

茅場町グリーンビルディングに導入した 知的照明システムと稼働ログデータ解析結果

三木 光範*¹ ○松下 昌平*²
桑島 奨*² 間 博人*³
雛元 昌一郎*⁴ 水取 寛満*⁵

キーワード：オフィス環境 最適化 光環境 照明制御 ログ解析

1. はじめに

近年、オフィスにおける執務者の知的生産性、創造性、および快適性の向上が注目されている¹⁻²⁾。ワークスタイルの多様化が進むにつれ、オフィス環境においても単一的な効率重視に限らず、働きやすさや快適性が求められるようになってきている。一方、オフィスにおけるエネルギー問題に対する対策も急務となっている。

このような背景から、次世代テナントオフィスビルのモデルケースとして、2013年5月、茅場町グリーンビルディング（三菱地所株式会社）が竣工した³⁾。当該ビルでは、快適性向上と省エネルギー性向上の両立を目指して先進的な環境配慮技術が数多く導入されている。

同志社大学が研究・開発を行ってきた知的照明システム⁴⁻⁵⁾も、オフィス環境を改善する先進技術の一つとして導入された。知的照明システムを導入することによって、オフィスにおける執務快適性の向上とともに省エネルギー性の向上が期待される。当該ビルでは、知的照明システム以外の照明技術として、人感センサ照明システム、タスクアンビエント照明システム、および環境配慮型照明システムが導入されており、著者らはそれら4種類の照明システム技術について有用性を検証している。

本稿では、当該ビルに導入した知的照明システムの稼働ログデータを解析し、知的照明システムの有用性を評価する。

2. 知的照明システム

2.1. 知的照明システムの概要

日本のオフィスでは、一般的にフロアに均一な明るさを提供する天井照明が用いられてきた⁶⁾。一方で、照明を個別に制御し、執務に最適な明るさを個人ごとに提供することは、照明環境改善の観点から有効であることが明らかにされている⁷⁾。そのような背景から、我々はオフィスにおける照明環境の改善と消費電力削減のために、分散制御照明システム（以下、知的照明システム）の研究を行っている⁴⁻⁵⁾。

知的照明システムは、任意の場所に各執務者が要求する明るさ（目標照度）および色温度（光色）を提供する

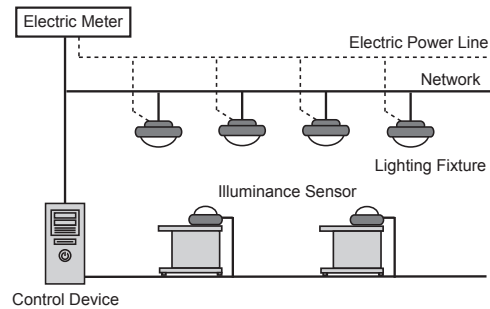


図1 知的照明システムの構成

照明システムである。知的照明システムは、制御装置、照明器具、照度センサ、および電力計を1つのネットワークに接続することで構成されている。知的照明システムの構成を図1に示す。

知的照明システムは東京都内複数の実オフィス環境において実証実験を行っており、オフィス全体に均一な照度を提供する従来の照明システムと比較した結果、高い省電力性を実現した⁸⁾。

2.2. 知的照明システムの制御アルゴリズム

知的照明システムの有効な制御アルゴリズムとして、回帰係数を用いた適応的近傍アルゴリズム(Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient : ANA/RC)を提案している⁵⁾。

ANA/RCとは、汎用的最適化手法である確率的山登り法をベースに、Simulated Annealing(SA)を照明制御用に改良したアルゴリズムである。

各照明は執務者に感知されない範囲で光度をランダムに変化させることで、最適な点灯パターンを探索する。

知的照明システムは、各執務者の目標照度の実現および消費電力の最小化を目的とする。そこで、制御に用いる目的関数を式(1)のように定式化する。

$$f = P + w \sum_{i=1}^n (L_t - L_c)^2 \quad (1)$$

P : 消費電力 [W], w : 重み, n : 照度センサ数,
 L_t : 目標照度 [lx], L_c : 現在照度 [lx]

目的関数は消費電力 P と目標照度 L_t と現在照度 L_c の差からなり、照明ごとに計算する。なお、重み w の設定によって、目標照度の実現を優先するか、省エネルギー性を優先するかを決めることが可能となる。

3. 茅場町グリーンビルディングの知的照明システム

3.1. 知的照明システムの導入フロア

茅場町グリーンビルディングでは、照明設備における先進技術の一つとして、同志社大学が研究・開発している知的照明システムが導入された。知的照明システムは、10階建ての当該ビルの2フロアに導入しているが、紙数の関係上、本稿では導入したフロアのうちの1フロア(以下、知的照明フロアと呼ぶ)について述べる。

3.2. 照明および照度センサの配置

当該ビルの知的照明フロアでは、グリッド天井用の調光調色型 LED 照明 50 灯 (シャープ株式会社製) を用いて制御を行っている。なお、照明の光度範囲は鉛直下方の光度で 0~1200 cd, 相関色温度 (以後、色温度) の範囲は 2800~6400 K である。このフロアの照明配置図を図 2 に示す。

知的照明システムでは、各執務者の机上面に照度センサを設置する。当該ビルでは、照度センサを 44 台設置し、各執務者の目標照度を実現する制御を行っている。このフロアにおける照度センサ配置図を図 3 に示す。

図 2 および 3 に示すフロアでは、基本的にマネージャーの執務机が図面上側、すなわち窓側に、窓を背にして配置され、それ以外の執務机は図面左右、すなわち窓面に垂直の方向に 2 名向かい合わせで配置されている。このようなレイアウトは日本の標準的なレイアウトである。

4. 知的照明システムの稼働ログデータ解析

4.1. 知的照明システムの稼働ログデータ

知的照明システムでは、導入したフロアにおけるすべての照明および照度センサの取得情報を定期的に収集し、ログデータとして保存している。ログデータとして保存するデータは次の通りである。

- ① すべての調光・調色型 LED 照明器具における白色の調光信号値および電球色の調光信号値
- ② すべての照度センサの目標照度値、現在照度値、および在席・離席状態

茅場町グリーンビルディングの知的照明フロアでは、1 分間に 1 回の頻度でログデータを保存している。収集したログデータの例として、照明器具から得られるログデータを図 4 に示す。

稼働ログデータを解析することで、システムの稼働状況や異常などを発見することが可能となる。さらに、ログデータを人が見やすいように可視化し、システムの利

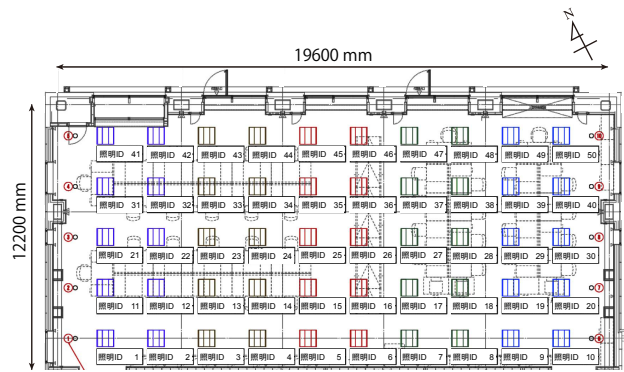


図 2 知的照明フロアの照明配置図

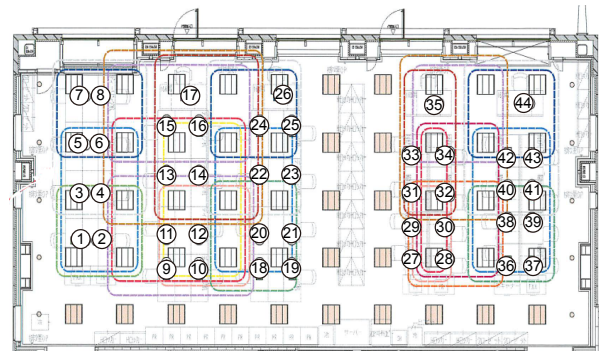


図 3 知的照明フロアの照度センサ配置図

日時・時間	ラベル	照明 25 電球色		照明 26 電球色	
		照明 25 白色	照明 26 白色	照明 25 電球色	照明 26 電球色
2013/11/01 08:51:00.758	L025	678	616	026	205
2013/11/01 08:52:01.071	L025	685	622	026	205
2013/11/01 08:53:00.212	L025	685	622	026	205
2013/11/01 08:54:00.446	L025	678	616	026	205
2013/11/01 08:55:00.727	L025	678	616	026	205
2013/11/01 08:56:01.024	L025	678	616	026	205
2013/11/01 08:57:00.009	L025	678	616	026	205
2013/11/01 08:58:00.212	L025	678	616	026	205
2013/11/01 08:59:00.415	L025	684	622	026	205
2013/11/01 09:00:00.649	L025	685	622	026	205
2013/11/01 09:01:00.852	L025	678	616	026	205
2013/11/01 09:02:01.087	L025	678	616	026	205
2013/11/01 09:03:00.212	L025	685	622	026	205
2013/11/01 09:04:00.477	L025	678	616	026	205
2013/11/01 09:05:00.685	L025	678	616	026	205
2013/11/01 09:06:00.868	L025	678	616	026	205
2013/11/01 09:07:01.040	L025	685	622	026	205
2013/11/01 09:08:00.087	L025	685	622	026	205
2013/11/01 09:09:00.290	L025	685	622	026	205

図 4 稼働ログデータフォーマット (照明器具)

用者や管理者に提示することで、システムの利用状況を改善することや、より良いシステムを構築することが可能となる。

また、知的照明システムの稼働ログデータから、各執務者の目標照度や現在照度、および色温度などの履歴がわかる。これらのデータを解析することで、各執務者が好む照度 (選好照度) や色温度 (選好色温度) を明らかにすることが可能となる。

4.2. 稼働ログデータ可視化システム

知的照明システムの稼働状況をより効率的に評価するために、稼働ログデータを可視化する必要がある。データの可視化手段として、照明の光度および色温度、ならびに各執務者の机上面照度などのログデータから、時間履歴グラフを作成するシステム、および任意の時刻にお

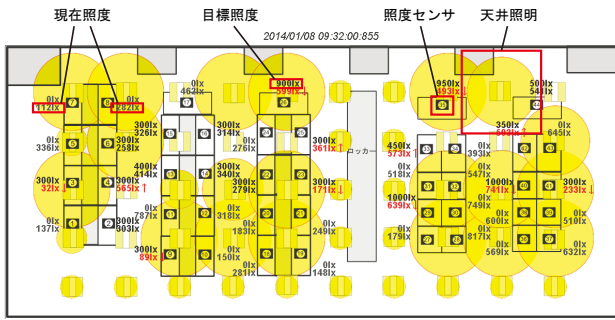


図5 可視化システムにより作成した光度分布図の概略

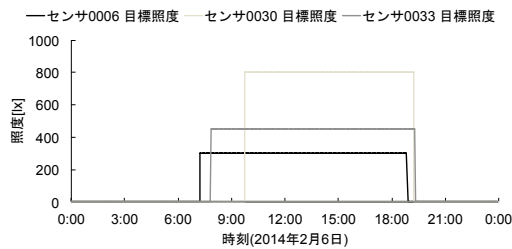


図6 目標照度履歴（照度センサ6, 30および33）

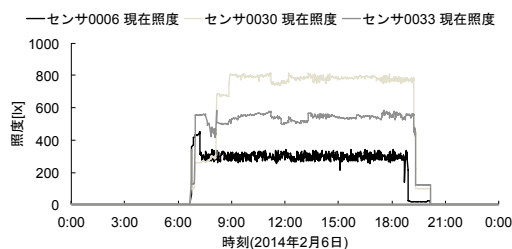


図7 現在照度履歴（照度センサ6, 30および33）

ける照明の光度分布図を作成するシステムを開発した。

前者を用いることで、知的照明システムの時間的な変化の理解が容易になり、後者を用いることで、照明の点灯状況と照度分布の関係性や外光の影響などを容易に検証することが可能となる。可視化システムによって作成した知的照明フロアの光度分布図の概略を図5に示す。

5. 稼働ログデータ解析結果

5.1. 解析するログデータ

本稿で解析に用いたログデータは、茅場町グリーンビルディングの知的照明フロア（導入された2フロアのうちの1フロア）において、2013年9月1日から2014年2月28日までに、照度センサおよび照明器具から得られたデータである。設置した照度センサは44台、照明器具は50灯であり、それぞれの機器から1分ごとにデータを取得し収集した。

5.2. 目標照度と現在照度の差が小さい状況

本節では、当該ビルの知的照明フロアにおける照度センサの取得照度の履歴を解析し、目標照度と現在照度の

差が小さい状況について述べる。

ここでは、執務者の目標照度が実現された代表的な例として、2014年2月6日における照度センサ6, 30, および33の目標照度履歴を図6に、現在照度履歴を図7に示す。なお、照度センサの番号は、図3における照度センサの番号を示している。

知的照明システムでは、執務者が離席ボタンを押すことで目標照度を0にする。また在席した際に照度センサの在席ボタンを押すことで以前の目標照度に復帰する。図6から、各執務者の入社時刻および退社時刻がわかる。そして設定された目標照度がそれぞれ300 lx, 600 lx, および800 lxであることがわかる。

オフィス環境において、人間が認知できる照度差は現在の照度の±7%程度であることから⁹⁾、知的照明システムでは、目標照度の±7%以内であれば目標照度を実現していると考える。図7から、各照度センサ地点において、各執務者が在席中の照度履歴は、それぞれ設定した目標照度の±7%程度を示している。

この結果から、2014年2月6日の照度センサ6, 30, および33地点において、知的照明システムは各執務者の目標照度を実現していることが確認できた。

5.3. 目標照度と現在照度の差が大きい状況

本節では、目標照度と現在照度の差が大きい状況について述べ、その原因を考察する。

ここでは、執務者の目標照度が実現できなかった代表的な例として、2014年1月17日における照度センサ9, 13, および29の目標照度履歴を図8に、現在照度履歴を図9に示す。なお、照度センサの番号は、図3における照度センサの番号を示している。

前節同様、目標照度の履歴から各執務者の入社時間、退勤時間および設定した目標照度がわかる。図8から、照度センサ13地点の執務者が目標照度を二度変更していること、照度センサ29地点の執務者が14時頃から15時頃にかけて離席していることがわかる。

しかし図9から、照度センサ9, 13および29のいずれの執務者においても、図8の目標照度と現在照度に大きな相違があることがわかる。この原因を調べるため、2014年1月17日の12時における知的照明フロアの照明光度分布図を作成した。作成した光度分布図から各照度センサ付近を拡大した図を図10および11に示す。

照度センサ9の目標照度と現在照度の差が大きい原因として、照度センサの設置位置が適正でないことが推察される。図10から、照度センサ9直上の照明は明るく点灯しているが、照度センサの現在照度は97 lxである。一方、図11の照度センサ27では、図10の照度センサ9と同等の照明点灯状況にもかかわらず、取得した照度が500 lxを超えていることが確認できる。この結果から、

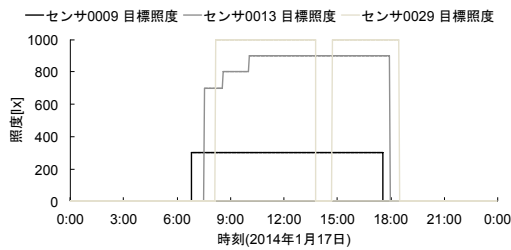


図 8 目標照度履歴（照度センサ 9, 13 および 29）

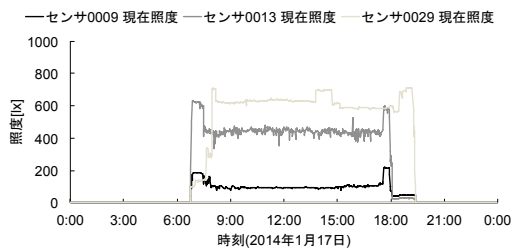


図 9 現在照度履歴（照度センサ 9, 13 および 29）

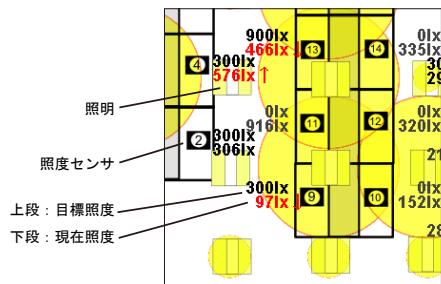


図 10 照度センサ 9 および 13 付近の光度分布図

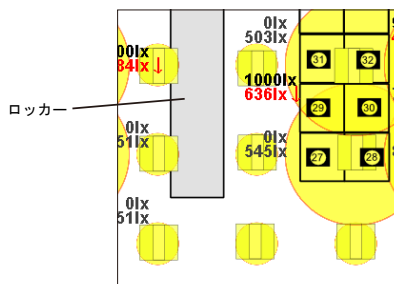


図 11 照度センサ 29 付近の光度分布図

照度センサ 9 は液晶ディスプレイの影になる位置に置かれている状況や、パーティションや書類の間に挟まれている状況など、机上面の照度を正しく取得できる位置になかったことが推察される。そのような場所に設置されている照度センサは、可能な限り執務スペース内の影にならない位置への移動を執務者に依頼する必要がある。

照度センサ 13 の目標照度と現在照度の差が大きい原因として、近傍の照度センサの目標照度が照度センサ 13 の目標照度と大きく異なることが推察される。知的照明システムでは、天井照明を用いているため、隣接した照度センサ同士が大きく異なる照度を要求した場合、それぞれの目標照度を実現することが物理的に不可能である

状況が存在する。図 10 より、照度センサ 13 の目標照度が 900 lx であるのに対し、近傍の照度センサ 4 の目標照度は 300 lx である。このように近傍の照度センサ同士で大きく異なる照度を要求した結果、照度センサ 13 は目標照度と現在照度の差が大きくなったと推察される。

照度センサ 29 が目標照度と現在照度の差が大きくなったのは、通路上の照明が均一光度制御されていることに原因がある。当該ビルでは、利用しているテナントの希望で、通路上の照明を最大点灯光度の 20% で均一光度制御している。図 11 から、通路上、およびロッカー上の照明（以下、通路照明）は 20% で固定制御されていることが視覚的にもわかる。図 11 では、照度センサ 29 の周辺にある照明のうち、通路照明以外の照明は、照度センサの目標照度を実現するため点灯光度が最大となっているが、照度センサ 29 の現在照度は目標照度を大きく下回っていることがわかる。この結果から、通路照明が均一光度制御されている状況では、照度センサ 29 の目標照度を実現することは物理的に困難であったと推察される。

5.4. 知的照明システムを導入したフロアの消費電力

本節では、茅場町グリーンビルディングの知的照明フロアにおける消費電力について述べる。

消費電力のログデータからグラフを作成することで、消費電力の高い時間帯の情報や、知的照明システムの省エネルギー性を検証することが可能となる。

代表的な例として、2013 年 11 月に消費電力が最小であった日の消費電力履歴を図 12 に、消費電力が最大であった日の消費電力履歴を図 13 に示す。

図 12 および 13 から、消費電力が最小の日と最大の日で、消費電力の差はほとんどないことがわかる。特に、多くの執務者が勤務している時間帯ではほとんど差がなく、比較的差があるのは残業時間帯であることがわかる。

また図 12 および 13 から、いずれの場合も消費電力は朝一旦高くなるが、11 時頃に低くなり、その後執務時間終了時まで徐々に増加していることがわかる。昼頃に消費電力が低くなっている原因は、窓からの日光により執務者の机上面照度が増加した結果、照明の光度が下がったためであると考えられる。この減少率はピーク時の消費電力の約 15% であり、知的照明システムの日光利用による省エネルギー効果は約 15% であることが確認できた。

一方、図 12 および 13 では、オフィスが使われていない時間帯でも消費電力が発生していることが確認できる。これは、知的照明システムの制御に用いる照度センサや照度センサを接続するためのネットワークハブ、制御 PC などの消費電力であると考えられる。これらの消費電力は無駄な電力であるため今後の検討課題である。対策として、フロアの最後の退室者が出た時点で全電源を切断するようなシステムに改良することで削減することがで

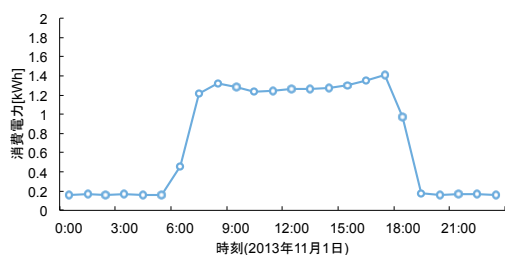


図 12 消費電力最小であった日の消費電力履歴 (11月)

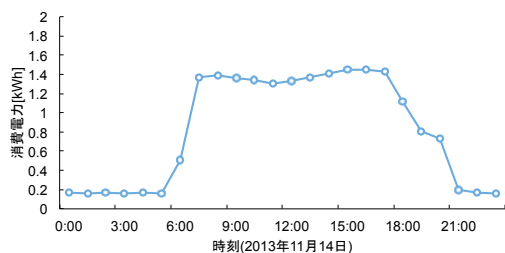


図 13 消費電力最大であった日の消費電力履歴 (11月)

きると考えられる。

なお、この知的照明システムの消費電力は、照度を 700 lx 均一とした天井照度センサと人感センサを用いた照明システムと同等の消費電力であり、知的照明システムの制御による省エネルギー効果は表面的には確認できなかった。この原因には、人感センサ照明システムのフロアで用いた LED 照明器具と知的照明フロアで用いた調光・調色型 LED 照明器具における器具効率の相違がある。このビルで用いられている、色温度固定で調光だけの LED 照明器具の器具効率は、調光率に関わらず約 88 lm/W であるが、知的照明フロアで用いている調光調色型 LED 照明では色温度によって器具効率が異なり、調光率 100% で約 74 lm/W、調光率 10% で約 49 lm/W となり、調光率が下がると器具効率が大きく低下する。これを考慮し、知的照明フロアにおける平均的な調光率から求めた器具効率の悪化を差し引いて計算すると、調光なしの LED 照明器具を用いた場合には、知的照明システムによる省エネルギー効果は約 30% であることが推定された。その意味では、調色型 LED 照明器具の発光効率の向上は今後の課題である。

6. あとがき

本稿では、茅場町グリーンビルディングに導入した知的照明システムの稼働ログデータを解析し、その有用性を評価した。

照度履歴や照明の調光度履歴などのログデータを解析したことで、知的照明システムが執務者の目標照度を適切に実現している状況と、目標照度と現在照度に大きな差が存在する状況があることがわかった。その原因として、照度センサの設置位置が適正でないことや、近傍の照度センサとの目標照度が大きく異なること、通路照明

が均一光度制御されていることなどが推察された。

一方、消費電力のログデータを解析したことにより、知的照明システムは調光・調色で制御を行っているにもかかわらず、調光のみで制御を行っている人感センサ照明システムのフロアと同等の消費電力であることがわかった。また、知的照明フロアで調色なしの LED 照明器具を用いた場合には、知的照明システムによる省エネルギー効果は約 30% であることも推定された。

このように稼働ログデータを解析した結果、当該ビルに導入した知的照明システムの稼働状況を確認し、その有用性を検証することができた。また、今後の展望として改善すべき問題を発見することができた。

なお、本研究は独立行政法人 NEDO 技術開発機構の「省エネルギー革新技術開発事業／実証研究／高機能省エネ型知的照明システムの研究開発」として H23-25 年度に実施した研究成果の一部である。

【参考文献】

- 1) Olli Seppanen, William J. Fisk, "A Model to Estimate the Cost-Effectiveness of Improving Office Work through Indoor Environmental Control", Proceedings of ASHRAE, 2005.
- 2) M. J. Mendell and G. A. Heath, "Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature", Indoor Air, Vol. 15, No. 1, pp. 27-52, 2005.
- 3) 「茅場町グリーンビルディング」竣工のお知らせ http://www.mec.co.jp/j/news/archives/mec130509_kayabacho.pdf
- 4) 三木光範, "知的照明システムと知的オフィス環境コンソーシアム", 人工知能学会誌, pp. 399-410, 2007.
- 5) 小野景子, 三木光範, 米澤基, "知的照明システムのための自律分散最適化アルゴリズム", 電気学会論文誌. C, 電子・情報・システム部門誌, vol. 130, no. 5, pp. 750-757, may 2010.
- 6) 照明基準総則 (JIS Z 9110-2010)
- 7) Peter R. Boyce, Neil H. Eklund, S. Noel Simpson, "Individual Lighting Control: Task Performance, Mood, and Illuminance", Journal of the Illuminating Engineering Society, pp. 131-142, Winter 2000.
- 8) 大学法人同志社大学, 株式会社三井物産戦略研究所, "平成 20 年度~平成 22 年度成果報告書エネルギー使用合理化技術戦略的開発/エネルギー有効利用基盤技術先導研究開発/自律分散最適化アルゴリズムを用いた省エネ型照明システムの研究開発", Technical Report 20110000000875, 2011.
- 9) 鹿倉智明, 森川宏之, 中村芳樹, "オフィス照明環境における明るさの変動知覚に関する研究", 照明学会誌, Vol. 85(5), pp. 346-351, 2001.

- *1 同志社大学理工学部 教授 工博
- *2 同志社大学理工学研究科 大学院生
- *3 同志社大学理工学部 助教 工博
- *4 三菱地所株式会社 名古屋支店 次長
- *5 株式会社三菱地所設計 電気設備設計部 主事

Log Data Analysis Result of an Intelligent Lighting System Introduced in Kayabacho Green Building

Mitsunori MIKI*¹ ○Shohei MATSUSHITA*²
Sho KUWAJIMA*² Hiroto AIDA*³
Shoichiro HINAMOTO*⁴ Hiromitsu MIZUTORI*⁵

Keywords : Office environment, Optimization, Light environment, Lighting control, Log analysis

In recent years, continuing research into an office environment, such as office workers intellectual productivity, creativity, and amenity identifies the office environment has a major influence on workers. Diversification of work style progresses, not only the efficiency emphasize a unitary, the comfort and ease of work are required in the office environment. Furthermore, the energy saving in buildings is a big issue in order to promote Japan's saving-energy strategy and to improve electricity supply and demand situation.

For all of these reasons, as a model case for the next generation tenant office building, Kayabacho Green Building (Mitsubishi Estate Co., Ltd.) was completed in May 2013. Many advanced environmental consideration technologies are introduced into the building concerned for comfort improvement and the coexistence in the energy-saving inclination. An Intelligent Lighting System, which offers individual illumination and color temperature to the office workers that Doshisha University researched and developed, was introduced as one of the advanced technologies to improve the office environment. In the building concerned, a motion sensor lighting system, a task ambient lighting system and an environment-conscious lighting system are introduced as an illumination technology except the intellectual lighting system, and authors inspect usefulness about those four kinds of lighting systems technology.

In this report, we analyze the operation log data of the Intelligent Lighting System, which we introduced into the building concerned and evaluate the usefulness of the Intelligent Lighting System.

As a result analyzing the operation log data, we confirmed the situation that the Intelligent Lighting System realizes the illuminance that the office workers required appropriately, and the situation with the large difference between illuminance that the office workers required and present illuminance. As the cause of the situation, which there is a large difference between office workers target illuminance and current illuminance, we inferred the installation position of the illuminance sensor is not appropriate, target illuminance and illuminance sensor in the neighborhood are significantly different, and passage lightings are controlled in uniform luminance.

On the other hand, despite of the Intelligent Lighting System is controlling the LED Lightings with diming and toning functions, the power consumptions were approximately equal to the occupancy sensor lighting system, controlling the LED lightings with diming function. In addition, we confirmed the Intelligent Lightings System's energy saving is approximately 30 % when the usage of LED lighting fixture without toning in the Intelligent Lighting System floor.

From all of these results, analyzing the operation log data, we verified the energy efficiency and the operation status of the Intelligent Lighting System which was introduce in the building, and found problems that needs to be improved for the future prospects.

*1 Professor, Department of Science and Engineering, University of Doshisha.

*2 Graduate Student, Department of Science and Engineering , University of Doshisha.

*3 Associate Professor, Department of Science and engineering, University of Doshisha.

*4 Deputy General Manager, Nagoya Branch Office, Mitsubishi Estate Co., Ltd.

*5 Manager, Electrical Equipment Design Department, Mitsubishi Jisho Sekkei Inc.