

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560548

研究課題名(和文) アジア各地の人工照明に起因する二酸化炭素を削減する環境共生昼光照明システムの開発

研究課題名(英文) Development of Sustainable Daylighting System to reduce Carbon Dioxide due to Artificial Lightings in Asia.

研究代表者

上谷 芳昭 (UETANI YOSHIAKI)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00258302

研究成果の概要(和文)：昼光を活用して人工照明に起因する二酸化炭素(CO₂)を大きく削減することが可能な環境共生昼光照明システムを開発した。これは発展途上国においても急速に普及しつつあるインターネットとPCを活用して、一時間毎に気象衛星画像から天空輝度分布を算出して室内の昼光照明度を算出し、昼光によるグレアを制御しつつ、基準照度に不足する最小限の照度を補うよう照明システムを制御するものである。

研究成果の概要(英文)：A sustainable daylighting system is developed to reduce Carbon Dioxide (CO₂) from artificial lightings in Asia. It utilizes the Internet and PC spreading rapidly in developing countries. The system downloads meteorological satellite images every hour and calculates the local sky luminance distribution, daylight illuminance and glare in rooms. Then it controls the lighting system to supply minimum lighting energy keeping the required illuminance level.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：光環境, 地球温暖化防止

1. 研究開始当初の背景

京都議定書により、日本は2008～2012年の二酸化炭素(CO₂)を主とする温室効果ガスの年間排出量を1990年比で6%削減する義務がある。しかし、2005年の排出量は逆に7.8%も増加しており、計13.8%を削減せねばならない。さらに、ポスト京都議定書が議論された2007年6月のハイリゲンダムサミットでは、2050年までに温室効果ガスを50%削減することが提案された。

一方、2004年の世界各国の化石燃料消

費に伴う二酸化炭素排出量の割合は、京都議定書に批准した先進国が30%(うち日本は6%)、離脱したアメリカが22%、オーストラリアが1%であった。残りの47%は発展途上国である。

発展途上国の排出量は、今後の経済発展によりさらに増加することが懸念される。実際、オランダの政府系研究機関である「環境評価局」は、中国の2006年の二酸化炭素の排出量は前年比で8.4%増え、1.4%減少したアメリカを抜いて世界第一位になったとする分析結果を発表した。2004年の発

展途上国の排出量47%の内訳は、中国が18%、インドが4%、韓国が2%、その他が23%であり、中国とインドと韓国のアジア3カ国が世界の発展途上国の排出量の半分以上を占めている。このことはアジアの発展途上国における二酸化炭素排出量削減が、様々な地球温暖化対策の中でも優先度の高い問題であることを示している。

人工照明の一次エネルギー消費量は、日本照明器具工業会の調査によると、建物全体の25%を占め、空調の50%（動力用27%＋冷暖房用23%）に次いで多い。空調の省エネルギー技術は年々発展している。しかし、人工照明は、高周波点灯蛍光灯や電球型蛍光灯、LEDランプなどハード面の技術開発は進みつつあるが、調光の自動制御などソフト面はほとんど普及していない。

一般のエアコンは、夏でも冬でもリモコンの電源ボタンを押すだけで快適に自動制御できる。しかし、ほとんどの人工照明は、単純なON/OFFスイッチが取り付けられているにすぎない。スイッチやリモコンでON/OFFと段調光ができる照明器具もあるが、明るさが変動する昼光に応じて操作するためではない。従って、多くの建築では、昼間でも夜間と同じ明るさで人工照明を点灯し、電力エネルギーを浪費し、多量の二酸化炭素を排出している。最近では、照明の壁スイッチが窓側と室内の2系統に分けられたり、調光スイッチが採用されたりしつつあるが、天気や時刻の変化に応じた調整を居住者に強いるのには無理がある。一部の先進的なビルでは、明るさセンサーや人感センサーなどを用いて人工照明を自動調光することも試みられているが、特殊な機器はインシヤルコストとランニングコストが高く、また高い技術レベルが要求されるので、先進国である日本でさえ一般に普及するには至っていない。

地球温暖化は世界的な課題であるので、昼光を活用して人工照明に起因する二酸化炭素排出量を削減するためには、一部の先進的なビルだけでなく、住宅、雑居ビル、学校など、大多数の一般的な建築に、新築・改修を問わず適用可能で、省エネルギー効果の高い昼光照明システムが必要である。また、前記の今後の経済発展で大量の二酸化炭素を増産することが懸念される中国を始めとする発展途上国でも容易に普及可能な技術レベルのものでなくてはならない。

研究代表者は、昼光照明シミュレーションと昼光光源の研究に取り組んできた。特に昼光光源では、気象庁の測候所でもほとんど測定されていない日射量や照度および天空輝度を、気象衛星画像を用いて任意の地点で推定する方法を開発してきた。また、魚眼レンズ付デジタルカメラを用いて全天空画像を天空輝度分布と相関色温度分布に変換し、気

象台でも目視で観測せざるを得ない雲量を自動測定できる「全天空ビデオ測色法」を独自に開発した。さらに、地上で観測した照度・日射量や天空輝度分布・放射輝度分布を昼光照明の設計に用いるためのモデル化に関する研究を行ってきた。

従来の昼光光源データや気象データは、過去の観測データを統計的に整理して設計資料とすることが一般的であった。しかし、研究代表者は、地上観測の全天空ビデオ測色法による全天空輝度分布から、昼光照明シミュレーションにより、室内の作業面照度を予測し、基準照度に不足する最小限の照度を算出し、人工照明をリアルタイムで自動調光して補う「環境共生昼光照明システム」を開発した。そして、模型実験で実現可能性を、天空輝度分布の実測データを用いた年間シミュレーションにより省エネルギー性を確認した。

さらに、全天空ビデオ測色法の代わりに、気象衛星画像から推定した全天空輝度分布を用いても「環境共生昼光照明システム」が実現可能であることをシミュレーションにより示した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、研究代表者が開発した「環境共生昼光照明システム」および「気象衛星画像による全天空輝度分布予測法」を連結することで、日本だけでなく、中国などアジア各地の人工照明に起因する二酸化炭素排出量の削減に貢献できるシステムを開発することである。環境共生昼光照明システムは、昼光を活用して人工照明に起因する二酸化炭素を大きく削減することが可能で、発展途上国においても急速に普及しつつあるインターネットとPCを活用して、気象衛星画像から天空輝度分布を算出して室内の昼光照度を算出し、昼光によるグレアを制御しつつ、基準照度に不足する最小限の照度を補うよう照明システムを制御するものである。

3. 研究の方法

一時間毎の気象衛星画像をアジア各地の天空輝度分布に変換して配信する昼光データサーバーのシステムを構築する。また、ローカルな天空輝度分布をサーバーからダウンロードして、昼光照明計算と調光制御を行うクライアントソフトを開発する。

シミュレーションによるフィジビリティスタディにとどまっている気象衛星画像による環境共生昼光照明システムを実際の建物に適用して実証実験を行い、季節・時刻などと二酸化炭素の削減量を検討する。また、実証実験に用いるために窓面の不快グレアを魚眼レンズ付デジタルカメラにより連続測定する方法を開発する。

新しく JIS 照明基準に照明の演色性が追加されたことを受け、可視光線を波長別に相互反射計算することで間接光も含めた作業面に入射する光の分光放射照度を求め、この光の演色評価数（作業面演色評価数）を算出する方法を開発した。これに対応して魚眼レンズ付デジタルカメラにビデオ測色法を適用し、CIE XYZ 三刺激値の全天空分布を連続測定する方法を開発した。これを入力データとして室内の任意の点の昼光による照度および相関色温度を算出できるように昼光シミュレーションを改良した。

昼光照明計算の基になる昼光光源は、天空光・直射日光・地物反射光からなるが、都市空間では多くの地物すなわち建物の壁面の反射率を逐一測定するのは煩雑である。そこでビデオ測色法を用いてデジタルカメラで撮影した景観画像からマンセル値を精度よく計測する手法を開発した。

4. 研究成果

(1) アジア各地における日射量および昼光照度の静止気象衛星画像を用いた推定

一時間毎の気象衛星画像をアジア各地の天空輝度分布に変換して配信する昼光データサーバーのシステムを構築した。

静止気象衛星の1年間の画像と、マレーシア・中国・日本の日射量の地上観測データを用いて、アジアの昼光照度分布として1年間の1時間毎の日射量（図1）および照度分布地図（図2）を作成した。

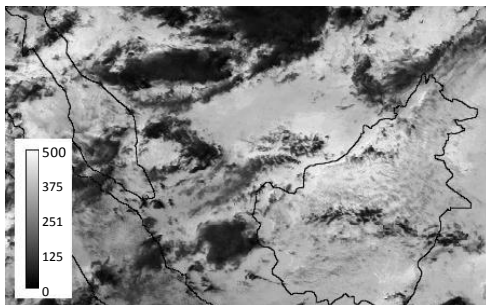


図1 マレーシアの直達日射量分布地図 (12:00, May 8, 2007)

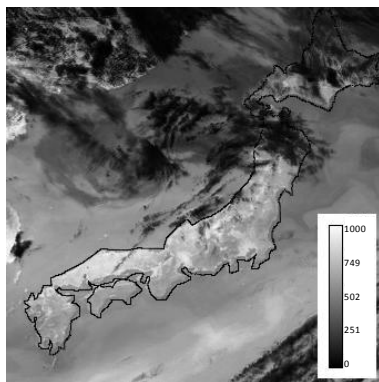


図2 日本の直射日光照度分布地図 (12:00, May 8, 2007)

(2) 昼光照明計算と調光制御を行うクライアントソフトの開発

図3にクライアントソフトのフローチャートを示す。全天空輝度分布と全昼光照度は、上記の昼光データサーバーから気象衛星画像をダウンロードする。また、下記の実証実験では、屋上で測定した全天空輝度分布と全昼光照度を用いる。

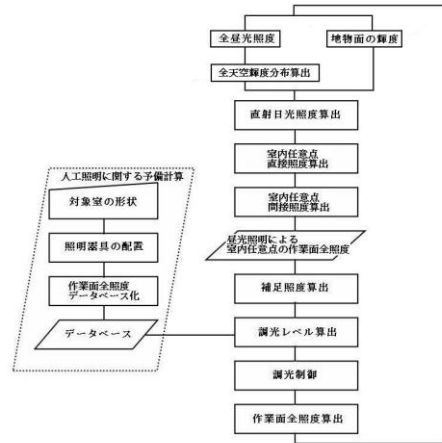


図3 クライアントソフトのフローチャート

(3) 実際の居室を用いた実証実験

図4に示すシステムを用いて実証実験を行った。図5は夕方の実験結果で、昼光照度が低くなるにつれて調光レベルが上がるように制御されている。

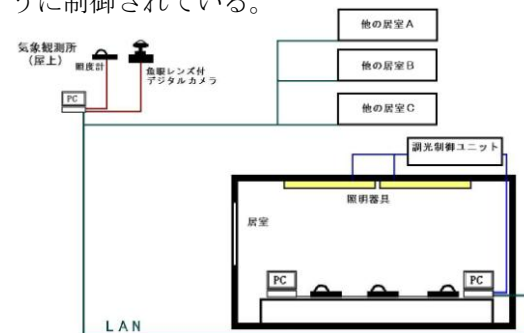


図4 実証実験の概要

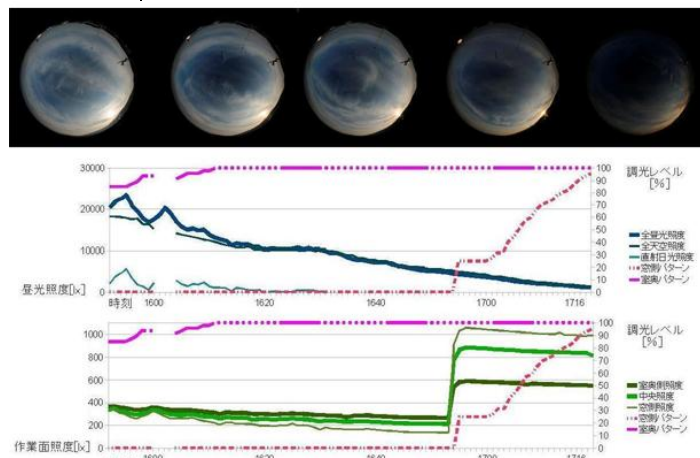


図5 実験結果 (晴・15:50 - 17:20)

(4) 魚眼レンズ付デジタルカメラによる不快グレアの予測法の開発

魚眼レンズ付デジタルカメラを用いて不均一な輝度分布の視野の不快グレアを予測する方法を提案するために実際の室の窓を用いて被験者実験を行い、グレア式の係数を決定した。

一般に不快グレアは光源輝度、光源の立体角、光源の被験者からの角度、順応輝度の四つの要因に依存する。本研究では円周魚眼レンズ付デジタルカメラを用いて、被験者の視野を撮影する。その画像の各画素に対応する微小な光源がグレア源であり、その視野全体の平均的なものが総合的に被験者のグレアの申告値に相関すると仮定する。順応輝度 L_f は円周画像の平均輝度と仮定し、画素 i の光源輝度 L_i 、立体角 W_i 、ポジションインデックス P_i を用いて(1)式をグレアの基本式とする。

$$G_v = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \log_{10} \frac{L_i^a \cdot W_i^b}{L_f^c \cdot P_i^d} + e \right) \quad (1)$$

$$\ln P_i = (35.2 - 0.31889 \tau - 1.22 e^{-2\tau/9}) \times 10^{-3} \sigma + (21 + 0.26667 \tau - 0.002963 \tau^2) \times 10^{-5} \sigma^2 \quad (2)$$

ただし、 n は魚眼レンズ付デジタルカメラの円周画像(180°、立体角 2π [sr])のうちグレア源であると見なした画素数である。

被験者が選択した「まぶしいと感じる範囲」をグレア源として、重回帰分析により(1)式の係数(a~e)を決定した結果を表1に示す。

表1 選択範囲のグレア式の係数

円周画像の直径(画素数)	2373(100%)	1187(50%)	791(33%)	593(25%)
a	6.327	2.99	2.997	3.006
b	1.072	4.046	4.288	4.505
c	-0.146	8.034	7.945	7.909
d	-4.441	-5.249	-5.233	-5.211
e	1.69E+05	5.76E+04	2.56E+04	1.43E+04
R ²	0.9754227	0.977173	0.977147	0.977151

(5) 波長別相互反射計算による作業面の演色性評価

JIS 照明基準に照明の演色性が追加された。演色性評価には主に演色の忠実性を示す演色評価数が用いられるが、これは光源の分光分布から算出される。しかしこの方法は間接光が考慮されていないので室内表面が有彩色の場合に適用できない。本研究では可視光線を波長別に相互反射計算することで間接光も含めた作業面に入射する光の分光放射照度を求め、この光の演色評価数(以下「作業面演色評価数」)を算出する。そしてアンビエント照明に対し、同等またはそれ以上の演色性を持つ光源をタスク照明としたタスク・アンビエント照明(TA照明)によって一般照明よりも高演色な照明環境とすることができないかを検討した。室内表面が図6に示す分光反射率である場合の作業面演色評価数を計算した結果を表2に示す。

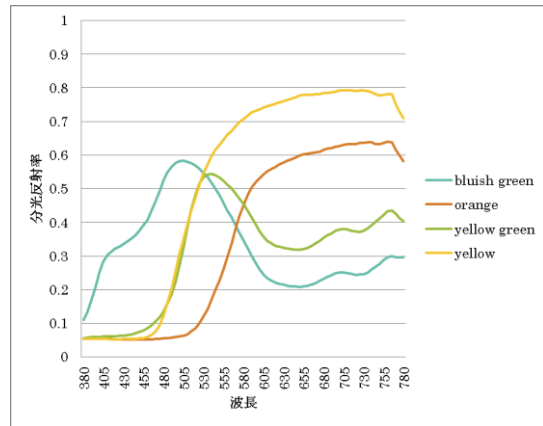


図6 室内表面の分光反射率

表2 混光の作業面演色評価数

内壁色	orange (5YR 6.0/11.0)					
タスク照明	なし	3波長		高演色		LED
タスク照度	0	375	500	375	500	375 500
TA比	0	1	2	1	2	1 2
Ra'	77.1	78.2	80.4	83.1	87.1	85.9 89.3
内壁色	bluish green (2.5BG 7.0/6.0)					
タスク照明	なし	3波長		高演色		LED
タスク照度	0	375	500	375	500	375 500
TA比	0	1	2	1	2	1 2
Ra'	83.2	83.5	83.9	90.4	93.4	83.6 84.1
内壁色	yellow green (5GY 7.1/9.1)					
タスク照明	なし	3波長		高演色		LED
タスク照度	0	375	500	375	500	375 500
TA比	0	1	2	1	2	1 2
Ra'	78.8	79.6	80.8	87.2	91.0	81.6 82.9
内壁色	yellow (5Y 8.0/11.1)					
タスク照明	なし	3波長		高演色		LED
タスク照度	0	375	500	375	500	375 500
TA比	0	1	2	1	2	1 2
Ra'	72.1	74.8	77.7	80.1	85.0	82.2 86.6

(6) 全天空のCIE XYZ三刺激値分布の連続測定法の開発

従来、天空輝度分布の研究やISO標準などにはあり、昼光・人工の併用照明の研究や実施例は多いが、明るさのみで色は考慮されていない。人工照明の色は前述の研究(5)で対応できるようになったが、昼光の色についても考慮する必要がある。本研究では魚眼レンズ

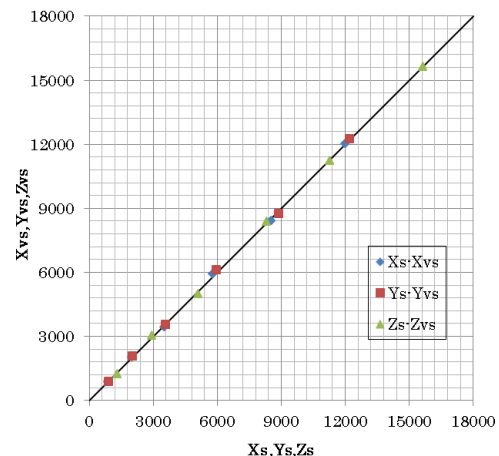


図7 三刺激値XYZの較正結果

付デジタルカメラにビデオ測色法を適用し、CIE XYZ 三刺激値の全天空分布を連続測定する方法を開発した。魚眼レンズ付デジタルカメラはキセノンランプと分光色彩計で校正した。図7は三刺激値XYZの校正結果で、横軸は分光色彩計の測定値、縦軸はデジタルカメラのRGB信号から校正関数を用いて三刺激値XYZを算出した結果である。また、表3は各シャッタースピード(1/13, 1/50, 1/200)における三刺激値XYZと相関色温度Tの分光色彩計の測定値に対するRMSEとMBEで、いずれもよい精度を示している。図8には、朝から夕方まで連続測定した東西南北の天空の相関色温度の時間変化を示した。

表3 三刺激値XYZと相関色温度TのRMSEとMBE

SS		X		Y		Z		T	
1/13	RMSE	9.3	2.61%	10.4	2.85%	9.4	1.90%	370.1	4.33%
	MBE	-0.2	-0.06%	-0.2	-0.07%	-0.2	-0.05%	-18.7	-0.22%
1/50	RMSE	27.3	2.41%	31.4	2.72%	22.3	1.37%	312.2	3.65%
	MBE	-0.3	-0.02%	-0.3	-0.03%	-0.1	-0.01%	-27.0	-0.32%
1/200	RMSE	12.3	0.19%	15.5	0.24%	2.0	0.02%	8.8	0.11%
	MBE	0.9	0.01%	0.4	0.01%	6.9	0.08%	54.3	0.65%

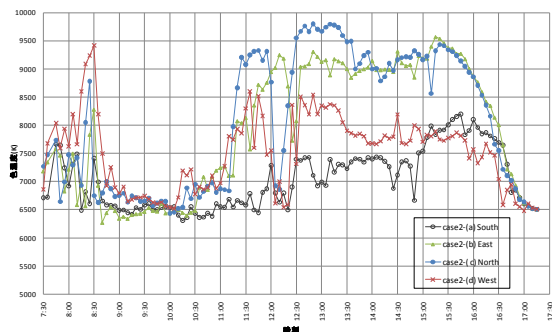


図8 東西南北天空の相関色温度の変化

(7) ビデオ測色法によるマンセル値の計測
屋外で景観色彩のマンセル値を魚眼レンズ付デジタルカメラの撮影画像から算出する測色法を開発した。色彩校正により撮影画像のビデオ信号値RGBから三刺激値の絶対値XYZを算出し、均等性の良好なNC-III C均等色空間に変換後、JIS Z 8721のマンセル値データを用いてマンセル値を決定した。屋外で行った検証結果を図9に示す。横軸は分光色彩計による測定値、縦軸はデジタルカメラの測定値で、RMSEとMBEもよい精度を示している。

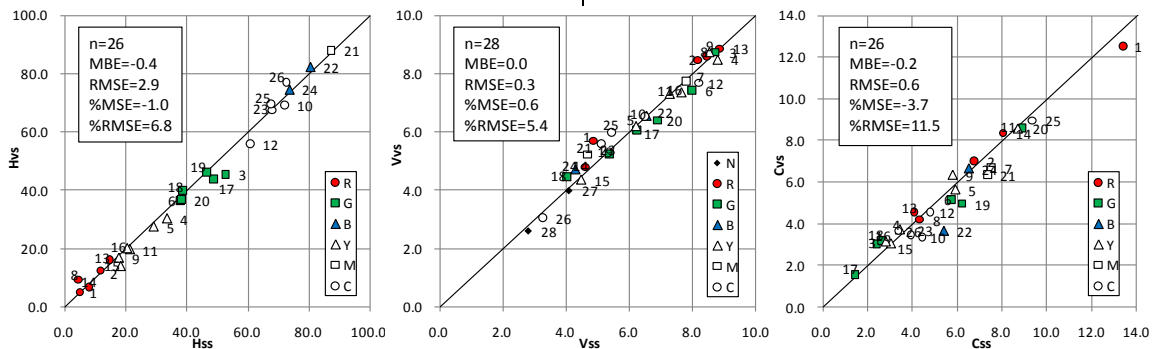


図9 マンセル値の検証結果(色相H、明度V、彩度C)

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)

[学会発表] (計5件)

- ① 山本貴仁、上谷芳昭、浅野雄太、平井大介、全天空輝度分布応答型昼光照明制御システムに関する実証的研究、日本建築学会近畿支部、2009年6月21日、大阪工業技術専門学校(大阪府)
- ② 上谷芳昭、平井大介、窓面の不快グレアの予測法と昼光照明制御システムへの応用に関する研究~その1 不均一な輝度分布に対するグレアの予測法~、日本建築学会近畿支部、2010年6月19日、大阪工業技術専門学校(大阪府)
- ③ 平井大介、上谷芳昭、窓面の不快グレアの予測法と昼光照明制御システムへの応用に関する研究~その2 実際の室を用いた実証実験~、日本建築学会近畿支部、2010年6月19日、大阪工業技術専門学校(大阪府)
- ④ 上谷芳昭、全天空輝度分布応答型昼光照明制御システムに関する研究-魚眼レンズ付デジタルカメラによる不快グレアの予測法とブラインドおよび人工照明制御の実験、照明学会、2010年9月8日、大阪市立大学(大阪府)
- ⑤ 上谷芳昭、平井大介、魚眼レンズ付デジタルカメラによる不快グレアの予測法、日本建築学会、2010年9月11日、富山大学(富山県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上谷芳昭 (UETANI YOSHIAKI)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00258302