

気体放電パラメータ測定(17)

長谷川 博 一*・佐 藤 義 則**・村 井 国 昭***・下 妻 光 夫****

パーソナル・コンピュータによるモンテカルロシミュレーション
その1 He ガスモデル

Measurement of Gas Discharge Parameter (17) Monte Carlo Simulation with Personal Computer in Helium Gas

Hirokazu HASEGAWA and Yoshinori SATO
Kuniaki MURAI and Mitsuo SHIMOZUMA

要 旨

He ガスをモデルガスにして平等電界下でパーソナル・コンピュータを使用してモンテカルロシミュレーションを行なった。その結果 $E/p_0=40$ から 160 で電離係数および励起係数は、他の報告とは一致しなかったが、移動速度は近い値となった。

Abstract

Monte Carlo simulation are performed with a personal computer in helium gas in a uniform electric field. the ionisation and excitation coefficients can not be agreed with previous works for $E/p_0=40\sim 160$ V/cm/Torr. But drift velocities are approximated them.

1. 緒 言

放電パラメータの諸量を求めるための数値解析には、モンテカルロシミュレーション (MCS) と Boltzmann 方程式 (BE) を解く方法がある。BE は、高次の偏微分方程式を解くことになり、一般に多項近似などにより限られた条件のもとでしか解くことができない。このため、近年では統計的手法である MCS が広く使用されている。MCS は、平等電界のみならず不平等電界中や電極での電子の吸収・反射や非平衡領域の電子群などについても論ずることが可能である。しかし、MCS は、BE に比べ電算機の使用時間が長く(飛ばした電子数の平方根に比例して精度が上がる) パーソナル・コンピュータ (パソコン) には適さないと

されてきた。しかし今日その手軽さと使用時間、経費に制約がないパソコンの利点を生かした研究が各分野で盛んになってきた。筆者らは 16 ビットパソコンを使用して、MCS の解析を試みパソコンの有効性を検討するものである。使用したシステムは、本体 NEC PC-9801 E (メモリ 384 K バイト) 数値データプロセッサ (PC-9808) 付、言語 MS-DOS FORTRAN を使用した。また使用した乱数は、乗算合同法をもとにして一様性を高めた伏見乱数¹⁾を使用した。

2. 電子運動の計算

2-1 電子軌道の計算

電子の軌道の計算は、基本的には伊藤と武者²⁾の方法で行なった。さらに電離で発生する 2 次電子も追跡する Thomas ら³⁾の方法ですべての電子を追跡して計算した。シミュレーションのフローチャートを Fig. 1 に示す。生成電子の追跡プログラムを外すと伊藤らのプログラムと同様にな

* 助 手 電気工学科

** 助教授 電気工学科

*** 教 授 電気工学科

**** 北海道大学医短大学部

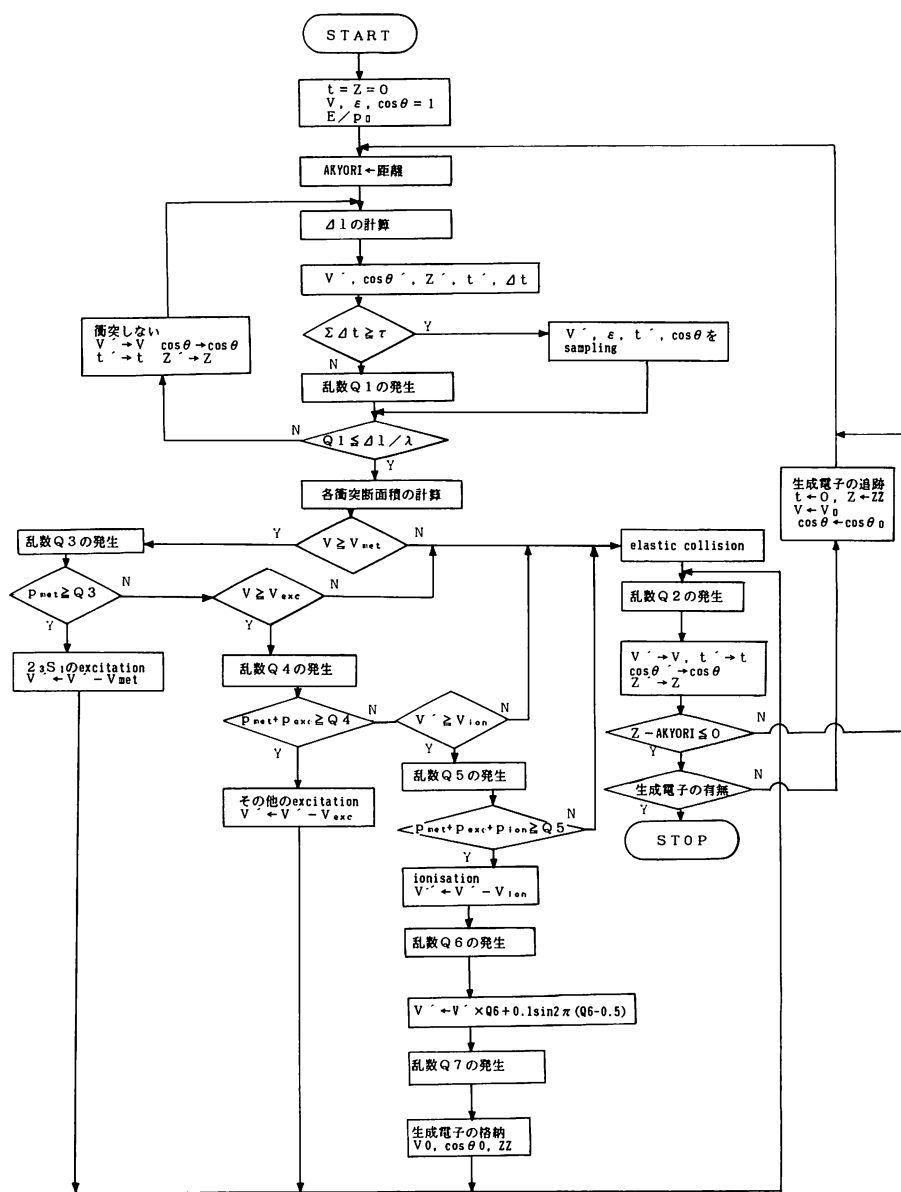


Fig. 1 シミュレーションのフローチャート

る。衝突の判定は、気体中の電子の平均自由行程を λ とすると電子が l 進むごとに

$$l = \frac{\lambda}{10} = \frac{1}{10Qm} \quad (1)$$

として行なった。ただし Qm は運動量変換断面積 He ガスの場合衝突の種類は弾性衝突と非弾性衝突（励起、電離）とに分類される。また電子の衝突後の方向は、今回は等方散乱を仮定して計算を行なった。

2-2 衝突断面積

計算に使用した各衝突断面積を Fig. 2 に示す。運動量変換断面積 Qm および各励起衝突断面積 Qex は、Rapp⁴⁾ らのデータを使用した。電離衝突断面積 Qi は、Register⁵⁾ らのデータを使用して計算した。

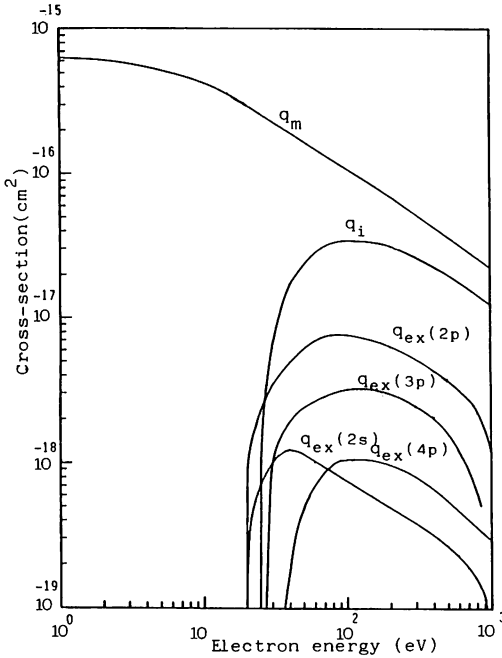


Fig. 2 Heの衝突断面積

2-3 サンプルング

パラメータのサンプルングの仕方により求める値が実験値と異なる場合がある。今回は、以下のようにサンプルングを行なった。

Fig. 3は、1個の電子が陰極から飛び出して1 cm進んだときの電子の平均エネルギーを $\bar{\epsilon}$ を $E/p_0=40, 80, 160$ についてプロットしたものである。この結果より統計変動が充分小さくなる距離を考えて電極間距離を5 cmとして計算を行なった。

a) 電離係数 α 、励起係数 α_{ex}

電離係数 α は、放電空間内で電離増倍してゆく電子の密度から決定した。すなわち、d点を通る電子個数の平均値 $\bar{n}(d)$ とすると

$$\alpha = \frac{\ln\{\bar{n}_2(d)/\bar{n}_1(d)\}}{d_2 - d_1} \quad (2)$$

同様に励起係数 α_{ex} は、累積励起回数 N_{ex} とすれば

$$\alpha_{ex} = \frac{N_{ex} \alpha}{N_0(e^{\alpha d} - 1)} \quad (3)$$

と表わすことができる。ただし N_0 : 初期電子個数

b) 移動速度Vd

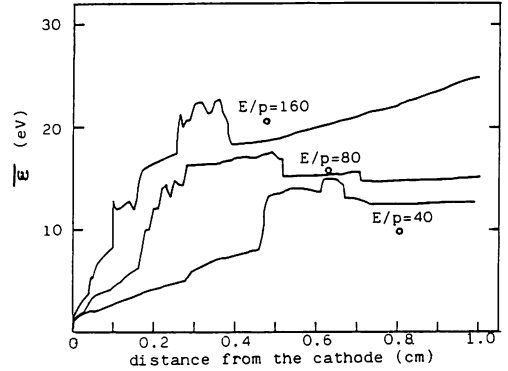


Fig. 3 電子の陰極からの距離と平均電子エネルギーの変動

陰極からの距離dのときの平均到達時間を $\bar{t}$ とすれば、N個の電子の平均移動速度Wは、

$$W = \frac{d_2 - d_1}{\bar{t}_2 - \bar{t}_1} \quad (4)$$

と表わすことができる。

c) 各衝突によるエネルギー損失

弾性衝突においては、エネルギーの損失を無視して考えた。電離については、24.5 eVの損失を考え、発生した子電子とのエネルギーの配分は、

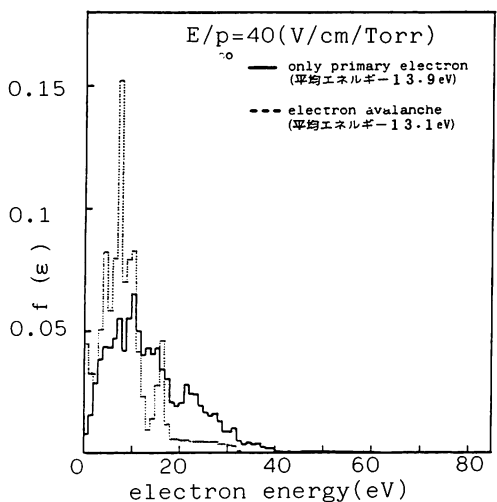
$$\epsilon' = (\epsilon - \epsilon_i)\{q + 0.1 \sin 2\pi(q - 0.5)\}$$

ただし ϵ' : 電離電子のエネルギー、 ϵ_i : 電離エネルギー、 ϵ : 入射エネルギー、 q : 一様乱数より ϵ' と $\epsilon - (\epsilon' + \epsilon_i)$ に分け、各電子を追跡した。準安定励起は、19.8 eVその他の励起については、各準位の励起エネルギーの差が小さいので平均して21.5 eVとして計算した。

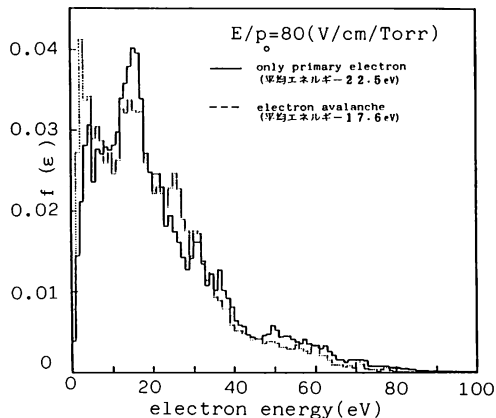
3. 解析結果

シミュレーションは、電界 $E/p_0=40 \sim 160$ で伊藤らの初期電子のみを追跡する場合とThomasらの発生電子を全部追跡する場合について算出し比較した。

Fig. 4(a)~(c)は、 $E/p_0=40, 80, 160$ における電子エネルギー分布関数である。 $E/p_0=40$ の時全電子を追跡する場合の値のバラツキが大きく平均エネルギーの値も小さくなっている。しかし E/p_0 が大きくなるとバラツキが逆に初期電子のみを追跡する場合より小さくなっている。これは初期電子に対し発生する2次電子の数が高 E/p_0 では指数的に増加し変動が少なくなるためと考えられる。

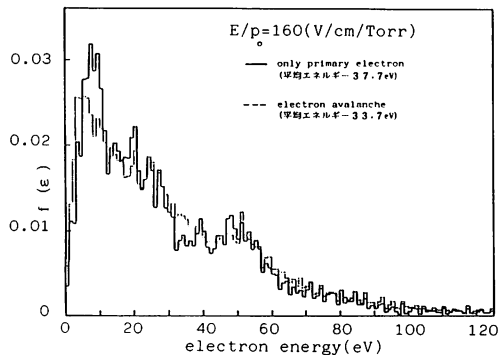


(a)



(b)

Fig. 4 電子エネルギー分布



(c)

Fig. 5は、電離係数 α の結果である。すでに報告されているBE⁶⁾の結果や実測値⁷⁻⁹⁾もプロットしてある。低 E/p_0 では、他の報告例よりも小さく、また高 E/p_0 では大きくなっている。またシミュレーションの回数が少ないためか変動した値となっている。しかし全電子を追跡する場合の方が初期電子のみを追跡する場合より、実測値に近い。

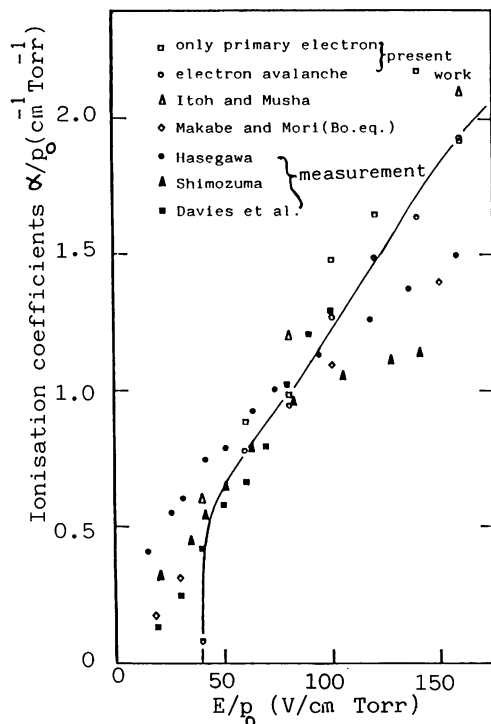
Fig. 5 H₂の電離係数

Fig. 6は、励起係数 α_{ex} の結果である。準安定励起は、両方とも大きな差はなく、伊藤らの結果と同じ桁である。その他の励起は、伊藤らと比べ小さな値になっている。

Fig. 7は、移動速度 W の結果である。初期電子のみの場合も発生電子全部の場合も大きな差はない。伊藤らの値と比べると本計算値は小さくなっている。特に高 E/p_0 になるにつれその差は大きくなっている。Phelpsらの実測値とも近い値になっている。

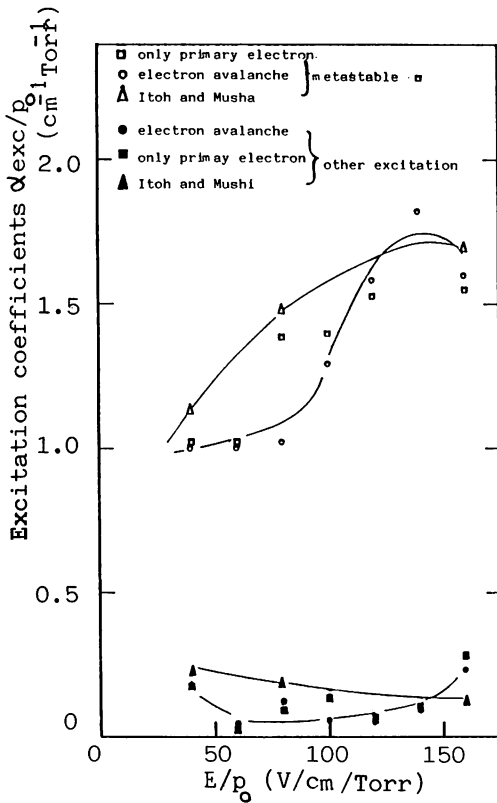


Fig. 6 H₂ の励起係数

4. 結 言

パソコンを使用して MCS シミュレーションを He ガスをモデルにして行なった。算出した各パラメータはバラツキがあり充分満足できる結果とはならなかった。第一の原因は、シミュレーションの試行回数が大型電算機に比べ少なかった。(初期電子の追跡の場合後方散乱で陰極へ戻るものを含め 100 個程度、発生 2 次電子の追跡の場合子電子、孫電子を含め 100~200 個程度で行なった。) 今後パソコンの使用アルゴリズムをも含めて改善し数 100~1000 倍程度までの電子の追跡を可能にしたいと考えている。第二の原因は、サンプリングの方法の適正化に対する検討の不足。すなわち、現在行なわれている MCS 手法は、S. S. T 法、P. T 法、T. O. F 法などで行なわれている。今回は、基本的な考え方で解析を行ない、これらの手法を考慮しなかった。今後は、これらの手法を取り入れシミュレーションを行ない実測値と一致するパソコンによる解析プログラムを開発したいと考えている。

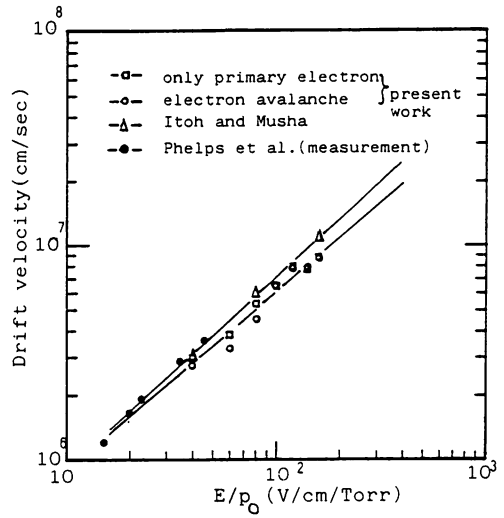


Fig. 7 移動速度

最後に本報告に御指導御助言いただきました北海道大学工学部田頭先生、同技術医短大学部酒井先生に深く謝意を表わすとともにシミュレーションの解析に協力いただいた第 14 期生(故)梶原君、第 16 期生倉本君、第 17 期生川崎君、第 18 期生蔵野君、第 19 期生枝元、佐々木君に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 伏見正則, 数学セミナー, 10, 1979.
- (2) Itoh and Musha, J. Phys. Soc. Japan, 15, No9, 1960.
- (3) Thomas and Thomas, J. Phys. B, 2, 1969.
- (4) Rapp and Englander-Golden, J. Chem. Phys, 43, 1965.
- (5) Register et al., Phys. Rev. A, 21, 1980.
- (6) 真壁・森, 電気学会放電研究資料, ED-80-2, 1980.
- (7) 長谷川・佐藤・村井・下妻, 苫小牧高専紀要, 18, 1983.
- (8) 下妻・沢田・酒井・田頭, 物理学会第 37 回年会講演集 2 a-SE-2, 1982.
- (9) Davies et al, Proc. Phys. Soc., 80, 1962.
- (10) Phelps et al, Phys. Rev., 117, 1960.
- (11) 電気学会編, 電気学会技術報告 (II 部), 140, 1982.
- (12) 田頭, 北海道大学大型論算機センターニュース, 15, 1983.

(昭和 61 年 12 月 1 日受理)

