

13.5MHz 高周波のアーカ状放電プラズマが生じる直前の電子密度分布

長 濱 治 男

Radial distribution of electron densities of 13.5MHz high-frequency discharge plasma

Haruo NAGAHAMA

In the high-frequency electrodeless discharge, if the plasma has a negative conductance, the discharge state suddenly changes from a weak discharge with visible light emission to an intense one. The equivalent conductance of plasma, σ_{10}' , is expressed by function of gas pressure and ξ which is the ratio of electron density at wall to axis of the discharge tube. The author measures the electron density distribution in radial direction at immediately becoming arc-like discharge of 13.5MHz high-frequency at various gas pressure which is not reported so far, and investigates the relation between gas pressure and ξ .

1. は じ め に

円筒状の放電管に高周波コイルを巻き、方位(θ)方向に $\mathbf{E}_{1\theta}$ 、管軸(z)方向に \mathbf{B}_{1z} の高周波電磁界を加えると、無電極放電が発生する。しかし、電流が小さい間の放電は発光強度の弱い放電である。この状態からさらに高周波電圧を上昇させると、ある電圧値で急に発光強度の極めて強い放電に移行する。⁽¹⁾ 今まで調べてきた結果によると、強い発光の放電機構は次のように考えられる。⁽²⁾

円筒状のプラズマで管軸と管壁との間に電子密度の差があると、半径方向の電子速度 v_{0r} が生じる。それゆえ、電磁力 $-e(\mathbf{v}_{0r} \times \mathbf{B}_{1z})$ が θ 方向にフィードバックされて $-e\mathbf{E}_{1\theta}$ に加わる。その結果、 $\mathbf{E}_{1\theta}$ と逆位相の電流が流れ、高周波に対するプラズマのコンダクタンスが負になり得る。そのため、プラズマ中での電界が増大し、電離が促進されて発光強度の大きい放電に移行する。発光強度の弱い放電と強い放電は視認の状態がちょうど直流放電のグロー放電とアーカ放電に似ているので、便宜上仮にグロー状放電およびアーカ状放電と呼ぶことにする。

プラズマのコンダクタンスを σ_{10}' とした時、 σ_{10}' はガス圧の関数であるから、負性コンダクタンスの出現はガス圧に依存している。それゆえ、 σ_{10}' が負になるガス圧領域を、実験的に求めた半径方向電子密度分布をもとにして計算し、⁽³⁾ 1 MHz 放電の場合として既に報告した。

本報告では、今までに報告していない13.5MHz 高周波放電プラズマにおける σ_{10}' が負になるガ

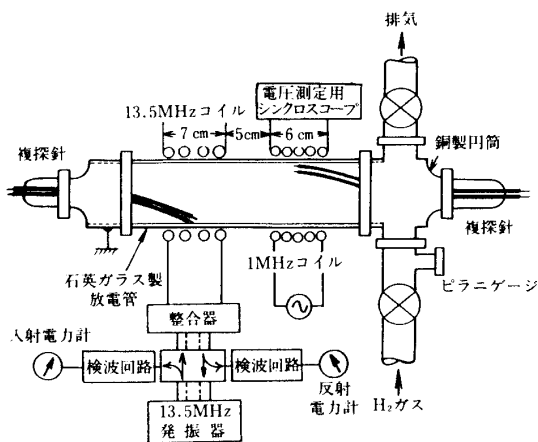
ス圧領域を調べるため、半径方向の電子密度分布をガス圧 p をいろいろと変えて測定したので、これらの結果について説明する。

2. 実験装置および方法

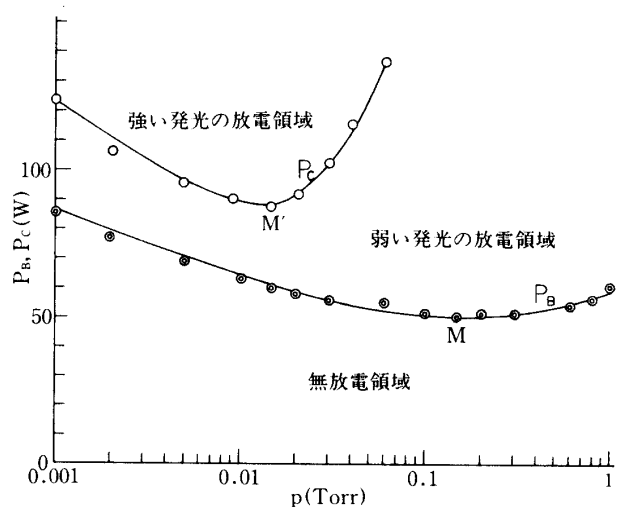
図一 1 は実験に用いた放電管および発振器の略図である。放電管内径は30mm, 1 MHz 用コイルは10回巻き, 13.5MHz 用コイルは 8 回巻きである。2つの発振器とも、発振管の陽極電圧には全波整流された高電圧が印加されているので、発振出力電圧は60Hz で振幅変調されている。1 MHz の場合は、放電管に印加されてる高周波電圧はコイル両端の電圧を高周波分圧器で分圧した後シンクロスコープで測定している。13.5MHz の場合には周波数が高いので、通過形電力計の入射電力と反射電力の検波波形をシンクロスコープで測定している。複探針は電子温度、密度、イオン飽和電流などを測定するために用いる。探針の材質は、タングステンで長さ 2 mm, 直径 0.5mm ϕ である。また、複探針は放電管軸から管壁まで半径方向に可変できる。実験を行う前に放電管全体を 10^{-6} Torr 程度に排気した後、 H_2 ガスを実験ごとに必要な量だけ入れて放電を行う。

3. 実験結果

プラズマへの入力電力と反射電力の各波形を通過形電力計とシンクロスコープを用いて観測し、同時にプラズマに挿入した探針で浮遊電位の波形を調べると、無放電から弱い発光の放電が開始した場合と、弱い発光の放電状態から強い発光の放電状態に急に移行した場合に、各波形に明らかな変化が現われる。それゆえ、弱い発光の放電開始時の入力電力の瞬時値 P_B と、強い発光の放電が生ずる臨界時における入力電力の瞬時値 P_C を正確に測定することができる。常温における H_2 ガスのガス圧 p を変化して、 P_B , P_C を測定した一例が図一 2 である。



図一 1 実験装置



図一 2 P_B , P_C とガス圧 p の関係

次に $p=0.01\text{Torr}$ において、強い発光の放電が生ずる直前の状態に入射電力を保ち、複探針を用いて電子密度 N_{0r} の半径方向分布を測定した結果が図-3である。この場合には管の中心密度 N_{00} と管壁密度 N_{0a} の比は $N_{0a}/N_{00}\simeq 0.25$ である。図-3と同様の測定をガス圧 p を変えて行くと、各ガス圧において管壁密度(N_{0a})と中心密度(N_{00})の比 N_{0a}/N_{00} が求まるので、その結果を図-4に示す。ガス圧 p が大きい(すなわち衝突周波数 ν_m が大きい)ほど N_{0a}/N_{00} が小さく、逆に p が小さい程1に近い。

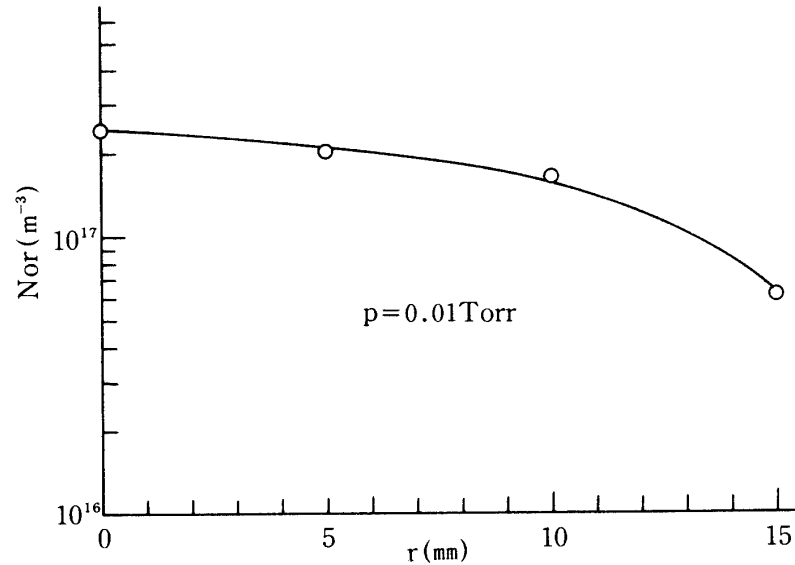


図-3 半径方向電子密度分布 ($p = 0.01\text{Torr}$ の場合)

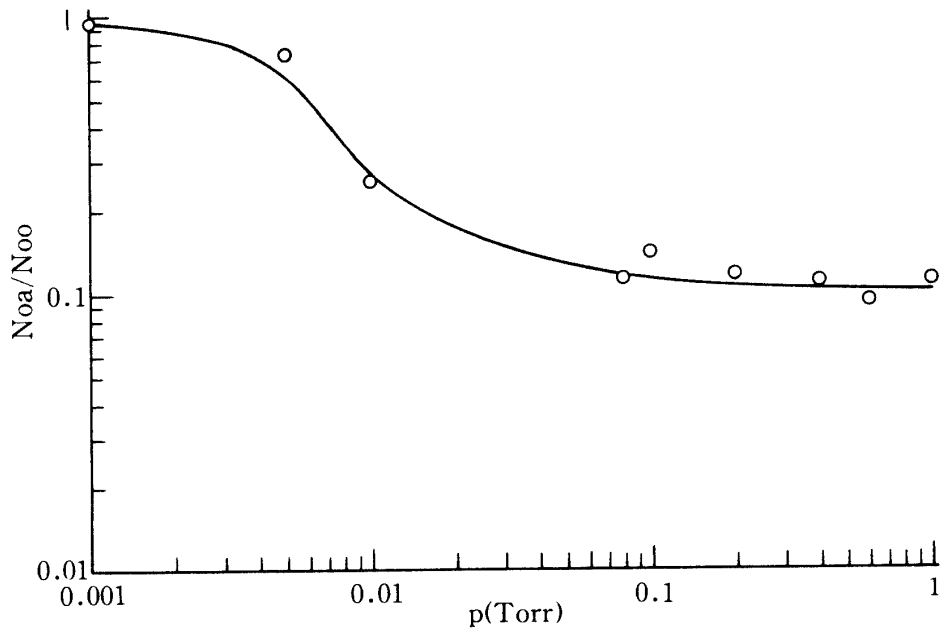


図-4 N_{0a}/N_{00} とガス圧 p の関係

4. N_{00} , N_{0a} から ξ を求めるプログラム

既に報告したように、電子密度の半径方向分布を与える式として

$$N_{0r} = N_{00} J_0(\sqrt{\nu_i/D_a} \cdot r) \quad \dots\dots\dots (1)$$

を得た。ただし、 N_{00} は $r=0$ における密度、 J_0 は零次のベッセル関数である。

放電管壁部($r=a$)の密度を N_{0a} とすると、(1)式より

$$\frac{N_{0a}}{N_{00}} = J_0(\sqrt{\nu_i/D_a} \cdot a) = J_0(\xi) \quad \dots\dots\dots (2)$$

が得られ、(2)式と図-4から ξ がガス圧 p の関数として求まる。しかし、従来は ξ の値をベッセル関数の表より近似的に求めていた。

今回は Hitchcock⁽⁵⁾の式を用いて ξ の値を求めるプログラムを、N₈₈-BASIC 言語を使用して作成した。まず、プラズマ円筒を次に述べる理由から10分割にした。既に報告したように、プラズマの最も外側の領域における拡散速度が負性コンダクタンスの出現に影響を与えているが、密度分布の測定は長さ2 mmの探針を用いて行っているため、測定位置は点状でなく2 mmの長さの範囲にわたる平均的な密度しか測定できない。また、実験に用いている放電管の半径 a は15mmであるから、この半径と探針の長さを考慮して10分割とした。それゆえ、任意の分割したプラズマ領域での ξ の計算ができるように、まず領域を選ぶように作成されている。図-5のプログラム50行目から150行目がプラズマ領域の選択枝である。また、405行目から490行目は、計算させるデータ数、中心密度 N_{00} 、管壁密度 N_{0a} およびガス圧 p の入力部分であり、図-6は入力部分の画面表示の一例である。

```

10 'MITUDO
20 GOSUB 1700
30 DIM L(2),S(21),SJ(21),SN(21),KAS(NHK),RIO(NHK),CU(NHK),KAN(NHK),KUS(NHK),VR(NHK),NH(NHK)
31 CONSOLE .:0
40 FOR I=1 TO NHK:CLS
50 LOCATE 1,1:PRINT "デ-タ NO. ";I:" Select plasma region-----"
60 LOCATE 3,3:PRINT "(1)-----"
70 PRINT " (2)-----"
80 PRINT " (3)-----"
90 PRINT " (4)-----"
100 PRINT " (5)-----"
110 PRINT " (6)-----"
120 PRINT " (7)-----"
130 PRINT " (8)-----"
140 PRINT " (9)-----"
150 PRINT " (10)-----"
160 LOCATE 36,15:INPUT "input "
170 LOCATE 42,16:INPUT ANS:GOTO 400
180 IF ANS=1 GOTO 280
190 IF ANS=2 GOTO 290
200 IF ANS=3 GOTO 300
210 IF ANS=4 GOTO 310
220 IF ANS=5 GOTO 320
230 IF ANS=6 GOTO 330
240 IF ANS=7 GOTO 340
250 IF ANS=8 GOTO 350
260 IF ANS=9 GOTO 360
270 IF ANS=10 GOTO 370
280 R=.00075:GOTO 500
290 R=.00225:GOTO 500
300 R=.00375:GOTO 500
310 R=.00525:GOTO 500
320 R=.00675:GOTO 500
330 R=.00825:GOTO 500
340 R=.00975:GOTO 500
350 R=.01125:GOTO 500
360 R=.01275:GOTO 500
370 R=.01425:GOTO 500
400 CLS
405 LOCATE 20,1:PRINT "デ-タ NO. ";1
410 LOCATE 20,3:PRINT "チュウシ ミット^ ---- n00"
420 LOCATE 36,4:PRINT " n00=◆E+♥ "
430 LOCATE 36,6:INPUT " ◆= ";AA
440 LOCATE 36,7:INPUT " ♥= ";B:AN00=AA*10^B
450 LOCATE 20,8:PRINT "カンヘキ ミット^ ---- n015"
460 LOCATE 36,9:PRINT " n015=◆E+♥ "
470 LOCATE 36,11:INPUT " ◆= ";CC
480 LOCATE 36,12:INPUT " ♥= ";DD:AN015=CC*10^DD
490 LOCATE 36,14:INPUT "カス アツ ";APP
495 GOSUB 1800:NEXT I
496 GOSUB 1850
500 NN=N015/N00
510 J=NN :GOSUB 1000

```

図-5 ξ 計算プログラム (入力部分)

13.5 MHz高周波のアーカ放電プラズマが生じる直前の電子密度分布

```

データ NC. 1

フェウシ ミツト ---- n00
n00=♣E+♥

♣= ? 2.4
♥= ? 17

ミツト= ミツト ---- n015
n015=♣E+♥

♣= ? 6.0
♥= ? 16

カス アツ ?

```

図一6 入力の画面表示一例

```

1000 L(1)=0:L(2)=0:M=0
1001 WIDTH 40.20
1002 CONSOLE .20.0.1 :COLOR 5
1009 CLS:LOCATE 11.9:PRINT "Bessel ケイサン チュウ !"
1010 LOCATE 13.18:PRINT "アト ":NHK-1K+1:" ッ テス。
1020 A00=1!:A01=-3.99999:A02=3.99999:A03=-1.77775:A04=.44435:A05=-.07092:A06=.00767:A07=-.0005
1025 A10=1.99999:A11=-3.99999:A12=2.66666:A13=-.88888:A14=.17775:A15=-.02366:A16=.0022:A17=-.00012
1030 FOR I=0 TO 300
1040 O=1/100:Y=(O/4)^2
1050 K1=(((((A07*Y+A06)*Y+A05)*Y+A04)*Y+A03)*Y+A02)*Y+A01)*Y+A00
1060 IF K1<=J THEN 1090
1070 L(1)=O
1080 NEXT I
1090 L(2)=O
1095 P=L(2)-.005
1100 U=1
1129 H=P
1130 FOR I=(P-.01) TO H+.01 STEP .001
1140 X=I
1150 GOSUB 1470
1160 IF U=>18 THEN 1190
1170 U=U+1
1190 M=M+1:S(M)=X:SJ(M)=J0:SN(M)=J1
1200 NEXT I
1210 FOR I=21 TO 1 STEP-1
1220 IF SJ(I)>=J THEN 1240
1230 NEXT I
1240 BN=I
1250 FOR N=1 TO 21
1260 IF SJ(N)<=J THEN 1280
1270 NEXT N
1280 CN=N
1290 IF (SJ(BN)-J)-(J-SJ(CN))<0 THEN 1310
1300 AJ=CN :GOTO 1350
1310 AJ=BN
1350 G=SN(AJ)/SJ(AJ)
1370 RETURN
1470 Y=(X/4)^2 : Z=X/4
1475 J0=(((((A07*Y+A06)*Y+A05)*Y+A04)*Y+A03)*Y+A02)*Y+A01)*Y+A00
1560 J1=(((((A17*Y+A16)*Y+A15)*Y+A14)*Y+A13)*Y+A12)*Y+A11)*Y+A10)*Z
1570 RETURN

```

図一7 ξ計算サブプログラム

Hitchcock のベッセル関数の式では、与えられた ξ の値に対する零次および1次のベッセル関数 $J_0(\xi)$ 、 $J_1(\xi)$ の値が計算できる。しかし、本研究では(2)式に示したように管壁密度 N_{0a} と中心密度 N_{00} の比 N_{0a}/N_{00} を与えることから、 ξ の値を調べることに意味があるので、Hitchcock の式そのままを利用しても有用でない。そのため、 N_{0a}/N_{00} を与えることから ξ の値を求め、さらに求めた ξ の値を用いて $J_0(\xi)$ 、 $J_1(\xi)$ を計算させるプログラムを開発し、サブプログラムとして利用した。図一7がサブプログラムである。1030行目で任意変数Iを0から300まで1ステップずつ増やしていき、各変数値に対する零次のベッセル関数K1を1050行目で計算させ、このK1の値が図5の510行目の値(N_{0a}/N_{00} の値)と一致するかを1060行目で判断させている。そして等しくなった時の変数値Iを ξ とおき直し、この ξ の値を用いて $J_0(\xi)$ 、 $J_1(\xi)$ を1475行目、1560行目で計算させるプログ

データノカス 9

ケイサン クッカ

カスアツ p(Torr)	リョウイキ ハンコウ	チュウシンミツ Noo(m-3)	カンベキミツ Noa(m-3)	ミツ ヒ Noa / Noo	グサ イ
.001	10	2.81E+17	2.7E+17	.960854	.398
.005	10	2.33E+17	1.67E+17	.716738	1.107
.01	10	2.4E+17	6E+16	.25	1.955
.08	10	4.3E+17	4.8E+16	.111628	2.198
.1	10	5E+17	7.4E+16	.148	2.133
.2	10	7.6E+17	9.04999E+16	.119079	2.184
.4	10	3.41001E+18	3.5E+17	.102639	2.214
.6	10	6.13E+17	5.28E+16	.0861337	2.244
1	10	2.35E+18	2.7E+17	.114893	2.192

表-1 ξ の計算結果

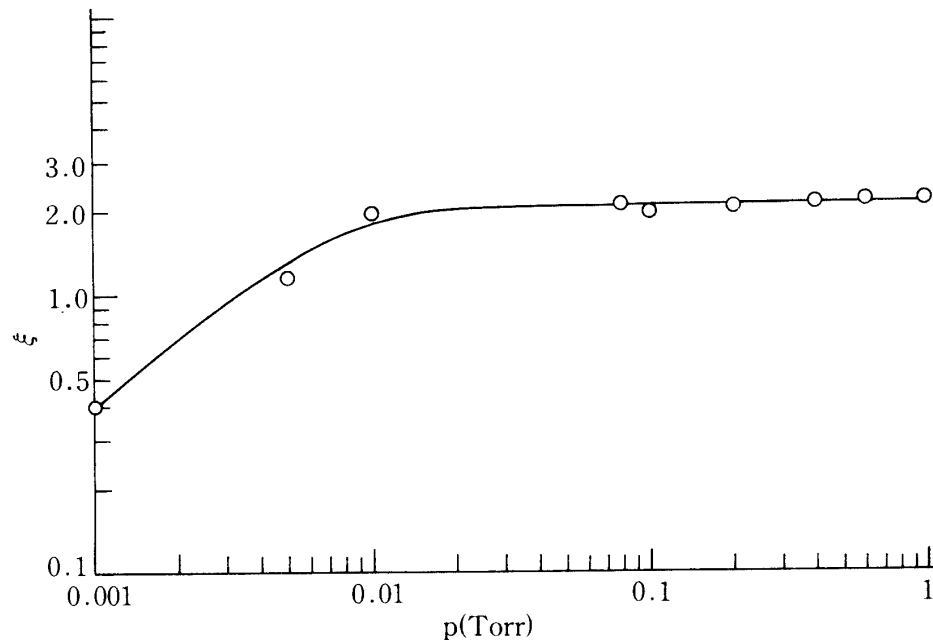


図-8 ξ とガス圧 p の関係

ラムになっている。 $J_0(\xi)$, $J_1(\xi)$ は本論文の中では使用しないが、プラズマのコンダクタンス σ_{10}' が負になるかどうかを検討する場合に、拡散速度 v_{0r} の値を計算する時に使用する。⁽⁷⁾

5. ξ の計算結果

表-1は、4章で説明したプログラムを用いて ξ を計算した結果である。表ではガス圧の小さい順に結果が並んでいるが、これはガス圧 p の小さい順にデーターを並び換え、プリントアウトさせるソート機能を持たせたプログラムになっているためである。従来の ξ の計算では、 N_{0a}/N_{00} の値に最も近い $J_0(\xi)$ の値をベッセル関数表から求め、この値をもとにさらにニュートン補間法の計算を行うことから ξ の値を求めていた。このため、 ξ の計算に時間を要していた。しかし、本プログラムを実行させた結果、表-1がプリントアウトされるまでに要した時間は8分30秒となり、計算時間は1/30に短縮された。図-8は、計算結果から ξ とガス圧 p の関係を作図したものである。

6. 結 言

13.5MHz 高周波放電における弱い発光の放電から強い発光の放電への移行機構を研究する目的のため、強い発光の放電が生じる直前の弱い発光の放電状態における電子密度の半径方向分布を広いガス圧の範囲で測定した。そして、新しく作成したベッセル関数 ξ の計算プログラムに実験結果を入力し、 ξ の計算を実行させた。その結果、従来の ξ を求めていた方法に較べて入力さえ間違わなければ早くて正確に ξ の値が得られることがわかった。また、プログラムを発展させて、半径方向の拡散速度 v_{0r} やプラズマのコンダクタンス $\sigma_{1\theta'}$ とガス圧 p の関係を求めることが出来ることもわかった。

本研究は本学の特別研究費により行われたもので、多大の御援助と深い御理解をいただいている金井兼造理事長、正田強学長をはじめ関係各位に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1)高元, 向山, 長浜: 電気学会雑誌 91, 753(1971)
- (2)長濱, 福村, 高元: 電気学会論文誌 103-A, 5, 265(1983)
- (3)長濱: 福井工業大学研究紀要 15号, 37(1985)
- (4)長濱: 福井工業大学研究紀要 12号, 1 (1982)
- (5)山内二郎他: 電子計算機のための数値計算法III, 培風館, 166(昭50)
- (6)長濱: 福井工業大学研究紀要 13号, 15(1983)
- (7)長濱: (3)と同じ