

研 究 報 告

令和 8 年 4 月 2 3 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 東京都市大学建築学科

氏 名 : 中川 純

研究課題名 : 熱的シーケンスを伴った建築デザインに関する基礎的研究

助成金額 : 1 0 0 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 8 年 3 月 3 1 日

熱的シーケンスを伴った建築デザインに関する基礎的研究

A Fundamental Study on Architectural Design with Thermal Sequences

東京都市大学 建築学科 准教授 中川 純

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. はじめに

都市における半屋外空間の歩行は、視環境や温熱環境が移動に伴って連続的に変化する。歩行者はこれらを刺激として受け取り、環境を知覚するとともに、現時点での環境が望ましいか、すなわち快適か不快か評価する¹⁾。また、こうした評価は刺激の強さだけでなく、直前の環境履歴や身体内部状態の変化によって左右されることがある。同一の外的刺激であっても快・不快感の感じ方が変化する現象は、1971年に Michel Cabanac²⁾が提唱した心理生理学用語「アリエステージア (Alliesthesia)」として整理されている。その後、移動を伴う空間体験における熱的な知覚を説明する概念として、Thomas Parkinson と Richard de Dear³⁾は「空間的アリエステージア」を提唱した。これは、直射日光や気流など深部体温の変化が生じない程度の刺激であっても、局所的な皮膚温のわずかな変動を通じて、快・不快感が更新され得ることを示す。例えば、夏季に冷房の効いた空間から屋外に出た直後に、一時的な心地よさを感じるなどの経験は、直前の環境履歴が現在の快適性に影響を及ぼす可能性が説明できる。このように、都市空間における歩行中の快適性は、移動に伴う環境変化とその履歴に応じて絶えず変化する。近年、猛暑日の増加やヒートアイランド現象といった課題を抱える都市の半屋外空間の快適性を検討するうえで、このような動的な熱的快適性を捉えることは重要である。以上を踏まえ、本研究では大学キャンパス内の半屋外空間を対象に、物理環境が歩行者の熱的快適性に及ぼす影響を把握することを目的とする。

2. 1 実測概要

東京都市大学世田谷キャンパス内の半屋外空間を対象にした歩行実測調査を、2025年9月17日から26日の4日間、11月4日から17日の4日間における11時から14時半の間に行った。9月の実測は夏季条件を想定し、11月は中間期条件を想定した。また、雨天を避け、晴れまたは曇りの天候を実測対象日とした。

2. 2 実測手順

はじめに室内環境である前室にて被験者への実測の目的・注意事項を含むレギュレーションを説明し、並行して年齢・性別・着衣量・体調等に関するアンケート回答を依頼した。続いて、約10分間の歩行実測を行った。歩行経路は図1に示すように、同一区間の重複通過を避け、移動中に多様な半屋外環境シーケンスを体験できるルートを指定した。なお、被験者は夏季で18名、中間期で21名の20代男女であった。申告内容への相互影響を避けるため、歩行中は被験者同士の会話を不可とした。また、被験者の服装について、気流を遮断する厚手の上着やコート、マスク、手袋等の着用、そして日射を遮蔽する日傘、帽子等を着用不可とした。着衣量は夏季で0.3~0.5clo、中間期で0.5~0.7cloであった。

2. 3 測定項目・使用機器

表1に環境・心理量測定項目を示す。歩行に伴い被験者近傍の温熱環境の測定に加え、魚眼

カメラを用いて被験者視点での経路上の視環境を記録した。乾球温度、相対湿度、グローブ温度、照度、風速は1秒間隔で測定し、視環境は10秒間隔で記録した。また、歩行中の被験者の温熱環境に対する快・不快感を記録するため、図2に示すリアルタイム申告アプリを用いて1秒間隔で記録した。申告は7段階評価（-3：非常に不快、-2：不快、-1：少し不快、0：どちらでもない、1：少し快適、2：快適、3：非常に快適）から成り、熱的な快適感が変化した場合にスライダーの位置を調節するよう指示した。

測定項目		測定間隔[s]	使用機器
時刻		1	M-Logger
物理量	乾球温度 [°C]	1	
	相対湿度 [%]	1	
	グローブ温度 [°C]	1	
	照度 [lux]	1	
	風速 [m/s]	1	
			風量計 AM-4224SD
心理量	熱的快・不快感（7段階）	1	リアルタイム申告アプリ
視環境		10	魚眼レンズカメラ

表1 環境・心理量測定項目



図1 歩行経路



図2 申告アプリ

（実験調査によって得られた新しい知見）

3.1 測定結果

表2に歩行実測別の半屋外環境の温熱環境を示す。乾球温度の平均値は、夏季で27.6～34.6℃、中間期で14.8～20.9℃であった。グローブ温度の平均値は、夏季で30.9～37.4℃、中間期で15.3～26.5℃であった。また、被験者の着衣量から算出したSET*の平均値は、夏季で30.3～38.5℃、中間期で20.1～25.7℃であった。

表2 歩行実測別の半屋外温熱環境条件

(1) 夏季条件

観測日		2025/9/17		2025/9/18		2025/9/26		2025/9/26	
天候		晴		晴		晴		晴	
乾球温度[°C]		Max	30.2	31.5	31.0	32.4	30.5	29.2	34.5
		Min	30.4	31.4	31.9	30.5	26.7	26.3	29.8
		Avg	33.2	34.4	34.8	32.2	28.5	27.8	32.0
相対湿度[%]		Max	84.9	82.6	77.5	82.5	79.7	78.7	77.6
		Min	65.1	66.8	57.5	67.9	60.6	56.4	54.3
		Avg	72.9	68.9	67.9	72.7	69.1	69.2	67.9
グローブ温度[°C]		Max	36.8	40.7	40.6	35.0	42.3	41.9	37.0
		Min	33.1	34.1	33.8	32.1	32.0	31.3	30.7
		Avg	35.8	37.4	37.4	33.9	36.1	35.9	33.6
照度[m/s]		Max	7.60	2.00	1.16	2.59	3.98	4.37	3.68
		Min	0.17	0.21	0.20	0.21	0.30	0.28	0.25
		Avg	0.64	0.77	0.52	0.95	1.36	1.04	0.97
風速[m/s]		Max	40.7	47.5	46.6	37.3	36.7	34.0	37.3
		Min	23.8	32.1	25.7	22.3	22.4	28.9	28.3
		Avg	36.7	37.3	38.5	34.6	31.1	30.3	33.2

(2) 中間期条件

観測日		2025/11/4		2025/11/7		2025/11/11		2025/11/17	
天候		晴		晴		晴		晴	
乾球温度[°C]		Max	19.8	18.0	24.5	22.1	15.4	18.0	22.3
		Min	15.1	15.8	19.4	19.9	14.4	15.3	18.9
		Avg	17.1	16.5	20.8	20.8	14.8	15.6	20.9
相対湿度[%]		Max	76.0	75.1	75.5	68.8	98.2	98.8	67.5
		Min	38.5	39.5	38.6	34.6	47.6	43.5	45.9
		Avg	53.0	49.1	51.6	42.8	59.4	49.8	55.2
グローブ温度[°C]		Max	22.8	18.8	25.4	22.2	18.1	16.9	21.1
		Min	16.8	16.4	20.2	20.0	14.8	15.6	22.3
		Avg	19.9	17.6	21.9	21.4	15.9	16.2	20.5
照度[m/s]		Max	3.26	3.30	3.53	3.09	3.48	2.87	5.30
		Min	0.28	0.18	0.19	0.30	0.20	0.18	0.21
		Avg	1.32	0.63	1.13	1.11	1.21	1.22	1.11
風速[m/s]		Max	28.6	24.4	30.9	28.4	22.1	22.6	39.1
		Min	17.0	19.9	22.1	22.5	18.9	15.2	18.4
		Avg	22.7	22.7	28.7	28.2	20.1	20.3	28.1

3.2 快適感申告と日射環境の相関関係

日射環境の解析にあたり、M-Loggerに内蔵された照度計の計測上限が16,800lxであり、強い日射環境下ではこの上限値に達する記録が生じた。照度のみでは日射環境を区別することが困難であったため、歩行実測中の観察記録と被験者視点の視環境の記録画像に基づき、4段階の日射レベル（レベル0：日陰、レベル1：やや日陰、レベル2：やや日向、レベル3：日向）を日射解析の指標として、以降の分析を行った。

3.3 日射レベル別の快適感の関係

日射レベルごとの快適感申告値の割合を図3に示す。夏季では日射レベル3で不快側（非常に不快／不快）の割合が高く、日射レベル0、1で快適側（快適／非常に快適）の割合が増加した。中間期では夏季と比べ、日射レベル3で不快側の減少と快適側の増加がみられ、日

射レベル 0 で不快側の割合の増加と快適側の減少がみられた．季節によって日射の度合いが快適感に与える影響が異なることが示された．

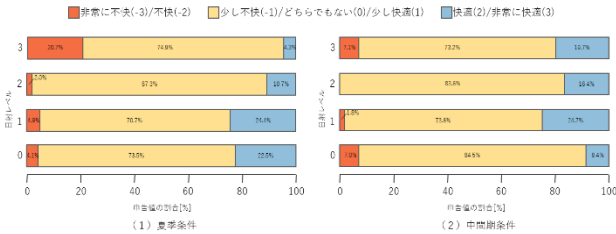


図 3 日射レベル別の快適感申告割合

3.4 日射遷移と快適感の関係

日射環境の遷移が快適感の変化に及ぼす影響を検討するため，表 3 に示すように日射環境がレベル 0 から 3 へ変化する遷移を Case A，3 から 0 へ変化する遷移を Case B とした．以降では，実測中に日射が大きく変化した 2 ケースに着目し，夏季および中間期における快適感の変化量や傾向を比較した．表 4 に，日射遷移後に快適感が変化した割合とその変化が上昇／低下のいずれであったかの内訳を示す．夏季において，Case A では遷移後に 85.4%に快適感の変化がみられ，その大半は快適感が低下した ($\Delta C < 0$: 78.0%)．一方，Case B では遷移後 92.3%に快適感の変化がみられ，その大半において快適感が上昇した ($\Delta C > 0$: 84.6%)．中間期において，Case A では遷移後に 81.8%に快適感の変化がみられ，上昇 ($\Delta C > 0$: 52.3%) が低下 ($\Delta C < 0$: 29.5%) を上回った．Case B では遷移後に 83.8%が快適感が変化し，低下 ($\Delta C < 0$: 56.8%) が上昇 ($\Delta C > 0$: 27.0%) を上回った．夏季では遷移後の快適感が上昇または低下のいずれかに大きく偏り，ケース間で傾向が顕著であったのに対し，中間期ではその偏りが小さくなる傾向がみられた．

表 3 日射遷移ケース

ケース名	遷移前	遷移後
Case A	日射レベル0(日陰)	日射レベル3(日向)
Case B	日射レベル3(日向)	日射レベル0(日陰)

表 4 日射遷移後の快適感変化率

季節	遷移ケース	変化率	$\Delta C > 0$	$\Delta C < 0$	$\Delta C = 0$	総数(件)
夏季	Case A	85.4%	7.3%	78.0%	14.6%	n=41
	Case B	92.3%	84.6%	7.7%	7.7%	n=52
中間期	Case A	81.8%	52.3%	29.5%	18.2%	n=44
	Case B	83.8%	27.0%	56.8%	16.2%	n=37

3.3 日射環境履歴と快適感変化および反応速度の関係

日射遷移時の快適感の変化と遷移前の日射環境の履歴の関係を検討するため，遷移前の日射レベル継続時間と快適感変化量の関係を単回帰分析した．図 4 に示すように，夏季・Case A では有意な負の関係がみられ ($p < 0.001, R^2 = 0.30$)，遷移前の日射継続時間が長いほど遷移後の快適感は大きく低下する傾向が示された．夏季・Case B では負の傾向がみられたが，関係は弱かった ($p = 0.087, R^2 = 0.057$)．中間期では，いずれのケースも有意差は得られなかった ($p > 0.1, R^2 < 0.1$)．夏季において遷移前の日射環境が長く継続するほど環境に対する慣れが生じ，Case A では日向環境への遷移後，熱負荷が相対的に大きく知覚されやすいことが示唆された．一方，Case B では日向に長く曝露されるほど，遷移後の日陰環境が相対的に小さく評価され，快適感が増幅が小さくなる可能性が示唆された．中間期では日射が快・不快の両方向に作用し得ることに加え，気流や着衣量など日射以外の要因も影響し得るため，遷移前の継続時間のみでは快適感変化量を十分に説明できなかった可能性がある．次に，日射遷移後に快適感が初めて変化するまでの時間を反応速度として算出し，結果を表 5 に示す．反応速度の中央値は夏季・Case A で 6 秒，Case B で 4.5 秒，中間期は 2 ケースとも 6 秒であった．季節・遷移ケースによる時間差は大きくなく，反応速度は直前の日射環境に強

く依存しない可能性が考えられる。

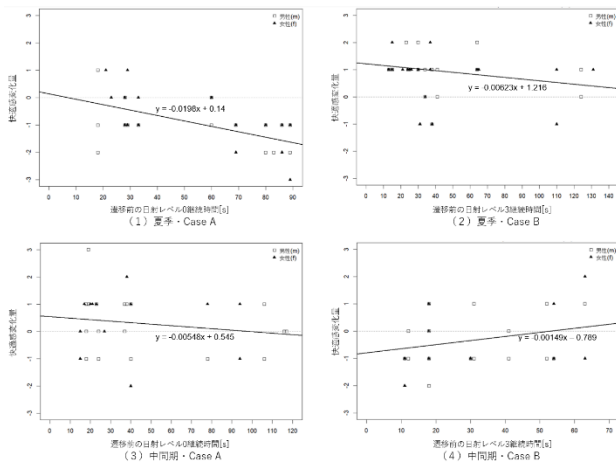


図4 遷移前継続時間と快適感変化量の関係

3.4 視環境を考慮した日射遷移時の快適感変化量の関係

環境の遷移前後の空間特性は日射環境の遷移と熱的な快・不快感に影響を及ぼす可能性がある。そこで、魚眼画像から算出した空開放率を視環境の指標として用い、各ケースにおける快適感変化量との関係を検討した。

まず、遷移前の空開放率と快適感変化量の関係を単回帰分析した。図5に示すように、夏季では両ケースで有意な正の関係がみられ（Case A : $p=0.040, R^2=0.12$, Case B : $p=0.049, R^2=0.081$ ）、遷移前の空開放率が高いほど、Case A では遷移後に快適感が大きな低下が相対的に緩和され、Case B では遷移後の快適感がより上昇する傾向が示された。一方、中間期では両ケースともに有意な関係は得られなかった（ $p>0.1, R^2<0.1$ ）。

次に、遷移前と比較した日射遷移後の空開放率の上昇率と快適感変化量との関係を単回帰分析した。図6に示すように、夏季においてCase A では有意な負の関係がみられ（ $p=0.024, R^2=0.14$ ）、遷移前に比べ遷移後の空開放率が増すほど快適感が大きく低下する傾向が示された。一方、夏季・Case B、中間期・Case A では有意差は得られなかった（ $p>0.1, R^2<0.1$ ）。中間期・Case Bでは有意な正の関係がみられ（ $p=0.040, R^2=0.14$ ）、遷移後に空開放率が増すほど快適感変化量が快適側へ大きくなる傾向が示された。

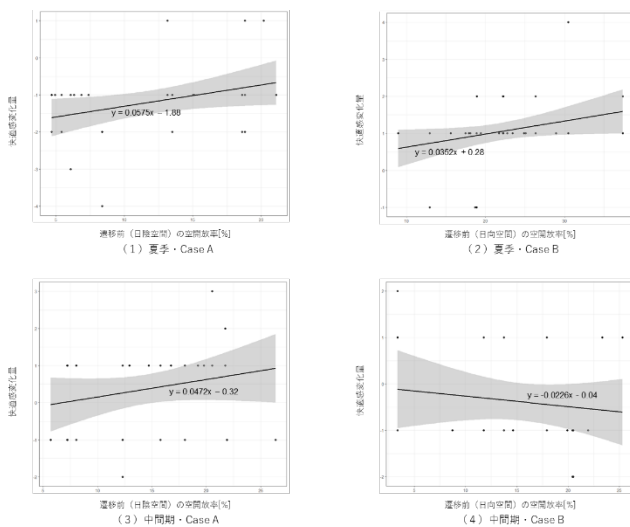


図5 遷移後の空開放率と快適感変化量の関係

表5 遷移ケース別の反応速度

季節	遷移ケース	中央値[Q1 - Q3] (s)	対象数(件)
夏季	Case A	6.0 [2.5 - 11.0]	35
	Case B	4.5 [2.0 - 13.2]	48
中間期	Case A	6.0 [1.8 - 13.2]	36
	Case B	6.0 [1.0 - 11.0]	31

図6 遷移後の空開放率の上昇と

快適感変化量の関係

以上より，夏季・Case A では熱的快適感の変化に対する要因として，物理環境以外に視環境が一定程度関与した可能性がある．遷移前の日陰空間の開放性が高いほど，日射環境が変化し得るというネガティブな期待感が事前に形成され，結果として遷移後の快適感の低下量が抑制されたと考える．一方，夏季・Case B では日向から日陰への遷移は温熱環境が改善されるため，熱的快適感への影響は物理環境要因が大きく占めると推測される．また中間期では，夏季に比べ温熱負荷が小さく，快適感に及ぼす日射の影響が一方向に限定されにくい．そのため，視覚的な期待が熱的快適感の変化に現れにくい可能性が考えられる．

参考文献

1. 宿谷昌則：人・建築・地球とエクセルギー 環境物理学入門，建築資料研究者，2024 年
2. Michel Cabanac : Sensory pleasure and alliesthesia , The Encyclopedia of Neuroscience (3rd ed., CD-ROM), Elsevier Science Publishing Co., 2004
3. Thomas Parkinson, Richard de Dear : Thermal pleasure in built environments: physiology of alliesthesia, Building Research & Information 2015, Vol.43, No.3, pp288-301, 2014.12

（ 発 表 論 文 ）

建築学会大会にて発表予定