

資格試験と例題による解説(2)

資格認定委員会試験委員会 (監修) 委員長 中山勝矢

第1回に引き続き「基礎」に関する例題を示し、解説を試みたい。

1. 基礎 (続き)

1.4 気体の平均速度と平均自由行程

すべての気体分子は、同じ速度で飛び回っているのではない。これは真空技術の基本的な知識であると述べた。

その速度分布は、マックスウエルの速度分布関数で与えられるが、これは見るからになじみの悪い式である。

それでも図示するとどのような形の曲線になるのか、左右が対称になるのか、最大速度というものが存在するのか、真空でお馴染みの気体はどの程度の速度で飛んでいるのか、また温度と分子量とはどんな関係になっているのかなど、十分に理解しておく必要がある。次に例題を掲げておく。

例題7 (2級)

ある温度における酸素気体分子の平均速度は600 m/sであった。同じ温度の水素気体分子の平均速度はおおよそいくらか。

- (a) 9,600 m/s, (b) 6,400 m/s, (c) 2,400 m/s,
(d) 1,800 m/s, (e) 1,200 m/s

分子量が1/16で、その平方根の逆数倍となり(c)が正解である。

気体分子の運動に関する速度分布は、温度に依存するが圧力には依存しない。したがって圧力が高いときも低いときも、平衡状態にある限り、成り立っている。平衡状態にある限りと言ったが、局所的に温度の高低や流れがあるときは簡単でなく、取り扱いが複雑になることも記憶に留めておきたい。

例題7に「平均速度」という言葉が出てきた。これは個々の気体分子が持つ速度を、全体にわたって平均したものである。ただ平均のしかたによって、「平均速度」、「最大確率速度」、「二乗平均速度」の3種類がある。この3種類の平均速度について、お互いの大小関係はどうなっているのか、大小関係はそれぞれを表す式の係数だけであって絶対温度 T と分子量 M との関係は同じである等々、詳しく見ておく必要がある。

あとで述べるように、気体の「平均速度」は気体分子の衝突頻度やオリフィス(厚みのない孔)のコンダクタンスを求めるときに関係が出てくるので、出題の可能性が高い。

圧力が高いときは分子同士が衝突を繰り返す。このような状態での流れを「粘性流」と呼ぶ。分子同士の衝突回数は、気体の圧力が低下するとともに減少する。

気体分子同士が衝突するまでに直進できる平均距離を「平均自由行程」と呼ぶ。この値が長くなって真空容器の大きさを超え、器壁との衝突が主要なものとなった状態の流れを「分子流」という。高真空、超高真空ではすべて分子流である。

平均自由行程は、真空の分野では基本的な概念である。これについて十分に理解しているか否かを訊ねた問題の一つが例題8である。

例題8 (2級)

平均自由行程に関する次の記述の中で間違っているものはどれか。

- (a) 温度一定では、平均自由行程は圧力に反比例する。
(b) 平均自由行程は気体分子密度に反比例する。
(c) 平均自由行程は分子の半径に反比例する。
(d) 圧力一定では、平均自由行程は絶対温度に比例する。
(e) 窒素の1 Pa, 0°Cにおける平均自由行程は約6 mm程度である。

間違っているのは(c)、したがって(c)を選べば正解である。このなかで(e)の内容を覚えておくと、取り扱っている真空の状態が分子流領域にあるかどうか、判断しやすい。

この種の問題は、数式を言葉で述べたものに過ぎない。問題は単純であるだけに、テキストに出ている式に実際に数値を入れて計算を試み、慣れておくことが必要であろう。

日常、プログラミングしたソフトで、数値だけ入れて結果を求めることをしているのなら、式の意味が身に付かず、手も足も出ないことになる。

低真空では粘性流となるが、その中間の圧力領域は両者が入り混じった複雑な状況であるため、区別して「中間流」と呼んでいる。それぞれの流れには特徴的な現象が存在するから、それを記憶しておく必要がある。

なお気体の流れに関しては、ときには「層流」、「乱流」とか「ポアズイユ流」、「クヌーセン流」といった呼び方もある。それぞれの物理的な内容を調べておいた方がよい。クヌーセン流であることを見極めるために「クヌーセン数」が使われるが、それに関連したものとして例題9を示しておく。

例題9 (2級)

クヌーセン数に関する正しい記述はつぎのどれか。

- (a) 粘性流, 中間流, 分子流の順に大きくなる。
(b) 粘性流, 中間流, 分子流の順に小さくなる。
(c) 導管の直径を分子の平均自由行程で割った値である。
(d) 分子の平均自由行程を導管の長さで割った値である。
(e) 一定の容器の場合, 気体の圧力が低くなるほど小さくなる。

これは定義を訊ねただけであり、正解は(a)である。

しばしば問題の文章に「分子流領域において…」とか「分子流の状態において…」といった条件が付けられていることがある。これは分子同士の衝突が無視でき、器壁との衝突が主要な状況にあるとされているわけである。

1.5 固体表面との相互作用

真空技術は、固体面とは極めて深い関係にある。第一に重要なことは、入射頻度である。単位面積に対し、単位時間にどのくらいの数の気体分子が降り注ぐかを表す言葉である。

固体表面における汚染の進行状況を見積もる場合にも、オリフィスのコンダクタンスを計算する場合にも、つぎの式

$$\Gamma(\text{入射頻度}) = n(\text{分子密度}) \cdot \bar{v}(\text{平均速度}) / 4$$

が使われるからである。

これらのことは、例題10のような形で出題されることもある。

例題10 (2級)

つぎの真空用語の定義は日本工業規格に基づくものであるが、誤っているのはどれか。

- (a) 分子流とは、「気体分子の平均自由行程が、導管断面の最大寸法よりも十分に大きい場合の導管内の気体の流れ」
- (b) 真空とは、「大気圧以下の気体の状態」
- (c) 脱ガスとは、「人為的な操作による物質からの気体の放出」
- (d) 入射頻度とは、「表面の単位面積あたりに単位時間に入射する分子数」
- (e) パスカルとは、「国際単位系の圧力単位の名称」で $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ である。

間違っているのは(b)で、それ以外は正しい。つまり(b)を選べば正解である。入射頻度についての理解があいまいであると(d)を選びかねない。(c)の説明は別の箇所によずる。

その次に大切なのは、飛び込んだ気体分子が固体表面で跳ね返る様子である。同一平面内で、入射角と反射角が同じという場合は鏡面反射といわれるが、これはきわめて珍しい。

実際は、飛び込んだときの方向や速度に関係なく飛び出すことが知られている。いま法線方向を1とすれば、法線から θ の角度の方向には $\cos \theta$ の確率で飛び出す。しかも前後左右は関係ないから、3次元的な説明図を作れば球形となる。これを余弦則、または cosine 則といっている。

この事実は、分子流領域での真空導管のコンダクタンス、いいかえれば通過確率を考える場合の基本になる。モンテカルロ法によるシミュレーションは、この考えに基づいてプログラムが作られている。もしも余弦則が成立していないとした場合には、コンダクタンスの数値は変わったものになるはずだと考えられる。

固体表面と真空の関係では、吸着と離脱の問題が無視できない。放出気体は排気の所要時間を著しく長くするし、残留気体を増加させ、到達圧力を劣化させる。したがって1級の資格には不可欠の知識の一つだと考えられる。

例題11 (1級)

下記の(1)~(4)は平衡状態における各種の吸着モデルの名称、ア~オは各種吸着モデルを説明した文章である。

モデルの名称と説明とが正しく対応している組み合わせを選びなさい。

- (1) Langmuir モデル
- (2) Henry 則
- (3) Dubinin-Radushkevich (DR) モデル
- (4) Brunauer-Emmett-Teller (BET) モデル

- ア. 均質表面上の多層吸着を考慮している。
 - イ. 吸着サイトが1分子で占有されると、そこには別の分子が吸着しない場合によく用いられる。
 - ウ. 適用する圧力領域において気相の圧力と吸着密度が比例する場合によく用いられる。
 - エ. 吸着密度の増加に対して吸着エネルギーが直線的に減少する場合によく用いられる。
 - オ. 多孔質吸着媒体への凝縮を伴う物理吸着を考慮している。
- (a) (1)―ア, (2)―オ, (3)―エ, (4)―イ
 - (b) (1)―イ, (2)―エ, (3)―ア, (4)―オ
 - (c) (1)―ウ, (2)―イ, (3)―オ, (4)―ア
 - (d) (1)―イ, (2)―ウ, (3)―オ, (4)―エ
 - (e) (1)―イ, (2)―ウ, (3)―オ, (4)―ア

正解は(e)である。なお、このような形式は組み合わせ型と呼ばれる。この例題は、夏季大学のテキストを参考にして作られている。

1.6 輸送現象 (拡散, 熱伝導, 粘性)

気体における拡散, 熱伝導, 粘性という現象は、空間的に物理量の不均一が存在したとき、その勾配に比例して物理量の流れが生じるために起きるものと説明されている。これらはまとめて輸送現象と呼ばれている。

真空計, 断熱, 排気システムなどで広く利用されているので、こういった機器が依って立つ理論を理解しているか否かを確認する目的で問題が作成される。

出題は主として、現象が気体の種類や圧力によっていかに変わるか、またそこにいかなる項目が入っているかを訊ねるものが多い。たとえば気体の熱伝導は、分子流領域では圧力に比例するようになるから、真空計として利用できる。このことを、基本になる式によって十分に理解しておくことが必要である。

例題12 (2級)

真空中の熱伝導について、正しい記述はつぎのうちのどれか。

- (a) 粘性流領域では圧力に依らず一定であり、分子流領域では圧力に比例する。
- (b) 粘性流領域では圧力に依らず一定であり、分子流領域では圧力の2乗に比例する。
- (c) 粘性流領域では圧力に比例し、分子流領域では圧力の2乗に比例する。
- (d) 圧力に依らず一定である。
- (e) 圧力の2乗に比例する。

これは初歩的な知識を教科書どおりに訊ねていて、難しくなれないと思われる。正解は(a)である。

次回は「流れ」を取り上げ、4月号で解説する。(続く)