

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14075

研究課題名(和文) 建築意匠の自由度向上と省エネを両立するセントラル・ライティングの提案と基礎的実践

研究課題名(英文) Fundamental proposal and developments of Central Lighting System capable of both design flexibility and energy efficiency

研究代表者

高取 愛子 (Takatori, Aiko)

京都大学・工学研究科・講師

研究者番号：10335185

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：中央管理された励起光源と、光ファイバを用いた励起光の遠隔地への配光伝送路、および、遠隔地に離隔設置された蛍光体配光部からなる、セントラル・ライティング・システム(CLS)の基礎的開発を行い、基本的な動作を確認した。照度や省エネなど技術的観点からは、実用化に向けた要素開発は未だ途上にありつつも、基本コンセプトを用いた本取り組みは、これまでの照明計画を一新する可能性を有し、シンプルな構造で意匠性の高い照明システムの実現に貢献できる一つの手法として有用であると考えられる。特に、配光部が電氣的な要素から開放されることによる利点とその可能性、また、配光部における意匠計画の展開の幅広さについて強調したい。

研究成果の概要(英文)：A new lighting technology, central lighting system (CLS), was proposed and practically performed in this study. The CLS is based on a solid state excitation light source and a phosphor based visible light distributor. The excitation light is functionally coupled with the light distributor via an optical transmission system by using optical fibers. Because the excitation source is centrally managed and efficiently cooled, it could be operated at any place of far away from the light distributor. Moreover, the light distributor is free of electric wirings and heat loads, and has no influence to characteristics of the light distributor. Accordingly, the CLS could accommodate with various shapes and environments. The proposed CLS potentially contributes to renovate the basic concept of the existing illumination system, and imparts high designability with a simple system.

研究分野：建築意匠

キーワード：セントラル・ライティング 半導体光源 蛍光体 高効率照明 照明意匠 生活居住空間

1. 研究開始当初の背景

近代以降、自然光の採光に加え、太陽光に近似した色合いを有する人工照明の巧みな配灯により、人間生活に心地よく呼応する光の溜まりを表現した照明計画が重視されてきた。とりわけ昨今では、器具自体の技術革新が進み、光と建築との相関はさらに緊密かつ多様化している。そうした革新の一つに、白色発光ダイオード(LED)の実用化がある。白色LEDは照明システムのエネルギー効率に関する需要を満たすという点において、従来光源である白熱球や蛍光灯の代替として汎用化しつつある。その普及の背景には、LED光源の発光効率の向上や、当初懸念されていた色味(演色性)が、十分とは言えずとも大きく改善したことがある。しかし、白色LEDの器具開発においては、従来光源の代替が主たる目的であるため、白色LEDの原理(励起光源である青色LEDと、蛍光体を組み合わせることで疑似白色を生成)を積極的に活かした視点や、光のデザインの柔軟性を重視した視点での発展は、いまだ途上にある。こうした背景を受け、本研究では新たな照明器具システムを提案、開発することによって、住生活と「あかり」の関係を改めて問い直したい。多様化する生活、めまぐるしく変化する住環境への要求に即応する照明の在り方への問いに、照明を設計者や施工者によって一方的に決定されてしまう一回性のものとしてではなく、住まい手の意志により自由に選定・交換可能な可変性を有するものと捉え、具体的な照明器具の作製を通して応えたい。とりわけ、「素材」や「色」が人間の心理に働きかける力への期待は大きく、住生活の中で、照明が住まい手にとって、心理的な動機付けとして積極的な役割を担えるべく、その応用技術を確立したい。

2. 研究の目的

本研究では、発光効率や素子寿命の観点から優れている半導体光源を用いて、照明と建築意匠との相関に主眼をおいた新規照明システム、すなわち、セントラル・ライティング・システム(以下、CLS)の可能性を提案する。つまり、中央集中管理された励起光源と、励起光を導波する光ファイバを用いた光伝送路、および、遠隔地に設置された蛍光体(波長変換部)からなる照明システムの提案である。励起光源は紫外～青色発光ダイオード(LED)やレーザダイオード(LD)といった高効率固体光源とする。励起光源から出る励起光は、光伝送路を経由して配光部に導波され、蛍光体を用いた配光部にて波長変換が生じることで照明用の白色光を呈する。本研究では、CLSを最も基本的な構成要素で具現化した光源・配光ユニットのプロトタイプをLD光源を用いて作製し(LD励起白色光源、図1)同時に配光部の設計に着手する。ところで、我々が提案するCLSは、いわゆるリモート蛍光体と呼ばれる、励起光源と

蛍光体を空間的に分離することで蛍光体の熱的劣化を防ぐ技術(図2)と類似点が見られる。このようなリモート蛍光体技術は、高出力白色光源向け用途で、主に民間企業で研究が進められている。また、レーザ光を用いた白色光源という観点では、自動車用の高輝度ヘッドライト用途として開発が進められている製品との類似性がある。しかし、これらはすべて、励起光源と蛍光体塗布部とを一体化して使用することを前提とする白色光源であって、我々が提案するCLSのように、光伝送路を介して、励起光源と配光部を全く別の空間に配置し、さらには配光部をオンデマンドで交換することを前提とするものではない。また、CLSの目指すところは、高出力作業時においても省エネ性を担保したうえで、一般照明であり、かつ、住環境の質的向上である。以上のことから、CLSは既往の研究や製品とは一線を画すものといえる。



図1 CLSを構成する3つの要素技術

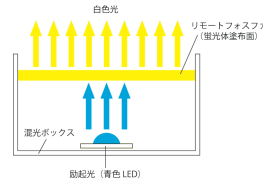


図2 白色LEDの動作原理

3. 研究の方法

本研究では、まず独自に開発する光源・配光ユニットを住空間へ適応することを想定し、CLSの基本構成およびCLS導入によって期待できる特徴についてまとめ、その後CLSを構成する各々の要素技術について、つぎように並列的に開発を遂行する。

(1) LD励起光源を用いた光源・配光ユニットの開発: CLSの中心的役割を担う光源・配光ユニットを、LD励起光源および光ファイバを用いて作製する。

(2) アクリル材を用いた配光部の開発: CLSの要素技術の一つである配光部の開発に着手する。蛍光体粒子を透明なアクリル材に分散・固定する簡便な技術を開発し、蛍光体部を作製する。また、照明器具と建築との取り合いや、光の質的な変換に対して、柔軟かつ革新的な照明意匠を模索するための端緒として、アクリル製配光部の発光特性を評価し、照明器具として機能させるための形状検討を加える。

(3) 高演色性白色LD光源のための蛍光体部の作製: アクリル製配光部の作製について、その再現性と作業性の改善、および、高演色性白色LD光源の実現に向けた蛍光体部の作製を目的として、蛍光体の塗布方法について更なる検討を加える。

(4) 配光部の高付加価値化に向けた蛍光体部の素材開発の試み：造形や質感調整において高い自由度を有するガラスや磁器素材に着目し、配光部意匠への高付加価値化を目指す。また、蛍光体粒子のガラス材や釉薬への添加時の課題点を整理し、熱特性および発光特性の安定化に向けた検討を行う。

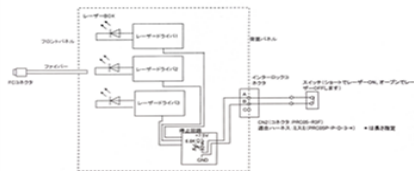


図3 光ファイバ結合青色LDモジュールの設計図

4. 研究成果

(1) 光源・配光ユニットの開発 (図3)

① 集中管理された励起光源

外形寸法 370 W×400 D×150 H (mm) の筐体に、高出力青色LDである PL TB450B (OSRAM 社製、波長 450 nm, 1.6 W, 標準効率 (出力された光の消費電力に対する比率 29-30%) 3 基を搭載し、筐体内で LD 溶接にて直結した光ファイバによって外部へ青色の光を出力させる。LD と光ファイバの結合効率は 80%以上と見積もられている。本体の電源は 100 V AC, ファイバ端部から自由空間に出射する光は、調整ツマミによって 0.0~3.5 W の範囲にて調整が可能である。LD は ACC 制御による駆動で、ファンによる強制空冷方式を採用した。なお LD は光源に実装された状態であるため、静電気の影響は受けにくい。LD やファンの駆動をすべて含めた LD モジュールの消費電力は、光ファイバ端光出力が 3.5 W のとき 36 W であった。

② 励起光を遠隔地へ伝える光伝送路

光伝送体として使用する光ファイバには全長 5 m のバンドルモードファイバ (SI114) を用い、FC コネクタを終端とした。

(2) アクリル材を用いた配光部の開発

平坦なアクリル板に YAG 蛍光体粒子である BY102J を塗布し、蛍光体塗布面に励起光 (450 nm) を照射することで、白色照明用途の器具のあり方を模索した。アクリル材へ蛍光体粒子を均一に分散塗布する簡易な方法を独自に開発し、蛍光体溶液および膜厚を最適化することによって、アクリル製蛍光体部を用いた 3 種類の配光部の形状 (点, 線, 面) を、YAG 蛍光体を用いた LD 励起白色光源として試作した。図 4 に示すように、タスク

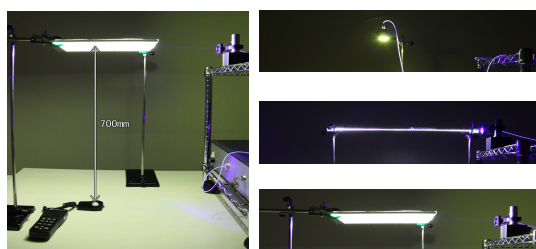


図4 LD励起白色光源 (点, 線, 面)

照明であるペンダント型を想定し、光源から 700 mm 離れた位置にて照度を計測した。

表 1 に 3 つの形状の LD 励起白色光源, 市販の白熱電球および電球色 LED の照度を示す。効率を表す「照度/消費電力」は, LD 励起白色光源, 点: 6.8 lx/W, 線: 5 lx/W, 面 a: 7.22 lx/W, 面 b: 11.86 lx/W である。同程度の消費電力下での市販の白熱電球の効率 2.74 lx/W と比較すれば, LD 励起白色光源は 2~5 倍の効率を示す。一方で, LD 励起白色光源「線」と同程度の照度を有する電球色 LED と比較すると, その消費電力は 4 倍以上となり, 効率の観点からは LD 励起白色光源は, 現状では電球色 LED には劣る。しかしそれは, 今回用いた LD が照明用途に開発されたものではない汎用品であること, LD 素子以外にも電力消費要素があることなどにも起因しており, 今後 LD 素子そのものの技術革新と, モジュールの設計最適化が進めば, 現在の LED に近い効率での運用が期待できる。

	700 mm の距離での照度 (lx)	消費電力 (W)	照度/電力 (lx/W)
点 (20×20×20)	245	36	6.8
線 (10×500×10)	180	36	5
面 a (薄光板) (210×300×8)	260	36	7.22
面 b (50×50×3)	420	36	11.66
白熱電球 (106×52)	96	35	2.74
電球色 LED (98×55)	192	8	24

表 1 塗布膜厚の異なる試験体の分光スペクトル

(3) 高演色性白色 LD 光源のための蛍光体部の作製

① YAG 蛍光体濃度, および, 塗布厚の最適化

LD 励起照明器具用途の蛍光体部に適した蛍光体粒子の添加量 (蛍光体濃度) と滴下量 (塗布厚) を検討した。なお, 主に蛍光体濃度により発光スペクトルを制御した。

作製した試験体の発光を分光測定し, 図 5 の結果を得た。これらのスペクトルに基づき算出された CIE 色度図, 色温度・平均演色評価数に加え, 目視による評価によれば, 本研究での手順や混合仕様が目的に沿っている事がわかった。また, 色度図の分布や色温度・平均演色評価数の推移から, 蛍光体濃度の調整のみで照明としての色調の制御が可能であるといえる。

以上より, 色度図と色温度による評価にて, 最も太陽光 (黒体軌跡上の 5000~6000 K) に近似する濃度を, アクリル製配光部における蛍光体濃度と定めた。

② 高演色性白色 LD 光源に向け蛍光体部の作製

発光スペクトルと平均演色評価数の評価により、演色性向上を試行した。①で作製した蛍光体部を目標スペクトルに近づけるために、625~630 nm で吸収発光する赤色蛍光体 BR102C を添加して長波側を補強し、演色性の向上を試みると共に、色温度の変化を観察した。

これによれば、添加により 450 nm 付近の強強度な発光特性が和ぎ、さらに不足分として補った 625~630 nm の色成分が太陽光に近づくことが示された。また、Ra は、BR102C 添加量に比例して目標値に近づき、さらに、色度図から、BR102C の添加量の調整により、色調を容易に制御できることがわかった。一方、励起光 450 nm 付近では、極端な強強度分布が見られたが、それはレーザー光特有のコヒーレント性によるものであるため、今後は、光を分散、散乱させるレンズの採用を検討する余地がある。

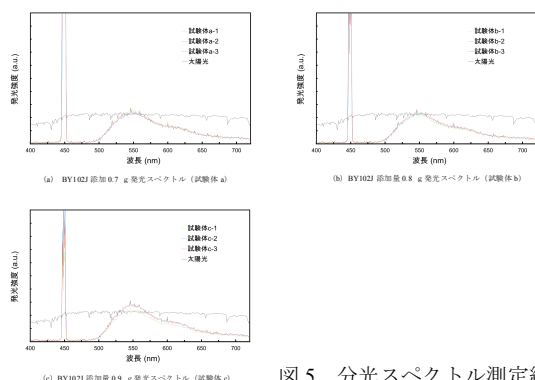


図5 分光スペクトル測定結果

(4) 配光部の高付加価値化に向けた蛍光体部の素材開発の試み

配光部における意匠のさらなる自由度を獲得するため、蛍光体のアクリル材以外の素材への適応を試み、それらを用いて配光部の高付加価値化を目指した。CLS の配光部には、蛍光体を定着させることができればどのような素材でも採用可能であることから、消灯時にも価値があり、かつ点灯時にはやわらかな光を呈するような意匠を実現する余地がある。そこで、配光部の素材として、造形・質感そのものにも価値を見出すことのできるガラスと磁器に注目し、配光部の素材対象としての予備的考察を行う。当然のことながら、ガラスおよび磁器は無機材料であり、器具の長寿命化の点でも都合がよい。また今後、光源の高出力化が現実になるにつれ、その利点はより有利となる。なお用途や設置場所に応じた様々な色温度を実現することを意図し、蛍光体には、配合比によって色成分を個別に制御可能なサイアロン蛍光体を用いた。

① ガラス材への蛍光体粒子の添加

そもそも蛍光体粒子のガラス材への添加においていくつか課題がある。特に、蛍光体の耐熱温度に比べ、一般的に流通するガラス(ソーダ硝子 FA) の形成温度は、1400 °C と一般的に高いため、蛍光体の発光特性劣化が生じるという課題の克服が肝要となる。そこ

で照明用途での実用レベルの波長変換効率を持つ蛍光体が、ガラス成形過程においてどのように特性変化するかについて検証した。

まず実際のガラス造形における基本工程に追随し、熔融したソーダ硝子を竿に巻き取り、蛍光体粒子を纏わせて、再度バーナーで焼き戻しながら、以下の様な方法で硝子への付着、変質、発光の状況を確認した。なお、工程 A および B (図 6) における作業温度は、A が 800-1000°C、B が 1200°C である。

工程 A : 熔融硝子に纏わせ、再加熱後に引き伸ばした

工程 B : 再加熱しながら硝子内部に粒子を練り混ぜた

次に、除冷後の外観画像の目視評価を行った。熔融硝子への付着状況は、蛍光体ごとによって差異が見られたが、それぞれ一定程度付着した。この試行では、各色共に均質に溶解馴染む状況には至らなかったものの、工芸的な硝子成形技法によく見られる金属箔の『散り』に類する様相を呈した。『散り』とは、硝子だけが伸縮し、金属箔は伸縮せずに引きちぎれてバラバラになる現象をさす。

- 赤色蛍光体 (CaAlSiN₃:Eu²⁺)、
付着しやすいが、再加熱すると発泡・黒化し、ダマが見られた。
- 橙色蛍光体 (CaAl_mSi_{12-m}N₁₆:Eu²⁺ (m=2))、
付着しづらいが、黒化・発泡しなかった。
- 緑色蛍光体 (Si_{6-z}Al_zOzN_{8-z}:Eu²⁺ (z=0.25))、
付着しやすいが、生地馴染みが悪く粒子層とガラス生地との温度ムラが大きかった為、成形作業性が悪かった。
- 青色蛍光体 (LaAl(Si_{6-z}Al_z)N_{10-z}Oz:Ce³⁺ (z=1))、
付着しやすいが、再加熱すると発泡・黒化した。
- 青色蛍光体 (SrSi₆N₈:Eu²⁺)、
付着しやすいが、再加熱すると発泡・黒化した。
- 黄色蛍光体 (Y₃Al₅O₁₂:Ce)
付着しにくいと比較的均等に『散り』、ある程度成形が可能。

本試験体独特の材料色や『散り』現象等においては、これまでに無い加飾素材となり得ることが考えられる。一方で、非点灯時の意匠性に鑑みれば、黒化を防ぐために、今後、低融組成でなおかつ、透明性の保たれる硝子をベースとして検討する必要がある。また、透明性を維持しつつも、均質に発光色が得られる添加量の最適化や、添加物の使用などの検討が必要である。

さらに蛍光体を添加したガラスに、励起光を照射して発光特性を評価した(図 7)ところ、高温下での黒化現象はあるものの、赤色蛍光体 (CaAlSiN₃:Eu²⁺) を除き、発光性能自体には劣化は見られなかった。

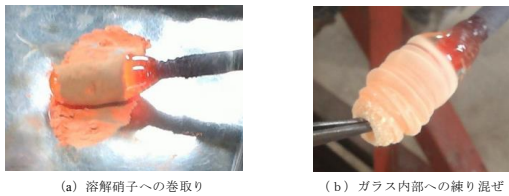


図6 硝子への塗布方法

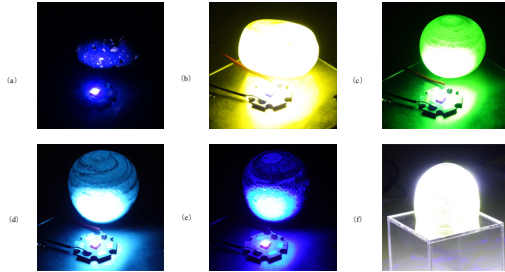


図7 蛍光体を添加したガラスの発光の様子

② 陶器への蛍光体粒子の添加

釉薬に蛍光体を添加して質感を損なわずに、かつ発光特性が劣化しない焼成条件を探るために、照明用途での実用レベルの波長変換効率を有する蛍光体が、実際の施釉過程においてどのように特性変化するかについて検証した。

まず、実際の絵付けにおける基本的工程に追随し、磁器土を 1250 °C で還元焼成した試験体に、蛍光体粒子を添加した絵具で絵付けを行った。この際、フリット 5 g に蛍光体 0.25 g 程度で混合したものを、ふのりをバインダーとして水を加えて粘度調整し、絵具とした。焼成条件は、ニクロム線の輻射熱を用いた電気炉にて、大気中で 780 °C、6 時間とした。

焼成後の試験体の外観の目視によれば素焼き片への付着状況は、蛍光体によって差異が見られたが、すべての色で、蛍光体粒子は釉薬として磁器に定着することが確認できた。

- a. 赤色蛍光体 (CaAlSiN₃:Eu²⁺)、発泡し、灰色化した。
- b. 橙色蛍光体 (CaAlmSi_{12-m}N₁₆:Eu²⁺ (m=2))、発泡した。
- c. 緑色蛍光体 (Si_{6-z}AlzOzN_{8-z}:Eu²⁺ (z=0.25))、発泡した。
- d. 青色蛍光体 (LaAl(Si_{6-z}Alz)N_{10-z}Oz:Ce³⁺ (z=1))、(若干) 発泡した。
- e. 青色蛍光体 (SrSi₆N₈:Eu²⁺)、(若干) 発泡した。
- f. 黄色蛍光体 (Y₃Al₅O₁₂:Ce) 発泡した。

今後、非点灯時 (OFF 時) の意匠性に鑑みると赤色の灰色を防ぐ、あるいは、彩色可能な釉薬として機能させるために、金属の添加も視野に入る。

さらに 365 nm の紫外光を照射して、釉薬の発光特性を評価した (図 8) 結果、赤色蛍光体のみが発光は確認できず、失活していることがわかった。

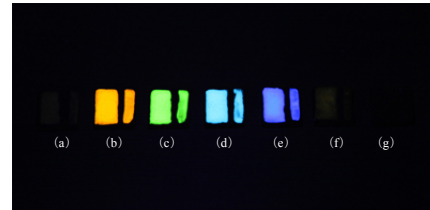


図8 焼成後の試験片に紫外線を照射した様子

③ 赤色蛍光体の熱特性の検証

熱を加える工程において、赤色蛍光体の発光特性が失活することが明らかとなった一方で、赤色蛍光体は、発光の際の色味に高い演色性と色彩の幅を付与することを目的とする本研究では重要な位置づけであることから、釉薬焼成条件における赤色蛍光体の失活原因について探った。

まず、赤色蛍光体の加熱時における物性変化を評価するために熱重量測定 (Ar 雰囲気中) を行ったところ、550 °C において、急激な重量減少が見られることがわかった。また、熱処理前後の蛍光体粒子の写真を概観すれば、熱処理によって赤色蛍光体の色が変化 (赤橙色の赤蛍光体が、脱色した白黄色化) していることから、熱処理によって蛍光体の状態もしくは組成が変化していると推察される。つぎに、ガス質量分析測定を行ったところ、試料の温度上昇に伴い、550 °C にて分子量 28 と 44 のガスが検出されることがわかった。すなわち、N₂ (分子量 28) と CO₂ (分子量 44) の発生が示唆される。

また、熱処理前後の走査型電子顕微鏡観察 (Scanning Electron Microscopy, SEM) 及びエネルギー分散型 X 線 (Energy Dispersive X-ray spectrometry, EDX) による定量分析の結果によれば、SEM 像では熱処理に伴う粒子形状等の変化は確認できなかった一方、EDX 結果では熱処理による N の減少、及び O の増加を確認することができた。なお、Ca, Al, Si, Eu の量には、変化はほぼ見られなかった。これらを踏まえれば、熱処理によって蛍光体に含まれる N の還元分解による N₂ 発生、及び O による酸化反応が進行したことが想定される。

さらに、熱処理による赤色蛍光体の化学状態変化を観察するために、X 線光電子分光 (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) 測定を行った結果、赤色蛍光体の構成元素 Ca, Al, Si, N, Eu において、Ca 2p, Al 2p, Si 2p スペクトルでは熱処理による変化は確認されなかった。一方で、N 1s 及び Eu 3d においては、熱処理前後でスペクトル変化が確認され、N と Eu の化学状態の変化が示唆された。また、Eu においては、熱処理前の Eu 3d スペクトルを、熱処理後には確認できなかった。赤色蛍光体の構成元素以外では、O 1s ス

ペクトルが確認されたことから、表面が酸化状態にあることが考えられる。

X線回折(X-ray Diffraction, XRD)の測定結果によれば、熱処理の前後でXRDプロファイルの大きな変化は確認されず、基本的な骨格構造は熱処理後も保たれていることが分かる。一方で、熱処理後のXRDプロファイルを詳細に検証すると、熱処理前の試料には見られなかった複数の新たなピークの生成が確認された。この原因として、N脱離と同時に組成変化が部分的に生じたこと(例えばOと反応した酸化物)が考えられる。

以上の結果から、赤色蛍光体の失活原因は、550℃以上の温度領域において、Nの脱離に伴い、Euの状態が変化することによるものであると想定される。同時に、新たに導入される相の存在が、発光特性に影響を与えることも考えられる。

そこで、N脱離抑制を目的として、赤色蛍光体をN₂雰囲気中で熱処理を行うことを試行した。その結果、焼成後の赤色蛍光体の色は白黄色に変色していたが、発光特性そのものは失活しておらず、赤色に発光することが確認された。すなわち、焼成雰囲気をN₂にしたことで、赤色蛍光体からのN脱離は抑制されることがわかる。

④ 蛍光体の安定化に向けた試み

蛍光体の表面を別の物質で被覆し、高温下においても、内部の蛍光体の光学特性が劣化しないように保護することを考えた。被覆のための材料として、本研究では他材料で実績のあるシリカ(SiO₂)を選定した。シリカは他の酸化材料に比べて低屈折率を有しており、さらに、化学的・熱的に非常に安定な物質である。またゾル-ゲル法に着目し、ゾル-ゲル反応を用いることで、熱的ダメージを最小限に抑えた状況でシリカ被覆処理を施すこととした。

反応条件の最適化を検証し、反応の解析において、QCMを用いたその場測定を利用することで析出挙動の定量的な評価が可能であることを実験的に示した。現在、このような被覆条件の最適化と並行して、シリカ被覆処理した蛍光体を色材として使い、鉛フリー低融点フリット[5]と混合し熱処理を行うことにより実際に釉薬を作製し、特性を評価中である。

以上のように、本研究では、発光効率や素子寿命の観点から優れている半導体光源を用いて、照明と建築意匠との相関に主眼をおいた新規照明システム、すなわち、セントラル・ライティング・システム(CLS)の可能性を提案した。

なお、照度や省エネなどの技術的観点からは、実用化に向けたそれぞれの要素開発は未だ途上にありつつも、本システムは、これまでの照明計画の基本コンセプトを一新する可能性を有するものであり、シンプルな構造で

意匠性の高い照明システムの実現に貢献できる一つの手法として有用であると考え。とりわけ、今後さらにLD光源自身の高効率化、高出力化が進めば、大きな照度を必要とする照明用途への応用も可能になると期待する。

5. 主な発表論文等

① Masatsugu Oishi, Shohei Shiomi, Takashi Yamamoto, Yoichiro Kai, Tomoyuki Ueki, Shigefusa F. Chichibu, Aiko Takatori, and Kazunobu Kojima, Thermal property at elevated temperatures of a red phosphor, CaAlSiN₃:Eu for solid-state lighting, Journal of applied physics, 査読あり, 投稿中

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高取 愛子 (TAKATORI, Aiko)
京都大学・大学院工学研究科・講師
研究者番号: 10335185

(2) 研究分担者

小島 一信 (KOJIMA Kazunobu)
東北大学・多元物質科学研究所・准教授
研究者番号: 30534250

(3) 連携研究者

該当なし

(4) 研究協力者

大石 昌嗣 (OOISHI, Masatsugu)
徳島大学・大学院理工学研究部・准教授
研究者番号: 30593587

改井 陽一郎 (KAI, Youichirou)
京都大学・大学院工学研究科・技術補佐員

塩見 昌平 (SHIOMI, Shohei)
京都市産業技術研究所