

II-27 浄水場スラッジ処理について

札幌市水道局 正会員 辻口 宏紀
 工藤 仁臣
 津田 隆成
 山口 紳一

1. はじめに

札幌市には、現在、藻岩・白川・西野・宮町・定山溪の5つの浄水場があり、いずれも河川表流水を水源とする薬品沈殿・急速ろ過方式の在来型浄水場で、合わせて685,200^m3/日の施設能力を有している。浄水場は、原水に薬品を添加して固液分離する質的変換プロセスであるが、このプロセスで生ずるスラッジの処理施設を逐次整備してきたが、その中心は維持管理が容易な天日乾燥方式である。白川浄水場では、現在までに約50,000^m2の天日乾燥床が完成している。ここでは、天日乾燥床によりスラッジがケーキになるまでの乾燥過程を、観察結果、室内実験と運転実績を基に考察したので報告する。

2. スラッジ処理システムの概要

本市においては、浄水場の近辺に必要な用地を確保できたこと、乾燥ケーキの最終処分場として約30haの広大な用地を取得でき、ここで二次乾燥が期待できること、さらには水源水質は春・夏・秋・冬の変動が大きく、発生するスラッジの質・量とも表-1に示すとおり大きく変動することなどから、維持管理が容易な天日乾燥床を志向している。しかし藻岩浄水場は用地の取得が困難であったことから、機械脱水方式を採用している。白川浄水場のスラッジ処理システムフロー及び天日乾燥床の構造を図-1に示す。このシステムの基本諸元は以下のとおりである。

- ① 原水量 ; 520,000 ^m3/日
- ② 原水濁度平均 ; 15度
- ③ 硫酸アルミ注入率; 30 P.P.M
- ④ 天日床投入濃度 ; 2% ~ 5%
- ⑤ ケーキ搬出含水率 ; 70%以内
- ⑥ 天日乾燥床 ; 40床, 50,000^m2
- ⑦ スラッジ負荷量 ; 40^{kg}/m²
- ⑧ 乾燥日数 ; 90日

冬を経過するものは雪解け後50日

表-1 各期別スラッジ性状 (昭和58年~59年)

		原水水質及び凝集剤注入率		各期代表スラッジ性状			
		濁度(度)	凝集剤注入率(ppm)	汚泥濃度(%)	強熱減量(%)	粒径5μ以下含有率(%)	活性A含有率(%)
春期	融雪期	最大 14.0	最大 10.0	5.4	14.7	71~77	53
	最小	2.2	8				
	平均	7.7	21.0				
夏期	融水期	最大 2.0	最大 4.0	6.1	17.1	67~73	62
	最小	1.0	9				
	平均	2.3	14.6				
秋期	降雪期	最大 3.0	最大 15.0	1.1	15.1	92~94	70
	最小	1.2	9.6				
	平均	18.0	35.0				
冬期	融水期	最大 8.1	最大 25	3.0	18.2	91	82
	最小	0.8	9				
	平均	1.7	8.6				

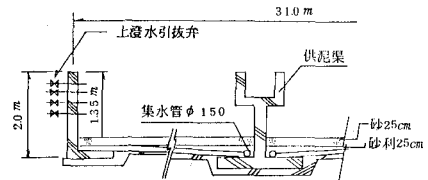
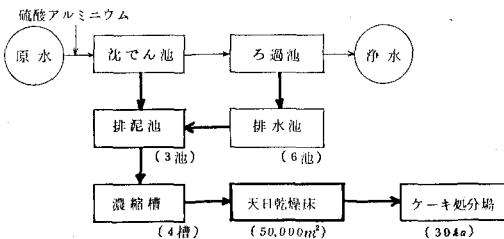


図-1 スラッジ処理システムフロー及び天日乾燥床構造図

3. 天日乾燥床におけるスラッジの乾燥状況

(1) 含水率94~98%、厚さ1m程度で天日乾燥床に投入したスラッジは、写真-1で見られるようにドロドロの流動性をもった液体で、供泥直後から界面沈降による固液分離を開始する。界面沈降は沈降速度の大きい等

速沈降を経て、次に緩慢な圧密沈降となり、スラッジ量は当初の70~90%にまで減少する。等速沈降から圧密沈降に移る時間はスラッジの性状によって異なり、沈降性の良いものは24~48時間で完了するが、沈降性が悪い場合は両者の区分が明瞭でなく数日間かけて上澄水を分離する。

圧密されたスラッジは透水性が悪く、分離した上澄水は浸透しないため、側壁に設けた排水弁から排除する。等速沈降完了後、下部集水管の弁を開けて浸透を開始させる。この段階ではスラッジ粒子による層が形成されており、いわゆるケーキ層が行われるため浸透水は清澄である。浸透水量はスラッジの量や性状によって異なるが、開始直後に多く40%負荷で80~100mm台であるが時間とともに減少する。スラッジが液性で上澄水がある間は水面からの蒸発があるが、蒸発量は気象条件に左右され、平均で3mm程度である。

以上のとおり、スラッジが液性の間は除上澄水・浸透・蒸発の3要素が働くが、このうち浸透すなわち下向きのフラックスが卓越しており、含水率は下層ほど低い。

(2) 液性のスラッジからの脱水が進行して含水率が90%を切る頃になると、粘土に特有なネバネバの塑性を示し始める。スラッジ厚はすでに伏泥時の半分程度まで低下しているが、塑性域での体積収縮は垂直方向のみならず、水平方向にも働いてクラックが発生する。クラックは含水率の低い部分から入り始め、数日間のうちには写真-2のようにスラッジ表面全体に広がる。塑性域以降では上澄水の発生はみられず、浸透と蒸発が脱水の要素となる。浸透は透水性の急速な低下で数mm程度までに減少するが、蒸発よりは多く、含水率の垂直分布も依然として下層ほど低い。蒸発は露出したスラッジ表面から活発に行われ3~4mm程度である。塑性域のスラッジ表面はヌレ状態を保っており、スラッジ内部から表面への水分移動が蒸発速度に追随している。

(3) 塑性のスラッジからさらに脱水して含水率80%程度になると塑性が失われ、ボロボロと形のくずれる半固体状になり、ケーキと呼ばれるようになる。ケーキの厚さは20cm程度になっており、写真-3で見られるとおりクラックが成長して角柱状のブロックに分割され、表面積としては当初の数倍にまで増加する。半固体域での浸透は重力や毛管力などの作用によるフラックスで、量的には蒸発よりと少なく1mm以下である。蒸発は主脱水要素となり、ケーキブロックの側面からも蒸発が行われるが、含水量の低下とともに毛管力による水分伝導性が漸減し、表面積の増加にもかかわらずに減少して1mm程度となる。含水率の垂直分布は上向きのフラックスの優越によって逆転し、上層ほど低下している。

(4) 半固体のケーキがさらに乾燥し、含水率70%程度になるとコチコチの固体状となり、ケーキ厚は10cm程度になっている。ここに至ると浸透水はほぼなくなり、搬出が可能である。搬出時のケーキは比重約1.2で、体積は当初の10%程度にまで低下している。

写真-1

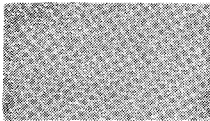


写真-2

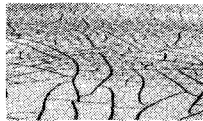


写真-3



4. 脱水の3要素

天日乾燥床における脱水は、除上澄水・浸透水・蒸発の3要素である。ここでは、実験床の運転実績と実験室での実験データからこの3要素について以下に考察した。

4-1 上澄水

上澄水の発生はスラッジの界面沈降に伴ない発生し、主たる因子は泥温、濃度、負荷量、活性アルミ含有量・粒度・強熱減量等のスラッジ性状といわれている

(1) 泥温

図-3は、泥温、濃度を变化させたときのSV値の経

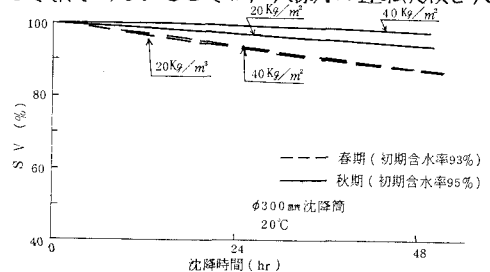


図-2 負荷量とSVの関係

時変化を示したものである。図から、初期濃度が同一のスラッジでも泥温が異なれば界面沈降速度が変化し、泥温が高いスラッジほどこの速度は大きい。この速度は水の粘性係数の逆数にはば比例している。

(2) 濃度

図-3 から泥温が同一のスラッジでも濃度が異なれば界面沈降速度が変化し、濃度の薄いスラッジほどこの速度は大きい。

(3) 負荷量

図-2 は春期と秋期スラッジの負荷量を $20 \frac{kg}{m^2}$, $40 \frac{kg}{m^2}$ にしたときのSV値の経時変化を示したものである。図から、春期スラッジは負荷量が異なってもSV値は同じであるが、秋期スラッジは負荷量が異なればこの値が変化し、負荷量の少ないほど小さく、上澄水の発生割合が大きい。

(4) スラッジ性状

図-4 は春期と秋期スラッジの泥温・濃度・負荷量と同一にしたときのSV値の経時変化を示したものである。図から、上記3因子が同一でも春期と秋期のスラッジでは界面沈降速度が異なる。これはスラッジ性状が異なるためと考えられる。

4-2 浸透水

スラッジからの浸透水量は、液性域で非常に多く、塑性域で徐々に低下し半固体ではごくわずかとなる。固体域では、浸透水量はない。液性域では、スラッジ粒子の間隙が水で満たされている状態で下記のケーキ過理論式が当てはまる。これによると浸透速度は泥温・濃度・負荷量・スラッジ性状に左右される。

$$\frac{dv}{dt} = \frac{K \cdot A \cdot \Delta p}{\mu \cdot L}$$

v : 浸透水の体積 Δp : 圧力差
 t : 時間 L : ケーキ厚
 A : 通過面積 μ : 水の粘性
 K : 透過率 (ケーキの透過特性)

(1) 泥温

図-5 は春期、夏期、秋期の同一スラッジの4℃と20℃の浸透速度を示したものである。図から、泥温が異なれば浸透速度が変化し、泥温の高いほど、この速度が大きい。この速度は水の粘性と強い相関が認められる。

(2) 濃度

各期のスラッジについて、濃度のみを変化させたときの浸透速度の経時変化とみると、濃度の薄い方が浸透速度が

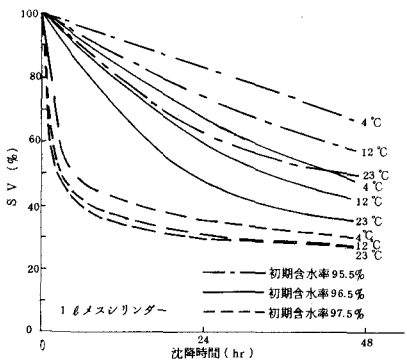


図-3 温度・濃度とSVの関係 (北海学園大学余湖製作)

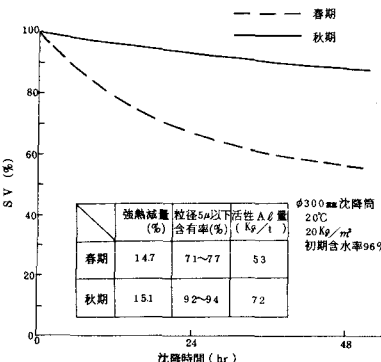


図-4 スラッジ性状とSVの関係

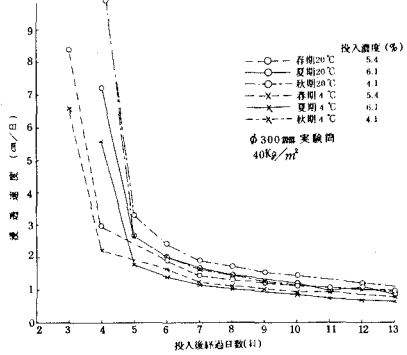


図-5 泥温と浸透速度の関係

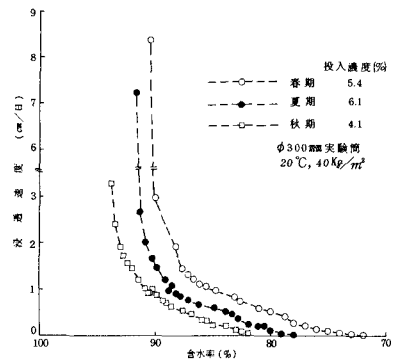


図-6 含水率と浸透速度の関係

大きい。

(3) 負荷量

春期、夏期、秋期のスラッジの負荷量を20kg/m²、40kg/m²にしたときの浸透速度をみると、浸透水量は40kg/m²の方が大きい、単位負荷量当りでは20kg/m²の方が大きい。一方85%の含水率になるまでの日数で比較すると、春期は20kg/m²で4日・40kg/m²で8日て夏では8日・21日、秋では15日・40日であり、これを単位負荷量当りで見ると、春期は等しく夏期以降では低負荷の方が短くなっている。

(4) スラッジ性状

図-6は春期、夏期、秋期のスラッジについて、泥温と負荷量と同一にしたときの含水率と浸透速度の関係を示したものである。図から、泥温、負荷量、濃度が同一でも各期のスラッジの浸透速度が異なっている。これはスラッジ性状のちがいによるためと考えられる。

4-3 蒸発

天日乾燥床におけるスラッジからの蒸発は、乾燥の進行に伴って次の3段階を呈する。まずスラッジが液性で上澄水が存在する間は、蒸発皿からの蒸発と同様の水面蒸発がみられる。次に上澄水がなくなりスラッジ面が露出しても、塑性域で表面がヌレ状態を保っている間は、スラッジ内部から表面への水分移動が蒸発速度に追いつく恒率蒸発となる。さらに乾燥が進行して半固体域に入るとケーキ内の水分移動が減衰し、蒸発量もしだいに減少する減率蒸発となる。蒸発を決定する因子は気象因子とスラッジ性状で、蒸発の各段階で異なる。

(1) 水面蒸発及び恒率蒸発

蒸発量は気象因子のみで決定され、次のバルク式によって算定することができる。

$$E = f \cdot u \cdot (e_s - e)$$

E : 蒸発量 f : 蒸発係数 u : 風速 e_s : 蒸発面の飽和蒸気圧 e : 大気蒸気圧

図-7は白川天日乾燥床における実測水面蒸発量と、気象観測データを用いて計算した $u \times (e_s - e)$ の関係を示しているが、両者の間には強い相関が認められる。

(2) 減率蒸発

減率蒸発は気象因子に加えて、スラッジ内部から表面への水分伝導性が蒸発に関与する。水分伝導性はスラッジの性状、すなわち組成成分や水分量によって決まる。スラッジの水分量は水分伝導性と比例するため、乾燥の進行とともに蒸発量は減少する。

図-8は実測及び蒸発皿からの蒸発量とスラッジの表面積増加率の経時変化を示したものである。液性から塑性域にかけては恒率蒸発で、スラッジからの蒸発量が水面蒸発量を上回っている。これは昼間の日射の影響を受けてスラッジの表面温度が水面温度より上昇し、蒸気圧差がより大きくなったためと考えられる。半固体域に

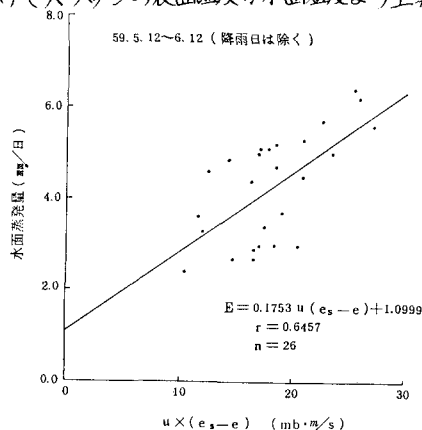


図-7 水面蒸発量と $u \times (e_s - e)$ の関係

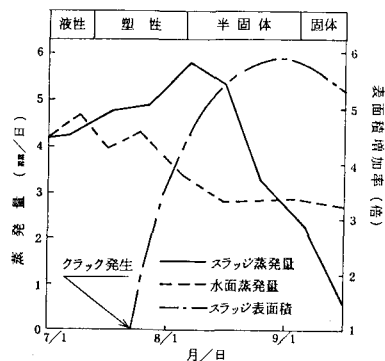


図-8 蒸発量とスラッジ表面積の変化

においてはクラックが拡がり表面積が当初の数倍にも増加しているにもかかわらず、減率蒸発期間に移っているため蒸発量は漸減し、固体域では急激に減少している。

5. 考察

天日乾燥方式では、脱水に関する3要素は、除上澄水は液性域、浸透は主に液性域から塑性域、蒸発は全領域に関係している。しかし除上澄水、浸透だけの脱水では塑性域より脱水されず、ケーキとして搬出可能な含水率70%までに脱水を行うのは蒸発である。蒸発は気象条件に大きく左右されるが、各時期ともほぼ定まった量であるといえる。この限りある蒸発量を、スラッジ発生量、天日乾燥床の使用サイクル内で、いかに有効に利用するかが天日乾燥床の運転と考える場合、重要となる。また、除上澄水、浸透で脱水可能な量といかに多く、かつ、早く排除するかも蒸発量と有効に利用するキーポイントである。

春期及び夏期のごく初期に投入したスラッジは濃度が濃く泥温も高い。かつ、スラッジ性状もよいことから、除上澄水と浸透による脱水効率がよい。また、この時期の蒸発能力也非常に大きい。このことから3要素のいずれにおいても脱水効率が優れている。このため設計値の負荷量を上回って処理出来ている。特に春期に投入するスラッジの処理能力はかなり高負荷(70%)の処理が可能であった。

秋期に投入したスラッジは濃度が薄いため、水分の絶対量が多く、泥温も低く、かつ、スラッジ性状も悪い。ため液性から塑性への移行に春期の数倍の期間を要する。また、この時期は蒸発能力が極端に落ちるため20%の低負荷でも越冬してしまう。越冬したスラッジが搬出可能となる時期は、春期に投入したスラッジが搬出可能となる時期とは同じであり、負荷量20%~70%の範囲では、搬出可能となる時期にあまり差がみられない。このことから秋期に投入するスラッジについては、できる限り高負荷、たとえば70%程度とする方が効率的と考えられる。また、冬期については脱水の3要素のいずれも最も劣っている。

図-9は搬出可能な含水率70%になるまでの3要素の水分割合と液性から半固体までの各領域と負荷量20・40・70%について示したものである。図から、上澄水排除による割合は全水分量の約2割を占め、負荷量が異なってもほぼ同じである。浸透は全水分量の5割を占め脱水効率率が最も高い。この割合は各期ともほぼ同じであるが含水率80%になるまでの期間は春期が最も短い。蒸発は液性から塑性域における脱水量割合としては小さいが、半固体から搬出含水率70%までの仕上げの脱水としては重要である。含水率80%から70%になるまでの日数と負荷量とにみると、20%で10日、40%で16日、70%で29日とほぼ比例している。また、この期間における水面蒸発量はそれぞれ38mm、54mm、123mmであり脱水量とほぼ一致している。

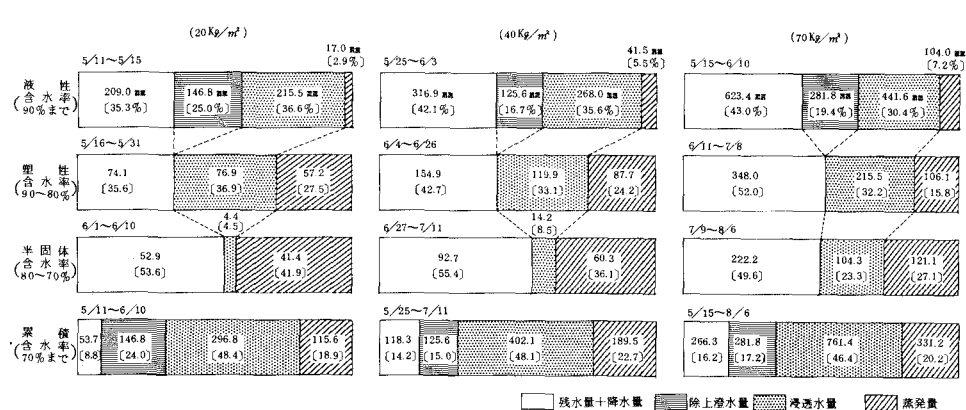


図-9 3要素の割合

以上がらいえることは、①上澄水は、各期、どの負荷でも排除した方が後の乾燥に有利となる。②春期のスラッジは、浸透性、蒸発共よいことから高負荷処理(70kg/m²)が可能である。③夏期の初期は春期と同様に扱ってよい。④夏期中期から後半にかけては、浸透・蒸発共下降期に入り、気象条件を勘案しながら負荷を決定しなければならない難しい時期である。⑤秋期のスラッジは、乾燥することなく越冬するので高負荷とした方がよい。越冬したスラッジは春期のスラッジと同じ時期に搬出出来るからである。⑥冬期は、積雪、凍結の影響で乾燥しない。たとえ、覆蓋付で積雪の影響をなくしても、凍結し、浸透や蒸発を防げる。⑦脱水の3要素のうち、浸透の寄与率は大きく、この効率を上げることが重要であるが、粘性やスラッジ性状に左右されるので、コントロールが難しい。しかし蒸発は比較的コンスタントにあり、特に最後の仕上げ、すなわち搬出可能なケーキにするきめ手である。⑧各期の脱水性の違いは、温度による粘性の違い、スラッジ性状、特に活性アルミ含有量の違いであると思われる。

6. おわりに

天日乾燥床における乾燥過程を考察してきたが、天日乾燥床が単に万能とは考えていない。本市の場合には、冬期は積雪や凍結の影響を受け投入作業が困難になる。覆蓋を設け、これらの影響を取り除いた場合にも、乾燥効率が低下するため、この期間には他の補助的な脱水設備の併用も考慮する余地がある。また脱水性のよいスラッジとし、かつ、スラッジ発生量を少なくすることが、天日乾燥床の効率的運用につながることから、添加アルミ量の低減化を考慮した浄水処理方法の確立や、高濃度時の取水カットを考慮した施設づくりも必要である。

しかし、天日乾燥床の効率的な運転方法を考える場合は、単に早く乾燥させることのみを考えるべきでなく、維持管理性や経済性等を含め、排水処理システム全体の中のユニットとして、天日乾燥床の役割を考慮しなければならない)と考える。

(参考文献)

1. 佐々木喜一；札幌市の天日乾燥床の必要面積の算定方法について～その一例，第18回全国水道実務発表会
2. 津田隆成他；札幌市藻岩浄水場における排水処理システム，第32回全国水道研究発表会，1981
3. 中川忠博；藻岩浄水場における排水処理施設の運転実績，第33回全国水道研究発表会，1982
4. 山口伸一他；札幌市白川浄水場における天日乾燥床の運転実績，第35回全国水道研究発表会，1984