

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	夏季の温熱環境制御が睡眠と省エネに与える影響の経済性評価
Title(English)	
著者(和文)	本多 英里, 伊香賀 俊治, 岡島 慶治, 海塩 渉
Authors(English)	Eri Honda, Toshiharu Ikaga, Keiji Okajima, Wataru Umishio
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 85, , pp. 65-68
Citation(English)	, Vol. 85, , pp. 65-68
発行日 / Pub. date	2015, 3

夏季の温熱環境制御が睡眠と省エネに与える影響の経済性評価

4. 環境工学-1. 環境心理・生理

正会員 本多 英里^{*1} 正会員 伊香賀俊治^{*2}
 " 岡島 慶治^{*3} " 海塩 渉^{*1}

温熱環境制御 経済性評価 睡眠
 省エネ 夏季 被験者実験

1. 背景と目的

気候変動問題の深刻化に伴い、民生家庭部門におけるエネルギー消費量の削減が喫緊の課題となっており^{*1}、その対策の1つとして、省エネ行動の実施が求められている。一方、冷房を使用しないといった過度な省エネ行動は睡眠環境を悪化させる危険性が示唆されている^{*2}。そのため、既報^{*3}では被験者実験により夏季の温熱環境制御が睡眠と省エネに与える影響の検証を実施し、良質な睡眠と省エネを両立する温熱環境の範囲を提示した。しかし、上記の成果では推奨する温熱環境の範囲が広く、居住者へ適切な温熱環境を提示する上で課題が残る。そこで本研究では、両者の価値を貨幣価値として統合化し、最適値を導出することで、良質な睡眠と省エネを両立する最適な室内温熱環境を提示することを目的とする。

貨幣価値の換算において、エネルギー消費量の増加は冷房費の増加として推計可能である。一方、睡眠効率の低下は翌日の作業効率の低下を引き起こし、人件費のロスに繋がることが示唆されている^{*4}が、定量的な関係性の検証は不十分である。そこで、本稿では睡眠効率が翌日の作業効率に与える影響の定量化を目的として、被験者実験を行った結果を示す。

2. 被験者実験

2.1 被験者実験の概要

実験は、神奈川県に所在する、断熱水準が平成11年基準^{注1)}を満たす集合住宅^{注2)}のモデルルームと集会室にて実施した。期間は、2014年8月4~8日(A日程)、8月11~15日(B日程)の2回に分けて行った。被験者は非喫煙者、かつ標準的な体型^{注3)}である20~24歳の男子学生8名とした。また、飲酒習慣は睡眠に大きく影響を及ぼすため、飲酒回数が週に1回未満である者を選定した。被験者はA,Bいずれかの日程に参加し、各日程4名ずつとした。睡眠環境のケース設定は、実生活における居住者の行動を模擬し、設定温度を26℃と28℃、運転方式を連続運転とタイマー使用3時間とする計4ケースとした(表1)。タイマー使用の時間に関しては、日本睡眠学会の調査報告^{注5)}における居住者のタイマー使用時間を参考に設定した。

表1 睡眠環境のケース設定

Case I	冷房26℃設定 連続運転
Case II	冷房28℃設定 連続運転
Case III	冷房26℃設定3時間使用(タイマー運転)
Case IV	冷房28℃設定3時間使用(タイマー運転)

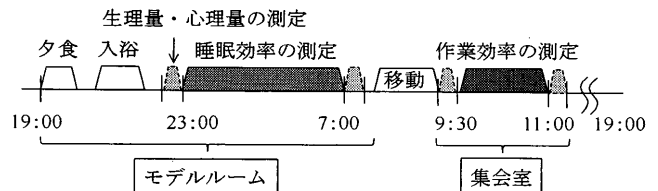


図1 実験スケジュール

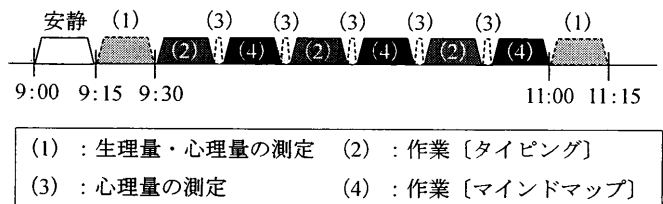


図2 作業効率測定時のスケジュール

2.2 実験スケジュール

1日の実験スケジュールを図1に示す。被験者は夜19時までにモデルルームに帰宅し、統一した夕食を済ませた後、21時から22時の間に1人15分間を上限として入浴した。入浴から睡眠までの時間を統一するため、4日間同一の順番で入浴した。その後、23時から7時まで睡眠状態の測定を行った。睡眠時間は総務省の統計調査より報告された20~24歳男性の平均睡眠時間である8時間とした^{*6}。着衣は半袖と半ズボン、寝具は綿シーツをかけた敷布団とタオルケットに統一し、寝具の使い方に関する制約は設けなかった。就寝前と起床時には、生理量・心理量の測定を実施した。翌日は統一した朝食をとった後、9時までに作業空間を模擬した集会室に移動し、9時半から90分間の作業効率の測定を実施した。作業効率測定時のスケジュールを図2に示す。2種類の模擬作業を15分毎に交互に実施し、作業効率の測定前後には就寝前後と同様に生理量、心理量の測定を行った。また、実験期間中の日中(11時半~19時)は激しい運動、飲酒、昼寝等の規制を行った。

2.3 測定項目

2.3.1 睡眠状態

睡眠状態は、枕元に非接触型の睡眠計を設置し測定した。本実験で使用した睡眠計は、電波センサにより測定した被験者の体動から睡眠・覚醒の状態を判定し、睡眠の質を評価するものである。本睡眠計から、睡眠効率や中途覚醒時間と回数等の測定を行った。睡眠の質を評価する指標としては総合的な指標として広く用いられている⁷⁾、総就床時間中の総睡眠時間の割合を示す睡眠効率を採用した。また、睡眠効率は個人差が非常に大きいため、「日ごとの睡眠効率－個人の睡眠効率の平均値」を行い、個人差を排除した上で分析を行った。

2.3.2 集会室における物理環境

集会室における物理環境の測定項目を表2に示す。室内の温湿度は0.1m, 0.6m, 1.1mの高さで、グローブ温度と風速は1.1mの高さで1分間隔の連続測定を行った。照度、騒音、CO₂濃度は1.1mの高さで作業効率の測定中30分間隔で1日に4回測定した。上記の測定は、被験者が作業を行った集会室の中心に設置した2点の環境測定点にて実施した。また屋外の温湿度についても、1.1mの高さで1分間隔の連続測定を行った。

2.3.3 集会室における作業効率・生理量・心理量

模擬作業の内容としては単純作業としてタイピング、知識創造作業としてマインドマップ⁸⁾を採用し、各々の作業効率を測定した。習熟の影響を極力排除するため、被験者は事前に模擬作業の練習を行った。生理量の測定としては作業前後に、鼓膜温、2分間の脳波測定、ストレスの指標となる唾液アミラーゼ活性の測定を実施した。さらに、実験中は心電計を装着し、自律神経や体表面温度の24時間連続測定を行った(表3)。また、心理量の測定として、室内環境満足度や疲労度、眠気、主観的な作業効率に関するアンケート調査を実施した(表4)。室内環境満足度と疲労度、体調・眠気は作業前後に調査した。室内環境満足度は温熱、光、音、空気質環境について4段階の評価を行い、疲労度は自覚症状調べ⁸⁾を用いて頭痛、だるさといった32症状を調査した。眠気の評価には主観的な眠気を9段階で評価するカロリンスカ眠気尺度(KSS)を使用した。また、作業中は作業効率や作業意欲に関して問うた。

3. 実験結果

3.1 集会室における物理環境の測定結果

睡眠効率の低下による経済的影響を貨幣価値換算するため、睡眠効率と作業効率の関係の定量化を行う。ここで、作業空間の室内環境は執務者の作業効率へ大きな影響を与えることが既往研究⁹⁾により明らかにされている。そのため、睡眠効率と作業効率との関係を検証する上で、室内環境の影響を極力排除する必要がある。実験中は全

表2 物理環境の測定項目

	測定項目	測定機器	測定方法
屋外	温度/湿度	ワイヤレスデータロガー (RTR-503)	1分間隔の 連続測定
	温度/湿度		
室内	グローブ温度	グローブ球 (080340-150)	
	風速	クリモマスター風速計 (Model6533)	
	照度	照度計 (T-10)	
	騒音	普通騒音計 (NL-21)	
	CO ₂ 濃度	IAQ モニター (Model2211)	作業中 30分間隔 で測定

表3 生理量の測定項目

測定項目	測定機器	測定方法
鼓膜温	耳式体温計けんおんくん (MC-510)	作業前後 に測定
脳波	脳波測定機 (alphatec-IV)	
唾液アミラーゼ	唾液アミラーゼモニター	24時間 連続測定
自律神経	多機能ワイヤレスホルタ記録器 (CarPod)	
体表面温度		

表4 アンケート調査の概要

評価項目	指標や質問形式	調査のタイミング		
		作業前	作業後	作業中
室内環境満足度	温熱・光・音・空気質 に対して4段階評価	○	○	×
体調	4段階評価	○	○	×
疲労度	自覚症状調べ	○	○	×
眠気	9段階評価	○	○	×
作業意欲	0~100%評価	×	○	○
作業効率		×	○	○

表5 集会室の物理環境の測定結果(平均値±標準偏差)

	Case. I	Case. II	Case. III	Case. IV
室温[°C]	25.1±0.3	25.3±0.3	25.5±0.5	25.5±0.5
湿度[%]	66.7±2.0	64.6±2.7	64.1±4.0	67.0±2.9
気流[°C]	0.10±0.04	0.06±0.05	0.05±0.04	0.07±0.06
CO ₂ 濃度[ppm]	650±93	650±44	642±23	621±32
机上面照度[lx]	755±8	752±13	759±12	759±11
騒音[dB]	39.6±1.0	40.5±1.4	39.4±1.0	40.4±0.8

日程において、室内環境が統一されるよう冷房を26°C設定の連続運転とした。各ケースの室内環境を表5に示す。その結果、温熱環境・空気質環境・光環境において「建築物における衛生的環境の確保に関する法律」の定める室内環境基準を満たしており、音環境についても作業を行う上で支障をきたすことのない状態であることを確認した¹⁰⁾。また、ケース間に有意な差が認められないことから、室内環境の影響を排除した上で、睡眠効率と作業効率の関係の検証が可能であると考えられる。

次に、被験者の作業前後における室内環境満足度の調査結果を図3に示す。音、光、空気質環境に対しては全ての被験者が満足していることが確認された。一方で、温熱環境に対しては作業前又は作業後に不満を抱いている被験者が確認された。

3.2 睡眠効率と作業前の眠気の関係

睡眠効率と作業効率の関係を検証する前段として、睡眠の質が翌日の作業前の眠気に与える影響を検証した。睡眠効率とカロリンスカ眠気尺度 (KSS) の対応関係を図4^{註5)}に示す。その結果、睡眠効率の低い日ほど作業前に眠気を感じている傾向が示唆された。

3.3 睡眠効率が作業効率に与える影響

睡眠効率が作業効率に与える影響を検証する。ここで、温熱環境が作業効率に影響を与えている可能性がある。作業前又は作業後に温熱環境に不満を抱いている被験者を分析から除外した。まず、睡眠効率と知識創造作業であるマインドマップの回答数との関係を図5に示す。睡眠効率が高い日ほどマインドマップの回答数が多い傾向が確認された。次に、睡眠効率と単純作業であるタイピングの正答率との関係を示す(図6)。その結果、睡眠効率が高い日ほどタイピングの正答率が向上する傾向が得られ、睡眠効率1%の低下に伴い、作業効率が1.1%低下することが示唆された。単純作業・知識創造作業ともに睡眠の質向上が好影響を与える可能性が明らかとなった。

4. 温熱環境制御が睡眠と省エネに与える影響の経済性評価

4.1 温熱環境制御が睡眠と省エネへ与える影響

既報^{註3)}における標準状態^{註6)}の就寝中平均SET*を指標とした、温熱環境制御が睡眠効率とエネルギー消費量へ与える影響を図7に示す。SET*27.6°Cを境に睡眠効率が低下する傾向が得られた一方で、冷房を抑制する程エネルギー消費量が削減されることが示唆された。従って、良質な睡眠と省エネを両立するSET*は睡眠効率が最大となる27.6°Cからエネルギー消費量が0[kWh/日/m²]となる31.4°Cの範囲であることが示唆された。以降の分析では、上記の推奨SET*の範囲において経済的価値が最も高くなる、即ち良質な睡眠と省エネを両立する室内温熱環境の提示を行う。

4.2 睡眠効率の変化による経済的影響

3.3節の結果より、睡眠効率の低下は翌日の作業効率の低下に影響することが確認された。従って、睡眠効率の低下は作業効率の低下を引き起こし、人件費のロスに繋がると推察される。そこで、睡眠効率の変化による経済的影響を(1)式より算出した。

$$\begin{aligned} & \text{睡眠効率の変化による経済的影響[円/人/日]} \\ & = \text{人件費[円/人/日]} \times \text{睡眠効率の低下率}^{\text{註7)}} [\%] \\ & \quad \times \text{睡眠効率1\%の低下に伴う作業効率の変化率} [\%] \cdots (1) \end{aligned}$$

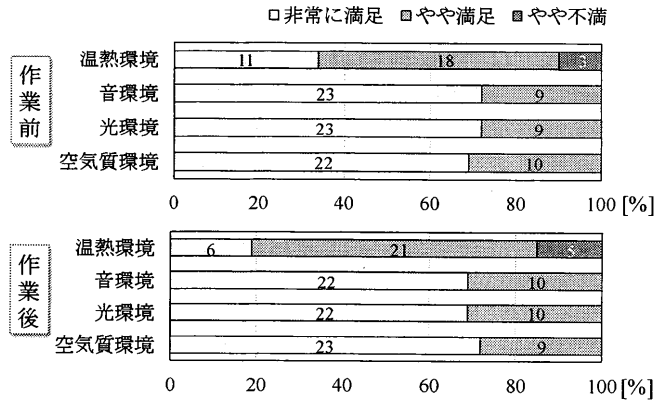


図3 作業前後の室内環境満足度 (n=32)

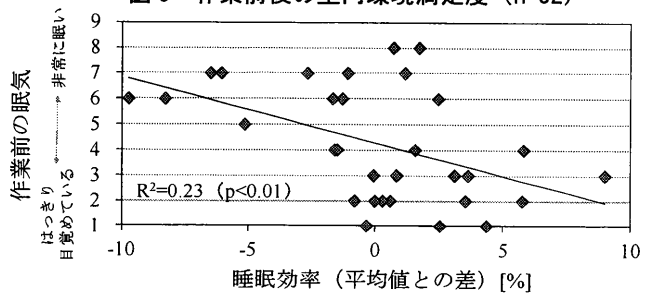


図4 睡眠効率と作業前の眠気の関係 (n=31)

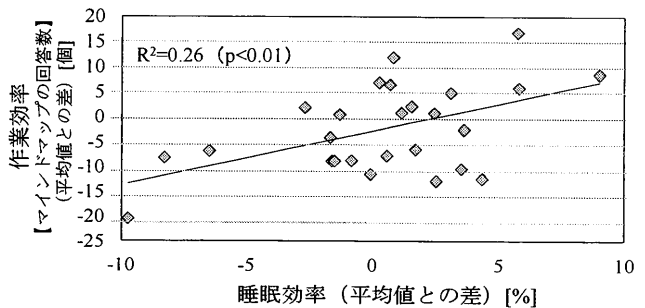


図5 睡眠効率とマインドマップの回答数の関係 (n=26)

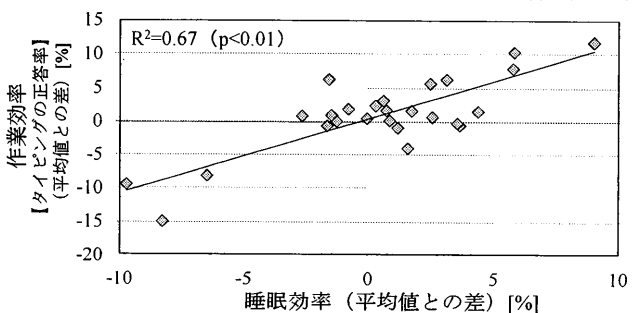


図6 睡眠効率とタイピングの正答率の関係 (n=26)

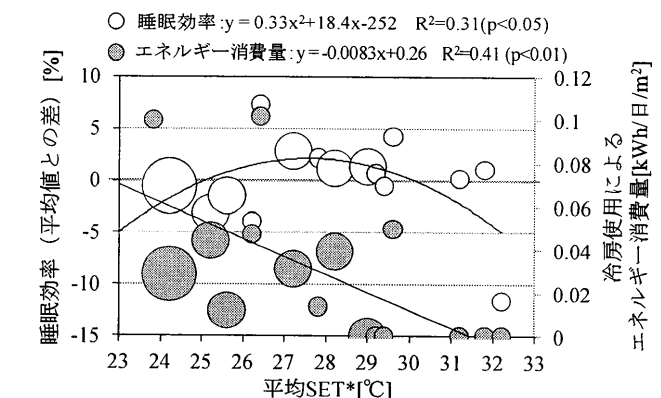


図7 平均SET*と睡眠効率・エネルギー消費量の関係

人件費は、労働経済白書^{文11)}による2013年の現金給与額(月額)である31万4048円並びに、2013年の月間労働時間145.5時間を用い、1日の労働時間8時間分^{注8)}の人件費を算出し、採用した。また、作業効率の低下率に関しては、図6から得られた睡眠効率1%低下に伴う作業効率の変化率である-1.1%を用いた。

4.3 エネルギー消費量の変化による経済的影響

冷房使用に伴うエネルギー消費量の増加、及びその経済的影響は冷房費の増加として換算することが可能である。そこで、エネルギー消費量の変化による経済的影響を(2)式より算出した。

$$\begin{aligned} & \text{エネルギー消費量の変化による経済的影響[円/人/日]} \\ & = \text{エネルギー消費量の変化量}^{\text{注9)}} [\text{kWh/m}^2/\text{日}] \\ & \quad \times \text{夏季の家庭用エネルギー価格[円/kWh]} \\ & \quad \times \text{冷房面積[m}^2\text{]} \div \text{世帯人数[人]} \quad \dots (2) \end{aligned}$$

家庭用エネルギー価格には東京電力が設定している夏季の家庭用電力価格の22.1[円/kWh]を用い、冷房面積には被験者が睡眠をとった部屋の合計面積である55.68[m²]を、世帯人数には各日程の被験者数4名を用いた。

4.4 睡眠効率及びエネルギー消費量の変化による経済的影響

就寝中SET*を横軸にとり、睡眠効率及びエネルギー消費量の変化による経済的影響の算出結果を図8に示す。尚、算出にあたっては、図7で得られた睡眠効率が最大となるSET*27.6°Cの値を基準とした。その結果、睡眠の質向上がもたらす経済的影響は省エネによる影響よりもはるかに大きいことが明らかとなった。そのため、両者の経済的影響を統合した結果は、睡眠効率の変化に伴う影響とほぼ重なり、経済的影響の大小に基づく室内温熱環境の最適値は、就寝中平均SET*27.6°Cであることが示された。

5. まとめ

睡眠の質が翌日の作業効率に与える影響を検証することを目的として被験者実験を実施した。さらに、得られた結果より、温熱環境制御が睡眠と省エネに与える影響を貨幣価値として統合化し、最適値の導出を行った。本研究により得られた知見を以下に示す。

(1) 睡眠効率が高い日ほどマインドマップの回答数が多く、タイピングの正答率が高い傾向が確認され、単純作業、知識創造作業ともに睡眠の質向上が好影響を与える可能性が示唆された。睡眠効率1%の低下に伴い、タイピングの正答率が1.1%低下することが確認された。

(2) 温熱環境制御が睡眠と省エネへ与える影響を経済的に評価した結果、睡眠の質向上がもたらす経済的影響は省エネによる影響よりもはるかに大きく、経済的影響の

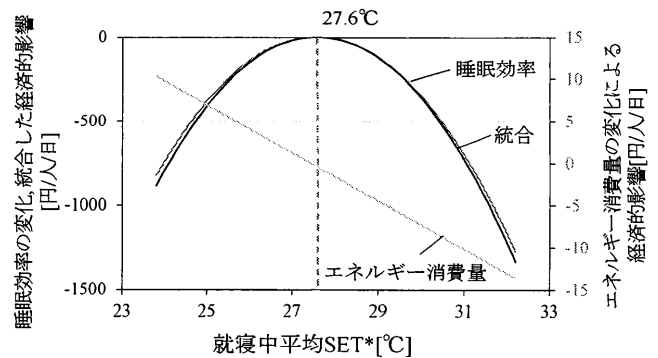


図8 睡眠効率及びエネルギー消費量の変化による経済的影響

大小に基づく、良質な睡眠と省エネを両立する室内温熱環境は就寝中平均SET*27.6°Cであることが示唆された。

本研究により、経済的価値の最大となる室内温熱環境が提示され、睡眠の質向上の重要性が示唆された。今後、更なる睡眠の質向上に向けた、温熱環境制御手法の検証が求められる。本研究で検証を実施した温熱環境制御は、冷房の連続運転における定常的な温熱環境制御に留まっている点が課題として挙げられるため、今後は非定常的な運転方式も含めた検証を実施する必要がある。

【謝辞】本研究は、東京ガス株式会社の委託研究「居住者の意識・生活行動がエネルギー消費量と健康へ与える影響の評価指標の導出に関する調査研究(研究代表者:伊香賀俊治)」として実施したものである。本研究の遂行にあたり多大な御協力、御助言を頂きました鈴木真貴子様、大平昇様(東京ガス株式会社)、松岡由紀子様(当時東京ガス株式会社)、浦田麻衣様(当時慶應義塾大学大学院)、被験者の皆さまに感謝の意を表す。

尚、本研究は、科学研究費補助金・基盤研究(A)(研究代表者:伊香賀俊治、課題番号:26249083)を受け実施した。

【注】注1)国土交通省により制定された断熱性能基準を使用注2)省エネ・創エネ・蓄エネ設備を導入した住宅注3)BMI(=体重[kg]÷(身長[m]×身長[m]))が18.5以上25.0未満注4)1つのキーワードから連想される言葉を書き出す作業注5)n数は被験者8名×4日の延べ32名から測定ミスがあった1サンプルを除外注6)着衣量を0.6clo、代謝量を58.2W/m²注7)睡眠効率が最大となる27.6°Cの値を基準注8)労働基準法で定められた1日当たりの法定基準時間注9)睡眠効率が最大となる27.6°Cのエネルギー消費量を基準とした変化量

【参考文献】文1)資源エネルギー庁「エネルギー白書2014第2部エネルギー動向」,2014文2)玄地裕ら「居住環境における健康維持増進に関する研究その10外気温上昇が居住者の睡眠障害に及ぼす影響」日本建築学会大会学術講演梗概,2009文3)本多英里ら「住宅の冷房がエネルギー消費量と睡眠に与える影響に関する被験者実験」日本建築学会関東支部研究報告集,2014.3文4)Rosekind, Mark R. 「The Cost of Poor Sleep: Workplace Productivity Loss and Associated Costs」 JOURNAL OF OCCUPATIONAL AND ENVIRONMENTAL MEDICINE, Vol.52, 2010.1文5)久保博子ら「クーラー使用時の寝室温熱環境が睡眠に及ぼす影響について」第19回睡眠環境シンポジウム,日本睡眠学会調査報告,2004.7文6)総務省「平成23年社会生活基本調査生活時間に関する結果要約」2012.9文7)厚生労働省健康局「健康づくりのための睡眠指針2014」,2014.3文8)吉竹博,「改訂産業疲労-自覚症状からのアプローチ-」,労働科学研究所出版部,1993文9)高橋祐樹ら「サーカディアンリズムを考慮したオフィスの温熱環境制御が執務者の深部体温とその他生理・心理・作業効率に与える影響」日本建築学会環境系論文集,第76号,第662号,pp.335-343,2011.4文10)日本建築学会編集「建築物の遮音性能基準と設計指針」,第二版,1997文11)厚生労働省「平成26年度労働経済白書第1章労働経済の推移と特徴」

*1 慶應義塾大学大学院 修士課程

*2 慶應義塾大学理工学部 教授 博士(工学)

*3 東京ガス株式会社