

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：32702

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20467

研究課題名（和文）光電式容積脈波記録法を用いた環境騒音による睡眠影響の評価ツール開発

研究課題名（英文）Development of tools for evaluation of sleep disturbance caused by environmental noise using Photoplethysmography

研究代表者

森長 誠（Morinaga, Makoto）

神奈川大学・建築学部・助教

研究者番号：70536846

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：スマートウォッチ等のウェアラブルデバイスでの普及が進んでいる光電式容積脈波記録法（PPG）やポータブル心電計（ECG）を用いた環境騒音による睡眠影響の評価手法を検討した。睡眠ポリグラフ検査（PSG）を行っている実験参加者の体に、PPG及びECGを同時に装着して一晩寝てもらった。その結果、PPGとPSGの結果は中程度に一致し、ECGで得られた心拍変動の解析値を特徴量とした機械学習での推計値はPSGと非常によく一致していた。次に、嘉手納飛行場の周辺に居住する29名に、PPGを装着した生活をしてもらい、1か月間の睡眠段階のデータを取得し、騒音の曝露量と睡眠段階の変化に関する分析を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2018年にWHO欧州事務局が環境騒音ガイドラインを公表して以来、騒音に係る環境基準の意義とそのあり方を見直すべきとの議論は欧州を超え、国際的に機運が高まっている。しかしながら、その見直しに必要不可欠である「曝露-反応関係」について、とりわけ睡眠影響に関する日本独自のデータは不足している。本申請研究により、環境騒音による睡眠影響に関しての曝露-反応関係の構築に必要とされながらも、コストや労力の観点で困難とされてきた、大規模かつ客観的に睡眠データを収集できる手法を提案することができた。本手法を用いたフィールド調査を継続することで、我が国の騒音政策に資する科学的知見を提供することが可能と言える。

研究成果の概要（英文）：We investigated a method for evaluating the effects of environmental noise on sleep using a photoplethysmography (PPG) and a portable electrocardiograph (ECG). The participants undergoing polysomnography (PSG) were asked to sleep overnight wearing PPG and ECG. As a result, the sleep stages estimated by PSG were in moderate agreement with PPG, and those estimated by machine learning with feature values derived from heart rate variability obtained by ECG were in very good agreement with those by PSG. Next, 29 people living near Kadena Airfield were asked to live with PPG, and data on their sleep stages were obtained for one month, and the relationships between noise exposure and sleep stage changes were analyzed.

研究分野：建築音響

キーワード：環境騒音 睡眠妨害 航空機騒音 ウェアラブルデバイス 光電式容積脈波記録法 心拍変動 機械学習

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、欧州諸国を中心として、環境騒音による生理ストレス反応が心臓血管系疾患の罹患リスクを増大させるとの見解を示す研究が盛んに報告されている。この背景の下、2018年にWHO欧州事務局は環境騒音ガイドライン（以降、WHOガイドラインとよぶ）を作成した。WHOガイドラインでは高度の不快感および睡眠妨害を防止するための騒音レベルの勧告値が示され、このガイドラインが公表されて以来、騒音に係る環境基準の意義とそのあり方を見直すべきとの議論は欧州を超え、国際的に機運が高まっている。一方、我が国における各種の交通騒音の環境基準は、いずれも制定から数十年が経過しており、その見直しに必要不可欠である「曝露-反応関係」についての日本独自のデータは欠如している。我が国における騒音の曝露-反応関係は古くから検討されているが、それらのデータは最新でも2000年前後の調査結果であり、近年のデータ不足が大きな課題とされている。特に航空機騒音に関しては社会調査の事例そのものが殆ど無く、調査の実施が喫緊の課題とされている。また、これらの社会調査はアンケート手法による自己申告の結果が採用されているが、睡眠妨害に関しては客観的な手法での騒音影響の評価が求められている。騒音曝露量に対応する覚醒、睡眠の質の低下を厳密かつ客観的に計測するには、睡眠ポリグラフ（PSG）を用いた脳波等のモニタリングが必要とされるが、PSGは極めて高額の医療機器であり、また、それらの機器の取り扱いを熟知した専門家の判断が必要である。さらに、多種多数の電極装着による調査参加者への大きな負担といった課題もあり、環境基準の検討に要求される数多くのデータを収集することを困難にしている。

2. 研究の目的

本申請研究では、環境騒音による睡眠影響に関しての曝露-反応関係の構築に必要とされながらも、コストや労力の観点で困難とされてきた、大規模かつ客観的に睡眠データを収集できる手法の確立を目的としている。具体的には、近年、スマートウォッチ等のウェアラブルデバイスでの普及が進んでいる光電式容積脈波記録法（Photoplethysmography: 以降、PPGデバイスとよぶ）等を用いた環境騒音による睡眠影響の評価手法を検討した。本研究では以下の2項目に取り組んだ。

- 1) ウェアラブルデバイスを利用した睡眠影響評価の可能性の検討
- 2) PPGデバイスを用いたフィールド調査の実践

3. 研究の方法

研究の全体像を図1に示す。

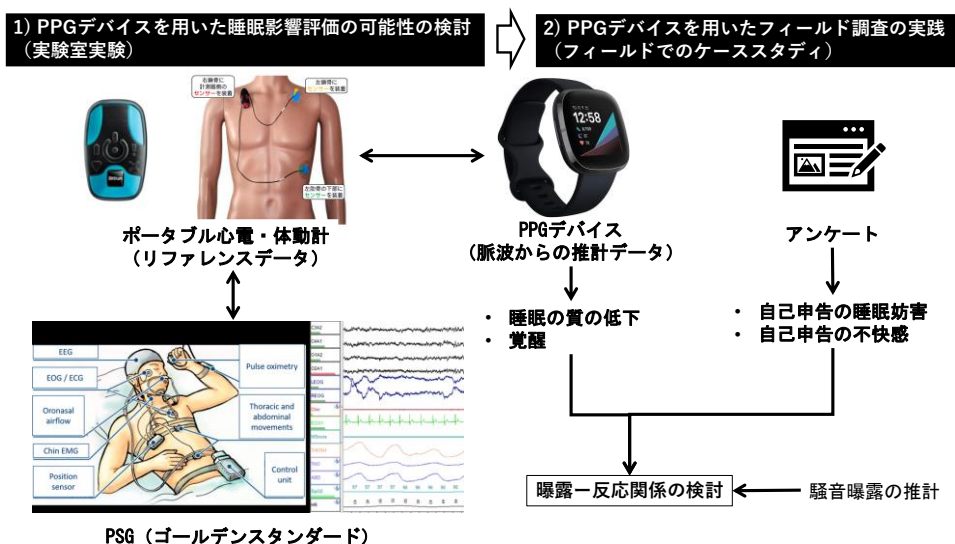


図1 本研究の全体像

(1) ウェアラブルデバイスを用いた睡眠影響評価の可能性の検討

近年、スマートウォッチ等のウェアラブルデバイスでの普及が進んでいる PPG を用いた睡眠ステージの推定の妥当性を検討した。本研究で用いた PPG は Fitbit 社の Fitbit Sense である。心拍変動 (HRV) と体動に基づく独自のアルゴリズムによって睡眠段階を推計できる仕様となっており、その妥当性を検討するために睡眠ポリグラフとの比較を行った 22 の研究についてのシステムティックレビューが報告されている [1]。そのシステムティックレビューで実施された 3 つの実験によるメタ分析の結果によると、WASO (中途覚醒時間)、TST (総睡眠時間)、SE (睡眠効率) に関して PSG との間に有意差は認められなかったことが報告されている。また、

睡眠段階の推定精度に関しては、正解したエポック数を全エポック数で除した Accuracy を用いて評価しており、浅い睡眠 (N1+N2) で 0.69~0.81, 深い睡眠 (N3) で 0.36~0.89, REM 睡眠で 0.62~0.89 であったと報告されており、どの睡眠段階においても比較的高い精度で推定できている。本研究では、このメタ分析には使用されていない、後継モデルを用いた検討を行った。睡眠段階は Wake, REM, light, Deep の 4 段階に分類される。

PPG と並行して、Basner et al.[2]の研究で使用されている Bittium 社のポータブル ECG, Faros 180 を用いた検討も行った。Basner et al.の手法は心拍数の 90 秒間における移動中央値に基づいた睡眠段階の推定を行っているが、その詳細なアルゴリズムは不明である。このため、本研究では、HRV の時間領域と周波数領域での解析値を学習データとしたランダムフォレストによる睡眠段階の推定を行った。学習の際、正解データは PSG の結果であり、全実験参加者のデータの 1 エポック (30 秒) ごとのデータ ($N=13,253$) で学習を行った。

実験は、沖縄県浦添市の名嘉村クリニックにおける睡眠治療のための病床で実施した。部屋は、実験参加者が普段と変わりなく眠れるように、一般的なインテリアデザインを採用している。また窓は 2 重窓を採用している。実験期間は 2021 年 10 月から 11 月である。実験参加者には、PSG 検査を受けながら同時に、PPG と ECG を装着して 1 晩の睡眠をとってもらった。クリニックにおいて、いびき治療 (C-PAP による治療) で通院している利用者に対して実験参加への協力を募った。本実験の実施意義と内容についての説明を記載した依頼書をクリニック利用者に読んでもらい、本研究への参加に同意した人のみが参加した。合計で 13 名が参加したが、睡眠中に PPG デバイスが外れたことにより、データが欠損した者が 3 名いた。これの協力者については ECG の結果のみを採用し、PPG のデータからは除外した。その結果、PPG に関しては合計 10 名の、ECG に関しては合計 13 名のデータで分析を行うこととした。表 1 および表 2 に、実験協力者の年齢と性別を示す。本実験は、「神奈川大学における人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」で審査を受け、承認を得た上で実施した。

表 1 PPG による実験の分析に用いた協力者人数

	20 歳代	30 歳代	40 歳代	50 歳代
女性	1	0	0	0
男性	3	1	0	5

表 2 ECG による実験の分析に用いた協力者人数

	20 歳代	30 歳代	40 歳代	50 歳代
女性	1	0	0	0
男性	3	1	1	7

(2) PPG デバイスを用いたフィールド調査の実践

PPG デバイスと質問紙を併用した飛行場周辺でのフィールド調査を行い、PPG デバイスを使用した社会音響調査の実装における課題について検討した。調査は沖縄県嘉手納町にある嘉手納飛行場の周辺で行った。2022 年 11 月にアンケート調査を行い (一次調査)、一次調査の参加者の中から 27 名が PPG デバイスを装着して生活する二次調査に参加した。二次調査の調査期間は 2023 年 2 月~3 月の約 1 ヶ月間である。

一次調査は、嘉手納町役場内で参加募集を行い、74 名の協力を得た。この内、45 名が嘉手納町に居住しており、半数以上を占めた。その他は沖縄市や北谷町、うるま市などに居住しており、回答者の大半は嘉手納飛行場の周辺に居住していた。アンケートでは、家屋の構造や窓のタイプ、寝室の窓の開閉状況、防音工事の有無など自宅に関する質問、日頃の睡眠時間や睡眠の状況に関する質問、道路交通騒音および航空機騒音についてのうるささや活動妨害に関する質問を行った。本研究の主目的である睡眠影響に関する質問は、不眠症の評価に用いられるアテネ不眠尺度 (AIS) による質問と、航空機騒音による入眠妨害、中途覚醒、早朝覚醒、翌朝の気分、翌日の影響に関する質問を行った。参加者には謝礼として 500 円の図書カードを配布した。

二次調査は、(1)で使用した PPG 搭載のスマートウォッチを用い、参加者には、スマートウォッチを装着して就寝するよう求めた。調査期間は約 1 ヶ月である。このデバイスはスマートフォンやタブレット端末にインストールしたアプリを介してクラウド上に睡眠データが記録される仕組みであり、数日に 1 度、データをアップロードする必要がある。このため、参加者には各自でスマートフォン等にアプリをインストールし、3 日に 1 度、データをアップロードするよう依頼した。

4. 研究成果

(1) ウェアラブルデバイスを用いた睡眠影響評価の可能性の検討

最初に、PPG と PSG の一致度について示す。それぞれの実験協力者について、PSG の結果から睡眠時間 (SPT: 入眠から最後の覚醒までの時間) を定義し、SPT の時間範囲における 1 エポックごとに PPG による睡眠段階の推計結果を整理し、PSG との一致度について検討した。

PPG で出力される”Light”は PPG の N1+N2 として、整理した。評価は以下の式(1), (2)に示す 2 つの指標と、重み付きカッパ係数を用いた。

$$\text{Accuracy} = (\text{TN} + \text{TP}) / (\text{TN} + \text{FP} + \text{FN} + \text{TP}) \quad (1)$$

$$\text{F-measure} = (2(\text{Precision} \times \text{Recall})) / (\text{Precision} + \text{Recall}) \quad (2)$$

ここで、

$$\text{Recall} = \text{TP} / (\text{FN} + \text{TP}) \quad (3)$$

$$\text{Precision} = \text{TP} / (\text{FP} + \text{TP}) \quad (4)$$

式中の TP は真陽性、FP は偽陽性、TN は真陰性、FN は偽陰性を意味する。

個人別にこれらの評価指標を算出し、協力者間での幅を確認した結果、Accuracy は 0.57～0.81、F-measure の個人内での平均値（睡眠段階ごとの数値の平均）は 0.46～0.79、重み付きカッパ係数は 0.25～0.75 の範囲であった。次に、10 名全員のデータで一致度を検討した結果を表 3 に示す。Accuracy は 0.68、F-measure の平均値は 0.61、重み付きカッパ係数は 0.49 であった。先述した過去の Fitbit モデルによる結果[1]は睡眠段階別に示したものであり、これは表 3 の Recall に相当する値である。REM, N1+N2, N3 のいずれにおいても先行研究の結果の範囲内であり、モデルの違いによる推定精度の違いは見られなかった。武田ら[3]は心電計で得られた心拍変動の解析値を用いた機械学習を行い、その学習結果から睡眠段階を識別する 5 つの手法を示している。これらの手法では Accuracy が 0.72～0.74、F-measure の平均が 0.45～0.61、カッパ係数が 0.24～0.48 である。ただし、覚醒、REM、non-REM の 3 分類での結果である。このため、本件研究で得られた表 3 の結果についても同様に 3 分類に変換した結果 (N1+N2+N3 を non-REM として合成)、Accuracy は 0.79、F-measure の平均値は 0.66、重み付きカッパ係数は 0.46 となり、先行研究で得られている結果の上限もしくはそれを上回る結果であった。

表 3 PSG と PPG による睡眠段階の推計結果の一致度 (4 分類での比較)

	Estimated by PPG				Total	Recall	
	Wake	REM	Light	Deep			
PSG	Wake	498	168	505	7	1178	0.42
	REM	38	1094	236	68	1436	0.76
	N1+N2	382	628	4290	412	5712	0.75
	N3	17	54	596	799	1466	0.55
Total	935	1944	5627	1286	9792	-	
Precision	0.53	0.56	0.76	0.62	-	-	
F-measure	0.47	0.65	0.76	0.58	-	-	
Accuracy					0.68		
κ					0.49		

次に、ECG と PSG の一致度について示す。ECG で計測した心拍に基づく HRV の解析を行い、SPT の時間範囲における 1 エポックごとに、心拍の時間領域及び周波数領域での解析パラメータ値を整理した。ここで、HRV の解析には 5 分程度の時間長が必要とされているため、該当するエポックの中心から前後 2 分 30 秒の区間を解析長として分析した。これらの HRV の解析値を学習データとして、PSG による推定結果を教師データとしてランダムフォレストによる睡眠ステージの推定を行った。分類は Wake, REM, N1, N2, N3 の 5 種類である。推定精度の評価は 10 分割交差検定により実施した。10 分割交差検定による 10 回のテストデータによる睡眠ステージの推定結果を表 4 に示す。分類数が多いにも関わらず PPG での推定よりも高い精度の結果が得られており、Accuracy は 0.83、F-measure の平均値は 0.75、重み付きカッパ係数は 0.79 であった。また、PPG と同様に、Wake, REM, non-REM の 3 分類問題に変換すると、Accuracy は 0.92、F-measure の平均値は 0.87、重み付きカッパ係数は 0.78 であった。ただし、ここでの機械学習にはテストをしている本人のデータが学習データにも含まれているため、本人以外のデータのみで学習した場合にも同様の結果が得られるとは限らない。

(2) PPG デバイスを用いたフィールド調査の実践

一次調査のアンケートで得られた AIS の結果と、騒音曝露の関連性について分析した。AIS は 8 つ質問のそれぞれの選択肢に対して 0～3 点を割り当て、8 つの質問における合計得点が高いほど不眠症傾向が強いと判定される。具体的には 1～3 点は不眠症の可能性は低い、4～5 点は

表 4 PSG と ECG による睡眠段階の推計結果の一致度 (5 分類での比較)

	Estimated by ECG (HRV analysis)					Total	Recall	
	Wake	REM	N1	N2	N3			
PSG	Wake	109	3	19	6	0	137	0.80
	REM	4	182	4	10	0	200	0.91
	N1	18	3	33	14	0	68	0.49
	N2	22	18	52	628	35	755	0.83
	N3	0	0	0	18	140	158	0.89
Total	153	206	108	676	175	1318	-	
Precision	0.71	0.88	0.31	0.93	0.80	-	-	
F-measure	0.75	0.90	0.38	0.88	0.84	-	-	
Accuracy	0.83							
κ	0.79							

不眠症の疑いが少しある、6 点以上は不眠症の可能性が高いと判定される。そこで、航空機騒音の騒音の高曝露地区と低曝露地区における AIS の 4 点以上もしくは 6 点以上の発生割合を比較した。航空機騒音の高曝露もしくは低曝露の分類は、自治体の常時監視の結果を参考にしており、回答者の居住地域に最も近い常時監視局での L_{den} で 50 dB 以上の地域を高曝露地区とし、それ以外を低曝露地区とした。その結果を表 6 に示す。両地区の 4 点以上の発生割合はいずれも 57% と等しかった。また、6 点以上の割合は高曝露地区が 36%、低曝露地区で 30%であり、独立性の検定の結果、有意水準 5%での有意差は認められなかった。

航空機騒音による睡眠妨害についての質問の回答結果を高曝露地区と低曝露地区で比較した結果を、表 6 に示す。いずれの質問も、妨害が「まったくない」「たまにある」「週に 1~2 回」「週に 3 回以上」の 4 択で質問している。いずれの質問も「週に 1~2 回」及び「週に 3 回以上」との回答者数は少数であったため、ここでは「たまにある」以上の解答率で整理した。いずれの妨害についても、高曝露地区において発生割合が高い結果であったが、独立性の検定の結果、入眠妨害のみ有意水準 5%での有意差が認められた。

表 5 航空機騒音の高曝露地区と低曝露地区における AIS の結果の比較

	AIS 1~3 点	AIS 4~5 点	AIS 6 点以上	合計 (N)
高曝露地区	19	9	16	44
低曝露地区	13	8	9	30

表 6 航空機騒音の高曝露地区と低曝露地区における睡眠妨害の発生割合

	入眠妨害	中途覚醒	早朝覚醒	翌朝の気分	翌日の活動
高曝露地区	64%	36%	50%	39%	34%
低曝露地区	37%	27%	30%	33%	30%

二次調査の実施期間中に嘉手納町役場に騒音計を設置し、夜間の航空機騒音のイベントを記録した。その結果に基づき、夜間に航空機騒音が発生した時刻を同定し、同時刻における嘉手納町役場周辺に居住している実験参加者の睡眠データを分析した。騒音イベント数は 5 データであり、対象者数は 9 名である。ただし、イベント発生時に就寝していない場合もあるため、分析対象の全データ数は 37 である。覚醒の判定はスマートウォッチの記録に基づいており、騒音発生時刻から 3 分後までのエポックを対象とした。騒音レベルは屋外の L_{ASmax} で 70 dB~80 dB であり、 L_{EA} で 82 dB~87 dB であった。その結果、6 ケースで覚醒が確認され、2 ケースで睡眠ステージ N1 から REM への睡眠ステージの変化が確認された。すなわち、覚醒の割合は 16%、睡眠ステージの浅化の含めると 22%であった。

<参考文献>

- [1] S. Haghayegh, S. Khoshnevis, M. H. Smolensky, K. R. Diller, R. J. Castriotta, "Accuracy of Wristband Fitbit Models in Assessing Sleep: Systematic Review and Meta-Analysis", J. Med. Internet Res., 21(11), e16273 (2021).
- [2] M. Basner, M. Witte, S. McGuire, "Aircraft Noise Effects on Sleep-Results of a Pilot Study Near Philadelphia International Airport", Int. J. Environ. Res. Public Health, 16, 3178 (2019).
- [3] 武田十季, 水野理, 田中智博, "心拍変動を用いた時間依存睡眠段階遷移モデル", 日本データベース学会和文論文誌, 14-J, 16 (2016).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 森長誠
2. 発表標題 ウェアラブルデバイスを用いた睡眠深度の推計 - 環境騒音による睡眠影響調査への応用 -
3. 学会等名 2022年7月 日本音響学会騒音・振動研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Makoto Morinaga
2. 発表標題 Study on the objective assessment of sleep disturbance due to environmental noise by wearable devices
3. 学会等名 The 51st International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------