

PDP放電シミュレータの開発

Development of PDP Discharge Simulator

皆川 登, 阿部 裕之

Noboru Minagawa, Hiroyuki Abe

要 旨 PDPのセル内部で起きている放電現象を解明し、セル構造、駆動方法などの最適設計に供するため、3次元放電シミュレータを開発した。実測では困難なセル内部の各量の時間空間変化が求められ、放電現象の理論的解明が可能になった。また、PDPとしての各種特性量(壁電圧伝達曲線、動作電圧の範囲、エネルギーバランス、紫外線効率など)を求めることも可能になった。

本シミュレータの計算結果は公知の事実や実測と良く一致し、その有効性を確認することができた。PDPのさらなる高精細化、高効率化を進めるには、有力な設計ツールになるものと期待される。

Summary We have developed a 3-D PDP discharge simulator to analyze the behavior of the discharge phenomena in a PDP cell, and to help us to design the optimum cell structures and optimum driving methods. This simulator can calculate space and time variations of many quantities in a PDP cell, which are difficult to observe experimentally. It enables us to understand the discharge phenomena in a PDP cell theoretically. This simulator can also calculate various characteristics of a PDP cell, e.g., wall voltage transfer curve, range of operating voltage, energy balance, UV efficiency, etc.

Calculation results of this simulator have matched well with the known facts and experimental results; thus we have confirmed the validity of this simulator. It will be a powerful designing tool for high definition and high efficiency PDP cells.

キーワード : PDP, 放電, シミュレーション

1. まえがき

PDPは高画質・大画面の薄型ディスプレイとして普及しているが、さらなる高精細化、高効率化を進めるには、PDPのセル内部で起きている放電現象を詳しく解明することが必要となる。しかし、微小セルの内部を実験的に観測することは容易ではなく、未だに多くの点が不明である。そこで、PDPのセル内部で起きている放電現象を解明し、セル構造、駆動方法などの最適設計に供するため、3次元放電シミュレータを開発した。ここでは放電シミュレーションの考え方と計算の一例を紹介する。

2. PDPのセル構造と動作原理

PDPのセル構造と動作原理について説明する。

2.1 セル構造

図1にPDPのセル構造を示す。前面板と背面板からなり、前面板はガラス基板上に透明電極、バス電極、ブラックストライプ、誘電体層、MgO膜を設けて作られる。透明電極は対向して配置され、その一端はバス電極に接続される。背面板はガラス基板上にアドレス電極、アドレス保護層、リブを設けて作られる。各セルはリブで区切られ、リブの内壁には蛍光体が塗布される。最後に、前面板と背面板を張り合わせ、Xe

と Ne の混合ガスを封入する。

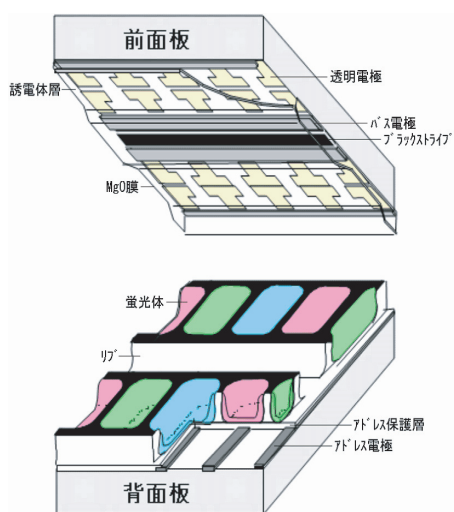


図 1 PDP のセル構造

2.2 動作原理

図 2 に PDP の動作原理を示す。同図はセルを縦に割った断面を表し、左側が背面板、右側が前面板である。前面板において、対向して配置された電極の一方を X 電極、他方を Y 電極とする。動作は、リセット放電 (全セルの初期状態を揃える)、アドレス放電 (発光させるセルを選択する)、維持放電 (選択したセルを発光させる) の順に行われる。ここでは、維持放電の動作を詳しく説明する。

(1) X 電極に正電圧を印加すると、セル空間に存在する初期電子は X 電極の方向に加速され、走行の途中でガス分子と衝突し、ガス分子を電離ま

たは励起させる。ガス分子を電離させた場合は、新たに 1 個の電子が生成される。

(2) この電子もまた X 電極の方向に加速され、走行の途中でガス分子と衝突し、ガス分子を電離または励起させる。このようにして、セル空間には多数の電子とイオンと励起粒子が生成される。電子は X 電極の方向に走行し、イオンは Y 電極の方向に走行する (図 2(a))。

(3) 励起された Xe 分子は、基底状態に戻るときに紫外線を放射する。この紫外線が蛍光体に照射されると、可視光に変換され、前面板を透過してセル外に脱出する (図 2(b))。

(4) X 電極の方向に走行した電子は、X 電極付近の誘電体層表面を負に帯電させる。また、Y 電極の方向に走行したイオンは、Y 電極付近の誘電体層表面を正に帯電させる。この帯電を「壁電荷」という (図 2(c))。

(5) これにより、印加電圧による電界 (X 電極から Y 電極の方向) と壁電荷による電界 (Y 電極から X 電極の方向) が互いに逆向きとなり、セル空間の電界は弱まる。これにより、放電は自然に (印加電圧が続いたままの状態でも) 終息する。

(6) 印加電圧の極性を反転し、Y 電極に正電圧を印加すると、電子は Y 電極の方向に走行し、前と同様に放電を開始し、やがて自然に終息する。ただし、このときの印加電圧は 1 回目の放電のときの印加電圧よりも小さくてよい。セル空間の電界は、印加電圧による電界と壁電荷による電界が同じ向き (Y 電極から X 電極の方向) とな

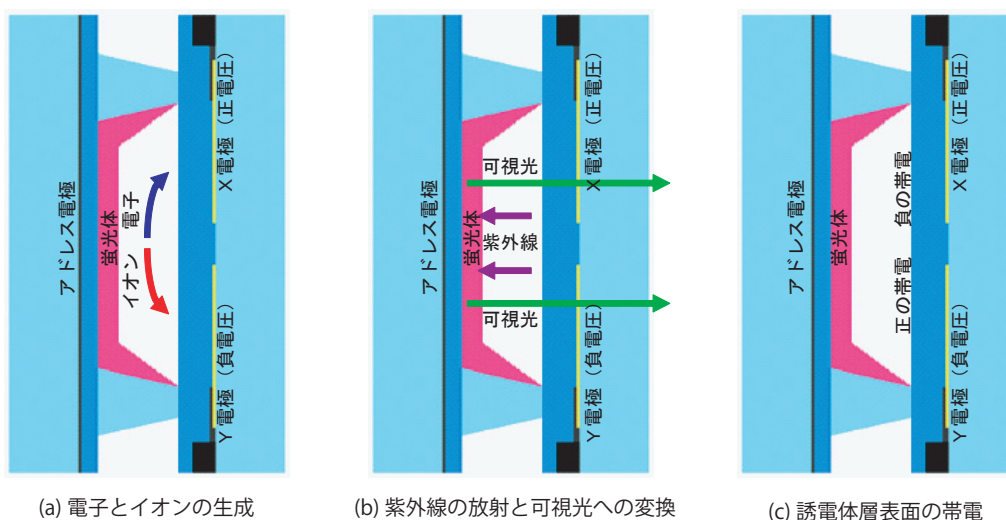


図 2 PDP の動作原理

り、セル空間の電界が強められるからである。

(7) 以下同様にして、X,Y 電極に正電圧を交互に印加していくと、そのたびに放電を開始し、やがて自然に終息する。このときの印加電圧も同様に、1 回目の放電のときの印加電圧よりも小さくてよい。

以上の動作波形を図 3 に示す。2 回目以降の印加電圧は、1 回目の印加電圧よりも小さくてよい。2 回目以降の放電の開始時間が 1 回目の放電に比べて早いのは、セル空間に存在する初期電子が多いためである。輝度は電流の絶対値にほぼ比例する。

2.3 動作電圧の範囲

図 3 において、最初の放電のときの印加電圧を V_{wr} 、2 回目以降のそれを V_{sus} とする。 V_{wr} の大小により誘電体層表面に作られる壁電荷の量が異なるため、 V_{sus} が同一値であっても、2 回目以降の放電が起きる場合と起きない場合がある。PDP による画像表示では、発光させるセルだけに V_{wr} を印加し (実際はアドレス電極を使った別の方法で行われる)、以後は全セルに同一の V_{sus} を印加する。これにより、 V_{wr} を印加し、壁電荷を作ったセルだけが発光し、画像表示が行われる。ただし、 V_{sus} がある上限値 (一般に V_f と表記) より大きい場合は、 V_{wr} の有無に関係なく 2 回目以降の放電が起き、全セルが発光してしまう。また、 V_{sus} がある下限値 (一般に V_s と表記) より小さい場合は、 V_{wr} の有無に関係なく 2 回目以降の放電が起きず、全セルが発光しない。したがって、画像表示を行うためには、 V_{sus} は V_s 以上、 V_f 以下の範囲に設定しなければならない。

3. 放電シミュレーションの計算手順

上述の動作機構を数式で記述し、プログラム化、計算機シミュレーションを行うことにより、PDP セル内部

で起きている放電現象を解明する。計算方法には、粒子モデルを用いる方法と流体モデルを用いる方法があるが、ここでは後者を用いた。粒子モデルは、電子やイオンを数万~数十万個の粒子で代表し、各粒子間の衝突をモンテカルロ法により求め、衝突後の全粒子の運動を個別に追跡する。流体モデルは、粒子を連続体で近似し、粒子密度の時間空間変化を求める。粒子モデルのほうが厳密であるが、ガス圧力が高くなると (1torr 以上) 粒子間の衝突回数が増すため、計算時間が膨大になる。流体モデルは、PDP のようにガス圧力が比較的高い場合 (数 100torr) に有効な計算方法である。

3.1 計算モデル

本シミュレータで扱う計算モデルの条件を示す。

- (1) 計算領域は直方体の 3 次元空間とし、これを直方体のメッシュで分割する。
- (2) セルを構成する物体 (誘電体層、リブ、蛍光体など) は直方体の組み合わせで表し、各直方体の対角位置とその領域を占める構成材料を指定する。
- (3) 構成材料には比誘電率を指定し、セルの内壁面を構成する材料には、二次電子放出係数も指定する。
- (4) 電極も同様に直方体の組み合わせで表し、その対角位置とそれに接続される駆動電源を指定する。
- (5) 駆動電源はその電圧波形を折れ線で表し、各点の時刻と電圧を指定する。

《粒子種》

扱う粒子種は、電子とイオン 5 種、Xe 励起原子 4 種、Xe 励起分子 3 種、Ne 励起原子 2 種、計 15 種とする。これらの詳細を表 1 に示す。紫外線は、 $Xe^*(^3P_1)$ から放射される 147nm 共鳴線、 $Xe_2^*(0_u^+)$ から放射される 150nm 分子線、 $Xe_2^*(^3\Sigma_u^+)$ と $Xe_2^*(^1\Sigma_u^+)$ から放射される 173nm 分子線、計 3 種とする。

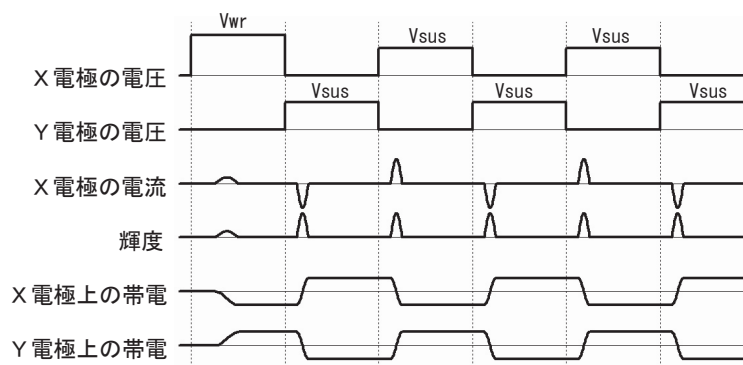


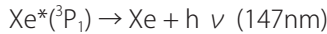
図 3 動作波形

表 1 粒子種

分類	記号	備考
電子	e ⁻	
イオン	Xe ⁺	
	Ne ⁺	
	Xe ₂ ⁺	
	Ne ₂ ⁺	
	NeXe ⁺	
Xe励起原子	Xe*(³ P ₂)	準安定準位
	Xe*(³ P ₁)	147nm共鳴線
	Xe**	6s', 6p, 5d, 7s 準位の合計
	Xe***	その他の準位の合計
Xe励起分子	Xe ₂ *(⁰ u ⁺)	150nm分子線
	Xe ₂ *(³ Σ _u ⁺)	173nm分子線
	Xe ₂ *(¹ Σ _u ⁺)	173nm分子線
Ne励起原子	Ne*(³ P ₀₋₃ P ₂)	³ P ₂ , ³ P ₀ 準位の合計
	Ne**	その他の準位の合計

《衝突反応式》

考慮に入れる衝突反応式⁽¹⁾を表2に示す。とくに、147nm 共鳴線の放射



の反応レート係数については、共鳴線の閉じ込めも考

慮に入れる。共鳴線の閉じ込めとは、単独で存在するXe*(³P₁)が約3nsの寿命で147nm紫外線を放射して基底状態に戻るのに対して、Xe混合ガス中では他のXe*(³P₁)から放射された147nm紫外線を再吸収して励起状態に戻るため、見かけの寿命が非常に大きくなる(その逆数である反応レート係数は非常に小さくなる)現象である。この現象による見かけの反応レート係数の縮小率を「共鳴線の脱出係数」という。セルの寸法が大きいほど、Xe濃度が高いほど、共鳴線の脱出係数は小さくなり、通常のセルでは0.01程度となる。本シミュレータでは、セルの寸法とXe濃度より共鳴線の脱出係数を計算する^{(2),(3),(4)}。

図4に計算手順を示す。以下、各ステップの詳細を説明する。

3.2 入力データの読み込み

以下の入力データを用意し、これらの値を読み込む。

- ・計算領域、メッシュ間隔、境界条件
- ・セルを構成する各直方体の対角位置
- ・その領域を占める構成材料
- ・構成材料の比誘電率と二次電子放出係数
- ・電極を構成する各直方体の対角位置
- ・それに接続される駆動電源

表 2 衝突反応式

衝突反応式	反応レート係数	衝突反応式	反応レート係数
直接電離 Xe + e ⁻ → Xe ⁺ + 2e ⁻ Ne + e ⁻ → Ne ⁺ + 2e ⁻	ボルツマン方程式解析による	解離再結合 Ne ₂ ⁺ + e ⁻ → Ne* + Ne Xe ₂ ⁺ + e ⁻ → Xe** + Xe NeXe ⁺ + e ⁻ → Xe** + Ne	3.7 × 10 ⁻⁸ T _e ^{-0.43} cm ³ s ⁻¹ (1) 2 × 10 ⁻⁷ T _e ^{-0.5} cm ³ s ⁻¹ (1) 8 × 10 ⁻⁸ T _e ^{-0.5} cm ³ s ⁻¹ (1)
累積電離 Xe*(³ P ₂) + e ⁻ → Xe ⁺ + 2e ⁻ Xe*(³ P ₁) + e ⁻ → Xe ⁺ + 2e ⁻ Xe** + e ⁻ → Xe ⁺ + 2e ⁻ Ne*(³ P ₀₋₃ P ₂) + e ⁻ → Ne ⁺ + 2e ⁻		ボルツマン方程式解析による	電荷転移 Ne ₂ ⁺ + Xe + Ne → Xe ⁺ + 3Ne NeXe ⁺ + Xe → Xe ₂ ⁺ + Ne NeXe ⁺ + Xe → Xe ⁺ + Ne + Xe
ペニング電離 Ne* + Xe → Ne + Xe ⁺ + e ⁻ Ne* + Xe → NeXe ⁺ + e ⁻	7.5 × 10 ⁻¹¹ cm ³ s ⁻¹ 2.3 × 10 ⁻¹¹ cm ³ s ⁻¹	励起粒子間の反応 Xe** + Ne → Xe*(³ P ₂ , ³ P ₁) + Ne Xe** + Xe → Xe*(³ P ₂ , ³ P ₁) + Xe Xe*(³ P ₁) + Ne → Xe*(³ P ₂) + Ne Xe*(³ P ₂) + Ne → Xe*(³ P ₁) + Ne Xe*(³ P ₁) + Xe → Xe*(³ P ₂) + Xe Xe*(³ P ₂) + Xe → Xe*(³ P ₁) + Xe Xe*(³ P ₁) + 2Xe → Xe ₂ *(⁰ u ⁺) + Xe Xe*(³ P ₂) + 2Xe → Xe ₂ *(³ Σ _u ⁺) + Xe Xe*(³ P ₁) + Xe + Ne → Xe ₂ *(⁰ u ⁺) + Ne Xe*(³ P ₂) + Xe + Ne → Xe ₂ *(³ Σ _u ⁺) + Ne Xe ₂ *(⁰ u ⁺) + Xe → Xe ₂ *(¹ Σ _u ⁺) + Xe	2.0 × 10 ⁻¹² cm ³ s ⁻¹ 1.0 × 10 ⁻¹⁰ cm ³ s ⁻¹ 3.11 × 10 ⁻¹⁴ cm ³ s ⁻¹ 1.62 × 10 ⁻¹⁶ cm ³ s ⁻¹ 2.18 × 10 ⁻¹⁴ cm ³ s ⁻¹ 1.26 × 10 ⁻¹⁶ cm ³ s ⁻¹ 1.55 × 10 ⁻³¹ cm ⁶ s ⁻¹ 8.53 × 10 ⁻³² cm ⁶ s ⁻¹ 4.07 × 10 ⁻³² cm ⁶ s ⁻¹ 1.35 × 10 ⁻³² cm ⁶ s ⁻¹ 2.6 × 10 ⁻¹⁰ cm ³ s ⁻¹
分子イオンの生成 Ne ⁺ + 2Ne → Ne ₂ ⁺ + Ne Ne ⁺ + Xe + Ne → NeXe ⁺ + Ne Xe ⁺ + 2Ne → NeXe ⁺ + Ne Xe ⁺ + 2Xe → Xe ₂ ⁺ + Xe Xe ⁺ + Xe + Ne → Xe ₂ ⁺ + Ne	4.4 × 10 ⁻³² cm ⁶ s ⁻¹ 1.0 × 10 ⁻³¹ cm ⁶ s ⁻¹ 1.0 × 10 ⁻³¹ cm ⁶ s ⁻¹ 2.5 × 10 ⁻³¹ cm ⁶ s ⁻¹ 1.5 × 10 ⁻³¹ cm ⁶ s ⁻¹	光放射遷移 Xe** → Xe*(³ P ₂ , ³ P ₁) + hv (823nm, 828nm) Xe*(³ P ₁) → Xe + hv (147nm) Xe ₂ *(¹ Σ _u ⁺) → 2Xe + hv (173nm) Xe ₂ *(³ Σ _u ⁺) → 2Xe + hv (173nm) Xe ₂ *(⁰ u ⁺) → 2Xe + hv (150nm)	3 × 10 ⁷ s ⁻¹ 3.3 × 10 ⁸ × g s ⁻¹ (2) 1.66 × 10 ⁸ s ⁻¹ 9 × 10 ⁶ s ⁻¹ 5 × 10 ⁸ s ⁻¹

(1) T_e は電子温度 [eV], (2) g は共鳴線の脱出係数

- ・ 駆動電源の電圧波形の各点の時刻と電圧
- ・ 計算の開始時刻, 終了時刻, 時間間隔
- ・ ガス圧力, ガス温度, Xe 濃度
- ・ 粒子密度の初期値

3.3 セル内の電位と電界の計算

セル内の電位と電界は以下によって決まる。

- ・ 電極に印加される電圧
- ・ セル内の空間電荷 (電子とイオン) の分布
- ・ 壁電荷 (セル内壁面の帯電) の分布

《ポアソン方程式》

セル内の電位 V と電界 E について次式が成り立つ。

$$\epsilon \nabla^2 V = -\rho, \quad E = -\nabla V \quad (1)$$

ここで, ϵ は誘電率, ρ は電荷密度 (空間電荷と壁電荷の和) を表す。(1) 式を差分式に書き換えると, 各メッシュ上の電位を未知数とする連立方程式となる。これを解くことにより, セル内の電位 V と電界 E が求められる。

3.4 各粒子のフラックスの計算

各粒子の移動は以下の 2 つによって起きる。

- ・ 電界によるドリフト
- ・ 密度勾配による拡散

《フラックスの式》

単位時間に単位面積を通過する粒子数をフラックスという。各粒子のフラックス J は次式で与えられる。

$$J = \pm n \mu E - D \nabla n \quad (2)$$

ここで, n は粒子密度, μ は移動度, D は拡散係数を表す。右辺第 1 項の符号は, 電子では負, イオンでは正である。励起粒子は電荷がないので, 右辺第 1 項は 0 である。

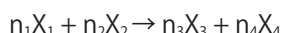
電子の移動度と拡散係数はボルツマン方程式解析⁽⁵⁾, イオンの移動度と拡散係数は参考文献 (1), 励起粒子の拡散係数は参考文献 (6) より求めた。

3.5 粒子間の衝突反応の計算

粒子間の衝突反応により, 粒子の生成または消滅が起きる。単位時間単位体積当たりの各粒子の生成量を求める。

《各粒子の生成量》

表 2 の衝突反応式を以下の一般式で表す。



反応レート係数を k とすると, 単位時間単位体積当たりの反応回数 f は次式で与えられる。

$$f = kn[X_1]^{n_1}n[X_2]^{n_2} \quad (3)$$

ここで, $n[X]$ は粒子 X の密度を表す。これより, 単位時間単位体積当たりの粒子 X_1, X_2, X_3, X_4 の生成量

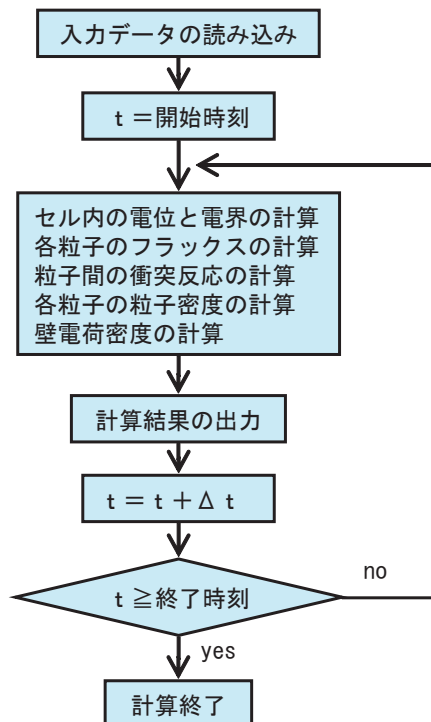


図 4 計算手順

S_1, S_2, S_3, S_4 は次式で与えられる。

$$S_1 = -n_1 f, \quad S_2 = -n_2 f, \quad S_3 = n_3 f, \quad S_4 = n_4 f \quad (4)$$

衝突反応の各式について各粒子の生成量を求め, すべての衝突反応について合計すれば, 各粒子の生成量が求められる。

《二次電子放出》

セルの内壁面にイオンおよび励起粒子が入射すると, セルの内壁面から二次電子が放出される。セルの内壁面において, 単位時間単位面積当たりの二次電子放出量 S は次式で与えられる。

$$S = \sum \gamma J_n \quad (5)$$

ここで, J_n は二次電子放出を起こす粒子 (イオンおよび励起粒子) のフラックスの壁面に入射する方向の成分, γ は二次電子放出係数, \sum は粒子種に関する和を表す。 γ の値は粒子種と壁面の材料によって決まる。

3.6 各粒子の粒子密度の計算

粒子密度の変化は以下の 2 つによって起きる。

- ・ 粒子の移動による変化
- ・ 粒子間の衝突反応による生成消滅

《連続方程式》

粒子密度の変化について次式が成り立つ。

$$\partial n / \partial t = -\nabla \cdot J + S \quad (6)$$

ここで, n は粒子密度, J はフラックス, S は単位時間単位体積当たりの生成粒子数を表す。右辺第 1 項は

粒子の移動による変化量を表し、第2項は粒子間の衝突反応による生成消滅量を表す。ただし、電子の連続方程式の場合は、二次電子放出による生成量も加える。連続方程式は粒子(電子、イオン、励起粒子)の種類数だけ存在し、それぞれ個別に解く。

《時間進展の計算》

連続方程式を解き、粒子密度を現在の値から Δt 時間後の値に更新する。現在の時刻を i 、 Δt 時間後の時刻を $i+1$ で表し、(6)式を差分式(中心差分)に書き換える。

$$(n_{i+1} - n_i) / \Delta t = - (1/2)(\nabla \cdot J_{i+} + \nabla \cdot J_{i-}) + S \quad (7)$$

時刻 $i+1$ における未知量を左辺に、時刻 i における既知量を右辺にまとめると次式になる。

$$n_{i+1} + (1/2)(\nabla \cdot J_{i+}) \Delta t = n_i + \{ - (1/2)(\nabla \cdot J_{i-}) + S \} \Delta t \quad (8)$$

この式は左辺に J_{i+} を含むので、 n_{i+1} を直接求めることはできない。(2)式をSharfetter-Gummel法⁽⁷⁾により差分式に書き換え、 J_{i+} と n_{i+1} の関係式を求め、これと(8)式との連立方程式として n_{i+1} を求めた。

《 Δt の決定》

(8)式の解は Δt を大きく取ると発散するため、次式により Δt を制限する。

$$\Delta t < \min(\tau_M, \tau_{CFL}) \quad (9)$$

$$\tau_M = \min[(\epsilon_0 / e) / (n_e \mu_e + \sum n_i \mu_i)] \quad (10)$$

$$\tau_{CFL} = \min(L / |v_e|) \quad (11)$$

ここで、 τ_M はマクスウェルの誘電緩和時間⁽¹⁾で、 n_e, μ_e は電子の粒子密度と移動度、 n_i, μ_i はイオンの粒子密度と移動度、 Σ はイオンの粒子種に関する和を表す。 τ_{CFL} は電子が1メッシュ間隔を通過するのに要する時間の最小値で、 L はメッシュ間隔、 v_e は電子の速度を表す。

3.7 壁電荷密度の計算

壁電荷は以下の2つの和で与えられる。

- ・壁面に入射する荷電粒子が運んでくる電荷
- ・壁面から放出された二次電子と同量の正電荷

それぞれ、単位時間当たりの壁電荷密度の増加量は次式で与えられる。

$$I_1 = -eJ_e + \sum eJ_i \quad (12)$$

$$I_2 = \sum e\gamma J_n \quad (13)$$

(12)式において、 J_e, J_i は電子とイオンのフラックスの壁面に入射する方向の成分、 Σ はイオンの粒子種に関する和を表す。(13)式において、 J_n は二次電子放出を起こす粒子(イオンおよび励起粒子)のフラックスの

壁面に入射する方向の成分、 γ は二次電子放出係数、 Σ は粒子種に関する和を表す。

これより、 Δt 時間内の壁電荷密度の増加量 $(I_1 + I_2) \Delta t$ を求め、これを現在の壁電荷密度に加算し、 Δt 時間後の壁電荷密度に更新する。

3.8 その他

本シミュレータに関して、その他の特記事項を示す。

(1) 電子については、粒子密度だけでなく、電子エネルギーも計算する。

- ・電子エネルギー密度

$$n_\epsilon = (3/2)n_e k_B T_e \quad (14)$$

- ・電子エネルギーのフラックス

$$J_\epsilon = (5/3)(-n_e \mu_e E - D_e \nabla n_\epsilon) \quad (15)$$

- ・電子エネルギーの連続方程式

$$\partial n_\epsilon / \partial t = -\nabla \cdot J_\epsilon + S_\epsilon \quad (16)$$

- ・電子エネルギーの生成量

$$S_\epsilon = W_L - W_E - W_I \quad (17)$$

ここで、 n_e, T_e, μ_e, D_e は電子の粒子密度、温度、移動度、拡散係数、 k_B はボルツマン定数である。 W_L は電界からのエネルギー取得、 W_E は弾性衝突によるエネルギー損失、 W_I は衝突反応によるエネルギー損失である。

(2) イオンと励起粒子の時間変化は電子に比べて緩やかであるため、時間間隔を2~5倍に間引いて計算する。

(3) 可視光出力は計算しない(未完成のため)。

4. 放電シミュレータの概要

開発した放電シミュレータの概要を示す。

4.1 プログラムの構成

図5にプログラムの構成を示す。本プログラムは、計算を行う本体プログラムのほかに、入力データの作成などを行う前処理プログラム、計算結果の処理や可視化などを行う後処理プログラムからなる。前処理プログラムと後処理プログラムはパソコン上で動作する。また、本

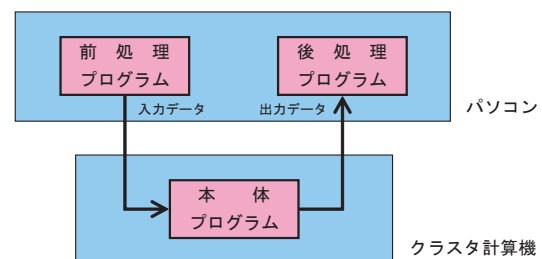


図5 プログラムの構成

体プログラムによる計算は負荷が大きいため、高性能のクラスタ計算機を導入した。各プログラムはすべて自作した。本体プログラムの言語には Fortran90 を用いた。

4.2 前処理プログラム

入力データは、Excel ファイルからなる記入様式を用意し、これに書き込んでいくようにした。前処理プログラムは、この Excel ファイルから必要な入力データを取り出し、テキストファイルに変換する。セル構造を 3D 表示で確認した後、本体プログラムに引き渡し、計算を開始する。セル構造の 3D 表示は、視点の変更とともに、構成材料毎の表示切り換え (ソリッド表示 / ワイヤ表示 / 非表示) も可能である。図 6 に表示例を示す。背面板はソリッド表示、前面板は非表示、電極はワイヤ表示とした。

4.3 本体プログラム

前処理プログラムで作成された入力データを読み

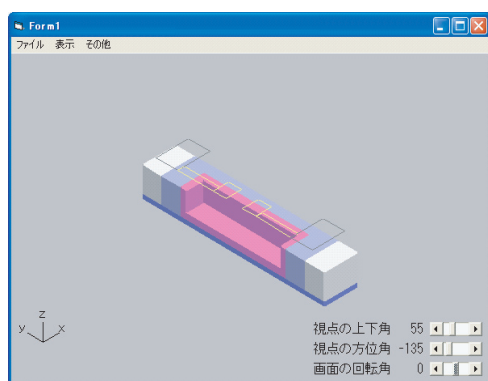


図 6 セル構造の 3D 表示

込み、放電シミュレーションの計算を実行する。出力データは、各時刻、各メッシュの電位、電子温度、粒子密度、壁電荷密度、電極の電圧電流からなる。電極の電圧電流以外の各データは 3 次元配列となるため、出力データのサイズは非常に大きくなる。このため、テキスト形式でなく、バイナリ形式で保存する。

4.4 後処理プログラム

出力データの中から所望のデータを取り出し、テキスト形式に変換して出力する。また、これを等高線図や折れ線グラフとして可視化する。等高線図は yz,xz,xy 平面上の分布として表示し、折れ線グラフは x,y,z 軸上の分布として表示する。図 7 に等高線図の表示例を示す。電圧波形と 4 つの等高線図を合わせて表示し、画面下端の水平スクロールバーをクリックすると表示時刻が変化し、データの時間変化を見ることができる。

このほかに、取り出したデータは、汎用の表計算ソフトによるデータ処理やグラフ化に使用することもできる。

5. 計算例

まず、テスト計算として対向放電の計算を行った。PDP のセル構造とは異なるが、1 次元解析となるので計算が速い。種々の放電特性を調べるには、対向放電で十分な場合が多い。以下の確認を行った。

- (1) 放電の開始から終息までの一連の動作 (電圧の印加→放電の開始 (粒子数の増加) →壁電荷の形

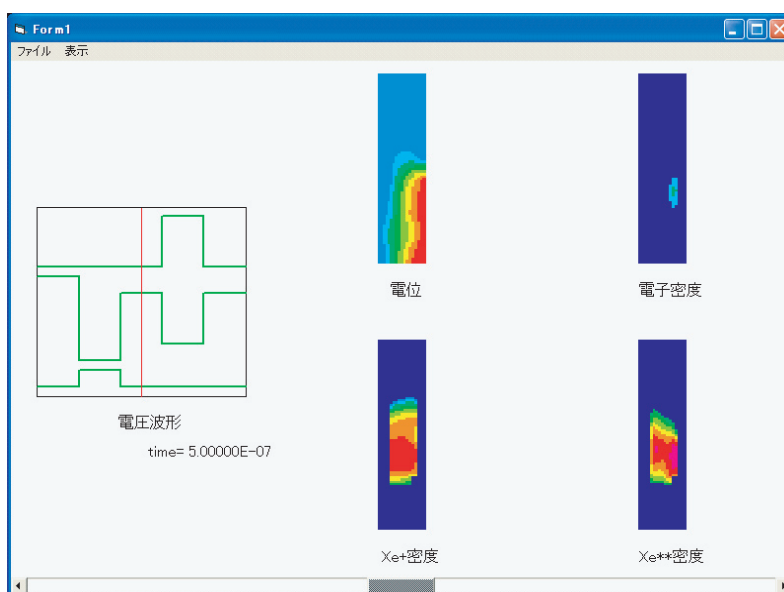


図 7 等高線図の表示例

成 (セル内の電界が弱まる) → 放電の終息 (粒子数の減少)) が正しく再現されることを確認した。
 (2)Xe 濃度と放電電圧, 紫外線効率の関係を求めた。Xe 濃度を高くすると放電電圧が高くなり, 紫外線効率が高くなった。紫外線出力は 147nm 共鳴線の比率が減少し, 150nm 分子線と 173nm 分子線の比率が増加した。

これらの結果は公知の事実や実測と良く一致し, 本シミュレータの有効性を確認することができた。つぎに, 実用計算として 50 インチ FHD セルの計算例を示す。

5.1 計算条件

図 8 にセル構造を示す。左右対称のため, 計算領域は右半分だけとした。表 3 に計算条件の詳細を示す。放電ガスは表 4 に示した 7 水準とする。

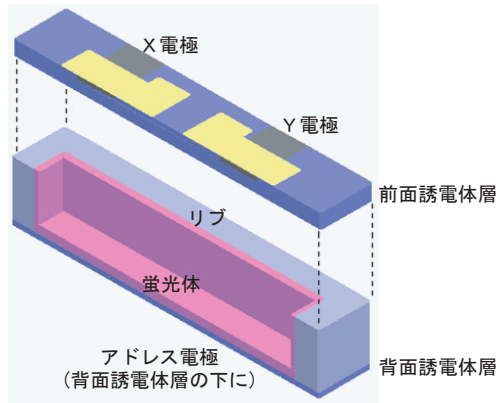


図 8 セル構造

表 3 計算条件

セル構造
画素ピッチ : 横191.6[um] × 縦574.8[um]
背面誘電体層 : 厚さ10[um], $\epsilon_r = 11.8$
リブ : 半幅41.25[um], 高さ102[um], $\epsilon_r = 9.9$
蛍光体 : 底厚15[um], 側厚7.5[um], $\epsilon_r = 5$ $\gamma_{Xe} = 0.0005$ $\gamma_{Ne} = 0.005$
前面誘電体層 : 厚さ28[um], $\epsilon_r = 7$ $\gamma_{Xe} = 0.05$ $\gamma_{Ne} = 0.5$
電極
透明電極 : 先端幅140[um], 首幅100[um], 先端奥行58[um], 放電ギャップ60[um]
金属電極 : 幅70[um], 間隔200[um], 厚さ8[um]
アドレス電極 : 半幅25[um]
放電ガス
圧力 : 227~1360[torr]
温度 : 300[K]
Xe濃度 : 5~30[%]
駆動電圧
書き込みパルス : V_{wr} , 幅5[us]
維持パルス : V_{sus} , 幅3[us] × 5発
パルスの立上り/立下り時間 : 0.05[us]
アドレス電極 : 0[V] (全期間)

ϵ_r : 比誘電率, γ_{Xe} : Xeの二次電子放出係数(イオンおよび励起粒子)
 γ_{Ne} : Neの二次電子放出係数(イオンおよび励起粒子)

表 4 放電ガスの条件

水準	Xe濃度[%]	全圧[torr]	Xe分圧[torr]	備考
1	5	700	35	全圧同じでXe分圧違い
4	15	700	105	
7	30	700	210	
8	30	227	68	Xe分圧同じで全圧違い
9	17	400	68	
10	12	567	68	
11	5	1360	68	

5.2 動作電圧

動作電圧は壁電圧伝達曲線より求める。壁電圧伝達曲線は、印加電圧 V_g と放電後の壁電圧 ΔV_w (壁電荷 ΔQ_w を電極間の静電容量 C で除した値) の関係を表す曲線で、**図 9** のような形状となる。 V_g が小さい領域では、放電が起きないから $\Delta V_w=0$ となる。また、 V_g が十分に大きい領域では、放電後のセル空間の電界 (印加電圧 V_g による電界と壁電圧 ΔV_w による電界との差) は非常に小さくなるから、 $\Delta V_w \simeq V_g$ となる。

壁電圧伝達曲線を求めるには、ステップ電圧 V_g を印加し、このときの放電電流を時間で積分して壁

電荷 ΔQ_w を求める。これを電極間の静電容量 C で除して壁電圧 ΔV_w とし、横軸に印加電圧 V_g 、縦軸に壁電圧 ΔV_w を取れば、壁電圧伝達曲線が求められる。電極間の静電容量 C の値は不明であるが、 $\Delta V_w = \Delta Q_w / C$ が成り立ち、 V_g が十分に大きい領域では $\Delta V_w \simeq V_g$ となることから、その値が求められる。

動作電圧の上限 V_f と下限 V_s は、壁電圧伝達曲線に傾き 2 の接線を引き、この接線と横軸との交点で求められる⁽²⁾。

計算結果を示す。**図 10** は壁電圧伝達曲線、**図 11** は動作電圧の範囲を示す。水準 1,4,7 の比較より、全

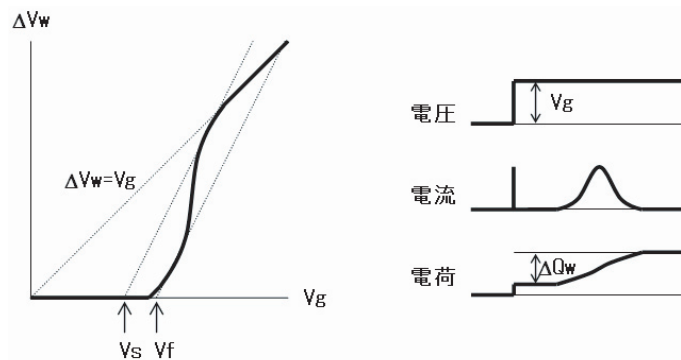


図 9 壁電圧伝達曲線

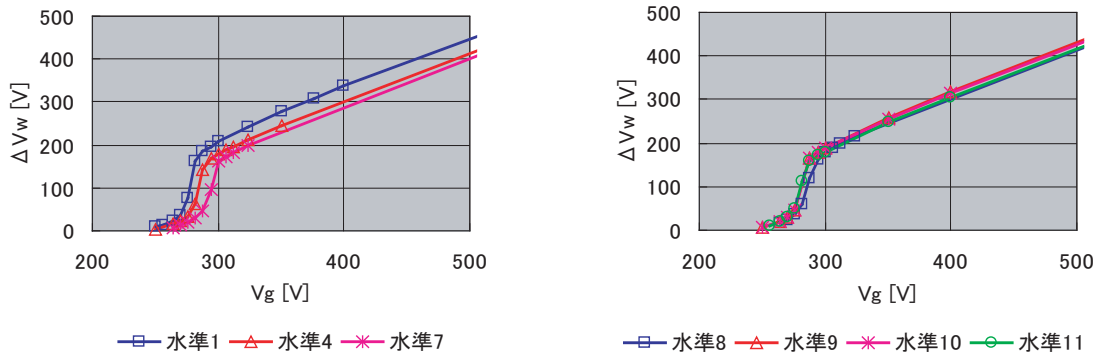


図 10 壁電圧伝達曲線

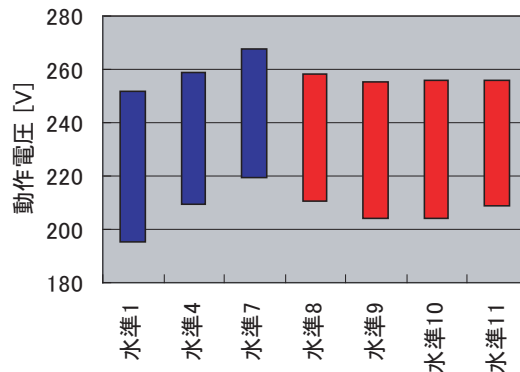


図 11 動作電圧の範囲

圧が同じならば Xe 分圧が高いほど動作電圧は高い。水準 8,9,10,11 の比較より, Xe 分圧が同じならば全圧と動作電圧との相関は小さい。

5.3 電圧電流波形

図 12 に駆動電圧波形を示す。維持パルス電圧 V_{sus} は V_s 以上, V_f 以下の範囲で決める。書き込みパルス電圧 V_{wr} は, 後続の維持パルス列に対する応答が, 最初の維持パルスで定常状態となるように決め

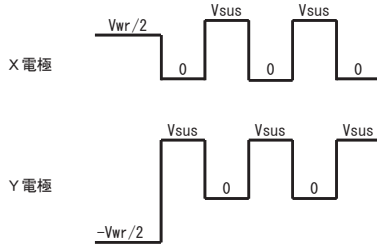


図 12 駆動電圧波形

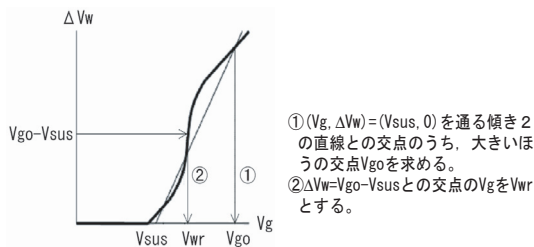


図 13 V_{wr} の決定法

る。種々の放電特性は, 何発かの維持パルスを経て定常状態に達した後, 維持パルス 1 発分の期間の応答から求めるのがふつうである。このため, できるだけ早く定常状態に達するのが望ましい。 V_{sus} が与えられたとき, これに対応する V_{wr} は壁電圧伝達曲線より求められる。これを図 13 に示す。

書き込みパルスの X,Y 電極への印加電圧は $V_{wr,0}$ でなく $\pm V_{wr}/2$ とし, 書き込みパルスによってアドレス電極 (電位は 0) で放電が起きないようにした。各パルスの立上り / 立下り時間は 0.05[us] とした。本シミュレータは所定の時間間隔 (通常は数 ns) で計算結果を出力するので, それより速い変化は正確に捕えることができない。このため, 立上り / 立下り時間はこの時間間隔に比べて十分に大きく設定する。また, 立上り / 立下り時間内に放電が始まってしまうと, 計算結果が大きく変わってしまうので, 放電開始時間より小さく設定する。

図 14 に電圧波形 (水準 4) の計算結果を示す。図 15 に電流波形 (水準 4) の計算結果を示す。ただし, グラフが重ならないように, X 電極の電圧には 300[V] を, X 電極の電流には 100[μ A] を加算して表示した。書き込みパルス電圧は $V_{wr}=287.2[V]$, 維持パルス電圧は $V_{sus}=234.2[V]$ とした。駆動電圧の極性が反転する時刻 0,5,8,11,14,17,20[us] に流れるインパルス状の電流は, 電極間の静電容量への充放電の電流で, 発光には寄与しない無効電流である。その後に流れる電流が放

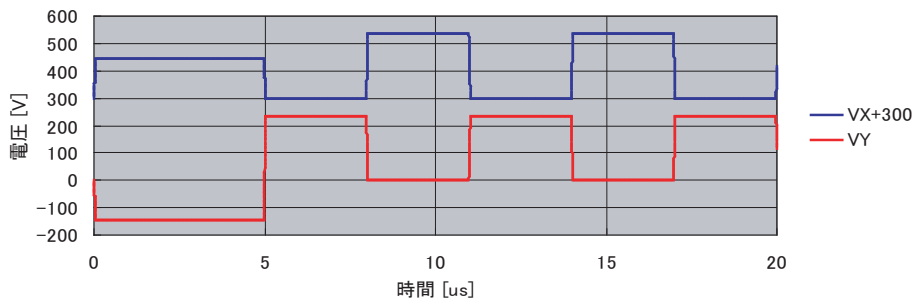


図 14 電圧波形 (水準 4)

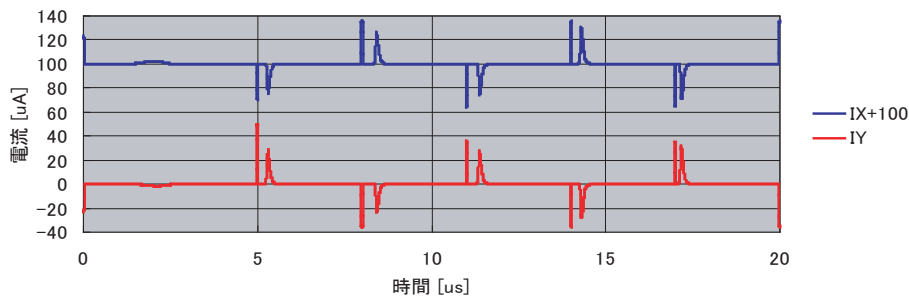


図 15 電流波形 (水準 4)

電流である。

5.4 粒子密度の時間変化

図16に最後の維持パルス期間17~20[us]における平均粒子密度の時間変化を示す。ただし、各図の横軸は最後の維持パルスの開始時刻を基準として、0~3[us]と表示した。平均粒子密度は全放電空間の平均値とした。

水準1,7の比較より、全圧が同じならばXe分圧が大きいほど各粒子の減衰速度は大きい。水準8,11の比較より、Xe分圧が同じならば全圧が小さいほど電子の減衰速度は大きい。他の粒子の減衰速度はあまり変わらない。

5.5 エネルギーバランス

エネルギーの投入量と消費量は等しくなければならない。これを「エネルギーバランス」という。図17にエネルギーバランスの内訳を示す。エネルギーバランスに

関して、下記の(1),(2),(3)が成り立つ。

- (1) 荷電粒子のエネルギー取得量(電界から受ける力×移動速度×粒子数)の合計は入力電力(電極の電圧×電流)に等しい。
- (2) 電子のエネルギー消費量(衝突1回当たりのエネルギー消費量×衝突回数)の合計は電子のエネルギー取得量に等しい。
- (3) 紫外線出力(Xe励起粒子数×放射係数×紫外線光子1個当たりのエネルギー)の合計は電子エネルギーのXe励起への消費量より小さい。

ここで、3種類の紫外線に対して、Xe励起粒子と放射係数は表5を用いる。147nm共鳴線の放射係数に含まれるgは3.1で説明した共鳴線の脱出係数で、通常はg=0.01程度である。173nm分子線は2種類の粒子 $Xe_2^*(^3\Sigma_u^+)$ と $Xe_2^*(^1\Sigma_u^+)$ の和からなる。紫外線光子1個当たりのエネルギーは、 hc/λ (h:プランク

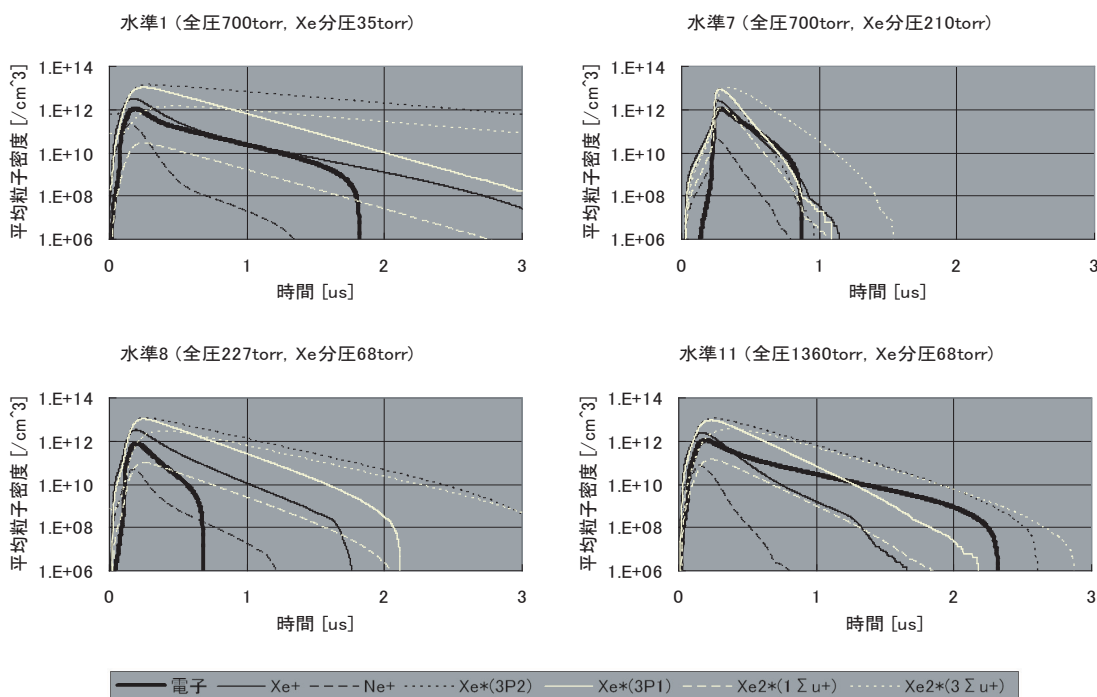


図16 平均粒子密度の時間変化

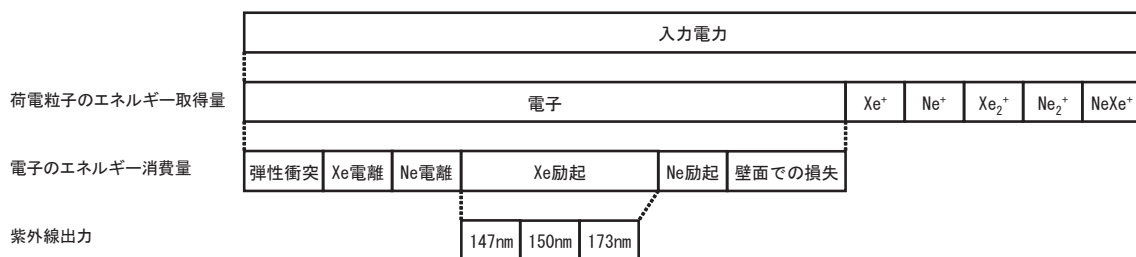


図17 エネルギーバランス

表 5 3種類の紫外線

	Xe励起粒子	放射係数
147nm共鳴線	Xe*(³ P ₁)	3.3×10 ⁸ ×g s ⁻¹
150nm分子線	Xe ₂ *(⁰ _u ⁺)	5×10 ⁸ s ⁻¹
173nm分子線	Xe ₂ *(³ Σ _u ⁺)	9×10 ⁶ s ⁻¹
	Xe ₂ *(¹ Σ _u ⁺)	1.66×10 ⁸ s ⁻¹

の定数, c:光速, λ:紫外線の波長)である。

計算結果を示す。各エネルギーは最後の維持パルス期間 17～20[us]において時間平均を取り,それを全放電空間で合計して求めた。図18は荷電粒子のエネルギー取得量を示す。Xe分圧が大きいほど,また全圧が大きいほどXe₂⁺のエネルギー取得量が増加し,Xe⁺のエネルギー取得量は減少する。電子のエネルギー取得量はあまり変わらない。エネルギーバランス(1)を確認するため,荷電粒子のエネルギー取得量の合計と入力電力の比を調べた。正しくは1となるが,1.09～1.14となった。誤差の原因は,計算結果の時間間隔が十分に小さくなかったことであると考えられる。対向放電で時間間隔を十分に小さく取った計算では,

誤差は3%以下となった。

図19は電子のエネルギー消費量を示す。Xe分圧が大きいほどXe励起へのエネルギー消費量が増加する。エネルギーバランス(2)を確認するため,電子のエネルギー消費量の合計と電子のエネルギー取得量の比を調べた。正しくは1となるが,1.04～1.08となった。同じく,対向放電で時間間隔を十分に小さく取った計算では,誤差は1%以下となった。

図20は紫外線出力を示す。Xe分圧が大きいほど147nm共鳴線は減少するが,150nm分子線と173nm分子線は増加し,紫外線の総量(3種類の合計)も増加する。エネルギーバランス(3)を確認するため,紫外線出力の合計とXe励起へのエネルギー消費量の比を調べた。0.82～0.91となった。

5.6 紫外線効率

図21に電流,入力電力,紫外線出力,紫外線効率の計算結果を示す。ただし,各量は最後の維持パルス期間17～20[us]における時間平均より求めた。維持パルス電圧Vsusは動作電圧の中央値(Vf+Vs)/2とし,各水準でVf,Vsの値は異なるため,Vsusの値も異なる。電流は5.3で説明した無効電流を差し引いた。入力電

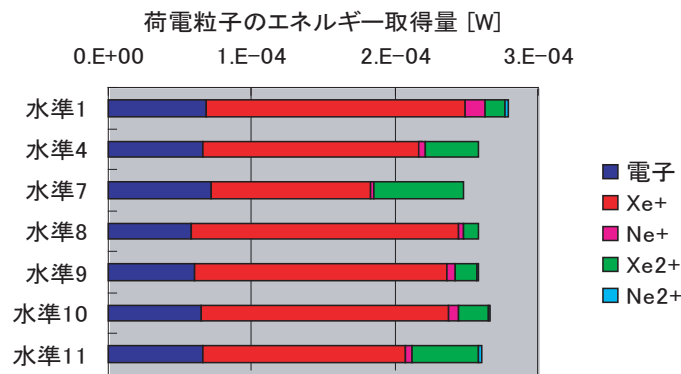


図18 荷電粒子のエネルギー取得量

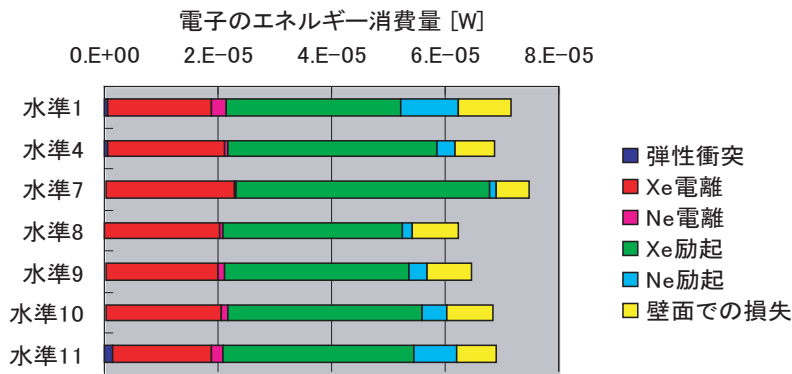


図19 電子のエネルギー消費量

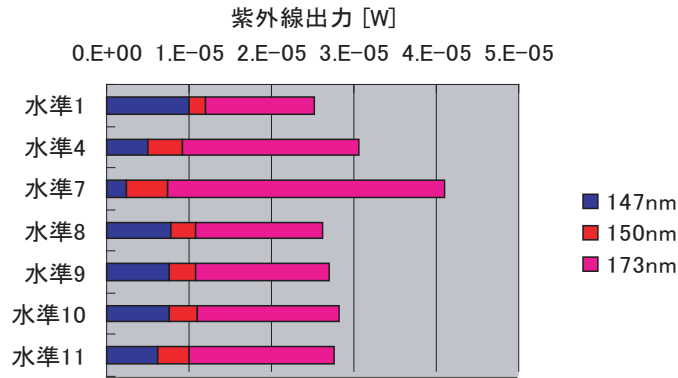


図 20 紫外線出力

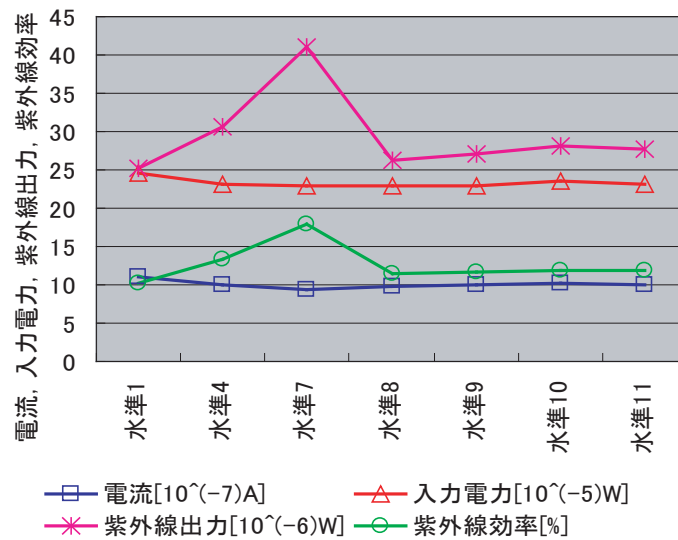


図 21 電流, 入力電力, 紫外線出力, 紫外線効率

力も無効電流による寄与分を差し引いた。紫外線出力は3種類の紫外線出力の合計とした。紫外線効率は紫外線出力と入力電力の比である。

全圧が同じならばXe分圧が高いほど紫外線効率は高い(水準1,4,7では水準7が最大)ことがわかった。Xe分圧が同じならば全圧と紫外線効率との相関は小さい(水準8,9,10,11の差は小さい)ことがわかった。

紫外線効率は下記の ρ_1 と ρ_2 の積に比例する。

$$\rho_1 = W_{\text{ele}} / W_{\text{tot}} \quad (18)$$

$$\rho_2 = W_{\text{exi}} / W_{\text{ele}} \quad (19)$$

ここで、 W_{tot} は入力電力、 W_{ele} は電子のエネルギー取得量、 W_{exi} はXe励起へのエネルギー消費量である。紫外線効率を高くするには、 ρ_1 と ρ_2 の値を大きくする条件を見つければよい。 ρ_1 については、図18より各水準の ρ_1 の値があまり変わらないので、今回の計算例の範囲内では、 ρ_1 の値を大きくする条件は見つからなかった。ただし、今回の計算例とは別に、二

次電子放出係数を変えた計算によると、 ρ_1 の値を大きくするには二次電子放出係数を大きくするのが有効である。 ρ_2 については、図19よりXe分圧を大きくするのが有効である。

6. まとめ

PDPのセル内部で起きている放電現象を解明し、セル構造、駆動方法などの最適設計に供するため、3次元放電シミュレータを開発した。実測では困難なセル内部の各量の時間空間変化が求められ、放電現象の理論的解明が可能になった。また、PDPとしての各種特性量(壁電圧伝達曲線、動作電圧の範囲、エネルギーバランス、紫外線効率など)を求めることも可能になった。

本シミュレータの計算結果は公知の事実や実測と良く一致し、その有効性を確認することができた。PDPのさらなる高精細化、高効率化を進めるには、有力な設計ツールになるものと期待される。

参 考 文 献

- (1) J.Meunier, Ph.Belenguer, and J.P.Boeuf, "Numerical model of an ac plasma display panel cell in neon-xenon mixtures," J. Appl. Phys., vol.78, no.2, pp.731-745, 1995
- (2) 内田龍男, 内池平樹, "フラットパネルディスプレイ大辞典," 工業調査会, 2001
- (3) T.Holstein, "Imprisonment of Resonance Radiation in Gases," Phys. Rev., vol.72, no.12, pp.1212-1233, 1947
- (4) T.Holstein, "Imprisonment of Resonance Radiation in Gases. II," Phys. Rev., vol.83, no.6, pp.1159-1168, 1951
- (5) G.J.M.Hagelaar and L.C.Pitchford, "Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models," Plasma Sources Sci. Technol. 14, pp.722-733, 2005
- (6) J.S.Chang, R.M.Hobson, 市川幸美, 金田輝夫, "電離気体の原子・分子過程," 東京電機大学出版局, pp.262-287, 1982
- (7) D.L.Sharfetter and H.K.Gummel, "Large-Signal Analysis of a Silicon Read Diode Oscillator," IEEE Trans. Electron Devices ED-16, pp.64-77, 1969

筆 者 紹 介

- 皆 川 登 (みながわ のぼる)
技術開発本部 PDP開発センター
- 阿 部 裕 之 (あべ ひろゆき)
技術開発本部 PDP開発センター