車室内空間のリビング化と高演色 LED

High Color-Rendering LEDs for Transforming Vehicle Interiors into Living Spaces

佐　藤　祐　一*
Yuichi Sato

概要　自動運転技術の進展や価値観の多様化に伴い，自動車の室内空間は単なる移動空間からくつろぎやコミュニケーションを提供するリビング空間へ変化すると考えられている。そこで，車室内空間の価値向上に寄与する照明の実現を目的として，車室内において人物の肌を自然かつ血色よく見せる発光スペクトルを有する肌色高演色 LED を開発した。試作品は，平均演色評価数 Ra 95.6，特殊演色評価数 R9 93.2 および R15 96.3 を示した。本稿では，開発の背景，目標設定，発光スペクトルの設計ならびに試作・評価結果について報告する。

1. まえがき

1.1 室内 LED 照明の課題

自動運転技術の進展や価値観の多様化に伴い，自動車に求められる価値は大きく変化すると考えられている。特に車室内空間には，単なる移動空間としての機能に加え，くつろぎやコミュニケーションを提供するリビング空間としての役割が期待されている[1)]。

従来，車室内照明は，夜間に地図や手元を照らすことを主な目的として使用されてきた。今後は，室内全体を快適に照らし，居住性やデザイン性を高める空間照明としての活用が拡大すると考えられる。このため，車室内空間の価値向上に寄与する要素の一つとして，演色性の向上が求められている。

車室内照明の光源は，従来の白熱電球から LED へと急速に置き換えられてきた。LED 化により，低発熱，高効率，高輝度，長寿命に加え，電球色から昼光色まで幅広い色温度を選択できるなどの利点が得られる。

他方で，一般的な白色 LED は，青色 LED チップの発光と蛍光体による発光を組み合わせて白色光を生成するため，発光スペクトルに偏りや不足する波長域が生じる場合がある。これに対し，白熱電球は可視光域にわたる連続的な発光スペクトルを有する。そのため，一般的な白色 LED では，白熱電球と比較して演色性が低くなる傾向がある。

特に人物の肌色の再現では，黄色域の発光成分が相対的に強く，赤色域の発光成分が不足しているため，自然さや血色感が損なわれることが課題であった。

1.2 演色評価数

演色性とは，光源によって照らされた物体の色の見え方に関する性質である。演色評価数は，試料光源で照明した試験色の見え方を，同じ相関色温度の基準光で照明した場合と比較して演色性を数値化した評価指標であり，値が 100 に近いほど基準光による色の見え方に近い。JIS Z 8726 では，15 種類の試験色に対する演色評価数 Ri（R1～R15）が規定されており，このうち R1～R8 の平均値を平均演色評価数 Ra としている。特殊演色評価数 R9～R15 は，Ra の算出には含まれず，赤色，黄色，緑色，青色，肌色および植物の葉の色など，特定の色の再現性を個別に評価するために用いられる[2)]。特に R13 は明るい肌色，R14 は植物の葉の色，R15 は日本人の肌色に対応した試験色である。演色評価数 R1～R15 に対応する試験色を**表 1** に示す。

表 1　演色評価数

R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15
Ra：平均演色評価数								赤	黄	緑	青	明るい肌色	木の葉の色	日本人の肌色

＊技術開発本部ﾊﾟﾜｰﾃﾞﾊﾞｲｽ開発統括部
ｵﾌﾟﾄ技術部 LED 開発課

本開発では，平均演色評価数Raに加え，赤色の再現性を示すR9および日本人の肌色に対応するR15に着目した。R9は肌の血色感に影響する赤色の再現性を示し，R15は人物の肌色そのものの再現性を示す指標である。本開発の目的は，車室内において人物の肌を自然かつ血色よく見せることであるため，R9およびR15を肌色高演色LED開発における重要な評価指標とした。Raが高い場合でも，Raの算出に含まれないR9やR15が必ずしも高いとは限らない。このため，車室内における人物の肌色の再現性を評価するには，Ra，R9およびR15を個別に確認する必要がある。

2. 開発目標

人物の肌を自然かつ血色よく見せるためには，前節で述べたR9による血色感およびR15による肌色の再現性を向上させる必要がある。このため，肌のくすみを強調しやすい黄色域の発光成分を抑制するとともに，血色感に寄与する赤色域の発光成分を増加させることを開発方針とした。したがって，本開発では平均演色評価数Raに加え，R9およびR15も重要な目標指標とした。

3. 肌色高演色LEDの開発

3.1 発光スペクトルの設計方針

開発目標を達成するため，まず目標とする発光スペクトルを設定した。具体的には，黄色域の発光成分を抑制しながら赤色域の発光成分を増加させるとともに，青色域と緑色域の間に生じる発光強度の落ち込みを補完することで，R9およびR15の向上を図った。以降，この発光スペクトルを実現するため，青色LEDチップのピーク波長および蛍光体配合の最適化を行った。車室内を自然に照らせる白色の代表として5000Kを色温度の狙いとし，Raのみを規定した一般的な高演色品と明確に差別化するため，Ra，R9，R15の演色評価数は，いずれも90以上を目標値とした。これ以外の演色評価数は，発光効率を低下させるなどの観点から，規定しないこととする。

3.2 青色LEDチップおよび蛍光体配合の最適化

目標とする発光スペクトルを実現するため，緑色蛍光体Aおよび赤色蛍光体Bを基本構成とし，青色LEDチップのピーク波長ならびに蛍光体の配合濃度についてシミュレーションを実施した。

まず，緑色蛍光体Aと赤色蛍光体Bの配合濃度を固定し，青色LEDチップのピーク波長が演色性に及ぼす影響を確認した。結果を**図1**および**図2**，**表2**に示す。青色LEDチップのピーク波長が長波長側へ移るにつれてRaおよびR9は向上し，454nm付近ではRa 96.3，R9 93.6が得られた。一方，447nm付近ではRa 90.3，R9 81.8となり，R9が目標値である90を下回った。この結果から，Ra，R9およびR15をいずれも90以上とするためには，青色LEDチップのピーク波長を適切に選定する必要があることがわかった。

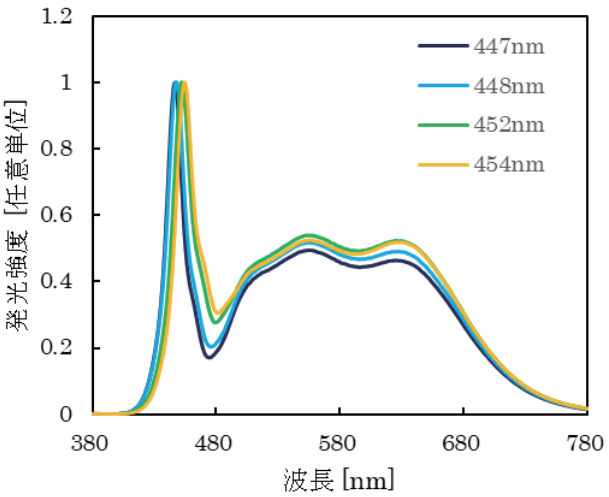

図1　青色LEDチップのピーク波長と発光スペクトル

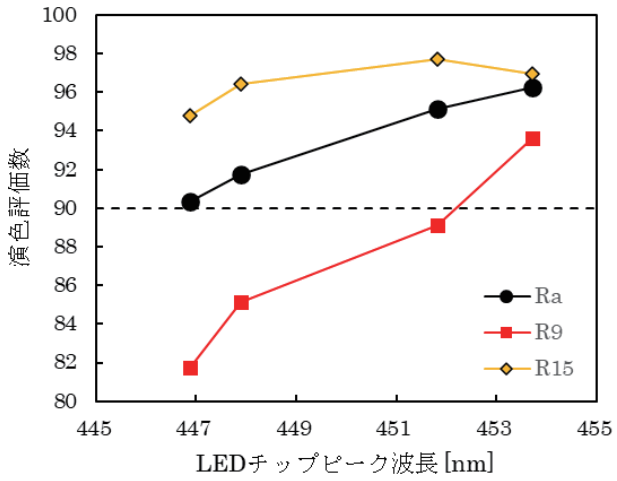

図2　青色LEDチップのピーク波長と演色評価数変化

表2　青色LEDチップのピーク波長と演色評価数

ピーク波長	Ra	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
目標値	≧90								
447nm	**90.3**	94.1	91.2	86.6	89.4	93.4	86.7	89.7	91.6
448nm	**91.7**	95.1	92.6	88.0	91.0	94.5	88.1	91.4	93.2
452nm	**95.1**	96.4	96.3	93.2	95.4	95.4	91.7	96.6	95.9
454nm	**96.3**	97.3	98.4	95.9	95.9	95.6	93.5	97.0	96.5

ピーク波長	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15
目標値	≧90						≧90
447nm	**81.8**	78.4	90.6	74.5	92.6	92.2	**94.8**
448nm	**85.1**	81.4	91.7	74.9	94.0	93.0	**96.4**
452nm	**89.1**	89.6	94.6	72.7	96.8	95.9	**97.7**
454nm	**93.6**	94.7	95.5	72.2	98.7	97.5	**97.0**

青色LEDチップのピーク波長を調整した場合でも，青色域と緑色域の間に位置する480～490nm付近には，発光強度の落ち込みが残った。そこで，当該波長域を補完し，発光スペクトル全体のバランスを改善するため，青緑色蛍光体Cを追加して，その配合濃度を変化させた。結果を**図3**および**図4**，**表3**に示す。

蛍光体Cの配合濃度を高めると，490nm付近の発光強度が増加し，青色域と緑色域の間に見られる発光強度の落ち込みが緩和された。蛍光体Cの配合濃度増加に伴いRaおよびR9は向上し，10wt%ではRa 93.1，R9 94.9を達成し，さらに15wt%ではRa 94.0，R9 98.2まで高くすることができた。蛍光体Cを追加することにより，スペクトル分布のバランスを調整し，相対的に赤色の再現性を向上させる効果があることが確認できた。しかしながら，20wt%まで増加させるとRa 94.2とわずかに向上したものの，R9は92.5に低下した。配合濃度が過度に高くなるとスペクトルバランスを崩し，かえってR9を低下させるため，演色性が良好となる適正な配合範囲が存在することが分かった。以上の結果に基づき，青色LEDチップのピーク波長ならびに緑色蛍光体A，赤色蛍光体Bおよび青緑色蛍光体Cの配合濃度を決定した。

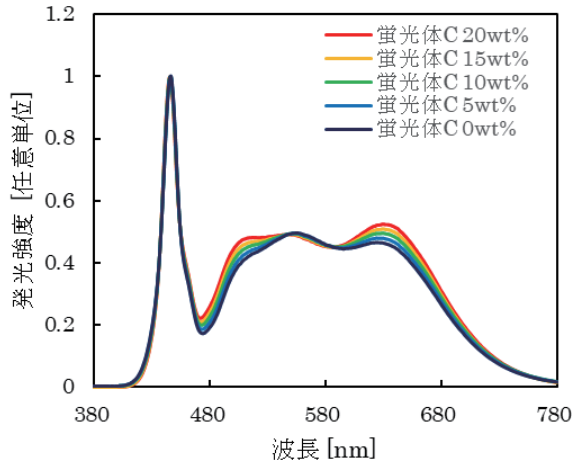

図3　蛍光体C配合濃度による発光スペクトルの変化
（λp＝447nmの場合）

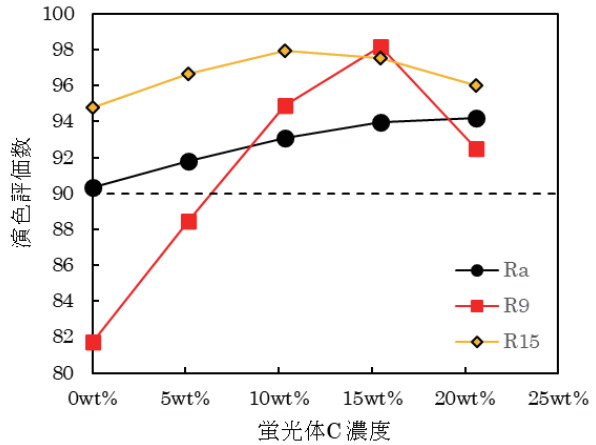

図4　蛍光体C配合濃度と演色評価数の変化
（λp＝447nmの場合）

表3　蛍光体C配合濃度と演色評価数

蛍光体C濃度	Ra	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
目標値	≧90								
0%	**90.3**	94.1	91.2	86.6	89.4	93.4	86.7	89.7	91.6
5%	**93.1**	98.0	94.1	88.8	90.4	96.9	90.8	91.4	94.1
10%	**93.1**	98.0	94.1	88.8	90.4	96.9	90.8	91.4	94.1
15%	**94.0**	99.2	95.5	89.9	90.4	97.9	92.7	92.1	94.3
20%	**94.2**	97.8	96.7	90.9	90.1	97.5	94.4	92.7	93.6

蛍光体C濃度	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15
目標値	≧90						≧90
0%	**81.8**	78.4	90.6	74.5	92.6	92.2	**94.8**
5%	**94.9**	85.6	90.6	80.7	96.4	93.5	**97.9**
10%	**94.9**	85.6	90.6	80.7	96.4	93.5	**97.9**
15%	**98.2**	89.1	89.7	83.5	98.0	94.1	**97.5**
20%	**92.5**	92.4	88.5	86.3	98.5	94.6	**96.0**

4．試作および評価結果

シミュレーションにより決定した青色LEDチップのピーク波長および蛍光体配合濃度を用いて，肌色高演色LEDを試作した。チップ波長は450nm，蛍光体Cの濃度は15wt%とした。試作品の発光スペクトル特性を評価するため，一般白色LEDおよび高演色LEDの発光スペクトルと比較した。発光スペクトルの比較結果を**図5**に，主要な演色評価結果を**表4**に示す。

肌色高演色LEDでは，一般白色LEDと比較して，490nm付近における発光強度の落ち込みが抑制された。また，黄色域（570～610nm付近）の相対発光強度が低下する一方，赤色域（620～700nm付近）の発光成分が広帯域に増加した。これらの結果から，試作品において設計方針に沿った発光スペクトルが得られたことを確認した。

肌色高演色LEDは，平均演色評価数Ra 95.6，特殊演色評価数R9 93.2およびR15 96.3を示し，いずれも開発目標である90以上を達成した。一般白色LEDと比較すると，Raは81.7から95.6，R9は6.2から93.2，R15は76.3から96.3へ向上した。特にR9およびR15が大幅に向上している。

高演色LEDとの比較においても，490nm付近における発光強度の落ち込みが抑制され，赤色域（620～700nm付近）の発光成分が広帯域に増加している。Raについてはどちらも90以上であり大きな差は見られなかった。一方，R9は高演色LEDの76.2に対し，肌色高演色LEDでは93.2であり，高い値を示した。これらの項目においてはJIS Z 9112:2019における高演色形クラス3の要求値と同等以上の水準であり，血色感および肌色の再現性の向上が期待できる結果が得られた[3)]。

一方，光度については演色性の向上に伴って低下する傾向が懸念されたため，今後は演色性を維持しながら光度向上を図るよう，蛍光体組成および製品構造の最適化を進める予定である。

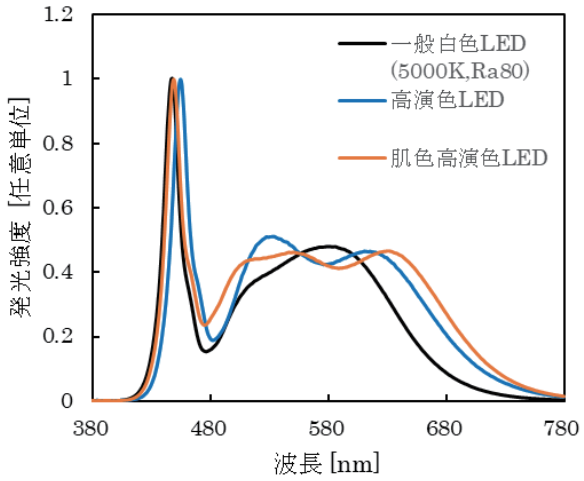

図５　肌色高演色 LED の発光スペクトル
（λp ＝ 450nm ／蛍光体 C 濃度 15wt% のとき）

表４　試作品の演色評価結果

試料	Ra	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
目標値	≧90								
一般白色LED	**81.7**	81.1	85.9	88.8	82.9	82.3	80.2	84.8	67.6
高演色LED	**92.9**	95.5	93.0	87.8	95.2	93.3	88.4	96.3	93.6
肌色高演色LED	**95.6**	98.0	97.2	91.8	93.8	99.2	93.4	95.4	95.8

試料	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	色温度
目標値	≧90						≧90	5000K
一般白色LED	**6.2**	66.4	83.1	62.0	81.9	93.9	**76.3**	5223K
高演色LED	**76.8**	80.6	93.0	61.4	95.1	92.6	**94.5**	5125K
肌色高演色LED	**93.2**	92.7	91.9	78.7	98.6	95.1	**96.3**	5237K

5. むすび

車室内空間のリビング化が進む中，車室内照明には，従来の照明機能に加えて，快適性や空間価値の向上に寄与する役割が求められている。本開発では，人物の肌を自然かつ血色よく見せることを目的として，目標値を設定し，青色 LED チップのピーク波長および蛍光体配合濃度をシミュレーションにより最適化した。さらに，選定した条件で肌色高演色 LED を試作し，設計方針に沿った発光スペクトルが得られることを確認した。その結果，試作品は Ra 95.6，R9 93.2 および R15 96.3 を示し，いずれも目標値である 90 以上を達成した。一方，演色性向上に伴い光度は低下するため，今後は高演色性と高効率の両立に向けた最適化を進める。

開発した肌色高演色 LED は，ルームランプやバニティランプなどの車室内照明に適用することで，人物の肌色の見え方を改善し，車室内空間の価値向上に寄与すると考えられる。今後は，色温度および明るさのラインアップを拡充し，多様な車両コンセプトやニーズへの対応を進める。

参考文献

1）国土交通省：令和 4 年度国土交通白書，車内空間の高度化を通じた移動時間の高付加価値化
2）JIS Z 8726：光源の演色性評価方法
3）JIS Z 9112：蛍光ランプ・LED の光源色及び演色性による区分