

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月13日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02280

研究課題名(和文) 温熱環境の変動が睡眠の質に与える影響の解明

研究課題名(英文) Effects of thermal environment and variation on sleep quality

研究代表者

田邊 新一 (Tanabe, Shin-ichi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：30188362

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,100,000円

研究成果の概要(和文)：睡眠の質を向上させる寝室内環境の解明を目的として実際の住宅で睡眠状態に関する研究を行い、以下の知見を得た。全睡眠段階で空気温度が25～27の時に中途覚醒発生率Pr(w)が低くなり、特に26.6の時に最も低くなることが示された。また、動画撮影により睡眠時の着衣量、体動が測定可能となった。騒音および空気質の悪化が睡眠を妨げる可能性が示された。さらに、人体熱負荷の変動が大きいほどPr(w)が増加することが示された。また、個人の基礎代謝量を考慮することで、より統一的に睡眠時温熱環境評価ができる可能性が示唆された。人体熱負荷の累積値が0kJ/m<sup>2</sup>に近いほど深睡眠割合が増加することが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

睡眠の質を向上させる寝室内環境の解明を目的として、実際の住宅において睡眠状態に関する研究を行った。その結果、寝室内の温度が26.6の時に睡眠の質が最も高くなる可能性が示された。また、騒音および空気質の悪化が睡眠を妨げる可能性が示された。さらに、温熱環境を総合的に評価した指標であり、中立状態で睡眠の質が高いとされる人体熱負荷において、この変動が大きいほど、睡眠の質は悪くなることが示された。特に夏季において睡眠が阻害される要因を詳細に調査した。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate the environment in the bedroom that improves the quality of sleep, we conducted a research in actual houses. As a result, the following things were found out. From 25 to 27, the incidence of wake after sleep onset; "Pr(w)" decreased for all sleep stages. Especially, Pr(w) was the lowest at 26.6. In addition, the clothing amount and body movement during sleep became measurable by video recording. From this research, the possibility that the noise and the deterioration of the air quality lowers the quality of sleep, was shown. Furthermore, the stronger the fluctuation of human heat load was, the value of Pr(w) increased. The result also showed the possibility to evaluate the thermal environment during sleep more uniformly, by considering the individual's basal metabolism. Additionally, it was shown that the ratio of the deep sleep increases as the cumulative value of the human heat load is closer to 0 kJ/m<sup>2</sup>.

研究分野：建築環境工学

キーワード：睡眠 温熱環境 熱的快適性 変動 寝床内環境

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

昨今、ヒートアイランド現象に起因した外気温の上昇に伴って熱帯夜が増加し、睡眠障害者の割合は増加している。大阪府における夏季 1 日あたりの睡眠障害による被害額は 17.3 億円にのぼるとの試算もある。また、睡眠の質の低下は健康や日中の作業効率に影響を及ぼすことから、良質な睡眠を得ることは非常に重要である。睡眠の質を低下させる要因には様々なものがあり、温熱環境もその中のひとつである。夏季においては、関東圏及び関西圏の居住者の約 9 割がエアコン、扇風機のいずれかの環境適応手法を採用し、寝室の暑熱環境を緩和している。しかし、エアコン、扇風機によって睡眠の質が改善される一方で、環境適応手法によって発生する気流が睡眠に対して悪い影響を与えるという報告もある。以上より、質のよい睡眠を得るためには気流環境が睡眠に与える影響を把握し、適切な空調の運用法を検討する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、夏季および冬季における寝室内環境を詳細に評価した上で、寝室内温熱環境と睡眠の質の関係を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

表 1 に物理量および生理量の測定項目、表 2 に心理量の測定項目を示す。各対象者には、自宅寝室にて連続 5 日間、睡眠時温熱環境および睡眠時脳波を測定させた。また、就床時および起床時の心理量をアンケートにより調査した。

表 1 物理量および生理量の測定項目

	測定項目	測定機器	測定 間隔	測定精度
物理量	空気温度	Wireless Thermo Recorder TR-72wf	30s	±0.3(°C)
	相対湿度			±5(%RH)
	グローブ温度	簡易グローブ球		±0.3(°C)
	CO <sub>2</sub> 濃度	Wireless Thermo Recorder RTR-576		±50(ppm)
	照度	小型CO <sub>2</sub> 濃度計 RTR-576		±5(%)
	気流速度	小型照度計 TR-74Uj		±0.015(m/s)
生理量	EEG/EOG/EMG/ECG	無指向型風速計CLIMOMASTER	10s	-
	脳波計	小型デジタル騒音計 NL-42	30s	-
	寝姿勢・寝具掛け方	脳波計 ポリメイト	1s	-

表 2 心理量の測定項目

測定項目	申告時			尺度
	就床時・起床時	就床時	起床時	
全身温冷感、乾湿感、温熱環境満足度			睡眠満足度	7段階
熱的快不快感、気流感、気流快不快感、騒音感、汗かき感	不安感	疲労感、日中の眠気、ストレス		5段階
適温感				4段階
				3段階

式(1)および式(2)に熱伝導を考慮した睡眠時人体熱負荷算出式、式(3)に放射温度の算出式を示す。本研究では睡眠時の寝室内の温熱環境を評価する際に、Linらの睡眠時人体熱負荷評価法に基づいて秋山らが提案した人体熱負荷算出式を用いた。不感蒸泄を除いた発汗による潜熱損失量を 0 W/m<sup>2</sup> (皮膚ぬれ率を 0.06 と仮定)、運動による熱発生量を 0 W/m<sup>2</sup> と仮定して算出を行った。空気温度、相対湿度、気流速度および放射温度は 30 秒間隔で測定された実測値を用い、着衣量はビデオデータを参考に 30 秒間隔で推定値を求めた。q<sub>tax</sub> においては、サーマルマネキンの実験結果から推定された、身体から寝具に伝導した熱流量を表す。

$$L = M - \left\{ \frac{1}{0.155I_{cl}} \left[ \left( t_{sk} - \frac{h_r t_r + h_c t_a}{h_r + h_c} \right) + w_i m^L (p_{sk,s} - p_a) \right] + 0.056(34 - t_a) + 0.692(5.87 - p_a) \right\} - q_{tax} \quad (1)$$

$$q_{tax} = \frac{(35 - t_{ax})}{13} \times (56.088 \times T_x^{-0.283} - 23.5) \times 0.233 \quad (2)$$

$$t_r = t_g + 2.37\sqrt{v}(t_g - t_a) \quad (3)$$

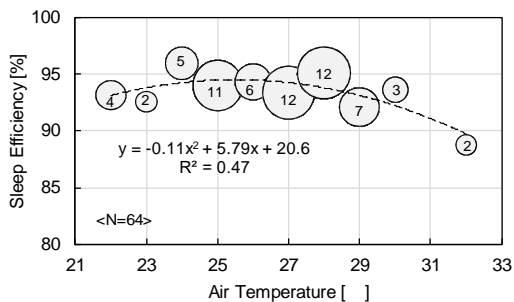
$h_c$	:対流熱伝達率	[W/(m <sup>2</sup> · K)]
$h_r$	:放射熱伝達率	[W/(m <sup>2</sup> · K)]
$I_t$	:皮膚表面から環境までの熱抵抗	[clo]
$I_m$	:着衣透湿係数	[-]
$L$	:人体熱負荷	[W/m <sup>2</sup> ]
$L_R$	:ルイス比	[K/kPa]
$M$	:代謝熱産生量	[W/m <sup>2</sup> ]
$p_a$	:空気中の水蒸気圧	[kPa]
$p_{sk,s}$	:皮膚温における飽和水蒸気圧	[kPa]
$t_a$	:空気温度	[°C]
$t_r$	:平均放射温度	[°C]
$t_g$	:グローブ温度	[°C]
$v$	:気流速度	[m/s]
$t_{sk}$	:平均皮膚温 (= 34.6)	[°C]
$w$	:皮膚ぬれ率 (= 0.06)	[-]
$q_{tax}$	:熱伝導による熱流量	[W/m <sup>2</sup> ]
$t_{ax}$	:環境温度	[°C]
$T_x$	:寝返り後経過時間	[min]

4. 研究成果

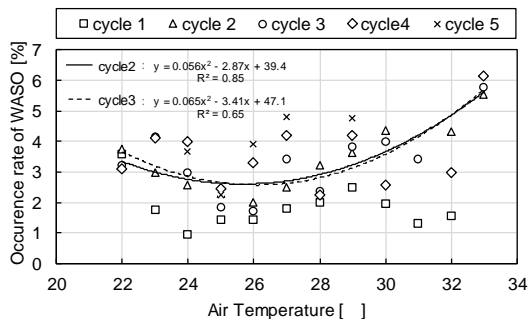
研究成果の概要は、以下の通りである。

空気温度が 24 ~ 28°C の場合に睡眠効率が高く、中立な温度域から離れるに伴い睡眠効率が低下する傾向がみられた。睡眠段階の割合は睡眠の前半に深睡眠、後半に浅睡眠が大きくなった。睡眠段階ごとに中途覚醒発生率は異なり、浅睡眠の際に温熱環境の影響を受けやすいことが示された。睡眠後半では、睡眠前半と比較して、すべての睡眠段階において中途覚醒発生率が高くなった。熱的に中立な温度域において睡眠効率は高く、中途覚醒発生率は低くなり、睡眠の質が向上される可能性が示された。これらの傾向は既往研究による 26°C 近傍で睡眠の質が良くなるという夏季の実験結果と同様の傾向を示しており、実際の睡眠環境においても同様の結果が得られることが確認された。また、睡眠周期ごとに空気温度と中途覚醒発生率の関係を分析した結果、cycle 2 及び cycle 3 における関係が強くみられた。双方の睡眠周期の回帰曲線はほぼ一致し

ており、熱的に中立と考えられる 26°C 近傍での中途覚醒発生率が低くなった。入眠直後の周期では深睡眠の割合が大きいため、空気温度の影響をあまり受けないと考えられる。一方、睡眠後半の周期では REM や浅睡眠の割合が大きく、空気温度以外の影響も受けて中途覚醒が発生していることが考えられる。睡眠周期によって、空気温度が睡眠に及ぼす影響度は異なる可能性が示された。

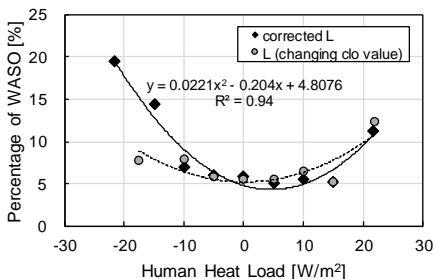


空気温度と睡眠効率の関係

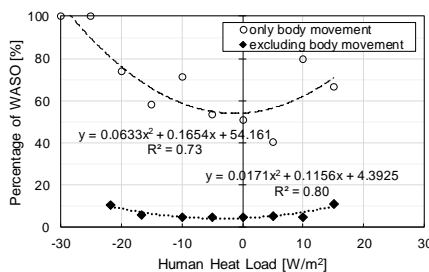


睡眠周期ごとの空気温度と中途覚醒発生率の関係

睡眠中の継時的な着衣量変化及び寝返りによって生じる熱伝導を考慮して温熱環境評価を行った結果、一晚を通して環境が一定であることを仮定した場合と比較して人体熱負荷と中途覚醒の割合の関係が強くなった。睡眠中の継時的な睡眠環境変化を定量的に評価することで、温熱環境の評価精度が向上することが確認された。また、人体熱負荷の値が熱的中立から離れた場合に、中途覚醒の割合が有意に大きくなることが示された。睡眠時における熱的受容域の幅は覚醒時と比較して広がっており、睡眠時にはやや暖かい環境を許容する可能性が示された。

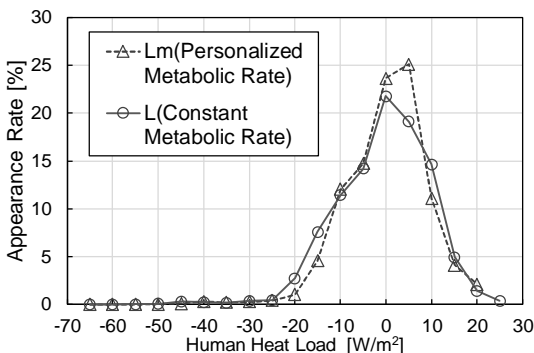


熱伝導の影響を考慮した人体熱負荷と中途覚醒の割合の関係

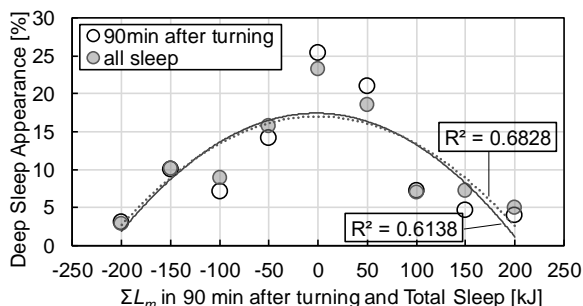


寝返りの影響を考慮した人体熱負荷と中途覚醒の割合の関係

睡眠時の寝室内温熱環境評価には、秋山らによる熱伝導を考慮した睡眠時人体熱負荷算出式を用いた。人体熱負荷の算出において、睡眠時の代謝量を個人によらず 0.7 met 一律と仮定した場合と比較し、対象者個人の代謝量の測定値を用いて算出した場合に熱的中立環境付近の睡眠出現時間が増加した。睡眠時においては対象者が基礎代謝量に対して熱的中立となるよう環境を調節する可能性が示された。また、入眠直後を初期値とし、30 秒ごとの放熱量または吸熱量を加算した  $\Sigma L_m$  を算出した。入眠後 90 分間および睡眠全体のいずれにおいても、 $\Sigma L_m$  が 0 kJ、すなわち正值の  $\Sigma L_m$  と負値の  $\Sigma L_m$  が同程度である状態において深睡眠出現率が高かった。



睡眠時人体熱負荷の分布



寝返り後 90 分間および睡眠全体における  $L_m$  と深睡眠出現率の関係

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計3件)

- 1) 秋山雄一・井上莉沙・竹内悠香・尾方壮行・都築和代・田辺新一：睡眠時における体動の影響を考慮した温熱環境評価、日本建築学会環境系論文集, Vol.83, No.752, 2018.10, pp.831-838 (査読あり)
- 2) 秋山 雄一・三宅 絵美香・松崎 里穂・尾方 壮行・都築 和代・田辺 新一：人体熱負荷とその変動が睡眠に及ぼす影響、日本建築学会環境系論文集, Vol.83, No.745, 2018, pp.277-284 (査読あり)
- 3) 海野 賢・田辺 新一・三宅 絵美香：人体熱負荷とその変動が睡眠に及ぼす影響、日本建築学会環境系論文集, Vol.80, No.716, 2015, pp.917-923 (査読あり)

### 〔学会発表〕(計26件)

- 1) Yuka TAKEUCHI・Yuichi AKIYAMA・Risa INOUE・Masayuki OGATA・Riho MATSUZAKI・Junichi ASAKA・Mika SAITO・Kazuyo TSUZUKI・Shin-ichi TANABE、Effect of Sleep Quality Based on Sleep Stage on the Next-day Performance in the Morning and Afternoon、IndoorAir、USA、2018
- 2) Risa INOUE・Yuka TAKEUCHI・Yuichi AKIYAMA・Mika SAITO・Junichi ASAKA・Riho MATSUZAKI・Masayuki OGATA・Kazuyo TSUZUKI・Shin-ichi TANABE、Effects of the Thermal Environment in Bedrooms on Sleep Considering the Change in Clothing Insulation、IndoorAir、USA、2018
- 3) 尾方壮行・井上莉沙・竹内悠香・秋山雄一・都築和代・田辺新一、寝室環境が睡眠の質に与える影響 第3報：各環境調節手法により形成される自宅寝室環境における睡眠の質、空気調和・衛生工学会、名古屋、2018年
- 4) 井上莉沙・竹内悠香・秋山雄一・尾方壮行・都築和代・田辺新一、寝室環境が睡眠の質に与える影響 第4報：空気質を考慮した寝室環境が睡眠に及ぼす影響、空気調和・衛生工学会、名古屋、2018年
- 5) 竹内悠香・井上莉沙・秋山雄一・尾方壮行・田辺新一・都築和代、寝室における温熱環境が睡眠に及ぼす影響 その12：自宅寝室における脳波計を用いた睡眠実測調査、日本建築学会、宮城、2018年
- 6) 井上莉沙・竹内悠香・秋山雄一・尾方壮行・田辺新一・都築和代、寝室における温熱環境が睡眠に及ぼす影響 その13：寝室内空気質が睡眠に及ぼす影響、日本建築学会、宮城、2018年
- 7) 秋山雄一・尾方壮行・井上莉沙・竹内悠香・田辺新一・都築和代、寝室における温熱環境が睡眠に及ぼす影響 その14 体動の影響を考慮した睡眠時の温熱環境評価法、日本建築学会、宮城、2018年
- 8) 尾方壮行・秋山雄一・井上莉沙・竹内悠香・田辺新一・都築和代、寝室における温熱環境が睡眠に及ぼす影響 その15 温熱環境が中年と青年の睡眠に及ぼす影響、日本建築学会、宮城、2018年
- 9) Shin-ichi Tanabe、Effect of thermal environment on sleep quality in summer considering sleep stages、International Symposium on Healthy and Sleep Stimulating Bed Micro-Environment、Japan、2017
- 10) Yuichi Akiyama・Riho Matsuzaki・Akihiro Takimoto・Emika Miyake・Masayuki Ogata・Kazuyo Tuzuki・Shin-ichi Tanabe、Effect of Thermal Environment on Sleep in the Bedroom Considering Sleep Stages Using Polysomnography、Healthy Buildings、EUROPE、2017
- 11) 竹内悠香・井上莉沙・秋山雄一・尾方壮行・田辺新一・都築和代、午前と午後の知的生産性に影響を及ぼす睡眠段階を考慮した睡眠の質に関する研究、空気調和・衛生工学会、高知、2017年
- 12) 秋山雄一・井上莉沙・竹内悠香・尾方壮行・田辺新一・都築和代、寝室環境が睡眠の質に与える影響第1報：寝姿勢及び寝具を考慮した着衣熱抵抗の測定と予測、空気調和・衛生工学会、高知、2017年
- 13) 井上莉沙・秋山雄一・竹内悠香・尾方壮行・田辺新一・都築和代、寝室環境が睡眠の質に与える影響第2報：着衣量変化を考慮した温熱環境が睡眠の質に及ぼす影響、空気調和・衛生工学会、高知、2017年
- 14) 秋山雄一・井上莉沙・竹内悠香・松崎里穂・尾方壮行・浅賀潤一・斎藤実佳・田辺新一・都築和代、寝室における温熱環境が睡眠に及ぼす影響その9：自宅寝室における脳波測定による睡眠実測調査、日本建築学会、広島、2017年
- 15) 井上莉沙・秋山雄一・竹内悠香・松崎里穂・尾方壮行・浅賀潤一・斎藤実佳・田辺新一・都築和代、寝室における温熱環境が睡眠に及ぼす影響その10：睡眠時における体動が着衣量変化に及ぼす影響、日本建築学会、広島、2017年
- 16) 竹内悠香・井上莉沙・秋山雄一・松崎里穂・尾方壮行・浅賀潤一・斎藤実佳・田辺新一・都築和代、寝室における温熱環境が睡眠に及ぼす影響その11：睡眠段階を考慮した睡眠の質が午前と午後の知的生産性に及ぼす影響、日本建築学会、広島、2017年
- 17) 秋山雄一・松崎里穂・瀧本晃裕・都築和代・田辺新一、睡眠段階を考慮した夏季の適切な寝

- 室内温熱環境に関する研究、空気調和・衛生工学会、鹿児島、2016年9月
- 18) 瀧本晃裕・三宅絵美香・松崎里穂・秋山雄一・池田直樹・田川萌子・田辺新一・都築和代、  
寝室における温熱環境が睡眠に及ぼす影響その5：自宅寝室における脳波計を用いた実測調査の概要と睡眠環境の実態、日本建築学会、福岡、2016年8月
  - 19) 秋山雄一・三宅絵美香・松崎里穂・瀧本晃裕・池田直樹・田川萌子・田辺新一・都築和代、  
寝室における温熱環境が睡眠に及ぼす影響その6：睡眠段階ごとに温熱環境が睡眠の質に及ぼす影響、日本建築学会、福岡、2016年8月
  - 20) 三宅絵美香・秋山雄一・松崎里穂・瀧本晃裕・池田直樹・田川萌子・田辺新一・都築和代、  
寝室における温熱環境が睡眠に及ぼす影響その7：夏季における適切な寝室内温熱環境指標の提案、日本建築学会、福岡、2016年8月
  - 21) 松崎里穂・三宅絵美香・秋山雄一・瀧本晃裕・池田直樹・田川萌子・田辺新一・都築和代、  
寝室における温熱環境が睡眠に及ぼす影響その8：夏季を想定した温熱環境室における被験者実験結果、日本建築学会、福岡、2016年8月
  - 22) Moeko Tagawa,・Emika Miyake,・Ayaka Hirose,・Yuuka Sakurai,・Naoki Ikeda, Effects of Fluctuations in the Thermal Environment on Quality of Sleep, Indoor Air 2016, Belgium, 2016年7月
  - 23) 松崎里穂, 三宅絵美香, 池田直樹, 田川萌子, 瀧本晃裕, 秋山雄一, 田辺新一,・松前和則, 松葉佐智子、温熱環境の変動が睡眠の質に与える影響、第39回人間-生活環境系シンポジウム、東京、2015年11月
  - 24) 田川萌子・三宅絵美香・櫻井柚夏・池田直樹・広瀬文郁・松前和則・松葉佐智子・田辺新一、  
夏季における寝室の温熱環境が睡眠に及ぼす影響、空気調和・衛生工学会、大阪大学、2015年9月
  - 25) 三宅絵美香・田川萌子・広瀬文郁・池田直樹・櫻井柚夏・田辺新一・松前和則・松葉佐智子、  
寝室における温熱環境が睡眠に及ぼす影響 その3：夏季実測調査概要と睡眠環境の実態、日本建築学会、2015年9月、東海大学
  - 26) 三宅絵美香・田川萌子・広瀬文郁・池田直樹・櫻井柚夏・田辺新一・松前和則・松葉佐智子、  
寝室における温熱環境が睡眠に及ぼす影響 その4：空気温度と気流速度の変動が睡眠に及ぼす影響、日本建築学会、2015年9月、東海大学

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

○取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：田邊 新一

ローマ字氏名：TANABE Shin-ich

所属研究機関名：早稲田大学創造理工学部建築学科・教授

部局名：

職名：

研究者番号(8桁): 30188362

(2)研究協力者

研究協力者氏名：都築 和代

ローマ字氏名：TSUZUKI Kazuyo

研究協力者氏名：尾方 壮行

ローマ字氏名：OGATA Masayuki

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。