

## 画像処理法を用いたプラズマ分光診断法の開発と水素RFプラズマへの適用

正員	伊藤 秀範	(室蘭工大)
非会員	池田 誠	(室蘭工大)
正員	武山 保人	(日本電気)
正員	佐藤 孝紀	(室蘭工大)
正員	中尾 好隆	(室蘭工大)
正員	田頭 博昭	(北海道大)

Development of Plasma Diagnostics using Image Processing and Optical Diagnostics of RF Plasmas in H<sub>2</sub>

Hidenori Itoh, Member, Makoto Ikeda, Non-member (Muroran Institute of Technology), Yasuhiro Takeyama, Member (NEC Corporation), Kohki Satoh, Member, Yoshitaka Nakao, Member (Muroran Institute of Technology), Hiroaki Tagashira, Member (Hokkaido University)

A computer-aided spectroscopic system by use of an image processing method has been developed in order to diagnose various processing plasma. This system is composed of a monochromator, two image intensifiers, a CCD camera and a computer. This is characterized by the employment of a digital signal processor and spatial filtering treatment of image data for fast image operations. The validity and the significance of this system have been confirmed by the results of the spatiotemporally resolved optical emission diagnostics of plasmas in H<sub>2</sub>.

The time-resolved spectra have been obtained clearly and the time variation of the profiles has been explained from the viewpoint of the self-bias voltage in plasmas.

キーワード：プラズマプロセス、分光診断、イメージインテンシファイア、時空分解

## 1. まえがき

低温プラズマは、プラズマ中の化学反応を利用するもので、近年の半導体材料やデバイスなどのプラズマプロセスにおいて広く用いられている。プラズマプロセスにおいて、弱電離気体プラズマの性質が、得られる材料やデバイスの性能に大きく影響を及ぼす。したがってプラズマの基礎特性を的確に把握し、プロセスの制御を予測しうる技術を開発することは、プロセスの高効率化のために極めて重要であり、高精度なプラズマ診断が期待されている。

分光検出法によるプラズマ診断は、これまで多くの研究者によって行われている。最近の多チャネル測光システムによるマイクロ波放電の診断<sup>(1)</sup>や光子カウント法によるRFプラズマの時空分解診断<sup>(2)</sup>などは注目に値する。またRFコロナ放電に適用されたものではあるが、イメージイン

テンシファイア法と写真撮影法を組み合わせた観測<sup>(3)</sup>は、同時に発表された多チャネル測光システムによる観測<sup>(4)</sup>とともに評価される。

筆者らは、各種プロセッシングプラズマの特性を詳細に調査研究することを目的として、画像処理法を用いたプラズマ分光診断装置の開発を行ってきた<sup>(5)</sup>。この装置は、イメージインテンシファイアを用いた分光検出法と画像処理法を組み合わせて構築されたものである。すなわち、プラズマからの発光を分光検出し、2段のイメージインテンシファイアで増幅したスペクトラム像をCCD (Charge Coupled Device) カメラで電気信号に変換し、画像データを計算機に転送して、搭載されているDSP (Digital Signal Processor) で、高速に統計処理演算を行うものである。この装置の特長は、装置を移動させることなく、ギャップ空

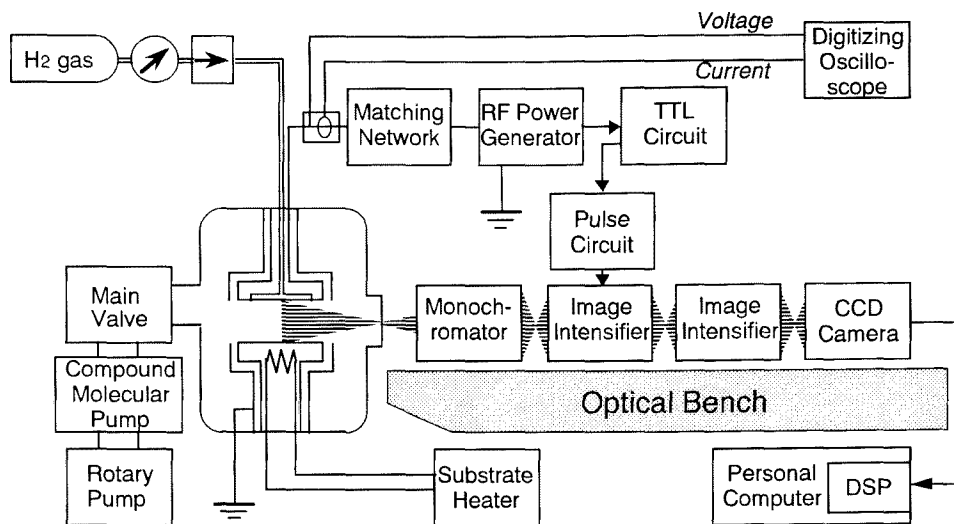


図1 実験装置

Fig.1 Experimental apparatus

間の位置情報を含んだスペクトラム像を検出できる点にある。位置分解能は、CCDカメラの画素（ピクセル）数で決定され、これまでの方法より精度を上げることが可能である。また、1段目の高速ゲート型イメージンシファイアをスイッチングすることにより、スペクトルの空間プロファイルを時間分解することができる。

本論文の目的は、開発したプラズマ診断装置の原理を詳細に述べるとともに、この診断装置を用いて、プラズマプロセスにおいてバッファガスとして広く用いられている水素ガスの診断結果から、装置の妥当性について検討することである。

## 2. 実験装置

2.1. 反応容器・真空排気系 実験装置の概略図を図1に示す。プラズマ発生部分の基本構成はプラズマCVD装置（日電アネルバ製・PED-301）からなる。反応容器は外径30cm、高さ20cmの円筒型でステンレス製である。チャンバ内には直径21cmのステンレス製平行平板電極が設置されている。今回は電極間隔15mm一定とした。反応ガスは、パワー側電極から電極間に導かれる。グランド側電極にはヒーターが埋め込まれていて、常用550℃まで基板加熱が可能である。反応容器は、プラズマが発生する部分以外接地されている。

2.2. プラズマ発生部・ガス導入系 プラズマは、0.1～1.6MHzの低周波用RF電源、1～100MHzの高周波用RF電源と6台の整合器を組み合わせて、作られる。電圧波形、電流波形はパワー電極の直前に取り付けられた高電圧プローブ、電流トランスフォーマとデジタルオシロスコープ（ソニーテクトロニクス社製・TDS540）で観測され、同時にこれらのデータから電力波形がモニタされる。オシロスコープは、GP-IB デジタルバスで計算機と接続されている。

実験に用いた水素ガス（純度：99.99999%）は、反応容器のガス導入部に取り付けられたマスフロコントローラ（エステック社製・SEC-410型NC）によって流量0～500sccmの範囲で任意の量をパワー電極側からギャップ空間へ導入可能である。

2.3. 発光検出系 発光検出系の概略図を図2に示す。ギャップ間に発生したプラズマの発光は、合成石英レンズで集光され、分光器（リッター応用光学社製・MC-30N）に入射する。分光された画像は、合成石英レンズによって1段目の高速ゲート型イメージンシファイア（浜松ホトニクス社製・V3063U）の光電面（S-20）に結像する。この像は電極間の発光全体を分光したものであり、設定した波長のスペクトルの空間プロファイルを示している。イメージンシファイアのゲインは約 $10^4$ であり、増幅した画像を蛍光面（P-20）に写す。更に、この画像をレンズで集光して、同様にイメージンシファイア（浜松ホトニクス社製・V2697U）を入力し、増幅した画像を蛍光面で得る。これをCCDカメラ（NEC製・TI-23A、有効画素数512×492 pixel）で撮影し、電気信号に変換する。CCDカメラから出力される画像データは、フレームメモリ基板（サイバテック社製・CT-9800B）で、輝度を8ビットで量子化してデジタル信号に変換され、計算機（NEC社製・PC9801RA）に転送される。

転送された画像データは、モニタに出力されると同時にDSP基板（総合計画工業社製・MB86220EX）にも伝送する。計算機に装着されているDSP基板は、DSP（富士通社製・MB86220、24bit浮動小数点）と、プログラムメモリ（8k×30bit）、ワーキングメモリ（256k×24bit）、デュアルポートメモリ（2k×16bit）から構成される。DSPのマスタークロックは36MHz、内部システムクロックは12MHzで、浮動小数点演算を $167 \times 10^{-9}$ 秒、そ

の他の演算は  $83 \times 10^{-9}$  秒でそれぞれ実行可能であるので、演算後の画像を高速に再現できる。また、基板のメモリによって効率的な処理ができる。

DSP 基板に転送された画像データは、フレームメモリ

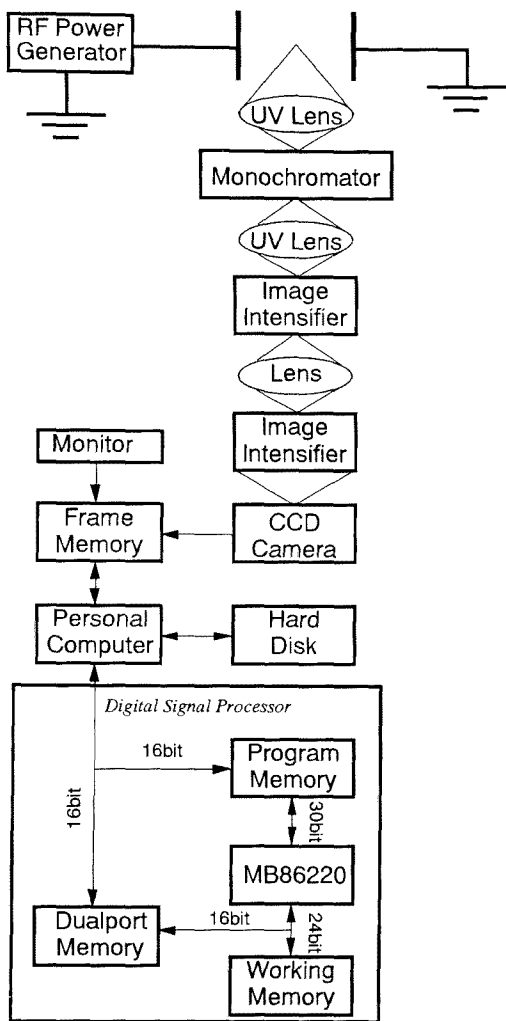


図2 発光検出系

Fig.2 Schematic diagram of optical diagnostics

に取り込まれている画像データと計算機の外部記憶装置にファイリングされている画像データとの間で相互に演算することが可能である。この画像処理プログラムは、C言語とマクロアセンブラによるオブジェクトモジュールで構成されているため、画像データの入出力のみならず、バックグラウンドの除去、データの協調化や平滑化などのプラズマ診断に必要な基本的な画像処理操作を行うことができる。

2.4 画像処理 画像データのS/N改善のために、空間フィルタリング法による平滑化処理<sup>(6)</sup>を用いた。平滑化処理は、ある画素に対して、その近傍の画素の濃度を平均化させることで、画像中の雑音による濃度のばらつきを低下させる手法であり、ここでは平滑化フィルタにメディアンフィルタを採用した。

平滑化処理は、図3のようにプラズマの発光を分光検出して得られた原画像データに対して、バックグラウンド除去と平均加算処理を行い、プラズマ観測が終了した後、画像データ解析の前処理として行うため、観測時間には全く影響を与えない。平滑化処理の採用によって、S/Nが改善され、特徴抽出が容易になったことにより、バックグラウンド除去や平均加算の演算回数を大幅に減らすことができた。結果として、プラズマの観測時間が短縮された。メディアンフィルタを用いることにより、診断時間を約1/4に短縮できることが、窒素の低気圧直流グロー放電の観測で確認された<sup>(7)</sup>。このようにDSPの導入によって画像データ間演算の高速化が実現し、空間フィルタリングの採用によって処理時間の大幅な短縮が達成できた。結果として、画像データの統計的なばらつきを抑えることに成功し、分刻みで変化するプロセッシングプラズマの診断への適用を可能にした。

2.5 時間分解診断の原理 イメージンシファイアは、光電面(C)、MCP(Micro Channel Plate)、蛍光面(S)から構成される。光電面に正の電圧が印加されていると、光電面で変換された光電子はMCPに達することができないため、蛍光面では発光が得られない。これを利用して時間分解診断を行う。すなわち、1段目の高速ゲート型イメージンシファイアをパルス制御することによって、RFプラズマからの発光をパルス幅の時間に相当する発光位置プロファイルとして得る<sup>(3)</sup>。

文献(5)では、ケーブル充電方式を利用したパルス発生回

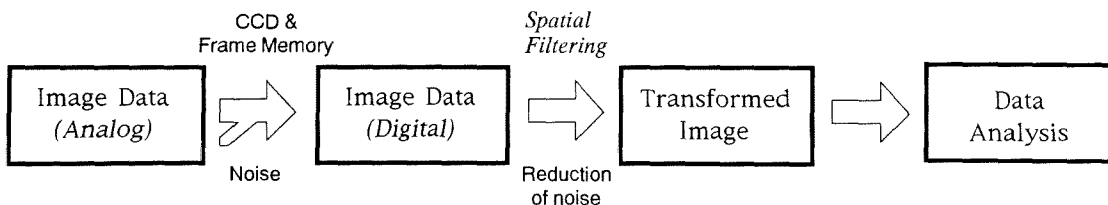


図3 画像データ処理の流れ

Fig.3 Flowchart of Image processing treatment

路を用いて、100kHzプラズマの診断結果について考察している。本論文では、より高い周波数のプラズマの診断を可能にするために、コンデンサの充放電を利用したパルス発生回路に変更して、100kHzと1MHzの診断を行う。図4は採用した回路を示す。スイッチにFET（東芝社製・

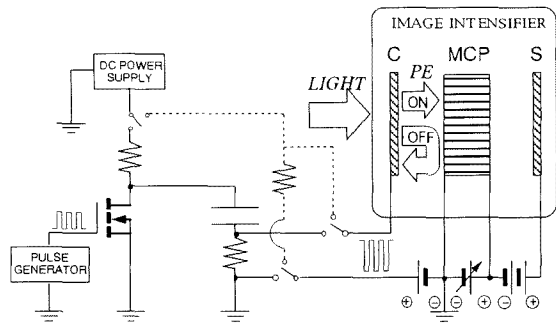


図4 ゲート回路  
Fig.4 Gating Circuit

2SK386) を、そのトリガにパルス発生器（岩崎通信機社製・PG-230）をそれぞれ採用し、充電回路を1000pFのコンデンサ（村田製作所社製・802）と直流高電圧電源（高砂製作所社製・GP0650-05R）から構成した。また、FETをトリガするパルス発生器はプラズマを発生させる電源周波数に同期しており、遅延時間を設定することにより印加電圧波形の任意の位相に対しパルスを発生させることができる。このことによって、RFプラズマの時間分解測定が可能となる。

電源周波数を1MHzとすると、コンデンサの充放電が追従できなくなる。この場合、10進カウンタ用のIC（SN74LS90N）を用いてサンプルパルスのタイミングを10周期に1度の割合で分周し<sup>(8)</sup>、時間分解測定をした（図5）。

### 3. 実験方法

ギャップ長を設定した後、レーザを用いて発光検出系の光軸を合わせる。イメージインテンシファイアのゲインは実験に合わせて設定を変化させた。CCDカメラの絞りは開放である。次に、ガスの圧力、流量、電源周波数、注入電力などを設定してギャップ間にプラズマをたてる。

画像データは、「発光を必要回数重ね合わせ、強調化を行った後、バックグラウンドを引き算する」という画像演算処理を行い、外部記憶装置に保存する。さらに画像データのS/N改善の為にメディアンフィルタをファイリングされたデータに施し、画像データ解析に用いる。

### 4. 実験結果

図6に100kHzの水素RFプラズマの結果を示す。これは、電力60W、流量100sccm、気圧67Paの観測条件で得られた結果である。(a)は、 $H\alpha$  ( $n=3 \rightarrow n=2: 656\text{nm}$ )の時間分解発光位置プロファイルを示す。これは、半値幅約 $50 \times$

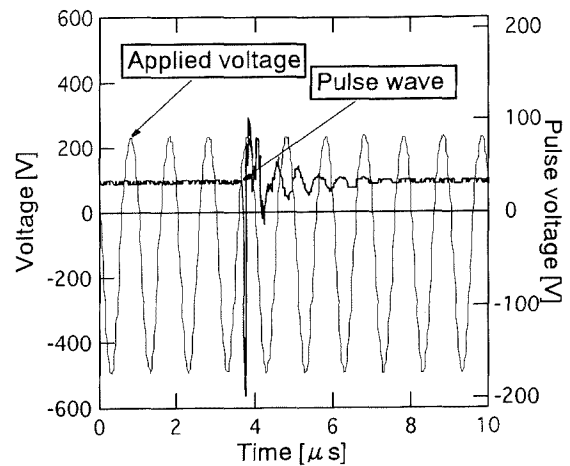


図5 パルスのタイミング  
Fig.5 Chart for timing

$10^{-9}$ 秒の負パルスで24分割したものを示す。(b)は、このとき得られた電圧、電流、電力波形、ならびにそれぞれの位相における発光強度の最大値を示している。正負のピーク間電圧（ここではピーク電圧と呼ぶ）は1052Vであり、おもに実効的な電極の非対称性などの影響により-210Vの自己バイアスが生じていることが観測される。また、発光のほとんどが印加電圧の負の半周期の位相でみられ、発光強度最大値のピークの位置は電流波形に対応し、その大きさは電力に対応していることがわかる。このことは、自己バイアスと直流グロー放電の構造から説明される。すなわち、電源電圧に自己バイアスが重畳し、電極間に実質的に印加される電界は、負の周期の方がはるかに大きく、直流グロー放電の陰極グローあるいは、負グローに対応する発光<sup>(9)</sup>が負の半周期で大きくみられるためである。

図7に1MHzの水素RFプラズマの結果を、図6に対応させて示す。すなわち、電力、流量、気圧の観測条件は同じで、(a)は、 $H\alpha$ の時間分解発光位置プロファイルを示す。これは、半値幅約 $50 \times 10^{-9}$ 秒の負パルスで12分割したものを示す。(b)は、このときの電圧、電流、電力波形、発光強度の最大値をそれぞれ示している。この時、ピーク電圧は988V、自己バイアス電圧は-286Vであった。図6と図7を比較してみても、発光プロファイルに大きな差異は認められない。しかし、100kHzに比べ1MHzの放電は、常に発光し続ける持続放電の傾向を示しはじめている。また図7(b)より電流が零の時でも発光していることが確認できる。これは、電子は電界に対して追従できるが、非弾性衝突によって発生したイオン、励起種などが徐々に追従できなくなり電極間にトラップされはじめていることを示している。

発光プロファイルの気圧依存性を調べるために、図7の観測条件のうち気圧のみを5倍にした $H\alpha$ の時間分解した

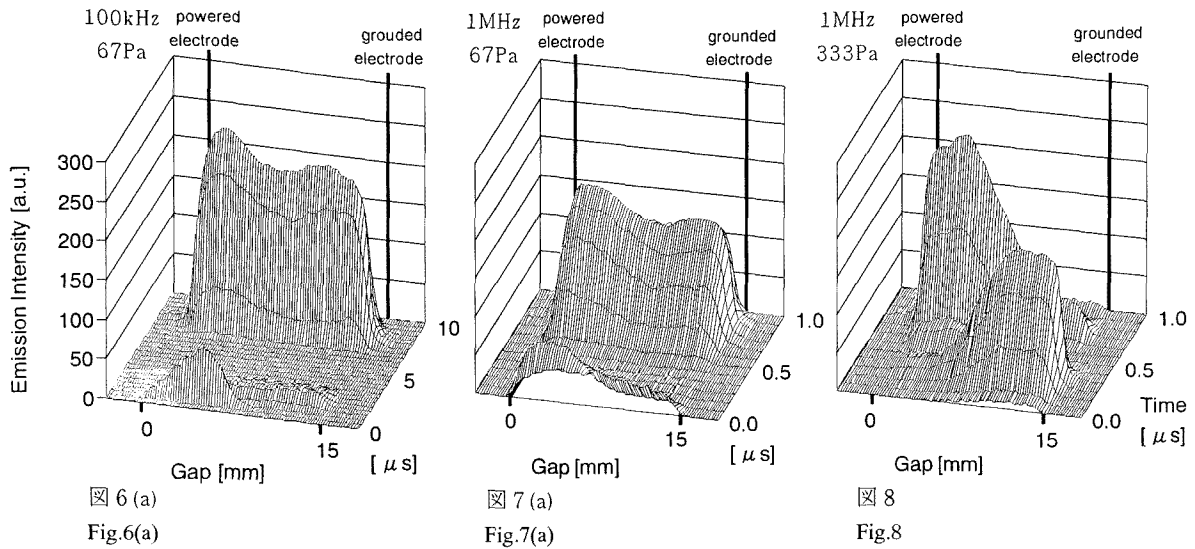


図 6(a), 図 7(a), 図 8 H $\alpha$ の時間分解

Fig.6(a), Fig.7(a), Fig.8, Time-resolved emission intensity profiles for H $\alpha$

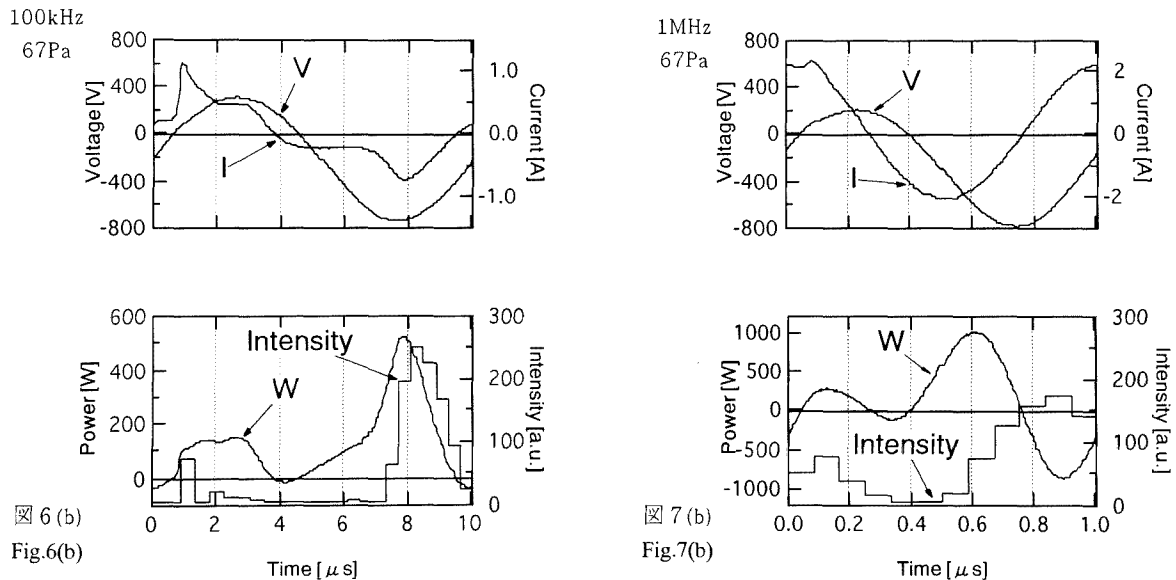


図 6(b), 図 7(b) 電圧, 電流, 電力, 最大発光強度波形

Fig.6(b), Fig.7(b) Wave-forms of voltage, current, power and maximum emission intensity

発光プロファイルを図 8 に示す。すなわち、電源周波数 1MHz、電力60W、流量100sccm、気圧 333Paの観測条件で得られた結果である。発光プロファイルは、電界の正負の周期で各々ピークを持っていて、対称形に近づいていることがわかる。この時、ピーク電圧は684V、自己バイアスは-14Vであった。自己バイアスがゼロに近づくにつれて、発光プロファイルも対称形に近づき、プロファイルも反転していることが分かる。このことは、前述の図 6 の

プロファイルの説明を支持する。

### 5. むすび

画像処理法と分光法を組み合わせた分光プラズマ診断装置を開発し、装置の詳細を明らかにするとともにこれを水素RFプラズマ診断に適用して、装置の妥当性を検討した。以下に本研究で得られた結果をまとめる。

- (1) 反応性プラズマの分光診断装置を、イメージンテ

ンシファイアを用いた写真撮影法と画像処理法を組み合わせ  
て開発した。

(2) DSP基板の導入と空間フィルタリングの採用によ  
って、プロセスプラズマへの適用が達成できた。

(3) イメージインテンシファイアのスイッチング回路の作  
成によって、RFプラズマの時間分解診断を可能にした。

(4) 電源周波数と気圧に対する水素RFプラズマ中のH $\alpha$ ブ  
ロファイルの時間変化を、自己バイアスから説明した。

今後は、より高周波のプラズマ診断への適用が必要であ  
る。

日ごろ御指導をいただきオーストラリア、ニューイング  
ランド大学理学部ハイドン教授、徳島大学工学部生田信皓教  
授、北海道大学医療短期大学部下妻光夫助教授に深く感謝の  
意を表する次第である。

(平成6年7月25日受付)

## 文 献

- (1) J.Röpcke, A.Ohr and M.Schmidt: "Comparison of optical emis  
sion spectrometric measurements of the concentration and energy  
of species in low-pressure microwave and radiofrequency plasma  
sources", *J. Anal. At. Spectrom.*, **8**, 803-8(1993)
- (2) T.Makabe, F.Tochikubo and N.Nishimura: "Influence of negative  
ions in RF glow discharges in SiH<sub>4</sub> at 13.56 MHz", *Phys. Rev.*,  
**A42**, 3674-7(1990)
- (3) N.Sato and S.C.Haydon: "Time-resolved observations of RF co  
rona in air and nitrogen", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **17**, 2009-  
21(1984)
- (4) N.Sato and S.C.Haydon: "Nanosecond time-resolved spectro  
scopic investigations of RF corona with high spatial  
resolution", *ibid.*, **17**, 2023-36(1984)
- (5) 例えばH.Itoh, Y.Takeyama, M.Ikeda, K.Satoh, Y.Nakao and  
H.Tagashira: "Spectroscopic and image intensified investigations  
of RF plasmas in H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> mixtures", *IEE Proc.-Sci. Meas.  
Technol.*, **141**, 95-8(1994)
- (6) 例えば日本工業技術センター編: コンピュータ画像処理入  
門, 総研出版(1991)
- (7) 武山, 佐藤, 伊藤, 中尾, 田頭: 「画像処理を用いたプロセッシング  
プラズマの分光診断」, 電気学会放電研究会資料 ED-92-  
106(1992)
- (8) 加藤: 電子技術者のための実用回路, マグロウヒル好学社,  
(1982)
- (9) 例えば長谷川, 松村, 佐藤, 伊藤, 中尾, 田頭: 「低気圧グロー放  
電の分光特性」, 電気学会放電研究会資料 ED-91-77(1991)

伊藤 秀 範 (正員) 昭和26年10月26日生。52年  
北海道大学工学部電気工学科卒業。55年同  
大学大学院工学研究科博士後期課程修了。  
同年徳島大学勤務。59年室蘭工業大学勤  
務, 現在に至る。工学博士。日本物理学  
会, 応用物理学会(プラズマエレクトロニ  
クス分科会), 放電研究グループ会員。



池 田 誠 (非会員) 昭和45年7月14日生。平成  
5年室蘭工業大学工学部電気工学科卒業。  
同年同大学大学院工学研究科博士前期課程  
入学, 現在に至る。応用物理学会会員。



武 山 保 人 (正員) 昭和44年2月20日生。平成3  
年室蘭工業大学工学部電気工学科卒業。平  
成5年室蘭工業大学大学院工学研究科博士  
前期課程修了。同年日本電気(株)勤務,  
現在に至る。



佐 藤 孝 紀 (正員) 昭和38年12月17日生。61年  
室蘭工業大学工学部電気工学科卒業。平成  
3年北海道大学大学院工学研究科博士後期  
課程修了。同年室蘭工業大学勤務, 現在に  
至る。工学博士。応用物理学会会員。



中 尾 好 隆 (正員) 昭和12年7月25日生。37年北  
海道大学工学部電気工学科卒業。38年同大  
学工業教員養成所勤務。43年室蘭工業大学  
勤務, 現在に至る。工学博士。照明学会,  
放電研究グループ会員。



田 頭 博 昭 (正員) 昭和8年1月13日生。33年北  
海道大学工学部電気工学科卒業。36年同大  
学大学院工学研究科博士課程中退。同年北  
海道大学勤務, 現在に至る。Ph.D.(英国リ  
バプール大学)。工学博士。日本物理学  
会, 応用物理学会(プラズマエレクトロニ  
クス分科会), 照明学会, プラズマ核融合  
学会, 溶接学会, 放電研究グループ会員。

