

知的作業における集中度評価指標と集中度向上照明

Intellectual Concentration Index and Concentration-Improving Lighting

大林 史明
Fumiaki Obayashi

石井 裕剛
Hirotake Ishii

下田 宏
Hiroshi Shimoda

要 旨

オフィスや学習の場などにおける、執務者・学習者の知的作業時の集中度を客観的・定量的に評価できる技術を開発した。認知モデルに基づく集中度評価指標であり、評価時の習熟の影響を受けない特徴がある。また評価に要する計測・解析ツールも開発した。これにより、執務空間・学習空間の室内空間設計・評価や執務・学習支援器具の設計・評価が可能となる。またこれを用いて、オフィス向けに省エネルギーかつ集中度を向上させる照明システムを開発し、従来照明と比較し集中度を平均約5%ポイント、向上率平均で10.0%向上させる効果が確認された(N=21, $p<.01$)。

Abstract

The authors have proposed concentration time ratio as a new index to evaluate intellectual productivity, which has been difficult to quantitatively evaluate. It uses the concept of concentrating on a target task. In addition, a measurement tool has been developed based on the index. This intellectual concentration index can be used for designing and evaluating the indoor environment of offices and educational buildings. In addition, a new illumination system to improve workers' concentration has been developed. An experiment to evaluate intellectual productivity was conducted by employing Concentration Time Ratio (CTR). The results showed that the average CTR under the new illumination system was 5 percentage points higher than that under normal ambient lighting, and the average progress rate of CTR was 10.0% (N=21, $p<.01$).

1. はじめに

オフィスや教育施設、家庭での学習空間などの次世代付加価値として、知的活動の促進が注目されている。例えばオフィスにおいては知的生産性の経済的影響の大きさなどの調査結果が示されている[1]。しかし知的活動や知的生産性という概念に対し、それらを考慮した空間制御設計を行ったり、効果評価を行うには、客観・定量的な評価指標は確立していないのが現状である。

一方、さまざまな知的活動においては、人間の集中が汎用かつ重要な要素であると考えられる。そこで、知的活動、知的生産性の客観・定量的な指標として、人間の知的作業時の集中度の客観・定量評価指標を導出する。さらに執務・学習空間などへの応用開発として、集中度向上効果をもつオフィス向け照明の開発・評価を行う。

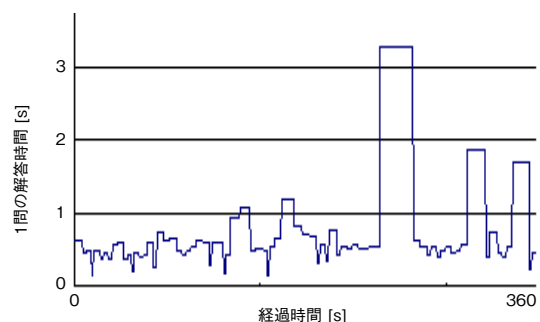
は数秒程度で解答できているが、そのなかには10秒~30秒程度かかって解答している問題がある。すなわち、執務環境変化などにより知的生産性が変化する場合には、各問題の解答時間が一様に変化するわけではなく、解答に長い時間がかかっている問題の数が増えることにより、全体として作業効率が変化していることがわかる。解答に長い時間がかかっている問題は特に難易度が高いわけではないことを考えると、この問題を解答する際に解答作業に集中しておらず、ある時間だけ休憩している状態であると考えられることができる。

オフィスでの知的作業は、Cardら[3]の人間情報処理システムを参考に、意識的で直列的な情報処理として捉えると、周期が数十ms~百数十ms程度の認知ステップの連なりとみなせる。そして、第1図に示したような解答時間の延長は、ある一定の時間、情報処理が進行しない

2. 集中の客観・定量評価指標

2.1 集中の定義

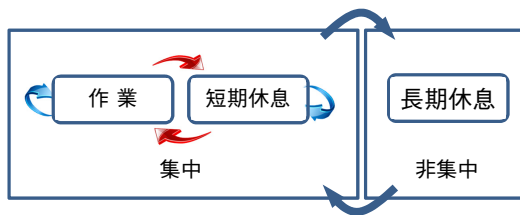
知的生産性が変動する過程を情報処理プロセスの変化という観点から説明する数理モデルがある[2]。このモデルでは、同程度の認知処理時間が必要な認知タスクの問題を連続で実施していると、その処理時間が著しく延びる問題があることに着目している。第1図は、難易度が同じ問題の認知タスクを連続的に被験者に与えたときの各問題の解答時間を示したものである。ほとんどの問題



第1図 解答時間の経時変化
Fig. 1 Series of solving times

ときがあると考えることができる。また、数秒程度で解答できている多くの問題も、難易度が一定であれば解答時間が一定であるはずにもかかわらず解答時間は少し変動している。これも短時間だけ情報処理が進行していないものとみなせる。

そこで、ここでは第2図に示すように、知的作業中の情報処理の状態を、「作業状態」、「短期休息状態」、「長期休息状態」の3状態に分類し、状態間の遷移によって知的生産性の変動を説明する。作業状態は作業に認知資源を割り当て実際に作業が進んでいる状態である。短期休息状態は認知資源を作業へ割り当ててはいるものの、無意識に短い間作業が止まり、作業が進んでいない状態である。長期休息状態は、認知資源を作業に割り当てず、作業処理が停止している状態である。作業処理を遂行する際は、作業状態と短期休息状態を一定の確率で遷移するマルコフモデルを形成し、疲労が蓄積すると意図的に長期休息状態へ遷移する。長期休息状態時に疲労が回復すると、再び作業状態に復帰する。



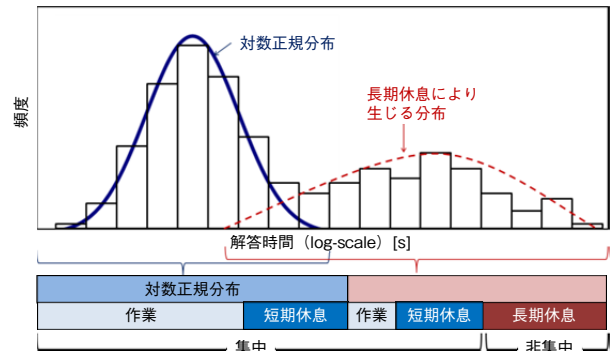
第2図 知的生産性変動モデルのフレームワーク
Fig. 2 Cognitive state transition model

集中とは「1つの事柄に注意を集めて物事に取り組むこと」であるが、本研究では、認知資源を一定期間対象に割り当てている状態を集中状態と定義し、対象に割り当てていない状態を非集中状態と定義する。そして集中状態は、先述の3状態遷移モデルにおける「作業状態」と「短期休息」の2状態に対応するものとし、非集中状態は「長期休息」に対応するものとする。そして、10分以上の長時間にわたって連続して知的作業をしている場合に、集中状態が全作業時間に占める時間比率を「集中時間比率 (CTR: Concentration Time Ratio)」と呼び、これを知的活動評価の指標とする。

2.2 集中の客観・定量評価指標

このような状態遷移モデルを考えた場合、均質で同程度の所要時間が期待される認知課題を連続して行った際、その所要時間の頻度分布は、第3図のように、時間が短い区間での頻度は(1)式の数正規分布で近似され、さらに所要時間が長い区間にも別の山が生じる。(1)式

において、 t は所要時間、 μ は最頻値、 σ は分散である。これはモデルに従ってシミュレーションをした結果および実際に収集した所要時間頻度分布から導出したものである。



第3図 解答時間ヒストグラムと集中時間
Fig. 3 Histogram of solving time and concentration time

対数正規分布の内側の区間では長期休息が生じなかった設問の数が、対数正規分布の外側の区間は長期休息が生じた設問の数が頻度分布上に表れる。また、両者が重なり合った区間では、長期休息が生じた設問と、生じていない設問が混じり、その合算数で表れる。

集中指標では、集中を作業状態・短期休息と考えるため、この2つの状態の合計時間から、集中時間比率が計算できる。適切な認知タスクを連続して T_{total} 秒間実施させ、その間の合計回答数が N 問であった場合、解答1問あたりの集中時間の平均CT (以降、 \overline{CT}) が明らかになれば、集中時間比率CTRは(2)式で表される。

第3図のように、 \overline{CT} は長期休息が生じず、頻度分布が(1)式の数正規分布で表される区間の問題の平均解答時間と考えられる。これは対数正規分布の期待値であるから、 \overline{CT} は(3)式で表される。

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma t}} \exp\left(-\frac{(\ln(t) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{集中時間比率 } CTR = \frac{\overline{CT} \cdot N}{T_{total}} \dots\dots\dots (2)$$

$$\overline{CT} = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \dots\dots\dots (3)$$

したがって、頻度分布のグラフに対して、もっとも適切な対数正規分布による近似曲線を導出することで、CTRを算出できる。この集中時間比率CTRを集中指標(集中度)として用いる[4]。

2.3 集中指標の特徴

このようにして導出される集中指標は、実際に認知課

題を行わせた際の実測データより導出された客観・定量的なものとなる。また多様な知的活動を「集中」という1つの観点から評価可能であり、「集中している時間割合」という意味のある数値として定量化が可能である。

さらに、集中状態の程度を測っているため、認知タスクを用いた評価では通常発生する習熟の影響を排除可能であり、また検証実験によりそのことを確認している[5]。このため従来は正確な評価には数十回ほどのタスク施行が必要であったものが、事前の説明・練習と評価対象の実測のみで済み、大幅な評価時間の短縮が実現する。

また数秒程度の認知タスクを用いれば、最小評価時間は10分程度であり、さらに移動平均による集中度の時間推移などの詳細な評価も可能となる。

参考までに、同一被験者の異なる集中度での、実際の1問あたりの解答所要時間（30分間計測時）の分布図を第4図に示す。集中時間比率が高いときは、長期休息が少なく、また短時間で処理できていることが多いのに対し、集中時間比率が低いときは、長期休息の占める割合が大

きく、短時間で処理できていることは少なくなっている。このように本集中時間比率は、実際の作業結果から導出されたものであり、作業者の状態をわかりやすく反映したものである。

こうした集中指標を用いて、知的作業時の集中度を高めるような種々の作用要素の設計や効果評価を行うことができる。

3. 集中の客観・定量評価ツール

集中状態を定量的に評価するためには、ユーザーが知的作業中にどれくらい集中状態にあるのかを測定する必要がある。そこで、ある環境下におけるユーザーの集中状態を簡便に測定するための集中指標評価ツールを開発した。

3.1 計測ツール

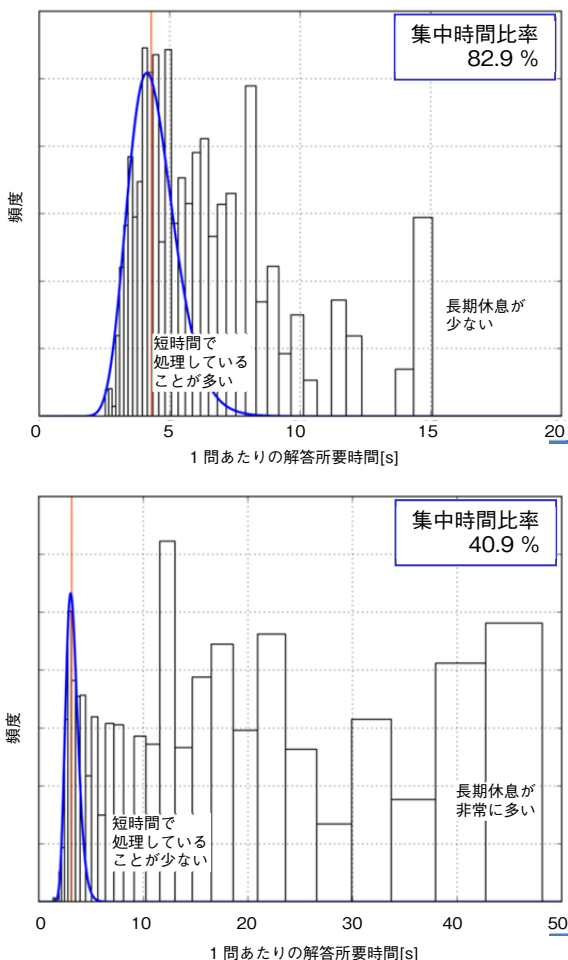
計測ツールは、被計測者が実際に認知課題を行い、その応答を計測するものである。この計測ツールが満たすべき要件を以下に示す。

1. 認知要素として言語、数字、判断能力を扱うこと
2. 被計測者が自分のペースで作業を続けることができること
3. 各問題の認知負荷が一定であり、集中状態では1問あたりの回答所要時間にばらつきが少ないこと
4. 作業中に解答戦略が変化しない内容であること
5. 実用的な時間分解能をもつこと

これらの要件を満たすべく開発した認知タスクは3つの情報処理課題を合わせたもので、被計測者は提示された3つの情報をそれぞれのルールに従って3択分類を行い、回答を入力するものである。被計測者は、評価時間内はこの課題を順次行っていく、その1問あたりの解答所要時間を計測している。

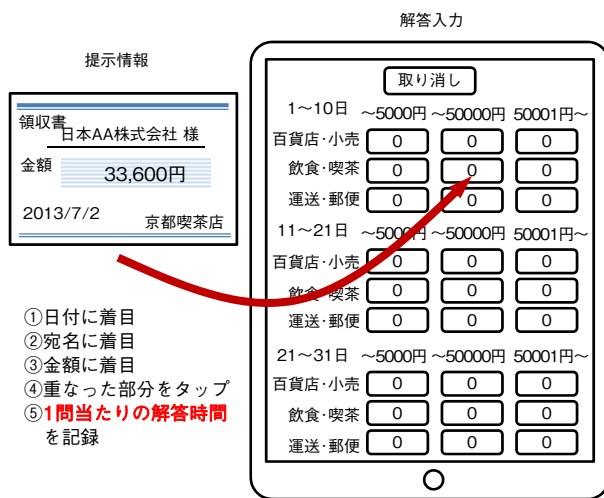
この認知タスクは本来抽象的な情報処理課題であるが、実装例の1つとして提示情報のデザインを領収書に似せたものがある（第5図）。なおこれは新規導入時に処理ルールを直感的に把握しやすいように身近に見慣れたものに似せただけであり、このタスクは経理処理などの単純作業を対象とするものではない。本タスクは、提示された伝票を、記載された日付、業種、金額の3種類の要素に対し、それぞれのルールに従って3択分類をし、提示された伝票を27通りに分類するタスクである。

この認知タスクの1問あたりの平均解答時間は数秒程度であり、10分程度以上の計測で集中度の評価は可能となる。



第4図 解答時間分布と集中時間比率の例

Fig. 4 Example of solving time histogram and CTR



第5図 認知タスクの概要
Fig. 5 Cognitive task

3.2 解析ツール

3.1節の計測ツールを被計測者が使用した結果データを基に、集中時間比率CTRを導出する解析ツールも開発した。計測データは対数正規分布部分と長期休息部分の重畳となるため、これらを分離して近似曲線を求め、CTRを算出するようにしている。また計測期間中のCTRの時間推移も導出するなど、各種応用解析も可能となっている。

3.3 被験者実験による評価

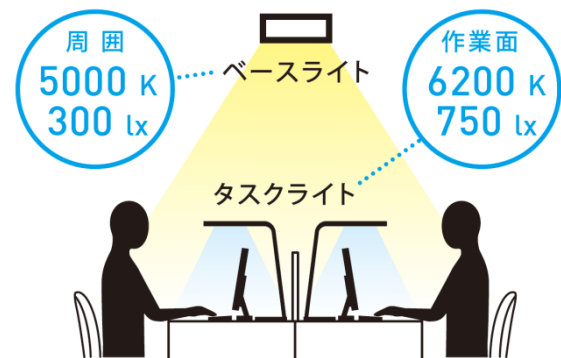
本集中指標および評価ツールの有効性を検証するために被験者実験を行った[5]。教示により集中させた状態と通常状態の条件下で集中度評価を行ったところ、有意な集中時間比率の差を確認している (N=16)。また、タスク成績は施行回数が増えるに従って習熟影響により増加してしまいが、集中時間比率は習熟の影響を受けていないことも確認している。また室内照度条件の違いにより集中度が変化することも確認している。

4. 集中度向上照明の開発・効果評価

4.1 集中度向上照明

執務者・学習者の集中度を向上させるために、没入感や覚醒度の向上が有効であると考えられる。そこでオフィス向けに以下のような集中度向上照明を開発した(第6図)。

本照明は天井からのベースライト照明とデスク上のタスク照明から構成される。ここで第1表に示すように各



第6図 集中度向上照明の概要
Fig. 6 Concentration-improving lighting

第1表 照明設定

Table 1 Setting of lighting

	オフィス標準照明	集中度向上照明
ベース照明	5000 K, 750 lx	5000 K, 300 lx
タスク照明	なし	6200 K, 450 lx

照明のパラメータを設定することにより、光による没入空間を作り出し、また覚醒効果や文字の読みやすさも考慮した色温度とすることで、執務者の集中度を向上させる照明を設定した。また本照明は一般的なオフィス照明に比べて30%以上の省エネルギー効果もある。

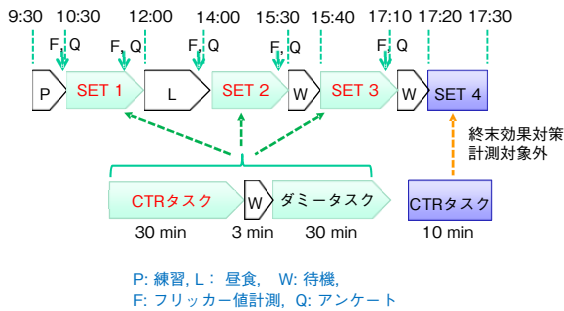
4.2 効果評価

本照明の集中度向上効果を検証するため実験室での被験者実験を行った[6]。第7図に示す机上面照度を750 lxに統一した3種の照明条件(標準照明、従来タスクアンビエント照明(以下、従来TA照明)、集中度向上照明)において、被験者に集中度評価ツールによる作業を課し評価した。

実験は2013年7月29日から9月5日にかけて、京都大学工学部1号館233号室で行った。実験参加者は30代~50代の派遣人材男女12名ずつ計24名であり、全員が色覚異常をもたない健常者であった。被験者を均等に6グループに分け、照明条件間のカウンターバランスをとった。各グループでの実験は月曜日から木曜日までの4日間連続で行い、1日目は説明・順応などを行い、2日目から4日目で1日1照明条件をあて、各日は9時半から17時半とした。各日は1日3セット(午前1セット、午後2セット)知的作業時の集中度計測を行った。各セットは第5図の認知タスク30分、ダミータスク30分、アンケート、フリッカー計測などで90分としている(第8図)。照明による影響のみを抽出するため、窓を遮光し、室温を26℃±1℃、湿度を70%±10%、二酸化炭素濃度を800 ppm以下になる

	標準照明	従来タスク アンビエント照明	集中度向上照明
照明手法 (机上面照度 750 lx)	5000 K 750 lx	5000 K 300 lx 5000 K 450 lx 配光制御なし	5000 K 300 lx 6200 K 450 lx 狭角

第7図 照明条件
Fig. 7 Illumination conditions



第8図 1日の流れ
Fig. 8 Experimental procedure

ように制御した。また被験者には実験中の飲食物は支給品のみとし、タスク後から翌朝までの活動、起床・就寝時刻、飲食などに関する生活統制を行った。

被験者のうち適切に作業を行っていなかった者など3名のデータを除き、21人分のデータを解析対象とした。集中度向上照明と標準照明、従来TA照明と標準照明との比較を第2表に示す。

第2表 照明条件間でのCTR比較
Table 2 Comparison of CTRs

CTR平均 (集中度向上照明) [%]	CTR平均 (標準照明) [%]	CTR平均値の差	向上率平均
72.5	67.5	5.0%ポイント** **: $p < .01$	10.0%
CTR平均 (従来TA照明) [%]	CTR平均 (標準照明) [%]	CTR平均値の差	向上率平均
70.9	67.5	3.4%ポイント	6.6%

照明条件の違いがCTRに与える影響を評価するため、各照明条件におけるCTRをそれぞれ対のある両側t検定を用いて比較したところ、集中度向上照明は標準照明に比べて有意に高く ($p < .01$)、集中度向上照明は標準照明に比べて集中時間比率を差で平均約5%ポイント、各人の向上率の平均で10.0%向上させる効果が確認された。CTRは集中していた時間の割合という意味のある単位であるため、環境条件による効果を、集中時間比率の差 [%ポイント]として表すことも、環境条件による各人の集中

時間比率の向上率として表すことも可能である。

また1日をとおした大脳新皮質の疲労の変化を調べるため、フリッカーによる生理評価で、各照明条件における、セット1前とセット3後の値を対のある両側t検定で比較した。有意差が見られたのは標準照明のみであり、1日の後半で値が低下していた ($p < .001$)。このように標準照明では、1日をとおして疲労が現れてくるが、集中度向上照明および従来TA照明では確認されなかった。

さらに主観評価においても、「集中しやすい」「眠くならない」「快適」の各項目で、集中度向上照明と標準照明、従来TA照明と標準照明のデータをそれぞれ対のある両側t検定で比較したところ、集中度向上照明および従来TA照明は標準照明よりも有意に高く、良好な効果実感があることを確認した。

これらをとおし、集中度向上照明は知的作業時における集中度向上に効果があることが確認された。

5. まとめ

オフィスや学習の場における、執務者・学習者の集中度を客観的・定量的に評価できる技術を開発した。これにより、執務空間・学習空間の室内空間設計・評価や執務・学習支援機器の設計・評価をはじめ、集中に関するさまざまな要素の評価が汎用的に可能となる。またこれを用いて、オフィス向けに集中度を向上させる照明システムを開発した。なお、この集中度向上照明の効果評価は、環境省平成25年度節電・CO₂削減のための実践促進モデル事業において行ったものである。

今後、知的作業時の集中に関する基礎研究や、集中に良い室内環境構築や支援機器の開発など、幅広い応用展開に取り組んでいきたい。

参考文献

- [1] 伊藤雅人 他, “建築物の総合環境性能評価手法 CASBEE に関する研究 その126 CASBEE スコアと知的生産性の経済効果に関する調査,” 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1065-1066, 2015.
- [2] 宮城和音 他, “断続的な休息を仮定した知的生産性変動モデルの提案,” ヒューマンインタフェース学会論文誌, vol.16, no.1, pp.7-18, 2014.
- [3] S. K. Card et al, “The Psychology of Human-Computer Interaction,” Erlbaum Associates, 1983.
- [4] 宮城和音 他, “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.
- [5] 下田宏 他, “作業への集中に着目した知的生産性の定量評価法,” 第5回横幹連合コンファレンス, Paper no.2A-1-3,

pp.371-378, 2013.

- [6] H. Kanagawa et al, "Proposal of Intellectual Productivity Evaluation Index and Quantitative Evaluation of Concentration Improvement Lighting," APCHI - ERGOFUTURE - PEI -IAIFI, 2014.

執筆者紹介



大林 史明 Fumiaki Obayashi
エコソリューションズ社 技術本部
Engineering Div.,
Eco Solutions Company
博士 (エネルギー科学)



石井 裕剛 Hirotake Ishii
京都大学大学院エネルギー科学研究科
Graduate School of Energy Science, Kyoto
University
博士 (エネルギー科学)



下田 宏 Hiroshi Shimoda
京都大学大学院エネルギー科学研究科
Graduate School of Energy Science, Kyoto
University
工学博士