

令和 6 年 5 月 14 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03954

研究課題名（和文）車室内温熱環境の動的変化を考慮可能なドライバー体調変動予測モデルの開発

研究課題名（英文）Development of a driver's physical condition prediction model that can consider dynamic changes in the thermal environment inside the vehicle

研究代表者

金子 成彦（KANEKO, SHIGEHICO）

早稲田大学・理工学術院・教授（任期付）

研究者番号：70143378

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では心臓系と血管系の相互作用の数理モデルへの人体温熱モデルの組み込みを行い、このモデルを用いて車室内温度とドライバー覚醒度変化との関係をモデルによって計算し、被験者による実験結果と比較した。

また、ドライバーの体調を測定するために試作された脈波センサーの原理に関する研究を実施した。このセンサーを構成している3次元立体編み物（3D-net）の繊維構造に着目し、数値解析と実験から、摩擦が振動特性に及ぼす影響を明らかにした。さらに、1組の繊維素材が接触する際の摩擦振動に着目し、マクロモデル実験と数値モデルにより摩擦と押しつけ力がセンサー特性に与える影響を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国内における交通事故の発生件数や死者数は近年減少傾向にあるが、ドライバーに健康起因事故は増加傾向にある。このような事故を防止するためには、ドライバーの覚醒度を非侵襲計測可能な脈波センサーで「検知」し、居眠り運転の危険性がある際には覚醒状態を維持するための「対策」を行う必要がある。本研究では車室内空調制御によるドライバーへの温熱刺激の有効性について数理モデルと実験から研究を行った。学術的には、これまで明らかにされてこなかった温熱環境-自律神経系-心臓血管系間の関係性に踏み込んだことに意義があると考えている。また、脈波センサーの原理解明に向けての手がかりを与えたことも貢献と考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study, a human body thermal model was incorporated into a mathematical model of the interaction between the cardiac and vascular systems. Using this model, the relationship between vehicle interior temperature and changes in driver arousal level was calculated by the model and compared with experimental results from subjects. In addition, a study was conducted on the principle of a prototype pulse wave sensor designed to measure the driver's physical condition. Focusing on the fiber structure of the three-dimensional knitted fabric (3D-net) that makes up this sensor, we clarified the effect of friction on vibration characteristics through numerical analysis and experiments. Furthermore, we focused on the frictional vibration when a pair of fiber materials contact each other, and clarified the effects of friction and pressing force on the sensor characteristics through macro-model experiments and mathematical modeling.

研究分野：機械力学およびメカトロニクス関連

キーワード：交通事故 居眠り運転 体調モニタリング 生体信号 モデル化 温熱環境 自律神経系 センサー

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、国内における交通事故の発生件数や死者数は減少傾向にあるが、健康起因事故は増加傾向にある。このような事故を防止するためには、ドライバーの覚醒度を「検知」し、居眠り運転の危険性がある際には、覚醒状態を維持するための「対策」を行う必要がある。覚醒状態を維持するための対策には、車室内空調制御によるドライバーへの温熱刺激が有効であるとされている。人体が寒冷環境に曝されると、体温を保持する目的で抹消血管が収縮し交感神経活動が高進し、覚醒度の低下を妨げる効果が期待されるためである。しかしながら、温熱環境-自律神経系-心臓血管系間の定量的な関係性は明らかになってはいない。問題の解決の糸口を見つけるために温熱環境を考慮することのできる数理モデルを開発することにした。人体表面からの放熱と人体内の産熱の熱バランス式により、温熱感覚の指標である深部温度や皮膚温度を予測することが、伝熱モデルの役割である。モデルは人体形状や物理特性等を考慮する「人体組織系」と抹消血管の収縮、拡張やふるえ、発汗などの制御方法を考慮する「体温調節系」からなる。これまでに提唱されたモデルの中から、人体要素別に体温を計算できる Stolwijk モデルを参考にモデルを構築することを思いついた。

(2) ドライバーの体調を測定するために試作された体調モニタリングセンサーの原理に関する研究を実施した。目下、ドライバーの運転を妨げないシートバックなどに取り付け可能な非侵襲の脈波センサーが開発されている。このセンサーは、マイクロフォンよりも 1-20Hz の周波数帯域の信号が増幅されるという特徴があることが知られてはいたが原理は未解明であった。

## 2. 研究の目的

(1) 最初の目的は、心臓系と血管系の相互作用の数理モデルへの人体温熱モデルの組み込みである。このモデルを用いて車室内温度と覚醒度の変化の関係をモデルによって計算し、被験者による実験結果と比較し妥当性を検証することである。

(2) 2つ目の目的はドライバーの体調を測定するために試作された体調モニタリングセンサーの原理を解明することである。目下、ドライバーの運転を妨げないシートバックなどに取り付け可能な非侵襲の脈波センサーが開発されている。このセンサーでは、1-20Hz の周波数帯域の信号が増幅されるという特徴があるものの、その測定原理は未解明である。そこで、このセンサーを構成している 3次元立体編み物 (3D-net) の繊維構造に着目し、数値解析と実験から、摩擦が振動特性に及ぼす影響を明らかにし、センサーの測定原理について検討する。

## 3. 研究の方法

(1) 人体温熱モデルを心臓系と血管系の相互作用の数理モデルへ組み込み、このモデルを用いて車室内温度と覚醒度の変化の関係をモデルによって計算する。

(2) 車室内を模擬した実験設備内の室温を時間的に変化させながら、連続血圧計を用いて計測した被験者の脈波の時系列データから眠気の評価指標の一つである RR 間隔の時間的変動を抽出することで、車室内温度変化の仕方が被験者の眠気に与える影響について調査した。さらに、周波数解析により交感神経活動の評価指標である LF/HF (注: LF は 0.04 ~ 0.15Hz, HF は 0.15 ~ 0.4Hz 成分) と副交感神経の評価指標である nHF (HF と 0.04Hz 以上の周波数帯域におけるパワースペクトル強度の総和の比) を求め、被験者に温度刺激を与える前後の LF/HF, nHF の変動傾向を比較することで温度刺激による眠気覚醒効果の評価を行った。

(3) 非侵襲脈波センサーで、1-20Hz の周波数帯域の信号が増幅されるという特徴を明らかにするために、このセンサーを構成している 3次元立体編み物 (3D-net) の繊維構造に着目し、数値解析と実験から、摩擦が振動特性に及ぼす影響を明らかにし、センサーの測定原理について検討する。

## 4. 研究成果

(1) 生理学的知見をもとに温熱環境の変化が血圧や RR 間隔に対して与える影響をモデル化するため Gagge らのモデル<sup>[1]</sup>を参考に、人体を皮膚層と深部層の 2 層からなる球体に近似した。そして、人体からの放熱量と産熱量に関して 1 次元の熱バランス式を立て、車室内温度を入力として皮膚層の温度と深部層の温度について解くことで体温を算出した。また、Seidel らのモデル<sup>[2]</sup>を参考に心臓血管系に作用する自律神経の働きが心拍変動や血圧に与える影響をモデル化した。さらに、体温が自律神経活動に与える影響について考慮することで上記 2 つのモデルを連成させた。計算結果の一例を Fig.1 に示す。

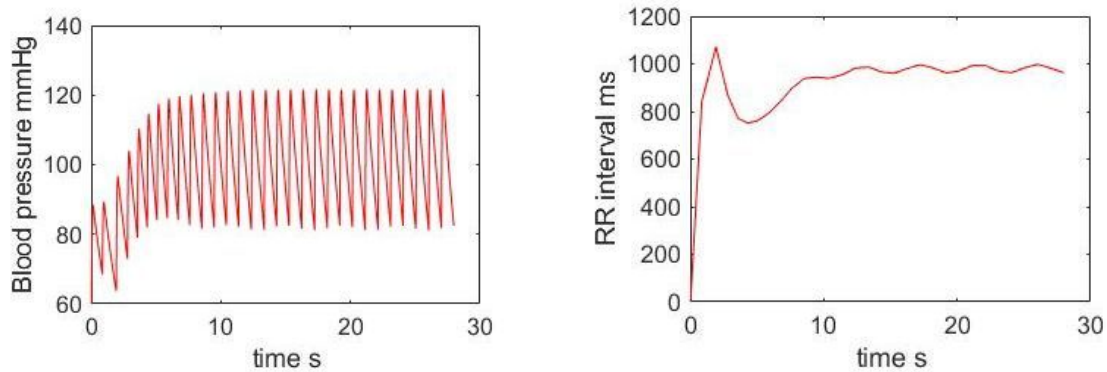


Fig. 1 Blood pressure and RR intervals calculated by cardiovascular model at room temperature of 30°C

(2) モデルの妥当性を評価するために、防音室内にて被験者実験を行った。実験は、冬場に人体への冷却刺激を行うという条件下で行った。実験参加者は、体温調節機能に大きな差がないと思われる健康な男子学生2名とした。本実験は早稲田大学倫理委員会の承認を受けており、実験の内容を実験参加者に対して事前に説明し、インフォームドコンセントを得た上で実施した。生理指標に影響することを考え、実験前日からは激しい運動、飲酒、カフェインの摂取を避け、適切な睡眠をとるように指示した。結果の一例を Fig.2 に示す。

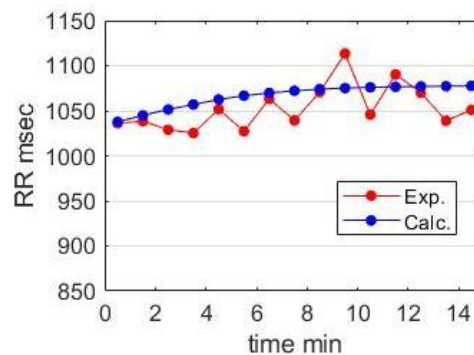


Fig.2 Comparison of experimental and calculated RR interval

(3) 最近、ドライバーの運転を妨げないシートバックなどに取り付け可能な非侵襲の脈波センサーが Fujita らによって開発されている<sup>[3]</sup>。このセンサーでは、1-20Hz の周波数帯域の信号が増幅されるという特徴がある。しかしながら、その測定原理は未解明である。そこで、本研究では、確率共鳴現象との関係に注目し、このセンサーを構成している3次元立体編み物(3D-net)の繊維構造と2本の繊維同士が擦れあう現象に着目し、数値解析と実験から、摩擦が振動特性に及ぼす影響を明らかにし、センサーの測定原理について検討した。弦同士を擦り合わせた時に発生する摩擦振動の周波数特性を調査したところ、非侵襲脈波センサーにおいて増幅されるような入力信号以外の周波数を持った振動が発生していることが明らかになった。また、入力加振周波数の1Hzという値は、人間の心拍の基本周波数に相当する値であり、実際のセンサーでも増幅原理が1Hz-20Hzにおいて発現していることから、センサーの増幅原理は摩擦振動に関係しているものと考えられる。

(4) 脈波測定時の3D-net内の構造をマクロに再現した装置による実験とモデルによる計算の結果から、細棒の材料や直径、接触角度に関わらず、摩擦振動によって高調波成分が増幅する様子を確認することができた。細棒の押し込み量が小さいほど高調波成分を明確に確認でき、逆に押し込み量が大いとき高調波成分がノイズに埋もれ確認できなくなった。これより、押し込み量が周波数特性に影響を及ぼすという知見を得ることができた。また、数値モデルにより周波数特性について検討した結果、細棒の断面二次モーメントが小さい場合には高調波成分が増幅されたが逆に断面二次モーメントが大いとき高調波成分は増幅されないことと、摩擦特性も周波数特性に影響することが明らかとなった。Fig.2からわかるように、初期押し込み量が

小さいときには、モデル計算でも実験でも 1 Hz の高調波成分が増幅されているのが明確に確認できる。今後、摩擦振動の影響を組み込んださらなる解析が待たれる。

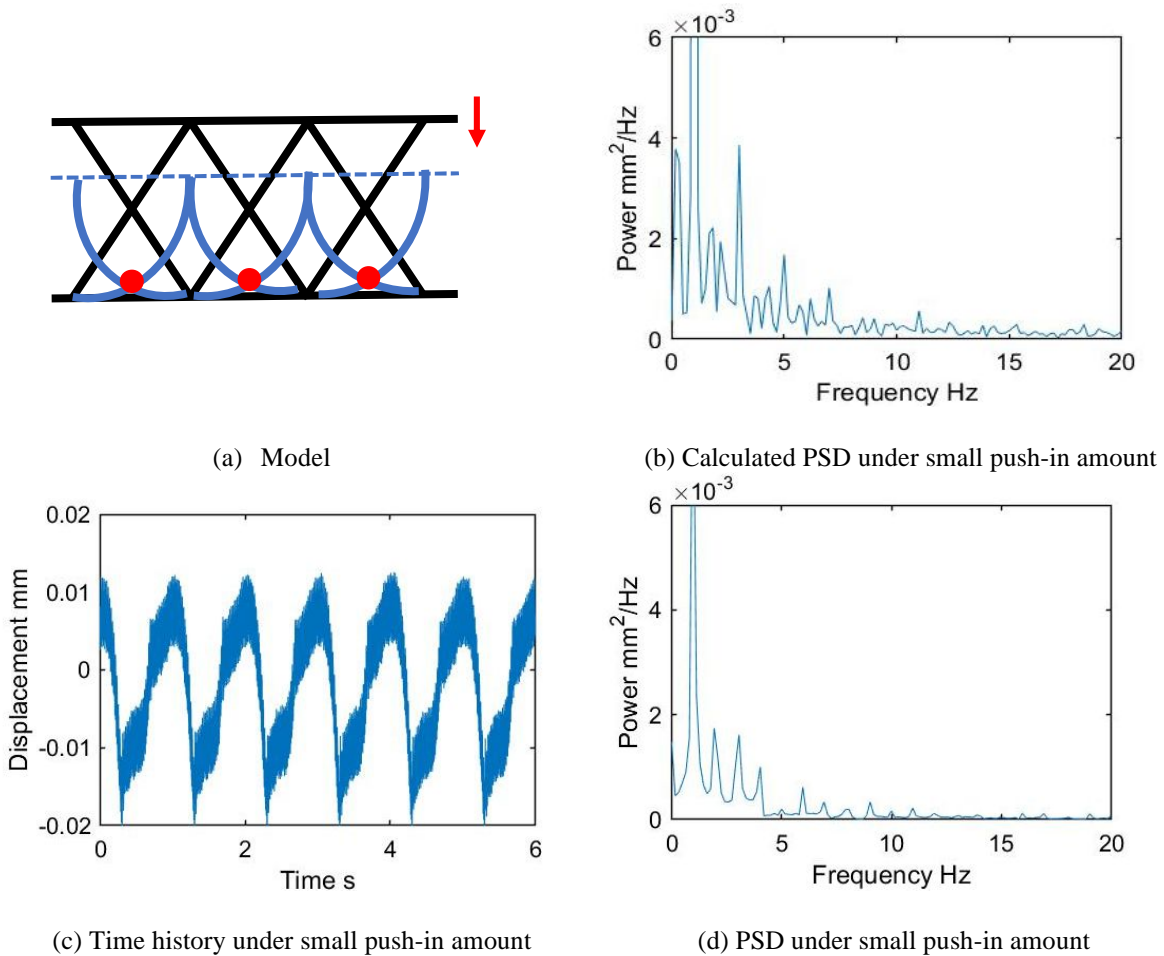


Fig.3 Model, calculated and measured wave form and PSD

#### <引用文献>

Gagge, A. "An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response", ASHRAE Trans, Vol.77, No.2192, 1997, pp.247-262.

H. Seidel, H. Herzog, "Modelling Heart Rate Variability Due to Respiration and Baroreflex", Modelling the Dynamics of Biological Systems, 1995, pp. 205-229.

Etsunori Fujita, Masahiro Horikawa, Yoshika Nobuhiro, Shinichiro Maeda, Shigeyuki Kojima, Yumi Ogura, Kohji Murata, Tomohiko Kisaka, Kazushi Taoda, Shigehiko Kaneko, Masao Yoshizumi, "Extraction of Apex Beat Waveform from the Acoustic Pulse Wave using Unrestrained sensing System", Scientific reports, (2021), pp.1-6.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 岡崎充、荒瀬太智、草鹿仁、金子成彦
2. 発表標題 繊維素材で構成されるドライバー体調モニタリング用脈波センサーで生じる摩擦振動の再現と周波数特性の解明
3. 学会等名 日本機械学会2023年度年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡崎 充, 荒瀬太智, 金子成彦, 草鹿 仁
2. 発表標題 繊維素材で構成されるドライバー体調モニタリング用非侵襲脈波センサーの測定原理
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Z. Xia, Y. Ishikawa, S. Kaneko, J. Kusaka
2. 発表標題 Development of a cardiovascular mathematical model considering the thermal environment
3. 学会等名 16th International Conference of Dynamical Systems -Theory and application (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石川 佑輔, 夏 周正, 草鹿 仁, 金子 成彦
2. 発表標題 温熱環境を考慮した心臓血管系モデルの構築
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021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
研究 分担 者	上道 茜  (UEMICHI AKANE)  (10734155)	早稲田大学・理工学術院・准教授(テニユアトラック)   (32689)	

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