

平成23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24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

# 目次

## 第1章 研究開発の概要

- 1 研究開発の背景, 研究目的および目標
  - 1-1 背景
  - 1-2 研究目的
  - 1-3 研究目標
  - 1-4 当初の目的および目標に対しての実施結果
- 2 研究体制 (研究組織, 管理体制, 研究者氏名, 協力者)
  - 2-1 研究組織 (全体)
  - 2-2 管理体制
  - 2-3 管理員, 研究員, および協力者
- 3 成果概要
- 4 当該研究開発の連絡窓口

## 第2章 本論

- 1 汎用型ラムダ真空計の製品化 <センサ>
  - 1-11 過年度 (平成 21 年度) の研究成果の概要
    - 1-1-1 第 1 次試作機の構造
  - 1-2 契約年度 (平成 22 年度, 23 年度) の研究成果
    - 1-2-1 試作設計の方針
    - 1-2-2 イオン軌道のシミュレーション
    - 1-2-3 試作機の構造
    - 1-2-4 実験
    - 1-2-5 実験結果
  - 1-3 まとめと今後の課題
- 2 汎用型ラムダ真空計の製品化 <制御電源・ソフトウェア>
  - 2-1 過年度 (平成 21 年度, 22 年度) の成果の概要
  - 2-2 今年度 (平成 23 年度) の研究
    - 2-2-1 制御電源 (量産試作機) の製作指針
    - 2-2-2 仕様
    - 2-2-3 構成・各部の説明
    - 2-2-4 ソフトウェア <ユーザインターフェイス>
    - 2-2-5 通信機能
    - 2-2-6 制御電源 (量産試作機) の評価試験 <イオン電流計測>
- 3 プラズマ用ラムダ真空計への展開
  - 3-1 過年度 (平成 21 年度, 22 年度) の成果の概要
  - 3-2 今年度 (平成 23 年度) の研究方針

### 3-3 薄膜製造装置技術者への聞き取り調査と今後の課題

## 4 分圧用ラムダ真空計への展開

4-1 過年度 (平成 21 年度, 22 年度) の成果の概要と残された課題

4-2 今年度 (平成 23 年度) の研究方針

4-3 補正曲線

4-4 マイクロフォーカス電子ビーム型イオン源の評価とシミュレーション

4-5 長短 2 種類の四重極の評価

4-6 今後の課題

## 最終章 全体総括

### 1 複数年の研究開発成果

1-1 汎用型ラムダ真空計の製品化 <センサ>

1-2 汎用型ラムダ真空計の製品化 <制御電源・ソフトウェア>

1-3 プラズマ用ラムダ真空計への展開

1-4 分圧用ラムダ真空計への展開

1-5 CVD 用ラムダ真空計への展開

### 2 研究開発後の課題・事業化展開

2-1 汎用型ラムダ真空計の製品化 <センサ>

2-2 汎用型ラムダ真空計の製品化 <制御電源・ソフトウェア>

2-3 プラズマ用ラムダ真空計への展開

2-4 分圧用ラムダ真空計への展開

2-5 CVD 用ラムダ真空計への展開

## 第1章 研究開発の概要

### 1 研究開発の背景, 研究目的および目標

#### 1-1 背景

スマートフォンやコンピュータ, 薄型テレビなどの情報家電の基本部品である液晶フラットパネルや半導体素子, 高密度ストレージ素子・媒体を製造する先端技術の多くは, 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, 1 Pa (大気圧の10万分の1の圧力) 程度のArなど不活性ガス雰囲気での物理的方法である「スパッタ」法や10 Pa以上の原料雰囲気での化学的方法である「CVD」法がある. 特別なガス雰囲気ではなく,  $10^3$  Pa台以下の真空状態で単に材料を気化させる「真空蒸着法」もあるが, 今では光学用の一部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, 真空蒸着法とは異なり雰囲気ガス自体がプロセスの主役となるため, 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・半導体製造では他の製造業に比べ「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.

現状の全圧/分圧真空計が上記の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対応したものに過ぎず, 現在のものに適応できていないためであると考えられる. 代表的な真空計の一つである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, もう一方の代表である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1 Pa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い. すなわち, 汚染や熱のために, 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.

従来の測定原理とその問題点について説明する. イオンゲージは雰囲気ガスである中性分子に新たな電子を衝突させて既存の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あらかじめイオン量と密度の関係(換算値)を得ておくと, 計測されたイオン量からガス密度を算出することができる. 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設置した隔膜が雰囲気ガスの力(圧力)で変形する量を電的に計測する. 変形量は雰囲気ガスの圧力に比例するので, 同様にあらかじめ換算値を得ておくと変形量から圧力を算出することができる. 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の前提条件になるが, 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である. なぜならば, 真空中では本質的に汚染が発生しやすいためである. 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.

これらの問題を解決するために, 以前からキヤノンアネルバでは飛行経路上の2点における粒子量の比から求められるラムダ( $\lambda$ , 平均自由行程)に注目し, その利用を提唱・検証してきており, 簡単な実証実験に成功している.

## 1-2 研究目的

本研究の目的は、液晶フラットパネルや半導体素子、高密度ストレージ素子・媒体を製造する産業でキーとなっているスパッタ・CVD などのプロセスにおいて高度な真空制御を行うために、全く新しい原理による高信頼・高精度の全圧/分圧真空計を開発することである。

## 1-3 研究目標

### ① 汎用型ラムダ真空計の製品化

(実施：センサ・・・VISTA、制御電源とソフトウェア・・・東京電子)

実用化に向けて、性能面では圧力範囲の広域化、高精度化、高安定化が必要であり、また商品化に向けてシンプル化、小型化、および応用開発を行う。

- a. センサに関してはイオン源からのイオン取り込み効率の向上や、ビームの軌道の制御により輸送効率の向上を検討する。さらにイオン源やラムダ電極の小型化、シンプル化も検討し、これらを実証するセンサとして第3次試作設計、製造、評価を行う。
- b. 制御電源に関しては、計測回路の精度安定性や電流計測分解能の向上に向けての回路要素を検討する。さらに小型化、信頼性向上、通信機能付加なども検討し、これらを実証する計測回路要素として第3次試作設計、製造、評価を行う。
- c. 精度の確認に関しては影響を与える環境要因の把握に努め、必要に応じて影響要因の補正の方法に関して対策を行う。
- d. 応用開発の一つとして、校正用基準真空計への応用を検討する。具体的にはセンサ温度の圧力計算への取り込みを行い、表示圧力の精度、安定性の検討を行う。

### ② プラズマ用ラムダ真空計への展開

(実施：センサ・・・キャノンアネルバ, ホリゾン、制御電源・・・東京電子)

イオン発生部の電極構造を最適化することでフィラメント付き以上の感度を得るよう改良を進めた上で、量産型プラズマ装置の成膜チャンバ内に取り付け、実データを蓄積する。

### ③ 分圧用ラムダ真空計への展開

(実施：センサ・・・キャノンアネルバ, ホリゾン),  
制御電源・・・キャノンアネルバ)

信号を比較する二つの飛行領域（質量分析計）へ同じ条件のイオンを供給できるように試作したイオン源の評価を進め、その結果をイオン軌道シミュレーションにフィードバックして試作を重ねる。一方、飛行空間では質量分離のためのイオンが振動して進むので、この補正を行えるようにする。さらに、プラズマ用で問題となった高エネルギー光の影響の対策も行う。その他、汎用型と同様に電流計測の高精度化や経験補正項の確定も試みる。汚れとしてはイオン源の汚れが支配的であり、その原因は散乱電子の照射である。したがって、電子の利用効率を上げるとともに、計測に寄与しない領域には電子を撒き散らさないマイクロフォーカス電子ビーム型のイオン源の評価を進める。なお、これには偏向機能を備え、両飛行領域への同条件イオンの供給にも有効に働くように最適化する。また、圧力上限の拡大に対しては、圧力に応じて長さの異なる2種の質量分析計のうち、より適切な長さのものを選択するように

する。これらを実証するセンサーとして試作設計・製造を行い、引き続きを評価・手直しを実施する。

#### 1.4 当初の目的および目標に対しての実施結果

##### ① 汎用型ラムダ真空計の製品化

- a. 完了した。検討の上 3 次試作を試作し、ラムダ方式で測定した圧力でほぼ  $1 \times 10^2$  Pa から 1 Pa 近くまで 45 度の直線に乗る特性を得ることができた。ただし、制御電源と接続しての評価には到らなかった。
- b. 完了した。量産試作機を試作し、デジタル回路の集約やイオン電流計測ユニットの削減、回路構成の見直しなどにより、平成 21 年度の一次試作機から容積比 45% 以下の小型化が実現した。ソフトウェアにおいては、イオン電流計測の切り換え方式への対応、通信機能の搭載、製品レベルのユーザーインターフェースの実装を実現した。ただし、センサと接続しての評価には到らなかった。
- c. 完了しつつある。電極形状および寸法の更なる最適化、再現性の確認等々、研究開発を継続している。
- d. 準備を完了した。センサと制御電源を接続して評価を行った後に継続研究として実施する。

##### ② プラズマ用ラムダ真空計への展開

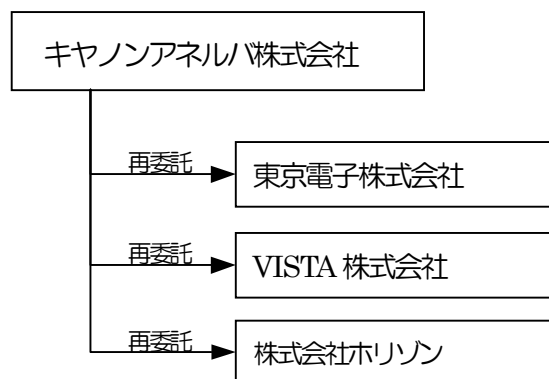
詳細な検討を行った。量産型プラズマ装置への取付けの課題を把握するためにキヤノンアネルバ社内の真空成膜装置部門の技術者に詳細なヒアリングを行ったところ、イオン発生部の電極構造を最適化と量産型プラズマ装置への取り付けは汎用型ラムダ真空計の開発データで顕在化した新たな課題を解決できた後に実施すべきとの結論に到った。

##### ③ 分圧用ラムダ真空計への展開

全て実施した。感度の圧力依存性の実験結果はコンピュータシミュレーション結果と概ね一致した。マイクロフォーカスイオン源の評価を進めたがそのイオンイオン化効率が低いためコンピュータシミュレーションで精査した結果、電子ビームを目標に収束させることが困難であることが判明した。電極長: 14mm, 28mm の四重極を試作し、双方ともに高圧下で質量分析が可能であることを検証した。

## 2 研究体制

### 2-1 研究組織（全体）



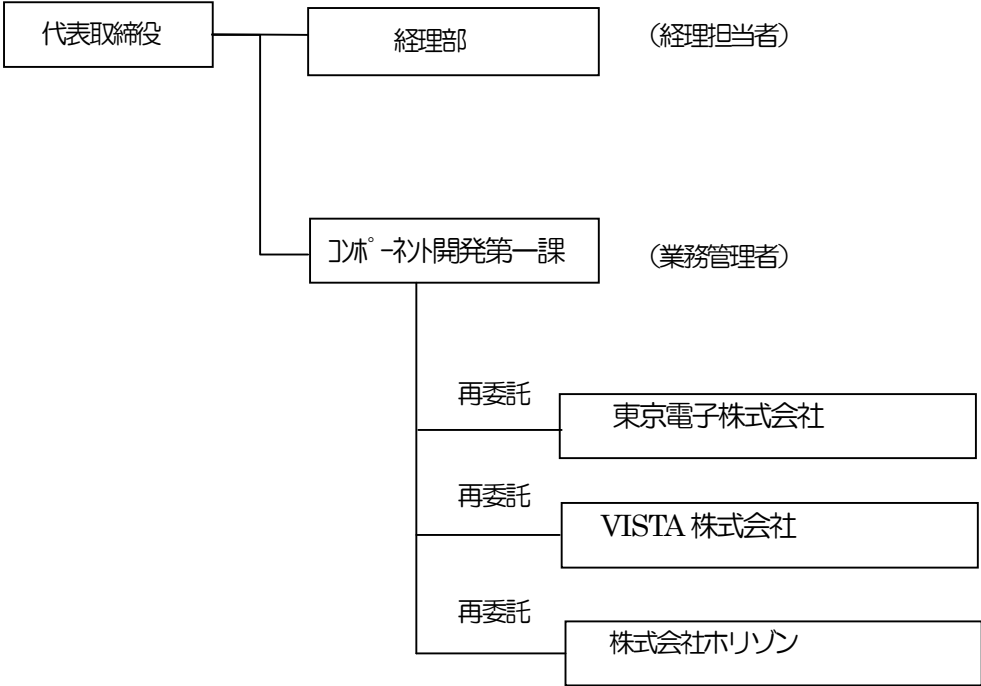
統括研究代表者（PL）  
 キヤノンアネルバ株式会社  
 ｺﾝﾍﾞｰﾁｻﾞﾙ開発第一課 主任  
 中村 恵

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

2-2 管理体制

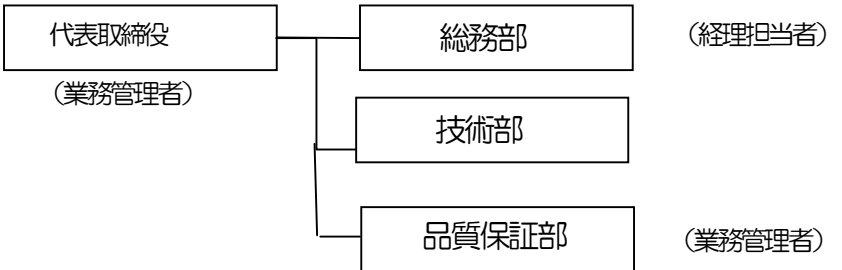
①事業管理機関

[キヤノンアネルバ株式会社]

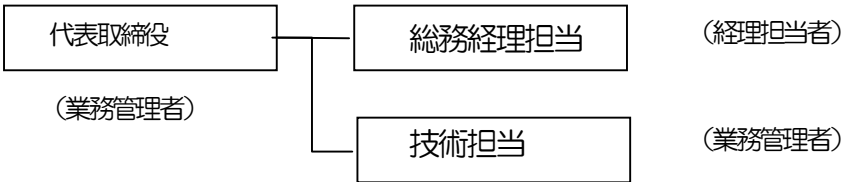


② 再委託先

[東京電子株式会社]



[ VISTA 株式会社]



[株式会社ホリゾン]



## 2-3 管理員, 研究員, および協力者

【事業管理機関】 キヤノンアネルバ株式会社

### ①管理員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
中村 恵	コンポーネント開発第一課 主任	プロジェクトの管理・運営
樋野 賢治	コンポーネント開発第一課 課長	プロジェクトの管理・運営
舟久保 藤雄	経理部 主任	プロジェクトの管理 (経理)

### ② 研究員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
中村 恵	コンポーネント開発第一課 主任	②、③
浜田 一彦	コンポーネント開発第一課 課長	③
瀧澤 義幸	コンポーネント開発第一課 主任	③
陳 雷	コンポーネント開発第一課 担当	③
杉山 正行	コンポーネント開発第三課 課長	③
嶋田 博之	コンポーネント開発第三課 主任	③
縄田 明	コンポーネント開発第三課 担当	③

### 【再委託先】

(研究員)

東京電子株式会社

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
黒岩 雅英	代表取締役社長	①、②
藤井 進	取締役 技術部 部長	①、②
松本 信彦	技術部 主任技師	①、②
辺見 修一	技術部 部員	①、②
佐々木 優直	技術部 部員	①、②

VISTA 株式会社

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
大迫 信治	代表取締役	①
大迫 岳志	技術担当	①

株式会社ホリゾン

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
堀川 祐一	代表取締役	②、③
瀧澤 克雄	企画開発主任	②、③



- ③ 協力者 平田 正紘様 (元 (独) 産業技術総合研究所 計測標準研究部門)  
全般に対するアドバイス。

### 3 成果概要

#### ① 汎用型ラムダ真空計の製品化

(実施：センサ・・・VISTA、制御電源とソフトウェア・・・東京電子)

小型化、電流値の増大、特性の改善を目指してイオン軌道のコンピュータシミュレーションにより電極形状、寸法を最適化し、第3次試作まで行った。その結果、ラムダ方式で測定した圧力でほぼ $1 \times 10^2$  Pa から 1 Pa 近くまで45度の直線に乗る特性が得られた。また $10^3$  Pa 台でも微小電流の注意深い計測を行えば直線特性が得られることも分かった。

一方、制御電源については、ラムダ真空計制御電源の量産試作機を製作した。量産試作機においては、デジタル回路の集約やイオン電流計測ユニットの削減、回路構成の見直しなどにより、平成21年度の一次試作機から容積比45%以下の小型化が実現した。ソフトウェアにおいては、イオン電流計測の切り換え方式への対応、通信機能の搭載、製品レベルのユーザインターフェースの実装を実現した。

#### ② プラズマ用ラムダ真空計への展開

(実施：センサ・・・キヤノンアネルバ・ホリゾン、制御電源・・・東京電子)

量産型プラズマ装置への取付けの課題を把握するためにキヤノンアネルバ社内の真空成膜装置部門の技術者に詳細なヒアリングを行ったところ、イオン発生部の電極構造を最適化と量産型プラズマ装置への取り付けは汎用型ラムダ真空計の開発データで新たに顕在化した課題を解決できた後に実施すべきとの結論に到った。

#### ③ 分圧用ラムダ真空計への展開

(実施：センサ・・・キヤノンアネルバ・ホリゾン、  
制御電源・・・キヤノンアネルバ)

感度の圧力依存性の実験結果はコンピュータシミュレーション結果と概ね一致した。一方、マイクロフォーカスイオン源の評価を進めたがそのイオンイオン化効率が低いためコンピュータシミュレーションで精査した結果、左右とも電子ビームを目標に収束させることが困難であることが判明した。さらに、電極長: 14mm, 28mm の四重極を試作し、双方ともに高圧下で質量分析が可能であることを検証した。

### 4 当該研究開発の連絡窓口

キヤノンアネルバ株式会社

コンポーネント開発センター コンポーネント開発部 コンポーネント開発第一課

中村 恵

TEL: 044-980-3501, FAX: 044-986-4162, E-mail: compo@canon-anelva.co.jp

## 第2章 本論

### 1 汎用型ラムダ真空計の製品化 <センサ>

#### 1-1 過年度（平成 21 年度）研究成果の概要

##### 1-1-1 第1次試作機の構造

平成 21 年度の研究では、ラムダ真空計の基本原理に基づきプロトタイプ（第 1 次試作）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  $\lambda$  および圧力の計測を試みた。図 1.1 に試作したセンサーの構造と写真を示す。

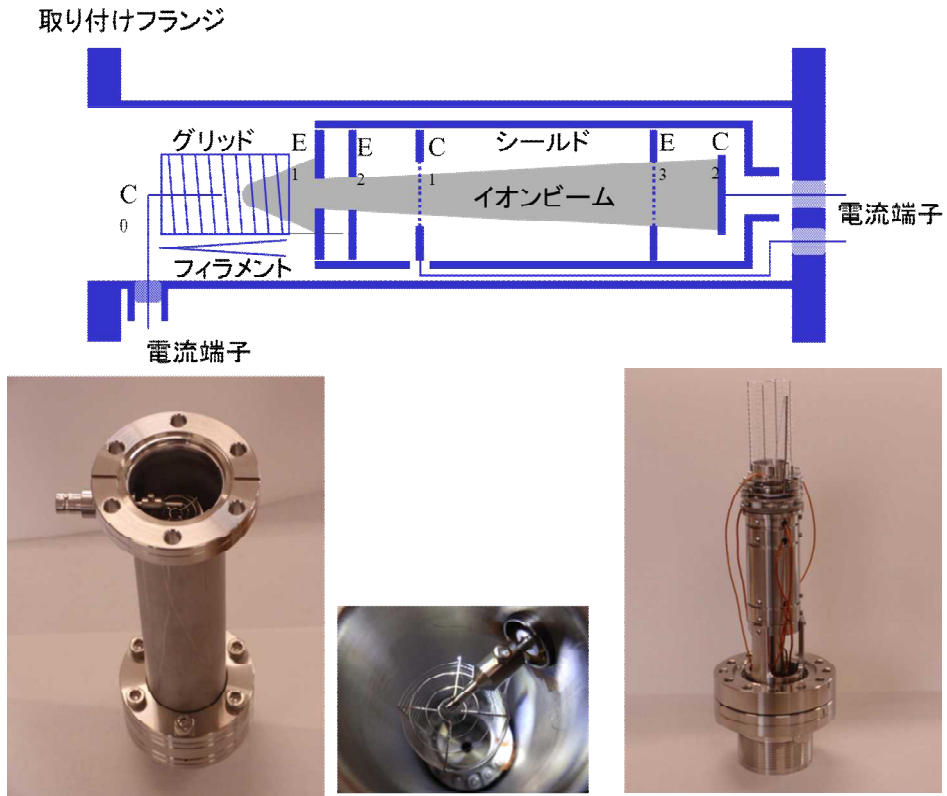


図 1.1 汎用型ラムダ真空計センサー第 1 次試作機

ラムダ真空計センサーの基本構造は、イオン源とラムダ部から構成される。

イオン源は、B-A ゲージと同様のグリッド、フィラメントからなる。イオン源の中心軸上にはグリッドの長さの半分程度まで伸ばした細線のイオンコレクタを配置し、このイオンコレクタにより発生するイオンの一部を捉えて計測し通常の B-A ゲージとしても動作するようにしている。したがってラムダ真空計には、このイオン源兼用 B-A ゲージと後述するラムダ圧力測定部と 2 つの真空計が組み込まれていることになる。（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。）

ラムダ部はイオン源のグリッドと中心軸を同じくして配置され、イオン源で発生した気体分子イオンの一部をラムダ真空計の第 1 電極  $E_1$  の中心に空けたオリフィスから取り込みイオンコレクタ 1 ( $C_1$ ) を経てイオンコレクタ 2 ( $C_2$ ) まで飛行させる構造となっている。

イオンコレクタ 1 ( $C_1$ ) は  $x=0$  の位置におかれたメッシュで構成され、通過するイオンの一部を捉える。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

位置に配置した円板電極で、途中で分子と衝突散乱せずにとどり着くイオンを捉える。

これら2つのイオンコレクタに流れ込むイオン電流は図の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する。2つのイオンコレクタで測定する電流の比から、途中で気体分子との衝突で失われずに到達するイオンの割合を求めて圧力に換算を行うのが基本的なラムダ真空計の動作原理である。

ラムダ真空計の各電極 (E1、E2、C1、E3、C2) の電位を決め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。このシミュレーションの例を図 1.2 に示す。上の図に示した電極 E<sub>2</sub> および E<sub>3</sub> の電位がイオン源電位 180V に近い電位配置の場合は、イオンが反発されてラムダ部の通過効率が悪くなっていることが分かる。下の図に示した電位配置では実験でもイオン電流の通過効率が最適になることが確認され、この電位配置を採用した。

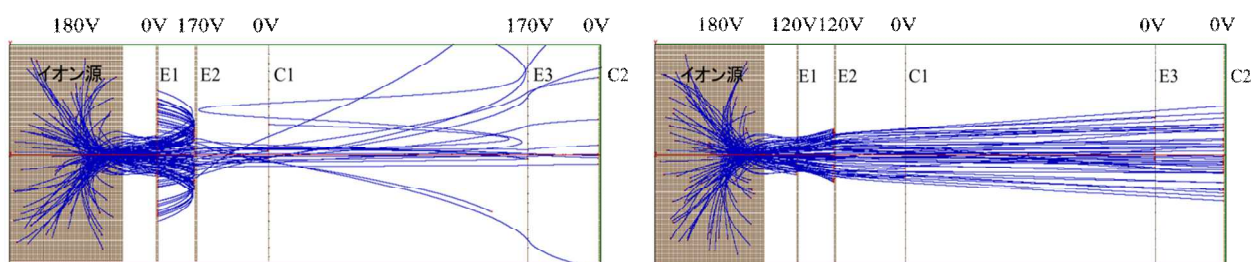


図 1.2 第1次試作センサーのイオン軌道シミュレーション汎用型ラムダ真空計センサー1次試作

図 1.3 に実験結果の一例を示す。10<sup>3</sup>Pa と 10Pa の間でキャパシタンスゲージの圧力に対してイオンコレクタ 1 (C<sub>1</sub>)、イオンコレクタ 2 (C<sub>2</sub>)の電流値、それらから計算された平均自由行程λおよび圧力 P をプロットしているが、10<sup>2</sup>Pa から 1Pa 程度まで比較的直線的な特性を確認することが出来た。

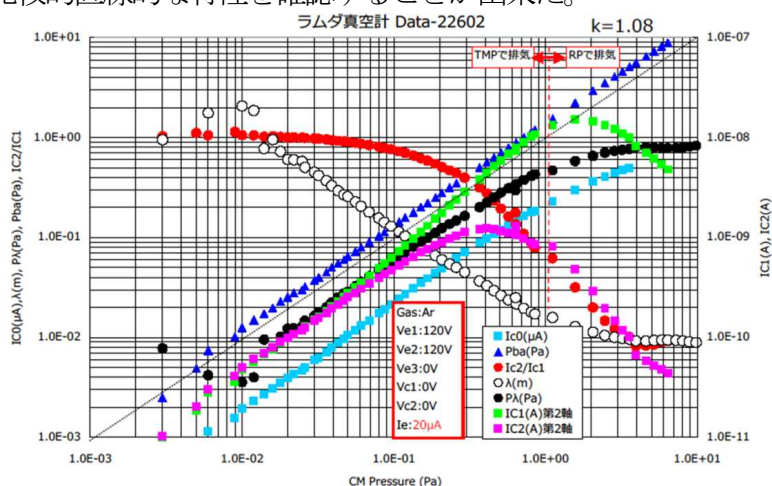


図 1.3 第1次試作機の実験結果

## 1-2 契約年度 (平成 22 年度、23 年度) の研究成果

### 1-2-1 試作設計の方針

平成 22 年度、23 年度の研究では、より商品に近い形での試作 (第 2 次試作、第 3 次試作) を行った。試作の方針として第 1 次試作機の課題を踏まえて以下を設定した。

- (1) イオン源、ラムダ部を同軸構造とする、イオン源内で発生したイオンの一部を捉えて B-A ゲージとして兼用する、ラムダ部はイオン取込み部の電極、電極メッシュ状のイオンコレクタ 1 および円板状のイオンコレクタ 2 から構成する、などの基本コンセプトは第 1 次試作機と同一とする。
- (2) 商品化を踏まえてセンサーを小型化するために、イオン源を小さく、またイオン飛行部を小さくする。
- (3) イオン飛行距離 (コレクタ 1-2 間の距離) は第 1 次試作機の長さを踏襲する。
- (4) 第 1 次試作機ではイオンコレクタ 1、2 におけるイオン電流が非常に小さく測定の不確かさが大きかった。これを改善するためにイオン取り込み量を大きくするべくイオン源とラムダ部の第 1 電極をできるだけ接近させる。
- (5) ラムダ部の入口の、イオン源に対向した第 1 電極から第 3 電極までの 3 つの電極で静電レンズを構成してイオンを収束させ、通過するイオンの割合を大きくする。
- (6) 商品化を睨んで各電極に印加する電位の種類をできるだけ少なくする。可能ならグラウンド電位以外に 1 つの電位を共通に使用する。

### 1-2-2 イオン軌道のシミュレーション

機構設計に先立ち、電極の構造、寸法をイオン軌道のコンピュータシミュレーションによる試行錯誤で決定した。

図 1.4 図 1.5 に第 2 次試作、第 3 次試作のシミュレーション結果の例を示す。使用する電極電位は制御電源の簡素化を考慮して、グラウンド電位以外にはイオン源のグリッド電位と同一の 180V のみとした。

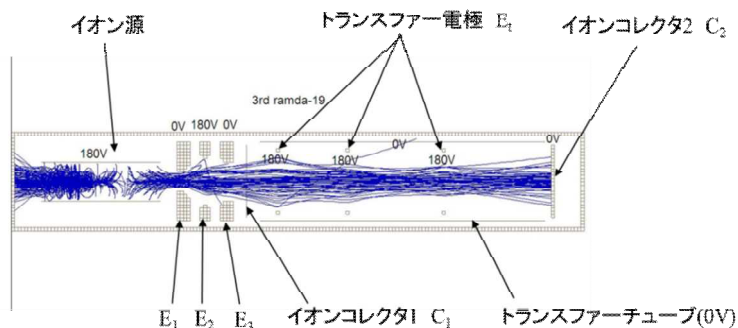


図 1.4 第 2 次試作機でのイオン軌道シミュレーション例

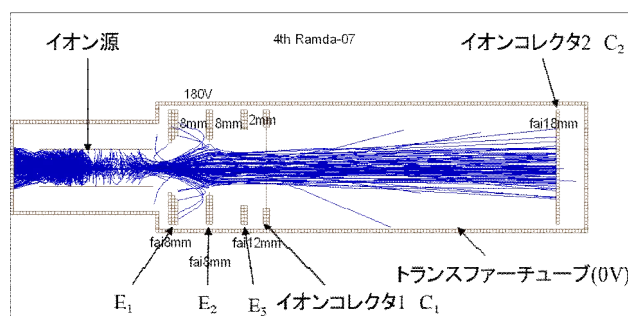


図 1.5 第 3 次試作機でのイオン軌道シミュレーション例

### 1-2-3 試作機の構造

シミュレーションに基づいて試作した第 2 次試作機、第 3 次試作機の構造を図 1.6 に、写真を図 1.7 に示す。

イオン源はラムダ部とは分離してそれぞれにフランジを持ち、お互いに対向させて接続する構造とした。

ラムダ部側は第 1 段から第 3 段までの電極 ( $E_1 \sim E_3$ ) (イオン取込部) で静電レンズを構成し、第 3 段電極の後に、メッシュで構成されたイオンコレクタ 1 ( $C_1$ )、イオン飛行部を覆う円筒状のトランスファーチューブ、最終段に円板のイオンコレクタ 2 を配置した。トランスファー部には、第 2 次試作ではリング状の収束電極 ( $E$ ) を 3 段配置したが第 3 次試作ではこの電極は廃止した。

静電レンズおよび収束電極への印加電圧はイオンコレクタ 2 の後ろの電流端子を通して外部電源から供給した。また、イオンコレクタ 1、イオンコレクタ 2 に集められるイオン電流は同じ電流端子を通して外部の微小電流計により計測した。

ラムダ真空計全体は 38mm 内径の SUS304 パイプにより真空中に保たれ、側面に設けたフランジにより試験真空チャンバーに接続した。

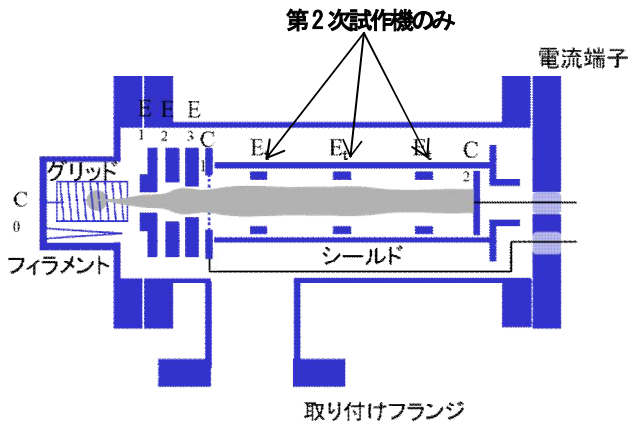


図 1.6 第 2 次、第 3 次試作機の概略構造



図 1.7 第 2 次、第 3 次試作機の外観

### 1-2-4 実験

実験に用いた排気系のブロック図と写真を図 1.8 に示す。

計測気体には  $N_2$  を用いた。

参照圧力の測定にはキャパシタンスゲージおよび市販の B-A ゲージを用いた。キャパシタンスゲージは  $10^3 \text{ Pa}$  台あるいはそれ以降での安定性が悪いため、参照としては主に B-A ゲージを使用した。

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 ゲージ電源を使用し、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 ( $I_{C1}$ 、 $I_{C2}$ ) 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  $\lambda$  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 ( $10^{-5} \text{ Pa}$  以下) に排気して安定するまで放置。
  - ・ ガスを導入し、測定圧力に保つ。圧力が安定状態で、参照用の B-A 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  $I_{C0}$  も記録。



- ・ 以上の操作を  $10^4$  Pa から  $10^1$  Pa ないし 1 Pa 程度まで圧力を上げながら計測を行う。
- ・ 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。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電極ないしトランスファーチューブ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、簡略化のため外部で測定した温度を計算に使用した。
- ・ 測定した  $I_{C1}$ 、 $I_{C2}$  を式 1.10 の  $I_1$ 、 $I_2$  として  $\lambda$  を計算した。透過率  $K$  は基本的には  $10^3$  Pa 以下の圧力における  $I_{C1}$ 、 $I_{C2}$  の比から求めたが、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  $\lambda$  を使用して式 1.12 からラムダゲージによる圧力  $P_\lambda$  を計算した。圧力の計算には気体温度  $T$  の他に分子直径  $\sigma$  が必要だが、文献から  $N_2$  の分子直径として 0.378 nm を使用した。

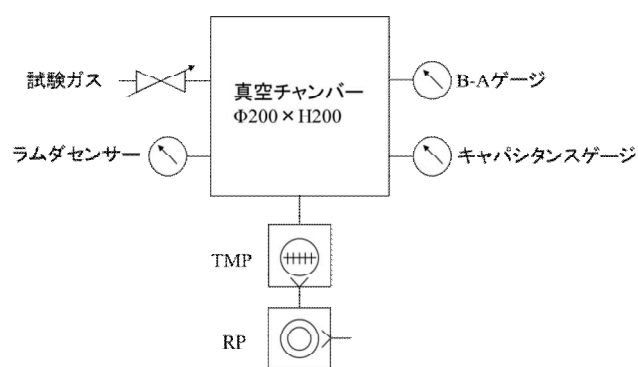


図 1.8 実験装置

### 1-2-5 実験結果

図 1.9、図 1.10、図 1.11 に実験データの例を示す。これらは電極形状、寸法を少しずつ変えてとったデータである。

22 年度、23 年度の研究を通じて、イオンがコレクタ 1 とコレクタ 2 間を飛行する間に減衰する要因が気体分子との衝突散乱による減衰（これがラムダ真空計の測定原理である）以外にもあることが分かった。これは主にイオンの軌道が圧力の上昇とともに膨らんでイオンコレクタ 2 に到達する前に周りの壁に衝突して失われることによる。第 3 次試作は、この軌道のふくらみを最小限にして、イオンの減衰を純粋に分子との衝突のみにすることが主眼であった。この観点から、圧力に対するイオンコレクタ 1 の電流とイオンコレクタ 2 の電流の比 ( $I_{C2} / I_{C1}$ ) の減衰曲線をデータとして評価した。気体との衝突以外の要因が少ないほど減衰曲線は高圧側に寄る（つまり下がり始める圧力が高くなる）はずである。

各データにおいて上のグラフにはイオン電流とともに  $I_{C2} / I_{C1}$ （高真空における値で規格化している）を○で示している。図 1.12 に示す第 1 次試作機での減衰曲線と比較すると、いずれも高圧側に曲線が寄っていることが分かる。減衰曲線が高圧側に寄るほど余分な減衰が少ないことを意味するので、気体分子との衝突散乱による本来の減衰に近いより正しい圧力を示していると結論される。

各図の下側のグラフには、ラムダ方式で計測した圧力のプロットを 3 つのイオン

電流 ( $I_{c0}$ ,  $I_{c1}$ ,  $I_{c2}$ ) とともに●で示した。圧力測定値は  $10^2$  Pa 台ではほぼ 45 度の直線に乗り、 $10^1$  Pa 台では若干寝てくる特性を示した。 $10^3$  Pa 台から低圧側の計測は微小電流計の不確かさのためにばらつきが大きい。うまく計測できた場合には図 1.11 のように  $3 \times 10^3$  Pa あたりまで直線に乗る結果が得られた。

本実験全体を通じてラムダ計測圧力の絶対値は参照した B-A ゲージの圧力の 30%から 50%程度の値を示す結果となっている。圧力の計算式の中に定数の一つとして分子直径  $\sigma$  が含まれているが、文献より  $N_2$  ガスに対しては  $3.78 \times 10^{-10}$  m を使用した。しかしこの値はラムダ真空計の原理である分子衝突に対する分子直径としては必ずしも正確ではないと思われる。圧力の絶対値のずれは、この  $\sigma$  の値の違いが大きく影響しているものと思われる。

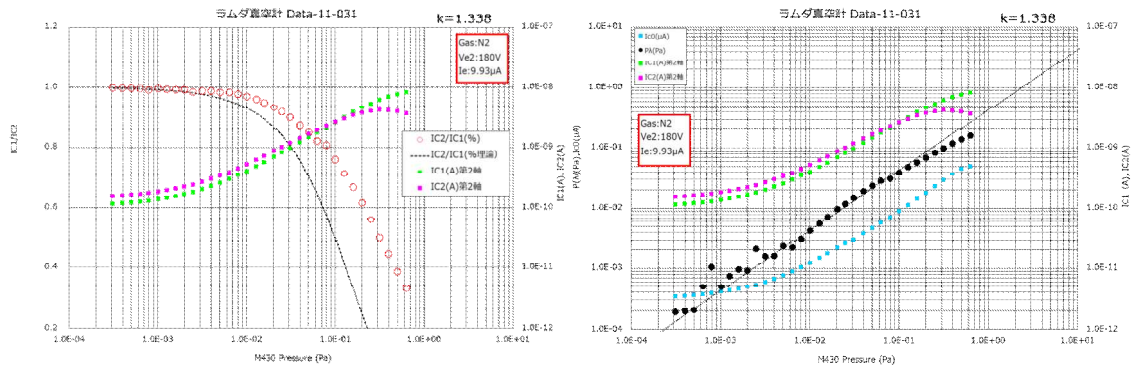


図 1.9 実験結果-1 (電極寸法 A,  $I_e: 10 \mu A$ )

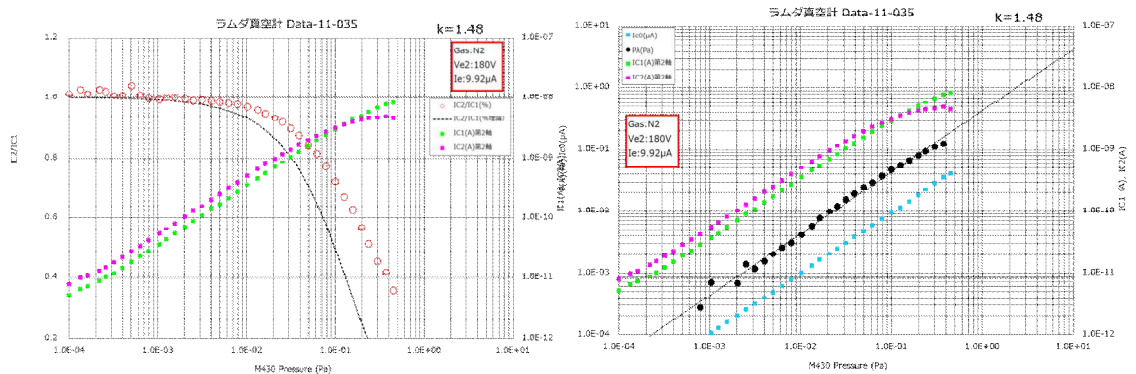


図 1.10 実験結果-2 (電極寸法 B,  $I_e: 10 \mu A$ )

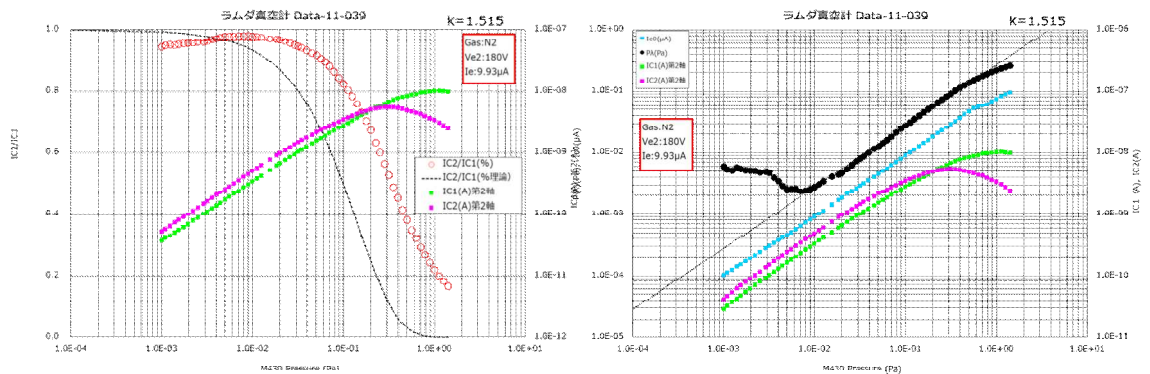


図 1.11 実験結果-3 (電極寸法 C,  $I_e: 10 \mu A$ )

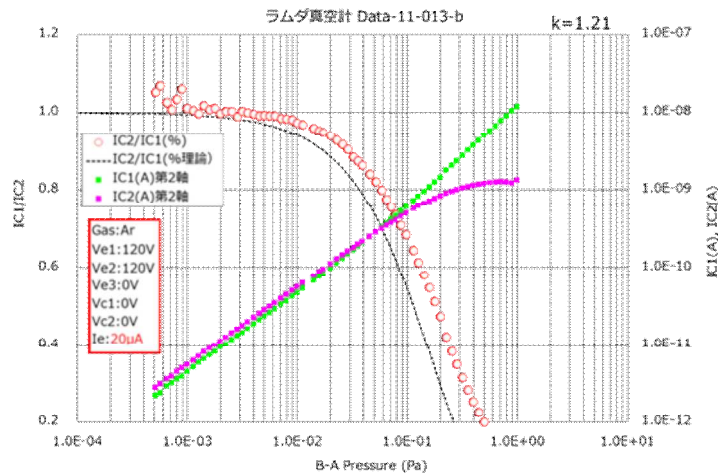


図 1.12 第 1 次試作機での減衰曲線の例

### 1-3 まとめと今後の課題

- 1) B-A ゲージを兼用したイオン源で発生するイオンを取り込んで直線的に飛行させ、軌道上の 2 つのイオンコレクタ間を飛行する間に気体分子との衝突散乱で失われるイオンの量を測定することにより平均自由行程を求めて圧力に変換する原理に基づいたラムダ真空計の試作研究を行った。
- 2) 第 1 次試作で原理の検証を行った後、小型化、電流値の増大、特性の改善を目指してイオン軌道のコンピュータシミュレーションにより電極形状、寸法を最適化し、第 3 次試作まで行った。
- 3) ラムダ方式で測定した圧力でほぼ  $1 \times 10^2 \text{Pa}$  から  $1 \text{Pa}$  近くまで 45 度の直線に乗る特性が得られた。また  $10^3 \text{Pa}$  台でも微小電流の注意深い計測を行えば直線特性が得られることも分かった。この圧力領域では 2 つのイオンコレクタ電流値の不確かさに大きく影響されるので制御電源ではこの点に特に留意した設計が必要であることが確認された。
- 4) 今後の商品化に向けての課題として、電極形状および寸法の更なる最適化、再現性の確認、等々継続してさらに研究開発を進めていく。



## 2 汎用型ラムダ真空計の製品化 <制御電源・ソフトウェア>

### 2-1 過年度 (平成21年度, 平成22年度) の研究の概要

汎用型ラムダ真空計の実用化に向けて、性能面では圧力範囲の広域化、高精度化、高安定化が必要であり、また商品化に向けてシンプル化、小型化し、さらに応用開発を行う必要がある。

平成22年度は、性能面に関しては、イオン電流計測回路の精度安定性や電流計測分解能の向上に向けての回路要素の検討を行い、これらを実証することを目的に、新たにイオン電流計測ユニットおよび制御ソフトウェアを開発した。また、筐体の小型化のため、基本的な構造設計の検討を行った。すなわちエミッション回路の変更、イオン電流計測ユニットの切り換え方式化によるユニット数の削減、電極電源のコモン(0V)共通化および内部回路の配置構造変更である。その結果、一次試作機から容積比45%以下の小型化実現の目処が立ち、筐体板金の試作を行った。図2.1にイオン電流計測ユニットを、図2.2に試作した小型化筐体板金を示す。

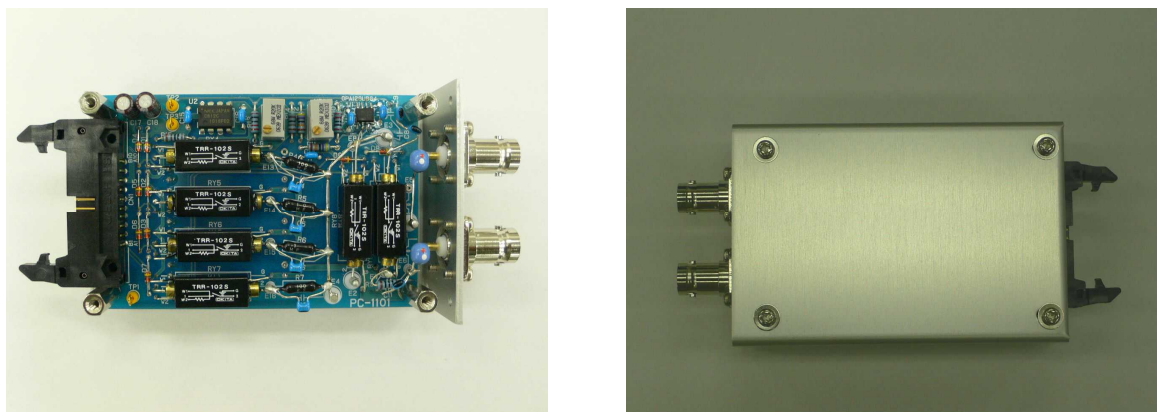


図2.1 イオン電流計測ユニット



図2.2 小型化試作筐体

### 2-2 今年度 (平成23年度) の研究

平成23年度では、平成22年度の研究で残された課題、すなわち、小型化やイオン電流計測の性能確認を実施し、制御電源の量産試作機を製作した。

## 2-2-1 制御電源（量産試作機）の製作指針

量産試作機の製作に当たっては下記の点を考慮した。

- ・一次試作機から容積比 45%以下に小型化する。
- ・デジタル回路（パネル部、CPU 部）を集約して、1つの基板とする。
- ・イオン電流計測は、1つのユニットの切り換え方式とする。
- ・通信機能を搭載する。
- ・製品レベルのユーザーインターフェースとする。
- ・ソフトウェアは一から見直す。特にイオン電流計測における回路切り換え制御および抵抗切り換え制御部分を重点的に見直す。

製作した量産試作機の外観図を図 2.3 に、外観写真を図 2.4 に示す。

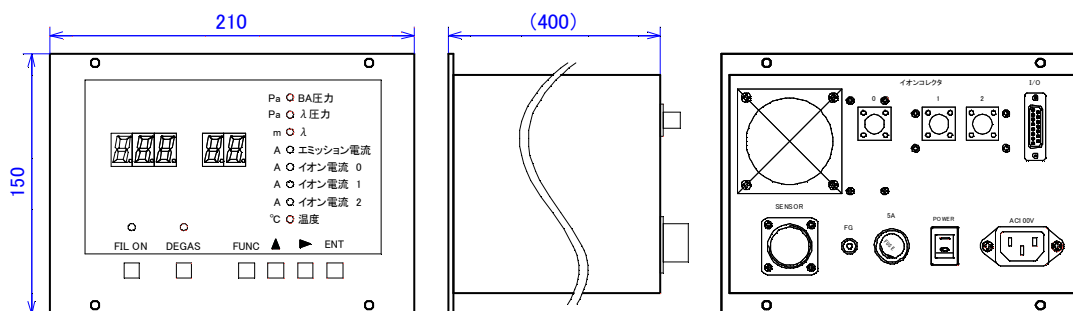


図2.3 制御電源（量産試作機）外観図



図2.4 制御電源（量産試作機）外観写真

## 2-2-2 仕様

製作した制御電源（量産試作機）の仕様は、表 2.1 の通りである。

表 2.1 制御電源（量産試作機）の仕様

測定圧力範囲	$\lambda$ 圧力 : $1.00 \times 10^{-2} \sim 1.00 \times 10^1$ [Pa] B-A 圧力 : $1.00 \times 10^{-8} \sim 1.00 \times 10^1$ [Pa]
イオン電流計測範囲	イオン電流0 : $1.00 \times 10^{-12} \sim 2.00 \times 10^{-5}$ [A] イオン電流1 : $1.00 \times 10^{-9} \sim 2.00 \times 10^{-5}$ [A] イオン電流2 : $1.00 \times 10^{-9} \sim 2.00 \times 10^{-5}$ [A]
使用温湿度	0~40[°C]、90[%]以下（結露しないこと）
使用電圧	AC100[V]±10[%] 50/60[Hz]
表示	仮数部3桁、指数部2桁のデジタル表示 □.□□×10□□
アナログ出力	3点、10[V]F.S、出力インピーダンス100[Ω]
表示・アナログ出力 選択項目	① $\lambda$ 、② $\lambda$ 圧力、③BA 圧力、④エミッション電流、 ⑤イオン電流0、⑥イオン電流1、⑦イオン電流2 ⑧イオン電流1とイオン電流2の差、⑨温度
ステータス表示	FIL ON（緑）、DEGAS ON（緑）
通信機能	RS-485 二線式 半二重方式
外形寸法、質量	210(W)×150(H)×400(D)[mm]、4.7kg

## 2-2-3 構成・各部の説明

量産試作機は、イオン電流計測回路、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）、パネル・CPU 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機器を設計した。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。

## 2-2-4 ソフトウェア<ユーザーインターフェース>

制御電源（量産試作機）におけるソフトウェアの役割は非常に重要である。量産試作機では、製品レベルのユーザーインターフェースの実装を目的として開発を行った。一次試作機からの変更点として、通信機能（RS-485）を付加、及び計測値・アナログ出力を同時に 3 種類モニターできるようにし、機能の拡張を行った。

製品レベルのユーザーインターフェースとしては、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」、表示・アナログ出力 1~3 でモニターできる計測値を 9 種類から任意に設定する「表示・アナログ出力選択切換モード」、エミッション電流 1 (10 $\mu$ A) とエミッション電流 2 (1mA) を切換える「エミッション電流切換モード」とし、図 2.5 のようになった。

また、表示・アナログ出力 1~3 でモニター可能な 9 種類の計測値は、① $\lambda$ 、② $\lambda$  圧力、③BA 圧力、④エミッション電流、⑤イオン電流 0、⑥イオン電流 1、⑦イオン電流 2、⑧イオン電流 1 とイオン電流 2 の差、⑨温度である。

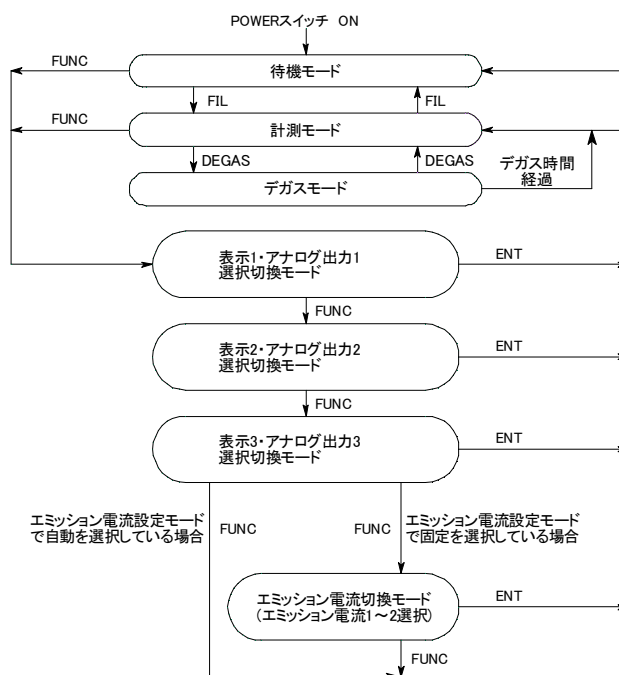


図 2.5 制御電源（量産試作機）の各モード

### 2-2-5 通信機能

量産試作機には、一次試作機からの機能拡張として、通信機能を搭載させた。通信方式は、ノイズに強く、長距離／高速の伝送が可能な汎用インターフェースである RS-485 とし、RS-485 インターフェースを通じてホスト・コンピュータとの通信を行えるようにした。ホストがコマンド（命令）を送信すると本器はコマンドを解釈し、正常／異常の判断をレスポンス（応答）として返して 1 回の通信を終了する。通信コマンドは、①フィラメント ON/OFF、デガス ON/OFF を制御する C（コントロール）コマンド、②フィラメント状態の読み込み、デガス状態の読み込み、各種計測値（9 種）の読み込み、エラー状態（3 種）の読み込みを行う S（ステータス）コマンドの 2 種類とする。

### 2-2-6 制御電源（量産試作機）の評価試験＜イオン電流計測＞

ラムダ真空計制御電源は、計測回路の精度安定性や電流計測分解能の向上といった性能面の改良が必要である。電流計測分解能に関しては、一次試作機では 7 セグメント LED 表示は仮数部 2 桁であったが、量産試作機では 3 桁にした。また、一次試作機では、イオン電流 1 とイオン電流 2 を別々の電流計測回路で計測していたが、量産試作機では、イオン電流 1 とイオン電流 2 を同一の計測回路で計測し、個々のバラツキの影響を排除した。表 2.2 は擬似的にイオン電流を入力したときの表示値と擬似電流に対する表示値の相対差である。なお、イオン電流の計測範囲は、イオン電流 0 は  $1.00 \times 10^{-12} \sim 2.00 \times 10^{-5} [A]$ 、イオン電流 1 及びイオン電流 2 は  $1.00 \times 10^{-9} \sim 1.00 \times 10^{-5} [A]$  である。

表2.2 イオン電流0～2の擬似入力に対する表示値、相対差

擬似入力	イオン電流 0		イオン電流 1		イオン電流 2	
	表示値	相対差	表示値	相対差	表示値	相対差
1.00E-05 Pa	1.00E-05 Pa	0.00%	1.00E-05 Pa	0.00%	1.00E-05 Pa	0.00%
5.00E-06 Pa	5.00E-06 Pa	0.00%	5.00E-06 Pa	0.00%	5.00E-06 Pa	0.00%
2.00E-06 Pa	1.99E-06 Pa	-0.50%	2.00E-06 Pa	0.00%	2.00E-06 Pa	0.00%
1.00E-06 Pa	9.98E-07 Pa	-0.20%	9.98E-07 Pa	-0.20%	9.98E-07 Pa	-0.20%
5.00E-07 Pa	4.98E-07 Pa	-0.40%	4.98E-07 Pa	-0.40%	4.98E-07 Pa	-0.40%
2.00E-07 Pa	1.99E-07 Pa	-0.50%	1.99E-07 Pa	-0.50%	1.99E-07 Pa	-0.50%
1.00E-07 Pa	9.98E-08 Pa	-0.20%	0.99E-07 Pa	-1.00%	0.99E-07 Pa	-1.00%
5.00E-08 Pa	4.98E-08 Pa	-0.40%	5.00E-08 Pa	0.00%	5.00E-08 Pa	0.00%
2.00E-08 Pa	1.99E-08 Pa	-0.50%	2.00E-08 Pa	0.00%	2.00E-08 Pa	0.00%
1.00E-08 Pa	0.99E-08 Pa	-1.00%	0.99E-08 Pa	-1.00%	0.99E-08 Pa	-1.00%
5.00E-09 Pa	5.02E-09 Pa	0.40%	5.00E-09 Pa	0.00%	5.00E-09 Pa	0.00%
2.00E-09 Pa	2.00E-09 Pa	0.00%	1.99E-09 Pa	-0.50%	1.99E-09 Pa	-0.50%
1.00E-09 Pa	1.00E-09 Pa	0.00%	1.00E-09 Pa	0.00%	1.00E-09 Pa	0.00%
5.00E-10 Pa	4.99E-10 Pa	-0.20%				
2.00E-10 Pa	1.99E-10 Pa	-0.50%				
1.00E-10 Pa	9.97E-11 Pa	-0.30%				
5.00E-11 Pa	4.98E-11 Pa	-0.40%				
2.00E-11 Pa	1.98E-11 Pa	-1.00%				
1.00E-11 Pa	9.83E-12 Pa	-1.70%				
5.00E-12 Pa	4.88E-12 Pa	-2.40%				
2.00E-12 Pa	1.95E-12 Pa	-2.50%				
1.00E-12 Pa	1.00E-12 Pa	0.00%				

イオン電流 0 の計測について、擬似電流に対する相対差は最大-2.50%であった。イオン電流 1 とイオン電流 2 の計測について、擬似電流に対する相対誤差は最大-1.00%であった。また、イオン電流 1 とイオン電流 2 は、擬似入力に対し同じ数値となった。この結果、同一のイオン電流計測ユニット使用により個々のバラツキの影響や計測経路に起因する誤差要因が排除されたことを確認した。次に、表 2.3 は擬似的にイオン電流を入力したときのラムダ圧力の実測値と、計算値による相対差である。

表2.3 ラムダ計測回路による計算値と実測値の相対差

ラムダ圧力	計測値との相対差
1.50E-03 Pa	-0.034733%
2.00E-03 Pa	0.003235%
2.50E-03 Pa	0.005179%
3.00E-03 Pa	0.037285%
3.50E-03 Pa	-0.028268%
4.00E-03 Pa	0.010549%
4.50E-03 Pa	0.013782%
5.00E-03 Pa	-0.002490%
5.50E-03 Pa	0.004518%
6.00E-03 Pa	-0.004435%
6.50E-03 Pa	-0.002508%
7.00E-03 Pa	-0.000823%
7.50E-03 Pa	-0.010593%
8.00E-03 Pa	0.000722%
8.50E-03 Pa	0.001065%
9.00E-03 Pa	-0.004760%
9.50E-03 Pa	0.000278%
1.00E-02 Pa	0.004522%

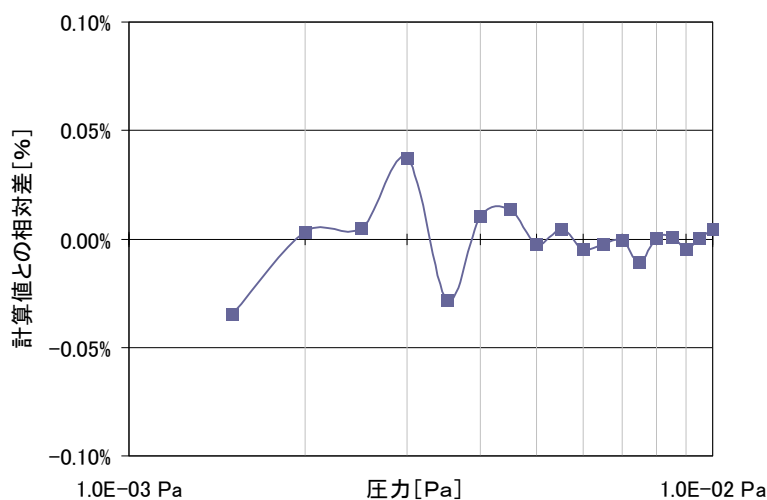


図 2.6 ラムダ計測回路による計算値と実測値の相対差

擬似的にイオン電流を入力してラムダ圧力を実測した結果、計算値と実測値の相違が  $10^{-3}$ [Pa]台においても $\pm 0.05\%$ 以内であることを確認した。

### 3 プラズマ用ラムダ真空計への展開

#### 3-1 過年度 (平成 21 年度, 22 年度) の成果の概要

平成 21 年度の研究では、準備段階として二つの試みを行った。すなわち、汎用型ラムダ真空計をそのままプラズマ装置に取り付けて予備的な実験を行うとともに、プラズマ装置に適したシンプルなセンサを試作した。そして、前者によりプラズマ用への展開に必須であるいくつかの課題が明らかとなり、後者によりプラズマ用ラムダ真空計としての基本構造を確定することが出来た。試作・使用したセンサの外観図を図 3.1 に示した。



図 3.1 試作したセンサ (外観)

平成 22 年度では、21 年度のセンサを元にプラズマ用ラムダ真空計としてシュルツ型、飛距離 25mm のセンサを試作し、通常のコリダクタ利用により 0.1~2 Pa の真空計測を行うことが出来たことを確認した上で、フィラメントを消灯しプラズマからの電子を利用してイオン化することにより 0.1~2 Pa の真空計測を行うことが出来た。その際、センサ軸はプラズマ方向と直交させた方が汚れ・迷光などの点で有利であることが明らかとなったものの、イオン化効率および生成できたイオン利用効率はまだ充分ではない。さらに、 $k$  値 (コレクタ-1 とコレクタ-2 の電流比率) は非常に小さく、現状での性能・信頼性を律速している可能性が指摘された。

#### 3-2 今年度 (平成 23 年度) の研究方針

前年度 (平成 22 年度) までの成果を踏まえ、今年度の研究方針を、

- a. イオン発生部の電極構造を最適化することでフィラメント付き以上の感度を得るよう改良を進める。
  - b. 量産型プラズマ装置の成膜チャンバ内に取り付け、実データを蓄積する。
- 以上の 2 点とした。

#### 3-3 薄膜製造装置技術者への聞き取り調査と今後の課題

量産型プラズマ装置への取付けの課題を把握するためにキャノンアネルバの真空成膜装置部門の技術者に詳細なヒアリングを行ったところ、下記の評価と見解を得た。

- a. 平成 22 年度のプラズマ測定の結果について  
22 年度の成果のうち、実験用プラズマ装置を測定したデータについては高く評価することができる。
- b. 汎用型のデータについて  
一方で、汎用型の開発データで顕在化した新たな課題については不安を禁じ得ない。
- c. 優先順位  
新原理に基づく計測技術に強く期待しているが、それだけに基礎データの完成度を高めることが必須である。
- d. 結論  
イオン発生部の最適化を含めて、量産型プラズマ装置への取り付けはその課題が解決された後に実施するべきである。

そこで、イオン発生部の電極構造を最適化および量産型プラズマ装置への取り付けは、汎用型ラムダ真空計の開発で新たに顕在化した課題を解決できてから実施することにした。



## 4 分圧用ラムダ真空計への展開

### 4-1 過年度 (平成 21 年度, 22 年度) の成果の概要と残された課題

信号を比較する二つの飛行領域 (質量分析計) へ同じ条件のイオンを供給できるようにするために、また、電子の利用効率を上げるために、さらに、イオン源の汚れを低減するためにマイクロフォーカス電子ビーム型のイオン源の試作を進めた。さらに、イオン源で発生した真空紫外光によるバックグラウンドノイズの上昇を抑止した四重極 (Q) 電極の試作と評価を進め、バックグラウンドを低く保ちかつ分解能を確保したマススペクトルを得ることができた。これらの成果を踏まえて、製品化のプロトタイプとなる分圧用ラムダ真空計の概要設計を行った。

一方で、プロトタイプの具体的設計や試作・評価には至らなかった。

### 4-2 今年度 (平成 23 年度) の研究方針

分圧用 $\lambda$ 真空計ではイオンが質量分離のために飛行空間を振動しながら進むため、全圧用 $\lambda$ 真空計と同じ式は適用できない。そこで、飛行空間での振動分を補正する曲線を得る。

次に、信号を比較する二つの飛行領域 (質量分析計) へ同じ条件のイオンを供給できるように試作したマイクロフォーカス電子ビーム型イオン源の評価を進め、その結果をイオン軌道シミュレーションにフィードバックして試作を重ねる。なお、このマイクロフォーカス電子ビーム型イオン源は、汚れ対策にもなっている。すなわち、汚れの原因はイオン源における電子の散乱であるので、電子ビームを計測に寄与しない領域には撒き散らさないことが汚れ対策に有効なのである。さらに、電子の利用効率を上げる効果もある。

最後に、圧力上限の拡大に対しては、圧力に応じて長さの異なる 2 種の質量分析計のうち、より適切な長さのものを選択するために、試作設計・製造を行い、評価・手直しを実施する。

### 4-3 補正曲線

第 1 項 要素技術で示したように全圧型ラムダ真空計において検出されるイオン量は 1.3 式  $N(x) = N_0 \cdot \exp(-x/\lambda)$  で表される ( $x$  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)。実際の機器において  $x$  はイオン源とコレクタの間の距離であるので分圧型ラムダ真空計の場合は質量分離を行う四重極の長さ  $L$  となるが、イオンは四重極の中を振動しながら進むため、実際のイオンの軌道長は四重極長よりも長くなる。そこで、コレクタで検出されるイオン量と圧力との相関関係を実験装置で精査した。合わせてイオン軌道シミュレーションソフトウェアである Scientific Instrument Services 社製 SIMION 8 を用いて、同じサイズのイオン源、四重極、コレクタに同じガス種を導入し、ガス圧力を変えた時の検出イオン量の変化をコンピュータでシミュレーションした。その結果、実測値とコンピュータシミュレーションの値は概ね一致した。

コンピュータシミュレーションの結果の一例として Ar ガス 0.2 Pa の時のイオン軌道を図 4.1 に、検出イオン量の圧力依存性の実測値とコンピュータシミュレーション結果の各プロットを重ねて図 4.2 に示した。

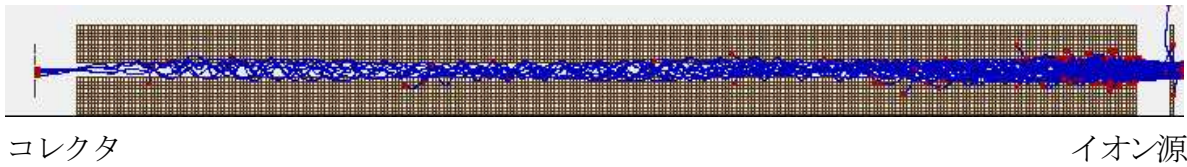


図 4.1 Ar ガス 0.2 Pa の時のイオン軌道

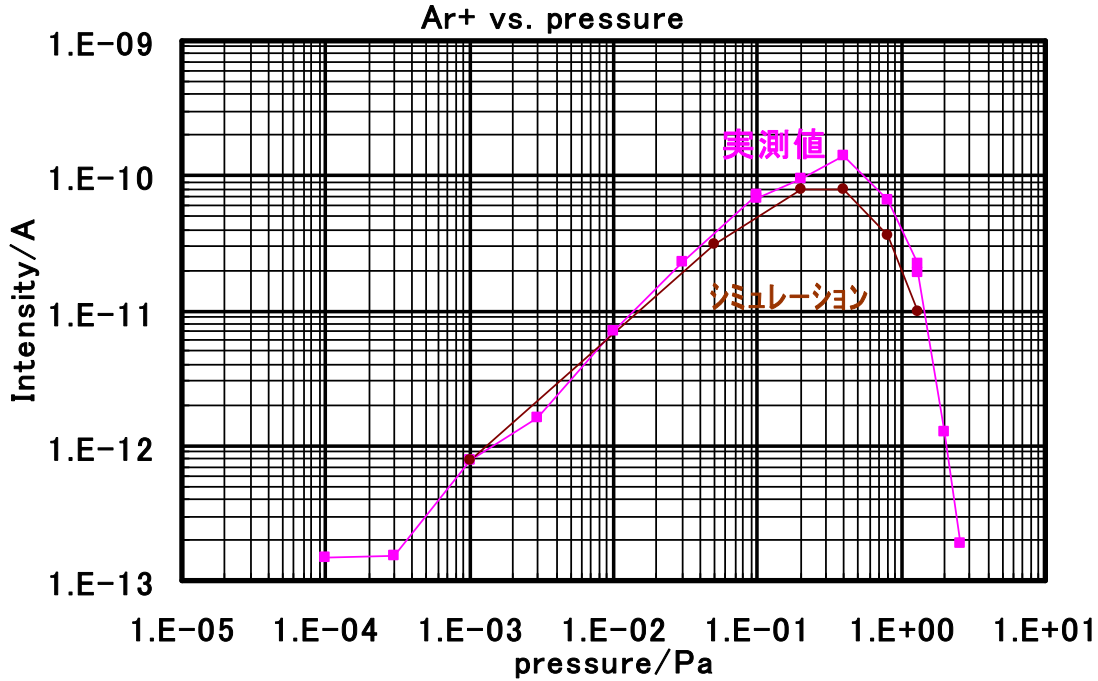


図 4.2 検出イオン量の圧力依存性の実測値とコンピュータシミュレーション結果

#### 4.4 マイクロフォーカス電子ビーム型イオン源の評価とシミュレーション

平成 22 年度に試作したマイクロフォーカスイオン源を実験系に組み込み評価を進めたがそのイオン化効率が低いためコンピュータシミュレーションで精査した結果、左右とも電子ビームを目標に収束させることが困難であることが判明した。そこで、イオン源は 1 つにして、2 組の各四重極に印加する電圧を制御することで振り分けを行う方式に変更することとした。マイクロイオンフォーカスイオン源のコンピュータシミュレーションの結果を図 4.3 に示した。

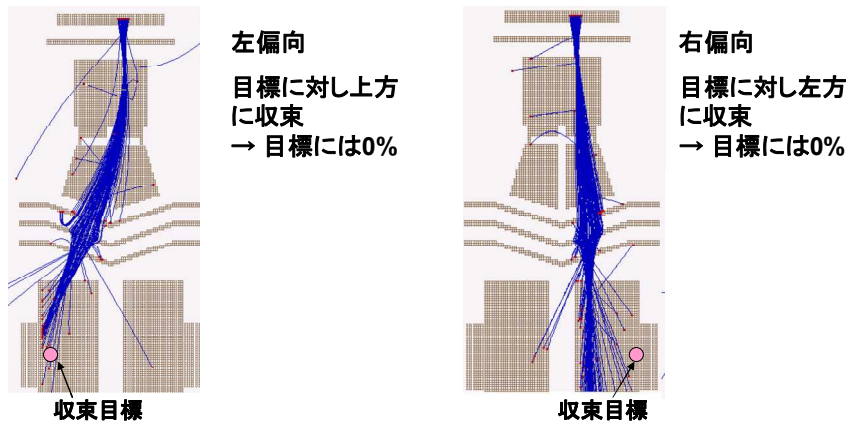


図 4.3 マイクロイオンフォーカスイオン源のコンピュータシミュレーションの結果

#### 4-5 長短2種類の四重極の評価

電極長の異なる四重極を試作し、双方ともに高圧下で質量分析が可能であることを検証した。得られたマススペクトルの一例を図 5.4 に示した。導入ガスは Ar, 圧力は 0.1 Pa である。

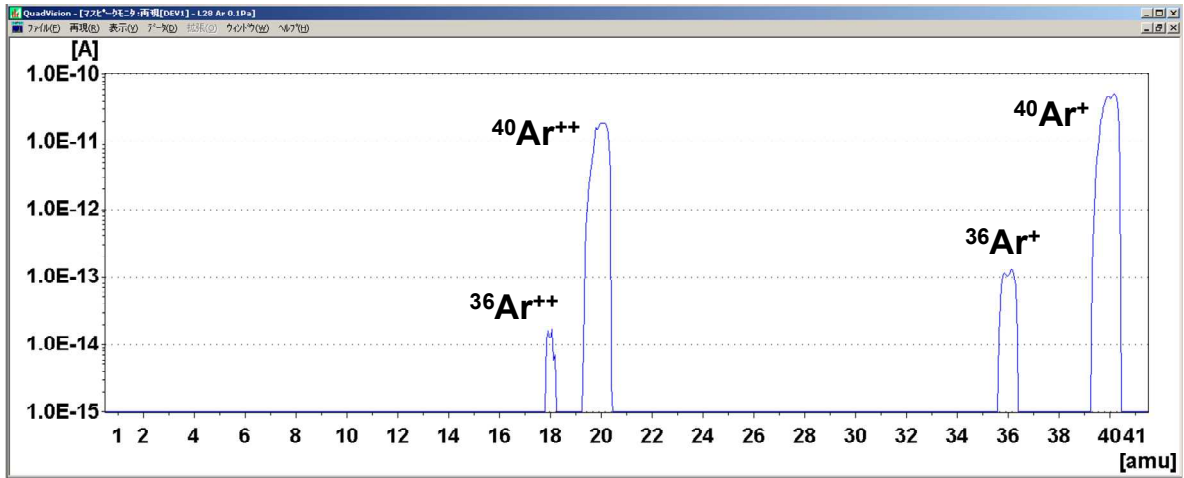


図 4.4 高圧下で得られたマススペクトル

#### 4-6 今後の課題

当初の計画には無かったが、製品化を見越して、製作精度の確保、および寸法計測手段の確立について精査したところ、繰り返し性に大きな困難があることが浮かび上がってきた。補正の再現性、マイクロフォーカスイオン源の代替策とともに来年度も引き続き開発が必要である。

## 最終章 全体総括

### 1 複数年の研究開発成果

#### 1-1 汎用型ラムダ真空計の製品化 <センサ>

B-A ゲージを兼用したイオン源で発生するイオンを取り込んで直線的に飛行させ、軌道上の2つのイオンコレクタ間を飛行する間に気体分子との衝突散乱で失われるイオンの量を測定することにより平均自由行程を求めて圧力に変換する原理に基づいたラムダ真空計の試作研究を行った。すなわち、第1次試作で原理の検証を行った後、小型化、電流値の増大、特性の改善を目指してイオン軌道のコンピュータシミュレーションにより電極形状、寸法を最適化し、第3次試作まで行った。その結果、ラムダ方式で測定した圧力でほぼ $1 \times 10^2$  Pa から 1 Pa 近くまで45度の直線に乗る特性が得られた。また $10^3$  Pa 台でもうまく計測すれば直線特性が得られることも分かった。

#### 1-2 汎用型ラムダ真空計の製品化 <制御電源・ソフトウェア>

平成21年度は、基本的な操作性・信頼性を備えたソフトウェアを搭載するラムダ真空計制御電源の一次試作機を製作した。一次試作機においては、平均自由行程が算出式通りに表示されることを確認した。

平成22年度は、性能面に関しては、イオン電流計測回路の精度安定性や電流計測分解能の向上に向けての回路要素の検討を行い、これらを実証することを目的に、新たにイオン電流計測ユニットおよび制御ソフトウェアを開発した。また、筐体の小型化のため、基本的な構造設計の検討を行った。その結果、一次試作機から容積比45%以下の小型化実現の目処が立ち、筐体板金の試作を行った。

平成23年度は、ラムダ真空計制御電源の量産試作機を製作した。量産試作機においては、デジタル回路の集約やイオン電流計測ユニットの削減、回路構成の見直しなどにより、平成21年度の一次試作機から容積比45%以下の小型化が実現した。ソフトウェアにおいては、イオン電流計測の切り換え方式への対応、通信機能の搭載、製品レベルのユーザーインターフェースの実装を実現した。

#### 1-3 プラズマ用ラムダ真空計への展開

平成21年度の研究では、準備段階として二つの試みを行った。すなわち、汎用型ラムダ真空計をそのままプラズマ装置に取り付けて予備的な実験を行うとともに、プラズマ装置に適したシンプルなセンサを試作した。そして、前者によりプラズマ用への展開に必須であるいくつかの課題が明らかとなり、後者によりプラズマ用ラムダ真空計としての基本構造を確定することが出来た。

平成22年度では、プラズマ用ラムダ真空計としてシュルツ型、飛距離25 mmのセンサを試作し、通常のコレクタ利用により0.1~2 Paの真空計測を行うことが出来たことを確認した上で、コレクタを消灯しプラズマからの電子を利用してイオン化することにより0.1~2 Paの真空計測を行うことが出来た。その際、センサー軸はプラズマ方向と直交させた方が汚れ・迷光などの点で有利であることが明らかとなったものの、イオン化効率および生成できたイオン利用効率はまだ充分ではない。さらに、k値(コレクタ-1とコレクタ-2の電流比率)は非常に小さく、現状での性能・信頼性を律速している可能性が指摘された。

続く平成23年度では量産型プラズマ装置への取付けの課題を把握するためにキヤ

ノンアネルバの真空成膜装置部門の技術者に詳細なヒアリングを行ったところ、平成 22 年度のプラズマ用ラムダ真空計の成果に高い評価を得ることができた一方で、イオン発生部の電極構造の最適化と量産型プラズマ装置への取り付けは汎用型ラムダ真空計の開発で新たに顕在化した課題を解決できた後に実施すべきとの結論に到った。

#### 1-4 分圧用ラムダ真空計への展開

平成 21 年度、平成 22 年度では、信号を比較する二つの飛行領域（質量分析計）へ同じ条件のイオンを供給できるようにするために、また、電子の利用効率を上げるために、さらに、イオン源の汚れを低減するためにマイクロフォーカス電子ビーム型のイオン源の試作を進めた。さらに、イオン源で発生した真空紫外光によるバックグラウンドノイズの上昇を抑止するために四重極 (Q) の試作と評価を進め、バックグラウンドを低く保ちかつ分解能を確保したマススペクトルを得ることができた。これらの成果を踏まえて、製品化のプロトタイプとなる分圧用ラムダ真空計の概要設計を行った。

平成 23 年度において感度の圧力依存性の実験を進めたところ、コンピュータシミュレーション結果と概ね一致した。一方、マイクロフォーカスイオン源の評価を進めたがそのイオン化効率が低いためコンピュータシミュレーションで精査した結果、左右とも電子ビームを目標に収束させることが困難であることが判明した。さらに、電極長の異なる四重極を試作し、双方ともに高圧下で質量分析が可能であることを検証した。

#### 1-5 CVD 用ラムダ真空計への展開

ラムダ真空計を CVD 用に適用するにあたって他の応用分野と際立って異なるのは、その測定圧力が 10~100 Pa と高いことと電極の汚れが多いことにある。

平成 21 年度、平成 22 年度では、汚れへの抜本対策として、被測定空間に熱源が存在しない真空紫外光式電子源を試作した。すなわち、真空紫外光発光させるための Xe ガス封入のランプを製作し、その際、冷陰極放電をさせるために新規に開発した冷陰極素子 (CNT) をカソードとして使用し、ランプ内部に白色蛍光体を塗布した反射板を設け Xe ガスを 266 Pa 封入した。その上で 3 kV を印加することで CNT 電極形状に合わせて正確に発光していることを確認することができた。

## 2 研究開発の課題・事業展開

### 2-1 汎用型ラムダ真空計の製品化 <センサ>

10<sup>3</sup> Pa 台の圧力領域では 2 つのイオンコレクタ電流値の不確かさに大きく影響されるので制御電源ではこの点に特に留意した設計が必要であることが確認された。さらに、制御電源試作機との組み合わせ評価が課題として残った。

今後、電極形状および寸法の更なる最適化、再現性の確認、等々継続してさらに研究開発を進め、事業化に向けた取り組みを行って 1 年後をめどに商品化を目指す。

### 2-2 汎用型ラムダ真空計の製品化 <制御電源・ソフトウェア>

平成 23 年度にラムダ真空計制御電源の量産試作機を製作したが、量産試作センサーと組み合わせた総合的な評価に関しては、実施することが出来なかった。その結

果、生産装置等に取り付けての最終評価や公的機関（産業技術総合研究所等）による精度認定の実施といった課題が残った。

そこで、技術開発部門の継続テーマとして年間計画に盛り込む事により、平成 23 年度の研究開発終了より約 1 年を目途に製品化を目指す。製品化関連の開発費用は技術開発部門の年間予算として計上し、生産については従来品の生産ラインでの少量生産を予定している。営業活動は従来の販路である装置メーカーへのアプローチがメインとなる。またホームページでの製品及び技術紹介を通して販路拡大を目指す。

### 2-3 プラズマ用ラムダ真空計への展開

研究開発成果の項で触れたように、汎用型の開発の課題がプラズマ用ラムダ真空計にとってボトルネックになっている。ラムダ真空計に対する薄膜製造装置技術者の懸念を払拭できた後にイオン発生部の最適化および量産型プラズマ装置への取り付けを行う予定である。

### 2-4 分圧用ラムダ真空計への展開

補正の再現性、マイクロフォーカスイオン源の代替策とともに来年度も引き続き開発が必要であり、事業化はそれを踏まえて 1 年後を目処に実施する予定である。

### 2-5 CVD 用ラムダ真空計への展開

試作を行い実験に着手したものの、課題の解決に必要な時間および製品化後における市場性について再検証を進めた結果、このまま CVD 用ラムダ真空計への展開を継続することは事業目的に必ずしも沿うものではないことが明らかになったため、研究を停止するのが妥当と判断した。

以上