

照明刺激環境下のくつろぎ感に関する心理生理学的研究

中村 透^{†a)} 上垣百合子[†] 藤原 ゆり[†] 奥谷 晃久[†]
山本 松樹^{††} 長田 典子^{†††}

Psychophysiological Study on Feeling of “Relaxation” in an Environment with Lighting Stimuli

Toru NAKAMURA^{†a)}, Yuriko UEGAKI[†], Yuri FUJIWARA[†], Teruhisa OKUYA[†],
Matsuki YAMAMOTO^{††}, and Noriko NAGATA^{†††}

あらまし 本研究では、照明刺激環境における高次感性であるくつろぎ感がどのような心理尺度から構成されているか、更にはどのような生理指標で客観的に説明できるかを心理生理学的に検討した。代表的な四つの照明刺激を用いて、心理計測と生理計測（脳波、心電、皮膚電位水準）を実施した。心理評価の結果、くつろぎ感とは二次元感情モデル（快適感、覚醒感）で表現できることを確認した。更に、重回帰分析と交差検証を用いて、心理指標と生理指標との相関性を検討した結果、快適感、覚醒感共に脳波パワー値やその相互相関係数といった生理指標で説明できる相関モデルを導出した。以上より、本研究で対象とした照明刺激環境下のくつろぎ感が脳波パワー値関連の生理指標を用いて客観的に説明できることが30代、40代女性において示唆された。

キーワード 照明刺激、くつろぎ感、二次元感情モデル、生理指標、脳波

1. ま え が き

近年、住宅照明では、居住者のライフスタイルの多様化により、くつろぎやだんらんの場面など生活シーンに合った質的な照明空間を求めるニーズが高まっている [1]。こうしたニーズに対応した照明空間を創出するためには、照明刺激環境とそのときのユーザの心理状態との関連性を生活シーンごとに明確化する必要がある。

人の心理状態を評価する手法として、心理計測手法、生理計測手法などがある。心理計測手法では、アンケート方式の主観評価が一般的であり、照明環境の印象を計測している研究事例は多く見られるが [2], [3]、照明環境によって喚起される気分や心理状態を計測し

た事例は少ない。また生理計測手法では、実用的な計測手段の一つとして知られる脳波を用いた感性解析法が提案されている。代表的な解析法として、武者らによる感性スペクトル解析手法 [4] や、中川らによる感性フラクタル次元解析手法 [5] がある。感性スペクトル解析手法は、脳波信号の θ , α , β 波帯域における電極間の相互相関係数を用いて4種類の基本的な感性とされる喜怒哀楽を推定する。また、感性フラクタル次元解析手法は、脳波の差分信号に対するフラクタル次元を用いて喜怒哀楽をより精度良く推定する手法として実用化に向けた研究がなされている [5]。感性スペクトル解析手法や感性フラクタル次元解析手法の応用として、繊維製品を対象とした匂い刺激時の感性や衣服着用時の着用感などに適用した研究は見られるが [6] ~ [8]、照明環境に適用した研究例は少ない。このように、照明刺激環境下の人の心理状態を客観的に評価する手法がまだ確立していないのが現状である。

そのような中、筆者らはこれまで、ヒューマンセンタードな快適空間をユーザに提供することを目指し、空間内の環境刺激による心理状態を客観的に捉えるための指標化の方法を提案してきた。映像刺激環境を対象とした先行研究 [9] では、映像刺激による心理状

[†] パナソニック株式会社エコソリューションズ社, 門真市
Eco Solutions Company, Panasonic Corporation, Kadoma-shi, 571-8686 Japan

^{††} パナソニック株式会社アプライアンス社, 草津市
Appliances Company, Panasonic Corporation, 2-3-1-2 Nojihigashi, Kusatsu-shi, 525-8555 Japan

^{†††} 関西学院大学理工学部, 三田市
School of Science and Technology, Kwansai Gakuin University, 2-1 Gakuen, Sanda-shi, 669-1337 Japan

a) E-mail: nakamura.to-oru@jp.panasonic.com

態を客観的な生理指標でモデル化できるかを検討し、ラッセルらの先行研究でよく知られる二次元感情モデル [10] の構成要素である快適感と覚醒感を、中枢神経系と末梢神経系の生理指標によって高い相関係数でモデル化できることを示した。

こうした二次元感情モデルの考え方に基づいた筆者ら提案の評価手法が、本研究で対象とする照明刺激環境におけるくつろぎ感などのより高次な感性の客観的評価に適用できるかは、映像刺激環境における心理状態を対象とした筆者らの先行研究 [9] においても検討されておらず、また照明刺激環境を対象として心理と生理の両面で検討した類似の先行研究も少ないため、不明である。

そこで、本研究では、照明刺激環境においても、二次元感情モデルの考え方に基づいた筆者ら提案の評価手法が適用できるという仮説を立てて、心理計測と生理計測による検証実験を行った。特に、住宅照明の代表的な生活シーンであるくつろぎのシーンを想定し、照明刺激環境下のくつろぎ感に着目した場合に、高次感性であるくつろぎ感が二次元感情モデルで表現できるか、更にはどのような生理指標で説明できるかを心理生理学的アプローチにより明確化することを目的とした。なお、照明刺激環境下のくつろぎ感のモデル化に際して、性別、年齢、照明の関心度などの属性がくつろぎ感に及ぼす影響は大きいと考えられるため、本研究では、照明空間の質を適切に評価できると考えられる住宅照明に関心の高い属性の中で、30代、40代の女性に限定した場合のモデル化の可否を明確化することに主眼を置いた。

2. 実験方法

2.1 実験参加者

実験参加者は数年以内に新築住宅購入予定の意思があり、正常な視覚を有する健康な30代、40代女性12名（平均年齢 38.1 ± 6.3 歳）であった。実験の冒頭で非侵襲的な生理計測内容に書面にて同意を得てから実験した。

2.2 刺激条件

表1に、本実験で用いた四つの照明刺激条件 A, B, C, D をそれぞれ示す。本実験ではリビングの照明空間を対象とし、刺激呈示にはリビング空間を想定した照明実験環境（4380 mm × 3640 mm の約 10 畳）を用いた。なお本研究では、できるだけ実際のリビングに近い照明空間でのくつろぎ感を計測するために、リビ

表 1 本実験で用いた四つの照明刺激条件
Table 1 Lighting stimuli.

刺激条件名	主な照明仕様 ※図は天井面から照明器具を見た場合の設置位置			実験参加者が観察する照明空間	
	観察イメージ	顔面鉛直面の照度、光色			
A	1室1灯 明るめ	【調光仕様シーリングライト(蛍光灯)】 ・天井面の中央に1箇所 ・調光:100%, 光色:昼白色			208(lx) 4331(K)
B	1室1灯 暗め	【調光仕様シーリングライト(蛍光灯)】 ・天井面の中央に1箇所 ・調光:15%, 光色:電球色 ※器具自体は刺激条件Aと同じものを使用			40(lx) 2644(K)
C	1室複数灯 明るめ	【ライン照明(LED)】 ・天井面左側、TVボード上・下面の計3箇所 【ダウンライト(LED)】 ・天井面の前側・中央・後側の計8箇所			128(lx) 2629(K)
D	1室複数灯 暗め	【スポットライト(LED)】 ・天井面の前側に2箇所 【フロアスタンド(蛍光灯)】 ・床面の前側・後側に2箇所			33(lx) 2662(K)

ングに一般的に設置されるテレビやテレビ台などを配置した。ただし、テレビ映像のコンテンツがくつろぎ感に与える影響を排除するために、テレビの電源は切とした。刺激条件は、住宅照明の代表的な手法である1室1灯と1室複数灯 [1] において照明手法ごとに明るめと暗めの条件を設定した。ここで、1室1灯については住宅照明で一般的に普及しているシーリングライトを用いて可能な範囲でくつろぎ感を考慮した照明条件（調光と光色の組合せ）を設定した。条件設定に際し、明るさと光色で人が感じるとされるクルイトフ [11] の快適領域の考え方（低い光色で低い照度だと快適であり、高い光色で高い照度だと快適）に基づき、明るめの条件 A は光色の高い昼白色で調光を 100% とし、暗めの条件 B は光色の低い電球色で調光を 15% とした。一方、1室複数灯については社内の照明プランナーがくつろぎのシーンを想定してプランニングした代表的な照明条件 C, D を設定した。こうして設定した各照明刺激条件を代表する照明物理量として、実験参加者の顔面鉛直面における照度と光色を表1に示す。なお、本実験中の温湿度条件は、平均温度 25°C、平均湿度 53%RH であった。

2.3 実験手続き

図1に、本実験のプロトコルを示す。実験参加者は、ソファに着席しアイマスクを着用した閉眼状態で、1分間安静にした。安静後、アイマスクを閉眼状態で外し、開眼して照明空間を3分間観察した。ここで、主な観察対象は、実験参加者の目の前の壁全体とした。照明のまぶしさの影響を極力排除するため、照明の光源を直視し続けたり天井を見上げたりしないように、実験前に教示した。生理計測は、安静開始以降、連続

アイマスク装着(閉眼)	安静(1分間)	アイマスク外す(閉眼)	照明空間観察(3分間)	心理評価(数分)
-------------	---------	-------------	-------------	----------

図1 本実験のプロトコル
Fig. 1 Experimental protocol.

して行い、心理評価は空間観察後に実施した。

以上の手続きを、表1で示した四つの刺激条件に対し繰り返して実施した。なお本実験では、1室1灯と1室複数灯の呈示順番を交互にしつつ、実験参加者ごとに四つの刺激条件の呈示順番をランダムに入れ換えた。

2.4 計測・解析方法

2.4.1 心理計測・解析方法

図1で示した心理評価では、照明空間観察後のくつろぎ感と心理状態を計測した。くつろぎ感は0から100%の9段階尺度で総合的に評価した。一方、高次感性であるくつろぎ感を説明するための心理状態の評価には、筆者らの先行研究[9]で用いたSDアンケートが人の気分や心理状態を評価するに足りる一般的で汎用的なものであることから、先行研究[9]と同じ仕様のSDアンケートを用いた。ここで、SDアンケートは、快適な、気分が明るい、緊張するなどの19個の評価形容詞対を7段階で評定する仕様であった。なお、くつろぎ感を説明するための具体的な説明変数として、照明空間における生活シーンをSD法で得られた心理データの主因子で説明している先行研究[3]にならって、SDアンケートの結果に対して主成分分析を実施し得られた心理状態の主成分を選択した。くつろぎ感と、心理状態の主成分との対応関係を検討するために、目的変数をくつろぎ感とし説明変数を心理状態の主成分とする線形重回帰分析をステップワイズ法に基づいて実施した。統計ソフトにはSPSS (Version 19.0.0)を用いた。

2.4.2 生理計測・解析方法

心理状態を説明するための説明変数の候補として、本研究のような刺激時間が3分と比較的短い場合では、刺激に対する生理的反応が遅い内分泌系の生理指標よりも、生理的反応がより早い中枢神経系や末梢神経系の生理指標が有効と考えられる。刺激時間が本研究と同程度である映像刺激(平均刺激時間150秒)を対象とした先行研究[9]では、心理状態(快適感、覚醒感)を説明する生理指標を検討するために、脳波、脳血流、心電、呼吸、皮膚電位水準、皮膚温度、脈波、瞬目を計測項目として、中枢神経系、末梢神経系の生理指標を多面的に計測している。その結果、脳波、心電、皮

表2 生理計測項目
Table 2 Measurement apparatus.

生理計測項目		計測装置名	センサ取付部位
中枢神経系	脳波	Active Two Syssem 32ch (Biosemi 社製)	両耳含む34点 (拡張10-20法)
	心電		胸部2点
末梢神経系	皮膚電位水準	皮膚電位計(SPL-01) (株)西澤電機計器製作所製	手掌部3点

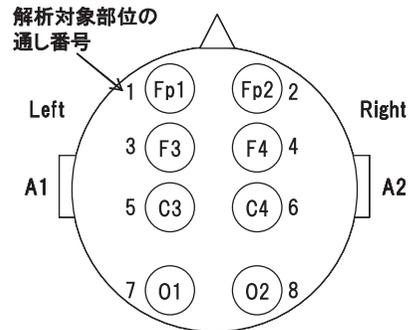


図2 脳波データの解析対象部位
Fig. 2 Location of electrodes used in EEG analysis.

膚電位水準が心理状態の説明変数として有効であることが示されている。以上より、本研究では、心理状態を説明するための説明変数として、先行研究[9]で十分であると示された脳波、心電、皮膚電位水準を選択した。表2に、生理計測項目を示す。筆者らの先行研究[9]で心理状態(快適感、覚醒感)を説明する有効な生理指標として抽出された脳波、心電、皮膚電位水準を計測した。脳波は、拡張10-20法に基づいた32チャンネルをサンプリング周波数1024Hzで計測したが、本研究では、図2で示す代表的な八つの脳波部位(Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, O1, O2)に対して両耳基準(A1, A2)にて解析した。脳波データを周波数解析し、各脳波部位ごとに、 θ (4.0~8.0 Hz), $\alpha 1$ (8.0~10.0 Hz), $\alpha 2$ (10.0~13.0 Hz), $\beta 1$ (13.0~20.0 Hz), $\beta 2$ (20.0~30.0 Hz)帯域の脳波パワー値 $V_{i,j}$ を算出した。ここで $i = 1 \sim 8$ (Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, O1, O2), $j = \theta, \alpha 1, \alpha 2, \beta 1, \beta 2$ である。また、 θ (4.0~8.0 Hz), α (8.0~13.0 Hz), β (13.0~30.0 Hz)帯域における異なる脳波部位間の相互相関係数 $X_{i,j,k}$ を算出した。なお、相互相関係数は式(1)で定義する[12],[13]。

$$X_{i,j,k} = \frac{\langle V_{i,k} V_{j,k} \rangle}{\sqrt{\langle V_{i,k}^2 \rangle} \sqrt{\langle V_{j,k}^2 \rangle}} \quad (1)$$

$i, j = 1 \sim 8$ ($Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, O1, O2$)

$k = \theta, \alpha, \beta$

以上、脳波パワー値 $V_{i,j}$ と相互相関係数 $X_{i,j,k}$ を脳波の生理指標とした。

心電は、RR 間隔データの周波数解析を実施し、副交感神経活動指標 HF の自然対数である $\ln HF$ を心電の生理指標とした。ここで、HF は 0.15~0.4 Hz の周波数範囲で算出した。精神性発汗の生理指標として、皮膚電位水準を検討した。なお各生理指標は、安静時を基準に空間観察時に対し算出した。

心理状態の主成分が、どのような生理指標で説明できるかを検討するために、心理状態の主成分を目的変数とし、脳波、心電、皮膚電位水準から算出した生理指標を説明変数とする線形重回帰分析を実施した。重回帰分析は、SPSS を用いて、ステップワイズ法（変数増減法）に基づいて実施した。なお、ステップワイズのための F 値確率の投入、除去条件は、それぞれ 0.10, 0.15 で実施し、重回帰モデルの導出に際し多重共線性の問題が生じないように変数選択をした。また、残差に明確な外れ値がないことを確認して重回帰モデル（初期モデル）を導出した。

更に、重回帰分析で導出した重回帰モデルの汎用性を評価し、改善するために、モンテカルロ法に基づく交差検証を実施した [14]。全データ 48 個（=実験参加者 12 名 × 照明刺激 4 条件）のうち、30 個のデータを用いた学習と、残りの 18 個のデータに対する予測を 500 回ランダムに繰り返して、重回帰モデルの推定精度 cv を算出した。また、重回帰モデルの汎用性の改善には、重回帰分析で導出した重回帰モデルの説明変数を最適化することで、推定精度 cv を最小化した。統計ソフトには R (Version 2.13.1) を用いた。また、交差検証によって得られた重回帰モデル（改善モデル）の導出に際しても、残差に明確な外れ値がないことを確認した。

3. 実験結果

3.1 心理評価結果

図 3 に、四つの刺激条件に対するくつろぎ感を 12 名の平均値と標準偏差で示す。1 室 1 灯である刺激条件 A, B におけるくつろぎ感はいずれも 50% 以下であり、特に刺激条件 B が四つの条件の中でくつろぎ感が最も

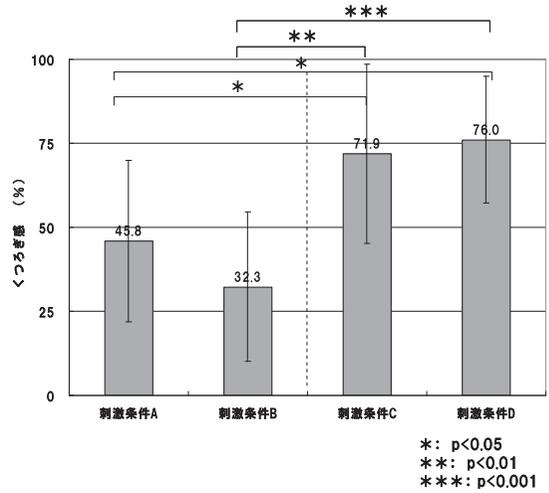


図 3 心理評価結果（くつろぎ感）
Fig.3 Feeling of "Relaxation".

低い値であった。一方、1 室複数灯である刺激条件 C, D におけるくつろぎ感はいずれも 75% 前後の同程度の値であった。くつろぎ感における刺激条件の影響を分析するために、一元配置分散分析を行った。その結果、刺激条件の効果は有意であった ($F(3, 44) = 9.849, p < 0.001$)。更に、分散分析後の検定として、Tukey 法による多重比較を実施した結果、図 3 に示すように、1 室 1 灯である刺激条件 A, B と 1 室複数灯である刺激条件 C, D との間には、統計的に有意な差があった。

心理状態を計測する SD アンケートの結果に対して主成分分析を実施した。その結果、四つの主成分が抽出された。表 3 に、因子負荷量を示す。第 1 主成分は、気分が明るい、快適などといった評価形容詞と相関があり、「快適感」と解釈できた。また第 2 主成分は、緊張する、落ち着かないといった評価形容詞と相関があり、「覚醒感」と解釈できた。一方、第 3 主成分と第 4 主成分は評価形容詞がそれぞれ 1 個しかなく、明確に解釈するのが難しかった。明確な解釈ができた第 1 主成分と第 2 主成分の累積寄与率は 64% であり、SD アンケートの評価形容詞対の 6 割程度を説明できた。

図 4 に、四つの刺激条件に対する心理状態（横軸：快適感、縦軸：覚醒感）を 12 名の平均値と標準偏差で示す。1 室 1 灯においては、明るめの刺激条件 A では快適感が中程度で覚醒感が最も高く、暗めの刺激条件 B では快適感が最も低く、覚醒感が中程度であった。一方、1 室複数灯においては、明るめの刺激条件 C では快適感が最も高く覚醒感が中程度であり、暗

表 3 因子負荷量
Table 3 Factor loadings for each scale.

評価形容詞	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第4主成分
気分が明るい	0.921	-0.126	-0.093	-0.059
気分が軽い	0.855	-0.030	0.008	-0.043
陽気な	0.825	-0.338	-0.080	-0.140
快適な	0.808	0.344	0.092	0.197
好き	0.807	0.330	0.051	0.170
開放的	0.791	-0.227	-0.084	-0.197
楽しい	0.790	-0.193	-0.081	0.046
にぎやかな	0.763	-0.458	-0.037	-0.025
爽やかな	0.734	-0.141	-0.014	0.437
はっきり	0.682	-0.553	0.252	0.028
地味な	-0.647	0.232	0.175	0.490
疲労感のない	0.636	0.358	-0.449	-0.003
安心	0.571	0.482	-0.216	0.251
緊張する	0.549	0.717	-0.020	0.194
鎮静する	0.164	-0.657	0.074	0.103
眠い	0.380	-0.654	0.387	0.257
落ち着かない	0.521	0.649	0.243	-0.025
自然な	0.245	0.431	0.711	-0.112
あたたかい	0.523	0.391	0.190	-0.568
累積寄与率(%)	45.4	64.0	70.0	75.7

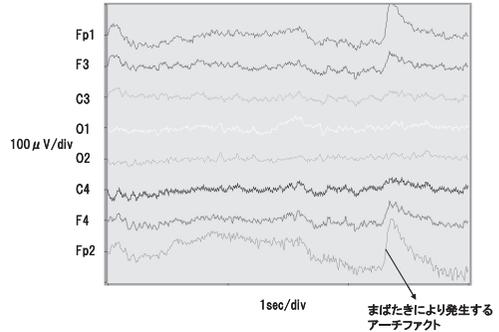


図 5 脳波の波形データの一例
Fig. 5 EEG waveform.

な差があった。

高次感性であるくつろぎ感と、心理状態の主成分との対応関係を検討した。くつろぎ感を目的変数として、表 3 に示した四つの主成分全てを説明変数として、ステップワイズ法に基づく重回帰分析を実施した結果、第 1 主成分である快適感と、第 2 主成分である覚醒感の二つの説明変数によって有意に説明された ($F(2, 45) = 64.057, p < 0.001$)。ここで、第 3 主成分と第 4 主成分は説明変数として除外された。得られた重回帰モデルの重相関係数は 0.86、自由度調整済み決定係数は 0.73 と高く、快適感、覚醒感の標準化係数はそれぞれ 0.73, -0.46 であった。

3.2 心理と生理との相関モデルの導出結果

図 5 に、生理計測結果の一例として脳波の波形データ（両耳基準）を示す。この波形は、本研究の平均年齢に最も近い実験参加者（39 歳）が刺激条件 C の照明空間を観察しているときの脳波データ（観察終了直前の 3 秒間）である。図 5 に示すようなまばたきにより発生したノイズ（アーチファクト）をデジタルフィルタ処理で除去した後、2.4.2 で示した脳波データの解析を実施し、脳波の生理指標（脳波パワー値と相互相関係数）を算出した。

次に、3.1 で示した重回帰分析によりくつろぎ感の説明変数として有意に抽出された快適感や覚醒感を目的変数とし、脳波、心電、皮膚電位水準から算出した生理指標を説明変数とする重回帰分析をそれぞれ実施し、快適感や覚醒感の重回帰式の初期モデルを導出した。

まず快適感の重回帰モデルは、脳波部位間の相互相関係数や脳波パワー値といった中枢神経系の生理指標 10 個によって有意に説明され ($F(10, 37) = 10.407$,

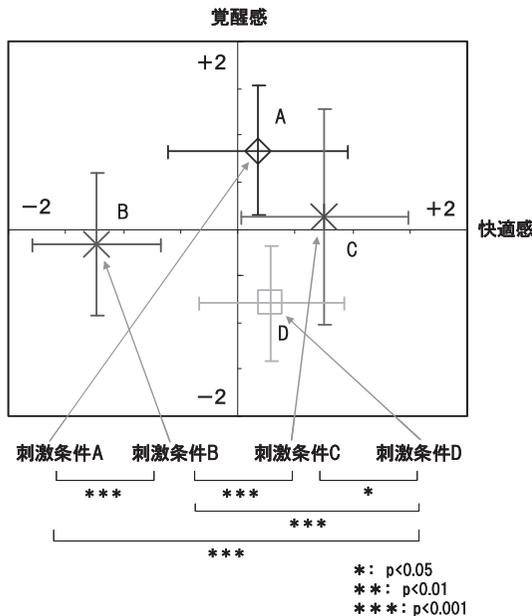


図 4 心理評価結果（快適感、覚醒感）
Fig. 4 Plot of psychological valence and arousal.

めの刺激条件 D では快適感が中程度よりやや高く覚醒感が最も低かった。多変量に拡張された平均値の検定 (Wilks のラムダ) [15] の結果、刺激条件 A と C との間では 5%水準の統計的に有意な差はなかったが ($p = 0.052$)、その他の刺激条件間では統計的に有意

表 4 重回帰分析による重回帰モデルの導出結果（初期モデル）(a) 快適感を説明する代表的な生理指標 (b) 覚醒感を説明する代表的な生理指標

Table 4 Results of multiple regression analysis (initial model), (a) Major physiological indices for psychological valence, (b) Major physiological indices for psychological arousal.

生理指標 (標準化係数の絶対値が 0.4 以上のみ)	標準化係数
$X_{1,6,\beta}$	-0.892
$V_{1,\theta}$	0.652
$X_{1,3,\beta}$	0.556
$X_{6,7,\beta}$	-0.499

(a)

生理指標 (標準化係数の絶対値が 0.4 以上のみ)	標準化係数
$X_{1,8,\beta}$	0.738
$X_{1,7,\theta}$	0.538
$V_{7,\beta 1}$	0.413
$X_{1,6,\alpha}$	-0.408

(b)

$p < 0.001$), 末梢神経系の生理指標は説明変数として抽出されなかった。また、快適感の重回帰モデルの重相関係数は 0.86, 自由度調整済み決定係数は 0.67 と比較的高い値を示した。表 4(a) に、重回帰分析による重回帰モデルの導出結果として、快適感を説明する代表的な生理指標とその標準化係数を示す。ここで、代表的な生理指標として、快適感を説明する割合を示す標準化係数の絶対値が 0.4 以上のみ示した。

次に覚醒感の重回帰モデルは、脳波部位間の相互相関係数や脳波パワー値といった中枢神経系の生理指標 13 個と、末梢神経系の生理指標である ln HF によって有意に説明された ($F(14, 33) = 16.933, p < 0.001$)。また、覚醒感の重回帰モデルの重相関係数は 0.94, 自由度調整済み決定係数は 0.83 と高く、かなり当てはまりが良かった。表 4(b) に、重回帰分析による重回帰モデルの導出結果として、覚醒感を説明する代表的な生理指標とその標準化係数を示す。ここで、代表的な生理指標として、覚醒感を説明する割合を示す標準化係数の絶対値が 0.4 以上のみ示した。なお、覚醒感の重回帰モデルの説明変数として抽出された末梢神経

表 5 交差検証による重回帰モデルの改善結果（推定精度 cv）

Table 5 Results of cross validation (estimated accuracy cv).

	初期モデルの 推定精度 cv	改善モデルの 推定精度 cv	推定精度 cv の改善率
快適感	1.00	0.80	20%
覚醒感	1.98	0.60	70%

表 6 交差検証による重回帰モデルの改善結果（改善モデル）(a) 快適感を説明する代表的な生理指標 (b) 覚醒感を説明する代表的な生理指標

Table 6 Results of cross validation (improved model), (a) Major physiological indices for psychological valence, (b) Major physiological indices for psychological arousal.

生理指標 (標準化係数の絶対値が 0.4 以上のみ)	標準化係数
$X_{1,6,\beta}$	-0.812
$V_{1,\theta}$	0.673
$X_{1,3,\beta}$	0.577

(a)

生理指標 (標準化係数の絶対値が 0.4 以上のみ)	標準化係数
$X_{1,8,\beta}$	0.750
$V_{7,\beta 1}$	0.534
$X_{1,2,\alpha}$	-0.498
$X_{1,7,\theta}$	0.412

(b)

系の生理指標である ln HF の標準化係数は -0.2 程度と比較的小さい値であった。

3.3 相関モデルの検証と改善結果

3.2 で示した快適感、覚醒感の重回帰式（初期モデル）に対して 2.4.2 で示した方法で交差検証をそれぞれ実施し、初期モデルの汎用性の評価と改善を行い、改善モデルを導出した。表 5 に、交差検証による重回帰モデルの改善結果を推定精度 cv で示す。快適感、覚醒感の初期モデルの推定精度 cv に対してそれぞれ 20%, 70%の改善率が得られた。

まず快適感の改善モデルでは、初期モデルで抽出された 10 個の中枢神経系の生理指標から、より汎用性の高い生理指標として、6 個の生理指標が選択された。

ここで、快適感の改善モデルの重相関係数は 0.77、自由度調整済み決定係数は 0.53 であった。表 6(a) に、標準化係数の絶対値が 0.4 以上の代表的な生理指標を示す。

次に覚醒感の改善モデルでは、初期モデルで抽出された 13 個の中樞神経系の生理指標と、末梢神経系の生理指標である ln HF から、より汎用性の高い生理指標として、6 個の中樞神経系の生理指標のみが選択され、ln HF は選択されなかった。ここで、覚醒感の改善モデルの重相関係数は 0.83、自由度調整済み決定係数は 0.65 であった。表 6(b) に、標準化係数の絶対値が 0.4 以上の代表的な生理指標を示す。

4. 考 察

本研究では、照明刺激環境下のくつろぎ感に着目し、心理計測と生理計測を実施した。

心理評価では、図 3 で示した結果より、1 室複数灯（刺激条件 C, D）におけるくつろぎ感の方が 1 室 1 灯（刺激条件 A, B）より高い値であった。表 1 で示した照明空間の観察イメージから推測すると、1 室複数灯によって形成される照明の陰影がくつろぎ感に影響したものと考えられ、照明空間のプランニングの違いによってくつろぎ感が大きく変化することが分かった。また、SD アンケートの結果に対して主成分分析を実施することで、心理状態の第 1 主成分と第 2 主成分が快適感と覚醒感と解釈できた。また、心理状態の第 1 主成分と第 2 主成分は互いに直交関係にある 2 軸であることから、本研究で快適感と覚醒感を用いて表現する心理空間は、ラッセルらの先行研究 [10] で様々な心理状態（落ち着いた、楽しいなど）を説明している二次元感情モデルとほぼ一致した結果といえる。先行研究との一致により、本研究において、高次感性であるくつろぎ感の説明変数として快適感と覚醒感を選択することの妥当性が客観的に示された。また本研究では、1 室 1 灯と 1 室複数灯において照明手法ごとに明るめと暗めの条件設定をしたが、図 4 で示した結果より、設定した四つの刺激条件は、二次元心理空間上において比較的異なった心理状態を喚起する条件であったといえる。しかし、明るめの条件である刺激条件 A と C の間で 5%水準の有意な差がわずかに得られなかった。その理由としては、1 室複数灯の条件である刺激条件 C における覚醒感のデータのばらつきが大きいことから、明るめの照明が複数に配置されている刺激条件が影響したと推察される。今後、実験参加者の空間観察

中の視線計測などによりばらつきの主要原因を究明する必要がある。

次に、3.1 で示したように、くつろぎ感を快適感と覚醒感で有意に説明した場合の重回帰モデルの重相関係数が 0.86 と高く、当てはまりが良かったことから、くつろぎ感の説明変数としては、心理状態の第 1 主成分と第 2 主成分まで十分に表現できることが分かった。これより、高次感性であるくつろぎ感が、快適感と覚醒感で構成される二次元感情モデルで表現できることを重回帰分析により確認した。更に、くつろぎ感の説明変数として設定した快適感や覚醒感の標準化係数がそれぞれ 0.73, -0.46 であることから、照明刺激環境下のくつろぎ感を高めるためには、快適感を高め、覚醒感をやや低める照明刺激が有効であることが示唆された。このことは、よりくつろぎ感の高い照明刺激の探索や新たな照明空間の創出において、その方向性を示す重要な知見となる。

更に、心理と生理との相関性を、重回帰分析と交差検証を通して検討した結果、表 6(a), (b) で示したように、快適感、覚醒感を説明する生理指標としては、末梢神経系の生理指標（心電、皮膚電位水準）より、中樞神経系の生理指標（脳波パワー値や相互相関係数）の方が説明率が高いことを確認できた。また、表 4(a), (b) で示したように、快適感、覚醒感の初期モデルにおいて標準化係数の絶対値が最も高い生理指標としてそれぞれ抽出された相互相関係数 $X_{1,6,\beta}$, $X_{1,8,\beta}$ が、交差検証により導出した快適感、覚醒感の改善モデル（表 6(a), (b)）においても標準化係数の絶対値が最も高い生理指標として選択されていることが分かる。これより、相互相関係数 $X_{1,6,\beta}$, $X_{1,8,\beta}$ は、本研究で検討した快適感、覚醒感をそれぞれ最も説明する生理指標であると考えられる。

快適感に関して支配的であった相互相関係数 $X_{1,6,\beta}$ は、標準化係数が -0.812 と符号が - であることから、左前頭部 (Fp1) と右中心部 (C4) との部位間における β 帯域の脳波の相関度合が増加すると、心理的な快適感が弱まる傾向にあることが示唆された。また、覚醒感に関して支配的であった相互相関係数 $X_{1,8,\beta}$ は、標準化係数が 0.75 と符号が + であることから、左前頭部 (Fp1) と右後頭部 (O2) との部位間における β 帯域の脳波の相関度合が増加すると、心理的な覚醒感が高まる傾向にあることが示唆された。このことから、本研究で対象とした照明刺激環境下においては、異なる脳波部位間の相互相関係数が心理的な快適感や覚醒

感を説明する生理指標として有効であることが30代、40代女性において確認できた。

しかしながら、どのような脳内神経基盤によりこのような結果が生じたのか、脳波の発生源が一つなのか複数なのかなどについては、本研究の範囲では定かではない。また、快適感に関しては、先行研究[16]より、快不快感情を前頭部の α 波の左右差から議論している知見があるが、こうした先行研究からの解釈も難しく、脳科学的な意味付けに関しては今後の研究課題であると考えている。

5. むすび

本研究で提案した心理生理学的アプローチにより、照明刺激環境下の高次感性であるくつろぎ感が、二次元感情モデルの構成要素である快適感と覚醒感で表現できることを確認した。更に、快適感と覚醒感が脳波パワー値関連の生理指標を用いて説明できることを確認した。以上より、本研究で対象とした照明刺激環境下におけるくつろぎ感が、脳波パワー値関連の生理指標を用いて客観的に説明できることを30代、40代女性において見出した。これより、本研究のような短時間(3分間)で安定した照明刺激環境下では、心電や皮膚電位水準といった末梢神経系の生理指標は必ずしも必要ではなかったといえる。加えて、照明刺激環境下のくつろぎ感を高めるためには、快適感を高め、覚醒感をやや低める照明刺激が有効であることを示すデータを導出したことで、くつろぎ感がより高い照明空間を創出する住宅照明設計の方向性を見出した。

今後は、本研究で提案した評価手法をベースに、脳科学的な意味付けのある生理指標の探索や、他の照明刺激環境や個人属性などへの適用範囲を明確にしておく必要があると考えている。

文 献

- [1] (社)照明学会, 省エネと快適性を目的とした住宅照明に関する研究調査委員会報告書 (JIER-105), (社)照明学会, 東京, 2009.
- [2] 城戸麻紗子, 井上容子, “あかりと心理—くつろぎ空間における壁面照明手法の検討,” 平成23年度日本建築学会近畿支部研究発表会, 2011.
- [3] 高橋啓介, “照明の色温度と照度とが室内環境評価に及ぼす効果,” 医療福祉研究, 第2号, pp.30-36, 2006.
- [4] T. Musha, Y. Terasaki, H.A. Haque, and G.A. Ivanitsky, “Feature extraction from EEGs associated with emotions,” *Artif Life Robotics*, vol.1, pp.15-19, 1997.
- [5] 丸山貴司, 笹本裕美, 荒川尚美, 川副智行, 中川匡弘, “脳

波のフラクタル性を用いた感性推定精度の向上に関する研究,” *信学論 (A)*, vol.J95-A, no.4, pp.343-356, April 2012.

- [6] 諸岡晴美, 廣村江利子, 長岡千紗, 諸岡英雄, “脳波解析を用いた感性の客観評価,” *J. Textile Engineering*, vol.57, no.3, pp.61-68, 2011.
- [7] 小此木慎哉, Herr Vaxeng, 中川匡弘, 今井公泰, 網屋繁俊, 滝澤 清, “脳波の自己相似性に着目した衣服着用感の感性解析に関する研究,” *信学技報*, CAS2007-60, NLP2007-88, 2007.
- [8] 中川匡弘, カオス・フラクタル感性情報工学, 日刊工業新聞社, 2010.
- [9] 中村 透, 山本松樹, 佐藤 弥, “映像刺激環境における心理状態と生理指標との相関モデルの研究,” *生体医工学*, vol.48, no.2, pp.197-206, 2010.
- [10] J.A. Russell, A. Weiss, and G.A. Mendelsohn, “Affect grid: A single-item scale of pleasure and arousal,” *J. Personality and Social Psychology*, vol.57, pp.493-502, 1989.
- [11] A.A. Kruthof, “Tubular luminescence lamps for general illumination,” *Philips Technical Review*, vol.6, pp.65-96, 1941.
- [12] 住谷正夫, 尾崎久記, 安久正紘, “音楽および雑音呈示条件下におけるトポグラフィ,” *脳の精神の医学*, vol.8, no.2, pp.175-182, 1997.
- [13] 宇都宮直子, 田中久弥, 井出英人, “脳波の相互相関係数による快・不快推定マトリックスの作製,” *電学論 (C)*, vol.122, no.2, pp.309-310, 2002.
- [14] J. Shao, “Linear model selection by Cross-Validation,” *J. American Statistical Association*, vol.88, no.422, pp.486-494, 1993.
- [15] 清水健司, 川邊浩史, 海塚敏郎, “対人恐怖心性—自己愛傾向2次元モデルにおける性格特性と精神的健康の関連,” *パーソナリティ研究*, vol.16, no.3, pp.350-362, 2008.
- [16] I.B. Mauss and M.D. Robinson, “Measures of emotion: A review,” *Cognition and Emotion*, vol.23, no.2, pp.209-237, 2009.

(平成24年6月26日受付, 11月28日再受付)



中村 透 (正員)

1993 金沢大学大学院工学研究科修士課程了。同年松下電工(株)に入社。家庭用燃料電池の技術開発を経て、人の快適性研究に従事。日本機械学会会員。



上垣百合子

1990 京大・農卒. 同年松下電工(株)に入社. 住宅システムの研究開発, 人間工学・感性工学を応用した UD 商品の企画開発を経て, 人の快適性研究に従事. 一級建築士.



藤原 ゆり

1997 大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程了. 同年松下電工(株)に入社. 家電や住設機器等の使用性評価や理美容商品の効能評価技術開発を経て, 人の快適性研究に従事. 日本計算機統計学会会員.



奥谷 晃久

2011 東京農工大学大学院工学研究科修士課程了. 在学中, 社会性行動, 情動の脳内メカニズム研究を経て, 同年パナソニック電工(株)に入社後, 人の快適性研究に従事. 専門は神経科学, 生体計測, 生体信号処理. IEEE 各会員.



山本 松樹

1983 大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程了. 同年松下電工(株)に入社. 構造物の FEM 解析, 筋骨格系解析技術開発を経て, 人の快適性研究に従事. 専門はバイオメカニクス, 生体計測, 生体信号処理. ヒューマンインターフェース学会等各会員, ヒューマンストレス産業技術研究会幹事等.



長田 典子 (正員)

1983 京大・理・数学卒. 同年三菱電機(株)入社. 以来, 産業システム研究所などで産業計測機器の研究開発に従事. 1996 阪大大学院基礎工学研究科博士課程了. 2003 より関西学院大・理工・情報科学科助教授, 2007 同教授. 2009 バリュー大客員研究員. 工博. 専門は感性情報学, メディア工学など. 情報処理学会, 電気学会, IEEE, ACM 各会員.