

機械学習によるカメラ画像を用いた 着衣量・代謝量推定モデルの開発

Development of a machine learning based model to estimate
the clo value and the metabolic rate from camera images

研究代表者 金 政秀 武蔵野大学 工学部 建築デザイン学科 教授

共同研究者 宮崎 莉帆 武蔵野大学大学院 工学研究科 建築デザイン専攻
田中 葵 武蔵野大学大学院 工学研究科 建築デザイン専攻
西原 直枝 日本女子大学 家政学部 被服学科 准教授

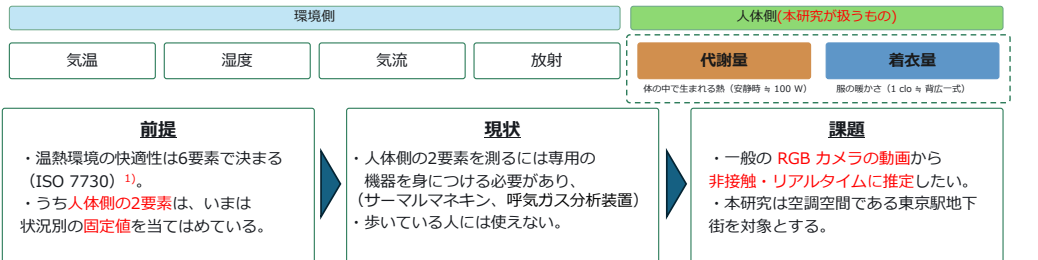
目次

1	はじめに	研究背景／本研究のゴール／推定の流れ／研究の全体像／既往研究
2	研究概要	着衣スタイルの分類と学習データ／歩行時の着衣量の補正／東京駅地下街の撮影
3	研究方法	東京駅路上調査／荷物重量／インナーウェア／被験者実験／サーマルマネキン実験
4	研究結果	荷物の重量／インナーウェア／運動量と代謝量／サーマルマネキン実験
5	推定結果	代謝量推定／着衣量推定とクロ値の補正／地下街の快適性評価
6	まとめ	本研究のゴール／まとめ／参考文献

研究背景：温熱環境の6要素

環境側 4 要素と人体側 2 要素

PMV は6つの要素で決まる。環境側の4要素はセンサーで測れるが、人体側の2要素は非接触計測機器では測定が困難。



本研究の目的

一般の RGB カメラの動画から、歩行速度に応じた着衣量・代謝量を**非接触で推定**し、**地下街の快適性を評価**する。

研究背景：東京駅地下街（八重洲）の空調の現状

いまの設計：全員を同じ着衣量・代謝量とみなす（イメージ）

着衣量 (clo) : 全員 **1.0 clo** (アウターなし)

代謝量 (W) : 1.2 met 約 **120 W** (立って安静)



✓ 全員を同じ値とみなす制御から、ひとりずつの**着衣量・代謝量**にもとづく制御へ。

※ 室温22℃ は地下街の暖房設定²⁾。
※ 1.0 clo・1.2 met は ASHRAE 55³⁾ のアウターなしの冬の服装・立って安静の値。

本研究のゴール（イメージ）

通行者ひとりずつの着衣量と代謝量



ひとりずつの着衣量と代謝量をカメラで推定し、暖房の設定温度を決める。

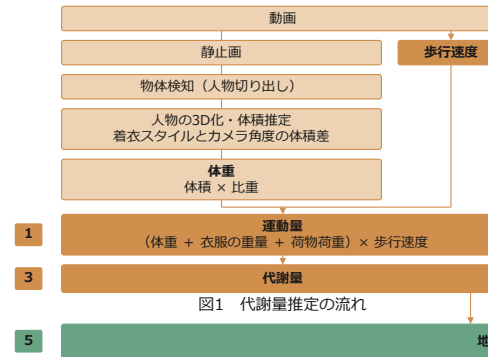
※ PMV は 5 人の平均の着衣量・代謝量で計算 (室温 = 放射温度 = 設定温度。相対湿度 40% は p.4 の設計条件と同じ、気流は 1.0 m/s)。

5 / 26

推定の流れ

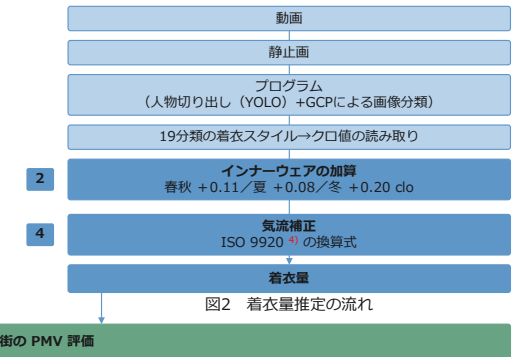
動画から代謝量まで

体重・衣服・荷物荷重・歩行速度から運動量を求める。



動画から着衣量まで

着衣スタイルを判定してクロ値を読み取る。

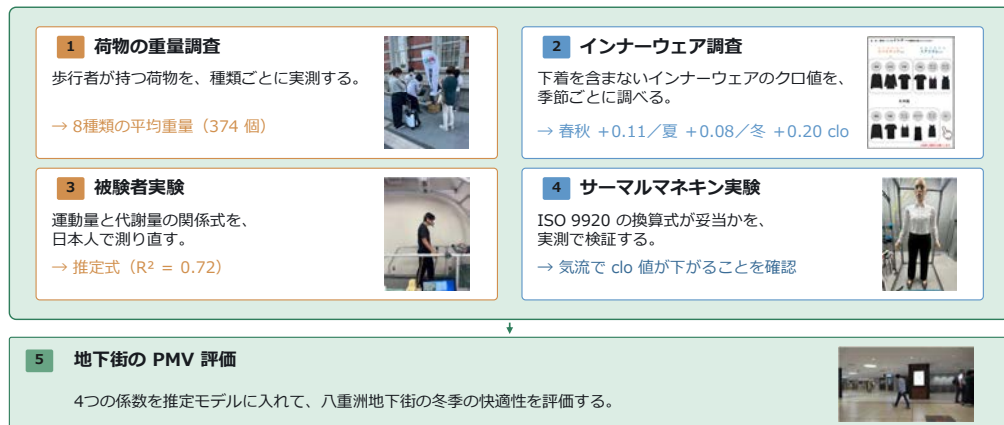


代謝量は体重・衣服・荷物・歩行速度から、着衣量はクロ値に2つの補正をかけて求める。

6 / 26

研究の全体像

4つの調査の役割



7 / 26

既往研究

既往研究の一例

画像から PMV を組み立てた例、代謝量の規格、日本人の実測、機械学習による推定の4件を見る。

金子ら (2022) ⁵⁾
目的: 画像解析で PMV を求め、空調を制御する
方法: AI で人流・客層 (性別・年代・着衣量・代謝量) を計測しフィードフォワード制御
結果: 快適な温熱環境と省エネルギーを両立した
本研究での扱い: 画像から PMV を組み立てる筋道は成立。
代謝量は歩行・停止の2状態、着衣量は半袖・長袖・厚着の3区分

久山ら (2020) ⁷⁾
目的: 日本人の代謝量が規格値と合うかを確かめる
方法: 若年日本人 男女 45 名の代謝量を実測し規格値と比較する
結果: 全被験者で推定値が基準値より低い。
歩行時の性差は見られない
本研究での扱い: 日本人向けに測り直す。
本研究の被験者実験がこれにあたる

ISO 8996 (2021) ⁶⁾
目的: 作業時の代謝量の推定方法を規定する
方法: 歩行速度と体重・荷重から代謝量を計算する
結果: 水平で均等な道・2.5~5.0 km/h・荷重 20 kg 以下で 235~360 W
本研究での扱い: この推定式の考え方をうい、被験者実験で日本人向けに検証する

富田ら (2025) ⁸⁾ / Liu ら (2022) ⁹⁾
目的: 熱画像から入室者の温冷感・活動量を推定する
方法: 富田ら 熱画像 4,848 枚を CNN で3群に分類。
Liu ら 映像から肌と衣服の領域を特定
結果: 温冷感 90.6%、着衣領域 96.2%、活動 3 段階 95.6%
本研究での扱い: いずれも段階の判定にとどまる。
連続値で推定した例ではない

接触計測や RGB カメラを用いた研究はあるが、着衣量と代謝量を連続値で非接触推定した例はほとんどない。

8 / 26

着衣スタイルの分類と学習データ

着衣スタイル 19 分類

表1 各着衣スタイルと学習データの変更 ²⁾

画像	分類名	2023年	2024年	画像	分類名	2023年	2024年
	1.半袖Tシャツ+長ズボン	650枚	1,000枚		9.スーツスタイル(ジャケット)	650枚	650枚
	2.スーツスタイル(半袖シャツ)	650枚	1,000枚		10.スーツスタイル(長袖シャツ)	650枚	1,000枚
	3.半袖シャツ+短パン	650枚	571枚		11.カーディガン+長ズボン	550枚	648枚
	4.半袖Yシャツ+長ズボン	525枚	525枚		12.長袖Yシャツ+長ズボン	550枚	550枚
	5.ワンピース(半袖)	550枚	550枚		13.長袖+長ズボン	550枚	550枚
	スーツスタイル(腕まくり)	650枚			14.ジャケット(薄手)+長ズボン	500枚	500枚
	6.コート	550枚	550枚		15.ジャケット(フォーマル)+長ズボン	550枚	550枚
	7.アウター	550枚	850枚		16.ジャケット(ウィンドブルーフ)+長ズボン	550枚	550枚
	8.ダウン	550枚	550枚		17.パーカー+長ズボン	550枚	550枚
					18.黒		550枚

学習データは 2023年 のべ 10,425 枚、2024年 のべ 11,694 枚。
2024年は判別を誤りやすい分類の枚数を増やした。

- ✓ 季節を通した着衣の変化に対応できるよう、着衣スタイルを **19** 分類（18分類+その他）とした。

9 / 26

歩行時の着衣量の補正（ISO 9920）

歩行時にクロ値が下がる理由と換算式

歩くとき服のまわりの空気が動き、クロ値が下がる。ISO 9920 ⁴⁾ の換算式で補正する。

停止時



空気の層：厚い
服のまわりの空気が
ほとんど動かない
→ 断熱の層になる

歩行時



空気の層：薄い
前から風が当たり、
服の中の空気も
入れ替わる
→ 断熱が下がる

・標準または軽装 ($0.6 \text{ clo} < I_{cl} < 1.4 \text{ clo}$) 半袖・長袖・ジャケット・スーツなど
 $I_{Tr} = \exp [-0.281 (v_{ar} - 0.15) + 0.044 (v_{ar} - 0.15)^2 - 0.492 v_w + 0.176 v_w^2] \times I_T$ ……式(1)

・防寒具着用 ($2.0 \text{ clo} < I_T$) ダウン・コート・アウターなど、空気を通しにくい防寒着
 $I_{Tr} = \exp \{ [-0.0512 (v_{ar} - 0.4) + 0.794 \times 10^{-3} (v_{ar} - 0.4)^2 - 0.0639 v_w] \times p^{0.144} \} \times I_T$ ……式(2)

v_w : 空気速度 [m/s] v_w : 歩行速度 [m/s] p : 通気性 ($p=1$)
 I_T : 全断熱性 [clo] I_{cl} : 固有着衣断熱性 [clo]

- 4 サーマルマネキン実験 気流速度と clo 値の関係を実測した。

- ✓ 歩くとき服の断熱が下がるため、歩行時のクロ値は ISO 9920 の換算式で補正する。

10 / 26

東京駅地下街（八重洲）の撮影

撮影の概要

東京駅八重洲地下街で、10か月・計42日、定点で動画を撮影した。

表2 八重洲地下街動画詳細

撮影場所	東京駅八重洲地下街
撮影日	2022年4月～2023年1月
撮影日数	計42日（月4日、平日休日2日ずつ）
時間帯	9：00～、12：30～、16：00～
撮影時間	15分
歩行者数	約430人（動画1本あたり）×42日×3時間帯≒54,000人



図5 撮影風景（赤丸：定点カメラ）



八重洲地下街の動画

- ✓ 10か月・計42日の定点動画から、男女各**90名**を分析対象とした。

11 / 26

研究方法：東京駅路上調査

調査の概要

東京駅周辺の公共道路で、荷物の重量調査とインナーウェア調査を計4回実施した。

表3 路上調査の詳細

日程	6/5（荷物の重量調査のみ）、 8/20、10/20、12/8
時間	9：00～、12：00～、16：30～
場所	東京駅周辺公共道路
対象者	20代、30・40代、50・60代 （各時間30人程度）
粗品	QUOカード300円、ボールペン、カイロ
方法	・体重計で荷物の重さを量る。 ・鞆を複数持っている場合は、1つずつ量る。 ・インナーウェアは指差してアンケートに答えてもらう。



図6 調査の様子



指差しボード

- ✓ 計4回の調査で、重量調査 延べ **366名**・インナーウェア調査 延べ **328名**から回答を得た。

※ 調査前に、弁護士と最寄りの警察署に相談済み。

12 / 26

研究方法：荷物の重量調査

荷物の種類（8種類）

地下街の動画分析¹⁰⁾の4種類（リュック・斜め掛け・片掛け・トート）に、4種類を加えて計8種類とした。

追加



図15 荷物の種類（8種類）

荷物の数

4回の調査で、男性 156 個・女性 218 個、計 374 個を量った。鞆を複数持つ人は、1つずつ量った。

表4 荷物の総数

	春 (6/5)	夏 (8/20)	秋 (10/20)	冬 (12/8)	合計
男性	25	49	44	38	156
女性	29	52	74	63	218

✓ 4回の調査で 374 個（男性 156・女性 218）を測定し、種類ごとの平均重量を求めた。

13 / 26

研究方法：インナーウェア調査の人数

集計できた人数

1回あたり男女それぞれ50名前後、3つの年代がほぼ均等になった。



表5 インナーウェア調査人数

	夏 (8/20)				秋 (10/20)				冬 (12/8)			
	20代	30・40代	50・60代	合計	20代	30・40代	50・60代	合計	20代	30・40代	50・60代	合計
男性	18	16	16	50	19	22	12	53	21	17	20	58
女性	18	14	17	49	17	20	22	59	24	18	17	59

回答者の内訳

男女の差は 6 名、年代の差も最大 13 名にとどまった。

328 名

男性 161 名／女性 167 名

✓ 3季で計 328 名（男性 161／女性 167）から回答を得た。

14 / 26

研究方法：被験者実験

実験の概要

運動負荷装置と呼吸代謝測定装置を用い、20～60代の男女23名の代謝量を実測した。

表7 代謝量実測の詳細

日程	11/20、26日、27日、28日
被験者	20代男性3名 30・40代男女5名ずつ 50・60代男女5名ずつ
測定内容	着座 (10分間) 歩行 3km/h (15分間) 4km/h (15分間) 5km/h (15分間)
被験者への注意事項	前日に夜更かしをしない。 測定開始の2時間前から食事、激しい運動を行わない。
服装	ジャージ



図8 呼吸代謝測定装置



図9 被験者実験の様子

表6 被験者のデータ（平均 ± 標準偏差）

	男性13名	女性10名
年齢	41 ± 15	49 ± 8
身長	170 ± 7	160 ± 4
体重	65.7 ± 7.8	57.3 ± 6.1
BMI	22.7 ± 2.0	22.4 ± 2.3

測定の流れ

着座で安静を保ち、歩行速度を3条件に設定して代謝量を測定した。



✓ 23名の代謝量を、歩行速度3条件で運動量と対応づけて測定した。

15 / 26

研究方法：サーマルマネキン実験

実験の目的と条件

地下通路など不特定多数が通過する空間の空調を最適化するには、歩行者の着衣量を想定する必要がある。着衣量は歩行による相対気流を受けるため、気流が clo 値に与える影響を実測した。

第一実験（作用温度 × 風速）

人工気候室内に作用温度 4 条件（18・22・25・28℃）、相対湿度 50% に設定し、風速 3 条件（0.16・0.67・1.19 m/s）で、女性用パンツスーツ（標準服）の clo 値の変化を調べた。
1.19 m/s は歩行時を想定した。

第二実験（12 種類の着用条件）

スーツスタイルにおける 12 種類の着用条件を設定し、作用温度 25℃、相対湿度 50%、風速 3 条件（第一実験と同じ）における clo 値の変化を調べた。
実施場所は日本女子大学 人間環境系実験室。

実験の様子



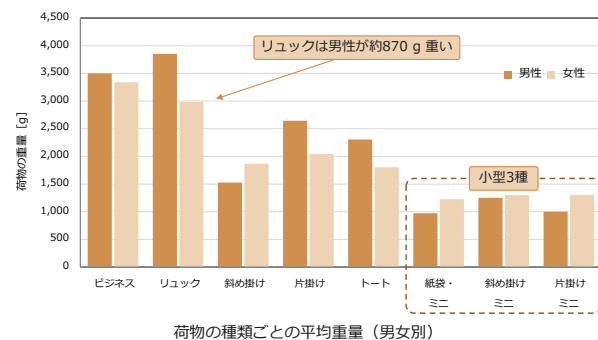
図10 サーマルマネキン実験風景

✓ 気流が clo 値に与える影響を、作用温度と着衣条件を変えて実測した。

16 / 26

研究結果：荷物の種類別の平均重量

種類ごとの平均重量（男女別）



男女の差

大型（リュック）は男性が
+870 g

小型3種は女性が
+203 g

荷物の数

種類	男性	女性
リュック	75	34
斜め掛け	15	13
片掛け	14	37
トート	14	73
ビジネス	21	9
紙袋・ミニ	6	30
斜め掛けミニ	5	13
片掛けミニ	1	8
その他・分類不明	5	1
合計	156	218

リュックなど大型の鞆では男性が重く、ミニバッグなど小型の鞆では女性が重い傾向が見られた。

✔ 女性は小型の鞆でも、一定重量の必需品を常時携行していると考えられる。

17 / 26

研究結果：インナーウェアのクロ値

年代別・季節ごと

年代を3つに区切り、それぞれ夏・秋・冬の順に並べた。

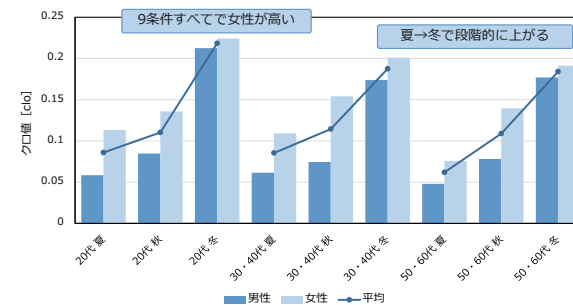


図16 インナーウェアの年代別・季節ごとの平均クロ値

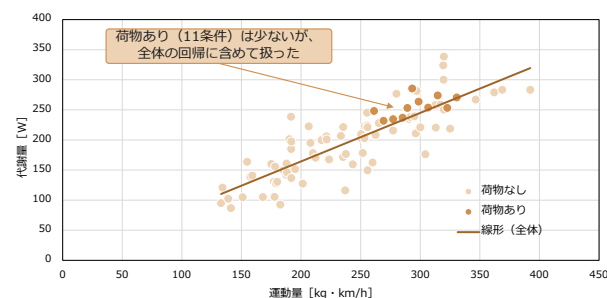
どの年代でも夏→秋→冬と段階的に上がり、上がり幅は20代がいちばん大きい。

✔ 9条件すべてで女性が高く、夏→冬で平均 **+0.12 clo** 上昇した。

18 / 26

研究結果：運動量と代謝量の関係

運動量と代謝量の相関



代謝量の推定式

代謝量 [W]
 $= 0.8067 \times (\text{体重} + \text{荷物荷重 [kg]})$
 $\times \text{歩行速度 [km/h]} + 3.0054$

相関の強さ

決定係数 R^2
0.7197
相関係数 $R = 0.848$
LOSO でも $R^2 = 0.7196$ 。

運動量の増加とともに、代謝量も直線的に増加した。

✔ 荷物荷重を含めた運動量から、歩行時の代謝量を推定する。

19 / 26

研究結果：サーマルマネキン実験

作用温度と風速による全身 clo 値

標準服で、作用温度 4 条件・風速 3 条件を測った。

表12 作用温度と風速条件による全身clo値の変化 (clo)

作用温度	気流条件 0.16m/s	気流条件 0.67m/s	気流条件 1.19m/s
28℃	0.52	0.33	0.24
25℃	0.53	0.35	0.26
22℃	0.57	0.39	0.30
18℃	0.58	0.39	0.30

標準服の気流速度と clo 値

作用温度 25℃ での標準服（条件A：女性用パンツスーツ）。

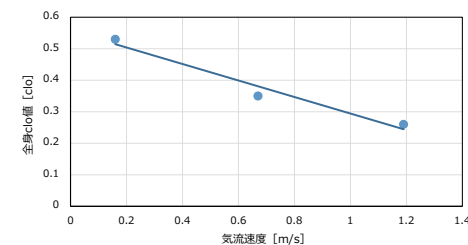


図20 標準服（条件A）の気流速度と全身 clo 値の関係

気流による clo 値の変化

作用温度による差は小さく、気流の影響が大きい。

✔ 作用温度によらず、気流速度が上がると全身 clo 値は下がる。

気流速度と clo 値の関係

$\text{clo 値} = -0.26 \times \text{気流速度} + 0.56 \quad (R^2 = 0.96)$

20 / 26

推定結果：代謝量推定に用いた条件

荷物の種類の内訳

男女各 90 名が持っていた荷物 147 個の内訳。

表14 荷物の種類の内訳

	ビジネス	リュック	斜め掛け	斜め掛けミニ
男性	3	29	13	1
女性	6	11	10	9
	片掛け	片掛けミニ	手持ち (トート)	手持ち (紙袋、ミニ)
男性	8	0	11	0
女性	15	3	18	10

分析対象

動画**18**本（6区分×朝・昼・夕）
1本あたり男女**5**名ずつ → 区分ごとに男女**15**名
計 男女各**90**名・持っていた荷物 **147** 個

※ 体重は人体部分の体積 × 比重で求める。衣服の重量は表13、荷物は種類別の平均重量を使う（内訳は表14）。

✔ 男女各 **90 名** の推定体重に衣服と荷物を加え、 $y = 0.8067x + 3.0054$ で**代謝量**を求めた。

21 / 26

着衣スタイルごとの衣服の重量

考慮していなかった衣服の重量を推定体重に加える。

表13 着衣スタイルごとの衣服の重量

	衣服の重量 [g]
1 半袖Tシャツ+長ズボン	760
2 スーツスタイル(半袖シャツ)	720
3 半袖シャツ+短パン	670
4 半袖Yシャツ+長ズボン	720
5 ワンピース(半袖)	500
6 コート	1,940
7 アウター	1,670
8 ダウン	1,590
9 スーツスタイル(ジャケット)	1,610
10 スーツスタイル(長袖シャツ)	950
11 カーディガン+長ズボン	1,360
12 長袖Yシャツ+長ズボン	950
13 長袖+長ズボン	910
14 ジャケット(薄手)+長ズボン	1,570
15 ジャケット(フォーマル)+長ズボン	1,080
16 ジャケット(ウィンドブレーフ)+長ズボン	1,250
17 パーカー+長ズボン	1,110
18 黒	—
19 その他	—

推定結果：代謝量推定

区分ごとの平均推定代謝量

全体と、季節・平日休日の6区分を並べた。

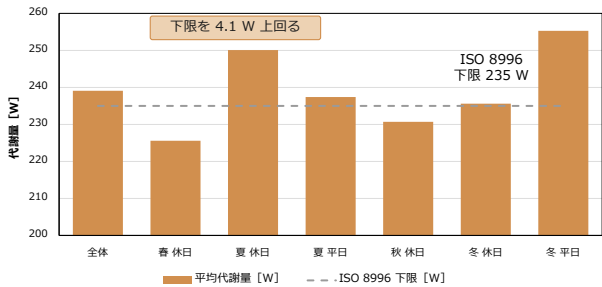


図 平均推定代謝量比較

※ 縦軸は 200～260 W を拡大。上限 360 W は図の外。日本人の代謝量は ISO 8996 の基準値より低い傾向がある⁷⁾。

✔ 平均 **239.1 W**。ISO 8996 の下限 **235 W** を **4.1 W** 上回る。

22 / 26

推定結果：着衣量推定とクロ値の補正

各着衣スタイルのクロ値（抜粋）

基準値にインナーウェアの加算値を足し、歩行時は ISO 9920 ⁴⁾ の換算式で補正する。

表16 各着衣スタイルのクロ値（抜粋）

	基準値	春、秋	春、秋歩行時	夏	夏歩行時	冬	冬歩行時
半袖Tシャツ+長ズボン	0.34	0.45	0.32	0.42	0.30		
スーツスタイル(長袖シャツ)	0.49	0.60	0.43	0.57	0.41	0.69	0.49
カーディガン	0.88	0.99	0.71	0.96	0.69	1.08	0.77
ジャケット(フォーマル)+長ズボン	0.99	1.10	0.79	1.07	0.76	1.19	0.85
コート	1.79	1.90	1.81			1.99	1.89
		夏（6～8月）		秋（9～11月）		冬（12月）	
歩行者の平均クロ値 [clo]		0.56		0.84		1.63	

クロ値の補正量

従来の一律の加算値を季節別に置き換え、さらに歩行時の気流で補正する。

インナーウェアの加算値

従来：季節によらず一律 +0.09 clo
→ 春秋 +0.11/夏 +0.08/冬 +0.20 clo

歩行時の気流補正（ISO 9920 ⁴⁾）

停止時より 0.09～0.34 clo 下がる。
防寒着は下がり方が小さい（0.09～0.10 clo）。

✔ インナーウェアの加算と歩行時の気流補正で、着衣スタイルごとのクロ値を実態に近づけた。

※ インナーウェア調査は夏・秋・冬の3季。春季は未測定のため、中間期（秋）の値を適用した。
※ 季節ごとの平均クロ値：25日分（延べ 7,343 人）を人数で重み付け。4・5月の動画は使っていない。

23 / 26

推定結果：地下街の快適性評価

防寒着の有無と 12/13 の実態による快適範囲

PMV が -0.5～+0.5 に入る室温の範囲を、3つの場合で比べた。

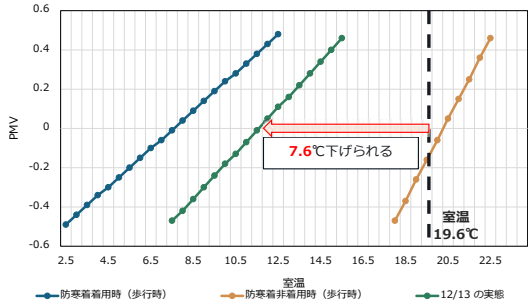


図22 防寒着あり・12/13 の実態・防寒着なしの快適範囲

※ 12/13 の実態：163 名（うち防寒着 104 名）の平均クロ値から算出。

✔ 12/13 の実態では、室温を **19.6℃** から **12.0℃** まで **7.6℃** 下げられる（全員が防寒着なら **11.6℃**）。

24 / 26

ISO 8996 の基準値

歩行速度 2.5～5 km/h のときの範囲。

基準の範囲

235～360 W

推定した平均代謝量

男女各90名の推定結果。

239.1 W

平均歩行速度 4.4 km/h
平均体重 64.2 kg

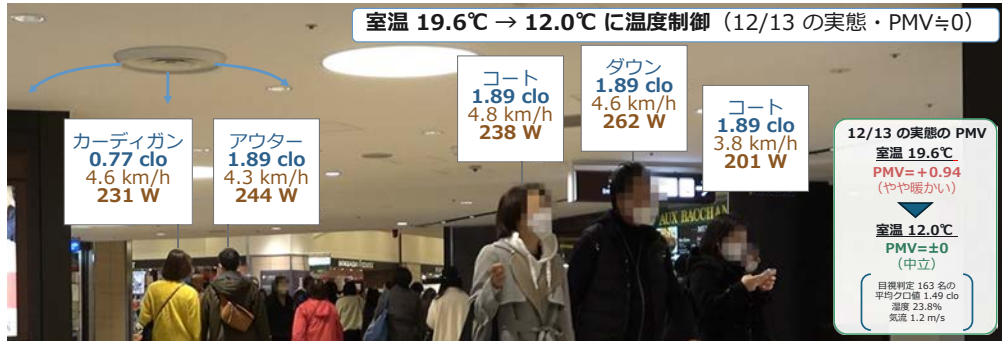
区分別では 225.6～255.3 W。
下限をまたいでいる。

本研究のゴール（暖房時の結果）

12/13 の地下街の実態で求めた室温（結果）

着衣スタイル：表1 の19分類から判定
着衣量（clo）：服の暖かさ（1 clo ≒ 背広一式）

歩行速度（km/h）：動画から求める
代謝量（W）：体の中で生まれる熱（安静時 ≒ 100 W）



✓ 12/13 の実態なら室温を 19.6℃ → 12.0℃ に 7.6℃ 下げられる（PMV +0.5 までなら 4.1℃）。

※ 写真は p.5 と同じ例示。PMV は 12/13 の実態（目視 163 名の平均 1.49 clo・歩行時）で計算。

25 / 26

まとめ

- ✓ 荷物 374 個、インナーウェア 延べ 328 名、被験者 23 名を実測し、推定に使う係数を整備した。
- ✓ 歩行時のクロ値は換算式で 0.09～0.34 clo 下がり、サーマルマネキン実験でも気流で clo 値が下がった。
- ✓ 男女各 90 名の平均推定代謝量は 239.1 W。ISO 8996 の 235～360 W の範囲に入った。
- ✓ 12/13 の実態から室温を 19.6℃ → 12.0℃ に 7.6℃下げられる可能性あり（全員が防寒着なら 11.6℃）（PMV≒0 まで）。

参考文献

- 1) ISO 7730, Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2025
- 2) 田中葵ら：機械学習による画像分析を用いた着衣量推定に関する研究－推定プログラムによる地下街評価－、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.189-192、2025.9
- 3) ANSI/ASHRAE Standard 55-2023, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE, 2023
- 4) ISO 9920, Ergonomics of the thermal environment — Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble, 2007
- 5) 金子研ら：ららぼーと名古屋みなとアルクスにおける AI による解析を利用した快適性を損なわない省エネルギー空調の設計と実施、空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会論文集、第23号、pp.137-140、2022.03
- 6) ISO 8996, Ergonomics of the thermal environment — Determination of metabolic rate, International Organization for Standardization, Geneva, 2021
- 7) 久山遼ら：人体温冷感・快適感予測モデルに関する研究（その20）－個人属性を考慮した代謝量推定式の精度検証、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第6巻、p.349、2020.9
- 8) 富田奈歩、項奕銘、田島和、岩泉秀、平松功至、浅野碩光、森谷泰樹、山野井曜、菅野福馬、中川純、田辺新一：熱画像と機械学習を用いた在室者の温冷感推定法に関する研究、日本建築学会環境系論文集、第90巻 第833号、pp.291-299、2025.07
- 9) Jinsong Liu, Isak Worre Foged, Thomas B. Moeslund : Clothing Insulation Rate and Metabolic Rate Estimation for Individual Thermal Comfort Assessment in Real Life, Sensors 22, 619, pp.1-20, 2022.01
- 10) Aoi Tanaka, Riho Miyazaki, Jeongsoo Kim : A Study on Metabolic Rate Estimation in Underground Shopping Malls Using Machine Learning-Based Image Analysis, Indoor Air 2026, ID 10324, pp.830-832, 2026

26 / 26