

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

Basic experiments to realize energy saving of lighting

with desirable visual environment

猪岡達夫 ・イノオカ タツオ・Inooka Tatsuo

SUBJECT

照明、視環境、省エネルギー、照度および輝度分布

ABSTRACT

2011 年の 3.11 以降、多くの建物で照明の減光や間引きが実施されているが単なる減光や間引きは暗くなるだけであり視環境の面で問題があり、根本的な解決とは言えない。一方で、日本の照明設計基準と言えるものは作業面の照度だけであり他国と比べて過大であると言われている。本研究では、従来の照度の他に輝度分布を考慮に入れた新たな照明設計法を提案したいと考え、直接照明と間接照明の比較実験、光源の位置と瞳孔の縮動反応実験、照明方式の違いによる輝度比較測定、講義室での照明の減光実験、照明による省エネルギーの可能性の解析などを行ったので報告する。

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

猪岡達夫*

Basic experiments to realize energy saving of lighting with desirable visual environment

Tatsuo Inooka

Received October 17, 2013

Since the 3/11 disaster, many buildings have seen reductions in energy usage via the dimming and thinning of lighting, with the goal of saving electricity. In addition, JIS standards regarding luminosity have been revised; however, the dimming and thinning of lighting can lead to dark and gloomy environments. Thus, the ultimate purpose of this study is to find a solution that allows for the saving of lighting energy without compromising desirable visual environments. Experiments aimed at achieving this goal were carried out, including a comparison study of direct vs. indirect lighting, a study of pupil response to high brightness lamps, and a light dimming experiment during a class lecture.

Keywords : visual environment, energy saving , direct/indirect lighting, luminous, brightness

1. はじめに／研究の目的と背景

2011 年の 3.11 以降、多くの建物で省エネルギーが図られているが、空調のクールビズは高温多湿な日本の気候には合わず、なかなか効果が上がらない。一方、照明の減光や間引きによる節電は確実に効果が上がっている¹⁾。しかしながら、単なる減光や間引きでは、ただ暗くなるだけであり視環境の面で問題が残る。根本的な解決とは言えない。

筆者は長年に亘って、建築環境・空調・換気などの側面から省エネルギーの研究を行ってきた。照明は専門外であったが、かねてより現状の照明については疑問があり、また、視環境に良いとされる間接照明を普及させたいとの思いから、2009 年より研究

を始めた。折しも 3.11 で照明が脚光を浴びることになった。

図 1 は事務所ビルの消費エネルギーの内訳を示す。2004 年度とやや古い調査であるが、今日と大きく変わらない。空調（熱源・熱源補機・水搬送・空調・換気）が全体のほぼ半分を占めるが、次に多いのが照明で建物全体の約 30%を占める。本研究はこの照明を対象とし、省エネルギーと同時に快適な視環境の両立を図る照明とは何かを研究するものである。

人は視覚を通じて得る情報量が全体の 87%を占めると言われている。故に、建築として如何に良い照明設計をするかは重要である。しかし、明るさには照度・均斉度・輝度・グレア・演色性などが絡み合い複雑である。この中で設計基準として確立しているのは照度だけであり、他は基準とすることが難

*建築学科 (Department of architecture)

しいため、唯一の基準である照度に色々なしわ寄せがきて、本来の良き視環境を構築する妨げになっている側面がある。本研究では、従来の照度の他に輝度分布を考慮に入れた新たな照明設計法を提案したいと考える。

本論文では、これまでの研究の時間的流れにそって以下の分析内容について述べる。

- 1) 明るさに関する基準・指標の整理
- 2) 直接照明と間接照明の比較実験
- 3) 光源位置と瞳孔の縮動反応実験
- 4) 照明方式の違いによる輝度比較
- 5) 照明による省エネルギーの可能性の検討
- 6) 講義室での照明の減光実験

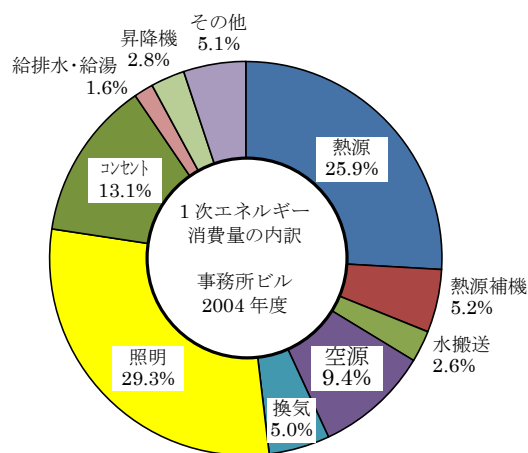


図1 事務所ビルの1次エネルギー消費量の内訳 (省エネルギーセンター、2004年度)

2. 明るさに関する基準・指標の整理

2-1 照度基準

表1はJISの照度基準の変遷をまとめたものである。JISでは水平な作業面(床からの高さは概ね80cm)における照度を規定している。照度の他に輝度・均斉度・グレアなど色々な要素があるが、JISで規定されるのは照度だけである。旧JIS(と本報では呼ぶ)は1979~2010年まで31年間使われてきた。新JIS(と本報では呼ぶ)は2010年に改訂されたもので、それまで上下限があり曖昧であったとして基準値が1本に絞られた。新々基準(と本報では呼ぶ)は、3.11以後、より低い照度に誘導するために事務所を対象に改訂されたものである。

表1の照度基準(JISZ9110)の変遷 [lx]

	旧 JIS 1979 年	新 JIS 2010 年	新々 JIS 2013 年 6 月
事務所	300~750	750	500~750~1000
教室	200~750	300	—

学校については学校保健安全法に対する文科省の告示(2009年)で、教室の照度の下限を300lx、望ましい照度を500lx以上とした。また、照度の最大・最小の照度比を20:1とするなどの基準を定めた。これにより、小学校などで500lxに満たないところは天井に照明器具を増やすなどの工事が行われた。

3.11の後、建築学会は新JISから、旧JISの1段下げて500lx、更に2段下げて300lxとするように要請した。これにより減光や間引きをした建物では新JISの照度基準を満たさないことになった。しかし、実際は照度を落としても問題ないことが分かり、2013年にJISの照度基準が一部改訂された。新々JISでは事務所は750lxを標準とし下限を500lxに引き下げ、他方上限は1000lxに引き上げられた。

2-2 明るすぎる日本の照明

日本の照明は明るすぎるという意見は以前よりある。瞳の色が違う欧米とは同列にできないが、欧米諸国の照度基準は500lx以下である。例えば、アメリカ・カナダは200~500lx、フランスは425lx、ドイツ500lx。オーストラリア160lxである。

照明学会の古い研究^{2) 3)}によると、夜間読書をしていて人が最も疲れな照度は160lxであるとされている。これは新々JISの事務所の照度基準の下限値500lxの1/3以下である。

また、住宅の居間の照度を測ってみると、大抵は200lxに満たない。これでも普段の生活には支障がないし、明るすぎるのは却って疲れる。明るさが欲しければスタンドなどを使えばよいのである。

京都の大山崎にある「聴竹居」は京都帝国大教授であった建築家・藤井厚二(1888~1938)の自宅であり、建築環境工学を具現化した建物として有名であるが、ここの居間の照度は昼間照明を点灯しても100lxに満たない。

また、戦前の小学校の教室には照明など無かった。「明日館(みょうにちかん)」は1921年に羽仁吉一・もと子が創立した自由学園の校舎である。フランク・ロイド・ライトと弟子の遠藤新が設計した。東京・池袋に今も記念館として残っているが、ここで照明が無かった頃の学校を体験できる。

人の明るさに対する許容範囲は極めて広く、昼間の外部で直射があれば照度は最大で100,000lx位ある。一方、新月の夜道は0.0003lxである。実に10桁、3千万倍の差に追従できるのである。この幅広い対応能力を狭い照度基準で規定すること事態が難しいことなのである。

2-2 輝度に関する評価指標

明るい/まぶしいは照度よりも輝度の方がより感覚に合っている。しかし輝度についての基準はない。

輝度が計測機器として高価であることも基準化しにくい要因になっている。

なお、最近、Feu（フー）なる指標が提案されている。これは室の明るさを輝度で評価するという試みである。この意味で本研究と目的とするところと同じであるが、Feu は高輝度の光源を除外した輝度で室の明るさ感を評価とするのに対して、本研究は、高輝度の光源および光源を含む輝度分布から眩しさを評価する点異なる。

3. 直接照明と間接照明の比較

天井に取り付けた照明で明るさを得るのが直接照明である。直接作業面を照らすので所定の照度を容易に得ることができること、また、比較的価格の安い照明器具であることから、事務所の執務室や学校の教室などでは、ほとんどが直接照明を採用している。

一方、間接照明は天井などに光を照射してその反射光で明るさを得る方法である。光源が見えないため眩しさ（グレア）がなく目に優しいが、一度光を反射させるため高い照度を得るには不利である。

本章では、直接照明と間接照明を以下の内容について比較検討した。

- ① 照度分布の比較
- ② 照明電力の比較
- ③ 被験者のアンケート調査

3-1 照度分布の比較

中部大学 8 号館の実験室（図 2）は天井が高い。通常の天井高さに、直接照明と間接照明が自由に切り替えられるように照明器具（インバータ調光付き Hf 蛍光灯 2 灯×6 組）を背中合わせに設置した。

実験は、平均照度が 750 lx と 500 lx になるように調整して、直接照明と間接照明の比較実験をした。なお小さな室なので両者の差が顕著に出る。

机上面の照度分布の結果を図 3 に示す。直接照明は照度の等高線が密であり、それだけ場所による照度の差が大きい。一方、間接照明は照度の等高線の間隔が広く、最高照度と最低照度の差も小さく均一である。極端な例として、1 組の照明だけ点灯した場合、直接照明で明るいのは照明の真下だけであるが、間接照明では室全体が明るい。

3-2 照度電力の比較

実験室の照明は無段階に調光できるが、同じ電力であれば、間接照明は直接照明の 2/3 の机上面照度しか得られない。逆に、同じ照度を得るためには間接照明は直接照明の 1.5 倍の電力が必要である。このため、照度が同じ条件では、間接照明は省エネルギーにはなり得ない。なお、後述のアンケート結果

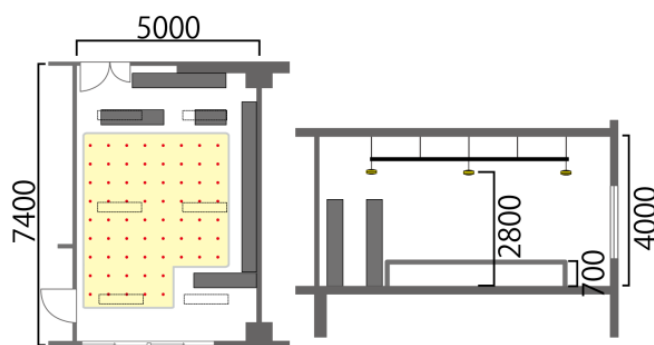


図 2 実験室の平面図・断面図

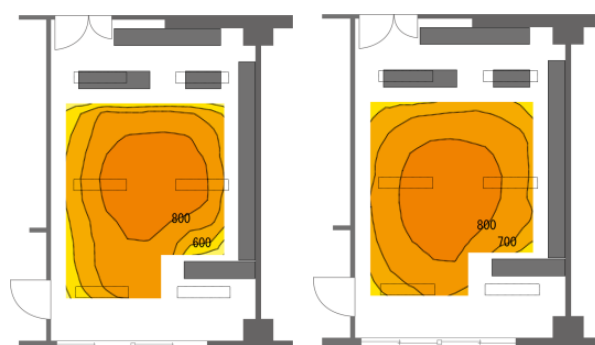


図 3 照度分布（左:直接 750lx、右:間接 750lx）

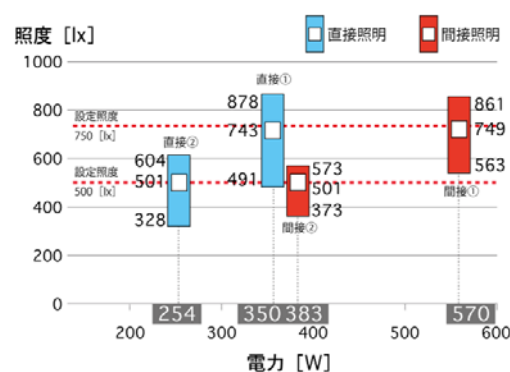


図 4 照度と照明電力の関係



図 5 アンケート結果

によると、作業性と照度は必ずしも比例関係でなく、間接照明では照度が下がっても作業性は落ちにくいので、間接照明による省エネルギーの可能性はあると言える。

3-3 被験者のアンケート調査

実験室でゼミ等を行い、終了後にアンケート調査を実施した。照明は、照度と照明方式を日によって様々に設定した。アンケートは「明るい」「まぶしくない」「作業しやすい」「文字が見やすい」「目が疲れにくい」など9項目を5段階で評価してもらった。各評価項目の結果の平均値を図4に示す。

- 1) 明るい： 当然のこととして直接照明の方が高い結果となった。
- 2) まぶしくない： 光源が見えない間接照明が良い結果となった。小さな実験室なので直接照明でも光源が見えることは少ないのであるが、評価では大きな開きが認められる。また、この項目の評価が高い事が「落ち着き」「居心地」等の項目での高い評価結果につながっている。
- 3) 作業がしやすい： ゼミでは小実験、実験模型の製作、講義、ノート取りなど様々なことをする。これらの総合的な結果は、間接照明と直接照明は大きく変わらない。むしろ間接照明 500 lxの方が直接照明 750 lxよりも僅かであるが高い結果となった。「まぶしくない」ことから目への負担が少なくなった結果と言える。
- 4) 文字が読みやすい： 作業がしやすいと同様の結果である。なお、細かい文字を読む場合は、少し高い照度が必要であることが分かった。

4. 光源位置と瞳孔の縮動反応実験

照度が低い間接照明と照度が高い直接照明が「作業のしやすさ」や「文字の読みやすさ」でほぼ同等の評価になったのには光源が影響している。

人の瞳は照明などの高輝度による影響で縮動がおきる。直接照明では輝度の高い部分があり、縮動して眩しさに対処している。一方、間接照明では視野内に高い輝度が無く、縮動しないので同じ明るさでもより明るく感じるができる。このことを実験で確認した。

4-1 縮動反応実験の方法

図6に示すように、中心のO点に被験者が座り（顔の高さ120cm）、ほぼ真正面の1A点にあるカメラを見る。光源をO点から半径1000mmの位置で水平方向に1～9点と垂直方向にA～D点の縦15°間隔で4点、これらの組み合わせで全36点の実験を行った。

光源を9A→8A→7A→・・・→1Aと順番に設置し瞳孔の撮影を行う。同様に9B→8B→・・・→2D→1Dと順番に撮影を行なう。なお、本実験では視野で重要とされる誘導視野（左右に55°、上に30°、下に50°）よりも広い範囲で実験した。

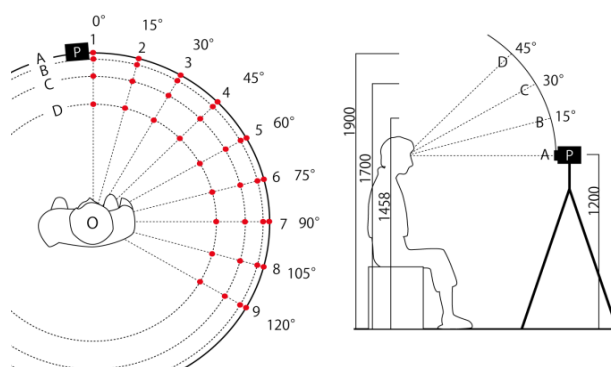


図6 瞳孔の縮動実験

4-2 縮動実験の結果

撮影した写真の虹彩をそろえ、瞳孔の直径を測る。実験開始前の瞳孔の大きさを1.00として、点灯時の瞳孔の大きさと比較する。なお、光源は白熱電球(90W)と指向性のあるLED電球(6W)の2種類使用したが、大きな違いはなかったので白熱電球のみの結果を示す。

1) 水平方向A列の瞳の縮動反応結果(表2)

光源が被験者の正面に近づくにつれて瞳孔の縮動が大きくなる。最も大きく変化したのは、光源の位置が7A～6A(90°～75°)で直径比が1.00→0.90と変化した。光源が視界に入り始めた角度であるといえる。これより誘導視野(5A→4A)よりも広い範囲で人は高輝度に対する反応を始めていることがわかる。真正面の1Aでの瞳孔比は0.62であり、強くグレアを感じているといえる。

2) 縦方向1列の瞳の縮動反応結果(表3)

光源が1D(45°)で瞳孔の直径比が1.00→0.89と0.11の変化があった。誘導視野の境界の1D～1C(45°～30°)でも瞳孔の直径比が0.89→0.78と大きく変化した。1列では光源が正面にあるため、光源の影響を強く受けている。

3) 全体における順応反応(図7)

被験者実験の結果を図7に示す。青の点線は実験視野の範囲を示す。赤は誘導視野の範囲を示す。

瞳孔が最初に大きく縮瞳した時の光源の位置を青の実線で示すが、誘導視野よりも広い範囲で瞳孔が光源に反応していることが分かる。

瞳孔比が基準の0.85となる位置を赤の実線で示すが、概ね誘導視野の境界と一致している。瞳孔比と明るさ感はずしも比例しないとされているが、誘導視野の瞳孔比0.85は面積比では0.72であり、直接照明の700 lxと瞳孔が縮瞳しない間接照明の500 lxの照度比も0.7であり、「作業しやすさ」や「文字が読みやすい」の評価が直接と間接とでほぼ同じであることと偶然にも一致している。

表 2 水平方向 A 列の瞳孔の縮瞳反応結果

	基準	光源の位置								
		9A	8A	7A	6A	5A	4A	3A	2A	1A
径mm	31.5	31.5	31.5	31.5	28.0	27.5	26.5	24.0	21.0	19.5
比率	1.00	1.00	1.00	1.00	0.89	0.87	0.84	0.76	0.67	0.62
差	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.02	0.03	0.08	0.10	0.05

表 3 垂直方向 1 列の瞳孔の縮瞳反応結果

	基準	光源の位置			
		1D(45°)	1C(30°)	1B(15°)	1A(0°)
径mm	31.5	28.0	24.5	21.5	19.5
比率	1.00	0.89	0.78	0.68	0.62
差	0.00	0.11	0.11	0.10	0.06

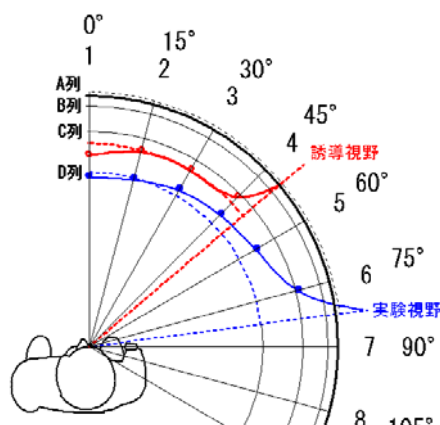


図 7 光源の位置と瞳孔の縮瞳反応

5. 照明方式の違いによる輝度比較

3 章と同じ実験室で直接照明と間接照明の輝度の比較をした。照度の条件は①750 lx、②500 lx である。

5-1 輝度の測定方法

輝度はデジタル 1 眼レフカメラを用い、画像データから輝度に変換する。使用したカメラは予め輝度計とのキャリブレーションを行っており、画像データをモノクロに変換し、その階調値から輝度に変換する。輝度計はピンポイントの輝度を測定するのに適し、カメラは輝度分布を知るのに適する。

シャッタースピードは 1/4000、1/800、1/160、1/30、1/4、2 秒と 1 つのシーンで何度も撮影する。カメラが持つ輝度範囲が狭いため、光源から陰まで幅広い輝度がある実画像を分析するためにはシャッター速度を変えた画像が必要である。

魚眼レンズを使うのは画像と形態係数の分布が同じであるからであり、画像がそのまま輝度分布になる利点がある。使用した魚眼レンズは上下 40°、横方向 70° の範囲を撮影できるものである。

表 4 と表 5 の写真の赤枠の範囲が誘導視野に相当し、写真全体を実験視野とした。写真内の高輝度部分を黄枠で示す。各視野範囲の平均輝度と高輝度部分の輝度を調べた。

表 4 条件②500[lx]の場合の輝度

上：直接 下：間接	輝度[cd/m ²]
	平均輝度 誘導： 239 実験： 20 高輝度： 1126
	平均輝度 誘導： 44 実験： 42 高輝度： 383

表 5 条件①750[lx]の場合の輝度

上：直接 下：間接	輝度[cd/m ²]
	平均輝度 誘導視野： 40 実験視野： 35 最高値： 1739
	平均輝度 誘導視野： 50 実験視野： 44 最高値： 554

5-2 輝度の結果

条件①の平均照度が 750 lx (表 4) の場合、間接照明の最高輝度は 554cd/m²と低く眩しくないが、直接照明は 1739 cd/m²と 3 倍であり、眩しい。一方、平均輝度は直接照明が 40～35cd/m²であり、間接照明は 50～44cd/m²と間接照明の方が高く、室全体が明るいのは間接照明である。条件②の 500 lx (表 5) も同様の結果となった。

なお直接照明の輝度の最高値は照明器具を含む値である。ランプ自体の輝度は 20,000cd/m²程ある。

6. 照明による省エネルギーの可能性の検討

先ず、各ケースの結果を図 8 に示す。

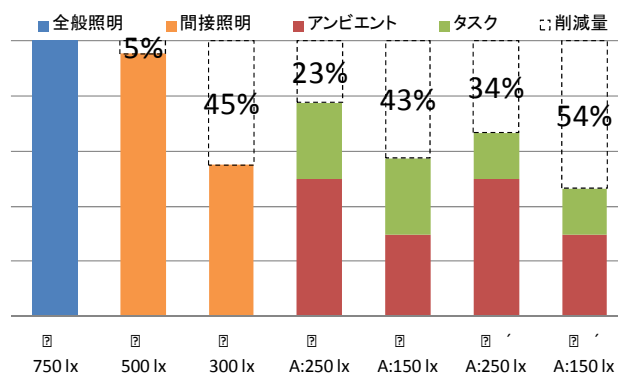


図 8 間接照明と TAL による省エネルギー性

6-1 試算結果

①は直接照明 750 lx の場合である。これを基準とする。なお照明電力は 20W/m²とする

②は間接照明 500 lx の場合である。このケースは「作業性」「視認性」が①の直接照明 750 lx と同程度である。照明電力は 19W/m²で①より 5%下がるが、実質的には変わらない。

③は間接照明の照度が 300 lx で、旧JISの照度基準の下限値まで下げた場合である。照明電力は 12W/m²で①に対して 45%の省エネルギーになる。なお、低照度の場合の実験も行っているが「作業性」「視認性」が著しく下がるわけではない。(→図 9)

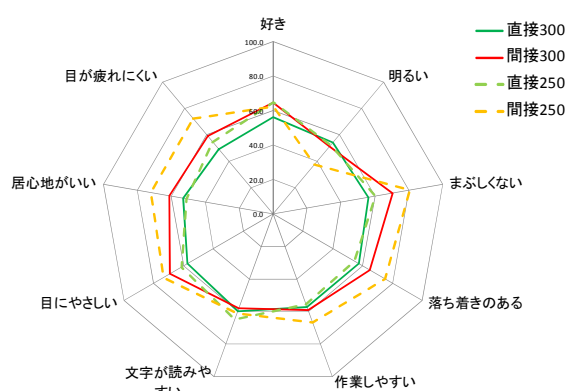


図 9 低照度の場合のアンケート結果

④は全般照明 (ambient) の間接照明を 250 lx (10W/m²) まで下げ、これとタスク照明 (1 人当たり 27W=5.4W/m²) を併用した場合である。合計照明電力は 15.4W/m²で①よりも 23%小さくなるが、③よりも大きくなる。

⑤は間接照明を更に 150 lx (6W/m²) まで下げ、同時にタスク照明 (1 人当たり 27W=5.4W/m²) を併用する場合である。これであると、必要な照度を確保しつつ、43%の省エネルギーを達成できる。

④' は全般照明を間接照明で 250 lx (10W/m²) に戻し、タスク照明 (27W=5.4W/m²) を併用するが、タスク照明の使用率を 60%とした。これであると、①に対して 34%の省エネルギーが得られる。

⑤' は全般照明を間接照明で 150 lx (6W/m²) まで下げ、タスク照明 (1 人当たり 27W=5.4W/m²) を併用し、かつタスク照明の使用率を④' と同じ 60%とした場合である。これであれば①に対して 54%の省エネルギーとなる。

6-2 間接照明による省エネルギー

間接照明で省エネルギーにするには、照度を旧 JIS の基準 (300 lx) まで下げるか、あるいは、タスク照明を併用して必要な場所・必要な時間に必要な照度を確保しつつ省エネルギーとするかである。

ところで実際に TAL (Task and Ambient Lighting) を導入した事例で全般照明の照度がなかなか下げられないことがある。それは直接照明で全般直接をすることに原因があり、直接照明では明るいのは机の上だけで室全体は暗い印象なり、居住者に好まれないからである。全般照明を間接照明であれば天井・壁など室全体が暗くならず、不安感がなくなるこれならば TAL が受け入れられると考える。

また、低照度における TAL についても実験を行っている。結果を表 6 に示す。タスク照明を併用すると「好き」「眩しくない」の回答率がやや下がる、一方、「明るい」「作業しやすい」「目が疲れにくい」などは大きく改善される。

表 6 タスク照明の有無によるアンケート結果

	間接 140 lx	間接 140 lx +タスク
好き	87%	71%
明るい	40%	71%
眩しくない	100%	75%
作業しやすい	67%	83%
目が疲れにくい	65%	75%

図 10 は事務所ビルでの内部発熱 (人・照明・PC) の実測データである^{1 2)}。人の在席率とパソコンの使用率はほぼ連動しているが、照明は昼休み消灯の時間以外はほぼ 100%点灯のままであり、深夜になって初めて点灯率が下がる。この昼間の在席率は大凡 60%である。この在席率を④' ⑤' のタスク照明の使用率に使った。

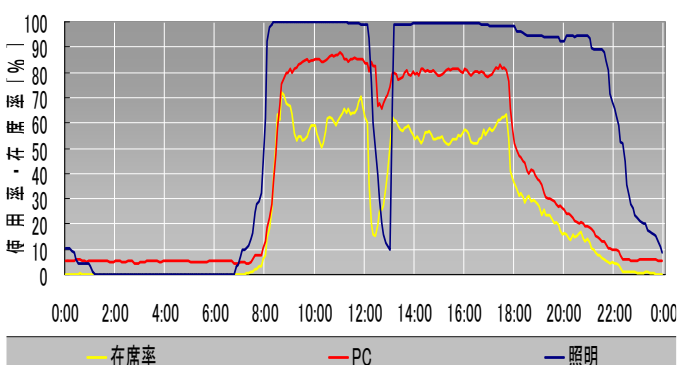


図 10 事務所の在席率と照明の利用率^{1 2)}

7. 講義室での照明の減光実験

これまでは 8 号館のゼミ室における様々な実験および分析結果を示した。

ここからは、これまでの成果を発展させ、より大きな省エネルギーを得るために、中部大学の中心施設である講義室を取り上げ、ここで行った照明の実験および結果に述べる。

なお、教育施設では、特殊な実験施設を除けばエネルギー消費量は事務所と同程度（事務部門）か、講義室などではそれ以下である。講義室で最大のエネルギー消費は照明である。故に、照明の省エネルギーを図ることが教育施設では重要になる。

7-1 本学の講義室の照度

先ず図 11 を示す。これは中部大学の教室等の照明照度の実態である。緑の帯が室内の照度の上限と下限の範囲を示し、赤い短い帯が平均照度を示す。5511 教室は多目的用途に使うことが想定されており、様々な照明装置がある。これを全て点灯すると照度が 2000 lx を超えるが、これは例外である。

その他の講義室の平均照度は 700~900 lx が多い。これは蛍光灯を従来の FL 蛍光灯からより明るい Hf 蛍光灯に切り替えたためである。新 JIS の教室の照度基準や文科省の告示値よりも高く、新々 JIS の事務所並であり、3.11 で減光している事務所よりも高い。本学の講義室の照明は照度が高いことから省エネルギーの余地があると言える。

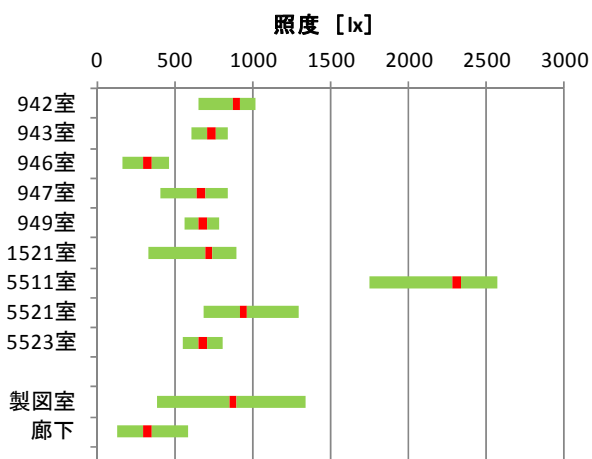


図 11 本学の施設の照明照度

7.2 講義室での減光実験

実験を行ったのは 1043 講義室である。ここには 32W の Hf 蛍光灯が 2 灯 1 組で $5 \times 3 = 15$ 台と、他に黒板用に 1 灯が 2 台、合計で 32W の Hf 蛍光灯が 34 灯ある。照明の電力密度は 11.4 W/m^2 であった。

1) 実験の方法

講義室の照明は下面開放型のごく一般的な直接照明である。さて、ここで減光しようと思っても、Hf 蛍光灯であるが調光装置は無いので減光ができない。また、間引きについては、従来の FL 蛍光灯ならば 2 本のうちの 1 本を間引くことができるが、Hf 蛍光灯は安定器を兼用しているので、1 本間引くともう 1 本も消えてしまう。器具毎消すと照度のばらつきが目立つ。よって間引きもできない。

そこで、減光実験は次のようにして行った。照明器具にトレシングペーパー（以下トレペと呼ぶ）を照明器具の枠に貼り調光装置の代わりとする。トレペは 0 枚から始め、1 枚、2 枚、3 枚と毎週の授業毎に増やし、最終的には 10 枚まで貼った。

なお、遮光性のカーテンを講義中は閉め、外光を完全に遮断した。自然採光をすれば省エネルギーと思われるかも知れないが、単純な垂直窓では、窓際は必要以上に明るい室奥は暗く、明るさのばらつきが大きいため結局照明を点灯する羽目となる。更に言えば、よそ見して窓から外を見ると天空輝度が高いため、相対的に室内が暗く感じる。また、天空光の移り込みでプロジェクターの画面が見づらくなる。このように自然採光して消灯すれば省エネルギーかも知れないが、快適な視環境が得られるとは限らない。

2) 減光実験による照度と輝度

図 12 に 1034 教室の照度分布を示す。机上面照度は縦 4 点、横 11 点で合計 44 点を測定した。

図 13 はトレペの枚数と室内の机上面照度および輝度の関係を示す。初めのトレペ 0 枚での平均照度は 1058 lx と高い。最高輝度は 8330 cd/m^2 ある。トレペの枚数を増やすと、それと反比例して照度と輝度とも下がる。トレペ 4 枚で新々 JIS の事務所の照度基準の下限値並の 515 lx となり、トレペ 8 枚で新 JIS の教室の照度基準並の 315 lx となり、最終のトレペ 10 枚では照度は 221 lx まで下がった。

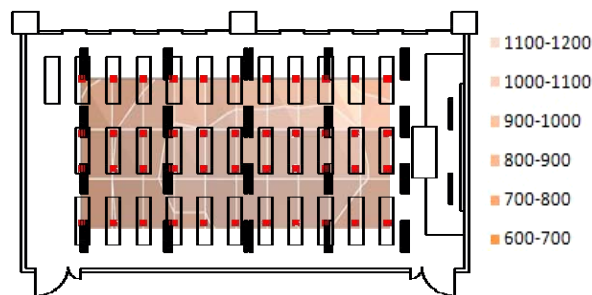


図 12 1031 教室の照度分布（トレペ 0 枚）

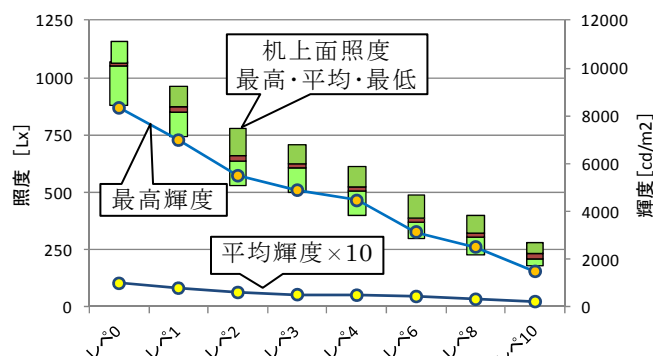


図 13 トレペの枚数と照度と輝度の関係
(最高輝度は照明器具面の平均値)

3) アンケートとアンケート結果

90分の授業は75分がPPTでプロジェクターを使っている講義であり、その間にノートも取る。最後の15分はその日の復習を兼ねた演習課題を解く。授業の最後に照明についてのアンケートを回収する。

アンケートは①「明るい／暗い」、②「眩しい／眩しくない」、③プロジェクターの文字が「見やすい／見えにくい」、④「集中できた／できない」等の項目とした。

①「明るい／暗い」トレペの枚数を増やすと照度が下がり、これに比例して「明るい」と感じる比率が下がる。なおトレペ6枚の時の平均照度は379 lxと低い、それでも54%と約半数が「明るい」と回答している。

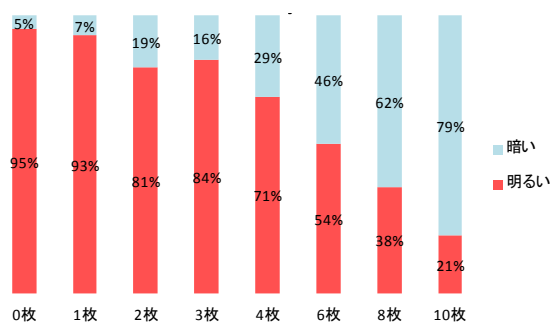


図14 「明るい／暗い」の回答結果

②「眩しい／眩しくない」トレペ0枚と1枚までは「眩しい」とする回答が37～25%存在するが、トレペ2枚で「眩しい」とする回答が急に下がる。トレペは光源を隠し光を拡散することで輝度を下げる。トレペ2枚の時の最高輝度は5500cd/m²である。以後は最高輝度が下がるが、「眩しい」とする回答は横ばいである。「眩しさ」には閾値があるようだ。

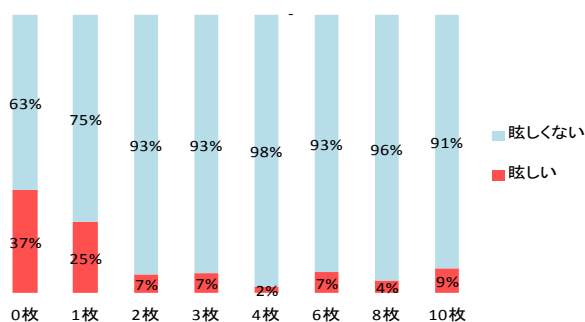


図15 「眩しい／眩しくない」の回答結果

③スクリーンが「見やすい／見えにくい」トレペの枚数を増やすと平均照度は下がるが、同時に輝度も下がるため、スクリーンが「見やすい」が増える。このことは、図16の「眩しい」と丁度逆の傾向になっており「眩しい」が急激に減ったトレペ2枚の時に「見やすい」が急速に増えている。また、以後、「眩しい」は横ばいになるが、「見やすい」も

トレペの枚数が増えてもほぼ横ばいである。

なお、トレペ6枚の時に「見えにくい」が増えているが、これはトレペの重さでテーブルが下がり隙間から光が漏れたためである。

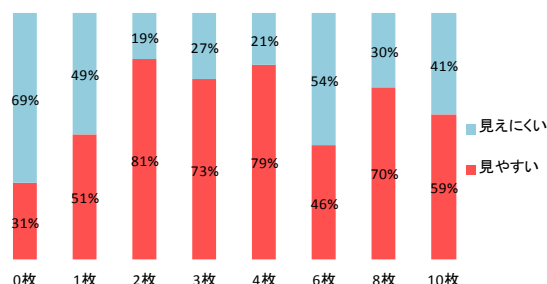


図16 スクリーンが「見やすい／見えにくい」

4) 減光実験のまとめ

講義室の元々の状態は、直接照明の光源が目に入り、このため「明るい」が「眩しく」このため肝心なスクリーンが「見えにくく」なっている。通常は最前列の照明を落とすが、こうすると前方の席の照度が下がってしまう。

実験ではトレペで減光したが、照度が下がるが同時に輝度も下がるので、結果的には「見やすい」の回答が増えた。これはトレペ1枚から2枚の時に劇的に変化した、このことから「輝度」や「見やすさ」には閾値があることと推測される。更に、トレペの枚数を増やし照度と輝度が下がっても、「見やすさ」の回答は横ばいで減らない。

以上より、照明は現状の1/2～1/3まで照度・照明電力を下げて問題ないことが分かった。こうすることで大きな省エネルギーを得ることの可能性が示せた。

8. 本研究のまとめと今後の課題

本論文では、良好な視環境と省エネルギーが両立する照明とは何かを知るために様々な実験を行い以下の知見を得た。

1) 間接照明と直接照明の比較実験

- ・間接照明は天井に一度反射させるので照度が2/3に減じる。
- ・しかし、高い輝度がなくなるので、照度が下がっても作業性や視認性は落ちない。

2) 瞳孔の縮動反応実験

- ・誘導視野よりも広い領域で瞳孔の縮動が始まる。
- ・直接照明では光源の高輝度に瞳孔が反応し、作業性や視認性を低下させている。

3) 照明による省エネルギー

- ・直接照明で照度を落とすと視環境が低下する。
- ・間接照明では照度を300 lxまで下げるだけで、試

算では 45% に省エネルギー効果が得られる。この照度では事務所の新々 JIS の照度基準を満たさないが、本実験の結果ではこれでも作業性や視認性に著しい問題は生じていない。

- ・必要な照度を確保しつつ、省エネルギーとするならば、拡散性の良い間接照明で全般照明をし、ただし 250~150 lx まで照度を落とし、これとタスク照明と併用することである。試算では 34~54% の省エネルギーが可能である。

4) 講義室の減光実験

- ・通常状態（トレペ 0 枚）の平均照度は 1000 lx を超え必要以上に明るい。「明るい」が「眩しく」、プロジェクター画面の「視認性」が最も低い。
- ・トレペを重ねて照度を落とすと「眩しさ」が減りスクリーンの「視認性」が改善される。
- ・照度を 500→300→200 lx まで下げても「視認性」は落ちない。
- ・講義室での実験で減光しても視環境の問題はないことが分かった。しかし、現状の照明器具では、減光や間引きができるようになっていない。
- ・本学の講義室で照明によって省エネルギーをするためには、
 - ・照明器具を調光できるものに交換する。
細かい作業をするときは照度は高い方が良いので、通常時は調光して照度と電力を下げる。
 - ・間接照明は建築的な制約から難しいので、輝度を抑えるために照明器具を和紙で覆う。
 - ・和紙はトレペよりも透過性が低く 1 枚で 0.7 程度である。これと調光で 70~50% にすれば、併せて 50~35% の照度になる。
 - ・調光で 30~50% の省エネルギーが図れる。
- ・自然採光については今後の課題である。
 - ・図 13 でトレペ 2 枚の時の最高輝度 5500cd/m² では視認性は問題なかったが、この輝度は天空の輝度に近い。このことから直射光さえ処理して、天空光を取り入れるようにすれば問題ないかも知れない。

謝辞

本研究は 2010~2011 年度の特別研究「既存の中小規模建物において可能な省エネルギーの実証的研究」の一部であり、2013 年度からは科研費（基盤研究 C）「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」を得て現在も継続中である。

本研究は下記の卒業研究および修士研究をまとめたものである。担当者の氏名を記し、彼らの努力に報いたい。2009 年度卒業研究（安田依加、成澤裕次）、

2010 年度卒業研究（武田実可子、中西健太、松山和之）、2011 年度卒業研究（丹羽修平、村上将宗、金田和樹、中尾このみ）、研究生（武田美可子）、修士研究（安田依加）、2012 年度卒業研究（永田哲、平田勝晟、西川卓真）、2013 年度卒業研究（石元健太・加藤光敏・杉野雄基・中野稜大・長尾文晴・西脇大祐・安丸裕之・山田貴弘）

また、本研究では輝度測定にデジタル一眼レフカメラを利用したが、このキャリブレーションでは、東海大学・岩田教授に大変お世話になった。紙面を借りて感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) IBEC、特集 節電と省エネルギー、IBEC、2012-7
- 2) 中村芳樹、照明計画と省エネルギーの可能性、IBEC、Vol-30-5、2010-1、pp2-7
- 3) 照明学会誌、vol.24 No.24、1940
- 4) 安田・成澤・池尻・猪岡、間接照明の実用化に向けた研究～直接照明と間接照明の比較実験～、空気調和・衛生工学会名古屋支部学術研究発表会論文集、2010-03、pp81-84
- 5) 武田・中西・松山・安田・猪岡、間接照明の可能性の研究～直接照明と間接照明の比較実験～、空気調和・衛生工学会名古屋支部学術研究発表会論文集、2011-03、pp39-42
- 6) 学内外施設の省エネルギーの可能性に関する研究、空気調和・衛生工学会名古屋支部学術研究発表会論文集、2012-03、pp85-88
- 7) 快適な視環境と省エネルギーを両立させる照明方法に関する研究、空気調和・衛生工学会名古屋支部学術研究発表会論文集、2012-03、pp89-92
- 8) 永田・平田・西川、講義室の照明による省エネルギーの可能性の研究、空気調和・衛生工学会名古屋支部学術研究発表会論文集、2013-03、pp111-114
- 9) 安田・猪岡、間接照明の実用化に向けた基礎実験、日本建築学会学術講演梗概集、2010-8、pp499-500
- 10) 武田・安田・猪岡、間接照明の実用化に向けた基礎実験 第 2 報 照度測定およびアンケート調査による直接照明と間接照明の比較分析、日本建築学会学術講演梗概集、2011-8、pp471-472
- 11) 安田・武田・猪岡、間接照明の実用化に向けた基礎実験 第 3 報 直接照明と間接照明の輝度の比較およびシミュレーションによる照度分析、日本建築学会学術講演梗概集、2011-8、pp473-474
- 12) 岩島・猪岡、建物の内部発熱の実測に基づく省エネルギー化に関する研究、空気調和・衛生工学会大会、2008-9、pp549-5512