

論文内容要旨 (和文)

令和4年度入学 大学院博士後期課程

電子情報工学専攻

氏 名 太田 周彰



論 文 題 目 睡眠中の平均心拍数に影響する寝室環境因子に関する研究

本論文は睡眠中の平均心拍数(以下、SHR)に着目し、SHRに影響する寝室環境因子を明確にすると共に、SHRを最も低くする寝室環境の条件を明らかにする。

1章では、序論として睡眠中の平均心拍数に関する先行研究や研究の意義について述べる。

睡眠は人の健康状態を良好にする必須の生活行為である。日中の住環境が身体に与える影響に関する研究は多岐にわたるが、睡眠中の寝室環境の研究は限定的である。睡眠時は代謝量が減るため、身体は寝室環境の影響をより受けやすく、睡眠状態を良好に保つには良好な寝室環境の解明が重要である。

既往研究では睡眠状態の推測に心拍変動(HRV)が指標として頻繁に用いられてきた。この中で、RR間隔の標準偏差(以下、SDNN)は重要とされ、長期SDNNが高いと自律神経活動が良好とされる。SDNNとSHRには負の相関があり、SHRが低いと自律神経活動が良好と解釈できる。

ウェアラブルデバイスの普及で心拍数の計測が容易になったため、SHRは計測が容易である。SHRと寝室環境との関係性が把握できれば、適切な寝室環境を検討できる。

既往研究では安静時心拍数(RHR)は外気温に影響されるとの報告があり、SHRも寝室の温度などの環境因子に影響される可能性がある。これには、被験者個人の経日変化と、被験者間で共通なSHRと寝室環境との関係を確認する必要があり、複数被験者の長期反復測定に基づいた計測・分析が不可欠で、そのための条件を明らかにする必要がある。

以上から本研究の目的は、「SHRに影響しうる寝室環境因子を特定する実験を通じて、SHRを低値にする理想的な環境因子の値の範囲を明らかにすること」である。

2章では、本研究に必要な実験手法を提案する。

心拍数の測定は被験者の寝室で行い、身体に負担をかけない非接触/非拘束で計測可能な圧力式マットセンサーで計測した。日常の睡眠の心拍状況を計測するために特別な実験条件は指定しない。環境要因としては室温、放射温度、寝床内温度、二酸化炭素濃度、照度を計測対象とした。

実験に必要な被験者数および測定日数を推定するため、属性の異なる男女の被験者2名で予備実験を行い、得られたデータに基づいたシミュレーションにより、統計的検出力が80%以上となる実験条件を推定する方法を提案する。

3章では、夏季・冬季の実験概要および線形分析手法を述べ、結果と考察を示す。

実験は2章での提案方法を用い、測定数は各被験者・各季節で約21夜を計測数の目安とした。2022年の夏季と冬季は男性6名、女性5名とした。2023年夏季には追加で男性被験者3名の、2023年冬季には男性被験者5名の追加実験を行った。

最初に相関分析を行った結果、男性被験者ではSHRに対して一晩の体動率(BM)と温度、二酸化炭素濃度との間で高い相関があった。

続いてSHRを目的変数とし、上述で相関が確認された因子を説明変数としてモデル化を行い、夏季・冬季のモデルを構築した。モデルは以下である。

夏季: $SHR \sim 9.41 * BM + 0.55 * OT$

冬季: $SHR \sim 10.88 * BM - 0.38 * OT + 0.51 * Tb + 0.02 * CO_2 - 0.001 * Tb:CO_2$

ここで、OTは作用温度、Tbは寝床内温度、CO₂は二酸化炭素濃度、Tb:CO₂は両者の相互作用を表す。

4章では、3章の線形モデル内のOTの係数が夏季・冬季で異なった点に着目し、通年の分析を非線形モデルで行い、これに関する結果と考察を示す。

様々なモデルに対応可能な機械学習で非線形モデルの構築を行う。SHRを目的変数として、線形モデルと同様の因子を特徴量としてモデルを生成した。生成したモデルの妥当性を検討するため、モデル内での変動を既往研究と比較し議論する。モデルでは室温や放射温度の影響は25°C付近で傾向が変わる。これより高い温度、低い温度での影響の機序を既往研究との比較で説明し、妥当性を議論する。一方で二酸化炭素濃度は、秋季と冬季に約1000ppm以下において濃度が高くなるとSHRが高くなることが確認され、既往研究との比較でこの妥当性を議論する。

5章では、3～4章で得た結果を基に総合考察を述べる。

SHRに影響を与える要因とその影響の大きさについて、個人属性や生活習慣では、性別、飲酒、睡眠長さによる影響が大きく、その他の日中の活動はあまり影響を与えないと考察した。体動の発生や温度、二酸化炭素濃度への暴露は睡眠中であるために影響が大きいと考察した。

6章では、本論文の結論及び今後の展望を述べる。

通年モデルから、室温や放射温度は25～26°C付近でSHRが最低値となり、これより高くなるとSHRが高く、低くなるとSHRが高くなり、冬季の放射温度の影響は他の季節より大きくなることが分かった。掛け布団が使用される状況では、寝床内温度が高くなるとSHRも高くなった。以上からSHRを低く保つには空調での室温制御と共に、断熱による放射温度の変動制御が重要である。

各季節のモデルから、二酸化炭素濃度は冬季と秋季に一定濃度以下の範囲で濃度が高くなるとSHRが高くなることが分かった。換気扇による空気の入替えがSHRを低く保つには重要である。

今回の計測範囲では照度と湿度によるSHRへの影響は確認されなかった。

以上からSHRを低値にする理想的な環境因子の値の範囲を季節毎に示すと以下となり、本論の結論である。

- ・夏季は室温及び放射温度を25°C程度とする。
- ・冬季は室温・放射温度を23°C程度とし、二酸化炭素濃度を1000ppm以下に保ち極力小さくする。
- ・秋季は室温・放射温度を27°C程度とし、二酸化炭素濃度を900ppm以下に保ち極力小さくする。

今後はモデルのロバスト性を検証する。モデルの適用範囲の確認および拡張性の検討、更に多くの被験者に対するモデルの汎用性の検討が必要である。

論文内容要旨 (英文)

令和4年度入学 大学院博士後期課程

電子情報工学専攻

氏 名 太田 周彰



論 文 題 目 A Study on the Bedroom Thermal Environment Contributing to Mean Heart Rate During Sleep

Chapter 1 (Purpose)

People spend about one-third of their lives in a bedroom, and sleep is essential for health. Although many studies have examined daytime indoor environments, research on bedroom conditions during sleep remains limited.

The average sleep heart rate (SHR) can be interpreted as one of the indices which reflects the activities of the autonomic nervous system. This study explores bedroom environmental factors which have influence on SHR, and to find their optimal ranges.

Chapter 2 (Methods)

An experimental framework and analysis methodology are proposed. SHR will be measured non-invasively in participants' own bedrooms using a pressure-based mat sensor. Indoor temperature, radiant temperature, and bedding microclimate temperature, CO₂ concentration, and illuminance will be recorded. Mixed-effects models and correlation analyses will guide the selection of explanatory variables. The number of the participant and measurement nights were estimated to achieve over 80% statistical power.

Chapter 3 (Linear Models)

Linear regression models were constructed for summer and winter. In men, body movement (BM) strongly influenced SHR. Both temperature and CO₂ also showed significant correlations. The resulting models are:

Summer: $SHR \sim 9.41 * BM + 0.55 * OT$

Winter: $SHR \sim 10.88 * BM - 0.38 * OT + 0.51 * Tb + 0.02 * CO_2 - 0.001 * (Tb:CO_2)$

(OT: operative temperature, Tb: bedding microclimate temperature)

Chapter 4 (Nonlinear Models)

To consider annual variations, nonlinear models were built using machine learning. Visualization techniques (XAI) allowed seasonal comparisons and confirmed distinct seasonal influences for BM, temperature and CO₂.

Chapter 5 (General Discussion)

Based on the results obtained in Chapters 3 and 4, a comprehensive discussion is provided on the factors

that may influence SHR and the magnitude of their effects.

Chapter 6 (Conclusions)

- Indoor and radiant temperatures strongly correlate with SHR, positively in summer and negatively in winter. Minimum SHR occurs around 25-26°C.
- Bedding microclimate temperature >30°C correlates positively with SHR.
- CO₂ < 1000 ppm correlates positively with SHR in winter/autumn.

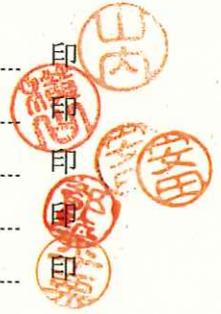
学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

令和7年 2月 12日

理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 山内 泰樹 印
 副査 横山 道央 印
 副査 安田 宗樹 印
 副査 都築 和代 印
 副査 平栗 靖浩 印



学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

論文申請者	電子情報工学専攻 氏名 太田 周彰		
論文題目	睡眠中の平均心拍数に影響する寝室環境因子に関する研究		
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日	令和7年 1月 21日～ 令和7年 2月 7日
論文公聴会	令和7年 2月 7日	場 所	工学部 11-503 教室
最終試験結果	合格	最終試験年月日	令和7年 2月 7日
学位論文の審査結果の要旨 (1,000 字程度)			
<p>近年、日本人の睡眠不足は生産性の低下や健康への影響などにより問題視されており、良質な睡眠を取るために、睡眠環境をいかに快適に整えるかが重要な課題となっている。本論文では、睡眠中の平均心拍数の変動に着目した上で、各季節において長期睡眠実験を行い、環境情報を記録しながら睡眠中の心拍を測定し、心拍数に影響を与える環境因子を見出してモデルを提案することで、睡眠に最適な寝室環境条件に関する提案を行なっている。</p> <p>第1章では、本研究の背景と目的について述べている。第2章では、本研究を遂行するのに必須な睡眠実験に関する最適条件を求めるための実験、並びにその結果から実験サイズ（被験者数、測定夜数）を決定している。第3章では、夏季と冬季における睡眠中の平均心拍数の変動に対して影響する寝室環境因子について線形モデルにて検討し、季節に依存する環境因子の特定を行った。第4章では、線形モデルの限界と矛盾点を解消すべく非線形モデルの導入を図り、機械学習によりモデルのパラメータについての最適化を図り、環境因子の寄与に関して検討した。第5章では、第3章と第4章で得られた実験結果から総合的な考察を行い、モデルの適応限界や寝室環境因子の影響度などについて検討を加えた。第6章では、本研究の結論と今後の課題を述べながら、研究を総括している。</p> <p>このように本論文では、研究テーマに新規性・独自性があるだけでなく、研究のアプローチに機械学習などの新規学術領域のモデルを積極的に導入するなどの新規性がみられる。自ら研究を計画・遂行するための専門的知識を基に、研究背景・目的が正しく述べられていた。線形モデルの構築を試みた後にその限界・問題点を明らかにした上で非線形モデルの構築を図るなど、学位論文の構成は適切で、体裁も整っており、設定した研究テーマに沿った明確な結論が述べられていた。また上記の研究成果について、査読付き筆頭著者論文6報が学術論文誌に掲載/採択され、国際学会会議においても発表されている。国内学会でも7件の発表がなされ、その成果の一部はWeb上の記事として取り上げられるなど、その研究の価値は業界でも一般的にも認められている。以上より、本論文を博士（工学）の学位論文として合格と判定した。</p>			
研究内容に関する研究倫理又は利益相反に係る手続き			
<p>研究内容に関する研究倫理又は利益相反に係る手続きについて確認します。手続きの有無について該当する項目の□にチェックの上、手続きを要した場合は、手続きの内容を記入してください。</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> 本論文は、研究倫理又は利益相反に係る手続きを要する研究内容を含んでいます。 内容：ヒトを対象とする医学系研究に関する学内規程に基づき山形大学工学部倫理審査委員会に申請し、承認された後に遂行されている。</p> <p><input type="checkbox"/> 本論文は、研究倫理又は利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ありません。</p>			
最終試験の結果の要旨			

最終試験は、公聴会実施後に主査・副査の教員により、学位論文を中心とし関連する事項について口頭にて実施された。当該学生の専門的知識、学位論文の妥当性・論理性について議論が行われた。全ての主査・副査からの質問に対して論理的かつ適切に回答がなされた。その結果、博士の学位を授与するのに十分な知識と能力を有していると判断されたため、最終試験について合格と判定した。