

ヒトの熱環境適応とその地域性に関する研究

(札幌・福山・熊本での被験者実験)

A Study on Human Thermal Environment Adaptation and Its Regional Characteristics

(Subjective Experiments in Sapporo, Fukuyama and Kumamoto)

空間デザイン分野 1862007 原 大介 (Daisuke Hara)

主指導教員 齊藤 雅也

Keywords: 夏季, 熱環境適応, 地域性, 想像温度, エクセルギー*Summer, Thermal Environment Adaptation, Regional Characteristics, Cognitive Temperature, Exergy*

1. 研究背景

建築環境計画では、ヒトの寒暑感や快・不快と感じる室内熱環境の予測や評価に PMV・PPD・SET*などの世界共通の指標が用いられる¹⁾。建築設備計画では、これらの指標に基づき冷暖房時の室内温湿度条件として、夏季は気温 26~28°C、湿度 40~60%、冬は 20~22°C、40~50%が定められている²⁾。また、現在の建築の省エネルギー基準における冷暖房負荷は、以上の冷暖房時の温湿度条件とその地域の外気温湿度差によって求められ、省エネルギー性を予測・評価している。

一方、私たちヒトが実際に過ごしている熱環境は、PMV や SET* で想定されるような空気温湿度が一定の熱環境（定常環境）ではなく、時々刻々と変化する非定常環境下にいる。たとえば、夏であれば過酷な暑熱環境となる屋外空間に滞在、移動してから、冷房空間に入る場合や、通風空間に入る場合がある。このような熱環境の変化がある時の、ヒトの寒暑感や快・不快感を PMV や SET* によって予測・評価するには限界があると考えられる。

ヒトは任意に変化する熱環境に対して対応でき得る生理的・心理的・行動的適応の過程があるとされる。これは、ヒトの「感覚→行動」プロセス³⁾、「熱環境適応プロセス」⁴⁾と呼ばれている。これらのヒトの感覚から行動に至る熱環境適応プロセスは、普段の住まい方、曝されている熱環境によって形成されるとされ、最近の研究ではヒトの「想像温度（今、何度と思うか）」に影響を与えることが判っている⁴⁾。また、気候風土の異なる札幌と熊本の小学生の熱環境適応プロセスやその中で出現する想像温度には違いがあることが示されている⁴⁾。たとえば、夏に快適と感じる空気・放射温度、また通風・冷房空間での想像温度は地域によって異なる可能性がある。

以上を踏まえて、ヒトの熱環境適応や想像温度の地域差・季節差を新たに明らかにすることによって、建築環境・設備計画の新たな知見が得られると考えられる。例えば、入室前の屋外熱環境を踏まえて寒暑感などの予測・評価手法を整備すると、地域性を活かすランドスケープとも連動した微気候デザインの条件を導くことが期待される。また、建築の省エネルギー評価においては一定の温湿度条件ではなく、ヒトの熱環境適応による想像温度の地域差を考慮して室内温湿度条件を変えて評価する手法を新たに確立できる可能性がある。

2. 研究目的

本研究では、熱環境に特徴が出やすい夏季において、気候が異なる札幌・福山・熊本の大学生・大学職員を対象に2種類の被験者実験と日常生活調査を行ない、室内外空間における熱環境適応、特に想像温度や寒暑感・快適感などの心理的適応とその地域差を明らかにすることを目的とした。さらに、得られた結果に基づいて地域固有の「快適」または「不快ではない」とされる夏季の微気候デザイン手法を提案する。

3. 実験・調査概要

本研究では、上記の目的を達成するために被験者実験(2017年、2019年の2回)と日常生活調査を行なった。

2017年の被験者実験の目的は、熱環境適応の地域差を明らかにすることである。実験は、札幌市立大学芸術の森キャンパスの通風室(67.5 m²)と冷房室(81 m²)にて2017年8月2~6日の計5日間、熊本県立大学の通風室(145 m²)と冷房室(84 m²)にて、8月1日、4日、8日の計3日間の13:00~15:00に行なった。被験者は健康な大学生とし、札幌では1日(1回)の実験につき被験者を3人、5日間で計15人、熊本では、1日(1回)の実験につき4人、3日間で計12人とした。被験者は、約2時間かけて移動と

通風室・冷房室の滞在を繰り返し、各室内の入室直後と、その後は5分間隔にて計9回、表1の内容を申告した。なお、冷房時の室温設定は札幌26℃、熊本24℃とした。熱環境の実測では、調査者が被験者に追従し、手持ちの棒に取り付けた計測機器類を移動させ1秒間隔でデータを記録した。表2に熱環境の実測項目と測定方法を示す。

2019年の被験者実験の目的は、札幌・熊本に福山を加えた3地域で室内環境条件を揃えた冷房室を用いて被験者実験を行ない、熱環境適応の地域差を明らかにすることである。実験は、札幌市立大学・福山大学・熊本県立大学の冷房室を利用して行なった。被験者は各大学で無作為に選んだ学生4名とし、札幌で2019年8月5～9日の5日間、福山では7月29日～8月2日の5日間、熊本では8月5日と7～10日の5日間で行なった。実験は被験者一人につき1日1回、4名として5日間で計20回行なった。実験室は、全ての地域で前半2日間は冷房設定温度を29℃とし(室内温度が30℃を超えるような場合)、後半3日間は26℃設定とした。被験者には冷房室に入室してから3分間待機してもらい、その後、想像温度・寒暑感・快適感などを回答してもらった。なお、熱環境の実測項目と測定方法を表3に示す。

日常生活調査の目的は、2017年の実験で把握できなかった各地域の学生が普段曝されている熱環境を調査し、気候の違いが想像温度の地域差をもたらしているか否かを解明することである。調査は、札幌市立大学・福山大学・熊本県立大学の学生・大学職員を被験者とし、札幌と熊本では2019年8月3～9日の7日間、福山では7月26日～8月4日の10日間で行なった。被験者は、札幌では学生11人、福山では学生8人、熊本では学生8人・大学職員6人の計14人を対象とした。実験期間中、被験者の日常曝されている熱環境を把握するため、空気温湿度計を携帯させ、2分間隔で計測した。また、被験者には任意の場所・時間にて想像温度・寒暑感・快適感などを記録帳に1日3回(最高5回)を目安に申告し、毎回の申告後に実際の空気温度の示度を確認してもらった。

4. 札幌・熊本の被験者実験の結果(2017年)

図1は、実験中における札幌と熊本の空気温度・相対湿度を示したものである。札幌の外気温は概ね23～24.5℃、熊本は33.5～34.5℃であった。

図2は、札幌・熊本の各室における全被験者の許容の可否を含めた熱的快・不快の申告割合である。「不快ではない」は、表1のアンケートに示した「快適というほどでもない」に対応する。

札幌の通風室では、「不快」の申告はない。一方、冷房室では、13%の「不快」申告が現われ、そのうちの5%は「許容できない」と申告している。熊本の通風室では、

表1 熱環境に関する申告用紙

(1) 今、何度だと思いますか? _____℃

(2) 今の寒暑感を直線上に、たて線で記してください。

とても寒い | どちらでもない | とても暑い

(3) 今の乾湿感を直線上に、たて線で記してください。

とても乾燥している | どちらでもない | とても湿っている

(4) 今の温熱環境は不快ですか?

不快 不快ではない

(5) 「不快ではない」を選択した方は快適ですか?

快適である 快適というほどではない

(6) 今の温熱環境を許容できますか?

許容できる 許容できない

表2 熱環境の実測項目と測定方法

物理量	測定方法
外気温度(℃)	日差しを避けた風通しの良い空間で地面から1500mm程度の高さにて1秒間隔で測定。
外気湿度(%)	
空気温度(℃)	移動時:計測機器を手持ちの棒に取り付け被験者に追従し、1秒間隔で測定。
相対湿度(%)	
気流速度(m/s)	室内滞在時:被検者近傍にて床面から1100mmの高さにて1秒間隔で測定。
小型灰色球温度(℃)	

表3 熱環境の実測項目と測定方法

物理量	測定方法
外気温度(℃)	日差しを避けた風通しの良い空間で地面から1500mm程度の高さにて30分間隔で測定。
外気湿度(%)	
空気温度(℃)	被験者の近傍にて、床から椅坐位の被験者の胸ほどの高さ(800～1000mm)にて1秒間隔で測定。
相対湿度(%)	
気流速度(m/s)	
小型・大型黒球温度(℃)	

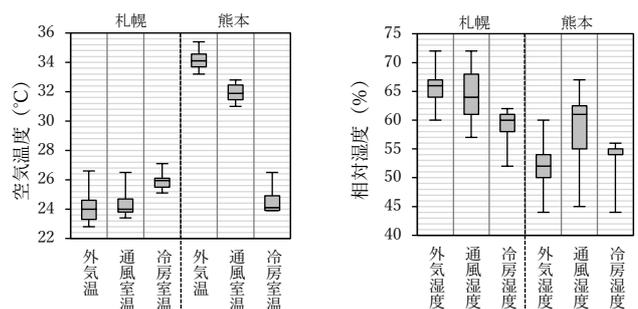


図1 札幌・熊本の空気温度・相対湿度(2017年)

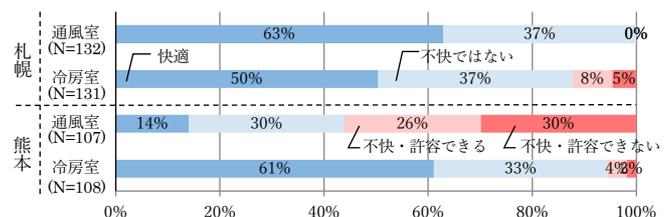


図2 札幌・熊本の熱的快・不快申告(2017年)

56%が「不快」申告で、そのうちの30%は「許容できない」と申告している。熊本の冷房室では、90%以上が「快適」、「不快ではない」と申告している。

図3は、想像温度の平均値・標準偏差値を熱的快・不快の申告別に示したものである。赤い帯は実際の空気温度幅を示している。札幌の通風室では、空気温度と想像温度の分布に大きな差はなく、実際の空気温度（以下、実際温度）に近い温度を想像している。一方、札幌の冷房室の被験者は、ほとんどが実際温度より2℃以上低い温度を想像している。熊本では、通風室で「不快」の申告の被験者が、実際温度と同程度の温度を想像している。一方、「不快ではない」申告の想像温度は、実際温度よりも1℃ほど低く、「快適」申告の想像温度は実際温度を大幅に下回っている。冷房室では、実際温度に概ね近い温度を想像している。

図4と5は、札幌と熊本の通風室・冷房室における熱的快・不快の申告割合、MRT（平均放射温度）と想像温度の平均を経過時間別に示したものである。通風・冷房ともに時間経過によるMRTの変化はほとんどない。札幌の通風室では、入室直後から20分までの申告にかけて「快適」の割合が増えている。同様に、熊本の通風室では入室直後は80%以上が「不快」であるが、時間経過とともに「不快ではない」が増え、10分以降には「快適」とする申告も現れる。冷房室では、札幌・熊本ともに入室直後に不快が最も多く、時間経過とともに減っている。しかし、25分を目途に再び「不快」が増える。想像温度は、全体的に入室直後が最も高く、熊本の冷房室以外では入室から10分間で2℃低下している。また、図には示していないが、寒暑感の平均に関しても全体を通して入室直後が最も「暑い」側にあった。これは、移動時の代謝量とともに、屋外移動時に日射に曝されるなどの熱的履歴が影響していると考えられる。

そこで、時刻nにおけるグローブ温度の瞬時値を t_n とし、移動平均値である \bar{t}_n を次式(1)で求める。

$$\bar{t}_n = \alpha t_n + (1 - \alpha) \bar{t}_{n-1} \quad (1)$$

MRTは屋外と室内で算出方法が異なり、入室前後を連続で計算することが困難なため、グローブ温度で計算を行なう。1分前の測定値を一時刻前の値とし、 α の値を0.25、0.5、0.75、1.0として計算した。図6は、移動平均グローブ温度 \bar{t}_n と、熊本3日目の通風室・冷房室における入室直後の寒暑感の関係である。4つの α に対してロジスティック曲線で回帰すると、 $\alpha=0.75$ の場合に決定係数(R^2)が0.63で最大となった。また、空気温度の移動平均値についても $\alpha=0.75$ の時決定係数が最大であった。これは、現在のグローブ温度・空気温度が75%、過去の移動平均グローブ温度・空気温度が25%割合で現在の申告

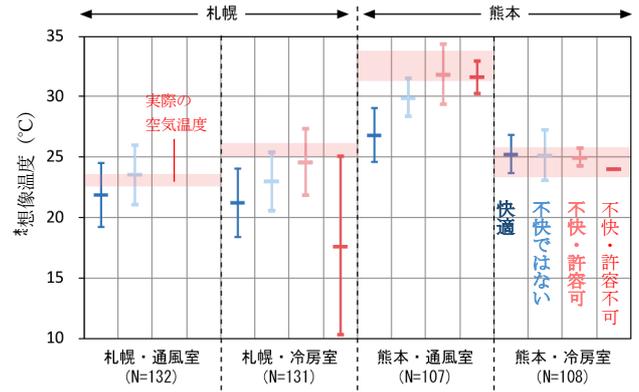


図3 札幌・熊本の想像温度と熱的快・不快

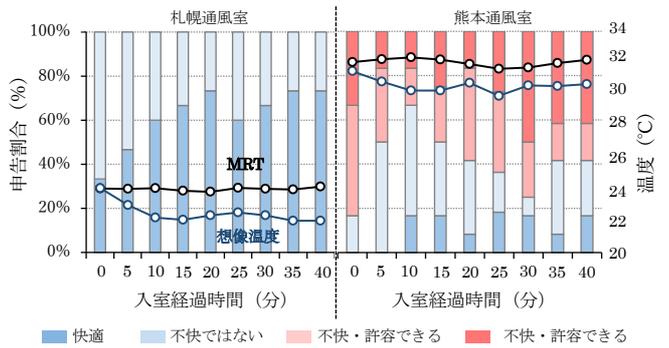


図4 札幌・熊本の通風室の想像温度と熱的快・不快

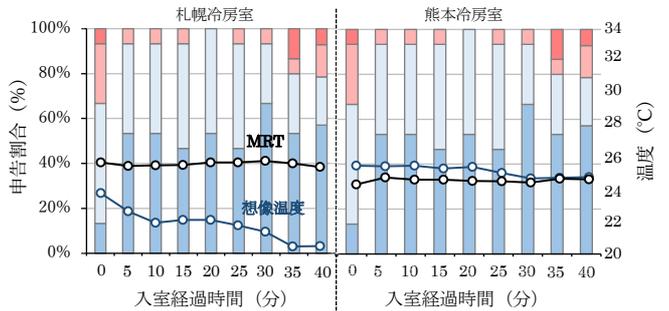


図5 札幌・熊本の冷房室の想像温度と熱的快・不快

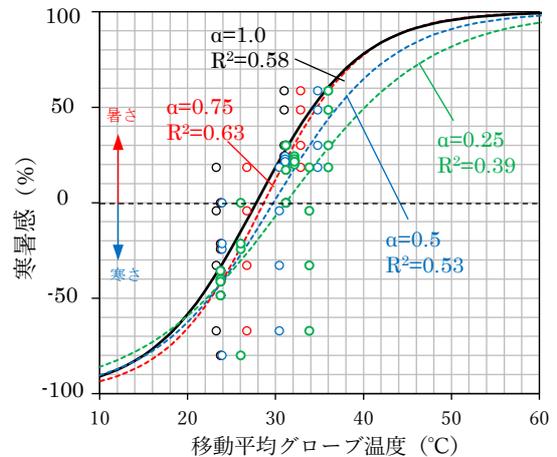


図6 熊本（3日目）の通風室・冷房室における入室直後10分間の移動平均グローブと寒暑感

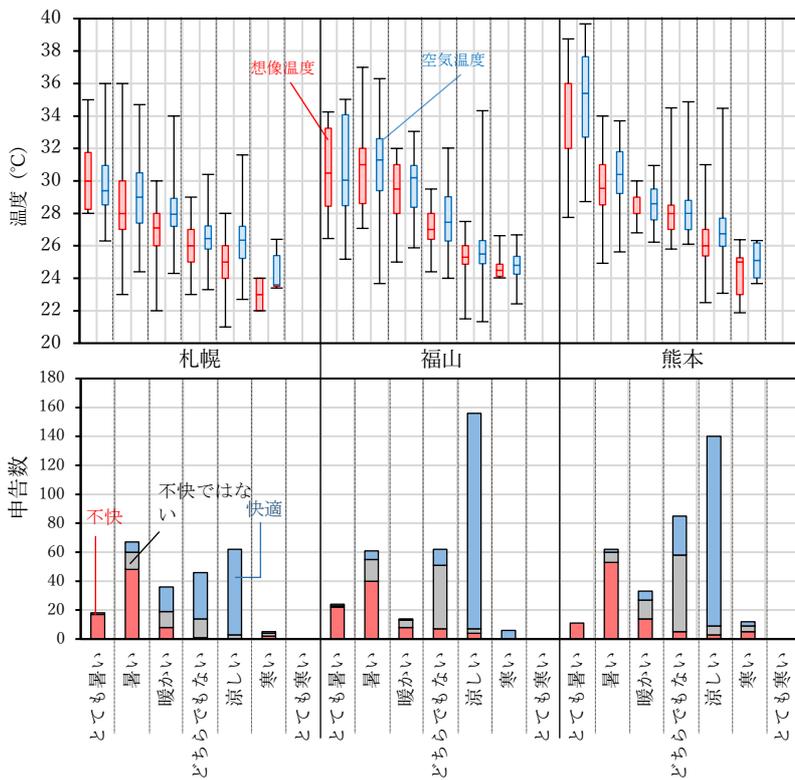


図7 札幌・福山・熊本の想像温度・空気温度（上）と寒暑感・快適感（下）（2019年）

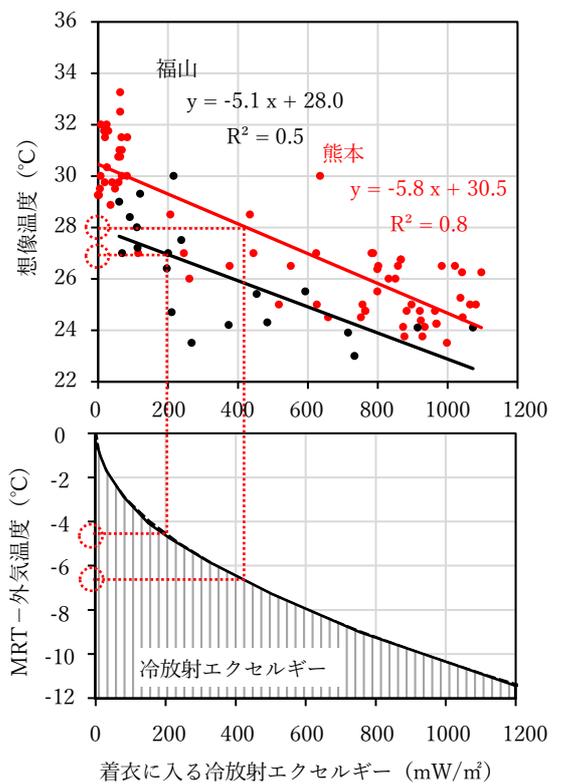


図8 着衣外表面に入る冷放射エクセルギーと想像温度（上）・MRT-外気温度（下）

に影響していることを意味する。また、 $\alpha=0.75$ の移動平均グローブ温と実測値を比較したところ、移動平均グローブ温は過去2分間の影響を受けていることがわかった。

5. 札幌・福山・熊本の日常生活調査の結果（2019年）

調査期間中、札幌の日最高外気温が30℃前後、福山では32~34℃、熊本では34~36℃であった。図7は、各地域の寒暑感と快適感、想像温度の関係を示したものである。「どちらでもない（暑くも寒くもない）」とする申告では「不快」がほとんどない。また、その時の想像温度は、札幌が26℃、福山が27℃、熊本が28℃と地域差がある。普段過ごしている外気温の高低は地域差に他ならないが、その影響が想像温度の高低にも現れている。

6. 想像温度と冷放射エクセルギー

図8は、福山・熊本での周壁面から着衣外表面に入る冷放射エクセルギーと想像温度（上図）、MRT-外気温度（下図）の関係である。熊本は、2017年・2019年度のデータを含めている。福山・熊本ともに着衣外表面に入る冷放射エクセルギーが大きいほど、想像温度は低くなる。福山では想像温度が26℃の時の周壁から着衣に入る冷放射エクセルギーは約400 mW/m²で、熊本では約800 mW/m²である。熊本の方が福山よりも2倍の冷放射エクセルギーが必要となる。以上より、周壁面からの冷放射エクセルギーと想像温度には地域差がある。

7. まとめ・デザイン展開

札幌・福山・熊本での被験者実験および日常生活調査より、夏季の熱環境適応とその地域差を明らかにした。特に、図8は居住者の想像温度から外気温度に対するMRTを地域別に求める線図になる。たとえば、図7の「どちらでもない」ときの想像温度は、福山27℃、熊本28℃であった。両者を実現するためには、福山では室内のMRTを外気温よりも4.5℃、熊本では6.5℃低くすればよいとわかる。また、夏の屋外から居室に入室する非定常熱環境では、図6のように室内での寒暑感が屋外移動時の放射環境の影響を受けていることを明らかにした。夏の屋外から室内に至る移動空間では、植栽や建築計画により日射・照明を抑え、放射冷房などでMRTを徐々に下げること、入室後の暑熱不快感を軽減できると考えられる。

参考文献・引用

- 1) 田辺新一：温熱環境の快適性評価，日本物理学会誌 Vol.54, No.6, pp.440-448, 1999.
- 2) 田中俊六・宇田川光弘・斎藤忠義・大塚雅之・秋元孝之・田尻陸夫：最新建築設備工学改訂版，井上書院，p.81, 2010.
- 3) 宿谷昌則：人の「感覚-行動」プロセス，建築設計資料集成 [環境] (第1章 人間・環境・設備 所収)，丸善，pp.2-3, 2007.
- 4) 斎藤雅也・辻原万規彦：ヒトの想像温度の形成プロセスに関する考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.269-272, 2018.