

# 高圧水銀ランプの特性について

## Characteristics of High Pressure Mercury Vapor Lamps

町田 充 作\* 河喜多能 明\*  
 Jūsaku Machida Yoshiaki Kawakita  
 広田 泰 輔\* 望月美喜 夫\*  
 Taisuke Hirota Mikio Mochizuki

### 内 容 梗 概

最近の照明用高圧水銀ランプの進歩，すなわち製品品質の向上およびその製作技術の改善にはめざましいものがある。本稿では高圧水銀ランプの一般的基礎特性について説明し，現在実用せられている照明用の高圧水銀ランプの電気的特性およびそれらに与える外部回路の影響，放電管諸元による特性変化の様相について検討した。

さらに照明用としての光色，光束などについても説明を加え現在の高圧水銀ランプの情勢について記述した。

### 1. 緒 言

照明用の光源として最も早く研究されたのはアーク灯であるが，1904年 Retschinski により最初の石英水銀ランプが作られ，今日の高圧水銀ランプ発展の端緒を開いた。その後1931年 Gabor の Mo 箔封入法の発明，1934年ころからの Elenbaas の単位電力に対する理論的考察によりほぼ今日みられる水銀ランプが作られるようになった。

すなわち，照明用の高圧水銀ランプでは配電電圧とアーク電圧の関係から，安定器や電極における損失を考慮すると高効率化にこだわらず，動程や全体としての経済性の良い設計が採用されるようになった。

さらに1951年頃から蛍光高圧水銀ランプが実用されるようになり光色の改善が行われた。1957年からは蛍光体の改善により光色と同時に効率の上昇が行われ，今後とも手軽な光源としてますます照明界への進出が著しいものと思われる。

### 2. 一般的特性

#### 2.1 水銀蒸気的特性

蛍光ランプや水銀ランプは水銀の放電を利用したものであり，一般に水銀蒸気圧が1ないし数気圧のものが高圧水銀ランプといわれている。水銀蒸気圧と蒸気温度の関係は(1)式<sup>(1)</sup>で示され，

$$\log P = -\frac{52.23 \times 58.7}{T_c} + 7.752 \dots\dots\dots (1)$$

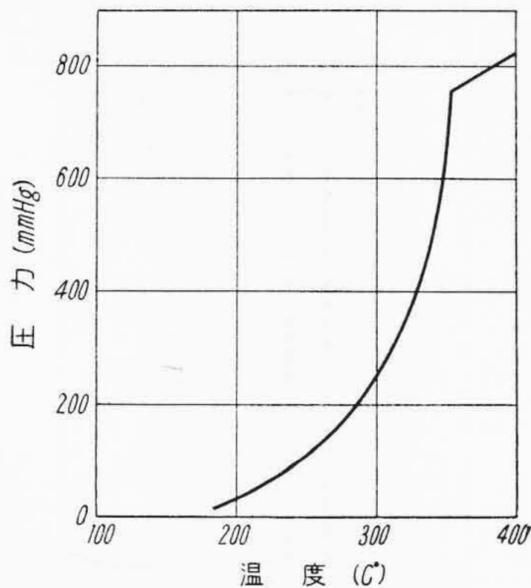
ただし  $P$  蒸気圧 mmHg  
 $T_c$  温度 °K

動作蒸気圧が1気圧に設計された場合の温度と圧力の関係は第1図のとおりである。

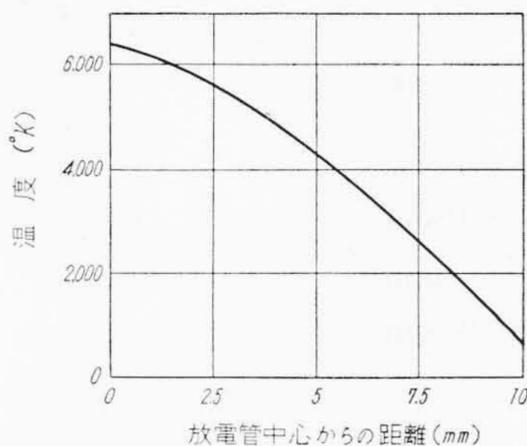
一般にランプは不飽和蒸気中の放電を利用するため動作温度における蒸気圧は(2)式にて表わされる。

$$P = nK(T - T_n) \dots\dots\dots (2)$$

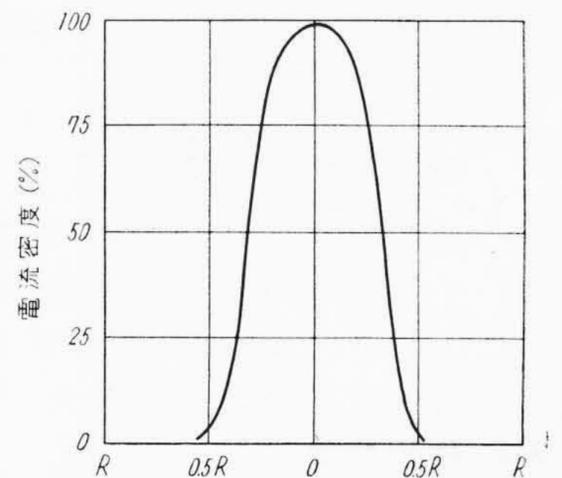
ただし  $T$  : 動作温度  
 $T_n$  : 飽和蒸気温度 ( $T > T_n$ )



第1図 1気圧に設計された場合の温度と圧力の関係

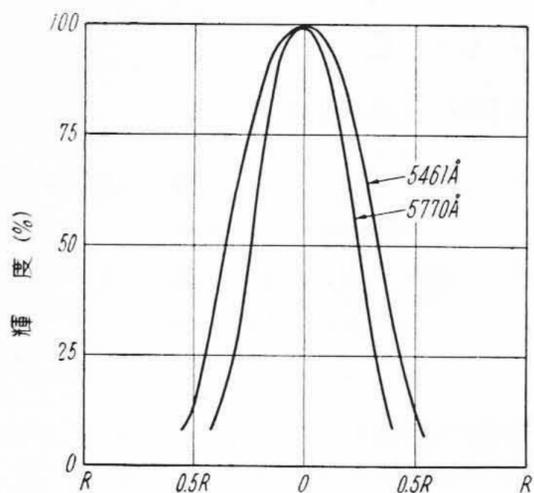


第2図 直径 20 mm の放電管断面の温度分布

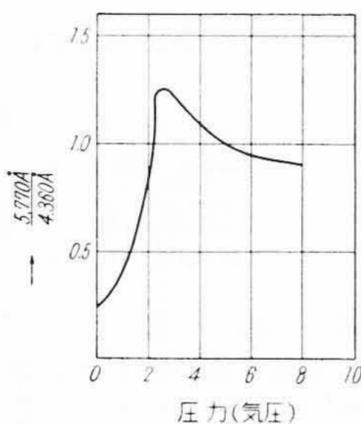


第3図 半径Rの放電管断面の電流密度分布

\* 日立ランプ株式会社



第4図 半径Rの放電管断面のスペクトル強度分布



第5図 放電管圧力とスペクトル強度比

$n$  : 蒸気密度  
 $K$  : 定数 ( $1.37 \times 10^{-16} \text{erg/K}^m$ )

これら水銀蒸気圧は放電管管壁の最低温度に対応するものであり、管壁温度は放電陽光柱における電流、電離状態および管壁からの損失熱などの平衡状態で示される。動作蒸気圧が1気圧に設計されている場合の放電管断面の温度分布はほぼ第2図のようになり陽光柱温度は実験的に(3)式<sup>(2)</sup>で示されている。

$$T_g = \left( 6025 \frac{Pe}{8.5 + 5.75m} \right) \dots \dots \dots (3)$$

$Pe$  = 単位陽光柱あたりの入力 (W/cm)  
 $m$  = 単位陽光柱あたりの水銀量 (mg/cm)

放電電流は放電回路に直列に置かれた安定抵抗によって左右されるが管内の電流密度は温度と蒸気密度との関数になるため、その分布は第3図のとおりになり電流の流れに対する有効管径は約1/2となる。一般に高圧水銀ランプのような大きな電流密度では励起された原子は平衡状態に帰るまえに電子との衝突が行われるため高エネルギーの荷電粒子量が多く、放電を維持するために必要な電圧は低くなる。さらに熱損失は一般には蒸気圧や管径に無関係の定数と考えられる<sup>(3)</sup>ことから陽光柱の電位傾度としてIwanowは(4)式を与え<sup>(4)</sup>、Elenbaas<sup>(5)</sup>は(5)式を与えている。

$$G = 185 \frac{Pe^{1/2} \cdot m^{7/12}}{D^{3/2} (Pe - S)^{1/3}} \dots \dots \dots (4)$$

$$G = 100m^{1/4} (8.5 + 5.75m)^{1/2} / D^{3/2} \dots \dots \dots (5)$$

ただし  $G$  : 陽光柱電位傾度 (V/cm)  
 $D$  : 放電管管径 (mm)  
 $S$  : 熱損失 (9.3 W/cm)

2.2 発光特性

放電管内の陽光柱は中心からの距離における温度および蒸気密度の関数であり、したがってあるスペクトルの強度も距離の関数となり第3図のような放電管では第4図のような強度分布を示す。

一般に高圧水銀ランプでは水銀原子の高準位間の転移による可視線を利用しており、高準位間の励起を容易にするため蒸気圧を適正なものに保つ必要がある。

第5図は蒸気圧とスペクトル強度比の関係を示す一例<sup>(6)</sup>であり一般には蒸気圧の上昇に伴い大部分のスペクトル線については長波長部分の強度が増加し紫外から赤外範囲にわたり連続スペクトルが生ずる。

第6図は一般的な高圧水銀ランプのスペクトル分布図である。

陽光柱の輻射効率<sup>(6)</sup>は放電管諸元や電氣的諸量によって影響され、エネルギー的にバランスのとれた状態ではガス密度、水銀量および放電管径によって変化する。

したがって一義的に効率式を求めることは不可能であるが特定の場合については多くの実験式がある<sup>(7)-(9)</sup>。

(6)式は普通の高圧水銀ランプについて適用されるElenbaasの効率式である。

$$He = Q(1 - A/Pe) \dots \dots \dots (6)$$

ただし  $A = \text{const.} (\approx 9 \text{ W})$

$$Q = f_1(G) \cdot D f_2(G)$$

$$f_1(G) = -2.1 + 2.72m - 2.2 \times 10^{-2} G^2$$

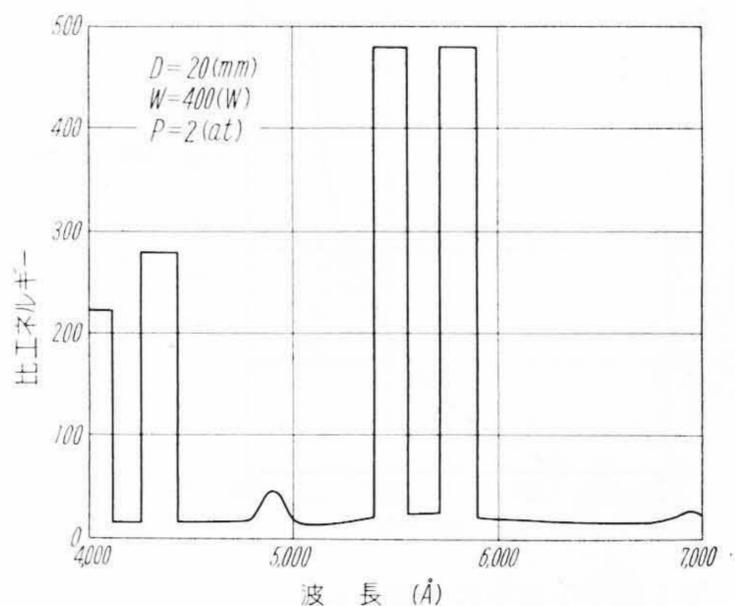
$$f_2(G) = 53.3 \times 10^{-2} - 16.6 \times 10^{-3} G + 1.42 \times 10^{-4} G^2$$

第7図は一定圧力、一定管径における管電流と陽光柱の相対効率の関係であり、第8図は単位電力との関係を示す一例である。

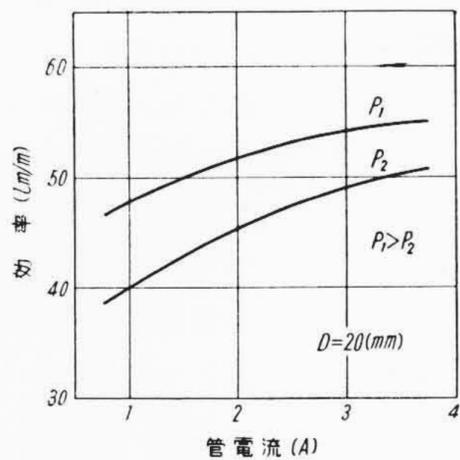
3. 電氣的特性

3.1 電圧・電流

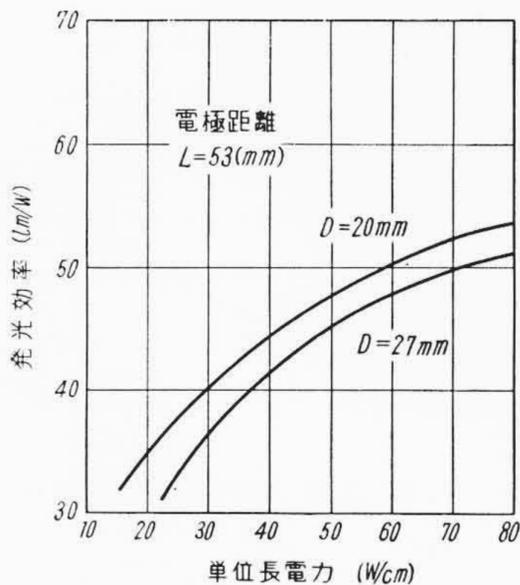
高圧水銀ランプ陽光柱のインピーダンスは一般の負特



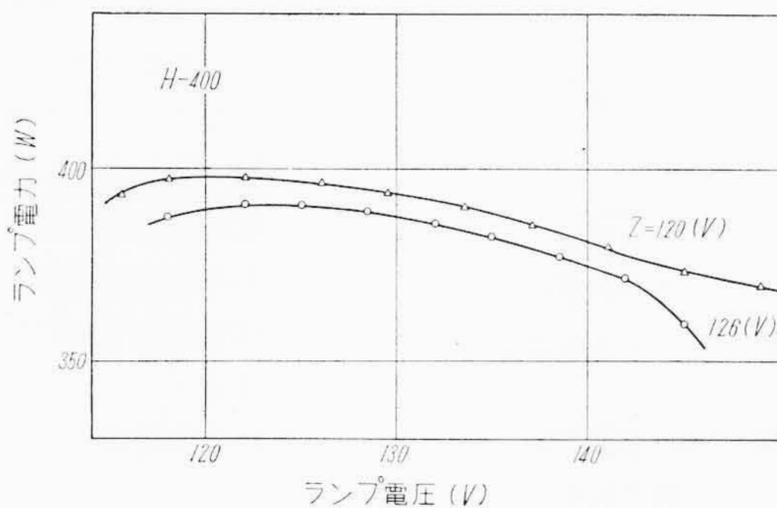
第6図 一般的な高圧水銀ランプの分光エネルギー分布



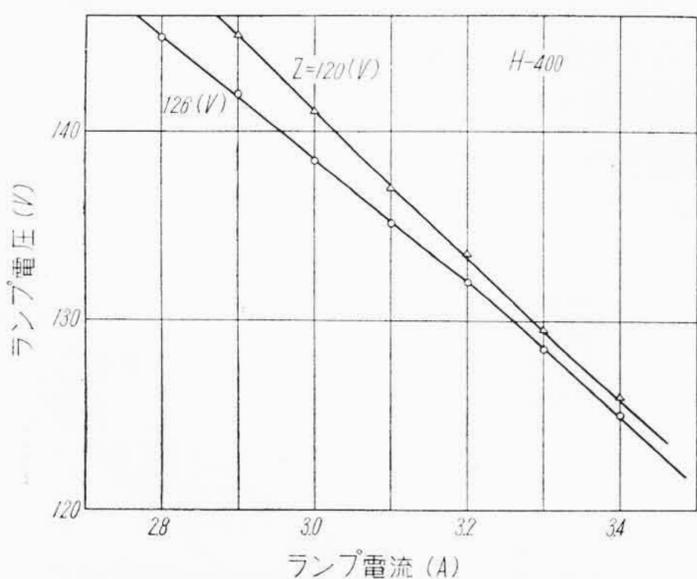
第7図 管電流と効率の関係



第8図 単位電力と効率の関係



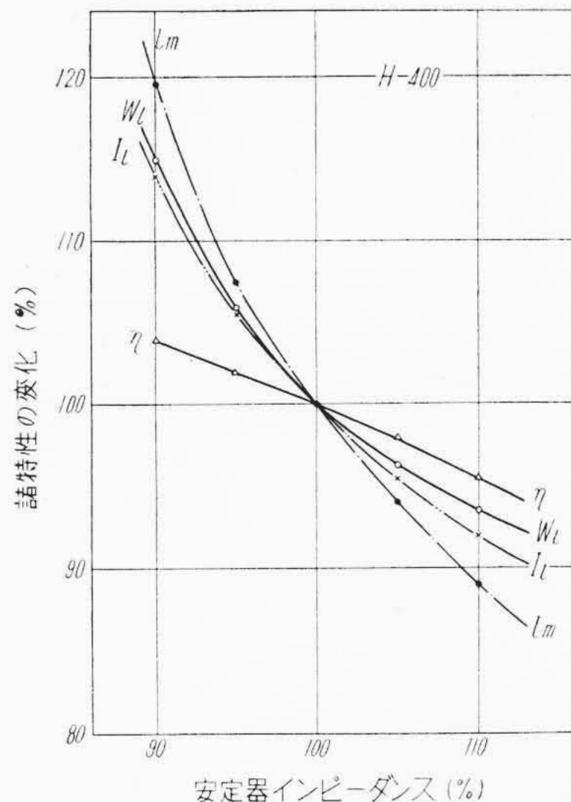
第9図 ランプ電圧とランプ電力の関係



第10図 ランプ電圧とランプ電流の関係

性と異なり、約90%の純抵抗と若干の誘導から成っている。これらの誘導成分および安定器との組合せより生ずるひずみ波形によるランプの等価力率は一般に90~93%程度である。

電源電圧が一定の場合にはランプ電力は安定器インピーダンスによって第9図のように変化し、ランプ電圧に対し最大電力が存在する。電圧・電流特性は第10図の



第11図 安定器インピーダンス変化によるランプ特性の変化

ように変化しその変化率  $\partial Ve/\partial Ie$  は実験的に  $-1.1$  となる。すなわち等価力率が一定の場合にはランプ電力はほとんど安定器によって決定される。第11図は安定器インピーダンスの変化に対するランプ特性の変化を示す。

放電管諸元の内、電圧・電流に最も影響するものは水銀量と管径である。水銀量変化に対する電圧・電流変化は実験的にそれぞれ  $0.5, -0.5(\%)$  で示されランプ電力の変化率は零である。電流と管径の関係式は実験的に(7)式で示され、エネルギー的にバランスのとれた状態を中心にした電圧・電流の変化率は

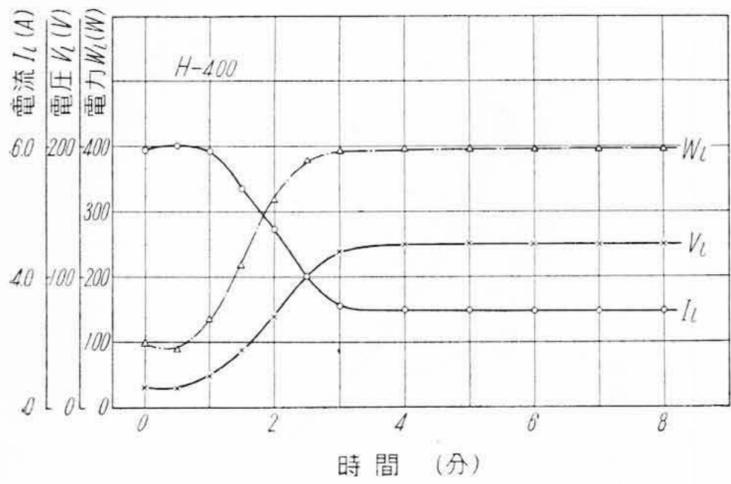
$$\frac{\partial Ie}{\partial D} = 3.0, \quad \frac{\partial Ve}{\partial D} = -1.8 \quad \text{にて示される。}$$

$$Ie = K \cdot \frac{D^3 G}{m^{1/2}} \dots \dots \dots (7)$$

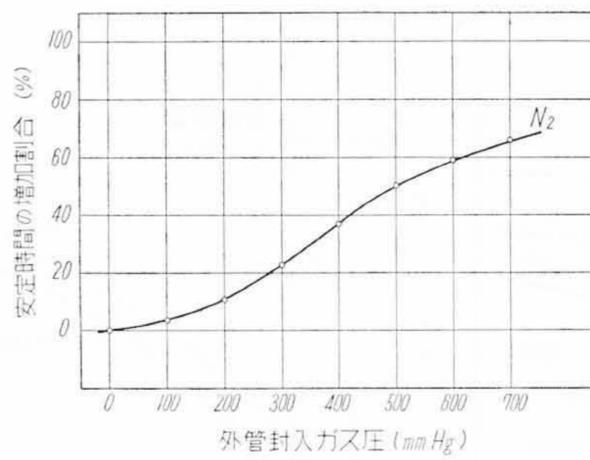
- ただし  $D$ : 放電管管径 (mm)
- $m$ : 水銀量 (mg)
- $G$ : 陽光柱電位傾度 (V/cm)
- $I$ : ランプ電流 (A)
- $K$ : 定数

3.2 起動特性

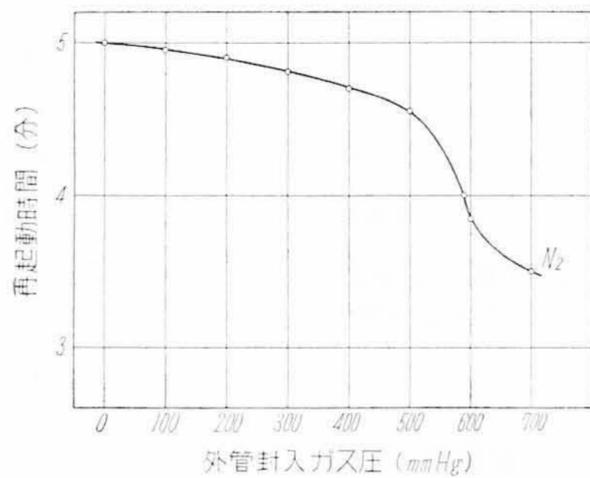
水銀ランプは一般に起動後安定状態に達するまで3~10分を必要とする。この間温度が安定するまで電気的および光学的特性は第12図に示すように変動をする。すなわち熱的平衡状態に達するまでにはある一定の時間がかかり、この時間は安定状態におけるある一定の特性に対しては放電管寸法、形状、外管寸法、外管封入ガスなどによって影響される。完全な真空の場合には損失熱は放射によってのみまかなわれるが、ガス封入の場合にはさらに対流と伝導が加わり、安定時間は長くなる。第13



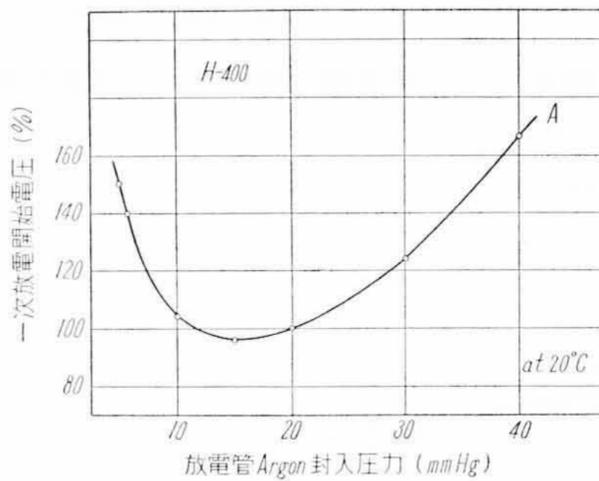
第12図 起動時のランプ特性



第13図 外管封入ガス圧と安定時間



第14図 外管封入ガス圧と再起動時間



第15図 封入ガス圧と放電開始電圧

図はガス圧と安定時間の関係を示す一例である。水銀灯の再起動は放電管内の蒸気圧すなわち管温度によって影響されるので再起動時間は内管の冷却速度に関係する。冷却速度はガスによって変化し、第14図はその一例である。

水銀ランプの放電開始電圧は低圧放電管におけると同様放電管内封入ガス圧によって変化しその例は第15図のようになる。さらに周囲温度に対する放電開始電圧の影響は第16図のとおりになり、一般の低圧放電管におけるような著しい変化はない。

### 3.3 電圧特性

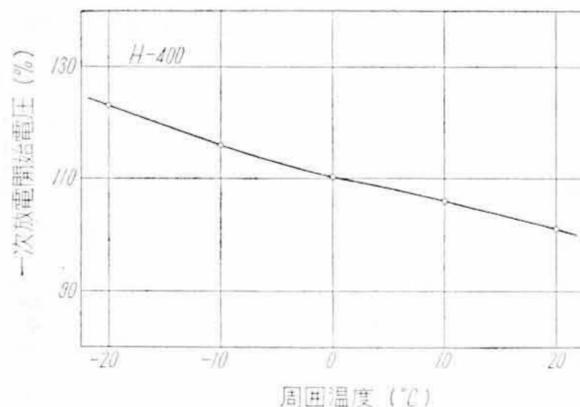
ランプの等価力率を $\phi$ とし、ランプ電圧・電流を正弦波と仮定するとランプ電力は(8)式にて示される。さらに安定器のインピーダンスを $Z$ とすると(9)式が成立し、ランプ電力は(10)式のように電源電圧の関数として現わされる。

$$We = K\phi Ve \cdot Ie \dots\dots (8)$$

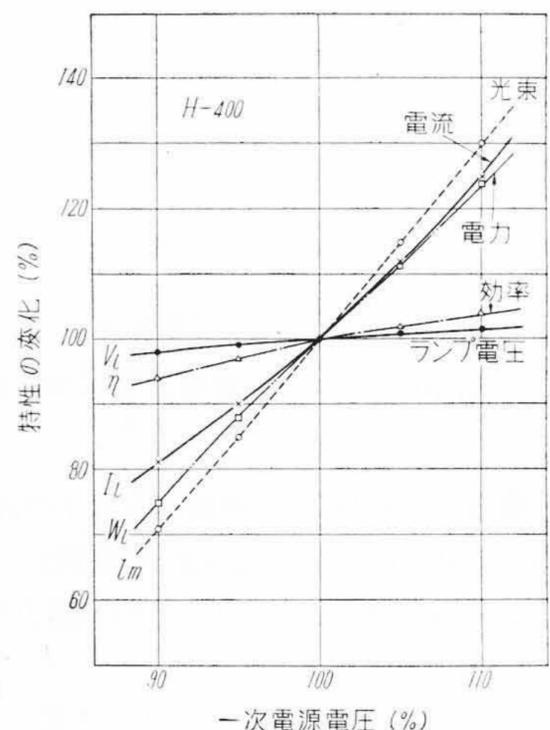
$$V_2 = Ve^2 + (ZIe)^2 \dots\dots (9)$$

$$We = K\phi \frac{Ve}{Z} \sqrt{V^2 - Ve^2} \dots\dots (10)$$

- ただし We: ランプ電力
- V: 電源電圧
- K: 回路による補正系数



第16図 周囲温度による放電開始電圧の変化



第17図 電源電圧変動に対するランプ特性の変化

(10)式より電源電圧変動に対するランプ電力の変化は(11)式のとおりになり、実際にエネルギー的にバランスのとれた状態から変動した場合の実測値も略(11)式と一致する。

$$\frac{\partial We}{\partial V} \cdot \frac{V}{We} = 2.37K \dots (11)$$

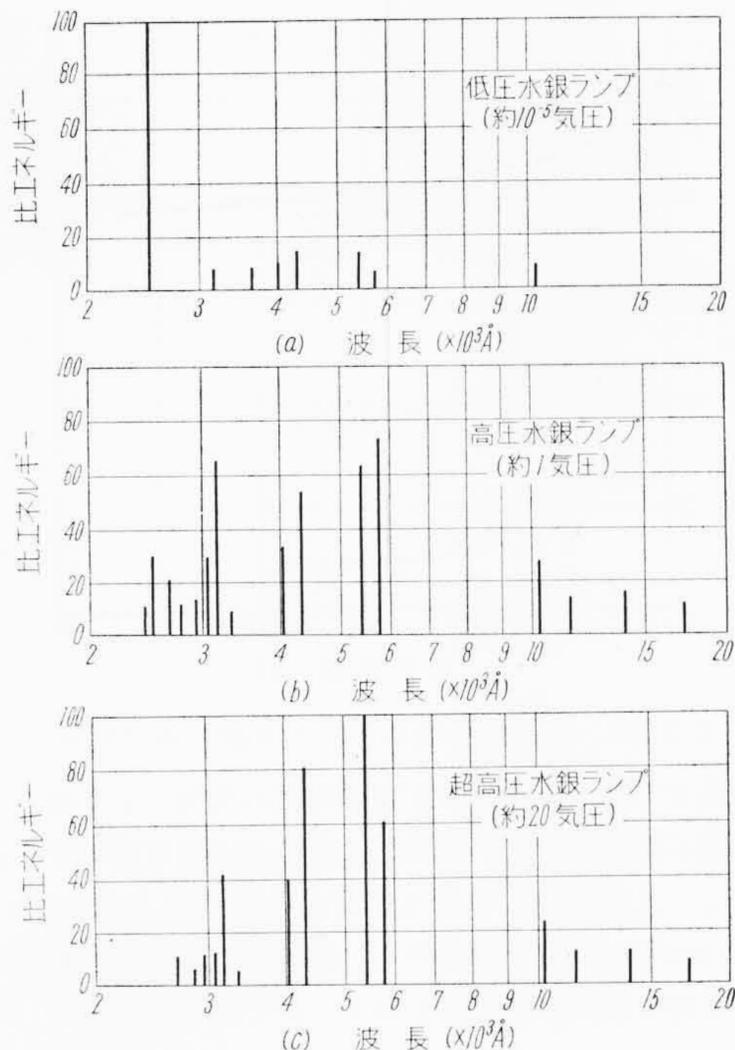
電源電圧の変動に対するランプ電圧の変動はほとんどなく、ランプ電流、光出力とも放電管内の水銀蒸気が不飽和の状態では直線的な変動をする。

第17図は電源電圧変動に対するランプ諸特性の変化を示す一例である。

### 4. 光学的特性

高圧水銀ランプの測光方法に関してはいまだ確定的なものがなく今後の研究課題となっている。

一般に水銀ランプの明るさとしては水銀放電による水銀の放射スペクトルが重要な因子となるほか、蛍光高圧



第18図 水銀蒸気圧によるスペクトル分布の変化

水銀ランプでは蛍光体の特性が問題となる。

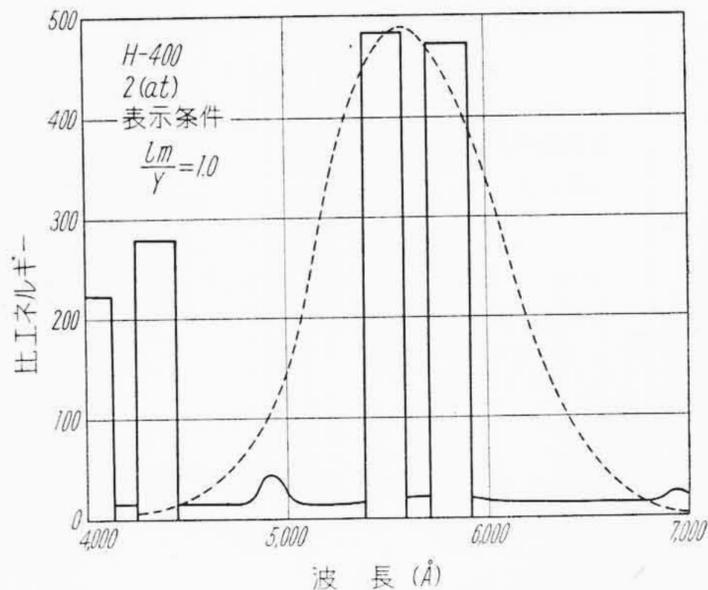
前述のように水銀の放射スペクトルは蒸気圧の増大により長波長側に移るとともに連続スペクトルが生じてくる。第18図は圧力の相違によるスペクトル分布の変化を示す。

一般照明用の高圧水銀ランプは第18図(b)に相当するものであり、可視部のスペクトルは4047Å(紫), 5358Å(青), 5461Å(緑) および 5780Å(黄) の4本であるが光束として表現する場合には視感度曲線を考慮する必要がある。このような考え方によるエネルギー分布を第19図に示す。

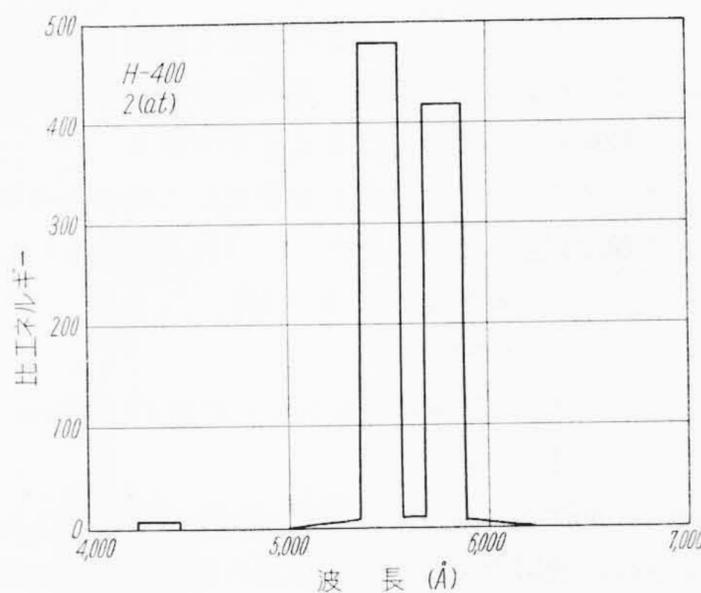
すなわち、5450, 5780Åのスペクトルが全光束の90%以上を占めていることがわかる。したがって光束を増加せしめるためにはこの波長のエネルギーを増せばよいこととなる、換言すると蒸気圧を高めればよいこととなり、超高圧にするほど効率が良好となる。事実超高圧では85 lm/W程度が得られるが実際には寿命の点から一般照明用としては実用されない。

今エネルギー分布が第19図で示されるような水銀ランプの光色を考えると、分布から明らかなように緑がかかった白色光であることがわかる。この光色を改善し輝度を下げるための一方法として蛍光高圧水銀ランプが実用されている。

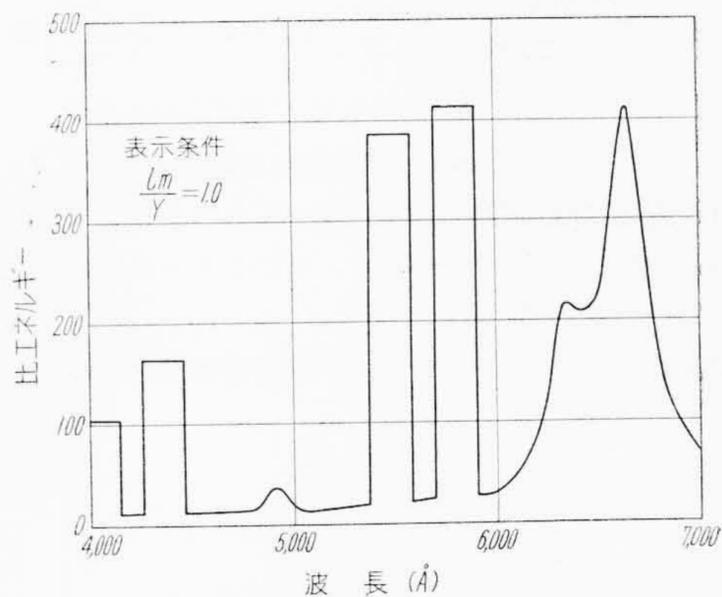
これら蛍光高圧水銀ランプに使用されている蛍光体には Mg-Fluorogermanate; Mn, Sr-Zn Phosphate; Sn,



第19図(a) 分光エネルギー分布および視感度曲線

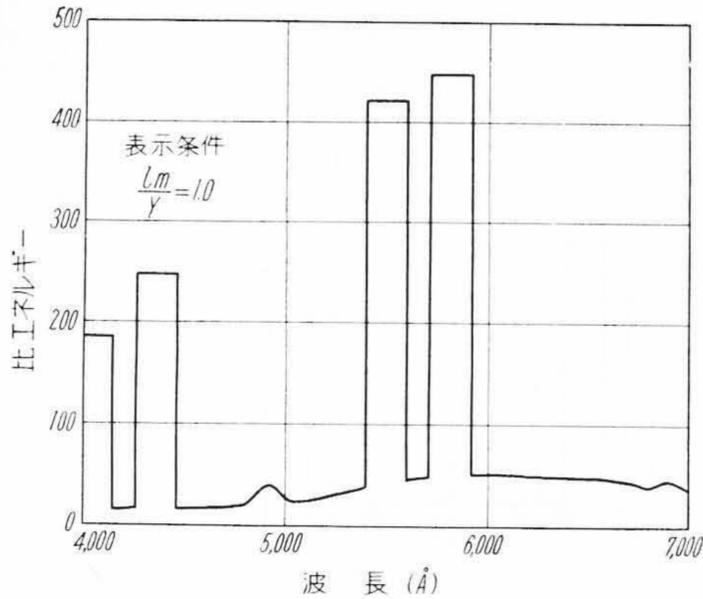


第19図(b) 視感分光エネルギー分布



第20図 Mg-Fluorogermanate; Mn の分光エネルギー分布

および Sr-Mg Phosphate; Sn などがあるがいずれも温度特性、可視光への変換能率、可視光吸収特性などが重要である。第20, 21図は Mg-Fluorogermanate; Mn, Sr-Zn Phosphate; Sn 使用の蛍光高圧水銀ランプの分光エネルギー分布を示す。



第21図 Sr-Zn Phosphate の分光エネルギー分布

蛍光体によるランプの明るさの変化を比較すると第22図のようになり最も効率の良いものでは蛍光体を塗らない場合の120%の明るさをうる事ができる。

同一ランプにおいて入力電力を変化した場合スペクトル強度は第23図のように変化する、(12)式で示される。

$$\text{スペクトル強度} = A(P-10) \dots\dots\dots (12)$$

(あるいは全光束)

ただし  $P'$ : 単位陽光柱あたりの電力 (W/cm)

$A$ : 定数

一般に放電管内の温度は前述第23図に示すような分布で示され、放電管中心からある点の温度は半径の関数として示される。さらに蒸気圧は温度の関数となるため(13)式が成立する。

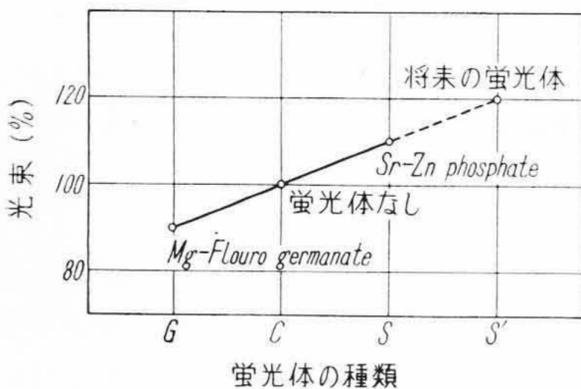
$$P \frac{200.6 \times 273}{22.4} \int_0^R \frac{2\pi r}{T(r)} dr = m \dots\dots\dots (13)$$

ただし  $P$ : 蒸気圧 (気圧)

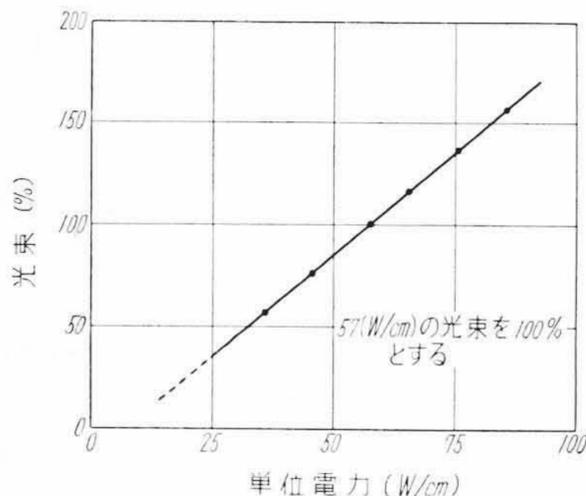
$m$ : 水銀量 (mg/cm)

(13)式より放電管内部の圧力が算出できる。現在一般に用いられている照明用のランプでは1~4気圧程度に設計されている。

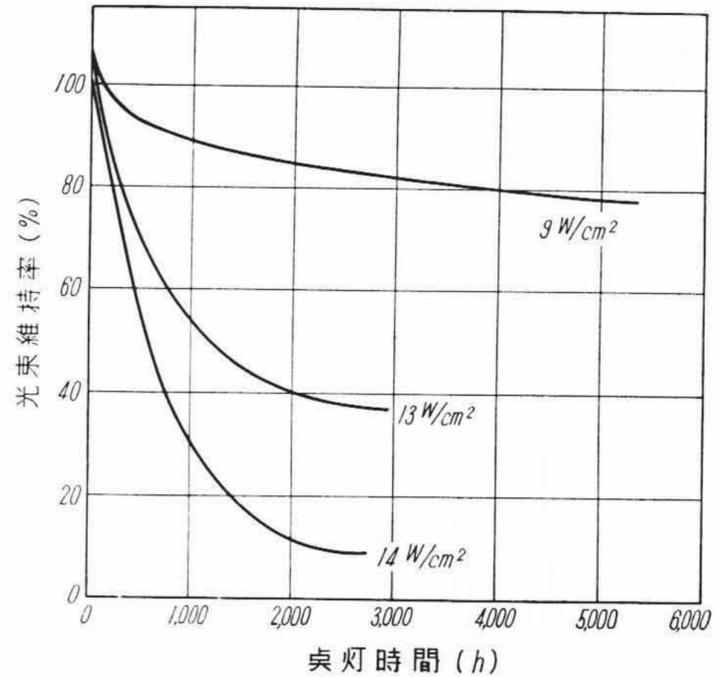
放電管の光束維持率については放電管材料に使用され



第22図 蛍光体による明るさの比較



第23図 単位電力と光出力の関係



第24図 放電管管壁負荷と光束維持率の関係

る石英ガラスの失透および電極物質の飛散による透過率の減退が関係する。一般的には維持率は放電管の管壁負荷によって変化する、良好な維持率をうるためにはほぼ9 W/cm<sup>2</sup>程度までが妥当といわれている。第24図は管壁負荷と維持率の関係を示す一例である。

### 5. 結 言

高圧水銀ランプの一般的な基礎特性、および現在実用されているランプの電氣的、光学的特性、さらにこれら特性に及ぼす外部回路、放電管諸元の影響について記述した。

照明用の高圧水銀ランプとしては単に高効率化にこだわらず全般的に経済性のすぐれたものや、光色がさらに自然光に近いものが望まれる。今後はこのような改善によってさらに手軽な光源として使用される日も近いものと思われる。

### 参 考 文 献

- (1)(2)(4)(9) A. P. Iwanow: Elektrische Lichtquellen Gas ent ladungslampen 375~394(1955)
- (3) W. Elenbaas: Philips Tec. Rev., 18 168~169 (June 1957)
- (5)(7)(10) E. B. Noel: Illum. Eng., 1045~59 (Nov. 1948)
- (6) J. M. Harris: Illum. Eng., 366 (July 1957)
- (8) Marden, Beese, Meister: Trans. Electroch. Soc., 69 389 (1936)