

# プラズマディスプレイパネルの計算機支援設計の研究

橘 邦英

京都工芸繊維大学 工芸学部

電子情報工学科 教授

## 1. はじめに

来るべきハイビジョン放送時代の家庭用大型高精細TV受像機として、プラズマディスプレイパネル(PDP)に対する早期実用化の期待が高まっている。しかし、工業化に至るまでには、発光効率や輝度の改善、動作寿命の向上などの大きな問題が残されている<sup>1)</sup>。本課題では放電物理の立場から、PDPの単一セルの放電特性や発光特性を模擬できる実際的なシミュレータを開発し、計算機支援設計(CAD)によってセルの構造や動作条件の最適化の方向を探ることを目的として研究を進めた。

カラー表示用のPDPでは、放電プラズマからの紫外線によって蛍光体を励起し、赤緑青の可視光に変換している。従って、放電で紫外線を発生する過程の効率を高める必要がある。そこで種々の素過程、すなわち、電子と原子や分子の衝突による励起や電離、電子とイオンの再結合、励起原子の発光などを考慮して、電子やイオン、励起原子・分子の密度に関する連続の式から成る放電プラズマモデルを構築した。そのモデルを外部回路方程式と組み合わせて、与えられた動作条件や境界条件で解くことによって、放電特性や発光特性のシミュレーションを行った。また、簡単な模擬放電セルを用いた実験との比較によって、計算技法や用いた基礎定数の改良を行って、モデルの現実性を高めるべく努力を重ねている。

## 2. 放電における基礎過程と速度定数

PDPの動作ガスの代表例として、図1にHe-Xe混合ガス系の放電現象に関わる衝突や放射過程の主要なものを示す。セルの寸法が数100 $\mu\text{m}$ と小さいので、放電開始電圧を下げるために動作ガス圧が数100hPaと高い値に設定され、分子の励起状態やイオンも生成される。放電プラズマ中では電子の衝突による電離や励起が主要な役割を担うが、集団としての電子はエネルギー分布(EEDF)をもち、その分布は場所や時間とともに変動している。種々の弾性、非弾性の電子衝突断面積のデータを用いてBoltzmann方程式を解くことによって、換算電界 $E/N$ ( $E$ は電界、 $N$ はガス密度)の関数としてEEDFを求め、電離・励起係数、移動速度、拡散定数などのスウォームパラメータを計算できる。一方、電子移動管を用いた実験との比較により、その計算結果の妥当性を評価し、衝突断面積を改良して最適なセットを得ることができた<sup>2)</sup>。また、原子や分子同士の衝突による励起移乗やペニング電離などの速度定数については、既報の文献から必要なデータを集積した<sup>3)</sup>。

## 3. 局所電界近似による1次元連続流体モデル

最初に連続流体モデルによる1次元のシミュレーションを試みた<sup>1) 5)</sup>。基本的には粒子密度に関する連続の式を用い、電子や図1に示した各種のイオンや励起状態原子、分子を独立の粒子として取り扱った。連続の式は次のように表される。

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_i}{\partial x} = G_i(x, t) - L_i(x, t) \quad (1)$$

$$\Phi_i = v_i n_i - \frac{\partial(D_i n_i)}{\partial x} \quad (2)$$

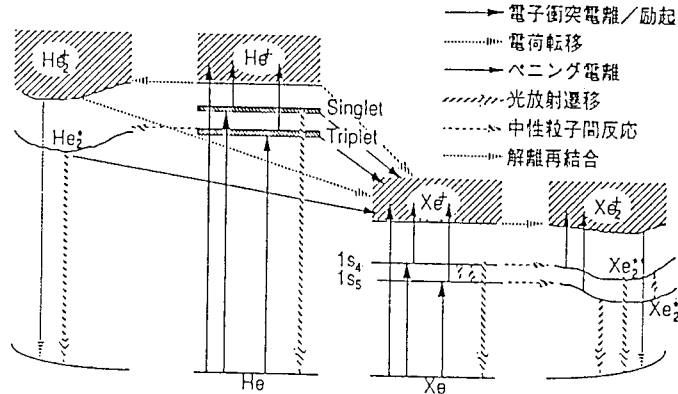


図1 He-Xe混合ガス系における電子、原子、分子の衝突・放射過程の概略

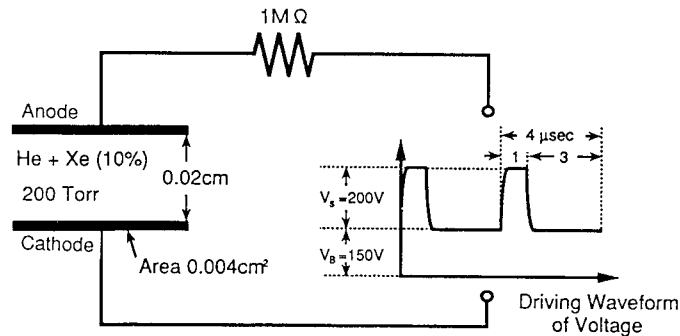


図2 1次元放電セルモデルと駆動電圧波形

ここで、 $n_i$ 、 $\Phi_i$ 、 $v_i$ 、 $D_i$ はそれぞれ粒子  $i$  の密度、フラックス、移動速度、拡散定数であり、 $G_i$ 、 $L_i$ はその粒子の生成および消滅項を表す。147nm共鳴線の発光過程に対してはHolsteinの式に基づいて光の閉じ込めを考慮した<sup>6)</sup>。また、 $v_i$ や $D_i$ 並びに電子衝突による電離係数や励起係数は、その場の電界だけで決まり近傍の電界には影響されないと仮定した(局所電界近似)。一方、電位や電界はPoissonの式に従って、イオンと電子の密度差で与えられる空間電荷から求める。電位の境界条件は外部回路方程式と連動して電極間電圧から与えられる。

各種粒子に関する連続の式の連立微分方程式の数値計算の方法としては、拡散と移動の両項を含む場合に有効なScharfetter-Gummelの差分法を採用した<sup>7)</sup>。モデル計算に用いたセルの構造や印加電圧波形などは図2に示す。 $V_s$ は維持電圧でパルス幅を $1 \mu s$ 、周期を $4 \mu s$ とした。 $V_R$ は直流バイアス電圧であり、電流制限抵抗の値は $1 M\Omega$ とした。

結果の一例として、全ガス圧260hPa、Xe混合比10%、 $V_s=150V$ 、 $V_B=150V$ の場合における電界強度 $E$ 、電子密度 $n_e$ 、イオン密度 $n_i$ ならびに147nm線発光の上順位Xe( $1s_4$ )密度、順安定のXe( $1s_5$ )密度、173nmバンド発光の上準位Xe $_2^*$ の時間・空間変化の様子を図3に示す<sup>5)</sup>。放電の立ち上がりとともに電界は陰極前面で大きく陽極に向かって減少していくが、高電界の領域が広く展開しており、その範囲では大きな空間電荷が存在し、電子が少なくイオンが多い陰極シース領域を形成していることを示唆している。Xe( $1s_4$ )準位の密度は電子エネルギー分布関数EEDFと $n_e$ の空間分布の兼ねあいから、陰極シース端付近でピークをもつが、光の再吸収による閉じ込め効果によって、時間的空間的に比較的緩やかな変化をする。Xe( $1s_5$ )準位は準安定状態であるため、衝突によって消滅するまでの寿命がさらに長く時間的な変化がほとんどなく、拡散によって空間的にも広がっている。そのためXe( $1s_5$ )と基底状態Xe原子の3体衝突で生成されるXe $_2^*$ も同様の変化をする。

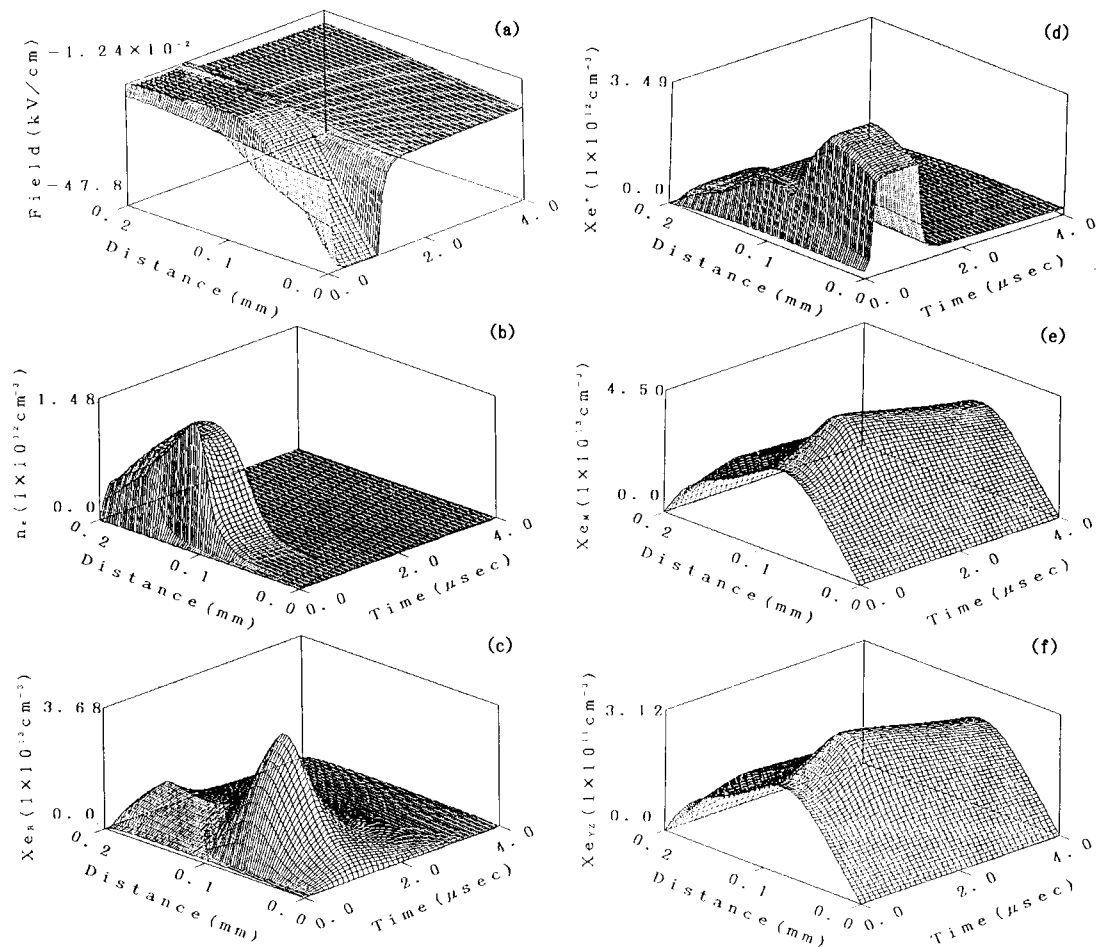


図3 1次元の局所電界近似モデルで計算された(a)電界強度、(b)電子密度、(c)Xe $^+$ イオン密度、(d)Xe( $1s_4$ )密度、(e)Xe( $1s_5$ )密度、(f)Xe $_2^*$ 密度の時間・空間変化

#### 4. 模擬放電セルにおける測定との比較

上述のシミュレーション結果と比較するために、電圧、電流波形などの簡単に計測できる量のみならず、Xe原子の147nm発光や、Xe<sub>2</sub>分子の173nmバンドの発光スペクトルの強度や波形を、Xe混合比や印加電圧をパラメータとして測定した<sup>8)</sup>。真空紫外光の測定は、前面をサファイヤガラスとした特別のパネルを製作し、分光器に入射スリットのフランジにO-リングを介して密着させた。測定された電極間電圧 $V_g$ や電流 $I_d$ 、147nm発光の波形の例を、シミュレーション結果と比較して図4に示す。実験と計算の結果は波形の特徴のみならず、定量的にもますますの一致を示している。

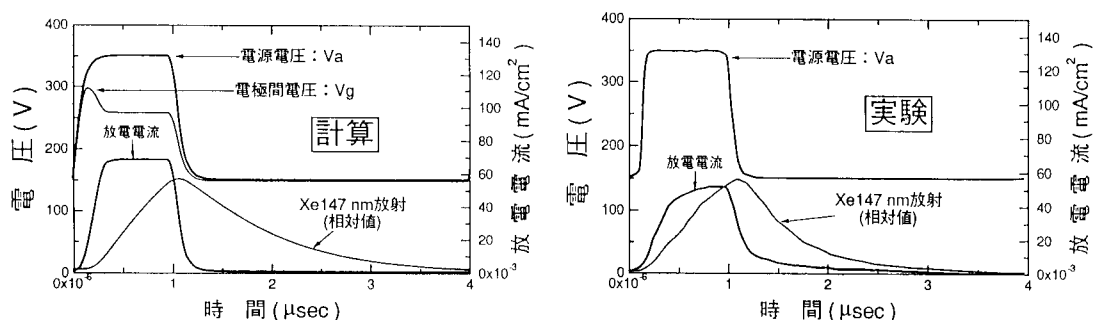


図4 電極間電圧、放電電流、147nm線発光波形の計算値と実験値の比較  
( $V_s=200V$ 、 $V_B=150V$ 、全ガス圧260hPa、Xe10%)

全印加電圧( $V_s + V_B$ )を350Vで一定とし、 $V_B$ を変化させたときの147nm線の発光強度の相対変化の様子を計算値と比較して図5に示すが、両者の変化は互いによく一致している<sup>5)</sup>。しかし、 $V_B$ が300Vまで増加した場合には測定値は計算値より大きく下にずれている。そこでは電流値が大きくなって電子密度も増え、電子衝突による励起準位からの累積電離も増大していると推定される。その効果を取り入れた新しい計算の結果ではその不一致がかなり改善された。

印可電圧や全封入圧力を一定とし、Heに対するXeの混合比を変化させた場合の147nm線の発光強度の変化の様子を図6に示す。実験、計算の結果とも約5%程度の混合比で最大の強度が得られることを示している。この他に、147nmと173nmの発光強度の相対比率や、それらの時間変化の波形でも両方の結果は比較的よく一致している<sup>5, 9)</sup>。

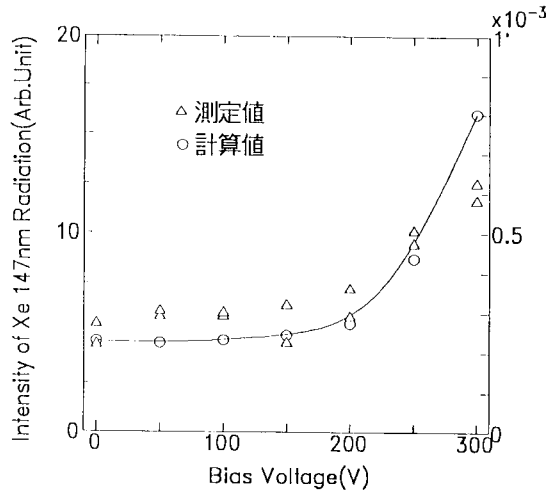


図5 Xe147nm線の平均発光強度の直流バイアス電圧 $V_B$ 依存性 ( $V_S + V_B = 350V$ 一定、全ガス圧260hPa、Xe10%)

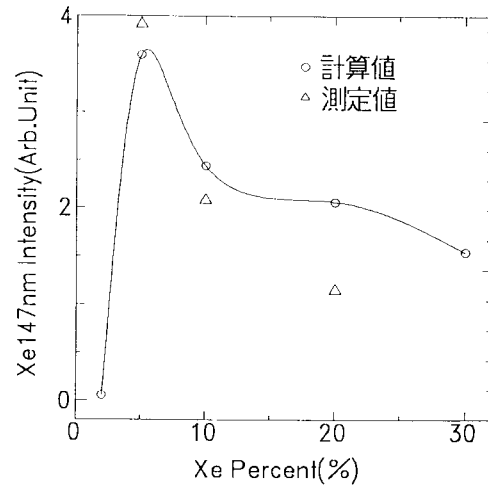


図6 Xe147nm線の平均発光強度のXe混合比依存性 ( $V_S = 200V$ 、 $V_B = 150V$ 、全ガス圧260hPa)

## 5. モデルの改良と多次元化

### (1) 1次元ビーム電子モデル

局所電界近似では、原子・分子との衝突による電子のエネルギーの緩和が、位置の移動や時間の経過に対して十分速く起こることを仮定している。この仮定はガス圧が低い場合や印加電圧の変化の早い場合には当てはまらないことがある。非平衡な電子エネルギーの成分を簡単な扱いで取り入れることができるモデルとして、EEDFにビーム成分を含ませる方法を試みた<sup>10)</sup>。このモデルでは、陰極へのイオン衝撃による $\gamma$ 効果で発生する二次電子を単一エネルギーのビームとして扱い、その密度やエネルギーの時間空間変化に関する連続の式も連立させて解いていく。さし当たって簡単化するために、空間電荷密度の小さいプラズマバルク部に存在する熱的に緩和した冷電子はエネルギーが小さく、電離や励起に関与しないとしたが、Poissonの式を通して空間的な電界分布の形成には関わってくる。

このモデルによる計算結果を局所電界近似の場合と比較すると、電極間の電界分布の様子がやや異なっており、冷電子の密度が高くなるためにバルク部で電界が急速に小さくなっている。しかし、高エネルギーのビーム成分で決まる電離や励起の頻度ならびに147nm発光強度の結果には、最大2倍程度の違いしか現れてこなかった。

## (2) 2次元連続流体モデル

現実の放電セルにおける側壁の存在などの効果を取り入れ、より定量性を高めるためには多次元的なモデルが必要となってくる。我々も現在、2次元モデルの構築に着手しているが、同一の計算手法では単純に評価しても1次元の場合の計算時間の2乗程度の時間が必要となる。円筒形状のように軸対称性を取り入れたり、扱う粒子数を減らす（具体的には時間変化の遅いものは時間刻みを間引いて計算する）などの工夫を要する。方形の1辺を陽極とし対向する陰極の幅は有限で、周りを絶縁壁で囲まれている2次元形状において計算された結果の一例を図7に示す。荷電粒子の絶縁壁方向への拡散による再結合損失が生じるため、縦方向（電極間の方向）での電界や電子密度の分布が影響を受けている。この計算では実質に電子とXe<sup>+</sup>イオン、準安定Xe原子しか独立な粒子として考慮されていないが、計算時間は50MIPS程度のワークステーションで5日間程度必要であった。

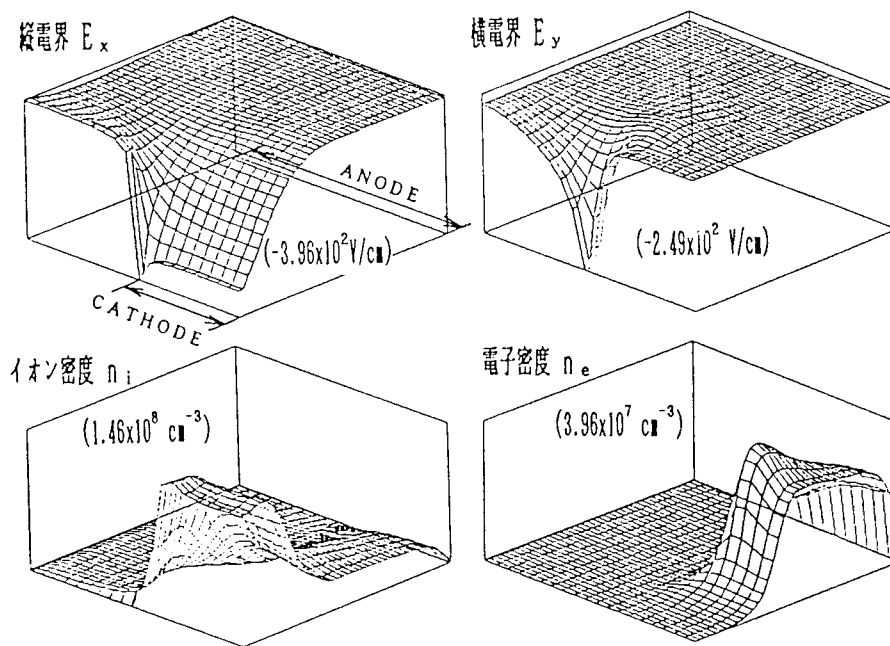


図7 2次元モデルによるHe-Xe混合ガスの直流放電特性の計算例

## 6. おわりに

PDPの実用化に向けての実験的研究を支援するために、計算機シミュレーションによる単一セルでの放電現象の解析を行った。その結果、封入ガスの組成や印加電圧などの変化に対する放電電圧、電流および紫外線発光特性の変化が定性的に予測できるモデルが構築できた。さらに定量性を高めていくためには、多次元のモデルが必要になるが、現実的な計算時間で有効な結果が得られるように、計算手法などに更に工夫を重ねていく必要がある。

最後に、本研究の遂行にあたって多大の御支援をいただいた(株)高柳記念電子科学技術振興財団並びに関係各位に厚く御礼申し上げます。また、共同研究者の橋口、伊藤（京都工繊大）、高橋、竹井、河原（松下電子工業(株)）、坂井、松崎、村上（NHK技研）の各氏の御協力に感謝致します。

## 参考文献

- [1] 村上編：NHKエンジニアリングサービス技術セミナー・テキスト「壁掛けテレビを目指す最近のカラープラズマディスプレイ」(1993).
- [2] 高橋，橋：電気学会論文誌A，He-Xe混合ガスにおける電子衝突電離係数および励起係数の測定と解析，Vol.111，No.3，pp.182-191 (1991).
- [3] 松崎，坂井，村上，北田，高野：カラーテレビ表示用放電型パネルにおけるCADのための基礎検討，電子情報通信学会技法，EID87-19，pp.19-24 (1987).
- [4] K. Tachibana, K. Takahashi, M. Takei, T. Sakai, Y. Murakami and S. Hashiguchi: Electron swarm parameters in a He-Xe mixture and discharge modeling for a color plasma display panel, Proc. Joint Symp. on Electron and Ion Swarms and Low Energy Electron Scattering, Goald Coast, pp.133-135 (1991).
- [5] 伊藤，橋，竹井，河原，村上，坂井：プラズマディスプレイの放電発光特性のシミュレーション，第7回光源物性とその応用研究会資料PE-92-8，pp.61-69 (1992).
- [6] O. Sahni, C. Lanza and W.E. Howard: One-dimensional numerical simulation of ac discharges in a high-pressure mixture of Ne-0.1%Ar confined to a narrow gap between insulated metal electrodes, J. Appl. Phys. Vol.49, No.4, pp.2365-2375 (1978).
- [7] J.P. Boeuf: A two dimensional model of dc glow discharges, J. Appl. Phys. Vol.63, No.5, pp.1342-1349 (1988).
- [8] 坂井，村上，高橋，橋：テレビジョン学会技法，カラー放電パネル(PDP)用セルの諸特性(1)パルス放電の分光測定，Vol.14，No.67，pp.49-54 (1990).
- [9] S. Hashiguchi, K. Itoh and K. Tachibana: Numerical investigation of He-Xe glow discharges for full-color plasma sidplay panels, Proc. 25th Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases (1993)(to be published).
- [10] Y. Murakami, K. Takahashi, H. Matsuzaki, T. Sakai, M. Takei, S. Hashiguchi and K. Tachibana: Computer simulation of pulsed discharge for a color DC plasma display panel, Proc. EURD Display '93, Strasbourg (1993)(to be published).