

## 新しい数式モデルによる高圧水銀ランプの 点灯動作シミュレーション

—始動時間の短縮に関する検討—

藤川 誠\*・井上 肇洋\*・姫井 豊治\*

The Simulation of High Pressure Mercury Lamp Operation  
by means of a New mathematical Model  
—Study on shortening of starting time—

Makoto FUJIKAWA , Toshihiro INOUE and Toyoji HIMEI

### ABSTRACT

By the simulation model for high pressure mercury lamps with electrical conductivity in plasma, we have studied mainly on shortening of the starting time.

The summary is as follows.

- (1) When the thermal conductivity of inside enclosure gas of out tube is smaller, the starting time is shortened.
- (2) When the outside diameter of the arc tube of lamp is larger, or the thickness of the arc tube of lamp is larger, the starting time is shortened.
- (3) When the ambient temperature raise, the starting time is shortened.
- (4) When the ambient temperature is 9 [°C], the oscillation of effective temperature of plasma and light output appears, in the calculation by means of this mathematical model.  
Under 8 [°C], they become to be severe and stop halfway.
- (5) In the experimental calculation, if it don't make decrease light output (radiated electric power), it is possible to continue the calculation until 0 [°C].
- (6) The above mentioned matters suggest that an additional supply of appreciated input in starting seems to be effective, such as heating arc tube or superposition of high voltage pulse between electrodes and so on.

#### 1. まえがき

高輝度、高効率、長寿命などの特長を持つHIDランプは、発光管プラズマの高温、高圧動作により、始動時や再始動時の光の立ち上がりの応答が、他のランプに比

べて遅いという欠点がある。また、外気温度が低い時の始動においては、光の立ち上がりの応答がより遅い。しかし、定常状態に達すると、外気温度には無関係となり、点灯状態には支障はないと考えられる。

従来は始動時間をあまり問題としない、ナイターなどの屋外照明に広く用いられてきた。しかし、近年数10Wクラスの小容量HIDランプが開発され、オフィスや店舗などの屋内照明用光源としても採用されるようになり、光応答の高速性が望まれている。従って、その安定器も小型軽量・制御性・高機能のものが要求されている。そこで、このような点灯システムの解析・設計のために有用であると考えられる、プラズマの電気導電率を用いた高圧水銀ランプの数式モデルが発表された<sup>2)3)4)\*\*</sup>。この数式モデルは、HIDランプの調光時や始動時の過渡状態を、一定の仮定のもとでシミュレートしたものである。

本文では、まず、状態方程式に用いられる係数の変化がランプの始動時間に及ぼす影響について調べ、次に、発光管内径、発光管外径、外管内径、外管外径、電極間距離、発光管の長さなどランプ形状がランプの始動時間に及ぼす影響を調べた。また、状態変数の初期値を変えて、外気温度の影響を示した。以上の結果をもとに、高圧水銀ランプの始動時間に及ぼす基本的な要因を分析し、その時間の改善、すなわち、ランプの光出力を早く立ち上げる方法について考察したので報告する。

## 2. 点灯回路とその動作

本研究における数式モデルの構築の対象とした、基本点灯回路の概略図をFig. 1に示す。

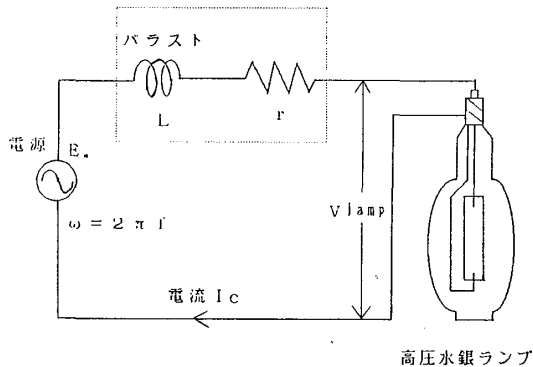


Fig.1 Operating circuit of high pressure mercury lamp

電圧がランプに印加された後、始動から定常状態に至るまでの点灯動作は実測結果より次のように考えられる。

### (1) 放電開始

主電極と補助電極の間で局部放電を開始し、始動用アルゴンガスがイオン化される。次第に陰極が加熱され熱電子が放出される。そして主電極間でのアーク放電へと移行し、やや細めのプラズマが現れる。

### (2) 過渡状態

アーク放電による発熱によって発光管内壁温度と気圧が上昇するため、水銀が盛んに蒸気化する。これに伴ってランプ電圧も上がり、ランプ電力が増すためプラズマは次第に明るくなり、直径も太くなって数分で定常状態となる。

### (3) 定常状態

定常状態では、ランプに入る電力エネルギーとランプから出ていく光熱エネルギーが等しい状態で、ランプ電流、ランプ電圧、ランプ電力、光出力が一定となり、ランプは演色性の良い白色光となる。

## 3. 点灯動作シミュレーション

### 3.1 動作範囲

スイッチ投入後、ランプが点灯を開始してから、光出力が定常値の90%に達するまでの時間を始動時間とする。ここでは始動時間を文献(1)の例に示された133秒を基準として比較検討することにする。

なお、後述のFig. 2からFig.12は、時間が200秒では電源電圧を200Vから180Vに、280秒後には180Vから元の200Vに変化させたものである。これにより、安定に点灯している状態から電力調整した時の過渡応答特性を知ることができる。

### 3.2 係数変化の影響

100W高圧水銀ランプを対象として、文献(4)の数式モデルの各係数や初期値を試行錯誤的に変化させながらシミュレーションを行い、ランプの始動時間との関係を調べた。

まず、状態方程式の材質等に関する係数の変化が高圧水銀ランプの始動時間に及ぼす影響について検討した。すなわち、各係数の変化前後の値、始動時間、始動時間比をTable 1に示す。表中の始動時間比とは、通常安定器による上記の始動時間を基準として、シミュレーションによる始動時間を百分率で表したものである。また、シミュレーション計算は実際の係数に対して大きい場合と小さい場合について行い、始動時間比の小くなった方を変化後として表中に示している。これは、以下に示す計算結果も同様である。Table 1より、発光管の熱伝導率 $\lambda_t$ の変化が始動時間に大きな影響を与えていることが分かる。発光管の内壁から外壁への熱伝導損失は $\lambda_t$ に比例するため、 $\lambda_t$ を小さくするとこの損失が小さくなり、発光管内壁における蓄熱エネルギーが増加して発光管内壁温度が早く上昇する。従って、発光管内水銀の気化量が多くなり、ランプ抵抗が早く増加して始動時間が短縮されるためと考えられる。Fig. 2は $\lambda_t$ を小さくし

\*\*本論文の一部は、平成2年電気関係学会中国支部第41回連合大会にて発表済みである。

Table 1 Effects of constants to starting time

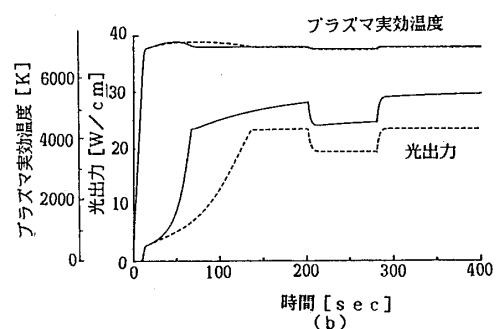
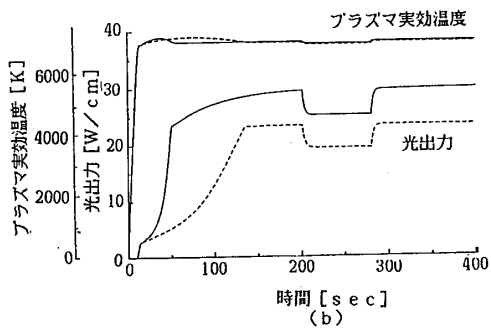
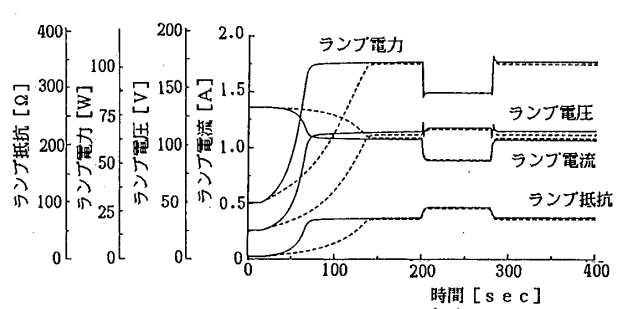
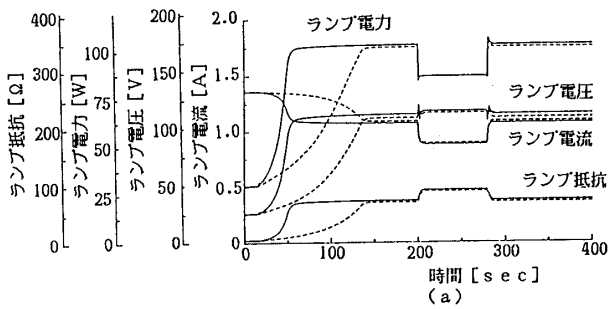
| 定数             | 簡単な物理的意味  | 変化前                    | 変化後                  | 始動時間[sec] | 始動時間比[%] |
|----------------|-----------|------------------------|----------------------|-----------|----------|
| $\lambda_t$    | 発光管の熱伝導率  | $3.86 \times 10^{-3}$  | $6 \times 10^{-6}$   | 49        | 35.4     |
| $\lambda_{tb}$ | 外管ガスの熱伝導率 | $1.714 \times 10^{-2}$ | $9 \times 10^{-5}$   | 65        | 46.9     |
| $\lambda_b$    | 外管の熱伝導率   | $9.09 \times 10^{-4}$  | $4 \times 10^{-6}$   | 101       | 72.9     |
| $\lambda_a$    | 空気の熱伝導率   | $1.056 \times 10^{-2}$ | $1.8 \times 10^{-4}$ | 123       | 88.8     |
| $\cos \phi$    | ランプ力率     | 0.83                   | 1                    | 125       | 90.3     |
| $C_{vHg}$      | 水銀の比熱     | $6.771 \times 10^{-2}$ | $49 \times 10^{-2}$  | 126       | 91.0     |
| $C_{vt}$       | 発光管の比熱    | $7.468 \times 10^{-2}$ | $3.5 \times 10^{-3}$ | 111       | 80.1     |
| $C_{vn}$       | 外管ガスの比熱   | 1.85015                | 1.0                  | 119       | 85.9     |
| $C_{vb}$       | 外管の比熱     | $6.54 \times 10^{-2}$  | $6 \times 10^{-3}$   | 121       | 87.4     |
| $C_{va}$       | 空気の比熱     | 12.836                 | 1.0                  | 120       | 86.6     |

た場合のシミュレーション結果であり、ランプ抵抗の変化が急速に大きくなっていることが分かる。なお、このFig.2(a)は、時間に対するランプ電力、ランプ電流、ランプ電圧、そしてランプ抵抗を示し、このFig.2(b)は、時間に対するプラズマ実効温度と光出力を示す。これは、以下の図においても同様である。また、Fig. 3に外管ガスの熱伝導率 $\lambda_{tb}$ 、Fig. 4に外管の熱伝導率 $\lambda_b$ 、Fig. 5に空気の熱伝導率 $\lambda_a$ を、それぞれ小さくした場合のシミュレーション結果を示す。それぞれのシミュレーション結果の立上りの形は若干異なるが、始動時間短縮の理由は、 $\lambda_t$ の場合と同じであると考えられる。

以上、始動時間の短縮には、熱伝導率を小さくすることが効果的であると考えられる。

### 3. 3 ランプ形状の変化の影響

ランプ形状の変化の影響が始動時間に及ぼす影響を調べた。発光管の内径と発光管の外径、そして、電極間距離と発光管の長さを変化させた場合のシミュレーションを行った。その結果をFig. 6、Fig. 7、Fig. 8、Fig. 9に示す。また、各定数の変化前後の値、始動時間、始動時間比をTable 2に示す。ランプ発光管の外径を大きくして、発光管の肉厚を厚くすると保温が良くなり、プラズマ温度が早く上昇し、水銀の気化が促進されるため、



----- normal  
 ———  $\lambda_t = 6 \times 10^{-6}$

----- normal  
 ———  $\lambda_{tb} = 9 \times 10^{-5}$

Fig.2 Effects of  $\lambda_t$

Fig.3 Effects of  $\lambda_{tb}$

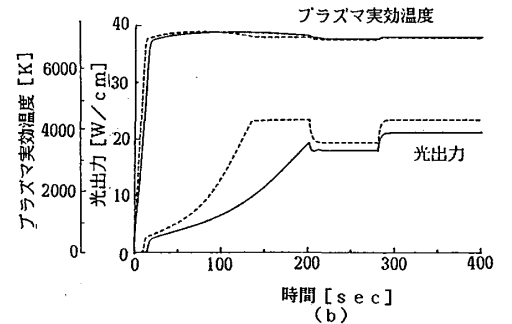
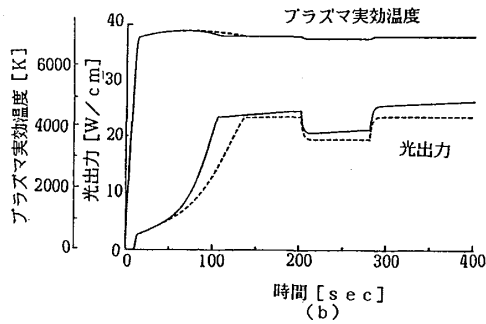
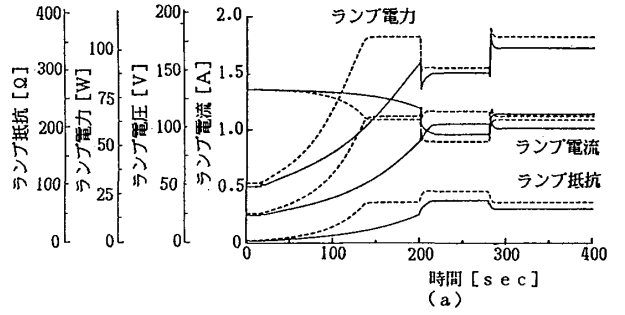
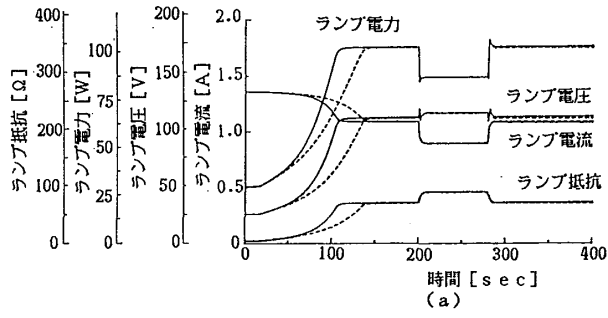


Fig.4 Effects of  $\lambda_b$

Fig.6 Effects of  $\lambda_{out}$

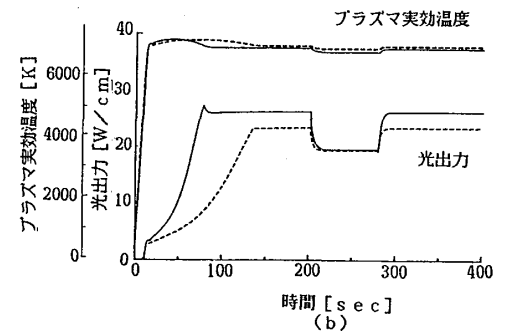
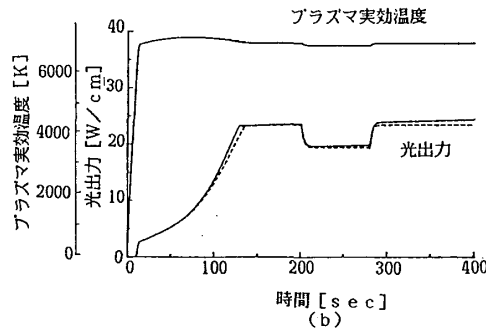
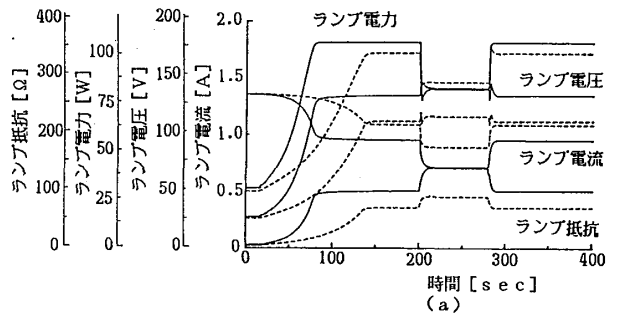
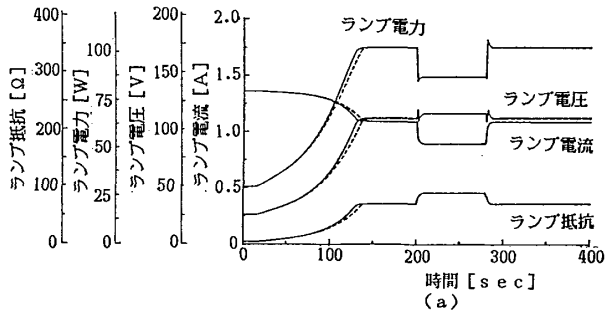


Fig.5 Effects of  $\lambda_a$

Fig.7 Effects of  $D_{tin}$  and  $D_{tout}$

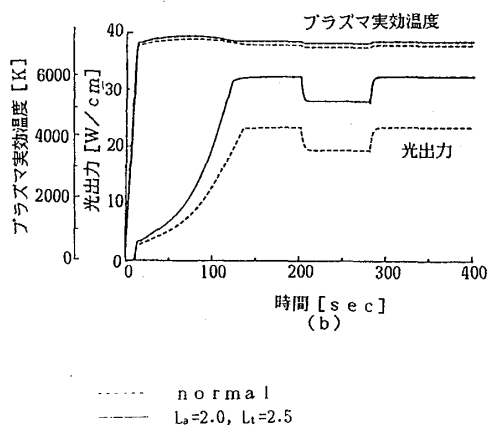
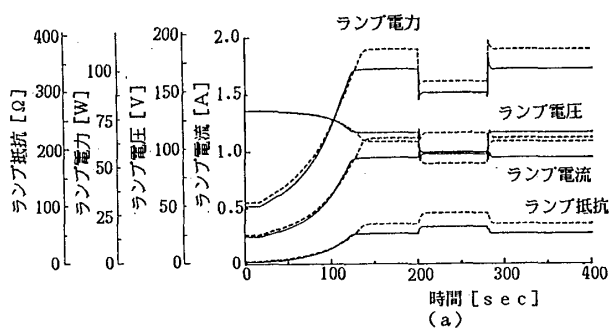


Fig.8 Effects of  $L_a$  and  $L_t$

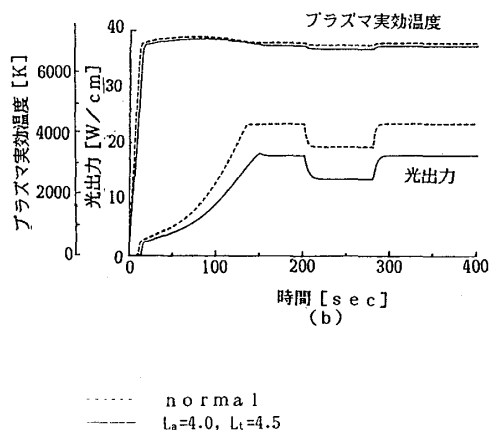
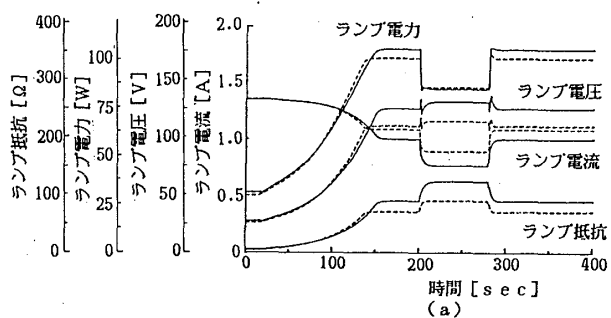


Fig.9 Effects of  $L_a$  and  $L_t$

Table 2 Effects of constants to starting time

| 定数         | 簡単な物理的意味 | 変化前 | CASE 1 | CASE 2 | CASE 3 | CASE 4 |
|------------|----------|-----|--------|--------|--------|--------|
| $D_{tin}$  | 発光管の内径   | 0.8 | 1.0    | 0.6    | —      | —      |
| $D_{tout}$ | 発光管の外形   | 1.0 | 1.2    | 1.2    | —      | —      |
| $D_{bin}$  | 外管の外形    | 5.5 | —      | —      | —      | —      |
| $D_{bout}$ | 外管の外形    | 5.7 | —      | —      | —      | —      |
| $L_a$      | 電極間距離    | 3.0 | —      | —      | 2.0    | 4.0    |
| $L_t$      | 発光管の長さ   | 3.5 | —      | —      | 2.5    | 4.5    |
| 始動時間[sec]  |          | 133 | 204    | 67     | 98     | 149    |
| 始動時間比[%]   |          | —   | 153.4  | 50.4   | 73.7   | 112.0  |

始動時間が短縮されるものと考えられる。

### 3. 4 外気温度変化

外気温度の変化が、始動時間に及ぼす影響を検討した。外気温度の初期値を20 [°C] から60 [°C]、100 [°C] に変えてシミュレーションを行った。その結果をFig.10 に示す。始動時間は20 [°C] の時128秒、60 [°C] の時84秒、100 [°C] の時58秒となった。これは外気温度を上げればランプ各部の温度の初期値が上がるため、水銀の蒸気化の速度が速くなり、ランプ抵抗も速く上昇して始動時間が短くなるものと考えられる。

### 3. 5 低温時の場合

#### 3. 5. 1 シミュレーション結果

このモデルは、外気温度が20 [°C] 以上を対象としているモデルである。しかし、始動時間が長いとされる低温時で点灯するための対策を考える一つの方法として、

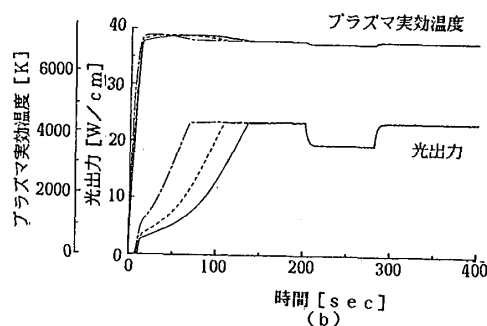
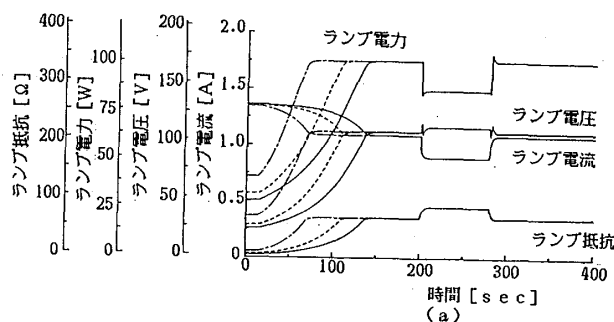


Fig.10 Effects of the ambient temperature

あえて20 [°C] 以下についてのシミュレーション計算を行った。

外気温度を20 [°C] から1 [°C] ずつ下げていった結果、外気温度が9 [°C] の時において、プラズマ実効温度と、光出力に振動が発生した。

このシミュレーション結果を、Fig.11に示す。さらに、外気温度が8 [°C] 以下においては、計算が途中で止まる。

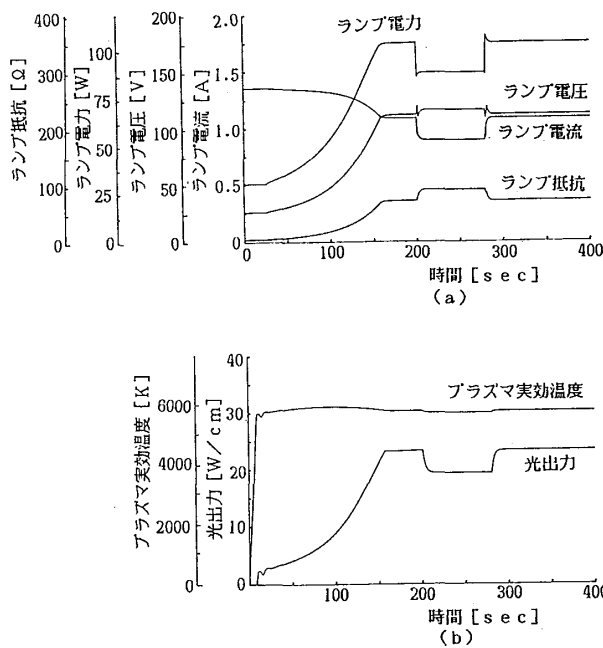


Fig.11 Simulation results before improvement

3. 5. 2 振動現象の考察

ここで、放射電力（光出力）とプラズマ実効温度の、定常状態までの計算過程と振動現象の原因について述べる。文献(4)より次式が得られる。

$$P_{Lu} = N_p G_1 \cdot \exp(-90500 / k_b \cdot T_{peff}) \quad (1)$$

$$\frac{dT_{peff}}{dt} = (P_{pu} - P_{UC} - P_{Lu}) / MSC \quad (2)$$

$P_{Lu}$ ・・・放射電力（光出力）

$N_p$ ・・・プラズマ中心部における水銀蒸気量

$G_1$ ・・・放射出力の係数

$T_{peff}$ ・・・プラズマ実効温度

$P_{pu}$ ・・・プラズマ入力電力

$P_{UC}$ ・・・熱伝達エネルギー

$MSC$ ・・・水銀蒸気量と水銀の定積比熱との積

まず、式(1)から放射電力 ( $P_{Lu}$ ) が求まる。なお、最初の計算におけるプラズマ実効温度 ( $T_{peff}$ ) は、外

気温度とする。そして、その $P_{Lu}$ を式(2)に代入することにより、 $T_{peff}$ が求まる。そして、フィードバックにより、式(2)で求めた $T_{peff}$ を式(1)に代入する。そして、 $P_{Lu}$ が求まる。この繰り返しにより、定常状態まで到達する。

この $P_{Lu}$ や $T_{peff}$ が、振動を起こしたり、計算が途中で止まる原因として、次のことが考えられる。

式(1)の、 $N_p$ や $G_1$ の係数は、外気温度が20 [°C] 以上の場合を対象として考えられている。実際の係数は、外気温度によって変化し、低温時においては、係数が低い値になると考えられる。この低温時の場合の計算実験では、20 [°C] 以上の場合と同様の値にしているため、過渡時において、式(1)で求められる $P_{Lu}$ の値が実際よりも大きくなる。よって、式(2)で求まる $T_{peff}$ の値が小さくなる。小さくなった $T_{peff}$ の値のために、フィードバックにより求められる $P_{Lu}$ の値が小さくなる。そのため、式(2)で求められる $T_{peff}$ の値は大きくなる。大きくなった $T_{peff}$ の値のために、フィードバックにより求められる $P_{Lu}$ の値が大きくなる。この繰り返しが、振動の原因であると考えられる。

3. 5. 3 改良後のシミュレーション結果

この数式モデルによる計算実験において、Fig.11の(b)の振動の原因である放射電力を、減少しないように改良を行った。すなわち、もし、放射電力の計算値が1秒前の計算値より小さければ、後者の値として計算する。その結果、外気温度が0 [°C] まで、定常状態に至らせることが可能となった。

Table 3に、改良後のモデルによる、外気温度と定常状態までの時間の関係を示す。また、Fig.12に、外気温度が20 [°C]、10 [°C]、0 [°C] の時のシミュレーション結果を示す。

Table 3 Relation of the open air temperature and time

| 外気温度[°C] | 定常状態までの時間[s] |
|----------|--------------|
| 20       | 128          |
| 10       | 154          |
| 9        | 156          |
| 8        | 158          |
| 7        | 161          |
| 6        | 163          |
| 5        | 165          |
| 4        | 170          |
| 3        | 173          |
| 2        | 175          |
| 1        | 178          |
| 0        | 180          |

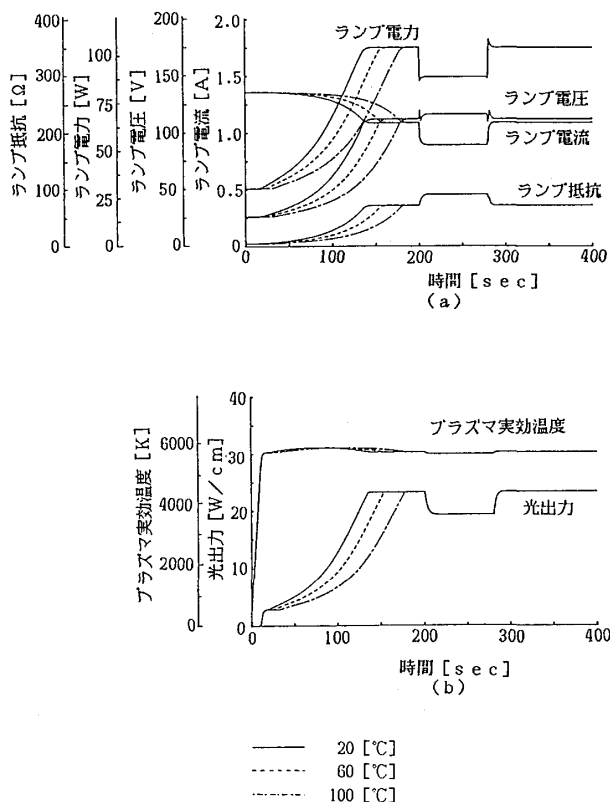


Fig.12 Simulation results after improvement

このように、計算実験において、放射電力を減少しないようにすることによって、ランプの点灯を定常状態に至らせることができた。このことより、始動時適当量の入力の追加供給、例えば発光管の加熱とか、電極への高圧パルスの重畳等が効果的であると推論される。

#### 4. あとがき

以上、プラズマの電気導電率を用いた高圧水銀ランプの数式モデルを用いて、ランプ始動期間のシミュレーションを行い、始動時間の改善について検討した。その成果を要約すれば以下の通りである。

(1) 外管内封入ガスの熱伝導率が、ランプの始動時間

の短縮に、大きな影響を与え、熱伝導率を小さくすることが始動時間の短縮に効果的であると考えられる。

- (2) ランプ発光管の外径を大きくし、発光管の肉厚を厚くすると、始動時間が短縮される。
- (3) 外気温度を上げればランプ各部の温度の初期値が上がるため、水銀の蒸気化のスピードが早くなり、ランプ抵抗も早く上昇して始動時間が短くなる。
- (4) 本数式モデルでは、外気温度を下げると、外気温度が9 [°C] において、プラズマ実効温度と、光出力が振動を起こす。また8 [°C] 以下においては、これらの振動がさらに激しくなり、計算が途中で止まる。この現象は外気温度に対応した定数決定をしていないことや、放電開始時のアルゴンガスのペニング効果を考慮した放電初期のシミュレーションを無視していることも関係していると考えられる。
- (5) 計算実験において、放射電力を減少しないようにした結果、外気温度が0 [°C] まで計算が可能となる。このことより、始動時適当量の入力の追加供給、例えば、発光管の加熱とか、電極への高圧パルスの重畳等が効果的であると推論される。

#### 参考文献

- (1) 中西、中川、姫井：状態変数方程式モデルによる高圧水銀ランプの点灯動作シミュレーション、照明学会誌、72-6 (昭63)、p.11、12、13.
- (2) 中西、戸田、井上、姫井：プラズマの電気導電率を用いた高圧水銀ランプの数式モデル、照明学会全国大会、(平2)、32.
- (3) 藤川、井上、姫井：状態変数方程式モデルによる高圧水銀ランプの点灯動作シミュレーションー外気温度が20 [°C] 以下についての考察一、電気関係学会中国支部連合大会、(平2)、52.
- (4) 井上、姫井：プラズマの電気導電率を用いた高圧水銀ランプの数式モデル、福山大学紀要 第13号.