活性汚泥の減圧浮上濃縮に関する研究

奥友晃*, 宮明大輝**, 澤井正和***, 林公祐****, 鈴木隆起*****, 赤対秀明*****

Study on Decompression of Flotation Thickening of Activated Sludge

Tomoaki OKU*, Daiki MIYAAKE**, Masakazu SAWAI^{***}, Kousuke HAYASHI^{****}, Takayuki SUZUKI^{*****} and Hideaki SHAKUTSUI^{******}

ABSTRACT

In the decompression method, the sludge solids are floated and thickened with the fine air bubbles generated by decompressing the sludge. The disposal coast of this method is lower compared with other methods, however, the processing efficiency is not good. In the present study, in order to improve the processing efficiency of decompression method, the method by supplying the sludge after decompression in the test tank is investigated instead of the method by supplying the sludge before decompression as existing method. As the results, it is found that the good processing was confirmed (1) in the test tank 16 kPa~51 kPa ata in "the sludge supply after decompression", (2) 21 kPa~ 51 kPa ata in "the sludge supply before decompression". The height of supernatant liquor increases with time progress, dramatically, and close to the certain height in both methods. The completion time of processing by "the sludge supply after decompression" is shorter than "the sludge supply before decompression" in the range of $P_v = 21$ kPa~33 kPa. On the other hand in the range of more than $P_v = 33$ kPa, it is opposite. Finally, the final thickened sludge thickness for total height is 16 % of supernatant thickness.

Keywords : sludge, decompression, thickened sludge, microbubble

1. 緒言

一般に、家庭から排出される下水は地域ごとの 下水処理場へ集められ、沈殿、生物反応、固液分 離等の工程を経て処理される.分離された固形物 である汚泥は脱水後、焼却、埋め立て、コンポス ト化などの処理が行われる.固液分離の工程では、 汚泥の含水率を 2~3%程度濃縮すると、汚泥の容 積は 1/3~1/4 になる⁽¹⁾ため、固液分離の工程以降 の施設容量を小さくできる.このため、固液分離 の工程において汚泥を効率よく濃縮・分離するこ とは、処理コスト面から非常に重要である⁽²⁾.

汚泥の濃縮法の一つである浮上濃縮法は,汚泥 に気泡を付着させて見かけ密度を水よりも小さ くし浮上分離濃縮する方法であり,効率や経済性 に優れているために,広く用いられている.

浮上濃縮法は,加圧浮上濃縮法,常圧浮上濃縮 法,減圧浮上濃縮法に分類される.加圧浮上濃縮

*	専攻科 機械システム工学専攻
**	機械工学科
* * *	テクノプラン
* * * *	神戸大学 助教
* * * * *	機械工学科 講師
*****	機械工学科 教授

法(1)は、加圧状態で溶解した空気を大気圧に開放 することで 100 μm 以下の超微細気泡の形で気 泡化させて固形物に付着させる.また,常圧浮上 濃縮⁽¹⁾は、薬品を添加することにより気泡と固形 物を電気化学的に吸着させる.これらに対して, 減圧浮上濃縮法は汚泥を含む容器内を減圧して, 汚泥中に微細気泡を発生させる方法であるが,処 理能力が低いため,非常に小規模な汚水処理場で わずかに実績がある程度である.しかし、容器内 上部の空間を減圧するだけで良いため,同規模に おける他の方法よりも比較的小さな動力で分離 処理ができる. そのため処理能力が改善され中規 模以上の下水処理場へ適用できれば, 大幅なコス ト削減が期待できる.これまで,給泥した容器内 を減圧する従来の方法(減圧前給泥法)について の汚泥濃縮特性が明らかにされている(3).一方, この減圧前給泥法に対して,容器を減圧した後に 汚泥を急激に供給する減圧後給泥法により,既存 の濃縮法より汚泥濃縮特性の改善が見込めるこ とが提案されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾.しかし、本方法による 汚泥の濃縮特性については明らかではない.

そこで本研究では,減圧浮上法の中でも減圧後 給泥法に着目し,実験的に汚泥の浮上状況,汚泥 が排除された脱離液高さ,濃縮完了時間などの濃 縮特性を明らかにすることを目的とする.また, 比較のために減圧前給泥法についても濃縮特性 を検討する.

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置 Fig. 1 に実験装置の概略図を 示す.実験装置は(1)試験部,(2)減圧部,(3)給泥 部からなる.



Fig. 1 Experimental apparatus

(1) 試験部 Fig. 2 に試験部を示す. 内径 120 mm, 厚さ5 mm, 高さ500 mm, 容量 6.6 Lの透明アクリル管を用いた. フランジで上下から棒ねじ(同一方向 8 箇所)で挟み込み,機密性を高めた. フランジは, 厚さ10 mmのアクリル板を使用し, 上部のフランジには給泥用の塩ビ管(φ40 mm), 真空ポンプの空気吸入用のニップル, 真空計(長野計器 AC10-133)を取り付けた. 下部の穴は排泥用に塩ビ管(φ65 mm)を接合した. また, 配管は塩化ビニル管の VP 管を使用した. 給泥・排泥ラインにはボールバルブを使用し, 大気開放ラインにはニードルバルブとボールバルブを組合わせた. 汚泥の濃縮状況はビデオカメラ(Sony,DCR-PC 3000, 25 fps)により撮影した.

(2)減圧部 試験部内の減圧には真空ポンプを用いた.真空ポンプは,佐藤真空株式会社 DS-20
 IIを使用した.排気速度は 20 L/min,到達圧力は100 Pa である.

Fig. 3 に補助真空タンクを示す. アクリル管(内 径 240 mm, 厚さ 5 mm, 高さ 950 mm, 容量 43 L) をアクリル板(上部)と鉄板(下部)で挟み, ボルト で固定した. アクリル管側面に試験部と真空ポン プにシリコンホースを繋ぐため, ニップルを 2 箇 所取付けた.補助真空タンクの効果により試験部内圧力は実験中ほぼ設定値一定に維持され,汚泥の発泡による圧力の回復を防ぐことができる. (3)給泥部 試験部上部に給泥タンク(最大容量約 20 L)を設置した.ポリ容器に採取した汚泥をタンク上部より供給する.





Fig. 2 Test section

Fig. 3 Additional tank

2.2 実験方法 以下に減圧後給泥法の実験手 順を示す.

- ① バルブの開閉の確認を行う.
 給泥バルブ:閉 大気開放バルブ:閉
 排泥バルブ:閉 真空ポンプ用バルブ:開
 ② 真空ポンプを作動し、設定圧力まで圧力を下
- げ,真空ポンプ用グローブバルブを閉める.
- ③ 上部の汚泥タンクに汚泥(約 8 L)を入れる.
- ④ 給泥バルブを開き、減圧槽に給泥する. 給泥 量が多いと、汚泥タンクの水面まで旋回流が 発生し、空気を吸い込むため注意を要する.
- ⑤ 高さ 350 mm で給泥バルブを閉じ,密閉状態に する.
- ⑥ 浮上状況をビデオカメラで撮影する.
- ⑦ 汚泥濃縮が完了後,大気開放バルブを開ける.⑧ 槽内圧力が大気圧になったのを確認後,排泥

バルブを開けて排泥する. なお,減圧前給泥法では,減圧槽内が大気圧状

態で高さ 350 mm まで給泥した後,手順①→②→ ⑥→⑦→⑧の順に行う.

2.3 実験条件 試験部内の圧力 P_v は 11~71 kPa (絶対圧力)で実験を行った.また,実験に用 いた汚泥は神戸市内の下水処理場における最終 沈殿池より直接採取した活性汚泥で,汚泥採取時 の温度は 22.5 \mathbb{C} ~25 \mathbb{C} , MLSS(Mixed Liquor Suspended Solid)は 2120 ~ 2260 ppm, DO (Dissolved Oxygen)は 2.4~2.8 ppm であった.ここ で, MLSS とは⁽⁶⁾,混合液中の浮遊物質を示す微 生物量を中心にした量である.単位は 1 L 中の乾 燥重量(mg)である.DO とは⁽⁷⁾,水中に溶解して いる分子状酸素量のことである.酸素量の溶解量 は気圧,水温などに影響される.なお,汚泥の性 状が変化しないよう,採取日のみ実験に使用した. 減圧後給泥法,減圧前給泥法の実験時における汚 泥条件は,減圧後給泥法:MLSS=2260 ppm, DO=2.8 ppmで,減圧前給泥法:MLSS=2130 ppm, DO=1.6 ppmであった.

実験結果および考察

3.1 浮上濃縮の状況 Figs. 4(a)~(f)に減圧後 給泥法による,試験部内圧力 P,に対する浮上濃縮 状況を時間ごとに示す. なお, 試験部内圧力は絶 対圧であり, それぞれ P_v = 11 ~ 71 kPa の場合で ある. P_v = 11 kPa (Fig. 4 (a))の場合,汚泥は浮上 しているものの, 脱離液の透明度は低い. これは, P,が非常に低いため、汚泥に対して気泡径が大き く,気泡が汚泥粒子に付着し難いと考えられる. また,給泥中に,ほとんど発泡が終わってしまい, 汚泥中に溶解している空気量が減少しているた め,汚泥の浮上分離濃縮が活発に行われなかった ことも考えられる. 今後, これらを定量化するた めに、汚泥の粒径(以下、汚泥径)や気泡径および 発泡量の計測を時間ごとに行い、検討する必要が ある. P_v = 16~51 kPa (Figs. 4(b)~(d))の場合,汚 泥中に微細気泡が発生することで、時間の経過と ともに濃縮層厚さが減少, すなわち汚泥が濃縮さ れている様相が確認できる. 脱離液も透明度があ り浮上分離が良好に行われていることが分かる. $P_v = 61$ kPa (Fig. 4(e)の場合,汚泥は時間の経過と ともに一旦, 重力沈降を起こしているが, その後, 底から浮上している.これは、P,が比較的高い場 合には,汚泥の浮上に必要な発泡量に達するまで 時間がかるため,一旦,重力沈降したと考えられ る. P_v = 71 kPa(Fig. 4(f))の場合,汚泥は浮上せず, 重力沈降を起こしている.これは,汚泥が浮上に 必要な発泡量を得られなかったためであると考 えられる.

次に Figs. 5(a) ~ (e)に減圧前給泥法による試験 部内圧力 $P_v = 16 ~ 51$ kPa における浮上濃縮状況 を示す. 圧力が低い場合($P_v = 16$ kPa, Fig. 5(a))に は、時間の経過とともに一旦重力沈降を起こした. これは、減圧後給泥法での P_v が低い場合と同様に、 発生した気泡が汚泥粒子に対して大きいとすれ ば、気泡の浮上速度が増加し、吸着性能が低下し たと考えられる.また、 $P_v = 21 ~ 51$ kPa (Figs. 5 (b) ~ (e)の場合、時間の経過とともに、汚泥は比較的 良好に浮上分離濃縮していることが確認できる が、脱離液の透明度が減圧後給泥法に比べやや劣 っている.







3.2 無次元脱離液高さ 給泥完了直後の容器 底部から汚泥の最上部までの高さを初期汚泥高 さ *H*₀,分離途中の容器底部から脱離液の最上部 (濃縮汚泥の最下部)までの高さを脱離液高さ*H*と する.また,*H*₀-*H*を濃縮層厚さ*H*_c,*H*/*H*₀を無 次元脱離液高さ *H*_s^{*},*H*_c/*H*₀を無次元濃縮層厚さ *H*_c^{*},20秒毎の*H*_c^{*}において3点の変化率が1%以 内に収まった最終的な無次元濃縮層厚さを(*H*_c^{*})_b



Fig. 6 Definition under thickening



Fig. 7 Height of supernatant liquor (Sludge supply after decompression)





と定義する. なお,本節以降では良好に浮上分離 濃縮した $P_v = 16 - 51$ kPa の場合の結果のみを用いる.

3.2.1 圧力による影響 Figs. 7,8 に減圧後給 泥法,減圧前給泥法それぞれの無次元脱離液高さ *H*_s*の時間変化を示す.時間は汚泥の供給を完了し, ボールバルブを閉じた直後から測定した.いずれ の場合も、浮上分離濃縮の定性的変化は同様であ り、 H_s^* は時間の経過とともに急激に増加し、その 後緩やかに増加しほぼ一定となる.これは浮上分 離濃縮の変化は、汚泥中に溶解している気体の発 泡量に依存し、気体の発泡が急激に起こった後、 その後減少するためであると考えられる.また、 P_v によらず最終的な H_s^* は比較的近い値となって いる.なお、 H_s^* が急激に増加するまでに時間遅れ が存在するが、これは汚泥供給直後の減圧槽内の 汚泥は乱れた状態であるため、気泡が汚泥粒子に 付着し難かったことが、汚泥浮上の時間遅れの原 因であると考えられる.

以上をまとめると,汚泥の浮上が起こる P_v の範 囲内であれば,汚泥は減圧されると微細気泡の発 泡が起こり,急激に脱離液高さが増加する.そし て,濃縮が行われ緩やかに脱離液高さが増加した 後,濃縮完了となり,最終的な無次元脱離液高さ は試験部内圧力によらず,ある値の近傍(この場 合, $H_s^* = 0.8$)に近づくと言える.

3.2.2 給泥法の影響 Fig. 9 に給泥法の違い による無次元脱離液高さ H_s*を示す.なお,それ ぞれの給泥法で使用した汚泥は採取日が異なる ため,第 2・3 節で述べたように汚泥条件が異な り,定量性は有していない.

2つの給泥法を比較すると、H_s*の変化は定性的 に同じであることが分かる.また、同一圧力にお いて、減圧後給泥法の濃縮時間や脱離液高さなど の濃縮特性は減圧前給泥法よりも良好であるこ とが確認できる.そのため、減圧後給泥法の有効 性が示唆されるが、汚泥条件が一致していないた め、今後、同条件において、定量的に比較・検討 する必要がある.





3.3 濃縮完了時間 Fig. 10 に両給泥法におけ る各試験部内圧力 P_v に対する濃縮完了までの時 間を示す.なお濃縮完了の定義は,時間経過に対 する無次元脱離液高さの変化が,最終測定点3点 において,その変化率が1%以内となるまでの時 間とした.なお,減圧前給泥法の $P_v = 21$ kPa 未 満に関しては,重力沈降が起こったため測定でき なかった.

3.3.1 圧力の影響 Fig. 10 において圧力によ る濃縮完了時間の影響を比較する.いずれの給泥 法の場合も,濃縮特性の様相は同様であり,試験 部内圧力が低いほど濃縮完了時間は短くなった. これは,試験部内圧力が低いほど,汚泥の発泡量 が多くなることや,給泥後から発泡が起こるまで の時間が短いためであると考えられる.

3.3.2 給泥法の影響 Fig. 10 において給泥法 による濃縮完了時間の影響を比較すると,濃縮完 了時間が約 $P_v = 33$ kPa 未満では減圧後給泥法の 方が短く,また,約 $P_v = 33$ kPa 以上では減圧前 給泥法方が短いことが確認できる.また,本実験 においては,減圧前給泥法において $P_v = 21$ kPa の場合が最も短いことが確認できた.これらのこ とより,濃縮完了時間が短い最適な給泥法を選択 する場合には,圧力に応じて選択する必要がある ことが考えられる.



Fig. 10 Completion time of thickening

3.4 最終無次元濃縮層厚さ Fig. 11 にそれぞ れの給泥法に対する最終無次元濃縮層厚さ $(H_c^*)_b$ を示す.減圧前給泥法においては,試験部内圧力 によらず, $(H_c^*)_b = 0.16$ 程度であった.一方,減 圧後給泥法においては,試験部内圧力 $P_v > 51$ kPa では,同様に $(H_c^*)_b = 0.16$ 程度であることが確認 できる.しかし, $P_v < 51$ kPaでは, $(H_c^*)_b = 0.10$ 程度であり,急激に $(H_c^*)_b$ が減少していることが 確認できる.発泡量の総量が給泥法や試験部内圧 力に関係なく一定であれば,最終濃縮層厚さは, ほぼ同じであると考えられるため, $P_v > 51$ kPa に おいては妥当な結果であると考えられる.

それに対して $P_v < 51$ kPa で $(H_c^*)_b = 0.10$ となっ た理由について検討する.減圧後給泥法の場合, Fig. 1 に示すように装置の構造上,汚泥給泥部に はボールバルブを設置し,絞り構造となっている. よって,給泥の際,試験部内外の大きな圧力差に より汚泥が急激に試験部に吸込まれ,圧力変化に よる流速の増加やバルブ部の機械的な衝突に伴 い汚泥粒子の細分化したと考えられる.そのため, 最終的に浮上した汚泥が密となることで, $(H_c^*)_b$ は小さくなったと考えられる.よって,汚泥粒子 の大きさが同じなら圧力と給泥法によらず,最終 無次元濃縮層厚さはほぼ同じになると考えられ る. 今後,圧力の違いによる汚泥径と気泡径およ び発泡量について測定する必要がある.



Fig. 11 Completion height of supernatant liquor

4. 結論

本研究では,減圧濃縮法における汚泥の濃縮特 性の調査を目的とし,実機の運転に必要な基礎デ ータを得るために,減圧後給泥法と減圧前給泥法 により,経過時間ごとの脱離液高さを測定した. その結果,本実験範囲内で以下の結論を得た.

- (1)本実験装置では、減圧後給泥法の場合、試験部 内圧力 P_v が $P_v = 16$ kPa ~ 51 kPa では浮上分離 濃縮が良好に行われた.また、 $P_v = 11$ kPa より 低いと、脱離液の透明度が下がった.逆に $P_v =$ 71 kPa より高いと汚泥が浮上しなかった.それ に対して、減圧前給泥法の場合、 $P_v = 21$ kPa ~ 51 kPa では比較的良好に浮上分離濃縮が行わ れたが、脱離液の透明度が減圧後給泥法に比べ やや劣っている.また、 $P_v = 16$ kPa では時間の 経過とともに一旦重力沈降を起こした.
- (2)無次元脱離液高さは給泥法に関らず急激に増加した後,緩やかに増加し,その後,一定になった.
- (3)濃縮完了時間は、約 P_v = 33 kPa 以下では減圧
 後給泥法の方が短く、その中でも P_v = 21 kPa

が最も短い.また,約 $P_v = 33$ kPa 以上では減 圧前給泥法の方が短い.よって,圧力に応じて 濃縮完了時間が最短となる給泥法を選択する 必要があることが分かった.

(4)最終無次元濃縮層厚さ $(H_c^*)_b$ は給泥法に関らず, $(H_c^*)_b = 0.16$ 程度となった.ただし,減圧後給 泥法で圧力が低い場合には汚泥が機械的に細 分化され $(H_c^*)_b = 0.10$ 程度になった.

参考文献

- (1)鈴木宏:「下水汚泥処理の維持管理」,東京都下 水サービス株式会社,2005.
- (2)Takeshi Kumagai, et al. : "Influences of Drugs on the Oxygen Uptake Rate and Biosorption of Activated Sludge", Biological & pharmaceutical bulletin 29(1), pp.183-186, 2006.
- (3)藤崎一裕:「資源処理技術」, Vol. 46, No.1 pp.19-23, 1999.
- (4)奥友晃,澤井正和,望月修一,林公祐,鈴木隆起,赤対秀明:「汚泥減圧浮上濃縮装置の開発」, 日本混相流学会年会講演会 講演論文集, E334,pp.384-385, 2010.
- (5)澤井正和, 畠山修一郎, 諸岡隆良, 神澤正樹: 「汚泥の処理装置」,特許第 3782428 号, 2006.
- (6)三好康彦著:「汚水・排水処理-基礎から現場 まで-」,株式会社オーム社, pp.134-135, 2009.
- (7)タクマ環境技術研究会:「絵とき下水・汚泥処 理の基礎」,株式会社オーム社, pp.113, 2005.