

資格試験と例題による解説(3)

資格認定委員会試験委員会 (監修) 委員長 中山勝矢

第1, 2回には、「基礎」として、用語と定義、単位と換算、気体の性質、気体に関係した現象などについて出題例を紹介した。今回は「気体の流れ」を取り上げることにしたい。

2. 気体の流れ

2.1 流れの基本認識

真空システムで気体の発生もなく、排気系もないというような例は、きわめて珍しい。どこかに気体が発生する箇所があり、それを除去するための排気系がついているとしたら、必ず気体の流れが存在する。これが基本認識である。

言い換えれば、低真空であろうと、高真空であろうと、真空システムにとって流れは本質的なものだから、「気体の流れ」に関する出題はあると思って間違いない。

気体の流れは気体分子の平均自由行程の長短により、つまりクヌーセン数の大小により、粘性流と分子流とに分けられる。クヌーセン数は(平均自由行程)/(真空装置の特徴的な長さ・大きさ)で定義され、これが0.3以上なら分子流、0.01以下なら粘性流とされ、両者の間は中間流として扱われる。「クヌーセン数が0.3以上の状態で…」と問題に書いてあったら、これは「分子流領域にあるとして…」という条件設定をしているものと理解する必要がある。このような形で、クヌーセン数を訊ねられる可能性がある。

2.2 粘性流と分子流

粘性流については大気圧以上の気体の流れを扱う場合と同じで、いわば気体力学の領分である。そこでは層流とか乱流が存在し、ときには音速との関係も考えなければならない。

真空技術でも、排気の初期段階、あるいは大気圧またはそれ以上の圧力の気体を導入する段階で、そのような状態が出現することがあり、無関係ではない。しかしこの点に関する出題は多くない。

それに比べ分子流領域における流れの方は、真空技術固有の課題であるだけに、出題される頻度が高くなる。

この領域では壁との関係は深いけれども、気体分子同士の相互作用はないとしてよい。気体Aと気体Bとは、お互いに独立していると考えるのである。例えば水蒸気の排気に有効な液体窒素温度のバップルが設けられていたとしよう。この場合は水蒸気のみ注目し、他の非凝縮性気体のことは一切考えずに、水蒸気の発生量や排気量を扱ってよいのである。

2.3 オリフィスのコンダクタンス

分子流領域における流れは、決して力学的な力(押したり引いたりする力)の差によるのではない。分子の入射頻度の差によるのである。したがって、入射頻度が基本である。単位面積への気体分子の入射頻度 Γ は、気体分子の平均速度を \bar{v} とすると、 $\bar{v}/4$ である。この式は覚えるだけでなく、その成り立ちを理解することが大切である。

これを体積流量に換算し、圧力で割ると、オリフィスのコ

ンダクタンス C_0 と呼ばれるものとなる。その値は、気体のモル質量を M [g/mol]とし温度を T [K]とすれば、

$$C_0 = 36.38 \sqrt{\frac{T}{M}} [\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)] \text{ or } [\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}]$$

なお真空夏季大学では、モル質量 M をSI単位系の[kg/mol]で表しているので、

$$C_0 = 1.15 \sqrt{\frac{T}{M}} [\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)]$$

となる。20°Cの空気に関しては1 m²あたり116 m³/s, 1 cm²あたりなら11.6 l/sとなる。誰しもが覚えている値である。

コンダクタンスに関するさらに詳しい説明は、「2.5真空導管のコンダクタンス」を参照していただきたい。

ここまでなら2級のレベルである。1級となると、さらに応用の力が試される。それを以下の例題により説明する。

例題13 (1級)

壺状のチタン蒸発源が真空容器の中にあり、その開口は直径12 mmの円形オリフィスだと見なせる。この蒸発源の温度が1600 K、蒸発源中の蒸気圧が 1×10^{-3} Paのとき、毎秒オリフィスから飛び出してくる原子数のおおよその値を次の中から選びなさい。ただしチタンの原子量は48とする。

- (a) 1×10^{19}
- (b) 8×10^{16}
- (c) 4×10^{15}
- (d) 1×10^{15}
- (e) 1×10^{14}

まず与えられている蒸発源の温度と分子量(この場合は原子量)とから、蒸発源開口をオリフィスとみなして入射頻度を求め、それに開口の面積を乗じれば個数が得られる。正解は(d)。計算間違いをしないよう、注意が肝要である。

2.4 真空導管のコンダクタンス

真空導管のコンダクタンス、つまり気体の通りやすさ(抵抗の逆数)は、粘性流で層流の場合は管の半径の4乗に比例し、平均圧力に比例する。この点が分子流領域のコンダクタンスと著しく異なる。実際に計算してみると分かるが、分子流領域の場合に比べコンダクタンスは非常に大きい。つまり流れに対する抵抗が極めて小さい。

分子流領域では、コンダクタンスが圧力によって変わることはない。断面形状が一樣な長い管であるのなら、そのコンダクタンス C_l は次のようになる。

$$C_l = \frac{4}{3} \alpha \bar{v} \frac{A^2}{Hl}$$

この式にある α は導管の断面の形状によって決まる補正係数で、ほとんど1に近い数である。断面積 A 、長さ l 、断面の周長 H との関係は記憶に留めておく必要がある。

半径が a [m] なら

$$C_l = 304.8 \frac{a^3}{l} \sqrt{\frac{T}{M}} \text{ [m}^3\text{/s]}$$

なおこの場合も、モル質量を [kg/mol] で表すと係数は異なってくる。ここで T は気体の絶対温度、 M は分子量である。

この場合も、コンダクタンスというものが分子量、温度、断面積、長さといった項目とどのような関係にあるのか熟知しておく必要がある。式の暗記では歯が立たない。

導管が短いときには補正が要る。1 級であれば、この点に関しても訊ねられることがある。

2.5 通過確率

さらに検討を加えてみると、コンダクタンスが温度や分子量に関係するのは入り口の入射頻度によるのであって、導管等を通る確率（通過確率）とは関係ないことが分かる。

真空夏季大学では、毎年コンピュータシミュレーションの映像をみてもらっている。そこで示されるモンテカルロ法によって計算された粒子の挙動には、温度も分子量も関係がない。すべての種類の気体分子が同じ挙動をするから、余弦法則を前提に、繰り返される一個一個の気体分子の経路を追いかけて、確率を算出している。それがすべてであり、それで十分である理由は、考えておく価値がある。

そうすると、次のような問題を作ることができる。

「ある真空部品で、窒素の通過確率が 0.3 であることがわかった。水素ならどのような値になるか」

あるいは

「100 K の窒素について通過確率が 0.3 であることが分かっているバッフルは、400 K のアルゴンではどうなるか」

ここでは、コンダクタンスではなく、通過確率といっているところがミソである。どちらも 0.3 である。

入り口のオリフィスコンダクタンスとこの通過確率を組み合わせたものが、その部品のコンダクタンスなのである。オリフィスコンダクタンスには、分子量と温度が入ってくる。

例題 14 (2 級)

パイプ、バルブ、バッフルなどの真空部品のコンダクタンスについて次の文章で正しい説明はどれか。

- (a) あらゆる温度領域で気体の圧力にかかわらず一定の値となる。
- (b) 分子流領域であれば、部品の形状、構造によらずその値は同じになる。
- (c) 分子流領域では、気体の種類にのみ依存したその部品固有の一定値となる。
- (d) 温度と気体の種類が決まれば、分子流領域ではその値は部品の幾何学的構造に固有なものとなる。
- (e) 圧力が高くて粘性流領域ならば、その値は圧力の二乗に比例して変化する。

この例題は 2 級のものである。これまでに述べてきたコンダクタンスというものが、総合的に十分に理解できているかを確認する形になっている。正解は (d) である。これ以外はどこに誤りがあるのか、探してみたい。

1 級なら、もっと突っ込んだ出題になる可能性がある。

2.6 真空導管の結合

コンダクタンスの直列結合、並列結合の計算だけなら教科書的であり、簡単である。そうではなく、気体の種類（分子量）、温度などどのように結びついているかなども訊ねられる。つまり単なる計算問題ではなく、次のような形で出題されることが多い。

例題 15 (2 級)

直径 3 cm、長さ 25 cm の円形導管をおよそ何本束ねると、直径 10 cm、長さ 50 cm の円形導管とほぼ同じ分子流コンダクタンスとなるか。次のうちから正しい本数を選びなさい。ただし、これらの管の長さは直径に対して十分に長いとして考えなさい。

- (a) 6 本, (b) 11 本, (c) 19 本, (d) 37 本, (e) 50 本

一つ一つコンダクタンスを計算して比べてもいいが、断面積とコンダクタンスとの関係、長さコンダクタンスとの関係を理解していれば容易に正解が求められる。答えは (c)。

ここでは円形導管としてある。もし断面が矩形で、中央に断面積を二分するような仕切り板を入れる場合を考えるとしよう。板を一枚入れただけで、コンダクタンスはどのように変わるだろうか。これなどは実際の装置で出会うことが少なくない事例だろう。しかし改まって聞かれると詰まってしまうのでは、ちょっと情けない。

1 級では通過確率をベースに直列、並列結合について訊ねられることもないとはいえない。そこまでは講習会テキストの範囲内だからである。そのときには管端補正の問題に関連した出題がなされることが考えられる。

真空ポンプを真空導管によって真空容器に取り付けることはしばしば行われるところである。したがって

「ポンプの吸気口における排気速度が導管のコンダクタンスでどのように変わるか計算せよ」といった形をベースにして変形し、複雑化したものは一度ならず出題されてきた。

2.7 圧力分布

気体に流れがあるということは、コンダクタンス、つまり配管抵抗にしたがい圧力差が生じるということである。2 級なら、配管の寸法と流量を与えて圧力差を計算する程度の出題もあり得るが、1 級であると次のようになるだろう。

「導管の一端が閉じられ、片方には真空ポンプが付いているとする。この場合、内壁から一様の気体放出があるとしたら、管内の圧力分布はどのようになるか」「両端と中央部分から等しい排気速度で排気されているとき、管内の圧力分布はどのようになるか。ただし内壁からの気体放出は一様であるとする」として出題された例では、正解を含め、似て非なる五つの圧力分布曲線が選択肢として示された。正答率は 70% だった。径の異なる二つの管が直列に結ばれている場合や、器壁からの気体放出がなくて中央部から気体導入がある場合など、さまざまな形で出題されることが考えられる。

配管と圧力分布は、日ごろ身の回りにいくらかでもある課題である。一点で計った圧力で真空システム全体の圧力だと考えるのではなく、流れに沿って圧力の分布が生じているという認識を、常に持っていたい。(続く)