

人間の呼気に含まれる CO₂ 呼出量推定式の精査

高知工科大学 システム工学群 建築都市デザイン専攻 建築環境研究室
学籍番号: 1150025 氏名: 大西裕治
指導教員: 田島昌樹

呼気 二酸化炭素 代謝量 年齢 性別

1. はじめに

実使用条件の居室などでは、人間の呼気に含まれる CO₂ をトレーサースガス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取られることがある。斎藤ら^[1]や合原ら^[2]の研究でも人間の CO₂ 呼出量をトレーサースガスとして換気量を求めている。この時の CO₂ 呼出量はたとえば JIS A1406^{1974[3]} (以下 JIS) に示されている値が用いられる。当該 JIS は 1974 年から現在まで日本工業標準調査会の確認を受けており、直近では 2014 年 10 月に確認されているが、改正はされず^[4] に使用され続けている。

先行研究^[5]で JIS の CO₂ 呼出量との比較を一目的とし、20 代の日本人のデータを収集した。また収集した呼気データを回帰分析することで CO₂ 呼出量推定式 (1-1) を作成した。なお式 (1-1) に使用する体表面積は式 (1-2)^[6] を用いて算出する。

$$P_{CO_2} = 1.589 \times 10^{-4} \times (94.4A_D + 83.9Met + 21.0C_g - 149.7) \quad (1-1)$$

$$A_D = 0.007246 \times W^{0.425} \times H^{0.725} \quad (1-2)$$

ここで

P_{CO_2}	: CO ₂ 呼出量 [m ³ /h]
A_D	: 日本人成人の体表面積 [m ²]
Met	: エネルギー代謝率 [-]
C_g	: 性別 女性 0, 男性 1
W	: 体重 [kg]
H	: 身長 [cm]

この推定式は一定の精度を持つことを確認している^[5] が、重回帰式によるため一部物理的、生理的な現象を表現するには至っていない。

そこで本研究では式 (1-1) を CO₂ 呼出量が体表面積や Met 値に比例する物理的、生理的な現象を表現しやすい形にする (以下一般化) とともに、年代や性別、人種に関して精査を行う事を目的とする。

2. 研究概要

本研究は以下の手順で行った。

- ① 先行研究の推定式 (1-1) の一般化
- ② 推定式の精査に用いる呼気データの収集を目的とした複数の属性を設定した呼気収集実験
- ③ 収集した呼気データによる推定式の精査
- ④ 単室における推定式の検定

3. CO₂ 呼出量推定式の一般化

3.1 既往の研究による CO₂ 呼出量の表現

ASTM D6245-12^[7] (以下 ASTM) に示されている CO₂ 呼出量の式 (3-1) は CO₂ 呼出量が体表面積と Met 値に比例しており、物理的、生理的な現象を表現しやすい形になっている。以下に ASTM の式 (3-1) と式 (3-1) で使用されている DuBois の体表面積の式 (3-2) を示す。

$$F = RQ \frac{0.00276A_{DB}Met}{(0.23RQ + 0.77)} \quad (3-1)$$

$$A_{DB} = 0.203 \times W^{0.425} \times H^{0.725} \quad (3-2)$$

ここで

F	: CO ₂ 呼出量 [L/s]
RQ	: 呼吸商 (0.83) [-]
A_{DB}	: 体表面積 [m ²]
W	: 体重 [kg]
H	: 身長 [m]

RQ について ASTM で示されている成人男性の設定値は 0.83、先行研究で取得した全呼気データの平均 RQ は 0.92 であった。

3.2 一般化の検討

CO₂ 呼出量推定式 (1-1) の一般化は、先行研究で取得した呼気データとして最も数が多い 20 代男性被験者の呼気データを用いて行った。本研究では事務室や教室等で行われると考えられる作業強度に焦点を当て、検討に使用する呼気データの Met 値を 3.0 以下とした。一般化した推定式 (3-3) を以下に示す。

$$P_{CO_2} = 1.601 \times 10^{-4} (60.63 \times A_D \times Met) \quad (3-3)$$

一般化後の式 (3-3) と一般化前の式 (1-1) に 20 代男性被験者の属性 (体重・身長) を代入して求めた CO₂ 呼出量の推定値と測定値を図 1 に示す。一般化する前と後で決定係数が 0.8887 から 0.8997 に増加した。

4. 呼気収集実験

CO₂ 呼出量推定式の精査で用いる呼気データの取得を目的として、様々な年代、性別、人種を複数設定し呼気収集実験を行った。ボランティアによる被験者の属性と人数を表 1 に、実験条件を表 2 に、実験で使用した機器と測定項目を表 3 に示す。呼気を収集する際の実施条件は 4 つに設定し、椅座静位の条件で呼気を収集する前に 30 分の安静時間を設けた。呼気データの収集は先行研究の方法^[8]に沿って行った。実験を行った結果、延べ 120 人

の呼気データを収集することができ、昨年度のデータと合わせて述べ 171 人の呼気データが得られた。

5. CO₂呼出量推定式の精査

5.1 精査の概要

実験で収集した呼気データを用いて年代や性別に関して一般化した CO₂ 呼出量推定式 (3-3) の精査を行い、年代、性別に関する係数として年齢係数 C_a 、性別係数 C_g を設定し、新しく推定式を作成する。作成する式 (5-1) の形を以下に示す。

$$P_{CO_2} = a \times A_D \times Met \times C_a \times C_g \quad (5-1)$$

ここで

a : 係数
 C_a : 年齢係数
 C_g : 性別係数

先行研究^[5]や ASTM^[7]より CO₂呼出量と代謝量は比例関係であることが分かっている。そのため本研究では年齢や性別による CO₂呼出量の差を基礎代謝量を用いて検討した。基礎代謝量は日本人の食事摂取基準 2015 年版^[9]に記載してある値を参考にした。基礎代謝量 [kcal/日] は基礎代謝基準値¹⁾ [kcal/日・kg] に体重 [kg] を乗じることで求められる。本研究の推定式 (3-3) の中には体表面積の式 (1-2) が変数として組み込まれており、式 (1-2) の中には体重が変数として組み込まれている。体重に関する変数を複数推定式の中に組み込む事を避けるため、基礎代謝基準値ではなく基礎代謝量で検討した。なお検討に使用した呼気データは一般化の時と同じく Met 値 3.0 以下の物を使用した。

5.2 年齢による CO₂呼出量の検討

年齢係数導入前の式 (3-3) は 20 代男性の呼気データで作成したため、18~29 歳の基礎代謝量を基準に対象の年代との基礎代謝量の比を年齢係数とした。表 4 に年代別の基礎代謝量、表 5 に 18~29 歳を基準とした年代別の基礎代謝量の比を示す。年齢係数を導入した式 (5-2) を以下に示す。

$$P_{CO_2} = 1.601 \times 10^{-4} (60.63 \times A_D \times Met \times C_a) \quad (5-2)$$

ここで

C_a : 年齢係数 (表 5 参照)

年齢係数を導入する前の式 (3-3) と導入した後の式 (5-2) に 30 代以上の男性被験者の属性を代入して求めた CO₂呼出量の推定値と測定値を図 2 に示す。年齢係数を導入したことにより決定係数が 0.7167 から 0.7354 に増加した。

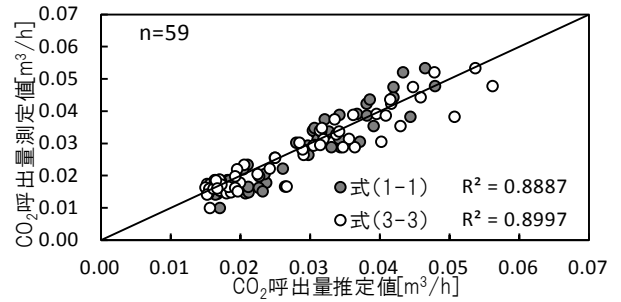


図 1 20 代男性被験者の CO₂呼出量の測定値と推定値

表 1 被験者の属性と人数

属性	人数
20 代日本人	18 (9)
30 代日本人	1 (1)
40 代日本人	4 (0)
50 代日本人	1 (0)
60 代日本人	1 (0)
留学生*	5 (2)
合計	30 (12)

* 留学生出身地は東南アジア 3 人・東アジア 1 人・アフリカ 1 人
 () 内は女性 内数

表 2 呼気収集実験の条件

活動	休息時		事務作業時		歩行時
	椅坐静位	タイプ・ワープロ	歩き回る		
実施条件					3.2km/h
設定時間	5 分	5 分	4 分		3 分
ASHRAE に示されている Met 値 ^[6]	1.0	1.1	1.7		2.0

表 3 測定機器と測定項目

測定項目	機器名	測定概要
CO ₂ 濃度	HORIBA ポータブルガス分析器 PG-240	測定範囲 CO ₂ 0~20vol% O ₂ 0~25vol%
	竹井機器工業株式会社 ダグラスバッグ TK-11288	容量 100L

表 4 年代別基礎代謝量^[9]

年齢	基礎代謝量 (kcal/日)	
	男	女
18~29	1520	1110
30~49	1530	1150
50~69	1400	1100

表 5 18~29 歳を基準とした年代別の基礎代謝量の比

年齢	基礎代謝量の比	
	男	女
18~29	1.00	1.00
30~49	1.01	1.04
50~69	0.92	0.99

5.3 性別による CO₂呼出量の検討

先行研究の推定式 (1-1) では性別による CO₂呼出量の差をダミー変数 (男性 1 女性 0) を用いて表現しており、JIS では比率 (男性 1 女性 0.9) により表現している。本研究でも性別による CO₂呼出量の差を比率で表現するため性別に関する検討を行った。性別係数導入前の式 (3-3) は 20 代男性の呼気データで作成したため、18~29 歳の男性と女性の基礎代謝量の比を性別係数とした。表 4 より

1) 基礎代謝基準値とは基礎代謝量を、“性及び年齢に応じ、日本人として平均的な体位を持った人を想定し、健全な発育並びに健康の保持・増進、生活習慣病の予防を考える上での参照値である参照体位”^[9]の参照体重 [kg] で除したものである。

性別係数は男性が 1.00、女性が 0.73 となった。以下に性別係数を導入した式 (5-3) を示す。

$$P_{CO_2} = 1.601 \times 10^{-4} (60.63 \times A_D \times Met \times C_g) \quad (5-3)$$

ここで
 C_g : 性別係数 (男性 1.00 女性 0.73)

一般化後に性別係数を導入した式 (5-3) と一般化する前の式 (1-1) に 20 代女性被験者の属性を代入して求めた CO_2 呼出量の推定値と測定値を図 3 に示す。一般化する前後では決定係数が 0.7072 から 0.7135 に増加した。

5.4 CO_2 呼出量推定式の決定

作成した CO_2 呼出量推定式 (5-4) を以下に示す。

$$P_{CO_2} = 1.601 \times 10^{-4} (60.63 \times A_D \times Met \times C_a \times C_g) \quad (5-4)$$

ここで
 C_a : 年齢係数 (表 5 参照)
 C_g : 性別係数 (男性 1.00 女性 0.73)

図 4 に作成した式 (5-4) と先行研究の式 (1-1) に全ての日本人被験者の属性を代入して求めた CO_2 呼出量の推定値と測定値を示す。決定係数は 0.8200 から 0.8561 に増加した。次に JIS や ASTM の CO_2 呼出量と比較した結果を図 5 に示す。図 5 には本研究の CO_2 呼出量推定式 (5-4) と ASTM の CO_2 呼出量の式 (3-1) に 20 代男性被験者の平均体重、身長を代入して求めた CO_2 呼出量と JIS に示されている CO_2 呼出量を示している。本研究で作成した推定式から求めた CO_2 呼出量は Met 値 1.0 のとき $0.0170m^3/h$ となり、JIS に示されている CO_2 呼出量と比較すると $0.0050m^3/h$ 多い結果となった。

5.5 人種に関する検討

人種による CO_2 呼出量の検討を行った。作成した推定式 (5-4) に留学生被験者の属性を入力して求めた CO_2 呼出量と、日本人被験者の属性を入力して求めた CO_2 呼出量を比較した。図 6 に留学生被験者と日本人被験者の CO_2 呼出量の推定値と測定値を示す。なお留学生の体表面積は式 (1-2) を用いて求めた。図 6 より留学生の測定値と日本人の測定値に大きな差異は見られなかった。次に留学生の CO_2 呼出量の推定値と測定値の差が統計的に有意かを確かめるために、有意水準 5% で両側検定の t 検定を行った。全留学生の推定値の平均値は $0.0226m^3/h$ 、測定値の平均値は $0.0227m^3/h$ であった。t 検定の結果、有意な差は見られなかった。

6. 単室における CO_2 呼出量推定式の検定

6.1 測定概要

先行研究で推定式の精度を検定した測定対象室の概要を表 6 に示す。また表 7 に測定機器と測定項目を示す。測定対象室は 2 室 (A 室、B 室) で、A 室は付属の機械換気

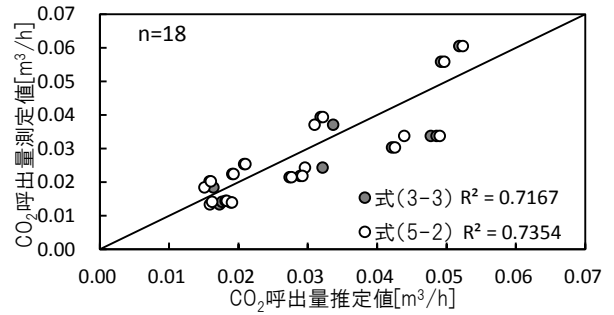


図 2 30 代以上の男性被験者の CO_2 呼出量の推定値と測定値

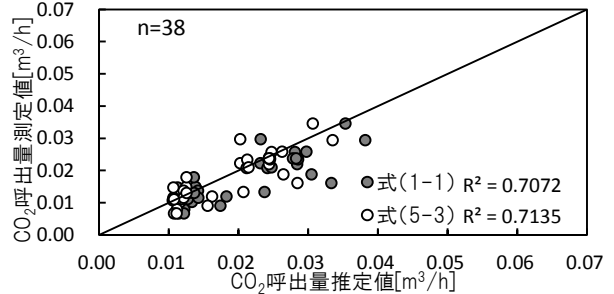


図 3 20 代女性被験者の CO_2 呼出量の推定値と測定値

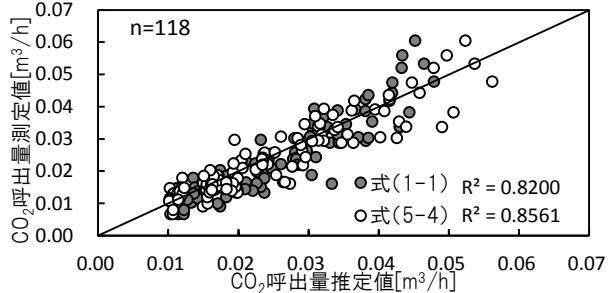


図 4 全被験者の CO_2 呼出量測定値と推定値

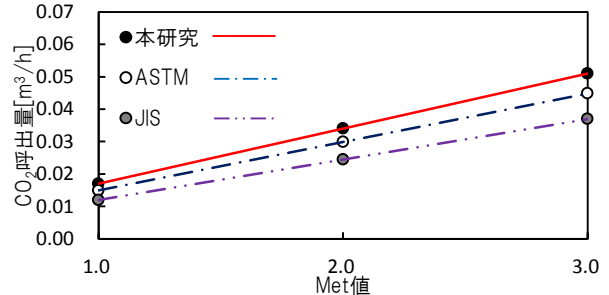


図 5 CO_2 呼出量の比較

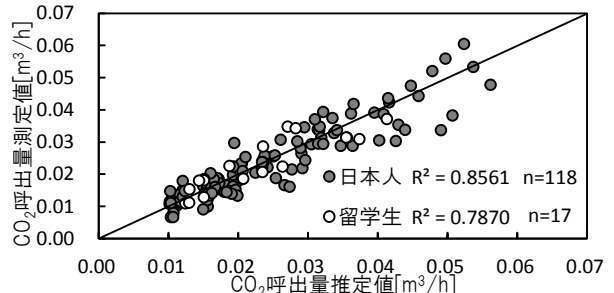


図 6 日本人と留学生の CO_2 呼出量推定値と測定値

設備を稼働させた条件で、室の中央に CO_2 濃度計を設置し測定を行った。B 室では換気設備の代わりに気密測定器を利用することで換気量を設定した。 CO_2 濃度計を排出口近

くに設置し、完全拡散に近いと考えられる条件で測定を行った。

表 6 測定対象室の概要

検討ケース	A-1	A-2	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]	413	403	400
在室人数 [人]	58 (18)	60 (20)	6 (1)

* CO₂ 濃度減衰法による計算値
() 内は女性 内数

表 7 測定機器と測定項目

測定項目	機器名	測定概要
CO ₂ 濃度	CO ₂ センサー KNS-CO2S	測定誤差 ±50ppm ±測定値の 5%
	RVR-52L	測定誤差 ±5%+5dat (0~40℃の環境下において)
室内の 換気量の設定	気密測定器 (コーナール観株式会社)	出力範囲 0Pa 2100/2400m ³ /h (最大) 100V 50/60Hz

6.2 検定概要

本研究で作成した CO₂ 呼出量推定式 (5-4) から求めた室内 CO₂ 濃度理論値を測定値と比較する検定を行った。同時に ASTM の CO₂ 呼出量の式 (3-1)、JIS に示されている CO₂ 呼出量の値を用いて室内 CO₂ 濃度を求めた。式 (5-4) と式 (3-1) から CO₂ 呼出量を求める際、A 室ではアンケートにより取得した在室者の属性データ (体重・身長・年齢・性別) を、B 室では参加者 6 人の属性データを使用し、どちらの室も目視で確認した Met 値を用いた。それぞれの居室の CO₂ 濃度は、以下に示す単室の換気に関する微分方程式 (6-1) を用いて求めた。

$$\frac{dC_i}{dt} V_i = \sum P_{CO_2} + Q_{io} (C_o - C_i) \quad (6-1)$$

ここで

- V_i : i 室の容積 [m³]
- Q_{io} : 換気量 [m³/h]
- C_o : 外気 CO₂ 濃度 [m³/m³]
- C_i : i 室の CO₂ 濃度 [m³/m³]

6.3 検定結果

A 室、B 室の CO₂ 濃度の測定値と式 (6-1) を用いて求めた理論値を図 7、図 8、図 9 に示す。理論値として、本研究の推定式を用いて求めた値、ASTM の式を用いて求めた値、JIS に示されている CO₂ 呼出量を用いて求めた値を示す。すべての測定条件において、本研究の推定式を用いて求めた理論値は、式を新しくしたことで先行研究と数値が変わっているが全体的な傾向は変化しなかった。B-1 室では測定値との RMSE が 17 となり、測定値と本研究の推定式から求めた理論値がほとんど一致する結果となった。他の条件でも測定値との RMSE は ASTM や JIS と比べて最小となる結果となった。

7. まとめ

本研究は人間の呼気に含まれる CO₂ 呼出量推定式の精査と、新しく作成した CO₂ 呼出量推定式の単室での検定を行った。新しく作成した推定式は、目視による Met 値や在室者の身長、体重、年齢、性別から精度よく CO₂ 呼出量を推定する物になった。単室の室内 CO₂ 濃度を推定した結果、ASTM の CO₂ 呼出量の式や JIS で示されている CO₂ 呼出量の値を用いて推定した場合より、本研究の推定式を用いた方がより高い精度で居室の CO₂ 濃度を推定できることを確認した。

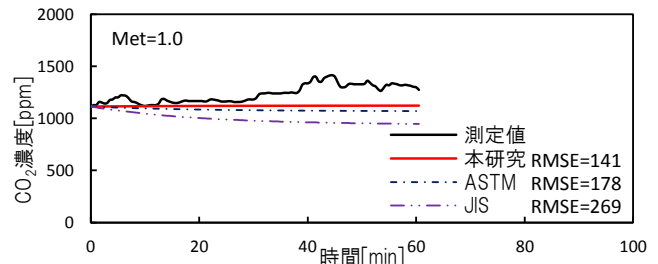


図 7 A-1 室内 CO₂ 濃度

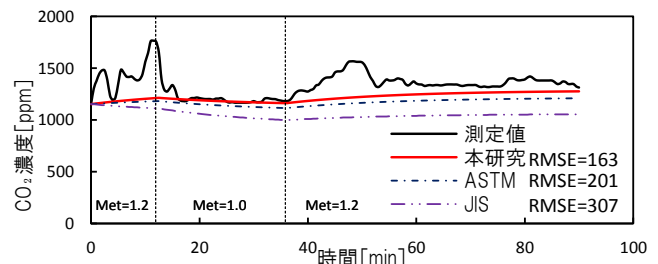


図 8 A-2 室内 CO₂ 濃度

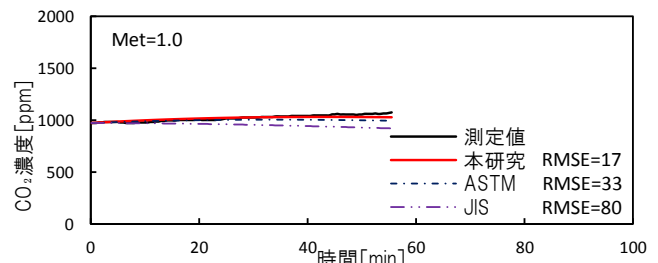


図 9 B-1 室内 CO₂ 濃度

参考文献・本研究に関する既発表論文

- [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調査研究その 4 教室の二酸化炭素濃度と換気について, 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), 2014.10
- [4]日本工業標準調査会「データベース-JIS 詳細表示」, <http://www.jisc.go.jp/app/pager?id=2105645>, 2015.2.10 取得
- [5]Masaki TAJIMA・Takayuki INOUE・Yuji Ohnishi, DERIVATION OF EQUATION FOR PERSONAL CARBON DIOXIDE IN EXHALED BREATH INTENDED TO ESTIMATION OF BUILDING VENTILATION, Ventilation and airtightness in transforming the building stock to high performance PROCEEDINGS, p427-p435, AIVC, 2014.9
- [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, 2010.2
- [7]ASTM D6245-12, Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation, American society for Testing and Materials International, 2012
- [8]田島昌樹・井上貴之・大西裕治, 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 その 1 研究概要, 日本建築学会四国支部研究報告集, 第 14 号, 日本建築学会, 73-74, 2014.5
- [9]「日本人の食事摂取基準 (2015 年版)」策定検討会報告書, 厚生労働省, p65-66, 2014.3
- [10]大西裕治・井上貴之・田島昌樹, 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 その 2 人間の CO₂ 呼出量の測定, 日本建築学会四国支部研究報告集, 第 14 号, 日本建築学会, 75-76, 2014.5
- [11]井上貴之・田島昌樹・大西裕治, 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 その 3 居室における換気性状の推定実験, 日本建築学会四国支部研究報告集, 第 14 号, 日本建築学会, 77-78, 2014.5
- [12]大西裕治・井上貴之・田島昌樹, 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 その 1 人間の CO₂ 呼出量の推定式の導出と実空間への適用, 日本建築学会大会学術講演概要集, 日本建築学会, p831-832, 2014.9
- [13]井上貴之・大西裕治・田島昌樹, 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 その 2 必要換気量についての検討, 日本建築学会大会学術講演概要集, 日本建築学会, p833-834, 2014.9