

室内のCO₂濃度が人の生産性と生理心理量に及ぼす影響に関する研究
—タイピング・計算による作業性・疲労度の検証—

Study on the effect of indoor CO₂ concentration on human productivity, physiological and psychological quantity
-Verification of workability and fatigue level by typing and calculation-

○坂井 遥祐 (立命館大学) 近本 智行 (立命館大学) 具島 豊治 (パナソニック株式会社)
湯浅 明子 (パナソニック株式会社) 信長 賢輝 (パナソニック株式会社)

Yosuke SAKAI*1 Tomoyuki CHIKAMOTO*1 Toyoji GUSHIMA*2 Akiko YUASA*2 Masaki NOBUNAGA*2

*1 Ritsumeikan University *2 Panasonic Corporation

In this study, subject experiments were conducted to clarify the effect of indoor CO₂ concentration on workability and to investigate the relationship between indoor CO₂ concentration and physiological psychological amount. As a result, it was shown that the error rate of the workability test tended to increase depending on the CO₂ concentration, and the concentration ratio tended to decrease. It was also suggested that pulse affects PCO₂.

1. はじめに

CO₂は人間には知覚されないガスであるが、高濃度であれば人間の健康に影響を及ぼすと言われている。実際に50000ppmを超えるなど、非常に高濃度のCO₂ではめまいや頭痛など健康上のリスクをもたらす可能性がある(許容可能な室内空気質のための換気、ASHRAE Standard 62.1-2016)。また、CO₂濃度は執務者のパフォーマンスにも影響を与える可能性があり^{文1) 文2)}、筆者らは5000ppm以下を対象に、CO₂濃度が作業性に与える影響や生理メカニズムに与える影響を調査してきた^{文3) 文4)}。

そこで引き続き本研究では、室内のCO₂濃度が作業性に及ぼす影響と生理心理量との関係性を明確化することを目的とし、CO₂濃度を30分間で緩やかに上昇させた実験①と5分間で急上昇させた実験②の計2パターンの被験者実験を実施した。本稿ではまず、実験①の概要と結果について記述し、その後実験②について記述する。

2. 実験① (CO₂濃度 30分上昇) 概要

2.1 実験条件

実験①は2021年1、2月に、立命館大学びわこくさつキャンパス内にある恒温恒湿室にて行った。被験者は健康な男子大学生3名である。

2.2 実験ケース

実験ケースをTable.1に示す。また、CO₂濃度の変化のイメージをFig.2に示す。CO₂濃度は30分間かけ緩やかに上昇させていき、すべての実験において、誤差が100ppm以内に収まるよう濃度を制御した。

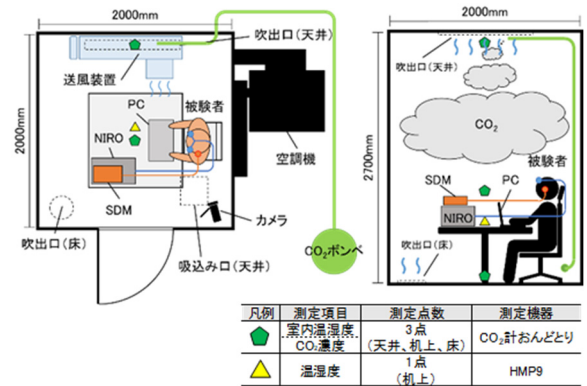


Fig.1 Laboratory (Experiment ①)

Table.1 Experimental case (Experiment ①)

	CO ₂ 濃度	温度	相対湿度	着衣量	状態
case1-1	600ppm	25°C	50%RH	0.8clo	椅座
case1-2	1000ppm				
case1-3	2000ppm				
case1-4	3500ppm				

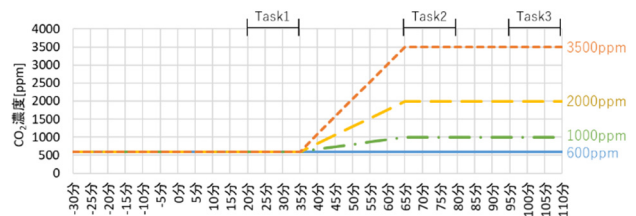


Fig.2 CO₂ concentration (Experiment ①)

2.3 作業性テスト

作業性テストとして、100マス計算とタイピングを実施した。100マス計算はケース毎に問題を変更しているが、難易度が統一されるよう全て2桁×1桁で構成し、解く順序も固定した。また、タイピングはフリーソフトである

「TypeLighter」を使用した。

2.4 測定項目

生理量の測定項目を Table.2 に示す。また、心理量の調査として、Table.3 に示した項目でアンケートと Table.4 に示した項目で自覚症しらべ^{注1)}を実施した。

Table.2 Measurement item (Experiment ①)

機器名	測定項目	測定部位
SDM (経皮的血液ガスモニタリング)	PCO ₂ (血中二酸化炭素分圧)	耳たぶ
	SpO ₂ (動脈血酸素飽和度)	
	PR (脈拍数)	
ニロモニタ NIRO-200 (赤外線酸素モニタ装置)	ΔO ₂ Hb (酸素化ヘモグロビン濃度変化)	額
	TOI (組織に含まれるO ₂ Hbの割合)	
サーモクロン	平均皮膚温(7点法)	額など7点
手動式血圧計 HEM-6324T	血圧	上腕

Table.3 Questionnaire items (Experiment ①)

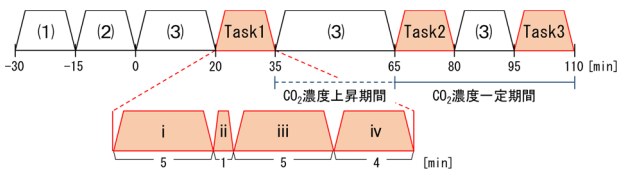
カテゴリー	内容	評価方法
環境的項目	明るさ/温冷感/湿度感/ airflow感/ 温熱環境満足度	7段階評価
	発汗	4段階評価
	よどみ感/ 空気環境満足度	7段階評価
心理的項目	ストレス	7段階評価
	集中度	7段階評価

Table.4 Awareness Questionnaire items (Experiment ①)

	各項目(1.まったくあてはまらない-5.非常によくあてはまる)
I 群(ねむけ感)	ねむい、横になりたい、あくびがでる、やる気がとぼしい、全身がだるい
II 群(不安感)	不安な感じがする、ゆううつな気分だ、おちつかない気分だ、いらいらする、考えがまとまりにくい
III 群(不快感)	頭がいたい、頭がおもい、気分がわるい、頭がぼんやりする、めまいがする
IV 群(だるさ感)	腕がだるい、腰がいたい、手や指がいたい、足がだるい、肩がこる
V 群(ぼやけ感)	目がしょぼつく、目がつかれる、目がいたい、目がかわる、ものがぼやける

2.5 実験手順

タイムスケジュールを Fig.3 に示す。濃度上昇前、上昇直後、上昇の30分後の計3回において、Task(作業性テストと主観申告)を実施した。



(1)測定機器装着 (2)作業性テスト練習 (3)安静期間(椅座安静1.0met)
i. 100マス計算 ii. 休憩 iii. タイピング iv. 主観申告
※実験開始時間を0minとして表記 ※Task1, 2, 3はすべて同じ内容

Fig.3 Time schedule (Experiment ①)

3. 実験① (CO₂濃度 30分上昇) 結果

3.1 作業性テスト結果

タイピングと100マス計算のミス率の平均値を Fig.4 に示す。タイピングの結果においては、3回目(濃度上昇の30分後)に3500ppmのみでミス率が高い値を示した。100マス計算においては、3500ppmで濃度上昇前に比べ上昇後にミス率が増加した。しかし、600、1000、2000ppmではCO₂濃度による影響は確認できておらず、CO₂濃度と生産

性の関係を調査するためには、もう少しCO₂濃度を高く設定した実験を実施する必要があると考えられる。

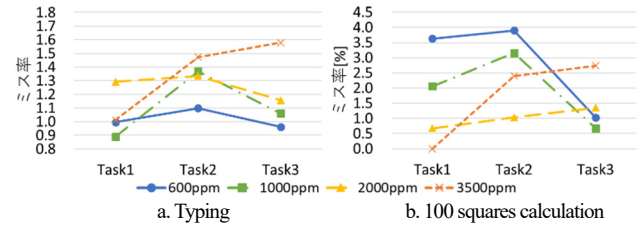
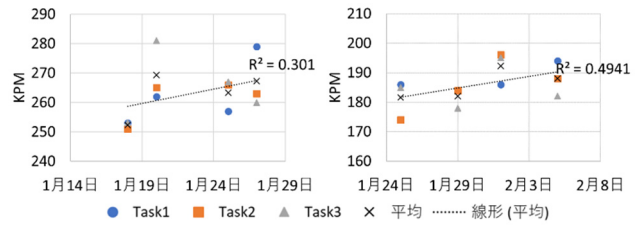


Fig.4 Error rate of workability test (Experiment ①)

3.2 慣れの影響

タイピングにおける KPM (1分間当たりの入力キー数)と実験日の関係を Fig.5 に示す。被験者 A、B において、実験回数を重ねる度に被験者の KPM が上昇する傾向が確認できた。これは実験を重ねる毎に、被験者が作業に対し徐々に慣れていったことが原因であると考えられる。



a. sub. A b. sub. B

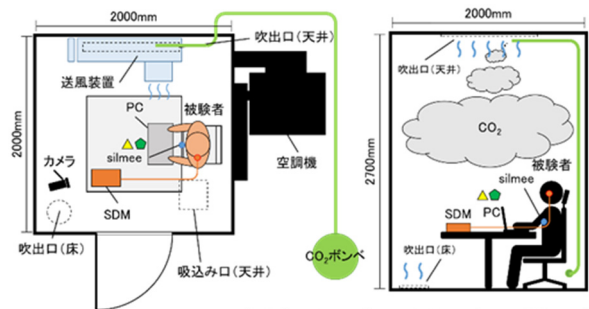
Fig.5 KPM x Day (Experiment ①)

4. 実験② (CO₂濃度 5分急上昇) 概要

4.1 実験条件

実験①で知見された結果を考慮して、慣れの影響を限りなく排除し濃度負荷を大きくする等の改善をした実験②を実施した。

実験②は2021年3~12月に同実験室で行い、被験者は健康な男子大学生7名(2,3サイクル目は5名)である。



凡例	測定項目	測定点数	測定機器
●	室内温度	1点(机上)	CO ₂ 計おんどり
▲	CO ₂ 濃度	1点(机上)	
▲	温湿度	1点(机上)	HMP9

Fig.6 Laboratory (Experiment ②)

4.2 実験ケース

実験ケースを Table.5 に示す。また、CO₂濃度の変化のイメージを Fig.7 に示す。実験①では30分間かけ緩やかに上昇させていったが、CO₂濃度による負荷を増やすため、実験②では5分間で急上昇させた。また、実験②では同様の実験を同一被験者で計3サイクル実施した。1サイ

クル目は600ppmと3500ppmまたは5000ppmの2ケースを実施し、2、3サイクル目はTable.5の通り計4ケースで実験を行った。

Table.5 Experimental case (Experiment ②)

	CO ₂ 濃度	温度	相対湿度	着衣量	状態
case2-1	600ppm	25°C	50%RH	0.8clo	椅座
case2-2	1500ppm				
case2-3	3500ppm				
case2-4	5000ppm				

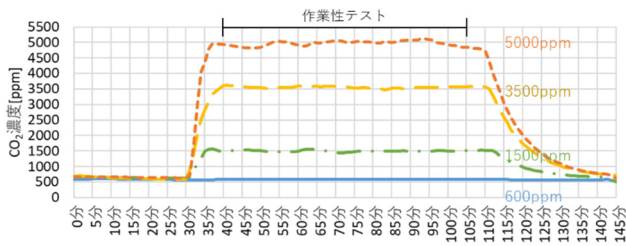


Fig.7 CO₂ concentration (Experiment ②)

4.3 作業性テスト

生産性を測るための作業性テストとして、実験②では作業負荷を増やすため、60分間のタイピングと5分間の100マス計算を実施した。なお、テストの慣れを防ぐため、初回の実験前に計3回の作業テストを行ってもらい、実験前にも5分間タイピングの練習を実施した。

4.4 測定項目

生理量の測定項目をTable.6に示す。実験②では、SDMに加え、生体センサを用いて生理量を実測した。主観申告は実験①の内容にリフレッシュ感を追加し、4回目の主観申告時に回答してもらった。

Table.6 Measurement item (Experiment ②)

機器名	測定項目	測定部位
SDM (経皮的血液ガスモニタリング)	表2と同様	耳たぶ
silmee (生体センサ)	心拍数	胸部
	R-R間隔	
	呼吸間隔	
	体動	
手動式血圧計 HEM-6324T	表2と同様	上腕

Table.7 Questionnaire items (Experiment ②)

カテゴリー	内容	評価方法
環境的項目	表3と同様	表3と同様
	ストレス	7段階評価
心理的項目	集中度 ※3回目のみ	7段階評価
	リフレッシュ感 ※3回目のみ	7段階評価

4.5 実験手順

実験手順はFig.8の通りであり、計4回の主観申告と60分間のタイピング、5分間の100マス計算を実施した。

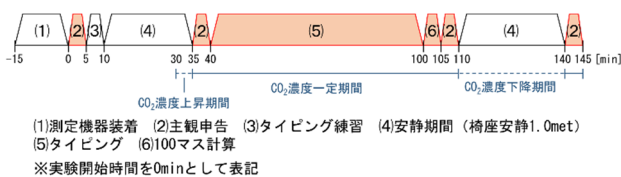


Fig.8 Time schedule (Experiment ②)

5. 実験② (CO₂濃度5分急上昇) 結果

5.1 作業性テスト結果

全3サイクルのタイピングのミス率を回数毎に並べたものをFig.9に示す。なお、a. 低CO₂濃度は600ppmの結果、b. 高CO₂濃度の被験者A、Cは3500ppm、被験者D、E、Gは5000ppmの結果である。被験者D以外においては回数を重ねる毎にミス率が減少するというような現象は見られないことから、慣れの影響を少なくすることができていると考えられる。同様に100マス計算においても被験者E以外では慣れの影響は見られなかった。

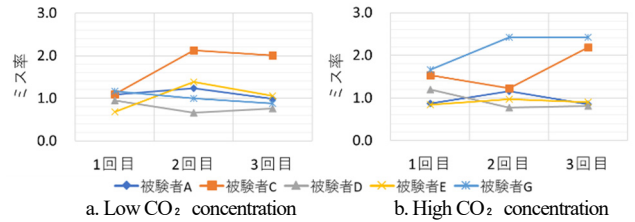


Fig.9 Error rate × Day (Experiment ②)

全3サイクルのタイピングのミス率(総ミス数/総ワード数)の平均値と100マス計算のミス率(ミス数/総回答数)の平均値をFig.10に示す。タイピングにおいては、600ppmに対し3500ppmで約10%、5000ppmでは約17%ミス率が増加しており、CO₂濃度が上昇することによりミス率が増加する傾向が確認された。100マス計算では、1500ppmから5000ppmにかけCO₂濃度が上昇することにより、ミス率が増加する傾向が確認された。

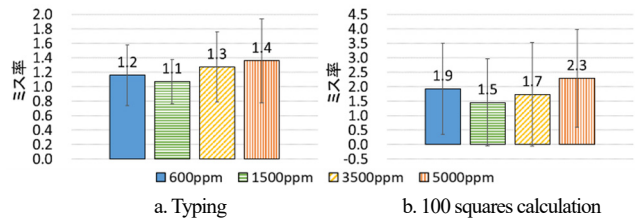


Fig.10 Error rate of workability test (Experiment ②)

5.2 心理量結果

主観申告の結果をFig.11に示す。600ppmに対し5000ppmで約11%集中度が低下し、高CO₂濃度において集中度が低下する傾向が確認された。その他の主観申告に関しては、CO₂濃度による差異は確認できなかった。

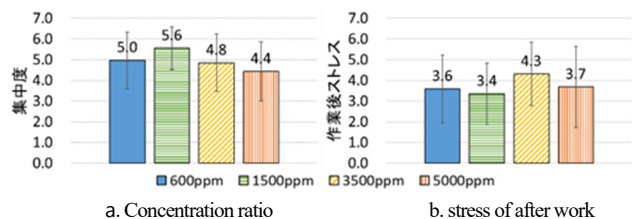


Fig.11 Questionnaire results (Experiment ②)

また、ねむけ感の結果をFig.12に示す。これは全サイクルの結果の平均値である。被験者毎による差は大きいですが、濃度上昇直後の2回目では5000ppmで、作業性テスト後の3回目では3500ppmでねむけ感が最も大きくなった。したがって、わずかではあるが高濃度においてねむ

け感が大きくなることが確認できた。

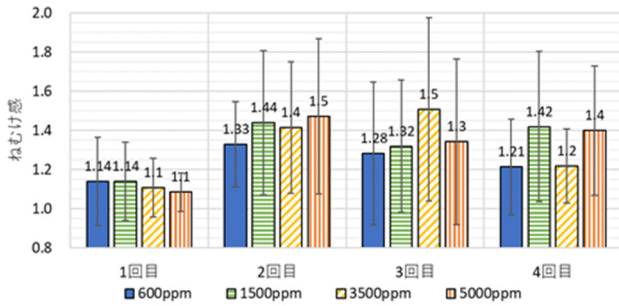


Fig.12 Sleepiness results (Experiment ②)

5.3 生理量結果

生理量として実験中PCO₂を測定したが、CO₂濃度とPCO₂の結果に関係性は見られなかった。仮に外気のCO₂濃度が5000ppmの場合、吸気中のCO₂分圧は3.8mmHgとなる。それに対して肺胞内の全圧は760mmHg、酸素分圧は約100mmHgと言われており、肺胞内のガス交換に関わる分圧に対し、吸気中のCO₂分圧は小さい値であるため、本実験のCO₂濃度では直接的なPCO₂への影響は少ない可能性が考えられる。一方、被験者Cにおいては全ケースにおいて一時的にPCO₂が下降する現象が見られた。実験中撮影していた動画を確認すると、PCO₂が下降したタイミングで被験者が深呼吸または欠伸をしており、それがPCO₂に影響したものと考えられる。

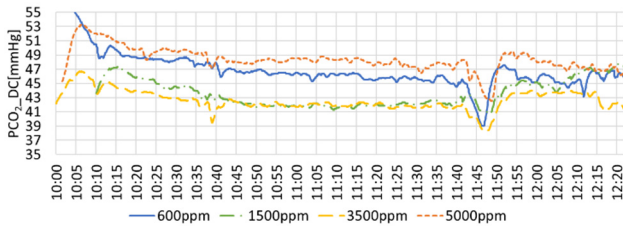


Fig.13 PCO₂ (sub. C)

また、全ての実験においてPRの上昇に伴いPCO₂が低下する挙動が確認できた。この現象は2019年度に実施した既往研究⁴⁾においても同様の傾向が確認できている。PRが高くなることにより血流がよくなり、血中CO₂濃度の低い新鮮な血液が流れてきたと考えられる。

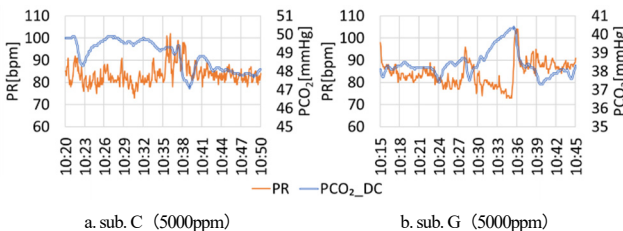


Fig.14 PR × PCO₂

また、全ての被験者において濃度上昇後の主観申告を行うタイミングでPRが上昇する傾向が見られた。しかし、低濃度においても同じような挙動が示されたため、CO₂濃度の影響よりも、リラックス状態からアンケートや作業性テストという緊張状態に移行したことが原因であると

考えられる。

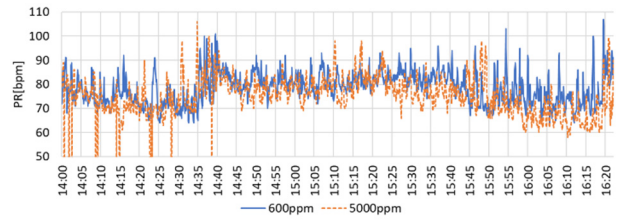


Fig.15 PR (sub. E)

6. まとめ

CO₂濃度を30分間で上昇させた実験①と、CO₂濃度を5分間で急上昇させた実験②を行い、結果は以下のようになった。

- 1) CO₂濃度が高くなると、タイピング、100マス計算の両方でミス率が大きくなる傾向が示された。タイピングにおいては、600ppmに対し5000ppmで約17%ミス率が増加した。
- 2) CO₂濃度が高くなると、集中度が低下する傾向が示された。600ppmに対し5000ppmにおいては約11%集中度が低下した。
- 3) 個人差はあるが、高CO₂濃度においてねむけがわずかに大きくなることが確認できた。
- 4) PRがPCO₂に影響を与えることが示唆された。

注釈

- 1) 調査票は日本産業衛生学会産業疲労研究会による。各25項目の質問を5つの群(I群:ねむけ感、II群:不安感、III群:不快感、IV群:だるさ感、V群:ぼやけ感)に分別しそれぞれを平均することにより、疲労状況を評価することができる。

参考文献

- 1) U. Satish, et al. “Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to- Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision- Making Performance”, Environ Health Perspect (2012)
- 2) J. G. Allen et al. “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, 124-7 (2016)
- 3) Tomoyuki CHIKAMOTO, Ryouto MIMURA, “Influence of Carbon Dioxide Fluctuation and Thermal Environment on Workability”, Physiology and Psychology, CLIMA 2019
- 4) 坂井遥祐ほか、「ヒューマンファクターを組み込んだ空調システム・制御システムの構築 (その19) 室内のCO₂濃度が血中CO₂濃度と他の生理量に及ぼす影響」、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第3巻、pp.101-104、(2020)