

令和 5 年 5 月 28 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20659

研究課題名（和文）働く高齢者の安全向上と支援のための環境生体データ科学の構築

研究課題名（英文）Establishment of environmental and biomedical data science for improving elderly workers safety and health

研究代表者

清野 健（Kiyon, Ken）

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

研究者番号：40434071

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）：働く高齢者の安全支援を実現するため、ウェアラブル生体センサを用いて計測可能な心拍数、身体活動量などの生体情報と、IoTセンサを用いて計測可能な温湿度などの環境情報を統合分析する方法を開発した。重要な成果として、ウェアラブル生体センサを活用して毎日の生体情報計測を行うことで個人特性を自動学習し、急な体調変化のリアルタイム評価を実現するアルゴリズムを開発した。また、集積した生体情報および環境情報を分析することで、個人特性の評価、労働環境のリスク評価するアルゴリズムを開発した。本研究で開発したアルゴリズムについては、企業の協力をえて実際の労働環境での実証を行い、その有用性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高齢化率が3割を超えつつある本邦において、年金・医療などの社会保障制度を維持するためには、定年年齢の引き上げは不可避である。しかし、人は加齢とともに体温調節、運動、記憶・認知・判断などの機能が低下するため、働く高齢者の増加は新たな健康問題を引き起こす。本研究では、ウェアラブル生体センサを活用し、働く高齢者の安全支援を実現するための技術を開発した。本研究の成果は、働く高齢者の安全の見守りだけでなく、より安全な職場環境への改善も実現するものである。これらは、安全・安心な社会の構築に貢献するものであり、社会的意義がある。また、生体データ分析の新たな技術開発という点で、本研究成果には学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）：To achieve adequate safety support for working elderly people, we developed a method to integrate and analyze biosignal information such as heart rate and physical activity that can be measured using wearable biometric sensors and environmental information such as temperature and humidity that can be measured using IoT sensors. As a significant achievement, we developed an algorithm that automatically learns individual characteristics through daily biosignal measurements using wearable biosensors and realizes real-time evaluation of sudden changes in physical condition. We also developed an algorithm that evaluates personal characteristics and risks in the work environment by analyzing the accumulated biometric and environmental information. The algorithms developed in this study were verified in an actual working environment, and their usefulness was confirmed.

研究分野：生体情報学

キーワード：労働環境衛生 ウェアラブル生体センサ 生体データ科学

## 1. 研究開始当初の背景

全人口に占める高齢者数が3割を超えつつある本邦において、経済の低成長に耐えながら、年金・医療などの社会保障制度を維持するためには、定年年齢の引き上げは不可避である。しかし、大規模な高齢労働者層の出現は、従来の労働年齢にはなかった新たな問題を引き起こす可能性がある。人は加齢とともに体温調節、運動、記憶・認知・判断などの機能が低下するため、高齢者では労働災害の発生リスクが高まる。そのようなリスクは、働く側と雇用する側の両者において懸念事項となるため、高齢者の社会参加を妨げる要因になる。そのような課題を解決するため、本研究では、「働くことで人生の活力を維持し、働くことでより健康になれる」社会を実現するために、高齢者の労働・社会参加の価値の向上を目指す。これまで、国内においては、健康寿命の延伸を実現するため、寝たきりの直前段階を予防する医学研究が積極的に行われてきた。本研究では、そのような視点とはやや異なり、長い高齢者人生の毎日を安心して有意義なものにするために、労働環境を高齢者向けに改善する必要性を強調する。

## 2. 研究の目的

本研究では、定年年齢の引き上げによる高齢労働者の増加がもたらす健康問題、および労働環境の問題の発見・対応のための方法論を確立することを目的とする。本研究では、高齢者が病気でなければ良い、あるいは寝たきりでなければ良いとする規範ではなく、高齢者の日常生活に安心と活力を与えること、すなわち高齢労働者ウェルネスの実現に重点を置く。ここでは、従来科学のように、一般的・平均的知識を蓄積し、それを社会全体に適応するだけではなく、個別の実世界環境と個人を実際に計測しながら、計測されたデータを速やかに分析することで、課題発見から改善までのサイクルを加速的させるアプローチをとる。このような枠組を構築するために、以下の内容に取り組む：

- (1) 高齢者の労働環境および身体能力を、IoT センサを用いて評価するシステムの確立(環境と身体との相互作用を分析)。
- (2) 実世界環境で働く高齢労働者の分析に基づき、環境リスクや潜在的課題を発見する技術の確立(実世界問題の見える化)。
- (3) 環境改善策(空調や休憩時間延長など)の効果の評価技術を確立。

## 3. 研究の方法

本研究では、働く高齢者の実世界環境情報(実際の労働環境の温湿度、作業負荷など)および生体情報(心拍数、活動量、体温など)を、IoT センサを用いて計測し、それらの情報を統合して分析する。申請者のグループは、工事現場や工場で働く作業員向けに、IoT センサネットワーク、および日本気象協会の気象データネットワークを活用した労働環境評価システムを開発し、事業化につなげた実績がある。本研究では、この技術をさらに発展させることで、高齢者の労働環境評価を実現する。主に以下の内容に取り組む：

- (1) 環境ストレス評価アルゴリズムの開発  
ここでは、高齢者を主な対象として、暑熱環境の適応能力の評価(環境順化の評価を含む)、労働作業が運動器に与える負荷評価の評価など、高齢化にともなう環境適応能力の低下を評価するアルゴリズムを開発する。
- (2) データ収集・分析システムの開発  
IoT 技術により集積された環境および生体データを、情報端末あるいはクラウド上でリアルタイムに分析できるシステムを開発する。前項で開発されたアルゴリズムを実装し、大規模な実証実験に対応できるシステムを構築する。
- (3) 実環境での実証実験

工事現場、工場、職業運転士の協力をえて、数十から数千人規模の労働現場で実証実験を行う。ここでは、大規模工場だけでなく、小規模な町工場等も想定し、個別の企業における労働環境問題を調査する。加えて、空調の導入、休憩スケジュールの最適化、作業負荷の軽減対策の導入など、職場環境の改善策の効果についても、その効果を定量化する技術を開発する。また、新たな改善策を本研究において開発し、その効果を実証する。

現状では、職業をもたない高齢者も多い。そのような高齢者を対象としたモニタリングについても実施する。この場合は、寝たきりの予防という観点から、フレイルの評価について検討する。

## 4. 研究成果

### (1) 心拍応答に基づく心拍機能評価指標の開発

多くのウェアラブル心拍計では、心拍数の計測に加えて、3軸加速度センサを含むものが多い。ここでは、3軸加速度センサの情報から身体活動量を推定し、身体活動量に対する心拍数の応答

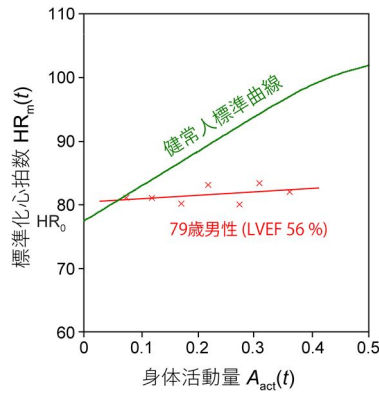


図 1：身体活動量に対する心拍数の変化を表す心拍応答．健常人標準曲線は，約 7000 人の労働者の平均として推定した．心不全患の例（赤実線）では，身体活動量に応じて心拍数が増加しない．

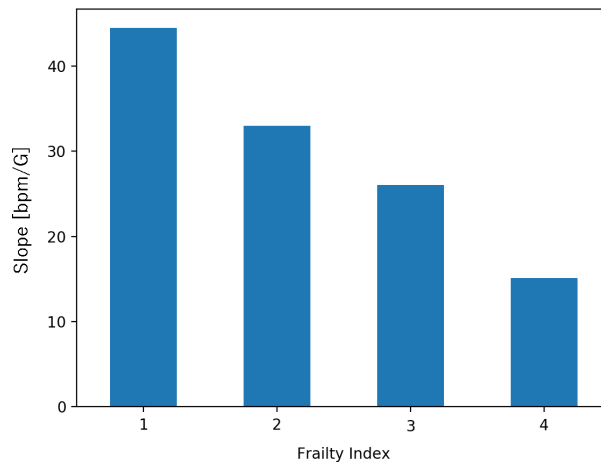


図 2：フレイル得点と心拍応答の傾きの関係．

（心拍応答）を評価する方法を開発した（図 1）．心拍応答の特徴量として，代謝当量が 1METs に相当する点の値（基準心拍数）と，心拍応答を直線近似した場合の傾きを定義した．被験者実験により，基準心拍数は安静時心拍数と強く相関していることが確かめられた．また，傾きについては，フレイル度の上昇にともない小さな値をとる傾向がみられた（図 2）．

加速度センサを含むウェアラブル心拍計を用いることで，日常生活中に心拍応答を評価可能であるので，ここで導入した指標は，働く高齢者の日常の健康管理に役立つと考えられる．ここで導入した指標の基準値を設定するために，ウェアラブル心拍計を用いて，工事現場や工場働く 60 歳以上

（最高年齢 74 歳）の生体情報を計測した．加えて，60 歳未満の労働者についても 870 人のデータを取得した．心拍応答の分析の結果，加齢とともに傾きの減少が見られた（図 3）．我々の先行研究において評価した心疾患患者の心拍応答は，年齢をマッチングさせても，労働者の値から大幅な減少がみられることから，心拍応答の傾きは，心機能や体力を反映していると考えられる．

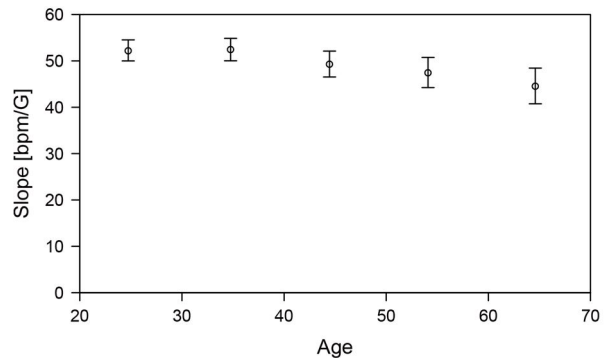


図 3：心拍応答の傾きの年齢依存性．

## (2) 急性の体調不良の評価法の開発

風邪，腹痛，頭痛などの急性の体調不良を検出する方法を検討した．ここでは，ウェアラブル

心拍計を用いて計測可能な心拍数、身体活動量、環境温度などの生体・環境情報データを活用し、日々の生活中、仕事中に発生する体調不良の客観的評価法を開発した。この方法では、ある個人の身体活動量(新たに開発した加速度データの分析法に基づく評価)と周辺の環境情報データを用いて、その個人の心拍数を予測する数理モデルを構築し、数理モデルの予測と実際に計測された心拍数の解離度を評価することで、普段とは異なる体調異変の発生を検出する。実際に職場で発生した、体調不良例を用いて、このアプローチの有効性を検証した。

図4は、ある工場の労働者において見られた体調不良検出例である。図中の破線が予測心拍数、実線が実際に計測された心拍数(実測心拍数)である。ここで、予測心拍数の計算には、身体加速度から推定された代謝当量(metabolic equivalents; METs)と、環境温度を説明変数とする線形回帰モデルを用いた。モデルパラメタの推定には、この労働者の過去のデータを用いた。図4では、12時すぎから、予測心拍数と実測心拍数の大きな乖離がみられる。この労働者は、13時ごろに現場の管理者に体調不良を訴え、午後には休息をとっている。我々の開発したシステムでは、予測心拍数と比べて実測心拍数が高い状態が持続的に観測された場合、体調確認を促す注意を労働者とその管理責任者に自動通知するようになっており、この例でも12:30頃にこの注意が通知されている。

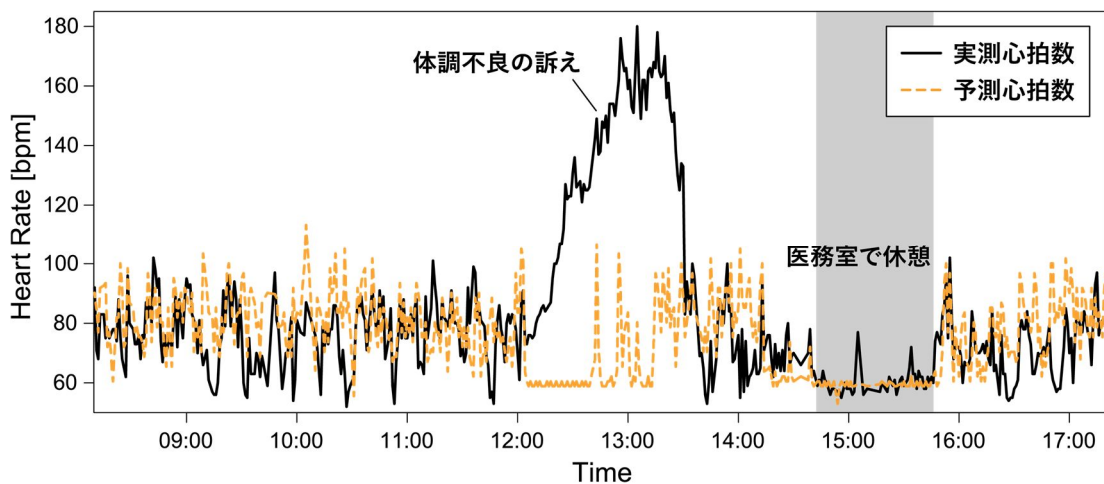


図4：実測心拍数と予測心拍数の比較。13:00頃に体調不良を訴えた工場労働者の例。

### (3) 職場環境における集団特性を活用した職場ストレスの評価法の開発

近年、夏季の最高気温が40を超える猛暑日が観測されるようになってきている。そのような異常な高温環境では、従来の労働環境衛生の安全基準(JIS Z 8504: 2021 [ISO 7243: 2017])を適用することはできない。そこで、本研究では、実際の労働者の集団の心拍応答を評価することで、実環境での暑熱負担を評価する方法を開発した。このアプローチの有効性について、工事現場や工場のデータを用いて検証した。

具体例として、スマート衣服に内蔵された心拍センサと加速度センサの情報、および環境IoTセンサの温湿度情報をサイバーフィジカルシステムに統合して分析した結果を示す。ここでは、スマート衣服を用いて計測可能な心拍数の1分ごとの中央値と平均身体活動量(METsに換算された値)を、同一環境で働く複数人から収集する。心拍数の代表値として1分間の中央値を採用するのは、外れ値の影響を軽減するためである。図は、ある工場で働く約50名の労働者のデータ(全員で延べ約4,000日分)を用い、湿度の条件に分けて平均心拍応答を推定したものである。相対湿度(RH)が50%未満の条件(図5(a))においても、50%以上の条件(図5(b))においても、外気温が上昇するに従って、平均心拍応答が上方にシフトしている。このシフト幅は暑熱負担を反映していると考えられる。これまでに、直腸温の上昇と心拍数の上昇が強く関連することが知られている。加えて、平均値の統計的特性により、直腸温と心拍数の集団平均をとれば、標本数が増えるにつれて、両者の関係は真の関係式に漸近することが期待できる。よって、このアプローチでは、直腸温と心拍数の関係の個人差やランダムなばらつきを打ち消した推定が可能になる。

我々の予備実験では、集団平均心拍数20bpmの上昇が、直腸温約1の上昇に相当した。従って、平均心拍応答の上昇幅を見積もることで、平均直腸温の上昇を推定できる。また、平均心拍応答の上昇幅は、暑熱負担の指標として活用することが可能である。

図6は実際に平均心拍応答の上昇幅を評価した結果である。ここでは、図6(a)のように、加速

度センサで推定された身体活動量の 1 から 4 METs の領域において、平均心拍応答の平均上昇幅を求めた。温度 25 未満、相対湿度 50%未満の環境を基準として、各環境における平均心拍応答の上昇幅を評価した。図 6(b)では、外気温  $T_a$  の上昇と相対湿度 RH の上昇に伴い心拍数の上昇幅が増加しており、暑熱負担の各環境条件での暑熱負担が定量化できている。この例では、温湿度のみに基づき環境条件を分けたが、さらにスマート衣服を着用する人数を増やし、年齢、性別、職種、作業服タイプなどの条件を分けることで、より詳細な暑熱リスクの定量化が可能になる。サイバーフィジカルシステムを活用することで、ほぼリアルタイムのリスク評価も可能になる。さらにこの方法は、作業服をより涼しいものに改善する、休憩回数を増やすなどの、職場の改善策の効果も評価可能である。従って 職場の改善サイクルにおいて活用することができる。

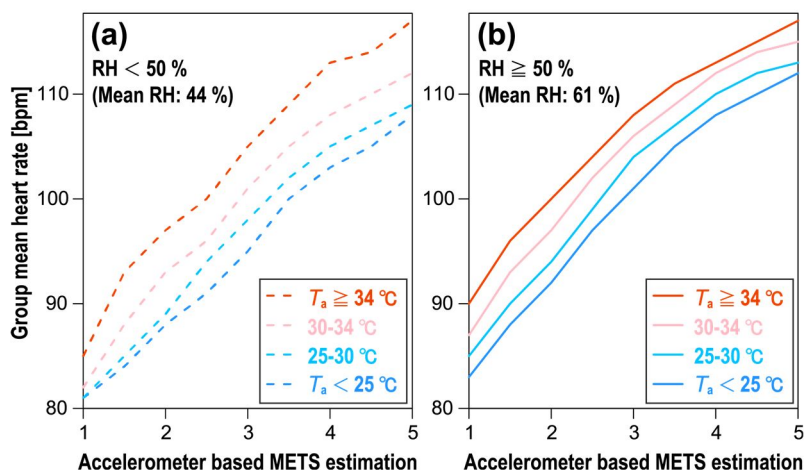


図 5：平均心拍応答の例。(a) 相対湿度 (RH)が 50%未満の環境。(b) RH が 50%以上の環境。

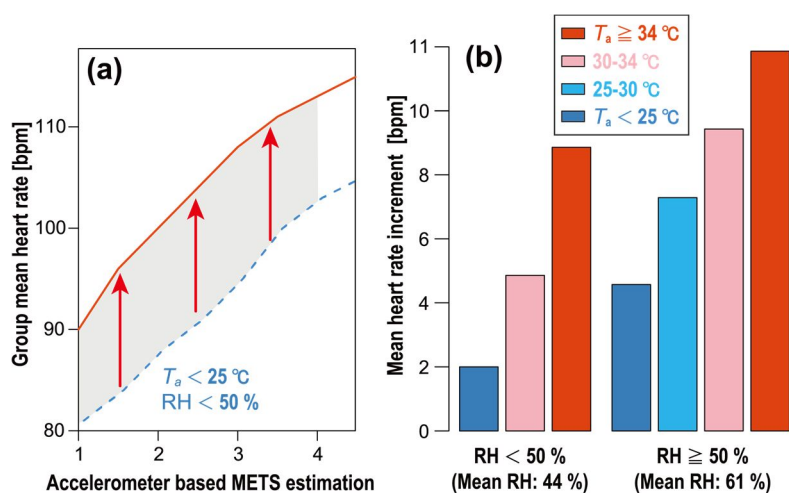


図 6：平均心拍応答の上昇幅の評価。(a) 温度 25 未満、相対湿度 50%未満の環境 (破線)の平均心拍応答を基準に、灰色の領域の平均上昇幅を平均心拍上昇 (Mean heart rate increment)として定義。(b) 図 5 に示した条件ごとの平均心拍上昇。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Akio Nakata, Miki Kaneko, Chinami Taki, Naoko Evans, Taiki Shigematsu, Tetsuya Kimura and Ken Kiyono	4. 巻 379
2. 論文標題 Assessment of long-range cross-correlations in cardiorespiratory and cardiovascular interactions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions of the Royal Society A	6. 最初と最後の頁 20200249
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1098/rsta.2020.0249	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 清野 健	4. 巻 66
2. 論文標題 柔軟素材を用いたIoTシステムの基礎と応用?III	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 システム/制御/情報	6. 最初と最後の頁 232 ~ 239
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11509/isciesci.66.6_232	査読の有無 無
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 Ju Hanqiu, Honda Naoki, Yoshimura Shige H., Kaneko Miki, Shigematsu Taiki, Kiyono Ken	4. 巻 208
2. 論文標題 Multidimensional fractal scaling analysis using higher order moving average polynomials and its fast algorithm	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Signal Processing	6. 最初と最後の頁 108997 ~ 108997
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sigpro.2023.108997	査読の有無 無
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 Chernykh Mariia, Vodianykh Bohdan, Seleznov Ivan, Harmatiuk Dmytro, Zyma Ihor, Popov Anton, Kiyono Ken	4. 巻 12
2. 論文標題 Detrending Moving Average, Power Spectral Density, and Coherence: Three EEG-Based Methods to Assess Emotion Irradiation during Facial Perception	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 7849 ~ 7849
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/app12157849	査読の有無 無
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5件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 藤本雄大, 金子美樹, 重松大輝, 清野健
2. 発表標題 高次フラクタル解析を用いた心拍変動のスケーリングクロスオーバー現象の評価
3. 学会等名 第60回日本生体医工学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ken Kiyono
2. 発表標題 Healthcare digital transformation using smart wearables
3. 学会等名 48th Textile Research Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清野 健
2. 発表標題 ウェアラブル生体センサを活用したスマートウェルネスケアの実現
3. 学会等名 講演会「繊維×AI・IoT・DX」～（第3回）デジタル活用の最前線～（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yosuke Isoyama, Ken Kiyono
2. 発表標題 Heat Stress Assessment using a Wearable Biosensor Network in Workplace Environments
3. 学会等名 2022 IEEE 4th Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清野健, 金子美樹, 重松大輝, 渡邊英一
2. 発表標題 ウェアラブル心拍計を活用した職場のウェルネスケア
3. 学会等名 心電学関連研究会2020
4. 発表年 2020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	金子 美樹 (Kaneko Miki)  (10795735)	大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教  (14401)	
研究分担者	重松 大輝 (Shigematsu Taiki)  (50775765)	大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教  (14401)	

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		
ウクライナ	Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute		