

平成 2 1 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「新原理による高信頼・高精度の全圧 / 分圧真空計の開発」

研究開発成果等報告書

平成 2 2 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 キヤノンアネルバ株式会社

**リサイクル適性 (A)**

この印刷物は、印刷用の紙へ  
リサイクルできます。

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### 1-1-1 背景

薄型TVに使われるフラットパネル（プラズマ・液晶）やコンピュータの基本となっている半導体素子、あるいは高密度ストレージ素子・媒体を製造する情報家電などの先端技術の多くは、そのキープロセスを各種の真空プロセス、特に薄膜形成プロセスに負っている。代表的な薄膜形成法としては、1Pa（大気圧の10万分の1の圧力）程度の不活性ガス（Arなど）雰囲気での物理的方法による「スパッタ」法や10Pa以上の原料雰囲気での化学的方法による「CVD」（Chemical Vapor Deposition；化学気相蒸着）法がある。特別なガス雰囲気ではなく単に $10^{-3}$ Pa以下の真空状態で材料を気化させる「真空蒸着法」もあるが、今では光学用など精度を要求しない用途に限定されている。

スパッタやCVDでは、真空蒸着法とは違って雰囲気ガス自体がプロセスの主役となるので、その全圧（ガス全体の圧力：真空度）と分圧（成分ごとの圧力）を高精度に制御することがポイントとなっている。フラットパネル・半導体製造では他製造業に比べ「歩留まり」などの生産性はかなり悪いが、その主原因のひとつがこれら真空プロセスであり、その制御の基本となる全圧/分圧真空計も一要因となっている。

これらの状況が下記のように指針で示されている。

<「高度化指針」において定める課題及びニーズ>

(二十) 真空の維持に係わる技術

1 (1) 情報家電に関する事項

川下製造業者等の抱える課題及びニーズ

ア. 生産性の向上 イ. 生産コストの低減 ウ. 生産装置の最適化

さて、現状の全圧/分圧真空計がニーズに十分に答えられていないのは、その測定原理が古い真空プロセスには適応していても現在のものには合っていないためと考えられる。代表的なイオンゲージは真空蒸着法のような高真空（低圧）での測定に適応しており、もう一方の代表的な隔膜真空計は低真空（高圧）での測定に適応しているが、いずれも1Paを境に精度が劣化する上、部品・電極の汚染や熱などの影響を受けやすくなっている。すなわち、汚染や熱が避けられないがスパッタ・CVDなど最新の真空プロセスには適合していないと言える。

従来 of 測定原理とその問題点について詳しく説明する。イオンゲージは雰囲気ガスである中性分子に電子を衝突させて電子を弾き飛ばしてイオン化し、そのイオンをコレクタに集めてイオン量を計測する。イオン量は雰囲気ガスの密度に比例するので、電子のエネルギーや量、電極の形状や電位を特定しておき一度イオン量と密度の関係（換算値）を得ておくと、実際のイオン量から密度が算出できることになる。一方、隔膜真空計は雰囲気ガスと十分低圧の領域との間に存在する隔膜が雰囲気ガスの力（圧力）で変形させる量を電氣的に計測する。変形量は雰囲気ガスの圧力に比例するので、同様に一度換算値を得ておくと変形量から圧力が算出できる。このように両者は測定原理が異なるので適用できる圧力領域が異なるものの、いずれも真空度（密度/圧力）に比例する量（イオン量/変形量）を換算値によって真空度を算出している点は同じである。

そのため、比例量の絶対値を正しく計測しかつ換算値が変更していないことが精度確保に必須となるが、これらをあらゆる条件下で長期に渡って保障することは不可能と言える。真空中では汚染は本質的に発生しやすい（もともと膜が付きやすいので真空プロセスが有効となっている）こと、および一般の測定では基本となっている標準試料との比較や試料有無の差からのバックグラウンドや変動・擾乱要素の排除が採用できないことが、その主な理由となる。

しかし、これらに代わる新しい原理の真空計は国内外とも発表はなく、研究開発自体が行われていないと推測される。なお、現在販売されている全圧真空計と分圧真空計のシェアは、前者は米国1社に、後者は米国数社に占められている。

### 1-1-2 研究目的・テーマ

以上のような背景からキヤノンアネルバでは以前からこれらの検討・模索を進めていたが、最近ニーズに合致し得る新原理の理論の整備と簡単な実験に成功し、現在特許化の準備を進めている。本研究開発は、この原理に基づいて行われることになる。

そこで、研究開発全体（3年間の法認定計画）の高度化目標は下記指針に示されている。

<「高度化指針」において定める高度化目標と実施方法>

(二十) 真空の維持に係わる技術

1 (1) 情報家電に関する事項

高度化目標

ア. 歩留まりの改善、故障率の低減、メンテナンス容易性の向上

ウ. 高品質化、信頼性の向上

2 真空技術における高度化目標の達成に資する特定研究開発等の実施方法

(3) 生産装置の最適化に対応した研究開発の方向性

新しい原理に基づいた高信頼性・高精度な真空計の開発、

汚染による感度変化のない真空計の開発、

零点がドリフトしない真空計の開発

ガス種に依存しない真空計の開発、

任意の個所の圧力や分圧が測定できる真空計の開発

なお、上記指針には含まれていないが「プラズマ発生領域の全圧（真空度）計測」を追加する。これはプラズマ領域をほぼ密閉したシールドで囲む量産型スパッタ装置において、測定可能なシールド外側領域と実際のプラズマ発生領域との真空度の差が大きくなっている課題を解決するものである。

そこで、研究開発全体でのサブテーマとしては以下のようなになる。

1. 要素技術開発（ラムダ方式全体）
2. 汎用型のプロトタイプ製作 <センサー>
3. 汎用型のプロトタイプ製作 <制御電源・ソフト>
4. プラズマ用への展開 基本特性評価
5. CVD用への展開 要素技術開発-1 <センサー全体およびコレクタ>
6. CVD用への展開 要素技術開発-2 <エミッタ>
7. 分圧用への展開 要素技術開発 <センサー>

## 8. 分圧用への展開 要素技術開発 <制御電源・ソフト>

### 1-1-3 技術的目標

サブテーマごとの技術的目標値は以下のとおり。

#### 1. 要素技術開発（ラムダ方式全体）

『ラムダ方式の理論構築と原理実証を行うとともに、下記すべてのサブテーマを進めるために必要なデータを収集する』

#### 2. 汎用型のプロトタイプ製作（センサー、および制御電源・ソフト）

『スパッタ法でのフィールド評価が可能な製品プロトタイプを製作する』

#### 3. プラズマ用への展開（基本特性評価）

『プラズマ発生領域の真空度計測を実験的に行い、基礎データを収集する』

#### 4. 1) CVD用への展開 要素技術開発（センサー全体およびコレクタ）

『10 Pa以上の真空度計測を実験的に行い、基礎データを収集する』

#### 2) 要素技術開発（エミッタ）

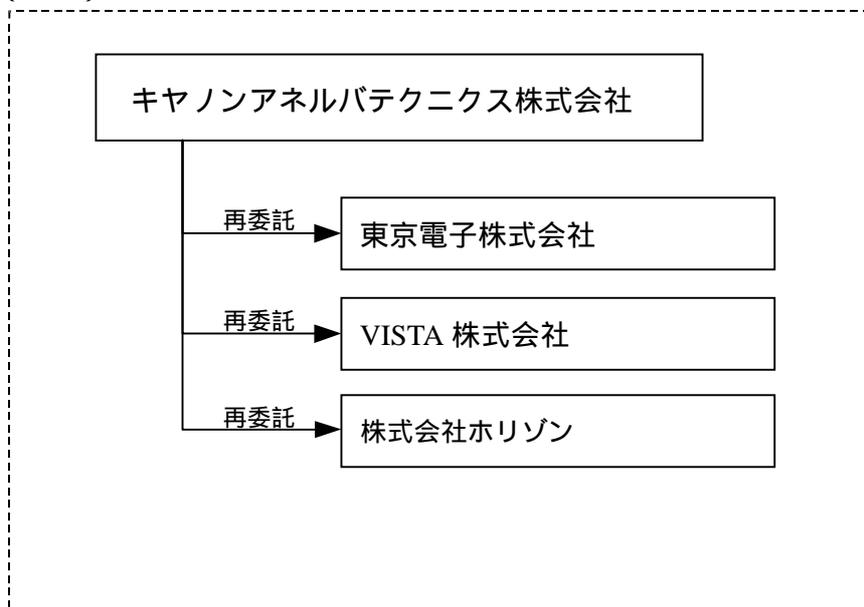
『10 Pa以上での電子放出を実験的に行い、基礎データを収集する』

#### 5. 分圧用への展開 要素技術開発（センサー、および制御電源・ソフト）

『ラムダ方式による成分測定（5種以上）を確認し、プロトタイプ製作のために必要なデータを収集する』

### 1-2 研究体制

#### 1) 研究組織（全体）



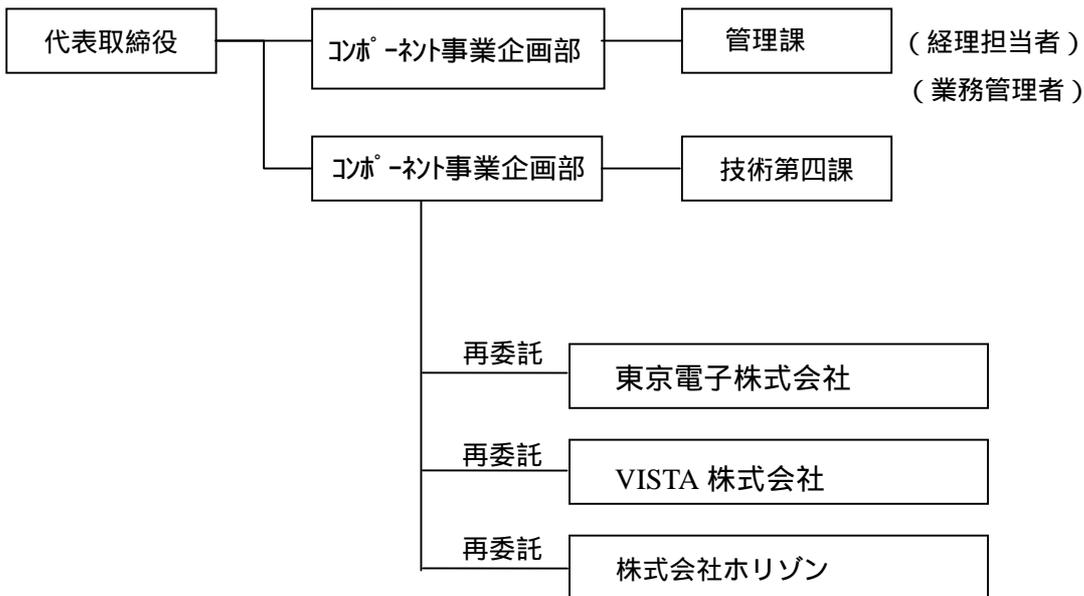
統括研究代表者（ P L ）  
 キヤノンアネルバ株式会社  
 コポ-ネット事業企画部  
 技術第四課 スペシャリスト  
 塩川 善郎

副統括研究代表者（ S L ）  
 東京電子株式会社  
 代表取締役  
 黒岩 雅英

2 ) 管理体制

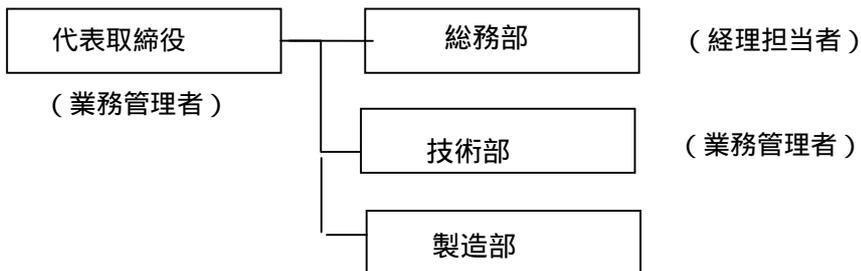
事業管理者

[ キヤノンアネルバ株式会社 ]

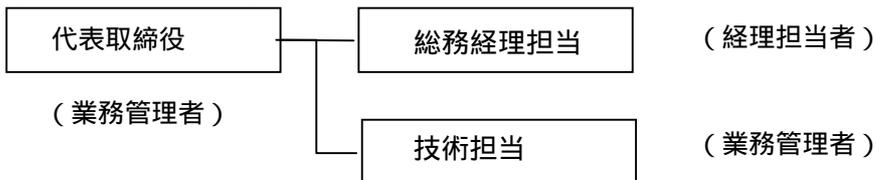


再委託先

[ 東京電子株式会社 ]



[ VISTA 株式会社 ]



[ 株式会社ホリゾン ]

代表取締役

( 業務管理者 )

( 経理担当者 )

企画開発主任

( 業務管理者 )

( 2 ) 管理員及び研究員

【事業管理者】キヤノンアネル株式会社 コホ°-ネト事業企画部

管理員

氏名	所属・役職
前島 馨	コホ°-ネト事業企画部 管理課 課長
杉本 譲治	コホ°-ネト事業企画部 管理課 主任
真砂 恵美	コホ°-ネト事業企画部 管理課 担当
藤井 香織	コホ°-ネト事業企画部 管理課 担当

研究員

氏名	所属・役職
塩川 善郎	コホ°-ネト事業企画部 技術第四課 スペシャリスト
平野 芳樹	コホ°-ネト事業企画部 技術第四課 主任
中村 恵	コホ°-ネト事業企画部 技術第四課 主任
彭 強	コホ°-ネト事業企画部 技術第四課 担当
杉山 正行	コホ°-ネト事業企画部 技術第四課 課長
嶋田 博之	コホ°-ネト事業企画部 技術第四課 主任
縄田 明	コホ°-ネト事業企画部 技術第四課 担当
飯塚 求磨	コホ°-ネト事業企画部 技術第四課 担当

【再委託先】

( 研究員 )

東京電子株式会社

氏名	所属・役職
黒岩雅英	代表取締役
藤井進	技術部 部長
白山拓哉	製造部 部長
松本信彦	技術部 主任技師
宇野健司	製造部 部員
辺見修一	技術部 部員
佐々木優直	技術部 部員

VISTA 株式会社

氏名	所属・役職
大迫 信治	代表取締役
高橋 誠	技術担当研究員
山崎 尚	技術担当研究員
大迫 岳志	技術担当

株式会社ホリゾン

氏名	所属・役職
瀧澤 克雄	企画開発主任

### 1-3 成果概要

本開発の成果を、上記 1-1-3 の技術的目標に照らして以下に示す。

1. 要素技術開発（ラムダ方式全体） <ほぼ達成>  
ラムダ方式の理論構築と原理実証を行うとともに、下記サブテーマを進めるために必要な基礎データを収集した。
2. 汎用型のプロトタイプ製作（センサー、および制御電源・ソフト） <達成>  
スパッタ法でのフィールド評価が可能な製品プロトタイプを製作した。
3. プラズマ用への展開（基本特性評価） <未達成>  
基礎データを得るとの目標は未達成であるが、プラズマ発生領域の真空度計測を行い克服すべき問題点を把握した。
4. 1) CVD用への展開 要素技術開発（センサー全体およびコレクタ） <未達成>  
基礎データを収集するとの目標は未達成であるが、そのための実験機の製作はほぼ完成した。  
2) 要素技術開発（エミッタ） <未達成>  
基礎データを収集するとの目標は未達成であるが、そのための実験機の製作はほぼ完成した。
5. 分圧用への展開 要素技術開発（センサー、および制御電源・ソフト） <ほぼ達成>  
主成分（Ar）でのラムダ方式による計算結果を確認するとともに、プロトタイプ製作のために必要なデータを概ね収集した。

### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

キヤノンアネルバ株式会社 コンポーネント事業企画部 技術第四課 塩川 善郎

TEL 044-980-3501 Fax 044-986-4236 E-mail [shiokawa.yoshiro@canon-anelva.co.jp](mailto:shiokawa.yoshiro@canon-anelva.co.jp)

同上

中村 恵

TEL 同上

E-mail [nakamura.megumi@canon-anelvatx.co.jp](mailto:nakamura.megumi@canon-anelvatx.co.jp)

## 第2章 本論

### 2-1 要素技術開発（ラムダ方式全体） [VISTA]

#### 2-1-1 ラムダ真空計の計測方式の基本原理

気体分子あるいはイオン、電子などの粒子が真空中を飛行する際には、その一部は途中で気体分子との衝突によって飛行ルートから外れて散乱する。真空の圧力が低くなるに従い（すなわち空間の気体分子密度が小さくなるほど）、飛行粒子が気体分子に衝突して散乱する頻度は小さくなる。ラムダ真空計はこの現象を利用し、粒子が散乱せずに飛行する平均距離（これを平均自由行程という）を測定することによって真空の圧力を測定しようとするものである。“ラムダ真空計”の名称は、この平均自由行程を通例的に（ラムダ）で表すことから名付けられた。

真空技術の理論によれば、真空中の気体分子密度（空間をランダムに飛び回っている気体分子の空間密度）を  $n$ 、気体分子の直径を  $d$ 、平均自由行程を  $\lambda$ 、とすると、

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 n} \quad (1.1)$$

と表される。

また真空の度合いを気体分子密度  $n$  の代わりに圧力  $P$  で表すと、気体の温度を  $T$ （絶対温度）、 $k$  をボルツマン定数 ( $1.380662 \times 10^{-23} \text{JK}^{-1}$ ) として、

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 P} \quad (1.2)$$

と表される。

これらの式から、真空の度合いである圧力、または気体分子密度と  $\lambda$  は反比例の関係にあり、 $\lambda$  を測定することが出来れば圧力または気体分子密度を知ることが出来ることが分かる。これがラムダ真空計の基本原理である。

注) 上に示した  $\lambda$  と  $n$  または  $P$  の関係式は、気体中をその気体と同じ種類の粒子が飛行する場合に適用できる。電子または別の種類の粒子が飛行する場合には、粒子の直径  $d'$  が気体分子の直径  $d$  とは異なるので補正が必要である。

参考) いくつかの気体種に対して具体的な  $\lambda$  の値は表 1.1 のように求められている。

表 1.1  $\lambda$  の値

気体	(nm)	@0.01Pa(mm)	@0.1Pa(mm)	@1Pa(mm)	@10Pa(mm)
H <sub>2</sub>	0.268	1182	118.2	11.82	1.182
He	0.22	1754	175.4	17.54	1.754
N <sub>2</sub>	0.378	594	59.4	5.94	0.594
O <sub>2</sub>	0.365	637	63.7	6.37	0.637
Ar	0.369	623	62.3	6.23	0.623

## 2-1-2 平均自由行程 の測定

平均自由行程を測定するには、測定したい気体中にイオンあるいは電子などの荷電粒子を走らせ、出発点から一定の距離を飛行後に粒子量が減衰する割合を測定すれば良い。この減衰割合は真空技術の理論によると次の式で表されることが分かっている。(この式における  $\lambda$  が平均自由行程の定義であるとも言える。)

$$N(x) = N_0 \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) \quad (1.3)$$

ただし  $x$  は出発点からの距離、 $N_0$  は粒子量の初期値、 $N(x)$  は距離  $x$  飛行した時点で残っている粒子量である。すなわち粒子量は飛行距離が長くなるに従って指数関数的に減衰し、また同じ距離における減衰の程度は分子の平均自由行程  $\lambda$  に依存する。 $\lambda$  が大きいほど減衰の程度は少なく、逆に  $\lambda$  が小さいと早く減衰する。(  $\lambda$  は気体分子の種類と圧力または気体分子密度で決まることに注意。)

この式を変形して  $\lambda$  に付いて表すと

$$\lambda = \frac{x}{\ln\left(\frac{N_0}{N(x)}\right)} \quad (1.4)$$

または  $s(x) = \frac{N(x)}{N_0}$  を  $x$  の位置における粒子の生存率と定義すると

$$\lambda = \frac{x}{\ln\left(\frac{1}{s(x)}\right)} \quad (1.5)$$

式 1.4 から、粒子量の初期値  $N_0(x)$  と減衰後の値  $N(x)$ 、および飛行距離  $x$  を知れば  $\lambda$  は計算できることが分かる。さらに式 1.5 によれば、 $N_0(x)$  と  $N(x)$  の個々の値は必ずしも必要ではなく、比  $s(x)$  のみを知れば良いことが分かる。図 1.1 は粒子の飛行経路に沿った距離 0 と距離  $x$  の点での粒子数の減衰の様子を表している。

これらのことから、ラムダ真空計に必要な機能は、

- (1) 粒子を一定方向に飛ばすこと
  - (2) 粒子の飛行経路上の 2 点における粒子量(あるいはその比)を測定すること
- の 2 つであることが分かる。

## 2-1-3 粒子量の生存率の測定

気体中を飛ばす粒子としてはイオンや電子などの荷電粒子を使用すると粒子を発生させて一定方向に飛行させることが容易であり、また粒子量が電流として簡単に測定出来るので都合が良い。式 1.1、式 1.2 の注で述べた様に、圧力(または分子密度)を測定する気体(被測定気体)の分子と同じ種類の粒子(直径が同一の粒子)を使用すれば  $\lambda$  から圧力や分子密度への換算が容易であるので、被測定気体自身のイオンを使用するのが便利であるが、基本的には粒子が分かれば電子や他の気体分子イオンでも構わない。

(ただし電子や他の気体分子イオンを用いる場合は、測定した平均自由行程  $\lambda$  は被測定気体自身の分子の平均自由行程ではなく、飛行させる粒子の被測定気体中に於ける平均自由行程という意味となる。)

真空計の基本構成を図 1.1 に示す。イオン(電子)源から飛行するイオン(電子)がイオン(電子)コレクタ 1 ( $x=0$  とする)と、距離  $L$  だけ離れたイオン(電子)コレクタ 2 ( $x=L$ )の位置を通過する間に減衰せずに生き残る粒子の割合(生存率)を測定することによってイオン(電子)コレクタ 1, 2 間の気体を通過するイオン(電子)の平均自由行程 を計測する。

イオン(電子)コレクタ 1, 2 でのイオン(電子)電流の計測値  $I_1$  と  $I_2$  から  $x=0$  と  $x=L$  位置での粒子量  $N_0$ 、 $N(L)$  は次のように求められる。

$$N_0 = \frac{I_1}{C_1} \quad (1.6)$$

$$N(L) = \frac{I_2}{C_2} \quad (1.7)$$

ただし  $C_1$ 、 $C_2$  はそれぞれイオン(電子)コレクタ 1 および 2 におけるイオン(電子)の収集効率、すなわちその位置を通過する全イオン(電子)のうちイオン(電子)コレクタに捕捉されるイオン(電子)の割合である。イオン(電子)コレクタ 1 ではコレクタをメッシュ状にするなどして一部のイオンをコレクタ 2 のために通過させなければならないこと、またコレクタ 2 ではコレクタ 1 を通過した後に気体分子との衝突以外の要因によって軌道から消え去るイオン(電子)があり、原理図で示すような理想的な軌道上で  $x=0$  や  $x=L$  の面を通過するイオン(電子)の全てを計測することが出来ないこと、などの理由によりこのような収集効率を考えなければならないのである。

を計算するために必要なのは式 1.5 に示したように  $L$  の位置における粒子の生存率  $s(L)$  である。式 1.6、1.7 から

$$s(L) = \frac{N(L)}{N_0} = \frac{C_1 I_2}{I_1 C_2} = \frac{I_2 C_1}{I_1 C_2} = \frac{I_2}{I_1 K} \quad (1.8)$$

$$\text{ただし } K = \frac{C_2}{C_1}$$

この  $K$  の値は以下のようにして実験的に求めることが出来る。すなわち  $s(L)$  が 100% となるようにラムダ真空計を十分に低い任意の圧力(高真空)において動作させて  $I_1$ 、 $I_2$  を計測する。このときのそれぞれのイオン(電子)電流を  $I_{1U}$ 、 $I_{2U}$  とすると式 1.8 において  $s(L)=1$  なので

$$1 = \frac{I_{2U}}{I_{1U}} \frac{1}{K}$$

$$\text{したがって } K = \frac{I_{2U}}{I_{1U}} \quad (1.9)$$

つまり  $K$  は高真空におけるイオン(電子)コレクタ 1 とイオン(電子)コレクタ 2 の電流値の比として求めることが出来る。(本報告書ではこの  $K$  を便宜上透過率と呼ぶ。)

#### 2-1-4 平均自由行程、圧力、分子密度の計算

上で計測した粒子の生存率  $s(L)$  を用いて式 1.5 から は

$$\lambda = \frac{L}{\ln\left(\frac{1}{s(L)}\right)} = \frac{L}{\ln\left(\frac{I_1 K}{I_2}\right)} \quad (1.10)$$

として求めることが出来る。

被測定気体と同一の気体イオンを用いて測定を行う場合には式 1.1、式 1.2 から次のように分子密度および圧力を計算することが出来る。

分子密度  $n$  はここで求められた  $\lambda$  を基に式 1.1  $n = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma^2\lambda}$  を用いて

$$n = \frac{\ln\left(\frac{I_1 K}{I_2}\right)}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 L} \quad (1.11)$$

として求められる。

同様に圧力  $P$  は式 1.2  $P = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2\lambda}$  に式 1.10 を代入して

$$P = \frac{\ln\left(\frac{I_1 K}{I_2}\right)kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 L} \quad (1.12)$$

として求められる。

注) 式 1.10、1.11、1.12 から分かるように、平均自由行程  $\lambda$  は気体の種類および気体温度によらずに求められるが、分子密度  $n$  の計算には分子直径  $\sigma$  が含まれているので気体の種類が分からないと求められない。さらに圧力  $P$  の計算には分子直径に加えて気体温度  $T$  が必要である。

以上はイオンを用いた場合に  $\lambda$  から  $n$  および  $P$  を求める方法であるが、電子を用いた場合には  $\lambda_e$  と  $n$ 、 $P$  の関係は以下ようになる。

$$\lambda_e = \frac{4}{\pi\sigma^2 n} \quad (1.13)$$

または

$$\lambda_e = \frac{4kT}{\pi\sigma^2 P} \quad (1.14)$$

ただし  $\lambda_e$  は電子の平均自由行程、 $\sigma$  は電子がその中を飛行する気体の分子直径である。これらを式 1.1、1.2 の代わりに用いると式 1.11、1.12 の代わりに

$$n = \frac{4\ln\left(\frac{I_1 K}{I_2}\right)}{\pi\sigma^2 L} \quad (1.15)$$

$$P = \frac{4kT\ln\left(\frac{I_1 K}{I_2}\right)}{\pi\sigma^2 L} \quad (1.16)$$

となる。

## 2-2-1 汎用型ラムダ真空計センサー

ラムダ真空計として最も汎用的に使用されることを意図した場合、B-A ゲージをイオン源として備えた真空計が考えられる。これを汎用型のセンサーとして試作した。図 2.1 に汎用型センサーの基本構造を模式的に示す。

B-A ゲージと同様のグリッド、フィラメントからなるイオン源を真空計の中心軸上に設けた。グリッドの中心軸上には細線のイオンコレクタがグリッドの長さの半分程度まで伸びて配置されているので、この部分でこのイオン源は通常の B-A ゲージとして単独で圧力の計測が可能である。(以下 B-A ゲージ部のイオンコレクタをイオンコレクタ 0 と呼び  $C_0$  と記す。)

イオン源で発生した気体分子イオンの一部はイオンコレクタ 0 に捉えられずにラムダ計測部に向かい、その一部は電極  $E_1$  の中心に空けたオリフィスを通り抜けてラムダ計測部内を飛行する。ラムダ計測部は図 2.1 に示すように全体をシールド円筒で覆った中に飛行経路にそって電極  $E_2$ 、イオンコレクタ 1 ( $C_1$ )、電極  $E_3$ 、イオンコレクタ 2 ( $C_2$ ) が配置されている。

電極  $E_1$  はイオン源から飛来するイオンビームを一定の角度でラムダ計測部内に取り込むための電極である。取り込み角度を制限することにより、ラムダ計測部内を飛行するイオンを中心軸付近のものに限定するためのものである。またこの電極はグリッドの電位に比べて低い電位にすることにより、グリッド内で生成されたイオンを引き込む役割も負っている。以下この電極を  $E_1$  あるいは ビーム角制限電極と呼ぶ。

電極  $E_2$  は適当なバイアス電位をかけることによって、気体分子に一旦衝突してエネルギーを失った散乱イオンに対してのポテンシャルの障壁を軌道上に作り、低エネルギー散乱イオンがそのまま飛行を続けてイオンコレクタによって計測されないようにするためのものである。以下この電極  $E_2$  を迷イオン阻止電極 1 と呼ぶ。この目的にとってはイオン源から一度も衝突することなく飛んでくるイオンのみを通過させるようにイオン発生部の電位とほぼ同じ電位にするのが良いが、前後の電極との間の空間の電位分布がイオンの軌道を左右し本来測定したいイオンの通過にも影響を及ぼすので逆に信号を小さくしかねない。従ってノイズと信号の関係から最適なバイアス電位を決める必要がある。

電極  $E_3$  はオリフィスの中央にメッシュを張った構造で、電極  $E_2$  と同様に適当なバイアス電位をかけて、散乱イオンがイオンコレクタ 2 に到達しないようにする目的を持つ。また気体分子と衝突して散乱し飛行の中心軸から外れた方向に進むイオンがイオンコレクタ 2 に入ることを防ぐために、中央のオリフィス以外の周囲部分は金属プレートで覆って不透明としている。以下この電極を電極  $E_3$  あるいは迷イオン阻止電極 2 と呼ぶ。 $E_2$  と同様にこの電極のバイアス電位は信号とノイズの関係から最適な値を決める必要がある。

イオンコレクタ 1 ( $C_1$ )は  $x=0$  の位置にメッシュを置き、通過するイオンの一部を捉える。このイオンコレクタに流れ込むイオン電流は図上右端の電流端子を通して外部の微小電流計に接続して計測した。

イオンコレクタ 2 ( $C_2$ ) はイオンの飛行経路の終点  $x=L$  の位置に配置し、単純な円板形状とした。流れ込むイオン電流は図上右端の電流端子を通して外部の微小電流計に接続して計測した。今回の試作機では  $L$  すなわちイオンコレクタ 1 ( $C_1$ ) とイオンコレクタ 2 ( $C_2$ )間

の飛行距離は 45mm とした。完成したセンサーの写真を図 2.2 a、b、c に示す。

### 2-2-2 B-A ゲージとの複合

このラムダ真空計には上記のようにイオン源として B-A ゲージを設けて単独でも圧力が測定できるようにした。このことにより、ラムダ真空計では計測が出来ない高真空、超高真空は B-A ゲージを使用して圧力の計測が可能で、低真空から超高真空までのワイドレンジ真空計として使用出来る。

B-A ゲージとの複合は単に測定範囲を広くするだけではなく以下のように単なる組み合わせ以上のメリットが生じる。

(1) ラムダ真空計は B-A ゲージに比べて感度の変動する要素が極端に少なく、限られた圧力範囲 (数 Pa から  $10^{-2}$  Pa 台) ではあるが非常に安定した計測が可能である。

この領域でラムダ真空計に対して付属 B-A ゲージの感度を毎回その場校正すれば B-A ゲージによる信頼性の高い高真空、超高真空の計測が可能となる。

(2) 逆にラムダ真空計にとっては、 $I_1$  と  $I_2$  を計測して透過率  $K$  を求めるには真空計が  $10^{-3}$  Pa 以下の圧力になったことを知る必要があり、このために B-A ゲージが必要である。

### 2-2-3 イオン軌道のシミュレーション

各電極のバイアス電位がラムダ真空計内を飛行するイオンの軌道に与える影響を探るためにイオン軌道のコンピュータシミュレーションを行った。シミュレーションに使用したモデルを図 2.3 に示す。当初は簡素化のためイオンコレクタ 1 と電極 3 に使用しているメッシュを同心円状物としてモデリングを行ったが、後に実際の物に近い直交メッシュでのモデリングを行った。

シミュレーションの結果の一例を図 2.4 の a、b、c、d に示す。両方イオンコレクタは常に 0V に固定、イオン源はグリッド電位の 180V を使用した。電位を変化させたのは  $E_1$  (ビーム角制限電極)、 $E_2$  (迷イオン阻止電極 1) および  $E_3$  (迷イオン阻止電極 2) の 3 つである。以下この 3 つの電極電位の組み合わせを ( $Ve_1, Ve_2, Ve_3$ ) で表す。 ( $Ve_1, Ve_2, Ve_3$  はそれぞれ  $E_1, E_2, E_3$  の電位を表す。)

ポテンシャル障壁をイオン源の電位に近い 170V に設定した (0V, 170V, 170V) の条件では迷イオンの阻止効果が最も大きいと期待されるが、迷イオンだけでなくオリジナルのイオンまでが奥への到達を大きな割合で阻止されることが分かった。(図 2.4b、c)

イオンの飛行軌道が中心軸に集中して発散しないという観点から判断すると比較的良いと思われる条件は (120V, 120V, 0V) であった。(図 2.4d、e) ただし迷イオンの阻止の効率まではシミュレーションを行っていないので判断できていない。また本来は透過率(入射したイオンが奥まで到達する割合)までシミュレーションが可能であるはずであるが今回は行っていない。

### 2-2-4 実験

実験に用いた排気系のブロック図を図 2.5 に、装置全体の写真を図 2.6 に示す。

計測気体には  $N_2$ 、Ar および He を用いた。

参照圧力の測定にはフルスケール 33.3Pa のキャパシタンスゲージを用いた。イオン源の駆動

および  $C_0$  (イオンコレクタ 0) の電流の測定には市販の B-A ゲージの電源を改造して使用し、イオン電流は表示圧力から公称感度を基に逆算して求めた。

イオンコレクタ 1、2 の電流 ( $I_1$ 、 $I_2$ ) は市販の微小電流計を用いて計測した。

ラムダ真空計を用いて および圧力を計測した手順は次の通りである。

- ・ 真空チャンバーを高真空( $10^{-5}$  Pa 以下) に排気してラムダ真空計を ON し、安定するまで放置。キャパシタンスゲージが安定したらゼロ調整を行う。
- ・ マスフローコントローラを通してガスを導入し、測定圧力に保つ。圧力が安定状態で、キャパシタンスゲージの圧力、イオンコレクタ 1、2 の電流値( $I_{c1}$ 、 $I_{c2}$ )を計測記録。同時に  $I_{c0}$ 、参照用の B-A ゲージの圧力も記録。
- ・ 以上の操作をキャパシタンスゲージの圧力で  $10^{-3}$  Pa から 10Pa 程度まで圧力を上げながら計測を繰り返す。なお、1Pa 以上ではターボ分子ポンプ(TMP)が過負荷になるため、ターボ分子ポンプを止めてロータリーポンプで排気を行って測定した。
- ・ 温度はラムダ真空計センサーの外筒に取り付けた熱電対で計測した。測定中ほぼ 50 の値を定常的に示した。圧力の計算には気体の温度が必要であり正確な計測のためには内部のシールドの温度を測定するのが最も気体温度に近いと思われるが、今回は簡略化のため外部で測定した温度 50 を一定の値と仮定して計算に使用した。
- ・ 測定した  $I_{c1}$ 、 $I_{c2}$  を式 1.10 の  $I_1$ 、 $I_2$  として を計算した。透過率  $K$  は基本的には  $10^{-3}$  Pa における  $I_{c1}$  と  $I_{c2}$  の比から求めたが、 $10^{-3}$  Pa 台の電流計測値の不確かさが大きいいため、実際には計算で求めた圧力が両対数グラフ上で 45 度の傾きに最も近くなるように微調整を行って決定した。
- ・ 上で計算した を使用して式 1.12 から圧力  $P$  を計算した。圧力の計算には気体温度  $T$  の他に分子直径 が必要だが、それぞれ  $N_2$ : 0.378nm、Ar: 0.369nm、He: 0.22nm を使用した。結果のグラフではここで計算した圧力を参照 B-A ゲージの圧力と区別するために、ラムダ真空計での計測圧力を  $P$ 、参照 B-A ゲージでの計測圧力を  $P_{ba}$  と記している。

#### 2-2-5 実験結果と考察

図 2.7 a、b に  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  の電位とイオンコレクタ 1、2 の電流の関係のデータを示す。圧力は  $1.4 \times 10^{-2}$  Pa に固定して行ったので、圧力の影響ではなく電極のバイアス電位を変えたことによる透過率の変化を見ていることになる。

$E_2$  の迷イオン阻止電極 1 の電位( $V_{e2}$ )を変えた場合(図 2.7a) には 140V 近辺でイオンコレクタ 2 に到達する電流は最大になり、それ以上に電位を上げるとイオンコレクタ 1、2 ともに電流値は急激に低下することが分かった。これは図 2.4a のシミュレーション結果で、 $E_2$  が 170V の場合に多くのイオンが  $E_2$  ではじき返されていることに対応する。

図 2.7a の結果において  $E_2$  は 120V 近辺が最適と思われたので  $V_{e2}=120V$  に固定して  $E_1$  ビーム角制限電極の電位( $V_{e1}$ )を変化させた結果が図 2.7b である。 $V_{e1}$  を上げていくとイオン源からのイオンの引き込みの効率が悪くなるので  $I_{c1}$  が次第に落ちてくるが、逆に  $I_{c2}$  は上昇することから  $V_{e1}$  がある程度高い方が透過率は良くなることが分かる。ただし 140V を超えると  $I_{c2}$  が落ち始め、さらに 160V を過ぎると  $I_{c1}$  も急激に減衰してくる。

これらの結果から、 $V_{e1}=120V$ 、 $V_{e2}=120V$ 、 $V_{e3}=0V$  の条件が比較的良好と思われた。シ

ミュレーションの結果でもこの電位配置でイオンビームが中心軸付近に固まっていて透過率が大きいと思われる結果を示している。

図 2.8a, b には、実際に測定した  $I_{c1}$ 、 $I_{c2}$  と、それらから計算して求めた平均自由行程および圧力  $P$  をキャパシタンスゲージの圧力に対してプロットしたデータの一例を示す。なお、同時に測定した  $I_{c0}$  および参照 B-A ゲージの指示圧力  $P_{ba}$  も同時に示す。

図 2.8a は Ar での測定、図 2.8b は He での測定である。2 から  $3 \times 10^{-2}$  Pa あたりから 1Pa 近くまで比較的直線に近い特性が得られた。ただし圧力の絶対値では 60% から 70% の値になった。この原因の究明に関しては今後の課題である。

#### 2-2-6 まとめと今後の課題

- ・ ラムダ真空計の汎用型センサーを試作し、コンピュータシミュレーションおよび実験によって動作条件の最適化を行い、実際に平均自由行程 および圧力の計測を試みた。
- ・  $10^{-2}$  Pa 台から数 Pa の範囲で比較的直線に近い応答が得られた。
- ・ ただし圧力の絶対値に関してはキャパシタンスゲージとの開きがあり、今後原因の究明が必要である。
- ・ 0.1Pa 以下の圧力領域では  $I_{c1}$  と  $I_{c2}$  が接近した状態での計測となるため、計測値の少しの差が圧力に大きく影響する。この領域を測定するためには計測分解能、安定性の見直しが必要である。
- ・ 電流計測精度の向上にはイオン電流の取り込み効率を上げることが効果的である。今回の試作機では形状的な制約からイオン源と初段電極の取り込み口の距離をあまり近くすることが出来ず取り込みイオンの割合が小さかったと思われる。イオン引き込み電極をイオン源近く(グリッドの端)まで伸ばすことにより相当程度効率を上げることが可能と思われる。
- ・ 圧力表示の精度にとって気体温度の正確な測定が必要である。気体温度に最も近いと思われるイオン飛行部を覆うシールドの温度計測を行い、リアルタイムに計算に反映する機能を盛り込むことが必要である。
- ・ 現時点での計測精度を決めているのは主に電流計測の不確かさであると思われ、迷イオンの影響に関しては顕在化していないため今回は評価が出来なかった。計測精度が上がってくると今後顕在化する可能性があり今後の課題である。
- ・ 今回のプロトタイプセンサーは迷イオンの除去を中心に電極設計を行ったが、イオンを収束させて真っ直ぐに飛行させるという観点から電極の形状および電位の設計を行うことも効果が期待できる。これに関してはコンピュータシミュレーションが役に立つと思われる。

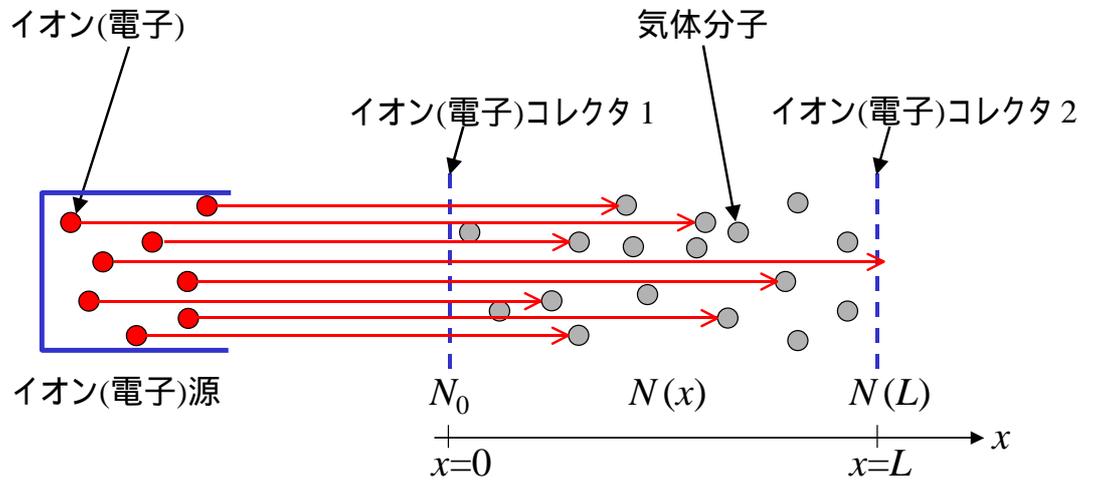


図1.1 ラムダ真空計の基本構成

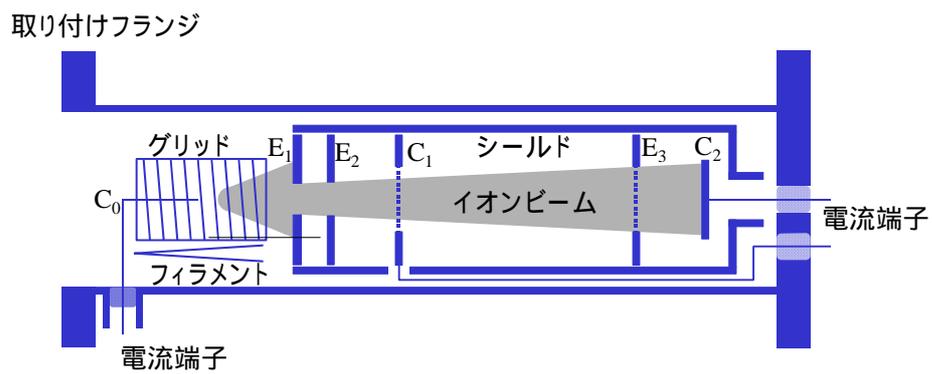


図2.1 汎用型センサーの構造概略



a. 全体

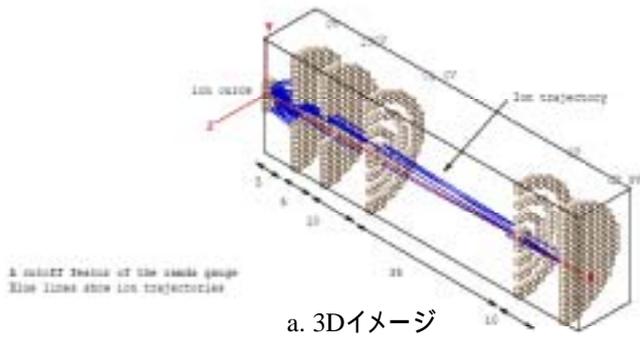


b. B-Aゲージ部

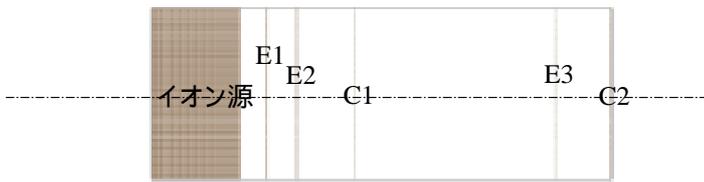


c. 外筒の内部

図2.2 汎用型センサー



a. 3Dイメージ



a. x-y 断面

図2.3 イオン軌道シミュレーションモデル

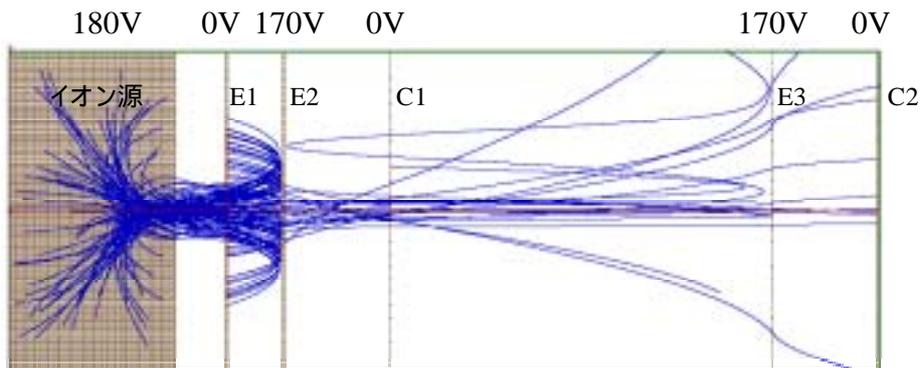


図2.4a イオン軌道シミュレーション結果

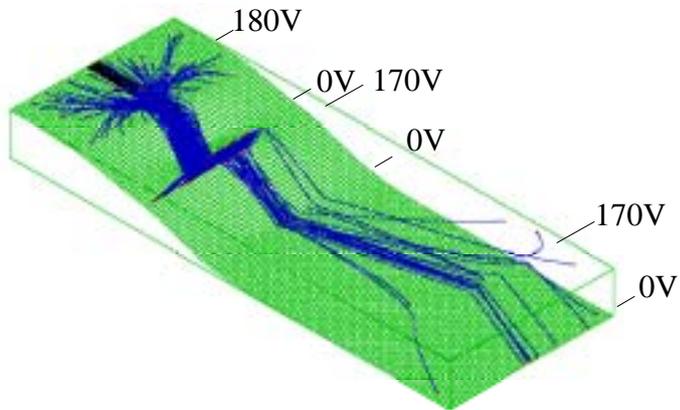


図2.4b イオン軌道シミュレーション結果

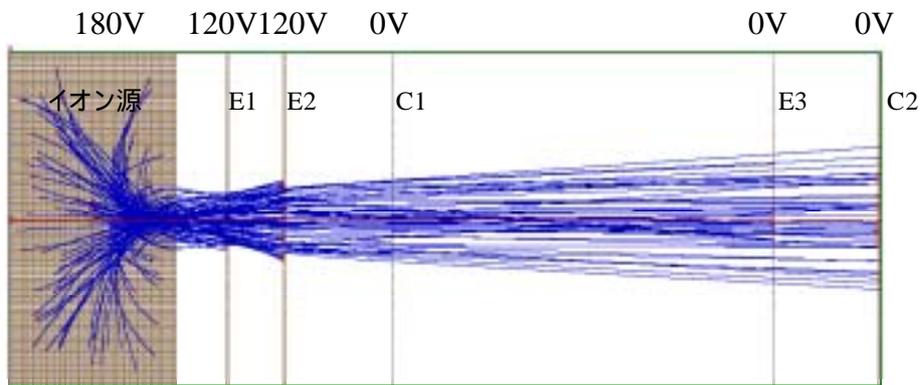


図2.4c イオン軌道シミュレーション結果

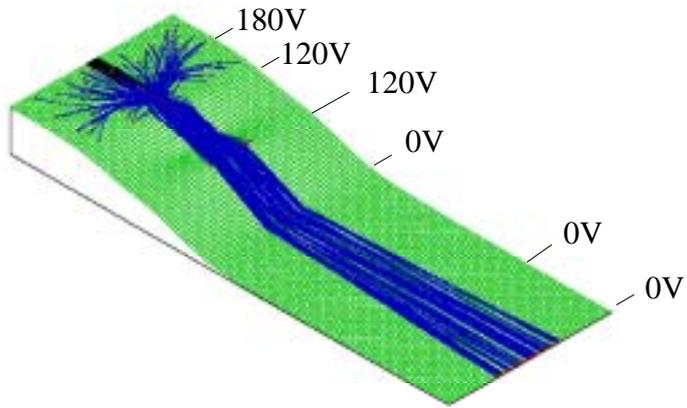


図2.4d イオン軌道シミュレーション結果

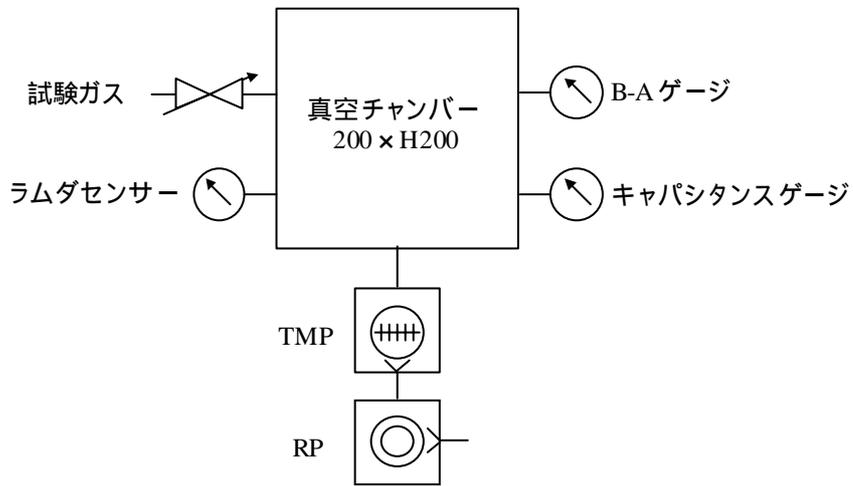


図2.5 実験用真空系



図2.6 試験用装置

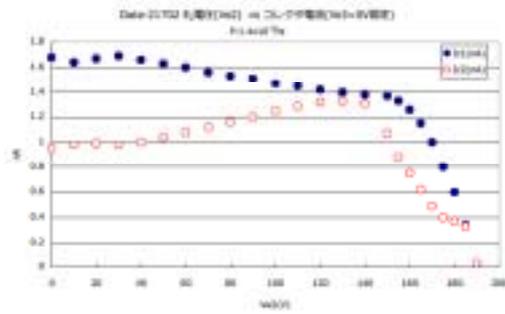


図2.7a E2電位(Ve2)の影響  
(Ve1=0V, Ve3=0Vに固定)

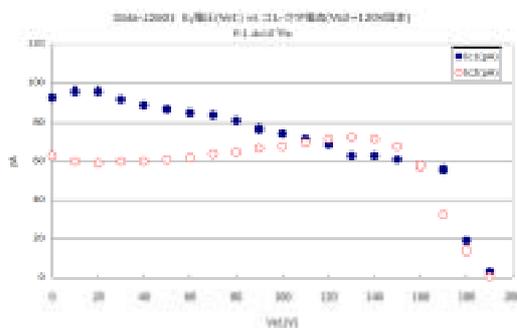


図2.7b E1電位(Ve1)の影響  
(Ve2=120V, Ve3=0Vに固定)

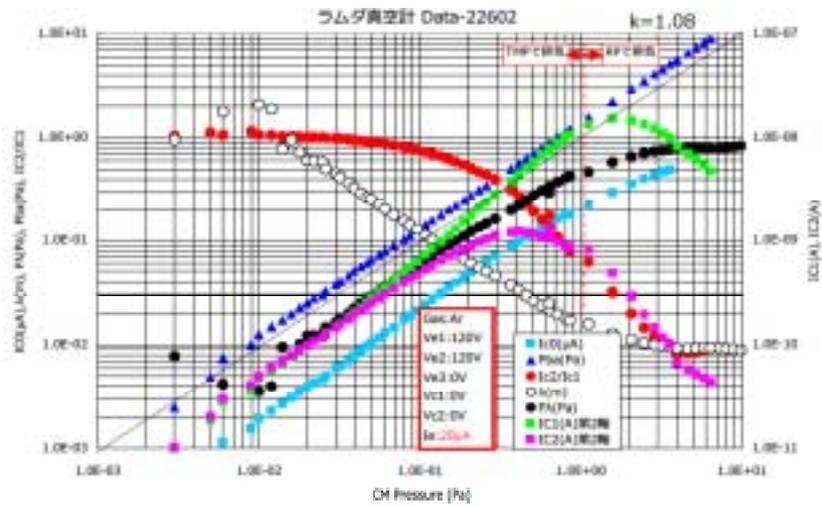


図2.8a Arでの および圧力の測定結果  
(120V, 120V, 0V, Ie=20  $\mu$  A)

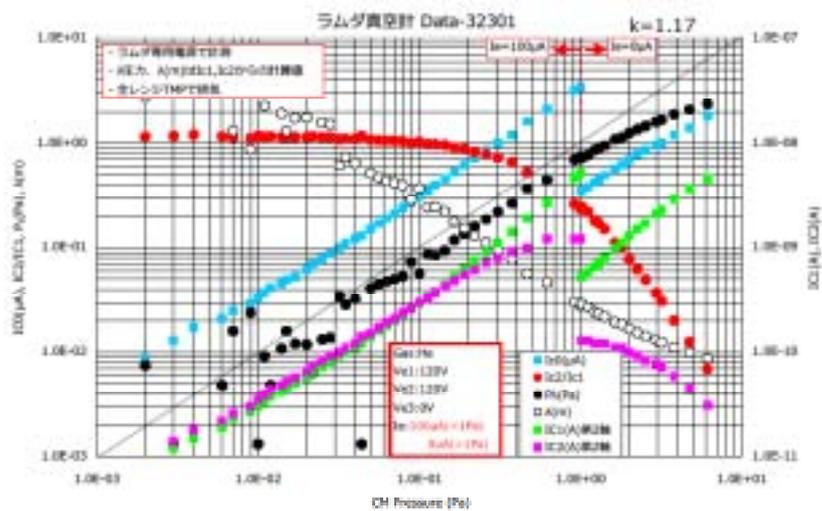


図2.8b Heでの および圧力の測定結果  
(120V, 120V, 0V, Ie=100  $\mu$  Aと8  $\mu$  A切替)

## 2-3 汎用型のプロトタイプ製作 <制御電源・ソフト> [東京電子]

### 2-3-1. 概要

基本的な操作性・信頼性・コスト性能を備えたソフト付き制御電源を製作することが目的である。制御電源自体には本質的な技術難度は低い、ソフトウェアには全く新しいアルゴリズムが必要で、上記「1.要素技術開発」、「2.汎用型のプロトタイプ製作<センサー>」との連携によって試行錯誤が必要であり、これに伴って制御電源・ソフトにも多くの改良が求められると予測される。ただし、制御電源・ソフトは製作期間が長く手直しも容易でない、上記「1.要素技術開発」での結果を完全に反映させて十分に洗練化させることはできない。その点で、上記センサーとともにプロトタイプとしての位置付けである。

プロトタイプとは、基本性能は持つが操作性・信頼性は必ずしも十分でなく一般ユーザではなく研究者が使用可能な試作品を意味し、その主目的は最終製品化に向けてのフィールドでの評価・用途開発である。また、汎用型として製作された制御電源・ソフトは、一部の改造および付属ユニット製作が行われ、下記「4.プラズマ用への展開」、「5.CVD用への展開」の実験にも使用可能である。最終的には、プロトタイプ<センサー>と組み合わせてスパッタ法でのフィールド評価が可能な製品プロトタイプを製作することが目標である。

制御電源自体の技術難度が低いとはいえ、ハードウェアとしての基本的な性能は押さえておく必要がある。また、他の実験との連携によってかなりの試行錯誤が予想されることから、各種測定条件の変更・追加等に柔軟に対応できるようにする必要がある。

ソフトウェアに実装される新しいアルゴリズムとして、飛行距離  $L[m]$  だけ離れたイオンコレクタ1と2で計測される電流値から平均自由行程  $\lambda[m]$  を求める算出式がある。さらに、平均自由行程  $\lambda[m]$ 、真空計温度  $T[K]$ 、主成分のガス分子直径  $d[m]$  から圧力が算出可能で、これをラムダ真空計の圧力  $P [Pa]$  と呼び、その算出式も同様に実装される。また、ハードウェアと同様に柔軟に対応するために、パラメータの変更や追加が容易に出来る必要がある。

<制御電源・ソフト>のプロトタイプ機は、自社用のほかに「2.汎用型のプロトタイプ製作<センサー>」、「4.プラズマ用への展開」、「5.CVD用への展開」との連携用に各1台ずつの合計4台を製作した。

### 2-3-2. 仕様

入力電源	AC100[V]
電源出力	(1) BA部へのフィラメント、グリッド (2) ラムダ用の電極電源
計測	(1) イオンコレクタ電流・・・ $1.0 \times 10^{-12} \sim 2.0 \times 10^{-5} [A]$ (2) 算出 BA圧力、ラムダ真空計の圧力 (3) パラメータ・・・(T、L、S、d、K、C) 3-5項参照
本体外形寸法	480(W) × 150(H) × 400(D) [mm]
センサーケーブル	3-4項参照

### 2-3-3. 構成及び各部の説明

#### 2-3-3-1 ブロック図

図 3-3 にラムダ真空計制御機のブロック図、図 3-4 及び図 3-5 にラムダ真空計制御機の内部写真を示す。ラムダ真空計制御機プロトタイプは、イオン電流検出回路、電極電源、B-A ゲージコントローラ部(グリッド電源回路、フィラメント電源・エミッション電流コントロール回路)、デジタル部、パネル部を組み込んだ制御電源等を一体化して 1 つのユニットに纏めるように各基板を設計した。各基板、部品は配線が最短となる且つシャーシの大きさが最小となるよう配置した。電源スイッチは、フロントパネル操作時に必要となるため、リアパネルよりフロントパネルへ配置した。

### 2-3-3-2 各部の説明

#### 1) イオン電流検出回路

イオン電流検出回路は、イオンコレクタに流れる電流を検出し電圧に変換する。イオン電流の計測範囲は  $1.0 \times 10^{-13} \sim 2.0 \times 10^{-5} [A]$  と広い範囲をカバーしているが、電流-電圧変換時はイオン電流の量に応じて増幅率が変わる回路としたことでイオン電流が微小の場合でも電圧変換可能とした。イオン電流検出回路は 3 種類あり、イオン電流 0 検出回路は、B-A ゲージ用のイオン電流検出部として使用する(B-A ゲージについては後述する)。イオン電流 1 検出回路及びイオン電流 2 検出回路は、ラムダ(平均自由行程)及びラムダ圧力を算出するために使用する。

#### 2) 電極電源

電極電源については、3-4. 参照とする。

#### 3) B-A ゲージコントローラ部

グリッド電源及びフィラメント電源については、3-4. 参照とする。エミッション電流は、 $10 [\mu A]$ 、 $100 [\mu A]$ 、 $1 [mA]$  の 3 種類で切換可能とした。エミッション電流値は圧力により切り替わる「自動」切換と、ユーザーで電流値を切り換える「固定」の 2 種類を設定可能とした。自動の場合エミッション電流は、 $1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^0 [Pa]$  の時  $10 [\mu A]$ 、 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-1} [Pa]$  の時  $100 [\mu A]$ 、 $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-5} [Pa]$  の時  $1 [mA]$  となるようにした。

#### 4) デジタル部

A/D 変換は、イオン電流検出回路で電流-電圧変換した値をアナログからデジタルへ変換する。CPU は A/D 変換したイオン電流値を使用し平均自由行程、圧力等を演算し算出する。また、基板はソフトのバグチェックや、試行錯誤によるソフト変更が発生するので、都度書き込めるようソフト書込み治具と接続し易い場所に配置した。

また、D/A 変換は、CPU で算出した平均自由行程、圧力、イオン電流等をデジタル-アナログ変換し、I/O コネクタに出力させる。アナログ出力はログリニア出力であり、アナログ出力と表示値の関係は各換算式による。

#### 5) パネル部

表示部は 7 セグメント LED に算出した平均自由行程、圧力、イオン電流等各種設定値、9 個の LED に各種ステータスを表示させた。

操作部は操作スイッチを 6 個設け、フィラメントの ON/OFF、デガスの ON/OFF や各種設定値を決定できるようにした。

### 2-3-4. 電源、計測部、その他のハード

#### 2-3-4-1 エミッション制御

BA ゲージコントローラの主たる機能としてエミッション制御がある。ここでは従来のBA ゲージコントローラで用いていたトライアックでの位相制御方式を採用した。BA ゲージとしては圧力の高い領域（10[Pa]程度）も含まれるのでエミッション電流は最小値を 10[ $\mu$ A]とした。感度係数も未定であるがほぼミニチュアタイプのゲージヘッド用と同等になっている。また圧力の低い領域を  $1 \times 10^{-7}$ [Pa]程度として、エミッション電流は切替で 100[ $\mu$ A]、1[mA]が選択できるようにした。本機ではエミッション電流固定の「手動」切換え、圧力によってエミッション電流を切り換える「自動」のどちらかを選択して行うことになる。

連続計測中に（圧力変化により）エミッション自動切換えが起きるとやや遅れてアンブレンジ切り替えも起きる。そのため圧力表示、圧力アナログ出力は過渡的に上下することになりこの急変を抑える必要がある。ここではソフトで安定の待ち時間を設け出力の急変を抑えている。逆に圧力の急変の場合はその時間のために出力に段差を生じることとなる。

以下はエミッション制御に関する参考データ

エミッション制御の安定性（メータ表示で確認）

表3-1.AC電源ライン変動に対して

電源電圧 [V]	90	100	110
le1 = 10[ $\mu$ A]	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$
le2 = 100[ $\mu$ A]	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$
le3 = 1[mA]	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$

表3-2.圧力変動に対して

基準計圧 力[Pa]	$5.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-2}$	$5.0 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-1}$
le1 = 10[ $\mu$ A]	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$
le2 = 100[ $\mu$ A]	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	
le3 = 1[mA]	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$		

#### 2-3-4-2 センサー電極への電源供給

センサーへはBAゲージに相当する部分とラムダセンサー部各電極に電源を供給する。

##### 1) フィラメント・・・

本機ではAC6[V]を位相制御で供給（フィラメント波形参照） 電位はDC + 45[V]

##### 2) グリッド電圧・・・

DC + 180[V] （シャーシ内電源基板上のVRで90～240[V]可変可能）

またデガス時はDC + 500[V]程度でボンバード

### 3) ビーム角制限板・・・

イオン開き角度を制限するために設けられている電極であるがその電位については設計段階では確定していなかった。当初-40～+40[V]程度の可変を想定して電源を用意していた。試作センサーへの通電実験では「DC+120[V]程度」との情報を得て改造を行った。シャーシ内電源基板上のVRで15～200[V]の可変が可能となっている。リヤパネルの端子台のジャンパー線で0[V]固定も選択できる。

### 4) 迷イオン阻止板 1・・・

計測に無関係なイオンをコレクタに取込まない対策として、迷イオン阻止板がイオン源近傍とコレクタ-2の近傍にそれぞれ設けられている。

当初、阻止板2枚の電位は共通でDC+170[V]程度を想定して電源を用意していた。試作センサーへの通電実験では「阻止板1のみDC+120[V]程度、阻止板2は0[V]」との情報を得て改造を行った。シャーシ内電源基板上のVRで15～200[V]の可変が可能となっている。リヤパネルの端子台のジャンパー線で0[V]固定も選択できる。

### 5) 迷イオン阻止板 2・・・

阻止板1で述べたように0[V]としているが、当初ビーム角制限板で用意した電源をこの阻止板2に接続している。

## 2-3-4-3 イオンコレクタ電流の計測

イオンコレクタ電流としては $2.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-12}$  [A]の計測範囲をカバーすることとした。イオン電流1、イオン電流2の値が特定できないこと、またBAゲージの低圧領域の計測を可能にするために最小値は $1.0 \times 10^{-12}$  [A]までとした。イオンコレクタ電流はアンブユニット内で電圧に変換しているが、桁毎にゲインを切替えて広範囲の電流に対応している。

- ・ 圧力上昇時は仮数部「9.9」から「1.0」、指数部桁上げ
- ・ 圧力下降時は仮数部「0.9」から「8.9」、指数部桁下げ  
(表示は仮数部「9.0」から「8.9」、指数は先行して桁下げ)

本機では3系統のイオンコレクタ電流の計測が必要なことから、取外し交換可能なようにユニット型の形状で設計製作を行った。

## 2-3-4-4 センサーとの接続ケーブル

MSコネクタからの線材はフィラメン用電源の電流を確保するために0.75SQのキャブタイヤケーブルを使用している。イオンコレクタとの接続は微小電流用としてローノイズ同軸ケーブルを使用している。イオンコレクタ0用ケーブルは導入端子(13P)とは別に設けられたセンサーケースのサイドのBNCに接続するため単独のケーブルで製作している。ケーブル長はそれぞれ2[m]で製作

## 2-3-5 ソフトウェア <ユーザーインターフェース>

制御機におけるソフトウェアの役割は非常に重要である。先にも述べたが、全く新規なアルゴリズムの実装のほかに、プロトタイプとしての柔軟性が求められる。平均自由工程 [m]の算出やラムダ真空計の圧力P [Pa]の算出に関しては、別に述べるとして、ここではプロトタイプとしての柔軟性に関係する各種ユーザーインターフェースについて説明する。

### 2-3-5-1 操作・表示

制御機の操作は、主にフロントパネルに配置された6個の操作ボタンで行い、各種計測値の表示やステータス表示は、4個の7セグLEDおよび9個のLEDで行われる。電源スイッチ(POWER)は、FUNCボタンやENTボタンと組み合わせた操作の必要性から筐体前面に配置されている。

### 2-3-5-2 各モード

製作初期の制御機は、図3-13のように、電源投入直後の待機モード、計測時の計測モード、デガス時のデガスモードから構成されていたが、フィールドでの評価を行う上で計測中にエミッション電流を手動で切り替える必要性が生じたため、新たなモードとしてエミッション電流切換モードを追加し図3-14のようになった。

### 2-3-5-3 パラメータ設定

平均自由工程 [m]やラムダ真空計の圧力P [Pa]の算出には、多くのパラメータが関係する。そうした多くのパラメータは、実験や研究を繰り返して決定されるのが常であり、本研究開発においても同様である。プロトタイプ役割として、これらのパラメータの決定を容易にする必要があり、そのためには簡単な手順でパラメータの変更を可能にすることが重要である。本機では、主要なパラメータである「温度T<sub>1</sub>」、「飛行距離L<sub>1</sub>」、「感度係数S<sub>1</sub>」、「ガス種(分子直径)d<sub>1</sub>」、「透過率K<sub>1</sub>」、「補正係数C<sub>1</sub>」、「計測電流」に関しては、図3-15のようにユーザーインターフェースで簡単に変更可能にしてある。その他のパラメータ(各切換時の安定待ち時間や各種デフォルト値)に関しては、1つのソースファイルにすべてを集めて変更が容易になるようにしている。

## 2-3-6. ソフトウェア <算出>

### 2-3-6-1 平均自由工程 [m]

平均自由工程 [m]は、イオンコレクタ1、2で計測したイオン電流値 (Ic1[A]、Ic2[A]) と飛行距離L[m]から、原理的には、式3-1で算出される。

$$[m] = \frac{L[m]}{\ln\left(\frac{Ic1[A]}{Ic2[A]}\right)} \dots \dots \dots \text{式3-1}$$

しかし、プロトタイプとして製作した<センサー>のイオンコレクタ1、2の形状・配置においては上記の算出式に、補正係数(透過率Kと呼ぶ)が必要となる。

高真空では、イオンコレクタ1を通り抜けたイオンは分子と殆ど衝突せずに全部イオンコレクタ2に到達するはずであるが、実際にはそうはならない。分子軌道の広がりなどで他の電極にぶつかって散乱してしまうイオンが存在するからである。従って、平均自由工程 を算出するにはIc1とIc2の比率だけでなくこの分を考慮に入れる必要がある。そのために高真空(気体分子との衝突によるイオンの減少分を無視できる圧力)で、Ic2/Ic1の比率を求めておき、それを透過率Kとして計算に入れることになる。(例えば50%が透過率だとすると、 を求める式においてln(Ic1/Ic2)のIc1の代わりにIc1×0.5を使うことになる。)

もう一つ考慮に入れなければならないことは、イオンコレクタ1で計測するのは、通過するイ

オンの一部でしかないことである。(全部計測してしまったらイオンコレクタ2に飛んでいくイオンは無くなる。)従って、Ic1にさらにその分の補正を加えなければならないことになるが、実際に計測で求める透過率Kには、この分も結果として入っているので全部を含めて透過率Kとして式3-2で計算すればよいことになる。

$$[m] = \frac{L[m]}{\ln\left(\frac{Ic1[A] \times K}{Ic2[A]}\right)} \dots \dots \dots \text{式3-2}$$

### 2-3-6-2 ラムダ真空計の圧力P [Pa]

平均自由行程 [m]が算出されれば、ガスの種類(分子直径d[m])、真空計温度T[K]からラムダ真空計の圧力P [Pa]が算出可能となり、その算出式は式3-3となる。

$$P [Pa] = \frac{T[K]}{d[m]^2 \times [m]} \dots \dots \dots \text{式3-3}$$

ここで、 は不変な定数で、 = 3.107 × 10<sup>-24</sup> [Pa・m<sup>3</sup>/K]となる。なお、コレクタで計測する電流が、イオン電流ではなく電子電流の場合には、 = 1.758 × 10<sup>-23</sup> [Pa・m<sup>3</sup>/K]となる。

### 2-3-6-3 B-A圧力P[Pa]

B-Aゲージ部で計測した圧力P[Pa]は、エミッション電流Ie[A]、コレクタ0で計測したイオン電流Ic0[A]および感度係数S[Pa<sup>-1</sup>]から算出され、通常、その算出式は式3-4となる。

$$P[Pa] = \frac{Ic0[A]}{(Ie[A] \times S[Pa^{-1}])} \dots \dots \dots \text{式3-4}$$

プロトタイプとして製作した本機においては、ラムダ真空計の圧力P [Pa]を用いてB-A圧力P[Pa]を校正する機能の検証を行うために、さらに補正係数C = (B-A圧力P)/(ラムダ真空計の圧力P )を導入し、算出式は式3-5のようになる。

$$P[Pa] = C \times \frac{Ic0[A]}{(Ie[A] \times S[Pa^{-1}])} \dots \dots \dots \text{式3-5}$$

補正係数Cは、現状では手動で入力するようになっているが、将来的には、自動キャリブレーション機能およびキャリブレーションをかける圧力(範囲)をパラメータで入力し、自動で実施するようにする。

### 2-3-6-4 算出確認

作成したソフトを基に、平均自由行程 及びラムダ真空計の圧力P が正しく計算されていることをイオン電流を擬似的に入力することで確認した。(表 3-3)

表 3-3 及び P の算出結果(気体 N<sub>2</sub>)

飛行距離 L[mm]	40	40	40	40	40
イオン電流 1[A]	$1.0 \times 10^{-6}$				
イオン電流 2[A]	$5.0 \times 10^{-7}$	$3.0 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-8}$
透過率 K	1.000	1.000	1.000	0.500	1.000
平均自由行程 [m]	$5.8 \times 10^{-2}$	$3.3 \times 10^{-2}$	$1.7 \times 10^{-2}$	$2.5 \times 10^{-2}$	$8.7 \times 10^{-3}$
ラムダ真空計の 圧力 P [Pa]	$1.1 \times 10^{-1}$	$2.0 \times 10^{-1}$	$3.8 \times 10^{-1}$	$2.7 \times 10^{-1}$	$7.6 \times 10^{-1}$

この結果、計算どおりの数値が表示された。また、この値の妥当性を検証するため、図 3-16 の場合を擬似入力を行って確認した。(表 3-4)

飛行距離 L[mm]	52	52
イオン電流 1[A]	$9.0 \times 10^{-7}$	$3.0 \times 10^{-6}$
イオン電流 2[A]	$4.2 \times 10^{-7}$	$3.3 \times 10^{-8}$
透過率 K	1.000	1.000
平均自由行程 [m]	$6.8 \times 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-2}$
ラムダ真空計の 圧力 P [Pa]	$1.0 \times 10^{-1}$	$6.0 \times 10^{-1}$

表 3-4 及び P の算出結果(気体 Ar)

この結果で P はグラフの I<sub>0</sub>の線にほぼ一致する値となった。これにより、この計算結果に妥当性があると言える。

### 2-3-7 まとめ

「汎用型のプロトタイプ製作<制御電源・ソフト>」としては、試作機 4 台を製作した。試作機によるダミーセンサーの制御や擬似入力によるソフトウェアの検証を実施し、基本性能を満足することを確認した。また、プロトタイプ<センサー>と組み合わせて、真空中でのエミッション制御、B-A 圧力やイオン電流の計測などを確認した。

しかし、「1.要素技術開発」、「2.汎用型のプロトタイプ製作<センサー>」との連携が十分とは言えず、平均自由行程 の計測には至らなかった。

試作機をフィールドでの評価・用途開発に耐えうるものにするには、さらなる試行が必要であり、これに伴って多くの変更や改良が求められることが予想される。



図3-1 本体外観図(フロント)



図3-2 本体外観図(リア)

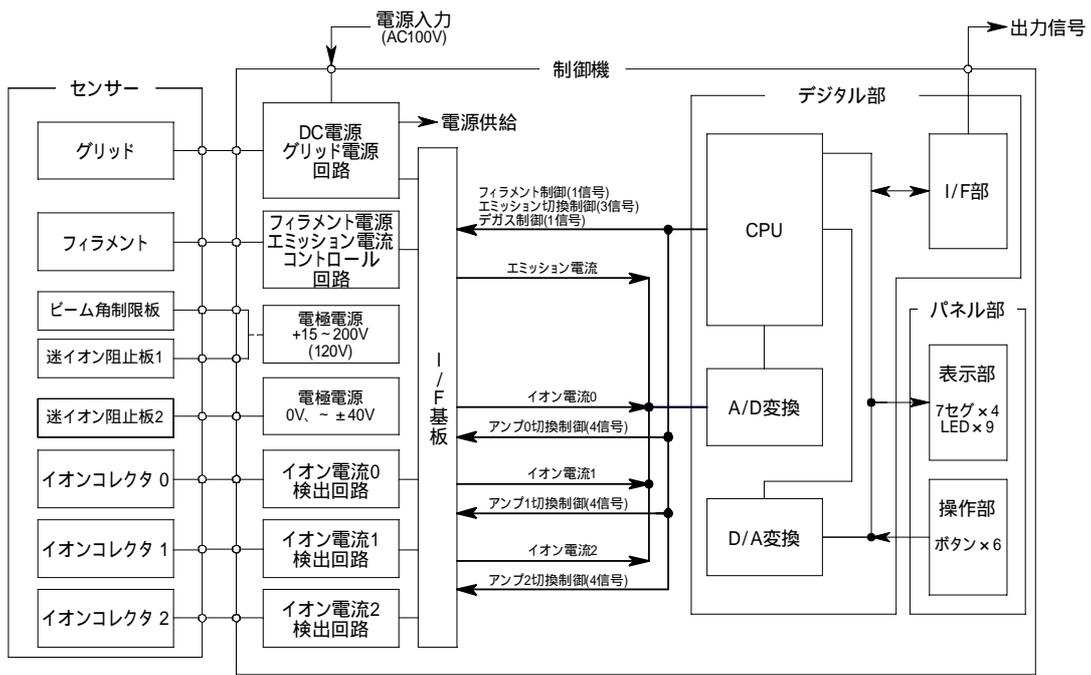


図 3-3 . ラムダ真空計制御機のブロック図

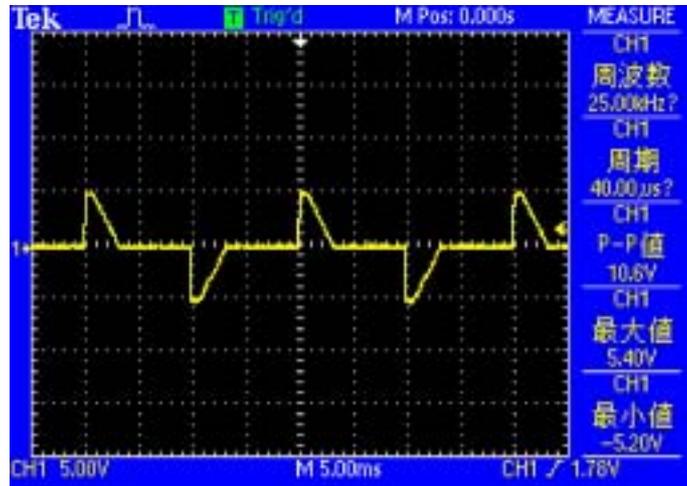


図3-4.エミッション電流 $10[\mu\text{A}]$ のときのフィラメント両端の波形

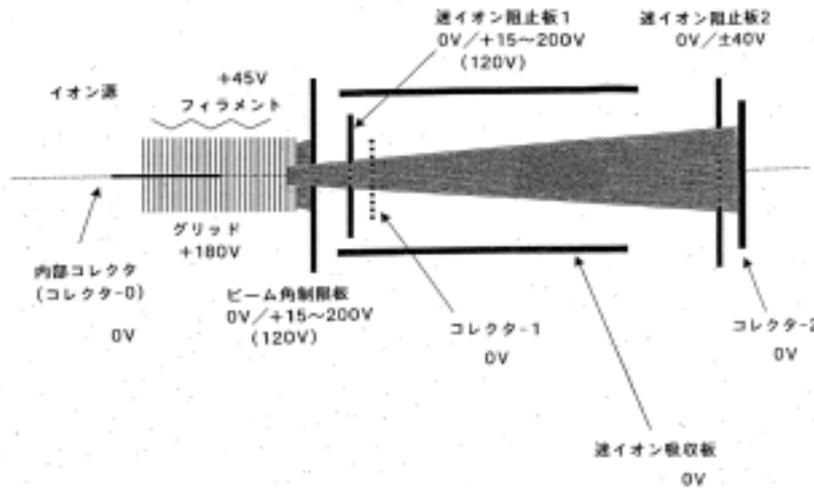


図3-5.センサー内 各電極の電位



図3-6. イオンコレクタユニット

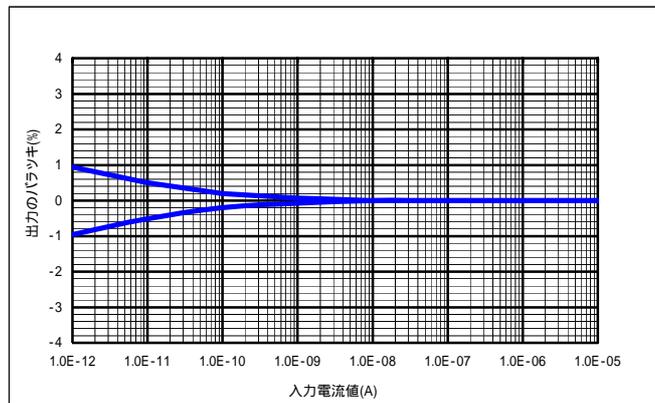


図3-7. DCアンプ出力 12台のバラツキ最大値データ（参考）

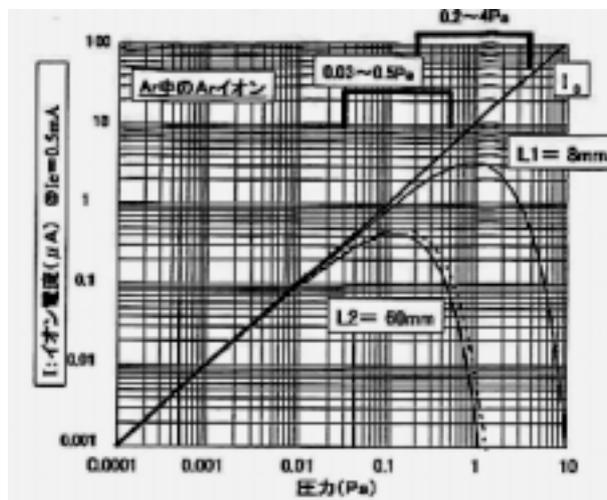


図 3-8 圧力、イオン電流特性

## 2-4 プラズマ用への展開 基本特性評価 [VISTA、キャノンアネルバ]

### 2-4-1 プラズマ用センサー

プラズマ用センサーはプラズマからのイオンをそのままラムダ真空計に引き込んで平均自由行程を測定するために自前のイオン源が不要である。今回は簡易的に汎用型センサーからイオン源である B-A ゲージ部を取り除いたものを試験に使用した。このセンサーをプラズマからの粒子が飛来する位置にセンサー入口のオリフィスが来るようにプラズマ装置に取付けた。図 4-1 にセンサーの構造を、図 4.2 にセンサーの外筒を外した写真を示す。

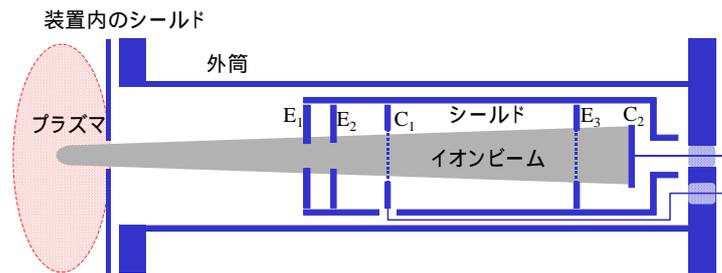


図4.1 プラズマ用センサー



図4.2 プラズマ用センサー  
(外筒を外した写真)

## 2-4-2 実験

実験は以下の条件にて行なった。

### 1. 装置構成

- 1) 排気系：TMP (170L/S) + RP
- 2) 真空計：バラトロン真空計 (1Torr ヘッド)
- 3) プラズマ源：EMIS-221C (ARIOS 製マイクロ波イオン源)
- 4) ガス導入系：MFC (窒素 100sccm)
- 5) 信号検出器：MIG-921 (2台)

### 2. 実験方法

- 1) プラズマ源とラムダ真空計を CF70 T 管に対向で取り付け、横のポートより排気。
- 2) ガスはチャンバー側より導入、バラトロン真空計はイオン源・真空計側に設置。
- 3) バラトロンにより圧力を測定しながら排気バルブにより調整し、プラズマを発生させ、その時の電極 1 と電極 2 の値を読み取る。(流量は 4sccm 程度で固定)
- 4) ラムダ真空計の入り口に取り付けたメッシュは、0V もしくは 100V とした。
- 5) ラムダ真空計のコレクター電極付近に並行磁場 (マグネット 2 個を 2 箇所) を印加。  
注 プラズマ源 OFF (バックグラウンド) は、P-1、P-2 とともに  $0.1 \times 10^{-9}$  Pa

## 2-4-3 結果

測定結果を図 4.3 に示す。一応の圧力依存性は出ているものの、真値と大きく異なり K の値も予想値よりもかなり大きい。そこで、次のような問題が発生していると考えられた。

プラズマで発生した高エネルギー光 (真空紫外光) がセンサーのコレクタを照射し、そこから 2 次電子が発生する。コレクタから放出される 2 次電子は偽イオン電流となり、本来のイオン電流に重畳することになる。そして、高エネルギー光は雰囲気中のガス濃度にほとんど影響されないため、真空紫外光の分が入った計算値は真値とは大きくずれることになる。なお、2 次電子が影響していることは、コレクター電極付近に並行磁場を印加すると計測されるイオン電流が大きく変化することからほぼ間違いないと思われる。

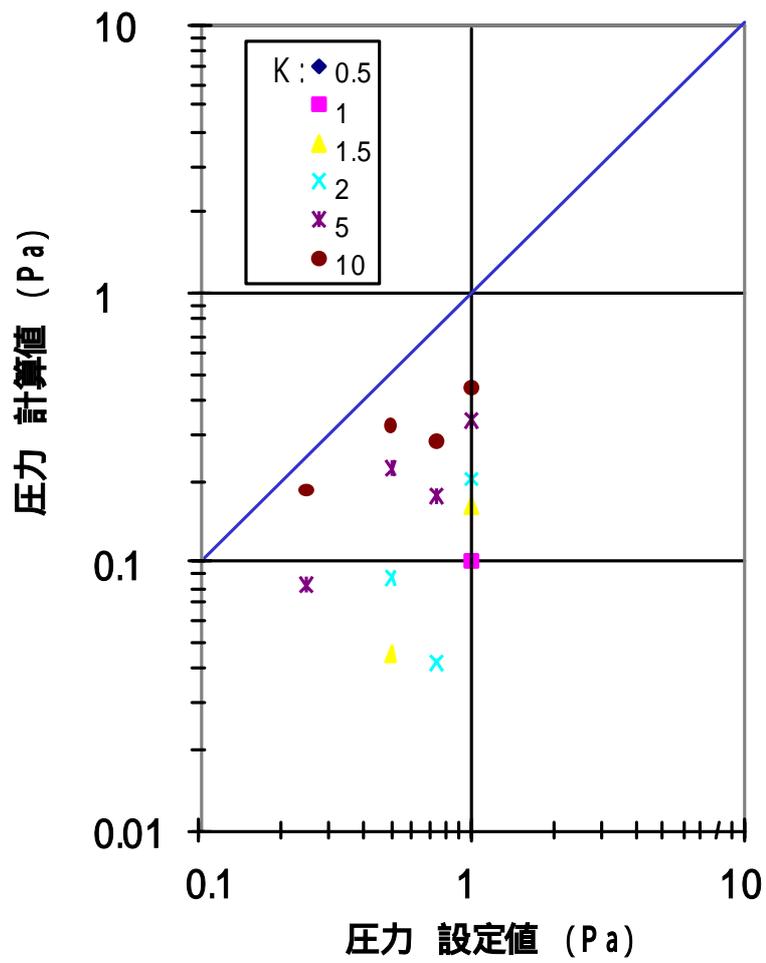


図4.3 測定結果

## 2-5 CVD用への展開 要素技術開発-1 <センサー全体およびコレクタ>

[VISTA、キャノンアネルバ]

### 2-5-1 シュルツ型（イオン化部とセンサー部の一体構造）の可否検討

開発する真空測定計においてはセンサー部についても新規のアイデアを盛り込んでいるため、センサー部が当初の狙い通りに動作するかの確認も重要であり、そのためには、現時点で実装可能なシュルツ型（イオン化部と一体となったセンサー部）を製作して、動作確認を行う必要がある。そこで、現時点で確実な動作が期待できるイオン化部の候補としてフィラメントからの熱電子方式のイオン化部を選び、イオン化部とセンサー部の一体構造の可否を検討した。フィラメントからの熱電子方式では、フィラメントを通電加熱してフィラメント自身の温度を上げることでそこから電子が熱電子放出の原理に基づいて発生する。発生する電子の量はフィラメントに流す電流量で制御することができ、取り扱いが容易である。また、熱電子放出で発生した電子は熱速度分の初速度しか備えていないので、その周辺の電位分布に応じて自在に進行方向を誘導できることも利点の1つである。図5-1に、検討したイオン化部とセンサー部の一体構造の基本構造とこの構造に加える電圧等を示す。フィラメントで発生した電子をセンサー部に制御良く導入するためにグリッドを配置してある。図5-1の右図に示したとおり、電圧の印加を変更することによってセンサー部に導入する荷電粒子を電子だけでなくイオンにすることも可能な構造である。検討の結果、この一体構造では発生した電子の初速度をゼロにすることはできないが、基本的な動作の確認は行えることがわかった。

詳しく説明する。図5-1の左図はイオン化部とセンサー部の一体構造を示したものであり、上図は側面から見た状態で下図は正面から見た状態である。フィラメントの左側にはグリッドが配置し、右側にはセンサー部としてシールドケース、コレクター1、コレクター2とを配置した。この左側図では電子を扱う場合の電圧印加の様子を示してある。フィラメント、コレクター1、コレクター2を基準（ゼロ電位）としてグリッドには $-30\text{V}$ を印加することで電子を跳ね返すようにしてある。シールドケースにも $-30\text{V}$ を印加しているため電子がシールドケースに入ることを抑制しているが、全体の電位分布によってわずかには電子が入る。電子の大半がコレクター1またはコレクター2に到達する。イオンを扱う場合にはグリッドに $+110\text{V}$ を、シールドケースには $+40\text{V}$ を印加して残留気体がイオン化したイオンをセンサー部で受け止める。図5-1に示す通り、シールドケース、コレクター1、コレクター2には電流計をつないでそれぞれ電流量を解析することで真空度を測定する。今回開発する真空測定計では測定したい真空度の領域でシールドケース、コレクター1、コレクター2の電流比率が明確に測定できるようにセンサー部の構造を設計する必要がある。今回の検討によって、フィラメントとグリッドの構造で質のよい電子をセンサー部に送り込めることがわかったので、さらに詳細な構造の検討を行うこととした。

### 2-5-2 シュルツ型（イオン化部とセンサー部の一体構造）の製造検討

上記検討でフィラメントからの熱電子方式のイオン化部とすることで、センサー部との一体構造を構成することが可能なことが分かったので、具体的な設計および部品調達、組立てを行った図5-2は一体構造の構成図である。

図5-3は組み立てた実際の一体構造である。内部構造が見やすいように組立ての途中段階の写真である。測定精度を低下させる可能性のある不要なイオンの遮蔽、電子の軌跡を想定外の

方向に誤って誘導しない引き回し線の取り付け方法等を検討し、実際の試作に反映させることができた

## 2-6 CVD用への展開 要素技術開発-2 <エミッタ> [ホリゾン、キャノンアネルバ]

### 2-6-1 真空紫外光ランプ構造の可否検討

開発する真空測定計では「真空紫外光」によって被測定真空容器内の残留ガスをイオン化し、イオン化で発生した「イオン」または「電子」をセンサー部で分析することで真空度を測定するものである。まず、この真空測定計に適した真空紫外光ランプを製造できるか基本検討を行った。図6-1に検討結果を示す。Xeガスを封入した容器内で電子フィラメントから電子ビームを放射し、波長150nmの真空紫外光を発生させる構造である。シール部分はエラストマーで対応可能であり、実現可能であることがわかったが、現段階ではUV透過合成石英の製品としては波長200nm以上の光のものしかなく、波長150nm対応のものは硝子メーカー（旭硝子）で現在開発中であることがわかった

### 2-6-2 電子線管を用いたイオン化の可否検討

上記検討によって、現時点では開発する真空計に必要なイオン化を真空紫外光で行うことに困難があることがわかったので、他の方式のイオン化の検討を行った。真空測定計のイオン化としては電子線を用いた方式が一般的であるが、本来の「真空紫外光」によるイオン化に近い構造でのイオン化が望ましいと判断し、ホリゾン社で独自に開発した「電子線管」を適用できないか検討を行い、電子線管の窓から放出する電子線は、開発する真空測定計に必要な安定度（速度、方向）にらないことがわかった。至

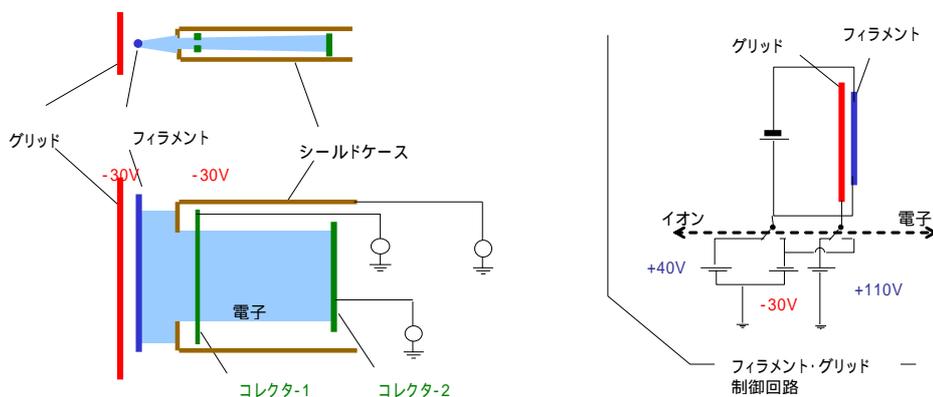


図5-1 イオン化部とセンサー部の基本構造と動作方式

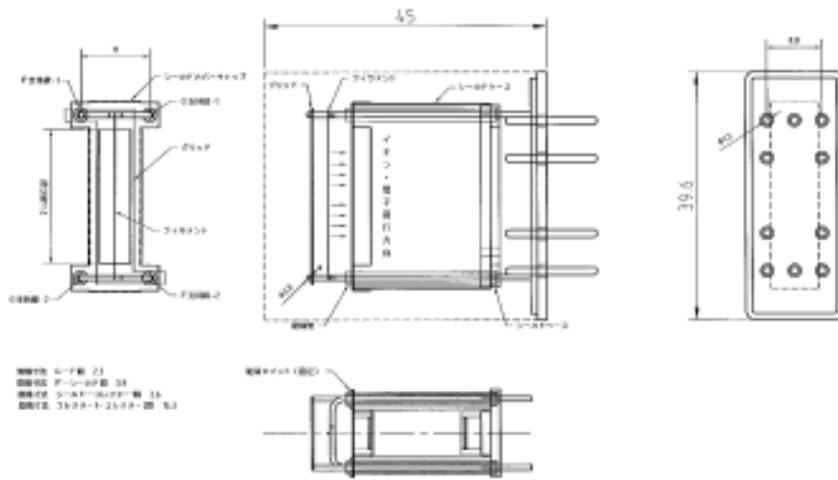


図5-2 イオン化部とセンサー部の一体構造



図 5 - 3

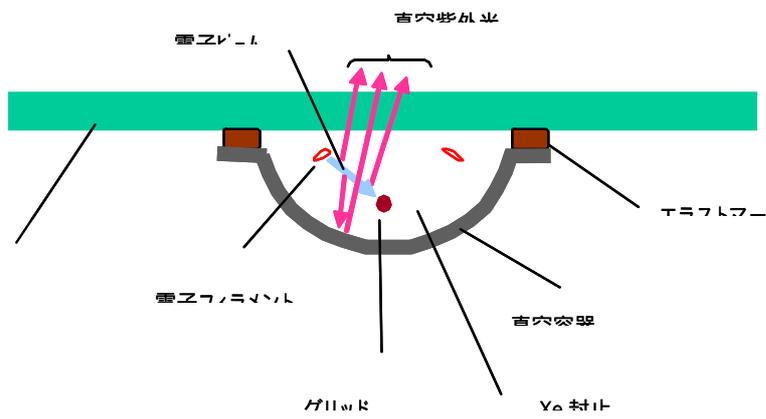


図6 - 1 真空紫外光ランプ構造

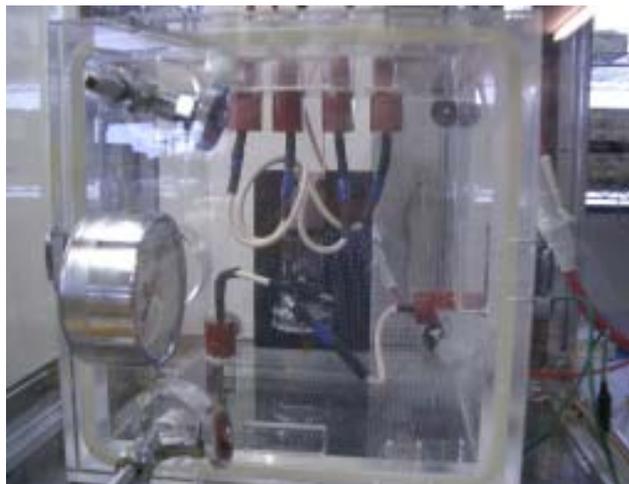


図6 - 3 電子線管からの放出電子の評価実験

## 2-7 分圧用への展開 要素技術開発 <センサー> [キヤノンアネルバ]

### 2-7-1 課題とその対策

#### A 原理的課題

平気自由行程（ $\lambda$ ：ラムダ）は圧力に反比例し、例えば 1 Pa の  $N_2$  ガスの場合は 6.6 mm である。従来のマスフィルタ（四重極質量分析計）をこのような高圧力で動作させることができないのは、この  $\lambda$  が短いために質量分離中のイオンの軌道が乱れて感度が著しく低下するからである。そこで、高圧対応ラムダ分圧計を実現するには質量分離を行う Q-pole（四重極）電極の全長  $L$  を  $\lambda$  に近い値、被測定プロセス圧力にもよるが 10~30 mm 程度にしなければならない。しかし、その長さでも質量分離に必須なイオンの振動回数を確保するには RF の周波数を上げて 10 MHz 程度に上げる必要がある。しかしながら、それに伴う電力増大を回避するためには Q-pole 電極間の間隔を狭くして内接円半径  $r_0$  を 1 mm 以下にする必要がある

#### B 高圧力による信号減衰

前項のように Q-pole 電極の全長を 10~30 mm に短くしても圧力が 0.1 Pa 以上になると信号の減衰は避けられず、補正手段が必要となる。他社製では、予め得た減衰データとイオン源部で得た全圧値を用いて補正しているが、精度・構造的な問題がある。そこで、信号の減衰を逆手に取った全く新規の方式を採用することとした。すなわち、 $L$  の異なる Q-pole を 2 組併設し、両者における検出信号値の違いの比率から真の信号値を直接算出する方式（ラムダ方式）である。10 mm と 30mm の場合を図 7-1 と式 7-1 に示した。

$$I_0 = (I_A^3 / I_B) ^{1/2} \dots (7-1)$$

長さの異なる Q-pole 電極を使うことは、被測定圧力領域に応じて 2 組の電極長の組み合わせを最適化できる利点もあり、この実用的な価値は大きい。

#### C ノイズ低減

マスフィルタの主要なノイズはイオン源で発生した真空紫外光が直接検出器にはいることにより発生するが、その量は  $L^2$  に反比例するので高圧対応ラムダ分圧計では大変深刻になる。そこで、Q-pole のイオン軌道を従来の直線からカーブへ変更することとした。そうしても Q 電極間の間隔と印加電圧を同じにすれば各断面における電界はほぼ変わらず、質量分離は可能である。

### 2-7-2 対策を実現する基本設計

しかしながら、前項の課題 A. Q 電極間の内接円半径  $r_0$  を 1 mm 以下に狭く、B. 2 組併設、C. カーブに曲げた電極を製作することは、従来の構造では不可能である。そこで、構造と製作方法を根本的に変更することとした。すなわち、セラミックスの円盤の片側を旋盤またはフライスで切削して円弧状傾斜を持つ溝を一周形成し、その表面に金メッキを施した上で同じ形状のものとはめ合わせる。そして、溝の途中に両方向型のイオン源とコレクタを設置することとした

### 2-7-3 実験

前項までの検討を踏まえて実験装置の試作を行った。イオン源は高圧力での安定性と構造のシンプルさから Nier（箱）型とした。コレクタは第一次実験においてファラディカップのみとした。

### 2-7-4 結果

分解能の調整がまだ不十分であるものの感度は  $7.6E-9$  A/Pa であった。さらに、下段のデータは最小検知分圧が  $1.3E-7$  Pa, であること, 最小検知濃度が 1.3 ppm, ダイナミックレンジが 6 桁弱であることを示しており, 開発目標値および他社製の公称値と同等と言える。

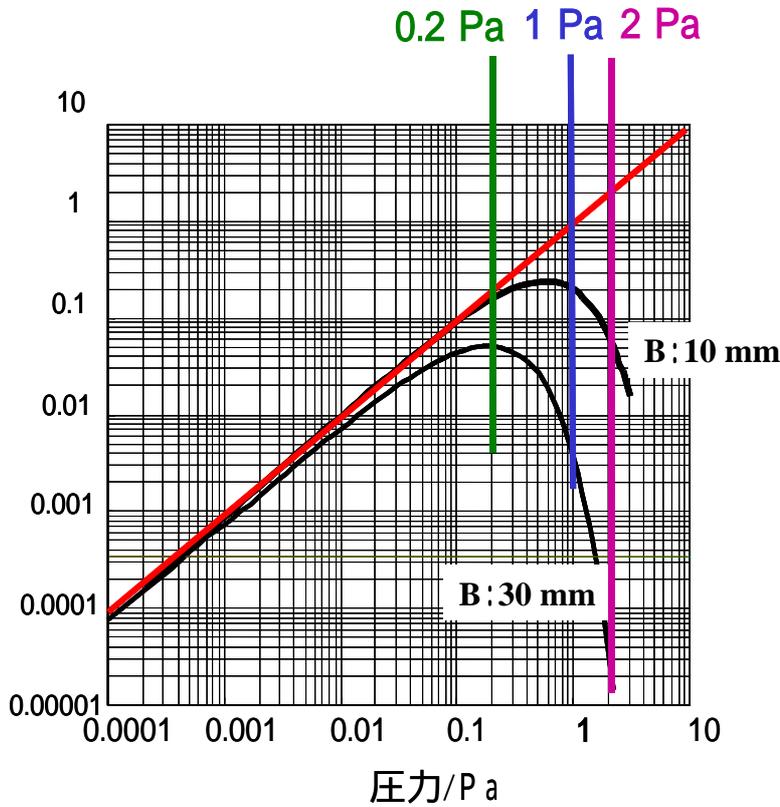


図 7-1 信号減衰の補正

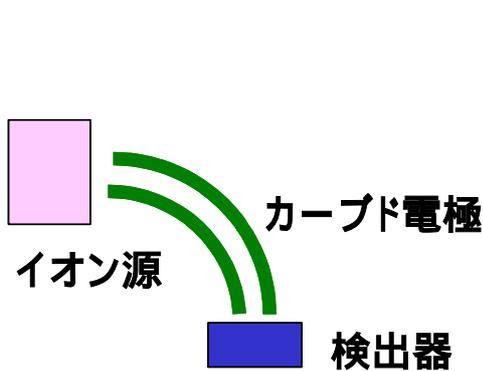


図 7-2 カーブ型電極の概要

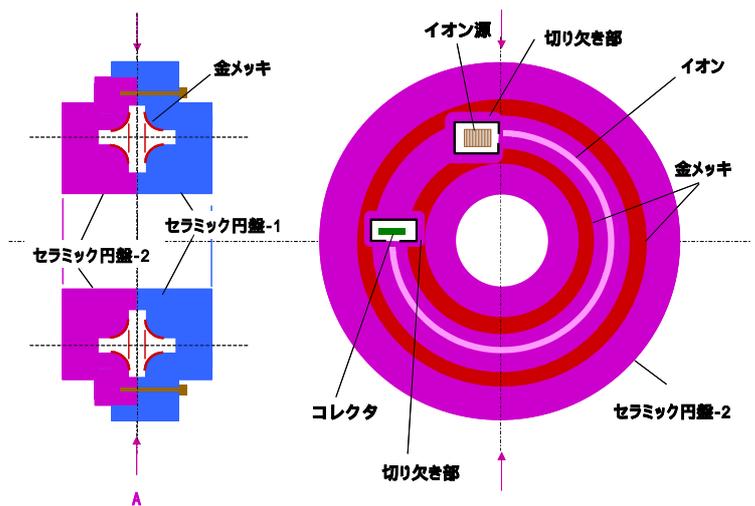


図 7-3 カーブ型 Q 電極の基本設計

## 2-8 分圧用への展開 要素技術開発 <制御電源・ソフト> [キヤノンアネルバ]

### 2-8-1 計算・較正方法(アルゴリズム)

雰囲気ガスとの衝突によるイオンの減衰の状況は、平均自由行程とイオン飛行距離とによって決められるので、もしイオンの飛行距離の異なる質量分析装置が同じ真空領域に設置されていれば、二つのイオン電流の変化は異なる指数関数となる。しかし、飛行距離による減衰状況以外の条件が同じであれば、その指数関数の仮数は同じとなり、指数のみが異なる二つの指数関数となる。

そこで、本来のイオン電流を  $I_0$ 、平均自由行程を  $\lambda$ 、二つの飛行距離を  $L_1$ 、 $L_2$ 、それぞれのイオン電流を  $I_{L1}$ 、 $I_{L2}$  とすると、減衰式より

$$I_{L1} = I_0 \cdot \exp(-L_1 / \lambda) \quad \dots(1)$$

$$I_{L2} = I_0 \cdot \exp(-L_2 / \lambda) \quad \dots(2)$$

対数をとって整理すると、式(1)(2)は

$$= -L_1 / \text{Loge}(I_{L1} / I_0) \quad \dots(3)$$

$$= -L_2 / \text{Loge}(I_{L2} / I_0) \quad \dots(4)$$

ここまででは上記の全圧用のラムダ真空計と同じ考え方であるが、分圧用では  $\lambda$  を必要とするのではなく、本来の信号量  $I_0$  を求めることが必要となる。そこで、

式(3)(4)から  $\lambda$  を消去すると、

$$L_1 / \text{Loge}(I_{L1} / I_0) = L_2 / \text{Loge}(I_{L2} / I_0) \quad \dots(5)$$

式(5)の本来のイオン電流  $I_0$  以外の値はすべて既知( $L_1$ ,  $L_2$ : 設定値、 $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$ : 例えば、コレクタ 23 a、23 b での計測値)であるため、式(5)より本来のイオン電流  $I_0$  が算出される。このように、式(5)では、平均自由行程  $\lambda$  と無関係となり、さらに、正確に求められる設定値  $L_1$ 、 $L_2$ 、およびコレクタでの計測値  $I_{L1}$ 、 $I_{L2}$  により計算できるので、従来のように別個に測定が必要な圧力によって決められた換算値による補正を行わなくても、高精度な測定を行うことができる。

しかし、上式では「飛行距離による減衰状況以外の条件が同じ」と仮定しているが、実際には条件は全く同じとはならない。そこで、圧力が低くて減衰がない、あるいは低い状態でのイオン電流の比率を測定しておき、これで実際の計測値を補正することが望ましい。この「減衰なし補正」においてはまず、減衰が無視できるような良い圧力(低い圧力)の状態それぞれのコレクタ 23 a、23 b でのイオン電流  $I_{L1-A}$ 、 $I_{L2-A}$  を測定し、その値を初期値(減衰なしの値)として設定しておく。そして、実際の測定では、コレクタ 23 a、23 b の各々で実測したイオン電流  $I_{L1}$ 、 $I_{L2}$  をこの初期値で割った値に規格化して計算すればよい。上記項目 6) と同じく、減衰なしで a 対 b、減衰ありで d 対 e の場合、 $I_{L1}$  対  $I_{L2}$  は  $(d/a)$  対  $(e/b)$  となる。

実際の測定としては、例えば次のように行なえば良い。

イオン源 31 a からコレクタ 33 a までの距離(第 1 の飛行距離)を  $L_1$ 、イオン源 31 b からコレクタ 33 b までの距離(第 2 の飛行距離)を  $L_2$  とする。本例では  $L_1 = 10 \text{ mm}$ 、 $L_2 = 30 \text{ mm}$  としている。

まず、圧力が十分低い雰囲気において、特定の成分の存在量(例えば、特定のイオンの圧

力、密度、濃度など様々な表現が可能)とイオン電流との関係を求めておく。すなわち、コレクタ電流を  $I$ 、存在量を  $C$  とし、特定のイオン(測定対象のガスのイオン)について、予め次式の  $K$  なる比例係数(感度)  $K$  を求めておく。

$$C = K \times I \quad \dots (6)$$

つぎに「減衰なし補正」を行う場合は、該減衰なし補正のために、同じく圧力が十分低い雰囲気において、コレクタ 33a とコレクタ 33b とでの特定イオンのイオン電流を求め、これを  $I_{L1-A}$ 、 $I_{L2-A}$  とする。ここまでの予備測定を行なっておいてから実際の測定に移る。なお、十分に低い圧力の具体的な値としては、平均自由行程がロード長(四重極型質量分析器の電極長)よりも十分に大きくなることが必要で、本例では、例えば 1000 mm 程度、圧力として  $7 \times 10^{-3}$  Pa 程度の圧力であれば良い。

## 2-8-2 制御電源

制御電源としては主制御電源と副制御電源の 2 つで構成されている。主制御電源は小型化に対応するために、従来のマスフィルターをベースに一部変更されたものとなっている。また、副制御電源はカーブ型に対応するために、新たに試作されたものとなっている。これらの制御電源を上記 2-7 で示したセンサーに接続して実験を行なった。

## 2-8-3 ラムダ方式による信号値の補正

これらの実験装置においてラムダ方式の実験を行なった。ガスは Ar、飛行長は 30mm と 60 mm であり、 $Ar^+$  のマスピークの高さを信号量(縦軸)としている。なお、圧力(横軸)は市販のイオンゲージの値である。実際の計測値  $I_{L1}$ 、 $I_{L2}$  では 0.1Pa 以上で大きな減衰が発生しているが、ラムダ方式により計算された値  $I_0$  は 1 Pa 近くまでほぼ直線性が維持されている。

ただし、2 つの測定が連続的でないこと、イオン量が必ずしも同量ではない状態となっている。そのため、前者により圧力のレンジ切替時での圧力測定起因の誤差が、後者により  $I_{L1}$ 、 $I_{L2}$  の比率が大きくなる 1 Pa 以上で誤差が強調されてしまっているようである。切替えがスムーズとなるイオン源を使用すれば、本方式にてアプリケーションに必要な十分な結果が得られるものと予想される。

# 最終章 全体総括

## 1. 背景と研究目的、体制

フラットパネル(プラズマ・液晶)、半導体、ストレージなどの先端技術の多くはそのキープロセスを各種の真空プロセス、特にスパッタなどの薄膜形成プロセスに負っている。これらの歩留まりはかなり悪いが、その主原因のひとつが真空プロセスであり、その制御の基本となる全圧/分圧真空計\*も一要因となっている。

( \* 全圧真空計は雰囲気ガスの全体の圧力を、分圧真空計は雰囲気ガスの各成分の圧力を計測 )

従来の測定原理では真空プロセスに不可避の汚染の影響に対応することが出来ないが、キヤノンアネルバ(株)ではこれらを解決し得る基本技術を得ている。そこで、本研究開発は本原理の実用化開発を進めるものとし、今年度は第一段階として基本特性の確認、各種アプリケーション評価用の試作機製作を目的とした。

そこで、キヤノンアネルバ(株)が事業管理者となるとともに以前より進めてきた分圧真空計を担当し、一方従来型真空計で実績のある東京電子(株)、V I S T A (株)、(株)ホリゾンの3社が全圧真空計を担当することとした。

## 2. 原理と構造

異なる二つの距離を飛行させたイオンが雰囲気ガスとの衝突によって減衰する量を計測し、その比率から中性分子の平均自由行程\*を算出することを原理としている。

( \*平均自由行程とはイオンが衝突なしに進める距離の平均値で真空度を示すひとつの表現。成分が知られば圧力に換算できるが、真空プロセスには平均自由行程の方が重要。平均自由行程は (ラムダ)と略されるので、本真空計の通称をラムダ真空計とした)

基本構造としてはイオン源からの距離が異なる二つのコレクタを設置し、近い方をメッシュ状として一部のイオンがそこを透過した後、遠い方に到達するようにしている。両コレクタでのイオン量の比率のみが必要で、しかも同じビームをメッシュで分けて計測している。このため、基となるイオン量に変化しても、また電極の汚染や変形があっても測定結果には無関係となる。

今回は用途に応じた2種類のセンサー、および両方に使用できる制御電源を試作した。

## 3. 実験結果

全圧真空計の測定結果によると、Ar、Heの雰囲気ガスにおいて精度の高い値が確認され、しかもこの精度が $1 \times 10^{-2}$ Pa ~ 1Paの圧力範囲において維持している。この圧力範囲はスパッタで使用領域なので実用性も十分と言える。

分圧真空計の測定結果によると、百万分の一(6桁)近くの極めて微量な成分まで計測され得ること、1Pa近くまで正しい信号量が算出されていることが確認された。

## 4. 成果と今後の課題

先端技術での真空プロセスの歩留まりを改善し得る全圧/分圧真空計の実用化に向けた第一段階として、基本特性の確認、各種アプリケーション評価用の試作機製作を行い、その目的をほぼ達成した。

今後の課題は1)各種アプリケーションでの評価、2)計測値の高精度・高信頼化、3)計測器の小型化、操作性向上、4)公的機関からの認定、などとなっている。

これらは認定計画の2年目、3年目の内容となっているので、本委託制度の継続研究によって進め、製品化・事業化まで行きたいと考えている。