

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360237

研究課題名(和文) 光放射の視覚的・非視覚的作用の評価と固体照明環境デザイン

研究課題名(英文) Evaluation of Visual- and Non-Visual Effects of Light and Design of Solid-State Lighting

研究代表者

古賀 靖子 (Koga, Yasuko)

九州大学・人間・環境学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60225399

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、光放射の視覚的・非視覚的作用の分光特性を明らかにして、光環境の健康性を高めるような固体照明デザインを提案するものである。睡眠・覚醒の調整には、実用上、幅広い分光分布を持つ光源が効果的であること、短波長域の光放射は非視覚的作用を生じやすいが、複数の波長から成る光放射に対してヒトの生理応答の波長依存性は弱いこと、明所視と薄明視ではグレア感の影響要素が異なること、昼食後の覚醒水準は低色温度光環境で維持されることが得られた。

研究成果の概要(英文)：This research work aims to clarify spectral properties of visual- and non-visual effects of optical radiation and to propose a view of solid-state lighting design that enhances health of luminous environment. Results are as follows: light sources having broadband spectral power distribution would be practically effective in adjusting sleep and awakening, short-wavelength optical radiation had a larger non-visual effect but the wavelength dependence of human physiological responses was reduced for polychromatic optical radiation, main photic factors in glare were different between photopic and mesopic conditions, and alertness during the post-lunch hours was kept in luminous environment of low colour temperature.

研究分野：建築環境学

キーワード：光環境 視覚 生体リズム 固体照明 分光分布 LED 瞳孔反射 分光感度

## 1. 研究開始当初の背景

21世紀初めに、ヒトを含む哺乳動物の網膜で、視細胞のほかに、視細胞からの光信号を中継する網膜神経節細胞の一部も、光受容を行うことが明らかになった。それは、メラノプシンという視物質を含み、光放射を直接的に感受することから、内因性光感受性網膜神経節細胞 (intrinsically photosensitive retinal ganglion cell; ipRGC) と呼ばれる。IpRGC は内因性の光信号と視細胞からの光入力信号を統合して、環境の光情報を脳へ伝える。その光情報は、外界を像として捉える視覚的な作用とは別に、概日リズムの光同調や瞳孔の対光反射などの非視覚的な生理作用を誘導する。

視覚と同様に、光放射の非視覚的作用にも波長依存性がある。それを照明制御に応用すれば、生理的に効果のある照明環境を構築できると考えられている。光放射の非視覚的作用の代表的なものに、夜間のメラトニン分泌抑制がある。メラトニンは夜間に分泌されるホルモンで、睡眠に関係する。夜間に明るい光にさらされると、メラトニン分泌は抑制され、睡眠に入る時刻が遅くなる。その作用スペクトルは、短波長域にピークを持つ<sup>1,2)</sup>。

朝の明るい光は、体内時計をリセットして、覚醒を促す。しかし、その作用スペクトルは明らかでない。睡眠・覚醒リズムに係わる昼間の非視覚的作用の分光感度が、夜間のメラトニン分泌抑制の作用スペクトルと同じであるか、不明である。夜間のメラトニン分泌抑制の作用スペクトルは、単一の光受容器の関与を仮定して導出されており、視細胞と ipRGC が関与する非視覚的作用の神経回路を正しく反映していない。本研究では、概日リズムの光同調に関する先行研究を進展させ、昼間の非視覚的作用の分光感度を求める。

照明分野では、固体光源の開発と改良が進み、照明応用も普及してきた。固体光源とは、発光ダイオード (LED) やエレクトロルミネセンス (EL) による光源の総称である。LED 光源では多様な分光分布を作ることができ、LED 照明では、比較的容易に光量と光色を変えることができる。照明環境の性能には、視作業性や視覚快適性に加えて、気分や睡眠・覚醒リズムを良好に保つ健康性が求められる。照明環境制御の要件は、光量が一定の静的なものから、光量と光色が適切に変化する動的なものへ変わってきている。本研究では、快適で健康的な固体照明の動的な分光分布設計のため、光放射の視覚的作用と非視覚的作用の観点から、照明環境の評価指標を考案する。

## 2. 研究の目的

照明環境の性能を高めるため、エネルギー効率を改善すると共に、質の高い照明を実現することが喫緊の課題である。照明の質に関する要素のうち、近年、光の生理的影響と光環境の健康性が重視されている。本研究では、

光放射の非視覚的作用の分光感度を求めて、標準比視感度に基づく測光量に対応させ、光環境を生理的側面から評価する指標を考案する。また、固体光源を用いる照明デザインの要は、時間の概念を入れた動的な分光分布設計であると考え、分光分布を基に固体照明の視覚快適性を評価する。

## 3. 研究の方法

### (1) マウスにおける光放射の非視覚的作用に関する機能解剖学的研究

光の生理的影響に関する基礎資料を得るために、マウスにおいて睡眠・覚醒に係わる脳の神経核の分光応答特性を調べる。24時間暗順応させたマウスに対し、単色光刺激または混色光刺激を15分間与え、深麻酔の後、速やかにパラホルムアルデヒド溶液で灌流固定を行った。その後、脳切片に対して、抗 c-Fos 抗体による免疫組織化学を行った。

### (2) ヒトにおける光放射の非視覚的作用に関する基礎的研究

固体照明環境を生理的側面 (光放射の非視覚的作用) から評価する指標を作成するために、瞳孔の対光反射 (以下、瞳孔反射と称する) を生理指標として、その分光特性を明らかにする。被験者を30分間暗順応させた後、単色光刺激または混色光刺激を左眼に与え、右眼の瞳孔径を測定した。単色光刺激に関する刺激応答曲線より、瞳孔反射の分光感度曲線を導出した。波長の異なる2つの単色光を混ぜた光刺激に関する刺激応答曲線より、瞳孔反射の分光感度の加法性を調べた。

### (3) ヒトにおける光放射の視覚的作用に関する実験

固体照明の視覚快適性を分光分布に関して評価するために、グレア感覚の分光感度を調べた。グレアが問題となりやすい薄明視環境で、小光源に対するグレア評価を行った。白色光源の光放射から特定の波長域の光放射を除いたものを光刺激として、視線または視線から離れた位置に呈示した。

### (4) 光放射の視覚的・非視覚的作用と固体照明応用に関する調査・実験

屋内照明に関する各種規格や推奨を調査し、屋内作業場の LED 照明環境に関する評価研究を行った。LED シーリングライトを設備した室で、光環境の測定、照明環境に関する作業者の評価を行った。また、高輝度小光源で構成される面光源のグレア感、視作業領域とその周囲環境を分けて照らすタスク・アンビエント照明方式で、照明電力の消費を抑えても快適性を損なわないアンビエント照明の許容下限光量、タスク照明の光量と光色の好み、VDT 作業に好ましい空間の輝度分布を調べた。さらに、ポストランチディップと呼ばれる昼食後の眠気に着目して、注意や眠気に対する照明環境の光色の影響を調べた。

#### 4. 研究成果

##### (1) マウスにおける光放射の非視覚的作用に関する機能解剖学的研究

マウスの脳内において、光放射の非視覚的作用に係わる青斑核および縫線核のニューロンの分光応答特性を、c-Fos の発現を指標にして検討した。セロトニン作動性ニューロンを含む縫線核では、短波長光に対して強い反応が認められた。ノルアドレナリン作動性ニューロンを多く含む青斑核では、若干弱い長波長域の光に最大の反応が認められた。縫線核も青斑核も、概日リズムの光同調や睡眠・覚醒の調整に係わっている。特定の狭い波長域を増強した光源より、幅広い分光分布を持つ光源の方が、実用上それらの機能に及ぼす影響が大きいと考える。

マウスの網膜には、UV 錐体（分光感度の最大波長：約 360 nm）および M 錐体（分光感度の最大波長：約 500 nm）の 2 種類の錐体視細胞が存在する。この 2 種類の錐体視細胞を、混色光によって同時に刺激すると、一方の錐体視細胞を刺激した時より、光子あたりの反応が顕著に高くなるのが、光放射の非視覚的作用に係わる視交叉上核および縫線核において確認できた（図 1）。光放射の視覚的作用に係わる外側膝状体背側核について、同様の実験を行ったが、そのような反応は確認できなかった（図 2）。

光放射の非視覚的作用と視覚的作用に係わる神経核の間で違いが生じた理由に、ipRGC（分光感度の最大波長：約 480 nm）の関与の有無が推定される。網膜内で ipRGC は、主に視交叉上核など非視覚的作用に係わる神経核に投射している。また、ipRGC には錐体視細胞からのシナプス入力が存在する<sup>3)</sup>。詳細なメカニズムは不明であるが、混色光による反応の上昇効果に、シナプスおよび 2 次メッセンジャー系を介した ipRGC と錐体視細胞との相互作用が示唆された。

##### (2) ヒトにおける光放射の非視覚的作用に関する基礎的研究

21 歳～25 歳の晴眼者 5 名（男性 3 名・女性 2 名）について、縮瞳率の刺激応答曲線から瞳孔反射の分光感度曲線を導出した。ここで、縮瞳率は、光刺激前の平均瞳孔径と光刺激中後半の平均瞳孔径の差を、光刺激前の平均瞳孔径で除したものである。得られた分光感度は 481 nm～564 nm で最大となり、個人差があった。ヒトの光受容器の分光感度は、杆体で 507 nm、S 錐体で 420 nm、M 錐体で 535 nm、L 錐体で 565 nm、ipRGC で約 480 nm で最大となる<sup>4,5,6,7)</sup>。得られた分光感度に、単一の視物質の吸光度と強い相関はなく、複数の光受容器の関与が示された（図 3）。

光刺激時間の長さによって、瞳孔反射に対する視細胞と ipRGC の関与の程度は変化し、光刺激時間が長いほど、瞳孔反射の分光感度の最大波長は短波長側に移ることが報告されている<sup>8)</sup>。絶対感度が視細胞に比べて低く、

光反応が持続的な ipRGC の特性を考えると、光放射の非視覚的作用の分光特性を的確に把握して、固体照明デザインに利用するには、光刺激が数分以上の定常状態における観察が必要という課題が残った。

標準比視感度による光束の定義と同様に、光放射の非視覚的作用の測光量を定義するには、その分光感度に加法性が成り立つ必要がある。晴眼者 3 名（21 歳男性、23 歳男性、25 歳女性）から得られた縮瞳率の刺激応答曲線は、全体的に劣加法的傾向を示した。混色光刺激を構成する単色光の混合比を変えても、刺激応答はほぼ等しかった。これは、混色光刺激に対する反応が、受容される光子数に依存し、波長依存性は弱いことを示すと考える。図 4 に縮瞳率の刺激応答曲線の例を示す。

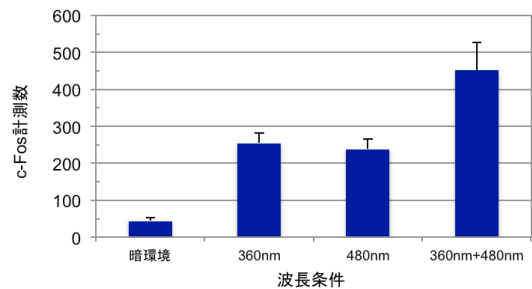


図 1 視交叉上核における c-Fos 発現数

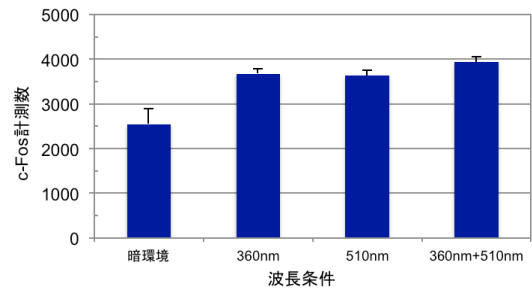


図 2 外側膝状体背側核における c-Fos 発現数

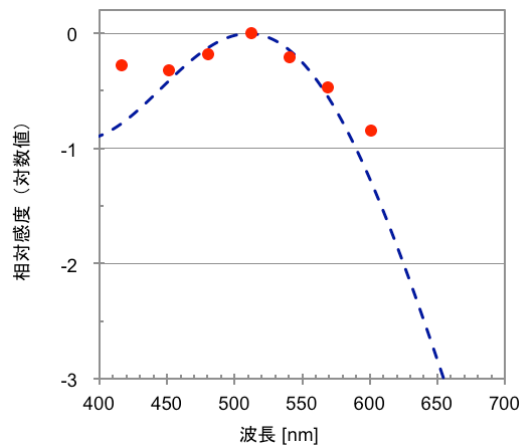


図 3 瞳孔反射の分光感度（22 歳女性）  
（点線は視物質の吸光度のテンプレート；  
最大波長 510 nm； $R^2=0.72$ ）

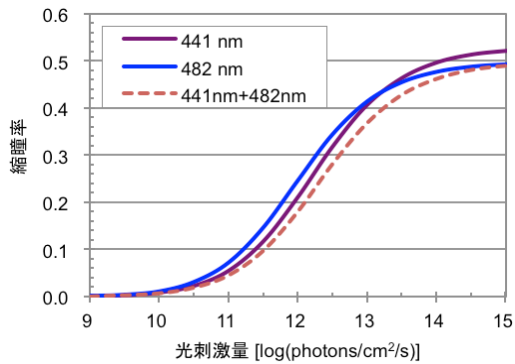


図4 縮瞳率の刺激応答曲線 (23歳男性)  
(混色光刺激は441 nmと482 nmの単色光  
を同程度ずつ混ぜたもの)

(3) ヒトにおける光放射の視覚的作用に関する実験

薄明視環境における小光源のグレア評価で、快・不快の境界となる放射照度 (BCD 放射照度と称する) を基準に、光源の分光分布についてグレア感を比較した結果、グレア感に影響する光放射の波長域は、中心視と周辺視で異なった。薄明視環境では、錐体視細胞と杆体視細胞が働いている。錐体視細胞は網膜の中心部、杆体視細胞は網膜の周辺部に多い。中心視では532 nm、周辺視では515 nmの光放射がグレア感に影響し、それぞれM錐体、杆体の関与が示唆された。視線から5°の範囲では、440 nm以下の短波長光もグレア感に影響し、S錐体の関与が示唆された。明所視環境でのグレア感と異なり、薄明視環境では、光源が視線から離れるほど、グレア感が高くなった。絶対感度が高い杆体視細胞の影響と考える。図5に、BCD放射照度の例(背景輝度: 0.02 cd/m<sup>2</sup>)を示す。BCD放射照度が低いほど、グレア感が高いことを意味する。光源の相関色温度がほぼ同じでも、グレア感には違いがあり、分光分布の影響は否定できないと考える。

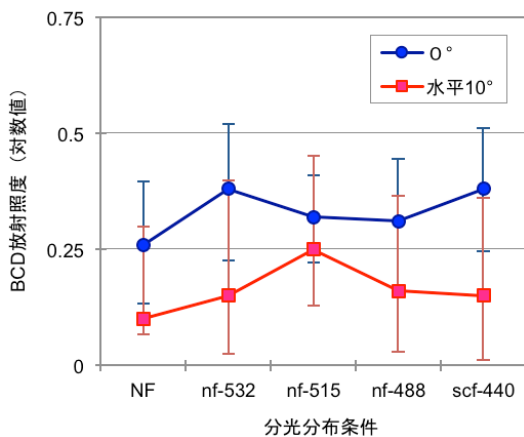


図5 BCD放射照度 (背景輝度: 0.02 cd/m<sup>2</sup>)  
(NF: フィルター無し、nf-532・nf-515・  
nf-488: それぞれ532 nm、515 nm、488 nm  
をカット、scf-440: 440 nm以下をカット)

(4) 光放射の視覚的・非視覚的作用と固体照明  
応用に関する調査・実験

LEDシーリングライトが設けられた大学の研究室で、光環境測定と在室者評価を行った結果、室内の明るさ感には、壁面上部の輝度分布が最も関係した。照明によるまぶしさを増やさずに、室内の明るさ感を高めるには、まず壁面、次いで天井面の反射率を高くするのが効果的であった。LEDシーリングライトでは、側方へ光が広がる配光とするのがよいと言える。

LEDのような高輝度な小光源で構成される面状光源について、小光源の面密度や輝度を変えて、明所視環境でグレア感を評価した。グレア感と不快感には、強い正の相関があることを確認した。小光源による粒々した光と面光源の輝度変化は、グレア感に影響せず、面光源全体からの光量がグレア感に影響した。通常のLED照明器具では、発光面の平均輝度を用いてグレアを評価できることが示された。

タスク・アンビエント照明に関する実験の結果、快適性を損なわないアンビエント照明の許容下限量は、色温度2800 K~5200 Kの範囲では光色に関係なく、紙面作業で300 lx~400 lx、VDT作業で200 lx~300 lxであった。タスク照明とアンビエント照明の光色は同じであることが好まれた。個人用執務室でのVDT作業には、低めの空間輝度が好まれた。空間輝度が低すぎると、視作業対象のVDT画面と空間の輝度対比が過大になり、視覚疲労の原因となるため、室内面の反射率を高くし、照度を下げることが、照明の省エネにも視覚快適性にも効果的であると言える。

ポストラランチディップと呼ばれる眠気が生じる午後の時間帯に、低色温度光(2300 K)または高色温度光(6800 K)を48分間見せて(顔面照度: 100 lx)、脳波と眠気の主観評価を取った結果、α波(覚醒時にリラックス状態で出現し、注意によって抑制される)が低色温度光環境で抑制され、覚醒度(注意)が維持された(図6)。高色温度光環境でも、照明の点灯と共にα波が抑制されたが、抑制は長く続かなかった。暗環境に比べて、照明環境下で主観的眠気は抑制されたが、光色による違いはなかった。

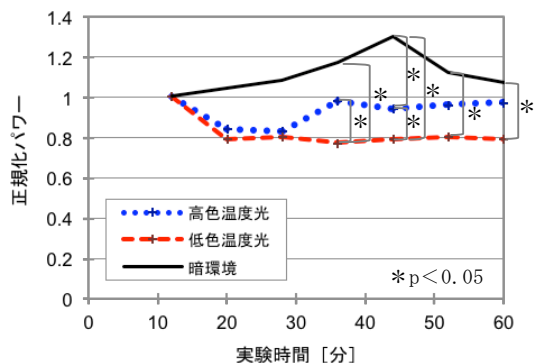


図6 α波の時間変化

<参考文献>

- ① K. Thapan et al., An Action Spectrum for Melatonin Suppression: Evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans, *Journal of Physiology*, 535(Pt 1), 2001, 261-267
- ② G.C. Brainard et al., Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a novel circadian photoreceptor, *Journal of Neuroscience*, 21(16), 2001, 6405-6412
- ③ R.J. Lucas et al., How Rod, Cone, and Melanopsin Photoreceptors Come Together to Enlighten the Mammalian Circadian Clock, *Progress in Brain Research*, 199, 2012, 1-18
- ④ A. Stockman et al., The Spectral Sensitivity of the Human Short-Wavelength Sensitive Cones Derived from Thresholds and Color Matches, *Vision Research*, 39(17), 1999, 2901-2927
- ⑤ D.M. Berson et al., Phototransduction by Retinal Ganglion Cells That Set the Circadian Clock, *Science*, 295(5557), 2002, 1070-1073
- ⑥ D.M. Dacey et al., Melanopsin-Expressing Ganglion Cells in Primate Retina Signal Colour and Irradiance and Project to the LGN, *Nature*, 433(7027), 2005, 749-754
- ⑦ H.J. Bailes and R.J. Lucas, Human Melanopsin Forms a Pigment Maximally Sensitive to Blue Light ( $\lambda_{max} \approx 479$  nm) Supporting Activation of  $G_{q/11}$  and  $G_{i/o}$  Signalling Cascades, *Proc. of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280(1759), 2013
- ⑧ D.H. McDougal and P.D. Gamlin, The Influence of Intrinsically-Photosensitive Retinal Ganglion Cells on the Spectral Sensitivity and Response Dynamics of the Human Pupillary Light Reflex, *Vision Research*, 50(1), 2010, 72-87

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

- ① M. Takao, H. Miyajima, T. Shinagawa, Diurnal Modulation of Visual Motion Prediction, *Chronobiology International*, 査読有、Vol. 32, 2015, 1019-1023 DOI: 10.3109/07420528.2015.1053564
- ② Y. Koga, N. Saita, K. Takao, Effects of Cutting Light in a Wavelength Range on Discomfort Glare, *Proc. of the 11<sup>th</sup> International Symposium on Automotive Lighting*, 査読有、Vol. 16, 2015, 671-678
- ③ Y. Koga, N. Saita, Spectral Effects of

Light on Discomfort Glare under Mesopic Conditions, *Proc. of the 28<sup>th</sup> CIE Session*, 査読有、Vol. 1, Part 2, 2015, 1612-1616

- ④ 古賀靖子、光放射の非視覚的効果の定量化に関する標準化動向、*照明学会誌*、査読有、第99巻、2015、28-31
- ⑤ 古賀靖子、屋内照明環境の評価指標とJIS照明基準の現状・課題、*BE 建築設備*、査読有、第64巻、2013、33-40
- ⑥ 古賀靖子、光の非視覚的効果に関する規格作成の動向、*照明学会誌*、査読有、第96巻、2012、708-712
- ⑦ 高雄元晴、生物時計に対する光の作用機構、*照明学会誌*、査読有、第96巻、2012、694-699

[学会発表] (計26件)

- ① 古賀靖子、光は薬にも毒にもなる - 光放射の非視覚的効果と照明応用、*日本バイオロギー研究会・第44回定例セミナー*、2016年3月12日、東京都市大学(東京都・世田谷区)
- ② 高雄元晴、もっと朝の光を夜の暗がりから - 脳の時計から考える夜の闇の大切さ、*光害シンポジウム2015*、2015年12月5日、東洋大学(東京都・文京区)
- ③ M. Takao et al., Diurnal Time-of-Day Dependence of Visual Motion Prediction, *The 8<sup>th</sup> FAOPS Congress*, 2015年11月23日、Bangkok (Thailand)
- ④ 古賀靖子、照明空間の光色と昼食後の覚醒水準、*2015年度日本建築学会大会*、2015年9月4日、東海大学(神奈川県・平塚市)
- ⑤ 古賀靖子、渡邊亮、高雄元晴、午後の覚醒水準に対する光色の効果、*平成27年度照明学会全国大会*、2015年8月27日、福井大学(福井県・福井市)
- ⑥ M. Takao et al., Circadian Modulation of Visual Motion Prediction, *The 8<sup>th</sup> Lighting Conference of China, Japan and Korea*, 2015年8月20日、京都女子大学(京都府・京都市)
- ⑦ M. Takao, T. Shinagawa, H. Miyajima, Circadian Dependence of Time Prediction to Moving Images, *International Symposium on Human Adaptation to Environment and Whole-Body Coordination*, 2015年3月15日、神戸大学(兵庫県・神戸市)
- ⑧ 古賀靖子、照明環境の設計・評価に関する国際標準化、*CEREBA研究会*、2015年3月5日、秋葉原UDX(東京都・千代田区)
- ⑨ 税田直堯、古賀靖子、薄明視条件の不快グレアに対する分光分布の影響について、*2014年度日本建築学会九州支部研究発表会*、2015年3月1日、熊本県立大学(熊本県・熊本市)
- ⑩ 渡邊亮、古賀靖子、宮城亜矢、VDT作業空間における好ましい周辺輝度について、

- 2014年度日本建築学会大会、2014年9月14日、神戸大学（兵庫県・神戸市）
- ⑪ 古賀靖子、非イメージ形成の視覚に関する基礎的研究 - その6 瞳孔の対光反射の分光特性、2014年度日本建築学会大会、2014年9月12日、神戸大学（兵庫県・神戸市）
- ⑫ 品川貴紀、宮島浩明、高雄元晴、背景輝度が運動刺激に対する時間予測に及ぼす影響、平成26年度照明学会全国大会、2014年9月5日、埼玉大学（埼玉県・さいたま市）
- ⑬ 宮島浩明、高雄元晴、視覚的時間判断に及ぼす空間照度の影響、平成26年度照明学会全国大会、2014年9月5日、埼玉大学（埼玉県・さいたま市）
- ⑭ Y. Koga、J. de Boer、A. Hoier、International Activities on Advanced Lighting Solutions for Retrofitting Buildings - IEA SHC Task 50、Grand Renewable Energy 2014、2014年7月28日～7月29日、東京ビッグサイト（東京都江東区）
- ⑮ M. Takao、Blue Light - A discovery of unconscious vision、SoA+D Lecture Series、2014年3月11日、Bangkok (Thailand)
- ⑯ 山下裕也、古賀靖子、非イメージ形成の視覚の分光感度に関する実験、2013年度日本建築学会九州支部研究発表会、2014年3月2日、佐賀大学（佐賀県・佐賀市）
- ⑰ 明珍徹哉、坂本悠馬、西秋智博、古賀靖子、高雄元晴、LEDアレイを用いた皮質下視覚神経核における分光波長感度特性評価システムの開発、'13SAS インテリジェントシンポジウム、2013年11月13日、東海大学（神奈川県・平塚市）
- ⑱ 坂本悠馬、明珍徹哉、西秋智博、古賀靖子、高雄元晴、プレパルスインヒビションに対する光環境評価システムの開発、'13SAS インテリジェントシンポジウム、2013年11月13日、東海大学（神奈川県・平塚市）
- ⑲ 西秋智博、明珍徹哉、坂本悠馬、古賀靖子、高雄元晴、LEDを用いたマウス視覚ニューロンの分光感度測定システム、平成25年度照明学会全国大会、2013年9月6日、名古屋大学（愛知県・名古屋市）
- ⑳ 古賀靖子、非イメージ形成の視覚に関する基礎的研究 - その5 睡眠・覚醒に関わる背側縫線核の応答、2013年度日本建築学会大会、2013年8月30日、北海道大学（北海道・札幌市）
- ㉑ 宮城亜矢、古賀靖子、LEDタスク・アンビエント照明の照明条件に関する考察、2013年度日本建築学会大会、2013年8月30日、北海道大学（北海道・札幌市）
- ㉒ M. Takao、A Postnatal Photoenvironment Effect on Morningness-Eveningness in Asian Population、The 2<sup>nd</sup> ASEAN Sleep

Congress、2013年8月2日、Bangkok (Thailand)

- ㉓ 税田直堯、古賀靖子、LED照明環境に関する事例調査、2012年度日本建築学会九州支部研究発表会、2013年3月3日、大分大学（大分県・大分市）
- ㉔ 山下裕也、古賀靖子、非イメージ形成の視覚に関する基礎的研究 - その4 瞳孔の対光反射の測定、2012年度日本建築学会大会、2012年9月12日、名古屋大学（愛知県・名古屋市）
- ㉕ 中村怜衣那、古賀靖子、屋内照明基準の再考の必要性、2012年度日本建築学会大会、2012年9月12日、名古屋大学（愛知県・名古屋市）
- ㉖ 井手渚紗、御厨藍子、古賀靖子、高雄元晴、非イメージ形成の視覚の分光感度 - 覚醒喚起に関する行動学的実験、平成24年度照明学会全国大会、2012年9月8日、山口大学（山口県・山口市）

[図書] (計2件)

- ① 高雄元晴 他、朝倉書店、光と生命の事典、2016、436
- ② 岩田利枝、古賀靖子、高雄元晴 他、照明学会、照明光のサーカディアンリズムへの作用と夜間屋内照明のあり方、2014、49

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

古賀 靖子 (KOGA, Yasuko)  
九州大学・大学院人間環境学研究院・准教授  
研究者番号：60225399

### (2) 研究分担者

高雄 元晴 (TAKAO, Motoharu)  
東海大学・情報理工学部・教授  
研究者番号：90408013