

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K19826

研究課題名（和文）睡眠時と日中の生体振動データに基づく無拘束型睡眠時無呼吸症候群判定

研究課題名（英文）Sleep Apnea Syndrome Detection Based on Biological Vibration Data During Daytime and Sleep

研究代表者

高玉 圭樹（Takadama, Keiki）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：20345367

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、睡眠障害の約6割を占める睡眠時無呼吸症候群(sleep apnea syndrome：SAS)の判定に向け、布団やマットレスの下に敷いた無拘束型マットレスセンサから得られる「睡眠中」と「日中」の生体振動データを用いた無拘束型SAS判定法をそれぞれ提案し、高い精度で判定できることに成功した。さらに、SAS患者の生体振動データには健常者には見られない3Hz前後の振動を持つことが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義としては、無呼吸時に生じる覚醒以外の非覚醒状態においてSAS判定を可能にすることに加え、睡眠中ではなく日中においてSAS判定を実現する方法を確立することで、従来手法の問題を克服することである。社会的意義としては、無拘束型のマットセンサを用いた提案手法によってSASを早期に発見することで、糖尿病・高血圧・心筋梗塞・脳梗塞のリスクを低減させ、SASによる不眠からくるヒューマンエラーや産業・交通事故を削減し、労働生産性の低下を抑制することが可能となる。

研究成果の概要（英文）：To detect the sleep apnea syndrome (SAS) which is accounted for an approximately 60% of sleep disorder, this research proposes the two types of the non-contact SAS detection methods based on the biological vibration data during “daytime” and “sleep”, both of which are acquired from a sensor set under a mattress, and shows that the proposed methods succeed to derive the high accuracy of SAS detection. This research has also revealed that the vibration around 3Hz frequency is found in the biological vibration data of the SAS patients, while it is not found in the date of the healthy persons.

研究分野：知能情報学

キーワード：睡眠時無呼吸症候群 機械学習 無拘束型センサ 生体振動データ

1. 研究開始当初の背景

睡眠障害の約6割を占める**睡眠時無呼吸症候群**(sleep apnea syndrome : SAS)は睡眠中に一定時間呼吸が止まる病気であり、新型コロナウイルス感染症の重症化要因となるだけでなく、糖尿病・高血圧・心筋梗塞・脳梗塞のリスクを上げ、放置すると8年以内に約4割が死亡する。さらに、SASによる不眠は、産業・交通事故の増加、労働生産性の低下を招き、それらによる経済損失は大きな社会的問題となっている。しかし、睡眠中の**無呼吸に自ら気づくことは難しく、早期発見の妨げ**となっている。また、SASの主たる原因である無呼吸や低呼吸(血中酸素飽和度や呼吸気流の低下)を測るには、右図に示すように鼻の気流を測る機器を鼻に設ける必要があるため、SAS診断で用いられる終夜睡眠ポリグラフ(PSG)検査では、多くの測定器具を装着した拘束状態で就寝しなければならず、**患者への身体的負担が大きく、高額かつ診断に時間がかかる**ことが問題となっている。



このような背景から、寝具の下に敷いたマットレスセンサから得られる生体振動データ(心拍・呼吸・体動を含む合成波)を用いてSASの主症状である無呼吸・低呼吸を特定し、SAS判定する**無拘束型判定法**が提案されている[Davidovich 2016]。しかし、この方法は軽症SAS患者に多い低呼吸の検出は難しく、SAS判定に限界がある。そこで、研究代表者は挑戦的研究(萌芽)(令和2~3年度)において、**呼吸ではなく睡眠中の覚醒に基づくSAS判定法**を提案した[Nakari 2019]。この手法は、6段階に分類される睡眠段階のうち、**健常者とは異なるSAS患者の「覚醒」の特徴**に着目したもので、低呼吸を特定しなくてよいことから、高精度でSAS判定に成功し、軽症SAS患者の判定も可能にした。

しかし、覚醒の特徴を検出するには、睡眠中の生体振動データから覚醒時のデータを抽出する必要があり、それにはPSG検査の結果を用いるのが一番正確であるが、無拘束という本研究の目的と矛盾する。そこで、PSG検査のかわりにマットレスセンサから覚醒を特定し、覚醒時の生体振動データを抽出する方法に着手したが、覚醒特定精度に限界があり、SAS判定の精度も頭打ちとなった[Nakari 2019]。

2. 研究の目的

「1. 研究開始当初の背景」で述べた問題を解決するために、本研究では(1)今までの前提(SAS判定には覚醒時のデータが必要であるという前提)を覆し、**覚醒と非覚醒を分離せずに両者が混ざった生体振動データからSAS患者の特徴を検出する睡眠中の無拘束型SAS判定法**を考案する。さらに、(2)入院せずに日中の検査でSAS判定を可能にするために、**睡眠中ではなく日中の生体振動データ**を用いた**無拘束型SAS判定法**の確立し、それらの有効性を被験者実験を通して検証することを目的とする。

3. 研究の方法

上記で述べた2つのSAS判定法を確立するために、次の研究課題1と2に取り組む。このとき、研究協力者の医師が務める病院で診察を受けたSASの疑いのある患者の実データを用いて評価する。

・研究課題1：睡眠中の覚醒と非覚醒を区別しない無拘束型SAS判定法

挑戦的研究(萌芽)(令和2~3年度)において、健常者とSAS患者の睡眠中の**覚醒**に差異があることを発見したことから、両者の生体振動データのパワースペクトルの形状にも何らかの差異があると考えられる。そこで、それらの差異を分析し、その差異に基づくSAS判定法を考案する。

その目的に向け、図1に示すように、一夜分の生体振動データに対して、赤色の枠に示す毎秒64秒分のパワースペクトルを算出する。この図において、一夜分の生体振動データのグラフの縦軸と横軸はセンサ値と時刻を表し、パワースペクトルのグラフの縦軸と横軸はパワースペクトル密度(Power Spectral Density: PSD)と周波数を表す。具体的な手順としては、64秒分の生体振動データを切り出し、FFTを用いることでパワースペクトルを算出する。しかし、この状態では低周波数帯の密度が高く、他の周波数帯の密度の差異が見えないため、対数スペクトルに変換する。このような作業を毎秒1秒の幅の窓をスライドしながら、起床時刻まで繰り返した後、一夜分の対数スペクトルの平均(周波数ごとの平均)を計算することで、一夜を通じた傾向(覚醒・非覚醒をあわせた傾向)を分析する。

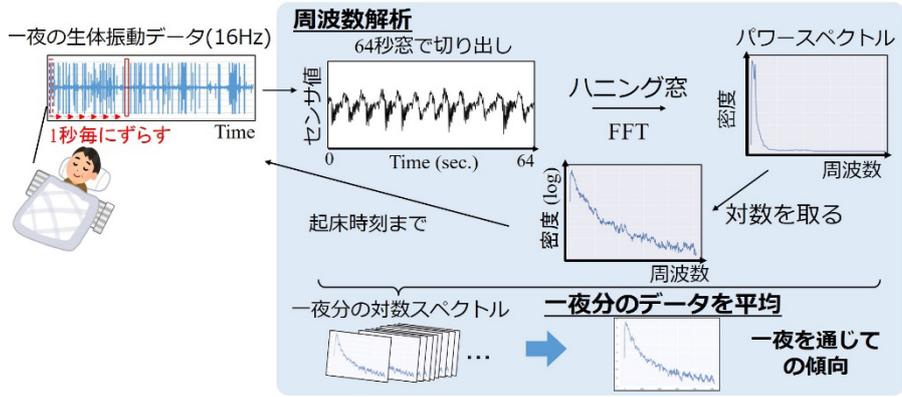


図1： 生体振動データに対する周波数解析の手順

・研究課題2：日中の生体振動データに基づく無拘束型 SAS 判定法

研究課題1は睡眠中の生体振動データを用いるのに対し、研究課題2では日中の生体振動データに用いる。ここで、睡眠中の覚醒状態は、体は寝ていても脳は起きている状態と捉えることができ、健常者と SAS 患者の睡眠中の覚醒に差異があることから、日中の生体振動データをそのまま用いても、同様の判定が実現できると考えられる。ただし、日中のデータとしては日常生活の中で取得したデータはなく、就寝前(布団にはいってからの寝るまでの間)の生体振動データを用いる。なぜなら、日常生活における生体振動データには多くのノイズがのり、健常者と SAS 患者の差異がノイズに埋もれる可能性が高いからである。

4. 研究成果

・成果1：睡眠中の覚醒と非覚醒を区別しない無拘束型 SAS 判定

図2に健常者と SAS 患者における「睡眠中」の平均対数スペクトル密度(PSD)の結果を示す。各グラフの縦軸は対数スペクトル密度、横軸は周波数を表し、青線が対数スペクトル密度、各グラフの右上にあるアルファベットは被験者 ID を表す。特に、左図は20代から60代の健常者9名、右図は軽度から中等度の SAS 患者9名の結果を示している。赤の色がけ部分に示すように、SAS 患者は3Hz前後の周波数帯の対数 PSD が凸になる傾向があるのに対し、健常者は周波数が大きくなるほど滑らかに対数 PSD が小さくなるという傾向が見られる。

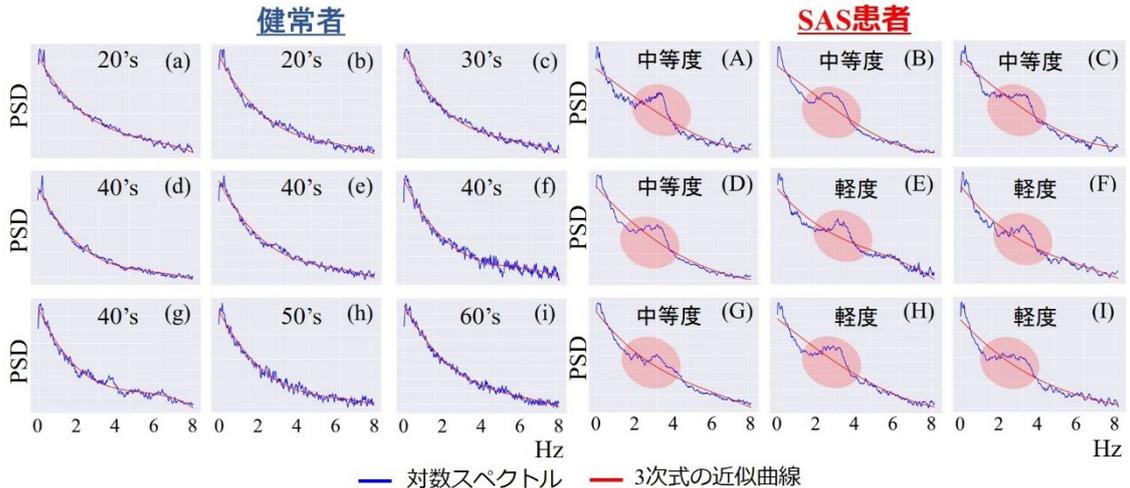


図2： 健常者と SAS 患者の平均対数スペクトル(睡眠時)

ここで重要なことは「SAS 患者にみられる 3Hz 前後の山は健常者にはない」という違いは覚醒/非覚醒によらず表れることである。これにより、SAS 判定には覚醒時のデータを抽出する必要がなくなり、上記で述べた従来手法の問題の克服が可能になる。そこで、図2の青線で示す対数 PSD に対する近似曲線(赤線で示す)を計算し、両者の差の累積値が設定した閾値より大きければ SAS と判定、以下であれば健常と判定する方法を考案する。近似曲線は $\hat{y} = ax^3 + bx^2 + cx + d$ で表される3次式とし、 a, b, c, d は最小二乗法で推定する係数、 \hat{y} は推定密度、 x は周波数とする。また、対数 PSD とその近似曲線の差を Degree of Convexity of the Logarithmic Spectrum (DCLS) と呼び、次式で表す。ここで、 y_i は i 番目の周波数の対数 PSD、 \hat{y}_i は i 番目の周波数の近似曲線の値、 N はサンプリング点数を示す。なお、第1周波数と第2周波数($i=1, 2$)の対数 PSD はノイズの影響を受けやすいため、DCLS の算出時には除外する。

$$DCLS = \sum_{i=3}^N |y_i - \hat{y}_i|$$

図3に、軽症から重度のSAS患者54名と20代から60代の健常者50名におけるDCLS(睡眠時)を示し、縦軸はDCLS値、横軸は各被験者を示す。図中の赤線のように閾値を設定しSAS判定した場合、正確度(Accuracy)は91.3%、SAS患者を正しくSASと判定した割合を示す感度(Sensitivity)は98.1%、健常者を正しく健常と判定した割合を示す特異度(Specificity)は84.0%となった。心電図ベルトを用いたSAS判定法[Baty 2020]では、SASと疑われる241名に対して正確度は72%、感度70%、特異度74%である結果と比較すると、提案手法はマットセンサのみのデータにも関わらず、医療用の心電図ベルトを使った結果よりも高い精度を達成することに成功している。

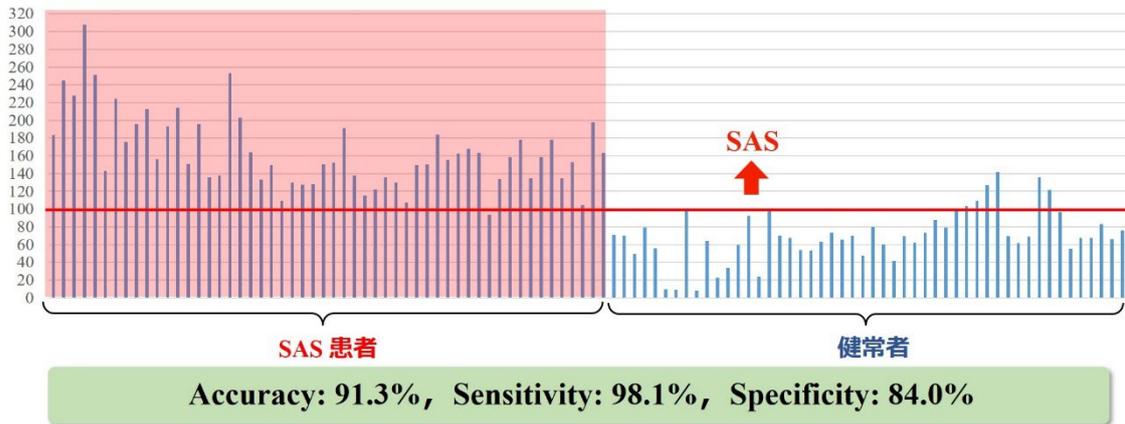


図3: SAS判定結果(睡眠時)

約3Hzの成分が覚醒時だけでなく、非覚醒時にも高いかどうかを調べるために、図4にSAS患者と健常者における睡眠段階(橙線)と2.5~3.5Hz帯のスペクトル密度の総和(青線)を示す。横軸は時刻、左縦軸は睡眠段階(覚醒(WAKE)、レム睡眠(REM)、ノンレム睡眠1~4(NREM1~4))、右縦軸はパワースペクトル密度の総和を示し、図4(a)はSAS患者、図4(b)は健常者の結果を表す。特に、パワースペクトル密度の総和が高いときに焦点を当てるため、密度の総和が2500以上を表示する。また、同図の上部にある黒い矢印は無呼吸/低呼吸が発生した箇所を表す。

この結果より、SAS患者における2.5~3.5Hz帯のPSD密度は、無呼吸/低呼吸の発生箇所に関係なく高くなる箇所があり、覚醒・非覚醒(レム睡眠、ノンレム睡眠1~4)も関係なく高くなる箇所があることが分かる。一方、健常者における2.5~3.5Hz帯のPSD密度は、入眠時と起床時のみ高くなり、SAS患者と同様な傾向は見られない。以上より、SAS患者は健常者と比べて、無呼吸/低呼吸という特徴がある医学的な知見に加えて、生体振動データにおける2.5~3.5Hz帯のスペクトルの密度が高くなる傾向にあるという知見を得た。これが提案方法(DCLS)によるSAS判定の高い精度を導いた理由となっている。

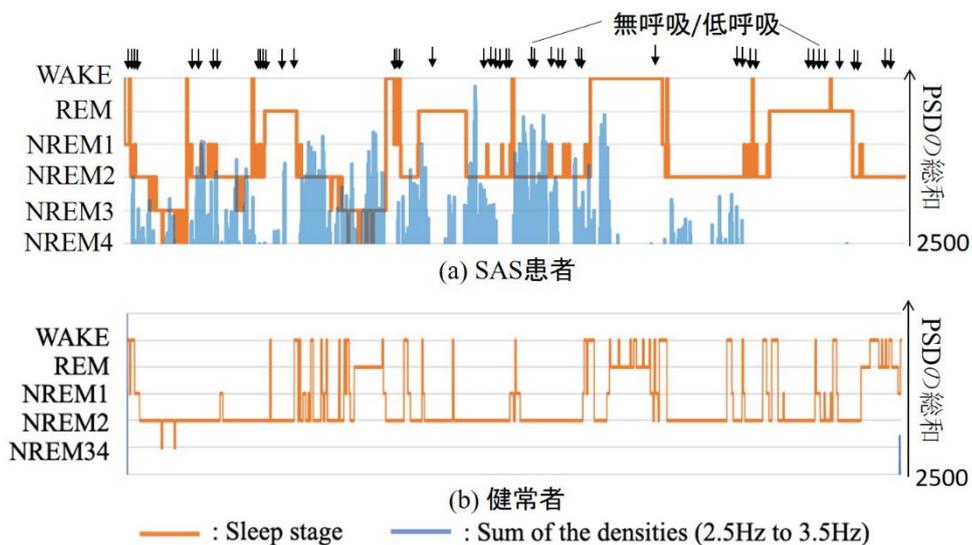


図4: SAS患者と健常者の睡眠段階と2.5-3.5Hz帯のスペクトル密度の和

・成果 2：日中の生体振動データに基づく無拘束型 SAS 判定

図 4 に健常者と SAS 患者における「就寝前」の平均対数スペクトル密度(PSD)の結果を示す。各グラフの縦軸と横軸、青線と赤線は図 2 と同じ意味であり、左図に健常者 9 名、右図に SAS 患者 9 名の結果を示している。図 2 と同様、赤の色がけ部分に示すように、SAS 患者は 3 Hz 前後の周波数帯の対数 PSD が凸になる傾向があるのに対し、健常者は周波数が大きくなるほど滑らかに対数 PSD が小さくなるという傾向が見られる。しかし、SAS 患者の右下の 2 名の形状は他の 7 名とは少し異なっているが(3 Hz 以外でも凸になる場合もあるが)、これは睡眠中に比べて就寝前は体の動きが大きいためであると考えられる。ただ、DCLS は 3 Hz の凸に特化した方法ではなく、対数 PSD とその近似曲線との差のため、SAS 判定への影響は少ない。

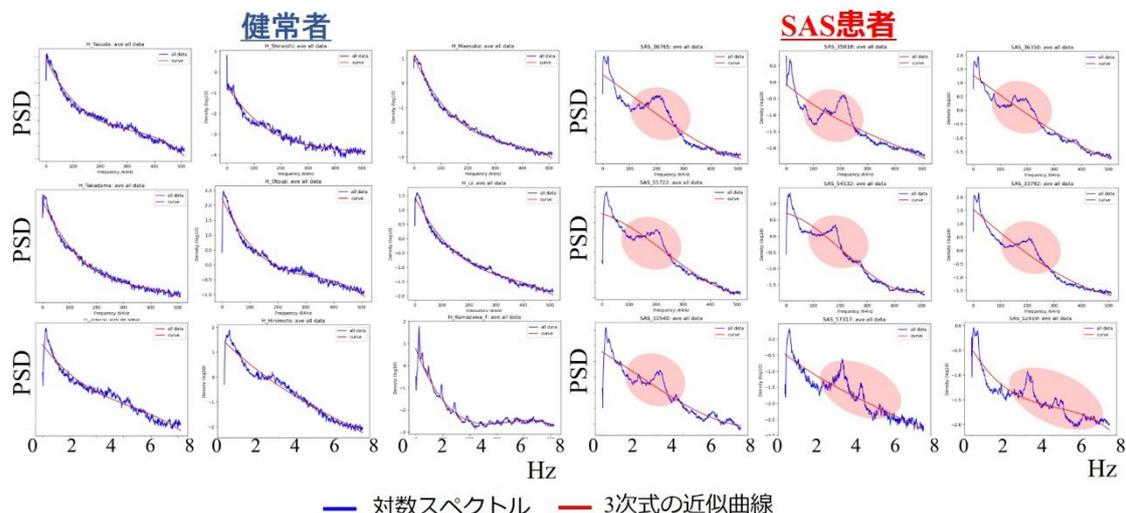


図 5： 健常者と SAS 患者の平均対数スペクトル(就寝前)

日中の生体データでの SAS 判定の可能性を明らかにするために、図 6 に SAS 患者と健常者における DCLS(就寝前)を示す。縦軸と横軸は図 3 と同じことを意味する。図中の赤線のように閾値を設定し SAS 判定した場合、正確度(Accuracy)は 90.4%，SAS 患者を正しく SAS と判定した割合を示す感度(Sensitivity)は 98.1%，健常者を正しく健常と判定した割合を示す特異度(Specificity)は 82.0% となった。図 3 の睡眠時の結果と比べて若干精度は下がっているものの、ほぼ同精度を達成することに成功した。これにより、提案手法は夜間と日中の両側面からアプローチでき、SAS 判定の適用範囲の拡大に大きな貢献ができる。

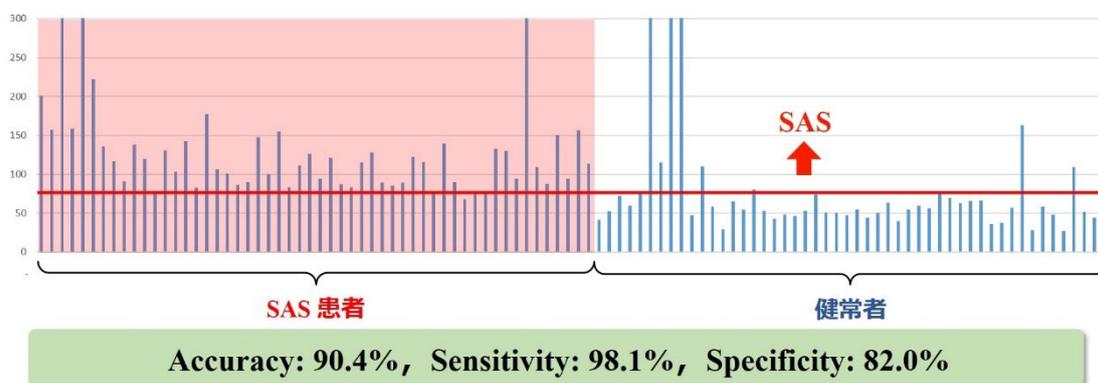


図 6： SAS 判定結果 (就寝前)

<引用文献>

- [Davidovich 2016] Davidovich, M.L.Y., Karasik, R, Tal, A., Shinar, Z: “Sleep Apnea Screening with a Contact-Free Under the Mattress Sensor,” International Conference of Computing in Cardiology (CinC), No.43, pp.849-852, 2016.
- [Nakari 2019] Nakari, I., Murata, A., Kitajima, E., Sato, H., Takadama, K.: “Sleep Apnea Syndrome Detection based on Biological Vibration Data from Mattress Sensor,” The 2019 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI 2019), pp. 549-555, 2019.
- [Baty 2020] Baty, F., Boesch, M., Widmer, S., Annaheim, S., Fontana, P., Camenzind, M., Rossi, R.M., Schoch, O.D., Brutsche, M.H.: “Classification of Sleep Apnea Severity by Electrocardiogram Monitoring Using a Novel Wearable Device,” Sensors (Basel). 20(1):286, 2020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nakari Iko, Takadama Keiki	4. 巻 28
2. 論文標題 Non-Contact Sleep Stage Estimation by Updating its Prediction Probabilities According to Ultradian Rhythm	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics	6. 最初と最後の頁 444 ~ 453
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jaciii.2024.p0444	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高玉 圭樹	4. 巻 77
2. 論文標題 運転事故防止に向けた睡眠トータルケア：運転前の睡眠状況把握と運転後の睡眠改善	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 自動車技術	6. 最初と最後の頁 112-114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Shintani, D., Nakari, I., Washizaki, S., and Takadama, K.
2. 発表標題 REM Estimation Based on Accelerometer by Excluding Other Stages and Two-Scale Smoothing
3. 学会等名 The 46th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine Biology Society (EMBC2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Takadama, K.
2. 発表標題 What is a correct output by Generative AI from the viewpoint of Well-being? - Perspective from sleep stage estimation
3. 学会等名 The AAAI 2024 Spring Symposia (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Nakari, I. and Takadama, K.
2. 発表標題 Sleep Stage Estimation by Introduction of Sleep Domain Knowledge to AI: Towards Personalized Sleep Counseling System with GenAI
3. 学会等名 The AAAI 2024 Spring Symposia (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Shintani, D., Nakari, I., Washizaki, S., and Takadama, K.
2. 発表標題 NREM3 Sleep Stage Estimation Based on Accelerometer by Body Movement Count and Biological Rhythms
3. 学会等名 The AAAI 2024 Spring Symposia (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Nakari, I., Nakashima, M, Takadama, K.
2. 発表標題 Personalized Sleep Stage Estimation based on Time Series Probability of Estimation for Each Label with Wearable 3-axis Accelerometer
3. 学会等名 The 25th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nakari, I., Matsuda, N. and Takadama, K.
2. 発表標題 Personalized Non-contact Sleep Stage Estimation with Weighted Probability Estimation by Ultradian Rhythm
3. 学会等名 The 45th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takadama, K.
2. 発表標題 How to handle well-being in Socially Responsible AI? - Findings from sleep perspective
3. 学会等名 The AAAI 2023 Spring Symposia (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nakai, M., Ashikaga, T., Shimizu, J., and Takadama, K.
2. 発表標題 Evaluation of sleep quality and thermal environment according to nap time
3. 学会等名 The AAAI 2023 Spring Symposia (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中理 怡恒, 高玉 圭樹
2. 発表標題 複数の時間窓の生体振動データを学習した機械学習の組み合わせによる無拘束型睡眠段階推定
3. 学会等名 第3回 ヘルスケア・医療情報通信技術研究会 (MICT), 電子情報通信学会, 信学技報, Vol. 122, No. 264, MICT2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shiraishi, H., Hayamizu, Y., Sato, H., and Takadama, K.
2. 発表標題 Absumption based on Overgenerality and Condition-Clustering based Specialization for XCS with Continuous-Valued Inputs
3. 学会等名 Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中理 怡恒, 高玉 圭樹
2. 発表標題 マットレスセンサから得られた生体振動データの機械学習による特徴抽出に基づく健常者と睡眠時無呼吸症候群の違いの発見
3. 学会等名 第47回日本睡眠学会シンポジウム, 日本睡眠学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中理 怡恒, 高玉 圭樹
2. 発表標題 Random Forestsによる睡眠時無呼吸症候群と健常者の学習結果の比較に基づく特徴抽出と解釈可能な判定
3. 学会等名 2022年度人工知能学会全国大会(第36回)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 環境制御内容決定装置、及び環境制御内容決定方法	発明者 高玉圭樹, 足利朋義, 大賀隆寛, 中井美希, 武内敏文	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2023/001929	出願年 2023年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 睡眠時無呼吸症候群判定装置、睡眠時無呼吸症候群判定方法および睡眠時無呼吸症候群判定プログラム	発明者 高玉 圭樹, 中理 怡 恒	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特許第7216408号	取得年 2023年	国内・外国の別 国内

〔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
研究協力者	千葉 伸太郎 (Chiba Shintaro)		

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1件

国際研究集会 AAAI 2024 Spring Symposium	開催年 2024年～2024年
--------------------------------------	--------------------

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
---------	---------