

業種・労働内容に依存した生体情報に基づく 労働ストレスの基礎検討

立命館大学 OIC 総合研究機構 ○ 丹羽 誠
マージシステム株式会社 蔭山 逸行
マージシステム株式会社 塘 将典
株式会社熊谷組 畑本 浩伸
株式会社熊谷組 北原 成郎
東京工業大学環境・社会理工学院 仙石 慎太郎
立命館大学理工学部 橋本 征二
名古屋市立大データサイエンス学部 児玉 耕太

1. はじめに

現代社会において、社会情勢の変化や高齢労働者の増加、就業意識や働き方の変化、業務の質的变化など労働環境は著しい変化を見せている。そのような状況において、労働者の健康の保持促進を図り、継続して働くことのできる労働環境を整え、適切に人的資源を管理することは、企業にとって労働生産性向上の観点からも重要となっている。

近年、過労死や心理的ストレスが原因の精神障害の労災請求は年々上昇している。しかし、従来の質問表によるストレスチェックは客観的指標とは言い難く、リアルタイム性・即時性に欠けるなどの問題があった。

そこで、本研究では質問表に変わる労働者のストレス度合いを示す客観的指標の確立に向け、労働者本人からスマートウェアラブルデバイスで取得された生体情報に基づくストレス分析を試みた。

本報告では基礎検討として、今までのスマートウェアラブルデバイス実証実験¹⁾²⁾で得られた心拍情報、加速度情報などの生体情報を用い、複数のストレス指標を用いて業種・労働内容毎のストレス特性の違いを考察した結果を報告する。

2. 生体情報の取得

2.1 システム構成

心拍数 (Heart rate, HR)、身体活動量 (加速度)、温度を操作者が着用したスマートウェアラブルデバイス (センシングウェア、データ処理及び送信機から成る) で取得した。心電計 (Electrocardiogram, ECG) 電極の役割を果たすセンシングウェアは COCOMI® (東洋紡)、三軸加速度・心電計・温度データの処理及び送信機は WHS-2 (ユニオンツール)、データの遠隔送受信には Raspberry Pi Zero W (Raspberry Pi Foundation) および CC2650 (Texas

Instruments) を使用した (図-1)。センシングウェアの衣類は伸縮性のある生地で作られており、作業中のデータ取得が容易となっている。

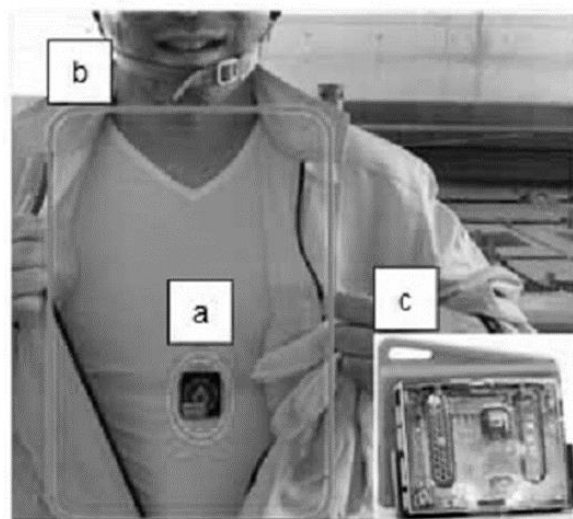


図-1 スマートデバイスの装着状況. (a) 三軸加速度・心電計・温度データの処理及び送信機WHS-2、(b) センシングウェアCOCOMI®および(c) データ遠隔受信装置CC2650。

2.2 実証実験フィールド

2.2.1 重機オペレーション¹⁾

データの収集は、2020年7月29日、30日と2021年2月18日に、建設会社である熊谷組の筑波技術研究所で行った。

参加資格は18～50歳の健康者とし、神経または心血管系の持病を持つものは除外した。結果として建設会社から選抜された建設技術者9名が参加者となり、反復参加を許容した。参加者は全員男性であり、年齢は35.6±12.8歳、身長168.7±4.1cm、

体重 71.1±13.2kg、BMI 24.9±4.4 (平均値±標準偏差) であった。

参加者は 1 周 400m の工事現場を模したテストコースでクローラーキャリア (IC120-2、KATO) の運転操作を直接搭乗、遠隔操作、仮想現実 (VR) 下での操作の 3 条件で反復実施し、その間の生体情報 (心拍数、身体加速度、温度) を取得した。参加者はすべて建設機械の遠隔操作の訓練を受けており、操作法を熟知していた。

この実証実験環境では、直接搭乗および VR では振動の体感があるところ、遠隔操作はモニタのみを頼りとする操作であり、操作実感には欠けるものの振動の負荷からは解放されると考えられる状況であった。

2.2.2 産業廃棄物処理²⁾

データの収集は 2019 年 9 月 3 日から 4 日、および 2020 年 8 月 24 日から 26 日にかけて、京都市伏見区にある廃棄物処理施設で実施した。参加者は施設の従業員の中から募集し、施設からの呼びかけに応じた作業員がこの実験に参加した。

参加資格は 20~63 歳の健康者とし、神経疾患や心血管疾患のある者は除外した。参加者は合計 29 人であり、年齢は 35±15.7 歳、BMI は 21.5±3.2、平均職務経験は 7.7±4.2 年、参加者は全員男性であった。

参加者は、仕事内容に基づいて 2 つのグループに分割した。グループ A (n=22) は産業廃棄物の運搬、解体、選別を担当し、グループ B (n=7) は施設のメンテナンスと設備修理を担当した。グループ A の作業員は、施設でトラックから廃棄物を降ろし、手作業で整理し、カートで焼却用の搬入口まで移動させる担当である。廃棄物選別工程では、比較的小さな廃棄物 (重機には適さない) が手作業で選別されるため、継続的な有害物への曝露リスクがあった。グループ B の作業員は、施設内の機器の点検と修理が仕事であり、廃棄物に直接触れることはなかった。

グループ A では手作業と人力での移動があり、グループ B とは身体活動の態様が異なっている。また、廃棄物との接触とメンテナンス特有の作業との差異において、業務上で感じるリスクに差異があることが考えられる状況であった。

2.3 心拍データの解析

心拍データの一つの利用法として、心拍数 (Heart Rate, HR) を用いた身体的負荷の評価を行った。指標としては %HRR を用いた。%HRR は下式で表される指標である。

$$\%HRR = (HR_{\text{working}} - HR_{\text{resting}}) / (HR_{\text{maximum}} - HR_{\text{resting}}) \times 100 (\%)$$

なお、HR_{working} は労働時の平均 HR、HR_{resting} は安静時の HR、HR_{maximum} は最大心拍数である。

心拍データのもう一つの利用法として、HR および心拍数変動 (Heart Rate Variability, HRV) から自律神経機能の状況を評価した³⁾。一般に、心拍は自律神経に支配されており、交感神経優位になれば HR が増加する。心拍にはある程度のゆらぎ (HRV) があるが、これは通常、交感神経・副交感神経の緻密な制御を反映している。そのため、疲労やストレスによって HRV の低下が起こるとされる⁴⁾。本研究の評価指標としては、Time-domain と Frequency-domain の 2 つの解析法から、それぞれ心拍間隔の標準偏差 (RMSSD) および低周波高周波比 (LF/HF) を用いた。

2.4 統計解析

統計解析は SPSS Ver.26 (IBM Corp)、Bell Curve (Social Survey Research Information) for Excel version 3.21 (Microsoft Corporation) および R Ver. 4.2.2 (R foundation) で行った。多群間の比較は Kruskal-Wallis 検定後、有意であった場合には Steel-Dwass 検定で群間の有意差を確認した。二群間の比較は Mann-Whitney U 検定を行った。

3. 各業種・作業における体動・身体負荷の特徴

3.1 身体加速度 (振動・体動)

重機操作は基本的に搭乗操作であり、身体加速度データは振動の指標として扱った。一方、廃棄物選別および施設メンテナンスは主にマニュアル作業である。そのため、2 つの実証実験間で身体加速度を体動指標として比較することは困難である。

重機オペレーションにおいては直接搭乗と遠隔 VR は類似した環境と考えられたが直接搭乗の身体加速度が有意に大きかった。振動の影響が無い遠隔モニタ群の身体加速度は低値であった。

廃棄物処理においては廃棄物選別よりメンテナンスの身体加速度が有意に大きかった。作業時間全体を通じての体動はメンテナンス群の方が大きかったと考えられる。ただし、この推定体動は純粋な加速度による評価であり、労作と結びつく身体負荷は RRI または %HRR で評価されるべきと考える。

表-1 各グループの身体加速度

フィールド	グループ	n	身体加速度 (mG) (平均値±標準偏差)	
重機オペレーション	直接搭乗	14	595.2	± 177.3
	遠隔モニタ	14	133.3	± 207.0
	遠隔VR	14	553.9	± 210.0
産業廃棄物処理	廃棄物選別	22	222.4	± 116.3
	メンテナンス	7	261.8	± 126.2

1) Kruskal-Wallis 検定後 Steel-Dwass 検定で直接搭乗-遠隔モニタおよび遠隔モニタ-遠隔VR の p<0.001、直接搭乗と遠隔VR の p=0.004

2) Mann-Whitney U 検定で p<0.001

3.2 RRI (心拍間隔)

RRI (心拍間隔) の評価結果を図-2 に示す。心拍数が上昇すれば RRI は短縮するため、短い RRI は身体負荷または身体負荷に依らない交感神経系刺激による拍動数増を示唆する。

前項の結果と見比べると、VR 操作は振動による身体負荷が加わっているが、RRI はモニタ操作と VR 操作に大きな差異が見られない。一方で、直接搭乗とモニタ操作間には有意差が見られ、振動による身体負荷と、実操作を行う緊張の両要素が心身の負荷となっている可能性がある。

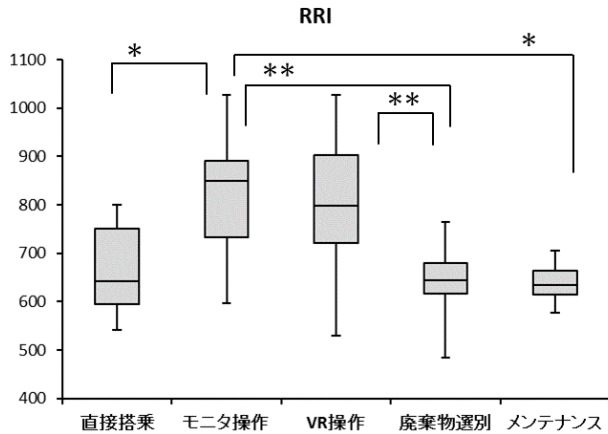


図-2 RRI の群間比較.

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$.

3.3 %HRR

%HRR の評価結果を図-3 に示す。%HRR は運動により変動しうる最大心拍数に対する作業中心拍数の位置づけであり、どれだけの身体負荷を作業員自らがかけているかの指標と解釈できる。

マニュアル操作である廃棄物選別とメンテナンスで高く、次いで実作業である直接搭乗で高く、実作業を伴わないモニタおよび VR を介した遠隔操作では低かった。

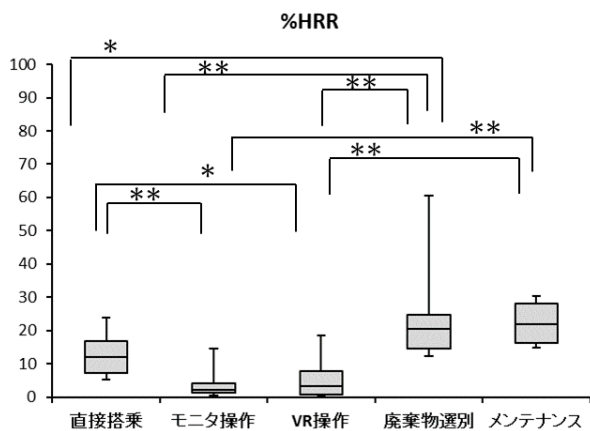


図-3 %HRR の群間比較.

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$.

4. 各業種・作業における自律神経活動の特徴

4.1 RMSSD

RMSSD の評価結果を図-4 に示す。RMSSD については群間に顕著な差が無く、Kruskal-Wallis 検定で有意差が認められなかった。

すなわち、作業内容によって副交感神経系に異なる影響があるとは判断されなかった。

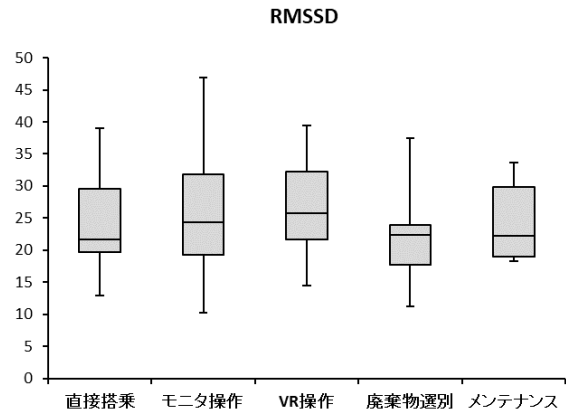


図-4 RMSSD の群間比較.

4.2 LF/HF

LF/HF の評価結果を図-5 に示す。直接搭乗で高く、遠隔操作では低い傾向があり、また、メンテナンス業務でも低い傾向が伺われた。

すなわち、実地対応と、必ずしも実地での対応ではない作業内容とでは、前者で交感神経が亢進しやすい状況であることが示唆された。また、モニタと VR に有意差がみられたことから、振動そのもの、あるいは、仮想的状況によって交感神経活動が活発化する可能性が示された。

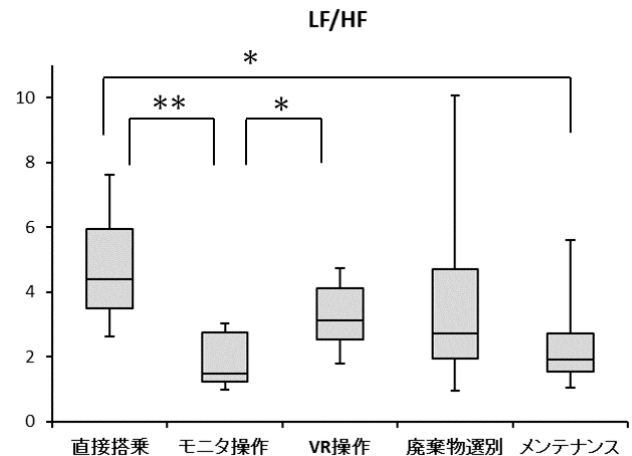


図-5 LF/HF の群間比較.

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$.

5. 特徴量の相互関係

図-6 に身体的負荷の指標である %HRR と心理的負荷の指標である LF/HF の関係を示す。作業内容を横断してある程度関係性が維持されていることが確認された (図中に近似曲線を例示)。この背景として、もともと身体的負荷によっても交感神経優位になりうるという生理的な連関が考えられ、

これが寄与した可能性がある。

ただし、VR 群で身体的負荷の低いケースでは身体的負荷が大きくないもののモニタ群より心理的負荷が大きい傾向が伺われ、VR が主に心理的負荷を与えている可能性も示された。一方、VR 群で %HRR が高いケースもあり、状況により VR 環境における振動等の身体的負荷の寄与が大きい可能性も残されている。

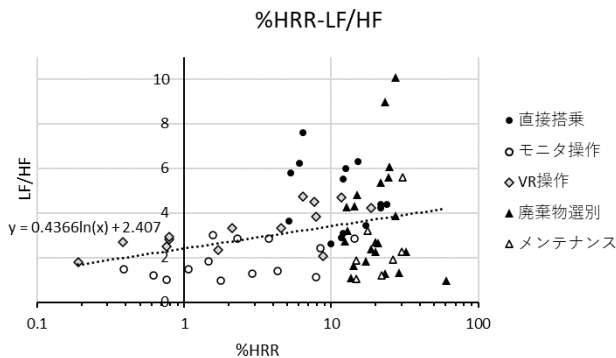


図-6 %HRR と LF/HF の関係。

6. 各作業の負荷特性の特徴

各作業の負荷特性を考察するため、要約統計量に着目して身体的負荷の指標である %HRR と心理的負荷の指標である LF/HF の関係を検討した (図-7)。

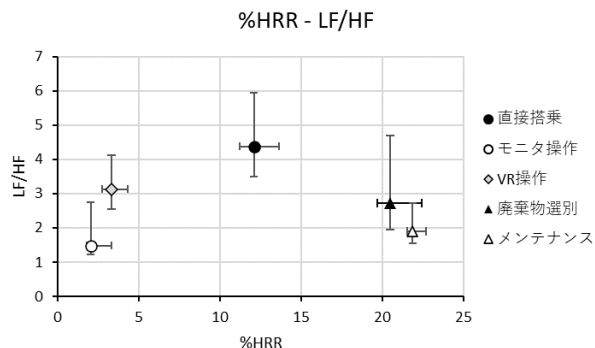


図-7 %HRR と LF/HF の関係 (要約統計量)。各点は中央値を、誤差線は四分位範囲を示す。

%HRR の中央値および四分位範囲に着目して考察すると、遠隔操作より直接操縦、それよりも用手が主である作業 (廃棄物選別やメンテナンス) の身体負荷が大きい。

LF/HF に着目すると、実際に現地で操縦する直接搭乗の心理的負荷が大きく、VR 操作は部分的にそれを模しているが、身体的負荷は十分に模していなかったと考えられる。用手作業のうちでは未知のリスクが想定される廃棄物選別は心理的負荷が大きく、メンテナンスは比較的負荷が小さいと考えられた。すなわち、実地において、業務上感じるリスク (未知・認知不足によるものを含む) があ

れば緊張傾向となり、身体負荷に加え心理的負荷を生じることが示唆された。

また、%HRR と LF/HF の 2 次元に着眼することで、(a)遠隔操作、(b)直接搭乗操作、(c)用手作業の 3 つの類型で労働負荷の特徴が異なることを認識することができた。

7. おわりに

本検討は業種・作業内容を横断した評価を試み、取得できる情報を探索する意図で実施したものである。今回データを使用した 2 つの実証実験で性別と年齢の代表値は類似していたが、協力者の背景が類似しているかについては不明である。

その状況下で、RMSSD で評価した副交感神経の働きには群間差が見られず、労働環境間で副交感神経活動の明確な差異が伺われなかった一方で、交感神経の働きを反映する LF/HF や RRI には群間差が認められたことから、緊張をはじめとする労働負荷が存在し、その強度が業務内容ごとに異なることが示唆された。また、身体的負荷の指標である %HRR にも顕著な群間差が確認された。さらに、身体的負荷 (%HRR) と心理的負荷 (LF/HF) の両面から労働負荷を特徴づけ認識できることが示唆された。

この結果から、身体的負荷または心理的負荷の状況をリアルタイムで把握することで、適切な休憩を確保できる可能性が示唆される。特に、作業中の心拍数モニタにより、実地で感じるリスクなどによる緊張傾向を検出し、それを基にして交替頻度など労務管理を改善、あるいは根本原因除去に向けて業務内容の改善を試みることは労働衛生管理上有益であると考えられる。

参考文献

- 1) Hashiguchi N, Cao J, Lim Y, Kuroishi S, Miyazaki Y, Kitahara S, Sengoku S, Matsubayashi K, Kodama K. : Psychological Effects of Heart Rate and Physical Vibration on the Operation of Construction Machines: Experimental Study, JMIR Mhealth Uhealth. 9(9): e31637, 2021.
- 2) Kageyama I, Hashiguchi N, Cao J, Niwa M, Lim Y, Tsutsumi M, Yu J, Sengoku S, Okamoto S, Hashimoto S, Kodama K. : Determination of Waste Management Workers' Physical and Psychological Load: A Cross-Sectional Study Using Biometric Data, Int J Environ Res Public Health. 19(23): 15964, 2022.
- 3) Shaffer F, Ginsberg JP. An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. Front Public Health. 28(5):258, 2017.
- 4) Lu K, Sjörs Dahlman A, Karlsson J, Candefjord S. Detecting driver fatigue using heart rate variability: A systematic review. Accid Anal Prev. 2022 178:106830, 2022.