

1 気体の性質

Point

- ▶ 理想気体としてのガス分子の基本的知識は呼吸生理に必須である。理想気体の法則は圧 (P) と容積 (V), 温度 (絶対温度: T), モル数 (n) 間の関係を数学的に示したものである。圧と容積の積をガス容量と絶対温度の積で割ると定数となる。

$$R = \frac{PV}{nT}$$

その他の法則は、全てここから導きだせる。

- ▶ 水分子は理想気体ではない。臨床では必ず水分子が関わる。水分子が関与した時の状態と理想気体との関連を理解し、変換できるようになっておく必要がある。

概要

- 呼吸は様々な役目を持っているが、何と言っても生命維持のためのガス交換、酸素を取り入れて二酸化炭素を排出するのが最重要である。
- ガス交換の障害が発生した際や、障害発生の予防に呼吸管理が必要となる。したがって、呼吸管理を行うには気体の基本的な化学的・物理学的知識が必要である。難しい内容ではなく、中学で習う程度のレベルの確かな知識であるが、臨床で利用しようとすると意外に厄介である。面白いものではないものの、おろそかにすると正しい知識が身につかない。
- 特に気体の性質については基本を知らないとガス交換の正しい解釈ができない。気体についてはいくつかの基本的な法則がある。

気体の運動

- ガス分子は常にランダムに動き、それぞれが衝突し合うとともに、周囲の物体にも衝突している。
- ガス分子の運動エネルギーは温度に影響される。
- 温度が高いほどガス分子の動きは活発になる。ガス分子の動く速度もあがる。

アボガドロの法則

- 気体や液体、固体といった物質の状態に関わらず、1モルの物質は 6.02×10^{23} 個の分子を含んでいる。

- ガスの場合は 0°C, 760mmHg の条件で容量が約 22.4L となる。ガスの種類によって若干の差はあるが、いずれのガスでも約 22.4L の容積である。

▶ 密度

- 単位容積あたりの物質を表す。一般的には g/L で表示する。
- 酸素の場合には 22.4L で 1 モル 32g なので

$$\text{酸素: } \frac{32}{22.4} = 1.43\text{g/L}$$

その他のガスも同様に

$$\text{窒素: } \frac{28}{22.4} = 1.25\text{g/L}$$

$$\text{二酸化炭素: } \frac{44}{22.4} = 1.96\text{g/L}$$

▶ 圧力

- 圧力は単位面積あたりに加えられる力である。1cm² あたりに加わるグラム数 (g/cm²) または 1 インチ平方あたりに加わるポンド (psi) で表示される。
- より一般的には単位面積あたりに加えられる圧力を液柱の高さであらわす。水銀柱であらわすと mmHg や Torr である。ガス分子が単位面積にぶつかることにより圧が発生し、数が多いほど圧力は高くなる。厳密に言うと同じ数の分子がぶつかってもガス密度が異なるのでガスの種類によって発生する圧力は異なるが、臨床上は誤差範囲と考えてよい。
- 圧力を水銀柱 mmHg であらわした場合、実際には mmHg に水銀の密度 13.534g/cm³ を乗じた値となる。
- 1 気圧 760mmHg とすると 76cmHg であるので
$$76 \times 13.534 = 1,028\text{g/cm}^2$$
私達は cm² 当り約 1kg の重さのガスを頭上に乗せていることになる。

▶ 理想気体

- 理想気体の法則は圧 (P) と容積 (V)、温度 (絶対温度: T)、モル数 (n) 間の関係を数学的に示したものである。圧と容積の積をガス容量と絶対温度の積で割ると定数となる。

$$R = \frac{PV}{nT}$$

- R はボルツマン定数で 82.1mL·atm/mol である。この式には、よく知られているガスに関する法則の全てが含まれている。
- ボイルの法則はモル数 (n) と温度 (T) が一定の条件下で、残る

圧 (P) と容積 (V) 間の関係を示すものである。n と T が一定なので、変数は圧 (P) と容積 (V) になり、2つの積は一定となる。言い方を変えるとモル数と温度が一定であれば、圧と容積は反比例の関係にある。

ボイルの法則: $P_1V_1 = P_2V_2$

- チャールズの法則は圧 (P) とモル数 (n) が一定の状態をあらわす。残る変数は容積 (V) と温度 (T) であり、この2者間の関係をあらわすことになる。容積と温度は比例の関係にある。

チャールズの法則: $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$

- ゲイ・リュースクの法則は容積 (V) とモル数 (n) が一定の際の状態をあらわす。残る変数は圧 (P) と温度 (T) であり、この2者間の関係をあらわすことになる。圧と温度は比例の関係にある。

ゲイ・リュースクの法則: $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$

- 混合気体の法則はモル数 (n) が一定の際の状態をあらわす。残る変数は圧 (P) と容積 (V)、温度 (T) であり、この3者間の関係をあらわすことになる。

混合気体の法則: $\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$

- 呼吸生理で扱うガスは水蒸気を除き理想ガスとしてとらえることができる。水の沸点は体温より高く、体温レベルでは液体と気体の両方の状態となりうる。このために理想気体ではなく、前記のいずれの法則にも合致しない。
- 水分子が気体である量は温度により影響される。水分子が存在する気体を考える時には、水分子による分圧補正が必要である。この水分子の存在は呼吸生理学を学ぶ上でのハードルの一つである。他の気体とは全く異なった反応をするからである。

▶ ダルトンの法則

- 実際の臨床では数種類のガスが混合した状態を対象とする。
- 全体の圧力は個々のガスが分担する圧力 (分圧) の合計に等しい。理想気体であれば、各ガスの分圧は濃度に比例する。
- 水分子が含まれる時には、水分子の濃度 (気体として存在する分子数) は温度に影響されるので理想気体ではなく、ダルトンの法則に従わない。水分子を含む時には、水分子が作り出す分圧に対する補正が必要である。
- Dry の状態では酸素分圧は $760 \times 0.21 = 159.6 \text{ mmHg}$ である。水分子の分圧が 40 mmHg である際には酸素分圧 $(760 - 40) \times 0.21 = 151.2 \text{ mmHg}$ である。

- 呼吸では吸入したガスが速やかに加温加湿され、肺泡レベルでは 37°C で水分子が飽和状態となる。37°C で飽和状態の時、水分子による分圧は 47mmHg である。したがって、酸素分圧は $(760 - 47) \times 0.21 = 149.7\text{mmHg}$ となる。

湿度

- 水分子は理想気体ではない。沸点は気温よりも高いので、大気中（または医療ガス中）にある水分子の量は温度と利用可能な水分量により決まる。
- 温度が高いほど、水分子のエネルギーが大きくなり、より多くの分子が気相に入る。気相の水分子が他のガス分子同様に分圧を担うことになる。温度が上昇し、気相の水分子量が増加すると分圧も上昇するため、他のガスによる分圧は低下する。
- 気体の水分子量をあらわす方法には 2 種類ある。絶対湿度と相対湿度である。絶対湿度は一定容積のガス中に含まれる水分子の重量である。単位は mg/L または g/m^3 である。分圧であらわすこともある。37°C で飽和している時の絶対湿度は 44mg/L であり、分圧では 47mmHg である。

表 1 各温度での相対湿度 100%（飽和状態）時の絶対湿度と水分子の分圧

温度 (°C)	絶対湿度 (mg/L)	圧 (mmHg)
0	4.9	4.6
5	6.8	6.5
10	9.4	9.2
15	12.8	12.8
20	17.3	17.5
21	18.4	18.6
22	19.4	19.8
23	20.6	21.0
24	21.8	22.3
25	23.0	23.7
26	24.4	25.1
27	25.8	26.7
28	27.2	28.3
29	28.8	29.9
30	30.4	31.7
31	32.0	33.6
32	33.8	35.5
33	35.6	37.6
34	37.6	39.8
35	39.6	42.0
36	41.7	44.4
37	43.9	46.9
38	46.2	49.5
39	48.6	52.3
40	51.1	55.1
100	598.0	760.0

- 相対湿度は、その温度での最大水分量（飽和状態）に対する実際の水分量の割合である。37℃で飽和状態の時には気相にある水分量は44mg/Lである。水分量が22mg/Lであると相対湿度は $22/44 = 0.5$ （50%）となる。気温が低下すると飽和状態での水分量が低下するので、同じ絶対湿度でも相対湿度は上昇する。
- 気体の温度がさらに下がり、気相にある水分量が飽和状態より多くなると、飽和状態以上の水分子は液相に移る。結露と呼ばれるものである。

例題

3,000mLの肺活量があった時、測定条件が760mmHg, 20℃, ドライでBTPSではいくらになるか？

BTPS（表2参照）では温度は37℃であるので $37 + 273 = 310^\circ\text{K}$ である。測定条件時は20℃なので 293°K である。つまり、測定時の条件を条件1として、それぞれの圧と温度、容量を P_1, T_1, V_1 とし、BTPSの条件を条件2として圧と温度、容量を P_2, T_2, V_2 とすると

$$\text{混合気体の法則: } \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$$P_1 = 760, T_1 = 293, V_1 = 3,000$$

$$P_2 = 713, T_2 = 310, V_2 = ?$$

全体のモル数が変化しないことが条件であるので（最初の条件がdryなので、水分子以外のガスで考える必要がある）、水分子以外のガスが作り出す分圧は $P_2 = 760 - 47 = 713$ となる。47mmHgは37℃で飽和している際に水分子が作り出す分圧である。

$$\frac{760 \times 3,000}{293} = \frac{713 \times V_2}{310}$$

$$V_2 = \frac{760 \times 3,000 \times 310}{293 \times 713} = 3,383$$

表2 呼吸生理学で用いられる、ガス条件を表す略号とその意味

呼吸生理でガスを扱う際に、学生や研修医を悩ませ、呼吸生理にとっつきにくくしているものの一つが、測定時の条件を表す略号とその意味である。どのような状態での話なのかがわかりにくく、条件が変われば数値も変わる。5つの状態が考えられる。表にどのような状態を示しているのかをまとめる。STPDかBTPSかが問題になることが多い。それぞれの条件と相互変換ができるようになっておくとよい。

	温度 (T)	圧 (P)	水蒸気
STPD	273°K	760mmHg	0
STPS	273°K	760mmHg	飽和
ATPD	大気温	大気圧	0
ATPS	大気温	大気圧	飽和
BTPS	体温	大気圧	飽和

STPD: standard temperature and pressure, dry

STPS: standard temperature and pressure, saturated

ATPD: atmospheric temperature and pressure, dry

ATPS: atmospheric temperature and pressure, saturated

BTPS: body temperature and pressure, saturated