

## 推薦論文

## 知的生産性と心拍数との関係の検証

堀田 竜士<sup>1,a)</sup> 小村 晃雅<sup>1</sup> 千葉 祥子<sup>1</sup>

受付日 2020年8月27日, 採録日 2020年12月1日

**概要:** 本研究は、携帯型生体センサで取得できる生理指標と、知的作業の成績との関係を明らかにすることを目的とした。特に、生理指標の個人差に依存しないモデルを導出することを目指した。生理指標として心拍数 (HR) を、知的作業として計算課題を採用した。仮説は、HR と知的作業の成績は逆 U 字の関係を示す、とした。被験者に以下の 2 条件で課題を与えた。統制条件では、2 桁の加算・減算を行う計算課題を与えた。実験条件では、同様の計算課題と 1 桁の暗算課題を同時に与えた。2 条件の計算課題の正解数の変化率と、課題中の HR の平均値、標準偏差、180 拍の単純移動平均の標準偏差の上昇率との関係を分析した結果、生理指標の個人差に依存しない以下の 2 点の結論を得た。(1) 回帰分析の結果、HR の平均値・標準偏差の上昇率と、計算課題の正解数の変化率の関係について、線形の 1 次式よりも逆 U 字の 2 次曲線のモデルがよくあてはまることが示された。特に HR の平均値は、分散分析の結果と係数が回帰式に与える影響が共に 5%水準で有意だったため、知的作業の成績予測に有用である可能性がある。(2) HR の平均値・標準偏差が中央値以上の群では、HR の各指標の上昇率と計算課題の正解数の変化率との間に強い負の相関がみられた ( $r = -.793, -.741, p < .01$ )。つまり、実験条件で HR が大きく上昇する被験者は、計算課題の成績が大きく下がる傾向にある。知的作業中の HR の上昇を抑制すれば、成績低下を予防できる可能性が示唆された。

**キーワード:** 知的生産性, 知的作業, 心拍数, 心拍変動

## Verification of Relationship between Intellectual Productivity and Heart Rate

RYOJI HORITA<sup>1,a)</sup> AKINORI KOMURA<sup>1</sup> SHOKO CHIBA<sup>1</sup>

Received: August 27, 2020, Accepted: December 1, 2020

**Abstract:** The purpose of this study was to clarify relationship between physiological indices obtained by portable biosensors and performance of intellectual tasks. We aimed to derive a model that doesn't depend on individual differences. Heart rate (HR) was used as a physiological index, and calculation tasks were used as intellectual tasks. Subjects were given tasks under two conditions. In control condition, a calculation task was given, and in experimental condition, other calculation task and a one-digit mental arithmetic task were given simultaneously. The relationship between rate of change in the number of correct answers in calculation tasks and rate of increase of HR in average, standard deviation, and standard deviation of simple moving average of 180 beats in the task was analyzed. The main results of this study were the following two points; (1) The regression analysis showed the inverse U-shaped quadratic curve model was fitter than linear model. (2) In groups which the average and standard deviation of HR were greater than the median, there were strong negative correlation between the rate of increase in each index of HR and the rate of change in the number of correct answers for the calculation task ( $r = -.793, -.741$ , both  $p < .01$ ).

**Keywords:** intellectual productivity, intellectual task, heart rate variability

## 1. はじめに

企業や研究機関等において、知的生産性の向上が課題と

なっている。知的生産性とは知的作業の効率を表す [1]。知的作業は情報処理、知識処理、知識創造の 3 つに分類される [2]。多くの企業や研究機関等では、これらの知的作業を

<sup>1</sup> 富士ゼロックス株式会社  
Fuji Xerox Co., Ltd., Yokohama, Kanagawa 220-8668, Japan

<sup>a)</sup> ryoji.horita@fujixerox.co.jp

本論文の内容は 2019 年 11 月のグループウェアとネットワークサービスワークショップ 2019 にて報告され、グループウェアとネットワークサービス研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

組み合わせながら日々の業務を行っている。そのため、知的作業の成績を向上させることによって、知的生産性の向上に寄与できると考えられる。

知的作業の成績は、生理指標と相関がみられることが明らかになっている [3]。現状では複数の非携帯型の生体センサから得られた生理指標を用いる研究が主に行われているが、これらのセンサの装着は、企業や研究機関等の従業員にとって負荷が大きい。一方、近年、携帯型の生体センサが普及し始めている。携帯型の生体センサは、非携帯型のセンサと比較して、装着の負荷が小さく、長時間の連続的なデータ取得が可能であるものが多い。そのため、携帯型の生体センサから得られる生理指標を用いて知的作業の成績が予測できれば、作業中の成績をつねにモニタリングでき、成績の予測値が低下した際に適切なフィードバックを与えることができ、知的作業の成績の向上に寄与できる可能性がある。しかし、携帯型の生体センサから得られるデータは種類が限られていることが多いため、少ない種類の生理指標を用いた知的作業の成績の予測が必要である。

加えて、既存研究 [3] では推定結果に対する生理指標の寄与度に個人差が大きく、被験者間に共通する 1 つのモデルを導出できていない。モデルの汎用性や計算負荷の大きさを考慮すると、生理指標の個人差に依存しないモデルの導出が求められる。

以上をまとめると、生理指標を用いた知的作業の成績予測に関する課題は、以下の 2 点に集約される。

1. 非携帯型の生体センサは、測定負荷が大きく長時間のデータ取得が困難であるため、実用性が低い。
2. 推定結果に対する生理指標の寄与度に個人差が大きい。

本研究は、携帯型の生体センサで取得可能な生理指標と、知的作業の成績との関係を明らかにすることを目的とする。特に、生理指標の個人差に依存しないモデルを導出することを目指す。そのために、多くの携帯型の生体センサで取得可能な生理指標である心拍数と、代表的な知的作業の 1 つである計算課題の成績との関係を検証する。このことによって、将来的には、知的作業の連続的な成績予測を可能にすることを目指す。

本稿は以下のような構成である。2 章で知的作業を含む認知課題と心臓血管反応との関係や、認知能力・知的作業の成績と心拍変動との関係を明らかにした関連研究をあげ、本研究の位置づけを示したうえで、仮説を提示する。3 章で仮説を検証するための実験方法について述べる。4 章で実験結果、5 章で結果から導出される考察を述べ、6 章でまとめを行う。

## 2. 関連研究

### 2.1 認知課題と心臓血管反応との関係

知的作業を含む認知課題を行った際の人の心臓や血圧の反応、つまり心臓血管反応に関する研究は多数行われてき

た。Williams [4] は、ストレス下における人の心臓血管反応を以下の 2 つのパターンに分類した。パターン 1 は、心筋収縮活動の増大による心拍数および血圧の上昇がみられるもので、暗算等、能動的対処が求められる課題を実施しているときに生じる。パターン 2 は、抹消血管の収縮による心拍数の減少、および血圧の上昇がみられるもので、恐怖映像視聴等、明確な対処行動がない課題を実施しているときに生じる。

このような異なる課題に対する心臓血管反応の分化を説明しようと試みる研究は複数存在する。Obrist [5] は、能動/受動的対処モデルを提示した。本モデルは、心臓血管反応の分化を、課題に対する認識の違いによって説明した。能動的対処においては、課題の遂行者は、「努力次第で課題によって引き起こされるストレスを低減できる」と認識し、心拍数の上昇が引き起こされる。一方、受動的対処においては、課題の遂行者は「課題によるストレスは耐えるしかない」と認識し、抹消血管の収縮が引き起こされる。前者は Williams [4] のパターン 1、後者はパターン 2 の反応と類似する。

Lacey ら [6] は、環境の取り入れ/拒否モデルを提示した。本モデルでは、課題に対する心臓血管反応の分化を、外界の環境に対する意識づけの側面から説明する。環境の取り入れでは、外界の出来事に積極的に注意が払われ、心拍数が減少する。環境の拒否では、外界の出来事は積極的に無視、もしくは拒否され、心拍数は上昇する。

Biascovich ら [7] は、挑戦/脅威モデルを提示した。本モデルは、成果が求められる課題における心臓血管反応の分化を、個人の資源（知識・能力）と課題に求められる需要（危険・不安・労力）のバランスの側面から説明したものである。資源が需要を上回る挑戦時には、心拍数の増加および血圧の減少がみられる。需要が資源を上回る脅威時には、心拍数・血圧双方の増加がみられる。

このように、認知課題に対する心臓血管反応の差異を明らかにした研究は多いが、これらの課題の成績と心臓血管反応との関係を明らかにした研究は少ない。Biascovich ら [7] は、挑戦時の方が脅威時よりも、引き算課題の成績が回答数・正答数共に高く、心拍数も高いことを示した。岩永ら [8] は、ピアノの実技試験における不安反応と実技試験の成績との関係を分析し、実技試験の客観的成績が高い被験者は、テスト前の心拍数がテスト後と比較して低いことを明らかにした。特にテストが行われる実験室への入室直前の心拍が抑えられ、退出後に一時増加する after discharge 現象がみられることを示した。しかし、知的作業の成績と心臓血管反応との関係を明らかにした研究の蓄積は不足している。特に本研究が扱う心拍数と知的作業の成績との関係を示した研究は少ない。近年、企業や研究機関等で知的作業の割合が増加しており、その効率性が求められるため、知的作業の成績と心拍数との関係を明らかに

できれば、知的生産性の向上に寄与できると考える。

## 2.2 心拍変動を用いた認知能力、知的作業成績の推定

近年の生体センサ技術の発達により、センサが小型化・非侵襲化したことによって、生体センサから得られるデータと知的作業にかかわる作業の成績との関係を明らかにすることを試みる研究が行われてきた。

知的作業の成績の維持のために必要と考えられる認知能力の水準を、心拍変動から得られる特徴量を用いて推定した研究 [13] では、認知能力水準と心拍変動の大きさとの間に強い負の相関があること、機械学習により算出した認知能力水準の推定値と、実験により得られた実測値との間に強い正の相関がみられたことが報告されている。一方、認知能力水準と知的作業の成績との関係は検証されていないため、知的作業の成績を心拍変動から得られる特徴量を用いて推定可能かは明らかになっていない。

心拍変動と瞳孔径の2つの生理指標を用いて知的作業の成績の推定を行った研究 [3] では、一定の推定精度は実現されたものの、推定結果に対する各生理指標の寄与度の個人差が大きく、全被験者に共通する1つのモデルを導出できていない。また心拍変動の測定に非携帯型のセンサを用いており、被験者の測定負荷が大きいことが予想される。

ゆえに本研究では、被験者の測定負荷が小さい携帯型の生体センサで多くの場合取得可能な生理指標である心拍数と知的作業の成績を明らかにすることを目指す。特に、既存研究で課題となっている被験者間に共通するモデルを導出することを目指す。

## 2.3 仮説

本研究では、以下の仮説を立てた。

- 仮説：実験中の心拍数と知的作業の成績は、逆U字の関係を示す。

課題成績と心理指標との関係を明らかにした研究として、Yarkesら [9] は、マウスに迷路を解かせる課題を与えた際、学習効率と覚醒度との間に逆U字の関係があることを示した。覚醒度は課題失敗時の刺激強度を指標とした。刺激が与えられないときや非常に強い刺激を与えた際は学習効率が下がり、中程度の刺激を与えた際に最も学習効率が上がることを明らかにした。

Spence [10] は、不安と課題遂行量との関連について、逆U字関係を仮定した。不安は一種の活性動因と見なされ、不安が低すぎる場合は反応が鈍くなるため、課題遂行量も低くなる。逆に不安が高すぎる場合には、妨害反応や拮抗反応が強まり、課題遂行量が減少する [8]。

Easterbrook [11] は、覚醒の程度と選択的作業の成績との間に逆U字関係が存在することを示した。低覚醒状態では、課題を行うのに必要な手がかりと不必要な手がかりの両方を認知してしまうため、成績が低くなる。また高覚醒

状態では、必要な手がかりに対する知覚も低下するため、成績が低下する。

以上の研究で示されたように、様々な課題の遂行能力は、覚醒や不安といった心理指標と逆U字の関係があることが明らかになっている。一方、これらの心理指標を代替する生理指標として、心拍数が用いられている。岩永ら [8] は、不安の生理指標として心拍数を採用し、ピアノの実技試験の成績との関連を調査した。Yudaら [12] は、覚醒の生理指標として心拍数を採用し、青い光が覚醒状態に与える影響を分析した。

以上の研究から、覚醒や不安といった心理状態を代替する生理指標として用いられる心拍数と、作業成績との間には、逆U字の関係が存在することが推測される。ただし、実験環境下では、被験者は特殊な環境で作業を行うため、低覚醒（または不安）状態であることは考えにくく、中程度から高程度の覚醒（または不安）状態になることが予測される。そのため、実験環境下の心拍数と作業成績との関係は、逆U字の頂点付近から右側のみ、すなわち、心拍数が上昇するにつれて成績が下がる部分のみが観察できる可能性が高い。

さらに、心拍変動特徴量の水準によって、認知能力と心拍変動特徴量との相関が変化することを示した研究も存在する [13]。本研究でも心拍変動特徴量の1つである心拍数を生理指標に採用するため、同様の現象が生じる可能性がある。そこで、心拍数が異なる水準の被験者の知的作業の成績と心拍数との関係も分析した。

## 3. 実験方法

### 3.1 研究対象

以下の3つの条件を満たす健康者33名を研究対象とした。

- (1) 直近の健康診断で聴覚異常と診断されていない。
- (2) 心電図が洞調律を示す。
- (3) 学歴が大卒以上。

(1)は後述する暗算課題で音声を用いるため、(2)は正常な心拍数のデータを取得する必要があるため、(3)は後述する計算課題の成績に学歴が与える影響を抑えるために条件に加えた。

全員が実験実施前に本研究への参加について口頭による説明を受け、参加同意書に署名した。

### 3.2 課題

以下の2種類の課題を実施した。統制条件では計算課題のみを、実験条件では、計算課題に加えて、暗算課題を同時並行で実施した。

#### 3.2.1 計算課題

知的作業として、2桁の加算・減算を採用した。知的作業の選考基準として、体動による心拍数への影響を最小限

に抑えるため、作業中の体動が少ないものを選択した。加えて、前述のとおり、知的作業の成績と心拍数との関係を明らかにした研究は少ないため、単純な知的作業との関係の検証から始めることが妥当と考え、1章で示した知的作業の3つの分類のうち、最も単純な情報処理に該当する計算課題を採用した。

ExcelのRandom関数を用いて2種類の問題を作成した。1ページに40問の問題を20ページ、計800問の問題を用意した。

### 3.2.2 暗算課題

被験者の心拍数に影響を与える課題として、1桁の暗算を採用した。暗算課題は心拍数を上昇させることが複数の研究で明らかになっている [4], [6], [14]。

既存研究 [15] を参照したうえで予備実験を行い、難易度を調整した。20秒間に1桁の数字が4つと問題の区切りを示す効果音が流れる音声データを作成し、実験時にPCで音声データを再生した。被験者に対して、読み上げられた数字を暗算で足していき、4つの数字が読み上げられた時点で、4つの数字をすべて足した値を解答欄に記入するよう指示した。読み上げられた数字をメモすること、暗算課題を無視して計算課題の回答を進めることは控えるよう指示した。

### 3.3 プロトコル

課題以外の要因による心拍数への影響を最小限に抑えるため、表1に示した制限事項を設けた。被験者に対して、実験前日の21時以降、激しい運動とカフェイン・アルコールの摂取を行わないこと、実験前日に7時間以上の睡眠をとること、直近の食事を実験開始時刻の2時間以上前にとることを指示した。日内変動が心拍数に与える影響を抑えるため、実験は午前10時から12時の間に実施した。室温・外光の影響を抑えるため、空調によって室温を24度に設定し、外光を遮光した。1度に1名から4名の被験者を対象に実験を実施した。複数人を対象に実験を行う場合は、被験者間の距離が心拍数に与える影響を抑えるため、近接学 [16] における社会距離に該当する1.5m以上の距離をとり、横並びに着席するよう指示した。

実験環境の俯瞰図を図1に示す。各被験者の前に配置された机の上には計算課題、筆記用具、生体センサが配置された。実験者は被験者の前方に配置された席に着席した。イヤホンの装着の有無が心拍数に与える影響を抑えるため、計算課題の実施時は、被験者は統制条件・実験条件を問わず、イヤホンを装着するよう求められた。実験者は、実験条件時のみ、音声操作用PCを操作して、暗算課題の音声データを再生した。統制条件時は音声は流さなかった。

実験の流れを図2に示す。被験者が着席した後、研究目的の説明を行い、実験前日の指示内容の遂行状況を確認するアンケートに対する回答と、実験参加同意書への署名を

表 1 制限事項

Table 1 Limitations.

項目	制限事項	
被験者への指示	運動	実験前日の21時以降、激しい運動を行わない
	カフェイン	実験前日の21時以降、摂取しない
	アルコール	実験前日の21時以降、摂取しない
実験環境	睡眠	実験前日に7時間以上の睡眠
	食事	直近の食事を実験開始時刻の2時間以上前にとる
実験環境	日内変動	午前10時から12時の間に実験を実施
	室温	空調により、室温を24度に設定
	外光	遮光
	被験者間の距離	近接学 [16] における社会距離に該当する1.5m以上の距離をとって着席

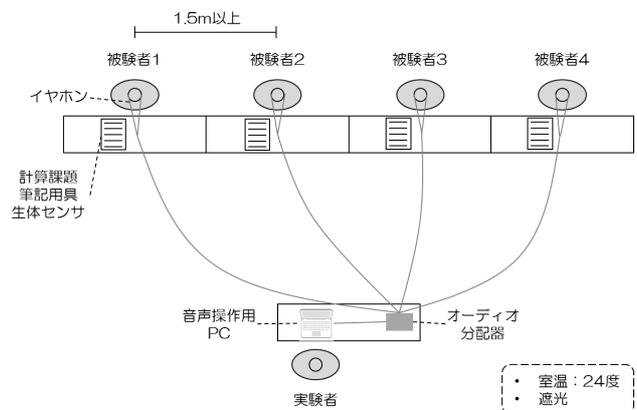


図 1 実験環境の俯瞰図 (被験者が4名の場合)

Fig. 1 Bird's-eye view of the experimental environment (when there are 4 subjects).

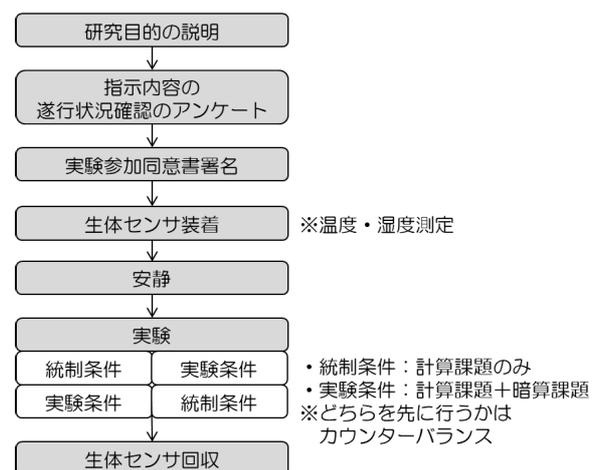


図 2 実験の流れ

Fig. 2 Experimental flow.

求めた。その後、携帯型の生体センサ (ユニオンツール社, myBeat®) を上胸部に装着した。被験者がセンサの装着を行っている間、実験室内の温度・湿度の記録を行った。被験者がセンサを装着した後、座位・閉眼の状態です5分間の安静の時間を設けた。その後、3.2節で示した統制条件・

実験条件の課題を各 15 分間実施した。被験者には、できる限り早く正確に計算課題に回答するよう指示した。各条件の実施順序、および 2 種類の計算課題の出題順は、被験者間でカウンターバランスをとった。課題の実施後、生体センサを回収した。

### 3.4 測定

実験中の時刻および心電図を上述の生体センサを用いて記録した。心電図は 1,000 Hz で記録した。ユニオンツールの専用ソフトウェアによる解析から、1 拍ごとの R-R 間隔のデータを取得した。R-R 間隔とは、心電図に表れる最も鋭いピーク (R 波) の間隔であり、単位はミリ秒 (ms) で表される。得られた R-R 間隔のデータからエラーデータを除いたうえで、心拍や脈拍の測定で一般的に用いられる指標である 8 拍の単純移動平均 HR (bpm) (以下、HR と記す) を 1 拍ごとに算出した。生体センサが拍動を記録したタイミングが  $t$  のときの R-R 間隔を  $RRI(t)$  とすると、 $HR(t)$  は以下の式で算出した。

$$HR(t) = \left(60 / \sum_{t-7}^t (RRI(n))\right) / 8$$

上記の式で得られたデータを用いて、HR の平均値、標準偏差、ならびに長周期のゆらぎを示す 180 拍の単純移動平均の標準偏差を算出した。180 拍の単純移動平均を  $SMA(t)$ 、生体センサが拍動を記録したタイミングが  $t$  のときの HR を  $HR(t)$  とすると、 $SMA(t)$  は以下の式で算出した。

$$SMA(t) = \sum_{t-179}^t (HR(n)) / 180$$

平均値、標準偏差に関しては、課題 15 分間の全時間分のデータを分析対象とした。180 拍の単純移動平均の標準偏差に関しては、課題開始から 3 分間のデータは課題開始前のデータが反映されることを考慮し、後半 12 分間のデータのみを分析対象とした。なお、データの質を担保するため、洞調律の R-R 間隔が占める時間の割合が 80% 以上の被験者のデータのみを分析に使用した。

### 3.5 統計処理

統計処理には、IBM SPSS Statistics 20® を使用した。統制条件・実験条件の実施順序、および 2 種類の計算問題の出題順による計算問題の正解数の有意差の検定には、t 検定を用いた。正解数と HR の各指標との相関係数の算出には、Pearson の相関係数を用いた。HR の各指標の水準が異なる被験者の正解数と HR の各指標との相関係数の算出には、Spearman の相関係数を用いた。HR の各指標の水準が異なる被験者のバイアスの有無の確認には、カイ 2 乗検定および Mann-Whitney の U 検定を用いた。統制条件・実験条件の条件間における計算問題の正解数、および HR の有意差の検定には、t 検定を用いた。

## 4. 結果

### 4.1 概要

33 名中、センサエラーが発生した事例や、実験中の洞調律の割合が 80% 未満だった事例を除き、正常にデータを取得できた 27 名分のデータを分析対象とした。表 2 に、分析対象とした被験者の年代と性別を示す。年代に関しては 20 代の被験者数が多かったが、30 代から 60 代の被験者も存在した。性別に関しては男性の被験者数が多かった。

表 3 に、被験者の前日の睡眠時間、直前の食事からの経過時間、実験室の温度・湿度の平均値と標準偏差を示す。睡眠時間がやや短い被験者が存在したが、平均的にはおおむね 7 時間の睡眠をとっていた。直前の食事からの経過時間に関しては、全被験者において 2 時間以上が経過していた。朝食を摂らなかった被験者が複数存在したため、標準偏差がやや大きな値を示した。実験時の温度・湿度に関しても問題はみられなかった。

### 4.2 実施順序および計算課題の実施順による差

統制条件 (計算課題のみ) ・実験条件 (計算課題 + 暗算課題) の実施順序による計算課題の回答状況の差を検証した。統制条件に関しては、回答数 ( $p = .201$ )、正解数 ( $p = .223$ )、誤答数 ( $p = .265$ )、実験条件に関しては、回答数 ( $p = .401$ )、正解数 ( $p = .328$ )、誤答数 ( $p = .222$ ) となり、いずれも有意差はみられなかった。

次に、2 種類の計算問題の出題順による差を検証した。統制条件の回答状況に関しては、回答数 ( $p = .531$ )、正解数 ( $p = .482$ )、誤答数 ( $p = .704$ )、実験条件の回答状況に関しては、回答数 ( $p = .458$ )、正解数 ( $p = .406$ )、誤答数 ( $p = .411$ ) となり、いずれも有意差はみられなかった。

以上から、統制条件・実験条件の実施順、および計算問

表 2 分析対象とした被験者の年代と性別

Table 2 Age and gender of subjects.

年代		性別	
20代	15	男性	21
30代	4	女性	6
40代	2		
50代	3		
60代	3		
計	27	計	27

表 3 被験者と実験室の状況

Table 3 Situation of laboratory and subjects.

	睡眠時間(h)	直前の食事からの経過時間(h)	温度(°C)	湿度(%Rh)
平均値	6.93	5.80	24.49	42.33
標準偏差	0.70	5.74	1.08	8.30

表 4 統制・実験条件による差

Table 4 Differences of control / experimental conditions.

	平均値		t 値	自由度	有意確率 (両側)
	統制条件	実験条件			
回答数	261.70	135.67	13.50	26	.000
正解数	249.70	126.96	14.41	26	.000
誤答数	12.00	8.70	1.88	26	.071
HR平均値	79.48	83.74	-6.06	26	.000
HR標準偏差	4.12	5.18	-3.15	26	.004
HR180拍単純 移動平均標準偏差	1.37	2.00	-3.94	26	.001

題の出題順は、計算課題の回答状況に統計的に有意な影響を与えないことを確認できた。

### 4.3 統制・実験条件による差

表 4 に、統制条件（計算課題のみ）・実験条件（計算課題 + 暗算課題）における計算課題の回答状況と HR の各指標の差を示した。計算問題に関しては、回答数、正解数に有意差がみられた ( $p < .001$ )。HR に関しては、平均値 ( $p < .001$ )、標準偏差 ( $p < .01$ )、180 拍の単純移動平均の標準偏差 ( $p < .01$ ) のすべてにおいて有意差がみられた。

### 4.4 正解数変化率と HR の各指標の上昇率との関係

#### 4.4.1 全体の相関

計算課題の正解数の変化率と HR の各指標の上昇率との関係を分析した。正解数の変化率  $C$  は、統制条件の正解数を  $c_1$ 、実験条件の正解数を  $c_2$  としたとき、以下の式で算出した。

$$C = (c_2 - c_1) / c_1$$

HR に関しては、平均値、標準偏差、180 拍の単純移動平均の標準偏差の各指標について、上昇率を算出した。上昇率を  $I$ 、統制条件の HR の各指標の値を  $hr_1$ 、実験条件の HR の各指標の値を  $hr_2$  としたとき、以下の式で算出した。

$$I = (hr_2 - hr_1) / hr_1$$

そのうえで、正解数の変化率と HR の各指標との相関係数を算出した結果を表 5 に示す。正解数の変化率と HR の標準偏差の上昇率との間に、有意な負の相関 ( $r = -.425$ ,  $p < .05$ ) がみられた。その他の HR の指標と正解数の変化率との相関はみられなかった。

#### 4.4.2 心拍数の水準が異なる被験者の相関

心拍数の水準が異なる被験者の正解数の変化率と HR の各指標との相関を分析した。心拍変動の特徴量はばらつきが大きく、すべてが正規分布に従っていると仮定することは難しいと考えられる [13]。そこで、HR の各指標の中央値を基準として、HR の各指標の値が中央値より高い被験者と低い被験者に分類したうえで、正解数の変化率と HR

表 5 正解数変化率と HR の各指標の上昇率との相関

Table 5 Correlation between the rate of change in the number of correct answers and the rate of increase in each index of HR.

		HR 上昇率		
		平均値	標準偏差	単純 移動平均 標準偏差
正解数 変化率	相関係数	-0.29	<b>-.425*</b>	-0.23
	有意確率	0.143	0.027	0.248
* 5% 水準で有意 (両側)				

表 6 HR の各指標の水準が異なる被験者の計算課題の正解数変化率と HR の各指標の上昇率との相関

Table 6 Correlation between the rate of change in the number of correct answers of calculation task and the rate of increase in each index of HR among subjects with different levels of each index of HR.

	中央値以上			中央値以下		
	HR 平均値 上昇率	HR 標準偏差 上昇率	HR 単純 移動平均 標準偏差 上昇率	HR 平均値 上昇率	HR 標準偏差 上昇率	HR 単純移動平均 標準偏差 上昇率
相関係数	<b>-.793**</b>	<b>-.741**</b>	-.160	.088	.363	.071
有意確率 (両側)	.001	.002	.584	.775	.223	.817
N	14	14	14	13	13	13
** 1% 水準で有意 (片側)						

表 7 カイ 2 乗検定結果

Table 7 Results of Chi-square test.

	HR 上昇率	値	自由度	漸近有意確率 (両側)
年代	平均値	4.30	4	0.37
	標準偏差	6.71	4	0.15
性別	平均値	0.68	1	0.41
	標準偏差	0.68	1	0.41

の各指標の上昇率との相関係数を算出した結果を表 6 に示す。HR の平均値の上昇率が中央値以上の群において、正解数の変化率と HR の平均値の上昇率との間に、有意な強い負の相関がみられた ( $r = -.793$ ,  $p < .01$ )。HR の標準偏差の上昇率でも同様の傾向がみられた ( $r = -.741$ ,  $p < .01$ )。180 拍の単純移動平均の標準偏差の上昇率が中央値以上の群、および HR の各指標の上昇率が中央値以下の群では、有意な相関はみられなかった。

バイアスの有無を確認するため、HR 平均値上昇率および HR 標準偏差上昇率の高群・低群に分類された被験者の年代・性別に関するカイ 2 乗検定を実施した結果を表 7、前日の睡眠時間、直前の食事からの経過時間、温度、湿度に関する Mann-Whitney の U 検定を実施した結果を表 8 に示す。どの項目に関しても有意差はみられなかった。

表 8 Mann-Whitney の U 検定結果

Table 8 Results of Mann-Whitney U test.

	HR 上昇率	Mann- WhitneyのU	Wilcoxon のW	Z	漸近有意 確率(両側)
前日の 睡眠時間(h)	平均値	61	166	-1.64	0.10
	標準偏差	72	177	-1.04	0.30
直前の食事から の経過時間(h)	平均値	67	172	-1.18	0.24
	標準偏差	76.5	181.5	-0.71	0.48
温度(°C)	平均値	89	180	-0.10	0.92
	標準偏差	86.5	191.5	-0.22	0.83
湿度(%Rh)	平均値	88.5	193.5	-0.12	0.90
	標準偏差	89	180	-0.10	0.92

表 9 HR 平均値の標準化係数と有意確率

Table 9 Standardization coefficient and p-value of average of HR.

	非標準化係数		標準化係数	t	有意 確率
	回帰係数	標準誤差	ベータ		
HR平均値上昇率	2.324	1.448	.687	1.605	.121
HR平均値上昇率 <sup>2</sup>	-.218	.087	-1.069	-2.498	.020
(定数)	-52.059	5.109		-10.189	.000

表 10 HR 標準偏差の標準化係数と有意確率

Table 10 Standardization coefficient and p-value of standard deviation of HR.

	非標準化係数		標準化係数	t	有意 確率
	回帰係数	標準誤差	ベータ		
HR標準偏差上昇率	0.053	0.151	.141	0.353	.727
HR標準偏差上昇率 <sup>2</sup>	-.002	.001	-0.630	-1.582	.127
(定数)	-48.584	3.892		-12.484	.000

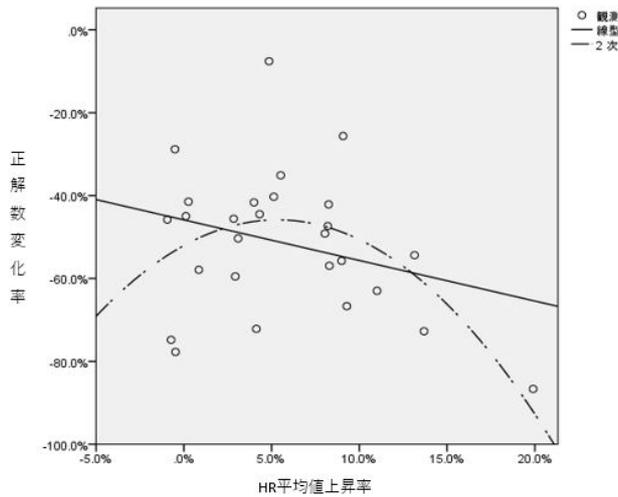


図 3 正解数変化率と HR 平均値の上昇率との関係

Fig. 3 Relationship between the rate of change in the number of correct answers and the rate of increase in the average of HR.

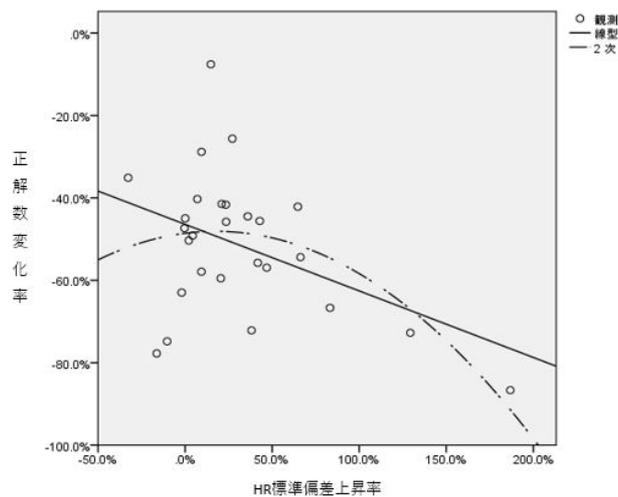


図 4 正解数変化率と HR 標準偏差の上昇率との関係

Fig. 4 Relationship between the rate of change in the number of correct answers and the rate of increase in the standard deviation of HR.

#### 4.4.3 モデルの適合性の比較

HR の平均値と標準偏差に関して、HR の各指標の水準が中央値以上の群と以下の群で計算課題の正解数との相関

関係が大きく変化したことから、これらの HR の指標の上昇率と、計算課題の正解数の変化率との関係は、1 次式では表せない可能性が示唆された。そこで、これらの 2 つの指標に関して、線形 (1 次式) および曲線推定 (2 次式) の回帰分析を行い、モデルの適合性を比較した。1 次式の近似直線および 2 次式の近似曲線を描いた散布図を図 3、図 4 に示す。

まず HR の平均値に関して回帰分析を行った結果、モデルのあてはまりの良さを示す決定係数は、線形 (1 次式) で  $R^2 = .084$  ( $p > .05$ ), 2 次式で  $R^2 = .273$  ( $p < .05$ ) であり、2 次式でのみ 5%水準で有意だった。HR の平均値の標準化係数と有意確率を表 9 に示す。係数である HR 平均値の上昇率の 2 乗は、計算課題の成績の変化率を 5%水準で有意に説明することが分かった。

次に HR の標準偏差に関して回帰分析を行った結果、モデルのあてはまりの良さを示す決定係数は、線形 (1 次式) で  $R^2 = .181$  ( $p < .05$ ), 2 次式で  $R^2 = .258$  ( $p < .05$ ) であり、ともに 5%水準で有意だった。HR の標準偏差の標準化係数と有意確率を表 10 に示す。係数である HR の標準偏差の上昇率の 2 乗は、計算課題の成績の変化率を有意に説明しないことが分かった。

以上の結果から、HR 平均値および HR 標準偏差の上昇率の双方に関して、1 次式より 2 次式の方が、モデルの適合性が高かった。また図 1, 2 を見ると、ともに逆 U 字を示すことが分かった。ただし、今回観測できたのは、主に頂点付近から右側のデータのみだった。

## 5. 考察

4.2 節において、統制条件 (計算課題のみ)・実験条件 (計算課題 + 暗算課題) を比較すると、計算課題の回答数・正解数および HR の各指標に有意差がみられた。前者の計算課題の回答数・正解数に有意差がみられた理由として、実

験条件では、計算課題と暗算課題を同時並行で行うことによって、計算課題に対する集中力が低下した等が考えられる。マルチタスク状況では情報処理能力が低下することが既存研究でも指摘されている [17]。本研究の結果は、それらの報告と一致する。後者の *HR* の各指標に有意差がみられた理由として、実験条件で課された暗算課題の影響がみられたと考えられる。暗算課題は Williams [4] が示したパターン 1 を示す典型的な課題として認知されており、 $\beta$  アドレナリン作動性の交感神経興奮 [18]、および心臓迷走神経興奮の抑制 [19] によって心拍数が上昇することが明らかになっている。心拍数が上昇することにより、*HR* の平均値が上昇するとともに、ゆらぎの指標である標準偏差や 180 拍の単純移動平均の標準偏差も上昇したと考えられる。

本研究の主な結論は以下の 2 点である。1 点目は、回帰分析の結果、*HR* の平均値および標準偏差の上昇率と計算課題の正解数の変化率との関係は、線形の 1 次式よりも、逆 U 字の 2 次曲線の方が、モデルのあてはまりが良いことが示された。特に、*HR* 平均値に関しては、回帰分析における分散分析の結果と、係数である *HR* 平均値の上昇率の 2 乗が回帰式に与える影響がともに 5%水準で有意だったため、他の指標と比較して、計算課題の成績を予測する際に有用である可能性がある。

既存研究においては、不安や覚醒という心理指標と、様々な課題の成績との間に逆 U 字の関係があることが示されたが [9], [10], [11]、本研究によって、心理指標ではなく、生理指標である *HR* の平均値および標準偏差の上昇率と、知的作業である計算課題の成績との間に、逆 U 字の関係があることが示唆された。特に *HR* の平均値は、不安や覚醒の代替指標として用いられてきたように、これらの心理指標と *HR* の平均値は強い関係を持つことが示唆される。そのため、本研究においても、*HR* の平均値の上昇率と、知的作業である計算課題の成績に逆 U 字の関係がみられたと考えられる。これまで知的作業の成績と *HR* との関係を扱った研究は不足していたため、本研究の結果は、両者の関係を明らかにする一助になると考えられる。*HR* は多くの携帯型の生体センサで測定可能であるため、*HR* を用いて知的作業の成績を予測できれば、実際のオフィス環境においても測定・予測が可能であることが期待される。

ただし、本研究では、モデルのあてはまりの良さを示す決定係数の値は、必ずしも高いとはいえなかった。また、本研究で観測できたデータは、主に逆 U 字の頂点付近から右側のデータであった。今後さらなるモデルの適合性の検証のため、特に被験者の心拍数の変化率が低い状態のデータを収集する必要がある。

2 点目は、*HR* の平均値および標準偏差の上昇率が中央値以上の群においては、それらの指標と計算課題の正解数の変化率との間に 1%水準で有意な強い負の相関 ( $r = -.793, -.741$ ) がみられた。*HR* の指標の中央値は、*HR* 平均値上

昇率 (図 1) および *HR* 標準偏差上昇率 (図 2) の双方において、逆 U 字の頂点付近に位置する。そのため、中央値より右側の領域に限定すれば、*HR* の各指標の上昇率と計算課題の成績は線形の関係でとらえられる可能性が示唆された。つまり、暗算課題を与えられた際、心拍数が一定以上上昇する被験者は、知的作業の成績が大きく低下する可能性が高い。ゆえに、心拍数の上昇を抑えることによって、知的作業の成績の低下を予防でき、知的生産性の向上に寄与できる可能性がある。

ただし、本研究では、心拍数の上昇率と知的作業の成績との関連は示せたものの、知的作業の成績を低下させる原因を明らかにするには至らなかった。心拍数の上昇そのものが知的作業の成績に影響を与えた可能性もあるが、暗算課題が被験者に与えた心理状態等の他の要因、またはそれらの要因と心拍数の上昇との交互作用が、知的作業の成績に影響を与えた可能性も残されている。既存研究では、暗算課題は、日本語版 POMS の緊張–不安、怒り–敵意、疲労、混乱、活気の項目に有意な影響を与えることが明らかになっている [20]。暗算課題によって引き起こされる可能性が高いこれらの心理状態等が、知的作業の成績に影響を与えた可能性がある。さらに、特定状況下で引き起こされた心拍数の上昇のみが、計算課題の成績に影響を与える可能性も考えられる。今後は、心拍数の上昇以外の要因を統制した実験や、特定の心理状態と心拍数の上昇を引き起こすことが明らかになっている実験等を通じた検証を追加で実施することによって、知的作業の成績を低下させる原因の特定を進めることが期待される。

## 6. まとめ

本研究は、携帯型の生体センサでも取得可能な生理指標と、知的作業の成績との関係を明らかにすることを目的とした。特に、既存研究の課題であった生理指標の個人差に依存しないモデルを導出することを目指した。そのため、多くの携帯型の生体センサで取得可能な生理指標である心拍数と、代表的な知的作業の 1 つである計算課題の成績との関係を分析した。研究仮説は、心拍数と知的作業の成績は、逆 U 字の関係を示す、とした。一定の条件を満たした 33 名の被験者に、統制条件と実験条件の 2 つの条件で課題を与え、その結果を比較した。統制条件では、被験者に 2 桁の加算・減算を行う計算課題を与え、正解数を算出した。実験条件では、計算課題に加えて 1 桁の暗算課題を与え、統制条件と同様に、計算課題の正解数を算出した。両条件の計算課題の正解数の変化率と、心拍数の平均値、標準偏差、180 拍移動平均の標準偏差の 3 つの指標の上昇率との関係を、正常にデータを取得できた 27 名分のデータを対象に分析した。

その結果、生理指標の個人差に依存しない以下の 2 点の結論を得た。

1 点目は、回帰分析の結果、HR の平均値および標準偏差の上昇率と計算課題の変化率との関係は、線形の 1 次式よりも、逆 U 字の 2 次曲線の方が、モデルのあてはまりが良いことが示された。特に HR 平均値の上昇率に関しては、回帰分析における分散分析の結果と、係数である HR 平均値の上昇率の 2 乗が回帰式に与える影響がともに 5%水準で有意だったため、他の指標と比較して、計算課題の成績を予測する際に有用である可能性がある。ただし、本研究で観測できたデータは、主に逆 U 字の頂点付近から右側のデータであり、決定係数も必ずしも高くなかったことから、さらなるモデルの適合性の検証のために、特に HR の各指標の変化率が低い被験者のデータを収集する必要がある。

2 点目は、HR の平均値および標準偏差が中央値以上の群に関しては、HR の各指標の上昇率と計算課題の正解数の変化率との間に強い負の相関 ( $r = -.793, -.741$ , ともに  $p < .01$ ) がみられた。つまり、暗算課題を課された際、心拍数が大きく上昇する被験者は、知的作業である計算課題の成績が大きく下がる傾向にある。ゆえに、心拍数の上昇を抑えることによって、知的作業の成績の低下を予防でき、知的生産性の向上に寄与できる可能性がある。

上記 2 点の結論は、被験者間に共通するモデルであるため、既存研究と比較して汎用性が高いと考えられる。今後は、知的作業の成績に影響を与える要因の追求と、それらの要因が心拍数に与える影響の分析を行い、知的作業の成績向上に寄与する支援方法を探索していく。

付記 myBeat は、ユニオンツール株式会社の登録商標である。SPSS は、インターナショナル・ビジネス・マシーンス・コーポレーションの登録商標である。本稿は、堀田ら [21] に加筆・修正を加えたものである。

## 参考文献

- [1] 宮城和音, 内山皓介, 大林史明, 岩川幹生, 石井裕剛, 下田宏: 知的生産性評価のための集中指標の提案, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.16, No.1, pp.19-28 (2014).
- [2] 建築環境・省エネルギー機構: 知的創造とワークプレイス, 武田ランダムハウスジャパン (2010).
- [3] 國政秀太郎, 瀬尾恭一, 下田 宏, 石井裕剛: 知的作業中の生理指標計測による作業成績推定手法, 計測自動制御学会論文集, Vol.55, No.4, pp.260-268 (2019).
- [4] Williams, R.B.: Patterns of reactivity and stress, *Handbook of Stress, Reactivity and Cardiovascular Disease*, Matthews, K.A., Weiss, S.M., Detre, T., Demobroski, T.M., Falkner, B., Manuck, S.B. and Williams, R.B. (Eds.), pp.109-125, New York, John Wiley & Sons (1986).
- [5] Obrist, P.A.: *Cardiovascular psychophysiology: A Perspective*, New York, Plenum Press (1981).
- [6] Lacey, B.C. and Lacey, J.I.: Studies of heart rate and other bodily processes in sensorimotor behavior, *Cardiovascular psychophysiology: Current issues in response mechanisms, biofeedback and methodology*, Obrist, P.A., Black, A.H., Brener, J. and DiCara, L.V. (Eds.), pp.538-564, Routledge (1974).
- [7] Blascovich, J. and Mendes, W.: Challenge and threat appraisals: The role of affective cues, *Feeling and thinking: The role of affect in social cognition*, Forgas, J.P. (Ed.), pp.59-82, Cambridge University Press (2000).
- [8] 岩永 誠, 宇野 宏, 吉田一誠: テスト不安状況における不安反応の時系列変化と課題遂行量との関連, 行動療法研究, Vol.11, No.2, pp.119-126 (1986).
- [9] Yerkes, R.M. and Dodson, J.D.: The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation, *J. Comp. Neurol. Psychol.*, Vol.18, pp.459-482 (1908).
- [10] Spence, K.W.: Anxiety (drive) level and performance in eyelid conditioning, *Psychological Bulletin*, Vol.61, pp.129-139 (1964).
- [11] Easterbrook, J.A.: The effect of emotion on cue utilization and the organization of behavior, *Psychol. Rvw.*, Vol.66, No.3, pp.183-201 (1959).
- [12] Yuda, E., Ogasawara H., Yoshida Y. and Hayano J.: Enhancement of autonomic and psychomotor arousal by exposures to blue wavelength light: Importance of both absolute and relative contents of melanopic component, *Journal of Physiological Anthropology*, Vol.36, p.13 (2017).
- [13] 角田啓介, 千葉昭宏, 千明 裕, 吉田和広, 渡部智樹, 水野理: 心拍変動を用いた認知能力水準の逐次推定, 情報処理学会論文誌, Vol.58, No.2, pp.568-579 (2017).
- [14] Cacioppo, J.T. and Sandman, C.A.: Physiological differentiation of sensory and cognitive tasks as a function of warning, processing demands, and reported unpleasantness, *Biological Psychology*, Vol.6, pp.181-192 (1978).
- [15] Logie, H.R., Gilhooly, J.K. and Wynn, V.: Counting on working memory in arithmetic problem solving, *Memory & Cognition*, Vol.22, No.4, pp.395-410 (1994).
- [16] エドワード・T・ホール: かくれた次元, みすず書房 (1970).
- [17] Holding, L.: The Multitasking Monster, *Mindful Voice, Journal of Singing* 68, No.4, pp.451-455 (2012).
- [18] 田中豪一, 澤田幸展, 藤井力夫: 暗算と反応時間作業における心臓血管系ストレス反応の血行力学的対比, 心理学研究, Vol.64, No.6, pp.442-450 (1994).
- [19] 田中豪一, 澤田幸展, 藤井力夫: ストレス作業遂行時の迷走神経抑制—圧反射感度および呼吸性不整脈による推定—, 心理学研究, Vol.65, No.1, pp.9-17 (1994).
- [20] 山田晋平, 三宅晋司, 大須賀美恵子: 精神疲労を評価する指標の探索, 人間工学, Vol.48, No.6, pp.295-303 (2012).
- [21] 堀田竜士, 小村晃雅, 千葉祥子: 知的生産性と心拍数との関係の分析, 情報処理学会研究報告グループウェアとネットワークサービスワークショップ, pp.107-113 (2019).

## 推薦文

本研究は、装着の負荷が小さく、長時間の連続的なデータ取得が可能な携帯型生体センサで取得できる生理指標と、知的作業の成績との関係を明らかにすることを目的としたものであり、実用性・新規性の面から特筆すべきものであるため推薦する。

(グループウェアとネットワークサービス研究会主査  
齊藤 典明)



堀田 竜士 (正会員)

2011年東北大学大学院工学研究科修了。同年富士ゼロックス株式会社(現、富士フイルムビジネスイノベーション株式会社)入社。2020年名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。生体

情報を用いた知的生産性推定技術の研究に従事。



小村 晃雅

1988年横浜国立大学大学院工学研究科物質工学専攻博士課程前期修了。同年富士ゼロックス株式会社(現、富士フイルムビジネスイノベーション株式会社)入社。オフィスワークのワークスタイル研究に従事。



千葉 祥子

2014年東京工業大学大学院社会・人間科学系コース修了。同年富士ゼロックス株式会社(現、富士フイルムビジネスイノベーション株式会社)入社。コミュニケーションと創造に関する研究に従事。