

真空技術者資格試験への手引き(3)

中山 勝 矢*1

Guidance for the Vacuum Engineer Examination (3)

Katsuya NAKAYAMA*1

*1Chair, The Qualification Committee of Vacuum Engineers

(Received April 25, 2011, Accepted May 10, 2011)

4. 知識問題 (続き)

前回は、用語を中心に、国際標準化機構の規格 ISO と日本工業規格 JIS について述べました。今回は学術用語に関し、理解の程度を確認するために出題された問題を紹介します。

4.4 気体分子の速度

絶対温度で 0 度でない限り、あらゆる気体分子は静止することなく絶えず飛び回っています。真空と呼んでいる空間にある気体も例外ではなく、真空を扱う者にとって最も重要な知識だといえます。

このようなモデルから、気体のさまざまな性質を考究し、説明する学問(物理学)は気体分子運動論と呼ばれ、真空技術を支える科学に位置付けられています。おおよそのことは常識として知っていても、飛び回る気体分子の速度(気体分子速度)は室温でどのくらいのものか、計算で求めることができるのか、気体の種類によらず均一なものか、温度によってどのように変わるのか、といったことまでは知らないかもしれません。これが最初の課題です。

飛び回っているすべての気体分子の速度は、同じ値に揃っているわけではありません。あらゆる速度の分子が存在するのですが、定常状態ではマックスウェルの速度分布則、あるいはマックスウェル・ボルツマンの速度分布関数に従っていると気体分子運動論は教えています。

こういったことに関して、2005年の1級に出題された例を次に示します。

例題11 (1級)

真空容器中の気体分子について説明した次の文章の中で、誤っているものはどれか。

- 非常に大きい速度を持つものが常に存在する。
- 容器の温度が一定であれば、すべての気体分子は同じ速度を持つ。
- 限りなく遅い速度の分子が存在することを否定できない。
- 真空容器の中の気体が室温のヘリウムだとすると、半分以上の分子が毎秒1,000 m 以上の速度を持っている。
- 2種の気体が混在しているとき、それぞれの種類で速

度分布則が成立している。

ここでは、(b)の「すべての気体分子は同じ速度を持つ」という文章が誤りです。したがって、これを選べば正解ということになります。

内容的に言えば(a)~(c)に比べて、(d)と(e)はかなり難しく、相当に突っ込んで勉強していないと出来ないかもしれません。そのため1級に出題されたと思われます。

4.5 平均速度

気体分子の速度は幅広く分布しています。それで取扱いを容易にするため、平均速度という概念が導入されています。これは算術的平均速度、あるいはただ単に平均速度 \bar{v} と呼ばれるもので、他に「確率の最も大きい速度」 v_p と二乗平均速度 v_{rms} とがあります。定常状態では $v_p < \bar{v} < v_{rms}$ の関係にあります。このなかで真空に関連して使うことが多いのは平均速度 \bar{v} であり、出題も少なくありません。

例えば入射頻度 ν (ニュー) の計算において、平均速度 \bar{v} と気体分子密度 n とは

$$\nu = \frac{1}{4} n \bar{v}$$

という形で結び付きます。

そしてさらにその先では、オリフィス(厚さのない板の穴)のコンダクタンス C_0 や蒸発速度を計算する場合に出てきます。分子流領域でのオリフィスのコンダクタンスは、あらゆるコンダクタンスを考える場合の基礎となるもので、疎かにできません。単位面積当たりでは

$$C_0 = \frac{\bar{v}}{4}$$

です。

\bar{v} はこのようにいろいろと繋がりの多い概念ですから、形を変えて出題される可能性が高く、式の形で十分に自分のものにしておくことが肝要です。

次の例題の狙いは、平均速度と温度、分子の質量との関係を掘り下げて把握しているかを確認することにあります。この例のように、いろいろな量の関係を全体として理解しておくことが大切なのです。

例題12 (2級)

熱平衡にある気体分子が持つ平均速度は、その気体の絶対温度と、分子の質量とで表わすことができる。その関係を正

*1 真空技術者資格認定委員会委員長

しく表わしているのは次のどれか。

- (a) 平均速度は絶対温度に比例し、分子の質量に反比例する。
- (b) 平均速度は絶対温度と分子の質量の両者に比例する。
- (c) 平均速度は絶対温度に反比例し、分子の質量に比例する。
- (d) 平均速度は絶対温度と分子の質量のそれぞれの平方根に比例する。
- (e) 平均速度は絶対温度の平方根に比例し、分子の質量の平方根に反比例する。

正解は(e)です。これは2005年の2級に出題されたものを改訂したものです。ちなみに0°Cの水素分子の平均速度が毎秒1,693 mであるのに対し、酸素分子の平均速度は毎秒425 mです。

平均速度については、2009年の2級に「メタン分子（化学式 CH_4 ）の0°Cにおける平均速度は、酸素分子（化学式 O_2 ）の273°Cにおける平均速度の何倍か」という問題が出されたことがあります。分子量が2倍、温度が2倍になっていますから、「1倍」というのが正解です。このときの正答率は48%でした。

4.6 輸送現象

気体には熱伝導性、粘性、拡散といった様々な性質が見られます。これらはまとめて輸送現象と呼ばれています。

大気圧から気体の圧力を下げていくと、粘性流領域から分子流領域に移っていくわけですが、圧力の低下につれて気体の熱伝導や粘性も変化します。このことを利用して熱伝導真空計（ピラニ真空計など）や粘性真空計（スピニング・ローター真空計）が作られ、実用化されてきました。輸送現象はまた、断熱や熱シールドの設計にも大いに関係します。

次の例題は、真空中の熱伝導に関して全般的なことを訊ねたもので、2010年の2級に出題されました。

例題13 (2級)

気体の熱伝導によって運ばれる熱量 Q [$\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$] について、正しい記述は次のうちどれか。

- (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に反比例する。
- (c) 粘性流領域では圧力に比例し、分子流領域では圧力に依らず一定である。
- (d) 粘性流領域、分子流領域とも圧力に比例する。
- (e) 粘性流領域、分子流領域とも圧力に反比例する。

正解は(a)ですが、正答率は61%でした。ここでは数式に

は立ち入っていません。真空技術者の常識の範囲に留まっているということから2級に出題されました。

4.7 熱遷移（サーマル・トランスピレーション）

実際の真空装置の中には気体の発生源があり、消滅する場所（ポンプ作用がある場所）があって流れが生じていることが多いのです。このようなときはマックスウェルの速度分布則に歪ができていていると考えるわけですが、取扱いが複雑で、出題された例はありません。

また装置内に温度差があり、また場所によっては存在する気体の種類が異なることもあります。粘性流の領域では全体が圧力で平衡すると考えてよいのですが、分子流領域では様子が異なります。

いま穴のあいた厚みのない板で区切られた二つの部屋AとBがあり、その温度が同じでないとします。

このような場合は、Aから穴を通してBへ行く分子数、すなわちAから穴への入射頻度と、BからAへ行く分子数、つまりBから穴への入射頻度が等しくなったときに平衡が成り立つのです。つまり分子流領域では入射頻度で平衡するわけです。これを、サーマル・トランスピレーションが平衡に達した状態といいます。

こうしたことがあるのは知っていても、具体的な事例で問われると戸惑うことが多いのです。次の例題は、2009年の1級に出題されました。

例題14 (1級)

ヘリウムガスで置換されたクライオスタット内部の圧力を考える。低温側真空容器Aと室温側真空容器Bが配管で繋がれ、両方の容器は分子流領域の圧力で、定常状態になっており、容器Aが75 K、容器Bが300 Kに保たれているとする。このとき、容器A、Bの圧力に関する次の文章のうち正しいものはどれか。

- (a) A、Bどちらの容器も等しい圧力である。
- (b) 容器Aの圧力は容器Bの圧力の4倍である。
- (c) 容器Aの圧力は容器Bの圧力の2倍である。
- (d) 容器Aの圧力は容器Bの圧力の1/2である。
- (e) 容器Aの圧力は、容器Bの圧力が分かっても推し量ることができない。

正解は(b)です。正答率は51%でした。この問題で述べられているようなことは、真空を扱う場では珍しいことではありません。サーマル・トランスピレーションという現象には関心を持っておく必要があります。

似たような問題が2007年の1級にも出題されています。こうした基礎の知識は、そこに関与する要素とどのような関係にあるのか、常にテキストをひもといて見ておくようにして欲しいものです。 (隔号掲載、次回は8号)

訂 正
Erratum

真空技術者資格試験への手引き(3)
中山 勝 矢

Guidance for the Vacuum Engineer Examination (3)
K. NAKAYAMA
[J. Vac. Soc. Jpn., 54(6) (2011) 401]

例題14の正解に誤りがありましたので、以下のように訂正いたします。

(誤) 正解は(b)です。 → (正) 正解は(d)です。