

気体放電パラメータ測定 (10)

— CO₂ + N₂ + He 三種混合ガスの電離係数 (N₂ パラメータ) —

長谷川 博 一* ・ 佐 藤 義 則**
村 井 国 昭*** ・ 下 妻 光 夫****

Measurement of the Gas Discharge Parameter (10)

—The Ionization Coefficient in Ternary Mixtures for CO₂, N₂ and He (Parameter N₂)—

Hirokazu HASEGAWA and Yoshinori SATO, Kuniaki MURAI
and Mitsuo SHIMOZUMA

要 旨

CO₂ ガスレーザの混合ガスの電離係数を定常タウンゼント法で測定した。実験は、CO₂ と He の比を 1 : 3, 1 : 8 とし N₂ の混合率 K をパラメータとした混合ガスでおこなった。その結果 K の増加にともなって電離係数は、減少した。

Abstract

The ionization coefficients for gas mixtures used in CO₂ lasers have been measured experimentally by the steady-state Townsend method.

The experiment have been made gas mixtures with CO₂ and He in the ratio 1:3, 1:8 and parameter in N₂ partial pressure K .

In result, the ionization coefficients have been decreased by increasing K .

1. 結 言

ガスレーザにおいて CO₂ ガスレーザは、他のガスレーザに比べて出力が大きく、効率も高いため広く工業用に使用されつつある。この CO₂ ガスレーザのガス材料の主成分は、CO₂, N₂, He 三種混合ガスが一般的である。しかしガスレーザの研究、開発を考える上で重要なデータである電離係数などの放電基礎パラメータの報告は、Lakshminarasimha et al. (1976)⁽¹⁾, Davies (1978)⁽²⁾, Sierra et al. (1981)⁽³⁾ などがおこなっており、多くはないようである。また数値解析の報告は、Lowke et al. (1973)⁽⁴⁾, Sakai et al.

(1979)⁽⁵⁾ がおこなっている。しかしこれらの報告は、測定された E/p_0 や混合率 K の範囲が狭い。

筆者らは、これら三種混合ガスの電離係数の測定範囲を拡張することで CO₂ ガスレーザの設計に必要な基礎データを求めることを目的としてすでに CO₂ と N₂ の混合率を一定として He の混合率 $K = 0 \sim 100\%$ を測定し報告した⁽⁶⁾⁽⁷⁾。その結果より He のある混合率 K に対して最大値を持つ傾向が得られている。今回は、CO₂ と He の混合率を一定とし N₂ の K を $0 \sim 100\%$ 変化させて電離係数 α 、二次電離係数 γ を測定した⁽⁸⁾ ので報告する。

2. 実験装置、実験方法および解析方法

2-1 実験装置

放電チェンバ、真空排気系装置については、文献(9)に詳しく述べてあるのでここでは省略する。

* 助 手 電気工学科

** 助教授 電気工学科

*** 教 授 電気工学科

**** 北 大 工学部電気工学科

図1は、本実験の測定系全体のブロック図である。新しい測定装置のみについて述べると、オイルマノメータの油による影響をなくするために圧力計をフルスケール100 Torr 分解度1/1000のデジタルマノメータ(MKS バラートロン社, 2 BHS-B-B-100)にし、またこれに接続したデジタルボルトメータ(ソア社, Model MC-545, 4.5桁最大分解能100 μV)で圧力を直読でき混合ガスの分圧比の設定が容易となっている。デジタルマノメータの電源は、ボルゲン社, VTM 23 WA (出力15 V 0.5 A)を使用した。実験に使用した試料ガスの純度は、 CO_2 ガス 99.992% (液化炭酸KK), N_2 ガス 99.999% (日本酸素kk), He ガス 99.9999% (日本酸素kk) である。

2-2 実験方法および解析方法

実験方法は、定常タウンゼント法(SST法)を用い設定圧力 p 、換算電界 E/p の条件下で電離電流 I をギャップ長 d に対して測定した。試料混合ガスは、 CO_2 と He の体積混合率を1:3および1:8として、これに N_2 を $K=0\sim 100\%$ 混合した。また混合率を正確にするため分圧比の小さなガスから先にチェンバに導入した。実験の測定範囲は $E/p_0=54, 108, 161, 215 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Torr}^{-1}$ について $10^{-3}<I<10^{-8} \text{ A}$, $0.2<d<2.5 \text{ cm}$ (E は電界, p_0 は 0°C に換算した気圧)でおこなった。

解析方法は、測定した電離電流 I とギャップ長 d (例えば図2は $E/p_0=161 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Torr}^{-1}$ のときの電離電流増倍曲線)をマイクロコンピュータを使用して線型化最小二乗法でタウンゼントの電離電流成長式にカーブフィッティングして電離係数 α 、二次電離係数 γ を決定した。 CO_2 ガスは、電子付着作用があるが He , N_2 と混合して実験したため、この作用が無視できる程度小さく、ここでは考慮しなかった。

3. 実験結果と考察

図3は、 $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:3$ および1:2:3のときの E/p_0 に対する α/p_0 の実験結果である。Lakshminarasimha et al.の値は、パルスタウンゼント法(PT法)で測定した値であり、Sakai et al., Lowke et al.の値は、ボルツマン方程式解析により計算値である。混合率が1:2:3の場合は、測定方法が異なっているにもかかわらずLakshminarasimha et al.の値と本測定値は、よく一致している。Sakai et al.の値とは、

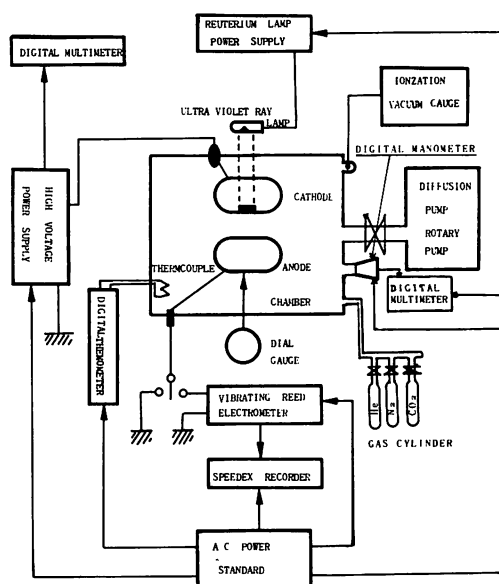


図1 測定系のブロック線図

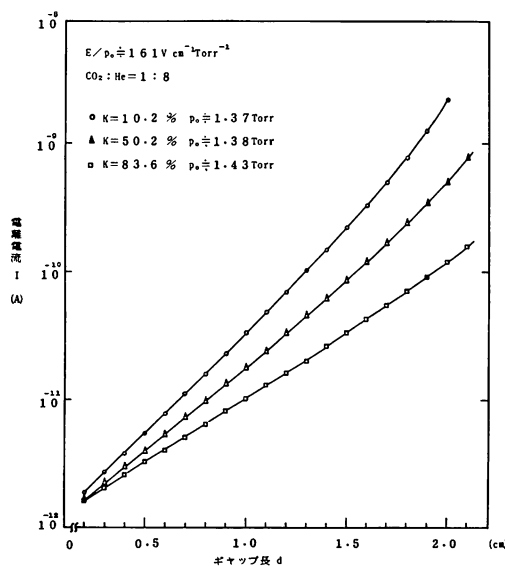


図2 電離電流増倍曲線

$E/p_0=50$ 以上では非常によく一致しており、それ以下では本測定値の方が小さくなっている。Lowke et al.の値は、本測定値より大きな値になっている。特に高 E/p_0 になるにしたがってその差が大きくなっており、他の報告者の値とも差が大きくなっている。この結果より高 E/p_0 のLowke et al.の値は、正しくないと思われる。混合率が1:1:3の場合は、Lakshminarasimha et al.の値、Sakai et al.の値ともに本測定値より大きくなっているがしかし E/p_0 が大きくなる

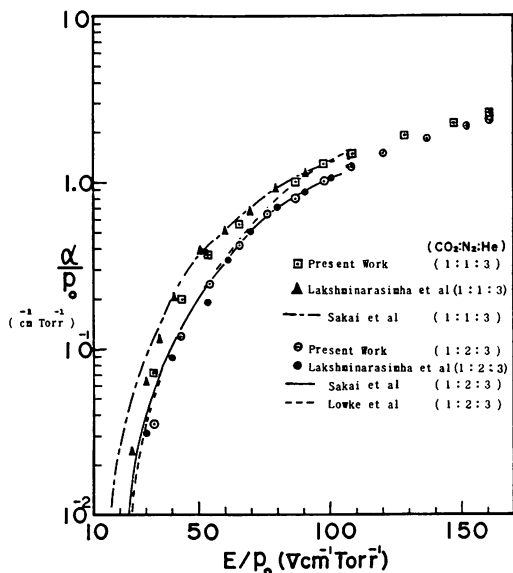


図3 CO₂:N₂:He = 1:1:3, 1:2:3 のとき E/p_0 に対する α/p_0 の測定値

にしたがって本測定値との差が小さくなってゆき $E/p_0 = 90$ 以上では一致している。

図4は、CO₂ と He の混合率を 1:3 と一定に保ち、それに N₂ を $K = 0 \sim 100\%$ 混合し測定したときの α/p_0 の値である。 E/p_0 は、54, 108, 161, 215 V cm⁻¹ Torr⁻¹ 一定とした。N₂ の K を大きくすると α/p_0 の値は、減少してゆくことがわかる。しかし $E/p_0 = 108$ のときを基準とすると $E/p_0 = 54$ のときは、下に凸な曲線で減少している。また $E/p_0 = 161, 215$ のときは、上に凸な曲線で減少している。

図5は、CO₂ と He の混合率を 1:8 としてそれに N₂ を $K = 0 \sim 100\%$ 混合し測定したときの α/p_0 の値である。 E/p_0 は、54, 108 のとき α/p_0 の値は、図4と同様な傾向を示した。しかし $E/p_0 = 161$ では上に凸な傾向が大きくなり、 $E/p_0 = 215$ では、最大値を持つ傾向になった。

この最大値を持つことを検討すると、次のように考えられる。表1より CO₂ を He に混ぜると α/p_0 は、増加している。これに N₂ を混ぜること

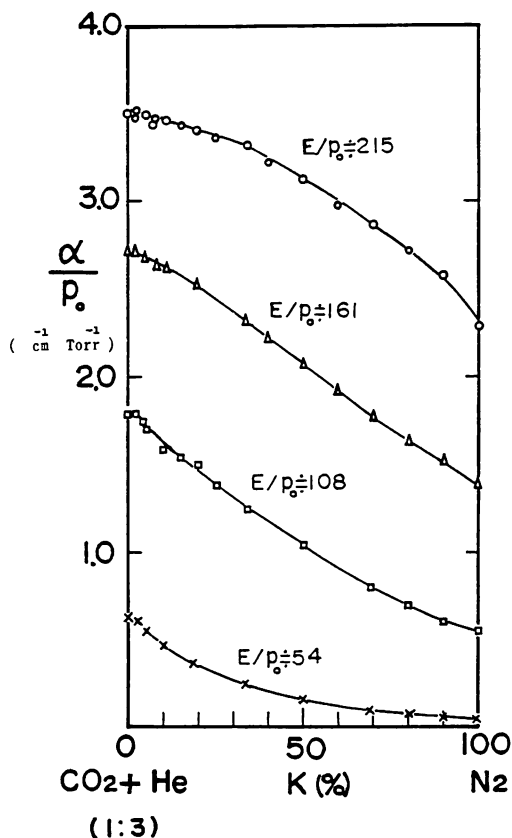


図4 $\alpha/p_0 - K$ 曲線 (CO₂:He = 1:3)

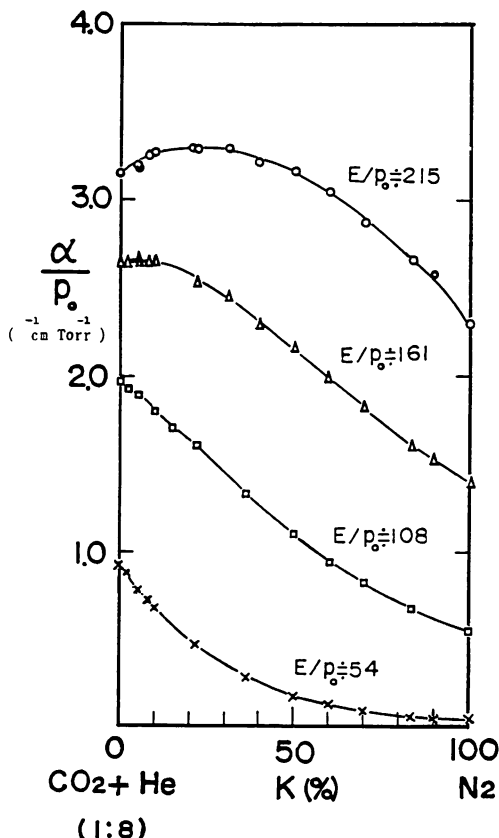


図5 $\alpha/p_0 - K$ 曲線 (CO₂:He = 1:8)

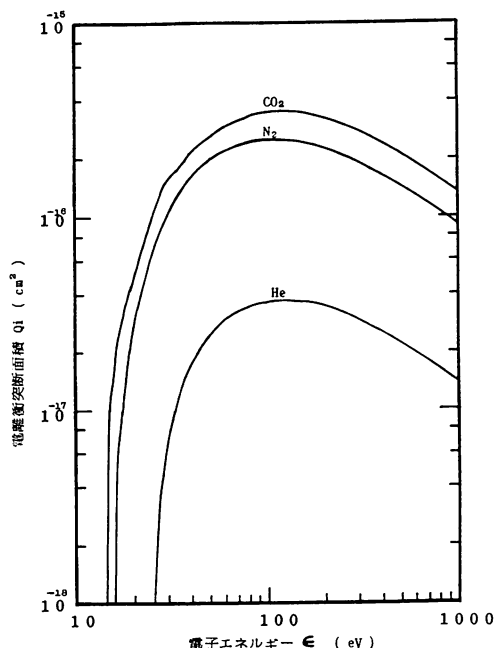
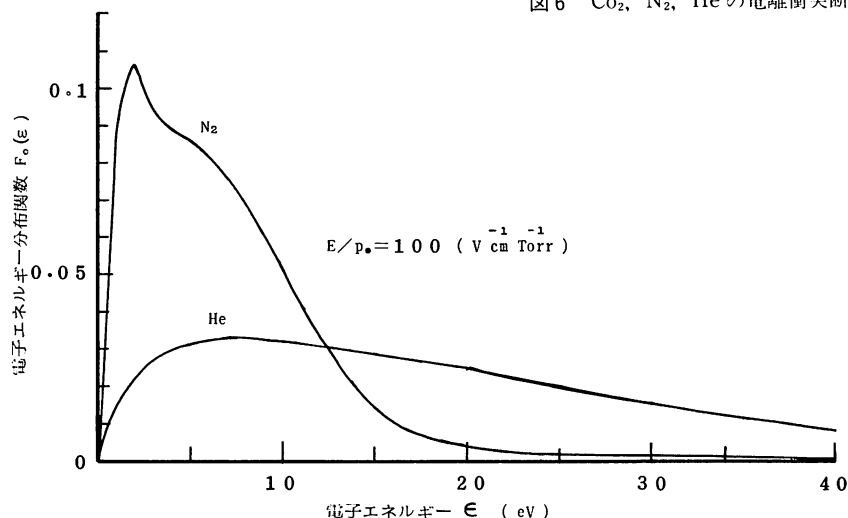
表1 He単ガスとCO₂:He=1:8のときの α/p_0 の値

	He単ガス	CO ₂ :He (1:8)
54	0.85	0.92
108	1.25	1.97
161	1.50	2.65
215	1.90	3.15

で $E/p_0 = 215$ において α/p_0 は、さらに 3.30 ($K \approx 20\%$) まで増加している。Lowke et al. は、この α/p_0 の増加を He の励起原子による Penning 電離で説明している。しかし筆者らは、この α/p_0 の増加を Penning 電離だけでなく、それぞれのガスの電子エネルギー分布、電離電圧、電離衝突断面積の違いからも説明が可能と考えている。

図6は、CO₂、N₂、He の電離衝突断面積 Q_i であり⁽¹⁰⁾、図7はたとえば $E/p_0 = 100$ のときの N₂ と He の電子エネルギー分布⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ である。図6より He の Q_i は、CO₂、N₂ のそれに比べ約1桁(100 Torr で He の $Q_i = 3.66 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ 、CO₂ の $Q_i = 3.52 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 、N₂ の $Q_i = 2.53 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$) 小さい。また He の電離エネルギーは、24.5 eV (また、準安定励起原子のエネルギーも 20.6 eV) と CO₂、N₂ のそれ(13.7 eV, 15.5 eV) より高くなっている。図7より He の電子エネルギー分布は、N₂ のそれに比べ高い方にシフトしている (CO₂ についても同様と思われる)。そのため CO₂、N₂ との混合で CO₂、N₂ の各種衝突断面積 (Q_i も含む) が入り込み He のエネルギー分布をエネ

ギーの低い方へ変化させることになり、CO₂ や N₂ の電離が支配的になる。すなわち、電子エネルギー分布が徐々に低いエネルギー分布側にシフトして行くのに対して CO₂、N₂ の電離衝突断面積が10%の混合で He のそれと同じ大きさになる。そして、実効電離エネルギーは 24.5 eV から 13.7 eV まで急激に下がる。したがって α は、上昇その後さらに CO₂、N₂ の混合率が増すと、CO₂、N₂ 混合ガスのエネルギー分布に近づき (低エネルギー側に分布のピークを持つ)、高エネルギーの電子が減少してゆくので α が減少すると説明する

図6 CO₂、N₂、He の電離衝突断面積図7 He、N₂ の電子エネルギー分布

ことができる。これより He の混合率が大きい CO₂ : He = 1 : 8 のとき $E/p_0 = 215$ で α/p_0 は、最大値を持つ傾向を示すものと考えられる。

図 8 は、CO₂ と He の混合率を 1 : 8 としそれに N₂ を 0 ~ 100% 混合したときの γ の結果である。He の γ は、 $E/p_0 = 50 \sim 300$ で $10^{-2} \sim 10^{-1}$ の桁にある。しかし CO₂ を混ぜることにより、 γ_m

(準安定励起原子による陰極からの電子放出作用) や γ_p (励起原子からの光子による電子放出作用) をおこなう励起原子が急激に減少し CO₂ : He = 1 : 8 の場合 γ は、 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ の桁で算出された。N₂ の γ は $10^{-3} \sim 10^{-2}$ の桁の値であるが Wagner et al.⁽¹³⁾ は、クエンチング力の大きな (クエンチング気圧 $Pq = 2.3$ Torr) CO₂ を混ぜることで 2 nd Positive band から発光をとまなう励起分子 C³ π u が励起解消されることを報告している。また A₃ Σ^+ u の励起分子も CO₂ により励起解消することが Dreyer et al.⁽¹⁴⁾ によって報告されている。これらのことにより図 8 のように N₂ に CO₂ を混ぜると γ の値の大きな He を混ぜてあっても励起分子が減り、 γ は減少する。

4. 結 言

CO₂ + N₂ + He 三種混合ガスの電離係数を CO₂, He の混合率を一定とし N₂ を 0 ~ 100% 混合し測定した。他の報告例と比較検討すると Lowke et al. の値は、高 E/p_0 領域では大きすぎるように思われる。電離係数 α/p_0 は、N₂ の K の増加にともなって減少した。高 E/p_0 のときは、 α/p_0 は上に凸になる傾向を示した。He の混合率が大きい場合 α/p_0 は、最大値を持つことがある。He 混合ガスの α/p_0 が増加する説明を Lowke et al. は、Penning 電離によるものとしている。しかし筆者らは、Penning 効果だけでなく電子エネルギー分布や電離衝突断面積などの違いから説明を試みた。また N₂ の K の減少によって γ が減少することも考察した。最後に本報告に御指導御助言いただいた北大工学部田頭教授に深く謝意を表わすとともに電離係数の測定に協力いただいた第 16 期卒業生篠河君に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) Lakshminarasimha et al., J. Phys. D: Appl. Phys., 9, 1976
- (2) Davies, J. Appl. Phys., 47 (1), 1978
- (3) Sierra et al., J. Phys. D: Appl. Phys., 14, 1981

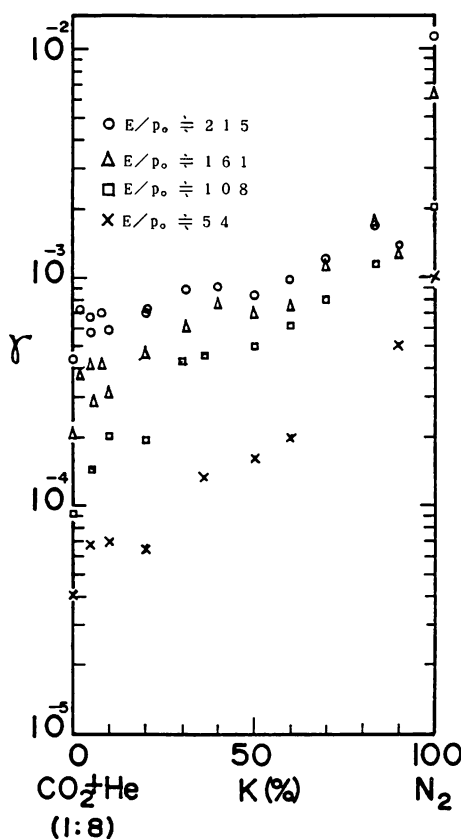


図 8 $\gamma - k$ 特性 (CO₂ : He = 1 : 8)

- (4) Lowke et al., J. Appl. Phys., 44, 1973
- (5) Sakai et al., J. Phys. D: Appl. Phys., 12, 1979
- (6) 長谷川・佐藤・村井・下妻・田頭, 昭和 58 年電気学会全国大会論文集, 1983
- (7) 長谷川・佐藤・村井・下妻・田頭, 電気学会放電研究会資料 ED-83-29, 1983
- (8) 長谷川・佐藤・村井・下妻・田頭, 昭和 58 年電気四学会道支部大会論文集, 1983
- (9) 長谷川・佐藤・村井・下妻, 苫小牧高専紀要, 第 16 号, 1981
- (10) Rapp et al., J. Chem. Phys., Vol 43 No5, 1963
- (11) 松島, 北大修士論文, 1979
- (12) 伊藤, 北大修士論文, 1979
- (13) Wagner et al., Zeitschrift für Physik, 189, 465-515, 1966
- (14) Dreyer et al., J. Chemical Phys., Vol 61 No8, 1974

(昭和 58 年 11 月 30 日受理)

