

## 研究助成実施報告書

助成実施年度	2021 年度
研究課題（タイトル）	熱画像の AI 画像認識に基づく温熱快適性制御が知的生産性に与える影響に関する研究
研究者名※	海塩 渉
所属組織※	東京工業大学 環境・社会理工学院 建築学系 助教
研究種別	研究助成
研究分野	建築技術
助成金額	150 万円
発表論文等	

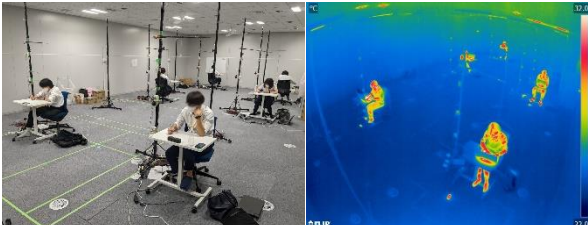
※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

( ) は、報告書提出時所属先。

所属機関名 東京工業大学  
申請者氏名 海塩 渉

研究課題	熱画像の AI 画像認識に基づく温熱快適性制御が知的生産性に与える影響に関する研究
(概要)	
<p>本研究では、熱画像と AI 画像認識を用いて算出した温熱快適性指標 PMV (Predicted Mean Vote) に基づく空調制御を提案し、被験者実験によって提案した空調制御が快適性や知的生産性に与える影響を検証した。空調制御の提案においては、人体温熱生理モデルである Two-Node-Model を用いたパラメトリックスタディによって、熱画像を用いた代謝量の推定手法を検討し、推定した代謝量をもとに PMV を算出し、空調制御に用いる手法を提案した。被験者実験においては、大学生 11 名を被験者として歩行運動・模擬作業・アンケートを行い、従来の室温を一定にする空調制御と提案した空調制御が快適性や知的生産性に与える影響を検証した。その結果、熱画像を用いた PMV に基づく空調制御によって、より快適な温熱環境を実現できたことに加えて、作業効率が向上する可能性が示唆され、ヒトの状態の機微を捉えた空調制御の開発に際して、有用な知見を得ることができた。</p>	

1. 研究の目的
<p>近年、執務空間における快適性や知的生産性の向上が求められている。快適性や知的生産性への影響が大きい温熱環境については、個人の属性や嗜好によって温冷感が異なることや、1 日の中でもサーカディアンリズムにより温冷感が変化することが知られている。しかし、従来の空調は室温を一定に保つ制御であり、実際の執務空間において個人や時間帯に合わせた温熱環境を提供できていない。一方で、昨今のセンシング技術の発展によってバイタルサインの取得が容易になったことで、より人の状態に寄り添った空調制御を開発できる可能性がある。そこで、人の熱的状态を非接触で測定できる熱画像センサに着目し、夏期の冷房を対象として、熱画像を用いた予測平均温冷感申告 PMV に基づく空調制御を提案することとした。本研究では、熱画像を用いた PMV に基づく空調制御が快適性や知的生産性に与える影響を検証することを目的とした。</p>

2. 研究の経過
2-1. 実験概要
<p>図 1 に実験の様子を示す。実験は、A 社の実験室において、2022 年 10～11 月に実施した。本実験は、東京工業大学の人を対象とする研究倫理審査委員会の承認を得た(承認番号 2021100)。</p>

図 1 実験の様子 (左: 可視画像 右: 熱画像)

被験者は大学生 11 名として、2 日程に分けて各 4 日間の実験を行い、一部ケース欠席者と実験中に体調不良を訴えた者のデータを除外した 9 名を分析対象とした。分析対象者の内訳は男性 6 名、女性 3 名である。図 2 に実験室平面、表 1 に環境測定項目を示す。図 3 に示す通り、通勤等を模擬した歩行運動・模擬作業・アンケートを 130 分間で 1 タームとし、各日 3 タームずつ実験を行った。表 2 に模擬作業内容、表 3 にアンケート項目を示す。空調制御は表 4 に示す 4 ケースとし、1 日につき 1 ケースの実験を行った。代謝量の推定式を求めるために Case 1 は各日程で最初の日に行い、Case 2 から Case 4 は順番の影響を排除するため各日程で順序を入れ替えて行った。

## 2-2. 熱画像を用いた代謝量の推定

人の温冷感には代謝量が大きく影響することから、代謝量を把握することは重要である。しかし、代謝量を常時計測することは難しいため、熱画像を用いて推定を試みた。Kotani ら<sup>1)</sup>は、熱画像からディープラーニングを用いて人の領域を抽出し、着衣表面温度を計測する手法を提案している。着衣表面温度と比例する皮膚温と代謝量の関係について、Gagge ら<sup>2)</sup>の Two-Node-Model を用いたパラメトリックスタディを行ったところ、概ね比例関係となった。そこで、着衣表面温度と代謝量の関係を線形と仮定した。ただし、着衣表面温度が安静時以下のときは 1 met、歩行運動時以上のときは 2 met と仮定した。本実験においては、代謝量は安静時～歩行運動時の間で変動すると仮定し、Case 1 の着衣表面温度が最も低い値を椅座安静時(1.0 met)、中央値を座位作業時(1.1 met)、最も高い値を歩行運動(2.0 met)のものとして、時刻毎の代謝量を推定した。

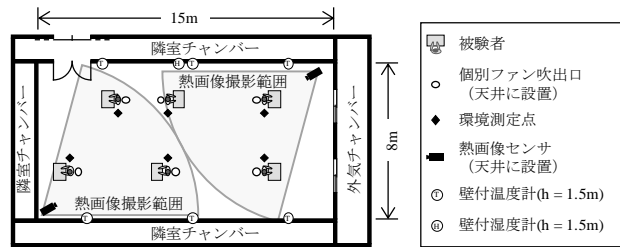


図 2 実験室平面

表 1 環境測定項目

測定箇所	測定項目	測定高さ	測定機器	測定間隔
実験室隅角部	放射温度, 着衣表面温度	-	熱画像センサ	5 分
各被験者の机横 (図 2 中◆)	温度, 相対湿度, CO <sub>2</sub> 濃度	0.1 m, 0.6 m 1.1 m, 1.7 m	TR-76Ui(T&D)	1 分
	グローブ温度	1.1 m	グローブ球(SIBATA), TR-71nw(T&D)	1 分
各被験者の頭上	風速	2.0 m	testo 400 / testo 440(testo)	1 分
各被験者の机上	騒音, 照度	1.1 m	2JCIE-BL01(オムロン)	1 分

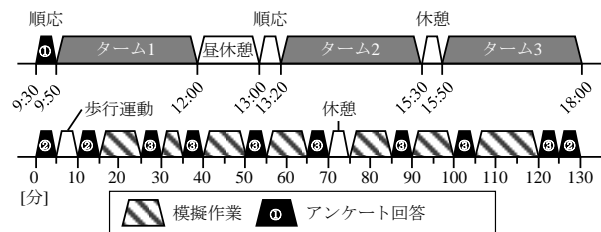


図 3 実験タイムテーブル

表 2 模擬作業内容

分類	作業名	作業内容	作業時間
単純作業	タイピング	英文演説をノート PC・専用ソフトを用いて打ち込む作業	10 分
情報処理作業	クレペリン	1 桁の数字を足し算し、一の位を書き込む作業	5 分
収束的思考作業	数独	9×9 の正方形の枠内に 1~9 の数字を書き込む作業	10 分
拡散的思考作業	マインドマップ	与えられた 1 つの言葉から連想される言葉を書き込む作業	10 分
	TTCT 図形テスト	与えられた 3 つの図形を用いた新奇性・独創性のある絵を描く作業	15 分

表 3 アンケート項目

タイミング	アンケート内容
実験開始前	身長, 体重, 平熱, 暑がり・寒がり・汗かき傾向, 睡眠習慣
① 実験日前	体調, 体調への影響要因(朝食摂取の有無等), 睡眠時間, 睡眠状況等
② ターム開始・終了時, 歩行後	環境に対する主観評価(温冷感, 温熱快適性等), 空調・気流変更希望, 疲労
③ 作業後	環境に対する主観評価, 作業に対する主観評価(主観作業効率等), 空調・気流変更希望

表 4 ケース設定

	室温 (空調機) 制御	気流速度 (個別ファン) 制御
Case 1	一定制御(26 °C)	-
Case 2	PMV に基づく制御①	-
Case 3	PMV に基づく制御②	-
Case 4	PMV に基づく制御②	PMV に基づく制御

### 2-3. PMVに基づく空調制御

個人や時間帯にあわせた温熱環境を提供するため、前節で推定した代謝量を含む温熱環境の指標である PMV を空調制御に用いた。制御の対象は室温(空調機)および気流速度(個別ファン)とした。表 5 に PMV の算出に使用した要素、表 6 に制御方法を示す。Case 1 は従来の制御、Case 2 は制御を行う時点での全執務者の PMV の平均値を±0 に近づける室温制御、Case 3 は執務者のうち PMV が最も低い人の PMV を±0 に近づける室温制御、Case 4 は Case 3 の室温制御に加えて執務者個人の PMV を±0 に近づける個別ファンを用いた気流速度制御を行った。PMV の算出および制御は 5 分間隔とした。

表 5 PMV の算出に使用した要素

要素	使用した値
空気温度	実験室内の壁付温度計で計測した値
相対湿度	実験室内の壁付湿度計で計測した値
放射温度	熱画像から計測し、人以外の領域を平均した値
気流速度	個別ファンの可変スイッチ開度に応じて、事前に測定した値
代謝量	熱画像から計測した着衣表面温度に基づいて推定した値
着衣量	0.49 clo (被験者の服装を指定した)

表 6 空調の制御方法

制御対象	手法名	手法概要
室温 (空調機)	PMV に基づく制御①	被験者の PMV の平均値が+0.5 を超えたとき、被験者の PMV の平均値が±0 に近づく室温に設定する。
	PMV に基づく制御②	被験者のうち PMV が最低の人の PMV が+0.5 を超えたとき、被験者のうち PMV が最低の人の PMV が±0 に近づく室温に設定する。
気流速度 (個別ファン)	PMV に基づく制御	被験者の PMV が正の値をとったとき、被験者の PMV が±0 に近づく気流速度になる個別ファン可変スイッチ開度に設定する。

## 3. 研究の成果

### 3-1. 環境測定結果

図 4 に温度の 1 日の変化を示す。日程 1 の Case 1 では、午前中に給気温度と内部発熱が均衡しておらず温度が低下したため、午後から給気温度を調整し温度を一定に制御した。それ以外では、PMV に基づく空調制御により室温が変動したことが確認できた。表 7 に環境測定の結果を示す。温度、相対湿度、グローブ温度は、日程・ケース間で差が見られた。温度、グローブ温度は PMV に基づく室温制御の結果と考えられ、相対湿度は外気の湿度の影響を受けたと考えられる。CO<sub>2</sub> 濃度、騒音、照度は、日程・ケース間に顕著な差は見られず、温熱環境以外の要素による知的生産性への影響が小さく抑えられていることが確認された。

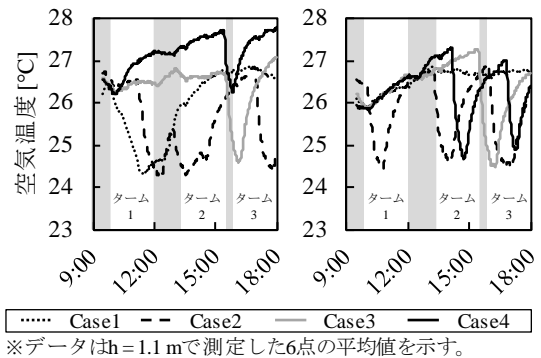


図 4 温度の 1 日の変化

表 7 環境測定結果

Case	日程 1				日程 2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
温度 [°C]	26.0	25.5	26.4	27.2	26.5	25.8	26.4	26.3
相対湿度 [%]	51.0	47.0	30.4	24.0	31.5	33.9	33.0	27.6
グローブ温度 [°C]	25.5	25.0	25.8	26.5	25.8	25.0	25.6	25.5
風速(h=2.0m)[m/s]	0.09	0.09	0.08	0.99	0.11	0.11	0.12	0.54
CO <sub>2</sub> 濃度 [ppm]	519	499	498	515	477	469	494	484
騒音 [dB]	38.5	38.2	38.3	39.2	38.7	37.4	37.7	38.7
照度 [lx]	351	346	348	353	344	330	349	340

### 3-2. 環境に対する主観評価への影響

図5に温冷感を中立（暑くも寒くもない）と回答した割合、図6に温熱快適性を快適側（やや快適～非常に快適）と回答した割合を示す。いずれも、Case 2・3・4ではCase 1に比べ、有意に回答割合が増加した。PMVに基づく空調制御では、熱画像から推定した代謝量に合わせることで、温冷感中立の評価が増加し、快適な温熱環境が実現された。

### 3-3. 知的生産性への影響

図7に主観作業効率の平均値、図8・図9に模擬作業成績の平均値を示す。図中エラーバーは平均±標準偏差を示す。タイピングは慣れの影響がみられたため、習熟曲線からの差をとった。

主観作業効率の平均値について、Case 4ではCase 1に比べ、2.5 pt増加した( $p < 0.05$ )。

タイピングの正打数の平均値について、Case 4ではCase 3に比べ37.5回増加した( $p < 0.01$ )。

数独の正答数、マインドマップの回答数の平均値について、ケース間に有意な差は見られなかった。

以上より、PMVに基づく室温・気流速度制御が主観作業効率を向上させること、および個別ファンの使用による気流速度制御が単純作業の作業効率を向上させることが示唆された。

数独、マインドマップの成績には有意な差が見られなかったが、これは本実験のすべてのケースで一定程度以上の快適な温熱環境が実現されたため、知的生産性に顕著な差が生じなかったと考えられる。

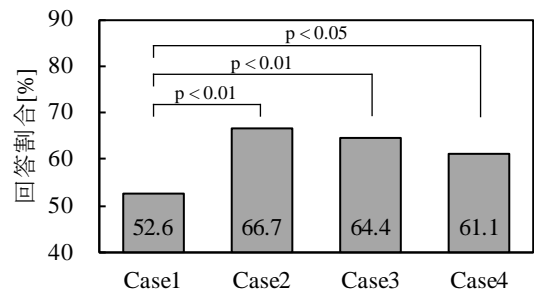


図5 温冷感中立回答割合

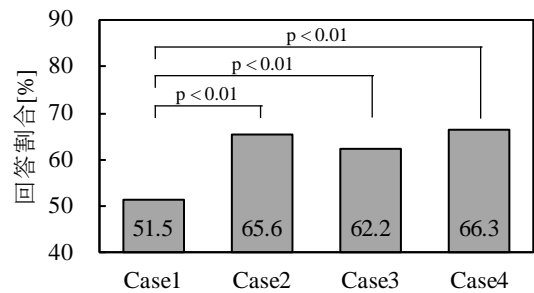


図6 温熱快適性快適側回答割合

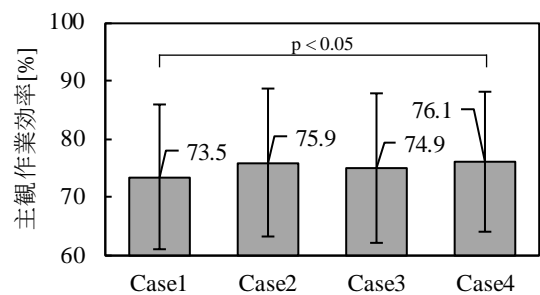


図7 主観作業効率

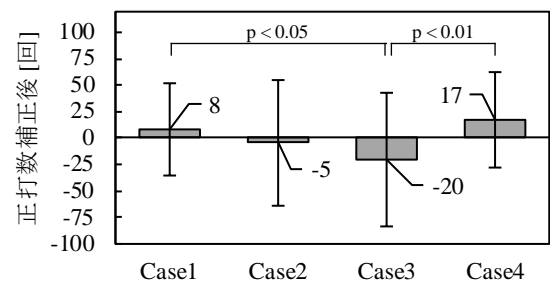


図8 タイピング成績

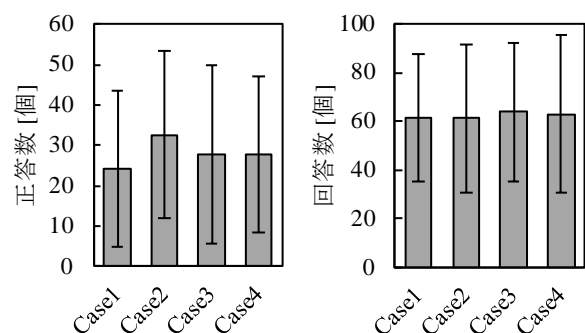


図9 数独成績 (左) マインドマップ成績 (右)

#### 4. 今後の課題

本研究では、次の知見を得た。

1)熱画像を用いた PMV に基づく空調制御によって、温冷感中立，温熱快適性快適側の評価が増加したことを確認した。さらに，主観作業効率が向上することが示唆された。

2)個別ファンの使用による気流速度制御によって，単純作業の作業効率が向上することが示唆された。

今後は実際の代謝量の測定を含めた熱画像による代謝量推定手法の改良および省エネルギー性の評価を含めた空調制御手法への改良を試行する予定である。

#### 参考文献

1) Shuntaro Kotani et al. : Practical multi-person PMV estimation using infrared thermography and deep learning, SICE 2020, 2020

2) A. P. Gagge et al. : A Standard Predicted Index of Human Response to the Thermal Environment, ASHRAE Transactions, Vol.92, pp.709-731, 1986