

位置情報を活用した照明制御と視的快適性向上技術の検討

大塚 俊裕 古川 慧 五十嵐 雄哉 貞清 一浩 山田 哲弥
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Lighting Control System using Location Information in Office and Study on Technology for Visual Comfort

by Toshihiro Otsuka, Kei Furukawa, Yuya Igarashi, Kazuhiro Sadakiyo and Tetsuya Yamada

Abstract

In this paper, we reported the LED lighting control system using location information in office and the study on technology for visual comfort. The concept of control in this study is to offer the person's favorite environment only to the place where the person is working. We installed lighting control system using RFID location information system and favor illumination database in the operating office. As a result, compared with the conventional lighting, 70% or more of energy-saving performance was measured. Furthermore, in order to improve visual comfort, we made a brightness effecting lighting control of the wall and glare control of the window. As a result, increase of worker satisfaction to light environment and decrease of glare sensation was measured.

概要

本報では、執務空間における位置情報をを用いた LED 照明制御と視的快適性向上技術の検討について報告する。本研究における制御のコンセプトは、執務者の好みの環境をその人が作業している場所だけに提供するというものである。RFID を用いた個人の位置情報と好みの照度データベースに基づき人が居る場所のみ照明する制御システムを実際のオフィスに実装し、従来照明に比べて 70%以上の省エネルギー性能を確認した。さらに、視的快適性を向上させるため壁面の明るさ感演出照明制御と窓面のグレア対策を行った結果、執務者の光環境に対する満足度の向上傾向やグレア感の低下が確認された。

§1.はじめに

我々は、ICT(情報通信技術)を活用した建築環境のきめ細やかな制御により快適性と省エネルギーの両立を目指すスマートワークプレイス(以下 SWP)の開発を進めている。SWP では、RFID(電波による個人認証)を利用した位置情報に基づいて個人が執務する場所の照明や空調などをその個人の好みに合わせて設備制御することにより、快適な執務空間を提供すると共に、不在場所の照明や空調設備を自動的に停止することで大幅な省エネルギー性能を得ることを目標としている。本報では SWP の概念に基づいて開発した環境制御システムのうち、LED 照明制御についてシステムの内容と省エネルギー性能について報告するとともに、不均一な照明環境下における視的快適性を向上する工夫を検討した結果について報告する。

§2. LED 照明制御システムの概要

SWP の概念に基づく LED 照明制御システムは、執務者の位置情報をもとに、その場所だけを調光する機能が求められる。その機能を実現するために RFID にて取得した執務者の位置情報を管理する位置情報サーバと、そのリアルタイムな位置情報に基づき各灯具の調光率を逐次算出する照明制御サーバおよび各灯具への個別調光制御を行う個別制御コントローラで構成される LED 照明制御システムを開発した(図 - 1)。

各執務席の照明は素早く安定的な照度を提供するため、照度センサによるフィードバック型の調光制御ではなく予め用意した必要な照度に応じた調光率データベースにより直接灯具に調光を指示するデジタル制御方式としている。

本システム開発では、清水建設技術研究所本館の一部に SWP 実証スペースを構築した。面積 320 m²の執務空間に配置した 32 席の個人席と 6 台の打ち合わせ

テーブルを対象に、改修前と同程度の消費電力量となるようにグリッド天井型LED照明70灯を設置しシステムの実装と実証を実施した⁴⁾。

2.1 調光率データベースの作成

個人席と打合せテーブルで個別に必要な照度を得るための調光率データベースの作成には、双方向モンテカルロ光線追跡法に基いた照明シミュレーションソ

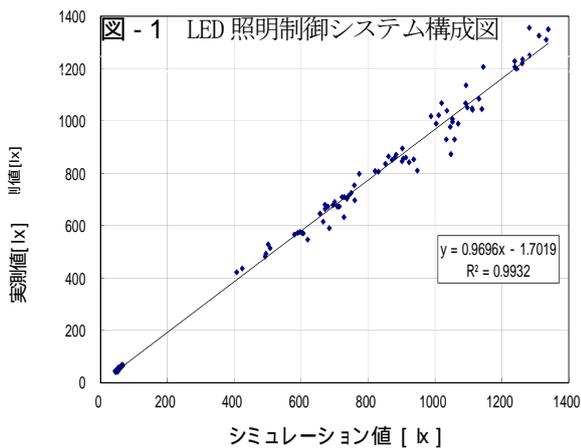
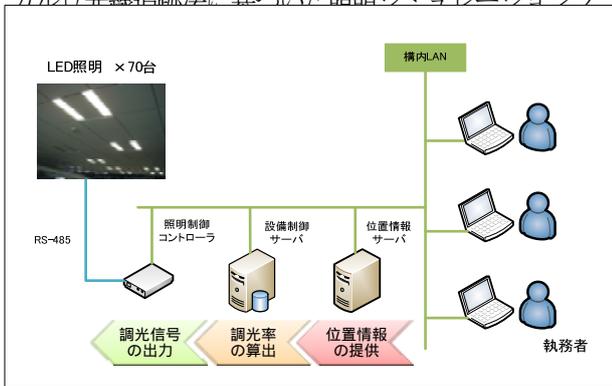


図-3 照明制御コントローラのGUI

はLED照明による室内全体の照度分布をシミュレーションし、70個の各灯具が32席の個人席と6台の打ち合わせテーブルの机上面に与える照度を個々に算出した。机上面照度シミュレーション値と実測値の比較を図-2に示す。調光率5%~100%での各席の机上面照度シミュレーション値と実測値より散布図と回帰直線を示している。回帰直線の決定係数は $R^2 = 0.9932$ でありその精度は極めて高いと言える。照明シミュレーションの結果より、各席にて300~700lxの照度を得るために必要な1灯ずつの調光率を算出した。調光率の算出では照明効率と好み照度を個人席単位で実現することを考慮し、自席直上の照明を優先して点灯、さらに直上の照明だけで照度が不足する際には、横、前、斜め前の順番に最大4灯を点灯させることをルールとして求めた。

2.2 好み照度の取得

執務者の好み照度を反映させるため、個人別の好み照度データベースを構築した。一般に、個人の好み照度について執務者に聞き取り調査しても、何ルクスと答えることは難しい。そこで、事前に自由に自席上のLED照明の点灯率を調整してもらい、その最多頻度の点灯率での机上面照度を各自の好み照度とすることとした。各自が簡単に照度調整できるWebブラウザを用いたグラフィックユーザーインターフェース(GUI)を照明制御コントローラに実装した(図-3)。GUIの丸いアイコンは一つ一つがLED照明の点灯状態を表しており、アイコン中央の丸を取り囲む円弧によって10%刻みで調光率を変更できる。

執務者にイントラネットに接続されている自席のパソコンからGUIを操作して照明を好みの明るさになるように約1ヶ月間自由に調整してもらった。その結

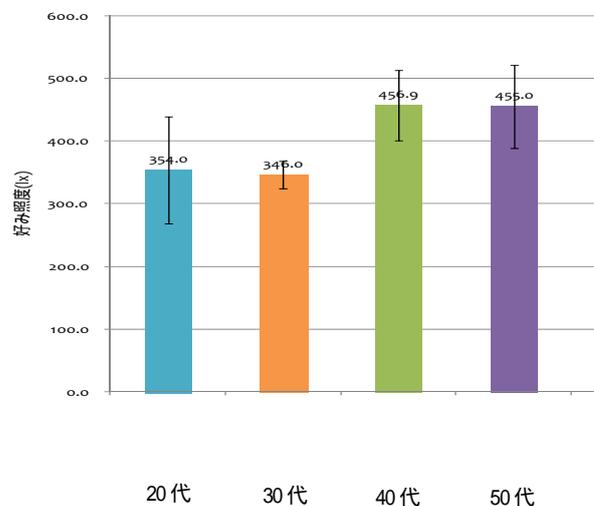


図-4 個人席における執務者の好み照度

果、個人席における執務者の好み照度が得られた。図-4は、このようにして得られた年代別の好み照度の平均値である。これを見ると、好み照度は年齢が高くなると共に高くなる傾向にあることが分かる。



写真-1 照明点灯状況

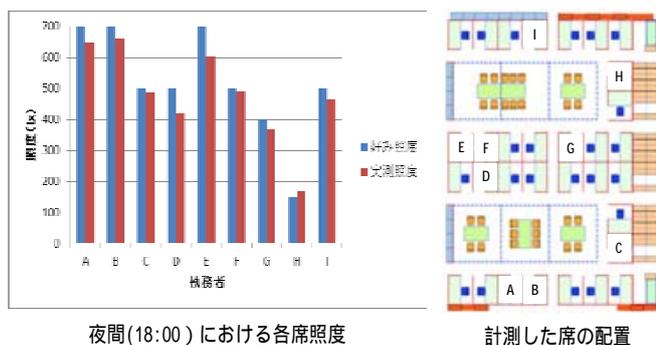


図-5 照明制御検証結果

2.3 位置情報とLED照明制御システムの連動

位置情報システムとLED照明制御システムを実装した状態で、その連動動作の検証を実施した。位置情報の連動は、位置情報サーバ上で生成される執務者位置データベースを設備制御サーバが参照することで行われる。照明の点灯状況を写真-1に示す。天井のLED照明は人が在席しているところだけ点灯していることが分かる。

図-5は、9名の執務者について好みの照度と、LED照明制御システムを稼働させて実測した机上上面照度である。これを見ると、好み照度と実測照度の差は執務者DおよびEを除いて5%以内となっている。なお、執務者EおよびDは好み照度に対して10%以上低い照度となったが、それらの机上には資料や本が積まれていたため、影ができ机上上面照度が低くなったと考えられる。

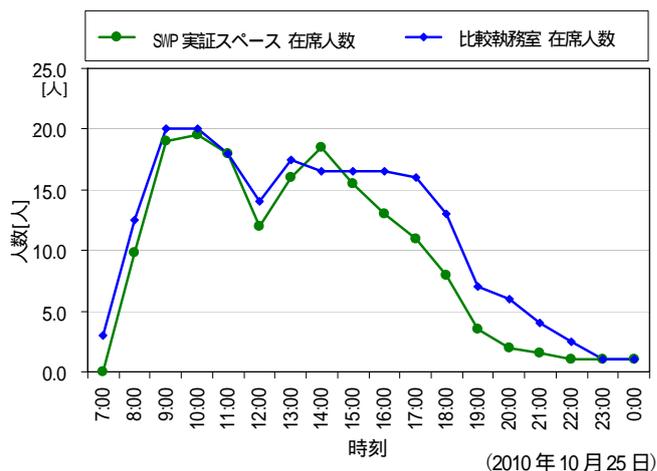


図-6 在席人数の推移

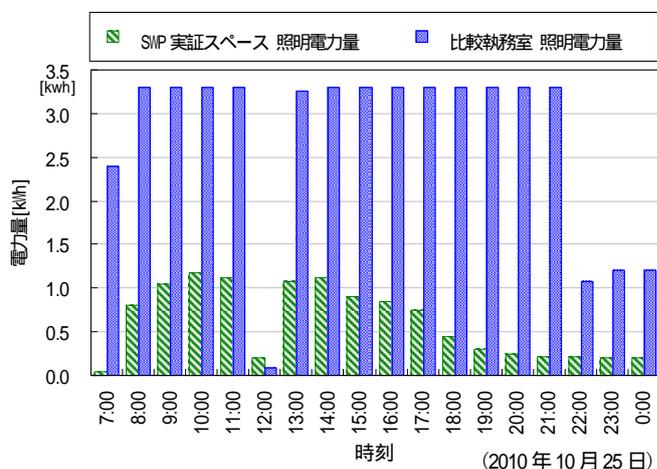


図-7 照明電力量の比較

2.4 照明制御による省エネルギー性能

省エネルギー性能を確認するため、SWP実証スペースと同じ建物で同じ床面積、同様な使い方をしている従来照明の比較執務室とで、1日の在席状況が同様な日を抽出し、その日の照明電力量を計測し比較した。比較執務室では、Hf照明66台を3ゾーンに分けたゾーン単位のON/OFF制御を行っている。在席人数の推移を図-6に、時刻毎の照明電力量を図-7に示す。

比較執務室ではゾーン単位でのON/OFF制御であるため、在席人数が少ない早朝や深夜は2ゾーンあるいは1ゾーン点灯だが、大部分の時間帯で全点灯であったのに対し、SWP実証スペースでは在席人数にほぼ対応した推移となっていることが分かる。就業時間帯(9:00-18:00)の積分値では69%減の31%の照明電力量となっている。さらに、終日の比較では78%減の22%の照明電力量となり、人数の少ない早朝や残業時間帯での省エネルギー効果が特に大きい。

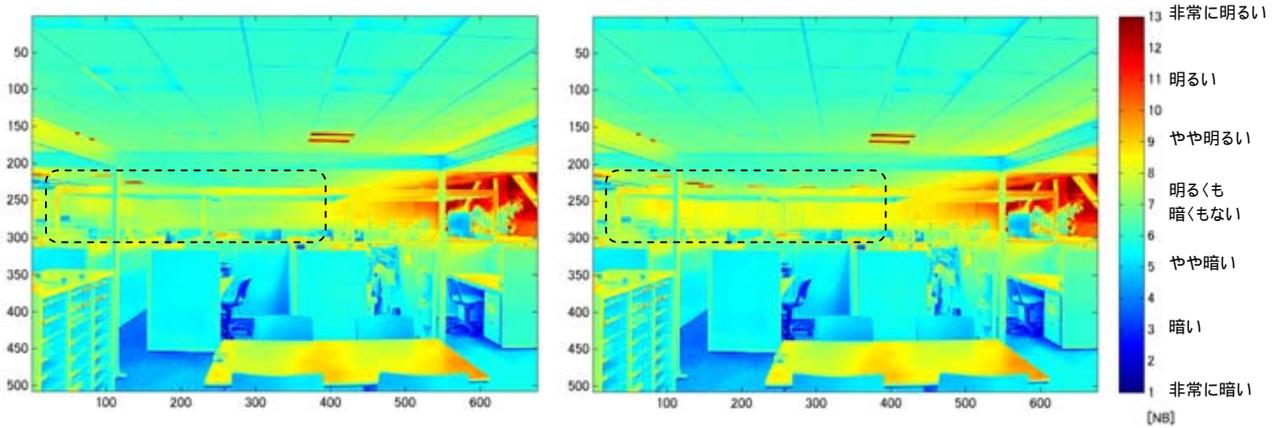


図 - 8 明るさ画像(左側：明るさ感制御導入前、右側：明るさ感制御導入後)

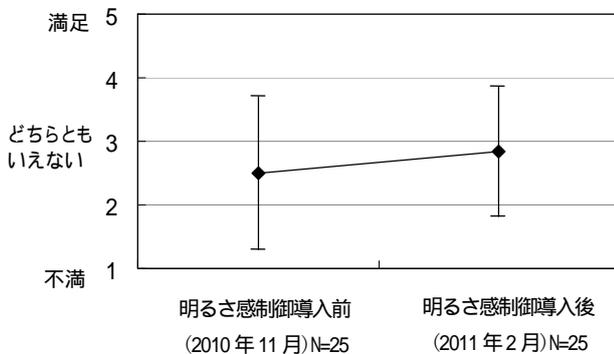


図 - 9 光環境に対する満足度

感が高く感じられ、少なければ明るさ感が低く感じられる⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。

スマートワークプレイスは個人位置情報に基づき人が居る場所のみ照明する仕組みであるため、机上面は個人の好み照度に保たれているが、在席率が低いと室内全体が暗くなり、明るさ感はあまり良好でないことが懸念された。上述したように、明るさ感を向上させるには視野中で明るく知覚される領域を増やせば良い。床、壁、天井などの室内を構成する領域を照明することで明るく知覚される領域を増やせるが、照明する面積と立体角の関係から水平面よりも鉛直面である壁を照明する方が効率が良い。そこで、在席率が低くても明るさ感を確保するために壁に近い灯具を30%点灯し壁面輝度を高くする明るさ感制御を導入した。輝度画像に対しコントラスト・プロファイル法で解析して得られた明るさ画像を示す(図 - 8)。左側が明るさ感制御導入前、右側が明るさ感制御導入後である。明るさ感制御導入前では、日光が届かない部屋の奥(点線で囲った部分)で壁面の輝度が低く明るさ感が低い。一方、明るさ感制御導入後部屋の奥(点線で囲った部分)の明るさ感が向上していることが確認できる⁹⁾。

実際に執務者が明るさ感の違いを感じているか確認するため、室内全体の光環境に対する満足度について、導入前後に5段階尺度によるアンケート調査を実施した。図 - 9に執務者へのアンケート調査結果を示す。

明るさ感制御導入前に比べて、導入後の満足度平均値が上昇している傾向があるが、有意ではなかった。満足度向上のために、更なる方策を考えることが必要である。この照明に必要な電力は122.4Wであり、従来照明に対して就業時間帯で31%の照明電力量が導入後35%に増加、終日で22%が導入後27%に増加するが、提案する照明制御システムの省エネルギー性能は依然として高いと言える。

S3.視的快適性向上技術の検討

スマートワークプレイスでは執務者個々に好みの照度環境を提供するが、更なる視的快適性向上技術として室内全体の明るさ感を確保する技術と窓面のグレアを抑制する技術について検討を行った。

3.1 明るさ感制御

明るさ感とは、環境に対して人が感じる明るさの印象である⁸⁾。従来明るさの尺度として用いられている照度では明るさ感を十分に説明することはできない。なぜなら、明るさ感には視環境の輝度対比、目の順応、視対象の大きさなどの要因が関与しているからである。これらの要因を含めて視環境を解析する方法として、中村ら(2005)はコントラスト・プロファイル法を開発している。コントラスト・プロファイル法では輝度画像を空間周波数成分に分解し、被験者実験で得られた空間周波数毎の評価係数を掛け合わせることで明るさ画像が出力される。明るさ画像は各画素が明るさ尺度値と呼ばれる値を持ち、明るく知覚される部分が視野内の大きな部分を占めていれば空間全体の明るさ

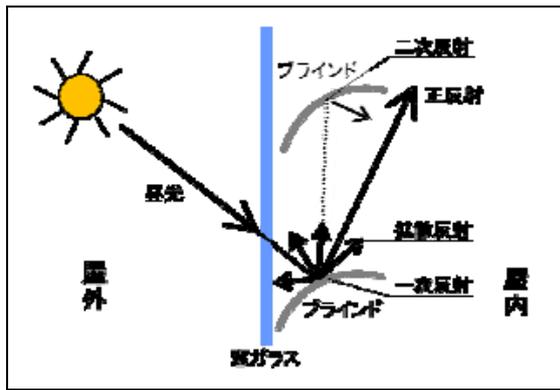
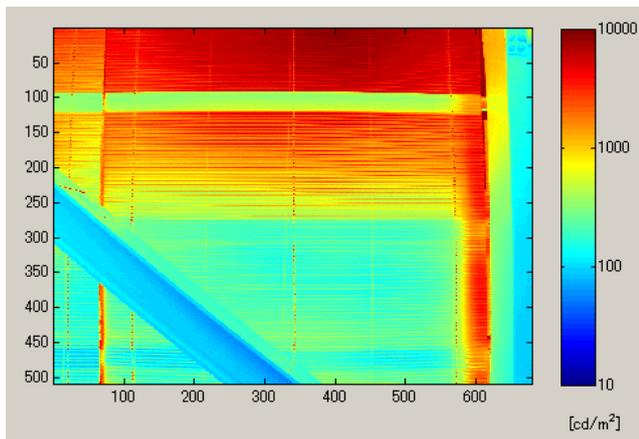


図 - 10 ブラインドにおける光の反射模式図

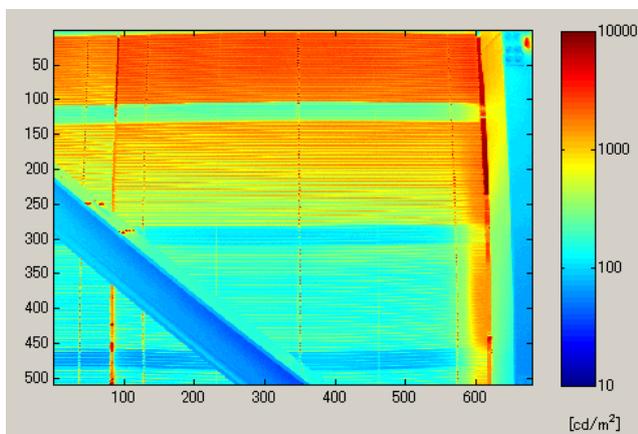
表 - 1 ブラインド スラット反射率

	通常ブラインド	グレア対策ブラインド
表	63.9%	71.2%
裏	63.9%	36.8%



測定日: 2012年1月13日 9:33
 太陽高度: 24.3° 全日射量: 0.43kW/m²
 窓面に対する太陽のプロファイル角度: 24.4°

図 - 11 ブラインド面の輝度画像(グレア対策前)



測定日: 2012年2月3日 9:07
 太陽高度: 24.3° 全日射量: 0.45kW/m²
 窓面に対する太陽のプロファイル角度: 24.4°

図 - 12 ブラインド面の輝度画像(グレア対策後)

3.2 窓面のグレア抑制

SWP 実証スペースでは、窓面に昼光導入型ブラインドを導入し昼光照明⁹⁾を行っているが、直射光が窓面に入射する時間帯にブラインド面の輝度が高くなることもあり、快適性の低下が懸念された。昼光導入型ブラインドはスラット角度が上から下にかけて順次変化しており、ブラインド上方に入射した光は室内天井方向へ、下方に入射した光は窓際天井方向へ反射することで昼光照明として機能する¹³⁾。日光がブラインドのスラット表面で反射(一次反射)する際に一部の拡散反射光が上部のスラット裏面で反射(二次反射)する(図 - 10)。この二次反射光が室内側から見たブラインド面の輝度を高める原因となる。そこで、ブラインド面のグレア対策として、二次反射を生じさせるスラット裏面の反射率を低下させる事で、ブラインド面のグレア対策とした⁷⁾。比較対象である通常のブラインドとグレア対策ブラインドとして選定した表と裏のスラット反射率を表 - 1 に示す。グレア対策ブラインドは裏面の反射率が 36.8% の灰色である。

SWP 実証スペースは窓面が南東に向いており、午前中に直射日光が入射する。また、窓ガラスは厚さ 12mm 透明フロートガラスである。グレア対策ブラインド導入前後において対策の効果を確認するために、窓面に対する太陽のプロファイル角度と全日射量がほぼ同じ条件で輝度画像の計測を行った。図 - 11、図 - 12 にそれぞれグレア対策前後のブラインド面の輝度画像を示す。対策前では昼光導入のためにスラットが開いているブラインド上部で 3000~6000cd/m² と高い輝度を示す。ブラインド下部では直射光を防ぐためにブラインドが閉っており輝度は 100~300 cd/m² である。対策後は、ブラインド上部で 1500~3000 cd/m² の輝度に低下しており、グレア対策の効果が表れている。

ブラインド面の輝度低下は、室内の昼光照明に影響すると考えられる。窓面中心から水平方向に 2.5m、高さ 1.2m のパーティション上に設置した照度計にて昼光照明度を計測した。前述した輝度画像計測後 1 時間

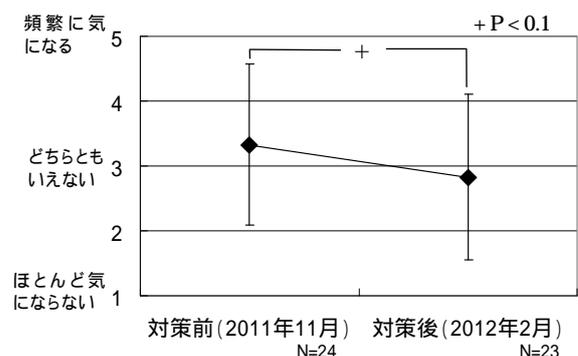


図 - 13 自席でのまぶしさが気になる頻度

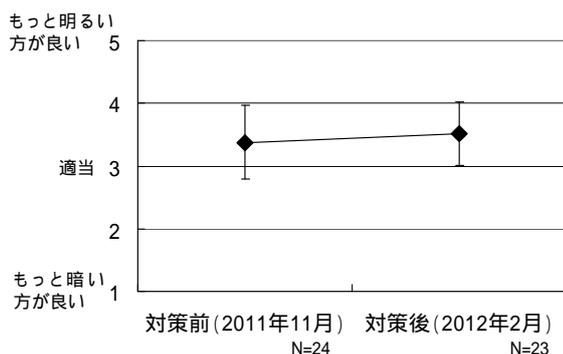


図 - 14 室内全体の明るさ

の平均照度は対策前の 1404lx に対し、対策後 931lx となった。

窓面のグレア対策について執務者がどう感じている確認するため、グレア対策前後にアンケート調査を行った。自席での眩しさが気になる頻度(図 - 13)では、グレア対策後に頻度が低下した。一方、昼光照度の低下に対して室内全体の明るさ(図 - 14)は対策後で差がない。グレア対策後のブラインド面の輝度低下により、人の順応輝度が低下したことで昼光照度の低下を相殺したことが考えられる。

§4.まとめ

SWP の概念は、必要な人に、必要な時、必要な場所で必要な環境を提供することであり、それにより快適性と省エネルギーの両立を図ることを目的としている。この概念に基づいた照明制御システムを開発し SWP 実証スペースに導入した。RFID を用いた個人の位置情報と好み照度データベースに基づき、人が居る場所のみ照明する制御を導入した結果、執務者の好みの照度を提供しつつ、従来照明に比べて 70%以上照明電力量を低減する大幅な省エネルギー性能を示すことができた。

視的快適性向上技術では、明るさ感制御と窓面のグレア抑制を行った。在席率が低い時に低下が懸念された室内全体の明るさ感に対して壁面を照明する明るさ感制御を行った結果、執務者の光環境満足度の向上傾向を示すことができた。窓面のグレア抑制では、ブラインド裏面の反射率を下げることで、執務者がまぶしさを感じる頻度の低下を示すことができた。

今後も SWP 実証スペースを用いて、より快適で省エネルギーな環境制御技術の実現に向けた開発を継続する予定である。

<参考文献>

- 1) 貞清一浩, 山田哲弥, 五十嵐雄哉: “スマートワークプレイスの開発 その1: スマートワークプレイスの概念と制御システム”, 2011年度日本建築学会学術講演梗概集, pp.475-476, 2011.
- 2) 五十嵐雄哉, 貞清一浩: “スマートワークプレイスの開発 その2: ワークプレイスにおける人の位置情報システムの活用”, 2011年度日本建築学会学術講演梗概集, pp.477-478, 2011.
- 3) 白石理人, 五十嵐雄哉, 國分誠, 貞清一浩: “スマートワークプレイスの開発 その3: 無線センサネットワークによる室内環境モニタリング”, 2011年度日本建築学会学術講演梗概集, pp.479-480, 2011.
- 4) 古川慧, 大塚俊裕, 伊藤清, 山田哲弥, 貞清一浩: “スマートワークプレイスの開発 その4: 個人の位置情報と好みに基づく照明制御手法の開発”, 2011年度日本建築学会学術講演梗概集, pp.481-482, 2011.
- 5) 大塚俊裕, 伊藤清, 古川慧, 山田哲弥, 貞清一浩, 中村芳樹: “スマートワークプレイスの開発 その5: 個人の位置情報と好みの照度に基づく照明制御を行う執務室における省エネルギー性能と光環境評価”, 2011年度日本建築学会学術講演梗概集, pp.481-482, 2011.
- 6) 古川慧, 大塚俊裕, 伊藤清, 田中康裕, 山田哲弥, 貞清一浩: “スマートワークプレイスの研究開発 その6: 昼光導入型ブラインドを利用した省エネ快適制御”, 2012年度日本建築学会学術講演梗概集, pp.1275-1276, 2012.
- 7) 大塚俊裕, 伊藤清, 古川慧, 山田哲弥, 貞清一浩, 中村芳樹: “スマートワークプレイスの研究開発 その7: 昼光導入型ブラインドにおけるグレア対策”, 2012年度日本建築学会学術講演梗概集, pp.1277-1278, 2012.
- 8) 藤野雅史, 中村芳樹, 井上修作, 岩井彌: “照明設計ツールとしての輝度-明るさ変換システムの構築”, 日本建築学会環境系論文集, No.597, pp.13-17, 2005
- 9) 中村芳樹, 江川光徳: “均一背景をもつ視対象の明るさ知覚”, 照明学会誌, Vol.88, No.2, pp.77-84, 2004
- 10) 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”, 照明学会誌, Vol.89, No.5, pp.230-235, 2005
- 11) 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, Vol.90, No.2, pp.97-101, 2006
- 12) 空間の明るさ評価研究調査委員会: “「空間の明るさ感」検討のためのリファレンスデータ”, 照明学会研究調査報告書 JIER-108, 2010
- 13) 登石久美子, 奥山博康, 野部達夫, 矢川明弘, 多井慶史: “昼光導入型ブラインドの省エネルギー性能に関する研究”, 2003年度日本建築学会学術講演梗概集, pp.237-238, 2003