

## 夏期における外気温度変化が熱的快適性へ及ぼす影響に関する研究

創造理工学専攻 環境都市コース 6164110003-9 伊藤 紘一  
(指導教員 近本智行)

## 1. はじめに

Richard de Dear らが提唱しているアダプティブ理論では、「居住者の熱的な期待度や好みはある時点のみならず、そのときの状況や過去の熱的な履歴に影響を受ける」という仮説を設けている<sup>文1)</sup>。従来使用される PMV<sup>文2)</sup> (予測平均温冷感申告) のような快適指標は環境条件を正確に制御した人工気候室にて作成されており、過去の熱的な履歴が考慮されていない。

Humphreys と Nicol は、適応的な熱的快適性に関して、世界中の現場研究からデータを集めメタ分析を行った。彼らは、温冷感申告は室内温度にほとんど依存しないこと示し、温冷感申告はむしろ平均外気温度との差に依存すると述べている<sup>文3)</sup>。また Humphreys は、公表されている世界気象表から得た月平均外気温度と快適温度の関係を分析し、至適温度は月平均外気温度と強く関係を示すことを明らかにした<sup>文4)</sup>。

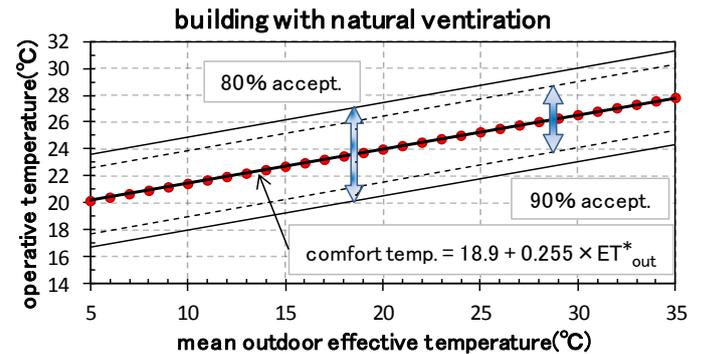
このメタ分析が発表されて以降、他の研究者が適応という観点から快適性を探究してきた。de Dear らは回答者の着衣量と代謝率を評価する厳密な現場研究を行うことにより、PMV と温冷感申告を明確に比較した。自然換気建物において暑い室内条件のとき、PMV から算出した室内中立温度と現場研究から算出した室内中立温度には統計的な矛盾が確認されている<sup>文5)</sup>。

その上で de Dear らは ASHRAE Standard 55-2004 (以下 55-2004) にアダプティブモデル<sup>文1)</sup> を提示した (図 1)。自然換気建物では月平均外気温によって室内中立温度が異なる。また ASHRAE Standard 55-2010 (以下 55-2010) では横軸を指数的に重み付けた 7 日~30 日の移動平均外気温度としている<sup>文6)</sup>。最近に暴露された温度は快適温度に強く影響し、過去の暴露温度の影響は小さいといった考慮が 55-2010 ではなされている。

なお熱的な適応には行動的調整 (衣服の調整、エアコンの ON/OFF など)、生理的適応 (発汗、血管収縮・拡張など)、心理的適応の 3 種類が定義されている。熱的な適応の心理的側面としては、過去の熱的経験によって同じ温熱環境であったとしても異なる温冷感が得られることが当てはまる<sup>文1)</sup>。つまり経験する外気温度によって室内中立温度が変化する要因は心理的適応である。

過去の熱的な履歴は季節の変化といった長いスパンだけでなく、一日の外気温度変化が大きい夏期にも感じら

れると考える。つまり月平均や移動平均外気温度で室内中立温度が変化するなら、一日の外気温度変化においても室内中立温度は変化すると考えられる。しかし、de Dear らのアダプティブモデルは横軸の外気温度を月平均もしくは数日間の移動平均といった長いスパンでしか定義しておらず、時間単位まで踏み込めていない。

図 1 月平均外気温度と室内快適温度の関係<sup>文1)</sup>

## 2. 目的と実験ケース

本研究では夏期において時間単位での外気温度変化が被験者の快適性へ及ぼす影響を確認することを目的とし、3 ケースの被験者実験を行った。図 2 に実験風景を示す。

(1) case1 の目的 (特徴: 常に屋内待機)

de Dear 氏が示したアダプティブモデルの外気温度 (横軸) よりさらに短いスパンでも室内中立温度が変化するか確認する。時間単位の外気温度変化においても室内中立温度が変換することが確認出来れば、午後の気温の高い時、被験者の快適と感じる温度も高くなっているため、空調設定温度を緩和しても不快になりにくいと考えられる。

(2) case2 の目的 (特徴: 外気温度の提示)

case2 では外気を認知させる方法として外気温度を被験者に提示する。数値情報として外気温度を被験者に認知させることで、case1 の結果と違いが出るか確認する。



図 2 実験風景

(3) case3 の目的 (特徴: 被験者の屋外暴露)

case3 では外気を感じさせる方法として、実験の休憩中に被験者を実際の外気に暴露した。case2 と同様に、case3 の結果は case1 の結果と比較する。

3. 実験概要

3.1 実験期間

2012年8月1日~2012年8月22日のうち9日間実験を行った。雨天日には実験を行わなかった。また実験日は外気温度が比較的高い日を選定した。

3.2 被験者

被験者として健康な男子大学生 10 名を用いた。実験中は着衣量 0.6clo、代謝量は 1.0met に統一した。椅子の種類によって被験者の着衣量が変化することを防ぐため、使用する椅子も統一した。

また被験者には窓やドアを開閉するなどの熱環境を調整出来ないようにした。

3.3 アンケート内容

図3にアンケート内容を示す。温冷感申告・快適感申告を中心に PC 上で指定した時間帯に申告をしてもらった。

3.4 室内環境設定

ファンコイルの風量は常に一定(Low、Middle、High のうち Low を選定)とした。また被験者に直風が当たらないようにした。

実験中、熱環境の調整のため窓は開けたままにしたが、ブラインド・ドアは常に閉めたままにした。

空調機は使用していたが、窓は開けており室内と屋外は連続した空間であったため、部分的に自然換気をしていると考えられる。

3.5 実験場所と測定項目

実験は立命館大学 BKC の研究棟の一室で行った。図4に実験場所平面図を、表1に測定項目を示す。

また外気温度は大学内の百葉箱でも 1 分間隔で測定している (Pt センサー)。

3.6 実験手順・実験条件

実験手順を図5に、実験条件と凡例を表2に示す。実験は各ケースとも同一時間帯に行った。また 1 セット目~7セット目までタイムスケジュールは同様である。

case1・case2 では実験中、休憩中ともに屋内の実験場所に滞在してもらった。ただし、case2 ではアンケートを記入する前に外気温度も同時に記入してもらい、外気状況を認知させた。

case3 では①の休憩時間帯に屋外 (ベランダ) に移動してもらい、外気に暴露した。

<温冷感申告> あなたは、この室内の温熱環境をどう思いますか。 寒い 涼しい やや涼しい どちらでもない やや暖かい 暖かい 暑い (-3) (-2) (-1) (0) (+1) (+2) (+3)						
<快適感申告> あなたは、この室内の温熱環境を快適と思いますか。不快と思いますか。 非常に不快 不快 やや不快 どちらでもない やや快適 快適 非常に快適 (-3) (-2) (-1) (0) (+1) (+2) (+3)						

図3 アンケート内容

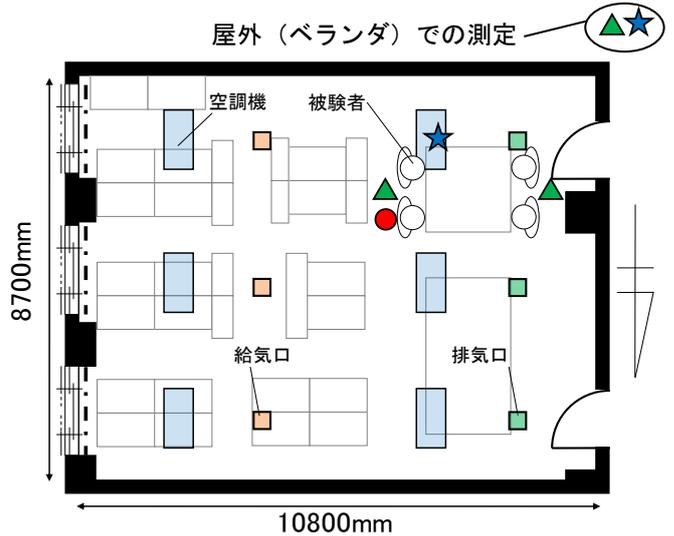


図4 実験場所平面図

表1 測定項目

凡例	測定機器	測定項目	測定点数	測定間隔
●	T型熱電対 + データロガー (NR1000)	上下温度分布	5点(100mm, 600mm, 1100mm, 1700mm, 2100mm)	1分
★	おんどとり	空調機吹出口 温度・湿度 空調機吸入口 温度・湿度 外気温度・湿度	各項目1点	
▲	アメニティーメータ	空気温度 相対湿度 風速 平均放射温度	各項目1点 (1100mm)	

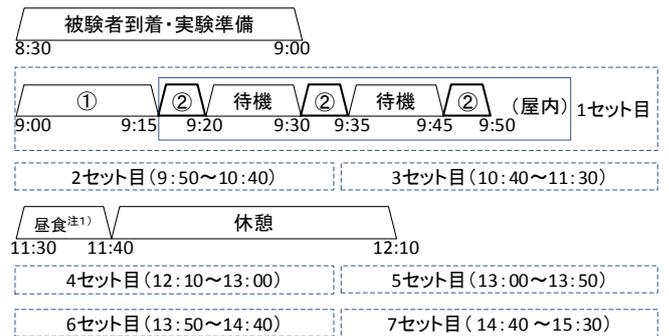


図5 実験手順

表2 実験条件と凡例

	ケースの特徴	①	②
case1	基準ケース	休憩 (屋内待機)	アンケート記入
case2	外気温度情報を与えるケース		外気温度情報記入後にアンケート記入
case3	被験者を屋外に暴露するケース	休憩 (屋外待機)	アンケート記入

4. 解析方法 (図6)

解析は外気温度と室内中立温度の散布図・回帰線作成のために行う。解析には外気温度・室内温度・温冷感申告<sup>注2)</sup>を使用した。なお外気温度はそれぞれのアンケート

申告時刻から 30 分間、1 時間、2 時間、3 時間、4 時間、5 時間遡った平均外気温度を使用する。

解析は 3 ケースにて、上記 6 つの平均外気温度ごとに行う。なお図 6 の解析方法は、case1 における 30 分間平均外気温度を用いた場合を例として示す。

**プロセス 1** 外気温度を昇順として、室内温度・温冷感申告を並び変えた。その後、5 つの温度域に分けた。

**プロセス 2** 5 つの温度域それぞれでアンケート申告時の外気温度を平均した。

**プロセス 3** 5 つの温度域それぞれで回帰分析を行い、回帰式を算出 (x:室内温度、y:温冷感申告) した。

**プロセス 4** 回帰式に  $y = 0$  を代入し、各温度域で室内中立温度を算出 (有意水準 5% で検定を行い、危険値が 5% を越える回帰式から算出されて室内中立温度に関してはデータから除外) した。

温冷感申告が 0 のときを室内中立温度とした理由について、図 7 に温冷感申告と不快率の関係を示す。不快率は以下の式から算出した。

$$\text{不快率}[\%] = (\text{快適感申告} < 0) / \text{アンケート総数}$$

図 7 より、すべてのケースにおいて温冷感申告が 1 を超えると不快率が急激に増加することが分かる。従って、温冷感申告 0 が不快とならない限界値と判断した。

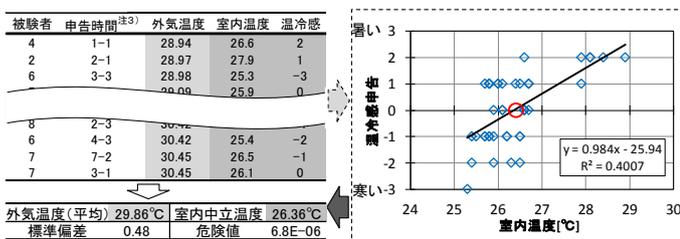


図 6 解析方法

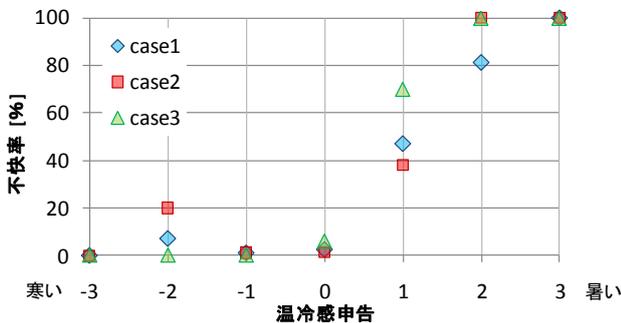


図 7 温冷感申告と不快率の関係

**プロセス 5** 各温度域における外気温度と室内中立温度から散布図を作成し、回帰線を算出した。

## 5. 結果・考察

図 8 に 3 ケースの各時間平均における外気温度と室内中立温度の関係、図 9 に各時間平均における回帰線の決定係数、図 10 に各時間平均における回帰線の傾きを示す。

### 5.1 case1 の結果・考察

図 8、図 9 から回帰線の決定係数は、30 分平均外気温度と 1 時間平均外気温度で非常に高く、2 時間平均外気温度から減衰していくことが分かる。また図 8、図 10 から回帰線の傾きは 1 時間平均外気温度の時、1 番高い。

以上から時間単位での外気温度変化によって室内中立温度が変化することが確認された。

de Dear らは自然換気建物における居住者の快適性と屋外熱環境の状況との関連性を、心理的適応 (期待・慣れ) が原因であると提言している<sup>(文1)</sup>。本研究では実験場所の窓は開けており室内と屋外は連続した空間となっている。そのため case1 において時間単位での外気温度と室内中立温度に正の相関が出た理由は心理的適応であると考えられる。熱的な適応の心理的な側面としては、過去の熱的経験と期待によって異なる温冷感が得られることが当てはまる<sup>(文1)</sup>。1 時間前の平均外気温度という非常に直近なものでも過去の熱的な経験に当てはまり、室内中立温度が変化したと考えられる。

### 5.2 case2 の結果・考察

図 8、図 9 から回帰線の決定係数は、30 分平均外気温度と 1 時間平均外気温度で非常に高い。2 時間平均外気温度から減衰していくが case1 に比べより大きく減衰している。また図 8、図 10 から回帰線の傾きは 30 分平均外気温度の時、1 番高い。

case1 と同様に、時間単位の外気温度変化で室内中立温度が変化することが確認された。ただし、室内中立温度は直近 (30 分平均、1 時間平均) の外気温度にしか影響を受けない。

図 8 の 30 分平均外気温度と 1 時間平均外気温度では case2 の回帰線は case1 の回帰線より上側にシフトしていることが分かる。同じ外気温度の場合でも外気温度情報を与えれば室内中立温度は上昇することが示された。

### 5.3 case3 の結果・考察

図 8、図 9 から回帰線の決定係数は、すべての時間平均外気温度で非常に高い。また図 8、図 10 から回帰線の傾きは 1 時間平均外気温度の時、1 番高い。

case1 と同様に、時間単位の外気温度変化で室内中立温度が変化することが確認された。しかし、case1 に比べ case3 では時間を遡っても決定係数・傾きともにあまり減衰しない。

被験者を外気に暴露することで、過去の外気温度に室内中立温度は case1 よりも影響を受けることが確認された。

また図 8 のすべての時間帯において、case3 の回帰線は case1 の回帰線より上側にシフトしていることが分かる。同じ外気温度の場合でも被験者を実際の屋外に暴露し外気を感じさせることで、室内中立温度は上昇することが示された。

凡例：◆ case1 ■ case2 ▲ case3 — 線形 (case1) - - 線形 (case2) - - - 線形 (case3)

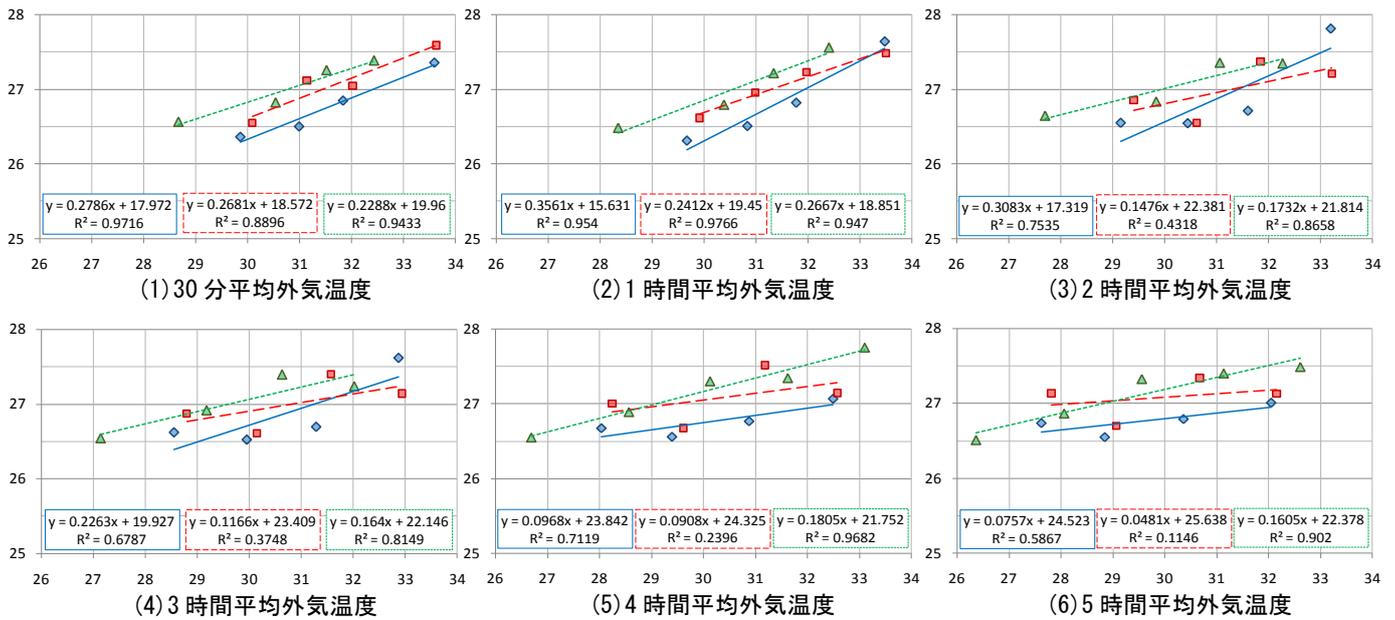
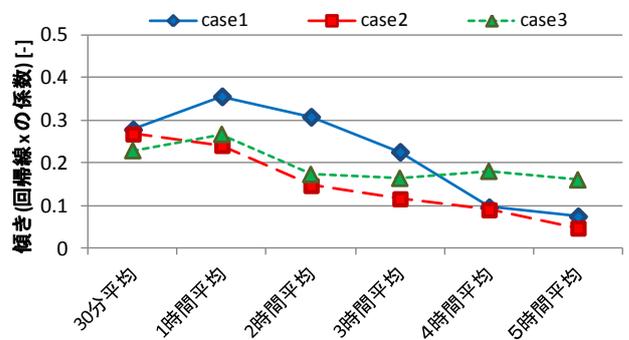
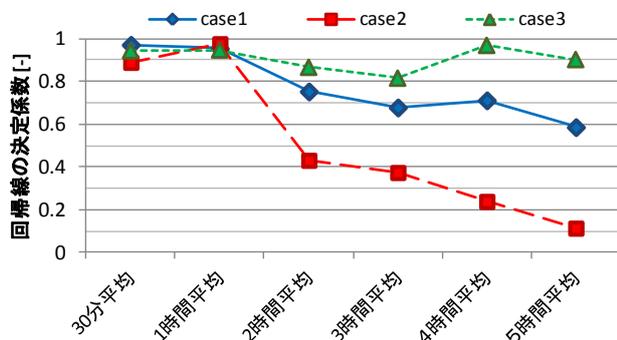


図8 各ケースの各時間平均における外気温度と室内中立温度の関係(縦軸:室内中立温度[°C],横軸:外気温度[°C])



## 6. まとめ

本研究では夏期における時間単位での外気温度変化が被験者の快適性へ及ぼす影響を確認することを目的とし、被験者実験を行った。そこで以下の知見が得られた。

- 各ケースにおいて、時間単位での外気温度変化によって室内中立温度が変化することが確認された。また時間を遡るにつれ回帰式の決定係数・傾きは減衰することが確認され、直近の外気温度は室内中立温度に大きく影響することが確認された。
- case2 では 30 分、1 時間平均の外気温度を使用した場合、case1 の回帰線より上側にシフトした。外気温度情報を被験者に与える有効性が確認された。
- case3 ではすべての時間帯の外気温度データを使用した場合、case1 の回帰線より上側にシフトした。被験者を外気に暴露する有効性が確認された。

### 参考文献

- 1) De Dear, R.J : Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and

Preference, published in ASHRAE Transactions 1998, Vol, Part 1

- 2) Fanger ,P.O : thermal Comfort(1970), Danish Technical Press
- 3) Humphreys, M.A. and Nicol, J.F. (1970) An investigation into the thermal comfort of office workers. JIHVE 38 181-189
- 4) Humphreys, M.A. 1978 Outdoor temperatures and comfort indoors, Building Research and Practice (J. CIB) 6(2), pp 92-105
- 5) De Dear, R.J : Thermal comfort in air-conditioned office buildings in the tropics. Standards for thermal comfort : Indoor air temperature standards for the 21st century. London, UK : E&FN Spon(1995)
- 6) ANSI/ASHRAE Addendum c to ANSI/ASHRAE Standard 55-2010, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy

### 注釈

- 1) 昼食は各被験者に同じものを与えた。
- 2) case3 では、各セットにおける始めのアンケートは定常状態の結果が得られなかったため、解析データから除外する。
- 3) 左側の数字はアンケート申告時刻のセット数、右側は各セット内での順番を示す。

### 謝辞

本研究を進めるにあたり大阪大学の甲谷准教授に非常に的確なご助言をいただいた。また今回、実験をするにあたり多くの被験者にご協力をいただいた。記してここに感謝の意を表す。