

# 一般化学

## - Chemistry -

### 第10回 気体の性質と振る舞い

東京工業大学 元素戦略研究センター  
高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所  
山浦淳一

1

## 本日の最重要ポイント

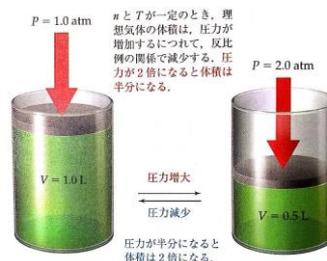
### ■ 大気圧と水銀柱

トリチェリの  
大気圧測定



### ■ 気体の法則

ボイルシャルルの法則  
 $PV = nRT$



2

## 気体と気体の圧力

教科書9.1

最も身近な気体 **空気** を考えてみよう

| 成分              | 体積%                   | 質量%                   |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|
| N <sub>2</sub>  | 78.08                 | 75.52                 |
| O <sub>2</sub>  | 20.95                 | 23.14                 |
| Ar              | 0.93                  | 1.29                  |
| CO <sub>2</sub> | 0.0385                | 0.059                 |
| Ne              | $1.82 \times 10^{-3}$ | $1.27 \times 10^{-3}$ |
| He              | $5.24 \times 10^{-4}$ | $7.24 \times 10^{-5}$ |
| CH <sub>4</sub> | $1.7 \times 10^{-4}$  | $9.4 \times 10^{-5}$  |
| Kr              | $1.14 \times 10^{-4}$ | $3.3 \times 10^{-4}$  |

Q. 何がわかる?

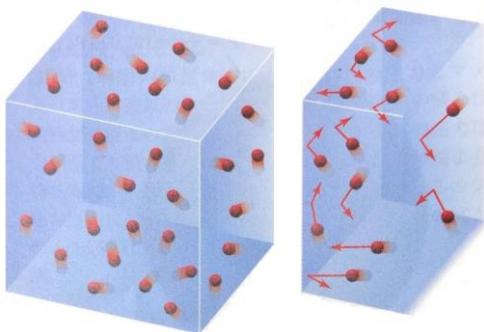
- 様々な元素の混合物
- 窒素と酸素が大部分
- 二酸化炭素は極わずか
- 空間を占める体積  
0.1%以下しかない

Note 3

## 気体と気体の圧力

教科書9.1

気体の特徴



気体  
ほとんど何もない空間を  
**乱雑**に飛び回っている

圧力の源  
とは、気体分子(原子)が  
運動で壁を押し出すこと

- 常に均一
- 圧縮できる(いずれ液体になる)
  - \* 圧力を加えるほどに体積は縮小
  - \* 固体や液体の圧縮には高い圧力が必要

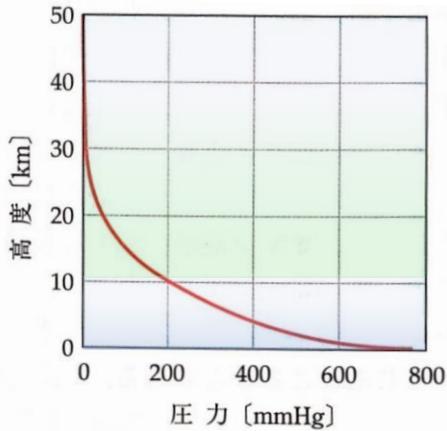
4

## 地球の大気

教科書9.9

地球の大気圏は下から、対流圏(~12 km)、成層圏(~50 km)  
中間圏(~85 km)、熱圏(~120 km)で構成されている

\*飛行機は10 km付近



760 mmHg = 1 atm(気圧)  
→水銀柱を760 mm押し上げる

押し上げられた水銀質量  
 $1 \text{ cm}^2 \times 76 \text{ cm} \times 13.5 \text{ g/cm}^3$   
 $= 1026 \text{ g}$   
 つまり指先に1 kgの力→  
 我々は大気の深海の底にいる

5

## 気体と気体の圧力

教科書9.1

圧力

単位面積あたりに働く力

単位はPa(パスカル, SI単位)  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ kg}/(\text{ms}^2)$

圧力の計算

Q.  $1 \text{ cm}^2$ に10 mgの物体を置いたときの圧力

(地表の重力加速度  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ )

圧力の定義  $P = mg/S$

$$\begin{aligned}
 P &= 10 \text{ mg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 / 1 \text{ cm}^2 \\
 &= 10 \times 10^{-6} \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 / 1 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \\
 &\sim 1 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

6

## 気体と気体の圧力

教科書9.1



エヴァンジェリスタ・トリチェリ  
(1608-1647)  
ガリレオ・ガリレイの弟子

[sciencephoto.com](http://sciencephoto.com)  
[burrisabio.net](http://burrisabio.net)

水銀気圧計

Evangelista Torricelliの発明

10 m以上深い井戸から

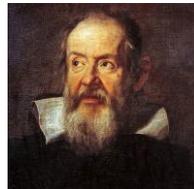
水をくみ上げることは不可

水銀を満たしたガラス管は

水の1/14=76 cm

(水と水銀重量比=1:14)

→大気圧を発見



ガリレオ・ガリレイ  
物理学、天文学  
の巨人

7

## 空気探求史

中世

空気の比重

ガリレオガリレイ

(1564-1642) 科学的精神

水銀柱の実験

トリチェリ (1608-1647)

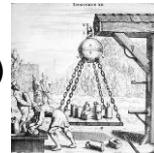
パスカル (1623-1662)

ポンプの発明

ゲーリケ (1602-0686)

気体の法則

ボイル(1627-1691)



フロギストン説

シタール (1660-1734)

固まる空気(CO<sub>2</sub>)

ブラック (1728-1799)

毒のある空気(N<sub>2</sub>)

ラザフォード (1749-1819)

フロギストンのない空気(O<sub>2</sub>)

ブリーストリ (1733-1804)

空気の発見(三宅泰雄)参  
[britannica.com](http://britannica.com)

化学の父

ラボアジエ (1743-1794)

8

## 気体と気体の圧力

教科書9.1

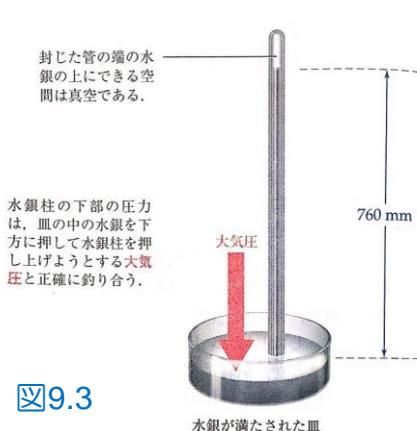


図9.3

### 水銀気圧計

左の実験結果から  
大気圧が求められる  
(水銀の密度  $\rho = 1.36 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$ )

Q. 計算してみよう

$$P = 0.76 \text{ m} \times \rho \text{ kg/m}^3 \times g \text{ m/s}^2$$

Paのほかに

1 atom(気圧) = 760 mmHg  
(torr)が用いられる

Q. 問題9.2を解いてみよう

圧力実験では図9.4のような  
マンノメーターが用いられていた

9

## 気体の法則

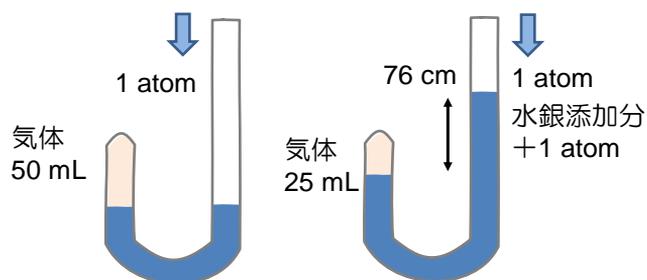
教科書9.2

気体の物理的性質(圧力、温度、体積、物質質量)を表す  
理想気体の法則(次節)には、その元となる法則がある

ボイルの法則 気体の体積と圧力の関係

シャルルの法則 気体の体積と温度の関係

アボガドロの法則 気体の体積と物質質量の関係



### ボイルの実験

水銀76 cm分を  
添加=1+1 atom  
つまり圧力2倍で  
気体の体積1/2

10

## ボイルの法則

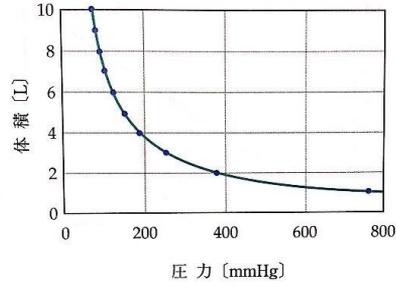
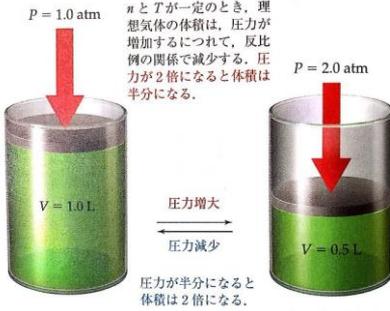
教科書9.2

### ボイルの法則

理想気体の体積は圧力に反比例する \*法則に厳密に従う気体

$$PV = \text{一定}$$

キーワード



E. 実際に実験してみましょう  
圧力 (atom) 体積(mL)

図9.5, 9.6

Note 11

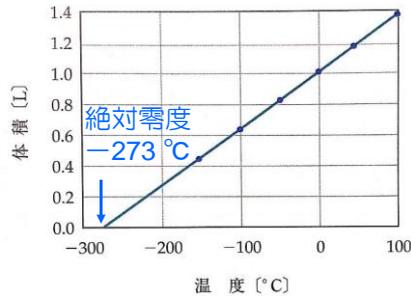
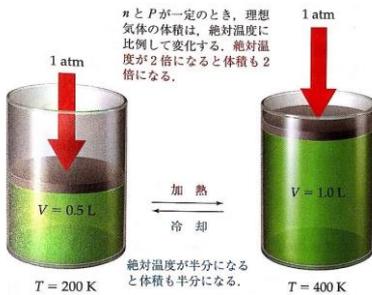
## シャルルの法則

教科書9.2

### シャルルの法則

理想気体(法則に厳密に従う)の体積は絶対温度に比例する

$$V = kT \quad (T: \text{絶対温度})$$



圧力は気体分子(原子)が運動で壁を押し力  
→絶対零度では気体の運動がゼロになるので  $P = 0$

図9.7, 9.8

Note 12

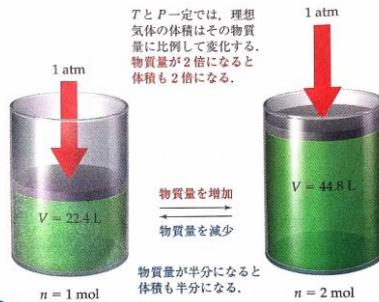
## アボガドロの法則

教科書9.2

### アボガドロの法則

理想気体(法則に厳密に従う)の体積は物質質量に比例する

$$V = kn \quad (n: \text{物理量} = \text{現代のモル数})$$



\*ゲイリュサックの気体反応とドルトンの原子説を説明するための仮説(1811年)  
分子の存在が不明であった時代

図9.9

Q. 問題9.5を解いてみましょう

Note 13

## アボガドロの仮説

教科書9.2

### ゲイリュサックの法則

反応物と生成物の気体体積における比は、簡単な整数の比で表される

例) 体積2の水素と体積1の酸素を反応させると体積2の水蒸気が生成

この実験事実から、アボガドロは、  
等しい体積の気体は等しい数の分子を含む  
圧力、温度、体積が等しい、全ての気体にはある定数の粒子が含まれていることを提案  
(1811年発表だが50年忘れ去られる)

14

## 理想気体の法則

教科書9.3, 9.4

これまでに述べた3つの気体法則を合わせて  
理想気体の法則(状態方程式、ボイルシャルルの法則)に  
まとめることができる

$$PV = nRT \quad (P: \text{atom}, V: \text{L}, n: \text{mol}, T: \text{K})$$

理想気体は0 °C(273.15 K), 1 atom, 1 molで**22.414 L**  
から、気体定数 $R = 1 \text{ atom} \times 22.414 \text{ L} / 1 \text{ mol} \times 273.15 \text{ K}$   
 $= 0.08206 \text{ L} \cdot \text{atom} / \text{K} \cdot \text{atom}$   
 $= \mathbf{8.315 \text{ J/mol} \cdot \text{K}}$

- Q. 例題9.4, 9.5, 問題9.10を解いてみよう  
Q. 例題9.7, 9.8を解いてみよう

Note 15

## 分圧とドルトンの法則

教科書9.5

分圧の法則(ドルトンの法則)  
気体混合物による全圧は各成分からの圧力(分圧)の和となる

$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots = \sum P_i, \quad P_i = n_i RT / V$$

$$P_{\text{total}} = (n_1 + n_2 + n_3 + \dots) RT / V$$

ここでモル分率 $X_i = \text{ある成分のモル数} / \text{全モル数}$ とすると

$$X_i = P_i / P_{\text{total}}$$

空気の全圧1 atomのとき

$$P(\text{N}_2) = 0.7808 \text{ atom}(\text{N}_2) = 593.4 \text{ mmHg}$$

$$P(\text{O}_2) = 0.2095 \text{ atom}(\text{O}_2) = 159.2 \text{ mmHg}$$

$$P(\text{Ar}) = 0.0093 \text{ atom}(\text{Ar}) = 7.1 \text{ mmHg}$$

$$P(\text{CO}_2) = 0.0004 \text{ atom}(\text{CO}_2) = 0.3 \text{ mmHg}$$

$$P(\text{air}) = 1.0000 \text{ atom}(\text{air}) = 760.0 \text{ mmHg}$$

Q. 例題9.9  
を解いてみる

Note 16

## 気体分子運動論

教科書9.6

圧力の源とは、気体分子(原子)が運動で壁を押す力のこと  
→ 気体分子運動論

仮定

1. 気体は無秩序運動する粒子(原子,分子)
2. 粒子の体積は無視できる
3. 粒子間に引力、斥力がない
4. 粒子の衝突(粒子間、壁)は弾性的(全運動E変化なし)
5. 平均運動エネルギーは試料の温度に比例

キーワード

ボイルの法則・・・体積小で衝突頻度大でP上昇  
シャルルの法則・・・T大で衝突頻度大、P一定にはV大が必要  
アボガドロの法則・・・粒子数増で衝突頻度大、P一定にはV大

Note 17

## 気体分子運動論

教科書9.6

気体分子運動論の仮定5より

1 molの気体粒子の運動エネルギーが $3RT/2$ が示される→  
1粒子の平均運動エネルギー $E_k$ は $3RT/2N_A$  ( $N_A$ :アボガドロ数)

$$E_k = \frac{3RT}{2N_A} = \frac{1}{2}mu^2 \quad \text{から} \quad u = \sqrt{\frac{3RT}{mN_A}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

Q. 298 KのHeの平均速度を求めよ

( $R = 8.31 \text{ J/molK}$ ,  $M = 4 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$ )

Heの平均自由行程  
 $2 \times 10^{-7} \text{ m}$

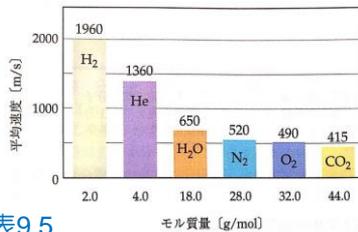


表9.5

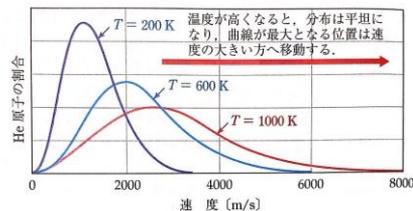


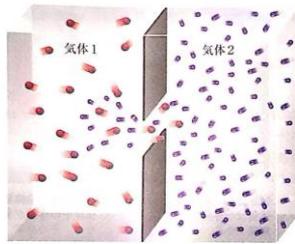
図9.12

18

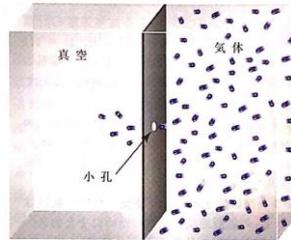
## グラハムの法則

教科書9.7

気体粒子は常に高速で運動しているため  
 気体同士が迅速に混じりあう**拡散**、  
 小孔から真空中へ逃げ出す**噴散**などが起こる



分子同士の衝突で運動が乱雑になること  
 によって気体分子が混じり合う  
 ことを**拡散**という。



気体分子が衝突せずに小孔から真  
 空中に逃げ出すことを**噴散**という。

図9.13

グラハムの法則  
 気体の噴散速度は気体質量 $m$ の平方根に反比例する

19

## 実在気体の振舞い

教科書9.8

理想気体の仮定は実在気体では成立しない  
 問題点

1. 高圧で気体の体積が無視できない  
 500 atm, 0 °Cで全体積の20%
2. 実際は粒子間の引力が無視できない  
 直径の10倍、近距離で急増



低圧では、気体粒子の  
 体積は全体積と比べて  
 無視できる。



高圧では、全体積と比べて  
 気体粒子の体積が無視できな  
 くなる。その結果、実在気体  
 の体積は理想気体の場合より  
 いくぶん大きくなる。

以上を考慮したのが  
 ファンデルワールスの方程式

$$\left(P + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - bn) = nRT$$

↑                      ↑  
 分子間力              分子体積  
 補正                      補正

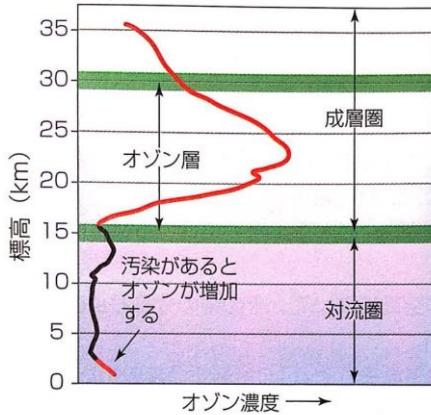
図9.14

20

# 地球の大気

教科書9.9

## 大気汚染とオゾン層



地球の大気  
対流圏/成層圏/中間圏/  
熱圏に分かれている

人間活動に影響され易い  
対流圏  
大気汚染、酸性雨、温暖化等

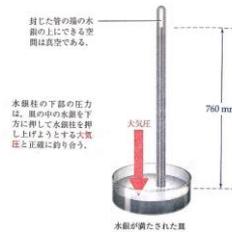
オゾン(O<sub>3</sub>)層  
紫外線から生物を保護  
フロン等のハロゲン系物質  
による破壊

大気汚染、酸性雨、温暖化  
のパートを読んでおく

# 本日の最重要ポイント

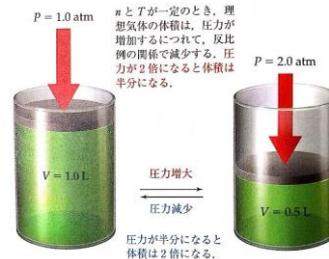
## ■ 大気圧と水銀柱

トリチェリの  
大気圧測定



## ■ 気体の法則

ボイルシャルルの法則  
 $PV = nRT$



## 第10回まとめ

今回は、気体の性質について

- 気体と圧力
- 地球の大気
- 気体の法則
- 理想気体と実在気体
- 分圧
- 気体分子運動
- グラハムの法則

を学んだ

次回は「液体、固体と相変化」です

### 一般化学 第10回小テスト

Q1. 第10回のキーワードを記しなさい

Q2. 体積300 mLの缶に3.3 gのプロパンガス( $C_3H_8$ )が入っている。中の圧力は20 °Cで何気圧か

Q3. 25 °Cの空気中の水蒸気の水蒸気モル分率は0.0287である。全圧が0.977 atmとして空気中の $H_2O$ の分圧を求めよ

Q4. 酸素分子の平均速度が、928 km/hで飛ぶ飛行機と等しくなる温度を求めよ