

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420617

研究課題名(和文) 間接照明による良好な視環境と省エネルギーが両立する照明設計法に関する研究

研究課題名(英文) Study on the Illumination Design Method by the Indirect Lighting to Realize Both the Good Visual Environment and the Energy Saving

研究代表者

猪岡 達夫 (INOOKA, Tatsuo)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：20367668

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：現在、多くは直接照明である。これは照度を得るには都合が良いが、ランプが目に入るために眩しく視環境的には好ましくない。間接照明は視環境的には良いが、反射光を利用するので同じ照度を得るには不利である。本研究ではまず、照度を様々に変えた実験を行ったが、物の見やすさと照度とは必ずしも比例しないことが分かった。次にランプの位置を変えた瞳の縮瞳実験を行ったが、誘導視野の範囲にランプが入ると縮瞳反応が生じ、輝度の高いランプほど顕著であった。同時に行ったアンケートでは縮瞳動反応と眩しさ感には相関性が見られた。これらの結果に基づき、輝度分布を判断基準に加えた新たな照明設計法を提案した。

研究成果の概要(英文)：The direct lighting is adopted in many buildings. It is convenient to get a certain illuminance, but is dazzling to catch a lump in a view. On the other hand, the indirect lighting is good for visual environment, but is disadvantage to get same illuminance. In this study, some light dimming experiments in the class room were done. As the results, the illuminance is not high proportion to the easiness in seeing. By the other results of experiments on the pupil's shrinkage response under various positions and brightness of lamps, the shrinkage motion of the pupil occurred when the the lump is in a certain field of the view and it was remarkable in case of a high brightness of a lump. And according to the questionnaire that was done simultaneously, there is the definite correlation between the pupil's shrinkage motion and the feeling of dazzling. Based on such results, I propose new lighting design method taking account of the luminance distribution as the criteria.

研究分野：建築環境計画

キーワード：視環境 省エネルギー 照明設計 間接照明 照度 輝度分布 瞳の縮動反応

## 1. 研究開始当初の背景

建築設備の省エネルギーといえば、空調分野での研究や取り組みが盛んであるが、空調は気候風土・年間の気象変化・建物での使われ方・人の温熱感・機器の性能特性・制御方法など様々の要因が複雑に絡み合い難しい。また1つのことで大きな省エネルギー効果を得ることはなく、細かいことを積み上げていかねばならない。一方、照明の分野では、人の視覚的な生理反応には難しい面もあるが、照明の省エネルギーとなると消灯や減光などであり、空調に比べれば遙かに簡易で効果も大きい。にも関わらず、照明分野での省エネルギーは、LEDランプなどの技術面ばかりが強調され、照明設計や制御などのソフト面が話題になることが少ない。

ところで、2010年に照明のJIS基準が改定された。事務所について言うと、従来300~750lxであったものが750lxの単一基準に引き上げられた。しかし、東日本大震災後の電力不足から、照度を下げた旧JIS基準での運用が要請され、首都圏を中心に部分消灯や減光が多くビルで実施された。これを受けて、2011年に再度JIS基準が改定され、下限500lx、標準750lx、上限1000lxとなった。

現在、多くの照明方式である直接照明はJISの基準である作業面照度を得るのには都合が良いが、光源のランプが直接視野の中に入るため、視環境の点では好ましくない。一方、間接照明は輝度が抑えられるので視環境的には好ましいが、反射を利用するために、同じ作業面照度を得ようとすればより多くの電力を必要とし、省エネルギーの点で不利にならざるをえない。

研究代表者は以前より視環境に優れた間接照明を普及させたいと考え、問題点を明らかにするためにいくつかの予備的な実験や調査を行ってきた。例えば、直接照明と間接照明の両方による作業面照度と電力消費量の比較分析、被験者による物の見やすさやの比較実験などである。これらの結果から、直接照明よりも間接照明は多少低い作業面照度であっても物の認識度は落ちない、室全体の平均輝度や明るさ感は間接照明の方が高い、などの結果を得ていた。これらの結果から、作業面照度以外に、視野の中の輝度分布が重要であり、これが物の見やすさや明るさ感などに強い関係があるとの結論に至った。

間接照明の普及のためには、輝度を考慮に入れた新たな照明設計法の確立が不可欠であると考えた。なお、設計法に輝度を入れるとなると、それを計測することが必然となる。しかし、輝度を測るための輝度計は照度計よりも高価であり、輝度を前提とした照明設計を実務で採用することには難しさがある。幸いにも、デジタル一眼レフカメラで撮影した画像データから輝度に変換する技術が開発され、しかも、ピンポイントの輝度だけでなく、面での分布も分かるようになった。デジタル一眼レフカメラならば輝度計よりも安

価であり、実務設計に導入しやすくなった。

## 2. 研究の目的

本研究では、視環境的に良い間接照明を普及させることを究極の目的とする。なお一方で、同じ作業面照度を得るには直接照明よりも大きな電力を必要とするが、この省エネルギー上の課題を如何に克服するかも重要なテーマである。

このために、3章に記す種々の実験を行った。ポイントは輝度であるが、高輝度は瞳の縮動を誘発し、このため明るさ感を得ようとすれば照度を上げることになる。一方、輝度を下げれば瞳の縮動が抑えられ、低い照度でも明るさ感が得られると予測した。

最終的には新たな照明設計法を提案することが目的であるが、この設計法では、輝度と照度の両方を考える。また、間接照明だけでは省エネルギーが得られにくいので、タスク照明との併用も考えに入れる。また、新築の建物だけでなく、既設の建物に適用できると普及効果が大きくなるが、既設建物では、天井や天井高など間接照明とするための制約が大きい。この解決策・代替案についても検討する。

## 3. 研究の方法

本研究では、新たな設計方法の提案をするために、その根拠となるデータを得る必要があり、以下の実験を行った。

### (1) 予備実験／直接照明と間接照明の比較

ゼミ室で直接照明と間接照明の両方を設置し、照度・電力量の比較実験、明るさ感・眩しさ・見やすさなどのアンケートを行った。

### (2) 照明の減光と在室者の視的反応実験

照明器具に0~8枚のトレッシングペーパー(以下、トレペと略す)を貼り、輝度と照度を変化させ、被験者に、物の見え方・眩しさ感などのアンケートを行った。

### (3) ランプの輝度と位置による縮瞳実験

輝度が異なる3種類のランプを選定し、更にトレペの枚数で輝度を調整し、垂直方向と水平方向のどの位置で縮瞳反応が生じるかの実験を行った。同時に、眩しさ感のアンケート調査を行い、縮瞳反応と眩しさ感の関連性について分析した。

### (4) 輝度を考慮した照明設計法の提案

良い視環境を実現するならば、間接照明とするのが良いが、既存の建物の直接照明の改修を含む設計法を提案する。また、省エネルギー性の試算も行った。

## 4. 研究成果

### 4-1 予備実験／直接照明と間接照明の比較

この予備実験は本研究の前に大学の特別研究(2011年)で行った。ゼミ室(図1)は床面積が35㎡であまり広くはないが、天井高が3.5mと高い。床より2.8mの高さにHf蛍光灯6台12灯を背中合わせに二重に設置し、直接照明と間接照明を自由に切り替える

れるようにした。なお、天井と壁の上半分は白色で塗装し反射率（約 80%）を高めた。

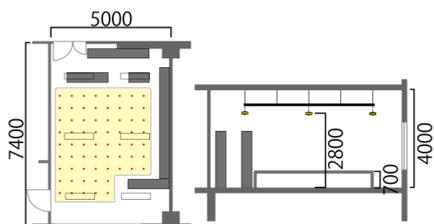


図 1 予備実験を行った室

### (1) 照度と照明電力

図 2 に作業面照度と電力の関係を示す。これより次のことが分かった。

- ・直接照明 750lx（実測平均値 743lx）と間接照明 500lx（実測平均値 501lx）の電力がほぼ同じである。逆に言うと、
- ・同じ作業面照度を得るには間接照明は直接照明の約 1.5 倍の電力が必要となる。

実験室は小さい室で壁などの 2 次反射が大きく不利な要素もあるが、天井・壁・机を白色系で反射率を高めたので有利な要素もある。

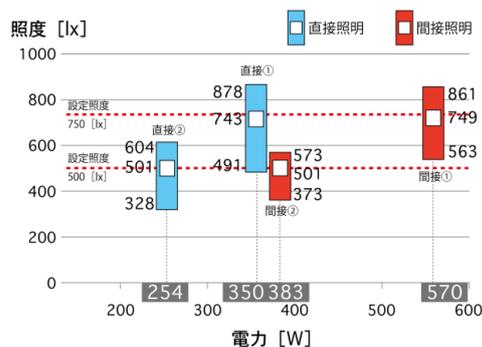


図 2 直接照明と間接照明の照度と電力

### (2) アンケート結果

実験と同時にを行ったアンケート調査では

- ・直接照明は明るい、眩しい。
  - ・間接照明は明るさ感劣るが眩しくない。
  - ・作業性は間接照明がやや良い。
  - ・文字が読みやすいは直接照明がやや良い。
  - ・目が疲れにくい等は間接照明が優位である。
- 作業内容はゼミの授業であり、白板を見る・ノートを取る・資料を読む・時に模型を作るなどであり、色々な作業が絶え間なく変化している。その総体としての印象評価である。

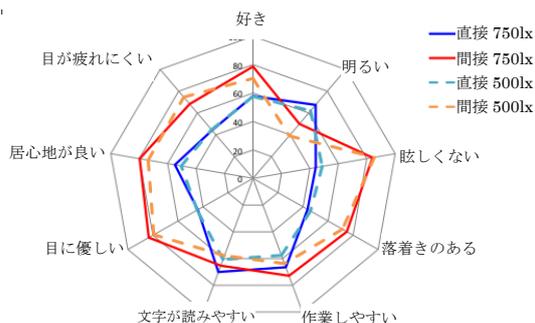


図 3 直接照明と間接照明のアンケート結果

### 4-2 照明の減光と在室者の視的反応実験

本実験は大学の講義室(130 m<sup>2</sup>)で行った。毎回の授業で照度を徐々に落としていった。授業中は窓のカーテンを閉め自然光を遮った。授業後にアンケート調査を行い、明るさ感・眩しさ・物の見やすさ・作業性などとの関係を分析した。同じ条件で 2 回の授業があり、毎回の対象者は 60 人程度である。結果を以下に示す。

#### (1) 照度と輝度

講義室は Hf 蛍光灯による直接照明である。調光装置は無いので天井埋込下面開放の照明器具にトレペを重ねることで輝度と照度を調整した。輝度や照度の調整に障子紙も用いたが、図 4 以下はトレペの場合を示す。

最初（トレペ無し）の机上面の平均照度は 955lx であった。トレペの枚数を増やすと机上面照度は双曲線状に下がり、トレペ 8 枚で 288lx となり、JIS の照度基準の事務所の下限値 500lx や教室の 300lx を若干下回った。

照度とともに輝度も同様に下がる。視野の平均輝度とは講義室の中央の席から正面を向いたときの誘導視野（上 30°、下 50°、左右 55° とした）の平均輝度であり、照明器具が視野の中に入る。なお、照明部分の輝度は最初（トレペ無しの Hf 蛍光灯）14,550cd/m<sup>2</sup> であった。

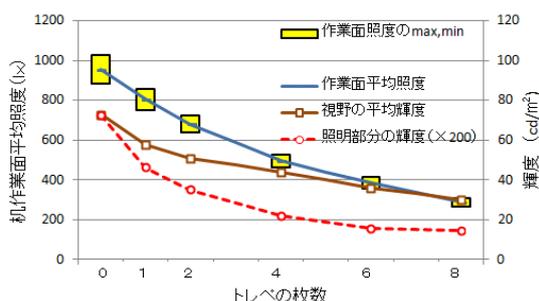


図 4 トレペの枚数と照度・輝度の関係

#### (2) 物の見やすさ・作業性

図 5 は授業後に行ったアンケート調査結果である。授業中は主としてプロジェクタを使い、同時に資料に目を通したり、ノートを取る。最後の 15~20 分が演習時間である。

スクリーンの見やすさ：プロジェクタに写す画像の地色は濃紺であり、スクリーン自体の輝度は低い。スクリーンの見やすさは主に輝度が関係すると考える。図 5 では輝度が下がると見やすさが向上している。トレペ 4 枚の時に最高値を示した。この時の誘導視野

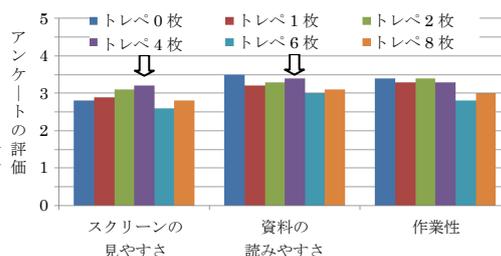


図 5 見やすさ・作業性のアンケート結果

の平均輝度は  $44\text{cd}/\text{m}^2$  であり、照明部分が  $4,400\text{cd}/\text{m}^2$  であったが、この辺りが眩しさが無く見やすさの目安と考える。

資料の見やすさ：教科書や資料を見る場合は、主として机上面照度が関係すると考える。トレペ無しの際に見やすさが最高値を示したが、一旦下がり、トレペ4枚の時に再度ピークとなった。この時の机上面照度は  $463\sim 529\text{lx}$  であった。概ね  $500\text{lx}$  が資料の見やすさの目安と考える。

作業性：90分授業の最後の15~20分が演習時間である。単に、机に向かっての作業だけでなく、資料に目を通し、スクリーンを見、電卓を使い、互いに相談もし、解答するなど、色々な作業を連続的に行うが、その総体としての評価である。図5によると、作業性と照度や輝度との相関性は希薄である。

### (3) 作業面照度と光源の輝度の基準（暫定値）

以上より作業面照度と光源の輝度の設計上の基準は暫定的に以下とする。

- ・作業面照度は  $500\text{lx}$  とする。
- ・光源の輝度は  $4,400\text{cd}/\text{m}^2$  以下とし、眩しさを抑える。

## 4-3 縮瞳実験

### (1) 実験方法

縮瞳実験では、図6に示すように被験者とランプの距離を  $1\text{m}$  とし、垂直方向と水平方向で  $15^\circ$  ごとにランプを設置し、時間を置いて順次点灯し各9点の縮瞳率を調べた。

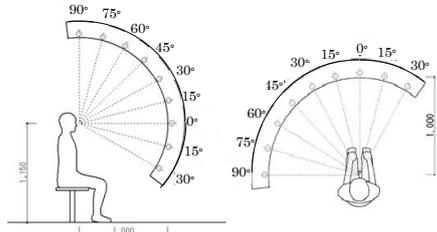


図6 縮瞳実験の実験装置

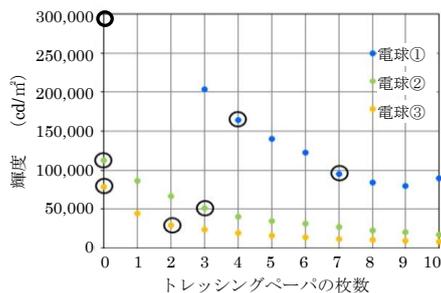


図7 トレペにより調整した光源の輝度

使用したランプは次の3つである。

- 電球①：下方形の高輝度 LED ランプ  
8.0W、760lm、 $290,000\text{cd}/\text{m}^2$
- 電球②：全方向方形の低輝度 LED ランプ  
8.4W、760lm、 $112,000\text{cd}/\text{m}^2$
- 電灯③：ミニクリプトンランプ  
36W、490lm、 $79,000\text{cd}/\text{m}^2$

なお、研究の2年目に8種類の LED ランプで同様の実験を行ったが、LED ランプの輝度

が非常に高く、ランプの差が不明確であった。

最終年度では①高輝度と②低輝度の2種の LED ランプに絞り、これに輝度がより低い③ミニクリプトンを加えた。それでも間接照明を想定すると輝度が高いので、更に、トレペを前面に重ねることで輝度を下げる実験を加えた。図7にランプの輝度を示すが、○印が実験したケースである。

### (2) 実験結果/縮瞳反応

ランプの位置を  $90^\circ$ （真上または真横）から始め  $15^\circ$  毎に点灯し、正面が  $0^\circ$  である。真正面から瞳孔の写真を撮り、画像データに取り込んで縮瞳率（=瞳孔/光彩）を割り出す。なお、窓はブラインドを下げ、外光の影響がない状態で実験した。また、作業面の平均照度は間接照明で  $600\text{lx}$  に調光した。

実験結果を図8（垂直方向）に示す。なお、被験者3人の平均値である。縦軸が縮瞳率である。これを自乗すると面積比になる。

垂直方向では誘導視野（上  $30^\circ$ ）の前後から大きな縮瞳反応が始まる。真正面  $0^\circ$  で縮瞳率が最大になる。光源の輝度が高い場合は縮瞳率が大きくなり、縮瞳範囲も広がる。

水平方向では  $75^\circ$  位から縮瞳反応が起きるが縮瞳率の変化は緩やかである。

以上より、縮瞳反応を抑えるためには、

- ・光源が直接視野に入らないようにする。
- ・光源が視野に入る場合は、光源の輝度を抑える。

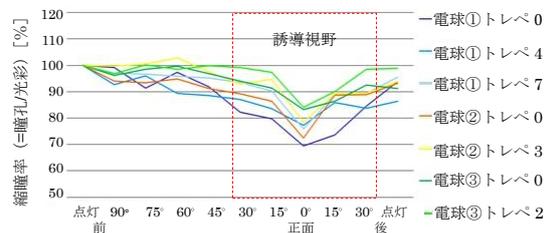


図8 ランプの位置と縮瞳反応（垂直）

### (3) 眩しさ感のアンケート調査

縮瞳実験と同時に、被験者に眩しさ感などに関する調査を行った。ランプの位置を  $90^\circ$  から  $0^\circ$  まで順次点灯し、その位置で感じた「眩しさ感」を5段階で評価した。

結果を図9に示す。厳密な評価は難しいが、おおよ次のことが言える。

- ・縮瞳反応と眩しさ感は概ね連動している。
- ・縮瞳反応よりも広い範囲で眩しさを感じている。
- ・輝度が高いと眩しさを感じ、輝度が低いと正面近くでも眩しさを感じにくい。

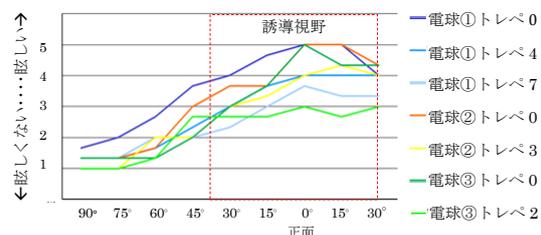


図9 ランプの位置と眩しさ感（垂直）

#### 4-4 新たな照明設計法の提案

良い視環境を実現するなら、間接照明が良い。ただし、いつも間接照明が可能とは限らないので、既存の建物の改善・改修を含めた照明設計法を提案する。

設計の基本条件をまとめると

- ・必要な机上面照度を確保する。(500lx)
- ・光源の輝度を抑える。(4,400cd/m<sup>2</sup>以下とする)

##### (1)直接照明での改善

直接照明では視野内に光源が入るのは避けられない(図10上)。ここではスクリーンを用いて必要な照度を確保し、かつ輝度を下げする方法を示す。(図10下)

- ・元々の机上面照度を 750lx とする。
- ・必要な照度 500lx を確保するためのスクリーンの透過率は  $\tau = 500/750 \approx 0.67$  (トレペ3枚半相当) となる。
- ・輝度を 4,400cd/m<sup>2</sup> に下げするためにスクリーンで光源の面積を拡大する。光源が Hf 蛍光灯 (14,550cd/m<sup>2</sup>) の場合、面積拡大率は  $\phi_A = 14,550 / 4,400 \times \tau \approx 2.2$  となる。
- ・光源が前出の電球② (全方向方形の低輝度 LED ランプ 112,000cd/m<sup>2</sup>) の場合、面積拡大率は  $\phi_A = 112,000 / 4,400 \times \tau \approx 17$  となる。LED ランプは小さいので、面積 17 倍は可能と思われる。

この方法はグレアを抑えるために用いられるルーバーと基本的には変わらないが、スクリーンを用いることで、光の漏れを無くすことと均質な輝度とすることが容易になる。

なお、照明電力は軽減されない。

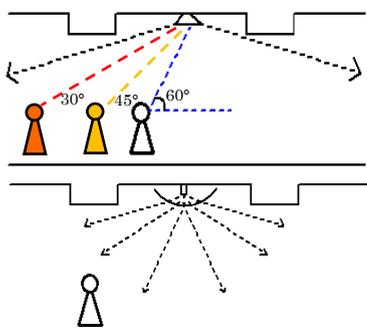


図10 直接照明での改善

##### (2)間接照明

間接照明で大きな天井面に反射させれば高輝度が避けられ、眩しさ感も生じにくい。ここでは、既設の建物で間接照明をする場合の方法を示す。(図11)

- ・高さを得るため天井はむき出しが良い。(設備が単純な学校の教室などでは可能)
- ・照明を天井に向け天井面に広く反射させる。
- ・LED ランプならば、その指向性を利用して個々のランプの向きを調整し、天井面に均質に反射させることができる。
- ・天井は無指向性の白色とし、反射率を高める。(反射率 80% を目標とする)
- ・2次反射の壁・床・家具も明るい色で反射率を高める。(必ずしも白色でなくて良い)

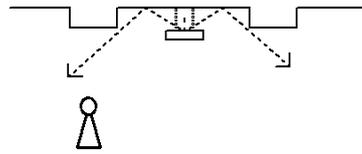


図11 既設建物の間接照明への改修

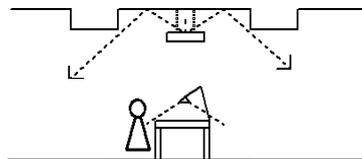


図12 タスク・アンビエント照明

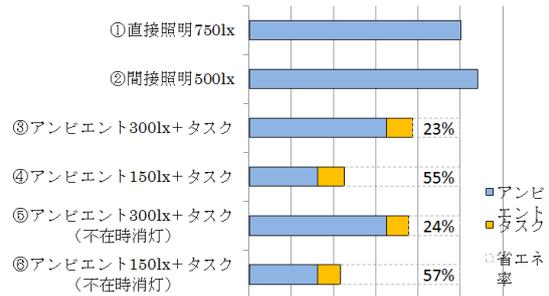


図13 照明の省エネルギーの試算

##### (3)タスク・アンビエント照明

間接照明で机上面照度を下げても、これだけでは照明の電力削減にはなりにくい。本格的な省エネルギーを図るならば、タスク・アンビエント (T&A) 照明とする。

その基本は

- ①アンビエント照明は間接照明が望ましい。輝度を上げないことが肝要である。
- ②アンビエントによる作業面照度は 300lx 以下を目安とする。できる限り照度を下げる。
- ③必要な照度はタスク照明で得る。
- ④不在時にはタスク照明を自動消灯する。

(4)タスク・アンビエントによる省エネルギー  
図13にタスク・アンビエント照明の省エネルギー試算結果を示す。

- ①直接照明 750lx を基準とする。
- ②間接照明 500lx とすると 8% の増エネとなる。なお、図2の効率 (=電力/照度) で直接照明から間接照明の電力を割り出した。
- ③T&A 照明で、アンビエントの間接照明の机上面照度を 300lx とすると、①に対して 23% の省エネとなる。なお、タスクは 1 灯 15W とし、人員密度は省エネルギー法の熱負荷計算基準の 0.1 人/m<sup>2</sup> に準じた。
- ④T&A 照明でアンビエントの机上面照度を 150lx とすると 55% の省エネルギーとなる。
- ⑤T&A 照明でアンビエントを 300lx で、タスクを不在者消灯とすると 24% の省エネルギーになる。
- ⑥T&A 照明でアンビエントを 150lx で、タスクを不在者消灯にすると 57% の省エネルギーになる。

不在者消灯による効果が小さいように思わ

れるが、在席率は省エネルギー法の事務所の平均在席率 82%に準じた。なお、研究代表者が以前（2008 年）に行った事務所の実態調査では平均在席率は 50～52%であった。

③と⑤のアンビエントの 300lx は JIS の事務所の下限値より低いが、学校の教室の基準と同じであり、労基法の精密作業の基準と同じである。④と⑥の 150lx は、労基法の普通作業の基準である。住宅での照度は 200lx 未満が多いことから、決して暗くはない。必要な照度はタスク照明で確保すればよい。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- ① 猪岡達夫、良好な視環境と省エネルギーを両立させる照明のための基礎実験、中部大学工学部紀要、査読無（招待論文）、Vol.49、2014-03

〔学会発表〕（計 3 件）

- ① 森祐介，鈴木崇之，吹田優希美，猪岡達夫、省エネルギーかつ良好な視環境を実現する照明設計の研究～瞳孔の縮動実験に基づく照明設計の提案～、空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会論文集、Vol-17、pp.33-36、査読無、2016-03-15、東桜会館（愛知県・名古屋市）
- ② 葛谷宗馬，鈴木沙織，村瀬裕太，猪岡達夫、良好な視環境の実現に向けて 照明の位置・瞳の縮瞳・人の感じ方に関する基礎実験、空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会論文集、Vol-17、pp.101-104、査読無、2015-03-09、名古屋大学環境総合館レクチャーホール（愛知県・名古屋市）
- ③ 加藤光敏，中野稜大，山田貴弘，西脇大祐，猪岡達夫、講義室における照明の減光に対する居住者の視環境的反応の分析、空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会論文集、Vol-16、pp.93-96、査読無、2014-03-17、東桜会館（愛知県・名古屋市）

〔図書〕（計 1 件）

- ① 猪岡達夫、デザイナーのための建築環境計画、丸善、2015、228

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

なし

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

猪岡 達夫 (INOOKA, Tatsuo)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：20367668

##### (2)研究分担者

なし ( )