

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翌日の作業効率に与える影響の経済性評価
Title(English)	ECONOMIC EVALUATION ON THE EFFECT OF THERMAL ENVIRONMENTAL CONTROL IN SUMMER ON SLEEP AND WORK EFFICIENCY
著者(和文)	本多 英里, 伊香賀 俊治, 大平 昇, 岡島 慶治, 海塩 渉
Authors(English)	Eri Honda, Toshiharu Ikaga, Noboru Ohira, Keiji Okajima, Wataru Umishio
出典(和文)	日本建築学会環境系論文集, Vol. 81, No. 724, pp. 523-533
Citation(English)	Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 81, No. 724, pp. 523-533
発行日 / Pub. date	2016, 6
権利情報	日本建築学会

夏季の温熱環境制御が睡眠と翌日の作業効率に与える影響の経済性評価

ECONOMIC EVALUATION ON THE EFFECT OF THERMAL ENVIRONMENTAL CONTROL
IN SUMMER ON SLEEP AND WORK EFFICIENCY

本多英里*, 伊香賀 俊治**, 大平 昇***, 岡島慶治****, 海塩 渉*****

Eri HONDA, Toshiharu IKAGA, Noboru OHIRA,
Keiji OKAJIMA and Wataru UMISHIO

Reduced sleep quality is a serious problem. Previous studies have reported that the thermal environment affects sleep, and that although thermal environmental control via cooling is necessary, this increases energy consumption. Here, we conduct an economic evaluation of the impact of thermal environment control on both sleep quality and energy consumption through experiments conducted in August 2013 and 2014. Reduced sleep efficiency led to decreased work efficiency. The economic impact of improving sleep quality was much greater than that of energy consumption. This study showed importance of the improvement of the sleep quality.

Keywords : Thermal Environmental Control, Economic Evaluation, Sleep, Work Efficiency, Energy Consumption, Subject Experiment

温熱環境制御, 経済性評価, 睡眠, 作業効率, エネルギー消費量, 被験者実験

1. 序論

睡眠の質の低下は生活習慣病の罹患リスクを高め、更に睡眠障害による日中の眠気が作業効率の低下や交通事故を引き起こすことが明らかにされている^{1),2)}。厚生労働省が公表した平成 25 年国民健康・栄養調査結果³⁾では、国民の約 2 割が睡眠に対して不満や悩みを抱えていることが明らかとなり、睡眠の質の低下は大きな社会問題となっている。睡眠の質の低下を引き起こす要因の一つとしては、温熱環境が睡眠中の体温調整と密接に関係していることから⁴⁾、夏季の蒸し暑さが挙げられ⁵⁾、冷房を使用した適切な暑さ緩和対策が求められている⁶⁾。

このような背景を鑑みて、就寝中における温熱環境制御と睡眠の関係が注目されてきた。垣内⁷⁾⁻⁹⁾らは住宅内における夏季の冷房使用に関する実測調査を実施し、冷房の使用実態を把握した上で、冷房の使用方法が睡眠へ与える影響の検証の必要性を示した。その後、複数の冷房条件を設定した上で、8 組の男女を対象とした睡眠状態の測定を実施し、冷房条件の好みを男女別に検証した。久保¹⁰⁾らは冷房の普及が進む一方で、冷房の不適切な使用が睡眠中の覚醒や起床後の体調不良に影響を与えることを示唆し、睡眠中の適切な使用方法を検証する重要性を示した。これを受け、川島¹¹⁾らは、温度と湿度を制御した計 3 ケースの条件下で、青年を対象とした被験者実験を実施し、睡眠の質の向上に寄与する温熱環境制御の検討を行った。さらに、都築¹²⁾らは夏季に睡眠の質の低下が顕著である高齢者を対象とした実験により、冷房の有無や冷房方式が睡眠時の皮膚温

や温冷感申告に影響することを示した。また、糸井川¹³⁾らは皮膚温に加え、自律神経系の活動を考慮した対流式冷房の制御手法を提案した。冷房の気流に着目したものと、井上¹⁴⁾、森戸¹⁵⁾らは冷風が身体に直接当たらない制御手法が適していることを示した。以上のように、冷房を使用した温熱環境制御が睡眠に与える影響に関する研究が蓄積されつつある。

一方で、冷房を使用した温熱環境制御はエネルギー消費量の増加を招く。我が国では、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¹⁶⁾、その対策の一つとして、省エネ行動の実施が求められている。夏季においては、冷房の設定温度の上昇や使用時間の短縮等、温熱環境制御に関する対策が居住者の省エネ行動実施率の上位を占めている¹⁷⁾。しかし、冷房を全く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、睡眠障害の訴えを増加させる危険性が示唆されている^{18),19)}。上述の研究では、温熱環境制御が睡眠に与える影響のみの検討にとどまっているため、省エネに与える影響までを含んだ包括的な検討が求められている。

そこで本研究では、被験者実験を実施し、温熱環境制御が睡眠とエネルギー消費量に与える影響を総合的に検証する。両者の影響を総合的に検証する手法としては既往研究²⁰⁾⁻²⁴⁾において多く用いられている貨幣価値換算を用いる。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

* 慶應義塾大学大学院理工学研究科 大学院生

** 慶應義塾大学理工学部 教授・博士(工学)

*** 東京ガス(株) 博士(工学)

**** 東京ガス(株)

***** 鹿島建設(株) 修士(工学)

(当時 慶應義塾大学大学院理工学研究科 大学院生)

Grad. Stud., Graduate School of Science and Technology, Keio Univ.

Prof., Faculty of Science and Technology, Keio Univ., Dr.Eng.

Manager, Residential Sales Marketing Department, Tokyo Gas Co., Dr.Eng.

Manager, Residential Sales Marketing Department, Tokyo Gas Co.

Kajima Corporation, M.Eng.

(Grad. Stud., Graduate School of Science and Technology, Keio Univ.)

に繋がること示唆されており^{25)・27)}、人件費のロスといった企業の利益損失は労働者の賃金の減少に影響を与える²⁸⁾。Goldsmith²⁹⁾らの報告においても、作業効率及び作業意欲の低下が賃金の減少に繋がること示されている。そのため、本研究では睡眠効率の低下を作業効率の低下が引き起こす賃金の減少と定義して推計を行う。しかし、睡眠効率と作業効率の関係に関しては定量的な検証が不十分であるため、被験者実験を行い、睡眠状態の測定と翌日の作業効率の測定を実施し、睡眠効率が作業効率に与える影響の定量化を行う。尚、金子^{30)・31)}、亀田³²⁾、羽田^{33)・34)}、西川³⁵⁾、高橋^{36)・37)}らにより、作業空間の室内環境が執務者の作業効率へ大きな影響を与えることが明らかにされている。そのため、実験期間中の作業空間の室内環境を統一することで、室内環境が作業効率へ与える影響を極力除去するよう努めた。被験者実験により得られた睡眠効率、作業効率、エネルギー消費量のデータを用いて、貨幣価値換算を行い、経済的価値が高い室内温熱環境を検証する。

2. 温熱環境制御と睡眠に関する被験者実験 (2013 年) の概要

2.1 実験期間・被験者

温熱環境制御が睡眠とエネルギー消費量に与える影響の検証を目的とし、被験者実験を行った。実験は、神奈川県に所在する、断熱水準が次世代省エネルギー基準を満たす集合住宅^{注1)}の1住戸にて実施した。これ以降、「睡眠空間」と定義する。期間は、2013年8月2～5日(A日程)、8月9～12日(B日程)の2回に分けて行った。被験者は、非喫煙者、かつBMI値^{注2)・38)}により標準的な体型と判断された20～22歳の男子学生8名とした^{注3)}。また、飲酒習慣は睡眠に大きく影響を及ぼす³⁹⁾ため、飲酒習慣が週に1回未満である者を選定した。また、実験開始1～2週間前より極力規則正しい生活を送るように指示し、睡眠状態の測定を実施した。被験者の普段の総就床時間の平均は6時間27分であった^{注4)}。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。尚、正当な謝金を支払うことを告知するとともに、事前説明会を実施した。個人情報の取り扱い等に関して同意を得た上で、慶應義塾大学理工学部・理工学研究科の生命倫理委員会の承認を得た手順で実験を実施した(承認番号:25-4)。

2.2 実験ケース

睡眠時の温熱環境制御ケースは、実生活における居住者の行動を模擬し、冷房設定温度に関する全国アンケート結果の最頻値である26℃設定(Case. I)⁴⁰⁾、省エネ推進のために政府が推奨している28℃設定(Case. II)⁴¹⁾、冷房を使用しない自然通風(Case. III)の計3ケースとした(表1)。着衣は半袖と半ズボン(0.3clo)とし、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^{注5)}。順序効果を極力除去するため、A日程とB日程ではケースの順番を変えて実験を行った。ケース設定と各日程の外気条件を表2に示す。

2.3 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19時までに睡眠空間に帰宅し、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。夕食に関しては、食事による睡眠への影響を極力小さくするため、統一した夕食を用意した。入浴後から心理量測定までは、激しい運動と仮眠を規制した上で過ごした。そ

表1 睡眠時の温熱環境制御ケース (2013年)

Case. I	冷房 26℃設定 (連続運転)
Case. II	冷房 28℃設定 (連続運転)
Case. III	自然通風

表2 2013年実験日程と外気条件

実施日	A日程				B日程			
	8/2	8/3	8/4	8/5	8/9	8/10	8/11	8/12
Case	II	I	III	III	III	II	I	
天気	曇	晴一時曇	曇後晴	薄曇時々晴	曇	曇一時晴		
気温[℃]	23.7±0.3	24.6±0.6	26.2±0.6	28.1±0.8	29.1±0.8	29.3±0.7		
湿度[%]	79.1±1.0	84.6±5.8	86.0±2.7	84.8±3.2	82.0±6.1	68.2±4.1		

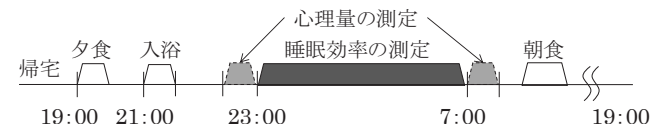


図1 2013年実験スケジュール

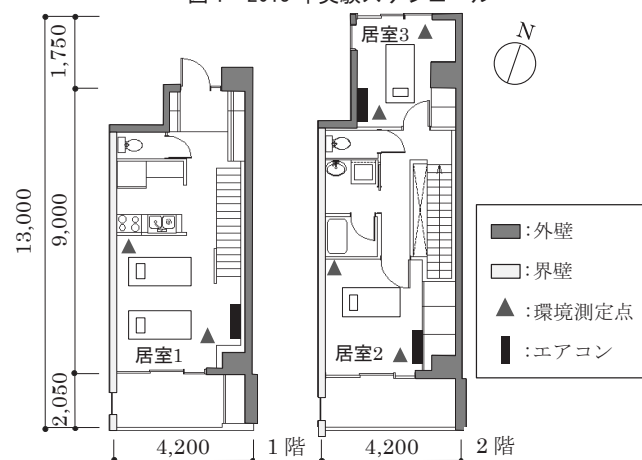


図2 睡眠空間の平面図と物理環境測定点 (単位・mm)

表3 睡眠空間の物理環境測定項目

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	グローブ温度	
	グローブ温度	グローブ球 (080340-150)	
室内	風速	クリモマスター風速 (Model6533)	就寝前起床後に測定
	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)	

の後、23時に消灯し、翌朝の7時まで睡眠状態の測定を行った。被験者は実験者の合図によって起床した。総就床時間は統計局が実施した社会生活基本調査において報告された20～24歳男性の週全体の平均総就床時間である8時間とし^{注6)}、就寝前(消灯前)と起床後に心理量、物理環境の測定を実施した。さらに、多機能ワイヤレスホルタ記録器 CarPod (MEDILINK社)を装着し、自律神経の24時間連続測定を行った^{注7)}。また、実験期間中の日中(9時～19時)は激しい運動、飲酒、昼寝等の規制を行った。

2.4 測定項目

(1)睡眠空間内の物理環境

実験を行った睡眠空間の平面図と物理環境測定点を図2に示す。環境測定点は被験者が睡眠をとった各部屋に2点ずつとした。測定項目を表3に示す。室内の温湿度は0.1mと1.1m、グローブ温度、

風速は 0.1m 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 0.1m の高さで就寝前と起床後に測定した。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)エネルギー消費量

睡眠空間の各部屋に設置されているエアコンのエネルギー消費量は 1 分間隔で積算値を測定した。エアコンは成績係数 (COP : Coefficient of Performance) が 3.23~4.49 の省エネ型であった。

(3)睡眠状態

睡眠状態は、枕元に非接触型の睡眠計 HSL-102-M (OMRON 社) を設置し測定した。本実験で用いた睡眠計は、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。睡眠の指標としては、睡眠の質を判定する総合的な指標として広く用いられ⁴²⁾、翌日の作業効率との関連が強い^{注 8)}、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。

(4)心理量

室内環境満足度や疲労感、睡眠感に関してアンケート調査を実施した (表 4)。室内環境満足度は、就寝前と起床後に温熱、光、音、空気質環境について 4 段階の評価を行った。体調、疲労感は就寝前に調査した。体調は 4 段階の評価を行い、疲労感は自覚症状調べ⁴³⁾ を用いて頭痛、だるさといった 32 症状を問うた。睡眠感は、起床後に OSA 睡眠調査票 MA 版^{注 9), 44)}を用いて調査した。

3. 睡眠と作業効率に関する被験者実験 (2014 年) の概要

3.1 実験期間・被験者

睡眠の影響を貨幣価値に換算する際に用いる指標となる睡眠効率と作業効率の関係の定量化を目的として、被験者実験を行った。実験は温熱環境制御と睡眠に関する実験場所と同様の集合住宅内の 1 住戸を「睡眠空間」、集会室を「作業空間」として実施した。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 BMI 値により標準的な体型と判断された 20~24 歳の男子学生 8 名とした^{注 3), 10)}。また、飲酒習慣が週に 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。尚、温熱環境制御と睡眠に関する実験と同様に、正当な謝金を支払うことを告知するとともに、事前説明会を実施した。個人情報取り扱い等に関して同意を得た上で、慶應義塾大学理工学部・理工学研究科の生命倫理委員会の承認を得た手順で実験を実施した (承認番号 : 26-4)。

3.2 実験スケジュール

1 日の実験スケジュールを図 3 に示す。夜 19 時~翌日 9 時までの睡眠空間内の測定は 2.4 節に記載した温熱環境制御と睡眠に関する実験と同様の内容である。睡眠時の温熱環境制御ケースは冷房の設定温度を 26℃と 28℃、運転方式を連続運転とタイマー使用 3 時間⁴⁾とする計 4 ケースとした (表 5)。翌日は 9 時までに作業空間に移動した後、作業空間に慣らし作業前の状態を統一するため、15 分間椅子安静状態とした。その後、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 4 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と作業の切り替えのタイミングで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。

表 4 心理量の測定項目

調査のタイミング		評価項目	指標や質問形式
就寝前	起床後		
○	○	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
○	×	疲労感	自覚症状調べ
×	○	睡眠感	OSA 睡眠調査票

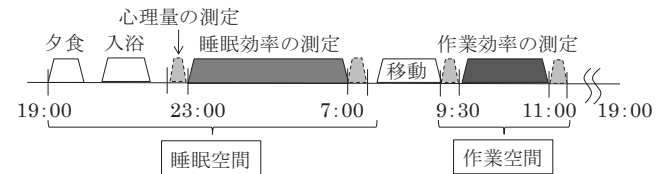
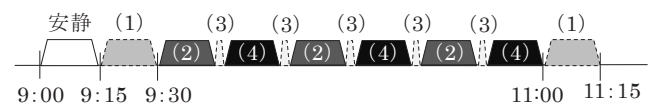


図 3 2014 年実験スケジュール

表 5 睡眠時の温熱環境制御ケース (2014 年)

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 (タイマー使用 3 時間)
Case. IV	冷房 28℃設定 (タイマー使用 3 時間)



(1) : 心理量の測定 (作業前後) (2) : 作業 [タイピング]
(3) : 心理量の測定 (作業中) (4) : 作業 [マインドマップ]

図 4 作業効率測定時のスケジュール

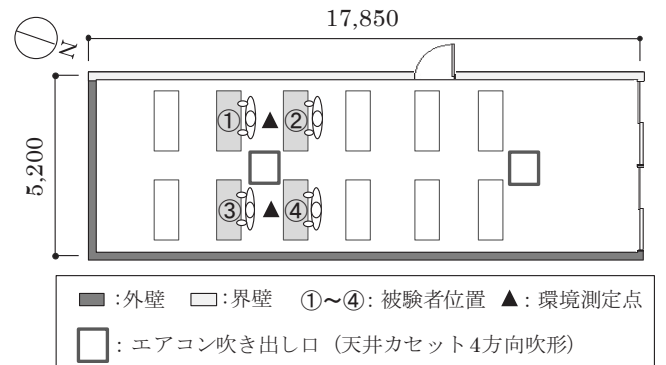


図 5 作業空間の平面図と物理環境測定点 (単位・mm)

表 6 作業空間の物理環境測定項目

	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		
	グローブ温度		
室内	風速	クリモマスター風速計 (Model6533)	作業中 30 分間隔で測定
	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)	

3.3 測定項目

(1)作業空間内の物理環境

作業空間の平面図と物理環境測定点を図 5 示す。環境測定点は被験者が作業を行った座席の中心に 2 点設けた。また、測定項目を表 6 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。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)作業効率

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^{注11)}を採用し、各々の作業効率を測定した。タイピングの作業効率は正答率により評価し、マインドマップは回答数により評価を行った。尚、習熟の影響を極力除外するため、被験者は事前に模擬作業の練習を行った。

(3)心理量

心理量の測定項目を表7に示す。室内環境満足度と体調・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段階の評価を行った。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、作業の切り替え時には主観的な作業効率や作業意欲に関して、最も作業が捗った時及び作業に対する意欲がある状態を100%とした際の相対評価を問うた。

4. 温熱環境制御と睡眠に関する被験者実験の結果

4.1 睡眠空間における物理環境の測定結果

寝室の環境要素の中で睡眠に影響を及ぼすとされる温熱、光、音環境に関して^{46),47)}、枕元の高さである0.1mの測定値をケース毎に平均した結果を表8に示す^{注12)}。光、音環境に関してケース間に有意差は認められず、光、音環境の影響が小さいことを確認した。従って、温熱環境が睡眠に与える影響の検証が可能であると考えられる。夏季における体感温度は室温に加えて湿度が大きな影響を与える。そのため、温熱環境の指標には温湿度、風速、放射の影響を考慮した体感温度である標準新有効温度(SET*)を用いて評価を行った⁴⁸⁾⁻⁵²⁾。温湿度、風速、放射温度は実測値を採用した。また、標準状態の人が睡眠空間にいた場合の体感温度を示すことで、温熱環境制御によって形成される室内温熱環境を理解し易くするため、着衣量及び代謝量は標準状態における0.6clo、58.2W/m^{2.53)}とした^{注13)}。就寝中(23時~7時)の平均SET*^{注14)}は、Case Iでは24.9℃、Case IIでは27.4℃、Case IIIでは30.4℃であった。

4.2 エネルギー消費量の測定結果

就寝中の冷房使用によるエネルギー消費量(23時~7時の8時間の積算値)をケース毎に示す(図6)。Case Iでは0.06kWh/日/m²、Case IIでは0.03kWh/日/m²となり、本実験において、冷房の設定温度を26℃から28℃へ2℃上昇させることによるエネルギー消費量削減効果は0.03kWh/日/m²(50%削減)となった(p<0.01)。羽原⁵⁴⁾らの調査では、冷房の設定温度を26℃から28℃に上昇させることによって、1日のエネルギー消費量が63~65%削減されると示している。本研究では夜間における冷房使用のみを分析対象としたため、削減率がやや小さくなったものと推察される。

4.3 室内温熱環境が睡眠感と睡眠効率へ与える影響

室内温熱環境が睡眠の質に与える影響の検証を実施する。ここで、就寝前のアンケート調査で体調が「悪い」と回答した1名は温熱環境以外の要因が睡眠に及ぼす影響が大きいと考えられるため、分析から除外した。また、分析対象とする7名に関して、実験期間中の就寝前の疲労感が同等であることを確認した^{注15)}。まず、OSA睡眠

表7 作業効率測定時の心理量測定項目

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	○	○	×
眠気	KSS(9段階評価)	○	○	×
作業意欲	0~100%評価	×	○	○
作業効率		×	○	○

表8 睡眠空間内の物理環境測定結果(平均値±標準偏差)

	Case. I	Case. II	Case. III	
就寝中の室温[℃]	24.9±0.5	26.7±0.7	28.3±1.0	
就寝中の湿度[%]	71.6±4.1	74.9±2.5	78.2±1.0	
就寝中のSET*[℃]	24.9±0.9	27.4±1.4	30.4±1.4	
照度[lx]	就寝前	130±68	136±55	140±66
	起床後	249±75	222±97	250±87
騒音[dB]	就寝前	37.9±2.1	37.5±1.5	39.5±1.2
	起床後	37.6±1.8	37.4±1.3	39.7±1.3

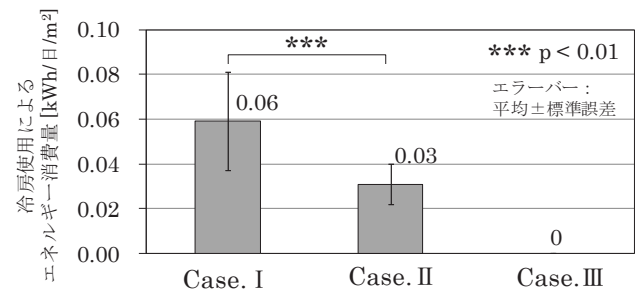


図6 実験ケース別のエネルギー消費量

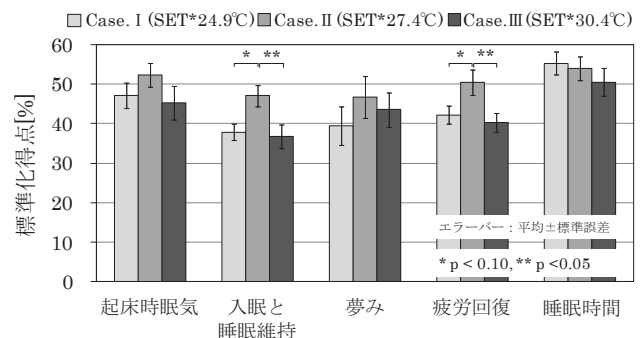


図7 実験ケース別の起床時の睡眠感(n=7)

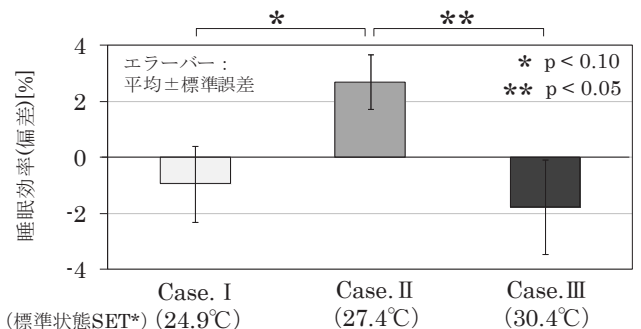


図8 実験ケース別の睡眠効率(n=7)

調査票 MA 版を用いて評価した、起床時の睡眠感^{注16)}をケース別に示す(図7)。「入眠と睡眠維持」及び「疲労回復」の項目において、Case. IIの得点が高い傾向が示唆された。次に、各ケースの就寝中の平均SET*と睡眠効率を図8に示す。ここで、睡眠効率は個人差

が非常に大きいことから^{注 17,18)}、平均的に睡眠効率が低い人に対しても、平均的に睡眠効率が低い人に対しても温熱環境制御ケースの違いによる睡眠効率の変化量を等しく検討するため、偏差（被験者の日ごとの睡眠効率－実験期間中の被験者の睡眠効率の平均値）を用いて分析を行った。その結果、平均 SET* が 27.4℃ となった Case. II において睡眠効率が最も高くなる傾向が確認された。Case. II と Case. III を比較すると Case. III において睡眠効率が低下しており (p<0.05)、また、Case. I についても Case. II と比較して、睡眠効率が低下する傾向が得られた (p<0.10)。これより、過度な冷房使用による低い SET* (Case. I) と冷房を使用しないことによる高い SET* (Case. III) は、共に睡眠へ悪影響を及ぼし、睡眠に適切な SET* が存在することが示唆された。

5. 睡眠と作業効率に関する被験者実験の結果

5.1 作業空間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。前述の通り、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明らかにされている³⁰⁾⁻³⁷⁾。そこで、実験中は全日程において、室内環境が統一されるように冷房を 26℃ 設定の連続運転とした。冷房の設定温度は、既往研究²³⁾において、作業効率は室温 25.7℃ で最大となることが報告されているため、予備実測により、冷房の設定温度と作業空間の室温の関係を確認した上で、26℃ 設定とした。作業空間内の物理環境の測定結果を表 9 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、音環境に関し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⁵⁵⁾。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 9 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。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は作業空間内の温熱環境が作業効率に影響を与えている可能性があるため、以降の分析から除外した。

5.2 睡眠効率が眠気・作業意欲に与える影響

睡眠効率と作業効率の関係を検証する前段として、睡眠効率が作業前の眠気や作業中の作業意欲に与える影響を検証した。まず、睡眠効率とカロリンスカ眠気尺度を用いて調査した作業前の眠気の間隔を図 10 に示す。その結果、睡眠効率が低いほど、作業前に眠気を感じている状態であることが確認された ($R^2=0.39, p<0.01$)。次に、睡眠効率の偏差が 0 未満の群（睡眠効率が低い群）と睡眠効率の偏差が 0 以上の群（睡眠効率が高い群）に分類し、作業中の作業意欲を比較した (図 11)。睡眠効率の偏差が 0 以上の群において、作業意欲が高く維持される傾向が示唆され、作業開始 90 分後の時点では有意な差が認められた (p<0.05)。

5.3 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^{注 19)}。尚、作業効率に関しても睡眠効率と同様に、個人差が大きい指標であるため、偏差（被験者の日ごとの作業効率－実験期間中の被験者の作業効率の平均値）を用い、個人差を極力除外した上で分析を行った。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

表 9 作業空間内の物理環境測定結果(平均値±標準偏差)

	室温 [°C]	湿度 [%]	気流 [m/s]	CO ₂ 濃度 [ppm]	机上面照度 [lx]	騒音 [dB]
8/5	25.1±0.3	66.3±2.0	0.14±0.03	685±16	756±7.4	40.6±0.3
8/6	25.3±0.3	63.0±2.4	0.11±0.03	613±17	742±5.5	41.5±1.2
8/7	25.2±0.5	62.8±2.7	0.09±0.04	623±14	754±13	38.9±0.8
8/8	25.4±0.5	65.9±3.5	0.12±0.03	618±22	751±6.9	40.3±0.5
8/12	25.2±0.3	66.9±1.7	0.12±0.03	623±40	760±13	40.4±1.0
8/13	25.2±0.3	66.3±1.9	0.11±0.03	686±28	762±9.1	39.5±0.8
8/14	25.2±0.3	65.4±1.8	0.08±0.04	658±19	764±8.4	39.9±1.0
8/15	25.3±0.3	64.2±1.8	0.12±0.03	613±35	755±8.9	38.7±0.5

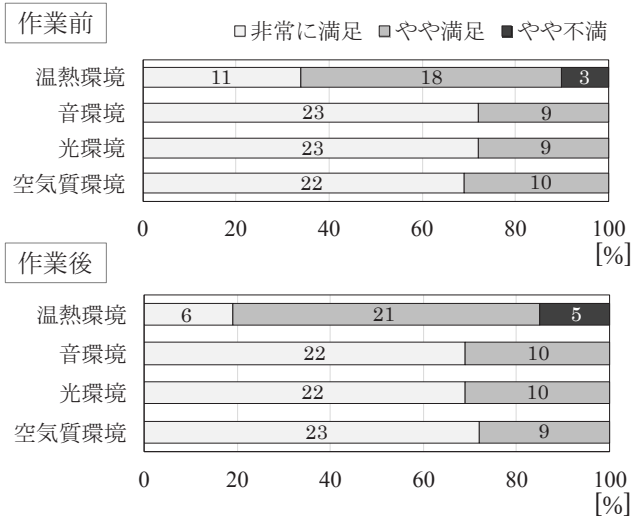


図 9 作業前後の室内環境満足度 (n=32)

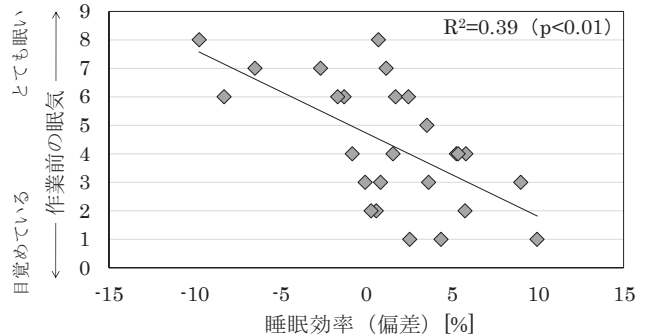


図 10 睡眠効率と作業前の眠気の関係 (n=26)

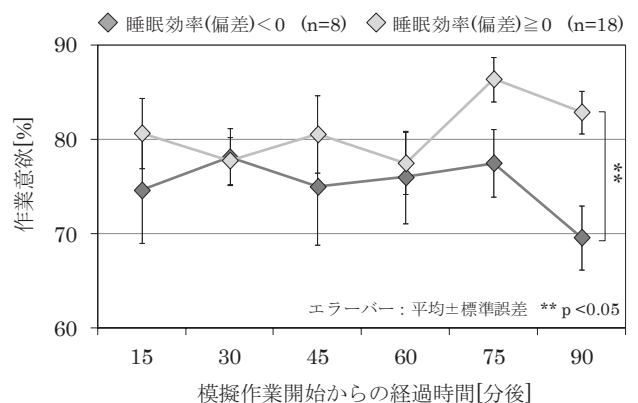


図 11 睡眠効率と作業意欲の関係 (n=26)

図 12 に示す。睡眠効率が低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 ($R^2=0.26$, $p<0.01$)。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 13)。その結果、睡眠効率が低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 ($R^2=0.67$, $p<0.01$)。単純作業・知識創造作業ともに睡眠の質の向上が好影響を与える可能性が明らかとなった。

6. 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

6.1 睡眠効率の変化による経済的な影響

5.3 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、賃金の減少に繋がると推察される。睡眠効率の変化による経済的影響を (1) 式より算出した。

睡眠効率の変化による経済的影響[円/人/日]

$$= \text{賃金}[\text{円}/\text{人}/\text{日}] \times \text{睡眠効率 (偏差)} [\%] \\ \times \text{睡眠効率 1\%の低下に伴う作業効率の変化率} [\%] \cdots (1)$$

賃金は、労働経済白書⁵⁶⁾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、労働基準法で定められた 1 日当たりの法定基準時間である 8 時間分の賃金を算出し、採用した。また、作業効率の低下率に関しては、オフィスで一般的に行われている作業⁵⁷⁾であるタイピングの結果を採用とし、図 13 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。

6.2 エネルギー消費量の変化による経済的な影響

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。

エネルギー消費量の変化による経済的影響[円/人/日]

$$= (-1) \times \text{エネルギー消費量}[\text{kWh}/\text{日}/\text{m}^2] \\ \times \text{夏季の家庭用エネルギー価格}[\text{円}/\text{kWh}] \\ \times \text{冷房面積}[\text{m}^2] \div \text{世帯人数}[\text{人}] \cdots (2)$$

エネルギー消費量に関しては、冷房費の増加を居住者にとっての負の経済的影響とするため、-1 を乗じた。また、家庭用エネルギー価格には公益社団法人 全国過程電気製品公正取引協議会が定める家庭用電力価格の 27 円/kWh⁵⁸⁾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 55.68m²を、世帯人数には各日程の被験者数 4 名を用いた。

6.3 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

図 6、図 8 に示した実験ケース別の睡眠効率およびエネルギー消費量を貨幣価値に換算した結果、さらに両者の影響を統合した結果を図 14 に示す。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。本実験におけるケース間比較において、最も経済的に価値の高い環境は Case. II であることが示唆された。

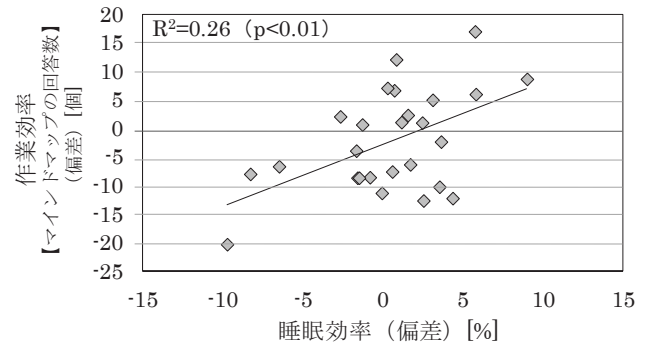


図 12 睡眠効率とマインドマップの回答数の関係 (n=26)

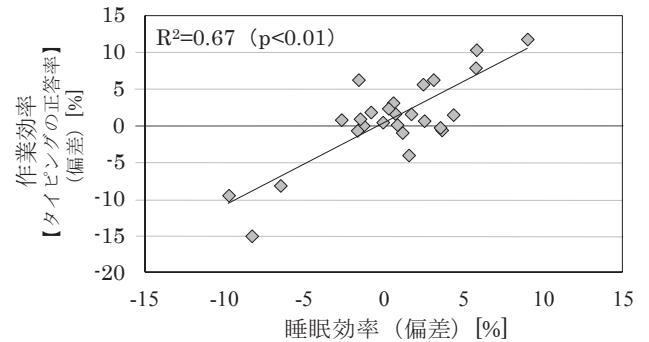


図 13 睡眠効率とタイピングの正答率の関係 (n=26)

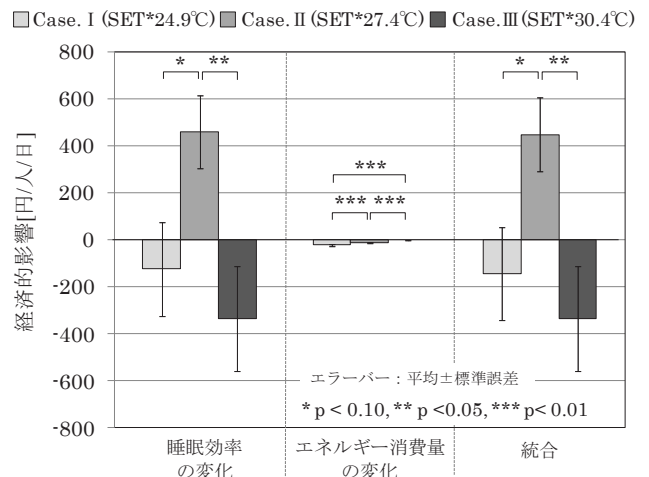


図 14 睡眠効率及びエネルギー消費量の変化による経済的影響 (実験ケース別 n=7)

7. まとめ

7.1 結論

本稿では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を行うことを目的として被験者実験を実施した。その結果、以下の 4 点の結論を得た。

- 1) 平均 SET*が 27.4°Cであった Case. II において、起床時の睡眠感が向上し、睡眠効率が最も高くなる傾向が示された。睡眠効率に関して、Case. II と Case. III (平均 SET*30.4°C) の比較では Case. III において睡眠効率の低下が確認され ($p<0.05$)、Case. I (平均 SET*24.9°C) についても同様に低下する傾向が見られた ($p<0.10$)。

2) 睡眠効率が低い日ほど作業前の眠気を感じている傾向が確認された。また、睡眠効率が低い日ほど、作業中の作業意欲が高く維持される傾向が示唆された。

3) 睡眠効率が低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された。睡眠効率が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。

4) 夏季の温熱環境制御が睡眠と省エネへ与える経済的影響を実験ケース別に比較した結果、Case IIにおいて有意に経済的価値が高いことが示された。

7.2 今後の課題

本報では睡眠の質向上がもたらす経済的影響が省エネによる経済的影響よりも非常に大きく、就寝中の平均SET*が27.4°CであったCase IIにおいて睡眠効率が最も高くなる傾向を示唆した。しかし、本研究における温熱環境と睡眠の関係や睡眠効率と作業効率の関係の分析は、大学生を対象とした実験によって得られたものである。今後、執務者を対象とした睡眠の質と作業効率の調査、温熱環境制御と睡眠の質の調査や温度感受性に鈍化がみられる老人を対象とした調査を実施することで、幅広い年代に適応した汎用性のある結果が得られることを期待する。執務者や老人を対象とした場合には、生活習慣の蓄積や職種や健康状態等、温熱環境以外に睡眠に影響を与える要因が数多く存在するため、より綿密な実験の計画及びサンプル数を確保した上での個人属性別の分析が必要と考えられる。

また、本分析において、睡眠の質低下が与える影響を翌日の作業効率の低下に限定している。しかし、土井⁵⁹⁾らは睡眠の質低下が様々な身体疾患や精神疾患と関連していることを示している。これより、睡眠の質向上がもたらす経済的影響はさらに大きいことが推察され、健康症状への影響をも考慮すべきであると考えられる。

さらに、睡眠の質向上の重要性が示唆されたことから、快適な睡眠環境構築のため、より詳細な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、今後は冷房の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と言える。

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経済性評価に関する調査研究（研究代表者：伊香賀俊治）」及び「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（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）を受け実施したものである。

参考文献

- 1) 厚生労働省健康局：健康づくりのための睡眠指針 2014, p.4-11, 2014.3 [WEB サイト] <http://www.mhlw.go.jp/file/04-Houdouhappyou-10904750-Kenkoukyoku-Gantaisakukenkoukouzoushinka/0000042751.pdf> (2015.6.10 参照)
- 2) 三島和夫：睡眠と生活習慣病, 公衆衛生, Vol. 75, No.10, pp.755-759, 2011.10
- 3) 厚生労働省：平成 25 年 国民健康・栄養調査結果の概要, 第 2 章 身体状況、運動及び睡眠に関する状況, p.14, 2013.11 [WEB サイト] <http://www.mhlw.go.jp/file/04-Houdouhappyou-10904750-Kenkoukyoku-Gantaisakukenkoukouzoushinka/0000068070.pdf> (2015.6.10 参照)
- 4) 日本睡眠学会：睡眠学, 朝倉書店, pp.140-143, 2009.1
- 5) K. Tsuzuki, K Okamoto-Mizuno, K Mizuno : Effects of humid heat exposure on sleep, thermoregulation, melatonin, and microclimate, Journal of Thermal Biology, Vol. 29, No. 1, pp.31-36, 2004.1
- 6) 都築和代：温熱環境と睡眠, 日本生気象学会雑誌, Vol. 50, No.4 , pp.125-134, 2014.1
- 7) 垣鏑直：住宅における夏のエアコン利用に関する実態調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-II, pp.247-248, 2001.7
- 8) 垣鏑直, 川島庸, 伊師真理子：夏期における睡眠時の最適な冷房条件, 人間-生活環境系シンポジウム報告集, Vol. 30, pp.229-232, 2006.12
- 9) 垣鏑直：夏期における睡眠時の好みの冷房条件, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-II, pp.409-410, 2007.7
- 10) 久保博子, 梁瀬度子, 鈴木有以子 ほか 2 名：夏期と冬期における高齢者の睡眠と寝室・寝床環境に関するアンケート調査, 人間-生活環境系シンポジウム報告集, Vol. 26, pp.105-108, 2002.12
- 11) 川島庸, 垣鏑直：夏期の睡眠時における最適な冷房条件に関する実験的研究, 人間と生活環境, Vol. 11, No. 1, pp.31-37, 2004.5
- 12) 都築和代, 森郁恵：高齢者の睡眠に及ぼす冷房方法の影響に関する研究, 人間-生活環境系シンポジウム報告集, Vol. 38, pp.45-46, 2014.11
- 13) 糸井川高徳, 羽山広文, 絵内正道 ほか 1 名：病室における睡眠時の対流式冷房に関する実験的研究, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 78, No. 631, pp.1133-1138, 2008.9
- 14) 井上雄二, 安井圭子, 森田健：冷房時の気流制御が睡眠の質に与える影響, 人間-生活環境系シンポジウム報告集, Vol. 30, pp.77-80, 2006.12
- 15) 森戸直美, 西宮肇, 都築和代：冷房の気流が睡眠と皮膚温に及ぼす影響 - 被験者実験による冷房方法の比較 -, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 161, 2010.8
- 16) 経済産業省資源エネルギー庁：平成 25 年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書 2014）, 第 2 部 エネルギー動向, pp.140-149, 2014.6 [WEB サイト] http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2014pdf/whitepaper2014pdf_2_1.pdf (2015.6.10 参照)
- 17) 環境省：家庭における節電・CO₂削減行動に関する調査（夏期調査）の結果について, 2013.5 [WEB サイト] <http://www.env.go.jp/press/files/jp/22132.pdf> (2015.6.10 参照)
- 18) 玄地裕, 井原智彦, 宮沢和貴 ほか 2 名：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集, D-I, pp.1003-1004, 2009.7
- 19) 井原智彦, 日下博幸, 原政之 ほか 2 名：問題比較型影響評価手法を用いた都市気温上昇に伴う軽度の健康影響推定, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 76, No. 662, pp.459-467, 2011.4
- 20) D.P.Wyon: The effects of indoor air quality on performance and productivity, Indoor Air 2004, 14(Suppl 7), pp.92-101, 2004.2
- 21) Olli Seppanen, PE William J. Fisk, PE David Faulkner.: Control of Temperature for Health and Productivity in Offices, ASHRAE Transactions, 2005.8
- 22) 羽田正沖, 西原直枝, 田辺新一：知的生産性によるオフィスの温熱環境の経済的影響評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-II, pp.455-458, 2006.7
- 23) 多和田友美, 伊香賀俊治, 村上周三 ほか 2 名：オフィスの温熱環境が作業効率及び電力消費量に与える総合的な影響, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 75, No. 648, pp.213-219, 2010.2
- 24) 川口玄, 和田一樹, 粕谷敦 ほか 5 名：タスク・アンビエント対応膜放射冷房システムに関する研究, その 5 - 知的生産性評価およびエコ効率分析に基づく経済性・環境性評価 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-II, pp.1085-1086, 2010.7

- 25) V. Godet-Cayre, N. Pelletier-Fleury, M. Le Vaillant et al. : *Insomnia and Absenteeism at Work. Who Pays the Cost?*, SLEEP, Vol. 29, No. 2, pp.179-184, 2006.2
- 26) R. Rosekind, K. Gregory, M. Mallis et al. : *The Cost of Poor Sleep: Workplace Productivity Loss and Associated Costs*, JOURNAL OF OCCUPATIONAL AND ENVIRONMENTAL MEDICINE, Vol. 52, No. 1, pp.91-98, 2010.1
- 27) 内山真: 睡眠障害の社会生活に及ぼす影響と経済損失, 日本精神科病院協会雑誌, Vol.31, No. 11, pp.1163-1169, 2012.11
- 28) 厚生労働省: 平成 26 年度版労働経済の分析, 第 1 章 労働経済の推移と特徴, p.35-41, 2014.9 [WEB サイト]
http://www.mhlw.go.jp/wp/hakusyo/roudou/14/dl/14-1-1_02.pdf (2015.10.26 参照)
- 29) AH. Goldsmith, JR. Veum, W. Darity : *Working hard for the money? Efficiency wages and worker effort*, JOURNAL OF ECONOMIC PSYCHOLOGY, Vol. 21, No. 4, pp.351-385, 2000.10
- 30) 金子隆昌, 村上周三, 伊藤一秀 ほか 1 名: 現地実測による温熱・空気環境の質が学習効率に及ぼす影響の検討—学習環境におけるプロダクティビティ向上に関する研究, その 1—, 日本建築学会環境系論文集, No. 606, pp.43-50, 2006.8
- 31) 金子隆昌, 村上周三, 伊藤一秀 ほか 3 名: 実験室実験による温熱・空気環境の質が学習効率に及ぼす影響の検討—学習環境におけるプロダクティビティ向上に関する研究, その 2—, 日本建築学会環境系論文集, No. 611, pp.45-52, 2007.1
- 32) 亀田健一, 村上周三, 伊藤一秀: 室内環境質が学習意欲ならびに学習効率に与える影響—学習環境におけるプロダクティビティ向上に関する研究, その 3—, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 74, No. 642, pp.943-949, 2009.8
- 33) 羽田正冲, 西原直枝, 田辺新一: 温熱環境と換気量が知的生産性に与える影響に関する被験者実験, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 74, No. 638, pp.507-515, 2009.4
- 34) 羽田正冲, 西原直枝, 川口玄 ほか 1 名: 夏季に室温を高めに設定したオフィスにおける知的生産性—採涼手法の導入による温熱満足度の向上と作業効率および疲労への影響—, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 74, No. 646, pp.1329-1337, 2009.12
- 35) 西川雅弥, 西原直枝, 田辺新一: 中程度の高温環境下の長時間作業が作業効率と疲労に与える影響に関する被験者実験, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 74, No. 638, pp.525-530, 2009.4
- 36) 高橋祐樹, 加藤信介, 小林敏孝 ほか 7 名: 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, Vol. 76, No. 662, pp.335-343, 2011.4
- 37) 高橋祐樹, 加藤信介, 小林敏孝 ほか 7 名: 環境変化に敏感な性格傾向を持つ執務者の日中の活動・夜間の睡眠についての検討—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— その 2—, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 79, No. 695, pp.11-17, 2014.1
- 38) 日本肥満学会: 肥満研究 肥満症診断基準 2011, 日本肥満学会誌, Vol. 17, 2011.10
- 39) 近藤英明, 神林崇, 清水徹男: 睡眠と飲酒 (特集 睡眠と生活習慣病), 成人病と生活習慣病, Vol. 40, No. 4, pp.386-389, 2010.4
- 40) DIMSDRIVE: 『エアコン』に関するアンケート [WEB サイト]
<http://www.dims.ne.jp/timelyresearch/2007/070522/> (2015.6.10 参照)
- 41) 経済産業省資源エネルギー庁: 家庭の省エネ徹底ガイド, p.6, 2013.3 [WEB サイト] http://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/pdf/katei_tettei.pdf (2015.6.10 参照)
- 42) 日本睡眠学会: 初心者のための睡眠の基礎と臨床, p.1-8, 1999.6 [WEB サイト] <http://jssr.jp/kiso/syoshin/syoshin.pdf> (2015.6.10 参照)
- 43) 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, 1973.1
- 44) 山本由華史, 田中秀樹, 高瀬美紀 ほか 3 名: 中高年・高齢者を対象とした OSA 睡眠調査票 (MA 版) の開発と標準化, 脳と精神の医学 10, p.401-409, 1999.12
- 45) 久保博子: 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
- 46) 健康維持増進住宅研究委員会: 健康に暮らすための住まいと住まい方エビデンス集, 技報堂出版, 2013.6
- 47) 大林賢史, 佐伯圭吾, 刀根庸浩: 日常生活における夜間光曝露量と睡眠障害の関連, 住環境に関する大規模疫学調査 (平城京スタディ), 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.397-398, 2014.9
- 48) 深井一夫, 伊藤宏, 後藤滋 ほか 2 名: 標準新有効温度 (SET*) と日本人の温熱感覚に関する実験的研究 第 2 報-冬期および夏季における温熱感覚の比較, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集 Vol.51, pp.139-147, 1993.2
- 49) 深井一夫: 標準新有効温度 (SET*) における放射, 湿度, 気流, 着衣の影響の温度換算, 日本建築学会計画系論文集, 第 465 号, pp.19-26, 1994.11
- 50) 中村泰人, 横山真太郎, 都築和代 ほか 4 名: 日常生活で生じる気候適応を把握するための居住環境温度の多地域同時計測法, 人間と生活環境, Vol.15, No.1, pp.5-14, 2008.5
- 51) 宮本征一: オフィス空間におけるスーツ着用時の温熱的快適域に関する研究 その 2 夏季の中程度高温環境下における温冷感に男女の差異について, 日本建築学会環境系論文集, 第 73 巻, 第 628 号, pp.715-720, 2008.6
- 52) 安岡絢子, 久保博子, 磯田憲生 ほか 1 名: 住空間における生理心理反応からみた温熱的快適範囲の季節差に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 76 巻, 第 663 号, pp.479-484, 2011.5
- 53) 空気調和・衛生工学会: 快適な温熱環境のメカニズム, p.113-119, 2006.6
- 54) 羽原宏美, 三浦尚志, 細井昭憲 ほか 2 名: 夏期および中間期における通風冷房行為の再現による RC 集合住宅の室内温熱環境および冷房消費電力量に関する研究 住宅のための省エネルギー手法の実験的研究に関する研究 その 2, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 73, No. 633, pp.1321-1329, 2008.11
- 55) 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, 1997.12
- 56) 厚生労働省: 平成 26 年度版労働経済の分析, 第 1 章 労働経済の推移と特徴, p.27-36, 2014.9 [WEB サイト]
<http://www.mhlw.go.jp/wp/hakusyo/roudou/14/dl/14-1-1.pdf> (2015.6.10 参照)
- 57) 日経 BP 社: 1 日のうち、仕事でパソコンに接する時間, 2007.7 [WEB サイト] <http://pc.nikkeibp.co.jp/article/NPC/20070706/276946/> (2015.7.9 参照)
- 58) 公益社団法人 全国過程電気製品公正取引協議会: 「電力料金の目安単価」の改訂に関する件, 2014.4 [WEB サイト]
http://www.eftc.or.jp/qa/qa_pdf.pdf (2015.6.10 参照)
- 59) 土井由利子: 日本における睡眠障害の頻度と健康影響, 保健医療科学, Vol. 61, No. 1, pp.3-10, 2012.2
- 60) 東京ガス都市生活研究所 都市生活レポート: 現代人の睡眠事情 2015 ~寝室の現状と睡眠実態~, p.14, 2015.9 [WEB サイト]
<http://www.toshiken.com/report/life27.html> (2016.2.17 参照)
- 61) 三品昌美: 分子脳科学 分子から脳機能と心に迫る, 化学同人, 2015.4

注

- 注 1) 省エネ・創エネ・蓄エネ設備を導入した住宅。
- 注 2) BMI は Body Mass Index の略称であり、 $[BMI = \text{体重}[\text{kg}] \div (\text{身長}[\text{m}])^2]$ により算出される。18.5 未満が「低体重」、18.5 以上 25.0 未満が「標準」、25.0 以上が「肥満」に分類される
- 注 3) 規則正しい生活を送る被験者を選定するため、夜勤を行っていない点に関しても選定条件とした。
- 注 4) 被験者は実験開始直前の 1~2 週間の間、自宅にて睡眠状態の測定を行った。これにより、普段の睡眠状態の把握を行った。被験者毎の自宅における平均総就床時間を図 15 に示す。総就床時間の平均が 6 時間未満の被験者が 4 名、6 時間以上の被験者が 4 名であった。個人毎の標準偏差は 1 時間程と、極端な総就床時間の変動は確認されなかった。

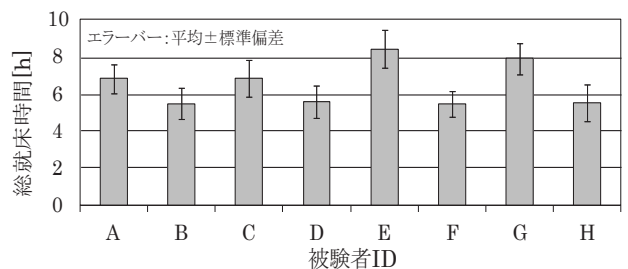


図 15 普段の総就床時間の平均値 (被験者別)

注 5) 現代人の寝具に関して東京ガス都市生活研究所が実施した調査⁶⁰⁾において10~20代の男性の37.0%が布団を使用していることが示されている。本実験の被験者に関しても2013年実験の被験者は3名が布団、5名がベッドを使用しており、2014年実験の被験者は4名が布団、4名がベッドを使用していたことから、実験時の寝具条件が若者の実生活から大きく乖離していないことを確認した。また、自宅と異なる寝具を用いることによる睡眠への影響を極力小さくするため、自宅で使用している枕を使用した。

注 6) 普段の総就床時間と異なる条件とすることで、睡眠効率に影響を与える可能性があるため、自宅と実験を行った睡眠空間での睡眠効率を被験者毎に比較した(図16)。その結果、普段の生活との総就床時間の差が大きい被験者であっても、両者に有意な差は認められなかった。

()内は有効サンプル数 【 】内は自宅での総就床時間の平均値

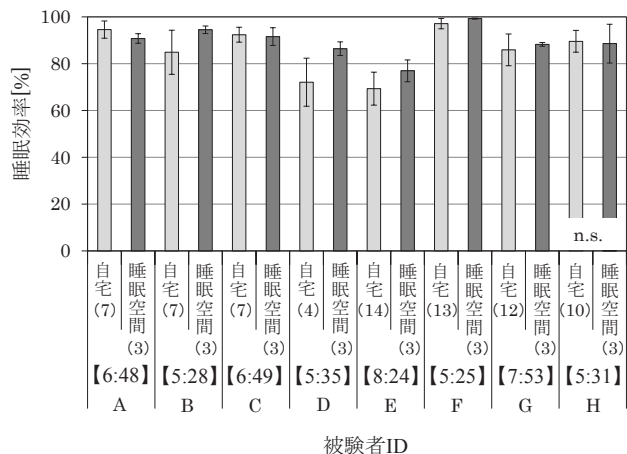


図 16 自宅および睡眠空間の睡眠効率 (平均値±標準偏差)

注 7) 実験を実施した全日程における、自律神経の活性度割合を図17, 18に示す。自律神経の活性度割合とは交感神経(緊張状態を反映する指標)と副交感神経(リラックス状態を反映する指標)の活動の優劣を示す指標である。結果、全日程において、覚醒時に交感神経の活動が優位となり、睡眠時に副交感神経の活動が優位となる自律神経の適切な日内変動リズム⁶¹⁾が確認された。

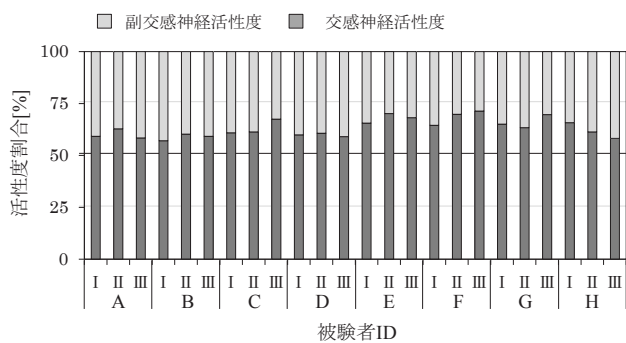


図 17 覚醒時の自律神経活性度割合 (被験者別)

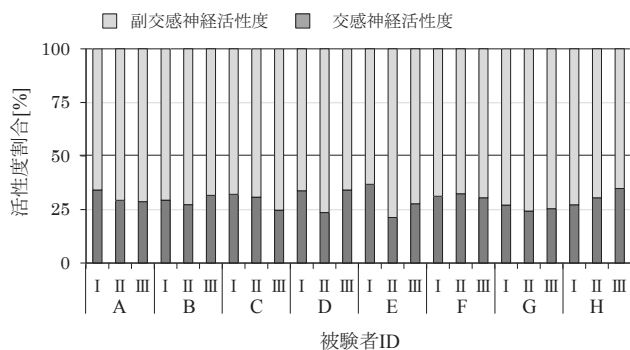


図 18 睡眠時の自律神経活性度割合 (被験者別)

注 8) 睡眠の質を評価する指標としては「睡眠効率」の他に、「入眠潜時(寝付くまでの時間)」や「中途覚醒時間」が挙げられる。そこで、翌日の作業効率と最も関連が強い指標を検証するため、相関分析を実施した(表10)。睡眠効率が最も翌日の作業効率との関連が強いことが示唆された。

表 10 睡眠評価指標と作業効率の相関分析

* p<0.10, ** p<0.05, *** p<0.01

	睡眠効率	入眠潜時	中途覚醒時間
タイピングの正答率	0.82***	-0.24	-0.53***
マインドマップの回答数	0.50**	0.12	-0.38*

注 9) 睡眠感を評価する心理尺度。

注 10) 普段の睡眠状態の把握を目的として実験前1~2週間に実施した自宅での睡眠状態の測定結果を用いて2013年実験と2014年実験の被験者の睡眠効率を比較した(図19)。その結果、2013年実験に参加した被験者の平均睡眠効率は86.7±10.1%、2014年実験の被験者は平均86.3±8.5%とほぼ同等であることが示された(p=0.91)。これより、同程度の睡眠状態の被験者を対象とした実験であることが確認された。

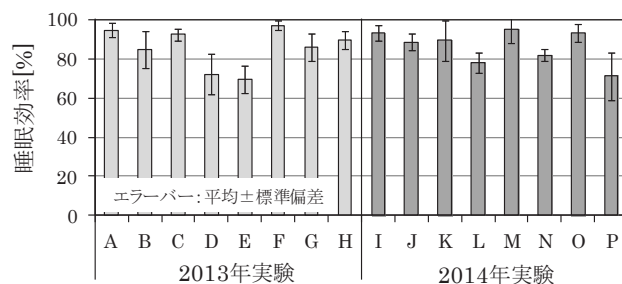


図 19 普段の睡眠効率の平均値 (被験者別)

注 11) 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 12) 本実験は1住戸内の複数の居室を睡眠空間とし、睡眠の測定を実施した。1階居室と寝室として使用される2階居室の差を極力小さくするため、光環境・音環境を統一するよう努めた。測定結果より、居室間の光環境及び音環境に有意な差が認められないことを確認した(表11)。

表 11 居室別の光環境・音環境

	居室1	居室2	居室3	
照度[lx]	就寝前	137±33	122±15	146±21
	起床後	220±56	241±79	258±34
騒音[dB]	就寝前	39.6±1.8	37.8±2.5	37.4±1.8
	起床後	39.4±1.8	36.8±2.8	38.4±2.8

注 13) 標準状態における着衣量(0.6clo)、代謝量(52W/m²)と睡眠状態における着衣量(1.3clo)、代謝量(40W/m²)を用いた場合の就寝中平均SET*を表12に示す。その結果、睡眠状態のSET*は睡眠時の代謝量が低いことが要因となり、日常生活で体感する温度とずれが生じることが確認された。これより、本研究では各ケースの室内温熱環境を標準状態のSET*を用いて示した。

表 12 就寝中平均SET* (平均値±標準偏差)

	Case. I	Case. II	Case. III
標準状態のSET*[°C]	24.9±0.9	27.4±1.4	30.4±1.4
睡眠状態のSET*[°C]	23.5±0.9	25.7±1.1	28.1±1.1

注 14) 枕元の高さ(0.1m)での測定結果の平均値。

注 15) 分析対象とする7名に関して、就寝前の疲労感をケース別に示す(図20)。疲労感は身体的、精神的、神経的の3つに分類され、各10項目の症状のうち、当てはまった症状の数を割合として示す。その結果、ケース間に有意な差は認められず、就寝前の疲労感が実験期間中、同等であることが示唆された。

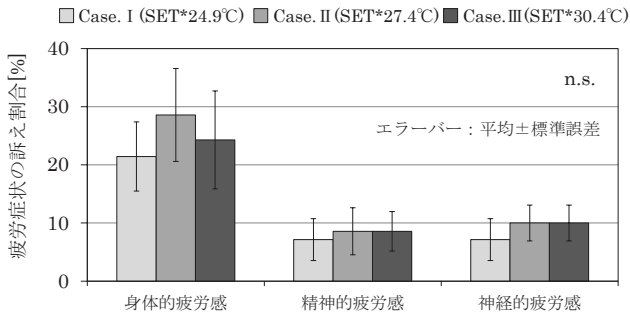


図 20 実験ケース別の就寝前の疲労感 (n=7)

注 16) 睡眠感は 5 つの睡眠因子に分類される。(因子 I:起床時眠気、因子 II:入眠と睡眠維持、因子 III:夢み、因子 IV:疲労回復、因子 V:睡眠時間)

注 17) 被験者毎の実験期間中の睡眠効率の平均値を図 21 に示す。最も平均睡眠効率が高い被験者 F と睡眠効率の低い被験者 E の間に 22% の差を確認し、個人差を極力除外する必要があると判断した。

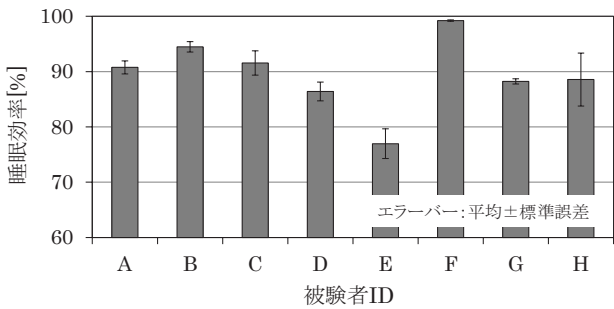


図 21 実験期間中の睡眠効率の平均値 (被験者別)

注 18) 実験ケース別の睡眠効率を図 22 に示す。個人差の影響が大きく、有意な差は認められないが、Case. II において睡眠効率が高い傾向が示された。

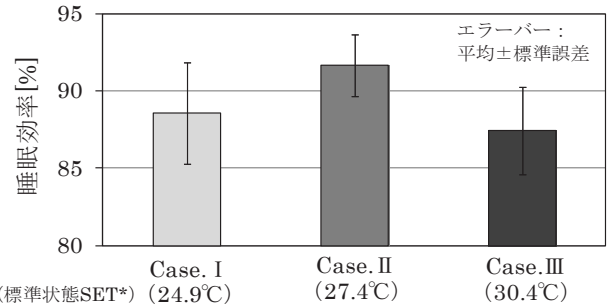


図 22 実験ケース別の睡眠効率の平均値 (n=7)

注 19) 睡眠効率とアンケート調査で得られた主観作業効率との関係を図 23 に示す。その結果、睡眠効率が高い日ほど主観的な作業効率が高い傾向が示された ($R^2=0.32$, $p<0.01$)。

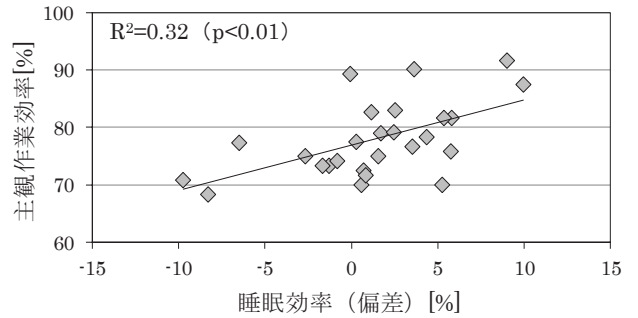


図 23 睡眠効率と主観作業効率の関係 (n=26)

ECONOMIC EVALUATION ON THE EFFECT OF THERMAL ENVIRONMENTAL CONTROL IN SUMMER ON SLEEP AND WORK EFFICIENCY

Eri HONDA *, *Toshiharu IKAGA* **, *Noboru OHIRA* ***,
Keiji OKAJIMA **** and *Wataru UMISHIO* *****

* Grad. Stud., Graduate School of Science and Technology, Keio Univ.

** Prof., Faculty of Science and Technology, Keio Univ., Dr.Eng.

*** Manager, Residential Sales Marketing Department, Tokyo Gas Co., Dr.Eng.

**** Manager, Residential Sales Marketing Department, Tokyo Gas Co.

***** Kajima Corporation, M.Eng.

(Grad. Stud., Graduate School of Science and Technology, Keio Univ.)

Decline in the quality of sleep increases the morbidity and risk of lifestyle diseases. In addition, daytime sleepiness causes traffic accidents and decreased work efficiency. According to a survey conducted by the Japanese Ministry of Health, Labour and Welfare, 20% of people experience sleep problems, and decline in sleep quality in particular is serious. One factor that has been linked to decline in sleep quality is high heat and humidity in summer.

Against this background, some studies have examined the effects of thermal environment control on sleep. Appropriate use of air conditioning has been shown to improve sleep quality; however, maintaining a good indoor thermal environment using air conditioning increases energy consumption. Given the present state of climate change, the reduction of energy consumption in the Japanese residential sector is a pressing issue. However, an excessive reduction in air conditioning use for the purpose of saving energy could create a poor sleep environment. The effects of thermal environment control using air conditioning on sleep quality and energy consumption have been independently investigated in several previous studies.

In this research, we elucidate the impact of thermal environment control on both sleep and energy consumption during the summer. The effect of thermal environment control on sleep and energy saving was unified as a monetary value. Increase in energy consumption can be estimated as an increase in air conditioning costs. Conversely, because reduced sleep efficiency translates to reduced working efficiency, improved sleep efficiency was converted into monetary value as a reduction in wages.

Eight healthy male university students participated in this study. The study was performed in a two-story maisonette room in an apartment building with high environmental performance. Experiments were conducted in August 2013 and 2014. In the 2013 experiments, we examined the effect of thermal environment control on sleep and energy consumption. Three thermal environmental control scenarios were used: an air conditioner set at continuous operation at 26.0 °C (Case I); an air conditioner set at continuous operation at 28.0 °C (Case II); and natural draft only (Case III). The increase in air conditioner temperature setting from 26.0 to 28.0 °C used in this study resulted in a 0.03 kWh/day/m² reduction in 8-h energy consumption (Fig. 6). Sleep efficiency was significantly higher for Case II (average SET* during sleep, 27.4 °C) (Fig. 8). Low SET* caused by excessive air conditioner use and high SET* caused by not using an air conditioner adversely affected sleep efficiency. The relationship between sleep efficiency and work efficiency was verified in the experiments conducted in August 2014, confirming that the economic impact of decreased sleep efficiency could be converted to a monetary value. Working efficiency decreased by 1.1% per 1% decrease in sleep efficiency ($p < 0.01$) (Fig. 13). The combined economic impact of energy saving and sleep quality was calculated. The economic impact of improved sleep quality was much greater than that of energy saving, and the economic value of Case II (average SET* during sleep, 27.4 °C) was the highest (Fig. 14).

This study found that sleep quality influences work efficiency, demonstrating the importance of improving sleep. To create a comfortable sleeping environment, further verification of thermal environment control in more detail is necessary.

(2015年8月7日原稿受理, 2016年2月19日採用決定)