

■9 群 (電子材料・デバイス) - 10 編 (真空・低温・強磁場技術)

1 章 真空

(執筆著者: 土佐正弘) [2014 年 3 月 受領]

■概要■

真空は、古くは 17 世紀中頃、トリチェリの水銀柱を用いた実験、ならびに、同時期のゲーリエのマグデブルクの半球の実験により初めてその存在が実証された後、19 世紀末のファラディの真空放電の研究を起点に、真空の発生、測定、応用の各関連技術が、単独、あるいは相互にリンクしながら発展してきており、現代社会において、図 1 に示すように、小は LSI デバイスやフラットディスプレイなどの作製装置から、大は核融合炉や大型加速器などの大型システムまで担っており、科学技術研究から先端電子・エネルギー産業まで幅広い分野で必要不可欠なキーテクノロジーとして拡大かつ進歩し続けている。

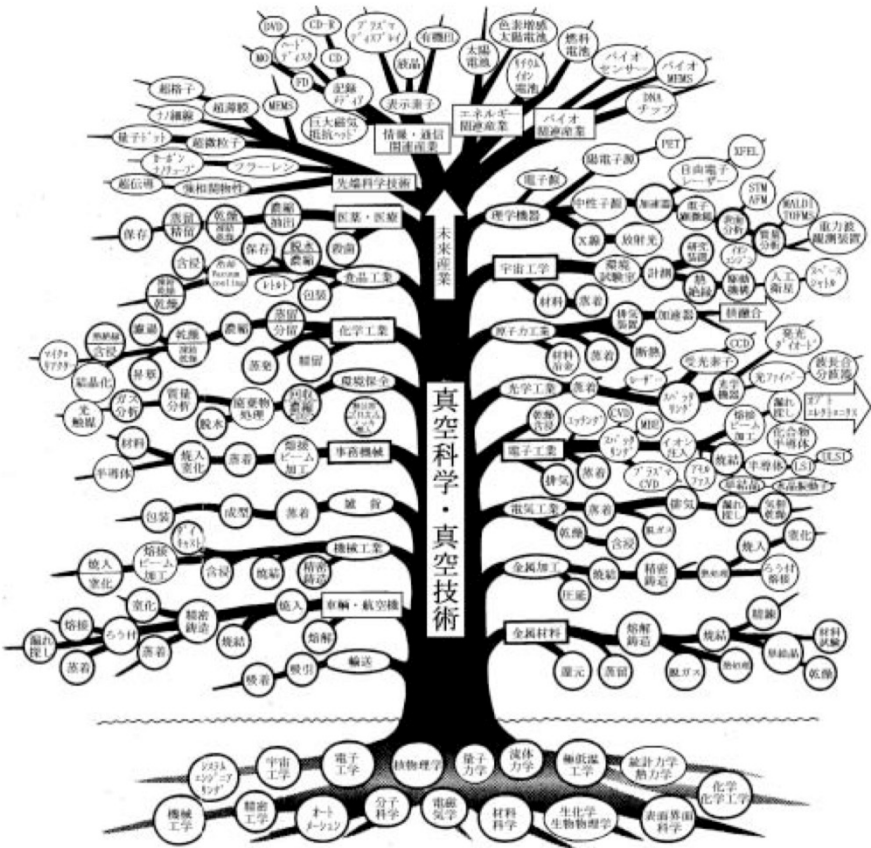


図 1 真空科学技術の実りの木 (日本真空学会 <http://www.vacuum-jp.org>)

本編では、真空技術の理解に不可欠な基礎として、まず、気体分子の現象について、真空の圧力の源となる分子運動論、真空空間と出入りして圧力を定める気体分子の吸着と脱離、真空から大気への気体排気の流れと圧力について解説する。次いで真空空間を評価する雰囲気圧力を測定する手法について、直接力を機械的に測定する力学利用式、気体分子の密度を測定する輸送利用式、気体の種類を同定する残留ガス質量分析について解説する。

また、真空を発生させる容器内空間の排気手法として、大容量外部排気の拡散ポンプ、オイルフリーでクリーンな外部排気のドライポンプ、高速外部排気のターボ分子ポンプ、気体分子スパッタ閉じ込めタイプのスパッタイオンポンプ、蒸発閉じ込めタイプのゲッターポンプ、冷却閉じ込めタイプのクライオポンプについて説明する。更に、発生した真空を安定して空間内に閉じ込め保持するために不可欠な真空容器については、ガス放出の少ない真空用材料、真空を乱す容器材料からのガス放出現象、真空圧力を左右する材料からのガス放出の評価について解説する。

最後に、真空空間を実際に利用する真空システムについては、大気側と真空側をやり取りする容器窓口の真空封止、真空空間で機械的操作を行う真空中駆動、真空容器の漏れ箇所を検出するリークテスト、超低圧清浄空間として利用するための超高真空システムの設計について解説する。

【本章の構成】

本章では以下について解説する。

- 1-1 真空の基礎
- 1-2 圧力測定
- 1-3 真空排気
- 1-4 真空容器
- 1-5 真空システム

■9 群-10 編-1 章

1-1 真空の基礎

(執筆者：板倉明子) [2013 年 1 月 受領]

1-1-1 気体の分子運動論

(1) 理想気体の状態方程式

物質には、固体、液体、気体という 3 つの状態があり、気体状態では、分子は自由に空間を移動し、分子同士、あるいは分子と壁面の衝突を繰り返している。気体の圧力 (p)・体積 (V)・温度 (T) の間には、理想気体の状態方程式 $pV=nRT$ が成り立つ。ここで、 n ：気体のモル数、 R ：気体定数、 T ：気体の絶対温度 [K] である。0°C、1 気圧の状態を標準状態 (STP: Standard Temperature and Pressure) と呼び、標準状態の圧力と温度は、 $p = 1.10325 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $T = 0^\circ\text{C} = 273.15 \text{ K}$ である。

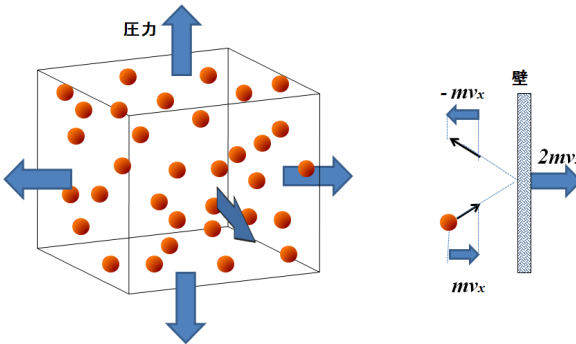


図 1・1 立方体の中の気体分子

一辺の長さ L の立方体に閉じ込められた、熱平衡状態にある理想気体を考える。気体は質量 m の分子 N 個で構成され、各分子は立方体中を自由に飛び回り、壁に衝突しては跳ね返るとする (気体分子数は少ないと仮定し、分子同士の衝突は無視する)。ここである 1 つの分子の速度を \vec{v} 、壁に垂直の成分を v_x とする。この分子が壁に弾性衝突すると、壁に与える運動量は、 $2mv_x$ となる。また、この分子が左右の壁を 1 往復するのにかかる時間は、 $2L/v_x$ 、よって 1 秒間に $v_x/2L$ 回衝突することになる。その間壁に与えられる力積は、 $mv_x \times v_x/2L$ となり、壁に及ぼす力の大きさは

$$\frac{mv_x^2}{L}$$

となる。

立方体の中には N 個の分子があるので、壁の受ける力の総量は

$$F = N \frac{mv_x^2}{L}$$

となる。ここで立方体の中の分子の動きは等方的であることを考えれば、平均値として

$v_x = v_y = v_z$ であり、分子速度 \vec{v} について、 $v_x^2 = \frac{1}{3} \vec{v}^2$ が成立する。

壁が単位面積当たりで受ける力を考えると、 F を壁の面積 L^2 で割ると、

$$N \frac{m \vec{v}^2}{3L^3}$$

となり、これが圧力 P である。 L^3 が体積 V であることを考えれば、ここで理想気体の状態方程式

$$V = N \frac{m \vec{v}^2}{3}$$

が得られる。圧力の単位は、SI 単位系ではパスカル (Pa [N/m²]) であり、1 m² 当たり 1 N (ニュートン) の力が加わっている圧力である。JIS 単位系では大気圧以下の圧力領域を真空と定義しており、真空の圧力領域を以下のように大別している。また、10⁻⁹ Pa 以下を極高真空と呼ぶこともある。

表 1・1 真空の領域 (JIS 単位系)

圧力領域名	圧力範囲 [Pa]
低真空	大気圧～10 ²
中真空	10 ² ～10 ⁻¹
高真空	10 ⁻¹ ～10 ⁻⁵
超高真空	10 ⁻⁵ 以下

理想気体のモル数 n は、アボガドロ数 N_0 を用いて $N = nN_0$ 、理想気体の状態方程式と組み合わせると、

$$\frac{1}{2} m \vec{v}^2 = \frac{3}{2} kT$$

が得られる。ここで $k = R/N_0$ で、これがボルツマン定数で、値は $k = 1.3806503 \times 10^{-23}$ [JK⁻¹] である。

気体の分子密度は、理想気体の状態方程式と、アボガドロ数から求めることができる。

$$n = 7.243 \times 10^{22} \frac{P}{T} [\text{個} \cdot \text{m}^{-3}], \quad p[\text{Pa}], \quad T[\text{K}]$$

また、密度ではなく、分子同士の距離の尺度で気体分子の混み具合を表す目安として、平均分子間距離 (L_m) がある。平均分子間距離は、

$$L_m = n^{-\frac{1}{3}}$$

で定義される。

なお、気体の熱力学的性質に関する法則は、状態方程式で記すと、それぞれ、ボイルの法則は $pV = \text{一定}$ 、シャルルの法則は $V/T = \text{一定}$ 、ドルトンの分圧の法則は $p = \sum p_i$ である。

(2) 気体分子の速度分布

速度分布関数 $f(v)dv$ は、温度 T で熱平衡にある気体分子の中で、速度 v と、 $v + dv$ の範囲の

速度を持つ分子の割合を与えるものである。速度分布関数を用いると、エネルギーや運動量などの分子の熱運動に関する物理量の平均値を求めることができる。熱平衡にある気体分子の速度分布は、マックスウェルボルツマンの速度分布関数で以下のように与えられる。

$$f(\vec{v})dv = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{m\vec{v}^2}{2kT}\right)dv$$

速度ベクトルを \vec{v} は速度成分 (v_x, v_y, v_z) を持つので、 v_x について

$$f(v_x)dv_x = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{mv_x^2}{2kT}\right)dv_x$$

となる。

これによれば、分子の質量が大きく温度が低いほど分布は密になり、分子の質量が小さく温度が高いほど分布は疎になる。アルゴン分子の速さの分布をプロットしたものを図 1・2 に示す。速度分布曲線より下にある部分の面積が分子の総数に等しくなる。

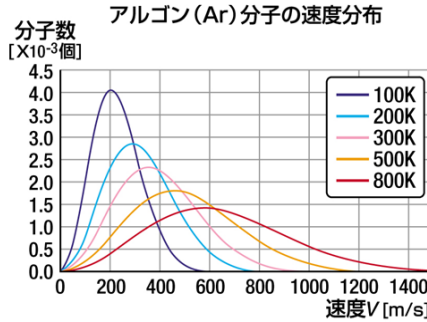


図 1・2 アルゴン分子の速度分布

出典：<http://rikanet2.jst.go.jp/contents/cp0280/manual/j063400.html>

(3) 平均自由行程

気体の中で分子が他の分子と衝突してから、次に衝突するまでに移動する距離を自由行程といい、その平均値を平均自由行程 (λ) という。平均自由行程が短く 1 つの分子の動きが隣の分子に伝わる状態である圧力領域を粘性流領域といい、平均自由行程がその分子がある真空容器などの空間の寸法よりも十分大きい圧力状態を分子流領域と呼ぶ。

一定圧力の気体の中に、分子線 (N_0 個) が入射すると、空間にある気体分子との衝突により、分子線強度は指数関数的に減衰する。 $N(x)$ を距離 x だけ進んだ地点での分子数とすると、 $N(x)$ は

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

である。この式における減衰定数 λ が平均自由行程である。

分子密度 n の気体の中を、速度 \vec{v} で運動する分子を考えたとき、平均自由行程 (λ) は以下のように表せる。

$$\lambda = \frac{\text{時間単位に分子が移動する平均距離}}{\text{単位時間に分子が衝突する回数}}$$

分子直径を σ とし各分子が静止しているとする、時間 Δt の間に衝突する回数は、速度 \bar{v} で飛行してくる分子の中心から、直径 2σ 、長さ $v\Delta t$ の円柱状の領域内に入った分子の数ということになる。

$$\begin{aligned} \Delta t \text{ 時間に散乱される分子数} &= [\text{直径 } 2\sigma, \text{ 長さ } v\Delta t \text{ の円柱の体積}] \times [\text{分子密度 } n] \\ &= \pi\sigma^2 n v \Delta t \end{aligned}$$

これを平均自由行程の式に入れると、

$$\lambda = \frac{1}{\pi\sigma^2 n}$$

が得られる。

この式は、空間に存在するほかの分子が静止していると仮定して算出したが、他の分子が運動していた場合には、散乱される分子数を求める際の直径 2σ の円柱の長さを、 $v\Delta t$ ではなく相対運動速度の ω を用いて書き換えればよい。 $\omega = v - v'$ なので、 $\pi\sigma^2 n v \Delta t \Rightarrow \pi\sigma^2 n \omega \Delta t$ として、

$$\lambda = \frac{\bar{v}}{\pi\sigma^2 n \bar{\omega}}$$

となる。また、気体分子の速度分布が、マックスウェル分布に従う場合には、 $\bar{\omega} = \sqrt{2}\bar{v}$ であることが知られているので、この式は

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 n}$$

と書くことができる。また、混合気体の平均自由行程については、分子 A (質量 m_A 、密度 n_A 、直径 σ_A) と、分子 B (質量 m_B 、密度 n_B 、直径 σ_B) の混合気体の中での分子 B との衝突による分子 A の平均自由行程は、 $\sigma' = (\sigma_A + \sigma_B)/2$ として、

$$\lambda_{A-B} = \sqrt{\frac{m_B}{m_A + m_B}} \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma'^2 n_B}$$

となる。

1-1-2 気体の吸着と脱離

(1) 気体分子と表面

さて、気体分子が表面に入射し、表面と衝突すると、あるときには直接散乱され (跳ね返され)、あるときには表面に吸着する (図 1・3 参照)。散乱によって分子のエネルギーや速度、運動方向などは変化する。一方、吸着した分子は、表面を拡散しある時間の後に脱離したり、あるいはその場にとどまったり、固体内部に拡散したりする。拡散している途中に他の分子と結合、反応する場合もある。

表面を作っている固体の多くは、ある決まった結晶構造をとり、理想的には原子が規則正しく配列した構造をしている。しかしながら、実際の表面には凹凸があり、欠陥や構造の乱れ、偏析物や汚染による組成の乱れがある。よって、原子が表面のどの部分に衝突するかで、相互

作用が変わり、その後の振る舞いが変わってくる。このため、分子のエネルギーや吸着・脱離などは平均的な振る舞いとして、平均値や分布として表現する。

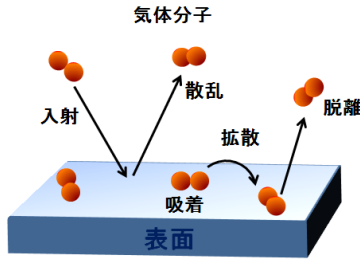


図 1・3 気体分子と表面の相互作用

(2) 気体分子の吸着

単位面積当たりの表面に、単位時間内に入射する分子数を、入射頻度と呼ぶ。表面上の微小面積 dS に飛び込んでくる分子を模式的に考えると、表面の推薦に対して角度 θ で dS に入射する分子は、底面 dS 、高さ $v \Delta t \cos \theta$ の斜円柱内にある分子である。

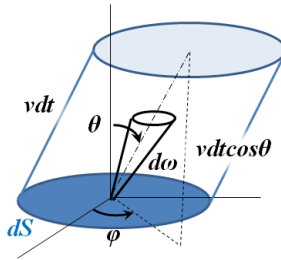


図 1・4 気体分子の表面への入射頻度

斜円柱内の分子の速度分布がマクスウェル側に従い空間的に等方的であるとすると、速度は $v \sim v + dv$ の範囲にあり、方向 (θ, ϕ) を中心とする立体角 ω の範囲にある分子数 dN は、

$$dN = n v dt \cos \theta dS f(\vec{v}) dv \frac{\omega}{4\pi}$$

となる。

入射頻度 Γ は、この式を速度分布及び全領域で積分することで得られ、状態方程式を代入することによって、最終的に

$$\Gamma = \frac{p}{\sqrt{2\pi m k T}}$$

が得られる。

真空工学では入射する気体分子数を、体積に変換して表すことが多い。空間で分子 1 個が占有的体積が、分子数密度 n の逆数であることを考えれば、体積入射頻度 Γ_v は

$$\Gamma_v = \frac{1}{n} \Gamma = \frac{1}{4} \bar{v}$$

分子間（及び分子と表面）の結合エネルギーは、結合力の成因によって、永久電気双極子、誘起電気双極子、分散力、結合エネルギーに分けられ、その合計として記述できる。化学結合を除く3つの項目による吸着が物理吸着であり、吸着エネルギーは0.3 eV程度以下である。一方、化学結合の吸着エネルギー (W) は1 eV程度以上であるため、化学吸着を考えると、それ以外の項目はほとんど無視できる。しかし、化学吸着になる前の前駆状態として物理吸着を経由する場合もある。

入射分子が吸着する割合を、吸着確率 (c) という。また、物理吸着・化学吸着に関わらず、吸着エネルギーは吸着量依存性が見られる。この原因は、吸着媒表面の不均質性と、吸着分子間の相互作用である。極端な例だが、化学結合の相手になる表面の結合サイトがすべて吸着物で満たされてしまえば、分子はそれ以上吸着できない。また、吸着分子間に斥力があれば、吸着量が増えるに従って吸着エネルギーは減少し、次の分子が吸着しにくくなる。他原子分子が表面に入射する場合には、分子が乖離して、原子となって化学吸着する場合もあり、これを乖離吸着という。乖離吸着には乖離の活性障壁がある場合がある。

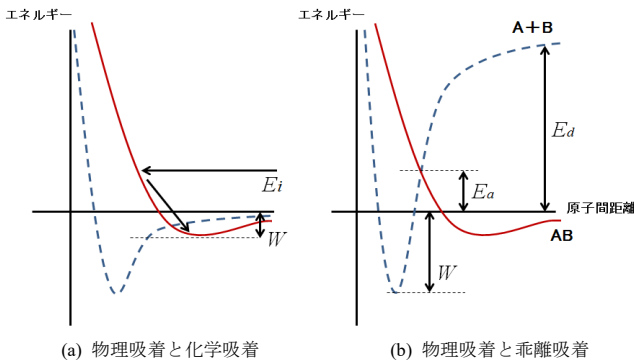


図 1・5 吸着ポテンシャルの模式図

横軸に表面と分子の距離、縦軸にエネルギーをとったときの、吸着ポテンシャルの模式図を示す。図 1・5(a)で、物理吸着（赤実線）と化学吸着（青破線）のポテンシャルを持つ表面と分子の組合せのときに、入射エネルギー E_i で表面に飛来した分子は、物理吸着ポテンシャルの最小値に落ちる。図 1・5(b)は AB が分子を作っているときの物理吸着ポテンシャル（赤実線）と A, B が乖離し、化学吸着するときのポテンシャル（青破線）を示している。AB 分子を乖離させるために、乖離エネルギー E_d が必要であるが、表面に近づくと、A と B がそれぞれ表面と強く化学吸着をするために安定になる。この図で、いったん物理吸着した分子 AB が化学吸着するためには、活性化障壁 E_a を越えなければならない。

(3) 気体分子の脱離

吸着している気体分子は、外部から吸着エネルギーに相当するエネルギーを受け取ると、表面から放出される。これを脱離と呼び、エネルギーの受け取り方によって、いくつかに分類で

きる。熱的にエネルギーを受け取る熱脱離，電子的な励起を經由して電子系からエネルギーを受け取る電子遷移誘起脱離，入射粒子と表面構成原子が直接運動量の授受を行うスパッタリングなどがある。代表的な脱離として，ここでは熱脱離を説明する。

温度 T の表面で吸着ポテンシャルにいる分子の脱離速度は，単位面積当たりの分子の吸着量 σ に比例する。脱離速度は σ の減少率であることを考えると，

$$-\frac{d\sigma}{dt} = \frac{\sigma}{\tau}$$

で表すことができる。比例係数 $(1/\tau)$ は単位時間当たりに吸着した分子が脱離する確率であり，その逆数 τ は分子の平均滞在時間である。 τ は

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_{\text{des}}}{kT}\right)$$

と表せる。 E_{des} は脱離に要する活性化エネルギーであり， τ_0 は分子の振動周期 10^{-13} s 程度になることが知られている。図 1・5 (a) では脱離の活性化エネルギーは吸着エネルギー W に等しい。吸着分子同士に相互作用がある場合や，分子が会合して脱離する場合は，脱離速度に吸着量の項目が含まれる。前式を一般化し，

$$\tau = \sigma^n v_n \exp\left(\frac{E_{\text{des}}}{kT}\right)$$

と示す。 n は脱離の回数と呼ばれ v_n は定数である。乖離していた二原子分子が会合して脱離する場合は， $n=2$ となる。一例として図 1・5 (b) の場合には， $E_{\text{des}} = W + E_a$ である。

(4) 吸着平衡

蒸気圧 (飽和蒸気圧) とは任意の温度に対して，その物質の気体が液体状態や固体状態と平衡になるような圧力のことである。そのため，表面に吸着している分子は，気相が蒸気圧以下であれば気相へと脱離する。吸着平衡とは気体と吸着層が共存し，気体の表面への吸着速度と，表面から気相への脱離速度が等しくなり，見掛け上，表面の吸着密度に変化がなくなった状態をいう。

吸着分子間の相互作用がなく，吸着分子と吸着媒表面間の相互作用が吸着密度に依存しないときに成り立つのが Henry 則である。このとき，吸着密度 σ は気相の圧力 p に比例する。比例係数は，吸着媒表面からの脱離速度 $\Gamma_{\text{des}} (= \sigma/\tau)$ と，気相からの気体の吸着速度 (入射頻度 $\Gamma (= \frac{p}{\sqrt{2\pi m k T}})$ に吸着確率 (c) を掛けたもの) が釣り合う条件， $\Gamma_{\text{des}} = c\Gamma$ から導かれ，これにより吸着密度

$$\sigma = \frac{c\tau_0}{\sqrt{2\pi m k T}} p \exp\left(\frac{W}{kT}\right)$$

が得られる。

一方，分子が吸着できる特定の吸着サイトが存在する場合は，1 つの分子がそのサイトに吸着している場合，次の分子が吸着することができない。このようなモデルに対応する理論式が，Langmuir の吸着等温式である (この場合も，吸着分子間の相互作用は考えていない)。既に占有されている吸着席に入射した分子は吸着しないとし，空席に入射した分子の吸着確率を s とすると，吸着速度と脱離速度が等しいという吸着平衡の条件は，

$$\frac{\sigma_0 - \sigma}{\sigma_0} s \frac{p}{\sqrt{2\pi mkT}} = \frac{\sigma}{\tau_0} \exp\left(-\frac{W}{kT}\right)$$

となる。ここで、 σ_0 は単分子層を形成する、つまり吸着サイトがすべて埋まったときの吸着密度であり、 $(\sigma_0 - \sigma) / \sigma_0$ は空いている吸着席の割合を示す。また、 σ / σ_0 は被覆率 θ と定義され、一般に使われる値である。 p が ∞ のとき、 $\theta = 1$ となって吸着が飽和し、 p が蒸気圧よりも十分小さいところ、すなわち θ が小さいところでは Henry 則と一致する。

1-1-3 気体の流れと圧力

(1) 流れの種類

真空装置は真空容器内の気体を真空ポンプで排気する必要がある。このとき、気体は真空容器とポンプをつなぐ配管、パイプ、バルブなどを通して排気されることになる。よって、排気を考えるときは、真空容器よりも細いパイプ類のコンダクタンスを考えなければならない。コンダクタンスとは、管を期待が通るときの抵抗値のようなものである。

気体の流れといっても、様々な状態がある。分類の仕方も、希薄化 (Knudsen 数) による分類、慣性力 (Reynolds 数) による分類、圧縮性 (Mach 数) による分類がある。ここでは Knudsen 数を中心に気体分子の流れを解説する。

圧力によって、その流れの特徴を把握する必要がある。大きく、流れを3つに分類する。分子運動を考慮に入れなければならないのは、希薄な流れである。圧力が低いで希薄な流れとは言えない。流れが希薄と言えるかどうかは、気体分子と真空容器壁との衝突頻度と、気体分子同士の衝突頻度の割合によって決まる (図 1・6 参照)。分子同士の衝突が主となる流れを粘性流、分子と壁との衝突が主な流れを分子流という。つまり、希薄な流れとは、この分子流領域の流れを意味する。粘性流と分子流の中間領域を、中間流という。

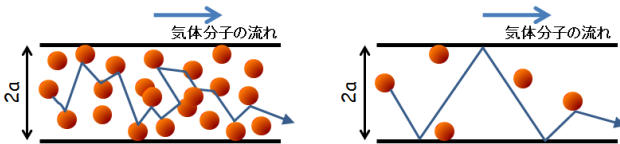


図 1・6 粘性流 (左) と分子流 (右) の流れの概念図

流れが粘性流か分子流かは、クヌーセン数 (Knudsen 数, Kn 数) の値で判断する。Kn 数は流体を特徴づける無次元パラメータの一つで、

$$\text{Kn} = \frac{\text{平均自由行程}}{\text{代表的寸法}} = \frac{\lambda}{d} = \frac{\text{壁との衝突頻度}}{\text{分子同士の衝突頻度}}$$

で定義される。平均自由行程 λ は、気体の分子運動論で示した通り、

$$\lambda = \frac{\text{分子の平均速度}}{\text{分子同士の衝突頻度}} = \frac{\bar{v}}{\pi\sigma^2 n\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 p}$$

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad p = nkT$$

と表せる。ここで、 \bar{v} は分子の平均速度、 k はボルツマン定数、 T は温度 (K)、 n は分子密度、 σ は分子直径、 p は圧力、 R は気体定数、 M は分子のモル質量、 m は分子質量である。よって Kn は、

$$\text{Kn} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2pd}$$

となる。なお、半径 a の円断面積導管の場合、代表的な寸法 d は、 $2a$ である。温度が一定の場合、Kn 数は pd の関数になる。真空工学では、稀薄化の程度を、Kn を用いて、以下の表のように分類している。

表 1・2 真空工学における希薄化の分類

分類	真空工学の場合
分子流	$0.3 < \text{Kn}$
中間流	$0.01 < \text{Kn} < 0.3$
粘性流	$\text{Kn} < 0.01$

なお、他の機械工学などの分野では、範囲が異なることもあるため、注意が必要である。

(2) 流量とコンダクタンス

気体の隆昌は、真空容器や配管を単位時間に通過する量として定義される。真空工学では、気体の量と体積と圧力の席で表した体積流量で表すことが多い。 $[\text{Pa}\cdot\text{m}^3\text{s}^{-1}]$ 、 $[\text{Pa}\cdot\text{ls}^{-1}]$ 、 $[\text{mbar}\cdot\text{ls}^{-1}]$ などが、よく使われる流量の単位である。圧力を一定とすれば、

$$Q_v = p \frac{dV}{dT}$$

である。この体積流量 Q_v では温度を決めないと気体分子の絶対量、例えば分子数の流量

$$\frac{dN}{dT} = \frac{d}{dt} \left(\frac{pV}{kT} \right) = \frac{p}{kT} \frac{dV}{dT} = \frac{Q_v}{kT}$$

を規定することができない。しかし、真空装置やガス導入系などに温度勾配がない場合に、圧力との対応が明確になるという利点がある。一方、温度が不均一な場合や、分子の化学反応が付随する場合などでは、重量で示した質量流量が使用されることが多い。体積流量 Q_v と質量流量 Q_m の間には、次の関係式が成り立つ。

$$Q_m = \frac{mQ_v}{kT}$$

真空配管と通過する気体の流量は、次式に示すように配管両端の圧力差と、配管のコンダクタンスの積として与えられる (図 1・7 参照)。

$$Q_v = C(p_1 - p_2) = C\Delta p$$

この式におけるコンダクタンスの意味は、電気回路における抵抗の逆数として定義されるコンダクタンスの意味と同じである。気体の流れのコンダクタンスは、 $[\text{m}^3\text{s}^{-1}]$ $[\text{ls}^{-1}]$ などの単位で表される。

コンダクタンスが配管両端の圧力差によってどの程度の流量が流れるかを示す量だったのに対し、仮想的な断面を通過する流れに対して、排気速度と呼ばれる量 (S) を定義することができ、この概念を覚えておくと便利である。

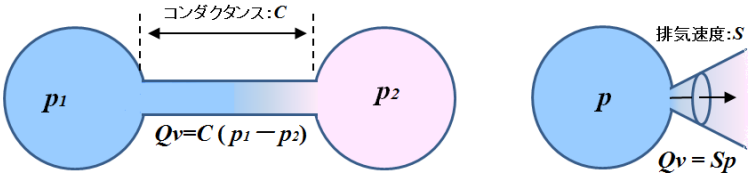


図 1・7 コンダクタンスと排気速度の概念図

図 1・7 の圧力 p_1 の容器に着目したとき、壁の一部に開口があり、そこに入射した分子が戻ってこない（完全に排気される）と考えるなら、分子流領域での理想気体の排気速度は以下のようになる。

$$[\text{排気速度}] = [\text{入射分子数}] \times [\text{分子 1 個が占有する体積}] = A \frac{\Gamma}{n} = A\Gamma_v$$

ここで、 A は開口の面積、 Γ は入射頻度、 Γ_v は体積入射頻度である。図 1・7 の配管がない状態である（図 1・8 参照）。

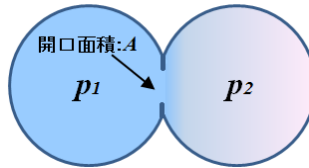


図 1・8 開口の分子流コンダクタンス

孔の持つコンダクタンス C_0 は以下ようになる。体積流量は

$$Q_v = \frac{1}{4} \bar{v} A (p_1 - p_2) \quad [\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \text{s}^{-1}]$$

なので、定義により

$$C_0 = \frac{1}{4} \bar{v} A \quad [\text{m}^3 \text{s}^{-1}]$$

である。孔の分子流コンダクタンスは配管のコンダクタンスを計算する際に、基本となる量である。

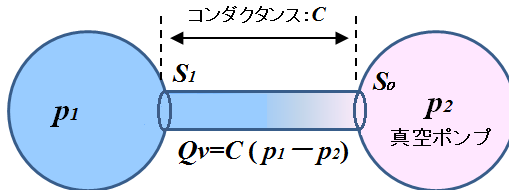


図 1・9 コンダクタンスと実行排気速度

ここで、排気速度 S_0 を持つ真空ポンプを、コンダクタンス C の配管で真空容器に接続した

ときの、真空容器の実行排気速度 S_1 を計算してみる。連結された管の中の流量は連続条件を満たすので、

$$Q_V = S_1 p_1 = S_0 p_2 = C(p_1 - p_2)$$

この関係式から、 p_1 、 p_2 を消去することによって、排気速度とコンダクタンスの合成則が得られる。

$$\frac{1}{S_1} = \frac{1}{S_0} + \frac{1}{C}$$

(3) 導管のコンダクタンス

粘性流領域の気体の流れは、圧力勾配による力と、粘性による壁面から受ける抗力との平衡によって決定される。この領域の気体が長さ L 、直径 $2a$ の管を流れるときのコンダクタンスを計算すると、

$$C = \frac{\pi a^4 \bar{p}}{8\eta L}$$

となる。ここで \bar{p} は平均圧力、 η は流れる気体分子の粘性係数である。一方、同じ管であっても、分子流領域にある気体の場合のコンダクタンスは、

$$C = \frac{2\pi a^3 \bar{v}}{3L} = \pi a^2 \frac{\bar{v}}{4} \left(\frac{8a}{3L} \right)$$

となり、圧力に依存しなくなる。

■9 群-10 編-1 章

1-2 圧力測定

(執筆：秋道 斉) [2011年10月 受領]

日本工業規格 (JIS) には、真空計を、圧力を力として検出する「機械的現象に基づく真空計」、気体分子による熱伝導や摩擦効果を利用する「気体の輸送現象に基づく真空計」、気体の分子密度を測定する「気体の電離現象に基づく真空計」と分類されている。また、気体に含まれる分子の種類の上同定とその分圧を測定する真空計が必要であり、分圧真空計として分類されている。「機械的現象に基づく真空計」を除いた多くの全圧計と分圧計は直接圧力を測定していないため、正しい圧力に換算するための校正が必要である。図 2・1 には主な真空計の種類と測定範囲を示した。

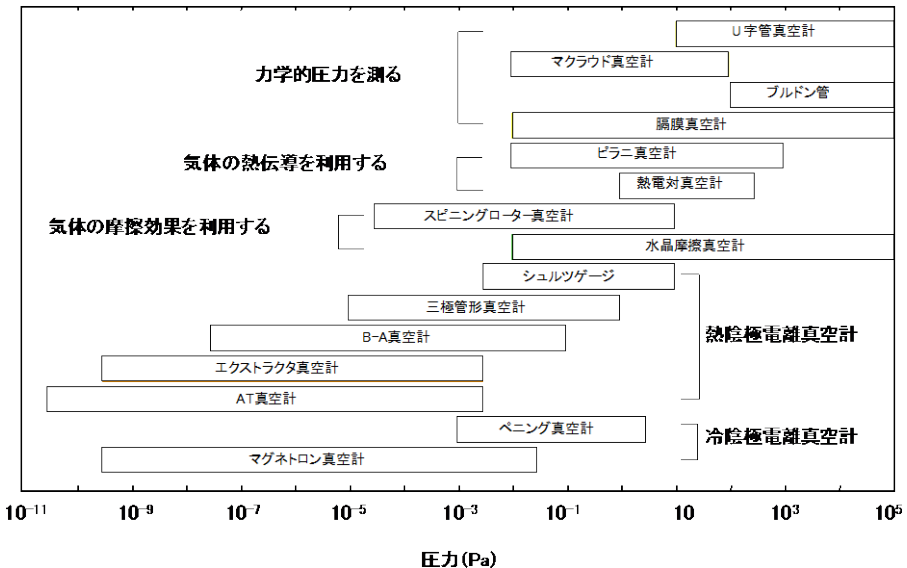


図 2・1 真空計の種類と測定範囲

1-2-1 機械的現象に基づく真空計

機械的現象に基づく真空計は、単位面積に働く「力学的な力」を測定しており、「液柱差真空計」、「マクラウド真空計」、「ブルドン管真空計」、「隔膜真空計」などが分類される。絶対圧の測定が可能であることや気体に対する感度依存性がないなどの利点がある。測定可能な圧力は、大気圧から 0.01 Pa 程度である。

(1) 液柱差真空計

液柱差真空計 (図 2・2) は、U 字管真空計、あるいはマノメーターとも呼ばれ、液体によって隔てられた U 字管両端の圧力差を、液面の高さの差 (液柱差)、液体の密度及び重力加速度から求める。液柱差の計測には、目視、カセットメーター、白色光やレーザーまたは超音波の干渉方式などがある。作動液は水銀、水や油が使われる。液柱差真空計による圧力測定は、取付け

姿勢に制約がある，電氣的出力が得にくい，急激な圧力変化に追従できずに作動液が飛び出すこともある，などの注意点はあるが，圧力を絶対測定できる利点がある。

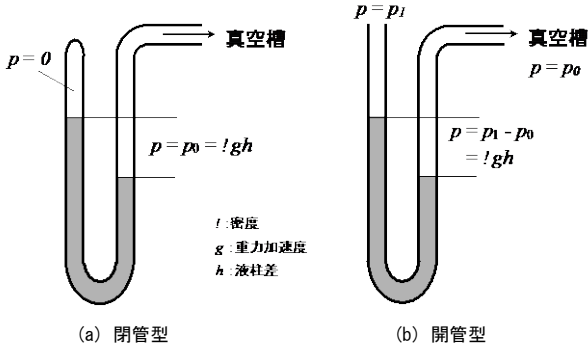


図 2・2 U 字管真空計

(2) マクラウド真空計

マクラウド真空計 (図 2・3) は，液柱差真空計より低圧力での測定を可能とするために，気体をボイルの法則を利用して圧縮 (加圧) するという工夫を取り入れたものである。測定可能な圧力範囲は 0.013~1.3 Pa である。精度の高い測定には，毛管現象のばらつきと水銀蒸気によるゼロ点の効果に注意が必要である。

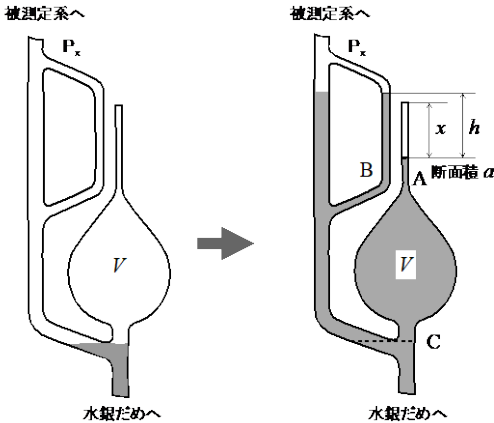


図 2・3 マクラウド真空計

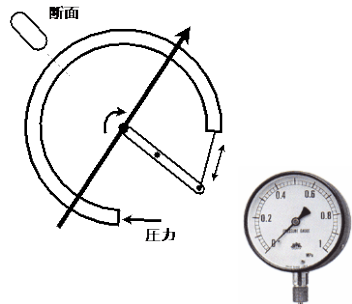


図 2・4 ブルドン管真空計

(3) ブルドン管真空計

ブルドン管真空計 (図 2・4) は，内外圧差にともなうブルドン管 (弾性体で作られた楕円形断面の中空湾曲管) の変形を利用する真空計である。大気圧から 103 Pa 程度までの圧力測定が可能である。この真空計は，高圧ガス用ポンペなどの機械式圧力指示器にも使われている。

(4) 隔膜真空計

隔膜真空計 (図 2・5) は，金属隔膜 (ダイアフラム) の両側に圧力差を加えたときに生じる

隔膜の弾性変形量から圧力を測定する真空計である。変形量を読み出す方法として静電容量式が一般的である。金属隔膜に対向して固定電極を配置し、圧力差による変形量をこれらの電極間の静電容量変化として検出する。高精度型では、センサ部が一定の温度（～45℃）に保たれる構造になっている。また、活性な気体による金属隔膜の破損を防ぐために、隔膜に特殊な金属やセラミックを使用したり、隔膜などを高温に保つものもある。隔膜真空計は、 $10^5 \sim 10^{-2}$ Paの圧力領域では最も信頼性の高い真空計の一つである。ただし、室温変動の影響を受けやすいので、正確な測定を行うためには注意が必要である。また、高精度型や高温度型のように、真空容器との温度差が考えられる場合には、熱遷移の効果を考慮する必要がある。静電容量式の他にも、振動子型歪みセンサにより変形量を測定する隔膜真空計もある。

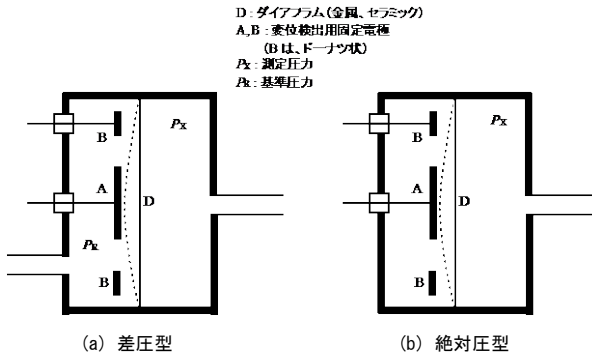


図 2・5 静電容量型隔膜真空計

1-2-2 気体の輸送現象に基づく真空計

圧力を力として検出する真空計は、圧力が低くなるにつれて変化量（変形量）も小さくなり測定が難しくなる。そこで、圧力と相関のある気体の物性（輸送現象）を利用する真空計が考案されている。この真空計の代表的なものは、気体分子による熱伝導を利用する「熱伝導真空計」と真空中で運動する物体に作用する気体分子の摩擦効果を利用する「粘性真空計」である。

(1) 熱伝導真空計

熱伝導真空計（図 2・6、図 2・7）は、通電加熱した金属細線に気体分子が衝突する際に失う熱量が、分子流領域では圧力に依存することを利用した真空計である。この方式の真空計は、構造が簡単で小型であり、被測定系への影響が少なく、工業用あるいは簡便な指示計器として広く使われている。特性が金属細線の表面状態に敏感で、気体種による感度の依存性が見られる。失った熱量を金属細線の抵抗変化として検知する「ピラニ真空計」、直接温度変化を測定する「熱電対真空計」や「サーミスタ真空計」が代表的なものである。

(2) スピニングロータ真空計

スピニングロータ真空計（図 2・8）は、磁気的に真空中に浮上させた金属球を自由回転させ、気体分子との摩擦によって生じる回転の減衰率が圧力に比例することを利用する粘性真空計である。環境温度や外部振動に影響されやすいが、不活性気体中での感度の経時変化は非常に小さく、また、水などの活性な気体をロータ球に吸着させないことに注意することで、感度の

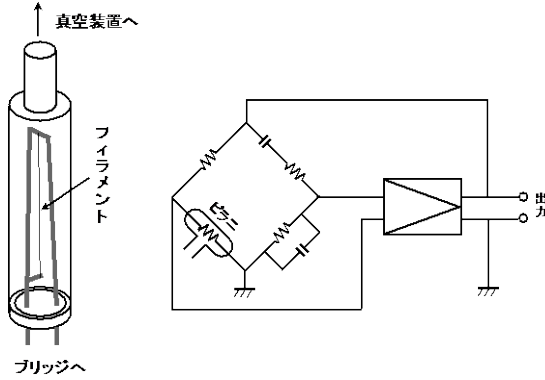


図 2・6 ピラニ真空計

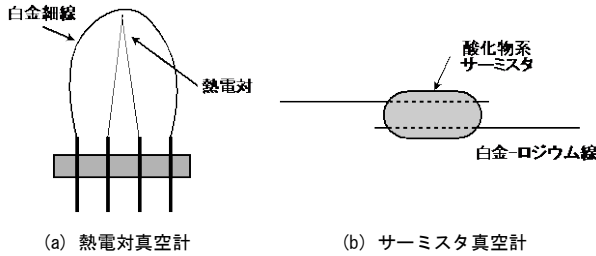


図 2・7 熱電対真空計とサーミスタ真空計

大きな変化を防ぐことができる。真空系に対して電氣的，熱的影響を与えないなど中真空領域 $10^{-4} \sim 10$ Pa では，最も信頼性の高い真空計であり，真空計の校正の基準真空計として使われるほか，真空標準の国際比較にも用いられる。

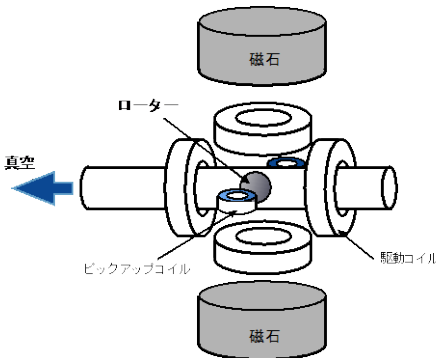


図 2・8 スピニングロータ真空計

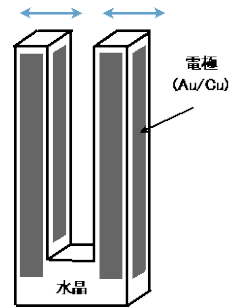


図 2・9 水晶摩擦真空計

(3) 水晶摩擦真空計

水晶摩擦真空計 (図 2・9) は、音叉型水晶振動子をセンサとして利用し、その共振状態における交流インピーダンスが気体の抗力に比例することを利用する粘性真空計である。長さ数 mm、幅 1 mm 程度の腕時計にも使われる音叉型水晶振動子を使用した場合、大気圧から 0.1 Pa までの測定が可能である。センサ部の素材が化学的に安定であって、サイズも小さい点に特徴がある。

1-2-3 気体中の電離現象に基づく真空計

より低圧力領域では、気体の熱伝導や粘性の圧力に対する変化量も小さくなり圧力測定が難しくなる。そこで、真空中の気体分子を電離してイオン化し、電流値として計測する真空計が電離真空計である。この真空計は、気体分子の密度を測定しており、圧力とは、理想気体の状態方程式により関係づけることができる。イオン化の確率が気体の種類によって異なるため、真空計の感度は気体の種類に依存する。しかし、真空計の中で感度が最も高く、超～高真空領域での唯一の真空計である。電子やイオンを介在とした真空計であるために、被測定系との相互作用が強いので、測定とその結果の解釈には注意が必要である。気体のイオン化に、放電を利用する「冷陰極電離真空計」と加速した熱電子を利用する「熱陰極電離真空計」とがある。

(1) 冷陰極電離真空計

冷陰極電離真空計 (図 2・10) は、2つの電極間に高電圧を印加して放電させ、その放電電流を測定して圧力を知る真空計である。より低圧力まで放電を持続させるために工夫がなされている。磁場を電場と平行に印加するペニング真空計と直交させる (正, 逆) マグネトロン真空計とがある。熱陰極電離真空計と比べると放電電流と圧力の線形性は劣るが、熱フィラメントを使用していないことから、活性な気体中での圧力測定や動作中に誤って大気に曝しても壊れることが無く扱いやすい。しかし、その構造・動作は、スパッタイオンポンプと同等であり、イオン化された気体が陰極に打ち込まれることにより排気作用を持つ。また、電極に汚れが蓄積しやすいことなどに注意が必要である。

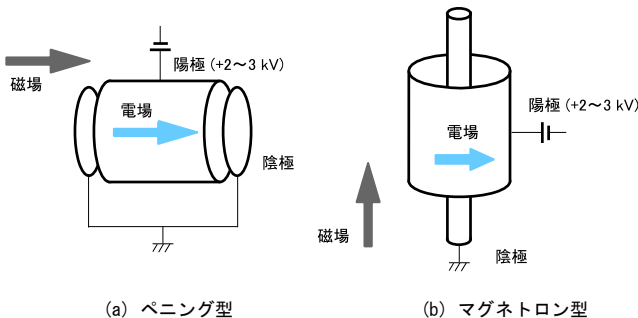


図 2・10 冷陰極電離真空計

(2) 熱陰極電離真空計

熱陰極電離真空計 (図 2・11) は、熱陰極電子源 (カソード, フィラメント) から放出され、集電子電極 (アノード, グリッド) との間で加速された電子が、気体分子をイオン化し、集

オン電極（イオンコレクタ）でイオン電流として測定する真空計である。「三極管型真空計」、「シュルツ型真空計」、「B-A 型真空計」、「エキストラクタ型真空計」、「エネルギーフィルタ型真空計」などがある。

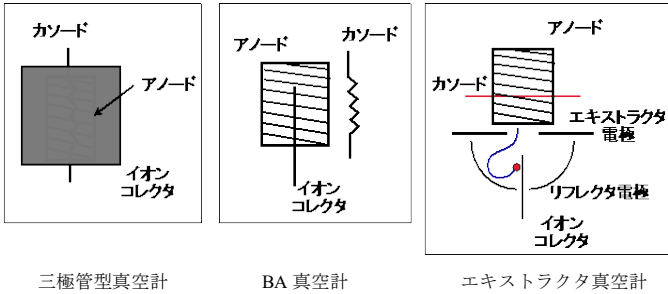


図 2・11 熱陰極電離真空計

(3) 三極管型真空計

三極管型真空計は、中心にカソード、それを囲むように格子状のアノードが、更にもその周りにイオンコレクタが配置されている。圧力 $10^{-1} \sim 10^{-5}$ Pa 程度の高真空領域で使用される真空計である。感度は安定しているが、高圧力側では生成イオンの空間電荷効果により圧力依存性が見られる。また、加速された電子がアノードに入射することで発生する軟 X 線による効果によって、圧力 10^{-5} Pa 以下の測定が不可能であることが知られている。

(4) シュルツ型真空計

シュルツ型真空計は、カソードを挟むように 2 枚の金属電極をアノードとコレクタとして配置された構造を持ち、三極管型真空計より高い圧力領域 ($10 \sim 10^3$ Pa) を測定するために考案された。電極間の距離を短くすることによって、生成されるイオンの数を減らして感度を小さくし、空間電荷効果を起こりにくくしている。

(5) B-A 型真空計

B-A 型真空計は、アノードから放出される軟 X 線の入射を少なくするために、三極管型真空計の電極構造を逆転させ、細い金属線をイオンコレクタとして真空計の中心に、電子源であるカソードをアノードの外側に配置した真空計である。イオンコレクタの面積が小さいため軟 X 線による光電子電流は三極管型の 1/100 以下で、測定下限圧力を $10^{-8} \sim 10^{-9}$ Pa 程度にすることが可能となった。

(6) エキストラクタ型真空計

エキストラクタ型真空計は、アノードとイオンコレクタを空間的に分離した構造を持つ真空計である。これにより、イオンコレクタがアノードを見込む立体角がより小さくなり、軟 X 線効果を更に低減できる。加えて、電離真空計の低圧力側の測定限界を決めているもう一つの要因である ESD（電子励起脱離）イオンも、リフレクタ電極により分離できる。これらの改良により、測定限界を 10^{-10} Pa 程度まで下げることができる。

(7) エネルギーフィルタ型真空計

エネルギーフィルタ型真空計（図 2・12）は、イオン化室と集イオン電極の間にエネルギー分析器が配置された真空計で、「ヘルマー型真空計（90° 静電エネルギー分析器）」、「同軸円筒透

過型真空計 (ベッセルボックス型エネルギーフィルタ) 及び「イオンスペクトロスコープ真空計 (半球形エネルギー分析器または 240° 偏向型平行平板エネルギー分析器)」などが開発されている。

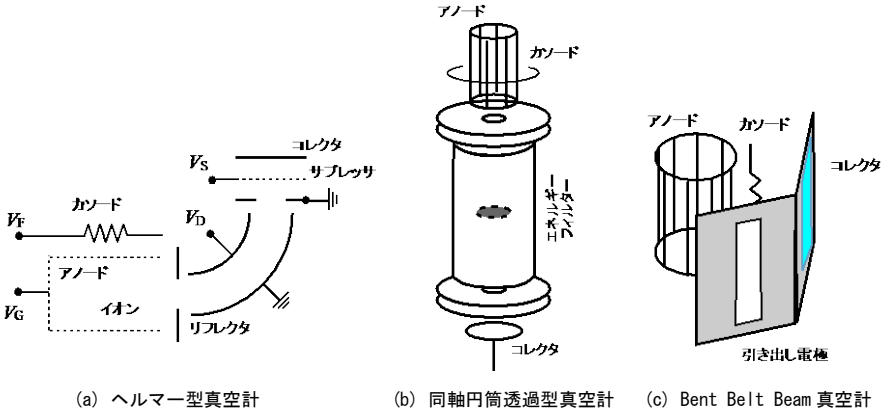


図 2・12 エネルギー分析型真空計

1-2-4 分圧真空計

同じ圧力でも, 含まれる気体の種類によってその性質が異なる場合がある. その真空の「質」を判断するためや真空中での様々な反応プロセスの条件を制御するために, 気体の種類とその分圧を測定する真空計が, 残留ガス分析計あるいは質量分析計と呼ばれる. 原理は電離真空計と同様にイオン化された気体分子をイオンコレクタで電流として測定するものであるが, アノードとイオンコレクタとの間に質量を弁別する機能 (質量分析部) が付加されている. 質量分析部の種類によって「四極子型分圧真空計」と「磁場偏向型分圧真空計」と分類されている.

(1) 四極子型分圧真空計

四極子型分圧真空計 (図 2・13) は, 質量分析計のなかで最も一般的であり, 質量分析部の対向する 4 本の柱状電極に印加した高周波電圧によって特定のイオンを弁別できる. 磁場を使わないため分析装置などで多く利用されている. また, 商品として確立しているため, 真空装置

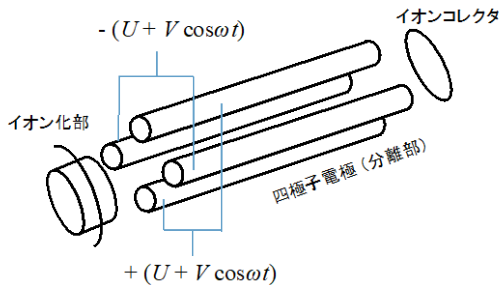


図 2・13 四極子型分圧真空計

に組み込めば手軽に残留ガス分析を行うことができるが、高周波電源の変動に伴う感度の変動が無視できないため、定量性を確保するには気体種ごとの感度校正が必要である。また、イオン検出に、二次電子増倍管を使用しているものでは、その増幅率の変動なども無視できない。

(2) 磁場偏向型分圧真空計

磁場偏向型分圧真空計(図 2・14)は、四極子型分圧真空計に並んで多く利用されている質量分析計である。質量の選別には、磁場偏向型分析器により、分析器に印可する磁場または入射するイオンの加速電圧を変化させることで行う。四極子型の分析器のように高周波を使用していないため信号強度の安定性は得られるが、大きな質量を選別するためには、大きなマグネットが必要なため大型化することになる。ヘリウムの分析に特化したヘリウムリークディテクタには、磁場偏向型分圧真空計が使用されていることが多い。

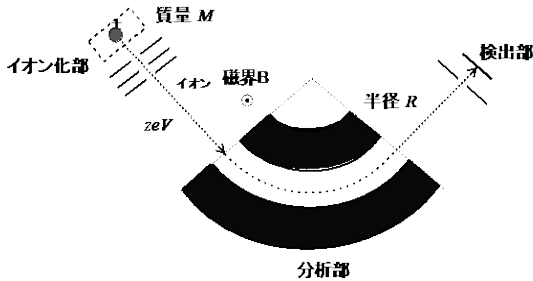


図 2・14 磁場偏向型分圧真空計