

# 二酸化炭素の状態変化

## 1. 目的

一般的な物質である二酸化炭素を用いることにより、ある条件下でのその状態を把握して物質の状態変化を観察すること。

## 2. 理論

物質は、圧力、温度などの条件に応じて、気体、液体、固体の三つの状態を示す。

固体状態では、分子間力によって、熱運動が阻害されるため、分子は規則的な配列をする。そのため、密度は大きく、モル体積は小さくなる。

固体状態に対して、周囲の温度が高くなると、熱運動が激しくなり、分子配列の規則性が壊れてくる。その結果、流動性が生じる。これが液体状態である。このとき、一般に固体状態に対して密度は小さくなる。

さらに温度を上げて、熱運動が分子間力に打ち勝つようになると、分子は表面を形成することなく、容器全体に広がろうとする。したがって、モル体積は大きく、密度は小さくなる。これが気体状態である。

## 3. 実験方法

### 実験 1 固体から気体へ状態変化

- (a) はじめに、ドライアイスを入れるポリエチレン袋の質量を秤量した。次に、少量（3 g 以下）のドライアイスをポリエチレンの袋に入れ、ポリエチレンの袋が膨れないうちに素早く袋を折りたたんで秤量した。
- (b) 秤量後、二酸化炭素が漏れないように注意して、ポリエチレンの袋の一端を閉じた。このとき空気が入らないように注意した。
- (c) ドライアイスが完全に昇華して、一定量の水を入れたビーカーにポリエチレンの袋を完全に浸し、水の体積の増加量を測定した。この値を、気体状態にある二酸化炭素の体積とした。

### 実験 2 気体から固体へ状態変化

- (a) 実験 1.(a)のドライアイスの入ったポリエチレン袋を用いた。
- (b) ドライアイスが完全に昇華し、大きく膨らんだポリエチレン袋の重さは、実験 1.(a)で秤量しておいた。
- (c) ポリエチレン袋の上にビーカーを載せ、その中に液体窒素を注いだ。このときのポリ

エチレン袋の形状変化と、ビーカーを置いた部分のポリエチレン袋の内側に白い固体が付着する様子を観察した。さらに、このときのポリエチレン袋の重さを秤量した。

### 実験 3 固体・気体から液体への状態変化

- (a) ビニールチューブの一端をスクリュウコックで閉じた。スクリュウコックを閉じる際には、いずれの場合も中心を外さない位置にビニールチューブをおき、手袋をはめて指でスクリュウコックのねじを閉めた。
- (b) 次に、ビニールチューブの開いている方の端から砕いたドライアイス素早く詰めた。このとき、なるべく密にドライアイスを詰めるようにした。ドライアイスの通過と接触のためにビニールチューブの開いているほうの口は固化するが、固化した箇所を指でつまんで熱を与えると、ビニールチューブはすぐに軟らかくなった。その軟らかくなった一端に、ドライアイスからの隙間をなるべく少なくして、スクリュウコックを挟み、閉じた。この際、前述のようにビニールチューブとコックの中心を合わせるようにした。そうしなければ、気体がもれてしまい液化するまでの圧に達しないことがあるので注意した。
- (c) コックを閉じてしばらくすると、ビニールチューブ内に二酸化炭素の湿り気が生じ、すぐに二酸化炭素の液体が観察できた。この際、ビニールチューブの表面に付着してきたので、水分を取り除くようにした。

### 実験 4 液体から固体への状態変化

温度が少し高くなると、圧力が上昇し、このスクリュウコックだけでは耐えられなくなったので、観察が終わり次第、スクリュウコックのひとつを少しずつ緩めていった。シューという音とともにビニールチューブ以内の二酸化炭素が流れ出し、ビニールチューブ内には白い粉末が残った。この白い粉の生じる現象がドライアイスを作る原理である。これは液体の二酸化炭素を断熱的に膨張させたことになる。

## 4. 実験結果

### 実験 1 固体から気体への状態変化

固体の二酸化炭素、すなわちドライアイスを袋に密閉して、気化させて、気化後の二酸化炭素の入った袋の体積を計測し、さらにその質量を計測すると、表 1 のようになった。

表 1 ドライアイスの質量と気化後の体積

番号	ドライアイス[g]	袋[g]	気体の体積[cm <sup>3</sup> ]	気化後の袋の質量[g]
1	0.3	4.9	200	5.2
2	2.0	4.8	1180	6.6
3	0.4	3.8	210	4.0
4	1.0	3.8	420	4.3
5	2.2	3.8	980	4.9
6	0.7	3.8	390	4.2
7	0.8	3.8	415	4.3
8	0.6	3.8	300	
9	0.9	3.8		
10	0.5	3.8	220	
11	0.3	3.8	100	

ドライアイスと気化後の体積増加の関係は、原点を通り比例すると考えられるので、図 1 のようになった。理想気体として、体積が 1cm<sup>3</sup> のときを考える。このとき、ドライアイスの密度を 1.57g/cm<sup>3</sup>\*1) として状態方程式を用いて計算すると、

$$V = \frac{1.56 / 44.0^{*2)} \text{ mol} \times 0.0821 \text{ atm} \cdot \text{l} / \text{mol} \cdot \text{K} \times 293.3 \text{ K}}{1.0 \text{ atm}} = 854 \text{ ml}$$

ゆえに、体積は固体から液体への変化で何倍になるかというと

$$854 \text{ ml} / 1 \text{ cm}^3 = 854$$

よって、854 倍になると理論上計算ができる。

ここで、図 1 において、二酸化炭素を理想気体として、期待の状態方程式が成り立つとして考えた、原点と点 (1, 854) を通る、つまり傾きが 8 5 4 の直線を破線で引いた。

ここで、ドライアイスの密度  $1.57\text{g/cm}^3$  を用いて、その質量を体積に換算して、測定した気化後の体積と比較した。それらの値から、倍率を求めた。体積の倍率をまとめると、以下の表 2 のようになった。

表 2 体積の倍率

番号	1	2	3	4	5	6	7	8
固体の体積*	0.191	1.27	0.255	0.637	1.40	0.45	0.51	0.38
気体の体積	200	1180	210	420	980	390	415	300
倍率	1047	929	824	659	700	874	814	785

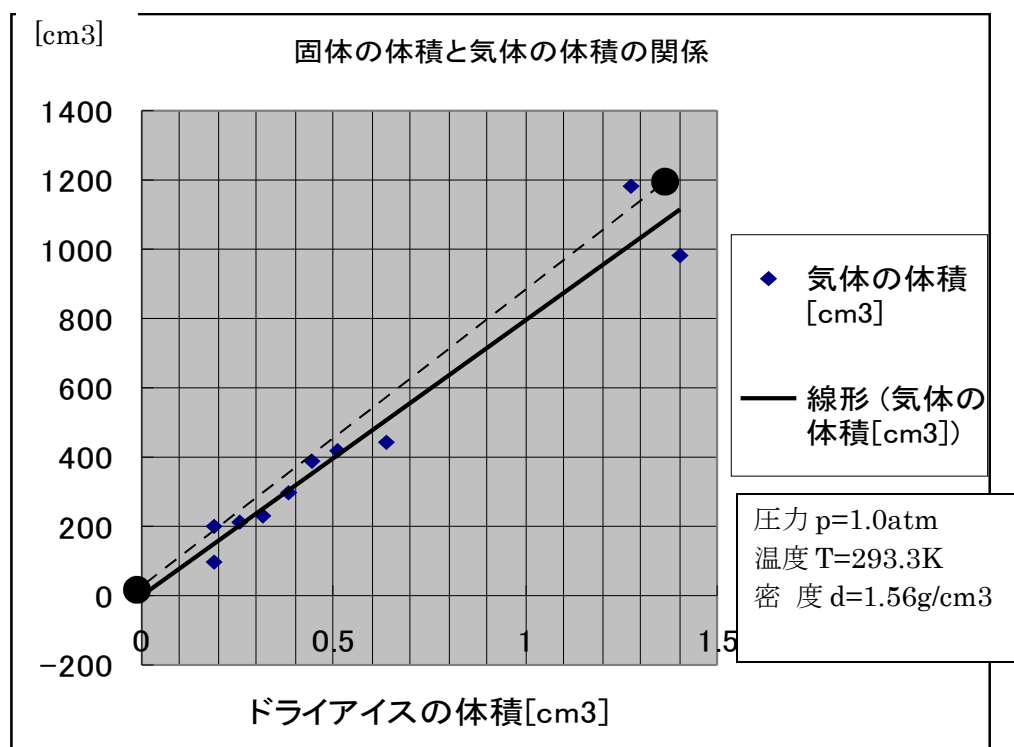


図 1 ドライアイスの質量と気化後の体積増加

## 実験 2 : 気体から固体への状態変化

液体窒素を用いて、実験 1 において気化させた二酸化炭素を再び固体に戻した。固化後の質量を計測した値を表 3 にまとめた。

表 3 固化後の質量

資料番号	2	3	5	6	9
袋の質量[g]	7.6	4.1	5.9	4.5	4.7

### 実験 3：固体、気体から液体への状態変化

ビニールチューブにドライアイスを閉じ込めると、二酸化炭素自身の気化が起きて、体積が増大したため、圧力があがった。そのため、二酸化炭素の液体が観測された。

### 実験 4：液体から固体への状態変化

スクリーコックを緩めて二酸化炭素を膨張し、勢いよく気体の二酸化炭素が飛び出した。その際、ビニールチューブに閉じ込めて液化した二酸化炭素が固化するのが観測された。

## 5. 考察

二酸化炭素の密度は  $1.57\text{g/cm}^3$ <sup>\*1)</sup> なので、気化によって体積が 30 倍になるとすると、 $200\text{cm}^3$  の袋を満たすには、

$$1.57 \times 200 \div 30 = 10.5 \text{ [g]}$$

の二酸化炭素が必要である。また、体積が 2000 倍になるとすると、 $200\text{cm}^3$  の袋を満たすには、

$$1.57 \times 200 \div 2000 = 0.157 \text{ g}$$

の二酸化炭素が必要である。ここで、表 2 よりこの実験における気体の固体に対する体積の倍率の平均をとると、

$$(1047 + 929 + 824 + 659 + 700 + 874 + 814 + 785) \div 8 = 829$$

より、829 倍となる。つまり、二酸化炭素は子固体状態から気体状態になることによって、体積が 829 倍となることがわかった。この値は文献値<sup>\*1)</sup>と 3.6% の誤差で一致した。理論値の 854 倍ともほぼ一致した。

計測値を用いて、気体状態での密度を計算すると、

$$1.57 \div 829 = 0.00785 \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

となった。

実験 1 で、ドライアイス気化させた後の重量が実際よりも軽く計測されたのは、浮力が働いたためだと考えられる。なぜなら、その誤差が体積と比例関係にあることが図 2 よりわかるからである。

実験3では、圧力を上げることによって液体の二酸化炭素を観測できた。ちなみに、二酸化炭素の三重点での圧力は5.11atmなので、大気圧下では、液体が観測できない。

実験4では、断熱膨張が起こった。そのため、温度が下がり凝固した。

## 6. 結論

物質の状態は、特に温度、圧力によって変化した。温度が高く、圧力が低いほど気体になりやすく、逆に温度が低く、圧力が高いほど固体になりやすかった。

### 報告事項(1)

実験1において測定した固体状態の二酸化炭素の重さから二酸化炭素のモル数を求めよ。また、理想気体の状態方程式が成立するものとして、気体状態の二酸化炭素のモル数を求め、固体状態で得られたモル数と比較せよ。

二酸化炭素の分子量を  $44.0^{*2}$  を用いて、質量をモル数に換算した。その値と、理想気体の状態方程式を利用して求めた、気体状態の二酸化炭素のモル数との関係を表4にまとめた。

表4 試料のモル数

試料番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
固体のモル数[mol]	0.0068	0.0045	0.0091	0.0023	0.050	0.016	0.018	0.014	#	0.011	0.0068
気体のモル数*[mol]	0.0083	0.049	0.0087	0.017	0.041	0.016	0.017	0.012		0.0091	0.0042

\*CO<sub>2</sub> の分子量を  $44.0^{*2}$  大気圧  $P=1.0\text{atm}$ , 室温  $T=20.9^{\circ}\text{C}=293.3\text{K}$ , 気体定数  $R=0.0821\text{atm l/mol K}$  を用いて、理想気体の状態方程式  $pV=nRT$  が成り立つとしてとして計算した。

### 報告事項(2)

実験2で得られた(a)(b)(c)の重さを比較せよ。もしこれらの値に差がある場合は、その理由を答えよ。

二酸化炭素の気体状態における質量の計測値と固体状態における計測値には誤差があった。その理由をここで考えた。質量の変化を表5にまとめた。

表5 質量変化

番号	2	3	5	6	9
固体の質量[g]	6.8	4.2	6	4.5	4.7
気体の質量[g]	6.6	4.0	4.9	4.2	
固化後の質量[g]	7.6	4.1	5.9	4.5	4.7

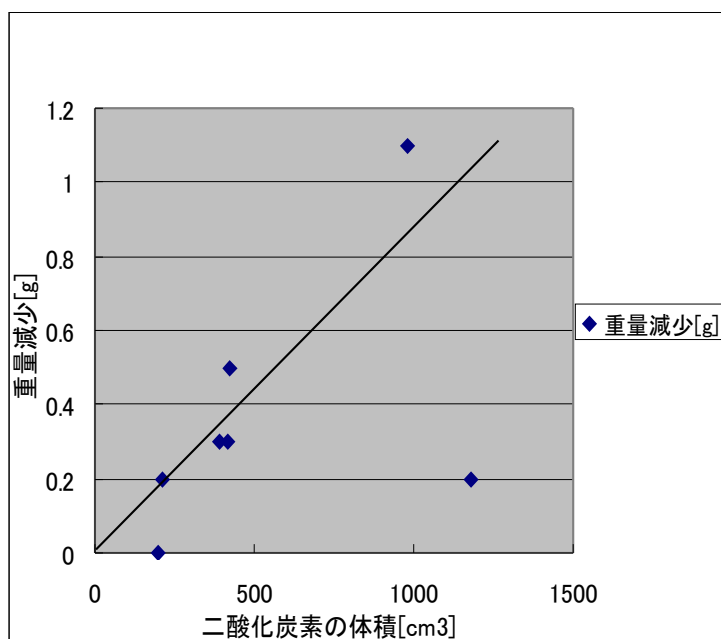


図 2 体積と重量減少の関係

気体の二酸化炭素の体積と固体から気体に変化したときの重量減少との関係を図に示すと、図 2 のようになった。この表に引いた直線は、原点を通り、体積が、1180cm<sup>3</sup>の時を無視して引いた近似直線である。

表 4 から、気体状態で重量を測ると実際よりも小さく計測されてしまうことがわかる。そして、これは図 2 より、二酸化炭素の体積の大きさに依存していると考えられる。これは、体積に比例する浮力  $F = \rho g V$  ( $\rho$ : 空気の密度、 $g$ : 重力加速度、 $V$ : 気体の体積) による誤差であると考えられる。ここで、

$$\rho = w/V = PM/RT = (1.0 \times 28.8) / (0.0821 \times 293.3) = 1.20 [\text{g/l}] = 1.20 \times 10^{-3} [\text{g/cm}^3]$$

(理想気体の状態方程式が成立するとして、窒素のモル分率を 0.8、酸素のモル分率を 0.2 として計算した) であるから、例えば、 $V = 400 [\text{cm}^3]$  とすると、浮力として

$$F = 1.20 \times 10^{-3} \times 980 \times 400 = 470.4 [\text{g} \cdot \text{cm} / \text{s}^2] = 4.70 \times 10^{-3} [\text{N}]$$

が作用するので、浮力によって減少した重量は

$$w = F \div g = (4.70 \times 10^{-3} \times 10^3) \div (9.8) = 0.48 [\text{g}]$$

となる。

これは、図 2 の近似曲線で得られた値と 25 % の誤差で一致した。

#### 参考文献

- 1) 永川元、清水一幸、中村好伸、堀内和夫、山本進一；ダイナミックワイド図説化学、p 47、東京書籍、東京（2003）
- 2) P.W.Atkins 著 千原秀昭・中村亘夫；物理化学（上）第6版、巻末、東京化学同人
- 3) P.W.Atkins 著 千原秀昭・中村亘夫；物理化学（上）第6版、p. 153、東京化学同人