

廉価 LED 前照灯システムの開発

Development of Headlight System with Cost Advantageous Design Using Light Emitting Diodes

土 屋 洋 介*

Yosuke TSUCHIYA

竹 繁 徹 朗*

Tetsuo TAKESHIGE

松 崎 哲 平*

Teppei MATSUZAKI

小 口 敢*

Tsuyoshi OGUCHI

要 旨

近年、低消費電力、長寿命、デザイン上の自由度などの観点から、従来の電球に代わり LED 光源を採用することが注目されている。自動車業界においても、LED 光源の普及が進んでいる。特に、消費電力の大きい前照灯への LED 採用により、車両の消費電力低減に大きな効果がもたらされ、燃費向上が期待される。さらに、LED 光源が、販売台数の多い低価格二輪車に適用できれば、総 CO₂ 排出量の削減に大きな寄与が期待できる。しかし、これまで、LED の二輪車前照灯への適用は、高価格帯の一部機種に限られていた。これは、主に、高輝度 LED 光源部やドライバユニットのコストが高いためであった。これに対し、我々は、中輝度 LED を複数使用する方式を採用し、また、高コスト化の原因であったヒートシンクを用いずに放熱性を満足する構成を考案した。さらに、ハイビーム用とロービーム用の光源を直列接続することを可能とする回路構成の考案により、定電流回路を一つとすることが可能となり、更なる低コストを実現した。本開発により、LED 前照灯の低価格帯二輪車への採用が可能となった。

ABSTRACT

Recently, it is widely noticed that replacing conventional incandescence lights with light emitting diodes as light sources is beneficial in terms of their low power consumption, longer life and larger degree of freedom in designing. That is also the case in automobile industry and light emitting diodes are increasingly used as light sources. Applying light emitting diodes to light sources of the headlights, which consume a large amount of electric power, is highly advantageous for overall reduction of consumed energy in a vehicle resulting in a good fuel economy. Moreover, if light emitting diodes are applied to headlights of motorcycles sold in a large number in affordable price range, a significant contribution is expected to the reduction of the total amount of carbon dioxide emission. However, up to the present, the use of light emitting diodes for headlights of motorcycles has been limited to only certain models in high price range. This is mainly because the headlight systems using high power light emitting diodes and their driver units are expensive. Based on these backgrounds, we adopted a configuration with a multiple use of medium intensity light emitting diodes. In addition, heat dissipation configuration that fulfills the thermal requirements was devised without using a heat sink that was a causal factor of high cost. The cost was further reduced through the employment of a single constant current regulation circuit. It was made possible by the serial connection of high-beam and low-beam light sources. This development made it possible to employ headlights using light emitting diode for motorcycles in low price ranges as well.

1. はじめに

近年 Light Emitting Diode (LED) 光源は電球に比べて低消費電力であり長寿命であること、デザイン性や設計自由度が高いこと、リサイクル時に有害な化学物質の放出が少ないことなどさまざまな利点から注目されている。

LED 光源は照明器具への普及が進んでおり、東日本大

震災以降の節電意識の高まりから、LED 照明の出荷数量は増加し、それに伴って価格の低下が進み、急速に普及段階を迎えつつある (Fig. 1)⁽¹⁾。

自動車業界においても先に述べた利点から灯火器、指示警告表示器、車内灯などへ LED 光源の普及が進んでいる。特に灯火器は近年多くの部位へ LED 光源が適用されている。その中でも消費電力の高い前照灯は、LED 光源を採用

*二輪 R&D センター

することにより、低消費電力化が可能となるため車両の総発電量が抑えられ、燃費向上に寄与できる。将来的には販売台数の多い低価格帯の車両へLED光源を普及できればCO₂削減に大きな効果があると考えられている。LED光源を用いた前照灯は、2007年に初めて四輪自動車へ搭載され、二輪自動車には2012年に初めて搭載された。しかし従来のLED灯火器システムは、電球灯火器システムに対しヒートシンクやドライバ回路などの部品が追加され高コストとなるという課題があった。コンピュータのような廉価機種に、上記従来型LED前照灯を適用した場合のコスト比較をFig. 2に示す。

このように、LED前照灯は電球に対してコストが約4倍となるのでコンピュータへの適用は難しい。この課題を解決するために、特にコストが高い光源部とドライバ部についてコスト低減の検討をおこなった。光源部のコストが高額となる第一の理由は、LED光源を放熱させるためのヒートシンクが追加されることである。従来技術ではLED光源が消費する電力が大きく、ヒートシンクを用いて放熱することが必須であったが、我々はヒートシンクをなくす

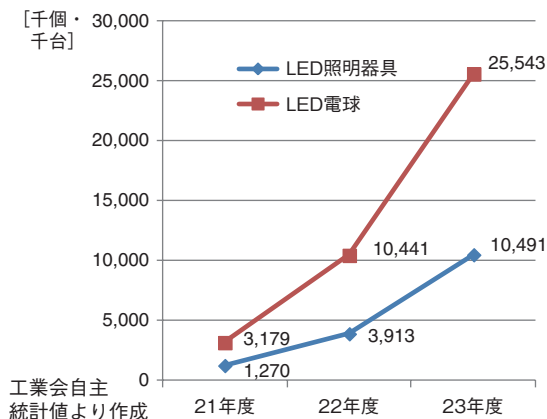


Fig. 1 Numbers of shipments of LED products

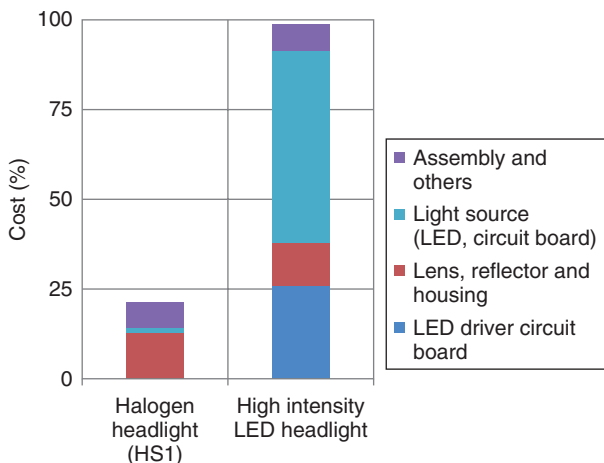


Fig. 2 Cost constituents of a halogen headlight system and a conventional LED headlight

ことによるLED前照灯の低コスト化を試みた。

ドライバのコストが高額となる第二の理由は、ロービーム (Low beam:Lo) とハイビーム (High beam:Hi) の双方に対して制御回路が必要となるためである。本開発では、制御回路の簡素化を実現するためにハイビーム用LEDとロービーム用LEDの接続方式を変更し更なる低コスト化を目指した。

2. ヒートシンクを持たないLED前照灯の成立性検証

2.1. 高輝度LED採用可否の検証

まず、最初に、従来の自動車向けで採用されている高輝度LEDを用いた前照灯のヒートシンクを削減することが可能であるかを検証した。光源光束が従来の進展国向け廉価二輪車 (コンピュータ) が主に採用しているHS1電球と光源光束が同等の高輝度LEDで検証をおこなった。高輝度LEDとHS1電球の性能比較をTable 1に示す。

ヒートシンクなしによる放熱が可能であるかを検証するため、ガラスエポキシ基板 (Flame Retardant Type 4: FR4) 上に高輝度LEDをマウントし、LEDの電流とLEDの接合部温度 (T_j 温度) の関係を測定した (Fig. 3)。基板サイズは電球前照灯のサイズ内に設置できるサイズとしてハイビームとロービームそれぞれ幅を130 mm、奥行きを50 mmに設定した。基板は両面基板とし、銅箔厚は35 μm 、銅箔面は両面を同サイズとし両面合計で14,300 mm^2 とした。両面銅箔間の熱伝導はスルーホール内に銅箔を通すことで確保した。雰囲気温度は灯火器使用環境温度の上限に設定した。 T_j 温度の測温は、LEDチップからカソード側半田接合部温度 (T_s) を熱電対にて測定し、 T_s から T_j までの熱量はLED内の熱抵抗にLEDへの印加電力 (LED順方向電圧 $\times$ 通電電流) を加算する方法を採用した。

高輝度LEDの T_j は700 mA以上で寿命とする使用時間に対する光源輝度の経時変化要件を満たせる温度を超えてしまい、十分な放熱性能が得られない結果となった。し

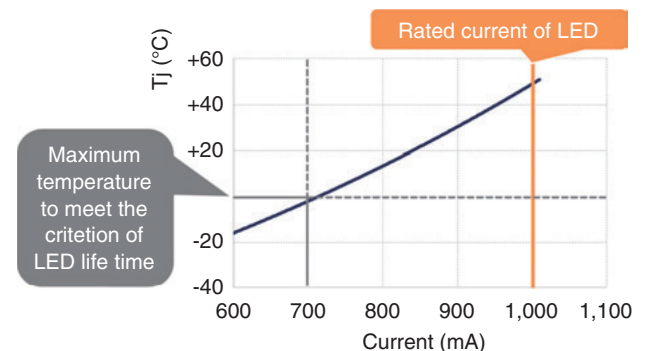


Fig. 3 Characteristic of high intensity LED under the heat dissipation condition without heat sink

Table 1 Rated values of performances for high intensity LED and halogen light bulb

Specification	High intensity LED (PHILIPS/ALTION) *(1)	Halogen (HS1)
Luminous flux	800 lm	825 lm (High)
Rated voltage	13.7 V	13.2 V
Rated current	1.0 A	2.65 A
Rated power	13.7 W	35 W

*(1) The performance as of products in 2010

Table 2 Rated values of performances for high intensity LED and medium level intensity LED

Specification	Medium intensity LED	High intensity LED
Luminous flux	200 lm	800 lm
Rated voltage	3.0 V	13.7 V
Rated current	700 mA	1.0 A
Rated power	2.2 W	13.7 W

たがって、高輝度 LED を用いた場合にはヒートシンクを用いずにはヘッドライト機能を満足できないことが明らかになった。

2.2. 中輝度 LED の採用可能性検証

前章で述べたように、高輝度 LED をヒートシンクなしで使用することはできない。そこで、高輝度 LED の代わりに中輝度 LED を複数使用し、熱源である LED を分散配置することで、放熱性能を成立させる検討をおこなった。中輝度 LED の代表的な定格特性を Table 2 と Fig. 4 に示す。

高輝度 LED は自動車用前照灯のみに適用されてきた光源であるが、中輝度 LED は自動車用 Daylight Running Lamp のほか、広く民生用の光源としても使用されており、高輝度 LED と比較して製造個数が多く、低価格化が進んでいる。このことから、LED 単体のコストとしても、高輝度 LED に対して中輝度 LED を複数用いた方が光源のコ

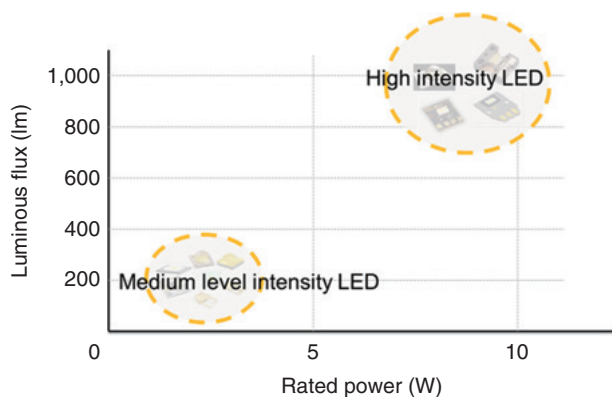


Fig. 4 General ranges in the diagram of rated power and luminous flux for high intensity LEDs and medium level intensity LEDs

ストを低減できる。高輝度 LED と中輝度 LED の光束とコストの関係を Fig. 5 に示す。

ハイビーム使用時の光束は約 800 lm であり、この明るさを中輝度 LED を用いて実現した場合のコストは、高輝度 LED を使った場合の約半分となる。800 lm を中輝度 LED で得るためには 4 個必要であり、ロービーム設定時に 2 個点灯、ハイビーム設定時にはロービーム用光源に加えて、さらに 2 個光源を点灯することで、HS1 電球と同等の光束を得ることができる。また、中輝度 LED の定格電力は 2.2 W であり、高輝度 LED の定格電力と比較して 6 分の 1 以下である。したがって、中輝度 LED を 4 個使った場合は、小さな基板サイズで十分な放熱を得ることができる可能性がある。

次に、中輝度 LED を用いて、ヒートシンクなしによる放熱が可能であるかを検証した。FR4 基板上に中輝度 LED をマウントし、基板上的銅箔サイズを変化させ、銅箔面積をどこまで拡大すれば LED の T_j が灯火器寿命を確保可能な温度以下になるかを確認した。基板は FR4 両面基板、銅箔厚は 35 μm 、放熱用の銅箔は両面で同サイズとした。また、両面銅箔間の熱伝導はスルーホール内に銅箔を通すことで確保した。 T_j 温度の測温は、先に説明した方法と同様の方法を用いておこなった。

中輝度 LED を搭載した基板のイメージ図を Fig. 6、Fig. 7 にて示す。

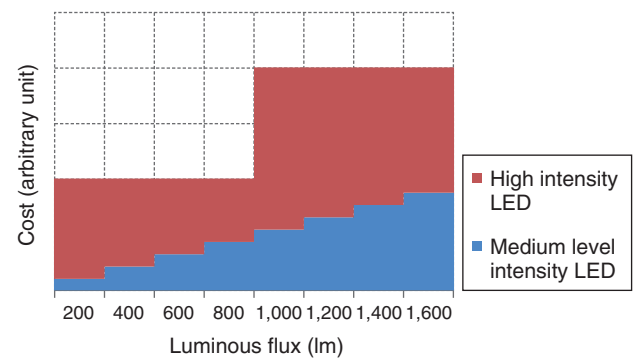


Fig. 5 Relationship between luminous flux amplitude and cost for high intensity LED and medium level intensity LED

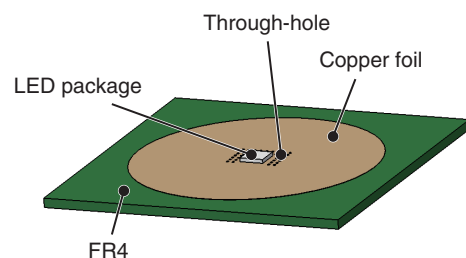


Fig. 6 Schematic view of onboard medium level intensity LED

LEDの通電電流は700 mAとした。雰囲気温度は灯火器使用環境温度の上限に設定した。LEDの T_j と基板上銅箔面積の関係をFig. 8に示す。

中輝度LED 1個(電力2.2 W)あたりの放熱銅箔面積は表面、裏面を合計して2,000 mm²が確保できれば、ヒートシンクなしで灯火器を成立可能であることが分かった。また、この基板サイズはロービームとハイビームそれぞれ横幅130 mm、奥行き50 mm以下で設定でき、コンピュータで使用されている前照灯のサイズ内に収めることが可能である。これらの結果より、中輝度LEDを複数個使用することで、ヒートシンクなしで前照灯機能を満足できることが明確となった。

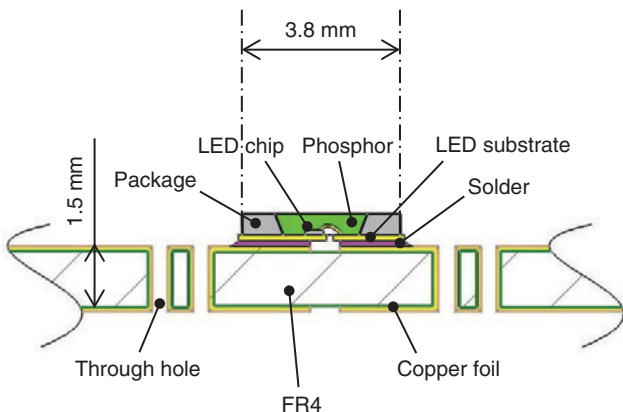


Fig. 7 Circuit board mounted with LED of medium level intensity (cross-sectional view)

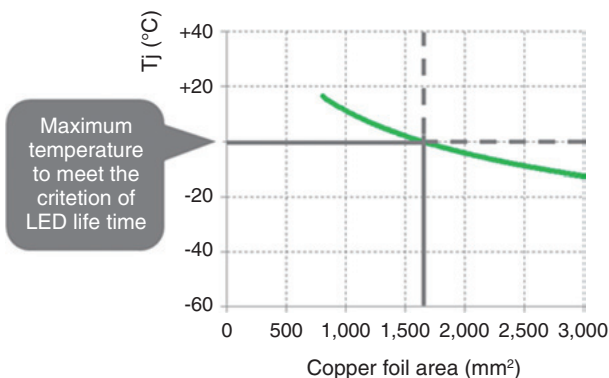


Fig. 8 Heat dissipation characteristic of a medium level intensity LED without heat sink

3. ハイビーム、ロービーム直列接続点灯回路の成立性検証

従来のLED前照灯の点灯回路は、12 Vバッテリーを電源とし、LED光源と定電流制御回路を持ったハイビーム用回路とそれらを持ったロービーム用回路を並列に接続する方

式となっている。Fig. 9に並列接続方式のLED前照灯点灯回路を示す。

並列接続は直列接続に比べ、各列のLEDの電流値のばらつきが生じ、一列点灯から二列点灯させる場合は消費電流値が変動することから、並列接続は定電流制御を各列に持つ必要がある。直列接続は、各LEDに流れる電流のばらつきはなく、消費電流は一定で、定電流制御も一つで済む利点はある。しかし、 V_f が高くなるため、高い電圧の供給が必要であり、ロービーム回路とハイビーム回路の切り替え手法、LED故障時の対応などの課題を解決する必要がある。Table 3に並列接続と直列接続の比較を示す。

3.1. 高電圧駆動を昇圧回路なしで実現する手法

前章で述べた中輝度LEDの場合、 V_f は最大3.5 Vのため、ロービームLED 2個ハイビームLED 2個を直列に接続すると、LEDを点灯させるには14 V以上の電圧が必要となる。そのため、バッテリーを電源とすると、昇圧回路を設ける必要が生じる。そこで、従来から電球式前照灯のコンピュータで多く採用されているACGを電源とし負側半波をレギュレートすることにより12 Vを電球に供給する回路を応用することに着想した。

従来の電球式前照灯点灯回路は、電球に印加する電圧をACGの負側交流半波の実効電圧により制御している。

あらかじめ設定した電圧と実効電圧の演算結果の差分を考慮してサイリスタ(SCR)のタイミング信号(Trig)を出力することで、通電時間を制御して一定の実効値電圧を得ることができる。電球式前照灯の負側半波点灯回路をFig. 10, Fig. 11に示す。

LEDの場合、定電流制御が必要なことから、電球式回路に対し、LEDに流れる電流値を監視してサイリスタの通電時間を制御する仕様に変更し、定電流制御とした。ACGの負側半波を使って定電流制御をすると、LEDの明るさのちらつきが懸念となる。LEDは電球と違って残光現象がないため、脈流電流による明るさのちらつきは電球に比べて際立つ傾向にある。脈流電流を平滑化するために、一般的な

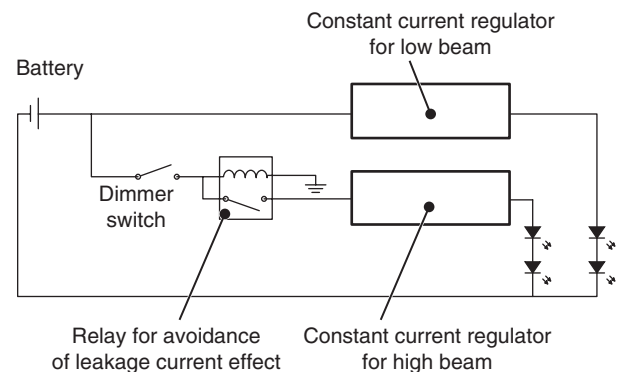


Fig. 9 Schematic circuit diagram for turning on the conventional headlights

Table 3 Comparison between parallel and series circuit connections

Wiring	Parallel connection	Series connection
Equivalent circuit		
Current variation and associated measures	Separate current regulations are necessary because unbalanced current supply occurs from the difference in V_f of those LEDs if one common regulation circuit is applied for providing currents to both of the LEDs for low and high beams.	The same magnitude of current flows through both of low and high beam LEDs.
Constant current circuit	Two (necessary for each line)	One
Total drive current	Large total current is needed for supplying two lines. (1,400 mA)	Current is the same as when driving one LED and unchanged with the number of LEDs. (700 mA)
Drive voltage	Driven by relatively low voltage with a small number of LEDs connected in series on each line. (The voltage is deliverable by using only a down converter.)	V_f becomes high in association with the number of LEDs.
High/Low alternation	By placing on/off switch onto the high beam circuit line, high and low beams alternation is possible.	Placing on/off switch onto the series-connected line works only for turning on or off for both beams at the same time.
When one LED fails in open mode	The other beam with unflawed LED can be turned on.	Both beams cannot be turned on.

手法であるコンデンサを追加することで明るさのちらつきを抑制しようと考えたが、これにはちらつきを抑制するコンデンサ容量の決定とコンデンサの耐圧以下に電圧を制御する手法の二つの課題が存在する。

コンデンサの容量を決めるには、まずちらつきの許容レベル基準を決定する必要がある。我々は、従来の電球式前照灯の ACG 負側半波点灯方式に対して、ちらつきの大きさが同等以下となることを目標とした。

ちらつきが従来の電球式前照灯に対して、同等になるレベルを確認した結果、リップル電流は 300 mA 以下でちらつきが同等以下に抑えられることが分かった。コンデンサ容量違いによるリップル電流を確認した結果、2,250 μF 以上でリップル電流は 300 mA 以下になり、2,250 μF 以下になると、リップル電流は急激に増える。コンデンサのばらつき $\pm 20\%$ と劣化想定 -20% を含めても、2,250 μF 以下にならないようにコンデンサ容量は 4,800 μF と決定した。Fig. 12 にコンデンサ容量とリップル電流特性を示す。

LED ヘッドライトを OFF にすると、LED に電流が流れないため、ACG からの電圧は上がり続け、コンデンサの耐圧をオーバーしてコンデンサが故障してしまう。その対策として、コンデンサの定格電圧以下に基準電圧を設定し、その基準電圧より高くなる場合は、サイリスタの

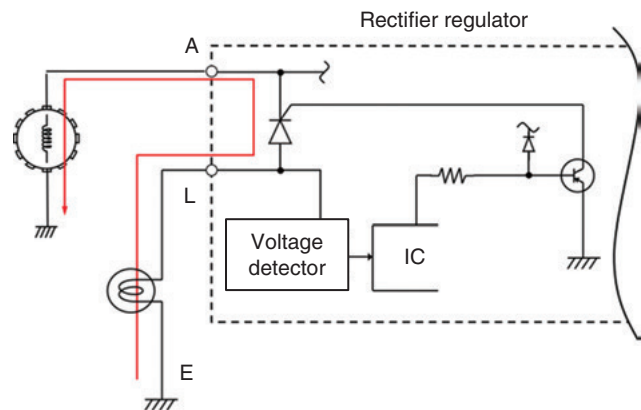


Fig. 10 Circuit diagram of halogen headlamp driver applying negative voltage half wave activation type

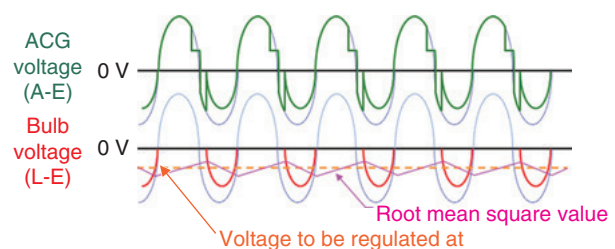


Fig. 11 Waveforms of halogen headlamp driver applying negative voltage half wave activation type

通電幅を縮めるようにタイミング信号を出力し基準電圧以下に調整する制御回路を追加した。コンデンサの定格電圧は 25 V のものを選択したため、基準電圧は温度特性などのばらつきも含めて、基準電圧を 21 V に設定した。Fig. 13, Fig. 14 にコンデンサを追加した定電流制御回路を示す。

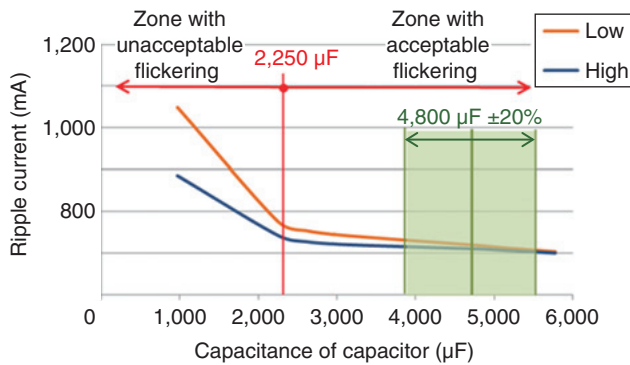


Fig. 12 Ripple currents to capacitance

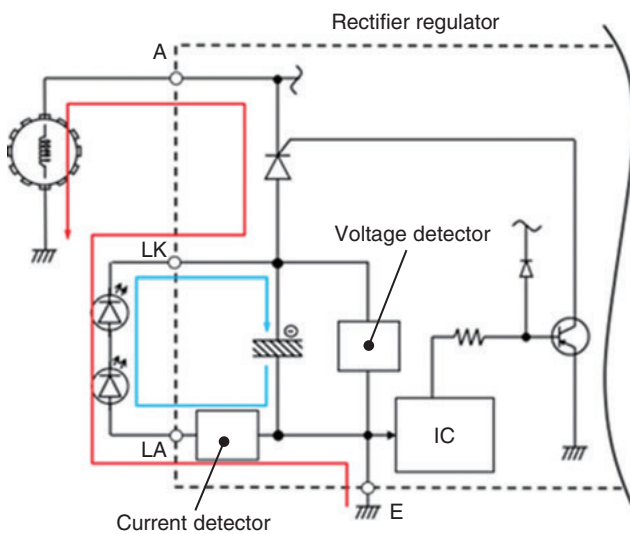


Fig. 13 Circuit diagram adopted with capacitor

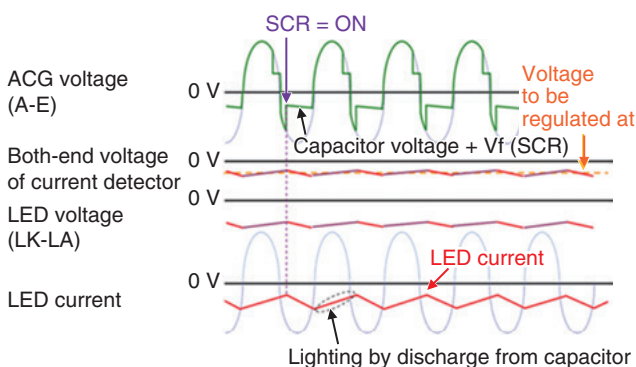


Fig. 14 Waveforms in the circuit adopting capacitor

負側サイクル時にサイリスタを ON して電解コンデンサの電位を溜めると同時に LED へ通電させる。正側サイクル時に電解コンデンサより電流検出回路を通して放電電流を LED へ流す。

LED に流れる電流を電流検出部にて監視し、それと同時に、電解コンデンサの両端電圧を電圧検出部にて監視する。どちらかが基準値より高い場合にサイリスタの通電幅を縮めるように Trig を出力し、低い場合にサイリスタの通電幅を広げるように Trig を出力する。出力制御の方法は、LED に電流が流れている場合は、電流を監視し定電流制御となる。断線等で LED に電流が流れない場合は電解コンデンサの両端電圧を監視し定電圧制御となる。

3.2. 直列回路におけるハイビームとロービームの切り替え手法

点灯形態はロービーム使用時に、ロービーム側 LED 2 個のみ点灯し、ハイビーム切り替え時に、ロービーム側 LED 2 個とハイビーム側 LED 2 個を同時点灯する。つまり、ロービームとハイビームの切り替えは、ロービーム側 LED は常時点灯として、ハイビーム側 LED の点灯、消灯をおこなうことで切り替えられる。そこで、ロービーム側回路とハイビーム側回路の中間部分からハイビーム回路と並列するバイパス回路を設け、バイパス回路への通電と非通電を切り替えるスイッチを設けることにより、ハイビーム非点灯時にはバイパス回路を短絡させる構成とした。Fig. 15 にロービームとハイビームの切り替え回路を示す。

従来の並列接続の LED 前照灯では、ディマスイッチが被水したときに、ハイビーム側 LED が誤点灯することへの対策として、防水スイッチを適用する、または、スイッチは非防水のまま、リレーを追加してリーク電流を排除するか、リーク電流検出回路をドライバに内蔵していた。これらいずれの施策も、コストアップ要因になっていた。一方、本開発で用いられた回路は、ハイビーム非点灯時に

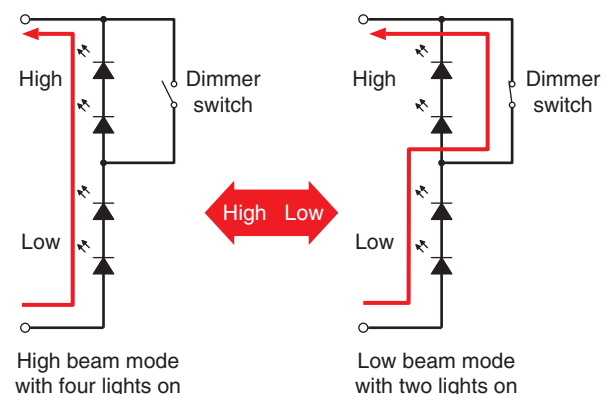


Fig. 15 Alternation circuit between low and high beams

ディマスイッチがリークしても、回路上、ハイビーム側の誤点灯は起きない。また、ハイビーム点灯時にリークした場合には、バイパス回路に電流が流れる分、ハイビーム側の電流値が低下するために明るさは落ちるが、リークで流れる電流値は微少であるため、目視で判別できるほどの影響は生じない。したがって、本回路を採用することにより、従来必要であった、ディマスイッチのリーク対策を省くことが可能となった。しかしながら、この手法を採用した場合、ハイビームからロービームへの切り替えをおこなったときに生ずる、突入電流への対策が新たに必要となる。

ハイビーム（4灯）からロービーム（2灯）に切り替えたとき、コンデンサにはLEDのVf 4個分の電圧が維持されている。そのため、2個に切り替えた際に突入電流が流れる。その対策として、トランジスタと突入電流制限抵抗を設けて、突入電流発生時にのみ、抵抗を通して電流を流す制限回路を追加した。通常の定電流制御の0.7 AではトランジスタQ1にベース電流が流れQ1はONとなっており、Rs2の抵抗に電流が流れない（Fig. 16）。

スイッチをハイビーム側からロービーム側に切り替えたとき、電流1.0 A以上が流れると、Rs3の端子間電圧が上がり、Q1とRs3よりも、Dr1、Dr2の電圧が低くなるため、Q1のベース電流は流れなくなり、Q1がOFFする。結果、電流はRs2の抵抗を通して流れ、突入電流が制限される（Fig. 17）。

電解コンデンサCREGの電圧が低下していき、電流が1.0 A以下となるとQ1がONして通常制御に戻る。

本回路を追加することにより、通常、2.4 A程度流れる突入電流を、LED保証電流以下に抑えることが可能となった（Fig. 18）。

3.3. LED 故障時の対応手法の検討

通常のヘッドライトは、ロービームまたはハイビームのどちらか一方の回路が断線しても走行を継続できるように、ディマスイッチで切り替えれば、断線していないビームを点灯することができる。

【Normal operation】

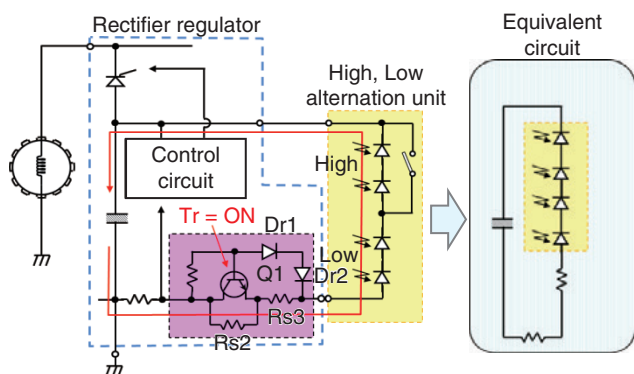


Fig. 16 Current route when normal operation

直列接続の場合、ハイビーム側断線時にはディマスイッチでの切り替えで、ロービーム側を点灯することができる。Fig. 19にハイビーム側が断線したときの様子を示す。

しかし、ロービーム側断線時は、ディマスイッチを切り替えても、ハイビーム側を点灯できない。本方式においては、このことが新たな課題となる。その対応策として、ロービーム側に並列するバイパス回路を設け、そこにツェナーダイオードとサイリスタを追加し、ロービーム側断線時にレギュレータ出力ライン間の電圧上昇を検知して、サ

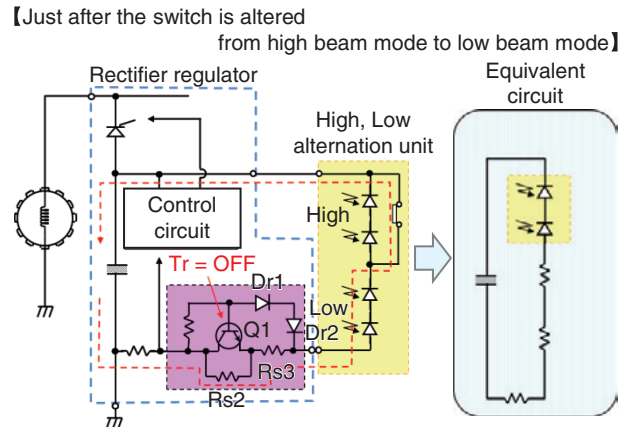


Fig. 17 Current route when rush current occurs

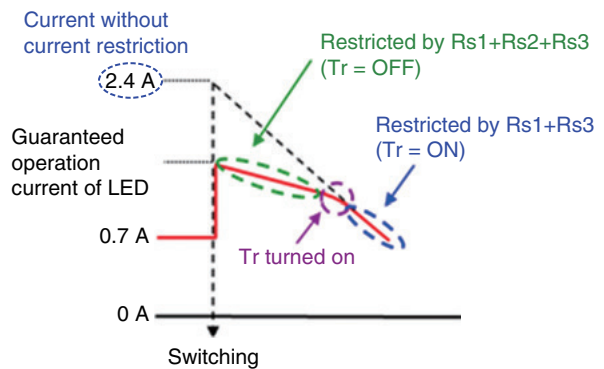


Fig. 18 Current reduction effect by rush current restriction circuit

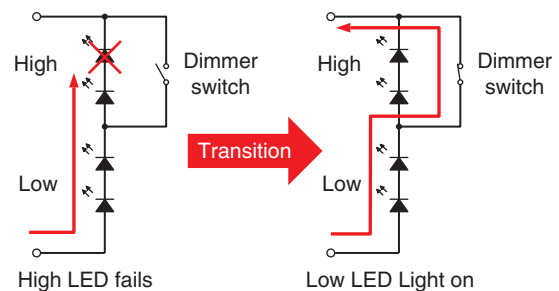


Fig. 19 Change of the current route when a LED for high beam brakes

イリスタを動作させ、バイパス回路を導通させることで、ハイビーム側に電流を流す仕様とした (Fig. 20)。

この対応により、ロービーム側が断線した場合でも、スイッチをハイビーム側に切り替えることでハイビームの点灯が可能となった。

以上に述べた技術手段を講じることにより、ハイビームとロービームを直列に接続する点灯回路を実現することができた。

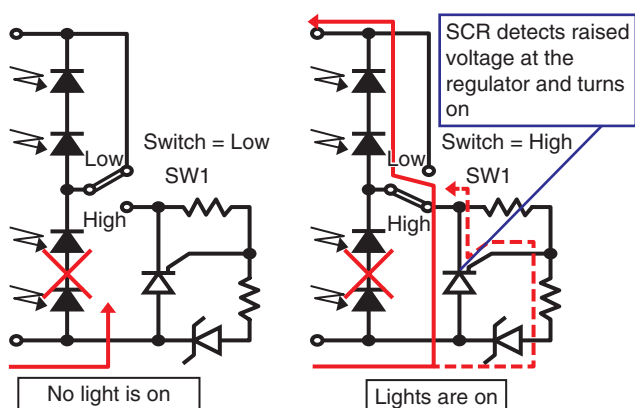


Fig. 20 Change of current route when a low beam LED brakes

4. まとめ

低価格二輪車に適用可能な LED 前照灯を開発した。本開発において、下記技術手段を達成した。

- (1) 中輝度 LED を基板上に分散配置し、ヒートシンクなしの前照灯を実現した。
- (2) ACG の半波電圧を LED 駆動電圧として使用することで、LED 4 個以上の直列接続を昇圧回路なしで実現した。
- (3) LED 端子間に適正な容量のコンデンサで接続することにより、ACG 半波電圧に起因する LED ちらつき量を電球式前照灯同等以下に低減した。
- (4) ハイビーム用 LED と並列にバイパス回路を設定し、バイパス回路通電をディマスイッチで制御することにより、ハイビームとロービームの切り替えを実現した。
- (5) ハイビームからロービームへ切り替え時に発生する突入電流を、LED と直列に電流低減回路を設定することにより、LED 許容電流範囲まで低減した。
- (6) ロービーム側断線に対応するため、ロービーム側回路と並列に断線検知回路を設定し、ロービーム側 LED 回路断線時には、ハイビーム側 LED への手動点灯切り替えを可能とした。

これら技術の適用により、LED 前照灯のコストを従来電球前照灯に対し 1.2 倍の範囲に抑えることができた。本開発により、進展国向けコンピュータ用二輪車への LED 前照灯の採用が可能となり、今後、二輪車から排出される CO₂ の総量の低減に寄与することが期待される。

参考文献

- (1) http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004310/pdf/018_04_00.pdf

■ 著 者 ■



土屋 洋介



松崎 哲平



竹繁 徹朗



小口 敢