

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：32644  
 研究種目：挑戦的萌芽研究  
 研究期間：2011 ～ 2012  
 課題番号：23656351  
 研究課題名（和文） 天空画像を用いた夜間照明浪費エネルギー量マップおよび光害頻度予測方法の開発  
 研究課題名（英文） Development of a map of the electricity wastage for night time lighting and a method for predicting the frequency of light pollution by using celestial images  
 研究代表者  
 岩田 利枝（IWATA TOSHIE）  
 東海大学・工学部・教授  
 研究者番号：80270627

## 研究成果の概要（和文）：

光害の原因である都市から空への漏れ光（上方光束）を天空輝度、雲底高、雲の反射率から推定する方法を開発した。模型実験による検証を行い、より精度を高めた上方光束推定アルゴリズムを作成した。また、2011年震災に伴う電力使用制限があったので首都圏駅舎で光環境実測調査を行い、点灯率と照度の変化から現状の電力削減率を推定した。これらの結果から都市部の上方光束および浪費電力量分布マップの作成を行った。

## 研究成果の概要（英文）：

A method for computing the upward flux from cities, which causes light pollution, was developed by using luminance of the night sky and the reflectance and the heights of the clouds. In order to identify the outdoor lighting environment under power shortage triggered by the 2011 Tohoku earthquake, field measurements had been conducted in railway stations. The results showed that nearly 30% of the luminaires was turned off. Based on these results, distribution of the electricity wastage, as well as upward flux, emitted to the sky was illustrated.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：光害、上方光束、天空輝度分布、雲量・雲高計、節電、電力消費量

## 1. 研究開始当初の背景

夜間の屋外照明は歩行者の安全、防犯の点から必要だが、天空など不必要な場所を照らすことは光害をもたらす。「光害」は良好な「照明環境」の形成が、漏れ光（照明対象域以外に漏れた光）によって阻害されている状況又はそれによる悪影響のことと定義される。光害の悪影響は天体観測にとどまらず、昆虫・植物から生態系全体、人間の生体リズムにまで及ぶ。さらに空に向かって漏れる光はエネルギー的に考えても、照明用電力を宇宙に捨てることを意味する。24時間都市とし

て照明の点灯時間が長い日本の都市においては無視できないエネルギーの浪費につながる。

光害は1990年代から世界的な問題となり、国際照明委員会（CIE）と国際天文学連合（IAU）によって研究がはじめられた。国内では1996年に照明学会が実態調査を行い、1998年には環境省が光害対策ガイドラインを発表した。さらに国際照明委員会（CIE）は2003年に屋外照明のより細かい規制に言及したガイドを発表している。いずれも街路灯などの屋外照明の器具と設置位置につい

ての規制を中心としている。

しかし、2003年の調査では東京都心部では空に向かって漏れる光の量（上方光束）としてオフィスビルからの漏れ光の影響が大きいことが示されている。また2005年の調査では東京の市街地居住地域で上方光束が商業地域では減少したが、住居地域では増加していることが示されている。このように、日本の都市部では光害の原因となる光源が多様で、街路灯などの屋外照明の器具が改善されても、上方光束の総量の減少に結びついていない。環境省のガイドラインから10年以上経過したが、日本の都心部の「明るい夜空」は解決されていないといっている。

従来の光害の定量的研究では、屋外照明など光源側からの地道な調査を行っていたが、すべての上方光束を拾い上げることができなかった。そこで筆者らは夜間の天空の明るさの方から都市の上方光束を逆算しようと考えた。

## 2. 研究の目的

都市から上方へ漏れる光の分布は衛星写真を用いて語られることが多い。近年は高解像度で都心部繁華街の分布がはっきりわかる。しかし、全体の傾向把握には役立つが、どの程度の光、電力が放出されているのかを地域ごとに定量的に示すことは難しい。また、衛星画像の輝きは夜間の都市活動の活発さを示すものと捉えられがちである。

本研究ではエネルギー削減と環境保全の双方に貢献することを目的として、日頃見上げる夜空の明るさから、都市部の光害を定量的に把握した上で夜間照明エネルギー消費量の分布を示すことを目指した。具体的には以下の(1)～(3)を目的とした。

### (1) 都市からの上方光束推定方法の開発

夜間の天空輝度画像と雲の反射率、雲底高さから各地域から上方光束を計算するプログラムを作成する。

### (2) 夜間照明消費電力マップ作成

開発したプログラムを用いて上方光束分布を算定し、さらに地理情報から夜間照明消費電力マップに発展させる。

### (3) 節電による照明用電力低減量の把握

光害頻度予測図の作成を予定していたが、震災による節電影響が大きくまた長引いたため、その把握を目的に加えた。

## 3. 研究の方法

### (1) 研究の構成

研究の流れを図1に示す。研究は3つのパートからなり、Aでは都市から上方に漏れる光(上方光束)を推定する方法の開発を検証実験を含めて行った。また2011年3月の震災による都市の節電の影響が大きかったため、Bに示した調査を加え、Cの東京都市部

の消費電力結果の検討に用いた。それぞれの方法の詳細を(2)～(4)に示す。

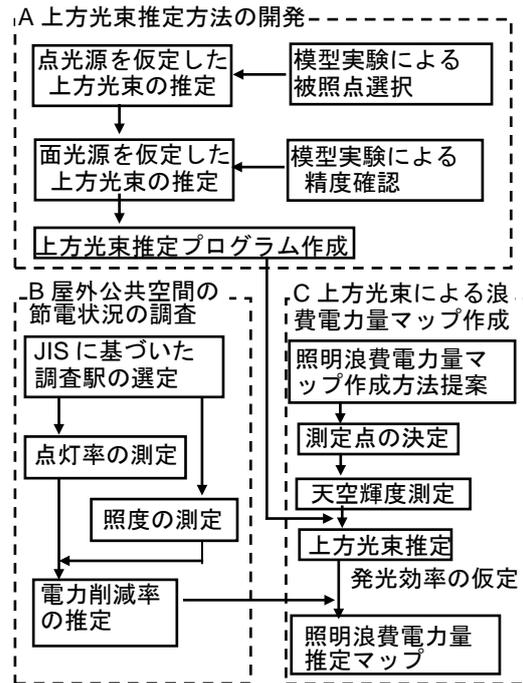


図1 研究の流れ

### (2) 上方光束推定方法の開発

#### ① 計算理論

雲の底面が地面に平行な様な反射板と仮定すると、上方光束は雲底高、雲の反射率、天空輝度(天空の輝度測定点を被照点と呼ぶ)から求めることができる。図2に面光源を仮定した場合の模式図を示す。各放光点あるいは面(上方光束を放つ点あるいは面)の上方光束は、式1に示すように被照点の個数の連立方程式を解き、各放光点の上方光束の最小二乗解を算出する。

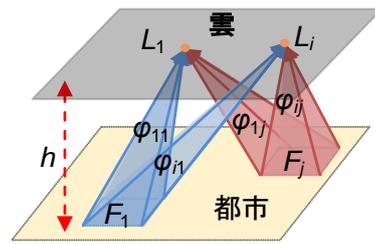


図2 計算模式図(面光源)

$$X=[{}^tAA]^{-1} {}^tAb \quad (式1)$$

$$b = \begin{pmatrix} L_1 \\ \vdots \\ L_i \end{pmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} P_{11} & \dots & P_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{i1} & \dots & P_{ij} \end{pmatrix}$$

点光源の場合

$$X = \begin{pmatrix} I_{01} \\ \vdots \\ I_{0j} \end{pmatrix} \quad P_{ij} = \cos^2 \theta_{ij} / r_{ij}^2 \rho_c / \pi$$

面光源の場合

$$X = \begin{pmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_j \end{pmatrix} \quad P_{ij} = \phi_{ij} \rho_c / \pi / S_j$$

$i$ :被照点  $j$ :放光点  $\rho_c$ :雲の反射率[-]  
 $L_i$ :被照点  $i$  の輝度[cd/m<sup>2</sup>]  $\theta_{ij}$ : $j$ から  $i$ への入射角[rad]  $I_{\theta j}$ :放光点  $j$ が  $\theta$ 方向へ放つ光度[cd]  $F_j$ :上方光束[lm]

②各パラメータ値の決定

被照点輝度は魚眼レンズ(等距離射影方式)を用いた CCD カメラにより作成した輝度分布画像から求めた。被照点は、天頂角 10°~30° の範囲で 5° 毎、方位角 15° 毎で計 120 点とした。

雲の反射率の推定は以下のように行う。雲量・雲高計(EKO, CIR4)により測定した雲底高と天空放射温度、目視により雲の種類を判別する。既往の雲に関する研究から低層雲・中層雲と高層雲に分けて反射率を推定する。

③模型実験による検証

開発した方法の精度を検証するために、点光源、面光源それぞれについて図 3 の様な装置で模型実験を行った。中央に設置した魚眼レンズにより輝度画像を取得し、輝度値から求めた各放光面の計算による上方光束値とあらかじめ設定した上方光束値の比較を行った。

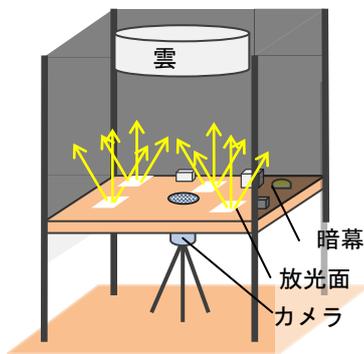


図 3 検証実験用模型

(3)屋外公共空間の節電状況の調査

2011年3月の東日本大震災により東京電力管内では電力供給力不足のため首都圏では各所で消灯、減灯が実施された。震災前後では特に首都圏の駅、公共通路、繁華街等の光環境は大きく変化した。交通機関の節電状況の把握として、中でも公共性の高い駅舎に着目した。

駅舎は JISZ9110:2010 により照度基準が定められている。表 1 に駅舎の維持照度の推奨値を示す。駅舎の照度基準は 1 日の乗降客数により A 級 (15 万人以上)、B 級 (1 万~15 万人未満)、C 級 (1 万人未満) の 3 階級に区分されている。

1 日の乗降人数が多いほど維持照度の推奨

値が高く設定されている箇所が多い。例えば、コンコースでは A 級駅舎では 500 lx、B 級駅舎では 300 lx であり、A 級駅舎の方が一段階高い設定となっている。通路も A 級、B 級、C 級となる事に一段階ずつ低い設定となる。

表 1 駅舎の維持照度の推奨値 (JIS Z 9110:2010 抜粋)

	A 級駅	B 級駅	C 級駅
1日乗降客数	15 万以上	1~15 万	1 万未満
コンコース	500	300	-
ホーム	200	100	75
改札	1000	500	200

本調査で対象とした駅舎は JISZ9110:2010 の 3 階級の区分を参考として、東京及び東京近郊にある 19 路線の A 級駅舎 22 駅、B 級駅舎 64 駅、C 級駅舎 20 駅、計 106 駅である。各駅について電力使用制限令の発令中と電力使用制限令の解除後の 2011 年 8~9 月 (夏季) と 11 月 (中間期) に 2 回調査を行った。昼光の影響を避けるために日没後に調査した (地下の駅舎は昼光の影響が無いものとし日中も測定している)。測定は利用者の邪魔にならない様に注意し、ラッシュの時間帯は除いた。

照度基準と比較をするために床面照度、さらに節電状況を明らかにするために照明器具の点灯率を調査項目とした。

床面照度の測定は図 4 に示すカートを用いた。測定カートは艶無し黒の塗料で塗布し、照度計のセンサーとロガーが装着されている。利用者の動線を測定ルートとし 1 秒間隔で床面照度の測定を行った。

点灯率とは全ランプ数に対する点灯しているランプ数の割合とし、これらは目視によって数えた。

図 5 に測定の様子を示す。測定者は照度測定係と記録係の二人以上とした。記録係は利用者や電車が影になった時間帯などを記録して、その時間帯は除いて解析を行った。



図 4 測定カート



図 5 測定風景

(4) 上方光束による浪費電力量マップ作成

①放光面と測定点（輝度画像取得点）の決定  
東京 23 区の都市域を網目状に区切り、各マス放光面とした。各放光面の大きさは  $2.5 \times 2.5 [km^2]$  とした。

1 つの測定点での測定有効範囲を決定するために、放光点-測定点間の距離と雲底高と測定点天頂の雲に照射する光量の関係を求めた。図 6 に示す。計算では、上方光束を  $6.00 \times 10^7 [lm]$ 、放光部面積を  $2.5 \times 2.5 [km^2]$  と仮定した。

放光点-測定点間の平面距離が遠くなるほど上方光束の影響が少なくなるため、雲底高を 5000m と仮定し、測定点 1 点における測定有効範囲は半径 5km 圏内とした。

この結果に基づき東京都市部を網羅できる測定候補地点において天空写真を撮影し、雲量・雲高計の測定可能範囲である天頂角 30 度内に障害物がないことを確認した（図 7）。最終的に、都心部に図 8 のように 6 か所の測定点を決定した。

②天空輝度等パラメータの測定

天空写真撮影は曇天日に 18、19、20 時の 3 回、シャッタースピードを 1 分、8 秒、2 秒で 1 枚ずつ撮影し、輝度画像に変換した。雲量・雲高計による雲量と雲底高の測定、放射温度測定を行った。雲の種類を判別して反射率の推定を行い、開発したプログラムを用いて放光面の上方光束量を推定した。

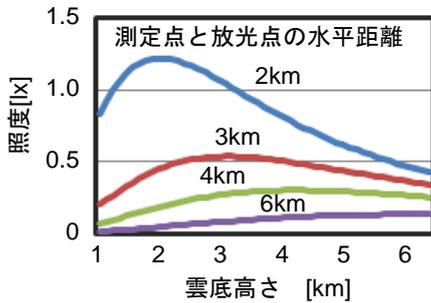


図 6 測定点までの距離と雲に照射する照度

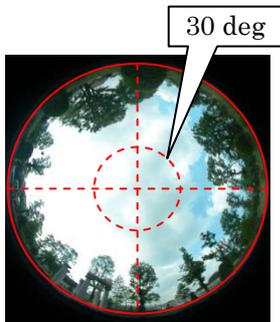


図 7 測定点検討の例

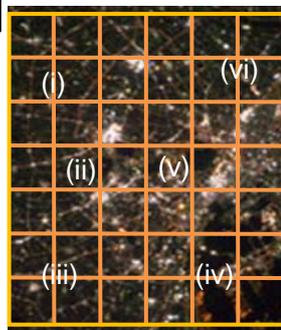


図 8 夜間の都市域

③上方光束からエネルギー量の推定

照明浪費エネルギー量を推定するために屋外照明の発光効率を仮定した。屋外照明の発光効率は広告照明 ( $80 [lm/W]$ )、スポーツ照明 ( $110 [lm/W]$ ) とした。GIS データの統計情報により、1 グリッド内における屋外照明数の割合を推定し、計算を行なった。

4. 研究成果

(1) 上方光束推定方法の開発

開発した方法の精度を模型実験で検証した結果、被照点として適さない点を抽出する必要があることが示された。間接成分の影響があり、高輝度の被照点が誤差の原因となる。検討の結果、高輝度の被照点を避ける事により正確に推定を行うことができると考えられた。

これらを考慮して面光源を仮定した上方光束推定プログラムを作成した。プログラムのフローを図 9 に示す。

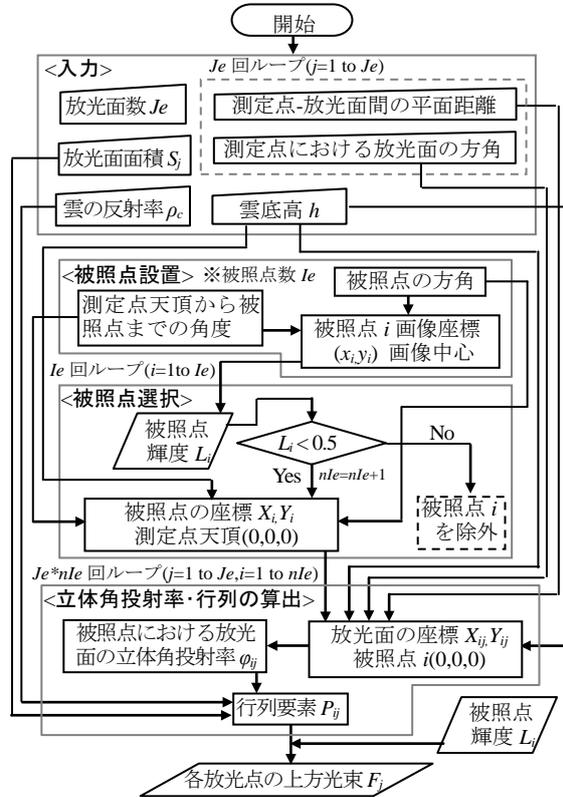


図 9 面光源 上方光束推定プログラムフロー

(2) 屋外公共空間の節電状況の調査結果

図 10 に一例として駅コンコースの照度の累積割合を示す。コンコースでは夏季と中間期ともに A 級駅舎と B 級駅舎の平均照度の累積割合は同様な分布となっている。A 級駅舎は JIS の維持照度の推奨値よりもほとんどの駅で下回っている。中間期は夏季よりも全体的に照度が増加している傾向がある。ホームでは概ねの駅で夏季、中間期ともに JIS の維持照度推奨値よりも上回っている。

図 11 に一例としてコンコースの点灯率の累積割合を示す。コンコースの累積出現頻度 50%で点灯率が 50~70%となっている。A 級駅舎、B 級駅舎ともに点灯率が 10%程度から 100%までなだらかに増加している。この結果から各駅舎で消灯減灯方法は定まっていなと考えられる。一部の駅舎では消灯や減灯は現場対応で決められたのとの報告もある。一方、安全性に関わるホームではコンコースよりも全体的に点灯率は高くなっている傾向がある。

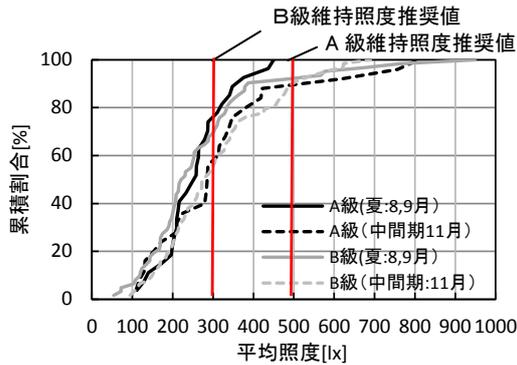


図 10 コンコースの照度の累積割合

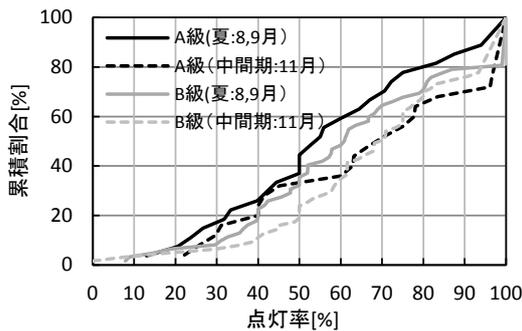


図 11 コンコースの点灯率の累積割合

(3) 上方光束による浪費電力量マップ作成  
測定日の 19 時、20 時の放射温度、雲量、雲底高の測定点 (V) (四谷付近、図 8 参照)での測定結果を表 2 に示す。

表 2 雲量、雲底高

時刻	放射温度 [K]				雲量[%];雲底高[m]
	N	E	S	W	
19:00	265	286	269	286	60 ; 6500
					38 ; 5400
20:00	267	286	267	286	9 ; 6900
					90 ; 4600

雲量の 90%が一定の高さの雲となった 20 時の測定結果を基にマップの作成を試みた。雲の種類は中層雲 (As)、反射率は 0.92 と推定した。

天空の輝度分布画像を図 12 に示す。天頂

角 10~30° (5° 毎)、12 方位の 120 被照点のうち輝度 0.5cd/m<sup>2</sup> 以上の点を除いて上方光束算出を行った。

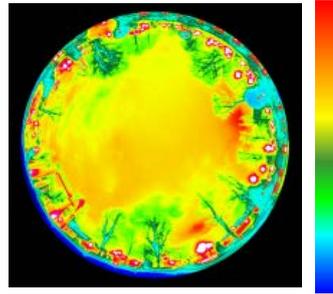


図 12 測定点天空の輝度分布

測定結果から上方光束を計算によって推定した結果を表 3 に示す。表中の A~C、i~iii については図 13 に示す。

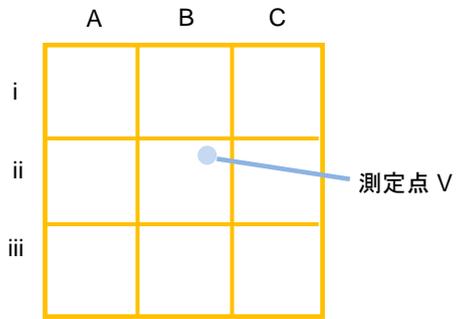


図 13 分割した放光面と測定点 V

表 3 放光面の上方光束・光束発散度推定値

	光束 (上段)		光束発散度 (下段)	
	A	B	A	B
i	4.63×10 <sup>7</sup> lm 7.4 lm/m <sup>2</sup>	0.70×10 <sup>7</sup> lm 1.1 lm/m <sup>2</sup>	2.85×10 <sup>7</sup> lm 4.6 lm/m <sup>2</sup>	
ii	3.73×10 <sup>7</sup> lm 6.0 lm/m <sup>2</sup>	3.98×10 <sup>7</sup> lm 6.4 lm/m <sup>2</sup>	4.41×10 <sup>7</sup> lm 7.1 lm/m <sup>2</sup>	
iii	2.72×10 <sup>7</sup> lm 4.4 lm/m <sup>2</sup>	1.35×10 <sup>7</sup> lm 2.2 lm/m <sup>2</sup>	3.98×10 <sup>7</sup> lm 6.4 lm/m <sup>2</sup>	

2005 年に筆者らによって点光源を仮定して推定した渋谷の上方光束量の値 (8.21×10<sup>7</sup> [lm]) と比較すると本研究で推定した渋谷・新宿付近 (表 3:A-i~A-ii) の上方光束は、約 1/2 となった。震災後の節電による影響もあると考えられた。表 3 各下段に示したようにこれを光束発散度で示すと渋谷・新宿エリアは 4.4~7.4 [lm/m<sup>2</sup>] となる。歩行者に対する道路照明 (住宅地域、交通量の多い道路) の基準が 5 [lx] であることを考えると、上方に漏れている光で住宅地の道路照明が補えることになる。

推定した上方光束と発光効率より照明浪費電力量 (式 2) を推定した。その結果を図 14 に示す。

$$Le = \frac{tM}{\eta_{ave}} \quad \text{式(2)}$$

$$\eta_{ave} = \sum P_k \eta_k$$

$Le$ : 照明浪費電力量 [Wh/km<sup>2</sup>]

$t$ : 時間 [h] ( $t=1$ )  $M$ : 上方光束発散度 [lm/km<sup>2</sup>]

$n_k$ : 各種屋外照明数の割合

$\eta_k$ : 照明種類別の発光効率 [lm/W]

$k$ : 屋外照明の種類

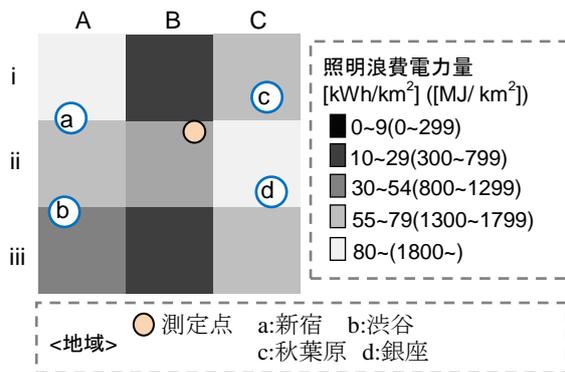


図 14 照明浪費電力量マップ

本研究では、地域ごとの上方光束量およびそれによる浪費電力量を、定量的に示す方法を開発した。この方法により「夜空の明るさ」という日常的に経験する現象を用いて、無駄な光漏れを防ぐことで達成される電力削減量を示すことができた。エネルギーの中でも特に電力は 2011 年の原子力発電所の事故以来、関心の高いところであり、光害に関しては電力の無駄の削減がヒトを含めた生態系保護となる。

今後は雲(雲底高、反射率)の不安定さによる精度を検証し、測定の見易化に努める。また測定地域を拡大して定期的な調査を行い、データの蓄積を図る。得られたデータはホームページ等を通して公開する予定である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 7 件)

(1) Toshie Iwata, Yusuke Tsuyuki, Daisuke Ito and Kenta Tsuda: Measurement of upward light from city causing light pollution and energy waste, Proc. of Energy for Sustainability 2013 年 9 月 8 日~10 日 Coimbra, Portugal

(2) 伊藤大輔、露木祐介、岩田利枝、津田健太: 上方光束による夜間照明浪費エネルギー量マップの作成、照明学会大会、2013 年 9 月 4 日、名古屋

(3) 露木祐介、津田健太、岩田利枝、伊藤大輔: 雲高計を用いた都市の夜間上方光束推定方法の提案、日本建築学会大会学術講演会 2013 年 8 月 30 日、北海道

(4) Y. Tsuyuki, K. Tsuda, T. Iwata and D. Ito: Development of a method for determining upward flux by cloud infrared radiometer, Proc. of Lux Pacifica 2013. 3. 8, pp.157-162, Bangkok (Thailand)

(5) 加納さくら、伊藤大輔、望月悦子、岩田利枝、中村芳樹: 東日本大震災に伴う節電時の駅舎照明実態調査 その 2 照度測定結果と利用者評価、日本建築学会大会学術講演会 2012 年 9 月 12 日、名古屋

(6) 伊藤大輔、加納さくら、望月悦子、岩田利枝、中村芳樹: 東日本大震災に伴う節電時の駅舎照明実態調査 その 1 調査概要と節電時の点灯率、日本建築学会大会学術講演会 2012 年 9 月 12 日、名古屋

(7) 大武俊洋、岩田利枝、伊藤大輔: 一枚の天空画像による上方光束推定方法の検討、照明学会全国大会 2011 年 9 月 15 日、愛媛

[その他]

ホームページ

明るい夜空と照明用エネルギー

<http://iwatalab.web.fc2.com/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岩田 利枝 (IWATA TOSHIE)

東海大学・工学部・教授

研究者番号: 80270627

### (2) 研究分担者

伊藤 大輔 (ITO DAISUKE)

ものづくり大学・技能工芸学部・講師

研究者番号: 10567978

### (3) 連携研究者

中島 孝 (NAKAJIMA TAKASHI)

東海大学・情報理工学部・教授

研究者番号: 70408029