

東海大学大学院平成 29 年度博士論文

オフィス空間における視的快適性に基づく
昼光制御に関する研究

指導 岩田利枝 教授

東海大学大学院総合理工学研究科
総合理工学専攻

谷口 智子

オフィス空間における視的快適性に基づく昼光制御に関する研究
Study on Automated Control Method of Daylighting System Based on Visual Comfort
in Office Spaces

目次

| | | |
|---------|----------------------------|------|
| 第1章 | 序論 | |
| 1.1 | 研究の背景と目的 | 1-1 |
| 1.2 | オフィス空間の昼光照明に関する既往の研究 | 1-2 |
| 1.2.1 | 視的快適性に関する既往研究 | 1-2 |
| 1.2.2 | 知的生産性に関する既往研究 | 1-2 |
| 1.2.3 | 照明用電力削減効果に関する既往研究 | 1-3 |
| 1.3 | 窓装置の種類と制御方法 | 1-3 |
| 1.4 | 本論文の構成 | 1-6 |
| 1.5 | 本研究の意義 | 1-8 |
| | 【第1章の参考文献】 | 1-9 |
| 第2章 | 不快グレア予測に基づく自動ブラインドの制御方法の提案 | |
| 2.1 | はじめに | 2-1 |
| 2.2 | 基本のブラインド制御方法 | 2-1 |
| 2.3 | ブラインド制御方法に関する既往研究 | 2-2 |
| 2.4 | 不快グレア抑制制御アルゴリズムの概念 | 2-3 |
| 2.5 | 昼光のためのグレア評価方法 | 2-4 |
| 2.5.1 | グレア評価方法 | 2-4 |
| 2.5.2 | 大光源からのグレア予測指標 | 2-7 |
| 2.6 | 方法 | 2-9 |
| 2.6.1 | PGSVの計算 | 2-9 |
| 2.6.1.1 | 窓面平均輝度の計算方法 | 2-9 |
| 2.6.1.2 | ブラインドスラット輝度 | 2-9 |
| 2.6.1.3 | スラット間から見える屋外景観輝度 | 2-10 |
| 2.6.1.4 | スラットとスラット間から見える屋外景観部分の立体角 | 2-11 |
| 2.6.2 | 制御アルゴリズム | 2-11 |
| 2.6.3 | シミュレーションモデル | 2-13 |
| 2.6.4 | 照明用消費電力 | 2-14 |
| 2.6.5 | 眺望性 | 2-16 |
| 2.7 | 結果 | 2-17 |

| | | |
|---------|----------------------|------|
| 2.7.1 | 晴天日における検討 | 2-17 |
| 2.7.1.1 | 直射日光遮蔽角とグレア抑制角 | 2-17 |
| 2.7.1.2 | スラット反射率とスラット幅・間隔比の影響 | 2-18 |
| 2.7.2 | 曇天日における検討 | 2-19 |
| 2.7.3 | 照明用電力削減率の検証 | 2-20 |
| 2.7.4 | 屋外眺望満足度の検証 | 2-24 |
| 2.8 | 結論 | 2-26 |
| | 【第2章の参考文献】 | 2-27 |

第3章 ブラインドのゾーン制御方法の提案

| | | |
|---------|-----------------------|------|
| 3.1 | はじめに | 3-1 |
| 3.2 | 大空間オフィスの昼光利用の概要 | 3-1 |
| 3.3 | 数値計算による窓と座席位置に関する基礎検討 | 3-3 |
| 3.3.1 | 窓幅と視線方向の検討 | 3-3 |
| 3.3.1.1 | 窓幅の影響 | 3-3 |
| 3.3.1.2 | 視線方向の影響 | 3-5 |
| 3.3.2 | 窓面からの距離が屋外景観に与える影響 | 3-6 |
| 3.3.3 | ブラインド制御ゾーンによるグレア感への影響 | 3-7 |
| 3.4 | ブラインドゾーン制御検証実験 | 3-8 |
| 3.4.1 | 実験方法 | 3-8 |
| 3.4.1.1 | 実験条件 | 3-8 |
| 3.4.1.2 | 測定項目 | 3-9 |
| 3.4.1.3 | 実験手順 | 3-9 |
| 3.4.2 | 実験結果 | 3-10 |
| 3.4.1.1 | 視野内輝度分布 | 3-10 |
| 3.4.1.2 | グレア感評価 | 3-12 |
| 3.4.1.3 | 評価位置の影響 | 3-12 |
| 3.4.1.4 | 制御方法とグレア感申告値の関係 | 3-13 |
| 3.5 | ブラインドゾーン制御方法の提案 | 3-14 |
| 3.6 | 結論 | 3-15 |
| | 【第3章の参考文献】 | 3-16 |

第4章 ブラインド制御時の窓面輝度変化の予測

| | | |
|-------|--------|-----|
| 4.1 | はじめに | 4-1 |
| 4.2 | 計算方法 | 4-1 |
| 4.2.1 | 基本計算条件 | 4-1 |

| | | |
|-------|---------------------------|------|
| 4.2.2 | スラット角制御条件 | 4-3 |
| 4.3 | 計算結果 | 4-4 |
| 4.3.1 | 窓面平均輝度とスラット角の変化の確認 | 4-4 |
| 4.3.2 | 切替時窓面平均輝度変化量と切替時窓面平均輝度変化率 | 4-9 |
| 4.4 | 結論 | 4-11 |
| | 【第4章の参考文献】 | 4-12 |

第5章 窓面の明るさ変化による不快感を軽減するスラット開閉速度決定法の提案

| | | |
|-------|--|------|
| 5.1 | はじめに | 5-1 |
| 5.2 | 光環境実験室の仕様 | 5-1 |
| 5.2.1 | 人工窓光源装置 | 5-1 |
| 5.2.2 | 光環境実験室 | 5-12 |
| 5.3 | 実験方法 | 5-14 |
| 5.3.1 | 実験条件 | 5-14 |
| 5.3.2 | 評価対象 | 5-14 |
| 5.3.3 | 実験手順 | 5-15 |
| 5.4 | 実験結果 | 5-18 |
| 5.4.1 | スラット開閉速度と窓面明るさ変化感 | 5-18 |
| 5.4.2 | 窓面明るさ変化感と不満者率の関係 | 5-20 |
| 5.4.3 | 切替時窓面平均輝度変化量 ΔL_w 、スラット開閉速度、 切替時窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w/L_{wb}$ と窓面明るさ変化感 | 5-20 |
| 5.5 | 窓面明るさ変化感に基づくスラット開閉速度決定方法の提案 | 5-21 |
| 5.6 | 結論 | 5-23 |
| | 【第5章の参考文献】 | 5-24 |

第6章 特殊ブラインドの計算への適用

| | | |
|---------|--------------------|-----|
| 6.1 | はじめに | 6-1 |
| 6.2 | 角度変化型ブラインドの概要 | 6-1 |
| 6.3 | 形状によるスラット角への影響 | 6-2 |
| 6.3.1 | 計算方法 | 6-2 |
| 6.3.2 | 計算結果 | 6-2 |
| 6.4 | ブラインドのスラット角制御性能の確認 | 6-3 |
| 6.4.1 | 測定方法 | 6-3 |
| 6.4.1.1 | ブラインド条件 | 6-3 |
| 6.4.1.2 | 測定手順 | 6-4 |
| 6.4.2 | 測定結果 | 6-4 |

| | | |
|------------------------------------|--------------------------|------|
| 6.5 | 照明用電力削減量の計算方法 | 6-5 |
| 6.5.1 | ブラインド輝度 | 6-5 |
| 6.5.2 | 天井面からみたスラット立体角投射率 | 6-6 |
| 6.5.3 | 天井面に入射する窓面からの直接照度 | 6-7 |
| 6.6 | スラットおよび天井面の輝度測定 | 6-7 |
| 6.6.1 | 実測方法 | 6-7 |
| 6.6.1.1 | 実験場所 | 6-7 |
| 6.6.1.2 | 実験条件 | 6-8 |
| 6.6.1.3 | 測定手順 | 6-8 |
| 6.6.2 | 実測結果 | 6-9 |
| 6.6.2.1 | 窓面輝度および天井面輝度 | 6-9 |
| 6.6.2.2 | 計算値と実測値の比較 | 6-10 |
| 6.7 | 照明用電力削減効果の年間シミュレーション | 6-11 |
| 6.7.1 | 計算方法 | 6-11 |
| 6.7.1.1 | アンビエント照明調光率の計算 | 6-11 |
| 6.7.1.2 | ブラインド計算条件 | 6-12 |
| 6.7.2 | 計算結果 | 6-13 |
| 6.7.2.1 | 天井面照度分布 | 6-13 |
| 6.7.2.2 | 1日のアンビエント照明電力使用率 | 6-14 |
| 6.7.2.3 | 年間のアンビエント照明電力使用率 | 6-15 |
| 6.8 | 結論 | 6-17 |
| | 【第6章の参考文献】 | 6-18 |
| 第7章 複数の開口部を有するオフィスのアンビエント照明制御方法の提案 | | |
| 7.1 | はじめに | 7-1 |
| 7.2 | 対象建物 | 7-1 |
| 7.3 | 昼光による机上面照度 | 7-1 |
| 7.3.1 | 全体計算フロー | 7-1 |
| 7.3.2 | 天空光による机上面照度予測 | 7-2 |
| 7.3.2.1 | 方法 | 7-2 |
| 7.3.2.2 | 結果 | 7-3 |
| 7.3.3 | 自動ブラインドに反射した昼光による机上面照度予測 | 7-5 |
| 7.3.3.1 | 方法 | 7-5 |
| 7.3.3.2 | 結果 | 7-5 |
| 7.4 | アンビエント照明の調光率 | 7-8 |
| 7.4.1 | 各アンビエント照明の調光率決定方法 | 7-8 |

| | |
|------------------------|------|
| 7.4.2 各アンビエント照明による照度分布 | 7-8 |
| 7.5 アンビエント照明調光率の試算 | 7-9 |
| 7.6 結論 | 7-10 |
| 【第7章の参考文献】 | 7-11 |
| 第8章 総括 | 8-1 |

APPENDIX

| | |
|-----------------------------------|--|
| 01_研究業績 | |
| 02_変動照明_窓面輝度変化計算プログラム | |
| 03_変動照明_評価用紙 | |
| 04_ブラインドスラット角計算プログラム | |
| 05_ブラインド輝度計算プログラム | |
| 06_天井から見た立体角投射率、窓立体角、天井面照度計算プログラム | |

謝辞

第 1 章 序論

1.1 本研究論文の背景と目的

我が国の建築に関わるエネルギー消費量うち、約60%はオフィスビルや住宅の運用エネルギーであり、そのうちの約20%はオフィスビルの照明によるエネルギー消費量¹⁾²⁾と大きな割合を占めている。オフィスビルにおける照明用電力の削減には、太陽からのエネルギーの利用が必要不可欠である。

太陽からのエネルギーは、直接地表面に到達した直達日射、空気中の水蒸気や塵などによって拡散・吸収した天空日射、直達日射と天空日射が地表面に反射した地物反射日射から成る。そのうち、可視域では直達日射を直射日光、天空日射を天空光、地物反射日射を地物反射光と呼び³⁾、これらを総合したものを昼光、昼光を建物に取り込み照明として利用することを昼光照明という。昼光照明はオフィスを中心に推奨されている⁴⁾。また、2015年には日本建築学会環境工学委員会主催で「自然光を積極的に利用したサステナブル建築」が題材とする技術部門設計競技⁵⁾も開催されている。さらに、昼光を照明として利用することは、1日の多くの時間を屋内で過ごす現代人に対して生理・心理的に必要不可欠であるということが報告されている^{例えば 6)7) 8)}。このように、持続可能な建築を創造するだけでなく、人の生理・心理に大きな効果を示す“昼光照明”は、現代の建築に最も求められている手法であると言える。

しかし、昼光は量的な過不足や変動、極端な対比などを伴うため、これらを制御することが求められる。効果的な昼光照明を行うためには、昼光の制御装置の選択や制御方法が重要となる。昼光装置は、水平型・垂直型ルーバー、庇、ライトシェルフといった固定式装置と、内付け水平型ブラインド、ロールスクリーンといった可動式装置があり、大きく、外付けと内付け、また可動式と固定式に分けられ、建物の形状や用途によって選択される。オフィスの昼光制御に求められる性能には、直射日光の遮蔽、窓からのグレアの抑制、昼光の照明としての利用、眺望の確保、不快な変動の抑制といった要素があり、これらはトレードオフの関係にある。また、各要素が季節や時刻、オフィス内の座席位置によって変化する。これらから、オフィスビルでは可動式昼光装置の1つである水平型ベネシャンブラインド（以降、ブラインドと呼ぶ）が最も多く利用されており、近年はこれを自動制御する方法が提案されている。

しかし、実際のオフィスビルにおいて自動ブラインドを制御する場合に、様々な問題が発生し、効果的な運用が難しい。オフィスでは直達日射の遮蔽だけでなく窓からのグレアの抑制も優先される。現在の自動ブラインドでは、緯度・経度・日時などからブラインドのスラット角度を制御しているため、昼光が量的に過剰な場合に不快なまぶしさが発生する。さらに、自動ブラインドのゾーニング方法や制御インターバルの決定方法に関する問題も残されている。執務者の視的快適性および知的生産性の低下を防ぐためには、昼光装置の制御方法に関するこれらの問題を解決することは急務である。

そのため本論文では、昼光装置の制御方法に関する問題を解決するための、昼光装置の新たな制御手法を提案し、実際のオフィス空間において本論文で提案した制御手法を実現させることを目的とする。

1.2 オフィス空間の昼光照明に関する既往研究

1.2.1 視的快適性に関する既往研究

昼光照明を行うオフィス空間における視的快適性に関する既往研究は、高松ら⁹⁾¹⁰⁾、佐伯ら¹¹⁾の研究がある。

高松ら⁹⁾¹⁰⁾は、窓に対する座席の位置が明るさ変動および光環境の快適性に与える影響を明らかにすることを目的に、昼光利用を行うオフィスにおいて昼光変動に伴う室内の明るさ感を評価するアンケート調査を行っている。その結果、窓側の座席では、昼光の変動の影響を受けているにも関わらず、明るさ変動感および机上面の明るさ変動感の不快者率ともに、室中央の座席より低く、また室内の明るさ変動感および光環境の満足度は室中央の座席よりも窓側の座席の方が高いことを示している。

佐伯ら¹²⁾は、一般的な建築のオフィスとガラス建築などの昼光を積極的に導入するオフィスの現状を把握し、総合的な省エネルギー効果と執務者の快適性向上のための手法を提案することを目的に、オフィス内の光・温熱環境に関する実測調査とシミュレーションを行っている。その結果、視的快適性を得るためには、照度分布をなだらかになるように昼光を室奥まで導入する工夫が重要であることを示唆している。また、ペリメーター部分では直達日光の影響や大きく、その変動によって不快が生じることがあるが、天候によるものだけでなく、適切に直射日光の遮蔽によって、グレアを可否できる可能性があることを示している。

また、オフィス以外の昼光利用空間における視的快適性に関する研究として、宿谷ら¹²⁾は教室空間で室内の明るさと快適性に関するアンケートを行い、昼光照明が明るさの快適性を損なうことなく、蛍光灯の点灯本数を減らすことができることを示している。

1.2.2 知的生産性に関する既往研究

昼光照明を行うオフィス空間における知的生産性に関する既往研究は、佐藤ら¹³⁾、山本ら¹⁴⁾、小川ら¹⁵⁾の研究がある。

佐藤ら¹³⁾は、オフィスにおける昼光照明が知的生産性に与える影響を明らかにすることを目的に、被験者実験を行っている。その結果、昼光照明がアイデアを創出させる作業において、作業効率が優位に向上したことや、唾液中のアミラーゼを抑制することから執務者のストレス軽減にも効果的である可能性を示している。

山本¹⁴⁾は、オフィスにおける知的生産性を室内環境、執務者行動特性の両面から評価すること、行動誘発の環境要因を抽出することを目的に、執務者アンケート調査を行っている。その結果、グレアを防止しながら眺望性を維持できる環境を実現させることが快適性の向上につながることを示唆している。

小川ら¹⁵⁾は、オフィスのリフレッシュスペースに着目し、その空間の光・視環境が執務者の作業効率に与える影響を検討している。昼光導入時のリフレッシュ空間は、昼光がない場合に比べて交感神経活性化が高く、作業効率も向上したことを示している。

1.2.3 照明用電力削減効果に関する既往研究

昼光照明を行うオフィス空間における照明用電力削減効果に関する既往研究は、高瀬ら¹⁶⁾、伴ら¹⁷⁾の研究がある。

高瀬ら¹⁶⁾は、数種の昼光装置の省エネルギー効果を評価することを目的に、実際のオフィスに昼光装置を設置し光環境実測を実測し、照明用電力削減効果を試算している。採光ルーバー、採光フィルム、手動ブラインド、ライトシェルフといった窓装置を用いており、照明用電力削減手法として、昼光連動型照明制御も比較条件として含まれている。その結果、窓装置による照明用電力削減効果のばらつきはあるものの、夜間は8~17.6W/m²に対して、晴天日の日中で4.3~6.4W/m²まで大幅に照明用電力を抑えられることを示している。

伴ら¹⁷⁾は、昼光連動調光制御を導入した昼光利用オフィスにおいて、窓装置の照明用電力削減効果を実測値から比較、検討を行っている。その結果、隣棟間隔の狭い都心部においても昼光装置を用いることで、室内に効率的に昼光を導入できる可能性を示唆し、調光連動制御による昼光利用効果については調光固定を想定した夜間電力と比較して、晴天日において照明用電力を約2割削減できることを示している。さらに、導光量を多くすれば昼光利用効果は大きくなるが、窓面に対して頻繁に眩しさを感じると予想されるため、これらの両立を達成させるためにも、適切な直射日光の遮蔽制御が必要であるとも示している。

1.3 昼光装置の種類と制御方法

1.2では、オフィス空間における昼光照明に関する既往の研究についてまとめた。これらから、オフィスにおいて昼光照明を行うことは、視的快適性および知的生産性を向上させ、さらに照明用電力の削減に寄与できる可能性があることが十分にわかる。しかし、上記にも述べた通り、昼光照明手法は様々あり、昼光装置も多く開発されている。ここでは一度、現在市販されている昼光装置の種類についてまとめてみる。

現在の昼光装置の分類は、可動性や導光材料などの構造や仕組み、設置条件などの定性的なものが主体である。昼光装置を光環境および省エネルギーの面から評価する項目としては、以下のものが挙げられる。

- | | | |
|-------------------|--------------|-------------|
| [1] 導入する昼光のまぶしさ抑制 | [2] 導入する昼光の色 | |
| [3] 導入する昼光の安定性 | [4] 眺望生 | [5] 導入する昼光量 |

[1]～[4]は光環境として質的に評価し、[5]は省エネルギーを量的に評価する項目である。

昼光の制御装置は大きく、外付けと内付けに分類される。ここでは、オフィスに使用される頻度の高い窓装置に着目してみると、外付け装置には、庇、ルーバー、ライトシェルフ、オーニング、バースシェードなどがある。内付け装置には、ブラインド、カーテン、ロールスクリーン、ガラスフィルムなどがある。図 1.1 に外付け装置、図 1.2 に内付け装置を示す。また、室内と室外の間に設置するガラスも窓装置に含まれる。窓装置を含む昼光装置は外付けと内付けの他に、可動式と固定式に分類され、建物の形状や用途によって選択される。

庇、ルーバー、ライトシェルフなどの外付け装置は、雨風の影響で可動式にすることは難しく、固定式である場合がほとんどである。内付け装置であるブラインドやロールスクリーンは、可動式と固定式のどちらでも使用できる。

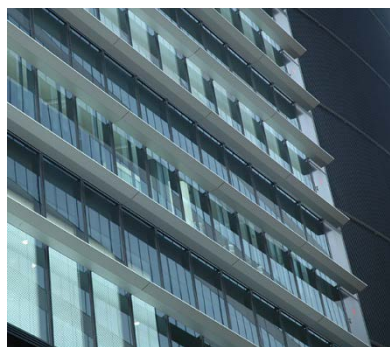
庇¹⁸⁾ルーバー¹⁹⁾ライトシェルフ²⁰⁾

図 1.1 外付け窓装置の例

ブラインド²¹⁾ロールスクリーン²²⁾

図 1.2 内付け窓装置の例

一方、近年では、上記に述べた窓装置以外にも特殊な装置が開発されている。例えば、市原らは室奥へ直射日光を導光する固定式自然光採光システム (T-Light Cube) を開発している¹⁸⁾。図 1.3 に市原らが開発した固定式自然光採光システムを示す。光ダクトの一種であり、装置の形状は放物線の持つ平行光を焦点に集光する原理と、焦点に集光した光を平行光に変える原理を利用し、複数の曲面を組み合わせることにより、あらゆる太陽高度に対応して導光する仕組みとなっている²³⁾。

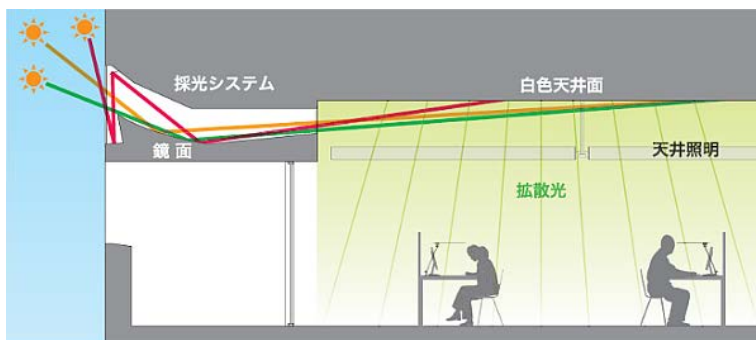


図 1.3 固定式自然光採光システム^{23) 24)}

植木らは採光フィルムによる昼光利用方法を提案している²⁵⁾。従来の特殊な窓フィルムは視界制御フィルムといわれるものであり、見る角度により透明、不透明になる特徴をもつ。植木らが開発した採光フィルムは、特殊なフィルム構造となっており、図 1.4 のように直射日光を天井方向に反射させることができる。

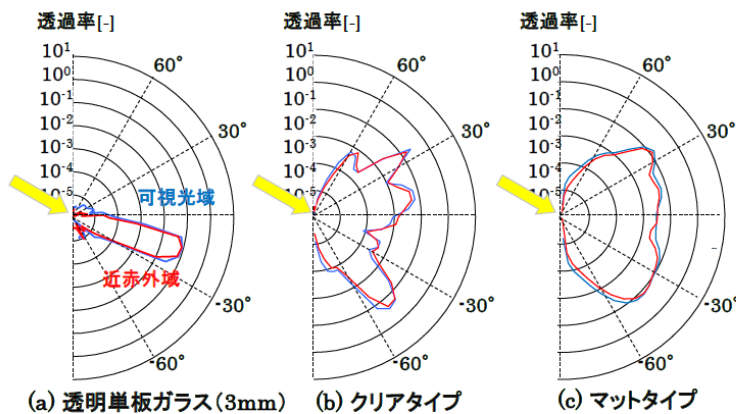


図 1.4 採光フィルムの配光曲線²⁵⁾

ここで述べた固定式自然光採光システムと採光フィルムは太陽の動きに合わせた制御を行うわけではないものの、固定式窓装置として照明用電力削減効果に寄与することが示されている²³⁾²⁵⁾。

このように、様々な昼光装置があるが、直射日光の遮蔽および利用を考えると、太陽は常に動くことから、可動式装置を選択する方が利便性に長けていると考えられる。さらにオフィスでは、まぶしさの抑制、安定性、眺望性、省エネルギー性の観点から、昼光装置の一つである自動ブラインドが最も多く用いられている。昼光装置の制御方法の基本は、自動ブラインドのスラットの羽根を直射日光を遮る最小限の角度に制御する。この角度は、緯度、経度、日時と、あらかじめ計算から求められるものであり、「まぶしさ」や「明るさ」など「人の感覚」は考慮されていない。そのため、現在のオフィス空間において昼光装置を導入した場合に、まぶしさ等昼光装置の制御に対するクレームが頻繁に発生している。さらに、オフィスにおける執務者の視的快適性や知的生産性を重要視する今日において、昼光装置の制御手法に執務者の感覚を考慮することは必要不可欠である。

そのため本論文では、昼光装置の執務者の視的快適性に基づく制御を提案することを目指す。ここに本研究の新規性があると言える。さらに、本研究で提案した昼光装置の制御方法を実用化させるための手法とさらなる応用方法も示すことで、確実に提案制御の実現を可能とする。

1.4 本論文の構成

本論文は全8章で構成されている。図1.5に本論文の構成を示す。

第1章では、昼光照明に関わる既往研究についてまとめ、制御手法の目的について述べた。ブラインド制御の第一の目的は、「日射すなわち直射日光の遮蔽」である。直射日光は、エネルギーが過剰であること、エネルギー量および位置の変動があること、光的観点では影を作ること、熱的観点では冷房負荷となること、が特徴として挙げられる。そのため、直射日光の遮蔽がブラインド制御の基本となる。しかし、直射日光の遮蔽だけでは窓からのグレアを抑制するには不十分であるため、「不快グレアの抑制」がブラインド制御の第二の目的になる。ここでは、基本のブラインド制御方法並びに、既存の不快グレア評価法について示した。

第2章では不快グレア抑制に基づく自動ブラインドの制御アルゴリズムを作成し、詳細な計算方法を提案した。本章で提案した不快グレア制御アルゴリズムによるスラット角シミュレーションを行い、アンビエント照明の電力削減率と屋外眺望の満足度について検証を行った。

自動ブラインドの制御手法である不快グレア抑制制御を実用化させるためには、ブラインド制御区域方法として「空間の分割」、制御間隔の決定方法として「時間の分割」の問題が挙げられる。第3章では、「空間の分割」の問題を解決するため、ブラインドのゾーニング方法について検討した。第4章では、「時間の分割」の問題を解決するため、ブラインド制御インターバルが窓面輝度変化に与える影響について検討した。さらに第5章では、第4章の結果を踏まえ、ブラインド制御時の窓面輝度変化に対する人間

の反応を把握するために行った被験者実験について述べる。

第 6 章と第 7 章ではブラインド制御の応用方法について述べる。第 6 章では、角度変化型ブラインドといった特殊ブラインドを取り上げ、第 2 章で提案したブラインド輝度計算方法を特殊ブラインドに適用させた場合の計算精度について検討した。第 7 章では、第 2 章のブラインド制御方法を応用した複数の開口部を有するオフィスにおけるアンビエント照明調光制御方法について検討した。

第 8 章において本研究の総括結論をまとめる。

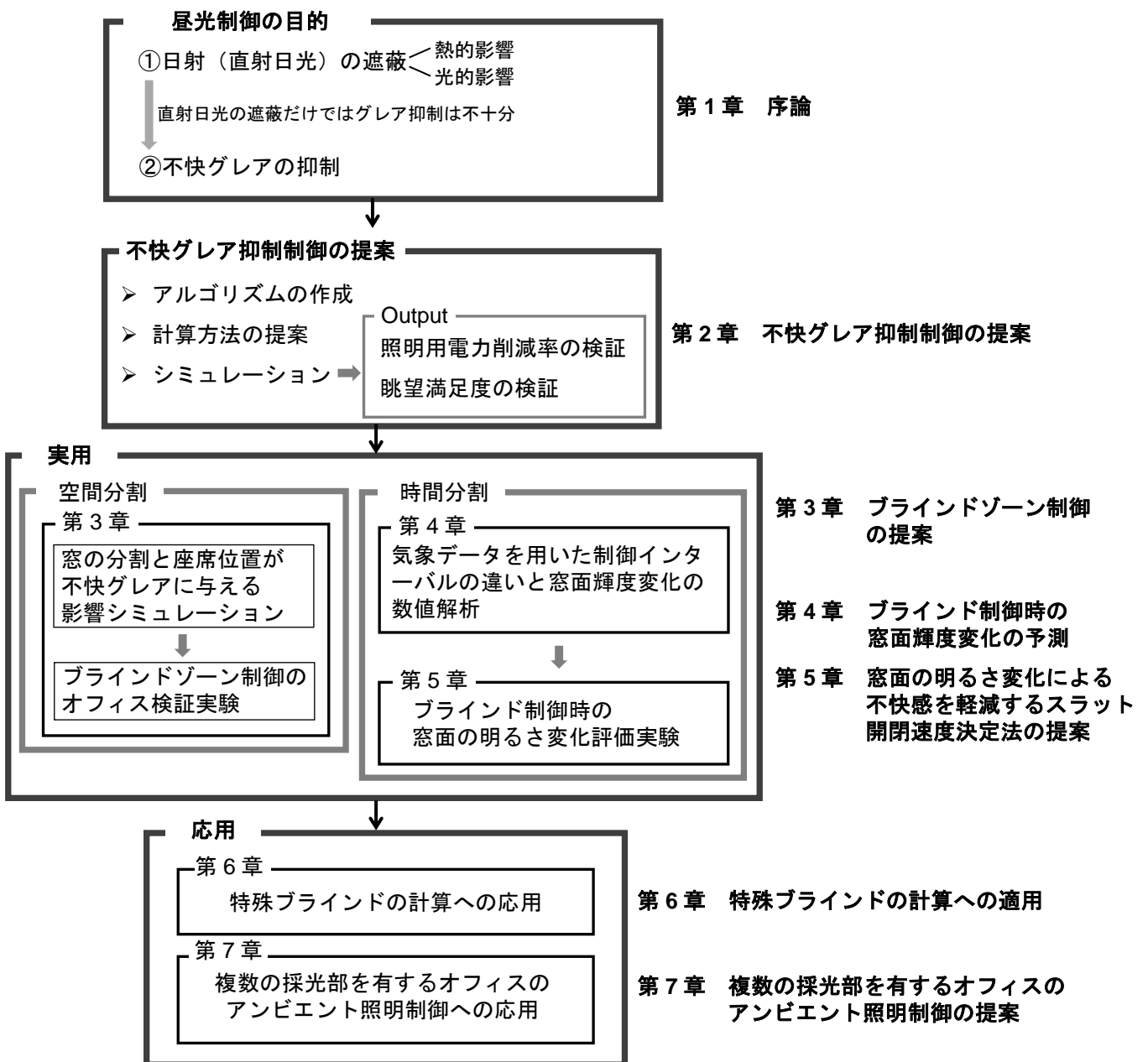


図 1.5 本研究の構成

1.5 本研究の意義

これまでに自動ブラインドのブラット角制御方法は、空調・照明エネルギーや窓面からの不快グレア、明るさ感によりかぶせ角を決定する方法など様々な制御方法が開発されている。不快グレア予測指標を用いたブラット角制御方法に着目したとき、不快グレア予測指標も多く提案されており、提案式の適用範囲を考慮すれば、自動ブラインドの制御方法にすぐに使用できるようにも思われる。しかし、このような高度なブラット角制御方法をそのまま実際の建物に導入しても、予想した効果が得られず問題となる事例が多発していることは事実である²⁶⁾²⁷⁾。これまでのように、ただ制御方法を提案するだけでなく、それを実空間で実現してこそ、初めて快適な光・視環境を作り出すことができる。制御を実空間に導入する際のすべての問題点を解決できなくても、現段階で問題視されている点に着目し解決を目指した制御方法であれば意義があると考えられる。

【第1章の参考文献】

- 1) 全国地球温暖化防止活動推進センターHP、http://www.jccca.org/global_warming/
- 2) (財)省エネルギーセンター：オフィスビルの省エネルギー パンフレット資料、2009E.Shen, J.Hu, M.Patel：Energy and visual comfort analysis of lighting and daylight control strategies, Building and Environment, Vol.78, pp.155-170, 2014.
- 3) 資源エネルギー庁：エネルギーの使用の合理化等に関する法律 省エネ法の概要、経済産業省 HP、http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/summary/pdf/2014_gaiyo.pdf
- 4) Boyce P, Hunter C, Howlett O.: The benefits of daylight through windows. New York: Lighting Research Center: Rensselaer Polytechnic Institute; 2003.
- 5) 日本建築学会：自然光を積極的に利用したサステナブル建築の「かたち」、日本建築学会 2015 年度日本建築学会技術部門設計競技開催案内、<https://www.aij.or.jp/jpn/symposium/2014/2015gijutu-compe.pdf>
- 6) Ihm P, Nemri A, Krarti M.: Estimation of lighting energy savings from daylighting. Build Environ 2009;44:509–14. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.04.016>
- 7) 望月悦子、村江行忠：窓からの昼光に連動した照明制御の心理・生理的効果に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.501-504、2014.
- 8) 田中俊六、武田仁、岩田利枝、土屋喬雄、秋元孝之、寺尾道仁：最新建築環境工学 改訂4版、井上書院、2014.
- 9) 高松幸雄、下川裕一、高橋祥雄：昼光の変動が事務所の明るさ感におよぼす影響に関する実測 その1 昼光に変動と明るさ変動感、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.385-386、1996.
- 10) 高松幸雄、下川裕一、高橋祥雄：昼光の変動が事務所の明るさ感におよぼす影響に関する実測 その2 明るさ感と明るさ変動感、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.387-388、1996.
- 11) 牧容子、宿谷正則：昼光照明を行なう教室の視的・熱的快適性に関する実測調査、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.421-422、2009.
- 12) 佐伯有希乃、渡邊進介、伊藤朋香、田辺新一、岡野健二、小島浩士、平松徹也：昼光導入空間における視的・熱的快適性及び省エネルギー性に関する研究(その1)：ガラス建築オフィスPビル実測結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.567-568、2003.

- 13) 佐藤啓明、伊香賀俊治、張本和芳、市原真希、多和田友美：午前中の昼光照明利用が生理量及び知的生産性に与える影響の検討 その2 生理量・心理量・作業効率の測定結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1257-1258、2010.
- 14) 山本倫代、星清慈、岩瀬基彦、佐々木真人、中川優一、秋元孝之、田辺新一：創造的活動を主体とするオフィスの執務環境評価 その2 夏季・冬季の執務環境測定および居住者申告結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1139-1140、2008.
- 15) 小川聡、伊香賀俊治、満倉靖恵、市原真希、張本和芳、青木世奈：オフィスサポート空間の光・視環境が執務者の作業効率に及ぼす影響 一心拍測定による検証一、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1219-1220、2014.
- 16) 高瀬幸造、井上隆、吉澤望、三木保弘、張本和芳、伴琢磨、小杉太洋、小林晃大：昼光利用による照明エネルギー消費量削減効果に関する系統的研究 その1,その2、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.465-468、2015.
- 17) 伴琢磨、井上隆、吉澤望、三木保弘、張本和芳、高瀬幸造、小杉太洋、小林晃大：非住宅建築物の昼光利用による照明エネルギー削減に関する実態比較調査 その3 実測建物における昼光利用効果の横並び評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.469-470、2015.
- 18) Eaves,
https://www.google.co.jp/search?q=%EF%BC%A5%EF%BD%81%EF%BD%96%EF%BD%85%EF%BD%93&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwia_ubQjvXTAhUCj5QKHdUdCBEQ_AUIBigB&biw=1023&bih=861#tbm=isch&q=%E5%BA%87%E3%80%80%E3%82%AA%E3%83%95%E3%82%A3%E3%82%B9&imgrc=_&spf=1494961732019
- 19) Sun Louver,
<http://www.bing.com/images/search?view=detailV2&ccid=PD35dsK5&id=BEE1AE4D11557D58AEC39454235E87A59DF501D8&thid=OIP.PD35dsK5qVEPe-DoLJJYngEsDh&q=Louver+office&simid=608000867593159290&selectedIndex=40&mode=overlay&first=1>
- 20) Light Shelf,
<http://www.bing.com/images/search?view=detailV2&ccid=0GTUdMng&id=FB3668D240D9C640AD5701033E36EDD4FC0533CE&thid=OIP.0GTUdMngoJ7k8UAI4RBMOAEsDt&q=light+shelf&simid=608038272466618747&selectedIndex=7&ajaxhist=0>
- 21) Blind,

<http://www.bing.com/images/search?view=detailV2&ccid=e4Kz%2bTmy&id=54F3A657FA50E42ABFD1D8F44AA0F5D4704BE5AA&thid=OIP.e4Kz-TmyxXRMWTSNmB6MewEsDf&q=%e3%83%96%e3%83%a9%e3%82%a4%e3%83%b3%e3%83%89%e3%80%80%e3%82%aa%e3%83%95%e3%82%a3%e3%82%b9&simid=607997633474988427&selectedIndex=18&ajaxhist=0>

- 22) Roll Screen, http://www1.bbiq.jp/ad504/s4395_01.jpg
- 23) 市原真希、張本和芳、鹿毛比奈子、吉澤望、三木保弘、望月悦子：室奥への導光を目指したオフィス用採光装置の開発 その1 採光装置の形状検討と模型実験結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.441-442、2014.
- 24) 大成建設 HP、<http://www.taisei.co.jp/giken/topics/1353302006664.html>
- 25) 植木俊、由井英臣、辻本昌洋、鎌田豪、津田裕介：採光フィルムを用いた自然採光システム その1 採光システム概要と実証室における性能検証、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.601-602、2016.
- 26) Y-C.Chan and A.Tzempelikos : Efficient venetian blind control strategies considering daylight utilization and glare protection, Solar Energy, Vol.98, pp.241-254, 2013.
- 27) J.Wienold, F.Frontini, S.Herkel and S.Mende: Climate based simulation of different shading device systems for comfort and energy demand, Proceeding of IBPSA conference, pp.2680-2687, 2011.

第2章 不快 glare 予測に基づく 自動ブラインドの制御方法の提案

2.1 はじめに

本章では、執務者の視的快適性に基づく自動ブラインドの制御方法を確立する。このアルゴリズムは、電気照明の制御方法も含み、室内センサーレスで屋外センサーのみを使用するものである。空調用消費エネルギーは、使用ガラスの特性などそのほかの要因によって変化する。ここでは、照明用電力の削減効果とスラット間から見える屋外景観に対する居住者の満足度について検証した。

2.2 基本のブラインド制御方法

自動ブラインド制御では、まず始めにブラインド制御要否判断を行う。直射日光が窓面に照射しない場合（直射日光の入射角が 90[deg]以上となる場合）、ブラインド制御は不要と判断される。この判断は、太陽方位角と窓方位の関係によって決まる。次に、窓に照射する直射日光照度がわずかな場合（直射日光照度が閾値以下となる場合）では、ブラインド制御は不要と判断される。この判断を行うため、屋上または窓に設置された屋外センサーにより得られる昼光照度の情報は必要不可欠である。上記に示したブラインド要否判断の閾値も、屋外センサーから得られたこの昼光照度によって事前に決定される。

一般的に、ブラインド制御は、ブラインド高さを設定する制御（以降、ブラインド高さ制御とする）とスラット角を設定する制御（以降、スラット角制御）の 2 種類がある。ブラインド高さ制御は、ブラインド最下端のスラットの位置を変化させるものである。ブラインド制御要否判断により、ブラインド制御が不要と判断された場合、このブラインド高さ制御によってブラインドはすべて挙げた状態となる。ブラインド高さ制御に関する既往研究では、居住者の机表面上に直射日光が照射しない限り、直射日光の室内への侵入を許容している。窓から侵入する直射日光の照射部分の長さによって、ブラインドの高さを決定する制御方法も提案されている⁷⁾。

しかし、一般に利用されている自動ブラインドは、モーターの騒音の点から常にブラインドが一番下まで降りていることが多く、スラット角制御の方が一般的であると言える。通常のスラット角制御では、スラット角を直射日光を遮る角度（以降、直射日光遮蔽角とする）で制御される。直射日光遮蔽角は、プロファイル角とスラットの幅、間隔の関数として、式(2.1)、式(2.2)のように表すことができる。

$$\theta_{\text{cut-off}} = \sin^{-1}(s/w \cos A_p) - A_p \quad (2.1)$$

$$A_p = \tan^{-1}(\tan h / \cos (A - A_v)) \quad (2.2)$$

$\theta_{\text{cut-off}}$: 直射日光遮蔽角[deg]、 s : スラット間隔[mm]、 w : スラット間隔[mm]、 A_p : プロファイル角[deg]、 h : 太陽高度[deg]、 A : 太陽方位角[deg]、 A_v : 窓面方位角[deg]

2.3 ブラインド制御方法に関する既往研究

1.1 も示したように、直射日光は、過剰であること、エネルギー量や位置が変動すること、光でいえば影を作ること、熱でいえば冷房負荷になるという点から、「直射日光の遮蔽」はブラインド制御に求められる最も重要な要素とされている。

しかし、直射日光の遮蔽だけでは、熱的にも光的にも不十分であるため、安全側になるように直射日光遮蔽角に一定のかぶせ角（以下、オフセット角）を加える方法がある。これをオフセット角制御という。さらに既往研究では、自動ブラインドのスラット角制御方法として、昼光による照度確保や熱負荷とのバランスを考えた方法など、これまでに様々な制御方法が提案されている。既往研究で提案されたスラット角制御方法のうち、いくつかは実用化もされている。表 1.1 に、現在国内外で検討されている自動ブラインドのスラット角制御方法をまとめる。表 1.1 に示すスラット角制御方法は、直射日光遮蔽角を基準としたものである。

表 2.1 に示した数々のスラット角制御方法は実際の建物に導入された事例があるものの、1.1 にも述べたように、導入時および実運用時に発生する問題点を解決する検討はなされていない。そのため著者は、導入時および実運用時に発生する問題点である「空間分割」と「時間分割」に対する検討および解決方法を提案することが重量と考える。

表 2.1 既存の自動ブラインドのスラット角制御

| No | スラット角制御方法 | | 参考文献著者 (発表年) | 測定量 |
|----|---------------------------------------|------------------------------|--|-------------------------------|
| ① | 空調および照明の消費エネルギーを算出し、スラット角を決定 | | E.Shen ら(2014) ⁸⁾ S.Doosam ら(2015) ⁹⁾ | 屋外センサーによる全天日射量とグローバル照度 |
| ② | 屋外の日射状態からスラット角を決定 | | 井上ら(1988) ¹⁰⁾ | 屋外センサーによる全天日射量と直達日射量 |
| ③ | 鏡面ブラインドの直射日光反射成分によるグレアを防ぐようにスラット角を決定 | | Y.C.Chan ら(2013) ¹²⁾ | — |
| ④ | 視環境性能評価指標を用いてオフセット角を決定し、直射日光遮蔽角に加えて制御 | 不快グレア予測指標 DGP ¹¹⁾ | Y.C.Chan ら(2013) ¹²⁾ | 魚眼レンズ付き CCD カメラによる視野内輝度分布 |
| | | 明るさ感予測指標 NB ¹³⁾ | 中村ら(2015) ¹⁴⁾ | 魚眼レンズ付き CCD カメラによる窓外および窓面輝度分布 |

2.4 不快グレア抑制制御アルゴリズムの概念

第1章で示した“直射日光遮蔽制御”はオープン・ループであるため、室内センサーを必要としないが、窓面からの不快グレアの抑制に対しては、“直射日光遮蔽制御”は不十分である¹⁾²⁾という欠点もある。そのため、第1章表1.1中の④のように、不快グレア感予測に基づくスラット角制御方法が提案されている³⁾⁴⁾。これらの制御手法では、グレア感が許容値以下になるまでスラット角を加える。これまでに、いくつかグレア予測指標を用いてこのグレア感を予測している。Chanらはスラットの鏡面反射成分によって引き起こされるグレアに対する解決方法についても示している³⁾。

日本では広く普及しているオープンプランオフィスでは、窓面からのグレア抑制はブラインド制御にとって重要な役割を担っている。そのため、本章では、自動ブラインドを用いたグレア抑制制御アルゴリズムに着目した。本研究で使用する自動ブラインドの不快グレア抑制制御アルゴリズムの概念を図2.1に示す。このアルゴリズムは日中におけるものであり、夜間はスラットを全閉に制御する。

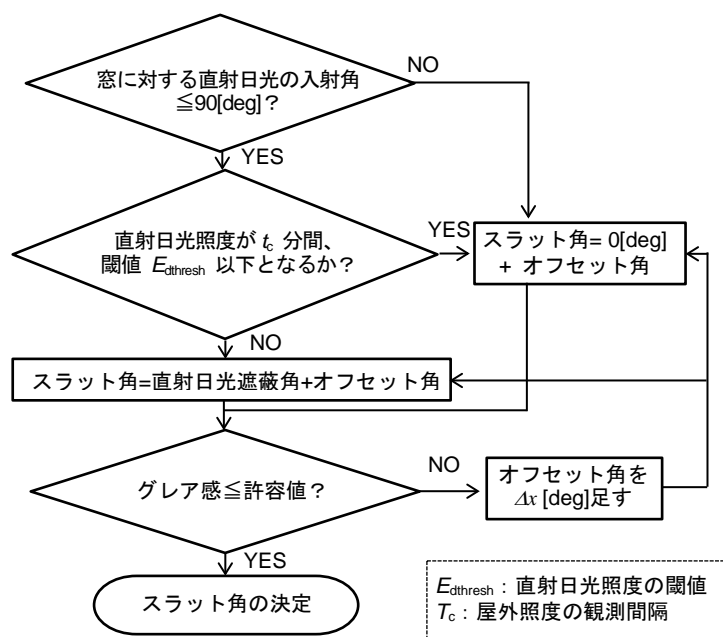


図 2.1 自動ブラインドの不快グレア抑制制御アルゴリズムの概念

スラット角制御の要否は、直射日光の窓面に対する入射角と窓面に入射する昼光照度によって判断される。連続的に変化する気象データを処理する必要があるため、直射日光照度の変化は一定期間ごとに観測される。直射日光の遮蔽が不要である場合、スラット角は水平角 0[deg]で制御され、眺望は最大限に確保される。直射日光の遮蔽が必要である場合、スラット角は直射日光遮蔽角に制御される。このときのグレア感を計算し、設定したグレア許容値と比較し、計算したグレア感が許容値以下であれば、スラット角は直射日光遮蔽角で制御され、許容値を上回る場合にはオフセット角が必要となる。グレア感が許容値以下に減少するまで、このクローズド・ループは継続されるという流れである。

2.5 昼光のためのグレア評価方法に関する既往研究

2.5.1 グレア評価方法

グレア抑制制御について具体的に述べるためには、グレア予測方法が必要となる。近年、昼光による不快グレアに関する研究は精力的に行われている。Konstantzos らは、昼光によるグレアを評価した既往研究についてまとめている¹⁾。

基本となるグレア評価式は、光源輝度 L_s 、背景輝度 L_b 、光源の立体角 ω 、ポジションインデックス P の4つのパラメータから構成され、背景輝度と光源輝度の対比グレアを評価している。GI 式を (2.3) に示す。以降に示すグレア評価式は、(2.3)を基本として、係数の補正あるいは総量効果を新しい項と足し合わせる方法がとられていることが多い。

$$GI = K \log \frac{L_s^a \omega^b}{L_b^c P^d} \quad (2.3)$$

L_s : 光源輝度[cd/m²]、 L_b : 背景輝度[cd/m²]、 ω : 光源の立体角[sr]、 P : ポジションインデックス[-]

初期のグレア評価式として、Hopkinson の点光源のための BRS-GI 式²⁾が挙げられる。BRS-GI 式を(2.4)に示す。その後、BRS-GI 式を修正した CGI (CIE Glare Index) 式³⁾を Einhorn が提案し、BRS-GI 式の ω の乗数を 0.8 から 1 にしたことにより、計算の簡略化とともに、不快グレアの加法・減法を行う上での矛盾がなくなっている。CGI 式を式(2.5)に示す。その後、BRS-GI 式と CGI 式を合体させた UGR 式へと発展した。

$$BRS - GI = 10 \log 0.478 \sum \frac{L_s^{1.6} \omega^{0.8}}{L_b P^{1.6}} \quad (2.4)$$

L_s : 光源輝度[cd/m²]、 L_b : 背景輝度[cd/m²]、 ω : 光源の立体角[sr]、 P : ポジションインデックス[-]

$$CGI = 2 \frac{[1+(E_d/500)]}{E_d+E_i} \sum_{i=1}^n \frac{L_s^2 \omega_s}{P^2} \quad (2.5)$$

L_s : 光源輝度[cd/m²]、 L_b : 背景輝度[cd/m²]、 ω : 光源の立体角[sr]、 P : ポジションインデックス[-]、

E_d : 光源からの直接分による目の位置の鉛直面照度[lx]、 E_b : 背景からの間接分による目の位置の鉛直面照度[lx]

窓面などの大きな光源からの不快グレアは「対比効果」と「総量効果」がある。不快グレアの基本式では、対比効果を評価しているため背景輝度が増加すると不快グレアは減少する。しかし、光源が大きい場合や背景輝度が高い場合には対比よりも目に入る光の総量によってグレアが引き起こされることがある。「総量」の効果を示す項を UGR に付け加えるなどの提案がされている。

DGI (Daylight Glare Index) 式⁴⁾は、Hopkinson が窓のような大光源のために BRS-GI 式を修正した指標である。これは、(1)光源が大きくなると目が順応している輝度として光源を無視できなくなる、(2)光源の位置を一点として扱うことができず、一点についてのポジションインデックスを得ることができない、という理由から BRS-GI 式を修正したものである。対比影響の緩和を考慮した DGI 式を提案した。DGI 式を式(2.6)に示す。

$$DGI = 10 \log 0.478 \sum_{i=1}^n \frac{L_s^{1.6} \Omega^{0.8}}{L_b + 0.07 \omega^{0.5} L_s} \quad (2.6)$$

L_s : 光源輝度[cd/m²]、 L_b : 背景輝度[cd/m²]、 ω : 光源の立体角[sr]、 P : ポジションインデックス[-]、 Ω : 修正立体角[sr]

Wienold らによって提案された DGP (Daylight Glare Probability) 式⁵⁾は、個室オフィスを前提にしており、対比より目に入る光の総量の影響を評価している。DGI 式を式(2.7)に示す。DGP 式は自動的にグレア検知を行うために、実際の窓を用い開発された式である。さらに Wienold らは、DGI 式を鉛直面照度で簡易的に算出する方法として、DGPs (Simplified Daylight Glare Probability) 式⁶⁾を提案している。DGPs 式を式(2.8)に示す。ただし、DGPs 式は、鉛直面照度のみで簡易的に算出されるため、窓面に近い位置のみで使用される。さらに、直射日光が直接または反射した光が、観測点に照射されない条件のみに適応されるという条件もある。

$$DGP = 5.87 \cdot 10^{-5} E_v + 9.18 \cdot 10^{-2} \log(1 + \sum_i \frac{L_{s,i}^2 \cdot \omega_{s,i}}{E_v^{1.87} \cdot P_i^2}) + 0.16 \quad (2.7)$$

$$DGPs = 6.22 \cdot 10^{-5} E_v + 0.184 \quad (2.8)$$

E_v : 目の位置の鉛直面照度[lx]、 L_s : 光源輝度[cd/m²]、 ω : 光源の立体角[sr]、 P : ポジションインデックス[-]、

VCP (Visual Comfort Probability) ⁷⁾はアメリカ照明学会が提案したグレアを不快でないと感じる人の割合をパーセントで評価した指標である。北米照明学会では、オフィス・学校などでは70以上を推奨している。

$$VCP = \left(\frac{100}{\sqrt{2\pi}}\right) \int_{-\infty}^{t_0} e^{-t^2/2} dt \quad (2.9)$$

$$t_0 = 6.374 - 1.333 \log e(DGR)$$

UGR (Unified Glare Rating) ⁸⁾は、人工照明を評価する指標である。光源の立体角のべき指数に関して光源立体角の線形加法性⁹⁾の見地が見地が検討され、CIEではイギリスIESのグレア評価式⁹⁾を修正して提案された式である²⁴⁾。

$$UGR = 8 \log_{10} \frac{0.25}{L_b} \sum \frac{L_s^2 \omega}{P^2} \quad (2.10)$$

L_s : 光源輝度[cd/m²]、 L_b : 背景輝度[cd/m²]、 ω : 光源の立体角[sr]、 P : ポジションインデックス[-]

BRS-GI、CGI、VCP、UGRは、蛍光ランプまたは白熱ランプといった電気照明のためのグレア予測指標であるのに対し、DGIは大きい光源のための、DGPは窓からの昼光によるグレア予測指標である。窓からの不快グレア評価の問題の一つは、グレア源の決定である。時間によってグレア限の大きさと位置が変化するためである。これは、視野内の輝度分布を測定できるCCDカメラが開発される以前に提案された従来のグレア予測指標と同様である。昼光によるグレア評価法を開発するため、DGPはCCDカメラシステムとプログラムにとって大きな可能性があることを示した。DGPは現在も昼光によるグレアを評価するツールとして使用されている。

デンマーク・オールボー (緯度 57.02°) で行われた個室オフィスでの実験研究では、この研究に参加した関係者が低照度に対してより寛大な評価をし、高照度に対してはDGPで計算した予測値よりもより敏感な評価をしたことが報告されている¹¹⁾。

ブリスベンのオープンプランオフィスで5つのグレア予測指標 (DGI, DGP, CGI, UGR, VCP) を用いて調査したHirningらの研究では、すべてのグレア予測指標は居住者の不快感を著しく過小評価していることを述べている¹²⁾。また、DGI、UGR、CGIはすべてとても類似した式であることを示している。しかし、VCPは不快感との相関は著しく低く、鉛直面照度に強く依存するDGPはそのほかのグレア予測指標と低い相関であることを示している。アメリカ・サンフランシスコ (緯度 37.8°) のオープンプランオフィスで現場調査を行ったKonisらは、CGIやDGI、UGR、またはその他の予測変数と比較して、鉛直面輝度 200cd/m²に対する最大窓面輝度の比が最も適したモデルであると示している¹³⁾。これらの結果は、Van Den Wymelenbegらの研究結果を援護するものである²⁸⁾。UGRが居住者の感覚に対して過

大評価している可能性があることも示唆している。このように、これらのたくさんの研究は、居住者の不快グレア評価について矛盾した結果を生み出している。

2.5.2 大光源からのグレア評価法

オープンプランオフィスにおける調査結果から、輝度の対比効果は無視することはできない²⁵⁾²⁷⁾。そこで岩田らは、DGIの矛盾を解決するため、式(2.11)に示すように窓面からの不快グレアを計算する Predicted Glare Sensation Vote (PGSV) を提案している¹⁵⁾。

$$PGSV = \log(L_s^{3.2} \omega^{0.64} / L_b^{(0.61-0.79 \log \omega)}) - 8.2 \quad (2.11)$$

L_s : 光源輝度[cd/m²]、 L_b : 背景輝度[cd/m²]、 ω : 光源立体角[sr]

PGSVの値は、Hopkinsonの研究で用いられた評価値0: 感じ始める, 1: 気になり始める, 2: 不快と感じ始める, 3: ひどすぎると感じ始める, となる。

このとき、光源の大きさの適応範囲は0.02sr~1.0srとしている。さらに、このときの光源立体角1.0srは、幅4m、高さ2mの窓を窓面からの距離2mの位置から見たときと同じ大きさである。PGSVは拡散光を照射した人工窓を用いた実験室実験により開発したものである。

PGSVの計算する方法として、2種類の方法がある。一つは、窓全体が光源として識別する方法(光源を固定する方法)である。これは、CCDカメラシステムが開発される以前の古典的な手法である。

もう一つの方法は、光源と背景の輝度閾値を決定し、輝度分布からグレア源を識別する方法である。この方法では、いくつかの方法で輝度閾値を決定することができる。代表的な方法は、視野内の平均輝度のx乗以上となる輝度を閾値とする。光環境シミュレーションソフトウェアRadiance内のfindglareは、輝度閾値を決める乗数xを固定値7として計算しているのに対し、Hirningらは乗数xに5を用いて計算している¹¹⁾。机上面の平均輝度のx乗以上を閾値とする方法をWienoldらは提案し、ここではxに4を用いて計算している¹²⁾。Konisらは、DGIを2種類の方法で計算している。一つは、findglareのデフォルト値と同様に計算する方法(DGI7x)と、閾値を2000cd/m²で計算する方法(DGI2000)である。この結果、DGI7xもDGI2000も居住者の評価を正確に予測できないことが示されている。

既往研究で岩田らは、平均背景輝度に対する平均光源輝度の比が最も高くなる輝度を閾値とし、その閾値を反復計算で求めている。ブラインドの反射率が極端に低くない場合、光源の大きさを固定した計算と平均背景輝度に対する平均光源輝度の比が最も高くなる輝度を閾値とする計算によるPGSVを比較すると、その差は小さくなることを示している¹⁷⁾。

さらに岩田らは、背景輝度とグレア源輝度との輝度閾値が PGSV に与える影響についても示している¹⁸⁾。輝度閾値と平均背景輝度に対する平均光源輝度の比の関係を示した2例を図2.2に示す。図2.2には、光源の立体角 ω と PGSV の変化も示している。輝度閾値が高くなるほど、光源の立体角が小さくなる。しかし、もっとも多くの場合、大きな立体角は低い光源輝度によって補われるため、PGSV の変化は極めて小さくなる。

そのため、光源の大きさを固定して計算した PGSV は現実的な状況でより簡易な方法として使用できるとみなされる。

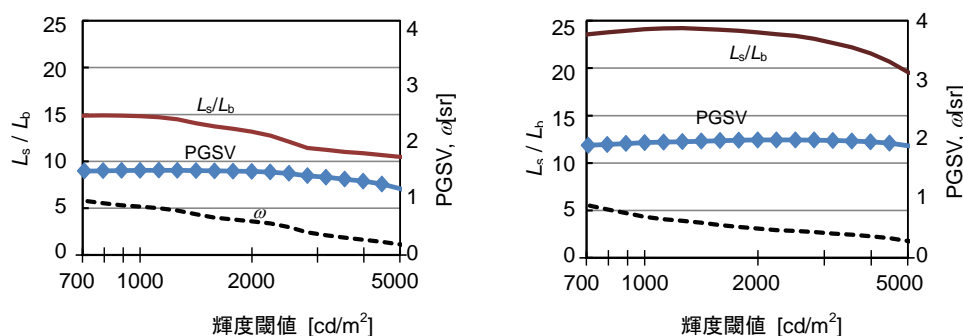


図 2.2 背景輝度とグレア源輝度との輝度閾値が PGSV に与える影響³¹⁾

PGSV は被験者実験の結果をもとに“オフィスにおける許容度”に換算される¹⁷⁾。ロジスティック回帰に基づく式(2.12)、式(2.13)を作成している。この方法では、許容度 80%はその位置の 80%の執務者がそのときのグレア感を許容できることを意味する。

$$z = -1.42 \times \text{Glare Sensation Vote} + 2.57 \quad (2.12)$$

$$\text{Acceptability} = \int \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad (2.13)$$

図 2.3 に PGSV とオフィスの許容度の関係を示す。その空間の許容度は以下の式より計算される。

$$AC_{\text{space}} = \frac{\sum_{i=1}^n AC_i}{n} \quad (2.14)$$

AC_{space} : 空間に対する許容度[-], AC_i : 各座席位置における許容度[-], n : 空間に滞在する執務者の人数[人]

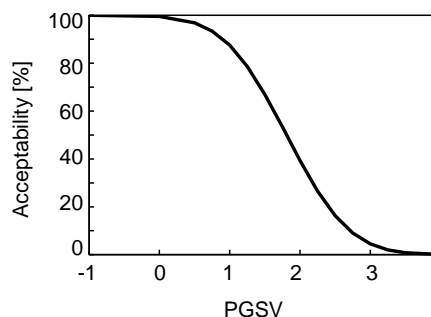


図 2.3 PGSV と許容度³⁰⁾

2.6 方法

2.6.1 PGSV の計算

PGSV を計算するには、グレア源の平均輝度、グレア源の立体角、背景輝度が必要である。窓全体をグレア源とみなすため、ここでは光源を固定して計算する方法を用いる。この計算方法では、ブラインドはわずかな厚みのフラットなスラットとみなした。

2.6.1.1 窓面平均輝度

PGSV は計算するために窓全体の平均輝度が必要となる。窓はブラインドスラットとスラットの間から見える屋外景観から構成される。実際の窓条件では、屋外景観に天空部分と、ブラインドに部分的に直射日光が照射するのを防ぐ周辺建物や樹木がある。各成分の立体角によって重みづけされた窓面全体の平均輝度は以下に式のように計算される。

$$L_w = \sum L_i \omega_i / \sum \omega_i \quad (2.15)$$

L : 輝度[cd/m²]、 ω : 立体角[sr] 添字 i はブラインドスラットの直射日光照射部分、日影部分、スラット間から見える天空、庇、周辺建物等

2.6.1.2 ブラインドスラット輝度

ブラインドの透過率について、Chan らは多くの既往研究（多くはラジオシティ法に基づく方法に関する研究）についてまとめている³⁾。スラットの鏡面反射特性については、ハイブリッドレイトレーシングとラジオシティモデルを提案している³⁾。

しかしここでは、提案したアルゴリズムは短時間のインターバルを用いた実際のシステムで使用することを前提に、簡易計算法として、スラット面上の均等拡散面としてスラット輝度を計算した。スラット輝度は、屋外照度から式(2.16)のように計算できる。

$$\begin{bmatrix} L_1 \pi \\ L_2 \pi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1^{-1} & -\Phi_{1 \rightarrow 2} \\ -\Phi_{2 \rightarrow 1} & \rho_2^{-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

L_1, L_2 : スラット下向き面1、上向き面2のスラット輝度[cd/m²]、 m_1, m_2 : スラット下向き面1、上向き面2への屋外から入射する直射日光、天空光、地表面反射日光によるスラット面照度[lx]、 ρ_1, ρ_2 : スラット下向き面1、上向き面2の反射率[-]、 $\Phi_{m \rightarrow n}$: 面 i を発した一様拡散光が面 j に入射する割合(形態係数)[-]

$$m_1 = \rho_2 \Phi_{3 \rightarrow 1} \frac{s}{w_{sun}} E_{DV} \tau_{glass}(\beta_i) + \Phi_{g \rightarrow 1} R_g \tau_{glass}(60) \quad (2.17)$$

$$m_2 = \Phi_{sky \rightarrow 2} R_{sky} \tau_{glass}(60) + \Phi_{g \rightarrow 2} R_g \tau_{glass}(60) \quad (2.18)$$

m : 屋外から入射する直射日光, 天空光, 地表面反射日光によるスラット面照度[lx] $\Phi_{\alpha\beta}$: 面 α を発生した一様拡散光が面 β に入射する割合(形態係数) $\tau_{glass(i)}$: ガラス透過率(i は入射角[deg]) ρ : 反射率
 E_{DV} : 窓面直射日光照度[lx] R_{sky} : 天空の光束発散度[lm/m²] R_g : 地表面の光束発散度[lm/m²] 添字は1,2,3 : スラット下向き面1, スラット上向き面2, 面2で直射日光照射部分(図2.4参照)

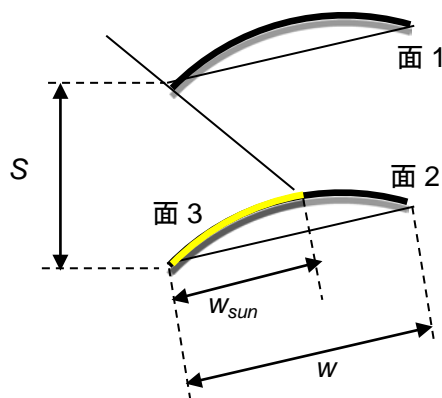


図 2.4 スラット輝度計算の番号

2.6.1.3 スラット間から見える屋外景観輝度

スラット間から見える天空輝度は以下の式より計算される。

$$L_{sky} = E_{sh} \tau_{glass}(\beta_i) / \pi \quad (2.19)$$

L_{sky} : 天空輝度[cd/m²] E_{sh} : 水平面天空光照射度[lx]
 $\tau_{glass}(60)$: 入射角 60 [deg]に対する窓ガラスの可視光透過率

スラット間から見える窓周辺の遮蔽物(建物や樹木など)の輝度の計算は簡易式として以下のように求められる。

$$L_{ob} = E_{sh} \Phi_{sky \rightarrow ob} \tau_{glass}(\beta_i) \rho_{ob} / \pi \quad (2.20)$$

L_{ob} : スラット間から見える窓周辺の遮蔽物の平均輝度[lm/m²], E_{sh} : 天空光輝度[lm/m²],
 $\Phi_{sky \rightarrow ob}$: 空から見た窓周辺の遮蔽物の形態係数,
 $\tau_{glass}(\beta_i)$: 入射角 β [deg]に対する窓ガラスの可視光透過率,
 ρ_{ob} : 窓周辺の遮蔽物の平均反射率[-]

2.6.1.4 スラットとスラット間から見える屋外景観部分の立体角

観測点から窓の立体角は以下のように計算できる。各スラットの仰角（スラット面の上端と下端）から、窓全体に対する1枚ごとのスラットの立体角割合を計算できる。その後、各スラットの立体角とスラット間から見える屋外景観の立体角が求められる。多角形立体角は以下の式より求められる。

$$\omega = (\sum_{i=1}^n \delta_i) - (n-2) \pi$$

ω : 多角形立体角[sr]、 δ : 球面角[deg]、 n : n 角形の面を構成する点
 なお、 δ は三角法を用いても計算できる。

2.6.1.5 背景輝度

背景輝度は以下の式を用いて計算できる。

$$\begin{bmatrix} E_w \\ E_c \\ E_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_w^{-1} & \Phi_{w \rightarrow c} & \Phi_{w \rightarrow f} \\ \Phi_{c \rightarrow w} & \rho_c^{-1} & \Phi_{c \rightarrow f} \\ \Phi_{f \rightarrow w} & \Phi_{f \rightarrow c} & \rho_f^{-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} L_w \pi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$\Phi_{m \rightarrow n}$ 面 m から面 n に対する形態係数, E : 照度[lx], ρ : 反射率[-], L_w 窓面平均輝度[cd/m²], 添字 w, c, f はそれぞれ窓、天井、床

2.6.2 不快グレア抑制制御アルゴリズム

本章で使用するブラインド制御アルゴリズムを図 2.5 に示す。直射日光遮蔽角が 0[deg]以下のときは水平角 0[deg]で制御し、屋外景観を最大限確保できるようにした。PGSV の計算には、窓面構成要素の各輝度および各立体角と背景輝度は 2.6.1.2~2.6.1.5 に示した方法で計算する。入力条件は、図 2.5 中の平行四辺形の部分となる。このアルゴリズムは実際の建物に適用できるものである。実際の運用とシミュレーションの結果との違いは以下に示す通りである。

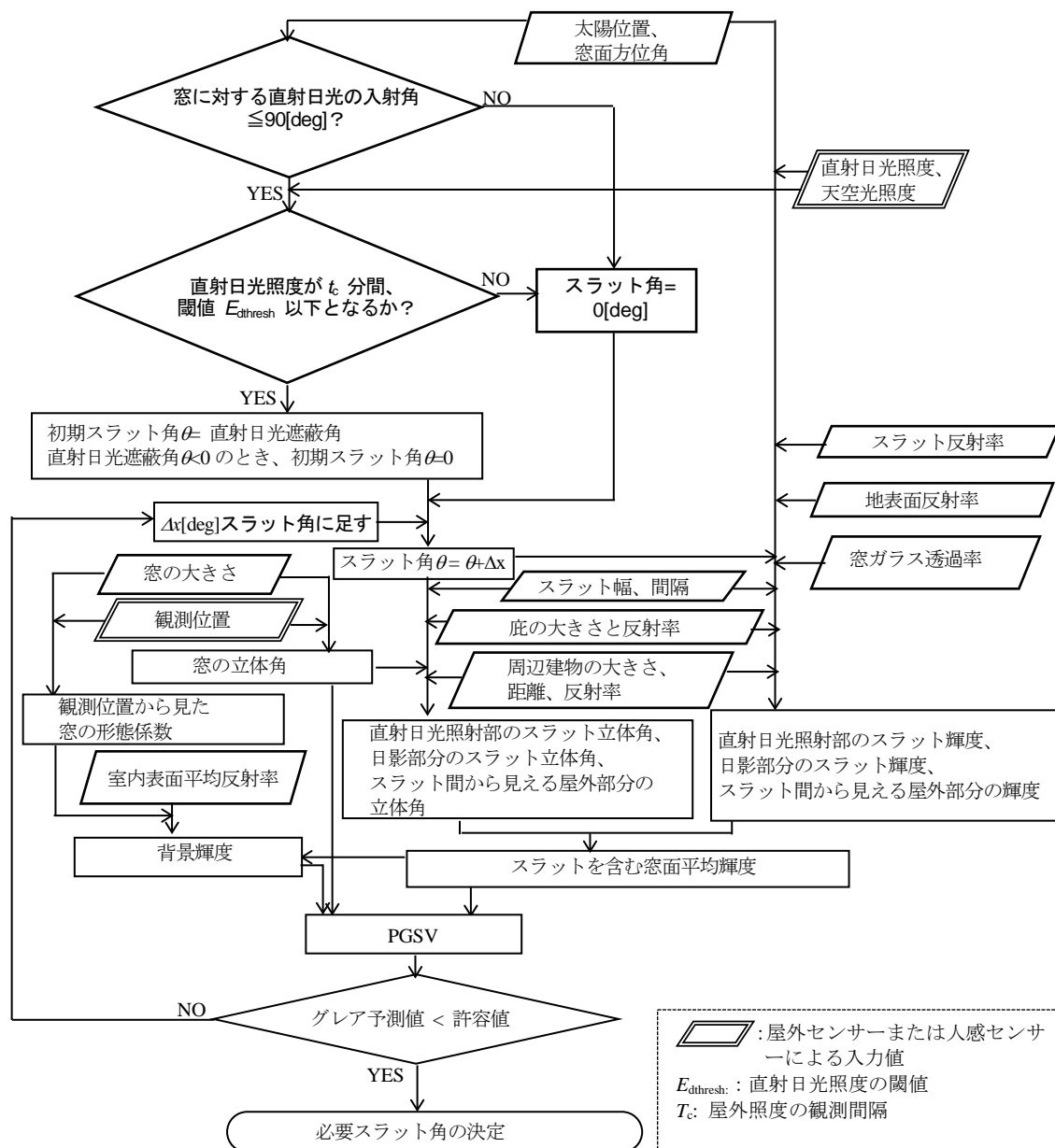


図 2.5 不快グレア抑制制御アルゴリズム

2.6.3 シミュレーションモデル

シミュレーション条件を表 2.2 に示す。シミュレーションとして使用したオフィスは、南に面する開口部（床面から 0.8m の高さ）を持つことを想定した。天井高さは 3.0m とした。

表 2.2 シミュレーション条件

| | |
|-------------|--|
| 緯度, 経度 | 35°41' N, 139°46' E |
| 開口部方位 | 0[deg] (南向き) |
| 気象データ | 拡張アメダス気象データ, 東京標準年, 計算時間: 8:00-18:00 直散分離方法: Perez model [18] 昼光の発光効率: Igawa_B [19] |
| 部屋の大きさ | 間口: 50 m |
| | 窓からの奥行: 10 m |
| | 高さ: 3.0 m |
| 反射率 | 天井: 0.8, 壁: 0.6 |
| 窓高さ | 0.8 m from floor - 3.0 m |
| 地表面反射率 | 0.2 |
| PGSV 計算点 | 観測位置: 窓から 2.5 m, 目線高さ: 1.2 m PGSV1.2 (満足者率 80%) |
| ブラインド要否判断 | 直射日光照度 < 5000lx |
| スラット角 かぶせ角度 | $\Delta x = 2$ [deg] |



図 2.6 オフィスモデル

通常、日本のオープンプランオフィスは、図 2.6 に示すように直線性の個人個室（仕事スペース）を作るためにパーティションが設置されている。一般的なパーティションの高さは、着席時の目線高さと同様に床から 1.2m であるため、目線高さよりも下の窓は見えない。実際のオフィスでこのアルゴリズムを使用する場合、計算位置（観測位置）は最もグレアが観測されるオフィスの執務者の位置となり、在席検知センサーまたは IC タグからの情報を使用しその位置を決定する。

しかしここでは、計算位置を窓面からの距離を 2.5m と固定する。2.5m よりも窓に近い範囲は普段の作業領域として滅多に使用されないことから、この計算位置でもっとも酷いグレア感が観測されると想定した。ブラインド条件は表 2.3 に示す内容で検討した。スラット反射率を 2 条件、スラットの幅・間隔比を 3 条件の計 6 条件とした。この条件は市販のブラインドを考慮して決定した。

実際のブラインド制御インターバルは 3 分～15 分間隔であるが、気象データの観測インターバルから、シミュレーションの計算間隔を 1 時間間隔とした。

表 2.3 ブラインド条件

| スラット | H09 | H08 | H07 | L09 | L08 | L07 |
|-----------------|------|-----|------|------|-----|------|
| スラット幅 w [mm] | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 |
| スラット間隔 s [mm] | 31.5 | 28 | 25.4 | 31.5 | 28 | 24.5 |
| s/w | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 0.9 | 0.8 | 0.7 |
| スラット反射率 [-] | 0.85 | | | 0.6 | | |

H:最も高い反射率, L:最も低い反射率,
09: $s/w=0.9$ 08: $s/w=0.8$ 07: $s/w=0.7$

2.6.4 照明用消費電力

オフィス空間では、蛍光灯による従来の天井照明が、調光制御が可能な LED 照明にすでに交換されている。天井照明の調光制御は人感知センサー、明るさセンサー、昼光連動型制御を用いて、照明用電力を削減することができる。

通常の昼光シミュレーションでは、窓からの机上面の直接昼光照度は計算の主なターゲットとされる。しかし、パーティションを使用したオフィスでは、窓からの直接光が遮蔽され、机上面の直射照度はシミュレーション結果よりも低い結果となる。ここでは、天井照明の必要光束量を減らすことができる天井面に反射した昼光に着目した。窓面からの昼光による天井面の照度は以下の式より計算される。

$$E_{d\text{ceiling}}(i) = \pi \sum L_k \varphi_{ki} \quad (2.22)$$

E_d : 天井面に入射する窓面からの直接照度[lx] L : 各窓面要素輝度[cd/m²] φ : 各窓面要素立体角投射率 [-] 添字 i は各窓面要素（上向き、下向き面のスラット、スラット間から見える地表面部分）

窓の奥行は、限りなく長いと仮定し、天井面における位置(i)での各スラットの形態係数は、以下の式に示すように仮定した。この計算方法の妥当性については、天井面照度の計算値と実測値の比較を行った参考文献 6) で検討している。詳細な内容は、第 6 章に示す。

$$\begin{aligned} x_{\text{out}}(j) &= 0 \\ x_{\text{in}}(j) &= w \cos \theta \\ y_{\text{out}}(j) &= js \\ y_{\text{in}}(j) &= y_{\text{out}}(j) - w \sin \theta \\ x_{\text{ceiling}}(i) &= i \Delta x_{\text{span}} \end{aligned}$$

$$\alpha_{in}(i,j) = \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{y_{in}(j)}{x_{ceiling}(i)-x_{in}(j)}\right)\right) \quad (2.23)$$

$$\alpha_{out}(i,j) = \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{y_{out}(j)}{x_{ceiling}(i)}\right)\right) \quad (2.24)$$

When $\alpha_{in}(i,j) \geq \alpha_{out}(i,j)$

$$\varphi_{slat2}(i,j) = (MAX(\alpha_{in}(i,j-1), \alpha_{out}(i,j)) - \alpha_{in}(i,j))/2 \quad (2.25)$$

$$\varphi_{slat1}(i,j) = 0$$

このとき $\alpha_{in}(i,j) < \alpha_{out}(i,j)$

$$\varphi_{slat1}(i,j) = (MIN(\alpha_{out}(i,j), \alpha_{out}(i,j+1)) - \alpha_{in}(i,j))/2 \quad (2.26)$$

$$\varphi_{slat2}(i,j) = 0$$

$\theta(j)$: j 番目のスラット角[deg] j : j 番目のスラット[-] i : i 番目の天井スパン[-] $x_{in}(j), y_{in}(j)$: スラット室内側の x 座標, y 座標[-] $x_{out}(j), y_{out}(j)$: スラット窓側の x 座標, y 座標[-] x_{span} : 天井面照度計算スパン[mm] s : スラット間隔[mm] w : スラット幅[mm] $\alpha_{in}(j), \alpha_{out}(j)$: 計算微小面と室内側, 窓側のスラット端部がなす角[-] $pointx(i)$: 奥行方向の天井座標[mm] $F_l(j)$: スラットの立体角割合[-] $\varphi_{slat1}(j), \varphi_{slat2}(j)$: 下向き, 上向き面スラットの立体角投射率[-]

制御概要を図 2.7 に示す。この制御方法を実際のオフィスで使用するとき、室内センサーは不要である。必要スラット角の計算結果から天井照明の必要光束量が計算できるためである。屋外の照度センサーの入力値のみで計算できる。

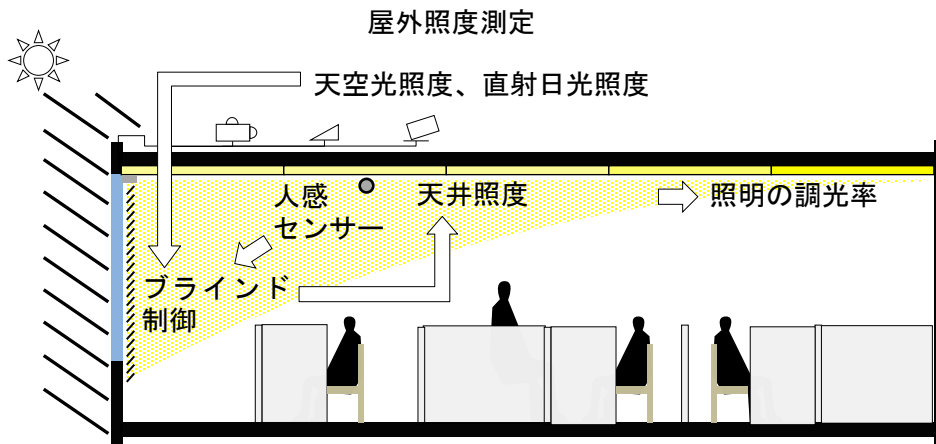


図 2.7 制御概要

天井に設置する明るさセンサーは直下の物体の反射率の影響を大きく受け、この従来の方よりもここで示す制御方法の方がより有利な点である。この制御方法は、アンビエント照明の一部に昼光を利用しているタスク&アンビエント照明方式の空間にとって適した手法である。室内の明るさセンサーは天井照明から光とタスクライトからの光を分離して識別することができないためである。

電気照明制御はグレア抑制ブラインド制御に基づいているため、窓面の平均輝度は一定に保たれており、電気照明からの光量は安定する。その上、この制御方法は天井面がより明るくなることを促進し、執務者の士気と生産性に明確なインパクトを与えるかもしれない。

天井照明の照明用電力のシミュレーション条件を表 2.4 に示す。各照明器具の調光率 $R_{dim}(i)$ は以下の式で計算される。

$$R_{dim}(i) = E_{dceiling}(i)\rho_{ceiling} A/F_i \times 100 \quad (2.27)$$

When $F_i < E_{dceiling}(i)\rho_{ceiling} A$, $R_{dim}(i)=100$

$R_{dim}(i)$: 各照明器具の電力削減率[%], F : 必要アンビエント照度を供給する照明器具からの光束[-], $E_{dceiling}$: 昼光による天井照度[lx], $\rho_{ceiling}$: 天井反射率[-], A : 照明器具 1 台あたりの面積、添字 i は照明器具および計算点の位置[-]

表 2.4 アンビエント照明の照明用電力シミュレーション条件

| 照度 [lx] | アンビエント照度 300[lx] |
|----------|--|
| アンビエント照明 | LED ライン照明 20[W/台]×5 / 列 3200 [lm/台] (0%) (0%~100% リニア調光可) 1 列 / 2.5 m 間隔で照明を配置, 合計照明台数 100 台 |
| 天井反射率 | 0.7 |
| 計算位置 | 2 m 間隔 |

2.6.5 眺望性

Wienold らは屋外の眺望性の量または質についての記述した変数は示されていないと言及している¹⁰⁾。窓を通して見える屋外の眺望性はほとんど評価されておらず、窓にブラインドなどの遮蔽物を設置したときの屋外の眺望性に対する執務者の満足度への影響があるかもしれない。眺望性が不快グレア評価へ与える影響に関して、既往研究では眺望の内容（自然な景観、人工的な景観、自然と人工の両方が混ざった景観）と窓からの距離によって分類されている¹¹⁾。Wienold らは、スラットを除いた窓から見える

屋外景観部分に対する窓とスラット間から見える屋外景観の比を RADIANCE による画像から計算する簡易方法を用いている。遮蔽システムを通して見える景観の鮮明さについての研究は、眺望の鮮明さは開口率ではなく視覚的透過率によって影響を受けることを示している。これらの研究は、開放性の高い暗い色の遮蔽システムは一般的に高い評価を得ると示している⁸⁾⁹⁾。

ここでは、眺望の満足度を予測するため、伊藤らの既往研究の結果を用いた^{10)註1)}。この既往研究では、窓全体の立体角に対するスラット間から見える屋外の立体角の割合($\omega_{\text{view}} / \omega_{\text{window}}$)と定義し、($\omega_{\text{view}} / \omega_{\text{window}}$)の極限比($\omega_{\text{view}} / \omega_{\text{window}})_{\text{limit}}$)を示している。 $(\omega_{\text{view}} / \omega_{\text{window}})$ が $(\omega_{\text{view}} / \omega_{\text{window}})_{\text{limit}}$ より小さくなる場合には、執務者は屋外眺望に対して満足しないとなる。極限比 $(\omega_{\text{view}} / \omega_{\text{window}})_{\text{limit}}$ はスラットと天空の輝度比($L_{\text{slat}} / L_{\text{sky}}$)によって変化する。その上、輝度比($L_{\text{slat}} / L_{\text{sky}}$)と極限比 $(\omega_{\text{view}} / \omega_{\text{window}})_{\text{limit}}$ の関係は、屋外眺望の地平線によって変化する。輝度比($L_{\text{slat}} / L_{\text{sky}}$)と極限比 $(\omega_{\text{view}} / \omega_{\text{window}})_{\text{limit}}$ は、グレア抑制アルゴリズムによって計算される。そのため、それぞれの計算時間で、 $(\omega_{\text{view}} / \omega_{\text{window}})$ は $(\omega_{\text{view}} / \omega_{\text{window}})_{\text{limit}}$ と比較され、眺望の満足度（屋外景観に対して執務者が満足する勤務時間の割合）が計算される。ここでは、目線高さが地平線となる場合で窓面からの2.5mの観測位置で計算した。

2.7 結果

2.7.1 晴天日における検討

2.7.1.1 直射日光遮蔽角とグレア抑制角

図 2.8 に各季節における晴天日の屋外照度を示す。図 2.9 に H09 ブラインドのスラット角の変化を示す。底長さは 0.8m とした。本研究で使用した制御アルゴリズムでは、直射日光遮蔽角が 0[deg]よりも小さくなると屋外景観の眺望性を保つため、スラット角は 0[deg]となる。

夏季と秋季では、直射日光遮蔽角は常に 0[deg]より小さくなる。しかし、グレア抑制角は 0[deg]～30[deg]の範囲にある。冬季では、8時から10時までまたは2時において直射日光遮蔽角はある程度大きく、グレア抑制角は直射日光遮蔽角となる。一方、直射日光遮蔽角がある程度小さいとき(10時～14時)ではグレア抑制角は直射日光遮蔽角よりも大きくなる。

庇影による影響はすべての季節でみられる。夏季ではその影響が明確で、高い太陽高度によってスラット上により長い庇影ができる。重みづけされた窓面平均輝度の立体角は、PGSV を計算するために用いられ、直射日光が照射されない輝度は PGSV を低くする。そのため、スラット角が小さいグレア抑制が必要となる。

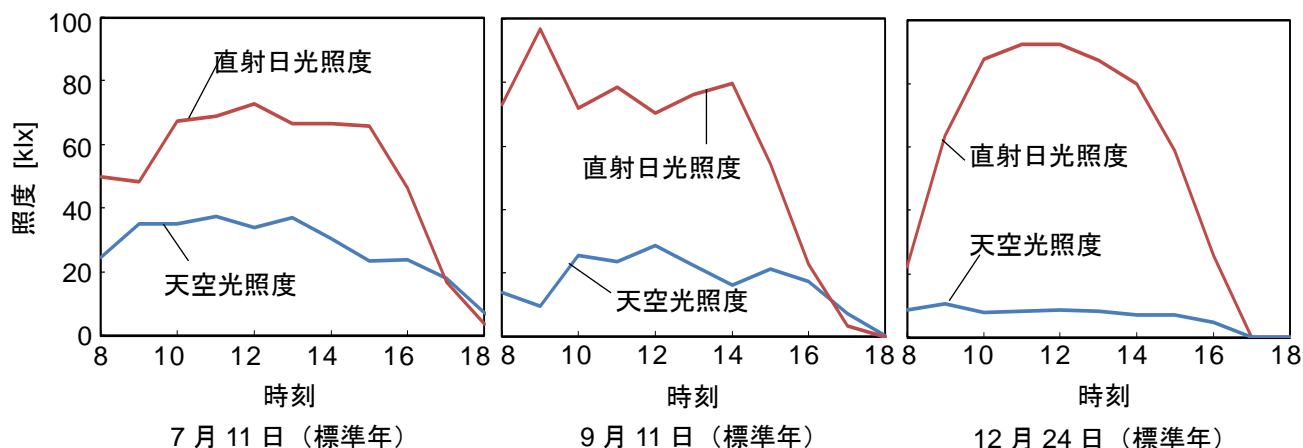


図 2.8 晴天日の屋外照度

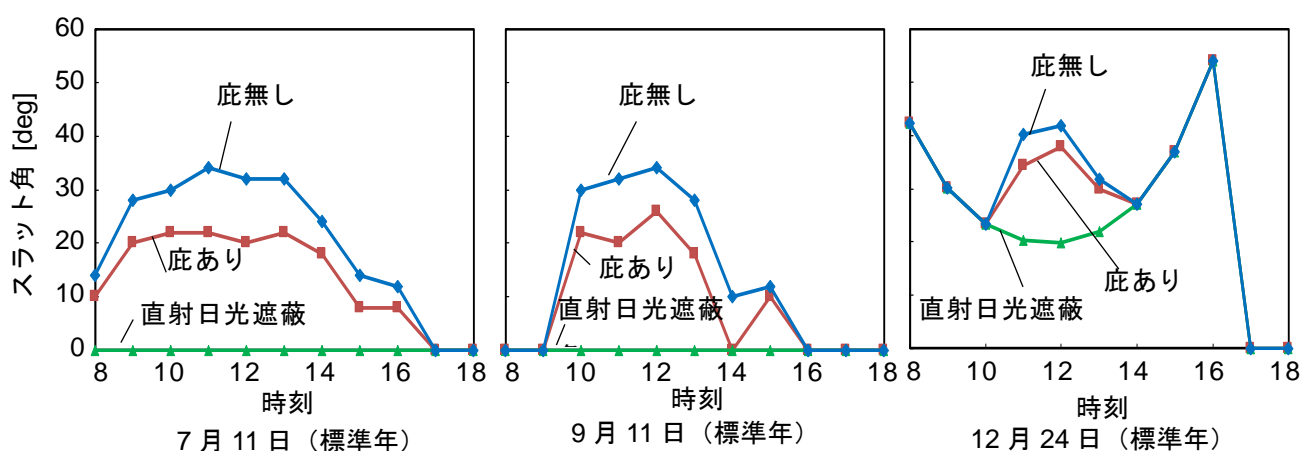


図 2.9 計算対象日のスラット角の変化

2.7.1.2 スラット反射率とスラット幅・間隔比の影響

スラット反射率とスラット幅・間隔比が必要スラット角に与える影響について、2.4.1.1 と同じ計算日で検討した。表 2.3 に示すように、スラット反射率は 0.6 と 0.85 の 2 条件とした。結果を図 2.10 と図 2.11 に示す。スラット反射率が高いブラインドでは、スラット輝度が高くなるため、不快グレアを抑制するように必要スラット角が大きくなる。冬季では、0.6 のスラット反射率のブラインドは直射日光遮蔽角となり、一方で 0.85 のスラット反射率のブラインドでは、オフセット角 10~20[deg]が必要となる。

必要スラット角の影響を示すため、表 2. のように 0.7~0.9 の 3 つのスラット幅・間隔比を用いて検討した。スラット幅・間隔比の影響は、図 2.8 の 12 月 24 日 (標準年) の結果に示すように、明確となった。スラット幅・間隔比がスラット反射率 0.6 のグレア抑制角に与える影響は、スラット反射率 0.85 のときより大きい。スラット反射率の高いブラインドは、スラット幅・間隔比がグレア抑制角に与える影響は小さい。

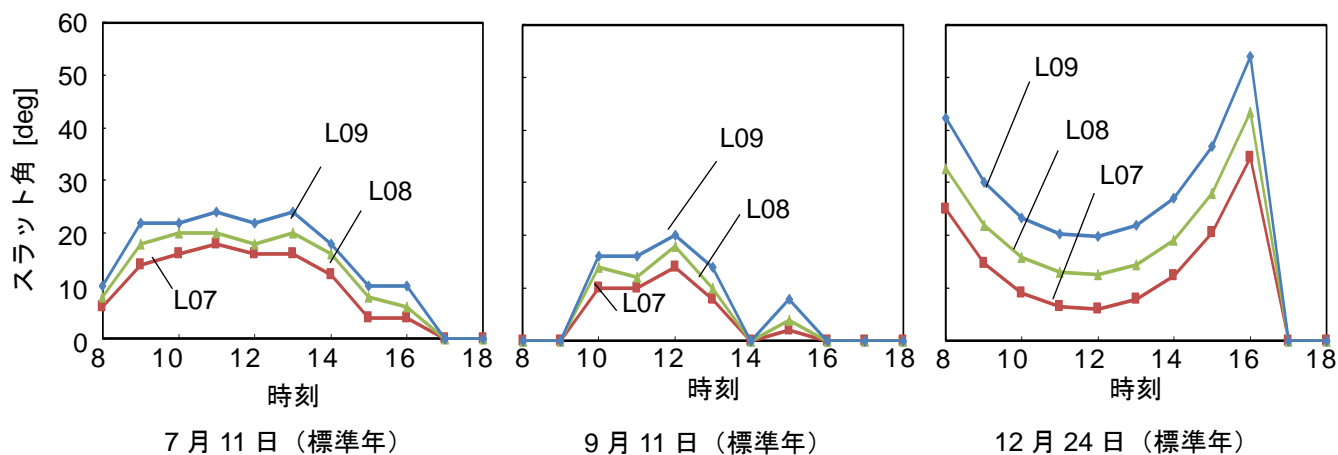


図 2.10 グレア抑制角の変化 (スラット反射率が低い場合)

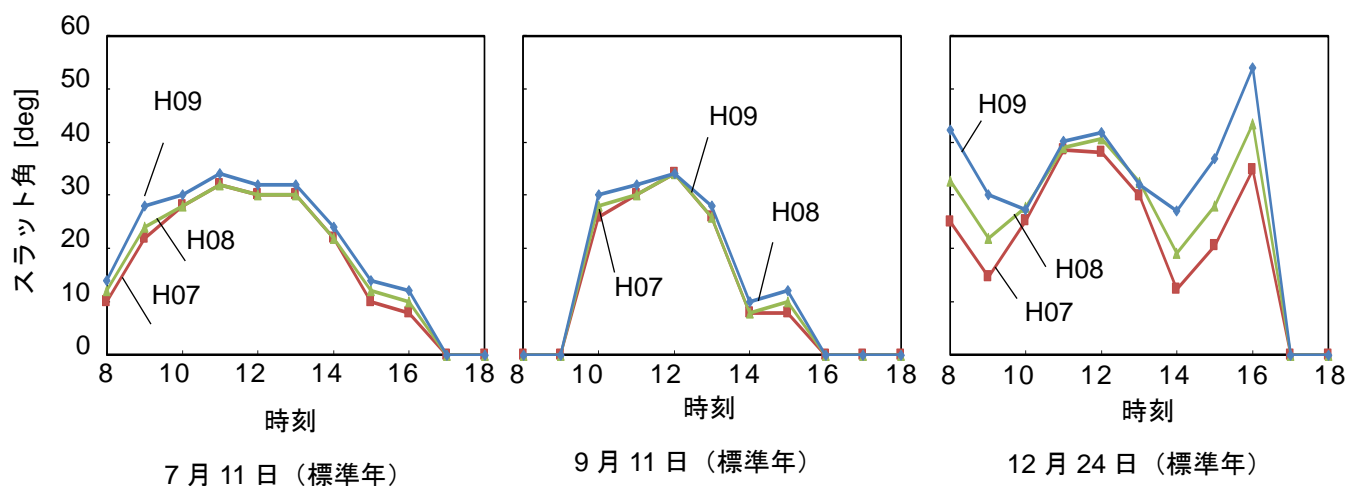


図 2.11 グレア抑制角の変化 (スラット反射率：高い)

2.7.2 曇天日における検討

曇天日では、図 2.11～図 2.13 に示すように最初のスラット角は 0[deg] (水平角) となる。しかし、グレア抑制のクローズドループはスラット角を 0[deg]以上にする必要がある可能性がある。いくつかのケースの例として、図 2.11 に曇天日の屋外照度 (直射日光照度 < 5000lx) の変化を示す。朝では、全天空照度が 20,000lx 以上となっている。図 2.12、図 2.13 に高い反射率と低い反射率のブラインドのグレア抑制制御角をそれぞれ示す。最初のスラット角は、つねに 0[deg]にも関わらず、グレア抑制角は 0～22[deg]の範囲にある。高い反射率のブラインドでは、不快グレアを抑制するためスラット角がより大きくなる。晴天日では、0.6 のスラット反射率とスラット幅・間隔比 s/w の影響は、0.85 のスラット反射率の条件より大きくなる。

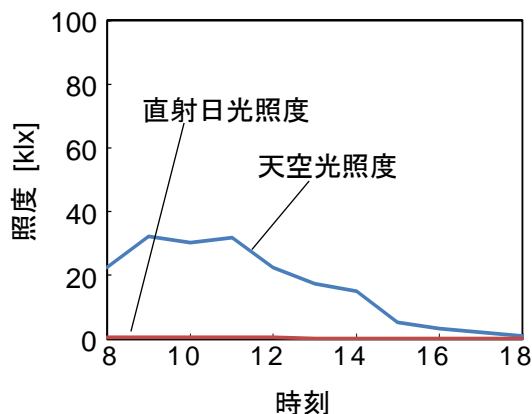


図 2.12 曇天日の屋外照度 6月29日(標準年)

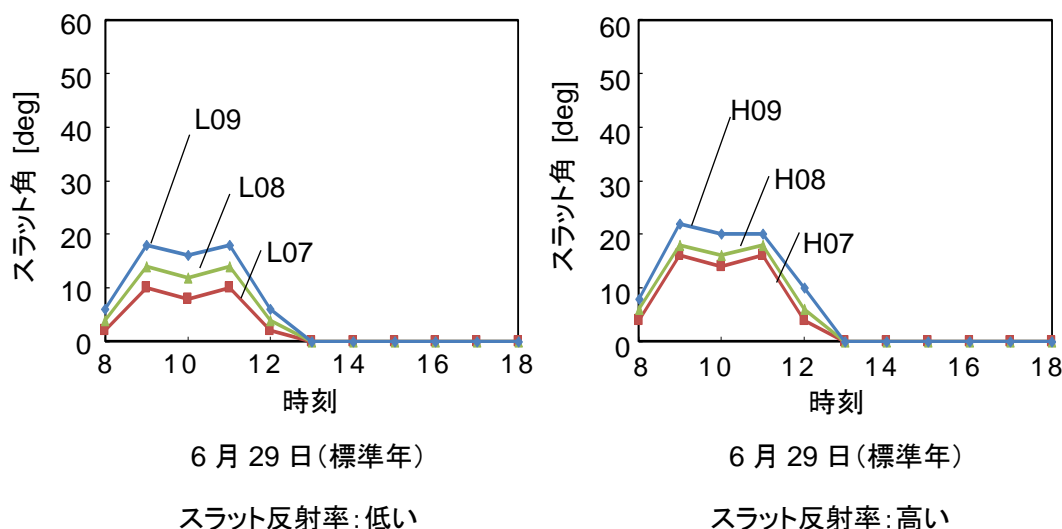


図 2.13 グレア抑制角の変化

2.7.3 照明用消費電力削減率の検証

図 2.8 に示す 3 日間において、人工照明の調光率 (100%=0 lm、0%=3200 lm) を計算した。照明器具の調光率の結果を図 2.14~図 2.17 に示す。L07 のブラインドでは、窓面から 4m に配置されている照明器具は、夏季の 10 時~14 時、中間季と冬季の 10 時~13 時では必要がなくなる。すべての照明器具の調光率は、冬季で 17 時以降、中間季で 18 時以降に 0% となる。すべての照明器具の調光率は、夏季では執務時間 (8 時~18 時) の間で 0% 以上となる。

スラット反射率とスラット幅・間隔比 s/w が調光率に与える影響を示すため、調光率と窓面からの距離の関係を図 2.18 と図 2.19 に示す。夏季と冬季の昼間において、より低い反射率とより小さい s/w では図 2.18 と図 2.19 に示すように調光率が高くなる (L07>L09>H07>H09)。しかし、早朝もしくは午後では、反射率が高く、 s/w が低くなるほど、図 2.20 に示すように調光率が高くなる (H07>L07>H09>L09)。

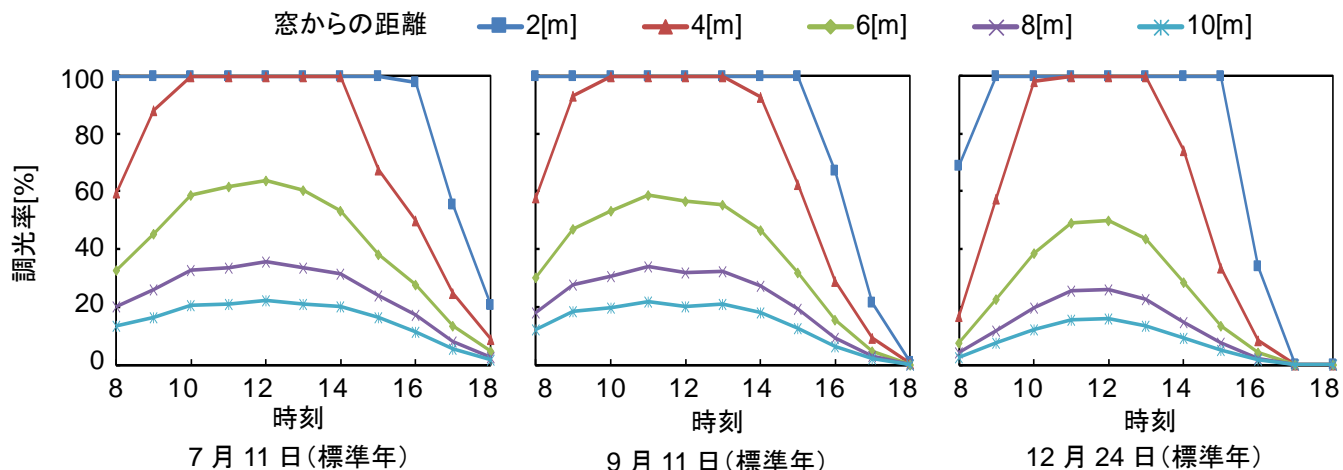


図 2.14 アンビエント照明の調光率(ブラインド条件: L07)

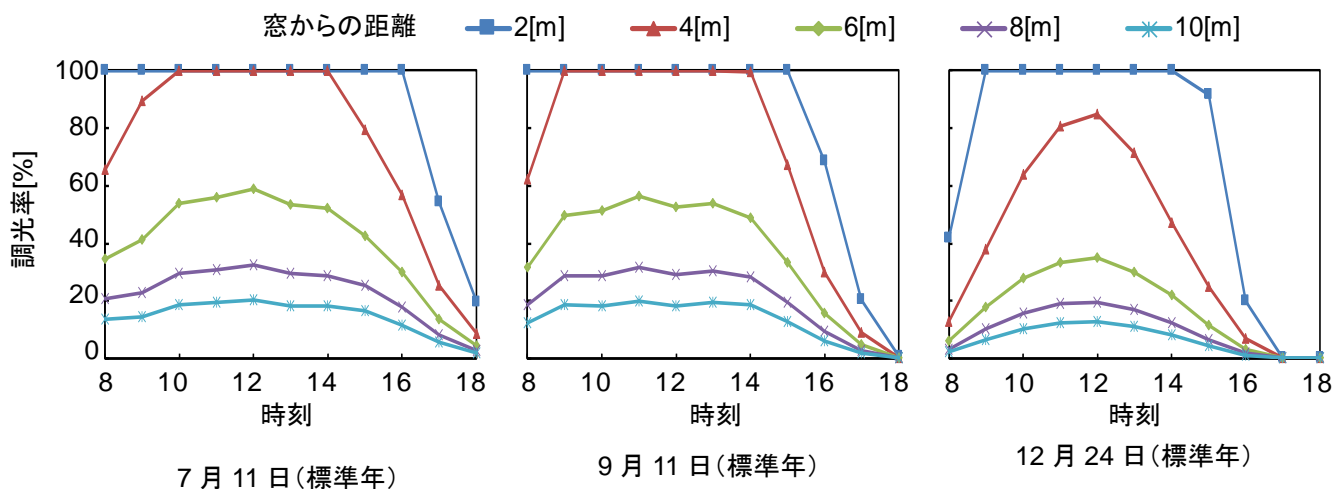


図 2.15 アンビエント照明の調光率 (ブラインド条件: L09)

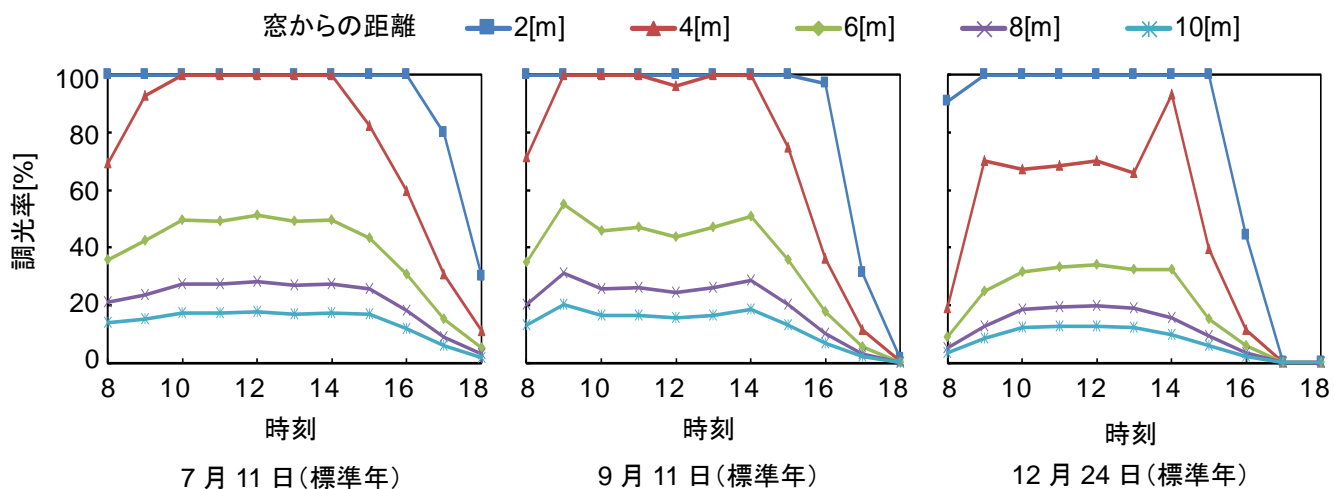


図 2.15 アンビエント照明の調光率 (ブラインド条件: H07)

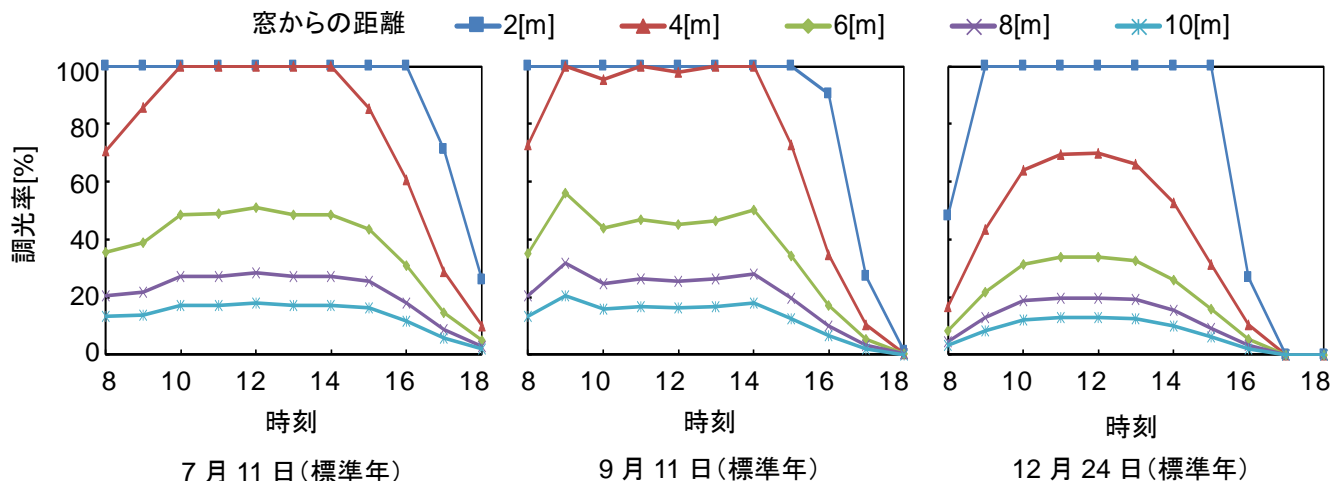
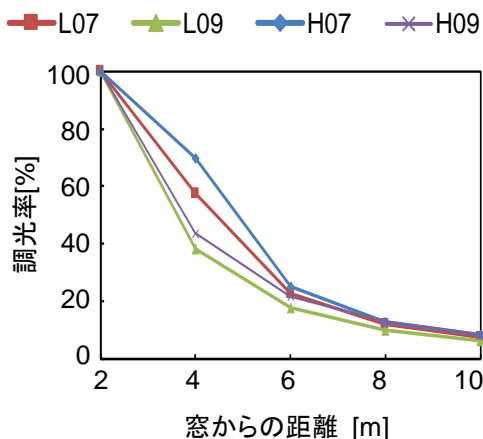
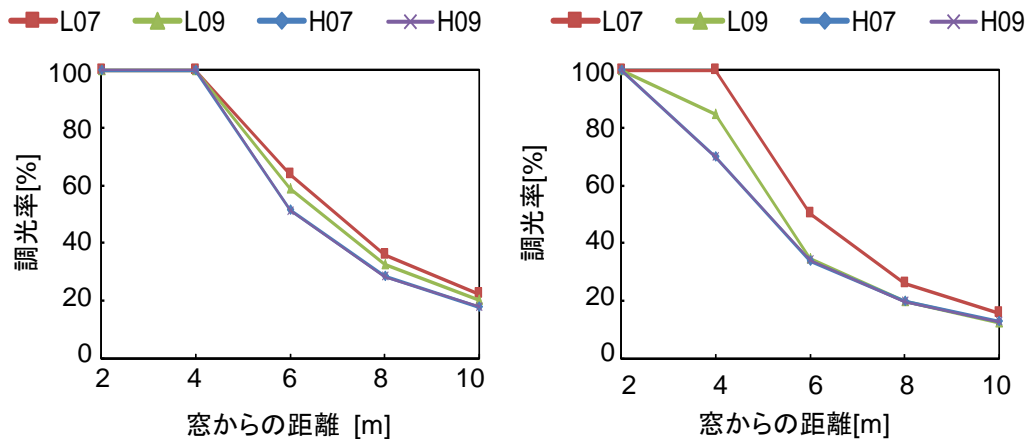


図 2.17 アンビエント照明の調光率 (ブラインド条件: H09)



月ごとの各位置の照明器具の調光率を図 2.21 と図 2.22 に示す。各月の全体の調光率を図 2.23 に示す。年間の照照明用電力削減率（調光率）は、L07 で 30.2%、L09 で 28.8%、H07 で 31.3%、H09 で 29.6% となった。反射率と s/w が年間の照明用消費電力に与える影響は小さい。6 月と 9 月の東京はそれぞれ、雨期であることと台風が多い時期であるため、照明用電力削減率が小さい。比較として、札幌（緯度 43°40'）における各月の照明用電力削減率を図 2.24 に示す。冬季では、東京よりも雪が降る。H09 のブラインドでは、年間の照明用電力削減率が 29.1% となった。スラット反射率と s/w が年間の照明用電力削減率に与える影響は、東京と同様の結果となった。スラット反射率が高く、s/w が小さい（H07）では、わずかに照明用電力削減率が大きくなった。

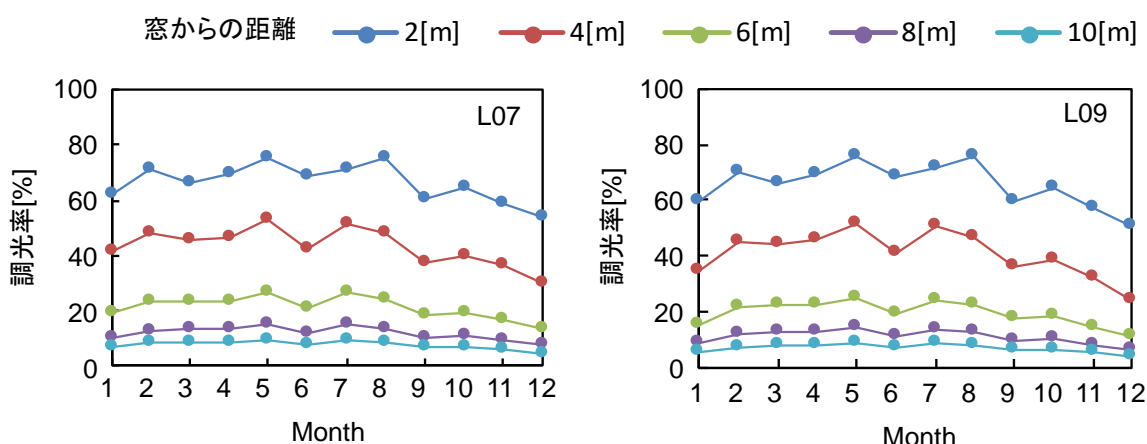


図 2.21 月ごとのアンビエント照明の調光率
(スラット反射率が低い場合)

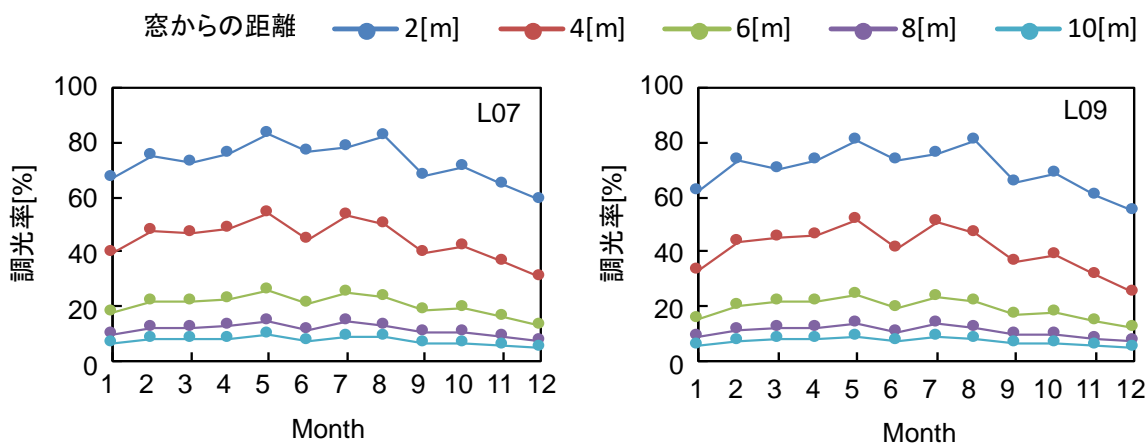


図 2.22 月ごとのアンビエント照明の調光率
(スラット反射率が高い場合)

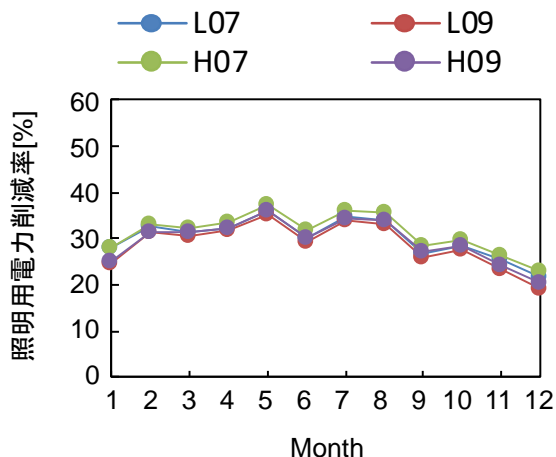


図 2.23 東京の月ごとの照明用電力削減率 (緯度 35°41' N)

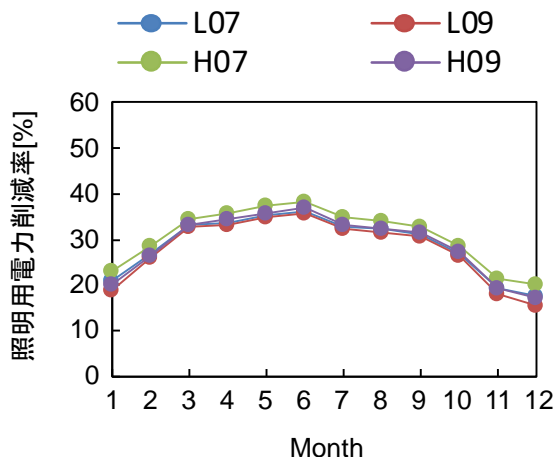


図 2.24 札幌の月ごとの照明用電力削減率 (緯度 41°4' N)

2.7.4 屋外眺望満足度の検証

まず、Wienold らが用いた計算方法¹⁶⁾で眺望性を計算した。ブラインドがない窓を通して見える屋外眺望の立体角に対するブラインドを設置した窓を通して見える屋外の立体角の割合を図 2.25 に示す。

直射日光遮蔽角で制御する場合、夏季の眺望割合は冬季よりも高くなる。しかし、グレア抑制制御の場合、春と秋の眺望割合は夏季または冬季よりも高くなる。本研究における季節の違いは、Wienold らの研究結果¹⁶⁾よりも低くなった。

低い反射率のブラインドにおける眺望割合は、反射率が高いブラインドの眺望割合よりも高い。0.6 と 0.85 の反射率の眺望割合の違いは小さいにもかかわらず、0.6 の反射率のブラインドは年間の眺望割合が 0.8 の反射率よりも高い結果となった。年間の眺望割合は、L07 のブラインドで 0.40、L09 のブラインドで 0.44、H07 のブラインドで 0.32、H09 のブラインドで 0.40 となった。

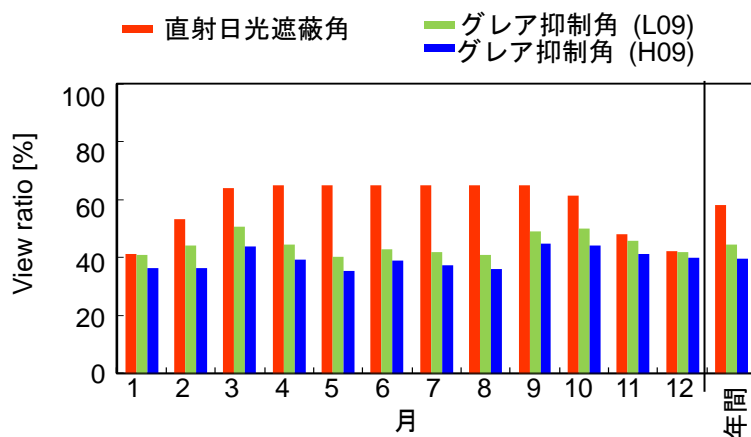


図 2.25 眺望率
=ブラインドがない窓を通して見える屋外眺望の立体角に対するブラインドを設置した窓を通して見える屋外の立体角の割合

さらに、伊藤らが提案した方法¹⁰を用いて、眺望満足度を計算した。図 2.26 に眺望満足度を示す。低い反射率のブラインドは高い反射率のブラインドよりも眺望満足度が高い。この結果は眺望率の結果と一致した。年間の眺望満足度は 46%~50%の範囲となった。

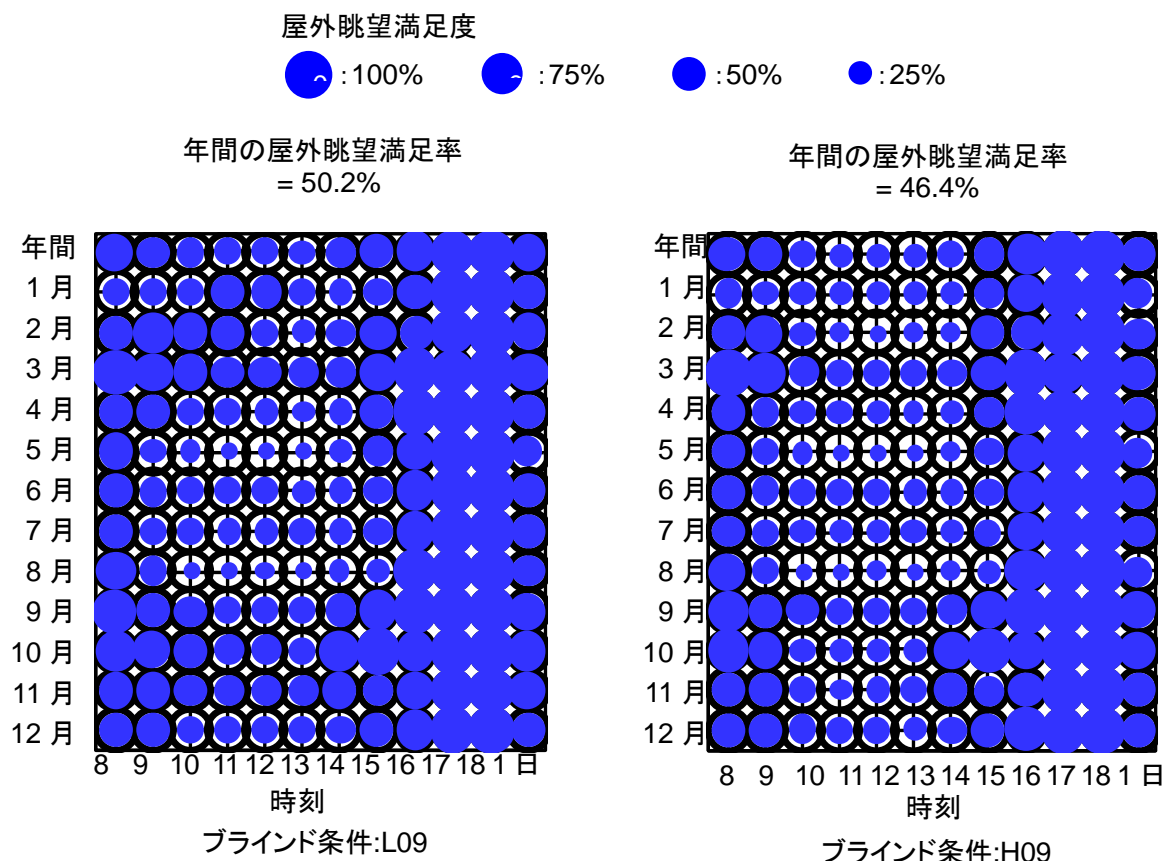


図 2.26 屋外眺望の満足度

眺める距離や、景観の内容、ブラインドの色や屋外景観の色が影響する屋外眺望の計算は、極端に困難である。そのため、今後の研究は遮蔽システムが眺望評価に与える影響について検討する必要がある。

2.8 結論

オープンオフィスにおいて、照明調光システムを連結させた自動ブラインド制御は、快適性の保持はもちろん、エネルギーの削減により効果的な手法の一つである。ブラインドを制御するとき、熱および光のエネルギーの削減、不快グレアの抑制、眺望の確保が重要となる。しかし、これらはトレードオフの関係にある。特にオープンプランのオフィスでは、グレアの抑制が優先される。直射日光遮蔽角制御ではグレアを防ぐには不十分であるため、本章ではグレア抑制に基づくスラット角の決定方法を示した。

“グレア抑制制御アルゴリズム”を述べるため、計算が簡易で且つ必要な入力情報が簡単に得られるグレア予測方法が必要となる。これまでにたくさんのグレア予測指標が提案されてきたが、多くの研究は不快グレアの被験者評価に基づく結果に矛盾が生じていた。そのため、制約や計算方法、必要な入力値について完全に理解していたため、本章では岩田らが提案した PGSV を用いた。

明白な光源の大きさや利用できるデータ、制御インターバルといった状況に応じて、適切なグレア評価指標を選択した。

ここではシミュレーションに関する研究について示したが、実運用のための制御アルゴリズムも提案した。このブラインド制御アルゴリズムは、執務者の在席検知のための IC タグを用いた実際のオフィスにおいて、すでに使用されている。計算の簡易化と入力データのための測定が、実際の運用をするには役に立つ。天井照明はブラインド制御アルゴリズムと屋外センサーからの情報を得る。そのため、室内センサーは不要となる。窓からの光を妨げるパーティションを使用したオフィスでは、この制御方法が適しているといえる。

グレア抑制に基づくスラット角は、直射日光遮蔽角よりもしばしば大きくなることを示した。しかし、東京の一般的なオープンプランオフィスでは、およそ 30%の照明用電力削減効果がみられた。眺望の満足度（屋外景観に対して執務者が満足できる勤務時間の割合）は 46%~50%となることも示した。

スラット反射率とスラット幅・間隔比 s/w が年間の照明用電力削減効果に与える影響は小さかった。屋外眺望については、スラット反射率が低く且つスラット幅・間隔比 s/w が大きいブラインドで眺望割合が高くなった。

本章で提案した不快グレア抑制に基づくオフィス空間のブラインド自動制御方法を、実際の建物に導入した場合には実運用上の様々な問題点が発生する可能性がある。そのため、実運用上の問題点として、「空間分割」および「時間分割」に焦点を当て、次章以降よりその問題点の解決に向けた検討を行う。

【第2章の参考文献】

- 1) Chan Y-C, Tzempelikos A. Efficient venetian blind control strategies considering daylight utilization and glare protection. *Sol Energy* 2013;98:241-54.
- 2) Wienold J, Frontini, F, Herkel, S, Mende, S, Climate based simulation of different shading device systems for comfort and energy demand,: Proceeding of IBPSA conference, 2011, 2680-2687
- 3) Chan Y-C, Tzempelikos A.A hybrid ray-tracing and radiosity method for calculating radiation transport and illuminance distribution in spaces with venetian blinds, *Energy Build.*2012; 46, 139-145
- 4) Perez R, Ineichen P, Maxwell, R.D, Seals R, Zelenka, A, Dynamic global to direct conversion models, *ASHRAE Transaction Research Series*,1992; 154-168.
- 5) Igawa,N, Koga, Y, Matsuzawa, T, Nakamura, H,Model of sky radiance distribution and sky luminance distribution, *Solar Energy*, 2004; 77(2),137-157
- 6) Taniguchi,T, Torie, Y, Sakuma, E, Kuramoto, Y, Suauki,M and Iwata, T. Comparison study on effect of slat shape and optical property of gradation blind on reduction of electric consumption for ambient lighting, *AIJ Journal of Technology and Design*, 22(50), 2016, DOI <http://doi.org/10.3130/aijt.22.159>
- 7) Shin, JY, Jeong, GY, Kim,JT, View types and luminance effects on discomfort glare assessment from windows, *Energy and Buildings*, 2012; 46,139-145
- 8) Konstantzos, I Chan, Y,C Seibold J,C, Tzempelikos, A, Proctor R, W, Protzman J. B, View clarity index: A new metric to evaluate clarity of view through window shades, *Build. Environ.* 2015;90, 206–214. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.005>
- 9) Nakamura, Y, Kobayashi, S, Inui, M, Kondo, T, Osawa, M, The interrelation between a window screen's ability to lower luminance and its ability to permit a clear view of outside scenery, *Journal of Architecture, Planning, Environmental Engineering*, Architectural Institute of Japan, 1996; 484, 9-16
- 10) Ito, D. and Iwata, T.:The effect of the ratio of blind slats luminance to outside luminance on occupants' satisfaction with a view through blinds, *Journal of Environmental Engineering*,

Architectural Institute of Japan, 2007; 622, 17-23.

- 11) Hu, J, Olbina, S, Illuminance-based slat angle selection model for automated control of split blinds, Build. Environ. 2011;46, 786–796. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.013>
- 12) Bakker, L.G., Hoes-van Oeffelen, E.C.M., Loonen, R.C.G.M., Hensen, J.L.M., User satisfaction and interaction with automated dynamic facades: a pilot study. Build. Environ. 2014;78, 44–52. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.007>

注1) 伊藤ら¹⁰⁾は、図 2-a1 に示すような画像をディスプレイに写し、ブラインドを通して見た屋外景観を評価する被験者実験を行っている。実験には 20 名の被験者が参加し、被験者はスラット角を 5 度ずつ変化させ、許容できる限界のスラット角を申告させた。図 2-a1 で使用した実験の結果が図 2-2a、式(2-1a)である。



図 2-1a 伊藤らが使用した屋外景観画像¹⁰⁾

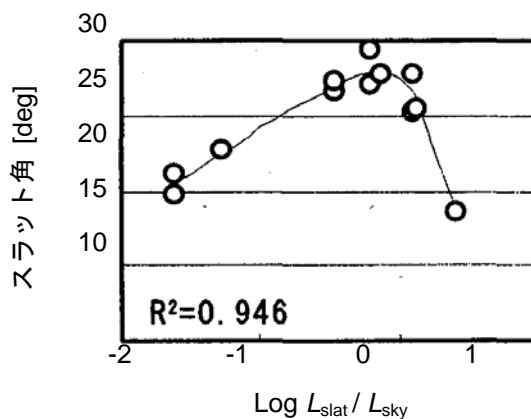


図 2-2a 伊藤らの実験結果と回帰曲線¹⁰⁾

$$y=y_0+A \times (1 / (1 + \exp(-(x-x_c+w_1/2) / w_2))) \times (1 - 1 / (1 + \exp(-(x-x_c-w_1/2) / w_3))) \quad (2-1a)$$

$$y_0=15.3027, x_c=0.4446, A=15.6165, w_1=1.4476, w_2=0.6319, w_3=0.1237$$

y:許容できる限界のスラット角[deg], x:log L_{slat} / L_{sky}

第3章 ブラインドのゾーン制御の提案

3.1 はじめに

前章では、不快グレア予測指標 PGSV に基づく自動ブラインド制御の実用的アルゴリズムを提案した。提案したアルゴリズムは、窓面情報、屋外照度、日時、執務者の在席位置分布、屋外周辺情報などを入力情報として、不快グレア予測指標を計算し、不快グレアが許容される最小スラット角に制御するものである。執務者の在席位置分布、屋外周辺情報を組み込んだことで効率のよい制御を可能にしている。これにより、過剰なオフセット角をなくし、窓面からの不快グレアを抑制することで、自然光利用と眺望確保に寄与することを第2章では示した。

一方、近年、日本では広いスペースに柔軟性を持たせたオープンプランオフィスを含む大空間オフィスを採用する企業が増加している¹⁾。大空間オフィスでは、執務者の様々な在席分布が予想される。このような大空間オフィスにおいてブラインドを一括で制御する場合、執務者の不在箇所も制御対象となるため、必要以上にブラインドが閉まり、室内全体の明るさを確保できない恐れがある。実際のオフィスにおいても、ブラインドの制御範囲すなわち「空間分割」に関する問題により、執務者の光環境に対する満足度が得られなかったことが報告されている²⁾。

そこで、大空間オフィスである0社技術研究所本館のワークスペースを一例に取り上げ、ICタグを用いた在席検知システムによる在席検知システムを用いたブラインドのゾーニング方法を開発することにした。本章では、在席分布検出可能な大空間オフィスにおけるブラインドのゾーン制御の開発を目的に、執務者の在席位置によるグレア感への影響を検討した。

3.2 大空間オフィスの屋光利用の概要

本研究の対象建物である0社技術研究所本館ワークスペースは、2層吹き抜けのワンボックス型のオフィスで約200名の研究員が業務を行っている。ワークスペース内部を図3.1に、ワークスペース断面図を図3.2に、対象建物および窓周辺の概要を表3.1に示す。ワークスペースの天井には、傾斜屋根と北向きのハイサイドライトを全面的に設置し、安定した天空光を天井反射面に拡散反射させ室内に導入している。図3.3に示すように、南側にはけやき並木（常緑樹）への眺望を重視し、東西方向に90mの大きな側窓を設けている。この南面窓には水平庇と垂直フィンおよび自動制御ブラインドによって直射日光を遮蔽しつつ採光を図っている。図3.4に窓と庇、外部ルーバーと街路樹の様子を示す。

自動ブラインドが85台設置され、著者らが提案したPGSV制御²⁾が導入されている³⁾。屋外照度と表1の建物条件から、窓面から一番近い座席（窓面から5.5m）のPGSVを算出し、許容値以下になるようにオフセット角を加え制御される。自動ブラインドの制御に利用する屋外照度は、技術研究所本館の屋上にある太陽追尾型屋外照度センサーによりグローバル照度および直射日光照度を1分毎に測定している。



図 3.1 ワークスペース内部

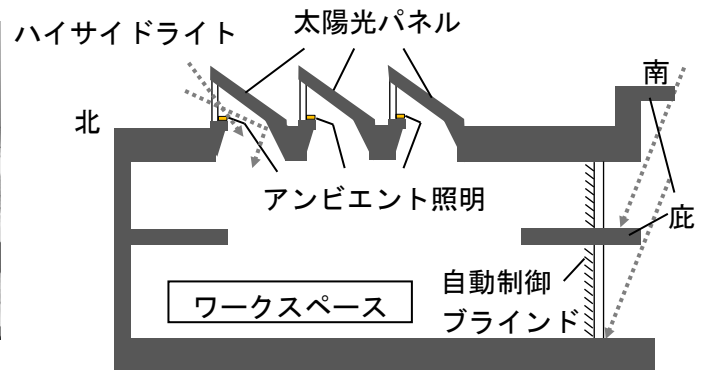


図 3.2 ワークスペースにおける昼光利用の概要

表 3.1 対象建物および窓周辺概要

| | | |
|------------|----------------------|----------------------|
| 緯度, 経度 | | N35°41', E139°46' |
| 窓面方位 | | -27°19'48" |
| 街路樹 | 窓面からの距離, 高さ 平均反射率 | 33m, GL+12.2m 0.2 |
| 庇 | 長さ, 高さ, 平均反射率 | 2.0m, FL+3.3m, 0.1 |
| 地表面平均反射率 | | 0.1 |
| 床面から窓上端の高さ | | 3.6m |
| ブラインド | スラット幅, スラット間隔 | 35 mm, 30 mm |
| | 反射率 | 0.7 |



図 3.3 対象建物と街路樹



図 3.4 窓と庇, 外部ルーバーと街路樹

3.3 数値計算による窓と座席位置に関する基礎検討

大空間におけるブラインド制御では、在室者の位置、視線方向とブラインドの制御幅（ゾーン）等の問題がある。これについて、既往のグレア評価式で数値上の基礎検討を行う。

昼光による不快グレアには、DGP (Daylight Glare Probability) ^{4)注1)} や PGSV (Predicted Glare Sensation Vote)、などの評価方法がある。DGP の算出には修正立体角 Ω ⁵⁾、PGSV には立体角が用いられる。本稿では、DGP と PGSV を用いて検討を行う。

3.3.1 では均等拡散の一樣輝度の窓を仮定した窓の大きさと視線方向の検討、3.3.2 ではスラットと外部輝度を分離した検討、3.3.3 ではブラインド制御幅ごとのグレア評価の検討を行った。

注1) Daylight Glare Probability (DGP) ⁴⁾はカメラシステムで自動的にグレア検出を行うために提案された式である。不快グレアによって引き起こされる不満者率を示し、目の位置の鉛直面照度 E_v 、光源輝度 L_s 、光源の立体角 ω_s 、ポジションインデックス P ⁴⁾から求められる。ポジションインデックス P は修正立体角 Ω ³⁾との光源の立体角から与えられる。

$$DGP = C_1 E_v + C_2 \log \left(1 + \sum \frac{L_{si}^2 \omega_{si}}{E_v C_4 P_i^2} \right) + C_3$$

$$C_1 = 5.87 \times 10^{-5} \quad C_2 = 9.18 \times 10^{-2} \quad C_3 = 0.16 \quad C_4 = 1.87$$

E_v : 目の位置の鉛直面照度[lx], L_s : 光源輝度[lx], ω_s : 光源の立体角[sr],

P : ポジションインデックス[-]

$$\ln P = (35.2 - 0.31889\gamma - 1.22 \exp(-2\gamma/9)) \times 10^{-3} \sigma + (21 + 0.26667\gamma - 0.002963\gamma^3) \times 10^{-5} \sigma^2$$

P : ポジションインデックス[-],

$\gamma = \tan^{-1}(x/y)$ [deg] (x, y : 視点位置と光源の間の水平、鉛直方向の距離),

σ : 視線と光源の間の角度[deg]

$$\Omega = \sum \frac{\omega_{si}}{P_i^2}$$

Ω : 光源の修正立体角[sr], ω_s : 光源の立体角[sr], P : ポジションインデックス[-]

3.3.1 窓幅と視線方向の検討

3.3.1.1 窓幅の影響

図 3.5 に示す条件で、窓幅水平角に対する修正立体角および立体角を検討した。図 3.6 に窓幅水平角と修正立体角および立体角を示す。立体角への影響立体角は修正立体角より大きくなった。窓幅水平角が 90[deg]以上になると、修正立体角と立体角の値は変化しなくなる。窓からの距離ごとの窓立体角を検討した。計算結果を図 3.7 に示す。窓高さが変わらないため、窓に近いほど窓の立体角は大きい。

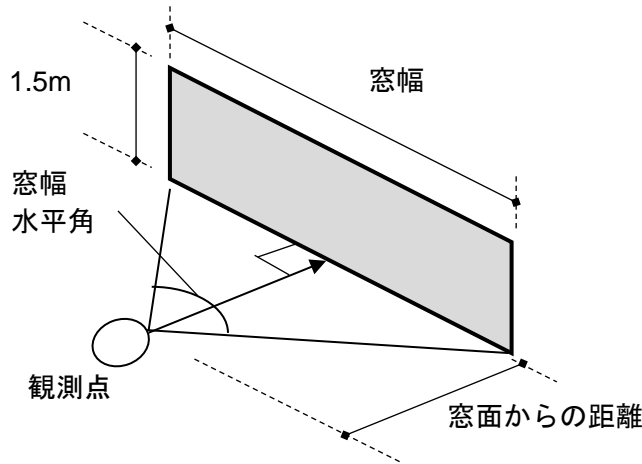


図 3.5 窓幅と観測点と水平視野角

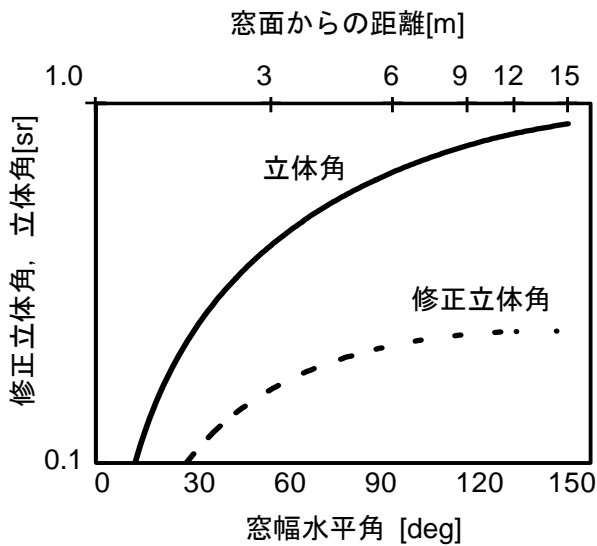


図 3.6 窓幅水平角の影響

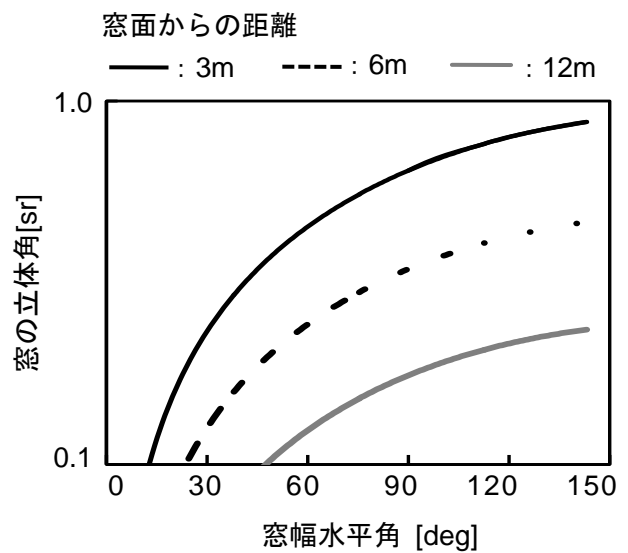


図 3.7 座席位置ごとの窓の立体角

3.3.1.2 視線方向の影響

視線方向の影響を検討するため、図 3.8 に示す 2 条件で窓面の修正立体角、立体角を算出した。条件①は窓面の視点を変えず観測位置を変え、条件②は条件①と反対に、観測点を変えず視点を変えた。

各条件での視野角の影響を図 3.9、図 3.10 に示す。条件①では、視野角 0[deg]のときがどちらの値も最大となり、視野角の増加に対し、視野角が大きくなるほど修正立体角と立体角は減少している。図 3.10 に示すように、条件②では立体角は一定値で変化せず、修正立体角は視野角 35[deg]付近でピークに達し、それ以降は減少する。

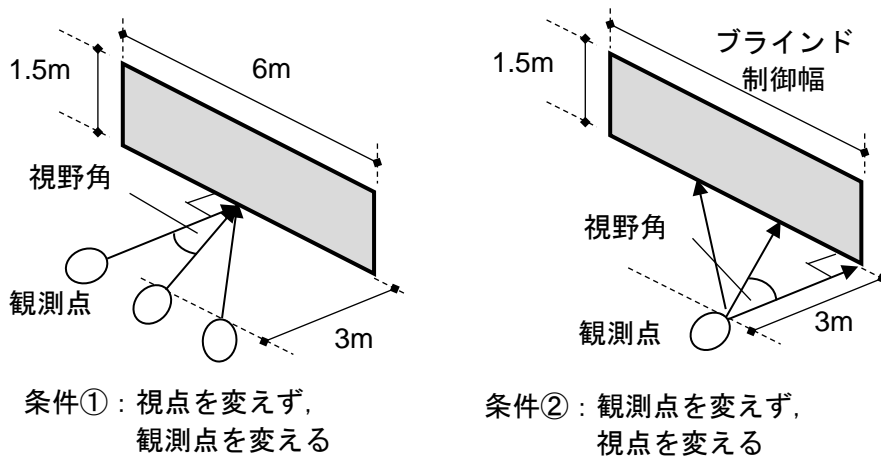


図 3.8 視線方向の影響の検討条件(条件①, ②)

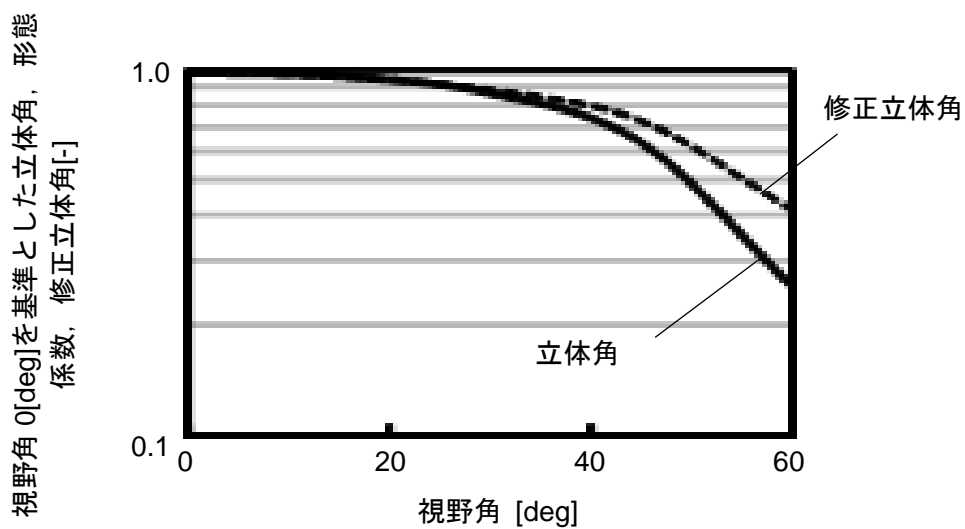


図 3.9 条件①における視野角の影響

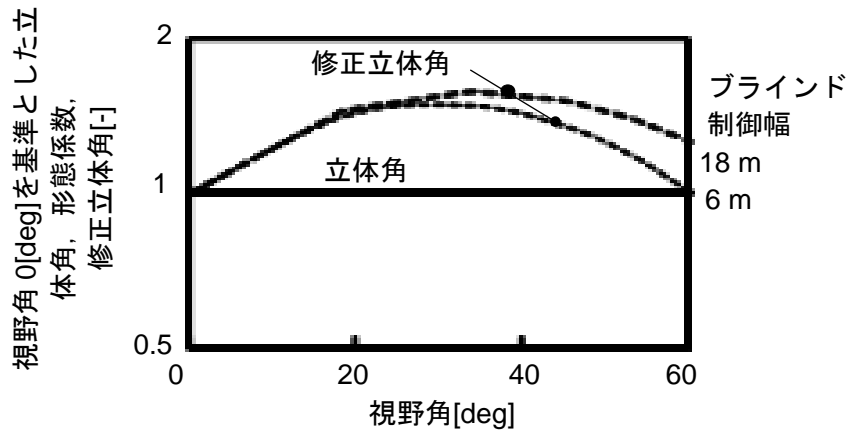


図 3.10 条件②における視野角の影響

3.3.2 窓面からの距離が屋外景観に与える影響

窓面からの距離によってブラインドスラットとスラット間から見える景観割合が異なる。表 3.1 に示す条件で窓面からの距離とスラットの間からの見える景観の立体角割合との関係を検討した。結果を図 3.11 に示す。スラットの間から見える窓外の立体角割合は、窓面から距離が遠いほど増加する。太陽高度が高い夏季は、スラット輝度が天空輝度より低くなり、窓外に対向建物などが無い場合、窓面平均輝度は窓面から遠ざかるほど増加し、グレアが高くなる。反対に冬季では、スラット面の輝度が高くなるため窓面に近いほどグレアが高くなり、スラットを閉めてもグレアを抑えることが難しくなる。

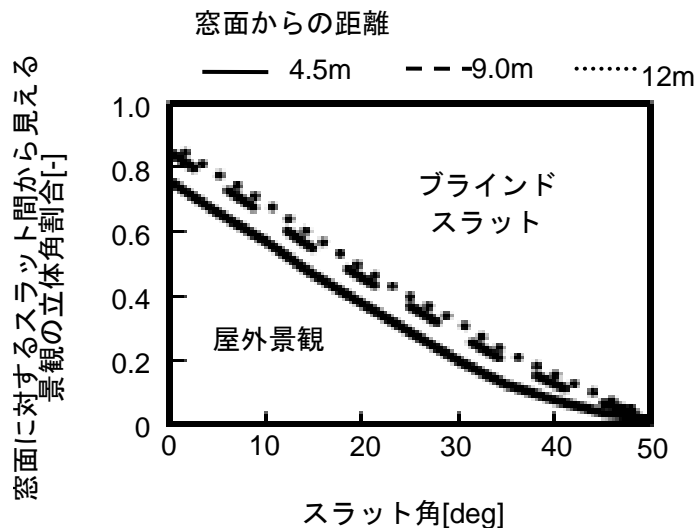


図 3.11 窓面に対するスラット間からの景観の立体角割合と窓面からの距離

3.3.3 ブラインド制御ゾーンによるグレア感への影響

3.3.1.2 の「視線方向の影響」で算出した修正立体角と立体角を用いてブラインド制御ゾーンがグレア感に与える影響を検討した。計算地点は東京で、日時は春分の正午、屋外照度が直射日光照度 60000lx、天空光照度 25000lx とした。観測位置は窓面からの距離 3m、床から高さ 1.1m、視野角 0[deg]とし、天井面反射率 0.7、床面反射率 0.1 として計算した。ブラインド制御は全体が 30m でゾーン制御（制御幅 6m、水平角 90[deg]）と一括制御（制御幅 3m、水平角 157[deg]）の 2 条件とした。

計算結果を図 3.12、図 3.13 に示す。ゾーン制御時の DGP は、スラットを倒すほど一括制御時よりもグレア感が高くなった。これに対し、PGSV ではスラットを倒すほど一括制御時の方がグレア感が高くなった。一括制御は目線の位置の鉛直面照度が下がるため DGP は低くなり、PGSV では目線の位置の鉛直面照度が下がると背景輝度が増加するため、一括制御の方がゾーン制御よりもグレア予測値が高くなったと考えられる。一括制御とゾーン制御の DGP および PGSV の差は小さく、視野角が約 90[deg]となる範囲を 1 つのゾーンとしたゾーン制御が可能であることが示唆される。

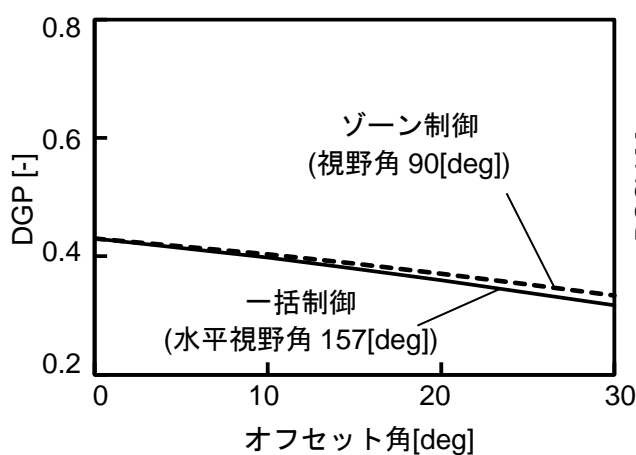


図 3.12 制御ごとの DGP
(直射日光遮蔽角 0[deg])

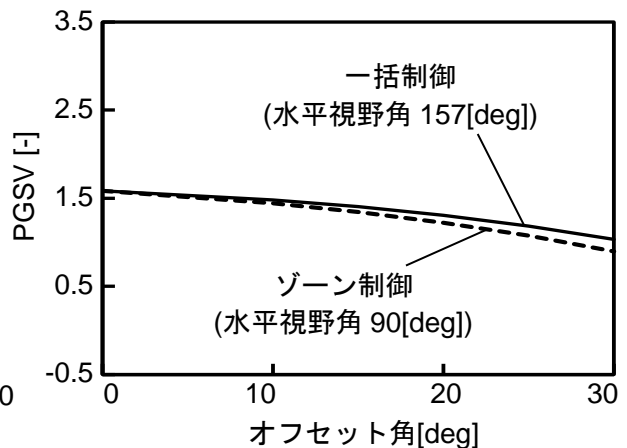


図 3.13 制御ごとの PGSV
(直射日光遮蔽角 0[deg])

3.4 ブラインドゾーン制御検証実験

3.4.1 実験方法

〇 社技術研究所本館ワークスペースにおいて、2011年11月26日に執務者による被験者実験を行った。

3.4.1.1 実験条件

実験時のブラインド制御条件を表 3.2 に示す。(I)一括制御（直射日射遮蔽角）、(II)7m ゾーン（ブラインド面からの距離が 5.5m の位置で水平視角 104[deg]）制御、(III)14m ゾーン（同位置で水平視角 107[deg]）制御、(IV)一括制御（直射日射遮蔽角+オフセット角）の 4 条件で、オフセット角は 24[deg] とした。視野角によるグレア感への影響を確認するため、対象建物ワークスペースで予備の被験者実験を行った。窓に対して視線方向が垂直（視野角 0[deg]）となる場合と視野角 45[deg] となる場合のグレア感を比較した。その結果、114 条件中 107 条件で窓に対して視線方向が垂直（視野角 0[deg]）の場合のグレアがより高くなった。そのため、本研究では被験者は座席位置正面の窓面を評価した。平面図と被験者評価位置を図 3.14 に示す。被験者のグレア評価は室内の東側、西側それぞれ窓からの距離 5.5m、12m の計 8 カ所で行った。

表 3.2 ブラインド制御方法

| No. | 制御方法 | | スラット角 |
|-------|--------------|----------|---------------------------------------|
| (I) | 一括制御（全ブラインド） | | 直射日光遮蔽角 |
| (II) | ゾーン制御 | ゾーン幅:7m | ゾーン部：直射日光遮蔽角 + オフセット角 他：直射日光遮蔽角 |
| (III) | | ゾーン幅:14m | |
| (IV) | 一括制御（全ブラインド） | | 直射日光遮蔽角 + オフセット角 |

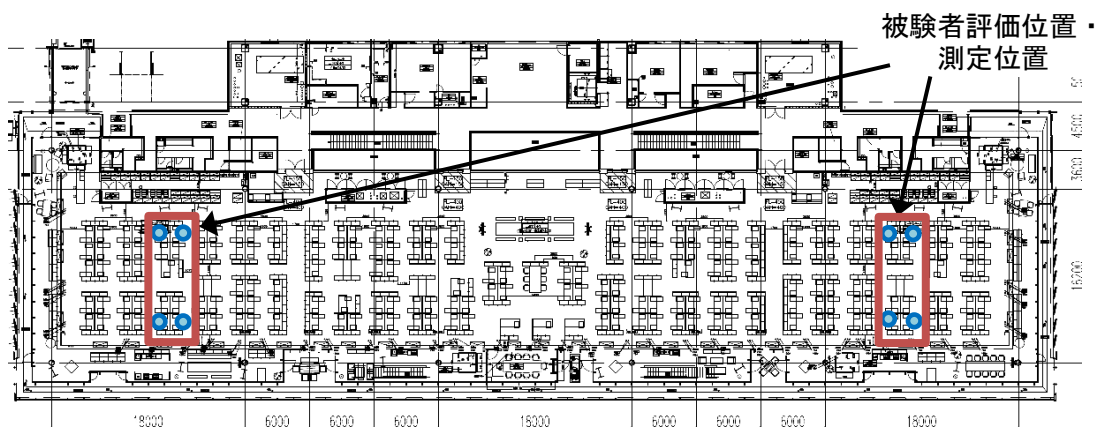


図 3.14 平面図と被験者評価位置

3.4.1.2 測定項目

対象建物の屋上でシャドウバンド (KIPP&ZONEN、CM121) を用いて、屋外照度 (グローバル照度、天空光照度) を測定した。執務室では、視野内輝度分布と机上面照度の測定を行った。輝度分布は、各評価位置で窓面方向に高さ FL+1.1m の位置で、魚眼レンズつき CCD カメラ (Nikon D40x、coolpix5000) により測定した。机上面照度は各机のパーティション上 (FL+1.1m) で照度計 (KONICA MINOLTA、T-10) を用いて測定した。実験には執務者 8 名 (年齢 25~30 歳) が被験者として参加した。

3.4.1.2 実験手順

図 3.15、図 3.16 に実験手順を示す。9 時から開始し日没 (16 時半頃) まで全 8 セットとした。被験者は机上面で 3 分間作業を行い、机上面の照度に目を順応させる。実験者の合図で顔をあげ、窓面を 10 秒間見た後グレア感評価を行う。グレア感評価には GSV スケールを使用した。評価と同時に、輝度分布画像の撮影を行い、移動前に机上面照度、被験者の目線高さ鉛直面照度の測定を行う。同様の作業を各測定・評価位置で行う。実験の様子を図 3.17 に示す。

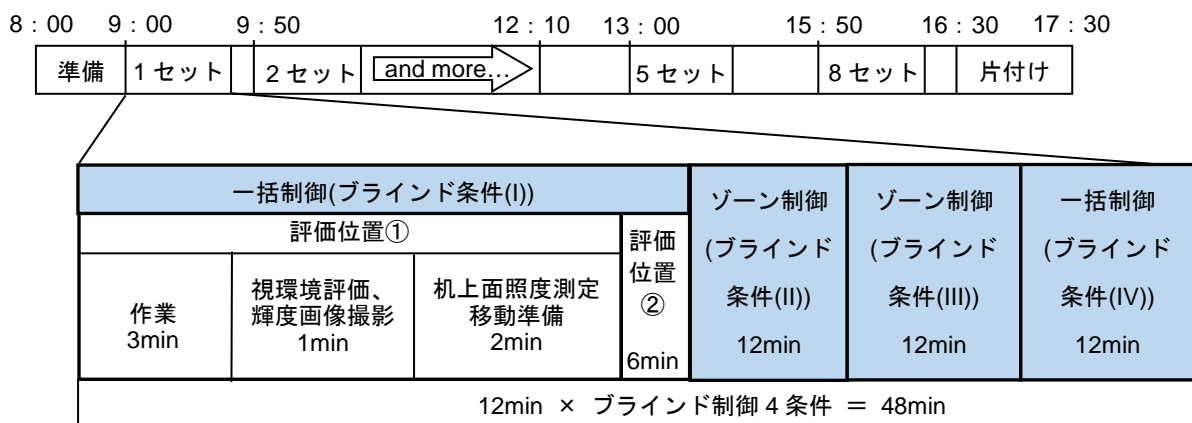


図 3.15 測定・評価の流れ (評価位置は図 3.16 参照)

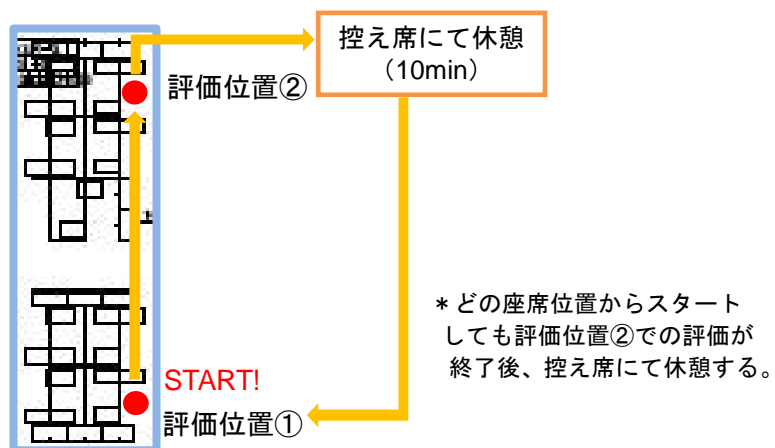


図 3.16 被験者評価位置の移動の流れ



照度計設置



VDT 作業を行う被験者

図 3.17 実験風景

3.4.2 実験結果

3.4.2.1 視野内輝度分布

図 3.18 に水平面直射日光照度と水平面天空光照度を示す。天候は実験時間中を通して晴天であった。図 3.19 に輝度分布画像の一例として、東側 5.5m の 12 時の測定結果を示す。輝度分布画像の窓面内の低輝度部分はスラット間から見える街路樹であるが、窓面内に占める割合が大きいことがわかる。

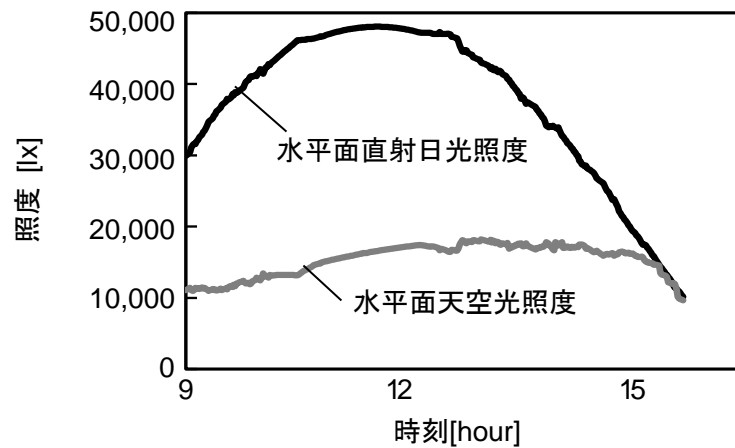


図 3.18 屋外照度

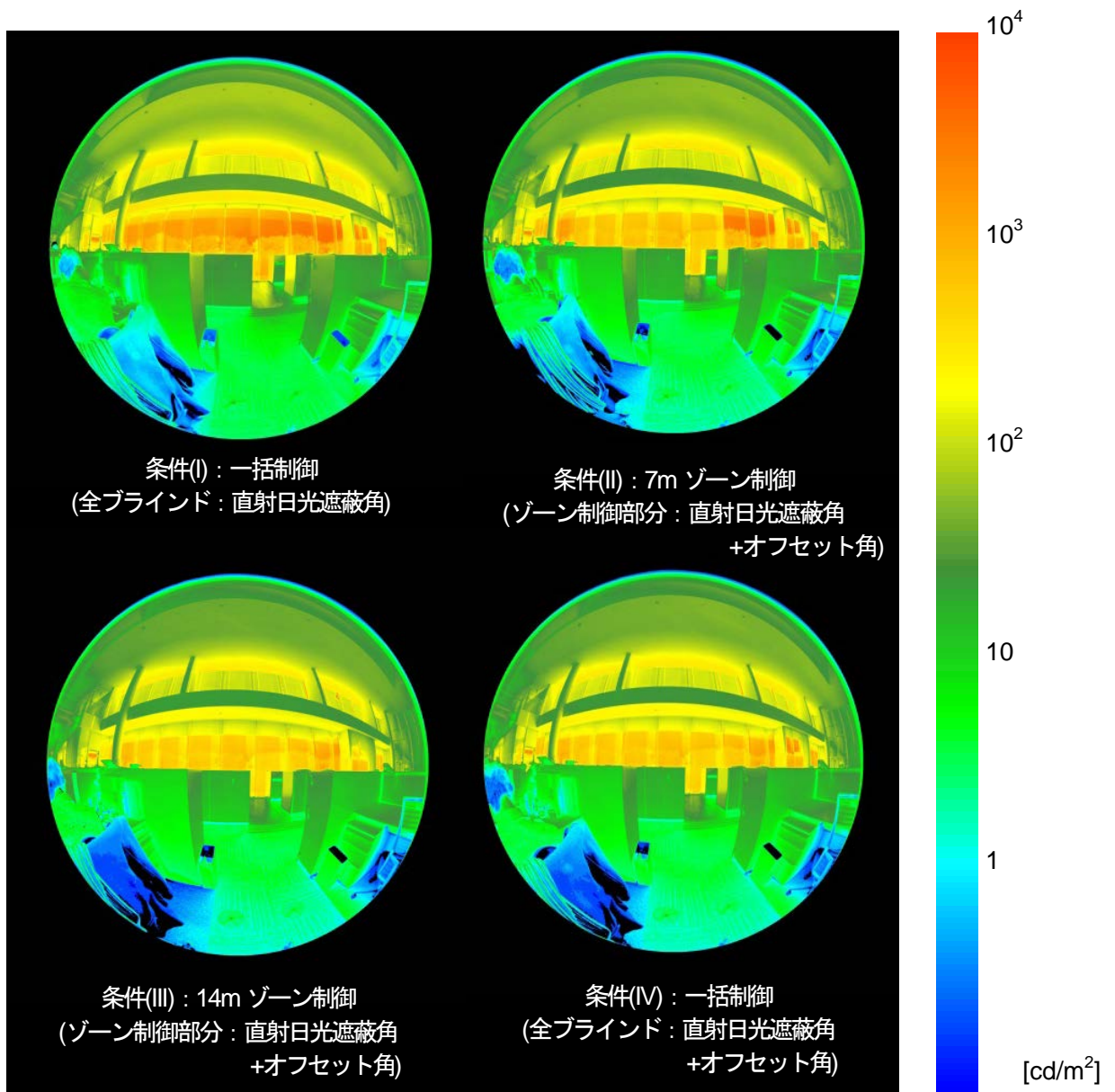


図 3.19 制御ごとの視野内輝度分布 (東側, 窓面から 5.5m)

3.4.2.2 グレア感評価

西側 5.5m における申告値の中央値を図 3.20 に示す。屋外照度が高くなった 11 時で、一括制御 (I) 時で 1.2 以上となった。太陽高度が低く晴天日であったため、窓面に直射日光が照射し、グレア感が高くなると予想されたが、庇の影と街路樹が窓面内に占める割合が大きいため、1 日を通してグレア感申告値は低い値となった。

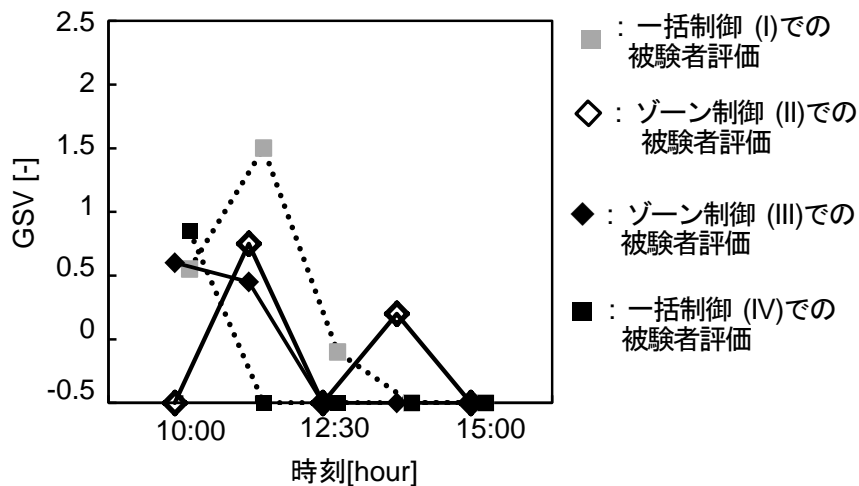


図 3.20 グレア感評価 (西側, 5.5m)

3.4.2.3 評価位置の影響

評価位置と制御方法がグレア感に与える影響について一元配置分散分析を行った。評価位置が被験者の申告値に与える影響について図 3.21 に示す。評価位置が窓面から遠い方が、グレア感申告値が有意に低くなり、PGSV 計算結果と一致した。

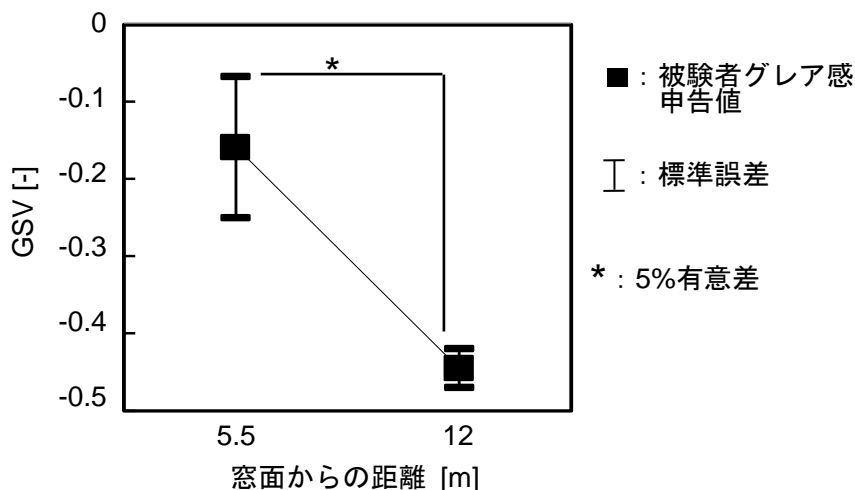


図 3.21 評価位置によるグレア感への影響

3.4.2.4 制御方法とグレア感申告値の関係

ブラインド制御方法と被験者の申告値における分散分析の結果を表 3.3 に示す。その一例を図 3.22 に示す。直射日光遮蔽角による一括制御 (I) と 7m ゾーン制御 (II) の場合、他の制御よりもグレア感申告値が高くなった。東側、西側どちらにおいても一括制御(日射遮蔽角+オフセット角制御) (IV) と 14m ゾーン制御 (III) には有意な差が見られなかった。この結果から、ゾーン制御をする場合、ブラインド制御幅が 14m ならば可能であることが示された。

表 3.3 制御方法とグレア感申告値の分散分析表

| 座席位置 | 制御方法 | グレア感申告値 | |
|------------|------|---------|---------------|
| | | 差 | P 値 |
| 東側 5.5m | (IV) | (I) | 0.870 0.000** |
| | | (II) | 0.230 0.009** |
| | | (III) | 0.005 0.954 |
| 東側 12m | (IV) | (I) | 0.315 0.000** |
| | | (II) | 0.023 0.796 |
| | | (III) | 0.003 0.977 |
| 西側 5.5m | (IV) | (I) | 0.407 0.028* |
| | | (II) | 0.100 0.584 |
| | | (III) | 0.200 0.274 |
| 西側 12m | (IV) | (I) | 0.385 0.037* |
| | | (II) | 0.019 0.919 |
| | | (III) | 0.099 0.589 |

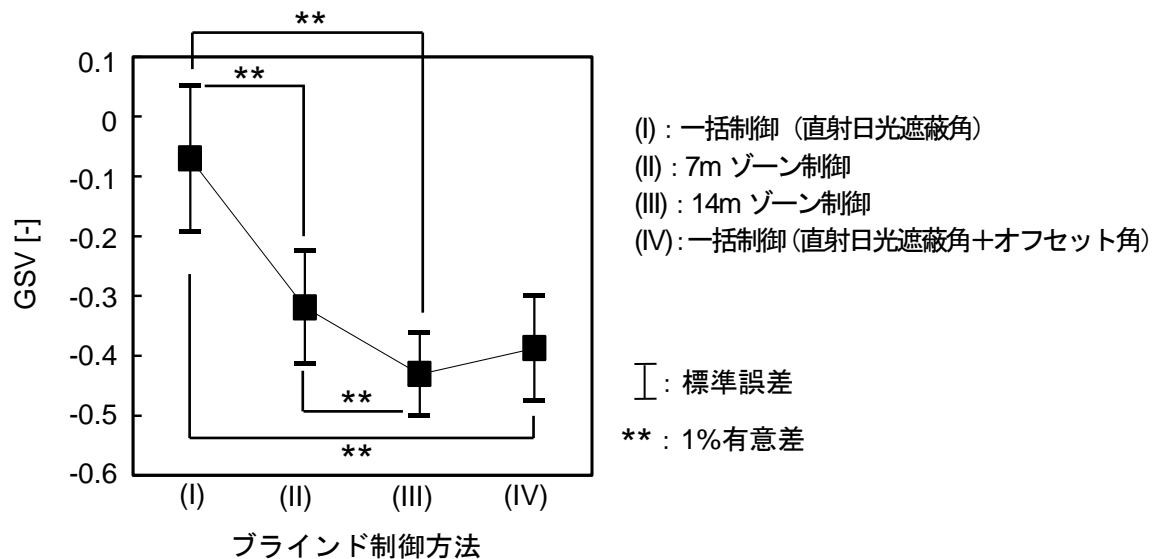


図 3.22 制御方法と申告値との関係 (東側,窓面からの 12m)

3.5 ブラインドゾーン制御方法の提案

ゾーン制御を組み込んだブラインド制御システムの概略を図 3.23 に示す。IC タグを用いた在席検知システムにより、執務者の在席位置を検知し、輝度計算対象点と制御すべきブラインドのゾーン位置を決定する。3.3 の数値計算による検討結果と 3.4 の実験結果より、本建物ではブラインドの制御ゾーン幅 14m を適用することとした。執務者在席位置である輝度計算対象点とブラインドゾーン位置および幅から、PGSV を計算する。直射日光遮蔽角に PGSV が許容値以下になるまでオフセット角を加えていき、対象ゾーンのスラット角を決定する。その他のゾーンについては、在席者のグレアを考慮せず、スラット角を直射日光遮蔽角に制御する。

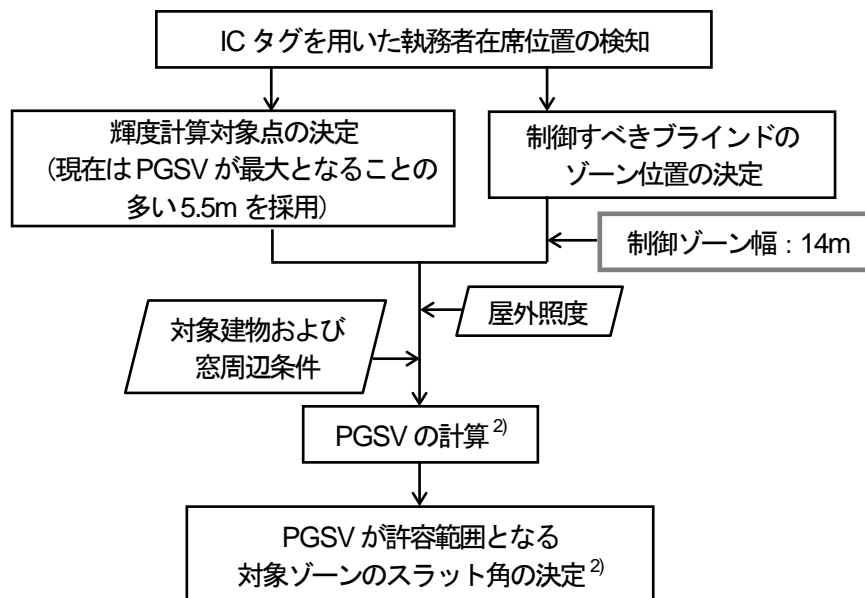


図 3.23 本研究で提案したブラインドゾーン制御を組み込んだスラット角制御システム

3.6 結論

本章では、様々な在席分布が予想される大空間オフィスにおいて、第2章で提案した視的快適性に基づく自動制御ブラインドの実用的アルゴリズムを導入した時に発生する問題点の一つである「空間の分割」に着目した。この問題点を解消するため、数値計算および実空間における被験者実験により検討を行い、大空間オフィスにおける在席検知システムを用いたブラインドのゾーン制御を提案した。

ゾーン制御を提案するにあたり、本章では数値計算および被験者実験を行い、(1) 窓面からの距離、(2) 視野角、(3) ブラインド制御幅の3つの要素による不快グレアへの影響を明らかにし、以下の知見を得た。

- (1) 窓に近い席でその他の窓から遠い席よりもグレア感が高くなることを確認した。
- (2) 視線方向が窓面に対して垂直であるとき、グレア感が最も高くなることを確認した。
- (3) ブラインドのゾーニング幅を水平角 $100[\text{deg}]$ 以上にするとき、ゾーン制御は一括制御よりも不快グレアを抑制できることを示し、眺望の確保に寄与できることを示した。

本章で提案した在席検知システムを用いたブラインドゾーン制御システムは、グレア源となる不快グレア抑制制御が必要なブラインドのみを制御することを可能にした。上記にも述べた通り、大空間オフィスでは様々な在席位置分布が予想されるが、それに伴い、窓および窓以外の輝度分布が各座席位置によって異なることが多い。そのような場合には、まず制御ゾーンごとにもっともグレアが感じられる位置に計算位置（グレア感予測位置）を設定し、その位置から見た窓を含む視野内輝度分布の構成要素を抽出する。そして、抽出した構成要素をブラインド制御アルゴリズムに設定することで、各制御ゾーンでの詳細なグレア抑制制御が実現できる。これは各制御ゾーンの制御位置ごとにキャリブレーションを行うことを意味し、多少面倒であると捉えられ実際のオフィスに導入することが困難なのではとも考えられる。しかしそれは、そのオフィス空間が求めている室内環境に合わせてキャリブレーションの精度を決定することで解消されると著者は考えている。詳細な制御を行うことでより良い視的快適性を確保するか、初期のキャリブレーションを簡易に行い、ある程度の性能を確保する程度で収まるかを、様々なグレードを実際の制御導入時に選択できることが何よりも重要である。その一つとして、本章で提案したブラインドのゾーニング制御は、自動ブラインド制御時に発生するブラインドゾーニング幅すなわち「空間の分割」に対する問題点を解消し、有効な昼光利用を可能にしたと考える。

【第3章の参考文献】

- 1) 奥西範久、亀嶋一矢、大幡英亮、恒川和久、谷口元：日経ニューオフィス賞からみたオフィスの変遷に関する研究 日本のオフィスにおけるコンセプトと執務空間の関係とその変遷その 1、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.381-382、2011
- 2) 間瀬亮平、岩田利枝、長吉謙輔、伊藤剛、平井大介：低炭素化と知的生産性に配慮した最先端オフィスの調査研究（第5報）オフィス空間の光環境とブラインド制御の実測評価、空気調和衛生工学会大会学術講演論文集、pp.1387-1390、2011
- 3) Wienold, J. and Christoffersen, J.,: Evaluation methods and development of a new glare prediction model for a daylight environment with the use of CCD cameras, Energy and Buildings, 38, pp.743-757, 2006.7
- 4) Hopkinson, R.G. and Bradley, R.C., : A study of glare from very large sources, Illuminating Engineering, Vol. 55, pp.288-294, 1960.
- 5) IES Lighting Handbook: Reference Volume, Illuminating Engineering, Society of North America, pp. 9-46, pp.9-49, 1984

第4章 ブラインド制御時の 窓面輝度変化の予測

4.1 はじめに

本章では、自動ブラインド制御の実運用時のもう一つの問題点として、ブラインドの制御間隔つまり「時間分割」に焦点をあて、自動ブラインド制御時のスラット角開閉動作によるスラット部分を含む窓全体の平均輝度（以下、窓面平均輝度）の変化を把握することを試みる。自動ブラインドを導入した建物で実施された在室者へのアンケート調査では「スラット開閉時の動作音や窓面の明るさ変化が気になる」といった回答があることも報告されている¹⁾²⁾。スラット角の切り替えに伴う在室者の不快感を最低限に抑えることが望まれる。これまで、自動ブラインドのスラット角切り替えに伴う在室者の不快感を評価対象とした研究例はみられない。このときの「不快感」の原因が、スラット開閉時のモーター音、スラットの動作音、窓面の明るさ変化といった刺激の大きさによるものなのか、あるいはそれらの刺激の頻度によるものなのかについても明らかではない。

スラット開閉時のモーター音などの騒音に関しては、制御モーターの小型化やダブルスキンファサード内に自動ブラインドを設置する等の改善が行われている³⁾。窓面の明るさ変化に関しては、側窓からの昼光照明と連動したアンビエント照明調光時の机上面の明るさ変化を評価する研究があるが⁴⁾、窓面の明るさ変化を評価対象とした研究はこれまでにない。スラット角切り替えに伴う刺激の頻度は、制御インターバルにより決定されるが^{注1)}、制御インターバルを長くすると、騒音回数は軽減できるもののスラット角の切り替えに伴う窓面輝度の変化量が増加する可能性もある。

そこで本論文では、スラット開閉時の窓面の明るさ変化に着目し、スラットの開閉速度を変化させることで窓面の明るさ変化による在室者の不快感の軽減を目標に掲げ、第2章で示した自動ブラインドのスラット角制御方法のうち、不快グレア予測指標 PGSV⁵⁾を用いた制御方法を仮定し、窓面輝度シミュレーションを行った。

4.2 計算方法

4.2.1 基本計算条件

基本条件を表4.1に示す。計算対象空間として、片側採光の窓に自動ブラインドを設置したオフィスを想定した。スラット角を決定するための PGSV は、目線より上のブラインドを含む窓面をグレア源として計算した⁶⁾。窓面平均輝度を式(4.1)に示す。最も基礎的な条件での窓面平均輝度の変動を把握するため、窓構成要素をブラインド、スラット間から見える天空部分の2つとした。

表 4.1 基本計算条件

| | | |
|--------------------------|-----------|------------------|
| 緯度, 経度 | | 35°3', 139°27' |
| 窓上端高さ, 窓幅 | | 3[m], 15[m] |
| パーティション高さ | | 1.2[m] |
| 窓面方位 | | 南向き(0[deg]) |
| 地表面反射率 | | 0.1 |
| ブラインド | スラット幅, 間隔 | 35[mm], 30[mm] |
| | スラット反射率 | 0.7 |
| ガラスの透過率 | | 0.7 |
| 計算対象時間 | | 8時~18時 (計 10 時間) |
| PGSV 計算点(窓からの距離, 床からの高さ) | | 3[m], 1.2[m] |
| 室内天井反射率 | | 0.8 |

$$L_w = \frac{\sum L_i \omega_i}{\sum \omega_i} \quad (4.1)$$

L : 輝度[cd/m²]、 ω : 立体角[sr] 添字 i はブラインドスラットの直射日光照射部分、日影部分、スラット間から見える天空、庇、周辺建物等

図 4.1 に示すものつくり大学（埼玉県行田市、緯度 35° 6' , 経度 139° 27'）建設棟 3 階屋上の気象観測ステーション^{注1)}により、2015 年 7 月~2015 年 12 月に 1 分間隔で測定した 6 カ月間（184 日間）の法線面直射日光照度と全天空照度を用いて、ブラインドスラット輝度とスラット間から見える天空輝度を計算した。スラット輝度は宿谷のモデル⁷⁾よりスラットの光束発散度を求め、スラット面を均等拡散面と仮定し、法線面直射日光照度と全天空照度から計算した。天空輝度は一様輝度と仮定し、全天空照度から計算した。計算対象時間は就業時間を仮定し、8 時~17 時とした。

注 1) 気象観測ステーションでは、太陽追尾型直射照度計（英弘精機 ML-010SD）と小型照度計（英弘精機 ML-020S-I）を用いて法線面直射日光照度と全天空照度を測定している。気象観測ステーションの周辺は、建物等の大きな障害物はない。



図 4.1 気象観測ステーション

(気象観測データは、ものつくり大学講師・伊藤大輔先生からご提供いただいた)

4.2.2 スラット角制御条件

スラット角制御条件を表 4.2 に示す。制御インターバルは、現在ブラインドメーカーで使用されている条件をもとに決定した^{注2)}。通常、スラット角制御に用いる屋外照度（直射日光照度、全天空照度）は、制御時の瞬時値ではなく、制御インターバル内のある期間の平均値や最高値を用いることが多い。現在ブラインドメーカーでは、前者を「平均照度制御」、後者を「ピークホールド制御」と呼んでいる。ここでは「平均照度制御」を想定し、制御インターバル全体の平均照度を用いることにした^{注3)}。

通常、自動ブラインドのスラット角制御は、直射日光遮蔽要否の判断となる閾値を設定し、一定期間閾値以下になる場合、制御を必要としないと判断しスラットを水平にする²³⁾。しかし、昼光変動が多い時間には、直射日光の侵入を避けるため、スラット角制御を続行する必要がある。そこで本研究では、昼光変動が多い時間においてもスラット角制御を継続することを想定し、計算を行った。

表 4.2 スラット角制御条件

| スラット角 制御方法 | 制御 インターバル Δt | スラット角制御に用いる 屋外照度 |
|---|----------------------------|--------------------------------|
| 不快グレア抑制制御 ^{注2)} (PGSV ≤ 0.9 : 不満者率 ⁵⁾ 10[%]以下) | (i)3分, (ii)10分, の2条件 | 平均照度制御 (制御インターバル中の 平均照度) |

注 2) 2017 年現在、制御インターバルは 3~10 分で運用することが多い。このうち、本シミュレーションでは最大および最小の制御インターバルをそれぞれ計算条件として使用した。

注 3) 制御インターバル 10 分で昼光の変動が大きいと考えられる 2 例（2015 年 8 月 19 日、2015 年 12 月 21 日）を用いて、「ピークホールド制御」と「平均照度制御」による窓面平均輝度を比較した結果、窓面平均輝度の変化に大きな差は見られなかった。そのため、ここでは実際の運用事例が多い「平均照度制御」を想定した。

4.3 結果

4.3.1 窓面平均輝度とスラット角の変化の確認

図 4.2、図 4.3 に示す昼光の変動が大きいと考えられる 2 例 (2015 年 8 月 19 日、2015 年 12 月 21 日) について、スラット角と窓面平均輝度の変化を確認した。図 4.2、図 4.3 の屋外照度に対する制御インターバル 3 分および 10 分のスラット角と窓面平均輝度の変化を図 4.4、図 4.5 に示す。8 月 19 日の例では、直射日光遮蔽角が終日 0[deg] であるが、スラット角はグレア抑制角となるため、窓面平均輝度は 3500[cd/m²] 付近に抑えられている。制御インターバルが短い方が、窓面平均輝度の変化幅が小さい。一方、12 月 21 日の例では、8 月 19 日に比べて、制御インターバルの違いによる窓面平均輝度の変化の違いが明確ではない。ほとんどの時間でスラット角はほぼ直射日光遮蔽角となっており、全天空照度が低く、冬至で太陽高度が低いこともあり、窓面平均輝度が 8 月 19 日より低くなる時が多い。

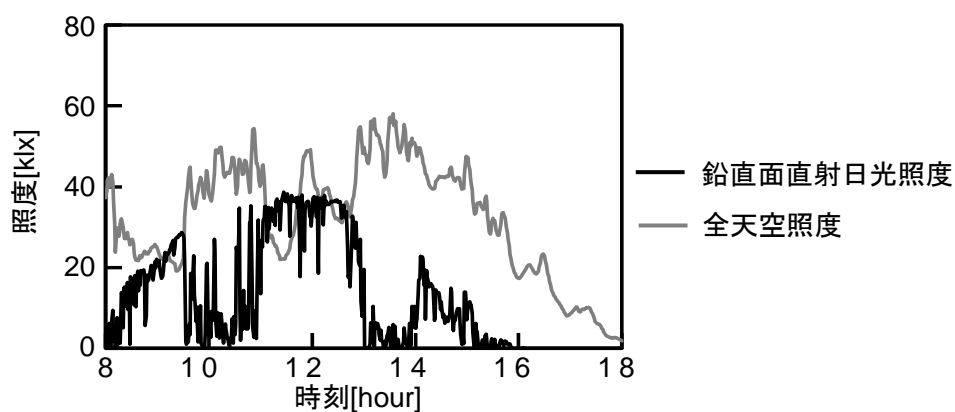


図 4.2 屋外照度 (2015/8/19、窓面方位 0[deg])

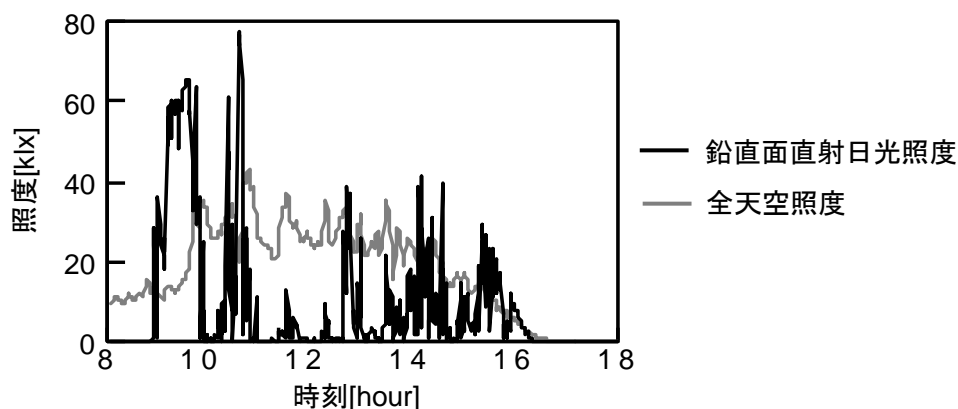


図 4.3 屋外照度 (2015/12/21、窓面方位 0[deg])

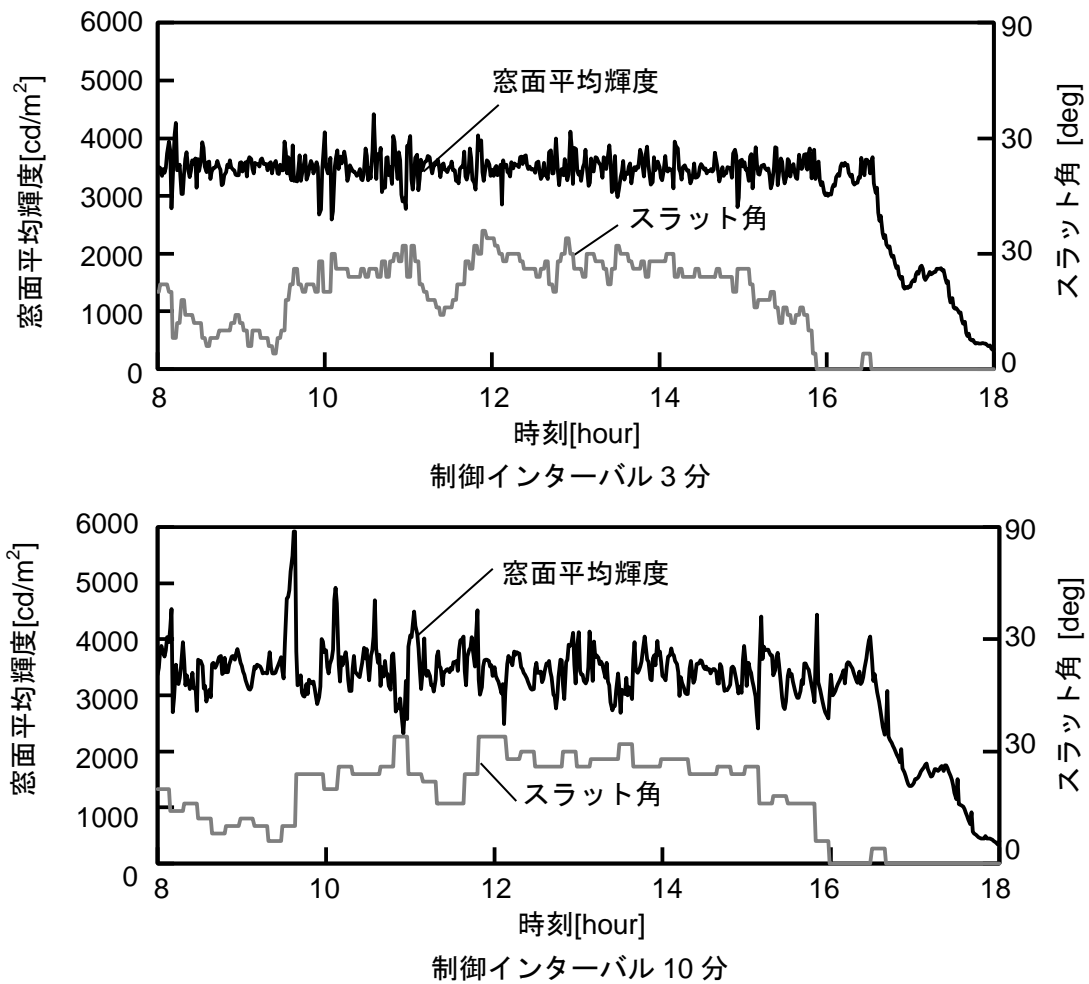


図 4.4 不快グレア抑制制御時の窓面輝度とスラット角の変化
(2015/8/19, 窓面方位 0[deg])

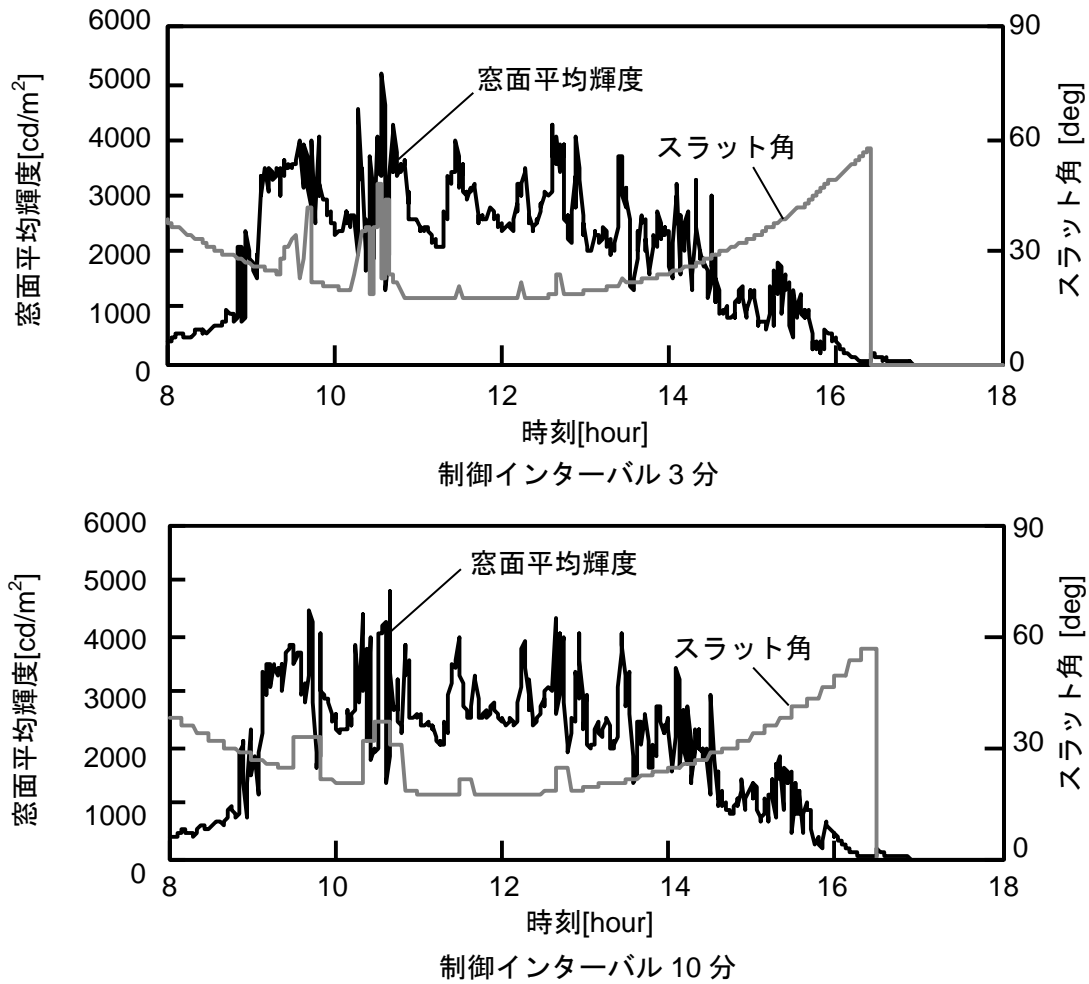


図 4.5 不快グレア抑制制御時の窓面輝度とスラット角の変化
(2015/12/21, 窓面方位 0[deg])

図 4.4、図 4.5 に示す窓面平均輝度の変化は、「スラット角切り替えによる変化」と「制御インターバル中の屋外照度の変動による変化」の両方によるものが含まれている。そこで、式 (4.2) に示すように、スラット角切替時の窓面平均輝度の変化を「切替時窓面平均輝度変化量 ΔL_w [cd/m²/回]」として定義した。スラット角切替後から切替前の窓面平均輝度を引いた値として算出される。切替時窓面平均輝度変化量 ΔL_w を、輝度が増加する場合 ($\Delta L_w > 0$, スラットが開く場合) と輝度が減少する場合 ($\Delta L_w < 0$, スラットが閉まる場合) のそれぞれについて求めた。制御インターバルおよび輝度が増加または減少する場合によって、スラットの切替回数が異なる。

$$\Delta L_w = L_{waf} - L_{wbe} \quad (4.2)$$

ΔL_w : 切替時窓面平均輝度変化量[cd/m²/回]、 L_{waf} : 切替後窓面平均輝度[cd/m²]

L_{wbe} : 切替前窓面平均輝度[cd/m²]

本章では切替時窓面平均輝度変化量 ΔL_w の最大値を把握するため、累積出現頻度を求めた。切替時窓面平均輝度変化量 ΔL_w の累積出現頻度を図 4.6 に示す。例えば輝度増加時の変化量 ΔL_w が 1000[cd/m²]以上となる出現頻度と比較すると、制御インターバル 3 分では 8 月が 2[%] (4[回/日])、12 月が 5[%] (10[回/日])、制御インターバル 10 分では 8 月が 7[%] (4.2[回/日])、12 月が 12[%] (7.2[回/日]) となる。出現頻度は制御インターバル 10 分の方が大きくなり、出現回数は 12 月のとき制御インターバル 10 分の方が小さくなった。輝度減少時では、12 月のときに制御インターバル 3 分より 10 分の方が出現頻度、出現回数ともに小さくなった。

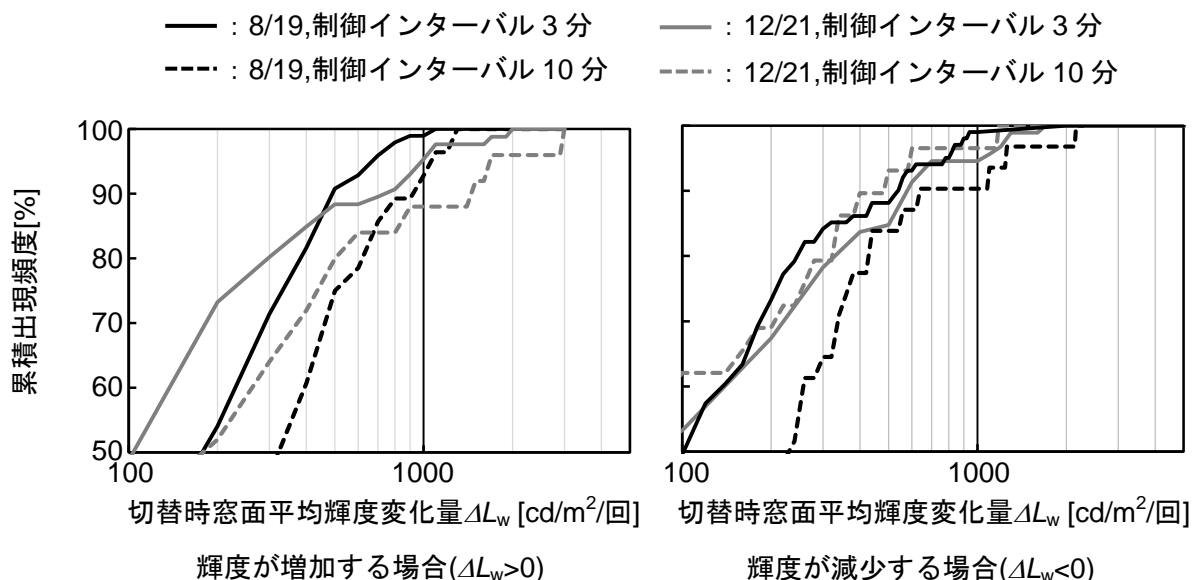


図 4.6 切替時窓面平均輝度変化量 ΔL_w の累積出現頻度 (2015/8/19 と 2015/12/21)

注) 1日のスラット切り替え回数は、制御インターバル 3 分のとき 200 回、制御インターバル 10 分のとき 30 回であり、出現回数が異なる。

窓面平均輝度の変化に対する評価は順応状態によっても異なる。そのため、式(4.3)に示すように、スラット角切替前 L_{wbe} の窓面平均輝度に対する切替時窓面平均輝度変化量 ΔL_w の割合を「切替時窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w/L_{wbe}$ 」と定義した。切替時窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w/L_{wbe}$ を輝度が増加する場合と減少する場合のそれぞれについて求めた。切替時窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w/L_{wbe}$ の累積出現頻度を図4.7に示す。

$$\Delta L_w/L_{wbe} = \frac{L_{waf} - L_{wbe}}{L_{wbe}} \quad (4.3)$$

$\Delta L_w/L_{wbe}$: 切替時窓面平均輝度変化率[-]、 ΔL_w : 切替時窓面平均輝度変化量[cd/m²/回]、

L_{waf} : 切替後窓面平均輝度[cd/m²]、 L_{wbe} : 切替前窓面平均輝度[cd/m²]

例えば輝度増加時の変化率 $\Delta L_w/L_{wb}$ が 0.3 以上となる出現頻度で比較すると、制御インターバル 3 分では 8 月が 1[%] (2[回/日])、12 月が 13[%] (23[回/日])、制御インターバル 10 分では 8 月が 11[%] (6.6[回/日])、12 月が 20[%] (12[回/日]) となる。出現頻度は制御インターバル 10 分の方が大きくなり、出現回数は 12 月のとき制御インターバル 10 分の方が小さくなった。輝度減少時も同様の結果となった。

切替時窓面平均輝度の変化量 ΔL_w 、変化率 $\Delta L_w/L_{wb}$ とともに、出現頻度でみると制御インターバル 10 分の方が大きくなった。

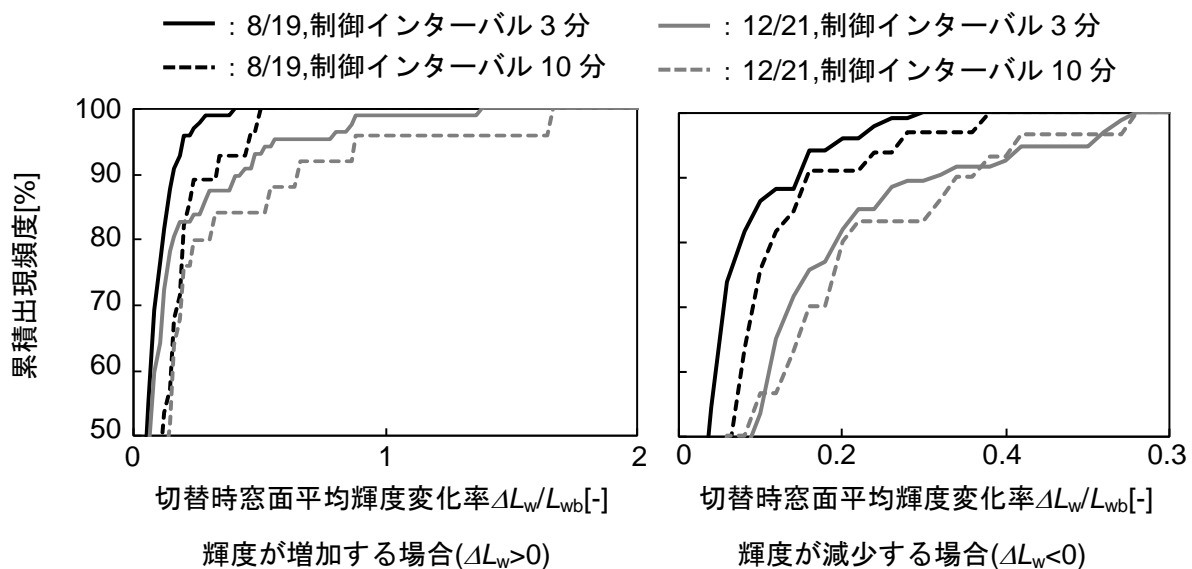


図 4.7 切替時窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w/L_{wb}$ の累積出現頻度 (2015/8/19 と 2015/12/21)

注) 1 日のスラット切り替え回数は、制御インターバル 3 分のとき 200 回、制御インターバル 10 分のとき 30 回であり、出現回数が異なる。

4.3.2 切替時窓面平均輝度変化量と切替時窓面平均輝度変化率

図 4.8、図 4.9 に切替時窓面平均輝度変化量 ΔL_w と切替時窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w/L_{wb}$ の昼光の変動が大きいと考えられる2例(2015年8月19日、2015年12月21日)を示したが、切替時窓面平均輝度変化量 ΔL_w と切替時窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w/L_{wb}$ の出現頻度について定量的な把握を行うため、3カ月間(184日間)の連続データを用いて、各月の切替時窓面平均輝度変化量 ΔL_w と切替時窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w/L_{wb}$ の出現頻度を算出した。

図 4.8、図 4.9 の結果から、制御インターバル 10 分の方が窓面平均輝度の変化量 ΔL_w および変化率 $\Delta L_w/L_{wb}$ が大きくなる傾向がみられたため、制御インターバル 10 分のときの窓面平均輝度の変化量 ΔL_w と変化率 $\Delta L_w/L_{wb}$ に着目した。各月の切替時窓面平均輝度変化量 ΔL_w の出現頻度を図 4.8 に、各月の切替時窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w/L_{wb}$ を図 4.9 に示す。切替時窓面平均輝度変化量 ΔL_w の最大値は、輝度が増加する場合($\Delta L_w > 0$)で 900~2800[cd/m²/回]、輝度が減少する場合($\Delta L_w < 0$)で-3300~-1300[cd/m²/回]の範囲であった。切替時窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w/L_{wb}$ の最大値は、輝度が増加する場合($\Delta L_w > 0$)で 0.5~2.7、輝度が減少する場合($\Delta L_w < 0$)で-0.3~-0.4の範囲であった。

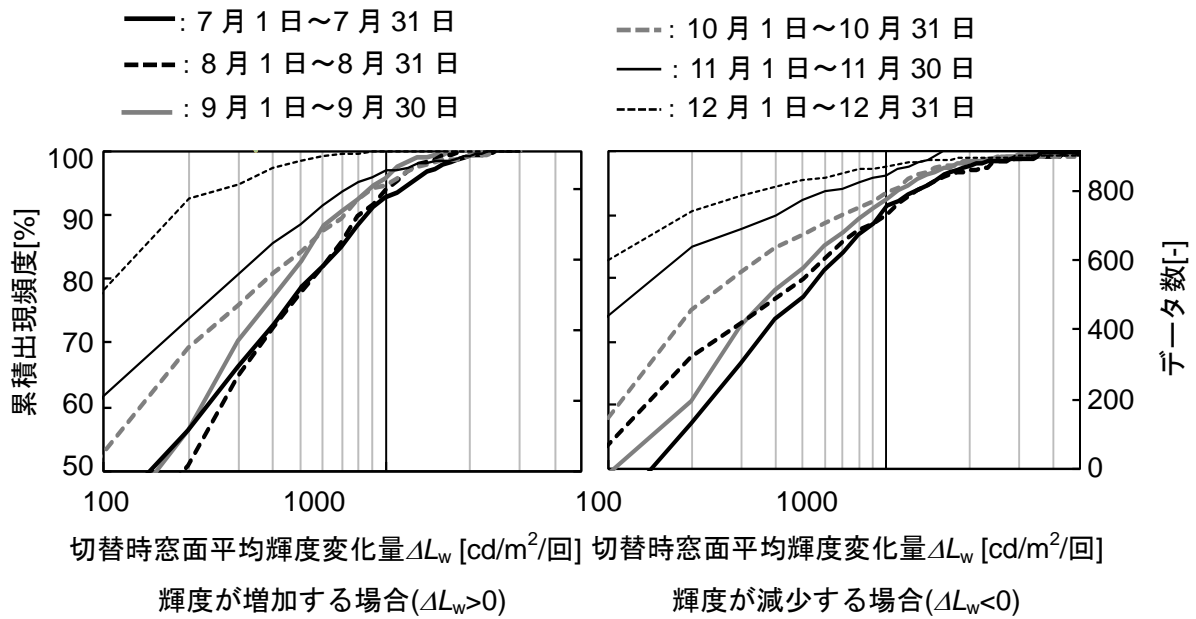


図 4.8 各月の切替時窓面平均輝度変化量 ΔL_w の累積出現頻度（制御インターバル 10min）

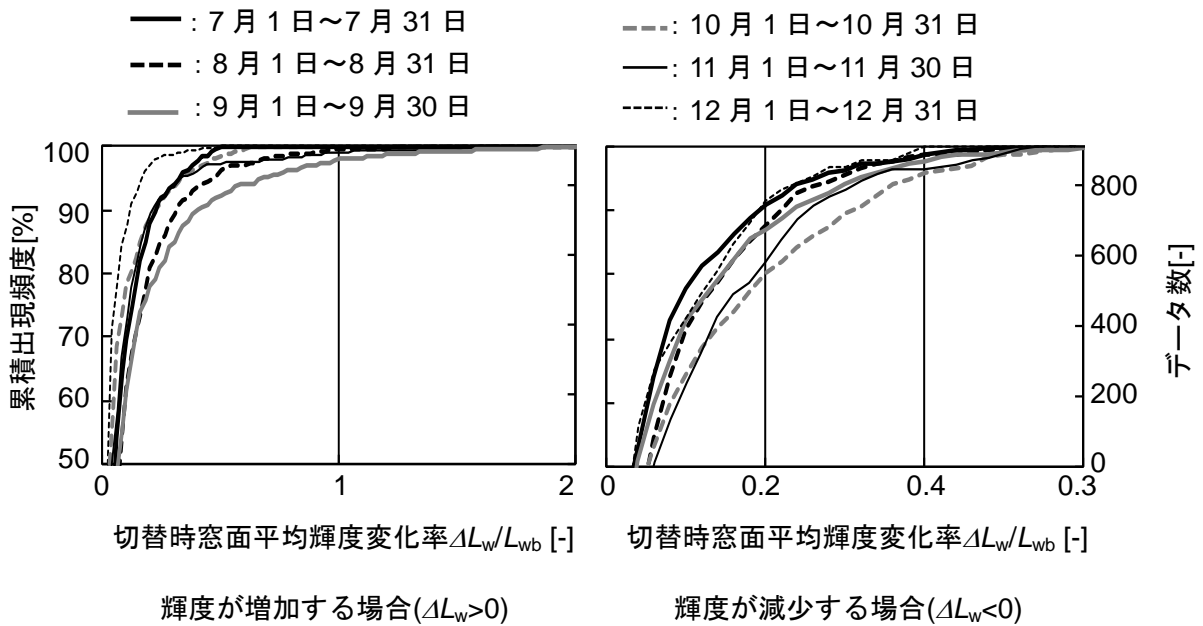


図 4.9 各月の切替時窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w/L_{wb}$ の累積出現頻度（制御インターバル 10min）

4.4 結論

本章では、自動ブラインド制御の実運用時のもう一つの問題点として挙げられる自動ブラインドの制御間隔すなわち「時間分割」に着目し、自動ブラインド制御時のスラット角開閉動作によるスラット部分を含む窓全体の平均輝度（以下、窓面平均輝度）の変化を把握することを試みた。

2015年7月～2015年12月に1分間隔で測定した法線面直射日光照度、全天空照度を使用し、制御インターバル別に、PGSV制御を行った場合のスラット角と窓面平均輝度の変化量および変化率を計算し、以下の知見を得た。

- (1) 制御インターバル 10 分のとき、切替時窓面平均輝度変化量 ΔL_w の最大値は、輝度が増加する場合 ($\Delta L_w > 0$) で $900 \sim 2800$ [cd/m²/回]、輝度が減少する場合 ($\Delta L_w < 0$) で $-3300 \sim -1300$ [cd/m²/回] の範囲であった。
- (2) 切替時窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w / L_{wb}$ の最大値は、輝度が増加する場合 ($\Delta L_w > 0$) で $0.5 \sim 2.7$ 、輝度が減少する場合 ($\Delta L_w < 0$) で $-0.3 \sim -0.4$ の範囲であった。

本章では、自動ブラインドの「時間分割」に着目したが、制御インターバル 10 分の方が窓面平均輝度変化量 ΔL_w 、切替時窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w / L_{wbe}$ ともに出現頻度も大きくなるものの、出現回数で見れば制御インターバル 3 分との大きな差は見られなかった。

しかしながら、切替時窓面平均輝度変化量 ΔL_w および切替時窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w / L_{wb}$ の最大値は幅広く分布し、窓面平均輝度の変化としてばらつきが見られた。この窓面平均輝度の変化に対する許容性を明らかにする必要があると考えた。

そのため、次章では、本章で求めた結果を参考に決定した実験条件を用いて、窓面の明るさ変化評価実験を行った。

【第4章の参考文献】

- 1) T.Inoue, T.Kawase, T.Ibamoto, S.Takakusa and Y.Matsuo : The Development of an Optimal Control System for Window Shading Devices Based on Investigation in Office Buildings, ASHRAE Transactions, Vol.94 Part2, pp.1034-1049, 1988.
- 2) L.G. Bakker, E.C.M. Hoes-van Oeffelen, R.C.G.M. Loonen, J.L.M. Hensen : User satisfaction and interaction with automated dynamic facades: A pilot study, Building and Environment, Vol.78, pp.44-52, 2014.8
- 3) 郡公子、石野久彌：ダブルスキン，エアフローウィンドウの熱性能式の提案 熱負荷計算のための窓性能値に関する研究 第3報、日本建築学会環境系論文集、第77巻、第682号、pp.997-1002、2012.12
- 4) 織間亜希、岩田利枝、宿谷昌則、木村建一：昼光の変動に応じた電灯照明制御が在室者の快適性に与える影響、日本建築学会計画系論文集、第486号、pp.9-16、1996.8
- 5) T.Iwata, K.Kimura, M.Syukuya, K.Takano : Discomfort caused by wide-source glare, Energy and Buildings, Vol.15/13, pp.391-398, 1991.
- 6) 谷口智子、岩田利枝、伊藤大輔：窓周辺遮蔽物を考慮した不快グレア指標 PGSV に基づく自動ブラインド制御に関する研究、照明学会誌論文号、第98巻、第5号、pp.211-217、2014.5
- 7) 宿谷昌則：数値計算で学ぶ光と熱の建築環境学、丸善株式会社、pp.145-152、1993

第5章 窓面の明るさ変化による不快感を 軽減するスラット開閉速度決定法の提案

5.1 はじめに

前章では、自動ブラインド制御の実運用時のもう一つの問題点として、ブラインドの制御インターバルつまり「時間分割」に焦点をあて、自動ブラインド制御時のスラット角開閉動作によるスラット部分を含む窓面平均輝度の変化を把握することを試みた。屋外照度データを用いて自動ブラインド制御時の窓面平均輝度およびスラット角の変化を求めた結果、ブラインドの制御インターバルが切替時窓面平均輝度変化量 ΔL_w と切替時窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w / L_{wb}$ の出現頻度に与える影響はさほど大きくはないことが明らかにされた。しかし、切替時窓面平均輝度変化量 ΔL_w および切替時窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w / L_{wb}$ の最大値は幅広く分布し、窓面平均輝度の変化としてばらつきが見られることも同時に示された。これらの切替時窓面平均輝度変化量 ΔL_w および切替時窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w / L_{wb}$ に対する被験者の評価を明らかにする必要がある。この被験者評価を明らかにすることで、自動ブラインドのスラット角切り替えに伴う在室者の不快感を軽減するためにはずである。

そのため本章では、昼光変動を再現可能な人工窓を用いた実験室における被験者評価実験を行った。実験条件は、第4章の結果を参考に考えた。実験は光環境実験室にて、2015年12月15日～21日で本実験を7回、12月22日に追加実験を2回、計8回行った。

5.2 光環境実験室の仕様

5.2.1 人工窓光源装置

昼光を模擬するため、図5.1に示すような人工窓光源装置を作成した。光源装置にはLED照明（三菱電機, EL-SK4500NM/4AHZ）12台が用いられている。図5.2に示すような、人工窓光源装置を囲うアルミテープで作成した反射板がある。実験室側の開口部には、拡散用のトレーシングペーパーを設置している。図5.3に人工窓光源装置の前面図、図5.4に人工窓光源装置の背面図として電源経路から機器までの配線図を示す。図5.5のLED照明を図5.6の光源取り付け台に設置した。表5.1にLED照明の仕様を示す。

調光装置は、図5.7の直流電源（高砂製作所, ZX-400M）4台と直流電源コントロールソフトウェア（高砂製作所, LinkAnyArts-SC ZxSeries Ver.1.0.0.5）を導入したノートPCからなる。表5.2に直流電源の仕様を示す。図5.8に示すように、直流電源は1台につき、LED照明3台に直列に接続した。直流電源間を並列運転用のコード（高砂製作所, ZXP-0R2M）を用いて図5.4のように接続し、同時にすべての直流電源を制御できるようにした。



図 5.1 人工窓光源装置外観

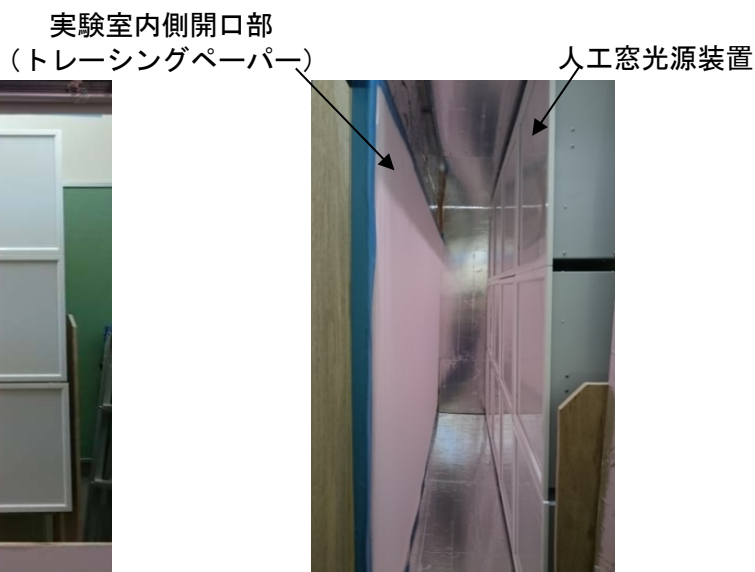


図 5.2 反射板を設置した人工窓光源装置

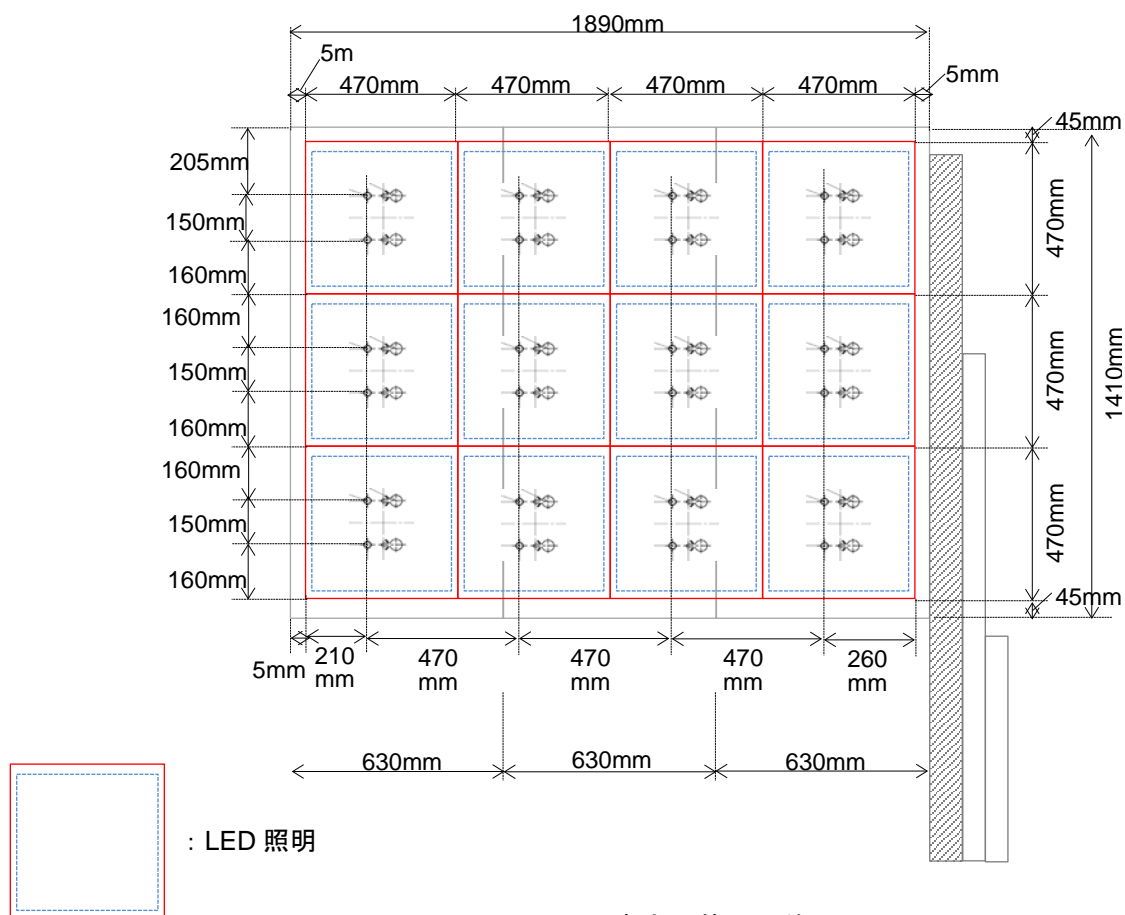


図 5.3 人工窓光源装置の前面図

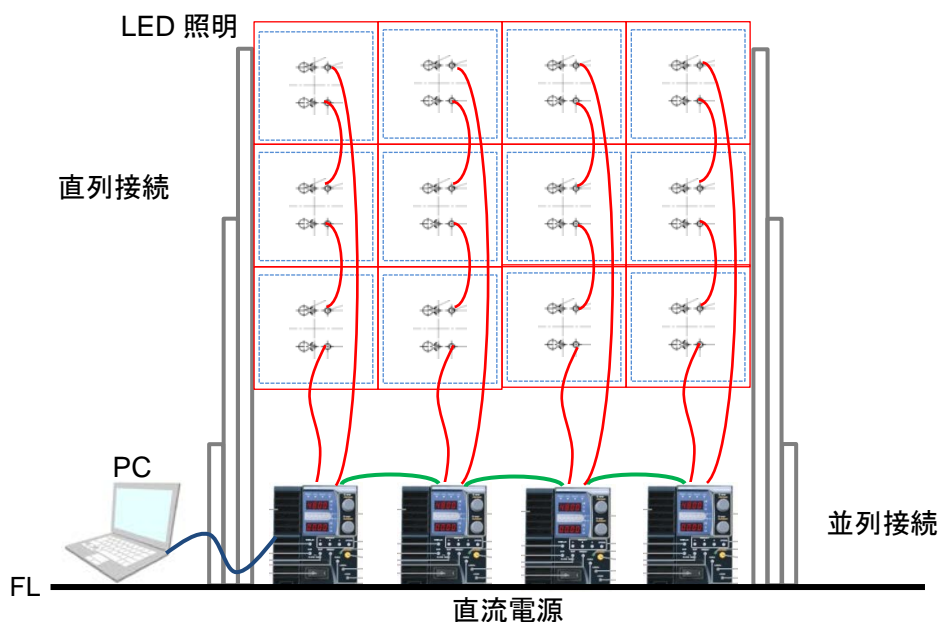


図 5.4 人工窓光源装置の背面図（電源経路から機器までの配線図）

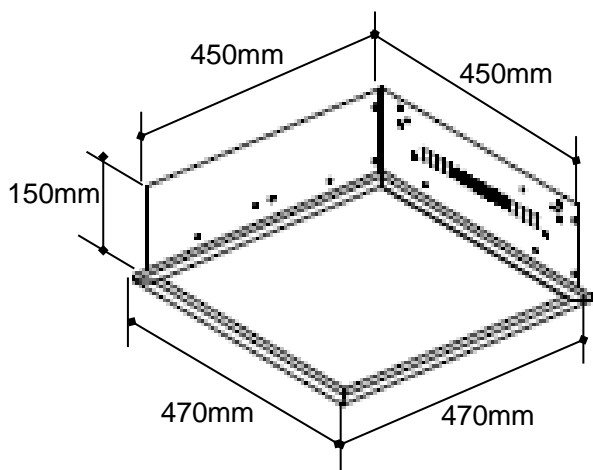


図 5.5 LED 照明



図 5.6 光源取り付け台

(写真 左:表、右:裏)

表 5.1 LED 照明仕様

| | | | | |
|---------|-------------------|-------------|-------|-------|
| 形名 | EL-SK4500NM/4 AHZ | | | |
| 点灯方式、用途 | 電子回路式、屋内用 | | | |
| 定格・電圧 | A | 100V | 200V | 242V |
| 入力電流 | | 0.40A | 0.20A | 0.17A |
| 定格消費電力 | | 39.7W | 38.8W | 38.8W |
| 平均電力 | | 35.7W | 34.9W | 34.9W |
| 定格 | HZ | 5~100%連続調光形 | | |
| 周波数 | | 50/70Hz | | |
| 定格光束 | | 4550lm | | |
| 演色性 | | Ra 83 | | |
| 光源色 | | 5000K | | |



図 5.7 直流電源

表 5.2 直流電源仕様

出力・入力仕様

| | | |
|--|----------------------|-----|
| 仕様・形名 | ZM-400M | |
| 定格出力電圧 | 320V | |
| 定格出力電流 | 5A | |
| 定格出力電力 | 400W | |
| 動作電源 | AC85V~250V、45Hz~65Hz | |
| 入力電流 ^{*1} (AC100V 入力、AC200V 入力) | 6A、3A | |
| 入力力率 ^{*2} | 0.99 以上 | |
| 電力効率 ^{*3} | 77% | |
| 突入電流 (ピーク値) | AC100V 入力 | 10A |
| | AC200V 入力 | 20A |
| | AC264V 入力 | 25A |

定電圧特性

| | | |
|---------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| 設定範囲 | 0.0V~336.0V | |
| 設定確度 ^{*4} | 設定値の± (0.1%+100mV) | |
| 設定分解能 | 100mV | |
| ロードレギュレーション ^{*5} | ± (定格出力電圧の 0.01%+12mV) 以下 | |
| ラインレギュレーション ^{*6} | ± (定格出力電圧の 0.01%+8mV) 以下 | |
| リップル (実効値) ^{*7} | 15mV | |
| ノイズ (p-p 値) (TYP) ^{*8} | 100mV | |
| 温度計数 (代表値) | ±100ppm/°C | |
| 過渡回復時間 ^{*9} | 1ms | |
| プログラミング時間 ^{*10} | 立上がり | 80ms±30% (全負荷時) /600ms±30% (無負荷時) |
| | 立下がり | 80ms±30% (全負荷時) /600ms±30% (無負荷時) |
| 最大吸い込み電流 | 0.05A±0.01A | |
| OUTPUTOFF 時の残留電圧 (TYP) | 0mV~40mV | |

*1：定格出力電力，定格出力電流のとき、*2：AC100V 入力，：定格出力電力，定格出力電流のとき、
 *3：AC200V 入力，：定格出力電力，定格出力電流のとき、*4：周囲温度 23°C±5°C，出力開放にて、
 *5：定格負荷電流の 0~100%の変動に対して，センシングポイントにて測定（静的負荷変動）、
 *6：入力電圧の±10%の変動に対して、*7：測定周波数帯域 20Hz~1MHz にて、*8：測定周波数帯域
 20Hz~20MHz のオシロスコープにて測定、*9：定格負荷電流の 50~100%の急変に対して，定格出力
 電圧の 0.1%±10mV 以内に回復する時間（動的負荷変動）、*10：パネル操作，通信制御による設定変更、
 または外部アナログコントロールにより，設定電圧に対する誤差が 1%以内に達する時間



並列運転用コード



並列接続した直流電源

図 5.8 直流電源の配線

LED 照明制御時には、直流電源コントロールソフトウェア（高砂製作所，LinkAnyArts-SC ZxSeries Ver.1.0.0.5）を立ち上げ、図 5.9 に示すようなコントロール画面上で操作を行う。本ソフトウェアでは、0.01[V]間隔で制御することができる。本研究では、人工窓光源装置を定格電流設定で電圧を 130V~145V まで 0.1V 間隔で調整し、制御した。制御空間を図 5.10 に示す。

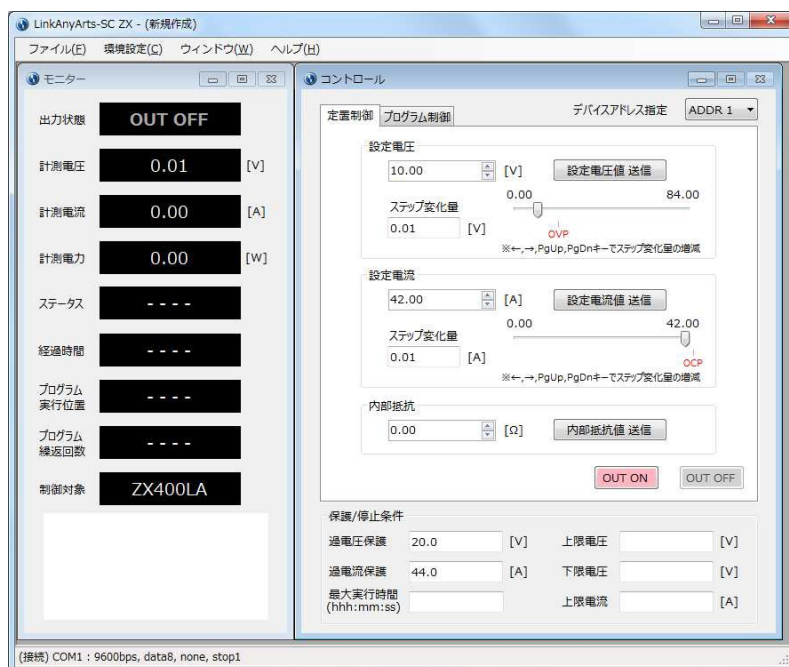


図 5.9 直流電源コントロールソフト起動画面

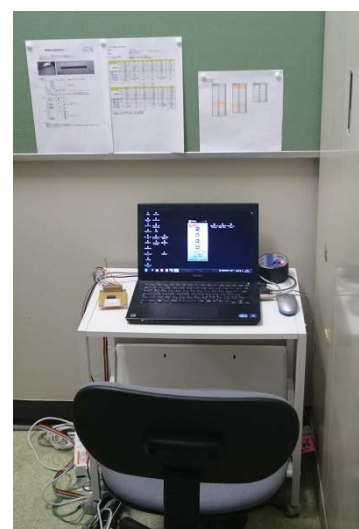


図 5.10 制御空間

人工窓ブラインドのスラット開閉時の窓面輝度変化を再現するため、スラット角およびスラット開閉速度を自由に変更できる特注の自動ブラインド（立川ブラインド、TIS-L35 タコスII（T-2573）、W2100mm×H1500mm）を設置した。図 5.11 に自動制御ブラインドを示す。スラット角の調節およびブラインドの昇降は、実験室外側に設置した図 5.12 の直流電源コントロール用ノート PC もしくは図 5.13 の外部コントローラーで操作する。ソフトによる操作では 1~3[deg]間隔（表 5.3）、外部コントローラーでの操作では 15 段階（表 5.4）でスラットを制御することができる。



図 5.11 自動制御ブラインド

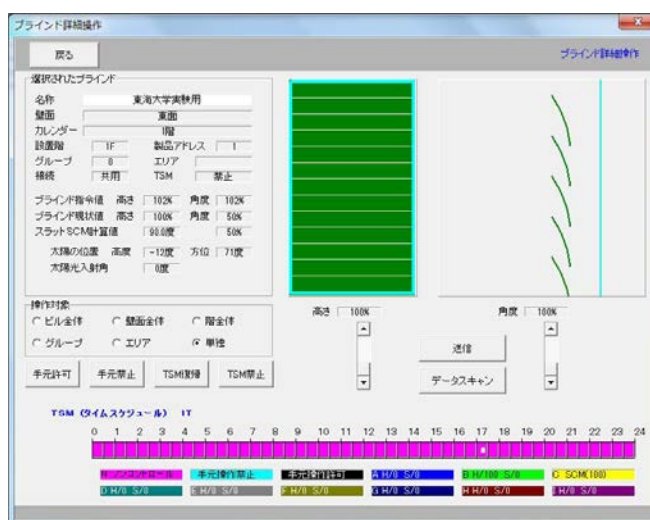


図 5.12 自動ブラインドのパソコン上操作画面

表 5.3 自動ブラインドコントローラーの設定角度対応表

| 角度[deg] | % | 角度[deg] | % | 角度[deg] | % |
|---------|----|---------|----|---------|-----|
| 0 | 50 | 32 | 68 | 62 | 84 |
| 1 | 51 | 34 | 69 | 64 | 85 |
| 3 | 52 | 35 | 70 | 67 | 86 |
| 5 | 53 | 37 | 71 | 69 | 87 |
| 7 | 54 | 39 | 72 | 72 | 88 |
| 9 | 55 | 40 | 73 | 73 | 89 |
| 11 | 56 | 43 | 74 | 75 | 90 |
| 12 | 57 | 45 | 75 | 77 | 91 |
| 14 | 58 | 47 | 76 | 78 | 92 |
| 16 | 59 | 48 | 77 | 80 | 100 |
| 18 | 60 | 50 | 78 | | |
| 19 | 61 | 52 | 79 | | |
| 21 | 62 | 54 | 80 | | |
| 24 | 63 | 56 | 81 | | |
| 25 | 64 | 58 | 82 | | |
| 26 | 65 | 60 | 83 | | |
| 28 | 66 | | | | |
| 30 | 67 | | | | |

表 5.4 自動ブラインドコントローラーの設定角度対応表

| 段階 | スラット角 [deg] | 備考 |
|----|-------------|-----|
| 15 | -80 | 逆全閉 |
| 14 | -78 | |
| 13 | -72 | |
| 12 | -54 | |
| 11 | -39 | |
| 10 | -24 | |
| 9 | -11 | |
| 8 | 0 | 水平 |
| 7 | 11 | |
| 6 | 24 | |
| 5 | 39 | |
| 4 | 54 | |
| 3 | 72 | |
| 2 | 78 | |
| 1 | 80 | 全閉 |

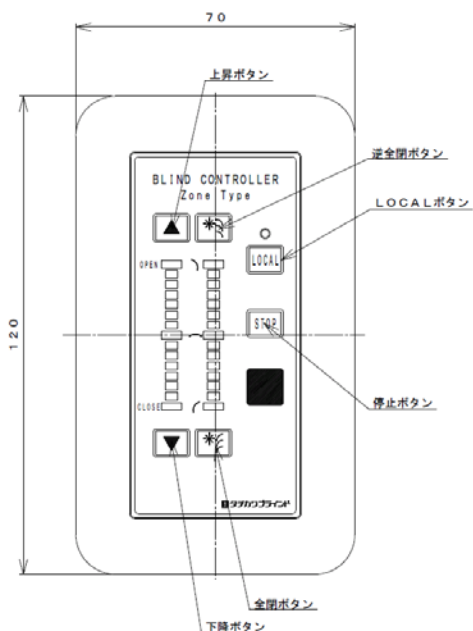
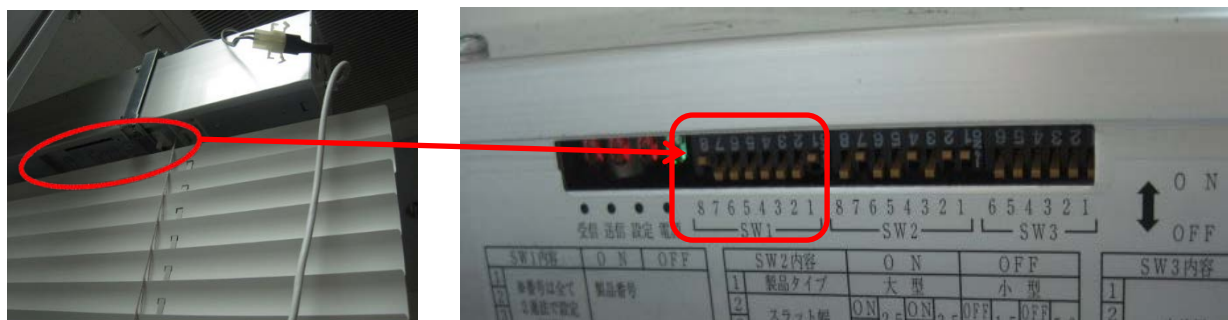


図 5.13 自動ブラインドコントローラー

自動ブラインドのスラット開閉速度は、自動ブラインドの本体に設置した図 5.14 の制御基盤によって設定する。制御基盤の基本設定を表 5.5 に示す。基本のスラット開閉速度は 150~1250[pps]の 6 段階である。自動ブラインド本体には 2 種類のステッピングモーター（フルステップモーターとハーフステップモーター）を使用し、基盤を操作することにより、モーターの設定をきりかえる。モーターの温度上昇については、連続動作を行っても若干暖まる程度で実験時に問題はないことを事前に確認した。



自動ブラインド本体

スラット開閉速度制御基盤

図 5.14 スラット開閉速度制御基盤

表 5.5 スラット開閉速度制御基盤の基本設定

| SW1 | | ON | OFF | |
|-----|---------|----------------------|---------------------|------------------------|
| 1 | 1250PPS | | | 任意の設定 |
| 2 | 1000PPS | | | |
| 3 | 500PPS | | | |
| 4 | 250PPS | | | |
| 5 | 200PPS | | | |
| 6 | 150PPS | | | |
| 7 | モード | ハーフステップ ^o | フルステップ ^o | 1.2.4.7 が ON (変更不要) |
| 8 | ギア比 | ● 1/250 | 1/200 | |

| SW2 | | ON | OFF | |
|-----|-------|----|-----|------------------------|
| 1 | 製品 | ● | | 1.2.4.7 が ON (変更不要) |
| 2 | スラット幅 | ● | | |
| 3 | | | ● | |
| 4 | ラダー | ● | | |
| 5 | 反転動作 | | ● | |
| 6 | モード | | ● | |
| 7 | 昇降速度 | ● | | |
| 8 | 初期化 | | ● | |

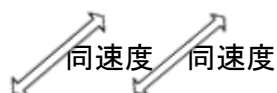
| SW3 | | ON | OFF | |
|-----|---------|----|-----|-------------------|
| 1 | | | ● | すべて OFF (変更不要) |
| 2 | | | ● | |
| 3 | | | ● | |
| 4 | | | ● | |
| 5 | 終端(BUS) | | ● | |
| 6 | 終端(SC) | | ● | |

表 5.6 に各モーター、各パルス設定時のスラット開閉速度を示す。スラット開閉速度 6 条件、モーター 2 条件の計 12 条件のスラット開閉速度を設定することができるが、フルステップモーター 3.8 と 4.8 設定時は、ハーフステップモーターの 2.7.8 と 3.7.8 の設定時と同じ速度となるため、実際に使用できるスラット開閉速度は 10 条件である。表 5.5 に示すスラット開閉速度は、スラット最大回転角[deg]とスラット開閉時間[s]から求めたものである。

なお、スラット開閉速度変更時は電源 OFF,ON が必要である。電源 OFF 後は 2~3 秒間隔をあけてから電源をつけ、スラットの原点を確認するため自動的に全閉に動作するため、動作完了後にスラット角の設定といった次の動作をする必要があることも注意点である。

表 5.6 各モーター、各パルス設定時のスラット開閉速度

| フルステップ | DIP | 1.8 | 2.8 | 3.8 | 4.8 | 5.8 | 6.8 |
|---------------|---------|------|------|------|------|------|-------|
| (DIP-7:OFF) | | 1.25 | 1 | 1/2 | 1/4 | 1/5 | 1/6.6 |
| 開閉速度 | [deg/s] | 37.0 | 29.6 | 14.8 | 7.4 | 5.9 | 4.4 |
| | pps | 1250 | 1000 | 500 | 250 | 200 | 150 |
| 閉~閉時間 (理論) | 秒 | 4.32 | 5.4 | 10.8 | 21.6 | 27 | 36 |
| 実測 凹→凸 | 秒 | 4.3 | 5.5 | 10.8 | 21.7 | 26.9 | 36.2 |
| 実測 凸→凹 | 秒 | 4.4 | 5.5 | 10.9 | 21.7 | 27 | 35.8 |
| 騒音("ジ"音) | | 小(短) | 小(短) | 小 | 小 | 中 | 中 |
| 騒音(動作音) | | 中 | 中 | 小 | 小 | 小 | 小 |
| スラットの揺れ | | 極小 | 極小 | 無し | 無し | 無し | 無し |



| ハーフステップ | DIP | 1.7.8 | 2.7.8 | 3.7.8 | 4.7.8 | 5.7.8 | 6.7.8 |
|---------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| (DIP-7:ON) | | 0.625 | 1/2 | 1/4 | 1/8 | 1/10 | 1/13.3 |
| 開閉速度 | [deg/s] | 18.5 | 14.8 | 7.4 | 3.7 | 3.0 | 2.2 |
| | pps | 1250 | 1000 | 500 | 250 | 200 | 150 |
| | pps | 625相当 | 500相当 | 250相当 | 125相当 | 100相当 | 75相当 |
| 閉~閉時間 (理論) | 秒 | 8.64 | 10.8 | 21.6 | 43.2 | 54 | 72 |
| 実測 凹→凸 | 秒 | 8.8 | 10.9 | 21.6 | 43.3 | 54.2 | 71.1 |
| 実測 凸→凹 | 秒 | 8.7 | 10.9 | 21.5 | 43.1 | 53.7 | 71.7 |
| 騒音("ジ"音) | | 小(短) | 小(短) | 小 | 小 | 中 | 中 |
| 騒音(動作音) | | 中 | 小 | 小 | ほぼ無し | ほぼ無し | ほぼ無し |
| スラットの揺れ | | 極小 | 無し | 無し | 無し | 無し | 無し |

ブラインドがない状態で、スラットを含まない人工窓部分のみの平均輝度（以下、窓部平均輝度）を、以下の CCD カメラシステムを用いて測定した。測定位置は、窓面から 2m、床からの高さ 1.2m とした。

輝度測定用のカメラとして、図 5.15 の Nikon D40x を使用した。以下に CCD カメラの仕様を示す。

【カメラの設定】

カメラ：Nikon D40X

撮影モード：マニュアルモード

シャッタースピード：1/4000, 1/2000, 1/500, 1/60, 1/15, 1/2

撮影サイズ：L(3872×2592)

画質モード：RAW

ホワイトバランス：晴天

ISO 感度：100

輪郭強調：0

明るさ：0

彩度：0

色相：0

フィルター効果：OFF

色調：0

測光方式：マルチパターン

長秒時ノイズ：OFF

高感度ノイズ：OFF

露出補正：0

調光補正：0



図 5.15 CCD カメラ Nikon, D40x

フォーカスはマニュアルで行うので、マウント横についているフォーカスモードセレクトダイヤルは M にしておく。

【レンズの設定】

レンズ：Nikon DX AF-S NIKCOR 18-55mm(測定時は焦点距離 18mm(広角)で測定)

画角[deg]：広角 76[deg]

ピクセル数[pixel]：3872×2592

解像度：[deg/pixel]：0.0196

フォーカスモード：M(レンズ横のスイッチで変更)

階調値を読み込む際には、Photoshop CS6.0 を使用している。

測定結果として、スラットを含まない人工窓部分の輝度分布を図 5.16 に、直流電源の電圧と窓部平均輝度を図 5.17 に示す。測定対象の人工窓は直流電源を使用しているため、LED のフリッカーの影響がないことを確認した。

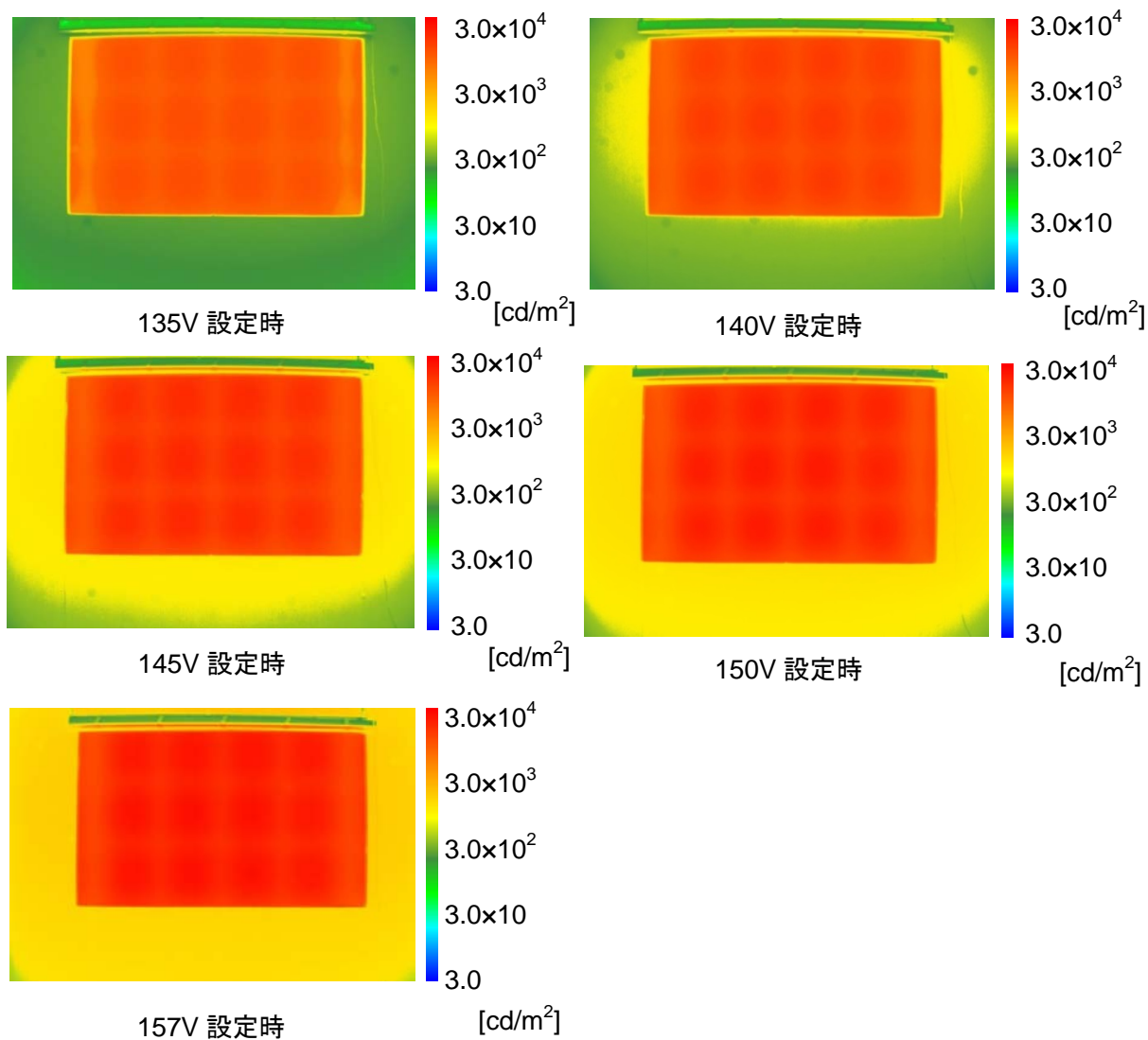


図 5.16 スラットを含まない人工窓部分の輝度分布

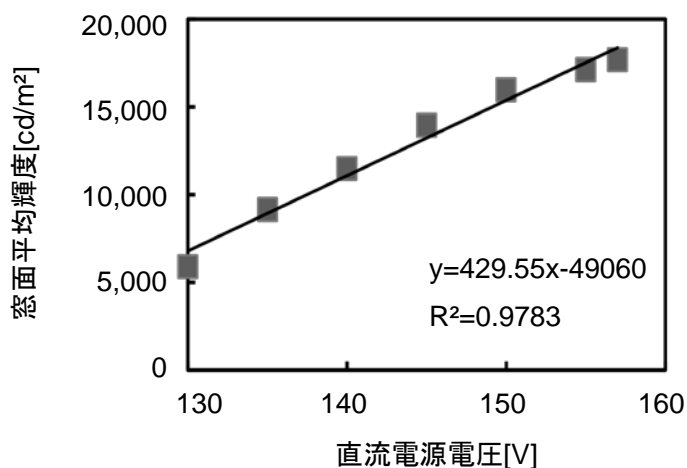


図 5.17 直流電源の電圧と窓部平均輝度

5.2.2 光環境実験室

光環境実験室の平面図と断面図をそれぞれ図 5.20、図 5.21 に、光環境実験室内の条件を表 5.7 に示す。デジタルカメラ (Nikon D3300) システムを用いて窓部平均輝度を測定した結果^{注8)}、輝度分布は平均輝度 18,000[cd/m²]時で±10[%] (測定点数 3.75×10⁶ 点) で、概ね均一輝度光源とみなせると判断した。ブラインドは、スラット角を 1[deg]間隔、スラット開閉速度を 2.2 [deg/s]~37 [deg/s]まで PC 操作により自由に調節できる特注の自動制御ブラインドを用意した。人工窓の電圧と窓部平均輝度の関係を求め、さらに窓面平均輝度を測定し、実験条件を作成した。座席位置からみた窓面の立体角は 0.36[sr]、ディスプレイの立体角は 0.72[sr]であった。

表 5.7 実験室内条件

| | | |
|-------------|---------|------|
| ブラインドスラット幅, | 35[mm], | |
| スラット間隔 | 30[mm] | |
| スラット反射率 | 0.69 | |
| 室内反射率 | 天井 | 0.89 |
| | 壁 | 0.80 |
| | 床 | 0.10 |

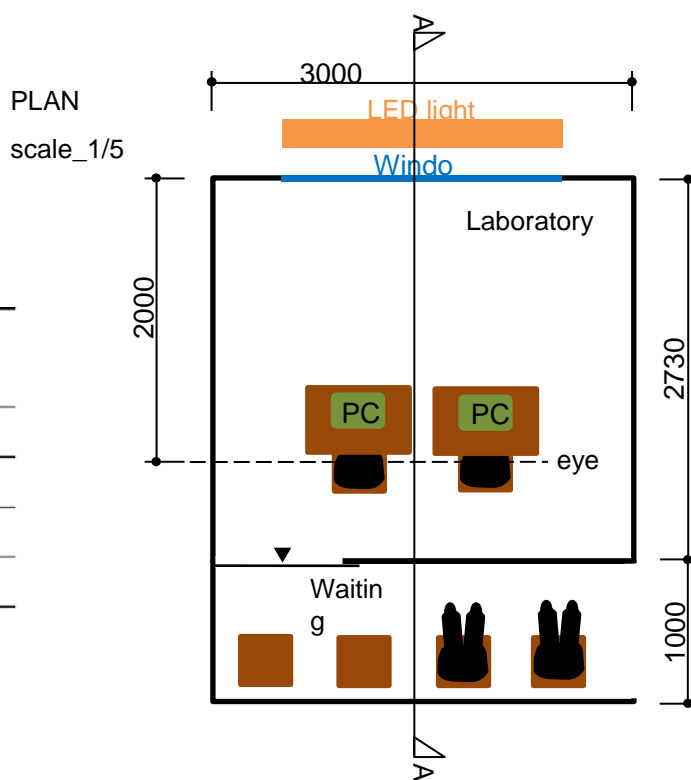


図 5.20 光環境実験室の平面図

A-A' SECTION

scale_1/50

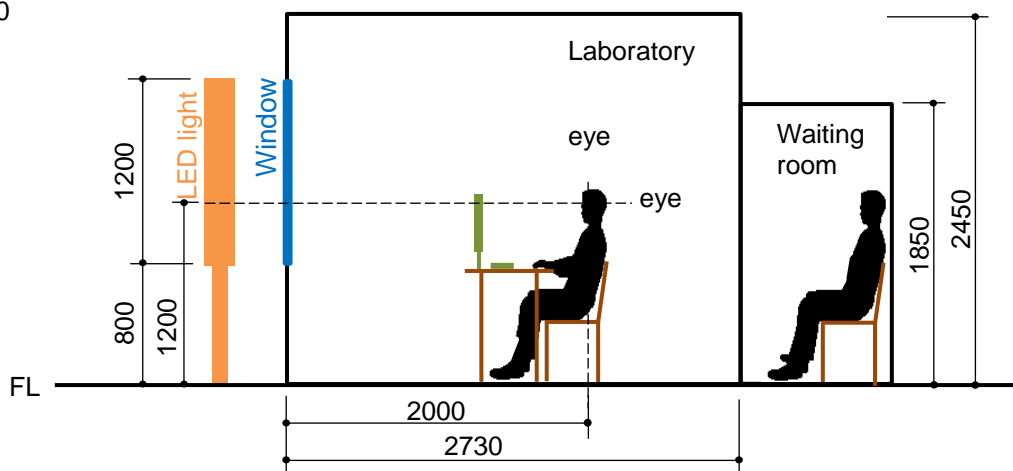


図 5.21 光環境実験室の断面図

本実験で使用した人工窓は、拡散光による窓面輝度を再現し、実際の窓面のように直射日光の再現はできない。そのため、直射日光の有無の違いがスラット開閉動作に伴う窓面平均輝度の変化に与える影響を確認するため、第4章の計算条件を用いて窓面平均輝度のシミュレーションを行った。図 5.22 に直射日光があると仮定した場合とないと仮定した場合（拡散光のみ）の窓面平均輝度の変化を示す。スラット角はスラットを吊るす紐によって制御されるため、ここでは横軸を $\sin\theta$ (θ : スラット角) として示した。スラット角を 15[deg] から 35[deg] に閉めるときの窓面平均輝度変化量 ΔL_w は、直射日光があると仮定した場合は約 810[cd/m²]、拡散光のみがあると仮定した場合は約 940[cd/m²] となった。直射日光があると仮定した場合に比べて、拡散光のみの窓面平均輝度はスラットを閉めるほど急激に減少する。

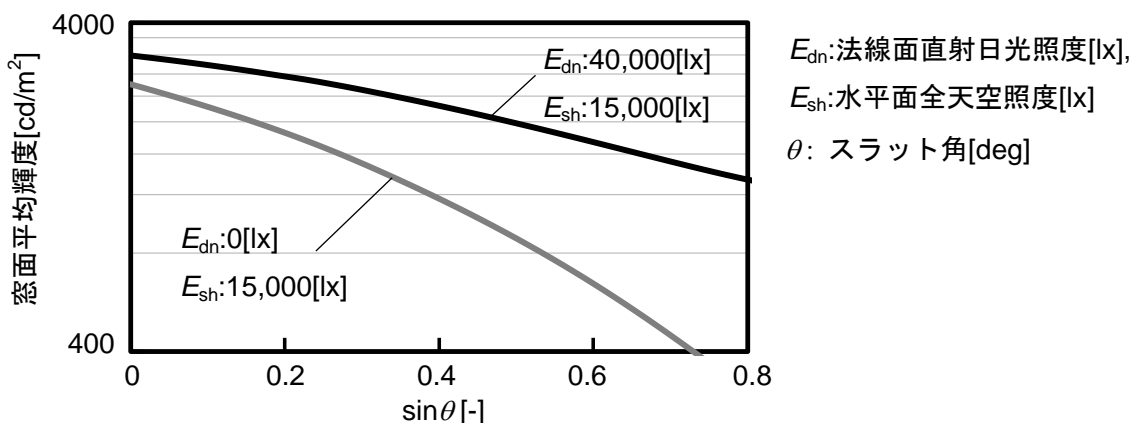


図 5.22 直射日光があるまたはないと仮定した場合の窓面平均輝度の変化(直射日光入射角 45[deg]の条件)

5.3 実験方法

5.3.1 実験条件

本実験と追加実験の実験条件を表 5.8、表 5.9 に示す。スラット角制御は不快グレア抑制制御を想定し、実験室の窓条件で PGSV=0.9 となる窓面平均輝度（約 2800[cd/m²]）を算出した。その輝度値をスラット切替後輝度として設定した。さらに、窓面平均輝度変化量は 4 章のシミュレーション結果を参考に決定し、スラット開閉速度を基準に実験条件を作成した。窓面平均輝度変化率は 4 章のシミュレーション結果の範囲内となるようにした。窓面平均輝度変化量を 4 条件、スラット開閉速度を 5 条件、計 20 条件を本実験で行い、さらに追加実験で 4 条件の計 24 条件を実験条件とした。設定窓面平均輝度と測定した窓面平均輝度は 5[%]未満の誤差範囲で制御できた。

表 5.8 本実験の実験条件

計 20 条件

| 条件 | 設定窓面平均輝度 | | スラット角 | | スラット開閉速度[deg/s] |
|----|---------------------------------------|--------|-----------------------|-----------------|-----------------|
| | 切替後一切替前 =変化量[cd/m ² /回] | 変化率[-] | 切替後一切替前 = 変化量[deg] | 開閉に要 する時間[s] | |
| A | 2800-1000=1800 | 1.8 | 34-54=-20 | 0.7~9.1 | (1) 2.2 |
| B | 2800-1900=900 | 0.47 | 18-34=-16 | 0.5~7.3 | (2) 7.4 |
| C | 2800-6400=-3600 | -0.56 | 54-34=20 | 0.7~9.1 | (3) 14.8 |
| D | 2800-4600=-1800 | -0.39 | 34-18=16 | 0.5~7.3 | (4) 18.5 |
| | | | | | (5) 29.6 |

表 5.9 追加実験の実験条件

計 4 条件

| 条件 | 設定窓面平均輝度 | | スラット角 | | スラット開閉速度[deg/s] |
|----|---------------------------------------|--------|-----------------------|-----------------|-----------------|
| | 切替後一切替前 =変化量[cd/m ² /回] | 変化率[-] | 切替後一切替前 = 変化量[deg] | 開閉に要 する時間[s] | |
| A | 2800-1000=1800 | 1.8 | 34-54=-20 | 0.5 | (6) 37 |
| E | 3700-1000=2700 | 2.7 | 18-34=-16 | 0.9 | (4) 18.5 |
| C | 2800-6400=-3600 | -0.56 | 54-34=20 | 0.5 | (6) 37 |
| F | 2800-5500=-2700 | -0.49 | 34-18=16 | 0.9 | (4) 18.5 |

5.3.2 評価対象

昼光変動の評価に関する既往研究では、評価時の視線方向は机上面であるものが多い¹⁾⁶⁾。近年では、PC 画面を見ることが多く、視線が水平で視野に窓が入り、昼光変動による不快感が引き起こされる可能性が高くなっている。本研究では、窓に正対した位置で PC 画面直視時の窓面の明るさを評価対象とした。

5.3.3 実験手順

実験手順を図 5.23 に示す。手順は本実験、追加実験ともに同様に行った。本実験が 17 名（平均 21.7 歳）、追加実験が 12 名（平均 22.3 歳）の計 29 名の学生が被験者として参加した。1 グループ 1~2 名で、一回の実験に各条件につき 2 グループずつ実験を行った。被験者はまず鉛直面照度 450[lx]に設定した待機室で 10 分間待機し、実験室に入室する。実験室に入室後、ヘッドフォンを用いてホワイトノイズを聞きながら、VDT 作業を約 4 分間行い、実験終了時に実験中の光環境の変化に関する評価を行った。VDT 作業はディスプレイ上の文章の黙読とすることで、被験者は常にディスプレイを注視し、視野内に窓面がある状態を保った。実験者は人工窓のみの明るさを変化させる際、被験者が気づかないように時間をかけて調光した。人工窓調光後、スラットを開閉し、そのときの窓面の明るさ変化を被験者に評価させた。評価には、図 12 に示す窓面明るさ変化感の評価スケール、図 13 に示す許容度スケールを用いた。図 12 に示す評価スケールはグレアの評価スケール⁷⁾と既往研究¹⁾を参考に作成した。窓面明るさ変化感の評価値は、明るさの変化を感じ始めた：0、気になり始めた：1、不快だと感じ始めた：2、ひどすぎると感じ始めた：3、として集計した。許容度は、実験条件の窓面輝度変化が 1 日に起こる回数を想定して評価した。全 8 回の実験ごとに実験条件の順序を乱数で決定し、異なる順番で実験を繰り返し行った。

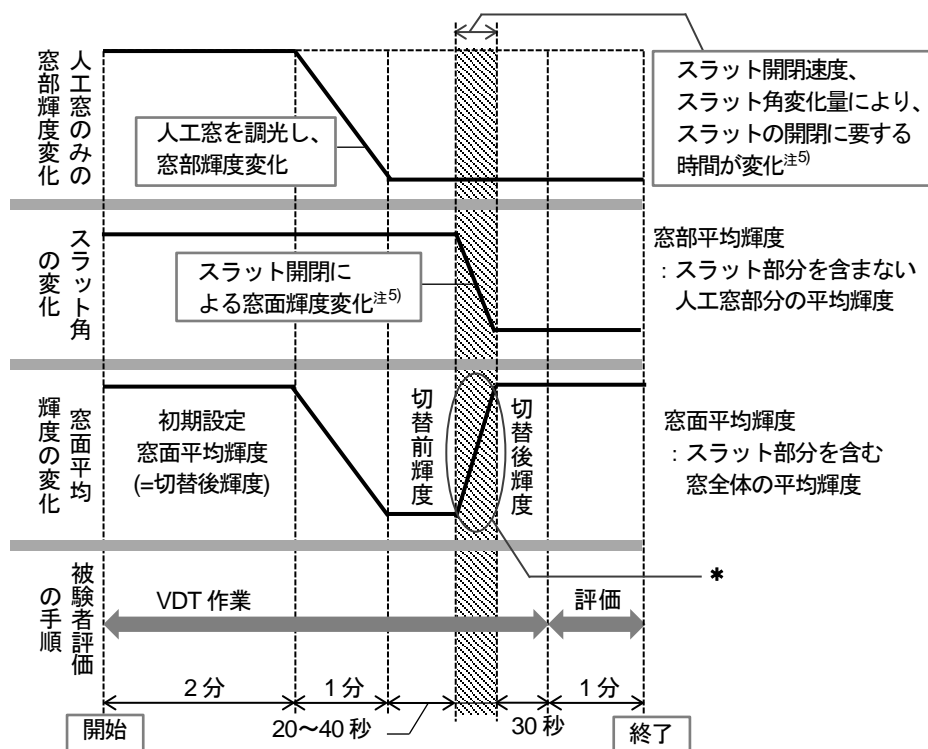


図 5.23 実験手順（窓面平均輝度が増加する場合）
*：窓面平均輝度の変化については^{注5)}に示す

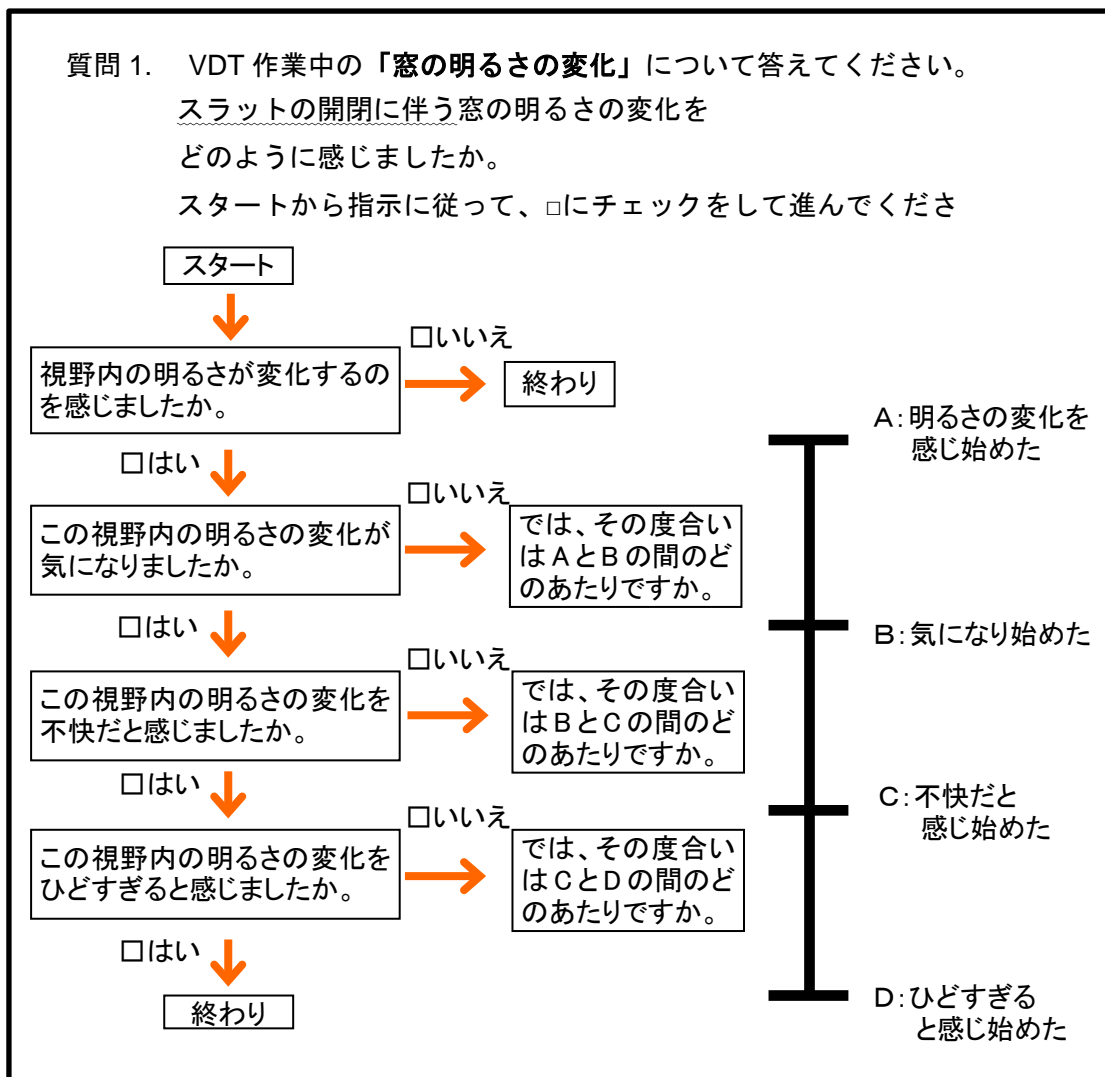


図 5.24 窓面明るさ変化感の評価項目

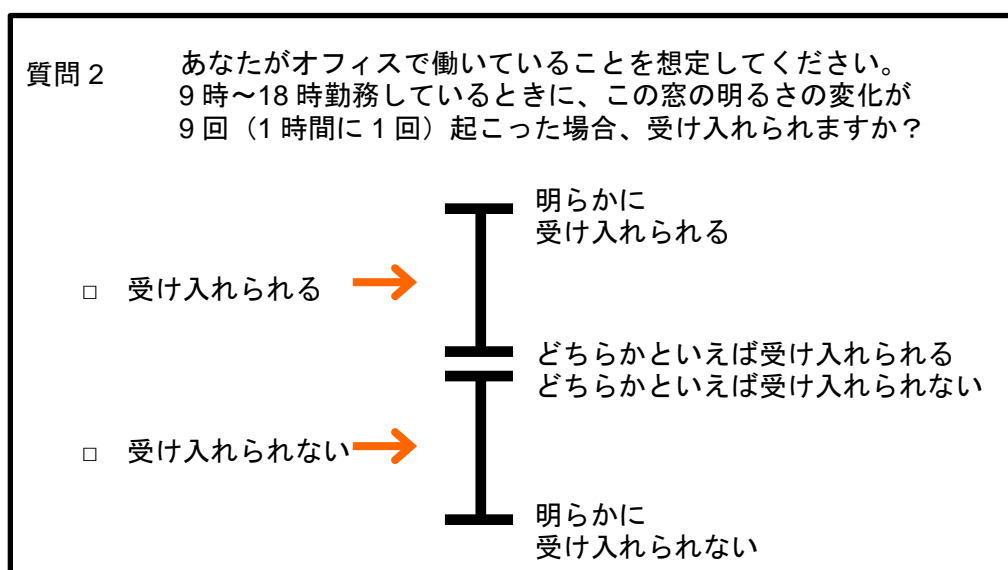


図 5.25 許容度の評価項目

被験者が実験中に体験するスラット開閉動作に伴う窓面平均輝度の変化を確認するため、スラットを0～60[deg]まで2～3[deg]間隔に変化させ、そのときの窓面平均輝度をCCDカメラにより測定した。スラット開閉動作に伴う窓面平均輝度の変化の例を図5.26に示す。スラット角はスラットを吊るす紐によって制御されるため、ここでは横軸を $\sin\theta$ (θ :スラット角)として示した。

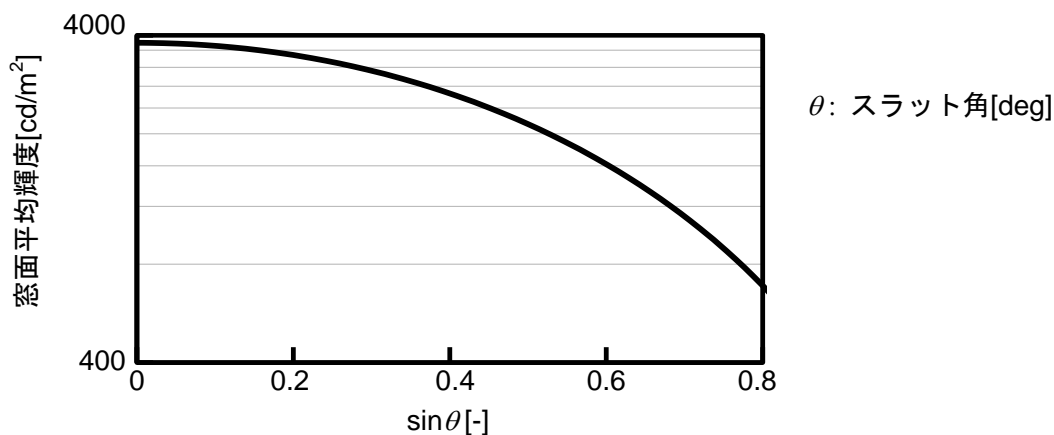


図 5.26 スラット開閉動作に伴う窓面平均輝度の変化
(スラット部分を含まない窓部平均輝度が $4800[\text{cd}/\text{m}^2]$ の条件)

なお、窓面明るさ変化感に対する質問では、まず左側1番目の質問の「窓面の明るさが増えるのを感じましたか」に対して、「はい」であれば下に進み、「いいえ」であればここで終了となる。2番目以降の質問に対して「いいえ」であれば、右側のスケール上に横線を記入し終了となる。

5.4 実験結果

5.4.1 スラット開閉速度と窓面明るさ変化感

窓面明るさ変化感について得られたデータが正規分布に従うかを確認するため、コルモゴロフ・スミルノフの検定を行った。検定結果を表 5.10 に示す。輝度が増加する場合には条件 B(1), B(2), B(4)、輝度が減少する場合には条件 C(4), D(3), D(5)で有意差が見られた。その他の条件では有意差は見られず、正規分布であるとみなすことができる。多くの条件で申告が正規分布に従っていたことを確認した。

表 5.10 窓面明るさ変化感の正規性の検定結果

| 条件 | n | 平均 | 標準偏差 | 歪度 | 尖度 | コルモゴロフ・スミルノフ検定 | |
|------|----|-------|------|-------|------|----------------|--------|
| | | | | | | 統計量 | P 値 |
| A(1) | 21 | 0.69 | 0.83 | 0.15 | 2.20 | 0.11 | >=0.10 |
| A(2) | 21 | 0.87 | 0.86 | 0.40 | 2.64 | 0.11 | >=0.10 |
| A(3) | 21 | 0.93 | 0.94 | 0.85 | 3.61 | 0.16 | >=0.10 |
| A(4) | 21 | 1.51 | 0.99 | 0.54 | 2.53 | 0.16 | >=0.10 |
| A(5) | 21 | 1.37 | 0.89 | 0.13 | 3.35 | 0.11 | >=0.10 |
| A(6) | 8 | 0.58 | 0.92 | 0.11 | 1.49 | 0.19 | >=0.10 |
| B(1) | 21 | 0.07 | 0.79 | 1.63 | 4.85 | 0.24 | 0.0026 |
| B(2) | 21 | -0.03 | 0.62 | 1.19 | 3.57 | 0.30 | 0.0000 |
| B(3) | 21 | 0.42 | 0.84 | 0.57 | 2.24 | 0.15 | >=0.10 |
| B(4) | 21 | 0.14 | 0.77 | 1.02 | 3.15 | 0.27 | 0.0003 |
| B(5) | 21 | 0.22 | 0.50 | -0.28 | 1.74 | 0.16 | >=0.10 |
| C(1) | 21 | 0.63 | 1.11 | 0.78 | 3.07 | 0.18 | 0.0839 |
| C(2) | 21 | 0.68 | 0.78 | 0.27 | 2.42 | 0.12 | >=0.10 |
| C(3) | 21 | 1.10 | 0.78 | 0.04 | 2.49 | 0.11 | >=0.10 |
| C(4) | 21 | 1.20 | 0.81 | 1.18 | 4.63 | 0.24 | 0.0035 |
| C(5) | 21 | 1.07 | 0.77 | -0.43 | 2.87 | 0.18 | 0.0884 |
| C(6) | 8 | 0.69 | 0.71 | 1.23 | 3.59 | 0.22 | >=0.10 |
| D(1) | 21 | -0.12 | 0.64 | 2.13 | 7.66 | 0.34 | 0.0000 |
| D(2) | 21 | 0.33 | 0.88 | 0.67 | 2.14 | 0.21 | 0.0183 |
| D(3) | 21 | 0.45 | 1.18 | 1.13 | 3.27 | 0.22 | 0.0097 |
| D(4) | 21 | 0.41 | 0.81 | 0.48 | 2.02 | 0.17 | >=0.10 |
| D(5) | 21 | 0.31 | 0.88 | 0.85 | 2.73 | 0.20 | 0.0225 |
| E(4) | 8 | 1.73 | 0.94 | -0.05 | 1.51 | 0.21 | >=0.10 |
| F(4) | 8 | 1.48 | 1.24 | 0.03 | 2.39 | 0.13 | >=0.10 |

有意確率が 5%以下でデータが正規分布でないと判断された条件

窓面平均輝度の変化条件ごとのスラット開閉速度と窓面明るさ変化感を図 5.29、図 5.30 に示す。窓面平均輝度変化率の条件ごとにスラット速度による影響を把握するため、正規分布であると確認された条件間で一元配置分散分析を行った結果、図 5.29 と図 5.30 中に示した有意差が認められた。窓面明るさ変化感は、輝度が増加または減少のいずれの場合においても、スラット開閉速度が速くなるにつれて増加すると予想されたが、あるスラット開閉速度でピークとなり、それ以上の値では減少する傾向がみられた。被験者はディスプレイを見ていたため、スラット開閉速度が非常に速い場合と非常に遅い場合に窓面の明るさ変化に気づきにくくなったと考えられる。

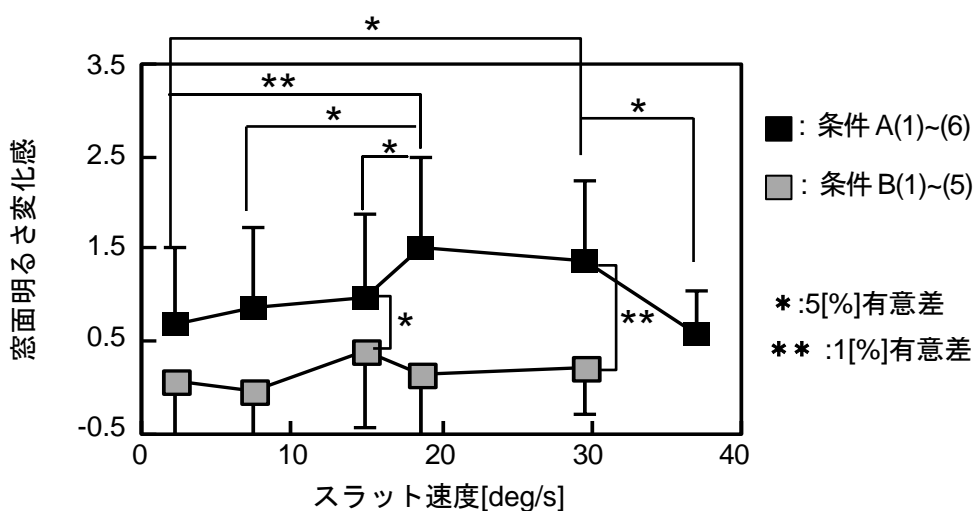


図 5.24 スラット開閉速度と窓面明るさ変化感（輝度が増加する場合）

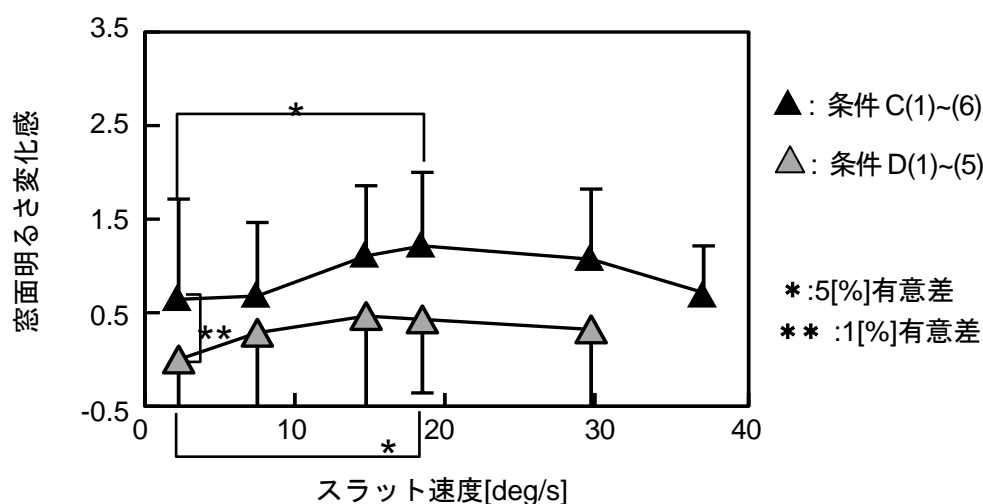


図 5.25 スラット開閉速度と窓面明るさ変化感（輝度が低くなる場合）

5.4.2 窓面明るさ変化感と不満者率の関係

図 5.26 に窓面明るさ変化感と不満者率を示す。縦軸は全被験者数に対して「受け入れられない」と回答した人の割合を示す。ばらつきが大きいものの、窓面明るさ感と不満者率の関係式を求めるため、ここではロジスティック回帰を行った。図 5.26 の結果から、不満者率 20[%]のとき窓面明るさ変化感 は 1.0、不満者率 10[%]のとき窓面明るさ変化感 は 0.7、不満者率 5[%]のとき窓面明るさ変化感 は 0.4 であった。これにより、窓面明るさ変化感の基準値が求められた。

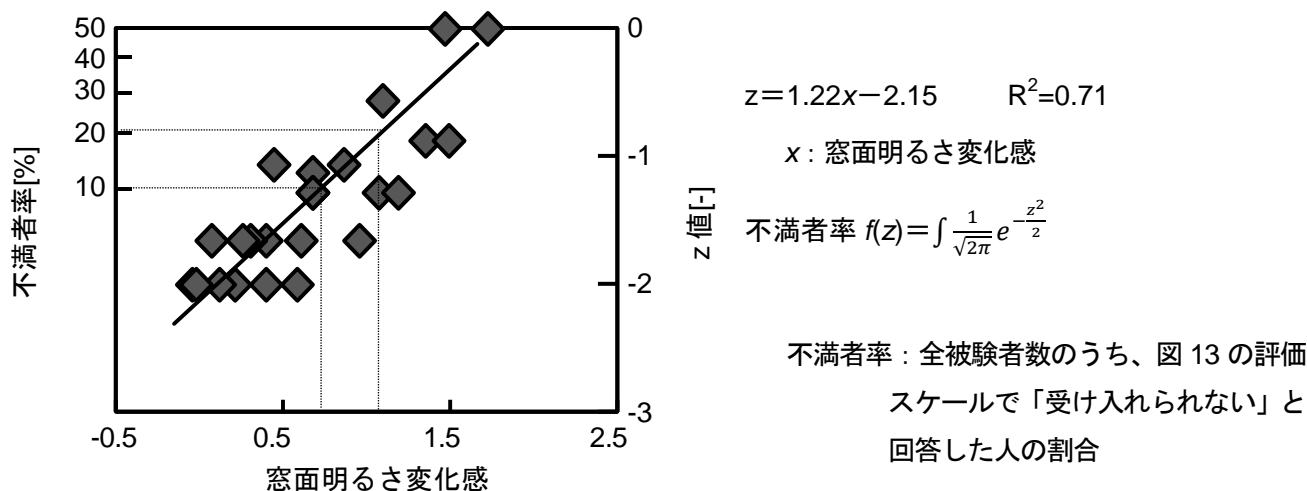


図 5.26 窓面明るさ変化感と不満者率

5.4.3 切替時窓面平均輝度変化量，スラット開閉速度，切替時窓面平均輝度変化率と窓面明るさ変化感

窓面平均輝度変化量 ΔL_w ，スラット開閉速度，窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w/L_{wb}$ と窓面明るさ変化感を図 5.27 に示す。横軸の窓面平均輝度変化量 ΔL_w は、輝度が増加する場合を正、輝度が減少する場合を負の値とし、円の大きさが窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w/L_{wb}$ を示す。窓面の明るさ変化感は、図 5.26 で求めた基準値を用いて図 5.27 中の線の種類によって区別した。

この結果、輝度が増加する場合には、切替時窓面平均輝度変化量 ΔL_w が 1800[cd/m²/回]以上で切替時窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w/L_{wb}$ が 1.8 以上のとき、スラット開閉速度を速く (37[deg/s]) または遅く (2.2[deg/s]) することで、窓面明るさ変化感を 0.6 程度まで抑えることができる。輝度が減少する場合には、切替時窓面平均輝度変化量 ΔL_w が-3600[cd/m²/回]以上で切替時窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w/L_{wb}$ が-0.56 以下のとき、スラット開閉速度を速く (37[deg/s]) または遅く (2.2~7.4[deg/s]) することで、窓面明るさ変化感 0.7 程度まで抑えることができる。

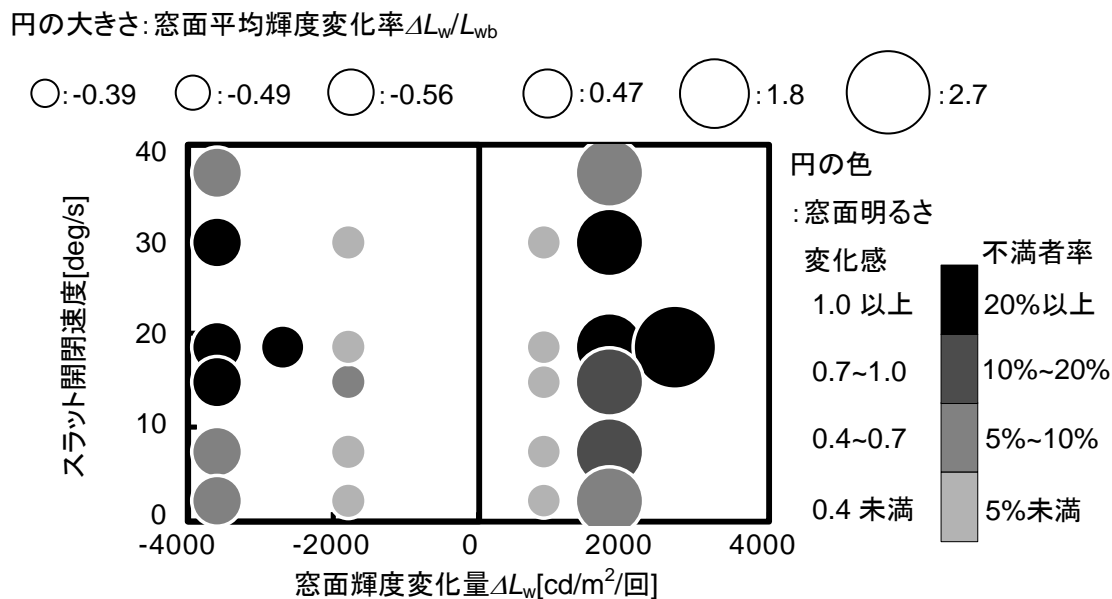


図 5.27 切替時窓面輝度変化量 ΔL_w , スラット開閉速度, 切替時窓面輝度変化率 $\Delta L_w/L_{wb}$ とスラット角切り替え時の明るさ変化感

5.5 窓面明るさ変化感に基づくスラット開閉速度決定法フローの提案

スラット開閉に伴う窓面明るさ変化感に基づくスラット開閉速度決定法フローを図 5.28 に示す。実験結果から、切替前後のスラット角 θ_b , θ_a 、スラット切替前後の窓面平均輝度 L_{wb} , L_{wa} 、切替時窓面平均輝度変化量 ΔL_w 、切替時窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w/L_{wb}$ 、スラット開閉初期設定速度 v_0 をパラメータとして用いる。ここでは、スラット角変化量、スラット開閉初期設定速度 v_0 、窓面平均輝度変化量 ΔL_w から「単位時間あたりの窓面平均輝度変化量 $\Delta L_w/t_s$ [cd/m²/回/s]」を求め、窓面明るさ変化感が不快にならないスラット開閉速度を決定することとした。なお、図 5.28 中に示した X , Y , Z は不満者率から決定されるが、本研究の不満者率の実験結果にばらつきが見られたため、ここではスラット開閉速度決定法フローには不満者率を含めず、図 5.28 中に注として示した。

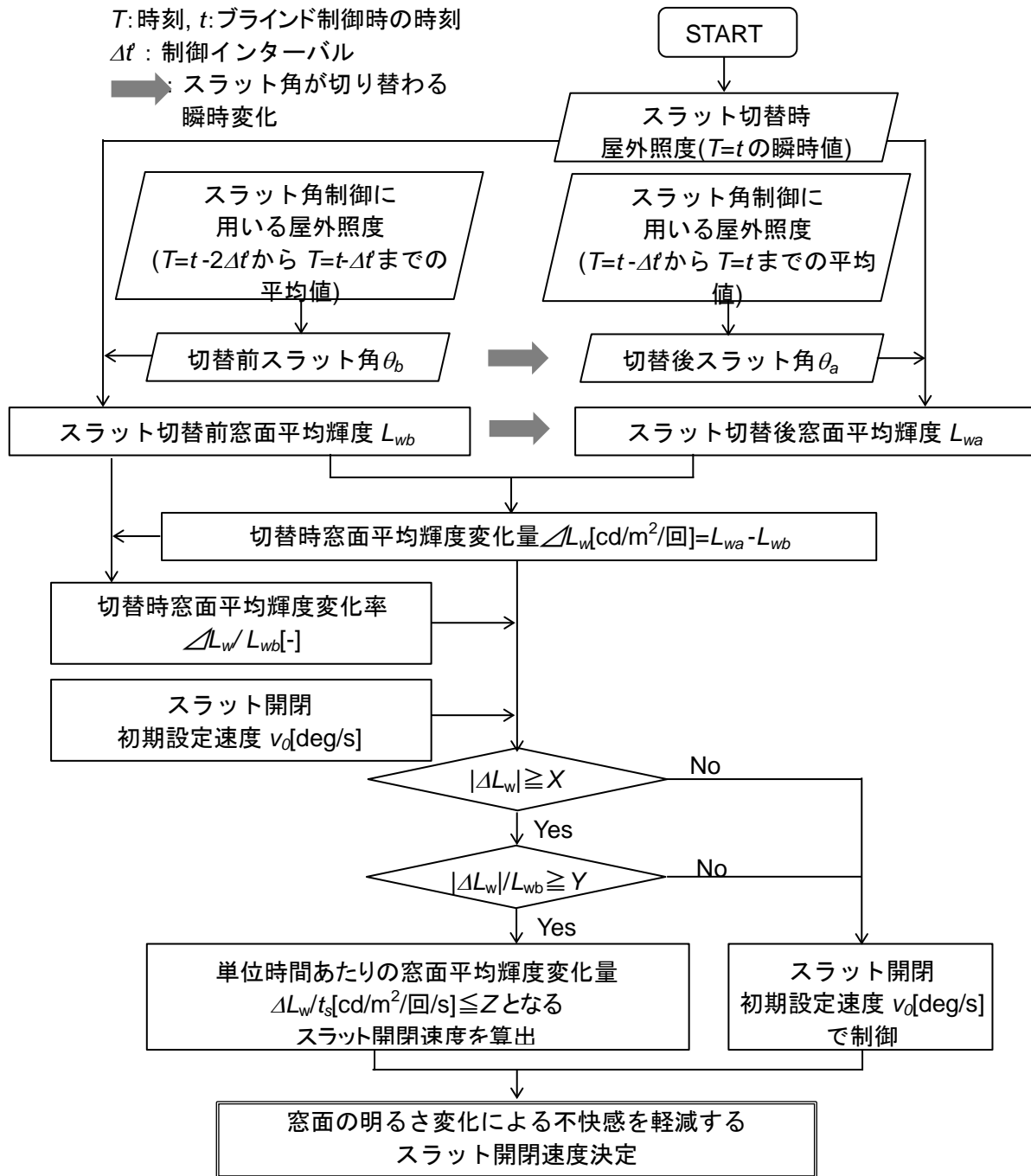


図 5.28 窓面明るさ変化感に基づくスラット開閉速度決定法フロー^{注12)}

注) 不快グレア抑制制御と同様に、不満者率 10[%]以下(窓面明るさ変化感 0.7 以下)に制御する場合、本研究結果を用いると、窓面平均輝度が増加するときでは $X=1800$, $Y=1.8$, $Z=200$ 、窓面平均輝度が減少するときでは $X=3600$, $Y=0.56$, $Z=900$ となった。

5.6 結論

第4章では、ブラインド制御導入時に発生するもう問題点の一つとして「時間の分割」に着目し、制御インターバルの違いとスラット角開閉動作による窓面輝度変化を把握することを目的に、気象データを用いた窓面平均輝度シミュレーションを行った。その結果、制御インターバルの違いよりも、不快グレア抑制制御によるスラット角切替時の窓面輝度変化が大きいことが明らかとなった。そのため本章では、自動制御ブラインドのスラット開閉に伴う窓面の明るさの変化による不快感を軽減することを目的に、人工窓を用いた光環境実験室において、第4章の窓面輝度変化を再現し被験者評価実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 前章（第4章）のシミュレーション結果を参考に作成した条件で、スラット開閉動作に伴う窓面の明るさ変化に対する被験者評価実験を行った。実験の結果、窓面明るさ変化感は、輝度が増加または減少する場合においても、スラット開閉速度が速くなるにつれて増加すると予想されたが、あるスラット開閉速度でピークとなり、それ以上の値では減少することを確認した。
- (2) 本章の実験結果から、窓面平均輝度変化量 ΔL_w 、窓面平均輝度変化率 $\Delta L_w / L_{wb}$ 、単位時間あたりの窓面平均輝度変化量 $\Delta L_w / t_s$ を用いて、スラット開閉動作に伴う窓面の明るさ変化による不快感を軽減するスラット開閉速度決定法を具体的に示した。

本章で提案した窓面明るさ変化感に基づくスラット開閉速度決定法を用いることにより、スラット角切り替えに伴う窓面の明るさ変化による不快感を軽減することが可能となったと考える。ここでは、被験者が窓に正対した条件で評価を行ったが、実際のオフィス空間に本章で提案した制御方法を導入する場合には、窓に平行に座った条件や窓が背面にある条件など、実際のオフィスでの執務者の座席条件についても今後検討を行う必要があると考えられる。さらに、本章では制御対象をブラインドとしているが、窓面輝度を自由に制御できるものであれば、そのほかの昼光装置にも窓面輝度変化速度という概念が応用できると筆者は考えている。

【第5章の参考文献】

- 1) 織間亜希、岩田利枝、宿谷昌則、木村建一：昼光の変動に応じた電灯照明制御が在室者の快適性に与える影響、日本建築学会計画系論文集、第486号、pp.9-16、1996.8
- 2) S.Kim, J.Kim : Influence of light fluctuation on occupant visual perception, Building and Environment, Vol.42, pp.2888-2899, 2007.
- 3) 池上陽子、井上容子：昼光の変動を緩和する人工照明の調節方法に関する研究－昼光の実態調査と単調な照度変化実験－、照明学会講演論文集、p.0614、2015.9
- 4) 國分詠美子、鈴木晴翔、鄭 新源、宗方 淳：照明の変動知覚における照度比と変化率の影響に関する研究、日本建築学会環境系論文集、第80巻、第711号、pp.407-414、2015.5
- 5) 鹿倉智明、森川宏之、中村芳樹：オフィス照明環境における明るさの変動知覚に関する研究、照明学会誌論文号、第85巻、第5号、pp.346-351、2001.5
- 6) 春川陽介、竹田昇平、吉澤望：照明環境の時間変動に対する知覚処理方法別の知覚閾算出、照明学会講演論文集、p.0637、2015.9
- 7) T.Iwata, W.Osterhaus, H.Ito : Assessment of discomfort glare from windows with venetian blinds using luminance distribution images, Proc. of 27th session of CIE, pp.751-757, 2011.

第6章 特殊ブラインドの計算への適用

6.1 はじめに

本章では、特殊ブラインドの一つである角度変化型ブラインドを取り上げ、第2章で提案したブラインド輝度計算方法を特殊ブラインドに適用させた場合の計算精度について検討した。

角度変化型ブラインド³⁾⁴⁾は特殊ブラインドの一つであり、窓側と室内側のスラット間隔に差を設けることで、ブラインドの上部から下部へとスラット角が閉まり気味に変化する。この特徴から、グラデーションブラインドと呼ばれることも多い。現在、市販されている角度変化型ブラインドはスラット形状（幅、間隔、間隔差）および可視光反射率（以下、反射率）の組み合わせが様々あり、形状や光学特性値による照明用電力削減効果の比較検討は行われていない。既往の研究においても、実在建物導入時の照明用電力削減効果の把握³⁾⁴⁾や数値計算による単一条件の角度変化型ブラインドの性能を示す⁵⁾⁶⁾に留まっている。

6.2 角度変化型ブラインドの概要

角度変化型ブラインドの概要を図6.1に示す。角度変化型ブラインドは窓側と室内側のスラット間隔に差を設け、下部のスラット角が閉まり気味となる。天井から1枚目のスラットを直射日光遮蔽角に制御し、ブラインドの各位置のスラット角は次式より算出される⁷⁾。

$$\theta_i = \sin^{-1} \frac{w \sin \theta_0 + (i-1)\Delta s}{w} \quad (6.1)$$

θ_i : 対象スラットのスラット角[deg] i : 対象スラットの天井からのスラット枚数[-] θ_0 : 天井から1枚目のスラット（基準スラット）の角度 [deg] w : スラット幅[mm] Δs : スラット間隔差[mm]

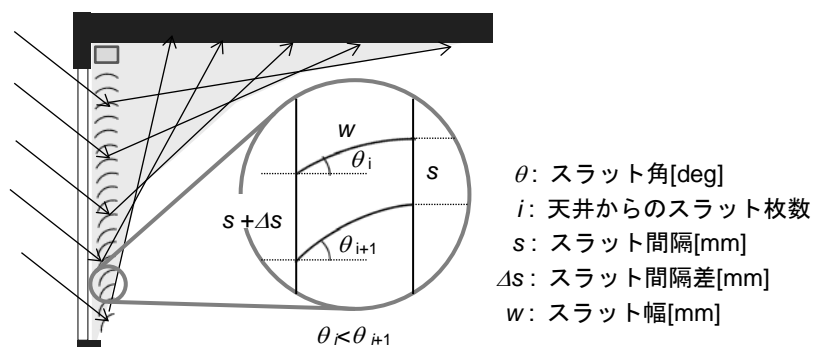


図 6.1 角度変化型ブラインド概要

6.3 形状によるスラット角への影響

6.3.1 計算方法

角度変化型ブラインドでは窓側と室内側の間隔差 Δs がわずか0.2[mm]程度でスラットの角度に変化をつけている。スラット形状が直射日光遮蔽角および天井からの各位置のスラット角の変動に及ぼす影響を把握するため、シミュレーションを行った。直射日光遮蔽角 θ_{suncut} を式(6.2)に、スラット計算条件を表6.1に示す。スラット形状による直射日光遮蔽角の違いを示すため、スラット幅が等しく間隔が異なるスラット条件とした。また、条件(I)は幅 w 25[mm]、間隔 s 21.5[mm]のスラットと s/w がほぼ等しくなる。間隔差は市販されている角度変化型ブラインドの一般的な値を参照し、仮定した。

$$\theta_{\text{suncut}} = \tan^{-1} \frac{s/w \cos Ap}{\sqrt{1 - (s/w \cos Ap)^2}} - Ap \quad (6.2)$$

θ_{suncut} : 直射日光遮蔽角[deg] s : スラット間隔[mm] w : スラット幅[mm] Ap : プロファイル角[deg]

表 6.1 スラット計算条件

| スラット | (I) | (II) |
|---------------------|---------|-------|
| 幅 w [mm] | 35 | 35 |
| 間隔 s [mm] | 30 | 25 |
| s/w | 0.857 | 0.714 |
| 間隔差 Δs [mm] | 0.1、0.2 | |

6.3.2 計算結果

図 6.2 にプロファイル角と直射日光遮蔽角の関係を s/w 毎に示し、図 6.3 にスラットの位置によるスラット角の違いを Δs 毎に示す。図 6.2 より s/w が小さいほど直射日光遮蔽角は小さくなる。例えば、太陽高度 15[deg]、太陽方位角 55[deg]、窓面方位角 0[deg]のときのプロファイル角は 25[deg]であり、直射日光遮蔽角は条件(I)で 25[deg]、条件(II)で 15[deg]となる(図 6.2 中破線①)。天井から 1 枚目のスラット(天井からのスラット位置 0[m])を直射日光遮蔽角 0[deg]に制御すると(図 6.2 中破線②)、天井からの各位置のスラット角は図 6.3 に示すようになる。目線位置でのスラット角(天井高さが 3.5[m]、目線高さが床面から 1.2[m]を想定、図 6.3 中破線③)は、条件(I)では $\Delta s=0.1$ [mm]で 40[deg]、 $\Delta s=0.2$ [mm]で 59[deg]、条件(II)では $\Delta s=0.1$ [mm]で 28[deg]、 $\Delta s=0.2$ [mm]で 44[deg]となる(図 6.3 中破線④)。スラット間隔差 Δs が目線位置のスラット角に与える影響が大きい。

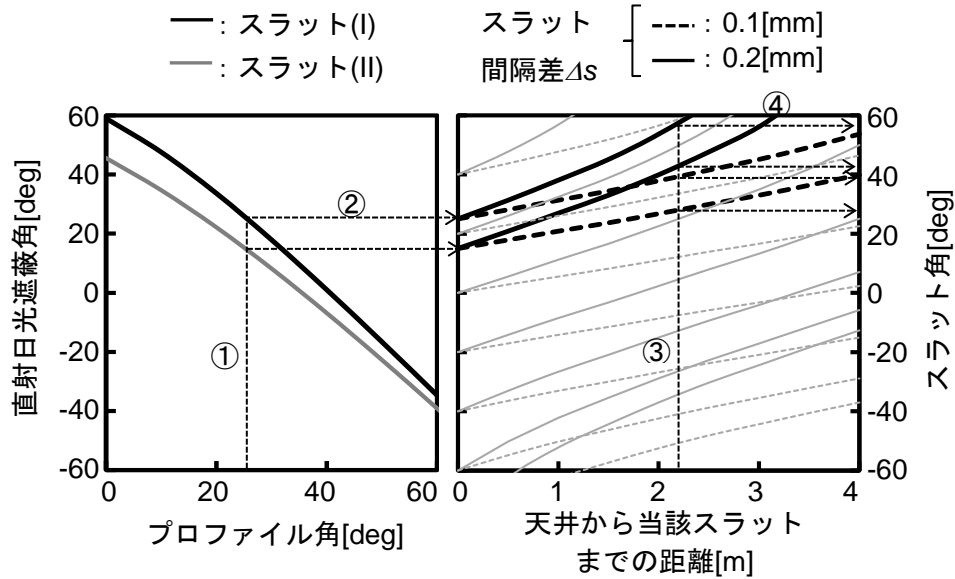


図 6.2 s/w による直射日光遮蔽角の違い

図 6.3 天井からのスラットとスラット角の変化

6.4 ブラインドのスラット角制御性能の確認

6.4.1 測定方法

6.3 でスラット間隔差 Δs が目線位置のスラット角に与える影響が大きいことを示した。本節 6.4 では、市販の角度変化型ブラインドのスラット角の制御性能を確認するため、スラットの角度測定を行った。

6.4.1.1 ブラインド条件

スラット形状を表 6.1 に示す。測定にはメーカー3 社が製作した角度変化型ブラインド計 5 台を使用した。

表 6.2 スラット形状

| メーカー | A | | B | | C |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ブラインド条件 | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ |
| 幅 w [mm] | 25 | 35 | 25 | 35 | 25 |
| 間隔 s [mm] | 21.5 | 30 | 21 | 25 | 21 |
| 間隔差 Δs [mm] | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.25 | 0.2 |
| s/w | 0.86 | 0.857 | 0.84 | 0.714 | 0.84 |
| $\Delta s/s$ | 0.0093 | 0.0100 | 0.0095 | 0.0100 | 0.0095 |

6.4.1.2 測定手順

実際の制御時を想定し、実大窓に各ブラインドを設置して測定した。天井から1枚目のスラット（以下、基準スラット）を直射日光遮蔽角に制御し、スラット角の測定位置は天井から500[mm]間隔で1500[mm]までの4点とした。測定は、メーカーA、Bのブラインド4台が9時～14時まで30分間隔で直射日光遮蔽角にした。1台あたり11回の計44回、メーカーCのブラインド1台は13時～14時までの30分間隔で3回、計47回測定し、1回の測定につきスラット測定位置4点、計188個のデータを収集した。

6.4.2 測定結果

同じメーカーの製品で実測値と計算値を比較した。一例として、基準スラットの角度を10[deg]としたときのスラット条件③、④の結果を図6.4に示す。

測定データのうち、天井から0[mm]の条件を除く測定位置3点の実測値141個を用いて誤差率（ $|\text{計算値}-\text{実測値}|/\text{計算値}$ ）を算出した。誤差率は幅w25[mm]で約10[%]～18[%]、幅w35[mm]で約8[%]～15[%]程度となり、スラット幅が広い方が制御誤差は小さかった。

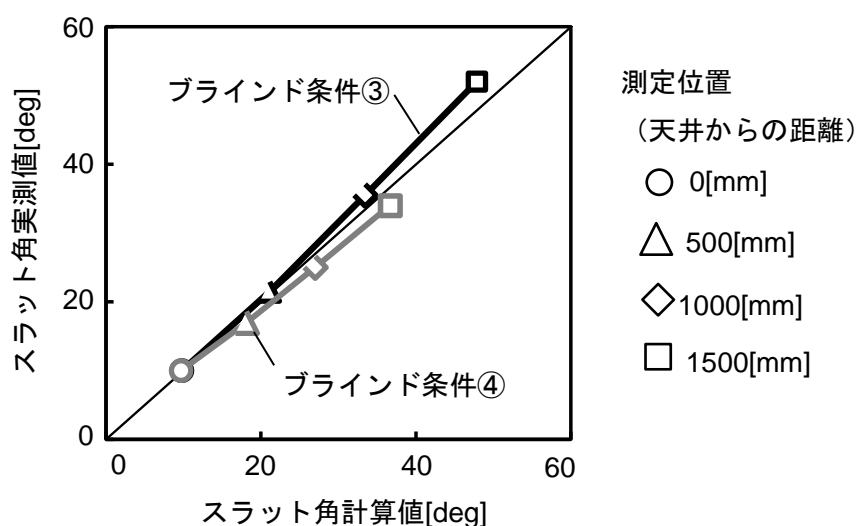


図 6.4 スラット角の計算値と実測値（スラット条件③、④、基準スラット 10[deg]）

6.5 照明用電力削減量の計算方法

角度変化型ブラインドによる照明用電力削減量の計算の流れを図 6.5 に示す。以下にスラット輝度および天井面からみたスラット立体角投射率、天井面に入射する窓面からの直接照度の計算方法を示す。

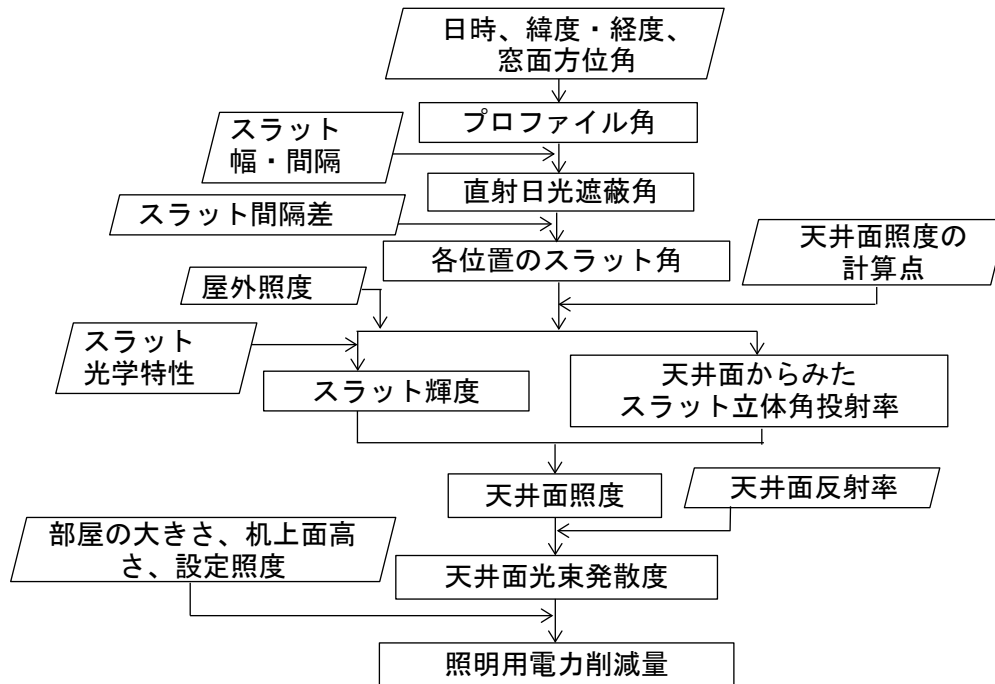


図 6.5 角度変化型ブラインドによる照明用電力削減量算出の流れ

6.5.1 ブラインド輝度

スラット輝度の算出には、宿谷らの方法⁹⁾により計算できる。図 6.6 のようにスラット下向き面 1、上向き面 2 への屋外から入射する直射日光、天空光、地表面反射日光によるスラット面照度 M_1 および M_2 は以下の式より与えられる。スラット面は平板且つ均等拡散面と仮定し、宿谷らの方法からスラットの光束発散度を計算し、 π で除することでスラット輝度を算出する。

$$M_1 = \rho_2 F_{31} \frac{s}{W_{sun}} E_{DV} \tau_{glass}(i) + F_{g1} R_g \tau_{glass}(60) \quad (6.3)$$

$$M_2 = F_{sky2} R_{sky} \tau_{glass}(60) + F_{g2} R_g \tau_{glass}(60) \quad (6.4)$$

M : 屋外から入射する直射日光、天空光、地表面反射日光によるスラット面照度[lx] s : ブラインド間隔[mm] W_{sun} : 直射日光が当たる部分のスラット幅[mm] $F_{\alpha\beta}$: 面 α を發した一様拡散光が面 β に入射する割合(形態係数)[-] $\tau_{glass}(i)$: ガラス透過率(i は入射角[deg]) [-] R_{sky} : 天空の光束発散度[lm/m²] R_g : 地表面の光束発散度[lm/m²] ρ : 反射率[-] E_{DV} : 窓面直射日光照射度[lx] 添字は 1、2、3 : スラット下向き面 1、スラット上向き面 2、面 2 上の直射日光照射部分、g は地表面、sky は天空

6.5.2 天井面からみたスラット立体角投射率

天井面からみたスラットの立体角投射率を以下の式より算出する。図 6.7 に示すように、スラットの幅・間隔および角度より天井面の計算位置から見たスラットの見える割合を 1 枚ずつ計算する。

$$x_{in}(j) = w \cos \theta(j)$$

$$y_{out}(j) = js$$

$$y_{in}(j) = y_{out} - w \sin \theta(j)$$

$$pointx(i) = ix_{span}$$

$$\alpha_{in}(i, j) = \cos(\tan^{-1}(y_{in}(j)/x_{in}(j)))$$

$$\alpha_{out}(i, j) = \cos(\tan^{-1}(y_{out}(j)/pointx(i)))$$

$\alpha_{in}(i, j) \geq \alpha_{out}(i, j)$ の場合

$$\varphi_{slat2}(i, j) = (\text{MAX}(\alpha_{in}(i, j-1), \alpha_{out}(i, j)) - \alpha_{in}(i, j))/2$$

$$\varphi_{slat1}(i, j) = 0$$

$\alpha_{in}(i, j) < \alpha_{out}(i, j)$ の場合

$$\varphi_{slat1}(i, j) = (\text{MIN}(\alpha_{out}(i, j), \alpha_{out}(i, j+1)) - \alpha_{in}(i, j))/2$$

$$\varphi_{slat2}(i, j) = 0$$

$\theta(j)$: j 番目のスラット角[deg] j : j 番目のスラット[-] i : i 番目の天井スパン[-] $x_{in}(j)$, $y_{in}(j)$: スラット室内側の x 座標、y 座標[-] $x_{out}(j)$, $y_{out}(j)$: スラット窓側の x 座標、y 座標[-] x_{span} : 天井面照度計算スパン[mm] s : スラット間隔[mm] w : スラット幅[mm] $\alpha_{in}(j)$, $\alpha_{out}(j)$: 計算微小面と室内側、窓側のスラット端部がなす角[-] $pointx(i)$: 奥行方向の天井座標[mm] $F_i(j)$: スラットの立体角割合[-] $\varphi_{slat1}(j)$, $\varphi_{slat2}(j)$: 下向き、上向き面スラットの立体角投射率[-]

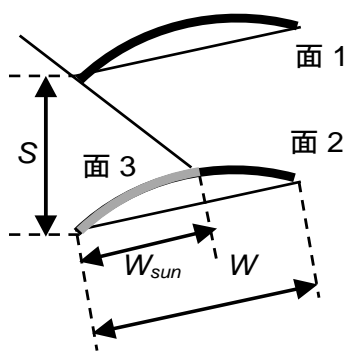


図 6.6 スラット面番号

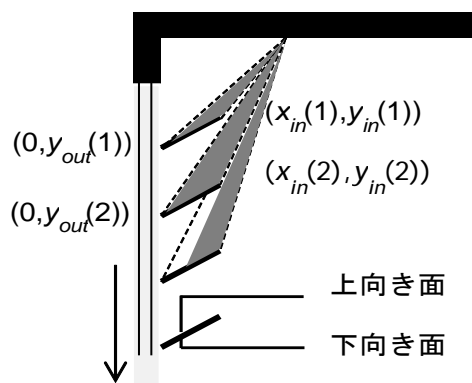


図 6.7 天井面からみたスラット
立体角投射率

6.5.3 天井面に入射する窓面からの直接照度

天井面に入射する窓面からの直接照度 E_d はスラット部分とスラット間から見える地表面部分から構成される。天井面に入射する照度 E_d を式(6.5)に示す。

$$E_d = \pi \sum L_i \varphi_i \quad (6.5)$$

E_d : 天井面に入射する窓面からの直接照度[lx] L : 各窓面要素輝度[cd/m²] φ : 各窓面要素立体角投射率[-]
添字 i は各窓面要素 (上向き、下向き面のスラット、スラット間から見える地表面部分)

6.6 スラットおよび天井面の輝度測定

6.6.1 実測方法

6.5 で示した方法の計算精度を確認するため、角度変化型ブラインドを含む窓面輝度分布と天井面輝度分布を測定した。実測は2013年10月27日、11月16日の晴天時に、東海大学湘南キャンパス12号館5階エレベーターホールにて行った。

6.6.1.1 実験場所

実測場所の概要を表6.3に示す。窓上高さ3.3[m]の位置の窓に、横幅2.7[m]のブラインドを2台設置できるようにした。実験室内は窓面以外からの外光の侵入を防ぐため、2台のブラインド間には暗幕による仕切りを設置し、壁、床を暗幕で覆った。天井の輝度分布測定部には、反射率0.80の白紙を設置した。

表 6.3 実測場所概要

| | | |
|-------------|-------------------|-----------------|
| 緯度、経度、窓面方位角 | 35°21'、139°16'、0° | |
| 窓 | 縦、横 | 2.4[m]、0.9[m] |
| 対向建物 | 窓面からの距離、高さ | 20[m]、4[m] |
| 反射率 | 対向建物、地表面 | 0.55[-]、0.20[-] |

6.6.1.2 実験条件

実測に使用した角度変化型ブラインドを表 6.4 に示す。スラット角制御位置は天井から 1 枚目のスラットとし、制御角は水平角 0[deg]から 60[deg]まで 10[deg]間隔の計 7 条件とした。測定した輝度分布画像から、天井から 375[mm]間隔で 750[mm]（目線位置）までの 3 点のスラット輝度を抽出した。

表 6.4 ブラインド測定条件

| ブラインド | | (I) | (II) | (III) |
|--------|---------------------|------|------|-------|
| スラット形状 | 幅 w [mm] | 25 | 35 | 25 |
| | 間隔 s [mm] | 21.5 | 30 | 21 |
| | 間隔差 Δs [mm] | 0.2 | 0.3 | 0.2 |
| 色調 | | 白 | 白 | 白 |
| 反射率[-] | | 0.85 | 0.87 | 0.77 |

6.6.1.3 測定手順

実験は 11 時から 12 時の間で太陽高度が安定している時間帯に行った。窓面から 1.0[m]、高さ 1.1[m]の位置で、制御角条件ごとにブラインド輝度および天井面輝度を測定した。測定には魚眼レンズ (SIGMA Circular Fish Eye、 Nikon fisheye converter) 付き CCD カメラ (Nikon D40x、 coolpix5000) を使用した。屋外照度は照度計 (KONICAMINOLTA、 T-10A) により測定した。図 6.8 に測定の流れを示す。

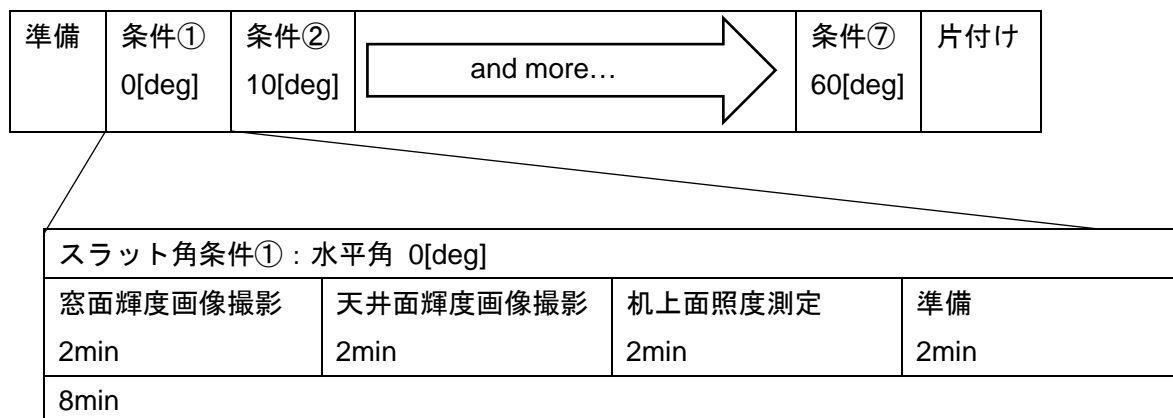


図 6.8 測定の流れ

6.6.2 実測結果

6.6.2.1 窓面輝度および天井面輝度

測定結果の一例として、基準スラット角 20[deg]のときブラインド(I)、(II)のブラインドを含む窓面輝度分布を図 6.9 に、天井面輝度分布を図 6.10 に示す。

水平面直射日光照度 67、016[lx]、水平面天空光照度 13、130[lx]

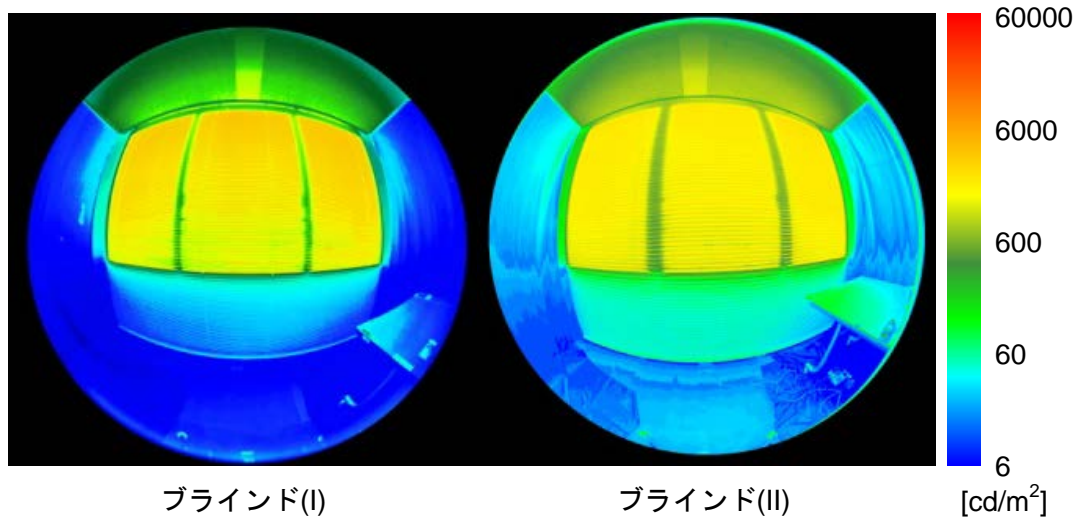


図 6.9 窓面輝度分布 (基準スラット 20[deg])

水平面直射日光照度 67、016 [lx]、水平面天空光照度 13、130 [lx]

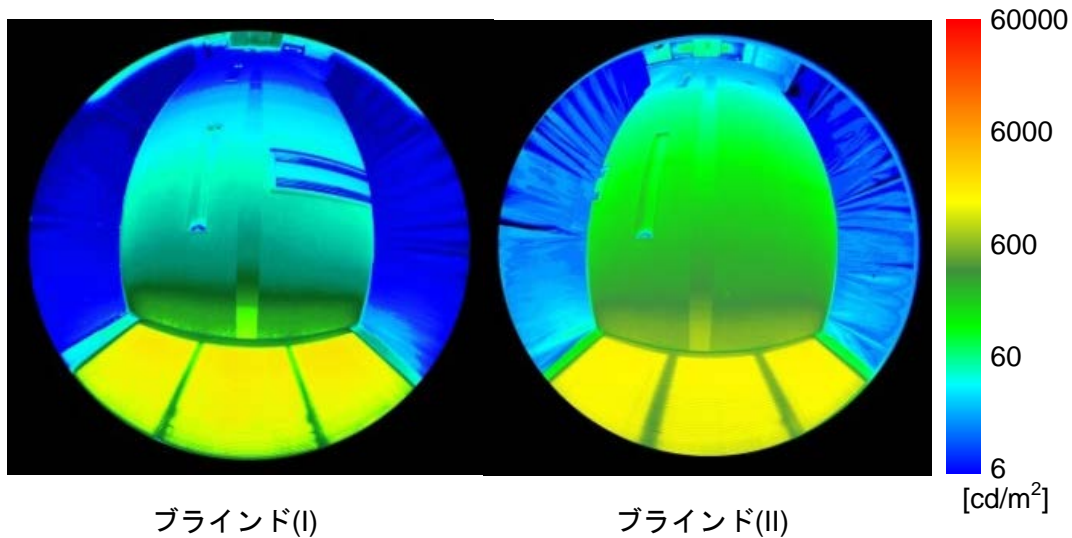


図 6.10 天井面輝度分布 (基準スラット 20[deg])

6.6.2.2 計算値と実測値の比較

窓面輝度分布画像からスラット輝度を抽出し、実測値と計算値の比較を行った。一例としてブラインド(I)、(II)、(III)の基準スラットを30[deg]~60[deg]のスラット輝度を図6.11に示す。ブラインド3条件、基準スラット制御角7条件、輝度抽出位置3点の計63条件のスラット輝度の実測値と計算値との差はRMSEで627[cd/m²]であった。天井面輝度分布画像と輝度測定部の反射率から天井面照度を算出し、計算値と比較した結果の一例を図6.12に示す。天井面照度の実測値と計算値は概ね一致した。

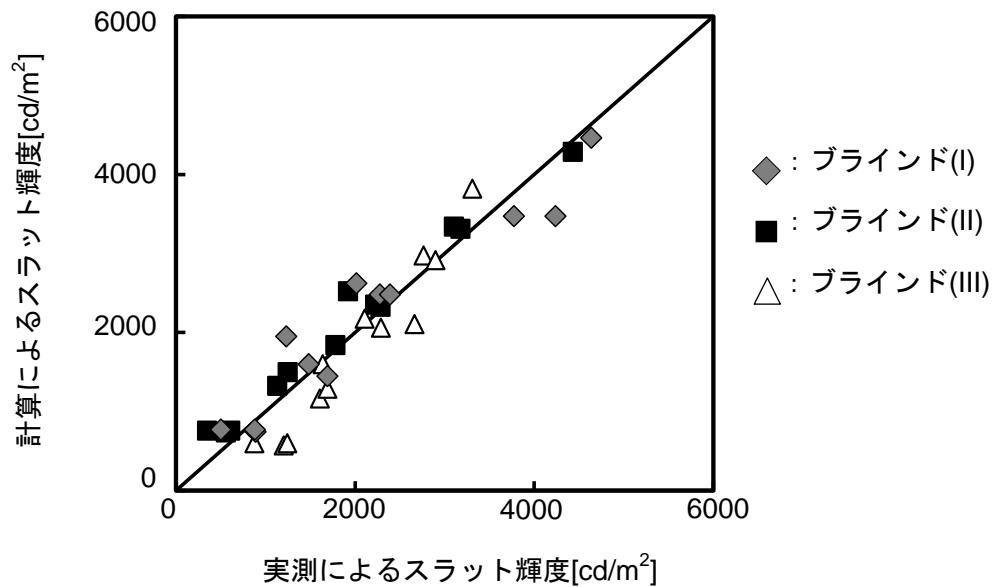


図 6.11 スラット輝度の計算値と実測値の比較

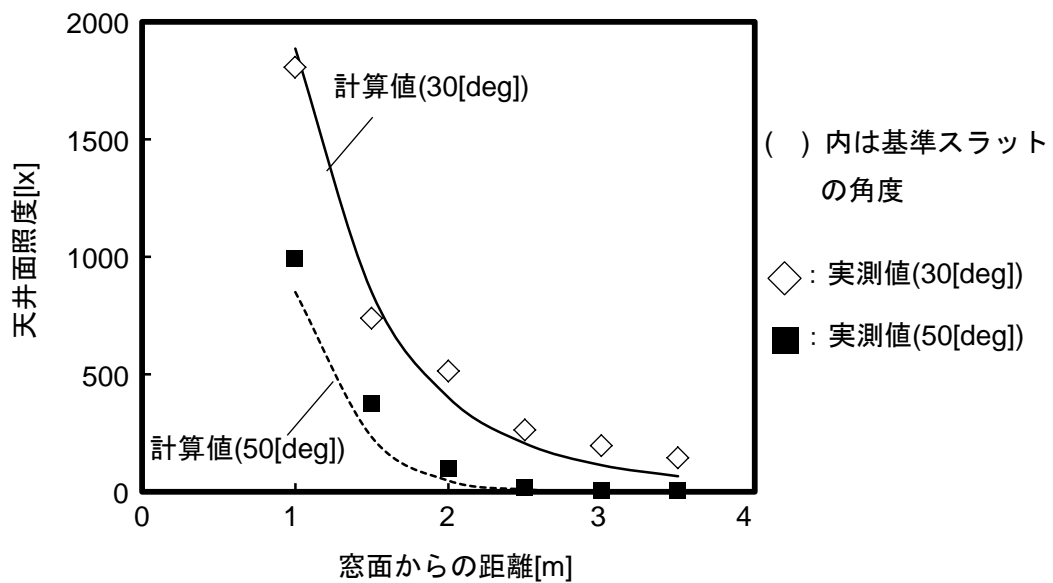


図 6.12 天井面照度の計算値と実測値の比較 (ブラインド(I))

6.7 照明用電力削減効果の年間シミュレーション

6.7.1 計算方法

6.5の図6.10、図6.11のように、スラット輝度および天井面照度の計算値と実測値は概ね一致したことを確認したので、拡張アメダス気象データ¹⁰⁾を用いて、角度変化型ブラインドによるアンビエント照明の電力削減効果を検討した。

6.7.1.1 アンビエント照明調光率の計算

基本条件を表6.5に示す。計算対象空間は、自動調光システムのLEDアンビエント照明を設置したパーティションがあるオフィスを仮定した。タスク&アンビエント方式とし、アンビエント照度を300[lx]とした。パーティションは横幅1.2[m]、奥行0.6[m]、高さFL+0.7[m]の机にコの字型で、高さはFL+1.2[m]（目線位置と同じ）とし、天井高を2条件とした。

ブラインドによる昼光利用時のアンビエント照明の調光率は式(6.6)より与えられる。式(6.6)は窓面からの間接分をアンビエント照度として利用する場合を仮定している。角度変化型ブラインドは反射させた直射日光により室内の天井面まで明るくするため、6.4で示した天井面で計算する方法により照明の調光率を算出した。天井面を室内方向に10スパンに分割し、天井スパンごとのアンビエント照明の調光率を求めた。

表6.5 基本条件

| | | |
|-----------|-----------|--|
| 緯度、経度 | | 35.68°、 139.76° |
| 開口部方位 | | 南向き 0[deg] |
| 気象条件 | | 東京標準年 ⁶⁾ 、 8~17[時] (10 時間) |
| 間口、 奥行 | | 15[m]、 10[m] |
| 天井高 (=窓高) | | 2.7[m]、 3.5[m]の 2 条件 |
| パーティション | 高さ (目線高さ) | FL+1.2[m] |
| | 立体角投射率 | 0.25[-] |
| 机上面高さ | | FL+0.7[m] |
| 反射率 | 室内 | 天井面:0.8[-]、 壁面:0.5[-]、 床面:0.1[-] |
| | 屋外 | 地表面:0.2[-] |
| 設定照度 | | アンビエント 300[lx] |
| 照明器具 | 種類 | 自動調光型 LED 照明 (0%~100%リニア調光可) 定格消費電力 : 18[W/台] 、光束 : 940[lm/台] |
| | 台数、 照明率 | 天井高 2.7[m] : 70 台(7 列×10 台)、 照明率:0.90 天井高 3.5[m] : 80 台(8 列×10 台)、 照明率:0.82 |

$$R_{ci} = \frac{M_c - E_{di}\rho_c}{M_c} \quad (6.6)$$

R_{ci} : 天井スパン i におけるアンビエント照明調光率[%] M_c : 調光率 100%時の照明器具の光束発散度 [lm/m^2] E_{di} : 天井スパン i に入射する昼光照射度 [lx] ρ_c : 天井反射率[-] 添字 c は天井、 i は天井スパン No.1~10

6.7.1.2 ブラインド計算条件

ブラインド条件を表 6.6 に示す。条件(1)は普通ブラインド、(2)~(6)は角度変化型ブラインドとなる。条件(1)の普通ブラインドのスラット角は、条件(2)の角度変化型ブラインドの目線高さのスラット角と等しくなるように（等グレア制御^{注1)}を仮定）し、(2)~(6)は天井から1枚目のスラット角を直射日光遮蔽角とした。直射日光遮蔽角が負の値になる場合には、スラット角を水平角 0[deg] とした。スラット形状および反射率は、条件(2)を角度変化型ブラインドの基本条件とし、スラット間隔に対するスラット間隔差 $\Delta s/s$ を条件(3)、スラット幅 w を条件(4)、スラット幅に対する間隔 s/w を条件(5)、反射率を条件(6)で比較できるようにした。普通ブラインドのスラット角を 75[deg]（全閉）に固定する場合を基準とし、各ブラインド条件のアンビエント照明の電力使用率を算出した。

表 6.6 ブラインド計算条件

| 条件 | (1) ^{注1)} | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
|---------------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 幅 w [mm] | 25 | 25 | 25 | 35 | 35 | 25 |
| 間隔 s [mm] | 21.5 | 21.5 | 21.5 | 30.1 | 25 | 21.5 |
| 間隔差 Δs [mm] | 0 | 0.2 | 0.1 | 0.28 | 0.23 | 0.2 |
| s/w | 0.86 | 0.86 | 0.86 | 0.86 | 0.714 | 0.86 |
| $\Delta s/s$ | 0 | 0.00930 | 0.00465 | 0.00930 | 0.00930 | 0.00930 |
| 反射率 ρ [-] | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.70 |

注1) 通常、普通ブラインドのスラット角の制御方法は、直射日光遮蔽角にかぶせ角（オフセット角）を加える方法をとっている。オフセット角は、制御インターバル等を考慮し窓面からのグレアを抑制するため、安全側になるように設定させるパラメータであり、10[deg]から最大 30[deg]になる場合もある。本報では、比較対象が角度変化型ブラインドであり、全てのスラット角を等しくすることはできないため、目線位置のスラット角を角度変化型ブラインドと同じ角度に制御することで等しい輝度（等グレア）になり、これを「等グレア制御」とした。

6.7.2 計算結果

6.7.2.1 天井面照度分布

一例として、プロファイル角 $30[\text{deg}]$ のときのスラット反射率が等しい条件(2)～(5)使用時の天井面照度分布を図 6.13 に示す。天井面照度を算出した結果、条件(1)と(2)の天井面照度分布に大きな差はみられなかった。条件(2)から(4)、(3)、(5)の順に天井面照度が高くなった。条件(2)と(4)では、天井面に入射する照度は大きな差は見られず、 s/w が等しい場合ではスラット幅 w の影響は小さいと示唆される。スラット間隔 Δs が異なる条件(2)と(3)では、窓面から $2[\text{m}]$ 位置での天井面照度で $600[\text{lx}]$ 程度の差が見られ、わずか $0.1[\text{mm}]$ の間隔差 Δs が天井面照度に与える影響は大きい。 s/w が小さい条件(5)で天井に入射する照度が最も高くなった。条件(2)～(4)よりも直射日光遮蔽角が小さい条件であることから、天井面からブラインドをみたときのスラット上向き面の直射日光照射部分 W_{sun} の見える割合が大きいため、天井面への入射する光束が増加することが示唆される。

プロファイル角 $30[\text{deg}]$ 、直射日光遮蔽角 $28.5[\text{deg}]$

(太陽高度 $30.2[\text{deg}]$ 、太陽方位角 $0[\text{deg}]$)

法線面直射日光照度 90 、 $400[\text{lx}]$ 、水平面天空光照射度 8 、 $300[\text{lx}]$

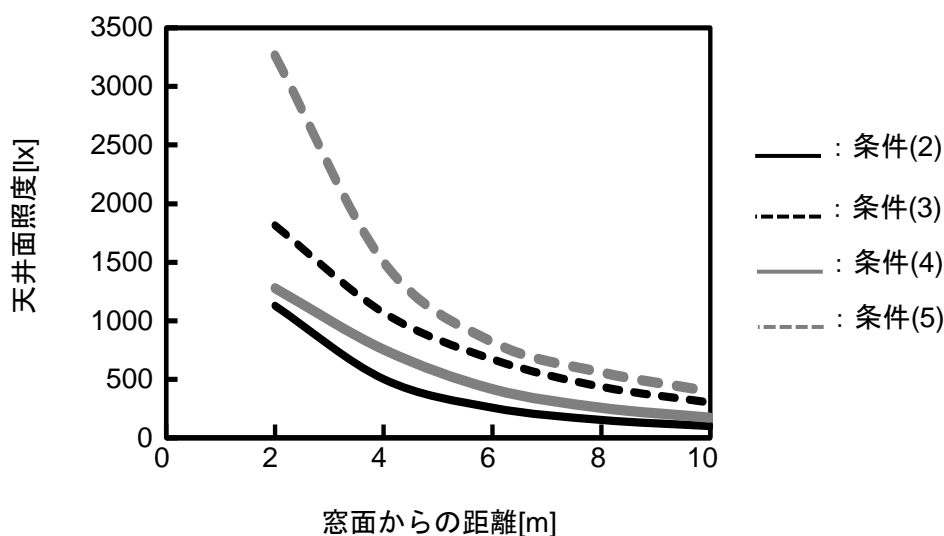


図 6.13 天井面照度分布 (天井高 $2.7[\text{m}]$ 、窓面方位 $0[\text{deg}]$)

6.7.2.2 1日のアンビエント照明電力使用率

夏至、冬至（晴天日）における1日のアンビエント照明の電力使用率を図6.14に示す。反射率の異なる条件(6)を除く(2)～(5)の角度変化型ブラインドでは、冬至の方が高い省エネルギー効果を示した。

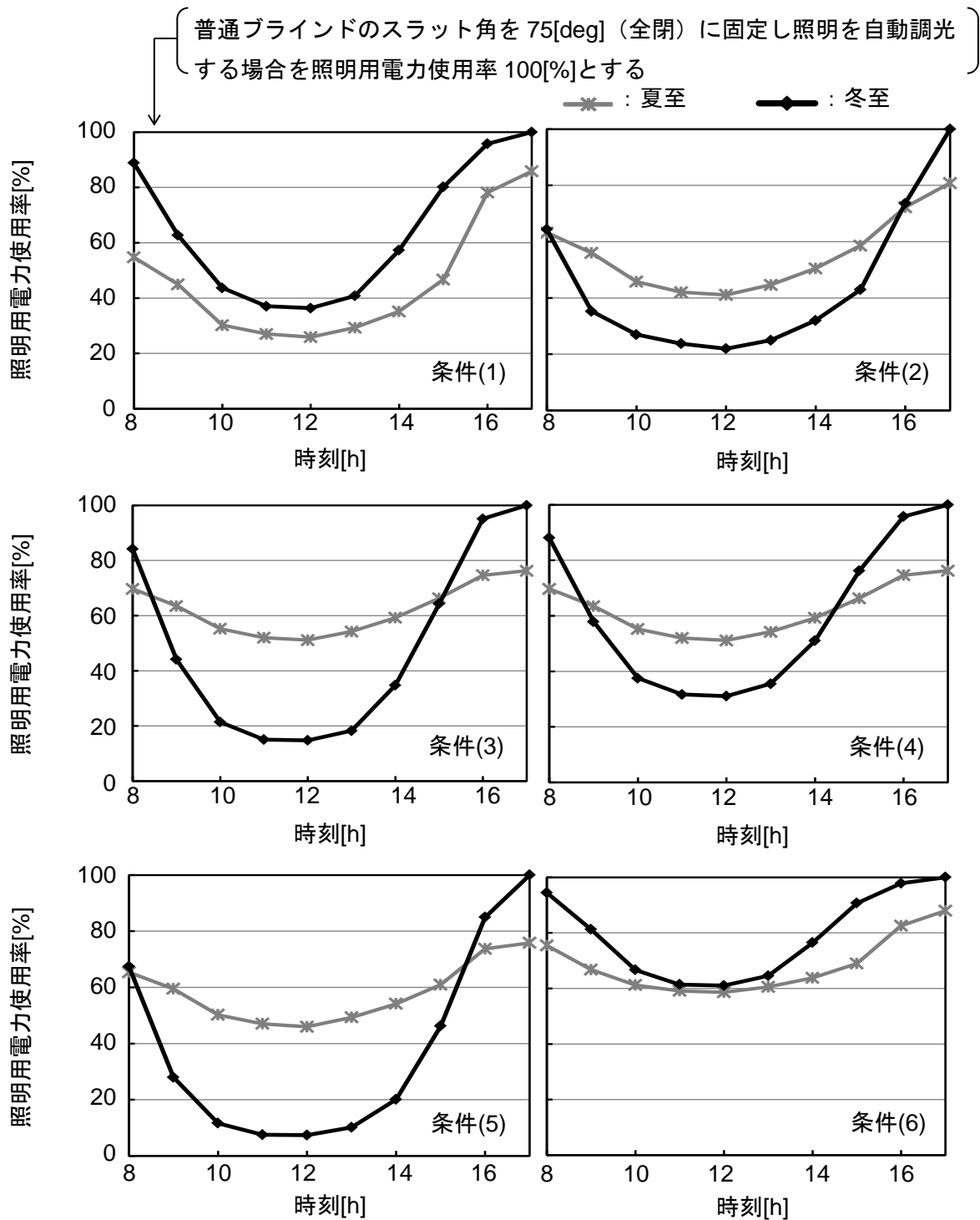


図 6.14 1日のアンビエント照明の電力使用率（天井高 2.7[m]、窓面方位 0[deg]）

6.7.2.3 年間のアンビエント照明電力使用率

普通ブラインドのスラット角を 75[deg] (全閉) に固定し照明を自動調光する場合を基準としたときのアンビエント照明の電力使用率を算出した。天井高 2.7[m]における結果を図 6.14 に、天井高 3.5[m]における結果を図 6.16 に示す。

$\Delta s/s$ が異なる条件(2)と(3)を比較すると、天井高が高い場合 $\Delta s/s$ が小さい条件(3)で省エネルギー効果を示した。天井高が高いほど下部のスラットがより閉まり気味になり、スラット面上の直射日光照射部分 W_{sun} や屋外地表面の高輝度部分のみ見える割合が減少するためであると考えられる。スラット幅・間隔比 s/w が等しく、幅 w が異なる条件(2)と(3)では、天井高が 2.7[m]では大きな差は見られなかったが、天井高 3.5[m]ではスラット幅 w が大きい条件で省エネルギー効果を示した。天井高が高い条件では、直射日光遮蔽角およびスラット上向き面上の直射日光照射部分の見える割合の影響が大きいことが示唆された。反射率の異なる条件(2)と(6)を比較すると、当然のことながら反射率の高い条件(2)の方が高い省エネルギー効果を示した。

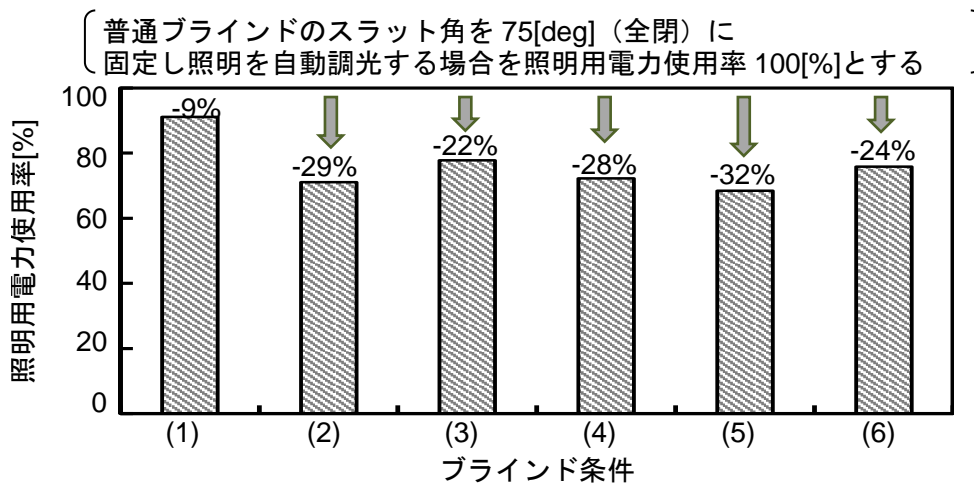


図 6.15 天井高 2.7[m]のときの年間の電力使用率 (窓面方位 0[deg])

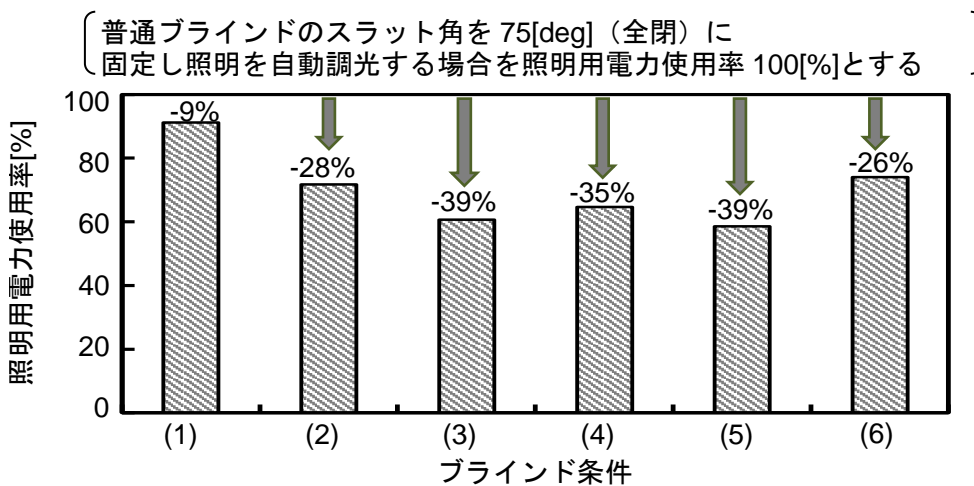


図 6.16 天井高 3.5[m]のときの年間の電力使用率 (窓面方位 0[deg])

さらに、普通ブラインドに第2章、第3章で提案したブラインド制御方法を導入した場合と角度変化型ブラインドを制御した場合の照明用電力削減効果についても検討した。計算条件として、各ブラインドの制御条件を表6.7に示す。オフィスモデルは、上記のシミュレーションと同じモデルを用いた。角度変化型ブラインドは、直射日光遮蔽角の最小角を水平角 0[deg]とする遮蔽角制御（条件(5)）と、直射日光遮蔽角を最小角をマイナスの角度とする採光角制御（条件(6)）の2条件を仮定した。

表 6.7 普通ブラインドと角度変化型ブラインドの制御条件

| 条件 | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
|-------------|---------------------|-------------------|-----------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 種類 | 普通ブラインド | | | | 角度変化型ブラインド | |
| スラット幅w, 間隔s | w=25[mm]、s=21.5[mm] | | | | | |
| 間隔差 Δs | | | | | 0.2[mm] | |
| 制御方法 | 直射日光遮蔽角 | 直射日光遮蔽角 +一定オフセット角 | 不快グレア抑制制御 | 不快グレア抑制制御 +ゾーン制御 (幅100°) | 1枚のスラットを直射日光遮蔽角に制御 (遮蔽角: マイナスなし) | 1枚のスラットを直射日光遮蔽角に制御 (遮蔽角: マイナスあり) |
| 制御種類 | 従来 | 従来 | 本論文 2章提案 | 本論文 3章提案 | 本論文 6章計算方法 | 本論文 6章計算方法 |

図 6.17 に普通ブラインドと角度変化型ブラインドの制御ごとの照明用電力削減効果を示す。ここでは、照明用電力使用率 100%が天井照明を全点灯したときとした。第2章で提案した不快グレア抑制制御を行った場合、削減率は約 30%、さらにブラインドのゾーン制御を行った場合、約 33%の省エネルギー効果が示され、直射日光遮蔽角制御と同等の削減効果となった。条件(5)、(6)の角度変化型ブラインドでは、採光角制御が遮蔽角制御よりも省エネルギー効果が高くなった。

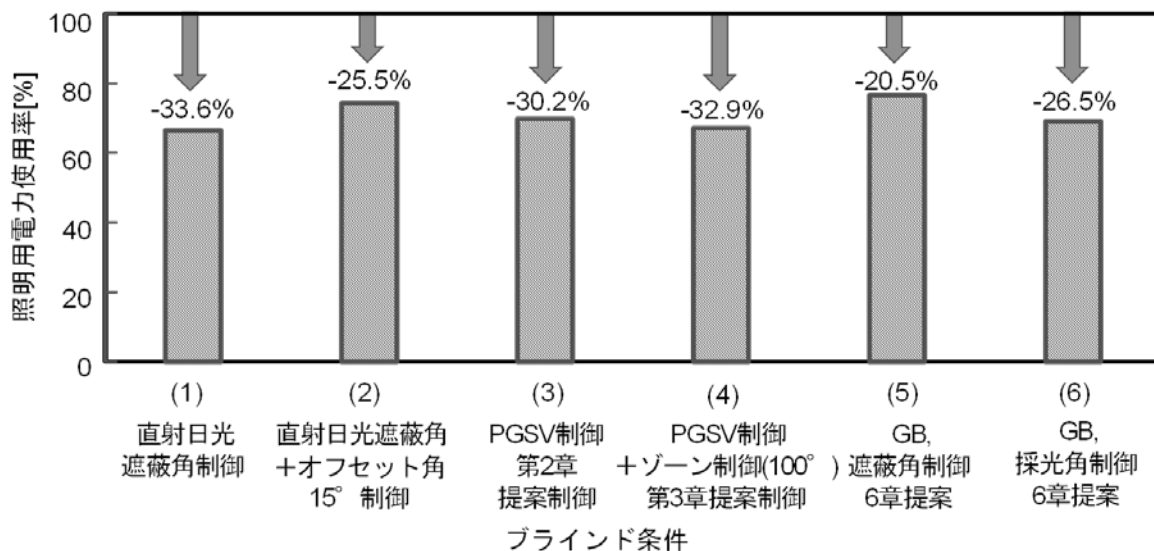


図 6.17 普通ブラインドと角度変化型ブラインドの制御ごとの照明用電力削減効果

6.8 結論

本章では、特殊ブラインドの一つである角度変化型ブラインドに着目し、これまでの不快グレア抑制制御の中のブラインド輝度計算が特殊ブラインドを用いた場合において適用可能であるかを検討することを目的に、形状および光学特性値ごとにスラット角制御性能の検討、輝度計算精度確認実験、計算値と実測値の比較を行った。さらに、特殊ブラインドの特徴として照明用電力の削減効果として、数値計算による基礎的検討を行い、以下の知見を得た。

- (1)角度変化型ブラインドのスラット角の制御性能を確認した結果、スラット幅が広い方が制御誤差は小さく、スラット間隔差が目線位置のスラット角に与える影響は大きい。
- (2)アンビエント照明の調光率を天井に照射した昼光導入量から計算する方法を示し、スラット輝度および天井面照度の実測結果を比較した結果、実測値と計算値は概ね一致していることを確認した。
- (3)昼光導入量を天井面で計算した場合、普通ブラインドのスラット角を $75[\text{deg}]$ (全閉) に固定し照明を自動調光する場合を照明用電力使用率 $100[\%]$ とすると、角度変化型ブラインドは約 $30[\%]$ ～ $40[\%]$ の電力削減を示した。普通ブラインドのスラット角を角度変化型ブラインドの目線高さのスラット角と等しくなるように制御 (等グレア制御を仮定) すると、約 $20[\%]$ ～ $30[\%]$ の電力削減を示した。また、角度変化型ブラインドの形状と光学特性値による照明用電力削減効果に与える影響を示した。

【第6章の参考文献】

- 1) 中川久美子、竹林芳久、岡建雄：角度変化型ブラインドの性能に関する研究、日本建築学会環境系論文集、第506号、pp.17-24、1998.4
- 2) 登石久美子、鈴木道哉、竹林芳久、秋元孝之、岡建雄：グラデーションブラインド（採光用ブラインド）のライフサイクル評価、照明学会全国大会講演論文集、pp.110-111、1999.9
- 3) 登石久美子、縄田龍一：昼光利用の新しい建築(3)トヨタ車株式会社開発センター技術本館、照明学会誌、第88巻、第10号、pp.811-814、2004.10
- 4) 谷口智子、岩田利枝、荒井義人、湊淳、伊藤清、沢田英一：ZEBを目指した都市型超高層オフィスビルの研究（第15報）角度変化型ブラインド制御の総合性能評価、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、第10巻、pp.197-200、2014.9
- 5) 登石久美子、奥山博康、野部達夫、矢川明弘、多井慶史：昼光導入型ブラインドの省エネルギー性能に関する研究 その1～4、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.237-244、2003.9
- 6) 伊藤清、鈴木道哉：省エネルギーファサードシステムの検討 照明エネルギー及び空調エネルギー削減効果の試算結果、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、pp.1029-1032、2012.9
- 7) 登石久美子、中島幸彦、秋元孝之、鈴木道哉、竹林芳久、岡建雄：グラデーションブラインド（角度変化型ブラインド）の性能実測、日本建築学会技術報告集、第7号、pp.83-86、1999.2
- 8) 谷口智子、岩田利枝、鳥居由樹夫、佐久間英二、倉本義弘、鈴木道哉：角度変化型ブラインドによる照明用電力削減効果の検討、日本建築学会関東支部研究報告集、pp.1-4、2015.3
- 9) 宿谷昌則：数値計算で学ぶ光と熱の建築環境工学、丸善株式会社、1993
- 10) 日本建築学会：拡張アメダス気象データ 1981-2000、 2005

第7章 複数の採光部を有するオフィスの アンビエント照明制御の提案

7.1 はじめに

本章では、不快グレア抑制制御の応用方法として、複数の採光部を有するオフィスのアンビエント照明制御方法を提案する。本論文で提案した不快グレア抑制制御は、屋外センサーのみで窓面からの不快グレアを予測し、自動ブラインドを制御するシステムである。つまり、室内センサーが不要であるという特徴がある。照明用電力削減のためには、この不快グレア抑制制御とともに自動調光制御を行う室内照明システムが必要となる。室内の取り込んだ昼光照度が設定照度に不足する場合、人工照明で照度を補う手法で、これを昼光連動型調光システムといい、照明用電力削減手法の一つとして多くのオフィスで利用されている。昼光の導入量の変化に応じて机上面の明るさを維持するため、通常、昼光連動型調光システムは明るさセンサーが含まれている。この明るさセンサーは、机上面の光量を検知するため、一般的に天井面に配置されていることが多い。明るさセンサーの設置位置とセンサー本体の性能は、天井照明からの適切な照度を供給するために必要不可欠である。そのため第2章では、不快グレア抑制制御を用いたアンビエント照明の電力削減効果について示したが、これは自動ブラインドを設置した1つの採光部からの昼光導入量のみを予測する方法であった。一方、近年のオフィス空間では、オフィスのレイアウトや照明のレイアウト、窓の位置が、明るさセンサーの設置位置を決める障害となる場合があり、明るさセンサーの誤作動に関する執務者からのクレームも多い。このことから、第2章でも示した通り、室内センサーレスで且つ、複数の採光部を有するオフィスを対象としたアンビエント照明の制御方法について検討する。

7.2 対象オフィス

対象オフィスは、第3章に示したO社技術研究所本館のワークスペースとした。

7.3 昼光による机上面照度

7.3.1 全体計算フロー

昼光からの机上面照度は、北側採光のハイサイドライトからの光と縦型ルーバーが取り付けられた東西窓からの光、自動ブラインドに反射した南面窓からの光からなる。前者のハイサイドライトと東西窓からの光は天空光と考えられる。それに対して、後者の南面窓からの光は、直射日光と天空光と考えられる。ここでは、これらを別々に計算した。昼光による机上面照度の計算フローを図7.1に示す。自動ブラインドがPGSVに基づくグレア抑制制御でコントロールされている場合、屋外の直射日光照度や全天空照度、ブラインドスラットの上向き面または下向き面輝度、直射日光照射部分のスラット立体角割合などのログデータが記録される。ハイサイドライトおよび東西窓からの光による机上面照度を、それぞれの窓からの昼光率を用いて計算することにした。南面窓からの光による机上面照度は、自動ブラインドのログデータから関数を作成することにした。

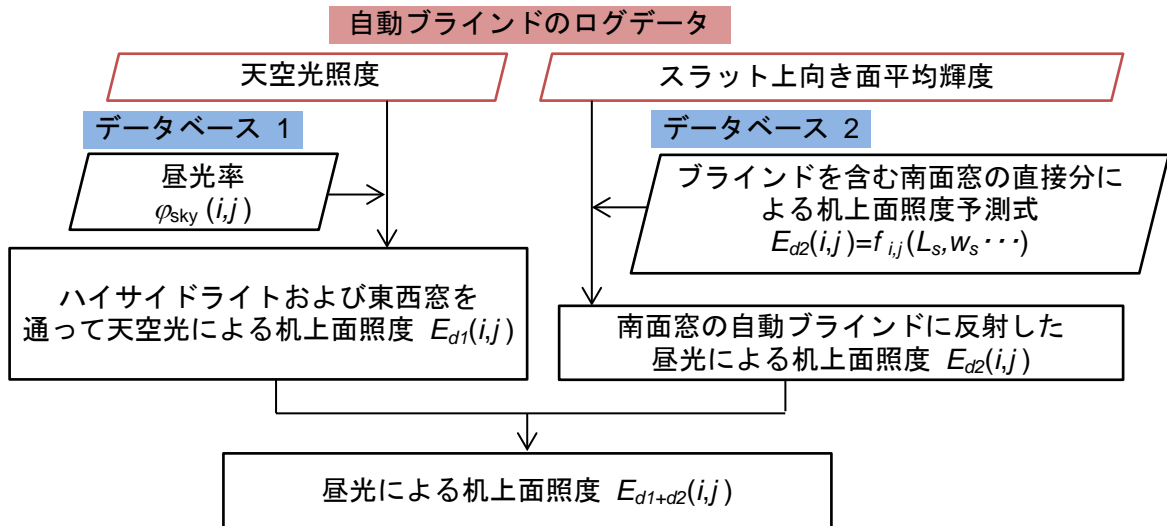
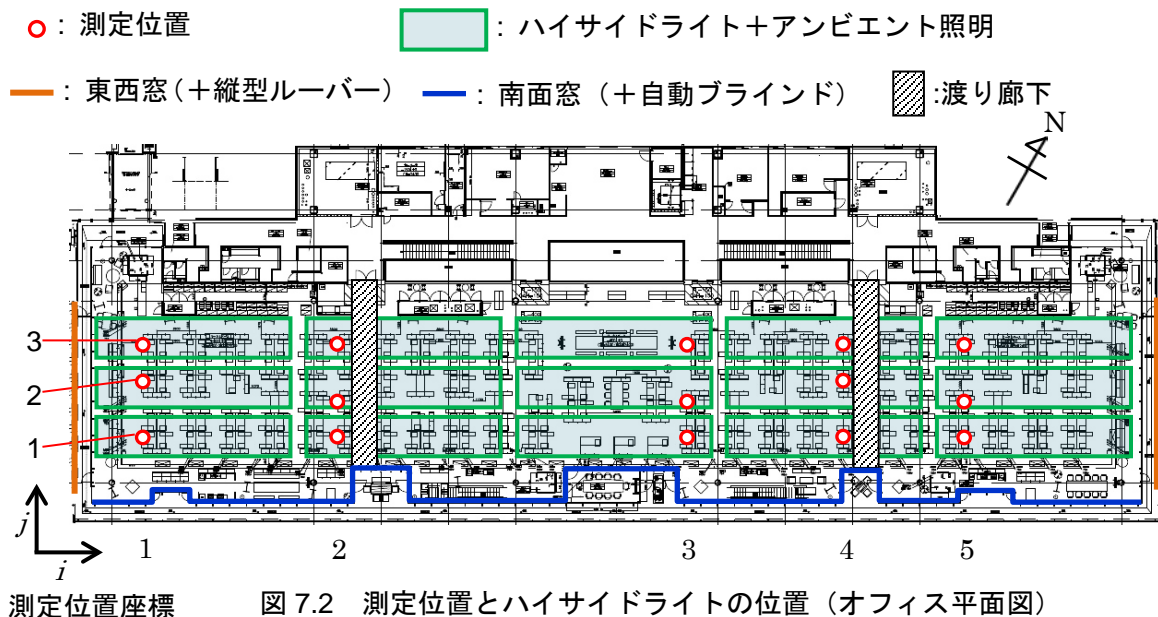


図 7.1 昼光による机上面照度の計算フロー

7.3.2 天空光による机上面照度予測

7.3.2.1 方法

昼光率は、全天空照照度に対する室内机上面照度の比から求められる。ハイサイドライトと東西窓による昼光率分布を得るため、曇天日(2014年10月12日)に各座席位置の机上面照度を測定した。なお、測定時は南面窓のブラインドを全閉とした。ハイサイドライトの位置に合わせて、図7.2のようにオフィス空間を15分割した。各エリアのうち、もっとも照度が低い地点を測定位置とし、15点を机上面照度の測定位置とした。図7.2に、机上面照度測定位置も併記した。机上面照度は9時~14時の15分間隔で測定した。屋上に設置した照度センサーで、グローバル照度と全天空照度を5分間隔で測定した。各測定位置の昼光率は、式(7.1)を用いて計算した。



$$\varphi_{sky}(i, j) = E_{d1}(i, j) / E_{sky} \quad (7.1)$$

$\varphi_{sky}(i, j)$: ハイサイドライトおよび東西窓による昼光率[-]

$E_{d1}(i, j)$: ハイサイドライトおよび東西窓からの天空光による机上面照度[lx]

E_{sky} : 全天空照度[lx] 添字 i, j は測定位置を示す座標

7.3.2.2 結果

直射日光照度と全天空照度の1日の変化を図7.3に示す。13時30分頃まで、曇天であることが確認された。全天空照度は25,000[lx]~40,000[lx]の範囲であった。机上面照度の1日の変化を図7.4と図7.5に示す。各測定位置の机上面照度は、図7.3に示した全天空照度の変化に対応して変化していることが分かる。

図7.3の全天空照度と図7.4および図7.5の机上面照度から、各位置における昼光率を計算した。昼光率の1日の変化を図7.6、図7.7に示す。各位置における平均昼光率を図7.8、図7.9に示す。平均昼光率の標準偏差はとても小さく、昼光率は一定値とみなせることを確認した。測定した昼光率は、0.39[%]~0.95[%]の範囲にあった。平均昼光率の分布を図7.10に示す。

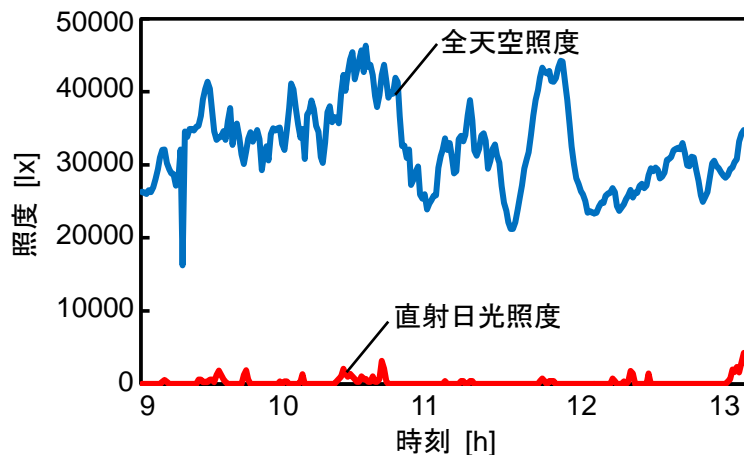


図 7.3 曇天日の屋外照度の変化 (2014 年 10 月 12 日)

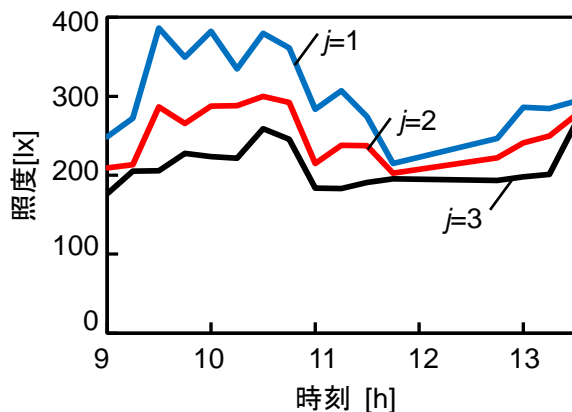


図 7.4 曇天日の机上面照度(i=1)

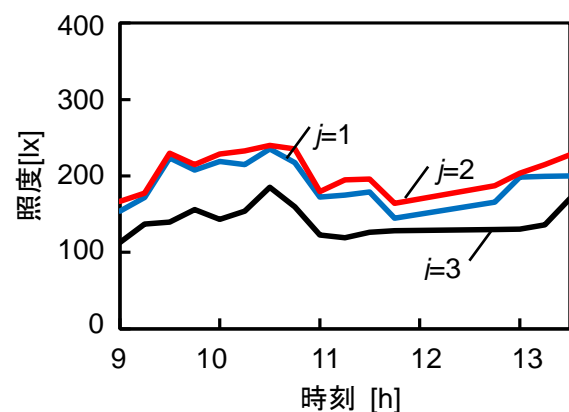


図 7.5 曇天日の机上面照度(i=3)

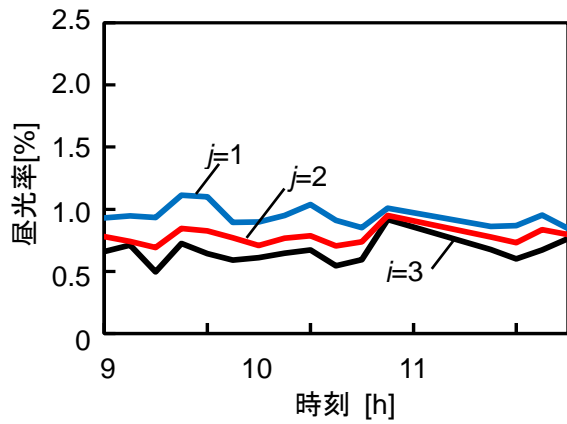


図 7.6 各位置の昼光率($i=1$)

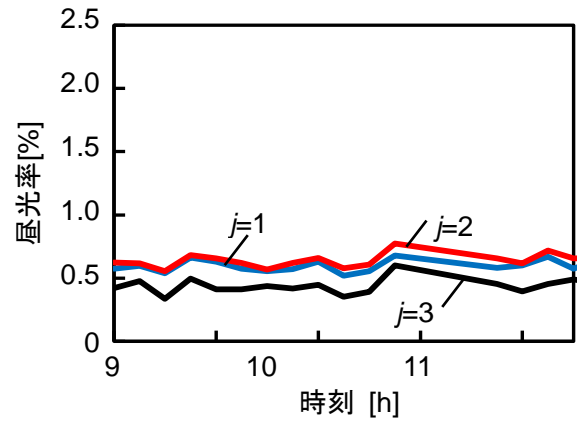


図 7.7 各位置の昼光率($i=3$)

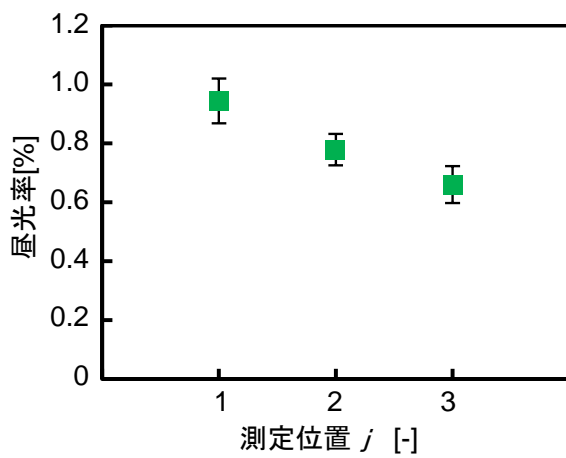


図 7.8 各位置の平均昼光率 ($i=1$)

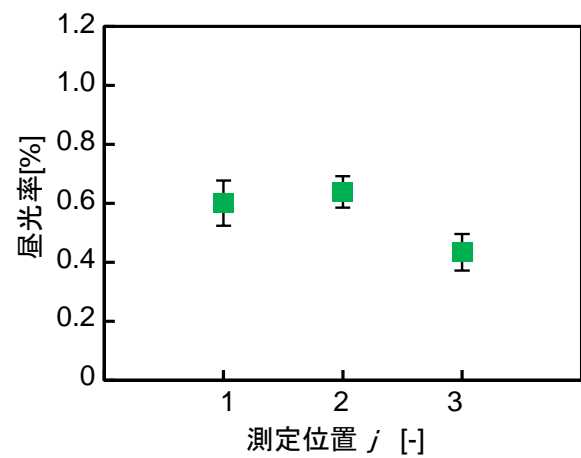


図 7.9 各位置の平均昼光率 ($i=3$)

— : 東西窓 (+縦型ルーバー)

— : 南面窓 (+自動ブラインド)

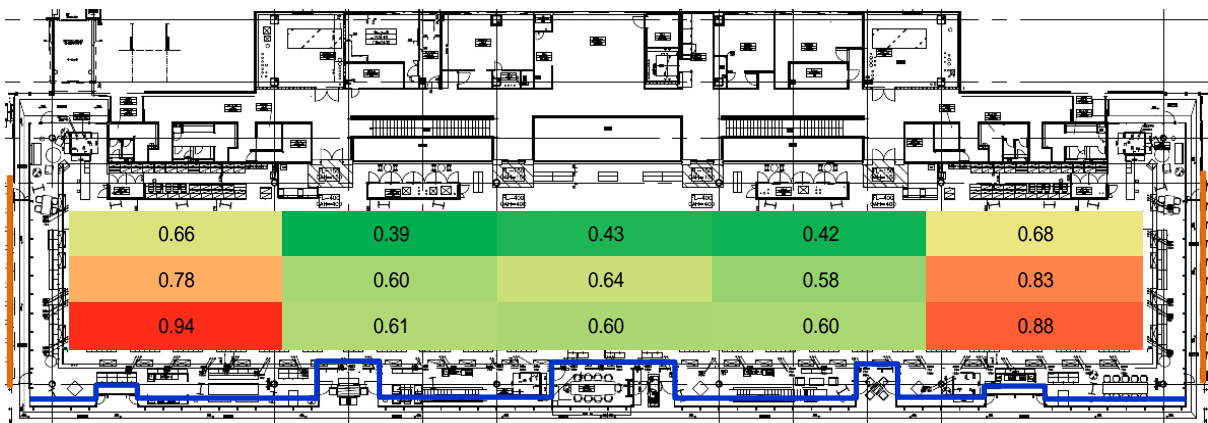


図 7.10 ハイサイドライトと東西窓による昼光率の分布

7.3.3 自動ブラインドに反射した昼光による机上面照度予測

7.3.3.1 方法

自動ブラインドに反射した昼光による机上面照度を得るため、晴天日（2014年10月18日）に各座席位置の机上面照度を測定した。なお、測定時は南面窓の自動ブラインドは、3章に示した PGSV に基づくスラット角制御で運用した。机上面照度は9時～16時30分の15分間隔で測定した。曇天時と同様に、屋上に設置した照度センサーで、グローバル照度と全天空照度を5分間隔で測定した。

7.3.3.2 結果

直射日光照度と全天空照度の1日の変化を図7.11に示す。一日中、晴天であることが確認された。机上面照度の1日の変化を図7.12と図7.13に示す。

ハイサイドライトと東西窓からの机上面照度は、7.3.1で求めた昼光率と、このときのログデータ中の全天空照度値を用いて求めた。求めたハイサイドライトと東西窓からの机上面照度を測定した机上面照度から引き、ブラインドのある南面窓からの机上面照度を求めた。図7.14と図7.15に自動ブラインドに反射した南面窓からの光による机上面照度を示す。

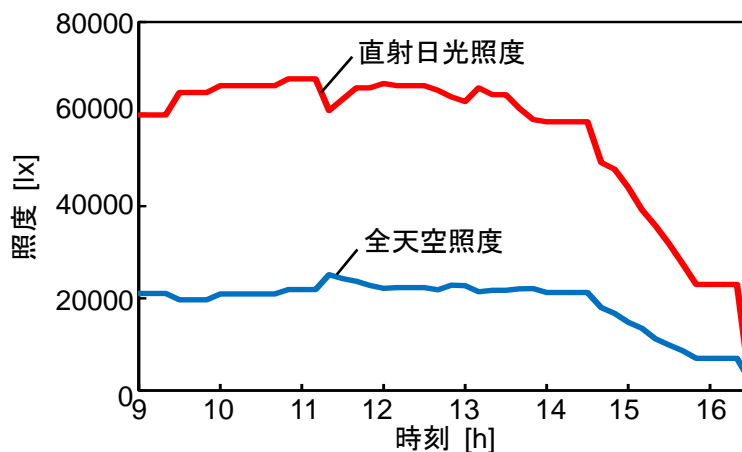


図 7.11 屋外照度の変化（2014年10月18日）

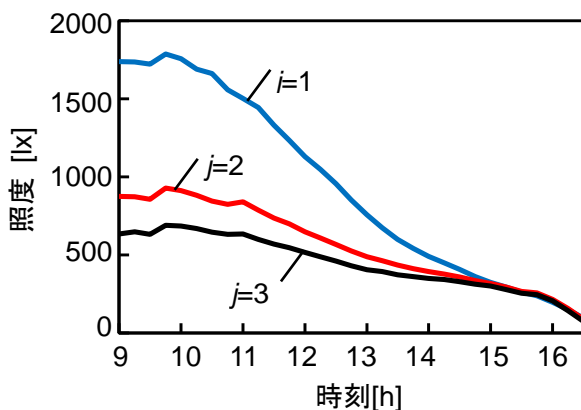


図 7.12 晴天日の机上面照度 ($i=1$)

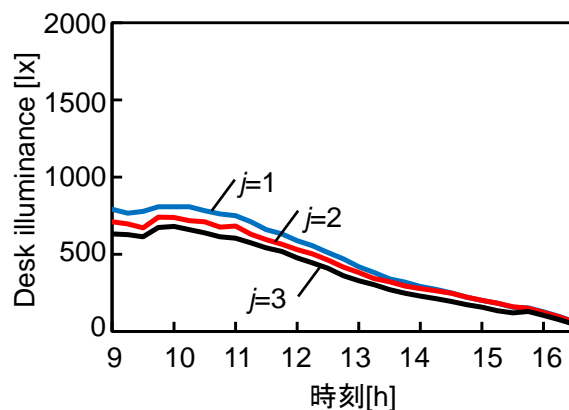


図 7.13 晴天日の机上面照度 ($i=3$)

— ハイサイドライトと東西窓からの机上面照度
 — 南面窓からの机上面照度

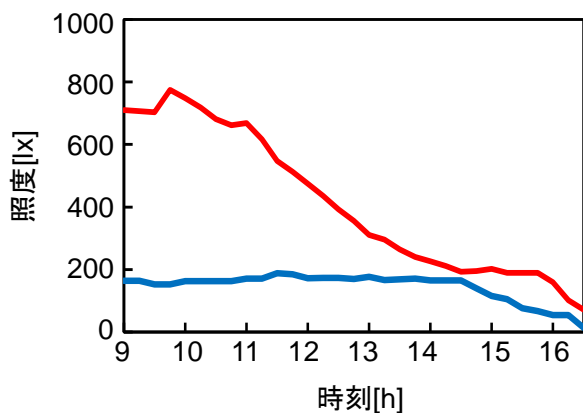


図 7.14 机上面照度 (i=1, j=2)

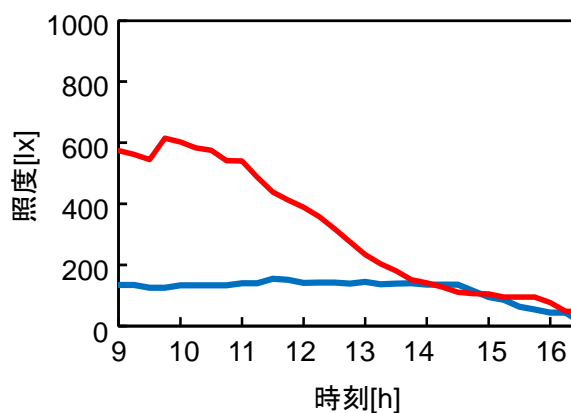


図 7.14 机上面照度 (i=3, j=2)

ブラインドを含む南面窓からの昼光照度の予測式を以下に示す。横軸を $L_{b2total} \times a$ (スラット上向き面輝度 (直射を含む) × スラットの直射日光受光部の幅[m]) とし、ブラインドログデータから参照する。計算された縦軸を各座席の回帰式に代入し、解の公式よりブラインドを含む南面窓からの昼光照度を計算する。

一例として、W2i1 における回帰式を図 7.15 に示す。直線回帰式を青枠 に、曲線回帰式を赤枠 に示す。本章では、 の回帰式を用いた。

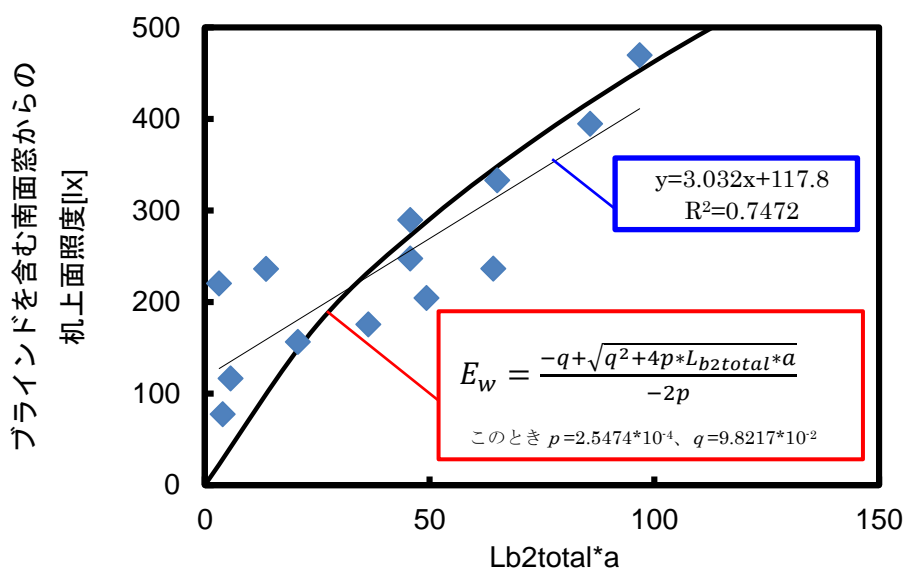


図 7.15 ブラインドを含む南面窓からの机上面照度予測式 (W2i1)

表 7.1 に各座席の回帰式の係数と昼光率、図 7.16 に測定位置を示す。式(7.2)の赤身文字 p, q を表 7.1 より参照し、青文字 $L_{b2total}, a$ をブラインド制御のログデータより参照する。

表 7.1 各座席の回帰式の係数と昼光率

| 位置 | | p | q | 昼光率 ϕ |
|----|----|-------------------------|-------------------------|------------|
| W2 | i1 | 2.5474×10^{-4} | 9.8217×10^{-2} | 0.009439 |
| | i2 | 2.9972×10^{-4} | 13.642×10^{-2} | 0.009430 |
| | i3 | 6.7502×10^{-4} | 8.5552×10^{-2} | 0.007737 |
| | i4 | 9.0801×10^{-4} | 7.1577×10^{-2} | 0.007490 |
| | i5 | 1.0645×10^{-4} | 7.8936×10^{-2} | 0.006918 |
| W1 | i1 | 2.1789×10^{-4} | 1.2394×10^{-1} | 0.006111 |
| | i2 | 2.6276×10^{-4} | 1.6063×10^{-1} | 0.006195 |
| | i3 | 4.0574×10^{-4} | 1.2643×10^{-1} | 0.005942 |
| | i4 | 4.4099×10^{-4} | 3.6855×10^{-1} | 0.004365 |
| | i5 | 3.0631×10^{-4} | 3.3629×10^{-1} | 0.004074 |
| 中央 | i1 | 3.3124×10^{-4} | 2.4982×10^{-1} | 0.006005 |
| | i2 | 3.1233×10^{-4} | 2.5887×10^{-1} | 0.006662 |
| | i3 | 9.4691×10^{-4} | 3.8733×10^{-1} | 0.006352 |
| | i4 | 1.9560×10^{-4} | 4.2110×10^{-1} | 0.004960 |
| | i5 | 3.0211×10^{-4} | 3.6164×10^{-1} | 0.004554 |
| E1 | i1 | 3.8915×10^{-4} | 7.5316×10^{-2} | 0.006032 |
| | i2 | 2.6690×10^{-4} | 1.1159×10^{-1} | 0.007174 |
| | i3 | 4.489×10^{-4} | 1.0743×10^{-1} | 0.005724 |
| | i4 | 6.6239×10^{-4} | 2.5648×10^{-1} | 0.004230 |
| | i5 | 5.6170×10^{-4} | 3.2881×10^{-1} | 0.004370 |
| E2 | i1 | 2.7245×10^{-4} | 8.4083×10^{-2} | 0.008807 |
| | i2 | 2.2021×10^{-4} | 1.6706×10^{-2} | 0.009523 |
| | i3 | 2.6693×10^{-4} | 2.7620×10^{-1} | 0.008286 |
| | i4 | 3.6646×10^{-4} | 2.7189×10^{-1} | 0.006970 |
| | i5 | 5.5935×10^{-4} | 2.1432×10^{-1} | 0.007231 |

$$E_{day} = \frac{-q + \sqrt{q^2 + 4p * L_{b2total} * a}}{-2p} + \phi(i,j) E_{sky} \quad \dots \text{式(7.2)}$$

E_{day} : 昼光照度[lx]

p, q : 回帰係数 [-]

$\phi(i,j)$: 各座席のハイサイドライトからの昼光率[-]

($p, q, \phi(i,j)$)は表 7.1 を参照)

$L_{b2total}$: スラット上向き面輝度(直射を含む)[cd/m²]

a : スラットの直射日光受光部の幅[m]

E_{sky} : 水平面全天空照度[lx]

($L_{b2total}, a, E_{sky}$ はブラインド制御のログデータを参照)

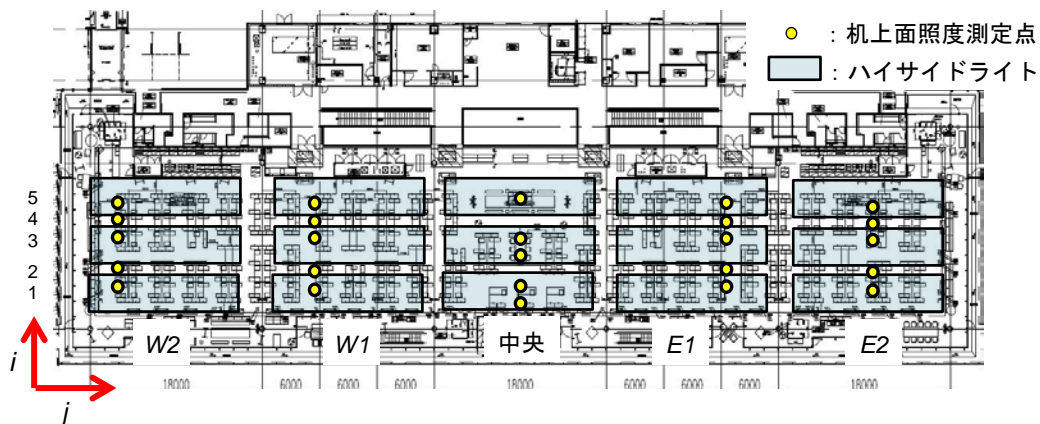


図 7.16 測定位置

7.4 アンビエント照明の調光率

7.4.1 各アンビエント照明の調光率決定方法

昼光からの机上面照度を決定した後、各アンビエント照明からの机上面照度を計算する。アンビエント照明による机上面照度は、必要アンビエント照度（対象建物では 400lx）から昼光による机上面照度を引くことで求められる。各アンビエント照明の調光率は、式（7.3）より算出される。

$$\text{Max}(0, E_s - E_{d1+d2}(i, j)) = \sum \sum (E_{100p,q \rightarrow i,j} R_{p,q}) \quad (7.3)$$

- E_s : 机上面必要照度[lx]
- $E_{d1+d2}(i, j)$: 昼光による室内机上面照度[lx]
- $E_{100p,q \rightarrow i,j}$: 100%出力時の各照明からの室内机上面照度[lx]
- $R_{p,q}$: アンビエント照明の調光率[%]
- $100p, q$: 100%出力時の各アンビエント照明の位置[-]
- i, j : 測定位置[-]

7.4.2 各アンビエント照明による照度分布

各アンビエント照明の調光率を計算するため、制御シグナルと照度値がリニアに変化すること確認した。アンビエント照明を1つのエリアごとに100%点灯したときの、各位置の机上面照度を測定した。測定結果を図7.17に示す。図7.17に示すように、100%点灯時の各位置の机上面照度のデータシートを作成した。

| 調光率 100%のアンビエント照明の位置 | | 測定位置 | | アンビエント照明からの机上面照度 [lx] |
|----------------------|-----|------|-----|-----------------------|
| p | q | i | j | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 212.4 |
| 1 | 1 | 1 | 2 | 123.6 |
| 1 | 1 | 1 | 3 | 39.4 |
| 1 | 1 | 2 | 1 | 74.6 |
| 4 | 4 | 2 | 2 | 72.1 |

図 7.17 100%点灯時の各位置の机上面照度のデータシート

7.5 アンビエント照明調光率の試算

本章で提案した昼光連動型アンビエント照明の調光制御システムの照明用電力削減効果に対する効果を確認するため、気象データを用いてアンビエント照明調光率の年間シミュレーションを行った。気象データは拡張アメダス気象データ（東京、標準年）を使用した。

夏季（7月）と冬季（12月）晴天日のアンビエント照明調光率の変化を図7.18に示す。年間のアンビエント照明平均調光率を図7.19に示す。試算した結果、対象建物では、アンビエント照明の調光率は年間で60%削減する結果となった。

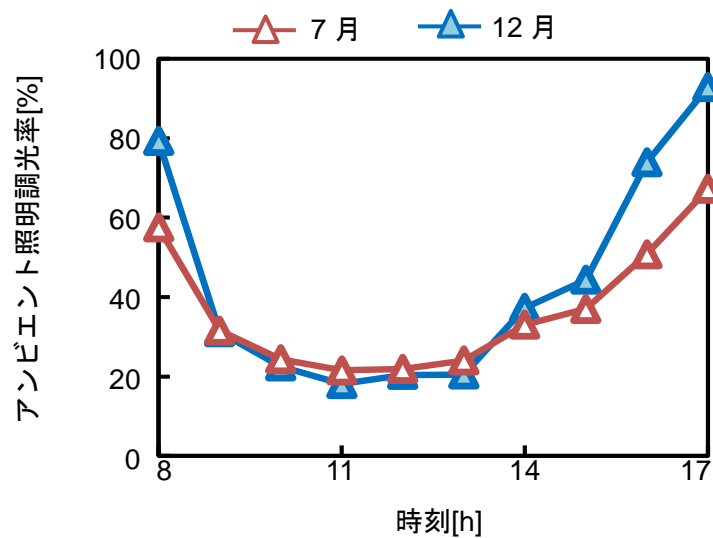


図 7.18 アンビエント照明調光率の日変化

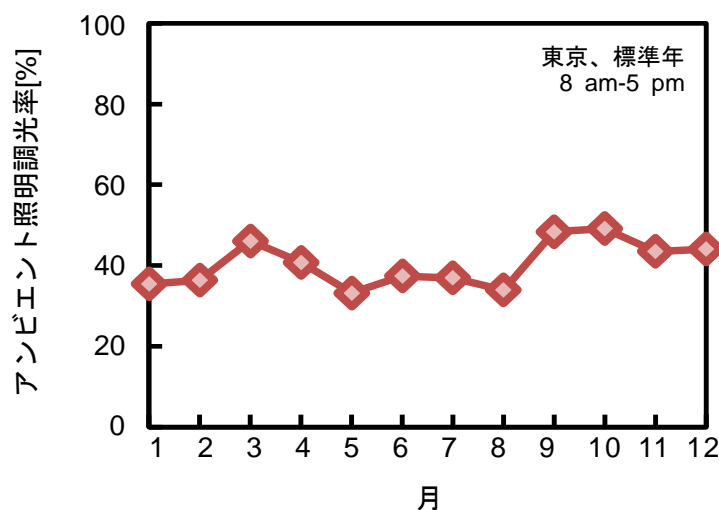


図 7.19 年間のアンビエント照明平均調光率

7.6 結論

第2章では、不快グレア抑制制御を用いたアンビエント照明の電力削減効果について示したが、これは自動ブラインドを設置した1つの採光部からの昼光導入量のみを予測する方法であった。一方、近年のオフィス空間では、オフィスのレイアウトや照明のレイアウト、窓の位置が、明るさセンサーの設置位置を決める障害となる場合がある。そのため本章では、不快グレア抑制制御の応用方法として、複数の採光部を有するオフィスにおける昼光照度予測手法を用いたアンビエント照明制御方法を提案した。さらに、気象データを用いた年間シミュレーションを行った結果、提案したアンビエント照明調光制御システムを用いることにより、本章の対象建物では、アンビエント照明の調光率は年間で60%削減する結果となった。

本研究で提案したアンビエント照明制御方法は、不快グレア抑制制御のログデータを使用するため、各窓からの直射日光および天空光の成分を分けて、昼光の導入量を予測することができることが特徴である。事前のキャリブレーションは必要となるものの、室内センサーレスのアンビエント照明を調光制御することが可能である。近年では様々な室内センサーが開発され誤作動は減少したものの、やはり吹き抜け空間やフリーアドレスといったオフィスの特徴によっては室内センサーを設置しづらい場合も多い。そのため、本章で提案したアンビエント照明制御方法を用いることで、上記に挙げたような室内センサーの設置が難しいオフィス空間においても、円滑に昼光照度を予測し、アンビエント照明の調光制御を可能としたと考える。

【第7章の参考文献】

- 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 and Technology*, Vol.30, pp.81-88, 1998.
- 2) 谷口智子、岩田利枝、間瀬亮平、伊藤剛、和田克明、平井大介：大空間オフィスにおける在席検知システムを用いたブラインドゾーン制御方法の開発、*日本建築学会技術報告集*、第21巻第48号、pp.683-688、2015年
- 3) Seyed Amir Sadeghia, Panagiota Karavaa, Iason Konstantzosa, Athanasios Tzempelikos: Occupant interactions with shading and lighting systems using different control interfaces: A pilot field study, *Building and Environment*, Vol.97, pp.177-195, 2016.
- 4) Liu, Wen Zhang, Xiaodong Chu, Yutian Liu: Fuzzy logic controller for energy savings in a smart LED lighting system considering lighting comfort and daylight, *Building and Environment*, Vol.127, pp.95-104, 2016.
- 5) Ivan Chewa, Vineetha Kalavallya, Naing Win Ooa, Jussi Parkkinen: Design of an energy-saving controller for an intelligent LED lighting system, *Building and Environment*, Vol.120, pp.1-9, 2016.
- 6) M.H. Toufiq Imama, Sina Afsharia, Sandipan Mishra: An experimental survey of feedback control methodologies for advanced lighting systems, *Building and Environment*, Vol.130, pp.600-612, 2016.
- 7) Ashish Pandharipande, David Caicedo: Smart indoor lighting systems with luminaire-based sensing: A review of lighting control approaches, *Building and Environment*, Vol.104, pp.369-377, 2015.
- 8) Marco Rossia, Ashish Pandharipande, David Caicedo, Luca Schenato, Angelo Cenedese: Personal lighting control with occupancy and daylight adaptation, *Building and Environment*, Vol.105, pp.263-272, 2015.
- 9) An Optimization Framework for Control of Non-Square Smart Lighting Systems with Saturation Constraints, *Proceedings of 2015 American Control Conference*, pp.1665-1670, 2015.
- 10) Li Shuguang: An optimal model for tunnel lighting control systems, *Building and Environment*, Vol.49, pp.328-335, 2015.
- 11) 渡邊健一、滝澤総、横田雄史、丹羽啓之、茨木健：無線通信を用いたタスク・アンビエント照明の統合制御の研究、*日本建築学会大会学術講演梗概集*、pp.545-546.2014.

- 12) Duong Tran, Member, IEEE, and Yen Kheng Tan, Senior Member: Sensorless Illumination Control of a Networked LED-Lighting System Using Feedforward Neural Network, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, Vol. 61, No. 4, pp.2113-2121, 2014.
- 13) Eric Shen, Jia Hu, Maulin Patel: Energy and visual comfort analysis of lighting and daylight control strategies, Building and Environment, Vol.104, pp.155-170, 2015.

第 8 章 総括

8.1 総括

本研究では、実際のオフィス空間にブラインド制御を導入した際に発生する問題解決を目的とし、不快グレア抑制に基づく実空間におけるブラインド自動制御方法について一連の研究を行った。

第 1 章では、オフィス空間の昼光照明に関わる既往の研究をまとめた。特に直射日光の遮蔽と利用を考えた窓装置の制御方法について分析し、執務者の視的快適性に基づく制御を目指した本研究の新規性を確認し、研究目的を明確にした。

第 2 章では、不快グレア予測指標を用いた自動ブラインドのスラット角制御方法の実用的アルゴリズムを提案し、アルゴリズムおよび詳細な計算方法を示した。提案したアルゴリズムは窓面情報、屋外照度、日時、執務者の在席位置分布、屋外周辺情報などを入力情報として、不快グレア予測指標を計算し、不快グレアが許容される最小スラット角に制御するものである。執務者の在席位置分布、屋外周辺情報を組み込んだことで効率のよい制御を可能にした。この制御方法による照明用電力削減効果を年間気象データを用いて検証し、さらにブラインドを通して見える屋外眺望に対する執務者の満足度を試算している。

第 3 章では、大空間オフィスで提案した制御方法を用いるために必要となる制御ゾーニングの最適化に関する提案を行った。数値計算により執務者の在席位置分布に応じた制御ゾーンの決定方法を示し、実際の空間における被験者実験でこの決定方法の有効性を示した。

第 4 章では、不快な窓面輝度変動を抑制するために必要となる制御インターバルに関する検討を行った。まず、1 分間隔で測定した 6 カ月間の気象データを用いた数値解析により、窓面輝度およびスラット角の変化を求めた。次に屋外照度の変動による変化とスラット切り替えによる変化の成分を分け、スラット切り替え時の急激な窓面輝度変化の出現頻度を求めた。制御インターバルの違いが窓面輝度の変化に与える影響を明らかにした。

第 5 章では、第 4 章で検証した窓面の輝度変化に対する執務者の不快感を定量化し、それを軽減するための窓面輝度変化速度の最適化に関する検討を行った。人工窓を用いた被験者実験を行い、窓面輝度変化に対する不快感とそのときの許容度を評価した。その結果、窓面輝度の変化速度が速くなるにつれて不快感は増加すると予想されたが、ある変化速度で評価はピークとなり、それ以上の値では減少することを確認した。さらに、窓面輝度変化に対する不快感の評価値と許容度の関係についても明らかにした。窓面輝度変化に対する不快感に影響するパラメーターを抽出し、窓面輝度変化速度の決定方法の制御フローを提案した。

第 6 章では、特殊ブラインドの一つである角度変化型ブラインドを取り上げ、第 2 章で示した計算方

法を適用させた場合の計算精度について検討した。特殊ブラインドを用いた場合の昼光による天井面照度の計算値と実測値は一致し、特殊ブラインドに本研究で示した計算方法が適用可能であることを示した。

第7章では、不快グレア抑制制御のログデータを用いて、側窓および天窗等の複数の窓からの昼光照度の予測方法を示し、昼光連動型のアンビエント照明制御方法を提案した。さらに、気象データによるアンビエント照明の年間調光率を算出し、提案したアンビエント照明制御方法を用いた場合の照明用電力削減効果についても明らかにした。

本論文で提案した不快グレア予測指標を用いた自動ブラインドのスラット角制御方法の実用的アルゴリズムは執務者の視的快適性を確保しつつ、照明用電力を削減し屋外眺望を確保することを可能にしている。さらに、オフィス空間で提案した制御方法を用いるためのゾーニング制御方法および窓面輝度変化速度の決定方法も同時に用いることで、ブラインド制御の実用化に関わる問題の解決を図った。本論文で示した考え方は、ベネシャンブラインドに限らず、ロールスクリーンや調光ガラスなどの昼光装置にも拡大することができる。そして、これまで長い間課題とされてきた室内環境の「省エネルギーと快適性の両立」の解決に視環境の上から大きく貢献するものである。本論文の成果は、照明用電力の削減だけでなく、執務者の視的快適性の維持・向上に寄与することができ、社会への貢献度は高いと考えられる。