

# 静的破壊における過渡グロー放電の放電断面積と電流密度

学生員 関川純哉 (名古屋大学)

正員 藤原民也 (岩手大学)

Cross-Sectional Area and Current Density of Transient Glow Discharge after Static Breakdown  
Junya Sekikawa, Student Member (Nagoya University), Tamiya Fujiwara, Member (Iwate University)

Cross-sectional area and current density of a transient glow discharge have been investigated in nitrogen after static breakdown. To measure the cross-sectional area of the transient glow discharge, the image converter camera is used with the framing mode. The measurements have been made for 5.0mm gap length at gas pressures of 80 - 160Torr. The results show that the cross-sectional area decreases with increasing gas pressure. At constant gas pressure, the cross-sectional area decreases with increasing the circuit resistance and increases in proportion to the discharge current. The current density of the transient glow discharge is proportional to the approximate square of pressure and independent of the resistance. These characteristics are similar to those of normal glow of DC glow discharge at low pressure.

キーワード: 過渡グロー放電、放電断面積、放電電流密度、正規グロー放電

## 1. まえがき

近年、大気圧に近い気圧領域でのグロー放電は、排ガス処理<sup>(1)</sup>、材料の表面処理<sup>(2)</sup>等への応用が可能なることから、その定常的で安定な形成に対する関心が高まっている。高い気圧領域でグロー放電を形成すること、グロー放電の断面積を大きくすることは、反応時間の短縮やプロセス装置の効率向上に直接寄与する。それゆえ、大気圧に近い気圧領域でのグロー放電について、その放電断面積および電流密度を明らかにすることは工学的に重要であると考えられる。グロー放電は大気圧に近い気圧領域では定常的には形成されにくい、過渡的にはその一形式として起こり得る。過渡グロー放電はこれまでいろいろ調べられており、その特性は低気圧領域における正規グロー放電に類似していることが報告されている<sup>(3)(5)(6)</sup>。また、イメージコンバータカメラを使った研究では、電極面から進展する放電様相のストリーク写真による観察<sup>(7)</sup>、繊維状の過渡グロー放電の放電半径の時間的変化<sup>(8)</sup>が報告されている。しかし、繊維状ではない広がった過渡グロー放電に対して電流密度と気圧との関係などについては明らかにされていない。また、それらの報告の放電開始方法は過電圧印加によるものであり静的破壊ではない。本研究では、特に静的破壊における、過渡グロー放電の放電様相を、気圧および放電抵抗を変えながらイメージコンバータカメラ(駒撮りモード)で撮影し、その画像から陰極面近傍の放電断面積を求めた。さら

に、同時測定した放電電流の値を用いて陰極面における電流密度を調べ、気圧との関係を明らかにした。

## 2. 実験装置および方法

図1に実験装置を示す。実験に使用した気体は窒素で、気圧範囲は80Torrから160Torrである。気圧の測定は水銀マンオメータを使用して行った。放電容器は上下が電極で、側面がアクリルの円筒形状である。電極間の放電発光を容器の外から観測するため、観測領域のアクリル側面を平面研磨し光学的なゆがみを取り除いた。電極はアルミニウム製ロッド電極で、その形状を図2に示す。これは過去に報告した研究に使用したものと同一形状である<sup>(3)(4)</sup>。電極直径は50mmであるが、放電は平等電界領域の直径25mmの円内で形成される。電極間隔は本実験を通して5.0mmである。実験開始前に実験時よりも低い気圧領域(10Torr以下)でグロー放電によるエイジングを行った。このときのグロー放電はアーク放電へと進展せず、アークによる電極表面の損傷は無い。そのグロー放電の放電路が、目視で一様になるまで放電を繰り返した後(20回程度)に実験を行った。実験では放電ごとの条件の変化を避けるため、一度放電した後はロータリーポンプで放電容器内を $10^{-3}$ Torrまで排気した後次に次の放電を行った。

放電は静的破壊によって開始される。静的破壊とは、放電開始前に破壊電圧よりも低い直流電圧を電極に印加し、その電圧を徐々に増大させ破壊電圧に達した時に放電が開

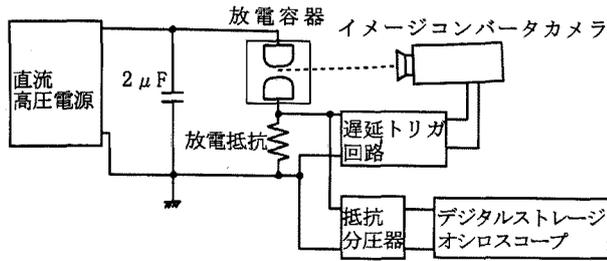


図1 実験装置

Fig. 1. Experimental apparatus and the imageconverter camera trigger system.

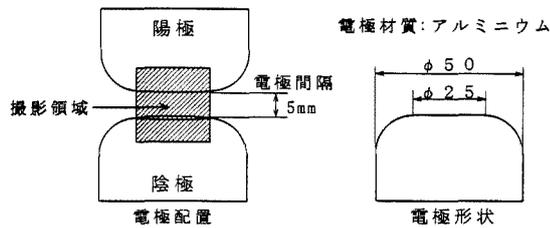


図2 電極と撮影領域

Fig. 2. The electrodes and the photographing region.

始する方法である。従って、放電開始時の印加電圧は破壊電圧と等しい。

放電電流の測定は、放電抵抗の両端に抵抗分圧器を接続し、その出力信号をデジタルストレージオシロスコープへ入力して行った。電極と直列接続の放電抵抗は、過渡グロー放電の持続時間を変えるとともに、アーク放電へ移行したときその電流を抑制する働きを持っている。本研究では、抵抗値による電流密度の違いを調べるため、 $617\ \Omega$ と $960\ \Omega$ の二つの放電抵抗を用いた。

過渡グロー放電の様相およびアーク放電への移行過程をイメージコンバータカメラ(Hadland社製Imacon790)の駒撮りモードを使用して撮影した。駒間隔は500nsで、各駒の露出時間は100nsである。使用したユニットでは一枚の写真に10駒までの撮影が可能であり、撮影の時間範囲は $4.5\ \mu\text{s}$ である。イメージコンバータカメラのトリガ回路として、放電電流の立ち上がりを検出すると一定の時間遅れでトリガ信号を発生させる遅延トリガ回路を用いた。この方法により、静的破壊による放電開始とのタイミング合わせを確実にした。過渡グロー放電の陰極面近傍での発光を確実にとらえるため、イメージコンバータカメラの位置は電極に対して完全な水平とせず、陰極面が見えるよう少し傾いた角度にある。

実験の気圧領域と放電抵抗値はイメージコンバータカメラの感度によって制約を受け、変化の範囲は制限される。すなわち、短い持続時間の過渡グロー放電に対しては、撮影の駒間隔を狭くしなければならず、そのため一駒当たりの露出時間も短くなってしまふ。持続時間は抵抗値を大きくするか、もしくは気圧を低くすることにより長くすることができるが、その場合は放電電流が小さくなり放電の発

光が弱くなるため写真は暗くなる。また、遅延トリガ回路の遅延時間とイメージコンバータカメラの遅延時間を足し合わせた時間の最小値( $1\ \mu\text{s}$ )よりも、持続時間が短くなる過渡グロー放電も撮影することができない。本研究では静的破壊により放電開始しており、そのタイミングを外部から制御することはできない。従って、イメージコンバータカメラを起動するまでの一定の時間遅れは避けられない。以上の関係から、気圧と放電抵抗には適当な範囲があり、実験条件はその範囲で選ぶ必要がある。本実験では過渡グロー放電の持続時間が $10\ \mu\text{s}$ 程度となるように窒素の気圧と放電抵抗の値を決定した。

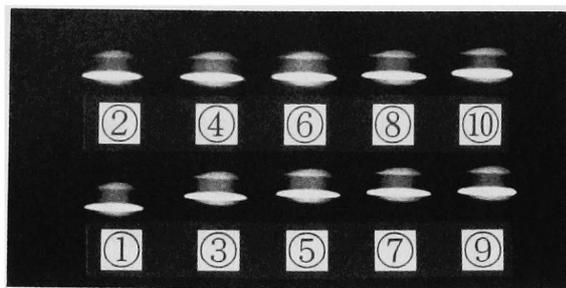
### 3. 実験結果および考察

#### <3.1> イメージコンバータカメラによる放電観察

イメージコンバータカメラによって撮影した放電様相の写真および放電電流波形を図3、図4に示す。図3(a)、図4(a)の各駒番号はそれぞれ図3(b)、図4(b)の各番号に対応している。図3はアーク放電へと移行する前の過渡グロー放電のみのもので、図4は過渡グロー放電とアーク放電への移行過程を撮影したものである。図4(b)において放電電流立ち上がり後のはじめの平坦部分が過渡グロー放電期間である。その後、時間が経過すると放電電流がステップ状に増大し、放電はアーク放電へ移行する。アーク放電時のギャップ間抵抗は非常に小さいことから、放電電流 $I_g$ は回路の直列抵抗 $R$ で決まる。また、放電回路の時定数は2ms程度になるので過渡グロー放電期間の電源電圧 $V_c$ はほとんど減少しない。この時の電極間電圧 $V_g$ と放電電流 $I_g$ との間には $V_g = V_c - I_g R$ の関係があり、 $V_c$ と $R$ を定数と考えると、 $V_g$ の時間発展は $I_g$ にのみ依存する。

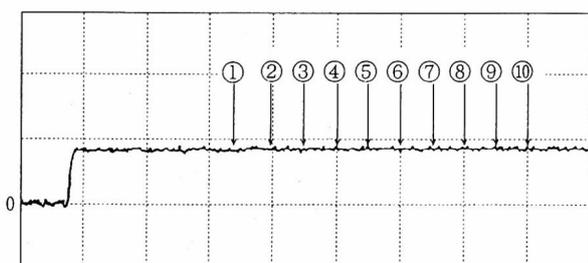
図5は撮影した写真の一駒分の撮影範囲を示している。写真の上側が陽極で下側が陰極である。イメージコンバータカメラの写真(図3(a)、図4(a))には、上下の電極部分に図5で示す放電空間からの反射光が写っている。

図3(a)、(b)は過渡グロー放電のみのもので、測定している期間( $10\ \mu\text{s}$ )ではアーク放電への移行が起こらない場合である。図3(a)で撮影した期間の後に放電形態はアーク放電へと移行している。図3(a)から、過渡グロー放電期間では放電様相がほとんど変化しないことがわかる。陰極面近傍には電極間の放電よりも非常に明るく広がった発光が見られる。過渡グロー放電の陰極部には低気圧正規グロー放電と同程度の電圧降下電圧があることから、その構造は低気圧正規グロー放電のものと類似していると考えられる<sup>(3)(4)</sup>。そこで陰極降下部の厚さを推定するために正規陰極降下部の厚さを用いる。本実験の気圧領域では陰極降下部は厚さが極めて小さくなっており、窒素80Torr、電極材質Alでは約 $40\ \mu\text{m}$  ( $p d_n = 0.31[\text{Torr} \cdot \text{cm}]$ )<sup>(10)</sup>であり、その厚さは写真からの識別は不可能である。従って、陰極近傍の明るく広がっている部分は正規グロー放電の負グロー領域に相当する部分であると言える。さらに、この発光に対して電極間に弱い発光も観測されるが、この発光部は陽光柱に



(a) イメージコンバータ写真

(a) Photographs by the imageconverter camera.  
Time interval between the frames is 500ns, exposure time of each frame is 50ns.



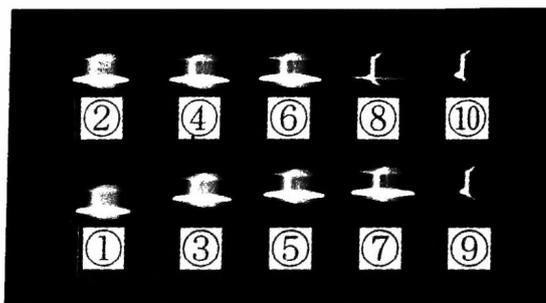
(b) 放電電流波形, 縦 3.74A/div; 横 1.0  $\mu$ s/div.  
(b) A oscillogram of the transient glow discharge current. Vertical: 3.74A/div; Horizontal: 1.0  $\mu$ s/div.

図3 過渡グロー放電: 窒素80Torr, 電極間隔5mm  
Fig. 3. Transient glow discharge in nitrogen at 80Torr.  
Gap length is 5mm. R=617 $\Omega$ .

相当する部分であろう。

図4(a), (b)は過渡グロー放電からアーク放電へと移行する場合である。図4(a)の各駒は図4(b)の電流波形との対応から、①～⑥は過渡グロー放電期間、⑦はグロー放電からアーク放電への移行時、そして⑧～⑩はアーク放電期間の写真である。図4(a)から、過渡グロー放電は広断面の放電となっており、アーク放電は繊維状の放電であることがわかる。また、過渡グロー放電期間(図4(a)①～⑥)では、図3(a)と同様に陰極近傍には負グロー領域に相当する明るい発光領域が存在している。

負グロー領域は過渡グロー放電期間中にはほとんど変化しないが、放電がアーク放電に移行すると発光を急激に弱め消滅する。陰極から離れた陽光柱領域には、縦方向(電極方向)に周りよりもひときわ明るい縞状の発光が観測される(図4(a)①～⑥)。この縦縞状の明るい発光部は時間の経過とともに次第に明るくなっていくが、その位置は変えていない。その明るい発光部に電流が次第に集中し、最終的にはアーク放電の放電チャンネルに成長することが写真からわかる。放電がアーク放電に移行すると、グロー放電の特徴である陰極領域の広がった発光が消え、代わって陰極



(a) イメージコンバータ写真

(a) Photographs by the imageconverter camera.  
Time interval between the frames is 500ns, exposure time of each frame is 50ns.



(b) 放電電流波形, 縦 3.74A/div; 横 1.0  $\mu$ s/div.  
(b) A oscillogram of the transient glow discharge current. Vertical: 3.74A/div; Horizontal: 1.0  $\mu$ s/div.

図4 過渡グローからアーク放電への移行: 窒素, 120Torr, 電極間隔 5mm  
Fig. 4. Transition of the discharge from transient glow to arc discharge in nitrogen at 120Torr. Gap length is 5mm. R=617 $\Omega$ .

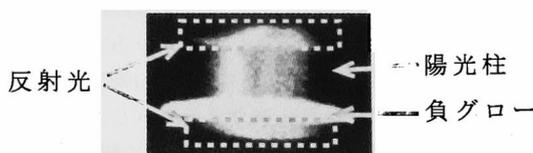


図5 写真の説明: 放電領域と電極からの反射  
Fig. 5. Explanation of the photograph of discharge region with reflection from the electrodes.

輝点が現れている。過渡グロー放電期間中に陽光柱部分に観測される縦縞状の発光は、電流密度が周りよりも高い領域であり、アーク放電の放電チャンネルの予備的なものと言える。しかし、この部分が現れても図4(a)の①～⑥の段階では、陰極近傍の発光は全体的に広がっておりグロー放電が続いていることを示している。これは、アーク放電チャンネルの予備的なものが現れても、グロー放電の特徴である陰極降下部が存在しているためである。

図3は図4よりも気圧が低いため、過渡グロー放電の持続

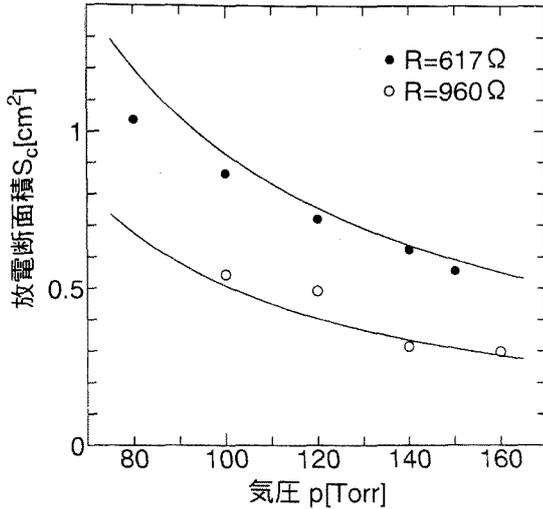


図6 放電断面積と気圧の関係

Fig.6. The relationship between cross-sectional area and pressure.

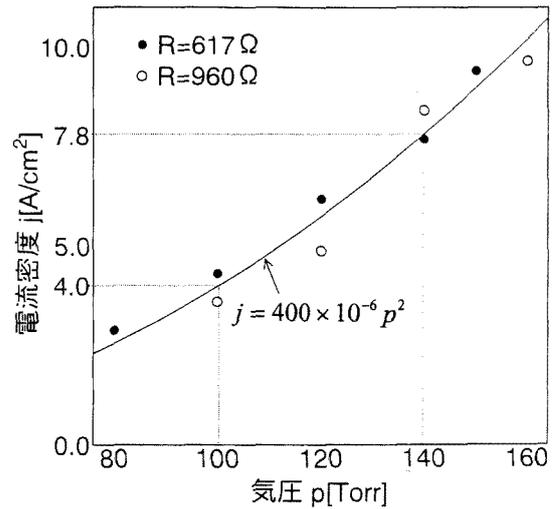


図8 陰極面近傍における電流密度と気圧の関係

Fig.8. The relationship between discharge current density and pressure near the cathode.

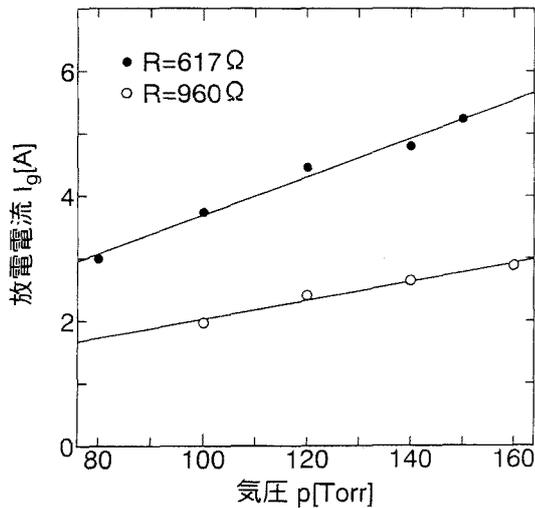


図7 放電電流と気圧の関係

Fig.7. The relationship between discharge current and pressure.

時間はより長くなっている。図3(a)と図4(a)は、ともに等しい駒間隔であるが、持続時間が長い場合(図3)は、短い場合(図4)に比べて広く均一な放電に変化はなく、グロー放電がより安定なものとなっていることがわかる。

**<3.2> 陰極近傍の放電断面積と電流密度** 図4(a)において、アーク放電への移行が近づくにつれて、陽光柱に相当する領域には非一様な縦縞状の発光部が現れるが、陰極近傍の発光状態にはほとんど変化がみられない。そこで、この陰極近傍の発光から過渡グロー放電の放電断面積を求め、さらにその断面積と電流値から電流密度を算出し、気圧との関係について調べた。ここでは放電路を円断面と仮

定し、写真を解析して得られる直径によって断面積を求めている。放電路がほぼ円断面になっていることは直接目視して確認している。図6は放電断面積と気圧の関係である。同図は、放電断面積は気圧の上昇に伴い減少することを示している。また、気圧が一定の場合、抵抗値が小さい方が放電断面積は大きいことがわかる。このことから、過渡グロー放電では放電電流が大きいと放電断面も広がると言うことができる。この特性は、放電電流の増大とともに放電断面積が広がることで説明される、低気圧正規グロー放電の定電圧特性に合致している。この結果は、気圧の減少に伴い粒子間の衝突が少なくなり、拡散が増大するためだと考えられる。また、図6から得られる  $S_c \propto 1/p$  の関係は過去の文献<sup>(9)</sup>で実験式として述べられており、我々の実験においても同様の結果となった。

図7に、過渡グロー放電時の放電電流と気圧の関係を示す。放電電流は気圧にほぼ比例して増大し、また放電抵抗が小さいと放電電流は大きくなる。これは、本実験は静的破壊で行われており、破壊電圧及び過渡グロー放電時の電極間電圧が気圧に比例して増大するためであると考えられる<sup>(4)</sup>。

気圧に対する放電断面積(図6)と放電電流(図7)の二つの関係から、陰極近傍の電流密度を次式を用いて求める。

$$j = \frac{I_g}{S_c} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $I_g$ :過渡グロー放電時の放電電流[A],  
 $S_c$ :陰極近傍の放電断面積[cm<sup>2</sup>],  $j$ :陰極近傍の電流密度[A/cm<sup>2</sup>]

その結果を図8に示す。電流密度は気圧の上昇とともに増大し、例えば100Torrと140Torrでは、それぞれ4.0A/cm<sup>2</sup>および7.8A/cm<sup>2</sup>である。また、放電抵抗を変えても電流密度は気圧に対してほぼ同一の曲線上にあり、抵抗値にほとん

ど依存していない。低気圧正規グロー放電における陰極面電流密度は一般に $p^2$ ( $p$ :気圧)に比例するとされ、その比例定数は気体の種類と電極材料によって与えられている<sup>(10)</sup>。低気圧正規グロー放電についての過去の資料<sup>(10)</sup>の中から、実験式 $j = 400 \times 10^{-6} p^2$  [A/cm<sup>2</sup>] (気体N<sub>2</sub>, 電極Ni)を選び、その気圧依存性を実線で図8に示した。実験式と本研究結果とはよい一致を示しており、このことから低気圧グロー放電の電流密度に対する近似式(気圧の2乗に比例)は過渡グロー放電にもあてはまることがわかる。

図6の結果から $S_c \propto 1/p$ , 図7からは $I_g \propto p$ の関係があることが明らかである。これらの関係と(1)式から $j \propto p^2$ の関係を導くことができる。これは図8の結果と一致している。

気圧が一定の場合、過渡グローの放電断面積は電流の増大とともにほぼ比例して広がるのがわかる。放電抵抗値を変えると、電流は変わるが電流密度( $I_g/S_c$ )は変わらない。これらの実験結果は、過渡グロー放電の電流-電圧特性にも低気圧グロー放電の考えが適用できることを示しており、また過渡グローの放電断面積を抵抗でほぼ直線的に制御ができることも意味している。

#### 4. まとめ

気圧および放電抵抗を変えた場合について、静的破壊における過渡グロー放電の陰極近傍の放電断面積および電流密度を調べた。その結果、電流密度は気圧の2乗に比例して増大するが、放電抵抗を変えてもほとんど変化しないことがわかった。また、放電断面積は気圧の上昇に伴い減少し、電流の増大とともに広がる。これらの過渡グロー放電の特性は低気圧正規グロー放電のものと合致し、そこで用いられる近似式は本研究で調べた過渡グロー放電( $pd$ :40~80[Torr·cm], 放電電流:2~5[A])に対しても適用できることがわかった。

最後に、本論文をまとめるにあたり名古屋大学大学院工学研究科 佐藤紘一教授に有益な御討論を頂いたことに深く感謝致します。

(平成9年11月25日受付, 平成10年4月6日再受付)

#### 文 献

- (1) B.Eliasson and U.Kogelschatz: "Nonequilibrium Volume Plasma Chemical Processing", IEEE Trans. Plasma Science, Vol.19, No.6, pp.1063-1077 (1991)
- (2) C.Yamabe K.Nakamura and K.Horii: "Generation of a large-volume atmospheric glow discharge in air by using double discharge", Proc. 10th International Conference on Gas Discharges and Their Applications, Swansea, U.K., pp.738-741 (1992)
- (3) T.Fujiwara, T.Sato, J.Sekikawa and H.Yamada: "Transient glow discharge in nitrogen after breakdown", J.Phys. D: Appl. Phys., Vol.27, pp.826-829 (1994)
- (4) T.Fujiwara, J.Sekikawa, E.Ebisu, T.Sato and H.Yamada: "Transient and Continuous Glow Discharge in He, H<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> at Sub-Atmospheric Pressure", 電学論, Vol.116-A, pp.914-918 (1996)
- (5) J.Meyer and C.S.Lee: "Investigation of the glow phase in spark discharges", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.4, pp.168-170 (1971)
- (6) M.M.Kekez, M.R.Barrault and J.D.Craggs: "Spark channel formation", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.3, pp.1886-1895 (1970)
- (7) I.D.Chalmers and H.Duffy: "Observations of the arc-forming stages of spark breakdown using an image intensifier and converter", J.Phys.D: Appl. Phys., Vol.4, pp.1302-1305 (1971)
- (8) M.C.Cavenor and J.Meyer: "The development of spark discharges in hydrogen", Aust.J.Phys., Vol.22, pp.157-167 (1969)
- (9) 三好保憲:「放電形式に関する研究」, pp.126-131, 生産技術センター(昭和52年)
- (10) 放電ハンドブック, 電気学会, p.110 (1984)

関川 純 哉 (学生員) 1971年2月14日生。1993年3月岩手大学工学部電気工学科卒業。1995年3月同大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程入学, 現在に至る。主として, 気体放電, 逆転磁場ピンチプラズマに関する研究に従事。プラズマ・核融合学会会員。



藤原 民也 (正員) 1947年4月17日生。1973年3月東北大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月一関高等専門学校電気工学科助手。1975年4月岩手大学電気電子工学科助手, 講師, 助教授を経て, 1994年2月同教授, 現在に至る。1987年3月~1988年3月マサチューセッツ工科大学客員研究員。工学博士。主として, 気体放電に関する研究に従事。応用物理学会, プラズマ核融合学会, 電気設備学会会員。

