排気と真空ポンプ

湯山 純平*1・末次 祐介*2

Evacuation and Vacuum Pumps

Junpei YUYAMA*1 and Yusuke SUETSUGU*2

*1ULVAC Japan, Ltd., 2500 Hagisono, Chigasaki-shi, 253-8543 Kanagawa, Japan

*2High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba-shi, 305-0801 Ibaraki, Japan

(Received February 22, 2013, Accepted April 8, 2013)

Presented here are the fundamental concepts of evacuation process and the key features of various vacuum pumps. Several essential terms, including evacuation time constant, pumping speed and conductance, are introduced to help the understanding of evacuation mechanism and to enable the design of vacuum systems. The vacuum pumps are systematically classified with their operating principles, structures and characteristics. It will help readers to select the proper vacuum pumps and to realize the reasonable vacuum system in different situations.

1. はじめに

真空とは「大気圧よりも低い状態」を表す。すべての真空作業は、当然のことながら「真空」を作り出すことから始まる。「排気」とは、文字通り、ある容器（真空を扱うので真空容器とも呼ばれる）内にある気体を真空ポンプを使って容器から排出し、真空を作り出す過程である。身近な電気掃除機（これも真空ポンプの一種、英語では Vacuum cleaner）を想像すると、「排気」には真空ポンプで容器の中の気体を積極的に吸い出す過程のような印象があるが、実際はそうではない。また、容器内の空間にある気体分子を吐き出していけばいくらかでも低い圧力が得られる、という単純なものでもない。自分が必要とする真空（圧力）を得るためには、排気の過程について十分理解し、場合に応じて適切な真空ポンプを選択する必要がある。ここでは、容器を排気する際に必要な基礎知識と、各種真空ポンプの特性等について解説する。多少数式も出てくるが、現象をより明確に表すために有用であり、また、真空を作る作業には基本となるものばかりなので、意味を理解して頭の隅にでも留めて頂きたい。また、理解の程度を確認するために、ぜひ問題にも挑戦して頂きたい。

2. 排気の式

まずは、「排気」とは実際どういう過程かを考える。今、図1のように、体積 V の容器に気体分子が密度 n で満たされているとする。容器内の気体分子数 N は nV である。この容器に、仮想的に、ある短い時間 Δt 毎に体積 v の空「箱」が取り付けられるとする（ v は V よりも十分小さいとする）。現実では、この「箱」は真空ポンプに相当する。すると、この箱には容器側から気体分子が勝手に飛び込み、 vn の気体分子で満たされる。そして時間 Δt 後、この「箱」を取り去る。そうすれば、容器の気体分子数はその分減る、つまり排気されることになる。これを式で表すと、時間 Δt の間に変化する容器内分子数 ΔN は、容器の体積 V は通常一

図1 排気過程の模式図。

定なので

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = V \frac{\Delta n}{\Delta t} = -\frac{v}{\Delta t} n \quad (1)$$

となる。つまり、容器内の気体分子数の減少は、その時の気体分子数 n と Δt 毎に取り付ける「箱」の体積 v に比例することになる。これが排気過程の基礎となる概念である。いわゆる容積移送式真空ポンプでは正にこのイメージである。特定の表面への吸着を利用する溜め込み式真空ポンプでは、その表面が「箱」の入口と見なすことができる。各種真空ポンプについては9.以降で解説する。ここで、式(1)から、

$$V \frac{\Delta n}{\Delta t} = -Sn, \quad \frac{v}{\Delta t} \equiv S \quad (2)$$

と S を定義する。この S は単位時間に持ち去られる体積を表し、「排気速度」と呼ばれる。排気速度は真空ポンプの性能を表す重要な指標の一つである。SI単位系では $[\text{m}^3 \text{s}^{-1}]$ の単位を持ち、慣例的には $[\text{L s}^{-1}]$ もよく用いられる。大

*1 株式会社アルバック（〒253-8543 神奈川県茅ヶ崎市萩園2500）

*2 高エネルギー加速器研究機構（〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1）

気圧付近で使用される真空ポンプでは $[\text{L min}^{-1}]$ で表示される場合も多い。ちなみに、「排気速度」というものに最初にイメージする単位は $[\text{個 s}^{-1}]$ かもしれない（「個」は分子の個数）。しかし、式(2)のように $[\text{m}^3 \text{s}^{-1}]$ の単位で定義すると、排気速度は分子密度（つまりは圧力）に依らないので、例えば真空ポンプの性能を表すのに都合の良いものとなる。

さて、上で述べた様な排気のモデルでは、密度の変化は滑らかではない（ Δt 毎にガタガタと変化する）。しかし、通常の時間スケールではその変化は時間的に十分滑らかに進むと考えてよい。そこで、密度は時間的な平均を取って滑らかに変化するとして、時間 Δt をどんどん短くし $\Delta t \rightarrow 0$ の極限をとると（数学の常套手段であるが）、式(2)から次の微分方程式が導かれる。

$$V = \frac{dn}{dt} = -Sn \quad (3)$$

この式は、正に容器内の気体分子の排気過程を表すものであるが、実際には分子密度 n を直接測定することは困難なので、測定可能な圧力 p で表現した方が実用上都合よく、実際的である。本講座の「気体分子運動論の基礎」でも出てくる理想気体の状態方程式

$$p = nkT \quad (4)$$

（ k ：ボルツマン定数、 T ：温度）を使って式(3)を書き直すと、温度を一定として

$$V \frac{dp}{dt} = -Sp \quad (5)$$

を得る [問：これを示せ]。この式は「排気の式」と呼ばれ、排気過程を考える上で非常に重要な式である。排気の式(5)を、 $t=0$ で圧力 $p=p_0$ （定数）という初期条件の下に圧力 p について解くと、

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{S}{V}t\right) = p_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad \tau \equiv \frac{V}{S} \quad (6)$$

が得られる [問：これを示せ]。すなわち、圧力は時間ともに指数関数的に減少する。減少の程度を表す $\tau \equiv V/S$ は「排気の時定数」と呼ばれ、圧力が初期圧力の $1/e$ （約 $1/3$ ）になるまでの時間を表す。容易に分かるように、体積 V が小さいほど、また排気速度 S が大きいほど時定数は小さい（排気が速い）。また、容器の体積が分かれば、測定した圧力を対数目盛で、排気時間を線形目盛で圧力変化をグラフ化した時に、その圧力変化の傾きから真空ポンプの排気速度を推定することができる [問題 1]。

この節で述べた事は、非常に理想的な場合である。実際には、圧力は単調に指数関数的に下がることはない。それは、上記の議論では容器壁等に吸着していた気体分子の放出や、容器外部からのリークが含まれていないからである。この点については後でもう一度触れる。

問題 1 図 2 は、体積 0.8 m^3 の容器を真空ポンプで排気始めた直後の圧力変化の様子である。縦軸は対数目盛の圧力、横軸は線形目盛の排気時間である。排気開始約 10 分後のデータからこの真空ポンプの排気速度を推定してみよう。

ヒント：式(6)の両辺の対数をとると、

$$\log p = \log p_0 - \frac{t}{\tau} \log e \quad \therefore \frac{\Delta(\log p)}{\Delta t} = -\frac{\log e}{\tau}$$

3. 流量とコンダクタンス

式(5)の $-d(pV)/dt$ は、単位時間に容器から流れ出す量を表しており、気体の「流量」（あるいは「体積流量」）と呼ばれる。圧力 p と体積 V の積で表されているので、「 pV 値」で表した流量とも言う。式(4)からわかるように pV 値を kT で割れば分子数 N が得られる。今、図 3 のように、二つの容器 1 と 2 が配管で連結されているとして、その間の気体の流れを考えてみる。それぞれの容器内の圧力を p_1 、 p_2 とする。まず、図左側の容器 1 だけに注目すると、容器 1 から流れ出す流量 Q_1 は、容器の排気過程と考えて、式(5)と同じく、

$$Q_1 = -V_1 \frac{dp_1}{dt} = C_1 p_1 \quad (7)$$

と書くことができる。ここで C_1 は定数である。同様に、容器 2 から流れ出す流量 Q_2 は、

図 2 実際の排気曲線の例。

図 3 配管で接続された二つの容器間の気体の流れ。

$$Q_2 = C_2 p_2 \quad (8)$$

となる (C_2 は定数). したがって, 容器 1 から容器 2 に流れる正味の流量 Q は

$$Q = Q_1 - Q_2 = C_1 p_1 - C_2 p_2 \quad (9)$$

となる. もし容器 1 と 2 の圧力が等しい場合 ($p_1 = p_2 = p$), 当然正味の流れは無いので,

$$Q = C_1 p - C_2 p = (C_1 - C_2) p = 0 \quad (10)$$

である. 圧力 p は任意の値をとれるので, 結局 $C_1 = C_2$ となり, 正味の流量 Q は次のように表せる.

$$Q = C(p_1 - p_2) \quad (11)$$

つまり, 正味の流量は繋がれた二つの容器の圧力差に比例する. この比例定数 C は, 配管の「コンダクタンス」と呼ばれる. コンダクタンスとは気体の流れやすさの指標となるもので, 同じ圧力差では C が大きいほど流量が大きくなる. コンダクタンスは, 配管等の太さ, 長さ, 気体の種類, 温度に依存する. また後述するように圧力によって変わる場合もある. コンダクタンスの単位は SI 単位系で $[\text{m}^3 \text{s}^{-1}]$ となり, 排気速度と同じ単位である. また, 式(7), (8)から, コンダクタンスはつながれた二つの容器のどちら側から見ても同じである. つまり, 配管のコンダクタンスは気体の流れの向きに依らないこともわかる.

さて, 1. で述べた排気過程では, 容器に直接排気速度 S のポンプを取り付けた「理想的な」場合を考えた. しかし実際には, 容器と真空ポンプの間にはなんらかの配管やバルブ等が挟まる場合がほとんどである. そこで今度は, 図 3 において, 容器 2 の所に排気速度 S の真空ポンプが繋がれているとしよう. つまり, 容器 1 にコンダクタンス C の配管を通して排気速度 S の真空ポンプが繋がれていることになる. 圧力 p_2 はポンプ入口の圧力とみなせる. この時, 容器 1 から流れ出す流量 Q は配管部分, および真空ポンプ部分に注目して,

$$\begin{aligned} Q &= C(p_1 - p_2) \\ Q &= S p_2 \end{aligned} \quad (12)$$

となる. これら二つの式を組み合わせると Q を p_1 で表すと,

$$Q = \frac{SC}{S+C} p_1 = S_{\text{eff}} p_1, \quad S_{\text{eff}} \equiv \frac{SC}{S+C} \quad (13)$$

と書くことができる [問: これを示せ]. この S_{eff} は, 配管の影響を含めた「実効 (あるいは有効) 排気速度」と呼ばれる. 実際の真空装置で排気システムを考える場合には, この S_{eff} の評価が重要なポイントとなる. いくら使用する真空ポンプの排気速度 S を大きくしても, 配管等のコンダクタンス C が小さければ, 実際の排気速度は結局そのコンダクタンスで制限されることになるからである [問: これを示せ].

問題 2 図 3 の排気システムにおいて, 真空ポンプ (容器 2) の排気速度 S が $0.3 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$, 繋いだ配管のコンダクタンスが $0.05 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ であった場合, 実効排気速度 S_{eff} はどうなるか評価してみよう.

4. 配管の組み合わせ

ここでは, 容器に配管等が複数接続されている場合を考える. 図 4(a) は, 容器に二本の配管が「直列」に接続されている場合である. これは, バルブ等が含まれる場合に相当する. 一方図 4(b) は, 二本の配管が「並列」に接続されている場合である. 排気初期の排気効率を上げるために用いられることがある. これらの組み合わせの場合に, 配管全体としてのコンダクタンス (「合成コンダクタンス」と呼ぶ) はどうなるだろうか.

まず, 図 4(a) の直列接続の場合, 真空ポンプまでの配管全体を流れる流量は同じであるから, 流量に関して下記の式を得る.

$$\begin{aligned} Q &= C_1(p_1 - p') \\ Q &= C_2(p' - p_2) \end{aligned} \quad (14)$$

ここで p' は配管 1 と 2 の間の圧力である. 式(14)から p' を消去すると, 合成コンダクタンス C は

$$\begin{aligned} Q &= \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} (p_1 - p_2) = C(p_1 - p_2) \\ \therefore C &\equiv \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \end{aligned} \quad (15)$$

である [問: これを示せ]. 式(15)の下の式を書き直すと,

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (16)$$

となる. 合成コンダクタンスの逆数は, それぞれのコンダクタンスの逆数の和となる. つまり, コンダクタンス (流れ易

図 4 典型的な二種類の配管.

さ)の逆数は「抵抗」とみなすことができるので、配管が直列に繋がれている場合は、その抵抗の和、と考えることができる。一方のコンダクタンスが小さいと、合成コンダクタンスは小さい方に引きずられて小さくなる。

圧力差、流量とコンダクタンスの関係は、しばしば電気回路に例えられる。すなわち、圧力差を電圧、流量を電流と考えれば、電気回路におけるオームの法則と同様に扱うことができる。電気抵抗はコンダクタンスの逆数なので、式(14)は直列回路のオームの法則と同等のものとなる。つまり、式(16)は直列回路全体の電気抵抗がそれぞれの電気抵抗の単純な和となることに相当する。

一方、図4(b)のように配管が並列に繋がっている場合、それぞれの配管の流量を Q_1 、 Q_2 、全体の流量を Q とすれば、

$$\begin{aligned} Q_1 &= C_1(p_1 - p_2) \\ Q_2 &= C_2(p_1 - p_2) \\ Q &= Q_1 + Q_2 \end{aligned} \quad (17)$$

これらの式から、

$$\begin{aligned} Q &= (C_1 + C_2)(p_1 - p_2) = C(p_1 - p_2) \\ \therefore C &\equiv C_1 + C_2 \end{aligned} \quad (18)$$

すなわち、合成コンダクタンスはそれぞれのコンダクタンスの和、となる。原理的には、配管を増やした分だけ合成コンダクタンスは大きくなる。再び電気回路に例えると、式(18)は、並列回路全体の電気抵抗の逆数がそれぞれの電気抵抗の逆数の和になることに相当する。

ここでは、二本の配管について考察したが、より多くの配管が並列・直列に繋がれている場合でも、配置を分解して同様に考えることができる。

問題3 図4において、配管のコンダクタンスが、 $C_1 = 0.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 、 $C_2 = 0.01 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の時、直接続(a)と並列接続(b)の場合のコンダクタンスを求めてみよう。

5. 気体の流れとコンダクタンス

コンダクタンスについてもう少し詳しく見る前に、配管等の中の気体の流れを、その「希薄さ」に関して分類しておく。

気体の平均自由行程(気体分子が他の気体分子と衝突するまでに移動する距離の平均) λ は、再び「気体分子運動論の基礎」から、

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 p} \quad (19)$$

と表される。ここで σ は気体分子の直径である。ちなみに、 20°C の空気では $\lambda = 6.6 \text{ Pa mm} / p$ である(例えば、 $p = 2 \text{ Pa}$ の時 $\lambda = 3.3 \text{ mm}$ となる)。 λ は圧力に反比例し、圧力が低いほど λ は長くなる。もし、 λ が配管の代表的な寸法(例えば丸管の場合は直径)よりも十分小さい場合、気体分子の衝突は分子同士の衝突が主となり、流れは気体の粘性で支配される(図5(a))。この領域の気体の流れを「粘性流」という。一方、もし、 λ が配管の代表的寸法より十分長い場合、気体は「希薄」となり、気体分子の衝突は配管の壁との衝突が主

図5 (a)粘性流領域と(b)分子流領域での気体の流れの模式図。

となる(図5(b))。この領域の流れを「分子流」という。ちなみに、その間の領域は「中間流」と呼ばれる。

流体力学では、その流体の特性を示すために無次元数がよく用いられるが、この「希薄さ」の指標は、クヌーセン(Knudsen)数 K_n である。すなわち、配管の代表的長さを d として、

$$K_n \equiv \frac{\lambda}{d} = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 p d} \quad (20)$$

で定義される。ここで、 K_n が圧力と配管寸法の積、 $p d$ 、に依存することに注目すべきである。つまり同じ圧力でも、配管の寸法によって流れの領域が異なる。真空工学においては、各流れの領域は K_n 数によって下記のように分類される。

分子流 : $0.3 < K_n$
 中間流 : $0.01 < K_n < 0.3$
 粘性流 : $K_n < 0.01$

例えば、 20°C の空気の場合、 K_n は

$$K_n = \frac{6.6}{p[\text{Pa}]d[\text{mm}]} \quad (21)$$

で与えられる。排気過程は、粘性流から始まり、中間流を経て分子流に至る。配管と容器の大きさに依存するが、通常の真空装置では、およそ 1 Pa 以下であれば分子流を取り扱うことになる。

問題4 20°C の空気、配管が $d = 20 \text{ mm}$ の時、 $K_n = 0.3$ となる(分子流領域と見なせる)圧力 p はどのくらいだろう。

さて、配管のコンダクタンスは、気体の流れ具合を示すものであるから、その流れが上に述べたどの領域にあるか、で当然変わってくる。ここでの導出は割愛するが、半径 a の円断面を持つ長い配管の場合、粘性流と分子流でのコンダクタンスはそれぞれ下記のように与えられる。

$$C = \frac{\pi a^4 \bar{p}}{8 \mu L} \quad (\text{粘性流領域}) \quad (22)$$

$$C = \frac{2\pi a^3 \bar{v}}{3L} \quad (\text{分子流領域}) \quad (23)$$

ここで、 $\bar{p}$ は配管の平均圧力（配管両側の圧力の平均）、 μ は粘性係数、 L は配管の長さ、 $\bar{v}$ は気体分子の平均速度 $\bar{v} = \sqrt{8kT/\pi m}$ （ m は気体分子の質量）である。粘性流領域でのコンダクタンスは、配管内の圧力に依存し、また、配管の半径の4乗に比例する。一方、分子流領域でのコンダクタンスは、圧力に依存せず、また、配管の半径の3乗に比例する。したがって、排気を考える場合、気体の流れがどの領域にあるかを理解することは非常に重要である。先にも述べたように、高真空、超高真空を扱う場合、ほとんどの排気過程は分子流領域にある。しかし、気体を積極的に導入するプロセス装置では、通常状態で粘性流となる場合もある。中間流領域のコンダクタンスは簡単には求められないが、分子流領域と粘性流領域の値を滑らかにつないだものと考えてよい。

6. 理想排気速度

ここでは、希薄な流れにおいて重要な「理想排気速度」について述べる。今、図6のように、容器に面積 A の穴（真空ポンプ入口に相当）が開いているとする。分子流領域では、「気体分子運動論の基礎」から、容器壁への入射頻度 Γ_i （単位時間に単位面積に衝突する気体分子の数）は

$$\Gamma_i = \frac{1}{4} n \bar{v} \quad (24)$$

である。理想の場合、穴から出て行った気体分子がすべて排気される。面積 A の穴から流れ出る流量 Q は、 kT を乗じて pV 値で表すと

$$Q = \frac{1}{4} A \bar{v} p = S_0 p, \quad S_0 \equiv \frac{1}{4} A \bar{v} \quad (25)$$

で表される〔問：これを示せ〕この排気速度 S_0 は「理想排気速度」と呼ばれる。実際の排気速度は理想排気速度より大きくなることは無い。例えば20℃の空気の場合には $S = A \times 117 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ である。面積 1 cm^2 のオリフィスのコンダクタンスは 11.7 L s^{-1} である〔問：これを示せ〕。この数値は実際の排気作業で有用な値であるので記憶しておくくと便利である。

式(25)の排気速度 S_0 は、図3の容器1と2が、厚みの無い穴（オリフィス）で接続されている時のコンダクタンスとみることもできる。穴を通った分子は必ず隣の容器に入るか

図6 分子流領域にあるオリフィスでの気体の流れの模式図。

らである。つまり、

$$Q = C_0(p_1 - p_2), \quad C_0 \equiv \frac{1}{4} A \bar{v} \quad (26)$$

である。容器2からの流量が無い、すなわち、 $p_2 = 0$ とすると、式(23)と同等となる。

詳しくは述べないが、分子流の場合の配管のコンダクタンスは、この配管入口面（オリフィスと見なせる）のコンダクタンスに、この配管を反対側まで通過できる確率（これを「通過確率」と呼ぶ）を掛けたものと考えることができる。つまり、配管を気体が行くという現象は、(1)気体分子が配管の入り口開口部にはいる、(2)配管に入った気体分子が配管を移動する、という二つの過程に分けて考えることができる。この通過確率の考え方は、一般的な配管のコンダクタンスを評価する上で役に立つ。

7. 実際に近い排気システム

排気過程の解説の最後に、実際の排気システムに近い条件で排気を考えてみる。図7のように、容器が、配管2本（コンダクタンス C_1, C_2 ）を介して真空ポンプ（排気速度 S ）に接続され、排気されるとする。まず、容器出口での実効排気速度 S_{eff} は、これまでの議論から、

$$\frac{1}{S_{\text{eff}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{S}, \quad = \frac{C_1 C_2 S}{C_1 C_2 + C_1 S + C_2 S} \quad (27)$$

となる〔問：これを示せ〕。

容器の排気の式は、基本的には式(5)であるが、ここでは、容器内へのガス放出 (Q_0) があるものとする。これは、容器内壁からの熱的なガス放出であったり、容器溶接部からの微小リークであったりする。

まず、 Q_0 は定数と仮定する。そうすると、排気の式は

$$V \frac{dp_1}{dt} = -S_{\text{eff}} p_1 + Q_0 \quad (28)$$

となる。 $t=0$ での圧力を p_0 としてこの微分方程式を解くと、

$$p_1 = \left(p_0 - \frac{Q_0}{S_{\text{eff}}} \right) \exp \left(-\frac{S_{\text{eff}}}{V} t \right) + \frac{Q_0}{S_{\text{eff}}} \quad (29)$$

を得る〔問：これを示せ〕。この式からわかるように、 Q_0 が小さければ（つまり、 $p_1 \gg Q_0/S_{\text{eff}}$ の時）、圧力は当初指数関数的に減少する。しかし、十分長い時間排気して圧力が下が

図7 ガス放出がある場合の排気システム。

ると、ガス放出 Q_0 が支配的となり、一定圧力

$$p_1 = \frac{Q_0}{S_{\text{eff}}} \quad (30)$$

に近づくことになる。式(29)で表される圧力変化の一例を図8に示す。

容器内のガス放出 Q_0 が外部からのリーク等である場合は上の議論でよいが、容器壁からのガス放出であれば、そう単純ではない。詳しい話は本講座の「真空と表面」の解説に委ねるとして、ガス放出率 Q_0 はその時の圧力に依存する、すなわち、排気とともに時間的に変化するからである。ただし、通常その変化の割合は排気の時定数（式(6)）よりも非常にゆっくりしている。

これまでに述べたことから、より低い圧力を得るためには、容器外部から、および容器表面からのガス放出を小さくすること、そして、実効排気速度を大きくすることに尽き

図8 ガス放出を考慮に入れた排気曲線（計算値）。

る。前者を達成するためには、容器の材料、内表面の洗浄方法、加工・溶接方法等を十分吟味して選択する必要がある。また、容器のベーキング等の熱処理も有効である。後者のためには、真空ポンプの特徴を良く理解して的確な真空ポンプを選択しなければならないのはもちろんのこと、配管系のコンダクタンスをいかに大きくするかが問題となる。もちろん、真空ポンプや配管系のガス放出も気体の逆流となり実効的な排気速度を落とす原因となるので、十分な配慮が必要である。

8. 真空ポンプの動作原理と分類

ここからは、真空を作り出す上で主要な役割を果たす真空ポンプについて述べる。なお、我が国においては真空ポンプの分類は JIS (Z-8126-2, 1999) によって表1のように規定されている¹⁾。

真空ポンプに期待される動作は、気体分子を空間から取り除くことであり、真空容器の空間に存在している気体分子を「ポンプによって輸送」して除去する方法と、真空容器内表面に入射している気体分子のうち特定の表面に入射した気体分子を「吸着作用によって空間に戻さないようにする」ことで除去する方法とがある。前者に属する機能を持つポンプを「気体輸送式真空ポンプ」と呼び、後者に属するポンプを「気体ため込み式真空ポンプ」と呼ぶ。

気体輸送式真空ポンプにおいては、気体を圧縮し圧力を高め、より高い圧力領域にまで押し出すことによって（排気したい）真空容器内の気体分子密度を小さくする。押し出した気体分子の最終到着圧力は大気圧である。もし、気体を圧縮して押し出すという気体輸送の働きが停止することがあれば、大気圧の気体分子が排気経路を逆にたどって、最も圧力が低い（気体分子密度が小さい）真空容器まで侵入し、排気側に逆止弁が無い場合にはやがて真空容器内は大気圧になる。

これに対して気体ため込み式真空ポンプにおいては、真空容器内に残留している気体分子が特定の吸着可能面に入射し

表1 真空ポンプの分類（日本規格協会の許可を得て文献1より転載）。

吸着した結果それらは空間に戻ることはない、ということで排気している。したがって、吸着可能面が万一その機能を失い、吸着していた気体分子すべてを放出しても（真空容器内の気体分子の総数は同じままなので）、排気スタート時点の圧力に戻るだけである。

9. 真空ポンプの動作特性と性能指標

真空ポンプには動作できる圧力領域の限界がある。そのため複数台のポンプを組み合わせることがある。真空系を目標の圧力まで排気し、その圧力を保つためのポンプを「主ポンプ」と呼び、主ポンプが動作可能な圧力領域まで大気圧から排気するポンプを「粗引きポンプ」と呼ぶ。また、主ポンプの背圧をそのポンプが正常に機能できる臨界値以下に維持するためのポンプを「補助ポンプ」という。ターボ分子ポンプと油回転ポンプの組み合わせを例にあげれば、ターボ分子ポンプが主ポンプ、油回転ポンプが粗引きポンプかつ補助ポンプである。

各種のポンプに共通する性能指標として、排気速度がある。これは気体輸送式、気体ため込み式のいずれにも共通する性能指標である。気体輸送式真空ポンプに固有な指標として圧縮比があり、気体ため込み式に固有な指標には排気容量がある。

排気速度については、2.で説明した。ポンプ自身の排気速度については、カタログや仕様書に記されている。しかし、実際の真空装置では多くの場合、排気したい真空容器に配管やバルブなどが接続され、その先に市販のポンプが接続される。そこで、3.で説明したように、真空容器の排気口における実効排気速度が重要となる。

気体輸送式真空ポンプに固有な性能指標として圧縮比がある。気体分子移送の基本動作「気体を圧縮して圧力を高め、より高い圧力領域へ押し出す」際の指標である。吸気側圧力 p_{in} と吐出側圧力 p_{out} を用いて

$$K = \frac{p_{out}}{p_{in}} \quad (31)$$

と定義される。この際、 p_{out} を徐々に高めていくとやがてはポンプが気体を押し出し切れなくなり、吐出側から気体輸送式真空ポンプを通してポンプ吸気側に気体が逆流することが起こる。すなわち、 $Q_{in \rightarrow out} = Q_{out \rightarrow in}$ となることが起こる。この状態になったときの p_{out}/p_{in} を最大圧縮比としている。

気体ため込み式真空ポンプに固有な性能指標に排気容量（ため込み容量）がある。ポンプを含めた真空容器内部に気体分子をため込むことが可能になるのは、その空間内に「気体分子を吸着する表面が存在」していることによる。[単位面積当たりの最大吸着量 N_{max} [個 m^{-2}] $\times$ [吸着可能な面積 A_p [m^2]] が最大吸着量、すなわち排気容量を与える。吸着可能な面積 A_p はクライオポンプのような極低温表面の表面積、あるいはゲッタ表面（気体分子が吸着する面）の面積である。最大吸着量は気体分子の吸着特性によって変わる。希ガスのように化学的に不活性な気体分子の場合、最大吸着量は大幅に小さな値となる。一方、多層吸着（クライオポンプ）や表面層内部への拡散を伴う吸着（非蒸発型ゲッタポンプ）

の場合には、最大吸着量は大きな値となる。

10. 真空ポンプ各論

気体輸送式および気体ため込み式真空ポンプの主な形式について、それらの動作原理、特徴、使用上の注意点などを解説する。

10.1 気体輸送式真空ポンプ

10.1.1 容積移送式真空ポンプ

10.1.1.1 油回転ポンプ

油回転ポンプ（oil-sealed rotary vacuum pump）は非常に圧縮比の大きい（ $\sim 10^5$ 以上）圧縮機の一つである。真空ポンプとしての機能は、低圧の気体を大気圧以上の圧力に圧縮し、大気中に放出することで実現する。通常は、真空容器を大気圧から 1 Pa 程度の圧力まで粗引きをする、主ポンプとして動作圧力を保つ、あるいはターボ分子ポンプ等の主ポンプの補助ポンプとして働くなどの目的で使用される。油回転ポンプの形式としては 3 種類ある。回転翼形（ゲート形）、カム形（センコ形）、揺動ピストン形（キニー形）である。

[JIS Z-8126-2]

図 9 に、回転翼形油回転ポンプの概略を示す²⁾。シリンダ内にはロータがあり、ロータに設けられた溝には翼が取り付けられている。翼はばねの力で常にシリンダ内面に押しつけられて回転する。シリンダ内の空間は、この回転翼とロータによって三つに区画される³⁾（図 10(a)）。図中、左上部空間 C ではロータの回転（図では右まわり）につれて容積が減少し、気体を大気圧まで圧縮して外部に押し出す。中央下部の大きな空間 B では気体が移送され、右上部空間 A では容積の増加につれて気体が吸引される。このシリンダ部全体が油中に浸されて、外気の侵入を防いでいる。シリンダ内に入った油は、シリンダ内面とロータ・回転翼との摺動部分での潤滑と気密保持に役立っている。さらに、到達圧力近くの低い圧力での排気に重要な役割を果たしている。すなわち、大気圧まで圧縮された吸気気体の体積が圧縮空間の死容積（機械的に圧縮できない残容積）よりも小さくなると、大気圧以上

図 9 回転翼形油回転ポンプの概略構造（日本機械学会の許可を得て文献 2 より転載）。

に圧縮することができず排出が不可能になる。そこで、油によって死容積を埋め、気体を泡として取り込んでシリンダ外に排出する。

カム形油回転ポンプ（図10(b)）、揺動ピストン形油回転ポンプ（図10(c)）でも、回転翼形と同様にシリンダ内のロータの動きに伴う区画された容積の変化により排気作用が行われる。

10.1.1.2 メカニカルブースタポンプ

油回転ポンプの到達圧力近くでの能力低下を補う目的で、吸気口側に取り付ける機械式ポンプをメカニカルブースタポンプという。図11のように、二葉のまゆ形断面のロータが互いに逆方向へ等速で回転して吸入排気を行うルーツポンプが多く使われている³⁾。ロータ同士、および、ロータとケーシングとの間は微小な間隙（0.1～0.5 mm 程度）を保って回転している。したがって、摺動に伴う潤滑油を必要とせず、高真空側への油分子の逆流による汚染の心配がない。

10.1.1.3 ドライポンプ

最近では、オイルフリーのドライポンプが多く使用されている。ドライポンプとは、特定のポンプの形式ではなく、半導体産業・液晶産業や測定機器などの分野で油蒸気の逆流を嫌って、油回転ポンプに代わって用いられている、油を用いないポンプの総称である。JIS では「油又は液体を運動する部分のすきまを密閉する目的に使用しない容積移送式真空ポンプ」と規定されている。上記のルーツポンプを多段にして、

大気圧から排気を可能にしたポンプの例を図12に示す⁴⁾。ドライポンプの問題点として、CVD やエッチングプロセスなどで使用すると、ポンプ内部に固形の間生成物が出て動作を阻害することがある。これを避けるためにポンプの温度コントロールを行い、長時間安定して排気できるポンプも市販されている。

その他の回転式のドライポンプとして、スクリー真空ポンプ、クロー真空ポンプ、スクロール真空ポンプなどがある。

更に、往復動式のドライポンプとして、ピストン真空ポンプ、ダイヤフラム真空ポンプ、ペローズ真空ポンプなども使用されている。

図12 多段ルーツ型のドライポンプの概略構造の例（株式会社アルバックの許可を得て文献4より転載）。

図10 回転翼形油回転ポンプ(a)、カム形油回転ポンプ(b)、揺動ピストン形油回転ポンプ(c)の排気動作（共立出版株式会社の許可を得て文献3より転載）。

図13 ターボ分子ポンプの概略構造の例（株式会社アルバックの許可を得て文献4より転載）。

図11 ルーツ真空ポンプの排気動作（共立出版株式会社の許可を得て文献3より転載）。

10.1.2 運動量輸送式真空ポンプ

運動量輸送式真空ポンプの代表として、ターボ分子ポンプを取り上げる。図13に市販されている機種種の概略構造の一例を示す⁴⁾。排気速度としては、約 $0.01 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ～ $6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の機種が市販されている。ターボ分子ポンプは、分子流領域で働く機械式ポンプである。

タービン翼を高速回転させ、その運動速度が気体分子の熱運動の速度と同程度になると、タービン翼の傾きに応じて、吸気側から排気側への気体分子の通過確率と排気側から吸気側への通過確率の間に差ができる。その効果により、排気を行うのが動作原理である。

ターボ分子ポンプの長所は、

- 気体ため込み式ポンプとちがい、長時間の連続運転ができる。
- 重い分子ほど圧縮比が大きいので、油潤滑が使用されていても、正常に運転されていれば油蒸気分子の逆流による汚染がない。
- クライオポンプなどに比べて起動時間が短い。

などである。

一方、欠点としては、

- ポンプ停止時には、ポンプを清浄な気体で満たしておく必要がある。さもないと、油分子の拡散による汚染が発生する。
- ポンプの構造上、高温での脱ガスができないので、ポンプ自体が放出ガス源になることがある。
- 水素のような軽い気体分子に対し圧縮比が小さい。

などである。

最近では、油潤滑を使わない磁気軸受のポンプが多く使用されている。

10.2 気体ため込み式真空ポンプ

気体ため込み式真空ポンプには、低温面への気体の物理吸着を利用した、クライオポンプ、ソーブションポンプなどと、化学吸着を利用したゲッターポンプ、スパッタイオンポンプ、サブリメーションポンプなどがある。ここでは、代表として、クライオポンプを紹介する。

クライオポンプでは、低温に冷却した面に、気体分子を凝縮、吸着させて排気を行う。通常の真空装置で使用されるクライオポンプでは、小型ヘリウム冷凍機で冷却が行われる⁵⁾(図14)。

図14 クライオポンプの概略構造の例（アルバック・クライオ株式会社の許可を得て文献5より転載）。

冷凍機の第1段のステージに取付けられるシールド、バッフルは、約80 Kまで冷却される。この部分では、主として水分子が凝縮排気される。約15 Kまで冷却される第2段のステージに取り付けられた凝縮パネルには、窒素、酸素、アルゴンなどが凝縮する。15 Kではまだ蒸気圧が高いヘリウム、水素、ネオンは、吸着パネルに貼り付けられた吸着剤で吸着排気される。

現在のところ、小型冷凍機付クライオポンプは、窒素の排気速度にして、 $0.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ～ $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ にわたる多くの機種が市販されている。圧力によるクライオポンプの排気速度の変化を見ると、 10^{-2} Pa ～ 10^{-8} Pa 程度の圧力領域ではほぼ一定であるが、 10^{-2} Pa 程度以上では、バッフル部分の流れが分子流から粘性流へ変化するにつれ、コンダクタンスが大きくなり排気速度が上昇する。 10^{-1} Pa 程度以上になると、排気する気体による熱負荷が大きくなり、排気速度が低下し、不安定になる。通常は、クライオポンプは 10^{-1} Pa 程度以下で使用する。ただし、スパッタ装置用クライオポンプとして高圧力領域で安定して動作するよう工夫された機種もある。

クライオポンプは、ため込み式のポンプであるから、一定量の気体を排気（すなわち凝縮）した後は、それを追出す再生操作が必要になる。小型冷凍機付クライオポンプでは、水素やヘリウムは吸着剤への吸着で排気されるので排気容量が小さい。しかし、自動的に再生操作を行うよう構成されたシステムとして使うことでこの欠点も克服される。

クライオポンプの特長は、

- 同じ吸気口径の他のポンプに比べると、排気速度が大きい。
- 気体の排気処理量が多い。
- ポンプ内の大部分の表面が低温であるため、ポンプ自身からのガス放出量が小さい。
- 油分子など重い分子は、低温での蒸気圧が十分低くなるので、油分子による真空容器の汚染がない。

などである。クライオポンプを用いることで、清浄な大型超高真空を生成することができる。

11. おわりに

真空ポンプで真空容器を排気するときの圧力変化を表す「排気の式」を解く方法を解説した。それに関連して、気体の流量、コンダクタンス、排気速度などの真空技術の基本的項目も説明した。さらには、真空ポンプの分類について述べ、代表的なポンプの説明も行った。この「解説」での記述は、基礎的・概略的なものなので、更に詳しく知るためには、参考文献に掲げた文献を学ぶ、日本真空学会が主催する真空夏季大学に参加するなどをお勧めする。

〔文 献〕

- 1) 日本規格協会：真空技術—用語—JIS Z8126-2 (1999)。
- 2) 日本機械学会：機械工学便覧 B5 流体機械（丸善，東京，1986）p. 159。
- 3) 小宮宗治：実験物理学講座「真空技術」（共立出版，東京，1985）p. 196, 199。
- 4) ㈱アルバック：カタログおよびプレゼン資料。
- 5) アルバック・クライオ㈱：研修資料。

さらに深く理解するためには下記文献が有用である。

- A) 真空夏季大学テキスト（第32, 33および37回）.
- B) 熊谷寛夫, 富永五郎編著：真空の物理と応用（裳華房，東京，1970）.
- C) 富永五郎, 辻 泰訳：超高真空の物理（岩波書店，東京，1968）.
- D) 八田吉典：気体放電（東北大学基礎電子工学入門講座，近代科学社，東京，1968）.
- E) 林 主税編集：真空技術（共立出版，東京，1985）.
- F) 堀越源一：真空技術（第3版）（東京大学出版会，東京，1994）.
- G) 石川和男訳：真空技術とその物理（丸善，東京，1995）.
- H) 山科俊郎, 広畑優子：真空工学（共立出版，東京，1991）.
- I) 日本真空協会関西支部編：わかりやすい真空技術（日刊工業新聞，東京，1990）.
- J) 日本機械学会編：機械工学便覧 A5（丸善，東京，1987）.
- K) 日本機械学会編：原子・分子の流れ（共立出版，東京，1996）.