

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	輝度画像を利用した照明とブラインドの協調制御と設計法に関する研究
Title(English)	A study on cooperative operation and design method in lighting and blind control system based on luminance image
著者(和文)	小島義包
Author(English)	Yoshikane Kojima
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11109号, 授与年月日:2019年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:中村 芳樹,松岡 昌志,室町 泰徳,那須 聖,浅輪 貴史
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11109号, Conferred date:2019/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

輝度画像を利用した照明とブラインドの

協調制御と設計法に関する研究

A study on cooperative operation and design
method in lighting and blind control system
based on luminance image

2019 年 3 月

小島 義包

YOSHIKANE KOJIMA

目次

第1章 序論	.....	1
1.1 本研究の背景	.....	2
1.2 既往の研究	.....	4
1.2.1 照明制御		
1.2.2 明るさ感の定量評価		
1.2.3 ブラインド制御		
1.3 本研究の目的	.....	9
1.3.1 オフィスにおける視環境の快適性		
1.3.2 照明制御		
1.3.3 ブラインド制御		
1.3.4 照明とブラインドの協調制御システム		
1.3.5 協調制御を構築するための照明設計法の提案		
1.4 論文の構成	.....	12
第2章 明るさ画像を利用した照明制御に関する検討	.....	17
2.1 明るさ画像を利用した照明制御方法の検討	.....	18
2.1.1 照明器具の調光率の算定方法		
2.2 目標とする明るさ感の適正範囲を求める主観評価実験	.....	21
2.2.1 実験方法		
2.2.2 実験結果		
2.3 明るさ画像を利用した照明制御の実証実験と評価	.....	26
2.3.1 実証実験施設と制御システムの概要		
2.3.2 制御結果		
2.4 第2章のまとめ	.....	30
第3章 輝度画像を利用したブラインド制御に関する検討	.....	33
3.1 輝度コントラストによる遮光要否判定方法の検討	.....	34
3.1.1 CCD カメラによる高輝度測定方法		
3.1.2 輝度コントラストを利用した検出方法		
3.1.3 判定閾値の検討		
3.2 輝度画像を利用した遮光要否判定の実証実験	.....	39
3.2.1 実証実験施設の概要		
3.2.2 輝度コントラストによる判定実験と結果		

3.2.3 遮光要否判定制御の実証実験	
3.2.4 実験結果	
3.3 窓面明るさ判定方法の検討	 49
3.3.1 ブラインドのスラット面輝度の推定	
3.3.2 窓面輝度画像の描画と明るさ判定	
3.4 第3章のまとめ	 53
第4章 照明とブラインドの協調制御に関する検討	 55
4.1 照明とブラインドの協調制御方法の検討	 56
4.2 実証実験と評価	 58
4.2.1 実証施設の概要	
4.2.2 実証実験の概要	
4.2.3 明るさ感と省エネルギー性に関する一定照度確保制御との比較実験結果	
4.2.4 協調制御に関する実証実験結果	
4.2.5 実証システムの省エネルギー性効果の確認	
4.3 昼光享受に関する性能評価	 68
4.3.1 ブラインドの空隙率による評価	
4.3.2 等価メラノピック照度による評価	
4.4 第4章のまとめ	 73
第5章 協調制御を構築するための設計法の提案	 75
5.1 協調制御システム構築のための課題	 76
5.2 タスク・アンビエント照明を採用したオフィスの実測調査	 77
5.3 評価エリアの設定（画像内の天井・壁の面積比率と室指数の関係）	 81
5.4 制御目標の設定（設計規準値と明るさ画像の関係）	 85
5.5 空間輝度の簡易予測手法の提案	 88
5.5.1 照明率を利用した人工照明使用下における平均輝度算出方法	
5.5.2 側窓を有した室内の昼光利用時における平均輝度算出方法	
5.6 モデル計算と評価	 94
5.6.1 モデルと計算条件	
5.6.2 計算結果と評価	
5.7 第5章のまとめ	 105
第6章 結論	 107
6.1 本研究のまとめ	 109
6.2 本研究に関する今後の課題	 112

謝辞	 114
付録	 117
付 1.F ビルにおけるブラインドの月別代表稼働実績	 121
付 2.タスク・アンビエント照明を採用したオフィスなどの輝度測定及び明るさ画像評価	 125
研究業績一覧	 138
英文概要【Abstract】	 146

第 1 章

序論

1. 1 本研究の背景

国は2014年4月に閣議決定した「エネルギー基本計画」において、新築公共建築物等は2020年までに、新築建築物は2030年までに平均でZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）化を実現することを目指すとしている。ZEBの概念は、建築・設備の種々の省エネルギー技術を組み合わせて大幅な省エネルギー化を図ったうえで、太陽光発電などのような再生可能エネルギーの利用により、見かけ上のビルのエネルギー消費量をゼロとするものである。

オフィスビルにおける照明の一次エネルギー消費量は、建物全体の20%程度を占めると報告されている¹⁻¹⁾。したがって、ZEB化を実現するためには、照明についても徹底的な省エネルギー化が求められており、高効率な照明器具や各種センサーによる自動的な照明制御の採用などが重要と考えられ、この中には昼光の活用も含まれる。2015年12月に経済産業省資源エネルギー庁で報告された「ZEBロードマップ検討委員会とりまとめ¹⁻²⁾」を参考に、ZEBに向けてのオフィス照明の取組みを図1.1に示す。事務室における設計照度は、2010年に改正されたJIS Z 9110 照明基準総則で定められた推奨照度の750 lxが一般的に適用されている。2000年以降に普及した高効率蛍光灯（高周波点灯専用型蛍光灯ランプ；Hf蛍光灯）を使用した場合、1 m²あたりの照明消費電力（照明消費電力密度）は約16 W/m²である。基準よりも50%以上省エネルギー化されたZEB Readyを目指すオフィスにおいては、設計照度を500 lx程度に抑え、また、蛍光灯よりも高効率なLED(Light Emitting Diode)などを採用し、照度センサーや人感センサーを組み合わせた制御を導入することにより、照明消費電力密度は約9 W/m²まで削減できるとされている。ZEBを目指すオフィスにおいては、さらなる省エネルギー化が求められており、ZEBを達成した事例から照明消費電力密度は4 W/m²を下回ることが必要であると考えられる。これを実現するためには、照明の省エネルギー化の鍵となる手法の一つとして、タスク・アンビエント照明が期待されている。

タスク・アンビエント照明は、オフィスなどにおける視作業空間の照明をタスク照明とアンビエント照明とに分離する方式で、非視作業域用のアンビエント照明の照度を低くできることと非在席者のタスク照明の消灯により、空間全体をほぼ均一な明るさで照明する全般照明方式に比べて大幅に消費エネルギーを低減できる^{1-3), 1-4)}。しかしながら、室内の明るさの印象が暗くなることから、執務者に受け入れられにくいと報告されている^{1-5), 1-6)}。このことは、執務者が望む光環境を形成するためには、視作業域の水平面照度だけでなく、壁や天井の輝度及びその分布に留意することが必要であることを示唆している。

もう一つの省エネルギー手法に昼光利用がある。窓から入射する昼光により、照明消費電力を削減することができる。一方で、昼光は、不快グレアや熱感などの原因となることから、その利用方法について十分な配慮が必要である。ZEBを目指すオフィスにおいて大幅な省エネルギーを実現するためには、人工照明と昼光照明を組み合わせた合理的な照明手法が必要であると考えられる。

近年、室内環境の快適性に関して多くの研究がなされており、昼光についても知的生産性や心地よさを高める効果などの生理的、心理的效果も報告されている¹⁻⁷⁾⁻¹⁻⁹⁾。また、オフィスにおいては、従業員の健康増進が企業価値の向上につながる経営課題と捉える、いわゆる、健康経営への取り組みが注目されている。建物を使う人の健康や幸福（Well-being）を考えた環境建築が要求され始めており、昼光の享受の良し悪しも重要な要素とされている。特に、近年、建物内で働く居住者の健康・快適性に焦点をあてた、米国で開発された建物・室内環境評価システムである Well Building Standard®（以降、WELL 認証という）¹⁻¹⁰⁾においても、ガイドラインが示されており、建築物における昼光利用は、省エネルギーと健康・快適の両側面から求められるようになった。

オフィスの採光は一般的に側窓を通して行われ、側窓には、日射遮蔽のためにブラインドが設置されている。また、近年建設される建物に使用される照明設備は、LED を光源とすることが多いため、照明が、光の出力を容易に変更できる、調光機能が備わっているため、調光制御システムが一般化されてきている。

このような状況に鑑み、人が光環境に求めている要件の一つと考える明るさ感に立脚し、窓による不快グレアの抑制も考慮した、照明とブラインドの協調制御に関する検討が必要であると考えられる。特に、近年、開発が進む画像処理技術や高精度なセンサーを活用し、空間の輝度画像を測定し、輝度分布を基にした空間の見え方を評価しながら照明・ブラインドを適切に制御することに着目した。

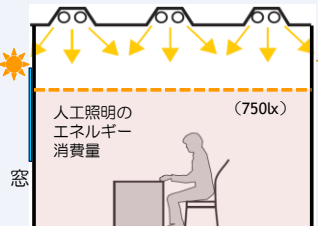
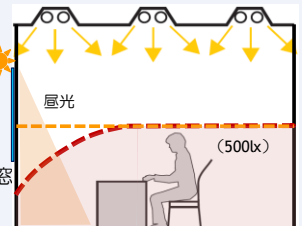
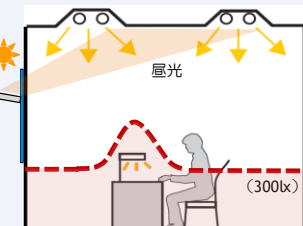
	従来	ZEB Ready	ZEB
方式	全般照明	全般照明	タスク・アンビエント照明
イメージ			
概要	750lxの高い照度を室内全体に与える手法。 余分な明かりが出ているため、省エネの余地が大きい。	全般照明の照度を500lxに下げた手法。照度センサや人感センサを組み合わせた 制御 を採用し、省エネ化。	アンビエント照明を300lx程度に抑え、タスク照明で補う手法。 暗い雰囲気にならない配慮が必要。昼光を最大限有効活用する。
照明器具	高効率蛍光灯(Hf型)	LED照明	LED照明+昼光
消費電力	16.3W/㎡	9.4W/㎡	4W/㎡以下

図 1.1 ZEB に向けてのオフィス照明の取組み

Fig.1.1 Methods of office lighting towards ZEB

1. 2 既往の研究

1. 2. 1 照明制御

現在、全般照明方式のオフィスにおける一般的な昼光連動による照明の制御は、図 1.2 に示すように、天井面に設置した照度センサーにより検知範囲内の床面や机上面などからの反射光を入射光量として記憶し、その光量が一定になるように照明器具の光出力を自動的に調節する一定照度確保制御である。昼光の入射量に合わせて机上の水平面照度が一定値を確保するように調光されるため、水平面照度が 750 lx 程度で設計される全般照明方式のオフィスにおいても、省エネルギー効果が期待できる制御方式と言える¹⁻¹⁾。しかしながら、この照度センサーの役割は、机上面の照度を検出することであり、空間の明るさ感を検出・評価することはできない。このことから、山口らは、照明の省エネルギー手法の一つである昼光利用において、照度センサーなどにより、入射する昼光の量に応じて照度を一定に保つよう照明を制御する場合、明るさ感を一定に保つことが担保されないことを示した¹⁻¹¹⁾。

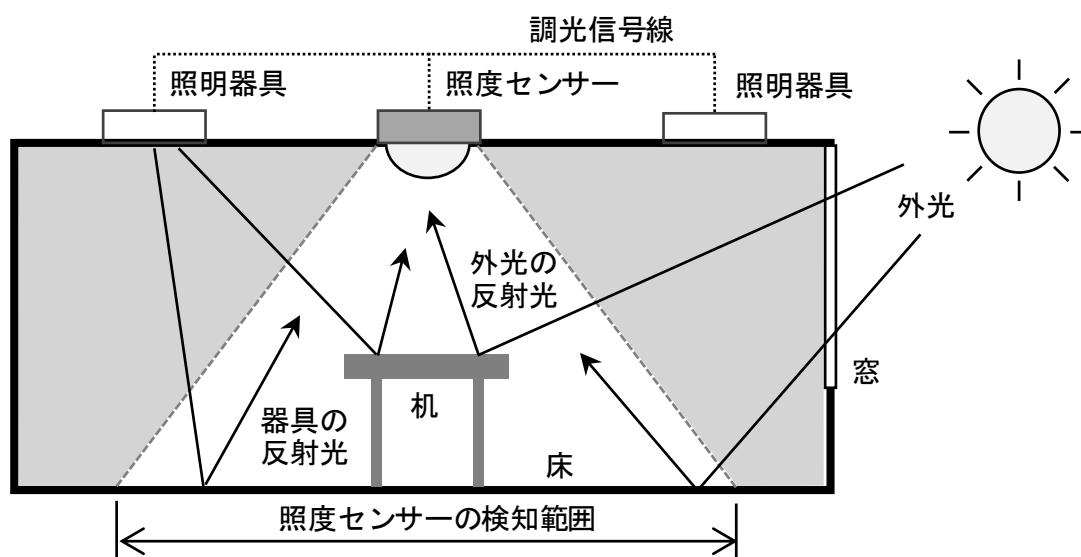


図 1.2 照度センサーを利用した照明制御の動作原理

Fig.1.2 Operation principal of lighting control using illuminance sensor

1. 2. 2 明るさ感の定量評価

照明空間の明るさ感を定量的に評価する既往研究には、中村らによる視野内の輝度分布を基に、部位毎の明るさ知覚を「明るさ尺度値 (NB 値)」で表すもの¹⁻¹²⁾⁻¹⁻¹⁴⁾や、山口ら¹⁻¹⁵⁾、岩井ら¹⁻¹⁶⁾による明るさ感指標「Feu」などがある。いずれも、これまでの作業面の平均照度によって評価するのではなく、室内の輝度の分布から空間の明るさ感を評価する手法であり、光環境の評価を3次元で扱うことが必要となった。近年、3次元コンピュータシミュレーションや CCD (Charge Coupled Device) カメラを用いて空間の光環境を測定した結果を表す画像 (画像測光) などの実用化においては、図 1.3 に示すような透視射影による画像投影が用いられる。

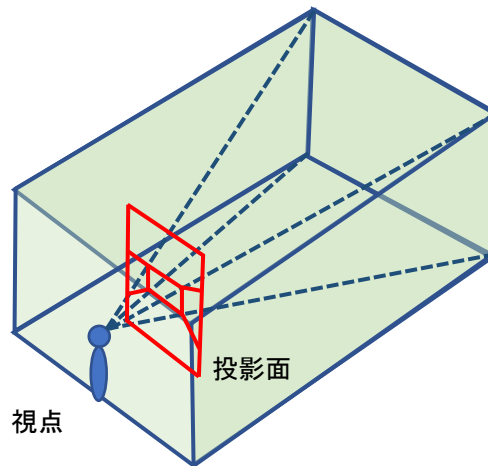


図 1.3 透視射影モデルのイメージ

Fig.1.3 Image of perspective model

中村によって提案された明るさ画像も、透視射影モデルを利用して空間をコンピュータ上に再現したものである。明るさ画像とは、輝度画像との双方向変換¹⁻¹⁴⁾を利用した評価システムで生成され、画像の各ピクセルに輝度を有する輝度画像から、目の順応や輝度対比効果を組み入れ、人の明るさ知覚を定量化した指標（NB 値）を用いて可視化することができる。明るさ知覚の定量化モデルとして、多重周波チャンネルモデル¹⁻¹⁴⁾を基に、輝度分布と輝度対比（コントラスト）に対する関係を求め、ウェーブレット分解によって明るさ知覚の予測画像（明るさ画像）を求めることができる。図 1.4 に輝度画像と変換後の明るさ画像の例を示す。明るさ画像は、画像の各ピクセルが、明るさ知覚に対応した NB 値を有する画像である。NB 値は、空間の輝度分布から目の順応や輝度対比といった人の視覚特性を加味した 1～13 の値で表され、1 が「非常に暗い」、7 が「どちらでもない」、13 が「非常に明るい」とする明るさの尺度を有している。

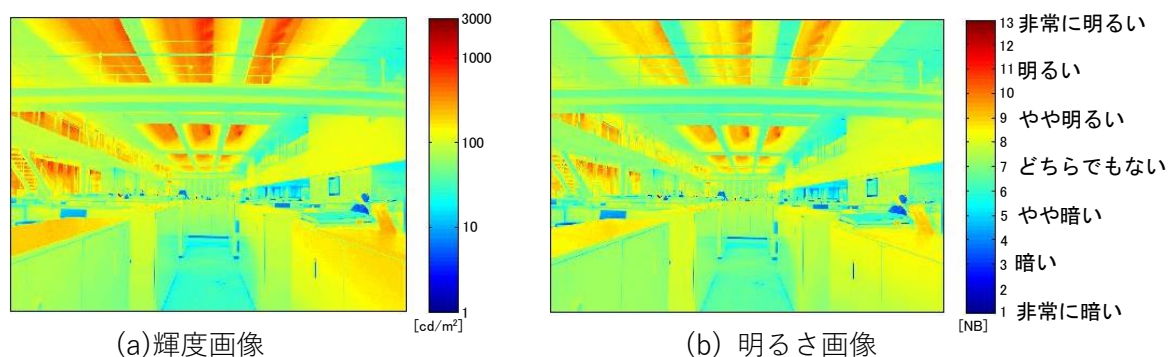


図 1.4 輝度画像と明るさ画像の例

Fig.1.4 Example of luminance image and brightness image

松下電工（株）（現パナソニック（株））が、空間の明るさ感を適切に予測し、客観的に示すことができる定量的指標として「Feu」を開発した。これは、色モード境界輝度と言われる、空間内のある視対象の見え方が、物体色の見え方（物体色モード）から光源として発光しているような見え方（光源色モード）へ変化する境界の輝度によって空間の明るさ感を定量的に表現するものである。実験の結果から、明るさ感は、誘導視野（視角にして左右 100 度×上下 85 度）内の高輝度部（1,000cd/m²以上）を除いた輝度の幾何平均値の 0.7 乗比例することから、Feu は、式(1.1)で算出される。色モード境界輝度は、人工照明環境下では実用性の高いものであるが、昼光などの大きく明るさが異なる照明が同時に存在する場合に適用することができないなど、技術的課題もある¹⁻¹⁹⁾。

図 1.5 にオフィスのイメージ CG とその画角における Feu を示す。Feu は数値が大きいほど空間の明るさ感が高いとされている。

$$\text{Feu} = 1.5 \cdot Lg^{0.7} \quad \dots(1.1)$$

Lg : 誘導視野内の輝度の幾何平均値

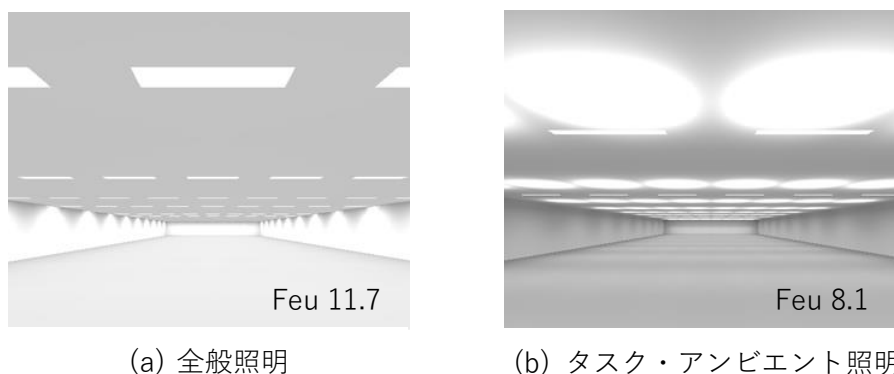


図 1.5 オフィスのイメージ CG と Feu¹⁻²⁰⁾

Fig.1.5 Computer graphics in office and Feu¹⁻²⁰⁾

これらの指標は、空間の輝度分布を基に算出するものであるが、現在のところ照明計画や建物完成後の評価に活用されているものの、照明制御への利用は実現されていない。

今後は、省エネルギーと視環境の快適性を両立するために、照度だけでなく空間の明るさ感も考慮に入れた照明制御が必要になると予測されており¹⁻¹⁹⁾、タスク・アンビエント照明方式の普及促進にとっても、この観点に立脚した新しい照明制御システムとその設計法の研究が必要である。

1. 2. 3 ブラインド制御

オフィスビルにおける執務室は、側窓採光が一般的である。側窓の多くには、日射遮蔽のため羽根板（スラット）が水平の横型ブラインド（ベネチアンブラインド）が設置されている。近年、ブラインドの昇降高さやスラット角度を自動制御する方式の採用が増加している。多くの自動制御は、図 1.6 に示すように屋上に設置したセンサー情報を基に直射光の状態の判断を行うことによって、方位毎に一律に行われる。現在、実用化されている遮光要否判定は、日射量や照度を用いて行われている。この場合、一定の閾値では太陽高度など条件の違いによって判定誤差が出ると報告されている¹⁻²¹⁾。

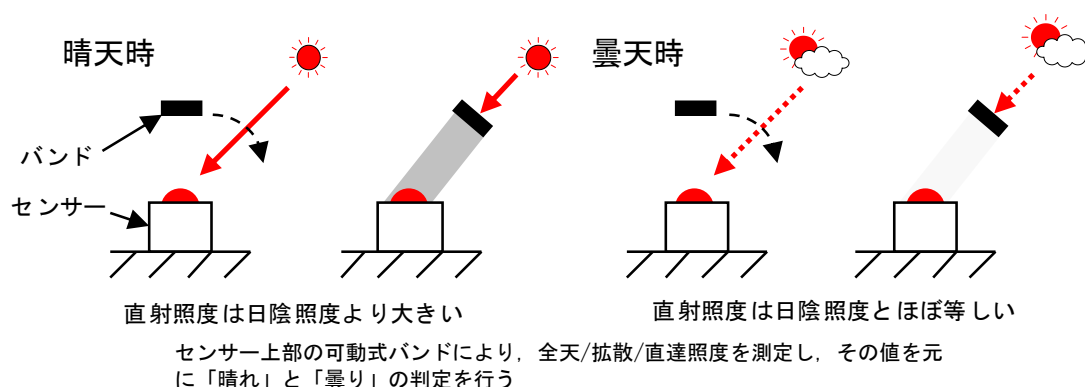


図 1.6 直射光判定制御の原理例 ((株)ニチベイ提供)

Fig.1.6 Principal example of evaluation method of direct sunlight (Nichibei)

また、CCD カメラによって撮影された天空画像を利用した遮光要否判定方法が報告されている¹⁻²²⁾。ここでは、天空に向けて設置した CCD カメラ画像を基に、最大輝度を示す地点を太陽位置として、太陽部分と周辺部分の輝度差と設定した閾値の大小関係によって遮光判定が行われている。いずれも、建物屋上に設置されたセンサーによって、直射光のみを検出することを目的としたものである。

これらの既往研究が目指すように、ブラインドの開放可能な時間を長くすることは省エネルギー性と眺望性を向上することができること¹⁻²³⁾から、窓面毎の遮光要否判断が今後、重要になると考えられる。特に、都市部においては、周辺建物によって直射光が遮られる場合も多く、屋上に設置したセンサーだけでは、適切な自動制御が難しくなっている。また、近年、ガラスを外装材とした建築物や太陽光発電パネルの設置が増加しており、建築物からの眩しい反射光による光害の事例も報告されている¹⁻²⁴⁾。反射光の入射により、グレアの発生、パソコン画面への映り込み、集中度の低下など、生産性や快適性を損ねる問題が挙げられている。

これまでのブラインド制御には、周辺建物による反射光を検出し、遮光制御する機能はなく、今後は、室内に入射すると、グレアや熱感となる可能性のある反射光や直射光を検出し、確実に遮光することができる、新たな遮光要否判定方法の研究が必要であると考えられる。

また、今後、照明制御に対して、これまでの照度に加えて輝度の概念が持ち込まれると、窓やブラインドを含めた空間の輝度分布と対比を考慮した制御が必要となり、視環境の快適性と省エネルギー性を両立するためには、空間の輝度分布へ大きな影響を与えるブラインドとの協調的に制御できる新たなロジックとシステムの研究開発が必要であると考えられる。

1. 3 本研究の目的

1. 3. 1 オフィスにおける視環境の快適性

オフィスにおける視環境の快適性に必要な要件は、図 1.7 に示すように、視作業に十分な机上面照度を得ること、空間全体が陰鬱な雰囲気にならないこと、不快なグレアがないことである。これは、天候や時刻などによって光量変動する昼光が入射する状態においても求められるため、これらを満足できる制御が必要である。

適度な机上面照度とは、一般的な執務をするオフィスであれば 500lx から 750lx 程度であり、アンビエント照明とタスク照明によって確保する。空間全体が陰鬱な雰囲気にならないためには、適度な空間の明るさ感が必要であり、壁面や天井面の輝度を、壁面を照らすダウンライトやアンビエント照明によって確保する。不快グレアは、窓面の太陽や直射光が反射したブラインド表面が要因となり、これらを抑えるためには適切なブラインドスラット角に保つことである。よって、昼光の入射するオフィス空間において適切な視環境を得るためには、アンビエント照明、タスク照明、ブラインドを協調的に制御することが必要である。

本研究の目的は、空間を透視射影した輝度分布の画像を基に、照明とブラインドを協調制御するロジック及びシステムを検討し、実証運用を通じて妥当性を明らかにすることである。また、システムの実用化に向けて、窓面を含めた室内の輝度分布を設計実務者が簡単に予測できる手法を明らかにすることである。

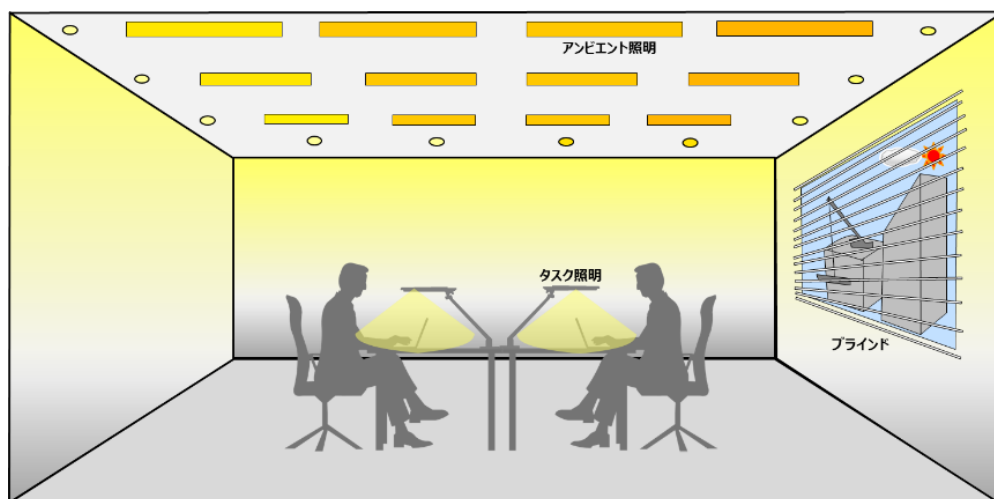


図 1.7 オフィスの視環境イメージ

Fig.1.7 Image of visual environment in office

1. 3. 2 照明制御

タスク・アンビエント照明を採用したオフィスでは、アンビエント照明の照度が低いため、昼光連動によってアンビエント照明を調光制御する場合、照度センサーだけでは空間の明るさ感が不足したり、過剰な明るさ感が得られたりする課題がある。照明制御に関する本研

究の目的は、この課題に対し、輝度画像及び明るさ画像を利用し、室内の明るさ感を向上することができる照明制御システムの論理構造を明らかにすることである。

1. 3. 3 ブラインド制御

ブラインド制御に関する本研究の目的は、CCD カメラの画像を利用して、窓面から見える対向建物による影の影響、周辺建物からの反射光などを含めた、ブラインドの遮光要否判定方法の論理を明らかにすることである。

図 1.8 に目標とするブラインド制御の動作を示す。窓面とブラインドの間に CCD カメラを屋外に向けて設置する。連続窓を持つような建物外装材の場合、一般的に窓面とブラインドとの間には 200mm 程度の空間があることから、CCD カメラをこの位置に設けることが可能である。この CCD カメラで生成する屋外輝度画像を基に、遮光要否判定を行う。窓面に設置することで、当該窓面に入射する直射光や周辺建物からの反射光を検出することができ、精度の高い遮光制御が実現できると考える。また、周辺建物の影になっている時間帯は、ブラインドを開放することができ、眺望と採光をより多く得ることが可能である。

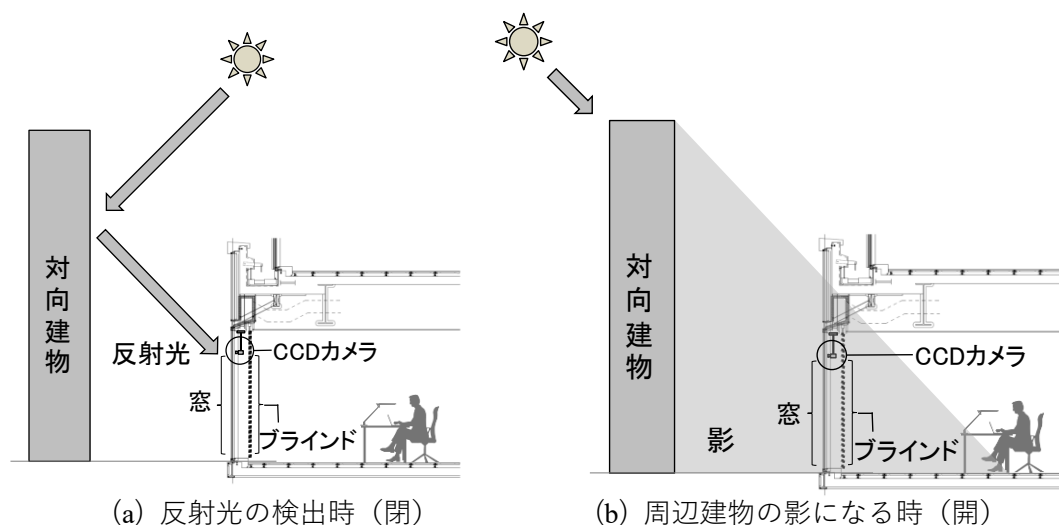


図 1.8 遮光判定によるブラインド制御の動作

Fig.1.8 Operation of solar shading method in blind control

1. 3. 4 照明とブラインドの協調制御システム

本研究の最後の目的は、二つの研究成果を組み合わせた照明とブラインドの協調制御システムを実建物に導入し、在来システムと比較することによってシステムの実用性を確認することである。

図 1.9 は、今回、実建物に導入した制御システムの構成を示す。窓面及び室内に設置した CCD カメラによって、窓面から見える屋外輝度画像及び室内の輝度画像を生成する。得られた輝度画像を評価することにより、ブラインドの適切な角度及びアンビエント照明、タス

ク照明の調光率を判定し、制御する。これらを適度な間隔で繰り返すことにより、明るさが変動する昼光に合わせて、不快グレアの抑制、適度な明るさ感と机上面照度を維持することができる。

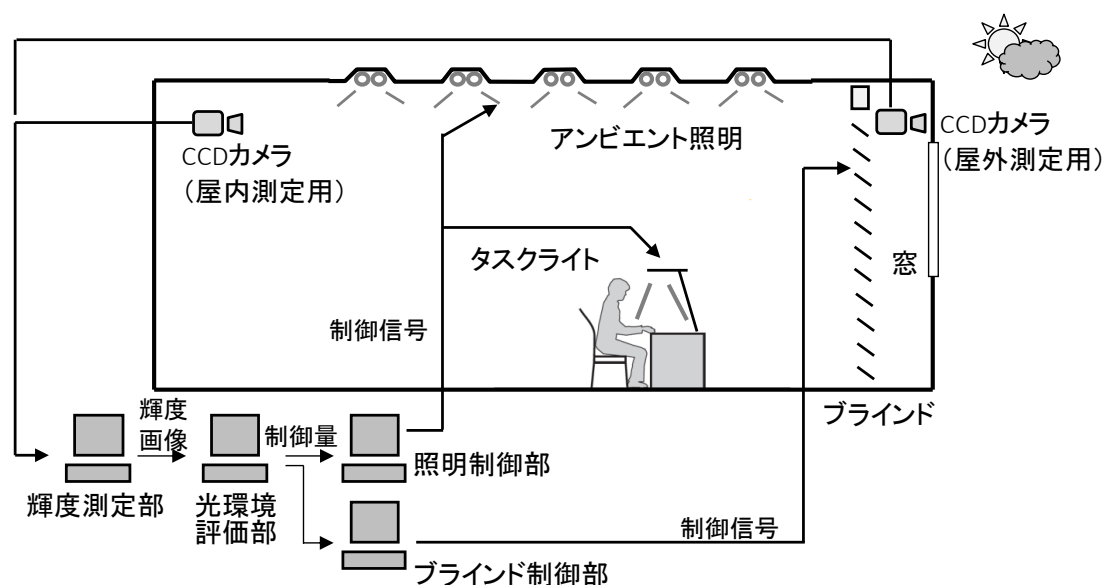


図 1.9 制御システムの構成
Fig.1.9 Diagram of control system

1. 3. 5 協調制御を構築するための照明設計法の提案

これらの制御システムを実用化するために、輝度を考慮した適切な明るさ感を確保する照明設計とシステムの設計のためには、室内の輝度分布を簡易に予測する手法が必要である。

まず、適切な明るさ感を確保するためには、壁や天井など、輝度分布を考慮しなければならない部位を明らかにするため、視野に占める面積の大小と室指数の相関を明らかにする。その上で、照明器具の配光特性を表す照明率を用いた壁面などの平均輝度簡易計算方法を検討する。また、側窓を有した室を想定し、昼光による平均輝度を簡易に求める方法を検討して、制御システムの効果を簡易に予測できることをモデルケースによって検証する。

1. 4 論文の構成

本論文は、図 1.10 に示す 6 章で構成される。

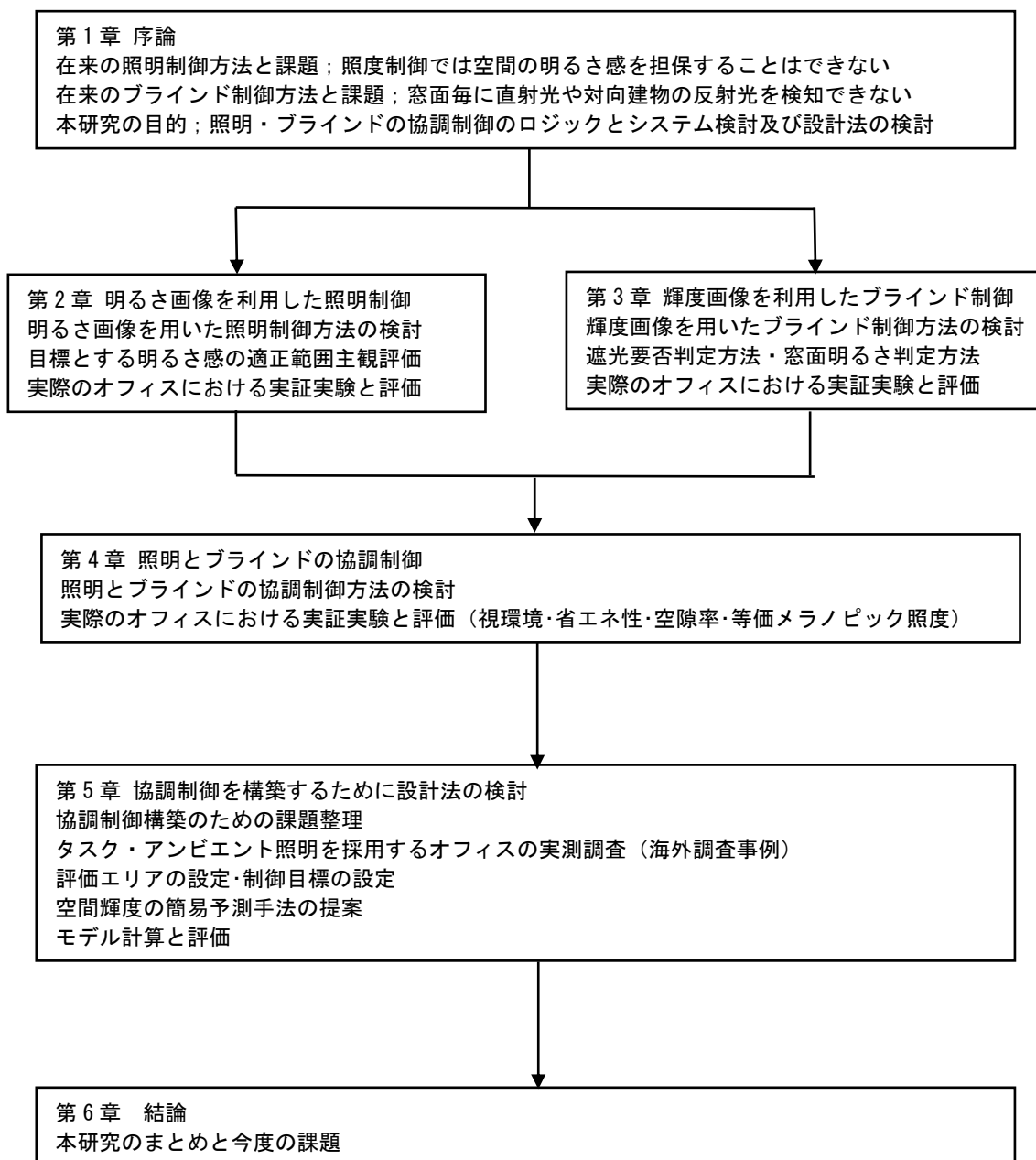


図 1.10 論文の流れ

Fig.1.10 Flow diagram of this thesis

本論文は、序論を含め本論6章と付録で構成する。

第1章（本章）は、序論である。はじめに、建築物における ZEB 化などのエネルギーや照明に関する社会的動向から本研究の背景と目的を述べた。次に、照明環境における明るさ感及び採光装置としてのブラインド制御に関する既往の研究について述べ、最後に論文構成を示す。

第2章では、明るさ知覚の尺度値を示す画像（明るさ画像）を利用した照明制御方法について述べる。制御に必要なオフィス空間における明るさ感の適正範囲を主観評価実験によって明らかにし、実際のオフィスにおける輝度画像、明るさ画像及び明るさ尺度値（NB 値）を利用した照明制御システムの実証実験とその評価について述べる。

第3章では、輝度画像を利用したブラインド制御システムについて述べる。CCD カメラを基に取得した輝度画像から、遮光の要否と窓面の眩しさを判定する方法の検討結果、およびこれら判定方法を備えた制御システムを実際のオフィスにおいて構築して行った、ブラインド制御システムの実証実験とその評価について述べる。

第4章では、照明とブラインドの協調制御について行った実証実験に関し、制御の妥当性、省エネルギー性、ブラインドの開放性などの評価について述べる。

第5章では、欧米におけるタスク・アンビエント照明オフィスの輝度分布を測定し、明るさ画像によってタスク・アンビエント照明下の光環境の実態を整理する。また、今回検討した照明とブラインドの協調制御の汎用化と普及のための課題と、これを解消するための方法として輝度分布の簡易予測方法を検討し、簡易モデルを用いて実証システムの制御の適用性について述べる。

第6章は、本研究の結論を述べる。

【第1章の参考文献】

- 1-1) 照明学会：「照明合理化の指針」改訂委員会報告書-環境負荷低減と豊かな光環境の両立に向けて-, 2009
- 1-2) 経済産業省 資源エネルギー庁 省エネルギー対策課：ZEB ロードマップ検討委員会とりまとめ, 2015
<http://www.meti.go.jp/press/2015/12/20151217002/20151217002-1.pdf> (2019/2/1 閲覧)
- 1-3) 照明学会：タスク・アンビエント照明システム研究調査委員会報告書, 1995
- 1-4) 照明学会：オフィス照明の実態調査研究調査報告, 2002
- 1-5) 照明学会：タスク・アンビエント照明 (TAL) 普及促進委員会報告書, 2012
- 1-6) 中村芳樹：オフィスの光環境の調査と実験, 照明学会誌, 74-1, pp.17-23, 1990
- 1-7) 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, 環境工学 I, pp.501-504, 2014
- 1-8) 古賀靖子：光放射の非視覚的効果の定量化に関する標準化動向, 照明学会誌, 99-1, pp.28-31, 2015
- 1-9) 市原真希ほか：午前中の昼光照明が生理量及び知的生産性に与える影響の検討その1, 実測概要と物理環境の測定結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.1255-1256, 2010
- 1-10) WELL Building Standard® v1 2015 年9月
[https://www.wellcertified.com/sites/default/files/resources/WELL%20Building%20Standard%20\(Japanese\).pdf](https://www.wellcertified.com/sites/default/files/resources/WELL%20Building%20Standard%20(Japanese).pdf) (2018/8/11 閲覧)
- 1-11) 山口秀樹・丸山隆志・篠田博之：窓面からの昼光導入が空間の明るさ感に与える影響, 照明学会誌, 98-11, pp.593-599, 2014
- 1-12) 中村芳樹・江川光徳：均一背景をもつ視対象の明るさ知覚-輝度の対比を考慮した明るさ知覚に関する研究(その1)-, 照明学会誌, 88-2, pp.77-84, 2004
- 1-13) 中村芳樹・江川光徳：コントラスト・プロファイルを用いた明るさ知覚の予測-輝度の対比を考慮した明るさ知覚に関する研究(その2)-, 照明学会誌, 89-5, pp.230-235, 2005
- 1-14) 中村芳樹：ウェーブレットを用いた輝度画像と明るさ画像の双方向変換-輝度の対比を考慮した明るさ知覚に関する研究(その3)-, 照明学会誌, 90-2, pp.97-101, 2006
- 1-15) 山口秀樹・篠田博之：色モード境界輝度による空間の明るさ感評価, 照明学会誌, 91-5, pp.266-271, 2007
- 1-16) 岩井彌・井口雅行：空間の明るさ感指標「Feu」による快適な空間創りのための新しい照明評価手法, Matsushita Technical Journal Vol.53 No.2 Jan, pp.64-66, 2008
- 1-17) Campbell, F.W. and Robison, J.G.: Application of Fourier analysis to the visibility of gratings, Journal of Physiology, 197, pp.551-566, 1968
- 1-18) 照明学会：空間の明るさ評価研究調査委員会・空間の明るさ感に基づく照明デザインに関する研究調査委員会 「空間の明るさ感」検討のためのリファレンス・データ報告書, 2010
- 1-19) たとえば 千代和夫：高効率 LED と昼光センサ活用の新たな可能性, 照明学会誌, 100-4, pp.156-159, 2016
- 1-20) パナソニック(株) Feu 設計資料
<http://www2.panasonic.biz/es/lighting/plam/knowledge/feu/office-3-2.html> (2018/12/1 閲覧)

- 1-21)伊藤大輔・岩田利枝・岩佐義久・佐々木真人・柳井崇：視環境評価に基づくブラインド制御に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 1513-1516, 2006.9
- 1-22)本間睦朗・岩田利枝・川瀬貴晴：天空画像による自動ブラインド制御のための直射日光遮蔽要否判断, 日本建築学会環境系論文集, 第 660 号, pp. 125-130, 2011.2
- 1-23)一ノ瀬雅之・井上隆・田宮有見子：気象の変動に追従するブラインドの自動制御手法, 日本建築学会環境系論文集, 第 646 号, pp. 1339-1345, 2009.12
- 1-24) 日経アーキテクチュア (919), 46-50, 2010-02-08, 日経 BP 社

第 2 章

明るさ画像を利用した照明制御に関する検討

2. 1 明るさ画像を利用した照明制御方法の検討

人が感じる空間の明るさ感は、壁面や天井面など、視野に占める割合の大きい部分の輝度分布によって影響を受ける。このため、この部分の輝度分布を適切に確保することにより、室内の明るさ感を向上することができる²⁻¹⁾。

研究対象とした照明制御システムは、タスク・アンビエント照明を採用するオフィスを対象としたものであり、図 2.1 に示すように「輝度測定部」、「光環境評価部」、「照明制御部」から構成される。CCD カメラを用いてリアルタイムに室内の輝度分布を測定し、そのデータを用いて明るさ感の評価を行う。制御は明るさ画像上に設定した評価エリア（明るさ感を確保したい領域）に入射する昼光の量を算出したのち、評価エリアの NB 値が目標として設定された値（目標 NB 値）となるよう照明を調光することにより行う。適度な間隔で明るさ感の評価と照明の制御を繰り返すことにより、室内に入射する昼光の量の変動に応じて評価エリアの目標 NB 値を維持しながら、アンビエント照明に必要な明るさ感を確保できる。

ここで、評価エリアは、空間サイズに応じて執務者の視野内の見え掛かりの面積の大きい壁面や天井面を代表のエリアとして設定することが想定される。

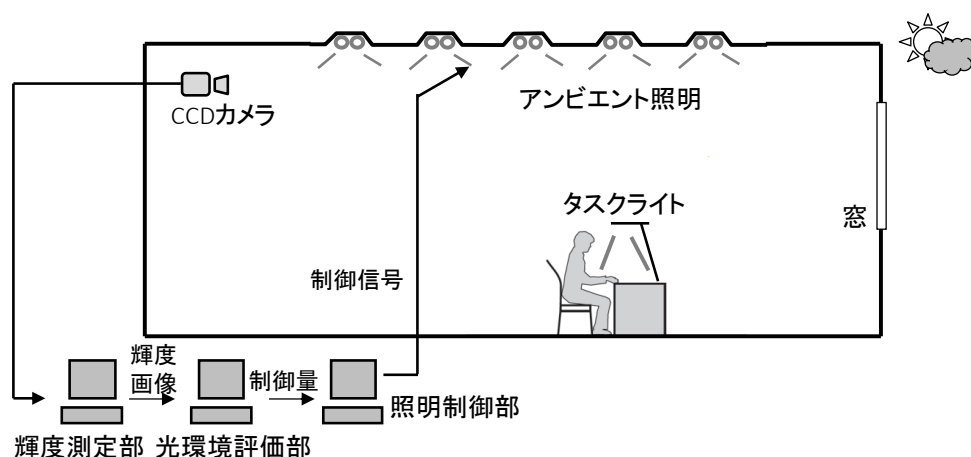


図 2.1 制御システムの構成

Fig.2.1 Diagram of control system

2. 1. 1 照明器具の調光率の算定方法

照明の制御のため任意に設定される評価エリアに対し、各照明器具グループが与える光束の程度（以降、寄与度とする）が把握できれば、評価エリアに必要な輝度を与えるために必要な調光率（光源の出力光束を光源の定格出力光束で除した値）を求めることができると考えた。

このため、室内に昼光が入らない状態において、各照明器具グループを定格状態（調光なし）で個別に点灯し、CCD カメラ毎にこのときの輝度画像（以降、基準輝度画像とする）を取得する。これにより各照明器具グループが評価エリアに与えている輝度を知ることが

でき、評価エリアに対する寄与度を把握することができる。図 2.2 に基準輝度画像の例を示す。

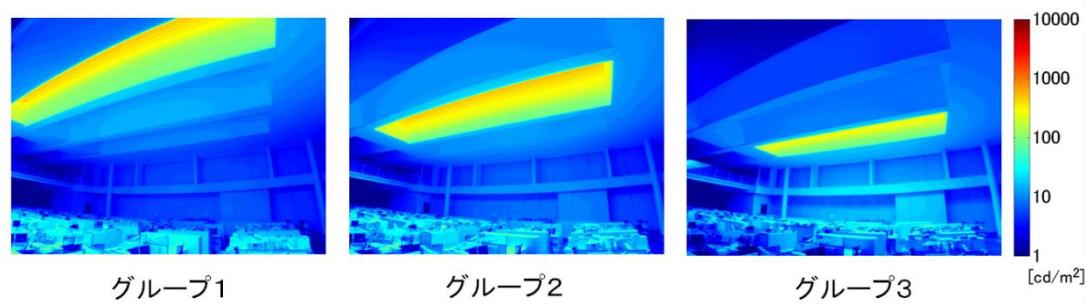


図 2.2 基準輝度画像の例

Fig.2.2 Example of luminance images for reference

実際の制御時の調光率は、以下のようなステップで決定する。(図 2.3 参照)

- ・ステップ 1
照明器具の現在の調光率を確認し、CCD カメラで撮影し輝度画像を取得する (図 2.3-①)。
- ・ステップ 2
基準輝度画像を用い、撮影された輝度画像から照明によって与えられている輝度分布を取り除き、昼光が与えている輝度分布を計算する (図 2.3-②)。
- ・ステップ 3
この輝度画像を明るさ画像に変換する (図 2.3-③)。
- ・ステップ 4
明るさ画像における評価エリアの平均 NB 値を算出し、目標 NB 値との差を求める。目標 NB 値に対し不足する NB 値を明るさ画像全体に加える [修正明るさ画像の作成] (図 2.3-④)。
- ・ステップ 5
修正明るさ画像を輝度画像へ逆変換する [修正輝度画像の作成] (図 2.3-⑤)。修正輝度画像の評価エリアの輝度が目標 NB 値達成に必要な輝度となる。
- ・ステップ 6
基準輝度画像および寄与度をもとに、図 2.3-②と図 2.3-⑤の輝度画像における評価エリアの輝度差を補うために必要な調光率を算出する。
- ・ステップ 7
評価エリアが複数ある場合、二番目以降の評価エリアについては、直前までの評価エリアの調光結果を反映した輝度分布を図 2.3-②に足し加え、同様な計算を行う。

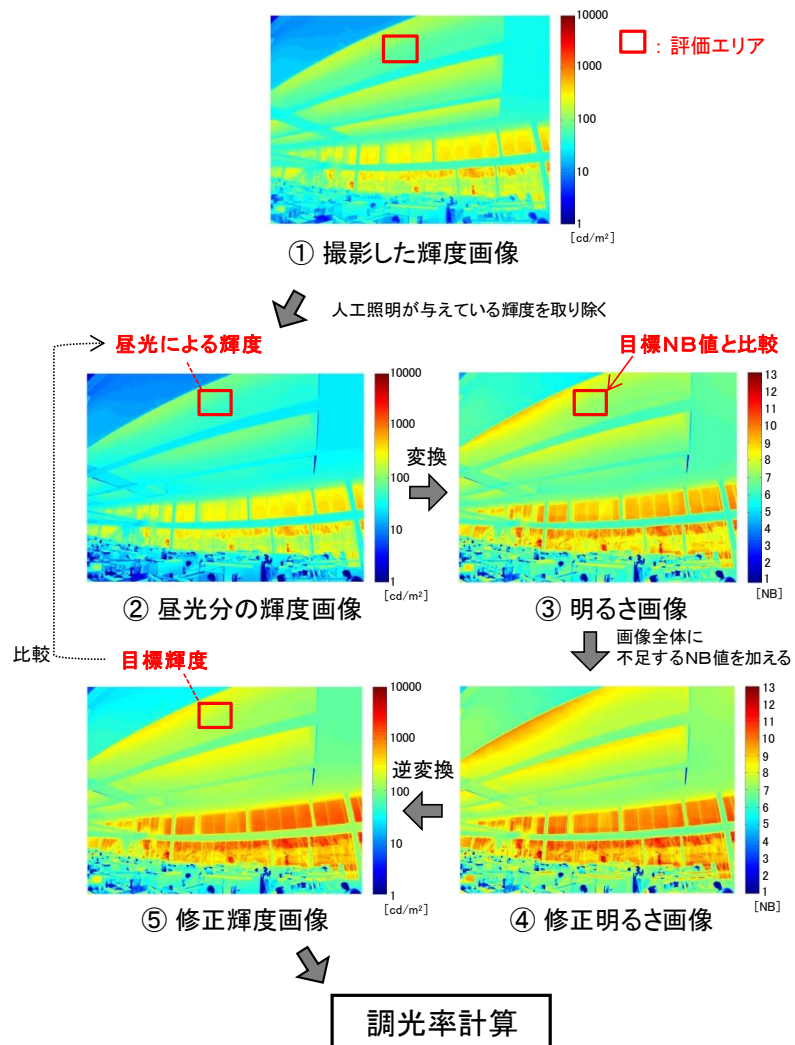


図 2.3 調光率算出の画像の様子
Fig.2.3 Images of dimmer ratio calculation

2. 2 目標とする明るさ感の適正範囲を求める主観評価実験

執務者が求める明るさ感を維持するための制御に最も重要な要素は、目標 NB 値の決定である。小谷らは、タスク・アンビエント照明方式を採用したオフィスでは、パーティションや壁面の NB 値の平均をそれぞれ 7.8, 7.4 以上とすることにより適切な照明環境を実現できる可能性があると報告している²⁻²⁾。しかし、当該報告は被験者の正面のみを評価対象として行ったものであった。また、加藤らは、空間の明るさ感は、空間全体を見回して得られる明るさの記憶から総合的に判断されると報告している²⁻³⁾。本研究では視野内の複数壁面での明るさ感評価により空間の明るさ感を評価する方法を検討するため、実大オフィスにおいて、調光制御によって各壁面の平均 NB 値を変えながら、その照明環境下における主観評価実験を行い、オフィスにおける適切な NB 値の範囲を求めた。

2. 2. 1 実験方法

実験施設は、東京都清瀬市にある O 社技術研究所内のオフィスである。部屋の大きさは、図 2.4 に示すように、間口約 7.2m、奥行 14.2m、天井高さ 2.55m である。なお今回は、昼光の影響を除いて評価するため、窓には遮光板を設けた。

実験用に設定した平均 NB 値は、6.5NB、6.7NB、7.0NB、7.3NB、7.5NB、8.0NB の 6 パターンである。室内には、壁面や机上面の輝度を測定するための CCD カメラを 5 台設置した。そして、この CCD カメラで得られた輝度画像を明るさ画像に変換し、評価エリアの平均 NB 値が、パターンごとの設定値になるよう、アンビエント照明用の天井埋込み型ルーバー付蛍光灯照明器具（高周波点灯専用形蛍光ランプ 2 灯用）20 台を、5～100%の範囲で個別に調光した。図 2.5 はカメラ 1 の明るさ画像を示し、図 2.6 はカメラ 2 の明るさ画像を示す。いずれも、破線内を評価エリアとし、平均 NB 値が 7.3NB のケースである。

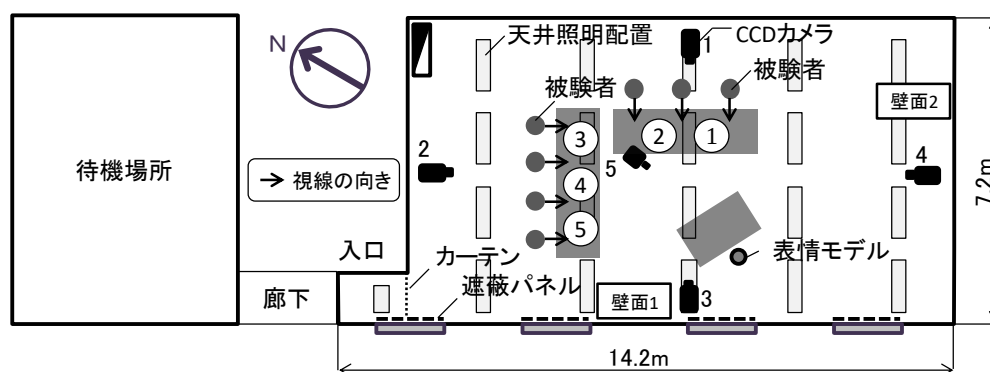


図 2.4 実験室のレイアウト
Fig.2.4 Layout of experimental room

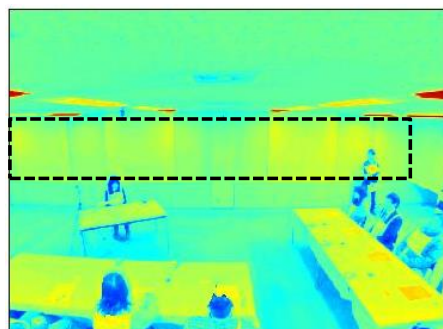


図 2.5 カメラ 1 の明るさ画像

Fig.2.5 Brightness image by camera 1

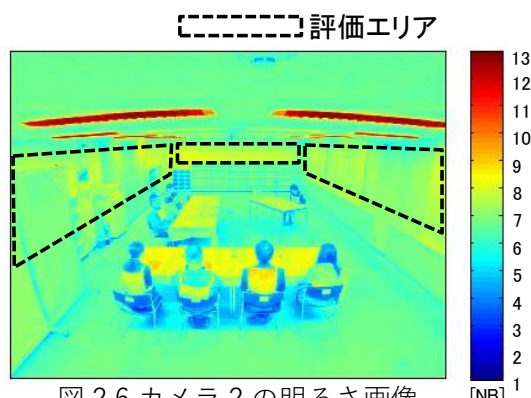


図 2.6 カメラ 2 の明るさ画像

Fig.2.6 Brightness image by camera 2

午前中の実験では 6.5NB から一段階ずつ明るく設定していく昇順で、午後は逆に 8.0NB から暗くしていく降順で主観評価を行った。図 2.7 に実験フロー、図 2.8 に実験の状況を示す。被験者は、机上面照度を 100lx 程度に保った控室で順応を行った後、廊下を歩いて実験室へ入室し、壁面を向いて着席する。そして、それぞれの実験パターンに対して、入室直後の第一印象と 3 分後の印象について 2 回評価を行った。1 パターン終了毎に実験室から退室し、15 分以上控室で安静にした後、次のパターンの評価を行った。被験者は女性 10 名、男性 12 名で、年齢構成は 20～30 代 10 名、40 代 5 名、50 代～7 名（内 2 名は午前のみ参加）であった。被験者には、執務室に在席し、机上にはタスク照明が設置されていることをイメージするよう予め教示した。評価項目を表 2.1 に示す。なお、評価の段階は、「見た目の明るさ」は 13 段階、これ以外の項目は 5 段階である。

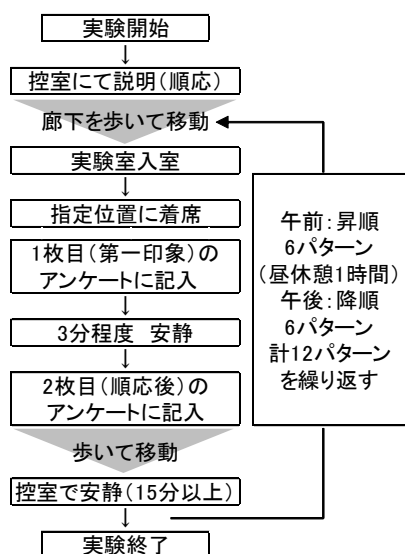


図 2.7 実験フロー

Fig.2.7 Experiment flow



図 2.8 実験の状況

Fig.2.8 Picture of Experiment

表 2.1 評価項目

Table 2.1 Subjective evaluations

	光環境に対する評価項目	形容詞
①	見た目の明るさ	非常に明るいー非常に暗い
②	快活性	快活な感じー陰鬱な感じ
③	安心感	安心な感じー不安な感じ
④	好ましさ	好きー嫌い
⑤	適切性	適切ー不適切
⑥	満足度	満足ー不満
⑦	天井の照明のまぶしさ	気にならないー非常に気になる
⑧	モデルの表情の見やすさ	見やすいー見にくい

※第一印象のアンケートでは①～⑤のみの評価

2. 2. 2 実験結果

設定した NB 値 6 パターンに対する被験者の印象評価の平均値は、図 2.9～図 2.16 のようになった。誤差棒は、順応後の結果の標準偏差を表している。昇順では、見た目の明るさ、快活性、安心感、好ましさ、適切性、満足度のいずれの評価項目においても、7.0NB を境界として、好印象・肯定的な評価が得られた。昇順の適切性において、7.5 NB と 8.0NB の評価に逆転現象が見られた。

一方、降順では、見た目の明るさにおいて、7.3NB を境界として明るい印象の評価が得られた。この他、快活性、安心感、好ましさ、適切性、満足度の場合の 7.3NB における評価は、「どちらともいえない」という結果となった。

天井の照明のまぶしさに対する評価結果は、図 2.15 に示す通り、いずれのパターンにおいても「あまり気にならない」となった。また、図 2.16 には、被験者の前方に着席するモデルの表情の見やすさに関する評価結果を示す。昇順では 7.0NB、降順では 7.3NB を境に良好な結果が得られた。

なお全ての評価項目とも、降順より昇順の方が好感・肯定的な評価となった。この要因としては、被験者が、前回の室内環境の記憶と比較することによって、昇順では明るい側に、降順では暗い側に評価する傾向が強いと考える。

見た目の明るさ、快活性、安心感、好ましさ、適切性の印象評価では、第一印象と順応後の評価に大きな差が見られなかった。

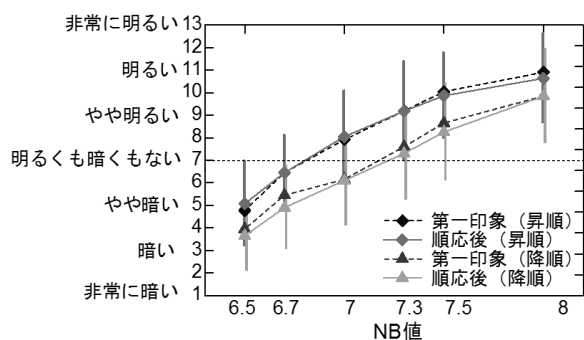


図 2.9 見た目の明るさの評価結果
Fig.2.9 Brightness of appearance

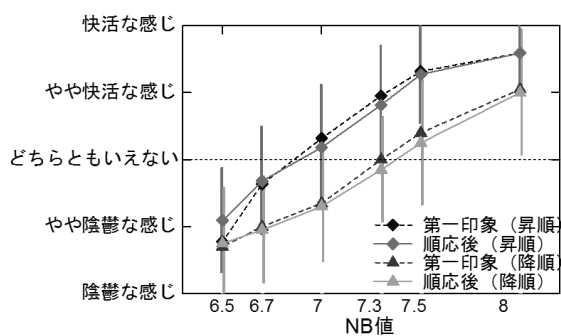


図 2.10 快活性の評価結果
Fig.2.10 Impression of activeness

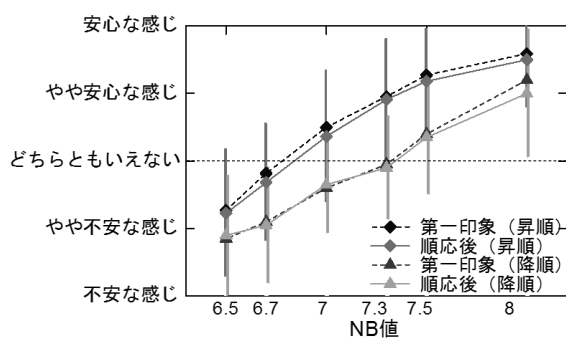


図 2.11 安心感の評価結果
Fig.2.11 Impression of ease

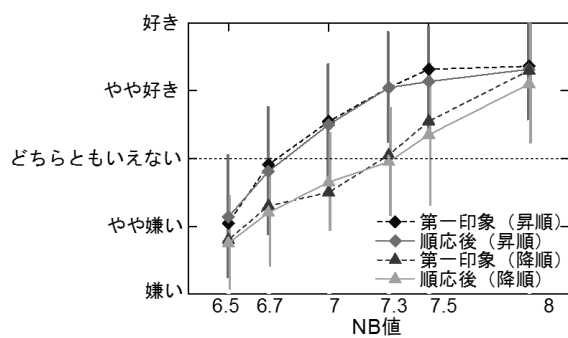


図 2.12 好ましさの評価結果
Fig.2.12 Impression of preference

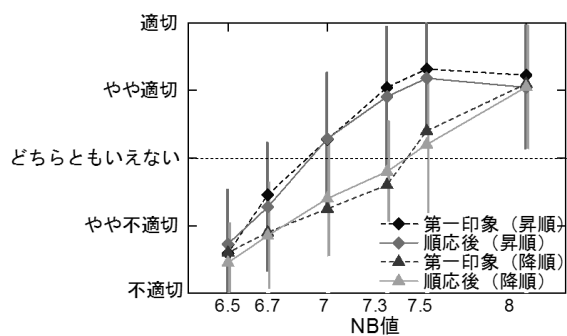


図 2.13 適切性の評価結果
Fig.2.13 Impression of appropriateness

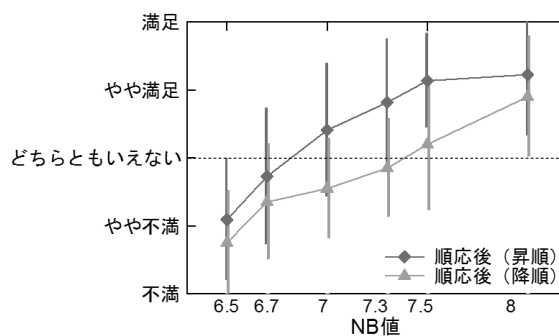


図 2.14 満足度の評価結果
Fig.2.14 Impression of satisfaction

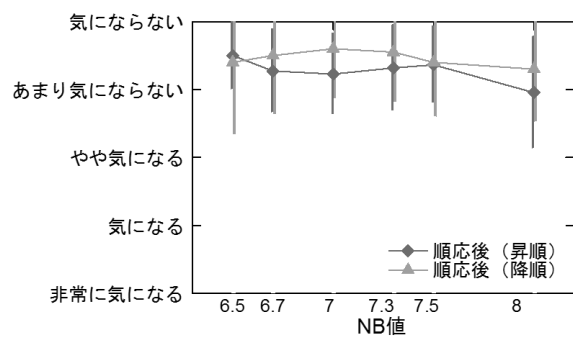


図 2.15 天井照明のまぶしさの評価結果
Fig.2.15 Glare of the ceiling

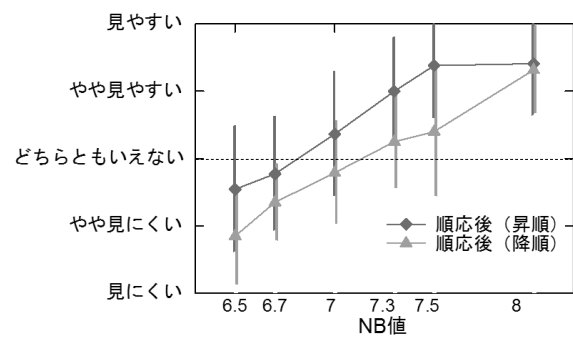


図 2.16 モデルの表情の見易さ評価結果
Fig.2.16 Visible easiness of the model's face

2. 3 明るさ画像を利用した照明制御の実証実験と評価

前節で得られた知見を組み込んだ照明制御の妥当性を確認するため、タスク・アンビエント照明方式を採用している実際のオフィスにおいて、輝度画像と明るさ画像を利用した照明制御システムを構築し実証実験を行った。

2. 3. 1 実証実験施設と制御システムの概要

実証実験を実施したのは、東京都清瀬市にある〇社技術研究所本館2階の執務室である。図 2.17 に実験施設の平面図，図 2.18 に断面図を示す。タスク・アンビエント照明方式を採用した執務室は、約 1,800m²の空間で 200 名程度が執務している。執務室の上部には 15 個のトップライトが設けられ、昼間はここから昼光が入射する。南面の窓には、日射の状況に合わせて自動的にスラットが制御（実証システムではないロジックで制御）されるブラインドが設置されている。

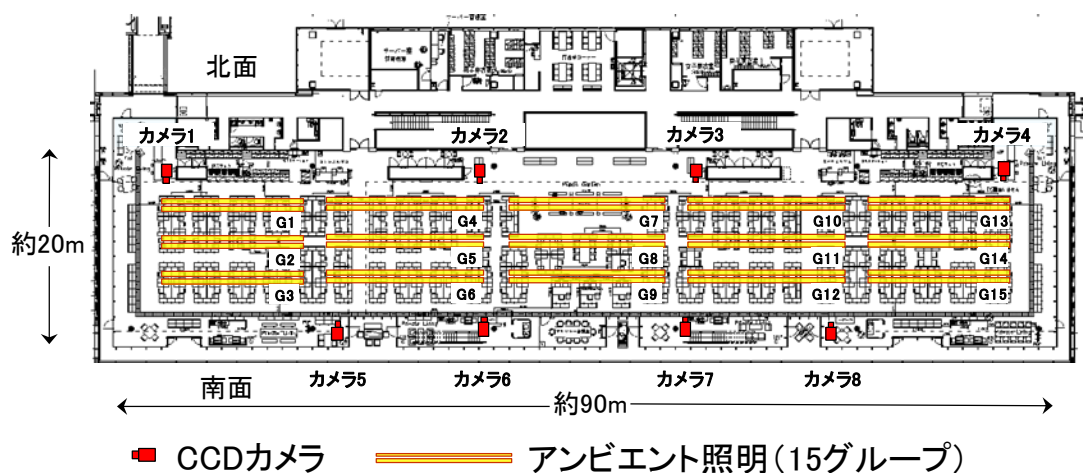


図 2.17 実験施設の平面図

Fig.2.17 Floor plan of experimental office

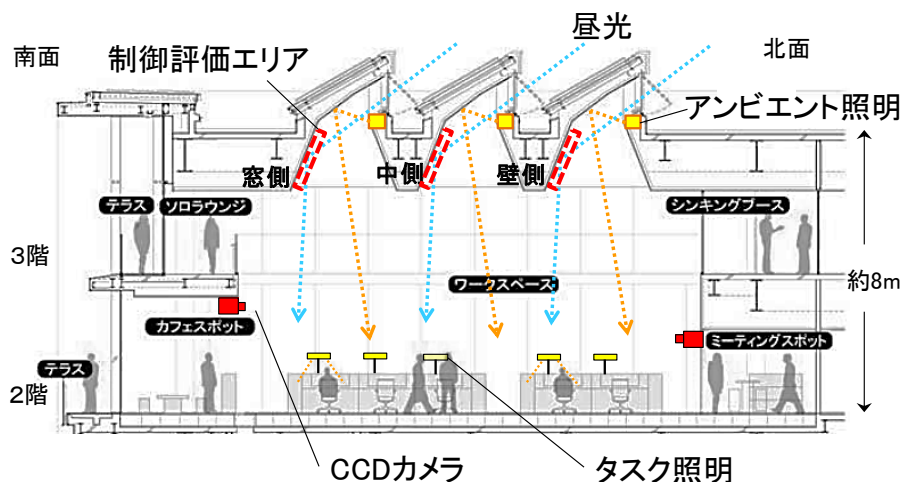


図 2.18 実験施設の断面図

Fig.2.18 Section plan of experimental office

間接照明方式のアンビエント照明は、点灯単位が 15 に区分(図 2.17 における G1～G15)された 10～100%で連続調光が可能な LED 照明器具 (定格消費電力：62 W，光束：6,900 lm，発光効率：111.3 lm/W) 288 台で構成される。執務者のデスクには LED を光源とするタスク照明 (定格消費電力 11 W) が設置され、在・不在に合わせて点滅制御している。また、室内の輝度画像を測定する CCD カメラ (画素数：1032 (H) × 778 (V)，画角：水平 67.7° 鉛直 50.8°) を 2 階に 8 台設置した。CCD カメラは、照明単独の状態から昼光を含む状態までの幅広い輝度 (0.1～80,000cd/m²) を測定することが可能で、測定の指令発出後 15 秒以内で、8 台とも同時に測定できる。

図 2.19 に制御システムの構成図を示す。建物の設備制御システムの標準通信プロトコルである BACnet を用いて、執務者の在/不在情報や照明器具の点灯状態を把握し、調光信号を送ることができ、汎用性や拡張性に優れたシステム構成としている。

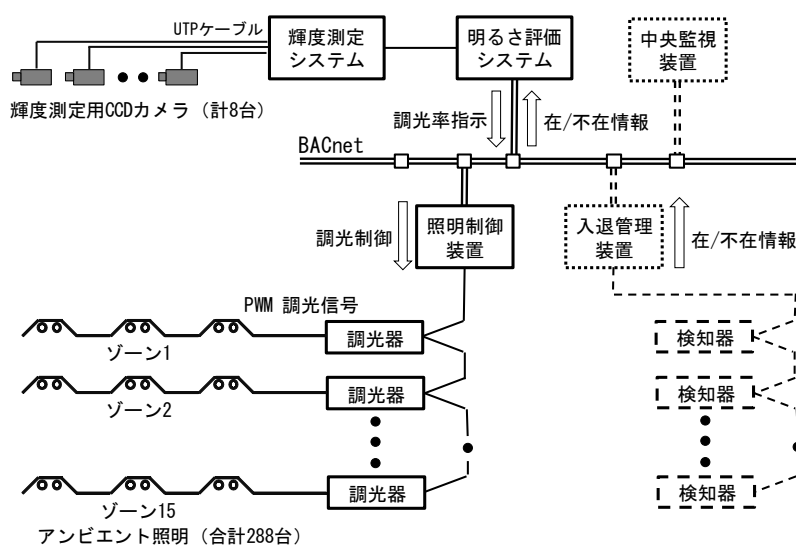


図 2.19 制御システムの構成図

Fig.2.19 Diagram of control system

実際の制御は、評価エリアに対する輝度の寄与度が最も高い照明器具グループから調光率を調整し、当該照明器具グループのみで目標 NB 値を達成できない場合は、次に寄与度が高い照明器具グループの調光率を調整するようした。なお、各照明器具グループには、約 5 分毎に制御指令が発出し、1 分間で徐々に調光率を変化させることによって、ちらつきや急激な光束の変化を抑えるように配慮している。

目標 NB 値は、図 2.18 に示すように天井面の評価エリア (全 15 エリア) を窓側、中間、壁側に区分し設定した。区分毎の時刻別平均目標 NB 値 (冬季) を表 2.2 に示す。今回は、先の主観評価結果に基づき、天井面は 7.5NB 以上を目標とした。

早朝に目標 NB 値を高くしたのは、出勤直後の執務者の覚醒度を高めたいとの執務者の

希望を反映したためである。また、主観評価結果により降順の場合、昇順に比べ評価が下がる傾向にあることから、日没前後の急激な日射の減少により、必要以上に明るさ感の不足を感じることはないように、夕方にかけて目標 NB 値を高めている。

なお、目標 NB 値の設定は季節毎に行い、2014 年 1 月以降、長期間の実証検証を行った。

表 2.2 時刻別平均目標 NB 値
Table 2.2 Target value of NB by hour

時刻	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
窓側	7.7	7.7	7.5	7.5	7.5	7.5	7.4	7.4	7.6	7.7	8.0	7.9
中間	7.8	7.8	7.6	7.6	7.6	7.6	7.5	7.5	7.6	7.6	7.8	7.8
壁側	7.7	7.7	7.6	7.6	7.6	7.6	7.5	7.5	7.6	7.6	7.8	7.6

2. 3. 2 制御結果

図 2.20 に晴天日の制御結果を、図 2.21 に曇天日の制御結果を示す。両図とも壁側の時刻別の平均目標 NB 値と昼光のみで得られる NB 値、照明制御後の NB 値及び壁側の照明の平均調光率を示す。また、カメラ 6 の 9 時における昼光のみの明るさ画像と照明制御後の明るさ画像と壁面の平均 NB 値を参考に示す。

晴天日は、昼光だけで 8NB 以上が確保されているため、照明を点灯する必要がなく、調光率は 0%が多くなっている。朝と夕方及び曇天日は昼光だけで目標値を達成できないため、照明によって補完され、ほぼ目標 NB 値を満足していることが確認できた。

壁面の制御後の平均 NB 値は、晴天日は 8.41 であり、曇天日でも 7.69 であり 7.5NB 以上が確保されていることを確認できた。

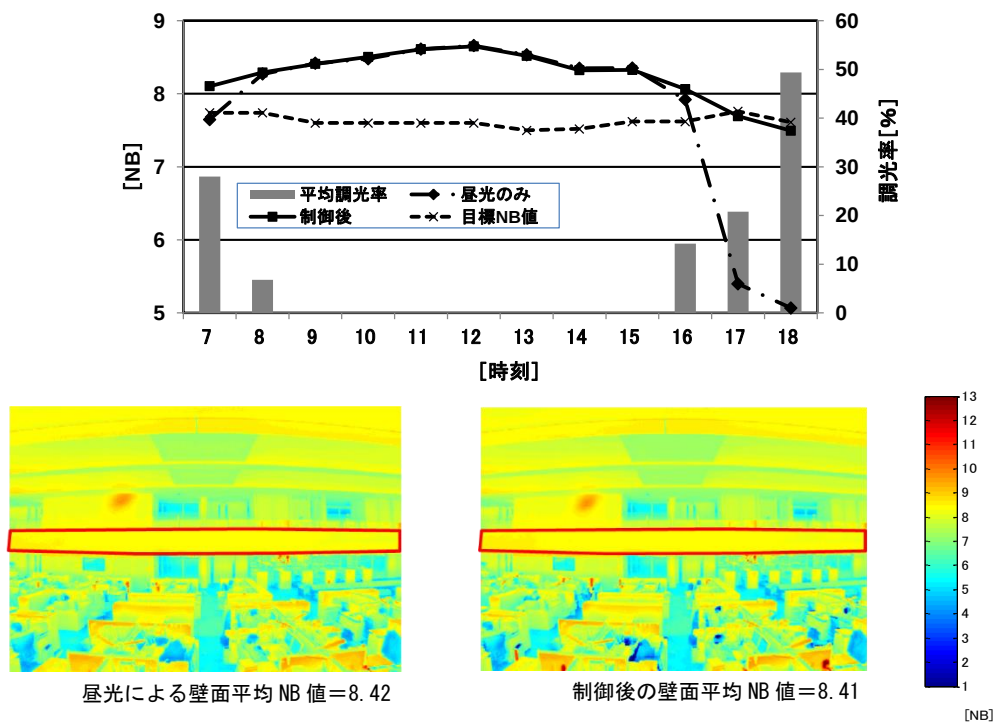


図 2.20 晴天日（2014 年 1 月 16 日）の制御結果
Fig.2.20 Control results on sunny day (16th Jan 2014)

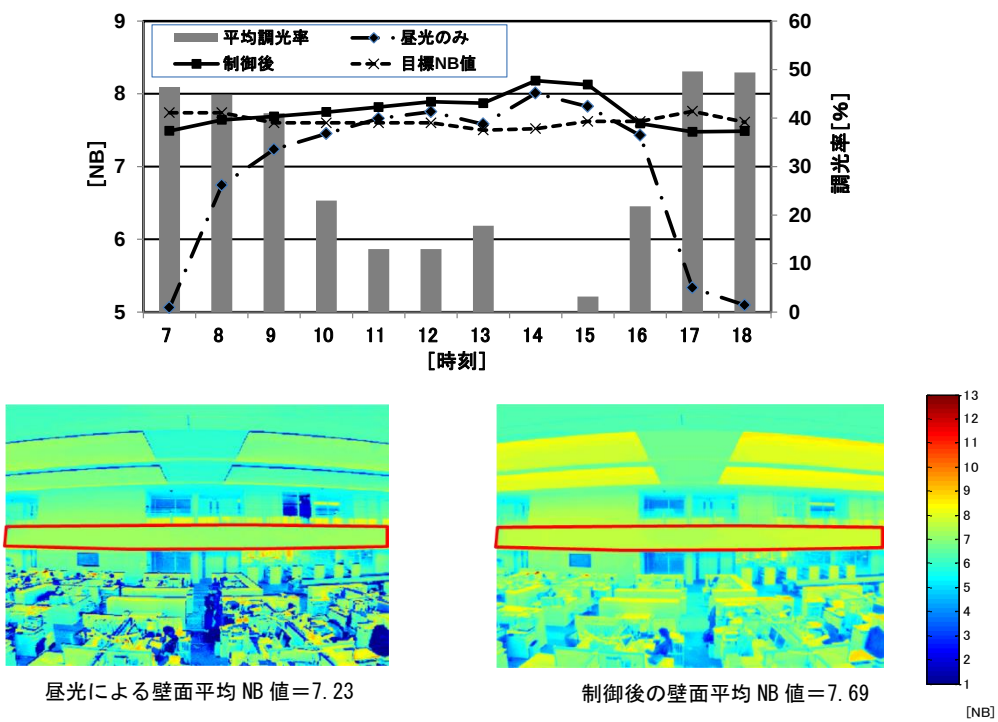


図 2.21 曇天日（2014 年 1 月 15 日）の制御結果
Fig.2.21 Control results on cloudy day (15th Jan 2014)

2. 4 第2章のまとめ

本章では、明るさ画像を利用した照明制御方法について検討した。

第1節では、輝度画像及び明るさ画像から画像内に設定した評価エリアの NB 値が目標 NB 値を維持できる調光率の算定方法を検討し、基順輝度画像と評価エリアに対する各照明器具グループの寄与度を基に、算出ロジックを構築した。

第2節では、タスク・アンビエント照明を採用するオフィスにおいて、アンビエント照明の制御の目標 NB 値を明らかにするため、複数壁面を評価エリアとする実大オフィスにおいて主観評価実験を行った。実験結果を分析し、以下の結論が得られた。

- (1) 複数壁面を評価エリアとした場合の好感・肯定的な評価の境界は、昇順の場合で 7.0NB、降順では 7.3NB となった。
- (2) 降順より昇順の方が好感・肯定的な評価となったことから、日射の減少する午後の閾値（目標 NB 値）は、日射が増加する午前より高めに設定するのが望ましい。
- (3) NB 値を高く設定しすぎると評価が下がることがある。
- (4) 照明の調光制御を行った際、順応による印象の違いは少ないと考えられる。
- (5) NB 値はオフィスの明るさ感に基づく制御に利用できる可能性があると考ええる。

第3節では、第1節、第2節で得られた知見を組み込んだ照明制御システムを、タスク・アンビエント照明を採用する実際のオフィスに構築し、制御の妥当性を確認した。実証実験から以下の結論が得られた。

- (1) 検討したアンビエント照明の調光率算定ロジックにより、昼光の変動下においても目標 NB 値を維持できることが確認できた。
- (2) オフィスの明るさ感に関し、NB 値を指標とし、7.5 以上の壁面の NB 値で運用できることを示した。
- (3) CCD カメラで取得する輝度画像を基にアンビエント照明を自動調光制御するシステムに関して、制御の妥当性を実証的に示し、システムの実用性を明らかにした。

【第2章の参考文献】

- 2-1)中村芳樹・乾正雄:オフィスの輝度分布特性とその心理的効果, 日本建築学会計画系論文報告集, 第445号, pp. 27-33, 1993.3
- 2-2)小谷朋子・中村芳樹・金谷末子・三木保弘:タスク・アンビエント照明方式を用いたオフィス照明の明るさ感向上に関する研究, 照明学会誌, 95-11, pp.699-710, 2011
- 2-3)加藤未佳・太田裕司・羽入敏樹・関口克明:光の到来バランスを考慮した空間の明るさ感の評価, 日本建築学会環境系論文集, 第568号, pp. 17-23, 2003.6

第 3 章

輝度画像を利用したブラインド制御に関する検討

3. 1 輝度コントラストによる遮光要否判定方法の検討

CCD カメラで生成する輝度画像を利用して、窓面から見える対向建物による影の影響、周辺建物からの反射光などを含めて評価できる、ブラインドの遮光要否判定方法を検討する。実大オフィスで制御システムを構築し、実証実験を基に実証システムの妥当性を明らかにする。ブラインド制御システムの構成は、図 3.1 に示すように「輝度測定部」、「光環境評価部」、「ブラインド制御部」から構成される。CCD カメラを用いてリアルタイムに屋外の輝度分布を測定し、そのデータを用いてブラインドを自動制御する。

本節では、グレアを発生する可能性のある直射光や反射光を検出する方法を検討し、窓面のグレアを評価する窓面明るさ判定方法は、3.3 節で述べる。

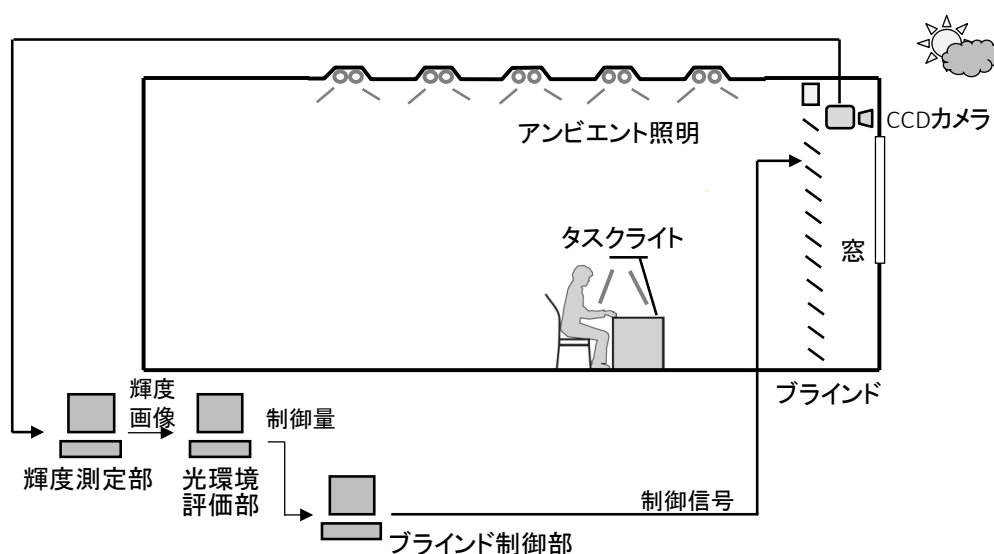


図 3.1 制御システムの構成

Fig.3.1 Diagram of control system

3. 1. 1 CCD カメラによる高輝度測定方法

使用する CCD カメラとレンズの仕様を表 3.1 に、分光感度を図 3.2 に示す。今回、1 台のカメラで広範囲に測定するため、魚眼レンズを採用した。投影方式は、照明制御に利用することを考慮して、撮影した画像を平面化した際に歪みの少ない画像が得られるように、等距離射影方式を採用した。

表 3.1 CCD カメラとレンズの仕様

Table 3.1 Specification of CCD camera and lens

受光素子	CCDイメージセンサ（モノクロ）
有効画像画素数	2456 (H) × 2058 (V)
フレームレート	15fps
絞り範囲	F1.4-F16（F16固定で使用）
画角	185° (H) × 185° (V)

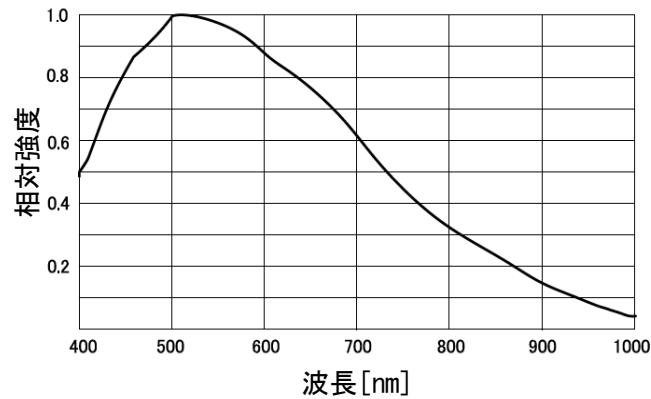


図 3.2 CCD カメラの分光感度³⁻¹⁾

Fig.3.2 Spectral sensitivity of CCD camera³⁻¹⁾

このカメラが測定可能な輝度の範囲は、80,000cd/m² 以下であるため、屋外で太陽のような高い輝度を撮影した場合、スミア（白飛び）やゴーストが生じ、正しい値を測定することができない。このため、今回、高い輝度も測定できるようにカメラにフィルタを設置することを検討した。

フィルタは、図 3.3 に示す分光透過率を持つ ND（Neutral Density）フィルタ（シグマ光機 AND-001）と IR（Infrared）フィルタ（シグマ光機 ECM-500）の 2 種類を使用した。ND フィルタは、400~700nm における平均透過率（0.1%）に対して近赤外波長域（700nm~1,200nm）の透過率が相対的に高くなっている。そこで、近赤外波長域を吸収する IR フィルタを重ねて装着することで、図 3.4 に示すように、スミアやゴーストを抑え、輝度の測定レンジを引き上げることができた。

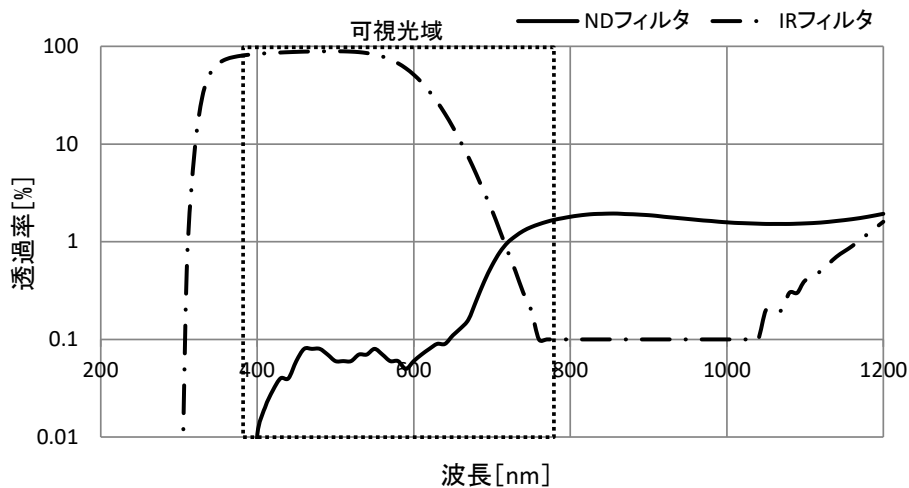
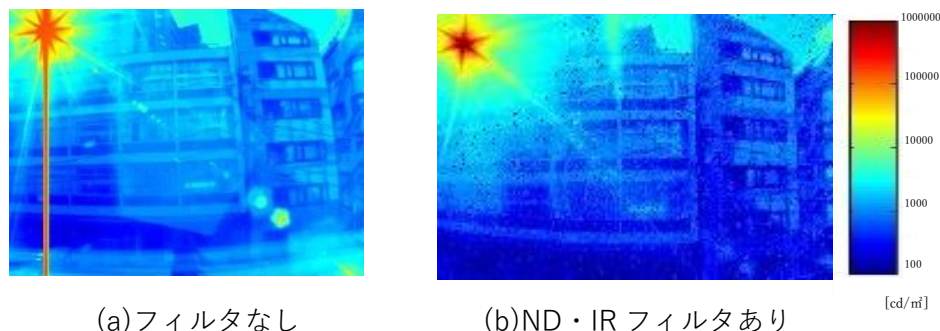


図 3.3 ND・IR フィルタの分光透過率^{3-2), 3-3)}

Fig3.3 Spectral transmittance of ND filter and IR filter^{3-2), 3-3)}



(a)フィルタなし

(b)ND・IR フィルタあり

図 3.4 ND・IR フィルタの有無による輝度画像の比較

Fig3.4 Comparison of luminance images with and without ND filter and IR filter

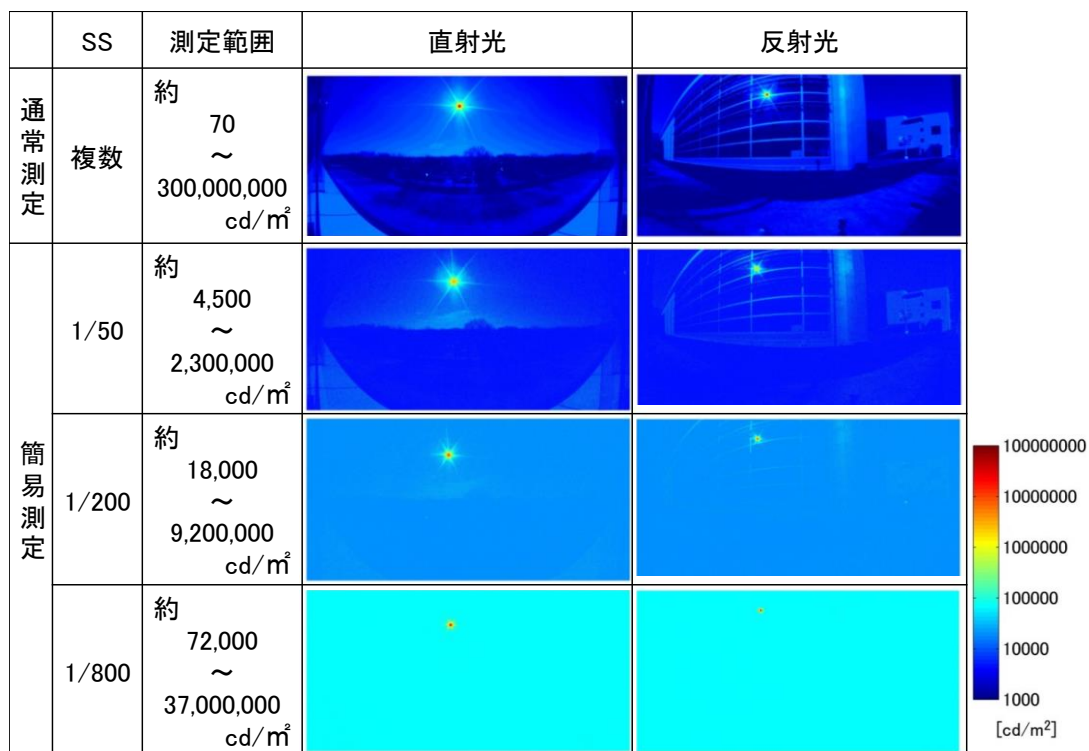
3. 1. 2 輝度コントラストを利用した検出方法

前節の方法によって生成した輝度画像から、直射光や反射光の有無を判定する方法を考える。中村によって提案された輝度コントラスト（C 値）を算出するフィルタ（N フィルタ）³⁻⁴⁾は、複雑な輝度分布を持つ実空間の中で対象物と背景との輝度コントラストを定量的に評価するために用いられる。これは、コントラスト・プロファイル法と呼ばれるもので、輝度画像に対して N フィルタを使用した対数輝度の重みづけ加算によって求められ、特定のサイズのコントラストを抽出することが可能である。また、N フィルタと同サイズの平均化フィルタによるフィルタリングは、特定サイズにおける対数輝度平均(A 値)を算出でき、C 値と A 値を用いることで、輝度画像内の特定サイズの高い輝度コントラストを持つエリアを検出し、そのエリアの輝度対比を定量的に評価することができる³⁻⁵⁾。

以上から、輝度画像の中から、直射光や強い反射光が持つ局所的な高輝度部を検出する方法として、C 値と A 値が利用できる可能性があると考ええる。

3. 1. 3 判定閾値の検討

C 値と A 値を基に、直射光や強い反射光を検出することができる判定閾値を検討する。制御の高速化のために、輝度画像の生成は単一のシャッタースピードで撮影（簡易測定）した画像を基に行う。図 3.5 にシャッタースピード別の輝度画像と通常測定の輝度画像を示す。いずれも直射光と建物ガラス面への反射光を映した画像である。シャッタースピードが速い場合、輝度の測定下限値が大きくなり、下限値以下の輝度が全てゼロとなるため A 値算出に誤差が生じることを考慮して、今回は、輝度測定範囲が 18,000~9,200,000cd/m² となる 1/200 秒を採用した。



SS : シャッタースピード

図 3.5 シャッタースピード別の輝度画像

Fig.3.5 Luminance image in various shutter speed

地球から見える太陽のサイズはおよそ 0.5degree であるが、フレアの影響などで大きめに写ることを考慮し、N フィルタの検出サイズは、1.061 degree とした。N フィルタを用いる際、検出周波数を f_o とすると、検出サイズは $2/(\pi * f_o)$ で表され、検出サイズ 1.061 degree の場合、 f_o は、0.6cycle/degree となる。また、今回用いた CCD カメラ解像度は、1 画素あたり 0.1degree のため、1.061 degree は 10.61 画素となる。

C 値と A 値の判定閾値の決定は、図 3.6 に示す 5 種類の検証画像に対する評価によって行う。5 種類の画像とは、①直射光の写る画像、②建物の強い反射光の写る画像、③夕陽の写る画像、④直射光と反射光が同時に確認できる画像、⑤太陽の見えない晴天日の画像であり、実用上想定されるケースを設定した。また、表 3.2 にはそれぞれのケースにおける、C 値と A 値をシャッタースピード毎に算出した結果を示す。この結果は、シャッタースピード 1/200 秒において、C 値 : 0.4, A 値 : 4.5 をいずれも超える場合が、直射光や眩しい反射光を検出できる判定閾値となる可能性を示した。

この遮光要否判定方法について、その妥当性を確認するために、実際のオフィスにて実証実験を行った。

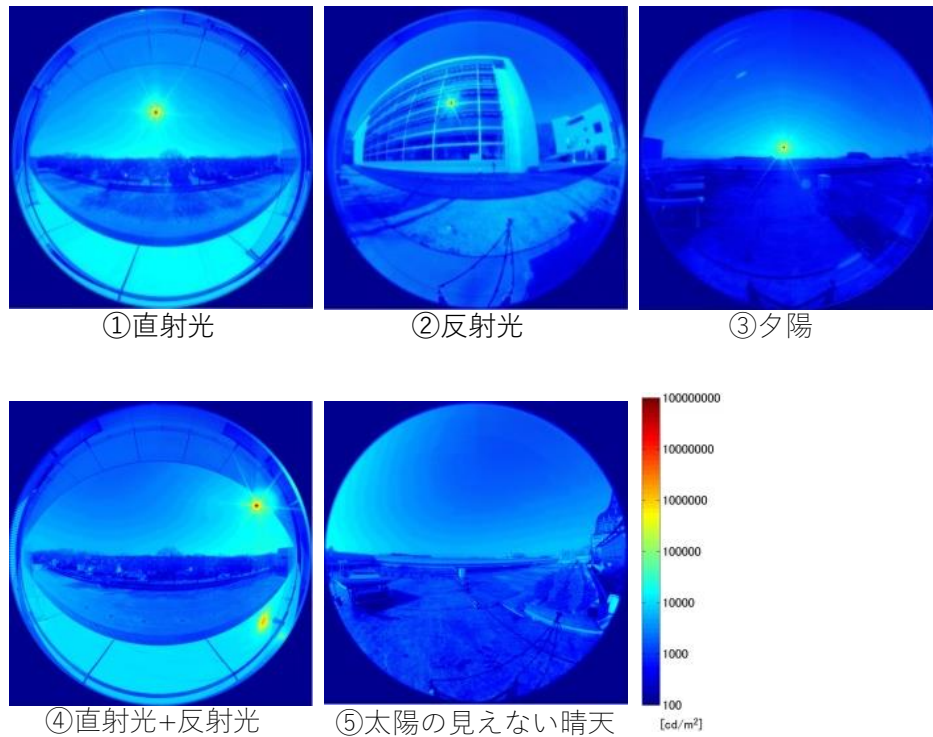


図 3.6 検証画像（通常測定）

Fi.g.3.6 Luminance images for evaluation

表 3.2 検証画像におけるシャッタースピード別 C 値・A 値

Table 3.2 C and A value in various shutter speed

	①直射光		②反射光		③夕陽		④直射+反射光		⑤太陽のない晴天	
SS	C値	A値	C値	A値	C値	A値	C値	A値	C値	A値
1/6400	1.2072	6.1799	1.4794	5.9390	1.4726	5.9585	1.2644	6.2359	0.0166	5.7686
1/3200	1.0875	6.0513	1.5315	5.7042	1.0223	5.5456	1.1416	6.0984	0.0108	5.4687
1/1600	0.9344	5.9763	1.3155	5.5251	1.3437	5.3278	0.8955	6.0711	0.0110	5.1684
1/800	0.7769	5.9400	1.1362	5.3951	1.3214	5.1345	0.6985	6.0610	0.0115	4.8649
1/400	0.6019	5.9212	0.9954	5.2993	1.0815	5.0987	0.5473	6.0366	0.0111	4.5667
1/200	0.4782	5.8709	0.7839	5.2683	0.9528	5.0716	0.4108	6.0060	0.0232	4.2659
1/100	0.3528	5.7955	0.6216	5.2479	0.6944	5.2000	0.3281	5.9314	0.0260	3.9691
1/50	0.2819	5.6934	0.4833	5.2294	0.5345	5.1883	0.2494	5.7955	0.0332	3.6755
1/25	0.2563	5.5159	0.3601	5.1956	0.2914	5.2423	0.2198	5.6268	0.0510	3.4259
2/25	0.2498	5.2879	0.2710	5.0932	0.2272	5.1794	0.1039	5.4691	0.0600	3.2828
4/25	0.2172	5.0393	0.7319	4.1180	0.1864	5.0364	0.2813	4.8917	0.0599	3.2585
8/25	1.0987	3.2340	0.0727	3.5263	0.1382	4.8606	0.4613	4.3832	0.0407	3.3054
16/25	NaN	NaN	0.6605	3.4691	0.1111	4.6308	NaN	NaN	0.0560	3.3342
32/25	NaN	NaN	0.3687	3.9609	0.0599	3.1095	NaN	NaN	0.0595	3.3296

C値 $\geq$ 0.4 A値 $\geq$ 4.5

3. 2 輝度画像を利用した遮光要否判定の実証実験

3. 2. 1 実証実験施設の概要

実証実験を実施したFビルは、東京都千代田区に建設されたオフィスビルであり、図 3.7 に実証実験施設の敷地配置図、図 3.8、図 3.9 に断面図及び平面図（2 階）を示す。執務室の南西面と北西面には、床から天井までのフルハイトガラス窓が配置されており、直射光のほか周辺建物の影や反射光も入射する環境にある。図 3.10、図 3.11 に各窓面からの眺望の様子を示す。この画像は、前章で記した 2 種類のフィルタを装着した CCD カメラで撮影したものである。カメラは、各窓面の中央部にブラインドと窓との間に外向きに設置した。取り付け高さは床面より 2,300mm とした（図 3.8）。窓ガラスは、可視光の透過率が 74.1% を有する高遮熱の Low-E 複層ガラス（Low-E 8mm+空気層 12mm+フロート 8mm）である。各窓には 117 段階に角度を変更できる電動ブラインドが設置され、グループ毎に制御が可能である。



図 3.7 実証実験施設の敷地配置図

Fig.3.7 Site layout

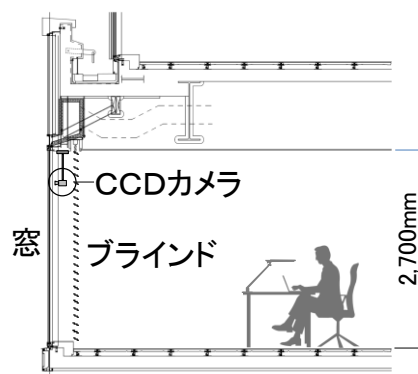


図 3.8 断面図

Fig.3.8 Section diagram

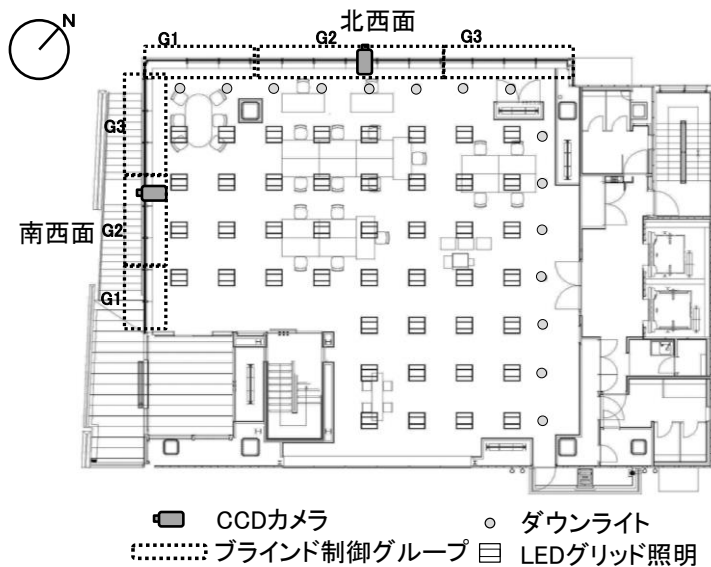


図 3.9 平面図（2 階）

Fig.3.9 2nd Floor plan



図 3.10 南西面窓からの眺望
Fig.3.10 View from south-west window

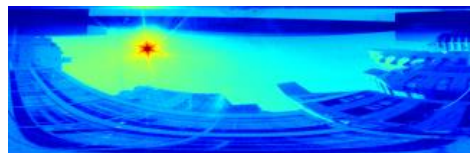


図 3.11 北西面窓からの眺望
Fig.3.11 View from north-west window

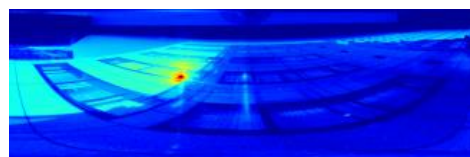
3. 2. 2 輝度コントラストによる判定実験と結果

2015 年 3 月 12 日に南西面、北西面の CCD カメラによって測定した通常測定の輝度画像を図 3.12 に示す。それぞれ、目視によって、「直射光あり」、「反射光あり」、「直射光・反射光なし」と確認された状態の画像である。同時刻に 1/200 秒の単一シャッタースピードで測定した輝度画像を基に輝度コントラストを用いて、直射光、反射光の有無を評価した。結果を図 3.13 に示す。

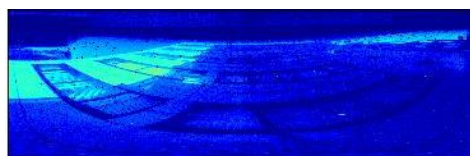
実証実験の結果、直射光、反射光のある簡易測定輝度画像において、前章で提案した判定の閾値（C 値：0.4，A 値：4.5）をいずれも超えていることから、輝度コントラストを用いて、直射光や反射光を検出できることが示された。



(a) 直射光あり



(b) 反射光あり



(c) 直射光・反射光なし

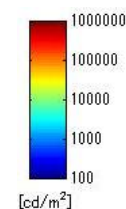


図 3.12 輝度画像（通常測定）

Fig.3.12 Luminance images (Normal measurement)

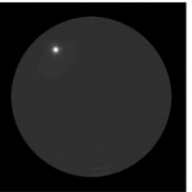
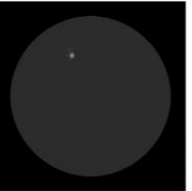
目視	簡易測定輝度画像	コントラスト画像	対数輝度平均画像	判定結果
直射光 あり (南西面)		 C値: 0.603	 A値: 5.722	あり
反射光 あり (北西面)		 C値: 1.100	 A値: 4.914	あり
直射光・ 反射光 なし (北西面)		 C値: 0.024	 A値: 4.279	なし

図 3.13 輝度コントラスト評価結果
Fig.3.13 Evaluation result in luminance contrast

3. 2. 3 遮光要否判定制御の実証実験

この判定方法を備えた自動ブラインド制御システムをFビルに構築し、同施設において自動制御の実証実験を行った。

図 3.14 にブラインド制御ロジックのフローを示す。

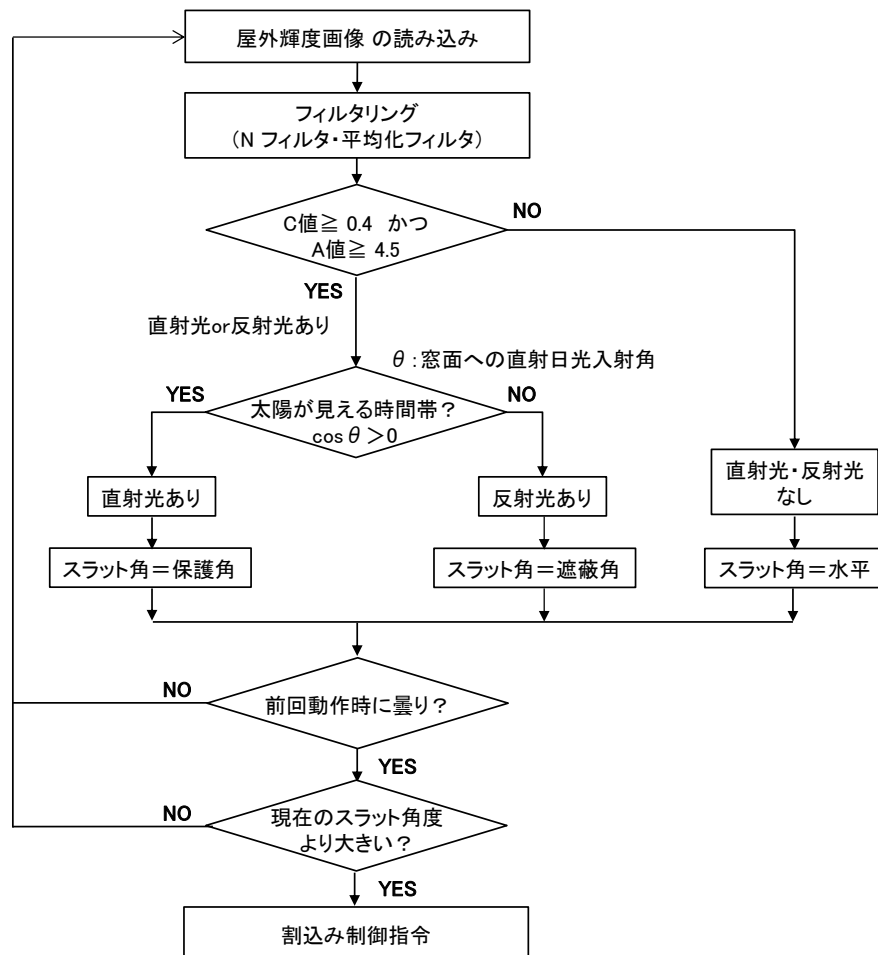


図 3.14 制御ロジックのフロー

Fig.3.14 Flow diagram of control logic

屋外輝度画像から輝度コントラストによって、直射光または反射光が存在することを判断する。直射光と反射光の判別は、窓が面する方位から窓面に太陽が見える時間帯は、直射光と判断し、見えない時間帯での検出は、反射光と判断することとした。

ブラインドのスラット角は、直射光・反射光共に検出されない場合、水平（0度）に保たれる。直射光が検出された場合、スラット角は保護角以上となる。スラットは、室内側への内倒し（スラット角がマイナス値をとる）も可能であり、保護角の範囲内で-20度（水平を0度としたとき、20度室内側に下向きになっている状態）を制限として制御される。反

射光が検出された場合、遮光角として F ビルにおいて設定した 30 度に制御され、室内へ反射光の入射を防ぐ。急な入射に対応できるように、これらの制御は前回の遮光判定において直射光・反射光が共になく、今回の判定で検出された場合に、ブラインドを即座に制御できるように割込みの指令を発する。

2016 年 7 月 29 日（晴天日）に、遮光要否判定の精度を確認するため、自動ブラインド制御と直射光、反射光の有無の目視判定を並行して行った。また、2017 年 1 月 13 日（晴天日）及び 14 日（薄曇り日）には、薄曇り時の判定精度を確認するため、同様の実験を行った。目視判定は、5 分おきに輝度測定用 CCD カメラ下方部から天空を見上げた状態で行い、太陽の輪郭が確認でき、かつ、足元に陰影が発生していることを判定閾値とした。輝度測定用 CCD カメラの下方 200mm の位置に、鉛直面外向きの照度計を設置し、窓面の日照状態を計測した。また、屋外の気象状態を把握するために、建物屋上に照度計を設置し、水平面全天照度を測定した。

3. 2. 4 実験結果

2016 年 7 月 29 日（晴天日）における実験結果を図 3.15～図 3.20 に示す。図 3.15 に示す水平面全天照度の時刻別推移から、当日は終日曇りのない晴天であった。図 3.16、図 3.18 は南西面、北西面での遮光要否判定結果とスラットの制御角度及び保護角の推移を示す。判定結果は、「直射光あり」、「反射光あり」、「直射光・反射光なし」のいずれかを時刻毎にプロットしている。輝度コントラストを用いて制御システムが判断した結果を●印で、目視判定した結果を◇印で示した。また、スラット角の制御結果と窓面における計算上の保護角をそれぞれ実線と破線で示した。図 3.17、図 3.19 は、南西面、北西面での遮光判定結果と窓面鉛直面照度の推移を示す。図 3.20 に図 3.21 及び図 3.19 の図中に明示した 4 時刻について通常測定の輝度画像と同時刻の鉛直面照度を示す。

図 3.16 に示す通り、当日、南西面においては、11 時 25 分から 16 時 15 分まで直射光が入射する時間帯であり、終日を通して制御システムの遮光判定結果と目視判定結果は、ほぼ合致していた。太陽が周辺建物の背後に部分的に隠れる 16 時 15 分に、目視との不一致が見られたが、直後の 16 時 20 分には太陽が周辺建物の背後にまわり、窓面に直射光が当たらなくなったため、いずれの判定も「直射光なし」となった。図 3.20(a)及び(b)にその様子を示す輝度画像と鉛直面照度を示す。図 3.16 に示すスラット角は、14 時 40 分頃から、保護角が -20 度を超えるため、以降ブラインドは保護角で制御された。16 時 15 分には最大 8 度まで傾斜し、16 時 20 分以降、スラット角が水平になる様子が確認できた。この時、全天照度に大きな変化は見られないが、南西面の窓面照度が急激に減少したことから、窓面に直射光が当たらなくなったことが確認できた。

図 3.18 に示すように、北西面は 11 時 5 分より 12 時 10 分頃まで断続的に反射光が検出された。また、13 時 40 分以降、直射光が検出され、14 時 22 分以降、直射光・反射光共に検出されなくなった。図 3.20(c)及び図 3.20(d)に反射光検出時及び直射光検出時の輝度画

像と鉛直面照度を示す。いずれも、局所的な高輝度部分が検出できていることが確認できた。

制御システムの遮光判定結果と目視判定結果は、11時5分、11時15分、11時20分及び12時10分の4度を除いて、全て合致していた。図3.19に示すように11時30分頃の北西面の窓面照度は、隣棟の影響を受け、大きな上下の変動を繰り返した。この変動は、太陽光を反射する部位の違いによって起こるものと考えられる。隣棟の窓ガラスに太陽光が反射した場合に、強い反射光が現れ、鉛直面照度が高くなる。一方、金属外装（アルミカーテンウォール）に反射した場合は、相対的に低くなっている。しかし、いずれも、高輝度部分が検出されたため、「反射光あり」と判断した

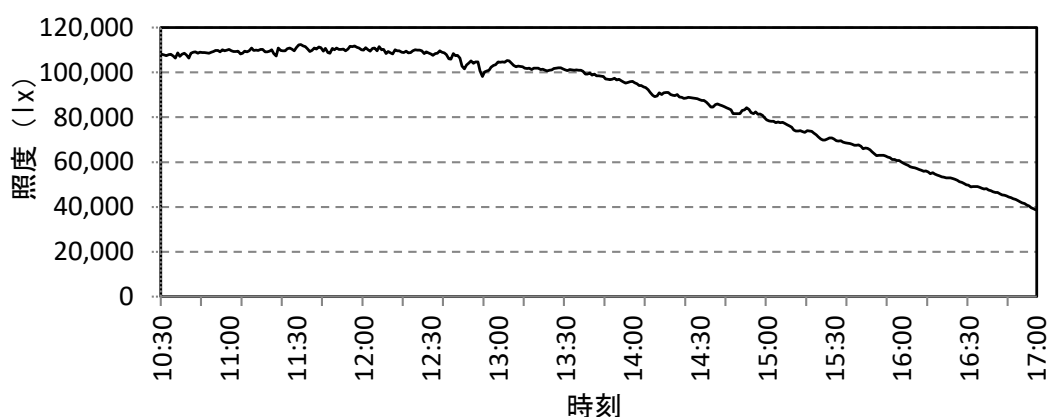


図 3.15 水平面全天照度

Fig.3.15 Horizontal global illuminance

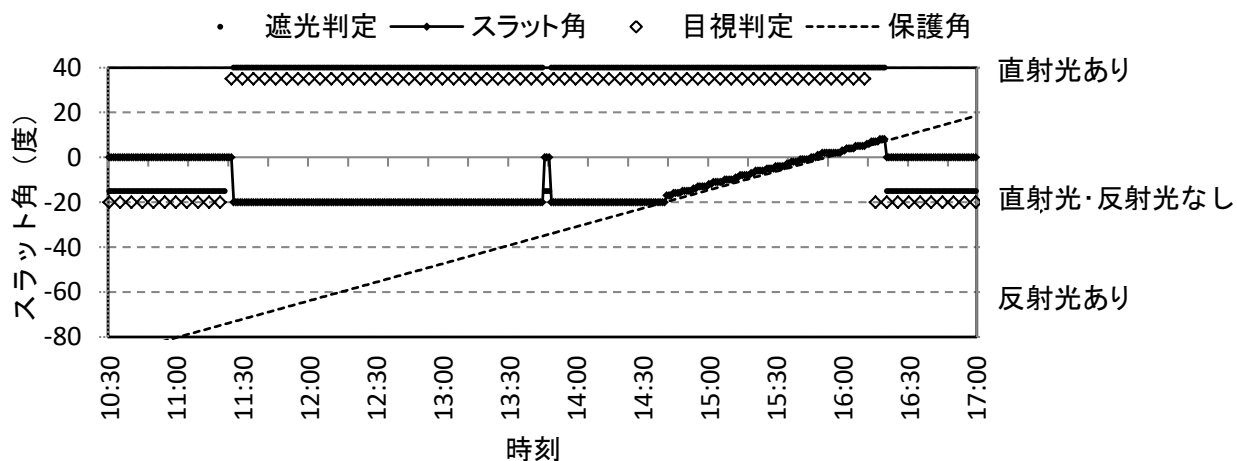


図 3.16 判定結果の比較とスラット角の推移（南西面）

Fig.3.16 Comparison in evaluation result and slat angle (south-west window)

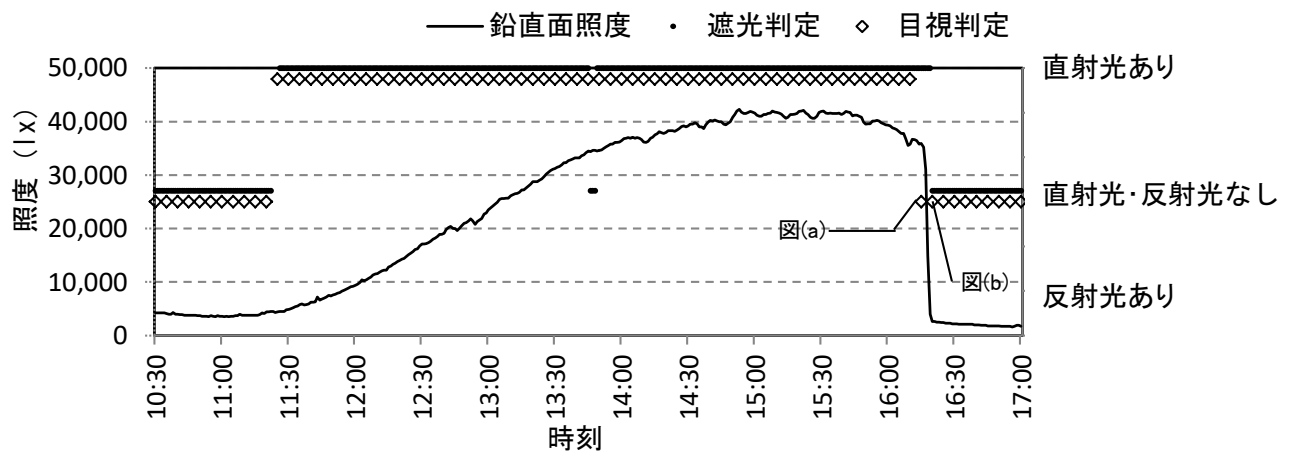


図 3.17 判定結果の比較と鉛直面照度の推移（南西面）

Fig.3.17 Comparison in evaluation result and vertical illuminance (south-west window)

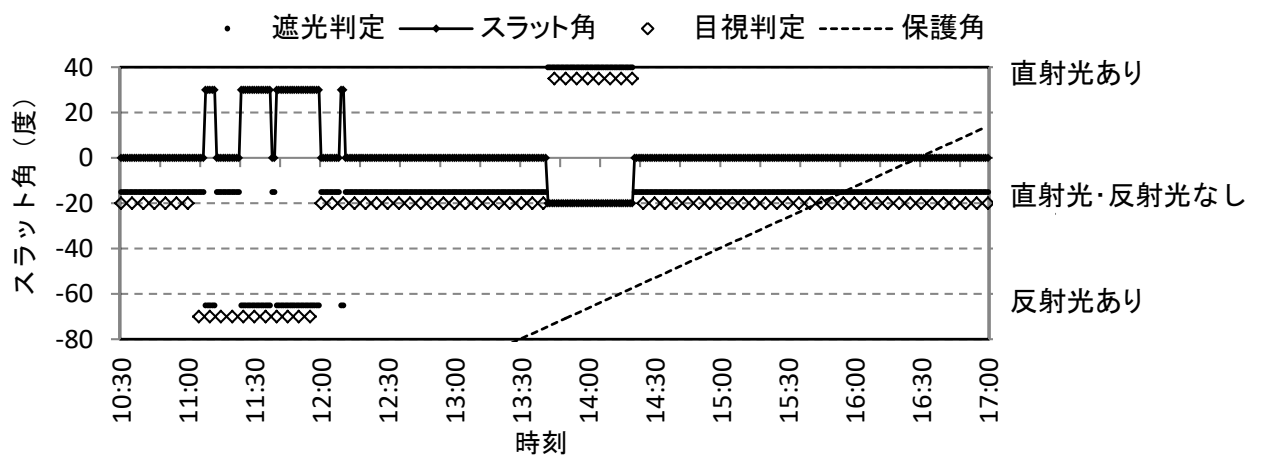


図 3.18 判定結果の比較とスラット角の推移（北西面）

Fig.3.18 Comparison in evaluation result and slat angle (north-west window)

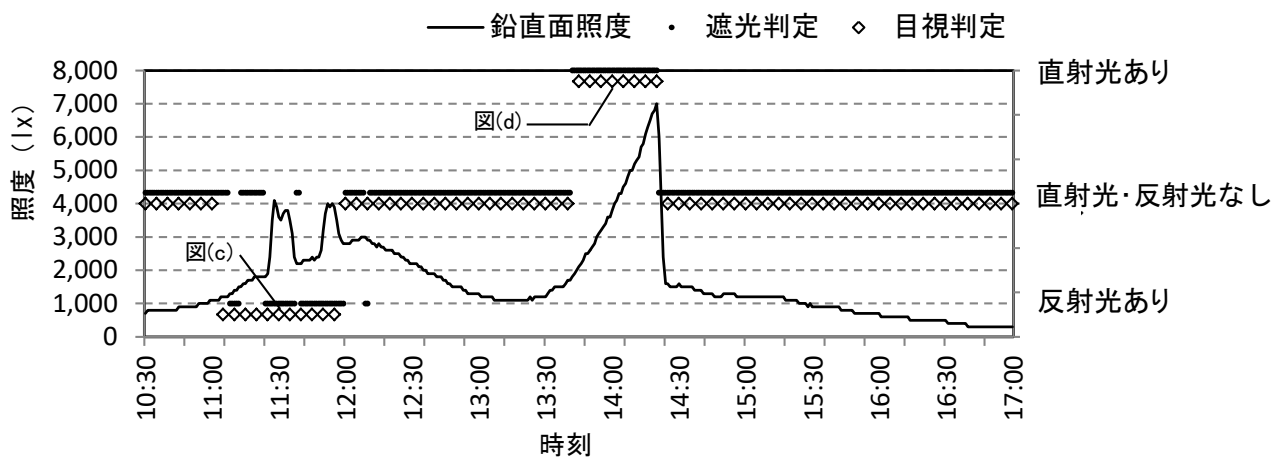


図 3.19 判定結果の比較と窓面鉛直面照度の推移（北西面）

Fig.3.19 Comparison in evaluation result and vertical illuminance (north-west window)

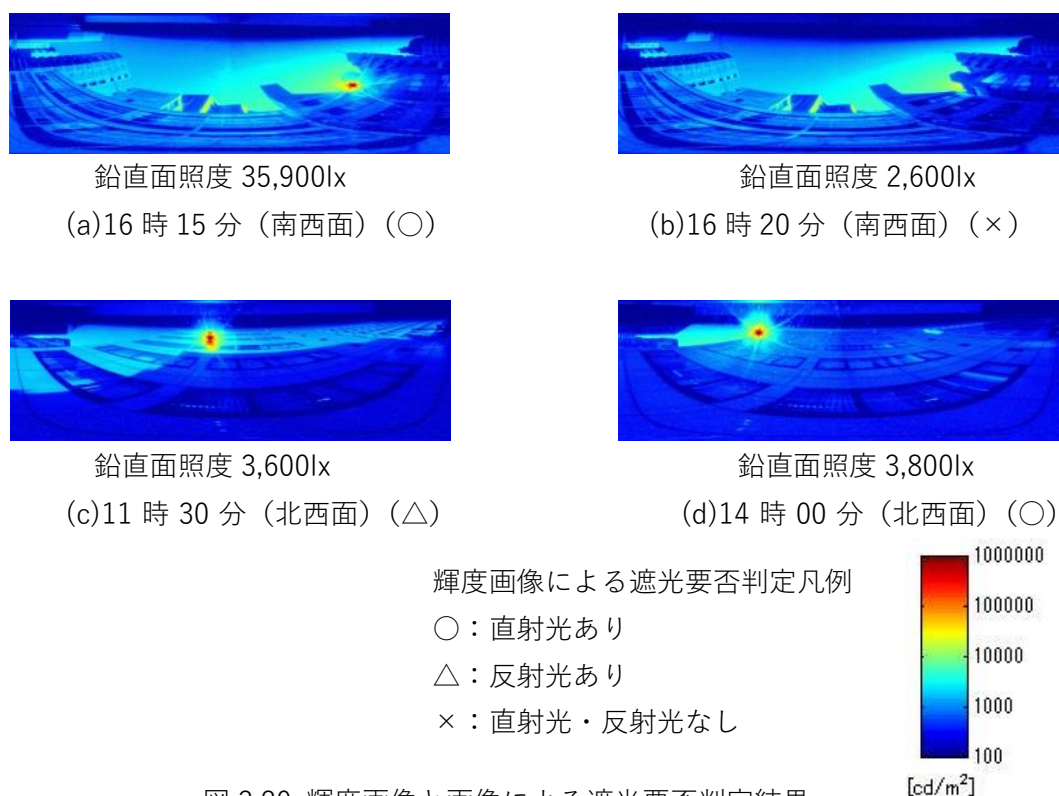


図 3.20 輝度画像と画像による遮光要否判定結果
Fig.3.20 Luminance images and shading evaluation result

次に、太陽が雲に隠れるような薄曇りの日において、遮光要否判定の妥当性を検証した。図 3.21~図 3.24 に、2017 年 1 月 13 日及び 1 月 14 日に実施した南西面窓での実証結果を示す。当日、南西面窓に直射光が当たる時間帯は、10 時 10 分~10 時 50 分と 12 時 27 分~12 時 53 分であり、この時間帯以外は、周辺建物の影になる。測定は、この時間帯を含む 10 時から 13 時まで行った。

図 3.21 は、屋上に設置した照度計で測定した水平面全天照度を示す。13 日は安定した晴天日であった。一方、14 日は薄日の射す曇りから 12 時以降、曇天に移り変わっていった。図 3.22、図 3.23 は前述の実験と同様に、ブラインド制御システムの遮光判定結果と目視による判定結果及び窓面での鉛直面照度の時刻別推移を示す。13 日、窓面に直射光が当たるすべての時間帯において、遮光判定、目視判定ともに「直射光あり」と判定した。窓面円鉛直面照度も 10 時台では 7,000lx から 17,000lx、12 時台では 47,000lx を記録し、周辺建物の影になる時間帯の照度 2,100lx に比べて高い値を示した。

一方、14 日、10 時台においては「直射光あり」と「直射光・反射光なし」の判定を繰り返した。図 3.23(a), (b)に 10 時 25 分 (直射光・反射光なし) と 10 時 30 分 (直射光あり) の輝度画像 (通常測定) と鉛直面照度をそれぞれ示す。雲の厚さの違いにより 10 時 25 分の画像には高輝度部分がなく「直射光・反射光なし」と判定し、10 時 30 分の画像には局所的な高輝度部分が存在し、「直射光あり」と判定した。また、その時の鉛直面照度も 4,200lx

であり、10時25分時点の照度3,500lxよりも高い値を示した。12時台は、厚い雲に覆われ始めたため、「直射光・反射光なし」の判定が続いた。どちらの時間帯においても、遮光判定結果は目視判定と合致していた。

10時台において、窓面鉛直面照度は4,000lx程度を境として、上回る場合に「直射光あり」、下回る場合に「直射光・反射光なし」と判定された。一方、周辺建物の影になる10時50分以降においても、窓面照度が4,000lxを超える時間帯が発生していた。これは、曇天時の天空光の増大によるものであり、照度だけでは高輝度部の存在を判別することができず、遮光要否判定が難しいことを示唆した。

以上のことから、今回提案した遮光要否判定方法は、晴天日だけでなく、薄曇りのような日においても直射光の有無を判別できることが確認できた。この判定方法を利用した窓面の日照状態に合わせたブラインド制御によって、スラットの開放時間を拡大することが可能となり、昼光の採光量や眺望性を増大することができ、照明消費エネルギーの削減や快適性の向上につながる可能性が示された。

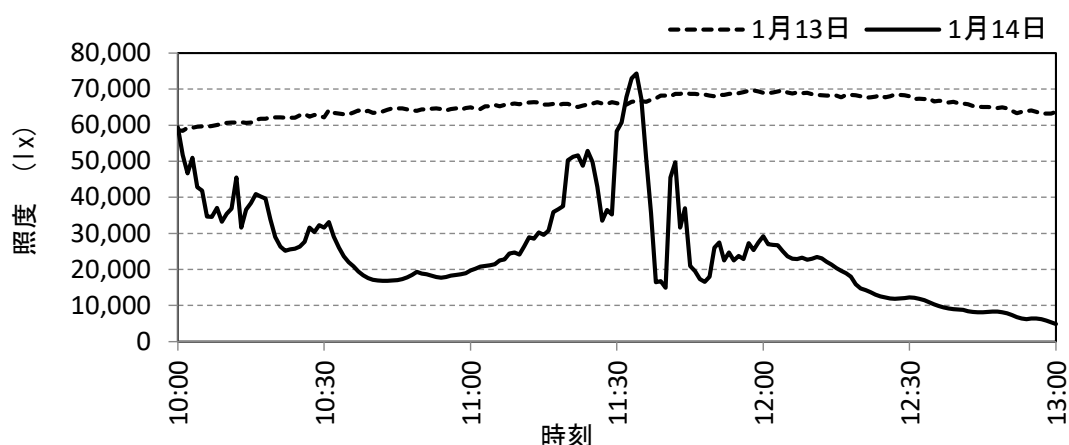


図 3.21 水平面全天照度

Fig.3.21 Horizontal global illuminance

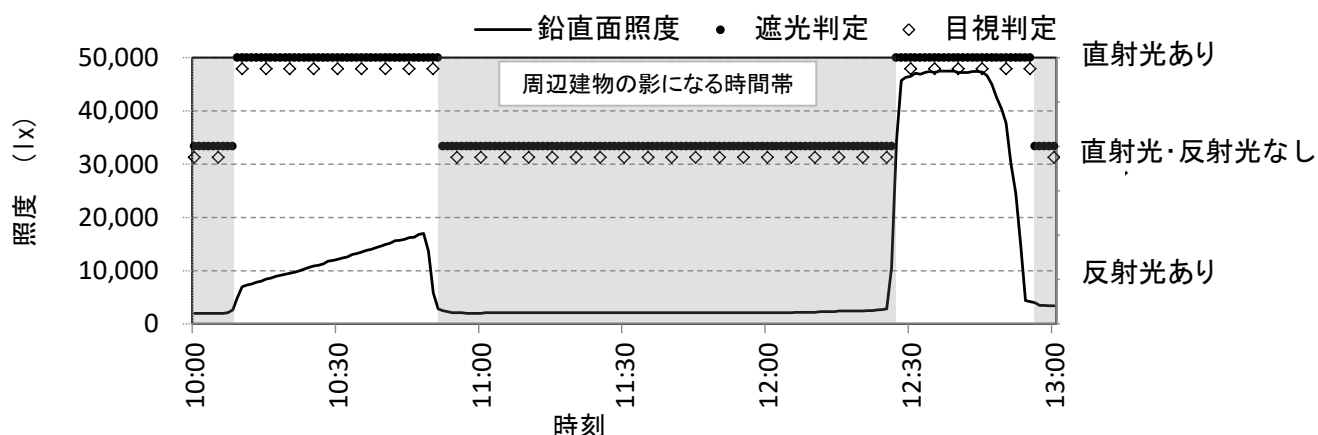


図 3.22 判定結果の比較と窓面鉛直面照度の推移（1月13日）

Fig.3.22 Comparison in evaluation result and vertical illuminance (north-west window)

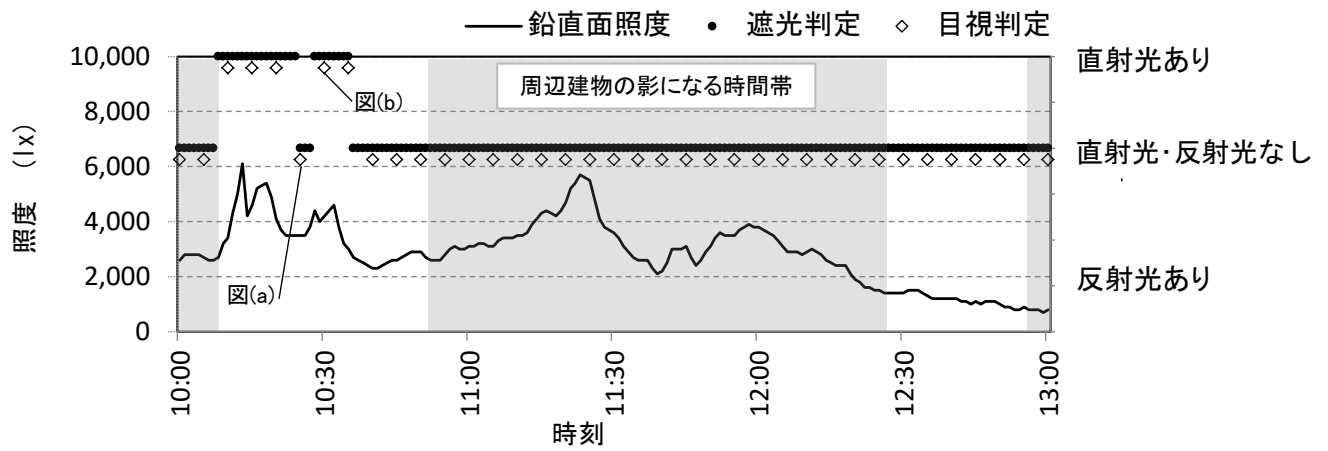
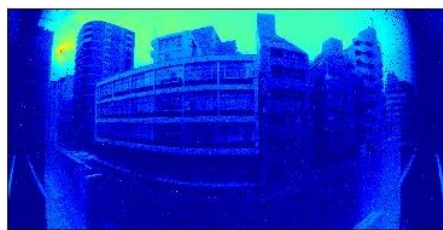


図 3.23 判定結果の比較と鉛直面照度の推移 (1 月 14 日)

Fig.3.23 Comparison in evaluation result and vertical illuminance (Jan.14)



鉛直面照度 3,500lx

(a)10 時 25 分 (南西面) (×)



鉛直面照度 4,200lx

(b)10 時 30 分 (南西面) (○)

輝度画像による遮光要否判定凡例

○：直射光あり

×：直射光・反射光共になし

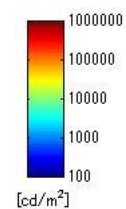


図 3.24 輝度画像と画像による遮光要否判定結果

Fig.3.24 Luminance images and shading evaluation result

3. 3 窓面明るさ判定方法の検討

本ブラインド制御では、屋外を撮影した輝度画像にブラインドの推定輝度画像を重ね合わせることで、屋内から見た窓面の輝度画像を作成する。本輝度画像を基に明るさを判定し、明るすぎる場合には適切なブラインドのかぶせ角を設定する。本節では、このブラインドの推定輝度画像を得るために必要となるスラット面輝度の推定方法について検討する。

3. 3. 1 ブラインドのスラット面輝度の推定

スラット面を水平な均等拡散面と仮定し、図 3.25 に示す通り、下向き面を面 1、上向き面を面 2 として、宿谷のモデル³⁻⁶⁾を用いて求めた光束発散度比を基に次式よりスラットの両面の輝度を算出する。入力値として用いた天空の光束発散度は、天空が均一な輝度分布であるとして、魚眼レンズで撮影した屋外の円周輝度画像（図 3.26）の上半分をパノラマ化した天空パノラマ輝度画像（図 3.27）の平均輝度から算出する。地物面反射光の光束発散度も同様に、屋外輝度画像の下半分をパノラマ化した地物パノラマ輝度画像（図 3.28）の平均輝度から算出する。

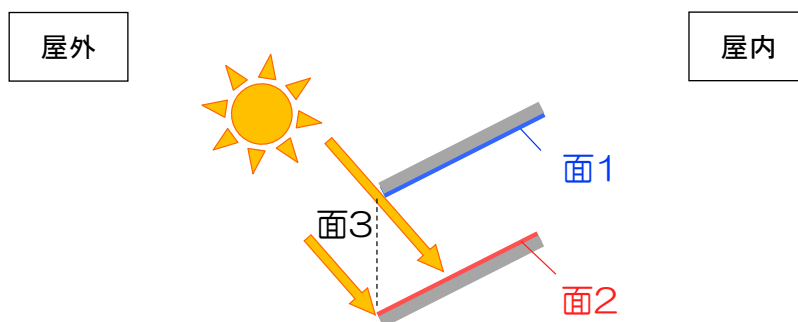


図 3.25 ブラインドのスラット面

Fig.3.25 Surface on slat of blind

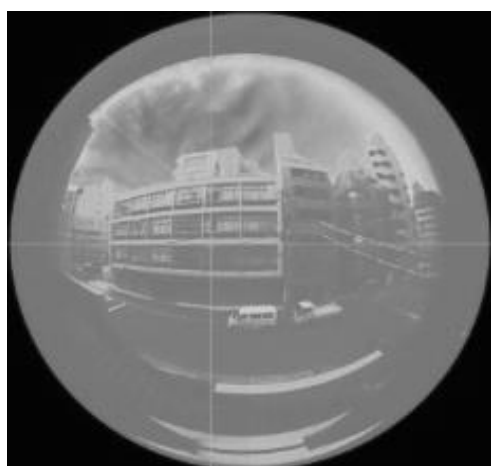


図 3.26 円周輝度画像

Fig.3.26 Circumference image



図 3.27 天空パノラマ輝度画像

Fig.3.27 Panoramic sky image

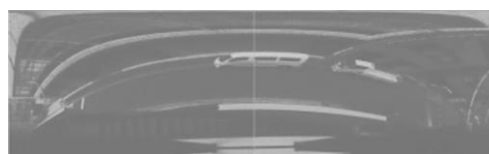


図 3.28 地物パノラマ輝度画像

Fig.3.28 Panoramic ground image

面 1 及び面 2 の輝度 L_1 , L_2 の算出方法は以下の通りである。

$$L_1 = b_{1D} \times E_{DV} \times \tau(\theta)/\pi + b_{1S} \times L_S + b_{1R} \times L_R \quad \dots(3.1)$$

$$L_2 = b_{2D} \times E_{DV} \times \tau(\theta)/\pi + b_{2S} \times L_S + b_{2R} \times L_R \quad \dots(3.2)$$

b_{1D} : ブラインド面へ入射する直射照度に対するスラット面 1 の光束発散度比 [-]

b_{2D} : ブラインド面へ入射する直射照度に対するスラット面 2 の光束発散度比 [-]

b_{1S} : ブラインド面へ入射する天空光に対するスラット面 1 の光束発散度比 [-]

b_{2S} : ブラインド面へ入射する天空光に対するスラット面 2 の光束発散度比 [-]

b_{1R} : ブラインド面へ入射する地物反射光に対するスラット面 1 の光束発散度比 [-]

b_{2R} : ブラインド面へ入射する地物反射光に対するスラット面 2 の光束発散度比 [-]

E_{DV} : 窓面鉛直面直射照度 [lx]

$\tau(\theta)$: 入射角 θ の時のガラスの透過率 [%]

L_S : 下向き光による平均輝度（天空成分） [cd/m²]

L_R : 上向き光による平均輝度（地物反射） [cd/m²]

一方、直射光については、太陽部分が高輝度であり測定上限値（約 300,000,000cd/m²）を超えてしまうことから、今回は、屋外輝度画像を使用せず、井川らによる昼光照度推定式³⁻⁷⁾により算出した。

$$E_{DN} = (-7.87 \times h^4 + 40.56 \times h^3 - 78.43 \times h^2 + 68.05 \times h + 35.16) \times J_{DN}^{1.1} \quad \dots(3.3)$$

$$E_{DV} = E_{DN} \times \cos \theta \quad \dots(3.4)$$

E_{DN} : 法線面直射日光照度 [lx]

h : 太陽高度 [rad]

J_{DN} : 法線面直達日射量 [W/m²]

ここで、直達日射量は、次式に示す Bouguer の式によって求める。

$$J_{DN} = J_O \times P^{1/\sin h} \quad \dots(3.5)$$

J_O : 大気法線面日射量 [W/m²]

P : 大気透過率 [%]

次に、ブラインドを重ね合わせたときの、ある視点からのスラットの見え掛かり面積を
図 3.29 の方法により算定する。

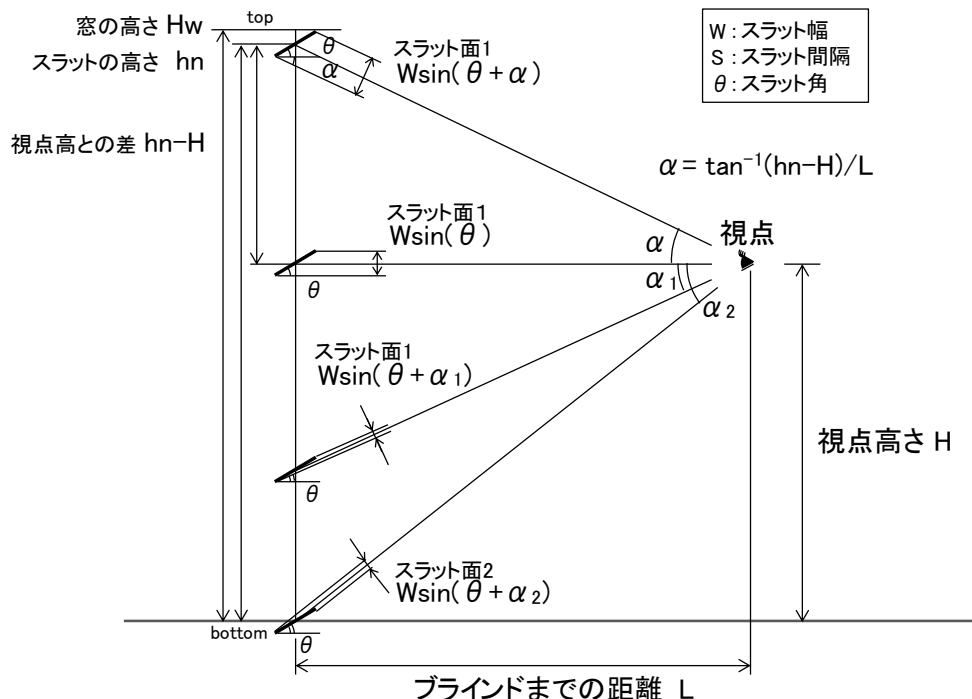
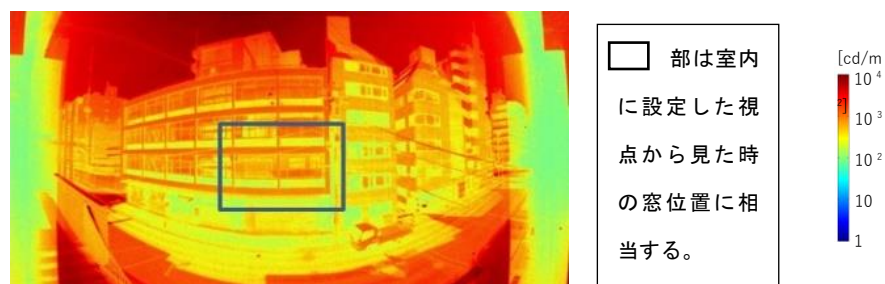


図 3.29 スラットの見え掛かり面積の推定方法
Fig.3.29 Estimation method of face side area of slat

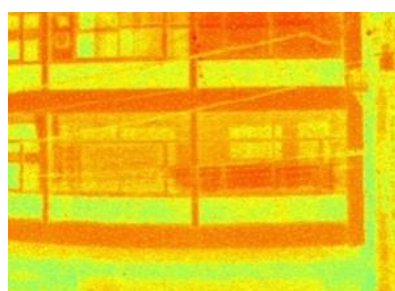
3. 3. 2 窓面輝度画像の描画と明るさ判定

窓面輝度画像を作成する手順と実際の画像を図 3.30 に示す。まず、(a)のように屋外輝度画像を撮影し、制御する窓面に該当する箇所を切り抜く(b)。切り抜いた画像に保護角のブラインドを重ね合わせた後(c)、明るさ画像へ変換する(d)。明るすぎると判断した場合には、一段階スラット角を大きくする(e)。明るすぎるかどうかの判定は、設定した NB 値以上の領域率（設定した NB 値以上の値を示す画素数の画像全体の画素数に対する割合）によって判断する。図(d)は、スラット角が -20 度で、図(e)は、スラット角が水平の場合を示しており、 $10NB$ 以上の領域率がそれぞれ 53%, 33%である。



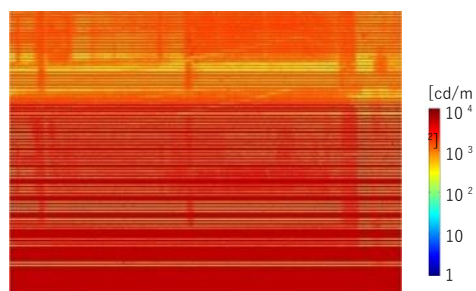
(a)屋外輝度画像の撮影

(a) Measurement of outdoor illuminance image



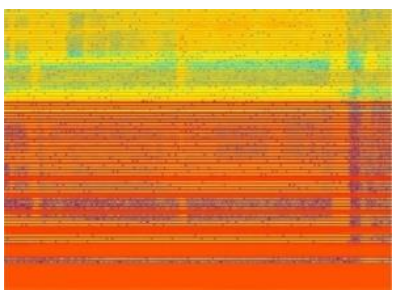
(b)窓面箇所の切り抜き

(b) Trimming window area



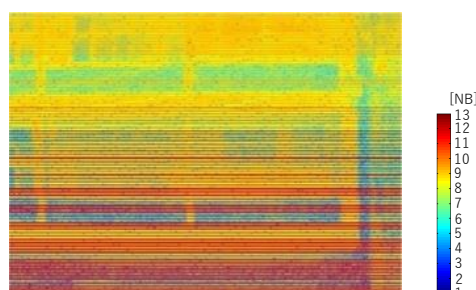
(c)ブラインドの重ね合わせ

(c) Superimposing blind



(d)明るさ画像変換

(d) Conversion to brightness image



(e)スラット角の変化

(e) Enlarge slat angle

図 3.30 窓面の明るさ判定手順

Fig.3.30 Evaluation procedure of brightness of window

これらの窓面輝度画像を用いたブラインドのスラット角度の決定方法及び制御の実証実験は、第4章において述べる。

3. 4 第3章のまとめ

第3章では、輝度画像を利用したブラインド制御について検討した。

第1節では、屋外輝度画像に対して輝度コントラストを利用した遮光要否判定方法を検討し、以下の結論が得られた。

- (1) 分光透過率の異なる2種類のフィルタを装着した魚眼レンズと CCD カメラの組み合わせは、直射光や反射光を含む高い輝度を測定できる可能性を示した
- (2) 中村が提案した N フィルタと平均化フィルタによるフィルタリングによって得られる、輝度コントラスト (C 値) と対数輝度平均値 (A 値) を利用することにより、輝度画像から直射光や反射光の遮光要否判定ができることを実証的に明らかにした。
- (3) 検証画像による実証実験の結果、遮光要否判定の閾値を、1/200 秒のシャッタースピードにおいて、 $C \geq 0.4$, $A \geq 4.5$ とできることが確認できた。

第2節では、第1節で得られた知見を組み込んだブラインド制御システムを、実際のオフィスに構築し、遮光要否判定制御に関する実証実験の結果から以下の結論が得られた。

- (1) 晴天日や曇天日などの違った天候条件下においても直射光や周辺建物の反射光を検出することができ、判定手法の妥当性と実用性が確認できた。
- (2) 窓面毎に制御することにより、自然採光の増大や眺望性の向上に寄与できることを示した。

第3節では、窓面の明るさを屋外輝度画像にブラインドの推定輝度画像を重ね合わせた、屋内から見た窓面の輝度画像を基に判定する方法に関して、ブラインドスラット面の輝度推定方法、窓面輝度画像の描画方法を検討した。明るさの判定方法として、ブラインドを重ね合わせた窓面の輝度画像に対して、NB 値とその領域の占める割合（領域率）からスラット角を算出する窓面明るさ判定ロジックを構築した。

【第3章の参考文献】

3-1)(株)ジェイエアイコーポレーション：BM-500GE,カタログ

<https://www.yumpu.com/en/document/view/25062902/cm-141-pmcl-cb-141-pmcl> (2016/8/8 閲覧)

3-2)シグマ光機(株)：AND-001 フィルタ透過率波長特性, カタログ, B68

<https://www.global-optosigma.com/jp/Catalogs/gno/?from=page&pname=AND-S&ccode=W3095&dcode=W3095-2&gname=AND-50S-001> (2016/8/8 閲覧)

3-3)シグマ光機(株)：ECM-50S-500 フィルタ透過率波長特性, カタログ, B97

<https://www.global-optosigma.com/jp/Catalogs/gno/?from=page&pname=CCF%2FECM&ccode=W3112&dcode=&gname=ECM-50S-500> (2016/8/8 閲覧)

3-4)中村芳樹：光環境における輝度の対比の定量的検討法, 照明学会誌, 84-8A, pp.522-528, 2000

3-5)高橋嶺ら：輝度分布を持つ不快グレア源の定量的評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.427-430, 2015

3-6)宿谷正則：数値計算で学ぶ光と熱の建築環境学, 丸善(株), pp.145-153, 1993

3-7)井川憲男ら：日射量による昼光照度の推定方法に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第 526 号, pp. 17-24, 1999.12

第4章

照明とブラインドの協調制御に関する検討

4. 1 照明とブラインドの協調制御方法の検討

第2章と第3章の成果を建物に適用していくためには、人工照明とブラインドの制御間の協調が必要となる。このため、この協調制御に適用できるロジックを検討する。図4.1に実証システムの構成、図4.2に制御フローを示す。

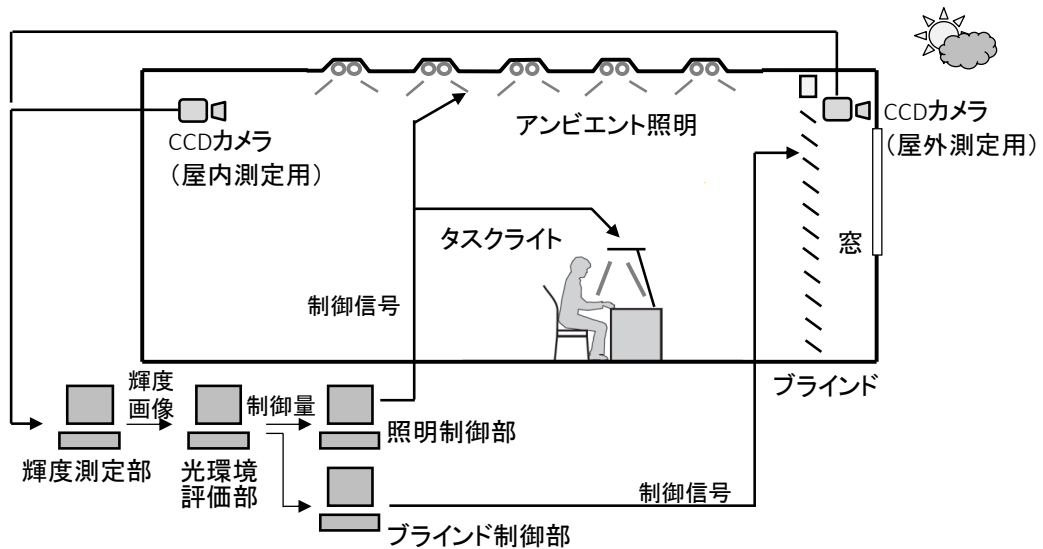


図 4.1 実証システムの構成
Fig.4.1 Diagram of control system

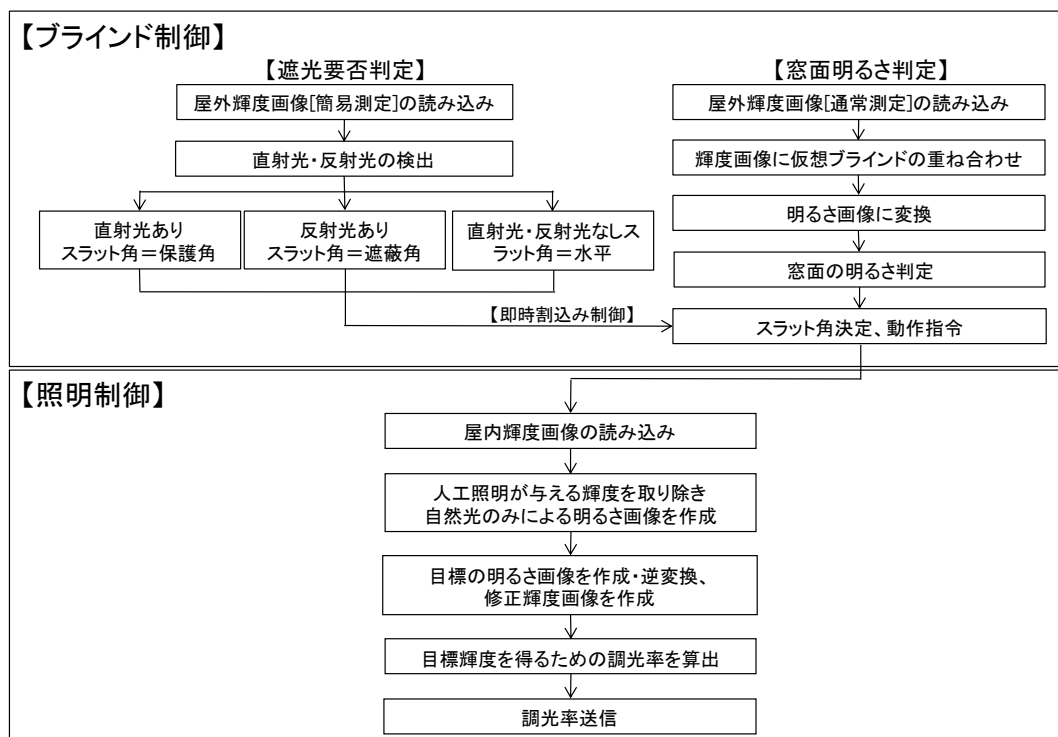


図 4.2 制御フロー
Fig.4.2 Control flow

本協調制御システムは、【ブラインド制御】部と【照明制御】部とで構成し、前者には以下の【遮光要否判定】機能と【窓面明るさ判定】機能を備える。

【遮光要否判定】機能 前章で述べた通り、常時撮影される屋外輝度画像から日射状況を判定し、急に直射光が入射した時や周辺建物からの太陽の反射光が生じた際に、即座に遮光させまぶしさを軽減させるための処理である。

【窓面明るさ判定】機能 前章で述べた通り、遮光判定で得られる屋外の日射状況を加味してブラインド面の輝度を予測し、撮影した屋外輝度画像に重ね合わせ、窓面の予測輝度分布を作成する。これを明るさ画像に変換し、NB 値とその領域の占める割合（領域率）で評価することにより、窓面の明るさを抑えた適切なかぶせ角を求める。

【照明制御】部 第2章で述べた通り、CCD カメラを用いてリアルタイムに測定する室内の輝度画像から変換した明るさ画像によって明るさ感の評価を行う。制御は明るさ画像上に設定した評価エリア（明るさ感を確保したい領域）に入射する昼光の量を算出したのち、評価エリアのNB 値が目標NB 値となるよう照明を調光することにより行う。

室内に入射する昼光の量の変動に応じて評価エリアの目標NB 値を維持しながら、アンビエント照明の調光制御によって必要な明るさ感を確保する。ブラインドを閉じた場合、透過光束は減少するものの、窓面輝度が抑えられることから室内壁面との輝度対比が小さくなる。その結果、目標の明るさ感を確保するためのアンビエント照明の調光率が小さくなることがある。在来システムの一定照度確保制御とは全く異なるロジックこそが、本研究に基づく協調制御システムの最大の特長である。

本実証システムで予想される課題として、屋外用カメラの撮影画像と制御対象とする窓面から見える画像との違いによる制御の誤差が挙げられる。屋外の輝度画像はカメラの設置位置を視点とした場合の画像であり、カメラ位置から大きく離れた窓から見える屋外とは異なる。このため、カメラには太陽が写っていない場合でも、離れた窓に日射が当たることが予想できる。今回は、ブラインド毎に設定可能な時刻毎の制御スケジュールを構築することで、運用上、不具合につながらないように配慮した。

4. 2 実証実験と評価

4. 2. 1 実証施設の概要

実証実験は、第3章で述べた遮光要否判定の実証実験を行ったFビルで実施した。図4.3に平面図（執務室面積197 m²）、図4.4に断面図を示す。執務室は、LEDグリッド照明（定格消費電力：31W、光束：3,750lm、色温度：5,000K）とLEDダウンライト（定格消費電力：16.5W、光束：1,704lm、色温度：5,000K）のアンビエント照明とLEDタスクライト（定格消費電力：11W、光束：694lm、色温度：2,700~4,200K 可変）によるタスク・アンビエント照明を採用している。アンビエント照明は、いずれも5~100%の範囲で連続調光が可能である。執務室の照明は、図4.3に示すように、壁面を主に照らす照明G2、G3を個別グループとし、使い勝手に合わせて調光できるように、G1からG7の7グループに分けられている。一方、タスクライトは、今回、執務者が、出力、色温度を好みに応じて自由に調節できる。執務室の南西面と北西面にはLow-E複層ガラス窓（Low-E 8mm+空気層12mm+フロート 8mm、可視光透過率：74.1%）が配置されており、直射光のほか周辺建物の影や反射光も入射する環境にある。輝度測定用CCDカメラは窓に面した屋外測定用2台と屋内測定用1台を設置した。カメラは、1台で広範囲を測定できるように等距離射影方式による魚眼レンズを採用した。このカメラが測定可能な輝度の範囲は、80,000cd/m²以下であるため、屋外測定用のカメラには、太陽のような高い輝度を撮影できるようにND（Neutral Density）フィルタとIR（Infrared）フィルタの2種類のフィルタを装着した。各窓には117段階に角度を変更できる電動ブラインド（スラット幅35mm、間隔30mm）を設置しており、各面で3グループ毎に制御が可能である。窓面の明るさ判定のための視点位置は、ブラインド面からの離隔距離5,000mm、床面から高さ1,200mmとした。

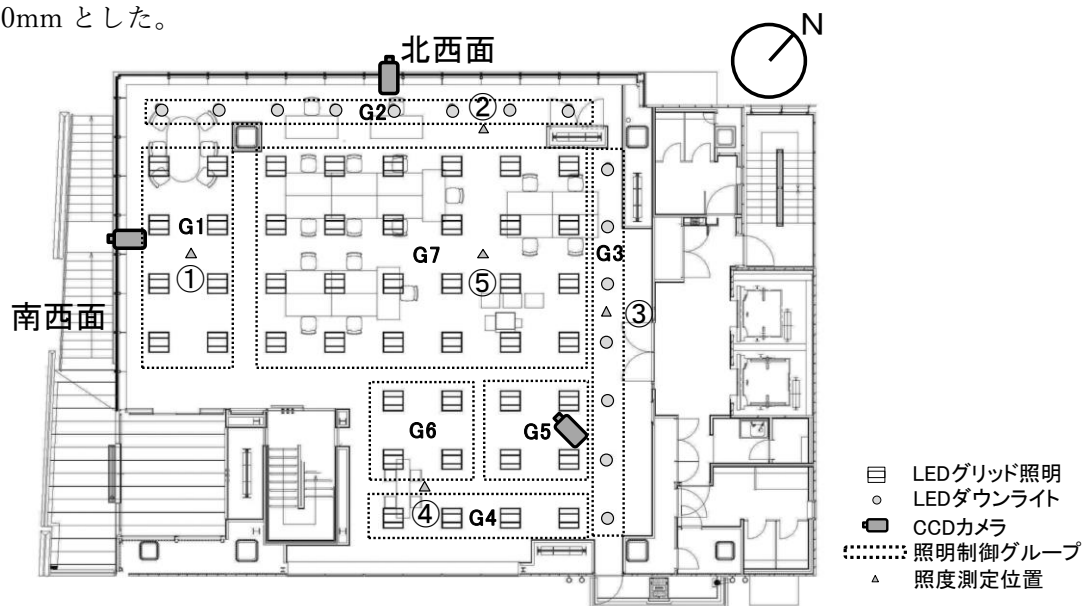


図 4.3 平面図

Fig.4.3 Floor plan

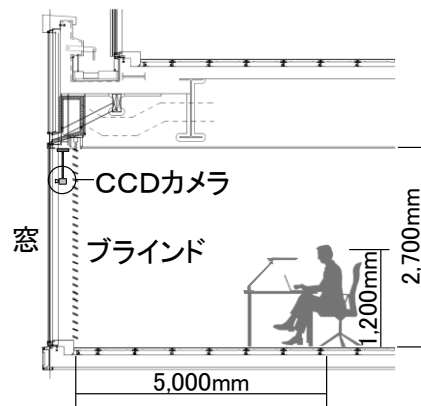


図 4.4 断面図

Fig.4.4 Section diagram

4. 2. 2 実証実験の概要

以下の 2 種類の実験を行った。

(1) 明るさ感と省エネルギー性に関する一定照度確保制御との比較実験

本実験の目的は、照度センサーを利用した一定照度確保制御下と本実証システムの制御下における、昼光が変動した場合の室内の明るさ感と照明消費電力を比較し、本実証システムの特性を明らかにすることである。そのため、今回、同じ昼光状態において明るさ感の評価対象面の平均 NB 値及びアンビエント照明の消費電力の比較を 2 ケース行った。本実験において、明るさ感の評価対象面は、執務室中央の照明グループ (G7) の制御対象範囲とした。これは、座席配置上、正対する使用者が多い面であること、対向建物自身の輝度や対向建物からの反射光など、複雑な輝度変化があることを理由に選定した。2016 年 2 月 9 日 (晴れ) の 13 時 50 分及び 15 時 4 分に実測した輝度画像を基に、図 4.3 に示した位置の照度が設定値 (200lx, 300lx, 400lx, 500lx) になるように調整したアンビエント照明の調光率から、人工照明によって得られる輝度と昼光によって得られる輝度を重ね合わせることによって、同じ昼光状態におけるそれぞれの制御下での室内輝度分布と NB 値を推定した。実験中、ブラインドは、直射光が室内へ透過しないように水平に固定したままを行った。また、本実験においては、対向建物自身の輝度や対向建物からの反射光など、複雑な輝度変化をもたらす北西面窓に着目し、評価を行った。

図 4.5 に北西面窓と照明制御グループ (G7) の制御対象範囲の屋内輝度画像を示す。



図 4.5 北西窓と評価対象面を示す屋内輝度画像

Fig.4.5 North-West window and evaluation area in illuminance image

(2) 協調制御に関する実証実験

本実験の目的は、屋外輝度画像を基にした窓面明るさ判定によるブラインド制御の動作検証と、ブラインド制御に伴う室内輝度分布の変動時における、照明制御による明るさ感と照明消費電力の変化を実測し、本実証システムの制御の妥当性を明らかにすることである。2018年2月9日(晴れ)の11時45分から12時30分までの実証システムの使用状況下で、ブラインドの窓面明るさ判定によるスラット角制御と制御後の室内輝度分布を基にアンビエント照明が自動調光する様子を確認した。北西面のブラインドのスラット角は15度を初期状態とし、8NB、領域率30%を明るさ判定の閾値として制御した。なお、南西面のブラインドは、直射光が透過しない15度に固定したまま実験を行った。また、アンビエント照明の制御グループ(G7)の目標NB値は8NBとした。

4. 2. 3 明るさ感と省エネルギー性に関する一定照度確保制御との比較実験結果

表4.1に実証システムと一定照度確保制御の窓面輝度、評価対象面輝度、評価対象面平均明るさ尺度値(NB値)、照明消費電力密度の比較結果一覧を屋内輝度画像と共に示す。窓面(北西面)の輝度は、対向建物に日射が当たる13時50分が高く、日射が当たらない15時4分は低くなった。評価対象面輝度は、一定照度確保制御では、いずれの場合も時間帯による変化が少なく、照度、壁面輝度が一定に保たれていた。一方、実証システムでは、評価対象面輝度は、13時より15時の結果が低い値となった。

図4.6に照明消費電力密度(室内面積1m²当たりの照明消費電力)と評価対象面のNB値について、実証システムと一定照度確保制御の比較を示す。

一定照度確保制御は、いずれの場合も窓面輝度が低い時の方が、照明消費電力密度が大きくなった。これは、窓面からの透過光束量が小さくなり、目標照度を確保するため、照明の出力を高めたからである。一方、実証システムにおいては、窓面輝度が低い時の方が、わずかに照明消費電力密度が下がっており、一定照度確保制御とは反対の動作をしている。NB値は、実証システムの場合はどちらも8.1NBであるのに対して、一定照度確保制御では、窓面輝度が高い時に0.2から0.3NB程度低下した。これは、窓面との輝度対比が大きくなったためである。この結果は、一定照度確保制御方式は、窓面輝度が高くなる際に明るさ感が低くなる可能性があることを示唆している。

また、照明消費電力密度の点では、実証システムは400lxで得られる平均NB値をより少ない電力で達成していることが確認できた。

これらの結果から、実証システムは変動する昼光状態においても、アンビエント照明の自動調光によって安定した明るさ感の維持と省エネルギー性が両立できる可能性を有すると考える。

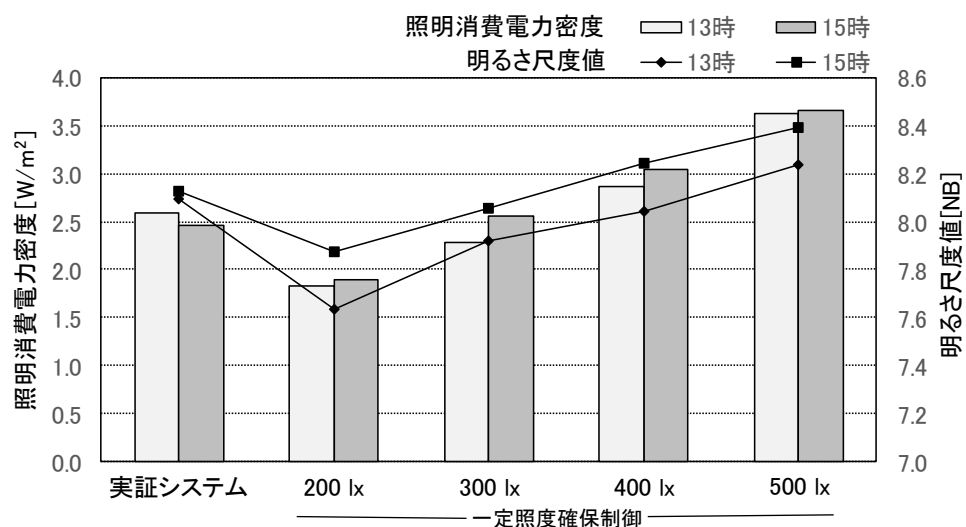
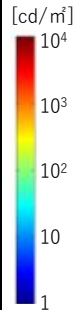


図 4.6 実証システムと一定照度確保制御の比較
 Fig.4.6 Comparison in experimental system and conventional system

表 4.1 実証システムと一定照度確保制御の比較

Table.4.1 Results in experimental system and conventional

			実証システム		一定照度確保制御							
					平均 200 lx		平均 300 lx		平均 400 lx		平均 500 lx	
13 時 50 分 高輝度時	輝度画像											
	窓面輝度	[cd/m ²]	最大	1044.7	最大	1038.9	最大	1041.8	最大	1060.8	最大	1071.7
			平均	222.1	平均	211.0	平均	216.2	平均	234.1	平均	246.0
	評価対象面輝度	[cd/m ²]	最大	166.3	最大	116.2	最大	138.3	最大	168.1	最大	195.6
			平均	78.6	平均	45.5	平均	64.1	平均	78.3	平均	100.5
	評価対象面平均明るさ尺度値	[NB]	8.1		7.6		7.9		8.0		8.2	
	照明消費電力密度	[W/m ²]	2.6		1.8		2.3		2.9		3.6	
15 時 04 分 低輝度時	輝度画像											
	窓面輝度	[cd/m ²]	最大	223.0	最大	220.4	最大	240.5	最大	244.8	最大	255.0
			平均	71.8	平均	66.5	平均	88.4	平均	93.3	平均	101.5
	評価対象面輝度	[cd/m ²]	最大	136.6	最大	112.7	最大	146.5	最大	174.8	最大	197.8
			平均	64.0	平均	45.5	平均	62.6	平均	80.7	平均	100.5
	評価対象面平均明るさ尺度値	[NB]	8.1		7.9		8.1		8.2		8.4	
	照明消費電力密度	[W/m ²]	2.5		1.9		2.6		3.0		3.7	



4. 2. 4 協調制御に関する実証実験結果

表 4.2 に実証システムの制御結果を示す。屋外輝度画像は、時刻と共に直射光が対向建物の外壁に当たるエリアが大きくなっていることを表している。初期（スラット角 15 度）のブラインドの重ね合わせ画像においても高輝度部分が広がっていることが分かる。11 時 45 分は、明るさ判定の閾値（8NB, 30%）を満足していたことから、スラット角は 15 度のままであったが、その後は、閾値を満足するために、スラット角が徐々に大きくなり、12 時 26 分には 60 度にまで至った。その様子は、屋内輝度画像からも確認できた。図 4.7 は制御時の輝度画像のうち、北西窓部分における輝度別のヒストグラムをピクセル総数（25,489 ピクセル）に対するピクセル数割合で示したものである。時刻が進むにつれて屋外輝度が高くなっているにも関わらず、ブラインドの遮光により高輝度のピクセル数が減少していることが確認できた。

アンビエント照明もこの間、自動的に調光され、対象面の NB 値がほぼ一定（8.1NB～8.2NB）に維持されていた。照明制御グループ(G7)の調光率及び室内全体の照明消費電力密度は、前述の実験結果と同様に、ブラインドの遮光による窓面輝度の低下と共にそれぞれ 10 ポイント（46%→36%）、 $0.3\text{W}/\text{m}^2$ （ $2.6\text{W}/\text{m}^2 \rightarrow 2.3\text{W}/\text{m}^2$ ）低下した。

これらの結果から、本実証システムは、屋内外に向けて設置した CCD カメラで取得する輝度画像を基に、ブラインドとアンビエント照明を NB 値によって制御できることを明らかにした。特に、窓面輝度を抑えるようにブラインドで遮光しながら、ブラインド開放時よりも少ない電力で、室内の明るさ感を維持できる協調制御の可能性を示した。また、第 3 章のブラインド遮光要否判定制御を含めると、窓面の日照状態を的確に把握できることから、適切な遮光制御が可能となり、眺望性・快適性の確保と省エネルギー性を両立し得るシステムの構築が可能であると考えられる。

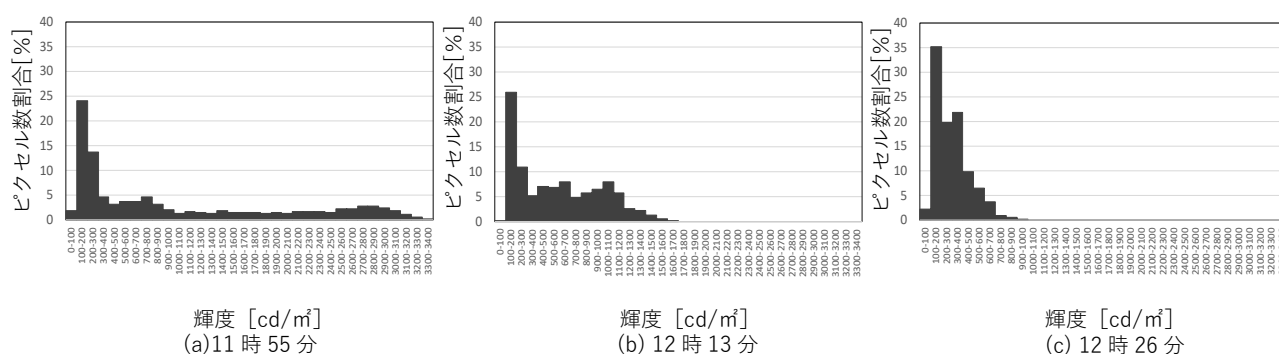
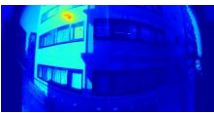
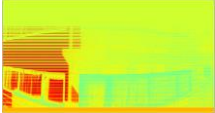
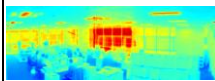
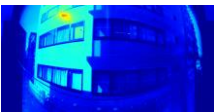
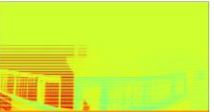
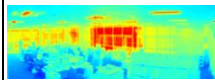
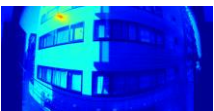
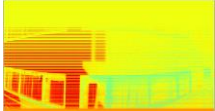
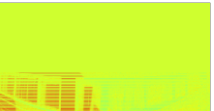
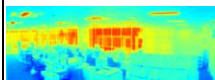
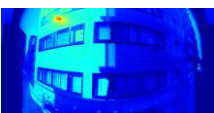
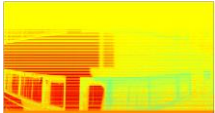
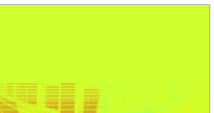
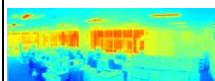
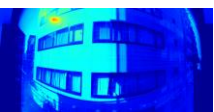
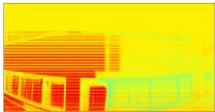
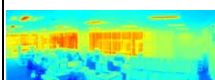
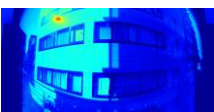
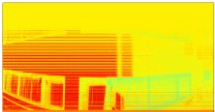
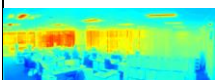


図 4.7 北西面の窓部分における輝度別のヒストグラム
Fig.4.7 Histogram of luminance on the north-west window area

表 4.2 実証システムの制御結果
Table.4.2 Operation results in experimental system

時刻	屋外輝度画像	ブラインド重ね合わせ輝度画像		屋内輝度画像	制御角	調光率	照明電力	平均NB
		初期 (スラット角 15 度)	制御時		[度]	[%]	[W/m ²]	[NB]
11 時 45 分			初期値で目標値を満足		15	46	2.6	8.1
11 時 55 分					30	46	2.6	8.1
12 時 05 分					45	44	2.6	8.1
12 時 13 分					50	42	2.5	8.2
12 時 18 分					55	39	2.4	8.2
12 時 26 分					60	36	2.3	8.2

屋外輝度画像
[cd/m²]



重ね合わせ画像
屋内輝度画像
[cd/m²]



4. 2. 5 実証システムの省エネルギー性効果の確認

本実証システムの省エネルギー性を確認するため、ブラインドの窓面明るさ判定制御の有無による1日当たりのアンビエント照明の調光制御実験を行った。実験は、ほぼ終日にわたり快晴であった連続した2日間（2018年5月15日・16日）に実施した。比較のため終日雨天であった直近日（2018年5月8日）の制御結果も示す。いずれの日も照明は、本実証システムによって自動調光制御を行った。図4.8は、気象庁が公開している東京における同日の時刻別全天日射量を示す。ブラインドの明るさ判定制御（明るさ判定閾値：8NB、30%）は、5月8日、15日は実施し、16日は実施しなかった。

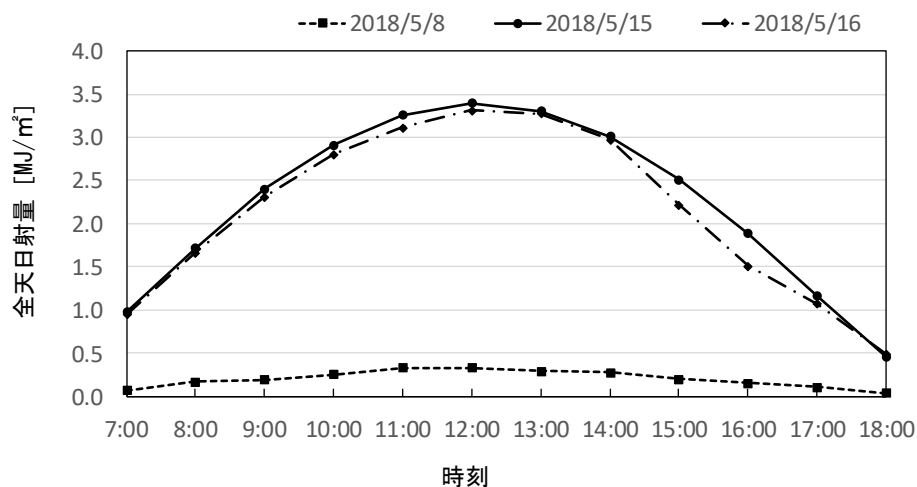


図 4.8 時刻別全天日射量

Fig.4.8 Global solar radiation

図 4.9、図 4.10 に 3 日間のブラインドの時刻別スラット角及びアンビエント照明の時刻別照明消費電力を示す。15 日は窓面明るさ判定によって、日中は最大 55 度まで制御されていた。一方、16 日は窓面明るさ判定制御を実施しなかったため、終日ほぼ 15 度で保たれていた。どちらも 11 時台に北西面で 30 度に制御されたのは、対向建物からの反射光が入射したためであり、その間、自動的に制御されていた。8 日は、雨天で直射光がないため終日 15 度で保たれていた。アンビエント照明の消費電力は、5 月 15 日の 13 時から 16 時にかけて、16 日より低い電力で制御されていたことが確認できた。終日の消費電力量を比較しても、窓面明るさ判定制御（2,978Wh）によって、窓面明るさ判定制御のない場合（3,107Wh）と比べて約 4%省エネルギーであったことが確認できた。雨天日は昼光が少なく照明消費電力が朝夕に高くなっていたため、終日の消費電力量（3,604Wh）は、明るさ判定制御時に比べて約 20%増加した。

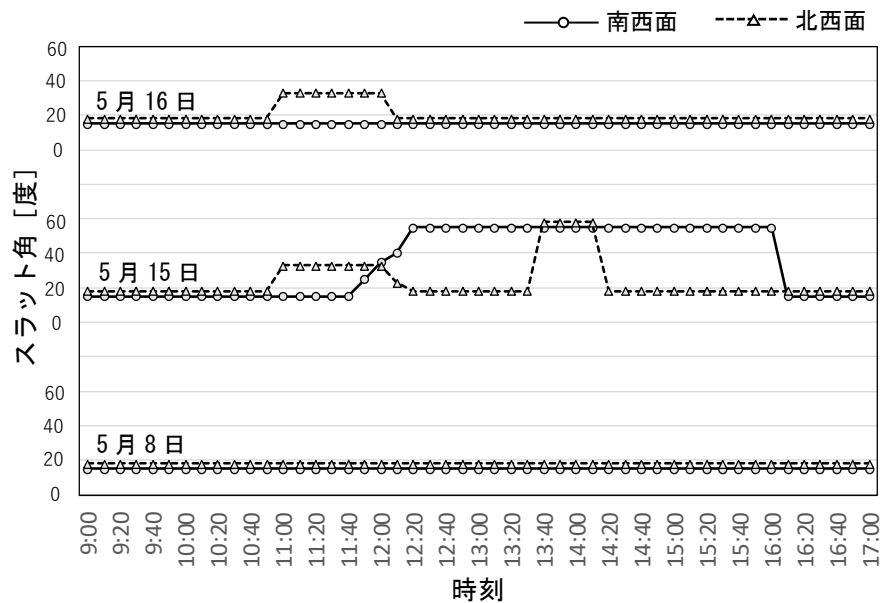


図 4.9 時刻別スラット角

Fig.4.9 Slat angle

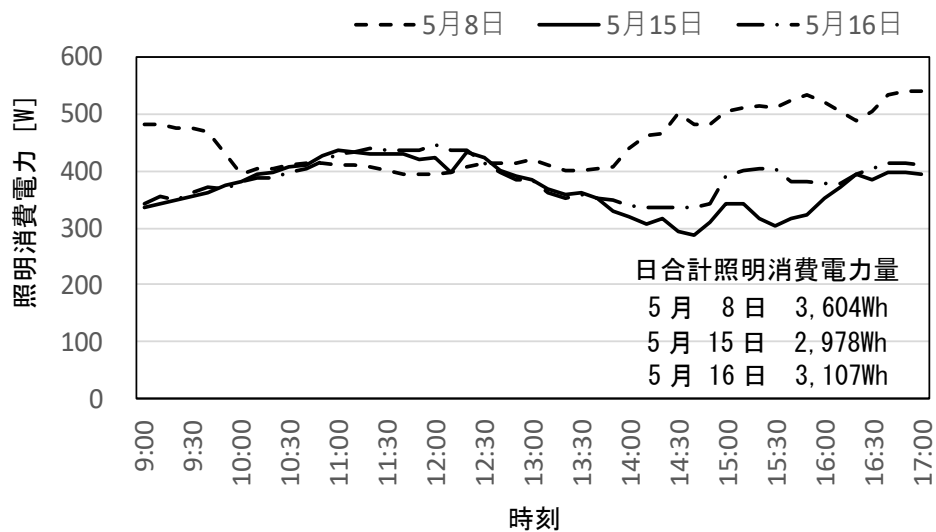


図 4.10 時刻別照明消費電力

Fig.4.10 Lighting electricity consumption

また、実証システムの運用期間中である 2015 年 4 月から 2016 年 3 月までの就業日、就業時間帯（9 時～17 時）における 1 m^2 、1 時間あたりの照明消費電力量の実績を図 4.11 に示す。アンビエント照明及びタスク照明を合わせた年間の平均値は、 3.29 Wh/m^2 であった。

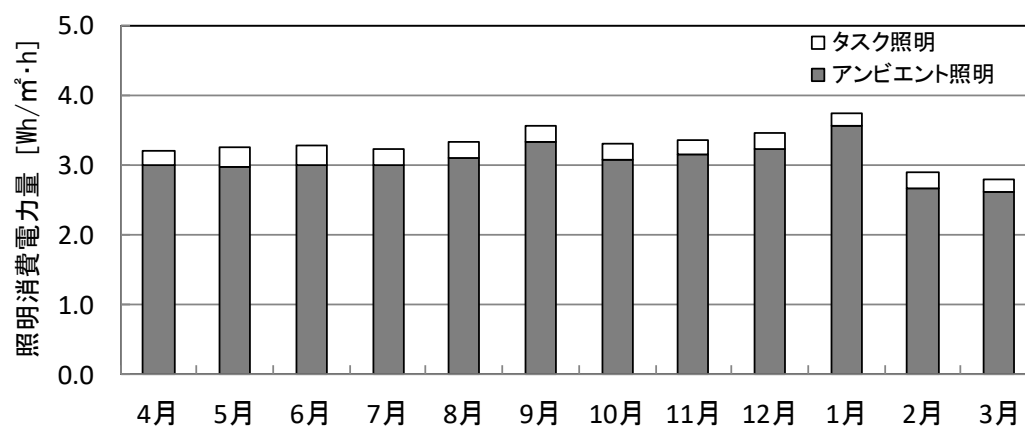


図 4.11 1 m²・1 時間あたりの照明消費電力量

Fig.4.11 Electricity consumption

4. 3 屋光享受に関する性能評価

窓は、採光などの機能の他、人が眺望、開放感、心地よさなどを享受できる効果を持つ。また、開口部と屋光は、建物で過ごす人の快適性や健康に着目した環境評価システムとして近年開発された WELL 認証⁴⁻¹⁾において重要な項目の一つとされている。

今回、実証開発したシステムの有用性について、前者の視点でブラインドの空隙率で、後者については、等価メラノピック照度を基に評価を行った。

4. 3. 1 ブラインドの空隙率による評価

ブラインドを通した眺望性を示す指標として空隙率を用いた。空隙率は、図 4.12 の概念図に示すように、窓面積に対する空隙部の面積で表される。

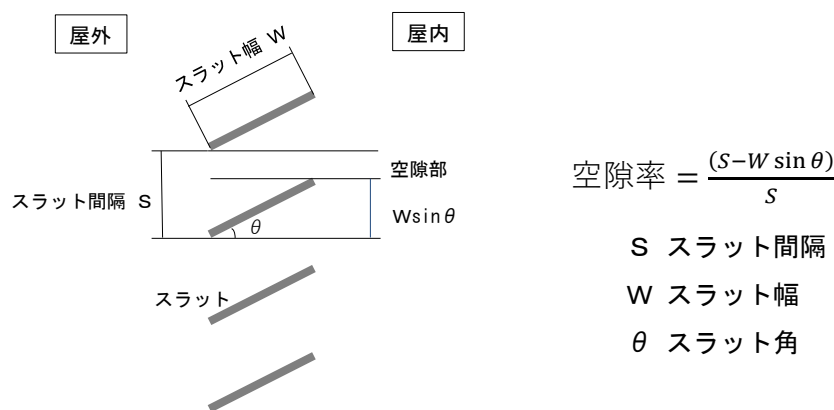


図 4.12 ブラインドの空隙率

Fig.4.12 Porosity of blind

今回、2015 年 8 月から 2016 年 7 月の 1 年間における、午前 9 時から午後 5 時までのブラインド制御実績結果を基に、空隙率の月毎の平均値を求めた。比較対象として、天候に左右されることなく、全日、全時刻において保護角制御されていた場合の平均空隙率及び、天候を加味した場合の平均空隙率を求めた。ここで、天候の判断として、気象庁の公開データ⁴⁻²⁾を利用して、各時刻の日照時間を基に、30 分以上の場合は晴天、30 分未満を曇天と仮定し、曇天時刻にはブラインドのスラットが水平 (0 度) に保つこととした。なお、10 月から 1 月の 17 時前に日没する時間帯は、いずれの場合もブラインドが全閉 (90 度) に制御されることとした。表 4.3、図 4.13、図 4.14 に平均空隙率の年間推移を示す。

南西面は、夏期に太陽高度が高いため保護角制御であっても空隙率は高い。一方、太陽高度が低くなる冬期には保護角制御の場合、空隙率は 50% 台まで低下し、天候判断があっても 70% 程度の空隙率に留まっている。一方、実証システムにおいては、年間を通じて非常に高い空隙率を示した。北西面は、直射光が当たる時間が短いことから南西面に比べて大きな差は現れないが、概ね同様の傾向を示している。年間平均の空隙率も 95% 以上であり、ほぼ年間を通じてブラインドが開放されていることが分かる。

表 4.3 空隙率の比較
Table4.3 Comparison in porosity

単位 [%]

	南西面			北西面		
	実証 システム	天候判断無 保護角制御	天候判断有 保護角制御	実証 システム	天候判断無 保護角制御	天候判断有 保護角制御
2015 年 8 月	99.61	94.49	98.60	98.24	92.46	97.49
9 月	99.44	84.63	95.17	98.14	88.88	96.46
10 月	98.24	71.93	83.58	95.11	83.51	90.54
11 月	90.37	61.98	78.98	89.49	80.81	86.20
12 月	88.12	57.99	70.04	87.66	80.93	84.33
2016 年 1 月	95.02	63.20	70.58	95.26	84.74	86.30
2 月	99.80	72.63	83.36	96.71	88.51	93.84
3 月	99.00	81.78	91.88	97.51	90.10	95.54
4 月	99.59	90.32	97.22	96.48	90.76	97.16
5 月	99.53	96.89	98.40	96.11	91.89	95.77
6 月	100.00	99.74	99.85	97.17	93.31	97.71
7 月	99.90	99.15	99.64	97.65	93.93	97.42
年間平均	97.28	81.24	88.90	95.37	88.32	93.21

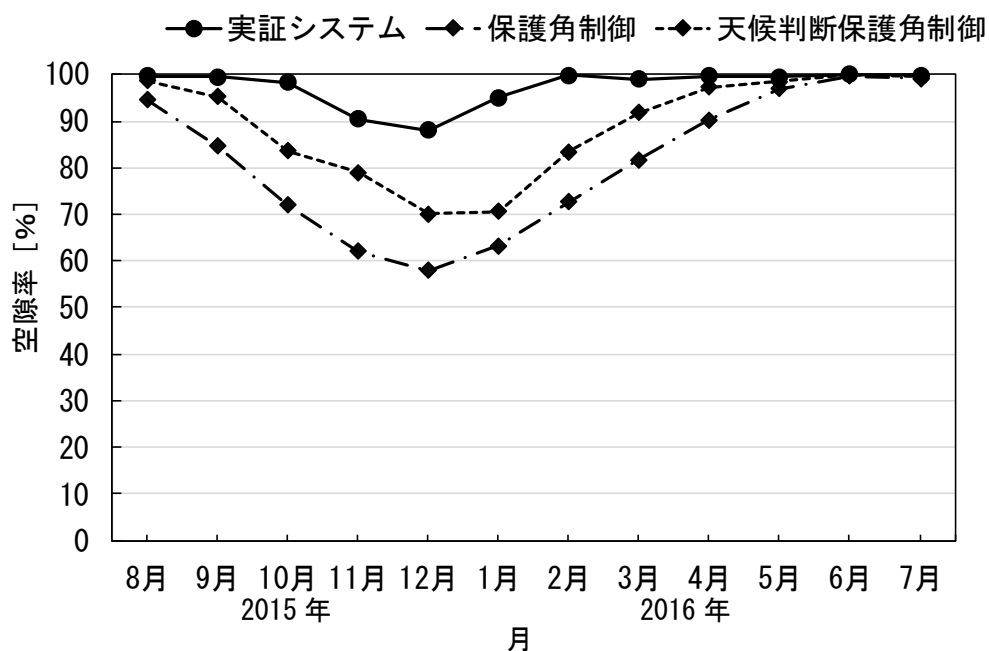


図 4.13 月別の平均空隙率 (南西窓面)
Fig.4.13 monthly average porosity (South-west window)

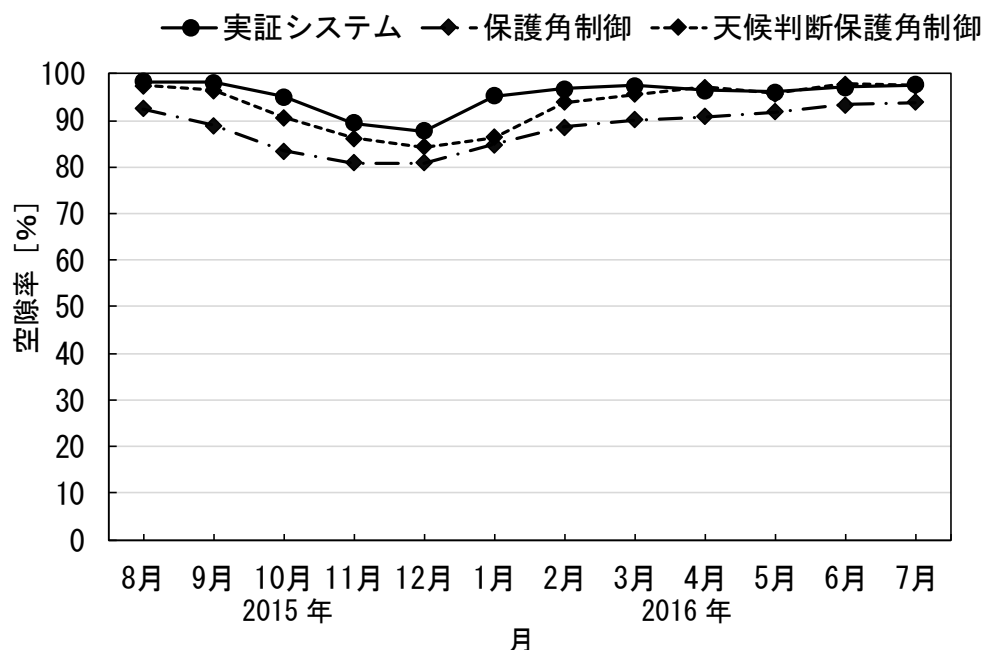


図 4.14 月別の平均空隙率（北西窓面）
Fig.4.14 monthly average porosity (North-west window)

これらの結果から、今回検討した実証システムは、窓面に設置した CCD カメラによって適切な遮光判定制御が可能であり、南西窓面においては、10 月から翌 3 月にかけて保護角制御に対して約 30%，天候判断のある保護角制御に対しても 15%~25%程度、空隙率が拡大した。北西窓面においても、それぞれ 10%，5%程度拡大できる。北西面は、元々、日射の当たる時間が少ないことから、ブラインドを閉じる必要性が少ない。但し、実証システムにおいて北西面は、隣棟の反射光を検出する時間帯に 30 度で遮蔽する制御が行われており、このため天候判断による保護角制御よりも空隙率がわずかに下回る月があった。

冬期は、太陽高度が低くブラインドの保護角が大きくなることから、空隙率は下がる。また、日没後、全閉状態（空隙率 0%）が発生することからも、平均空隙率は下がる傾向にある。しかしながら、対向建物による遮光などを適切に検知できる実証システムは、空隙率が高く天候判断できる制御方法に比べてもブラインドがより開放状態にあることが分かる。

実証システムの年間稼働実績は付録の付 1.F ビルにおけるブラインドの月別代表稼働実績に示す。

4. 3. 2 等価メラノピック照度による評価

WELL 認証(ver1)において、サーカディアンリズムのための照明環境を評価する方法として、等価メラノピック照度[EML]の測定が挙げられている。等価メラノピック照度を算出するには、実測された照度にメラノピック照度比率を乗ずる。また、メラノピック照度比率は、

5nm 毎に測定した分光分布に 490nm をピークに持つメラノピック曲線と 555nm にピークを持つ視感度曲線によって得られる波長ごとの強度をそれぞれ積算し、メラノピック反応の合計値を視覚反応の合計で除し、指数 1.218 を乗ずることによって求められる⁴⁻¹⁾。

評価は、上記によって求められた等価メラノピック照度 250EML 以上が毎日少なくとも 4 時間保たれるかどうかで判定される⁴⁻¹⁾。

今回、分光計を用いて図 4.15 に示す位置（高さ 1,200mm）において南西面、北西面に向けた鉛直面の等価メラノピック照度を測定した。測定は、2018 年 6 月 29 日（晴天日）の正午及び 2018 年 7 月 27 日（曇天日）の 13 時の 2 回行った。

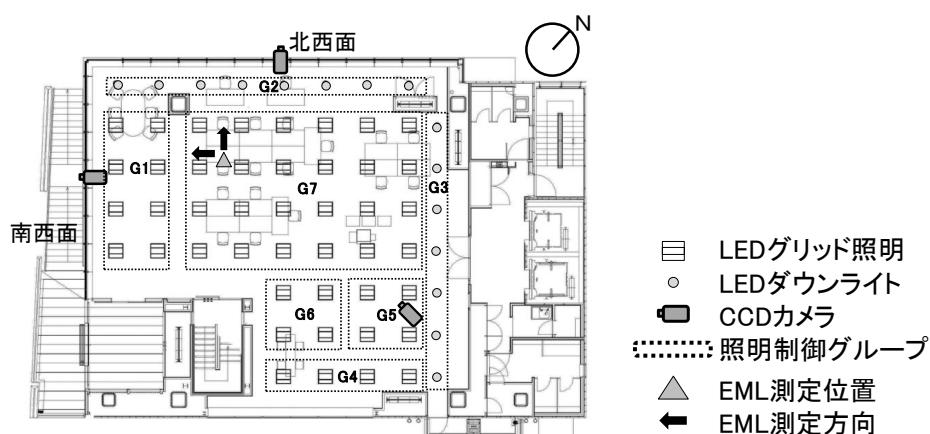


図 4.15 測定位置図

Fig.4.15 Measurement point on floor plan

測定結果を、図 4.16、図 4.17 に示す。

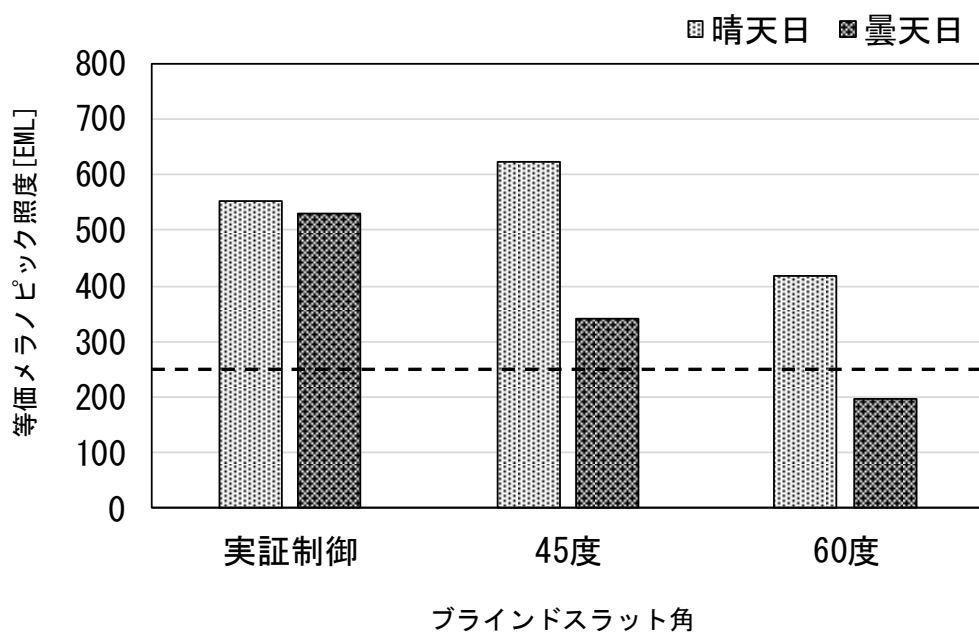


図 4.16 スラット角度別等価メラノピック照度（南西面）

Fig.4.16 Equivalent melanopic lux at slat angles (South-west window)

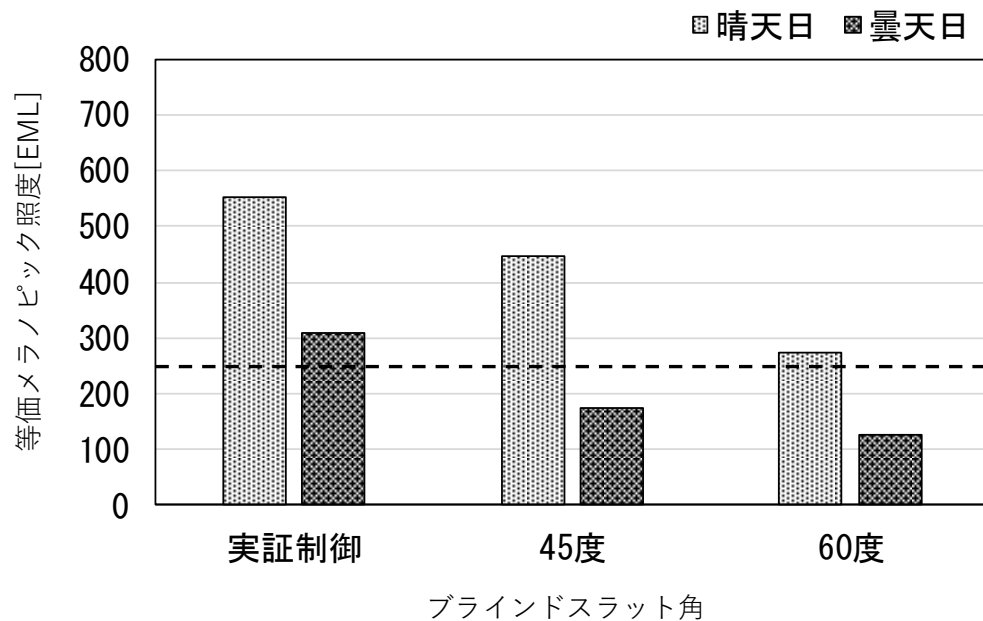


図 4.17 スラット角度別等価メラノピック照度（北西面）
Fig.4.17 Equivalent melanopic lux at slat angles (North-west window)

実証システムによるブラインド制御は、南西面、北西面ともにいずれも 15 度であった。晴天日は、南西窓面には直射光が当たっており、45 度、60 度とスラット角を深くしても透過する昼光が多く、いずれも基準値 250EML を大きく上回っていた。一方、北西面には、直射光、反射光共に当たっていなかったが、隣棟に反射する昼光によって 250EML を上回る結果となった。

一方、曇天日は、スラット角が深くなるにつれ、等価メラノピック照度も低くなった。曇天日は、ブラインド面を通過する昼光の量が空隙率に直接影響を受けることから、スラット角の小さい方が等価メラノピック照度を得やすい結果となった。

以上の結果から、実証システムは、サーカディアンリズムに必要とされる等価メラノピック照度の確保にも寄与できることが確認できた。

4. 4 第4章のまとめ

第4章では、第2章、第3章で得られた成果を組み合わせた、照明とブラインドの協調制御について検討した。

第1節では、第2章で提案した輝度画像と明るさ画像を基に明るさ感を確保するアンビエント照明の制御手法と、今回、新たに提案した窓面の明るさを抑制するブラインドのスラット角制御手法を利用した、照明とブラインドの協調制御のロジックを検討した。

第2節では、実際のオフィスに本実証システムを導入し、実証実験を行い、システムの妥当性について以下の結論及び知見が得られた。

- (1) 屋外輝度画像を基にブラインドのスラット面輝度を予測し、屋外輝度画像にブラインドの予測輝度を重ね合わせる手法と、重ね合わせ画像から窓面の明るさを閾値内に抑える明るさ判定制御手法を検討し、実証システムを構築した。
- (2) 照明の一定照度確保制御下においては、窓面輝度が高い時に、明るさ感を低下させる可能性があることを示した。一方、実証システムにおいては、輝度対比を考慮した制御であるため、窓面輝度の大小に関わらず一定のNB値を維持しつつ調光制御できることを示した。
- (3) 窓面が高輝度時、明るさ判定制御によって、窓面輝度を低減させるスラット角制御が可能であることを実証的に示した。
- (4) 昼光の変動に合わせて、窓面輝度を低減させるスラット角制御と、ブラインド開放時よりも少ない照明電力で明るさの目標NB値を維持する照明制御が可能であることを実証的に示した。
- (5) 明るさ判定制御の有無による比較実験によって、窓面の明るさを抑えながらも照明消費電力を4%削減することが確認できた。

第3節では、昼光享受に関する性能評価を検討し、以下の結論が得られた。

- (1) ブラインド制御の在来手法である、保護角制御及び天候判断が可能な保護角制御と比べて、本実証システムは、窓面毎に遮光要否を判断できることから年間を通して空隙率が高く、ブラインドを適切に開放できる時間を長くできることを明らかにした。
- (2) ブラインドを開放することで、閉鎖時よりも高い等価メラノピック照度を得られることが確認できた。
- (3) 実証システムは、CCDカメラを利用することによって、周辺建物の状況を考慮しながら、日射遮蔽の要否を適切に判断できることから、昼光利用による省エネルギー効果が得られる他、年間を通じて、ブラインドを開放できる機能を有しており、眺望や等価メラノピック照度など、心理的な面でも効果が期待できる。

【第 4 章の参考文献】

4-1) WELL Building Standard® v1 2015 年 9 月

4-2) 気象庁 各種データ・資料 角の気象データ検索

<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, (2018/8/12 閲覧)

第 5 章

協調制御を構築するための設計法の提案

5. 1 協調制御システム構築のための課題

これまでに述べた照明とブラインドの協調制御システムの実用化と普及のために設計上の課題を次に挙げる。

- ・明るさ感の制御目標値を与える評価エリアの選定と制御目標の決定方法
- ・昼光の変動やブラインドスラット角が変化した際の空間輝度の簡易な予測方法

評価エリアの選定のためには、ひとが視野内のどの部分から空間の明るさ感を判断しているのかを把握する必要がある。このためには、視覚に相当する画像で評価することが適切であり、画像測光により評価エリア設定の考え方を整理する必要がある。

2016 年に建築学会から発刊された照明環境規準の平均輝度の推奨値や多数のタスク・アンビエント照明を採用しているオフィスなどの実測調査結果をもとに、制御目標の参照値を検討する必要がある。

また、昼光の変動やブラインドのスラット角が変化した際に、室内空間の輝度がどの程度変化するのか、また、人工照明によって補うべき壁面や天井面の輝度がどの程度必要であるのか、簡易に予測する手法が必要であると考ええる。

本章においては、以下の流れによって検討を行う。

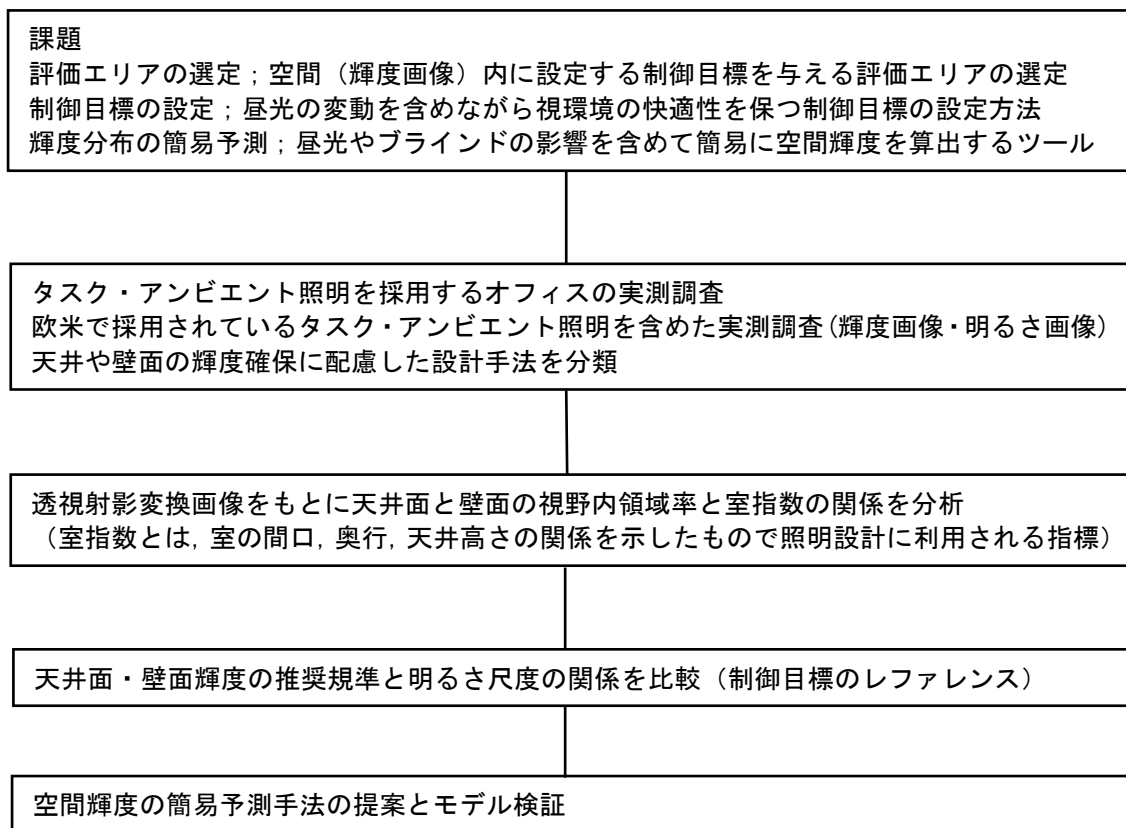


図 5.1 本章の流れ

Fig.5.1 Flow diagram of this chapter

5. 2 タスク・アンビエント照明を採用するオフィスの実測調査

実証システムの運用において、最も重要なことは、明るさ感の制御目標値を与える評価エリアをどこに設定するかである。これは、ひとが空間のどの部分から空間の明るさ感を判断しているかを明らかにするものである。

照明のパーソナル化が求められる中で、オフィスの照明はタスク・アンビエント照明方式が注目されている。この場合、空間の明るさ感に影響するアンビエント照明の方式の検討が必要となる。

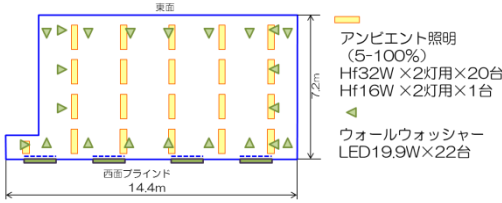
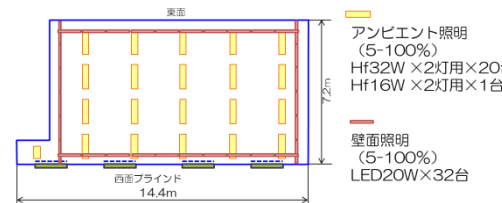
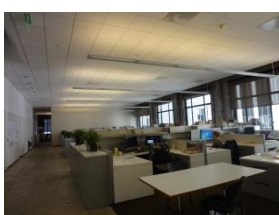
そこで、2013 年及び 2014 年にタスク・アンビエント照明が多く採用される欧米の事例を調査した。調査の内容は、執務時における人工照明と昼光の併用状態における輝度画像および明るさ画像の取得である。また、事務所のほか、ホテル、学校、駅舎、美術館など多岐にわたる空間を調査した。調査結果の画像一覧を付録の付 2. タスク・アンビエント照明を採用したオフィスなどの輝度測定及び明るさ画像評価に示す。

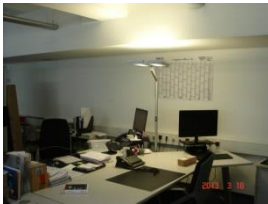
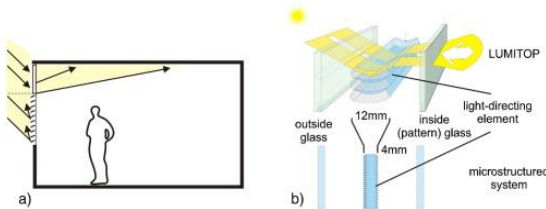
調査結果から、欧州・米国におけるタスク・アンビエント照明を採用したオフィスの壁面輝度は、 $50\text{cd}/\text{m}^2 \sim 100\text{cd}/\text{m}^2$ 程度であるのに対して日本の事例は $100\text{cd}/\text{m}^2$ 以上と高い値を示している。欧米におけるアンビエント照明の方式は、図 5.2 に示すようにペンダント式が多く採用されている。これは、器具の上下に配光を持ち、天井面と床面を照射することができる照明器具である。上向き配光とすることにより、天井面の輝度を保つ効果がある。その理由としては、オフィス空間において執務者の視野に占める割合のうち天井面の占める割合が高いとされており、この部分の輝度を適切に保つことで、空間の明るさ感を確保していると考えられる。この方式を含めた天井面や壁面の輝度の確保を考慮した設計方法を表 5.1 に示す。



図 5.2 ペンダント照明の事例
Fig.5.2 Example of suspended lighting

表 5.1 輝度に配慮した照明設計手法
Table.5.1 Lighting design method considertaing luminance

輝度配慮 対象	照明手法	備考
壁面 1	壁面照明（ウォールウォッシャー）  平面図 壁面を照らす照明としてウォールウォッシャー型ダウンライトを設置する手法。	ウォールウォッシャータイプであるが、光の陰影が出るため、配置する照明器具のピッチに注意が必要。
壁面 2	壁面照明（ライン型）  平面図 壁面に設置した直管型器具をライン上に配置し、壁面を照らす照明手法。	壁面を均一に照らすことができるが、ウォールウォッシャータイプに比べて高価になることが多い。
天井面 1	吊り下げ照明  吊り下げ照明の上方向と下方向への両配光を持つ器具によって、天井面と机上面に対して光を与える手法。上・下の配光比率は 70%・30%が理想的と言われている。	海外と比べて日本は、天井高さが低いいため吊り下げ型器具の採用が少ない。また、地震による揺れを抑えるための耐震措置に配慮しなければならない。

天井面 2	スタンドアップ照明  上下配光を持つスタンド型の照明器具によって、天井面と机上面を照らす照明手法。 在席エリアのみ点灯することができる。	天井高さが低い室内においても適用が可能。家具との取合いに配慮して計画する必要がある。
天井面 3	ライトシェルフ  建物外壁あるいは写真に示すような室内側にライトシェルフを設置して、昼光を天井面に反射させ、室内奥側へ昼光を導く手法。	晴天日の直射光しか利用できない。外壁のファサードデザインと調和する配慮が必要である。
天井面 4	光天井  天井面全体を人工照明あるいは昼光などによって均質に発光させる手法。	階層構造の建物では執務室上部を採光口とすることが難しい。
天井面 5	偏光ガラス  図に示すように昼光の放射向きを変えることができる昼光制御ガラスを用いて昼光によって天井面を照らす手法。	昼光を天井面の明るさ感向上に利用する方法。

タスク・アンビエント照明を採用するオフィスにおいては、アンビエント照明によって天井面や壁面の輝度を適度に確保することより、空間の明るさ感を確保する事例が多く見られた。今後、日本においても、働き方の変化によって、仕事の内容に合わせて働く場所を変える ABW(Activity Based Working) やフリーアドレスのようなオフィスが増えてくることが予想され、その場合には、タスク・アンビエント照明がエネルギー消費の面では合理的な考え方であり、今後、普及が見込まれる。その際には、このような照明手法や輝度分布が参照できる貴重なデータとなる。

5. 3 評価エリアの設定（画像内の天井・壁の面積比率と室指数の関係）

事例調査の結果、天井面や壁面を重視する必要があることが明らかになったが、空間のサイズによって天井面や壁面の見え方が異なる。天井、壁のどちらに配慮した照明計画とするか、空間の見え掛かりと照明設計で使用する室指数の関係を基に指標化することを検討した。

見え掛かりである視野内における天井面や壁面の割合を幾何学的に評価するために、3次元空間の見え方を物理モデルに最も近く2次元画像化する透視投影変換方法を利用し、当該画像に占める天井面や壁面の面積比率を算出することを試みた。

透視投影モデルを図 5.3 に示す。視点 $Z_v=0$ 、投影面 $Z_v=d$ における透視投影変換によって、点 A (x_v, y_v, z_v) と投影面上点 A' (x_d, y_d, z_d) の関係は式(5.1)で表される。

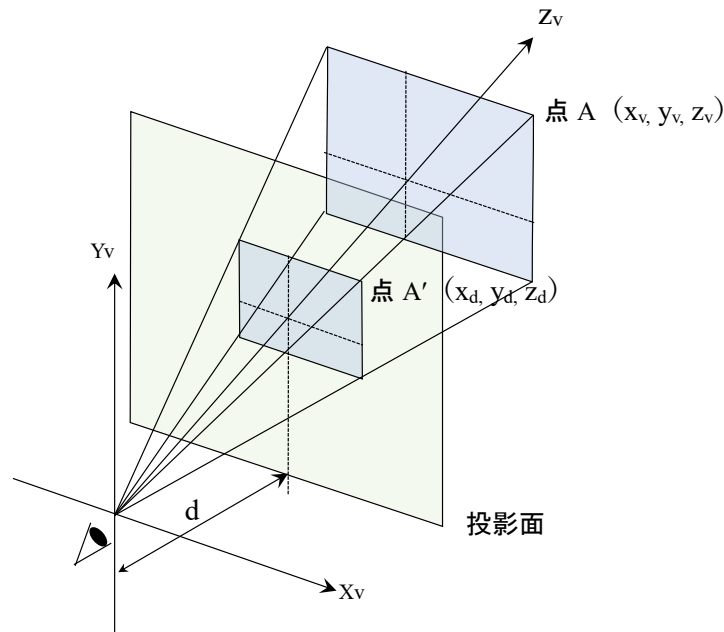


図 5.3 透視投影モデル

Fig.5.3 Perspective model

$$\begin{aligned} x_d &= \frac{x_v}{z_v / d} \\ y_d &= \frac{y_v}{z_v / d} \\ z_d &= d \end{aligned} \quad \dots (5.1)$$

本透視投影モデルを利用して、さまざまなサイズの室内空間の見え掛かりから、投影面画像内に占める天井面及び壁面の面積比率を求めた。図 5.4 に間口の狭い部屋(a)，間口の広い部屋(b)の投影モデルのイメージを示す。今回，視野角を左右，上下方向ともに 100 度とした。これは，両眼にて視認できる範囲を仮定したものである。また，投影面までの距離は，視野範囲になるようにその都度設定して計算を行った。

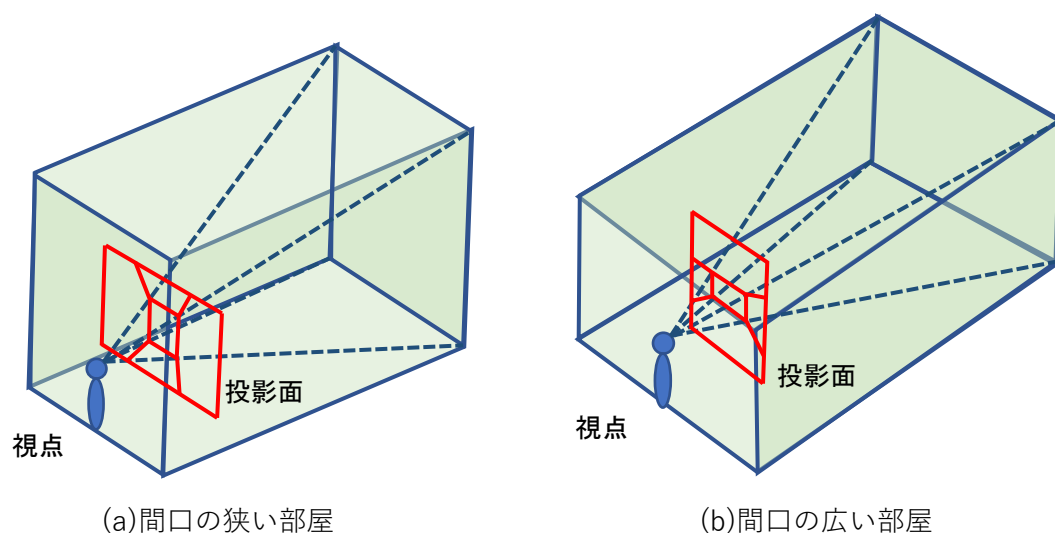


図 5.4 部屋サイズによる透視投影モデルのイメージ図

Fig.5.4 Images of perspective model in different size of the room

間口の狭い部屋においては，左右方向の視覚限界位置に投影面を設置し，間口の広い部屋においては，投影面は上下方向の視覚限界位置で設定した。投影画像内の天井面，壁面の面積比率を算出し，部屋の間口，奥行きによる視野内に占める面積の関係を明らかにした。今回は執務室や会議室を想定し，天井高さ 3m，視点高さを 1.5m に固定し，間口，奥行きのみを変化させた。代表的な計算結果を表 5.2 に示す。計算結果には，室指数を併記した。室指数は，光束法による作業面（被照面）平均照度を算出する際に用いる照明率を求めるために必要なもので，式(5.2)によって示される。

$$\text{室指数} = \frac{\text{間口} \times \text{奥行}}{(\text{間口} + \text{奥行}) \times \text{被照面から光源までの高さ}} \quad \dots (5.2)$$

室指数は，間口，奥行，天井高さの関係を示しており，図 5.5 に示すように一般に天井が高い場合または間口，奥行が狭い場合は室指数が小さく，天井が低い場合または間口，奥行が広い場合は室指数が大きくなる。

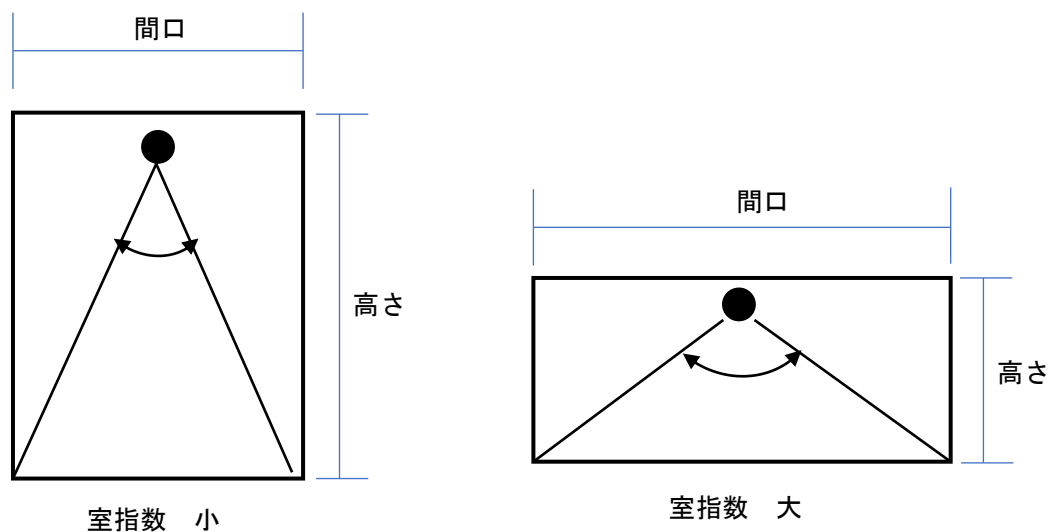


図 5.5 室断面と室指数の関係

Fig.5.5 Relation of room section plan and room index

図 5.6 に天井高さ 3m の場合の室指数と面積比率の相関図を示す。この結果から、室指数 2.0 以上の場合、天井面の面積比率が大きくなることから、壁面よりも天井面に対して配慮した人工照明計画と制御評価エリアの設定が重要となる。逆に、室指数 2.0 未満の場合、壁面の見え掛かりの面積が大きくなることから、壁面に対して配慮することが望ましい。

今回、天井、壁面の面積比率と室指数の相関を得ることによって、室指数を基に面積比率を推定することができることから、明るさ感の制御目標値の評価エリアの設定が容易に判別できるようになった。

表 5.2 面積比率 計算結果

Table.5.2 Calculation result on ratio of ceiling and wall area

間口 (m)	奥行 (m)	高さ (m)	室指数	壁の面積比率 (%)	天井の面積比率 (%)
4	4	3	0.67	44.1	28.0
4	10	3	0.95	38.6	30.7
4	15	3	1.05	38.0	31.0
5	5	3	0.83	35.3	32.4
5	10	3	1.11	31.3	34.3
5	15	3	1.25	30.6	34.7
10	5	3	1.11	25.6	37.2
10	10	3	1.67	17.6	41.2
10	20	3	2.22	15.7	43.2
20	10	3	2.22	12.8	43.6
20	20	3	3.33	8.8	45.6
20	40	3	4.44	7.8	46.1
20	50	3	4.76	7.7	46.1
40	20	3	4.44	6.4	46.8
40	40	3	6.67	4.4	47.8
50	25	3	5.56	5.1	47.4
50	50	3	8.33	3.5	48.2

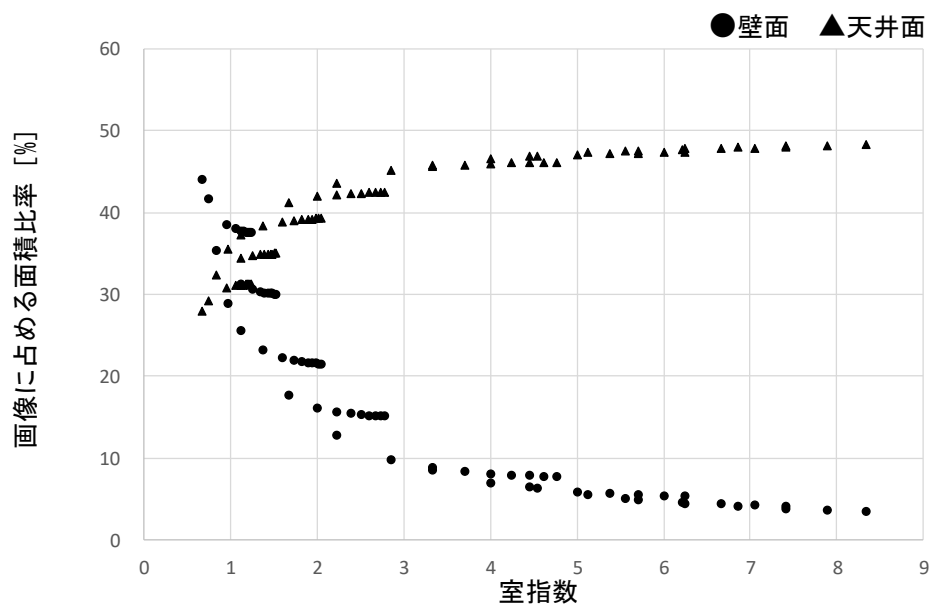


図 5.6 面積比率と室指数の関係

Fig.5.6 Relation of ratio of ceiling and wall area and room index

5. 4 制御目標の設定（設計規準値と明るさ画像の関係）

照明計画においては、適切な照明環境の形成とエネルギー及び経済的合理性を両立することが重要である。適切な照明環境とは、AIJES-L0002-2016 照明環境規準において、①空間及び視対象の明るさが確保されていること、②視覚的な不快感などをもたらすような照明条件が避けられていること、③室用途や行為に合わせた雰囲気が形成されていること、などが必要とされている⁵⁻¹⁾。特に、空間の明るさは、作業面照度からでは推定できず、輝度を用いて推定する必要があるとされており⁵⁻¹⁾、当規準においては、アンビエント照明によって得られる空間の明るさを担保するための推奨値として、壁面と天井面の平均輝度が示されている⁵⁻¹⁾。これらの推奨値は、今回の実証システムにおいて、人工照明の計画の参考値となると考えられる。表 5.3 に代表的な設計規準を示す。

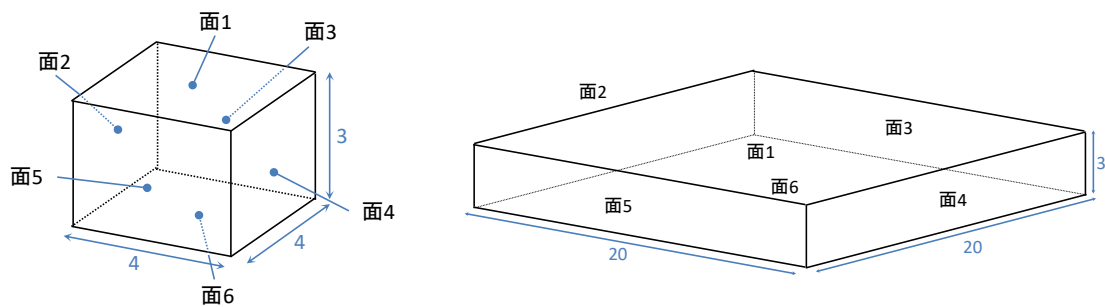
表 5.3 照明環境の設計規準-事務（抜粋）⁵⁻¹⁾

Table.5.3 Design standards for lighting environment – office

作業，活動または用途	対応する室または空間の例	平均輝度 壁面 (cd/m ²)	平均輝度 天井面 (cd/m ²)
設計，製図	設計室，製図室	30	20
集中監視・制御	集中監視室・制御室	20	15
事務	事務室	20	15
VDT 作業，計算	計算機室	20	15
会議，集会	会議室，集会室	15	10
応接	応接室，役員室	20	15
食事	食堂	15	10
談話，喫茶，喫煙，湯沸	談話室，喫茶室，ラウンジ	10	7.5
昇降歩行	階段	7.5	5
水平歩行	廊下，通路	5	3

第 2 章において、被験者の主観評価実験を通して壁面の NB 値の平均値を利用して明るさ感の適正範囲を示した。今回、設計規準値と明るさ画像の相関を得るために、規準で示された平均輝度を一様に持つ空間の輝度画像を作成し、明るさ画像に変換した。室モデルは、図 5.7 に示す間口の狭い部屋（間口 4m×奥行 4m×高さ 3m）と間口の広い部屋（間口 20m×奥行 20m×高さ 3m）を設定した。視点位置は面 5 の中央とし視点高さ 1.5m を想定し、面 3 に正対する注視点として画像作成を行った。

規準で示された数値から、面 1~5 の輝度及び床面に相当する面 6 の輝度を表 5.4 のように設定した。面 6 は規準に示されていないため床面反射率 10%、平均照度 250 lx 程度の環境下での輝度を想定した。



(a)間口の狭い部屋（モデル 1）

(b)間口の広い部屋（モデル 2）

図 5.7 計算モデル

Fig.5.7 Model for calculations

表 5.4 室内面に対する設定輝度

Table.5.4 Set value of luminance for room surface

	天井面 面 1	壁面 面 2	壁面 面 3	壁面 面 4	壁面 面 5	床面 面 6
設定輝度 (cd/m ²)	15	20	20	20	20	7.5

表 5.5 に上記設定輝度をモデル室に与えた輝度画像及び明るさ画像と面毎の平均 NB 値を示す。また、併せて画像全体の平均 NB 値を参考に記す。

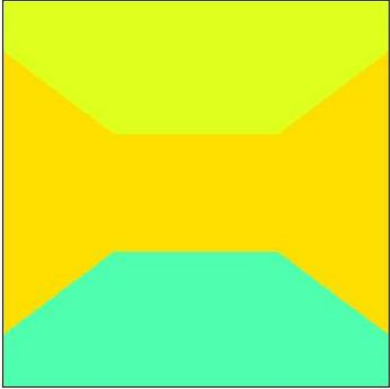
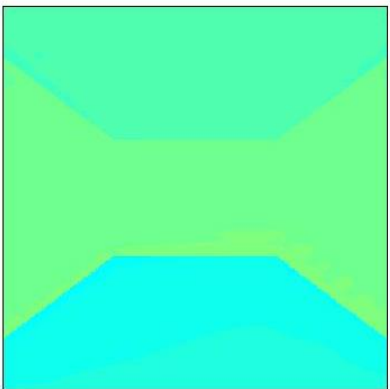
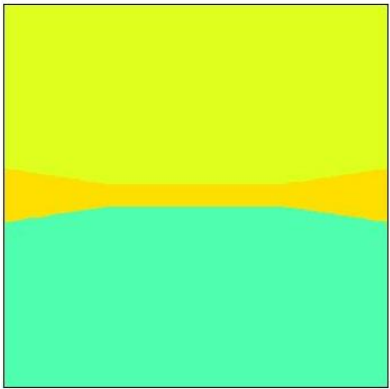
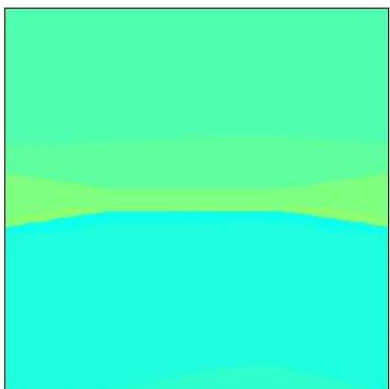
画像内に占める壁面や天井面の面積比率は、表 5.2 に示した通り、モデル 1 では、壁面 44.1%，天井面 28.0%，モデル 2 では、壁面 8.8%，天井面 45.6%であり、見え掛かり上、モデル 1 では壁面、モデル 2 では天井面が大きな割合を占めている。

計算結果から、モデル 1，モデル 2 とともに同じ傾向を示しており、壁面の平均は、6.7NB，6.9NB である。一方、第 2 章で実施した主観評価実験結果で得られた知見では、好感・肯定的な評価の閾値は、7.0NB（昇順），7.3NB（降順）であり、比較すると、規準はこれより少し小さい値であることが分かる。また、天井面の平均は、6.3NB，6.4NB であり、おおきな差はみられなかった。モデル 1，モデル 2 の壁面は同じ輝度であるにも関わらず、NB 値が異なるのは、天井面や床面との輝度対比の違いによるものである。

視野に占める面積は、モデル 1 は壁面が多く、モデル 2 は天井面が多いため、画像全体の平均は、モデル 1 の方がわずかに高くなった。これから、制御目標値の設定は、評価エリアの見え掛かりにも留意する必要があることが確認できた。

表 5.5 モデル室の輝度画像と明るさ画像

Table.5.5 Luminance image and brightness image of model

	輝度画像	明るさ画像
モデル 1	 [cd/m²]	 [NB] 天井面平均 6.3NB 壁面平均 6.7NB 床面平均 5.6NB 画像平均 6.3NB
モデル 2	 [cd/m²]	 [NB] 天井面平均 6.4NB 壁面平均 6.9NB 床面平均 5.8NB 画像平均 6.2NB

5. 5 空間輝度の簡易予測手法の提案

照明とブラインドの協調制御システムの実用化と普及に向けた設計上の課題として、簡易に室内の輝度を予測する手法の検討が挙げられる。これは、昼光の変動やブラインドのスラット角が変化した際に、室内空間の輝度がどの程度に变化するのか、また、人工照明によって壁面や天井面の輝度がどの程度補えるのかを簡易に予測する手法である。

輝度分布を3次元シミュレーションによって、精緻に予測する手法も開発、実用化されているが、3次元モデルの作成やシミュレーションそのものに時間がかかってしまい、制御システムの構築には手間がかかり過ぎる。そこで、本章においては、人工照明と窓面輝度の想定によって、室内輝度分布を簡易に予測する手法を検討した。

まず、光源を分け室内の輝度を算出することを検討する。図5.8及び図5.9に示すように、室内の輝度は、人工照明によって与えられる輝度、窓面から入射する昼光の直接輝度、入射した昼光の間接輝度の和である。

室内輝度 (壁面, 天井面)	=	人工照明 による輝度	+	昼光による 直接輝度	+	昼光による 間接輝度
-------------------	---	---------------	---	---------------	---	---------------

図 5.8 室内輝度算出方法

Fig.5.8 Methodology of luminance calculation of the room surface

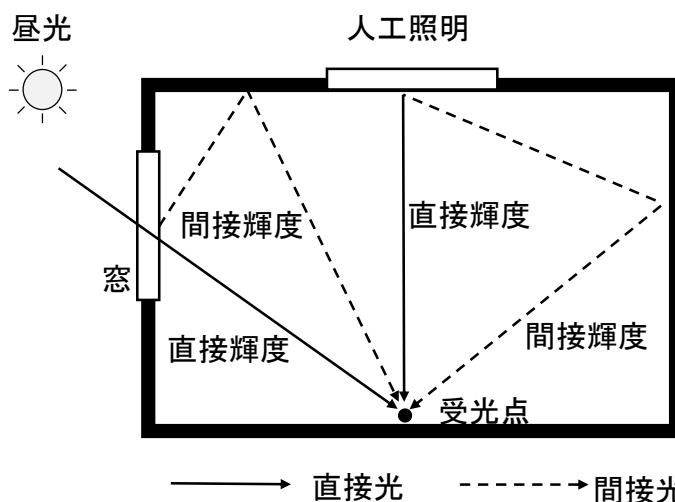


図 5.9 人工照明と昼光によって与えられる輝度のイメージ

Fig.5.9 Image of luminance illuminated by artificial lighting and daylight

人工照明によって与えられる輝度は、照明器具の特性をあらわす照明率に着目し、輝度算出方法について検討する。また、側窓を有する室内の昼光による輝度を窓面輝度の想定によって簡易に算出する方法を検討する。これらを利用することによって、図5.10に示す手順により、人工照明と昼光照明の併用時における壁面、天井面輝度と人工照明の適切な出力を求めることが可能となる。以下に、その概要と検証結果を示す。

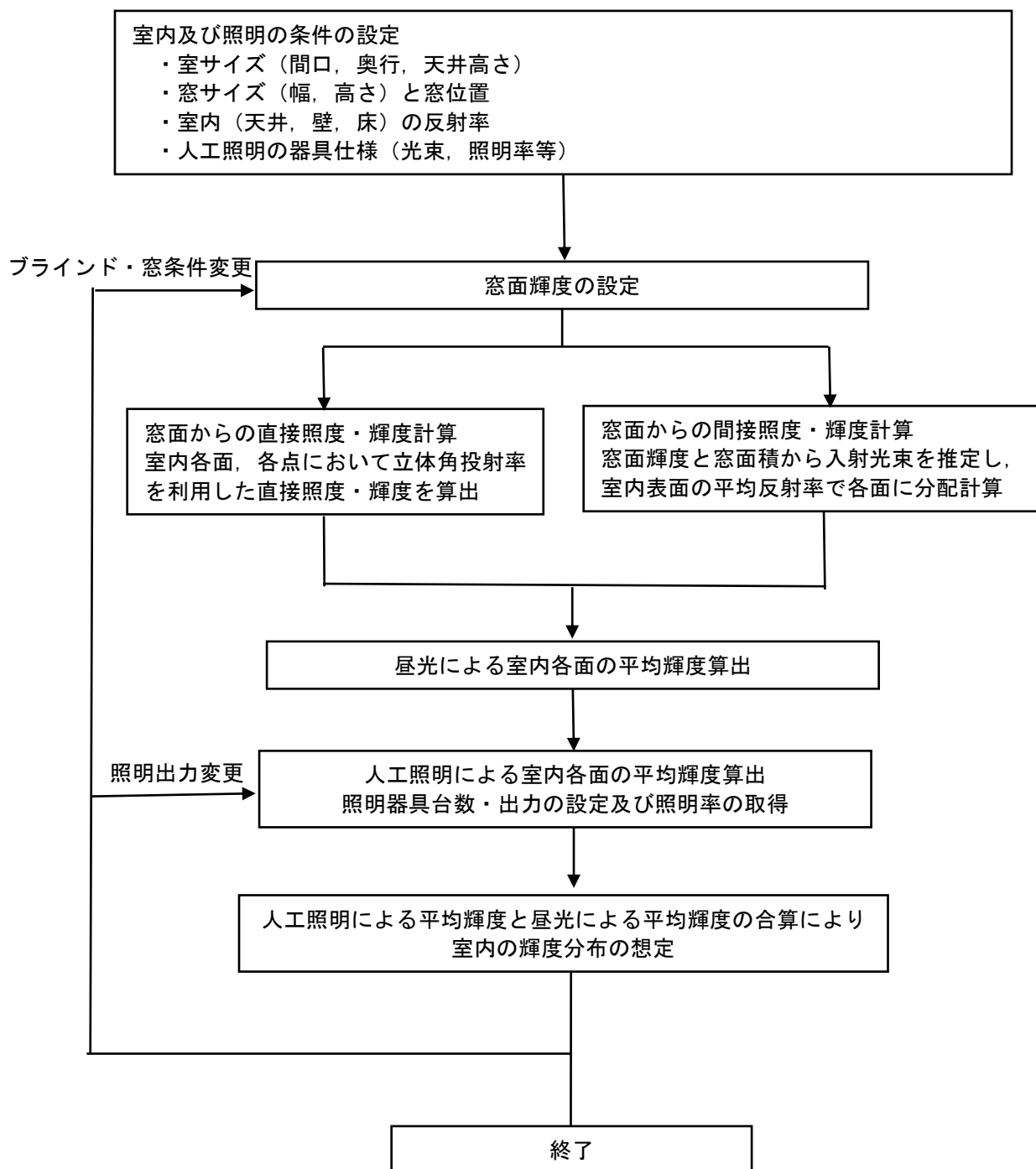


図 5.10 人工照明と昼光照明併用時の輝度予測手順

Fig.5.10 Flow diagram of luminance calculation under utilization of artificial and day lighting

5. 5. 1 照明率を利用した人工照明使用下における平均輝度算出方法

照明率は、室内に設置された照明器具の光源光束の総和に対する作業面に入射する光束の比で表され、屋内照明設計の重要な指標の一つである。2012 年以降、LED 照明器具が多く採用されるようになり、作業面の平均照度を正確に予測するためにも、照明率及び固有照明率の計算方法について JIS C 8030 屋内照明器具の照明率表計算方法⁵⁻⁵⁾において規格化された。照明率表の計算条件としては、天井、壁及び作業面からなる空の直六面体の部屋で、室内面は均等拡散の反射面で、照度分布はほぼ一様とする。また、照明器具は点光源とし、その配光は鉛直軸に対して対象であるとしている⁵⁻⁵⁾。

式(5.3)は、天井、壁及び作業面からなる三平面系の相互反射論の基礎方程式である。

$$E_i = E_{i0} + \sum_{j=1}^4 f(i, j) \times \rho_j \times E_j \dots (5.3)$$

ここで、添字 i, j は、1：天井、3：壁、4：作業面を示す

E_i	：	面 i の照度 ($i=1, 3, 4$)
E_{i0}	：	面 i の直接照度 ($i=1, 3, 4$)
ρ_j	：	面 j の反射率 ($j=1, 3, 4$)
E_j	：	面 j の照度 ($j=1, 3, 4$)
$f(i, j)$	：	面 j の面 i に対する形態係数 ($i, j=1, 3, 4$)

式(5.3)において、直射照度 E_{i0} を固有直射照明率 u_{i0} に、照度 E_i を固有照明率 u_i にそれぞれ置き換えると、式(2)が得られる⁵⁻⁵⁾。

$$\begin{pmatrix} 1 & -\frac{K}{2}(1-\alpha) \times \rho_3 & -\alpha\rho_4 \\ 1-\rho_1 & 1-\rho_3 & 1-\rho_4 \\ -\alpha\rho_1 & -\frac{K}{2}(1-\alpha) \times \rho_3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_3 \\ u_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{10} \\ 1 \\ u_{40} \end{pmatrix} \dots (5.4)$$

└──┘

行列 A

ここで、

K	：	室指数 $(X \times Y) / (h \times (X+Y))$
h	：	作用面からの照明器具の取付高さ
X	：	作業面の長辺
Y	：	作業面の短辺
u_i	：	各面の固有照明率 ($i=1, 3, 4$)
u_{i0}	：	各面の固有直射照明率 ($i=1, 3, 4$)
ρ_j	：	面 j の反射率 ($j=1, 3, 4$)
E_j	：	面 j の照度 ($j=1, 3, 4$)
α	：	面 1 の面 4 に対する形態係数 $f(4, 1)$

ここで式(5.4)の両辺に行列 A の逆行列を乗ずることで、固有照明率 u_1 , u_3 , u_4 は式(5.5)で表せる。

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_3 \\ u_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{K}{2}(1-\alpha) \times \rho_3 & -\alpha\rho_4 \\ 1-\rho_1 & 1-\rho_3 & 1-\rho_4 \\ -\alpha\rho_1 & -\frac{K}{2}(1-\alpha) \times \rho_3 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} u_{10} \\ 1 \\ u_{40} \end{pmatrix} \quad \dots (5.5)$$

式(5.5)で必要となる天井面固有直射照明率 u_{10} 及び床面固有直射照明率 u_{40} は、照明器具メーカーが開示する照明率表の「直射照明率、照明器具効率の上方光束・下方光束」の 3 項目から求められる。

よって、照明率 U_i は、式(5.5)で得られた固有照明率を用いて、式(5.6)によって求められる。

$$U_i = \eta \times u_i \quad \dots (5.6)$$

ここで、

η : 器具効率

式(5.6)により導出された照明率 U_i を用いて、平均照度 E_i 及び輝度 L_i が次式(5.7), (5.8)により求められる。

$$E_i = \frac{\Phi \times U_i \times M \times N}{X \times Y} \quad \dots (5.7)$$

$$L_i = \frac{E_i \times \rho_i}{\pi} \quad \dots (5.8)$$

ここで、

φ : 照明器具 1 台当たりの光源光束

M : 保守率

N : 照明器具台数

これらを国土交通省設計計算書フォーマットに機能追加（表 5.6）することで、天井・壁・床面の平均輝度と壁・天井面の平均照度が計算できる表計算ソフトを作成した。

表 5.6 照度・輝度算出シート

Table.5.6 Calculation sheet luminance of ceiling and wall area

照度・輝度計算書										建物名称										平成 年 月 日									
階数	室 名	照明器具形式	器具又は ランプ 光束 F [lm]	設計 照度 E [lx]	室 の 大 き さ				固有照明 率又は 照明率 U	保 守 率 M	器具数 [台] 又はランプ 数 [本] N	最 終			器具効率		直射照明率 (0～1)	照 度		輝 度									
					間口 X[m]	奥行 Y[m]	面積 A[m ²]	高さ Z[m]				照度 E [lx]	台数 [台]	上方光束 [%]	下方光束 [%]	壁面 [lx]		天井面 [lx]	床面 [cd/m ²]	壁面 [cd/m ²]	天井面 [cd/m ²]								
1F	事務室	LRS3-6300LM-LX	6,300	750	21.4	7.7	164.8	2.7	0.87	良い	0.81	27.8	28	754	28	0	100	0.78	1168.4	257.3	25.0	61.0	24.3						
1F	事務室	LRS3-6300LM-LX	6,300	750	14.2	7.7	109.3	2.7	0.83	良い	0.81	19.4	20	775	20	0	100	0.74	1070.4	327.6	25.9	68.5	27.1						
1F	会議室	LRS3-6300LM-LX	6,300	500	4.6	7.7	35.4	2.7	0.71	良い	0.81	4.9	6	614	6	0	100	0.61	496.0	480.0	20.8	57.9	26.3						
1F	廊下	LRS1-1900LM-LX	1,900	100	43.2	1.8	77.8	2.5	0.52	普通	0.63	12.5	12	96	12	0	100	0.43	36.1	167.5	3.3	9.2	5.2						

機能追加部分

5. 5. 2 側窓を有した室内の昼光利用時における平均輝度算出方法

図 5.11 に示す側窓を有する室において、窓面を通して入射する昼光によって得られる壁面や天井面の輝度を簡易に算出する方法を検討する。窓面にはブラインドが設置されており、不快なグレアを感じない程度に常にブラインドが遮光することで、窓面の輝度分布が均一であると仮定する。

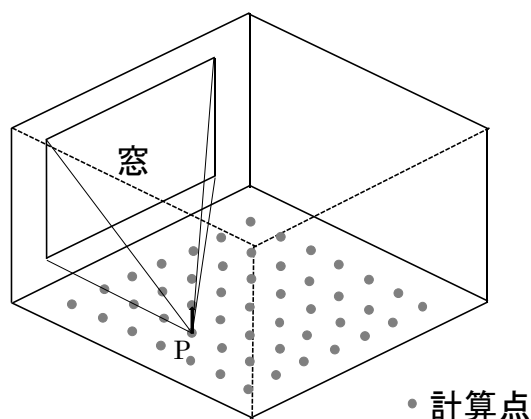


図 5.11 側窓を有する室内計算モデル

Fig.5.11 Calculation model with side window

均一な輝度分布を持つ複数の窓面から得られる直接照度 E_d は、次式で求められる。

$$E_d = \pi \sum_n (Ln Cn) \quad \dots (5.9)$$

ここで、

Ln : 均一輝度 (cd/m²)
 Cn : 立体角投射率

計算対象面の直接照度を図 5.11 で示す計算点毎に求め、算術平均することによって、対象面の平均直接照度が得られる。室内面は均等拡散面であると仮定すると、式(5.8)より直接

照度によって得られる平均輝度が求められる。

次に、昼光の間接照度によって得られる平均輝度を求める。間接照度 E_r は、次式の室内面平均値の式で表せる。

$$E_r = \frac{\rho_m \Phi_d}{S(1 - \rho_m)} \quad \dots (5.10)$$

ここで、

Φ_d : 窓面から室内に入射する昼光による光束 (lm)
 S : 室内の表面積 (㎡)
 ρ_m : 室内表面の平均反射率

室内平均反射率は次式で得られる。

$$\rho_m = \frac{\sum(\rho_i S_i)}{\sum S_i} \quad \dots (5.11)$$

ここで、

ρ_i : 窓面のある壁を除く各表面の反射率
 S_i : 窓面のある壁を除く各表面の面積 (㎡)

また、窓面から室内に入射する昼光による光束は、均等拡散面上の輝度 L と光束発散度 M の関係式から、次式で与えられる。

$$\Phi_d = M \cdot S_w = \pi L \cdot S_w \quad \dots (5.12)$$

ここで、

S_w : 窓面の面積 (㎡)

このようにして対象面の間接照度が得られる。室内面は均等拡散面であると仮定すると、式(5.8)より間接照度によって得られる平均輝度が求められる。

これまで述べた手順によって人工照明と昼光による室内の壁面や天井面の平均輝度を算出することができる。

5. 6 モデル計算と評価

本章で報告した通り、タスク・アンビエント照明方式を採用するオフィス事例を調査し、輝度画像及び明るさ画像を多数取得した。また、透視投影変換を利用して、視野内に占める天井面や壁面の割合を求め、照明設計に広く利用されている室指数との相関を明らかにした。これによって、本提案システムを採用する場合の、制御目標値を与える評価エリアの取り方に関する知見が得られた。

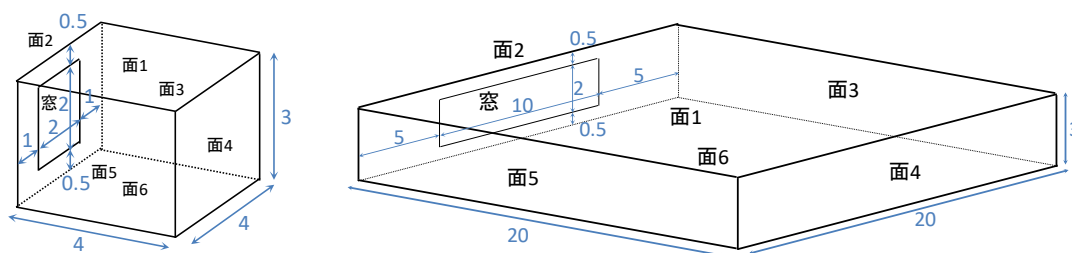
評価エリアとなる壁面や天井面に対して、適切な明るさ感を確保するために、人工照明によって与えるべき輝度を簡易に算出するため、照明器具の持つ照明率データを基に算出する方法を新たに検討した。加えて、側窓を有した室内の平均輝度を簡易に算出する方法を提案し、人工照明と昼光照明の併用時における室内の平均輝度を簡易に算出することが可能となった。

これによって、協調制御システムの制御の予測ができることから、システム構築方法についても明らかにできた。以下に、計算モデルを基に設計方法を具体的に検証する。

5. 6. 1 モデルと計算条件

側窓を有した計算モデルとして、図 5.7 で示した間口の狭い部屋（モデル 1）と間口の広い部屋（モデル 2）と同サイズの部屋で面 2 に側窓を配置した、図 5.12 に示すような部屋を計算モデルとした。

窓は、モデル 1 では幅 2m×高さ 2m、モデル 2 では幅 10m×高さ 2m とし、どちらも壁面の中心に配置した。



(a)間口の狭い部屋（モデル 1）

(b)間口の広い部屋（モデル 2）

図 5.12 計算モデル（窓あり）

Fig.5.12 Calculation model with window

計算条件を表 5.7 に示す。

表 5.7 計算条件

Table.5.7 Calculation conditions

項目	計算条件
反射率	面 1 (天井) : 50%, 面 2~5 (壁) : 30%, 面 6 (床) : 10%
窓面輝度 (cd/m ²)	2,000, 1,000, 500
人工照明	器具 LED グリッド照明 (照明率表は表 5.8 参照) 光束 3,750 lm 照度 床面平均照度 300 lx を設計照度とする
輝度計算点数	各面共に 5×5=25 点

また、今回使用した照明器具の照明率表を表 5.8 に示す。

表 5.8 照明率表

Table.5.8 Utilization factor table

反射率	天井	80%				70%				50%				30%				0%
	壁	70	50	30	10	70	50	30	10	70	50	30	10	70	50	30	10	0%
	床	10%				10%				10%				10%				0%
室指数		照明率 (x 0.01)																ZCM
0.6		46	36	29	24	45	35	29	24	43	34	29	24	41	34	28	24	23
0.8		55	45	38	33	54	44	38	33	51	43	37	33	49	42	37	33	31
1.0		60	51	45	40	59	50	44	39	57	49	43	39	54	48	43	39	37
1.25		66	57	51	46	64	56	51	46	62	55	50	45	59	53	49	45	43
1.5		69	62	56	51	68	61	55	51	65	59	54	50	63	58	53	50	48
2.0		74	68	63	58	73	67	62	58	70	65	61	57	68	63	60	57	54
2.5		77	72	67	63	76	71	67	63	73	69	65	62	71	67	64	61	59
3.0		79	75	71	67	78	74	70	67	76	72	69	66	73	70	67	65	63
4.0		82	78	75	72	81	77	74	71	78	75	73	70	76	74	71	69	67
5.0		84	81	78	75	83	80	77	75	80	78	76	73	78	76	74	72	70
7.0		86	83	81	79	85	82	80	79	82	80	79	77	80	79	77	76	74
10.0		87	85	84	82	86	84	83	82	84	83	81	80	82	81	80	79	76

側窓からの直接照度・輝度を算出するために使用する立体角投射率は、面 1， 3， 5， 6 に対しては、式(5.13)を、窓面と平行した壁面 4 は、式(5.14)を使用した。

$$F_{1, 2} = \frac{z_0}{2\pi\sqrt{z_0^2 + y_0^2}} \left[\tan^{-1} \frac{a - x_0}{\sqrt{z_0^2 + y_0^2}} + \tan^{-1} \frac{x_0}{\sqrt{z_0^2 + y_0^2}} \right] - \frac{z_0}{2\pi\sqrt{z_0^2 + (b + y_0)^2}} \left[\tan^{-1} \frac{a - x_0}{\sqrt{z_0^2 + (b + y_0)^2}} + \tan^{-1} \frac{x_0}{\sqrt{z_0^2 + (b + y_0)^2}} \right] \dots (5.13)$$

$$F_{1, 2} = \frac{a - x_0}{2\pi\sqrt{(a - x_0)^2 + h^2}} \left\{ \tan^{-1} \frac{b - y_0}{\sqrt{(a - x_0)^2 + h^2}} + \tan^{-1} \frac{y_0}{\sqrt{(a - x_0)^2 + h^2}} \right\} + \frac{b - y_0}{2\pi\sqrt{(b - y_0)^2 + h^2}} \left\{ \tan^{-1} \frac{a - x_0}{\sqrt{(b - y_0)^2 + h^2}} + \tan^{-1} \frac{x_0}{\sqrt{(b - y_0)^2 + h^2}} \right\} + \frac{x_0}{2\pi\sqrt{x_0^2 + h^2}} \left\{ \tan^{-1} \frac{b - y_0}{\sqrt{x_0^2 + h^2}} + \tan^{-1} \frac{y_0}{\sqrt{x_0^2 + h^2}} \right\} + \frac{y_0}{2\pi\sqrt{y_0^2 + h^2}} \left\{ \tan^{-1} \frac{a - x_0}{\sqrt{y_0^2 + h^2}} + \tan^{-1} \frac{x_0}{\sqrt{y_0^2 + h^2}} \right\} \dots (5.14)$$

図 5.13 に、式(5.13)，式(5.14)を使用する際の計算点と窓との位置関係を示す。

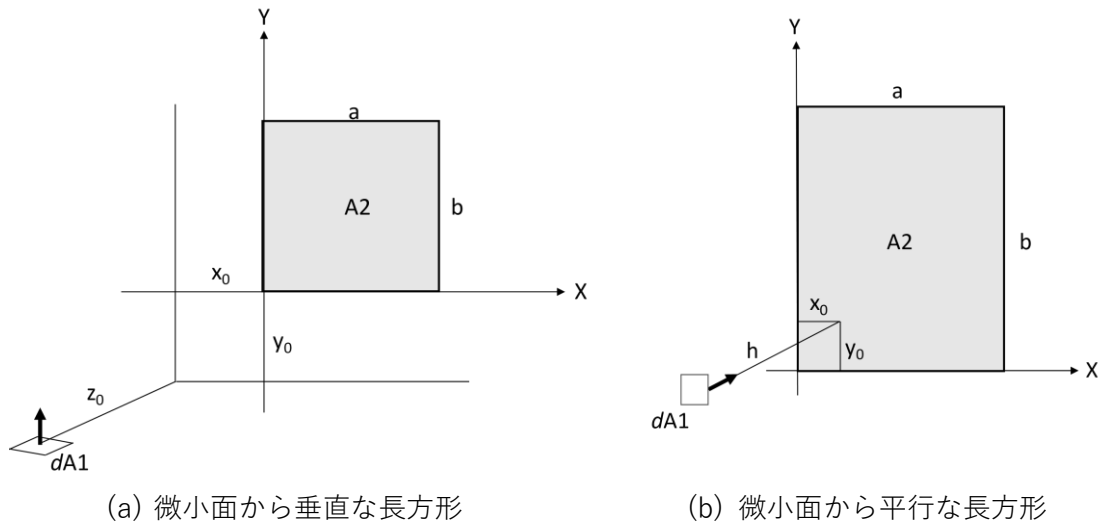


図 5.13 立体角投射率の計算モデル

Fig.5.13 Calculation model of configuration factor

5. 6. 2 計算結果と評価

窓面輝度が 2,000, 1,000, 500cd/m²における, モデル 1, 2 の各面の平均輝度計算結果を表 5.9, 表 5.10, 表 5.11 にそれぞれ示す。

表 5.9 平均輝度計算結果 (窓面輝度 2,000cd/m²)

Table.5.9 Calculation results of average luminance (Window luminance 2,000cd/m²)
(単位 cd/m²)

窓面輝度 2,000 cd/m ²		天井 (面 1)	壁 (面 2)	壁 (面 3, 5)	壁 (面 4)	床面 (面 6)
モデル 1	昼光直接輝度	65.82	—	33.08	36.28	13.16
	昼光間接輝度	21.43	12.86	12.86	12.86	4.29
	人工照明輝度	7.73	17.84	17.84	17.84	9.44
	昼光分合計	87.25	12.86	45.93	49.14	17.45
	総計	94.98	30.70	63.77	66.98	26.89
モデル 2	昼光直接輝度	22.79	—	10.08	8.04	4.56
	昼光間接輝度	8.24	4.95	4.95	4.95	1.65
	人工照明輝度	5.26	13.24	13.24	13.24	9.63
	昼光分合計	31.03	4.95	15.03	12.98	6.21
	総計	36.28	18.18	28.27	26.22	15.84

表 5.10 平均輝度計算結果 (窓面輝度 1,000cd/m²)

Table.5.10 Calculation results of average luminance (Window luminance 1,000cd/m²)
(単位 cd/m²)

窓面輝度 1,000 cd/m ²		天井 (面 1)	壁 (面 2)	壁 (面 3, 5)	壁 (面 4)	床面 (面 6)
モデル 1	昼光直接輝度	32.91	—	16.54	18.14	6.58
	昼光間接輝度	10.71	6.43	6.43	6.43	2.14
	人工照明輝度	7.73	17.84	17.84	17.84	9.44
	昼光分合計	43.63	6.43	22.97	24.57	8.73
	総計	51.36	24.27	40.81	42.41	18.16
モデル 2	昼光直接輝度	11.39	—	5.04	4.02	2.28
	昼光間接輝度	4.12	2.47	2.47	2.47	0.82
	人工照明輝度	5.26	13.24	13.24	13.24	9.63
	昼光分合計	15.51	2.47	7.51	6.49	3.10
	総計	20.77	15.71	20.75	19.73	12.73

表 5.11 平均輝度計算結果（窓面輝度 500cd/m²）Table.5.11 Calculation results of average luminance (Window luminance 500cd/m²)
(単位 cd/m²)

窓面輝度 500 cd/m ²		天井 (面 1)	壁 (面 2)	壁 (面 3, 5)	壁 (面 4)	床面 (面 6)
モデル 1	昼光直接輝度	16.46	–	8.27	9.07	3.29
	昼光間接輝度	5.36	3.21	3.21	3.21	1.07
	人工照明輝度	7.73	17.84	17.84	17.84	9.44
	昼光分合計	21.81	3.21	11.48	12.28	4.36
	総計	29.54	21.05	29.32	30.12	13.80
モデル 2	昼光直接輝度	5.70	–	2.52	2.01	1.14
	昼光間接輝度	2.06	1.24	1.24	1.24	0.41
	人工照明輝度	5.26	13.24	13.24	13.24	9.63
	昼光分合計	7.76	1.24	3.76	3.25	1.55
	総計	13.01	14.48	17.00	16.48	11.18

計算結果を基に、昼光のみによって得られる輝度画像、人工照明を加えた輝度画像及びそれぞれの明るさ画像を表 5.12（モデル 1）及び表 5.13（モデル 2）に示す。表中には、明るさ画像全体の平均 NB 値を参考に記す。また、表 5.14 には、明るさ画像における面毎の平均 NB 値を示す。

表 5.12 昼光と人工照明によるシミュレーション画像（モデル 1）

Table.5.12 Images simulated by daylight and artificial lighting (Model 1)

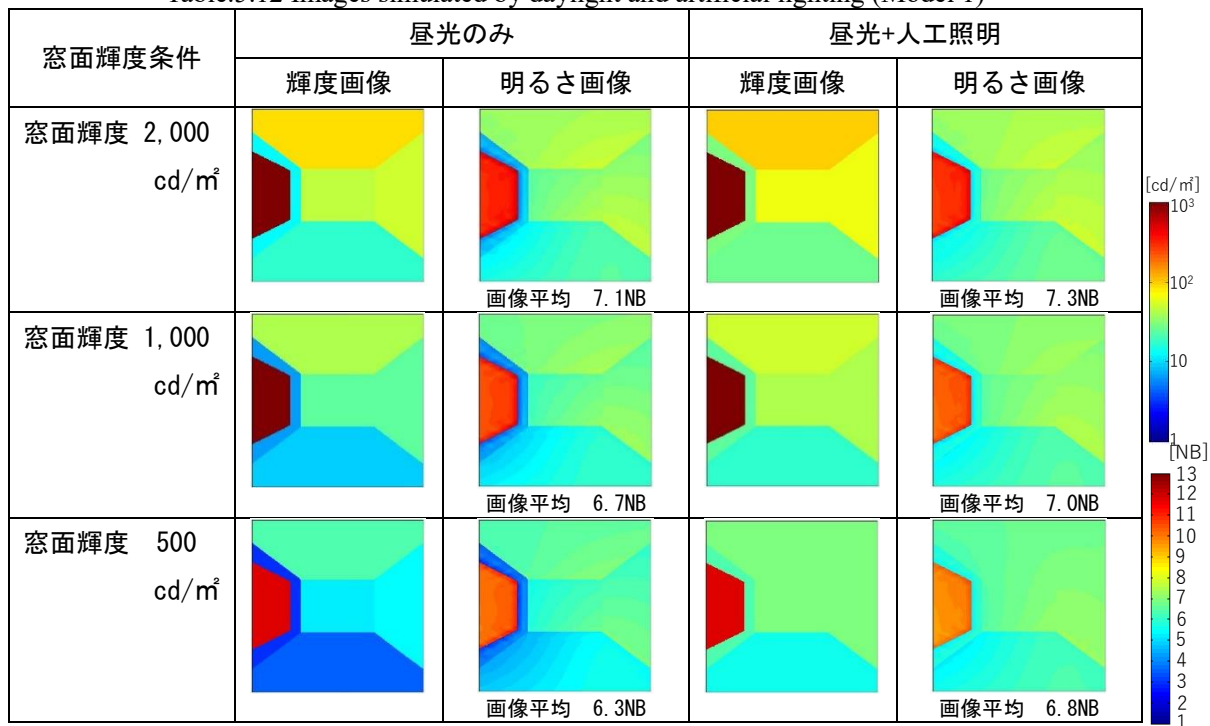


表 5.13 昼光と人工照明によるシミュレーション画像（モデル 2）

Table.5.13 Images simulated by daylight and artificial lighting (Model 2)

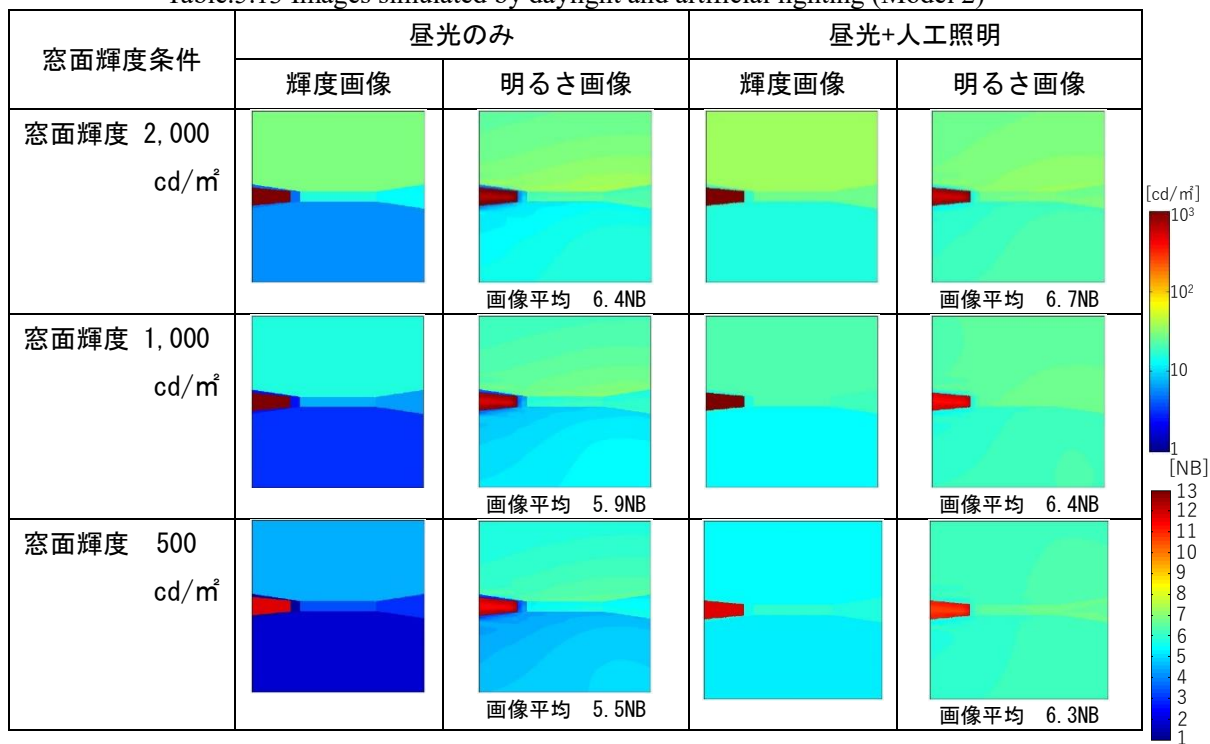


表 5.14 明るさ画像における面毎の平均 NB 値

Table.5.14 Average of NB in brightness images

No.	窓面輝度 cd/m ²	条件	天井（面 1） 平均 NB	壁（面 2） 平均 NB	壁（面 3） 平均 NB	壁（面 4） 平均 NB	床（面 6） 平均 NB
モデル 1	2,000	昼光	7.4	8.7	7.0	7.3	6.0
		昼+照	7.4	8.9	7.2	7.5	6.3
	1,000	昼光	7.0	8.2	6.5	6.9	5.6
		昼+照	7.0	8.6	6.9	7.3	6.1
	500	昼光	6.6	7.8	6.1	6.5	5.2
		昼+照	6.7	8.3	6.8	7.0	5.9
モデル 2	2,000	昼光	6.9	10.7	6.4	6.3	5.6
		昼+照	6.9	10.8	6.8	6.8	6.2
	1,000	昼光	6.5	10.3	6.0	5.9	5.2
		昼+照	6.5	10.3	6.7	6.7	6.1
	500	昼光	6.0	9.9	5.6	5.4	4.7
		昼+照	6.2	9.8	6.6	6.6	6.1

壁（面 2）は窓面を含んだ平均 NB を示す。

条件のうち、「昼光」は昼光のみ、「昼+照」は昼光+人工照明時を示す。

表 5.18 は、上記で用いた照明条件の輝度画像及び明るさ画像及び画像全体の平均 NB 値を参考に示す。また、表 5.19 には明るさ画像における面毎の平均 NB 値を示す。照明出力の違いによる室内の輝度分布を簡易に予測できることが分かる。

表 5.18 人工照明によるシミュレーション画像

Table.5.18 Images simulated by artificial lighting

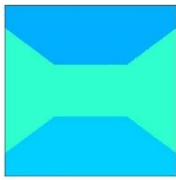
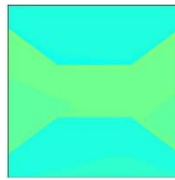
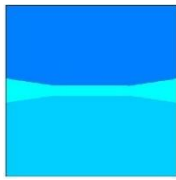
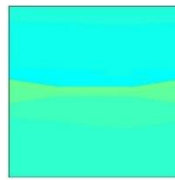
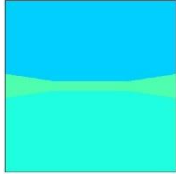
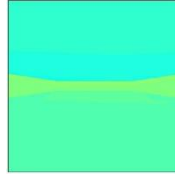
照度条件	モデル 1		モデル 2		[cd/m ²] 10 ³ 10 ² 10 1 [NB] 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
	輝度画像	明るさ画像	輝度画像	明るさ画像	
床面平均照度 300 lx		 画像平均 6.2NB		 画像平均 5.9NB	
床面平均照度 500 lx	—	—		 画像平均 6.2NB	

表 5.19 明るさ画像における面毎の平均 NB 値

Table.5.16 Average of NB in brightness images

モデル No.	床面平均 照度	天井（面 1） 平均 NB	壁（面 2） 平均 NB	壁（面 3） 平均 NB	壁（面 4） 平均 NB	床（面 6） 平均 NB
モデル 1	300 lx	5.8	6.6	6.7	6.7	5.8
モデル 2	300 lx	5.6	6.6	6.6	6.6	6.1
	500 lx	5.9	6.9	7.0	6.9	6.4

このように、側窓を有した室内の、昼光及び人工照明によって得られる天井、壁、床の平均輝度を算出する手法を用いて、簡単に輝度分布を得ることができる。得られた輝度分布を基に明るさ画像に変換することで、空間の明るさ感を定量的に知ることができるようになった。シミュレーション結果においても、室内の明るさ画像は、窓面の輝度との対比を考慮することができ、輝度対比の大きいエリアでは NB 値が低くなることが良く表されている。室サイズの異なるモデル 1 とモデル 2 を比較しても、窓と壁面の位置関係によって輝度が適切に計算されていることが分かる。また、昼光の量が少なくなるにつれ、室内の輝度や NB 値が低下することも良く表されている。

この計算方法を利用することにより、明るさの不足分を人工照明で補うための照明調光率を想定することが可能となる。一例として、モデル 2 において窓面輝度 500cd/m²の条件下で、人工照明による床面平均照度 300 lx を 500 lx に変更した場合の、室内の輝度分布及び明るさ感の変化をシミュレーションした。表 5.15 は、室内の平均輝度の計算結果を示す。表 5.16 は、昼光と人工照明の合成による輝度画像と明るさ画像を示す。

表 5.15 平均輝度計算結果

Table.5.15 Calculation results of average luminance (Window luminance 500cd/m²)

モデル 2 窓面輝度 500 cd/m ²		天井 (面 1)	壁 (面 2)	壁 (面 3, 5)	壁 (面 4)	床面 (面 6)
床面平均 照度 300 lx	昼光直接輝度	5.70	—	2.52	2.01	1.14
	昼光間接輝度	2.06	1.24	1.24	1.24	0.41
	人工照明輝度	5.26	13.24	13.24	13.24	9.63
	昼光分合計	7.76	1.24	3.76	3.25	1.55
	総計	13.01	14.48	17.00	16.48	11.18
床面平均 照度 500 lx	昼光直接輝度	5.70	—	2.52	2.01	1.14
	昼光間接輝度	2.06	1.24	1.24	1.24	0.41
	人工照明輝度	8.74	22.02	22.02	22.02	16.02
	昼光分合計	7.76	1.24	3.76	3.25	1.55
	総計	16.50	23.25	25.77	25.26	17.57

表 5.16 明るさ画像における面毎の平均 NB 値

Table.5.16 Average of NB in brightness images

床面照度 lx	輝度画像	明るさ画像
300		 画像平均 6.3NB
500		 画像平均 6.5NB

輝度画像においては、人工照明の出力の違いによる輝度の違いが良く表されている。一方、明るさ画像では床面及び壁面で NB 値が大きくなっていることが分かる。

表 5.17 は、明るさ画像における各面の平均 NB 値を示す。結果から、床面や壁面の NB 値が大きくなっていることが確認できた。この状態は、窓面輝度 $2,000\text{cd/m}^2$ 時と同等になっている。一方、窓を有する壁面 2 では、人工照明の光の増大によって、窓面輝度との対比が小さくなり、若干であるが壁面 2 の NB 値が下がっていることが分かる。

表 5.17 明るさ画像における面毎の平均 NB 値

Table.5.17 Average of NB in brightness images

No.	床面照度 lx	条件	天井 (面 1) 平均 NB	壁 (面 2) 平均 NB	壁 (面 3) 平均 NB	壁 (面 4) 平均 NB	床 (面 6) 平均 NB
モデル 2	300	昼+照	6.2	9.8	6.6	6.6	6.1
	500	昼+照	6.3	9.7	6.9	6.9	6.4

モデル 2 の窓面輝度 500cd/m^2 のケースでは、照明制御の効果を予測しフィードバックすることで、昼光だけでは不足している壁面、天井面の輝度を補えるように、人工照明の設定照度を 300 lx から 500 lx に変更した。これによって、窓面輝度の高い状態と同等の明るさ感を得ることが確認できた。

このようなシミュレーションを繰り返すことによって、照明とブラインドの協調制御システムの制御目標を予め予測することができることが示された。

また、夜間など昼光のない状態を想定し、床面平均照度 300 lx のケースと、天井面平均輝度が建築学会照明環境規準の設計規準である 15cd/m²程度を確保できる照度として、モデル 1 では 600 lx、モデル 2 では 850 lx のケースをシミュレーションした。今回、窓面は反射率 70%の白色ブラインドが全閉していると想定して、面 2 とは区別して輝度算出を行った。平均輝度の計算結果を表 5.17 に記す。また、計算結果を基に作成した輝度画像と明るさ画像と画像全体の平均 NB 値を表 5.18 に示す。表 5.19 には明るさ画像における面毎の平均 NB 値を示す。

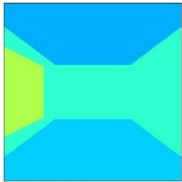
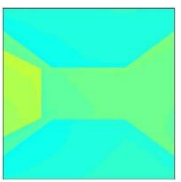
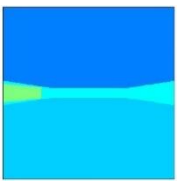
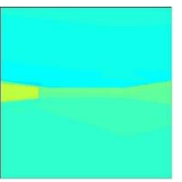
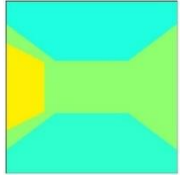
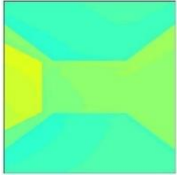
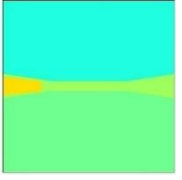
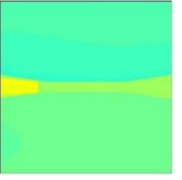
表 5.17 ブラインドを考慮した人工照明の平均輝度計算結果

Table.5.17 Luminance calculation results by artificial lighting with blind (単位 cd/m²)

ケース	床面 照度	天井 (面 1)	壁 (面 2)	壁 (面 3, 5)	壁 (面 4)	床面 (面 6)	窓面
モデル 1	300 lx	7.73	17.84	17.84	17.84	9.44	41.62
モデル 1	600 lx	15.03	34.69	34.69	34.69	18.35	80.93
モデル 2	300 lx	5.26	13.24	13.24	13.24	9.63	30.89
モデル 2	850 lx	14.96	37.66	37.66	37.66	27.39	87.87

表 5.18 ブラインドを考慮した人工照明によるシミュレーション画像

Table.5.18 Images simulated by artificial lighting with blind

	モデル 1		モデル 2	
	輝度画像	明るさ画像	輝度画像	明るさ画像
床面平均照度 モデル 1: 300 lx モデル 2: 300 lx				
		画像平均 6.2NB		画像平均 5.9NB
床面平均照度 モデル 1: 600 lx モデル 2: 850 lx				
		画像平均 6.6NB		画像平均 6.6NB

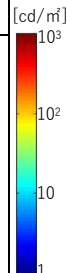


表 5.19 明るさ画像における面毎の平均 NB 値

Table.5.19 Average of NB in brightness images

モデル No.	床面平均 照度	天井（面 1） 平均 NB	壁（面 2） 平均 NB	壁（面 3） 平均 NB	壁（面 4） 平均 NB	床（面 6） 平均 NB
モデル 1	300 lx	5.7	7.1	6.7	6.7	5.8
	600 lx	6.2	7.5	7.1	7.1	6.2
モデル 2	300 lx	5.6	7.4	6.6	6.6	6.0
	850 lx	6.2	8.1	7.3	7.3	6.7

ブラインドを装着した窓面及び室内輝度分布及び輝度画像を基に変換した明るさ画像が適切に作成されることが確認できた。床面照度 300 lx の場合、壁面の見え掛かりの大きいモデル 1 における、壁面の平均 NB 値は、ブラインドのある面 2 が 7.1NB、その他の壁面である面 3 及び面 4 は 6.7NB であるのに対して、モデル 2 で見え掛かりの大きくなる天井面の平均 NB が 5.6NB となり、明るさ感が不足する可能性があるかと判断できる。この場合、モデル 2 においては照明の出力を上げる、天井面の輝度を高める照明手法を採用するなどの検討が必要となる。照明の出力を上げ床面照度を高め、建築学会照明環境規準の設計規準値（天井：15cd/m²、壁：20cd/m²）を確保するためには、床面平均照度をモデル 1 では 600 lx に、モデル 2 では 850 lx にすると、モデル 1 の面 3 及び面 4 は 7.1NB に達する一方で、モデル 2 の天井面においては 6.2NB に留まり、明るさ感の不足が改善できているとは言いがたい。よって、モデル 2 においてはモデル 1 に比べて大きく照明出力（照度）を高めても視野内面積の大きい天井面の輝度を高くできないため、モデル 2 の照明手法の見直しが必要と判断できる。

このように、この室内輝度の簡易予測手法は、各部位の適切な輝度を求めることができ、本実証システムの適用の計画だけでなく、昼光を含む照明設計において快適な視環境の形成に活用できる。

5. 7 第5章のまとめ

第5章では、照明とブラインドの協調制御システムの実用化に向けて、制御の適用性を簡易に予測できる輝度算出方法について検討した。

第1節では、協調制御システムの実用化に向けての設計上の課題を検討した。

第2節では、制御の評価エリアの設定や制御目標値の参考となるデータを収集するため欧米におけるタスク・アンビエント照明を採用したオフィスなどの実態調査を行い、輝度に配慮した照明設計手法を分類化した。この結果、天井面や壁面の輝度を配慮する照明手法が多く採用されていることが確認できた。

第3節では、制御の評価エリアの設定を決定するために、間口のサイズの異なる二つのモデル室に対して、透視投影画像内の天井、壁の面積比率と室指数の関係を検討し、室指数 2.0 以上においては、天井の見え掛かり面積が大きくなることから、天井面輝度に配慮した照明設計が重要であることを明らかにした。

第4節では、制御の目標値の設定を決定するために、建築学会照明環境規準で定められた推奨輝度を与えたモデル室の輝度画像及び明るさ画像を作成し、第2章で行った主観評価実験の結果と比較した。学会で定める規準は、主観評価で得られた境界値よりも低い値であることが明らかになった。

第5節では、空間輝度の簡易予測手法を検討した。人工照明によって与えられる壁面及び天井面の平均輝度を、照明率を利用して算出できる方法を提案した。側窓を有する空間において窓面を一様輝度と仮定した場合の、壁面及び天井面の平均輝度を算出する方法を検討し、人工照明と昼光を合わせた輝度分布の予測方法を構築した。

第6節では、簡易予測方法を用いてモデル計算を行い、協調システムの計画だけでなく、昼光を含む照明計算において活用できる手法であることを示した。

【第 5 章の参考文献】

- 5-1) 日本建築学会環境基準 AIJES-L0002-2016 照明環境規準・同解説
- 5-2) 日本工業規格 JIS Z 9110 ; 2010 照明基準総則
- 5-3) 国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課監修 建築設備設計基準 平成 27 年版
- 5-4) 国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課監修 建築設備設計計算書作成の手引 平成 27 年版
- 5-5) 日本工業規格 JIS C 8030;2014 屋内照明器具の照明率表計算方法 1-1) 照明学会:「照明合理化の指針」

第 6 章

結論

6. 1 本研究のまとめ

本研究では、昼光の入射するオフィスにおいて視環境の快適性と省エネルギー性を両立し得る制御システムとして、CCD カメラで取得する輝度画像を利用した、照明とブラインドの協調制御に関する制御ロジックを検討した。また、制御システムを実際の建物に適用し、その有用性を実証した。また、実証システムの実用化、普及を目指して、窓を有する室内の輝度分布を簡易に予測する手法を検討し、簡易モデルを用いて本提案システムの制御の適用性が予測できることを示した。以下に、本研究で得られた結論を示す。

(1) 明るさ画像を利用した照明制御

照明制御システムは、室内の輝度分布から変換した明るさ画像を利用して、室内に入射する昼光の量の変動に応じて評価エリアの目標 NB 値を最も少ない電力で維持するように、アンビエント照明の調光率を制御グループ毎に算出し、制御するものである。

今回、CCD カメラ毎の基準輝度画像と評価エリアに対する寄与度を基に、入射する昼光の量を算出したのち、評価エリアが目標 NB 値を維持するための必要輝度を基に寄与度の高いものから順に人工照明の調光率を算出するロジックを提案した。

目標 NB の指標となる、明るさ感の適正範囲を求めるための主観評価実験を行い、好感・肯定的な評価の閾値は、昇順の場合で 7.0NB、降順では 7.3NB となった。

提案した制御ロジックを実装したアンビエント照明制御システムを構築し、実際の建物で評価エリアの目標値を 7.5NB 以上として実証実験を行った。その結果、変動する昼光下においても、目標 NB を満足するようにアンビエント照明が制御できることが確認できた。

(2) 輝度画像を利用したブラインド制御

CCD カメラで生成する輝度画像を利用して、窓面から見える対向建物による影の影響、周辺建物からの反射光などを含めて評価できる、ブラインドの遮光要否判定方法を提案した。今回、制御の高速化を目的として、輝度画像の生成は単一のシャッタースピード(1/200 秒)で撮影(簡易測定)した画像を基に検討した。直射光や眩しい反射光の高輝度の検出は、輝度コントラスト(C 値)と対数輝度平均(A 値)のフィルタリングによって可能であることを明らかにした。

実証システムをオフィスのブラインド制御システムに適用し、晴天日や曇天日などの違った天候条件下においても直射光や周辺建物の反射光を検出することができ、判定方法の妥当性を明らかにした。

ブラインドのグレア抑制のために、屋外の輝度画像にブラインドの推定輝度画像を重ね合わせた、室内から見た窓面の輝度画像を基に眩しさを抑えたブラインドのスラット角を決定できる窓面明るさ判定方法を提案した。ブラインドのスラット面輝度の推定は、屋外の円周輝度画像の上半分をパノラマ化した天空パノラマ画像の平均輝度、下半分をパノラマ化した地物パノラマ画像の平均輝度から算出する方法を検討した。判定の閾値は、設定した

NB 値とその領域率によって判断することを検討した。

(3) 照明とブラインドの協調制御

上述のアンビエント照明制御、ブラインドの遮光判定制御及び窓面明るさ判定制御を組み合わせた照明とブラインドの協調制御システムを構築し、実際のオフィスに適用し実証実験を行った。

照度センサーを利用した在来の制御方式である一定照度確保制御との比較実験の結果、一定照度確保制御下においては、窓面輝度が高い時に、明るさ感を低下させる可能性があることを示した。一方、実証システムにおいては、輝度対比を考慮した制御であるため、窓面輝度の大小に関わらず一定の NB 値を維持するように調光制御できることを示した。

窓面が高輝度時、窓面明るさ判定制御によって、窓面輝度を低減させるスラット角制御を実現した。昼光の変動に合わせて、窓面輝度を低減させるスラット角制御と、ブラインド開放時よりも少ない照明電力で明るさの目標 NB 値を確保する照明制御が確認できた。これによって、明るさ判定制御の有無による晴天日比較実験では、窓面の明るさを抑えながらも照明消費電力を削減できることを明らかにした。

昼光享受に関する性能評価として、眺望性を表す指標となる空隙率、WELL 認証(ver1)の評価項目でサーカディアンリズムに必要とされる等価メラノピック照度を用いて評価した。空隙率は、保護角制御によるブラインド制御と実証システムによるブラインド制御の比較検証の結果、対向建物による遮光などを適切に検知できる実証システムは、空隙率が高く天候判断できる制御方法に比べてもブラインドがより開放状態にあったことが示された。また、実証システムは、等価メラノピック照度の確保にも寄与できることが確認できた。

以上を総括すると、CCD カメラで取得した輝度画像を基にした照明とブラインドの協調制御システムは、窓面の輝度を抑えることによって室内の明るさ感をブラインド開放時よりも少ない電力で目標を満足することができ、視環境の快適性と省エネルギー性を両立することができることを示した。また、適切な遮光判定ができることから、ブラインドの開放時間を長くすることができ、眺望性や快適性など心理的な効果も期待できることを示した。また、年間の運用実績においても、ZEB 化のための目標とする $4\text{Wh}/\text{m}^2$ を下回る $3.29\text{Wh}/\text{m}^2$ を達成していることが確認できた。

(4) 協調制御を構築するための設計法

提案システムの実用化と普及のための設計上の課題を抽出し、制御目標を与える評価エリアの設定と制御目標の決定の参照値となるデータとして、欧米のタスク・アンビエント照明オフィスの実態調査を行い、輝度に配慮した照明設計方法を分類化した。

評価エリアの設定が容易に判別できるようにオフィスにおける透視投影画像内の天井、壁面の面積比率と室指数の相関を明らかにした。これによって、計画する室サイズから評価エリアの設定を容易に判断できるようになった。

空間の輝度分布の簡易予測方法として、照明器具の特性を表す照明率を利用した人工照明の輝度算出方法を検討、また、窓面から入射する昼光の直接輝度と入射した昼光の間接輝度の和で求められる昼光の輝度算出方法を検討した。本設計法は、提案システムの制御を予測することが可能となり、システム設計に活用できることを示した。また、この設計法は、国土交通省の設備設計計算書式に準じていることから、これまでの照度による設計から輝度を考慮した設計に移行するための、新たな計算手法になり得るものと考えられる。

6. 2 本研究に関する今後の課題

本研究で提案したシステムは、実証運用中であり、今後の実用化と普及に向けて、以下の課題がある。

(1) CCD カメラの設置位置の検討

本システムの制御は CCD カメラで取得する画像を基に全てが行われる。現在は、執務者の全員を代表する視点としてカメラのサイズと意匠上への配慮から天井面にカメラを設置している。今後は、よりパーソナルな要求にも応えられるように、机上部などより視点に近い位置に設置することを検討し、カメラの設置位置の違いについて評価が必要である。

(2) 照明制御における評価エリアの妥当性の検討

本研究において、評価エリアの設定は、見え掛かりの面積が大きくなる場所を画像上で検討した。しかし、評価エリアの設定場所によって制御結果が変わることから、省エネルギー性を尺度とした設定場所の妥当性を検討する必要がある。

(3) さまざま形状を有する建築物への適用検討

本研究での実証はトップライトを有する建物と側窓を有する建物について行ったが、制御の評価エリアとなるような壁などの建築形状のあり方や庇やルーバーなどの日射遮蔽物を有するような建築物に対しての適用性の検討が必要である。

(4) タスクライトの制御の検討

今回、タスクライトは研究対象外であったが、実証施設においては、タスクライトの出力や色温度、併設されている人感センサーの在・不在のデータをそれぞれ収集している。また、中央装置から制御することも可能であり、昼光の状態や時間帯によって、出力や色温度を変化することで、視環境への影響を評価することができる。併せて、タスク照明利用による使用者の満足度や明るさ知覚に関する検討も可能である。

(5) 屋外輝度画像を利用した屋内輝度分布の予測の検討

システムコスト削減を目的に、CCD カメラ台数の削減を検討する必要がある。屋外輝度画像は日照状態の把握が必要であることから削減できないが、取得した屋外輝度画像、ブラインドを重ね合わせた輝度画像から屋内の輝度分布を予測することができれば、屋内 CCD カメラの削減の可能性がある。今回、検討した輝度の簡易算出方法と組み合わせた手法の検討が必要である。

(6) 目標の明るさ感を達成する消費電力最小化の照明設計の検討

より一層の省エネルギー化を図るために、明るさ感の目標値をできるだけ少ない電力で

達成するための照明設計方法の検討と消費電力を最小化するための窓面輝度の制限の検討が必要である。

(7) ZEB 実現のための熱と光の総合的なエネルギー評価の検討

窓面からの熱取得はブラインドの開閉によって変わることから、照明消費エネルギーだけでなく熱負荷による空調の消費エネルギーも合わせた総合的な評価に立った検討が必要である。

(8) 輝度設計への展開検討

今回提案した、空間輝度の簡易予測方法は、これまでの照度による設計から輝度を考慮した設計に移行の一助となるように精度の向上を検討する。

謝辞

本論文を進めるにあたり、貴重なご指導と助言を賜りました東京工業大学 環境・社会理工学院建築学系教授 中村芳樹博士に深く感謝致します。博士後期課程入学以前より、本論文の基礎研究段階から広い視野より研究全体を見通して頂き、適切なご指導を賜りました。その過程では、実際の建物で稼働できるシステムに昇華させるべく工学的な応用研究と学術研究の両側面をご指導下さいましたこと、心より感謝申し上げます。

本論文の査読を頂きました、松岡昌志博士、室町泰徳博士、那須聖博士、浅輪貴史博士の先生方からは、日常業務で凝り固まった思考の目を覚ますような的確で多角的なご指導、ご助言を賜り心より感謝申し上げます。

本研究は、大林組での研究開発業務として始まり、約7年間にわたり遂行してきました。当初の研究開発業務の幹事として大林組テクノ事業創成事業本部新領域事業部部長 前田茂哉氏（当時、名古屋支店設備設計部部長）には、業務の進め方をはじめプロジェクトリーダーとしてのご指導を賜り深く感謝致します。2012年、業務多忙の設計部門に籍を置きながら博士課程への入学をお許し頂いた大林組設計本部副本部長 古閑幸雄氏に心から謝意を表します。その後も、設計業務と研究業務の2足のわらじを履きながら、昼夜を問わず邁進できる環境を整えて下さったことに心より感謝申し上げます。

入社6年目に、光環境に関する研究に導いて下さった元大林組 斎藤満博士に心より感謝致します。文書の書き方にはじまり、光環境シミュレーションや採光技術に関して多岐にわたるご指導を賜りました。また、研究の要所でご意見と励ましを頂いたおかげで、本論文をまとめることができました。

本研究にあたり、常にサポートして頂いた大林組建築本部設備技術部担当課長 大木知佳子氏に感謝致します。研究開発業務の事務的な手続きをはじめ、実証システムの構築のために共に汗をかいた同士であり、言葉では言い尽くせないほどの感謝の気持ちでいっぱいです。同じ設備技術部でシミュレーション画像の作成に協力頂いた 浦田幸江氏に感謝致します。締め切りの迫った中で正確な作業にお礼申し上げます。

本研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が実施する助成事業「戦略的省エネルギー技術革新プログラム」によって行われました。本事業にあたり、ご指導とご協力賜った、ビジュアル・テクノロジー研究所代表取締役社長 金谷末子博士、日吉美南実氏、山本三七男氏、東京工業大学環境・社会理工学院建築学系博士後期課程 加藤洋子氏、大林組技術本部技術研究所都市環境技術研究部課長 小関由明氏、主任 矢部周子氏、大林組技術本部スマートシティ推進室課長 石川英樹氏に深く感謝の意を表します。そして、本研究における実証システムの導入あたり、実証の場を提供頂いた昭和電機様をはじめ多くの関係者の方々のご協力に心よりお礼申し上げます。

最後に、ここで記載できなかった多数の方々のご協力にここよりお礼申し上げます。

2019 年 1 月
小島義包

付録

付1．Fビルにおけるブラインドの月別代表稼働実績

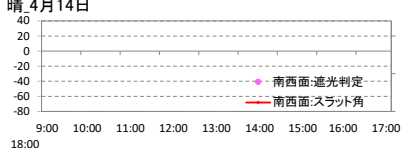
付2．タスク・アンビエント照明を採用したオフィスなどの輝度測定及び明るさ画像評価

付 1. F ビルにおけるブラインドの月別代表稼働実績

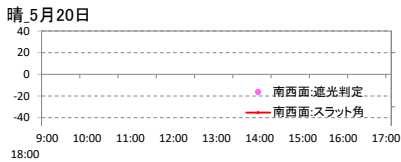
遮光判定と制御スラット角(9～18時)

晴

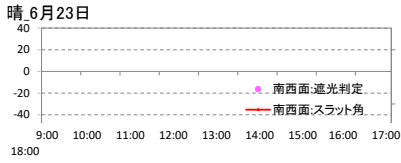
晴 4月14日



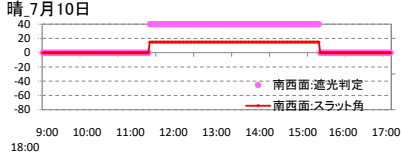
18:00



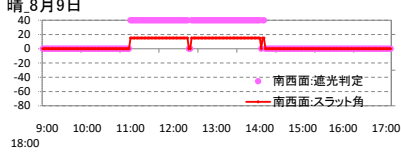
18:00



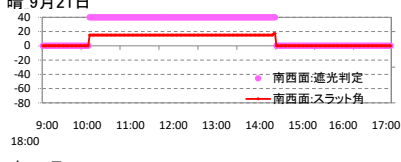
18:00



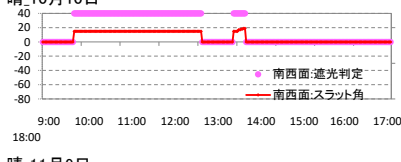
18:00



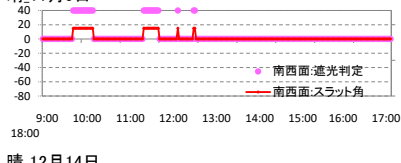
18:00



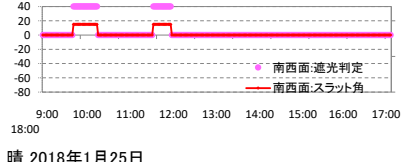
18:00



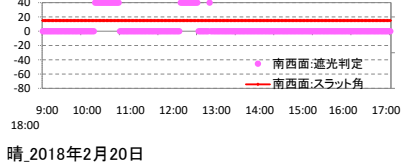
18:00



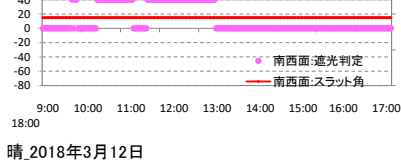
18:00



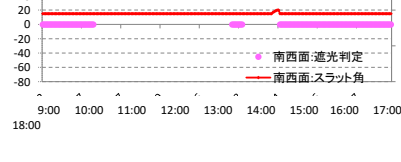
18:00



18:00

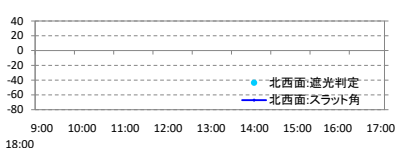


18:00

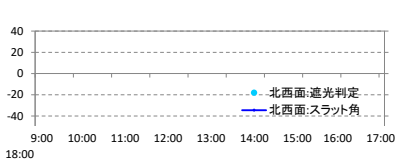


18:00

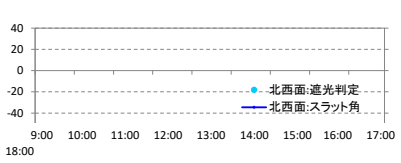
北西面



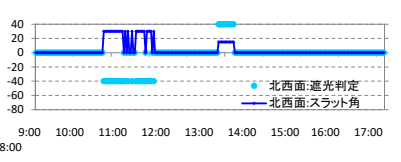
18:00



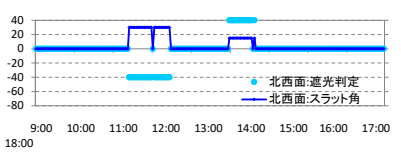
18:00



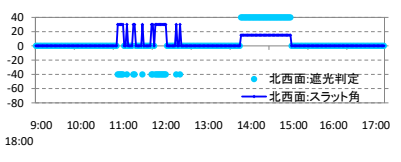
18:00



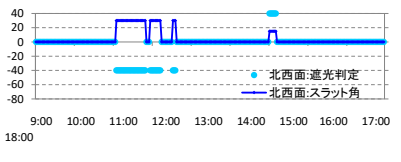
18:00



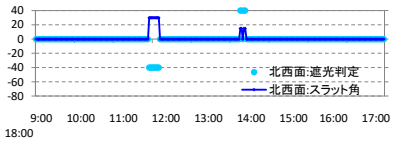
18:00



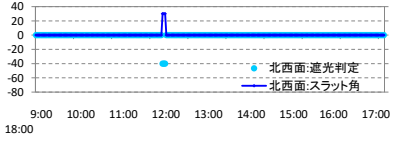
18:00



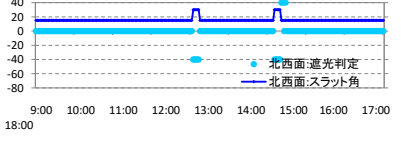
18:00



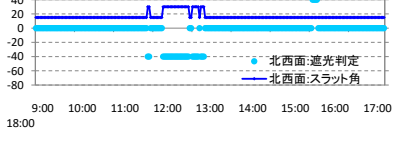
18:00



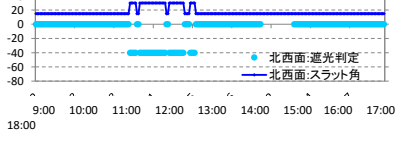
18:00



18:00



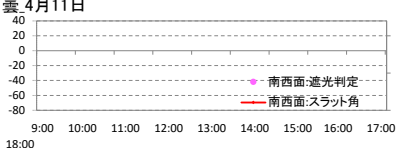
18:00



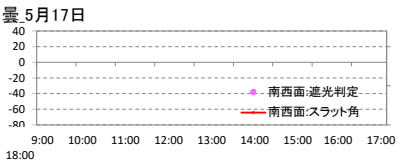
18:00

曇

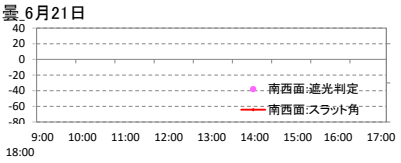
曇 4月11日



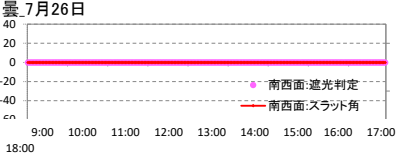
18:00



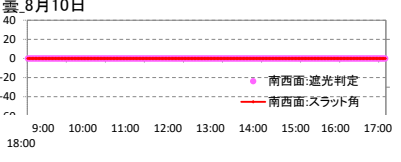
18:00



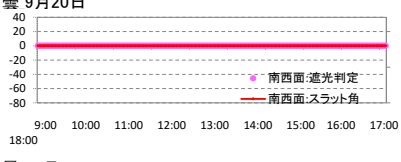
18:00



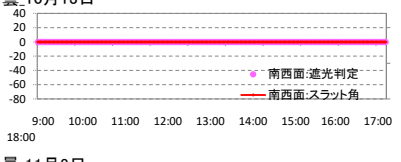
18:00



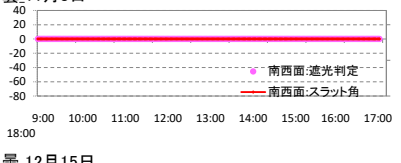
18:00



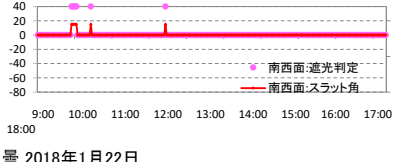
18:00



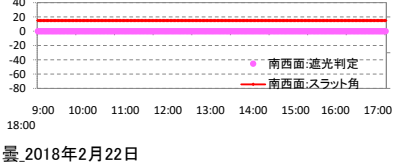
18:00



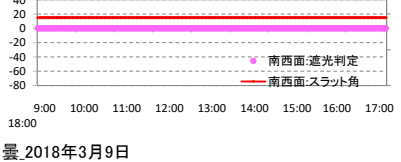
18:00



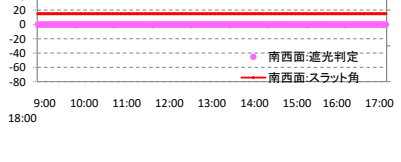
18:00



18:00

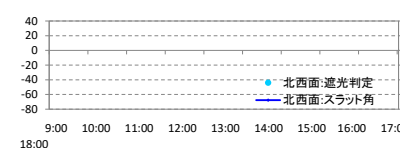


18:00

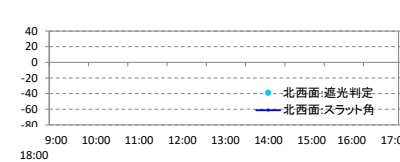


18:00

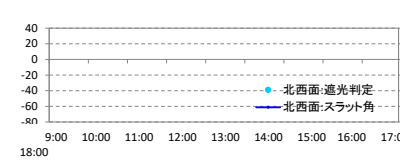
北西面



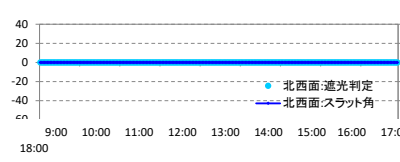
18:00



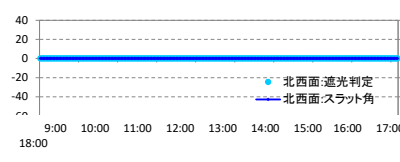
18:00



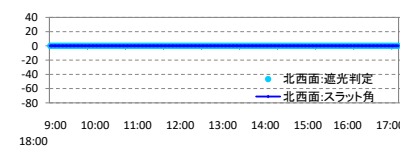
18:00



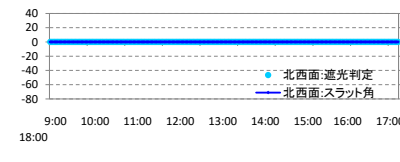
18:00



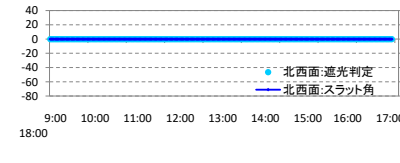
18:00



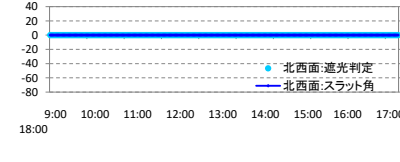
18:00



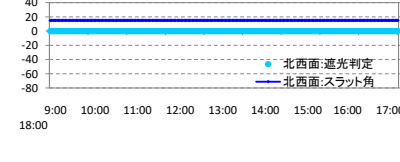
18:00



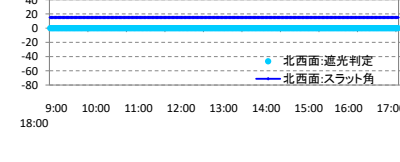
18:00



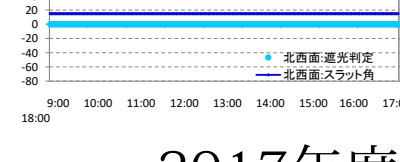
18:00



18:00



18:00



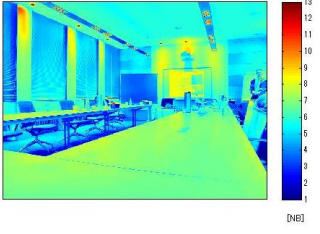
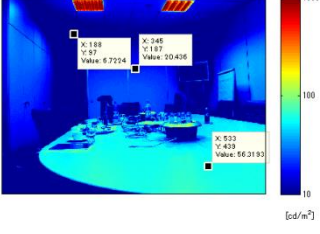
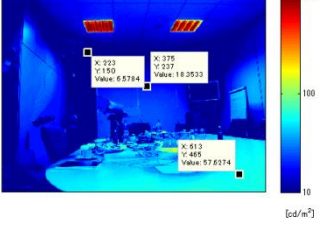
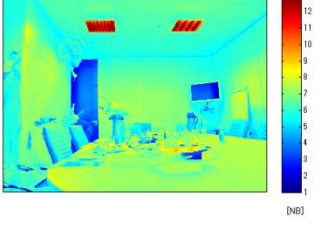
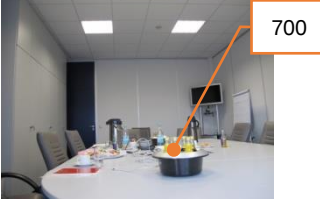
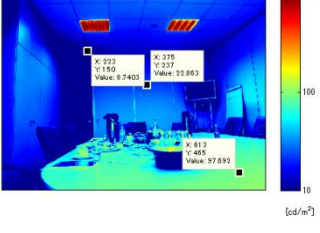
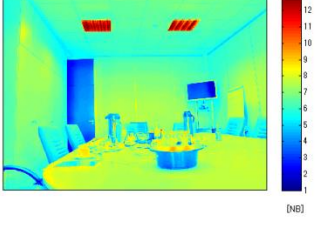
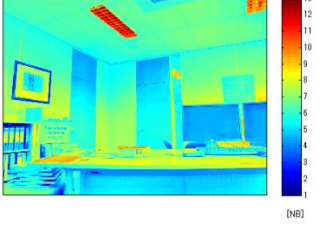
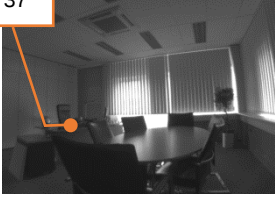
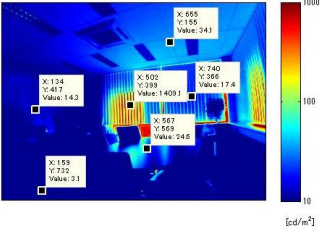
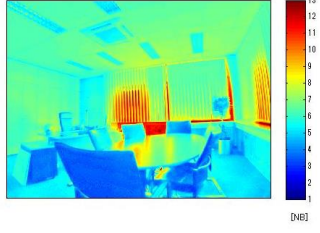
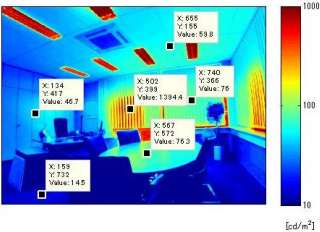
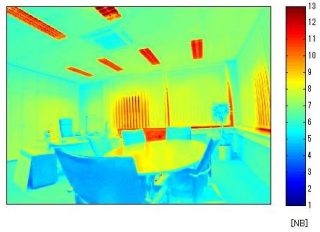
18:00

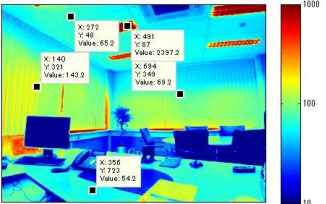
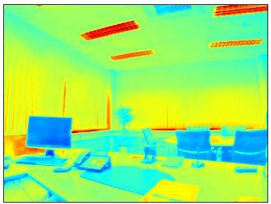
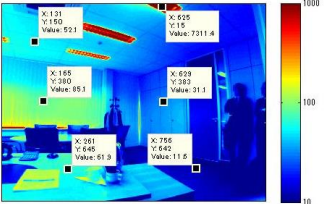
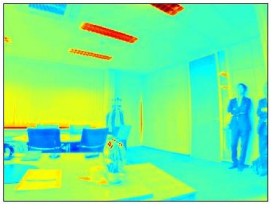
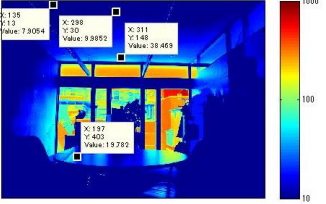
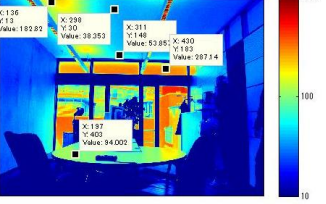
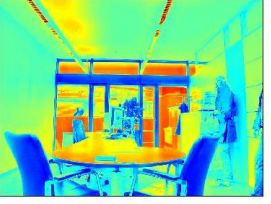
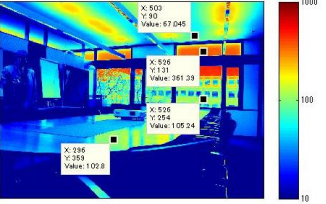
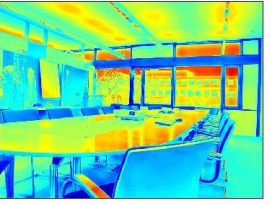
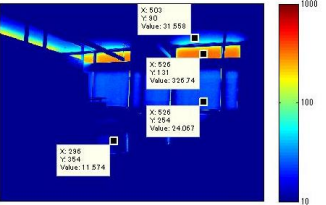
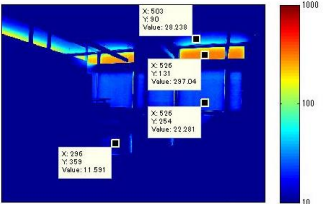
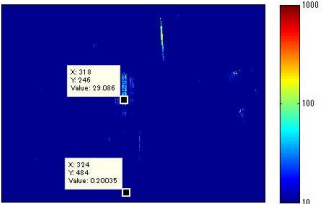
付2. タスク・アンビエント照明を採用したオフィスなどの輝度測定及び明るさ画像評価

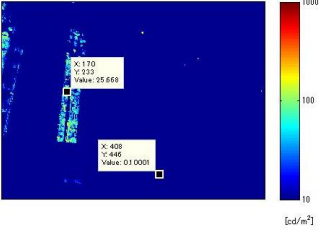
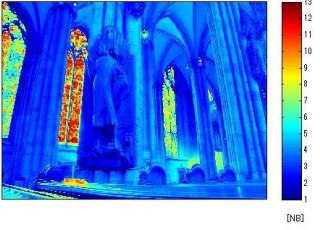
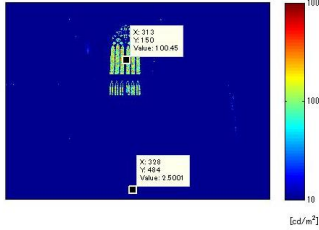
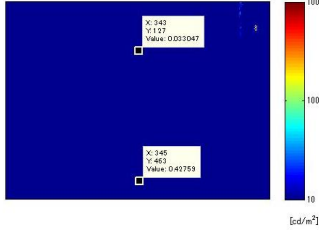
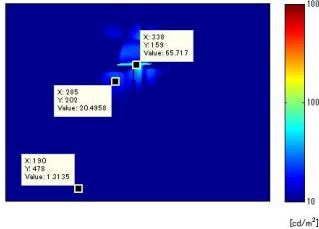
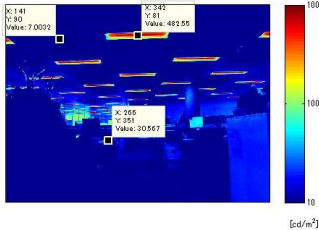
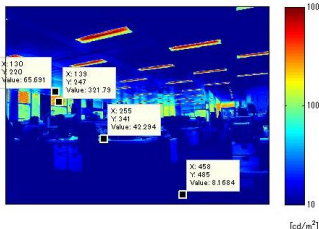
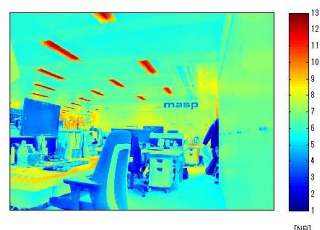
付2. タスク・アンビエント照明を採用したオフィスなどの輝度測定及び明るさ画像評価

日付	場所	写真（数値は照度[lx]を表す）	輝度画像	明るさ画像	備考
2013 年 3/17	事務所 エントランス				
	事務所 エントランス				
	事務所 エントランス				
	教会				
	鉄道駅舎 ホーム				
	鉄道駅舎 ホーム				
2013 年 3/18	事務所 執務室				
	事務所 執務室				
	事務所 執務室				

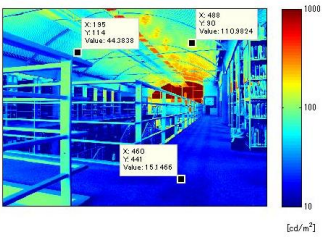
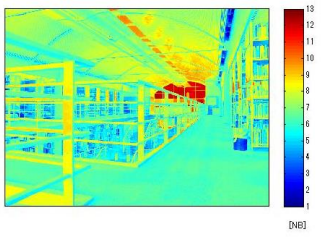
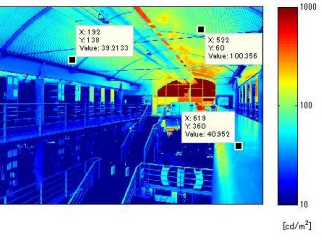
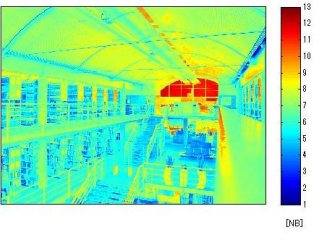
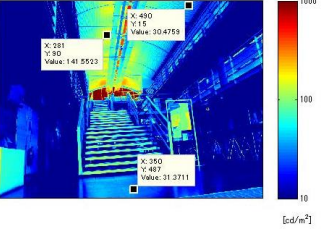
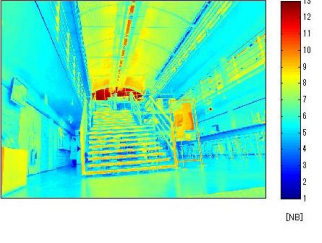
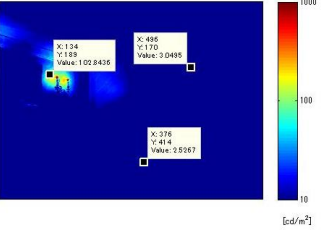
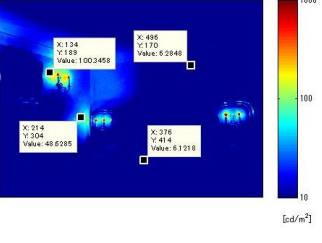
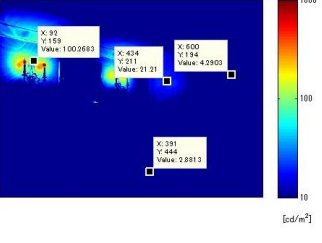
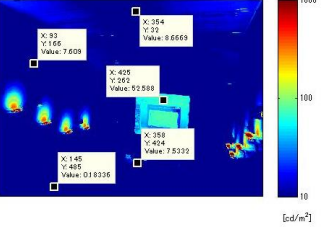
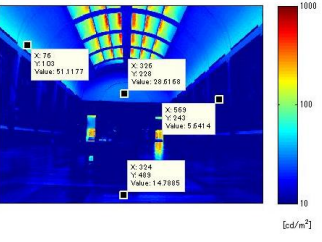
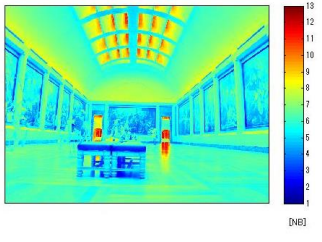
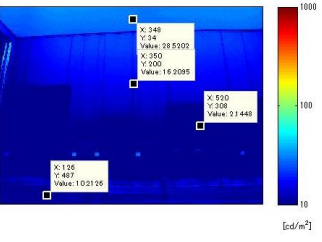
日付	場所	写真 (数値は照度[lx]を表す)	輝度画像	明るさ画像	備考
2013 年 3/18	事務所 執務室				ブラインド閉
	事務所 執務室				ブラインド開 (巻 上げ)
	事務所 執務室				
	事務所 執務室				
	事務所 執務室				
	事務所 執務室				
	事務所 廊下				
2013 年 3/19	事務所 会議室				
	事務所 会議室				

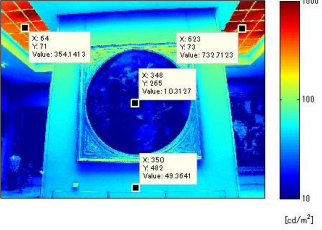
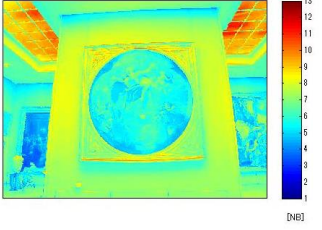
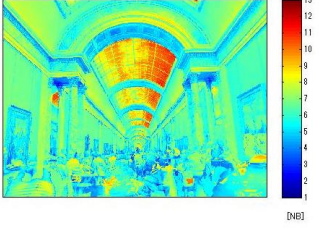
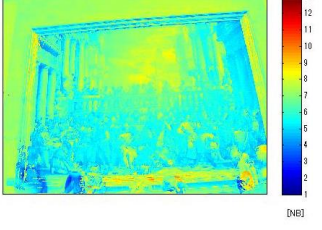
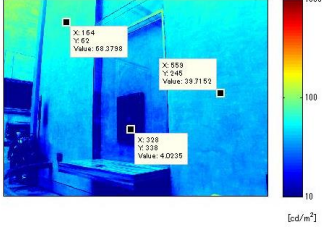
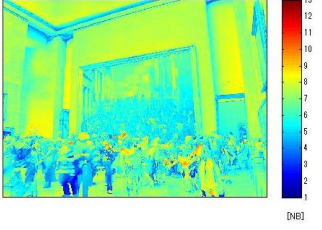
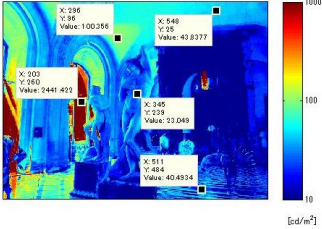
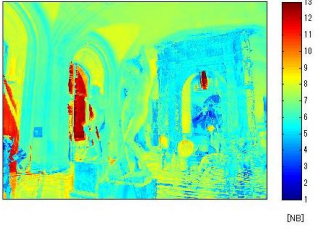
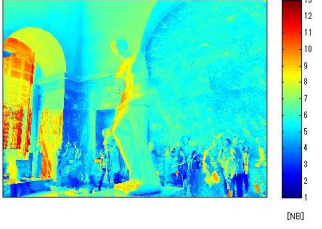
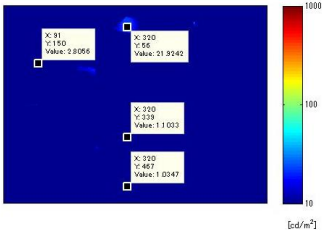
日付	場所	写真（数値は照度[lx]を表す）	輝度画像	明るさ画像	備考
2013 年 3/19	事務所 会議室		 [cd/m ²]	 [dB]	
	事務所 会議室		 [cd/m ²]	 [dB]	ブラインド閉＋ 点灯
	事務所 会議室		 [cd/m ²]	 [dB]	ブラインド水平 ＋点灯
	事務所 会議室		 [cd/m ²]	 [dB]	？
	事務所 役員室		 [cd/m ²]	 [dB]	消灯（ブライン ドなし）
	役員室		 [cd/m ²]	 [dB]	点灯（ブライン ドなし）
	事務所 役員室		 [cd/m ²]	 [dB]	点灯（ブライン ドなし）
	事務所 役員室	 リアル・アピアランス画像	 [cd/m ²]	 [dB]	消灯
	事務所 役員室	 リアル・アピアランス画像	 [cd/m ²]	 [dB]	点灯

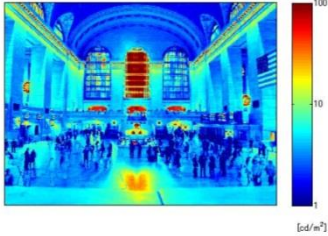
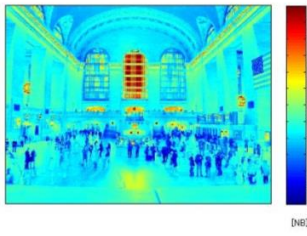
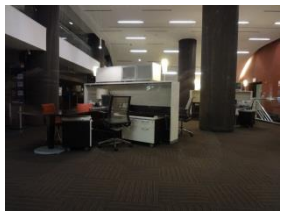
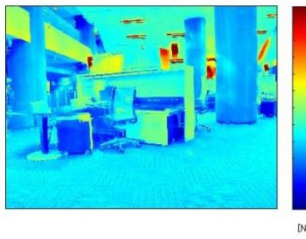
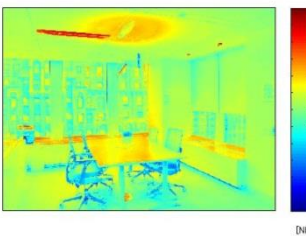
日付	場所	写真（数値は照度[lx]を表す）	輝度画像	明るさ画像	備考
2013 年 3/19	事務所 役員室	 リアルアピアランス画像	 [cd/m²]	 [DNB]	点灯
	事務所 役員室		 [cd/m²]	 [DNB]	
2013 年 3/20	事務所 執務室 （昼光制御ガラス設置）		 [cd/m²]	 [DNB]	消灯
	事務所 執務室 （昼光制御ガラス設置）		 [cd/m²]	 [DNB]	点灯
	事務所 執務室 （昼光制御ガラス設置）		 [cd/m²]	 [DNB]	点灯
	事務所 執務室 （昼光制御ガラス設置）		 [cd/m²]	 [DNB]	消灯（スクリーン降）
	事務所 執務室 （昼光制御ガラス設置）		 [cd/m²]	 [DNB]	
	教会		 [cd/m²]	 [DNB]	

日付	場所	写真 (数値は照度[lx]を表す)	輝度画像	明るさ画像	備考
	教会				
2013 年 3/20	教会				
	教会				
	ホテル 客室				
2013 年 3/22	事務所 執務室				
	事務所 執務室				
	事務所 執務室				
	事務所 執務室				
	事務所 執務室				

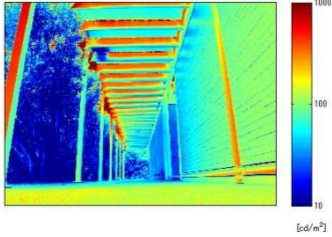
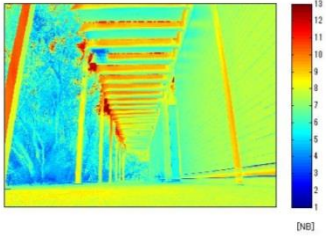
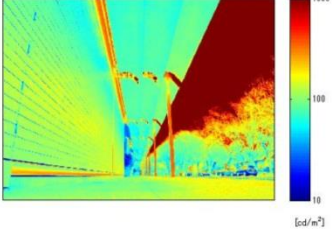
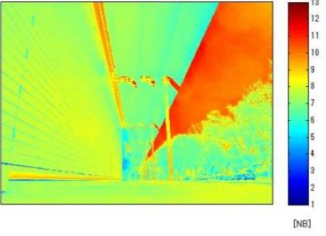
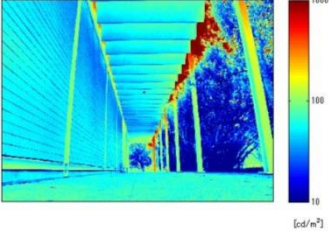
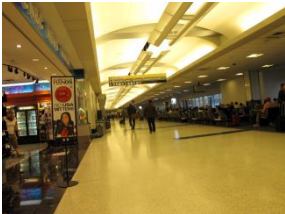
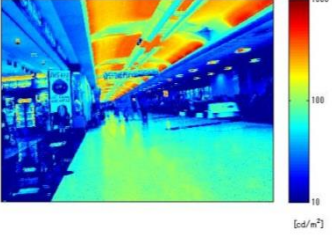
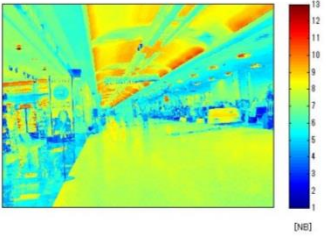
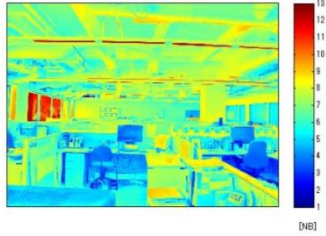
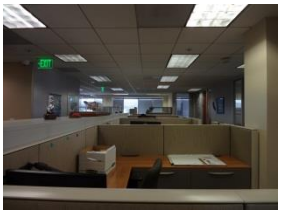
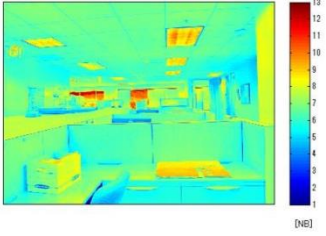
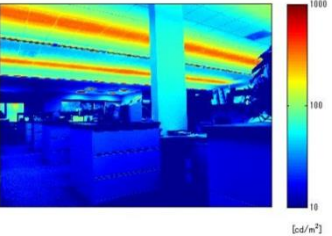
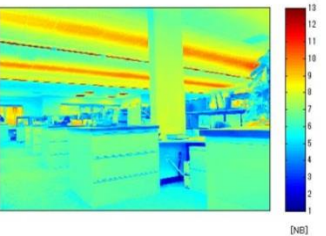
日付	場所	写真（数値は照度[lx]を表す）	輝度画像	明るさ画像	備考
	事務所 エントランス				
2013 年 3/22	事務所 エントランス				
	事務所 エントランス				
	事務所 エントランス				
	事務所 執務室				
	事務所 執務室				
	事務所 執務室				
2013 年 3/23	大学 図書館				
	大学 図書館				

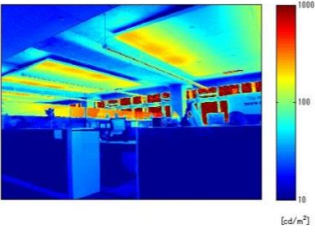
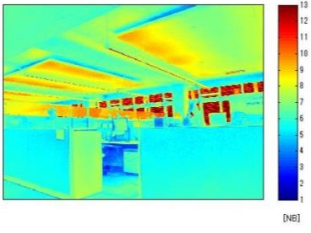
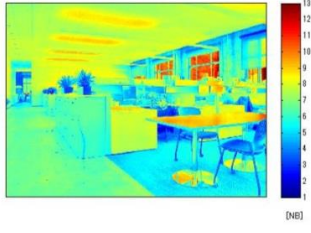
日付	場所	写真 (数値は照度[lx]を表す)	輝度画像	明るさ画像	備考
	大学 図書館	620 			
2013 年 3/23	大学 図書館				
	大学 図書館				
2013 年 4 月	ホテル 客室				
	ホテル 客室				
	ホテル 客室				
	大学 講堂				
	美術館 展示室				
	美術館 展示室				

日付	場所	写真 (数値は照度[lx]を表す)	輝度画像	明るさ画像	備考
	美術館 展示室				
2013 年 4 月	美術館 展示室				
	美術館 展示室				
	美術館 展示室				
	美術館 展示室				
	美術館 展示室				
	美術館 展示室				
	美術館 展示室				
	美術館 展示室				

日付	場所	写真（数値は照度[lx]を表す）	輝度画像	明るさ画像	備考
2014 年 3/9	鉄道駅舎 コンコース				
	事務所 執務室				
2014 年 3/10	事務所 執務室				
	事務所 執務室				
	事務所 執務室				
	事務所 執務室				
	事務所 執務室				
	事務所 執務室				

日付	場所	写真 (数値は照度[lx]を表す)	輝度画像	明るさ画像	備考
	事務所 執務室				
2014 年 3/12	美術館 展示室				
	美術館 展示室				
	美術館 展示室				
	美術館 展示室				
	美術館 展示室				
2014 年 3/15	美術館 外部				
	美術館 展示室				

日付	場所	写真（数値は照度[lx]を表す）	輝度画像	明るさ画像	備考
	美術館 外部		 [cd/m ²]	 [dB]	
	美術館 外部		 [cd/m ²]	 [dB]	
2014 年 3/15	美術館 外部		 [cd/m ²]	 [dB]	
	空港 コンコース		 [cd/m ²]	 [dB]	
2014 年 3/17	事務所 執務室		 [cd/m ²]	 [dB]	
	事務所 執務室		 [cd/m ²]	 [dB]	
	事務所 執務室		 [cd/m ²]	 [dB]	
2014 年 3/18	事務所 執務室		 [cd/m ²]	 [dB]	
	事務所 執務室		 [cd/m ²]	 [dB]	

日付	場所	写真（数値は照度[lx]を表す）	輝度画像	明るさ画像	備考
	事務所 執務室				
	事務所 執務室				

研究業績一覽

参考論文等（博士論文の内容の一部）

審査付き論文

1. 輝度画像を利用したブラインド制御用遮光要否判定方法の研究
小島 義包,中村 芳樹,加藤 洋子,大木 知佳子,矢部 周子,金谷 末子
日本建築学会環境系論文集,第 735 号, pp. 435-442
2017 年 5 月に掲載
2. 輝度画像を利用した照明制御システムの研究
小島 義包,中村 芳樹,加藤 洋子,大木 知佳子,矢部 周子,金谷 末子
電気設備学会誌,第 38 巻第 1 号,pp. 62-69
2018 年 1 月に掲載
3. 輝度画像を利用した照明とブラインドの協調制御システムの研究
小島 義包,中村 芳樹,加藤 洋子,大木 知佳子,矢部 周子,金谷 末子
電気設備学会誌,第 39 巻第 1 号
2019 年 2 月に掲載

審査付き Proceedings

1. DEVELOPMENT OF AUTOMATIC LIGHTING CONTROL SYSTEM USING BRIGHTNESS IMAGE
Kojima, Y., Ohki, C., Nakamura, Y., Kanaya, S.
CIE CENTENARY CONFERENCE Towards a new century of Light Paris
2013 年 4 月
2. LIGHT ENVIRONMENT CONTROL SYSTEM USING PERCEPTION OF BRIGHTNESS
Kojima, Y., Ohki, C., Nakamura, Y., Kato, Y.
CIE (The International Commission on Illumination) 2015 MANCHESTER UK
2015 年 6 月

講演論文

1. 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 その 7 自然光を利用したオフィスの光環境計画と実測
和田 克明,小島 義包,水井 啓喜,大西 宏治
日本建築学会学術講演梗概集,41473,pp. 973-974
2011 年 5 月
2. 明るさ感指標を利用した昼光照明計画
小島 義包,大木 知佳子,和田 克明,水井 啓喜

電気設備学会全国大会講演論文集,G-8,pp. 351-352

2011 年 9 月

3. 「明るさ感」指標を利用した昼光照明設計と省エネ効果

小島 義包,大木 知佳子,金谷 末子,中村 芳樹

照明学会全国大会講演論文集,5-19

2012 年 9 月

4. 「明るさ感」指標を利用した昼光照明設計と省エネ効果

小島 義包,大木 知佳子,金谷 末子,中村 芳樹

電気設備学会全国大会講演論文集,I-9,pp. 483-484

2012 年 8 月

5. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システムに関する研究 その 1 明るさ尺度値を用いた光環境制御の概要

小島 義包,大木 知佳子,中村 芳樹,金谷 末子

日本建築学会学術講演梗概集,環境工学 I ,40245,pp. 505-506

2013 年 8 月

6. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システムに関する研究 その 2 空間の明るさ感と照明消費電力の実測結果

大木 知佳子,小島 義包,中村 芳樹,金谷 末子

日本建築学会学術講演梗概集,環境工学 I ,40246,pp. 507-508

2013 年 8 月

7. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システムに関する研究 その 3 明るさ画像を用いた人工照明制御下での光環境の評価

矢部 周子,小島 義包,大木 知佳子,中村 芳樹,金谷 末子

日本建築学会学術講演梗概集,環境工学 I ,40247,pp. 509-510

2013 年 8 月

8. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その 1 明るさ尺度値を用いた光環境制御と照明消費電力の実測結果

小島 義包,大木 知佳子,中村 芳樹,金谷 末子

照明学会全国大会講演論文集,5-22

2013 年 9 月

9. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その 2 明るさ画像を用いた人工照明制御下での光環境の評価

大木 知佳子,小島 義包,矢部 周子,中村 芳樹,金谷 末子

照明学会全国大会講演論文集,5-23

2013 年 9 月

10. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その 1 明るさ尺度値を用いた光環

境制御と照明消費電力の実測結果

小島 義包,大木 知佳子,中村 芳樹,金谷 末子

電気設備学会全国大会講演論文集,F-19,pp. 317-318

2013 年 9 月

11. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その 2 明るさ画像を用いた人工照明制御下での光環境の評価

大木 知佳子,小島 義包,矢部 周子,中村 芳樹,金谷 末子

電気設備学会全国大会講演論文集,F-20,pp. 319-320

2013 年 9 月

12. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システムに関する研究 その 4 光環境評価システムの概要とロジック

加藤 洋子,中村 芳樹,小島 義包,大木 知佳子,金谷 末子,日吉 美南実

日本建築学会学術講演梗概集,環境工学 I ,40250,pp. 541-542

2014 年 9 月

13. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システムに関する研究 その 5 導入概要および省エネルギー性・快適性の評価

大木 知佳子,小島 義包,中村 芳樹,加藤 洋子,金谷 末子,矢部 周子

日本建築学会学術講演梗概集,環境工学 I ,40251,pp. 543-544

2014 年 9 月

14. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その3 光環境評価システムの概要とロジック

加藤 洋子,中村 芳樹,小島 義包,大木 知佳子,金谷 末子

照明学会全国大会講演論文集,5-1

2014 年 9 月

15. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その 4 導入概要および省エネルギー性の評価

大木 知佳子,小島 義包,中村 芳樹,加藤 洋子,金谷 末子

照明学会全国大会講演論文集,5-2

2014 年 9 月

16. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その3 光環境評価システムの概要
小島 義包,大木 知佳子,中村 芳樹,加藤 洋子,金谷 末子

電気設備学会全国大会講演論文集,H-9,pp. 407-408

2014 年 8 月

17. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その 4 実証概要および省エネルギー性・快適性の評価

大木 知佳子,小島 義包,中村 芳樹,加藤 洋子,金谷 末子

電気設備学会全国大会講演論文集,H-10,pp. 409-410

2014 年 8 月

18. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システムに関する研究 その 6 側窓採光オフィスにおける照明・ブラインド制御の概要

小島 義包,大木 知佳子,中村 芳樹,加藤 洋子,金谷 末子

日本建築学会学術講演梗概集,環境工学 I ,40189,pp. 401-402

2015 年 9 月

19. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システムに関する研究 その 7 側窓採光オフィスのタスク・アンビエント照明制御事例

大木 知佳子,小島 義包,中村 芳樹,加藤 洋子,金谷 末子

日本建築学会学術講演梗概集,環境工学 I ,40190,pp. 403-404

2015 年 9 月

20. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システムに関する研究 その 8 ブラインド制御の概要と遮光判定手法

加藤 洋子,中村 芳樹,小島 義包,大木 知佳子,矢部 周子,小関 由明,金谷 末子

日本建築学会学術講演梗概集,環境工学 I ,40191,pp. 405-406

2015 年 9 月

21. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システムに関する研究 その 9 窓面明るさ判定手法および実物件への導入事例

矢部 周子,中村 芳樹,小島 義包,大木 知佳子,小関 由明,加藤 洋子,金谷 末子

日本建築学会学術講演梗概集,環境工学 I ,40251,pp. 543-544

2015 年 9 月

22. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その5 タスク・アンビエントオフィスにおける照明・ブラインド制御の概要

小島 義包,大木 知佳子,小関 由明,矢部 周子,中村 芳樹,加藤 洋子,金谷 末子

照明学会全国大会講演論文集,0305

2015 年 8 月

23. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その6 ブラインド制御システムの遮光判定と窓面明るさ判定の手法と制御事例

加藤 洋子,中村 芳樹,小島 義包,大木 知佳子,矢部 周子,小関 由明,金谷 末子

照明学会全国大会講演論文集,0306

2015 年 8 月

24. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その 7 側窓採光オフィスのタスク・アンビエント照明制御事例

大木 知佳子,小島 義包,中村 芳樹,加藤 洋子,金谷 末子

照明学会全国大会講演論文集,0307

2015 年 8 月

25. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その5 タスク・アンビエントオフィスにおける照明制御の概要と結果

大木 知佳子, 小島 義包, 小関 由明, 矢部 周子, 中村 芳樹, 加藤 洋子, 金谷 末子

電気設備学会全国大会講演論文集, H-10, pp. 439-440

2015 年 9 月

26. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その6 ブラインド制御システムの概要と効果

小島 義包, 大木 知佳子, 矢部 周子, 小関 由明, 中村 芳樹, 加藤 洋子, 金谷 末子

電気設備学会全国大会講演論文集, H-11, pp. 441-442

2015 年 9 月

27. 適切な明るさ感を確保した省エネルギー照明システムの実証研究

小島 義包, 中村 芳樹, 大木 知佳子, 加藤 洋子, 矢部 周子, 金谷 末子

日本建築学会学術講演梗概集 選抜梗概, 環境工学 I, 40246, pp. 523-524

2016 年 8 月

28. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システムに関する研究 その10 タスクライト制御の開発

大木 知佳子, 小島 義包, 中村 芳樹, 加藤 洋子, 金谷 末子

日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 I, 40260, pp. 559-560

2016 年 8 月

29. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その8 タスク・アンビエントオフィスにおける照明・ブラインド制御の実証結果

小島 義包, 大木 知佳子, 中村 芳樹, 加藤 洋子, 金谷 末子

照明学会全国大会講演論文集, 03-11

2016 年 8 月

30. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その9 タスクライト制御の開発

大木 知佳子, 小島 義包, 中村 芳樹, 加藤 洋子, 金谷 末子

照明学会全国大会講演論文集, 03-12

2016 年 8 月

31. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その7 タスク・アンビエントオフィスにおける実証結果

小島 義包, 大木 知佳子, 矢部 周子, 小関 由明, 中村 芳樹, 加藤 洋子, 金谷 末子

電気設備学会全国大会講演論文集, H-3, pp. 445-446

2016 年 9 月

32. 明るさ感を向上させた省エネルギー照明システム その6 タスクライト制御の開発

大木 知佳子, 小島 義包, 中村 芳樹, 加藤 洋子, 金谷 末子

電気設備学会全国大会講演論文集,H-4,pp. 447-448

2016 年 9 月

33. 照明率を利用した輝度簡易算出方法について

浦田 幸江,小島 義包,大木 知佳子

電気設備学会全国大会講演論文集,E-15,pp. 245-246

2018 年 9 月

34. 照明率を利用した輝度算出方法の検討

小島 義包,浦田 幸江,大木 知佳子

照明学会全国大会講演論文集,④-O-01

2018 年 9 月

特許

- | | |
|-------------------|--|
| 1. 特許第 6154100 | 光環境制御方法および光環境制御システム |
| 2. 特開 2015-127470 | ブラインド制御方法およびブラインド制御システム |
| 3. 特願 2018-112021 | 照度算出装置, 照度算出方法, 該方法を実行するためのプログラム及び記憶媒体 |

受賞

1. 電気設備学会賞 技術部門 開発奨励賞「明るさ感指標を利用した光環境制御システムの開発」
- 2017 年 6 月

助成事業

1. 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)
- 戦略的省エネルギー技術革新プログラム
- 「明るさ感指標を利用した光環境制御技術の開発」
- | | |
|-------|----------------------|
| 実用化開発 | 2013年1月7日～2014年3月31日 |
| 実証開発 | 2014年4月1日～2016年2月28日 |

Abstract

The primary energy consumption of lighting in office buildings accounts for about 20% of the entire building. To realize the ZEB (net zero energy building) that the country is targeting, even in lighting equipment, energy conservation measures such as the adoption of task & ambient lighting, introduction of lighting control, daylight use are desired. Also, in recent years, environmental building considering improvement of intellectual productivity and health promotion of office workers is beginning to be demanded, and daylight use is positioned as an essential element from both sides of energy saving and health and comfort.

1. Conventional system

Horizontal blinds (Venetian blinds) are installed in the side windows, which is a daylighting method for office in office buildings, to shield the solar radiation. Since it is possible to improve the energy saving performance and the viewing ability by lengthening the openable time of the blind, it is required to make an appropriate judgment as to whether or not the light shielding is necessary for each window plane.

In the conventional lighting control at daytime using the illuminance sensor, the dimming of the lighting fixture is performed so that the illuminance on the desk surface will secure a fixed value according to the amount of daylight incident. For this reason, since it is not possible to detect and evaluate the sense of brightness of the space, it is not guaranteed to keep the sense of brightness appropriately

In an office that adopts task and ambient lighting, development of a lighting control system having luminance and brightness perception as an evaluation index is needed to create a high-quality visual environment with adequate brightness.

2. Purpose of this research

The purpose of this research is to develop logic and system for controlling lighting and blind based on luminance image obtained by perspective projection of space and to clarify the usefulness of the system through demonstration operation. In addition, for the practical application of the system, it is also to propose a method that enables the design practitioner to easily predict the indoor brightness distribution including the window surface.

3. Proposed system and operation

The developed system consists of "luminance measuring unit", "light environment evaluating unit", "lighting control unit", "blind control unit", and generates outdoor and indoor luminance images in real time using CCD cameras. The dimming rate of the ambient lighting and the slat angle of the blind are automatically controlled using the luminance

distribution. For the quantitative evaluation of the brightness, we used the "brightness scale value (NB value)" representing the brightness perception and "brightness image" having the NB value at each pixel of the image used.

(1) Development of lighting control method using brightness image

The sense of brightness of the space felt by humans is influenced by the luminance distribution of the part with a large proportion in the field of view, such as walls and ceilings. Therefore, by appropriately forming the luminance distribution of this portion, the sense of brightness in the room can be improved.

After calculating the amount of daylight incident on the evaluation area (area where you want to maintain the brightness perception) set on the brightness image, the luminarias are dimmed so that the NB value of the evaluation area is equal to the target value.

After calculating the amount of daylight incident on the evaluation area (area where you want to maintain the brightness feeling) set on the image, the illumination is dimmed so that the NB value of the evaluation area is equal to the target value.

By repeating the evaluation of brightness perception and the control of lighting at appropriate intervals, while maintaining the target NB value of the evaluation area in accordance with the variation of the amount of daylight incident on the room, the sense of brightness necessary for ambient lighting can be maintained.

(2) Development of blind control method using luminance image

Based on the outdoor luminance image, the presence or absence of a high luminance portion due to direct sunlight or glare reflected on the glass surface is detected to judge whether or not the blind is shaded.

By this control, it is possible to enlarge the blind open ratio (porosity) by evaluating the influence of the shadow by the facing building seen from the window surface and reflected light from the surrounding buildings.

Also, by predicting the brightness of the blind surface and superimposing it on the outdoor luminance image, a predicted luminance distribution of the window surface is created. Based on the converted brightness image, the slat angle is calculated from the NB value and the area ratio occupied by the NB value and more, and blind control is performed with reduced glare of the window surface.

(3) Proposal of design method for constructing cooperative control

The design problem of the development system is to establish the following.

- ① Setting the evaluation area giving the control target value of the brightness feeling and the

method of determining the control target

② Simple method of predicting spatial brightness when daylight changes and blind slat angle changes

Therefore, in 2013 surveying cases in Europe and the United States where task and ambient lighting is often adopted, and classified lighting design method with consideration for brightness.

It is also clarified that the correlation between the area ratio of the ceiling and the wall in the field of view and the room index so that the setting of the evaluation area can be easily discriminated. (The room index shows the relationship between the width and the depth of the room, and the height of the light source, and is used for calculating the average illuminance.)

This facilitates the setting of the evaluation area from the planned room size.

As a simple prediction method of spatial luminance, we proposed a method for calculating the brightness of artificial lighting using the illumination factor expressing the characteristics of lighting equipment. We also proposed a daylight luminance calculation method which is obtained by the sum of direct luminance of daylight entering from the window surface and indirect luminance of incident daylight.

5. Conclusion

In the task & ambient lighting office with electric blinds, the following was confirmed by controlling illumination and blind based on the luminance image of the CCD camera. (1) the blind slats are properly operated even under daylight fluctuations, (2) the lighting is dimmed to maintain the target value of brightness

As a result, compared to the conventional control method, it showed that maintaining the sense of brightness in the room, energy saving of the lighting, opening the blinds is enhanced, and clarified the usefulness of the system.