

博 士 論 文

情報通信技術の活用による産業廃棄物処理
労働者の労働負荷の定量化に関する研究
(Research on quantification of workload of
industrial waste treatment workers through the use
of information and communication technology)

2023年3月

立命館大学大学院テクノロジー・マネジメント研究科
テクノロジー・マネジメント専攻博士課程後期課程

蔭山 逸行

立命館大学審査博士論文

情報通信技術の活用による産業廃棄物処理労働者の労働負荷
の定量化に関する研究

(Research on quantification of workload of
industrial waste treatment workers through the use of
information and communication technology)

2023年3月

March 2023

立命館大学大学院テクノロジー・マネジメント研究科

テクノロジー・マネジメント専攻博士課程後期課程

Doctoral Program in Technology Management

Graduate School of Technology Management

Ritsumeikan University

蔭山 逸行

KAGEYAMA Itsuki

研究指導教員：児玉 耕太准教授

Supervisor : Associate Professor KODAMA Kota

目次

1. 研究背景	5
1.1. 廃棄物処理産業と労働者	5
1.2. 労働力の高齢化と未熟練労働者	9
1.3. 安全管理と情報通信技術	10
1.4. ウェアラブルデバイスの発展	12
2. 先行研究調査とリサーチギャップ	15
2.1. 生体情報とストレス指標	15
2.2. 建設業界におけるウェアラブルデバイスの活用	18
3. 研究目的とリサーチクエスチョン	20
4. 研究方法と研究対象	22
4.1. ウェアラブルデバイスを用いた生体情報測定システム	22
4.2. HRV メトリクス	24
4.3. 心拍と体温	26
4.4. 身体的負荷と身体活動量	27
4.5. 本論文で使用される用語	29
4.6. 分析ツール	31
5. 研究1「廃棄物処理労働者と非廃棄物処理労働者の比較」	32
5.1. 研究1の概要	32
5.2. 研究1の実験方法	32
5.2.1. 実験対象	32
5.2.2. 実験プロトコル	33
5.3. 研究1の実験結果	34
5.3.1. 記述統計量とグループ間のパラメータ比較	34
5.3.2. 体表温度と身体負荷、そして作業者の特性、HRV 指数との関係	37
5.3.3. 身体的%HRR および心理的負荷 LF/HF との関係	38
5.4. 研究1の小括	41
6. 研究2「混合系廃棄物処理労働者と非混合系廃棄物（医療系廃棄物）労働者の比較」	43

6.1.	研究2の概要	43
6.2.	研究2の実験方法	43
6.2.1.	実験対象	43
6.2.2.	実験プロトコル	44
6.3.	研究2の実験結果	44
6.3.1.	グループ別、年代別の身体活動量と身体的負荷の比較	44
6.4.	研究2の小括	47
7.	<i>研究3「ウェアラブルデバイス研究動向の調査」</i>	<i>48</i>
7.1.	研究3の概要	48
7.2.	研究3の実験方法と実験対象	48
7.2.1.	計量書誌学的分析	48
7.2.2.	データの収集	49
7.2.3.	クラスター分析	52
7.2.4.	キーワードの共起語分析	53
7.2.5.	解析に使用したソフトウェア	55
7.3.	研究3の実験結果	55
7.3.1.	研究領域の特徴	55
7.3.2.	キーワードの共起語分析の結果	59
7.3.3.	研究領域に貢献している2カ国の比較 (China と USA)	62
7.4.	研究3の小括	71
8.	<i>考察</i>	<i>73</i>
8.1.	研究1の考察	73
8.1.1.	主要な知見	73
8.1.2.	廃棄物処理作業における身体的負荷・心理的負荷について	74
8.1.3.	労働者のストレス軽減と労働者管理への取り組み	75
8.2.	研究2の考察	76
8.3.	研究3の考察	78
8.4.	総合的な考察	80
9.	<i>総括</i>	<i>82</i>
9.1.	本論文における研究成果と貢献	82
9.2.	研究の限界	83

謝辭.....	85
引用文献.....	86

1. 研究背景

1.1. 廃棄物処理産業と労働者

多くの労働集約型産業の労働現場において、労働者は、厳しい労働環境・労働内容の性質のため、身体的能力を超えた過度な労働要求に直面している。過度な労働要求が頻発する結果、慢性疲労や多くの怪我や病気のリスクが高まるばかりか、現場の生産性・作業効率の停滞、長期的な影響を及ぼす筋骨格系障害、そして労働者の離職など様々な影響をもたらす [1, 2]。とりわけ、廃棄物処理業におけるリスクは深刻であると言える。経済的発展をみせる世界の多くの地域では、廃棄物処理の過程で生じる廃棄物の収集、運搬、分別等を業務とする廃棄物処理労働者が様々な問題に直面している。取り扱う廃棄物自体そして、その過程で使用する重機や機械、施設利用に伴い物理的、機械的、化学的、生物学的、人工工学的、社会的リスクに晒されていることや、多発する労働災害など業務の性質上多くの危険がある。厚生労働省では、昭和 27 年以降、主要産業における年間の労働災害の発生状況を把握するために、「労働災害動向調査」を実施している。令和 3 年（2021 年）において、100 人以上の常用労働者がいる 15758 事業所および総合工事業の延べ 5549 工事現場での年間の労働災害発生状況が公表されている [3]。その結果、令和 3 年における労働災害の度数率（100 万延べ実労働時間当たりの労働災害による死者数：災害発生の頻度を表す）、そして強度率（1000 延べ実労働時間当たりの延べ労働損失日数：災害の重さの程度を表す）は全産業平均がそれぞれ 2.09、0.09 であったのに対し、産業廃棄物処理業（一般廃棄物含む）はそれぞれ 7.36、0.17 と顕著に高い結果を示した（表 1-1、図 1-1、図 1-2）。他の産業と比較しても廃棄物処理業における度数率・強度率は突出して高いことが伺える。

表 1-1：各業種における度数率・強度率の推移

業種	平成 29 年		平成 30 年		令和 1 年		令和 2 年		令和 3 年	
	度数率	強度率	度数率	強度率	度数率	強度率	度数率	強度率	度数率	強度率
全産業平均	1.66	0.09	1.83	0.09	1.80	0.09	1.95	0.09	2.09	0.09
建設業 (総合工事業を除く)	0.92	0.14	0.79	0.28	0.80	0.18	0.81	0.24	0.85	0.21
製造業	1.02	0.08	1.20	0.10	1.20	0.10	1.21	0.07	1.31	0.06
運輸業、郵便業	3.24	0.13	3.42	0.12	3.50	0.14	3.31	0.13	3.31	0.22
電気、ガス、熱供給、 水道業	0.55	0.01	0.65	0.01	0.70	0.01	0.75	0.24	0.67	0.01
卸売、小売業	1.94	0.10	2.08	0.10	2.09	0.04	2.27	0.11	2.31	0.05
サービス業	3.38	0.13	3.86	0.13	3.18	0.29	3.89	0.14	4.02	0.17
一般・ 産業廃棄物処理業	8.63	0.42	6.70	0.30	6.99	0.17	6.95	0.48	7.36	0.17

(出所：厚生労働省「令和 3 年労働災害動向調査」 [3]より作成)

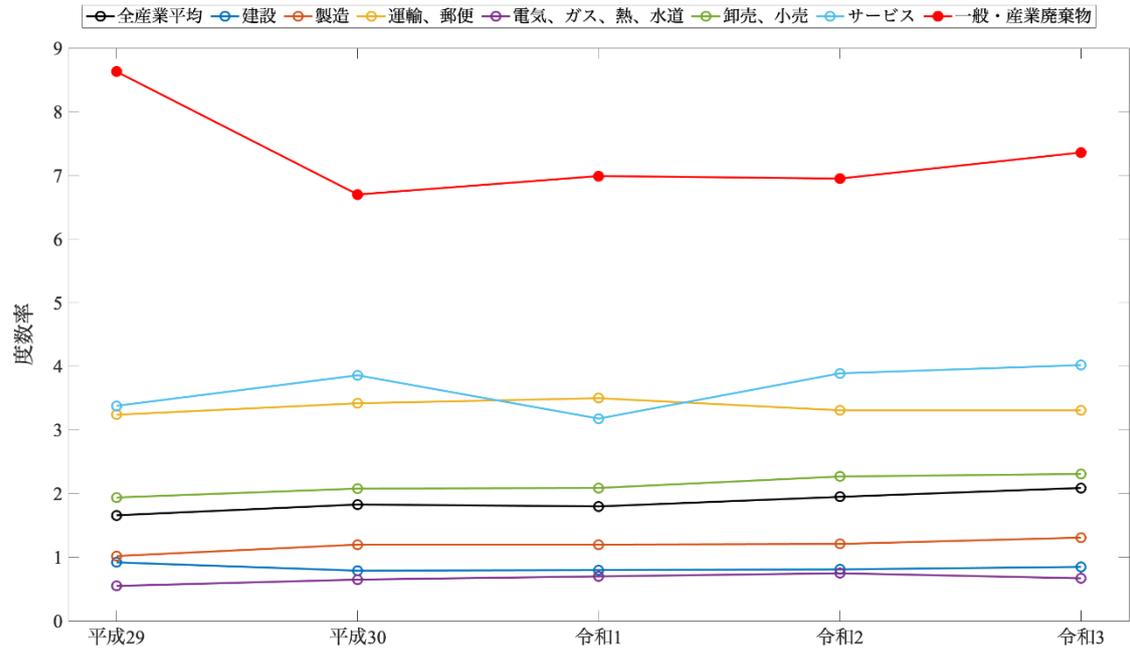


図 1-1：度数率の推移

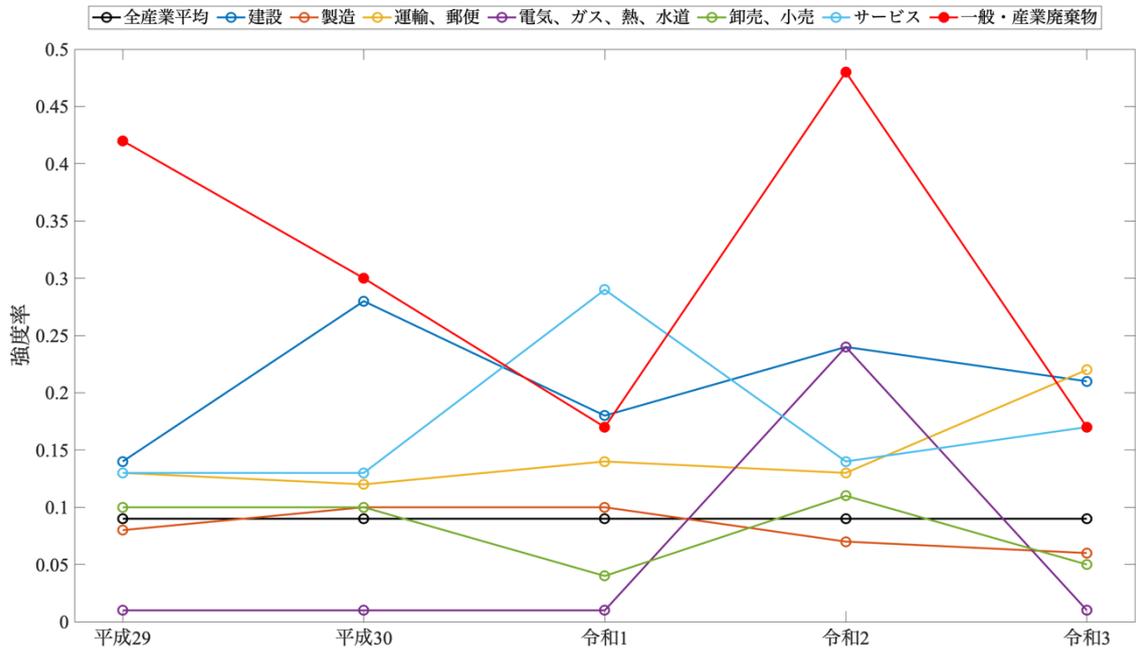


図 1-2：強度率の推移

(出所：厚生労働省「令和3年労働災害動向調査」 [3]より作成)

具体的な死傷災害発生状況としては、廃棄物の運搬等において用いる動力運搬機（トラックやキャリアダンプ、バックホーンなど）や仮設物、建築物・構築物等による「墜落・転落」「はさまれ・まきこまれ」「転倒」が上位を占めている（図 1-3）。また、廃棄物や資材、工具などの「飛来」や、高所作業時における「落下」、廃棄物による「切れ・こすれ」、そして「その他」として計上されている中には、ガスや廃液による「火災や爆発」があり、危険性が高い。災害の事例として、「受入ピットにおける発火・火災：混触反応、静電気着火、粉じん爆発」「廃プラスチック破碎機の発火・火災：空回り摩擦による蓄熱、静電気着火」「一斗缶等金属破碎機の発火・火災：スパークによる発火、缶内残留廃油への引火」などが挙げられている [4]。

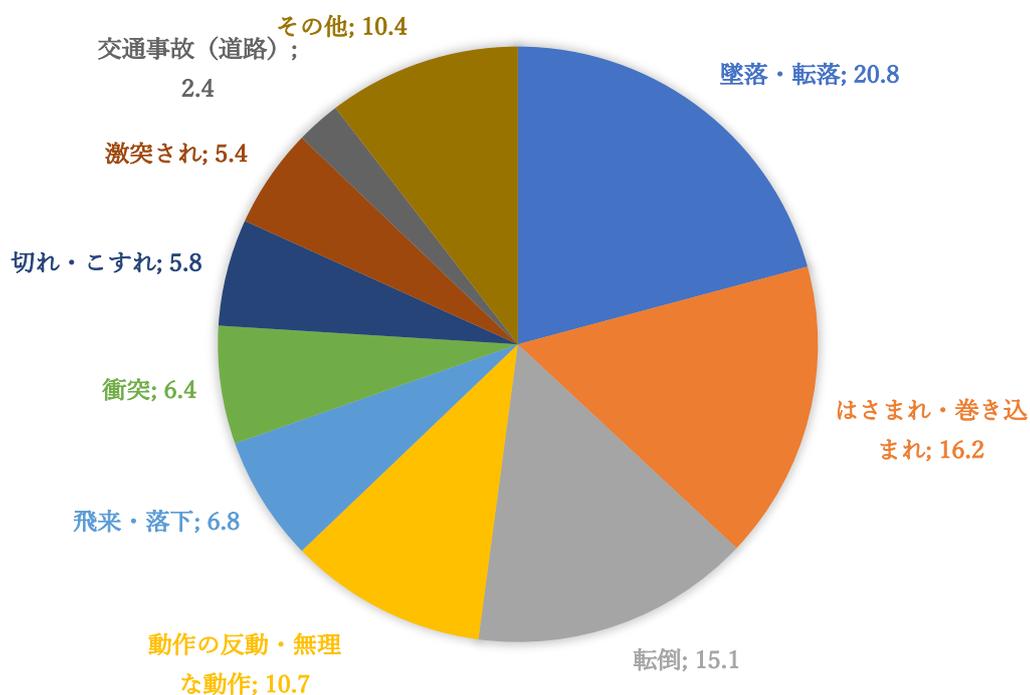


図 1-3：死傷災害発生状況（事故の型別）

（出所：厚生労働省「令和 3 年労働災害動向調査」 [3]より作成）

廃棄物管理施設では、主に破碎、選別、圧縮、焼却などの工程があり、処理の自動化が困難な施設や地域では、廃棄物作業は労働集約的で危険な作業となっている。また、廃棄物の作業環境は屋内でも空調設備が整っていることが少なく、近年の気象変動の影響もあり熱中症など体温や環境温の高さに関連する体調不良も深刻な問題となっている。労働集約型産業において、身体的要求を把握し、その許容範囲内に管理することは、労働者の安全と健康を犠牲にすることなく期待される生産性を維持するために重要である [6, 7]。

1.2. 労働力の高齢化と未熟練労働者

多くの先進国、企業では、働き手世代の高齢化による労働力の低下が社会・経済的な問題となっている [8, 9, 10]。それは日本においても例外ではない。政府は「生産性の向上により、少子高齢化・人口減少の時代においても経済成長が可能である」と展望を述べるものの、何ら具体的な策がとられていないのが現状である [10]。労働力の高齢化による心身の機能、認知力や判断力の低下は労働災害に繋がるヒューマンエラーを生むばかりか、生産性にも大きな影響を及ぼす。そして、少子高齢化に伴う単純な労働力低下に加え、厳しい労働環境を避けることによる離職率の増加、忌避感から労働者が定着しない、いわゆる3K(きつい・汚い・危険)労働を避けるように若手労働力が減少していることもまた大きな問題となっている。労働者が定着しない現状は、未熟練労働者がいつまでも熟達せず、熟練労働者の育成が阻まれる点においても問題となる。

平成29年の産業廃棄物業における労働災害を経験期間別にみると、経験1年未満が23%、3年未満が43%と多くを占めている(図1-4)。加えて、現代の不安定な経済状況、雇用状況により、中高年、高齢者層の未経験労働者が新たに参入するケースも増えている。未熟練労働者の労働災害を年齢階級別にみると、40

～49 歳が 25%、続いて 30～39 歳、50～59 歳が 22%と続いている（図 1-4）。
 今後、労働力の高齢化そして熟練労働者の減少＝未熟練労働者の増大は労働災害防止対策の観点から見ても注視すべきである。

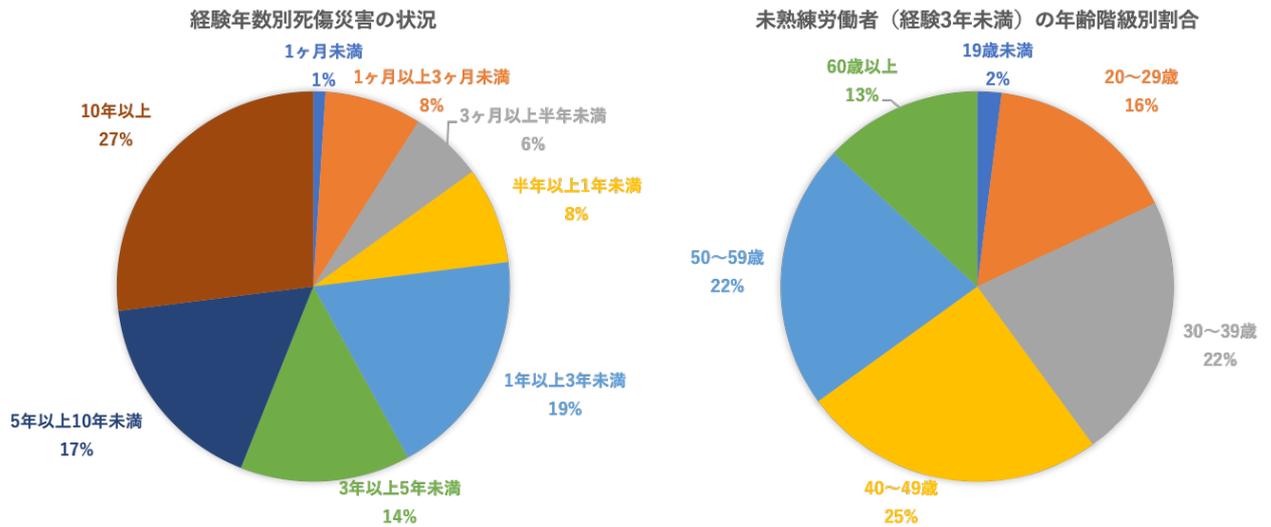


図 1-4：産業廃棄物業に関する基礎データ

（出所：厚生労働省「令和3年労働災害動向調査」 [3]より作成）

1.3. 安全管理と情報通信技術

先に上げたような労働災害を未然に防ぐため、リスクアセスメントの実施やヒアリハット事例の収集と分析による設備や作業方法、手順の改善、そして未熟な労働者への教育強化などの対策が取り組まれている。経済産業省は、一般社団法人セーフティグローバル推進機構（IGSAP：Institute of Global Safety Promotion）と共に、協調安全と Safety 2.0 という新たな安全概念に基づく安全確保の取り組みと企画の策定を主体的に推進している [11]（図 1-5）。協調安全とは、人・モノ・環境が情報を共有することで、協調して安全を構築する新しい安全の概念である。安全の取り組みは当初、人の注意力や判断力によって安全を確保しようとした Safety 0.0 から始まった。Safety 0.0 では、機械の領域そして人と機械の共存領域において高いリスクが存在した。そこで、次の段階である

Safety 1.0 では機械に安全対策を施すことにより、機械自体のリスクを下げると同時に、人と機械の共存領域を無くすことで安全レベルを引き上げようとした。しかし、近年では生産性を高めるために人と機械（ロボットなど）が共存する状況が増えてきた。加えて、高齢化により熟練労働者が減少したことにより現場力が低下するなど、Safety 1.0 の取り組みでは対応が困難になった。これをカバーするために、新たな試みとして Safety 2.0 が登場した。Safety 2.0 では、情報通信技術を活用し人・モノ・環境が情報を共有することで、人と機械それぞれの領域、両者の共存領域のリスクを最小化し、安全を確保する技術的方策である。Safety 2.0 を活用した協調安全による安全化は、ものづくり分野だけではなく、物流システムや交通安全、医療や介護分野での人の安全、社会インフラの状態変化に対する安全など広範囲に適用可能となっている。その取組の一環として安全の見える化がある。製造業や建設業のような労働集約型産業では、工程や設備に関する異常検知やメンテナンス等、工程の精緻化、そして情報通信技術を活用して、安全管理の高度化を図る取り組みが行われている。加えて、労働者の生体情報や行動を監視することで熱中症対策等のリスク管理、および教育訓練等に情報通信技術を活用し、安全管理の高度化が進められている [12, 13, 14]。

そしてそれらは、廃棄物処理業界においても同様の取り組みが求められている。安全管理における情報通信技術の活用は、廃棄物管理の作業環境を改善し、労働者の労働条件だけではなく、労働者自身の健康や生活の質を向上させ、最終的には環境の持続可能性に寄与することで、廃棄物産業が公衆衛生に与える影響を低減することが期待されている [15]。

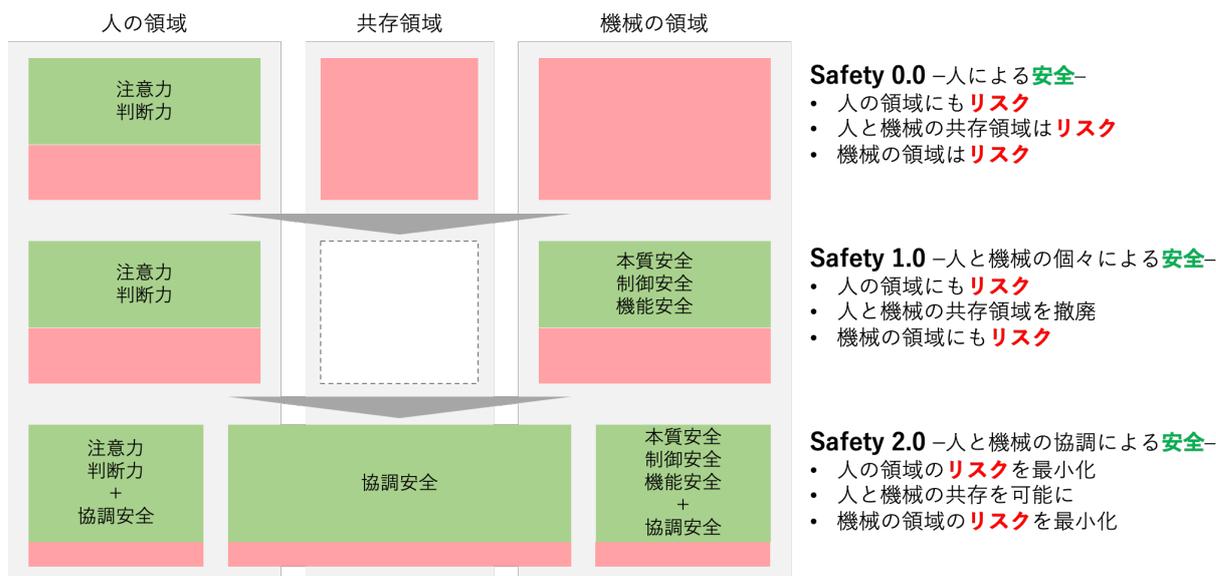


図 1-5 : Safety 0.0 から 2.0 までの歩み

1.4. ウェアラブルデバイスの発展

近年、情報通信技術は大きな進歩を見せ、ハードウェアの高性能化、小型化による恩恵により、ウェアラブルテクノロジーは大きく進化した。ウェアラブル (Wearable) とは、「着用できる」「身につける」という意味を持つ単語であり、ウェアラブルテクノロジー、ウェアラブルデバイスといった場合には、アクセサリやガジェット、衣服など人体に装着できる無線通信機能を備えた小型電子機器、モバイル機器、コンピュータ、マイクロチップなどの情報通信機器の総称を指す [16]。近年、Apple watch や Fitbit、Samsung Gear、Microsoft Band、Garmin などの腕時計型デバイスに始まり、眼鏡型、指輪型、靴型、服型など多種多様なウェアラブルデバイスが盛んに市場へ参入、消費者への普及が急速に拡大している。Mordor Intelligence [17]の報告では、2020 年スマートウェアラブルの出荷台数は世界で 2 億 6630 万台、2026 年までに 7 億 7623 万台に達すると予測されている。International Data Corporation [18]によると、世界的なインフレ率の上昇や半導体不足、世界情勢からくる不況を巡る懸念などにより

2022年の通年出荷台数は5億3550万台と横ばいになると予想しつつも、2023年には再び成長が回復すると予想している。Reportlinker.com [19]によるとウェアラブルテクノロジー市場は、2022年から2026年の間に613億2000万ドルの成長が見込まれ、CAGRは14.31%で加速すると予想しており、今後さらなる発展が期待されている。ウェアラブルデバイスが活躍する場面は教育、医療、エンターテインメント、ゲーム、スポーツ、音楽など多岐に渡っている。Vandricoのウェアラブルデバイスデータベースによれば、2022年9月21日時点で431件のデバイスが登録されている [20]。登録カテゴリとしてはライフスタイル（225台）、フィットネス（188台）、医学（88台）が上位となっており、健康管理への関心が強いことがうかがえる（ただし、Vandrico データベースは、一部のデバイスは複数のカテゴリに分類されている点は注意が必要である）。

ウェアラブルデバイスの健康利用として最も一般的なのは、日常生活における生理学的・生化学的パラメータや人間の行動に伴う情報をモニタリングすることである。主に、心電図（ECG：Electrocardiogram）や脈波（PPG：Photo Plethysmography）、心音図などによる心拍情報、血圧や血中酸素飽和度、体温、身体活動量などがよく利用されている。一昔前では、測定精度は一般の医療機器には及ばないと言われてきた。しかし近年ではApple社のウェアラブルデバイス「Apple Watch」のように医療機器として認可されるデバイスも登場した（2018年にUSAで展開が開始されたApple Watch ECG appが国内では「Appleの心電図アプリケーション」「Appleの腹側な心拍の通知プログラム」という製品名で認可されている [21]）。ウェアラブルデバイスによる血圧の測定は、やや難度が高いとされている。しかし、オムロン社のウェアラブルデバイス「Heart Guide」はアメリカ食品医薬品局（FDA：Food and Drug Administration）に認可されている数少ないウェアラブルデバイスである [22]。今後、技術革新が進めば、医

療機器として使用可能なウェアラブルデバイスは数を増し、測定できる生体パラメータの数も増えることが予想される。これらの生体パラメータは、単純に増分/差分を比較するだけにとどまらず、可視化することが困難な情報、例えば身体ストレス状態（身体的ストレス、心理的ストレス）を類推する試みも増えている [22, 23]。

2. 先行研究調査とリサーチギャップ

2.1. 生体情報とストレス指標

どのような職業においても、身体的・心理的負荷から生じるストレスは、あらゆる労働、職場において満足感や幸福感を低下させ、仕事の効率を下げる可能性がある。身体的・心理的リソースと要求の間の不均衡は、職場そして労働者自身の安全性を脅かす可能性がある。人がストレスを受けると、内分泌系や自律神経系に変調をきたし、これらを計測することでストレスの有無、量を定量的に解析する研究が行われてきた [25, 26, 27, 28]。内分泌系の解析では、血液や唾液、尿といった試料を必要とするが、高精度で分析できる反面、手軽さの面が障害となり、一般人が日常において測定することは難しい。一方、自律神経系の解析では、心拍 (HR: Heart Rate) や脈波などのバイタルサインの他、脳波や体温 (皮膚表面温度)、皮膚表面電位、呼吸など様々な生理反応を評価試料として利用することができる [28, 29, 30, 31]。これらの試料は、ウェアラブルデバイスや簡易測定器により非侵襲かつ手軽に測定することができ、一般人が日常において測定することが可能となっている。中でも、心拍の変動、心拍変動 (HRV: Heart Rate Variability) は、心血管系負荷の観点から信頼性の高いストレス指標として実証されており、身体的な負荷の計測に盛んに利用されている [32]。HRV の変化を評価することで、労働者の仕事量 [14]、精神状態 [33, 34]、心臓の健康状態 [35] を判断することができる。比較的短い時間 (最大 5 分間) の心拍変動 (HRV) を測定することでも精度の高い分析が可能であり応用の幅が広い [36]。特に、個人差を考慮した本来の絶対的な HR を正規化して身体的要求量を相対的に測定する心拍予備率 (%HRR: percentage Heart Rate Recovery。運動強度、身体的負荷ともいう) が、多様な動的筋作業に対して信頼性が高く広く利用されている [37, 38, 39, 40, 41]。%HRR は、筋肉活動に伴う身体的な負荷を示す指標である [42]。この方法は、安静時の最低値となる HR を身体的挙動や要求の

ない状態の基準となる HR とみなし、作業時と安静時の HR の差の割合を計算する。もともと、体内の状態（血圧や安静時 HR を上昇させうる高血圧性疾患や慢性的な心理的ストレスなど）により、個人の HR レベルは異なるが [43]、この相対的指標（%HRR）は、身体活動に由来する HR の相対的な変化にのみ着目し、個人ごとに異なる HR レベルを相殺することにより、個人の身体的欲求を推測することが可能となる [38, 39, 44]。また、身体的要求が生産性に及ぼす影響についても分析されている [45]。これらの研究は、職業的作業における %HRR の有用性を示しているが、身体的要求が時間とともにどのように、そしてなぜそのように変化するのかについて深い理解がまだ得られていないというのが現状である。なぜならば、高い身体的要求は、労働者の健康へのリスクのために長時間続くことはそもそも稀である。例えば、%HRR が 30% 以下の場合、8 時間未満であればその行動（運動、労働）は持続可能であると判断される。30% を超える場合、身体的な負荷が高いとされ、40% を超える場合には、その行動を 30–60 分間持続すると危険であると判断される [46]。つまり、作業員の身体的要求を 30–60 分毎に継続的に測定することが重要となる。この連続的な計測により、様々な労働負荷、労働条件、および個人の日々の身体的条件から生じる可能性のある重大な身体的要求を監視し、警告することが可能となる。

この連続測定は、屋内と屋外、暑さと寒さなど、様々な労働条件で多様な労働を行う職種（労働者）において、特に意義がある。加えて、この点においてウェアラブルデバイスの利用は増々有利だと言える。先行研究において、リストバンド型デバイスを用いて作業員に不快感を与えず、HR を継続的に測定できることを示している [47]。このように、これらの生理的反応は、個人に依存した要因（年齢や生活習慣、既往歴など）と環境要因の相互作用の結果であることを考慮すると、労働者の心身の状態を把握するためのより包括的で信頼できる指標と

なりえる。

一方、感情（例えば、恐怖や不安、怒りや失望感等）のような他の多くの心理的要因も HR に影響を与える可能性がある [48, 49]（危険な廃棄物や潜在的に危険な廃棄物を一日中継続的に取り扱う廃棄物処理労働者は、多くの場合、過酷な条件下で日々のリスクに直面しており、HR への影響が懸念される）。高リスク労働者の労働条件は、彼らの HR と HR 間隔の変動を観察することでモニターされてきた。Tiwari ら [50] と Hwang と Lee [47] は、作業中の HR の変化を分析し、作業員の身体的・心理的負荷を定量化している。身体活動量と生体データの変化は、被験者の状態を定量的に分析するのに有効である。

身体的疲労や誘発される心理的ストレスが、モチベーション、仕事への満足度、生産性、品質、安全性に有害な影響を与える可能性があることを考慮すると、労働者の心身の健康管理は重要である [51, 52]。従来、例えば建設業労働者を対象とした研究の中で、研究者は身体的・心理的状态を理解するために、主に決まった質問に対する作業員の主観的な回答（調査）に依存してきた（例えば、知覚疲労度評価、知覚ストレス尺度 [53]）。これらの調査の尺度は、建設労働者の心身の健康に関する理解を広げたが、主観的尺度に内在する自己報告バイアスがないとは限らない [54]。また、労働者にアンケートへの回答を求めることは、手間のかかる作業であり、継続的に作業を中断する可能性がある。加えて、1 回限りでの調査では、労働者の継続的な作業中の動的な変化を示すことができない。そのため、労働者の身体的・心理的状态を継続的に測定できる、客観的かつ非侵襲的な方法の必要性が高まっている。

2.2. 建設業界におけるウェアラブルデバイスの活用

Hwang らは、リストバンドが建設作業員の身体的要求の有意な変動を捉えることができるかを検討するために、ケーススタディを実施した [47]。具体的には、身体的負荷に影響を与える要因を検討することで、リストバンドによる %HRR ベースの身体的負荷の変動を捕捉することが実現可能かどうか、また有用かどうかを調査した。その結果、作業員の身体的欲求は、個人差（年齢差など）、労働内容、労働形態（直接作業、工具・設備・資材の取り扱いなどの関節作業、移動、準備作業などの作業活動の割合）、その他の環境条件（屋外と屋内など）の違いによって大きく変動することが示された。これらの変動は、日常業務の中で晒される様々な要因により絶えず変動しており、可能であれば避けるべき重大な身体的要求を把握するためには、継続的な作業員の身体測定を必要としていることを示した。

また、Jebelli らは、ウェアラブルデバイスから収集した生体情報（皮膚電気信号(EDA)、皮膚温度(ST)、脈波(PPG)、皮膚電気反応(EDR)、心拍変動(HRV)、心拍率(%HRR))などを用いて、建設業界の労働者の身体的・心理的状态を判断する可能性を検討した [52]。建設業は、産業廃棄物処理業界と同様に労働環境が過酷であり、労働内容や労働条件の特徴から、身体的疲労や心理的ストレスなど、心身の健康に対する潜在的なリスクも高い。身体的疲労や心理的ストレスの発生は、モチベーション、働きがい、生産性、品質、安全性などに悪影響を及ぼす可能性があり、心身の健康への配慮は非常に重要である。彼らは、労働者が行う様々な作業状況下において、EDA、HRV、%HRR に明確な差異が生じることを示し、ウェアラブルデバイスを用いて作業員の心身の状態評価する可能性について報告した。その結果は、作業に伴うストレス要因の早期発見に繋がることが期待された。

さらに、橋口らは、異なる労働内容を伴う建設作業員グループに対して、ウェアラブルデバイスを用いて労働者の生体情報の取得、および身体的・心理的状态を推定した [14]。彼らの研究では、高所において建設資材（鉄筋）を運搬、解体を行う高所作業員（鳶職）とそれを地上でサポートする補助作業員（補助作業員は高所での作業を行わない）それぞれを比較した。その結果、高所作業員が身体負荷レベルを危険なレベルで維持した状態で業務を遂行していることを示し、対策が求められた。建設業界ではこれら情報通信技術を活用した労働者の健康管理に対する取り組みが盛んに行われている。しかし、廃棄物処理産業ではこうした取り組みが遅れている。

3. 研究目的とリサーチクエスチョン

廃棄物管理施設では、廃棄物処理労働者との健全な雇用関係を維持するために労働条件を管理することが極めて重要だが、効果的な健康管理の実践を裏付ける実証的な証拠はほとんどない。このリサーチギャップを解消するために、本研究では廃棄物管理施設で働く廃棄物処理労働者に対して、情報通信技術（ウェアラブルデバイスと装着者の生体情報収集システム）を導入し、

1. 廃棄物処理労働者の業務に伴う生体情報および身体的・心理的負荷指標を定量的に明らかにする。
2. 廃棄物処理労働者の労働に伴う負荷を増大させる要因を特定する。
3. 労働内容の違い（取り扱う廃棄物の違い）は労働者の負荷指標に影響を与えるかを検証する。
4. 労働現場において有用で実用的な労働負荷の推定手段として有効かどうか検討する。

以上の4点について検討する。

上記の研究目的に基づき、本研究では2つの実証的な小研究、研究1・研究2、そしてそれを補強するものとして研究3を設定した。研究1では、廃棄物を扱う労働者と廃棄物を扱わない労働者の生体情報および労働に伴う負荷を比較・検討する。そして研究2では労働内容の違い（それに伴う扱う廃棄物の種類の違い）による労働者の生体情報および労働に伴う負荷を比較・検討する。研究1、研究2により、実証的な証拠の乏しい廃棄物処理労働者の実態を明らかとしたい。研究3では、ウェアラブルデバイスを用いた研究の位置づけをまとめることで、ウェアラブルデバイス研究領域の実態を示し、今後の方向性を示したい。そしてこれらの結果は、廃棄物産業における労働者の効率的なマネジメントに

寄与するものである。各小研究の目的、そしてリサーチ・クエスチョン（RQ）を以下に示す。

【研究 1】

- 研究 1 目的：廃棄物処理労働者と非廃棄物処理労働者を比較することで、廃棄物処理労働者の生体情報、そして労働に伴う負荷に違いがあるかを明らかにする。
- ◇ RQ1a：廃棄物処理労働者と非廃棄物処理労働者の比較において、労働者の生体情報の違いが明らかか？
- ◇ RQ1b：廃棄物管理施設における労働者の体表温度に影響を耐える因子は何か？
- ◇ RQ1c：労働者より取得した各種生体情報を用いて、労働者の身体的負荷、心理的負荷を推定することができるか？

【研究 2】

- 研究 2 目的：労働内容の違い（それに伴う取り扱うマテリアルの違い（混合廃棄物と非混合廃棄物（医療系廃棄物））を比較することで、労働内容（マテリアル）によって、生体情報および労働に伴う負荷に違いがあるかを明らかにする。
- ◇ RQ2a：廃棄物処理労働者において、労働内容の違い（それに伴う取り扱うマテリアルの違い）は、労働者の負荷に影響するか？

【研究 3】

- 研究 3 目的：ウェアラブルデバイスを取り巻く研究領域全体を包括的かつ客

観的、そして定量的に明らかにする。

- ◇ RQ3a：2001年～2022年までのウェアラブルデバイス研究領域における知的構造はどのような形か？また今後どのような発展を見せるか？

4. 研究方法と研究対象

4.1. ウェアラブルデバイスを用いた生体情報測定システム

本研究では、実際の廃棄物管理施設において従事する労働者を対象としている。そして、労働者が通常の業務内容に沿って労働を行う中、ウェアラブルデバイスによる生体情報取得システムを用いて労働者の生体情報を取得した。本実験では、橋口ら [14, 55] が開発したウェアラブルデバイス計測システムを使用した (図 4-1)。

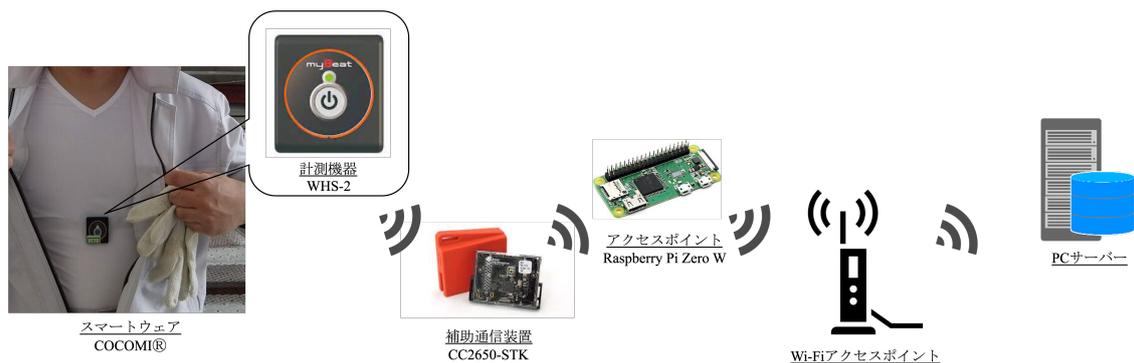


図 4-1：ウェアラブルデバイス計測システムの構成図。COCOMI® [56]、WHS-2 [57]、CC2650 [58]、Raspberry Pi Zero [59] を基本構成としている。

本装置では、労働者は東洋紡社製スマートウェア COCOMI® [56]、とユニオツール社製心拍センサー WHS-2 (WHS-2 は現在生産を中止している。後継機は WHS-3 [57]) を基本構成としている。スマートウォッチ型やスマートバンド型のウェアラブルデバイスは取り扱いが容易で装着者に不快感を与えにくいという点において有利である反面、装着者の動作により取得されるデータにノイズが生じたり、データにロスが生じる点が不利であった。その点、COCOMI®

の場合、ウェアの内側に取り付けられた伸縮性のある特殊なフィルム状導電素材 COCOMI[®]が装着者の肌と直接接触する。ウェア自体が装着者にフィットするため、取得データにノイズが生じにくい設計と成っている。心拍センサー WHS-2 は、スマートウェア COCOMI[®]の前面部に取り付ける形で使用される。WHS-2 は、装着者の心拍情報（心拍周期、波形）、体表温度、3 軸加速度を高分解能で測定することが可能となっている。対象となる労働者は、スマートウェア COCOMI[®]と WHS-2 を装着し、生体情報を取得する。取得したデータは、Bluetooth による無線通信によりデータ補助通信装置（テキサス・インスツルメンツ社製 CC-2650 [58]）に一時的に蓄積される。データ補助通信装置では、受信した装着者の取得データを一時的に蓄積し、作業エリアに設置されたアンテナ機器（Raspberry Pi 財団、Raspberry Pi Zero W [59]）にデータを転送する。そして、アンテナ機器から Wi-Fi による無線通信を通じて、PC サーバーまでデータが送信され、蓄積される。

本計測システムは、公衆回線のような GPS や Wi-Fi などの通信環境が利用できない、もしくは安定しない環境下での運用を想定している。現場に通信用アクセスポイントを設置することで、独自の通信環境を構築し、一般通信環境に左右されない通信環境を構築している。加えて、データ補助通信装置が一時的なデータの蓄積を担うことで、装着者が通信環境外に出る、もしくは通信環境の乱れからサーバーとの通信が一時的に不通となった場合でも取得データを損なうことがない。そして、装着者が通信環境内に復帰する、もしくは通信環境が安定したとき、サーバーへとデータを送信する仕組みをとっている。作業エリアの環境温度（湿球温度：WBGT）は、株式会社 A&D 社製データレコーダー AD5696 [60] を用いて測定した。

表 4-1：計測システムで用いられる主要機器と基本スペック

Measurements	Equipment model (Name of the Manufacturer)	Sampling Frequency	Interval	Note
Physical workload				
ECG(Sensing clothing)	COCOMI® (TOYOBO Co., Ltd.)	—	—	Stretchable conductive film
Heart rate sensor	WHS-2	1 kHz	Per beat	Analysis of RRI
3-axis acceleration	(Union Tool Co., Ltd.)	31.25 Hz	Per beat	Capacitive sense
Infrastructure				
Data acquisition time	CC2650 and ThinkPad (Texas Instruments and Lenovo co., Ltd.)	1 msec.	Per beat	Synchronized time with server
Data transfer	Raspberry Pi Zero W (Raspberry Pi Foundation)	—	—	IEEE802.11 b/g/n (Wireless LAN) Bluetooth 4.1

4.2. HRV メトリクス

心拍変動 (HRV) は、身体的負荷に対する影響だけではなく、自己調節や生理的・心理的ストレスなどの自律神経系制御にも関連しており、人体の心理的負荷の分析に有用であるとされている [36, 61]。HRV 指数が低いと、交感神経系と副交感神経系の連携が不十分であることを示し、将来の心血管疾患の信頼できる予測因子となっている [62, 63]。したがって、HRV 解析は、心身機能の評価に重要な情報を提供し、身体的疲労や衰弱のリスクを特定するのに役立つ [64]。特に、HRV は心電図や脈波などから計測した心拍周期 HR の変動を時間領域成分、周波数領域成分の面から解析する。HRV の時間領域成分の指標は、連続する心拍間の時間である心拍間隔 (RRI : Heart Rate Interval。NN 間隔 (Normal-to-Normal R-R 間隔と同義)) の変動の程度を定量化するものである。HRV の時間領域指標としては、SDNN (Standard Deviation of Heart Rate Interval) と呼ばれる正常心拍間隔時間 (NN) の標準偏差、RMSSD (Root Mean Square Successive Difference)、50ms 以上の隣接正常心拍間隔間の差の指標 (NN50)、50ms 以上の隣接正常心拍間隔の差の割合の指標 (pNN50) などがある。

以前の研究では、RMSSD は労働者の心理的ストレスの知覚と関係があり、値が低いほどストレスが高いことを示していた [65]。RMSSD 指標は欠損データ点の数に有意な影響を受けないため、データの質が低い患者の評価に対して頑健であることが示された。RRI の標準偏差 (SDRR) は、正常な RR 間隔の SD から算出され、SDRR が低いほど HRV が低いことを示す [66]。HRV と心理的ストレスの相互作用を調査した Taelman らは、心理的に負荷のかかる作業において、NN50 と平均 RR 間隔が有意に低いことを報告している [67]。

HRV の周波数領域成分の指標は、RRI の特定周波数帯のパワースペクトル密度から得ることができ、低周波 (LF : Low Frequency) パワーと高周波 (HF : High Frequency) パワーを主としている [36]。HRV メトリクスは、医療従事者向けの複数のアプリケーションで有望視されており、複数の研究者がこの分野に着目している [68, 69, 70, 71]。交感神経および副交感神経の活動を測定する HRV 指標の中には、その妥当性に懸念があるものも存在するが [72, 73]、LF (0.04-0.15 Hz) パワー、HF (0.15-0.40 Hz) パワーおよびそれらの比 LF/HF など、HRV 解析の意義は多くの研究によって支持されている。LF は交感神経と副交感神経の両方の活動の指標と考えられており、副交感神経の活動の指標である HF との比率によって、交感神経と副交感神経のどちらが優位かを定量的に特定することができる。このような分析は、交感神経系と副交感神経系の緊張状態を把握するために、臨床的に利用されている [74, 75]。

Joseph らは、HRV が自己申告によるストレスが生理的レベルの上昇と比例していることを明らかにした [76]。彼らの結果は、医療従事者が日常的に外科手術を行う医師が、厳しい時間的制約の中で自らのストレスを評価していることを示す説得力のある証拠となった。ストレスに関する客観的で生態学的に妥当な尺度の普及は、ストレスの多い状況を理解し、心理的負荷を軽減するための重

要な手がかりを提供する可能性がある [14, 77]。HRV 測定は RR データから導かれ、時系列の長さ（データポイント数）、体位、活動タイプに影響される。本研究では、これらの要因を、各活動の値を提供する 5 分間の RRI を用いて導出した。Fuentes-García らは、比較的短時間の心理的ストレスの場合でも、平均 HRV 値が低くなることを報告している [78]。アーティファクトによる外れ値や誤差拍動は、一般に心拍間隔の時系列に見られるもので、生理的な意味はない。アーティファクトは、時間領域および周波数領域で測定値を大きく歪め、広い周波数帯域でパワーを増大させる可能性がある [79]。HRV データでは、時系列がクリーンで、所定の周波数帯域のパワーを計算するのに十分な長さがあれば、その値は LF および HF のパワーを評価するのに有効である。例えば、LF のパワーを評価するためには、少なくとも 2.5 分間のクリーンなデータが必要である [80]。Chen らは、自律神経機能を安定して解釈するために、時間領域の HRV インデックス (SDNN、RMSSD、pNN50 など) には 1 分間の短期記録が、周波数領域の HRV インデックス (LF および HF) には少なくとも 3 分間の記録データが必要であると定めている [81]。

4.3. 心拍と体温

人間のパフォーマンスは、熱ストレスを含む作業システム内の様々な環境要因に影響される [82, 83]。体温の測定は、高温環境下にいる労働者の熱ストレスを観察するための効果的な方法である。しかし、直腸や食道の測定などの侵襲的な方法は、しばしば非現実的である [84, 85]。人間は、体内温度を約 37°C に維持する熱平衡を保つために、体内で発生した余分な熱を放散する必要がある。しかし、廃棄物管理会社が提供する制服は、特に作業員が薄着になる夏場には、十分な保護機能を備えていないことが多い。したがって、身体からの代謝熱、環境

要因（温度、湿度、輻射熱など）、衣服による全体的な熱負荷により、熱ストレスが発生する可能性がある [86]。熱放散がうまくいかず深部体温が上昇すると、熱の生理的負担により、熱射病、熱疲労、熱けいれんなどの健康障害を引き起こす可能性がある [87]。過度の環境的または代謝的な熱ストレスに個人的な危険因子が加わると、体温維持のための生理的プロセスが不十分となり、その結果、体温と脈拍の上昇および脱水による体重減少が生じる [88]。熱関連疾患の初期の兆候を無視すると、熱ストレスは、仕事のパフォーマンスの低下、さらには熱関連の怪我や死亡につながる可能性も報告されている [89]。近年の異常気象による夏場の高温環境での労働はそれらの危険性を高めている。

非侵襲的なウェアラブルデバイスを使用した研究により、人間の HR と体表温度の測定値と熱環境との間に有意な相関があることが判明している [90, 91, 92, 93]。Eggenberger らは、高温多湿の環境における様々な運動と衣服の条件を調査し、HR と肩甲骨部における体表温度という 2 つの測定パラメータが直腸温の予測に適していることを見いだした [94]。衣服内に閉じ込められた空気層は、身体の周りに特定の微気候を作り出し [95]、知覚される快適さに影響を与える [96]。衣服内の微気候は、活動中の人間の満足度及びパフォーマンスに影響を与える [97]。したがって、人間の熱感覚や熱ストレスを説明する指標として、HR や衣服内周囲温度が用いられることがある。しかし、労働者の熱ストレスに対する心拍数や衣服内周囲温度の影響を調査した研究はほとんどない。

4.4. 身体的負荷と身体活動量

心拍予備能の割合、そして身体的負荷を示す %HRR は、筋肉活動に伴う身体負荷または圧力強度の指標である [98]。その推定方法を式 (1) に示す。Norton らは、40~60% の HRR が 30~60 分間持続することは、中程度の身体負荷に

相当すると述べている [46]。建設労働者に注目した Hwang and Lee [47] と Hashiguchi ら [14]は、終日作業で 30~40%の HRR が労働者に健康リスクを与え続けていることを指摘した。

$$\%HRR = \frac{(HR_{working} - HR_{resting})}{(HR_{maximum} - HR_{resting})} \times 100(\%) \quad (1)$$

$$HR_{maximum} = (208 - 0.7 \times \text{年齢}) \quad (2)$$

ここで、HR_{working} は平均的な作業時心拍数、HR_{resting} は安静時心拍数、HR_{maximum} は年齢に基づく最大心拍数である [99]。本研究では、HR_{resting} を作業休憩中の安定した 5 分間の最低心拍数とした。Chen らは、自律神経機能を安定して解釈するために、時間領域の HRV インデックス (SDNN、RMSSD、pNN50 など) には 1 分間の短期記録が、周波数領域の HRV インデックス (LF および HF) には少なくとも 3 分間の記録データが必要であると定めている [81]。本研究で分析した HRV データは、1 セグメント 5 分であり、十分な長さであると考えられる。また、HR に対するアーティファクトの影響を排除するために、先行研究に基づいてフィルタリングを行った [100, 101]。つまり、長さ 1 の移動窓の中心点では、区間外のデータ点を除外し、中心点を除いた移動窓内のデータ点の平均を算出した。

詳細な動作データは生体情報から得ることができ、労働中に行われた作業動作 (例えば、荷物の持ち上げ、荷物の運搬、および歩行、立ち座り、しゃがみ込みなど) に関する労働者の動作の激しさを理解することができる。これを身体活動量 (PA: Physical Activity) として評価する。PA は、胸部に装着したスマートウ

エアに取り付けたセンサー（WHS-2）を用いて、3軸（縦軸：X，横軸：Y，縦軸：Z）の加速度を計測し、式（3）を用いて合成加速度を算出した [102]。本研究で収集したデータセットは、5分間隔で収集した評価データで構成され、5分間の平均値を用いて PA 量を算出し、労働時間中の労働者の動作の全体的な強度を観察した。PA の強度は、健康状態の予測因子となる [103]。

これらを踏まえ、廃棄物管理作業時の身体的負荷を把握するために、作業者の HR（HRV）と PA をひとつの指標とした。

$$PA = \sqrt{(A_{X_n} - A_{X_{n-1}})^2 + (A_{Y_n} - A_{Y_{n-1}})^2 + (A_{Z_n} - A_{Z_{n-1}})^2} \quad (3)$$

4.5. 本論文で使用される用語

本論文内で用いられるパラメーター、指標、用語一覧を表 4-2 に示す。

表 4-2：パラメーター、指標、用語一覧

	パラメーター		単位	説明	
労働者の 個人特性	AGE		歳	年齢	
	EXP	Experience	年	経験年数	
	BMI	Body Mass Index	%	ボディマス指数	
物理・ 環境指数	HR	Heart Rate	bpm	心拍数	
	%HRR	% Heart Rate Recovery	%	予備心拍数、運動 強度、身体的負荷	
	PA	Physical Activity	mG	身体活動量	
	BS TEMP	Body Surface Temperature	°C	体表温度	
	WBGT	Wet Bulb Globe	°C	環境温度	

		Temperature			
HRV 時間 領域成分	RRI	Heart Rate Interval	ms	心拍間隔 (NN と同義)	
	SDRR	Standard Deviation of Heart Rate Interval	ms	RR の標準偏差	
	CVRR	Coefficient of Variation of Heart Rate Interval		心拍 (RR 間隔) 変動係数	副交感 (迷走) 神経の緊張指標
	NN50			隣接する RR 間隔が 50ms 以上となる総数	副交感 (迷走) 神経の緊張指標
	pNN50		ms	NN50 を全 RR 間隔の総数で除した指数	副交感 (迷走) 神経の緊張指標
	RMSSD	Root Mean Square Successive Difference		連続して隣接する RR 間隔の二乗平均平方根の差分	副交感 (迷走) 神経の緊張指標
HRV 周波数 領域成分	LF	Low Frequency	ms ²	心拍の低周波数成分 (0.004~0.15Hz)	交感神経と副交感神経の両方の活動を反映
	HF	High Frequency	ms ²	心拍の高周波数成分 (0.15~)	副交感 (迷走) 神経の緊張指標

				0.4Hz)	
	LF/HF			LF と HF の比	交感神経と副交感神経の全体のバランスを反映

4.6. 分析ツール

統計解析やデータの取りまとめや図示には以下のソフトウェアを使用した。

Excel 2019 (Microsoft Corporation)、SPSS Version 26 for Windows (IBM Corporation)、Excel アドインソフト Bell Curve (Social Survey Research Information Co., Ltd.)、MATLAB R2022a (MathWorks)。

5. 研究1「廃棄物処理労働者と非廃棄物処理労働者の比較」

5.1. 研究1の概要

過酷な労働環境、労働内容故に常に危険に晒されている廃棄物処理労働者の労働に伴う負荷に関する実証的な証拠が乏しいことから、研究1では廃棄物処理労働者の実態を明らかにすることを目的とする。そのため、廃棄物管理施設において、同施設で働く2つの労働者グループ（廃棄物を扱う作業に従事する労働者グループと廃棄物を扱わない作業に従事する労働者グループ）を比較することで、その実態を明らかにしたい。本研究は、ヘルシンキ宣言、国連教育科学文化機関のヒトゲノムと人権に関する世界宣言に基づき、立命館大学研究倫理審査委員会（BKC-2019-009）の承認を得て実施された。

5.2. 研究1の実験方法

5.2.1. 実験対象

実験は、2019年9月3日から9月4日、そして2020年8月24日から8月26日にかけて京都市にある廃棄物管理施設の協力のもと実施された。実験への参加者は、同施設の労働者の中から募集し、協力を申し出た労働者を対象とした。本実験では心拍情報を用いる都合上、神経系や循環器系の疾患を持つ労働者は除外した。その結果、合計29人の労働者を最終的なサンプル対象とした。最終サンプルの29人は、職務内容に基づき以下の2つのグループに分けられた。グループA、グループBの人数が異なるのは、実験環境となった廃棄管理施設の人員配置によるものである。

- グループA (n=22人)：産業廃棄物の輸送、解体、選別を担当する。管理施設において、トラックにて輸送されてきた廃棄物をトラックから降ろし、手作業にて廃棄物を分別し、カートを用いて焼却施設まで廃棄物を運搬する。

廃棄物の選別工程では、比較的小さな廃棄物の分別作業を行うため、重機を使用することができない。そのため、直接廃棄物に接することから、廃棄物への被爆リスクが高い。

- グループ B (n=7)：廃棄物管理施設において、施設のメンテナンスや修理を担当する。そのため、廃棄物と直接接することはない。

5.2.2. 実験プロトコル

実験は、実験環境となった廃棄物管理施設における通常業務を遂行する中で行われた。実験参加者は実験参加に先立ち、全員がインフォームド・コンセントを受け、同意書を得ている。同意書には、参加者の権利に関する説明とデータの機密保持に関する説明が含まれている。個人情報漏洩のリスクを最小限とするため、実験及びデータ解析の際に各参加者に個人識別コードを割り当てた。

参加者の生体情報を勤務中の様々な時間帯に収集した。各グループの WBGT は、それぞれの作業場で測定された。29名の参加者から、約5分おきにデータが収集された。モニタリングは1時間の休憩を含む1日中行われた。我々は、労働者から年齢、労働経験年数、身長、体重の自己申告情報を収集した。研究チームは参加者の行動を監視しなかったが、各作業場の近くに設置した2台のカメラで作業行動を記録した。実験に先立ち、参加者には業務スキルを測定しないことを告げ、ホーン効果 [104] を避けるために、日常の作業手順から逸脱しないように指示した。

本研究では作業者にスマートウェアを装着させ、生体情報を測定した。しかし、スマートウェアと体が密着していない状況等が生じ、瞬間的に心拍数の値が極端に触れて出力される場合があったため、それら異常値(測定機器の最小値0あ

るいは最大値の 255 が出力される) は事前に取り除いた。

5.3. 研究 1 の実験結果

5.3.1. 記述統計量とグループ間のパラメータ比較

取得したデータを解析する前に、データの正規性を Shapiro-Wilk 検定と Kolmogorov-Smirnov 検定を使用して検定した (表 5-1)。どちらの検定でも、帰無仮説は、データセットが $p = 0.05$ で正規分布すると仮定する [105]。しかし、両検定には若干の食い違いがあり、HR を除くすべてのデータは正規分布の条件を満たしていた。Mann-Whitney U 検定は正規分布のデータセットを必要とせず [106]、その帰無仮説は「0.05 の有意水準で 2 群間に差がない」ことである。 $p < 0.05$ では、帰無仮説は棄却され、各グループのデータの分布に統計的に有意な差があることが示される [66]。検定の結果から、正規分布を示した HR に関しては T 検定、他のパラメータでは Mann-Whitney U 検定を使用した。

グループ A そしてグループ B の生体情報を比較すると、物理・環境指数のうち PA、BS TEMP、WBGT が、HRV 時間領域成分指標のうち NN50、pNN50、RMSSD、HRV が、周波数領域成分指標のうち LF パワー、HF パワー、LF/HF について、グループ間で統計的有意差がみられた。しかし、その他のパラメータについては、労働者間で統計的に有意な差は見られなかった (表 5-2)。

表 5-1：被験者の各パラメータの正規正検定結果

Parameter	Kolmogorov-Smirnov		Shapiro-Wilk		Normality test result
	Statistics	Significant*	Statistics	Significant*	
AGE	0.322	< 0.001	0.707	< 0.001	Non-parametric
EXP	0.173	< 0.001	0.903	< 0.001	Non-parametric
BMI	0.216	< 0.001	0.882	< 0.001	Non-parametric

HR	0.0174	0.162	0.0272	0.0506	Parametric
%HRR	0.0468	< 0.001	0.961	< 0.001	Non-parametric
PA	0.0464	< 0.001	0.981	< 0.001	Non-parametric
BS TEMP	0.0976	< 0.001	0.832	< 0.001	Non-parametric
WBGT	0.0684	< 0.001	0.956	< 0.001	Non-parametric
RRI	0.322	< 0.001	0.707	< 0.001	Non-parametric
SDRR	0.0482	< 0.001	0.948	< 0.001	Non-parametric
CVRR	0.0292	< 0.001	0.951	< 0.001	Non-parametric
NN50	0.171	< 0.001	0.792	< 0.001	Non-parametric
pNN50	0.170	< 0.001	0.789	< 0.001	Non-parametric
RMSSD	0.0572	< 0.001	0.957	< 0.001	Non-parametric
LF (power)	0.449	< 0.001	0.0542	< 0.001	Non-parametric
HF (power)	0.454	< 0.001	0.0302	< 0.001	Non-parametric
LF/HF	0.289	< 0.001	0.441	< 0.001	Non-parametric

Note: *indicates p-value.

表 5-2：グループ毎の各パラメータに対する統計検定結果

	Parameter (Unit)	Worker in waste treatment site		<i>P</i> -value between both worker
		Group A (廃棄物 処理労働者)	Group B (非廃棄 物処理労働者)	
労働者の特性	AGE (years)	35.5 ± 16.8	33.3 ± 12.7	0.383
	EXP (years)	7.23 ± 4.6	9.29 ± 1.9	0.074
	BMI (%)	21.2 ± 3.5	22.6 ± 1.4	0.229
物理・環境 変数	HR (bpm)	94.2 ± 13.2	94.3 ± 16.2	0.294
	%HRR (%)	21.6 ± 12.7	23.2 ± 14.5	0.154
	PA (mG)	222.4 ± 116.3	261.8 ± 126.2	< 0.001
	BS TEMP (°C)	31.4 ± 1.86	31.9 ± 2.02	< 0.001
	WBGT (°C)	30.0 ± 0.72	31.2 ± 0.57	< 0.001
HRV 時間 領域成分	RRI (ms)	650.3 ± 94.5	653.8 ± 106.6	0.210
	SDRR (ms)	15.4 ± 16.2	25.6 ± 16.2	0.134
	CVRR	0.039 ± 0.003	0.039 ± 0.039	0.144
	NN50	20.2 ± 20.8	30.5 ± 30.2	< 0.001
	pNN50 (%)	0.058 ± 0.058	0.083 ± 0.087	< 0.001
	RMSSD (ms)	21.7 ± 8.00	24.3 ± 9.87	< 0.001
HRV 周波数 領域成分	LF power (ms ²)	1070.5 ± 8853	695.6 ± 1120	< 0.001
	HF power (ms ²)	263.0 ± 537.6	740.6 ± 6956	< 0.001
	LF/HF	3.74 ± 7.58	2.38 ± 2.65	< 0.001

また、自律神経系に関連する時間領域成分である NN50、pNN50、RMSSD は廃棄物処理労働者で低く、副交感神経活動の低下やリラックス状態を示している。また、周波数領域成分について、LF パワーと HF パワーの比 (LF/HF) は、交感神経バランスの古典的な指標である [107]。この値は、交感神経系と副交感神経系の全体的なバランスを表している。値が高いほど交感神経優位であり、値が低いほど副交感神経優位であることを示している。

5.3.2. 体表温度と身体負荷、そして作業者の特性、HRV 指数との関係

各作業環境で収集したデータを統合し、労働者の体表温度（BS TEMP）への影響について分析した。重回帰分析を行い、各パラメーター間の有意な関係进行评估した。その結果を表 5-3 に示す。重回帰分析では、独立変数の間の多重共線性の有無を確認した。労働者の特性では AGE、EXP、BMI が、物理・環境変数では HR、PA、WBGT が、HRV 時間領域成分では SDNN、CVRR、RMSSD が、HRV 周波数領域成分 LF パワー、HF パワー、LF/HF がすべて分散インフレーション因子（VIF）10 未満であった。AGE、HR、PA、WBGT は、BS TEMP と有意な関係を示した。表 5-4a、5-4b に示すように、HR と PA が高いほど、BS TEMP と正の相関があった。また表 5-4c、5-4d から、WBGT と AGE は BS TEMP に正の効果を示したが、決定係数が低く、効果は小さいが統計的に有意であることが示唆された。

表 5-3：独立変数と従属変数（BS TEMP）の関係

Independent Variable	Dependent Variable: BS TEMP			
	B	S.E.	Std. β	<i>p</i> -Value
AGE	0.011	0.0037	0.0962	0.02
EXP	-0.011	0.012	-0.0249	0.36
BMI	-0.0853	0.0649	-0.0572	0.19
HR	0.060	0.0085	0.412	<0.0001
PA	1.78	0.398	0.111	<0.0001
WBGT	0.335	0.062	0.120	<0.0001
SDNN	-0.0016	0.0382	-0.0017	0.97
CVRR	12.8	24.6	0.0212	0.60
RMSSD	-0.0067	0.0072	-0.030	0.35
LF power	0.00001	0.00001	0.0096	0.69
HF power	0.00001	0.00001	-0.0210	0.34
LF/HF	0.012	0.0065	-0.0341	0.17

5-4：体表温度（BS TEMP）に対する各独立変数の影響

(a) BS TEMPに及ぼす独立変数(HR)の影響

Independent Variable	Dependent Variable: BS TEMP			
	Estimated	s.e.	t-Value	p-Value
HR	0.0686	0.0029	23.7	<0.001
(Intercept)	30.0	0.0738	406.8	<0.001
Adjusted R ²	0.223			
F static value	559.9			<0.001

(b) BS TEMPに及ぼす独立変数(PA)の影響

Independent Variable	Dependent Variable: BS TEMP			
	Estimated	s.e.	t-Value	p-Value
PA	4.96	0.342	14.5	<0.001
(Intercept)	30.4	0.088	344.6	<0.001
Adjusted R ²	0.198			
F static value	210.8			<0.001

(c) BS TEMPに及ぼす独立変数(WBGT)の影響

Independent Variable	Dependent Variable: BS TEMP			
	Estimated	s.e.	t-Value	p-Value
WBGT	0.596	0.066	9.10	<0.001
(Intercept)	13.5	1.98	6.83	<0.001
Multiple R ²	0.048			
F static value	82.9			<0.001

(d) BS TEMPに及ぼす独立変数(AGE)の影響

Independent Variable	Dependent Variable: BS TEMP			
	Estimated	s.e.	t-Value	p-Value
AGE	0.0094	0.0026	3.61	<0.001
(Intercept)	31.8	0.104	298.63	<0.001
Multiple R ²	0.0062			
F static value	813.1			<0.001

5.3.3. 身体的%HRR および心理的負荷 LF/HF との関係

作業環境から収集したデータを統合し、従属変数と身体的・心理的負荷の関係を評価した。表 5-5 はその結果を示している。身体的負荷%HRR の重回帰分析に先立ち、VIF を用いて多重共線性を評価した結果、独立変数間の多重共線性は

確認されなかった。独立変数のうち、%HRR、BMI、PA、BS TEMP、AGE、EXP、LF パワーは VIF が 1~2 であり、多重共線性の可能性はないことが示唆された。心理的負荷 LF/HF の重回帰分析では、心理的負荷 LH/HF の独立変数のうち、RRI、PA、BS TEMP、AGE、EXP、LF パワーの指標は VIF が低く、多重共線性の可能性がないことが示唆された。身体的負荷%HRR の RRI、心理的負荷 LH/HF の BMI は VIF>10 のため、各重回帰式の独立変数から除外した。作業負荷%HRR と心理的負荷 LF/HF 比のそれぞれについて、統計的に有意な独立変数を重回帰式に採用した。

表 5-5：身体的・心理的負荷を示す従属変数と独立変数の関係

Independent Variables	Dependent Variables					
	%HRR			LF/HF		
	B	S.E.	p-Value	B	S.E.	p-Value
BMI	-0.099	0.145	0.50			
RRI				-0.0089	0.0014	<0.001
PA	12.5	1.26	<0.001	-2.25	1.07	0.04
BS TEMP	0.772	0.080	<0.001	-0.163	0.0646	0.01
AGE	0.270	0.0082	<0.001	0.0046	0.0085	0.59
EXP	0.008	0.045	0.86	-0.218	0.0324	<0.001
LF power	0.00001	0.0001	0.61	0.0003	0.00001	<0.001

まず、独立変数である PA、BS TEMP、AGE が身体的負荷に及ぼす影響を示す重回帰式を求めた。式 (4) に示す回帰式は、修正 R² が 0.449 であった。分析結果は表 5-6 の通りであり、PA、BS TEMP、LF パワーの変化はいずれも作業員の作業量に正の影響を与えた。また、独立変数の標準回帰偏差はほぼ同じ値

$$\%HRR = 37.1 \times PA + 2.34 \times BS\ TEMP + 0.269 \times AGE - 70.1 \quad (4)$$

を示し、作業量への影響率も等しいことがわかった。

表 5-6：労働者の生物学的パラメータと%HRR の関係

Independent Variable	Dependent Variable: %HRR					VIF
	Partial β	S.E.	Standard β	t-Value	p-Value	
PA	37.1	1.94	0.340	19.2	<0.001	1.11
B.S. TEMP	2.34	0.122	0.339	19.1	<0.001	1.11
AGE	0.269	0.0134	0.339	20.0	<0.001	1.01
(Intercept)	-70.1	3.75	-	-18.7	<0.001	-
Adjusted R ²	0.449					
F static value	529.0					
Sig.	<0.001					

次に、独立変数である RRI、BS TEMP、LF パワー、EXP が心理的負荷に及ぼす影響を示す重回帰式を求めた。重回帰式は、式 (5) に示すように、修正 R² は 0.356 であった。分析結果は表 5-7 の通りであり、BS TEMP と LF パワーの変化は労働者の心理的負荷に正の影響を与えたが、RRI と EXP は負の影響を与えた。また、独立変数の標準回帰バイアスは、自律神経系に関連する LF パワーによる影響が最も大きいことが示唆された。

$$\text{LF/HF} = -0.0065 \times \text{RRI} - 0.186 \times \text{BS TEMP} + 0.0003 \times \text{LF power} - 0.205 \times \text{EXP} + 0.356 \quad (5)$$

表 5-7：労働者の生物学的パラメータと LF/HF の関係

Independent Variable	Dependent Variable: LF/HF					VIF
	Partial β	S.E.	Standard β	t-Value	p-Value	
RRI	-0.0065	0.0012	-0.147	-6.11	<0.001	1.27
B.S. TEMP	0.186	0.0549	0.088	2.74	0.006	1.26
LF power	0.0003	0.00001	0.561	18.3	<0.001	1.01
EXP	-0.205	0.0425	-0.018	-8.11	<0.001	1.01
(Intercept)	12.9	2.22	-	5.81	<0.001	-
Adjusted R ²	0.356					
F static value	156.6					
Sig.	<0.001					

廃棄物処理作業者の生体情報を解析し、作業時の負荷を推定するための重回帰式を求めた結果、BS TEMP は作業負荷 (%HRR) と心理的負荷 (LH/HF) の両方に有意に影響されることが示された。

5.4. 研究1の小括

グループ A (廃棄物を直接取り扱う労働者) は、グループ B (施設のメンテナンス労働者) と比較して、PA、BS TEMP、そして自律神経系に関連する HRV

パラメータ値が低いことがわかった。先行研究で調査されていない廃棄物処理労働者の身体的・心理的負荷、HRV、BS TEMP、PA、AGE、EXP との間に有意な関係があることが示唆された。また、作業者の BS TEMP は、HR、PA、WBGT、AGE と有意に関連していた。心理的負荷 LF/HF は、HRV パラメータ、RRI と LF パワー、BS TEMP、EXP に影響を受けていた。

6. 研究2「混合系廃棄物処理労働者と非混合系廃棄物（医療系廃棄物）労働者の比較」

6.1. 研究2の概要

研究1において、廃棄物を扱う労働者と扱わない労働者の生体情報と身体的負荷、心理的負荷を比較することで、廃棄物処理労働者の実態を明らかにすることができた。ひとえに廃棄物処理といっても、その業務内容は多岐にわたっている。研究2では、廃棄物処理労働者にとって高リスクとなり得る作業（危険な廃棄物への曝露を含む）が労働者にとって高負荷となり得るのかを検証したい。本研究は、ヘルシンキ宣言、国連教育科学文化機関のヒトゲノムと人権に関する世界宣言に基づき、立命館大学研究倫理審査委員会（BKC-2019-009）の承認を得て実施された。

6.2. 研究2の実験方法

6.2.1. 実験対象

実験は、2019年9月3日から9月4日、そして2020年8月24日から8月26日にかけて京都市にある廃棄物管理施設の協力のもと実施された。実験への参加は、同施設の労働者の中から募集し、協力を申し出た者を対象とした。本実験では心拍情報を用いる都合上、神経系や循環器系の疾患を持つ労働者は除外した。その結果、合計22人の労働者を最終的なサンプル対象とした。最終サンプルの22人は、職務内容に基づき以下の2つのグループに分けられた。

- グループA（n=11人）：混合系廃棄物を取り扱う。処理施設において、トラックにて輸送されてきた廃棄物を手作業にて分別する。
- グループB（n=11人）：非混合系（医療系）廃棄物を取り扱う。廃棄物管理施設において、処理施設において、トラックにて輸送されてきた医療系廃棄物をトラックから降ろし、カートを用いて焼却施設まで廃棄物を運搬する。

6.2.2. 実験プロトコル

実験は、実験環境となった廃棄物管理施設における通常業務を遂行する中で行われた。実験参加者は実験参加に先立ち、全員がインフォームド・コンセントを受け、同意書を得ている。同意書には、参加者の権利に関する説明とデータの機密保持に関する説明が含まれている。個人情報漏洩のリスクを最小限とするため、実験及びデータ解析の際に各参加者に個人識別コードを割り当てた。参加者の HR、身体加速度、体表温度のデータを勤務中の様々な時間帯に収集した。各グループの WBGT は、それぞれの作業場で測定された。22 名の参加者から、約 5 分おきにデータが収集された。モニタリングは 1 時間の休憩を含む 1 日中行われた。我々は、労働者から年齢、労働経験年数、身長、体重の自己申告情報を収集した。研究チームは参加者の行動を監視しなかったが、各作業場の近くに設置した 2 台のカメラで作業行動を記録した。実験に先立ち、参加者には業務スキルを測定しないことを告げ、ホーソン効果 [104] を避けるために、日常の作業手順から逸脱しないように指示した。

6.3. 研究 2 の実験結果

6.3.1. グループ別、年代別の身体活動量と身体的負荷の比較

グループ A およびグループ B 毎の労働者の身体活動量 (PA) と身体的負荷 (%HRR) を労働者の年代別に図 6-1、図 6-2、表 6-1 にそれぞれ示す。グループ A (混合系廃棄物労働者) では、20-30 歳代労働者の労働負荷は実験全体を通して平均 17.0 (SD 9.91) [%]、60 歳代労働者は平均 12.9 (SD 8.01) [%]であった。20-30 歳代労働者、60 歳代労働者共に身体活動量の増加に伴う身体的負荷の増加が僅かに見られたが、60 歳代労働者の方が僅かに身体活動量との相関が高かった (60 歳代 : $r = 0.77$, $p < 0.001$ 。20-30 歳代 : $r = 0.49$, $p < 0.001$)。また 20-30 歳代労働者の場合、身体的負荷が 30%以上となるのは全体の 10.8%、

40%以上となるのは 1.1%だったのに対して、60 歳代労働者の場合 30%以上となるのは全体の 5.8%、40%以上となるのは 0.0%と、60 歳代労働者と身体活動量に大差はないにも関わらず 20-30 歳代労働者の方が身体的負荷は大きかった。

一方、グループ B（非混合系（医療系）廃棄物労働者）では、20-30 歳代労働者と 60 歳代労働者との間に僅かに違いが見られた。20-30 歳代労働者では身体的負荷は実験全体を通して平均 18.4 (SD 10.1) [%]であったが、60 歳代労働者は平均 27.6 (SD 11.6) [%]であった。60 歳代労働者では身体活動量と身体的負荷の間に相関関係は見られなかったが、20-30 歳代労働者では身体活動量の増加に伴う身体的負荷の増加が見られた（60 歳代： $r=0.02$, $p=0.76$ 。20-30 歳代： $r=0.61$, $p<0.001$ ）。また、20-30 歳代労働者の場合、身体的負荷が 30%以上となるのは全体の 8.7%、40%以上となるのが 1.2%だったのに対して、60 歳代労働者の場合 30%以上となるのが全体の 27.7%、40%以上となるのが 13.3%となり、60 歳代労働者は身体活動量に関係なく 20-30 歳代労働者よりも身体的負荷が大きかった。

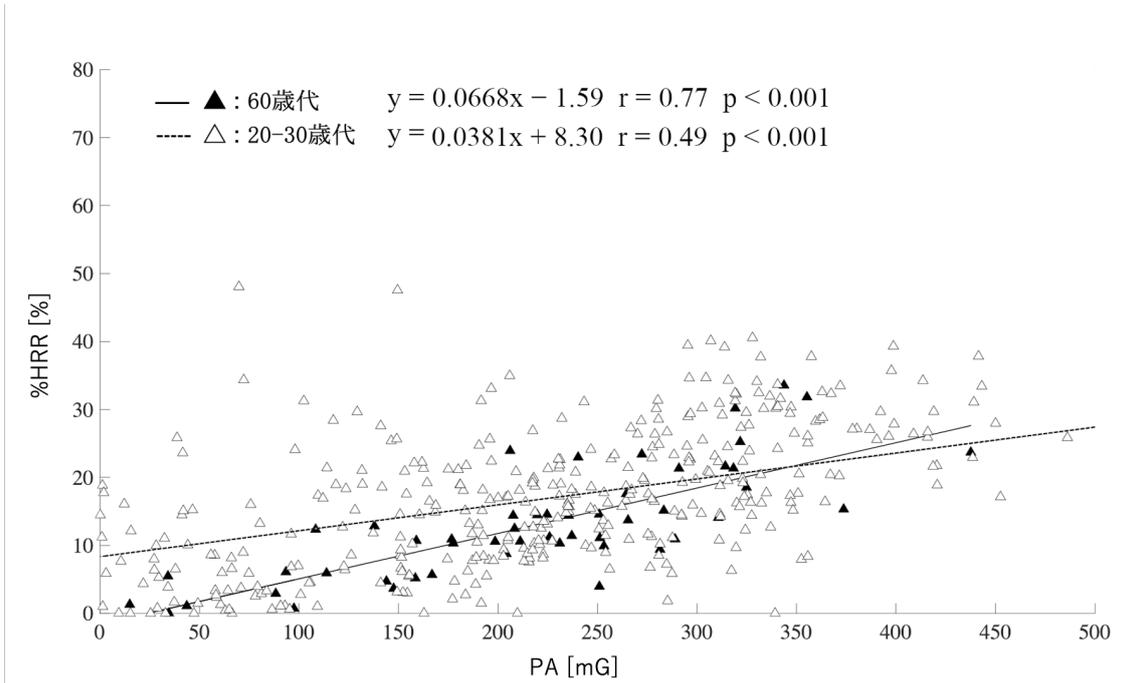


図 6-1：グループ A（混合系廃棄物労働者）の
身体活動量 PA と身体的負荷 %HRR

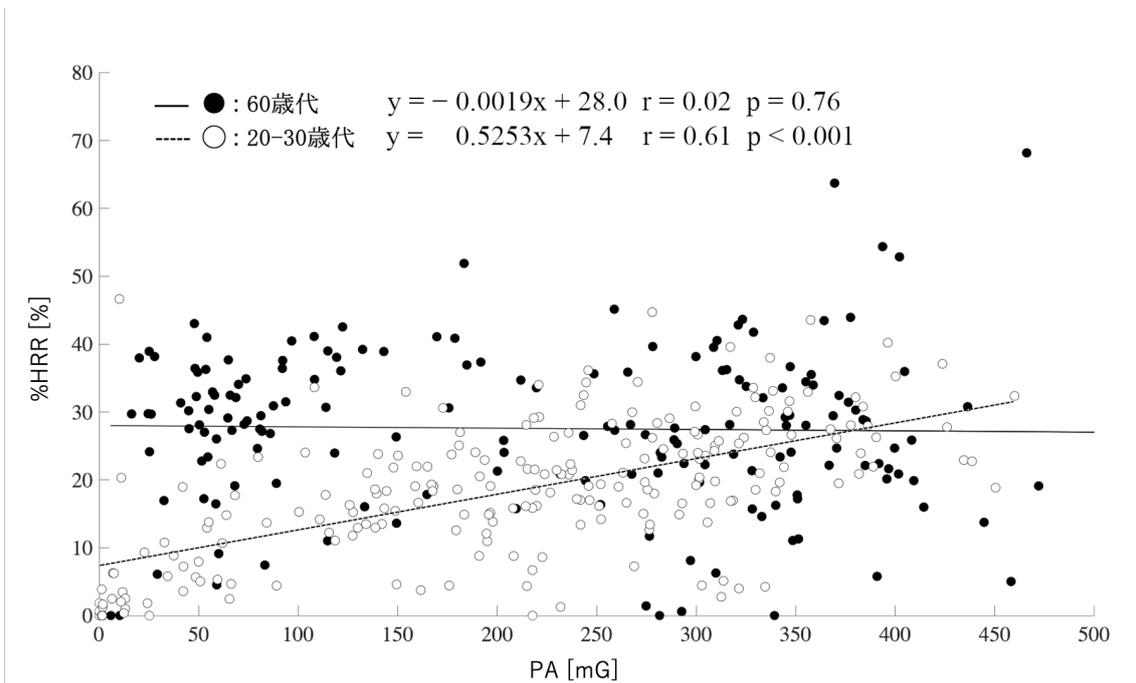


図 6-2：グループ B（非混合系（医療系）廃棄物労働者）の
身体活動量 PA と身体的負荷 %HRR

表 6-1：グループ別、年代別%HRR の分布

	グループ A (混合系廃棄物労働者)		グループ B (非混合系廃棄物労働者)	
	20 - 30 歳代	60 歳代	20 - 30 歳代	60 歳代
%HRR 分布 Mean (SD)	17.0 (9.91)	12.9 (8.01)	18.4 (10.1)	27.6 (11.6)
30 % ≦ %HRR ≦ 40 %	10.8 %	5.8 %	8.7 %	27.7 %
%HRR ≧ 40 %	1.1 %	0.0 %	1.2 %	13.3 %

6.4. 研究 2 の小括

本研究では、情報通信技術の導入事例が乏しい廃棄物処理業界へ情報通信技術を導入し、異なる作業内容毎の身体活動量と身体的負荷の実態を把握した。実験にはスマートウェアを用いて労働者の身体情報を測定する独自のシステムを用いて労働者の心拍数や 3 軸加速度を監視した。その結果、同一作業かつ同程度の身体活動量にも関わらず年代によって負荷が異なり、著しく身体的負荷が上昇するケースが確認された。

7. 研究3「ウェアラブルデバイス研究動向の調査」

7.1. 研究3の概要

ウェアラブルデバイスに関する研究領域は近年著しく成長しているにも関わらず、包括的な知識構造に着目した研究はほとんどない [108]。先行研究ではヘルスケア分野におけるウェアラブル技術研究の書誌学的分析 [109]や建設業界の安全管理におけるウェアラブルデバイスの適用 [110]など使用用途や業界を絞ったレビューが報告されている。しかし、トレンド分析は特定の条件下における研究論文の定性的レビューに留まっており、ウェアラブルデバイス研究領域全般を対象としたものが存在しない。その理由としては、本研究領域があまりにも様々な分野にまたがっているため、研究領域全体を見通しにくいとめだと考えられる。このリサーチギャップ解消するため、本研究では、ウェアラブルデバイスに関する研究が見られ始める2001年から2022年までウェアラブルデバイスに関する研究領域における情報を収集し、計量書誌学的分析により定量的に整理、この業界の知的構造を明らかにする。そして従来の研究のように、ウェアラブルデバイスの導入業界を限定したり、文献収集におけるキーワードを厳選しないことで、ウェアラブルデバイスを取り巻く研究領域全体を包括かつ客観的に明らかにすることを目的とする。

7.2. 研究3の実験方法と実験対象

7.2.1. 計量書誌学的分析

計量書誌学的分析は、数学、統計学、書誌学などを活用して学術文献を定量的に分析する研究手法である [111, 112, 113]。著者、期間、研究方向、その他の変数間の関係を特定するために広く使用されており、ある研究分野における知識構造や新たなトレンド、傾向を特定するために用いられる。大量の非構造化データを厳密な方法で理解することにより、確立された分野の科学的知識の蓄積と進化のニュアンスを読み解き、マッピングすることで研究者が「隠れた

パターン」を認識し、意思決定プロセスに役立てたり、新しい技術を予測するなど斬新かつ有意義な方法で研究領域を発展させるためのフレームワークを構築することができる [114]。現在では、VOSviewer [115]などの計量書誌学的ソフトウェアや Web of Science などの科学データベースが進歩し、利用しやすくなったことも計量書誌学的分析が盛んに行われるようになった一因である。

7.2.2. データの収集

本研究では、Web of Science (WoS) データベースを使用して対象となる文献を収集した。WoS は、インパクトファクターをベースに質の高い国際誌を厳選し、厳しい選定基準を設けている。そして採用された場合文献上のすべてのアイテムを記載する方針から網羅的な文献情報を取り扱うことが可能であり、質の悪い文献を除外できることから選択された。文献を収集するキーワードは「Wearable Device」(以下、WD)を用い、関連するすべての文献を調査対象とした。主題分野はあえて選択していない。それは、Wearable Device にかかわる研究分野を解析する事自体が一つの調査対象とするためである。ただし、Proceedings papers や Book などは除外し、専門誌に掲載された論文のみを対象とするため、文章タイプを「Article」に限定した。タイムスパンは、2001年から2022年(2022年5月31日)までを対象とした(しかし、分析によっては年毎の比較・解析を行う関係で、2001年から2021年までを使用している)。最終的に検索で使用された文字列は次のとおりである。:(ALL=(Wearable Device)) AND (DT=="ARTICLE"))AND(DOP==(2000-01-01/2022-05-31))。この結果、最終的に20581件の文献が抽出された(図7-1)。抽出された文献は、WoSのエクスポート機能によりテキストファイルとしてエクスポートされ、レコードコンテンツは「Full Record and Cited References」を選択し、全43件の関連情報のすべてを取得した(表7-2)。

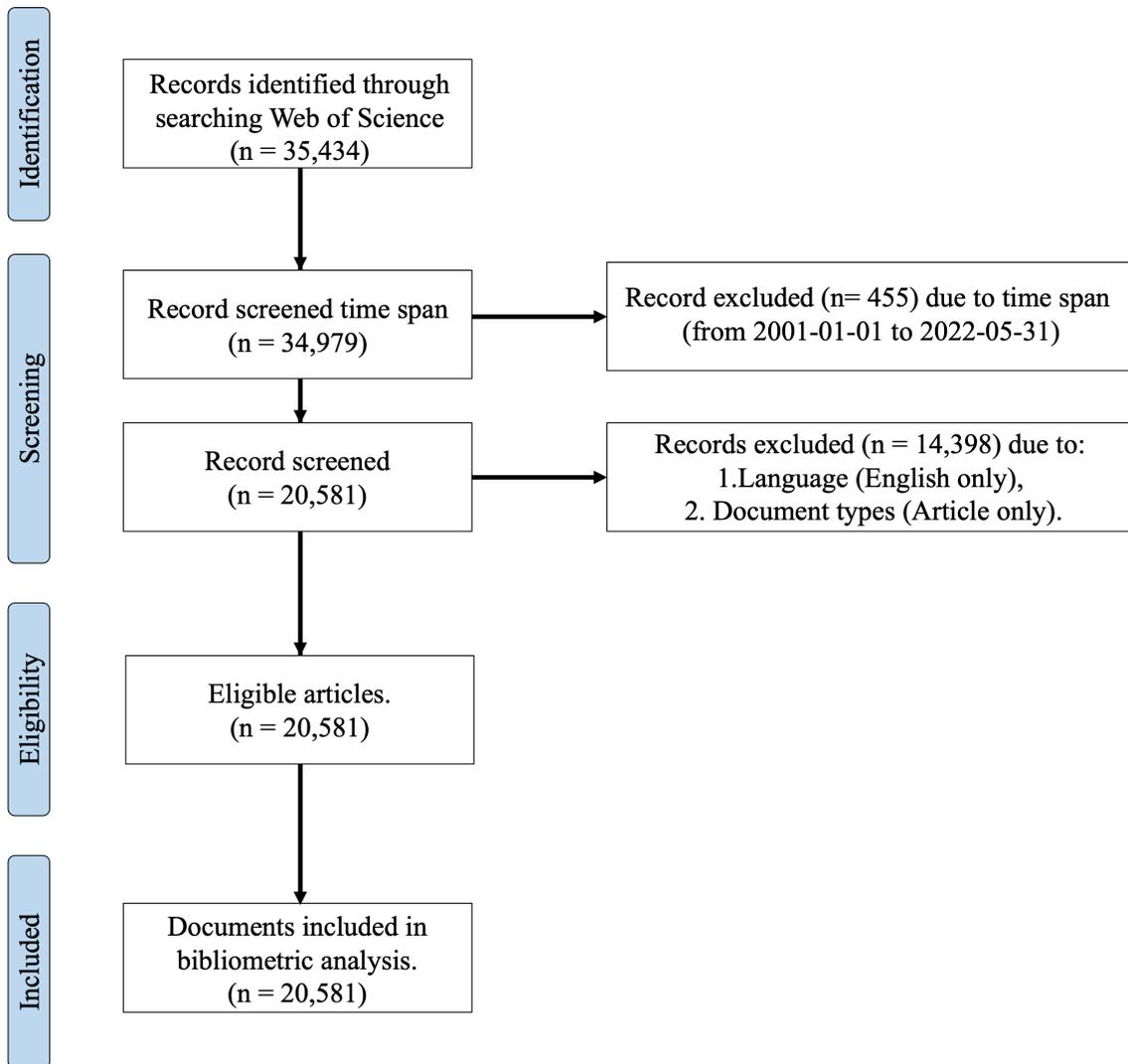


図 7-1：対象文献抽出に伴う PRISMA フロー図

表 7-1 : Web of Science から取得した論文に付随する情報と略語の一覧

Abbreviation	Description
AB	Abstract
AF	Author's full name
AU	Author's name
BP	Beginning page
BS	Series Subtitle
C1	Author Affiliation
CR	Works Cited
DA	Date this report was generated (exported)
DE	Author Keywords
DI	Digital Object Identifier (DOI)
DT	Document type
EM	Email address
EP	End page
ER	Identifier indicating the end of the record
FN	File name
GA	Document Delivery Number
IS	Issue
J9	29-character abbreviated form of publication name
JI	ISO publication name abbreviated form
LA	Language
NR	Number of references cited
PA	Publisher's address
PD	Date of issue (month)
PG	page number
PI	Place of Publication
PT	Publication type (J=Journal; B=Book; S=Series; P=Patent)
PU	Publisher
PY	Publication year
RP	Reprint request address
SC	Research Field
SN	International Standard Serial Number (ISSN)
SO	Publication name
TC	Number of citations in the Web of Science Core Collection

TI	Document title
U1	Number of times used (last 180 days)
U2	Number of times used (since 2013)
UT	Accession Number
VL	Volume
VR	Version number
WC	Web of Science field
WE	Type of Citation Index
Z9	Total number of citations

7.2.3. クラスタ分析

本研究では、収集した文献にける類似した特徴を持つ単語を特定し、ウェアラブルデバイスに関連する研究活動の傾向を明らかにするために、書誌的ネットワークの可視化を提供する VOSviewer ソフトウェアを用いた共起語ネットワークの作成とクラスタ分析を行った [116]。計量書誌学的分析における分析結果は VOSviewer や CiteSpace、HistCite などの可視化ツールを用いてビジュアルマップとして示されることが多い。各可視化ツールは機能により差別化される。本研究では、書誌的ネットワークの視覚化に特化し大規模ネットワークの可視化に適していること、クラスタ情報の抽出に十分な機能を備えているという理由により VOSviewer を用いた。

VOSviewer は、ネットワーク内のノードを 2 次元空間に配置し、正確に一つのクラスタに割り当て、個々の色によって可視化する [117]。クラスタとは、密接に関連したノードの集合を指す。円の大きさは書誌的ネットワーク内で重要度/頻度を表しており（具体的に円が何を意味しているのかは解析対象によって異なる）、円と円との距離が近ければ近いほど、書誌的な関連性が強いと言える。VOSviewer では、smart local moving algorithm によりノードを

クラスタリングしている [118]。

7.2.4. キーワードの共起語分析

論文に与えられる（著者）キーワードは、研究論文の核となる内容を反映している。キーワードの共起語分析は、計量書誌学的分析において、キーワードが論文の内容に一貫した説明を与えるという仮定に従って科学的構成を調査するための重要な定量的手法である [119]。この方法は、キーワードが文献間において頻繁に共起している場合、その根底にある概念・理論は密接に関連していることを意味している [120]。本研究では、単数形と複数形のキーワード（例えば、単数形の「device」、「sensor」と複数形の「devices」、「sensors」等）を統合する措置はとっていない。各クラスターが何を意味するかは、上記以外のキーワードで判断した。その理由は、ウェアラブルデバイス研究領域の著者がよく挙げるこれらのキーワードは、実際には関係がなくても、誤った共起を発生させる可能性があるためである。そこで、これらのキーワード（すなわち、例えば「device」と「devices」）は別のノードとして存在し、それぞれクラスターに分類される。2つのキーワード間の関連は、これら2つのキーワード間のリンク強度を示し、数値で表され、数値が高いほど強い関連を意味する。あるキーワードが多く共起している場合、他の単語と多くのつながりを持つ中心的な存在であることを示す。これらは中心性指標を持って定量的に示すことができる [121]。中心性とは、あるネットワークにおいて他者（他ノード）に影響を与える存在、中心的な存在をネットワーク的な視点から捉えようとした指標であり、ネットワーク全体の構造的特徴を定量的に表現することができる。ネットワークの中心性の概念は1940年代に登場し、それ以来多くの中心性の指標が提案されてきた。本論文では、ネットワーク解析においてよく

用いられている次の3つの中心性を用いた。

1 次数中心性 (Degree)

あるノードに接続している線 (エッジ) の数により表される指標。ノードとノードを繋ぐエッジの数を示しており、次数中心性の高いノードは、他のノードとの繋がりが多く、中心的なノードであると評価できる。

2 媒介中心性 (Betweenness)

あるノードが他のノードの最短経路である度合いを示す指標。あるノードが別のノード間における最短パスにどれだけ含まれるか、ノードを中継しているかを示している。連結された情報のネットワークでは、ネットワーク間の橋渡しを行うあるノードの存在によって連結が保たれているケースが存在する。もしその橋渡しを行うノードが存在しなければ、ネットワーク感の情報伝達経路が経たれてしまうような状況が起こり得る。そこで、ノード間の連結関係に注目し、より多くのノード、ネットワークの橋渡しを行っている中心的なノードを評価している。

3. 近接中心性 (Closeness)

あるノードが他のすべてのノードへの距離を示す指標。ノード間の最短経路長の平均値の逆数を取り、他のノードと最も密接に関連しているノードを評価することができる。

VOSviewer において、共起語分析を行うにあたって、以下の設定を用いた。

- Type of analysis : Co-occurrence

- Unit of analysis : All keywords

その結果、対象の全論文において全 49720 件のキーワードが存在したが、少なくとも 5 回の共起閾値を超えた 4756 件のうち、上位 1000 件を用いて共起語分析を行った。

7.2.5. 解析に使用したソフトウェア

WoS より得られた文献情報の取りまとめ、解析には以下のソフトウェアを使用した。VOSviewer 1.6.18、Excel 2019 (Microsoft Corporation)、MATLAB R2022a (MathWorks)。

7.3. 研究 3 の実験結果

7.3.1. 研究領域の特徴

Web of Science データベースより収集した「Wearable Device」関連する文献数を年代毎に図 7-2 に示す。2001 年ではわずか 22 本しか文献が存在していなかった。しかし、2014 年以降は関連する論文数が急激に増加しており、2021 年には 4608 本の文献が出版された。2001 年と比べるとおよそ 209 倍増加した。そして、2001 年から 2021 年までの間で 18553 本の関連する論文が出版されている。2001 年から 2021 年までの結果から、2025 年までの論文数を推定するために 4 次多項式回帰分析を行った [122]。結果次のような式を得た。

$$y = 0.0032x^4 + 1.5732x^3 - 31.788x^2 + 178.15x - 202.35, R^2 = 0.9952 \quad (6)$$

その結果、2025 年にはウェアラブルデバイスに関する論文数は 10000 本を超え、今後、Wearable Device に関連する文献はますます増加することが予想される。

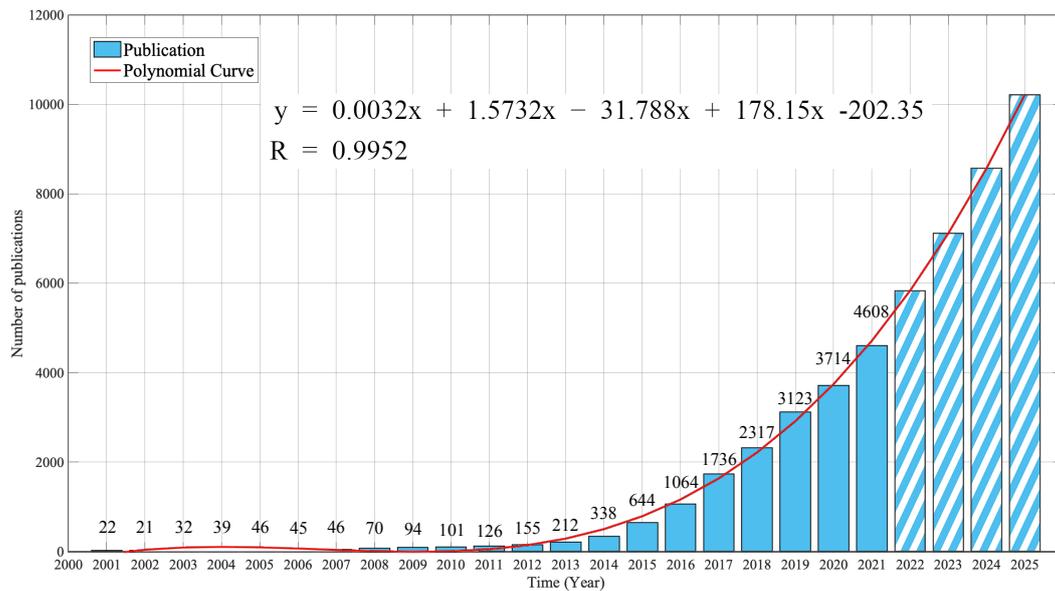


図 7-2 : 論文数の時間的变化 (2001 から 2021 年)。棒グラフは実測値、斜線の棒グラフ (2022 から 2025 年) は式(6)から推定した予測値を示す。

Wearable Device に関連する論文の、国別論文数の比較を図 7-3 に示す。

2001 から 2022 年の間で、Peoples r China (以下、China) の論文数が圧倒的に多く、全 7490 本の論文を出版しており、全論文数の約 37%に該当する。次点で USA (論文数 : 4508 本、全体の約 23%に該当)、South Korea (論文数 : 2648 本、全体の 13%に該当) と続き、本研究領域において、China と USA が牽引していることが示された。

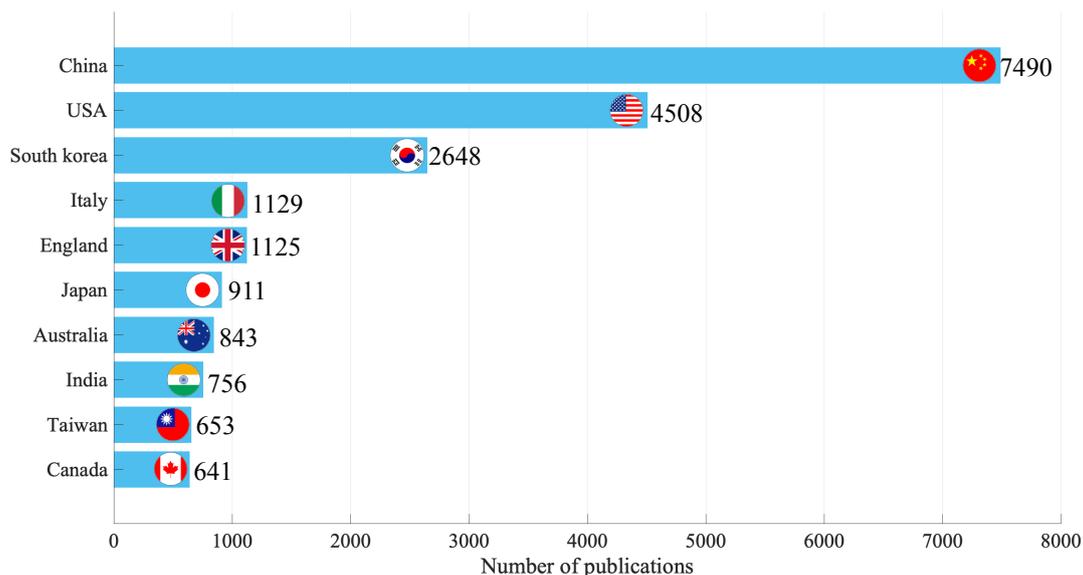


図 7-3 : 国別論文数の比較 (2001 から 2022 年)

図 7-4 に、当該研究領域における文献に関して、最も貢献している 10 カ国について共著者ネットワークを示す。上位 10 カ国の全てが連携されたネットワークに所属しており、当該研究領域における世界レベルの連携が見られた。上位 10 カ国における共著者ネットワークは、2つのクラスターを形成した。クラスター1 (赤色) は、Peoples r china (Rank 1)、USA (Rank 2) を含む、Italy (Rank 4)、England (Rank 5)、Australia (Rank 7)、Canada (Rank 10) で形成されたグループで、欧米諸国に Peoples r china を含んだグループだった。クラスター2 (緑色) は、South korez (Rank 3)、Japan (Rank 6)、India (Rank 8)、Taiwan (Rank 9) で形成されたグループで、アジア諸国において形成されたグループだった。Wearable Device に関する研究領域において、地域によって連携の強弱があることが明らかとなった。

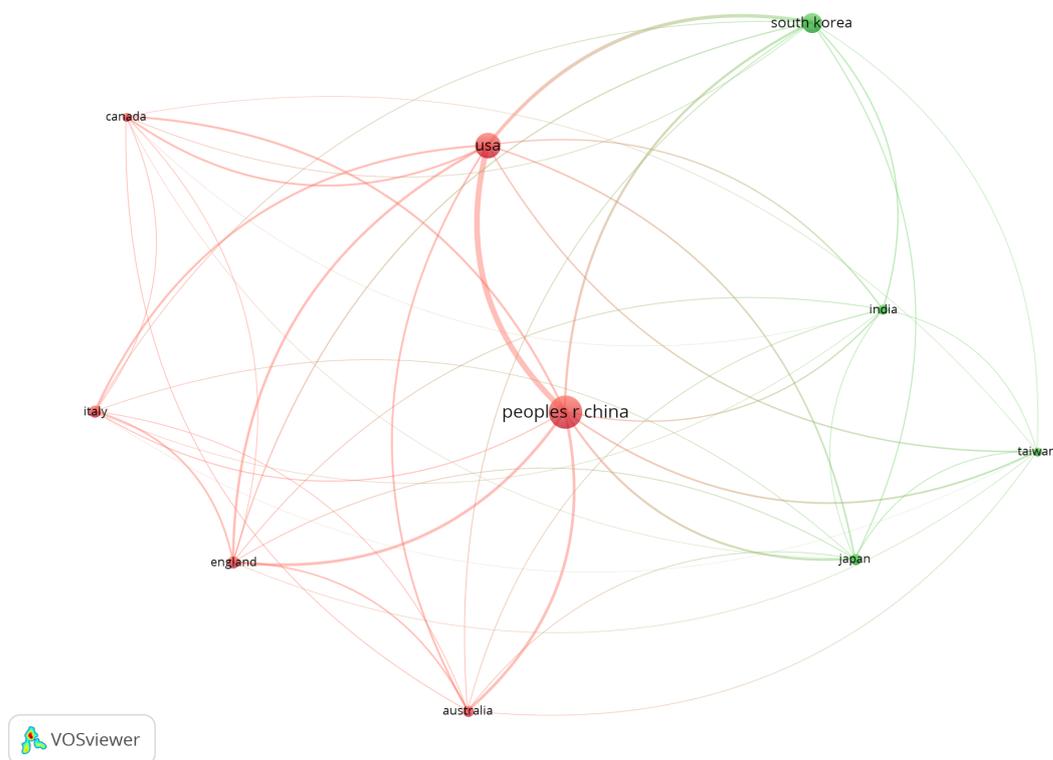


図 7-4 : 論文数の多い上位 10 カ国の共著ネットワーク (2001 から 2022 年)

Wearable Device に関連する論文の雑誌別論文数の比較を図 7-5 に示す。2001-2022 年の間で、*sensors* の論文数が最も多く、全 886 本で、全論文数の約 4.4 % に該当する。次点で *acs applied materials & interfaces* (論文数 : 823 本、全体の約 4 % に該当する。)、*nano energy* (論文数 : 460 本、全体の 2.3 % に該当する。) と続いた。上位 TOP 10 の雑誌のカテゴリーは見ると、化学、材料科学、物理学、エネルギー、ナノテクノロジー、電気工学、情報技術など幅広い分野にまたがっており、本研究領域がいかに様々な研究領域に広がっているかがうかがえる。

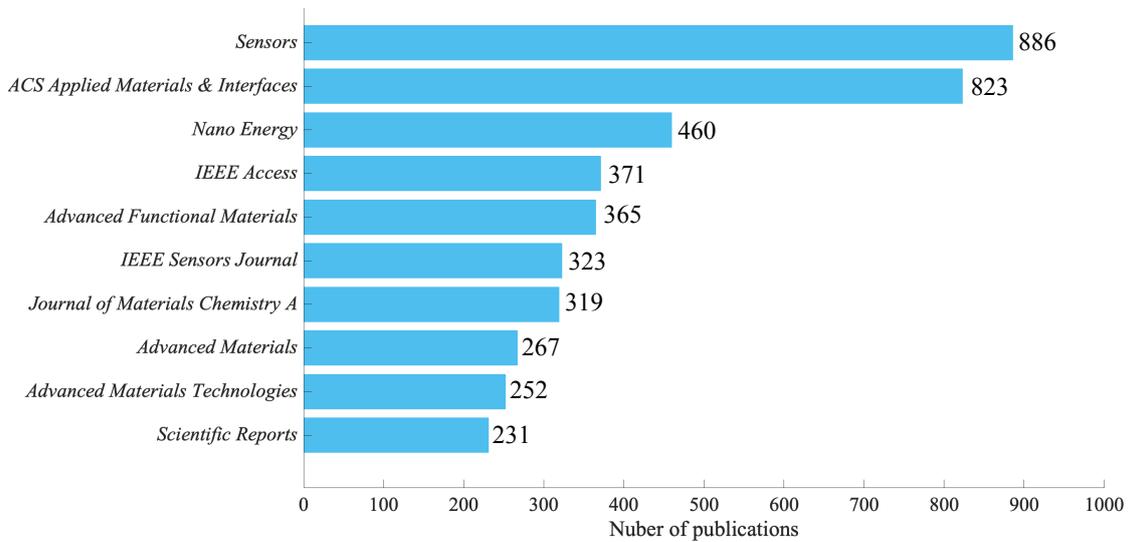


図 7-5：ウェアラブルデバイスに関する研究を掲載している雑誌の上位 10 誌
(2001 から 2022 年)

7.3.2. キーワードの共起語分析の結果

Web of Science より抽出した当該研究領域に関する 2001-2022 年間の全論文に関して、VOSviewer を用いて文献に設定された全ての著者キーワードに対する共起語分析を行い共起語ネットワークを生成した。生成したネットワークは、3つのクラスターを形成していた (図 7-6、表 7-2)。各クラスターの上位 10 のキーワードを示す。各クラスターは次のような特徴を持っていた。クラスター1 (赤色) は、「wearable device(s)」「wearable sensors」といった wearable device 研究領域名そのものが含まれている。その他に「health」「behavior」「walking」「physical-activity」「rehabilitation」「disease」といった健康管理に関するワードや「biomedical monitoring (monitoring)」「internet」「system(s)」などの技術的なワード、そして「machine learning」といった近年注目されているようなワードで構成されている。このように、クラスター1

は医学やバイオニクス、(医用)工学やヒューマンコンピュータインタラクションのような応用研究に関連するワードをカバーするクラスターであると言える。クラスター2(緑色)は、「sensor」「wearable electronics」「carbon nanotube(s)」「composites」「conductivity」「strain sensor」といったセンサーや素子に関するワードで構成されている。このように、クラスター2は、化学や(電気)工学に関するワードをカバーするクラスターであると言える。クラスター3(青色)は、「graphene」「oxide」「reduced graphene oxide」「nanowires」「super capacitor」「nano structures」「nano sheets」「polypyrrole」といったナノテクノロジーや化合物に関するワードで構成されている。このように、クラスター3は材料科学(工学)に関するワードで構成されているクラスターであると言える。応用研究をカバーするクラスター1に対して、クラスター2、3は基礎研究をカバーしていると言える。共起語ネットワークを構成する全1000件のキーワードの内、クラスター1は約48%、クラスター2は約36%、クラスター3は約16%の割合で構成されており応用研究領域(クラスター1)と基礎研究領域(クラスター2、3)はおよそ半分の割合で構成されていた。

表 7-2：クラスター別共起語上位 30 キーワード（2001 から 2022 年）

Rank	Cluster 1		Cluster 2		Cluster 3	
	Keyword	Weight	Keyword	Weight	Keyword	Weight
1	Design	849	Performance	889	Electrodes	617
2	Sensors	815	Devices	794	Graphene	608
3	Wearable devices	798	Sensor	754	High-performance	536
4	Wearable device	754	Fabrication	653	Flexible	478
5	System	736	Films	589	Oxide	457
6	Wearable	728	Skin	587	Arrays	452
7	Wearable sensors	622	Energy	583	Electrode	442
8	Behavior	607	Wearable electronics	577	Supercapacitors	435
9	Device	595	Pressure	556	Paper	426
10	Health	515	Electronics	546	Carbon	404
11	Systems	512	Transparent	541	Reduction	404
12	Model	501	Composite	540	Fiber	402
13	Technology	497	Carbon nanotubes	520	Reduced graphene oxide	398
14	Wearables	469	Nanoparticles	514	Nanowires	392
15	Machine learning	468	Flexible electronics	493	Supercapacitor	385
16	Challenges	463	Composites	492	Energy-storage	384
17	Wearable sensor	445	Stability	488	Nanosheets	373
18	Reliability	443	Temperature	482	Efficient	372
19	Monitoring	431	Film	478	Textiles	365
20	Management	397	Networks	474	Nanotubes	362
21	Wearable technology	397	Nanocomposites	469	Storage	358
22	Classification	394	Network	439	Polyaniline	349
23	Waling	394	Stain sensor	431	Nanostructures	342
24	Rehabilitation	377	Stain	429	Batteries	322
25	Physical-activity	376	Polymer	423	Flexibility	312
26	Recognition	373	Graphene oxide	420	Hybrid	305
27	Biomedical monitoring	369	Conductivity	404	Polypyrrole	302
28	Disease	362	Stain sensors	404	Conversion	297
29	Internet	361	Fibers	402	Energy storage	294
30	Accelerometer	360	Triboelectric nanogenerator	400	Capacitance	293

7.3.3. 研究領域に貢献している 2 カ国の比較（China と USA）

2001-2021 年における Wearable Device 研究領域における China と USA の年代ごとの論文数を図 7-7、表 7-3 に示す（2001-2003 年においては、China は関連する論文の出版がないため、データが存在しない）。2021 年の時点で、China の論文数は 1974 件、USA の論文数は 866 件と China が USA よりもお

よそ2倍多い。両国の論文数の推移は3つの期間に分かれていた。Period 1：USA 優位期間。2001-2013年における、わずかではあるがUSAの論文数がChinaよりも多い期間を示す。この期間において、Chinaの論文数は平均して7.4件/年、USAの論文数は21.6件/年とわずかではあるがUSAの方がChinaより論文数が多い。Period 2：拮抗期間。2014-2016年における、ChinaとUSAの論文数が拮抗してきた期間を示す。Chinaの論文数は平均189件/年、USAの論文数は平均183件/年と、Period 1と異なりChinaとUSAの論文数にほとんど差はない。Period 3：China 優位期間。2017-2021年における、Chinaの論文数がUSAの論文数を逆転し、大きく引き離れた期間を示す。Chinaの論文数は平均して1220件/年、USAの論文数が平均686件/年とPeriod 1、Period 2と異なり、Chinaの論文数がUSAの論文数を大きく引き離れた。USAの論文数がやや定常で平行になりつつある中、Chinaは未だ成長段階であり、今後もさらに増加することが予想される。

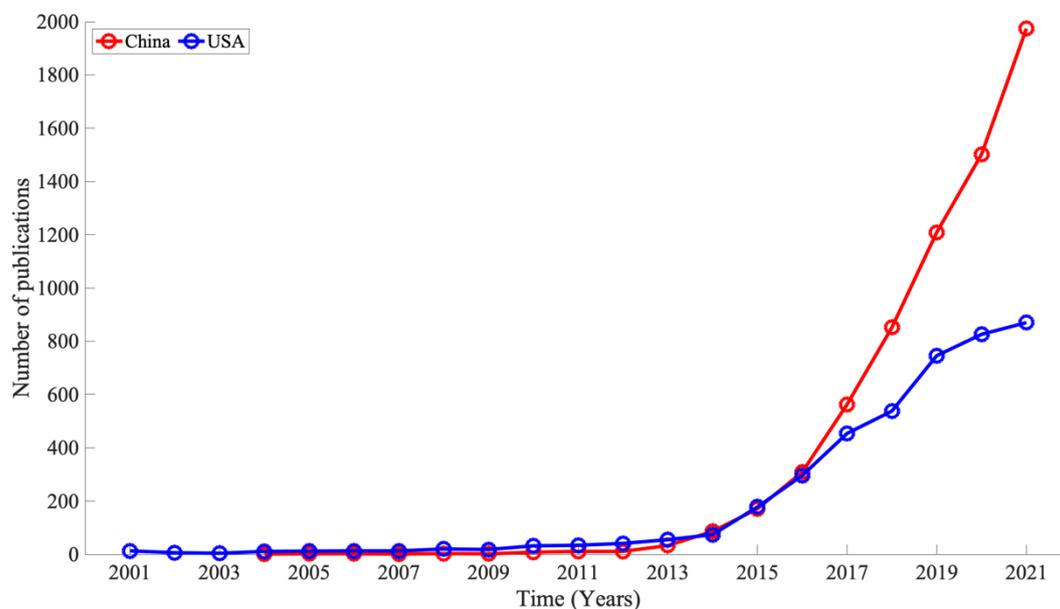


図 7-7：China と USA の論文数の経年変化比較（2001 から 2021 年）。China は 2001 から 2003 年まで関連する論文が発表されていないため、データが存在しない。

表 7-3 : China と USA の論文数と引用度インパクト (Citation Impact) の一覧

Year	China		USA	
	Publication	Citation Impact	Publication	Citation Impact
2001	—	—	13	97.15
2002	—	—	6	29.17
2003	—	—	14	44.64
2004	1	2.00	11	63.64
2005	2	11.50	12	42.67
2006	2	16.00	13	35.15
2007	1	12.00	13	209.85
2008	3	18.33	20	73.85
2009	2	20.00	18	28.17
2010	8	170.25	32	186.66
2011	11	83.18	33	75.82
2012	11	146.73	41	63.98
2013	33	89.55	55	119.40
2014	86	139.58	74	112.65
2015	171	86.64	178	89.58
2016	309	75.89	296	73.36
2017	563	59.53	454	57.63
2018	852	45.57	539	40.67
2019	1209	31.81	746	26.13
2020	1500	19.44	826	15.21
2021	1974	5.96	866	4.61

China と USA がこの研究領域においてどのような役割を果たしているかを明らかにするため、共著者ネットワーク内における両国のネットワークにおける中心性 (=重要度) を調査した (表 7-4)。結果、どの中心性指標においても USA が最もランクが高かった。次数中心性、近接中心性においては China が次点につけているが、媒介中心性において China は 5 位と USA の結果と開きがあった。共著者ネットワークにおける USA と China の中心性指標は変わ

らない、もしくは一部指標においては USA が China を上回る結果となり、論文数の差に反して、このネットワークにおいて中心的な存在となっているのは USA であった。この結果は、両国における 1 文献あたりの引用数の比率 (Citation Impact) にも反映されていた (図 7-8、表 7-3)。両国における Citation Impact もまた、近年における China の急激な論文数の増加に反して、China と USA の間に大きな差はなかった。

表 7-4：中心性指標上位 10 の一覧 (2001 から 2021 年)。

degree centrality			betweenness centrality			closeness centrality		
Rank	Score	Country	Rank	Score	Country	Rank	Score	Country
1	68	USA	1	207.78	USA	1	0.01042	USA
2	66	China	2	166.06	Italy	2	0.01020	China
3	65	England	3	159.53	England	3	0.01010	England
4	59	Italy	4	152.16	Spain	4	0.00952	Italy
5	59	Spain	5	146.70	China	5	0.00952	Spain
6	58	Germany	6	105.94	France	6	0.00943	Germany
7	57	France	7	89.85	South Korea	7	0.00935	France
8	57	India	8	88.59	Germany	8	0.00935	India
9	56	South Korea	9	86.97	Saudi Arabia	9	0.00926	South Korea
10	54	Saudi Arabia	10	86.45	India	10	0.00909	Saudi Arabia

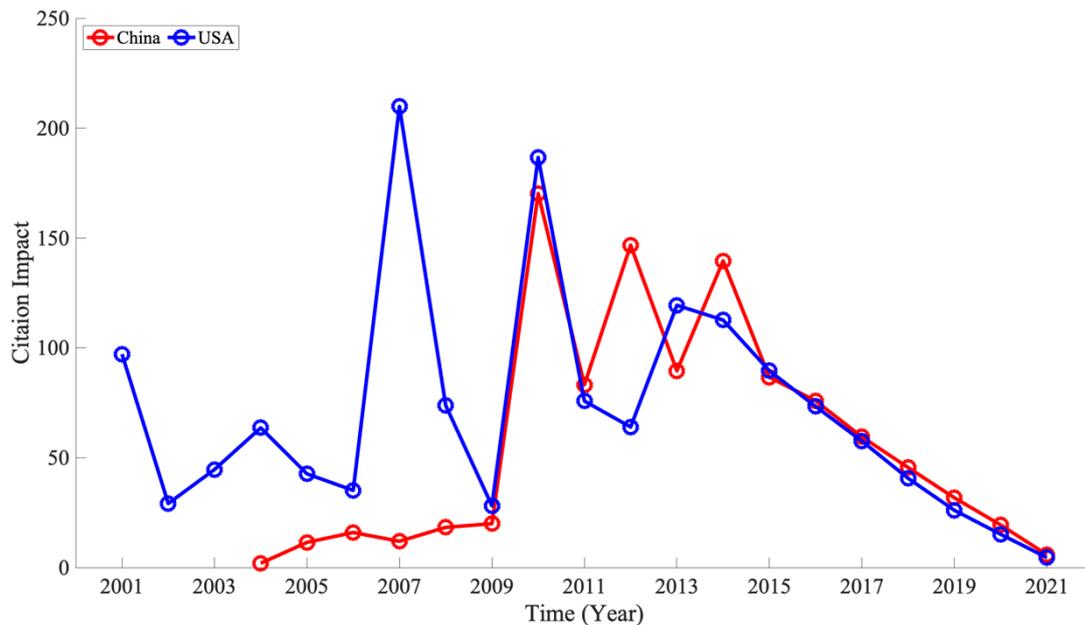


図 7-8 : China と USA における引用インパクトの比較 (2001 から 2021 年)。China は 2001 から 2003 年まで関連する論文が発表されていないため、データが存在しない。

China と USA の文献で用いられている著者キーワードが、2022 年現在における共起語ネットワーク (図 7-6) 内のクラスターに分類されているかを分析した (図 7-9)。China ではクラスター2に属するキーワードが主であり、続いてクラスター2、そしてクラスター1に属するキーワードが最も登場が少なかった (クラスター1 : 7 %、クラスター2 : 54 %、クラスター3 : 39 %)。しかし、USA はクラスター1に属するキーワードが主であり、続いてクラスター2、そしてクラスター3が続く結果となった (クラスター1 : 61 %、クラスター2 : 28 %、クラスター3 : 11 %)。

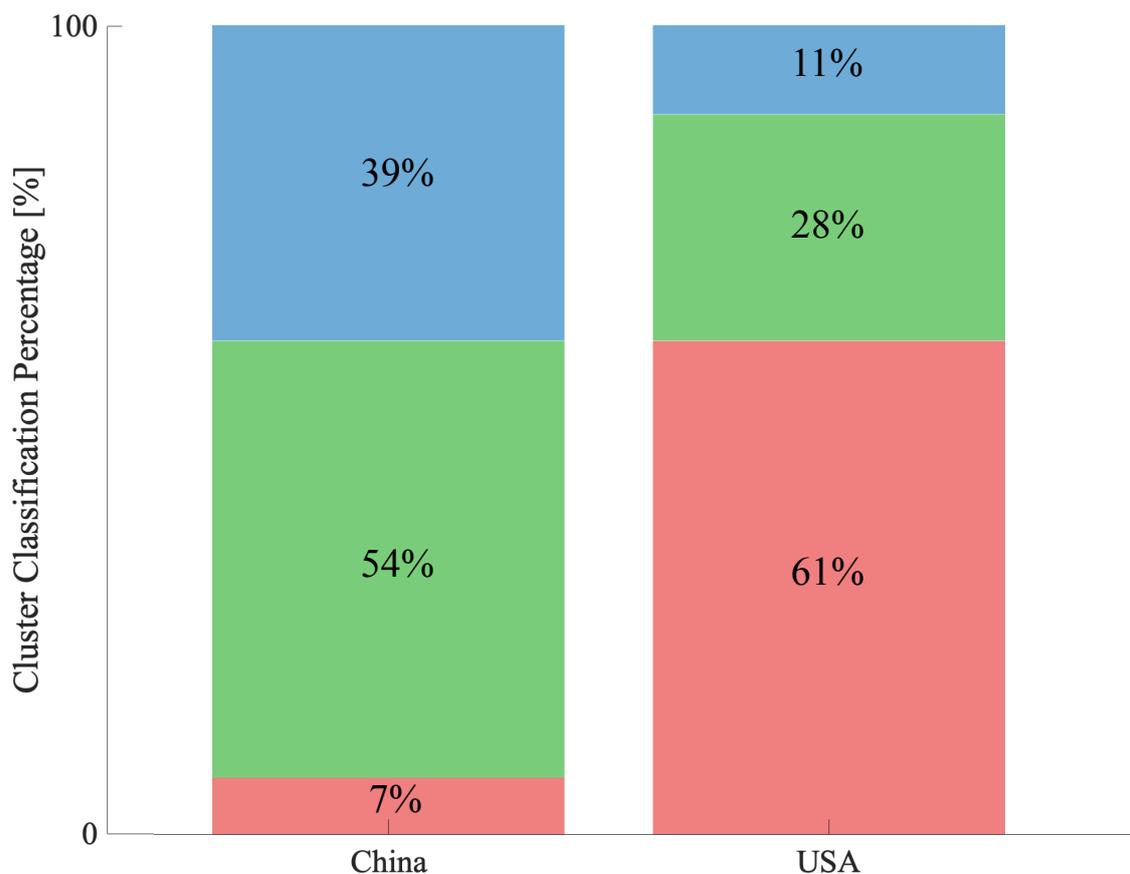


図 7-9 : China と USA で使用された著者キーワードのクラスター分布 (2001 から 2021 年)。著者キーワードのうち共起回数の多い上位 100 キーワードを使用 (赤 : クラスター1、緑 : クラスター2、青 : クラスター3)。

表 7-5 は、2001-2021 年間の China と USA における引用数 TOP 10 の文献を示している。China の引用 TOP10 文献は、全てマテリアルや素子研究に関するものであり、クラスター分類 (図 7-6) に当てはめると、クラスター2、3 に該当する基礎研究領域のものであった。一方、USA の場合は、China 同様クラスター2、3 のような基礎研究領域の文献の他に、Pantelopoulos et al. [123] や Son, Donghee et al. [124] のようなウェアラブルデバイスの活用に関する応用研究領域 (つまりクラスター1) に関する文献の引用件数も存在した。

表 7-5 : China と USA で最も引用された論文上位 10 件
(2001 から 2021 年)

Country	Author	Title	Source	Year	Number of Citation	References
China	Ling, Zheng et al.	Flexible and conductive MXene films and nanocomposites with high capacitance	PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE UNITED STATES OF AMERICA, 111(47), 16676-16681	2014	1118	[125]
	Meng, Chuizhou et al.	Highly Flexible and All-Solid-State Paper like Polymer Supercapacitors	NANO LETTERS, 10(10), 4025-4031	2010	998	[126]
	Wang, XW; Gu, Y; Zhang, T	Silk-Molded Flexible, Ultrasensitive, and Highly Stable Electronic Skin for Monitoring Human Physiological Signals	ADVANCED MATERIALS, 26(9), 1336-1342	2014	982	[127]
	Kou, Liang et al.	Coaxial wet-spun yarn supercapacitors for high-energy density and safe wearable electronics	NATURE COMMUNICATIONS, 5, 3754	2014	856	[128]
	Pu, Xiong et al.	Ultrastretchable, transparent triboelectric nanogenerator as electronic skin for biomechanical energy harvesting	SCIENCE ADVANCES, 3(5), e1700015	2017	696	[129]

		and tactile sensing				
	Meng, Fanlu et al.	In Situ Coupling of Strung Co ₄ N and Intertwined N-C Fibers toward Free-Standing Bifunctional Cathode for Robust, Efficient, and Flexible Zn Air-Batteries	JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, 138(32), 10226-10231	2016	674	[130]
	Pelaz, Beatriz et al.	Diverse Applications of Nanomedicine	ACS NANO, 11(3), 2313-2381	2017	655	[131]
	Koh, Ahyeon et al.	A soft, wearable microfluidic device for the capture, storage, and colorimetric sensing of sweat	SCIENCE TRANSLATIONAL MEDICINE, 8(366), 366ral65	2016	612	[132]
	Pu, Xiong et al.	Wearable Self-Charging Power Textile Based on Flexible Yarn Supercapacitors and Fabric Nanogenerators	ADVANCED MATERIALS, 28(1), 98	2016	572	[133]
	Lei, Zhouyue et al.	A Bioinspired Mineral Hydrogel as a Self-Healable, Mechanically Adaptable Ionic Skin for Highly Sensitive Pressure Sensing	ADVANCED MATERIALS, 29(22), 1700321	2017	572	[134]
Country	Author	Title	Source	Year	Number	References

					of Citation	
USA	Gao, Wei et al.	Fully integrated wearable sensor arrays for multiplexed in situ perspiration analysis	NATURE, 529(7587), 509	2016	2367	[135]
	Lara, Oscar D. and Labrador, Miguel A.	A Survey on Human Activity Recognition using Wearable Sensors	IEE COMMUNICATIONS SURVEYS AND TUTORIALS, 15(3), 1192-1209	2013	1308	[136]
	Hu, Liangbing et al.	Stretchable, Porous, and Conductive Energy Textiles	NANO LETTERS, 10(2), 708-714	2010	1244	[137]
	Pantelopoulos, Alexandros and Bourbakis, Nikolaos G.	A Survey on Wearable Sensor-Based Systems for Health Monitoring and Prognosis	IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS MAN AND CYBERNETICS PART C- APPLICATIONS AND REVIEWS, 40(1), 1-12	2010	1233	[123]
	Ling, Zheng et al.	Flexible and conductive MXene films and nanocomposites with high capacitance	ROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE UNITED STATES OF AMERICA, 111(47), 16676-16681	2014	1147	[138]
	Son, Donghee et al.	Multifunctional wearable devices for diagnosis and therapy of movement disorders	NATURE NANOTECHNOLOGY, 9(5), 397-404	2014	998	[124]
	Lee, Hyunjae	A graphene-based electrochemical device with thermoresponsive	NATURE NANOTECHNOLOGY, 11(6), 566	2016	970	[139]

		microneedles for diabetes monitoring and therapy				
Shin, Seong Sik et al.		Colloidally prepared La-doped BaSnO ₃ electrodes for efficient, photostable perovskite solar cells	SCIENCE, 356(6334), 167-171	2017	820	[140]
Dickey, Michael D.		Stretchable and Soft Electronics using Liquid Metals	ADVANCED MATERIALS, 29(27), 1606425	2017	795	[141]
McAlpine, Michael C.		Highly ordered nanowire arrays on plastic substrates for ultrasensitive flexible chemical sensors	NATURE MATERIALS, 6(5), 379-384	2007	789	[142]

7.4. 研究3の小括

本研究では、ウェアラブルデバイスを取り巻く研究領域全体における文献を収集し、計量書誌学的分析を用いてこの業界の知的構造を客観的に明らかにすることを目的とした。

研究キーワードの共起分析の結果、本研究領域内では3つのクラスターが特定され、応用研究領域（クラスター1）と基礎研究領域（クラスター2、3）で構成されていることが示された。また、2001年から2022年にかけては、China（主に基礎研究領域）とUSA（主に応用研究領域）がこの研究をリードしていることがわかった。さらに、化学、エネルギー、ナノテクノロジーなど様々な分野にまたがるため、これまで分かりにくかったウェアラブルデバイ

ス研究が、応用研究と基礎研究の2つに大きく分類されるようになった。これにより、この研究領域をよりシンプルに説明することができるかもしれません。ウェアラブルデバイスに関する研究は、2001年以降毎年増加しており、今後も継続的な成長が期待される。ウェアラブルデバイスに関する研究領域を牽引するChinaとUSAを比較したところ、文献の増加傾向に3つの期間が得られた。Period 1 (2001-2013年)：USAがChinaより文献数が多く、USAが優位である期間。Period 2 (2014-2016年)：USAとChinaの文献数が拮抗して同じレベルとなり拮抗した期間。Period 3 (2017-2022年)：ChinaがUSAの文献数を大きく引き離し、逆転した期間。ChinaとUSAがウェアラブルデバイス研究領域においてどのような役割を果たしているか明らかとするために、共著者ネットワーク内におけるネットワークの中心性を調査した。結果、次数中心性、近接中心性に関しては両国に大きな差はなく、媒介中心性に関してはChinaとUSAの間に開きがあった。しかし、ChinaとUSAの1文献に対する引用数の比率(Citation Impact)を見ると、ChinaとUSAの間に差は見られなかった。ChinaとUSAの文献で用いられている著者キーワードが、2022年現在における共起語ネットワーク内のクラスターに分類されているかを調査した。結果、Chinaはクラスター2が主であり、次点がクラスター3、クラスター1が続いた。一方USAは、クラスター1が主であり、次点でクラスター2、クラスター3が続き、両国の分布は反転していた。これは、両国における引用数の高い論文にも反映している。

8. 考察

8.1. 研究1の考察

8.1.1. 主要な知見

研究1では、廃棄物処理労働者の身体的・心理的負荷に対する個人特性および生体情報の影響について検討した。その結果、廃棄物処理労働者と非廃棄物処理労働者を比較した場合、労働者のHRV時間領域成分(NN50、pNN50、RMSSD)およびHRV周波数領域成分(LFパワー、HFパワー、LF/HF)に有意差があることが示された。廃棄物を扱わない労働者と比較して、扱う労働者はPAとBS TEMPが低く、HRV時間領域成分NN50、pNN50、RMSSDが低く、HRV周波数領域成分LF/HFとLFパワーが高いことは心理的負荷と関連することが示された。HR、RRI、%HRRには有意差はなかった。これらの結果から、廃棄物処理労働者は、労働によるHRや%HRRの変動に関わらず、高い心理的負荷のもとで作業を行っていることが示唆された。

労働者の%HRRとLF/HFは、生体情報を用いて推定した。深部体温、WBGT、HRの関係を分析した研究があるが[67,68]、本研究では、BS TEMPをこの推定に使用できることを確認した。%HRRは、PA、BS TEMP、AGEら推定され(調整済み $R^2 = 0.449$)、LF/HFは、自律性に影響するRRI、LFパワー、BS TEMP、EXPから推定された(調整済み $R^2 = 0.356$)。%HRRでは、PAとBS TEMPは%HRRに正の影響を与え[17]、AGEを含む3つの独立変数はほぼ等しく%HRRに影響を与えた。一方LF/HFの場合、LFパワーとBS TEMPはLF/HFに正の効果を与え[69,70]、RRIとEXPは負の効果を与えた。そしてEXPが長くなるにつれて、より低いLF/HFを報告する傾向があった。RMSSD、NN50、pNN50は、廃棄物を扱う労働者と扱わない労働者を比較すると有意差を示したが、LF/HFを決定するパラメータではなかった。Orsilaら[143]は、電機メーカーの従業員において、朝・昼・晩の比較的長い時間におけるRMSSDと心理的ス

トレスの関係を確認した。しかし、廃棄物作業を対象とした本研究とは作業環境や条件が異なり、それぞれの結果には差異があった。

8.1.2. 廃棄物処理作業における身体的負荷・心理的負荷について

UEMAE らは、生理指標である HR の変化と皮膚付近の温度・湿度との関係を観察し、皮膚温度の変化が HR に影響を与え、その要因は HR の自律的な体温調節機能に関係していると報告している [144]。自律神経系の交感神経活動は、ストレスなどの身体的・心理的負荷の強さを推定するために利用することができる [145]。したがって、BS TEMP は作業環境に関する負荷のインジケータである %HRR や HRV に影響を与えると推察される。この推論は、式 (4)、式 (5) で示される関係に基づいている。また、廃棄物処理労働者は、廃棄物の取り扱いや作業環境の温度により、様々なレベルのストレスに晒されていることがわかった。この結果は、廃棄物を取り扱う環境と作業員の温度条件を分析することで、作業員の心理的負荷とその許容範囲に関する不確実性を解消できることを示している。また、%HRR の推定では、説明変数として BS TEMP が影響したが、WBGT の影響はなかった。この関係は、表 5-4 から明らかなように、BS TEMP と WBGT の相関が低いことを示している。WBGT が生物学的情報に与える影響については、これまでも研究報告がなされている [82, 146]。しかし、各作業現場付近の WBGT は労働者の体温と関係がない可能性があり、体表温度を用いた解析は労働者の HR の変化をより正確に示すことができると推察される。さらに、LF/HF 推定により、廃棄物を扱う労働者は、緊張状態に関連する副交感神経活動（すなわち、RRI、SDRR、RMSSD、HF パワーが低い）よりも交感神経活動（すなわち、LH/HF、LF パワーが高い）が高いことが明らかとなった。また、労働者の HRV 指数は低く、これは過去の知見 [147, 148] と一致しており、仕事上のストレスの増大が副交感神経活動の低下と交感神経活

動の上昇につながることを示唆された。したがって、労働者の LF/HF は、彼らの仕事上のストレスレベルについての洞察を提供する。本研究の参加者は、低い身体的負荷と高い心理的負荷にさらされていた。このことは、廃棄物処理労働者は、ハードな肉体労働に従事する労働者よりも、環境の安全に関して特別な注意を払い、危険な廃棄物を扱うという仕事の特性から、高い心理的ストレスを感じる可能性があることを示している。Nguyen らは、廃棄物取扱者の危険物への曝露頻度が知覚ストレスを有意に増加させ、曝露頻度の高い労働者は曝露頻度の低い労働者に比べて 2.41 倍ものストレスを報告したことを示した [149]。廃棄物管理会社は心理的な仕事の要求度が高いため、労働者の仕事に関連する心理的要因を評価することが必要である。廃棄物処理会社が本調査ツールを用いて、労働者の身体的・心理的負荷を定期的かつ定量的に評価することは有用であると思われる。質問表や面接で労働者の健康状態を評価するのではなく、本調査ツールを用いることで、企業はより効果的に労働者の健康状態を把握し、適切な労働環境を提供することができるようになる可能性がある。

8.1.3. 労働者のストレス軽減と労働者管理への取り組み

労働者の心理的負荷の推定では、EXP が LF/HF と逆相関していた (EXP の標準 $\beta = -0.018$)。EXP が LF/HF と負の相関を持つのは、労働者が経験を積むことで、廃棄物の処理に関する知識をより多く持つようになるためかもしれない。つまり、経験の浅い労働者のヘルスリテラシー、取り扱う廃棄物、保護具、道具に関する知識の向上や教育訓練により、心理的負荷が軽減される可能性がある。廃棄物作業員に対するアンケート調査を用いた研究により、作業員の人口統計学 (例: 教育レベル、配偶者の有無、子供の数) および労働条件 (例: 交替勤務、労働時間、収入) が心理的負荷のレベルに有意に関連することが立証されている [150, 151]。廃棄物処理業者は離職率が高く、個人情報収集が困難なケースも

ある。我々の結果は、労働者の人口統計学や労働条件から独立して作業ストレスを推定できることを確認し、国や産業に依存しない労働者管理に利用できる可能性がある。

8.2. 研究2の考察

研究2では、スマートウェアデバイスを用いて廃棄物管理施設で働く労働者の労働コンテンツ（そして取り扱うマテリアル）、年齢層毎に労働者の身体活動量と身体的負荷について検証した。60歳代労働者の混合系廃棄物労働者と非混合系（医療系）廃棄物処理労働者の測定結果を比較すると、混合系廃棄物労働者は手作業において廃棄物を分別するというその作業性質のため、身体活動量に依存した身体的負荷を示したものと思われる。60歳代労働者と20-30歳代労働者の身体的負荷を比較すると、共に身体活動量に相関のある身体的負荷を示したが、20-30歳代労働者の方が全体の作業のうち%HRRが高負荷を示す30%そして40%以上となる労働者の割合はおよそ2倍以上大きかった。一方、非混合系廃棄物労働者の方が全体の作業のうち%HRRが高負荷を示す30%そして40%以上となる労働者の割合はおよそ7倍以上大きかった。これは、非混合系廃棄物労働者の方が廃棄物の積み下ろしや搬入など肉体的負荷の高い作業が多いため、身体活動量に依存せずに一定レベルの身体的負荷を示したものかもしれない。また年齢によって同一の身体活動量に対する身体的負荷への感度は異なる可能性がある。あるいは、非混合系（医療系）廃棄物を扱っているという状況が労働者の負荷を高める要因になっている可能性も否定できない。先行する研究において、廃棄物処理者の廃棄物への曝露頻度は労働者の知覚ストレスを有意に増加させ、曝露頻度の高い労働者は低い/もしくは全くない労働者よりも2.41倍のストレス症状を訴えることが報告されている。業種によって異なるが、取り扱う廃棄物の中には可燃性の高いもの、爆発性の高いもの、鋭利なもの、有害物

質を含んでいる物など様々な危険物含まれる場合がある。今回、非混合系廃棄物労働者において20-30歳代労働者よりも60歳代労働者の方が高い身体的負荷を示したが、長年危険物を扱っているという経験や扱っている危険物に関する知識が認知的なバイアスとなり、身体活動量に依存せずに身体的負荷を上昇させた可能性がある。ただし、本研究では各作業において取り扱われる廃棄物の詳細まで追跡していないため、今後更なる検証を行いたい。廃棄物労働者に対するアンケート調査による先行研究において、労働者のデモグラフィック（教育レベル、配偶者の有無、子供の数など）や労働条件（勤務シフトや勤務時間帯、収入など）は身体的負荷レベルに有意に関与することが報告されている [151, 150]。しかしながら、廃棄物処理場の労働者は離職率も高く、入れ替わりが生じることがあり、労働者の個人情報収集することが困難な場合も存在する。本研究成果は、労働者のデモグラフィックに依存せずに、労働者の身体的負荷を推定できる手段として、廃棄物労働者の労務管理に利用できることが示唆される。先行して実施された建設業労働者（鳶職とそれを補助する補助労働者）における作業中の身体的負荷 [55] [14]と比較すると、混合系廃棄物労働者、非混合系廃棄物労働者共に鳶職労働者と同等の身体活動量であるにも関わらず、身体的負荷は全体的に低い値に収まっておりおよそ2分の1であった。しかし、補助労働者に比べると混合系廃棄物労働者、非混合系廃棄物労働者の方が身体活動量・身体的負荷共に大きかった。これらは、それぞれの作業内容による肉体的・心理的負荷の程度が鳶職、非混合系廃棄物労働者・混合系廃棄物労働者、補助労働者の順番で大きかったことを反映していると考えられる。しかし、軽度な身体的負荷作業であっても混合系廃棄物労働者・非混合系廃棄物労働者の一部では鳶職作業と同様な身体的負荷を示していることから、作業内容にとらわれない安全管理が必要となることを示唆している。

8.3. 研究3の考察

本研究では、「Wearable Device」に関連する研究領域における論文を計量書誌学的分析の手法を用いて分析した。ウェアラブルデバイスに関連する研究は、2001年より年々増加しており、2014年頃を境に著しい増加を見せている。本研究領域の関心度、重要性が高まっていることが浮き彫りとなり、今後ますます関連研究は増加すると思われる。Wearable Device 研究領域において最も貢献しているのは China と USA であった。一般的に多くの研究領域において、最も貢献度の高い国は USA である。しかし、Wearable Device 研究領域においてはそれが逆転しており、最も貢献度の高いのは China、次点として USA が位置している。しかしながら、研究領域における共著者ネットワークの中心性指標を調査したところ、論文数に対して、China より USA の方が中心性指標が高く、研究領域におけるネットワークの中心を成すのは USA であった。加えて、両国の Citation Impact は近年の論文数の差に反して同レベルであった。これらの結果は、1. China は論文数に対して引用数が少ない。もしくは、2. USA の論文数は China よりも少ないがよく引用されている。の2つのケースが考えられた。しかし、China と USA の著者キーワードのクラスター分布を比較した結果、これは両国の研究の方向性によるものだという可能性を示唆していた。

China と USA のキーワードのクラスター分布を比較すると、USA はクラスター1が大部分を占めるが、China はクラスター1が極端に少なく、両国の特徴は真逆であった。クラスター1は応用研究に関するクラスターであり、それに関連する研究領域は多岐にわたる可能性がある。この結果は、中心性指標の分析にも反映されている。媒介中心性を比較すると、1位の USA に対して、China は5位とランクを下げた。媒介中心性はより多くのノード、より多くのネットワーク、

多くの小規模ネットワークの集団（コミュニティともいう）と連結しているかを示す指標と言える。つまり、USA は China よりも多くのコミュニティ（分野）と連結していることが示された。これらの状況により China の Citation Impact は論文数の差に反して USA と同レベルであった可能性が示唆され、両国における研究に対する方向性の違いを反映していると考えられる。また、世間的に応用研究への関心が高まっており、クラスター2、3に関連するような基礎研究への関心が少なくなっている可能性がある。類似の先行研究では、wearable technology の関連研究は健康などの分野に集中していることを報告している [108, 152, 153]。これは本研究におけるクラスター1に関連する研究が盛んであることと同義であるが、USA など一部の国による動向もしくはキーワードによって切り取られた結果であるのかもしれない。また、wearable technology に関連した研究領域では、医学と工学に関連する文献が当該研究領域に最も貢献しており、中でもリハビリテーションや障害者などのヘルスケアに焦点をあわせていたと報告されている [154]。本研究におけるクラスター分類でも応用研究と基礎研究の両立、そしてクラスター1では、「behavior」「health」「rehabilitation」といったキーワードを上位に確認し、これらの報告を支持する結果となった。

今後、健康分野・医療分野におけるウェアラブルデバイスの導入はますます加速すると予想される [155]。しかしながら、利用用途に限らずウェアラブルデバイス研究領域において、さらなる技術的発展は必要不可欠である。例えば、リチウムイオン電池の性能向上により、実運用時間の延長や情報発信・モニタリングの長時間化が可能になる。また、センサーや素子の性能を維持したまま小型・軽量化できれば、機器自体の小型・軽量化が進み、使用する年齢や場所に関係なく操作できるようになるかもしれない（例えば、最近のスマートウォッチは

体温、血流、血圧、血中酸素濃度を測定できるが、血糖値を測定する研究が進められている [156])。このように、基礎研究による技術開発やブレークスルーは、新しい用途（応用研究）を生み出し、新しい応用研究は新しい基礎研究の動機付けとなる。さらに、新しい市場も開拓される。基礎と応用の両方が重要なこの研究領域では、China と USA の異なる方向性は、相互支援的な意味で望ましい結果であると言える。

8.4. 総合的な考察

本研究では、ウェアラブルデバイスを用いた生体情報測定システムを廃棄物管理施設に導入して、廃棄物処理労働者の労働に伴う生体情報の変化、そして身体的・心理的負荷を推定することでその労働特性を定量的に評価した。廃棄物を扱う廃棄物処理労働者と扱わない非廃棄物処理労働者の比較から、廃棄物処理労働者が、身体的な活動量そして身体的な負荷は非廃棄物処理労働者と変わらないにも関わらず、高い心理的負荷を示していることが明らかとなった。廃棄物処理労働者がストレスフルな労働者であることが実測データを元に示すことができた。そして、身体的負荷は年齢、身体活動量、体表温度から、心理的負荷は HRV パラメータである LF、体表温度から推定できることが示された。身体的負荷、心理的負荷の両面に体表温度が有意に関係しているという報告は新規性のある結果である。先行研究では、体温や環境温度が心拍数に影響を与えることが示されていた。加えて、環境温度が生物学的状態に影響を与えることも明らかであった。しかし、環境温度の測定環境によっては、測定箇所の温度と対象となる人体（労働者）の温度と関係がない場合も多々ある。そして、環境温度が生体に影響を及ぼすまでの様々な波及効果を追求することは不可能である点から、環境温度を用いるよりも、体表温度を用いた解析は、労働者の心拍変動をより正確

に反映していると考えられる。この知見は、労働者の温度条件を分析することで、労働者の身体的・心理的負荷とその許容範囲に関する不確実性を解消できる可能性がある。

同じ労働内容を行う労働者でも、労働者の経験や知識といったデモグラフィック情報や個人のプロパティによりその労働負荷は変動する可能性が示された。先行研究でも、デモグラフィック情報（例：教育レベル、配偶者の有無、子供の数）および労働条件（例：交替勤務、労働時間、収入）が心理的負荷に有意に関連することが立証されている。廃棄物処理場の労働者は離職率も高く、入れ替わりが生じることがあり、労働者の個人情報収集することが困難な場合も存在する。本研究成果は、労働者のデモグラフィックに依存せずに、労働者の労働負荷を推定できる手段となりえる。廃棄物管理会社は心理的な仕事の要求が高いため、労働者の仕事に関する心理的要因を評価することが必要である。廃棄物処理会社が本研究で用いた手法により労働者の身体的・心理的負荷を定期的かつ定量的に評価することは有用であると考えられる。質問表や面接による評価ではなく、本研究手法を用いることで、企業はより効果的に労働者の健康状態を把握し、個々人のプロパティや産業に依存しない適切な労働環境を提供することができる可能性がある。ウェアラブルデバイス研究領域は今後増々発展すると予測される。基礎研究の発展により応用研究が、応用研究の発展により基礎研究が相互支援的な発展が期待できる。その結果、現状よりも、より小型でより高性能なデバイスの登場により、労働者への適応もより簡易になることが期待される。

9. 総括

9.1. 本論文における研究成果と貢献

本研究の結論を以下にまとめる。

RQ1a「廃棄物処理労働者と非廃棄物処理労働者の比較において、労働者の生体情報の違いが明らかか？」について、廃棄物労働者は、低い（非廃棄物労働者と変わらない）身体活動量（PA）・身体的負荷（%HRR）にも関わらず、高い心理的負荷（LF/HF）という差異を示すことができ、廃棄物処理労働者と非廃棄物処理労働者の生物学的パラメータの違いを明らかにした。

RQ1b「廃棄物管理施設における労働者の体表温度（BS TEMP）に影響を耐える因子は何か？」について、体表温度に最も影響を与える因子は心拍数（HR）と身体活動量であり、効果は小さいが環境温度（WBGT）と年齢（AGE）も共に体表温度に正の効果を与えることを明らかにした。

RQ1c「労働者より取得した各種生体情報を用いて、労働者の身体的負荷、心理的負荷を推定することができるか？」について、身体的負荷は年齢、身体活動量、体表温度から、心理的負荷は LF、体表温度から推定できる。体表温度は身体的負荷と心理的負荷の両方に有意に影響し、推定に使用できることを明らかにした。

RQ2a「廃棄物処理労働者において、労働内容の違い（それに伴う取り扱うマテリアルの違い）は、労働者の負荷に影響するか？」について、取り扱う廃棄物（それに伴う作業）によって労働に伴う負荷が変動する可能性が示された。労働者のデモグラフィック情報が関連している可能性が示された。

RQ3a「2001年～2022年までのウェアラブルデバイス研究領域における知的構造はどのような形か？また今後どのような発展を見せるか？」について、本研究領域全体の基本的な分析結果を得た。本研究領域は、基礎研究・応用研究からなる3つのクラスターから構成されており、牽引する China・USA がそれぞれ

を担っている。文献数としては China が圧倒的に多いが、研究領域における重要度、文献の引用率は両国に差はない。これは、USA が主としている応用研究領域の方が、関心度が高いためだと推察される。

これらの研究成果は、廃棄物管理労働者の労働に伴う生体情報、身体的負荷を計測し基礎的な分析結果とデータセットを提供する。また身体的負荷を定量化するために、HRV による心理的負荷 LH/HF と身体的負荷%HRR を用いた。その結果、廃棄物処理作業に伴う身体的負荷に関連する要因を特定した。HR による身体的・心理的負荷と PA や体表温度などの生体データを用いて、これらの負荷を推定する方程式を開発した。また、これまで明らかにされていなかった廃棄物処理労働者の身体的・心理的負荷が、作業の種類によって異なることを明らかにした。このエビデンスと労働者のモニタリングは、廃棄物処理業界における労働者の健康リスク低減と労働条件の向上に役立つとともに、これらを健康心理学の観点から考察することで、統一的な安全管理規則や対策を設けるだけでなく、労働者毎に調整されたオーダーメイドな安全管理法が必要となるかもしれない。そして、企業に対して新たな経営コンセプト、ヒューマン・リソース・マネジメントを提案することができる可能性がある。

9.2. 研究の限界

研究 1, 2 における実証実験に関して、身体的特性と年齢がサンプル内で均等に調整されていなかった。本研究は 20-63 歳の健康な男性を対象に行われたため、すべての廃棄物処理労働者に一般化できないかもしれない。また、日本の廃棄物管理産業は男性が多いことから、一般化を目指すのであれば、様々な年齢層からのサンプル、男性のみならず女性からのサンプルを取得する必要がある。さらに、今回の実験は、数日間の労働時間中にデータを収集したものである。年間を通じてより長い期間のデータを収集することで、より決定的な結果が得られるかも

しれない。

また、勤務開始時の心理的・身体的状態は測定されていない。栄養状態、家庭環境、過去のストレス状況、睡眠不足、運動不足などは、人の活動に影響を与えるため、より長期的に観察することで、より有用な結果が得られると考えられる。背景要因や初期状態の調査は、今後の研究課題である。また実際の労働現場で、実際の業務に携わる労働者を対象としている関係で実験条件を任意で構築することができていない。そのため、厳密に労働内容や取り扱うマテリアルで労働者グループを分類・比較することが難しい。最後に、交感神経と副交感神経の活動のバランスをより正確に表現するために、周波数ベースの指標で議論されているように [157]、ウェアラブルデバイスの HR 間隔の記録の質を向上させることが重要である。本研究で収集された一部のデータには HR データ間隔の欠落があり、これが HRV 指標の選択に影響を与え、統計分析から数人の参加者を除外する必要があった。今後、センシングウェアとウェアラブル技術のさらなる改善と記録品質の向上（例えば、運動アーティファクトのさらなる最小化）を目指した研究が、長期にわたる大規模サンプルの調査には不可欠である。そのような改善は、これらのデバイスの有用性を高めると思われる。

研究3に関して、本研究は、Web of Science データベースに於いて、「Wearable Device」のキーワードを基に抽出された論文に限定して分析を行った。このため、研究結果は関連するデータのみにおいてのみ限定される。そのため、別のデータベースを用いて同様の分析を行った場合、異なる結果が得られる可能性がある。また、VOSviewer ソフトウェアによって作成された共起分析及び可視化マップは、技術的な制限があることを認識している。

謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教官として多大なご指導を賜った、立命館大学 児玉耕太 准教授に深く感謝申し上げます。また、論文審査におきまして、主査および副査を担当いただき的確で丁寧なご指導を賜った、立命館大学 名取隆 教授、立命館大学 林永周 准教授に深く感謝申し上げます。また、本研究において多大なるお力添えを頂きました橋口伸樹 様に深く感謝申し上げます。さらに、研究、論文作成においてご助言・ご指導頂きました立命館大学 橋本征二 教授、東京工業大学 仙石慎太郎 教授、東京工業大学 宮下修人 助教、立命館大学 岡本宗一郎 様、丹羽誠 様、倉田かりん 様、そして立命館大学児玉研究室の皆様 に深く感謝申し上げます。最後に、社会人学生として学位取得の為に多大なるご支援を頂きましたマージシステム株式会社の皆様に深く感謝申し上げます。

引用文献

- [1] T. Laukkanen, Construction work and education: occupational health and safety reviewed, *Constr. Manag. Econ.* 1999. 17 (1). 53–62, <http://dx.doi.org/10.1080/014461999371826..>
- [2] J. Yates, *Productivity Improvement for Construction and Engineering: Implementing Programs that Save Money and Time*, ASCE, Reston, VA, 2014, <http://dx.doi.org/10.1061/9780784413463>.
- [3] 厚生労働省, 産業廃棄物処理業における労働災害の発生状況, [オンライン]. Available:https://www.zensanpairen.or.jp/wp/wp-content/themes/sanpai/assets/pdf/disposal/safety_saigaihasei.pdf. [アクセス日: 14 12 2022].
- [4] 厚生労働省, 職場のあんぜんサイト, [オンライン]. Available: <https://anzeninfo.mhlw.go.jp/index.html>. [アクセス日: 14 12 2022].
- [5] JCOSHA, Japan Construction occupational Safety and health Association, [オンライン]. Available: <https://www.kensaibou.or.jp/eng/index.html>. [アクセス日: 14 12 2022].
- [6] TS. Abdelhamid, JG. Everett, Physiological demands during construction work, *J. Constr. Eng. Manag.* 128 (5) (2002) 427–437.
- [7] W.J. Meerding, W. IJzelenberg, M.A. Koopmanschap, J.L. Severens, A. Burdorf, Health problems lead to considerable productivity loss at work among workers with high physical load jobs, *J. Clin. Epidemiol.* 58 (5) (2005) 517–523.
- [8] M. Rožman, P. Tominc, B. Milfelner, A Comparative Study Using Two SEM Techniques on Different Samples Sizes for Determining Factors of Older Employee's Motivation and Satisfaction, *SUSTAINABILITY*. 2020. 12(6). 2189.
- [9] I. Calvo-Sotomayor, J. Laka, R. Aguado, Workforce Ageing and Labour Productivity in Europe. 2019. 11(20), 5851.
- [10] 大嶋寧子, 上村未緒, 少子高齢化・人口減少時代に日本は成長を確保できるか--求められる「バランスのとれた危機意識」. 2007. みずほ総研論集. (2), 53-128.
- [11] 一般社団法人 セーフティグローバル推進機構, “協調安全, Safety2.0 とは,” [オンライン]. Available: <https://institute-gsafety.com/safety2/>. [アクセス日: 14 12 2022].
- [12] 株式会社 三菱化学テクノリサーチ, 平成 28 年度 エネルギー使用合理化促進基盤整備事業「製造業における労働安全及び 設備保全 IoT 導入等に関する調査報告書」. 2017.

- [13] 建設業労働災害防止協会, 労働災害防止のための ICT 活用データベース, [オンライン]. Available: https://www.kensaibou.or.jp/safe_tech/ict/index.html. [アクセス日: 14 12 2022].
- [14] N. Hashiguchi, K. Kodama, Y. Lim, C. Che, S. Kuroishi, Y. Miyazaki, T. Kobayashi, S. Kitahara, K. Tateyama, Practical Judgment of Workload Based on Physical Activity, Work Conditions, and Worker's Age in Construction Site. 2020. 20(13). 3786.
- [15] A. Dao-Tuan, A. Nguyen-Thi-Ngoc, K. Nguyen-Trong, A. Bui-Tuan, V. Dinh-Thi-Hai, Optimizing Vehicle Routing with Path & Carbon Dioxide Emission for Municipal Solid Wastes Collection in Ha Giang, Vietnam. In *Industrial Networks & In-telligent Systems*; Springer: Cham, Switzerland, 2018. 212–227.
- [16] A. Ometov, V. Shubina, L. Klus, J. Skibińska, S. Saafi, P. Pascacio, L. Flueratoru, D. Gaibor, N. Chukhno, O. Chukhno, et. al., A survey on wearable technology: History, state-of-the-art and current challenges. *Comput. Netw.* 2021, 193, 108074.
- [17] M. Intelligence, GROWTH: Smart Wearable Market, Trends COVID-19 Impact, and Forecasts (2022–2027)., [オンライン]. [アクセス日: 14 12 2022].
- [18] I. D. Corporation, Worldwide Quarterly Wearable Device Tracker. Volume 2022., [オンライン]. Available: https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=IDC_P31315. [アクセス日: 14 12 2022].
- [19] Reportlinker.com, Global Wearable Technology Market 2022–2026., [オンライン]. Available: <https://www.reportlinker.com/p05849727/Global-Wearable-Technology-Market.html>. [アクセス日: 14 12 2022].
- [20] Vandrico, The Wearable Database., [オンライン]. Available: <https://vandrico.com/wearables.html>. [アクセス日: 14 12 2022].
- [21] Apple, Apple Watch に心電図アプリケーションと不規則な心拍の通知機能が登場, [オンライン]. Available: <https://www.apple.com/jp/newsroom/2021/01/ecg-app-and-irregular-rhythm-notification-coming-to-apple-watch/>. [アクセス日: 14 12 2022].
- [22] B. Hewitt, K. Deranek, A. McLeod, A. Gudi, Exercise motives impact on physical activities measured using wearable devices. *Health Promot. Int.* 2022, 37, daac071.”.
- [23] W. Ho, Y. Yang, T. Li, Accuracy of wrist-worn wearable devices for determining exercise intensity. *Digit. Health* 2022, 8, 20552076221124393.
- [24] 南谷晴之, ストレスを計る. *電子情報通信学会誌*. 1997. 80(7). 754-757.
- [25] KY. Choo, HC. Ling, YC. Lo, ZH. Yap, JS. Pua, RCW. Phan, VT. Goh, Android based self-diagnostic electrocardiogram system for mobile healthcare. *Technol Health Care*.

2015. 23. S435-S442.
- [26] W. Martin, H. Xian, P. Chandiramani, E. Bainter, A. Klein, Cardiovascular mortality prediction in veterans with arm exercise vs pharmacologic myocardial perfusion imaging. *Am. Heart J.* 2015. 170(20). 362-U224.
- [27] 松本佳昭, 森信彰, 三田尻涼, 江鐘偉, “心拍揺らぎ”による精神的ストレス評価法に関する研究. *ライフサポート学会*. 2012. 24(2). 62-69.
- [28] 松尾崇, 渡辺紳一, 小関章仁, 堀太久麻, 高橋龍尚, 顔面温度計測によるストレス評価について. *日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会論文集*. 2008. ROMBUNNO. 346.
- [29] 林拓世, 水野由子, 岡本永佳, 石井良平, 鶴飼聡, 篠崎和弘, 稲田紘, 脳波・心電図測定によるストレスに関連した生体変動解析. *信学技報*. 2007. 107(248). 17-20.
- [30] P. Guzik, J. Piskorski, T. Krauze, R. Schneider, K. Wesseling, A. Wykretowicz, H. Wysocki, Correlations between the Poincare plot and conventional heart rate variability parameters assessed during paced breathing. *J Physiol Sci.* 2007. 57(1). 63-71.
- [31] M. Toichi, T. Sugiura, T. Murai, A. Sengoku, A new method of assessing cardiac autonomic function and its comparison with spectral analysis and coefficient of variation of R-R interval. *J Auton Nerv Syst.* 1997. 62(1-2). 79-84.
- [32] PO. Astrand, K. Rodahl, HA. Dahl, SB. Stromme, *Textbook of Work Physiology: Physiological Bases of Exercise, Human Kinetics, Champaign.*, 2003.
- [33] H. Melo, T. Martins, L. Nascimento, A. Hoeller, R. Walz, E. Takase, Ultra-short heart rate variability recording reliability: The effect of controlled paced breathing. 2018, 23, e12565.
- [34] R. Castaldo, L. Montesinos, P. Melillo, C. James, L. Pecchia, Ultra-short term HRV features as surrogates of short term HRV: A case study on mental stress detection in real life. *BMC Med. Inform. Decis. Mak.* 2019, 19, 12.
- [35] H. Matsuura, M. Mukaino, Y. Otaka, H. Kagaya, Y. Aoshima, T. Suzuki, Validity of simplified, calibration-less exercise intensity measurement using resting heart rate during sleep: A method-comparison study with respiratory gas analysis. *BMC Sports Sci. Med. Rehabil.* 2019, 11, 27.
- [36] F. Shaffer, J. Ginsberg, An overview of heart rate variability metrics and norms. *Front. Public Health* 2017, 5, 258.
- [37] H. Christensen, K. Sogaard, M. Pilegaard, H. Olsen, The importance of the work/rest pattern as a risk factor in repetitive monotonous work, *Int. J. Ind. Ergon.* 2000,

- 25(4). 367–373.
- [38] S. Ismaila, K. Oriolowo, O. Akanbi, Cardiovascular strain of sawmill workers in south-western Nigeria, *Int. J. Occup. Saf. Ergon.* 2013, 19(4).607–611.
- [39] P. Kirk, M. Sullman, Heart rate strain in cable hauler choker setters in New Zealand logging operations, *Appl. Ergon.* 2001, 32(4). 389–398.
- [40] S. H. M. Shimaoka, Y. Ono, H. Nonaka, E. Hjelm, M. Hagberg, A comparative study of physical work load in Japanese and Swedish nursery school teachers, *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 1997, 77(1-2). 10–18.
- [41] P. Yoopat, P. Toicharoen, T. Glinsukon, K. Vanwonderghem, V. Louhevaara, Ergonomics in practice: physical workload and heat stress in Thailand, *Int. J. Occup. Saf. Ergon.* 2002, 8(1). 83–93.
- [42] S. Klatt, N. Smeeton, Attentional and perceptual capabilities are affected by high physical load in a simulated soccer decision-making task. *Sports Exerc. Perform. Psychol.* 2021, 10, 205–216.
- [43] J. Achten, AE. Jeukendrup, Heart rate monitoring: applications and limitations *Sports Med.* 2003, 33 (7). 517–538.
- [44] HC. WU, MJJ. Wang, Relationship between maximum acceptable work time and physical workload, *Ergonomics.* 2002, 45 (4). 280–289.
- [45] UC. Gatti, GC. Migliaccio, SM. Bogus, S. Schneider, An exploratory study of the relationship between construction workforce physical strain and task level productivity, *Constr. Manag. Econ.* 2014, 32 (6). 548–564.
- [46] K. Norton, L. Norton, D. Sadgrove, Position statement on physical activity and exercise intensity terminology. *J. Sci. Med. Sport* 2010, 13. 496–502.
- [47] S. Hwang, S. Lee, Wristband-type wearable health devices to measure construction workers’ physical demands. *Autom. Constr.* 2017, 83, 330–340.
- [48] J. Achten, AE. Jeukendrup, Heart rate monitoring: applications and limitations *Sports Med.* 2003, 33 (7). 517–538.
- [49] J. Zhai, AB. Barreto, C. Chin, C. Li, Realization of stress detection using psychophysiological signals for improvement of human-computer interactions, *Proceedings of the IEEE SoutheastCon.* 2005. 415–420.
- [50] A. Tiwari, I. Albuquerque, M. Parent, J. Gagnon, D. Lafond, S. Tremblay , T. Falk., Multi-Scale Heart Beat Entropy measures for mental workload assessment of ambulant users. *Entropy.* 2019, 21, 783.
- [51] U. C. Gatti, S. Schneider, G. C. Migliaccio, Physiological condition monitoring of

- construction workers, *Automation in Construction*. 2014, 44. 227-233.
- [52] H. Jebelli, B. Choi, H. Kim, S. Lee, Feasibility study of a wristband-type wearable sensor to understand construction work-ers' physical and mental status. In *Proceedings of the Construction Research Congress, New Orleans, LA, USA, 2-4 April 2018*.
- [53] G. Borg, *Borg's Perceived Exertion and Pain Scales*, Human Kinetics, Champaign, IL, 1998.
- [54] H. L. Wang, L.-F. Cheong, Affective Understanding in Film." *IEEE Transactions on circuits and systems for video technology*. 2006, 16(6), 689-704.
- [55] 橋口伸樹, 児玉耕太, 石田修一, 作業効率化に向けた現場作業者の監視 IoT システム. 第 61 回日本経営システム学会全国研究発表大会公演論文集. 2018. 86-87.
- [56] 東洋紡, COCOMI 生体情報計測ウェア, [オンライン]. Available: <https://cocomi.toyobostc.com>. [アクセス日: 15 12 2022].
- [57] ユニオンツール, 心拍センサ WHS-3, [オンライン]. Available: <https://www.uniontool.co.jp/product/sensor/whs3.html>. [アクセス日: 15 12 2022].
- [58] テキサス・インスツルメンツ, CC2650, [オンライン]. Available: <https://www.ti.com/product/ja-jp/CC2650>. [アクセス日: 15 12 2022].
- [59] Raspberry Pi i 財団, Raspberry Pi Zero W, [オンライン]. Available: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-zero-w/>. [アクセス日: 15 12 2022].
- [60] 株式会社 A&D, 温湿度 SD データロガー (記録計) 熱中症指数計 / 熱中症指数モニター AD-5696, [オンライン]. Available: https://www.aandd.co.jp/products/electronic/hygrothermograph/wbgt_monitor/ad5696/. [アクセス日: 15 12 2022].
- [61] M. Patel, S. Lal, D. Kavanagh, P. Rossiter, Applying neural network analysis on heart rate variability data to assess driver fatigue. *Expert Syst*. 2011, 38. 7235-7242.
- [62] G. Ernst, Heart-rate variability-more than heart beats? *Front. Public Health* 2017, 5, 240.
- [63] A. Khan, G. Lip, A. Shantsila, Heart rate variability in atrial fibrillation: The balance between sympathetic and par-sympathetic nervous system. *Eur. J. Clin.* 2019, 49, e13174.
- [64] R. Mccraty, F. Shaffer, Heart rate variability: New perspectives on physiological mechanisms, assessment of self-regulatory capacity, and health risk. *Glob. Adv. Health Med.* 2015, 4, 46-61.

- [65] R. Orsila, M. Virtanen, T. Lukala, M. Tarvainen, P. Karjalainen, J. Viik, Perceived mental stress and reactions in heart rate variability—A pilot study among employees of an electronics company. *Int. J. Occup. Saf. Ergon.* 2008, 14, 275–283.
- [66] J. Nwaogu, A. Chan, Work-related stress, psychophysiological strain, and recovery among on-site construction per-sonnel. *Autom. Constr.* 2021, 125, 103629.
- [67] J. Taelman, S. Vandeput, A. Spaepen, S. Van Huffel, Influence of mental stress on heart rate and heart rate variability. In IFMBE, Proceedings of the 4th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering, Antwerp, Belgium, 23–27 November 2008.
- [68] I. Amirian, L. Toftegård Andersen, J. Rosenberg, I. Gögenur, Decreased heart rate variability in surgeons during night shifts. *Can. J. Surg.* 2014, 57, 300–304.
- [69] K. Dalmeida, G. Masala, HRV features as viable physiological markers for stress detection using wearable devices. *Sensors* 2021, 21, 2873.
- [70] S. Graham, D. Jeste, E. Lee, T. Wu, X. Tu, H. Kim, C. Depp, Associations between heart rate variability measured with a wrist-worn sensor and older adults’ physical function: Observational study. *JMIR mHealth uHealth* 2019, 7, e13757.
- [71] A. Rieger, R. Stoll, S. Kreuzfeld, K. Behrens, M. Weippert, Heart rate and heart rate variability as indirect markers of surgeons’ intraoperative stress. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 2014, 87, 165–174.
- [72] G. Billman, The LF/HF ratio does not accurately measure cardiac sympatho-vagal balance. *Front. Physiol.* 2013, 4, 26.
- [73] G. Reyes del Paso, W. Langewitz, L. Mulder, A. van Roon, S. Duschek, The utility of low frequency heart rate variability as an index of sympathetic cardiac tone: A review with emphasis on a reanalysis of previous studies. *Psychophysiology* 2013, 50, 477–487.
- [74] C. Cosmo, A. Seligowski, E. Aiken, M. Wout-Frank, M. Philip, Heart Rate Variability features as predictors of Inter-mittent Theta-Burst Stimulation Response in Posttraumatic Stress Disorder. *Neuromodul. Technol. Neural Interface* 2022, 25, 588-595.
- [75] L. Tracy, L. Ioannou, K. Baker, S. Gibson, N. Georgiou-Karistianis, M. Giummarra, Meta-analytic evidence for decreased heart rate variability in chronic pain implicating parasympathetic nervous system dysregulation. *Pain* 2016, 157, 7–29.
- [76] B. Joseph, S. Parvaneh, T. Swartz, A. Haider, A. Hassan, N. Kulvatunyou, Stress among surgical attending physicians and trainees: A quantitative assessment during

- trauma activation and emergency surgeries. *J. Trauma Acute Care Surg.* 2016, 81, 723–728.
- [77] G. Peters, M. Wong, J. Joseph, L. Sanchez, Pulse rate variability in emergency physicians during shifts: Pilot cross-sectional study. *JMIR mHealth uHealth* 2019, 7, e13909.
- [78] J. Fuentes-García, S. Villafaina, D. Collado-Mateo, R. de la Vega, P. Olivares, V. Clemente-Suárez, Differences between high vs. low performance chess players in Heart Rate Variability during chess problems. *Front. Psychol.* 2019, 10, 409.
- [79] M. Costa, A. Goldberger, C. Peng, Multiscale entropy analysis of biological signals. *Phys. Rev. E Stat. Nonlinear Soft Matter Phys.* 2005, 71, 021906.
- [80] T. Kuusela, Methodological aspects of heart rate variability analysis. In *Heart Rate Variability (HRV). Signal Analysis*; Ka-math, M.V., Watanabe, M.A., Upton, A.R.M., Eds.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2013; 9.
- [81] Y. Chen, W. Lu, J. Pagaduan, C. Kuo, A novel smartphone app for the measurement of ultra-short-term and short-term heart rate variability: Validity and reliability study. *JMIR mHealth uHealth* 2020, 8, e18761.
- [82] A. Alomari, M. Alfgih, A. Ibrahim, Wet bulb globe temperature (WBGT) among solid waste collection workers at Al Leith municipal. *IOSR J. Environ. Sci. Toxicol. Food Technol.* 2020, 14, 28–36.
- [83] T. Son, D. Ramli, A. Aziz, Wearable heat stroke detection system in IoT-based Environment. In *Proceedings of the 25th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems* *Procedia Computer Science*, Virtual, 8–10 September 2021. 3686–3695.
- [84] R. Niedermann, E. Wyss, S. Annaheim, A. Psikuta, S. Davey, R. Rossi, Prediction of human core body temperature using non-invasive measurement methods. *Int. J. Biometeorol.* 2014, 58, 7–15.
- [85] D. Hart, M. Rischall, K. Durgin, M. Donoghue, T. Pham, T. Wyatt, Non-invasive zero-heat-flux technology compared with traditional core temperature measurements in the emergency department. *Am. J. Emerg. Med.* 2020, 38, 2383–2386.
- [86] DEPARTMENT OF OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH, Guidelines on Heat Stress Management at Workplace 2016, [オンライン]. Available: <https://www.dosh.gov.my/index.php/legislation/guidelines/industrial-hygiene-1/2017-guidelines-heat-stress-management-at-workplace/file/>. [アクセス日: 16 12

- 2022].
- [87] R. Ahmed Bhuiyan, N. Ahmed, M. Amiruzzaman, M. Islam, A robust feature extraction model for human activity characterization using 3-axis accelerometer and gyroscope data. *Sensors* 2020, 20, 6990.
- [88] ACGIH, Heat Stress and Heat Strain. In *TLVs and BEIs. Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices*; ACGIH: Cincinnati, OH, USA, 2015; 218–227.
- [89] J. Park, Y. Kim, I. Oh, Factors affecting heat-related diseases in outdoor workers exposed to extreme heat. *Ann. Occup. Environ. Med.* 2017, 29, 30.
- [90] J. Choi, V. Loftness, D. Lee, Investigation of the possibility of the use of heart rate as a human factor for thermal sensation models. *Build. Environ.* 2012, 50, 165–175.
- [91] M. Buller, W. Tharion, S. Chevront, S. Montain, R. Kenefick, J. Castellani, Estimation of human core temperature from sequential heart rate observations. *Physiol. Meas.* 2013, 34, 781–798.
- [92] R. Yao, Y. Li, C. Du, B. Li, A 'heart rate'-based model (PHSHR) for predicting personal heat stress in dynamic working environments. *Build. Environ.* 2018, 135, 318–329.
- [93] G. McGarr, S. Saci, K. King, S. Topshee, B. Richards, M. Gemae, Heat strain in children during unstructured outdoor physical activity in a continental summer climate. *Temperature* 2020, 8, 80–89.
- [94] P. Eggenberger, B. MacRae, S. Kemp, M. Bürgisser, R. Rossi, S. Annaheim, Prediction of Core Body temperature based on skin temperature, heat flux, and heart rate under different exercise and clothing conditions in the heat in young adult males. *Front. Physiol.* 2018, 9, 1780.
- [95] I. Kašurina, A. Vilumsone, Microclimate of smart garment. *Sci. J. Riga Tech. Univ.* 2011, 6, 99–103.
- [96] H. Özdemir, Thermal comfort properties of clothing fabrics woven with polyester/cotton blend yarns. *Autex Res. J.* 2017, 17, 135–141.
- [97] I. Spelic, D. Rogale, A. Bogdanic, The study on effects of walking on the thermal properties of clothing and subjective comfort. *Autex Res. J.* 2020, 20, 22–243.
- [98] S. Klatt, N. Smeeton, Attentional and perceptual capabilities are affected by high physical load in a simulated soccer decision-making task. *Sports Exerc. Perform. Psychol.* 2021, 10, 205–216.
- [99] P. Coenen, M. Korshøj, D. Hallman, M. Huysmans, A. van der Beek, L. Straker, A.

- Holtermann, Differences in heart rate reserve of similar physical activities during work and in leisure time—A study among Danish blue-collar workers. *Physiol. Behav.* 2018, 186, 45–51.
- [100] J. Behar, A. Rosenberg, I. Weiser-Bitoun, O. Shemla, A. Alexandrovich, E. Konyukhov, Y. P. Yaniv, A novel open access platform for heart rate variability analysis of mammalian electrocardiographic data. *Front. Physiol.* 2018, 9, 1390.
- [101] M. Costa, A. Goldberger, Generalized multiscale entropy analysis: Application to quantifying the complex volatility of human heartbeat time series. *Entropy (Basel)* 2015, 17, 1197–1203.
- [102] E. Bruin, B. Najafi, K. Murer, D. Uebellhart, K. Animian, Quantification of everyday motor function in a geriatric population. *J. Rehabil. Res. Dev.* 2007, 44, 417–428.
- [103] M. Menai, V. Hees, A. Elbaz, M. Kivimaki, A. Singh-manoux, Accelerometer assessed moderate-to-vigorous physical activity and successful ageing: Results from the Whitehall II study. *Sci. Rep.* 2017, 8, 45772.
- [104] R. McCarney, J. Warner, S. Iliffe, R. van Haselen, M. Griffin, P. Fisher, The Hawthorne Effect: A randomised, controlled trial. *BMC Med. Res. Methodol.* 2007, 7, 30.
- [105] A. Darko, A. Chan, Strategies to promote green building technologies adoption in developing countries: The case of Ghana. *Build. Environ.* 2018, 130, 74–84.
- [106] N. Nachar, The Mann-Whitney U: A test for assessing whether two independent samples come from the same distribution. *Tutor. Quant. Methods Psychol.* 2008, 4, 13–20.
- [107] M. Pagani, F. Lombardi, S. Guzzetti, G. Sandrone, O. Rimoldi, G. Malfatto, S. Cerutti, A. Malliani, Power spectral density of heart rate variability as an index of sympatho-vagal interaction in normal and hypertensive subjects. *J. Hypertens. Suppl.* 1984, 2, S383–S385.
- [108] M. Dehghani, K. Kim, Past and Present Research on Wearable Technologies: Bibliometric and Cluster Analyses of Published Research from 2000 to 2016, *Int. J. Innov. Technol. Manag* 2019. 16(1), 1950007.
- [109] L. Lu, J. Zhang, Y. Xie, F. Gao, S. Xu, X. Wu, Z. Ye, Wearable Health Devices in Health Care: Narrative Systematic Review, *JMIR mhealth uhealth* 2020. 8(11). e18907.
- [110] R. Gao, B. Mu, S. Lyu, H. Wang, C. Yi, Review of the Application of Wearable Devices in Construction Safety: A Bibliometric Analysis from 2005 to 2021. *BUILDINGS*

- 2020, 12 (3), 44.
- [111] A. Pitchard, Statistical bibliography or bibliometrics. *J. Doc.* 1969, 24, 348–349.”.
- [112] R. Broadus, Early approaches to bibliometrics. *J. Am. Soc. Inf. Sci.* 1987, 38, 127–129.
- [113] W. Hood, C. Wilson, The literature of bibliometrics, scientometrics, and informetrics. *Scientometrics* 2021, 52, 291–314.
- [114] N. Donthu, S. Kumar, D. Mukherjee, N. Pandey, W. Lim, How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *J Bus Res* 2021, 133. 285-296.
- [115] VOSviewer. [オンライン]. Available: <https://www.vosviewer.com>. [アクセス日: 15 12 2022].
- [116] N. Van Eck, L. Waltman, Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics* 2010, 84, 523–538.
- [117] L. Waltman, N. van Eck, E. Noyons, A unified approach to mapping and Clustering of bibliometric networks. *J. Inf.* 2010, 4, 629–635.
- [118] L. Waltman, N. van Eck, A smart local moving algorithm for large-scale modularity-based community detection. *Eur. Phys. J. B* 2013, 86, 471.
- [119] M. Wang, L. Chai, Three new bibliometric indicators/approaches derived from keyword analysis. *Scientometrics* 2018, 116, 721–750.
- [120] A. Bayer, J. Smart, G. McLaughlin, Mapping intellectual structure of a scientific subfield through author cocitations. *J Am. Soc. Inf. Sci.* 1990, 41, 444–452.
- [121] V. Latora, M. Marchiori, A measure of centrality based on network efficiency. *New J. Phys.* 2007, 9, 188.
- [122] M. Sarajchi, M. Al-Hares, K. Sirlantzis, Wearable Lower-Limb Exoskeleton for Children with Cerebral Palsy: A Systematic Review of Mechanical Design, Actuation Type, Control Strategy, and Clinical Evaluation. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 2021, 29, 2695–2720.
- [123] A. Pantelopoulos, N. Bourbakis, A Survey on Wearable Sensor-Based Systems for Health Monitoring and Prognosis. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C* 2010, 40, 1–12.
- [124] D. Son, J. Lee, S. Qiao, R. Ghaffari, J. Kim, J. Lee, C. Song, S. Kim, D. Lee, S. Jun, e. al., Multifunctional wearable de-vices for diagnosis and therapy of movement disorders. *Nat. Nanotechnol.* 2014, 9, 397–404.
- [125] Z. Ling, C. Ren, M. Zhao, J. Yang, J. Giammarco, J. Qiu, M. Barsoum, Y. Gogotsi,

- Flexible and conductive MXene films and nanocomposites with high capacitance. *PROC. NATL. ACAD. SCI. U. S. A.* 2012, 111(47), 16676-16681.
- [126] C. Meng, C. Liu, L. Chen, C. Hu, S. Fan, Highly Flexible and All-Solid-State Paper like Polymer Supercapacitors. *Nano Lett.* 2010, 10(10), 4025-4031.
- [127] X. Wang, Y. Gu, Z. Xiong, Z. Cui, T. Zhang, Silk-Molded Flexible, Ultrasensitive, and Highly Stable Electronic Skin for Monitoring Human Physiological Signals. *Adv. Mater.* 2014, 26(9), 1336-1342.
- [128] L. Kou, T. Huang, B. Zheng, Y. Han, X. Zhao, K. Gopalsamy, H. Sun, C. Gao, Coaxial wet-spun yarn supercapacitors for high-energy density and safe wearable electronics. *Nat. Commun.* 2014, 5, 3754.
- [129] X. Pu, M. Liu, X. Chen, J. Sun, C. Du, Y. Zhang, J. Zhai, W. Hu, Z. Wang, Ultrastretchable, transparent triboelectric nanogenerator as electronic skin for biomechanical energy harvesting and tactile sensing. *Sci. Adv.* 2017, 3(5), e1700015.
- [130] F. Meng, H. Zhong, D. Bao, J. Yan, X. Zhang, In Situ Coupling of Strung Co₄N and Intertwined N-C Fibers toward Free-Standing Bifunctional Cathode for Robust, Efficient, and Flexible Zn Air-Batteries. *J. AM. CHEM. SOC.* 2016, 138(32), 10226-10231.
- [131] B. Pelaz, et. al., Diverse Applications of Nanomedicine. *ACS NANO.* 2017, 11(3), 2313-2381.
- [132] A. Koh, et. al., A soft, wearable microfluidic device for the capture, storage, and colorimetric sensing of sweat. *Sci Transl Med.* 2016, 8(366), 366ra165.
- [133] X. Pu, L. Li, M. Liu, C. Jiang, C. Du, Z. Zhao, W. Hu, Z. Wang, Wearable Self-Charging Power Textile Based on Flexible Yarn Supercapacitors and Fabric Nanogenerators. *Adv. Mater.* 2016, 28(1), 98.”.
- [134] Z. Lei, Q. Wang, S. Sun, W. Zhu, P. Wu, A Bioinspired Mineral Hydrogel as a Self-Healable, Mechanically Adaptable Ionic Skin for Highly Sensitive Pressure Sensing. *Adv. Mater.* 2017, 29(22), 1700321.
- [135] W. Gao, et. al., Fully integrated wearable sensor arrays for multiplexed in situ perspiration analysis. *NATURE.* 2016, 529(7587), 509.
- [136] O. Lara, M. Labrador, A Survey on Human Activity Recognition using Wearable Sensors. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2013, 15(3), 1192-1209.
- [137] L. Hu, et. al., Stretchable, Porous, and Conductive Energy Textiles. *Nano Lett.* 2010, 10(2), 708-714.
- [138] Z. Ling, et. al., Flexible and conductive MXene films and nanocomposites with high

- capacitance. *PROC. NATL. ACAD. SCI. U. S. A.* 2014, 111(47), 16676-16681.
- [139] H. Lee, et. al., A graphene-based electrochemical device with thermoresponsive microneedles for diabetes monitoring and therapy. *Nat. Nanotechnol.* 2016, 11(6), 566.
- [140] S.S. Shin, et. al., Colloidally prepared La-doped BaSnO₃ electrodes for efficient, photostable perovskite solar cells. *SCIENCE.* 2017, 356(6334), 167-171.
- [141] M. Dickey, Stretchable and Soft Electronics using Liquid Metals. *Adv. Mater.* 2017, 29(27), 1606425.
- [142] MC. McAlpine, H. Ahmad, D. Wang, J. Heath, Highly ordered nanowire arrays on plastic substrates for ultrasensitive flexible chemical sensors. *Nat.* 2007, 6(5), 379-384.
- [143] R. Orsila, M. Virtanen, T. Lukala, M. Tarvainen, P. Karjalainen, J. Viik, Perceived mental stress and reactions in heart rate variability—A pilot study among employees of an electronics company. *Int. J. Occup. Saf. Ergon.* 2008, 14, 275–283.
- [144] T. Uemae, M. Uemae, M. Kamijo, Evaluation of Psychological and Physiological Responses under Gradual Change of Thermal of Conditions with Aim to Create Index to Evaluate Thermal Comfort of Clothes. In *Proceedings of the 7th International Conference on KEER, Malaysia, 2018*; 495–503.
- [145] E. Quendler, K. Trieb, A. Nimmerichter, Validation of automated detection of physical and mental stress during work in a Huhnermobil 225. *Ann. Agric. Environ. Med.* 2017, 24, 329–331.
- [146] S. Yasmeen, H. Liu, Y. Wu, B. Li, Physiological responses of acclimatized construction workers during different work pat-terns in a hot and humid subtropical area of China. *J. Build. Eng.* 2020, 30, 101281.
- [147] J. Garza, J. Cavallari, B. Eijkelhof, M. Huysmans, O. Thamsuwan , P. Johnson, Office workers with high effort–reward imbalance and overcommitment have greater decreases in heart rate variability over a 2-h working period. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 2015, 88, 565–575.
- [148] S. Järvelin-Pasanen, S. Sinikallio, M. Tarvainen, Heart rate variability and occupational stress-systematic review. *Ind. Health* 2018, 56, 500–511.
- [149] Q. Nguyen, B. Nguyen, H. Do, B. Nguyen, V. Nguyen, S. Vu , T. Tran, Psychological stress and associat-ed factors among municipal solid waste collectors in Hanoi, Vietnam: A cross-sectional study. *PLoS ONE* 2021, 16, e0254355.
- [150] S. Cheema, P. Maisonneuve, A. Abraham, K. Chaabna, A. Tom, H. Ibrahim, Factors

- associated with perceived stress in Middle Eastern university students. *J. Am. Coll. Health* 2022, 70, 2462–2469.
- [151] N. Kêdoté, G. Sopoh, S. Tobada, Perceived stress at work and associated factors among E-waste workers in French-speaking west Africa. 2022. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2020, 19, 851.
- [152] M. Chan, D. Estève, J. Fourniols, C. Escriba, E. Campo, Smart wearable systems: Current status and future challenges. *Artif. Intell. Med.* 2012, 56, 137–156.
- [153] N. Sultan, Reflective thoughts on the potential and challenges of wearable technology for healthcare provision and medical education. *Int. J. Inf. Manag.* 2015, 35, 521–526.
- [154] M. Dehghani, A bibliometric review of wearable technologies. In *World Scientific Series in R&D Management*; World Scientific Publishing, Singapore. 2020; 3–34.
- [155] H. Thakkar, S. Chowdhury, A. Bhoi, P. Barsocchi, Applications of wearable technologies in healthcare: An analytical study. In *5G IoT and Edge Computing for Smart Healthcare*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2020; 279–299.
- [156] T. Chang, H. Li, N. Zhang, X. Jiang, X. Yu, Q. Yang, Z. Jin, H. Meng , L. Chang, Highly integrated watch for noninvasive continual glucose monitoring. *Microsyst. Nanoeng.* 2022, 8, 25.
- [157] N. Singh, K. Moneghetti, J. Christle, D. Hadley, D. Plews, V. Froelicher, Heart Rate Variability: An old metric with new meaning in the era of using mhealth technologies for health and exercise training guidance. Part one: Physiology and meth-ods. *Arrhythm. Electrophysiol. Rev.* 2018, 7, 193–198.
- [158] N. Hashiguchi, K. Kodama, Y. Lim, C. Che, S. Kuroishi, Y. Miyazaki, Practical judgment of workload based on physical activity, work conditions, and worker’s age in construction site. *Sensors.* 2020, 20, 3786.