

# 31. 生産性および安全性の向上に向けた 生体情報モニタリングシステムの開発

立命館大学 ○橋口 伸樹, 児玉 耕太, 塩澤 成弘, 小林 泰三  
株式会社熊谷組 黒石 真一, 久保田 泰史, 宮崎 康弘, 北原 成郎

## 1はじめに

大都市圏を中心とした建設現場では、2020年開催の東京オリンピック・パラリンピックを控え、老朽化した施設の建て替えや、海外旅行者向けなどの新たな需要を見込んだ施設の建設ラッシュが続いている。しかし、労働人口および熟練作業者数の減少は各業種に見られ、とりわけ、人手不足と高齢化が続く建設・土木業界では、離職率を下げるために、その労働環境を改善することは重要な課題である<sup>1)</sup>。建設工事の請負額の中に占める安全対策にかける費用は増大しており、IoT技術などを利用し、効率的な作業と建設現場における安全管理を如何に進めていくかが注目されている<sup>2)</sup>。

労働集約的な建設・土木現場においては、その性質のために、多くの労働者が自身の身体能力を超え、過度な作業要求に直面している<sup>2),3)</sup>。特に高温多湿などの劣悪な作業環境において、労働者は高い身体的な負荷により、慢性的な疲労の蓄積や傷害および事故が生じることで、現場生産性の停滞が懸念される。

本研究では、生体情報センサ（心拍数や移動加速度の検出センサ）を一体化した下着型シャツに、無線IoTデバイスを装着し、測定環境に設置した無線通信機器と組み合せて、被験者の生体情報を測定するシステムを開発した。このシステムを建設現場に適用し、作業員の業務進行を妨げることなく、身体への負荷により生じる作業員の心拍数を計測し、心拍数と身体活動量の関係を確認した。計測においては、建設作業員はITリテラシーを必要とせずに、夏季の屋外作業や閉鎖的な環境下で起こりやすい体調不良や、労働負荷による身体への影響を管理できるIoTシステムの開発し、安全で生産性の高い作業性を実現することを検討する。

## 2 本研究の特徴

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は、建設作業員の物理的な身体負荷を可視化し、許容限界内で管理することが重要である。一方で、バイオセンサシステム（例えば、心拍センサ）を装備したウェアラブル健康機器の近年の進歩により、現場労働者

の身体的な負荷を継続的に測定するのに十分な機能を有している。

先行研究で示される、心拍予備率（%HRR）による相対的な身体負荷の測定は、心拍の個人差を正規化することによって、作業者間での身体への負荷を比較するのに有用である<sup>4)</sup>。

心拍数の測定では、多くの計測機器が存在し、被測定者の身体活動の激しさと計測時間の長さに応じ、図-1に示すような分類が行える。



図-1 身体活動と計測期間による心拍計測ツール

開発したIoTシステムでは、ウェアラブルデバイス（下着型のセンサ搭載ウェア：以下、スマートウェア）を用いて、生体情報をモニタリングし、労働者の仕事を妨げることなく継続的に心拍変動から物理的な身体負荷を測定する。労働者の安全と健康を把握し、期待される生産性を管理が可能である。被験者の身体活動量、労働時間や休憩時間といった行動パターン、および心拍数の変動などの生体情報を記録し、被験者である建設作業員ごとに分析を行なうことによって、建設現場における作業にどのような影響を及ぼすのかを明らかにする。

## 3 研究方法

### 3.1 データ収集システム

本システムは建設現場への適用を考え、GPSや携帯電話などの公共的な通信機能が使用できない環境下にてデータ通信を行なうことを想定した。開発したシステムの全体構成を図-2に示す。データの収集をエリアでは、7~8m間隔で複数のアクセスポイント（以下、APと称す）を設置し、スマ

ートウェアから発する Bluetooth Low Energy(BLE)の電波と生体情報を採取し、上位ネットワークとは2.4GHzの WiFi無線によりデータ通信を行なう。

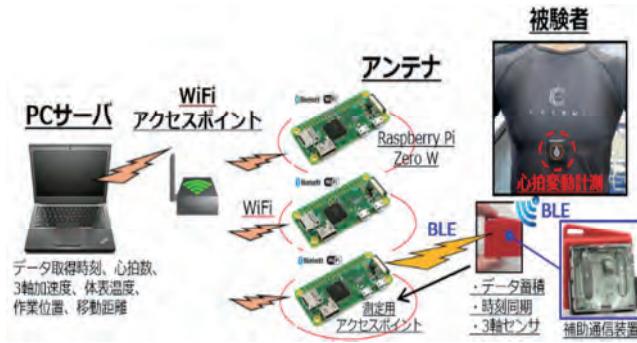


図-2 開発したIoTシステム全体構成



図-3 立命館大学と東洋紡社で開発されたスマートウェア

建設作業員はスマートウェアを着用し、バッテリ駆動の送信装置を併せて装着し、被験者の心拍変動を計測した。スマートウェアは生地に伸縮性があり、心拍を計測するための電極がウェア生地に印刷されている<sup>5)</sup>。生体情報としては、心拍数と体表温度、3軸加速度が得られ、これらデータは送補助通信機器（Texas Instruments 社製 CS2650）からAPへ、更にPCサーバに送信され記憶される。

データ解析ではプログラミング言語 Python を用いており、ソフトウェア開発環境は Anaconda、描画や解析に使用したライブラリは scikit-learn, NumPy, SciPy, Matplotlibなどを用いた。

### 3.2 作業員の心拍測定と労働負荷

被験者的心拍については、(1)式を用いて予備心拍率を算出して身体的な負荷を評価した。

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

ここで、 $HR_{working}$  は作業中の平均心拍数を示す。 $HR_{resting}$  は被験者の安静時の心拍数を測定するが、各被験者の休息中の最も低い心拍数を安静時の心拍数として用いる。また、 $HR_{maximum}$  は年齢から推定される当該作業員の最大心拍数で表し、 $220 - 0.7 \times \text{年齢}[bpm]$  で求める<sup>3),4)</sup>。また、負荷限界の目安として以下の値から判断を行なう。

< 30%HRR	: 8 時間未満は持続できる
30-40%HRR	: 繙続監視が必要（許容限界）
> 40%HRR	: 30-60 分間続くと注意

%HRR は連続して計算することが出来るが、労働負荷が持続できる時間を分析し、その変動を詳しく把握するために、30 分単位で%HRR を求める。

30 分単位の%HRR は、30-60 分間で継続は注意すべき40%HRR、8時間未満持続できる30%HRRなどの目安により、身体的な負荷レベルを判別し、作業時間と休憩時間（業務中に予定された休息）における労働負荷を比較する。

監視エリア内に複数の AP を設置し、被験者の装着する送信装置から発信する電波を利用し、作業員の行動把握を行なった。被験者の通信装置が発信する電波に対し、各ゾーンに設置した AP が受信した電波強度 RSSI[dBm] (Received Signal Strength Indicator) によって、作業者の位置を推定する。ある時刻に被験者はいずれかのゾーン近くで作業しており、作業進行により移動した各ゾーンを時刻ごとに記録した。この時系列の移動記録をもとに、各被験者の移動距離や移動時間、休憩時間を観測した。これら数値をもとに被験者の労働負荷を判断し、作業員ごとに比較が行える。

### 3.3 身体活動量の計測

作業行動の分析として、労働者の行動パターン（直接作業の割合、作業場所の移動、休憩、準備作業、清掃）を計測する。労働活動量の分析を行なうため、身体活動量を把握する。心拍数の変動から、直接作業、作業場所の移動、準備作業、清掃を含む、身体的な負荷と作業活動の関係をデータ採集する。身体活動量の計測は、被験者のスマートウェアに装着されたユニオンツール社製のWHS-2に搭載された機能である3軸加速度計を用いて計測した。作業員の動きにおいて、左右方向：X軸、上下方向：Y軸、前後方向：Z軸での各活動量が output される。時間ごとに計測される3軸の各加速度に対し、作業員の身体活動量として、3軸の移動加速度  $Moving_n$  を(2)式で表す。

$$Moving_n[G] = \sqrt{(A_{X_n} - A_{X_{n-1}})^2 + (A_{Y_n} - A_{Y_{n-1}})^2 + (A_{Z_n} - A_{Z_{n-1}})^2} \dots (2)$$

ある観測ポイントの前後において、各軸の加速度  $A_X$ ,  $A_Y$ ,  $A_Z$  の変化量を二乗和し、平方根を求めて、3軸における身体の活動量である移動加速度を求める。単位は重力加速度となり、本実験での被験者の身体活動量の単位は[mG]で表現する。

### 3.4 建設現場の作業エリア

実験現場の作業エリアの見取り図を図-4に示す。

作業員に装着した通信装置より発せられる生体情報を受信するために、作業エリアには、Zone 1-6 の位置6ヶ所にAPを設定した。この作業エリア内に

おいて、作業員が移動しながら足場階段の鉄骨を解体し、外部へ搬送する作業が行なわれた。作業員は補助通信機器を所持し、その機器にてWHS-2のデータを受信して一旦記憶させ、作業員が作業エリアの範囲外に移動しても、データ抜けの無いことを実現している。システム全体での時刻合わせは、PCサーバと作業員が所持する補助通信装置との間で定期的に時刻同期を行ない、収集した生体情報の収集時刻の整合性を保っている。

建設現場には、作業進行の障害にならない位置にビデオ撮影機を設置し、作業員の行動を録画した。ビデオ撮影機を作業エリアにおいて対抗する位置に2台設置し、作業エリアを挟んだ両側から撮影を行なった。労働状況と作業タスク、時刻の関係を一致させるのに役立った。

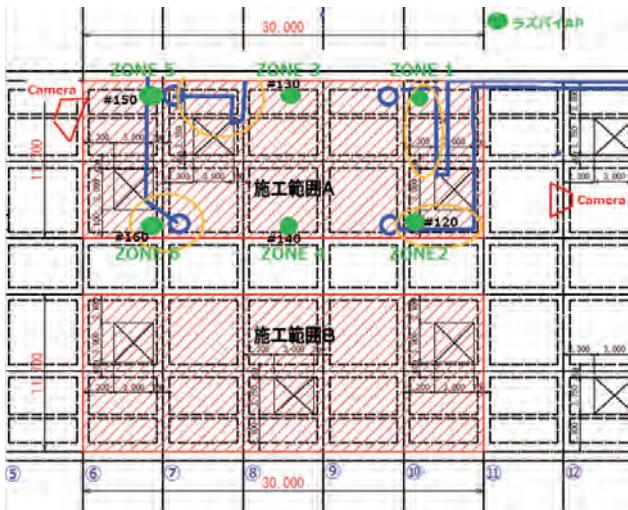


図-4 建設現場の見取り図



図-5 建設現場の足場階段

身体活動量の収取において、潜在的な課題としてはホーソン効果があるが、今回の作業エリアにおいては、我々の研究チームメンバーは被験者の行動監視は行わず、被験者の作業エリアから離れた場所に待機して実験を行なった。一般的に、肉体労働者は高負荷作業による健康上の懸念から、

日常業務の身体的な負荷にも関心がある。このため、被験者の通常の作業パターンから逸脱しないように、本実証実験に先立ち、作業員らの生産性の監視が目的ではなく、作業員の身体的な負荷を測定することを説明して実験を進めた。

#### 4 実証実験の分析結果

##### 4.1 被験者データの収集と分析

本システムを用いた実証実験は、2018年5月25日、6月29日、11月16日の延べ3日間で実証実験を行なった。場所は大阪市西区の建設作業所において実施した。実験対象は、足場用鉄骨材の解体作業とした。この計測において、建設現場の作業員12名（専門職作業員が8名と作業補助員が4名）を被験者とし、心拍数および身体の活動量を測定データとして収集を行なった。実験を行なった時間は、午前8時30分から午後5時までの間で、観測区間を30分間ごとと定め、被験者のデータを収集した。心拍数と身体活動量に関する情報は、建設現場において、反復作業（足場の解体および鉄骨材の搬出）を行なう専門職作業員と、機材設置および配線敷設といった間接作業を行なう補助作業員からデータ収集した。データ収集のプロトコルや被験者のプライバシーに関する条件は、立命館大学研究倫理審査番号：BKC-人医-2017-071-1により承認を受けた。表-1に参加した被験者IDと作業日、作業内容、全観測時間[分]を示す。作業内容はデータ収集中の主な作業を記述している。作業員#1~4は、建設現場で補助的な作業を担当し、技術的な作業や管理業務は行なわない。作業員#5~11は専門技術者として高所作業が伴う足場鉄骨の解体作業を行なう。

表-1 作業員IDと作業日、作業内容

ID	年/月/日	職種	作業	観測時間
#1	2018/5/25	補助1	補助	210分
#2	2018/5/25	補助2	補助	210分
#3	2018/5/25	補助3	補助	150分
#4	2018/11/15	補助4	補助	150分
#5	2018/6/29	専門1	足場解体	450分
#6	2018/6/29	専門2	足場解体	300分
#7	2018/6/29	専門3	足場解体	300分
#8	2018/6/29	専門4	足場解体	450分
#9	2018/11/15	専門5	足場解体	510分
#10	2018/11/15	専門6	足場解体	510分
#11	2018/11/15	専門7	足場解体	510分
#12	2018/11/15	専門8	足場解体	510分

##### 4.2 被験者データの収集と分析

各被験者の平均の心拍数と労働負荷の%HRR、身体活動量を時間帯別に収集した。予定された作業と休憩を両方含めた全観測時間帯において、30分間ごとの%HRRを求め、%HRRは30%未満の場合、30-40%の場合、40%以上の場合で分類した。

計12名の被験者の計測より、30分単位のデータセットが148セット収集され、データ収集の準備時間は除き、1作業日の観測時間は作業と休憩を含め、最短150分～最長510分であった。

全被験者の労働負荷%HRRは、最低1.9%～最高60.6%であった。前述のように、表-1の作業員#2および#5-12の%HRRは30%以上が見られた。労働負荷が大きい（%HRRが高い）労働者は、労働負荷以外で他の要因としては、比較的に年齢が高いことや、BMIが高い被験者（表-1の作業員#2）である可能性がある。また、労働者の作業安全と健康リスクが、労働負荷（%HRR）とその継続期間に依存することに配慮が必要であり、今回の結果でも%HRRの許容限界（例えば、30%～40%HRR）が長く続いている。

各作業者の%HRRが計算される各データ区間の時間は30分間としているが、作業員の%HRRの安全限界は、建設作業においては特に定義されていない。Nortonらは、有酸素運動のガイドラインとしては40%HRRが30-60分以上持続すると健康リスクがある<sup>6)</sup>と述べている。また、通常の8時間業務におけるガイドラインとしても、40%HRRは身体的に高い負荷<sup>7)</sup>とみなされる。このような指針は30-40%ほどのHRRを労働負荷の上限とし、継続して監視する必要があることを示唆している。

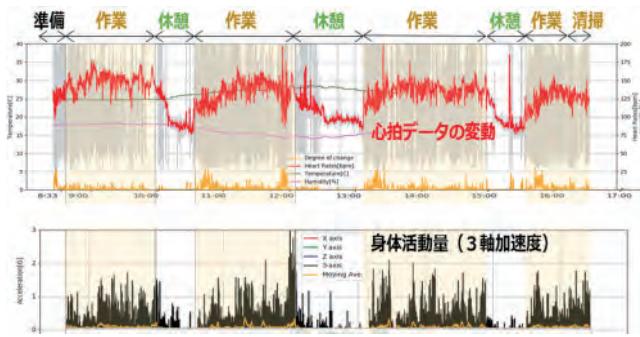


図-2 心拍数と身体活動量の終日の変動（作業員：鳶7）

表-2 被験者別的心拍数と労働負荷

被験者	推定		推定		平均		全時間帯		全時間帯		全時間帯	
	最大心拍数	休息時心拍数	最大心拍数	休息時心拍数	SD	平均心拍数	SD	平均%HRR	SD	平均%HRR	SD	平均活動量
補助1	178	76	93.00	4.64	90.71	5.71	14.43	5.60	96.14			
補助2	170	83	114.40	9.21	108.43	13.06	29.23	15.01	109.14			
補助3	193	75	93.33	4.51	89.40	6.35	12.20	5.38	159.6			
補助4	161	76	91.50	6.24	90.4	5.94	16.94	6.99	74.2			
鳶1	200	77	123.27	19.35	115.07	21.64	30.95	17.59	184.07			
鳶2	180	79	107.00	14.22	102.00	14.60	22.77	14.45	99.27			
鳶3	188	76	118.73	12.51	110.47	17.79	30.77	15.89	155.6			
鳶4	179	75	109.36	7.41	102.00	14.15	25.72	13.71	176.02			
鳶5	179	75	125.15	10.78	117.35	18.17	40.72	17.47	139.71			
鳶6	180	72	119.62	11.67	109.47	21.40	34.69	19.81	147.41			
鳶7	184	80	132.38	7.74	124.24	16.73	42.53	16.09	137.71			
鳶8	198	74	122.54	12.09	11.94	16.23	33.82	13.09	102.06			

鳶7の作業員を例として、実験で観測した心拍数と身体活動量の終日変動を図-2に示す。表-2には、作業員全員分の年齢から推定する最大心拍数と休息時心拍数、全時間帯での心拍数の平均と標準偏差、全時間帯での%HRRの平均と標準偏差、全時間帯での平均身体活動量を示す。

作業補助員のなかで、補助2の作業員は身体活動量の高さに比べて平均%HRRが高く、これは補助2の作業員の年齢から推定される最大心拍数が低いことによるものと思われる。また、鳶1の作業員は全被験者のなかで、全時間帯において身体活動量が最も高かったが、作業時心拍数の平均%HRRはあまり高くなかった。

身体的な負荷の作業によって、安全限界を超えるデータ（30%HRR、および40%HRR）の割合を図-3に示す。各労働者のデータ総数のうち、30%HRR以上の負荷が全体時間の半分を超える作業員が複数いた。鳶3および鳶5-鳶8の作業員は、勤務時間の半分以上において、30%を超える高い負荷に直面しており、鳶5と鳶7の作業員は頻繁に40%HRRを超えており、安全性および健康上において危険である可能性がある。

鳶2は作業チームのなかで、職長と呼ばれる作業リーダーの役割を担当していた。撮影ビデオで確認すると、指示的な作業が多く、他作業員と比較して肉体的な労働を受け持つておらず、これがさほど心拍数が高くなっていない理由と思われる。

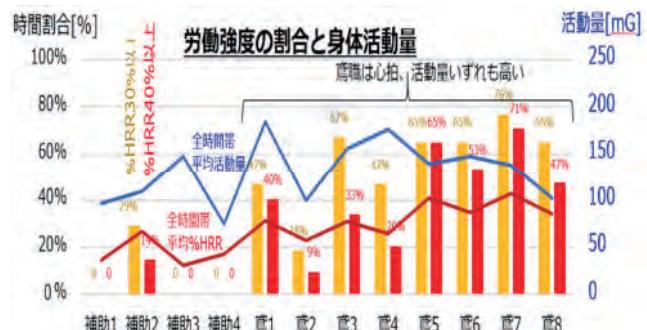


図-3 被験者別の%HRRの割合と活動量

鳶5~8の作業員は、身体活動量が比較的少ない割に、30%HRRおよび40%HRRが高い。彼らは、主に足場階段の高所で長時間の作業を担当しており、鉄骨材料の解体し、足場階段下において鉄骨材を待ち受ける他の作業員に搬送する作業を行なっていた。広い範囲を激しく歩き回る身体活動ではなかったが、鉄骨材を解体して床面へ降ろすといった作業が、心拍数の高い状態が継続された理由と思われる。

鳶7の作業員は、身体的な活動量は全作業員の中で最も活動量が高い。この作業員は足場階段下で解体された鉄骨材を受け取り、回収場所まで持ち運ぶ作業を担当していた。足場階段と鉄骨材の搬出場所との間を往復する搬送作業のため、全体的に身体活動量が高くなつたと推察される。

#### 4.3 心拍変動と身体活動量の相関関係

表3に全被験者の労働負荷を表わす%HRRと、身体活動量の相関係数の関係を表わす。いずれの作業員も%HRRと活動量の相関が高いことが分かる。

表-3 作業員別の実作業時間と相関係数

ID	被験者の職種	%HRRと活動量の相関係数 r
#1	補助1	0.885
#2	補助2	0.933
#3	補助3	0.961
#4	補助4	0.931
#5	鳶1	0.765
#6	鳶2	0.588
#7	鳶3	0.724
#8	鳶4	0.631
#9	鳶5	0.781
#10	鳶6	0.871
#11	鳶7	0.790
#12	鳶8	0.918

相関係数を求めるにあたり、時間経過とともに身体的な活動に応じて%HRRも変動しており、作業時間30分ごとの%HRRと身体活動量における相関係数を求めた。

図-4に示す労働負荷と身体活動量の関係図は、作業現場での職長（鳶2）の結果である。作業リーダーとして、自身の労働作業と他への作業指示、会議への出席のために現場から外れる時間もあった。このため、他の鳶職作業員と同レベルの労働負荷の大きさも見られたが、継続的に労働活動は行っていないことから、労働負荷と身体活動量の相関係数 ( $r=0.588$ ) はやや低い。

活動量[mG]と労働強度[%]

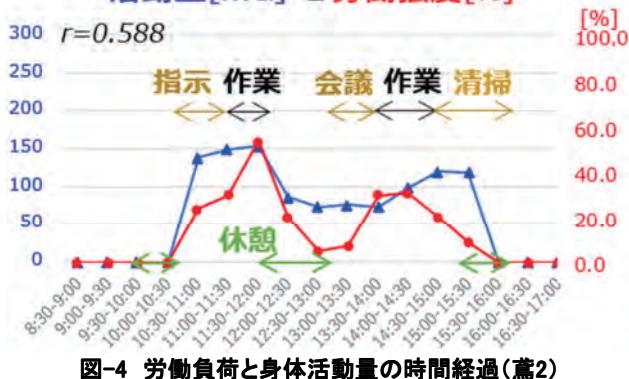


図-4 労働負荷と身体活動量の時間経過(鳶2)

図-5は鳶1、図-6は鳶7の%HRRと身体活動量の相関を示す。足場鉄骨の解体作業に関して、時間経過に応じた労働負荷と身体活動量、終日での相関を表わす。図5(鳶1)の作業員の相関係数は $r=0.765$ 、図6(鳶7)の作業員の相関係数は $r=0.790$ で、いずれも%HRRと身体活動量の相関は高い。

図5の鳶1の作業員は、午前に比べて午後からの労働負荷と活動量が高くなっている。当日の現場では天候悪化が予想されており、現場監督へのインタビューにより、午後からの作業ペースを意図的に速めたことを情報聴取している。このことが、鳶1の労働負荷が午後から上昇した要因と考える。

活動量[mG]と労働強度[%]

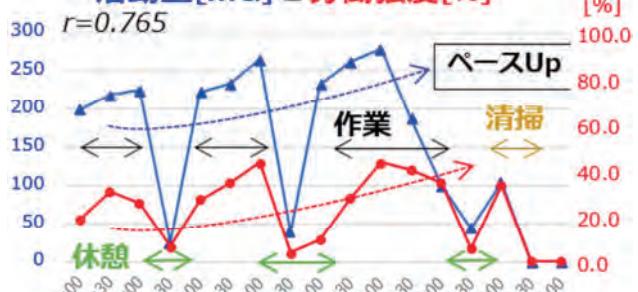


図-5 労働強度と身体活動量の時間経過(鳶1)

活動量[mG]と労働強度[%]

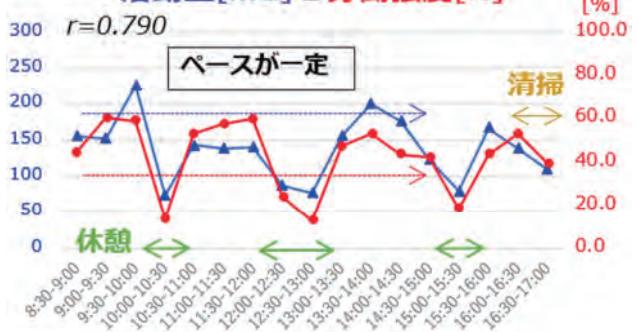


図-6 労働負荷と身体活動量の時間経過(鳶7)

図-6の関係図は、図-5とは異なる実験日と作業員の結果であるが、作業は変わらずに進行しており、作業と休憩で変化は見られるが一定のペースで作業が行われていた。他の鳶職作業員も、午前から午後にかけて、作業時間中の作業負荷と活動量は、同じ負荷の傾向が見られた。当日の現場においては、気象変動はなく、1日を通じて平均的な作業ペースが守られていた。途中での作業ペースに変化もなく、16:30過ぎまで作業が継続された。

午後の休憩後の15:30以降の作業では、%HRRと身体活動量がいずれも下がっている。これは作業終了前に清掃作業が実施されており、直接的な労働作業と比べ、%HRRと活動量が低くなっている。

## 5. 考察

### 5. 1 建設作業員の心拍と身体活動量

不規則な作業進行、労働条件の変化、日々の身体的条件の変化などにより、作業中に変化する建設労働者の身体的な負荷を継続して測定できる本システムの可能性を確認した。具体的には、スマートウェアを用いて測定した身体的な負荷の変動は、作業員の年齢、労働条件による身体的な負荷として、作業員ごとに顕著な差を示した。

この実験において、労働者の身体的な負荷は仕事のパターンによって、日中に大きく変化することが示された。今回の実験において、被験者である建設作業員の労働負荷は総じて高く、先行研究の指摘<sup>7)</sup>の従うと、連続作業を避けた方がいいとされる、 $\geq 40\%$ HRRの負荷が見られた。先行研究で

は、労働者的心拍数と生産性に着目し、>33%HRRが継続することで、その生産性の低下を指摘する報告<sup>8)</sup>がある。先行研究に示されるガイドラインは、作業員の過度な身体的な負荷を抑制し、生産能力の低下を回避するために、労働負荷の管理の必要性を示唆している。

## 5.2 生体情報による作業員の労務管理

本実験の結果より、建設作業員の心拍数は作業における活動量に比例し、心拍数と身体活動量の間に高い相関傾向が見られた。心拍数と活動量を比較することによって、作業員の潜在的な健康障害の発生を未然に防ぎ、健康障害の予測できる機会がある。具体的には、高い労働負荷の後に適切な休憩が確実に取られていることは、作業員の心拍数および活動量の変化を見る上で確認が容易となる。また、同じ活動量や作業タスクを実行する作業員の間で、身体的な応答が異なる場合、作業現場において異常状態を引き起こす潜在的な要因を見つけられる可能性がある。さらには、高い労働負荷が継続されるが作業進捗が停滞し、予定する工程計画が満たされない場合、作業員の労働負荷を把握しながら、作業員の増員や適切な計画変更を定量的に判断してもよい。こういった知見は、過度の身体的な負荷に直面しないように、作業員間において身体的な負荷を考慮した新たな作業方法の設計につながるかもしれない。

本研究の実用的な効用として、建設業就業者の意識に関連する心拍数を観察することにより、作業員の労働負荷を定量的に把握できることである。普段から建設作業員の心拍変動をモニタリングし、建設業就業者の作業中の労働負荷および活動量を労務管理として把握し、建設作業員の作業環境の改善や労働管理に繋げることが利用できる。

これら結果に基づいた将来の研究では、身体的な負荷が建設現場においての生産性の損失や事故に対する安全性、および怪我や病気などの健康上の被害に、どのように関係しているかを判断することが可能になるかもしれない。今後、さらに詳細な生体情報の計測し、作業員の労働における身体的な負荷を測定することにより、安全性に配慮した生産性向上の検討に役立てたい。

## 6.まとめ

スマートウェアを使用した生体情報の測定システムを開発し、実際の建設現場において 12 名の建設作業員の労働負荷と身体活動量を測定し、本システムの有効性・有用性を調べた。進行中の作業のなかで、%HRR を指標として用い、作業員の身体に影響を及ぼす負荷を確認することができた。ホルター心電計や 12 誘導心電図による測定は、作業活動量の激しい建設現場の労働作業に適用するのは非常に困難であるが、本システムのようなス

マートウェアを用いて心拍数を連続的に測定し、作業員ごとの心拍数を正規化して定量比較できることの実用的な意義は大きい。今回の実証実験では、労働者の職種や年齢、時間経過により、労働負荷がどのように変化するのかを理解するための豊富な情報が収集できた。これらの検討は、労働者の過度な労働負荷や疲労を軽減し、健康への被害を回避することで、生産性を維持しながら労働者の安全性の向上に寄与すると考える。

## 7.本研究における今後の課題

実験を実施した建設現場は、構造的に天井が存在し、基本的には屋内構造物であった。本システムは、無線機材および通信機器、PC サーバを用いてネットワークを構築しているが、全天候型に対応した性能は有していない。屋外作業の土木工事や造成工事を想定する場合には、各機材に対し、防水性能が必要と考える。また、梅雨や夏場の労働である場合、作業員の発汗により、何度も下着を着替えることがあり、長時間のスマートウェアの着用には課題があると予想される。

**謝辞:**本研究は国土交通省平成29年度建設技術研究開発助成制度政策課題解決型「建設現場におけるスマートウェアを用いた安心・安全及び生産性向上IoTシステムの開発」の助成を受けたものである。本研究の遂行に関して協力・助言いただいた立命館大学 建山和由先生、石田修一先生（現東北大）東京理科大学 小林和博先生（現青山学院大学）、国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所 高津知司先生、野村正之先生に謹んで感謝する。

## 参考文献

- 1) 建設産業の現状と課題-国土交通省,  
<http://www.mlit.go.jp/common/001149561.pdf>
- 2) 建設産業をめぐる現状と課題-国土交通省,  
<https://www.mlit.go.jp/common/001221442.pdf>
- 3) Sungjoo Hwang, et.al., Wristband-type wearable health devices to measure construction workers' physical demands, Automation in Construction, 83, PP.330~340, 2017
- 4) U.C. Gatti, et al. An exploratory study of the relationship between construction workforce physical strain and task level productivity, Constr. Manag. Econ. 32 (6), PP.548~564, 2014
- 5) Naruhiro Shiozawa, et al., Measurement of Electrocardiogram in Water with the Shirt-Type Electrocardiogram Electrode, The IEEE Conference on Biomedical and Health Informatics, 2018
- 6) K. Norton, et al., Position statement on physical activity and exercise intensity terminology, J. Sci. Med. Sport 13(5), pp.496~502, 2010
- 7) J. Ilmarinen, Job design for the aged with regard to decline in their maximal aerobic capacity: part I—guidelines for the practitioner, Int. J. Ind. Ergon. 10 (1), PP.53~63, 1992
- 8) N. Gupta, et al., Face Validity of the Single Work Ability Item: Comparison with Objectively Measured Heart Rate Reserve over Several Days, Int. J. Environ. P. Health, 11, pp.5333-5348, 2014