

人体呼気から吸気へのショートサーキットによる CO₂ 残留濃度に関する実験

環境都市専攻 建築都市デザインコース 6143120009-0 久保 隆明
(指導教員 近本智行)

1. はじめに

1.1 研究背景

吸気する CO₂ 濃度による人体への影響は、生理学という面においては盛んに研究されている。しかし、建築環境という面から、室内 CO₂ 濃度と執務者の知的生産性との関連性に着目した研究はほとんど見受けられない。また、これらに着目した研究では室内 CO₂ 濃度と執務者の知的生産性と関連性があるとされている^{文1)}が、しかし、CO₂ 濃度を空気質評価の指標として用いたアンケートによる定性的な結果であり、CO₂ 濃度そのものによる影響に着目し生理量といった定量的な面から検証した研究は見受けられない。

室内 CO₂ 濃度と執務者の関連性を示すためには、被験者の生理量を測定し定量的な結果から確認する必要がある。そこで本研究では、CO₂ 濃度変化による人体生理反応から定量的に室内 CO₂ 濃度と執務者の知的生産性との関連性の有無を検証することを目的としている。

1.2 研究内容

本報では、室内 CO₂ 濃度と執務者の知的生産性との関連性の検証の前に、以下の 2 点による影響の確認をする必要があるとし、検証を行ったため報告する。

まず、人体の 1 回の呼吸量は 500ml^{文2)} とされているが、状況によっては呼吸量の大小(浅い呼吸・深い呼吸)が変わる。同時に肺が得られる酸素濃度・肺から吐き出される CO₂ 濃度は異なると考えられるため、一回の呼吸量の違いが生理量に影響するかを確認する必要がある。そこで、被験者実験を行い、被験者に意図的に呼吸の強弱をつけさせ、各実験による影響が生理量に反映するかを検証した。また、呼吸量そのものを変えただけでは生理量への変化が確認されない、もしくは変化が確認されても変化量そのものが小さい可能性も懸念される。そこで、被験者の生理量が大きく変化すると考えられる息止めを被験者に行わせ、浅い呼吸・深い呼吸時の生理量変化との比較を行った。

次に、呼吸によって送出される高 CO₂ 濃度の呼気が呼吸域に滞在し、吸気時は呼気によって高められた高 CO₂ 濃度の空気を吸い込む可能性がある。その場合、室内 CO₂ 濃度を測定するだけでは被験者生理量への影響を把握することは難しい。そこで、呼気による呼吸域周辺の CO₂ 濃度性状への影響を検証するため、呼吸する人体模型を

作成し、呼吸を行わせることで検証した。

2. 被験者実験

2.1 実験概要

実験は立命館大学びわこ・くさつキャンパスの実験室にて、健康な男子大学生 2 名を被験者として行った。実験中の室内 CO₂ 濃度は総じて 600ppm 程度となっており、椅座安静状態の被験者(図 1)に 2 ケースの呼吸方法を意識的に行わせた。

生理量測定は血流量に着目して行い、赤外線酸素モニタ装置(図 2)を用い被験者の頸動脈・左脳の Δ O₂Hb・ Δ HHb・ Δ cHb^{注1)} 及び TOI 値^{注2)} の測定を行った。



図 1 実験風景



図 2 赤外線酸素モニタ装置

2.2 実験ケース

実験ケースを以下に示す。

(case1) 浅い呼吸と深い呼吸を繰り返し行う

1 回の呼吸量を通常より少なくさせる浅い呼吸を一定時間行い、その後に 1 回の呼吸量を通常より多くさせる深い呼吸を一定時間行う。この行為を繰り返し行わせた。

(case2) 息止めを行う

被験者に限界まで息を止めさせ、呼吸を開始してから落ち着くまでの生理量の変化を確認した。また、被験者の申告により、呼吸後に被験者が呼吸を整え終えた時間を確認した。

各ケースのタイムスケジュールは図 3 に示す。

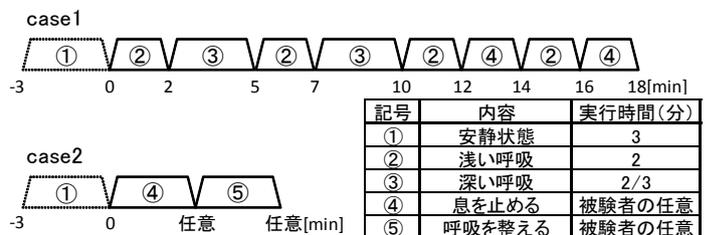
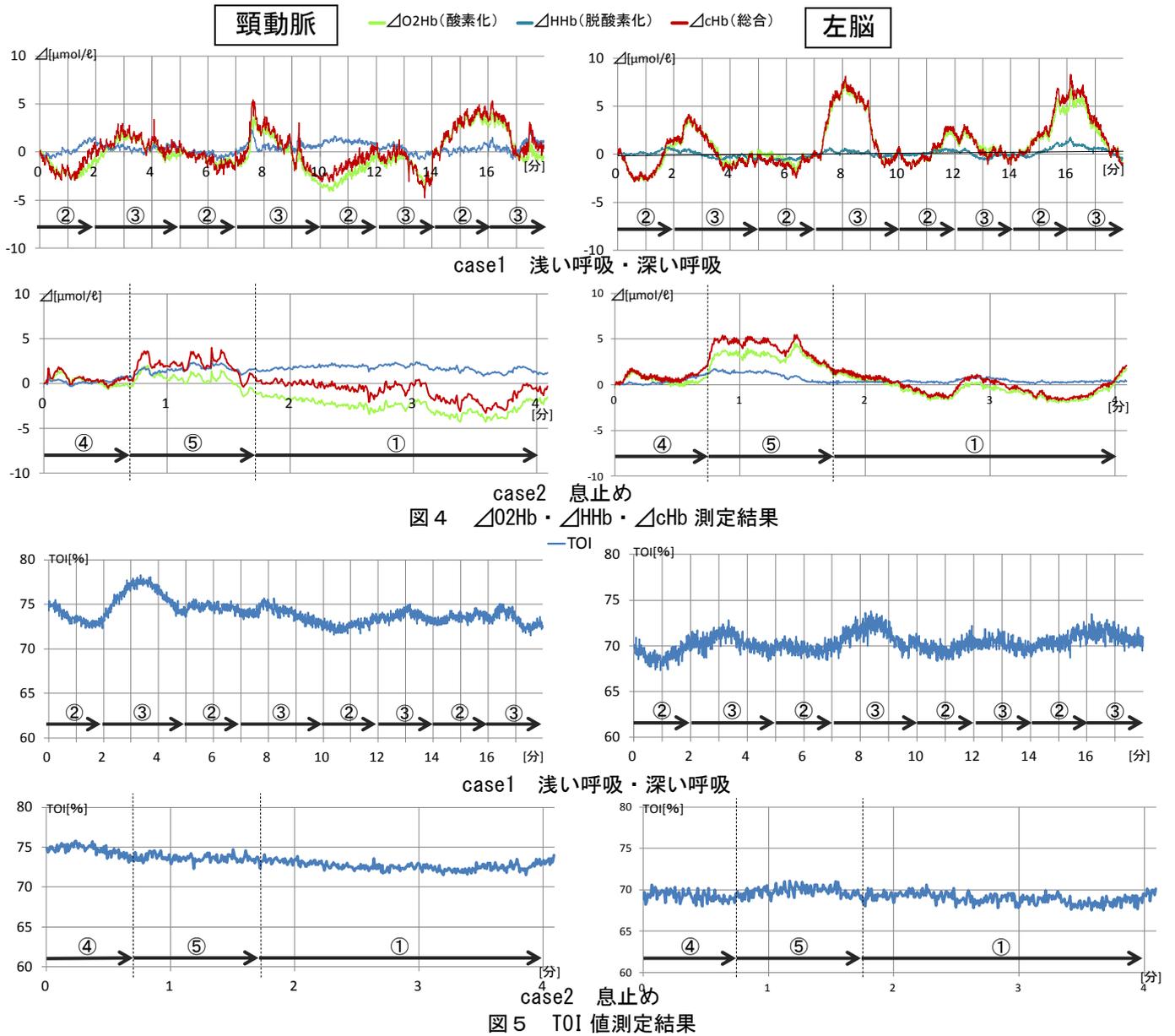


図 3 タイムスケジュール

2.3 実験結果

図 4・5 に代表者 1 名の生理量測定結果を示す。



case1 では頸動脈・左脳共に $\Delta HHb \cdot TOI$ が山なりに動いているように見え、浅い呼吸を行っている時間域より深い呼吸をする時間域のほうが大きな変化が見られる。しかし、 ΔHHb は呼吸法開始後 10 分までは浅い呼吸の中間地点時に谷、深い呼吸の中間地点時に山のピークとなるよう変動しているように見えるが、それ以降は山のピークの位置がずれている。また、代表者の結果は傾向が現れているように見て取れるが、しかし、もう一方の被験者の頸動脈は同様の傾向が見られたが左脳は異なり、呼吸法開始から 10 分までほとんど変化が見られなかったため、変化の傾向にも個人差による面が強く出る可能性があり、決まった傾向などを確認するには至っていない。

case2 では頸動脈・左脳共に、息を止めている段階では

なく、再呼吸を始めたタイミングで ΔcHb に大きな変動が見られる。これはもう一方の被験者にも同様の傾向が見られたが、しかし、再呼吸から数十秒後に大きな変動が見られた。また、息が整ったと申告したタイミングは代表者の ΔcHb が息止め開始時と同値付近まで下がった段階で申告されたが、もう一方の被験者は ΔcHb が大きく変動した際のピーク時に申告していたため、case1 と同様に変化の傾向にも個人差による面が強く出る可能性があり、決まった傾向などを確認するには至っていない。TOI は変化量が比較的少なかった。case1 との変化量の比較に関しては、変化の程度は個人差が強く見られ、変化の程度に傾向は見られなかった。

全体的に測定結果に個人差が強く見られ、頸動脈と左

脳における変化量の違いにおいても、これも個人差により変化の程度が変わり、決まった傾向などを確認するには至っていない。

3. 鼻周辺の CO₂ 濃度性状

3.1 呼吸サイクル

人体の呼吸量は個人ごとに差があるが、本研究では一回の呼気・吸気量を 500ml^{文2)}とし一回の呼吸サイクルを 6 秒^{文3)}(図 6)として実験を行った。また、呼吸流速は呼吸サイクルに合わせてポンプを押すため成り行きとなるが、鼻開口部を通過する空気の予測平均流速は 0.65m/s となる。

3.2 呼吸模型概要

呼吸する人体模型概要を図 7 に示す。呼気は手押しポンプにて呼気ガス袋 (CO₂: 4%、N₂: 96%) から呼気用ガスを送り、鼻開口部 (開口面積: 3.1cm²) から吹出角度 15°^{文3)}で送出^{注4)}される。吸気はポンプにて鼻開口部から空気を吸引し、吸気回収袋へと回収される。鼻開口部と各バルブまでを繋ぐチューブは人体の気管 (総容積: 150ml) を模擬したものであり、呼気・吸気動作時の呼気・吸気 500ml のうち 150ml はこのチューブ内に残留する。また、人体呼気と室内との温度差は再現していないため、浮力による影響は加味していない。

3.3 実験手法

実験室レイアウトを図 8 に示す。呼吸する人体模型に 3 分間、計 30 回呼吸を行わせ、呼吸による鼻周辺の CO₂ 濃度性状を測定する。測定位置 (図 10) は鼻頭頂部を基準位置として計 18 点測定を行った。

3.4 実験ケース

実験は以下の 3 ケース行った。

(case0)

呼吸域に障害物がなく、室内が無風状態での呼気の拡散を検証した。

(case1)

実験室内にある換気扇 (給気風量 140 m³/h) を用い、室内気流が乱れた状況で検証した。

(case2)

無風状態の室内で人体正面方向に机を置き、机による呼気残留への影響を検証した。

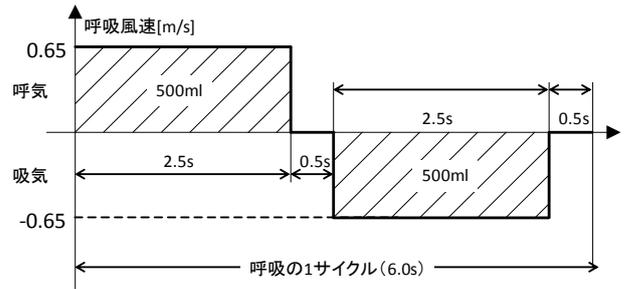


図 6 呼吸サイクル

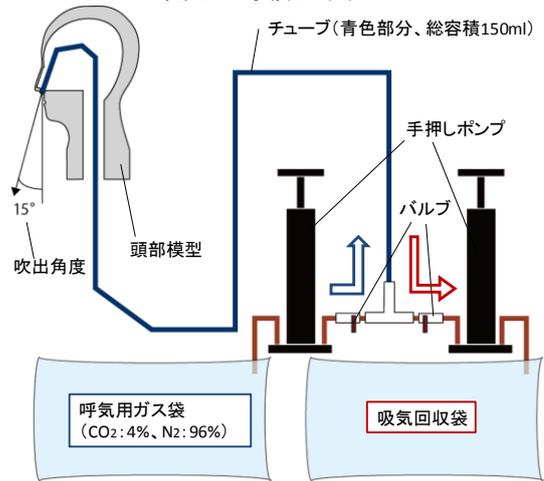


図 7 呼吸する人体模型概要図

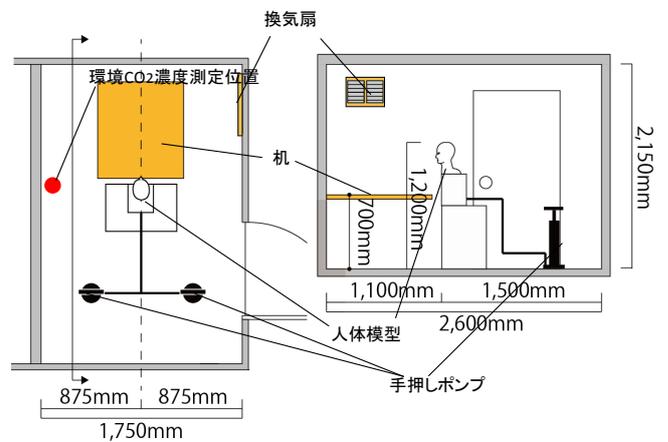


図 8 実験室レイアウト (左: 平面図、右: 断面図)



図 9 実験風景

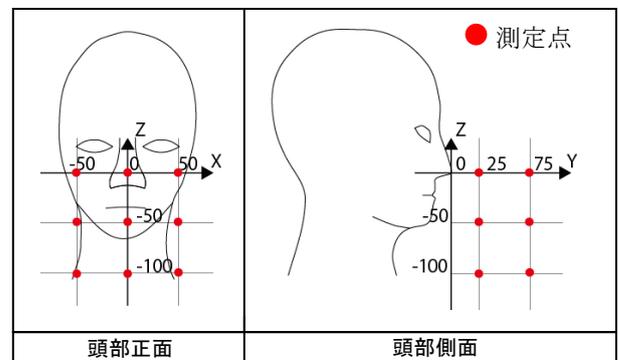


図 10 CO₂ 濃度測定位置

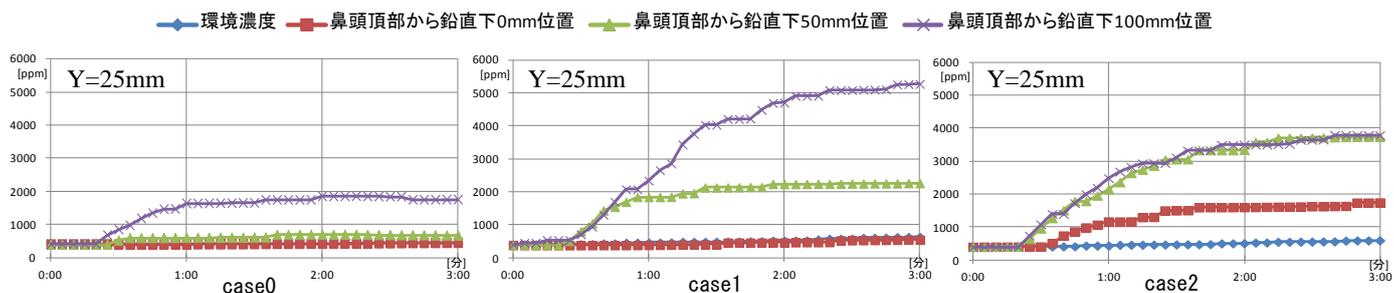


図 1 1 X=0mm、Y=25mmにおける CO₂ 濃度の時間変化

3.4 実験結果

図 11・表 1・2 に測定結果^{注5)}を示す。

case0 に関しては、X=0mm、Z=-100mm 地点においては 2000ppm 程度まで CO₂ 濃度上昇が見られたが、それ以外では 450ppm 程度と変化がほとんどない。その原因として、室内との温度による浮力といった呼気を拡散させる要因が無いと、鼻から呼気を噴出させた後は残留せず床へと流れるのみであったためと考えられる。

case1 に関しては、机による影響により、全体的に case1 より CO₂ 濃度上昇がみられ、特に Z=-100 地点においては他の測定地点より濃度上昇が大きい。机を設けることにより、呼吸域付近の呼気残留が見られたが、Y=25mm、Z=0mm といった吸気に影響が大きいであろう位置では影響は軽微であった。

case2 に関しては全体的な変化は case1 と大きな差はないが、X=0mm、Y=25mm、Z=0mm 地点の CO₂ 濃度が 1700ppm 程度まで上昇している。原因としては換気扇により呼気がより拡散されやすい状況となったためと考えられる。鼻へと吸気される空気は鼻開口部周辺の空気から一様に吸引されると考えられるため、室内気流が乱れているとき、人体は環境 CO₂ 濃度より高い濃度の空気を吸気している可能性がある。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 被験者実験では呼吸法の違いによる影響が血流量へと反映されたが、個人差による影響が強く、傾向を把握するまでには至らなかった。課題としては、個人差による影響がどこまで生理量に反映されるのかを把握する必要があると考えている。今後は、より細かな状況設定により、個人差以外のランダムな要素を除外した実験を行う、もしくは個人差が影響しにくい新たな生理量測定項目を検討すべきと考えている。

- 模型実験では case0・case2 は鼻周辺への影響は小さく、case1 は測定位置で鼻に最も近い位置の CO₂ 濃度が環境濃度よりも大きく上回る数値となった。しかし、今回は呼気と室内の温度差による浮力による要素を加味していないため、呼気の残留が少なかった可能性がある。今後はこの点を模型に取り入れた上での実験が必要である

表 1 Y=25mm 位置 3 分経過時 CO₂ 濃度

ケース	環境濃度 [ppm]	3分経過時CO ₂ 濃度[ppm]			
		Z \ X	-50mm	0mm	50mm
case0	477	0mm	458	445	457
		-50mm	449	664	451
		-100mm	520	1751	506
case1	631	0mm	566	546	549
		-50mm	531	2261	528
		-100mm	667	5271	845
case2	596	0mm	548	1745	575
		-50mm	634	3737	616
		-100mm	596	3788	593

表 2 Y=75mm 位置における 3 分経過時 CO₂ 濃度

ケース	環境濃度 [ppm]	3分経過時CO ₂ 濃度[ppm]			
		Z \ X	-50mm	0mm	50mm
case0	452	0mm	503	453	514
		-50mm	505	477	496
		-100mm	511	2184	466
case1	660	0mm	623	641	651
		-50mm	669	658	626
		-100mm	568	835	640
case2	604	0mm	532	561	523
		-50mm	512	516	534
		-100mm	586	903	591

注 1) ΔO_2Hb [$\mu mol/l$] は酸素を化学的に取り込んでいるヘモグロビン量の変化量、 ΔHHb [$\mu mol/l$] は酸素を取り込んでいないヘモグロビン量の変化量、 ΔcHb [$\mu mol/l$] は総ヘモグロビン量 (ΔO_2Hb と ΔHHb の総量) を表している。これらのパラメータは、微小時間隔で確認されたヘモグロビンの変化量を計測しているため、測定箇所を流れる血流量の大きさによって計測値が変化する。

注 2) TOI 値[%]: 血中ヘモグロビン中の酸素化ヘモグロビンの割合を表している。

注 3) 図中の $\Delta O_2Hb \cdot \Delta HHb \cdot \Delta cHb$ の数値はグラフの時間軸 0 分を 0 とした時の変化量を示している。

注 4) 鼻開口部には鼻が詰まらない程度に詰め物がされており、鼻から出る気流は層流ではなく乱流となって送出される。

注 5) 各測定結果は、呼吸開始時の CO₂ 濃度を 400ppm としたものととしている。また、鼻周辺の CO₂ 濃度の測定は、X 軸に沿って 3 同時に測定していたため、図・表中に示している環境濃度の値は、Z=0・-50・-100 地点を測定した時の環境濃度測定結果の平均値を示している。

文 1) 流田、田辺ら：低炭素化と知的生産性に配慮した最先端オフィスの調査研究：その 25 移転前後オフィスにおける夏季のアンケート調査およびコミュニケーション調査結果、日本建築学会学術講演梗概集 2012、p1391-1392、2012-09-12

文 2) 彼末・能勢：優しい生理学改訂第 6 版、p55-57、2012-10-10

文 3) 林、加藤、村上ら：室内化学物質による呼吸空気質汚染の数値解析とその制御に関する研究(その 9)：非定常の CFD 解析による呼吸域周辺流れ場と呼吸空気質性状の検討、日本建築学会学術講演梗概集 2001、895-896、2001-07-31