

平成 27 年度 風工学研究拠点 共同研究成果報告書

研究分野： 室内環境

研究期間： H25 ～ H27 [平成 27 年度で終了]

課題番号： 133009

研究課題名 (和文)： 在室者の覚醒状態および生産性を向上させる省エネ型室内環境制御法に関する研究

研究課題名 (英文)： Study on energy-saving indoor climate control with improving occupants' arousal and productivity

研究代表者： 後藤伴延

交付決定額 (当該年度)： 318,000 円

1. 研究の目的

近年、地球環境負荷の低減および省エネルギー・節電の観点から、空調設定温度の緩和が求められてきている。しかしながら、オフィスにおいてそのような空調温度の緩和を行った場合には、執務者の快適性が低下するのみならず、生産性をも低下させてしまう可能性が高い。例えば、申請者は覚醒状態に注目した研究を近年行っており、作業に適した覚醒状態を維持するためには、室温を高くすべきでないことを実験により示している。一方で、室温の変動は、在室者の覚醒状態を改善して作業効率を向上させる可能性があり、省エネ・節電の方向性とも合致すると考えられる。

そこで本研究では、在室者の覚醒状態および生産性を向上させる省エネ型空調制御法の開発を目指して、室温の変動が在室者の覚醒状態および作業効率に影響を及ぼすか否か、また、影響を及ぼすとすれば、どのような変動が覚醒状態や作業効率にとって望ましいのかを明らかにする。加えて、室温に比べて可変性や制御性の高い環境要素である風速に関しても、覚醒状態および生産性への影響と効果的な利用方法を明らかにする。

2. 研究の方法

① 急な上昇と緩やかな下降を組み合わせた室温の周期的変動

室温の変動には様々なバリエーションが考えられ、その全てを検討することは不可能である。しかしながら、全ての室温変動は室温の上昇と下降の組み合わせである。このことから、平成 25 年度と 26 年度には、室温変動を上昇局面および下降局面に分解して考え、それぞれが単独で覚醒状態に及ぼす影響について検討を行った。それにより、室温の急な上昇 (0.30°C/min)、および、緩やかな下降 (0.15°C/min) が在室者の覚醒状態の向上に有効であることが示された。

本年度は、急な上昇と緩やかな下降を組み合わせた室温の周期的な変動が在室者の覚醒状態および作業効率に及ぼす影響について、検討を行った。

覚醒状態の評価には、日本語版覚醒度尺度²⁾ (Japanese UWIST Mood Adjective Check List: JUMACL, 表 1) を用いた。JUMACL とは覚醒度を「エネルギー覚醒 (EA)」と「緊張覚醒 (TA)」の二つの評価軸で評価する手法である。

表 1 日本語版覚醒度尺度 (JUMACL)

あなたの現在の気分や感情はいかがですか？									
あてはまる数字を○で囲んでください。									
(1.あてはまる 2.ややあてはまる 3.ややあてはまらない 4.あてはまらない)									
ゆったりしている	1	2	3	4	気がすまない	1	2	3	4
生き生きしている	1	2	3	4	穏やかである	1	2	3	4
エネルギーギッシュである	1	2	3	4	落ち着いている	1	2	3	4
リラックスしている	1	2	3	4	頭の働きが鈍い	1	2	3	4
ピリピリしている	1	2	3	4	不安である	1	2	3	4
頭がぼんやりしている	1	2	3	4	元気がある	1	2	3	4
やる気がある	1	2	3	4	無気力である	1	2	3	4
冷静である	1	2	3	4	平静でない	1	2	3	4
緊張している	1	2	3	4	活動的である	1	2	3	4
活気がない	1	2	3	4	びくびくしている	1	2	3	4

実験は2015年7月31日から8月20日の10:00~12:45と15:00~17:45の時間帯に、東北大学の環境工学実験室内の人工気候室(図1)で行った。被験者は大学生及び大学院生31名とであり、全4ケースの実験に参加した。サーカディアンリズムに配慮し、各被験者は全ケースを同時時間帯に実施した。被験者には着衣の指定を行い、概ね0.68 cloとした

実験条件を表2に示す。23°Cと26°Cの室温一定条件に加え、室温変動条件を2ケース実施した。Case 3は、過去の実験³⁾で覚醒の向上に有効だった23°Cから29°Cへの20分間の室温上昇(0.30°C/min)と、29°Cから23°Cへの40分間の室温下降(0.15°C/min)を組み合わせて、60分周期の変動とした。Case 4は、室温の時間変化率を変えずに、24.5°Cから27.5°Cの3°C差にすることで、30分周期の変動とした。

実験スケジュールを図2に示す。被験者は環境順応時間として20分間の映像視聴を行った後、30分間の数独作業を計4回行った。Case 3・4は位相の異なる2つの変動のうち、ランダムで一方のケースを各被験者に割り当てた。アンケートは室温が26°Cとなる時点で図2に示す通りに実施した。

表2 実験条件

	室温	備考
Case 1	23°C	換気量:30 m ³ /(人・h) 照度:200 lx 風速:0.15 m/s 湿度:成り行き (絶対湿度:0.009~0.010 kg/kg')
Case 2	26°C	
Case 3	23°C⇄29°C (60分周期)	
Case 4	24.5°C⇄27.5°C (30分周期)	

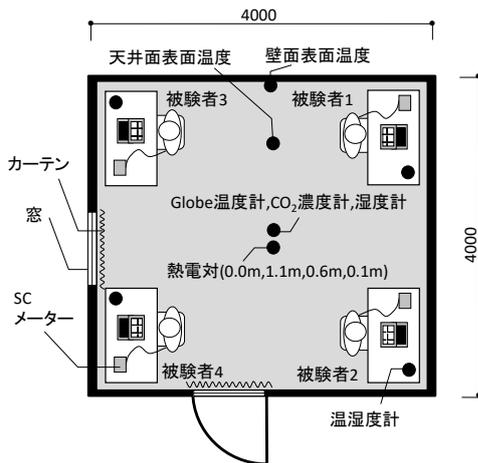


図1 実験室

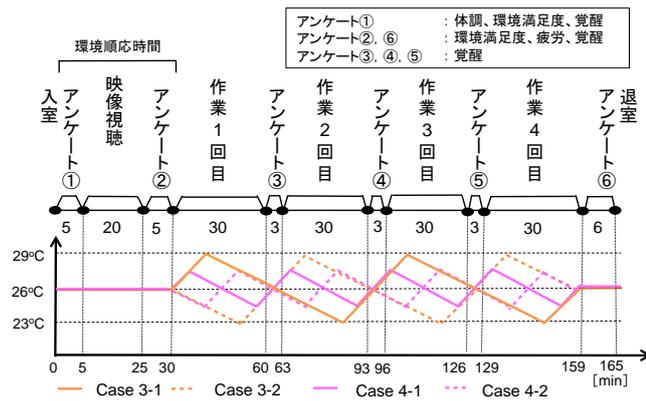


図2 実験スケジュール

② 一定間隔の風速上昇

室温に比べて変動幅・変化率ともに自由度の高い環境要素である風速が覚醒状態と作業効率に及ぼす影響を、被験者実験によって検討した。昨年度の実験⁴⁾で、高風速への一定時間以上の暴露が覚醒状態に悪影響を及ぼすことが示されたため、本実験では風速を短時間で複数回に分けて上昇させることとした。

実験は2015年9月10日から9月30日の10:00~12:10、13:30~15:40、17:00~19:10の時間帯に、東京工芸大学の人工気候室で行った。物理環境測定点を図3に示す。被験者は大学生男子10名とし、全4ケースの実験に参加した。被験者には着衣の指定を行い、着衣量を概ね0.65 cloとした。サーカディアンリズムに配慮し、それぞれの被験者が参加する実験は全て同時時間帯とした。

実験条件を表3に示す。本実験では風速変動条件を2つ設定した。この2条件は、風速上昇の頻度と1回あたりの継続時間は異なるが、風速上昇の累積時間は同じである。なお、風速変動条件と比較するための定常条件として、室温26°Cで風速0.15 m/sのCase 1、室温27.5°Cで風速0.15 m/sのCase 2を設定した。風速変動条件は、高風速時のPMVやSET*がCase 1と同レベル、PMVやSET*の時間平均がCase 2と同レベルになるように、室温28°C、0.15 m/sを基本として、約20分間に1回の頻度で風速上昇(1.0 m/s、4分)させるCase 3と、約20分間に4回の頻度で風速

上昇 (1.0 m/s, 1 分) させる Case 4 を設定した。その他の条件は、相対湿度 50 %, 換気量 30~35 m³/h・人, 照度 750 lx とした。

実験スケジュールを図4に示す。被験者は環境順応時間として20分間の映像視聴を行った後, 20 分の数独作業を 4 セット行った。風速変動を伴う条件では, 数独作業中に風速を周期的に変化させた。実験開始・終了時と各作業の合間に覚醒, 体調, 環境満足度に関するアンケートを図4に示す通り実施した。

表 3 実験条件

	室温 [°C]	風速 [m/s]	風速上昇継続 時間[min/回]	風速上昇回数 [回/作業]	PMV [-]	SET [*] [°C]
Case 1	26	0.15	0	0	0.5	25.9
Case 2	27.5	0.15	0	0	1.0	27.4
Case 3	28	0.15 ⇄ 0.1	4	1	1.1⇄0.7	27.8⇄25.6
Case 4	28	0.15 ⇄ 0.1	1	4	1.1⇄0.7	27.8⇄25.6

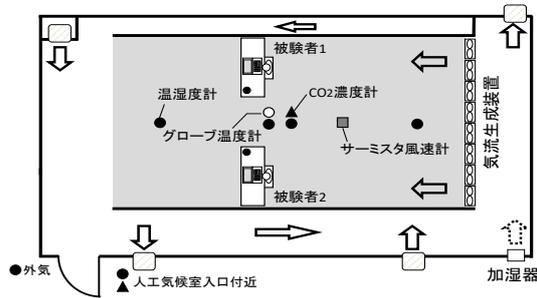


図 3 実験室平面図

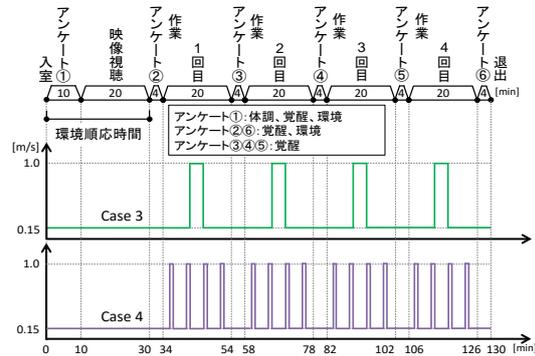


図 4 実験スケジュール

3. 研究成果

① 急な上昇と緩やかな下降を組み合わせた室温の周期的変動

覚醒と数独正答速度の全被験者平均の結果を図5に示す。Case 1・2 では, EA は時間経過とともに低下したが, TA には大きな変化はみられなかった。一方, Case 3・4 では, 実験後半に EA が上昇し, TA が低下する傾向がみられた。しかし, EA・TA ともに, ケース間の差は明確でなく, 数独正答速度についてもケース間に大きな差は確認されなかった。

本実験では, 実験日によって外気温に大きな差があり, 実験結果に影響を与えた可能性が考えられた。そのため, 実施日の平均気温が概ね 30° C を超えたグループ A (16 名) と, 概ね 22~28° C であったグループ B (15 名) に被験者を分類した。各グループの覚醒と作業効率の結果を図6・7に示す。

EA に関して, グループ B では実験後半に変動条件の EA が上昇する傾向が表れた。特に, 165 分時点には, Case 4 の EA が Case 1 および 2 よりも $p < 0.1$ で有意に上昇した。一方, この傾向はグループ A では見られなかった。この原因を考察するため, 昨年度の実験³⁾の結果を振り返ると, 室温低下が EA を上昇させる効果は, 一定時間持続する可能性が示されていた。一方, 室温上昇が EA を上昇させる効果については一時的であって, その上, 作業や環境条件に変化がない状態を一定時間維持させた後に室温上昇させて観察したものであった。以上を踏まえると, グループ A では, 実験実施日の外気温が高かったため, 実験室への入室時に大きな温度下降を体験しており, 室温一定条件である Case 1・2 においても, EA が上昇していた可能性がある。また, 室温変動条件である Case 3・4 では, この入室時の温度下降の効果によって, 実験中の室温下降の効果が表れにくくなっていったと考えられる。さらに, 室温上昇については, 当初の予想に反して, むしろ EA の低下を招いてしまっていたことが推察される。一方, グループ B の室温変動条件の結果からは, 実験前半では室温下降の効果が室温上昇の負の効果により打ち消されていたこと, 実験後半には室温上昇も EA の改善に寄与するようになり, 室温一定条件に比べて EA が上昇したことが示唆される。

TA に関しては, グループ A の Case 3・4 とグループ B の Case 4 において実験前半に上昇し, 実験後半に低下する傾向がみられる。これは, EA に対する効果と同様に, 室温上昇の TA に対

する効果も経過時間とともに変化したものと考えられる。

数独正答速度に関しては、グループ B の Case 3・4 において、実験後半の正答速度が上昇する傾向がみられた。前述したように、同じ時間に EA が上昇していたことから、EA の上昇が正答速度の上昇をもたらしたことが示唆される。

● Case 1 (23°C) ● Case 2 (26°C) ▲ Case 3 (23°C⇔29°C) ▲ Case 4 (24.5°C⇔27.5°C)
* p<0.05, † p<0.1 対応のあるt検定による

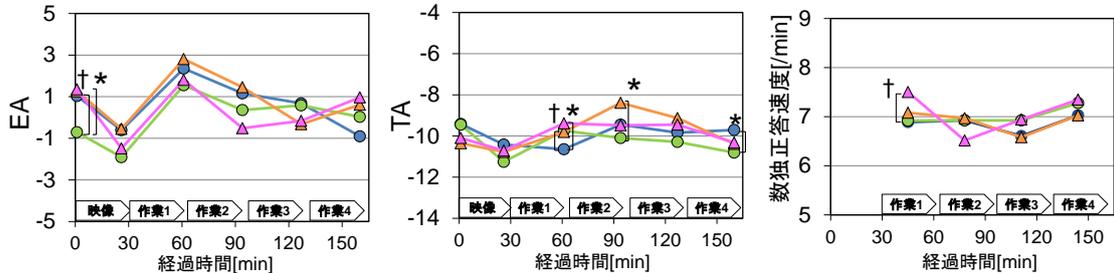


図5 EA・TA, 数独正答速度の経時変化 (全被験者平均)

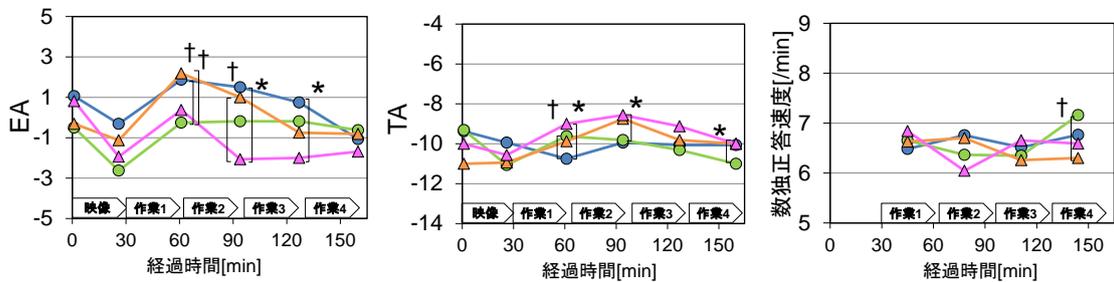


図6 EA・TA, 数独正答速度の経時変化 (グループ A)

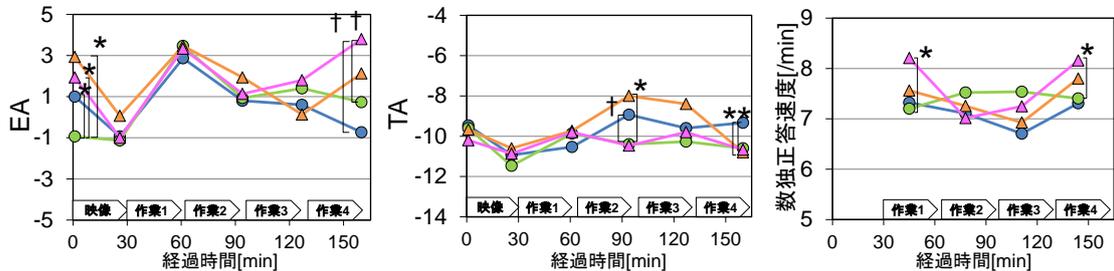


図7 EA・TA, 数独正答速度の経時変化 (グループ B)

② 一定間隔の風速上昇

EA と TA の結果を図 8 に示す。風速変動条件をみると、Case 3 の EA は 80 分まで Case 1・2 と同程度であり、それ以降は Case 1 より低い、Case 2 と同程度になっている。一方、Case 3 の TA は、80 分まで他ケースより低く、それ以降も Case 1 と同程度となっている。このことから、Case 3 の風速変動では、温熱快適性の改善効果以上に覚醒状態の改善効果が得られる可能性がある。それに対して Case 4 では、EA が実験を通じて他のケースよりも低く、TA が全般的に Case 2・3 より高く推移していることから、風速上昇の累積時間が同じでも、頻度を一定程度以上に多くすると覚醒状態が悪化することが示唆される。

数独正答速度については、本実験では被験者が 10 名と少なかったため、数独作業への習熟度や問題の難易度に対する被験者特性の影響がランダム化を行っても十分に平準化されなかった。そこで、習熟度と難易度に関して作業効率の補正を行った。図 9 に補正後の結果を示す。EA が高く TA が低い傾向にあった Case 3 では、作業効率が全般的に高くなっている。一方で、EA が低く TA が高い傾向にあった Case 4 では、作業効率が全般的に低くなっている。このことから、短時間の風速上昇を繰り返すケースにおいても、EA が高く TA が低いときには作業効率が向

上し、逆に EA が低く TA が高いときには作業効率が低下する傾向が観察された。

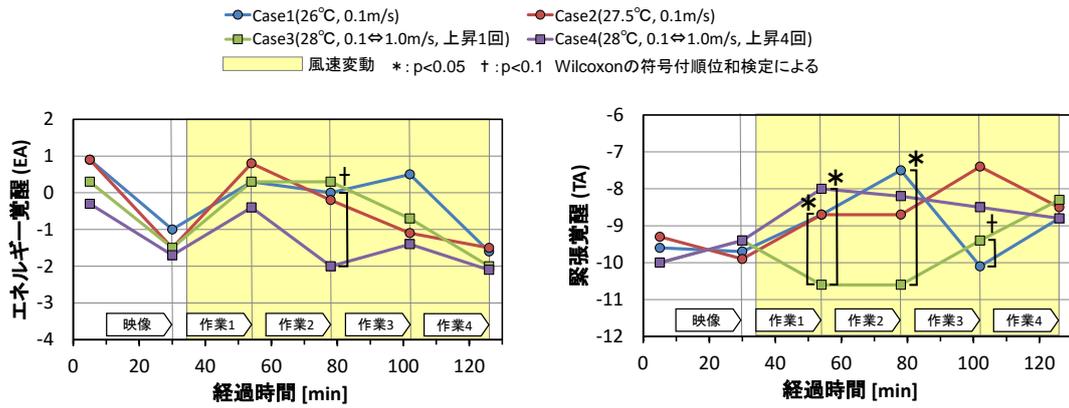


図 8 EA・TA の結果

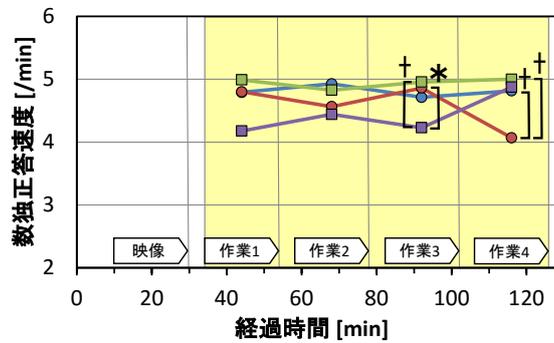


図 9 数独正答速度の結果

以上より、本年度の成果は次の通りである。

- 急な上昇と緩やかな下降を組み合わせた周期的な室温変動は、自然発生的な環境変動や作業状態の変更が無く、その状況が一定時間維持されるような場合において、覚醒状態および作業効率を向上させる可能性がある。
- 短時間の風速上昇を繰り返すことによって、温熱的な効果以上に覚醒状態が改善され、作業効率を向上させる可能性が示された。一方で、風速上昇の頻度を一定程度以上に多くすると、むしろ覚醒状態の悪化を招き、作業効率が低下する可能性があることも示された。

なお、2016年2月23日に東京工芸大学にて「在室者の覚醒状態および生産性を向上させる省エネ型環境制御法に関する研究集会」を開催し、本研究の成果報告を行った。この研究集会では、他にも生産性の向上と省エネルギーとの両立の問題や、非定常環境に関連する研究発表が行われ、活発な議論がなされた。

【参考文献】

- 1) 平松 他：在室者の覚醒状態を媒介とした室温と作業効率の因果関係に関する被験者実験，日本建築学会学術講演梗概集（近畿），pp.483-484, 2014.
- 2) 白澤 他：記憶探索に及ぼすエネルギー覚醒の効果，基礎心理学研究, 1999, 17(2), pp.93-99.
- 3) 古川 他：在室者の覚醒状態及び作業効率を向上させる変動室温制御法に関する研究，日本建築学会学術講演梗概集（関東），pp.437-438, 2015
- 4) 塚本他：在室者の覚醒状態および作業効率を向上させる室内空調制御法に関する研究 その1 風速の上昇・下降が覚醒状態に及ぼす影響に関する試行実験，佐藤工業技術研究所報, No.40, pp.57-60, 2015

4. 主な発表論文等

(研究代表者，研究分担者には下線)

- [1] 古川麻衣子，柳田祐里，後藤伴延：室温変動の時間変化率及び変動幅の違いが在室者の覚醒状態に及ぼす影響，日本建築学会東北支部研究報告会，2015年6月，pp.7-8.
- [2] 古川麻衣子，柳田祐里，後藤伴延，水谷国男，塚本健二：在室者の覚醒状態および作業効率を向上させる変動室温制御法に関する研究，その2 室温の変動幅および時間変化率が覚醒状態へ及ぼす影響，日本建築学会大会（関東），2015年9月，pp.437-438.
- [3] 古川麻衣子，近藤僚介，後藤伴延，塚本健二，水谷国男：急な上昇と緩やかな下降を組み合わせた室温の周期的変動が覚醒および作業効率に与える影響，日本建築学会東北支部研究報告会，（2016年6月発表予定）
- [4] 近藤僚介，古川麻衣子，後藤伴延，塚本健二，水谷国男：急な上昇と緩やかな下降を組み合わせた室温の周期的変動が覚醒と作業効率に与える影響に関する研究，日本建築学会大会（九州），（2016年8月発表予定）
- [5] 塚本健二，後藤伴延，水谷国男，古川麻衣子，近藤僚介：短時間の風速変動が在室者の覚醒状態および作業効率に及ぼす影響，日本建築学会大会（九州），（2016年8月発表予定）

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 5 件)

[図書] (計 0 件)

[その他]

- [1] 塚本健二，後藤伴延，水谷国男：在室者の覚醒状態および作業効率を向上させる室内空調制御法に関する研究 その1 風速の上昇・下降が覚醒状態に及ぼす影響に関する試行実験，佐藤工業技術研究所報，No.40，2015年12月，pp.57-60
- [2] 在室者の覚醒状態および生産性を向上させる省エネ型室内環境制御法に関する研究集会（2016年2月23日）

5. 研究組織

(1)研究代表者

後藤伴延（東北大学・工学研究科・准教授）

(2)研究分担者

水谷国男（東京工芸大学・風工学研究センター・教授）

塚本健二（佐藤工業株式会社・技術研究所 建築研究部・研究員）

森上伸也（豊田工業高等専門学校・建築学科・助教）

柳田祐里（東北大学大学院・工学研究科・大学院生）

古川麻衣子（東北大学大学院・工学研究科・大学院生）

近藤僚介（東北大学・工学部・大学生）