窓面のグレアが鉛直面のコンピュータ作業の視作業性に及ぼす影響

THE EFFECT OF GLARE FROM WINDOWS
ON VISUAL PERFORMANCE FOR VERTICAL VDT TASKS

加藤 洋子*, 明石 行生**, 菅野 普***

Yoko KATO, Yukio AKASHI and Susumu SUGANO

The purpose of this study was to investigate how a high-luminance side window impairs visual performance of a computer task. Subjects were asked to detect targets presented at the central and peripheral visual field, and the subjects' response times were measured. In order to investigate the mechanisms of how window luminance affects target detections, veiling luminance on each target caused by the window was calculated under each of the experimental conditions. The findings of the study are listed below.

- 1) The high-luminance window behind the computer display significantly impaired the detection performance of targets presented on the computer display. As the luminance of the window increased, the visual performance was decreased. The validity of the experimental dataset was confirmed by comparing the dataset with existing experimental data.
- 2) When window luminance exceeded a certain luminance between 3000 cd/m² and 6000 cd/m², visual performance was deteriorated significantly. This implies that window luminance should be reduced to lower than 3000 cd/m² for computer tasks.
- 3) Evaluations of discomfort glare did not necessarily correspond to visual performance. Therefore, in order to design windows for efficient task environments it is important to minimize the effects of windows on discomfort glare and visual performance.

Keywords : Glare, Visual Performance, Luminance of Window, Veiling Luminance, Peripheral Vision

グレア, 視作業性, 窓面輝度, 光幕輝度, 周辺視野

1. 背景

近年, 居住者の健康維持や地球温暖化の防止のために, 積極的な昼光の利用が推奨されている。しかし, 昼光を取り入れる開口部である側窓は, 高い輝度を持つためグレア源となり得る。窓面のまぶしさについては, これまで主として不快グレアの観点から研究が進められてきた。窓面の不快グレアの評価指標として, Predicted Glare Sensation Vote (PGSV)¹⁾および Daylight Glare Probability (DGP)²⁾が提案され, それらに基づいて光環境の評価方法が構築されつつある^{3), 4), 5)}。一方, 減能グレアについては, これまで屋内照明ではグレア光源が視対象に及ぼす影響が小さいため, 研究がほとんど進められてこなかった。

しかし, 輝度が高く立体角が大きい側窓は, 例えば, コンピュータ・スクリーンを使った視作業 (以降, コンピュータ作業とよぶ) など鉛直面に視対象が存在する場合には, その視対象の視認性に影響を与えるはずである。最近では, コンピュータ作業やテレビ鑑賞といった, 鉛直面の視対象を見る場合が多いので, 側窓が鉛直面にある視対象の視認性に及ぼす影響は無視できない。今後, 昼光を積

極的に利用するうえで, 窓面の不快グレアの観点からだけでなく⁶⁾, 減能グレアの観点からも窓面輝度の規制のガイドラインを構築することは有意義であると考ええる。

今回, ブラインドやスクリーンにより窓面輝度を制御するための基礎資料を蓄積することを目的として, 減能グレアの観点から窓面の輝度がコンピュータ作業の視作業性にどのような影響を与えるかを調べる実験を行った。具体的には, 種々の輝度に設定した窓面を背にしたスクリーンの様々な位置に視標を提示し, 視作業性の指標として, その視標を検出する時間 (以降, 反応時間と呼ぶ) と視標の見落とし率を測定した。つぎに, その実験結果に基づいて減能グレアの観点から窓面の許容限界輝度の提案を試みた。さらに, 今回の実験結果の信頼性を既往研究に基づいて考察した。具体的には, 本実験の各実験条件について, 減能グレアの程度を定量的に評価できる, グレア光源が視野内に生じる等価光幕輝度 (定義は後述する) を算出した。その等価光幕輝度が視標と背景との輝度コントラストを低下させる程度を調べ, 既往研究からその輝度コントラストの低下の程度を考慮した視標に対応するコントラスト感度を求めた。そ

本論文は, 参考文献 19) の内容を再構成し, 加筆修正したものである。

* 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系
博士後期課程・修士 (工学)** 福井大学学術研究院工学系部門建築建設工学分野
教授・博士 (工学)

*** 旭化成株式会社研究開発本部 博士 (工学)

Grad. Stud., Dept. of Architecture and Building Engineering, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, M.Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Graduate School of Engineering, University of Fukui, Ph.D.
Corporate Research & Development, Asahi Kasei Corporation, Ph.D.

のコントラスト感度と実験結果とを比較することにより、本実験のデータの信頼性を確認した。

2. 実験

2. 1. 実験設備

実験は、幅 3.7 m、奥行 6.4 m、高さ 2.6 m の実験室で行った。実験室の天井、壁、床の反射率は、それぞれ、0.8、0.7、0.4 であった。実験室の天井には、下面開放型照明器具（32W の HF 蛍光ランプ 2 灯用）が 4 台設置されている。照明器具には、調光機能がついていないため、ND フィルタをランプに巻き付けることにより照明器具の明るさを調光した。窓面は遮光カーテンで覆い屋外からの屋光が部屋に入らないようにした。

2. 2. 実験装置

図 1 に実験装置を示す。実験装置は、グレア光源、コンピュータ、17 インチ LCD スクリーン（発光部分の大きさ 272 mm × 340 mm）、キーボード、顎台から構成された。グレア光源は、側窓を模擬した 580 mm × 580 mm の面光源とした。内部を白色塗装した木製の箱（680 mm × 680 mm × 215 mm）の中に、16W の昼白色の HF 蛍光ランプ 16 本を取り付けた。木製の箱の開口面に乳白板を被せて、その周囲に 50 mm 幅の額縁を設けた。蛍光ランプの安定器には、調光機能がないため、ND フィルタを用いて発光面の輝度を調整した。LCD スクリーンは、視標を提示するために用いた。グレア光源と LCD スクリーンの位置関係は、図 1 に示すとおりである。キーボードは、被験者が視標の検出を知らせるスイッチとして用いた。コンピュータは、演算制御ソフトウェア（Mathworks 製 MATLAB）を介し、背景輝度の調整、視標の提示、反応時間の測定・記録を行った。視標は、反応時間を測定した既往研究⁷⁾を参考にして、寸法：16 ピクセル×16 ピクセル（4.25 mm×4.25 mm）、輝度：25 cd/m² の正方形の視標とし、視標の背景の輝度は 70 cd/m² とした。そのため、視標の輝度コントラストは、0.64 であった。視標輝度（ L_t ）と背景輝度（ L_b ）に対する輝度コントラスト（ C ）は次式で定義した。

$$C = \frac{L_b - L_t}{L_b} \tag{1}$$

LCD スクリーンの中心から被験者の目の位置までの距離が 50 cm となるよう、顎台を用いて顔の位置を固定した。LCD スクリーンから 14 cm 後方にグレア光源を設置した。つまり、被験者とグレア光源の距離は 64 cm である。

2. 3. 実験条件

実験中は、常に天井の照明器具を ND フィルタで覆って机上面照度が 300 lx になるように調光した。

独立変数として、グレア光源の輝度と視標の偏心角を変化させ、それぞれ 5 水準用いた。グレア光源の輝度は、光源 off (2 cd/m²)、3000 cd/m²、6000 cd/m²、9000 cd/m²、12000 cd/m² の 5 水準とした。視標の提示位置（偏心角）は、視野中心から 0°、5°、10°、15°、23° の 5 水準とした。実際の視標の提示位置は図 2 に示すように、29 箇所〔0°：1 箇所、5°：8 箇所、10°：8 箇所、15°：8 箇所、23°：4 箇所〕であった。いずれの偏心角においても視標提示の繰り返し回数を統一するために（16 回）、0°：1 箇所×16 回、5°：8 箇所×2 回、10°：

図 1 グレア光源と LCD スクリーンの位置関係(mm)

図 2 スクリーン上の視標の提示位置(mm)

表 1 被験者の詳細

No.	性別	年齢	裸眼 or 矯正	実験時の視力
1	女	22	裸眼	A
2	女	21	裸眼	A
3	女	22	矯正（眼鏡）	A
4	男	21	矯正（CL）	A
5	女	21	矯正（CL）	A
6	男	22	裸眼	A
7	男	22	裸眼	A
8	男	21	裸眼	A
9	女	22	矯正（CL）	B
10	男	22	裸眼	B
11	男	20	矯正（眼鏡）	A
12	男	20	矯正（CL）	B
13	男	22	矯正（眼鏡）	B
14	男	22	裸眼	A
15	男	21	裸眼	A
16	女	22	裸眼	A
17	女	21	矯正（CL）	A
18	女	22	裸眼	A
19	女	22	矯正（CL）	B
20	女	21	裸眼	C

8 箇所×2 回、15°：8 箇所×2 回、23°：4 箇所×4 回というように調整した。そのため、実験では、計 80 個の視標についての反応時間を、各輝度条件において測定した。輝度条件が 5 条件であったため、各被験者につき合計 400 個の視標についての反応時間を測定した。

従属変数として、提示された視標に対する反応時間、反応の有無（見落とし率）、視野内のまぶしさ評価とした。実験には、予備知識

のない20～22歳の学生、男10名、女10名の計20名（裸眼11、眼鏡3、コンタクト6）を被験者とした。表1に詳細を示す。

2. 4. 実験手順

実験では、①実験者は、予めいずれかの輝度条件に設定した実験室に、被験者を一人ずつ案内し、被験者を実験装置の前の椅子に着席させた。被験者に実験手順について教示した。②実験者は、スクリーン画面の中央から被験者の目までの距離が50 cmになるように顎台の位置を調整し、被験者に顎台に顎を乗せるように指示した。③被験者は、LCDスクリーンの中央を注視し、キーボードのエンターキーを押す準備をして待機した。実験者は、被験者が準備できるのを待って視標検出実験を開始した。④視標検出実験が開始されると、画面中央に黒の十字が現れた。被験者は、その十字を注視したまま、画面上の種々の位置（29通り）に提示される視標を検出するや否やエンターキーを押した。⑤視標検出実験が終われば、被験者は、スクリーンの背景のグレア光源のまぶしさについてどのように感じたかを表2の尺度に基づいて評価した。⑥①から⑤を別のグレア光源の輝度条件について繰り返した。

コンピュータは、視標が提示されてからエンターキーが押されるまでの時間を反応時間として測定・記録した。また、被験者が視標の出る位置とタイミングを予測することを防ぐため、視標を提示する順序はランダムとし、被験者がエンターキーを押してから次の視標が表示されるまでの間隔は、1～5秒の範囲でランダムとした。なお、視標は提示されてから3秒経つと、自動的に消えるようになっている。その場合、被験者が視標を見落としたとみなした。

3. 実験結果

3. 1. まぶしさ評価

実験結果の解析には、被験者20名全員のまぶしさの評価データを用いた。実験によって得られたまぶしさ評価についてグレア光源の輝度を因子とした一元配置分散分析、各輝度条件間におけるt検定を行い、統計的有意差を検証した。

図3に、視野内のまぶしさに対する評価を示す。グレア光源がない時に比べて、グレア光源がある時の方が、さらに、グレア光源の輝度が高くなるほど、まぶしさの程度は高くなることがわかる。図3は、グレア光源がoffになっているときも被験者がまぶしさを「感じ始める」と評価している被験者もいたことを示しているが、これは、LCDスクリーンの輝度によるまぶしさの評価したためであると推察できる。

グレア光源の輝度に対するまぶしさ評価について一元配置の分散分析を行った結果、グレア光源の輝度の主効果が確認できた（ $p<0.01^{**}$ ）。また、表3は、それぞれの輝度の条件間で行ったt検定の結果を示す。

3. 2. 視標提示から検出するまでの反応時間

実験結果の解析には、被験者20名の反応時間を用いた。実験によって得られた反応時間に対し、グレア光源の輝度と視標の偏心角を因子とした二元配置分散分析を行った。また、各輝度条件間におけるt検定と各偏心角条件間におけるt検定を行った。ただし、t検定を行う際、視標の見落としにより反応時間の得られなかったも

表2 まぶしさ評価尺度

番号	まぶしさ評価尺度
8	ひどすぎる、耐え難い
7	ひどすぎると感じ始める
6	不快である
5	不快であると感じ始める
4	気になる
3	気になり始める
2	感じられる
1	感じ始める
0	感じない

図3 まぶしさ評価

表3 各輝度条件間におけるまぶしさ評価に対するt検定の結果

輝度条件(cd/m²)	p 値(両側)
光源 off と 3000	$p<0.01^{**}$
光源 off と 6000	$p<0.01^{**}$
光源 off と 9000	$p<0.01^{**}$
光源 off と 12000	$p<0.01^{**}$
3000 と 6000	$p<0.05^{*}$
3000 と 9000	$p<0.01^{**}$
3000 と 12000	$p<0.01^{**}$
6000 と 9000	$p<0.05^{*}$
6000 と 12000	$p<0.01^{**}$
9000 と 12000	有意差なし

図4 視標に対する反応時間

のについては反応時間3000 msecとした。

図4は、グレア光源の輝度をパラメータとしたときの偏心角に対する反応時間を示す。グラフから偏心角が大きくなるほど反応時間が遅れること、グレア光源の輝度が高くなるほど反応時間が遅れる

ことが明らかになった。

視標に対する反応時間についてグレア光源の輝度と視標の位置とを因子とし二元配置の分散分析を行った。その結果、グレア光源の輝度、視標の位置のいずれについても主効果 ($p<0.01^{**}$) が認められた。表 4 は、輝度条件間の反応時間を比較したとき、表 5 は、偏心角条件間の反応時間を比較した t 検定の結果を示す。グレア光源の輝度については光源 off と 3000 cd/m^2 との間には統計的有意差は見られなかった。一方、偏心角条件において 0° 、 5° 、 10° の相互の角度の間には統計的有意差は見られなかったが、 10° 、 15° 、 23° の相互の角度の間には統計的有意差が見られた。

3. 3. 視標の見落とし率

解析にあたり、視標が提示されてから被験者が 3 秒以内に検出できなかった確率を視標の見落とし率と定義した。解析には、被験者 20 名全員のデータを用いた。視標の見落とし率に対してグレア光源の輝度と視標の偏心角を因子とした二元配置の分散分析、輝度条件間における t 検定、偏心角条件間における t 検定を行い、統計的有意差を検証した。

図 5 に、視標の見落とし率を示す。横軸は偏心角、縦軸は見落とし率(%)である。視標の偏心角が大きいところで見落とし率が高くなること、グレア光源の輝度が高いほど見落とし率が高くなること

がわかる。視標の見落とし率について、グレア光源の輝度と偏心角を因子として二元配置の分散分析を行った結果、グレア光源の輝度の主効果と偏心角の主効果が確認できた ($p<0.01^{**}$)。表 6 は、輝度条件間について、表 7 は、偏心角条件間における視標の見落とし率を比較した結果を示す。輝度条件においては、反応時間と同様に光源 off と 3000 cd/m^2 との間には統計的有意差は見られなかった。また、偏心角条件間においても 0° 、 5° 、 10° の間には統計的有意差は見られなかった。 10° 、 15° 、 23° の間には統計的有意差が見られた。

4. 考察

4. 1. 不快グレアと減能グレアとの対応関係について

今回の実験から、視標検出の反応時間は、視標の偏心角が大きくなるほど遅くなること、また、グレア光源の輝度が高くなるほど遅くなること

が明らかになった。視標の見落とし率についても同様の傾向が見られ、視標の偏心角が大きくなるほど、グレア光源の輝度が高くなるほど、見落としが多くなる。いずれも、偏心角が大きい視標ほど、グレアの影響を受けやすいことが明らかになった。

詳細を見ると、反応時間、視標の見落としのどちらにおいても、偏心角条件の 0° 、 5° 、 10° の間の統計的有意差はみられなかったため、 $0\sim10^\circ$ の間では偏心角による視作業への影響はないものと考えられる。 10° 、 15° 、 23° の間には統計的有意差がみられ、偏心角が視作業に影響することが明らかである。

注目すべきは、反応時間、視標の見落とし率のいずれにおいても、グレア光源の輝度について光源 off と 3000 cd/m^2 の間の統計的有意差は見られなかったため、 3000 cd/m^2 程度のグレア光源の輝度は、視作業に影響しないと考えられることである。一方、まぶしさ評価では統計的有意差が見られたことから、まぶしさ評価と視作業性とは対応しないことが示唆された。このことは、 9000 cd/m^2 と 12000

表 4 輝度条件間における反応時間に対する t 検定の結果

輝度条件(cd/m^2)	p 値(両側)
光源 off と 3000	有意差なし
光源 off と 6000	$p<0.01^{**}$
光源 off と 9000	$p<0.01^{**}$
光源 off と 12000	$p<0.01^{**}$
3000 と 6000	$p<0.01^{**}$
3000 と 9000	$p<0.01^{**}$
3000 と 12000	$p<0.01^{**}$
6000 と 9000	$p<0.01^{**}$
6000 と 12000	$p<0.01^{**}$
9000 と 12000	$p<0.01^{**}$

表 5 偏心角条件間における反応時間に対する t 検定の結果

偏心角条件($^\circ$)	p 値(両側)
0 と 5	有意差なし
0 と 10	有意差なし
0 と 15	$p<0.01^{**}$
0 と 23	$p<0.01^{**}$
5 と 10	$p<0.1$
5 と 15	$p<0.01^{**}$
5 と 23	$p<0.01^{**}$
10 と 15	$p<0.01^{**}$
10 と 23	$p<0.01^{**}$
15 と 23	$p<0.01^{**}$

図 5 視標の見落とし率

表 6 各輝度条件間における視標の見落としに対する t 検定の結果

輝度条件(cd/m^2)	p 値(両側)
光源 off と 3000	有意差なし
光源 off と 6000	$p<0.01^{**}$
光源 off と 9000	$p<0.01^{**}$
光源 off と 12000	$p<0.01^{**}$
3000 と 6000	$p<0.01^{**}$
3000 と 9000	$p<0.01^{**}$
3000 と 12000	$p<0.01^{**}$
6000 と 9000	$p<0.01^{**}$
6000 と 12000	$p<0.01^{**}$
9000 と 12000	$p<0.01^{**}$

表 7 偏心角条件間における視標の見落としに対する t 検定の結果

偏心角($^\circ$)	p 値(両側)
0 と 5	有意差なし
0 と 10	有意差なし
0 と 15	$p<0.01^{**}$
0 と 23	$p<0.01^{**}$
5 と 10	有意差なし
5 と 15	$p<0.01^{**}$
5 と 23	$p<0.01^{**}$
10 と 15	$p<0.01^{**}$
10 と 23	$p<0.01^{**}$
15 と 23	$p<0.01^{**}$

cd/m² の間において、反応時間、視標の見落とし率には有意差があったが、まぶしさ評価には有意差がないことから確認された。

既往の研究結果で示されていたように、中心視から周辺視に行くほど錐体の密度が低く、視力が低下することから⁸⁾、視標の提示位置の偏心角が大きくなるほど反応時間が遅くなったと考えられる。

また、偏心角が大きな視標においてグレア光源が提示されていなくても、複数回の見落としがあったことから、周辺視野での視標の検出能力の低さが明らかである。さらに、視野内のグレアにより視認性の低下が起り、グレア光源の輝度が高くなるほど、反応時間に遅れが生じたと考えられる。

本研究では、視標検出の反応時間を指標として用いることにより、視野内のグレア光源が視作業に及ぼす影響を客観的に評価した。グレア光源の影響は、その近傍の周辺視野に提示した視標の反応時間だけでなく、中心視野に提示した視標の反応時間にも影響を及ぼしていることがわかった。

また、グレアによる不快感と視作業性とが対応していないことは着目すべきである。視野内に高輝度面が存在する場合、不快だと感じなくても視作業効率は低下する可能性があることを示唆している。日本人は、欧米人よりもグレアを感じにくい可能性があるため⁹⁾、知らず知らずのうちに視作業効率が低下しているのかもしれない。

4. 2. 窓面の PGSV の計算

本実験ではグレア光源が周辺視野に存在するが、これまで提案されている不快グレアの計算式は、中心および周辺視野にグレア光源が存在する状況下で求められたものである。被験者が評価した不快グレアと提案されている計算式の程度の違いを比較するため、本研究では岩田らによって提案されている窓面の不快グレアの指標である Predicted Glare Sensation Vote (PGSV) を計算した。

実験装置の窓面の立体角を求めるにあたり、窓面の中央部分が LCD スクリーンに隠れているため、窓面の立体角 (0.69 sr) から LCD スクリーンの立体角 (0.37 sr) を引き算した。その結果、被験者から見える窓面の立体角 ω は、0.32 sr と算出した。また、実験装置の机上面およびグレア光源背後の壁面の輝度は 42 cd/m²、LCD スクリーンの輝度とグレア光源の枠部の輝度は 70 cd/m²であった。作業中の被験者の目は LCD スクリーンの輝度に順応していると考えられ、グレア光源の枠部も同輝度であるため、算出に用いる背景輝度 L_b は 70 cd/m² とした。これらの条件と実験に用いた窓面輝度を PGSV の計算式¹⁾に代入して各実験条件下の PGSV を算出した。

表 8 に PGSV の計算結果を示す。PGSV=0 は、「ちょうど感じる」、PGSV=1 は、「ちょうど許容できる」、PGSV=2 は、「ちょうど不快である」、PGSV=3 は、「ちょうど耐えられない」にそれぞれ相当する。なお、窓面のグレア光源を点灯していない (off) 条件については、負の値の PGSV が算出されたが、この条件は PGSV の適用範囲の外にあるため、表 8 には掲載していない。

今回の実験では、表 2 のまぶしさの評価尺度を用いたため、PGSV のそれとは異なる。表 2 のまぶしさ評価尺度に基づいて、図 3 の不快グレアの評価結果を表 8 の PGSV の計算結果と比較すると、表 8 の PGSV の計算結果に対応する評価よりも、やや不快グレアを感じない方向に評価されたことがわかる。このことは、今回の実験では、

不快グレアの感度が高い中心視野が低輝度の LCD スクリーンにより覆われていたことが原因であると考えられる。

表 8 各実験条件の PGSV の計算結果

窓面輝度 : L_s (cd/m ²)	off	3000	6000	9000	12000
PGSV	-	1.40	2.36	2.92	3.32

4. 3. グレア光源による光幕が視作業に及ぼす影響

ここでは、本実験のデータの信頼性を既往研究と比較することにより考察する。

グレア光源による視対象の視認性の低下 (減能グレア) の原因は、光源から眼に入射する光が眼球内で散乱することによって生じる光幕が網膜像に重なって、視対象と背景との輝度コントラストを下げることと考えられている^{10),11)}。この眼球内の光幕の量は、それと視覚的に等価な視野内に重畳された光幕の輝度として定量的に評価される。これは等価光幕輝度と呼ばれている。等価光幕輝度は、グレア光源の位置と観察者の目の位置での照度を変数とする関数で表される。一般に、各グレア光源と視線のなす偏心角を θ_i° として、光源による目の位置での照度を E_i lx とする時、中心視に生じる等価光幕輝度 : L_v cd/m² は次式で表される^{10),11),12)}。

$$L_v = k \sum_{i=1}^n E_i \cdot \theta_i^{-a} \quad (2)$$

ここで、 k, a は係数であり、それらの値は研究者によって異なるが、CIE では、 $(k, a)=(10, 2)$ とすることで合意が得られている¹⁰⁾。また、等価光幕輝度の加法性が成立するとされ^{13),14)}、視野内に複数のグレア光源が存在する場合は、中心視においてそれぞれのグレア光源が生じる等価光幕輝度を加算する。

しかし、これらの等価光幕輝度の研究成果は、周辺視の評価には適応できない。周辺視野に生じる等価光幕輝度について、Stiles と Crawford は、周辺視野に提示したグレア光源が周辺視野に生じる光幕輝度を調べた¹⁵⁾。その結果、周辺視野の光幕輝度についても (2) 式の関数が適応できること、ただし、係数は $(k, a)=(16, 2)$ であることを明らかにした。

今回、(2)式を用いて等価光幕輝度の分布を算出し、等価光幕輝度が視標の輝度コントラストに及ぼす影響を調べた。その際、デジタルカメラの撮影によって得られる輝度画像ではなく、輝度値を各ピクセルへ入力することによって作成した実験条件の輝度画像を用いて光幕輝度を計算した。撮影による輝度分布測定では、高輝度の光源が存在した際にカメラのレンズ特性によってフレアが発生し、既に光幕が生じた状態となり、その画像を用いて光幕輝度を計算すると、光幕輝度が二重に掛かってしまうためである。

輝度画像は、被験者が実験時に画面中央を固視している状態を想定し、実験装置の寸法や視点位置からの距離を基に視野角を算出し、対応するピクセル数を求めて作成した。各部の輝度をつぎのように設定した : LCD スクリーン 70 cd/m²、視標 25 cd/m²、グレア光源の枠部 70 cd/m²、机や壁などの実験装置周辺部 42 cd/m²。グレア光源の輝度条件ごとに輝度画像を作成した。輝度画像のサイズは 251 × 251 ピクセル、水平および鉛直面角を 100° とし、グレア光源の輝度の条件ごとに輝度画像を作成した。光幕輝度の加法性については、すでに明らかにされているため^{13),14)}、中心視野 2° の範囲にお

いて、輝度画像を構成する各ピクセルの輝度情報からそれが影響する被験者の目の位置の照度 E_i を算出し、それを視野中心からの偏心角 θ_i° の 2 乗で除したものを加算することにより算出した。視野中心から 50° に相当する範囲の影響を考慮した。周辺視野の範囲においても、周辺視野の各ピクセルを中心として、その周辺 50° の範囲のピクセルの輝度情報からそれが影響する被験者の目の位置の照度 E_i を算出し、それを中心からの偏心角 θ_i° の 2 乗で除した値を加算することにより算出した。(1)式において、中心視野 2° の範囲には、 $(k, a)=(10, 2)$ を用い¹⁰⁾、周辺視野には、 $(k, a)=(16, 2)$ を用いて計算した¹⁵⁾。

表 9 は、計算により求めた、視標に掛かる等価光幕輝度とその影響を加味した視標の輝度コントラストを示す。表 9 に示す、等価光幕輝度による輝度コントラストの低下が鉛直面の視作業の視作業性に及ぼす影響について考察するために、本実験の輝度コントラストと、Thibos ら¹⁷⁾がグレア光源のない実験条件下で求めた周辺視野の視標のコントラスト感度とを比較した。この既往研究は、均一な輝度のコンピュータ（またはオシロスコープ）画面を背景として、そこに空間周波数が異なる（ $0.5 \sim 10$ cpd）縞模様の視標を提示し、その視標のモジュレーションコントラスト（ C_m ）の閾値を調べている。なお C_m は、縞模様の最大輝度（ L_{max} ）と最小輝度（ L_{min} ）について、次の式で定義される。

$$C_m = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \quad (3)$$

Thibos らは、輝度が 80 cd/m^2 の背景に偏心角 30 度の位置に視標を提示した。この背景輝度は、コンピュータ画面の輝度であると同時に縞模様の視標の平均輝度であり、今回の実験に用いた LCD スクリーンの輝度 70 cd/m^2 と概ね近い値といえる。

今回の実験に用いた視標は、視角 0.5 度程度の正方形であったため、既往研究における空間周波数が 1 cpd の視標に相当すると見なし、既往研究の実験データからその空間周波数に対応する輝度コントラストの閾値を読み取った。また、別の既往研究¹⁸⁾は、空間周波数が低い（例えば、 1 cpd ）視標に対しては、 30 cd/m^2 と 300 cd/m^2 の順応輝度の間で C_m の閾値に差異は無いことを明らかにしているため、グレア光源により順応輝度が高くなっている本実験に適応して考察することにした。その結果、Thibos らの実験データから、偏心角 30 度の視標について C_m の閾値は 0.066 であることを読み取った。この C_m の値は (3) 式に示すように最大輝度と最小輝度を変数として定義される。 C_m の値を本実験の考察に適用するために、最大輝度と最小輝度を (1) 式の背景輝度と視標輝度に相当すると見なし、輝度コントラスト (C) に置き換えることにした。その結果、偏心角 30 度の視標の輝度コントラストの閾値は、 0.12 であることが明らかになった。さらに、この閾値を表 9 に示す本実験において偏心角に近い、 23 度の視標の輝度コントラストと比較した。その結果、グレア光源の輝度が上昇するにつれて視標の輝度コントラストが閾値である 0.12 に近づいており、グレア光源の輝度が 12000 cd/m^2 の条件下では視標の輝度コントラストが閾値に達していることが明らかになった。このことは、図 5 の見落とし率の結果が示すように、偏心角 23 度の視標に対してグレア光源の輝度が上昇するに連れて視標の見落とし率が高くなり、グレア光源の輝度が 12000 cd/m^2 の条件下で見落とし率が閾値（ 50% ）に達したことの信頼性

を裏付けた。

表 9 光幕輝度と輝度コントラストの計算結果
(VL: veiling luminance, C: contrast)

	off		3000 cd/m ²		6000 cd/m ²		9000 cd/m ²		12000 cd/m ²	
	VL	C	VL	C	VL	C	VL	C	VL	C
0 deg.	4.49	0.60	13.73	0.54	22.96	0.48	32.20	0.44	41.44	0.40
5 deg.	7.16	0.58	22.83	0.48	38.51	0.41	54.18	0.36	69.86	0.32
10 deg.	7.00	0.58	27.48	0.46	47.97	0.38	68.47	0.32	88.97	0.28
15 deg.	6.40	0.59	39.97	0.41	73.59	0.31	107.20	0.25	140.82	0.21
23 deg.	4.34	0.61	82.85	0.29	161.43	0.19	240.01	0.15	318.59	0.12

5. 結論

本研究の結果、今回の実験条件の範囲において、つぎのことが明らかになった。

- コンピュータ作業において、鉛直なスクリーン面の視作業対象の背景に高輝度の側窓が存在すると視作業性が低下する。窓面の輝度が高くなるほど、視作業性の低下が著しくなり、窓面に近いスクリーンの周辺部ほど視作業性は低下する。本実験のデータの信頼性は、コントラスト感度を求めた既往研究のデータから裏付けられた。
- 窓面がある一定の輝度、 3000 cd/m^2 から 6000 cd/m^2 の間の輝度に到達すると、視作業性が著しく低下する。このことから、コンピュータ・スクリーンなど、鉛直面の視作業がある場合、ブラインドなどにより、窓面輝度を 3000 cd/m^2 以下になるように制御するとよいと考えられる。
- 窓面がまぶしいことによる不快感と視作業効率の低下は必ずしも対応しない。快適な作業空間を構築するために窓設計をする場合、居住者の不快グレアの評価と視作業性を併せて考慮する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) T. Iwata, M. Tokura : Examination of the limitations of predicted glare sensation vote (PGSV) as a glare index for a large source: towards a comprehensive development of discomfort glare evaluation, *Lighting Research & Technology*, 30(2), pp.81-88, 1998.6
- 2) J. Wienold, J. Christoffersen: Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras, *Energy Build*, 38, pp.743-57, 2006.7
- 3) 伊藤大輔, 岩田利枝, 望月悦子: 窓スクリーンとブラインドの視環境性能の比較, *日本建築学会環境系論文集*, 73, 627, pp.573-579, 2008.5
- 4) 岩田利枝, 佐々木良和, 伊藤大輔, 望月悦子: 視野内平均輝度による総量グレア範囲の抽出・不快グレアの対比効果と総量効果, その 2, *日本建築学会環境系論文集*, 74, 635, pp.25-31, 2009.1
- 5) 望月悦子, 伊藤大輔, 岩田利枝: 窓面内輝度が不快グレアに与える影響-窓スクリーンを用いた室内視環境の評価法に関する検討, その 4, *日本建築学会環境系論文集*, 74, 637, pp.277-282, 2009.5
- 6) 中村一樹, 窪谷直彦, 小林茂雄, 中村芳樹, 乾正雄: オフィスにおける窓面輝度抑制と眺望確保の関係 その 1. CRT 注視作業時におけるグレア評価と窓面輝度抑制, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, D, 環境工学, pp.1065-1066, 1994.7
- 7) M.S. Rea, M.J. Quелlette : Visual performance using reaction times, *Lighting Research & Technology*, 20(4), pp.139-153, 1988.12
- 8) H. Kolb, How the Retina Works, *American Scientist*, 91, pp.28-35, 2003.3
- 9) Y. Akashi, R. Muramatsu, S. Kanaya : Unified Glare Rating (UGR) and subjective appraisals of discomfort glare, *Lighting Research & Technology*, 28(4), pp.199-206, 1996.12
- 10) Commission Internationale de l'Eclairage, CIE146 : CIE TC 1-50 report : CIE equations for disability glare, 2002
- 11) J.J. Vos : Disability glare - a state of the art report, *CIE Journal*, 3, pp.39-53, 1984
- 12) L.L. Holladay : The fundamentals of glare and visibility, *Journal of Optical Society of America*, 12, pp.271-319, 1926.4
- 13) W. Adrian, K. Eberback : On the relationship between the visual threshold and the size of the surrounding field, *Lighting Research & Technology*, 1(4), pp.251-254, 1969.12
- 14) W. Adrian : Method of calculating required luminances in tunnel entrances, *Lighting Research & Technology*, 8(2), pp.103-106, 1976.6
- 15) W.S. Stiles, B.H. Crawford : The effect of a glaring light source extra-foveal vision, *Proceedings of Royal Society of London B*, pp.255-280, 1937.4
- 16) J.M. Daitch, D.G. Green : Contrast sensitivity of the human peripheral retina, *Vision Research*, 9, pp.947-952, 1969.8
- 17) L.N. Thibos, D.L. Still, A. Bradley : Characterization of spatial aliasing and contrast sensitivity in peripheral vision, *Vision Research*, 36(2), pp.249-258, 1996.1
- 18) F. L. Van Nes, J. J. Koenderink, H. Nas, and M. A. Bouman : Spatiotemporal modulation transfer in the human eye, *J Opt Soc Am* 57(1), pp.1082-1088, 1967. 9
- 19) 加藤洋子, 明石行生, 菅野普: グレアの客観的評価-視作業効率に及ぼす影響, 平成 22 年度 (第 43 回) 照明学会全国大会講演論文集, 148, 2010.8

THE EFFECT OF GLARE FROM WINDOWS ON VISUAL PERFORMANCE FOR VERTICAL VDT TASKS

Yoko KATO *, *Yukio AKASHI* ** and *Susumu SUGANO* ***

* Grad. Stud., Dept. of Architecture and Building Engineering, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, M.Eng.

** Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Graduate School of Engineering, University of Fukui, Ph.D.

*** Corporate Research & Development, Asahi Kasei Corporation, Ph.D.

In order to reduce global warming while maintaining occupants' health it is important to make the best use of daylight in interior spaces. To maintain comfortable interior environments while utilizing daylight it is necessary to control window luminance appropriately. To this end, many researchers have referred to discomfort glare from high-luminance windows. However, since recent office workers often perform visual tasks by using computer displays their visual performances are susceptible to high-luminance windows. Ocular light scatter covers the entire visual field of a worker, and therefore often reduces the luminance contrast of a target against its background.

The purpose of this study was to investigate how a high-luminance side window impairs visual performance of a computer task. Subjects were asked to detect targets presented at the central and peripheral visual field, and the subjects' response times were measured. In order to investigate the mechanisms of how window luminance affects target detections, veiling luminance on each target caused by the window was calculated under each of the experimental conditions. The findings of the study are listed below.

- 1) The high-luminance window behind the computer display significantly impaired the detection performance of targets presented on the computer display. As the luminance of the window increased, the visual performance was decreased. The validity of the experimental dataset was confirmed by comparing the dataset with existing experimental data.
- 2) When window luminance exceeded a certain luminance between 3000 cd/m² and 6000 cd/m², visual performance was deteriorated significantly. This implies that window luminance should be reduced to lower than 3000 cd/m² for computer tasks.
- 3) Evaluations of discomfort glare did not necessarily correspond to visual performance. Therefore, in order to design windows for efficient task environments it is important to minimize the effects of windows on discomfort glare and visual performance.

(2015 年 12 月 10 日原稿受理, 2016 年 5 月 23 日採用決定)