アーク放電における発光色制御法について

専門会員 青野 正明* 久保 寔** 専門会員 板谷 良平**

On Luminous Color Control Methods in Arc Discharge

Masaharu Aono (Fellow Member)

(Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Ehime University)

Makoto Kubo Ryohei Itatani (Fellow Member)

(Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Kyoto University)

ABSTRACT

This paper treats luminous color control methods in pulsed arc discharges of Ne-Hg lamps. Luminous color is widely controlled from red color of Ne to blue color of Hg by changing the waveform of discharge current. Synthesized waveforms are favorable to make the glow to arc transition sure and to get good performance of color change of the high luminance positive column.

1. ま え が き

筆者達は、さきに放電管の発光色の電子的制御法としてパルス方式を提案し、同時に Ne-Hg 放電管をグロー放電させ、その陽光柱の発光色を Ne の赤色から Hg の青色まで、広範囲に連続的に変色した実験結果を発表した¹⁾。今回、たまたま、水銀極に陰極輝点が生じて、グロー放電からアーク放電に移行する例を発見し、この場合でもグロー放電と同様に、発光色を電子的に制御しうることを確認した。

アーク放電のほうが、グロー放電より当然のことながら放電電流が大きく、高輝度が得られるので、従来の可変色放電の欠点を克服できるものと期待される。

発光色の制御はパルス方式によっているので、放電の繰り返し周波数は 50 Hz ないし 400 Hz であり、各放電のたびに確実にグロー放電からアーク放電への移行を起こさせるには、電極構造だけでなく印加電圧波形にも工夫を必要とする。ここではアーク放電をさせるに適した印加電圧波形に対する発光特性についての実験結果について述べ、グロー放電とアーク放電の発光特性の違いについて報告する。さらに、アーク放電においてはグロー放電の場合より実効的陽光柱が長くなるという利点をもっている。

2. 変 色 の 原 理

パルス方式による変色法は、立ち上がりの急しゅんなパルスで

放電させるとき、放電開始直後の非平衡状態時に、過渡的に平衡状態時より高い電子温度が得られる現象を利用するものである。電子温度を制御するには次のような方法が考えられる。

- (1) パルス幅変化法¹⁾
- (2) 電圧変化法¹⁾
- (3) 周波数変化法¹⁾
- (4) 直流電流重畳法²⁾
- (5) 放電電流波形変化法³⁾

以下に、これらの制御法の変色原理のあらましについて述べる。

(1) パルス幅変化法

Ne と Hg の発光強度をそれぞれ I_{Ne} (赤)、 I_{Hg} (青)とすると、パルス幅が狭いときは、放電期間中に高電子温度の非平衡期間の占める割合が大きいため、 I_{Ne}/I_{Hg} が大となって赤色に発光する。パルス幅が広いときは、非平衡期間に対して低電子温度の平衡期間の割合のほうが大きくなるため、 I_{Ne}/I_{Hg} が小となって青色に発光する。

(2) 電 圧 変 化 法

印加電圧を高くすると、 I_{Ne} と I_{Hg} がともに増加するが、 I_{Ne} の増加率のほうが I_{Hg} のそれより大きいので、 I_{Ne}/I_{Hg} が大となって赤色が強くなる。

(3) 周 波 数 変 化 法

パルスの繰り返し周波数を高くすると、前パルスからの残留イオンの影響が大きくなって、放電開始直後の非平衡の程度が弱まり、この間の電子温度が低下して I_{Ne} が減少し赤色が弱くなる。

(4) 直 流 電 流 重 畳 法

パルス放電に直流放電を重畳すると、パルス放電直前の荷電粒

* 愛媛大学工学部電気工学科

** 京都大学工学部電子工学科

子が、周波数変化法による残留イオンと同様な効果を持つので、パルス放電期間の変色が可能である。直流放電期間は Hg だけが発光するため、全期間の平均の発光色はパルス放電期間だけのものより青色が強い。

(5) 電流波形変化法

放電電流の立ち上がり早いほど、すなわち di/dt が大きいほど I_{Ne} が増大することを利用するもので、 di/dt を変えることにより変色を行なう。

陽光柱の特性は、アーク放電においてもグロー放電の場合と同様であるから変色の原理は全く同じである。ただ、陰極の電子放出機構が異なり、パルス放電にあつては各パルスごとに、グローからアークへの移行を確実に行なわせなければならない。このために電極構造はもちろんのこと、制御回路にもそれに適したものを見出す必要がある。

3. 実験方法

変色の実験はパルス幅、印加電圧、繰り返し周波数および放電電流波形を変えて行なつた。使用した放電管、パルス電源および測光装置は次のとおりである。

3.1 放電管

アーク放電を発生しやすい陰極構造を見出すために、数種類の電極を試作して検討した結果、図 1 のように、Ni 板の後方に 5ϕ のガラス管を約 1 mm の間隔で配置し、この間隙に Hg を満たす構造のものが成績が良かった。陽極は陰極と同様の 20ϕ の Ni 板を、陰極より 15 cm の位置に対向させた。放電管内には Ne を 10 Torr と Hg を多目に封入してある。

図 1 試作放電管

3.2 パルス電源

出力波形として、矩形波、三角波、矩形と三角の合成波および階段波が得られる。矩形波は幅と高さを、三角波は幅と傾きを、階段波は各段の幅と高さをそれぞれ任意に変えることができる。

アーク放電においては、大きな電流が流れるから電源の保護のため、印加電圧を最高 1,000 V まで、周波数を 50 Hz から 400 Hz まで、パルス幅を矩形パルスのときは $25\mu\text{s}$ まで、合成波および

図 2 点灯回路

階段波のときは $200\mu\text{s}$ までとした。

さらに過電流防止用として、図 2 の点灯回路に示すように、電流波形測定用の抵抗 10Ω 以外に、 100Ω の抵抗を放電管に直列に挿入した。

3.3 測光装置

分光分布と、スペクトルの時間変化測定のための測光装置を図 3 に示す。受光部には長波長側にも高感度を有するフォトマル(EMI 9558 B)を使用し、分光分布の測定には負荷抵抗として $10\text{k}\Omega$ を接続して高出力を得て、応答速度が問題となる時間変化の測定には 25Ω を接続した。フォトマルの出力をボックスカー積分器(BX-530A, NF 製)によって、平均化と増幅の操作を行なつてペンレコーダで記録した。放電のデューティ比が小さいため分光分布の測定にもボックスカー積分器を使用し、ゲート幅はフォトマルの出力波形の幅に合わせた。

図 3 測定系

ボックスカー積分器の特性上、 $0.5\mu\text{s}$ 以下のゲート幅が得られないので、時間変化の大きなスペクトルの過渡特性の測定にはフォトマルの時間分解測光方式⁴⁾を採用し、このときのサンプリング時間を 50ns とした。

4. 実験結果および検討

4.1 矩形波パルスによる実験結果

低電圧においても、陰極の状態と放電回路の条件によってはグロー放電からアーク放電に移行することがある。

グロー放電かアーク放電かは、放電管端子電圧と陰極輝点の観測で容易に識別できる。管電圧はグロー放電では数 100 V であるが、アーク放電になると 100 V 程度にまで低下する。

矩形波パルスを印加したときのグロー放電と、アーク放電の放電電流を比較するために、印加電圧 700 V、繰り返し周波数 50 Hz のグロー放電と、アーク放電の電流波形を図 4 に示す。(a) がグロー放電のもので、パルス印加より最大電流に達するまでを

図 4 グローとアークの電流波形

示し, (b)はグロー放電から陰極輝点が発生して, アーク放電に移行したときの電流波形であり, 電源の容量の制約からパルス幅を $25\ \mu\text{S}$ とした. また, 放電回路の抵抗はグロー放電のときは $10\ \Omega$ としたが, アーク放電のときは過電流防止のため $110\ \Omega$ としている.

放電電流は, グロー放電のとき放電開始よりゆるやかに上昇して約 $40\ \mu\text{S}$ 後に最大値 $1.27\ \text{A}$ に達し, パルス幅をこれ以上に広くとするとゆるやかに減少して一定値に落ち着く. (b)においては, 放電開始直後はグロー放電であるが約 $3\ \mu\text{S}$ 後にアーク放電に移行し, アーク放電に移行後の電流の立ち上がりは非常に早く, 放電開始より約 $10\ \mu\text{S}$ 後に最大値 $6.3\ \text{A}$ に達する. 約 $14\ \mu\text{S}$ まではほぼ一定電流を保つがそれ以後減少し始め, 約 $20\ \mu\text{S}$ 後に定常電流 ($5.2\ \text{A}$) に落ち着く. グロー放電からアーク放電への移行時点は絶えず変動していて, 電圧と周波数が低いとその変動幅は数 $10\ \mu\text{S}$ にもなることがあるが, 印加電圧と周波数を高くしたときは変動幅を $1\ \mu\text{S}$ 程度に狭くすることができる.

放電管の発光状態を観察すると, グロー放電の場合は橙色に強く発光している負グローとファラデー暗部があるために, 変色可能な陽光柱の長さが陰極側で $1.5\ \text{cm}$ 程度短縮される. アーク放電のときは微小な陰極輝点が白色に輝き, 輝点より直径約 $3\ \text{mm}$ の球内に Hg の青色光が見られるが, それ以遠では陽光柱を形成している. したがって, アーク放電の場合はグロー放電の場合より実効的陽光柱が長くなって, 変色可能な面積が拡大される.

印加電圧を $700\ \text{V}$, パルス幅を $5\ \mu\text{S}$, 周波数を $50\ \text{Hz}$ としたときの, 陽光柱における Hg の $4,358\ \text{\AA}$ と Ne の $6,402\ \text{\AA}$ の時間変化を 図 5 に示す.

図 5 矩形波パルスによるスペクトルの時間変化 ($700\ \text{V}$, $5\ \mu\text{S}$, $50\ \text{Hz}$)

電流の立ち上がりと同様に, スペクトルの立ち上がりもアーク放電のときのほうがグロー放電のときより早い. また, グロー放電のときと同様に, Ne の立ち上がりのほうが Hg のそれより早い (文献(1)図 7 参照).

Ne のスペクトルは, 電流がなお上昇しているにもかかわらず, 放電開始後約 $4\ \mu\text{S}$ で最大に達し減衰を始める. Hg のスペクトルは立ち上がりが遅いため, $5\ \mu\text{S}$ のパルス幅ではまだ最大に達せず, 電流が切れると同時に減衰を始める.

アーク放電とグロー放電の分光分布を 図 6 に示す. ただし, 印加電圧と周波数は, いずれの場合もそれぞれ $700\ \text{V}$ と $50\ \text{Hz}$ であり, パルス幅はアーク放電のときは $7.5\ \mu\text{S}$ で, グロー放電の

図 6 グローとアークの分光分布の比較 ($700\ \text{V}$, $50\ \text{Hz}$)

ときは $40\ \mu\text{S}$ である.

Ne のスペクトルはいずれの場合も, これらパルス幅内で最大に達して急速に減衰してしまうから (図 5 および文献(1)の図 7 参照), この程度にパルス幅が異なっても, アーク放電とグロー放電の Ne 線の強度を比較することには意味がある.

アーク放電とグロー放電のスペクトルの強度比 I_a/I_g は, $6,402\ \text{\AA}$ では 5.2 となり, $7,032\ \text{\AA}$ では 17.1 となっていていずれもアーク放電のときのほうがはるかに強い. これは電流の上昇率がアーク放電のときのほうが, グロー放電のときより大きい (約 43 倍) ためと考えられる. また, I_a/I_g の値は各スペクトルで異なる.

このことから, 赤色の発光色はアーク放電において容易に得られることがわかる.

Hg のスペクトルは最大に達して以後減衰するが, 放電期間中発光を維持するため, パルス幅を広くすれば強度が増す.

図 7 アークとグローの色度の比較

印加電圧 $1,000\ \text{V}$, パルス幅 $6\ \mu\text{S}$, 周波数 $50\ \text{Hz}$ のグロー放電の色度 (文献(1)の図 4 参照) と, 印加電圧 $700\ \text{V}$, パルス幅 $7.5\ \mu\text{S}$, 周波数 $50\ \text{Hz}$ のアーク放電の色度 (図 6 のアーク放電の分光分布のものを) を CIE 色度図上に示すと 図 7 のようになる. 印加電圧が低く, パルス幅の広いアーク放電において純 Ne の赤色に近い発光色が得られた.

(1) パルス幅変化による実験結果

印加電圧 $700\ \text{V}$, 周波数 $50\ \text{Hz}$ のときパルス幅を $6.6\ \mu\text{S}$ から

図 8 パルス幅による色度座標の変化
(700 V, 50 Hz)

25 μS まで変えて放電させたときの色度の x , y 座標の変化を図 8 に示す。

6.6 μS のときは純 Ne の赤色に近い発光が得られるが、25 μS ではまだパルス幅が狭いため青色光が得られない。

(2) 印加電圧変化による実験結果

印加電圧を 500 V より 800 V まで変えたときの色度座標の変化を図 9 に示す。このときのパルス幅の幅を各電圧で放電開始より放電電流が最大に達するまでとしたため、電圧が高くなるにつれ図に示すようにパルス幅は狭くなっている。各電圧に対する最大放電電流も図 9 に合わせ示してある。アーク放電においては低電圧においても di/dt が大きいいため容易に赤色が得られる。

図 9 印加電圧による色度座標の変化

(3) 周波数変化による実験結果

印加電圧を 700 V、放電電流のピーク値を 5 A 一定に保って、周波数を 50 Hz から 400 Hz まで変えたときの色度座標を図 10 に示す。周波数が高くなるにつれアーク放電への移行が早くなるので、電流ピークを一定に保つために図に示すようにパルス幅を各周波数ごとに調節した。周波数を高くするにつれ Ne の発光が弱まり青みを増すことがわかる。

以上の実験結果より、アーク放電においてもグロー放電におけると同様に、矩形パルスの幅、印加電圧および周波数を変えることにより、赤色から青色までの広範囲の変色の可能なことが予想される。しかし、今回の実験は電源容量の制約からパルス幅を十分広く、また周波数を十分高くできなかったため、青色の発光を

図 10 周波数による色度座標の変化 (700 V)

得ることができなかった。

4.3 合成波パルスによる実験結果

(1) 矩形と三角の合成波による実験結果

グロー放電においては三角波でパルス点灯し、その傾きを変えることにより広範囲の変色が可能であった³⁾。しかし、傾きの小さい三角波で放電させると、グロー放電からアーク放電への移行が不安定になると同時にグロー放電期間が長くなる。グロー放電期間が長くなると陰極が加熱されて、Hg が陰極より蒸発してしまい陰極輝点が発生しなくなる。そこでこの欠点を除去するため三角波の先端に幅の狭い矩形パルスを配置した合成波によって放電させた。

三角波のパルス幅を 180 μS 、ピーク電流を 0.46 A として、この先端に 7 μS の矩形波を配置した合成波で放電させたときの電流と 4,358 $\text{\AA}$ および 6,402 $\text{\AA}$ の時間変化を図 11 に示す。

図 11 矩形と三角の合成波による電流とスペクトルの時間変化

(a)は矩形波の高さを 2 A と高くしたときのもので、Hg と Ne のスペクトルは、いずれも矩形波内だけで強く発光し、三角波内

への移行点を安定させた。しかし、三角波の初期の電流が小さい期間に無発光となることがある。そこで、安定にアーク放電に移行し、かつ無発光の期間もなく、より微細な変色が行なえるように、幅の狭い複数個の矩形で合成した階段波を用いて点灯した。

第一段の幅を $4\ \mu\text{S}$ 、第二段以後の幅をそれぞれ $15\ \mu\text{S}$ として、全体のパルス幅が約 $80\ \mu\text{S}$ のとき、各段の高さを変えて放電させた場合の電流とスペクトルの時間変化を 図 13 に示す。

Figure 1 consists of three sub-graphs labeled (a), (b), and (c), showing the effect of temperature on the current response of the sensor.

(a) Current vs. Time (μs) for 1358 $^{\circ}C$, 6102 $^{\circ}C$, and 1358 $^{\circ}C$. The graph shows three curves: a solid line for 1358 $^{\circ}C$, a dashed line for 6102 $^{\circ}C$, and a dotted line for 1358 $^{\circ}C$. The current response is highest for 1358 $^{\circ}C$ and lowest for 6102 $^{\circ}C$.

(b) Current (A) vs. Time (μs) for 6102 $^{\circ}C$, 1358 $^{\circ}C$, and 1358 $^{\circ}C$. The graph shows three curves: a solid line for 6102 $^{\circ}C$, a dashed line for 1358 $^{\circ}C$, and a dotted line for 1358 $^{\circ}C$. The current response is highest for 6102 $^{\circ}C$ and lowest for 1358 $^{\circ}C$.

(c) Intensity (arb. unit) vs. Time (μs) for 1358 $^{\circ}C$ and 6102 $^{\circ}C$. The graph shows two curves: a solid line for 1358 $^{\circ}C$ and a dashed line for 6102 $^{\circ}C$. The intensity response is highest for 1358 $^{\circ}C$ and lowest for 6102 $^{\circ}C$.

図 13 階段波による電流とスペクトルの時間変化

(a)の電流は第一段が0.98 A, 第二段0.15 A, 第三段0.2 A, 以後の各段ではそれぞれ0.1 Aずつ増加して, 最終段で0.5 Aとした。Hg と Ne のスペクトルは第一段内だけで強く現われて, 第二段の途中でほとんど消滅してしまう。

(b)の電流は第一段と第二段が0.4 Aで、第三段以後は(a)と同じである。Neのスペクトルは放電開始より約7 μ S後に最大に達して二段目終了付近で消滅してしまう。Hgのスペクトルは、電流がピークに達する(約6 μ S)のと同時に最大に達し、電流一定の間はほぼその強度を維持する。第三段で電流が減少すると強度も弱くなるが、第四段以後の電流の増加とともに再び強くなる。

(c) の電流は第一段をゼロとし、第二段以後は 0.1 A ずつ増加したときのものである。このとき、Ne のスペクトルは全期間にわたって現われない。Hg のスペクトルは電流の増加とともに強度を増すが、電流が大きいい段では各段の途中で強度が減少し始める。また、電流が大きくなるにつれ強度は飽和の傾向を示す。

階段波による色度変化を 図 14 に示す. 図中の (a), (b), (c) の各点は, それぞれ図13(a), (b), (c)の電流波形に対応する色度である.

階段波の高さだけを変えることによって、パルス幅の狭い矩形波のときに得られる赤色から、Hg だけの青色まで広範囲の変色が可能であった。(c)の色度点が下がっているのは図11の場合と同

図 14 階段波による色度変化

様に Ne が発光しないときは、発光しているときより I_{4358}/I_{5461} の値が大きいためである。

4.4 輝度の測定結果

Hg の青色光の輝度はパルス幅を広く、放電電流を大きく、周波数を高くすれば高めることができるが、Ne はパルス印加直後の短期間内においてだけ発光するから、赤色光の輝度の向上には限界がある。

アーク放電とグロー放電において、電流が最大に達するまでのパルス幅としたときの輝度と印加電圧との関係を 図 15 に示す。ただし、アーク放電は周波数を 200 Hz、放電回路の抵抗を 110 Ω と 10 Ω としたとき、および 50 Hz で 10 Ω の三とおりであり、グロー放電は 50 Hz で 10 Ω のときのものである。

図 15 アークとグローの輝度

印加電圧を上昇するほど輝度が高くなるのがわかる。周波数を高くするときは、電流の上昇率が大きくなるためパルス幅を狭くした。しかし最大電流の大きさはほとんど変わらないため輝度は周波数に比例して高くない。

回路の抵抗を小さくするときも、電流の立ち上がりが早くなるのでパルス幅を狭くした。このときは最大電流が増加するため輝度が高くなる。

グロー放電の輝度は、印加電圧、周波数および抵抗が等しいアーク放電の輝度の約 1/4 となる。両者の発光色は当然のことながら異なっている。

図 11(a), (b), (c) の矩形と三角の合成波の輝度は、それぞれ 180

nt, 93 nt, 163 nt であり、図 13(a), (b), (c) の階段波の輝度は、それぞれ 150 nt, 130 nt, 140 nt であった。

赤色と青色の輝度はいずれもほぼ等しくなったが、中間色の輝度は、とくに矩形と三角の合成波において低くなった。これは中間色のとき、Hg と Ne のいずれもが発光しない期間が生じるためである。

5. 考 察

矩形パルス点灯のとき、グロー放電では赤色を出せるパラメータ範囲が比較的狭かったのに対し、アーク放電では逆に限られたパルス幅では赤色は出しやすい代わりに、青色を出しにくいという結果である。しかし青色を出すことは十分可能で、そのためにはパルス幅を広くする必要がある。このことは放電管を単独で使用する場合はあまり問題にならないが、ディスプレイ用に多数の放電管を用い、しかも掃引点灯する場合には長いパルス幅を必要とすることは不利である。

これに対し、合成波はパルス幅、電圧および周波数を固定し、波形を変えるだけで変色範囲を広くとれるから、ディスプレイに応用するとき掃引を規則的に行なうことができ、掃引制御が簡単となる利点がある。

さらに階段波の場合には、波形制御をデジタル的に行なえるため、将来計算機と結合して色を変えることも可能となり応用範囲も拡張できるものと思われる。

6. む す び

グロー放電において、発光色制御が可能であったパルス方式をアーク放電に対して試みた。

以上の結果を要約すると次のようになる。

- (1) Ne-Hg 放電管において、パルス放電ごとにグロー放電からアーク放電への移行が数 μS 以内に起こることが観測された。
- (2) アーク放電の電流上昇率は 1.38 A/ μS であり、グロー放電のそれは 0.032 A/ μS である。この違いによってアーク放電においては、純粋に近い赤色光が得られる。
- (3) アーク放電においては、赤色は矩形波パルスで容易に得られるが、青色を得るにはパルス幅をグロー放電のとき以上に広く変化させることが必要である。
- (4) 電流波形の立ち上がりを制御して変色する方法では、青色を得るためのゆるやかな立ち上がりの場合に、グロー放電からアーク放電への移行を保証することが必要であって、この目的のために矩形波と三角波の合成波および階段波状合成波を試みた。その結果、変色の点では両者共に満足すべき結果を得たが、変色および輝度の両方を自由に制御できる点において、またグロー放電からアーク放電への移行を確実にする点において、後者がすぐれている。

(5) アーク放電の場合は、グロー放電に見られる負グローとフェラデー暗部がなく、陽光柱は陰極輝点近くまで伸びており、可変色の有効部分がグロー放電の場合より長い。

(6) アーク放電では電流が大きいため高輝度を得られる。周波数 50 Hz、パルス幅 3.5 μS 、ピーク電流 27 A、平均電力約 3 W のとき最大輝度 1,480 nt でグロー放電の場合の 10 倍以上である。

おわりに、本研究にあたり測光系の分光感度の校正に便宜をはかってくださった京都大学工学部助教授野口透先生ならびに、実験に終始協力いただいた、愛媛大学工学部技官黒河久悦氏に感謝

の意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 青野, 久保, 板谷: 照学誌 **60**-10 (昭51) 529~536
- (2) 青野, 久保, 板谷: 昭52 四国支部連大予稿集 163, 164

(3) 竜子ほか: 電気学会光源関連装置研究会資料 LS-78-3 (昭53)

(4) 南, 内田: 応物 **38**-8 (昭44) 789~796

(受付1979年11月5日)

5 月号掲載予定目次

- 技術総説 ○CIE LUV と CIE LAB 均等色空間に関する最近の話題
- 施設報告 ○省エネルギーモデルビル東京電力(株)大塚支店の照明設備
- 随 想 ○山頂のCIE (TC-4.6 SC-8 “High level matters”)
- 資 料 ○エジソン竹フィラメント電球の製作
- エジソン電灯発明 100 年ライトミッションに参加して
- 委員会報告 ○放射の応用・関連計測研究委員会, 関西支部測光測色研究会合同
公開研究会報告

その他