

HID ランププラズマの分光学的診断と 計算機シミュレーション (V)

— メタルハライドランプの計算機シミュレーション — III. スペクトル線放射強度の吸収を考慮した 計算方法と計算結果

Spectroscopic Diagnostics and Numerical Simulation of HID Lamp Plasma (V)

— Numerical Simulation of Metal Halide Lamp — III. Method for Calculation of Line Intensities with Absorption and Calculated Results

橋 口 征四郎* 久 保 寔** 橋 邦 英**
畑 瀬 和 也* 森 茂 行* 本 多 二 郎*

Seishiro Hashiguchi Makoto Kubo Kunihide Tachibana
Kazuya Hatase Shigeyuki Mori Jiro Honda

Abstract

We present a method to calculate spectral line intensities emitted from a HID lamp. The absorption of photons in the working gas was taken into account. The emission profile of the line was determined taking the collisions with mercury atoms into account. The width of the line profile increases with increasing number density of mercury atoms. The emission profile is to be calculated at each point in the discharge tube, because the number density of mercury atoms changes as a function of the position in the tube. The calculation of relative line intensities emitted from mercury, sodium and scandium atoms and scandium ions will be compared with those of the experimental values.

*照明機器カンパニー 光源製造部

**京都大学 大学院 工学研究科 電子物性工学専攻

1 はじめに

これはHIDランプの計算機シミュレーションに関する3番目の論文である。筆者たちは最初の論文¹⁾でモデリングの基礎について、2番目の論文²⁾ではHIDランプに実際に適用する方法と計算結果について述べ、放電時のランプ内の温度および各種粒子密度の空間分布を示した。しかしながら、ランプから放射される放射強度については述べなかった。ランプに投入される電力の大きな部分は光に変換されるので、光の放射エネルギーはシミュレーションに用いるエネルギー式の重要な1項として考慮されている²⁾。しかしそれは全放射エネルギーという形で表されているだけであった。この報告では個々のスペクトル線のランプ外で観測される放射強度を計算する方法を示す。

2 吸収を考慮したスペクトル線プロファイルの計算法

1本のスペクトル線を詳細に見れば光のエネルギーは有限の波長領域に広がっている。これをスペクトル線プロファイルと呼ぶ。この広がりの原因として量子力学的効果、発光原子の熱運動に基づくドップラー効果および発光原子と他の粒子の衝突が挙げられる。HIDランプでは放電時のガス圧が数気圧以上にも達するので衝突による広がりが重要となり、量子力学的効果やドップラー効果は無視できる。

図1に示すように放電管を通る1本の線を引く。放電管領域は0からLで示され、この線に沿って進む光線のLでのスペクトルプロファイル $I_{\xi}(L)$ は次の式

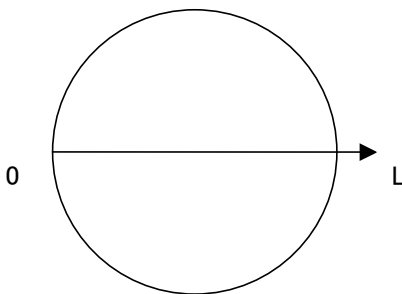


図1 放電管の中心を通る光線

Fig.1 A ray crossing the center of the discharge tube.

で表される³⁾。

$$I_{\xi}(L) = \frac{h\nu}{4\pi\tau} \int_0^L n_2(s) P_{\xi} \exp\left(-\int_s^L K(\xi, s') ds'\right) ds \quad \dots (1)$$

$$\xi = \lambda - \lambda_0, \quad K(\xi, s') = \frac{g_2 n_1(s') \lambda_0^4}{8\pi g_1 c \tau} P_{\xi}$$

ここで λ_0 は中心波長、 τ は遷移確率の逆数、 P_{ξ} は発光プロファイルと呼ばれ、広がりの原因でその形は決まる。 $K(\xi, s')$ は吸収係数で、 n_1 と n_2 は発光に関する下準位と上準位の密度である。0からの距離がsの線上の点で放射された光がLに達するまでに吸収される効果が吸収係数を含む項で表される。

(1)式はL点の単位面積から単位立体角へ単位時間に放射される波長 ξ における単位波長あたりのエネルギーを表す。1本のスペクトル線の放射パワーは(1)式を波長で積分して得られる。これを数値積分で行なうには波長領域の 10^5 程度の点で P_{ξ} と吸収係数の値が必要で、多大の計算時間を必要とする。計算時間を短縮するには次の近似式を用いる。

$$I(L) = \int_{-\infty}^{\infty} I_{\xi}(L) d\xi = \frac{g_2 h \nu}{4\pi\tau} \int_0^L n_2(s) TR(s) ds \quad \dots (2)$$

$$TR(s) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{\xi} \exp\left(-\frac{g_2 \lambda_0^4}{8\pi g_1 c \tau} \int_s^L P_{\xi} n_1(s') ds'\right) d\xi$$

ここで $TR(s)$ はTransmission factorと呼ばれる⁴⁾。この $TR(s)$ は無次元化された発光プロファイルと無次元長さ x を用いて表すと便利である。 $TR(x)$ をあらかじめ計算しておく、(2)式の計算で無次元長さを求めれば $TR(x)$ の値は用意した数値表を用いて直ちに得られる。この方法では実質的に光線に沿っての積分を行なうだけでスペクトル線強度が得られるので大幅な計算時間短縮が可能になる。しかしながら、この方法は次の点で近似的である。

- 1) 発光原子の主な衝突相手である水銀原子の密度は中心管と壁では6倍程度異なる。プロファイルの幅は水銀密度が高いほど広がる。
- 2) ある点で放出された光子の中心波長からの差はこの光子が進んでゆく途中で変化しない。
- 3) この光子が吸収される時、放出された位置より放電管の中心近くであれば相対的にプロファイルの周辺で、放電管の端に近ければプロファイルの中心近くで吸収される。

Transmission factorを用いる方法は吸収される時のプロファイルの相対的位置は発光時と同じであると仮定している。この仮定を用いないと無次元の長さ

だけで $TR(x)$ を表すことが出来ない。

良い精度を保ちながら計算時間を短縮するために、(2) 式で得られた結果を厳密な方法で得られた結果で較正することを考えた。いくつかの温度分布に対して二つの方法で計算時間をかけてスペクトル線強度を計算し、その比を数値表として保存しておく。任意の温度に対する比は、この表を用い内挿または外挿して決める。

3 計算結果

図2に計算に用いた HID ランプの放電管の形状を示す。計算領域は上下の平らな境界面 $z=0$, $z=3.2$ cm で仕切られた円筒部分である。水銀封入量は 34 mg である。この放電管は 60 Hz の交流電流で駆動され、計算との比較に用いたランプの実効ランプ電流は 2.34 A である。同じ水銀量と電流を用い、最冷点温度を 960 K として計算を行なった。文献2で述べたシミュレーションモデルを用いて収束するまで何周期も計算を繰り返した。計算で得られた温度および密度分布を用い、図1の放電管の中心を通る光線に沿って多くのスペクトル線について (2) 式の計算を行なった。水銀線 82 本、ナトリウム線 64 本、スカンジウム線 201 本およびスカンジウムイオン線 92 本を対象にした。発光プロファイルを計算するにはプロファイルの幅を決める係数のデータが必要である。強い 11 本の水銀線とナトリウムの D 線についてはこのデータが存在する⁵⁾ が、それ以外の線についてはその幅のデータ

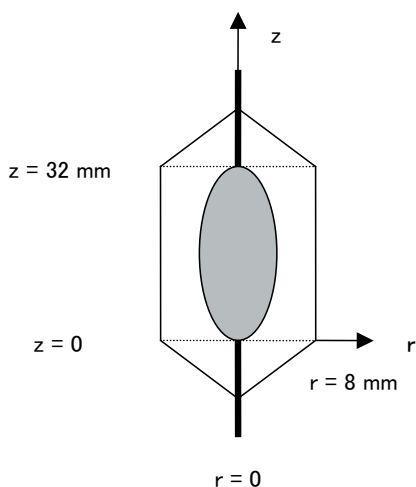


図2 放電管の形状

Fig.2 Configuration of the discharge tube.

がない。そこで、値がわかっている線幅のデータを参考にして、他の全ての線幅に関する係数を一定とした。そして (2) 式の計算を行なった。なお、546.1 nm の水銀線の幅のデータについて注意しておく。これは強い線なので文献5にその係数の値がある。これを用いて5気圧水銀ランプで計算された546.1 nmのプロファイルの幅は実験値よりかなり小さかった。別の強い水銀 435.8 nm とは励起の上準位が等しく、下準位も同じ P 状態である。それにもかかわらず、幅の係数は 435.8 nm の幅係数に比べると半分以下である。そこで、ここでは 546.1 nm の幅の係数は 435.8 nm の幅の係数に等しいと仮定した。

中心から管壁の間を 30 の格子点で分割して数値計算を行なった。正確な式を用いる計算で各格子点でプロファイルを求めた。水銀密度が異なるのでプロファイルの幅は格子点ごとに異なる。この方法で求めたスペクトル線強度を FCON, Transmission factor を用いた線強度を TR と名づける。

図3から図6に4種の粒子のスペクトル線の TR と FCON の比を示す。横軸は厳密な線強度 FCON の値である。電流がほぼ最大のときの温度・密度分布を用いた。図を見ると強度が小さい線では両者はよく一致している。弱い線では吸収が無視できるので、これは予想された結果である。線強度が大きくなると TR の方が小さくなるのが全ての種類の線について言える。また、これらの図は TR と FCON の比が線強度だけにはよらないものが存在することを示している。

線強度の計算では Transmission factor を用いる方法で計算し、図3から図6の結果を用いて補正を行なった。このために、最大電流時以外にも中心温度がほぼ 500 度異なる4つの位相の温度分布と密度分布を用いて図3から図6に相当するデータを計算で求めた。全てのスペクトル線について線強度を求めたが、ここではその一部を示す。図7に水銀原子線、スカンジウム原子線、スカンジウムイオン線、ナトリウム原子線の比較的強いものに関して、計算と実験との強度比較を水銀線 546.1 nm で規格化した相対値で示す。計算も実験も交流の1周期で平均された値で示した。水銀原子線とナトリウム原子線では実験値より大きくなる線と小さくなる線があるが、スカンジウム原子線およびスカンジウムイオン線では実験値よりすべて小さい値となった。もっとも、水銀原子線と添加物原子線あるいはイオン線の強度比は放電管内のヨウ化物が存在する最冷部位の温度にも依存するため、ここで想定した 960 K より高い可能性も考えられる。

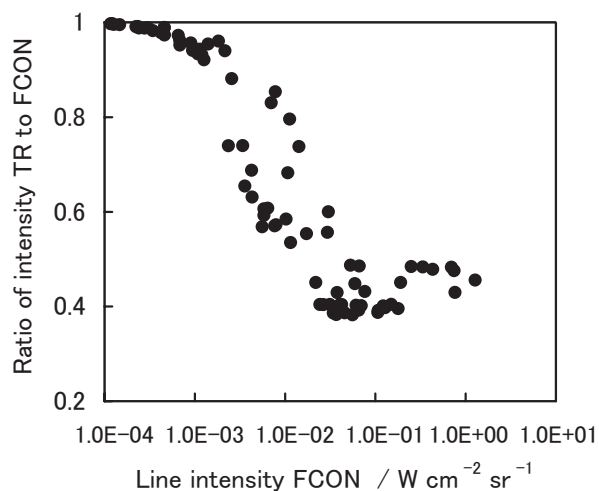


図3 Transmission factor を用いて計算した水銀原子に関する スペクトル線強度 TR と厳密な計算式による強度 FCON の比

Fig.3 Ratio of spectral intensity TR for mercury atom calculated by the method using the transmission factor to that of FCON by the exact calculation method.

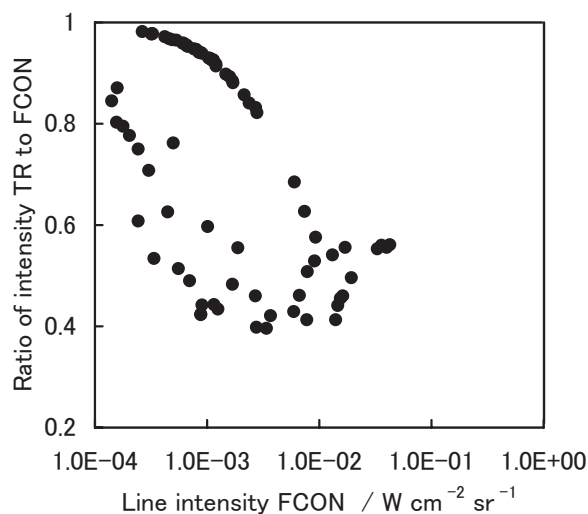


図5 Transmission factor を用いて計算したスカンジウム原子に関するスペクトル線強度 TR と厳密な式による強度 FCON の比

Fig.5 Ratio of spectral intensity TR for scandium atom calculated by the method using the transmission factor to that of FCON calculated by the exact method.

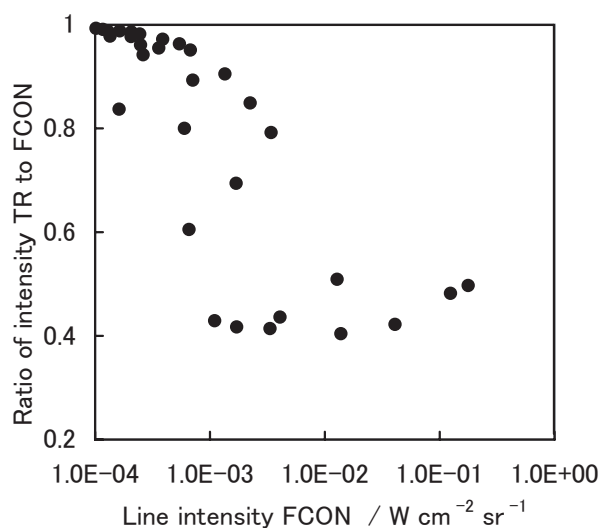


図4 Transmission factor を用いて計算したナトリウム原子に関するスペクトル線強度 TR と厳密な式による強度 FCON の比

Fig.4 Ratio of spectral intensity TR for sodium atom calculated by the method using the transmission factor to that of FCON by an exact method.

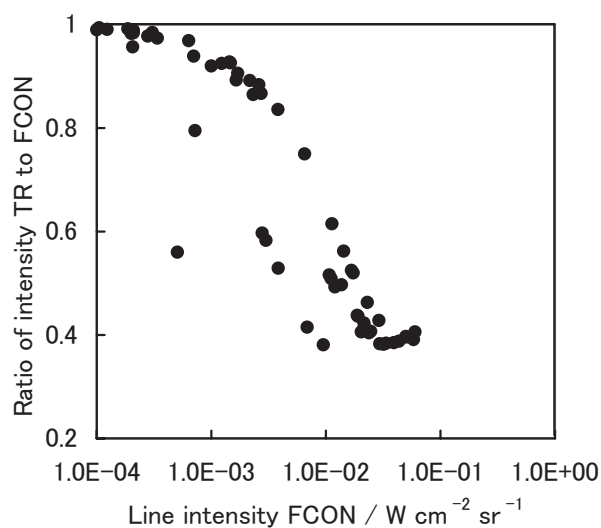


図6 Transmission factor を用いて計算したスカンジウムイオンに関するスペクトル線強度 TR と厳密な式による強度 FCON の比

Fig.6 Ratio of spectral intensity TR for scandium ion calculated by the method using the transmission factor to that of FCON by the exact method.

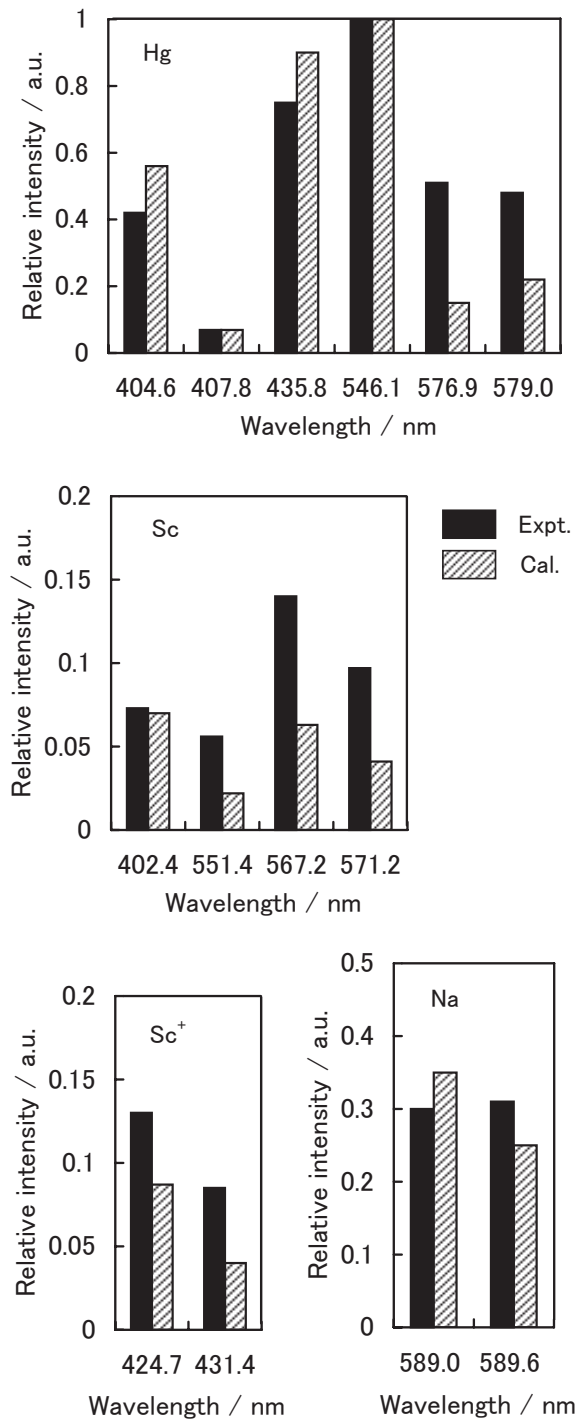


図7 スペクトル線の強度に関する計算と実験の比較

Fig.7 Comparison of calculation for line intensity with the experimental one.

4 おわりに

ランプから放射されるスペクトル線強度の計算法と結果について述べた。ここで示したのはランプの中心を通る光線に沿って観測される強度だけである。実際のランプの特性をシミュレーションで求めるためには全空間に放射される、それぞれの波長での強度を求めることが必要である。そのためには、ランプの中心を通らない光線の寄与も計算しなければならない。つまり、ランプを貫くいろいろの光線について図3から図6に相当するデータを計算で求める必要がある。そうすれば、全空間へ放射される強度を求めることが出来る。次の機会にその計算結果について報告したい。

文献

- 1) 橋口征四郎, 久保寔, 橘邦英, 畑瀬和也, 森茂行, 本多二郎, *GS News Technical Report*, **60** (2), 26 (2001).
- 2) 橋口征四郎, 久保寔, 橘邦英, 畑瀬和也, 森茂行, 本多二郎, *GS News Technical Report*, **61** (1), 21 (2002).
- 3) J. Richter, "*Plasma Diagnostics*", ed. by W. Lochte-Holtgreven, Chap.1, p53 (North-Holland, Amsterdam), (1968).
- 4) J. E. Lawler, G. J. Parker, and W. N. G. Hitchon, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **49**, 627 (1993).
- 5) H. P. Stormberg and R. Schafer, *J. Appl. Phys.*, **54**, 4338 (1983).