

認知アーキテクチャに基づく知的集中変化のシミュレーションに関する研究

坂本 龍平^{*1} 上田 樹美^{*1} 山本 理恵子^{*1} 石井 裕剛^{*1}
下田 宏^{*1} 大林 史明^{*2} 森田 純哉^{*3}

A Simulation Study of Concentration Change Based on Cognitive Architecture

Ryuhei Sakamoto^{*1}, Kimi Ueda^{*1}, Rieko Yamamoto^{*1}, Hirotake Ishii^{*1},
Hiroshi Shimoda^{*1}, Fumiaki Obayashi^{*2}, and Junya Morita^{*3}

Abstract – In this paper, the authors have tried to simulate variation of human intellectual concentration employing a cognitive architecture, ACT-R, when they are conducting a simple cognitive task. Based on the fact that the distribution of the problem-answering time series of the model varies depending on the structure of the model used for simulation and the parameter settings, the authors are tackling to reveal how the mechanism of transition between concentrated and defocused changes depending on human characteristics and conditions.

Keywords : intellectual concentration, cognitive architecture, cognitive task

1. はじめに

近年、日本では少子高齢化に伴う労働人口の減少により、労働者一人当たりの生産性を高めるための取り組みが行われている。特に、オフィス空間に着目して、労働者が快適かつ集中できる執務環境を模索している企業も多い。また昨今では、実際にオフィスに行かずに自宅で仕事を行う在宅勤務が促進され、集中できる環境を自ら設定する必要性が増えたこともあり、人間の集中に影響を与える環境やメカニズムの解明に対する需要が高まっている。しかし、人間の集中を議論するためには、人間の思考や認知のプロセスについての理解が前提となり、一筋縄ではいかない。

このような認知科学の分野にわたる研究には、しばしば認知アーキテクチャが用いられる。特に、認知アーキテクチャの一つである ACT-R (Adaptive Control of Thought-Rationa)^[1] は、多くの研究者によって利用され、人間の反応や脳の活性化パターンの予測にも用いられている。そのため、本研究では、認知アーキテクチャの一つである ACT-R を用いて、人間の集中を模擬するためのシミュレーションモデルを作成する。さらに、被験者実験で取得したデータとシミュレーションの結果を比較し、パラメータによる結果の差異を分

析する。すなわち、本研究の目的は、個人や環境、条件によって生じる人間の知的集中の変化をシミュレーションによって説明することである。本研究の目的が達成されれば、認知科学に新たな知見を加えるだけでなく、人間と相互に作用する機械や情報システムの研究に応用できる。また、あらゆる環境や条件を変数として人間の集中状態を予測するシミュレータの作成や、集中状態を考慮した環境や条件の設計を可能にする第一歩となる。

2. 関連研究

2.1 知的作業に対する集中に関する既往研究

オフィス作業や勉強などの知的作業に対する集中(以下、知的集中)と直接関連する知的生産性に関する研究は数多くある。特に、知的集中の程度を知的生産性と捉え、それを評価する方法の確立を目指してさまざまな試みが行われてきた。その中でも最も一般的な方法は、主観評価を用いるものである。杉浦らは、SAP (Subject Assessment of workplace Productivity) と呼ばれる手法を提案し、質問紙への回答を用いて評価した^[2]。SAP は、環境に対する印象等を主観的に回答するものであり、簡便な方法としてしばしば用いられている。しかし、この方法は客観性に欠け、個人の主観により結果が大きく異なる場合もある。主観評価以外の方法としては、仮想的な知的作業のタスクを作成し、そのタスクの作業成績を用いて評価する方法がある。これは、知的作業の成績を知的生産性と対応付けることで、知的生産性を客観的に定義することができる点で有用である。Wargoeki らは、テキストタ

*1 京都大学大学院 エネルギー科学研究科

*2 京都大学大学院 エネルギー科学研究科 (パナソニック株式会社 ライフソリューションズ社)

*3 静岡大学 情報学部

*1 Graduate School of Energy and Science, Kyoto University

*2 Graduate School of Energy Science, Kyoto University (Life Solutions Company, Panasonic Corporation)

*3 Faculty of Informatics, Shizuoka University

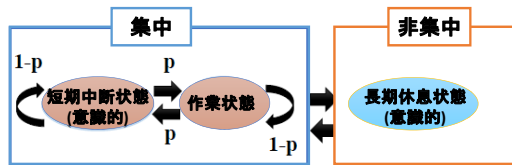


図1 三状態モデル [6]
Fig. 1 Three-state Model.

イピングなどからなるタスクを用いて、タスクの成績と空気質との関連を調べた [3]。この方法は客観性が高い一方で、課題の妥当性や習熟による影響を考慮する必要があるなどの欠点がある。他にも、國政らは、人間の生理反応を指標として仮想タスクの解答時間や集中状態の推定に用いた [4]。

以上のような方法を目的に合わせて使い分けることで、実験環境や実験条件によって変化する知的集中を評価し比較することは可能である。しかし、単に評価を行うだけでは、人間の集中状態に対して何らかの働きかけ (介入) を行った際に、結果が得られる原理や結果までのプロセスはブラックボックス化したままである。その原理やプロセスを分析するため、著者らは集中に関する状態モデルの開発を行い、人間の集中の変化を状態の遷移によって説明した。本節では、現在までに著者らが開発してきた集中に関する状態モデルの概要について述べる。

2.1.1 3 状態モデルについて

Card らが考案した人間情報処理モデル [5] をもとに、宮城らは、知的集中状態の変動過程を数理的に説明する状態モデルを作成した [6]。この状態モデルによれば、知的作業中には (1) 作業状態、(2) 短期中断状態、(3) 長期休息状態の三つの状態があり、(1) と (2) の両方を合わせたものを知的集中状態とした。この状態モデルでは図 1 のように、(1) と (2) が一定の確率 p で遷移するマルコフモデルを形成しているため、単純な認知課題を知的集中状態で解答したとき、1 問あたりの解答時間のヒストグラムは対数正規分布に近似される。本研究では、この状態モデルをもとに次章で述べるシミュレーションモデルを設計した。なお、本稿において、状態モデルは認知的な概念を数式などで表したものを指し、シミュレーションモデル (またはモデル) は人間の認知機能を前提にコンピュータ上でコード化した人工的な模型を指す。

2.2 ACT-R に関する既往研究

ACT-R とは、過去のあらゆる心理学実験から得られる理論をベースとして作られた認知アーキテクチャである。ACT-R には、人間の認知に関するモデリングを行うために必要な機能が標準で搭載され、それらは人間の脳の機能と対応している。近年では人工知

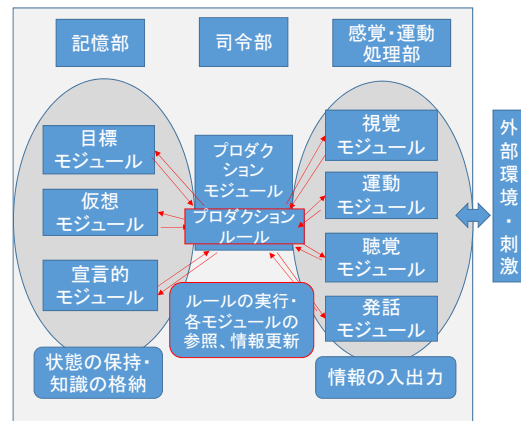


図2 ACT-R の構造
Fig. 2 Structure of ACT-R.

能に応用されるほか、人間の記憶や学習、感情や合理性などの曖昧さを表現することで、あらゆる日常的な現象を説明するために用いられる。本研究と関連性が深い分野では、人間の疲労や眠気、モチベーションを ACT-R のシミュレーションモデルで再現する試みがある。

例えば Gunzelmann らは、睡眠不足が知的課題のパフォーマンスに与える影響について、脳内の記憶へのアクセスに関わる変数で説明できることや、精神疲労の観点から、モチベーションに関わる変数によって眠気の状態が異なる実験の結果を模擬できることを示した [7],[8]。Jongman らは、個人の疲労度の違いによって、課題に取り組む戦略が異なり、疲労度が高い場合には適応戦略を取る頻度が減少することを示した [9]。他にも、モデルにさまざまな認知課題を解かせ、人間の成績と比較して議論する研究が多くなされてきた [10-12]。しかし、人間の知的集中状態に着目して、認知課題の解答結果の分布が環境や条件によってどう変化するかを分析した研究は数少ない。

3. ACT-R とシミュレーションモデルの設計

本章では、ACT-R の理論と機能の概要を述べた後、本研究で用いたシミュレーションモデルの設計について述べる。

3.1 ACT-R の概要

ACT-R は図 3 に示すように、人間の脳を複数のモジュールとみなし、それぞれのモジュールが並列で動作するように設計されている。なかでもプロダクションモジュールは、各モジュール間の相互作用を媒介する役割を持ち、各モジュールへの命令や各モジュールの状態に依存する一連の処理 (手続き) をルールとして記述し格納することができる。これは人間の脳の基底核に相当する。

一方で、その他の各モジュールは人間の脳皮質の部位とそれぞれ対応する機能を持つと考えることができる。すなわち、人間が行うのと同様に、外部環境との情報の入出力や、知識の保存などを記号として表現し、それらはプロダクションモジュールによる監視や照合のために使われる。モデラーはこの ACT-R の各モジュールに対して必要な情報を前もって準備することや、人間が行う手続きをルールとして前もって記述することで、人間が行う認知処理を再現することができる。また、各モジュールでの処理を行う際には、シミュレーションパラメータによって処理の進行パターンを変えることや、処理に必要な時間的コストの計算を変化させることができる。よって、認知プロセスを仮定したうえで自由にパラメータを設定することで、人間の反応そのものや反応にかかる時間を予測することができる。実際に、認知課題中の人間の反応時間を予測する多くの研究において、その妥当性が検証されている。

3.2 シミュレーションモデルの設計

本研究では、ACT-R を用いて人間の知的集中の変化を調べるため、2.1.1 項で述べた 3 状態モデルを仮定し、簡単な認知課題に取り組む際の認知活動をシミュレーションするモデルを設計した。なお、モデルが取り組む課題とモデルの実装には、ACT-R で推奨されるプログラミング言語である Lisp 言語を用いた。

3.2.1 課題

シミュレーションモデルが取り組む課題として、比較課題を用いた^[13]。比較課題は、著者らが集中状態の評価に適した認知課題として開発したものである。比較課題の各問は図 4 に示すように、問題部分が画面左側に、解答用のボタンが画面右側に表示される。そのうち問題部分は簡単な不等式の正誤を判定する問題と、2 単語が同じ意味カテゴリに分類されるかを判定する問題の二つから構成され、問題部分に表示される単語や数値は各問ごとに異なる。ここで分類に用いることができる意味カテゴリは、動物・植物・人工物・地名のうちいずれかである。解答者は、二つの問題に対する答えとして正しい組み合わせを画面右側のボタンから選択し解答する。解答が終わると次の問いが表示される。この課題の 1 問あたりの解答時間の分布から集中の評価指標を算出するためには、難易度が一定の問題を複数問続けて解答した際の解答時間データが必要である。そのため、比較問題では、比較すべき値や文字数、出題の順序などを考慮して作成してある。

本研究では、ACT-R のシミュレーションモデルが比較課題に取り組む環境を構築するため、比較課題の画面を ACT-R 上で動くプログラムとして記述した。このプログラムは、ACT-R のモデルが情報の入出力を

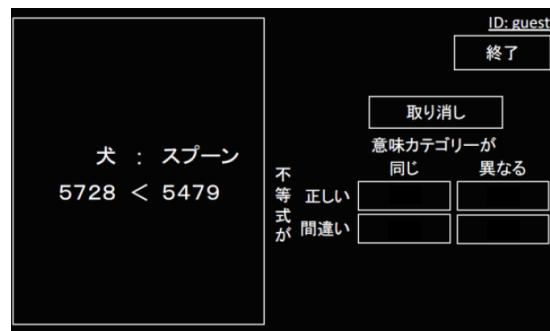
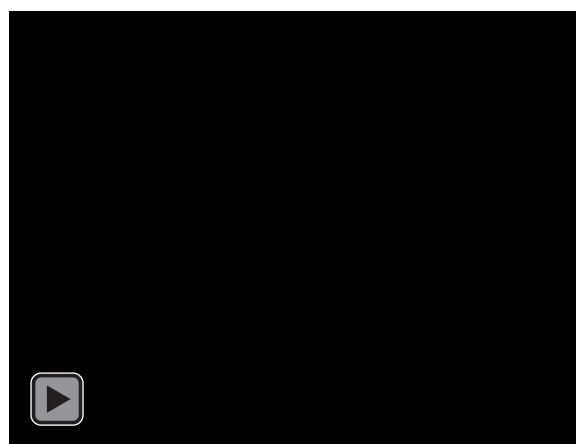


図 3 比較課題の解答画面例^[13]
Fig. 3 Screen Example of Comparison Task.

行うための画面（仮想ウィンドウとよばれる）に比較課題を表示する。シミュレーションモデルは、ACT-R 上で実装された比較課題の画面を外部環境として、情報の入出力に用いる。以下の動画は、ACT-R のシミュレーションモデルがこの比較課題を解く際の仮想ウィンドウの様子を示す。なお、仮想ウィンドウ上に表示する比較課題は、比較課題を与える被験者実験で用いるものを参考にレイアウトした。



3.2.2 シミュレーションモデルの思考プロセス

モデルの設計には視覚モジュール、運動モジュール、目標モジュール、仮想モジュール、宣言的モジュール、およびプロダクションモジュールを用いた。モデルの宣言的モジュール内には、前もってモデルが記憶しておくべき内容（ここでは、数値の大小と単語の意味カテゴリ）を知識として格納する。また、人間が比較課題に取り組む際の認知処理をステップに分け、それぞれのステップを独立したプロダクションルールに記述する。図 4 に認知処理のステップの進行の概要を示す。これらのステップに対応したルールは、各モジュールの状態を条件として順番に実行される。

図 5 に、設計したシミュレーションモデルの動作の概要を示す。3 状態モデルに従って、モデルが比較課

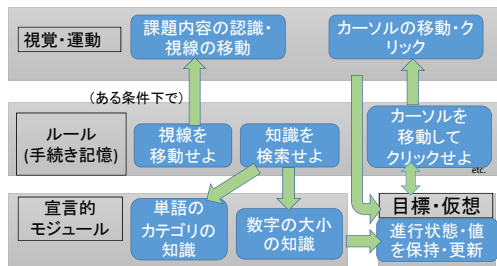


図4 認知ステップの進行
Fig. 4 Progress of Cognitive Step.

題に取り組むための動作に加えて、短期中断を行うための動作と長期休息を行うための動作を以下のように設計した。モデルははじめ、タスク（比較課題への解答）を開始する集中状態と長期休息を行う非集中状態の2状態に分岐した後、課題に対する解答を終了するまで認知ステップに対応する情報処理を行う。

(1) **作業状態**: 作業状態では、比較課題を解くプロセスと、知的集中を模擬した。比較課題を解くプロセスに関しては、モデルが認知処理のステップを順番に実行するように設計した。まず、モデルはプロダクションルールに従って、モデルの現在の状態を目標モジュールから取得する。また、視覚モジュールを介して仮想ウィンドウに表示された図形や文字、ボタンなどの判別および位置情報の取得を行う。次に、仮想ウィンドウから取得した情報を記号として仮想モジュールに格納する。これは、人間が画面上の文字をエンコードする動作に対応する。エンコードが終わると、モデルは仮想ウィンドウ上の単語に関する知識を宣言的モジュール内で検索する。この検索に必要な時間は、知識の活性レベルによって決まるとされ、活性値と呼ばれるパラメータを用いて計算される。その後、検索結果に応じて、目標モジュールの状態を変更し、視覚モジュールと運動モジュールを用いて視線および仮想ウィンドウ上のカーソルを移動させる。これを不等式の両辺の数値を比べる際にも繰り返した後、モデルは運動モジュールを用いて、ウィンドウ上の適切な位置をクリックする。このカーソル移動やクリックに要する時間は、フィッツの法則に基づいて計算される。また、カーソルの移動は視線の移動や知識の検索と並行で行うよう設計した。このとき視線やカーソルの移動先はボタンそれぞれに対して一意に定め、視線やカーソルの移動誤差は、ノイズパラメータによってのみ生じた。

一方知的集中に関しては、検索に必要な知識の活性値を他の状態の場合よりも高く設定し、検索の失敗や解答を中断するプロセスが起こらないように設計した。

(2) **短期中断状態**: 短期中断状態では、モデルが一時的に何も行わず、ただ視線を固定するように設計した。

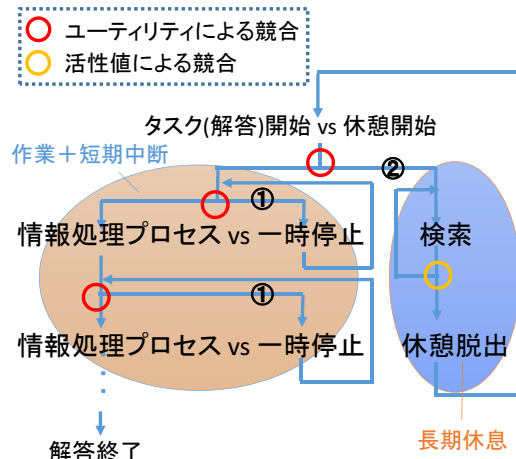


図5 シミュレーションモデルの動作の概要
Fig. 5 Outline of the Simulation Model.

これは図5の①のように、認知処理の各ステップに介入するルールとして記述し、1ステップに対して複数回繰り返して介入する。そのため介入回数はループ回数により変化し、ステップごとの時間に揺らぎが生じる。介入が起こる確率はプロダクションルールのユーティリティと呼ばれるパラメータで決定される。

(3) **長期休息状態**: 長期休息状態では、モデルが仮想ウィンドウに対しての入出力を開始せず、宣言的モジュール内の複数の情報を検索し続けるよう設計した。これは図5の②のように、作業状態における最初の認知処理のステップと競合するルールとして記述し、短期中断状態と同様にユーティリティパラメータに基づいて選択される。この状態にあるモデルは、指定された情報を検索するまで、目標モジュールの更新を行わないため、作業状態で実行される一連の処理を開始しない。これは、マインドワンダリングと呼ばれる現象を表現する場合にも用いられ^[14]、検索に用いる情報の数を複数準備することができる。

4. シミュレーションパラメータと評価の方法

本章では、3.2節で述べたシミュレーションモデルを設計するために用いた各シミュレーションパラメータの詳細を述べ、シミュレーション結果の評価方法について述べる。

4.1 シミュレーションパラメータの設定

シミュレーションモデルの設計に用いたACT-Rのパラメータのうち、代表的なものを表1に示す¹。

シミュレーションパラメータには大きく分けて、視線速度やルール間の処理速度などのモデルの動作そのものに関するもの、活性値の初期値や閾値などの宣言

1: 詳細はACT-RのホームページのReference Manualを参照。<http://act-r.psy.cmu.edu/>

表1 集中の変動を模擬するために使用したパラメータ
Table 1 Parameters Used for Concentration Variation

パラメータ変更時の動作	動作上の意味	パラメータ値の例
(A) プロダクションルールの実行時間を変える	処理プロセスの速さ	0.2,0.5
(B) 視線速度を変える	視線が動く速度	0.04,0.085
(C) 検索時間の最大値計算に用いる値を変更する	長期休息の1ループの最大時間を定義	0,-2,-5
(D) 長期休息中に検索する情報の活性値の初期値計算に用いる値を変更する	長期休息の1ループの基本長	10,50,100,400
(E) 長期休息を終える情報に与える活性値の初期値のハンデを変更する	長期休息からの抜けやすさ	50,150,200,300
(F) 活性値に与えるノイズの計算に用いる値を変更する	長期休息の長さのブレ	0.2,0.5
(G) 長期休息で検索対象とする情報の数を変更する	長期休息の多様さ	2,6
(H) 短期中断ルールのユーティリティを変更する	短期中断の起こりやすさ	-0.1,0,0.1
(I) 長期休息ルールのユーティリティを変更する	長期休息への入りやすさ	-0.1,0,0.1

的モジュールへのアクセスに関するもの、ユーティリティの初期値やノイズ、ルールの学習の有無などの手続きに関するものの3種類がある。活性値とは、一つ一つの情報に与えられる活性レベルのことであり、活性値が高い情報ほど検索に必要な時間は短くなる。また、ACT-R上で活性値は、初期値やノイズの他に、時間経過による減衰や他の情報との関連度など複数のパラメータをもとに計算される。ユーティリティとは、一つ一つのルールに対して与えられる優先度のことであり、優先度が高いルールほど選択されやすい。ユーティリティも活性値と同様に複数のパラメータを用いて設定可能である。また、ACT-Rのパラメータを用いてルールの選択に関する条件なども詳細に設定でき、これらはシミュレーションしたいモデルに合わせて任意に変化させることができる。しかし、シミュレーションパラメータは、シミュレーションモデルに対してどのような意味を持つかを考慮して選択・変更する必要がある。よって本研究では、比較課題を解くために必要と思われるパラメータのみを選択してモデルの設計を行った。また、モデルの挙動に影響を与える主なパラメータに対して、表1に示すような意味付けを行った。その後、パラメータの組み合わせを複数用意し、特徴的な実験データに対するシミュレーションを行った。

4.2 EMDを用いた評価

パラメータの組み合わせによって、シミュレーション結果が被験者実験で得られた実験データとどれだけ近いかを評価するために、本研究では、EMD(Earth Mover's Distance)を用いた。これは、2つのヒストグラムの分布について、各要素の重みと要素間の距離から分布を一致させるためのコストを計算することで、分布がどれだけ異なるかを表す指標である。すなわちEMDは、二つの分布が全く同じとき0をとり、0に近いほど二つの分布が類似していることを示す。本研究では、シミュレーションモデルの解答データと被験者実験の実験データをEMDを用いて比較することで、

分布そのものの類似度を議論する。

5. 結果と考察

本章では、前章で述べたパラメータの組み合わせに対応するシミュレーションの結果の一例について述べ、知的集中に関する考察を行う。なお、本章で述べるシミュレーションでは、前章で述べたパラメータの組み合わせのみを変化させ、それ以外の細かなパラメータ条件は共通とした。また、ACT-Rで実現できるコンパイルという機能を用いて、ルールを十分に学習させた状態でシミュレーションを実施した。

本研究では、竹川らが行った実験データを利用した[15]。竹川らは、比較課題を用いて集中を評価し、個人の特性データとの関連性を調べた。比較課題の実施時間は1回あたり30分であった。図6に、実験で得られたデータの内、特徴的な4人(Sub-1からSub-4)の解答時間のヒストグラムをそれぞれ示す。2.1.1項で述べた対数正規分布を含むことを仮定し、x軸を対数軸にしてある。また、y軸は解答数を表すが、各データの解答数が異なるため、ヒストグラムの総面積が1となるように正規化してある。図6より、個人によってヒストグラムの概形だけでなく、最頻値、標準偏差などが異なることがわかる。

一方図7に、本研究で設計したシミュレーションモデルによる解答時間のヒストグラムの一例を示す。シミュレーションでは、総解答数を1000問とした。概形に関して、実験データと異なる部分があるものの、最頻値や標準偏差、長い裾のある分布など大まかな解答時間の分布をとらえている。定量的な評価を行うために、EMDを用いて図6に示す4つの実験結果と図7に示すシミュレーション結果の類似度を調べた。その結果、表2に示すように、最も分布が類似する実験データはSub-1であった。さらに、シミュレーションパラメータを変化させることで、EMDの値を小さくする検討を行った。図8に、シミュレーションパラメータを変化させたときの解答時間ヒストグラムを示

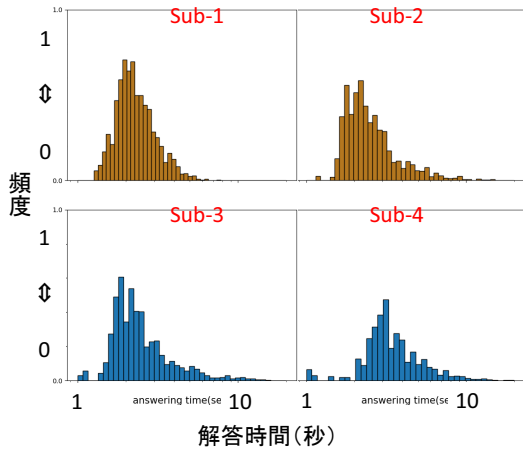


図6 実験で得られたヒストグラムの一例
Fig. 6 Examples of the Histograms in the Experiment.

表2 4つの実験データに対するシミュレーション結果の類似度

Table 2 EMD Values for Each Experimental Data.

比較した実験データ	EMD
Sub-1	2.342×10^{-2}
Sub-2	3.117×10^{-2}
Sub-3	4.730×10^{-2}
Sub-4	1.598×10^{-1}

す。シミュレーションパラメータによって分布の形が異なることから、個人によって適切なパラメータが異なることが予想される。表3に、各実験結果に対してそれぞれ4つのシミュレーション結果を比較したときのEMDを計算したものを示す。実験データに対してEMDが最小となるシミュレーションがそれぞれの実験データに最も対応していると考えられる。

表4に、対応するシミュレーション結果と特徴的なパラメータの値を示す。表1の意味付けに基づけば、Sub-1は、他の参加者と比較して長期休息の1ループが長いことが予想される。また、Sub-2およびSub-3は、他の参加者と比較して長期休息からやや抜けやすいことが予想される。同様にSub-4は、処理プロセスにかかる時間が他の実験参加者よりも長い可能性がある。本研究では、このように実験データをシミュレーションすることで、異なるデータを定量的に比較し、定性的な分析をすることができた。

6. 今後の課題と展望

本研究では、ACT-Rを用いて、簡単な認知課題に取り組むシミュレーションモデルを設計し、パラメータの変化によるモデルの挙動を分析した。パラメータの組み合わせによって、分布の形が大きく変化し、実験データと類似したシミュレーション結果をいくつも得ることができた。今後は個人の異なる実験データだけ

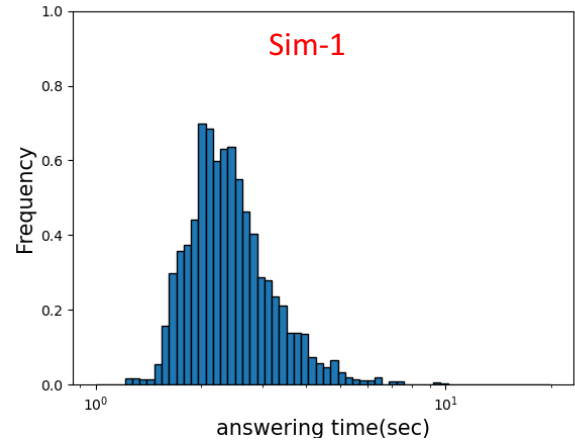


図7 シミュレーションで得られたヒストグラムの一例
Fig. 7 An Example of the Histograms in Simulation.

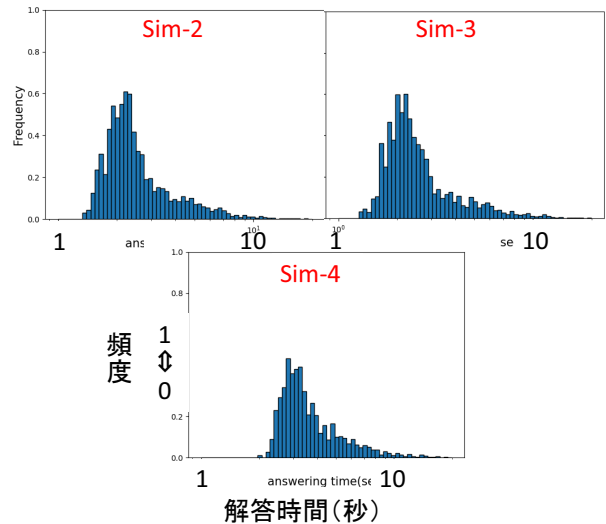


図8 パラメータの異なるシミュレーション結果の例
Fig. 8 Examples of the Simulation Results.

表3 4つの実験データに対する4つのシミュレーション結果の類似度

Table 3 EMD Values Calculated with 4 Different Simulation Results.

	EMD($\times 10^{-2}$)			
	Sim-1	Sim-2	Sim-3	Sim-4
Sub-1	2.342	4.614	5.088	20.28
Sub-2	3.117	1.831	1.564	16.34
Sub-3	4.730	1.855	2.053	17.04
Sub-4	15.98	13.70	13.14	3.085

でなく、条件の異なる実験データともさらなる比較を行うことで、各パラメータが持つ意味を詳細に考察していく必要がある。具体的には、遺伝的アルゴリズムを用いて、パラメータの組み合わせを最適化することを考えている。これは、パラメータを手動で変化させ

表4 対応するシミュレーション結果とパラメータの違い

Table 4 The Most Similar Simulation Results with Different Parameters.

実験結果	対応するシミュレーション結果	パラメータ設定
Sub-1	Sim-1	(A)=0.03, (D)=500,(E)=200
Sub-2	Sim-2	(A)=0.03, (D)=100,(E)=300
Sub-3	Sim-2	(A)=0.03, (D)=100,(E)=300
Sub-4	Sim-4	(A)=0.05, (D)=100,(E)=150

るよりも、より妥当なパラメータを求めることを可能にする。また、最適化の結果、実験データによって最適なシミュレーションパラメータの組み合わせが異なれば、個人差や条件による差が、どのパラメータに影響を与えるかを知ることができる。これは、ブラックボックス化していた人間の知的集中に影響を与える要因を明確にすることができる点で大きな意義がある。

一方で、本研究にはいくつかの制限がある。第一に、比較課題を用いた点である。他の認知課題に対する集中をシミュレーションするためには、シミュレーションモデルの変更が必要である。第二に、シミュレーションモデルの設計に際し、3状態モデルを用い、解答を行う認知ステップや戦略を一意に定めたため、解答方法が大きく異なる場合について考慮していない。シミュレーションによる厳密な分析のためには他の解答プロセスについても考慮することが必要である。第三に、選択したシミュレーションパラメータは限定的であるため、使用していないパラメータの潜在的な影響度についてのさらなる調査が必要である。第四に、シミュレーションの評価には、認知課題の一問あたりの解答時間の分布を用いたため、知的集中状態の時間遷移がシミュレーションできているわけではない。今後はパラメータの値がリアルタイムで変化するようなシミュレーションをすることが有効である。

7. 謝辞

本研究は JSPS 科研費 17H01777 の助成を受けたものです。

[1] Anderson, J. R.: *How Can the Human Mind Occur in the Physical Universe?*; Oxford University Press, New York (2007)

[2] 杉浦 敏浩, 橋本 哲, 寺野 真明, 中村 政治, 川瀬 貴晴, 近藤靖史: ワークプレイスプロダクティビティの評価方法, 第1報-プロダクティビティ評価方法の整理と標準的な評価票の提案; 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, Vol.123, pp.11-22(2007).

[3] P.Wargocki, D.P.Wyon and P.O.Fanger: *Productivity is Affected by the AirQuality in Offices*; Healthy

Buildings, pp.635-640(2000).

[4] 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).

[5] S.K. Card, T.P. Moran and A. Newell: *The Psychology of Human-Computer Interaction*; Erlbaum Associates(1983).

[6] 宮城 和音, 河野 翔, 石井 裕剛, 下田 宏: 短時間の作業中断に着目した知的生産性変動の分析; ヒューマンインタフェースシンポジウム 2011, pp.963-970(2011).

[7] Glenn Gunzelmann, Kevin A. Gluck, L. Richard Moore Jr., David F. Dinges: *Diminished access to declarative knowledge with sleep deprivation*; Cognitive Systems Research, Vol.13, No.1, pp.1-11(2012).

[8] Glenn Gunzelmann, Kevin A. Gluck, Hans P. A. Van Dongen, Robert M. O' Connor, David F. Dinges: *A Neurobehaviorally Inspired ACT-R Model of Sleep Deprivation: Decreased Performance in Psychomotor Vigilance*; Proceedings of the Twenty-Seventh Annual Meeting of the Cognitive Science Society, Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, pp.857-862(2005).

[9] Linda Jongman, Niels Taatgen: *An ACT-R Model of Individual Differences in Changes in Adaptivity due to Mental Fatigue*; Proceedings of the Twenty First Annual Conference of the Cognitive Science Society, pp246-251(1999).

[10] Maria Wirzberger, Günter Daniel Rey, Josef F. Krems: *Modeling cognitive load effects in an interrupted learning task: An ACT-R approach*; Complete CogSci 2017 Proceedings, pp3540-3545(2017).

[11] Glenn Gunzelmann, Kevin A. Gluck: *An Integrative Approach to Understanding and Predicting the Consequences of Fatigue on Cognitive Performance*; Cognitive Technology Vol.14 No.1, pp.14-25(2012).

[12] Frank E. Ritter, Michael Schoelles, Laura Cousino Klein, and Sue E. Kase: *Modeling the Range of Performance on the Serial Subtraction Task*; Eighth International Conference on Cognitive Modeling, Oxford, UK: Taylor and Francis Psychology Press, pp299-304(2007).

[13] Kimi Ueda, Hiroshi Shimoda, Hirotake Ishii, Fumiaki Obayashi, Kazuhiro Taniguchi: *Development of a new cognitive task to measure intellectual concentration affected by room environment*; The Fifth International Conference on Human-Environment System ICHES2016 Nagoya, No.20144(2016).

[14] van Vugt Marieke, Taatgen Niels, Sackur Jerome, Bastian, Mikael: *Modeling mind-wandering: a tool to better understand distraction*; Proceedings of the 13th International Conference on Cognitive Modeling, University of Groningen, pp. 252(2015).

[15] Wakako Takekawa, Kimi Ueda, Shogo Ogata, Hiroshi Shimoda, Hirotake Ishii, Fumiaki Obayashi: *An Experimental Study on Relationship Between Intellectual Concentration and Personal Mental Characteristics*; the 1st International Conference on Human Systems Engineering and Design (IHSED2018), pp.560-566(2018).