

オフィス執務者の知的生産性変動モデルに関する基礎的検討

河野 翔*¹ 宮城 和音*¹ 大石 晃太郎*¹ 石井 裕剛*¹ 下田 宏*¹

A Fundamental Study on Variation Modeling of Office Work Productivity

Shou Kawano*¹, Kazune Miyagi*¹, Koutarou Ooishi*¹, Hirotake Ishii*¹ and Hiroshi Shimoda*¹

Abstract – Aiming at proposing a new model which can explain and simulate the change of office work productivity caused by the change of office environment and/or workers' internal factors, the author has discussed the model details by examining the conventional models and experimental data. The proposed model is based on a tri-state transition model which consists of a working state, a short-term pause and a long-term pause. The transition between the working state and the short-term pause is simulated by a logarithmic normal distribution, while that between the working state and the long-term pause is caused by probabilistic functions calculated from a mental fatigue (MF) as a virtual parameter. It is expected that the model framework can not only explain the office work as a series of human cognitive processes but also predict the change of the productivity by computer simulation.

Keywords : Productivity, 3-State Model, Blocking, Mental Fatigue, Probabilistic Functions

1. はじめに

地球環境への配慮が求められている近年、企業はオフィスにおける省エネルギー活動を積極的に進めている。日本では2005年から、夏期の冷房時の室温を28程度にし、涼しく快適に働けるような軽装とすることでオフィスの冷房の消費電力を抑え、CO₂排出量削減を目指す運動、クール・ビズ(COOL BIZ)が多くの企業で実施されている。

オフィスにおける省エネルギー活動は、電力消費を抑えることにより火力発電所からのCO₂排出量が減り、環境負荷が低減され、また、照明・空調等にかかる経費も削減できるため、合理的であるかのように見える。しかし、企業で実施される省エネルギー活動には執務者の知的生産性に対する検討が欠けており、省エネルギーを推進するあまり、執務環境が悪化し、執務者の知的生産性が低下する恐れがある。

今やオフィスにおけるほとんどの作業が書類作成や情報管理といった知的作業であり、その社会的価値は年々高くなっている。したがって知的生産性の低下による経済的損失は大きく、オフィス環境を変更する際には執務者の知的生産性を考慮する必要がある。そのためにはオフィス環境下での執務者の知的生産性を定量的に評価する指標を確立し、環境の変化が知的生産性にどのように影響するのかを明確にする必要がある。

このような背景から、我々は人間を情報処理システムとして捉え、知的作業が行われる際のプロセスを考

慮した知的生産性変動のモデルを構築してきた^[1]が、これまでに作成したモデルでは被験者実験の結果を十分に再現することが難しかった。本研究ではこれまでの被験者実験の結果を精査し、考えられ得る様々なモデルを検討することを目的とする。モデルに基づいた計算機シミュレーションにより様々な条件下での実験結果の再現が可能になれば、ある環境・条件下での知的生産性変化を予測することが可能になり、被験者実験による検証を行うことなくオフィス環境等の評価・改善が可能になる。

2. 知的生産性変動モデルの再設計

2.1 モデルの対象とする範囲

対象とする影響要因

本研究では室温、空気質のような環境要因と、疲労、モチベーションのような執務者の内的要因による知的生産性への影響を考慮した、オフィス執務者の知的生産性変動モデル作成を目指す。

対象とする知的作業

オフィス執務者が行う作業の内容は様々であるが、その中で知的生産性向上が切望されているのは、書類作成や情報管理といったオフィスで主に行われている知的作業である。これらの作業は意識的なシンボル処理を必要とし、シングルプロセッサのコンピュータとのアナロジーで考えることができ、作業処理のモデル化が容易である。よって、本研究では意識的なシンボル処理を行う知的作業を対象としたモデル化を目指す。

対象とする作業期間

実際のオフィスにおける作業を考えた場合、執務者

*1: 京都大学大学院 エネルギー科学研究科

*1: Graduate School of Energy Science, Kyoto University

は何分、何時間という単位で一つの作業を処理していると考えられる。よって、オフィス執務者の知的生産性変動モデルとしては、何分、何時間という単位での知的生産性変動を考える。

2.2 作業-非作業状態間遷移モデル^[1]の概要

我々が作成した作業-非作業状態間遷移モデルは、作業から受ける心的負担とモチベーションを制御し、環境条件を一定に調整した上で実施した被験者実験のデータを元に構築されている。このモデルは知的作業時の認知プロセスに着目し、知的生産性の低下は、作業を中断している時間の増加が原因であるとするモデルである。図1にその概念図を、モデルの基本的な考え方を以下に示す。

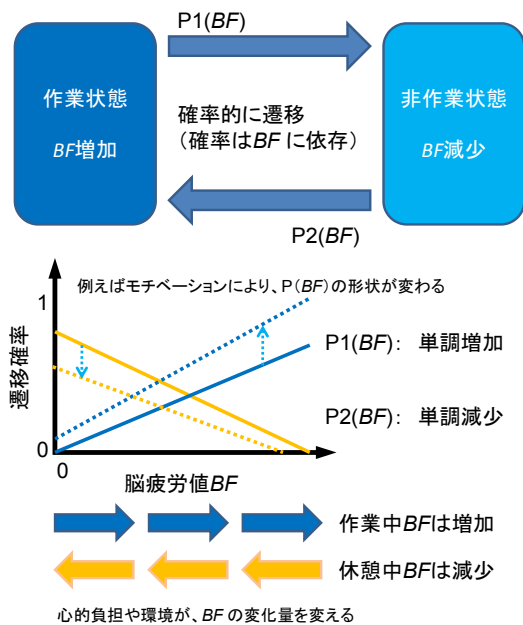


図1 作業-非作業状態間遷移モデルの概念図
Fig.1 Framework of W-NW model.

a. 作業・非作業状態

人間は知的作業中、以下の2状態間を交互に遷移しながら作業を行うと仮定する。

作業状態: 作業に集中しており、作業処理が進む状態

非作業状態: 作業に集中せずに休憩し、作業処理が停止している状態

b. 脳疲労値 BF (Brain Fatigue)

BF は生理学的な疲労を指すものではなく、疲労を想定した仮想的な値である。作業時には BF が増加していき、 BF の増加に従い非作業状態に遷移する確率が高くなる。非作業時には BF は減少し、 BF の減少に従い作業状態に遷移する確率が高くなる。また BF の増加・減少速度は、環境要因や執務者の内的要因の影響により変化する。

c. 状態遷移確率

2 状態間の遷移は状態遷移確率 $p_1(BF)$ (作業状態 → 非作業状態) $p_2(BF)$ (非作業状態 → 作業状態) に従い確率的に起こる。 $p_1(BF)$ 、 $p_2(BF)$ は BF の関数であり、その関数形は環境要因や執務者の内的要因の影響により変化する。

d. モデルパラメータ

以上の3点を前提とした枠組みのもとでモデルを作成し、計算機シミュレーションにより執務者の知的生産性変動を表現する。その際、 BF の時間変化と状態遷移確率に関しては具体的な数式を定め、その係数をモデルのパラメータとする。

2.3 作業-非作業状態間遷移モデルによる知見

我々は、環境条件を一定とし、被験者の内的要因の中で、知的生産性に直接的に大きく影響すると考えられ、かつ制御が容易で、定量化しやすいモチベーションと心的負担に着目した被験者実験を実施し、モデルの基礎的検討のためのデータを得た^[1]。モチベーションは教示と報酬により、心的負担はタスクの難易度により調整した。タスクとする作業は、モデルの対象とする知的作業であり、難易度調整が容易であるものとして、PC 上で行う暗算加算タスクとした。単位時間当りの問題解答数により、知的生産性を評価した。

そして被験者実験の結果を計算機シミュレーションによりできる限り忠実に再現し、提案したモデルによって表現できる範囲の検討を行った。その際には実験結果のうち1問あたりの解答時間のヒストグラムに着目し、実験結果とシミュレーション結果のヒストグラムの誤差 E を定量的再現度とし、 E が最小となるようなモデルのパラメータを求め、その傾向からオフィス執務者の知的生産性変動についての知見を得た。解答時間のヒストグラムに着目した理由は、それが何秒で解いた問題が何問あるかを示しており、ヒストグラムの形状の一致がすなわち、知的生産性の一致を意味するからである。

モデルに基づいたシミュレーションによる実験データの再現の結果からパラメータを解釈すると、執務者は報酬の提示等により作業に集中するようになり、作業負荷が高い時には作業への注意を持続するように努め、その分休憩を長くとするようになる傾向があることがわかった。

2.4 作業-非作業状態間遷移モデルの問題点

これまでの被験者実験では被験者にタスクを30分間行ってもらい、単位時間当りの問題解答数で知的生産性を評価してきた。図2に示すように、被験者はほとんどの問題を5秒前後で解答していたが、一部解答に30秒以上の長時間を要していた。そのような箇所は数が少ないものの、占有時間が長いと解答数に大きく影響する。作業-非作業状態間遷移モデルは解答

時間の小さな変動を再現できたが、実験結果に見られたような解答時間が長くなる現象は再現できない場合が多い。したがって新たに作成するモデルでは、解答時間の小さな変動に加え、上記のような解答時間が長くなる現象も再現する必要がある。

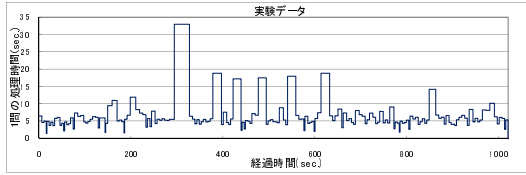


図 2 過去実験結果分析の例
Fig. 2 Analysis of past experimental result.

2.5 3 状態マルコフモデル

実験データで見られた、解答時間が長くなる現象が計算機シミュレーションで再現できなかったため、2 状態では不十分である可能性が高い。そこで、以下の 3 状態間遷移を考える。

(長期休憩 作業状態 短期休憩)

作業状態: 作業に集中しており、作業処理が進む状態

短期休憩: 作業に集中できずに休憩し、作業処理が停止している状態。

長期休憩: 作業に集中せずに休憩し、作業処理が停止している状態。作業状態に復帰しにくい。

短期休憩は、Bills^[2] が Blocking と命名した、脳の疲労によって起こる短い意識の中断により説明できる。また長期休憩は、自覚可能でよりモチベーションの影響を受けやすい意識的な休憩を想定する。

最も単純な 3 状態間遷移のモデルとして、図 3 に示す 3 状態マルコフモデルがある。我々は図 3 の 3 状態マルコフモデルを基に、次に示す対数正規分布モデルを考えた。

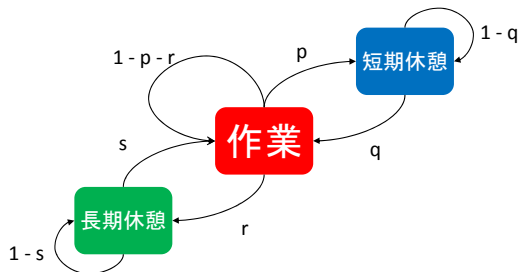


図 3 3 状態マルコフモデル
Fig. 3 3-state Markov model.

2.6 対数正規分布モデル

図 4 に示すように、実験データの解答時間のヒストグラムが対数正規分布に似た形状を持っていたことから、2 つの対数正規分布の和による実験データヒストグラムの再現を試みた。具体的には、実験データの解

答時間のヒストグラムを以下の式 (1) により再現し、数式の係数をモデルパラメータとした。

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1 t} \exp\left[-\frac{(\ln(t) - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] \cdot \alpha_1 \cdot t + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2 t} \exp\left[-\frac{(\ln(t) - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right] \cdot \alpha_2 \cdot t. \quad (1)$$

図 5 に対数正規分布モデルによる実験データの再現例を示す。

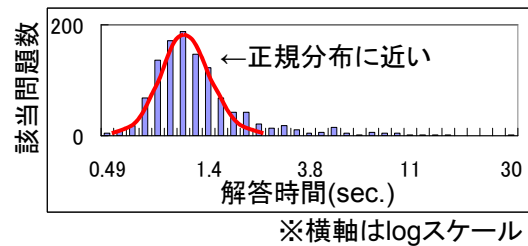


図 4 解答時間ヒストグラムの例
Fig. 4 A histogram of response time in experimental result.

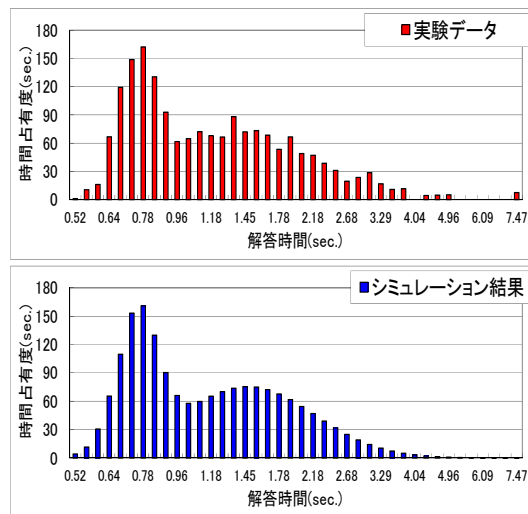


図 5 ヒストグラム再現の例
Fig. 5 An example of histogram reproduction.

実験データの解答時間ヒストグラムの形状が対数正規分布に似ている理由を考察すると、まず、HEP(Human Error Probability) との対応が考えられる。HEP の確率分布が対数正規分布に従うことは、経験則によってよく知られている。数学的根拠は未だ無いものの、実際の事例によく適合することから、人間信頼性工学の分野では一般的に、人間がエラーを起こす確率の分布として対数正規分布を用いる。

また、単純な 2 状態マルコフモデルの確率分布は図 6 に示すように対数正規分布による近似が可能であ

る。これより、脳の疲労によって起こる短い意識の中断 (Blocking^[2]) と HEP が対応し、作業状態と、自覚可能でよりモチベーションの影響を受けやすい意識的な休憩 (長期休憩) の 2 状態間遷移が 2 状態マルコフモデルに対応すると仮定し、実験データを 2 つの対数正規分布の和により再現する。

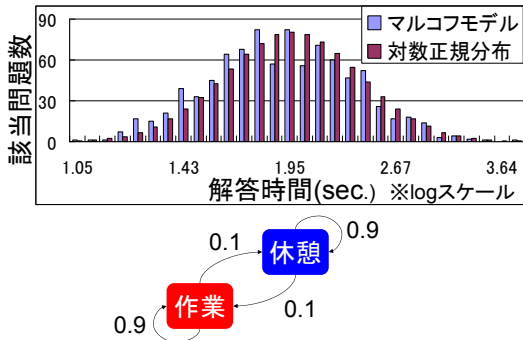


図 6 2 状態マルコフモデルの確率分布
Fig. 6 Probability distribution of 2-state Markov model.

2.7 対数正規分布モデルによる知見

これまでに我々は、照度とモチベーションを制御した場合の知的生産性への影響を、対数正規分布モデルを用いて検討するためのデータを収集することを目的とした被験者実験を行った。被験者頭上の照明設備により机上面照度を標準照度 (750lx)、高照度 (2500lx) の 2 条件に制御し、教示と報酬によりモチベーションを制御した。被験者に実施してもらったタスクとして、PC 画面を見ながら、テンキーと Wii スティックを用いる一位加算タスクと、iPad 画面を見ながら、iPad のボタンと紙伝票を用いる伝票分類タスクを用意した。図 7 に一位加算タスクの概要を、図 8 に紙伝票の例を、図 9 に iPad 上の伝票分類表を示す。

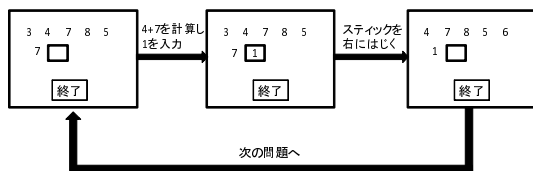


図 7 一位加算タスクの概要
Fig. 7 Outline of one-figure addition task.

そして被験者実験の結果を計算機シミュレーションによりできる限り忠実に再現し、提案したモデルによって表現できる範囲の検討を行った。その際には実験結果を最もよく再現するモデルのパラメータを GA により求め、その傾向からオフィス執務者の知的生産性変動についての知見を得た。

その結果、モチベーションが上がる時、一位加算タスクは長期休憩の長さが一定範囲に、伝票分類タスク

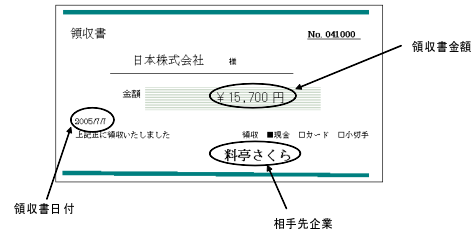


図 8 伝票分類タスクで用いる紙伝票
Fig. 8 A paper of check task.



図 9 iPad 上の伝票分類表
Fig. 9 Display image of check task on iPad.

は Blocking の長さが一定範囲に収まるようになることが分かった。ただし、伝票分類タスクにおいて、高照度で覚醒度が高くなることを確認したものの、照度が知的生産性に与える影響については把握できなかった。

3. 長期休憩重視 3 状態モデルの提案

3.1 作業-非作業状態間遷移モデルの問題点

作業-非作業状態間遷移モデルは解答時間の小さな変動を再現できたが、実験結果に見られたような解答時間が長くなる現象は再現できなかった。また、実験データの最短解答時間をシミュレーション時に採用し、その最短解答時間に対する検討は行わなかった。さらに、解答時間の時間変化には言及しておらず、実験データを完全に再現できているとは言い難い。

3.2 対数正規分布モデルの問題点

対数正規分布モデルは実験データの中で解答時間のヒストグラムを重視し、占有時間が長く、解答数に大きく影響する解答時間の延長を再現することができた。しかし、作業-非作業状態間遷移モデルに比べ知的生産性変動の機構を説明できず、また、解答時間の時間変化には言及していない。

3.3 長期休憩重視 3 状態モデルの提案

過去のモデルの問題点を踏まえ、本研究では、

- ・ 解答時間がどのように決定されるかを説明し、
- ・ 解答時間の延長を再現し、
- ・ 知的生産性変動の機構を説明でき、

- ・ 解答時間の時間変化を再現できるモデルの作成を目指す。

以下で、本研究で提案する長期休憩重視3状態モデルについて説明する。図10に長期休憩重視3状態モデルの概念図を示す。長期休憩重視3状態モデルは3つの機構により構成されている。

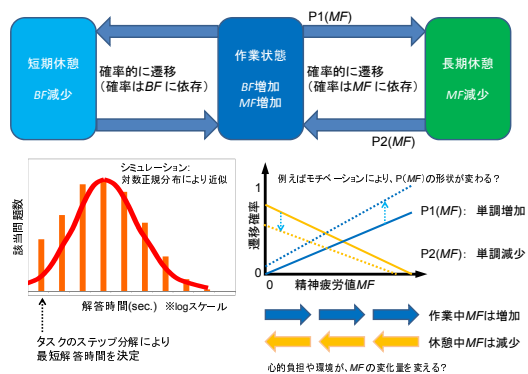


図10 長期休憩重視3状態モデルの概念図
Fig.10 Framework of long-term pause weighted 3-state model.

解答時間を説明する機構

長期休憩重視3状態モデルにおいては事前にタスクをステップ分解し、タスク1問の解答を終えるとは、「タスクの全てのステップを通過する」とこととする。タスクに対する最短解答時間は、ステップ分解により定まる。モデルにおいて最短解答時間は、「人間の認知特性を考慮した上で算出される、一切休憩せずにタスク1問を解答した場合の解答時間の理論値」と定義する。短期休憩を説明する機構

短期休憩は、脳疲労に応じて確率的に生じる Blocking^[2]を想定する。これまでの被験者実験のデータを見ると、1問当りの解答時間の分布形状は正規分布よりも対数正規分布に似た形状であった。そこで、作業状態と短期休憩間の遷移による解答時間の小さな変動は対数正規分布で近似する。

長期休憩を説明する機構

長期休憩重視3状態モデルでは、作業状態と長期休憩の2状態間の遷移を考える。2状態間の状態遷移は確率遷移とし、状態遷移確率は仮想的な内部パラメータ、精神疲労値 MF(Mental Fatigue) により変化するものとする。

3.4 長期休憩重視3状態モデルの利点

長期休憩重視3状態モデルは対数正規分布により解答時間の小さな変動を、作業状態と長期休憩間の遷移により解答時間の延長を再現することができる。それに加え、対数正規分布モデルよりも詳細に知的生産性変動の機構を説明することができる。また、対数正規分布に加えて MF を用いた状態間確率遷移モデルを

導入することにより、作業-非作業状態間遷移モデルでは難しかった、時間の経過に対して次第に解答速度が低下していく、という解答時間の時間変化も再現できることが期待される。

3.5 タスクのステップ分解

長期休憩重視3状態モデルでは、解答時間を説明・決定する機構をモデルに加え、今までのモデルよりも詳細に知的生産性変動を説明することを目指す。

解答時間を求める手法として、Cardら^[3]が考案したキーストロークレベルモデル(KLM)を用いる手法がある^[4]。KLMは計算機に対する入力操作モデルであり、従来はユーザインタフェースを評価するために用いられる。操作時間を評価の対象とすることから、工数の算定に用いる事も可能である^[5]。本研究ではタスクをステップ分解し、各ステップにおける実行時間を定め、解答時間を求めることを考える。その際にはCardら^[3]による人間情報処理モデルに記された認知時間と、実測する解答入力のための所要時間を採用する。表1に、ステップ分解におけるステップの種類と、その所要時間を示す。

表1 ステップの種類とその所要時間
Table 1 Sorts and process time of task steps

分類	所要時間
知覚	人間情報処理モデルでは 50 ~ 200msec. 刺激強度の逆関数とされている。タスクにおける刺激強度を定めることが難しいため、平均値の 100msec. を用いる。
認知	人間情報処理モデルでは 25 ~ 170msec. 課題要求や情報負荷に伴う努力の増大、および練習によって短縮される。本研究では習熟が十分に進んだ場合を考慮するため、最小値の 25msec. を用いる。
運動命令	人間情報処理モデルでは 30 ~ 100msec. 反応決定から実際の運動が起こるまでの所要時間を指している。本研究では平均値の 70msec. を用いる。
動作	実測値を用いる。
眼球運動	人間情報処理モデルでは 70 ~ 700msec. 飛躍に 20 ~ 50msec. (平均 30msec. ^[6])、停留に約 230msec. 必要とされている。本研究では飛躍の平均値の 30msec. を用いる。

タスクをステップ分解する際には、異なるプロセッサを使用する場合は並列処理が可能であるとした。例として、一位加算タスクにおけるステップ分解の例を表2に示す。

3.6 対数正規分布による近似

短期休憩は、脳疲労に応じて確率的に生じる Blocking^[2]を想定する。前述のようにこれまでの被験者実験のデータを見ると、タスク1問当りの解答時間の分布形状は正規分布よりも対数正規分布に似た形状であった。長期休憩重視3状態モデルでは、対数正規分

表2 ステップ分解による最短解答時間の導出
Table 2 Calculation of minimum time to execute One-figure addition task

順番	ステップ	分類	時間 (msec.)
1	Wii スティックを倒す	運動命令	70
	左の数字を見ようとする		
2	左の数字を見る	眼球運動	30
3	左の数字を確認する	知覚	100
4	左の数字を記憶する	運動命令	70
	右の数字を見ようとする		
5	右の数字を見る	眼球運動	30
6	右の数字を確認する	知覚	100
7	右の数字を記憶する	認知	25
8	2つの数字を足し合わせる	認知	25
9	計算結果の1の位を記憶する	認知	25
10	計算結果の1の位がテンキーのどの位置か判断する	認知	25
11	該当箇所のキーを押そうとする	運動命令	70
12	該当箇所のキーを押す	運動命令	70
	Wii スティックを倒そうとする		
	推定時間		640

布モデル同様、作業状態と短期休憩間の遷移による解答時間の小さな変動を対数正規分布で近似する。近似の際には、以下の式(2)を用いる。

$$t = \exp[\sigma * \text{gaussrand}() + \mu]. \quad (2)$$

式(2)において、 t はタスク1問毎の解答時間、 $\text{gaussrand}()$ は正規分布 $N(0, 1)$ の正規乱数である。この時、 μ をモデルパラメータとし、タスクのステップ分解で求めた解答時間 t_{min} を用い、

$$\ln(t_{min}) = \mu - 3\sigma \quad (3)$$

であるようにする。式(3)により、対数正規分布により想定する最短解答時間がほぼ t_{min} になる。パラメータ μ は、モチベーションなどの内的要因と室内環境などの外的要因により定まるものとする。

3.7 作業状態-長期休憩間の遷移モデル

長期休憩重視3状態モデルでは、作業状態と長期休憩の2状態間の遷移を考える。長期休憩は意識的な休憩を想定する。この2状態間の状態遷移は確率遷移とした。状態遷移確率は仮想的な内部パラメータ、精神疲労値 MF(Mental Fatigue) により変化し、作業状態では MF が蓄積、長期休憩では MF が解消され、それに応じて遷移確率が高くなるものとした。状態遷移確率関数、MF の蓄積・解消の速度は、モチベーションなどの内的要因と室内環境などの外的要因により定まるものとする。

3.8 モデルに基づくシミュレーション結果の例

図11に長期休憩重視3状態モデルに基づいたシミュレーション結果の例を示す。

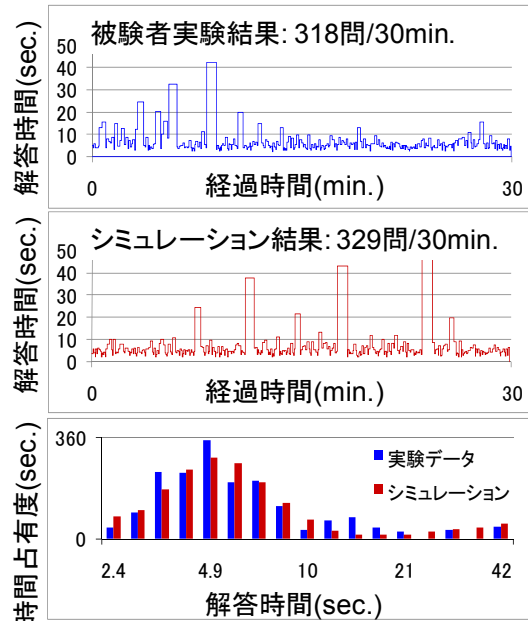


図11 長期休憩重視3状態モデルに基づいたシミュレーション結果の例

Fig.11 An example of simulation result based on long-term pause weighted 3-state model.

4. 今後の展望

今後は更なる文献調査により、心理・生理両面からモデルを理論的に裏付けていく。また被験者実験により一定環境・一定条件化における実験データを複数収集し、モデル精度の向上を図る。そして、モデルが完成し、様々な要因と知的生産性間との関係が解明されれば、計算機シミュレーションによる知的生産性変動の予測が可能になり、容易に知的生産性向上のためのオフィス環境改善が実現することが期待できる。

参考文献

- [1] 宮城, 河野, 金, 石井, 下田: 作業-非作業状態間の遷移を仮定した知的生産性変動モデルの作成, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2010(2010).
- [2] Bills, A. G. : Blocking: A new principle of mental fatigue, American Journal of Psychology, 43, pp.230 ~ 245(1931).
- [3] S.K. Card, T.P. Moran, A. Newell: The Psychology of Human-Computer Interaction, Erlbaum Associates(1983).
- [4] D. Kieras: Using the Keystroke-Level Model to Estimate Execution Times, University of Michigan(2001).
- [5] 大野, 金子: キーストローク・レベル・モデルによるドキュメント電子化プロセスの検討, 情報処理学会研究報告, 96(117), pp.9-16(1996).
- [6] 芋阪, 中溝, 古賀: 眼球運動の実験心理学, 名古屋大学出版会, p.106,113 (1993).