

第 2 章 熱現象

はじめに

熱現象を身近に知るために、様々な温度計とその測定原理を取り上げてみた。また、断熱圧縮、断熱膨張などの熱膨張現象、蒸発熱、対流、輻射熱、融点降下などの現象を身近な実験で体験的に考察した。

§2.1 温度計

われわれは寒暖を感覚として感じるが、その原因は温度である。しかし主観的な感覚では量を扱う自然科学にはなりえない。温度計は客観的に温度を示すものである。

1-A) 色々な温度計

温度を測定する際は、目的によって種々の温度計を使用する。よって、目的にあった温度計の選択および正しい使用法が温度測定の基本となる。なお、より精度の高い温度を必要としたり、古い温度計を使用する場合は、凝固点や沸点のわかっている標準物質や標準温度計を用いて温度の補正を行う。

1 程度の精度で温度を測定する場合は、水銀温度計やアルコール温度計などの液体温度計を用い、0.1 以上の精度を必要とする場合は、熱電対温度計や抵抗温度計を用いる。

< 主な温度計の使用温度範囲と特徴 >

水銀温度計	- 30 ~ 350 の範囲の温度測定が可能。 精度も高いので化学実験などでよく使用されるが、ガラス製でこわれやすい。
アルコール温度計	- 20 ~ 200 の範囲の温度測定が可。 液体温度計の一つであるが、水銀温度計に比べて精度が劣る。アルコールのかわりにトルエンやペンタンを封入したものは - 100 ~ - 200 程度のごく低温の温度測定も可能。
熱電対温度計	- 200 ~ 2000 の範囲の温度測定が可能。 2種の金属または合金を接続したものを熱電対といい、その2つの接点を異なる温度にすると起電力が発生する。この起電力は2種の金属または合金の組合せと温度に依存するため、一方の接点を既知(標準)温度に保ち、他方の接点を未知(測定)温度としたときに生じる起電力を測定して温度を求めるのが熱電対温度計。 < 金属の組合せによる測定温度範囲 > 白金ロジウム合金(+)と白金(-) : 0 ~ 1064 クロメル(+)とアルメル(-) : - 250 ~ 1200 銅(+)とコンスタンタン(-) : - 200 ~ 400 (参考) ・アルメル : ニッケルとアルミニウムの合金 ・クロメル : ニッケルとクロムの合金 ・コンスタンタン : ニッケルと銅の合金 0 の接合端で+の金属から-の金属へ電流が流れる。

サーミスター温度計	半導体の種類によって様々な範囲の温度測定が可能。電気抵抗の温度係数が大きい負の値を持つ半導体を使用した抵抗温度計の一つで、温度に敏感なためわずかな温度差や急激な温度変化の測定も可能である。このような特性を利用して、恒温槽などの温度制御にも使用されている。半導体としては、マンガンやニッケルなどの数種類の金属酸化物を混合焼結したものが用いられている。
白金抵抗温度計	- 260 ~ 630 の範囲の温度測定が可能。白金の電気抵抗が温度に伴って変化することを利用した温度計。安定性がよく、微小温度変化などの精密測定に適するため、標準温度計や精密高温槽の温度制御などにも使用される。
光高温計	700 ~ 2000 の範囲の温度測定が可能。黒体放射の法則を利用して温度を測定する温度計で、溶鉱炉や電気炉などの高温測定に有効。

上に挙げた表のなかで熱電対について実験を示す。

熱電対

用意するもの デジタルボルトメータ、ピーカー2個（いずれも水を入れ、一つに氷を入れる）、銅コンスタantan熱電対

熱電対をデジタルに接続する。（V ボタンに切換える）

イの先端を温める（手で握る）と電圧値が大きくなり、冷やすと小さくなることを確認する。

アを氷水につけ、イを水につけると温度差の違いによって電圧値が変化する。

< 電圧 \propto 温度差 >

以上のような方法によりかなりの精度で水の温度 θ を測定することができる

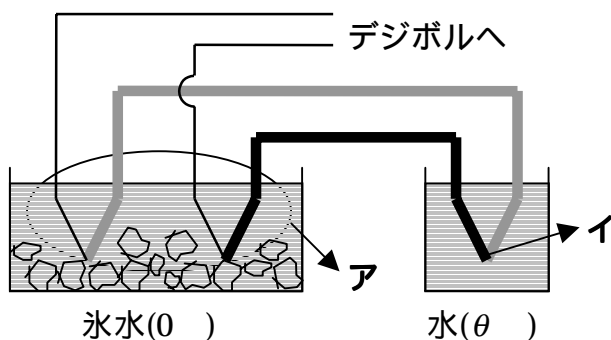


図 2 - 1

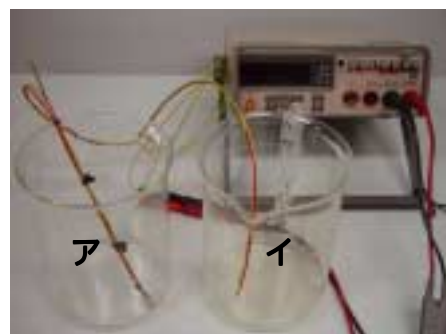
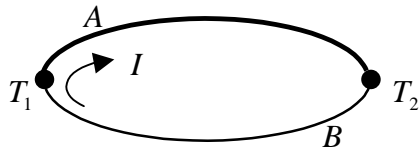


図 2 - 2 銅 - コンスタantan 熱電対

2種の異なる金属を2箇所で接続して閉回路を作り、下図のようにその接合点を異なる温度 T_1, T_2 に保つとその間に電位差が生ずる。ゼーベック効果



2種類の金属 A, B を接続し、その接点を異なる温度 T_1, T_2 に保持すると電流が流れる。

図 2 - 3

これは熱起電力によるもので、この一対の材料を熱電対という。

発生する熱起電力を ΔV 、両接点の温度差を ΔT とすると

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = \eta \quad , \quad \eta = a + b\Delta T \quad \eta : \text{熱電能} \quad (a, b \text{ は定数})$$

となる。

熱起電力の性質

異種金属の一方の中間に第3導体を接続しても、その両端の温度差が同じであれば全体の熱起電力は変わらない。(中間物質の法則)

接点温度が T_2, T_1 と T_1, T_0 の2つの熱電対があるときその起電力の和は接点温度が T_2, T_0 の熱電対の起電力に等しい。

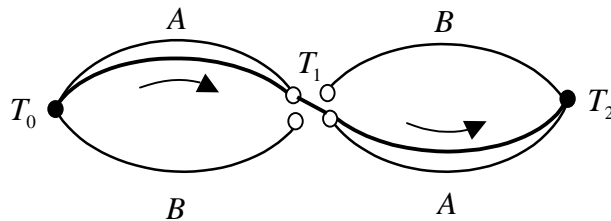


図 2 - 4

端子温度が T_2, T_1 の熱電対(A, B)の起電力と他の熱電対(B, C)の起電力の和は同じ端子温度の熱電対(A, C)の起電力に等しい。

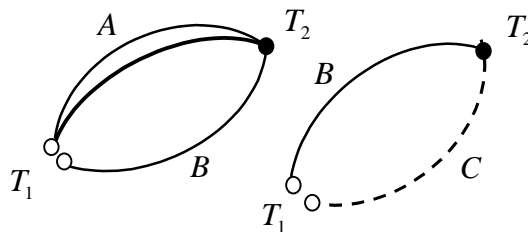


図 2 - 5

§ 2.2 熱膨張

気体の膨張は理想気体に対するボイル・シャルルの法則、あるいは実在気体に対するファン・デルワールス方程式によって記述される。後者に含まれる係数 a, b は気体の分子間力と排除体積によって決まる定数となっている。液体や固体ではその膨張はすべて個々の構成原子または分子に依存する膨張率で表される。

2 - A) 断熱圧縮と断熱膨張

断熱材で覆った容器内での気体の変化や、気体を急に圧縮・膨張させるような変化のように、熱の出入りがないような状態での変化のことを断熱変化という。気体を断熱圧縮($Q=0$ で圧縮)すると、外部から加える仕事为正なので、気体の内部エネルギーが増加し、温度が上がる(図2-6)。

一方、断熱膨張では、気体が外部に仕事をするから、気体の内部エネルギーが減少し、温度が下がる(図2-7)。

$$Q = \Delta U + p\Delta V \quad (\text{熱力学第一法則})$$

上式で $Q=0$ とおくと、 $\Delta U + p\Delta V = 0$ となり、

これに $\Delta U = nC_V\Delta T$ (理想気体の内部エネルギー)

と $pV = nRT$ (理想気体の状態方程式)

を代入すると、最終的に

$$TV^{\gamma-1} = \text{一定} \quad \text{ただし、} \quad \gamma = \frac{C_p}{C_V} > 1$$

で表されるので、気体を断熱圧縮すると温度が上がり、断熱膨張すると温度が下がることがわかる。

応用として、液体窒素等の気体の液化に利用する。

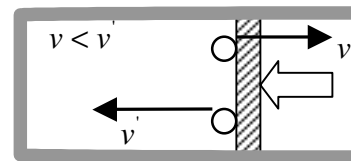


図2-6 ピストンを押して気体を圧縮すると、気体分子が跳ね返るときに速さが増す。
<内部エネルギー増加>

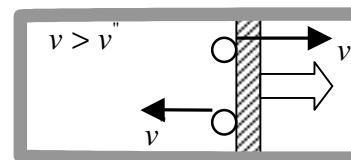


図2-7 ピストンを引いて気体を膨張させると、気体分子が跳ね返るときに速さが減る。
<内部エネルギー減少>

2 - B) 水のみ鳥

鳥のおもちゃ。鳥は身体をゆすり、そのうちにくちばしをコップの水の中に突っ込んで水を飲む動作をする。満足した鳥はまた起き上がり、同じ動作を繰り返す。鳥は何のエネルギーを使って運動しているのだろう。

<水飲み鳥の動作のしくみ>

- ▶ 本体はガラス細工で出来ていて、中にエーテルが入れてあり、空気は抜いて封じてある。鳥の頭の部分は外側をフェルトのようなもので覆われており、水に濡れるようにできている。鳥の中央を支えている台の部分はブリキで出来ている。鳥はこの支えを支点として振動できるようになっている。

はじめに頭の部分を濡らしておき、振動させると、エーテルの液面がだんだん管の中を上がっていく。これは、頭を濡らしている水が蒸発する時に蒸発熱を奪い、これによって温度が下がり、頭の中を満たしていたエーテルの蒸気が凝縮して液体になる。すると、頭部の圧力が減ってエーテルを吸い上げる。(図2-8)

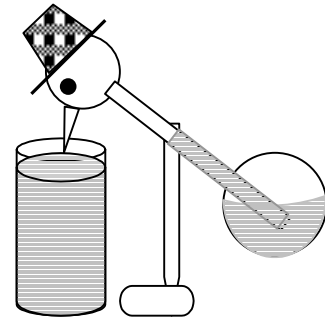


図2-8

エーテルを吸い上げると頭の方が重くなって、頭は次第に下に傾き、遂にはくちばしをコップの水面に突っ込む。同時に鳥のお尻の部分でガラス管がエーテルの液面から顔を出し、上部のエーテル液は管を下がって、お尻の部分に下がる。すると、重心が下がって、鳥は再び起き上がる。(図2-9) 鳥は振動を続け、この動作を繰り返す。

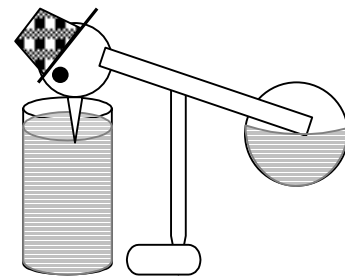


図2-9

水飲み鳥の繰り返し運動は頭の部分からの水の蒸発熱によっておきている。周囲を密閉して気密にすると湿度が高くなり、水の蒸発が止まっていずれ運動は止まる。

2-C) 凝結核と霧の発生

フラスコにアルコールを少量入れ、(タバコの)煙も少し入れておく。

フラスコ内の空気を膨張させる(ピストンを引く)と断熱膨張(温度降下)によって霧が発生し、ピストンを押すと断熱圧縮(温度上昇)によって霧が消える。

(タバコの)煙が凝結核となっている。

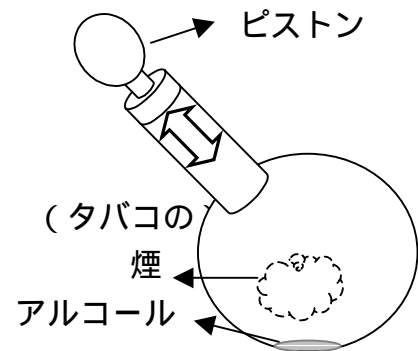


図2-10 霧の発生実験

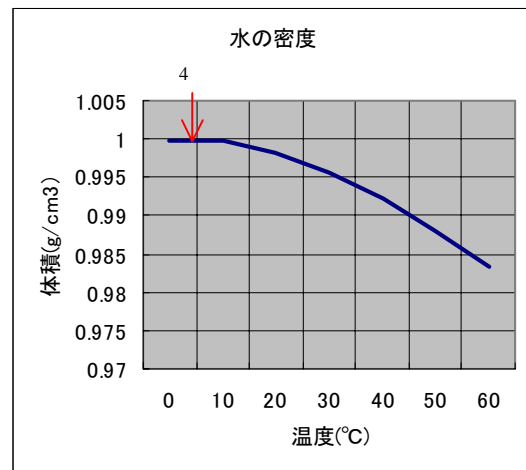
2 - D) 水の密度 <水の温度特性>

水には、他の流体にない温度特性がある。それは、大気圧下において、水は摂氏4度で最大密度になるということである。理由についてはまだ解明されていないが、密度測定の実験によると、密度分布は摂氏4度を境に対称になっているとされている。したがって、数値計算上では、密度が摂氏4度でピークになる2次曲線で近似できる。

<摂氏0度から摂氏8度までの範囲で有効>

$$\rho_0 = 0.999973 \text{ g/cm}^3 \quad \text{at} \quad T_0 = 4$$

グラフ 2 - 1 水の密度 <水の温度特性>



2 - E) 水の対流

流体内部のある区域が絶えず暖められ、その温度が周囲より高くなると、その部分の流体が膨張により密度が小さくなって上昇し、周囲の低温度の流体がその区域に流れこんでゆくという過程が繰り返される現象。

暖められる部分が下部にあるとき、対流によって流体全体の温度が高くなる。

お風呂

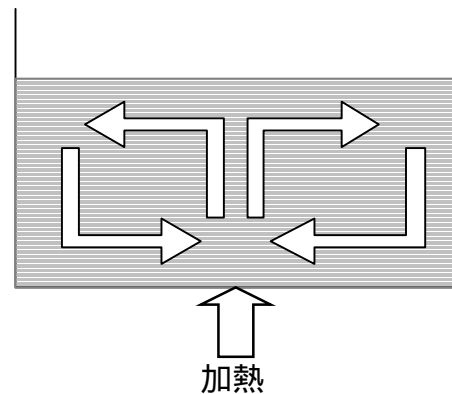


図 2 - 11 水の対流

2 - F) ベナール対流

シリコン油：温度勾配がある臨界値を超えると六角形の細胞状の渦が発生

2 - G) 熱膨張率測定装置 (島津製)

一般に温度変化 Δt による金属棒の長さの変化 Δl は以下のように表される。

$$\Delta l = l_0 \cdot \beta \cdot \Delta t \quad \beta = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta t} \quad (\text{deg}^{-1}) \cdot \dots$$

β : 線熱膨張率

l_0 : 金属棒のはじめの長さ

式のそれぞれの値を測定すれば、線熱膨張率が求められる。

< Δt および Δl の測定方法 >

上下の温度計の値を読み、その平均値を t_1 とし、鏡が M_1 (最初の位置) のときの目盛板の値を S_0 とする。(図 2 - 13)

次に蒸気を送り、上下の温度計の読みがそれぞれ一定になったときの上下の温度計の読みの平均値を t_2 とする。

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad \dots$$

で Δt が求められる。

蒸気の熱により試料棒が膨張し、光学てこの足を押し上げるために、鏡面が M_2 の位置に傾く。このときの目盛板の値を S とする。

$$\tan 2\alpha = \frac{S - S_0}{D}$$

α が小さいときは、 $\tan 2\alpha \approx 2\alpha$

$$\therefore \alpha \approx \frac{S - S_0}{2D} \quad \dots$$

また、光学てこと試料棒との接触点と、鏡の回転軸との距離を r 、回転角を ϕ とすると、試料棒の膨張量 Δl は、

$$\Delta l = r \cdot \sin \phi$$

ここで $\phi = \alpha$ なので上式は以下のようなになる。

$$\begin{aligned} \Delta l &= r \cdot \sin \alpha \\ &= r \cdot \frac{S - S_0}{2D} \quad \dots \end{aligned}$$

式・ 式および l_0 を 式に代入すると線熱膨張率 β が求まる。

$$\beta = r \frac{S - S_0}{l_0 \cdot \Delta t}$$

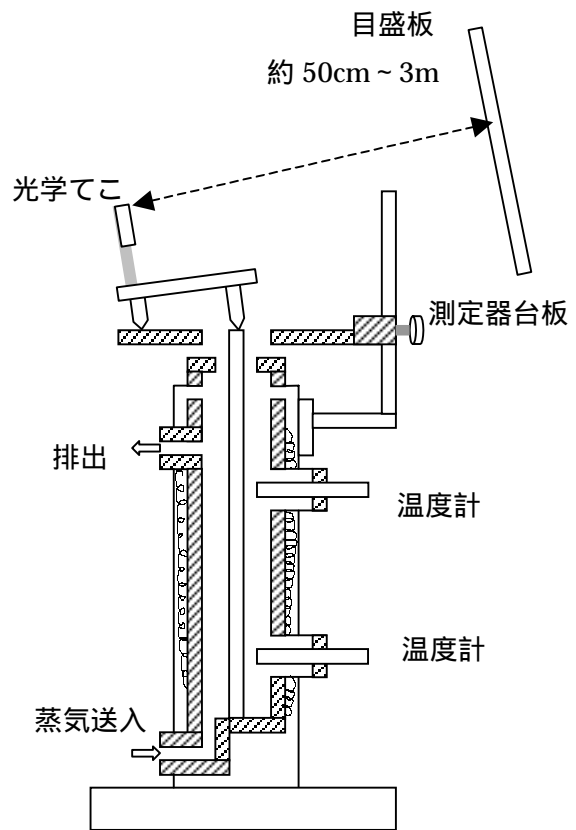


図 2 - 12 熱膨張率測定装置の概要

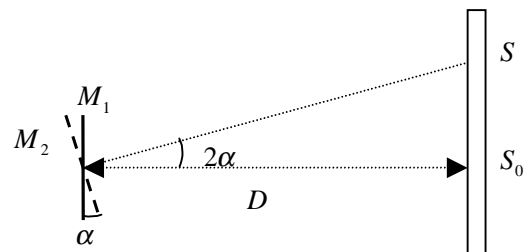


図 2 - 13 鏡と目盛板部分の詳細

参考) 膨張率 $\beta (\times 10^{-5} \text{ 1/ }) (0 \sim 100)$

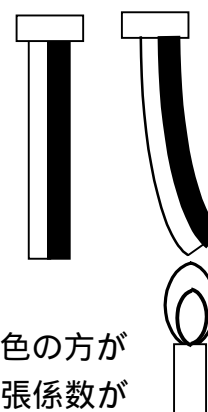
鉄	1.22	ゲルマニウム	0.6
アルミニウム	2.3	シリコン	0.24
真鍮	1.9	クラウンガラス	0.90
銅	1.6	石英ガラス	0.05
タングステン	0.44	木材	0.5~5
インバー	0.12		

インバー：ニッケルと鉄の合金

2 - H) バイメタル < 応用 1 >

熱膨張率の異なる 2 枚の薄い金属を張り合わせたもので、熱すると膨張率の大きい金属の方が余計に伸びるので、目に見えるほど曲がる。

金属としては膨張率の大きい真鍮(67%Cu、33%Zn 合金)と熱膨張の小さいインバー(36%Ni、64%Fe 合金)の組み合わせが用いられる。2 枚の金属を重ねて圧延して一体にする。これをひげぜんまいのように巻き、その中央の端に指示針をつけると、温度の変化によって針が回転し、指針温度計となる。



白色の方が膨張係数が大きい。

図 2 - 14 バイメタル

2 - I) 蛍光灯のスタータ (点灯管) < 応用 2 >

点灯管に電流が流れるとバイメタル(青色)の部分が熱によって伸び、反対側の極板に近づく。反対側の極板との距離が非常に近づいてスイッチが入り、蛍光灯の電極を数秒間予熱して、蛍光灯を点灯させる。

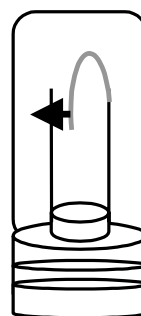


図 2 - 15 点灯管

2 - J) ラパート滴 (オランダの涙)

ガラス棒をバーナーで溶解し、熱いうちに水に滴下すると急速に固まる。割れてしまうものもあるが、割れずに残ったしずく状のものをラパート滴 (オランダの涙) という(図 2 - 16)。表面は急速に冷えて固まり、内部はゆっくり冷えるため、ガラスにはひずみが生じる。ラパート滴(オランダの涙)を偏光板の間に置いて観察するとひずみに応じたいろいろな干渉縞が見える(図 2 - 17)。またラパート滴(オランダの涙)の細い部分を折るとひずみが入っているためガラス全体が壊れて粉々になる(図 2 - 18)。



図 2 - 16 ラパート滴 (オランダの涙)



図 2 - 17 ラパート滴の干渉縞



図 2 - 18 粉々になったラパート滴 (オランダの涙)。
細い部分を折っただけで全体が粉々になる。

§ 2 . 3 相変化

水は水蒸気→水→氷 と変化するのは気体→液体→固体と相変化する典型的な例である。液体の中での相変化の一つは過冷却として知られる。固体の中でも相変化が起こる。

3 - A) 酢酸の過冷却

試験管に酢酸を入れ、氷水で冷却する。酢酸は冷却されて過冷却状態 (無色透明) になる。ガラス棒で試験管の内壁をこすると、過冷却状態が壊され、一瞬のうちに酢酸が固体 (白色) に変化する様子が確認できる。

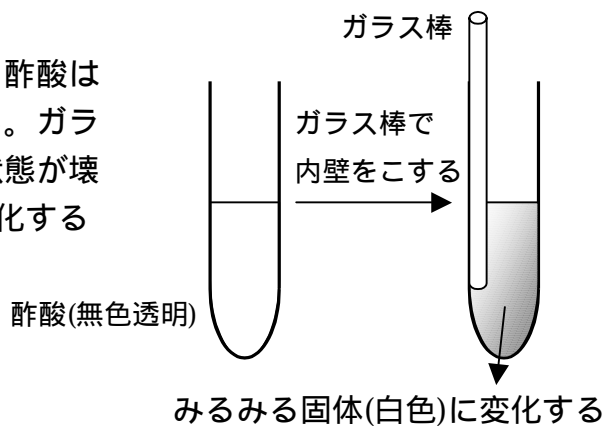


図 2 - 19 酢酸の過冷却

§ 2.4 輻射能と吸収能

物体表面の単位面積から 1 秒間に放出される熱輻射エネルギーを輻射能 E といい、入射してきた輻射のうち、表面で反射も散乱もされず、また、屈折・透過もしないで吸収されてしまう部分の割合を吸収率 a という。 E と a との間には Kirchhoff の法則

$$\frac{E(\lambda, T)}{a(\lambda, T)} = \text{const} = E_b(\lambda, T)$$

が成立する。つまり、 E と a との比は、温度 T 、波長 λ が与えられれば、どんな物体に対しても一定である。定数 E_b は黒体の輻射能である。なぜなら、完全に黒い物体は、その表面にある輻射を 100% 吸収する、つまり、吸収率 $a=1$ だからである。

Kirchhoff の法則は、物体の表面における熱輻射と熱吸収との間の一般的関係を表しているのであって、吸収率が大きければ輻射能も大きい、逆に、吸収率が小さいほど輻射能も小さいことを示している。

§ 2.5 希薄溶液の性質

5 - A) 寒剤

融点降下(溶媒を加えることによって融点が降下する現象)を利用した、低温を得る材料を寒剤という。例えば、氷と食塩を混ぜると、氷は強制的に融解させられ、融解熱をみずから提供することで温度が下がる。食塩は、その融けた水に溶解して熱を奪う(負の溶解熱)ので、ますます温度は下がり、共融点(溶解度が飽和に達して、溶媒と同時に溶質も結晶として析出するときの温度)に達して平衡を保つようになる。

< 寒剤の例 >

塩 類 (wt.%)	氷	温 度
NH ₄ Cl 20	80	- 15.4
NaCl 24.8	75.2	- 21.3
CaCl ₂ · 6H ₂ O 58.8	41.2	- 54.9
NaCl 21.8 } NaNO ₃ 20.5 }	57.7	- 25.5
NaCl 19.7 } NH ₄ Cl 17.6 }	62.7	- 25

氷を用いない寒剤として、ドライアイスとエチルアルコール(- 72)、ドライアイスとエチルエーテル(- 80)の組合せ等もある。

§2.6 極低温の奇妙な世界（ビデオ）

< ビデオの内容紹介 >

1) ゴム製のボール

ゴム製のボールを落とすと、通常跳ね返る。このゴム製のボールを -200 の中にいれてから先程と同じ高さから落とすと、粉々に碎ける。これは、プラスチックやゴムは -100 以下の低温にされると、中の高分子の物理的性質が変化してばらばらに碎けやすくなるためである。

この性質を利用してプラスチックや古タイヤの処理に応用できないかという研究も進められている。

2) 液体窒素による電気抵抗の変化

液体窒素(約 -200)で導線を冷やすと、常温の10倍もの電気を通すことができる。

< 実験例 >

右図のような回路のスイッチを入れると、大きなコイルによる抵抗のために、電球はぼんやりとしか点灯しない。

コイルを液体窒素の中に入れると、コイルが冷えるにつれて電球がどんどん明るくなる。これは、温度が下がることで導線(コイル)の電気抵抗が小さくなって、大きな電流が流れるためである。

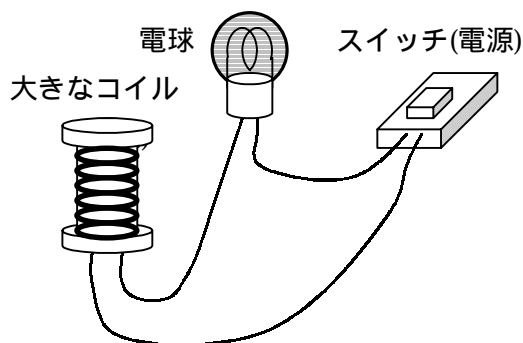


図 2 - 20

3) 液体窒素よりもっと低い温度

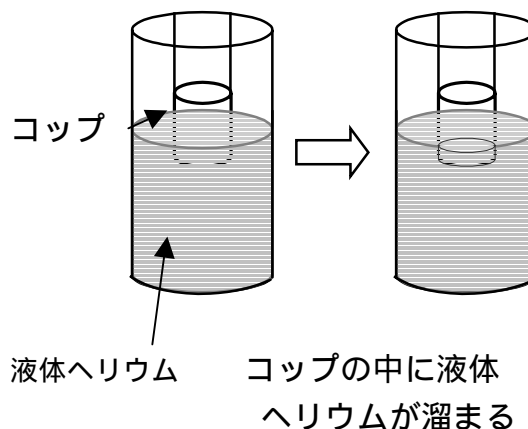
19世紀まで、全ての物質は特別な圧力を加えなくても -273 (絶対零度)で固体になるといわれていた。

しかし、その後の研究でヘリウムは例外であることが発見された。

-271 の液体ヘリウムが示す現象を**超流動現象**という。

< 実験例 >

液体ヘリウムの中に空のコップを右図のように吊り下げるとコップの中に少しずつ液体ヘリウムが溜まる。これは、液体ヘリウムが10万分の1という薄い膜を張って、コップの壁をはい上がるためである。この現象はコップの中と外の水平面が同じになるまで続く。このときの液体ヘリウムの温度は -271 である。



底に穴の開いたガラス管を液体ヘリウムの中につけ、ガラス管に光を当てると、ガラス管から液体ヘリウムが勢いよく飛び出し、水車を回す。これは、極低温に冷やされた液体ヘリウムだけが示す特別な現象である。

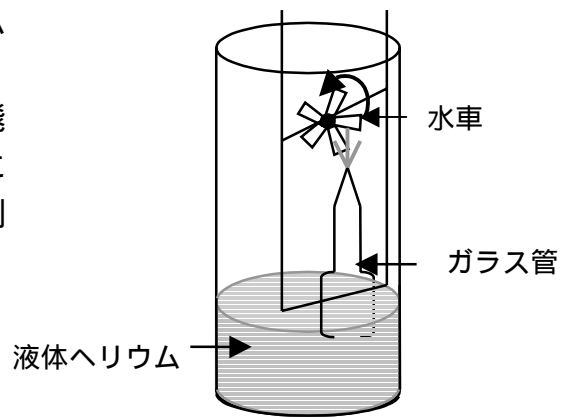


図 2 - 21 超流動現象