

## 論文

## フォワーダ走行の心拍計測における光学式心拍センサの適用可能性

中田知沙\*・山口浩和\*・猪俣雄太\*

中田知沙・山口浩和・猪俣雄太：フォワーダ走行の心拍計測における光学式心拍センサの適用可能性. 森利誌 38 (2) : 91 ~ 98, 2023. 本研究は走行集材機械であるフォワーダ走行の心拍計測における光学式心拍センサの適用可能性を明らかにすることを目的とした。森林総合研究所内に直線と曲線（曲線半径 6 m および 8 m）の周回路を設置し、3 名を対象にフォワーダ走行試験を行った。心拍計測には腕時計型の光学式心拍センサである Apple Watch（Apple 社）と胸部装着型の心電図モニタリングデバイスである myBeat（WHS-1, ユニオンツール社）を使用した。Bland-Altman 解析の結果、センサ間の測定値の誤差平均は -0.51 bpm で、相対誤差が  $\pm 20\%$  以内であった測定回数が 99% 以上であったことから、光学式心拍センサによって従来の心電計と同程度の精度で結果が得られることがわかった。また、本試験における労働負荷は空荷での 2 t ダンプトラックによる林道走行と同等で、荷役作業を含むフォワーダ作業中よりも低い値であった。時系列解析の結果、Apple Watch による心拍数の構造変化点を検出することができ、労働負担の検出に有効である可能性が考えられた。

キーワード：林内走行車両, 労働負荷, 心拍計測, 光電脈波, 構造変化

Chisa Nakata, Hirokazu Yamaguchi and, Yuta Inomata : **The use of an optical heart rate sensor to measure heart rate in a forwarder running process. J. Jpn. For. Eng. Soc. 38(2): 91 - 98, 2023.** The goal of this study was to determine the suitability of optical heart rate sensors for forwarder driving heart rate measurement. In the Forestry and Forest Products Research Institute, a circuit with straight lines and curves (curve radius of 6 m and 8 m) was installed, and forwarder driving experiments were conducted for three participants. The Apple Watch (Apple Inc.), a wristwatch-type optical heart rate sensor, and myBeat (WHS-1, Union Tool Co.), a chest-worn electrocardiogram monitoring device, were used to measure heart rate. Furthermore, in this test, the labor load was equivalent to driving on forest roads with an empty 2-ton truck, which was less than forwarding including loading and unloading. As a result of the Bland-Altman analysis, the average of the measured differences between the two sensors was -0.51 bpm. Because more than 99% of bias measurements were within  $\pm 20\%$  of the mean, it was discovered that the optical heart rate sensor can produce results as accurate as a conventional electrocardiograph. As a result of the time series analysis, Apple Watch was able to obtain the structural change in heart rate, and it was thought that it could be effective for detecting labor burden.

**Keywords** : forestry running vehicle, workload, heart rate measurement, photoplethysmography, structural changes

## 1. はじめに

走行集材機械であるフォワーダによる集材作業は、車両の移動がともなうことが他の林業機械と異なる特徴である。フォワーダを使った木材の運搬は、ガードレールがなく滑りやすい未舗装の作業道を走行することから、道からの逸脱や転落等の事故が発生しやすく、重大事故につながりやすい。林業労働災害（死亡災害）速報一覧によると、フォワーダが関係する死亡災害は 2000 年～2022 年の間に 19 件発生している（林業・木材製造業労働災害防止協会, オンライン）。死亡に至らないヒヤリハット事例も多く、74% が走行時に発生しており、その 9 割以上が実荷走行時に発生している（今富ら 2011）。特にヒヤリハットの発生件数が多い事例は「墜落・転落」や「転倒」で、滑りやすい路面や過積載による制動力の

低下が原因として示唆されている。

また、フォワーダによる集材作業は労働負担も大きい。車両が走行する際の車体の揺れや傾きの影響によって心拍数が大きく変動することが指摘される（井上 2000）。長時間の運転によりオペレータの疲労が蓄積して集中力が低下すれば、事故の危険性が増す。それゆえ、フォワーダの走行時における労働負担が大きい作業条件を明らかにし、労働負担の増加を低減する予防策を講じることが重要である。これまでフォワーダの労働負担については、車両の振動や騒音、作業姿勢が心拍数に影響を与えていることは明らかとなっている（Oliveira *et al.* 2021; 朴ら 2004; 豊川・山田 1993）。しかし、従来の方法は心拍数を簡易に計測することが難しく、被験者の数が少ないために、どのような走行条件（距離、時間、走行速度、

2022 年 7 月 11 日受付, 2023 年 1 月 21 日受理

連絡先 (Corresponding author) : 中田知沙 (Chisa Nakata) Email : nakatac27@ffpri.affrc.go.jp

\* 森林総合研究所 For. and Forest Prod. Res. Inst., Tsukuba 305-8687

作業道の線形、縦断勾配など)が心拍数の変動に影響を与えているのかは明らかになっていない。また、作業道走行中は勾配が急変する箇所や機体のスリップで心拍数が短時間で上昇することが推測されるが、数秒単位の解析は行われていない。

一方、近年 AppleWatch 等のウェアラブルデバイスによる心拍計測は、医療やスポーツ科学の分野では広く利用される (Khushhal *et al.* 2017; Falter *et al.* 2019)。AppleWatch 等の光電脈波 (PPG, photoplethysmography) を活用した腕時計型のデバイスは取り扱いが簡単であり、体表面のどの部位にもプローブを装着して長時間の連続測定ができる (岩田・平井 2005)。そのため、光学式心拍センサを活用すれば、従来の胸部装着型の心電計より簡易的に、かつ多くの被験者に対して測定することができる。しかし、AppleWatch などの光学式センサは光線の反射量にもとづく微小血管の容積変化を検出するため (岩田・平井 2005)、光の深達度や計測領域の血管床の大きさに個体差があり、定量化が難しく (Hernando *et al.* 2018)、屋外作業での精度の検証が必要である。

そこで、本研究では、従来の心電図モニタリングデバイスによる測定と光学式心拍センサを用いた心拍数測定を比較し、光学式心拍センサによる有用性について検証することを目的とした。

## 2. 研究方法

### 2.1 試験条件

本研究は、国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所倫理審査委員会の審査・承認を得て実施した。試験を始める前に、被験者に対して試験の目的や手順などに関する説明を十分に行い、試験参加に対する同意を得た。

茨城県つくば市の森林総合研究所の構内に直線と2種類の曲線 (曲線半径 6 m および 8 m) の計 3 コースの周回路を設置し、走行集材機械のフォワーダ (諸岡社製 MST650-VDL, 機械質量 7,420 kg, 陣川ら 2011) による空荷での走行試験を行った。本機は箱型の荷台を搭載したバイオマス対応型フォワーダである。試験は 2021 年 11 月 7 日に実施した。

被験者は、50 代 (被験者 A) と 30 代 (被験者 B) の男性、および 20 代の女性 (被験者 C) の職員 3 名で、特別教育修了後フォワーダをほとんど運転していない。被験者 A は 10 ~ 11 時、被験者 B は 13 ~ 14 時、被験者 C は 14 ~ 15 時の間に試験を実施した。天候は晴れで、試験時の気温/湿度はそれぞれ 15°C /70%RH (被験者 A)、18°C /60%RH (被験者 B)、18°C /70%RH (被験者 C) であった。

被験者はそれぞれ直線コース (約 120 m)、曲線半径 8 m の曲線コース (約 100 m)、曲線半径 6 m の曲線コース (約 75 m) の順に走行した (図-1)。直線コースでは、

120 m の直線に沿って走行し、直線の両端で折り返した。曲線コースでは曲線半径 8 m および 6 m の円周上を 8 の字状に走行した。本研究では、直線コースを S 区間、曲線半径 8 m の曲線コースを C8 区間、曲線半径 6 m の曲線コースを C6 区間とした。各コースの走行前後にエンジンをかけたままの状態では、被験者に運転席で 5 分間の座位姿勢をとらせて安静時の心拍数を測定した。

心拍数の測定には、胸部装着型的心電図モニタリングデバイスである myBeat (WHS-1, ユニオンツール社) と腕時計型の光学式心拍センサである AppleWatch (Series 6, WatchOS 7.5, Apple 社) の 2 種類の心拍計測機器を用いた。本研究では、前者による平均心拍数を mB、瞬時心拍数を mBI とした。また、後者による心拍数を AW とした。mB は、300 秒間の RRI (R-R Interval; 心拍の変動時の時系列データ) を計測し、解析周期 5 秒ごとに平均値を求めた心拍数である。瞬時心拍数 mBI は心拍間隔ごとの RRI の逆数である。

### 2.2 心拍数の測定方法の比較

得られた心拍数の比較には、方法比較研究で一般的に用いられる Bland-Altman 解析 (Bland and Altman 1986) を用いた。Bland-Altman 解析は異なる 2 つの測定方法の一致性の評価に用いられる手法で (Hernando *et al.* 2018)、生体データを扱う医療機器の開発分野において性能を評価するために広く適用されている (Hernando *et al.* 2018; 高野ら 2020; 小竹・佐藤 2009)。

精度には正確度と精密度の 2 つの要素がある。正確度は測定値の平均値と真値との差であり、精密度は方法間の差の標準偏差である (小竹・佐藤 2009)。これまで異なる 2 つの方法で得られた測定値を比較する際には、相関係数や回帰式が用いられることが多かった。しかし、相関係数と回帰式は変数間の関係を示し、その違いを示すものではないため、2 つの方法の一致関係を適切に評価できない場合がある (Giavarina 2015; 小竹・佐藤 2009)。そこで、本研究では、Bland-Altman 法を用いて正確度と精密度の 2 つの要素から精度を検証した。Bland-Altman 解析では、各点  $P_i$  の座標を  $P_i((A_i + B_i)/2$ ,

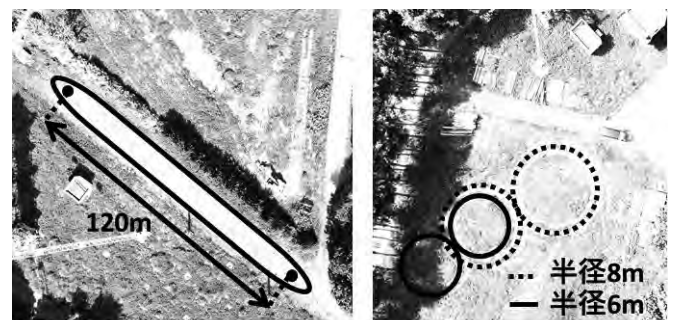


図-1 試験路

直線コース (左, 120 m) および曲線コース (右, 曲線半径 8 m および 6 m の 8 の字状)。

$A_i - B_i$ )として表した Bland-Altman プロットと呼ばれるグラフを作成する。ただし、 $A_i$ ,  $B_i$ は測定対象  $i$  に対する測定機器 A と B による測定値である。測定機器間の差が正規分布に従う場合、差の 95% 信頼区間である LOA (Limits of agreement) は、「測定値の差の平均値  $\pm 1.96 \times$  測定値の差の標準偏差」で表され、理論的には測定値の差の 95% が LOA に収束する。そのため、2つの測定値の差がこの範囲内であれば、2つの測定方法には一貫性があると解釈される (小竹・佐藤 2009)。さらに、相対誤差 (平均値に対するペア測定値の差の割合) が  $\pm 20\%$  以内であった測定回数が総測定回数の 75% 以上であれば、測定機器間に互換性があると定義される (小竹・佐藤 2009)。本試験では、従来方法である mB を真値と仮定し、AW との一貫性をみることで精度を検証した。

なお、Bland-Altman 解析では、同時刻における心拍数を対にして比較するが、測定機器ごとにデータのサンプリング周期が異なるため、それぞれ 5 秒ごとの平均値を算出して使用した。5 秒間にデータが出力されなかった場合は、その区間のデータは解析に使用しなかった。分析には、R 4.0.5 (R Core Team 2021) と BlandAltmanLeh ライブラリに含まれる BlandAltmanLeh 関数を用いた。

### 2.3 労働負担の構造変化点の検出

光学式心拍センサで取得したデータを用いて時系列解析を行い、フォワード走行における労働負担の構造変化の検出に有効であるかを検証した。これまで林業分野におけるフォワードの労働負担は、数十分程度の時間幅の中で取得したデータの平均値 (最大値) や作業前後の変化を指標としてきた (今富 1996; Inoue and Kobayashi 1996; 朴ら 2004)。また、走行する道の幾何構造と心拍数の関係 (潘ら 1997) や、作業工程 (荷役作業, 走行など) の要素を個別条件として計測してきたものの (Inoue and Kobayashi 1996), その要因を詳細に検知することは難しかった。一方、実際のフォワード走行中は、個別の作業条件によって心拍数が変動することが推測される。たとえば勾配が急に変化する箇所や機体のスリップで心拍数が上昇した場合、それらの変位を捉えるには、数秒単位の短時間での解析が必要と考えられる。さらに、試験的に設定した条件下では、あらかじめ想定した作業要素ではない要因を計測することが難しい。また、心拍数は時間の経過とともに変動する現象であり前後のデータが関連しあうため、時系列で変動を捉える必要がある。

そこで、光学式心拍センサである AW で取得したデータを用いて時系列解析を行い、従来の心電図をもとにした mB と比較することで、AW がフォワード走行における労働負担の構造変化の検出に有効であるかを検証した。

なお、mB と AW は測定対象とするデータが心電図と脈波で異なることや (富田 2016), 心拍数が自律神経系に関連して複雑に変動することから (中川 2016), 機器

による測定誤差が生じやすいと考えられる。そのため、解析には AW の精度が最も高い被験者 1 名のデータを使用した。また、時系列解析ではデータの出力間隔を考慮して試験開始からの経過時間を 10 秒ごとに平均化したデータを昇順に番号付けた観測番号で表した。10 秒間にデータの出力が行われていない区間がある場合はそれらを除去して解析を行った。

構造変化点は、構造変化の起きた回数を推定し、構造変化点の推定を行って変化点の信頼領域を求めることで検出する (黒住 2016)。構造変化の解析には、R 4.0.5 (R Core Team 2021) の strucchange ライブラリを使用した。これまで strucchange は生体データや森林面積など時系列データの変化点の検出に使用されてきた (Hislop *et al.* 2019; Aida *et al.* 2022)。strucchange は累積する標準化残差を用いた CUSUM 法や移動合計を用いて複数の平均値の変化を検出する MOSUM 法により心拍数の変動を求め、F 統計量が限界値を超えた点を構造変化点として検出し、線形回帰を行う (Zeileis *et al.* 2002)。変化点の数は、BIC (ベイズ情報量規準, Bayesian information criterion) と RSS (残差平方和, Residual sum of squares) をもとに決定し、本試験では BIC が最も小さい場合を最適なモデルとした。また、構造変化を伴う回帰モデルの構造変化点を信頼区間とともに図化した。

## 3. 結果

### 3.1 光学式心拍センサの精度

Bland-Altman 解析を用いて、心電図モニタリングデバイスによる測定と光学式心拍センサを用いた心拍数を比較した。その結果、測定値の正確度を示す誤差平均 (mB から AW の心拍数を引いた値) は、 $-0.51$  bpm と若干の系統誤差がみられた。測定値の精密度を示す誤差の 95% 信頼区間である LOA の下限値は  $-9.21$  bpm, 上限値は  $8.19$  bpm で、この範囲に 95% の測定値が含まれた。Bland-Altman プロット (図-2) では、AW の測定値は mB の測定値よりも全体的にやや多い傾向を示すが、測定範囲内で誤差平均である  $-0.51$  bpm をはさみ均等に分布していた。測定機器の平均値の増加に伴う平均差の増加である比例的な一致関係は平均値が 85 bpm 以下では認められなかった。

図-3 は Bland-Altman 解析における誤差平均の分布を示すヒストグラムである。測定値の差が平均値の  $\pm 20\%$  以内である頻度は 1918 対のうち 1906 対 (99%) で、mB と AW の 2 つの測定機器による結果の一致性は良好であった。

### 3.2 被験者の心拍数

フォワード走行中の平均心拍数 (標準偏差, 最小~最大) は、被験者 A は、mB で 68.81 bpm (2.10 bpm, 66.00 ~ 77.00 bpm), AW で 69.51 bpm (3.20 bpm, 62.00 ~ 86.00 bpm) であった。被験者 B は、mB で 79.97 bpm (2.20 bpm, 75.00 ~ 85.00 bpm), AW で 80.66 bpm (5.12

bpm, 68.00 ~ 110.00 bpm) であった。被験者 C は, mB で 75.72 bpm (3.78 bpm, 71.00 ~ 88.00 bpm), AW で 75.72 bpm (4.26 bpm, 68.00 ~ 95.00 bpm) であった (表-1)。

フォワード走行中の心拍数の平均出力間隔 (標準偏差, 最小~最大) は, 被験者 A は, mBI で 0.73 秒 (0.08 秒, 0.29 ~ 1.23 秒), AW で 5.06 秒 (2.51 秒, 1.00 ~ 15.00 秒) であった。被験者 B は, mBI で 0.74 秒 (0.07 秒, 0.29 ~ 1.68 秒), AW で 5.10 秒 (2.57 秒, 1.00 ~ 19.00 秒) であった。被験者 C は, mBI で 1.04 秒 (0.59 秒, 0.26 ~ 3.20 秒), AW で 5.07 秒 (2.53 秒, 0.00 ~ 19.00 秒) であった (表-2)。フォワード走行中に出力されたデータのサンプリング数は, 被験者 A は, mBI で 5318, AW で 765, 被験者 B は, mBI で 4757, AW で 693, 被験者 C は, mBI で 3690, AW で 755 であった。AW による被験者

らのサンプリング数は心拍間隔ごとの RRI の逆数, つまり実際の拍動数である mBI の 14.4%, 14.6%, 20.5% であった。

AppleWatch の出力間隔のヒストグラムは 0 ~ 9 秒の間で一様分布していたが, 4 ~ 5 秒区間では他に比べて頻度が高かった (図-4)。また, 本試験の結果からは, 出力間隔の長さとお心拍数の増減との関連は認められず, データはランダムな間隔で出力されていた。

3.3 労働負担の構造変化

図-5 は, mB と AW による構造変化の結果である。X 軸は構造変化点数で, Y 軸は BIC と RSS の値を示す。BIC/RSS が最も小さい変化点数は, mB は 3 (BIC 2224) もしくは 5 (RSS 9734), AW は 2 (BIC 2126) もしくは 5 (RSS 7414) であった。これらの構造変化が生じた観測番号を構造変化点の数ごとに表-3 に示す。BIC が最も小さい最適なモデルにおいて, 構造変化が生じた時点

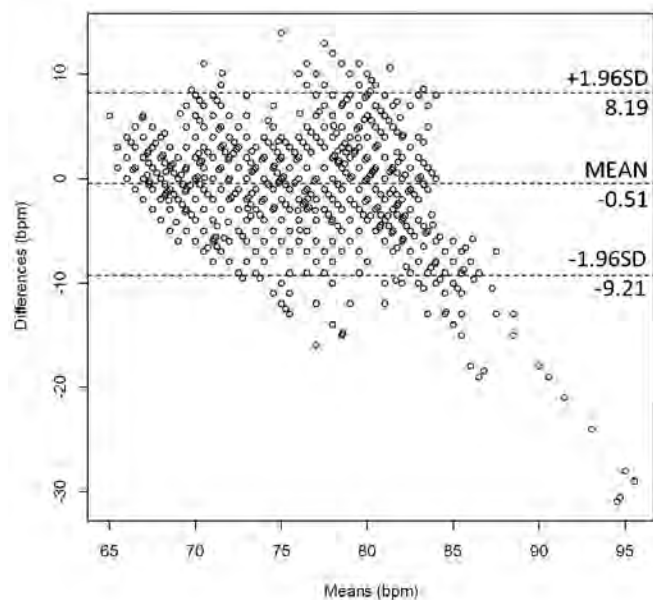


図-2 Bland-Altman プロット

Y 軸は従来法の胸部装着型の心電計 (mB) と光学式心拍センサ (AW) の測定値の差 (mB-AW), X 軸は両者の測定値の平均値を示す。Bland-Altman 解析における誤差平均の分布

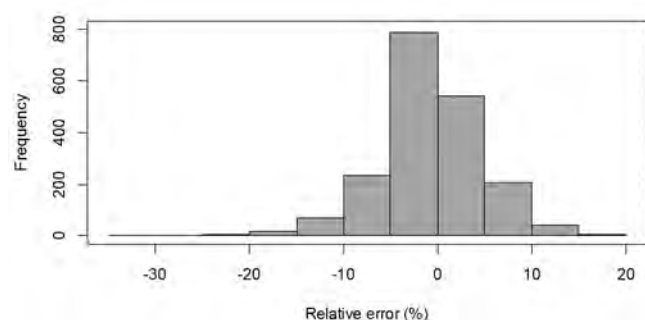


図-3 Bland-Altman 解析における誤差平均の分布

表-1 心拍数の結果

Subject		mB (bpm)	AW (bpm)
A	最大	77.00	86.00
	最小	66.00	62.00
	平均	68.81	69.51
	標準偏差	2.10	3.20
B	最大	85.00	110.00
	最小	75.00	68.00
	平均	79.97	80.66
	標準偏差	2.20	5.12
C	最大	88.00	95.00
	最小	71.00	68.00
	平均	75.72	75.72
	標準偏差	3.78	4.26

表-2 データの出力間隔

Subject		mB (s)	AW (s)
A	最大	1.23	15.00
	最小	0.29	1.00
	平均	0.73	5.06
	標準偏差	0.08	2.51
	サンプリング数	5318	765
B	最大	1.68	19.00
	最小	0.29	1.00
	平均	0.74	5.10
	標準偏差	0.07	2.57
	サンプリング数	4757	693
C	最大	3.20	19.00
	最小	0.26	0.00
	平均	1.04	5.07
	標準偏差	0.59	2.53
	サンプリング数	3690	755

の観測番号は, mB は 52, 122, 222, AW は 164, 216 であった。また, 変化点数が5 の場合の観測番号は,

mB は 52, 119, 171, 223, 296 で, AW は 52, 105, 164, 216, 294 であった。1 番目の変化点は一致したが, 2 番目以降は観測番号が 2 ~ 14 の 10 ~ 90 秒に該当する差が確認された。

図-6 は試験時の心拍数と時系列解析によって得られた構造変化点と作業内容の関係である。Y 軸は心拍数, X 軸は試験開始からの経過時間を示す。経過時間は 10 秒ごとのデータを昇順に番号付けた観測番号である。破線は構造変化点とその 95% 信頼区間で, 構造変化点ごとに回帰線を求めた。白の区間は安静時 (Relax1 ~ 4), グレーは直線走行時 (Run(S)) と曲線走行時 (曲線半径 8 m (Run(C8)), 曲線半径 6 m (Run(C6))) を表す。破線上の数値は構造変化点を示し, 各区間下部のカッコ書きの数値はその開始点を示す。mB は, 直線区間の走行開始後に心拍数が増加したのちに構造変化点 (観測番号 52) が検出され, 安静区間の開始と同時に (観測番号 122) に減少したが, 半径 8 m の曲線区間走行中は, 終了直前 (観測番号 222) まで再び増加した。それ以降は半径 6 m の曲線区間や安静時で変化点が検知されなかった。AW

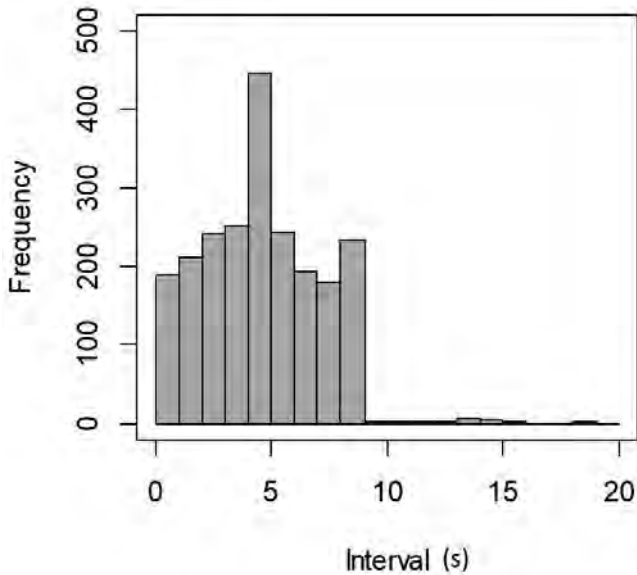


図-4 AppleWatch による出力間隔の分布

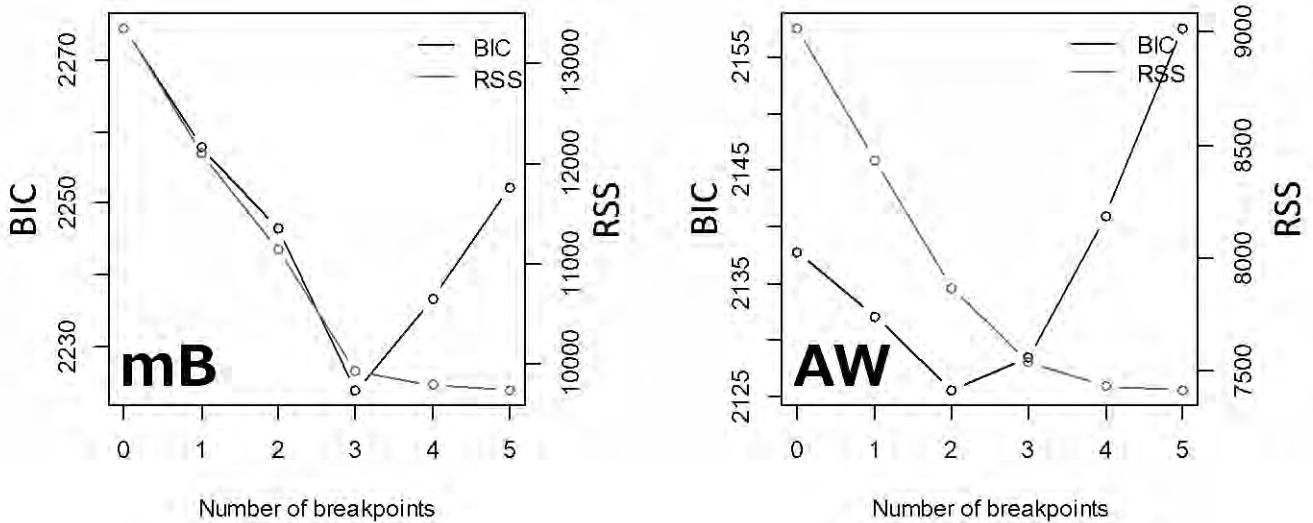


図-5 構造変化点数

表-3 構造変化の生じた観測番号

Sensor	Number of breakpoints	Observation number	BIC
mB	m=1	52	2258
	m=2	52, 222	2246
	m=3	52, 122, 222	2224
	m=4	52, 119, 171, 223	2237
	m=5	52, 119, 171, 223, 296	2252
AW	m=1	219	2132
	m=2	164, 216	2126
	m=3	52, 117, 216	2128
	m=4	52, 105, 164, 216	2141
	m=5	52, 105, 164, 216, 294	2158

は、試験前の安静時～直線区間走行～安静時までには構造変化点は検出されず、半径 8 m の曲線区間の走行開始後に構造変化点（観測番号 164）が検出された。その後心拍数は増加し、観測番号 216 を変化点として増加傾向はゆるやかになり、それ以降は変化点が検出されなかった。

曲線走行時の心拍数について、mB と AW のどちらも 1 度目の曲線走行中（Run(C8)）は心拍数が増加したのに対し、2 度目の曲線走行中（Run(C6)）はほとんど変化がみられなかった。

#### 4. 考察

##### 4.1 光学式心拍センサの適用条件

Bland-Altman 解析を用いて心拍数の結果を比較した結果、測定値の差が平均値の  $\pm 20\%$  以内である頻度は 99% 以上であったことから、腕時計型の光学式心拍センサ（AppleWatch）によって従来の胸部装着型の心電計（myBeat）と同程度で結果が得られることがわかった。また、これまで光学式心拍センサは屋内作業の測定に用いられることが多かったが（Hernando *et al.* 2018）、本試験により屋外作業においても適用できることが分かった。

心拍数が 85 bpm 以下の場合、Hernando *et al.* (2018) による結果と同様、比例的な一致関係は認められなかった。よって、心拍数が 85 bpm を超えない作業においては、

5% の有意水準で約 9 bpm 以上の変化を捉えることが可能と考えられ、光学式心拍センサが適用可能であることが分かった。一方、AW は運動強度の増加にともなう精度の低下が懸念される。先行研究では運動強度の小さい作業（座位姿勢やウォーキング、平均心拍数 70～95 bpm）では、AppleWatch によるデータは非常に信頼性が高いのに対して（心電図モニタリングデバイスとの相関係数  $r=0.97$ ）、運動強度の大きい作業（ジョギングやランニング、平均心拍数 130～155 bpm）ではやや低下（ $r=0.8 \sim 0.9$ ）した（Hernando *et al.* 2018; Khushhal 2017）。フォワード走行は座位姿勢であるため運動強度は大きくないが、本試験においても心拍数が 85 bpm を超える場合に AW が mB よりも心拍数を過大評価する比例的な一致関係が確認された。そのため光学式心拍センサで心拍数の大きい作業を計測する際は、試験条件にあわせて適用の可否を判断する必要がある。

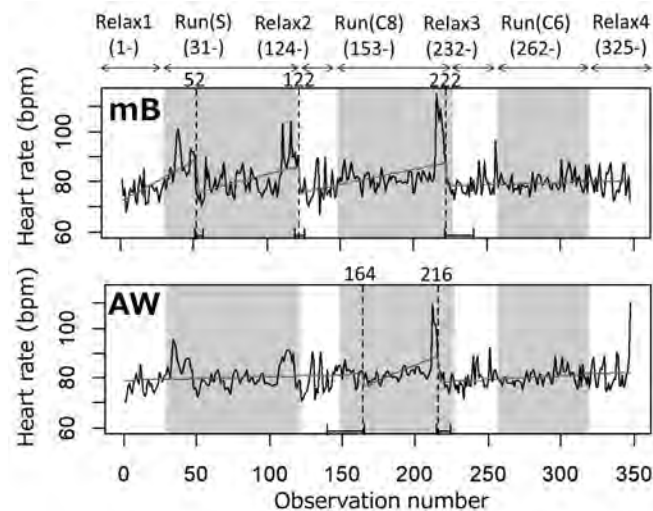
フォワード走行中の心拍数の平均出力間隔について、AppleWatch の出力間隔は約 5 秒であり、Khushhal (2017) と同程度であった。一般車両の走行時には急な割り込みや他車両の接近時の緊張の高まりによる心拍変動性指標の上昇が観測され（杉江ら 2015）、フォワード走行中も勾配が急に変わる箇所や機体のスリップなどで心拍数が上昇することが推測される。AppleWatch による出力間隔によってこれらの緊張状態を正確に検出できるかは今後検討する必要がある。

##### 4.2 被験者の心拍数の特徴

被験者らの平均心拍数は 68.81～75.72 bpm で、空荷での 2 t ダンプトラックによる林道走行（平均 71.8 bpm、最小 67.3～最大 78.0 bpm）と同程度もしくはやや高く、積載時の 4.5 t 運材車による林道走行（平均 76.6 bpm、最小 71.5～最大 82.3 bpm）よりもやや低かった（山崎 1987）。一方、荷役作業を含むフォワード作業中の心拍数（平均 86.8 bpm、最大 136 bpm、Inoue and Kobayashi 1996）と比べると低い値であった。本試験では荷役作業での乗り降りをとまなう作業を含まなかったことから、心拍数の上昇が抑えられたことが考えられた。また、被験者間で比較すると、年齢が最も高い被験者が最も低い値となった。被験者間で運転経験に差はなく、最大心拍数は年齢とともに減少することから（Arena *et al.* 2016; Tanaka *et al.* 2001; 山地 1981）、年齢が一因となったことが考えられた。

##### 4.3 労働負担の構造変化

時系列解析を行うことで、心拍数の変化を構造変化点で分けられた区間ごとに得ることができた。BIC/RSS に基づく最適な変化点数は、AW と mB で異なる結果となった。その要因として、心拍数の変化率の大きい時点の影響が考えられた。たとえば mB が変化点として検出した観測番号 52 や 122 は、作業中に心拍数が急上昇する時点であるが、AW では上昇が緩やかであったために、変化点として検出されなかった可能性がある。一方、構



図－6 時系列解析

Y 軸は心拍数、X 軸は試験開始からの経過時間を示す。経過時間は 10 秒ごとのデータを昇順に番号付けた観測番号である。破線は構造変化点を示し、破線上の数値はその観測番号を示す。構造変化点の 95% 信頼区間の範囲を破線に重なる実線で示した。白の区間は安静時（Relax1～Relax4）、グレーの区間は直線走行時（Run(S)）と曲線走行時（曲線半径 8 m（Run(C8)）、曲線半径 6 m（Run(C6)））を表す。各区間下部のカッコ書きの数値は各区間の開始時の観測番号を示す。グレーの折れ線は構造変化点ごとに求めた回帰線を示す。

造変化点数が同じ5の場合は、心拍数の構造変化点に10～90秒に該当する差が確認された。上記の結果より、測定機器の値によって最適な構造変化点数が異なる場合があるが、労働負担の変化点の検出にある程度は有効である可能性が考えられた。

曲線走行時の心拍数について、mBとAWのどちらも2回目の曲線半径6mのコースを走行中は心拍数の増加が小さかったことから、運転操作への慣れが生じていた可能性がある。潘ら(1997)は曲線半径が小半径の場合は視距が短いため運転手の心理的生理的圧迫感が増加することを報告しているが、本試験は平地の視界の良い条件下での試験であり、それらの影響は少ないと考えられた。朴ら(2004)による林内作業車の試験では、騒音と振動の曝露時間が長くなるほど疲労感が増大したが、本試験では時間経過に伴う心拍数の上昇はみられなかった。その要因として、本試験は路面の凹凸の少ない平坦な条件下であったため、車両の移動に伴う騒音や振動の影響が生じにくかったことが考えられた。

心拍数の構造変化を機械的に計測することで、安静/走行や直線コース/曲線コースといった実際の作業条件と構造変化点が一致しない場合があることがわかった。直線の折り返し地点や8の字状のコースの方向転換の操作等により構造変化が生じている可能性が考えられた。そのため今後は動画解析等で運転操作状況による影響についても解析する必要がある。

##### 5. おわりに

本研究はフォワーダ走行中の心拍計測における光学式心拍センサの適用可能性を明らかにすることを目的とした。Bland-Altman解析の結果、腕時計型の光学式心拍センサによって従来の胸部装着型の心電計と同程度の精度で結果が得られることがわかった。時系列解析を用いることで、時間の経過とともに変動する現象である心拍数の構造変化点を検知することができ、走行条件による心拍数の増大を明らかにする有効な手法であることを確認した。一方、フォワーダの作業現場では走行中に勾配が急に変化する箇所や機体のスリップなどで心拍数が上昇することが推測されるため、実際の現場での車体の揺れや傾きによる走行中の瞬間的な心拍数の増加やそれらの蓄積による労働負担を適切に評価できるかを今後検討する必要がある。また、本試験で使用したバイオマス対応型フォワーダは、積載時には後方死角によって心理的負担が生じる可能性がある。そのため、今後作業道走行中や積載状態での計測を行う際はそれらを考慮する必要がある。

本研究は(国研)森林研究・整備機構森林総合研究所交付金プロジェクト(課題番号:2アbPS4)「フォワーダ集材工程における労働負担の定量化」の研究成果である。

##### 引用文献

- Aida, T., Shionoya, A., Nonaka, H., Hayami, K., Uchiyama, H., Nagamori, M., Ohhashi, S., Kobayashi, M., Takayama, T., and Kimura, S. (2022) Exploration of an inflection point of ventilation parameters with anaerobic threshold using strucchange. *Sensors* **22** (7) : 2682.
- Arena, R., Myers, J., and Kaminsky, L.A. (2016) Revisiting age-predicted maximal heart rate: Can it be used as a valid measure of effort? *American Heart J.* **173** : 49-56.
- Bland, J.M., and Altman, D. (1986) Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The lancet* **327** (8476) : 307-310.
- Cooper, K.H., Pollock, M.L., Martin, R.P., White, S.R., Linnerud, A.C, and Jackson, A. (1976) Physical fitness levels vs selected coronary risk factors: a cross-sectional study. *J. Am. Med. Ass.* **236** (2) : 166-169.
- Falter, M., Budts, W., Goetschalckx K., Cornelissen V., and Buys R. (2019) Accuracy of Apple Watch Measurements for heart rate and energy expenditure in patients with cardiovascular disease: Cross-Sectional Study. *JMIR mHealth and uHealth* **7** (3) : e11889.
- Giavarina, D. (2015) Understanding Bland Altman analysis. *Biochemia Medica.* **25** (2) : 141-151.
- Hernando, D., Roca, S., Sancho, J., Alesanco, Á., and Bailón, R. (2018) Validation of the apple watch for heart rate variability measurements during relax and mental stress in healthy subjects. *Sensors* **18** (8) : 2619.
- Hislop, S., Jones, S., Soto-Berelov, M., Skidmore, A., Haywood, A., and Nguyen, T.H. (2019) A fusion approach to forest disturbance mapping using time series ensemble techniques. *Remote Sens. Environ.* **221** : 188-197.
- 今富裕樹(1997)高性能林業機械作業による精神的負荷の評価指標. *日林誌* **79** (4) : 173～179.
- 今富裕樹・上村巧・加藤隆(2011)フォワーダ作業の災害要因と災害発生の類型化. *森利誌* **26** (1) : 21～26.
- 井上公基(2000)森林作業と労働負担. 211pp, 東洋書林, 東京都.
- Inoue, K. and Kobayashi, H. (1996) Operators' physical strain in operating the high proficient forestry machines. *J. For. Res.* **1** (3) : 111-115.
- 岩田博英・平井正文(2005)フォトプレチスモグラフィ. *脈管学* **45** (5) : 329～332.
- Khushhal, A., Nichols, S., Evans, W., Gleadall-Siddall, D.O., Page R., O'Doherty A.F. and Abt, G. (2017) Validity and reliability of the Apple Watch for measuring

- heart rate during exercise. *Sports Med. Int. Open* **1** (06): 206-211.
- 小竹良文・佐藤暢一 (2009) Bland-Altman 法による心拍  
出量モニタの精度評価. *日集中医誌* **16**: 263 ~ 272.
- 黒住英司 (2016) 非斉次な説明変数を持つ回帰モデルに  
おける構造変化点の信頼領域の構築. *日本統計学会  
誌* **46** (1): 69 ~ 84.
- 中川千鶴 (2016) 人間工学のための計測手法 (第4部)  
生体電気現象その他の計測と解析 (5) 自律神経系  
指標の計測と解析. *人間工学* **52** (1): 6 ~ 12.
- Oliveira, F.M., Lopes, E.D.S., Koehler, H.S., and Behling, A.  
(2021) Application of an Integrated Ergonomic  
Indicator (IEI) in evaluating forest machines. *Int. J.  
For. Eng.* **32** (3): 256-265.
- 朴範鎮・呉宰憲・有賀一広・仁多見俊夫・小林洋司 (2004)  
林内作業車オペレータに与える疲労度の評価指標の  
考察. *森利誌* **19** (1): 19 ~ 26.
- 潘曉東・後藤純一・山本誠 (1997) 運転者の心理的生理  
的反応に基づく林道幾何構造の評価 - 単曲線部に  
おける視距の影響 -. *日林誌* **79** (4): 180 ~ 185.
- 林業・木材製造業労働災害防止協会. 林業労働災害 (死  
亡災害) 速報一覧. オンライン, ([https://rinsaibou.  
or.jp/](https://rinsaibou.or.jp/)). 2022年7月11日参照.
- 杉江亮輔・荒川俊也・小塚一宏 (2015) 心拍による長距  
離運転時の疲労評価および推定・制御の可能性. 産  
業応用工学会全国大会 2015 講演論文集: 4 ~ 5.
- 高野真史・倉持龍彦・久松学・細川正浩・蜂谷仁 (2020)  
クライオバルーンアブレーションにおける V1 電極  
を用いた複合筋活動電位の検討. *心電図* **40** (4):  
217 ~ 227.
- Tanaka, H., Monahan, K.D., and Seals, D.R. (2001) Age-  
predicted maximal heart rate revisited. *J. Am. Coll.  
Cardiol.* **37** (1): 153-156.
- 富田豊 (2016) 人間工学のための計測手法 (第4部) 生  
体電気現象その他の計測と解析 (4) 心拍の計測.  
*人間工学* **52** (1): 6 ~ 12.
- 豊川勝生・山田容三 (1993) ハーベスタの運転作業環境  
に関する研究. *森利誌* **76** (2): 17 ~ 24.
- 山地啓司 (1981) 心拍数の科学. 306pp, 大修館書店,  
東京都.
- 山崎忠久 (1987) 林道の幾何構造に関する研究. 三重大  
学農学部演習林報告 **15**: 1 ~ 96.
- Zeileis, A., Leisch, F., Hornik, K., and Kleiber, C. (2002)  
Strucchange: An R package for testing for structural  
change in linear regression models. *J. Stat. Softw.* **7**:  
1-38.
- 陣川雅樹・吉田智佳史・毛綱昌弘・中澤昌彦・伊神裕司・  
古川邦明・臼田寿生・岩岡正博・諸岡正美・諸岡 昇  
(2011) バイオマス対応型フォワーダの開発. *森利誌*  
**26** (4): 227 ~ 231.