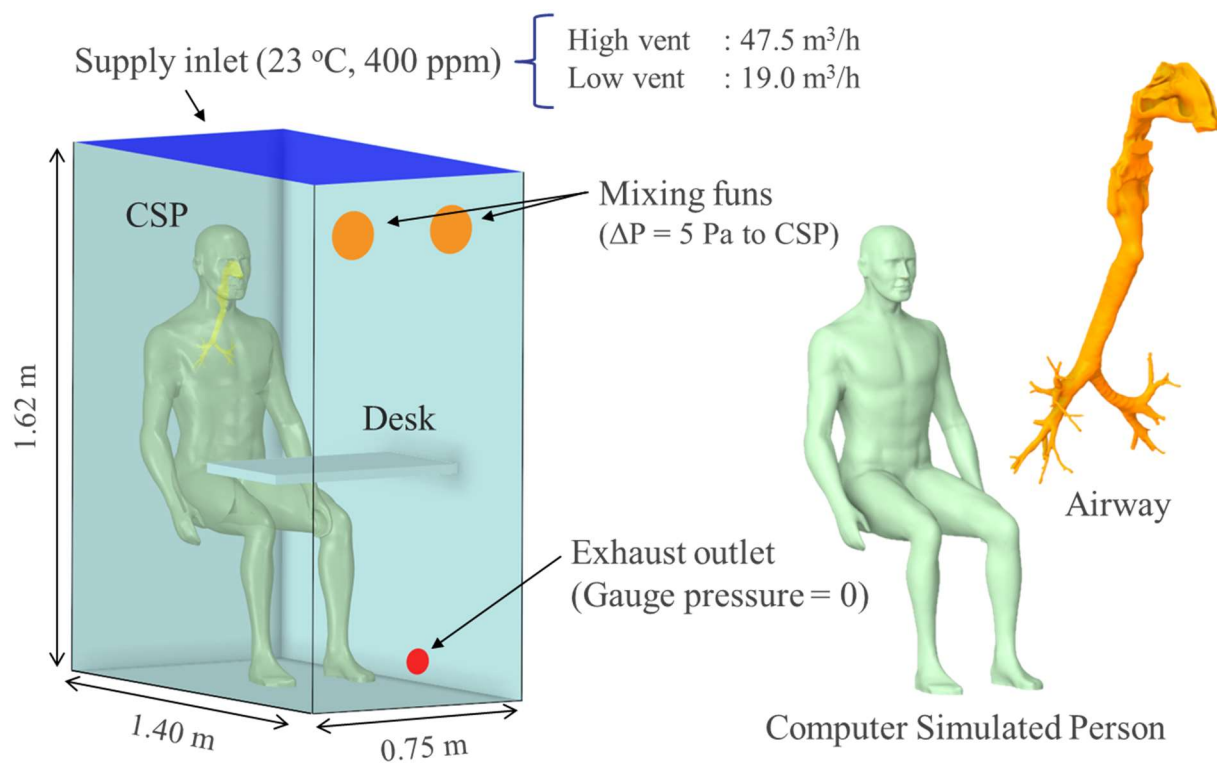


Fig.5-1 第4章の被験者実験を対象とした Digital Twin モデル

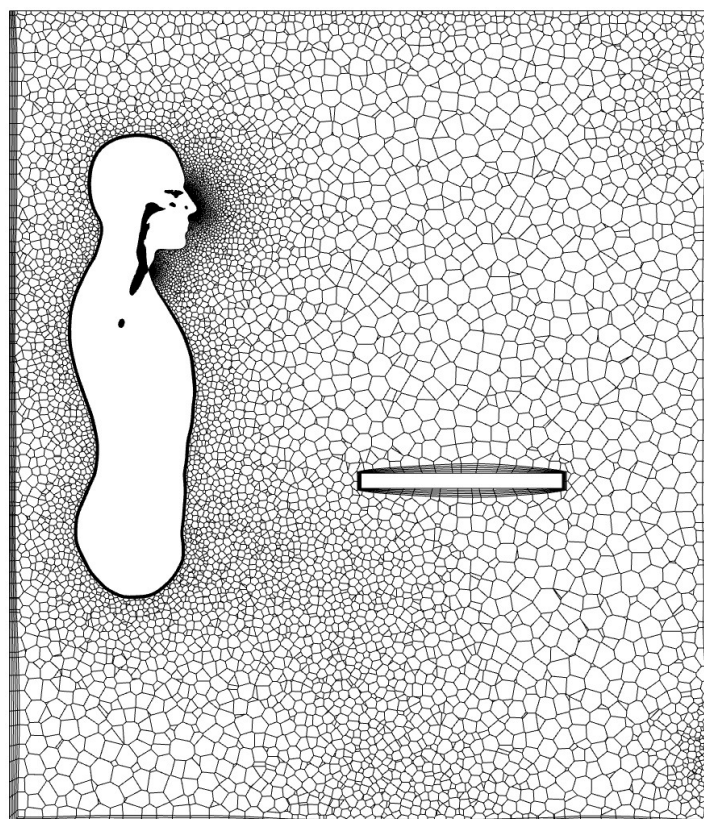


Fig.5-2 計算格子

Table 5-1 Mesh 作成パラメータ

Volume mesh (type: polyhedral)	Maximum size	Growth rate	
・Chamber	45.0	1.2	
・Airway	3.0	1.1	
Prism mesh	First aspect ratio	Number of layers	Growth rate:
・Wall & desk	10	5	1.0
・CSP	12	6	1.0
・Airway surface	12	5	1.0

Table 5-2 解析条件

Mesh	Chamber: 514,500 Airway: 1093,305 Sum: 1607,805 (Chamber + Airway)
Turbulence model	Low Reynolds number K-epsilon model (Abe-Kondoh-Nagano)
Radiation	Surface to surface (S2S) model
Algorithm	SIMPLE
Gravity	-9.8 m/s ²
Density	1.225 kg/m ³
Thermal expansion coefficient	0.003333 K ⁻¹
Inflow boundary	Temperature: 23 °C, CO ₂ concentration: 400 ppm
Outflow boundary	Pressure-outlet: gauge pressure = 0
Wall treatment	Velocity: no slip Scalar: $\partial C / \partial x = 0$ Temperature: Adiabatic (chamber), Fanger model (CSP)
Scalar (CO ₂)	Passive scalar, diffusivity: D = 0.164 cm ² /s

5.2.2 非定常呼吸モデル

本解析では CSP による非定常呼吸を再現するにあたり，J. K. Gupta らの研究⁵⁻²⁾に基づき，Fig.5-3 に示す非定常呼吸プロファイルを用いた。本呼吸プロファイルは，呼吸流量変化を Sin 関数に近似したもので，吸気，呼気の時間を 2:3 となるように，1 呼吸サイクルに要する時間と一回換気量から得ることができる。本解析では一回換気量（Tidal Volume: TV）を 0.5 L，呼吸時間を 4 s とした。

また，高換気量のケース（M800）については，CFD 解析の対象領域として気道を含めなかったケース（Nose）と，気道モデルを統合し気道内を CFD 解析したケース（Airway）を比較した。両者とも，呼吸気の流入出面に対し非定常呼吸プロファイルに従う一様流速を与えることで CSP の呼吸を再現した。ただし，Fig.5-4 に示すように，Nose は鼻腔面に対して，Airway は気道末端を呼吸気の流入出面とした。ここで，Airway の各気道末端に対する流量分配比は Shelley らのモデル⁵⁻³⁾により決定した。

さらに、低換気量条件において基準となるケース (M1400TV0) とは別に、悪化した空気質による呼吸換気能力の低下^{1-11,19,20,29)} を一回換気量の低減として再現した異なる低下率の 3 ケースを加えた。1 つは Shriram¹⁹⁾らが報告した呼吸換気パラメータの減衰率に基づき、一回換気量の減少率を 10%と仮定したケース (M1400TV10)、残る 2 つは数値検討のため減少率を 5, 15%としたケース (M1400TV5, M1400TV15) である。各ケースの TV を Table 5-3 に示す。

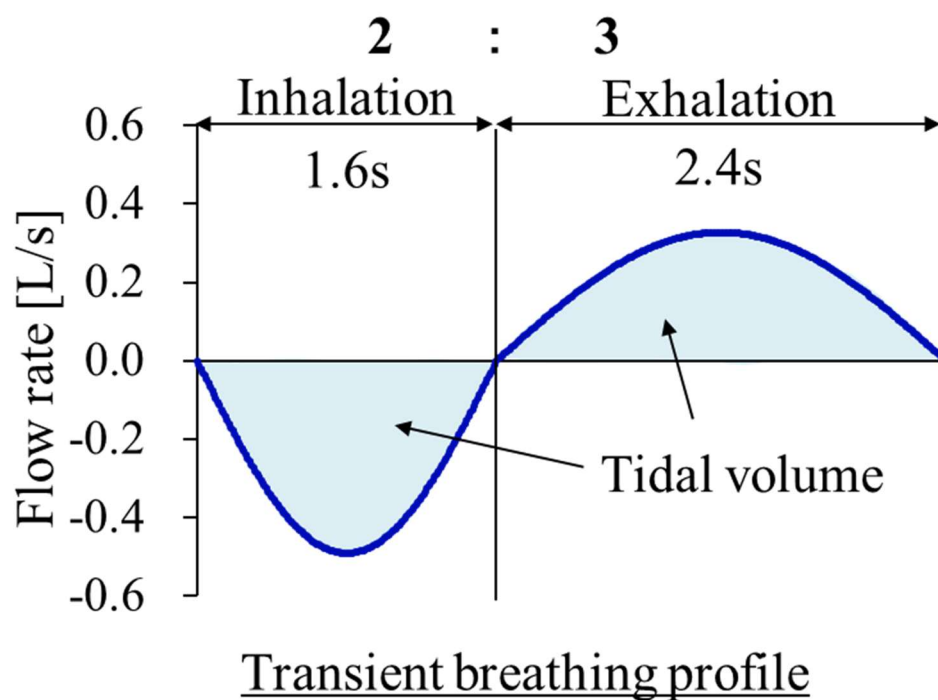


Fig.5-3 非定常呼吸プロファイル

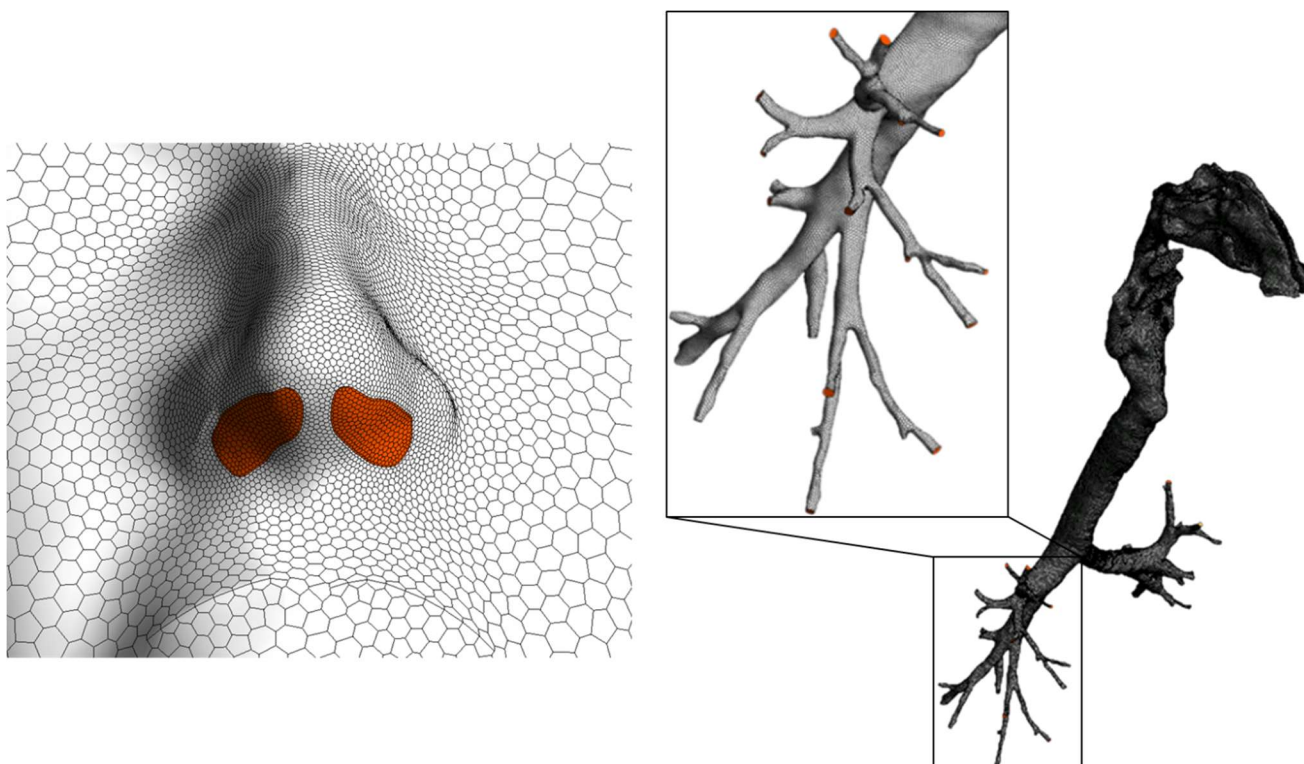


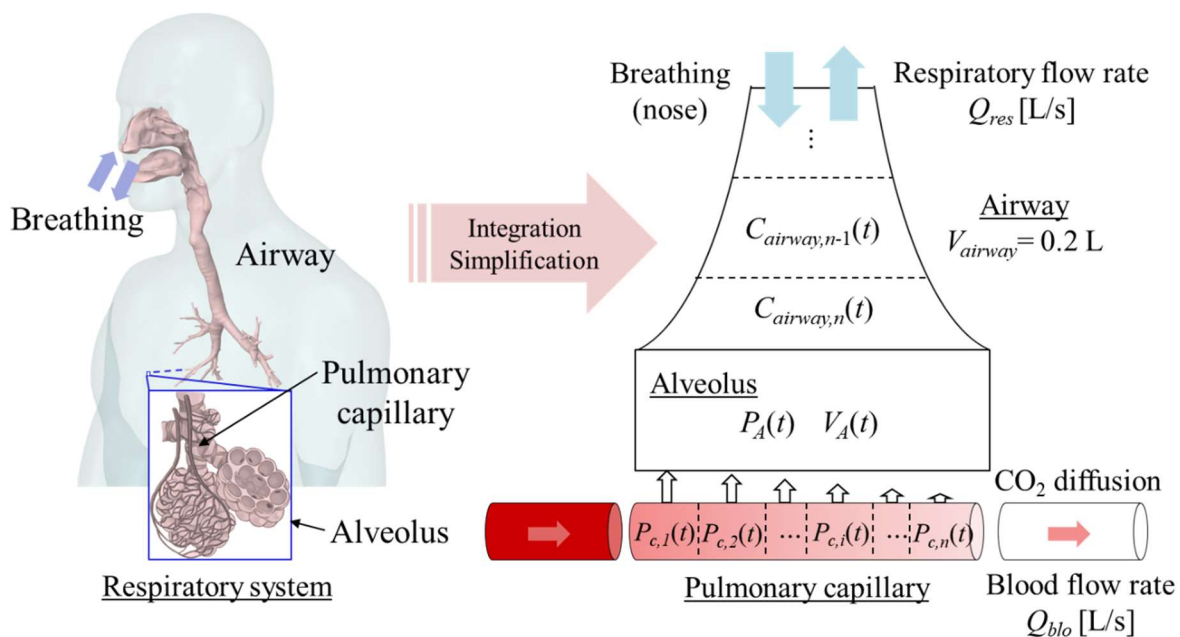
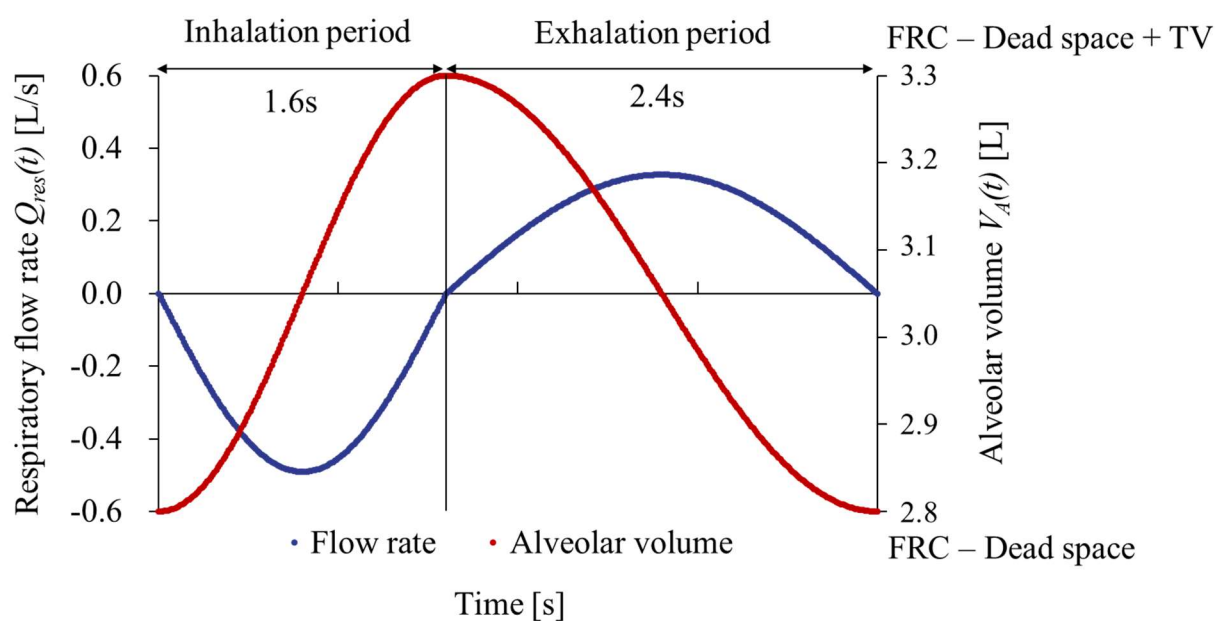
Fig.5-4 呼吸プロファイルに従う流入出面（左：鼻孔面，右：気道末端）

Table 5-3 各ケースにおける Tidal volume

Case	Tidal volume [L]
M800	0.500
M1400TV0	0.500
M1400TV5	0.475
M1400TV10	0.450
M1400TV15	0.425

5.2.3 CO₂呼出モデル

本解析では、CO₂呼出現象を再現するにあたり、Fig.5-5 に示す実人体の呼吸器系を統合・単純化したモデルを導入した。本モデルでは死腔域である気道中について移流方程式（Inhalation period: Eq.5.1, Exhalation: Eq.5.2）を連立させることで、室内空気－肺胞間での CO₂輸送の時間遅れを再現した。ここで、気道容積を 0.2L と仮定し、気道モデルを統合していないケースについては全 0.2L を、気道モデルを統合したケースについては、CFD 解析を行う気道モデルの容積（0.117L）を差し引いた 0.083L を本モデルにて解析した。また、肺胞 CO₂分圧の時間変化を再現するため、肺胞毛細血管からの拡散を考慮した Eq.5.3 を導入し、肺毛細血管の CO₂分圧は Eq.5.4 によりマスバランスを考慮した。ここで、呼気終末での肺胞容積を機能的残気量（FRC）と死腔域の差とし、Fig.5-6 のように呼吸流量に従い増減する。

Fig.5-5 CO₂呼出モデル概要図Fig.5-6 肺胞 CO₂分圧の時間変化

$$V_{air,n} \frac{dC_{air,n}(t)}{dt} = -Q_{res}(t)C_{air,n}(t) + Q_{res}(t)C_{air,n-1}(t) \quad (5.1)$$

$$V_{air,n} \frac{dC_{air,n}(t)}{dt} = -Q_{res}(t)C_{air,n}(t) + Q_{res}(t)C_A(t) \quad (5.2)$$

$$\frac{dP_A(t)}{dt} = -\frac{Q_{res}(t)}{V_A(t)}P_A + \frac{P_{atm} - P_{H_2O}}{V_A(t)} \left[\dot{V}_{dif} + Q_{res}(t)C_{res}(t) \right] \quad (5.3)$$

Inhalation period: $C_{res} = C_{air,n}(t)$, Exhalation period: $C_{res} = \frac{P_A(t)}{P_{atm} - P_{H_2O}}$

$$\dot{V}_{dif} = \sum_1^n \frac{D_L}{n} \{P_{c,i}(t) - P_A(t)\}$$

$$\alpha V_{c,i} \frac{dP_{c,i}(t)}{dt} = -\frac{D_L}{n} \{P_{c,i}(t) - P_A(t)\} + \alpha Q_{blo} \{P_{c,i-1}(t) - P_{c,i}(t)\} \quad (5.4)$$

$$V_{air,n} \frac{dC_{air,n}(t)}{dt} = -Q_{res}(t)C_{air,n}(t) + Q_{res}(t)C_{air,n-1}(t) \quad (5.1)$$

$$V_{air,n} \frac{dC_{air,n}(t)}{dt} = -Q_{res}(t)C_{air,n}(t) + Q_{res}(t)C_A(t) \quad (5.2)$$

$$\frac{dP_A(t)}{dt} = -\frac{Q_{res}(t)}{V_A(t)}P_A + \frac{P_{atm} - P_{H_2O}}{V_A(t)} \left[\dot{V}_{dif} + Q_{res}(t)C_{res}(t) \right] \quad (5.3)$$

Inhalation period: $C_{res} = C_{air,n}(t)$, Exhalation period: $C_{res} = \frac{P_A(t)}{P_{atm} - P_{H_2O}}$

$$\dot{V}_{dif} = \sum_1^n \frac{D_L}{n} \{P_{c,i}(t) - P_A(t)\}$$

$$\alpha V_{c,i} \frac{dP_{c,i}(t)}{dt} = -\frac{D_L}{n} \{P_{c,i}(t) - P_A(t)\} + \alpha Q_{blo} \{P_{c,i-1}(t) - P_{c,i}(t)\} \quad (5.4)$$

5.3 解析結果

5.3.1 気道内流れ場による影響

気道内の乱流拡散の影響やその他輸送現象への影響を検討するため、気道モデルを統合した M800_Airway と鼻腔開孔面に CO₂呼出モデルを適応した M800 を比較した。Fig.5-7 に開始 t 分後（呼気終末時）の CO₂濃度分布を示す。チャンバー内は混合ファンによる流れが支配的であったため、気道モデルの有無による呼吸時の流れ場に大きな差異はなく、結果濃度分布にも違いは確認されなかった。ただし、気道モデルを統合した場合、死腔域を流体として CFD 解析しているため、わずかに呼出時 CO₂輸送の時間遅れが小さくなる方向に呼出モデルでの各種パラメータが移動した。しかし、有意な差は無く、総輸送量にも変化は見られなかった。結果、気道モデルの有無に関わらず、CO₂呼出量はどちらも 14.4 L/h であった。

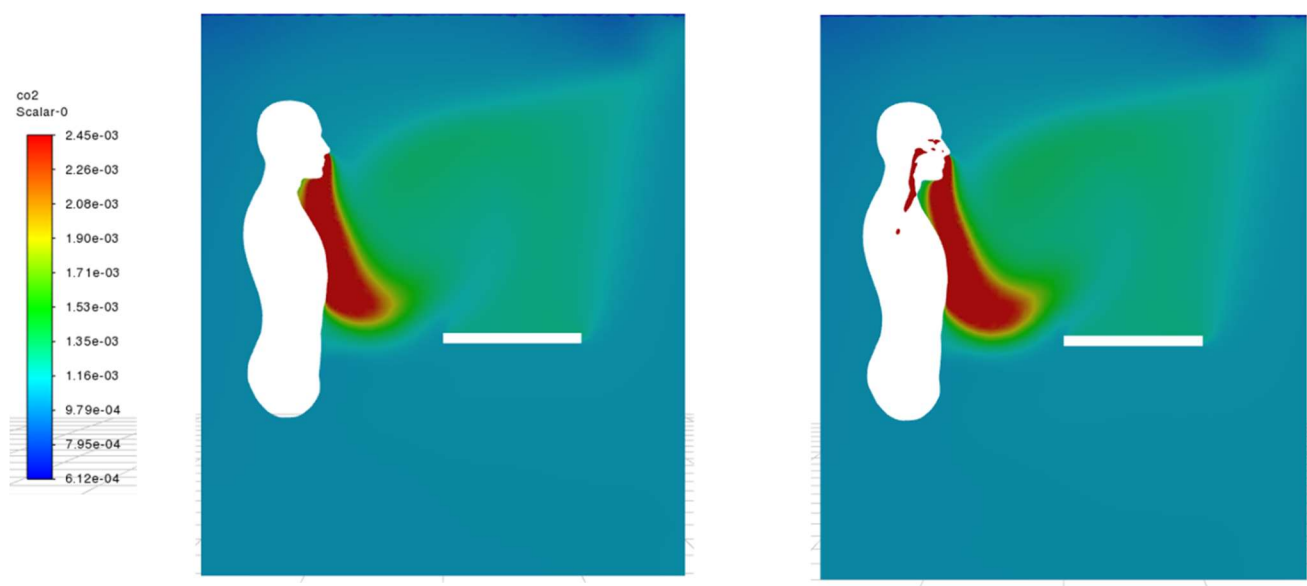


Fig.5-7 M800_Airway および M800 の CO₂濃度分布（720 s 後，呼気終末時）

5.3.2 吸入 CO₂

前節の通り，気道モデルの有無は本解析に有意な差を与えないことから，以降の解析は鼻腔開孔面に CO₂呼出モデルを適応し，それらのケースの結果を示す．Fig.5-8 では，M800 での流れ場を示す．混合ファンおよび人体熱上昇流によりチャンバー内に循環流が形成されている．それに伴い，人体前方に高 CO₂濃度の呼吸域が形成され，不均一性の強い分布が形成された（Fig.5-9）．Fig.5-10 は各種 CO₂濃度の時間変化を表す．青はチャンバー内の体積平均 CO₂濃度，赤は吸入した空気の CO₂濃度，緑がチャンバーの排気口 CO₂濃度である．吸入空気の CO₂濃度を分かりやすくするため，それぞれの CO₂濃度は呼吸毎の吸入期間 1.6 s 間での時間平均値で示されている．多くの場合，排気口空気は完全混合が期待されるが，チャンバーが小さかったことや，混合ファン等による循環流によって不均一分布が形成されたため，排気口の CO₂濃度が最も低く，在室者はより高濃度の空気を吸入した．これは，低換気量条件，高換気量条件ともに確認された．

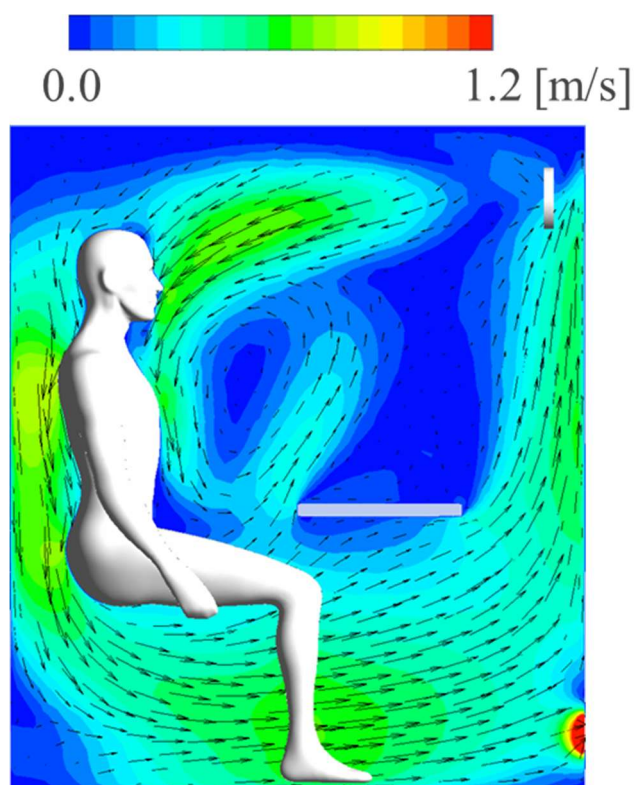


Fig.5-8 M800 条件下での流れ場

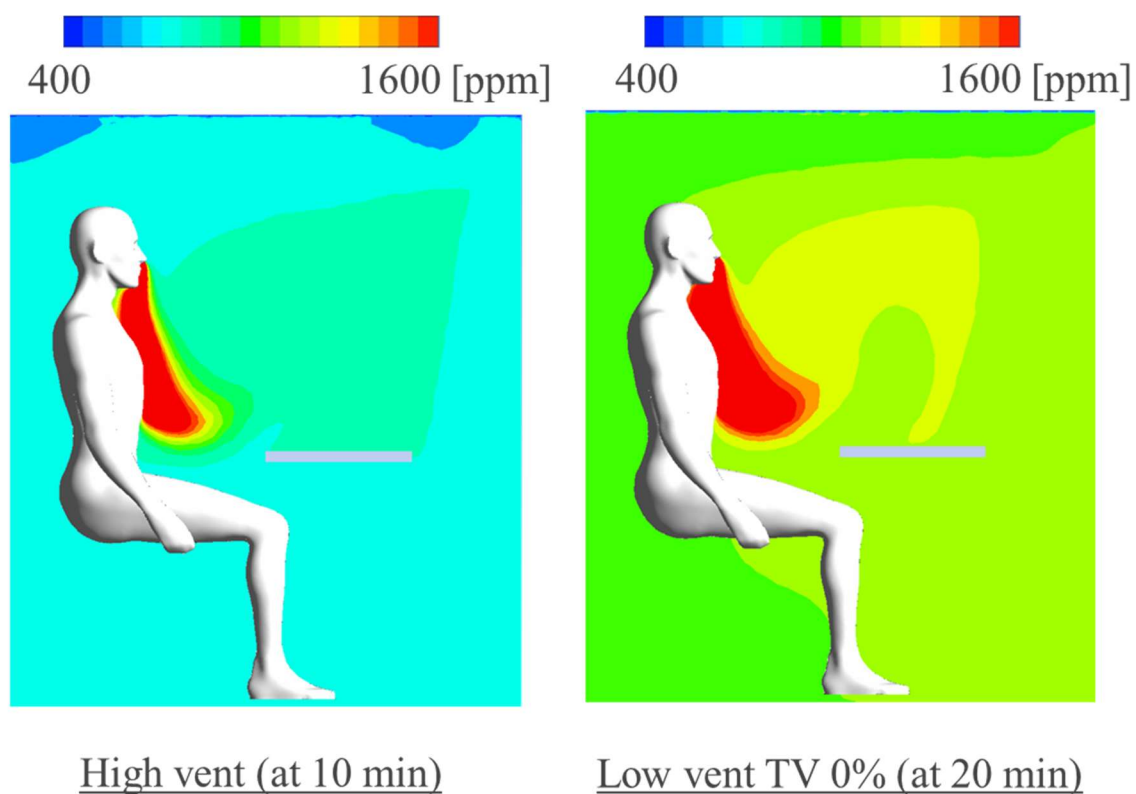


Fig.5-9 M800 (左), M1400 (右) 条件下での CO₂濃度分布

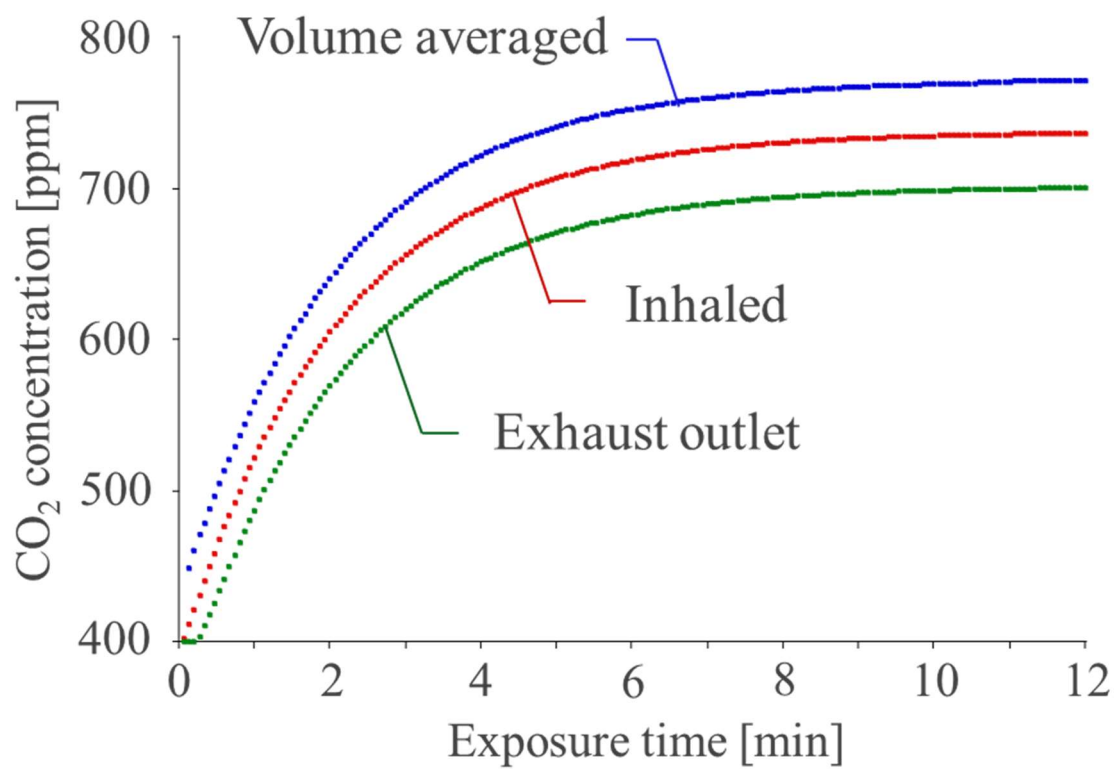


Fig.5-10 M800 条件下での流れ場

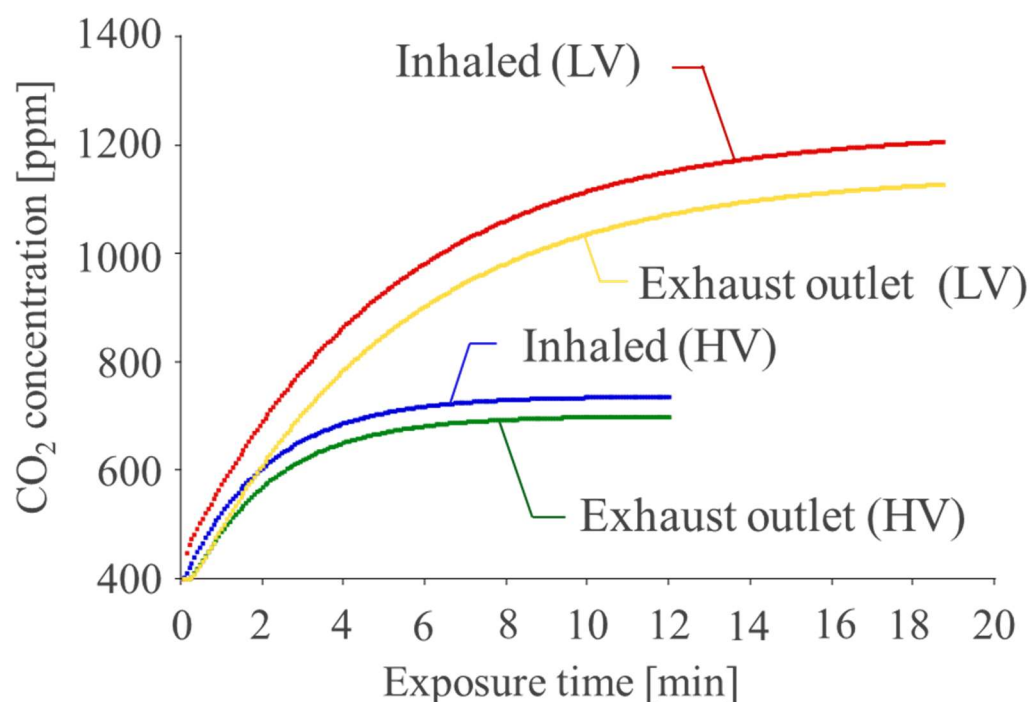


Fig. 5-11 CO₂ 濃度の時間履歴

5.3.3 CO₂呼出量

各ケースでの CO₂呼出量を Table 5-4 に示す．本解析での高換気量条件での CO₂呼出量は実験結果に近づいた．低換気量条件については，TV を減少させなかったケースでは，濃度の上昇による吸入気 CO₂の増加により呼出量も減少したものの，その減少量は極僅かだった．実験結果に最も近づいたのは，Shriram らの報告に基づいた TV の減少を再現したケースであり，本解析での「空気質悪化により TV が減少し，その結果呼出量が減少した」という過程が妥当であったことが確認された．また，Fig.5-12 で示すように，TV の減少により肺泡 CO₂分圧が増加した．Zhang らの報告¹⁻²⁹⁾では，500ppm と 1000ppm で被験者をそれぞれ暴露した場合，ETCO₂が増加した．ETCO₂は肺泡 CO₂分圧の指標であり，この報告は本解析結果と整合する．

Table. 5-4 CO₂呼出量

	CO ₂ emission rate [L/h]	
	High vent	Low vent
The present study		
(TV 0%)	14.3 (Inhalation: 0.4)	14.2 (Inhalation: 0.5)
(TV -5%)		13.2

(TV -10%)*		12.2
(TV -15%)		11.1
The chamber exp.	15.9 ± 3.3	12.9 ± 2.9

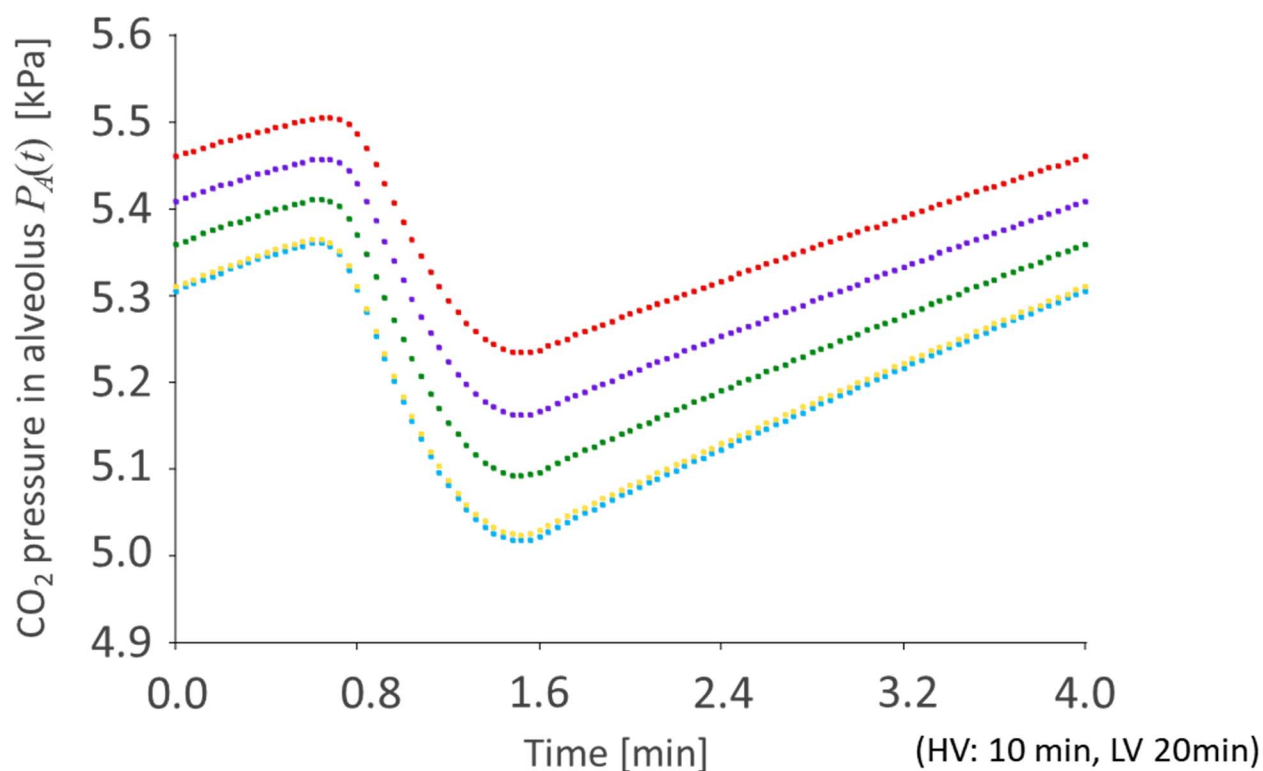


Fig. 5-12 肺胞 CO_2 分圧の時間変化

5.5 結論

本解析では、在室者の吸入気の CO_2 濃度が、チャンバーの排気 CO_2 濃度よりも高いことが確認された。また、肺胞 CO_2 ガス交換を考慮した CO_2 呼出モデルを用いて、空気質により TV が減少するという仮定の下、数値解析を行った結果、実験結果に良く近づいた。空気質による CO_2 呼出量への影響は大規模な被験者実験による定量的評価や、空気質と呼吸パラメータの関係調査などメカニズムの更なる確認が必要とされる。

【参考文献】

- 5-1) Yoo, S. and Ito, K. (2015). Improvement of thermo-regulation model by convective heat transfer analysis in numerical respiratory tract model. *Journal of Environmental Engineering*, 80(709), pp.229-238. (in Japanese)
- 5-2) Gupta, J., Lin, C. and Chen, Q. (2010). Characterizing exhaled airflow from breathing and talking. *Indoor Air*, 20(1), pp.31-39.
- 5-3) Shelley, D. A., Sih, B. L., & Ng, L. J. (2014). An integrated physiology model to study regional lung damage effects and the physiologic response. *Theoretical Biology and Medical Modelling*, 11(1), 1-19.

第6章 総括

本研究では、3種の被験者実験および内1種を対象とした数値解析により室内空気環境条件によるCO₂呼出量への影響を調査した。その結果、在室者の熱的不快感によるCO₂呼出量の増加や、10代の高いCO₂呼出量、睡眠時の低いCO₂呼出量、換気量の低減や純粋なCO₂ガスの添加によるCO₂呼出量の低下、それが一回換気量の減少により引き起こされる可能性を示唆した。

本研究で報告した結果は小規模な被験者を基にしているため、今後更なる大規模実験による調査が必要とされる。

謝辞

本論文では、筆者が九州大学総合理工学府環境エネルギー工学専攻伊藤研究室在籍中の研究成果を報告した。

本研究実施にあたって、伊藤一秀教授は、指導教員として常に誠実な態度で向き合って下さった。本研究遂行まで時に厳しく時に温かく、公私にわたり数々のご鞭撻を賜り、若輩者の筆者に対し、常に敬意をもってご指導戴いた。ここに深謝の意を表する。研究活動に関してはもちろん、物事に取り組む姿勢など多くの面で大変勉強になり薫陶を賜った。本専攻伊藤研究室に所属する機会を得たことを非常に幸運に思う。

同研究室の先輩である久我一喜氏にはいつもお心をかけていただき、本研究実施において殊にご支援いただいた。幾度となく相談に乗っていただき多くの知見を賜るとともに、筆者にとって遂行に至るまでの励みとなった。研究着手から遂行まで格別のご指導を賜った同氏に対し深謝の意を表する。

本研究において Technical University of Denmark 准教授 Pawel Wargocki 先生には、実験において大変ご助力いただき、結果をまとめる際にはその広く深い見識から多くのご意見を戴いた。ここに深く感謝の意を示す。

本専攻伊藤研究室の各位には研究遂行にあたり日頃より有益なご討論を戴いた。特に、同期・後輩諸氏は、日頃の研究室生活における精神的支柱であり、同じ研究室で学生生活を過ごせたことを非常にうれしく思う。ここに感謝の意を表する。また、実験にご協力いただいた Technical University of Denmark のボランティア各位に対し謝意を表す。

令和4年2月

坂本 光陽