

第4章 技術の概要

4.1 乾燥技術全般

4.1.1 乾燥の歴史

物を乾かすということは人類が古くから太陽熱あるいは火を使って行ってきた操作である。太陽熱の利用は物体に熱を伝える手段として最も手軽であり、天日乾燥が多く用いられてきた。しかし、産業が大規模化し工程が連続化するにつれ、乾燥に要する膨大な敷地、労力および乾燥時間を考えると、乾燥装置によって人工的に乾燥するほうがはるかに経済的になってきた。このため、あらゆる産業において各種の乾燥技術が考案され実用化されてきた。さらに、新しい乾燥技術の採用により多くの分野で従来よりも高品質の製品を得られるようになってきた。新しい装置の設計が合理的に行われるようになったのはここ数十年のことである。

4.1.2 乾燥の原理

(1) 乾燥の定義

乾燥とは、水分などの液体を含む物体（固体、液状物）に外部から熱を加えて液体を気化蒸発させ除去または低減する操作である。これに対して前工程として用いられる脱水は水分を減少させるが蒸発させてはならず、乾燥とは区別する。乾燥においては熱を加えていないようにみえる場合でも、実際には気化のために何らかの形で熱が供給されている。

なお、通常の乾燥以外に、気体中の水分の除去も広義の乾燥に含まれる。

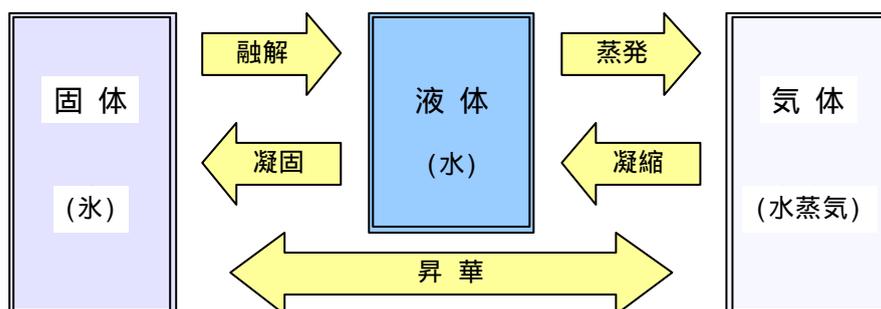
本書においては固体の乾燥と気体の乾燥を扱い、液体の乾燥技術は脱水精製技術のニュアンスが強いので除外している。

以下においては基本的な原理を説明する。

(2) 水の状態変化

一般に物質は温度や圧力の変化によって固体・液体・気体の3つの状態の変化をする。水の場合は氷と（液体の）水と水蒸気が3つの状態にあたる。これらの状態間の変化は図4.1.2-1のように表される。「融解」と「蒸発」と「固体 気体の昇華」においては温度変化がゼロであっても熱を加える必要がある。例えば0℃の氷を0℃の水に変えたり、100℃の水を100℃の水蒸気に変えたりするには熱が必要である。

図 4.1.2-1 物質の三態の変化



圧力が 4.58 Torr (注：1 気圧は 760 Torr、Torr と mmHg は同じ単位) より低い場合には、氷を加熱すると液体の水にはならず昇華して一気に水蒸気になる。この変化は「真空凍結乾燥」において利用されている。

(3) 伝熱の基本形態

一般に熱は高温の物体から低温の物体へ伝わるが、この現象を伝熱という。伝熱には、対流と輻射と伝導の3種類がある。

対流による伝熱は流体(気体または液体)と固体の間の伝熱で生じるものであり、流体が対流で移動することにより、熱の流れの速さにあたる熱流束(単位時間・単位面積当たりの通過熱量)は静止している場合より非常に大きくなっている。熱流束は両者の温度差にほぼ比例するが、流れの速度や様式(層流・乱流の区別など)のような各種の条件によっても大きく変化する。なお、対流は流体内の密度差(温度差に起因)により自然に生じる自然対流と、人為的に流体を流すことにより生じさせる強制対流の2種類がある。

輻射による伝熱は電磁波によるもので、例えば太陽から地球が受け取っている熱はすべて輻射によるものである。この例から分かるように、輻射による伝熱は真空中でも可能である。また、影になる部分には伝わらない。工学的に加熱で有効な波長は赤外線領域が主体である。なお、低温側の物体が電磁波をすべて反射する理想的な鏡のようなものであるか、あるいは電磁波をすべて透過する理想的な透明ガラスのようなものであれば伝熱量はゼロとなり、電磁波をすべて吸収する理想的な「黒体」の場合には伝熱量が最大になる。実際の物質はすべてこれらの中間にあり、また、波長により反射・透過・吸収の比率は異なる。

伝導による伝熱は物体の内部で熱が伝わっていくもので、「熱伝導率」が大きい物質ほど熱がよく伝わる。例えば純銅とスギの乾燥材では熱伝導率は数千倍も異なる。これは、同じ厚さの銅板とスギの板の両面に同じ温度差をつけているとき、高温側の表面から低温側に伝わる熱流束が数千倍も異なることを意味する。

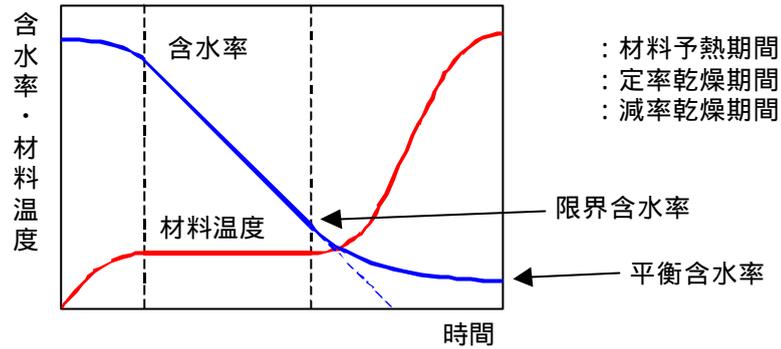
2つの固体が面で接触している場合には、見かけ上は密着していてもミクロにみれば真に接触している面積は小さいため、熱の伝わり方は一体の物体での伝導の場合よりも小さくなる。(真に接触していない空隙の部分においても、介在する気体を通しての伝導や輻射による伝熱は存在するが、これらは少ない。)

なお、以上はあくまで高温の物体から低温の物体への伝熱であり、例えば電子レンジのようなマイクロ波による加熱は伝熱ではない。

(4) 乾燥の基本的な機構

湿った多孔質の材料に熱風を当て続けると、含水率(含まれる水分量)と表面温度の変化は図 4.1.2-2 のようになる。図の ① は材料の温度が初期温度から平衡温度に達するまでの材料予熱期間で、乾燥も少し進行するが主として材料が加熱される期間である。② の定率乾燥期間では、材料温度が一定のまま材料に流入する熱量はすべて水分蒸発に費やされる。この間、乾燥速度は一定値をとる。乾燥の進行とともに表面の含水率が低下するため材料中の水は内部から表面に向かって移動する。表面に自由水が存在して蒸発している限り ③ の期間が続く。

図 4.1.2-2 乾燥の三期間



乾燥が進行し含水率が低下するにつれて水分移動が起こりにくくなるため、やがて内部からの水の補給が蒸発に追いつかなくなって表面の自由水がなくなり、水分の蒸発面が表面から内部に移動しての減率乾燥期間に入る。からに移るときの平均含水率を限界含水率という。これ以降は表面から温度が上昇し、表面温度が熱風温度に近づくため伝熱量が減少し、乾燥速度は低下していく。の期間では熱の一部が水分蒸発に、残りが材料の温度上昇に費やされる。無限時間後に到達する含水率を平衡含水率という。なお、一般に空気の湿度がゼロではないため平衡含水率も一般にゼロではなく、十分に乾燥した状態というのは含水率が平衡含水率に等しいか近い状態のことである。平衡含水率は湿度により変化するが、同じ湿度でも物質の種類や温度により異なる。

図 4.1.2-3 は乾燥特性曲線といい、乾燥速度と含水率との関係を示したもので、材料の乾燥特性を示すものとして乾燥装置設計に必要である。各種の条件により乾燥特性曲線は大きく変わる。材料の寸法を小さくし熱風との接触面積を大きくとれば限界含水率は小さくなり、短時間で乾燥できる。

図 4.1.2-3 乾燥特性曲線

