

電子情報通信学会「著作権規程」の基本方針より

電子的利用については、著作者本人ならびに所属機関が著作者の著作物の全文を著作者の研究室や所属機関のホームページもしくはプレプリントサーバに掲載する場合、一定条件の下で出版社版 PDF もしくは早期公開版 PDF の掲載を許諾します。

※掲載条件等、詳細については「利用申請基準」を御覧ください。

本会出版物に掲載された論文等の著作物の利用申請基準より

条件 A : 権利表示 (例 copyrightc2013 IEICE)

条件 B : 出版社版 PDF(紙版をスキャンで作成したもの含) の掲載。著者最終版は不可。

条件 C : 出所の明示 (例 著作者名、書名 (題号)、雑誌名、巻、号、頁、発行年など)

条件 D : 著作者の了解

条件 E : IEICE Transactions Online トップページへのリンク

上記、公開基準に従い出版社版 PDF を公開いたします。

なお、IEICE Transactions Online トップページは下記になります。

<https://search.ieice.org/>

複数実験によるプログラミング学習時の脳波と心拍について

梅澤 克之[†] 中澤 真^{††} 中野美知子^{†††} 平澤 茂一^{†††}

[†] 湘南工科大学 〒251-8511 神奈川県藤沢市辻堂西海岸 1-1-25

^{††} 会津大学短期大学部 〒965-0003 福島県会津若松市一箕町大字八幡門田 1-1

^{†††} 早稲田大学 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

E-mail: †umezawa@info.shonan-it.ac.jp, ††nakazawa@jc.u-aizu.ac.jp, †††{nakanom,hira}@waseda.jp

あらまし 学習時の脳波を計測して学習状態を把握する研究が行われている。それらの研究では課題の難易度が上がると脳波 (β/α) の値も高くなると言われている。我々は脳波以外の生体情報も計測し、より詳細な学習状態を把握する研究を行っている。その研究の中で課題の難易度が上がると心拍数が低くなるという結果を得た。本研究では、参加者や対象とする課題が異なる複数の実験結果を分析することで、プログラミング学習時の心拍数と脳波の関係を明らかにする。

キーワード プログラミング学習, 学習状態, 脳波, 心拍

A Study on Heart Rate and Brain Waves During Programming Learning in Several Experiments

Katsuyuki UMEZAWA[†], Makoto NAKAZAWA^{††}, Michiko NAKANO^{†††}, and Shigeichi
HIRASAWA^{†††}

[†] Shonan Institute of Technology Tsujido-Nishikaigan 1-1-25, Fujisawa, Kanagawa 251-8511, Japan

^{††} Junior College of Aizu Monden 1-1, Yahata, Ikki-Machi, Aizuwakamatsu, Fukushima 965-0003, Japan

^{†††} Waseda University Okubo 3-4-1, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan

E-mail: †umezawa@info.shonan-it.ac.jp, ††nakazawa@jc.u-aizu.ac.jp, †††{nakanom,hira}@waseda.jp

Abstract Several studies have been conducted to measure brain waves during learning and to better understand the learning state. According to these studies, as the difficulty of the task increases, the brain waves (β/α) value also increases. This study aims to better understand the learning state by measuring biometric information other than brain waves. Our study demonstrated that heart rate (HR) decreases as the difficulty of the task increases. In this study, we clarify the relationship between HR and brain waves during programming learning by analyzing the results of several experiments with different participants and different target tasks.

Key words Programming Learning, Learning State, Brain Wave, Heart Rate.

1. はじめに

遠隔かつリアルタイムでないオンデマンド型の授業を想定する。学習者の顔が見えず学習の状況が把握できない。学習状態を脳波を使って把握する研究がある。実運用を考えた場合、学生に脳波計の装着を強要して学習指せるのは学生側にとっても抵抗があると考えられる。脳波に変わる生体情報で学習状況を把握したい。我々は、プログラミング学習時の脳波、心拍、表情を計測して心拍と表情で脳波を説明する研究を行ってきた。その中で課題の難易度が上がるほど、心拍が下がるという実験結果を得た。直感的には課題を解くことができず、心拍数も上

がると考えていたがそれとは逆の実験結果となった。よって本研究では、脳波と心拍に限定して、対象者やプログラミング課題の異なる3種類の実験を行い、脳波と心拍の関係について分析する。なお、各実験における課題数が異なっている。分析方法を統一化するため、各実験の最も簡単な課題と最も難しい課題の2つを分析の対象とした。

2. 従来研究

人間の思考状態を観測するために α 波や β 波のパワースペクトルや、 α 波と β 波の比率を測ることが有効とされている[1]。さらに、簡易脳波計を使って α 波と β 波を計測し、 β/α の値

を評価することにより人の脳の活性化や活動度が測れることが示され、また、全般的に計算問題より言語問題の方が、 β/α の値の変化が大きくなり負荷が高いことが報告されている [2]。また、我々も脳波の計測による学習状態の判定方法に関する研究を進めてきた [3] [4] [5]。

さらに我々は、脳波以外の生体情報を使って学習状態を把握する研究を進めている。従来研究 [6] では、難易度の異なるプログラミングの課題を行っている際の生体情報（脳波、心拍、表情）を計測を行った。脳波の代替となる生体情報を見つけるために計測したデータを用いて重回帰分析の手法を用いて分析を行った。各課題を遂行時の生体情報からは有意な回帰式を求めることができなかった。しかし、難易度の異なる課題の遂行時の生体情報の平均値の差に着目することによって有意な回帰式を求めることができた。これにより脳波 (β/α) の値を心拍と表情から推測することが可能となり、学習時に脳波計を装着せずに学習状態を推定することが可能となることを示した。さらに従来研究 [7] では、上述の分析における、サンプル数が少ないことによるオーバーフィッティングの可能性を指摘し、説明変数の選択のために一つ抜き交差検証を使い二乗平均平方根誤差 (Root Mean Squared Error : RMSE) を最小化する説明変数の組み合わせを求めた。RMSE を最小化する回帰式は式 (1)~(5) のように求められた。

$$\begin{aligned} \hat{y}_1 = & -0.0072x_1 + 0.2409x_3 - 0.3228x_4 + 4.6063x_5 \\ & + 0.2140x_6 + 0.1784x_7 - 0.8902x_8 + 0.1308x_9 \\ & - 0.0165x_{10} - 0.0455x_{11} - 0.0261 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \hat{y}_2 = & -0.0386x_1 + 2.3171x_2 - 0.6562x_4 - 0.0185x_6 \\ & - 0.2389x_7 - 1.6664x_8 + 0.0251x_{11} + 0.0284 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \hat{y}_3 = & -0.0099x_1 + 1.1495x_2 - 1.5951x_5 + 0.1795x_6 \\ & + 0.0940x_9 - 0.0150x_{10} - 0.0523x_{11} + 0.0049 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \hat{y}_4 = & -0.0545x_1 + 3.8361x_2 - 1.4383x_3 - 0.5347x_4 \\ & - 9.5242x_5 - 1.2274x_6 - 2.0989x_7 - 2.9426x_8 \\ & - 0.9611x_9 + 0.0366x_{10} + 0.1642x_{11} + 0.0438 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \hat{y}_5 = & -0.0286x_1 + 1.7935x_2 - 0.1994x_3 - 0.2688x_4 \\ & - 1.3494x_5 - 0.1279x_6 - 0.4994x_7 - 1.3307x_8 \\ & - 0.1351x_9 - 0.0054x_{10} + 0.0129 \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、目的変数 \hat{y}_1 は、 β_l/α_l の推定値、 \hat{y}_2 は、 β_h/α_l の推定値、 \hat{y}_3 は、 β_l/α_h の推定値、 \hat{y}_4 は、 β_h/α_h の推定値、 \hat{y}_5 は、 $(\beta_l + \beta_h)/(\alpha_l + \alpha_h)$ の推定値である。また、説明変数 x_1 は心拍、 x_2 は怒り、 x_3 は軽蔑、 x_4 は嫌悪、 x_5 は恐れ、 x_6 は喜び、 x_7 は悲しみ、 x_8 は驚き、 x_9 は真顔、 x_{10} は表情の豊かさ、 x_{11} は感情価である。

式 (1)~(5) を見ると、心拍 (x_1) の係数の記号は全てマイナスである。つまり脳波 (β/α) を推定する際に、心拍が下がれ

ばらがるほど、脳波の推定値は上がることを意味している。今回の研究は、この現象を複数の実験で確かめることである。

3. 実験に用いた生体情報機器について

3.1 簡易脳波計

全ての実験においてニューロスカイ社の MindwavMoble2 を用いて脳波の計測を行った。この簡易脳波計は、額と耳の皮膚の電位差 (電圧) を検出します。ヘッドセットの中で高速フーリエ変換が実行され δ (0.5–2.75 Hz), θ (3.5–6.75 Hz), α_l (7.5–9.25 Hz), α_h (10–11.75 Hz), β_l (13–16.75 Hz), β_h (18–29.75 Hz), γ_l (31–39.75 Hz), and γ_m (41–49.75 Hz) の各種脳波を取得可能である。本研究では、優来研究に従い、 α_l , α_h , β_l , β_h の 4 種類の脳波の組み合わせに平均値の組み合わせを加えて合計 5 種類の β/α (β_l/α_l , β_h/α_h , β_l/α_h , β_h/α_l , β_{lh}/α_{lh}) を用いて分析を実施する。

3.2 心拍計

ユニオンツール株式会社のウェアラブル心拍センサ myBeat WHS-1 を使用する (以降、このデバイスで計測した心拍は HR-B と呼ぶ)。myBeat は心拍、加速度、体表温の 3 種類を計測できる。専用の USB 受信機と付属の専用ソフトを使用し計測が可能。今回は計測した数値のうち心拍 (H R) を使用する。さらにもう 1 種類の心拍計として GARMIN 社の vivosmart j HR+ を使用する (以降、このデバイスで計測した心拍は HR-g と呼ぶ)。この製品は手首に装着するウェアラブルデバイスである。

4. 実験

以下に示す 3 種類の実験への参加者は、全て該当年度の湘南工科大学の 3 年生あるいは 4 年生である。全ての実験において対象のプログラミング言語は Java 言語である。実験参加者は全員 Java 言語に関して、大学 1 年の時から複数の授業で教育を受けており Jaga 言語の基礎は習得済みである。ただし参加者の中には Java 言語が苦手な学生も居た。なお、実験は、湘南工科大学の研究室で行った。実験は可能な限り静寂の中で行った。

4.1 実験 1

本実験は 2020 年に行ったものである。学習中の学習状態を把握する研究として実施した。実験の参加人数は 14 人である。難易度の異なる 6 種類の Java 言語の課題を行っている最中の際の脳波と心拍 (2 種類) を計測した。実験では 6 種類の設問を解いたが、そのなかで最も簡単な問題は課題 1 (正解率 90.00%)、最も難しい問題は課題 5 (正解率 30.00%) であった。この正答率は実験参加者以外の 60 名が同じ問題を解いたときの正解率である。以下に課題 1 と課題 5 をしめす。なお、この実験では、3.2 節に示した 2 種類の心拍計を用いた。

4.2 実験 2

本実験は 2021 年に行ったものである。脳波の代替となる生体情報を発見するという研究として実施した。実験の参加人数は 9 人である。難易度の異なる 3 種類の Java 言語の課題を行っている最中の際の脳波と心拍を計測した。実験では 3 種類

課題 1: 入力された文字列を表示

文字列 S が入力されます。次の列に整数 n が入力されます。入力された文字列を n 行分表示するプログラムを作成しなさい。

課題 5: 小さい方から 2 つ目の数字

整数 n を読み込みます (n は 2 以上)。n 個の正の整数 mi を読み込みます。読み込んだ整数の中で小さい方から 2 つ目の値を出力しなさい。

図 1 実験 1 の課題 1 と課題 5 の概要

の課題を解いたが、最も簡単な問題は課題 1(正解率 91.88 %), 最も難しい問題は課題 3(正解率 48.91 %)であった。この正解率は Paiza ラーニングと言いうサイトで集計している正解率である。なお、この実験で用いた心拍計は HR-B のみである。

課題 1: Price including tax

捨てで表示する。2 つの数が入力される。1 つ目が消費税率 (%) であり、2 つ目が税抜価格である。この二つの入力を用いて税込価格を出力しなさい。結果は小数点以下を切り捨てること。

課題 3: Where is here?

一行目に三つの数字が入力される。それぞれマップの横幅・縦幅、移動ログを示す。二行目に二つの数字が入力される。これらはキャラクターのマップ上の X 座標、Y 座標を表す。三行目以降は、キャラクターが動く方向を示す文字と移動距離を表す数値が入力される。マップの端まで移動したときは、それ以上その方向に進もうとする場合は反対の座標に移動し残りを移動する。

図 2 実験 2 の課題 1 と課題 3 の概要

4.3 実験 3

本実験は 2021 年に行ったものである。ビジュアル型言語とテキスト型言語の学習の差異を発見するという研究として実施した。実験の参加人数は 8 人である。難易度の異なる 2 種類のビジュアル型言語 (google blockly) と、難易度の異なる 2 種類のテキスト型言語 (Java 言語) を行っている最中の際の脳波と心拍を計測した。課題 1 (D013: 割り算) の正解率は 95.69%, 課題 2 の正解率は、89.85%であった。なお、この実験で用いた心拍計も HR-B のみである。

課題 1: 商と余り

整数 m と n が与えられ、m を n で割り算した商と余りを出力しなさい。

課題 2: *を出力

入力された数字の数だけの*を出力しなさい。

図 3 実験 3 の課題 1 と課題 2 の概要

5. 実験結果

表 1~表 3 にそれぞれの実験の結果を示す。灰色に網掛けをした箇所が t 検定の結果 5% の有意水準で平均値に差があるという結果になった箇所である。薄いグレーの網掛けが平均値が有意に下がったもの、濃いグレーの網掛けが平均値が有意に上がった箇所である。

まず脳波 (β/α) に関しては、表 3 つまり実験 3 に関しては、課題の難易度の差があまりなかったためか、脳波の増減が少ないものとなった。表 1 および表 2 (つまり実験 1 および実験 2) に関しては、脳波 (β/α) の列に濃いグレーの網掛けが目立つ。これは課題を難しいと感じると、脳波 (β/α) の値が高くなるという従来研究の結果に沿うものである。

次に心拍に注目すると、脳波に比べて、薄いグレーの網掛けが目立つ結果となった。我々の想定では、課題の難易度が高くなると心拍数も上がるのではないかと考えていたが、それとは逆の結果となった。表 1~表 3 とも同じような傾向を示している。課題の内容や実験参加者、年度が異なる実験で同じ傾向の結果となった。

脳波と心拍の両方とも有意に低くなった被験者もいるが、脳波の値が高くなっているにもかかわらず心拍が低くなった被験者も存在する。心拍を下げる要因が隠れていると考える。例えば簡単な問題は解けて当然のため自身で解けるかドキドキしながら行うが、難易度の高い問題は解けなくて当然であるという考え方が生じ、落ち着きを取り戻しているのかもしれない。この仮説が正しければ学習時の「あきらめ」を判定するのに使えるかもしれない。

6. まとめと今後の課題

本研究では、課題の難易度が上がるとその時の脳波 (β/α) の値が上がるが、心拍数が下がる、という従来研究の結果を検証するために、参加者や課題、年度が異なる複数種類の実験の結果を分析した。その結果、確かに課題の難易度が上がるとその時の心拍数は下がるという傾向が見られた。この結果は、課題が難しすぎることによる「あきらめ」の状態を判定するのに利用できるかもしれないことを示唆していると考えられる。今後は、心拍数 (HR) ではなく心拍変動 (HRV) の各種指標の分析を進めたいと思う。また、脳波や心拍変動に加えて、視線や表情、体温等の他の生体情報を計測し、遠隔授業における学習者の状態を詳細に推定したい。

研究倫理について

今回の実験は湘南工科大学研究倫理委員会の承認を得ている。また実験参加者と実験参加者の保護者から実験参加に関する署名を得ている。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 JP22H01055, JP21K18535, JP20K03082 の助成を受けたものです。また、本研究の一部は、早稲田理工研特別勘定 1010000175806 NTT 包括協定共同

表 1 実験 1 の結果

		β_l/α_l	β_h/α_h	β_l/α_h	β_h/α_l	β_{lh}/α_{lh}	HR-B	HR-G
実験参加者 1	課題 1	1.2489*	0.9391	1.0062	1.1694*	0.8298	72.1481	78.3889**
	課題 5	0.8226*	0.9713	1.2792	0.7118*	0.6862	70.0000	69.4000**
実験参加者 2	課題 1	0.8298	0.6059**	0.8192**	0.8342	0.5273**	75.6349**	75.6250**
	課題 5	0.7645	0.9847**	1.0929**	0.6740	0.6153**	70.5417**	69.0250**
実験参加者 3	課題 1	1.9887	2.2022**	1.3899	2.6000**	1.4289**	75.4921**	74.5625
	課題 5	1.6067	1.4622**	1.4211	1.7762**	1.1457**	73.3951**	73.5122
実験参加者 4	課題 1	1.1477	0.9328	1.1148	0.9037*	0.7646	96.1605**	95.7368**
	課題 5	1.1629	1.0161	1.0708	1.1162*	0.7948	93.0113**	92.7049**
実験参加者 5	課題 1	1.1230	1.4014	1.1824	1.0902	0.8583	66.1833**	66.3478*
	課題 5	0.9327	1.1687	1.0915	0.9922	0.7929	68.0578**	68.1176*
実験参加者 6	課題 1	0.8532	1.0459**	1.4335	0.6502	0.6768	107.5303**	108.0625**
	課題 5	0.7252	1.4028**	1.3558	0.6868	0.6353	100.9177**	101.4898**
実験参加者 7	課題 1	1.1523	1.0536	1.2004	0.9854	0.8217	79.0208	78.5000
	課題 5	0.9586	1.2125	1.1810	1.0269	0.8361	79.1989	78.9153
実験参加者 8	課題 1	1.9521	1.6366**	1.5493	1.6277**	1.2053	90.0000**	95.6786**
	課題 5	1.4072	2.2927**	1.3396	2.4540**	1.3480	74.3246**	82.0259**
実験参加者 9	課題 1	1.3903*	1.5379	1.4863*	1.2908	1.0515	91.8333	74.1667
	課題 5	1.0357*	1.6132	1.1544*	1.4127	0.9488	104.0274	-
実験参加者 10	課題 1	1.0626	1.7403**	1.2198**	1.4701**	1.0069**	88.8095**	86.8333**
	課題 5	1.1632	3.2406**	1.6529**	2.3779**	1.4852**	72.6228**	72.1154**
実験参加者 11	課題 1	1.4218**	1.2937**	1.4063**	1.3881**	1.0433**	106.2833**	112.7692**
	課題 5	0.9563**	0.5769**	0.7435**	0.7420**	0.5423**	91.5039**	97.7451**
実験参加者 12	課題 1	1.3270	0.9322**	1.1992*	1.0621**	0.8213**	61.5965**	120.8636**
	課題 5	1.3378	1.9353**	1.4449*	1.8683**	1.2123**	79.6667**	109.5579**
実験参加者 13	課題 1	0.7940	0.6203	0.9482	0.5589	0.5440	83.8333	84.0556
	課題 5	0.7785	0.6556	1.1420	0.4681	0.5354	84.2963	83.1639
実験参加者 14	課題 1	0.9742**	0.8894**	1.2285*	0.7173**	0.7011**	107.0833**	109.0811**
	課題 5	0.6850**	0.6224**	1.0391*	0.4151**	0.5063**	89.4771**	90.4000**

薄い灰色：有意に低い。濃い灰色：有意に高い。

*: p -value < 0.05, **: p -value < 0.01

研究, および, 経営情報学会「ICT と教育」研究部会の助成を受けたものです。本研究成果の一部は早稲田大学理工総研プロジェクト研究「次世代 e-learning に関する研究」の一環として行われたものです。

文 献

[1] H. Uwano, K. Ishida, Y. Matsuda, S. Fukushima, N. Nakamichi, M. Ohira, K. Matsumoto, and Y. Okada, "Evaluation of software usability using electroencephalogram - comparison of frequency component between different software versions," *Journal of Human Interface Society*, 10(2), pp. 233-242, (2008). (in Japanese)

[2] K. Yoshida, Y. Sakamoto, I. Miyaji, and K. Yamada, "Analysis comparison of brain waves at the learning status by simple electroencephalography," *KES'2012, Proceedings, Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems*, pp. 1817-1826, (2012).

[3] 梅澤 克之, 石田 崇, 齋藤 友彦, 中澤 真, 平澤 茂一, "簡易脳波計測を用いた学習者にとっての課題難易度の判定方法," 情報処理学会 コンピュータと教育研究会 137 回研究発表会, pp.1-6, Dec. 2016.

[4] 梅澤 克之, 石田 崇, 齋藤 友彦, 中澤 真, 平澤 茂一, "簡易脳波計測を用いた課題遂行時の脳波の推移について," 情報処理学会 コンピュータと教育研究会 138 回研究発表会, pp.1-6, Feb. 2017.

[5] 梅澤 克之, 石田 崇, 齋藤 友彦, 中澤 真, 平澤 茂一, "高校生を対象とした C 言語学習時の閲覧履歴と脳波履歴による学習状態判定方法," 情報処理学会第 79 回全国大会, pp.4-419-420, Mar. 2017.

[6] 梅澤 克之, 中澤 真, 中野 美知子, 平澤 茂一, "プログラミング学習時の脳波と心拍と表情の関係について," 電子情報通信学会教育工学研究会 (ET) 予稿集, pp. 14-19, June 2022.

[7] 梅澤 克之, 中澤 真, 中野 美知子, 平澤 茂一, "プログラミング学習時の脳波と心拍と表情の関係の検証について," 第 21 回情報科学技術フォーラム (FIT2022), 予稿集 Vol.3 pp.447-448, Sept. 2022.

[8] ThinkGear measurements (MindSet Pro/TGEM), <http://support.neurosky.com/kb/science/thinkgear-measurements-mindset-protgem>. (Last accessed 6 July 2022).

[9] Paiza Learning, <https://paiza.jp/works> (Last accessed 6 July, 2022).

付 録

表 A・1, A・2, A・3 にそれぞれ実験 1,2,3 の p 値を示す。

表 2 実験 2 の結果

		β_l/α_l	β_h/α_h	β_l/α_h	β_h/α_l	β_{lh}/α_{lh}	HR-B
実験参加者 1	課題 1	1.0914**	1.0200**	1.2831**	0.8306**	0.7850**	64.2138**
	課題 3	1.5201**	2.5323**	1.5320**	2.5513**	1.4724**	47.7976**
実験参加者 2	課題 1	1.5379**	0.7813	1.1143	1.1454**	0.7055	90.6667**
	課題 3	0.9980**	0.7851	1.0872	0.7350**	0.6568	81.1854**
実験参加者 3	課題 1	1.7592	2.1512**	1.4782	2.7211**	1.4804**	90.9935**
	課題 3	1.4903	1.2688**	1.2442	1.4444**	0.9709**	84.6939**
実験参加者 4	課題 1	1.3049*	1.6158**	1.4843	1.4285**	1.0959**	114.4551*
	課題 3	1.1425*	1.2482**	1.4134	1.0558**	0.9016**	113.4768*
実験参加者 5	課題 1	1.0767**	2.3692**	1.3311**	1.8400**	1.2216**	81.6454**
	課題 3	1.6003**	3.2060**	1.5550**	3.2105**	1.7185**	72.1170**
実験参加者 6	課題 1	1.1431	0.8623	1.3087	0.7350*	0.7681	70.6250**
	課題 3	1.1088	0.9280	1.1911	0.9005*	0.7446	72.0129**
実験参加者 7	課題 1	1.3200*	2.0167**	1.4362*	2.3969*	1.1121**	81.0755*
	課題 3	1.0467*	1.6130**	1.2117*	1.3832*	0.9722**	79.8234*
実験参加者 8	課題 1	1.1532**	2.1303**	1.2445*	1.9666**	1.1698**	68.5283**
	課題 3	0.8734**	0.9248**	1.1118*	0.7723**	0.6577**	67.3072**
実験参加者 9	課題 1	1.5462	2.1173**	1.5212*	2.1401	1.2630	66.8095**
	課題 3	1.4461	1.7410**	1.3493*	1.9425	1.1874	73.8425**

表 3 実験 3 の結果

		β_l/α_l	β_h/α_h	β_l/α_h	β_h/α_l	β_{lh}/α_{lh}	HR-B
実験参加者 1	課題 1	1.1222	0.7579*	1.0414	0.7742	0.6791	74.3333**
	課題 2	0.9744	0.9475*	1.1363	0.8300	0.6887	70.6133**
実験参加者 2	課題 1	1.4233	1.2098	1.2100	1.4244**	0.9835	85.4493
	課題 2	1.3799	1.1056	1.3419	1.0953**	0.9340	85.0185
実験参加者 3	課題 1	1.4492	1.8524	1.4408	1.9402	1.1934	77.0000
	課題 2	1.3766	1.5037	1.3229	1.8248	1.0154	77.1944
実験参加者 4	課題 1	2.2616	2.8951	1.6282	3.8551	1.8967	73.5000
	課題 2	2.1273	2.7484	1.6248	3.6915	1.7753	75.0115
実験参加者 5	課題 1	1.2104	0.9995*	1.3403	0.9201	0.8439	124.3080**
	課題 2	1.1259	1.1001*	1.2671	1.0053	0.8278	121.1477**
実験参加者 6	課題 1	1.2177	1.8182	1.2661	2.3348*	1.1036	67.1667
	課題 2	0.9201	1.8634	1.3201	1.2212*	0.9557	66.5152
実験参加者 7	課題 1	1.3773	2.2064**	1.3170	2.3689**	1.2969**	87.2619**
	課題 2	1.4509	1.1211**	1.3362	1.1869**	0.9931**	79.7333**
実験参加者 8	課題 1	1.2233	1.2667	1.2315	1.3627	0.8881	67.2593
	課題 2	1.2555	1.1123	1.1016	1.2349	0.9844	66.8462

表 A.1 実験 1 の p 値

	β_l/α_l	β_h/α_h	β_l/α_h	β_h/α_l	β_{lh}/α_{lh}	HR-B	HR-G
Participant 1	0.0262*	0.4262	0.1166	0.0177*	0.0841	0.3235	0.0003**
Participant 2	0.3422	0.0000**	0.0002**	0.2888	0.0059**	0.0000**	0.0000**
Participant 3	0.1580	0.0001**	0.4027	0.0085**	0.0014**	0.0003**	0.1267
Participant 4	0.4555	0.1610	0.2987	0.0226*	0.2411	0.0000**	0.0016**
Participant 5	0.0694	0.1632	0.1835	0.2292	0.1436	0.0024**	0.0384*
Participant 6	0.0715	0.0087**	0.3278	0.3157	0.1577	0.0000**	0.0000**
Participant 7	0.0805	0.0587	0.4221	0.3904	0.3977	0.4226	0.3751
Participant 8	0.1143	0.0000**	0.0857	0.0021**	0.0838	0.0000**	0.0000**
Participant 9	0.0296*	0.3185	0.0136*	0.2222	0.0814	0.0803	–
Participant 10	0.2091	0.0000**	0.0002**	0.0001**	0.0000**	0.0000**	0.0000**
Participant 11	0.0007**	0.0000**	0.0000**	0.0004**	0.0000**	0.0000**	0.0000**
Participant 12	0.4751	0.0000**	0.0166*	0.0000**	0.0000**	0.0082**	0.0000**
Participant 13	0.4430	0.3161	0.0585	0.1778	0.4451	0.2185	0.1437
Participant 14	0.0032**	0.0001**	0.0486*	0.0000**	0.0000**	0.0000**	0.0000**

*: p -value < 0.05, **: p -value < 0.01表 A.2 実験 2 の p 値

	β_l/α_l	β_h/α_h	β_l/α_h	β_h/α_l	β_{lh}/α_{lh}	HR-B
Participant 1	0.0000**	0.0000**	0.0003**	0.0000**	0.0000**	0.0000**
Participant 2	0.0001**	0.4747	0.3818	0.0007**	0.0677	0.0000**
Participant 3	0.1655	0.0000**	0.0525	0.0001**	0.0000**	0.0000**
Participant 4	0.0334*	0.0001**	0.1978	0.0008**	0.0000**	0.0318*
Participant 5	0.0000**	0.0000**	0.0028**	0.0000**	0.0000**	0.0000**
Participant 6	0.3702	0.2091	0.1098	0.0172*	0.2954	0.0082**
Participant 7	0.0284*	0.0065**	0.0425*	0.0422*	0.0030**	0.0111*
Participant 8	0.0013**	0.0000**	0.0257*	0.0000**	0.0000**	0.0001**
Participant 9	0.2132	0.0057**	0.0239*	0.1568	0.0743	0.0000**

*: p -value < 0.05, **: p -value < 0.01表 A.3 実験 3 の p 値

	β_l/α_l	β_h/α_h	β_l/α_h	β_h/α_l	β_{lh}/α_{lh}	HR-B
Participant 1	0.2700	0.0435*	0.2709	0.3776	0.4377	0.0000**
Participant 2	0.3893	0.1443	0.1120	0.0066**	0.1912	0.2030
Participant 3	0.4144	0.1139	0.3225	0.4170	0.0750	0.4466
Participant 4	0.3325	0.2758	0.4893	0.3974	0.1441	0.0887
Participant 5	0.2046	0.0413*	0.1352	0.2136	0.3191	0.0000**
Participant 6	0.1087	0.4336	0.4059	0.0139*	0.0707	0.1635
Participant 7	0.3261	0.0000**	0.4399	0.0000**	0.0001**	0.0007**
Participant 8	0.4422	0.1834	0.2266	0.2875	0.1437	0.3543

*: p -value < 0.05, **: p -value < 0.01