

修 士 論 文

人間の呼気に含まれる二酸化炭素を利用した
室の換気測定法に関する研究

Study on Measurement Method of Ventilation in Rooms Using
Carbon Dioxide Produced by Occupants

高知工科大学大学院
工学研究科基盤工学専攻

依 光 剛 志

2019年1月

平成 30 年度 修士論文

人間の呼気に含まれる二酸化炭素を利用した
室の換気測定法に関する研究

高知工科大学大学院

工学研究科基盤工学専攻 社会システム工学コース

建築環境研究室 1215062

依光 剛志

指導教員 田島 昌樹 准教授

副指導教員 高木 方隆 教授

副審査員 大内 雅博 教授

論文要旨

室内環境で居住者に直接影響を与える要因として温度や湿度、空気の清浄度、照度などがあり、空気の清浄度は換気が一つの重要な要件となる。建物の換気について設計でよく用いられる汚染物質の基準濃度として、「建築物における衛生的環境の確保に関する法律」に示されている) 二酸化炭素 (CO₂) 濃度 1000 ppm 以下が挙げられる。しかしながら、換気量そのものを測定することは法律には定められていない。

居室の換気量を測定する方法としてトレーサガス法がある。ガスを居室内に発生させてガスの放出量と室内濃度の変化から換気量を測定する方法である。ガスによっては人体に影響があるため実際の換気量測定は在室者がいない状態で測定が行われることが多く、運用時の換気量を測定できているとは言い難い。しかし、人間の呼気に含まれる二酸化炭素をトレーサとして用いてその発生量を既知とすることで換気量を測定することができる。機械による発生方法と比較すると精度が低いことが課題として挙げられるが、安全かつ簡便に運用時の換気量を求めることができると考えられる。

本論文では、換気性状測定および換気量測定の不確かさを把握することを目的に室の条件を定常状態と非定常状態で、それぞれの換気性状測定および換気量測定の不確かさの算出を試みた。また複数の二酸化炭素呼出量の推定手法および在室者のエネルギー代謝率 (Met 値) の推定手法に関する精度確認を行った。

Met 値の推定手法および CO₂ 呼出量算出に関する精度向上では、被験者実験の結果から Met 値および CO₂ 呼出量について精度確認を行った。Met 値推定手法と CO₂ 呼出量推定手法との組み合わせについて検討を行い、関係式や ASTM の式を用いた場合は Met 値推定手法として活動量計の測定値や ASHRAE に示されている値を用いることで推定精度が向上することを確認した。

換気性状測定および換気量測定の不確かさについて定常状態では、不確かさの伝播側より定常時の換気に関する式を偏微分した式から不確かさの算出を行った。また非定常状態についてはモンテカルロ法による計算より不確かさを算出した。その結果、換気量測定の不確かさは約 20%程度になり、換気性状測定では約 15%程度であることを確認した。換気量測定および換気性状測定の不確かさは、活動量計および文献値を用いることで推定できることを確認した。

Abstract

Indoor temperature, humidity, air cleanliness and illuminance are the factors directly affecting occupants. Air cleanliness is especially affected by ventilation in buildings. The carbon dioxide concentration of 1000 ppm or less is often used as a standard concentration of pollutants in designing concerning the ventilation of buildings. (shown in the "Law for securing sanitary environment in buildings".) There are several laws related to ventilation, but the ventilation rate isn't required to verify.

Carbon dioxide included in exhaled breath is often used as a tracer gas when estimation of ventilation aspect in buildings with occupants is performed. Indoor carbon dioxide concentration is also adopted evaluation of ventilation commonly. It is needed for these investigations to grasp occupants' carbon dioxide production rate accurately.

A purpose of this study is grasping the uncertainties of the ventilation property measurement and the ventilation rate measurement. The uncertainties of both steady and non-steady conditions are calculated. The accuracy of estimation methods of occupants' carbon dioxide production rate and occupants' metabolic rate are confirmed.

In the estimation method of improvement concerning to the calculation for Met value and the carbon dioxide production rate, the accuracy is confirmed from the result of subject experiments. The combination of the Met value estimation methods and the carbon dioxide production rate estimation methods are examined. The estimation accuracy is improved by using measurement values of the triaxial accelerometers or the literature values (ASHRAE) as the Met value estimation method, when using the estimation equation or the ASTM equation.

The uncertainties of the ventilation property measurement and the ventilation rate measurement in steady condition, are calculated from the law of propagation of uncertainty. The uncertainty of the non-steady conditions is calculated by the Monte Carlo method. As a result, it confirmed that the uncertainty of the ventilation rate measurement is about 20% and the ventilation property measurement about 15%. It is also confirmed that the uncertainties of the ventilation rate measurement and the ventilation property measurement, can be estimated by using the measurement values of triaxial accelerometers and the literature values.

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	既往の研究	2
1.3	本研究の目的と概要	2
1.4	本論文の構成	3
	参考文献<第1章>	4
第2章	本研究に関する基本事項	6
2.1	はじめに	6
2.2	換気に関する基本事項	6
2.2.1	換気回数と換気量	6
2.2.2	換気手法の分類	6
2.2.3	トレーサガスによる換気量測定 ^[2-1] 註1	7
2.3	人間の呼気に関する基本事項	9
2.3.1	エネルギー代謝率	10
2.3.2	基礎代謝量	13
2.3.3	体表面積	15
2.3.4	呼吸商 RQ	16
2.3.5	心拍数	16
2.4	人間の二酸化炭素呼出量に関する規格および既往研究	17
2.4.1	JIS A1406-1974	17
2.4.2	SHASE-S102	17
2.4.3	ASTM D6245	18
2.4.4	Persily の式	19
2.4.5	先行研究の関係式	19
2.5	精度や誤差, 不確かさに関する語句および概念	21
2.5.1	従来の概念	21
2.5.2	新規の概念	23
2.6	統計的検討に関する語句	24
2.7	終わりに	26
	参考文献<第2章>	27
第3章	エネルギー代謝率および二酸化炭素呼出量の推定精度	29
3.1	はじめに	29

3.2	被験者実験の測定概要	29
3.2.1	エネルギー代謝率	32
3.2.1	二酸化炭素呼出量	33
3.3	被験者実験の測定結果	33
3.3.1	エネルギー代謝率	33
3.3.2	二酸化炭素呼出量	39
3.4	各推定式の精度に関する精査	47
3.5	おわりに	56
	参考文献<第3章>	57
第4章	単室実験による二酸化炭素発生量の精度確認	58
4.1	はじめに	58
4.2	単室での換気性状測定実験	58
4.2.1	測定概要	59
4.2.2	測定結果	62
4.2.3	人間の呼気を用いた場合とマスフローコントローラーを用いた場合の比較	69
4.3	おわりに	70
	参考文献 <第4章>	71
第5章	二酸化炭素呼出量を用いた換気量測定の精度確認	72
5.1	はじめに	72
5.2	換気量測定法に関する既往研究	72
5.3	換気量測定法 ^[5-1]	73
5.3.1	濃度減衰法	73
5.3.2	連続発生法	74
5.4	マスフローコントローラーによる換気量測定	75
5.4.1	測定概要	75
5.4.2	測定結果	76
5.5	人間の呼気による換気量測定	78
5.5.1	測定概要	78
5.5.2	測定結果	79
5.6	おわりに	81
	参考文献 <第5章>	82
第6章	実測に基づく換気性能評価の試行	83
6.1	はじめに	83
6.2	不確かさおよび誤差	83
6.2.1	二酸化炭素呼出量推定値	85

6.2.2	誤差伝播の法則.....	87
6.2.3	モンテカルロ法による繰り返し計算.....	88
6.3	理論的な二酸化炭素濃度および換気量の不確かさの算出.....	101
6.3.1	二酸化炭素呼出量関係式の不確かさおよび誤差.....	101
6.3.2	定常状態の換気量および室内濃度.....	102
6.3.3	非定常状態の換気量および室内濃度.....	110
6.4	実測値との比較.....	128
6.4.1	理論モデルと実測モデルの比較.....	128
6.4.2	室内二酸化炭素濃度.....	131
6.4.2	換気量.....	134
6.5	おわりに.....	136
	参考文献<第6章>.....	136
第7章	総括.....	138
7.1	本研究の総括.....	138
7.2	まとめおよび今後の展望.....	140
謝辞	1	
付録	2	
付録A:	ダグラスバッグ法より得られた二酸化炭素呼出量測定値と推定値の比較.....	i
付録B:	各二酸化炭素呼出量推定式の Met 値, 年齢および性別の関係.....	ix
付録C:	室内二酸化炭素濃度, 換気量の単室実験の測定結果.....	xi
[1]	室内 CO ₂ 濃度の測定結果(人間の呼気を用いた場合).....	xi
[2]	室内 CO ₂ 濃度の測定結果(マスフローコントローラーを用いた場合).....	xii
[3]	換気量の測定結果(マスフローコントローラーを用いた場合).....	xiii
付録D:	ASTM や JIS の式を用いた換気量, 二酸化炭素濃度の不確かさと誤差の同定.....	xiv
[1]	CO ₂ 呼出量について.....	xiv
[2]	室内 CO ₂ 濃度の計算結果.....	xvii
[3]	換気量の計算結果.....	xix
[4]	室内 CO ₂ 濃度の測定結果_人間の呼気の場合.....	xxi
[5]	室内 CO ₂ 濃度の測定結果_マスフローコントローラー.....	xxv
[6]	換気量の測定結果.....	xxvi

図目次

図 2-1 : 機械換気方式の種類.....	7
図 2-2 : 単室の濃度変動.....	7
図 2-3 : 瞬時一様拡散の濃度変換.....	8
図 2-4 : 平成 28 年度被験者の基礎代謝量.....	14
図 2-5 : 平成 26 年度被験者の基礎代謝量.....	14
図 2-6 : 不確かさ評価と従来の精度評価の関係図 ^[2-27]	21
図 2-7 : 分布と誤差.....	22
図 3-1 : 相関係数が低い被検者の回帰式.....	34
図 3-2 : 相関係数が高い被検者の回帰式.....	34
図 3-3 : Met _D の範囲.....	34
図 3-4 : 脈拍数 (全分) の範囲.....	34
図 3-5 : 脈拍数 (1 分) の範囲.....	34
図 3-6 : Met _a (平均値) の範囲.....	34
図 3-7 : Met _a (最頻値) の範囲.....	34
図 3-8 : Met _a (中央値) の範囲.....	34
図 3-9 : 各 METs の不確かさ (標準偏差).....	35
図 3-10 : 各 Met 値の不確かさ (標準偏差).....	35
図 3-11 : 各 METs の標準誤差 SE.....	35
図 3-12 : 各 Met 値の標準誤差 SE.....	35
図 3-13 : 各 METs の RMSE.....	36
図 3-14 : 各 Met 値の RMSE.....	36
図 3-15 : 各 METs の標準誤差.....	36
図 3-16 : 各 Met 値の標準誤差.....	36
図 3-17 : CO ₂ 呼出量関係式の RMSE.....	39
図 3-18 : ASTM-12 の RMSE.....	39
図 3-19 : ASTM-18 の RMSE.....	39
図 3-20 : JIS の RMSE.....	39
図 3-21 : Persily (Sohofeld) の RMSE.....	39
図 3-22 : CO ₂ 呼出量関係式の標準誤差.....	40
図 3-23 : ASTM-12 の標準誤差.....	40
図 3-24 : ASTM-18 の標準誤差.....	40
図 3-25 : JIS の標準誤差.....	40
図 3-26 : Persily (Sohofeld) の標準誤差.....	40
図 3-27 : CO ₂ 呼出量関係式の不確かさ.....	40
図 3-28 : ASTM-12 の不確かさ.....	40
図 3-29 : ASTM-18 の不確かさ.....	41
図 3-30 : JIS の不確かさ.....	41
図 3-31 : Persily (Sohofeld) の不確かさ.....	41
図 3-32 : CO ₂ 呼出量関係式の精査.....	47
図 3-33 : 測定値と推定値の回帰式.....	47
図 3-34 : 測定値と推定値 (関係式).....	48
図 3-35 : 測定値と推定値 (Persily).....	48
図 3-36 : 測定値と推定値 (JIS).....	48
図 3-37 : 測定値と推定値 (ASTM-12).....	48
図 3-38 : 各 CO ₂ 呼出量計算値の RMSE_平成 28 年度.....	50
図 3-39 : 各 CO ₂ 呼出量計算値の標準誤差_平成 28 年度.....	50
図 3-40 : 各 CO ₂ 呼出量計算値の RMSE_平成 26 年度.....	50

図 3-41 : 各 CO ₂ 呼出量計算値の標準誤差_平成 26 年度	50
図 3-42 : 各 CO ₂ 呼出量計算値の RMSE_平成 28 年度	51
図 3-43 : 各 CO ₂ 呼出量計算値の標準誤差_平成 28 年度	51
図 3-44 : 各 CO ₂ 呼出量計算値の RMSE_平成 26 年度	51
図 3-45 : 各 CO ₂ 呼出量計算値の標準誤差_平成 26 年度	51
図 3-46 : Met 値推定手法ごとの RMSE (CO ₂ 呼出量関係式) _ (図 3-17 (再掲))	54
図 3-47 : Met 値推定手法ごとの RMSE (Persily の式) _ (図 3-21 (再掲))	54
図 3-48 : Met 値推定手法ごとの RMSE (JIS) _ (図 3-20 (再掲))	54
図 3-49 : Met 値推定手法ごとの RMSE (ASTM-12) _ (図 3-18 (再掲))	55
図 3-50 : Met 値推定手法ごとの RMSE (ASTM-18) _ (図 3-19 (再掲))	55
図 4-1 : 測定条件概要 (人間の呼気)	61
図 4-2 : 測定条件概要 (マスフローコントローラー)	62
図 4-3 : 推定値と実測値の比較 A-1	64
図 4-4 : 推定値と実測値の比較 A-6	64
図 4-5 : 推定値と実測値の比較 B-6	64
図 4-6 : 推定値と実測値の比較 C-3	64
図 4-7 : 全ケース (在室者数 4 人) の RMSE	64
図 4-8 : 机拭きと歩行と掃除を除いたケースの RMSE	65
図 4-9 : 活動量計を用いた換気性状測定の精度比較	66
図 4-10 : 推定値と実測値の比較 A-1	67
図 4-11 : 推定値と実測値の比較 A-3	67
図 4-12 : 推定値と実測値の比較 A-6	67
図 4-13 : 推定値と実測値の比較 A-11	67
図 4-14 : CO ₂ 濃度推定値と実測値の比較 D-1	68
図 4-15 : CO ₂ 濃度推定値と実測値の比較 D-2	68
図 4-16 : CO ₂ 濃度推定値と実測値の比較 D-3	68
図 4-17 : CO ₂ 濃度推定値と実測値の比較 D-7	68
図 4-18 : CO ₂ 濃度推定値と実測値の比較 D-2	68
図 4-19 : Met 値と標準誤差 SE _R の関係 (CO ₂ 呼出量関係式)	69
図 4-20 : Met 値と標準誤差 SE _R の関係 (Persily (Schofiled))	69
図 4-21 : Met 値と標準誤差 SE _R の関係 (JIS)	69
図 4-22 : Met 値と標準誤差 SE _R の関係 (ASTM-12)	69
図 5-1 : 対象室の概要	75
図 5-2 : CO ₂ 濃度測定結果 D-3	77
図 5-3 : CO ₂ 濃度測定結果結果 D-7	77
図 5-4 : CO ₂ 濃度測定結果 E-1	77
図 5-5 : CO ₂ 濃度測定結果結果 E-3	77
図 5-6 : CO ₂ 濃度測定結果結果 E-6	77
図 5-7 : CO ₂ 濃度測定結果結果 E-8	77
図 5-8 : 計算結果 D-3	77
図 5-9 : 計算結果 D-7	77
図 5-10 : 計算結果 E-1	77
図 5-11 : 計算結果 E-3	77
図 5-12 : 計算結果 E-6	78
図 5-13 : 計算結果 E-8	78
図 5-14 : CO ₂ 濃度測定結果 A-3	80
図 5-15 : CO ₂ 濃度測定結果 F-1	80
図 5-16 : CO ₂ 濃度測定結果 F-2	80
図 5-17 : CO ₂ 濃度測定結果 F-3	80
図 5-18 : 計算結果 A-3	80

図 5-19 : 計算結果 F-1	80
図 5-20 : 計算結果 F-2	80
図 5-21 : 計算結果 F-3	80
図 5-22 : 計算結果 A-3	81
図 5-23 : 計算結果 F-1	81
図 5-24 : 計算結果 F-2	81
図 5-25 : 計算結果 F-3	81
図 6-1 : 数値計算に関するフロー図	89
図 6-2 : 一様乱数に関するフロー図 (処理①)	89
図 6-3 : χ^2 乗検定のフロー図 (処理②)	89
図 6-4 : Met 値の正規, 二項乱数のフロー図	90
図 6-5 : 誤差要因の正規乱数のフロー図	90
図 6-6 : CO ₂ 濃度計算の選択シート	90
図 6-7 : 換気量計算の選択シート	91
図 6-8 : 身長 of 確立分布	93
図 6-9 : 身長 of 累積確立分布	93
図 6-10 : 体重 of 確立分布	93
図 6-11 : 体重 of 累積確立分布	93
図 6-12 : 空気温度_理論モデル	94
図 6-13 : 空気温度_理論モデル	94
図 6-14 : 大気圧_理論モデル	94
図 6-15 : 大気圧_理論モデル	94
図 6-16 : 空気温度 (偶然誤差)_実測モデル	94
図 6-17 : 大気圧 (偶然誤差)_実測モデル	94
図 6-18 : 大気圧 (系統誤差)_実測モデル	94
図 6-19 : CO ₂ 濃度 (正規分布)_理論モデル	95
図 6-20 : CO ₂ 濃度 (偶然誤差)_実測モデル	95
図 6-21 : CO ₂ 濃度 (系統誤差)_実測モデル	95
図 6-22 : CO ₂ 濃度 (正規分布)_理論モデル	95
図 6-23 : CO ₂ 濃度 (偶然誤差)_実測モデル	95
図 6-24 : CO ₂ 濃度 (系統誤差)_実測モデル	95
図 6-25 : 呼吸商 RQ の確率分布	96
図 6-26 : 不確かさと Met 値の関係	97
図 6-27 : 活動量計 (平均値) の確率分布	97
図 6-28 : 活動量計 (最頻値) の確率分布	97
図 6-29 : 活動量計 (中央値) の信頼区間	97
図 6-30 : 脈拍数の確率分布	97
図 6-31 : 文献値 (ASHRAE) の確率分布	98
図 6-32 : 文献値 (METs 表) の確率分布	98
図 6-33 : 活動量計(平均値)の累積確率分布	98
図 6-34 : 活動量計(最頻値)の累積確率分布	98
図 6-35 : 活動量計(中央値)の累積確率分布	98
図 6-36 : 脈拍数の累積確率分布	98
図 6-37 : 文献値(ASHRAE)の累積確率分布	98
図 6-38 : 文献値(METs 表)の累積確率分布	98
図 6-39 : 室容積の確率分布	99
図 6-40 : 換気量の確率分布 (5.0 m ³ /h)	99
図 6-41 : VentSim の計算結果 (ケース G)	110
図 6-42 : VentSim の計算結果 (ケース H)	110
図 6-43 : VentSim の計算結果 (ケース J)	111

図 6-44 : VentSim の計算結果 (ケース K)	111
図 6-45 : VentSim の計算結果 (ケース L)	111
図 6-46 : VentSim の計算結果 (ケース M)	111
図 6-47 : VentSim の計算結果 (ケース G)	111
図 6-48 : VentSim の計算結果 (ケース H)	111
図 6-49 : VentSim の計算結果 (ケース J)	111
図 6-50 : VentSim の計算結果 (ケース K)	111
図 6-51 : VentSim の計算結果 (ケース L)	111
図 6-52 : VentSim の計算結果 (ケース M)	111
図 6-53 : 濃度 (全て) _ケース G	112
図 6-54 : 濃度 (全て) _ケース H	112
図 6-55 : 濃度 (全て) _ケース J	112
図 6-56 : 濃度 (全て) _ケース K	112
図 6-57 : 濃度 (全て) _ケース L	112
図 6-58 : 濃度 (全て) _ケース M	112
図 6-59 : 濃度 (CO ₂ 呼出量のみ) _ケース G	113
図 6-60 : 濃度 (CO ₂ 呼出量のみ) _ケース H	113
図 6-61 : 濃度 (CO ₂ 呼出量のみ) _ケース J	113
図 6-62 : 濃度 (CO ₂ 呼出量のみ) _ケース K	113
図 6-63 : 濃度 (CO ₂ 呼出量のみ) _ケース L	113
図 6-64 : 濃度 (CO ₂ 呼出量のみ) _ケース M	113
図 6-65 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (活動量計 (平均値))	113
図 6-66 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (脈拍数計)	114
図 6-67 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (文献値 (ASHRAE))	114
図 6-68 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (文献値 (METs 表))	115
図 6-69 : 濃度 (全て) _ケース G	116
図 6-70 : 濃度 (全て) _ケース H	116
図 6-71 : 濃度 (全て) _ケース J	116
図 6-72 : 濃度 (全て) _ケース K	116
図 6-73 : 濃度 (全て) _ケース L	116
図 6-74 : 濃度 (全て) _ケース M	116
図 6-75 : 濃度 (CO ₂ 呼出量のみ) _ケース G	117
図 6-76 : 濃度 (CO ₂ 呼出量のみ) _ケース H	117
図 6-77 : 濃度 (CO ₂ 呼出量のみ) _ケース J	117
図 6-78 : 濃度 (CO ₂ 呼出量のみ) _ケース K	117
図 6-79 : 濃度 (CO ₂ 呼出量のみ) _ケース L	117
図 6-80 : 濃度 (CO ₂ 呼出量のみ) _ケース M	117
図 6-81 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (活動量計 (平均値))	117
図 6-82 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (脈拍数計)	118
図 6-83 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (文献値 (ASHRAE))	118
図 6-84 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (文献値 (METs 表))	118
図 6-85 : 換気量 (全て) _ケース G	120
図 6-86 : 換気量 (全て) _ケース H	120
図 6-87 : 換気量 (全て) _ケース J	120
図 6-88 : 換気量 (全て) _ケース K	120
図 6-89 : 換気量 (全て) _ケース L	120
図 6-90 : 換気量 (全て) _ケース M	120
図 6-91 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース G	121
図 6-92 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース H	121
図 6-93 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース J	121

図 6-94 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース K.....	121
図 6-95 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース L.....	121
図 6-96 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース M.....	121
図 6-97 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (活動量計 (平均値))	121
図 6-98 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (脈拍数計)	122
図 6-99 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (文献値 (ASHRAE))	122
図 6-100 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (文献値 (METs 表))	122
図 6-101 : 換気量 (全て) _ケース G.....	124
図 6-102 : 換気量 (全て) _ケース H.....	124
図 6-103 : 換気量 (全て) _ケース J.....	124
図 6-104 : 換気量 (全て) _ケース K.....	124
図 6-105 : 換気量 (全て) _ケース L.....	124
図 6-106 : 換気量 (全て) _ケース M.....	124
図 6-107 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース G.....	125
図 6-108 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース H.....	125
図 6-109 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース J.....	125
図 6-110 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース K.....	125
図 6-111 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース L.....	125
図 6-112 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース M.....	125
図 6-113 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (活動量計 (平均値))	125
図 6-114 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (脈拍数計)	126
図 6-115 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (文献値 (ASHRAE))	126
図 6-116 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (文献値 (METs 表))	126
図 6-117 : ケース A-1 (活動量計(平均値)).....	132
図 6-118 : ケース A-6 (活動量計(平均値)).....	132
図 6-119 : ケース B-1 (活動量計(平均値)).....	132
図 6-120 : ケース C-1 (活動量計(平均値)).....	132
図 6-121 : ケース C-4 (活動量計(平均値)).....	132
図 6-122 : ケース A-1 (文献値(ASHRAE)).....	132
図 6-123 : ケース A-6 (文献値(ASHRAE)).....	132
図 6-124 : ケース B-1 (文献値(ASHRAE)).....	132
図 6-125 : ケース C-1 (文献値(ASHRAE)).....	132
図 6-126 : ケース C-4 (文献値(ASHRAE)).....	132
図 6-127 : 測定値と信頼区間 (D-1).....	133
図 6-128 : 測定値と信頼区間 (D-3).....	133
図 6-129 : 測定値と信頼区間 (D-7).....	133
図 6-130 : 測定値と信頼区間 (D-11).....	133
図 6-131 : 風量と信頼区間 F-2 (活動量計 (平均値))	134
図 6-132 : 風量と信頼区間 F-3 (活動量計 (平均値))	134
図 6-133 : 風量と信頼区間 F-2 (文献値)	134
図 6-134 : 風量と信頼区間 F-3 (文献値)	134
図 6-135 : 測定値と信頼区間 (E-2).....	135
図 6-136 : 測定値と信頼区間 (E-3).....	135
図 6-137 : 測定値と信頼区間 (E-4).....	135
図 6-138 : 測定値と信頼区間 (E-8).....	135
図 A-1 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (関係式)	i
図 A-2 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (ASTM-12)	i
図 A-3 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (ASTM-18)	i
図 A-4 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (JIS)	i
図 A-5 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (Harris • Benedict))	i

図 A-6 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (Schofield))	i
図 A-7 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (FAO・WHO))	i
図 A-8 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (関係式)	ii
図 A-9 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (ASTM-12)	ii
図 A-10 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (ASTM-18)	ii
図 A-11 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (JIS)	ii
図 A-12 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (Harris・Benedict))	ii
図 A-13 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (Schofield))	ii
図 A-14 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (FAO・WHO))	ii
図 A-15 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (関係式)	iii
図 A-16 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (ASTM-12)	iii
図 A-17 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (ASTM-18)	iii
図 A-18 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (JIS)	iii
図 A-19 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (Harris・Benedict))	iii
図 A-20 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (Schofield))	iii
図 A-21 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (FAO・WHO))	iii
図 A-22 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (関係式)	iv
図 A-23 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (ASTM-12)	iv
図 A-24 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (ASTM-18)	iv
図 A-25 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (JIS)	iv
図 A-26 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (Harris・Benedict))	iv
図 A-27 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (Schofield))	iv
図 A-28 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (FAO・WHO))	iv
図 A-29 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (関係式)	v
図 A-30 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (ASTM-12)	v
図 A-31 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (ASTM-18)	v
図 A-32 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (JIS)	v
図 A-33 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (Harris・Benedict))	v
図 A-34 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (Schofield))	v
図 A-35 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (FAO・WHO))	v
図 A-36 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (関係式)	vi
図 A-37 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (ASTM-12)	vi
図 A-38 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (ASTM-18)	vi
図 A-39 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (JIS)	vi
図 A-40 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (Harris・Benedict))	vi
図 A-41 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (Schofield))	vi
図 A-42 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (FAO・WHO))	vi
図 A-43 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (関係式)	vii
図 A-44 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (ASTM-12)	vii
図 A-45 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (ASTM-18)	vii
図 A-46 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (JIS)	vii
図 A-47 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (Harris・Benedict))	vii
図 A-48 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (Schofield))	vii
図 A-49 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (FAO・WHO))	vii
図 A-50 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (関係式)	viii
図 A-51 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (ASTM-12)	viii
図 A-52 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (ASTM-18)	viii
図 A-53 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (JIS)	viii
図 A-54 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (Harris・Benedict))	viii
図 A-55 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (Schofield))	viii

図 A-56 : CO ₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (FAO・WHO))	viii
図 B-1 : 7 歳の CO ₂ 呼出量推定値	ix
図 B-2 : 11 歳の CO ₂ 呼出量推定値	ix
図 B-3 : 17 歳の CO ₂ 呼出量推定値	ix
図 B-4 : 20 歳の CO ₂ 呼出量推定値	ix
図 B-5 : 30~39 歳の CO ₂ 呼出量推定値	ix
図 B-6 : 50~59 歳の CO ₂ 呼出量推定値	ix
図 B-7 : 70~歳の CO ₂ 呼出量推定値	ix
図 B-8 : 7 歳の CO ₂ 呼出量推定値	x
図 B-9 : 11 歳の CO ₂ 呼出量推定値	x
図 B-10 : 17 歳の CO ₂ 呼出量推定値	x
図 B-11 : 20 歳の CO ₂ 呼出量推定値	x
図 B-12 : 30~39 歳の CO ₂ 呼出量推定値	x
図 B-13 : 50~59 歳の CO ₂ 呼出量推定値	x
図 B-14 : 70~歳の CO ₂ 呼出量推定値	x
図 C-1 : 推定値と実測値の比較 A-2	xi
図 C-2 : 推定値と実測値の比較 A-4	xi
図 C-3 : 推定値と実測値の比較 A-5	xi
図 C-4 : 推定値と実測値の比較 A-7	xi
図 C-5 : 推定値と実測値の比較 A-8	xi
図 C-6 : 推定値と実測値の比較 A-9	xi
図 C-7 : 推定値と実測値の比較 A-10	xi
図 C-8 : 推定値と実測値の比較 A-12	xi
図 C-9 : 推定値と実測値の比較 A-13	xi
図 C-10 : 推定値と実測値の比較 A-14	xi
図 C-11 : 推定値と実測値の比較 D-4	xii
図 C-12 : 推定値と実測値の比較 D-5	xii
図 C-13 : 推定値と実測値の比較 D-6	xii
図 C-14 : 推定値と実測値の比較 D-8	xii
図 C-15 : 推定値と実測値の比較 D-9	xii
図 C-16 : 推定値と実測値の比較 D-10	xii
図 C-17 : 推定値と実測値の比較 D-11	xii
図 C-18 : CO ₂ 濃度測定結果 D-11	xiii
図 C-19 : CO ₂ 濃度測定結果 E-2	xiii
図 C-20 : CO ₂ 濃度測定結果 E-4	xiii
図 C-21 : CO ₂ 濃度測定結果 E-5	xiii
図 C-22 : CO ₂ 濃度測定結果 E-7	xiii
図 C-23 : 推定値と実測値の比較 D-11	xiii
図 C-24 : 推定値と実測値の比較 E-2	xiii
図 C-25 : 推定値と実測値の比較 E-4	xiii
図 C-26 : 推定値と実測値の比較 E-5	xiii
図 C-27 : 推定値と実測値の比較 E-7	xiii
図 D-1 : CO ₂ 濃度の不確かさ (呼出量のみ) _活動量計 (平均値)	xvii
図 D-2 : CO ₂ 濃度の不確かさ (呼出量のみ) _脈拍数計	xvii
図 D-3 : CO ₂ 濃度の不確かさ (呼出量のみ) _文献値 (ASHRAE)	xvii
図 D-4 : CO ₂ 濃度の不確かさ (呼出量のみ) _文献値 (METs 表)	xvii
図 D-5 : CO ₂ 濃度の不確かさ (全て) _活動量計 (平均値)	xviii
図 D-6 : CO ₂ 濃度の不確かさ (全て) _脈拍数計	xviii
図 D-7 : CO ₂ 濃度の不確かさ (全て) _文献値 (ASHRAE)	xviii
図 D-8 : CO ₂ 濃度の不確かさ (全て) _文献値 (METs 表)	xviii

図 D-9 : 換気量の不確かさ (呼出量のみ) _活動量計 (平均値)	xix
図 D-10 : 換気量の不確かさ (呼出量のみ) _脈拍数計	xix
図 D-11 : 換気量の不確かさ (呼出量のみ) _文献値 (ASHRAE)	xix
図 D-12 : 換気量の不確かさ (呼出量のみ) _文献値 (METs 表)	xix
図 D-13 : 換気量の不確かさ (全て) _活動量計 (平均値)	xx
図 D-14 : 換気量の不確かさ (全て) _脈拍数計	xx
図 D-15 : 換気量の不確かさ (全て) _文献値 (ASHRAE)	xx
図 D-16 : 換気量の不確かさ (全て) _文献値 (METs 表)	xx
図 D-17 : 測定値と計算値 A-1 _活動量計	xxii
図 D-18 : 測定値と計算値 A-6 _活動量計	xxii
図 D-19 : 測定値と計算値 B-1 _活動量計	xxii
図 D-20 : 測定値と計算値 C-1 _活動量計	xxii
図 D-21 : 測定値と計算値 C-4 _活動量計	xxii
図 D-22 : 測定値と計算値 A-1 _文献値	xxii
図 D-23 : 測定値と計算値 A-6 _文献値	xxii
図 D-24 : 測定値と計算値 B-1 _文献値	xxii
図 D-25 : 測定値と計算値 C-1 _文献値	xxii
図 D-26 : 測定値と計算値 C-4 _文献値	xxii
図 D-27 : 測定値と計算値 A-1 _活動量計	xxiii
図 D-28 : 測定値と計算値 A-6 _活動量計	xxiii
図 D-29 : 測定値と計算値 B-1 _活動量計	xxiii
図 D-30 : 測定値と計算値 C-1 _活動量計	xxiii
図 D-31 : 測定値と計算値 C-4 _活動量計	xxiii
図 D-32 : 測定値と計算値 A-1 _文献値	xxiii
図 D-33 : 測定値と計算値 A-6 _文献値	xxiii
図 D-34 : 測定値と計算値 B-1 _文献値	xxiii
図 D-35 : 測定値と計算値 C-1 _文献値	xxiii
図 D-36 : 測定値と計算値 C-4 _文献値	xxiii
図 D-37 : 測定値と計算値 A-1 _活動量計	xxiv
図 D-38 : 測定値と計算値 A-6 _活動量計	xxiv
図 D-39 : 測定値と計算値 B-1 _活動量計	xxiv
図 D-40 : 測定値と計算値 C-1 _活動量計	xxiv
図 D-41 : 測定値と計算値 C-4 _活動量計	xxiv
図 D-42 : 測定値と計算値 A-1 _文献値	xxiv
図 D-43 : 測定値と計算値 A-6 _文献値	xxiv
図 D-44 : 測定値と計算値 B-1 _文献値	xxiv
図 D-45 : 測定値と計算値 C-1 _文献値	xxiv
図 D-46 : 測定値と計算値 C-4 _文献値	xxiv
図 D-47 : 測定値と区間推定_D-1	xxv
図 D-48 : 測定値と区間推定_D-2	xxv
図 D-49 : 測定値と区間推定_D-5	xxv
図 D-50 : 測定値と区間推定_D-6	xxv
図 D-51 : 測定値と区間推定_D-8	xxv
図 D-52 : 測定値と区間推定_D-11	xxv
図 D-53 : 測定値と区間推定_E-1	xxvi
図 D-54 : 測定値と区間推定_E-5	xxvi
図 D-55 : 測定値と区間推定_E-6	xxvi
図 D-56 : 測定値と区間推定_E-7	xxvi
図 D-57 : 風量と信頼区間 A-3 (活動量計 (平均値))	xxvi
図 D-58 : 風量と信頼区間 F-1 (活動量計 (平均値))	xxvi

図 D-59 : 風量と信頼区間 A-3 (文献値)	xxvi
図 D-60 : 風量と信頼区間 F-1 (文献値)	xxvi

表目次

表 2-1 : ASHRAE HANDBOOK ^[2-1] に示されている Met 値.....	12
表 2-2 : Harris・Benedict の式.....	13
表 2-3 : Schofield の式.....	13
表 2-4 : FAO/WHO/UNU の式.....	13
表 2-5 : HBF-701 の測定項目と測定誤差.....	14
表 2-6 : 人間が呼出する CO ₂ 量 (成年男性)	17
表 2-7 : SHASE-S102 ^[2-20] による労働強度別 CO ₂ 呼出量 (成人男子)	18
表 2-8 : 被験者の属性と人数.....	19
表 2-9 : 測定機器と測定項目.....	20
表 2-10 : 年代別基礎代謝量と基礎代謝量の比 ^[2-22]	20
表 2-11 : 従来概念に関する語句 ^{[2-27] [2-28] [2-29] [2-30] [2-31]}	22
表 2-12 : 新規概念に関する語句 ^{[2-28] [2-31]}	23
表 2-13 : 統計に関する語句 ^{[2-32] [2-33] [2-34] [2-35] [2-36] [2-37]}	24
表 2-14 : 各項目の有効数字.....	25
表 3-1 : 被検者実験の手順.....	30
表 3-2 : 測定機器と測定項目.....	31
表 3-3 : 被験者実験の条件 (平成 28 年度)	32
表 3-4 : 各 Met 値の標準不確かさ [-].....	37
表 3-5 : 不確かさから算出した各 Met 値の標準誤差 [-].....	37
表 3-6 : 不確かさから算出した各 Met 値の相対誤差 [%].....	37
表 3-7 : Met _b を真値とした場合の各 Met 値の RMSE [-].....	38
表 3-8 : 各 Met 値の RMSE から算出した標準誤差 [-]	38
表 3-9 : 各 Met 値の RMSE から算出した相対誤差 [%].....	38
表 3-10 : 標準不確かさ [-] (CO ₂ 呼出量関係式)	42
表 3-11 : RMSE [-] (CO ₂ 呼出量関係式)	42
表 3-12 : 標準誤差 [m ³ /h] (CO ₂ 呼出量関係式)	42
表 3-13 : 標準不確かさ [-] (ASTM-12)	43
表 3-14 : RMSE [-] (ASTM-12)	43
表 3-15 : 標準誤差 [m ³ /h] (ASTM-12)	43
表 3-16 : 標準不確かさ [-] (ASTM-18)	44
表 3-17 : RMSE [-] (ASTM-18)	44
表 3-18 : 標準誤差 [m ³ /h] (ASTM-18)	44
表 3-19 : 標準不確かさ [-] (JIS)	45
表 3-20 : RMSE [-] (JIS)	45
表 3-21 : 標準誤差 [m ³ /h] (JIS)	45
表 3-22 : 標準不確かさ [-] (Persily (Sohofeld))	46
表 3-23 : RMSE [-] (Persily (Sohofeld))	46
表 3-24 : 標準誤差 [m ³ /h] (Persily (Sohofeld))	46
表 3-25 : 各 CO ₂ 呼出量測定値と推定値の比較.....	47
表 3-26 : 被験者実験の条件 (平成 26 年度)	48
表 3-27 : 回帰式の回帰係数.....	49
表 3-28 : 回帰式の決定係数.....	49
表 3-29 : 各 CO ₂ 呼出量計算値の RMSE_平成 28 年度	52
表 3-30 : 各 CO ₂ 呼出量計算値の標準誤差_平成 28 年度	52
表 3-31 : 各 CO ₂ 呼出量計算値の RMSE_平成 26 年度	52

表 3-32 : 各 CO ₂ 呼出量計算値の標準誤差_平成 26 年度	52
表 3-33 : 各 CO ₂ 呼出量計算値の RMSE_平成 28 年度	53
表 3-34 : 各 CO ₂ 呼出量計算値の標準誤差_平成 28 年度	53
表 3-35 : 各 CO ₂ 呼出量計算値の RMSE_平成 26 年度	53
表 3-36 : 各 CO ₂ 呼出量計算値の標準誤差_平成 26 年度	53
表 4-1 : 測定器と測定項目	59
表 4-2 : 測定概要 (人間の呼気)	60
表 4-3 : 実験で測定していた室内温度の平均値	61
表 4-4 : 必要ガス量計算	62
表 4-5 : 測定概要 (マスフローコントローラー)	62
表 4-6 : 測定条件と測定結果	63
表 4-7 : 測定条件と測定結果	66
表 4-8 : 設定値および測定結果	67
表 5-1 : V _{efc} (有効混合容積) の算定方法の換気量測定への適用性	73
表 5-2 : 測定概要	76
表 5-3 : 計算結果	76
表 5-4 : 測定概要	79
表 5-5 : 検討に用いた Met 値推定手法の値	79
表 5-6 : 計算結果 (Met 値推定手法 : 活動量計)	79
表 5-7 : 計算結果 (Met 値推定手法 : 文献値)	81
表 6-1 : 誤差要因の項目	84
表 6-2 : CO ₂ 呼出量関係式の不確かさおよび誤差の要因	84
表 6-3 : CO ₂ 濃度推定の不確かさおよび誤差の要因	84
表 6-4 : 換気量推定の不確かさおよび誤差の要因	84
表 6-1 : 誤差算出の流れ	86
表 6-2 : 平成 28 年度国民健康・栄養調査報告に記されている身長および体重 ^[6-5]	92
表 6-3 : 体重・身長の標準偏差 (各年齢の男女)	92
表 6-4 : 体重および身長の標準偏差および標準誤差 (各年齢の男女)	93
表 6-5 : 測定器の精度 ^[6-6] (空気温度, 気圧)	93
表 6-6 : 空気温度 (°C) の標準偏差および標準誤差	93
表 6-7 : 大気圧 (hPa) の標準偏差および標準誤差	94
表 6-8 : CO ₂ 濃度の標準偏差および標準誤差	95
表 6-9 : 各 Met 値の不確かさおよび RMSE	97
表 6-10 : 検討したケース	101
表 6-11 : 在室者の Met 値	101
表 6-12 : 各ケースの推定値	102
表 6-13 : 拡張不確かさ (信頼水準 95%) _活動量計 (平均値)	103
表 6-14 : 拡張不確かさ (信頼水準 95%) _脈拍数計	103
表 6-15 : 拡張不確かさ (信頼水準 95%) _文献値 (ASHRAE)	103
表 6-16 : 拡張不確かさ (信頼水準 95%) _文献値 (METs 表)	104
表 6-17 : 各ケースの推定値	104
表 6-18 : 拡張不確かさ (信頼水準 95%) _活動量計 (平均値)	104
表 6-19 : 拡張不確かさ (信頼水準 95%) _脈拍数計	105
表 6-20 : 拡張不確かさ (信頼水準 95%) _文献値 (ASHRAE)	105
表 6-21 : 拡張不確かさ (信頼水準 95%) _文献値 (METs 表)	105
表 6-22 : 各ケースの推定値	106
表 6-23 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) _活動量計 (平均値)	107
表 6-24 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) _脈拍数計	107

表 6-25 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) _文献値 (ASHRAE)	107
表 6-26 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) _文献値 (METs 表)	108
表 6-27 : 各ケースの推定値.....	108
表 6-28 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) _活動量計 (平均値)	108
表 6-29 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) _脈拍数計	109
表 6-30 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) _文献値 (ASHRAE)	109
表 6-31 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) _文献値 (METs 表)	109
表 6-32 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (活動量計 (平均値))	114
表 6-33 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (脈拍数計)	114
表 6-34 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (文献値 (ASHRAE))	114
表 6-35 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (文献値 (METs 表))	115
表 6-36 : 信頼区間割合	115
表 6-37 : 標準誤差	115
表 6-38 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (活動量計 (平均値))	117
表 6-39 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (脈拍数計)	118
表 6-40 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (文献値 (ASHRAE))	118
表 6-41 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (文献値 (METs 表))	119
表 6-42 : 信頼区間割合	119
表 6-43 : 標準誤差	119
表 6-44 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (活動量計 (平均値))	121
表 6-45 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (脈拍数計)	122
表 6-46 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (文献値 (ASHRAE))	122
表 6-47 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (文献値 (METs 表))	123
表 6-48 : 信頼区間割合	123
表 6-49 : 標準誤差	123
表 6-50 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (活動量計 (平均値))	125
表 6-51 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (脈拍数計)	126
表 6-52 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (文献値 (ASHRAE))	126
表 6-53 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (文献値 (METs 表))	127
表 6-54 : 信頼区間割合	127
表 6-55 : 標準誤差	127
表 6-56 : CO ₂ 濃度推定の拡張不確かさ (160 m ³ /h)	128
表 6-57 : CO ₂ 濃度推定の拡張不確かさ (360 m ³ /h)	128
表 6-58 : 換気量推定の不確かさ (160 m ³ /h)	129
表 6-59 : 換気量推定の不確かさ (360 m ³ /h)	129
表 6-60 : CO ₂ 濃度推定の信頼区間割合 (160 m ³ /h)	129
表 6-61 : CO ₂ 濃度推定の信頼区間割合 (360 m ³ /h)	129
表 6-62 : 換気量推定の信頼区間割合 (160 m ³ /h)	130
表 6-63 : 換気量推定の信頼区間割合 (360 m ³ /h)	130
表 6-64 : CO ₂ 濃度推定の標準誤差 (160 m ³ /h)	130
表 6-65 : CO ₂ 濃度推定の標準誤差 (360 m ³ /h)	130
表 6-66 : 換気量推定の標準誤差 (160 m ³ /h)	130
表 6-67 : 換気量推定の標準誤差 (360 m ³ /h)	131
表 6-68 : 信頼区間割合 [%].....	131
表 6-69 : 信頼区間割合 [%].....	133
表 6-70 : 拡張不確かさ [m ³ /h].....	134
表 6-71 : 拡張不確かさ [m ³ /h].....	135
表 D-1 : 信頼区間割合	xxi

第 1 章

序論

第1章 序論

1.1 はじめに

室内環境で居住者に直接影響を与える要因として温度や湿度、空気の清浄度、照度などがあり、このうち空気の清浄度は主に建物における換気である。換気とは“在室人員や各種の機器などの汚染源から発生する汚染物質、あるいは熱や水蒸気によって汚染、悪化した室内空気を正常な外気と入れ替えること”である^[1-1]。居室に必要な換気量が満たされていない場合、室内で発生した人体に害のある汚染物質（例、ホルムアルデヒドや二酸化炭素（CO₂）等）により在室者がめまいや頭痛などの健康被害を引き起こす原因になる。これを防ぐために換気に関連する法律があり、「建築基準法」や「建築物における衛生的環境の確保に関する法律」（以降、建築物衛生法）、「労働安全衛生法」などがある。

建築物の設計でよく用いられる汚染物質の基準濃度として、建築物衛生法で定められている二酸化炭素濃度 1000ppm 以下^[1-2]が挙げられる。しかし既往研究^[1-3]では特定建築物の全体の約 15%がこの基準濃度を上回っており、特に事務所・学校において不適率が高い結果が報告されている。このように室内の汚染物質が増えている背景があるため、居室の換気量が必要換気量を満たしてきちんと換気を行うことが重要である。しかしいずれの法律も換気量や換気回数等が定められているだけで運用時の換気量の確認は求められておらず、その理由として換気量の測定が難しいことが挙げられる。

居室の換気量を測定する方法の1つにトレーサガス法がある^[1-4]。この方法は、二酸化炭素、6フッ化硫黄（SF₆）や亜酸化窒素（N₂O）などのトレーサとなるガスを居室内に放出させて、ガスの放出量と室内濃度の変化から換気量を測定する方法である。SF₆やN₂Oは普段過ごす環境の空気中には存在しないため測定値そのものが放出量であることから容易に放出量が把握できる。しかし、SF₆やN₂Oは人体もしくは地球温暖化への影響が懸念され、在室者のいる実使用条件（以降、運用時）の居室での測定にこの方法は向いていない。

前述したガス（6フッ化硫黄や亜酸化窒素）によっては人体に悪影響があるため実際の換気量測定では、在室者がいない状態で測定が行われており運用時の換気量を測定できているとは言い難い。また室条件は定常状態と非定常状態の2種類に分けられ、設計では室条件は定常状態で計算をするが、実際の空間ではほとんどの時間が非定常状態である。設計通りの環境であれば問題は起きないが、設計条件より在室者数が過多であることや使用方法の変化などから室内環境が悪くなることが考えられる。このことから設計条件（定常状態）の換気量や実際の空間条件である運用時（非定常状態）の換気量を評価することが重要であると言える。

既往研究^[1-5] ^[1-6] ^[1-7]では、人間の呼気に含まれる二酸化炭素を発生量と仮定することで換気量を測定する手法が取られおり、一定の条件であれば高い精度で換気量を推定できることを確認している。しかし、既往研究では実際に換気量が既知である空間で換気量推定値と

測定結果についての評価を行っており、発生量や測定器の不確かさや誤差そのものがどの程度影響しているのかについてはほとんどまとめられていない。

すなわち、人間の呼気に含まれる二酸化炭素をトレーサとして居室の換気量測定を高い精度で行うことで、安全かつ簡便に運用時の換気量を求めることができると考えられる。また人間の呼気に含まれる二酸化炭素を利用した換気測定法の精度把握が必要であると言える。

1.2 既往の研究

日本人の二酸化炭素呼出量(以降, CO₂呼出量)は JIS A1406-1974^[1-8](以降, JIS) や SHASE-S-102-2011^[1-9](以降, SHASE-S) に示されている値が用いられることが多く、性別とエネルギー代謝率 *Met* 又は代謝率 RMR を基準によって値が決められる。海外の規格では, ASTM D6245-18 (以降, ASTM-18) ^[1-10]に示されている計算式を用いることで CO₂呼出量を推定することができる。しかし, ASTM-18 では, これまでの式の精査が行われ変更されており, 日本の多くの研究では ASTM D6245-16 まで示されていた式が用いられている。本研究では, ASTM D6245-12 (以降, ASTM-12) ^[1-11]に示されている式を用いた場合の CO₂呼出量の推定についても検討を行った。

既往研究では, 石川・倉渕らがトレーサガスを用いた単室の換気量測定法に関して人間の呼気に含まれる CO₂をトレーサとすることで換気量を測定できることを確認している^[1-12]。しかし, 当該の JIS は 1974 年から現在まで新たな改定は行われておらず, ASTM の計算式は西洋人のデータを用いて係数が決められており, 日本人に使用する際には一定の誤差が生じる可能性が考えられる。

このような背景から先行研究では, 現在の日本人の CO₂呼出量を精度よく推定するために身長, 体重, 活動量, 性別, 年齢を変数とした CO₂呼出量関係式を作成し, 単室での換気性状測定に応用出来ることを確認している^[1-13]。これらの値および式に関しては第2章で詳しく説明する。

1.3 本研究の目的と概要

本研究では, 人間の呼気に含まれる二酸化炭素を利用した換気性状測定および換気測定法の不確かさ推定による精度の評価を目的に在室者の活動量の把握および換気量測定の誤差や不確かさについて検討を行った。

先行研究^[1-13] ^[1-14] ^[1-15] ^[1-16] ^[1-17] ^[1-18]でも挙げられているように在室者の CO₂呼出量の推定精度は換気量測定において重要な項目である。規格や既往研究に示されている CO₂呼出量を算出する計算式や値の変数として身長, 体重, エネルギー代謝率, 年齢, 性別, 呼吸商が挙げられ, 特にエネルギー代謝率(以降, *Met* 値)はどの計算式でも変数として用いられているため *Met* 値推定の精度向上に関する検討を行った。当該先行研究では目視で在室者の

行為を確認し、ASHRAE Handbook^[1-19]に示されている値を用いていた。本研究では、ASHRAE の他に『身体活動のメッツ (METs) 表』^[1-20]に示されている値や三軸加速度センサー内臓活動量計や脈拍数計を用いて Met 値の測定を行い、被験者の Met 値推定について検討を行った。

人間の呼気に含まれる二酸化炭素量を推定する手法（以降、CO₂呼出量推定手法）についても JIS、ASTM および関係式などについて測定値との比較による精度確認を行った。また Met 値推定手法と CO₂呼出量推定手法の組み合わせによる精度確認を行った。

換気量測定法および換気性状測定の不確かさおよび誤差の同定については室条件である定常状態と非定常状態で分けて検討を行った。定常状態の不確かさ算出は不確かさの伝播則による検討を行った。非定常状態については計算値が近似式より算出されるため定常状態のように伝播則による算出が出来ないため、モンテカルロ法による繰り返し計算から非定常条件での不確かさの算出を試みた。

1.4 本論文の構成

本論文は序論および総括を含む 7 つの章で構成されている。下記に各章の概要を示す。

「序論」では、研究の背景、関連する既往研究、研究の目的および本論文の構成を示した。

第 2 章「本研究に関する基本事項」では、本論文で用いた語句（統計に関することや）や人体に関する基本事項および室の換気量に関する項目について既往研究や規格、先行研究の内容について記述する。

第 3 章「Met 値および二酸化炭素呼出量の推定精度」では、ダグラスバッグ法による被験者実験の測定結果について Met 値および CO₂呼出量に関する検討を行う。CO₂呼出量測定値と各推定値で比較を行い、Met 値の推定手法および CO₂呼出量推定手法についてまとめる。

第 4 章「単室実験による二酸化炭素発生量の精度確認」および第 5 章「二酸化炭素呼出量を用いた換気量測定の精度確認」では、本研究で行った単室での換気性状測定や換気量測定法の測定結果について示す。また推定した室内 CO₂濃度や換気量を測定値と比較し、推定精度について記述する。

第 6 章「実測に基づく換気性能評価の試行」では、換気量測定法および換気性状測定の不確かさおよび誤差の同定については室条件である定常状態と非定常状態で分けて検討を行った。第 3 章で示した Met 値の不確かさや誤差および CO₂呼出量の不確かさや誤差を用いて数値計算による換気性能評価の試行結果について記述する。

第 7 章は総括として本研究のまとめ、研究の総括と今後の課題について言及する。

参考文献<第1章>

- [1-1] 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 4 版], 井上書院, p149, 2015.2
- [1-2] 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, 空気調和衛生工学会, p336, 2012.2
- [1-3] 東賢一 池田耕一 大澤元毅 鍵直樹 柳宇 齊藤秀樹 鎌倉良太：建築物における衛生環境とその維持管理の実態に関する調査解析, 空気調和・衛生工学会論文集, No.179, 空気調和・衛生工学会, p19-p26, 2012.2
- [1-4] 空気調和・衛生工学会：SHASE-S 116-2011 トレーサガスを用いた単室の換気量測定法, 空気調和・衛生工学会規格, 2012.2
- [1-5] 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, p149-p152, 2001.3
- [1-6] 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, p29-p36, 2002.9
- [1-7] 藤川光利 吉野博 高木理恵 奥山博康 林基哉 菅原正則, 居住者の呼気を用いた多数室換気量測定法に関する実験的研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 75 巻 第 652 号, 日本建築学会, p499-p508, 2010.6
- [1-8] JIS A14061974 室内換気量測定法 (炭酸ガス法), 2010
- [1-9] [労働強度別二酸化炭素 (CO₂) 吐き出し量, 空気調和・衛生工学便覧 3 空気調和設備編, 第 14 版, 空気調和・衛生工学会, p141, 2010.2
- [1-10] ASTM D6245-18, Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation, American society for Testing and Materials International, 2018
- [1-11] 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
- [1-12] 石川和良 倉渕隆 嵐口晃宏 水谷泰三：トレーサーガスを用いた単室の換気量測定に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 日本建築学会, p709-p710, 2003.3
- [1-13] 田島昌樹 井上貴之 大西裕治：換気測定のための在室者の二酸化炭素呼出量の推定, 日本建築学会環境系論文集, 第 81 巻 第 728 号, 日本建築学会, p885-p892, 2016.10
- [1-14] 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, 日本建築学会学術講演梗概集 (近畿), 日本建築学会, p831-p832, 2014.9

- [1-15] 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 必要換気量についての検討, 日本建築学会学術講演梗概集(近畿), 日本建築学会, p833-p834, 2014.9
- [1-16] 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3 人間のCO₂呼出量に関する既往研究の調査, 日本建築学会学術講演梗概集(関東), 日本建築学会, p855-p856, 2015.9
- [1-17] 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4 CO₂呼出量推定式の適用範囲の拡張と精度確認, 日本建築学会学術講演梗概集(関東), 日本建築学会, p857-p858, 2015.9
- [1-18] 井上貴之 大西裕治 嶋田祐典 依光剛志 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5 呼気に含まれる CO₂ を利用した多数室系の換気性能評価, 日本建築学会学術講演梗概集(九州), 日本建築学会, p661-p662, 2016.8
- [1-19] 2013 ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS I-P Edition, ASHRAE Research, 2013
- [1-20] 改訂版『身体活動のメッツ (METs) 表』, 国立健康・栄養研究所

第 2 章

本研究に関する基本事項

第2章 本研究に関する基本事項

2.1 はじめに

本章では、本研究の概要や手法に関する基本事項についてまとめており、換気に関する基本事項では、換気量と換気回数との関係および換気手法について記述する。人間の呼気に関する基本事項では、人間の二酸化炭素呼出量（以降、CO₂呼出量）を推定する既往研究や規格について示し、その変数となっている項目について記している。またエネルギー代謝率（Met値）の推定手法に関する検討で用いた「ASHRAE HANDBOOK」^[2-1]や「身体活動のMETs表」^[2-2]（以降、文献）についてまとめている。精度や不確かさに関する基本事項では、換気測定法の精度向上に関する統計的処理、理論計算に関する語句や計算での有効数字についてまとめている。

2.2 換気に関する基本事項

2.2.1 換気回数と換気量

前章でも述べたが換気とは、自然または機械的手段により室内の空気と外気を入れ替えることである。国内では、1990年頃から住宅の高断熱高気密化に伴いシックハウス症候群、結露、ダニ、カビ問題などが原因とされる健康障害が問題視されようになった^[2-3]。

建築基準法には必要換気量が定められており、室の容積に対して1時間当たりに新鮮空気（外気）と入れかえられた室の空気量の比を換気回数（回/h）といい、住宅等の居室では換気回数0.5回/h以上と決められている。換気量でいえば、1人当たり20m³/h以上が必要とされている。

2.2.2 換気手法の分類

換気手法の分類^[2-4]は、全般換気と局所換気に分けられ、全般換気は建物全体の空気を入れ換えることにより、室内の汚染物質濃度を希釈するために行うもので、汚染源が固定していない場合の規格に適用され、居室や集会所などで採用される。これに対して、局所換気は全体ではなく汚染質が発生する場所を局部的に換気する方法で、汚染源が固定している場合の計画に適用され、ちゅう房や実験室などで採用される。

全般換気のなかには機械換気と自然換気による方式があり、機械換気方式には、給気系と排気系の送風機の組み合わせによって、3種類に分類される。機械換気は3種類に分類され、機械給気と機械排気との併用する第一種換気方式、機械給気と自然排気口による第二種換気方式、機械排気と自然給気とによる第三種換気方式である。機械換気方式の種類を図2-1に示す。

第一種換気方式は、確実に換気量を確保することができ、大規模な建築物に用いられる。

また、送風量と排風量を調整し室内を正圧にも負圧にもできるため、クリーンルーム・ハザード対策施設などの特殊な環境へも応用されている。一般的には、給気する外気を浄化するためにエアフィルタを必要とする。

第二種換気方式は、一般的には外気取入れ部に空気清浄装置が設けられる。室内が正圧となるため病院の手術室など汚染空気の流入が許されない室に利用される場合もある。

第三種換気方式は、駐車場・工場・作業場等のほかに小規模建築物に多く、外気を直接導入して第三種換気を行う場合、給気口からの給気が確実に確保されなければ、排気はその能力を発揮できない。

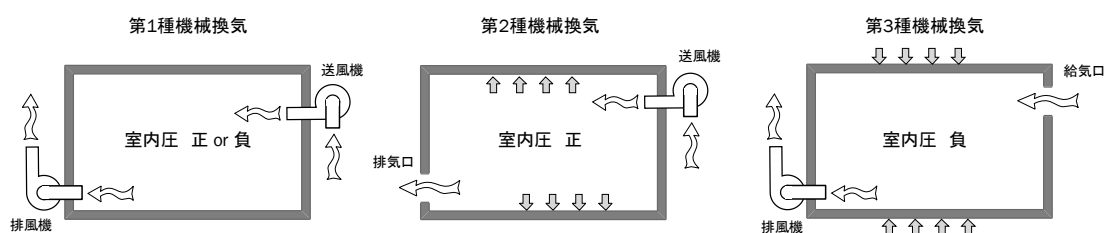


図 2-1：機械換気方式の種類

2.2.3 トレーサガスによる換気量測定^{[2-1] 註1}

(1) 瞬時一様拡散の仮定

空間内に、ある汚染質が発生した場合、発生した瞬間に汚染質に空間質が空間全体に広がり、しかも、空間の至るところで同じ濃度になるような拡散状況を瞬時一様拡散と呼んでいる。実際には汚染質が発生すると、その空気の動きによって汚染質は徐々に拡散していき、汚染質濃度の分布が生じるのが普通であるが、空間内の気流状況によっては瞬時一様拡散に近い状態が起きる場合もある。また、室内の平均的な汚染質濃度を予測したい場合には、計算が簡便なのでしばしば瞬時一様拡散を仮定して室内平均濃度を求めることが行われる。

図 2-2 に示すような単室で汚染質が一定の割合 ($M \text{ mg/h}$) で発生し、また、一定量の換気 ($Q \text{ m}^3/\text{h}$) が行われている場合の室内平均濃度を瞬時一様拡散に仮定して求める。

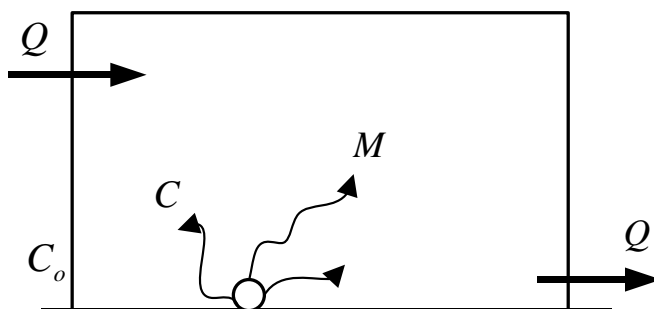


図 2-2：単室の濃度変動

微小時間 dt における汚染質の室に対する流出入バランスを考えると、

$$C_0 Q dt + M dt - C Q dt = V dC \quad (2-1)$$

ここでは、

C : 室内の汚染質濃度 [mg/m ³]	C_0 : 外気の汚染質濃度 [mg/m ³]
M : 汚染質発生量 [mg/h]	V : 室の容積 [m ³ /h]
t : 時間 [h]	

となり、 dt 時間に室内汚染濃度の微量 dC だけ濃度上昇が起きる。

上式を整理すると微分方程式

$$\frac{V}{Q} \frac{dC}{dt} = C_0 - C + \frac{M}{Q} \quad (2-2)$$

が得られる。これを初期条件 $t=0$ で、 $C=C_S$ として解くと

$$C = C_0 + (C_S - C_0) e^{-\frac{Q}{V}t} + \frac{M}{Q} \left(1 - e^{-\frac{Q}{V}t}\right) \quad (2-3)$$

ここでは、

C_S : 室内の初期濃度

となる。式 (2-3) の右辺第1項は外気の汚染質濃度、第2項は初期濃度減衰、第3項は汚染質発生による濃度の増加を示している。また、式中の Q/V は換気回数[1/h]と呼ばれ、1時間に室の空気が何回入れ換わるかを表している。

図 2-3 に室内汚染質濃度の時間変化を示す。図中の①、②、③はそれぞれ式 (2-3) の第1項、第2項、第3項に相当する。式 (2-3) は定常状態、すなわち $t \rightarrow \infty$ で、

$$C = C_0 + \frac{M}{Q} \quad (2-4)$$

となる。これは長時間、 M の発生、 Q の換気量が維持されているときの室内汚染質濃度である。また、室内初期濃度 C_S で、汚染質の発生がない場合 ($M=0$) に換気を始めたとする、式 (2-3) の第3項はなくなり、室内汚染質濃度は

$$C = C_0 + (C_S - C_0) e^{-\frac{Q}{V}t} \quad (2-5)$$

となり、図 2-3 で示したように徐々に減衰していき最終的には外気濃度と同じになる。

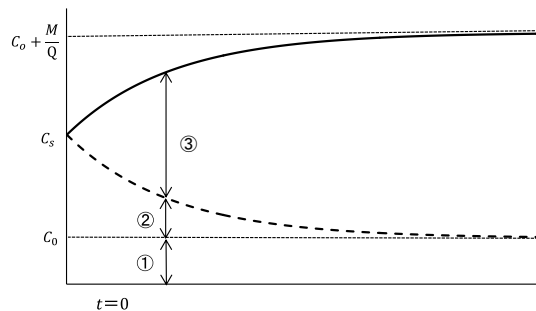


図 2-3 : 瞬時一様拡散の濃度変換

(2) 濃度測定による換気量の測定

瞬時一様拡散が仮定できるような状況では、汚染質濃度の時間変化を測定することにより空間の換気量を求めることができる。この方法を適用することにより空間の換気量を求めることができる。この方法を適用するためには厳密には以下の仮定が必要である。

空間内に侵入、または空間内で発生した汚染質は空間内で瞬時一様拡散する。汚染質は空間の壁などに吸われたり、付着したりすることはなく（吸着はない）、また、化学変化を起こさない。

流出入する空気の温度変化はない。

I.汚染物質を空間内に一定割合で人為的に連続放出し、その定常状態の濃度を測定する方法

II.汚染物質を空間内に放出し、均一的な濃度分布を達成した後の濃度変化を測定する方法（濃度減衰を測定する）

いずれの方法も、人為的に汚染質（ガス状の汚染質が用いられることが多い）を放出してその濃度を追跡する方法を、トレーサガス法と呼んでいる。トレーサガス法は空間の開口部や隙間が数多く分散しており、そこでの空気の流出入が不明確であるような自然換気の測定法として用いられることが多い。したがって、実験室実験などではなく実物での測定に適用されている。空気の流入や流出が予測でき、その位置も限定されている機械換気の場合には、流入口での風速測定やダクト内での流入測定により換気量を求める方法（JIS B 8330に測定方法が規定されている）が用いられる。

トレーサガス法による換気量の測定に用いられるトレーサとしては、二酸化炭素(CO₂)、エチレン(C₂H₄)などが一般的である。トレーサは空気の流動と共に動く、すなわち比重が空気とほぼ同じで、その濃度測定が簡便なものが適している。最近では6フッ素硫黄(SF₆)が用いられる例もある。実際の測定においては、それぞれの測定環境や目的に応じて適切なトレーサを選定するべきである。

2.3 人間の呼気に関する基本事項

本節では、CO₂呼出量推定手法およびエネルギー代謝率推定について記す。

前述のように先行研究では、エネルギー代謝率 Met の設定は在室者の行為を目視で確認し、文献^{[2-1][2-2]}に示されている値を代入してCO₂呼出量を算定している。本研究では、新たに三軸加速度センサー内蔵活動量計および脈拍数計を被験者に装着してもらい、Met 値推定の検討を行っており、各分野における Met 値について情報をまとめた。

人間の呼気に含まれるCO₂を推定するために必要な情報は、身長、体重、体表面積、BMI等の体格および体格指数や、代謝量などの人体に必要なエネルギー消費量および身体活動によるエネルギー消費量がある。特に代謝量とCO₂呼出量には強い相関があることが分かっており、既往研究では活動量によりCO₂呼出量の値を設定したり、推定式に活動量を変数として取り入れていたりしている。またCO₂呼出量を推定する方法の一つに心拍数から

酸素摂取量を推定し、CO₂排出量に変換する方法もとられている。これらの項目についても情報をまとめた。

2.3.1 エネルギー代謝率

生物学では代謝を“生体における物質とエネルギーの変換過程の総和”^[2-5]と示す。空腹安静時（最後の食事から12時間以上が経過した状態）の代謝量が基礎代謝量であり、体内のエネルギー源が完全に熱に変換された時の代謝量である。人体のエネルギー利用速度の基本的指標となるものである。代謝量の計測方法には2種類の方法があり、直接熱量測定法と間接熱量計測法である^[2-6]。本研究では間接熱量計測法の一つであるダグラスバッグ法を利用しており、第3章で説明する。

Met (Metabolic Rate) は国際的に使用される作業の強弱の指標で 1.0met=58.2W/m²に相当し、建築環境工学の分野でよく使用されている^[2-3]。算出方法は、基準となる着座安静時のエネルギー代謝量に対するある作業時のエネルギー代謝量の比をエネルギー代謝率 Met とし、単位は[Met]を用いる。算出方法を数式化すると式(2-6)のようになる^[2-3]。また Met 値はASHRAE HANDBOOK^[2-1]に活動に対応した値が示されており、表2-1に示す。

$$Met_i = \frac{M_i}{M_{Si}} \quad (2-6)$$

ここでは、

- 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 [W]
- M_{Si} : 被験者 i の着座安静時のエネルギー代謝量 [W]

スポーツ医学会では運動強度 METs (Metabolic Equivalent) が用いられており、式(2-7)によって求めることが出来る。この指標は運動の酸素需要量が安静時の酸素摂取量の何倍に相当するかを表すもので、MET=1.0の場合の酸素摂取量は成人で3.5ml/kg・分である^[2-7]。また1.0METの運動を行う際、体重1kg当たり、1時間あたりで約1kcalのエネルギーを消費する。つまりMETsは身体活動が安静時の倍数で示されるため非常に分かりやすい指標として広く運動処方や運動指導の場面で用いられている。(独)国立健康・栄養研究所では『身体活動のメッツ (METs) 表』^[2-2]を公開している。これは“METs活動を10分間行った際の、安静時代謝量を含んだ総エネルギー消費量と活動のみによるエネルギー消費量の体重別早見表が2種掲載されており、算出根拠となる簡単な計算式を添えている”^[2-7]のもので、様々な活動のMet値が示されている。

$$METs_i = \frac{\text{活動時の全エネルギー消費量}}{\text{安静時のエネルギー消費量}} \quad (2-7)$$

ここでは、

- $METs_i$: 被験者 i の METs [-]

となる。

エネルギー代謝量の計算については、Met 値は面積で除すが、METs は体重で除している。建築分野では熱のことを考える際、人体発熱であるため表面積であるが、医学分野で使われている METs は体重であるためこの点は異なっている。



写真 2-1 改訂版『身体活動のメッツ (METs) 表』^[2-2]

また METs には Ex (エクササイズ) もしくはメッツ・時と呼ばれる消費したエネルギー量に表す意味合いをもった身体活動の量を表す指標がある。その算出方法は式 (2-8) のように表せ、式 (2-9) に算出した Ex を代入することで消費エネルギーを推定することができる^[2-6]。

$$Ex[\text{エクササイズ}] = METs \times \text{身体活動の実施時間}[\text{時}] \quad (2-8)$$

$$Ex[\text{エクササイズ}] \times \text{体重}[\text{kg}] \times 1.05 = \text{消費エネルギー}[\text{kcal}] \quad (2-9)$$

Met に似たエネルギー代謝量の比率の表現として *RMR* (Relative Metabolic Rate)^[2-8] や動作強度 *Af* (Activity factor) と呼ばれる指標がある。式 (2-10)、式 (2-11) に示すように、*RMR* は活動時に必要としたエネルギーが基礎代謝量の何倍に当たるかといった活動強度を表しており、*Af* は消費したエネルギーが基礎代謝量の何倍かを表した動作指数である^[2-6]。また METs と *RMR* は式 (2-12) のように示される。

これらは体格、性別、年齢が考慮されている基礎代謝量を基準としていることから個人属性に関係なく活動の強度を示すものとして利用できる。

$$\begin{aligned} RMR &= \frac{\text{活動時のエネルギー消費量} - \text{安静時のエネルギー消費量}}{\text{基礎代謝量}} \\ &= \frac{\text{活動代謝量}}{\text{基礎代謝量}} \end{aligned} \quad (2-10)$$

$$\text{動作強度 } Af = \frac{\text{活動時のエネルギー消費量}}{\text{基礎代謝量}} \quad (2-11)$$

$$METs = \frac{RMR}{1.2} + 1.0 \quad (2-12)$$

Met 値および METs はどちらも安静時のエネルギーを分母, ある活動のエネルギー消費量を分子に計算される単位であり, 算出方法は同じである。そのため本研究では, METs および Met 値を同じ値とみなして検討を行う。以降, エネルギー代謝率を Met 値と示し, 単位を[Met]で示す。

表 2-1 : ASHRAE HANDBOOK^[2-1]に示されている Met 値

	met
Resting	
Sleeping	0.7
Reclining	0.8
Seated, quiet	1.0
Standing, relaxed	1.2
Walking	
2.9fps(2mph)	2.0
4.4fps(3mph)	2.6
5.9fps(4mph)	3.8
Office Activities	
Reading, seated	1.0
Writing	1.0
Typing	1.1
Filing, seated	1.2
Filing, standing	1.4
Walking about	1.7
Lifting/packing	2.1
Driving/Flying	
Car	1.0 to 2.0
Aircraft, routine	1.2
Aircraft, instrument landing	1.8
Aircraft, combat	2.4
Heavy vehicle	3.2
Miscellaneous Occupational Activities	
Cooking	1.6 to 2.0
Housecleaning	2.0 to 3.4
Seated, heavy limb movement	2.2
Machine work	
sawing(table saw)	1.8
light(electrical industry)	2.0 to 2.4
heavy	4.0
Handling 110 lb bags	4.0
Pick and shovel work	4.0 to 4.8
Miscellaneous Leisure Activities	
Dancing social	2.4 to 4.4
Calisthenics/exercise	3.0 to 4.0
Tennis, singles	3.6 to 4.0
Basketball	5.0 to 7.6
Wrestling/competitive	7.0 to 8.7

2.3.2 基礎代謝量

基礎代謝量を表す単位は、建築分野では kcal/m²/h (キロカロリー/体表面積/時間)、医学分野では kcal/kg/day (キロカロリー/体重/日) で表されることが多く、本研究では単位を MJ/day (メガジュール/日) で表している。体表面積や体重で代謝量を除しているのは、大きさの異なる生体のエネルギー交換量を比較するための共通単位に体重や身長が用いられているためである。

本研究で使用した基礎代謝量は日本人の食事摂取基準 2015 年版に記載してある値を参考にした^{[2-9] [2-10] [2-11] [2-12]}。基礎代謝量の式は、Harris・Benedict の式 (2-13), (2-14), Schofield の式 (2-15) ~ (2-20) および WHO・FAO の式 (2-21) ~ (2-26) より基礎代謝量を算出した。

表 2-2 : Harris・Benedict の式

性別	式	
男性	$BMR = 66.4730 + 13.7516 \times mb + 5.0033 \times H - 6.7550 \times Y$	(2-13)
女性	$BMR = 665.0955 + 9.5634 \times mb + 1.8496 \times H + 4.6756 \times Y$	(2-14)

ここでは、

BMR : 基礎代謝量 [kcal/day] mb : 体質量 [kg]
 H : 身長 [cm] Y : 年齢 [歳]

表 2-3 : Schofield の式

年齢	式	性別	
18~29 歳	$BMR = 0.063 \times W + 2.896$	男性	(2-15)
	$BMR = 0.062 \times W + 2.036$	女性	(2-16)
30~59 歳	$BMR = 0.048 \times W + 3.653$	男性	(2-17)
	$BMR = 0.034 \times W + 3.538$	女性	(2-18)
60 歳以上	$BMR = 0.049 \times W + 2.459$	男性	(2-19)
	$BMR = 0.038 \times W + 2.755$	女性	(2-20)

ここでは、

BMR : 基礎代謝量 [MJ/day] W : 体質量 [kg]

表 2-4 : FAO/WHO/UNU の式

年齢	式	性別	
18~29 歳	$BMR = 64.4 \times W - 113.0 \times H/100 + 3,000$	男性	(2-21)
	$BMR = 55.6 \times W + 1,397.4 \times H/100 + 148$	女性	(2-22)
30~59 歳	$BMR = 47.2 \times W + 66.9 \times H/100 + 3,769$	男性	(2-23)
	$BMR = 36.4 \times W + 104.6 \times H/100 + 3,619$	女性	(2-24)
60 歳以上	$BMR = 36.8 \times W + 4,719.5 \times H/100 - 4,481$	男性	(2-25)
	$BMR = 38.5 \times W + 2,665.2 \times H/100 - 1,264$	女性	(2-26)

ここでは、

BMR : 基礎代謝量 [MJ/day] H : 身長 [cm] W : 体質量 [kg]

本研究では、Persily の CO₂ 呼出量推定式^[2-13]を用いた検討について日本人の基礎代謝量を求める際に下記に示す 3 つの式で検討を行った。Harris・Benedict 式，Schofield 式，FAO/WHO/UNU 式を用いて平成 28 年度および平成 26 年度被験者実験被験者の基礎代謝量を算定した。平成 28 年度の計算結果を図 2-4，平成 26 年度の計算結果を図 2-5 に示す。

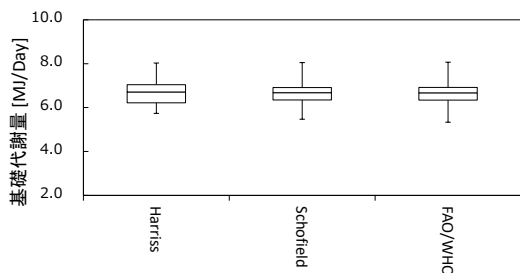


図 2-4：平成 28 年度被験者の基礎代謝量

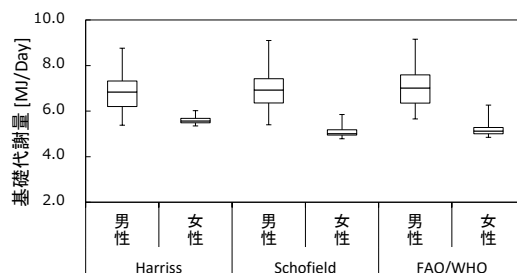


図 2-5：平成 26 年度被験者の基礎代謝量

基礎代謝量を推定する各式を用いて算出した平成 28 年度および平成 26 年度の男性の基礎代謝量は、最大値や最小値の値は被験者によって異なる結果となった。平成 26 年度のほとんど女性の算出結果で、Harris・Benedict 式より算出した基礎代謝量が最大値となり、Schofield 式の計算値が最小値となった。各推定式から求めた計算値を比較した結果、個人差があるもの男性は最大値と最小値の差異が約 0.1 MJ/day で、女性では差異が約 0.4 MJ/day であることが確認できた。



写真 2-2 体重体組成計 HBF-701

表 2-5：HBF-701 の測定項目と測定誤差

表示	0～100kg まで	: 100g 単位
	100～135kg まで	: 200g 単位
体重計 精度	0 kg を超えて 67.5 kg まで	: ±200g
	67.5 kg を超えて 100.0 kg まで	: ±300g
	100.0 kg を超えて 135.0 kg まで	: ±200g

2.3.3 体表面積

単位表面積は裸体立位姿勢における身体全体の表面積で、単位は[m²]が用いられる。単位表面積を求める方法は接触・直接法、非接触・直接法や、間接法など方法が取られる。接触・直接法は、非伸縮性のテープなどを用いて体表を写しとり体表面積を求める方法であり、非接触・直接法は、レーザー光などを用いて得た3次元座標から体表面積を求める方法である。

体重と身長からなる回帰式を用いて体表面積を求める間接法では、様々な研究で式が作成されており、式のいくつかを以下に示す。これらの式(2-27)、(2-28)、(2-29)は日本人を対象に作成された回帰式である。また海外の文献に示されているものはDuBoisの体表面積の式がある。以下にDuBoisの体表面積の式(2-30)を示す。この式はASTM D6245-12^[2-15]に示されている式で、西洋人のデータを用いて作成されている。

高比良の式^[2-16]

$$A_D = 0.007246 \times W^{0.425} \times H^{0.725} \quad (2-27)$$

藤本らの式^[2-17]

$$A_D = 0.008833 \times W^{0.444} \times H^{0.663} \quad (2-28)$$

蔵澄らの式^[2-17]

$$A_D = 0.0100315 \times W^{0.383} \times H^{0.693} \quad (2-29)$$

ここでは、

A_D : 日本人成人の体表面積 [m²]
 W : 体重 [kg]
 H : 身長 [cm]

DuBoisの式^[2-17]

$$A_{DB} = 0.203 \times W^{0.425} \times H^{0.725} \quad (2-30)$$

ここでは、

A_{DB} : 体表面積 [m²]
 W : 体重 [kg]
 H : 身長 [m]

2.3.4 呼吸商 RQ

RQ (Respiratory Quotient) とは呼吸商のことで、消費された O₂ 量に対する産生された CO₂ 量の比である。RQ の値は糖代謝のみ燃焼される場合の RQ は 1.00 であり、脂質代謝のみ場合の RQ は 0.703 である。運動時のエネルギー供給には糖と脂質が同時に使われると考えられているため、RQ の値は 1.00 から 0.703 を推移する。しかし CO₂ の過激な排出などにより RQ の値が 1.00 を上回る事がある。他にも細胞が食物栄養素を他の物質に変換することで物質から O₂ や CO₂ が放出される。そのため RQ が 1.00 を上回ったり、0.703 を下回ったりする事がある。

本研究では、ダグラスバッグ法より得られた CO₂ 呼出量測定値を計算する際と ASTM の CO₂ 呼出量推定式を用いる際に呼吸商 RQ 値を用いている。ダグラスバッグ法による被験者実験では、RQ が 0.703 未満および 1.00 以上のデータは外れ値として扱い検討を行った。また実測環境では、ASTM-12 の推定式では RQ 値を 0.83 と設定し、ASTM-18 の推定式では RQ 値を 0.85 と設定して与えて計算を行った。

2.3.5 心拍数

心拍数とは一定時間内に心臓が拍動する回数をいい、通常 1 分間の拍動の回数 (beats per minute) を指す。心拍数は最大酸素摂取量を間接的に測定する際に用いられ、身体運動の生理学には心拍数から酸素消費量を求める式が示されており、式 (2-31) が男性の式で、式 (2-32) が女性の式となっている^[2-8]。藤川らの研究^[2-18]ではこの式を用い、安静時の O₂ 摂取量と CO₂ 排出量の比から、心拍数計を用いて CO₂ 呼出量を測定している。

また心拍数から代謝量や活動強度を推定する研究も多く行われている。代謝量と心拍数には強い相関があり、心拍数を測定することにより代謝量の推定が可能であると考えられるが、人によって心拍数が安定しやすい運動があることが報告されている。

男性の式

$$Y = 30.8X - 2067 \quad (2-31)$$

女性の式

$$Y = 40.31X - 4236 \quad (2-32)$$

ここでは、

X : 心拍数 [bpm]

Y : 酸素摂取量 [cc/min]

2.4 人間の二酸化炭素呼出量に関する規格および既往研究

日本人の CO₂ 呼出量は JIS^[2-19]や SHASE-S^[2-20]に値が示されている。本研究では、JIS, ASTM, Persily の式および CO₂ 呼出量関係式の 4 つの式または規格を用いて検討を行った。

海外では ASTM D6245^[2-14]^[2-15]や The ASHRAE Fundamentals Handbook に身長・体重・Met 値より CO₂ 呼出量を推定する計算式 ((2-34), (2-35) 後述に示す) が示されている。呼吸商 RQ に代入する 0.83 という値は ASTM-12^[2-15]に示されている値であり, light activity (軽い活動) や sedentary activity (座っている活動) をしている成人男性の平均値である。最近の研究では Persily らが基礎代謝量や Met 値を変数とした CO₂ 呼出量の推定式(後述(2-36), (2-37)) を提案している。しかしながら, これらの計算式は, 西洋人のデータを用いて係数が決められており, 日本人に使用する際には一定の誤差が生じる可能性が考えられるため, 第3章ではダグラスバッグ法による CO₂ 呼出量の精度確認を行っている。

2.4.1 JIS A1406-1974

在室者の呼気を用いた質の換気量を測定する方法が示されており, 1964 年に制定されている。当該 JIS は 1974 年から現在まで新たな改定は行われておらず, 直近では 2014 年 10 月に日本工業標準調査会の確認が行われている^[2-21]。また日本人の CO₂ 呼出量が示されており, 表 2-6 に示す。ここで示されているエネルギー代謝率とは, Met 値ではなく RMR を示しており, 本研究では式 (2-7) を用いてエネルギー代謝率を置き換えて計算している。

表 2-6: 人間が呼出する CO₂ 量 (成年男性)

作業中のエネルギー代謝率	CO ₂ 呼出量 [m ³ /h]	労働時間 8 時間中の平均エネルギー代謝率	労働時間 8 時間中の平均 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	0.8	0.0129 ~ 0.0184
1.0 ~ 2.0 (徐歩行)	0.0230 ~ 0.0330	0.8 ~ 1.5	0.0184 ~ 0.0248
2.0 ~ 4.0 (軽労働)	0.0330 ~ 0.0538	1.5 ~ 2.6	0.0248 ~ 0.0350
4.0 ~ 7.0 (中労働)	0.0538 ~ 0.0840	2.6 ~ 3.5	0.0350 ~ 0.0420
1.0 以上 (重労働)	0.0840 以上	3.5 以上	0.0420 以上

※備考 女子は表の値の 90%、児童は表の値の 50%程度になる

2.4.2 SHASE-S102

SHASE-S は, 1972 年の空気調和・衛生工学会の学会誌によると昭和 14 年 9 月に制定され, 当該学会誌において HASS102 換気(案)として改定案が示されている。現行の SHASE-S は JIS を参照されているが若干数字が異なる。SHASE-S に記載されている値を表 2-7 に示す。また JIS と同様にここでもエネルギー代謝率は RMR を示す。

表 2-7 : SHASE-S102^[2-20]による労働強度別 CO₂呼出量 (成人男子)

エネルギー代謝率 RMR (Met)	作業程度	CO ₂ 呼出量 [m ³ /h]
0 (1.0)	安静時	0.0132
0~1 (1.0~1.83)	極軽作業	0.0132~0.0242
1~2 (1.83~2.66)	軽作業	0.0242~0.0352
2~4 (2.66~4.32)	中等作業	0.0352~0.0572
4~7 (4.32~6.81)	重作業	0.0572~0.0902

備考：女子は表の値 90%、児童は表の値の 50%程度にとり、Met 値は筆者の計算による

2.4.3 ASTM D6245

ASTM は 2018 年に式の改正があったため 2018 年と 2012 年の式について検討を行った。それぞれの式について下記で説明する。

(1) D6245-18^[2-14]

ASTM-18 では、基礎代謝量、呼吸商 RQ、気温、気圧および Met 値より CO₂呼出量を推定する計算式 (2-33) が示されている。RQ は 0.85 と示されており、標準温度は 0°C (273K)、標準気圧は 101kPa の条件で CO₂呼出量が推定される。

$$V_{CO_2} = RQ \cdot BMR \cdot M \cdot T/P \cdot 0.000211 \quad (2-33)$$

ここでは、

$$\begin{array}{ll} RQ & : \text{呼吸商} \\ BMR & : \text{体重 [kg]} \\ T & : \text{気温 [K]} \\ M & : \text{エネルギー代謝率 [-]} \\ V_{CO_2} & : \text{CO}_2 \text{の体積 [m}^3\text{/h]} \\ P & : \text{気圧 [kPa]} \end{array}$$

(2) D6245-12^[2-15]

海外では ASTM に身長、体重および Met 値より CO₂呼出量を推定する計算式 (2-34) , (2-35) および (2-30) が示されている。呼吸商 RQ に代入する 0.83 という値は ASTM で示されている値である。

$$V_{O_2} = \frac{0.00276A_D M}{(0.23RQ + 0.77)} \quad (2-34)$$

$$A_D = 0.203 \times W^{0.425} \times H^{0.725} \quad (2-30(\text{再掲}))$$

$$RQ = \frac{V_{CO_2}}{V_{O_2}} \quad (2-35)$$

ここでは、

$$\begin{array}{ll} RQ & : \text{呼吸商} \\ W & : \text{体重 [kg]} \\ V_{O_2} & : \text{O}_2 \text{の体積 [m}^3\text{/h]} \\ M & : \text{エネルギー代謝率 [-]} \\ H & : \text{身長 [m]} \\ V_{CO_2} & : \text{CO}_2 \text{の体積 [m}^3\text{/h]} \end{array}$$

2.4.4 Persily の式

Persily らは、ASHRAE Standard 55, ASHRAE Standard Fundamentals Handbook, ISO Standard 8996, および ASTM D6245-16 に示されている CO₂ 呼出量を推定する式では正確に推定することができないことを確認し、新たに西洋人の CO₂ 呼出量を推定する式を作成した。屋内の環境を評価するために CO₂ 濃度を用いているが発生量を正確に推定する必要がある。屋内での CO₂ 濃度推定を行い、精度よく推定できていることを確認している。Persily が作成した CO₂ 呼出量の推定式 (2-37) は気温 0°C (273K), 気圧 101kPa の条件で作成された推定式である^[2-13]。

$$V_{CO_2} = 0.000484 \times BMR \times Met \quad (2-36)$$

$$V_{CO_2} = 0.000179 \times BMR \times Met \times T \div P \quad (2-37)$$

ここでは,

V_{CO_2} : CO₂呼出量 [L/s]

BMR : 基礎代謝量 [MJ/day]

T : 気温 [K]

P : 気圧 [kPa]

M : エネルギー代謝率 [-]

2.4.5 先行研究の関係式

先行研究^{[2-22] [2-23] [2-24] [2-25] [2-26]}ではこのような背景から、これらの文献に示されている人間の CO₂ 呼出量との比較を一目的とし、20代の日本人を中心にダグラスバッグ法による呼気収集実験を行い、呼気データと被験者の属性データ（性別、年齢、身長及び体重）を収集した。表 2-8 に呼気収集実験の被験者の属性、表 2-9 に実験で使用した測定機器と測定項目を示す。性別、身長及び身長は被験者より聞き取り調査を行い、体重に関しては呼気収集実験前に OMRON 体重体組成計 HBF-701 を用いて測った値を用いた。以下に体重計の写真と表 2-5 に使用した表示範囲と精度について示す。実験の結果 169 点の呼気データを収集することが出来た。

表 2-8 : 被験者の属性と人数

属性	人数
20代	40 (18)
30代	1 (1)
40代	5 (0)
50代	1 (0)
60代	1 (0)
合計	48 (19)

() 内は女性 内数

表 2-9：測定機器と測定項目

測定項目	機器名	測定概要
CO ₂ 濃度 O 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

$$P_{CO_2} = 1.601 \times 10^{-4} \times (60.63 \times A_D \times Met \times C_g \times C_a) \quad (2-38)$$

$$A_D = 0.007246 \times W^{0.425} \times H^{0.725} \quad (2-27(\text{再掲}))$$

ここでは、

- P_{CO_2} : CO₂呼出量 [m³/h]
- A_D : 体表面積 [m²]
- Met : エネルギー代謝率 [-]
- C_a : 年齢係数 (表 2-10 参照)
- C_g : 性別係数 女性 0.73 男性 1.00
- W : 体重 [kg] H : 身長 [cm]

収集した呼気データおよび被験者の属性データを回帰分析することで人間の呼気に含まれる CO₂呼出量関係式 (2-38) を作成した。この時に用いた呼気のデータは前述した RQ が 1.00 から 0.703 の範囲外にあるデータは遷移的な状態にあると判断し、分析には使用していない。また関係式は学校、事務所などの比較的活動強度の低い活動が行われる居室で使用されることを想定し、ダグラスバッグ法で得られた Met 値が 3.0 より大きいデータは分析に使用していない。年齢係数及び性別係数は基礎代謝量を用いて検討を行っており、使用した年代別の基礎代謝量と基礎代謝量の比を表 2-10 に示している。

表 2-10：年代別基礎代謝量と基礎代謝量の比^[2-22]

年齢	基礎代謝量 [kcal/日] (基礎代謝量の比 C_a)	
	男	女
1～2	700 (0.46)	660 (0.59)
3～5	900 (0.59)	840 (0.76)
6～7	980 (0.64)	920 (0.83)
8～9	1140 (0.75)	1050 (0.95)
10～11	1330 (0.88)	1260 (1.14)
12～14	1520 (1.00)	1410 (1.27)
15～17	1610 (1.06)	1310 (1.18)
18～29	1520 (1.00)	1110 (1.00)
30～49	1530 (1.01)	1150 (1.04)
50～69	1400 (0.92)	1100 (0.99)
70 以上	1290 (0.85)	1020 (0.92)

基礎代謝量の比は 18～29 歳の値を基準としている
表中の灰色の部分は先行研究における被験者が含まれる条件を示している

2.5 精度や誤差, 不確かさに関する語句および概念

精度や誤差に関する語句について 1995 年に国際ガイドが(「Guide to the expression of uncertainty in measurement」訳「計測の不確かさの表し方のガイド」)作成されるまで、様々な分野や業界で言葉使われ、語句の違いにより正確さが判断できない問題があった。1981 年の国際度量衡委員会 (CIPM) の勧告 (CI-1981) にさかのぼり、ISO, IEC, BIPM および OIML によって構成された ISO/TAG4 (Technical Advisory Group) の作業部会が主体となって国際ガイドが作成された^[2-27]。

日本では計測・計量に関する語句に関して日本工業規格 (JIS) に、計測用語 (Z8103-2000)、分析・試験の許容差通則 (Z8402-1999) などがあり、これらは国際ガイドの発表後、改正がされている。しかし、Z8402-1991 および Z8103-1990 では、精度 (不確かさ) の総合的な表現が記載されているのは計測用語および分析・試験の許容差通則であるが、この二つの規格の間で語句の意味が完全に一致していなかった。今井氏の書籍「計測の信頼性評価」では、不確かさおよび誤差の定義について日本工業規格 (JIS) に示されている精度や誤差に関する語句を従来概念とし、不確かさの表現ガイドに示されている不確かさ等に関する語句を新規概念として図 2-6 のように説明されている^[2-28]。

本論文では、ほとんど改正されていない誤差に関する定義を従来の語句として示し、不確かさなどの定義を新規概念として用いた語句の説明を記述する。

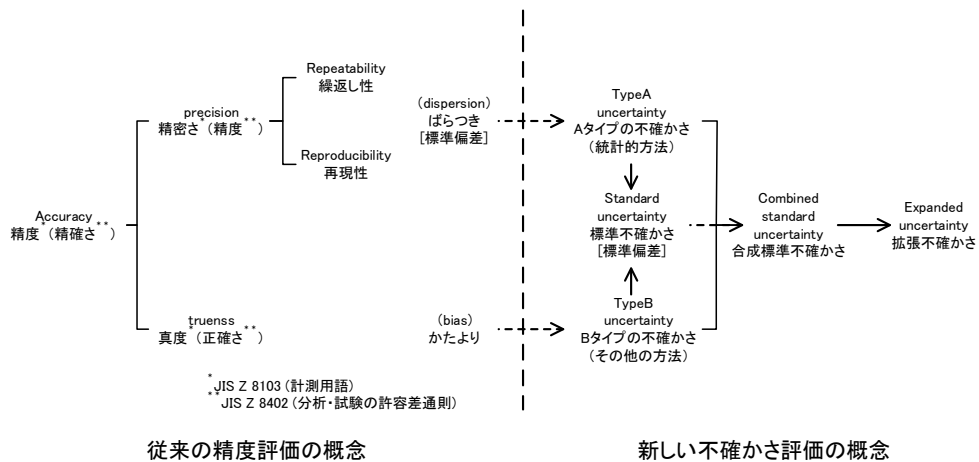


図 2-6 : 不確かさ評価と従来の精度評価の関係図^[2-27]

2.5.1 従来の概念

誤差および不確かさに関する語句の説明を示す。偶然誤差, 系統誤差および真値な度について図 2-7 に簡単な例として示す。

表 2-11：従来の概念に関する語句^{[2-27] [2-28] [2-29] [2-30] [2-31]}

誤差 (Error)	測定には不確かさがあり、それが誤差である。測定における誤差の定義は「測定値－真の値」である。実際に測定値は常に正しいと限らず、測定値には誤差があると考えるのが妥当である。
偶然誤差 (Random Error)	ランダムで発生する誤差のことであり、数学者ガウスが偶然誤差はガウス分布(すなわち、正規分布)に従うことを導いている。突き止められない原因によって起こり、測定値のばらつきとなって現れる誤差。
系統誤差 (Systematic Error)	理論誤差、機械誤差および個人誤差を一般的に示す。測定値のばらつきではなく、平均値をずらす形で測定に影響を与えるため、測定結果から誤差の存在に気づくのが困難である。誤差の要因がわかれば補正することで誤差を取り除くことが可能である。
理論誤差 (Model Error)	理論(モデル)の誤差である。シミュレーションにより算出した推定値と測定値の比較を行った際の差異などである。
機械誤差 (Mechanical Error)	測定器などが元々持っている誤差例えば、測定器で計測する際、測定機自体が真値から外れており、中央値と平均値が一致しない場合はこれにあたる。
個人誤差 (Personal Error)	測定者の癖による一定の誤差である。測定者の過失(過失誤差)による偶然の誤差の場合はこれに含まれない。
平均誤差 (Mean Error)	標本標準偏差自体は単位がなく無次元である。これは、下記の式のように n で割る回数が 1 回少ないためである。 $u = \sqrt{\frac{(x-\bar{x})^2}{n}} \quad (2-39)$ u : 標本標準偏差, 不偏標準偏差
標準誤差 (Standard Error)	標準偏差から求められる誤差のこと。一般的に正規分布である。
最大誤差 (Max Error)	真の値がほとんど確実にこの領域にあることを保証するため、最確誤差と系統誤差 δ の和を取って誤差を示す。
相対誤差 (Fractional Uncertainty)	単に誤差 δx の大きさだけ表されるわけではなく、明らかに x_{best} (真の値) に対する δx の比によって表すことができる。厳密に測定を行えば、誤差 δx は多くの場合 x_{best} の値に比べて十分に小さくなる。
真の値 (True Value)	ある特定の量と一致する値。
誤差の伝播 (Propagation of Error)	独立ないくつかの測定結果を組み合わせ演算して測定結果を求める誤差のことを「間接測定の誤差」と言う。求めたい物を計算する際に計算に用いた項目が持つ誤差が合わさることを“誤差の伝播”と言う。

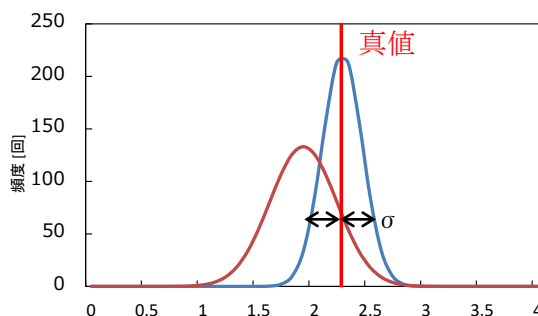


図 2-7：分布と誤差

2.5.2 新規の概念

従来の概念では「誤差」という表現が多かったが、ガイドでは「不確かさ」に統一され、誤差 (Error) は真の値がわからないと同じようにわからないと示されている。計測における不確かさの要因について、測定量が不完全である、測定量が決まっているが、実際の測定で定義範囲が測定できない、測定に対する環境条件 (温度, 湿度, 風速等) の影響について正しくわからないまたは未知のものがある, などがある。

表 2-12 : 新規の概念に関する語句^{[2-28] [2-31]}

<p>不確かさ (Uncertainty)</p>	<p>不確かさ成分は2つに分類され A タイプと B タイプがある。 A タイプ (統計的方法によって見積もる不確かさ成分) は, 統計的方法によって評価する方法として, 一連の互いに独立な測定による繰り返し (反復) 観測値 x_i から実験分散を次のように求める。 B タイプ (統計的方法以外によって見積もる不確かさ成分) は, 従来の技術儒法により, 入力量のばらつきによる測定値の分布を仮定し, の分布の標準偏差に相当するものを標準不確かさ成分として推定する。下記に示す 5 つの技術情報がある。 (a) 今までの実験データ (b) 測定資料や測定機に関する知識・経験 (c) 測定器の性能, 仕様 (d) 校正証明書や成績書記載のデータ (e) 引用したデータや定数の不確かさ</p>
<p>合成標準不確かさ (Combined Standard Uncertainty)</p>	<p>入力量に相関がない場合には, 計算値 y の合成標準不確かさ $u_c(y)$ を次のように示す。 $u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)} \quad (2-40)$ すなわち, A タイプの標準不確かさ S_a と B タイプの標準不確かさ S_b との 2 乗和の平方根で表す。 $s_c = \sqrt{(s_{a1}^2 + s_{a2}^2 + s_{a3}^2 + \dots + s_{b1}^2 + s_{b2}^2 + s_{b3}^2)} \quad (2-41)$ 合成標準不確かさは偏導関数で表している。ここでは, 偏導関数を用いないことにした。 偏導関数を求める手続きを偏微分法という^[19]。</p>
<p>拡張不確かさ (Expanded Uncertainty)</p>	<p>拡張不確かさは U と表される。 $U = k s_c \quad (2-42)$ $k=2$ とすると約 95% の信頼水準を持ち, $k=3$ で約 99% の信頼水準を持つことになる。一般的には, $k=2$ を用いて標準不確かさを表す標準偏差が正規分布, 一様分布, 三角分布などの分布でも $k=2$ は信頼水準約 95% で変わらないためである。</p>
<p>不確かさの要因となる因子</p>	<p>誤差因子 : 不確かさの原因となる条件 標示因子 : 測定範囲, 条件の範囲を区別するためにとりあげた条件 信号因子 : 量の違いを水準にした測定量</p>

2.6 統計的検討に関する語句

本研究では、第6章で換気測定法に関する精度についてモンテカルロ法や正規分布などの統計的な計算を行っており、この節ではそれらの語句について説明する。また正規分布などの一般的な理論式や本研究で行った数値計算の有効数字についても示す。

表 2-13：統計に関する語句^{[2-32] [2-33] [2-34] [2-35] [2-36] [2-37]}

数値計算	数値計算法, 数値解析, 実用解析とも呼ばれる。現象に対する最適解もしくは尤値を算出することが目的であり, 線形の漸化式の形が与えられることが多い。
モンテカルロ法	乱数を取り扱う技法の総称である。積分領域上に一様分布する N 個の乱数 x_1, \dots, x_N を用いて, $(1/N)\sum f(x_k) \times (\text{積分領域の体積})$ を積分の近似値 (推定値) とする方法である。誤差の評価基準は標準偏差であり, 近似値 (推定値) が見当違いの値である確率は決してゼロでないことに注意すべきである。シミュレーションの問題のうちランダムな要素を含むもの (事象) は全て対象である。
反復法	繰り返し計算を行い, 計算値を収束させて最適解に近づけていく計算方法である。
乱数	列, 行および行列で見てもランダムな数値のこと。
乱数表	日本では日本工業規格 (JIS) などにも乱数表が示されている。
乱数発生法(算術)	平方採中法や線形漸化式を用いて順次乱数列を発生させる方法。
一様乱数	広く使われてきた発生法として線形合同法があげられる。これは漸化式 (2-43) を用いて非負整数列 $\langle X_n \rangle$ を生成するものである。 $X_n = a X_{n-1} + c \quad (2-43)$
特殊乱数	指数乱数, 正規乱数, ガンマ乱数などの分布が一様でない乱数のこと。
疑似乱数	算術乱数とも呼ばれる。発生方法は2通りで, 算術乱数 (疑似乱数) と物理乱数である。
統計的検定	乱数 (模擬乱数) が本当にランダムであるのかを保証するための検定。一般的な方法はカイ 2 乗検定であり, 他に Kolmogorov-Smirnov 検定などがある。
合同法乱数	乱数を足し合わせて周期で繰り返す。
誤差	誤差に関する語句は第2章 5.1 節 (P22) にまとめて示している。
積み残しの誤差	絶対値の大きな浮動小数点 xf に絶対値の小さい数を足す計算で小数点を丸めたものが xf と等しくなって小さい数が反映されないこと。
桁落ちの誤差	同じ桁で引いた時に起きる有効数字の減少。
正規分布	ガウス分布とも呼ばれる。
二項分布	確率分布の1つ。
ポアソン分布	一定期間における事故の発生や放射性物質の崩壊など稀に起こる離散的な事象の頻度がこの分布と近似する。二項分布を一定の条件で極限にしたときの分布。小さな確率でしか起こらない現象が一定時間内に起こる回数は, これで記述される。
離散分布	離散確立分布とも呼ばれる。観測される値が事前に定義された一連の値に限定される場合の確率分布である。

[正規分布(確率密度関数)の式]

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2-44)$$

ここでは,

f(x) : 確率密度関数 μ : 平均値 σ² : 分散

[ポアソン分布の式]

$$P = \frac{e^{-m} \times m^k}{k!} \quad (2-45)$$

ここでは,

P : 回数 m : 試行回数の平均値 k : 試行回数

[二項分布の式]

$$P(X = k) = nCk p^k q^{n-k} \quad (2-46)$$

ここでは,

P : 回数 m : 試行回数の平均値 k : 試行回数

数値計算で重要になる変数の有効数字についてモンテカルロ法による数値計算では、各項目の有効数字は桁数ではなく小数点の位置で有効数字を調整することにし、丸めの誤差などについて考慮した。各項目の有効数字を表 2-14 に示す。

表 2-14 : 各項目の有効数字

項目	有効数字	小数点桁数
CO ₂ 濃度(室内) [ppm]	0 ~ 999 : 3, 1000 ~ 5000 : 4	6 (10 ⁻⁶) 桁
CO ₂ 濃度(屋外) [ppm]		
Met 値 [-]	1.0 ~ 9.9 : 2, 10.0 ~ : 3	1 (0.1) 桁
有効室容積 [m ³]	10 ~ : 2 ~	3 (10 ⁻³) 桁
身長 [cm]	10.0 ~ 99.0 : 3, 100.0 ~ : 4	1 (0.1) 桁
体重 [kg]	10.0 ~ 99.0 : 3, 100.0 ~ : 4	1 (0.1) 桁
RQ 値 [-]	0.70 ~ 1.00 : 2 (1.00 の時のみ 3)	2 (0.01) 桁
気温 [K]	273.2 ~ 323.2 : 4 (0°C ~ 50 °C)	1 (0.1) 桁
大気圧 [kPa]	~ 99.9 : 2, 100.0 ~ : 3	1 (0.1) 桁
換気量 [m ³ /h]	1.0 ~ 9.9 : 2, 10 ~ 99.9 : 3, 100 ~ : 4	1 (0.1) 桁

2.7 おわりに

本章では、本論文に関わる人体および統計学の基本事項について詳しく示した。CO₂呼出量に関する既往の研究について日本で示されている CO₂ 呼出量の値や海外で作成された CO₂ 呼出量の式 (ASTM や Persily の式) を記述した。また本論文で用いた誤差および不確かさに関する語句についても記述した。

ASTM などの海外で示されている式や値については西洋人を対象に式が作成されていることもあり、日本人と代謝量や属性 (体重や身長) などの違いも考慮して使う必要があると考えられる。

不確かさについては今井の書籍^[2-27]を参考に誤差や不確かさについて“従来”と“新規”と表現して説明した。

6章で記述する数値計算について変数の有効数字を示した。

参考文献<第2章>

- [2-1] 2013 ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS I-P Edition, ASHRAE Research, 2013
- [2-2] 改訂版『身体活動のメッツ (METs) 表』, 国立健康・栄養研究所
- [2-3] 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 4 版], 井上書院, p52-p53, p150, 2015.2
- [2-4] 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) 3 基空気調和設備, 2010.2
- [2-5] 身体活動量の定量法とその実際(1): [http://www.okamurakoji.info/Site/ti_yu_xue_bu_files/11%20%E8%BA%AB%E4%BD%93%E6%B4%BB%E5%8B%95%E9%87%8F%E3%81%AE%E5%AE%9A%E9%87%8F%E6%B3%95%E3%81%A8%E3%81%9D%E3%81%AE%E5%AE%9F%E9%9A%9B\(1\)%EF%BC%88%E9%85%8D%E5%B8%83%EF%BC%89.pdf](http://www.okamurakoji.info/Site/ti_yu_xue_bu_files/11%20%E8%BA%AB%E4%BD%93%E6%B4%BB%E5%8B%95%E9%87%8F%E3%81%AE%E5%AE%9A%E9%87%8F%E6%B3%95%E3%81%A8%E3%81%9D%E3%81%AE%E5%AE%9F%E9%9A%9B(1)%EF%BC%88%E9%85%8D%E5%B8%83%EF%BC%89.pdf), 2018.1.16 取得
- [2-6] 厚生労働省 生活習慣病予防のための健康情報サイト e-ヘルスネット[情報提供] エネルギー代謝の評価法, 2018.1.16 取得
- [2-7] 朝倉邦造, 人間の許容限界事典, 株式会社朝倉書店, pp846-p853, 2005.10.20
- [2-8] 身体運動の生理学, 猪飼道夫編著, 杏林書院, p292, 1973.12
- [2-9] 「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-p66, 2014.3
- [2-10] Harris JA, Benedict FG. Biometric studies of basal metabolism in man. Publication 279 : p233-250, 1919
- [2-11] FAO FOOD AND NUTRITION TECHNICALREPORT SERIES Human energy requirements Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert ConsultationRome, p17-p24 October 2001
- [2-12] Schofield, W.N. 1985. Predicting basal metabolic rate, new standards and review of previous work. Hum. Nutr. Clin. Nutr., 39C (suppl. 1): p5-p41.
- [2-13] A.Persily , L de jonge : Carbon dioxide generation rates for building occupants, The Authors. Indoor Air 2017, 14 March 2017
- [2-14] 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
- [2-15] ASTM D6245-18, Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation, American society for Testing and Materials International, 2018
- [2-16] 13・2・2 代謝量, 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, p229-p330, 2010.2
- [2-17] 日本建築学会基準・AIJES-H0004-2014 温熱心理・生理測定法基準・同解説, 一般社団法人日本建築学会, p46, 2014.3
- [2-18] 藤川光利 吉野博 高木理恵 奥山博康 林基哉 菅原正則: 居住者の呼気を用いた多数室換気量測定法に関する実験的研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 75 巻 第 652 号, 日本建築学会, p499-p508, 2010.6

- [2-19] JIS A14061974 室内換気量測定法（炭酸ガス法）, 2010
- [2-20] [労働強度別二酸化炭素(CO₂)吐き出し量, 社団法人 空気調和・衛生工学便覧 3 空気調和設備編, 第14版, 空気調和・衛生工学会, p141, 2010.2
- [2-21] 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=903941>, 2017.1.24 取得
- [2-22] 田島昌樹 井上貴之 大西裕治: 換気測定のための在室者の二酸化炭素呼出量の推定, 日本建築学会環境系論文集, 第81巻 第728号, 日本建築学会, p885-p892, 2016.10
- [2-23] 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, 日本建築学会学術講演梗概集 (近畿), 日本建築学会, p831-p832, 2014.9
- [2-24] 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 必要換気量についての検討, 日本建築学会学術講演梗概集 (近畿), 日本建築学会, p833-p834, 2014.9
- [2-25] 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3 人間の CO₂ 呼出量に関する既往研究の調査, 日本建築学会学術講演梗概集 (関東), 日本建築学会, p855-p856, 2015.9
- [2-26] 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4 CO₂ 呼出量推定式の適用範囲の拡張と精度確認, 日本建築学会学術講演梗概集 (関東), 日本建築学会, p857-p858, 2015.9
- [2-27] 吉澤康和: 新しい誤差論 実験データ解析法, 共立出版株式会社, p1-p126, 1989.11
- [2-28] 今井秀孝: 計測の信頼性評価-トレーサビリティと不確かさ解析-, 日本規格協会, p7-p48, 1996.1.22
- [2-29] JOHN・TAYLOR. 訳: 林茂雄 馬場涼: 計測における誤差解析入門, 株式会社東京化学同人, p2-p170, 2000.3
- [2-30] H.J.C.BERENDSEN. 訳: 林茂雄 馬場涼: データ・誤差解析の基礎, 株式会社東京化学同人, p5-p104, 2013.3
- [2-31] 矢野宏: 誤差のおはなし—測る世界の原点を探る—, 日本規格協会, 2005.1
- [2-32] 関和雄: ISO 規格等に基づく計測の基礎—SI 単位と不確かさ—, 日本電機大学出版社, p31-p48, 1997.3.10
- [2-33] 伏見正則: 乱数 UP 応用数学選書 12, 東京大学出版会, p1-p124, 1994.10
- [2-34] 豊田秀樹: 統計ライブラリー マルコフ連鎖モンテカルロ法, 朝日書店, p1-87, 2008.5
- [2-35] 宮武修 脇本和昌: 乱数とモンテカルロ法, 森北出版, p1-p58, 1995.4
- [2-36] 杉原正顕 室田一雄: 数値計算法の数理, 株式会社 岩波書店, p1-28, 1994.11
- [2-37] 津田孝夫: モンテカルロ法とシミュレーション-電子計算機の確率論的応用-, 培風館, p1-p70 p91-p168, 1969.6

第3章

エネルギー代謝率および二酸化炭素呼出量の推定精度

第3章 エネルギー代謝率および二酸化炭素呼出量の推定精度

3.1 はじめに

二酸化炭素呼出量（以降，CO₂呼出量）を算定するには，どの推定手法でもエネルギー代謝率 Met を用いる必要がある。前述した通りエネルギー代謝率（以降，Met 値）の推定方法および CO₂呼出量推定方法は多数あり，どの推定方法が最も日本人の CO₂呼出量を推定できるのかについてまとめた研究は少ない。先行研究では，目視で在室者および被験者の行為を把握し，文献（ASHRAE^[3-1]）に示されている値を関係式に代入して CO₂呼出量の算定を行っていた。しかし，単室の室内 CO₂濃度推定では，推定値と測定値がかい離している場合もあり，実際の Met 値と文献に示されている Met 値との差が一因であると考えた。

本章では，活動量計および脈拍数計を用いた Met 値推定手法による CO₂呼出量推定の精度向上を目的に検討を行った。さらに JIS^[3-2]や ASTM-12^[3-3]などによる CO₂呼出量推定手法と CO₂呼出量関係式による推定手法で比較を行い，Met 値推定手法と CO₂呼出量推定手法の組み合わせによる CO₂呼出量推定の精度向上に関する検討も行った。また CO₂呼出量推定手法の検討では，平成 26 年度および平成 28 年度の CO₂呼出量のデータを用いて式の誤差などについて精査した。本章の 3 節では，Met 値推定手法による CO₂呼出量推定の精度向上について記しており，4 節ではダグラスバッグ法より得られた CO₂呼出量測定値と各推定手法より算定した CO₂呼出量推定値の比較についての検討結果を記す。

3.2 被験者実験の測定概要

先行研究^[3-4]では CO₂呼出量関係式（2-38）の導出の際に 169 点の呼気データを収集している。各 CO₂呼出量推定手法に用いる Met 値を被験者の行為を確認して文献から設定する手法と活動量計などの測定値を用いる手法による精度確認および呼気データの拡充による CO₂呼出量関係式の精度の確認のため，呼気と活動量のデータの収集を目的に自発的参加者（以降，被験者）による被験者実験を行った。

実験は先行研究と同じくダグラスバッグ法による呼気データの収集および被験者に活動量計と脈拍数計を装着してもらい 11 ケースの行為について測定を行い，呼気データおよび三軸加速度センサーから得られる活動量，脈拍数計による脈拍数のデータを収集した。

ダグラスバッグ法は，短時間の多様な行為時のエネルギー消費量を測定する場合に採用される方法で，ダグラスバッグにつながっているマスクを着用しながら 1 分から数分間の行為の呼気を収集し，ガス分析器などを用いて集められた呼気を分析して体内での O₂消費量と CO₂排出量からエネルギー消費量を求める方法である。ダグラスバッグ法の手順を表 3-1 に示す。代謝量を求める式（(3-5)，(3-6)，(3-7)）は，ISO 8996^[3-5]に示されている。本研究ではこの手法を用いて呼気から代謝量を測定し，式（3-7）より Met 値を求める。

先行研究では、CO₂呼出量関係式作成およびその式の精査を行うためにダグラスバッグ法による Met 値および CO₂呼出量測定を行った。平成 28 年度の被験者実験概要を表 3-3 に示す。ポータブルガス分析器について写真 3-1 に、ダグラスバッグを写真 3-2 に示す。活動量計および脈拍数計の装着時の写真を以下に示す。

なお一部のデータについて卒業研究で報告しており、当時私の先輩にあたる大西裕治氏と一部共同で行ったため彼の修士論文に実験結果が記されているが、データを精査した際に一部の値を修正していることをここに記す。

表 3-1：被検者実験の手順

①	ポータブルガス分析器を暖機してゼロ校正およびスパン校正を行う。
②	ポータブルガス分析器を用いて、室内の空気を測定し、吸気酸素濃度 C_{IO_2} と吸気二酸化炭素濃度 C_{ICO_2} の値に問題がないことを確認する。
③	呼気を収集する前に 30 分の安静時間を設け、この間は椅子に座って安静にしよう。安静時間の後、被験者に呼気マスクを装着してもらい、設定した行為を一定時間行ってもらいながら呼気をダグラスバッグに収集する。
④	収集終了後、ダグラスバッグに集めた呼気をポータブルガス分析計で呼気酸素濃度 C_{EO_2} と呼気 CO ₂ 濃度 C_{ECO_2} を測定する。またダグラスバッグに収集した呼出量を流量計で測定する。
⑤	④で得られた測定値を用いて式 (3-1), (3-2), (3-3), (3-4) から O ₂ 消費量および CO ₂ 排出量を算出する。
⑥	求めた O ₂ 消費量と CO ₂ 排出量を式 (3-5), (3-6), (3-7) に代入して代謝量を求める。

$$\dot{V}_{O_2} = \dot{V}_{bag} \times C_{O_2} \quad (3-1)$$

$$C_{O_2} = C_{EO_2} - C_{IO_2} \quad (3-2)$$

$$\dot{V}_{CO_2} = \dot{V}_{bag} \times C_{CO_2} \quad (3-3)$$

$$C_{CO_2} = C_{ECO_2} - C_{ICO_2} \quad (3-4)$$

$$RQ = \frac{\dot{V}_{CO_2}}{\dot{V}_{O_2}} \quad (3-5)$$

$$EE = (0.23RQ + 0.77)5.88 \quad (3-6)$$

$$M = EE \times \dot{V}_{O_2} \quad (3-7)$$

ここでは、

\dot{V}_{bag}	: 吸気ガス量 [L/h]	\dot{V}_{O_2}	: 酸素消費量 [L/h]
C_{O_2}	: 酸素消費濃度 [%]	C_{IO_2}	: 外気酸素濃度 [%]
C_{EO_2}	: 呼気酸素濃度 [%]	\dot{V}_{CO_2}	: 二酸化炭素排出量 [L/h]
C_{CO_2}	: 排出二酸化炭素濃度 [%]	C_{ICO_2}	: 外気二酸化炭素濃度 [%]
C_{ECO_2}	: 呼気二酸化炭素濃度 [%]	RQ	: 呼吸商 [-]
EE	: エネルギー等価 [L/h]	M	: 代謝量 [W]

表 3-2：測定機器と測定項目

測定項目	機器名	測定概要
CO ₂ 濃度 O 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
空気温度 [°C]	T AND D TR-73U	測定範囲 0~50 °C ±0.3
大気圧 [hPa]		測定範囲 750~1100 hPa ±1.5
活動量	OMRON Active style PRO HJA-750c	測定範囲 ±6G 1.0~18.0METs (0.1METs 刻み)
脈拍数	MIO ALPHA 53PBLK-INT	測定範囲 脈拍数 30 ~ 220 拍



写真 3-1：ポータブル分析機器



写真 3-2：ダグラスバッグ



写真 3-3：Active style PRO HJA-750C



写真 3-5：MIO ALPHA



写真 3-4：活動量計（装着時）



写真 3-6：脈拍数計（装着時）

表 3-3：被験者実験の条件（平成 28 年度）

行為	作業時間 [分]	ASHRAE	METs 表		被験者数 [人]
			METs	Code	
椅座静位	5	1.0	1.0	07010	16 (1)
事務 作業		1.0	1.3	09040	8 (1)
		1.1			10
		書類整理**	1.2	2.0	11763
掃除	4	2.0~3.4	1.8	05041	11
			2.3	05032	14 (1)
			3.2	05022	12 (1)
			3.3	05043	12 (1)
歩行	3	2.0	2.8	17152	12 (1)
		2.6	3.5	11792	14 (1)
		3.8	5.0	17220	12

() 内は女性の人数

*ハンドクリーナー型の掃除機を使用した **ファイル整理と示されている

3.2.1 エネルギー代謝率

被験者実験では、ダグラスバッグ法に加え、脈拍数計付腕時計 MIO ALPHA と三軸加速度センサー内蔵活動量計 Active style PRO HJA-750C を用いて Met 値の測定を行った。被験者には服の上からベルトをしてもらい、そのベルトに活動量計を装着してもらい、Met 値を 10 秒間隔で測定した。また脈拍数計は、痛くない又は苦しくない程度に密着させて脈拍数計を腕に装着してもらい 1 秒間隔で測定した。文献値による検討では先行研究と同様に ASRAE HANDBOOK を用い、本研究では新たに“国立健康・栄養研究所”の示す値^[3-6]（以降、文献値（METs 表））の比較も行った。

被験者実験から得られる活動量のデータはダグラスバッグ法による Met 値と三軸加速度センサーから得られる METs である。またダグラスバッグ法による Met 値と脈拍数との回帰分析より作成された一次回帰式から活動量が得られる。

本論文ではダグラスバッグ法で得られた Met 値を Met_D 、三軸加速度センサー内蔵活動量計から得られた METs を Met_a と脈拍数より推定された Met 値を Met_{bpm} とする。

先行研究では実験で設定した実験条件は 3~4 ケースであったが、本論文では 1 人の被験者に設定した多くの行為をしてもらい、ダグラスバッグ法で得られた Met 値と活動量計で測定した活動量にどのような関係があるかを明確にするため実験条件を 11 ケース設定した。行為条件の Met 値の幅は CO₂ 呼出量関係式を作成した際に使用したデータが Met 値 3.0 以下であったため、文献に示されている Met 値 3.0 以下の行為を中心に設定し、今後体育館やジムなどにも CO₂ 呼出量関係式 (2-38) を応用させることを見据え、文献^{[3-1] [3-6]}に示されている Met 値 3.0 が超える行為もいくつか設定した。

3.2.1 二酸化炭素呼出量

ダグラスバッグ法から得られた CO₂ 呼出量測定値を真値として各 Met 値推定手法から得られる Met 値で最も精度が高く、容易に行える方法について検討を行った。また CO₂ 呼出量を推定する式で、最も良い Met 値推定手法についても検討を行った。先行研究と同様に文献に示されている Met 値を用いた検討も行った。CO₂ 呼出量に関する検討では、CO₂ 呼出量関係式、JIS、ASTM-12、ASTM-18^[3-7] および Persily^[3-8] の推定式や値を用いた。

3.3 被験者実験の測定結果

測定した Met 値および CO₂ 呼出量を推定値と比較した。推定精度を評価するにあたり不確かさのほかに測定値を真値とした根平均二乗誤差 (Root Mean Square Error) によるばらつきの評価を行い、精度確認を行った。また RMSE は平方根平均二乗誤差とも呼ばれる。

本論文では、誤差として評価するために RMSE より算出した標準誤差を SE_R とし、不確かさから算出した標準誤差 SE と比較を行った。標準誤差 SE より算出した相対誤差 RE とし、標準誤差 SE_R から算出した相対誤差 RE_R と示す。

$$RMSE = \sqrt{\frac{(x_i - X)^2}{n}} \quad (3-8)$$

$$SE_R = \frac{RMSE}{\sqrt{n}} \quad (3-9)$$

$$RE_R = \frac{SE_R}{\bar{x}} \quad (3-10)$$

ここでは、

x_i : i 番目の x X : 真値(本研究では測定値) n : データ数
 SE_R : RMSE より求めた標準誤差 SE : 不確かさより求めた標準誤差
 \bar{x} : x の平均値 (ここでは x は測定値)

3.3.1 エネルギー代謝率

心拍数から CO₂ 呼出量を算出する推定式 ((2-31), (2-32)) は既往研究^[3-9]で作成されており、個人差による差が課題となっていた。本研究ではダグラスバッグ法から得られた Met 値と脈拍数で回帰分析を行い、個人ごとに推定式を作成して推定を行った。Met 値を脈拍数から推定するために被験者ごとに Met_D を真値として脈拍数と回帰分析を行い、個人の式を作成し、式より得られた値を Met_{bpm} と示す。

測定結果より抜粋した被験者ごとの個人式の一例を図 3-1 および図 3-2 に示す。個人式作成では、被験者 B、C のように相関係数が高い個人式を作成できる被験者もいるが、中には被験者 A のように相関係数が低い被験者もいる結果となった。脈拍数は測定時間全てから求めた値 (以降、脈拍数 (全分)) と最後の 1 分 (以降、脈拍数 (1 分)) で比較を行ったが、ほとんど差異が見られなかった。

第3章 エネルギー代謝率および二酸化炭素呼出量の推定精度

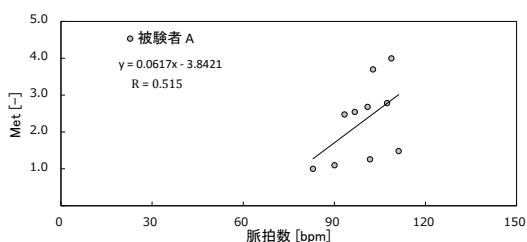


図 3-1：相関係数が低い被検者の回帰式

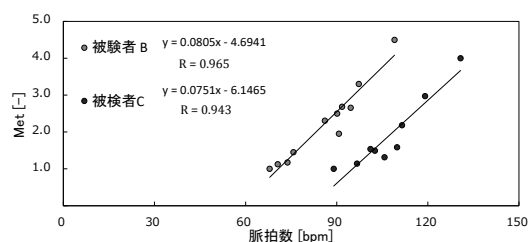


図 3-2：相関係数が高い被検者の回帰式

被験者実験で測定した各 Met 値推定手法の測定値を各行為で範囲に示したものを図 3-3～図 3-8 に示す。文献値である「ASHRAE」および「METs 表」の値を図内に示す。ASHRAE は掃除項目が範囲で示されているため検討を行っていない。

箱ひげ図の説明をここに記す。箱ひげ図のひげ上部は最大値、ひげの下部は最低値、箱上部は 75% の値、箱下部は 25%、箱中央は中央値を示す。図内の破線は、CO₂ 呼出量関係式作成時に用いた Met 値が 3.0 以下であったため 3.0 Met に破線を示している。データ数については表 3-3 に示す。

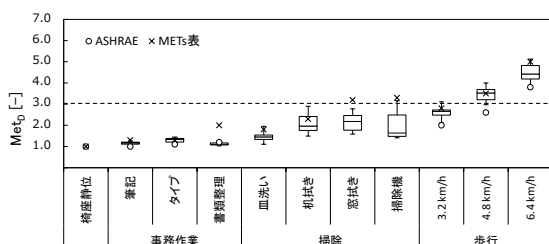


図 3-3：Met_D の範囲

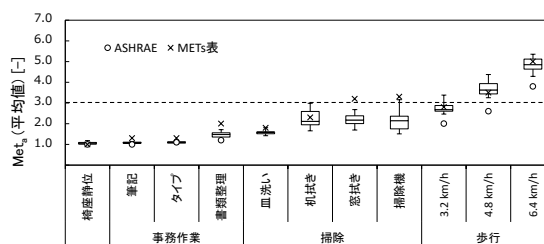


図 3-6：Met_a (平均値) の範囲

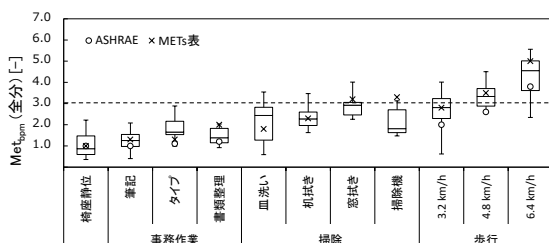


図 3-4：脈拍数 (全分) の範囲

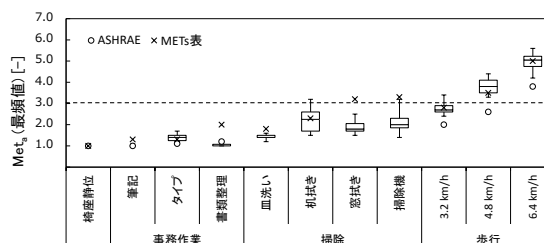


図 3-7：Met_a (最頻値) の範囲

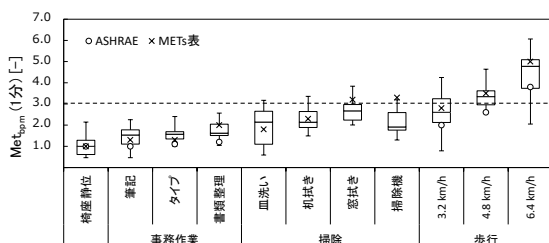


図 3-5：脈拍数 (1分) の範囲

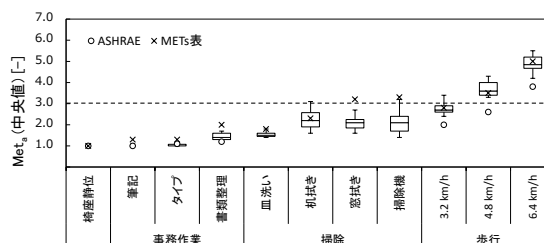


図 3-8：Met_a (中央値) の範囲

Met_DとMet_aの測定範囲は比較的近い結果となったが、脈拍数の測定範囲は大きい結果となった。これはMet値の最低値が安静時の1.0であると考えると1.0を下回る結果もあり、個人差による影響を除いても脈拍数はMet値で表しにくい結果となった。

文献値についてはASHRAEに示されている値がMet_Dの測定範囲内にあるという結果となり、METs表に示されている値については活動量の小さい行為はMet_Dの測定範囲内にあるという結果となった。

各Met値推定手法について行為によるばらつきを把握するために行うごとに不確かさ(標準偏差)の算出を行った。また不確かさから標準誤差SEを算出した。算出した不確かさを図3-9、図3-10に、標準誤差SEを図3-11、図3-12に示す。

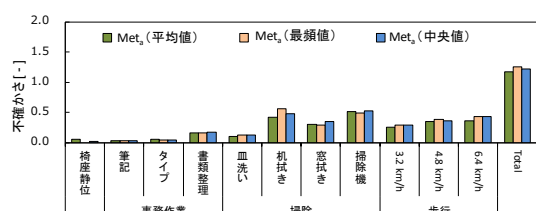


図 3-9：各 METs の不確かさ (標準偏差)

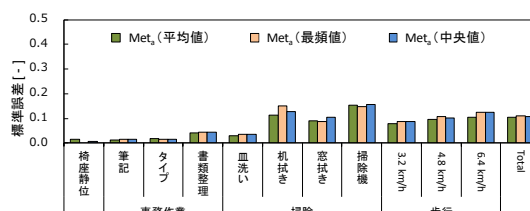


図 3-11：各 METs の標準誤差 SE

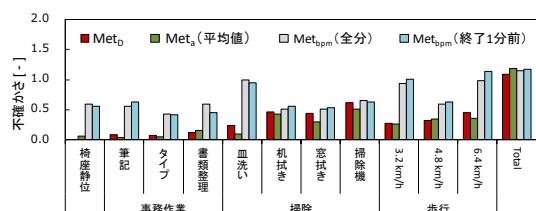


図 3-10：各 Met 値の不確かさ (標準偏差)

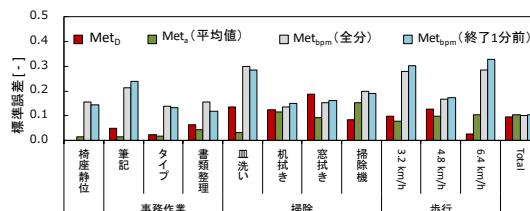


図 3-12：各 Met 値の標準誤差 SE

Met_a (平均値, 最頻値, 中央値)の不確かさを求めた結果、ほとんど差はみられなかった。Met_{bpm}のばらつきが最も大きい結果となり、Met値が大きくなるにつれて不確かさも大きくなり、同じ行為でもMet_{bpm}には個人差があることを確認した。

不確かさであるため全データから算出した値は大きい値となった。標準誤差SEについて、行為ごとに精度の高いMet値推定手法は違う結果となり、全データよりMet_Dが最も小さい結果となった。Met_{bpm}の標準誤差が最も大きい値となった。

次にRMSEの算出を行った。Met_Dを真値としてMet_aを平均値, 最頻値, 中央値として扱い求めたRMSEを図3-13, そのRMSEから求めた標準誤差SE_Rを図3-15, Met_Dを真値として各Met値から求めたRMSEを図3-14, そのRMSEから求めた標準誤差SE_Rを図3-16に示す。

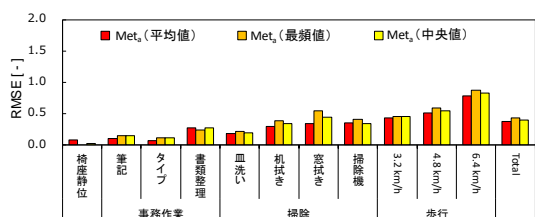


図 3-13：各 METs の RMSE (Met_D を真値とした)

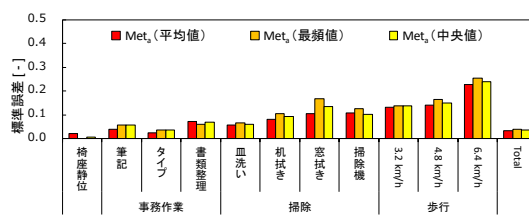


図 3-15：各 METs の標準誤差 (Met_D を真値とした)

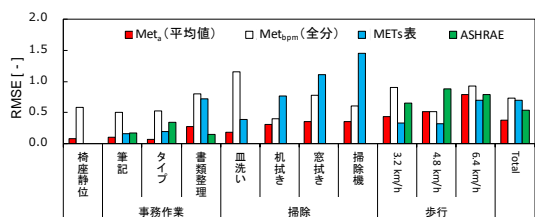


図 3-14：各 Met 値の RMSE (Met_D を真値とした)

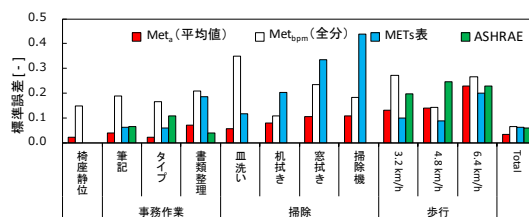


図 3-16：各 Met 値の標準誤差 (Met_D を真値とした)

文献値 (ASHRAE) は事務作業などの活動量が小さい行為で測定値に近い結果となったが、Met 値が大きい歩行では Met 値の範囲より小さい結果となった。文献値 (METs 表) はほとんどの行為で、測定された Met 値の範囲より大きい結果となった。この理由として測定器の着け方や装着者の動きが影響していると考えられる。

不確かさおよび標準誤差 SE を表 3-4～表 3-6 に、Met_D を真値として求めた各 Met 値の RMSE および標準誤差 SE_R を表 3-7～表 3-9 に示す。相対誤差は Met_D の平均値を真値として算出した。

各 Met 値の不確かさより Met 値は個人差があり、推定方法によってさまざまな誤差が生じることを踏まえて測定を行うことが重要であることが確認できた。Met 値推定手法について相対誤差は、ほとんどの行為で約 7%以下となる結果となった。しかし、脈拍数と回帰式より算出される Met_{bpm} については相対誤差が約 10 %という結果となった。

測定時間の Met_a の平均値、最頻値、中央値と Met_D で回帰分析を行ったところ回帰係数と相関係数にほとんど差はなかったが、Met_a (平均値) の相関係数が 0.948 と最も高く、回帰係数が 1.0 に近い結果となった。Met_a の最も精度が高い算出方法は、Met_a を平均値として扱った場合が最頻値や中央値よりも精度が高い結果となった。ダグラスバッグ法の測定値と比較するために平均値を用いた。測定値をそのものを用いる方法については室内の濃度推定に関する検討で行っており、第 4 章に示す。

表 3-4 : 各 Met 値の標準不確かさ [-]

	Met _D	Met _a			Met _{bpm}	
		平均値	最頻値	中央値	全分	1分
椅座静位	0.00	0.06	0.00	0.03	0.60	0.56
事務作業	筆記	0.09	0.04	0.04	0.56	0.63
	タイプ	0.08	0.06	0.05	0.44	0.42
	書類整理	0.13	0.16	0.17	0.60	0.45
掃除	皿洗い	0.24	0.10	0.12	0.12	0.99
	机拭き	0.46	0.43	0.56	0.48	0.51
	窓拭き	0.45	0.30	0.29	0.35	0.51
	掃除機	0.62	0.51	0.49	0.52	0.66
歩行	3.2 km/h	0.28	0.26	0.29	0.29	0.93
	4.8 km/h	0.32	0.35	0.38	0.37	0.60
	6.4 km/h	0.45	0.36	0.43	0.43	0.99
Total	1.09	1.18	1.25	1.22	1.15	1.17

表 3-5 : 不確かさから算出した各 Met 値の標準誤差 [-]

	Met _D	Met _a			Met _{bpm}	
		平均値	最頻値	中央値	全分	1分
椅座静位	0.000	0.015	0.000	0.007	0.155	0.144
事務作業	筆記	0.048	0.014	0.014	0.014	0.213
	タイプ	0.024	0.018	0.015	0.015	0.138
	書類整理	0.062	0.042	0.043	0.043	0.155
掃除	皿洗い	0.135	0.031	0.036	0.036	0.299
	机拭き	0.124	0.114	0.151	0.129	0.136
	窓拭き	0.187	0.091	0.088	0.105	0.153
	掃除機	0.085	0.154	0.147	0.158	0.198
歩行	3.2 km/h	0.097	0.078	0.086	0.086	0.281
	4.8 km/h	0.126	0.097	0.106	0.102	0.166
	6.4 km/h	0.025	0.105	0.125	0.123	0.285
Total	0.096	0.103	0.110	0.107	0.101	0.103

表 3-6 : 不確かさから算出した各 Met 値の相対誤差 [%]

	Met _D	Met _a			Met _{bpm}	
		平均値	最頻値	中央値	全分	1分
椅座静位	0.0	1.4	0.0	0.7	14.9	13.3
事務作業	筆記	4.2	1.3	1.4	1.4	17.0
	タイプ	2.1	1.6	1.5	1.5	9.4
	書類整理	4.8	2.9	3.1	3.0	8.3
掃除	皿洗い	9.1	2.0	2.5	2.4	14.3
	机拭き	5.9	5.1	6.9	5.8	5.9
	窓拭き	8.6	4.2	4.7	5.0	5.4
	掃除機	4.3	7.2	7.0	7.5	9.2
歩行	3.2 km/h	3.7	2.8	3.1	3.1	10.3
	4.8 km/h	3.7	2.6	2.8	2.7	4.9
	6.4 km/h	0.6	2.2	2.5	2.5	6.5
Total	4.6	4.6	5.1	4.9	4.3	4.4

表 3-7 : Met_D を真値とした場合の各 Met 値の RMSE [-]

	Met _a			Met _{bpm}		文献値		
	平均値	最頻値	中央値	全分	1分	ASHRAE	METs 表	
椅座静位	0.08	0.00	0.03	0.58	0.55	0.00	0.00	
事務作業	筆記	0.10	0.15	0.15	0.50	0.62	0.17	0.17
	タイプ	0.07	0.12	0.12	0.52	0.64	0.34	0.19
	書類整理	0.28	0.24	0.27	0.81	0.62	0.15	0.72
掃除	皿洗い	0.19	0.22	0.20	1.16	1.02	0.00	0.39
	机拭き	0.30	0.39	0.35	0.40	0.53	0.00	0.76
	窓拭き	0.35	0.55	0.45	0.77	0.69	0.00	1.11
	掃除機	0.36	0.41	0.34	0.61	0.50	0.00	1.45
歩行	3.2 km/h	0.44	0.46	0.46	0.90	0.93	0.65	0.34
	4.8 km/h	0.51	0.59	0.54	0.51	0.53	0.89	0.32
	6.4 km/h	0.79	0.88	0.83	0.92	1.07	0.79	0.69
Total	0.38	0.44	0.41	0.73	0.72	0.54	0.70	

表 3-8 : 各 Met 値の RMSE から算出した標準誤差 [-]

	Met _a			Met _{bpm}		文献値		
	平均値	最頻値	中央値	全分	1分	ASHRAE	METs 表	
椅座静位	0.022	0.000	0.007	0.150	0.141	0.000	0.000	
事務作業	筆記	0.027	0.040	0.040	0.130	0.161	0.045	0.043
	タイプ	0.019	0.030	0.030	0.135	0.165	0.088	0.050
	書類整理	0.072	0.061	0.070	0.208	0.161	0.039	0.186
掃除	皿洗い	0.048	0.058	0.051	0.299	0.262	-	0.101
	机拭き	0.078	0.100	0.089	0.104	0.136	-	0.197
	窓拭き	0.090	0.143	0.115	0.200	0.179	-	0.287
	掃除機	0.092	0.107	0.088	0.157	0.129	-	0.375
歩行	3.2 km/h	0.112	0.118	0.118	0.232	0.240	0.169	0.087
	4.8 km/h	0.132	0.153	0.141	0.132	0.136	0.229	0.082
	6.4 km/h	0.204	0.226	0.214	0.238	0.277	0.204	0.179
Total	0.098	0.113	0.105	0.189	0.186	0.139	0.180	

表 3-9 : 各 Met 値の RMSE から算出した相対誤差 [%]

	Met _a			Met _{bpm}		文献値		
	平均値	最頻値	中央値	全分	1分	ASHRAE	METs 表	
椅座静位	2.0	0.0	0.7	14.5	13.0	0.0	0.0	
事務作業	筆記	3.7	5.8	5.8	14.5	13.0	6.6	4.8
	タイプ	2.1	3.6	3.6	11.4	12.5	9.7	4.7
	書類整理	4.9	4.4	4.9	11.1	9.2	3.3	9.3
掃除	皿洗い	3.6	4.7	3.9	16.7	16.0	-	6.6
	机拭き	3.6	4.8	4.1	4.7	6.2	-	8.9
	窓拭き	4.9	8.8	6.5	8.2	7.7	-	10.5
	掃除機	5.0	5.9	4.9	8.5	6.9	-	13.3
歩行	3.2 km/h	4.8	4.9	4.9	10.0	10.3	9.9	3.6
	4.8 km/h	3.8	4.3	4.1	4.2	4.3	9.5	2.5
	6.4 km/h	4.7	5.1	4.9	6.1	6.9	6.0	4.0
Total	1.5	1.8	1.6	2.7	2.7	3.2	2.4	

3.3.2 二酸化炭素呼出量

被験者実験（平成28年度）のデータを用いて各CO₂呼出量推定手法よりCO₂呼出量を算出して推定精度に関する検討を行った。

Persilyの推定式で用いる基礎代謝量^[3-8]について、前章で示したHariss・Benedict式^[3-10]、Schofield式^[3-11]、FAO/WHO/UNU式^[3-12]の3つの式から得られる計算値にほとんど差がないことを確認しているため、本章ではPersilyが示しているSchofieldの式を用いて基礎代謝量の算定を行った。

被験者実験（平成28年度）の条件は表3-3に示している。CO₂呼出量測定値を真値とし、各推定式より得られるCO₂呼出量推定値から算出したRMSEを図3-17～図3-21に示す。

各CO₂呼出量推定手法のRMSE

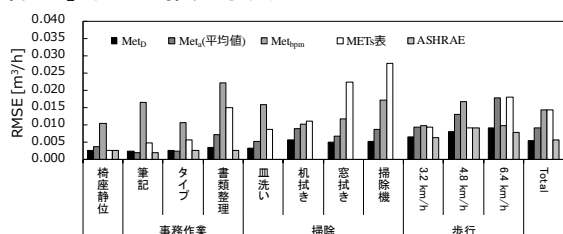


図 3-17 : CO₂呼出量関係式の RMSE

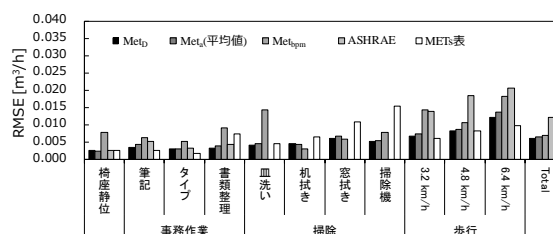


図 3-20 : JIS の RMSE

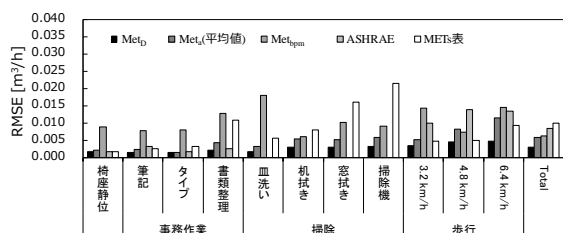


図 3-18 : ASTM-12 の RMSE

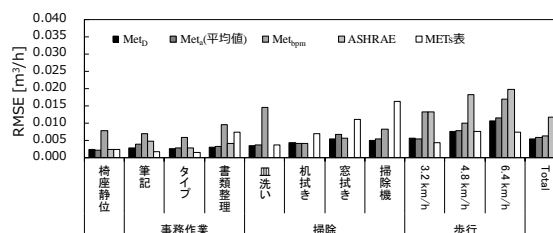


図 3-21 : Persily (Schofield) の RMSE

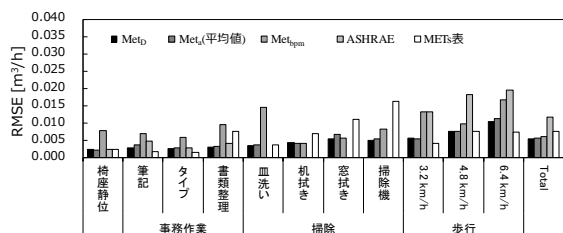


図 3-19 : ASTM-18 の RMSE

全ての推定手法でMet_Dを用いたCO₂呼出量推定値から求めたRMSEが最も小さい結果となった。

CO₂呼出量関係式およびASTM-12の式から算出したCO₂呼出量推定値は、Met値をMet_A（平均値）または文献値（ASHRAE）とした場合にほとんどの行為でRMSEが小さい結果となり、Met_{Bpm}ではほとんどの行為でRMSEが大きい値となった。

ASTM-18、JISおよびPersilyの式によるCO₂呼出量推定では、Met_A（平均値）の値が小さい結果となり、行為によってMet_{Bpm}も値が小さい結果となった。

RMSE から算出した標準誤差 SE_R を図 3-22～図 3-26 に示す。

各 CO_2 呼出量推定手法の RMSE から算出した標準誤差 SE_R

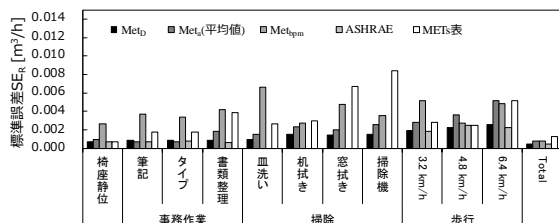


図 3-22 : CO_2 呼出量関係式の標準誤差

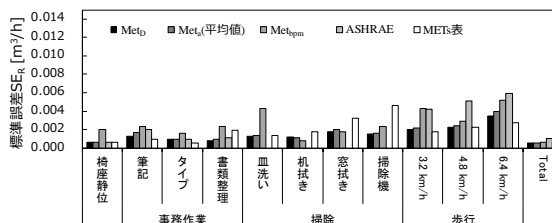


図 3-25 : JIS の標準誤差

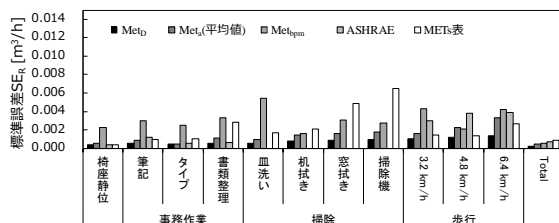


図 3-23 : ASTM-12 の標準誤差

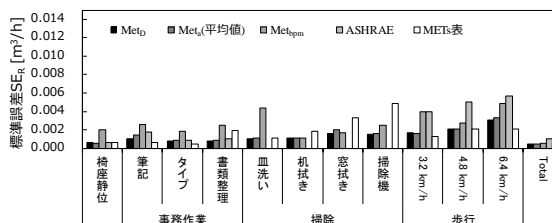


図 3-26 : Persily (Sohofeld) の標準誤差

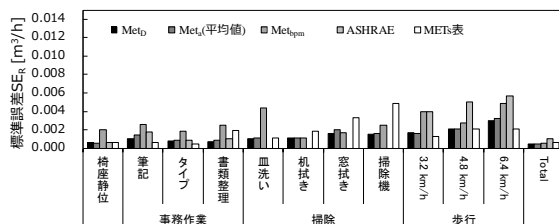


図 3-24 : ASTM-18 の標準誤差

SE_R は RMSE と同様の傾向であることを確認した。全ての CO_2 呼出量推定手法で Met_D から求めた値が最も標準誤差が小さい結果となった。このことからダグラスバッグ法より得られた Met 値は概ね正確であり、この値が測定および式による誤差であると考えられる。

行為ごとの RMSE および SE_R は Met 値が 1.0 に近い行為 (椅座静位や事務作業) が小さい結果となり、歩行は全ての CO_2 呼出量推定手法で事務作業などより大きい結果となった。

行為ごとの不確かさを図 3-27～図 3-31 に示す。

各 CO_2 呼出量推定手法の不確かさ

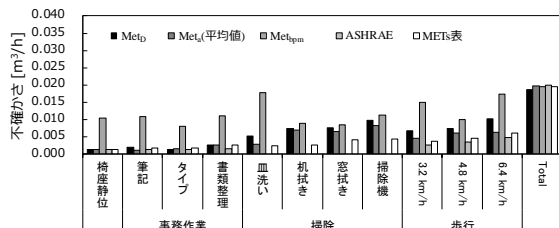


図 3-27 : CO_2 呼出量関係式の不確かさ

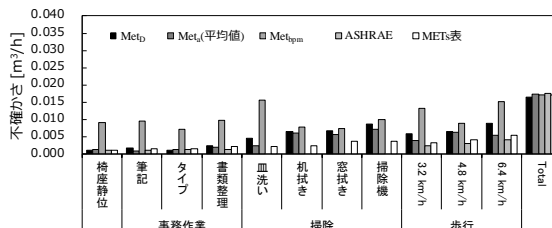


図 3-28 : ASTM-12 の不確かさ

第3章 エネルギー代謝率および二酸化炭素呼出量の推定精度

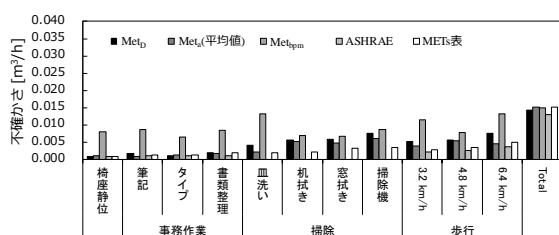


図 3-29 : ASTM-18 の不確かさ

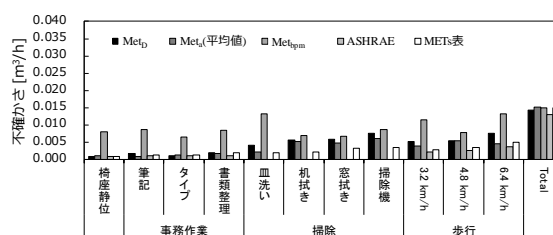


図 3-31 : Persily (Sohfeld) の不確かさ

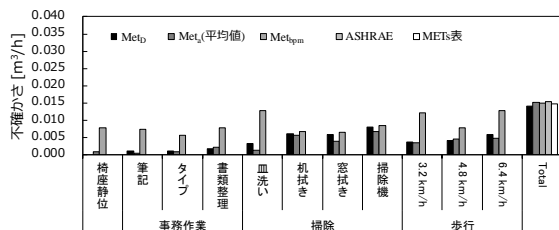


図 3-30 : JIS の不確かさ

各行為の不確かさは CO₂ 呼出量推定手法については差異が見られなかったが、Met 値推定手法によって異なる結果となった。全てのデータから求めた不確かさは平均力の差が大きいため不確かさも大きい結果となった。

JIS の変数は Met 値以外が定数であるため文献値 (ASHRAE および METs 表) の値を用いた場合の行為による不確かさを算出することはできなかった。このことから JIS の値では代謝量などの個人差が考慮できていないことが確認できた。前述した通り JIS に示されている値は 1974 年から現在まで新たな改定されていないため、日本人のスタイルの変化などから示されている値より現在の日本人の CO₂ 呼出量が大きくなっていると考えられる。従って、JIS A1406 については改定を検討する必要があると言える。

不確かさによるばらつきを評価した場合、Met 値の不確かさとほとんど同じ傾向が確認でき、CO₂ 呼出量推定手法はほとんどの手法で Met 値による影響が大きいことを確認した。CO₂ 呼出量推定手法によって文献値である ASHRAE または METs 表のどちらを用いるかによって推定精度が異なる結果となった。

各推定式の RMSE, RMSE から求めた標準誤差および不確かさを表 3-10～表 3-24 に示す。

各推定式より得られた不確かさより Met_a (平均値) を用いた場合のばらつきが小さいことを確認した。しかし、Met_{ppm} は不確かさの値が大きい結果となった。CO₂ 呼出量推定手法に共通する点として活動量計を用いることで CO₂ 呼出量推定の精度が向上することを確認した。文献値では、適切な行為を選択することが出来れば、ASHRAE や METs 表の値を使用して推定できることを確認した。

表 3-10 : 標準不確かさ [-] (CO₂呼出量関係式)

	Met _D	Met _a			Met _{bpm} 全分	文献値		
		平均値	最頻値	中央値		ASHRAE	METs 表	
椅座静位	0.0012	0.0013	0.0012	0.0013	0.0104	0.0012	0.0012	
事務作業	筆記	0.0019	0.0010	0.0011	0.0011	0.0108	0.0012	0.0016
	タイプ	0.0013	0.0014	0.0015	0.0015	0.0081	0.0013	0.0016
	書類整理	0.0026	0.0026	0.0024	0.0025	0.0111	0.0015	0.0025
掃除	皿洗い	0.0052	0.0028	0.0023	0.0027	0.0177	-	0.0023
	机拭き	0.0073	0.0069	0.0090	0.0075	0.0088	-	0.0026
	窓拭き	0.0075	0.0064	0.0057	0.0070	0.0084	-	0.0041
	掃除機	0.0098	0.0081	0.0075	0.0080	0.0112	-	0.0042
歩行 [km/h]	3.2	0.0067	0.0044	0.0047	0.0047	0.0150	0.0025	0.0036
	4.8	0.0074	0.0059	0.0073	0.0070	0.0100	0.0034	0.0046
	6.4	0.0101	0.0062	0.0070	0.0070	0.0173	0.0046	0.0061
Total	0.0186	0.0198	0.0210	0.0204	0.0194	0.0199	0.0195	

表 3-11 : RMSE [-] (CO₂呼出量関係式)

	Met _D	Met _a			Met _{bpm} 全分	文献値		
		平均値	最頻値	中央値		ASHRAE	METs 表	
椅座静位	0.0026	0.0037	0.0026	0.0027	0.0103	0.0026	0.0026	
事務作業	筆記	0.0024	0.0019	0.0015	0.0015	0.0097	0.0018	0.0047
	タイプ	0.0026	0.0024	0.0015	0.0015	0.0106	0.0026	0.0056
	書類整理	0.0035	0.0071	0.0057	0.0064	0.0164	0.0026	0.0148
掃除	皿洗い	0.0033	0.0051	0.0039	0.0049	0.0220	-	0.0087
	机拭き	0.0056	0.0088	0.0093	0.0089	0.0102	-	0.0111
	窓拭き	0.0048	0.0067	0.0075	0.0076	0.0158	-	0.0222
	掃除機	0.0051	0.0086	0.0081	0.0079	0.0117	-	0.0278
歩行 [km/h]	3.2	0.0065	0.0092	0.0096	0.0096	0.0171	0.0062	0.0093
	4.8	0.0080	0.0131	0.0150	0.0140	0.0098	0.0090	0.0090
	6.4	0.0090	0.0178	0.0196	0.0188	0.0168	0.0078	0.0179
Total	0.0054	0.0091	0.0096	0.0093	0.0093	0.0055	0.0142	

表 3-12 : 標準誤差 [m³/h] (CO₂呼出量関係式)

	Met _D	Met _a			Met _{bpm} 全分	文献値		
		平均値	最頻値	中央値		ASHRAE	METs 表	
椅座静位	0.0007	0.0010	0.0007	0.0007	0.0027	0.0007	0.0007	
事務作業	筆記	0.0009	0.0007	0.0006	0.0006	0.0037	0.0007	0.0018
	タイプ	0.0008	0.0007	0.0005	0.0005	0.0034	0.0008	0.0018
	書類整理	0.0009	0.0018	0.0015	0.0017	0.0042	0.0007	0.0038
掃除	皿洗い	0.0010	0.0015	0.0012	0.0015	0.0066	-	0.0026
	机拭き	0.0015	0.0024	0.0025	0.0024	0.0027	-	0.0030
	窓拭き	0.0015	0.0020	0.0023	0.0023	0.0048	-	0.0067
	掃除機	0.0015	0.0026	0.0025	0.0024	0.0035	-	0.0084
歩行 [km/h]	3.2	0.0020	0.0028	0.0029	0.0029	0.0052	0.0019	0.0028
	4.8	0.0022	0.0036	0.0042	0.0039	0.0027	0.0025	0.0025
	6.4	0.0026	0.0051	0.0057	0.0054	0.0048	0.0023	0.0052
Total	0.0005	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0005	0.0012	

表 3-13 : 標準不確かさ [-] (ASTM-12)

	Met _D	Met _a			Met _{bpm} 全分	文献値		
		平均値	最頻値	中央値		ASHRAE	METs 表	
椅座静位	0.0011	0.0013	0.0011	0.0012	0.0091	0.0011	0.0011	
事務作業	筆記	0.0017	0.0008	0.0009	0.0009	0.0095	0.0011	0.0014
	タイプ	0.0011	0.0013	0.0013	0.0013	0.0071	0.0012	0.0014
	書類整理	0.0023	0.0020	0.0021	0.0022	0.0097	0.0013	0.0022
掃除	皿洗い	0.0045	0.0024	0.0020	0.0024	0.0155	-	0.0020
	机拭き	0.0064	0.0061	0.0079	0.0066	0.0077	-	0.0023
	窓拭き	0.0066	0.0056	0.0050	0.0061	0.0074	-	0.0036
	掃除機	0.0086	0.0071	0.0066	0.0071	0.0099	-	0.0037
歩行 [km/h]	3.2	0.0059	0.0039	0.0042	0.0042	0.0132	0.0022	0.0031
	4.8	0.0065	0.0061	0.0065	0.0061	0.0088	0.0030	0.0040
	6.4	0.0088	0.0054	0.0061	0.0061	0.0152	0.0041	0.0054
Total	0.0163	0.0174	0.0184	0.0179	0.0171	0.0176	0.0172	

表 3-14 : RMSE [-] (ASTM-12)

	Met _D	Met _a			Met _{bpm} 全分	文献値		
		平均値	最頻値	中央値		ASHRAE	METs 表	
椅座静位	0.0016	0.0021	0.0016	0.0016	0.0088	0.0016	0.0016	
事務作業	筆記	0.0015	0.0023	0.0029	0.0029	0.0078	0.0032	0.0024
	タイプ	0.0015	0.0015	0.0020	0.0020	0.0079	0.0018	0.0032
	書類整理	0.0020	0.0042	0.0038	0.0042	0.0127	0.0026	0.0108
掃除	皿洗い	0.0017	0.0032	0.0038	0.0035	0.0180	-	0.0056
	机拭き	0.0029	0.0053	0.0064	0.0055	0.0060	-	0.0080
	窓拭き	0.0030	0.0052	0.0086	0.0071	0.0102	-	0.0161
	掃除機	0.0033	0.0058	0.0058	0.0054	0.0090	-	0.0215
歩行 [km/h]	3.2	0.0034	0.0052	0.0055	0.0055	0.0142	0.0098	0.0047
	4.8	0.0044	0.0081	0.0092	0.0086	0.0074	0.0138	0.0050
	6.4	0.0047	0.0115	0.0126	0.0123	0.0145	0.0134	0.0094
Total	0.0030	0.0058	0.0066	0.0062	0.0062	0.0084	0.0099	

表 3-15 : 標準誤差 [m³/h] (ASTM-12)

	Met _D	Met _a			Met _{bpm} 全分	文献値		
		平均値	最頻値	中央値		ASHRAE	METs 表	
椅座静位	0.0004	0.0006	0.0004	0.0004	0.0023	0.0004	0.0004	
事務作業	筆記	0.0006	0.0009	0.0011	0.0011	0.0030	0.0012	0.0009
	タイプ	0.0005	0.0005	0.0006	0.0006	0.0025	0.0006	0.0010
	書類整理	0.0005	0.0011	0.0010	0.0011	0.0033	0.0007	0.0028
掃除	皿洗い	0.0005	0.0010	0.0011	0.0011	0.0054	-	0.0017
	机拭き	0.0008	0.0014	0.0017	0.0015	0.0016	-	0.0021
	窓拭き	0.0009	0.0016	0.0026	0.0021	0.0031	-	0.0049
	掃除機	0.0010	0.0017	0.0017	0.0016	0.0027	-	0.0065
歩行 [km/h]	3.2	0.0010	0.0016	0.0017	0.0017	0.0043	0.0030	0.0014
	4.8	0.0012	0.0023	0.0026	0.0024	0.0021	0.0038	0.0014
	6.4	0.0014	0.0033	0.0036	0.0036	0.0042	0.0039	0.0027
Total	0.0003	0.0005	0.0006	0.0005	0.0005	0.0007	0.0009	

表 3-16 : 標準不確かさ [-] (ASTM-18)

	Met _D	Met _a			Met _{bpm} 全分	文献値		
		平均値	最頻値	中央値		ASHRAE	METs 表	
椅座静位	0.0009	0.0010	0.0009	0.0009	0.0080	0.0009	0.0009	
事務作業	筆記	0.0017	0.0008	0.0010	0.0010	0.0086	0.0010	0.0013
	タイプ	0.0011	0.0012	0.0013	0.0013	0.0064	0.0011	0.0013
	書類整理	0.0020	0.0017	0.0020	0.0020	0.0084	0.0011	0.0019
掃除	皿洗い	0.0041	0.0022	0.0019	0.0021	0.0132	-	0.0018
	机拭き	0.0056	0.0051	0.0067	0.0056	0.0069	-	0.0021
	窓拭き	0.0057	0.0048	0.0044	0.0052	0.0066	-	0.0032
	掃除機	0.0075	0.0061	0.0057	0.0060	0.0087	-	0.0033
歩行 [km/h]	3.2	0.0051	0.0038	0.0041	0.0041	0.0114	0.0020	0.0028
	4.8	0.0055	0.0054	0.0056	0.0053	0.0077	0.0026	0.0035
	6.4	0.0076	0.0045	0.0051	0.0050	0.0131	0.0037	0.0049
Total	0.0143	0.0152	0.0162	0.0157	0.0149	0.0130	0.0151	

表 3-17 : RMSE [-] (ASTM-18)

	Met _D	Met _a			Met _{bpm} 全分	文献値		
		平均値	最頻値	中央値		ASHRAE	METs 表	
椅座静位	0.0023	0.0021	0.0023	0.0023	0.0078	0.0023	0.0023	
事務作業	筆記	0.0027	0.0037	0.0045	0.0045	0.0069	0.0047	0.0016
	タイプ	0.0025	0.0027	0.0035	0.0035	0.0058	0.0028	0.0015
	書類整理	0.0029	0.0032	0.0035	0.0034	0.0096	0.0040	0.0075
掃除	皿洗い	0.0035	0.0036	0.0052	0.0042	0.0145	-	0.0036
	机拭き	0.0042	0.0041	0.0058	0.0045	0.0041	-	0.0069
	窓拭き	0.0053	0.0067	0.0107	0.0086	0.0057	-	0.0111
	掃除機	0.0050	0.0054	0.0060	0.0055	0.0082	-	0.0162
歩行 [km/h]	3.2	0.0055	0.0054	0.0055	0.0055	0.0131	0.0132	0.0042
	4.8	0.0076	0.0076	0.0077	0.0077	0.0098	0.0181	0.0075
	6.4	0.0104	0.0113	0.0112	0.0116	0.0168	0.0196	0.0073
Total	0.0053	0.0057	0.0065	0.0061	0.0061	0.0117	0.0076	

表 3-18 : 標準誤差 [m³/h] (ASTM-18)

	Met _D	Met _a			Met _{bpm} 全分	文献値		
		平均値	最頻値	中央値		ASHRAE	METs 表	
椅座静位	0.0006	0.0005	0.0006	0.0006	0.0020	0.0006	0.0006	
事務作業	筆記	0.0010	0.0014	0.0017	0.0017	0.0026	0.0018	0.0006
	タイプ	0.0008	0.0009	0.0011	0.0011	0.0018	0.0009	0.0005
	書類整理	0.0007	0.0008	0.0009	0.0009	0.0025	0.0010	0.0019
掃除	皿洗い	0.0010	0.0011	0.0016	0.0013	0.0044	-	0.0011
	机拭き	0.0011	0.0011	0.0015	0.0012	0.0011	-	0.0018
	窓拭き	0.0016	0.0020	0.0032	0.0026	0.0017	-	0.0033
	掃除機	0.0015	0.0016	0.0018	0.0017	0.0025	-	0.0049
歩行 [km/h]	3.2	0.0017	0.0016	0.0017	0.0017	0.0040	0.0040	0.0013
	4.8	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0027	0.0050	0.0021
	6.4	0.0030	0.0033	0.0032	0.0033	0.0048	0.0056	0.0021
Total	0.0005	0.0005	0.0006	0.0005	0.0005	0.0010	0.0007	

表 3-19：標準不確かさ [-] (JIS)

	Met _D	Met _a			Met _{bpm} 全分	文献値	
		平均値	最頻値	中央値		ASHRAE	METs 表
椅座静位	0.0000	0.0008	0.0000	0.0003	0.0077	0.0000	0.0000
事務作業	筆記	0.0011	0.0005	0.0005	0.0073	0.0000	0.0000
	タイプ	0.0010	0.0007	0.0006	0.0056	0.0000	0.0000
	書類整理	0.0016	0.0021	0.0022	0.0077	0.0000	0.0000
掃除	皿洗い	0.0031	0.0013	0.0016	0.0128	-	0.0000
	机拭き	0.0060	0.0055	0.0073	0.0066	-	0.0000
	窓拭き	0.0058	0.0039	0.0038	0.0065	-	0.0000
	掃除機	0.0080	0.0066	0.0063	0.0085	-	0.0000
歩行 [km/h]	3.2	0.0036	0.0034	0.0037	0.0120	0.0000	0.0000
	4.8	0.0041	0.0045	0.0050	0.0077	0.0000	0.0000
	6.4	0.0059	0.0047	0.0056	0.0127	0.0000	0.0000
Total	0.0141	0.0152	0.0162	0.0157	0.0148	0.0153	0.0148

表 3-20：RMSE [-] (JIS)

	Met _D	Met _a			Met _{bpm} 全分	文献値	
		平均値	最頻値	中央値		ASHRAE	METs 表
椅座静位	0.0025	0.0023	0.0025	0.0025	0.0077	0.0025	0.0025
事務作業	筆記	0.0035	0.0044	0.0050	0.0062	0.0052	0.0025
	タイプ	0.0029	0.0030	0.0038	0.0052	0.0031	0.0016
	書類整理	0.0031	0.0038	0.0039	0.0091	0.0042	0.0073
掃除	皿洗い	0.0042	0.0045	0.0060	0.0142	-	0.0045
	机拭き	0.0045	0.0043	0.0061	0.0030	-	0.0065
	窓拭き	0.0060	0.0067	0.0109	0.0058	-	0.0107
	掃除機	0.0051	0.0054	0.0059	0.0077	-	0.0154
歩行 [km/h]	3.2	0.0067	0.0073	0.0074	0.0143	0.0139	0.0060
	4.8	0.0081	0.0086	0.0087	0.0106	0.0184	0.0082
	6.4	0.0120	0.0137	0.0136	0.0181	0.0206	0.0096
Total	0.0060	0.0066	0.0074	0.0070	0.0070	0.0122	0.0079

表 3-21：標準誤差 [m³/h] (JIS)

	Met _D	Met _a			Met _{bpm} 全分	文献値	
		平均値	最頻値	中央値		ASHRAE	METs 表
椅座静位	0.0007	0.0006	0.0007	0.0006	0.0020	0.0007	0.0007
事務作業	筆記	0.0013	0.0017	0.0019	0.0024	0.0020	0.0009
	タイプ	0.0009	0.0010	0.0012	0.0016	0.0010	0.0005
	書類整理	0.0008	0.0010	0.0010	0.0024	0.0011	0.0019
掃除	皿洗い	0.0013	0.0014	0.0018	0.0043	-	0.0014
	机拭き	0.0012	0.0011	0.0016	0.0008	-	0.0017
	窓拭き	0.0018	0.0020	0.0033	0.0018	-	0.0032
	掃除機	0.0015	0.0016	0.0018	0.0023	-	0.0047
歩行 [km/h]	3.2	0.0020	0.0022	0.0022	0.0043	0.0042	0.0018
	4.8	0.0023	0.0024	0.0024	0.0029	0.0051	0.0023
	6.4	0.0035	0.0039	0.0039	0.0052	0.0060	0.0028
Total	0.0005	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0011	0.0007

表 3-22 : 標準不確かさ [-] (Persily (Sohofeld))

	Met _D	Met _a			Met _{bpm} 全分	文献値		
		平均値	最頻値	中央値		ASHRAE	METs 表	
椅座静位	0.0009	0.0010	0.0009	0.0009	0.0080	0.0009	0.0009	
事務作業	筆記	0.0017	0.0008	0.0010	0.0010	0.0085	0.0010	0.0013
	タイプ	0.0011	0.0012	0.0013	0.0013	0.0064	0.0011	0.0013
	書類整理	0.0020	0.0017	0.0020	0.0020	0.0083	0.0011	0.0019
掃除	皿洗い	0.0041	0.0022	0.0019	0.0021	0.0132	-	0.0018
	机拭き	0.0056	0.0051	0.0067	0.0056	0.0069	-	0.0021
	窓拭き	0.0057	0.0048	0.0044	0.0051	0.0066	-	0.0032
	掃除機	0.0075	0.0060	0.0057	0.0060	0.0087	-	0.0033
歩行 [km/h]	3.2	0.0051	0.0038	0.0041	0.0041	0.0114	0.0020	0.0028
	4.8	0.0055	0.0053	0.0056	0.0053	0.0077	0.0026	0.0035
	6.4	0.0076	0.0045	0.0051	0.0050	0.0131	0.0037	0.0048
Total	0.0143	0.0152	0.0161	0.0157	0.0149	0.0130	0.0150	

表 3-23 : RMSE [-] (Persily (Sohofeld))

	Met _D	Met _a			Met _{bpm} 全分	文献値		
		平均値	最頻値	中央値		ASHRAE	METs 表	
椅座静位	0.0023	0.0021	0.0023	0.0023	0.0078	0.0023	0.0023	
事務作業	筆記	0.0028	0.0038	0.0045	0.0045	0.0069	0.0047	0.0016
	タイプ	0.0025	0.0027	0.0035	0.0035	0.0058	0.0028	0.0015
	書類整理	0.0029	0.0032	0.0035	0.0034	0.0096	0.0040	0.0074
掃除	皿洗い	0.0035	0.0037	0.0052	0.0042	0.0144	-	0.0036
	机拭き	0.0043	0.0041	0.0058	0.0046	0.0040	-	0.0069
	窓拭き	0.0054	0.0067	0.0108	0.0086	0.0056	-	0.0110
	掃除機	0.0050	0.0054	0.0060	0.0055	0.0082	-	0.0162
歩行 [km/h]	3.2	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0131	0.0133	0.0042
	4.8	0.0076	0.0077	0.0077	0.0078	0.0099	0.0181	0.0076
	6.4	0.0105	0.0114	0.0113	0.0116	0.0168	0.0197	0.0074
Total	0.0054	0.0057	0.0066	0.0061	0.0061	0.0117	0.0076	

表 3-24 : 標準誤差 [m³/h] (Persily (Sohofeld))

	Met _D	Met _a			Met _{bpm} 全分	文献値		
		平均値	最頻値	中央値		ASHRAE	METs 表	
椅座静位	0.0006	0.0005	0.0006	0.0006	0.0020	0.0006	0.0006	
事務作業	筆記	0.0010	0.0014	0.0017	0.0017	0.0026	0.0018	0.0006
	タイプ	0.0008	0.0009	0.0011	0.0011	0.0018	0.0009	0.0005
	書類整理	0.0008	0.0008	0.0009	0.0009	0.0025	0.0010	0.0019
掃除	皿洗い	0.0011	0.0011	0.0016	0.0013	0.0043	-	0.0011
	机拭き	0.0011	0.0011	0.0015	0.0012	0.0011	-	0.0018
	窓拭き	0.0016	0.0020	0.0032	0.0026	0.0017	-	0.0033
	掃除機	0.0015	0.0016	0.0018	0.0017	0.0025	-	0.0049
歩行 [km/h]	3.2	0.0017	0.0016	0.0017	0.0017	0.0040	0.0040	0.0013
	4.8	0.0021	0.0021	0.0021	0.0022	0.0027	0.0050	0.0021
	6.4	0.0030	0.0033	0.0033	0.0034	0.0049	0.0057	0.0021
Total	0.0005	0.0005	0.0006	0.0005	0.0005	0.0010	0.0007	

3.4 各推定式の精度に関する精査

CO₂呼出量関係式について

先行研究で、大西らが CO₂呼出量関係式の精査を行い、更新前の決定係数は 0.82 であつたのに対して更新後は決定係数が 0.8561 と上昇したことを確認している。これは、RQ 値の範囲に関する精査や代謝量が基礎代謝量を下回っていないかなどの結果から呼気データを選別し、式を再度作成している。図 3-32 に更新前と更新後の CO₂呼出量推定値の散布図を示す。

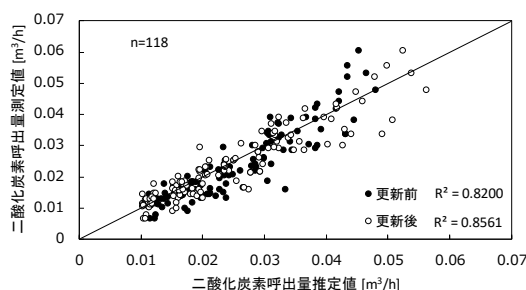


図 3-32 : CO₂呼出量関係式の精査

各推定式の精度の精査

関係式を作成したときに使用した CO₂呼出量測定値を用いて推定値と測定値で回帰分析を行い、原点を通る回帰式を算出した。さらに回帰式の標準誤差を算出した。その結果を表 3-25 に示す。検討に用いた測定値および各推定値を図 3-33 に示す。

表 3-25 : 各 CO₂呼出量測定値と推定値の比較

	回帰係数	平均値	標準偏差	
			1σ	1.96σ
CO ₂ 呼出量関係式	0.946	0.028	0.045	0.087
JIS	1.270	0.021	0.063	0.124
ASTM-12	1.072	0.025	0.052	0.101

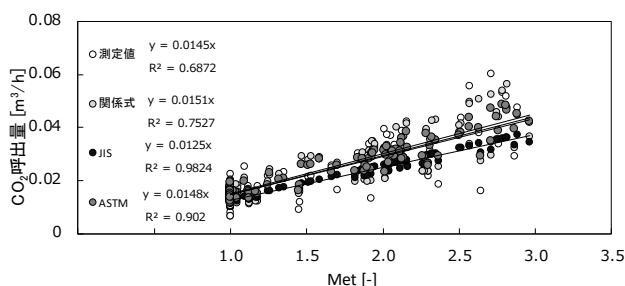


図 3-33 : 測定値と推定値の回帰式

最も回帰係数が 1.0 より離れていたのは、JIS の CO₂呼出量推定値であり、最も差が小さいのは ASTM-12 の式であることが確認した。回帰係数の標準偏差より関係式は信頼水準 95%では、1.0 が範囲内にあることが確認した。

平成 26 年度は CO₂呼出量関係式の精査を行うため、対象者が学生であることから講義の

ことを考慮してより多くの人数で比較を行うために項目数が平成28年度と違い、4～6項目までしか行っていない。各年度でCO₂呼出量測定値とCO₂呼出量推定値で比較を行った。表3-26に平成26年度の実験の条件を示す。

表 3-26：被験者実験の条件（平成26年度）

行為		作業時間	文献値	人数
椅座静位		5	1.0	23 (7)
事務作業	立位		-	3
	タイプ	1.1	15 (3)	
	歩き回る	4	1.7	20 (6)
	軽労働	3	-	4
歩行	3.2 [km/h]		2.0	19 (6)

()内は女性の人数

CO₂呼出量推定手法では、JIS、ASTM-12 および Persily の推定式を用いて検討を行った。ASTM-12 の式の変数である呼吸商 RQ は 0.83 として計算を行った。Persily^[3-7]の推定式について Schofield の式を用いて基礎代謝量の算定を行った。

平成28年度のデータを用いてCO₂呼出量測定値を目的変数、各推定値を説明変数として原点を通る回帰式を作成し、測定値と推定値の比較を行った。各推定値の回帰式の一例を図3-31～3-34に示す。各CO₂呼出量推定式より得られた推定値と測定値の回帰式の回帰係数および決定係数を表3-27および表3-28に示す。

平成26年度の被験者実験の結果より男性のみのデータで測定値を真値として推定値から求めたRMSEはほとんど差がない結果となり、女性のみデータはCO₂呼出量関係式を用いた場合が最も精度が高い結果となった。ASTM-12の推定値より算出した回帰係数が最も1.0に近い結果となり、CO₂呼出量関係式やPersilyの式は0.1程度の差がある結果となった。

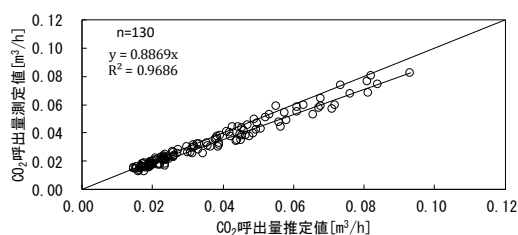


図 3-34：測定値と推定値（関係式）

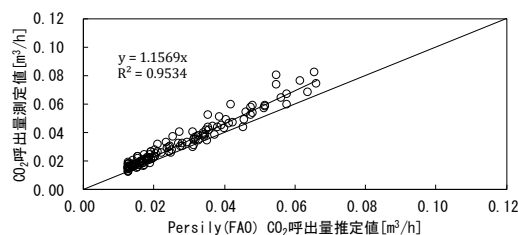


図 3-36：測定値と推定値（JIS）

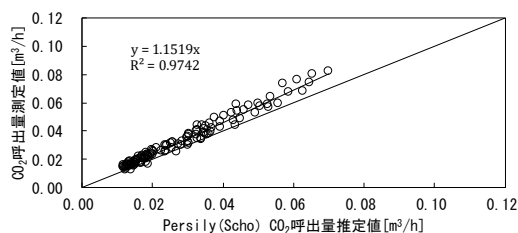


図 3-35：測定値と推定値（Persily）

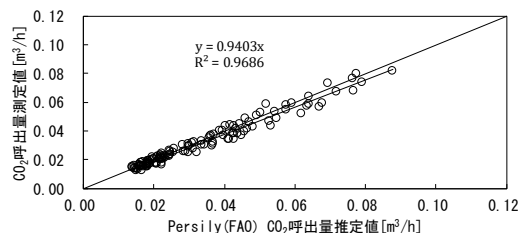


図 3-37：測定値と推定値（ASTM-12）

表 3-27：回帰式の回帰係数

		28年度			26年度			28・26年度 全て
		男性	女性	全て	男性	女性	全て	
全データ	関係式	0.887	1.152	0.892	0.887	1.039	0.905	0.896
	Persily	1.151	1.185	1.153	1.138	1.175	1.143	1.150
	JIS	1.156	1.065	1.153	1.210	0.979	1.160	1.155
	ASTM-12	0.908	0.859	0.906	0.948	0.828	0.925	0.912
	データ数	130	8	138	62	22	84	222
Met3.0 以下	関係式	0.880	1.176	0.889	0.897	1.064	0.921	0.901
	Persily	1.141	1.208	1.145	1.155	1.203	1.164	1.152
	JIS	1.148	1.087	1.144	1.223	1.018	1.172	1.155
	ASTM-12	0.933	0.911	0.931	0.946	0.832	0.920	0.926
	データ数	104	7	111	55	20	75	186

表 3-28：回帰式の決定係数

		28年度			26年度			28・26年 度全て
		男性	女性	全て	男性	女性	全て	
全データ	関係式	0.969	0.985	0.961	0.848	0.949	0.864	0.933
	Persily	0.974	0.985	0.975	0.811	0.941	0.838	0.934
	JIS	0.953	0.985	0.953	0.869	0.871	0.844	0.923
	ASTM-12	0.968	0.985	0.969	0.856	0.938	0.857	0.936
	データ数	130	8	138	62	22	84	222
Met3.0 以下	関係式	0.930	0.987	0.908	0.803	0.951	0.826	0.866
	Persily	0.941	0.987	0.942	0.753	0.943	0.799	0.872
	JIS	0.903	0.987	0.906	0.805	0.881	0.796	0.853
	ASTM-12	0.930	0.987	0.933	0.798	0.942	0.817	0.877
	データ数	104	7	111	55	20	75	186

各 CO₂ 呼出量推定式に MetD を代入して CO₂ 呼出量推定値の算出を行った。算出した推定値を用いて CO₂ 呼出量測定値を真値とした行為ごとの RMSE を求めた。RMSE は Met 値が 3.0 以下の条件と全ての条件で検討を行った。

Met3.0 以下の条件の RMSE および標準誤差を図 3-35～図 3-38 および表 3-26～表 3-29, Met 値全ての条件の RMSE および標準誤差を図 3-39～図 3-42 および表 3-30～表 3-33 に示す。

Met3.0 以下の場合

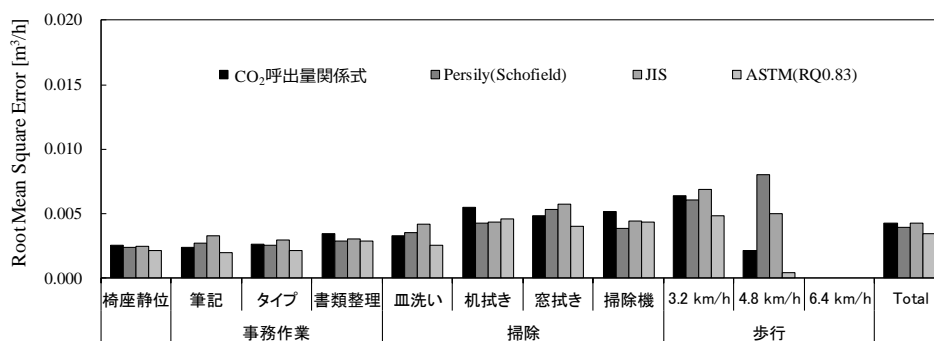


図 3-38：各 CO₂ 呼出量計算値の RMSE_平成 28 年度

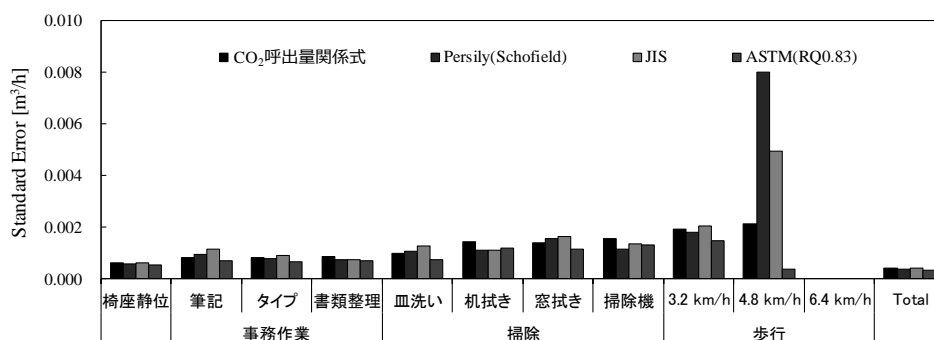


図 3-39：各 CO₂ 呼出量計算値の標準誤差_平成 28 年度

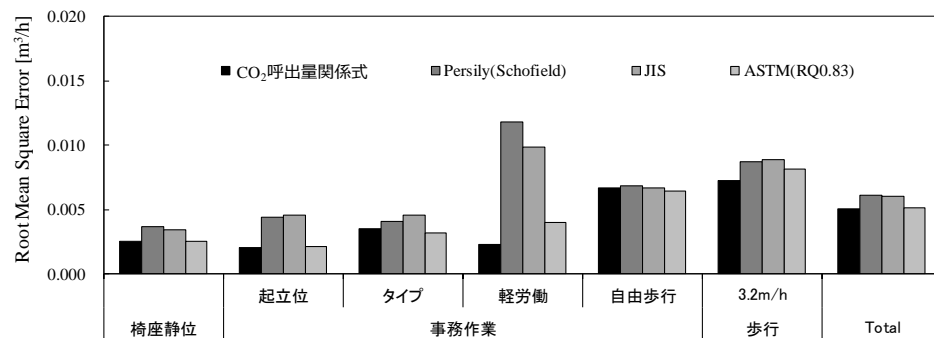


図 3-40：各 CO₂ 呼出量計算値の RMSE_平成 26 年度

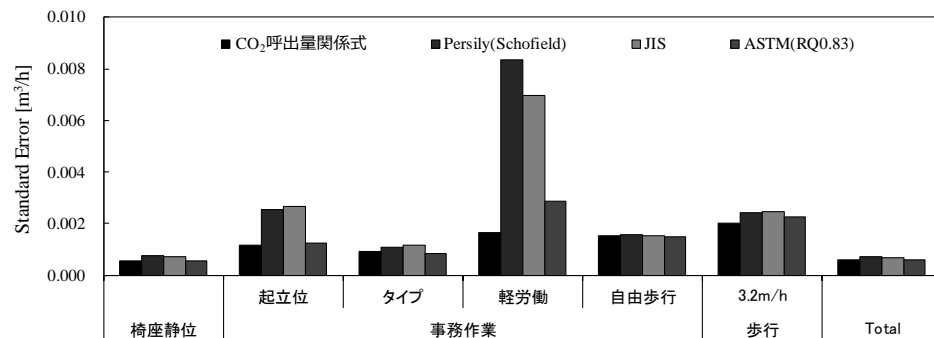


図 3-41：各 CO₂ 呼出量計算値の標準誤差_平成 26 年度

Met 値全ての場合

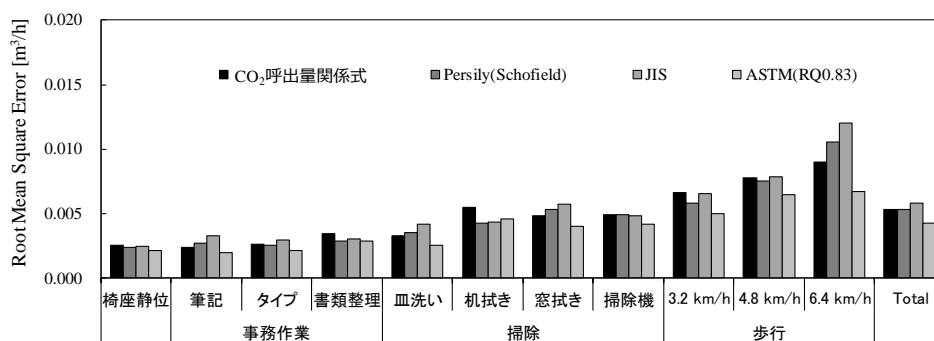


図 3-42：各 CO₂ 呼出量計算値の RMSE_平成 28 年度

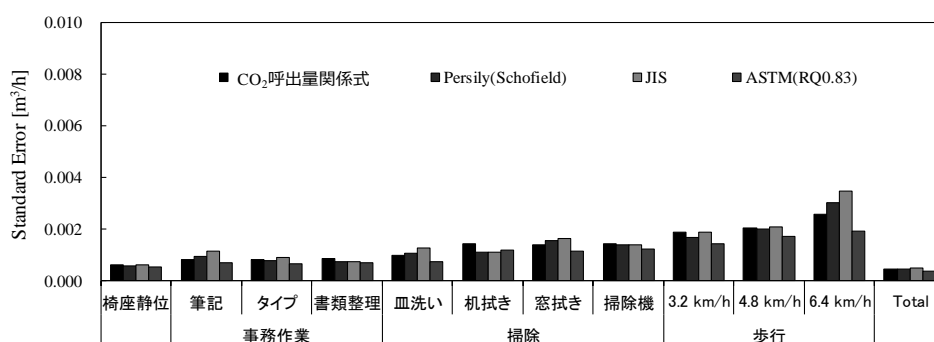


図 3-43：各 CO₂ 呼出量計算値の標準誤差_平成 28 年度

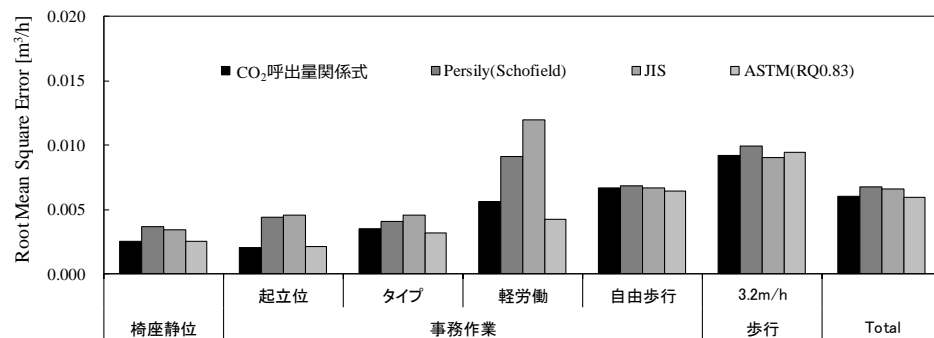


図 3-44：各 CO₂ 呼出量計算値の RMSE_平成 26 年度

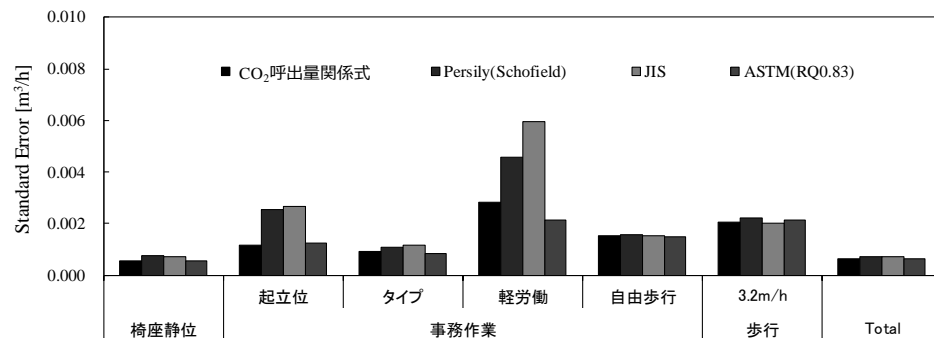


図 3-45：各 CO₂ 呼出量計算値の標準誤差_平成 26 年度

Met3.0 以下の場合

表 3-29：各 CO₂呼出量計算値の RMSE_平成 28 年度

		関係式	Persily	JIS	ASTM-12	データ数
椅座静位		0.00256	0.00234	0.00248	0.00210	16
事務作業	筆記	0.00233	0.00268	0.00325	0.00194	8
	タイプ	0.00264	0.00254	0.00292	0.00211	10
	書類整理	0.00341	0.00289	0.00304	0.00285	16
掃除	皿洗い	0.00325	0.00350	0.00417	0.00253	11
	机拭き	0.00551	0.00424	0.00434	0.00459	15
	窓拭き	0.00478	0.00534	0.00573	0.00400	12
	掃除機	0.00516	0.00385	0.00445	0.00437	11
歩行	3.2 km/h	0.00640	0.00602	0.00682	0.00485	11
	4.8 km/h	0.00215	0.00801	0.00497	0.00036	1
	6.4 km/h	-	-	-	-	0
Total		0.00424	0.00393	0.00428	0.00345	111

表 3-30：各 CO₂呼出量計算値の標準誤差_平成 28 年度

		関係式	Persily	JIS	ASTM-12	データ数
椅座静位		0.00064	0.00058	0.00062	0.00053	16
事務作業	筆記	0.00082	0.00095	0.00115	0.00068	8
	タイプ	0.00083	0.00080	0.00092	0.00067	10
	書類整理	0.00085	0.00072	0.00076	0.00071	16
掃除	皿洗い	0.00098	0.00105	0.00126	0.00076	11
	机拭き	0.00142	0.00109	0.00112	0.00119	15
	窓拭き	0.00138	0.00154	0.00165	0.00115	12
	掃除機	0.00156	0.00116	0.00134	0.00132	11
歩行	3.2 km/h	0.00193	0.00182	0.00206	0.00146	11
	4.8 km/h	0.00215	0.00801	0.00497	0.00036	1
	6.4 km/h	-	-	-	-	0
Total		0.00040	0.00037	0.00041	0.00033	111

表 3-31：各 CO₂呼出量計算値の RMSE_平成 26 年度

		関係式	Persily	JIS	ASTM-12	データ数
椅座静位		0.00258	0.00370	0.00345	0.00258	23
事務作業	起立位	0.00205	0.00442	0.00459	0.00218	3
	タイプ	0.00357	0.00413	0.00459	0.00323	15
	軽労働	0.00234	0.01180	0.00983	0.00404	2
	自由歩行	0.00673	0.00690	0.00670	0.00644	19
歩行	3.2m/h	0.00725	0.00875	0.00891	0.00813	13
Total		0.00505	0.00612	0.00603	0.00517	73

表 3-32：各 CO₂呼出量計算値の標準誤差_平成 26 年度

		関係式	Persily	JIS	ASTM-12	データ数
椅座静位		0.00054	0.00077	0.00072	0.00054	23
事務作業	起立位	0.00118	0.00255	0.00265	0.00126	3
	タイプ	0.00092	0.00107	0.00118	0.00083	15
	軽労働	0.00165	0.00834	0.00695	0.00286	2
	自由歩行	0.00154	0.00158	0.00154	0.00148	19
歩行	3.2m/h	0.00201	0.00243	0.00247	0.00226	13
Total		0.00058	0.00072	0.00070	0.00060	73

Met 値全ての場合

表 3-33：各 CO₂呼出量計算値の RMSE_平成 28 年度

		関係式	Persily	JIS	ASTM-12	データ数
椅座静位		0.00064	0.00058	0.00062	0.00053	16
事務作業	筆記	0.00082	0.00095	0.00115	0.00068	8
	タイプ	0.00083	0.00080	0.00092	0.00067	10
	書類整理	0.00085	0.00072	0.00076	0.00071	16
掃除	皿洗い	0.00098	0.00105	0.00126	0.00076	11
	机拭き	0.00142	0.00109	0.00112	0.00119	15
	窓拭き	0.00138	0.00154	0.00165	0.00115	12
	掃除機	0.00143	0.00141	0.00140	0.00121	12
歩行	3.2 km/h	0.00191	0.00169	0.00190	0.00145	12
	4.8 km/h	0.00207	0.00200	0.00210	0.00173	14
	6.4 km/h	0.00259	0.00303	0.00347	0.00193	12
Total		0.00045	0.00045	0.00050	0.00036	138

表 3-34：各 CO₂呼出量計算値の標準誤差_平成 28 年度

		関係式	Persily	JIS	ASTM-12	データ数
椅座静位		0.00064	0.00058	0.00062	0.00053	16
事務作業	筆記	0.00082	0.00095	0.00115	0.00068	8
	タイプ	0.00083	0.00080	0.00092	0.00067	10
	書類整理	0.00085	0.00072	0.00076	0.00071	16
掃除	皿洗い	0.00098	0.00105	0.00126	0.00076	11
	机拭き	0.00142	0.00109	0.00112	0.00119	15
	窓拭き	0.00138	0.00154	0.00165	0.00115	12
	掃除機	0.00143	0.00141	0.00140	0.00121	12
歩行	3.2 km/h	0.00191	0.00169	0.00190	0.00145	12
	4.8 km/h	0.00207	0.00200	0.00210	0.00173	14
	6.4 km/h	0.00259	0.00303	0.00347	0.00193	12
Total		0.00045	0.00045	0.00050	0.00036	138

表 3-35：各 CO₂呼出量計算値の RMSE_平成 26 年度

		関係式	Persily	JIS	ASTM-12	データ数
椅座静位		0.00258	0.00370	0.00345	0.00258	23
事務作業	起立位	0.00205	0.00442	0.00459	0.00218	3
	タイプ	0.00357	0.00413	0.00459	0.00323	15
	軽労働	0.00564	0.00913	0.01195	0.00424	4
	自由歩行	0.00673	0.00689	0.00670	0.00644	19
歩行	3.2 m/h	0.00921	0.00992	0.00903	0.00949	20
Total		0.00602	0.00676	0.00664	0.00596	84

表 3-36：各 CO₂呼出量計算値の標準誤差_平成 26 年度

		関係式	Persily	JIS	ASTM-12	データ数
椅座静位		0.00054	0.00077	0.00072	0.00054	23
事務作業	起立位	0.00118	0.00255	0.00265	0.00126	3
	タイプ	0.00092	0.00107	0.00118	0.00083	15
	軽労働	0.00282	0.00457	0.00597	0.00212	4
	自由歩行	0.00154	0.00158	0.00154	0.00148	19
歩行	3.2m/h	0.00206	0.00222	0.00202	0.00212	20
Total		0.00066	0.00074	0.00072	0.00065	84

平成26年度のデータでは ASTM-12 と CO₂呼出量関係式から算出した CO₂呼出量推定値の精度が高い結果となり、特に女性の推定精度が高い結果となった。平成28年度では、Met 値が 3.0 以下および全ての両方で ASTM-12 の精度が高い結果となった。CO₂呼出量関係式はおおむね推定できていることを確認した。

Met 値推定手法と CO₂呼出量推定手法の組み合わせ

CO₂呼出量推定式に代入する Met 値について各 Met 値推定手法より得られた Met 値を代入して CO₂呼出量を算出した。CO₂呼出量測定値を真値として CO₂呼出量推定値から RMSE を求めた。CO₂呼出量関係式から求めた RMSE を図 3-43 に、Persily の式から求めた RMSE を図 3-44 に、JIS の RMSE を図 3-45 に、ASTM-12 の RSME を図 3-44 に、ASTM-18 の RSME を図 3-45 に示す。

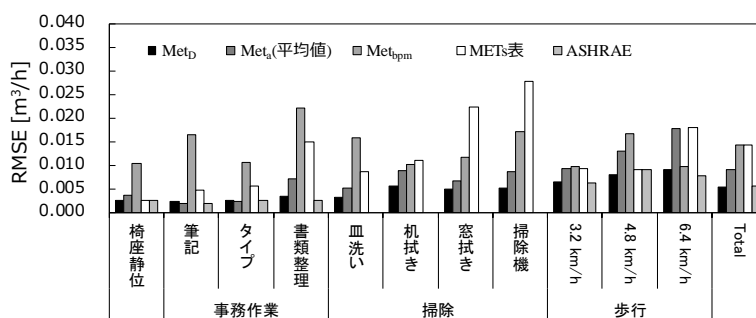


図 3-46 : Met 値推定手法ごとの RMSE (CO₂呼出量関係式) _ (図 3-17 (再掲))

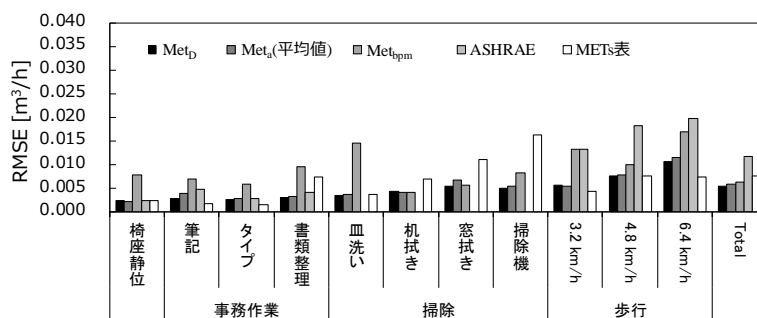


図 3-47 : Met 値推定手法ごとの RMSE (Persily の式) _ (図 3-21 (再掲))

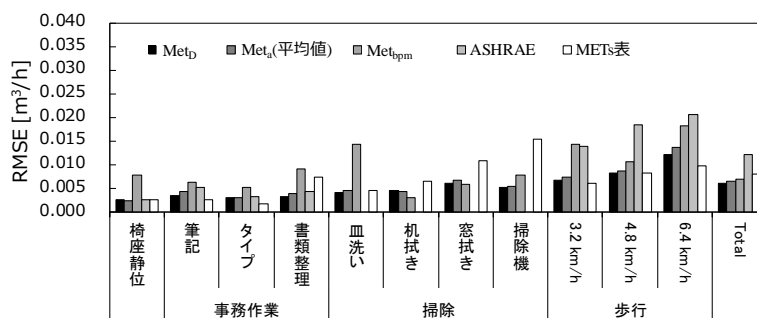


図 3-48 : Met 値推定手法ごとの RMSE (JIS) _ (図 3-20 (再掲))

第3章 エネルギー代謝率および二酸化炭素呼出量の推定精度

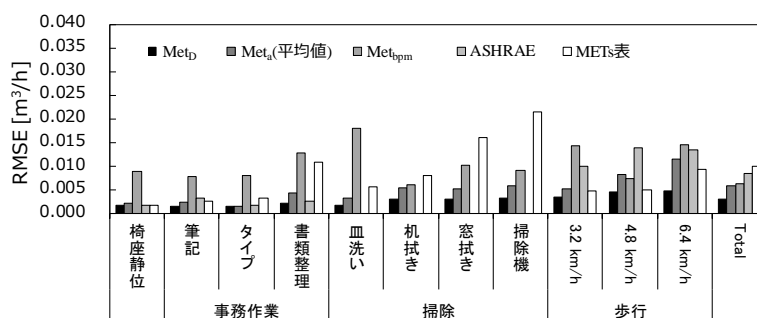


図 3-49 : Met 値推定手法ごとの RMSE (ASTM-12) _ (図 3-18 (再掲))

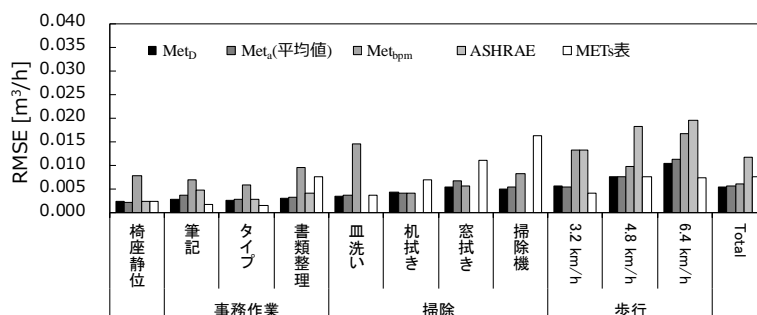


図 3-50 : Met 値推定手法ごとの RMSE (ASTM-18) _ (図 3-19 (再掲))

各 CO₂呼出量推定では Met_Dを用いた場合がどの CO₂呼出量推定手法でも最も精度が高い結果となった。これは実際の Met 値を測定できていることが理由として考えられる。ほとんどの条件で CO₂呼出量推定値が測定値より高く推定される関係式や ASTM-12 の場合は、Met 値推定手法として活動量計の測定値や ASHRAE に示されている値を用いた場合で推定精度が高いことを確認した。しかし、Persily の式や JIS の値では、METs 表に示されている値を用いることで推定精度が高いことを確認した。

関係式や ASTM-12 では ASHRAE に示されている値を用いた検討を行ったが、示されている項目は METs 表ほど多くなく、項目によっては範囲で示されているため留意が必要である。

3.5 おわりに

本章では、Met 値推定手法および CO₂ 呼出量推定手法に関する精度向上を目的に被験者実験の結果から Met 値および CO₂ 呼出量について精度確認を行った。

CO₂ 呼出量関係式について Met 値推定では、文献による Met 値推定手法の他に活動量計や脈拍数計を用いた Met 値推定手法の検討を行い、平成 28 年度の測定結果と比較したところ、ほとんどの推定式で活動量計を用いることで CO₂ 呼出量推定の精度が向上することを確認した。

Met_D を用いて各推定式の精度に関する検討を行った結果、男性のみの条件であれば ASTM-12 の式を用いることで精度よく CO₂ 呼出量を推定できることを確認した。しかし、女性については CO₂ 呼出量測定値よりも大きく推定するため CO₂ 呼出量関係式を用いるほうが精度よく推定できることを確認した。

CO₂ 呼出量では、Met_D を用いて各推定手法から算出される CO₂ 呼出量の精査を行った。CO₂ 呼出量による誤差は推定式による誤差を含むと相対で 10～15%程度であることを確認した。

Met 値推定手法と CO₂ 呼出量推定手法との組み合わせについて検討を行った。関係式や ASTM-12 の場合は、Met 値推定手法として活動量計の測定値や ASHRAE に示されている値を用いることで推定精度が向上することを確認した。また Persily の式や JIS の値、ASTM-18 では、文献値は METs 表を用いることで推定精度が高いことを確認した。

不確かさによる CO₂ 呼出量推定のばらつきを評価した場合、Met 値の不確かさとほとんど同じ傾向が確認でき、CO₂ 呼出量推定手法はほとんどの手法で Met 値による影響が大きいことを確認した。CO₂ 呼出量推定手法によって文献値である ASHRAE または METs 表のどちらを用いるかによって推定精度が異なる結果となった。

ダグラスバッグ法による CO₂ 呼出量測定は被験者や行為によってマスクをつけることによる作業の負荷が見受けられたことから背付きダグラスバッグの使用も検討すべきである。また測定時の被験者の体調や緊張感などの心理的影響もあると考えられ、今後の検討ではこのような要素も考慮したい。

JIS や SHASE-S では体重や身長等の個人属性によらず活動ごとに一つの値が示されていることや ASTM-12 の推定式は西洋人のデータから作成されていることなどを留意する必要がある。

参考文献<第3章>

- [3-1] 2013 ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS I-P Edition, ASHRAE Research, 2013
- [3-2] JIS A14061974 室内換気量測定法（炭酸ガス法）, 2010
- [3-3] 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
- [3-4] 田島昌樹 井上貴之 大西裕治：換気測定のための在室者の二酸化炭素呼出量の推定, 日本建築学会環境系論文集, 第81巻 第728号, 日本建築学会, p885-p892, 2016.10
- [3-5] Determination of metabolic rate, ISO8996, 2004.1
- [3-6] 改訂版『身体活動のメッツ（METs）表』, 国立健康・栄養研究所
- [3-7] ASTM D6245-18, Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation, American society for Testing and Materials International, 2018
- [3-8] A.Persily, L de jonge : Carbon dioxide generation rates for building occupants, The Authors. Indoor Air 2017, 14 March 2017
- [3-9] 身体運動の生理学, 猪飼道夫編著, 杏林書院, p292, 1973.12
- [3-10] Harris JA, Benedict FG. Biometric studies of basal metabolism in man. Publication 279 : p233-p250, 1919
- [3-11] Schofield, W.N. 1985. Predicting basal metabolic rate, new standards and review of previous work. Hum. Nutr. Clin. Nutr., 39C (suppl. 1): p5-p41.
- [3-12] FAO FOOD AND NUTRITION TECHNICALREPORT SERIES Human energy requirements Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation Rome, 17-24 October 2001
- [3-13] 「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-p66, 2014.3

第4章

単室実験による二酸化炭素発生量の精度確認

第4章 単室実験による二酸化炭素発生量の精度確認

4.1 はじめに

前述のように、実使用条件の居室などでは、人間の呼気に含まれる CO₂ をトレーサガスとしてその発生量を仮定することで換気量を測定する手法が取られることがある。先行研究^[4-1]では人間の呼気を用いた CO₂ 濃度推定を行った。CO₂ 呼出量関係式に代入するエネルギー代謝率 Met の設定は、行為を目視で確認し、文献値 (ASHRAE^[4-2]) を用いた。

本章では、Met 値推定手法による換気性状推定の精度向上および発生量推定の精度確認を目的に検討を行った。単室の条件で人間の呼気を用いた CO₂ 濃度測定および CO₂ 濃度推定を行い、精度向上について検討を行った。Met 値推定手法は文献値 (ASHRAE と METs 表^[4-3]) による Met 値推定と活動量計を用いた Met 値推定を行い、Met 値推定手法による CO₂ 呼出量推定の精度の比較を行った。また CO₂ 呼出量推定手法についても検討を行った。

4.2 単室での換気性状測定実験

換気性状測定は高知工科大学 B 棟 5F のセミナー室で行った。測定は機械換気を設定した室において活動量計を装着した被験者に行為を指示した。また、拡散用のファンを用いることで完全拡散に近いと考えられる条件で測定を行った。

被験者実験と同じく在室者には服の上からベルトをしてもらい、そのベルトに活動量計を装着し、10 秒間隔で活動量を測定した。また文献による Met 値の設定は在室者の行為を目視で確認し、示されている値を設定した。文献はこれまでと同様に ASHRAE^[4-2] および METs 表^[4-3] に示されている値を用いた。

室内 CO₂ 濃度は換気に関する微分方程式 (後述の (4-1)) を用いて 10 秒毎に計算し、在室者の CO₂ 呼出量は各 CO₂ 呼出量推定手法 (CO₂ 呼出量関係式, JIS^[4-4], ASTM^[4-5] [4-6], Persily 式^[4-7]) から求めた。

その他にマスフローコントローラーを用いた換気性状測定を行い、機械発生による精度と人間の呼気による推定精度について比較を行った。

$$\frac{dC_i}{dt} V_i = \sum P_{CO_2 i} - Q_{io} (C_o - C_i) \quad (4-1)$$

ここでは、

C_i	: i 室の室内濃度 [m ³ /m ³]	C_o	: 外気濃度 [m ³ /m ³]
$P_{CO_2 i}$: CO ₂ 呼出量 [m ³ /h]	Q	: 外気導入量 [m ³ /h]
t	: 時間 [h]	V	: 室の空気容積 [m ³]

測定項目および使用した測定器を表 4-1 に、写真 4-1, 4-2 に気密測定器を示す。

表 4-1：測定器と測定項目

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)
空気温度 [℃]	T AND D RTR-53	測定範囲 0~50℃ ±0.3
室内の 換気量の設定	気密測定器 (コーナー札幌株式会社)	出力範囲 0Pa 2100/2400m ³ /h (最大) 100V 50/60Hz
活動量	Active style PRO HJA-750c (OMRON)	測定範囲 ±6G 1.0~18.0METs (0.1METs 刻み)
実ガス流量 [SLM]	マスフローコントローラー PA01S, C1005-5L (FCON)	流量制御範囲 5~100%F.S. 流量精度 ±2%F.S.



写真 気密測定器 KNS-5000C



写真 気密測定器の表示画面

4.2.1 測定概要

人間の呼気に比べ発生量として誤差が小さいと考えられる流量制御の機能を持つマスフローコントローラーを用いてトレーサガス（本研究では二酸化炭素（CO₂）を用いた）を発生させ、単室の換気性状測定を行い、CO₂濃度測定値と推定値との比較を行った。

測定では、室内のCO₂濃度計は排気ファンの吸い込み口近くに設置し、10秒間隔で測定を行った。換気量の設定には、機械換気設備の代わりに風量が自由に設定できる気密測定器を使用した。

(1) 人間の呼気による方法

在室者数や機械換気量，測定時間，在室者の行為についての測定概要を表 4-2 に，測定条件概要を図 4-1 に示す。

CO₂濃度推定では，在室者の Met 値は活動量計から得られた 10 秒毎の測定値をそのまま代入したもの，測定時間内の平均値を代入したもの，測定時間内の最頻値を代入したもの，測定時間内の中央値を代入したもの，および文献値（ASHRAE および MTEs 表に示されている Met 値）を代入したものの 5 つを用いた。

ケース A-10 およびケース 11 で行った掃除の行為では在室者に机拭きと掃除機かけに分かれてもらい作業を行ってもらった。ケース A-12 および A-14 では，前半後半の 20 分で換気量を変更した検討を行った。測定時間は講義の都合で 1 回の測定を 30 分～60 分しか行えないため最長 60 分の測定となっている。

表 4-2：測定概要（人間の呼気）

ケース	在室人数 [人]	機械換気量 [m ³ /h]	測定時間[分]	行為		
A-1	4	80	30	椅座静位		
A-2				椅座・勉強		
A-3			60	30	タイプ	
A-4					書類整理	
A-5					勉強	
A-6			30	30	机拭き	
A-7					掃除	
A-8			80, 400	40	歩行	
A-9						
A-10			80	30		
A-11			80, 400	40		
B-1			8	160	30	椅座静位
B-2			8 (1)			打ち合わせ
B-3					30	書類整理
B-4	勉強					
B-5	机拭き					
B-6	8 (1)	240	25		椅座静位	
B-7						
C-1	12 (2)	240	30	勉強		
C-2				机拭き		
C-3						
C-4						

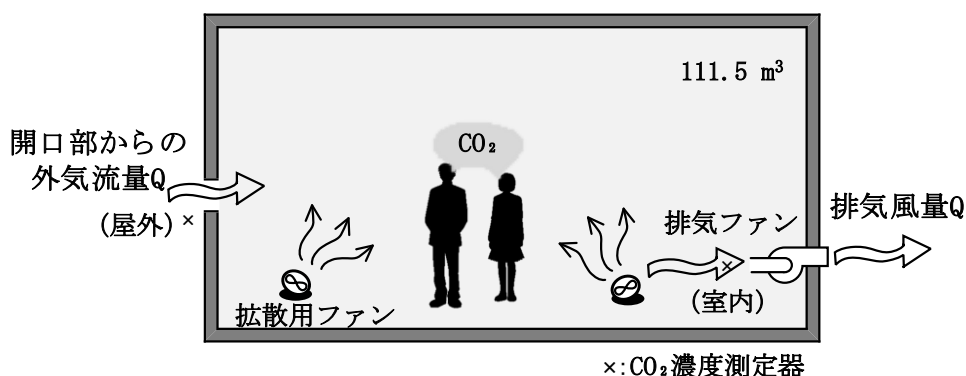


図 4-1：測定条件概要（人間の呼気）

各 CO₂ 呼出量推定手法による CO₂ 濃度推定の比較を行った。Met 値推定手法で最も精度が高かった活動量（平均値）を各推定式代入して算出した推定値を用いて室内 CO₂ 濃度を推定し、測定値と比較を行った。ASTM-12 の式に用いる呼吸商（RQ 値）は 0.83 を設定し、Persily の式および ASTM-18 は 0.85 とした。また計算に用いる温度については測定していたケースは測定値を用いた。計算に用いた平均温度を表 4-2 に示す。測定記録の無い日は、25℃と設定して計算を行った。大気圧の測定は行っていなかったため 101kPa とした。

表 4-3：実験で測定していた室内温度の平均値

ケース	A-1	A-2	A-3	A-5	A-6	A-7	A-10	A-11	A-13
温度 (°C)	30.3	20.1	26.4	20.5	24.4	20.6	21.8	24.8	24.4

(2) マスフローコントローラーによる方法

マスフローコントローラーによる測定は人間の呼気を用いた条件と比較するために発生量は在室者数を 4 人と想定して、在室者の活動量 Met 値を基準に表 4-4 のように設定した。在室者の属性は厚生労働省が公開している国民健康・栄養調査報告の身体調査の結果に示されている成人男性 20 歳の平均体重（64.6kg）と平均身長（173.2cm）とした^[4-8]。具体的な発生量は関係式 (2-38) を用いて CO₂ 発生量を算定した。また CO₂ 濃度推定値は換気に関する微分方程式 (4-1) を用いて算出した。

設定した人間の呼気と同じ量の CO₂ ガスを流すためにガス全体流量および必要ガス流量の計算を行った。下記の式 (4-2) を用いてガス流量の計算を行った。マスフローコントローラーは N₂ で設定されているためコンバージョンファクターによる発生量の計算を行った。

コンバージョンファクター（C.F）とは、マスフローコントローラーの設定されている単位は SLM（Standard Liter/min）であるため、建築で使う単位に変換する必要がある。基準となっているガスは窒素で C.F は N₂=1.00 であり、CO₂ の C.F は 0.74 であるため式 (4-2) に値を代入して算出した。発生量の単位は m³/h であるため 1 m³/h にすると 16.67 SLM になる。

$$\text{CO}_2\text{の実流量 } Q = \text{ガス全体流量 } S \times \frac{\text{ガスの } C.F}{\text{マスフローコントローラーの } C.F} \quad (4-2)$$

表 4-4 : 必要ガス量計算

流量 [m ³ /h・人]	流量 [m ³ /h]	必要ガス量 [m ³ /h]	必要ガス量 [SLM]	設定 [%FS]	Met 値	測定時間 [分]
0.01735	0.0694	0.0938	1.564	15.64	1.0	30
0.03471	0.1389	0.1876	3.127	31.27	2.0	
0.05207	0.2083	0.2815	4.691	46.91	3.0	

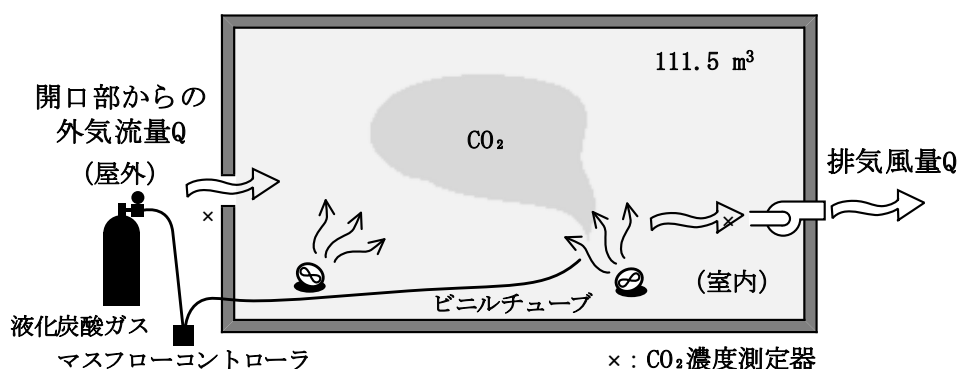


図 4-2 : 測定条件概要 (マスフローコントローラー)

測定する際に発生量の設定を容易にするためにガス流量を設定し直して設定発生量の算出を行った。マスフローコントローラーを用いた換気性状測定の測定概要を表 4-5 に示す。

表 4-5 : 測定概要 (マスフローコントローラー)

ケース	測定時間 [min]	設定 Met 値 [-]	ガス流量 [SLM]	設定 CO ₂ 発生量 [m ³ /h]	設定 換気量[m ³ /h]
D-1	30	1.0	1.6	0.0710	80
D-2					80
D-3					100
D-4	30				140
D-5	30	2.0	3.1	0.1376	100
D-6					140
D-7					110
D-8	30				140
D-9	30	3.0	4.7	0.2087	110
D-10	60				90
D-11	30				140

4.2.2 測定結果

前章と同様に推定値と測定値のばらつきについては RMSE で精度確認を行った。測定値を真値として RMSE を算出した。

(1) 人間の呼気による方法

各 Met 値推定手法の値を CO₂ 呼出量関係式に代入して算出した CO₂ 呼出量を用いて CO₂ 濃度推定を行った。測定対象室の CO₂ 濃度の測定値と推定値の一例を図 4-3 から図 4-6 に示す。また CO₂ 濃度測定値を真値とした CO₂ 濃度計算値の RMSE を求めた。計算に用いた Met 値と RMSE をまとめたものを表 4-6 に示す。表に示している文献値は ASHRAE および国立健康・栄養研究所に示されている値を参照して検討に用いた。

以下にそれぞれの計算した室内 CO₂ 濃度を計算値（測定値）、計算値（平均値）、計算値（文献値）として示している。

表 4-6：測定条件と測定結果

ケース	エネルギー代謝率				RMSE [ppm]				
	文献値	Met _a			文献値	CO ₂ 濃度推定値			
		平均値	最頻値	中央値		測定値	平均値	最頻値	中央値
A-1	1.00*1	1.03	1.00	1.00	12.0	15.3	15.9	12.0	12.0
A-2		1.04	1.00	1.00	20.7	15.6	14.6	20.7	20.7
A-3		1.05	1.00	1.00	17.1	12.5	13.6	22.7	22.7
A-4	1.10*1	1.07	1.00	1.00	30.5	34.6	34.2	43.9	43.9
A-5		1.04	1.00	1.00	13.3	21.6	21.6	28.0	28.0
A-6	1.20*1	1.64	1.50	1.60	82.7	28.2	25.6	43.3	28.2
A-7		1.29	1.20	1.20	13.7	5.7	3.5	13.7	13.7
A-8	1.30*2	1.18	1.00	1.10	16.3	11.5	13.6	35.5	22.2
A-9		1.33	1.00	1.20	5.7	8.3	7.8	40.0	13.0
A-10	2.30*2	2.28	2.40	2.30	19.4	15.0	16.9	33.5	19.4
A-11	2.30*2	2.57	2.80	2.60	34.9	32.3	30.3	14.0	36.4
A-12		2.36	2.50	2.40	81.9	51.1	53.7	73.6	59.7
A-13	1.70*1	2.29	2.30	2.30	133.5	58.3	58.1	57.3	57.3
A-14		2.82	3.00	2.90	76.9	84.9	81.7	108.7	94.6
B-1	1.00*1	1.03	1.00	1.00	32.1		38.9	32.1	32.1
B-2		1.04	1.00	1.00	17.8		27.0	17.8	17.8
B-3	1.10*2	1.14	1.00	1.10	34.3		27.1	18.3	20.4
B-4	1.20*1	1.23	1.10	1.20	6.7		12.4	22.0	6.7
B-5	1.30*2	1.11	1.00	1.00	101.6		52.1	26.2	26.2
B-6		1.11	1.00	1.00	57.4		10.4	22.5	22.5
B-7	2.30*2	2.06	2.00	2.00	105.2		46.1	32.6	32.6
C-1	1.00*1	1.01	1.00	1.00	25.6		22.8	25.6	25.6
C-2	1.30*2	1.14	1.00	1.10	37.9		21.0	66.1	33.4
C-3		1.17	1.00	1.10	56.9		15.0	47.3	15.2
C-4	2.30*2	2.09	2.00	2.00	104.3		33.5	10.4	10.4

*1：ASHRAE で示されている Met 値^[1]

*2：国立健康・栄養研究所で示されている Met 値^[2]

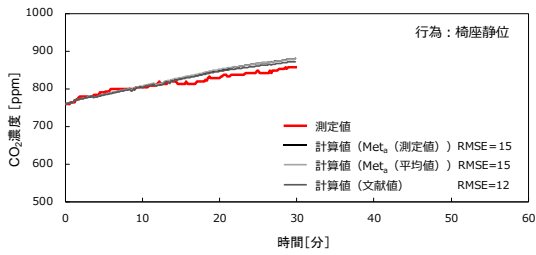


図 4-3：推定値と実測値の比較 A-1

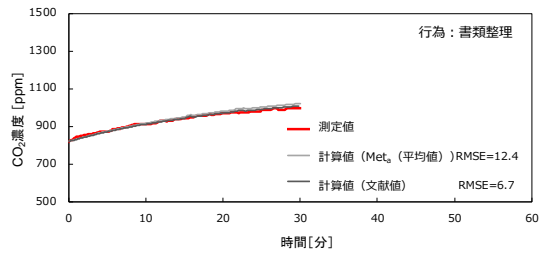


図 4-5：推定値と実測値の比較 B-6

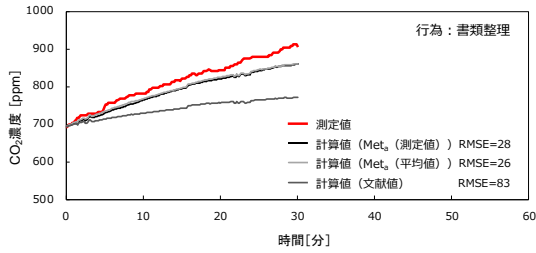


図 4-4：推定値と実測値の比較 A-6

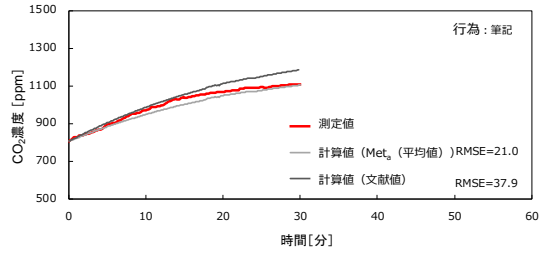


図 4-6：推定値と実測値の比較 C-3

ケース A-10 からケース A-14 の掃除や歩行などの活動量が高い条件では測定値にばらつきが多く、被験者による Met_a の差が大きくなる傾向があった。

在室者全員の活動量が測定できているケース A について信頼水準が約 95% の RMSE を図 4-7 に示す。

ケース A-9 までの活動量が小さい条件ではほぼすべての計算値が測定値と近い傾向を示し、人間の呼気を用いて CO_2 濃度が測定できることを確認した。ケース A-10 から A-14 の Met 値が高い条件では、ケース A-10, A-11 など測定値と計算値が同じ傾向を示していた。また測定値と計算値がかい離していた多くのケースで CO_2 呼出量計算値が測定値を超える結果となった。第 3 章で示した被験者実験の結果では CO_2 呼出量関係式 (2-38) を用いた際、 Met 値が高い条件では CO_2 呼出量が大きく推定されることを確認しており、測定値と計算値がかい離していた多くのケースでは Met_a が 3.0 を超える時間が多く、このことが影響していると考えられる。ケース A-12, A-14 では測定時間の途中で換気量を変化させているが、計算値が減衰し始める時間に対して測定値が減衰し始める時間に遅れがあることを確認した。

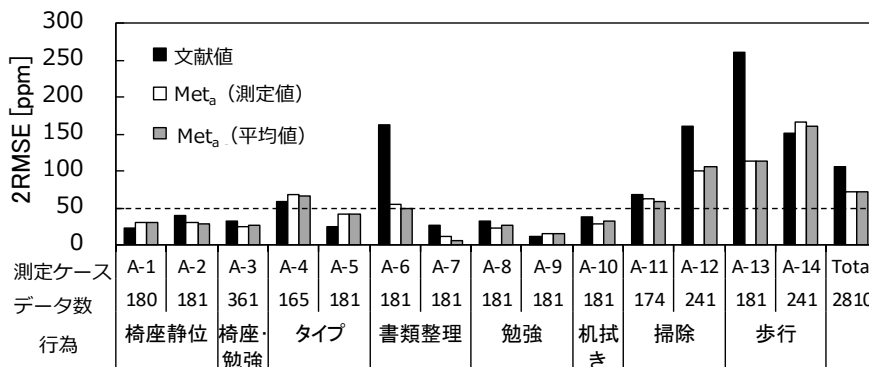


図 4-7：全ケース（在室者数 4 人）の RMSE

本研究で使用した活動量計4個であるため、在室者8人の条件では測定者率50%、12人条件では測定者率33%であった。8人（ケースB）と12人（ケースC）では、活動量が測定できた4人の Met_a （平均値）を用いて在室者全員の CO_2 呼出量の算定を行った。4人、8人、12人の椅座静位、勉強、机拭きのケースについて CO_2 濃度測定値を真値とした場合の1人当りのRMSEを図4-8に示す。

Met_a （平均値）は在室者数が増えるにつれて1人当りのRMSEが減少する結果となっており、人数が増えることで1人当たりの誤差が小さくなっていることを確認できた。

歩行、机拭き、掃除の条件では多くの時間で関係式(2-38)を作成した呼気データの Met_D の上限である $3.0 Met$ を超える結果となった。 CO_2 濃度測定の結果、活動量が小さい条件では活動量計を用いた際に室内 CO_2 濃度の測定値と計算値のRMSEが約50ppm以下の精度で換気性状を測定できることを確認した。

これは各文献の表には1つの行為にある一定の値しか示されておらず、文献に示されている行為を行っていても Met 値の時間によるばらつきも個人差も大きく、1つの値で表現するには限界があることが分かった。

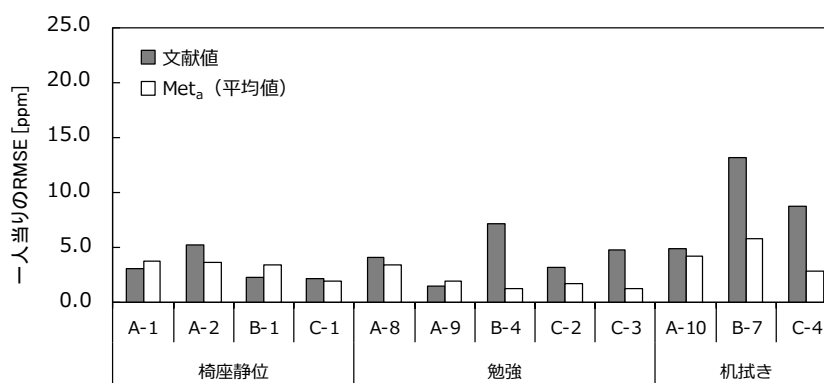


図 4-8：机拭きと歩行と掃除を除いたケースの RMSE

CO₂呼出量推定手法に関する検討

各 CO_2 呼出量推定手法を用いた場合の計算結果を表4-7に示し、測定値を真値として求めたRMSEを図4-9に示す。RMSEは信頼水準95%の係数1.96をかけた値を示している。この検討では、活動量の測定者率が100%である在室者数4人のケースAのみ検討を行った。 CO_2 呼出量推定手法は前章と同様に関係式、JIS、ASTMおよびPersilyの式を用いて検討を行った。

表 4-7：測定条件と測定結果

ケース数	1.96 RMSE [ppm]				
	関係式	Persily(schofield)	JIS	ASTM-12	ASTM-18
A-1	30.0	39.4	56.4	16.3	39.0
A-2	30.3	96.6	113.5	46.3	96.2
A-3	24.5	124.7	164.7	50.7	123.9
A-4	67.8	128.9	136.3	83.8	128.5
A-5	42.3	109.5	129.3	59.5	109.0
A-6	54.7	147.8	158.6	78.1	147.2
A-7	11.4	88.3	111.3	30.0	87.8
A-8	21.9	92.0	95.9	36.4	91.5
A-9	18.2	67.9	72.1	9.7	67.3
A-10	31.9	110.6	152.5	11.4	110.1
A-11	61.2	207.3	228.8	98.5	206.2
A-12	100.7	51.7	62.9	65.5	50.9
A-13	114.1	240.9	256.6	145.8	240.0
A-14	162.6	28.5	34.3	118.8	27.8

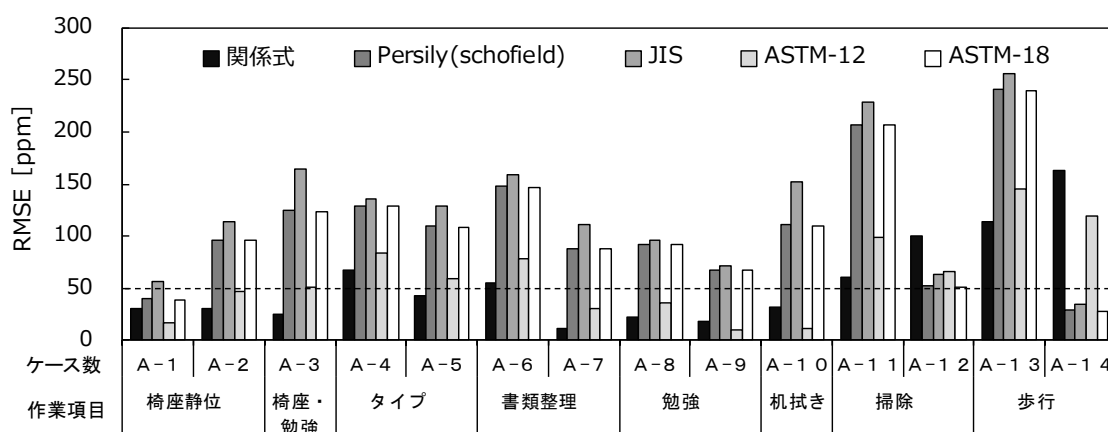


図 4-9：活動量計を用いた換気性状測定の精度比較

ほとんどのケースで CO₂ 呼出量関係式または ASTM による CO₂ 呼出量推定の濃度推定の精度が高い結果となった。ケース A-12 および A-14 では、途中で換気量を増やしたため濃度減少時の測定値と JIS および Persily の式より算出した CO₂ 濃度推定値が近い結果となり精度が高い結果となった。

活動量計を用いた条件では、関係式や ASTM による CO₂ 呼出量推定することで在室者の CO₂ 呼出量を推定できることを確認した。文献値による Met 値推定について本検討では、JIS や Persily の式を用いた場合で推定精度が高い結果となっているが、行為によって選択する値によって大きく変わることが考えられる。そのため活動量計などの測定を行い、さらに文献値と比較しながら Met 値を推定することでさらに精度が向上することも考えられる。ただし、複数の手法を用いると簡便さが失われるため必要な精度に合わせて手法を選択することが重要である。

測定の結果、活動量計は活動量が低い条件でも測定対象者の微小な動きを感知していることを確認した。また活動量が高い条件ではばらつきが大きく、個人による差も大きくなることを確認した。

換気性状測定の実験結果の一例および室内 CO₂ 濃度推定の計算結果について図 4-10～図 4-13 に示す。

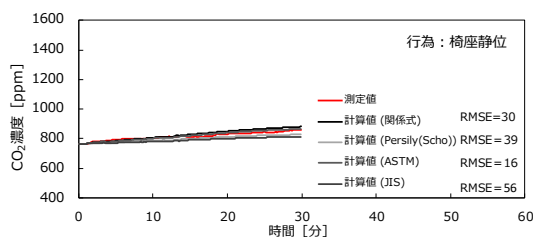


図 4-10：推定値と実測値の比較 A-1

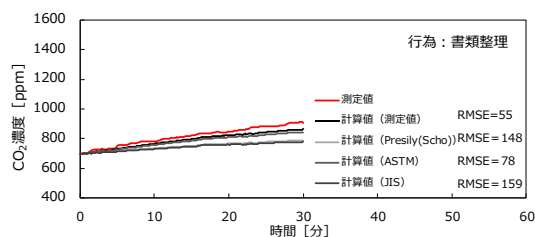


図 4-12：推定値と実測値の比較 A-6

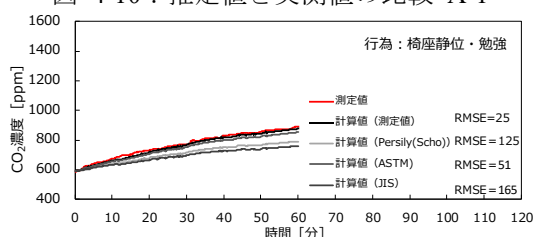


図 4-11：推定値と実測値の比較 A-3

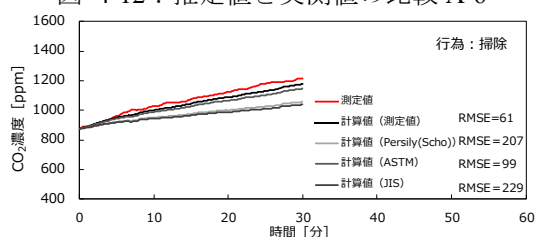


図 4-13：推定値と実測値の比較 A-11

(2) マスフローコントローラーによる方法

設定 CO₂ 発生量および測定結果を表 4-8 に示す。RMSE は測定値を真値として計算値より求めた信頼水準約 68%の値を示している。人間の呼気による濃度推定と比較を行うために 3 段階の発生量を設定して CO₂ 濃度測定を行った。測定時間は講義の都合で 30 分～60 分で測定を行った。

換気性状測定の実験結果の一例および室内 CO₂ 濃度推定の計算結果について図 4-14～図 4-17 に示す。また信頼水準約 95%の 2RMSE を図 4-18 に示す。

表 4-8：設定値および測定結果

ケース	測定時間 [min]	設定 Met 値 [-]	CO ₂ 発生量 [m ³ /h]	平均換気量 [m ³ /h]	RMSE	
D - 1	30.0	1.0	0.0710	83.1	7.4	
D - 2				76.3	6.1	
D - 3				108.7	11.3	
D - 4				140.3	23.9	
D - 5	30.0	2.0	0.1376	105.8	27.0	
D - 6				142.4	22.9	
D - 7				110.9	22.8	
D - 8				145.7	19.5	
D - 9	30.0	3.0	0.2087	113.1	35.8	
D - 10				60.0	89.9	47.2
D - 11				30.0	146.4	29.6

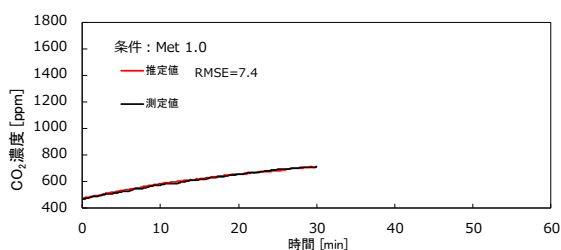


図 4-14 : CO₂ 濃度推定値と実測値の比較 D-1

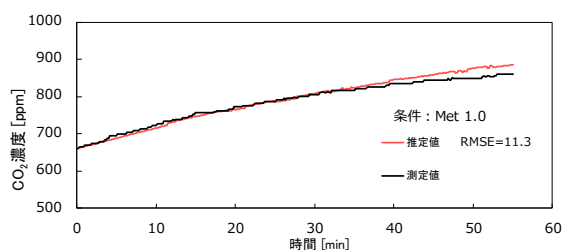


図 4-16 : CO₂ 濃度推定値と実測値の比較 D-3

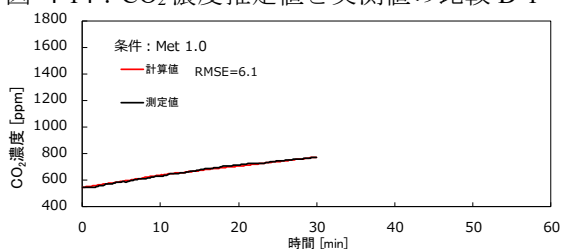


図 4-15 : CO₂ 濃度推定値と実測値の比較 D-2

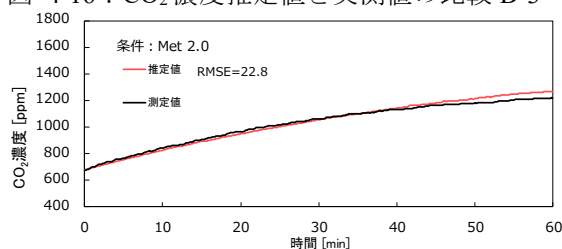


図 4-17 : CO₂ 濃度推定値と実測値の比較 D-7

マスフローコントローラーを用いた換気性状測定の実測値より求められた 2RMSE は、設定 Met 値が 3.0 のケース B-9,10,11 では、2RMSE が 50ppm を超える結果となった。発生量が少ない（ケース D-1~D-8）では、2RMSE は 50ppm を下回る結果となった。

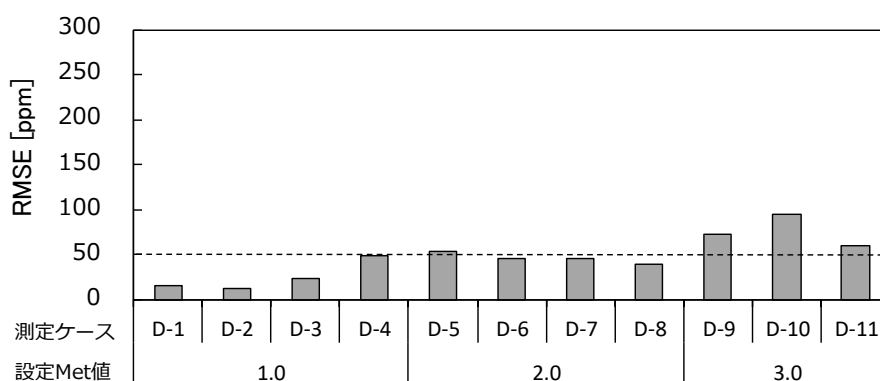


図 4-18 : CO₂ 濃度推定値と実測値の比較 D-2

人間の呼気を用いた換気性状測定とほとんど RMSE に差がない結果となった。これは発生量の誤差よりも測定での CO₂ 濃度や換気量の測定値に含まれる誤差が大きく影響していると考えられる。

換気性状測定では、十分にトレーサとなる物質を拡散することが出来ていれば、マスフローコントローラーを用いる場合と人間の呼気を用いる場合の精度について大きな差がみられないことを確認した。

4.2.3 人間の呼気を用いた場合とマスフローコントローラーを用いた場合の比較

CO₂呼出量関係式に Met_a (平均値) を代入して算出した CO₂ 濃度推定の標準誤差とマスフローコントローラーを用いた濃度推定の比較を行った。標準誤差 SE_R と Met 値の関係を図 4-19 に示す。Persily の式の標準誤差 SE_R と Met 値の関係を図 4-20, JIS を図 4-21, ASTM-12 を図 4-22 に示す。ここで示す標準誤差は RMSE より算出した標準誤差 SE_R である。

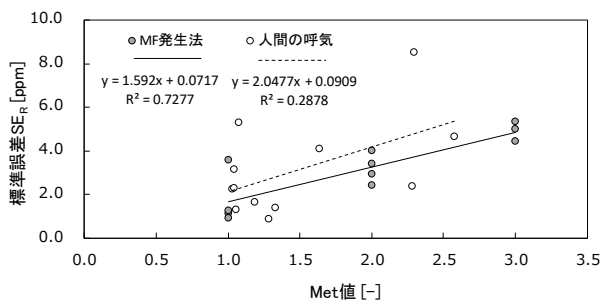


図 4-19 : Met 値と標準誤差 SE_R の関係 (CO₂呼出量関係式)

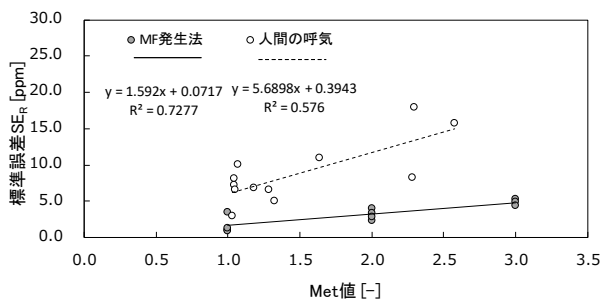


図 4-20 : Met 値と標準誤差 SE_R の関係 (Persily (Schofield))

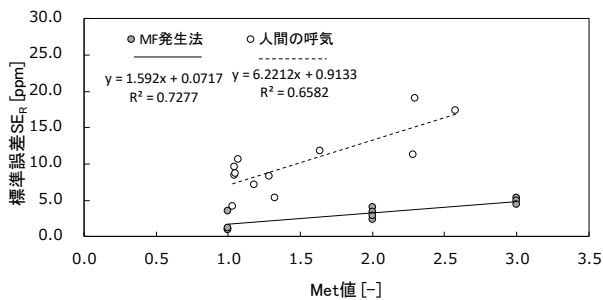


図 4-21 : Met 値と標準誤差 SE_R の関係 (JIS)

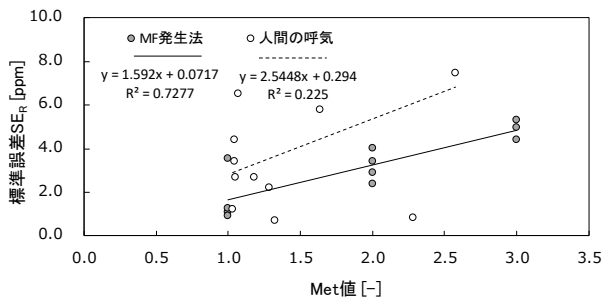


図 4-22 : Met 値と標準誤差 SE_R の関係 (ASTM-12)

マスフローコントローラーによる測定のばらつきは呼気による測定より小さい結果となり、CO₂呼出量関係式を用いた場合は個人差等の要因により最大で8ppmの標準誤差SE_Rとなる結果となった。Persilyの式およびJISの値を用いた場合は最大で20ppmとなり、ASTM-12を用いた場合は最大で8ppmとなった。またマスフローコントローラーによる手法の標準誤差SE_Rは最大で4ppmという結果になった。発生量としてマスフローコントローラーの精度が高い結果となった。

4.3 おわりに

本章では、人間の呼気を用いた換気性状測定について活動量計による精度向上および発生量推定の精度確認を目的に、実使用条件の単室で三軸加速度センサー内蔵活動量計を在室者に装着してもらい換気性状測定を行った。

呼気による換気性状測定での濃度推定では、在室者が事務作業(Met1.0程度)の行為を継続している場合は、Met値に文献値を用いてもCO₂濃度推定にほとんど差異は生じないが、清掃や歩行(Met2.0~3.0)などの行為であれば活動量計による測定値を用いることで文献値よりもCO₂濃度を高い精度で推定できることを確認した。人間の呼気による手法では、CO₂呼出量関係式およびASTM-12の式を用いた場合の標準誤差SE_Rが最大で8ppm程度であることを確認した。またマスフローコントローラーによる手法の標準誤差は最大で4ppmという結果になり、発生量としてマスフローコントローラーの精度が高い結果となった。

CO₂をトレーサとした換気性状測定でトレーサガスが十分に拡散されている条件ではマスフローコントローラーを用いる場合と人間の呼気を用いる場合の推定値について大きな差がみられないことを確認した。しかし、測定器などによる誤差のばらつきについてはマスフローコントローラーを用いた方が小さいため安定して測定することが出来ると言える。

前章と同様にCO₂呼出量推定手法について関係式およびASTMを用いる場合は活動量計によるMet値推定が最も精度が高いことが確認できた。またJISおよびPersilyの式を用いる場合は文献値を用いることでおおむね推定できることを確認した。

参考文献 <第 4 章>

- [4-1] 田島昌樹 井上貴之 大西裕治：換気測定のための在室者の二酸化炭素呼出量の推定，日本建築学会環境系論文集，第 81 巻 第 728 号，日本建築学会，p885-p892，2016.10
- [4-2] 2013 ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS I-P Edition, ASHRAE Research, 2013
- [4-3] 改訂版『身体活動のメッツ（METs）表』，国立健康・栄養研究所
- [4-4] JIS A14061974 室内換気量測定法（炭酸ガス法），2010
- [4-5] 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
- [4-6] ASTM D6245-18, Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation, American society for Testing and Materials International, 2018
- [4-7] A.Persily , L de jonge : Carbon dioxide generation rates for building occupants, The Authors. Indoor Air 2017, 14 March 2017
- [4-8] 厚生労働省：平成 27 年国民健康・栄養調査報告第 2 部身体状況調査の結果第 12 表，p112，取得日：2017 年 6 月 21 日

第 5 章

二酸化炭素呼出量を用いた換気量測定の精度確認

第5章 二酸化炭素呼出量を用いた換気量測定の精度確認

5.1 はじめに

トレーサガスを利用した測定法として、濃度減衰法、連続発生法、一定濃度法があり、人間の呼気をトレーサとする場合、人の呼気は連続発生であるため連続発生法による換気量測定を行う。これに関する既往研究は多数あり、その中で課題として挙げられるのは発生量の正確な値を推定する方法である^[5-1]。

本章では、単室空間における人間の呼気を用いた換気量測定の精度を明らかにすることを目的に CO₂ 濃度を測定し、換気量推定の精度確認を行った。発生方法は人間の呼気による発生法とマスフローコントローラーによる機械発生法の2つで測定を行った。また Met 値推定手法と各 CO₂ 呼出量推定手法の選択による組み合わせで推定精度が向上するの検討を行った。

5.2 換気量測定法に関する既往研究

単室における換気量測定法については JIS A 1406-1974^[5-2]や SHASE-S 116.2011 Standard^[5-1]が挙げられる。この内容については後述する。

本節では、単室および多数室における人間の呼気を利用した既往研究について挙げる。

単室における換気量測定について石川、倉渕ら^[5-3]による機械発生および人間の呼気による簡易測定法に関する研究では、簡易測定法による人間の呼気に含まれる CO₂ をトレーサとして逆数濃度平均法および濃度平均法により換気量を算出することが出来ることを確認している。

実空間での換気性状測定について藤川光利、吉野博^[5-4]らによる住宅を対象とした居住者の呼気を用いた多数室換気量測定法に関する実験的研究を行っており、測定方法の試行および測定の精度に関する検証を行っている。実住宅に近い条件で人工的に CO₂ を発生させて換気量を測定し、建物全体の総換気回数で約 3%程度の誤差であることを確認している。当該研究では、呼気に含まれる CO₂ は ASTM^[5-5]の式を用いて算出している。

2つの研究を例に挙げたがほかにも多くの研究がされており、人間の呼気を用いた場合の測定は機械発生法 (CO₂ や 6 フッ化硫黄, 亜酸化窒素をトレーサガスとした場合) に比べて精度が低い結果となる。しかしながら、測定精度を示すことが出来れば機械発生法の精度に近づけることができ、安全かつ簡易な方法として成立すると考えられる。

5.3.2 連続発生法

測定対象空間に連続的にトレーサガスを発生させ（供給し）、その発生（供給）量と濃度測定データから換気量を求める方法である。

(1) 逆数平均濃度法

室内濃度分布を常に一様とし、測定開始時点から終了時点までの時間平均換気量を求める。換気量は測定時間中一定である必要はないが、測定時間中の瞬時濃度、瞬時トレーサガス発生量（供給）量、有効混合容積が必要となる。式(5-5)から換気量を算出する。

$$\bar{Q} = \left(\frac{\bar{m}}{\bar{C}}\right) + \frac{V_{efc}}{t_2 - t_1} \log_e \frac{C(t_1)}{C(t_2)} \quad (5-5)$$

$$\left(\frac{\bar{m}}{\bar{C}}\right) = \left(\frac{m_1}{C_1} + \dots + \frac{m_k}{C_k} + \dots + \frac{m_n}{C_n}\right) / n \quad (5-6)$$

ここでは、

t_1	: 測定開始時点 [h]	t_2	: 測定終了時点 [h]
\bar{Q}	: 時間平均換気量 [m^3/h]		
n	: 濃度測定数 [m^3/m^3]	V_{efc}	: 有効混合容積 [m^3]
C_k	: k 番目の室内濃度測定結果 [m^3/m^3]		
M_k	: k 番目のトレーサガス発生（供給）量 [m^3/h]		
$C(t_1)$: t_1 における室内濃度 [m^3/m^3]	$C(t_2)$: t_2 における室内濃度 [m^3/m^3]

(2) 濃度平均法

室内濃度分布を常に一様とした場合の、時間変化しない換気量を求める。測定時間が十分に長い場合、測定時間中の平均トレーサガス発生（供給）量と室平均濃度のみによって算出が可能である。式(5-7)から換気量を算出する。

$$Q = \left(\frac{\bar{m}}{\bar{C}}\right) + \frac{V_{efc}}{t_2 - t_1} \left[\frac{C(t_2) - C(t_1)}{\bar{C}}\right] \quad (5-7)$$

$$\bar{m} = \left(\frac{m_1 + \dots + m_k + \dots + m_n}{n}\right) \quad (5-8)$$

$$\bar{C} = \left(\frac{C_1 + \dots + C_k + \dots + C_n}{n}\right) \quad (5-9)$$

ここでは、

Q	: 換気量 [m^3/h]	t_1	: 測定開始時点 [h]	t_2	: 測定終了時点 [h]
n	: 濃度測定数 [m^3/m^3]	V_{efc}	: 有効混合容積 [m^3]		
C_k	: k 番目の室内濃度測定結果 [m^3/m^3]				
M_k	: k 番目のトレーサガス発生（供給）量 [m^3/h]				
\bar{m}	: 平均トレーサガス発生（供給）量 [m^3/h]				
$C(t_1)$: t_1 における室内濃度 [m^3/m^3]	$C(t_2)$: t_2 における室内濃度 [m^3/m^3]		

(3) 一定濃度法

測定対象空間濃度を常時一定とするためにトレーサガス供給量を制御し、供給量から換気量を評価する。瞬時換気量を求める。式 (5-10) から換気量を算出する。

$$Q(t) = \frac{m(t)}{C_{target}} \quad (5-10)$$

ここでは、

- $Q(t)$: t における瞬時換気量 [m^3/h]
 - $m(t)$: t におけるトレーサガス発生 (供給) 量 [m^3/h]
 - $C(t)$: t における室内一様濃度 ($\approx C_{target}$) [m^3/m^3]
 - C_{target} : 目標濃度 [m^3/m^3]
- t : 時刻 [h]

5.4 マスフローコントローラーによる換気量測定

人間の呼気を利用した換気量測定との比較を目的にマスフローコントローラーによる機械発生で換気量測定を行った。前章で換気性状測定について単室実験でマスフローコントローラーを用いた場合、精度よく推定できることを確認した。本検討では 8 ケースの測定を行った。

5.4.1 測定概要

対象室は前章と同じ部屋で測定を行った。機械換気は前章の条件と違い、部屋に設置されている第 1 種熱交換換気 (定格風量 $360\text{m}^3/\text{h}$) で検討を行った。また室内は拡散用のファンを用いることで一様拡散に近い条件とし、扉や天井の隙間をふさぐ条件とふさがない条件の 2 つで実測を行った。測定器は部屋の 2 か所に高さを 3 段階設定して (計 6 点に) 設置した。(高さは床から 10cm , 110cm , 230cm の場所に設置した。) 対象室の概要を図 5-1 に、測定時間および発生量などの測定概要を表 5-2 に示す。

新たに測定したデータの他に、前章で示した測定のケースについても換気量を算出した。計算に用いたケースは測定時間が 50 分以上のケースで、機密測定機により得られた測定値を室の換気量とした。

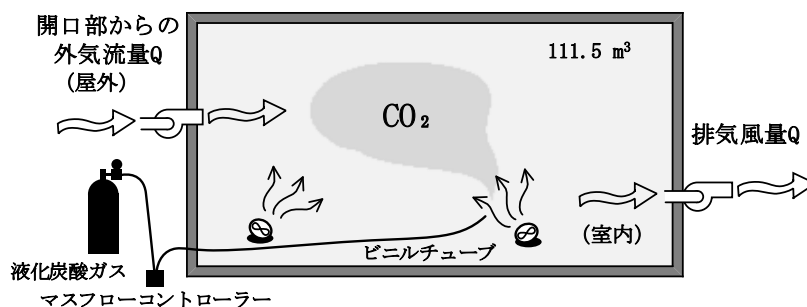


図 5-1 : 対象室の概要

表 5-2 : 測定概要

ケース	測定時間 [min]	ガス流量 [SLM]	設定 CO ₂ 発生量 [m ³ /h]	隙間の密封
D-3	50	1.6	0.071	無
D-7	60	3.1	0.138	
D-11		4.6	0.209	
E-1	150	3.1	0.138	無
E-2				有
E-3				
E-4	120	6.3	0.280	無
E-5				
E-6	100	9.4	0.417	
E-7	90			
E-8	100			

前章の単室実験と同様に隙間をふさいだ条件の測定も行った。発生量は在室者 8 人と設定し、前章と同じ計算方法で発生量を算出して測定を行った。前章と同様に在室者の属性は厚生労働省が公開している国民健康・栄養調査報告の身体調査の結果に示されている成人男性 20 歳の平均体重 (64.6kg) と平均身長 (173.2cm) とした^[5-6]。具体的な発生量は関係式 (2-38) を用いて CO₂ 発生量を算定した。本研究では定格風量である 360m³/h を室の換気量とし、以降は風量と示す。

5.4.2 測定結果

人間の呼気と比較するため算出方法を合わせて逆数濃度平均法で平均換気量を算出した。風量を真値として RMSE を求めた。算出した RMSE を表 5-3 に示す。単室実験の 3 ケースについては機密測定器で得られた換気量の平均値を真値として RMSE を求めた。CO₂ 濃度測定値は 6 つあるため平均値を算出してその値を用いて換気量の算出を行った。

各ケースの室内 CO₂ 濃度および外気 CO₂ 濃度の測定値を図 5-2～図 5-7 に、換気量測定値 (平均値) および平均換気量測定値を図 5-8～図 5-13 に示す。そのほかの測定結果については付録 D に示す。

表 5-3 : 計算結果

	換気量 [m ³ /h]		RMSE
	風量	平均値	
D-3	100* ¹	116.6	0.2
D-7		115.5	21.0
D-11		91.4	36.2
E-1	360	375.2	33.7
E-2		331.2	37.5
E-3		350.3	25.5
E-4		323.0	39.0
E-5		386.5	32.6
E-6		369.3	13.5
E-7		368.3	13.9
E-8		384.2	26.1

*1 : 機械換気の設定値

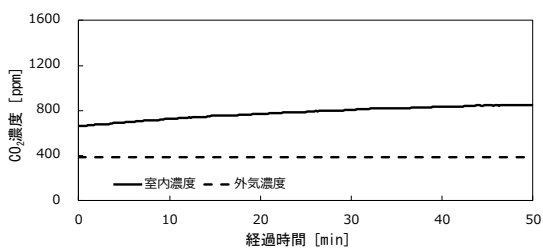


図 5-2 : CO₂ 濃度測定結果 D-3

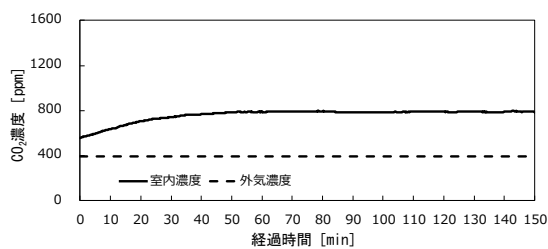


図 5-5 : CO₂ 濃度測定結果結果 E-3

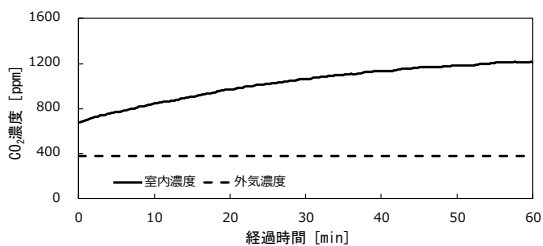


図 5-3 : CO₂ 濃度測定結果結果 D-7

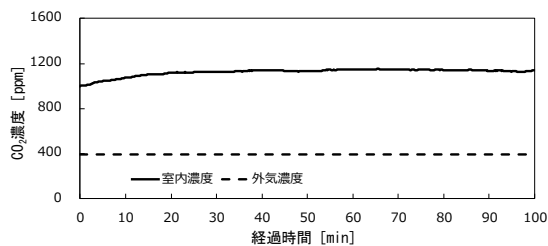


図 5-6 : CO₂ 濃度測定結果結果 E-6

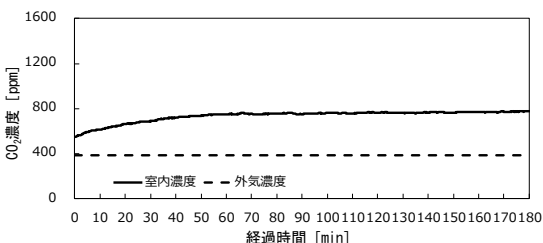


図 5-4 : CO₂ 濃度測定結果 E-1

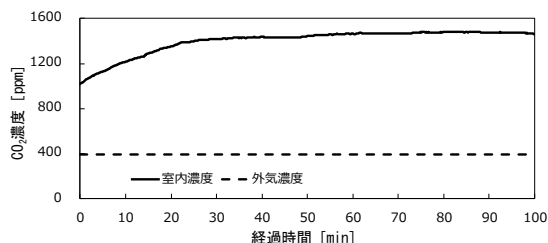


図 5-7 : CO₂ 濃度測定結果結果 E-8

室内にガス発生直後は換気量の計算を行っても精度が低いことが分かっているためガスを流し始めて 10 分以降のデータを用いて検討を行っている。また定常状態のデータを取得するために測定開始前にガスをまくことで室内濃度が早く定常状態になるようにした。CO₂ 濃度測定値は平均値から±50ppm 以下であることを確認した。

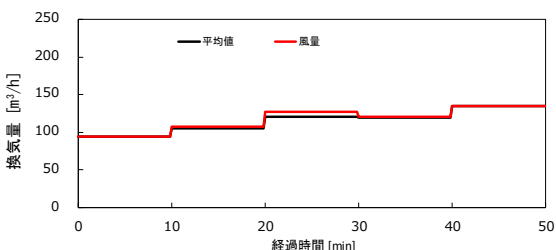


図 5-8 : 計算結果 D-3

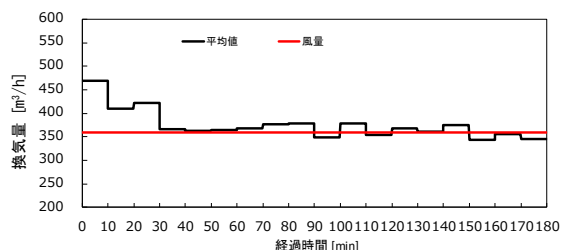


図 5-10 : 計算結果 E-1

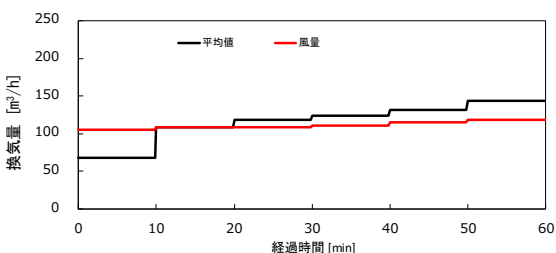


図 5-9 : 計算結果 D-7

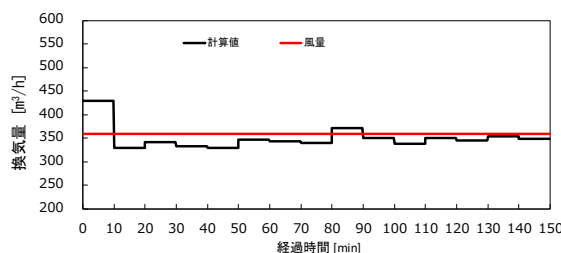


図 5-11 : 計算結果 E-3

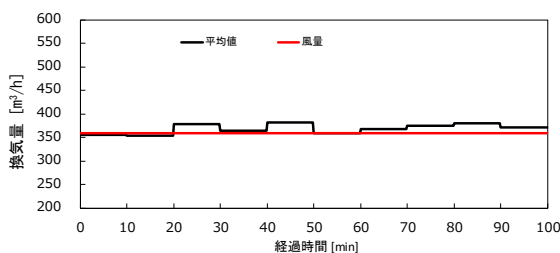


図 5-12：計算結果 E-6

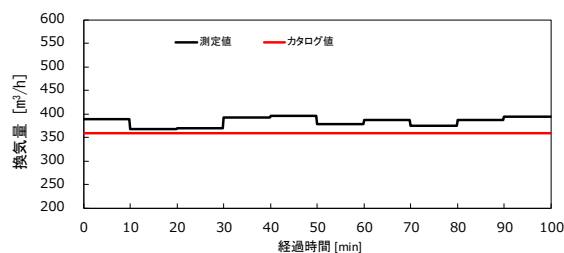


図 5-13：計算結果 E-8

隙間をふさいだ条件では、対象室の換気量は換気システムの風量 $360\text{m}^3/\text{h}$ を下回ることを確認した。また実（隙間をふさがない）条件で行った換気量測定では、風量 $360\text{m}^3/\text{h}$ を上回る結果となり、ふさいだ条件と逆の結果となった。これは実条件で測定をした場合、隙間からの漏気が多いことが考えられる。

単室実験の測定結果から得られた RMSE は、発生量が多くなるにつれて RMSE も大きくなる結果となり、実条件で隙間をふさいだ条件では、算出した平均換気量が風量より $30\text{m}^3/\text{h}$ 程度小さく、ふさがない条件の RMSE が小さい結果となった。

5.5 人間の呼気による換気量測定

単室における人間の呼気を用いた換気量測定を行い、精度確認を行った。

3章および4章と同様に CO_2 呼出量推定については CO_2 呼出量関係式^[5-7]、JIS^[5-2]、Persily^[5-8]の式および ASTM-12^[5-5]の式を用いて推定手法を行った。また Met 値推定については活動量計を用いる方法のほかに文献（ASHRAE^[5-9]および METs 表^[5-10]）に示されている値を用いて検討を行った。

5.5.1 測定概要

在室者数はケース A が 4 人で、ケース F が 8 人である。ケース A-3 については活動量計の装着者率 100%であるが、F-1～F-3 については装着者率 50%で測定を行っている。ケース F での在室者の行為は、2 人がタイピングで 6 人が勉強を行った。この時の活動量計装着者については、タイピング 2 人と勉強 2 人に活動量計を装着してもらい測定を行った。

室条件については、隙間をふさがずに換気量測定を行った。ほかの測定と同様に室内には拡散用のファンを用いることで一様拡散に近い条件で測定を行った。ファンは人の作業の邪魔にならない場所かつ給気口に向けて設置した。測定概要を表 5-4 に示す。

表 5-4 : 測定概要

ケース	在室人数 [人]	機械換気量 [m ³ /h]	測定時間 [分]	行為
A-3	4	100	60	椅座静位・勉強
F-1	8	360		勉強・タイプ
F-2				
F-3				

5.5.2 測定結果

人間の呼気に含まれる CO₂ を用いて換気量測定を行った。測定結果を表 5-6 に示す。CO₂ 濃度測定値から求めた CO₂ 濃度平均値を図 5-14～図 5-17 に、換気量計算結果を図 5-18～図 5-21 に示す。在室者の平均 Met 値を表 5-5 に示す。

ケース A-3 および F-3 については濃度が上昇傾向にあるデータであるため前後の時間で平均換気量の変化が大きい時もある結果となった。ケース F-1, F-2 については一時的に変化が大きいところがあるが、おおむね近い値を示す結果となった。A-3 では、関係式を用いて算出した平均換気量が最も近い値を示す結果となった。ケース F-1 および F-2 では、JIS および Persily の式を用いて算出した平均換気量の RSME が小さい結果となった。

活動量計から得られた Met 値は文献値よりも 0.1～0.2met 程度高い結果となった。これは活動量計の装着者率が 50%であったため全員の活動量を測定できていないことが理由だと考えられる。1 人に対して 1 つの活動量計を装着し、活動量を測定することで精度が向上すると考えられる。換気性状測定のように人数が増えることで個人の誤差は小さくなるが、このような誤差が生じるため測定では注意が必要である。

表 5-5 : 検討に用いた Met 値推定手法の値

	Met 値 推定手法	在室者							
		1	2	3	4	5	6	7	8
A-3	活動量計	1.07	1.03	1.05	1.06	-	-	-	-
F-1		1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
F-2		1.11	1.01	1.38	1.11	1.01	1.11	1.11	1.11
F-3		1.19	1.16	1.32	1.19	1.19	1.16	1.19	1.19
A-3	文献値	1.0	1.0	1.0	1.0	-	-	-	-
F-1		1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0
F-2		1.0	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0
F-3		1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0

表 5-6 : 計算結果 (Met 値推定手法 : 活動量計)

	換気量				RMSE			
	関係式	Persily	JIS	ASTM-12	関係式	Persily	JIS	ASTM-12
A-3	106.6	58.8	42.8	75.6	22.0	59.0	74.8	42.8
F-1	441.5	343.6	335.0	402.6	83.5	26.2	32.2	47.5
F-2	439.7	349.5	346.3	415.2	80.5	12.3	15.2	55.6
F-3	429.5	322.1	312.7	390.0	78.8	39.0	47.9	36.4

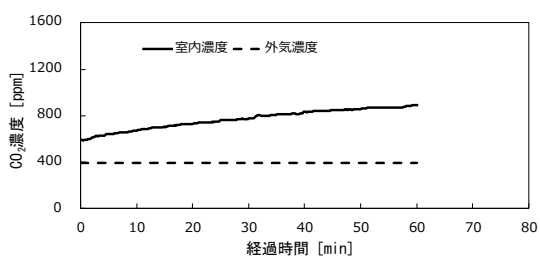


図 5-14 : CO₂ 濃度測定結果 A-3

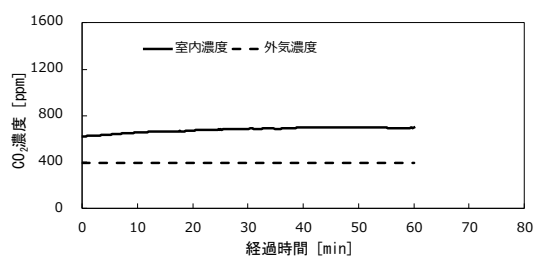


図 5-16 : CO₂ 濃度測定結果 F-2

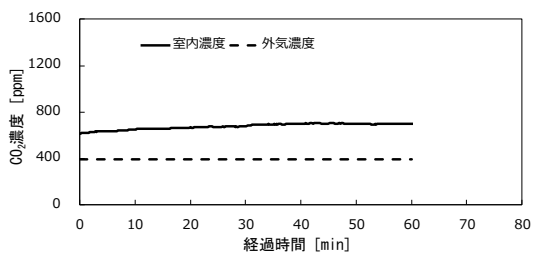


図 5-15 : CO₂ 濃度測定結果 F-1

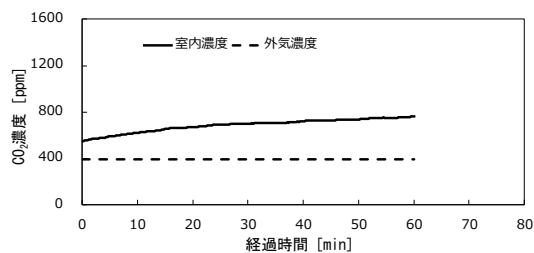


図 5-17 : CO₂ 濃度測定結果 F-3

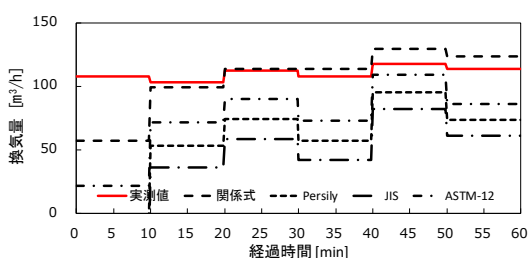


図 5-18 : 計算結果 A-3

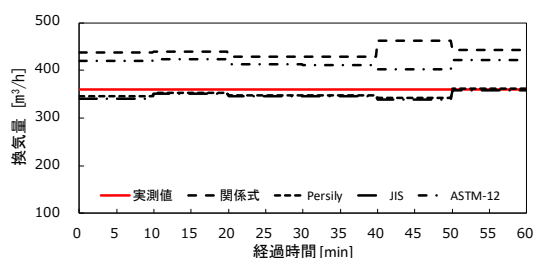


図 5-20 : 計算結果 F-2

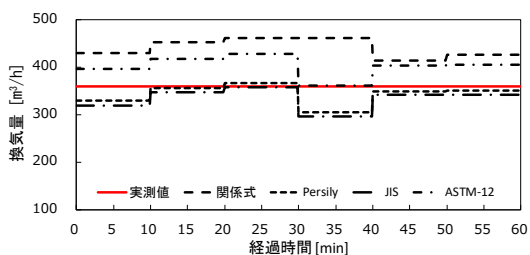


図 5-19 : 計算結果 F-1

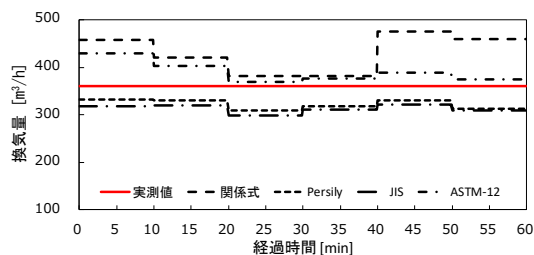


図 5-21 : 計算結果 F-3

ケース F では、隙間をふさがず測定を行ったためマスフローコントローラーの測定結果より漏気があり風量より平均換気量が多いと考えられる。したがって、実際の換気量は定格風量より多いと考えられる。これを検証するために今後は隙間をふさいだ条件での測定を行って確認する必要があるといえる。

前述した通り作業開始 10 分後からの CO₂ 濃度測定値を用いて計算を行ったが、マスフローコントローラーを用いた測定と同様に経過時間 20 分までの条件で算出値が大きく離れているケースがあった。ケース F は装着者率が 50% であり在室者の活動量を把握できなかったため平均値で検討を行ったのが一因だと考えられる。

Met 値の推定手法を文献値とした場合についても検討を行った。計算結果を表 5-7 に、計算結果を図 5-22～図 5-25 に示す。勉強内容が読書であったため Met 値を 1.0 と設定した。

表 5-7：計算結果（Met 値推定手法：文献値）

	換気量				RMSE			
	関係式	Persily	JIS	ASTM-12	関係式	Persily	JIS	ASTM-12
A-3	101.9	58.8	41.7	74.2	23.0	59.0	76.2	44.7
F-1	423.2	323.7	315.9	379.6	63.8	41.5	48.5	28.9
F-2	389.8	315.1	315.2	375.6	31.1	45.9	45.7	18.2
F-3	338.8	262.0	254.9	320.2	30.1	99.0	106.0	43.9

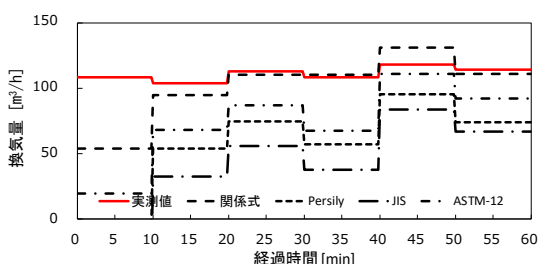


図 5-22：計算結果 A-3

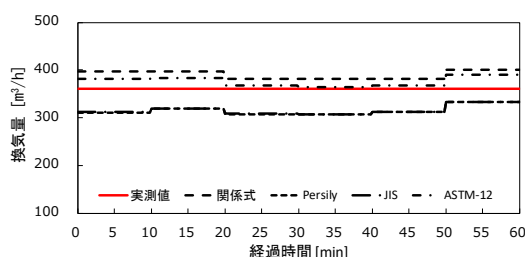


図 5-24：計算結果 F-2

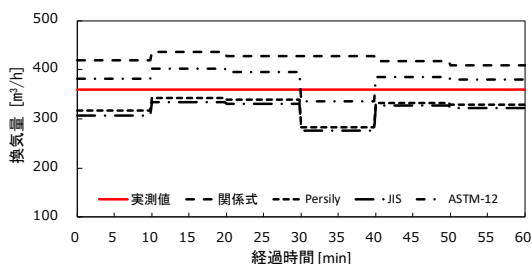


図 5-23：計算結果 F-1

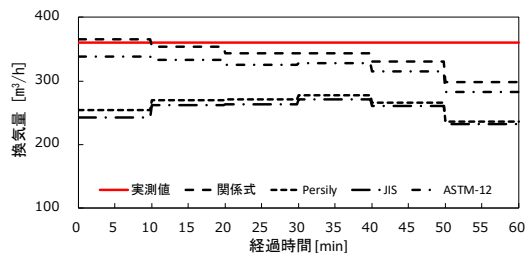


図 5-25：計算結果 F-3

CO₂呼出量関係式または ASTM-12 の式を用いて算出した平均換気量が風量に近い結果となった。これは、活動量計（平均値）の Met 値より文献値で設定した Met 値の値がほとんどのケースで下回ったためである。

5.6 おわりに

本章では、人間の呼気を用いた発生法とマスフローコントローラーを用いた機械発生法による換気量測定の精度を明らかにすることを目的に換気量測定法について説明し、人間の呼気を用いた換気測定を単室空間で行い、単室における人間の呼気を用いた換気量測定の測定結果を述べた。また前章と同様に各 CO₂呼出量推定手法と Met 値推定手法の選択による組み合わせで推定精度が向上するの検討を行った。

マスフローコントローラーを用いて換気量測定を行った結果、おおむね平均換気量を推定できることを確認した。また人間の呼気を用いた換気量測定では、活動量の推定精度が大きく影響していることが確認できた。活動量計（平均値）と文献値の Met 値の差は 0.1～

0.2met であったが、計算結果は大きく異なる結果となり、在室者の Met 値推定の重要性が再確認できる結果となった。

このことから人間の呼気を用いた換気量測定の場合は、機械発生に比べて人体発熱などの要因から隙間による漏気量の影響が大きいと考えられる。

本検討では、実空間に近い条件で測定を行った。人間の呼気を用いた測定では隙間をふさいだ検討を行っていないため今後はふさいだ条件で測定して風量と比較を行い、在室者による影響について検討を行う。

参考文献 <第5章>

- [5-1] 社団法人 空気調和・衛生工学会：トレーサガスを用いた単室の換気量測定法 SHASE-S 116-2011 Standard, 空気調和・衛生工学会規格, 2012.2.20
- [5-2] JIS A14061974 室内換気量測定法（炭酸ガス法）, 2010
- [5-3] 石川和良 倉渕隆 嵐口晃宏 水谷泰三：トレーサガスを用いた単室の換気量測定に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 日本建築学会, p709-710, 2003年9月
- [5-4] 藤川光利 吉野博 高木理恵 奥山博康 林基哉 菅原正則：居住者の呼気を用いた多数室換気量測定法に関する実験的研究, 日本建築学会環境系論文集, 第75巻 第652号, 日本建築学会, pp499-508, 2010.6
- [5-5] 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
- [5-6] 厚生労働省：平成27年国民健康・栄養調査報告第2部身体状況調査の結果第12表, pp112, 取得日：2017年6月21日
- [5-7] 田島昌樹 井上貴之 大西裕治：換気測定のための在室者の二酸化炭素呼出量の推定, 日本建築学会環境系論文集, 第81巻 第728号, 日本建築学会, pp885-892, 2016.10
- [5-8] A.Persily, L de jonge : Carbon dioxide generation rates for building occupants, The Authors. Indoor Air 2017, 14 March 2017
- [5-9] 2013 ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS I-P Edition, ASHRAE Research, 2013
- [5-10] 改訂版『身体活動のメッツ（METs）表』, 国立健康・栄養研究所

第 6 章

実測に基づく換気性能評価の試行

第6章 実測に基づく換気性能評価の試行

6.1 はじめに

本論文では、第3章にCO₂呼出量推定手法およびMet値推定手法について精度確認や比較結果を示し、第4章と第5章では人間の呼気を用いた単室実験による換気性状測定および換気量測定の測定結果について記述した。その結果、呼気に含まれる二酸化炭素をトレーサとすることで十分に推定することが出来ることを確認した。このことから測定による不確かさおよび誤差を推定することで室の換気量を評価することが出来ると考えられる。

本章では、人間の呼気を用いた場合の居室の換気量測定および換気性状測定の精度に関する評価を目的に測定における不確かさおよび誤差の同定について検討を行ったので報告する。

6.2 不確かさおよび誤差

前章までで実測に基づく人間の呼気を用いた換気量推定および室内CO₂濃度推定に関する精度をまとめた。本章では、不確かさおよび誤差の同定にあたり室条件の定常状態と非定常状態に分けて検討を行った。定常状態については時間による変化を考慮する必要がないため定常の式（後述の式(6-10)）を用いて不確かさの伝播則より不確かさの算出を行った。非定常状態については計算値が回帰式などによる近似解であるため誤差伝播の法則による偏微分を用いた計算では算出することができないためモンテカルロ法による繰り返し計算から算出する検討を行った。

モンテカルロ法は乱数を取り扱う技術の総称であり、計算は四則演算で行われ簡単に計算することが出来るため本研究ではこの手法を用いて不確かさの算出を行った。各誤差を乱数として与えて計算を行った。

偶然誤差は測定でランダムに発生するため取扱説明書に示されている精度または測定範囲を参考に値を設定した。測定器の誤差は系統誤差や偶然誤差を全て含めた誤差であるため測定値の結果から偶然誤差と系統誤差の設定を行った。

換気量およびCO₂濃度を算出するために用いる項目で誤差が生じると考えられる項目（以降、誤差要因）について系統誤差および偶然誤差の2種類に分けて検討を行った。本検討で誤差要因の考えられる項目を表6-1に示し、計算におけるCO₂呼出量、CO₂濃度および換気量に関する誤差要因を表6-2、表6-3、表6-4に示す。

本章では、標準誤差の検討も行ったが、基本的には不確かさで評価を行っているため本論文では不確かさについて主に記す。

在室者属性およびCO₂呼出量測定値は被験者実験のデータを無作為に抽選し、ケースを設定して検討を行った。抽出した在室者が同じ人である場合、把握できていない誤差の要

因が増す可能性があったため同じ人が被らないように抽選した。各項目の標準偏差（不確かさ）を設定して信頼区間を算出した。実現象では、把握しきれない誤差要因があるため理論計算による簡単な計算を行った。

表 6-1：誤差要因の項目

項目	目的変数	説明変数	誤差			
			系統誤差	分布	偶然誤差	分布
CO ₂ 濃度(室内)	正規乱数 又は 二項乱数	一様乱数 区間 [0,1]	測定器	正規分布, 一様分布	測定	正規分布
CO ₂ 濃度(屋外)			測定器	正規分布, 一様分布		正規分布
有効室容積			—	—		正規分布
換気量			測定器	正規分布	人体影響	正規分布
CO ₂ 呼出量			式(モデル)	正規分布		不明
マスフローコントローラー			測定器	正規分布	拡散	正規分布
Met 値			装着者の動き	—	測定	正規分布, 二項分布
身長			測定器	正規分布		正規分布
体重			測定器	正規分布		正規分布
RQ 値			—	—	人体影響	正規分布
気温			測定器	正規分布	測定	正規分布
気圧			測定器	正規分布		正規分布

表 6-2：CO₂呼出量関係式の不確かさおよび誤差の要因

項目	体重	身長	Met 値	性別	年齢
測定の有無	有	有	有*1	無*2	無*2
分布	正規分布	正規分布	正規分布, 二項分布	—*3	—*3

*1：活動量計や脈拍数計を用いることで推定ができる

*2：聞き取りで値を把握することができる

*3：定数であるため不確かさ誤差はないとする

表 6-3：CO₂濃度推定の不確かさおよび誤差の要因

項目	人体要因	室内外要因		
	CO ₂ 呼出量関係式	室外 CO ₂ 濃度	換気量	有効室容積
測定の有無	無*1	有	有*2	有*3
分布	正規分布	正規分布	正規分布	正規分布

*1：表 6-2 の項目および推定式より算出され、モデル(推定式)の誤差も含む

*2：単室条件など吸排気が全て把握できている時のみ測定が可能である

*3：計算式より算出することができる

表 6-4：換気量推定の不確かさおよび誤差の要因

項目	人体要因	室内外要因		
	CO ₂ 呼出量関係式	室外 CO ₂ 濃度	室内 CO ₂ 濃度	有効室容積
測定の有無	無*1	有	有	無*2
分布	正規分布	正規分布	正規分布	正規分布

*1：表 6-2 の項目および推定式より算出され、モデル(推定式)の誤差も含む

*2：計算式より算出することができる

不確かさおよび誤差の推定は理論計算と実測に基づく計算の2種類とし、理論計算ではさらに式のみと式を用いた測定法による計3種類の計算を行った。理論計算の①および②では、誤差は常に一定の値が発生しているとして計算を行った。③の実測条件の数値計算については一定の誤差と瞬時の誤差の2つが発生していると仮定して計算を行った。またマスフローコントローラーを用いた機械発生法についても検討を行った。

- ①式のみ誤差 (理論計算)
- ②式を用いた測定法 (理論計算)
- ③式を使った測定 (実測と同様の条件)

非定常状態の評価については理論計算と実測データを用いた確率分布に基づく検討を行った。以降、理論計算に基づくものを理論モデル、実測条件に基づくものを実測モデルと記す。実測モデルの不確かさについて精査する際は、理論計算の値を用いて理論モデルと比較を行った。

6.2.1 二酸化炭素呼出量推定値

第3章では、ダグラスバッグ法による被験者実験の測定結果から Met 値および CO₂ 呼出量の不確かさおよび標準誤差を算出した。定常状態では換気量および CO₂ 濃度の不確かさおよび誤差を誤差伝播の法則より算出した。また、発生量である CO₂ 呼出量についても誤差伝播の法則より各推定式を偏微分し、算出を行った。計算の流れを表 6-1 に示し、三章より CO₂ 呼出量関係式^[6-1]を用いることで CO₂ 呼出量を精度よく推定できることを確認できたので、本章では CO₂ 呼出量関係式による検討を記す。他の CO₂ 呼出量を推定する式 (ASTM^[6-2]や JIS^[6-3]など) を用いた場合の CO₂ 呼出量の不確かさ算出については付録 D に記す。

CO₂ 呼出量関係式および体表面積を算出する式を下記に再度示す。

$$P_{CO_2} = 1.601 \times 10^{-4} \times (60.63 \times A_D \times Met \times C_g \times C_a) \quad (2-38 \text{ (再掲)})$$

$$A_D = 0.007246 \times W^{0.425} \times H^{0.725} \quad (2-27 \text{ (再掲)})$$

ここでは、

P_{CO_2} : CO₂呼出量 [m³/h] A_D : 体表面積 [m²]

Met : エネルギー代謝率 [-]

C_a : 年齢係数 (表 2-2 参照)

C_g : 性別係数 女性 0.73 男性 1.00

W : 体重 [kg] H : 身長 [cm]

不確かさおよび誤差の伝播則を以下に示す。下記では不確かさの伝播則に基づく理論式を示すが、誤差の場合は不確かさの変数を誤差の変数に置き換えることで計算が可能である。

表 6-1：誤差算出の流れ

<p>①基礎代謝量もしくは体表面積の不確かさ誤差を算出する。 項目：体重 ($\delta_w, u(w)$), 身長 ($\delta_H, u(w)$)</p>
<p>②CO₂呼出量の誤差を算出する。 項目：体表面積($u(A_D), \delta_{AD}$), Met 値($u(Met), \delta_{Met}$), 呼吸商($\delta_{RQ}, u(RQ)$), 基礎代謝量($u(BMR), \delta_{BMR}$), 気温($u(K), \delta_K$), 気圧($u(p), \delta_p$)</p>

CO₂ 呼出量関係式を用いて CO₂ 呼出量を算出する際の不確かさでは、体表面積が体重および身長から算出されるため体重および身長の不確かさの算出を行い、次に CO₂ 呼出量の不確かさを算出する。

関係式に用いられる体表面積 A_D の式は高比良の式 (2-22) [6-4]であり、体重と身長の変数について偏微分を行い、身長および体重の不確かさを算出する。身長 H の不確かさを算出する場合は (6-1) となる。体重 W の不確かさを算出する場合は式 (6-2) となる。体表面積の不確かさ u_{AD} は式 (6-3) から求められる。

$$\frac{\partial A_D}{\partial H} u(A_D) = 0.007246 \times 0.725 \times H^{-0.275} \times W^{0.425} \times u_H \quad (6-1)$$

$$\frac{\partial A_D}{\partial W} u(A_D) = 0.007246 \times 0.425 \times H^{-0.575} \times W^{0.725} \times u_W \quad (6-2)$$

$$u(A_D) = \sqrt{\left(\frac{\partial A_D}{\partial H} u(A_D)\right)^2 + \left(\frac{\partial A_D}{\partial W} u(A_D)\right)^2} \quad (6-3)$$

CO₂ 呼出量推定値の不確かさ u_p の計算では、体表面積およびエネルギー代謝率 Met の不確かさが伝播する。 Met 値の不確かさは、被験者実験の測定結果から得られた RMSE を用いて計算値の不確かさ u_p を算出する。計算値の不確かさ $u(P_i)$ を算出するにあたって係数である性別 C_g および年齢 C_a は定数として取り扱った。個々の不確かさを式 (6-4)、式 (6-5) で算出し、全体の不確かさを式 (6-6) で算出する。実際の空間では在室者数が複数にいるため式 (6-7) を用いて合計の不確かさ (合成標準不確かさ) $U_c(m)$ を算出する。合成標準不確かさに包含係数 k (1.96 : 信頼水準 95%) をかけて式 (6-8) の拡張不確かさを算出する。

$$\frac{\partial P_i}{\partial A_D} u(A_D) = 1.601 \times 60.63 \times Met \times u(A_D) \quad (6-4)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial Met} u(Met) = 1.601 \times 60.63 \times A_D \times u(Met) \quad (6-5)$$

$$u(P_i) = \sqrt{\left(\frac{\partial P_i}{\partial A_D} u(A_D)\right)^2 + \left(\frac{\partial P_i}{\partial Met} u(Met)\right)^2} \quad (6-6)$$

$$U_c(m) = \sqrt{(u(P_1))^2 + (u(P_2))^2 + \dots + (u(P_n))^2} \quad (6-7)$$

$$U = k \times U_c(m) \quad (6-8)$$

ここでは、

W : 体重 [kg]	H : 身長 [cm]
A_D : 体表面積 [m ²]	BMR : 基礎代謝量 [W]
Met : エネルギー代謝率 [-]	K : 気温 [K]
p : 大気圧 [hPa]	RQ : 呼吸商 [-]
P_i : CO ₂ 呼出量推定値 [m ³ /h]	$U_c(x)$: 合成標準不確かさ [m ³ /h]
k : 包含係数 [-]	U : 拡張不確かさ [m ³ /h]

6.2.2 誤差伝播の法則

換気量および室内 CO₂ 濃度の定常状態での誤差伝播に関する検討を行った。単室の定常状態について換気量、ガス濃度および発生量は式 (6-9) で示され、トレーサガスが CO₂ 濃度などの普段から空気中に存在するものの場合、換気量は式 (6-10)、室内 CO₂ 濃度は式 (6-11) を用いて算出される。

$$Q = \frac{m}{c} \quad (6-9)$$

$$Q = \frac{m}{c_i - c_0} \quad (6-10)$$

$$C_i = \frac{m}{Q} + C_0 \quad (6-11)$$

ここでは、

Q : 換気量 [m ³ /h]	C : ガス濃度 [m ³ /m ³]
C_i : 室内の CO ₂ 濃度 [m ³ /m ³]	C_0 : 屋外の CO ₂ 濃度 [m ³ /m ³]
m : 発生量 [m ³ /h]	

発生量である CO₂ 呼出量推定値に関する CO₂ 濃度の定常状態の誤差伝播を算定である、ここでは CO₂ 呼出量の誤差の計算について推定式に用いる体重や身長、 Met 値から計算を行うべきであるが、今回は被験者実験から得られた RMSE を用いて検討を行った。

(1) 二酸化炭素濃度推定値

室内 CO₂ 濃度の不確かさの算出は発生量、換気量および室外濃度に不確かさがあり、定常の式 (6-11) を各変数で偏微分した式 (6-12)、(6-13)、(6-14) より算出し、合計の不確かさを式 (6-15) から求める。

$$\frac{\partial c_i}{\partial m} u(m) = \frac{1}{Q} U_c(m) \quad (6-12)$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial Q} u(Q) = -\frac{1}{(Q)^2} u(Q) \quad (6-13)$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial C_0} u(C_0) = u(C_0) \quad (6-14)$$

$$u(C_i) = \sqrt{\left(\frac{\partial C_i}{\partial m} u(m)\right)^2 + \left(\frac{\partial C_i}{\partial Q} u(Q)\right)^2 + \left(\frac{\partial C_i}{\partial C_0} u(C_0)\right)^2} \quad (6-15)$$

(2) 換気量推定値

換気量の不確かさの算出は発生量、室内濃度および室外濃度に不確かさがあり、定常の式(6-10)を各変数で偏微分した式(6-16)、(6-17)、(6-18)より算出し、合計の不確かさを式(6-19)から求める。

$$\frac{\partial Q}{\partial m} u(m) = \frac{1}{C_i - C_0} U_c(m) \quad (6-16)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial C_i} u(C_i) = -\frac{m}{(C_i - C_0)^2} U_c(C_i) \quad (6-17)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial C_0} u(C_0) = \frac{m}{(C_i - C_0)^2} U_c(C_0) \quad (6-18)$$

$$u(Q) = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial m} u(m)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial C_i} u(C_i)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial C_0} u(C_0)\right)^2} \quad (6-19)$$

6.2.3 モンテカルロ法による繰り返し計算

本節では、本検討で行ったモンテカルロ法を用いた繰り返し計算(以降、数値計算と示す)について説明する。理論的な誤差および不確かさを算出することを目的に、理論モデルによる数値計算を行った。また実現象に近い条件で実測モデルによる計算を行い、不確かさの計算を行った。

数値計算では反復回数を1000回とした。計算では乱数を誤差として発生させて計算を行った。ここでの乱数はランダムな値であり、計算機内部で随時発生させる疑似乱数を示す。

疑似乱数の算出方法はいくつかあるが、本検討ではExcelの拡張機能VBA(Visual Basic for Applications)で算術を行い、ランダム関数を用いて区間[0, 1]の一樣乱数を算出して検討を行った。計算で用いる乱数については目的変数を正規乱数または二項乱数とし、説明変数を一樣乱数(区間[0,1])としてExcelの関数であるNORM.DIST(平均値と標準偏差から正規分布確率を算出する)およびBINOM.DIST(成功数と試行回数、成功率から二項分布確率を算出する)を用いて乱数を算出した。疑似乱数は本当にランダムであるのか検定を行う必要があり、本検討ではカイ二乗検定を行って一樣乱数であることを確認したのち正規乱数または二項乱数を算出した。カイ二乗検定の分割数は10とした。

数値計算の手順については図6-1に、Met値の正規乱数および二項乱数の算出手順については図6-4に、その他の正規乱数の算出手順を図6-5に示す。図6-1で示している処理①は一樣乱数を発生させる流れで、処理②はカイ2乗検定の流れを示している。

検討した誤差要因については表6-1に示している。

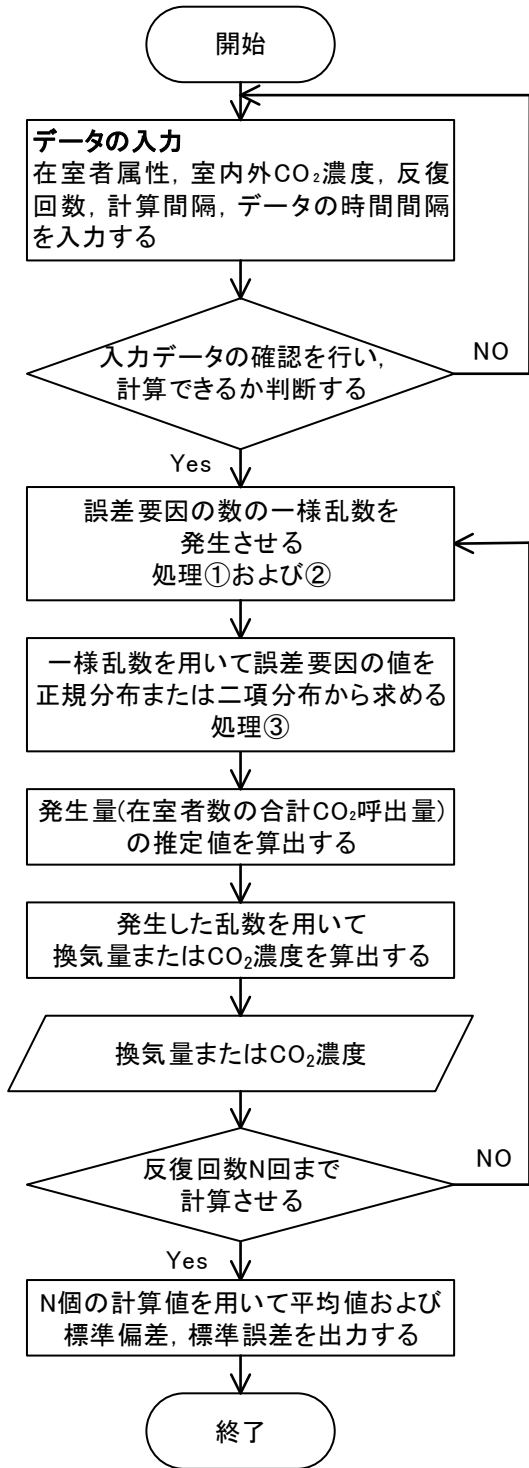


図 6-1 : 数値計算に関するフロー図

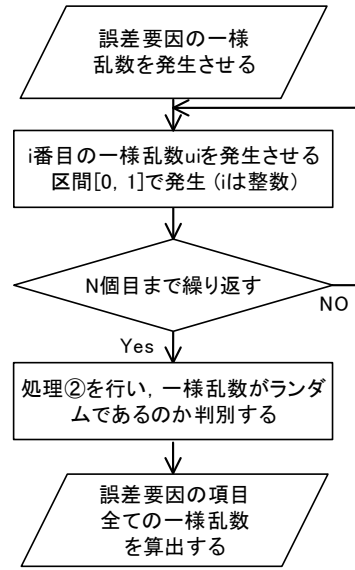


図 6-2 : 一様乱数に関するフロー図 (処理①)

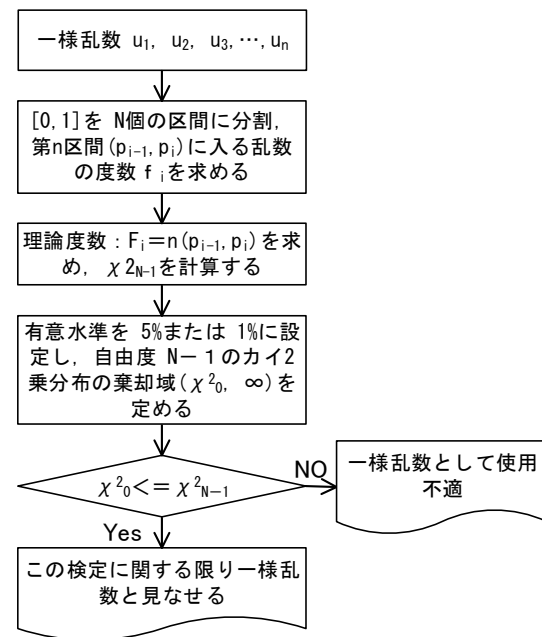


図 6-3 : χ^2 乗検定のフロー図 (処理②)

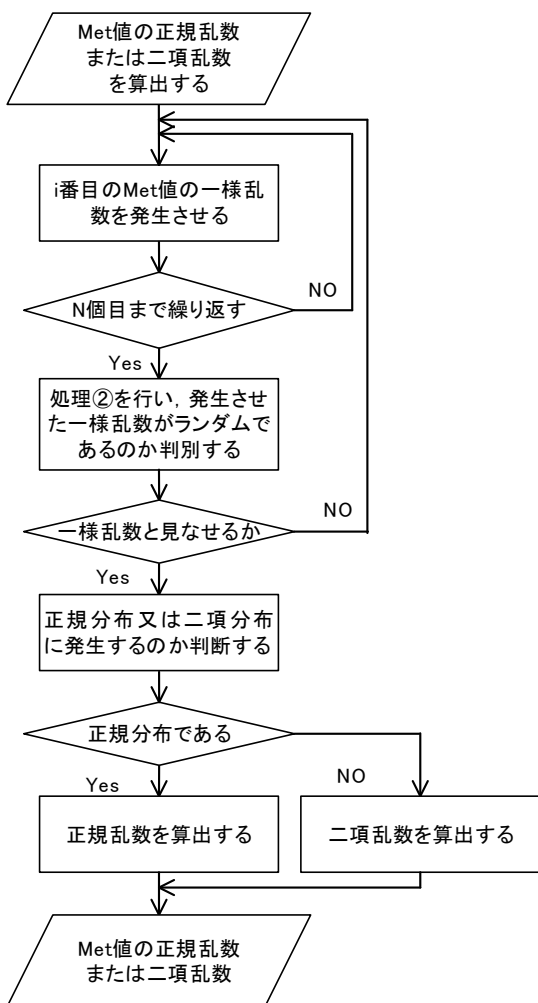


図 6-4 : Met 値の正規、二項乱数のフロー図

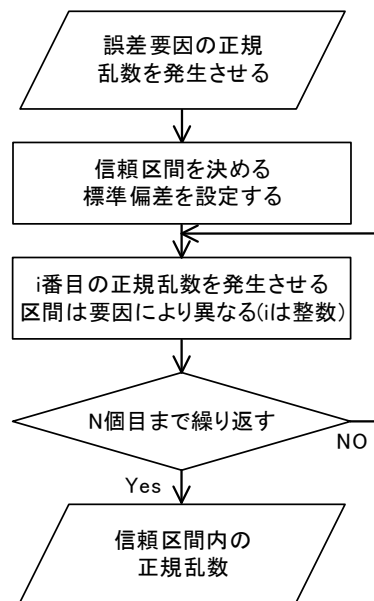


図 6-5 : 誤差要因の正規乱数のフロー図

計算では、在室者数、室容積および活動量推定手法を項目として選択できるようにした。図 6-6 に CO₂ 濃度計算の選択シートを示し、図 6-6 に換気量計算の選択シートを示す。

Met	在室者数	室容積	初期室内CO2濃度	CO2濃度計算に用いるデータ数	反復回数	データの時間間隔	活動量測定方法	乱数発生させる番号	呼出量に対して補正を行いますか	計算過程の値を算出しますか	CO2濃度
1	1	100	0.0004	1	1000	60	身体活動のMETs表	1番	し/え	NO	674
1	1	100	0.0004	1	1000	60	身体活動のMETs表	1番	し/え	NO	692
1	1	100	0.0004	1	1000	60	身体活動のMETs表	1番	し/え	NO	710
1	1	100	0.0004	1	1000	60	身体活動のMETs表	1番	し/え	NO	729
1	1	100	0.0004	1	1000	60	身体活動のMETs表	1番	し/え	NO	749
1	1	100	0.0004	1	1000	60	身体活動のMETs表	1番	し/え	NO	768
1	1	100	0.0004	1	1000	60	身体活動のMETs表	1番	し/え	NO	788
1	1	100	0.0004	1	1000	60	身体活動のMETs表	1番	し/え	NO	807
1	1	100	0.0004	1	1000	60	身体活動のMETs表	1番	し/え	NO	826
1	1	100	0.0004	1	1000	60	身体活動のMETs表	1番	し/え	NO	844
1	1	100	0.0004	1	1000	60	身体活動のMETs表	1番	し/え	NO	863
1	1	100	0.0004	1	1000	60	身体活動のMETs表	1番	し/え	NO	882
1	1	100	0.0004	1	1000	60	身体活動のMETs表	1番	し/え	NO	900
1	1	100	0.0004	1	1000	60	身体活動のMETs表	1番	し/え	NO	918
1	1	100	0.0004	1	1000	60	身体活動のMETs表	1番	し/え	NO	937
1	1	100	0.0004	1	1000	60	身体活動のMETs表	1番	し/え	NO	951
1	1	100	0.0004	1	1000	60	身体活動のMETs表	1番	し/え	NO	967
1	1	100	0.0004	1	1000	60	身体活動のMETs表	1番	し/え	NO	983
1	1	100	0.0004	1	1000	60	身体活動のMETs表	1番	し/え	NO	999
1	1	100	0.0004	1	1000	60	身体活動のMETs表	1番	し/え	NO	1014

図 6-6 : CO₂ 濃度計算の選択シート

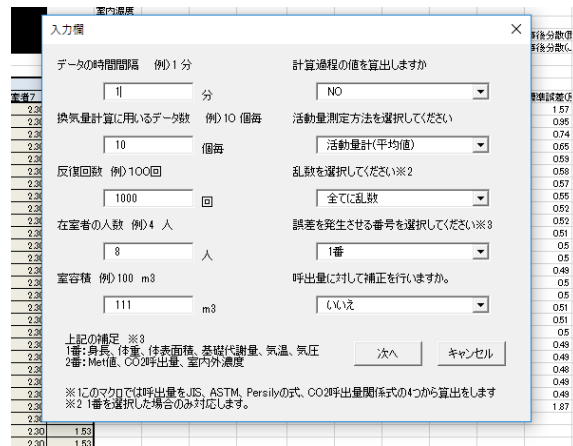


図 6-7：換気量計算の選択シート

1000 回の繰り返し計算を行ったのち期待値（本検討では中央値）を算出し、式（6-20）より不確かさを算出した。本研究では反復回数を全てのケースで 1000 回としたが、計算時間がかからず、実際のケースに置き換えても十分な数となる反復回数 1000 回とした。

在室者の CO₂ 呼出量を算出する際に二項分布を用いて Me 値の範囲を設定しているため Met 値が 1.0 に近い条件では、大きく計算されてしまうため数値計算で算出した CO₂ 濃度および換気量にはモデルによる誤差が生じるため誤差なしの条件で計算した計算値から推定値（中央値）を引いた値をモデル誤差（式（6-21））と定義して不確かさと合計して合成標準不確かさ Sc を（式（6-22））より算出した。合成標準不確かさに係数をかけて信頼水準 95% の拡張不確かさを（式（6-23））算出した。係数の値は 1.96 とした。

$$\sigma_m = |\bar{x} - x_0| \tag{6-20}$$

$$U(C_i) = \sqrt{(u(C_i))^2 + (\sigma_m)^2} \tag{6-21}$$

$$S_c = \sqrt{(u(C_i))^2 + (\sigma_m)^2} \tag{6-22}$$

$$U = kS_c \tag{6-23}$$

ここでは、

- | | |
|-------------------------------------|------------------------|
| σ_m : モデル誤差 | \bar{x}_i : i 番目の中央値 |
| x_0 : i 番目の計算値(誤差なし) | n : 反復回数 |
| $u(C_i)$: 不確かさ(CO ₂ 濃度) | S_c : 合成標準不確かさ |
| U : 拡張不確かさ | |

[1] 体重および身長

体重および身長については、計算では系統誤差で正規分布として発生すると仮定した。実験や実測では、体重計を用いて在室者の体重を測定し、測定値から1.0kgを引いた値を在室者の体重とした。これは、財布や携帯などを除いた服装の重さが測定値に含まれていたため服の重さを1.0kgとした。体重計の精度は表2-9に示した通り0kg～67.5kgでは誤差が±0.2kg、67.5kg～100.0kgでは誤差が±0.3kgであるが、服装の誤差を考慮して体重の標準偏差および標準誤差を1.2kgとした。

測定時の正確な身長を把握することは困難であるため、直近の健康診断の身体測定の値を用いた。様々な誤差が含まれていると考えられるため、値は国民健康・栄養調査報告^[6-5]（表6-2に示す）に示されている各年齢の体重および身長の標準偏差と人数から算出を行い、標準偏差を比較し十分に小さい値であることを確認して標準偏差を1.0cmとした。

身長に関する不確かさ（標準偏差）は各年齢の標準偏差より小さい結果となったが、個人差の方が大きいことは間違いないので計算では問題ないと考えられる。体重もの同様であり、測定器の精度より大きい値となっている。

体重および身長の標準偏差を表6-3、表6-4に示す。算出した確率分布および測定値より算出した確率分布を図6-8～図6-11に示す。

表 6-2：平成28年度国民健康・栄養調査報告に記されている身長および体重^[6-5]

	男 性						女 性					
	身 長 (cm)			体 重 (kg)			身 長 (cm)			体 重 (kg)		
	人数	平均値	標準偏差	人数	平均値	標準偏差	人数	平均値	標準偏差	人数	平均値	標準偏差
18歳	78	170.3	5.3	78	60.8	8.7	59	157.5	6.9	56	50.7	8.6
19歳	59	171.3	5.1	59	62.6	10.1	58	155.9	4.9	55	50.8	6.5
20歳	46	172.3	6.9	46	65.7	11.1	56	159.5	5.0	53	53.5	6.6
21歳	53	172.0	5.0	52	66.1	14.9	56	157.9	6.6	54	50.9	7.0
22歳	57	170.2	7.9	57	66.5	12.4	70	158.5	6.5	69	53.6	10.5
23歳	50	171.4	5.9	50	69.2	12.1	58	157.4	5.3	58	51.8	11.4
24歳	64	173.0	5.1	62	69.9	11.8	59	157.3	6.7	58	52.1	9.3
25歳	48	170.5	5.0	47	64.5	12.3	56	155.2	5.0	56	50.2	6.7
26-29歳	256	171.4	5.5	255	68.3	12.4	271	158.8	5.1	268	52.8	8.7
30-39歳	984	171.5	5.6	978	69.2	11.1	1,129	158.1	5.1	1,125	53.6	8.4
40-49歳	1,314	171.4	5.4	1,308	70.9	11.4	1,549	157.9	5.3	1,539	55.5	9.8
50-59歳	1,229	169.8	5.4	1,226	69.7	10.0	1,580	156.7	4.9	1,576	55.2	8.7
60-69歳	2,037	167.0	5.4	2,033	66.6	9.0	2,444	153.4	4.8	2,443	53.9	7.8

表 6-3：体重・身長の標準偏差（各年齢の男女）

		男 性		女 性	
		身 長 (cm)	体 重 (kg)	身 長 (cm)	体 重 (kg)
標準偏差	18-29歳	5.82	11.87	5.84	8.54
	30-49歳	5.50	11.25	5.20	9.13
	50-69歳	5.40	9.51	4.85	8.26

表 6-4：体重および身長標準偏差および標準誤差（各年齢の男女）

	設定値	
	身長 [cm]	体重 [kg]
標準偏差	1.0	1.2
標準誤差	1.0	1.2

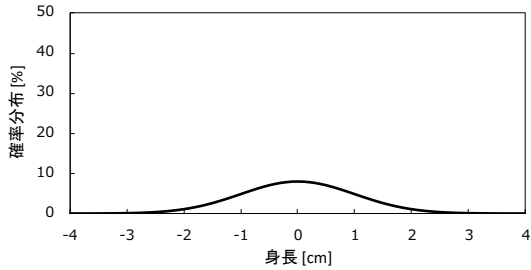


図 6-8：身長確立分布

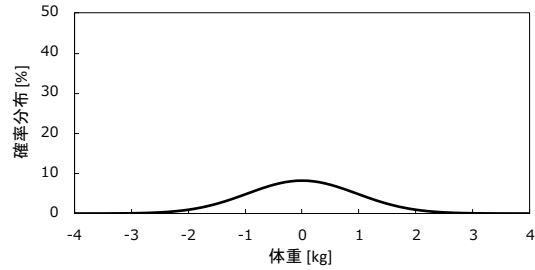


図 6-10：体重確立分布

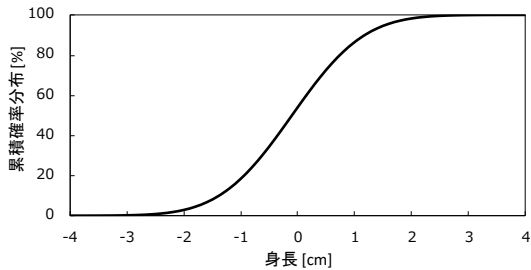


図 6-9：身長累積確立分布

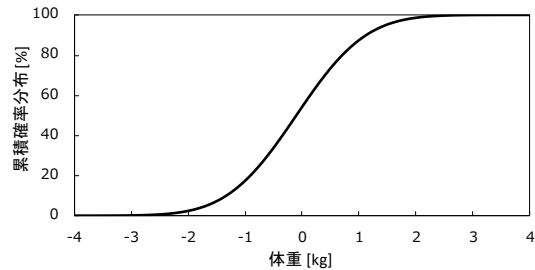


図 6-11：体重累積確立分布

[2] 空気温度および大気圧

Persily の式では空気温度および大気圧が変数として用いられているため確率分布の算出は取扱説明書に示されている測定器の値を参考に設定した。測定器の測定精度を表 6-5 に示す。また、実際に測定した値を用いて標準偏差および標準誤差を算出して偶然誤差および系統誤差の確率分布を測定値から簡易的に求めた。

空気温度および大気圧に関する測定器の精度を表 6-5、標準偏差を表 6-6、表 6-7 に示す。算出した確率分布および測定値より算出した確率分布を図 6-12～図 6-18 に示す。

表 6-5：測定器の精度^[6-6]（空気温度，気圧）

	測定範囲	測定精度
空気温度 (°C)	0～50	±0.3
大気圧 (hPa)	750～1100	±1.5

表 6-6：空気温度 (°C) の標準偏差および標準誤差

	測定値		設定値		
			理論モデル	実測モデル	
	系統	偶然		系統	偶然
標準偏差 [°C]	0.17	0.13	0.15	0.15	0.15
標準誤差 [°C]	0.08	0.01	0.1	0.1	0.05

表 6-7：大気圧 (hPa) の標準偏差および標準誤差

	測定値		設定値		
	系統	偶然	理論モデル	実測モデル	
				系統	偶然
標準偏差 [hPa]	1.92	0.47	0.75	0.75	0.5
標準誤差 [hPa]	1.36	0.02	0.15	0.15	0.1

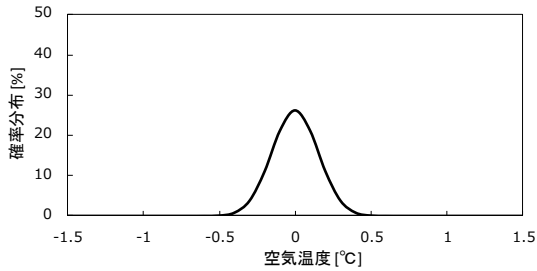


図 6-12：空気温度_理論モデル

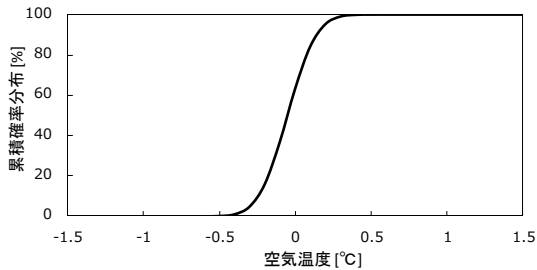


図 6-13：空気温度_理論モデル

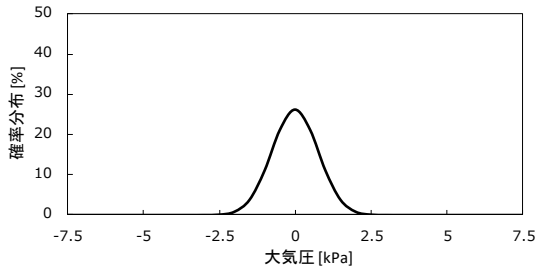


図 6-14：大気圧_理論モデル

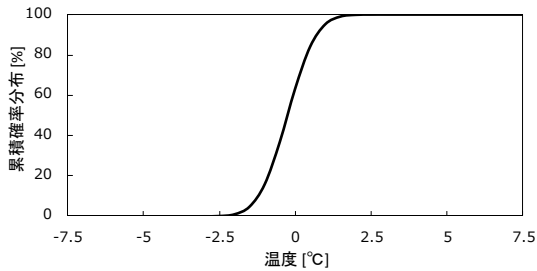


図 6-15：大気圧_理論モデル

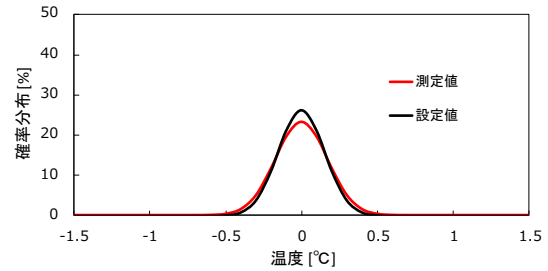


図 6-16：空気温度 (偶然誤差)_実測モデル

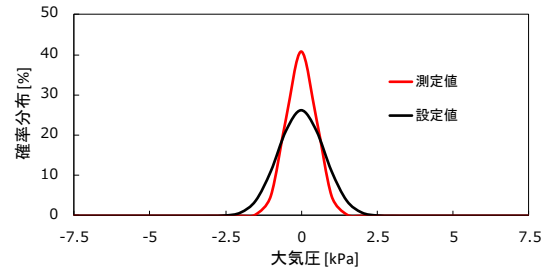


図 6-17：大気圧 (偶然誤差)_実測モデル

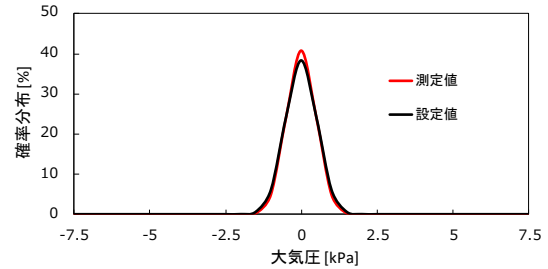


図 6-18：大気圧 (系統誤差)_実測モデル

測定値より偶然誤差および系統誤差について検討を行った結果、空気温度について実測モデルの系統誤差および偶然誤差を想定して算出した標準偏差にはほとんど差が見られなかった。大気圧は確率分布の範囲が大きく違う結果となった。また理論モデルと実測モデルを比較すると空気温度はほとんど差がなく、大気圧は実測モデルの系統誤差が理論モデルよりも小さい結果となった。

[3] CO₂ 濃度

気温などと同様に測定結果から簡易的に誤差（系統，偶然）の算出を試みた。

系統誤差については正規分布と一様分布に 2 種類があり，CO₂ 濃度の乱数に関する分布の場合は正規分布について検討を行った。一様乱数とした場合，正規乱数より区間内の両端に近い値をより多くひらうことが出来るため誤差を大きく見積もることが出来る。しかし，今回は誤差について正規近似すると仮定しているため正規乱数で誤差の算出を行うようにした。

CO₂ 濃度に関する測定器の精度は第 4 章の表 4-1 に示しており，設定した標準偏差を表 6-8 に示す。算出した確率分布および測定値より算出した確率分布を図 6-19～図 6-24 に示す。

表 6-8 : CO₂ 濃度の標準偏差および標準誤差

	測定値		設定値		
	系統	偶然	理論モデル	実測モデル	
				系統	偶然
標準偏差	20.7	1.7	25.0	20.0	5.0
標準誤差 [ppm]	7.8	0.1	25.0	20.0	5.0

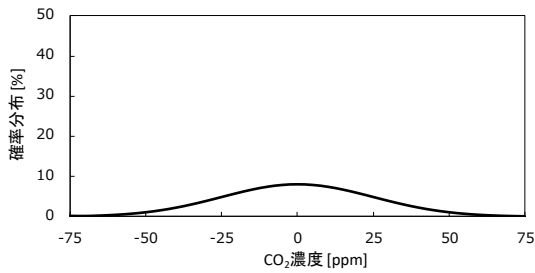


図 6-19 : CO₂ 濃度（正規分布）_理論モデル

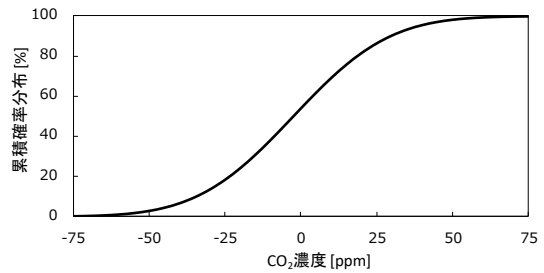


図 6-22 : CO₂ 濃度（正規分布）_理論モデル

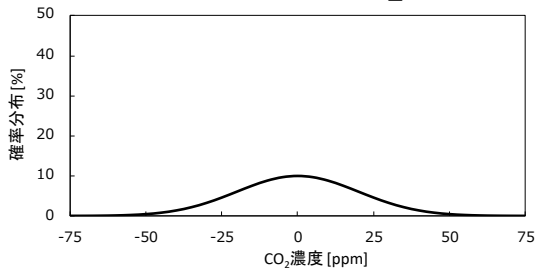


図 6-20 : CO₂ 濃度（偶然誤差）_実測モデル

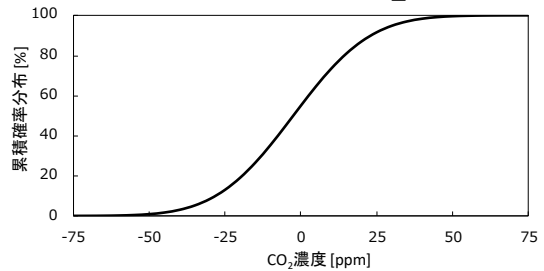


図 6-23 : CO₂ 濃度（偶然誤差）_実測モデル

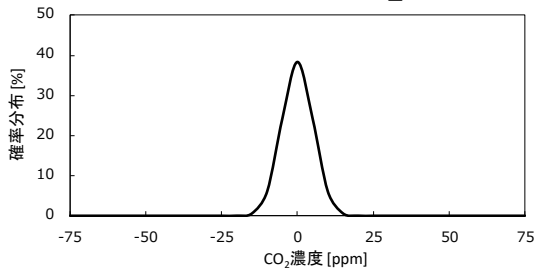


図 6-21 : CO₂ 濃度（系統誤差）_実測モデル

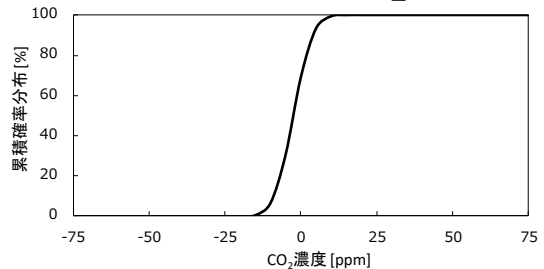


図 6-24 : CO₂ 濃度（系統誤差）_実測モデル

CO₂濃度計は1000 ppmまでの濃度では、誤差が50 ppmであり、1000 ppm以上の条件では、測定値に対して5%の誤差であることが示されており測定限界では250 ppmの誤差が生じることを想定されるが、分布を表現するうえで計算が複雑になってしまう恐れがあるため今回は簡単な式で表現することとした。式(6-22)を用いて算出することとした。

$$CO_2 = 5x \quad (1000\text{ppm} \geq x) \quad (6-24)$$

ここでは、

CO₂ : CO₂濃度の偶然誤差(標準誤差) [m³/m³]
x : CO₂濃度 [m³/m³]

[4] 呼吸商 RQ

ASTMの式のみ在室者属性の1つに呼吸商RQが必要である。先行研究および本研究で0.83を呼吸商RQとして用いている。Persilyの論文^[1]では0.85が用いられている。

標準偏差を0.05として正規分布で発生すると仮定して呼吸商の範囲を算出した。

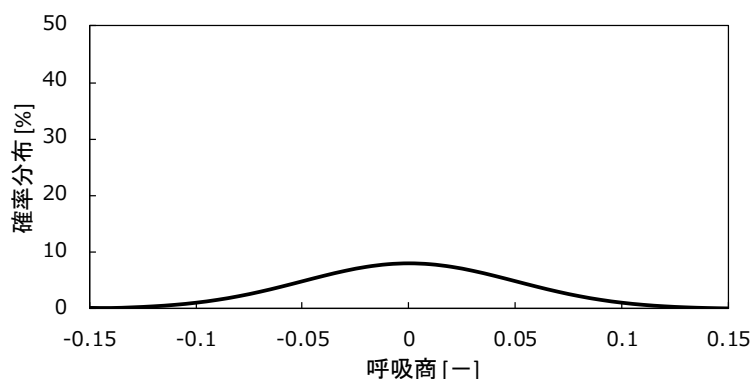


図 6-25 : 呼吸商 RQ の確率分布

[5] Met 値

被験者実験の測定結果から得られた各 Met 値の RMSE を用いて確率分布および累積確率分布の算出を行った。算出する際の範囲は区間[0, 1]と設定した。活動量計の不確かさは測定値そのものの誤差ではないため実際の誤差範囲との差があると考えたが、測定値そのものをから求めた値と比較して差異がないことを確認した。

Met 値の信頼区間の設定については、Met 値の最低値が 1.0met であることから 2.0 met 以下では二項分布に近似すると仮定して確率分布を算出し、一様乱数の確率 P は[0, 1]で検討を行った。二項分布の確率変数は被験者実験の測定結果の平均値である 2.0 Met の時に正規分布に近似するとし、表 6-9 に示す値を用いて検討を行った。表 6-9 の不確かさおよび RMSE は被験者実験で得られた全部での値を用いた。Met 値と不確かさの関係を図 6-26 に、各 Met 値推定手法の二項分布の確率分布を図 6-27～図 6-32 に、累積確率分布を図 6-33～図 6-38 に示す。確率分布より式(6-25)と(6-26)を用いて Met 値を算出した。文献値は AHSRAE^[6]

7) および METs 表^[6-8]の RMSE を用いて検討を行った。

表 6-9：各 Met 値の不確かさおよび RMSE

	活動量計			文献値		脈拍数
	平均値	最頻値	中央値	ASHRAE	METs	
不確かさ	0.36	0.43	0.33	0.45	0.73	0.74
RMSE	0.38	0.44	0.41	0.54	0.70	0.73

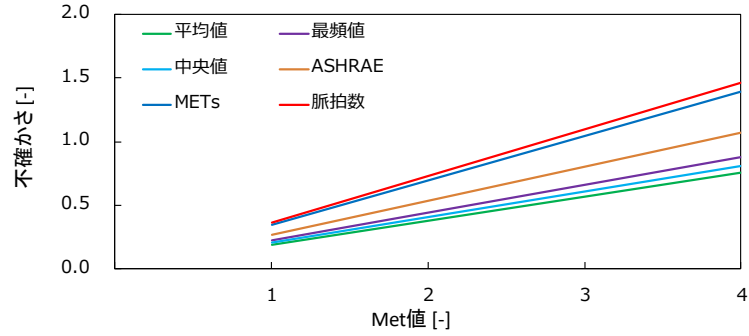


図 6-26：不確かさと Met 値の関係

$$P_n \leq P_i < P_{n+1} \quad n (= 0, 1, 2 \dots)$$

$$\mu = np \tag{6-25}$$

$$\sigma^2 = np(1 - p) \tag{6-26}$$

ここでは、

μ : 平均値 p : 確率
 n : データ数 σ^2 : 分散

確率分布

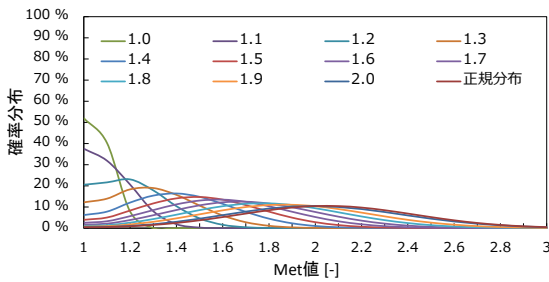


図 6-27：活動量計（平均値）の確率分布

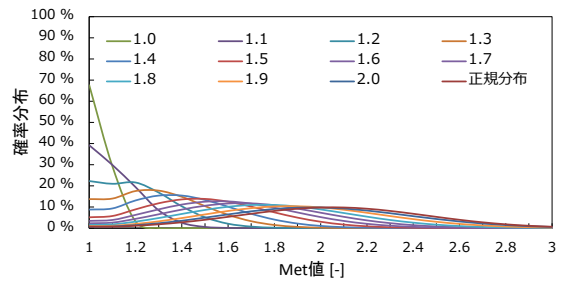


図 6-29：活動量計（中央値）の信頼区間

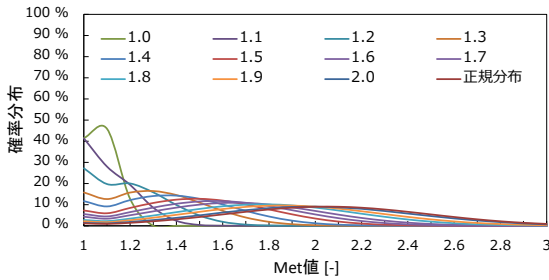


図 6-28：活動量計（最頻値）の確率分布

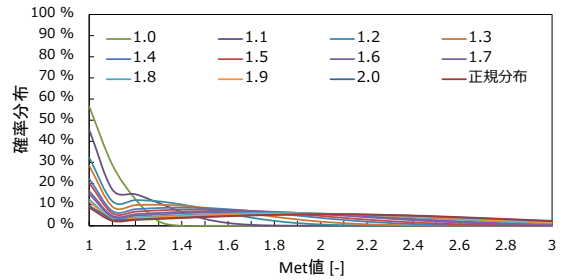


図 6-30：脈拍数の確率分布

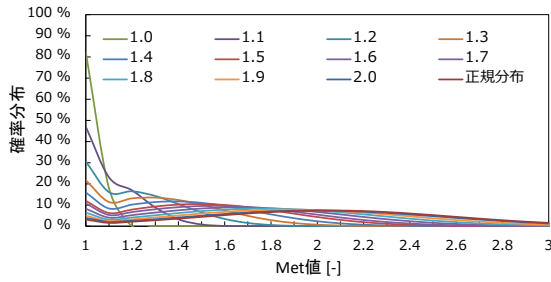


図 6-31：文献値（ASHRAE）の確率分布

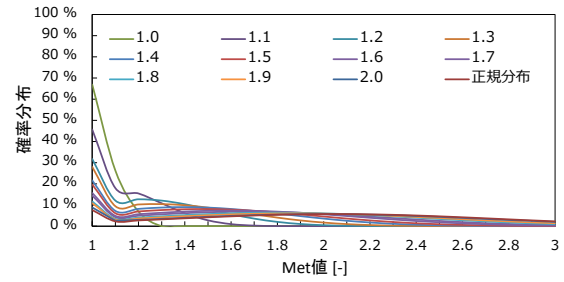


図 6-32：文献値（METs 表）の確率分布

累積確率分布

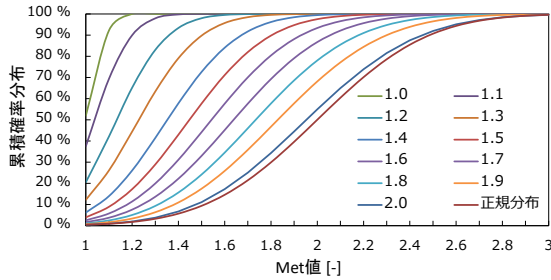


図 6-33：活動量計(平均値)の累積確率分布

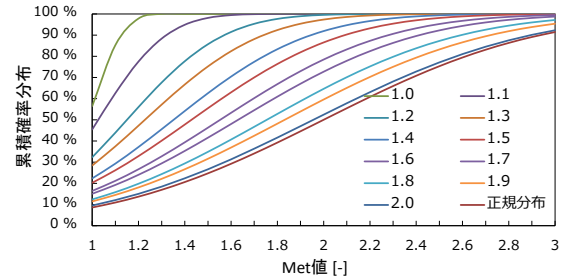


図 6-36：脈拍数の累積確率分布

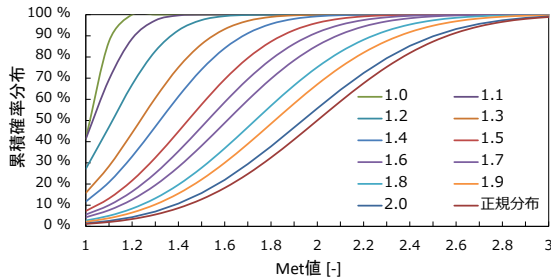


図 6-34：活動量計(最頻値)の累積確率分布

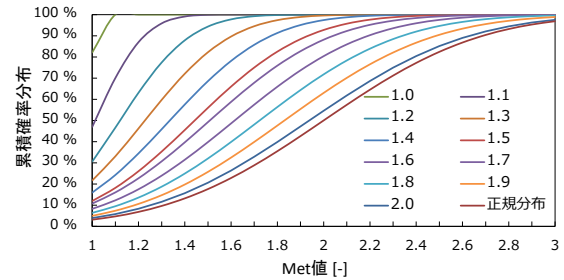


図 6-37：文献値(ASHRAE)の累積確率分布

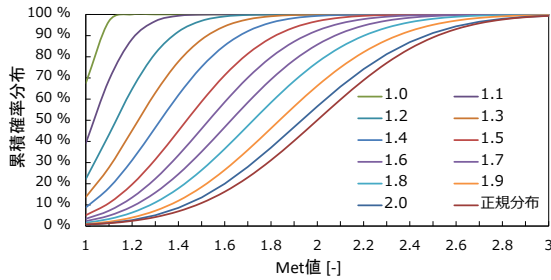


図 6-35：活動量計(中央値)の累積確率分布

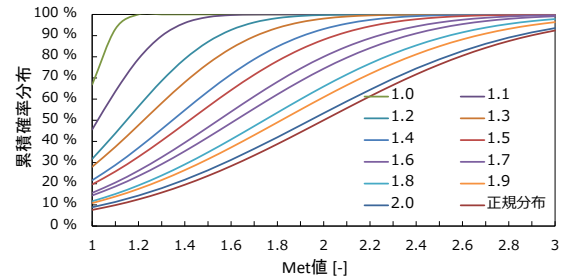


図 6-38：文献値(METs 表)の累積確率分布

今回設定した各 Met 値推定手法の不確かさと Met 値では、4.0met の時に脈拍数計の不確かさは活動量計の不確かさの約 2 倍の値になる。

活動量計用いた場合の不確かさは最大で 0.3 met 誤差が発生し、信頼水準 95%では 0.2met の誤差が発生することが確認できた。脈拍数計や METs 表の誤差（信頼水準 95%）では、0.5met となり、こちらも 2 倍近い差がある結果となった。METs 表については項目が多いため選択する際の基準を明確にしたうえで、最も近い条件の値を参照する必要があると考えられる。

Met 値が 1.0 を下回る確率について下回る値は 1.0met としたため脈拍数や METs 表の不確かさが大きい Met 値推定手法では、確率分布が 1.0 から 1.1 に対して大きな差が出来てしまったのが課題であるといえる。

[6] 有効混合容積

有効混合容積は式 (5-1), (5-2) または (5-3) から求められるが、本検討では一様拡散している部屋として考えたため室容積と有効混合容積は同じ値とし、有効混合容積は正規分布の系統誤差が発生するとした。

室容積の誤差については室の幅、奥行き、高さの測定誤差を足した誤差になるため式 (6-27) を用いて算出するが出来るが、本検討では室容積の標準偏差を 0.005m^3 と設定した。図 6-42 に区間推定による室容積の分布を示す。

$$\sigma_d = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2 + \sigma_c^2} \quad (6-27)$$

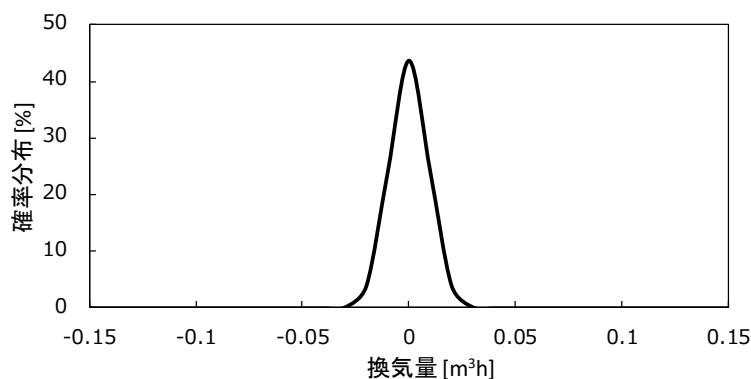


図 6-39：室容積の確率分布

[7] 換気量

室内 CO_2 濃度推定について数値計算で換気量が影響する場合の換気量の範囲について考えている。換気量は換気システムによる経年劣化およびメンテナンス不足による風量低下などが系統誤差とし、瞬間の風圧や温度差などによる影響を偶然誤差と考えた。

本検討では標準偏差を $5.0\text{m}^3/\text{h}$ の範囲を算出したものを下記に示した。

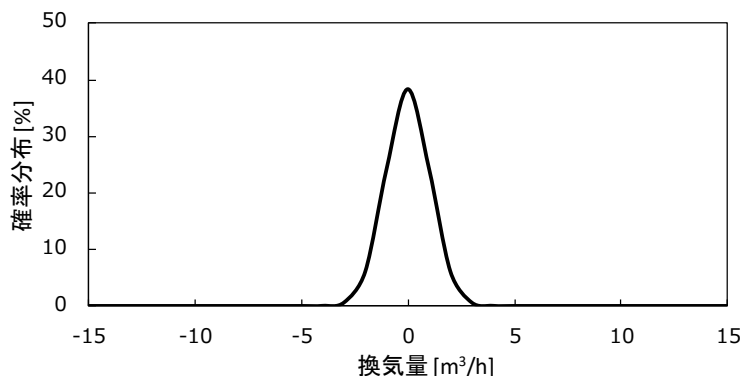


図 6-40：換気量の確率分布 ($5.0\text{m}^3/\text{h}$)

(1) 二酸化炭素濃度推定値

室内 CO₂ 濃度は多数室換気に関する微分方程式 (4-1) を用いて計算し、在室者の CO₂ 呼出量は CO₂ 呼出量関係式 (2-38) および体表面積の式 (2-27) に在室者の属性 (身長, 体重, 年齢および性別) を代入して求めた。計算の時間間隔について理論モデルは 1 分データを用いて計算を行い、実測モデルでは 10 秒間隔のデータを用いて算出した。理論計算については設定した換気量を用いて計算を行った。検討した換気量は一人当たりの換気量 20m³/h と 45 m³/h である。

$$\frac{dc_i}{dt} V_i = \sum P_{CO_2i} + Q_{io}(C_o + C_i) \quad (4-1(\text{再掲}))$$

ここでは,

C_i : i 室の室内濃度 [m ³ /m ³]	C_o : 外気濃度 [m ³ /m ³]
P_{CO_2i} : CO ₂ 呼出量 [m ³ /h]	Q : 外気導入量 [m ³ /h]
t : 時間 [h]	V : 室の空気容積 [m ³]

(2) 換気量推定値

換気量の算出は前章で用いた逆数濃度平均法より平均換気量を算出した。CO₂ 濃度計算と同様に発生量は CO₂ 呼出量関係式を用いて算出した値を用いて計算を行った。また理論モデルは 1 分間隔、実測モデルでは 10 秒間隔のデータを用いて算出した。

計算では、10 分間の平均換気量を算出することとした。

$$\bar{Q} = \left(\frac{m}{c}\right) + \frac{V_{efc}}{t_2 - t_1} \log_e \frac{C(t_1)}{C(t_2)} \quad (5-5(\text{再掲}))$$

$$\left(\frac{m}{c}\right) = \left(\frac{m_1}{c_1} + \dots + \frac{m_k}{c_k} + \dots + \frac{m_n}{c_n}\right) / n \quad (5-6(\text{再掲}))$$

ここでは,

t_1 : 測定開始時点 [h]	t_2 : 測定終了時点 [h]
\bar{Q} : 時間平均換気量 [m ³ /h]	
n : 濃度測定数 [m ³ /m ³]	V_{efc} : 有効混合容積 [m ³]
C_k : k 番目の室内濃度測定結果 [m ³ /m ³]	
M_k : k 番目のトレーサガス発生 (供給) 量 [m ³ /h]	
$C(t_1)$: t_1 における室内濃度 [m ³ /m ³]	$C(t_2)$: t_2 における室内濃度 [m ³ /m ³]

6.3 理論的な二酸化炭素濃度および換気量の不確かさの算出

定常状態と非定常状態の不確かさを推定することを目的に定常状態は不確かさの伝播則、非定常状態は数値計算を行い換気量または換気性状に関する検討を行った。理論計算で不確かさを求めるため、換気量を 1 人当たり 20m³/h と 45m³/h と設定して在室者数を 8 人とした場合の理論計算を行った。

在室者のデータは、平成 28 年度および平成 26 年度の被験者データを用いて検討を行った。定常状態の不確かさの伝播則の計算では在室者数を 1~10 人で計算を行った。外気 CO₂ 濃度は 400ppm、室容積を 111.5m³ と設定した。Met 値推定手法の検討は、活動量計 (平均値)、脈拍計、文献値 (ASHRAE) および文献値 (METs 表) の 4 種類について計算した。

性別と Met 値を基準に 6 ケースを設定して検討を行った。検討した 6 ケースの条件を表 6-10 に示す。女性のデータ数が 8 名であるため同じ人による誤差を無くするために最大 8 人までの検討しか行っていない。各ケースの在室者の Met 値を表 6-11 に示す。

本章では、推定した不確かさから求めた信頼区間内に測定値または理論値が存在するか割合で示し、その割合を信頼区間割合と記述した。

表 6-10：検討したケース

ケース	条件
G	H28 年度・H26 年度 男性のみ (Met1.0)
H	H28 年度・H26 年度 男性のみ (Met1.0 以上)
J	H28 年度・H26 年度 女性のみ (Met1.0)
K	H28 年度・H26 年度 女性のみ (Met1.0 以上)
L	H28 年度・H26 年度 男女 (Met1.0)
M	H28 年度・H26 年度 男女 (Met1.0 以上)

表 6-11：在室者の Met 値

ケース	在室者									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
G	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
H	1.02	1.84	2.05	1.73	2.42	1.09	4.95	1.00	1.00	1.00
J	1.00* ¹	1.00* ¹	1.00* ¹	1.00* ¹	1.00* ¹	1.00* ¹	1.00* ¹	1.00* ¹	-	-
K	2.71* ¹	1.00* ¹	2.96* ¹	1.00* ¹	1.89* ¹	1.00* ¹	2.30* ¹	1.00* ¹	-	-
L	1.00	1.00	1.00* ¹	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
M	1.35	2.30* ¹	2.81* ¹	3.55	4.09	3.82	2.30	1.53	2.71	4.00

*¹：在室者の属性が女性であることを示す。

6.3.1 二酸化炭素呼出量関係式の不確かさおよび誤差

第 3 章で記した通り CO₂ 呼出量関係式を用いた場合 Met 値推定手法を活動量計とすることで発生量の推定精度が向上することを確認した。また CO₂ 呼出量関係式自体の誤差は真値より 10%程度の誤差があり、Met 値の誤差を含むことで CO₂ 呼出量推定の誤差は 10~15%であることを確認している。

6.3.2 定常状態の換気量および室内濃度

定常状態の換気量測定および換気性状測定の不確かさを推定するために不確かさの伝播則による定常式(6-10, 6-11)を偏微分した式より不確かさの算出を行った。式については前述したとおりである。

本章では前述したとおり CO₂ 呼出量関係式を用いた場合の計算結果のみを示す。他の推定式の計算結果については付録 D に示す。

(1) 室内二酸化炭素濃度

本節では、被験者実験の CO₂ 呼出量測定値を用いて式(6-11)より算出した定常時の CO₂ 濃度を理論値とし、CO₂ 呼出量関係式で算出した CO₂ 呼出量計算値より計算された CO₂ 濃度を推定値と記す。

換気量が一人当たり 20m³/h の条件における CO₂ 濃度推定値および理論値を表 6-12 に、各 Met 値推定手法より算出した拡張不確かさを表 6-13～表 6-16 に示す。換気量が 45m³/h の条件における CO₂ 濃度推定値および理論値を表 6-17 に、各 Met 値推定手法より算出した拡張不確かさを表 6-18～表 6-21 に示す。拡張不確かさは信頼水準 95% の 1.96 を係数として与えて算出している。

換気量が一人当たり 20m³/h では、測定値から算出した CO₂ 濃度はほとんどのケースで衛生管理基準の 1000ppm を上回る結果となった。換気量が 45m³/h では、Met 値が高い人がいる場合は 1000ppm を超える結果となった。このことから安静状態であっても現在の日本人では一人当たり 20m³/h の換気量では足りないことが確認できた。

換気量 1人当たり 20 m³/h

表 6-12 : 各ケースの推定値

		人数							
		1	2	3	4	5	6	8	10
推定値	G	1196.6	1173.9	1168.2	1205.8	1205.1	1223.4	1227.4	1232.7
	H	1212.5	1695.6	1780.9	1830.9	1963.7	1878.8	2142.9	1980.8
	J	962.3	999.1	979.1	961.8	958.2	954.4	947.0	-
	K	1873.5	1391.8	1688.5	1500.4	1484.1	1397.1	1362.3	-
	L	1354.8	1360.7	1220.2	1228.3	1232.1	1230.4	1247.9	1211.9
	M	1427.8	1500.4	1635.9	2053.9	2354.3	2664.0	2524.5	2667.6
理論値	G	1065.0	1137.5	1196.7	1177.5	1142.0	1155.0	1145.0	1148.5
	H	1100.0	1562.5	1791.7	1757.5	1885.0	1848.3	2020.0	1849.0
	J	905.0	1020.0	1003.3	985.0	998.0	1005.0	1006.3	-
	K	2125.0	1527.5	1846.7	1646.3	1603.0	1486.7	1440.6	-
	L	1090.0	1215.0	1133.3	1140.0	1143.0	1173.3	1157.5	1134.5
	M	1560.0	1527.5	1780.0	2042.5	2270.0	2529.2	2335.0	2540.0

表 6-13 : 拡張不確かさ (信頼水準 95%) _活動量計 (平均値)

		人数							
		1	2	3	4	5	6	8	10
呼出量のみ	G	296.2	203.6	165.0	150.3	134.3	125.4	109.2	98.4
	H	302.1	363.4	309.4	274.6	269.3	233.8	262.1	215.5
	J	209.2	157.8	124.7	104.9	93.1	84.4	72.1	-
	K	548.2	291.3	296.7	228.0	197.6	168.3	139.9	-
	L	354.9	252.5	181.1	157.3	140.7	127.9	112.7	97.1
	M	382.4	290.2	269.0	337.3	357.7	380.3	306.9	288.8
全て	G	492.4	282.5	213.0	186.4	163.3	150.5	129.9	117.3
	H	502.2	485.0	386.0	329.5	313.7	267.6	287.3	234.2
	J	349.4	221.0	164.0	134.7	118.6	107.6	93.4	-
	K	907.9	382.5	367.0	269.4	229.6	193.3	159.5	-
	L	589.3	348.7	230.6	193.5	169.9	152.8	133.4	115.8
	M	634.2	399.1	339.8	396.5	408.7	425.7	336.9	313.3

表 6-14 : 拡張不確かさ (信頼水準 95%) _脈拍数計

		人数							
		1	2	3	4	5	6	8	10
呼出量のみ	G	570.8	392.3	317.9	289.7	258.7	241.7	210.4	189.4
	H	582.2	700.6	596.2	529.3	519.1	450.5	505.2	415.1
	J	403.0	304.1	240.2	202.0	179.4	162.6	138.9	-
	K	1056.0	561.2	571.7	439.4	380.6	324.2	269.5	-
	L	684.2	486.8	349.1	303.1	271.2	246.4	217.2	186.9
	M	736.6	558.9	518.1	649.9	689.2	732.9	591.4	554.9
全て	G	693.3	438.5	345.3	310.0	274.9	255.6	221.9	199.8
	H	707.0	770.7	639.3	559.7	543.5	469.0	518.7	425.1
	J	490.6	341.2	262.8	219.0	193.9	175.8	151.1	-
	K	1280.2	613.5	611.1	462.2	398.2	337.9	280.2	-
	L	830.3	542.9	377.2	323.4	287.4	260.2	228.6	197.3
	M	893.6	622.5	558.2	682.5	717.0	757.4	607.6	568.0

表 6-15 : 拡張不確かさ (信頼水準 95%) _文献値 (ASHRAE)

		人数							
		1	2	3	4	5	6	8	10
呼出量のみ	G	419.4	288.3	233.6	212.9	190.1	177.6	154.6	139.2
	H	427.8	514.7	438.1	388.9	381.4	331.0	371.2	305.1
	J	296.2	223.5	176.5	148.5	131.9	119.5	102.1	-
	K	776.1	412.4	420.1	322.9	279.7	238.3	198.0	-
	L	502.7	357.7	256.5	222.7	199.3	181.1	159.6	137.4
	M	541.3	410.8	380.8	477.6	506.4	538.5	434.6	408.1
全て	G	575.1	348.5	269.7	239.7	211.6	196.1	169.9	153.1
	H	586.5	606.7	495.2	429.4	414.0	355.8	389.4	318.5
	J	407.5	271.8	206.2	170.8	150.9	136.9	118.1	-
	K	1061.1	481.2	472.4	353.3	303.2	256.5	212.3	-
	L	688.5	431.0	293.5	249.6	220.8	199.5	174.8	151.2
	M	741.0	493.8	433.7	521.1	543.7	571.5	456.3	425.8

表 6-16 : 拡張不確かさ (信頼水準 95%) _文献値 (METs 表)

		人数							
		1	2	3	4	5	6	8	10
呼出量のみ	G	545.1	374.6	303.6	276.7	247.1	230.8	200.9	180.9
	H	556.0	669.0	569.3	505.4	495.7	430.2	482.4	396.4
	J	384.8	290.4	229.4	192.9	171.3	155.3	132.7	-
	K	1008.4	535.9	545.9	419.6	363.5	309.6	257.3	-
	L	653.3	464.8	333.4	289.5	259.0	235.3	207.4	178.5
	M	703.4	533.7	494.7	620.6	658.1	699.8	564.8	529.9
全て	G	672.2	422.7	332.1	297.8	263.9	245.4	212.9	191.8
	H	685.6	742.1	614.3	537.2	521.1	449.5	496.5	406.9
	J	475.8	329.1	252.9	210.6	186.4	169.0	145.3	-
	K	1241.2	590.4	587.1	443.4	381.8	323.9	268.5	-
	L	805.0	523.3	362.6	310.6	275.9	249.7	219.3	189.3
	M	866.5	600.0	536.6	654.7	687.1	725.5	581.6	543.6

換気量 1人当り 45 m³/h

表 6-17 : 各ケースの推定値

		人数							
		1	2	3	4	5	6	8	10
推定値	G	754.0	743.9	741.4	758.1	757.8	766.0	767.7	770.1
	H	761.1	975.8	1013.7	1035.9	1095.0	1057.2	1174.6	1102.6
	J	649.9	666.2	657.4	649.7	648.1	646.4	643.1	-
	K	1054.9	840.8	972.7	889.1	881.8	843.2	827.7	-
	L	824.4	827.0	764.5	768.1	769.8	769.0	776.8	760.9
	M	856.8	889.1	949.3	1135.1	1268.6	1406.2	1344.2	1407.8
理論値	G	695.6	727.8	754.1	745.6	729.8	735.6	731.1	732.7
	H	711.1	916.7	1018.5	1003.3	1060.0	1043.7	1120.0	1044.0
	J	624.4	675.6	668.1	660.0	665.8	668.9	669.4	-
	K	1166.7	901.1	1043.0	953.9	934.7	883.0	862.5	-
	L	706.7	762.2	725.9	728.9	730.2	743.7	736.7	726.4
	M	915.6	901.1	1013.3	1130.0	1231.1	1346.3	1260.0	1351.1

表 6-18 : 拡張不確かさ (信頼水準 95%) _活動量計 (平均値)

		人数							
		1	2	3	4	5	6	8	10
呼出量のみ	G	131.6	90.5	73.3	66.8	59.7	55.7	48.5	43.8
	H	134.3	161.5	137.5	122.1	119.7	103.9	116.5	95.8
	J	93.0	70.1	55.4	46.6	41.4	37.5	32.0	-
	K	243.7	129.5	131.9	101.3	87.8	74.8	62.2	-
	L	157.7	112.2	80.5	69.9	62.5	56.8	50.1	43.2
	M	169.9	129.0	119.5	149.9	159.0	169.0	136.4	128.4
全て	G	160.2	109.5	91.6	85.1	78.8	75.4	69.7	66.2
	H	163.1	180.1	152.6	136.0	132.8	117.3	128.1	108.7
	J	118.4	90.3	76.3	69.0	65.0	62.4	58.9	-
	K	286.5	146.5	146.7	115.7	102.7	90.8	80.0	-
	L	189.3	131.0	97.9	87.7	81.1	76.2	70.8	65.8
	M	202.9	147.9	135.2	162.7	170.6	179.7	147.2	139.1

表 6-19：拡張不確かさ（信頼水準 95%）_脈拍数計

		人数							
		1	2	3	4	5	6	8	10
呼出量のみ	G	253.7	174.4	141.3	128.8	115.0	107.4	93.5	84.2
	H	258.8	311.4	265.0	235.2	230.7	200.2	224.5	184.5
	J	179.1	135.2	106.8	89.8	79.7	72.3	61.7	-
	K	469.4	249.4	254.1	195.3	169.2	144.1	119.8	-
	L	304.1	216.3	155.2	134.7	120.5	109.5	96.5	83.1
	M	327.4	248.4	230.3	288.9	306.3	325.7	262.9	246.6
全て	G	269.6	184.9	151.6	139.1	126.0	118.8	106.0	97.7
	H	274.9	321.4	273.1	242.8	237.8	207.5	230.8	191.5
	J	193.5	146.7	118.9	103.2	94.2	87.8	79.1	-
	K	493.0	258.7	262.1	203.1	177.4	153.1	129.9	-
	L	321.6	226.6	164.9	144.8	131.1	120.7	108.7	96.8
	M	345.7	258.7	238.8	295.7	312.5	331.4	268.6	252.4

表 6-20：拡張不確かさ（信頼水準 95%）_文献値（ASHRAE）

		人数							
		1	2	3	4	5	6	8	10
呼出量のみ	G	186.4	128.1	103.8	94.6	84.5	78.9	68.7	61.9
	H	190.1	228.8	194.7	172.9	169.5	147.1	165.0	135.6
	J	131.6	99.3	78.5	66.0	58.6	53.1	45.4	-
	K	344.9	183.3	186.7	143.5	124.3	105.9	88.0	-
	L	223.4	159.0	114.0	99.0	88.6	80.5	70.9	61.1
	M	240.6	182.6	169.2	212.3	225.1	239.3	193.2	181.4
全て	G	207.6	142.2	117.5	108.3	98.9	93.9	85.0	79.3
	H	211.5	242.2	205.7	183.0	179.0	156.9	173.4	145.0
	J	150.6	114.5	94.4	83.3	77.1	72.8	67.1	-
	K	376.5	195.7	197.5	154.0	135.3	117.8	101.4	-
	L	246.7	172.7	126.9	112.3	102.5	95.2	86.8	78.7
	M	264.9	196.4	180.6	221.5	233.4	247.0	200.9	189.2

表 6-21：拡張不確かさ（信頼水準 95%）_文献値（METs 表）

		人数							
		1	2	3	4	5	6	8	10
呼出量のみ	G	242.3	166.5	134.9	123.0	109.8	102.6	89.3	80.4
	H	247.1	297.3	253.0	224.6	220.3	191.2	214.4	176.2
	J	171.0	129.1	101.9	85.7	76.1	69.0	59.0	-
	K	448.2	238.2	242.6	186.5	161.5	137.6	114.4	-
	L	290.3	206.6	148.2	128.7	115.1	104.6	92.2	79.3
	M	312.6	237.2	219.9	275.8	292.5	311.0	251.0	235.5
全て	G	258.9	177.5	145.7	133.8	121.3	114.5	102.3	94.5
	H	263.9	307.8	261.6	232.5	227.7	198.8	220.9	183.5
	J	186.1	141.1	114.6	99.7	91.2	85.1	76.9	-
	K	472.9	247.9	251.0	194.6	170.1	147.0	125.0	-
	L	308.6	217.3	158.3	139.1	126.1	116.3	104.9	93.6
	M	331.7	248.0	228.8	283.0	299.0	317.0	257.0	241.6

1人当たりの換気量が20m³/hと45m³/hのケースでは、一人当たりの換気量が多い45m³/hの条件で算出した不確かさが小さい結果となった。換気量に関わらず在室者のMet値が大き

いケース H と M の不確かさは大きい結果となり、1.0met のケース G, J, L の不確かさは小さい結果となった。

Met 値推定手法で比較すると脈拍数および METs 表の不確かさは活動量計（平均値）および ASHRAE の不拡張確かさより大きい結果となった。3章で示した CO₂呼出量推定手法と Met 値推定手法の関係と同じ結果となり、CO₂呼出量関係式より得られた CO₂呼出量の影響が大きく Met 値の RMSE が一因であると考えられる。

呼出量のみ条件では、換気量に関係なくほとんどのケースで拡張不確かさが 50ppm を上回る結果となり、CO₂濃度測定器よりも人間の呼出量の影響が大きいことが確認できた。また誤差が大きい値を示していたのは 1 人の時で、人数が増えることで拡張不確かさが小さくなる結果となった。計算では不確かさを足す式 (6-7) で値が小さくなっており、実現象では人数が増えることで 1 人当りの影響が小さくなっているためと考えられる。

(2) 換気量

換気量の条件が 20m³/h の時の CO₂濃度推定値および理論値を表 6-22、各 Met 値推定手法より算出した不確かさを表 6-23～表 6-26 に示す。条件が 45m³/h の時の CO₂濃度推定値および理論値を表 6-27 に、各 Met 値推定手法より算出した不確かさを表 6-28～表 6-31 に示す。

換気量が 1 人当り 20m³/h と 45m³/h で CO₂呼出量関係式を用いた計算値と理論値の差は相対的に 10%程度であることが確認できた。これはあらかじめ換気量を設定した値から計算しているため大きな誤差は生じないが、室の濃度を設定して計算を行うと換気量による誤差を算出することが出来ると考えられる。しかし、実測データでないためあくまで理論的に計算を行う必要があったため先に換気量を設定して計算した濃度を用いた。またこの値は元の被験者実験のデータの影響を大きく受けている可能性があるため留意が必要である。

換気量 1 人当り 20 m³/h

表 6-22：各ケースの推定値

		人数							
		1	2	3	4	5	6	8	10
推定値	G	24.0	42.0	57.9	82.9	108.5	130.9	177.7	222.5
	H	23.2	44.6	59.5	84.3	105.3	122.5	172.1	218.2
	J	22.3	38.6	57.6	76.8	93.3	110.0	144.4	-
	K	17.1	35.2	53.4	70.6	90.1	110.1	148.0	-
	L	27.7	47.2	67.1	89.5	112.0	128.8	179.1	221.1
	M	17.7	39.0	53.7	80.6	104.5	127.6	175.7	211.9
理論値		20.0	40.0	60.0	80.0	100.0	120.0	160.0	200.0

表 6-23 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) _活動量計 (平均値)

		人数							
		1	2	3	4	5	6	8	10
呼出量のみ	G	8.9	11.0	12.4	15.5	18.1	19.9	23.4	26.3
	H	8.6	12.5	13.3	16.2	18.2	19.4	25.9	29.8
	J	8.3	10.2	12.4	14.4	15.6	16.8	19.0	-
	K	6.4	10.3	12.3	14.7	16.4	18.6	21.5	-
	L	10.3	12.4	14.8	17.0	19.0	19.9	23.8	26.5
	M	6.6	10.3	11.7	16.4	19.1	21.5	25.4	27.0
全て	G	9.3	11.8	13.6	17.4	21.1	23.8	29.4	34.4
	H	9.0	13.0	14.0	17.4	19.6	21.3	28.5	33.6
	J	8.8	11.1	14.1	17.0	19.0	21.0	25.2	-
	K	6.5	10.7	12.9	15.6	17.8	20.6	24.7	-
	L	10.7	13.2	16.3	19.2	22.0	23.5	29.7	34.6
	M	6.7	10.8	12.3	17.3	20.3	22.9	27.8	30.1

表 6-24 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) _脈拍数計

		人数							
		1	2	3	4	5	6	8	10
呼出量のみ	G	17.2	21.3	23.9	29.8	34.9	38.4	45.2	50.6
	H	16.6	24.1	25.7	31.3	35.0	37.4	49.9	57.3
	J	16.0	19.6	23.9	27.6	30.0	32.3	36.7	-
	K	12.2	19.9	23.7	28.2	31.6	35.8	41.4	-
	L	19.8	23.9	28.6	32.8	36.5	38.2	45.9	50.9
	M	12.7	19.8	22.5	31.7	36.9	41.3	48.9	51.9
全て	G	17.4	21.7	24.6	30.9	36.5	40.6	48.6	55.3
	H	16.8	24.4	26.1	31.9	35.8	38.4	51.3	59.4
	J	16.3	20.1	24.8	29.1	31.9	34.6	40.2	-
	K	12.3	20.1	24.0	28.7	32.4	36.9	43.2	-
	L	20.0	24.3	29.4	34.0	38.2	40.3	49.2	55.6
	M	12.8	20.1	22.9	32.1	37.5	42.1	50.2	53.5

表 6-25 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) _文献値 (ASHRAE)

		人数							
		1	2	3	4	5	6	8	10
呼出量のみ	G	12.6	15.6	17.6	21.9	25.6	28.2	33.2	37.2
	H	12.2	17.7	18.9	23.0	25.7	27.5	36.7	42.1
	J	11.7	14.4	17.6	20.3	22.1	23.7	27.0	-
	K	9.0	14.6	17.4	20.7	23.3	26.3	30.5	-
	L	14.6	17.6	21.0	24.1	26.8	28.1	33.7	37.4
	M	9.3	14.6	16.6	23.3	27.1	30.4	35.9	38.2
全て	G	12.9	16.2	18.5	23.3	27.8	31.1	37.7	43.3
	H	12.5	18.1	19.4	23.8	26.8	28.8	38.5	44.9
	J	12.1	15.1	18.8	22.3	24.6	26.9	31.6	-
	K	9.1	14.9	17.8	21.4	24.3	27.8	32.8	-
	L	14.9	18.1	22.1	25.7	29.1	30.8	38.1	43.6
	M	9.4	14.9	17.0	23.9	27.9	31.4	37.7	40.4

表 6-26 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) _文献値 (METs 表)

		人数							
		1	2	3	4	5	6	8	10
呼出量のみ	G	16.4	20.3	22.9	28.5	33.3	36.7	43.1	48.3
	H	15.9	23.0	24.6	29.9	33.5	35.7	47.7	54.7
	J	15.2	18.7	22.8	26.4	28.7	30.8	35.0	-
	K	11.7	19.0	22.6	26.9	30.2	34.2	39.6	-
	L	18.9	22.8	27.3	31.3	34.9	36.5	43.8	48.6
	M	12.1	18.9	21.5	30.2	35.2	39.5	46.7	49.5
全て	G	16.6	20.8	23.5	29.6	35.0	38.9	46.7	53.2
	H	16.1	23.3	24.9	30.5	34.3	36.7	49.1	56.9
	J	15.5	19.2	23.8	27.9	30.6	33.3	38.7	-
	K	11.8	19.2	23.0	27.5	31.0	35.3	41.4	-
	L	19.2	23.2	28.1	32.6	36.6	38.6	47.3	53.5
	M	12.2	19.2	21.9	30.7	35.8	40.3	48.1	51.3

換気量 1人当り 45m³/h

表 6-27 : 各ケースの推定値

		人数							
		1	2	3	4	5	6	8	10
推定値	G	53.9	94.4	130.2	186.6	244.1	294.5	399.8	500.6
	H	52.2	100.3	134.0	189.7	236.9	275.7	387.3	490.9
	J	50.1	87.0	129.6	172.9	210.0	247.4	324.8	-
	K	38.4	79.2	120.2	158.9	202.8	247.8	332.9	-
	L	62.3	106.1	151.0	201.5	252.0	289.9	403.0	497.4
	M	39.9	87.8	120.9	181.3	235.1	287.1	395.3	476.8
理論値		45	90	135	180	225	270	360	450

表 6-28 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) _活動量計 (平均値)

		人数							
		1	2	3	4	5	6	8	10
呼出量のみ	G	20.0	24.8	28.0	34.8	40.7	44.9	52.8	59.2
	H	14.3	23.3	27.7	33.0	37.0	41.8	48.4	67.0
	J	18.7	22.9	27.9	32.3	35.1	37.7	42.9	-
	K	14.3	23.3	27.7	33.0	37.0	41.8	48.4	-
	L	23.2	27.9	33.4	38.3	42.6	44.7	53.6	59.6
	M	14.8	23.2	26.3	37.0	43.1	48.3	57.1	60.8
全て	G	23.7	31.9	37.8	51.1	65.5	75.6	98.9	119.9
	H	14.8	25.7	30.7	38.5	45.4	54.9	69.5	86.1
	J	24.2	31.7	43.6	56.3	65.0	74.1	93.9	-
	K	14.8	25.7	30.7	38.5	45.4	54.9	69.5	-
	L	27.1	34.5	46.3	57.2	67.9	73.6	98.7	121.2
	M	15.8	26.2	29.7	41.3	48.4	54.3	67.7	73.5

表 6-29：拡張不確かさ（信頼区間 95%）_脈拍数計

		人数							
		1	2	3	4	5	6	8	10
呼出量のみ	G	38.6	47.9	53.9	67.1	78.5	86.4	101.7	113.9
	H	37.4	54.2	57.8	70.4	78.8	84.1	112.3	129.0
	J	35.9	44.2	53.8	62.2	67.5	72.6	82.5	-
	K	27.6	44.8	53.4	63.5	71.2	80.6	93.2	-
	L	44.6	53.8	64.3	73.8	82.2	86.0	103.2	114.5
	M	28.6	44.6	50.7	71.2	82.9	93.0	110.1	116.7
全て	G	40.6	51.9	59.6	76.8	93.7	105.7	131.7	154.4
	H	39.2	55.9	59.8	73.7	82.9	89.4	119.1	139.8
	J	39.1	49.3	63.3	77.4	86.9	96.6	117.4	-
	K	27.8	46.1	55.0	66.5	75.9	88.1	105.7	-
	L	46.8	57.5	71.9	85.1	97.7	104.0	132.4	155.8
	M	29.1	46.2	52.5	73.6	85.8	96.2	115.9	123.8

表 6-30：拡張不確かさ（信頼区間 95%）_文献値（ASHRAE）

		人数							
		1	2	3	4	5	6	8	10
呼出量のみ	G	28.4	35.2	39.6	49.3	57.7	63.5	74.7	83.7
	H	27.5	39.9	42.5	51.7	57.9	61.8	82.6	94.8
	J	26.4	32.5	39.5	45.7	49.6	53.4	60.6	-
	K	20.3	32.9	39.2	46.7	52.3	59.2	68.5	-
	L	32.8	39.5	47.2	54.2	60.4	63.2	75.9	84.2
	M	21.0	32.8	37.3	52.4	61.0	68.3	80.9	85.9
全て	G	31.1	40.5	47.1	61.9	77.2	87.9	112.2	133.7
	H	29.9	42.1	45.1	56.2	63.3	68.8	91.6	109.1
	J	30.6	39.1	51.8	64.9	73.9	83.1	103.2	-
	K	20.6	34.7	41.4	50.7	58.6	69.1	84.8	-
	L	35.7	44.4	57.1	68.8	80.3	86.1	112.4	135.1
	M	21.7	35.0	39.7	55.5	64.8	72.7	88.6	95.3

表 6-31：拡張不確かさ（信頼区間 95%）_文献値（METs 表）

		人数							
		1	2	3	4	5	6	8	10
呼出量のみ	G	36.9	45.7	51.4	64.0	74.9	82.5	97.1	108.7
	H	35.7	51.8	55.2	67.2	75.3	80.3	107.3	123.2
	J	34.3	42.2	51.3	59.4	64.5	69.3	78.8	-
	K	26.3	42.8	51.0	60.6	68.0	76.9	89.0	-
	L	42.6	51.3	61.4	70.4	78.4	82.2	98.6	109.4
	M	27.3	42.6	48.4	68.0	79.2	88.8	105.1	111.5
全て	G	39.0	49.9	57.4	74.2	90.8	102.5	128.2	150.7
	H	37.6	53.5	57.3	70.7	79.5	85.8	114.3	134.5
	J	37.6	47.5	61.3	75.1	84.6	94.2	114.8	-
	K	26.6	44.2	52.6	63.8	72.9	84.8	102.1	-
	L	44.9	55.2	69.3	82.2	94.6	100.8	128.8	152.0
	M	27.8	44.3	50.3	70.5	82.2	92.2	111.2	118.9

換気量が一人当たり $20\text{m}^3/\text{h}$ の条件では、呼出量のみ条件と全ての条件で比較すると CO_2 濃度計による誤差が発生していたとしても CO_2 呼出量による誤差の影響が大きい結果となった。換気量を推定する場合は発生量の重みが大きいことが確認できた。

換気量が一人当たり $45\text{m}^3/\text{h}$ の条件では、不確かさは人数が増えるにつれて大きくなり、全てに誤差がある場合は換気量が多くなることで不確かさも大きくなることが確認できた。また Met 値推定手法についてはもともとの RMSE が小さい活動量計（平均値）の拡張不確かさが小さい結果となった。

換気量の拡張不確かさに関する影響は換気量が少ない条件では CO_2 濃度よりも発生量からの影響が大きく、換気量が多い条件では人数が増えるにつれて CO_2 濃度計による不確かさの影響が大きくなると考えられる。

6.3.3 非定常状態の換気量および室内濃度

非定常状態の換気量測定および換気性状測定の不確かさを推定するためにモンテカルロ法による繰り返し計算の数値計算を行った。在室者属性および換気量の設定については前節と同様の条件で計算を行った。設定した換気量や在室者属性を用いて換気回路網計算で室内濃度の計算を行い、その値を理論値として数値計算（理論モデル）から算出した不確かさの評価を行った。

この節では、被験者実験のデータを用いて理論計算を行い、不確かさの伝播則より算出した定常状態での不確かさを数値計算より算出した値と比較を行った。今回の不確かさの伝播則による検討では、用いた被験者実験のデータが大きく影響していると考えられる。

本検討では、換気回路網計算にシミュレーションに VentSim バージョン 2.1.5^[6-10]を用いた。このシミュレーションソフトは、独立行政法人建築研究所と（社）プレハブ建築協会の共同研究で開発されたもので、与えられた条件下での空気の流れや、室ごとの給気の充足度 SRF と汚染質等の非定常濃度等が求めることが出来る。「質点」としてモデル化し「質点」間の空気量流動を計算する方法であるため室内空気流動の複雑な動きを無視し、空間の空気の流れを簡潔に知ることが出来る。

VentSim より算出した換気量 $20\text{m}^3/\text{h}$ のケース G~M の計算結果を図 6-41~図 6-46 に、換気量 $20\text{m}^3/\text{h}$ のケース G~M の計算結果を図 6-47~図 6-52 に示す。

換気量 一人当たり $20\text{m}^3/\text{h}$

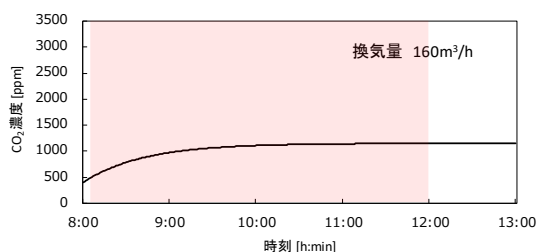


図 6-41 : VentSim の計算結果 (ケース G)

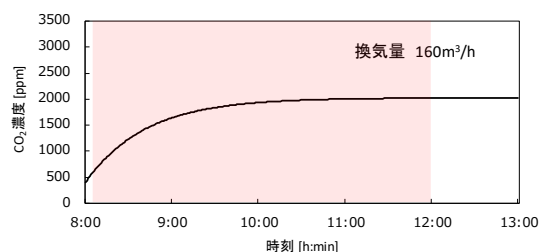


図 6-42 : VentSim の計算結果 (ケース H)

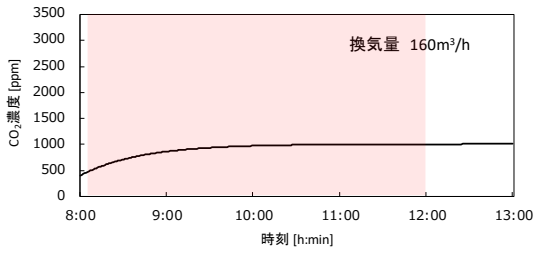


図 6-43 : VentSim の計算結果 (ケース J)

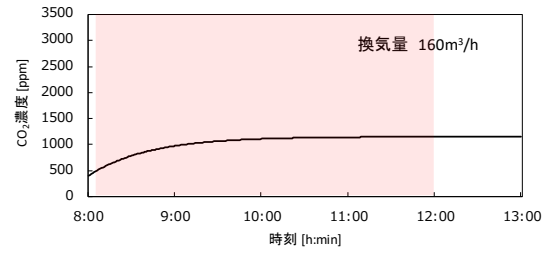


図 6-45 : VentSim の計算結果 (ケース L)

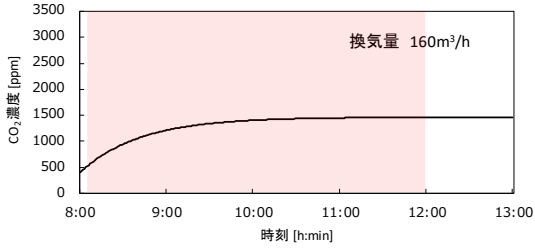


図 6-44 : VentSim の計算結果 (ケース K)

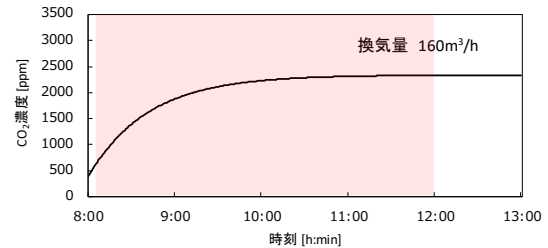


図 6-46 : VentSim の計算結果 (ケース M)

換気量 $160\text{m}^3/\text{h}$ の条件では、ほとんどのケースで定常時の CO_2 濃度は 1000ppm を上回る結果となった。ほとんどのケースが発生開始後 3 時間で定常値になっている。

換気量 一人当たり $45\text{m}^3/\text{h}$

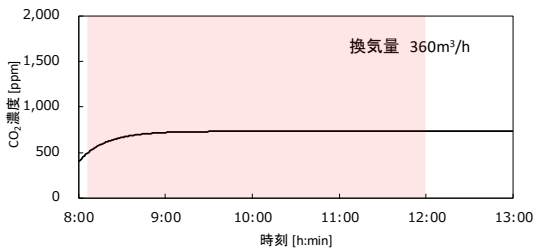


図 6-47 : VentSim の計算結果 (ケース G)

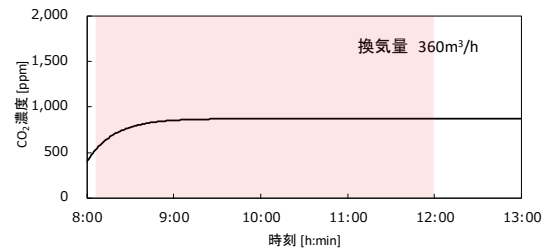


図 6-50 : VentSim の計算結果 (ケース K)

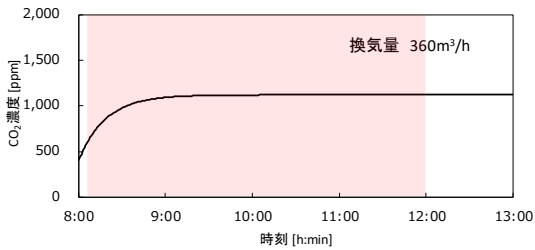


図 6-48 : VentSim の計算結果 (ケース H)

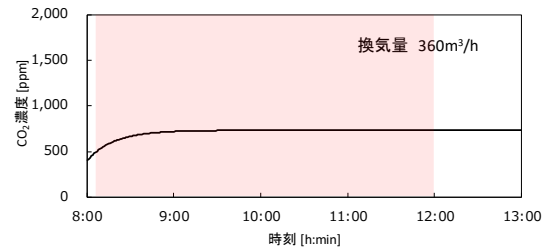


図 6-51 : VentSim の計算結果 (ケース L)

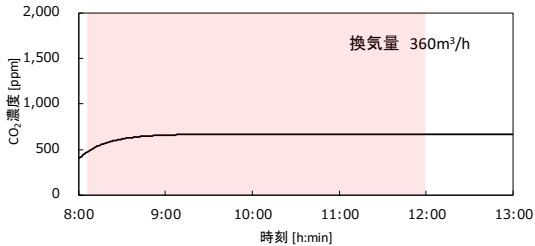


図 6-49 : VentSim の計算結果 (ケース J)

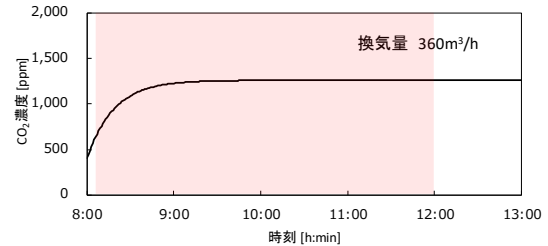


図 6-52 : VentSim の計算結果 (ケース M)

換気量 360m³/h の条件では Met1.0 の条件で 1000ppm を下回り Met1.0 以上のケースで 1000ppm を超える結果となった。

換気量の計算は発生開始直後のデータでは計算値が大きく異なることもあり、発生開始 10 分後から 4 時間のデータを用いて計算を行うことにした。図 6-41～図 6-52 のハッチ部分は計算に用いた範囲を示している。室内 CO₂ 濃度推定も同じ範囲で計算を行っている。

(1) 室内二酸化炭素濃度

換気量 160m³/h

呼出量のみには誤差がある場合で活動量(平均値)の不確かさをを用いた 6 ケースの計算結果について計算値および信頼区間を図 6-53～図 6-58 を示す。全てに誤差があるとした条件の計算値および信頼区間を図 6-59～図 6-64 に示す。

呼出量のみでの計算結果より CO₂ 濃度などの誤差も含む全ての計算結果が、不確かさが大きい結果となった。

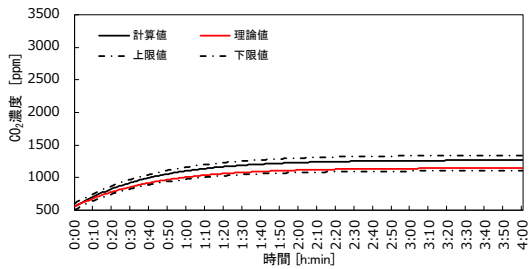


図 6-53 : 濃度 (全て) _ケース G

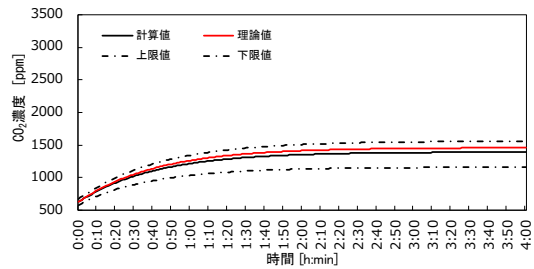


図 6-56 : 濃度 (全て) _ケース K

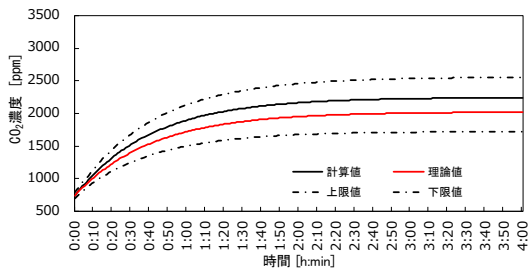


図 6-54 : 濃度 (全て) _ケース H

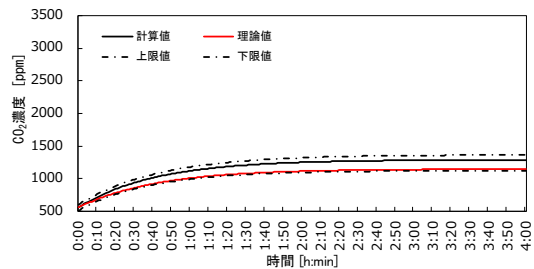


図 6-57 : 濃度 (全て) _ケース L

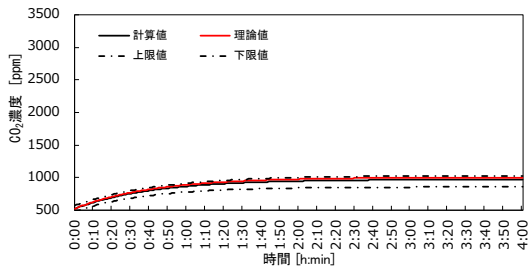


図 6-55 : 濃度 (全て) _ケース J

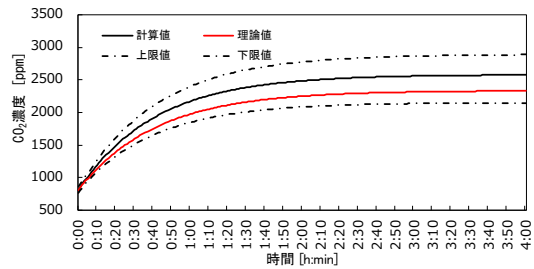


図 6-58 : 濃度 (全て) _ケース M

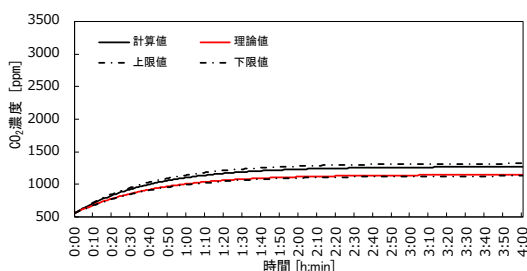


図 6-59 : 濃度 (CO₂呼出量のみ) _ケース G

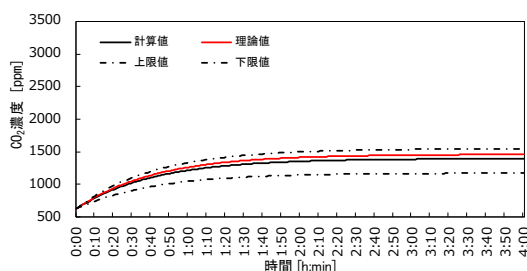


図 6-62 : 濃度 (CO₂呼出量のみ) _ケース K

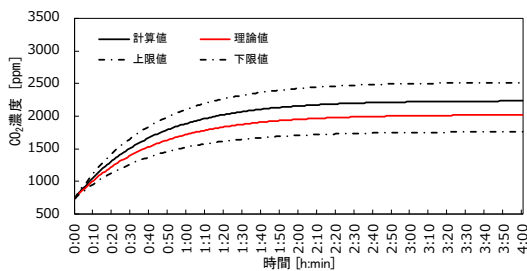


図 6-60 : 濃度 (CO₂呼出量のみ) _ケース H

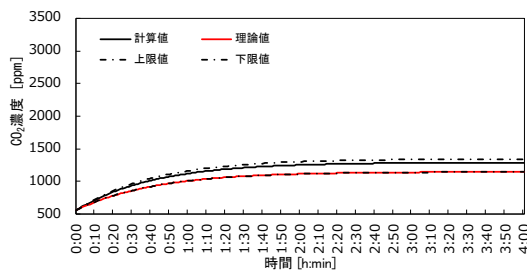


図 6-63 : 濃度 (CO₂呼出量のみ) _ケース L

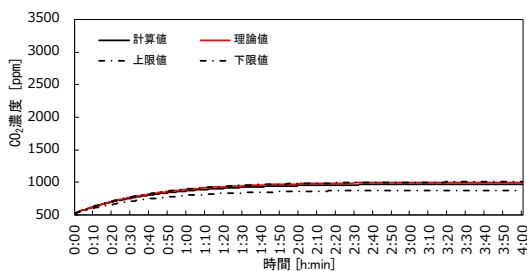


図 6-61 : 濃度 (CO₂呼出量のみ) _ケース J

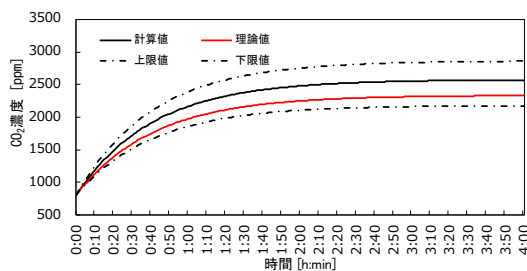


図 6-64 : 濃度 (CO₂呼出量のみ) _ケース M

定常状態での不確かさ (信頼水準 95%) を図 6-65～図 6-68 および表 6-32～図 6-35 に、信頼区間割合を表 6-36 に、標準誤差を表 6-36 に示す。CO₂呼出量のみ誤差がある条件と全部に誤差があるとした条件で推定した不確かさがおおむね伝播則から求めた不確かさに近い値であることを確認した。

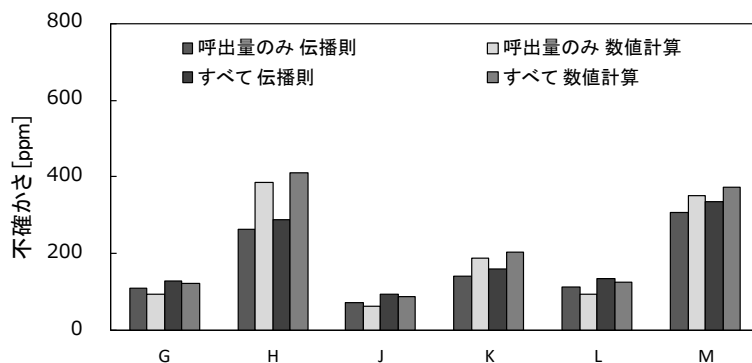


図 6-65 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (活動量計 (平均値))

表 6-32：拡張不確かさ（信頼区間 95%）の計算結果（活動量計（平均値））

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	伝播則	109.2	262.1	72.1	139.9	112.7	306.9
	数値計算	95.3	386.9	63.4	187.2	95.3	350.7
すべて	伝播則	130.0	287.3	93.4	159.5	133.4	336.9
	数値計算	123.0	411.2	89.0	203.5	126.3	372.6

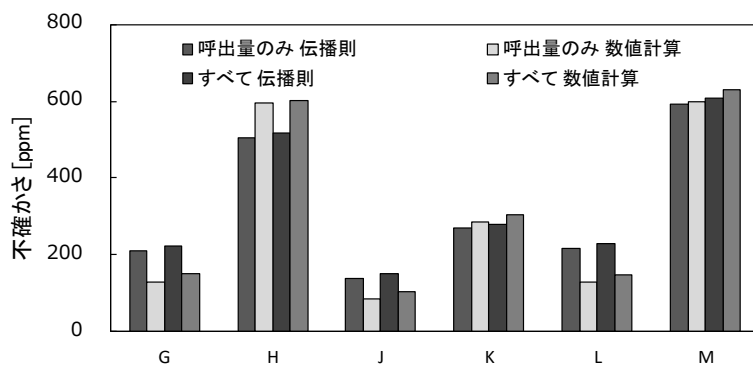


図 6-66：拡張不確かさ（信頼区間 95%）の計算結果（脈拍数計）

表 6-33：拡張不確かさ（信頼区間 95%）の計算結果（脈拍数計）

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	伝播則	210.4	505.2	138.9	269.5	217.2	591.4
	数値計算	128.6	595.6	83.5	284.7	127.2	597.2
すべて	伝播則	221.9	518.7	151.1	280.2	228.6	607.6
	数値計算	149.3	601.7	104.3	303.4	148.4	630.7

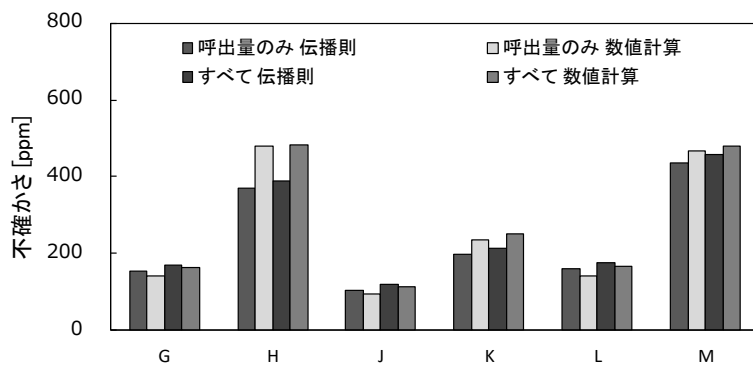


図 6-67：拡張不確かさ（信頼区間 95%）の計算結果（文献値（ASHRAE））

表 6-34：拡張不確かさ（信頼区間 95%）の計算結果（文献値（ASHRAE））

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	伝播則	154.6	371.2	102.1	198.0	159.6	434.6
	数値計算	141.5	479.3	92.8	233.7	142.2	467.7
すべて	伝播則	169.9	389.4	118.1	212.3	174.8	456.3
	数値計算	163.0	484.2	112.8	251.4	164.8	479.6

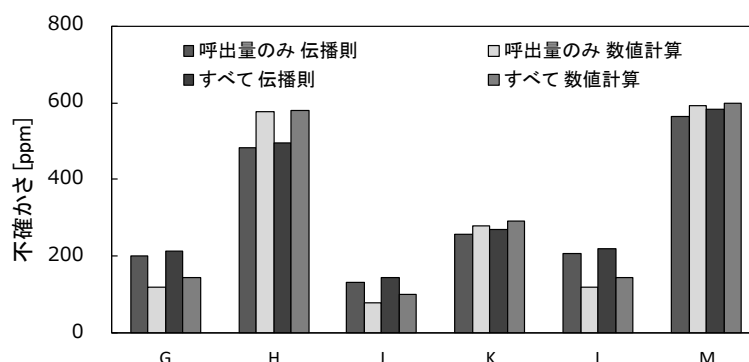


図 6-68：拡張不確かさ（信頼区間 95%）の計算結果（文献値（METs 表））

表 6-35：拡張不確かさ（信頼区間 95%）の計算結果（文献値（METs 表））

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	伝播則	200.9	482.4	132.7	257.3	207.4	564.8
	数値計算	120.6	576.1	78.5	280.0	118.3	591.5
すべて	伝播則	212.9	496.5	145.3	268.5	219.3	581.6
	数値計算	144.1	580.8	101.6	291.5	145.5	597.4

表 6-36：信頼区間割合

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	活動量計（平均値）	99.6	99.6	99.6	97.5	99.6	99.6
	脈拍数計	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6
	文献値（ASHRAE）	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6
	文献値（METs 表）	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6
すべて	活動量計（平均値）	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	脈拍数計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	文献値（ASHRAE）	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	文献値（METs 表）	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

表 6-37：標準誤差

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	活動量計（平均値）	0.61	5.28	0.39	2.8	0.62	5.24
	脈拍数計	0.88	8.3	0.58	4.31	0.93	9.31
	文献値（ASHRAE）	0.73	6.44	0.48	3.32	0.72	6.98
	文献値（METs 表）	0.83	8.03	0.55	4.19	0.84	9.12
すべて	活動量計（平均値）	1.32	5.85	1.05	3.03	1.3	5.66
	脈拍数計	1.53	8.44	1.09	4.54	1.5	9.68
	文献値（ASHRAE）	1.39	6.9	1.11	3.61	1.4	7.51
	文献値（METs 表）	1.5	8.18	1.12	4.33	1.43	9.41

ほとんどのケースでおおむね拡張不確かさを算出できていることを確認した。ケース H の拡張不確かさの差は 1 人だけ Met 値が約 5.0met であったためその影響が大きいと考えられる。また Met 値が小さい条件では、一様乱数から Met 値を算出する方法として用いた二項分布の確立による影響が大きいと考えられる。

計算結果より在室者の Met 値は 1.0 に近いほど不確かさは小さくなり、複数の行為が行われている場合は不確かさが大きくなることが確認できた。信頼区間割合を比較した結果、(活動量計 (平均値)) の呼出量のみの場合についてケースによって割合が低い結果となった。これは計算に用いた被験者実験のデータと濃度の計算値について VentSim などの計算のために値を丸めていたことによる影響や二項分布の確率が一因であると考えられる。

換気量 360m³/h

呼出量のみには誤差があるとした場合で活動量 (平均値) の不確かさをを用いた 6 ケースの計算結果について計算値および信頼区間を図 6-69～図 6-74 に示す。全てに誤差があるとした場合の計算値および信頼区間を図 6-75～図 6-80 に示す。

呼出量のみでの計算結果より CO₂ 濃度などの誤差を含む全てでの計算が、不確かさが大きい結果となった。ほとんどのケースで推定した信頼区間内に理論値がある結果となった。

定常状態での拡張不確かさ (信頼水準 95%) を図 6-81～図 6-84 および表 6-38～表 6-41 に、信頼区間割合を表 6-42 に、標準誤差を表 6-43 に示す。

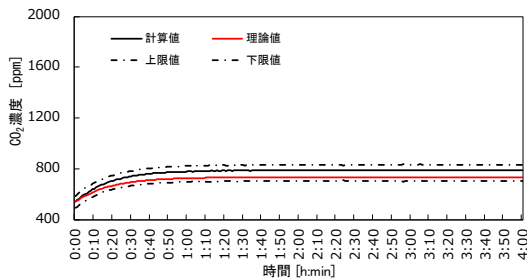


図 6-69 : 濃度 (全て) _ケース G

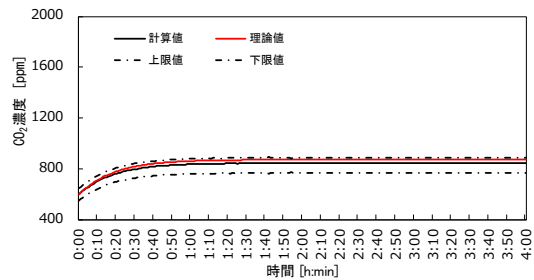


図 6-72 : 濃度 (全て) _ケース K

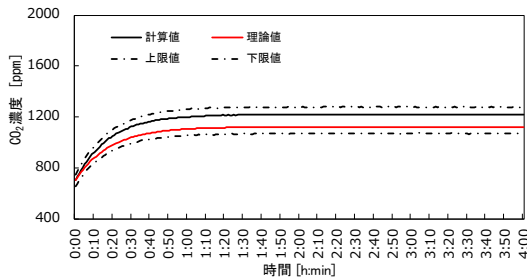


図 6-70 : 濃度 (全て) _ケース H

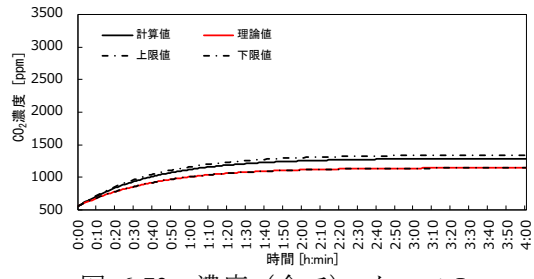


図 6-73 : 濃度 (全て) _ケース L

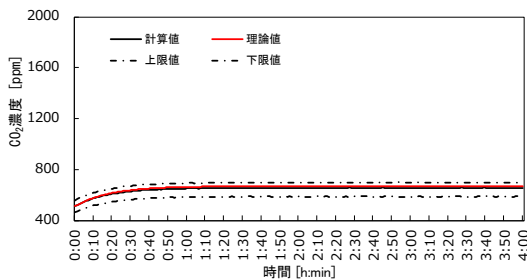


図 6-71 : 濃度 (全て) _ケース J

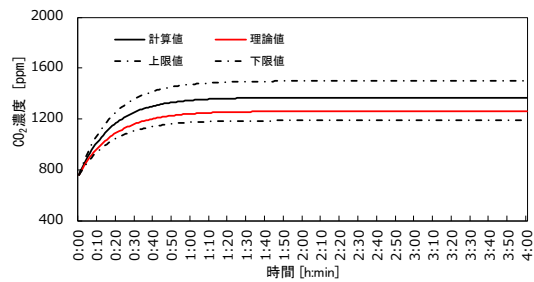


図 6-74 : 濃度 (全て) _ケース M

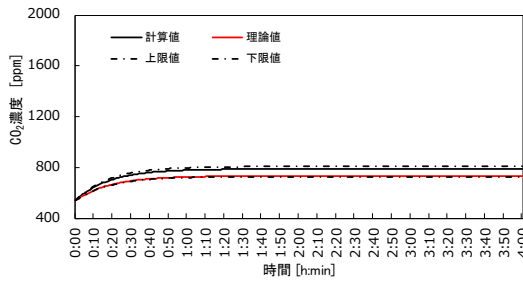


図 6-75 : 濃度 (CO₂呼出量のみ) _ケース G

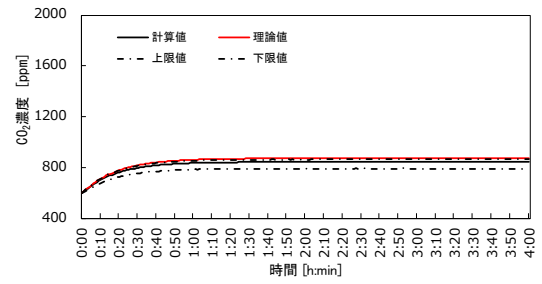


図 6-78 : 濃度 (CO₂呼出量のみ) _ケース K

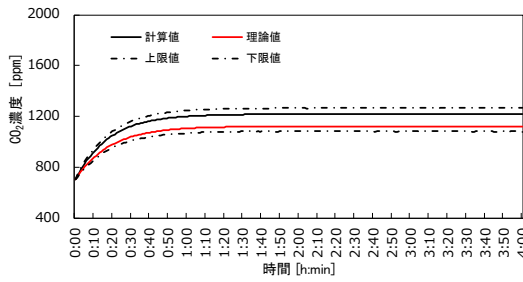


図 6-76 : 濃度 (CO₂呼出量のみ) _ケース H

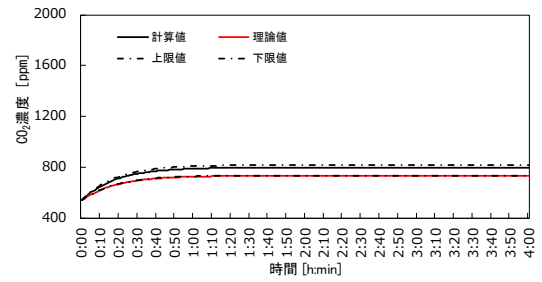


図 6-79 : 濃度 (CO₂呼出量のみ) _ケース L

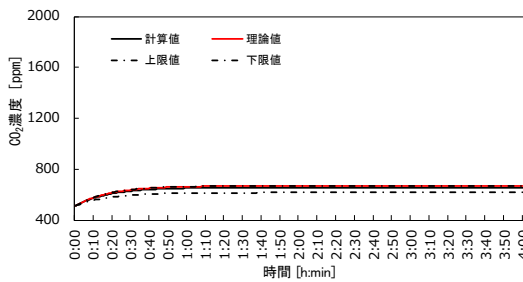


図 6-77 : 濃度 (CO₂呼出量のみ) _ケース J

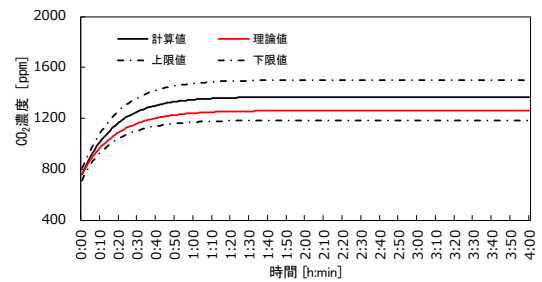


図 6-80 : 濃度 (CO₂呼出量のみ) _ケース M

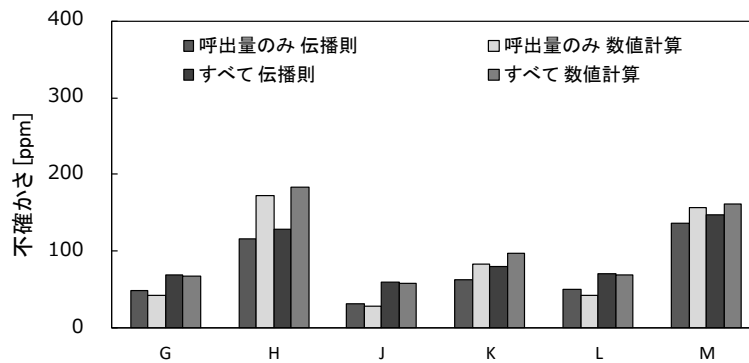


図 6-81 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (活動量計 (平均値))

表 6-38 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (活動量計 (平均値))

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	伝播則	48.5	116.5	32.1	62.2	50.1	136.4
	数値計算	42.5	172.5	28.2	83.4	42.6	156.4
すべて	伝播則	69.7	128.1	58.9	80.0	70.8	147.2
	数値計算	67.9	182.7	58.1	97.5	69.2	161.4

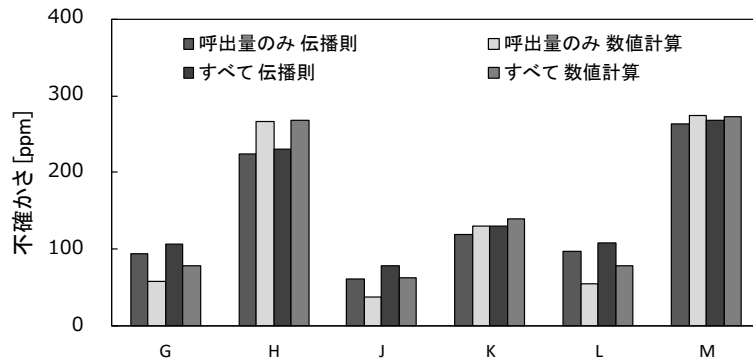


図 6-82：拡張不確かさ（信頼区間 95%）の計算結果（脈拍数計）

表 6-39：拡張不確かさ（信頼区間 95%）の計算結果（脈拍数計）

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	伝播則	93.5	224.5	61.7	119.8	96.5	262.9
	数値計算	57.4	265.6	37.3	129.5	55.5	274.1
すべて	伝播則	106.0	230.8	79.1	129.9	108.7	268.6
	数値計算	77.8	268.4	63.1	140.0	78.7	272.6

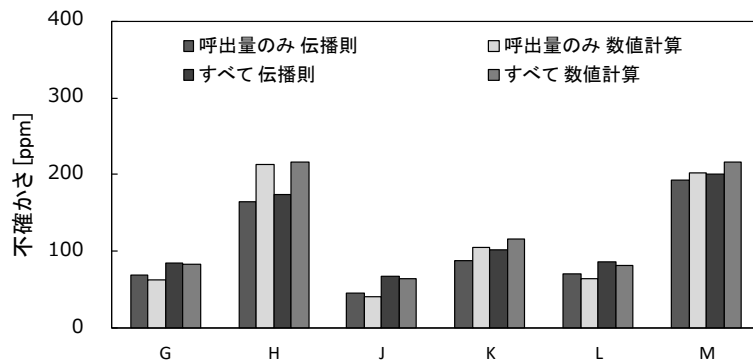


図 6-83：拡張不確かさ（信頼区間 95%）の計算結果（文献値（ASHRAE））

表 6-40：拡張不確かさ（信頼区間 95%）の計算結果（文献値（ASHRAE））

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	伝播則	68.7	165.0	45.4	88.0	70.9	193.2
	数値計算	63.1	213.6	41.4	105.3	64.2	201.4
すべて	伝播則	85.0	173.4	67.1	101.4	86.8	200.9
	数値計算	83.6	216.6	63.8	116.5	81.0	216.4

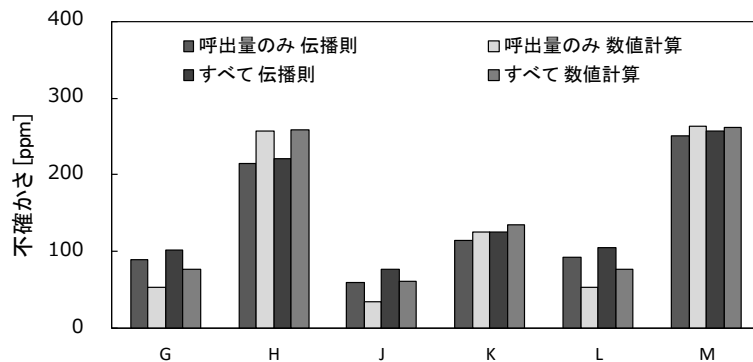


図 6-84：拡張不確かさ（信頼区間 95%）の計算結果（文献値（METs 表））

表 6-41：拡張不確かさ（信頼区間 95%）の計算結果（文献値（METs 表））

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	伝播則	89.3	214.4	59.0	114.4	92.2	251.0
	数値計算	53.8	256.7	35.0	124.8	52.8	263.7
すべて	伝播則	102.3	220.9	77.0	125.0	104.9	257.0
	数値計算	76.1	259.3	61.9	135.4	76.1	262.1

表 6-42：信頼区間割合

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	活動量計（平均値）	99.6	99.6	99.6	99.6	93.4	99.6
	脈拍数計	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6
	文献値（ASHRAE）	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6
	文献値（METs 表）	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6
すべて	活動量計（平均値）	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	脈拍数計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	文献値（ASHRAE）	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	文献値（METs 表）	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

表 6-43：標準誤差

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	活動量計（平均値）	0.27	2.41	0.18	1.25	0.29	2.38
	脈拍数計	0.39	3.70	0.26	1.93	0.40	4.22
	文献値（ASHRAE）	0.32	2.97	0.21	1.50	0.33	3.23
	文献値（METs 表）	0.37	3.58	0.24	1.87	0.38	4.07
すべて	活動量計（平均値）	0.87	2.58	0.81	1.43	0.87	2.42
	脈拍数計	0.92	3.76	0.84	2.08	0.92	4.29
	文献値（ASHRAE）	0.89	3.09	0.85	1.74	0.85	3.39
	文献値（METs 表）	0.91	3.65	0.84	2.02	0.90	4.13

椅座静位などの 1.0met の行為であればどの Met 値推定手法でもおおむね不確かさが推定できることを確認した。1人当りの換気量が多いケースでも同様に、Met 値が大きい条件では不確かさの計算値が理論値と差が大きくなる結果となった。度の計算結果でもケース K の不確かさは伝播則より得られた値より大きい結果であった。

信頼区間割合については全てに誤差がある場合は全てのケースで信頼区間内に理論値があることを確認した。不確かさの推定について Met 値推定手法として活動量計（平均値）および文献値（ASHRAE）をの不確かさを用いて計算することで定常状態の不確かさを概ね推定することが出来ることを確認した。不確かさ推定では、在室者の Met 値に差は少ない条件にすることで推定精度が向上すると考えられる。

(2) 換気量

換気量 160m³/h

呼出量のみには誤差があるとした場合で活動量（平均値）の不確かさを用いた 6 ケースの計算結果について計算値および信頼区間を図 6-85～図 6-90 に示す。全てに誤差があるとした場合の計算値および信頼区間を図 6-91～図 6-96 に示す。ここでは設定した換気量を理論値と記す。

定常状態での不確かさ（信頼水準 95%）を図 6-97～図 6-100 および表 6-44～表 6-47 に、信頼区間割合を表 6-48 に、標準誤差を表 6-49 に示す。

ケース L (CO₂ 呼出量のみ) の条件を除いて全てのケースで信頼区間割合が 100%であった。CO₂ 濃度の不確かさ算出と同様に被験者実験のデータによる影響で信頼区間内に理論値が入らなかったと考えられる。

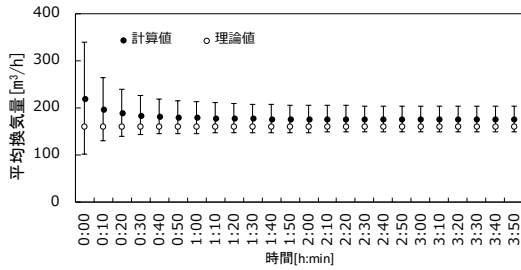


図 6-85 : 換気量 (全て) _ケース G

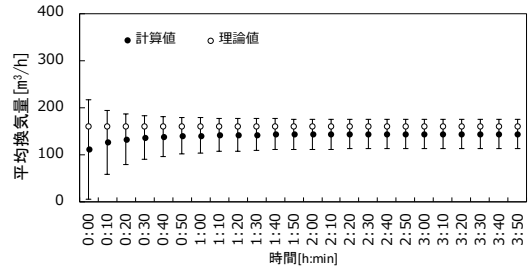


図 6-88 : 換気量 (全て) _ケース K

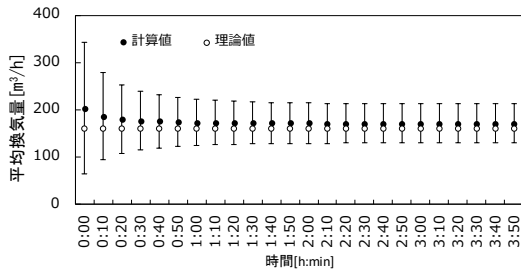


図 6-86 : 換気量 (全て) _ケース H

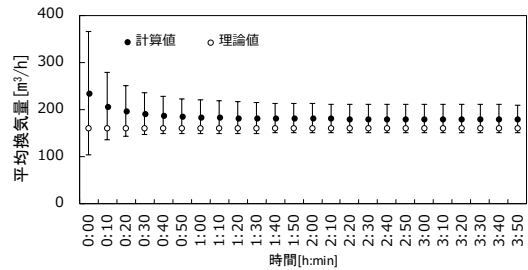


図 6-89 : 換気量 (全て) _ケース L

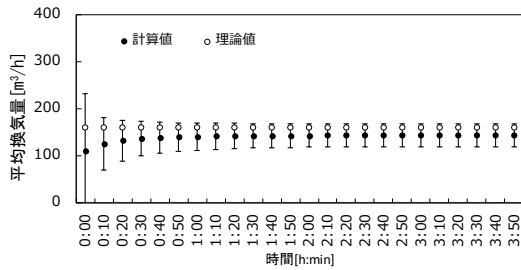


図 6-87 : 換気量 (全て) _ケース J

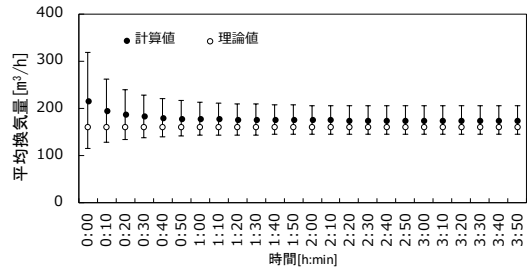


図 6-90 : 換気量 (全て) _ケース M

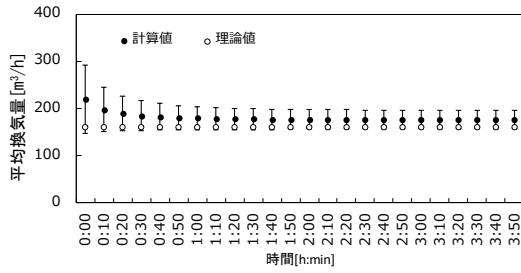


図 6-91 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース G

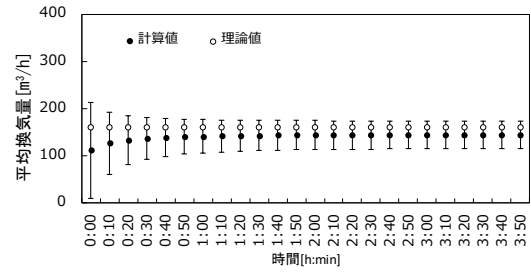


図 6-94 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース K

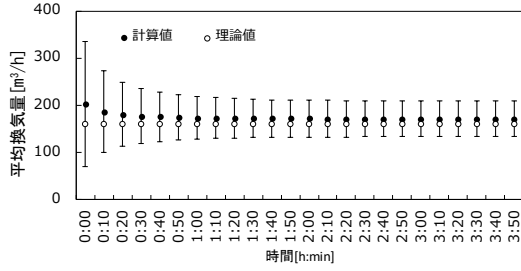


図 6-92 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース H

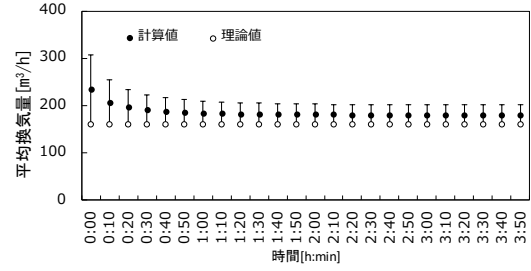


図 6-95 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース L

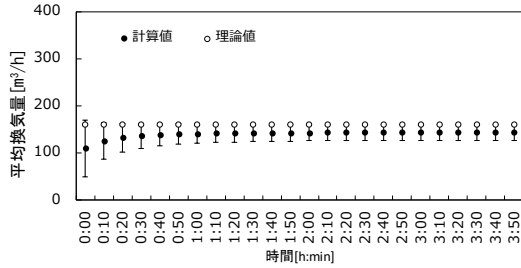


図 6-93 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース J

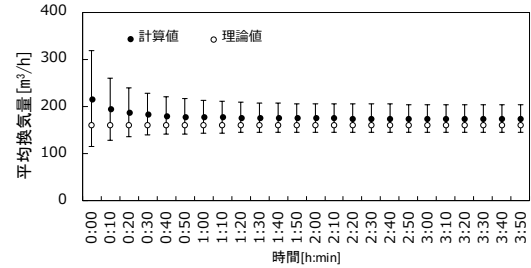


図 6-96 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース M

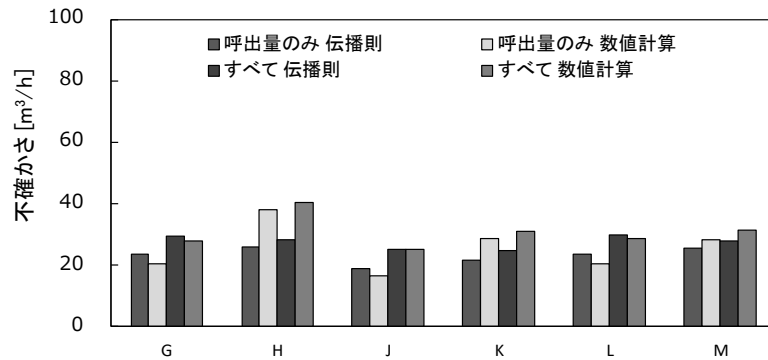


図 6-97 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (活動量計 (平均値))

表 6-44 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (活動量計 (平均値))

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	伝播則	23.5	25.9	21.5	21.5	23.8	25.4
	数値計算	20.6	38.2	16.6	28.9	20.6	28.3
すべて	伝播則	29.4	28.5	24.8	24.8	29.7	27.8
	数値計算	27.8	40.4	25.2	31.2	28.5	29.6

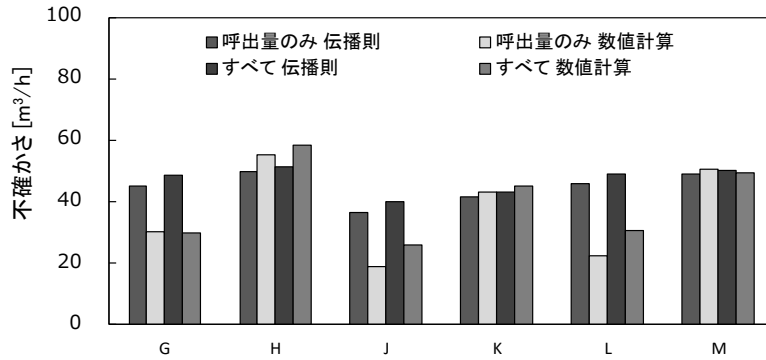


図 6-98：拡張不確かさ（信頼区間 95%）の計算結果（脈拍数計）

表 6-45：拡張不確かさ（信頼区間 95%）の計算結果（脈拍数計）

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	伝播則	45.2	49.9	36.7	41.4	45.9	48.9
	数値計算	30.2	55.2	18.9	43.1	22.3	50.6
すべて	伝播則	48.6	51.3	40.2	43.2	49.2	50.2
	数値計算	29.7	58.5	25.8	45.0	30.7	49.4

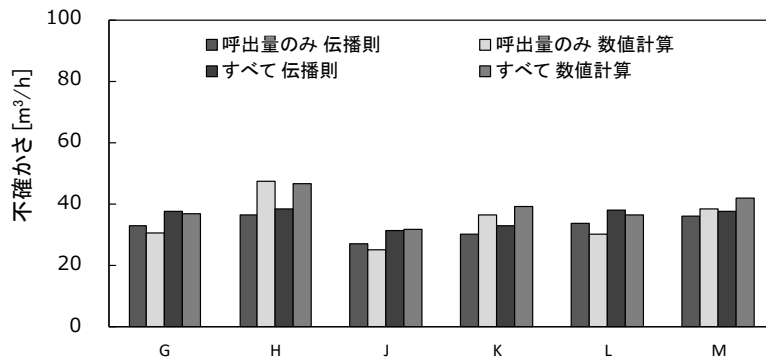


図 6-99：拡張不確かさ（信頼区間 95%）の計算結果（文献値（ASHRAE））

表 6-46：拡張不確かさ（信頼区間 95%）の計算結果（文献値（ASHRAE））

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	伝播則	33.2	36.7	27.0	30.5	33.7	36.0
	数値計算	30.4	47.5	25.2	36.4	30.3	38.6
すべて	伝播則	37.7	38.5	31.6	32.8	38.1	37.7
	数値計算	36.9	46.8	31.7	39.2	36.5	41.8

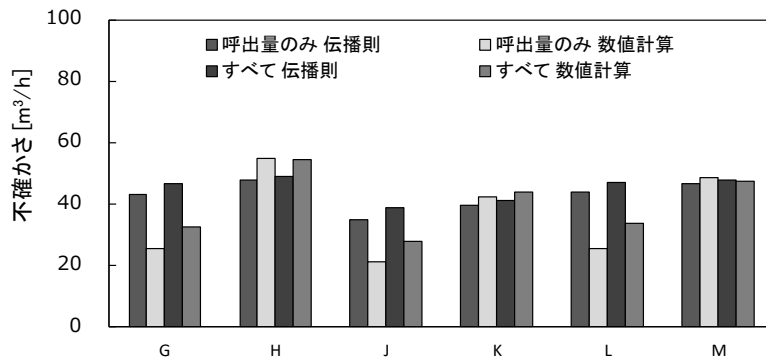


図 6-100：拡張不確かさ（信頼区間 95%）の計算結果（文献値（METs 表））

表 6-47：拡張不確かさ（信頼区間 95%）の計算結果（文献値（METs 表））

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	伝播則	43.1	47.7	35.0	39.6	43.8	46.7
	数値計算	25.6	55.1	21.2	42.2	25.7	48.6
すべて	伝播則	46.7	49.1	38.7	41.4	47.3	48.1
	数値計算	32.4	54.4	28.4	43.0	33.9	47.3

表 6-48：信頼区間割合

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	活動量計（平均値）	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	脈拍数計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	文献値（ASHRAE）	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	文献値（METs 表）	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
すべて	活動量計（平均値）	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	脈拍数計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	文献値（ASHRAE）	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	文献値（METs 表）	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

表 6-49：標準誤差

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	活動量計（平均値）	0.25	1.06	0.20	0.82	0.26	0.84
	脈拍数計	0.70	1.52	0.26	1.30	0.30	1.55
	文献値（ASHRAE）	0.3	1.27	0.25	0.99	0.32	1.12
	文献値（METs 表）	0.34	1.51	0.28	1.21	0.34	1.49
すべて	活動量計（平均値）	0.64	1.13	0.61	0.95	0.61	0.95
	脈拍数計	0.67	1.58	0.61	1.35	0.69	1.51
	文献値（ASHRAE）	0.67	1.35	0.64	1.08	0.71	1.23
	文献値（METs 表）	0.72	1.53	0.63	1.26	0.72	1.45

ほとんどのケースで拡張不確かさをおおむね推定できていると考えられるが、Met 値が小さいケース G, J, L については数値計算より算出した値が小さい傾向が確認できた。Met 値推定の不確かさが大きい脈拍数計や METs 表の計算結果では、おおむね不確かさが不確かさの伝播則から算出した値と近い結果となった。Met 値が高い在室者がいる条件のほうが拡張不確かさの推定精度が高い結果となった。Met 値が 1.0 に近い条件では二項分布から Met 値を算出しているために項分布の確立が大きく影響していると考えられる。

濃度推定と同様に、被験者実験のデータや VentSim による計算値の影響や Met 値を 2 項分布で算出する際の確率について精査が必要であると考ええる。

換気量 360m³/h

呼出量のみには誤差があったとした場合で活動量(平均値)の不確かさを用いた 6 ケースの計算結果について計算値および信頼区間を図 6-101～図 6-106 に示す。全てに誤差があったとした場合の計算値および信頼区間を図 6-107～図 6-112 に示す。

定常状態での不確かさ(信頼水準 95%)を図 6-113～図 6-116 および表 6-50～表 6-53 に、信頼区間割合を表 6-54 に、標準誤差を表 6-55 に示す。

誤差が全部にあるとした条件と CO₂ 呼出量のみにあるとした条件のほとんどのケースで拡張不確かさから求めた信頼区間内に理論値があることを確認した。

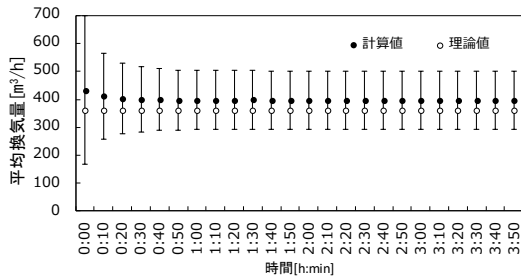


図 6-101 : 換気量 (全て) _ケース G

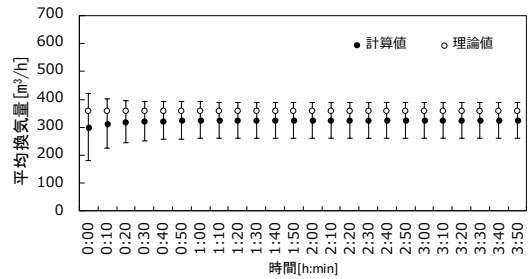


図 6-104 : 換気量 (全て) _ケース K

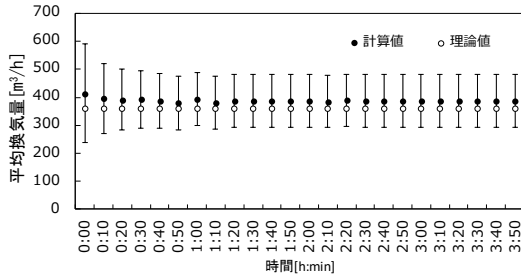


図 6-102 : 換気量 (全て) _ケース H

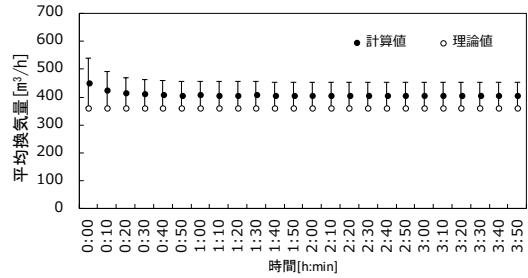


図 6-105 : 換気量 (全て) _ケース L

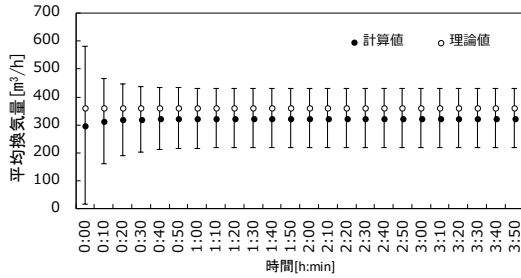


図 6-103 : 換気量 (全て) _ケース J

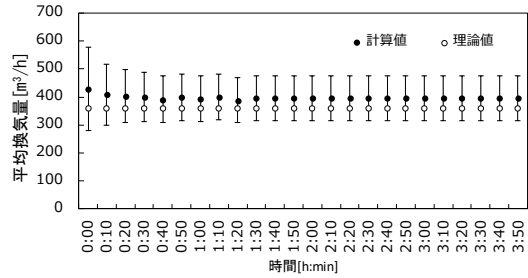


図 6-106 : 換気量 (全て) _ケース M

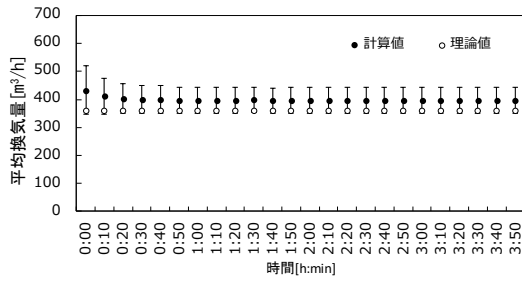


図 6-107 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース G

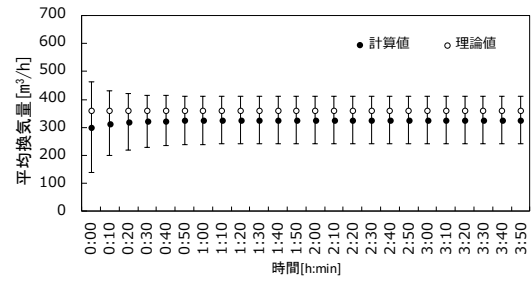


図 6-110 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース K

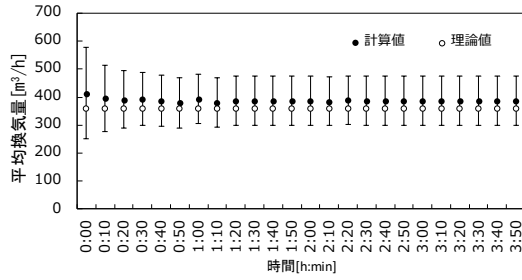


図 6-108 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース H

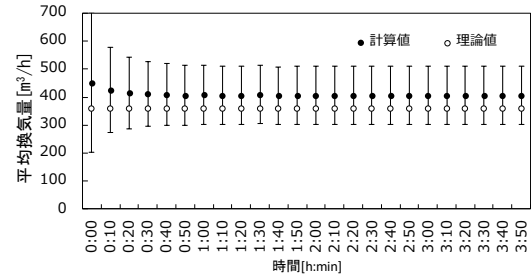


図 6-111 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース L

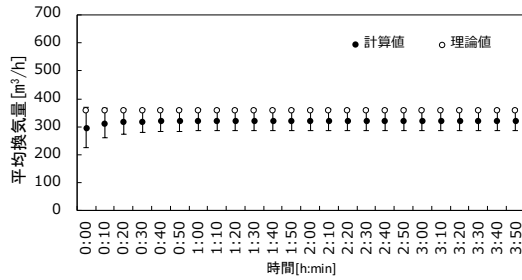


図 6-109 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース J

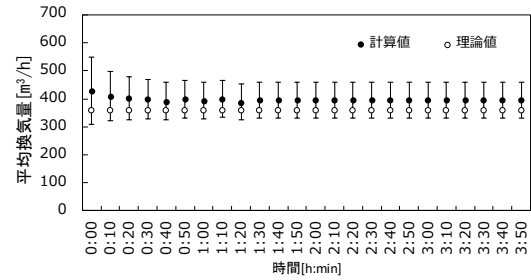


図 6-112 : 換気量 (呼出量のみ) _ケース M

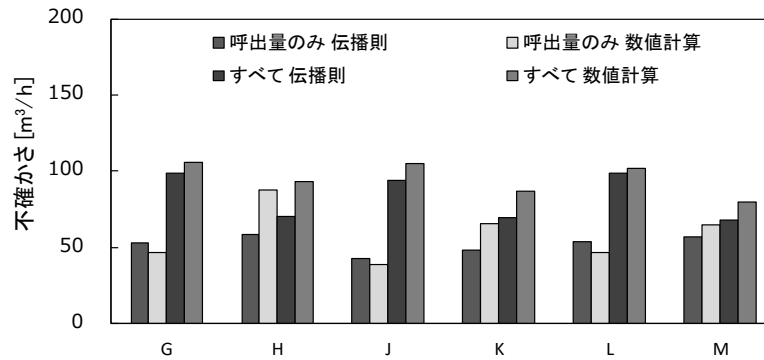


図 6-113 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (活動量計 (平均値))

表 6-50 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (活動量計 (平均値))

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	伝播則	52.8	48.4	42.9	48.4	53.6	57.1
	数値計算	46.1	87.4	38.6	65.3	46.4	64.9
すべて	伝播則	98.9	69.5	93.9	69.5	98.8	67.7
	数値計算	105.5	93.3	105.1	86.6	101.7	79.7

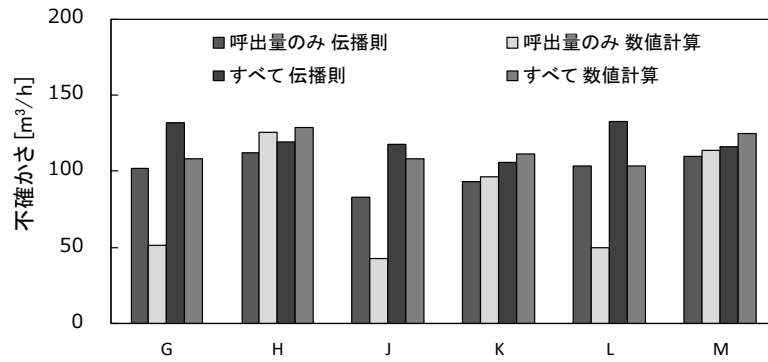


図 6-114 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (脈拍数計)

表 6-51 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (脈拍数計)

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	伝播則	101.7	112.3	82.5	93.2	103.2	110.1
	数値計算	51.2	125.2	42.4	96.4	49.8	113.9
すべて	伝播則	131.7	119.1	117.4	105.8	132.4	115.9
	数値計算	108.9	129.0	107.8	111.5	103.8	124.3

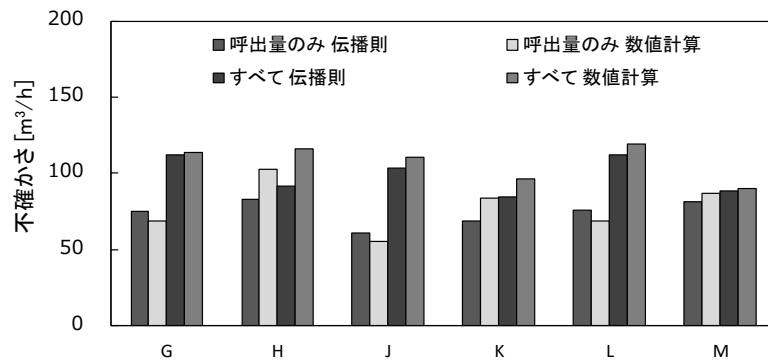


図 6-115 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (文献値 (ASHRAE))

表 6-52 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (文献値 (ASHRAE))

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	伝播則	74.7	82.6	60.7	68.5	75.9	80.9
	数値計算	68.3	102.5	55.6	83.7	68.5	87.0
すべて	伝播則	112.2	91.6	103.2	84.8	112.4	88.6
	数値計算	113.8	115.7	110.5	96.2	119.1	89.7

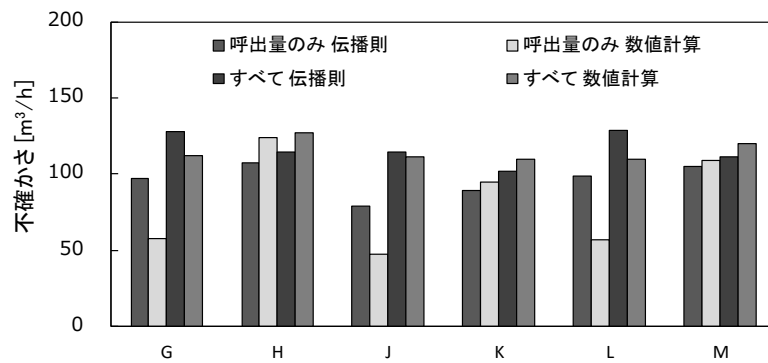


図 6-116 : 拡張不確かさ (信頼区間 95%) の計算結果 (文献値 (METs 表))

表 6-53：拡張不確かさ（信頼区間 95%）の計算結果（文献値（METs 表））

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	伝播則	97.1	107.3	78.8	89.0	98.6	105.1
	数値計算	57.4	123.5	47.5	94.4	56.7	109.2
すべて	伝播則	128.2	114.3	114.8	102.1	128.8	111.2
	数値計算	112.1	126.7	111.0	109.5	109.6	119.8

表 6-54：信頼区間割合

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	活動量計（平均値）	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	脈拍数計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	文献値（ASHRAE）	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	文献値（METs 表）	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
すべて	活動量計（平均値）	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	脈拍数計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	文献値（ASHRAE）	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	文献値（METs 表）	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

表 6-55：標準誤差

		G	H	J	K	L	M
呼出量のみ	活動量計（平均値）	0.55	2.37	0.45	1.91	0.57	1.91
	脈拍数計	0.80	3.50	0.66	2.80	0.86	3.42
	文献値（ASHRAE）	0.67	2.89	0.55	2.29	0.72	2.60
	文献値（METs 表）	0.76	3.40	0.63	2.78	0.80	3.28
すべて	活動量計（平均値）	2.99	2.64	3.07	2.61	2.80	2.38
	脈拍数計	3.11	3.66	3.18	3.31	2.97	3.77
	文献値（ASHRAE）	3.11	3.08	3.20	2.87	2.95	2.98
	文献値（METs 表）	3.11	3.57	3.16	3.32	2.88	3.64

不確かさについて CO₂ 呼出量のみの場合では、Met 値推定手法として文献値（ASHRAE）および活動量計の不確かさより算出した不確かさは不確かさの伝播則より算出した値と近い値となった。全部に誤差があるとした条件では、不確かさはほとんどのケースで一致している結果となった。一人当たりの換気量が 20m³/h の時と同様にほとんどのケースで信頼区間割合が 100%という結果になった。信頼区間割合については全てに誤差がある場合は全てのケースで信頼区間内に理論値があることを確認した。

一人当たりの換気量が多くなることで呼出量のみ誤差を与えた条件では、数値計算より算出した不確かさは伝播則より算出した不確かさとの差があることを確認した。

数値計算の理論モデルを用いることで定常状態の拡張不確かさをおおむね推定できることを確認した。不確かさ推定では、在室者の Met 値に差は少ない条件にすることで推定精度が向上すると考えられる。

6.4 実測値との比較

実測モデルがどのような信頼区間を算出するのかを把握するために理論モデルと比較を行った。実測モデルを用いて実測値が推定した信頼区間の中にあるのか確認を行った。また実測モデルではマスフローコントローラーによる測定結果についても検討を行った。在室者属性などの条件については理論計算と同様の条件で計算を行った。

6.4.1 理論モデルと実測モデルの比較

実測モデルの信頼区間を把握する目的で検討を行った。伝播則から算出した値、理論モデルおよび実測モデルから算出し、比較を行った。算出したCO₂濃度推定の不確かさを表6-56～表6-57に、換気量推定の不確かさを表6-58～表6-59に、CO₂濃度推定の信頼区間割合を表6-60～表6-61に、換気量推定の信頼区間割合を表6-62～表6-63に、CO₂濃度推定の標準誤差を表6-64～表6-65に、換気量推定の標準誤差を表6-66～表6-67に示す。

表 6-56 : CO₂濃度推定の拡張不確かさ (160 m³/h)

		G	H	J	K	L	M	
活動量計 (平均値)	伝播則	130.0	287.3	93.4	159.5	133.4	336.9	
	数値計算	理論モデル	123.0	411.2	89.0	203.5	126.3	372.6
		実測モデル	99.8	208.5	72.2	86.1	104.7	124.0
脈拍数計	伝播則	221.9	518.7	151.1	280.2	228.6	607.6	
	数値計算	理論モデル	149.3	601.7	104.3	303.4	148.4	630.7
		実測モデル	106.2	311.4	76.6	121.1	111.5	186.1
文献値 (ASHRAE)	伝播則	169.9	389.4	118.1	212.3	174.8	456.3	
	数値計算	理論モデル	163.0	484.2	112.8	251.4	164.8	479.6
		実測モデル	142.0	255.5	98.8	115.9	142.9	142.4
文献値 (METs 表)	伝播則	212.9	496.5	145.3	268.5	219.3	581.6	
	数値計算	理論モデル	144.1	580.8	101.6	291.5	145.5	597.4
		実測モデル	120.4	304.9	84.5	124.9	120.6	177.2

表 6-57 : CO₂濃度推定の拡張不確かさ (360 m³/h)

		G	H	J	K	L	M	
活動量計 (平均値)	伝播則	69.7	128.1	58.9	80.0	70.8	147.2	
	数値計算	理論モデル	67.9	182.7	58.1	97.5	69.2	161.4
		実測モデル	58.3	104.2	58.1	59.9	64.5	67.6
脈拍数計	伝播則	106.0	230.8	79.1	129.9	108.7	268.6	
	数値計算	理論モデル	77.8	268.4	63.1	140.0	78.7	272.6
		実測モデル	60.7	146.8	49.2	66.9	62.9	94.0
文献値 (ASHRAE)	伝播則	85.0	173.4	67.1	101.4	86.8	200.9	
	数値計算	理論モデル	83.6	216.6	65.9	118.3	82.8	210.4
		実測モデル	72.6	119.6	56.4	65.0	73.7	76.6
文献値 (METs 表)	伝播則	102.3	220.9	77.0	125.0	104.9	257.0	
	数値計算	理論モデル	76.1	259.3	61.9	135.4	76.1	262.1
		実測モデル	65.2	144.4	51.9	67.0	67.6	90.9

表 6-58 : 換気量推定の不確かさ (160 m³/h)

		G	H	J	K	L	M	
活動量計 (平均値)	伝播則	29.4	28.5	24.8	24.8	29.7	27.8	
	数値計算	理論モデル	27.6	41.1	24.3	30.9	29.7	29.6
		実測モデル	30.4	26.0	30.7	21.6	30.7	18.0
脈拍数計	伝播則	48.6	51.3	40.2	43.2	49.2	50.2	
	数値計算	理論モデル	33.1	58.1	28.6	44.5	35.3	49.4
		実測モデル	34.5	34.3	33.5	26.1	35.1	23.3
文献値 (ASHRAE)	伝播則	37.7	38.5	31.6	32.8	38.1	37.7	
	数値計算	理論モデル	34.9	48.4	31.4	37.0	37.1	40.6
		実測モデル	37.3	30.1	35.7	24.7	37.8	20.2
文献値 (METs 表)	伝播則	46.7	49.1	38.7	41.4	47.3	48.1	
	数値計算	理論モデル	32.4	54.4	28.4	43.0	33.4	51.4
		実測モデル	33.5	33.3	33.0	25.6	34.0	22.8

表 6-59 : 換気量推定の不確かさ (360 m³/h)

		G	H	J	K	L	M	
活動量計 (平均値)	伝播則	98.9	69.5	93.9	69.5	98.8	67.7	
	数値計算	理論モデル	104.4	93.4	105.1	84.3	103.6	79.7
		実測モデル	92.6	61.2	97.7	57.3	95.6	41.4
脈拍数計	伝播則	131.7	119.1	117.4	105.8	132.4	115.9	
	数値計算	理論モデル	112.9	129.0	113.4	109.9	114.7	124.8
		実測モデル	100.0	80.3	102.2	66.2	104.2	53.7
文献値 (ASHRAE)	伝播則	112.2	91.6	103.2	84.8	112.4	88.6	
	数値計算	理論モデル	118.5	109.0	115.9	96.2	118.7	98.1
		実測モデル	105.9	69.5	106.7	63.0	109.1	45.4
文献値 (METs 表)	伝播則	128.2	114.3	114.8	102.1	128.8	111.2	
	数値計算	理論モデル	111.0	126.7	111.0	106.8	111.6	119.8
		実測モデル	97.4	80.3	102.9	65.4	102.1	54.0

表 6-60 : CO₂ 濃度推定の信頼区間割合 (160 m³/h)

	G	H	J	K	L	M
活動量計 (平均値)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	6.6
脈拍数計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	60.2
文献値 (ASHRAE)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	8.7
文献値 (METs 表)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	17.0

表 6-61 : CO₂ 濃度推定の信頼区間割合 (360 m³/h)

	G	H	J	K	L	M
活動量計 (平均値)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	15.8
脈拍数計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
文献値 (ASHRAE)	100.0	100.0	100.0	100.0	90.9	9.5
文献値 (METs 表)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

表 6-62 : 換気量推定の信頼区間割合 (160 m³/h)

	G	H	J	K	L	M
活動量計 (平均値)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	91.7
脈拍数計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
文献値 (ASHRAE)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
文献値 (METs 表)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

表 6-63 : 換気量推定の信頼区間割合 (360 m³/h)

	G	H	J	K	L	M
活動量計 (平均値)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
脈拍数計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
文献値 (ASHRAE)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
文献値 (METs 表)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

表 6-64 : CO₂濃度推定の標準誤差 (160 m³/h)

		G	H	J	K	L	M
活動量計 (平均値)	理論モデル	1.32	5.85	1.05	3.03	1.30	5.66
	実測モデル	0.67	0.91	0.66	0.75	0.68	0.93
脈拍数計	理論モデル	1.53	8.44	1.09	4.54	1.50	9.68
	実測モデル	0.67	1.14	0.64	0.82	0.68	1.23
文献値 (ASHRAE)	理論モデル	1.39	6.90	1.11	3.61	1.40	7.51
	実測モデル	0.67	0.98	0.66	0.77	0.67	1.07
文献値 (METs 表)	理論モデル	1.50	8.18	1.12	4.33	1.43	9.41
	実測モデル	0.63	0.95	0.66	0.78	0.64	1.10

表 6-65 : CO₂濃度推定の標準誤差 (360 m³/h)

		G	H	J	K	L	M
活動量計 (平均値)	理論モデル	0.87	2.58	0.81	1.43	0.87	2.42
	実測モデル	0.66	0.75	0.63	0.69	0.66	0.75
脈拍数計	理論モデル	0.92	3.76	0.84	2.08	0.92	4.29
	実測モデル	0.66	0.88	0.63	0.73	0.66	0.94
文献値 (ASHRAE)	理論モデル	0.89	3.09	0.82	1.75	0.88	3.31
	実測モデル	0.62	0.79	0.65	0.71	0.62	0.83
文献値 (METs 表)	理論モデル	0.91	3.65	0.84	2.02	0.90	4.13
	実測モデル	0.66	0.87	0.63	0.72	0.66	0.92

表 6-66 : 換気量推定の標準誤差 (160 m³/h)

		G	H	J	K	L	M
活動量計 (平均値)	理論モデル	0.63	1.09	0.59	0.92	0.67	0.89
	実測モデル	0.77	0.57	0.82	0.6	0.74	0.47
脈拍数計	理論モデル	0.7	1.57	0.64	1.33	0.74	1.51
	実測モデル	0.77	0.66	0.82	0.67	0.74	0.59
文献値 (ASHRAE)	理論モデル	0.67	1.35	0.64	1.08	0.71	1.23
	実測モデル	0.78	0.60	0.82	0.63	0.75	0.52
文献値 (METs 表)	理論モデル	0.71	1.53	0.65	1.3	0.68	1.56
	実測モデル	0.78	0.65	0.81	0.62	0.69	0.52

表 6-67：換気量推定の標準誤差 (360 m³/h)

		G	H	J	K	L	M
活動量計 (平均値)	理論モデル	2.99	2.64	3.07	2.53	2.87	2.38
	実測モデル	2.66	1.42	2.79	1.73	2.62	1.17
脈拍数計	理論モデル	3.11	3.66	3.18	3.31	2.97	3.77
	実測モデル	2.68	1.63	2.88	1.81	2.62	1.37
文献値 (ASHRAE)	理論モデル	3.11	3.08	3.2	2.87	2.95	2.98
	実測モデル	2.67	1.63	2.88	1.81	2.62	1.39
文献値 (METs 表)	理論モデル	3.07	3.57	3.16	3.23	2.94	3.64
	実測モデル	2.70	1.61	2.90	1.80	2.63	1.36

不確かさは伝播則より算出した値と異なる結果となったが、ほとんどのケースで理論値が信頼区間内にある結果となった。理由として非定常状態を評価することが目的であるため誤差の与え方が違うことなどの定常状態との差であると考えられる。信頼区間内に理論値がある結果となった。理論計算であるため実測のように把握しきれない不確かさが無いことが大きな要因だと考えられる。

実測モデルは一定の誤差と瞬時の誤差の2つが発生していると仮定しているため、合計されることで信頼区間の幅が狭い推定区間となり、理論モデルよりも小さい拡張不確かさを算出する結果となった。最大で理論モデルの2分の1の値という結果になった。

6.4.2 室内二酸化炭素濃度

実測データに用いた換気性状測定における不確かさの算出を試みた。第4章で換気性状測定に用いた人間の呼気を用いた発生法による測定データ25ケースとマスフローコントローラーを用いた機械発生法による11ケースを対象に拡張不確かさを算出した。

(1) 人間の呼気

活動量計(平均値)を用いて算出したCO₂濃度計算値と測定値を図6-117~図6-121に、文献値(ASHRAE)を用いて算出したCO₂濃度計算値と測定値を図6-122~図6-126に示す。信頼区間割合を表6-68に示す。

表 6-68：信頼区間割合 [%]

ケース	活動量計 (平均値)	文献値 (ASHRAE)
A-4	78.8	100.0
A-6	100.0	25.4
A-10	100.0	99.4
A-11	89.5	89.0
A-12	32.0	17.4
A-13	50.3	33.1
A-14	15.4	100.0
B-1	82.9	100.0
B-7	100.0	12.7
C-4	100.0	8.3

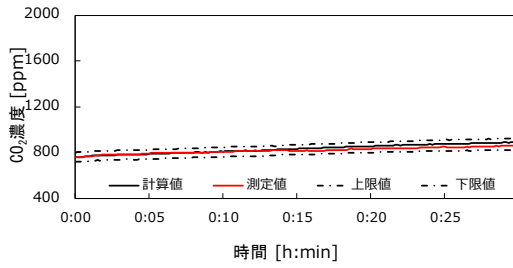


図 6-117 : ケース A-1 (活動量計(平均値))

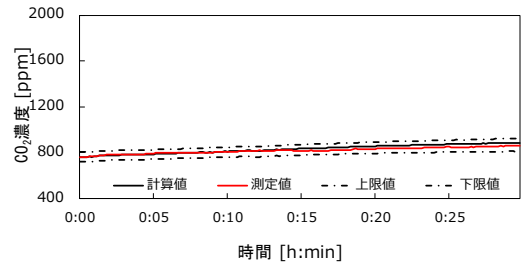


図 6-122 : ケース A-1 (文献値(ASHRAE))

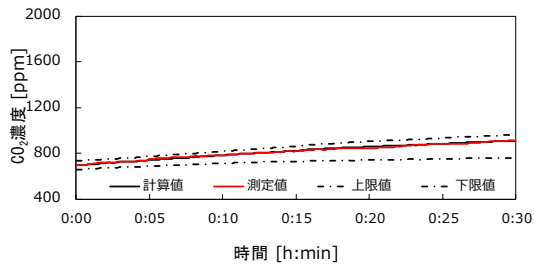


図 6-118 : ケース A-6 (活動量計(平均値))

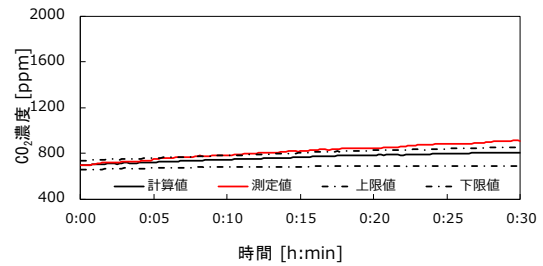


図 6-123 : ケース A-6 (文献値(ASHRAE))

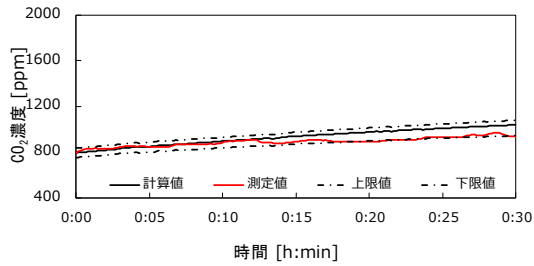


図 6-119 : ケース B-1 (活動量計(平均値))

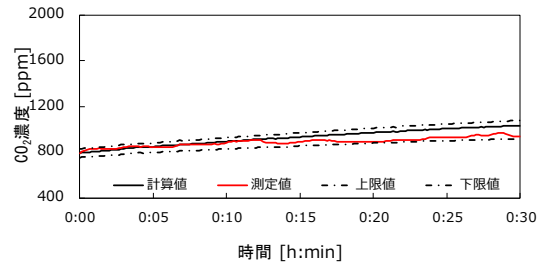


図 6-124 : ケース B-1 (文献値(ASHRAE))

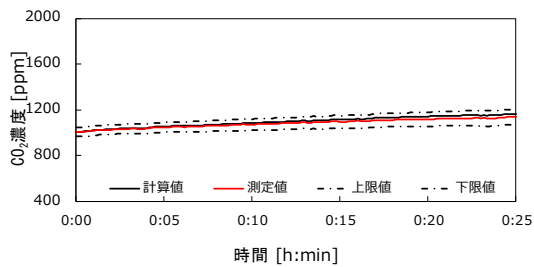


図 6-120 : ケース C-1 (活動量計(平均値))

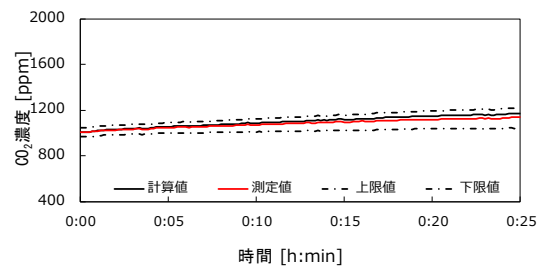


図 6-125 : ケース C-1 (文献値(ASHRAE))

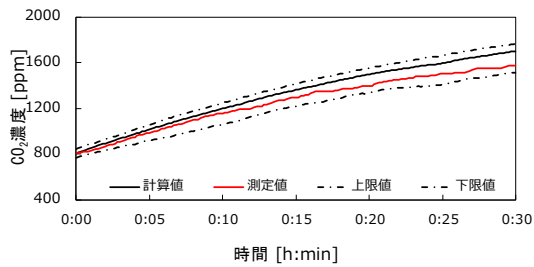


図 6-121 : ケース C-4 (活動量計(平均値))

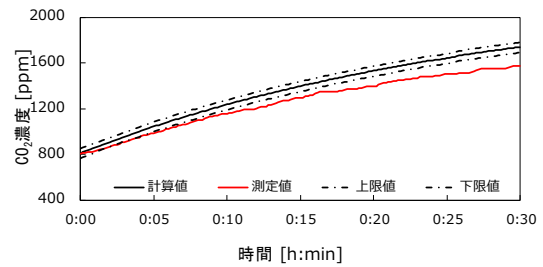


図 6-126 : ケース C-4 (文献値(ASHRAE))

活動量計（平均値）の不確かさとほとんど差のない文献値（ASHRAE）の不確かさと比較を行った。活動量計を用いることで在室者の Met 値を精度よく推定できるため文献値の不確かさと差がなくても活動量計の信頼区間割合が高い結果となった。活動量が大きい行為については活動量計による Met 値推定と文献値による Met 値推定にほとんど差が生じない結果となった。

この結果より実測モデルを用いることで概ね換気性状の不確かさについて推定できると考えられる。しかし、発生量を推定する上で Met 値推定手法が重要であることに変わりなく、推定精度には十分に気を配る必要がある。

(2) マスフローコントローラー

マスフローコントローラーを用いた場合について算出した CO₂ 濃度計算値と信頼区間を 図 6-127～図 6-130 に示す。信頼区間割合を表 6-69 に示す。

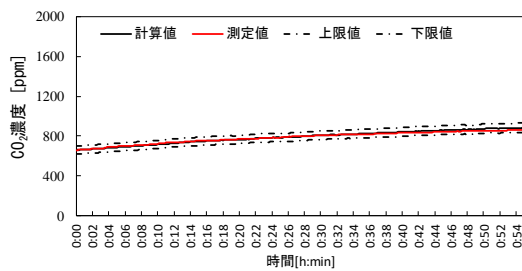


図 6-127：測定値と信頼区間 (D-1)

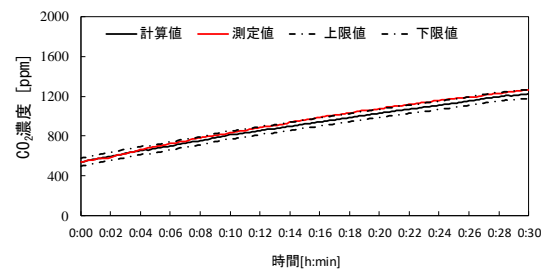


図 6-129：測定値と信頼区間 (D-7)

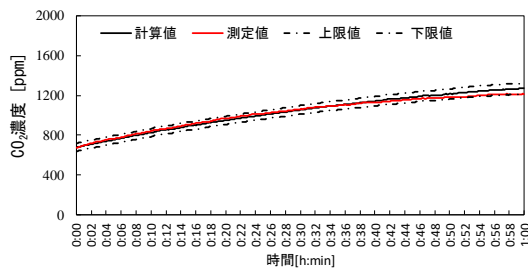


図 6-128：測定値と信頼区間 (D-3)

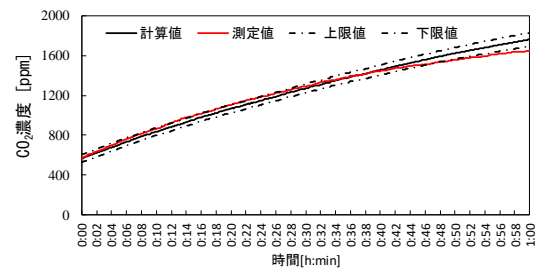


図 6-130：測定値と信頼区間 (D-11)

表 6-69：信頼区間割合 [%]

D-4	97.2
D-9	59.1
D-10	70.6
D-11	96.1
その他	100

ほとんどのケースで信頼区間割合は 100%であったが、D-4, 9, 10, 11 の 4 ケースは一部の時間で信頼区間外に測定値がある結果となった。これは 2 つの理由が考えられ、1 つは誤

差として設定した分布（標準偏差）の範囲が小さいことである。もう 1 つは測定における把握しきれていない誤差である。機械発生法であるため発生量の誤差は測定器の誤差より小さいと考えられるためこの 2 つが理由として考えられる。ケース D-9, 10, 11 については発生量が多く、室内 CO₂ 濃度が 1000ppm を超えているため前者が一因だと考えられる。

6.4.2 換気量

実測データに用いた換気量測定における不確かさの算出を試みた。第 5 章で換気量測定に用いた人間の呼気を用いた発生法による測定データ 4 ケースとマスフローコントローラーを用いた機械発生法による 8 ケースを対象に拡張不確かさを算出した。

(1) 人間の呼気

測定概要は第 5 章の表 5-5 に示している。活動量計（平均値）を用いて算出した換気量計算値と風量を図 6-131～図 6-132 に、文献値（ASHRAE）を用いて算出した換気量計算値と風量を図 6-133～図 6-134 に示す。また数値計算より得られた各ケースの拡張不確かさ（開始 30 分後）を表 6-70 に示す。

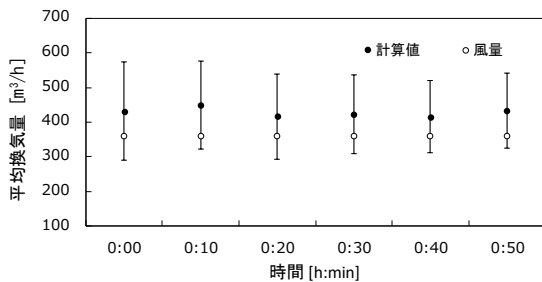


図 6-131：風量と信頼区間 F-2（活動量計（平均値））

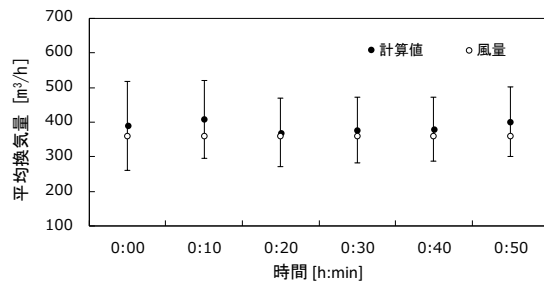


図 6-133：風量と信頼区間 F-2（文献値）

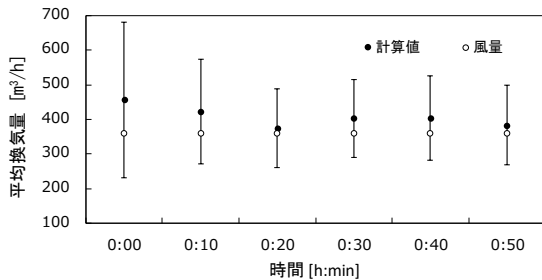


図 6-132：風量と信頼区間 F-3（活動量計（平均値））

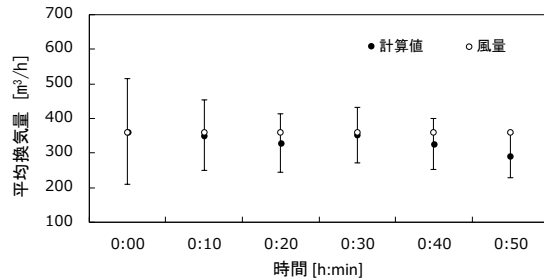


図 6-134：風量と信頼区間 F-3（文献値）

表 6-70：拡張不確かさ [m³/h]

	A-3	F-1	F-2	F-3
活動量計	37.94	124.6	123.6	113.8
文献値	39.45	112.3	99.1	84.9

全てのケースで測定開始から 10 分または 20 分までの平均換気量から求めた信頼区間内に風量が入らない結果となった。しかし、開始後 30 分以上経過した条件で風量 360m³/h とした場合の信頼水準 95%の拡張不確かさが 100m³/h である場合は、拡張不確かさが相対で 20%を超えているため Met 値推定手法および CO₂ 呼出量に関するさらなる精度向上が必要であると言える。文献値の不確かさが活動量計の不確かさより小さい結果となった。これは活動量計の値が瞬時値であるためばらつきが大きかったことが一因であると考えられる。

(2) マスフローコントローラー

測定値と信頼区間の一例を図 6-135～図 6-138 に示す。また数値計算より得られた各ケースの拡張不確かさを表 6-71 に示す。

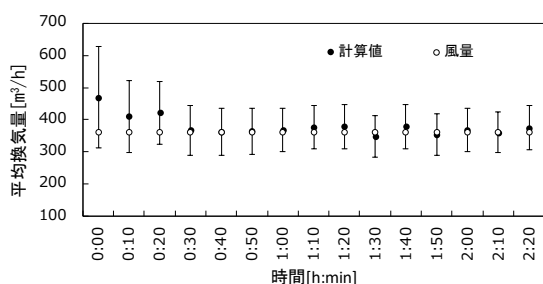


図 6-135：測定値と信頼区間 (E-2)

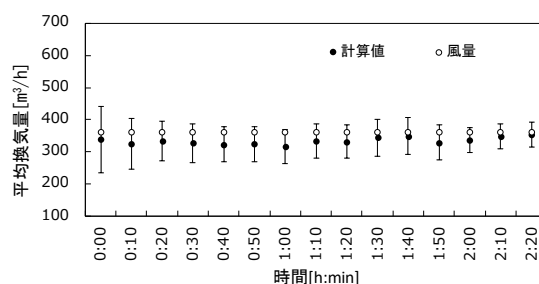


図 6-137：測定値と信頼区間 (E-4)

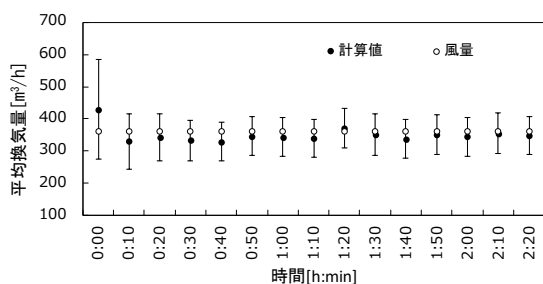


図 6-136：測定値と信頼区間 (E-3)

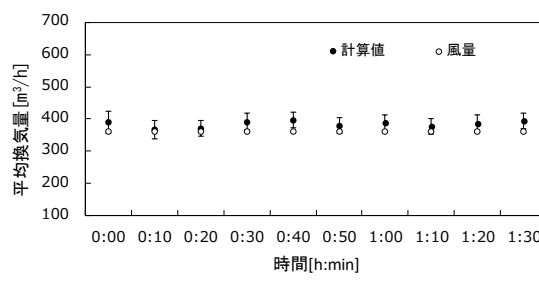


図 6-138：測定値と信頼区間 (E-8)

表 6-71：拡張不確かさ [m³/h]

	1	2	3	4	5	6	7	8
不確かさ	69.0	57.8	60.5	39.0	33.4	32.0	22.7	24.3

全てのケースで概ね換気量測定の測定値が信頼区間内に入っていることを確認した。ガス発生 10 分後からの測定データを用いて計算を行ったが、濃度の上昇が大きかったためガス発生開始からの 30 分間程度のデータは拡張不確かさが大きい結果となった。信頼区間内に風量が入らなかったケースは発生量が大きかったケース E-7 および E-8 であった。

開始後 30 分以上経過した条件で、風量 360m³/h とした場合の信頼水準 95%の拡張不確かさは 20～70m³/h であり、拡張不確かさは相対で 7.5～15%であることから人間の呼気を用いるよりも推定精度が高いと言える。他の計算結果は付録 D に示す。

6.5 おわりに

本章では、人間の呼気を用いた場合の居室の換気量測定および換気性状測定の精度に関する評価を目的に測定における不確かさおよび誤差の同定について検討を行った。不確かさおよび誤差の同定にあたり室条件の定常状態と非定常状態に分け、定常状態については不確かさの伝播則より不確かさの算出を行った。非定常状態についてはモンテカルロ法による簡単な繰り返し計算から算出する検討を行った。

換気性状測定および換気量測定の不確かさについて定常状態では不確かさの伝播則より算出した不確かさと数値計算（理論モデル）より算出した不確かさで比較を行い、数値計算の理論モデルを用いることで定常状態の拡張不確かさをおおむね推定できることを確認した。非定常状態では、実測モデルから算出した拡張不確かさを用いることで理論値を推定できることを確認した。

実測モデルを用いて換気性状測定の不確かさについて評価についてマスフローコントローラーを用いた機械発生法より発生量が多い条件では誤差として設定した分布（標準偏差）の範囲が小さいことなどから信頼区間内に測定値がないケースがあることを確認した。人間の呼気を用いた場合、換気量測定および換気性状測定の不確かさは、文献値を用いることで精度が向上することを確認した。換気量測定の不確かさは最大で 30%程度となり、換気性状測定では最大で 20%程度であることを確認した。また数値計算では、活動量計の測定値を用いた場合は測定値のばらつきによる影響が大きいため移動平均や作業時間で Met 値を平均して計算に用いるほうが良いことが確認できた。

換気量が $360\text{m}^3/\text{h}$ 程度ではマスフローコントローラーを用いた場合は、換気量測定では拡張不確かさは相対で 7.5～15%であり、換気性状測定では 10%以下であることから人間の呼気を用いるよりも推定精度が高いと言える。しかし、実空間では隙間による換気などの把握できない誤差要因があることを周囲する必要がある。

数値計算での課題として本研究ではエネルギー代謝率が 1.0 Met に近い条件では、二項分布を用いて表したが、精度は測定器と同じ小数点 1 桁で計算を行った。二項分布のほかの分布についても検討を行う必要があると考えられる。またモンテカルロ法に用いる乱数の範囲について本研究で設定した範囲について、 CO_2 濃度、換気量および Met 値の重みが大きいためこの項目についてさらなる検討を行うことを進める。

参考文献<第6章>

- [6-1] 田島昌樹 井上貴之 大西裕治：換気測定のための在室者の二酸化炭素呼出量の推定，日本建築学会環境系論文集，第 81 巻 第 728 号，日本建築学会，pp885-892，2016.10
- [6-2] JIS A14061974 室内換気量測定法（炭酸ガス法），2010

- [6-3] 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
- [6-4] 13・2・2 代謝量, 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, p229-330, 2010.2
- [6-5] 厚生労働省：平成 28 年度国民健康・栄養調査報告 第 2 部身体状況調査の結果, p101~p136, <https://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/eiyuu/h28-houkoku.html>
- [6-6] おんどとり T AND D TR-7Ui シリーズ USB 接続データロガー https://www.tandd.co.jp/product/tr7ui_series.html, 2018.12.12
- [6-7] 2013 ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS I-P Edition, ASHRAE Research, 2013
- [6-8] 改訂版『身体活動のメッツ（METs）表』, 国立健康・栄養研究所
- [6-9] 社団法人 空気調和・衛生工学会：トレーサガスを用いた単室の換気量測定法 SHASE-S 116-2011 Standard, 空気調和・衛生工学会規格, 2012.2.20
- [6-10] 社団法人 プレハブ建築協会 性能認定分科会：換気回路網シミュレーション VentSim version2, 2001.5

第7章

総括

第7章 総括

7.1 本研究の総括

本論文では、換気性状測定および換気量測定の不確かさについて CO₂ 呼出量推定手法および被験者の Met 値推定手法について精度確認や比較を行い、呼気に含まれる二酸化炭素をトレーサとした換気性状測定および換気量測定に十分な精度があることを確認した。また測定による不確かさおよび誤差を推定することで室の換気量の評価について、モンテカルロ法による測定の不確かさ推定について試行した。

本研究では Met 値推定手法について活動量計、脈拍数計および文献値による検討を行った。CO₂ 呼出量推定手法については CO₂ 呼出量関係式、JIS A1406, ASTM D6245-12, ASTM D6245-18 および Persily の式について検討を行った。

以下に、第6章までに得られた各章での要点を示す。

第1章 序論

本論文の研究背景および目的、概要、関連する既往研究や先行研究との位置づけを示した。

第2章 研究に関する基本事項

第2章では、本論文に関わる人体および統計学の基本事項について詳しく示した。CO₂ 呼出量に関する既往の研究について日本で示されている CO₂ 呼出量の値や海外で作成された CO₂ 呼出量の式 (ASTM や Persily の式) を記述した。特に CO₂ 呼出量に関係する代謝及び Met 値について詳しく示した。また本論文で用いた不確かさおよび誤差に関する概念や語句についても詳しく記述した。

第3章 人間の二酸化炭素呼出量および Met 値の推定精度

第3章では、Met 値の推定手法および CO₂ 呼出量算出に関する精度向上を目的に被験者実験の結果から Met 値および CO₂ 呼出量について精度確認を行った。

Met_D を用いて各推定式の精度に関する検討を行った結果、男性のみの条件であれば ASTM-12 の式を用いることで精度よく CO₂ 呼出量を推定できることを確認した。しかし、女性については CO₂ 呼出量測定値よりも大きく推定するため CO₂ 呼出量関係式を用いるほうが精度よく推定できることを確認した。

CO₂ 呼出量では、Met_D を用いて各推定式から算出される CO₂ 呼出量の精査を行った。CO₂ 呼出量による誤差はどの推定式による誤差を含むと相対で 10~15%程度あることを確認した。不確かさによる CO₂ 呼出量推定のばらつきを評価した場合、Met 値の不確かさとほとんど同じ傾向が確認でき、CO₂ 呼出量推定手法はほとんどの手法で Met 値による影響が大きいことを確認した。CO₂ 呼出量推定手法によって文献値である ASHRAE または METs 表のどちらを用いるかによって推定精度が異なる結果となった。

Met 値推定手法と CO₂ 呼出量推定手法との組み合わせについて検討を行った。関係式や ASTM-12 の場合は、Met 値推定手法として活動量計の測定値や ASHRAE に示されている値を用いることで推定精度が向上することを確認した。また Persily の式や JIS の値、ASTM-18 では、文献値は METs 表を用いることで推定精度が高いことを確認した。しかし、JIS や SHASE-S では体重や身長等の個人属性によらず活動ごとに一つの値が示されていることや ASTM の推定式は西洋人のデータから作成されていることなどを留意する必要がある。

第4章 単室実験による二酸化炭素発生量の精度確認

第4章では、人間の呼気を用いた換気性状測定について活動量計による精度向上および発生量推定の精度確認を目的に、実使用条件の単室で三軸加速度センサー内蔵活動量計を在室者に装着してもらい換気性状測定を行った。その結果、在室者が事務作業 (Met1.0 程度) の行為を継続している場合は、Met 値に文献値を用いても CO₂ 濃度推定にほとんど差異は生じないが、清掃や歩行 (Met2.0~3.0) などの行為であれば活動量計による測定値を用いることで文献値よりも推定精度が向上することを確認した。

人間の呼気による手法では、CO₂ 呼出量関係式および ASTM-12 の式を用いた場合の標準誤差 SE_R が最大で 8ppm 程度であることを確認した。またマスフローコントローラーによる手法の標準誤差は最大で 4ppm という結果になり、発生量としてマスフローコントローラーの精度が高い結果となった。

前章と同様に CO₂ 呼出量推定手法について関係式および ASTM-12 を用いる場合は活動量計による Met 値推定が最も精度が高いことが確認できた。また JIS, ASTM-18 および Persily の式を用いる場合は文献値を用いることでおおむね推定できることを確認した。

第5章 二酸化炭素呼出量を用いた換気量測定の精度確認

第5章では、本章では、人間の呼気を用いた発生法とマスフローコントローラーを用いた機械発生法による換気量測定の精度を明らかにすることを目的に換気量測定法について説明し、人間の呼気を用いた換気測定を単室空間で行い、単室における人間の呼気を用いた換気量測定の測定結果を述べた。また各 CO₂ 呼出量推定式の比較を行った。

人間の呼気を用いた換気量測定では、活動量の推定精度が大きく影響していることが確認できた。活動量計 (平均値) と文献値の Met 値の差は 0.1~0.2met であったが、計算結果は大きく異なる結果となり、在室者の Met 値推定の重要性が再確認できる結果となった。またマスフローコントローラーを用いて換気量測定を行った結果、おおむね平均換気量を推定できることを確認した。人間の呼気を用いた換気量測定の場合は、機械発生に比べて人体発熱などの要因から隙間による漏気量の影響が大きいと考えられる。

第6章 実測に基づく換気性能評価の試行

第6章では、人間の呼気を用いた場合の居室の換気量測定および換気性状測定の精度に関する評価を目的に測定における不確かさおよび誤差の同定について検討を行った。不確かさおよび誤差の同定にあたり室条件の定常状態と非定常状態に分け、定常状態について

は不確かさの伝播則より不確かさの算出を行った。非定常状態については計算値が回帰式などによる近似解であるためモンテカルロ法による簡単な繰り返し計算から算出する検討を行った。

換気性状測定および換気量測定の不確かさについて定常状態では不確かさの伝播則より算出した不確かさと数値計算（理論モデル）より算出した不確かさで比較を行い、数値計算の理論モデルを用いることで定常状態の拡張不確かさをおおむね推定できることを確認した。非定常状態では、実測モデルから算出した拡張不確かさを用いることで理論値を推定できることを確認した。

実測モデルを用いて換気性状測定の不確かさについて評価についてマスフローコントローラーを用いた機械発生法より発生量が多い条件では誤差として設定した分布（標準偏差）の範囲が小さいことなどから信頼区間内に測定値がないケースがあることを確認した。人間の呼気を用いた場合、換気量測定および換気性状測定の不確かさによる評価はおおむね出来ており、活動量計を用いることで精度が向上することを確認した。換気量測定の不確かさは約 20%になり、換気性状測定では約 15%であることを確認した。

7.2 まとめおよび今後の展望

本研究では、非定常状態と定常状態の換気量測定および換気性状測定の不確かさについてモンテカルロ法による繰り返し計算を行い、おおむね推定できることを確認した。モンテカルロ法については計算回数が多くすることで精度が向上するが、時間がかかることや計算するために様々な準備が必要となる。従って、実測データから精度検証を行い、簡便に計算を行えるようにする必要があると考えられる。

さらに多数室空間への適応について検討を行い、簡便に計算を行えるようにすることで、設計時や実空間での環境を推定できると考えられる。

以下に著者が本研究で感じたことまたは得たことについて記す。

- ・被験者実験では、ダグラスバッグ法による CO₂ 呼出量測定は被験者や行為によってマスクをつけることによる作業の負荷が見受けられたことから背付きダグラスバッグの使用も検討すべきである。また測定時の被験者の体調や緊張感などの心理的影響もあると考えられ、今後の検討ではこのような要素も考慮すべきであると考えられる。

- ・数値計算での Met 値推定について課題であると考え。Met 値が 1.0met に近い条件では、二項分布を用いて分布を表したが、精度については測定器と同じ小数点 1 桁で計算を行った。より正確に推定するためにはさらに有効数字を増やすことが望ましいと考える。また二項分布のほかの分布についても検討を行う必要があると考えられる。

- ・数値計算では、活動量計の測定値を用いた場合は測定値のばらつきによる影響が大きいため移動平均や作業時間で Met 値を平均して計算に用いるほうが良いことが確認できた。

- ・JIS や SHASE-S では体重や身長等の個人属性によらず活動ごとに一つの値が示されてい

ることや ASTM の推定式は西洋人のデータから作成されていることなどを留意する必要がある。

謝辭

謝辞

本論文は 2017 年から 2 年間在籍した高知工科大学大学院工学研究科基盤工学専攻の修士課程において、所属する建築環境工学研究室での研究成果をもとに修士論文としてまとめたものです。

本研究を進めるにあたり、主指導教員である高知工科大学システム工学群 田島昌樹准教授には多大なるご指導とご助言とを賜りました。本研究を論文としての形に成せるようになりましたのも、常日頃から私を温かく見守ってくださった田島先生のお陰であります。ここに深甚なる感謝の意を表します。

また副指導教員及び副査である高知工科大学の高木方隆教授、副査である高知工科大学の大内雅博教授には研究に対して多くの御助言を頂きました。ご両名のご指導に深謝致します。

そして研究室の皆様には、研究活動中および論文執筆中に様々なご協力をいただき、また日々の議論を通して多くの知識や示唆を頂きました。特に同じ研究班の先輩として、修士学生としての研究の取り組み方や手法について助言およびご意見を頂きました井上貴之氏（現職 株式会社 四電技術コンサルタント）、大西裕治氏（現職 日本住環境 株式会社）、嶋田祐典氏（現職 戸田建設 株式会社）、後輩として実験やデータ分析など研究活動に多大なる貢献をしていただいた西山亮、前田康介、瀧田遼、野田那奈および研究室学生の皆様には心から感謝いたします。

最後に高知工科大学並びに、田島研究室のより一層の発展を祈念して謝辞に代えさせていただきます。

2019 年 1 月 高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻
社会システム工学コース 建築環境工学研究室
学籍番号 1215062 依光剛志

付録

付録 A: ダグラスバッグ法より得られた二酸化炭素呼出量測定値と推定値の比較

各 CO₂ 呼出量推定手法とダグラスバッグ法より得られた CO₂ 呼出量測定値の比較を行った。平成 28 年度の推定値と測定値の比較結果を図 A-1～A-7 に示す。

男女(平成 28 年度_Met 値(全て))

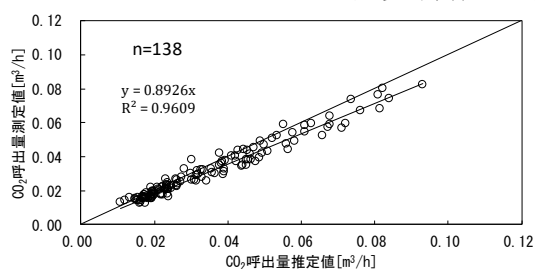


図 A-1 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(関係式)

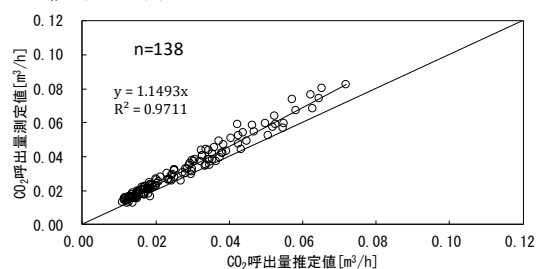


図 A-5 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(Persily (Harris · Benedict))

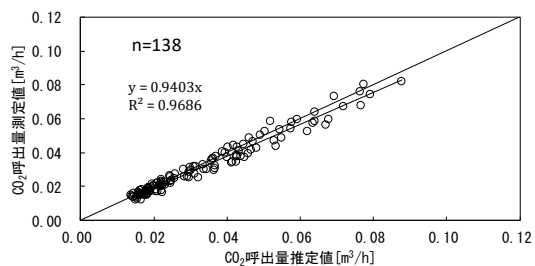


図 A-2 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(ASTM-12)

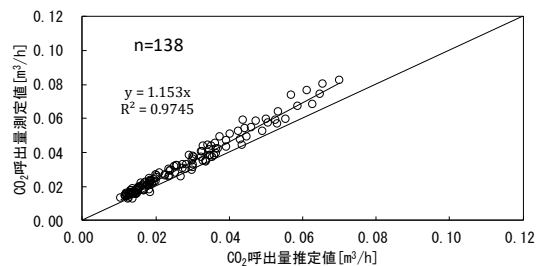


図 A-6 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(Persily (Schofield))

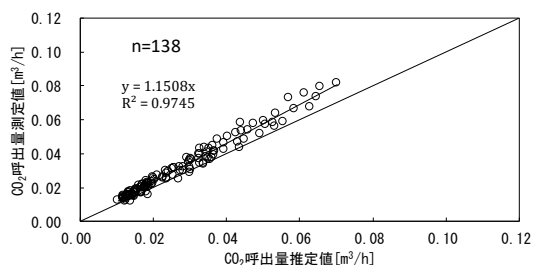


図 A-3 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(ASTM-18)

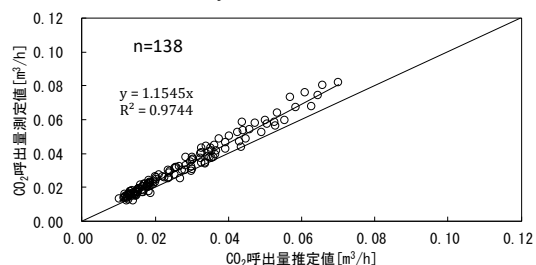


図 A-7 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(Persily (FAO · WHO))

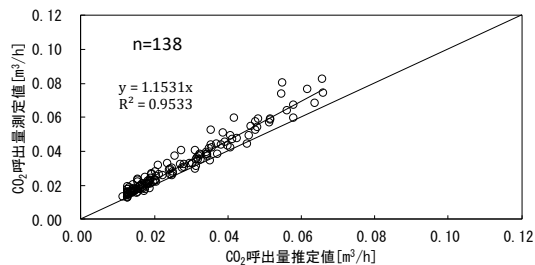


図 A-4 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(JIS)

平成 26 年度（男女）の推定値と測定値の比較結果を図 A-8～A-14 に示す。

男女(平成 26 年度_Met 値(全て))

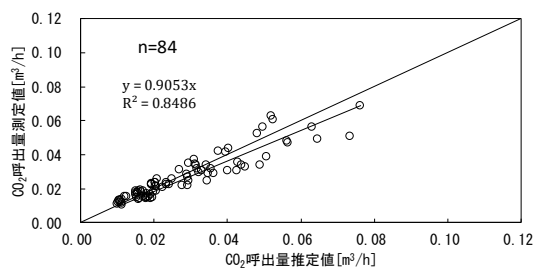


図 A-8 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(関係式)

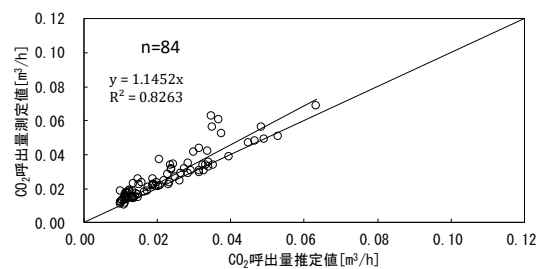


図 A-12 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(Persily (Harris · Benedict))

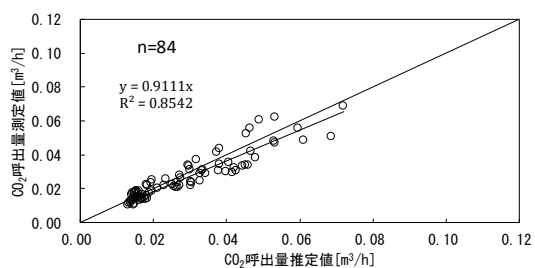


図 A-9 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(ASTM-12)

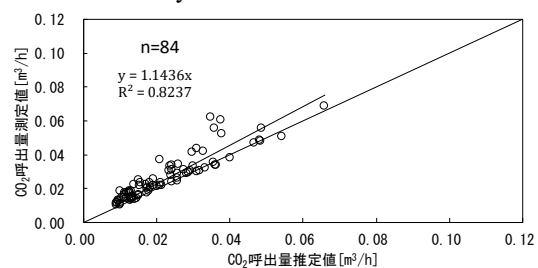


図 A-13 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(Persily (Schofield))

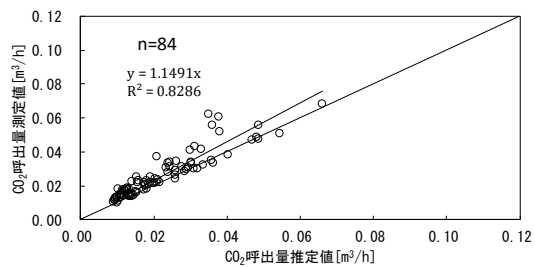


図 A-10 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(ASTM-18)

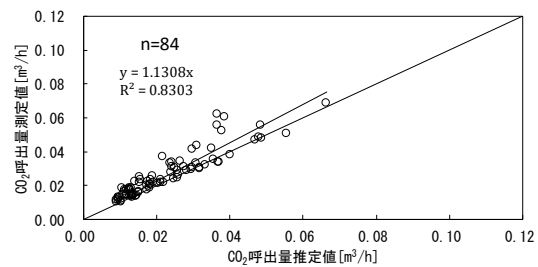


図 A-14 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(Persily (FAO · WHO))

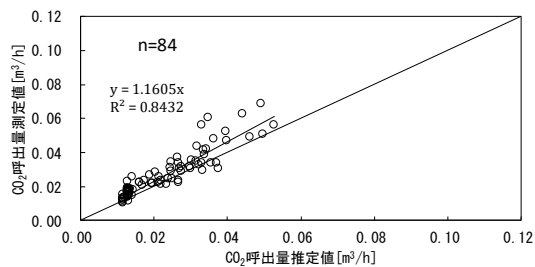


図 A-11 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(JIS)

平成 26 年度（男性のみ）の推定値と測定値の比較結果を図 A-15～A-21 に示す。

男性のみ（平成 26 年度_ Met 値(全て)）

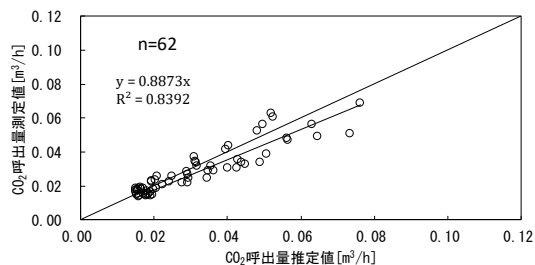


図 A-15 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (関係式)

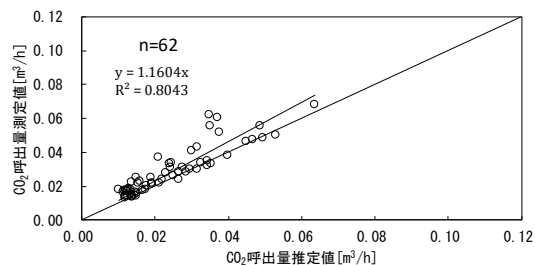


図 A-19 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (Harris・Benedict))

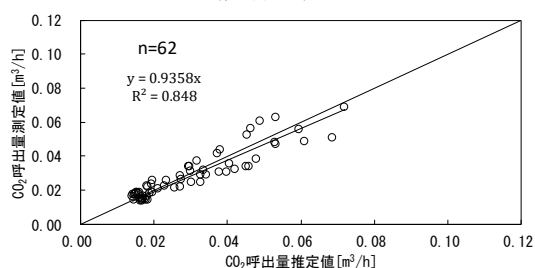


図 A-16 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (ASTM-12)

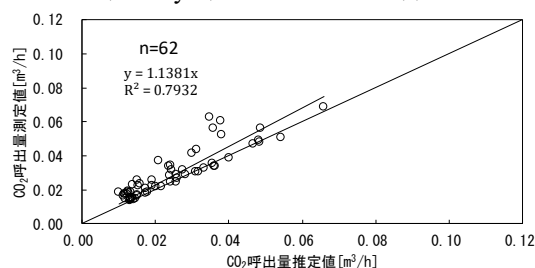


図 A-20 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (Schofield))

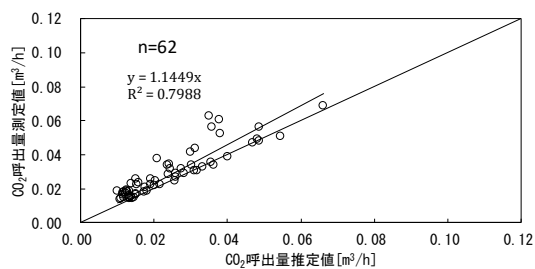


図 A-17 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (ASTM-18)

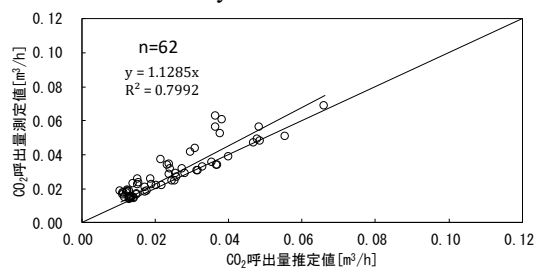


図 A-21 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (Persily (FAO・WHO))

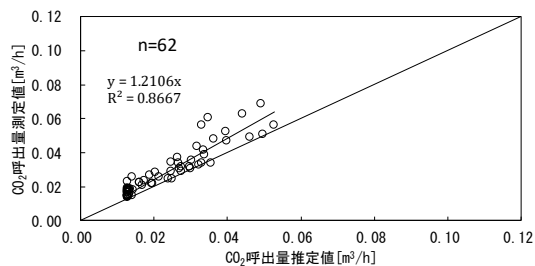


図 A-18 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較 (JIS)

平成 26 年度（女性のみ）の推定値と測定値の比較結果を図 A-22～A-28 に示す。

女性のみ（平成 26 年度_Met 値(全て)）

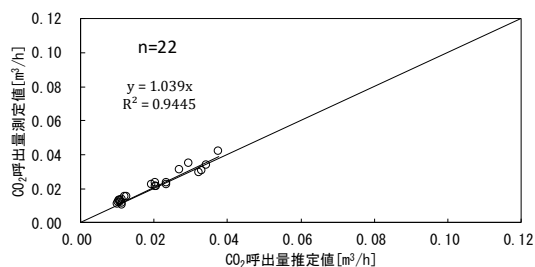


図 A-22 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(関係式)

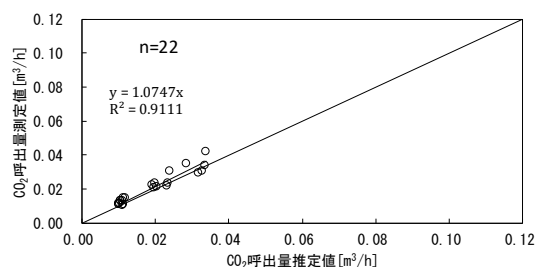


図 A-26 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(Persily (Harris · Benedict))

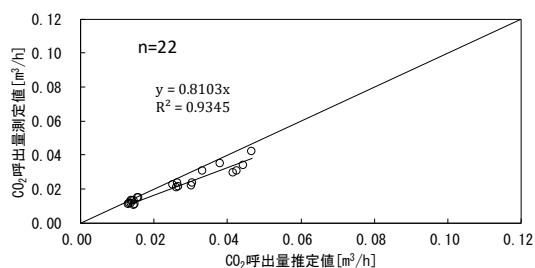


図 A-23 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(ASTM-12)

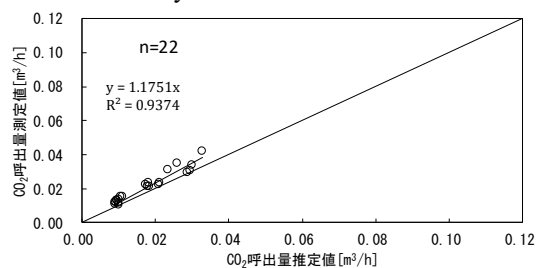


図 A-27 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(Persily (Schofield))

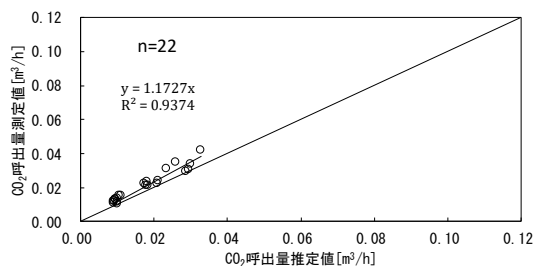


図 A-24 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(ASTM-18)

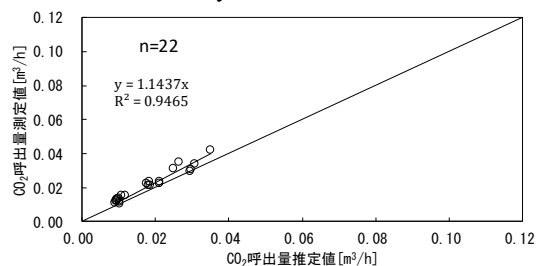


図 A-28 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(Persily (FAO · WHO))

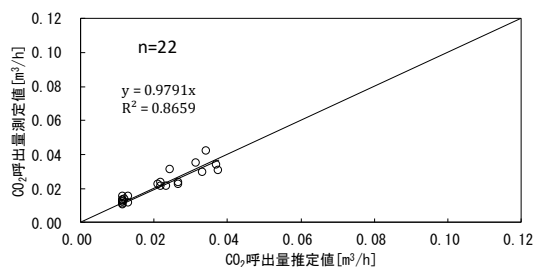


図 A-25 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(JIS)

平成 26・28 年度（男女）の推定値と測定値の比較結果を図 A-29～A-35 に示す。

男女（平成 28 年度と平成 26 年度_Met 値（全データ）

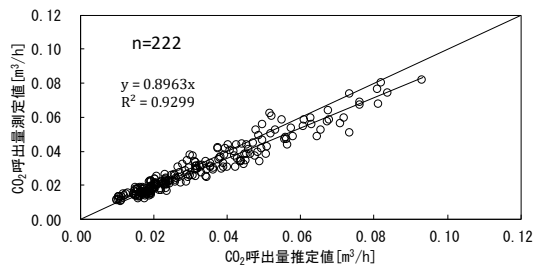


図 A-29 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(関係式)

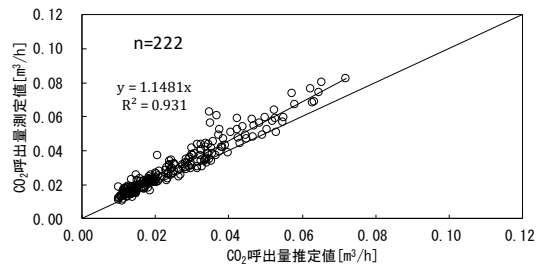


図 A-33 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(Persily (Harris · Benedict))

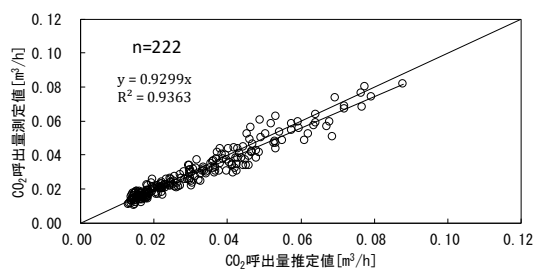


図 A-30 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(ASTM-12)

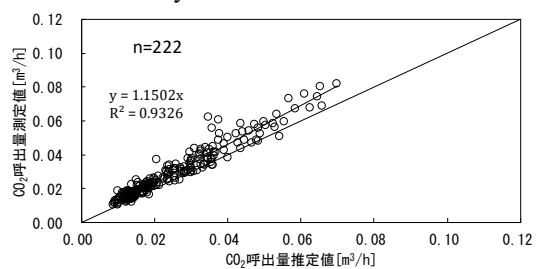


図 A-34 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(Persily (Schofield))

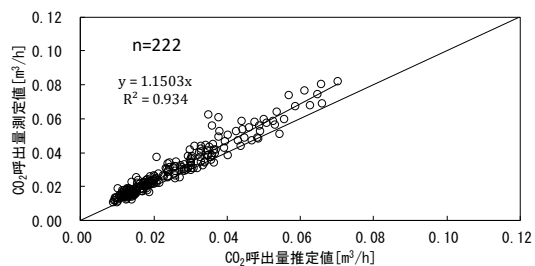


図 A-31 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(ASTM-18)

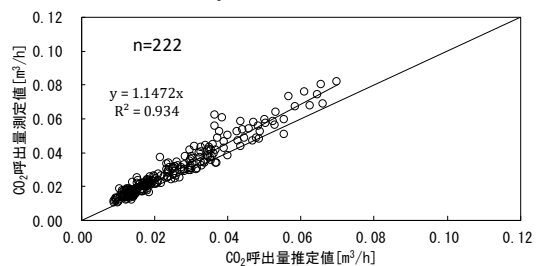


図 A-35 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(Persily (FAO · WHO))

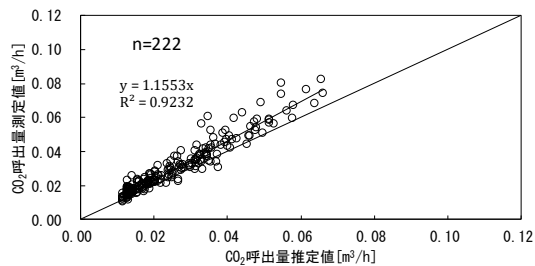


図 A-32 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(JIS)

平成 26・28 年度（男女）の推定値と測定値の比較結果を図 A-36～A-42 に示す。

男女（平成 28 年度と平成 26 年度_Met 値（3.0 以下））

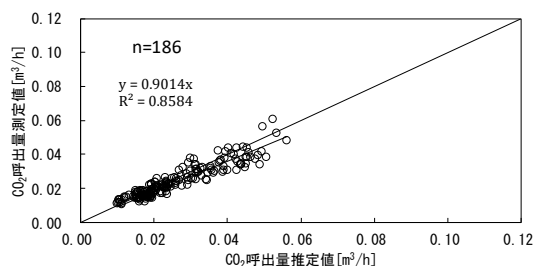


図 A-36 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(関係式)

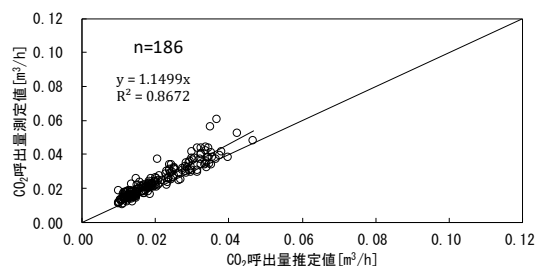


図 A-40 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(Persily (Harris・Benedict))

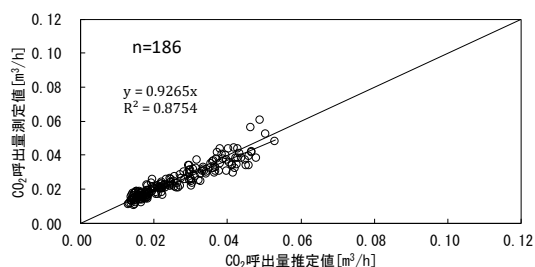


図 A-37 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(ASTM-12)

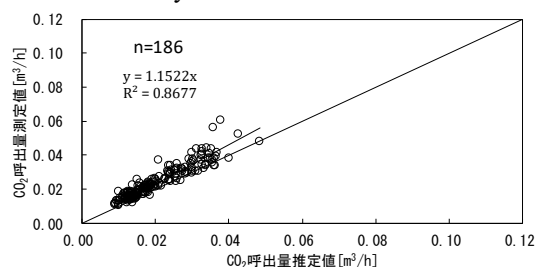


図 A-41 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(Persily (Schofield))

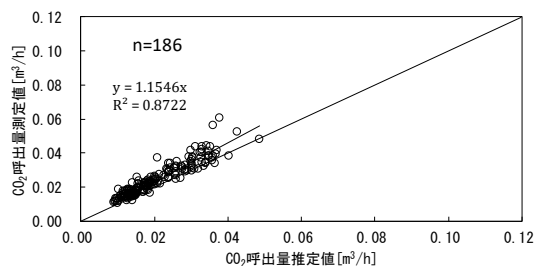


図 A-38 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(ASTM-18)

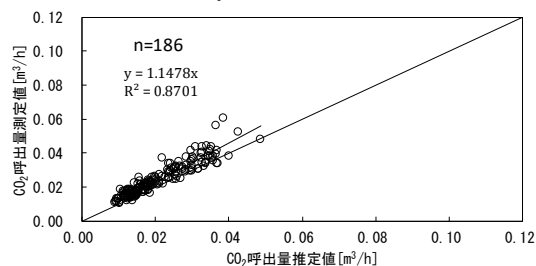


図 A-42 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(Persily (FAO・WHO))

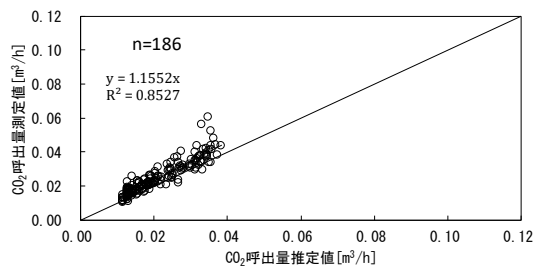


図 A-39 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(JIS)

平成 28 年度（男女）の推定値と測定値の比較結果を図 A-43～A-49 に示す。

男女（平成 28 年度_Met 値（3.0 以下））

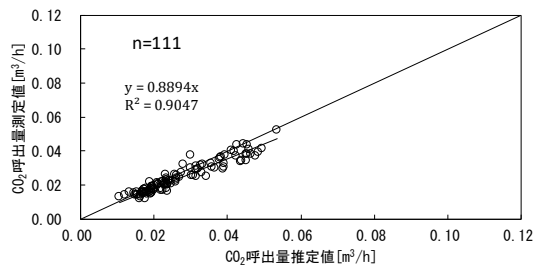


図 A-43 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(関係式)

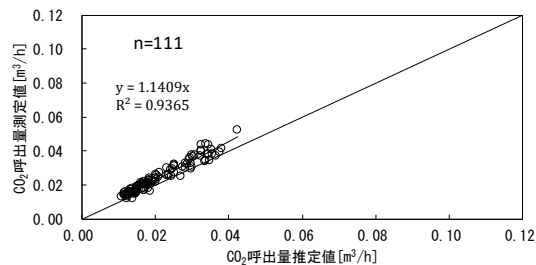


図 A-47 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(Persily (Harris・Benedict))

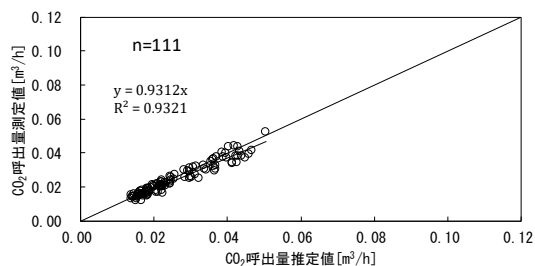


図 A-44 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(ASTM-12)

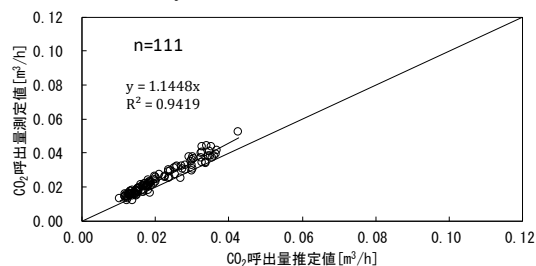


図 A-48 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(Persily (Schofield))

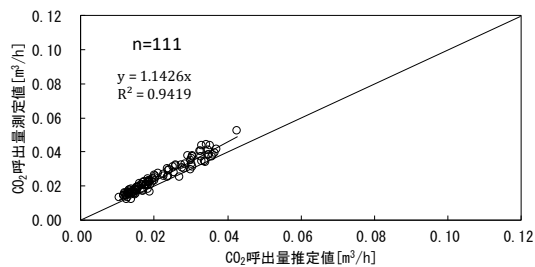


図 A-45 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(ASTM-18)

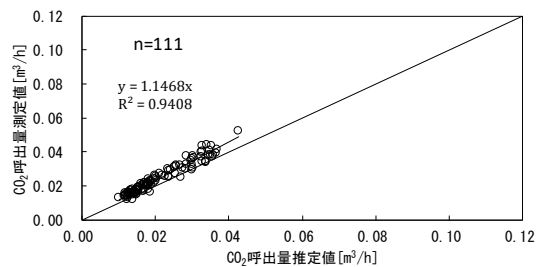


図 A-49 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(Persily (FAO・WHO))

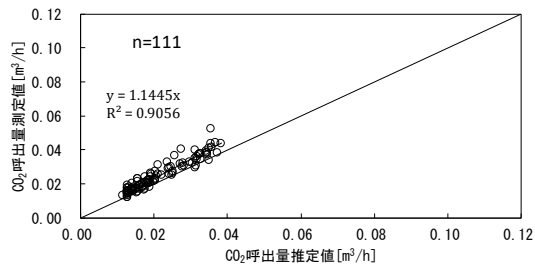


図 A-46 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(JIS)

平成 26 年度（男女）の推定値と測定値の比較結果を図 A-50～A-56 に示す。

男女（平成 26 年度_Met 値（3.0 以下））

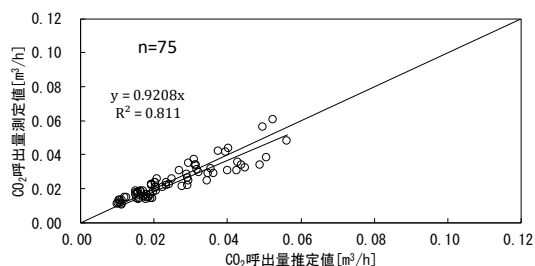


図 A-50 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(関係式)

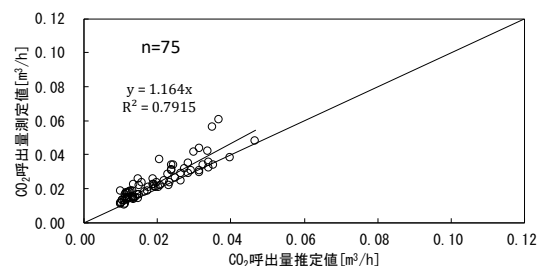


図 A-54 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(Persily (Harris・Benedict))

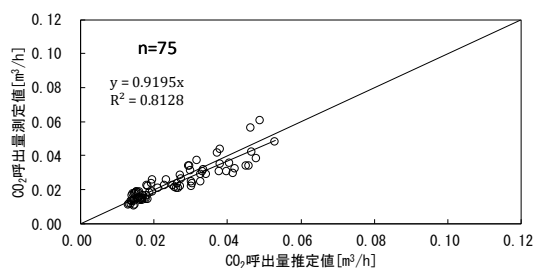


図 A-51 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(ASTM-12)

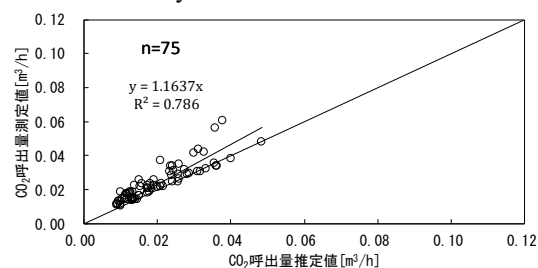


図 A-55 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(Persily (Schofield))

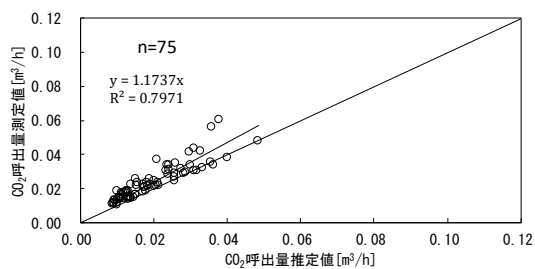


図 A-52 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(ASTM-18)

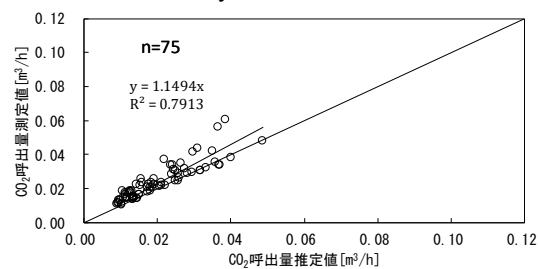


図 A-56 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(Persily (FAO・WHO))

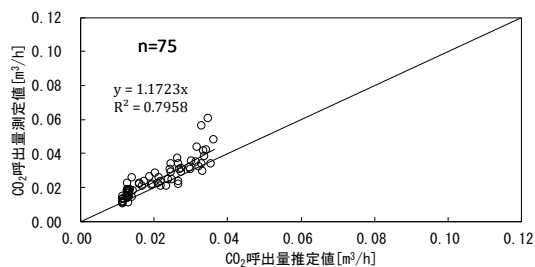


図 A-53 : CO₂ 呼出量推定値と実測値の比較
(JIS)

付録 B: 各二酸化炭素呼出量推定式の Met 値, 年齢および性別の関係

男性

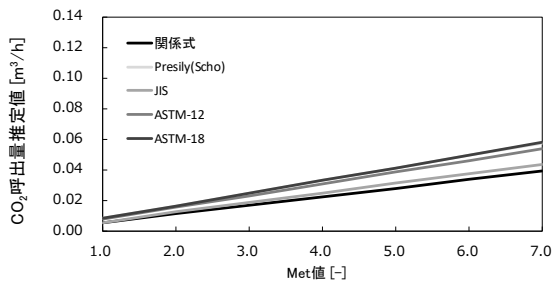


図 B-1 : 7 歳の CO₂ 呼出量推定値

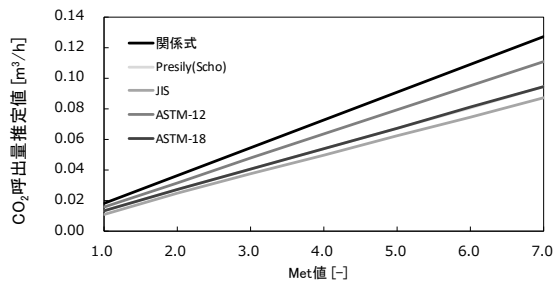


図 B-5 : 30~39 歳の CO₂ 呼出量推定値

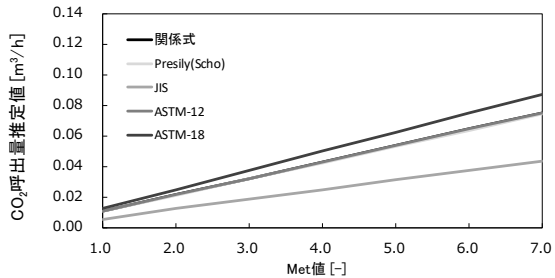


図 B-2 : 11 歳の CO₂ 呼出量推定値

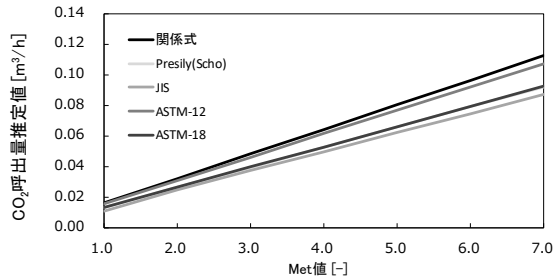


図 B-6 : 50~59 歳の CO₂ 呼出量推定値

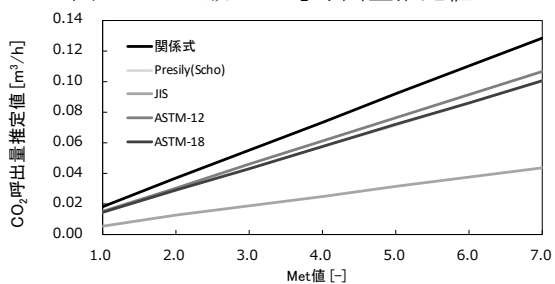


図 B-3 : 17 歳の CO₂ 呼出量推定値

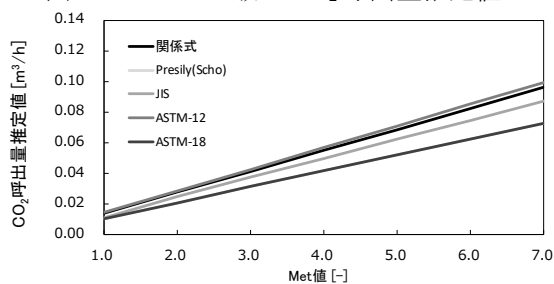


図 B-7 : 70~歳の CO₂ 呼出量推定値

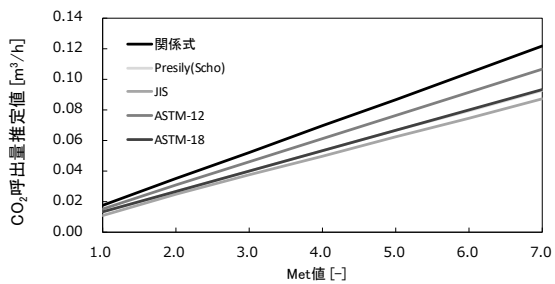


図 B-4 : 20 歳の CO₂ 呼出量推定値

女性

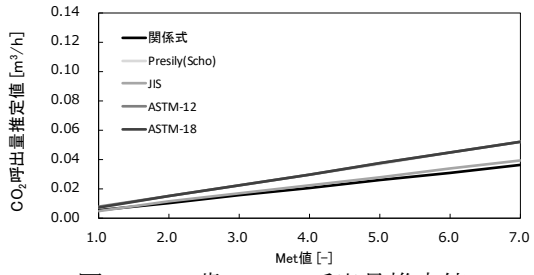


図 B-8 : 7 歳の CO₂ 呼出量推定値

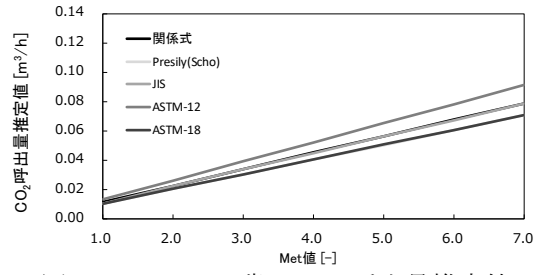


図 B-12 : 30~39 歳の CO₂ 呼出量推定値

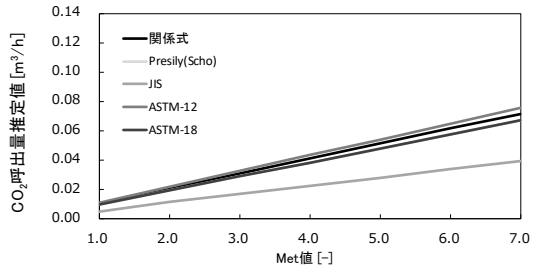


図 B-9 : 11 歳の CO₂ 呼出量推定値

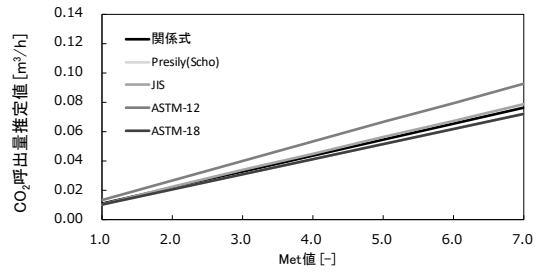


図 B-13 : 50~59 歳の CO₂ 呼出量推定値

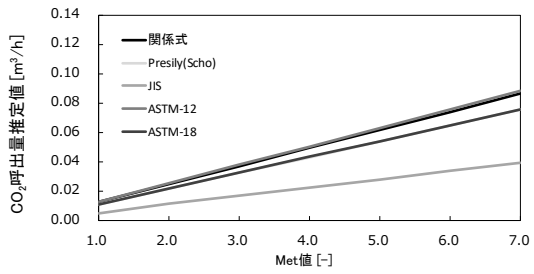


図 B-10 : 17 歳の CO₂ 呼出量推定値

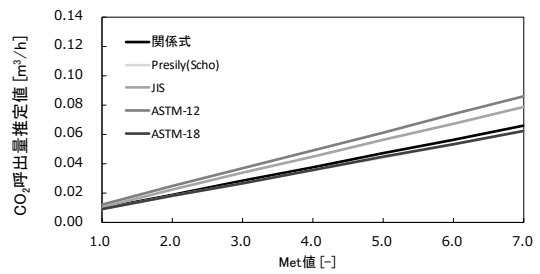


図 B-14 : 70~歳の CO₂ 呼出量推定値

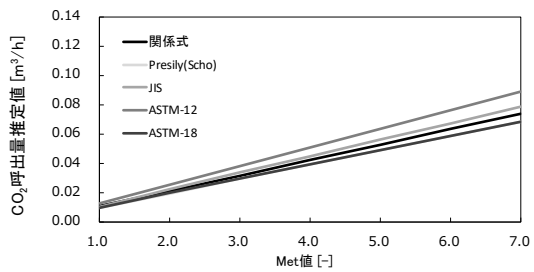


図 B-11 : 20 歳の CO₂ 呼出量推定値

付録 C: 室内二酸化炭素濃度, 換気量の単室実験の測定結果

[1] 室内 CO₂ 濃度の測定結果 (人間の呼気を用いた場合)

4章で示せなかった CO₂ 呼出量推定手法による測定結果を示す。ここでの ASTM は 2012 のほうで計算を行っている。

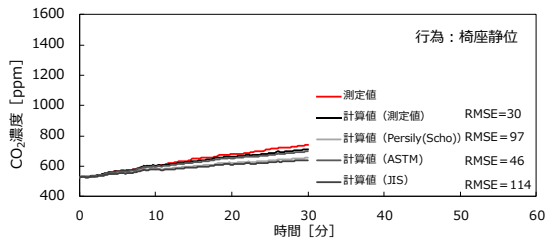


図 C-1: 推定値と実測値の比較 A-2

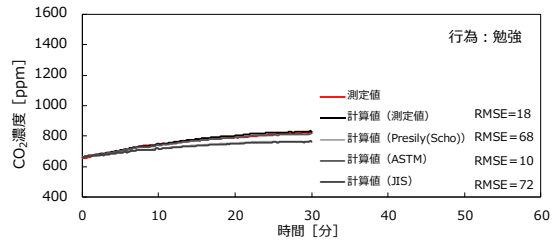


図 C-6: 推定値と実測値の比較 A-9

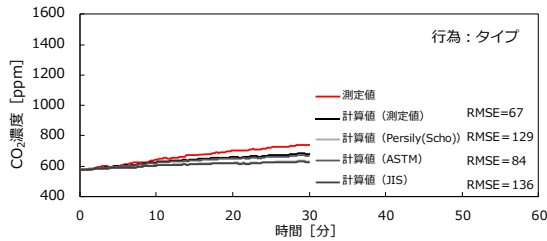


図 C-2: 推定値と実測値の比較 A-4

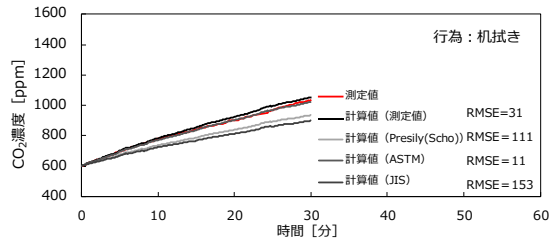


図 C-7: 推定値と実測値の比較 A-10

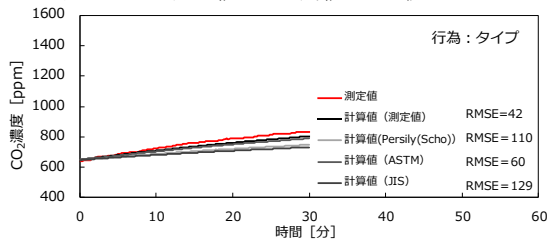


図 C-3: 推定値と実測値の比較 A-5

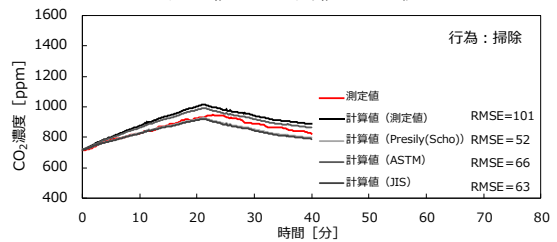


図 C-8: 推定値と実測値の比較 A-12

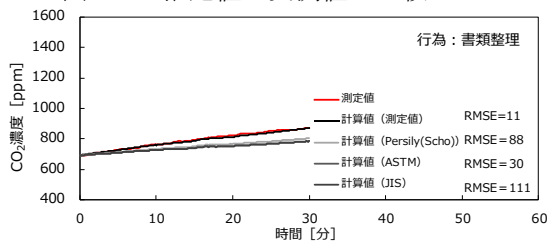


図 C-4: 推定値と実測値の比較 A-7

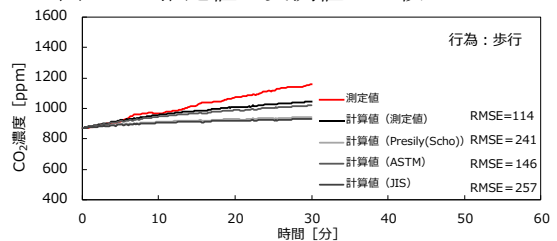


図 C-9: 推定値と実測値の比較 A-13

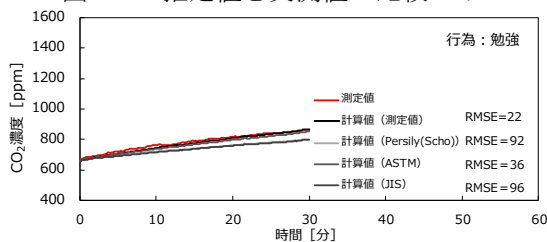


図 C-5: 推定値と実測値の比較 A-8

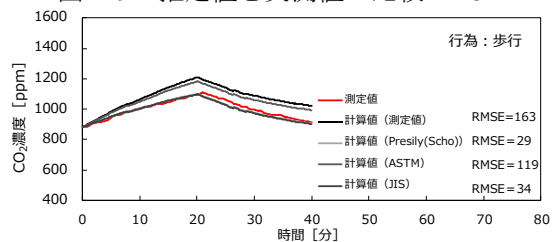


図 C-10: 推定値と実測値の比較 A-14

[2] 室内 CO₂ 濃度の測定結果 (マスフローコントローラーを用いた場合)

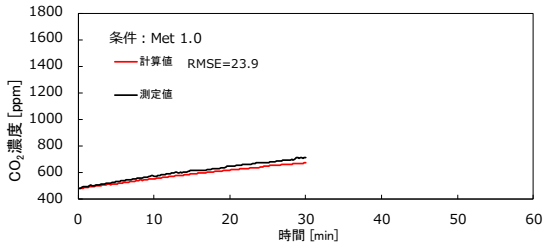


図 C-11 : 推定値と実測値の比較 D-4

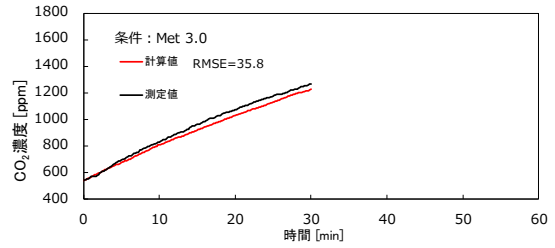


図 C-15 : 推定値と実測値の比較 D-9

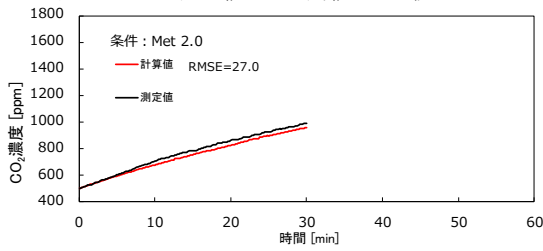


図 C-12 : 推定値と実測値の比較 D-5

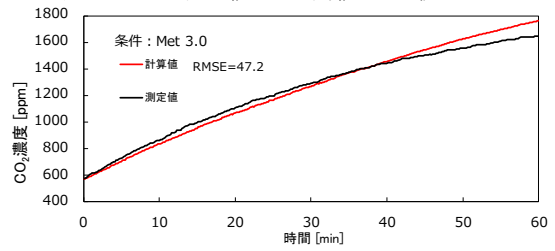


図 C-16 : 推定値と実測値の比較 D-10

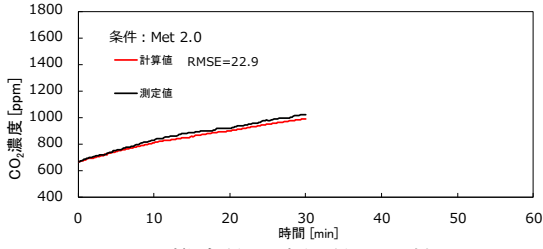


図 C-13 : 推定値と実測値の比較 D-6

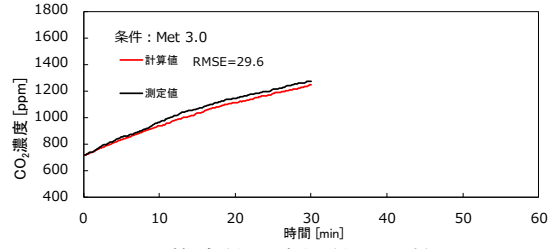


図 C-17 : 推定値と実測値の比較 D-11

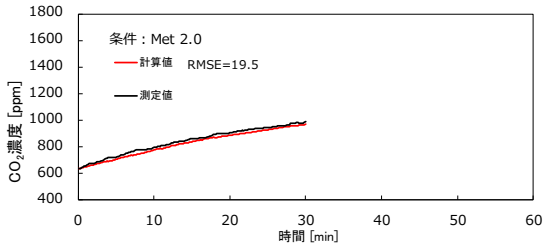


図 C-14 : 推定値と実測値の比較 D-8

[3] 換気量の測定結果(マスフローコントローラーを用いた場合)

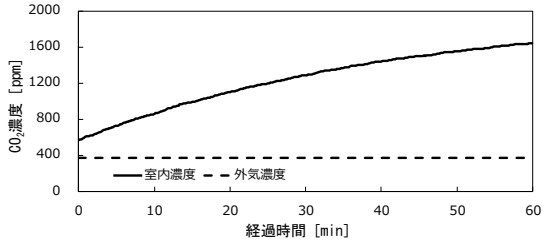


図 C-18 : CO₂ 濃度測定結果 D-11

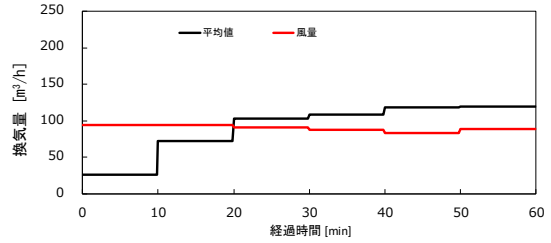


図 C-23 : 推定値と実測値の比較 D-11

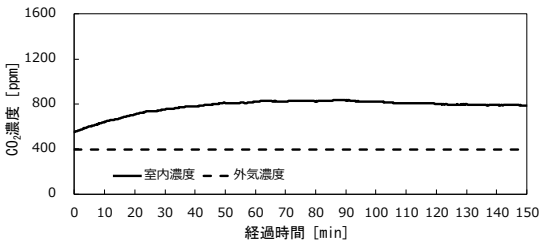


図 C-19 : CO₂ 濃度測定結果 E-2

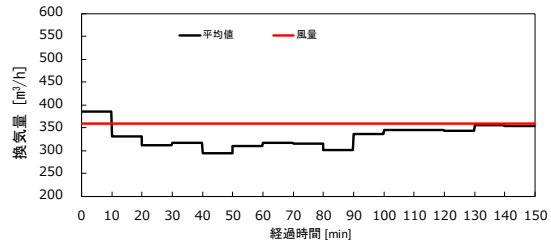


図 C-24 : 推定値と実測値の比較 E-2

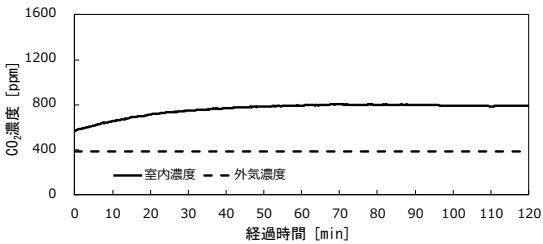


図 C-20 : CO₂ 濃度測定結果 E-4

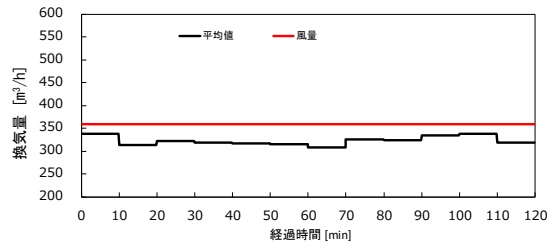


図 C-25 : 推定値と実測値の比較 E-4

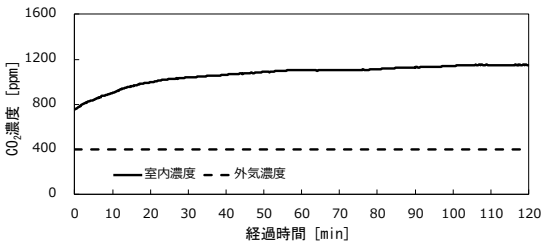


図 C-21 : CO₂ 濃度測定結果 E-5

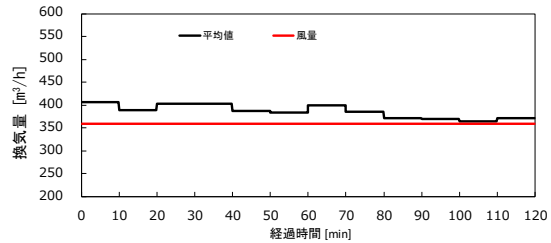


図 C-26 : 推定値と実測値の比較 E-5

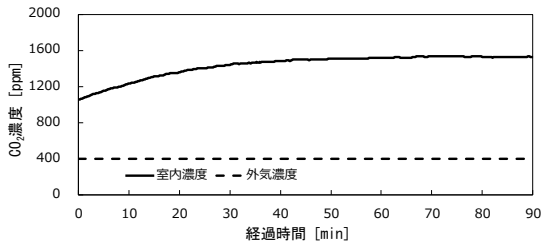


図 C-22 : CO₂ 濃度測定結果 E-7

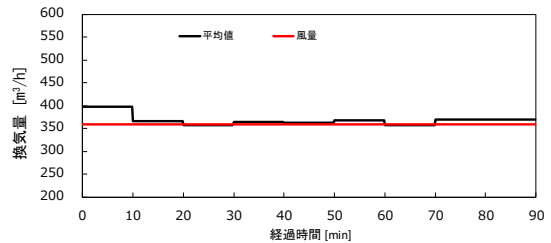


図 C-27 : 推定値と実測値の比較 E-7

付録 D: ASTM や JIS の式を用いた換気量, 二酸化炭素濃度の不確かさと誤差の同定

本検討で行った関係式以外の CO₂ 呼出量推定の不確かさについて不確かさの伝播則による計算式を示す。

[1] CO₂呼出量について

(1) Persily の式

Persily の推定式を用いて CO₂ 呼出量を算出する場合の不確かさについては、誤差算出の流れの誤差要因は以下の通りである。CO₂ 呼出量の単位は L/min であるため計算の際は m³/h に単位を直して計算している。

Persily 式では基礎代謝量を用いており、推定式は Harris-Benedict, Schofield または WHO・FAO の式が用いられている。日本の医学分野では、Harris-Benedict 式が用いられることが多いが、本研究では Schofield 式を主に用いて算出した。基礎代謝量の式より体重、身長の不確かさを用いて Harris-Benedict 式 (2-13,2-14), Schofield 式 (2-15~2-20), WHO・FAO 式 (2-21~2-26) であり、Harris-Benedict は式 (D-1), Schofield は式 (D-2), WHO・FAO は式 (D-3) となって不確かさを算出することができる。Harris-Benedict 式は単位がキロジュール (kJ) であるため 4.186/1000 を掛けてワット (W) の単位で算出した。

$$u(BMR) = \sqrt{(13.7516u(W) \times 4.186/1000)^2 + (5.0033u(H) \times 4.186/1000)^2} \quad (D-1)$$

$$u(BMR) = 0.063u(W) \quad (D-2)$$

$$u(BMR) = \sqrt{(64.4u(W))^2 + (113.0u(H)/100)^2} \quad (D-3)$$

Persily の呼出量推定式を用いた際に推定値として不確かさのある項目は BMR および気温、気圧、Met 値であり、誤差を算出する式は (D-4), (D-5), (D-6), (D-7) の通りとなる。そして、Persily の式を用いた時の CO₂ 呼出量推定値合計の標準合計不確かさは式 (D-8) によって求められる。

被験者全員の不確かさを算出する式は CO₂ 呼出量関係式と同様に式(D-7)から算出することで発生量 m の合計標準不確かさ U_mとなる。

$$\frac{\partial P_i}{\partial BMR} u(BMR) = 0.000179 \times Met \times K/p \times u(BMR) \quad (D-4)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial Met} u(Met) = 0.000179 \times BMR \times K/p \times u(Met) \quad (D-5)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial k} u(k) = 0.000179 \times Met \times BMR/p \times u(k) \quad (D-6)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial p} u(p) = -0.000179 \times BMR \times Met \times K/p^2 \times u(p) \quad (D-7)$$

$$u(P_i) = \sqrt{\left(\frac{\partial P_i}{\partial BMR} u(BMR)\right)^2 + \left(\frac{\partial P_i}{\partial Met} u(Met)\right)^2 + \left(\frac{\partial P_i}{\partial k} u(k)\right)^2 + \left(\frac{\partial P_i}{\partial p} u(p)\right)^2} \quad (D-8)$$

(2) JIS

JIS の推定式を用いて CO₂ 呼出量を算出する場合の不確かさについては、JIS は人の CO₂ 呼出量を表の値から Met 値の比率で算出するため式 (D-9) の計算方法がある。その他に、CO₂ 呼出量計算値の RMSE を被験者実験のデータ整理で把握しているため、RMSE を標準誤差にして単位を揃えて式 (D-9) を用いて不確かさを算出し、CO₂ 濃度推定の不確かさを算出する方法もある。式 (D-10) を用いて合計の発生した CO₂ 呼出量の不確かさを算出する。

今回の検討では、式 (D-9) を用いて検討を行った。

$$u(P_i) = 0.0129 \times u(Met) \quad (D-9)$$

$$U_c(P_i) = k \times u(P_i) \quad (D-10)$$

(3) ASTM-12

ASTM の式は体表面積、Met 値および呼吸商 RQ が変数でありこれらの値から求められる。関係式と同様に体表面積の不確かさをはじめに算出する必要があり、呼吸商 RQ は 0.83 を基準として検討を行っている。

体表面積に対する体重と身長の不確かさを式 (D-11)、(D-12) から算出し、式 (D-13) を用いて体表面積の不確かさを計算する。

$$\frac{\partial A_D}{\partial H} u(W) = 0.302(H/100)^{0.725} 0.425W^{-0.575} u(W) \quad (D-11)$$

$$\frac{\partial A_D}{\partial H} u(H) = 0.302W^{0.425} 0.725(H/100)^{-0.275} u(H) \quad (D-12)$$

$$u(A_D) = \sqrt{\left(\frac{\partial A_D}{\partial H} u(W)\right)^2 + \left(\frac{\partial A_D}{\partial H} u(H)\right)^2} \quad (D-13)$$

体表面積および Met 値、呼吸商 RQ の不確かさを算出する式は (D-14)、(D-15)、(D-16) であり、ASTM-12 の式を用いた時の CO₂ 呼出量推定値の合計の不確かさ（合成標準不確かさ） $U_c(P_i)$ は式 (D-17) によって求められ、被験者全員の不確かさを式 (D-9) から算出することで発生量 m の不確かさを計算することができる。

$$\frac{\partial P_i}{\partial A_D} u(A_D) = \frac{RQ \times 0.0276 \times Met}{0.23RQ + 0.77} u(A_D) \quad (D-14)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial Met} u(Met) = \frac{RQ \times 0.0276 \times A_D}{0.23RQ + 0.77} u(Met) \quad (D-15)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial RQ} u(RQ) = \frac{0.0276 \times A_D \times Met \times (0.23RQ + 0.77) + RQ \times 0.0276 \times A_D \times Met \times 0.23}{(0.23RQ + 0.77)^2} u(RQ) \quad (D-16)$$

$$u(P_i) = \sqrt{\left(\frac{\partial P_i}{\partial A_D} u(A_D)\right)^2 + \left(\frac{\partial P_i}{\partial Met} u(Met)\right)^2 + \left(\frac{\partial P_i}{\partial RQ} u(RQ)\right)^2} \quad (D-17)$$

(4) ASTM-18

ASTM-18 の式は体表面積，Met 値および呼吸商などから求められる。基礎代謝量の式は Persily の式と同様の条件で検討を行うことが出来る。CO₂呼出量の単位は L/min であるため計算の際は m³/h に単位を直して計算している。

基礎代謝量および Met 値，呼吸商 RQ の不確かさを算出する式は (D-18)，(D-19)，(D-20)，(D-21)，(D-22) であり，ASTM-18 の式を用いた時の CO₂呼出量推定値の合計の不確かさ（合成標準不確かさ）U_c(P_i)は式 (D-23) によって求められ，被験者全員の不確かさを式 (D-9) から算出することで発生量 m の不確かさを計算することができる。

$$\frac{\partial P_i}{\partial BMR} u(BMR) = 0.000211 RQ Met K/p u(BMR) \quad (D-18)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial Met} u(Met) = 0.000211 RQ BMR K/p u(Met) \quad (D-19)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial k} u(k) = 0.000211 RQ Met BMR/p u(k) \quad (D-20)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial p} u(p) = -0.000211 RQ BMR Met K/p^2 u(p) \quad (D-21)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial RQ} u(RQ) = 0.000211 \times BMR \times Met \times K/p \times u(RQ) \quad (D-22)$$

$$u(P_i) = \sqrt{\left(\frac{\partial P_i}{\partial BMR} u(BMR)\right)^2 + \left(\frac{\partial P_i}{\partial Met} u(Met)\right)^2 + \left(\frac{\partial P_i}{\partial k} u(k)\right)^2 + \left(\frac{\partial P_i}{\partial p} u(p)\right)^2 + \left(\frac{\partial P_i}{\partial RQ} u(RQ)\right)^2} \quad (D-23)$$

ここでは，

W	: 体重 [kg]	H	: 身長 [cm]
A _D	: 体表面積 [m ²]	BMR	: 基礎代謝量 [W]
Met	: エネルギー代謝率 [-]	K	: 気温 [K]
p	: 大気圧 [hPa]	RQ	: 呼吸商 [-]
P _i	: CO ₂ 呼出量推定値 [m ³ /h]	U _c (x)	: 合成標準不確かさ [m ³ /h]
k	: 包含係数 [-]	U	: 拡張不確かさ [m ³ /h]

[2] 室内 CO₂ 濃度の計算結果

定常状態の CO₂ 濃度について各 CO₂ 呼出量推定手法の不確かさを不確かさの伝播則より算出した。CO₂ 呼出量推定手法は CO₂ 呼出量関係式、JIS および ASTM-18 を用いた場合の計算を行った。誤差要因が呼出量のみの場合を図 D-1～図 D-4、全ての場合を図 D-5～図 D-8 に示す。計算条件については、p101 の表 6-10 に示す。ここでの不確かさは拡張不確かさを示している。一人当りの換気量を 20m³/h とした条件について示す。

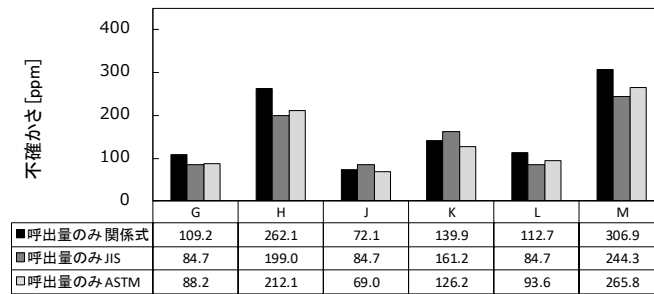


図 D-1 : CO₂ 濃度の不確かさ (呼出量のみ) _活動量計 (平均値)

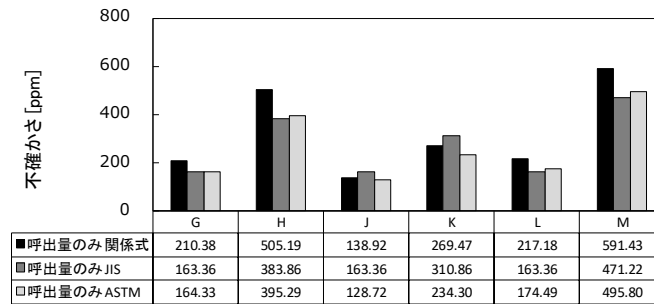


図 D-2 : CO₂ 濃度の不確かさ (呼出量のみ) _脈拍数計

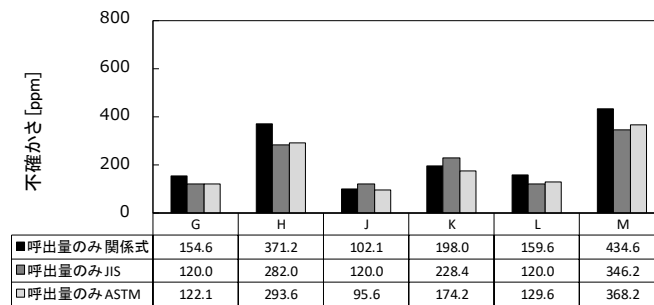


図 D-3 : CO₂ 濃度の不確かさ (呼出量のみ) _文献値 (ASHRAE)

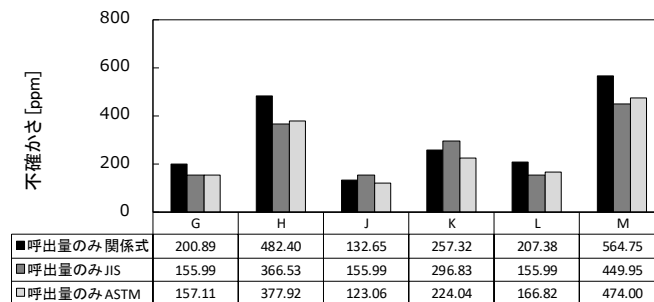


図 D-4 : CO₂ 濃度の不確かさ (呼出量のみ) _文献値 (METs 表)

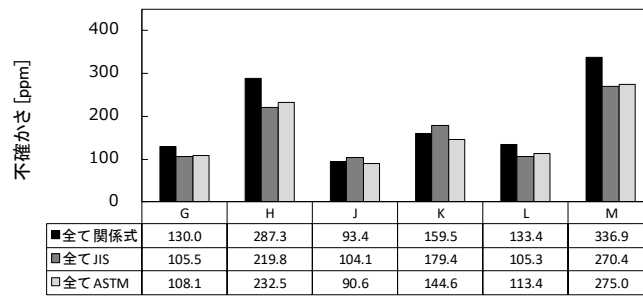


図 D-5：CO₂濃度の不確かさ（全て）_活動量計（平均値）

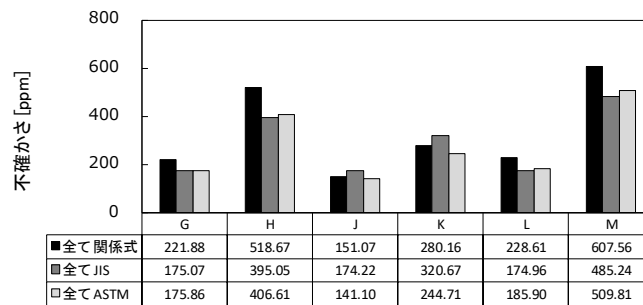


図 D-6：CO₂濃度の不確かさ（全て）_脈拍数計

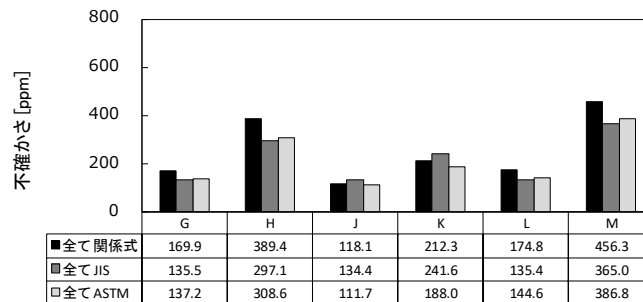


図 D-7：CO₂濃度の不確かさ（全て）_文献値（ASHRAE）

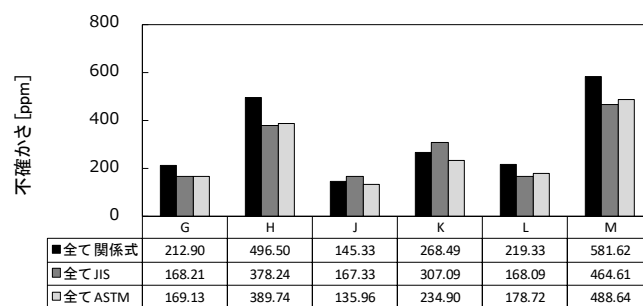


図 D-8：CO₂濃度の不確かさ（全て）_文献値（METs 表）

男性が多いケース（G, H, L, M）では、CO₂呼出量関係式を用いた場合の不確かさが大きい結果となった。女性が多い条件では JIS の値を用いた場合に不確かさが大きくなることを確認した。また Met 値が大きい条件ほど不確かさも大きい結果となった。総合的にみると JIS を用いた場合の不確かさは最小となるが、3 章や 4 章で記した通り、JIS の値は他の推定手法よりも測定値との差が大きいためこのことについて考慮が必要である。

[3] 換気量の計算結果

定常状態の換気量について各 CO₂ 呼出量推定手法の不確かさの算出を行った。CO₂ 呼出量推定手法は CO₂ 呼出量関係式、JIS および ASTM-18 を用いた場合の計算を行った。誤差要因が呼出量のみの場合を図 D-9～図 D-12、全ての場合を図 C-13～図 C-16 に示す。一人当たりの換気量を 20m³/h とした条件について示す。

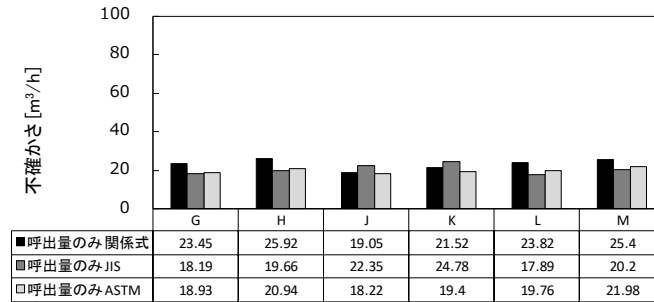


図 D-9：換気量の不確かさ（呼出量のみ）_活動量計（平均値）

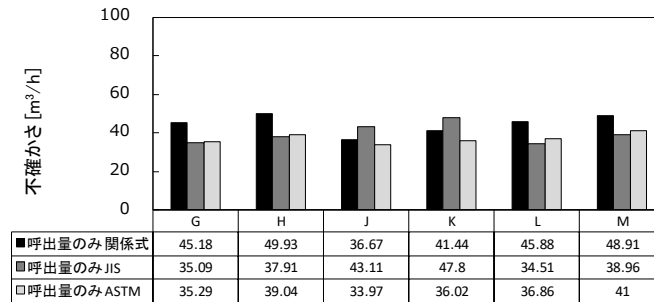


図 D-10：換気量の不確かさ（呼出量のみ）_脈拍数計

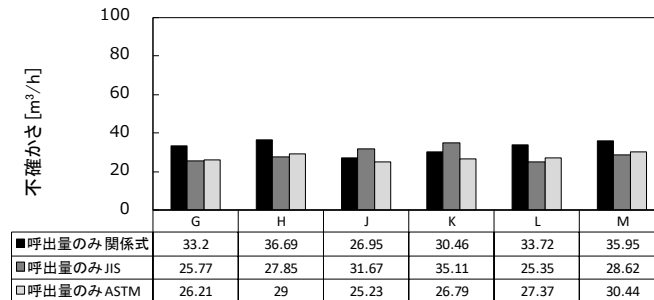


図 D-11：換気量の不確かさ（呼出量のみ）_文献値（ASHRAE）

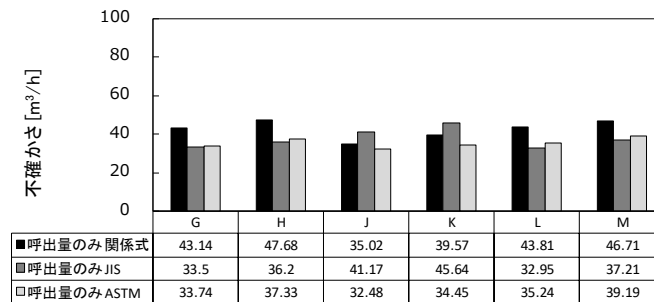


図 D-12：換気量の不確かさ（呼出量のみ）_文献値（METs 表）

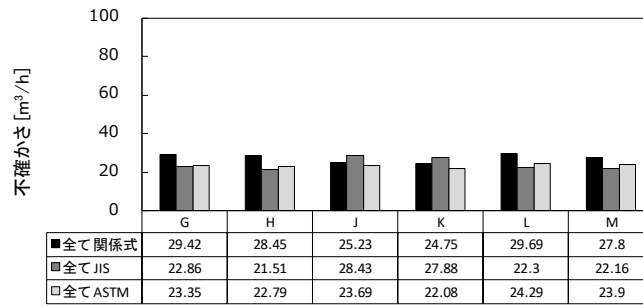


図 D-13：換気量の不確かさ（全て）_活動量計（平均値）

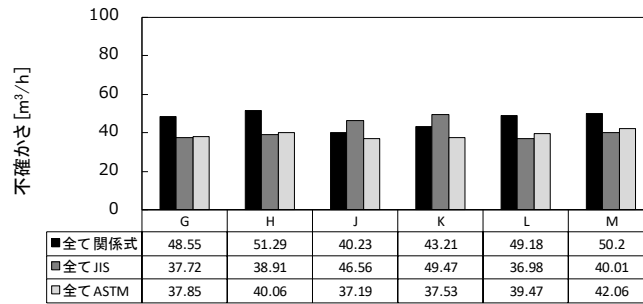


図 D-14：換気量の不確かさ（全て）_脈拍数計

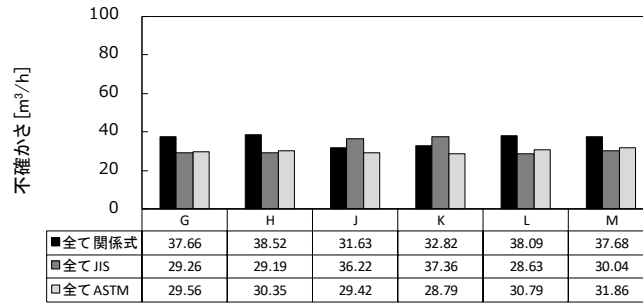


図 D-15：換気量の不確かさ（全て）_文献値（ASHRAE）

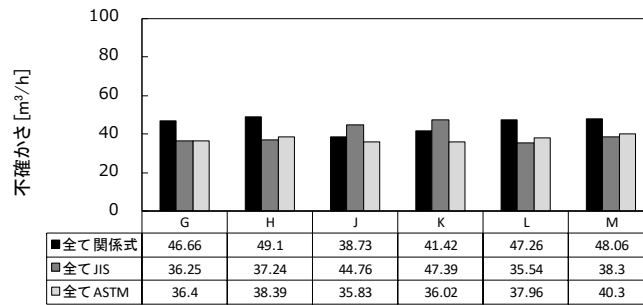


図 D-16：換気量の不確かさ（全て）_文献値（METs 表）

[4] 室内 CO₂ 濃度の測定結果_人間の呼気の場合

実測に基づく非定常状態の換気性状測定における不確かさを算出した。6 章では CO₂ 呼出量関係式の検討結果を主に報告したが、本節では JIS および ASTM-12 および Persily の式を用いた場合の計算結果を示す。

表 D-1 に信頼区間割合を示す。ほとんどのケースで A-9~A-14 で割合が低い結果となった。Met 値が高い行為については Met 値推定自体が難しいことなどが考えられる。

JIS に示されている値を用いた場合の不確かさの算出結果を図 D-17~D-26 に、ASTM-12 の計算結果について図 D-27~D-36 に、Persily の式の計算結果について図 D-37~D-46 に示す。

表 D-1 : 信頼区間割合

	活動量計 (平均値)				文献値 (ASHRAE)			
	関係式	JIS	ASTM-12	Persily	関係式	JIS	ASTM-12	Persily
A-1	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
A-2	100.0	43.6	100.0	48.6	100.0	40.9	100.0	44.8
A-3	100.0	18.8	100.0	20.5	100.0	43.1	100.0	59.8
A-4	78.8	37.0	60.0	36.4	100.0	43.6	83.6	43.6
A-5	100.0	33.7	100.0	40.3	100.0	42.0	100.0	45.3
A-6	100.0	22.1	100.0	22.1	25.4	16.6	21.0	16.6
A-7	100.0	58.0	100.0	99.4	100.0	51.4	100.0	59.7
A-8	100.0	99.4	100.0	74.0	100.0	100.0	100.0	100.0
A-9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
A-10	100.0	32.2	100.0	36.8	99.4	32.2	100.0	43.1
A-11	89.5	17.1	38.1	17.7	89.0	14.9	37.6	14.9
A-12	32.0	97.5	81.7	92.5	17.4	100.0	21.2	100.0
A-13	50.3	19.9	45.9	19.9	33.1	17.1	19.9	17.1
A-14	15.4	100.0	23.2	100.0	100.0	19.5	97.5	18.3
B-1	82.9	90.1	97.8	92.8	100.0	89.0	100.0	92.8
B-2	100.0	96.7	100.0	100.0	100.0	61.9	100.0	76.2
B-3	100.0	79.7	100.0	88.8	100.0	100.0	100.0	100.0
B-4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
B-5	100.0	38.7	100.0	96.7	100.0	100.0	100.0	100.0
B-6	100.0	32.0	100.0	47.5	100.0	100.0	100.0	100.0
B-7	100.0	30.4	100.0	48.6	12.7	100.0	28.2	100.0
C-1	100.0	37.1	100.0	34.4	100.0	40.4	100.0	36.4
C-2	100.0	21.0	100.0	19.9	100.0	100.0	100.0	100.0
C-3	100.0	64.6	100.0	62.4	100.0	100.0	100.0	100.0
C-4	100.0	24.9	100.0	22.1	8.3	45.3	11.6	43.6

JIS

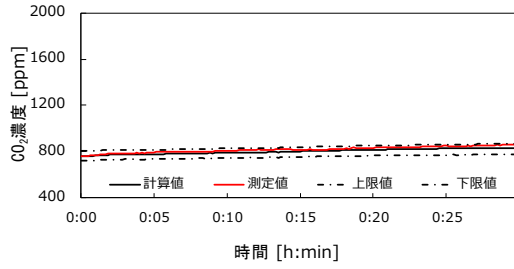


図 D-17：測定値と計算値 A-1_活動量計

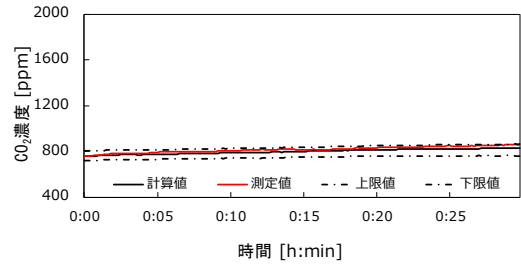


図 D-22：測定値と計算値 A-1_文献値

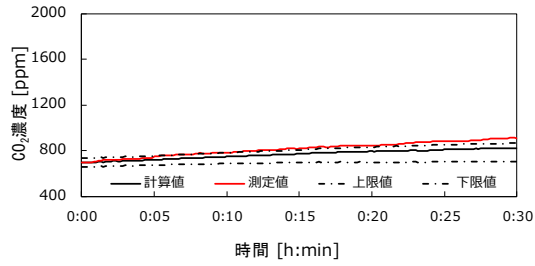


図 D-18：測定値と計算値 A-6_活動量計

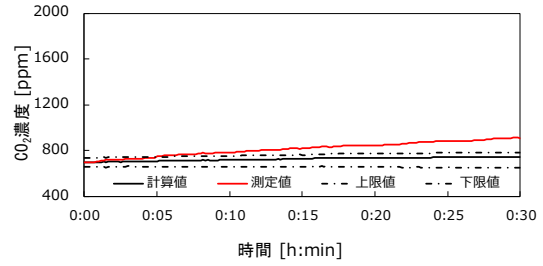


図 D-23：測定値と計算値 A-6_文献値

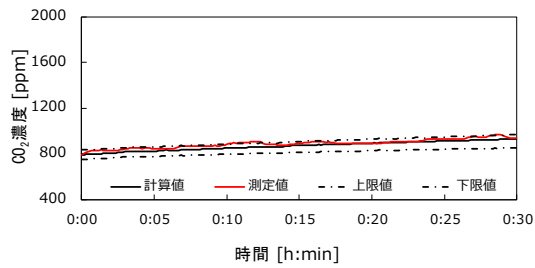


図 D-19：測定値と計算値 B-1_活動量計

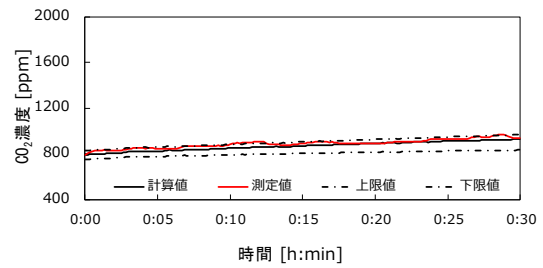


図 D-24：測定値と計算値 B-1_文献値

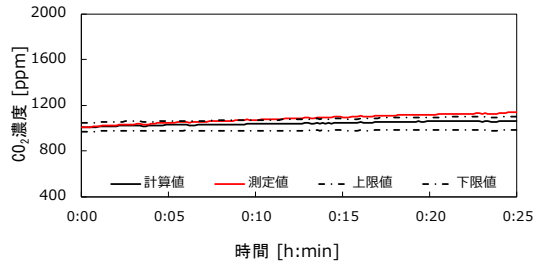


図 D-20：測定値と計算値 C-1_活動量計

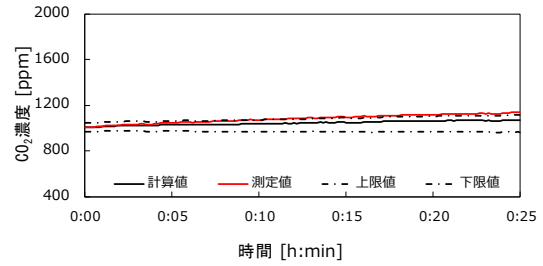


図 D-25：測定値と計算値 C-1_文献値

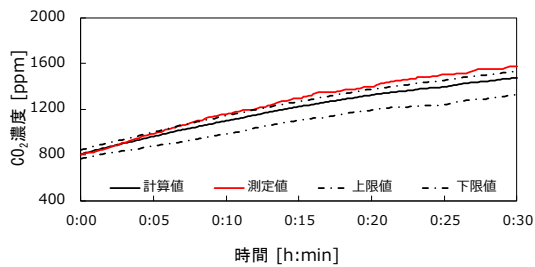


図 D-21：測定値と計算値 C-4_活動量計

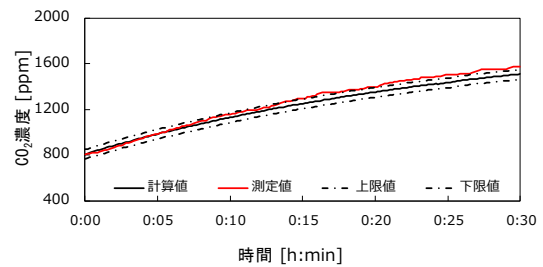


図 D-26：測定値と計算値 C-4_文献値

ASTM-12

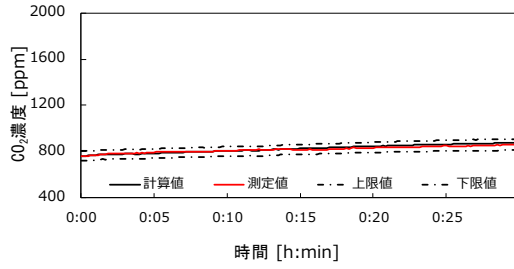


図 D-27 : 測定値と計算値 A-1_活動量計

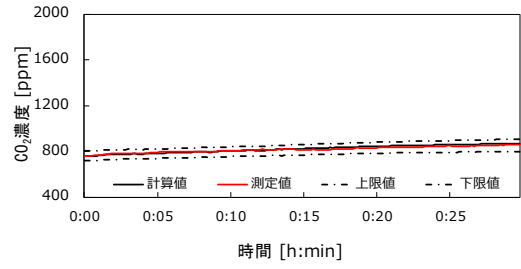


図 D-32 : 測定値と計算値 A-1_文献値

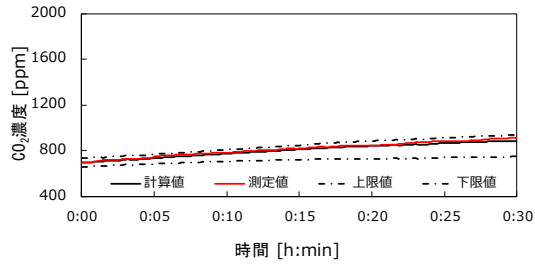


図 D-28 : 測定値と計算値 A-6_活動量計

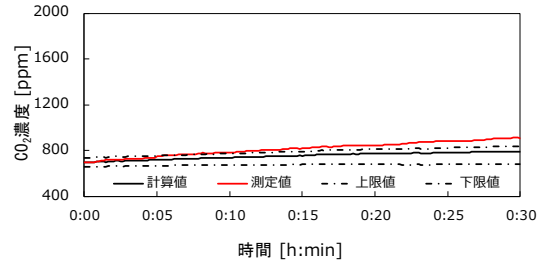


図 D-33 : 測定値と計算値 A-6_文献値

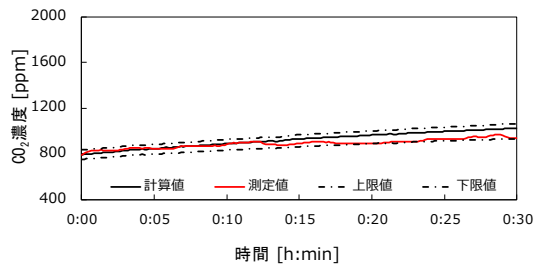


図 D-29 : 測定値と計算値 B-1_活動量計

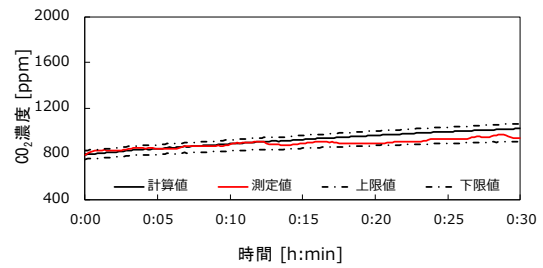


図 D-34 : 測定値と計算値 B-1_文献値

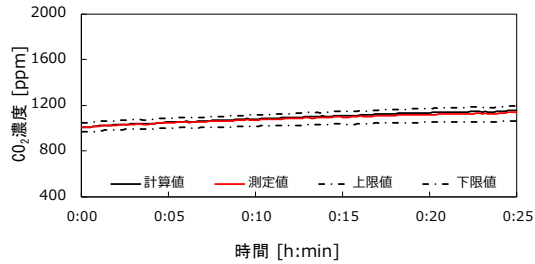


図 D-30 : 測定値と計算値 C-1_活動量計

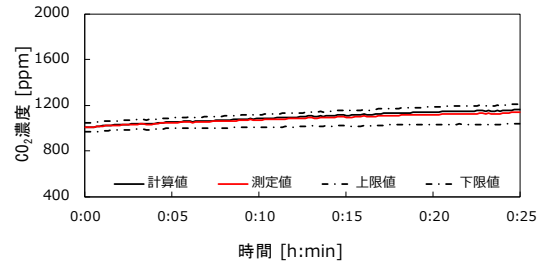


図 D-35 : 測定値と計算値 C-1_文献値

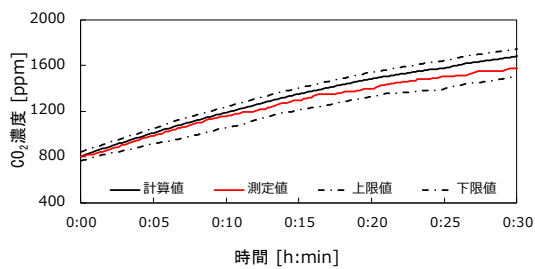


図 D-31 : 測定値と計算値 C-4_活動量計

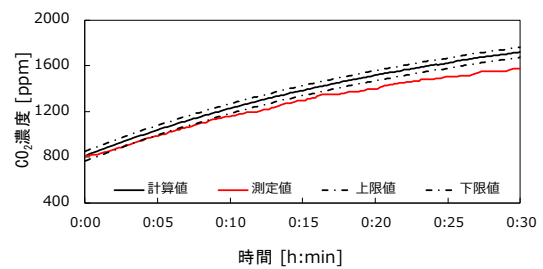


図 D-36 : 測定値と計算値 C-4_文献値

Persily

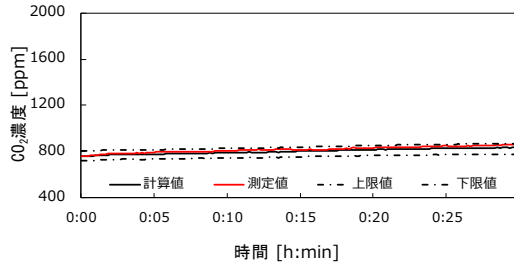


図 D-37 : 測定値と計算値 A-1_活動量計

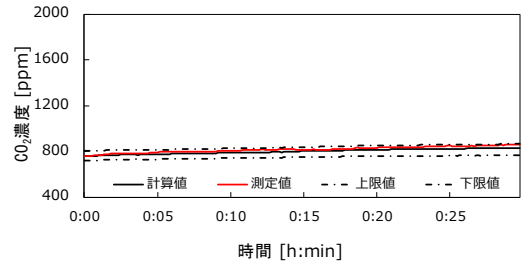


図 D-42 : 測定値と計算値 A-1_文献値

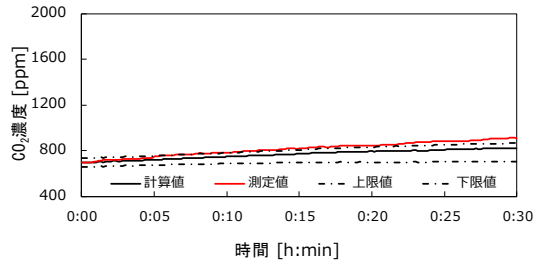


図 D-38 : 測定値と計算値 A-6_活動量計

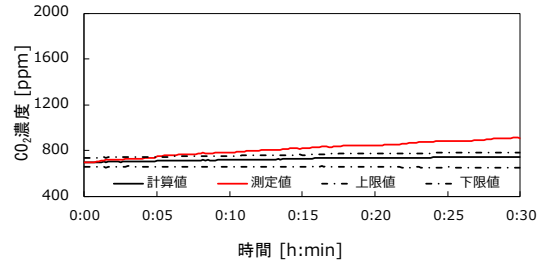


図 D-43 : 測定値と計算値 A-6_文献値

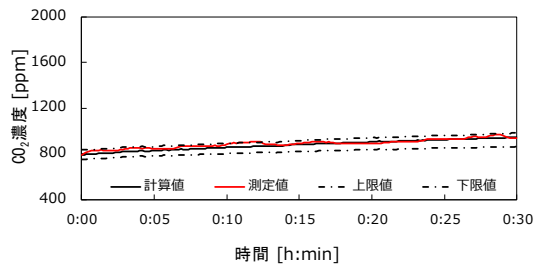


図 D-39 : 測定値と計算値 B-1_活動量計

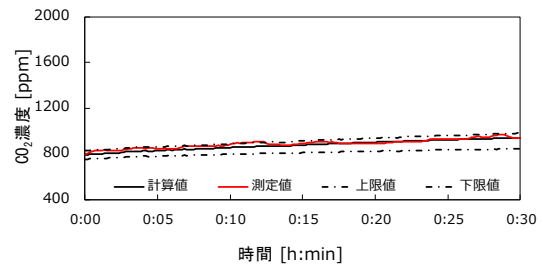


図 D-44 : 測定値と計算値 B-1_文献値

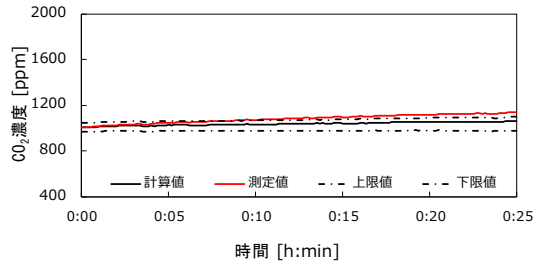


図 D-40 : 測定値と計算値 C-1_活動量計

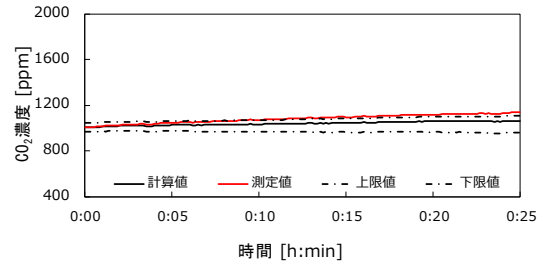


図 D-45 : 測定値と計算値 C-1_文献値

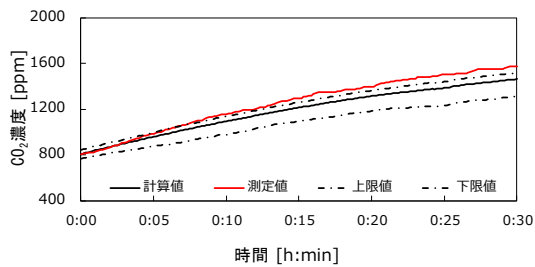


図 D-41 : 測定値と計算値 C-4_活動量計

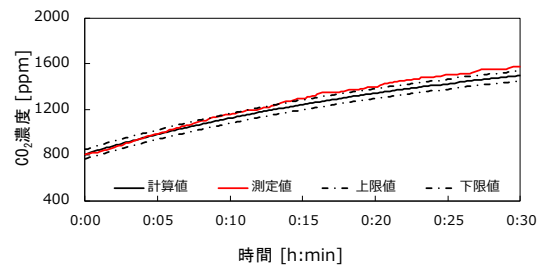


図 D-46 : 測定値と計算値 C-4_文献値

[5] 室内 CO₂ 濃度の測定結果_マスフローコントローラー

この節では、第 6 章に示せていない測定結果と計算結果を図 D-47～図 D-52 に示す。

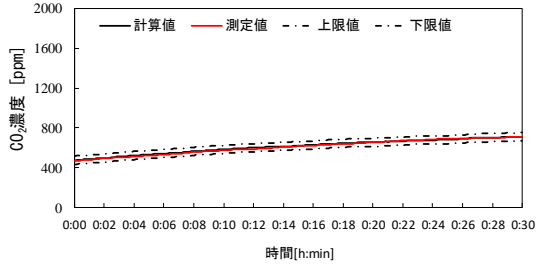


図 D-47 : 測定値と区間推定_D-1

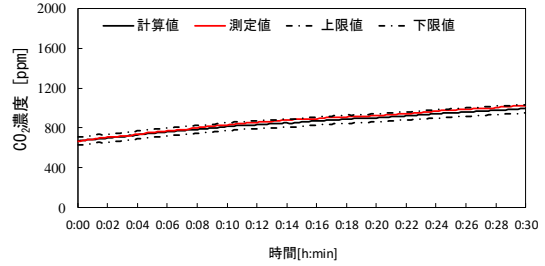


図 D-50 : 測定値と区間推定_D-6

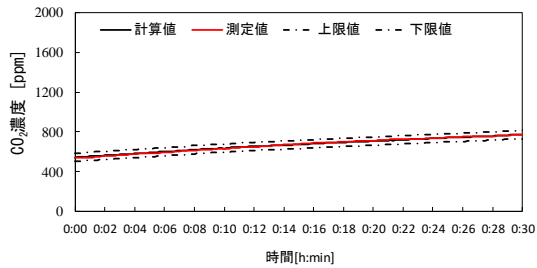


図 D-48 : 測定値と区間推定_D-2

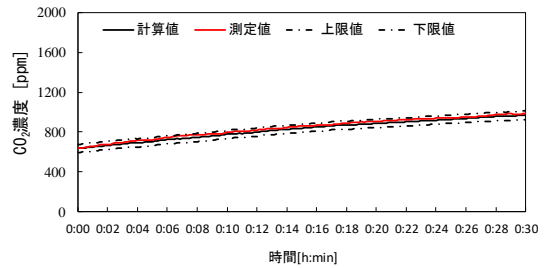
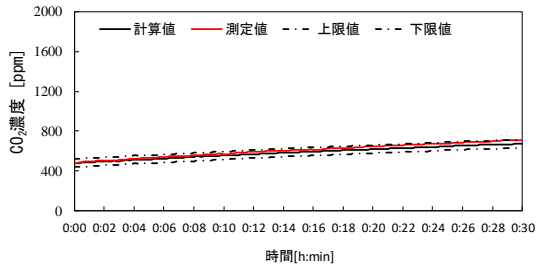


図 D-51 : 測定値と区間推定_D-8



測定値と区間推定_D-4

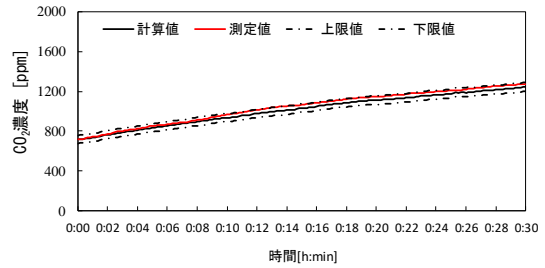


図 D-52 : 測定値と区間推定_D-11

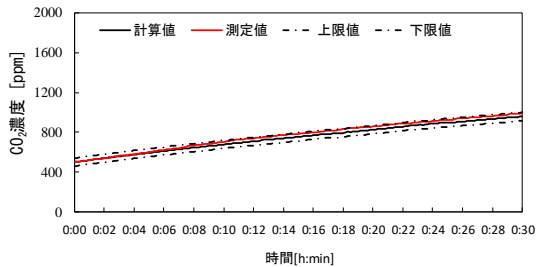


図 D-49 : 測定値と区間推定_D-5

[6] 換気量の測定結果

マスフローコントローラー

6章でケース E-2, E-3, E-4, E-8 について計算結果を示した。ここではケース E-2, E-3, E-4, E-8 の計算結果を示す。

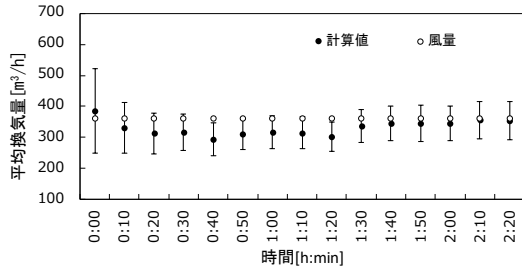


図 D-53 : 測定値と区間推定 E-1

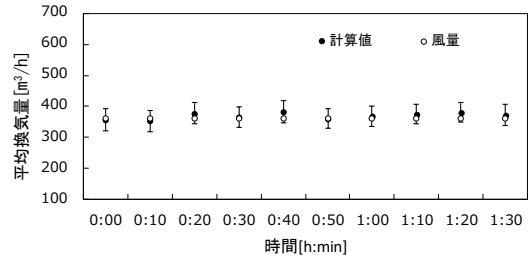


図 D-55 : 測定値と区間推定 E-6

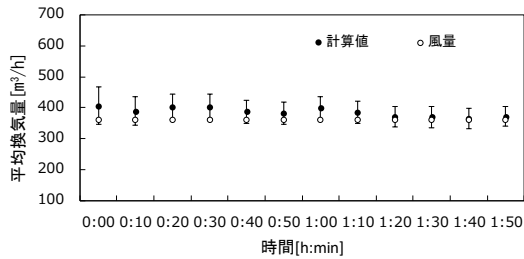


図 D-54 : 測定値と区間推定 E-5

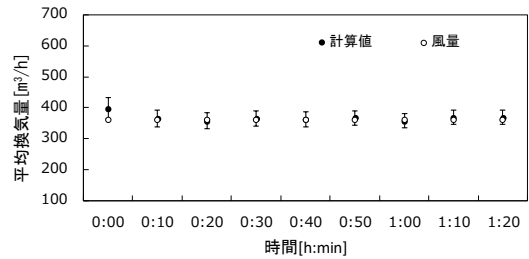


図 D-56 : 測定値と区間推定 E-7

人間の呼吸

ケース A-3, F-1 の計算結果を示す。

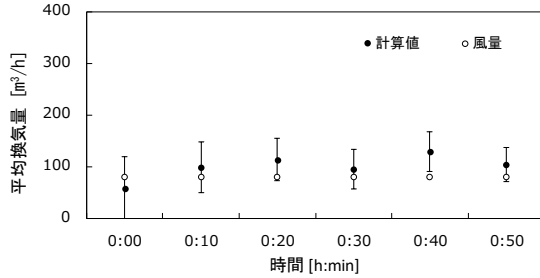


図 D-57 : 風量と信頼区間 A-3 (活動量計 (平均値))

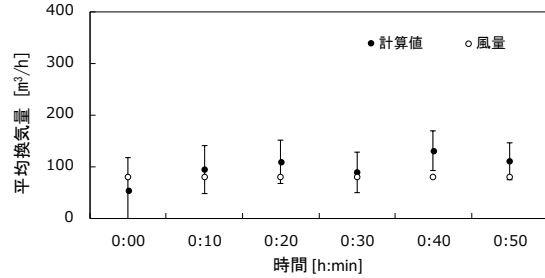


図 D-59 : 風量と信頼区間 A-3 (文献値)

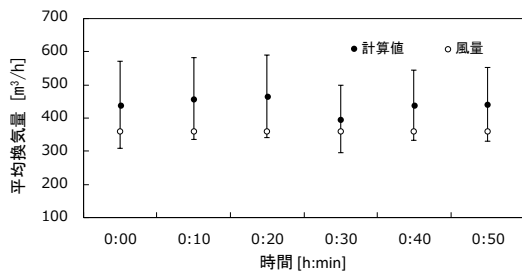


図 D-58 : 風量と信頼区間 F-1 (活動量計 (平均値))

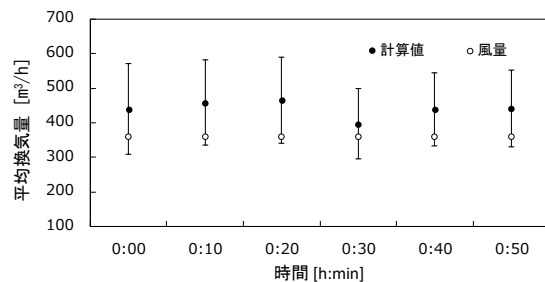


図 D-60 : 風量と信頼区間 F-1 (文献値)

