

人間の CO₂呼出量関係式を用いた CO₂濃度推定の精度向上

高知工科大学 システム工学群 建築・都市デザイン専攻 建築環境工学研究室
 CO₂呼出量関係式 エネルギー代謝率 呼吸 学籍番号：1170175 氏名：依光剛志
 三軸加速度センサー内蔵活動量計 在室者 指導教員：田島昌樹

1. はじめに

居室において在室者がいる条件で、トレーサーガスを発生させて換気量を測定することは様々な制約があるため困難となることが多い。そのため人間の呼気に含まれる CO₂をトレーサーとし、その発生量を設定することで換気量を推定する手法がある^[1]。先行研究では現在の日本人の CO₂呼出量を把握することを目的に人間の CO₂呼出量関係式 (1-1)^[2]を作成している。

$$P_{CO_2} = 1.601 \times 10^{-4} \times (60.63 \times A_D \times Met \times C_g \times C_a) \quad (1-1)$$

$$A_D = 0.007246 \times W^{0.425} \times H^{0.725} \quad (1-2)^{[3]}$$

ここで

- P_{CO_2} : CO₂呼出量 [m³/h]
- A_D : 日本人成人の体表面積 [m²]
- Met : エネルギー代謝率 [-]
- C_g : 性別係数 女性 0.73 男性 1.00
- C_a : 年齢係数 (表 1 に示す)
- W : 体重 [kg] H : 身長 [cm]

表 1 年齢係数^[4]

年齢	男	女
18~29	1.00	1.00
30~49	1.01	1.04
50~69	0.92	0.99

2. 研究概要

先行研究では、在室者の活動を目視で確認し、ASHRAE HANDBOOK^[5]に示されている Met 値を関係式 (1-1) に代入して在室者の CO₂呼出量の算定を行い、その結果をもとに換気されている室の CO₂濃度を推定し一定の精度があることを確認している。しかし活動量が大きい条件では CO₂濃度の測定値と計算値がかい離している測定ケースもあり、目視により設定したエネルギー代謝率 Met と実際の Met 値との差が一因と考えられる^[2]。そこで本研究では人の活動量をエネルギー代謝率の単位で計測が可能な三軸加速度センサー内蔵活動量計 (以下活動量計と表す) OMRON HJA-750C を用いることで、Met 値推定の精度向上と、換気されている室における CO₂濃度推定の精度向上について検討を行った。

3. CO₂呼出量関係式の精度と活動量計による活動量の把握

活動量計の記録する Met 値の精度確認を目的とし、ダグラスバック法により求められる Met 値との比較を多数の活動条件を設定して、被験者実験を行った。また両手法で得られる Met 値をそれぞれ式 (1-1) に代入することで得られる CO₂呼出量の差異についても検討を行った。

3.1 ダグラスバック法による呼気収集

呼気の収集は 20 歳代の男子学生を中心として 11 の活動を設定して行った。呼気収集の実施条件を表 2、収集で使用した機器と測定項目を表 3 に示す。

なお本研究で使用する活動量計は運動強度 METs (metabolic equivalents) が記録される。Met 値と METs はどちらも安静時のエネルギー消費量を分母、活動時のエネルギー消費量を分子として^[6]計算される指標であり、両者の算出方法は同じである。そのため本研究では活動量計の測定値 METs を Met 値として検討を行った。活動量は活動量計を被験者の腰にベルトを巻いて装着し 10 秒間隔で測定した。

また先行研究で行っていた目視による Met 値の推定手法の精度確認を行うため、本研究では『身体活動のメッツ (METs) 表』^[7]及び ASHRAE HANDBOOK による Met 値を用いた。文献に示されている値を実施条件とともに表 2 に示す。以降、ダグラスバック法で得られた Met 値を Met_D とし、活動量計で測定される値を Met_A と表す。

3.2 呼気の分析結果

3.2.1 活動量計の精度確認

収集した呼気の分析および活動量計により得られた活動ごとに測定した Met_D と Met_A (平均値) の範囲を図 1、2 に示す。Met_D、Met_A ともに活動量が大きくなるにつれて個人のバラツキ範囲が大きくなる結果となった。

表 2 被験者実験の条件

活動	作業時間 [分]	ASHRAE に示されている値 ^[5]	METs 表に示されている値 ^[7]	被験者数 [人]	
椅座静位		1.0	1.0	15	
事務作業	5	筆記	1.0	1.3	7
		タイプ	1.1	1.3	10
		書類整理	1.2**	2.0	15
		血洗い		1.8	11
掃除	4	2.0 ~ 3.4	机拭き	2.3	14
			窓拭き	3.2	11
			掃除機*	3.3	11
			3.2 km/h	2.0	2.8
歩行	3		2.6	3.5	13
			3.8	5.0	12

*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

表 3 測定機器と測定項目

測定項目	機器名	測定概要
CO ₂ 濃度 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
活動量	OMRON Active style PRO HJA-750c	測定範囲 ±6G 1.0~18.0METs (0.1METs 刻み)

Met_DとMet_a（平均値）の回帰分析の結果を図3に示す。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にはほとんど差がなかったが、なかでもMet_a（平均値）の相関係数が0.948と最も高くなり、活動量計を用いてMet_Dを推定する精度が最も高い結果となった。また活動量が大きくなるにつれてバラツキも大きくなっていることを確認した。

Met_Dを真値としてMet_aの平均値、最頻値、中央値について求めたRMSEを図4に示す。Met_a（平均値）のRMSEが最も小さい結果となった。

3.2.2 CO₂呼出量関係式の精度確認

関係式作成時に用いたMet_Dが3.0までの男性の呼気データを用いて、式(1-1)にMet_aおよびASHRAE、METs表の値を代入して得られるCO₂呼出量の差異について検討を行った。Met値のCO₂呼出量に対する影響のみを検討するため、関係式作成に使用した20代男性の平均体重(64.3kg)と平均身長(169.4cm)をもつ「平均男性」を設定し、CO₂呼出量測定値を補正し得られたCO₂呼出量を算出した。得られたCO₂呼出量の計算値を図5に示す。図5の横軸は、本研究の呼気収集の被験者のMet_Dの平均値、縦軸にMet_a（平均値）の平均値、ASHRAEおよびMETs表の値を式(1-1)に代入して得られたCO₂呼出量を表している。図5の実線は「平均男性」の条件により得られたCO₂呼出量を示しており、点線は関係式作成時に使用した呼気データから求めた誤差範囲（相対RMSE 13%）を示している。

METs表の値を用いて算出したCO₂呼出量は誤差範囲から外れていることが多く、活動量計で測定されたMet_a（平均値）から求めたCO₂呼出量は全ての条件で誤差範囲内にあることが確認された。

3.2.3 活動によるMet値の設定手法の検討

ダグラスバック法により得られたMet_Dを式(1-1)に代入して得られたCO₂呼出量を真値とし、活動量計およびASHRAE、METs表の値を式(1-1)に代入して得られたCO₂呼出量のRMSEを図6に示す。歩行の項目ではMet_a（平均値）が3.0以上であったため目視によるCO₂呼出量計算値のRMSEより大きい結果となった。CO₂呼出量算定に用いたMet_a（平均値）の平均値、ASHRAE及びMETs表の値を表4に示す。掃除項目では活動量計によるMet_a（平均値）のRMSEが小さく最も精度が高い結果となった。

表4 各手法による活動とエネルギー代謝率

活動	Met _D	目視		Met _a (平均値)	設定手法
		ASHRAE	METs表		
椅座静位	1.00	1.0	1.0	1.06	ASHRAE, METs表
筆記	1.17	1.0	1.3	1.08	Met _a , ASHRAE
タイフ	1.14	1.1	1.3	1.10	Met _a , ASHRAE
書類整理	1.31	1.2	2.0	1.47	ASHRAE
血洗い	1.54		1.8	1.57	Met _a
机拭き	2.37		3.2	2.17	Met _a
窓拭き	2.27		2.3	2.25	Met _a
掃除機	2.14		3.3	2.15	Met _a
3.2 km/h	2.91	2.0	2.8	2.76	ASHRAE

※関係式のMetに代入した場合、測定値に近くなった値を着色している

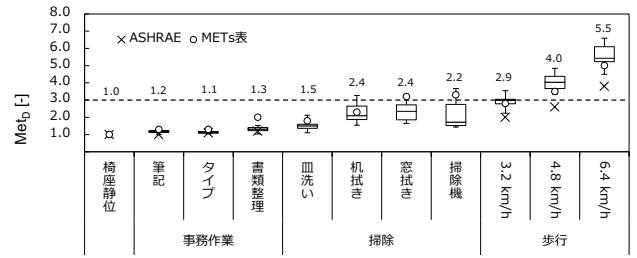


図1 Met_Dの範囲

※箱ひげ図上部の数値は平均値を示す

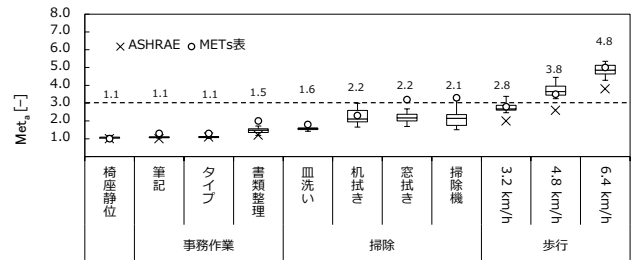


図2 Met_a（平均値）の範囲

※箱ひげ図上部の数値は平均値を示す

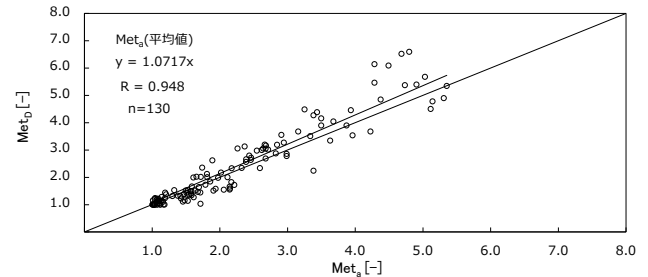


図3 Met_DとMet_a（平均値）の関係

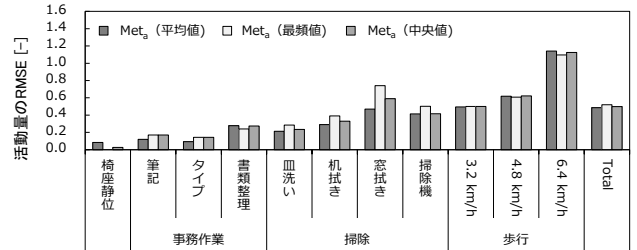


図4 活動量計測定値のダグラスバック法に対するRMSE

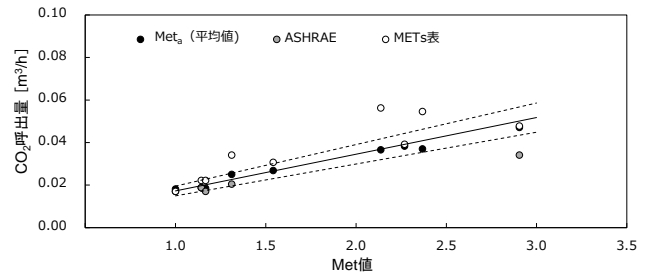


図5 CO₂呼出量の計算値(20代男性平均条件)

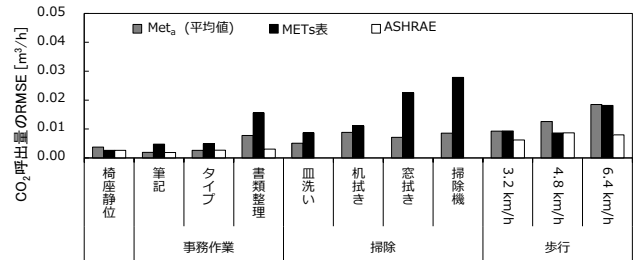


図6 CO₂呼出量計算値のRSME (Met_Dを真値とした場合)

4. 居室における CO₂濃度の測定実験

前章では活動量計を用いることで、目視により Met 値を設定する手法よりも精度よく CO₂呼出量を算定できることを確認した。本章では活動量計を用いて在室者の活動量を測定することで、室の CO₂濃度が正確に推定できるかを確認する。

4.1 測定概要

単室とみなせる居室において、在室者の装着した活動量計による Met 値と室内 CO₂濃度を 10 秒ごとに測定し、式 (1-1) による CO₂呼出量を単室換気に関する微分方程式 (4-1) に代入して算出した CO₂濃度と比較した。CO₂呼出量関係式 (1-1) に代入する在室者の属性データは聞き取りを行い、身長に関しては直近の健康診断の値を使用し、体重は体重計 OMRON HBF-701 を用いて測定した。Met 値は、前章で CO₂呼出量の値が最も精度が高かった Met_a (平均値) 及び Met_a をそのまま用いた Met_a (測定値) と、比較対象として設定した活動に対応する ASHRAE 及び METs 表の値を用いた。

測定条件を表 5、測定に使用した測定機器を表 6、対象室の測定条件概要を図 7 に示す。換気量の設定には、機

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

ここで

- P_{CO_2} : 在室者の CO₂呼出量 [m³/h]
- V_i : i 室の容積 [m³]
- Q_{io} : 換気量 [m³/h]
- C_o : 外気 CO₂濃度 [m³/m³]
- C_i : i 室の CO₂濃度 [m³/m³]

表 5 測定条件の概要

ケース	在室者数 [人]	機械換気量 [m ³ /h]	室容積 [m ³]	測定時間 [分]	活動	
A-1	4	80	111.5	30	椅座静位	
A-2				60	椅座・勉強**	
A-3				30	タイプ	
A-4					書類整理	
A-5					勉強**	
A-6					机拭き	
A-7					掃除*	
A-8					40	歩行
A-9						掃除*
A-10						掃除*
A-11				掃除*		
A-12				掃除*		
A-13				掃除*		
A-14				掃除*		
B-1	8 (1)	160	30	椅座静位		
B-2			40	打ち合わせ		
B-3			30	書類整理		
B-4				勉強**		
B-5				机拭き		
C-1	12 (2)	240	25	椅座静位		
C-2			30	勉強		
C-3				机拭き		
C-4				机拭き		

※ () 内は女性人数 掃除*: 机拭き 3 人、掃除機使用 1 人
勉強**: 主行動は筆記、その他に本で調べるなどがある

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利用した。CO₂濃度計は排出口近くと屋外に設置し、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。

4.2 測定結果

室の CO₂濃度の測定結果の例としてケース A-1 およびケース A-6 を図 8、9 に示す。

測定より得られた CO₂濃度測定値を真値として CO₂濃度計算値の RMSE を求めた。Met 値の測定結果と 2RMSE (信

表 6 測定機器と測定項目

測定項目	機器名	測定概要
CO ₂ 濃度	CO ₂ センサー KNS-CO2S	測定誤差 ±50ppm±測定値の5%
	データロガー RVR-52L	測定誤差 ±5%+5dat (0~40°Cの環境下において)
室内の換気量の設定	気密測定器 (コーナー札幌株式会社)	出力範囲 0Pa 2100/2400m ³ /h (最大) 100V 50/60Hz
活動量	OMRON Active style PRO HJA-750c	測定範囲 ±6G 1.0~18.0METs (0.1METs 刻み)

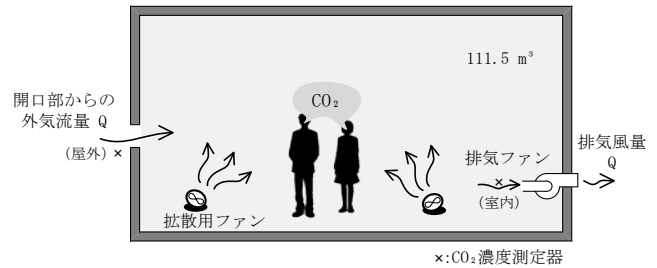


図 7 測定条件概要

表 7 測定結果

ケース	Met 値		2RMSE [ppm]			
	目視	Met _a (平均値)	目視	CO ₂ 濃度計算値		
				測定値	平均値	
A-1	1.0	1.03	24.1	30.6	29.6	
A-2		1.04	41.5	31.2	29.2	
A-3		1.0・1.3 ^{*2}	1.05	44.3	27.8	29.6
A-4		1.1 ^{*1}	1.07	60.9	69.2	68.4
A-5			1.04	26.5	43.2	43.3
A-6			1.64	165.5	56.3	51.2
A-7		1.2 ^{*1}	1.29	27.5	11.3	7.0
A-8			1.18	32.7	23.0	27.2
A-9			1.3 ^{*2}	1.33	11.4	16.5
A-10		2.3 ^{*2}	2.28	38.8	30.0	33.8
A-11			2.57	69.9	64.5	60.6
A-12		2.3・3.2 ^{*2}	2.36	163.8	102.2	107.5
A-13			2.29	267.0	116.6	116.3
A-14		1.7 ^{*1}	2.82	153.8	169.9	163.4
B-1	1.0	1.04	35.6		54.0	
B-2		1.1・1.5 ^{*2}	1.14	68.6		54.1
B-3		1.2	1.23	13.4		24.9
B-4		1.3	1.11	114.9		20.7
B-5		2.3	2.06	210.3		92.3
C-1	1.0	1.01	51.3		45.7	
C-2		1.14	75.8		42.1	
C-3		1.17	113.7		29.9	
C-4		2.3	2.09	208.6		67.0

*1: ASHRAE に示されている Met 値

*2: 国立健康栄養研究所「METs 表」に示されている値

頼度 95%) の範囲を表 7 に示す。また CO₂濃度計の測定誤差が±50 ppm であり、2RMSE の値が 50ppm 以上でかつ値が大きいほどセルを濃い色で着色している。

在室者数 4 人条件の 2RMSE を図 10 に示す。ケース A-6, 7 や A-11, 12 のように同じ活動であっても目視より設定した Met 値では CO₂濃度測定値と計算値がかい離する結果となり、活動量計で測定された Met_a (平均値) を用いて在室者の CO₂呼出量を推定した CO₂濃度の RMSE が小さい結果となった。Met 値が 1.0 に近い活動の CO₂濃度計算値は、目視により Met 値を設定した条件と Met_a を用いた条件で、測定値を真値とした場合の RMSE に差がない結果となった。

全データから算出した RMSE は目視より Met 値を設定する手法よりも活動量計を用いて Met 値を設定する手法の値が最も小さい結果となった。Met_a (測定値) と Met_a (平均値) を比較すると Met_a (平均値) の RMSE が小さいことを確認した。

4.3 在室者数による CO₂濃度推定の精度確認

測定では活動量計 4 個を使用したため、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 人と 12 人のケースでは、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 CO₂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 CO₂濃度測定値を真値とした場合の 1 人当りの RMSE を図 11 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た。目視により Met 値を設定した場合、CO₂濃度計算値の RMSE は Met_a (平均値) と違い在室者数による RMSE の関係は見られないことを確認した。

5. おわりに

本研究では活動量計を用いることで、Met 値測定の精度向上と、換気されている室における CO₂濃度推定の精度向上について検討を行い以下の知見を得た。

- (1) Met₀ は同じ活動であっても活動量が大きくなるにつれて個人々人によるバラツキが大きくなる結果となった。
- (2) 活動量計の精度確認では、Met_a、Met₀ の回帰分析と RMSE から Met_a を平均値として扱った条件が最頻値や中央値よりも精度が高い結果となった。
- (3) CO₂呼出量測定値を真値とした関係式による CO₂呼出量計算値の RMSE では、Met_a (平均値) または ASHRAE に示されている値を用いた CO₂呼出量の RMSE の値が小さく関係式 (1-1) による CO₂呼出量推定精度が高い結果となった。
- (4) 室内 CO₂濃度の推定において、Met が 1.0 に近い活動の場合、目視より Met 値の設定した値と Met_a による CO₂濃度測定値を真値とした計算値の RMSE に大きな差がないことを確認した。

(5) 活動量の小さい活動であれば目視でも居室の CO₂濃度推定を行うことができ、活動量が大きい場合では活動量計を用いることで高い精度で CO₂濃度を推定できることを確認した。

(6) CO₂濃度推定では、Met_a (平均値) を用いて CO₂濃度推定を行った結果、在室者数が多くなると 1 人当りの RMSE が小さくなることを確認した。

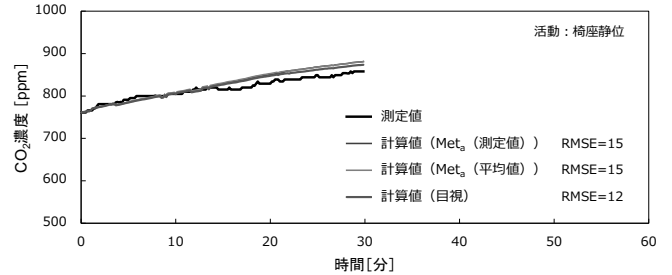


図 8 caseA-1 の室内 CO₂濃度

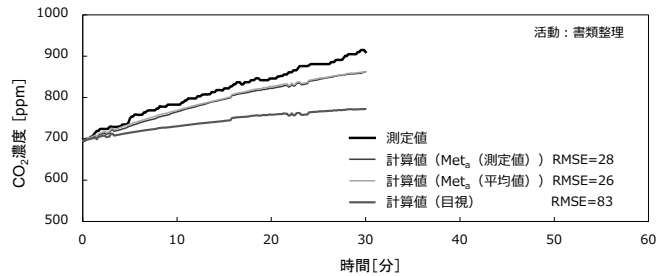


図 9 caseA-6 の室内 CO₂濃度

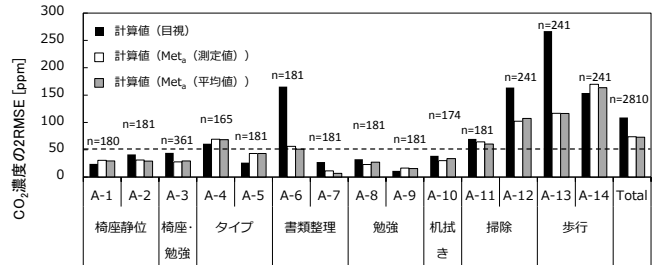


図 10 CO₂濃度の測定値と計算値 (在室者数 4 人)

※ n はデータ数

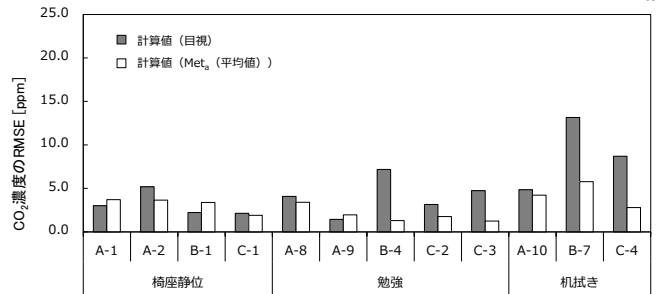


図 11 CO₂濃度の測定値と計算値 (1 人当りの RMSE)

参考文献

[1] 日本工業標準調査会: JIS A1406¹⁹⁷⁴室内換気量測定法 (炭酸ガス法), 2010 [2] 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, 2016.1 [3] 社団法人 空気調和・衛生工学会: 空気調和衛生工学便覧 (第 14 版) 1 基礎編, p330, 2010.2 [4] 厚生労働省: 「日本人の食事摂取基準 (2015 年版)」策定検討会報告書, pp65-66, 2014.3 [5] ASHRAE: ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS, 9.6, 2013 [6] 朝倉邦造: 人間の許容限界事典, 株式会社朝倉書店, pp846-853, 2005.10.20 [7] 中江悟司 田中茂徳 宮地元彦: 改訂版『身体活動のメツ (METs) 表』, 国立健康・栄養研究所, 2012.4

謝辞

呼吸収集及び室内 CO₂濃度測定では、本学の研究室学生各位、自発的被験者各位に多大なる協力を頂きました。記して謝意を表します。