研究論文 Received November 30, 2012; Accepted August 5, 2013

光学 **42**, 11（2013）568–573

次世代型自動車用ランプ Field Emission Lamp（FEL）の開発

荒川　俊也*・難波　篤史**・松岡　健二***・髙橋　久也****

*愛知工科大学工学部機械システム工学科　〒443–0047 蒲郡市西迫町馬乗 50–2
**富士重工業(株) スバル技術研究所　〒181–8577 三鷹市大沢 3–9–6
***市光工業(株) 研究開発部　〒259–1192 伊勢原市板戸 80
****(株)シィアイテクノ　〒224–0023 横浜市都筑区東山田 1–1–43

Development of Next Generation Automobile Lamps: Field Emission Lamp（FEL）

Toshiya ARAKAWA*, Atsushi NAMBA**, Kenji MATSUOKA*** and Hisaya TAKAHASHI****

*Aichi University of Technology, 50–2, Manori, Nishihasama-cho, Gamagori, Aichi, 443–0047
**Subaru Technical Research Center, Fuji Heavy Industries, Ltd., 3–9–6, Osawa, Mitaka, Tokyo 181–8577
***Department of Developing Research, Ichikoh Industries, Ltd., 80, Itado, Isehara, Kanagawa 259–1192
****CI Techino, Inc., 1–1–43, Higashi-yamada, Tsuduki-ku, Yokohama, Kanagawa 224–0023

Global environment, resource, and energy saving issues are growing, but the energy consumption of the transport sector tends to increase. Thus, it was essential to develop and promote lamps that use less electricity and Field Emission Lamp（FEL）for tail lamp was developed. In this development, light use efficiency and light distribution, were mainly improved by using aluminum reflector and the thickness of phosphor layer was optimized. As a result, the production of FEL source for tail lamp whose luminance is 15300 cd/m^2 at 1.56 W was made possible. In addition, a prototype of FEL lamp fitting was made, by which the light source of SUBARU Impreza was replaced.

Key words: energy saving, field emission, Field Emission Lamp, light use efficiency, tail lamp

1. はじめに

本論では，独自に開発した次世代型自動車用ランプの光源開発について述べるとともに，本光源を用いた自動車用リアランプの開発について述べる．

地球環境問題や資源エネルギー問題が深刻化する中で，2011 年度の国内のエネルギー消費における運輸部門の占める割合はエネルギー消費全体の 23.3% である[1]．運輸部門のエネルギー消費量は増加傾向にあり，乗用車やバスなどの自動車が含まれる旅客部門のエネルギー消費は，1965 年から 2011 年度の 46 年間に 6.3 倍（年率 4.1%増）となっている[1]．そのため，自動車の省エネルギーに寄与する対策として，電装系の消費電力低減化が進められている．US Environmental Protection Agency Technologies and Energy Efficiency（http://www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml）によれば，自動車を走行させるためのエネルギーは自動車全体の消費エネルギーの 12.6%，電装系が消費するエネルギーは 2.2% と考えられている．したがって，自動車を走行させるエネルギーのうち，電装系が消費するエネルギーは 17.5% となると推測される．

その一方で，自動車用ランプでは，発光効率が低く寿命も短いといった短所をもちながら，安価なため，いまだに多くの車両で白熱電球タイプのランプを搭載している．近年は，低消費電力の観点から，LED の市場が急速に成長している．可視光（単色および白色），赤外光，紫外光を含む LED 全体の市場は，2008 年では光源全体の 14.0% のシェアを構成しており，液晶バックライトや一般照明で需要が急増すると見込まれている[2]．

しかし，照明用途としての LED は，従来の蛍光灯器具に比べて5倍から10倍のコストを要するため，コスト削減が求められている[3]．また，LED は全エネルギーのうち，約 75% はジュール熱となり，実質的な発光効率は約 25% に過ぎないという報告がある[4]．エネルギーの大半がジュー

E-mail: arakawa-toshiya@aut.ac.jp

ル熱となるため，さまざまな対策が講じられている[5-7]．現状では，放熱対策のために，ヒートシンクなどに代表されるさまざまな部品を使用しており，LED 自体のみならず，灯具全体としても高コスト化に繋がっている．今後，環境対応車として電気自動車やハイブリッドカーなどの次世代環境対応車が普及すると見込まれている中で，少しでもエネルギー消費とコストを抑えるためには，低消費電力を実現する低コストランプの開発および普及が必須である．

そこで，われわれは，この低消費電力と低コストを両立するランプとして，白熱電球比1/10以下の低消費電力および低コストによる製造可能性を備えた自動車用電界電子放出型ランプ（Field Emission Lamp: FEL）の開発を行った．

本論の構成は以下の通りである．

第2章では，FELの原理および構造について説明するとともに，他光源との比較を行う．

第3章では，FELの発光原理を満足するための研究開発課題を述べ，それに対する課題解決方法および要素開発について述べる．

第4章はまとめと今後の課題である．

2. FELとは

本章では，FELの発光原理について説明するとともに，他光源との比較を行うことでFELのメリットを示す．加えて，FELの研究開発課題を説明する．

2.1 FELの発光原理

固体内に存在する電子は，格子点にある原子核の正電荷による電位の存在する空間内にあるものと考えられる．そのため，真空中における自由電子に比べ，ポテンシャルエネルギーが低い．したがって，固体内から真空中に電子を取り出すには，その分に相当するエネルギーを電子に与える必要がある[8]．真空中で固体表面にエネルギーを加えることで固体内の電子が真空中に放出される現象を，電界電子放出（field emission）という[8,9]．カーボンナノチューブに代表される冷陰極電子源に電界を印加すると，先端から電子が放出されるが，これも電界電子放出現象である．印加電界の強度を増すと，固体内電子を真空に放出させるために必要な仕事量である仕事関数が小さくなるだけでなく，電位障壁の幅が薄くなる．印加電界が 10^9〜10^{11} V/m程度の大きさに達すると，障壁内を突き抜ける電子の流れが顕著になる（トンネル効果）．一般に，電位障壁内に入ってきた電子は，波動関数によって，電位障壁の反対側に出てくることは不可能である．しかし，電位障壁による減衰が少なく，ある程度の大きさをもった電子の波動であれば，反対側に出てくることが可能である[8]．FELは，この電界電子放出特性を応用したデバイスである[10,11]．FELの発光原理は次の（1）〜（3）に従う．

（1）高真空ガラス容器内に蛍光体を印刷した陽極（アノード）と冷陰極電子源（カソード）を対向させ配置する．

（2）電界放射電子をゲートで加速させ，陽極の蛍光体に衝突させる．

（3）電子の衝突により蛍光体が励起され発光する[12]．

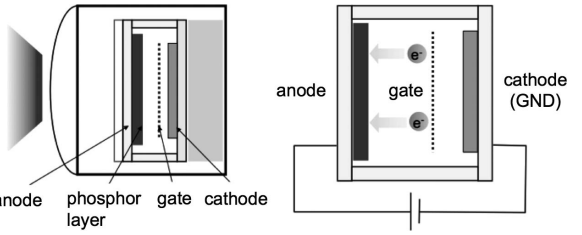


Fig. 1　Principle of FEL emission.

Table 1　Comparison of incandescent bulb and LED lamp.

	Incandescent bulb	LED lamp
Energy consumption [W]	21	3〜6

Fig. 1にFELの構造を示す．FELは片面発光かつ平面発光であるという特徴をもつ．蛍光灯などに代表される両面発光の場合は，照明対象物と反対側に向けて発光された光束は，直接，照明に寄与しないため，光の利用効率が悪い．一方，片面発光の場合は，光利用効率の高い設計を行うことによって，発光する大半の光束を，直接，照明対象物に向かわせることが可能である．また，発光に伴う温度上昇は電子線が衝突するガラス表面に限られており，発熱による電気的な動作特性が劣化しない構造であることから，放熱対策の部品が不要であるため，灯具のコスト低減を図ることができる．

2.2 他光源との比較

現在，自動車用ストップランプとして，白熱電球タイプおよびLEDタイプが存在する．それぞれのタイプの消費電力をTable 1に示す[13-15]．FELでは，ジュール熱によるエネルギー損失がLEDに比べると少ないため，LEDに比べて低消費電力を実現することが可能であると考えられる．したがって，本研究では，FELの消費電力として，3 W以下を目標とした．

3. FEL要素開発

本章では，FELの発光原理を満足するための研究開発課題と，その課題に対する解決方法および要素開発について述べる．

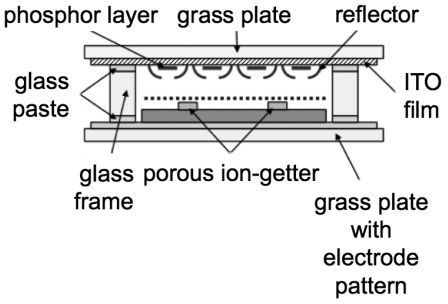


Fig. 2　Basic structure of FEL.

3. 1　ランプ基本構造開発

将来の量産化を容易に可能とすることを目的とし，安価な材料，単純な構造，低コストプロセスを目標に挙げ，ランプ基本構造開発を行った．ランプ構造を検討するための具体的な手順を ①～③ に示す．また，ランプ構造を Fig. 2 に示す．

① 電極を搭載するソーダライムガラス板（底板）に，配線用電極パターンをスクリーン印刷により塗布し，乾燥後，高温焼成する．

② ケミカルエッチング法により，電極（カソード，エミッター，ゲート）を構成する 42Ni の薄板に，電子線の通過孔や組み立てに必要な孔，溝および形状を加工する．

③ 発光面となる ITO 膜（酸化インジウムスズ（indium tin oxide），透明導電膜）付ソーダライムガラス板へ蛍光体をスクリーン印刷で塗布し，乾燥後，蛍光体に混練した有機バインダー（結合材）を高温焼成にて除去する．

われわれが製作した FEL は，①～③ の部材を，底板，電極，ガラス枠，アルミリフレクター（反射板，後述），ITO 膜付きソーダライムガラス板の順番に平行に重ねる単純な構造である．しかし，自動車用部品としての安全性を確保するために必要な法規準拠の耐振性能を備えていることが大きな特徴である（詳細は 3.7 節にて述べる）．

また，部材は 42Ni，ソーダライムガラス，アルミナセラミックス，純アルミなど，一般に大量生産されており，比較的安価に手に入る無機材料および金属材料を使用している．さらに，部材加工，組立作業等のすべての工程において，ケミカルエッチング，射出成形，切削研磨，プレス等の汎用化低コストプロセスのみを用いているため，部材および工程設計の両面から，製品の低価格化が実現できる．

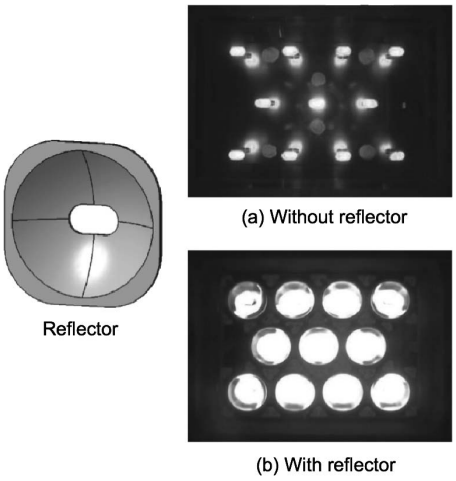


Fig. 4　Reflector and lighting appearance.

3. 2　光学系構造開発

蛍光体は電子が衝突することによって発光し，一部は蛍光体層を透過する（透過光）が，一部は透過せずガラス容器内部に反射する（反射光）．この様子を Fig. 3 に示す．したがって，ガラス容器内部に反射した光を効率よく取り出し，車両後方に照射する必要がある．そのため，発光面となる ITO 膜付きソーダライムガラス板にアルミリフレクターを取り付け，光利用効率，配光特性の向上を図った．リフレクターは放物線を基調とする曲面とした．今回のストップランプ用光源の検討で用いたリフレクターの形状およびリフレクターの有無による発光状態の差異を Fig. 4 に示す．リフレクターを取り付けたことによって，反射光が効率よく取り出されるようになり，光利用効率，配光特性ともに向上した．

3. 3　蛍光体印刷技術開発

ストップランプの発光を実現する蛍光体として，今回の開発では，CRT 用赤色蛍光体（P22-RE3; Y_2O_2S:Eu，三菱

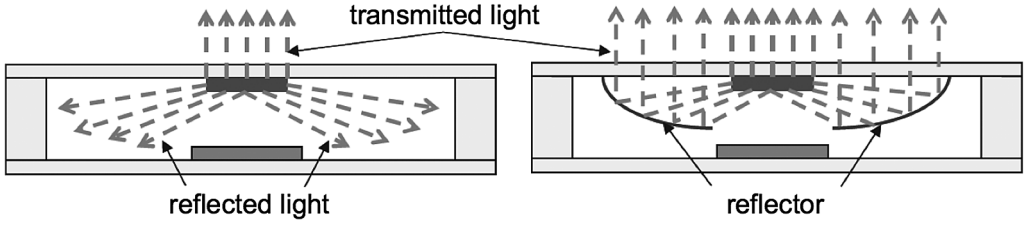


Fig. 3　Reflected light and transmitted light.

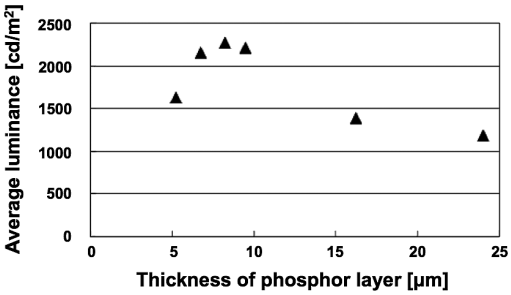


Fig. 5 Relation between thickness of phosphor layer and average luminance.

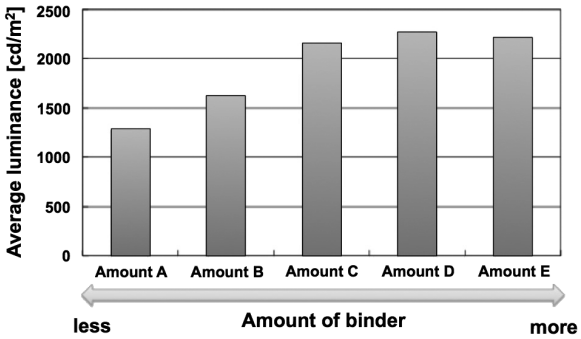


Fig. 6 Relation between amount of binder and average luminance.

化学製）を用いた．蛍光体層の厚さや密度の変化が，電子線の蛍光体への侵入に影響を及ぼし，発光輝度に影響を及ぼすという報告がある[12]．そこで，蛍光体の性能を最大限発揮させるために，蛍光体層の厚さおよび密度の最適化の検討を行った．なお，検討では，消費電力が 0.1 W/cm^2 となるように，アノードには 5 kV，180 μA の電圧，電流を印加し，リフレクターを装着しない状態で，透過光部の輝度のみについて調べた．

蛍光体層の厚さを 5.25 μm，6.75 μm，8.25 μm，9.50 μm，16.3 μm，24.0 μm と変化させた場合の輝度計測結果を Fig. 5 に示す．Fig. 5 より，蛍光体層の厚さと輝度の間に関係がみられ，8.25 μm のとき，最も輝度が得られた．この結果は，透過光の輝度は蛍光体の厚みを増すと増加するが，15 μm を過ぎると逆に低下するという結果[16] を追認している．

また，同一蛍光体重量に対するバインダー量を，バインダー量が最も少ない「量 A」から，バインダー量が最も多い「量 E」と割り振った．これらの条件の下で，蛍光体層を塗布した場合の輝度計測結果を Fig. 6 に示す．Fig. 6 よりバインダー量と輝度の間には関係があり，「量 D」のとき，最も輝度が得られることが判明した．

本結果より，蛍光体層が 8.25 μm の厚さで，バインダー量が「量 D」であることを蛍光体印刷時の最適条件と判断した．

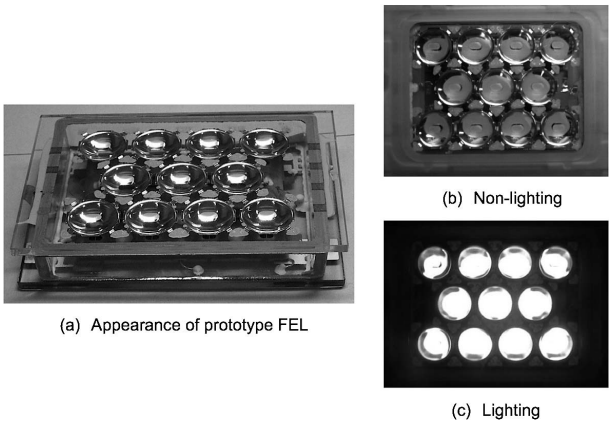


Fig. 7 Prototype FEL.

なお，本論では，バインダー量についての詳細はランプ製作のノウハウに直接該当するため，数値を記載せず，大小関係のみ記していることをご容赦願いたい．

3. 4 ランプ検証試作開発

ランプ試作のために，3.1 節および 3.2 節にて述べた試作材料および部品を統合した上で，無鉛ガラスペーストを用いて，ガラス内部の圧力が 0.1 Pa〜10^{-5} Pa の範囲内である高真空状態を保持しながら，ガラス板とガラス枠間の接着を行う必要がある．確実なガラスパネル接着のためには，ガラスペーストに，融点である 350℃〜500℃ の高温を加えて融解させ[17]，底板ガラス板，ガラス枠，ITO 膜付きソーダライムガラス板を接着させる必要がある．温度，時間，雰囲気，ガラス容器内部真空度の条件を調整した結果，真空リークが発生せず，良好かつ安定した発光が得られる条件を確立できた．この条件によって，ランプを試作することが可能となった．

以上のプロセスにより試作した FEL を Fig. 7 に示す．なお，アノードに 7 kV，223 μA の電圧，電流を印加している．したがって，ランプの消費電力は 1.56 W であった．また，発光時の輝度は 15300 cd/m^2 であった．

3. 5 電 源 開 発

自動車用電源である DC 12 V から，アノード電圧である DC 5〜7 kV，ゲート電圧である DC 3 ± 1 kV の電圧への変換方法として，高効率で発生ノイズの少ない方式を開発した．高圧部品は車載用として高信頼性部品を選定した．さらに，磁心の材質，形状，昇圧比，最大磁束密度，巻線構造，共振周波数の最適化を行った上で，部品特性に合う回路を選択した．その結果，DC 12 V〜DC 7 kV に変換する 10 W 出力の DC-DC コンバーターの効率は 93.1% となることを確認した．開発した高圧発生回路を Fig. 8 に示す．

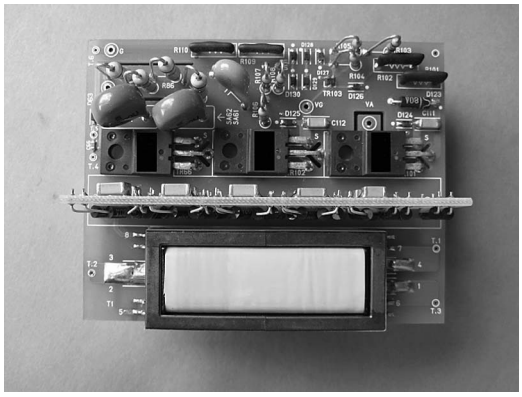
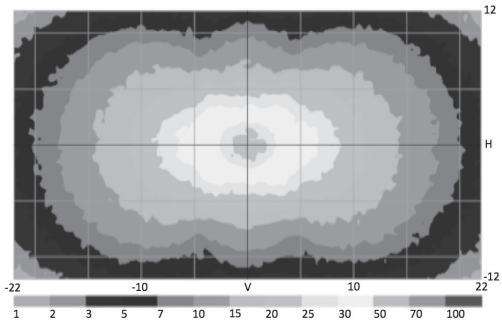
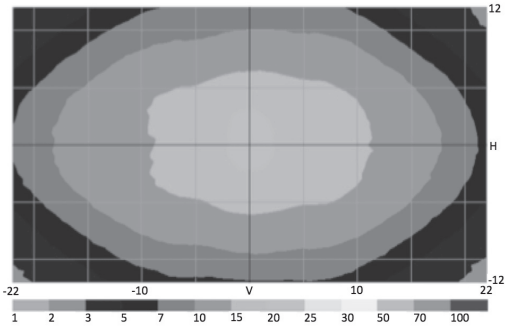


Fig. 8　Circuit of high voltage generator.



(a) Simulation



(b) Actual measured

Fig. 9　Light distribution of tail-lamp.

3. 6　配光特性開発

設計仕様についてシミュレーションによる配光特性を調べるとともに，試作ランプを1 Wで発光させて得られた実測値に基づいて配光特性の比較を行った．その結果をFig. 9およびTable 2に示す．

Fig. 9より，光源に内蔵したリフレクターを用いた配光制御によって，左右20 deg，上下10 degの広がりをもった光度分布を実現できていることがわかる．一方で，Table 2より，試作ランプはシミュレーション値相当の光度，光束，効率が得られていないことがわかる．このことは，試作ランプでは，蛍光体の改善が図れていないこと，およびリフレクターの形状精度が設計理想状態に比べて劣っていることに起因している．したがって，蛍光体の改善およびリフレクターの形状精度についての課題をクリアできれば，ストップランプの規格配光を達成可能であることが示唆される．

Table 2　Difference between simulation and measured value.

	Simulation	Measured
Total light flux [lm/W]	6.77	
Maximum luminance [cd]	46.4	21.1
Light flux [lm/W]	4.26	3.43
Efficiency [%]	62.9	50.7

Note: Efficiency $= \dfrac{\text{Light flux}}{\text{Total light flux}} \times 100.$

Non-lighting　　Lighting

Fig. 10　Lamp fitting mounted on SUBARU Impreza.

3. 7　灯具構造開発

3.1節から3.5節の過程を経て制作された光源に対して，JIS-D1601自動車部品振動試験方法[18]にて振動試験を実施した．また，自動車用光源の高温作動試験も実施した．両試験結果から，自動車に搭載し，実走行や高温環境下の使用を想定した場合に問題がないことを確認した．

両試験結果を踏まえて，実車（スバル インプレッサ，2009年式）灯具の光源をFELに置き換えて試作を行った．試作灯具を実車に取り付けて動作をさせた場合の様子をFig. 10に示す．その結果，発光時の視認性およびデザイン面で問題がないことを目視により確認した．また，従来のインプレッサ用ストップランプと比較して，20 mmの薄型化を達成できた．このように薄型化を達成させることで，自動車のカーゴルームを従来に比べて拡大させることが可能である．しかし，インプレッサのように，斜めに切り落とされている灯具の場合，奥行きを多く必要とする．さらなる薄型化を図るためには，光源部周辺のみならず，灯具全体にわたり設計検討を行う必要があることが示唆された．また，現状の光源は，12個の発光部を1つの光源としており，小型とはいいがたい．そのため，ランプのエッ

ジ部に沿ったような意匠が不可能である．したがって，デザイン面に自由度をもたせるためには，光源をさらに小型化させる必要がある．

4. まとめと今後の課題

本論では，省エネルギーの観点から，従来の白熱電球と比較して低消費電力，低製造コストという特徴を備えたFELの開発について述べた．今回の開発では，ストップランプ用光源の試作を行い，白熱電球比 1/10 以下である 1.56 W の消費電力で，発光時輝度 15300 cd/m^2 を実現することができた．また，実装灯具の光源を FEL に置き換えて試作を行い，20 mm の薄型化を達成することができた．現状では，法規適合のための光度が不足しているが，蛍光体の改善，リフレクターの形状精度の改善を行うことによって，さらなる光度，光束，発光効率の向上を図ることができることが示唆された．ただし，現状では光源が小型とはいいがたいため，デザイン面，配置の自由度がきわめて低い．現状の光源では，リアランプのエッジに沿って点灯させるような配置は不可能である．したがって，光源のさらなる小型化を行い，意匠自由度を増す必要がある．

今後は，これらの問題点を解決するとともに，ストップランプの場合と同様に，ヘッドランプ光源の開発および灯具構造の開発を進めて行く．

付　　記

本論文は，文献 19）を加筆・修正したものである．

謝　　辞

本研究は，独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）平成 18 年度～20 年度助成事業「エネルギー使用合理化技術戦略的開発 エネルギー有効利用基盤技術先導研究開発　電気自動車用の超高効率な省エネ型ランプの研究開発」の支援を受けて遂行された．

文　　献

1）経済産業省資源エネルギー庁：平成 24 年度エネルギーに関する年次報告書（エネルギー白書）（2013）p. 111.
2）富士経済大阪マーケティング本部第三事業部光源プロジェクトチーム：Special Appli. 光源 / 照明市場実態・技術・予測 2009 年版（2009）.
3）株式会社矢野経済研究所：LED 製造装置市場の現状と展望 2009 年版（2009）.
4）J. Perkins: “LED manufacturing technologies & costs,” *DOR Solid-State Lighting Manufacturing Workshop*（2009）.
5）N. Wang, C. Wang and J. Lei: “Numerical study on thermal management of LED packaging by using thermoelectric cooling,” *The International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging*（ICEPT-HDP 2009）（2009）pp. 433–437.
6）S. C. Lin, J. T. Hong, M. L. Tsai, H. C. Shih, J. C. Leong and W. L. Chen: “Thermal management of the LED headlamp module for a motorcycle,” *40th Thermophysics Conference*（2008）.
7）Y. Lai, N. Cordero, F. Barthel, F. Tebbe, J. Kuhn, R. Apfelbeck and D. Wurtenberger: “Liquid cooling of bright LEDs for automotive applications,” Appl. Therm. Eng., **29**（2009）1239–1244.
8）鐵卿浩彰：“微細針状シリコンの電界電子放出”，高知工科大学電子・光システム工学科卒業研究報告（2004）.
9）余谷純子，上村佐四郎：“カーボンナノチューブのディスプレイへの応用”，表面科学，**25**（2004）177–181.
10）古田　寛：“カーボンナノチューブの合成と電界電子放出ランプ（FEL）への応用”，高知工科大学紀要，**6**，No. 1（2009）47–55.
11）平木博久，平木昭夫：“蛍光灯に代わるフィールドエミッション式照明システム”，応用物理，**78**（2009）333–338.
12）小南裕子：“低速電子線用蛍光体の導電性制御と発光特性に関する研究”，静岡大学大学院電子科学研究科研究報告，第 21 号（2000）127–129.
13）社団法人日本機械工業連合会・財団法人金属系材料研究開発センター：“平成 16 年度輸送機械システムにおける LED 技術動向調査報告書”（2005）.
14）社団法人日本機械工業連合会・財団法人金属系材料研究開発センター：“環境・省エネ型 LED 照明機器システムの総合的普及戦略に関する調査研究報告書”（2004）.
15）本舘淳哉：“車載への適用が進む高輝度 LED ランプ”，東芝レビュー，**65**，No. l（2010）35–38.
16）一ヶ瀬剛：“DC 型カラー PDP の発光輝度向上検討”，独立行政法人国立高等専門学校機構大島商船高等専門学校紀要，第 41 号（2008）39–46.
17）甲原好浩，吉中　忠，日高隆太，吉田昌弘，幡手泰雄，皿田二充：“鉛フリー低融点ガラスの実用化に向けた研究開発”，鹿児島大学工学部研究報告，第 47 号（2005）79–86.
18）日本規格協会：JIS ハンドブック自動車 18-1 自動車 I（基本 / 試験・検査 / 測定方法）（2009）pp.1364–1370.
19）荒川俊也，難波篤史，松岡健二，髙橋久也：“低消費電力を目指した次世代型自動車用ランプ（電界電子放出型ランプ：Field Emission Lamp）の開発”，スバル技報，No. 37（2010）65–71.