

## 可視光通信による省電力照明システム

## Power Saving Lighting System with Visible Light Communication

松林 勝志<sup>\*1</sup> 大川 美緒<sup>\*2</sup> 田畑 愛美<sup>\*3</sup> 赤松 駿一<sup>\*4</sup> 山下 晃弘<sup>\*1</sup>

Katsushi Matsubayashi Mio Okawa Megumi Tabata Shunichi Akamatsu Akihiro Yamashta

## 1. はじめに

東日本大震災により電力が逼迫し、計画停電が実施された影響から節電に関する意識は高まってきているが、今後も省電力を推進し、エネルギーリスクを下げしていく必要がある。照明による節電は取組みやすく効果的である[1]。しかし、既存の照明システムにはいくつかの問題点がある。例えば大部屋によくある、「列」等のグループに照明を分け、手動操作パネルで調光できるシステムは、調光単位がグループ単位であるため、調整範囲や組合せの自由度に乏しい。照明毎の調光を目指せば、操作パネルと各照明器具との間に複雑な配線が必要になり施工コストも高くなる。またどこかが故障すればシステム全体が停止する恐れもある。さらに、節電する／しないは、人の意識に依存する。

そこで本研究では、周辺の明るさ（窓からの採光やプロジェクタの明かりなど）に応じて各照明が適切に自動調光するシステムを開発する。各照明間で照明自身の光を用いた可視光通信ネットワークを構築し、室内の全照明が協調して省電力動作する。このシステムでは照明光で可視光通信するため、電源接続以外の工事は不要で、電波も使用しない。施工コストは通常の照明設置コストと変わらない。故障の場合もシステム全体が停止することがなく、故障した照明を補うように周辺の照明が明るさを調整する。修理は故障した照明の交換だけで完了する。

## 2. システム概要

システム概要を図 1 に示す。照明には、今後急速な普及が見込まれる LED 照明を用いる。LED の高速点滅可能という特徴を利用し、照明間での可視光通信ネットワークを実現した。ユーザーは調光コントローラにより節電率の設定等を行うことが可能である。調光コントローラでは、可視光通信ネットワークを介して受け取るデータを元に、設定した節電率や明るさを達成するよう各照明に対して調光指示を行う。また、現在の節電状況、過

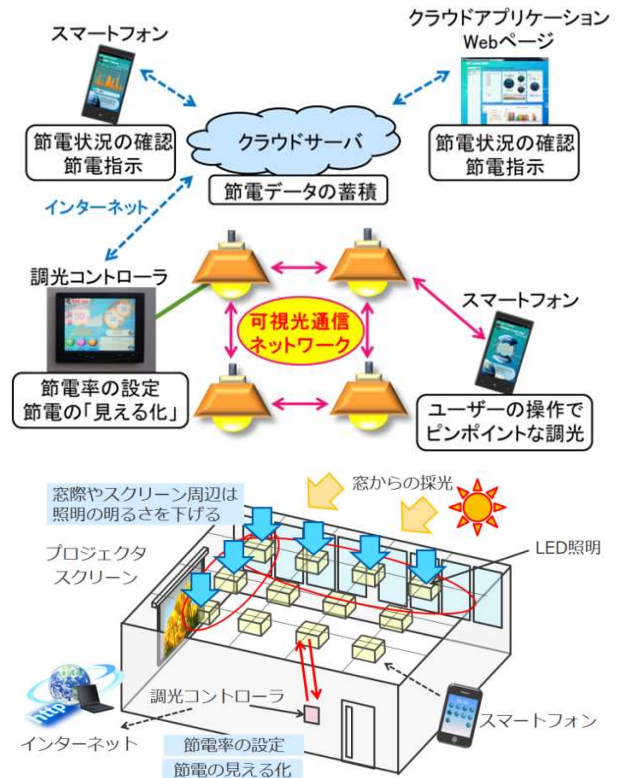


図 1 可視光通信による省電力照明システム

去の節電記録の確認などを行い、節電の「見える化」も実現している。さらに、スマートフォンと照明間で可視光通信を行い、ユーザーがピンポイントで調光することも可能にしている。建物単位等、更に広範囲における節電の「見える化」実現のため、調光コントローラは定期的にインターネット上のクラウドサーバへ節電データを送信している。スマートフォン・パソコンから、インターネットを介して節電状況の確認、節電指示などができるよう、クラウドアプリケーションも開発した。

## 3. ハードウェアの開発

可視光通信を行う送受信機は、文献[2]を参考に開発した。送信は LED、受信はフォトダイオード (PD) を使用するが、本システムでは下方の明るさを測定する必要があるため、照度センサ (CdS) も搭載した。

真下から見た LED 照明の構成を図 2 に示す。40W 電球相当の明るさを持つ。周辺の明るさの測定のため、CdS

\*1 東京工業高等専門学校 情報工学科

\*2 NTT コミュニケーションズ (株)

\*3 日信ソフトエンジニアリング (株)

\*4 本田技研工業 (株)

を 1 つ，スマートフォンとの通信のため，PD を 2 つずつ下に向けて取り付けました。

可視光通信モジュールの構成を図 3 に示す。LED，PD が水平方向を向くよう可視光通信モジュールを取り付け，四方にある他の照明と，さみだれ式に双方向通信を行うことができる。

また，スマートフォンと照明間で可視光通信を行い，ユーザーがピンポイントで調光することも可能にするため，スマートフォン用可視光通信モジュールも開発した(図 4)。このモジュールには小型の PIC マイコンを使用した。当初はスマートフォンと PIC マイコン間はヘッドフォン・マイク端子を利用した FSK (Frequency Shift Keying) 方式で開発し，後にスマートフォンに USB が搭載され，スマートフォン側が USB ホストになれるようになってからは，USB 接続とした。FSK 方式を採用したのは大半のスマートフォンがヘッドフォン・マイク端子を装備していたため，ハード的な機種依存性をなくすことができるためである。

#### 4. 照明間可視光通信ソフトウェアの開発

LED 照明に搭載した，H8 マイコン (H8-3052F，動作周波数 25MHz，RAM8kB) を LED 照明に搭載し，可視光通信を実現した。

##### 4.1 変調方式

可視光通信の研究では，照明の明るさを変えずに通信を行う I-4PPM (Inverse 4 Pulse Position Modulation) 伝送方式がよく使われる[2]。本システムではこの伝送方式で照明を点滅させ，可視光通信を行いながら調光を実現する。そこで I-4PPM 伝送方式をさらに発展させた I-4PPM-DFRM(Data Frame Rate Modulation) 方式を提案する。

I-4PPM-DFRM 方式は，データフレームの送信比率を変更することで調光を実現する (Fig.5)。データフレーム長×調光段階数 (例えば 20) を 1 レコードとし，このレコードをちらつきを感じない周波数で，繰り返し送信することで調光する。本研究では東日本の蛍光灯の点滅周波数である 100Hz 以上とした。

##### 4.2 通信方法

本研究では，データの送信は，部屋の照明そのもので行われる。そのため通常の通信とは異なり，データの送信を止めることができない。通信には H8 マイコンの SCI (Serial Communication Interface) で，データを途切れなく送信するため，DMA (Direct Memory Access) を使用した。なお完全消灯も可能であるが，完全消灯中は通信はできないため，通信が必要な場合はデータフレーム

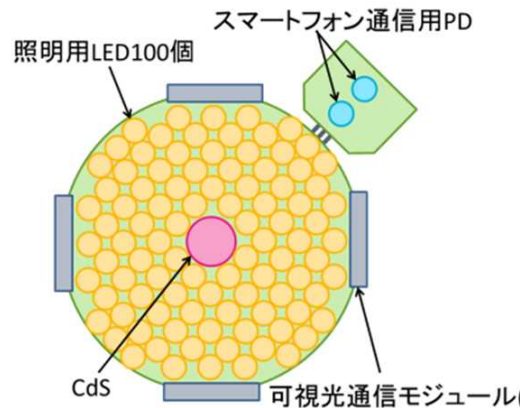


図 2 可視光通信機能付き照明

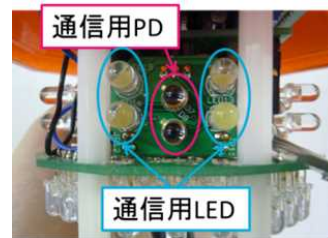


図 3 照明間可視光通信モジュール

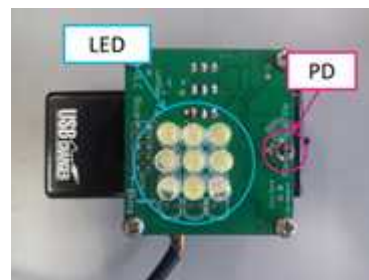


図 4 スマートフォン用可視光通信モジュール

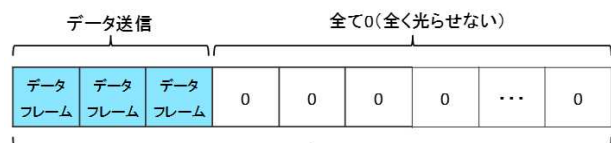


図 5 I-4PPM-DFRM 方式

の送信比率をゼロに近い値にする。

### 4.3 通信アルゴリズム

2 種類のアルゴリズムを検討した。

#### 4.3.1 半二重通信アルゴリズム

半二重アルゴリズムでは、調光コントローラからの命令を全ての照明に伝える動作 (図 5 上) と、全ての照明の周辺の明るさを調光コントローラへ伝達する動作 (図 6 下) を交互に繰り返す。

図 7 にデータフレームフォーマットを示す。PRE (Preamble) はデータの始まり、EOF はデータの終わりを示す。SOURCE で送信源が LED 照明なのかスマートフォンなのかを表し、LAMP\_ID で送信源照明の ID を表す。スマートフォンから送信する場合 (図 8), LAMP\_ID にはコントロール対象照明の ID が入る。DATA は照明の数分用意し、それぞれの照明において DIRECTION で送信方向フラグ、SP\_LOCK でスマートフォンによって調光されているか否か、BRIGHTNESS で照明周辺の明るさ、PWM で現在の照明の出力 (%) を表す。

各照明は、調光命令送信モードと周辺の明るさ送信モードを交互に繰り返す。全ての照明にデータが行き渡った時、モードを切り替える。図 6 の例では、コントローラからの調光命令が照明 A に送られ、A から B と D、E と C へと伝わっている。伝達する際、それぞれの照明は、データフレーム内の自分の DIRECTION 値を変えて伝送する。最下流の照明 F は、データフレーム内の全照明の DIRECTION を調べることにより、命令が行き渡ったと判断できる。命令が行き渡ったとき、F は周辺の明るさ送信モードになり、調光コントローラに向けて図 6 下の様にデータを発信する。

しかし、この方式では F に届いたデータフレーム内の全照明の DIRECTION の値が揃わない限り、調光コントローラに向けての通信が始まらないという問題がある。

#### 4.3.2 全二重可視光通信アルゴリズム

全二重通信アルゴリズムは、調光コントローラからの調光命令と各照明の周辺の明るさ情報を、データフレーム内にまとめて格納することで、双方向の同時通信 (図 9) を可能にした通信アルゴリズムである。

図 10 にフレームフォーマットを示す。調光命令と周辺の明るさ情報は、COMMAND\_DATA と LAMPS\_DATA にそれぞれ格納される。CMD\_ID は命令の新しさの度合い (命令 ID) を表し、CMD は各照明に対する調光命令を意味する。FLWD\_CMD\_ID には各照明が従っている調光命令の命令 ID が格納される。

このアルゴリズムでは、調光命令と周辺の明るさを同時に伝搬させる。隣の照明からデータを受信すると、照明は自分が現在送信しているデータと受信データとで

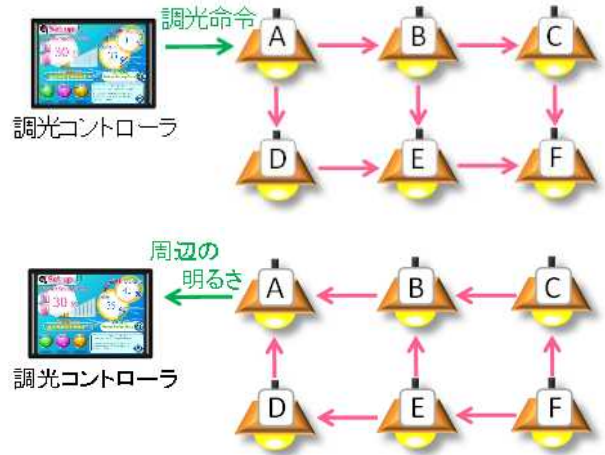


図 6 半二重可視光通信アルゴリズムの流れ

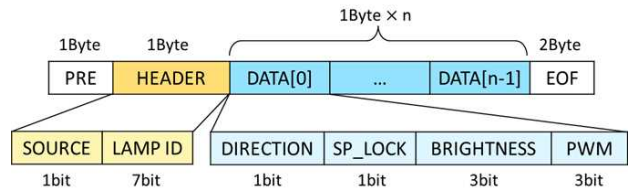


図 7 半二重可視光通信アルゴリズム時のデータフレームフォーマット

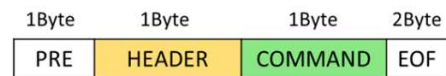


図 8 スマートフォンと照明で可視光通信する場合のデータフレームフォーマット

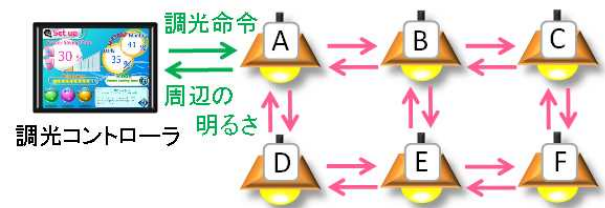


図 9 全二重可視光通信アルゴリズムの流れ

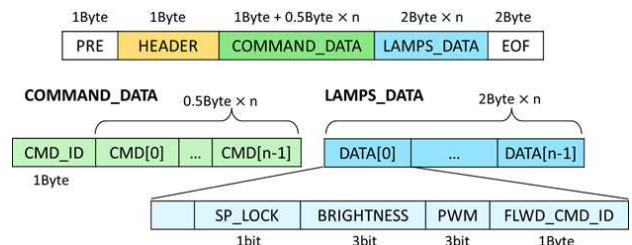


図 10 全二重可視光通信アルゴリズム時のデータフレームフォーマット

CMD\_ID, FLWD\_CMD\_ID をそれぞれ比較する。そして、新しい方を次の送信データとする。受信 CMD\_ID が新しい場合は、命令に合わせて出力を変更する。

このアルゴリズムで実験した結果、安定して照明間通信を行えることが明らかとなった。

## 5. 調光コントローラの開発

ICOP 社の超小型コンピュータ eBox-3310, OS として Windows Embedded Compact 7, 表示・操作装置としてタッチパネルディスプレイを使用し、調光コントローラを開発した (図 11)。

### 5.1 節電モード

次の 3 つのモードを実装した。

#### 5.1.1 節電率優先モード

各照明で照明下部周辺の明るさを測定し、部屋全体で明るさが均一になりかつ、部屋の照明全体で節電率を達成する。スマートフォンによる個別調光を受けた場合、個別調光を受けた状態で節電率を計算する。

#### 5.1.2 明るさ優先モード

明るさの度合いを 10 段階から設定できる。システムの動作開始時に取得する周辺の明るさを平常時とし、以降の周辺の明るさの変化を 10 段階の明るさ設定値に対応させる。周辺の明るさに応じて、照明自身の照度+窓などの採光で設定した明るさを保つよう調整する。スマートフォンによる個別調光を受けた照明は、調光指示対象から外し、個別調光が解除された場合は、調光指示対象に復帰する。

#### 5.1.3 シンプル調光モード

設定した節電率で全ての照明が動作する。スマートフォンによる個別調光を受けた照明は、調光指示対象から外す。個別調光が解除された場合は、調光指示対象に復帰する。

## 5.2 節電の見える化

調光コントローラにはタッチパネルディスプレイを利用し、次の 3 つの画面で節電状況の見える化を実装した。

### (1) 節電率設定画面

図 12 に節電率設定画面を示す。節電モードの切り替えの他、節電率の設定、当日の節電状況、当月の節電状況が確認できる。

### (2) 節電状況確認画面

図 13 に節電状況確認画面を示す。eBox-3310 に接続した USB メモリから、決められたフォーマットで作成された照明や窓等のレイアウトを示すデータを読み込み、天井の見取り図を自動作成する。各照明アイコンの色で照明ごとの節電状況が分かるほか、アイコンをタップすることで、具体的な節電状況が表示される。

### (3) 節電記録確認画面

図 14 に節電記録確認画面を示す。月毎・日毎の節電



図 11 調光コントローラ (開発中の写真)



図 12 節電率設定画面



図 13 節電状況確認画面



図 14 節電記録確認画面

率を切り替えて表示することができる。グラフをタッチ

することでその日、あるいはその時間帯の節電率をコメントボックスから知ることができる。

## 6. クラウド連携アプリケーションの開発

部屋単位の他、建物単位、事業所単位等、より広範囲における節電の「見える化」実現のため、Windows Azure クラウドサーバを利用し、部屋ごとの節電データを共有できるようにした。そのための調光コントローラ、パソコンのブラウザ、スマートフォンで利用できる、クラウド連携アプリケーションを開発した (図 15)。

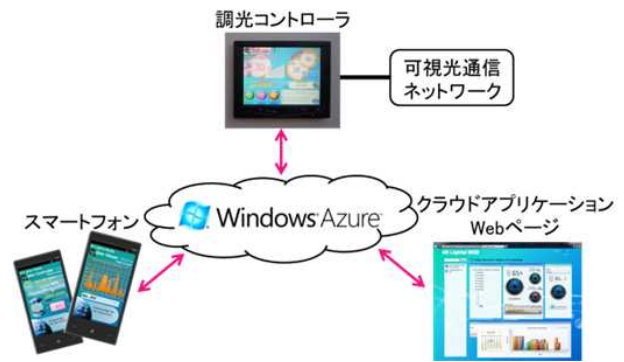


図 15 Windows Azure によるクラウド連携アプリケーション

### 6.1 クラウド連携アプリケーション

#### 6.1.1 調光コントローラ

調光コントローラは、節電データを定期的にクラウドサーバへ送信する。また、クラウドサーバ上には、スマートフォンまたは Web ページより、各部屋に向けた節電指示データが送信される。調光コントローラでは、節電指示データの有無を確認し、指示があった場合、その内容に従って各照明に適切な照度を指示する。

#### 6.1.2 パソコン等のブラウザ

パソコン等のブラウザからクラウドサーバにアクセスし、過去の節電記録のグラフ、各部屋の現在の節電状況を確認するクラウドアプリケーション Web ページを開発した。また、節電指示データをクラウドサーバへ送信し、離れた場所から各部屋に向けて節電の指示をすることができる。これにより、建物の管理者が別の部屋にしながら節電状況の確認や指示をすることができ、建物全体の見える化が実現できる。

#### 6.1.3 スマートフォン

スマートフォンからクラウドサーバにアクセスし、過去の節電記録のグラフ、各部屋の現在の節電状況を確認するクラウドアプリケーションを開発した。また、節電指示データをクラウドサーバへ送信し、離れた場所から各部屋に向けて節電の指示をすることができる。これにより、出先から節電状況の確認や指示をすることができる。

### 6.2 クラウドサーバに蓄積されるデータ

クラウドサーバ上に蓄積される節電データは以下の 4 つとした。データファイル名で建物・部屋を区別している。

#### 6.2.1 1 日の節電記録データ

1 時間ごとの平均節電率を、時間と合わせて記録している。

#### 6.2.2 1 ヶ月の節電記録データ

1 日の平均節電率を、日付と合わせて記録している。

#### 6.2.3 現在の節電状況データ

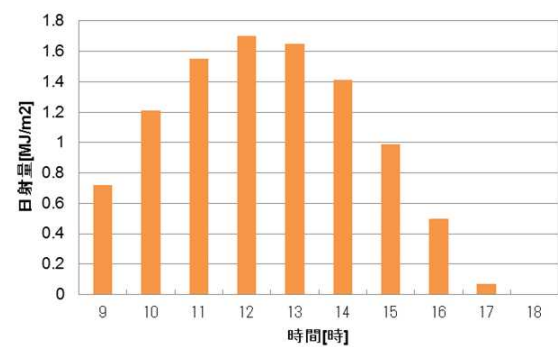
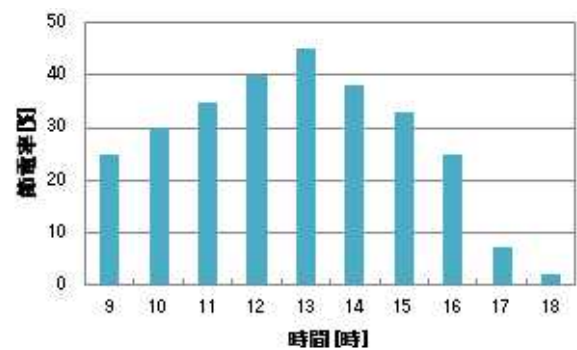


図 15 明るさ優先モードでの 1 週間の運用実験結果 (上) と平均日射量 (下)

現在の節電モード、現在の節電率、明るさの値、現在までの今日の平均節電率、現在までの今月の平均節電率を記録し、最後に記録した年月日と時間を付加している。

#### 6.2.4 節電指示データ

現在の各部屋に向けた節電指示の内容を記録している。具体的には節電モード、節電率または明るさの値の指示である。

## 7. 運用実験

開発した LED 照明を 12 個 (一部屋分) 設置した実験用ブースを製作した。実際の節電効果を確認するため、5.1.2 で示した明るさ優先モードで実験を行った。このモ

ードは明るければ明るいほど、節電率が高くなる。

運用実験を1週間続けた結果を図16上に、また年間の平均日射量を図16下に示す。ほぼ平均日射量に合わせた節電率が得られている。本実験では、1日あたり平均28%の節電効果が得られた。

## 8. 結論

可視光通信機能付きLED照明を開発し、周辺の明るさに応じて全照明が協調して自動調光する節電を実現した。ユーザーのニーズに合わせた適切な調光指示を行うため、調光コントローラに3つの節電モードを実装し、各モードにおける適切な照度算出方法を考案した。また、節電の見える化も実現し、節電状況や過去の節電記録を確認できるようにした。更に、クラウドサーバであるWindowsAzureとの連携アプリケーションを開発し、建物単位など、広範囲における節電の見える化を実現した。開発したシステムを使って、部屋の模型を使用した運用実験を行い、周辺の明るさに応じて適切に自動調光し、28%の節電効果が得られることを確認した。

## 謝辞

本研究はJSPS 科研費12345678（挑戦的萌芽研究）の助成を受けたものです。

## 参考文献

[1]DECC データに基づく業務用建築の夏季電力消費量節減検討委員会, DECC に基づく業務用建築物の冬季節電方策に関わる提言, 一般社団法人日本サステナブル建築協会, 2011.12

[2]可視光通信技術の基礎, 日本信号