

人間の呼気に含まれる CO₂ を利用した居室の換気性能評価

田島研究室
1140021 井上 貴之

二酸化炭素濃度, 代謝量, 換気性能, 二酸化炭素呼出量

1. はじめに

トレーサーガスを用いて換気量を測定することが困難な実使用条件の居室などでは人間の呼気に含まれる CO₂ をトレーサーとしてその発生量を仮定することで換気量を推定する手法がとられることがある。斎藤らの教室環境の実態に関する調査研究^[1]や合原らの室内空気環境実測^[2]などの文献でも人間の CO₂ 呼出量をトレーサーとして居室の換気量を求めている。これらの人間の CO₂ 呼出量は JIS A1406^[3] に示されており 1974 年から現在まで使用されている。(表 1 参照)

2. 研究概要

本研究は JIS A1406^[3] おいて体重や身長等の個人の属性値によらず活動量ごとに単一の数字が示されている人間の CO₂ 呼出量を、体重や身長、年齢、性別などの様々な要因を説明変数として同定することを目的として実験を行った。また機械換気による換気量を設定した居室において呼気をトレーサーとした場合の換気性状の推定とその検証を行った。

3. 人間の CO₂ 呼出量の測定実験

3.1 実験概要

被験者による CO₂ 呼出量の測定実験の概要を表 2、実験機器と測定項目を表 3 に示す。実験では様々な属性の人に協力を依頼し CO₂ 呼出量や活動量を設定して測定を行い、それらの関係より CO₂ 呼出量の推定式を求めた。

人間の CO₂ 呼出量は表 2 に示した 3 つの活動を設定した。実験から推定式の作成までの手順を表 4 に示す。手順に示した算定にかかると式を (3-1) から (3-4) ^[4] に示す。

$$V_{CO_2} = V_{bag} \times C_{CO_2} \quad (3-1)$$

$$V_{O_2} = V_{bag} \times C_{O_2} \quad (3-2)$$

$$M = (0.23RQ + 0.77) \times 5.88 \times V_{O_2} \quad (3-3)$$

$$RQ = \frac{V_{CO_2}}{V_{O_2}} \quad (3-4)$$

ここで

V_{CO_2} : バッグ内 CO₂ 体積 [m³]

V_{bag} : バッグ容積 [m³]

C_{CO_2} : CO₂ 濃度 [%]

V_{O_2} : バッグ内 O₂ 体積 [m³]

C_{O_2} : O₂ 濃度 [%]

M : 代謝量 [W]

RQ : 呼吸商 [-]

表 1 JIS A1406^[3] に示されている人間の CO₂ 呼出量

作業中のエネルギー	CO ₂ 呼出量 [m ³ /h]
0 (安生息時)	0.011
0~1.0 (着座事務作業)	0.0129~0.0230
1.0~2.0 (徐歩行)	0.0230~0.0330
2.0~4.0 (軽労働)	0.0330~0.0538
4.0~7.0 (中労働)	0.0538~0.0840
7.0 以上 (重労働)	0.0840 以上

表 2 CO₂ 呼出量測定実験の条件

活動	着座安静	徐歩行	軽労働
実施条件	椅坐位	時速 2 km で歩行	時速 4 km で歩行
設定時間	10 分*	5 分	3 分
被験者数	23 人 (9)	23 人 (9)	23 人 (9)

*ダグラスバッグに呼気が入らなくなった時点で終了 最大 10 分間

() 内は女性、内数

表 3 測定機器と測定項目

測定項目	機器名	測定範囲・測定誤差
CO ₂ 濃度 O ₂ 濃度	HORIBA ポータブルガス分析計 PG-240	CO ₂ 0~5/10/20vol% O ₂ 0~5/10/25vol%
	ダグラスバッグ (竹井機器工業株式会社 TK-11288)	100L
室内温度 室内湿度 室内外大気圧	RVR-52L RTR-53AL	±0.5%+5dat. (0°C~40°C の環境下において) 平均 ±0.3°C, ±5%RH (25°C50%RH に於いて)
室内外 CO ₂ 濃度	CO ₂ センサー KNS-CO2S	±50ppm ±測定値の 5%
室内の換気量の 設定	気密測定器 (コーナートラック株式会社)	0Pa 2100/2400 m ³ /h (最大) 100v 50/60 Hz

表 4 被験者実験による CO₂ 呼出量の算定と推定式の作成手順

① 呼気をダグラスバッグに集める (条件は表 2 参照)
② ダグラスバッグ内の呼気をポータブルガス分析計より CO ₂ 濃度および O ₂ 濃度を測定する
③ ②の測定結果より、バッグ内の CO ₂ 体積を式(3-1)および O ₂ 体積を式(3-2)で算定し、あわせて代謝量を式(3-3)より算出
④ 上記結果をもとに測定時間でバッグ内 CO ₂ 体積を除すことで CO ₂ 呼出量を算出し、被験者の属性や代謝量等を説明変数として推定式を作成

3.2 実験結果

表 3 の測定項目に加え被験者の性別や年齢、身長、体重などの属性を説明変数とし CO₂ 呼出量の推定式を導出した。

図 1 に測定より得られた CO₂ 呼出量と代謝量を示す。図 1 より CO₂ 呼出量と代謝量には強い正の相関があり本研究では CO₂ 呼出量を代謝量から推定することにした。両者の関係を一次式で近似した結果を式 (3-5) に示す。

$$I_{CO_2} = 1.575 \times 10^{-4} M + 3.693 \times 10^{-4} \quad (3-5)$$

ここで

I_{CO_2} : CO₂呼出量 [m³/h]

M : 代謝量 [W]

次に代謝量の推定式を検討した。実用上、活動量を説明変数と置く。活動量はJISやISOでは後述するRMRやMet値で表される。なお建築環境工学では主にMet値を用いることが多いためMet値を説明変数とする。図2に代謝量とMet値の測定値の関係を示す。なおMet値は式(3-6)を文献^[5]より算出した。

$$Met_i = \frac{M_i}{M_{Si}} \quad (3-6)$$

ここで

Met_i : 被験者iのエネルギー代謝率 [-]

M_i : 被験者iのある作業時のエネルギー代謝量 [-]

M_{Si} : 被験者iの着席安静時のエネルギー代謝量 [-]

先述のとおり、身長や体重などの個人属性値を変数とする。身長及び体重をそのまま代謝量の説明変数とする場合、BMI(体重[kg]÷身長²[m²])を変数とする場合、及び体表面積を変数とする場合を検討し、最も説明力の高かった、体表面積を説明変数として採用した。体表面積は式(3-7)^[6]で示すもので、身長と体重より求められる。図3に活動強度ごとに代謝量と体表面積の関係を示す。

$$A_D = 0.007246 \times W^{0.425} \times H^{0.725} \quad (3-7)$$

ここで

A_D : 体表面積 [m²]

W : 体重 [kg]

H : 身長 [cm]

性別についてはダミー変数(女性0、男性1)を説明変数とし、代謝量の推定式に採用した。これらの説明変数全てを用いた代謝量の推定式を式(3-8)に表す。

$$M_i = 92.8A_D + 83.9Met + 17.2C_S - 141.1 \quad (3-8)$$

ここで

M_i : 代謝量 [W]

A_D : 体表面積 [m²]

C_S : 性別 女性0, 男性1

上記の式(3-5)、(3-8)より最終的に導出された推定式を(3-9)に表す。

$$I_{CO_2i} = 1.575 \times 10^{-4} (92.8A_D + 83.9Met + 17.2C_S - 141.1) + 3.693 \times 10^{-4} \quad (3-9)$$

図4に式(3-9)を用いて求めたCO₂呼出量とJIS A1409^{[974][3]}に

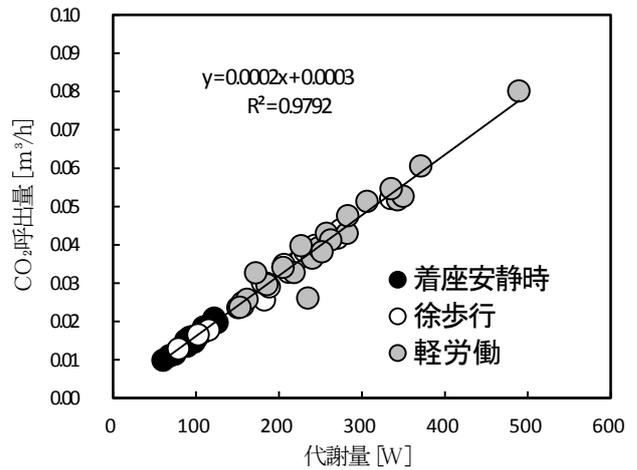


図1 CO₂呼出量と代謝量の測定値

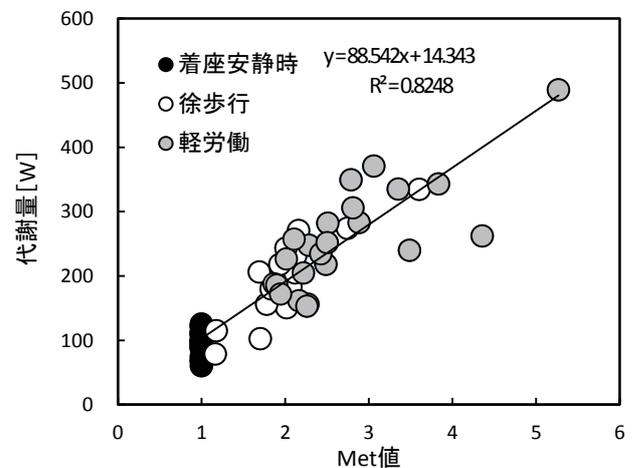


図2 代謝量とMet値^[8]

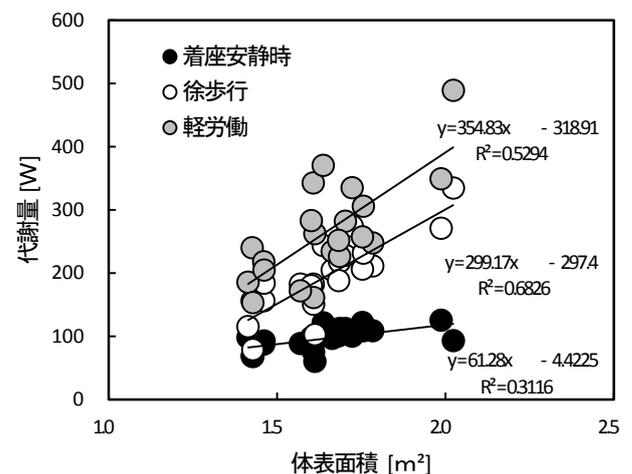


図3 代謝量と体表面積^[6]

示されているCO₂呼出量、当該JIS制定当時の身長、体重について構成年代別^[8]の加重平均値を式(3-9)に代入し求めたCO₂呼出量を示すのにJISではCO₂呼出量とRMR(エネルギー代謝率)の関係が示されておりMet値をRMRに変換した。RMR^[7]を式

(3-10)に表す。

$$RMR = 1.2 \times (Met - 1) \quad (3-10)$$

ここで

RMR : エネルギー代謝率 [-]

Met : Met [-]

本研究による推定式は JIS の値よりも少し大きい値を示し RMR=0 の条件で CO₂呼出量が 0.007[m³/h]の差異がある結果となった。

4. 居室における換気性状の推定実験

4.1 実験概要

CO₂呼出量をトレーサーとして実居室において換気性状の推定について検討する目的で複数の室で対象とした測定を行った測定概要を表3に示す。講義室2部屋（以下A室、B室とする）それぞれの平面図を図5、図6に示す。実測を行うに当たってA室は付属の機械換気設備を稼働させた条件で測定を行った。A室での測定は3ケース行い、B室では気密測定器（表2を参照）を使用することで換気量を設定し測定を行った。本研究の推定式より CO₂濃度を求める際、A室はアンケートより得た学生 55 人分の属性データを、B室では参加者 6 人の属性データを使用した。

4.2 実験結果

A室、B室の CO₂濃度を実測値と本研究の推定式より求めた理論値を図7、8、9、10に示す。室内の CO₂濃度は式(4-1)の多数室換気に関する微分方程式を用いて単室問題として算定した。図7では学生の退出後の CO₂濃度の減衰から換気回数を推定した。換気回数nの算出には文献^[5]の式(4-2)、(4-3)を用いた。

$$V \frac{dp_j}{dt} = I_{CO_2j} + \sum_{k=0}^N Q_{jk} (p_k - p_j) \quad (4-1)$$

$$\log_{10} \frac{p - p_0}{p_1 - p_0} = -\frac{1}{2.303} \frac{Q}{V} t \quad (4-2)$$

$$-\frac{1}{2.303} \frac{Q}{V} = -\frac{1}{2.303} n \quad (4-3)$$

ここで

p : 室内汚染物質濃度 [m³/m³]

p_0 : 外気汚染物質濃度 [m³/m³]

p_1 : 室内の初期汚染物質濃度 [m³/m³]

Q : 換気量 [m³/m²]

V : 室容積 [m³]

t : 時間 [h]

n : 換気量 [回/h]

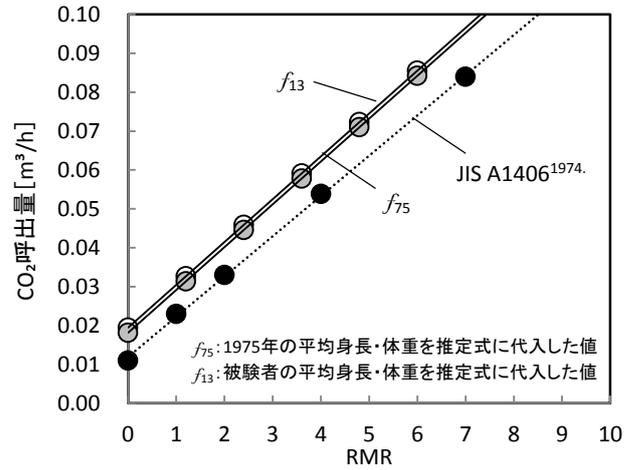


図4 JISのCO₂呼出量と推定式のCO₂呼出量

表3 測定概要

測定ケース	A-1	A-2	A-3	B-1
対象室名	A			B
室容積 [m ³]	468			141
機械換気量 [m ³ /h]	1300*			120
外気 CO ₂ 濃度 [ppm]	400	413	403	400
在室人数 [人]	58	58	61	6
被験者の属性把握	—	○ (100)	○ (95)	○

()内はアンケートの回答率[%] ※推定値 CO₂濃度減衰法により算定

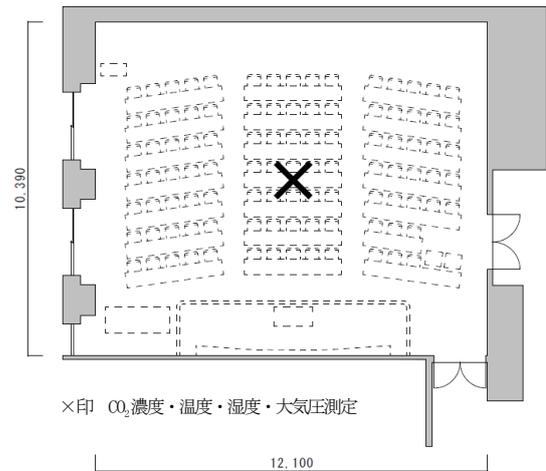


図5 A室の平面図

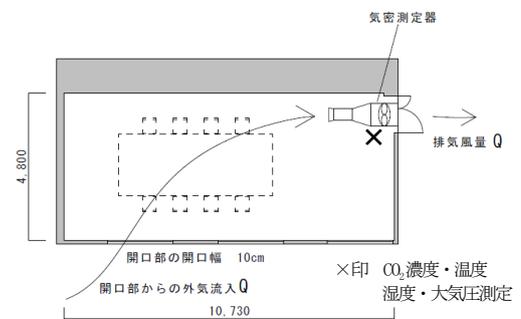


図6 B室の平面図 換気量の取得方法

A室の換気回数は2.9回/hとなり換気量1300m³/hを得た。図7にCO₂濃度の測定値と理論値を示す。図8では、講義開始後30分間は条件が不明だったため、機械換気が稼働した時間を初期値と理論値を算出した。測定値に対して本研究の推定式は前半の30分以外は実測値と変わらない値となった。

図9では講義内での学生の活動量を目視により確認しMet値1.0及びMet値1.2を設定した。この測定値に対して本研究の推定式は全体的傾向が一致している結果を得た。

図10のB室では気密測定器を排気扇として利用し換気量120m³/h~160m³/hの稼働条件で測定を行った。その結果、本ケースでも理論値は測定値の全体的傾向と一致している結果を得た。図11は全ケースの理論値と測定値の比較を行ったもので決定係数は0.9055となり測定値と理論値はほぼ一致している結果を得た。

5. まとめ

本研究ではCO₂呼出量に関する実験とCO₂呼出量をトレーサーとした場合の換気性状の推定とその検証を行った。CO₂呼出量を身長・体重・体表面積・Met値などより求めた推定式はJISの値とはRMR=0の条件でCO₂呼出量が0.007[m³/h]の差異があったが居室での実験では換気性状を一定の精度で把握できることを確認した。

6. おわりに

今後の研究としては被験者数を増やし、また幅広い年齢層を対象にした実験により一般化した推定式を作成することが望まれる。また、換気性能の評価は単室における評価は一定精度が確認されたため多数室への応用を検討したい。

謝辞

CO₂呼出量の推定実験では、本学の両角准教授、両角研究室学生各位、自発的の被験者各位に多大なる協力を頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

- [1] 斎藤基之・石井昭夫・塩月義隆・北山広樹, 教室環境の実態に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, 第40号, 日本建築学会, 149-152, 2001.3
- [2] 合原妙美・岩下剛, 鹿児島市内の小学校における室内空気環境実測, 日本建築学会環境系論文集, 第559号, 日本建築学会, 29-36, 2002.9
- [3] JIS A1406¹⁹⁷⁴ 室内換気量測定法(炭酸ガス法), 2013.11
- [4] Determination of metabolic rate, ISO8996, 2004.1
- [5] 田中俊六・武田仁・岩田利枝・土屋喬雄・寺尾道仁: 最新建築環境工学改訂3版, 井上書院, p50, 2014.1 上書院, p50, 2014.1
- [6] 社団法人 空気調和・衛生工学会: 空気調和衛生工学便覧(第14版)1基礎編, p330, 2014.1
- [7] Irving P. Herman, 「翻訳 人体物理学」: 動きと循環のメカニズムを探る, (株)エヌ・ティー・エス, p92, 2009.3
- [8] 厚生労働省, 平成23年国民健康・栄養調査, 2014.1

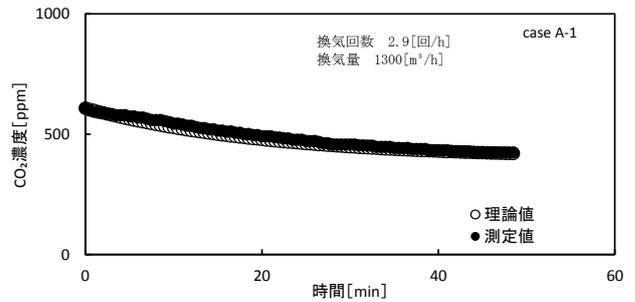


図7 換気回数の推定

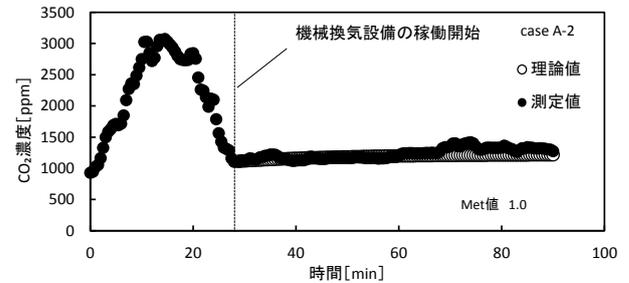


図8 A-2 室内CO₂濃度(理論値及び測定値)

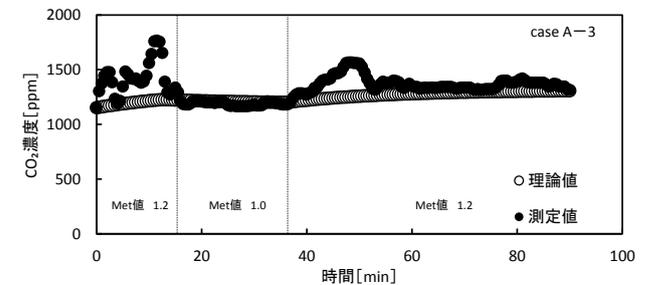


図9 A-3 室内CO₂濃度(理論値及び測定値)

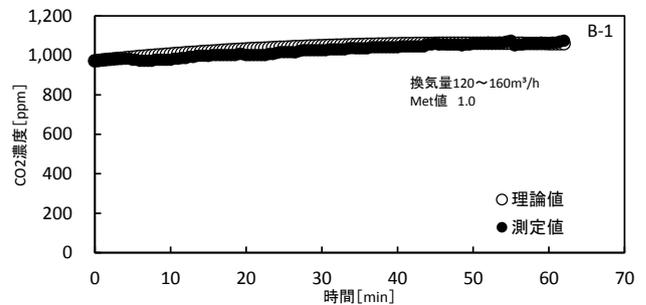


図10 B-1 室内CO₂濃度(理論値及び測定値)

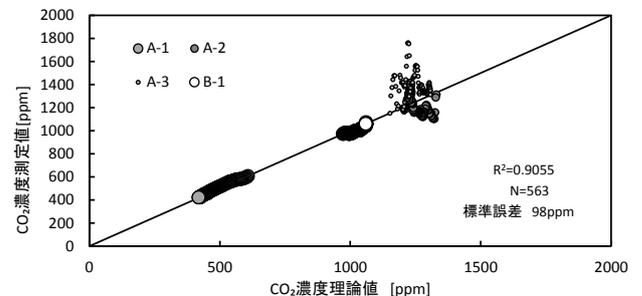


図11 居室における全実験結果
CO₂濃度(理論値及び測定値, 全実験結果)