九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

# ガス計数管動作ガスとしてのネオンベースガスの特 性

**久保, 龍二** 九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

佐島,隆生 九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

本村, 信篤 九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

**釘宮,浩** 九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

他

https://doi.org/10.15017/17139

出版情報:九州大学大学院総合理工学報告. 11 (1), pp.39-46, 1989-06-01. Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University バージョン: 権利関係:

# ガス計数管動作ガスとしてのネオンベースガスの特性

·佐 島 隆 生 久 保 龍 \_ ・本村 信 簏 糽 宮 浩 ・スシロウィドド ・藤 # 贵 志 住 尻 魚 裕 介\*・大 垣 英 明\*\* · 井 鴌 信\*\* 的 場 **優\*\*・**栄 武 二\*\*\*・桑 折 節 彦\*\*\* (平成元年2月28日 受理)

# Characteristics of the Ne-based Gases as a Counter Filling Gas

Ryuji KUBO, Takao SAJIMA, Nobutoku MOTOMURA Hiroshi KUGIMIYA, Susilo WIDODO, Takashi FUJII Yusuke UOZUMI, Hideaki OHGAKI, Hidenobu IJIRI Masaru MATOBA, Takeji SAKAE, Norihiko KOORI

Characteristics of gas multiplication and position sensing in Ne (neon)-based gases for radiation gas counters are investigated, and results are compared with those of Ar (argon)-based gases.

The results show that with Ne-based gases is got about ten times larger gas gain compared with Ar-based gases at the same anode voltage, and comparable position resolution at about 200 volt lower high voltage. It is proposed that Ne-based gases are preferable comparing with Ar-based gases for proportional, and drift counter filling gases.

#### 1. 序

ガス計数管は素粒子,原子核物理学研究用を始め, 工業用,医療用等での放射線計測のため数多く開発さ れ,使用されている.ガス計数管は,基本的に充填ガ スの電子なだれ増幅(電離箱モードを除く)を利用し て,入射放射線の数,エネルギー並びに入射位置の計 測を行う.ガス計数管の動作モードには印加電圧に従 って電離箱モード,比例モード,GMモード<sup>1121</sup>の3つ が知られている.

最近比例モードから GM モードに遷移せず,中間 的な自己消滅ストリーマ (Self-Quenching Streamer: 以 下 SQS と略す) モードに遷移する過程が発見されそ の研究が進められている<sup>3)-8)</sup>. GM モードでは電子な だれが陽極心線を覆うように心線に平行に伸びて行く のに対して, SQS モードでは陽極心線から陰極方向 に垂直に伸びて行き, それが連続放電に至らず自然消 滅すると考えられる. このため, このモードは放電が 局所的に起こり, 放電電荷量が大きいにもかかわらず 不感時間は割合短いという特徴がある.

電子なだれ増幅は高電場下でのガスの基本的特性で あるため放射線検出用として原理的にはどのようなガ スを用いてもよいが,実用上いくつかの条件が要求さ れる.

- 低い動作電圧
- 高いガス増幅度
- ・良い比例性
- 高い計数率特性
- 低い電子吸着特性
- 等である.

通常ガス増幅を容易にするため、電子なだれ増幅が 起こりやすい希ガスをベースとし、電子なだれから放 出される光子を吸収して二次なだれを抑制する多原子 分子ガスを消滅ガスとして用いることが多い.一般的

エネルギー変換工学専攻修士課程

<sup>\*</sup>エネルギー変換工学専攻博士課程

<sup>\*\*</sup>エネルギー変換工学専攻

<sup>\*\*\*</sup>工学部応用原子核工学科

in gas counters.							
Gas	dE/dx (keV/cm)	W <sub>i</sub> (eV)	X-ray detection efficiency	n Price (YEN/liter) *			
He	0.32	41	2.03×10 <sup>-5</sup>	3(99.99%) 8.5(99.9999%)			
Ne	1.41	36	0.06	60(99.996%)			
Ar	2.44	26	1	3(99.99%)			
				15(99.999%)			
Kr	4.60	24	48.5	62(99.995%)			
Xe	6.76	22	92.1	2000(99.995%)			
*'8	8/2/23日本	酸素	(株) 調べ				

Table 1Basic properties of several rare gases<br/>in gas counters.

にベース希ガスとしてアルゴンが使用されてる.しか しアルゴンが最適であるかの検討がなされた上で使用 されているわけではなく,むしろ入手しやすい安価な 希ガスであるためだと考えられている.**Table1**にガ ス計数管に使用される代表的なガスの諸元を示す<sup>9)</sup>. 最小電離粒子の検出では,高い比電離のガスが要求さ れる.**Table1**よりクリプトン及びゼノンが適してい るが価格が高いためX線,低エネルギーY線検出用等, 特殊な用途を除いてアルゴンを使用することが多い.

最近,ガス計数管は放射線の計数及びエネルギー測 定器として以外に、位置検出器、イメージング用検出 器として応用されるようになった. 我々のグループは 放射線入射位置の情報の測定を大阪大学核物理研究セ ンター (RCNP) での核物理実験のため行っている. 実験では有効長 1.8m, 長方形断面 10mm×30mm を 持ち, 陽極心線として直径 20~25 µm のニクロム線 を張った単心線ガス比例計数管を用いて位置検出を行 っている. ベースガスとして, 従来アルゴンを用いて きたがカウンターの厚さが割合薄く長さが長いため, 高印加電圧による放電,陽極心線の切断,プリアンプ の故障など様々なトラブルに悩まされてきた. そのた めアルゴンより低い印加電圧でガス増幅が起こり、高 ガス増幅度領域で安定して動作するベースガスの使用 が望まれている. 高ガス増幅度領域での計数管の動作 には.

1) 高印加電圧による連続放電発生の可能性

等の問題がある.

低ガス増幅度領域でのガス増幅理論<sup>10</sup>及び,実験 データ<sup>11)</sup>からネオンはアルゴンより低い電場でガス増 幅が起こる可能性がある.ここでは同軸円筒型ガス計 数管を用いて調べた高ガス増幅度領域並びに SQS 遷 移領域でのネオンベースガスの特性について報告する.

#### 2. 理論的検討

### 2.1 電離ガス増幅理論

X線がガス計数管に入射するとX線のエネルギーが ベースガスに付与され,初期電離による電子-イオン 対ができる.電場により初期電子は陽極心線方向にド リフトし,陽イオンは陰極方向にドリフトする.電子 のエネルギーがガスの電離ポテンシャルを越えると電 離衝突が起こり,衝突の結果電子-イオン対をつくる. さらに2つになった電子はドリフトを続け,つぎつぎ と電子-イオン対を生成して行く.これがガス増幅過 程であり,電子-イオン対がなだれのように生成する ので生成する電子-イオン対のかたまりを電子なだれ と呼ぶ.

電離に対する平均自由行程は,1つの電子が1回の 電離衝突を起こすまでに移動する平均の距離である. 電離の平均自由行程の逆数αはTownsendの第1電 離係数に対応し,単位ドリフト距離当り電離によって 生成される電子-イオン対の数を表している.ここで, nをある位置における電子の数とすると dx の行程の あとにできる電子の数の増加分は,

$$dn = n \cdot \alpha \, dx \tag{1}$$

でありこれを積分すると,

$$M = n/n_0 = exp(\alpha \cdot x) \tag{2}$$

となる. ここで *M* はガス増幅率, *n*<sub>0</sub> は初期電離で生成された電子-イオン対の数である. 全電荷量 *Q* は電子なだれサイズと呼び,

$$Q = n_0 \cdot M \tag{3}$$

と表わされる。

ガス計数管の構造が平行平板型の場合,電場が一様 のためガス増幅率が小さく,初期電離が起こった位置 に関係するなどの制限がある.ガス計数管の構造が同 軸円筒型の場合,電場は陽極心線表面で最大となり陰 極に向かって急激に減少する (1/r 依存性).そこで 陽極心線付近では低い印加電圧でも高い電場が得られ, ガス増幅率は大きく,初期電離が起こった位置に関係 しないという利点がある.この場合のガス増幅率 *M* は (1)式より,

$$M = \exp \int_{r_s}^{r_a} \alpha (r) dr \tag{4}$$

と書かれる. ここで  $r_a$  は陽極心線の半径,  $r_s$  は陽極 心線の中心からガス増幅が起こっている点までの距離 である. Townsend の第一電離係数 $\alpha(r)$ は,制限比例 領域では簡単に次のように書き表すことができる<sup>12)</sup>.

$$\alpha(r) = A \left\{ E(r) - B \right\}$$
(5)

ここで, A と B はガスの状態に依存する定数であり, 比例モードの制限比例領域を除いたデータを用いて電 子なだれサイズを最小自乗法でフィッティングして求 めることができる.

電子なだれによる自己誘起電荷 *C*<sub>s</sub>(r)より補正さ れた実効電場 *E*(r)は,

$$E(r) = \frac{V_a}{r \cdot \ln(r_c/r_a)} - C \cdot \frac{C_s(r)}{r}$$
(6)

となる. ここで  $V_a$  は陽極心線にかけられる印加電圧,  $r_c$  は陰極の半径で, C は次の式で表される<sup>13</sup>.

$$C = \frac{r_c^2}{4\pi^2 \varepsilon_0 \cdot \ln(r_c/r_a)} \tag{7}$$

距離 r から r+dr の間に  $n_0 \cdot M(r)$  の陽イオンが 存在すると仮定すると  $C_s(r) \sim n_0 \cdot M(r)$  が導かれ る. (6) 式を書き直すと、

$$E(r) = \frac{V_a}{r \cdot \ln(r_c/r_a)} - K \cdot \frac{n_0 \cdot M(r)}{r} \qquad (8)$$

となる. K は定数であり,電子なだれの密度効果に 対応するパラメーターであると考えることができる.

# 2.2 SQS モードの理論

最初の SQS モードのガス増幅に対する定量的な取り扱いは、de Lima<sup>14)</sup> 等によって与えられた. 彼等は 光子の媒介するガス増幅過程を検討し、次の公式を与 えた.

$$n(r) = n_0 \cdot M(r) + \int_{r}^{r_c} dp \qquad (9)$$

$$\int_{r}^{r_c} dp = n(r) \cdot W \left\{ \mu \cdot \int_{r_s}^{r} M(x) \cdot exp \left\{ -\mu \cdot (x-r) \right\} dx$$

$$+ M(r_a) \left\{ exp(-\mu \cdot (r_s - r_a)) - exp(-\mu \cdot (r_c - r_a)) \right\}$$

$$=n(r) \cdot P \tag{10}$$

また,

$$W = \frac{W_0}{\alpha (r_a)} \cdot g \cdot \xi \tag{11}$$

である. ここでn(r)はなだれ中の総電子数, $W_0$ は 単位長さ当りに発生する光子の数,gは幾何学的ファ クター, $\mu$ は吸収係数, $\epsilon$ は量子効率, $P \cdot n(r)$ は 光子の媒介によりガス増幅過程で生じた電子の総数で ある.よって(9)式を簡単化すると,

$$n(r) = \frac{n_0 \cdot M(r)}{1 - P} \tag{12}$$

と表すことができる.(10)式は(6)式の実効電場を 用いることで,空間電荷効果も考慮したことになる.

#### 3. 実験装置およびシステム

#### 3.1 ガス増幅特性の測定

ガス増幅特性測定には Fig. 1 に示す有効長 152mm, 内径 28mm のステンレス製で, 陽極心線として直径 50 $\mu$ m のステンレス線を張った同軸円筒型ガス計数管 を用いた.円筒型陰極の両端付近にはガスの導入口と 排気口が備えられている.また,中央部には直径 3 mmのX線入射用の窓を設け,厚さ8 $\mu$ m のマイラー を貼った.

入射放射線として Ti の 4.5keV のK<sub>a</sub>-X線を用い て計数管に垂直に入射した.充塡混合ガスとして Ne/CH<sub>4</sub> (70:30), Ar/CH<sub>4</sub> (70:30)の混合ガスと, それらにエチルアルコールをバブラーにより室温の蒸 気圧で添加した混合ガス計4種を使用して実験を行っ た.各混合ガスについて,パルス信号が観測できる最 低の印加電圧から印加電圧を50ボルトづつ徐々に上げ, 各印加電圧に対する電子なだれサイズを測定した.

#### 3.2 位置検出特性の測定

位置検出測定には **Fig. 2** に示す有効長 1.8m, 長方 形断面 10mm×30mm, 陽極心線として直径 25 μm の ニクロム線を張ったガス計数管を用いた. 充填ガスと して Ne/CH<sub>4</sub> (70:30), Ar/CH<sub>4</sub> (70:30) にそれぞれエ チルアルコールを添加した 2 種類の混合ガスを用いた.

3.3 信号処理システム

陽極心線に高電圧を印加し,X線をガス計数管に入 射させることによって陽極心線から信号が得られる. この信号はまず電荷有感型プリアンプで増幅される. このプリアンプにより電気信号は信号の大きさに応



Fig. 1 The gas counter for the measurement of the avalanche size.



Fig. 2 The gas counter for position sensing.

じて 2.5pF, 44pF または 110pF の帰還容量と 20M $\Omega$ の抵抗で積分され、70 $\mu$ sec の時定数で微分された後 増幅される. プリアンプで増幅された信号はスペクト ロスコピーアンプにより増幅および波形整形を行い, AD 変換してマイクロコンピューターで処理した.

#### 4. 実験結果

#### 4.1 ガス増幅特性

Ne/CH<sub>4</sub> と Ar/CH<sub>4</sub> にそれぞれエチルアルコールを 添加した 2 種類の混合ガスについて測定した電子なだ れサイズの印加電圧依存性を Fig. 3 に示す. 図より 比例モードが飽和する時の電子なだれサイズは各々 10pC 付近である. このことから,電子なだれの飽和 は初期電離の数ではなく全電子なだれ数に依存するこ とがわかる. また,同じ印加電圧で比較した場合, Ne/CH4 混合ガスは Ar/CH4 混合ガスに対して電子な だれサイズが約10倍であることがわかる.

4.2 波高スペクトル

Ne/CH<sub>4</sub> にエチルアルコールを添加した混合ガスに ついて,得られた波高スペクトルを Fig.4 に示す. 図では印加電圧に従い比例領域から制限比例領域,そ して SQS 領域に遷移する過程の波高スペクトルを示 している.

#### 4.3 SQS への遷移効率

Ne/CH<sub>4</sub> と Ar/CH<sub>4</sub> にそれぞれエチルアルコールを 添加した 2 種類の混合ガスについて、比例領域から SQS 領域に遷移する効率を **Fig. 5** に示す. Alekseev<sup>4)</sup> は SQS 遷移を定量的に取り扱うため比例モードのパ ルス数と SQS モードのパルス数が等しくなる電圧を 50%遷移点と定義して使用した. 図より各々の混合ガ

— 42 —



Fig. 3 Measured avalanche sizes of Ne/CH<sub>4</sub>+C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH and Ar/CH<sub>4</sub>+C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH as a function of anode voltage. Arrows show the 50% transition high voltage. Broken curves show the results of the calculation.

スについての50%遷移点を決定することができる. 50%遷移点は Ne/CH4 の方が Ar/CH4 の場合より250 ボルト程度低い.

#### 4.4 光子吸収ガスの効果

Ne/CH4 混合ガスにエチルアルコールを添加した時 の光子吸収効果を Fig.6 に示す.光子の吸収により, 特に SQS 領域での波高が低くなり,安定した.

#### 4.5 位置検出特性

**Fig. 7** に Ne/CH<sub>4</sub>, Ar/CH<sub>4</sub> にそれぞれエチルアル コールを添加した2種類の混合ガスについての位置測 定の結果を示す.

測定結果より, Ne/CH4 混合ガスは 2.1kV の印加 電圧で 1.47mm (FWHM), Ar/CH4 混合ガスは, 2.3kV の印加電圧で 1.66mm (FWHM) の位置分解能 を得た. よって, Ne/CH4 混合ガスは Ar/CH4 混合ガ スより200ボルト低い電圧で同等の分解能が実現でき ることがわかった.

#### 5. 解析及び議論

5.1 制限比例領域におけるガス計数管動作の解析

制限比例領域におけるガス計数管の心線近傍の電場 は、陽極心線の周囲に形成される大きな空間電荷のた めに弱められる.このためガス増幅が抑制され、ガス 計数管の出力は初期電離の数に比例せず飽和傾向を示 す.(8)式で示されるK値は陽イオンの密度に関係し、 空間電荷効果の大きさを示す.実験データから数値解 析を行い、各混合ガスに対する制限比例領域でのK値 を Table 2 に示す.

#### 5.2 SOS 領域におけるガス計数管動作の解析

SQS 領域では空間電荷効果と光子による電離の影響によりガス計数管の動作は比例領域とは異なった様相を示す.光子による電離の割合は(10)式のW値で



# Channel Number

Fig. 4 Typical spectrum of Ne/CH4+C2H5OH mixture which show the transition from the proportional to the SQS mode.



Fig. 5 Streamer efficiencies as a function of anode voltage. Broken curves show the result of least square fitting.





Fig. 6 Quenching effect of C2H5OH additive. Broken curves show the results of the calculation.

Fig. 7 Results of position sensing.

与えられる. 制限比例領域の場合と異なり, K値を一 定にすると測定データの再現ができない. このためK 値を測定した電子なだれサイズに適合するように逐次 変化させた. まず, 最も低い電圧の時のK値を0に固 定してW値を決め, このW値を用いてK値を求め, 更 にこれをくり返す方法によりデータを最も良く再現す るK及びWの値を決定した. 各混合ガスで得られたW 値を **Table 2** に, K 値を **Fig. 8** に示す. 図より, SQS 領域でのK 値は制限比例領域の数分の1 に減少 することがわかる.

### 5.3 議論

**Table 2**から Ne/CH<sub>4</sub> 混合ガスはエチルアルコール による光子吸収効果によりW値の変化が大きいことが

 
 Table 2
 K-value for limited proportional mode and W-value for SQS mode.

	Ne/CH <sub>4</sub>	Ne/CH <sub>4</sub> +C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Ar/CH <sub>4</sub>	Ar/CH <sub>4</sub> C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH
A	0.0728	0.0692	0.00662	0.0679
$B(\times 10^{4})$	3.37	3.43	4.39	4.67
$K(\times 10^{-6})$	0.837	2.45	1.75	2.58
W (×10 <sup>-6</sup> )	2.20	0.961	6.62	6.09

わかる.また、Ne/CH4 混合ガスのW値は Ar/CH4 混 合ガスの1/3以下であり、Ne/CH4 混合ガスは Ar/CH4 混合ガスより光子による電離の割合が小さいことがわ かる.Fig.8よりK値は陽極電圧が上がるにしたがっ て大きくなり、50%遷移点に近い所ではほとんど一定 になってピークを示す.さらに電圧が上がるとK値は 小さくなる.この傾向は大垣等<sup>15)</sup>の Ar/CO<sub>2</sub>,Kr/CH4 の解析結果とも良く一致する.また Ne/CH4 混合ガス のK値は,Ar/CH4 混合ガスの約半分である.このこ とから Ne/CH4 混合ガスでは Ar/CH4 混合ガスにお ける場合よりも空間電荷効果が小さくストリーマは空 間的に広がっていると考えることができる.

ここで述べた解析ではガス増幅過程を1次元的に取 り扱っており,更に詳細に議論するためには2次元, 3次元のモデルによる解析が必要であろう.また,電 子増幅をミクロスコピックに取り扱うことが望まれる

#### 6. 結 論

ガス計数管での Ne/CH4 及び Ar/CH4 混合ガスの 電子なだれサイズの絶対測定から,電子なだれサイズ の飽和特性は初期電離イオン数よりもむしろ全電子な



Fig. 8 Results of the calculated K-value for the SQS mode. Arrows show the 50% transition high voltage.

だれサイズに依存することがわかった. X線測定用と しては目的のなだれサイズを得るための印加電圧は Ne/CH<sub>4</sub> が Ar/CH<sub>4</sub> に対して250ボルト程度低くして よいことがわかった.これは、荷電粒子に対してエネ ルギー損失が60%になることを考慮しても200ボルト 程度は低く抑えることができることを示している. そ こで制限比例-SQS 領域の測定, S/N 比を良くする必 要がある場合(高ガス増幅),特殊な機械的構造を持 つ検出器等での位置検出の場合、ネオンベースガスの 使用が有利であると考えられる.以上よりネオン+ク エンチガスは興味あるガスであることが結論できる. 今までガス計数管の動作ガスとして Ar/CH4 混合ガ スが標準とされていたが、これからは Ne/CH4 あるい は Ne/iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 等の混合ガスによるシステム,特に ネオンベースガスによるドリフトチェンバー等が世界 各地で使用されることが考えられる.

#### References

- 1) H. Geiger and W. Muller: Phys. Zt. 29 (1928) 839.
- 2) H. Geiger and O. Klemperer: Z. Phys. 49 (1928) 753.

- M. Atac, A. V. Tollestrup and D. Potter: Nucl. Instr. and Meth. 200 (1982) 345.
- G. D. Alekseev, N. A. Kalinina, V. V. Karpukhin, D. M. Khazins and V. V. Kruglov, Nucl. Instr. and Meth. 177 (1980) 385.
- 5) G. Charpak, R. Bouclier, T. Bressani, J. Favier and C. Zupancic, Nucl. Instr. and Meth. 62 (1968) 262.
- H. Kametani, T. Sakae, K. Komatsu, H. Ijiri and M. Matoba, Nucl. Instr. and Meth. 225 (1984) 113.
- R. Baumgart, C. Grupen and U. Shafer, Nucl. Instr. and Meth. 222 (1984) 448.
- H. Ohgaki, S. Imabeppu, K. Urase, Y. Fujita, M. Maesako, S. Higuma, H. Kametani, H. Ijiri, M. Matoba, T. Sakae and N. Koori, IEEE Trans. Nucl. Sci. No. 1 NS-33 (1986) 381.
   F. Sauli, CERN 77-09 (1977).
- 10) M. E. Rose and S. A. Korff: Phys. Rev. 59 (1942) 850.
- 11) N. Koori, K. Yoshioka, M. Hashimoto, H. Ohgaki, M. Matoba, I. Kumabe, to be published.
- W. Diethorn. US Atomic Energy Commission Report NYO-6628 (1956).
- 13) R. W. Hendricks, Rev. Sci. Instr. Vol. 40 (1969) 1216.
- 14) E. P. de Lima, A. J. P. L. Policarpo, M. Salete, S. C. P. Leite and J. de Jesus, IEEE Trans. Nucl. Sci. No. 1 NS-32 (1985) 510.
- 15) H. Ohgaki, to be published.