メタルハライドランプの状態変数方程式モデルによる点灯シミュレーション

専門会員 中西宣一郎* 准員 中川龍秀*

The Simulation of Metal Halide Lamp Operation by a State Variable Equation Model

Sen-ichiro Nakanishi (Fellow Member) Tatsuhide Nakagawa (Semi Member)

(Faculty of Engineering, Okayama University)

ABSTRACT

This paper describes the simulation results of metal halide lamp operation by using the state variable equation model that based on the electrical conductivity of plasma, which model reported by authors. At first, the warm-up time of lamps are investigated by changing coefficient(s) in the equation, and the lamp shapes such as diameter of the arc tube, distance between electrodes and glass thickness of the tube. Next, the effect of initial vales of the state variables to the wram-up period are investigated on ambient temperature and preheating burning, etc. From these results, it is cleared that the rapid light standing up of metal halide lamp depend on the vaporization speed of enclosed materials, and the raising velocity of lamp temperature. And the experimental results of adjusting the lamp input power shows the possibility of shortening the warm-up time.

1. ま え が き

筆者らは先に高演色性、高効率、長寿命などの特長を持つメタルハライドランプについて、プラズマ電気導率に基礎をおいた状態変数方程式による数式モデルを発表した¹⁾。今回はそのモデルを用いたシミュレーション結果について報告するもので、特に始動時間の短縮に関して検討した結果を中心に述べる。

周知のように現在の HID ランプは多数の人々が努力を重ね、現存の材料、コスト等の制約の下で性能、価格、寿命等あらゆる観点から最適なものに作り上げられており、ランプの特性を変えることは容易ではないと考えられる。しかし、先にも述べた通り²⁾現時点で可能か不可能かはさて置き、従来の制約に捉われない自由な発想の下でランプ形状や方程式の係数パラメータを変化してシミュレーションを行い、動作特性を把握しておくことは今後屋内での一般照明用として発展が期待されるメタルハライドランプの点灯システムのために有益ではないかと考えられる。

そこで本文では、まず状態変数方程式に用いられている係数の変化がランプの始動時間へ及ぼす影響を単数と複数の場合に付いて調べた。次に、発光管内壁、電極間距離、肉厚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、始動時間に対する予熱ならびに外気温度の影響を示した。以上の結果をもとに、メタルハライドランプの始動時間に及ぼす基本的な要因を分析するとともに始動時間の改善、すなわちランプの出力を早く立ち上げる方法について検討した。最

後に、点灯回路のインピーダンスを制御することにより、ランプへの入力電力を調整して始動時間の改善を行った実験例について述べる。

2. メタルハライドランプの状態変数方程式モデル¹⁾

2.1 メタルハライドランプの状態変数

数式モデルを構築するためのメタルハライドランプの構造概念

図 1 メタルハライドランプの概念図

* 岡山大学工学部電気電子工学科

表 1 メタルハライドランプの状態変数

状 態 変 数	記 号	単 位
ランプ電流(回路電流)	I_c	A
ランプ電力	P_{lamp}	W
ランプ抵抗	R_{lamp}	Ω
プラズマの電気導電率	$\sigma(T_{peff})$	S/cm
発光管単位長当りの水銀蒸気量	$m_{Hg\text{vu}}$	mg/cm
発光管単位長当りのヨウ化ナトリウム蒸気量	$m_{NaI\text{vu}}$	mg/cm
発光管単位長当りのヨウ化トリウム蒸気量	$m_{ThI\text{vu}}$	mg/cm
発光管単位長当りのヨウ化スカンジウム蒸気量	$m_{ScI\text{vu}}$	mg/cm
電子の密度	n_e	個/cm ³
プラズマの実効温度	T_{peff}	K
プラズマ周辺部の温度	T_{pe}	K
ランプ発光管内壁温度	T_{tin}	K
ランプ発光管外壁温度	T_{tout}	K
ランプ外管内壁温度	T_{bin}	K
ランプ外管外壁温度	T_{bout}	K

表 2 供 試 ラ ン プ

メタルハライドランプ	M100(100W, 115V, 1.0A)
ランプの力率 $\cos\phi$	0.83
電極間距離 L_a	3.0cm
発光管の長さ L_t	3.5cm
ランプ発光管の内径 D_{tin}	0.8cm
ランプ発光管の外径 D_{tout}	1.0cm
ランプ外管の内径 D_{bin}	5.5cm
ランプ外管の外径 D_{bout}	5.7cm
電極の電圧降下 V_{e1}	15.0V
水銀の質量	15.89mg
ヨウ化ナトリウムの質量	4.50mg
ヨウ化トリウムの質量	0.30mg
ヨウ化スカンジウムの質量	3.00mg
ヨウ素の質量	0.48mg

図 2 点灯回路

図を図 1 に示す。メタルハライドランプの状態変数としては、ランプ電流、電力、プラズマや発光管・外管の温度、プラズマの導電率、電子密度、発光管単位長当りの水銀ならびにヨウ化物の蒸気量などを選んだ、それら 15 個の状態変数の記号と単位を表 1 に示す。なお、変数の数は微分方程式の次数から 15 個とした。

本文でシミュレーションに用いた供試ランプ M 100 の定格を表 2 に示す。また、点灯シミュレーションに用いた L バラストを持つメタルハライドランプ点灯回路の基本構成を図 2 に示す。

2.2 状態変数方程式モデル

表 3 方程式の係数とその値

係 数	記 号	単 位	値
水銀の気化定数	B_{Hg}	cm ³ ・sec ² ・K/mg	5.14×10^3
ヨウ化ナトリウムの気化定数	B_{NaI}	cm ³ ・sec ² ・K/mg	1.00×10^4
ヨウ化トリウムの気化定数	B_{ThI}	cm ³ ・sec ² ・K/mg	81.30
ヨウ化スカンジウムの気化定数	B_{ScI}	cm ³ ・sec ² ・K/mg	76.00
水銀の定積比熱	C_{vHg}	W・sec/(mg・K)	6.77×10^{-2}
ナトリウムの定積比熱	C_{vNa}	W・sec/(mg・K)	5.47×10^{-4}
トリウムの定積比熱	C_{vTh}	W・sec/(mg・K)	5.42×10^{-5}
スカンジウムの定積比熱	C_{vSc}	W・sec/(mg・K)	2.79×10^{-4}
ヨウ素の定積比熱	C_{vI}	W・sec/(mg・K)	1.00×10^{-4}
ヨウ化水銀の定積比熱	C_{vHgI}	W・sec/(mg・K)	6.60×10^{-5}
ヨウ化ナトリウムの定積比熱	C_{vNaI}	W・sec/(mg・K)	1.79×10^{-5}
ヨウ化トリウムの定積比熱	C_{vThI}	W・sec/(mg・K)	4.09×10^{-3}
ヨウ化スカンジウムの定積比熱	C_{vScI}	W・sec/(mg・K)	1.71×10^{-2}
ヨウ素の定積比熱	C_{vI2}	W・sec/(mg・K)	1.18×10^{-5}
プラズマ周辺部の比熱	C_{vp}	W・sec/(mg・K)	2.47
発光管単位長当りの比熱	C_{vt}	W・sec/(mg・K)	2.47×10^{-2}
外管ガス単位長当りの比熱	C_{vx}	W・sec/(mg・K)	0.85015
外管壁単位長当りの比熱	C_{vb}	W・sec/(mg・K)	6.54×10^{-2}
外気単位長当りの比熱	C_{va}	W・sec/(mg・K)	1.28×10^2
プラズマ周辺部の単位長当りの質量	m_{pvu}	mg/cm	7.7×10^{-4}
発光管の単位長当りの質量	m_t	mg/cm	0.77
外管ガスの単位長当りの質量	m_x	mg/cm	2.93×10^{-2}
外管の単位長当りの質量	m_b	mg/cm	5.6
外気の単位長当りの質量	m_a	mg/cm	8.08×10^{-2}
放射出力の係数	G_i	W/cm ³	1.33×10^{16}
プラズマ中心部の熱伝導率	λ_{pc}	W/(cm・K)	4.89×10^{-4}
プラズマ周辺部の熱伝導率	λ_c	W/(cm・K)	3.50×10^{-4}
発光管(石英ガラス)の熱伝導率	λ_t	W/(cm・K)	3.86×10^{-3}
外管ガス(窒素)の熱伝導率	λ_{tb}	W/(cm・K)	1.71×10^{-2}
外管(硬質ガラス)の熱伝導率	λ_b	W/(cm・K)	9.09×10^{-4}
外気(空気)の熱伝導率	λ_a	W/(cm・K)	1.06×10^{-2}
水銀の減衰率	δ_{Hg}	無次元	0.40
ヨウ化ナトリウムの減衰率	δ_{NaI}	無次元	0.80
ヨウ化トリウムの減衰率	δ_{ThI}	無次元	0.80
ヨウ化スカンジウムの減衰率	δ_{ScI}	無次元	0.90
水銀の固有角周波数	ω_{nHg}	rad/sec	0.18
ヨウ化ナトリウムの固有角周波数	ω_{nNaI}	rad/sec	0.20
ヨウ化トリウムの固有角周波数	ω_{nThI}	rad/sec	0.10
ヨウ化スカンジウムの固有角周波数	ω_{nScI}	rad/sec	0.11

メタルハライドランプのシミュレーション用モデルは上記状態変数を用いて 15 個の非線形な連立変数方程式で示される¹⁾。その方程式に現われる係数とその値の一覧を表 3 に示す。

3. 点灯動作のシミュレーション

ここでは表 2 の 100 W メタルハライドランプを対象として、状態変数方程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、ランプの始動時間が短くなる条件を求めた。ここに、「始動時間」とは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と定義した。基準とした通常の安定器による始動時間は 138.5 秒である。また、数値計算には連続系シミュレーション言語 MCSP を用いた¹⁾。

3.1 係数の変化

まず、状態変数方程式の材質等に関する係数変化がメタルハライドランプの始動時間に及ぼす影響を、単数と複数の係数について検討した。各定数の変化前後の値、始動時間、始動時間比を表 4 に示す。表中の始動時間比とは、通常の安定器による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わしたものである。また、シミュレーション計算は元の係数(表 3

表 4 ランプ各部の定数を変化させた時の始動時間

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[%]
G_i	放射係数	1.33×10^{16}	1.85×10^{15}	79.0	57.0
λ_t	発光管の熱伝導	3.86×10^{-3}	6.00×10^{-6}	66.0	47.7
λ_{tb}	外管ガスの熱伝導	1.71×10^{-2}	9.00×10^{-5}	76.5	55.2
λ_b	外管の熱伝導	9.09×10^{-4}	4.00×10^{-6}	114.0	82.3
λ_a	空気の熱伝導	1.06×10^{-2}	1.80×10^{-4}	134.0	96.8
C_{vHg}	水銀の比熱	6.77×10^{-2}	4.49×10^{-2}	129.5	93.5
C_{vt}	発光管の比熱	7.47×10^{-2}	1.35×10^{-2}	105.0	75.8
C_{vN}	外管ガスの比熱	1.85	0.44	118.5	85.6
C_{vb}	外管の比熱	6.54×10^{-2}	3.90×10^{-3}	130.5	94.2
C_{va}	空気の比熱	1.28×10^2	0.32	129.5	93.5
$\cos \phi$	ランプ力率	0.83	1.00	128.0	92.4
δ_{Hg}	水銀気化減衰係数	0.4	1.00×10^{-4}	86.5	62.5
δ_{NaI}	Na 気化減衰係数	0.8	13.9	57.0	41.2
ω_{nHg}	水銀気化速度係数	0.18	0.13	62.5	45.1
ω_{nNaI}	Na 気化速度係数	0.20	0.90	50.0	36.1

の値)に対して大きい場合と小さい場合について行い、始動時間比の小さ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。

表 4 より、 λ_i , δ_{NaI} , ω_{nHg} , ω_{nNaI} 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 λ_i に比例するため、 λ_i 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。したがって、発光管内封入物の気化量が多くなり、ランプ抵抗値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。図 3 は λ_i を小さくし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。また、係数 δ , ω は封入物の気化状態を示す係数であることから、気化速度が始動時間に大きく影響を及ぼしていることを示している。なお、時間が 240 秒(4 分)では電源電圧を 200 V から点灯可能な限界電圧の 168 V に、330 秒後には 168 V から 200 V に変化したものである。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や電源電圧が変動した時などの過渡応答

図 3 発光管の熱伝導率 λ_t を変化させたときのシミュレーション結果

特性を知ることが出来る。

3.2 幾何学的定数の変化

次に、幾何学的定数が始動時間に及ぼす影響を調べた。幾何学定数を変化させた場合の始動時間のシミュレーション結果を表 5 に示す。また、 D_{tout} を変化させた場合のシミュレーション結果を図 4 に示す。ランプ発光管の外径 D_{tout} を大きくして発光管の肉厚を厚くするか、あるいはランプ外管内径 D_{bin} 、外径 D_{bout} を変化させて外管の肉厚を厚くすれば始動時間は短くなる。これは、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、封入物の気化が促進されるためと考えられる。図 3 と比較してほぼ同様のパターンを示していることから理解できよう。しかし、経験的には発光管の肉厚の薄いほうが、発光管の熱容量が小さく、最冷部温度が早く上昇して、ウォームアップ時間が短くなると言われており、逆になっている。これは発光管の熱伝導損失と熱容量の相対関係、ならびに封入物の気化のパターンに起因して本文のような結果が得られたものと考えられる。それらのパラメータを変化させてシミュレートし、比較検討する事については別の機会に発表したい。

3.3 複数の係数変化

方程式の係数を複数同時に変化させた場合のシミュレーション結果について述べる。その計算の一部を表 6 に示す。これにより、単数で変化させた時に始動時間比が小さくなった熱伝導率や固有角周波数などの係数を組み合わせたものが特に始動時間が短

表 5 幾何学定数を変化させた時の始動時間

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[%]
D_{tin}	発光管太さ	0.8	0.947	80.5	58.1
D_{tout}	発光管肉厚	1.0	4.54	75.5	54.5
D_{bin}	外管の太さ	5.5	4.80	133.5	96.4
D_{bout}	外管の肉厚	5.7	11.9	116.0	83.8
L_a	プラズマの長さ	3.0	2.02	102.5	74.0
L_t	発光管の長さ	3.5	*1	138.5	100.0

*1 値を変化させても始動時間は変化しない。

図 4 発光管の外径 D_{tout} を変化させたときのシミュレーション結果

表 6 各係数を複数変化させた時の始動時間

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[%]
B_{Hg} λ_{pc}	水銀の気化定数 プラズマの熱伝導	5.14×10^3 4.89×10^{-4}	3.10×10^3 5.00×10^{-6}	29.0	20.9
B_{NaI} λ_c	NaIの気化定数 プラズマ周辺部の熱伝導	1.00×10^4 3.50×10^{-4}	4.37×10^4 7.00×10^{-4}	33.0	23.8
B_{NaI} λ_i	NaIの気化定数 発光管の熱伝導	1.00×10^4 3.86×10^{-3}	5.00×10^4 6.00×10^{-6}	34.0	24.5
λ_{pc} λ_c	プラズマの熱伝導 プラズマ周辺部の熱伝導	4.89×10^{-4} 3.50×10^{-4}	1.20×10^{-5} 1.50×10^{-3}	23.0	16.6
λ_{pc} ω_{nHg}	プラズマの熱伝導 水銀気化速度係数	4.89×10^{-4} 0.18	9.00×10^{-6} 0.13	28.0	20.2
λ_c δ_{NaI}	プラズマ周辺部の熱伝導 NaI気化減衰係数	3.50×10^{-4} 0.8	7.40×10^{-4} 13.9	36.0	26.0
λ_c ω_{nNaI}	プラズマ周辺部の熱伝導 NaI気化速度係数	3.50×10^{-4} 0.20	6.20×10^{-4} 0.50	34.0	24.5
λ_i ω_{nNaI}	発光管の熱伝導 NaI気化速度係数	3.86×10^{-3} 0.20	6.00×10^{-7} 0.60	34.5	24.9
λ_{pc} λ_c	プラズマの熱伝導 プラズマ周辺部の熱伝導	4.89×10^{-4} 3.50×10^{-4}	1.20×10^{-5} 1.50×10^{-3}	22.5	16.2
B_{NaI}	NaIの気化定数	1.00×10^4	4.00×10^4		
λ_{pc} λ_c	プラズマの熱伝導 プラズマ周辺部の熱伝導	4.89×10^{-4} 3.50×10^{-4}	1.20×10^{-5} 1.50×10^{-3}	22.5	16.2
δ_{NaI}	NaI気化減衰係数	0.8	5.00		
λ_{pc} λ_c ω_{nNaI}	プラズマの熱伝導 プラズマ周辺部の熱伝導 NaI気化速度係数	4.89×10^{-4} 3.50×10^{-4} 0.20	1.20×10^{-5} 1.50×10^{-3} 0.60	22.5	16.2

図 5 λ_{pc} , ω_{nHg} を同時に変化させたときのシミュレーション結果

くなっていることが分かる。プラズマ中心部とプラズマ周辺部の熱伝達率を変化させた時のシミュレーション結果を図 5 に示す。ランプ電力に着目すれば最初はフラットな変化であるが、一旦立ち上がりを始めると非常に急速な変化をすることが分かる。

図 6 外気温度の初期値を変化させたときのシミュレーション結果

3.4 周囲温度変化

次に、状態変数の初期値が始動時間に及ぼす影響を検討した。まず、外気温度の初期値を 20℃ から 60℃, 100℃ に変えてシミュレーションを行った。その結果を図 6(a)(b) に示す。始動時間は 60℃ の時 120 秒, 100℃ の時 108.5 秒となった。これは水銀ランプの場合と同様、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、封入物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ものと考えられる。

その他、シミュレーション結果によると状態変数の初期値 1 つのみを変化させても始動時間に変化はなかった。状態変数全体のバランスを取って変化させることが大切である。

図 7 ランプに予熱を与えた場合のシミュレーション結果

3.5 予熱を加えた場合

次に、ランプ始動前に予め定格より低い電圧を与えてランプ各部の温度を上げておいた場合、始動時間にどのような影響があるかについてシミュレーションを行った。現実の回路では補助電極や再点弧電圧のため、必ずしも計算通りではないが、初期値や予熱の影響を知るための基本的な様子は窺い知ることができるものと考えられる。その結果を図7(a)(b)に示す。まず、電源電圧 $E_s = 168\text{ V}$ 、 184 V を点灯回路に供給し、十分時間が経過して定常点灯状態に達した後、 $E_s = 200\text{ V}$ に変化して定格点灯とした。 $E_s = 168\text{ V}$ の時始動時間は約17秒、 $E_s = 184\text{ V}$ の時約9.5秒かかっている。これはプラズマ温度があらかじめ高くなっており封入物が完全に蒸気化しているためと考えられる。

4. 始動時間制御

4.1 始動時間の改善

以上の結果から考えてみると始動時間を改善するためには

(1) ランプ各部温度を早く立ち上げ、陽光柱温度を早く定常点灯状態の値に到達させる

(2) 封入物質の蒸気化のスピードを早くする

などが必要である。この具体的手法は以下になる。

まず、温度を早く上げるためには大きな電力を急速に注入してランプを早く加熱し、放熱を抑えるため断熱の高い材質・気体を用いればよい。即ち、保温を良くすれば良い。ただし、ランプが冷え難くなり、再始動時間が長くなる欠点も生じる。次に、封入物の気化を早くする方法としては(1)発光管の最冷点温度を速く上げる、(2)封入物質への熱伝導を速くする、等が考えられる。

以下、ランプに入る電力を制御して光を速く立ち上げる方法を実験により検討した結果について述べる。

4.2 実験回路

ランプ入力を増大する方法としては電源電圧を高くする、インピーダンスを小さくする等の方法が考えられる。ここでは、バラストのインピーダンスを変化する実験を試みた。図8にその実験回路を示す。この回路はランプ電圧を検出してフィードバックし、位相制御回路によりサイリスタの点弧角を制御して見かけの等価なインピーダンスを調整するものである。始動直後はトライアックの導通角が大きく等価インピーダンスが小さいため電流が多く流れランプ電力も大きくなる。したがって、ランプ抵抗及びプラズマ温度の上昇も速く、光出力も早く立ち上がる。ランプ電圧の上昇とともに位相角は徐々に遅れ、最後に安定に点灯する。ここに、 $L_1 = 0.218\text{ [H]}$ 、 $L_2 = 0.145\text{ [H]}$ とした。また、使用したメタルハライドランプは、M100 LE/BDである。

4.3 実験結果

位相制御回路を用いて実験を行った結果と、通常のパラストで点灯した場合の実験結果とを比較して図9に示す。破線が通常

図8 実験回路

図9 始動制御実験結果

アナライザによる定格始動特性、実線が位相制御を行った場合の始動特性である。始動直後はトライアックの導角位相角が小さいため、電流はトライアックTと L_2 を通り、コイル L_1 にはほとんど流れない。したがって、ランプ電力も大きくなり、光出力も早く立ち上がると考えられる。この方法により始動時間は約25秒短くなり、わずかであるが始動時間短縮の可能性を示している。

5. あとがき

以上、メタルハライドランプの状態変数方程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) ランプ始動時間に大きな影響を与える係数としては、封入物質の気化のパターン、外管内封入ガスの熱伝導率等であり、水銀の気化のスピードを大きくし、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。
- (2) ランプ形状では、発光管の長さ L_1 以外が始動時間の短縮に大きな影響を与える。
- (3) 外気温度の初期値の変化は始動時間の短縮に影響することが分った。それ以外の一つの初期値のみを変化させても、始動時間への影響は殆ど無かった。
- (4) 予熱点灯の場合、発光管などの温度を上げるのみならず封入物を気化しておくことが重要である。
- (5) メタルハライドランプの始動時間を短くする方法は次の通りである。
 - a) 発光管の温度を速く上げる。
 - b) プラズマ温度を速く上げる。
 - c) 封入物の気化時間を速くする。

今後の課題としては以下のような点が考えられる。

- (1) シミュレーションを行った係数変化に対する実験的確認
 - (2) 始動時間短縮のための最適な方法や制御回路の検討
- 最後に、計算、実験並びにデータ整理に協力頂いた卒研学生齋賀秀司君に感謝する。

参考文献

- (1) 中西, 中川: 状態変数方程式を用いたメタルハライドランプの数式モデル, 照学誌, 73-6 (平成1) 281
- (2) 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点灯動作のシミュレーション, 照学誌, 72-6 (昭63) 301 (受付1989年3月15日)