

論文

プリズム方式昼光利用窓装置による照明電力削減効果

岩永敏秀* 實川徹則* 山本哲雄*

Lighting electric power reduction by the window device of prism system for daylighting

Toshihide IWANAGA, Tetsunori JITSUKAWA and Tetsuo YAMAMOTO

Abstract The window device of prism system for daylighting uses sunlight for indoor lighting and indoor heating using the refraction effect of light from a transparent prism plate installed in a side window. In order to estimate the lighting effect of the window equipment, illuminance distribution on working plane and luminance of the window were measured using a model of an office. As a result, regarding the glare-control-type prism system, which combines a louver with a prism plate, it is expected that the working plane illumination of room depths of 200lx, 500lx, and 1000 lx or more are obtained respectively at the southern point of the summer solstice, the vernal/the autumnal equinox and winter solstice with the discomfort glare of the window controlled. By combining the dimmer function with this system, an annual reduction of 17% of electric power used for lighting can be achieved.

Keywords Prism system, Daylighting, Sunlight, Discomfort glare

1. はじめに

昼光利用によって、照明および暖房用電力の削減を行っていくことは、省エネルギー等の観点から広く社会的に求められている。しかし従来の昼光利用装置は、装置が大型であるため既設建築物への適用が困難であったり、設置費用がかかるため、普及が進んでいるとは言い難い。

プリズム方式の昼光利用窓装置とは、図1に示すようなプリズム板を窓面に取付けることで、その屈折効果を利用して直射日光を天井面に導き天井面で拡散反射させて、室内の照明効果を得るものである。構造が非常に簡単で、一般の既設オフィスビルなどの窓面に容易に設置でき、天空光に比べて照度の大きい直射日光を利用するため、大きな照明効果を期待することができる。一方、直射日光を照明として利用すると、まぶしさ（不快グレア）が伴うため、その制御を考慮する必要がある。

そこで本研究では、プリズム方式の昼光利用窓装置について、明るさやまぶしさといった照明効果を模型実験により測定・評価し、室内照明器具の調光システムと組み合わせることによる照明電力削減量の試算を行った。

2. 測定方法

2.1 プリズム板の仕様

測定に使用したプリズム板は、可視光線透過率が高く、

軽量、加工が容易であり、安価であるメタクリル樹脂板（厚さ2mm、可視光線透過率93%）を選択し、ノコギリ刃状のリニアプリズム加工を施したものを窓面に取り付けた。プリズムによる屈折角は、スネルの法則により次式で表すことができる。ここで、 R はプリズムからの出射角、 n はメタクリル樹脂の屈折率（1.49）¹⁾、 θ はプリズムの頂角、 p は太陽の高度角（南中時）である。

$$R = \sin^{-1} \{ n (\sin \theta \cdot (1 - \sin^2 p / n^2)^{1/2} - \cos \theta \cdot \sin p / n) \}$$

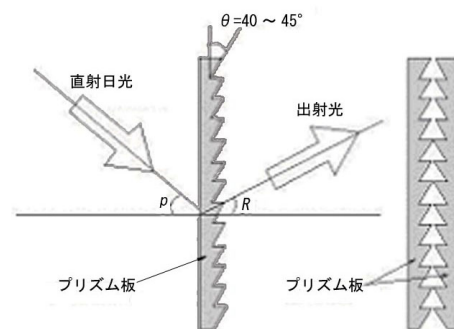


図1 プリズム板による屈折効果

上式から、プリズム板1枚のみでは、どのような頂角のプリズムでも、太陽高度が概ね20度以上になった場合、直射日光が天井方向に屈折しない。そこで、屈折効果を高めるためにプリズム板を2枚重ねて用いた（図1右参

*計測応用技術グループ

照)。この場合のプリズム頂角の最適値は、 $\alpha = 40 \sim 45^\circ$ と求められる。

2.2 測定方法

2.2.1 室内作業面照度の測定

室内作業面照度の測定により、昼光による室内作業面の明るさを評価する。ここでは、部屋の寸法が間口 5.4m、奥行き 6.8m、高さ 2.8m で、窓面の寸法が横 4.6m、高さ 2.0m の事務所を想定した。1/10 模型を製作し、その室内の作業面照度測定を行った。測定条件は次の通りである。

表 1 室内作業面照度の測定条件

模型寸法：間口 54cm，奥行き 68cm，高さ 28cm 窓面寸法：横幅 46cm，高さ 18cm プリズム板の寸法：幅 44cm，高さ 7cm， 厚さ 2mm×2 枚，ピッチ 0.5mm ブラインドの寸法：幅 46cm，羽根幅 15mm， 羽根間隔 11mm 天井面の反射率 ：80% 壁面および床面の反射率：60% 窓面の向き：南向き 光源（模擬太陽）：メタルハライドランプ （100W，全光束 6500lm，色温度 4500K，広角配光） 光源の位置設定：夏至，春・秋分，冬至の日の各時刻（地方時，その地点での南中時を 12 時とする）の太陽位置に設定 照度測定点：床上から 8cm（実寸法で，0.8m）の作業面（水平面）照度 E_h を測定（5 測定点） 窓面での鉛直面照度 E_v も測定 窓装置の条件： a．ブラインド羽根角度調節方式（羽根角度を光源高度に合わせて変化させ，光を室奥に導光） b．プリズム方式 （上部：プリズム，下部：ブラインド全閉） c．プリズム（グレア抑制型）方式 （上部前面：プリズム，上部後面：ルーバー，下部：ブラインド全閉）

窓装置の条件 a は、プリズム方式との比較のため、測定に加えた。測定の配置図を図 2 に示す。

実際の直射日光による作業面照度 E_h' は、次のように算出される。

$$E_h' = E_h / E_v \times E_v'$$

E_v' は、直射日光による鉛直面照度の計算値で、 E ：直射日光による法線照度、 p ：太陽高度、 A ：太陽の方位角、 α ：窓面の方位角（南向きは、 $\alpha = 0$ ）、 E_0 ：大気圏外法

線照度 134,000[lx]、 P ：大気透過率（0.59～0.70）²）とすると次式で計算される。

$$E_v' = E \cdot \cos p \cdot \cos(A - \alpha)$$

$$E = E_0 \cdot P \cdot \cos^2 p$$

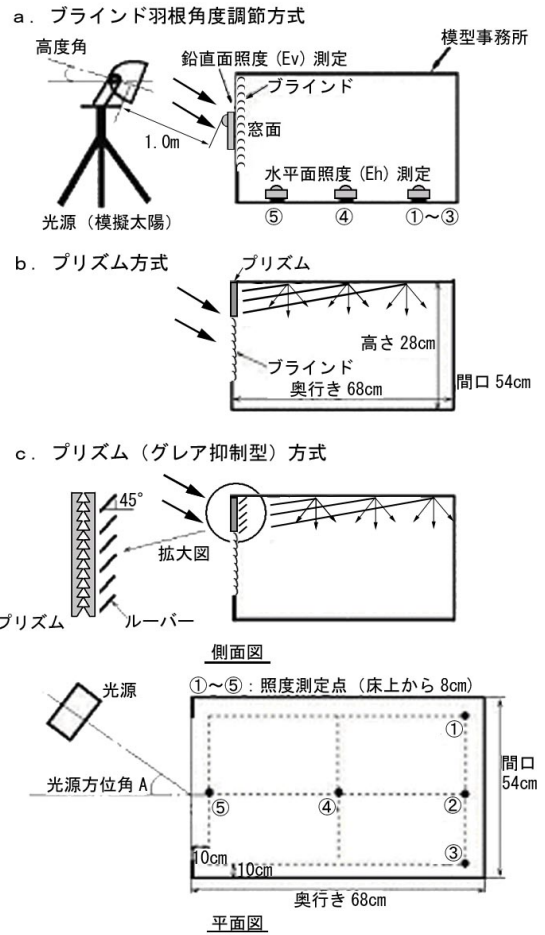


図 2 模型を使った室内作業面照度測定の配置図

2.2.2 窓面輝度測定

窓面輝度測定により、室内居住者が感じる窓面のまぶしさ（不快グレアの大きさ）を評価する。

図 3 に示すように装置を配置し、窓面から 100cm、床面から 11cm（実寸法 1.1m、いすに座った作業者の目の位置を想定）の地点から窓面の最大輝度を測定した。光源の種類および窓装置の条件は、前項と同じものを用いた。輝度計は、視野角 1/3 度として測定した。

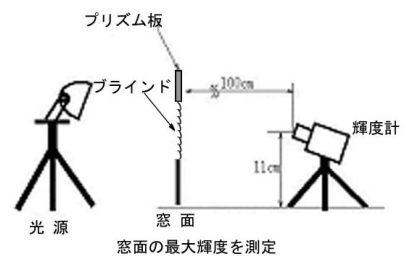


図 3 窓面輝度測定の配置図

2.2.3 照明電力削減量の算出

主な計算条件を表2に示す。

表2 照明電力削減量の計算条件

設計照度：750lx																
使用照明器具：露出 40W2 灯型																
照明器具台数：8台																
事務室の寸法：間口 5.4m 奥行き 6.8m 高さ 2.8m																
内装反射率：天井面 80%，壁・床面 60%																
窓ガラスの透過率：90%																
照明時間：平日 9時間（9時～18時）269日/年 休日 なし																
気象条件：東京																
調光方法： <ul style="list-style-type: none"> ・点滅方式（昼光照度 750lx 以上で、消灯。それ以下で点灯） ・段調光方式 <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td>昼光照度</td> <td>調光率（光束比）</td> </tr> <tr> <td>0 以上 375lx 未満</td> <td>0%（全点灯）</td> </tr> <tr> <td>375 以上 750lx 未満</td> <td>50%</td> </tr> <tr> <td>750lx 以上</td> <td>100%（消灯）</td> </tr> </table> ・連続調光方式（10%刻み） <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td>0 以上 75lx 未満</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>75 以上 150lx 未満</td> <td>10%</td> </tr> <tr> <td>...</td> <td>...</td> </tr> <tr> <td>750lx 以上</td> <td>100%</td> </tr> </table> 	昼光照度	調光率（光束比）	0 以上 375lx 未満	0%（全点灯）	375 以上 750lx 未満	50%	750lx 以上	100%（消灯）	0 以上 75lx 未満	0%	75 以上 150lx 未満	10%	750lx 以上	100%
昼光照度	調光率（光束比）															
0 以上 375lx 未満	0%（全点灯）															
375 以上 750lx 未満	50%															
750lx 以上	100%（消灯）															
0 以上 75lx 未満	0%															
75 以上 150lx 未満	10%															
...	...															
750lx 以上	100%															
窓側 4 台の照明器具については、室中央の昼光照度を使って、調光する																
室奥 4 台の照明器具については、室奥の昼光照度を使って、調光する。																
調光頻度：1 時間毎																

1 日間の人工照明削減量は、次式で表すことができる³⁾。

$$W = \sum_j W_j \times C \times 10^{-3} \text{ [kWh]}$$

$$W_j = N \times W1 \times C1_j \times C2 \text{ [W]}$$

ここで、 j ：昼光利用を行う時刻（ $j = 9 \sim 18$ ）， W_j ：各時刻の照明器具の制御による省電力値， C ：制御が頻繁に行われないようにするための係数 0.9， N ：照明器具台数 8 台， $W1$ ：照明器具 1 台当たりのランプ電力（80[W]）， $C2$ ：照明器具の安定器損失を考慮するための係数（蛍光灯 1.15）である。 $C1_j$ は、その時刻での昼光照度から決まる調光率（電力ベース）である。各時刻の昼光照度は、2.2.1 項で求めた Eh' を用いる。

1 日間の照明電力削減量 W を求め、さらに次式から年間の照明電力削減量 W_{total} を求める。

$$W_{total} = \sum_i W \times Mi \times Si \text{ [kWh]}$$

ここで、 i ：1～12 月， Mi ：各月の計算日数， Si ：各月の平均日照率 0.32～0.60 である⁴⁾。昼光照度 Eh' は、1・2・12 月は冬至の推定値，3～5，9～11 月は春・秋分の推定値，6～8 月は夏至の推定値を用いた。

3. 測定結果および考察

3.1 室内作業面照度測定結果

各季節、各時刻についての照度測定結果と鉛直面照度計算値から、作業面照度の推定値を算出した。室奥（照度測定点）の結果を図4に示す。図中の破線は、室内の必要作業面照度（750lx）を示す。一般の事務所の作業面照度は、750lx 以上が推奨されている⁵⁾。

各方式とも作業面照度の向上が見られた。特に、冬至、春・秋分についてその効果が大きい。プリズム（グレア抑制型）方式は、他の2方式に比べて作業面照度は抑えられているが、調光照明器具を組み合わせることで必要作業面照度を保ちながら照明電力の削減に寄与することができる。

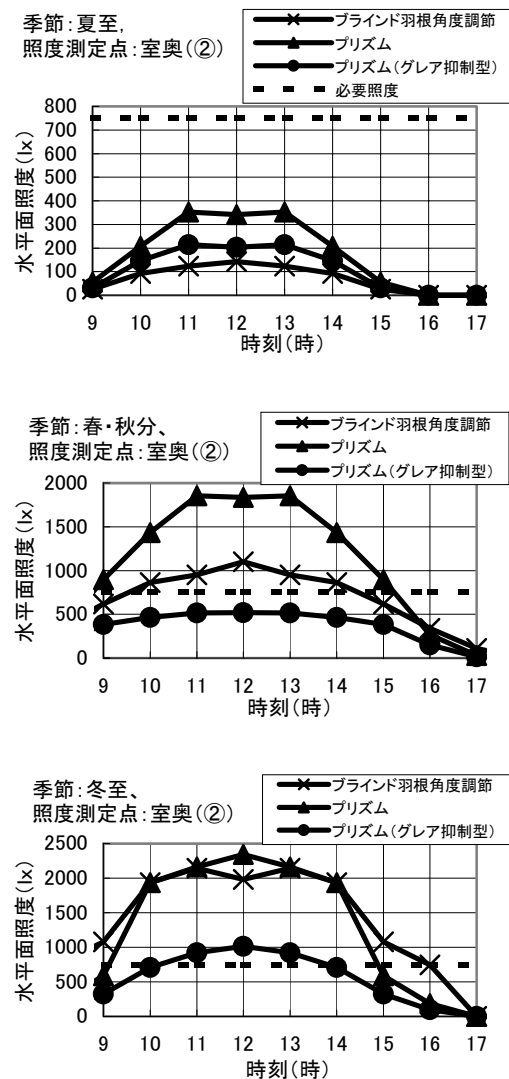


図4 直射日光による室内作業面照度推定値

3.2 窓面輝度測定結果

光源高度角に対する窓面輝度の最大値を図5に示す。

ブラインド羽根角度調節方式については、光源高度50度以下について輝度値が非常に大きい。また、光源高度60度以上についても窓面にもっと近い位置に輝度計を設置した場合の輝度は、かなり高いと考えられる(輝度計の測定距離が1m以上であり、測定不可であった)。

プリズム方式については、どの光源高度についてもかなり高い輝度を示していて、ブラインドほどではないが、見た目にも大変まぶしい。これは、プリズム部を透過する光は、天井方向に屈折する光だけではなく、プリズム内面での多重反射・透過により、複雑な配光を示すためと考えられる。

一方、プリズム(グレア抑制型)方式では、窓面輝度が抑えられ、室内居住者の感じるまぶしさ(不快グレア)を大きく低減させることができる。

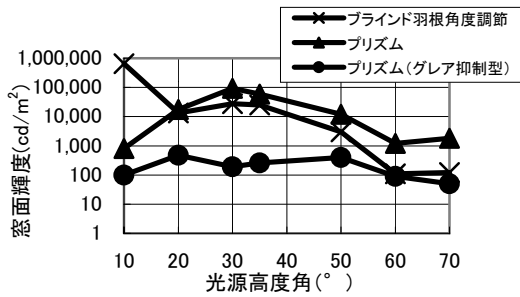


図5 模擬太陽光による窓面輝度

しかし、模擬太陽光と実際の直射日光との輝度比が測定できないため、実際の直射日光によるグレアがどの程度かが見積もれない。そこで、プリズム(グレア抑制型)方式について、屋外において窓面輝度を測定し、測定結果からグレアインデックスを計算して、不快グレアを評価した。グレアインデックスとは、照明器具や窓面の不快グレアが、居住者に対して許容できる範囲内にあるかどうかを判定するための指標の一つである。いくつかのパラメータの取り方があるが、ここではホプキンソンらによるDGIによって評価する⁶⁾。ここで、 L_s ：窓を通して見えるプリズム部分の輝度、 L_b ：作業者の視野の平均輝度(今回は、机上面の平均輝度160cd/m²を仮定)、 L_w ：窓面の平均輝度(今回は、プリズム面の輝度)、 θ ：窓全体を見る立体角、 θ_c ：窓の修正立体角とすると、

$$DGI = 10 \log_{10} G_c$$

$$G_c = 0.478 \times (L_s^{1.6} \cdot \theta^{0.8}) / (L_b + 0.07 \cdot \theta^{0.5} \cdot L_w)$$

とできる。プリズム部の輝度は、屋外において、太陽方向に窓面を向けて実測した結果、5,300[cd/m²]とした(測定日2/15 15:00、太陽高度約20度、鉛直面照度92,000lx、

プリズム(グレア抑制型)面の9点の平均輝度)。室内側から見た輝度は、窓を通して見る輝度になるので、上記の値に窓の透過率(0.9)を乗じる。これらから、 $L_s = L_w = 4,770$ [cd/m²]となる。立体角は、室と窓面の寸法で決まる量である。今回の設定では、 $\theta = 1.3$ 、 $\theta_c = 0.031$ となる。以上から、窓面プリズム部分のグレアインデックスは、16.3となる。一般事務室のグレアインデックスの限界値は23以下と定められており⁶⁾、その条件を十分満足することが確かめられた。

3.3 省エネルギー計算

プリズム(グレア抑制型)方式を窓面に適用し、人工照明の調光を行ったときの照明電力削減量を試算した。年間の照明電力削減量を表3に示す。点滅方式、段調光方式および連続調光方式について、それぞれ6%、11%、17%の照明電力の削減が見込まれる。

表3 プリズム(グレア抑制型)方式による照明電力削減量

調光方式	照明電力削減量 (kWh) (カッコ内削減率)
調光をしない場合の年間照明電力量 (40W2灯型蛍光灯器具8台) (kWh)	1,780
点滅方式 (昼光照度750lx以上で消灯、以下で点灯)	100 (6%)
段調光方式 (750lx以上で消灯、350lx以上で50%点灯、以下で全点灯)	190 (11%)
連続調光方式 (10%刻みで連続調光)	295 (17%)

4. まとめ

プリズムおよびブラインドを窓面に適用した場合の室内作業面照度および窓面輝度の測定を、模型事務所を用いて行った。測定結果から、プリズム(グレア抑制型)方式が、窓面のまぶしさを抑制でき、特に春・秋期および冬期に大きな室内作業面照度を得られることが分かった。年間照明電力削減量を試算した結果、この方式を採用した場合に大きな省エネルギー効果が期待できる。

参考文献

- 1) 伊藤公正編:プラスチックデータハンドブック,工業調査会,33(1984).
- 2) 松浦邦男:建築環境工学 (改訂版),朝倉書店,30,78(1988).
- 3) 日本建築学会:昼光照明の計算法,65-71(1993).
- 4) 松浦邦男:建築環境工学 (改訂版),朝倉書店,43(1988).
- 5) 照明学会:技術基準JIEC-001 オフィス照明基準,31(1992).
- 6) 日本建築学会:昼光照明の計算法,56-60(1993).

(原稿受付 平成14年7月31日)