

第6回 濾網恢恢疎にして漏らさず

老子の「天網恢恢疎にして漏らさず(失わず)」とは「天の法の網は広くて目があらいようであるが、すくい漏らすことはない」と言った意味で、コンプライアンスを細かく言われている現在に対して教訓めいた言葉である。今回はその濾過バージョンとも言える話題である。ちなみに、第2回「工学者は無次元がお好き」はマリリン・モンローの映画「紳士はお熱いのがお好き」をもじったものとお気づきであろうか(相当古い)。

さて、濾過の世界では、濾過すべき粒子より粗い濾網で濾過する「濾網恢恢疎にして漏らさず」の助剤濾過(ケーキ濾過)と、濾過すべき粒子より細かい濾網で濾過する「濾網窄窄密にして漏らす」の濾材濾過があるのでこれを今回の話題としたい。

1. 助剤濾過(ケーキ濾過) <濾網恢恢>

- ①濾過助剤：嵩密度が小さく非圧縮性で透過性が大である化学的に安定な物質で、珪藻土(セライト)・活性炭・パルプ・活性白土などがある。
- ②濾過方法：セライトなどの濾過助剤を濾網上に堆積させ、その濾過助剤の堆積層を濾材として、濾過すべき固体粒子を捕捉する濾過である。濾過原液供給前に濾過助剤層を濾網上に形成させるプリコート濾過、濾過原液中に濾過助剤を混合し、濾過ケーキの透過性を向上させるボディーフード濾過がある。代表的なセライトの濾過では、100 メッシュ(目開き 150 μ m)程度の濾網上に代表径数 10 μ m 程度のセライトを数 10mm の厚みでブリッジングさせ、1 μ m 程度の固体粒子を捕捉濾過している。一般に高スラリー濃度液(%オーダー)の濾過に利用される。
- ③濾過イメージ：餅焼き網(目開き 2cm 弱)の上に大量のつまようじをばらまき、そのつまようじのすきまで、水に入れた小豆を捕捉するような感じである。細かい網に小豆だけを堆積させた場合に比べ、非常にスカスカ(空隙率が大きい)であることが想像できると思う。
- ④濾過の特徴：濾過ケーキの空隙率が大きいため濾液の透過性が大きく、閉塞することがない。また、1 μ m 程度の細かい固体粒子まで濾過でき、濾過の王様である。また、大量の濾過助剤を使用しなくてはならず、濾過の後処理(ケーキ洗浄、ケーキ乾燥、ケーキ排出・廃棄)にコストがかかる。

2. 濾材濾過 <濾網窄窄>

- ①濾過濾材：表面で捕捉する濾材としては、金網・濾布などがある。濾材内部で捕捉する濾材としては、濾紙、不織布などがある。
- ②濾過方法：捕捉する固体粒子より細かい目開きの濾材を使用し、濾材自身(濾材表面または濾材内部)にて濾過する。濾過閉塞した場合は、逆洗浄・濾材交換により濾材を再生する。一般に低スラリー濃度液(ppm オーダー)の濾過に利用される。
- ③濾過イメージ：油濾しの網で天カスを濾すイメージで良い。網目よりあらいものが網上にゴロゴロと言った感じである。

④濾過の特徴：濾材の捕捉能力を超えると、急速に濾過速度が低下し閉塞してしまう。表面濾過では、逆洗や表面掻き取りにより濾材の再生の可能性はあるが、内部濾過の場合は新しい濾材への交換が最も良い再生手段である。濾材の目開きの関係からあまり細かい粒子は濾過できず(数 μ m程度まで)、また、目開きのばらつきから、固体粒子を少し漏らしてしまう。

3. 濾過モデル

(1)モデルイメージ

濾過のイメージがつかめたところで、次は工学的な取扱いである。まず、現象を簡略化するための仮説を考えてみよう(モデル化である)。実際の液流れや流路の変化は複雑であるが、「**流路は径が均一な毛細管の集合体**」と考える。これで、数学的取扱いが簡単になる(通常配管圧力損失の式にて計算可能となる)。この基本的な考え方をベースに、①助剤濾過のケーキ濾過、②濾材濾過の内部濾過(標準閉塞濾過)、③表面濾過(完全閉塞濾過)について、濾過の進行に伴い毛細管の形状に異なった方法で変化を与える。すなわち、以下のモデル現象を考える。

- ① ケーキ濾過：毛細管長が長くなる(径は一定) <図 1>
- ② 標準閉塞濾過：毛細管径が細くなる(長さは一定) <図 2>
- ③ 完全閉塞濾過：毛細管が塞がれ数が減少する(径、長さは一定) <図 3>

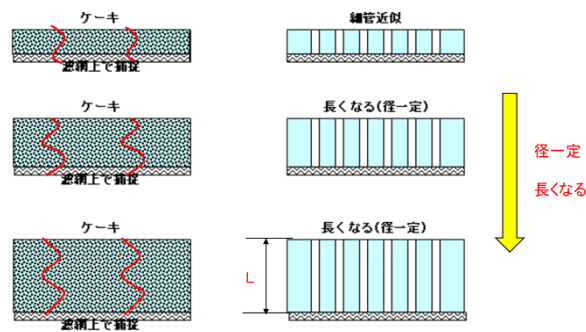


図 1 ケーキ濾過のモデルイメージ

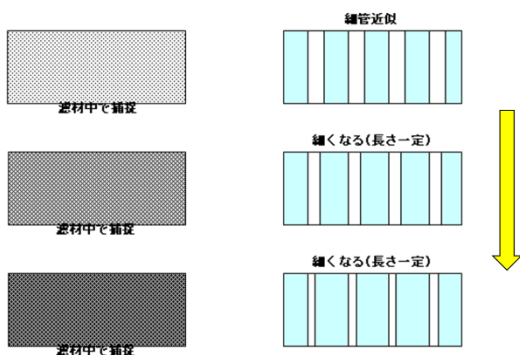


図 2 標準閉塞濾過のモデルイメージ

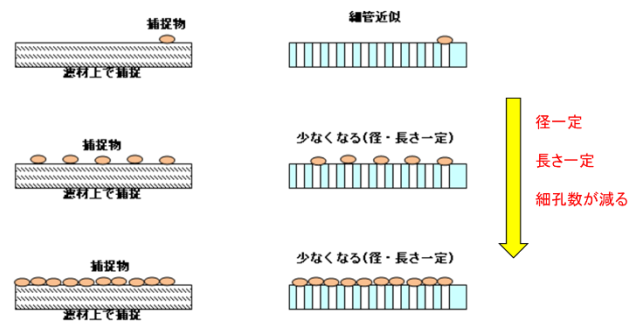


図 3 完全閉塞濾過のモデルイメージ

(2)数式の取り扱い

各濾過モデルのイメージがつかめたところで、少しがまんの数式である。まず、

濾過時間 : θ

全濾過量 : V

初期濾過流速 : Q_0

とする。そして、 $f(\theta) = d\theta/dV$ とし、 K を定数とすれば、濾過の特性式は、

$$Df/dV = Kf^n \quad (1)$$

で表される。ここで、 $n=0$ でケーキ濾過、 $n=3/2$ で標準閉塞濾過、 $n=2$ で完全閉塞濾過である。それぞれ積分すると、濾過量 V と濾過時間 θ の関係が得られる。

① ケーキ濾過($n=0$)

$$\theta/V = (K_c/2) \cdot V + 1/Q_0 \quad (2)$$

② 標準閉塞濾過($n=3/2$)

$$\theta/V = (K_s/2) \cdot \theta - 1/Q_0 \quad (3)$$

③ 完全閉塞濾過($n=2$)

$$V = Q_0/K_b \cdot (1 - e^{-k_b\theta}) \quad (4)$$

ここで、 K_c 、 K_s 、 K_b は定数である。以上の式より、濾過量と時間の関係から濾過機構が推定でき、操作条件の影響をだいたい予測できるようになる。しかし、濾過操作は固体粒子の粒子径分布、濃度などにより濾過時間は大きく変化し、予測しにくい操作であることも事実である。

以上、濾過の中で代表的なものについて濾過モデルを紹介したが、大切なことは現象をイメージとしてとらえることである。工学者であっても、単に数式だけでは理解し難いものである。現象をイメージとしてとらえ(現象の可視化)、数式を現象とリンクさせることが重要である。

参考文献

白戸紋平ら著：「濾過のメカニズム」(地人書館、1978)