N₂/NO 混合ガス中の光電離電流

正員 内田 哲史 (昭和アルミニウム缶)

正員 伊藤 晴雄 (千葉工業大学)

正員 生田 信皓 (千葉工業大学)

Photoionization current in N₂/NO mixtures.

Testushi Uchida, Member (Showa Aluminium Can),

H.Itoh, Member and N.Ikuta, Member (Chiba Institute of Technology)

Measurements of photoionization current have been carried out in N₂/NO mixtures for the first step to make clear the mechanism of photoionization processes of air. For the purpose of the study, a deuterium discharge lamp with MgF₂ window is used for the vacuum ultraviolet source. CaF₂, BaF₂ and quartz filters are prepared to change short side wavelengths of the vacuum ultraviolet. The photoionization current produced by the vacuum ultraviolet absorption is detected by eccentric cylinder electrodes in the gas cell. With the wavelength shorter than 134 nm, the observed currents are proportional to the partial pressure of NO clearly. Consequently, it is confirmed that the NO is ionized by the vacuum ultraviolet. Furthermore, the photoelectron current emitted from the surface of electrode by the ultraviolet, is observed simultaneously. We also find the decreases of photoelectron current with an increase in the partial pressure of NO. It is proved that the decrease of these currents are caused by the reduction in ultraviolet which can release photoelectrons from the electrode surface. In this case, ultraviolet will be absorbed by NO in the optical path and the gap space.

キーワード：真空紫外光，光電離，一酸化窒素，光吸収，光電子放出，MgF₂

1. はじめに

170~110nm の分光した真空紫外 (vacuum ultraviolet, 以下 VUV と記す) 光を空気と NO に照射して光電離電流の波長依存性を調べた結果について報告した⁽¹⁾⁽²⁾。NO 中では 760Torr だけの圧力であったが、その電離電圧 9.25eV に相当する波長 134nm より短波長域で光電離電流を観測できた。空気の場合には VUV 光のエネルギーが N₂ と O₂ の電離電圧 15.8eV (79.5nm) および 12.5eV (101.6nm) には達しない 160nm 付近から短波長にかけて、詳細な機構は不明であるが、光電離によると思われる電流を観測した。電流は N₂ の解離電圧 9.76eV (127.0nm) 付近より短い波長で急激に大きくなったことから、解離 N 原子が O₂ あるいは O との反応により NO もしくは NO₂ を生成し、それらが VUV 光により光電離したものと推測した。

このような実験結果を再確認する目的で、今回は 11eV を光子エネルギーの上限とする VUV 光を N₂/NO 混合ガスに照射し、生じた電流の印加電圧、全ガス圧力、NO 濃度、更に VUV 光波長等への依存性を調べた。N₂ に NO を混合したのは、空気のように、NO が生成される過程とこれが光電離する過程を個々に分けて調べるためである。今回

は、NO が生成された後 VUV 光の下でどのような現象が生ずるかに注目した。その結果、観測した電流は NO の 1 光子吸収による光電離反応によって生じたものであることを、光吸収、光電離断面積等のデータにより確認した。したがって、前論文⁽²⁾で述べた空気中の 127nm より短波長域で観測した電流は、そこで推測したように NO の光電離現象によるものであると判断できた。

本論文のもう 1 つの重要な結論は NO を直接光電離することができない VUV 光が、NO によって光吸収される結果も観測されたことである。しかし、光吸収した NO が別の NO、あるいは N₂ との衝突により電離しているか検討したが、これを積極的に支持する実験結果を確認することはできなかった。更に前論文⁽²⁾で注目した 160nm 付近より短波長域における光電離機構について十分明らかにすることができないままになっている。

本論文は、以上の結論に至った光電離、光吸収現象を放電特性として捕えた立場から詳細に記述してある。これらの応用分野に注目すると、環境問題、中でも大気汚染の大きな要因となっている NO_x の低減を目的とした汚染ガス処理技術の改善⁽³⁾⁽⁴⁾とその基礎現象、更に大気中の放電開始過程に関する理解に役立つものと考えられる。

2. 実験装置と方法

10⁻⁸Torr オーダーまで排気できる 200mmφ×300mm の円筒型ステンレス鋼製チェンバー内に図 1 のような偏心円筒電極を設けて電極間に流れる電流を測定した。電極はステンレス鋼製で、外側電極(陽極 A, 内径 115mmφ, 長さ 125mm)と内側電極(陰極 C, 外径 2mmφ, 長さ 100mm)を中心軸間で 42.5mm 隔てて平行に配置し、セラミック製の絶縁端子 D₁, D₂ で固定した。VUV 光光源 S は, MgF₂

図 1 実験容器と電極の概略図

Fig.1. Schematic diagram of experimental chamber and electrode.

を窓にもつ重水素放電管 (HPK L879) を用い、内側電極を直接照射するのを避けながら、光吸収セルである偏心円筒電極間空間 G₁ を広い範囲にわたり照射した。外側電極に直列抵抗 R を通して直流安定化電源 P(川口電機 V713) により電圧を印加し、内側電極回路に挿入した微少電流計 PA(Keithley 617) で電流を測定した。

光吸収の波長依存性を調べるために、光源の窓材 MgF₂ の他に CaF₂, BaF₂, quartz のフィルター F を光源の出射窓から 5cm 離れた電極入口に置いた。この光路 5cm の領域 G₂ は、光電離を検証するための光吸収セル G₁ の前段に置かれたもう 1 つの光吸収セルとなっている。したがって、光吸収が大きくなれば、G₂ 中でも VUV 光が吸収され、光電離を確認したい偏心円筒電極間には極めて弱い VUV 光が入射される場合も起こる。

表 1 フィルターのしゃ断波長とエネルギー

Table 1. Cut off wavelength and their energy of filters.

	MgF ₂	CaF ₂	BaF ₂	quartz
遮断波長 (nm)	125	130	150	180
(eV)	9.91	9.53	8.26	6.88
最短遮断波長 (nm)	115	122	134	170
(eV)	10.77	10.16	9.25	7.29

用いたフィルターの透過率曲線(付録図 1) から 50% 透過率の波長を読み、本論文ではフィルターのしゃ断波長とする。同じ透過率曲線で短波長端を、最短しゃ断波長と呼び、これらを表 1 に示した。

VUV 光源である重水素放電管の発光スペクトル(付録図 2) は、160nm 付近に 2 つのピークがあり、120nm 付近までスペクトルが観測されている。この図中に付録図 1 に示したフィルターのしゃ断波長を記入した。

用いたガスは N₂(99.9995%) と 3 種類の N₂/NO 混合ガスである。NO 混合率は、0.1% (0.1006%), 1.0% (1.00%), 10% (10.2%) である。

これらは容器内を十分ガス出した後、0°C 換算ガス圧力 p₀ で封入した。封入圧力は 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 Torr であった。ガス圧力は静電容量型圧力計により測定した。全ての実験は室温において行った。また、測定毎にガス出しを行い吸着ガスや不純物の混入に注意した。

3. 実験結果

〈3・1〉 真空中の電流電圧特性 10⁻⁸Torr オーダーまで排気した容器内に VUV 光を照射して電流を測定した結果を、図 2(a) に示した⁽⁵⁾。正電圧印加時の電流は、VUV 光の外側電極表面での反射光が内側電極を照射して放出された光電子によるものである。内側電極の表面積が小さいことと、これを照射する VUV 光が反射光であることから電流は 10⁻¹²A オーダーと小さい値を示した。外側電極は内側電極を取り囲む構造であるため、低い電圧から飽和電流が得られた。飽和電流は MgF₂ で最も大きく CaF₂, BaF₂, quartz の順に減少した。

これに対して負電圧印加時の電流は、電圧を 0 から負側に高くしていくと増加した。この電流は、VUV 光が外側電極面を直接照射したことにより放出された光電子によるも

図 2 真空中における VUV 光の I-V 曲線

Fig.2. I-V curves in vacuum.

ので、正の電流値より約 10^3 倍大きくなった。電流のフィルターによるしゃ断波長依存性は、正電流の場合と同じであった。しかし、正電圧側とは対照的に細い円筒電極で光電子を収集するため、測定した電圧範囲では電流の飽和は観測されなかった。

このように VUV 光照射により 2 つの電極面から放出された光電子電流がフィルターの種類と印加電圧に応じてバランスしたとき電流が 0 となった。電流 0 付近の拡大図を同図 (b) に示した。

〈3・2〉 N_2/NO 混合ガス中の電流電圧特性 偏心円筒電極間を VUV 光で照射しながら、3 種類の N_2/NO 混合ガス中でガス圧力をパラメータとして電極間電圧を変えて電流を測定した。その結果を、0.1%NO では図 3, 4 に、1.0%NO では図 5, 6 に、10.2% NO では図 7, 8 にそれぞれ示した。いずれも横軸は印加電圧 V を圧力 p_0 で割った値 V/p_0 ($V/Torr$) で表した。一般に、不平等電界ギャップの電界分布は電極の幾何学的条件だけで決まり、その大きさは印加電圧に比例する。したがって $V/p_0 = k (E/p_0)$ と書ける。この値は電極間の任意の点における E/p_0 を表す指標となる。既に述べたように⁽⁵⁾、測定した電流がガス圧力には無関係に V/p_0 のみに依存した曲線で表現できるならば、その電流は光電子放出電流⁽⁶⁾⁽⁷⁾であると判断でき、ガス中で電子生成が行なわれている場合の電流と区別することが可能となる。

(1) N_2/NO (0.1%) 混合ガス中の結果 図 3 は N_2/NO (0.1%) 混合ガス中で MgF_2 (○印) と CaF_2 (●印) のフィルターを用いた場合の結果である。両者とも、それぞれ 10 本の曲線が電流の小さい方から大きい方へ 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 0.5, 10, 20, 50, 100 Torr の順に並んでいる。 V/p_0 に対する電流の変化は

1. 低 V/p_0 では、電流の急増から平坦部へ移行する A 領域
 2. 中 V/p_0 では、平坦な飽和特性を示す B 領域
 3. 高 V/p_0 では、飽和電流から電子の衝突電離による急増が現れる C 領域
- の共通した 3 つの領域に分類できる。

図 3 の MgF_2 (○印), CaF_2 (●印) の場合はそれぞれ下から 4, 7 および 10 番目の曲線で表している 1, 10, 100 Torr の飽和電流値は、10 倍ずつ大きくなり、NO の分圧に比例している。図中、2 Torr 以上のガス圧力の電流の測定点が途中で無くなっているが、最も右に位置する点はそれぞれのガス圧力で測定可能な最も高い V/p_0 であり、それよりも高くなると外側電極と真空容器との間で放電が起こり電流測定が不可能となったためである。このような現象は、同じ理由で図 4~図 8 でも共通して観測された。

これに対して、図 4 は、 BaF_2 (▼印), quartz (▽印) のフィルターを用いた場合の電流を示している。ガス圧力は図 3 と同じく 10 通りについて調べた。この電流変化は、図 3 とは別の A, B, C 領域として分類でき、以下のようにまとめることができる。

- ① A 領域の電流は特に BaF_2 でガス圧力依存性は小さく、

V/p_0 のみに依存する。電流値は図 3 より小さい。

- ② B 領域の電流も特に BaF_2 で V/p_0 のみに依存し、飽和電流は $V/p_0 = 20 \sim 100 V/Torr$ にわたって観測された。1 つのガス圧力における電流は、図 3 中の曲線のように広い V/p_0 で飽和特性は描けなかった。

図 3 N_2/NO (0.1%) 混合ガス中の $I-V/p_0$ 曲線 (MgF_2, CaF_2 フィルター)

Fig.3. $I-V/p_0$ curves in N_2/NO (0.1%) mixture. (MgF_2 and CaF_2 filters)

図 4 N_2/NO (0.1%) 混合ガス中の $I-V/p_0$ 曲線 ($BaF_2, quartz$ フィルター)

Fig.4. $I-V/p_0$ curves in N_2/NO (0.1%) mixture. (BaF_2 and quartz filters)

③ C 領域の電流の立ち上がりは、図 3 と同じくガス圧力が高い場合ほど低い V/p_0 で観測された。

このような電流変化は、電極表面から放出された光電子が、ガス分子との衝突による後方散乱をのがれてガス中に注入される光電子の透過特性と、それに引き続く電子衝突

による電離増倍過程⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾ を描く特性として共通している。特に BaF₂ の場合、A, B 領域でガス圧力依存性がなく V/p_0 のみに依存していることは測定電流が電極面から放出された光電子電流であると判断できる⁽⁵⁾。

図 5 N₂/NO(1.0%) 混合ガス中の I-V/p₀ 曲線 (MgF₂, CaF₂ フィルター)

Fig.5. I-V/p₀ curves in N₂/NO (1.0%) mixture. (MgF₂ and CaF₂ filters)

図 7 N₂/NO(10.2%) 混合ガス中の I-V/p₀ 曲線 (MgF₂, CaF₂ フィルター)

Fig.7. I-V/p₀ curves in N₂/NO (10.2%) mixture. (MgF₂ and CaF₂ filters)

図 6 N₂/NO(1.0%) 混合ガス中の I-V/p₀ 曲線 (BaF₂, quartz フィルター)

Fig.6. I-V/p₀ curves in N₂/NO (1.0%) mixture. (BaF₂ and quartz filters)

図 8 N₂/NO(10.2%) 混合ガス中の I-V/p₀ 曲線 (BaF₂, quartz フィルター)

Fig.8. I-V/p₀ curves in N₂/NO (10.2%) mixture. (BaF₂ and quartz filters)

quartz の場合、A と B 領域の電流はガス圧力が高くなる程減少しているのが観測された。

(2) $N_2/NO(1.0\%)$ 混合ガス中の結果 NO 濃度 1.0% における電流の測定結果を図 5, 6 に示した。NO 濃度が図 3, 4 の場合より 1 桁増えたことにより、図 5 中の電流は同じガス圧力では、図 3 中の値の約 10 倍となり、確かに NO 濃度の増加に比例して飽和電流値は大きくなっている。しかし、ガス圧力が最も高い 100 Torr の飽和電流値は MgF_2 , CaF_2 の場合、共にそれまでのガス圧力の増加分に対する電流変化幅よりも小さくなった。

図 6 の電流は、図 4 より僅かに増加したが、 BaF_2 では V/p_0 によく依存性した電流が図 4 と同様に観測されている。quartz の場合、A, B 領域の電流のガス圧力依存性は 0.1%NO(図 4) の場合と同じ傾向でより大きくなった。

(3) $N_2/NO(10.2\%)$ 混合ガス中の結果 NO 濃度 10.2% における結果を図 7, 8 に示した。図 7 中の低ガス圧力における飽和電流値は図 5 と比較して約 1 桁増加している。しかし、ガス圧力が 10 Torr を越えると、飽和電流値はそれまでの増加する傾向から却って減少した。

このような傾向は、図 8 でも現れている。すなわち、低 V/p_0 域では V/p_0 の上昇と共に電流値は飽和に向かって増加するが、ガス圧力の高い場合ほど A 領域から低い電流値をとったまま C 領域の電離増倍域に移行している。図 4 それに図 6 より更に強いガス圧力依存性が認められた。

4. 考察

<4.1> 電流の V/p_0 依存性 VUV 光照射の下で偏心円筒電極間電流を測定し、電流- V/p_0 特性として表示した。これらの特性は V/p_0 の大きさにより A, B, C の 3 領域に分類できることを <3.2> の (1) で述べた。しかし、図 3, 5, 7 と図 4, 6, 8 との結果は互に異なったものとなった。これは

① NO の光電離

② 電極表面からの光電子放出

という荷電粒子発生法の違いによるものである。

まず、①の現象により観測される図 3, 5, 7 の電流は、

1. 電圧の上昇に伴い電流が増加するのは光電離で発生した電子が外側電極へ収集され易くなるためである (A 領域)。
2. NO の光電離で発生した電子を全て収集できるようになると、電流は飽和特性を描く (B 領域)。
3. 更に電圧を上昇すると、光電離で生成された電子による衝突電離作用により電流は増大する (C 領域)。
4. B 領域の飽和電流は、NO 濃度、したがって NO 分圧が増すほど大きくなり、ガス空間での荷電粒子の生成率が NO 分圧に比例して増えたことを意味する。これは <4.3> で改めて検討する。

一方、②による図 4, 6, 8 では次の特徴がある。

1. A 領域の電流は、 BaF_2 では、図 8 を除いて V/p_0 だけに依存する。これは光電子放出電流の特徴⁽⁵⁾である。quartz の場合は、ガス圧力の上昇に伴って電流が減少する割合

が大きい。この傾向は NO 分圧が高い程顕著になる。

2. B 領域の飽和電流は、NO 分圧の低い場合には明確な形で観測される。しかし、NO 分圧が高くなると電流はより低い値をとりながら V/p_0 の上昇と共に増加し、C 領域に移る。このため飽和特性は狭い V/p_0 範囲に限ったものとなる。NO 分圧が高くなるほど電流が小さくなるのは、UV 光が NO に吸収され電極表面を照射する UV 光強度が弱くなったことによるものであろう。

3. C 領域の電流の立ち上がりは、ガス圧力が高いほど低い V/p_0 から始まる。これは①の場合と同じである。

<4.2> 飽和電流の光子エネルギー依存性 図 9 に NO 分圧 $p_{NO} = 0.001, 0.01, 0.1$ 及び 1 Torr における飽和電流 I_s のフィルターによるしゃ断波長 (光子エネルギー) 依存性を示した。

quartz から BaF_2 間の飽和電流は、quartz の場合を基準にすると約 7 倍程度増大し、 BaF_2 のしゃ断波長 150nm より短い波長でも同じ傾向で電流は増している。

CaF_2 になると、このしゃ断波長は 9.53eV, 130nm になり、電流は急増する。この波長領域は NO の電離電圧 9.25eV を上回っていること、 CaF_2 , MgF_2 の場合には NO 分圧に比例して電流はほぼ 1 桁ずつ大きくなっていることなどから、光電離による荷電粒子生成を予想させる。

<4.3> NO 分圧依存性 図 3~8 の飽和電流を、NO 分圧に対してプロットすると図 10 が得られた。NO 分圧の低い方の電流は図中に点線で記入した真空中の光電子電流の飽和値 I_s (図 2) に漸近している。

MgF_2 , CaF_2 フィルターを用いた場合は、NO 分圧 1 Torr 以下では 10^{-4} Torr 付近から勾配が 1, したがって、電流は NO 分圧に正比例して増加していることが確認できる。1.0%NO と 0.1%NO 混合ガスの結果は、極めてよく一致している。10.2% では、やや大きめの電流が観測されているが、1 Torr 以下での NO 分圧依存性は他の 2 種類の濃度の場合と同じである。従ってこれら 2 本の NO 分圧に正比例する電流成分は、NO の 1 光子吸収による光電離によるものと判断できる。

<4.4> 光吸収による影響 図 10 中、NO 分圧 1Torr 以上で飽和電流値は減少した。電流の NO に対する減少率

図 9 飽和電流の波長依存性

Fig.9. Photon energy dependence of saturation current.

図10 飽和電流のNO分圧依存性

Fig.10. Partial pressure dependence of saturation current.

はMgF₂, CaF₂と比較して, BaF₂, quartzでは小さくなっている。この電流の減少は, 図1中でガスを満した放電容器内の光源の出射窓と電極入り口までの5cmの光路G₂の存在によるものである。これを検証するため, G₂を通過する間のVUV光強度の減衰量を検討した。すなわち, NOの121.5nmにおける吸収係数 α_ν ⁽¹⁾⁽⁸⁾を用いて, 次の式によりガスセル中へのVUV光入射口における光強度 I_{in} を計算した。

$$I_{in}(x) = I_0 \cdot \exp \left[-\alpha_\nu(T) \cdot \frac{p_{NO}}{760} \cdot \frac{273}{T} \cdot x \right] \dots (1)$$

I_0 : 光源出射口の光強度, p_{NO} : 0°CにおけるNO分圧, $\alpha_\nu = 64.6(\text{cm}^{-1})$, $x = 5(\text{cm})$, $T = 273(\text{K})$

計算結果を, I_{in}/I_0 として図11に示した。VUV光は5cm進む間に吸収され $p_{NO} = 1$ Torrでは約20%, 10Torrでは90%減衰している。このようにG₂中のNOの光吸収により減衰した光が偏心円筒電極間G₁を照射しているため図10の光電離電流の飽和電流値が減少することになる。

そこでG₂中での光吸収も考慮した電極間G₁での光吸収量を計算した。(1)式を用い, VUV光が放電空間に入射した点($x_1 = 5\text{cm}$)と, 対向した外側電極内面における強度($x_2 = 17.5\text{cm}$)の差を取り, これを I_0 で割った値を ΔA とし図12に結果を示した。 ΔA は, VUV光の吸収量($=I_0\Delta A$)に比例した量であるが, 図12と図10は互いに一致したNO分圧依存性を示している。こうして図10に示したMgF₂, CaF₂の飽和電流の10TorrまでのNO分圧依存性が再現されたことになる。

NOの吸収係数はMgF₂からBaF₂までの最短しゃ断波長115~134nmにおいて45~100cm⁻¹の値で鋭い山と谷をくり返し描く形で変化している⁽⁹⁾。今回の実験では, 短波長側をカットオフした光照射をしたので, この短波長端か

ら長波長側にわたるVUV光で生じた光電離電流を波長について積分した形で測定したことになる。したがって, NOの吸収係数は115~134nmの間で平均すると約60cm⁻¹となり, (1)式の計算に用いた $\alpha = 64.5\text{cm}^{-1}$ に近い。図12の結果が図10の結果と一致したのは, 以上のような理由によっている。なお, 光電離される可能性のある分子はNOの他, 9.75eVの電離電圧をもつNO₂も該当する。しかし, これまでの検討結果では殆どがNOであると判断できる。

〈4・5〉 134nmより長波長域での光吸収 図10のBaF₂とquartzの場合, 飽和電流は1Torr付近まで平坦である。この光子エネルギーでは, N₂とNOの電離電圧には遠く, 当然の結果である。そしてこの電流は図2に示した真空中の飽和電流と等しいことから内側電極表面からの光電子放出電流と判断できる。しかし, 電流は1Torrを越すと次第に小さくなるが, これは光源と対向した位置にある電極面を照射するVUV光強度が, 光路G₂と偏心円筒電極間G₁におけるNOの光吸収により弱くなっていること, すなわち, VUVはNOにより光吸収されていると判断できる。この減少率がMgF₂やCaF₂の場合と比較して小さくなっているのは150nmより長波長におけるNOの光吸収係数が短波長におけるそれより小さいためであろう。この電流の減少はNOの電子付着によるものと考えられるが, たとえそうであったとしても定常電流値を減少させることはないはずである。したがって, この場合はNOの光吸収による光電子電流の減少と考えられる。150nmより長波長側での光吸収は, その波長域からNOの β , δ , ϵ , γ バンドに相当している⁽¹⁰⁾。このような波長域での光吸収が観測されたものの, 今回の実験結果では, 光吸収したNO

図11 NO分圧に対する光吸収率

Fig.11. Photoabsorption rate against partial pressure of NO.

図12 NO分圧に対する光吸収量

Fig.12. Amount of photoabsorption against partial pressure of NO.

が NO または N_2 とで新たに荷電粒子を生成した可能性はほとんど無いと判断できた。

5. まとめ

偏心円筒電極間で N_2/NO 混合ガス中に VUV 光を照射し電流を測定した。

(1) 電流は、NO の光電離が可能な 134nm より短い波長域で、NO 分圧に比例した大きさに観測された。したがってこの電流は 1 光子吸収による NO の光電離によるものと判断できた。この結果は前論文で述べた空気的光電離電流が 134nm より短波長になると急増した現象についての解釈を支持する。

(2) CaF_2 のしゃ断波長 134nm より長い波長域では、電極表面からの光電子放出による電流が観測された。 BaF_2 を用いた場合の電流は、quartz を用いた場合より約 7 倍増加したが、これはより広い波長範囲の VUV 光を照射したことによっている。

(3) しかし、同じ波長域での実験において光電子放出電流が NO 分圧の増加によって小さくなる現象も観測した。この原因は内側電極表面を照射する VUV 光強度が NO の光吸収により減少したことによるものと考えられる。この現象はしゃ断波長の長い quartz を用いた場合にも、絶対値としては小さいものの、相対的には大きな吸収率をもつ結果として観測された。

(4) 光吸収した NO が、他の NO 又は N_2 との衝突により荷電粒子を生成する過程は、あったとしても無視できる程度に小さいものであると判断できた。したがって光吸収した NO は、他の分子にエネルギーを移行する機会がないままガス中に存在している可能性がある。著者らが前論文の空气中で観測した結果、特に 160nm より短波長域での光電離電流の発生過程を考える際の参考にしたい。

武田雅充君と堀江浩史君、論文のまとめ作業に協力いただいた西沢信康君（現在、東京電力（株）に勤務）に感謝する。

（平成 10 年 4 月 30 日 受付）

文 献

- (1) 伊藤、佐伯、柏木、御所：平成 7 年電気学会全国大会 S5-2 (1995)
- (2) 伊藤、佐伯、柏木：電気学会論文誌 117-A, 29-34 (1997)
- (3) 「放電プラズマ応用の現状とその将来展望」、1994 年度第 3 回静電気学会研究会、日本伝熱学会研究会 (1994)
- (4) 「環境浄化および水資源有効利用への放電・プラズマに関する研究」、鹿島学術振興財団、昭和 62 年 3 月
- (5) 伊藤、生田：電気学会論文誌 118-A 11 月号掲載決定
- (6) 伊藤、生田：電気学会論文誌 104-A, 17 (1984)
- (7) H. Itoh and N. Ikuta : Contributed Paper of ICPIGXVI 72 (1983)
- (8) G.V. Marr : *Photoionization Processes in Gases*, Acad. Press (1967)
- (9) J. Berkowitz : *Photoabsorption, photoionization and photoelectron spectroscopy*, 234, Acad. Press (1979)
- (10) F.F. Marmo : *J. Opt. Soc. Am.*, 43, 1186 (1953)
- (11) 株式会社 光洋 : カタログから転載
- (12) 浜松ホトニクス (株) : 重水素放電管カタログ

付録図 1 フィルターの透過率⁽¹¹⁾
Appendix fig.1. Transmission coefficient of filters.

付録図 2 重水素放電管の発光スペクトル⁽¹²⁾
Appendix fig.2. Emission spectra of deuterium discharge lamp.

内田 哲史

（正員） 1970 年 6 月 9 日生。96 年 3 月千葉工業大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月、昭和アルミニウム（株）に入社、現在に至る。

伊藤 晴雄

（正員） 1945 年 9 月 11 日生。68 年 3 月千葉工業大学電気工学科卒業。68 年 4 月～70 年 3 月理化学研究所勤務。72 年 3 月徳島大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月千葉工業大学助手、現在、同教授。放電基礎過程の研究に従事。工学博士。日本物理学会、応用物理学会、静電気学会会員。

生田 信皓

（正員） 1931 年 10 月 22 日生。51 年 3 月徳島工業専門学校電気科卒業。県立工業高校教諭を経て、64 年 4 月徳島大学工学部助手。その後、同工業短期大学部を経て、工学部電気電子工学科教授。95 年 3 月定年退官。同年 4 月千葉工業大学付属研究所教授、徳島大学名誉教授。コロナ放電の研究から、近年は放電基礎過程の研究に従事。工学博士。72 年電気学会論文賞受賞。電気学会四国支部長。日本物理学会、応用物理学会、日本分光学会会員。