

(39) 下水汚泥の加圧脱水過程の解析

Analysis of the dewatering process of sewage sludge

藤崎一裕* 内田志恵* 河野一輝**

Kazuhiro FUJISAKI Shie UCHIDA Kazuteru KAWANO

ABSTRACT; This paper deals with the dewaterability measurement of sewage sludge and its applications. It is reported that a thermal treatment enhances the dewaterability of both primary sludge and waste activated sludge. In order to study this effect more thoroughly, we measured the dewaterability and the compressibility of the thermally treated sludges. A newly made air-pressure compression apparatus was used and the effectiveness of the thermal treatment was confirmed. Using the compressibility properties of the sewage sludge measured, the sludge dewatering process was simulated and the numerical solution of this model agreed reasonably well with experimental results.

KEYWORDS; Dewaterability measurement, Sewage sludge, Thermal treatment, Process simulation.

1. はじめに

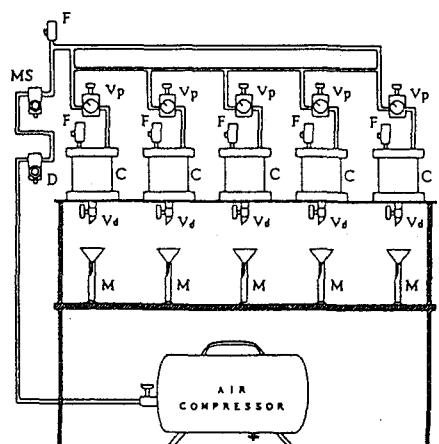
本研究は、下水汚泥の脱水性を調べ、その結果を用いて脱水過程の解析を行うことを目的としている。

筆者らはこれまでに下水汚泥や濃縮余剰汚泥を加温処理すると脱水性が向上することを報告してきた^{1,2)}。この現象をさらに詳しく調べるために、汚泥の脱水が促進される様子を新しく試作した装置を用いて測定した。加温処理した汚泥や無処理の汚泥を（常温で）種々の圧力で圧搾脱水して、ケーキの水分率や、脱水過程に及ぼす加温処理の効果を調べた。また、これら汚泥の脱水特性を利用して、圧搾脱水過程のシミュレーションを行った。

2. 実験

2.1 実験装置ならびに方法

図1に試作した装置を示す。これは5組の加圧脱水



D: drain catcher C: compression cell
MS: mist separator V: discharge valve
F: finger valve M: mess cylinder
Vp: pressure control valve

Fig.1 Experimental apparatus

*九州工業大学 工学部 設計生産工学科

(Kyushu Institute of Technology, Civil Engineering Department)

**九州工業大学 工学部 設計生産工学科 (現在: 九州電力株式会社)

テストを平行して行うもので、今回は同一の試料を用いて、異なった空気圧で同時に加圧圧搾を行った。コンプレッサーからの圧搾空気はドレインキャッチャー(D)やミストセパレーター(MS)によって水分が除去され、減圧弁(Vp)でセル(C)内の圧力が所定の圧力に設定される。本実験の場合、設定圧を0.2、0.5、1.0、2.0、4.0 Kg_f/cm²とした。(F)はフィンガーバルブで空気抜きに使用する。加圧濾過容器の詳細は図2に記されている。内径100 mm、肉厚10 mm、長さ150mmのアクリライトパイプを加工したもので、この容器に70-100ccの試料を投入して脱水した。なお容器の底部には濾紙(No.1)、濾布(ベルブ用布)、多孔板がおかれている。これらの部分の流水抵抗は本実験の場合、脱水時のケーキのそれに比べて無視できるほど小さい。

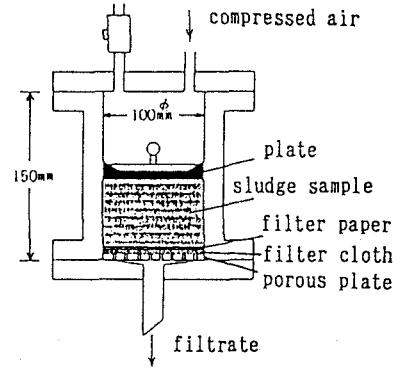


Fig.2 Compression cell

セル内に汚泥試料を投入して密封し、所定の圧力に設定すると、空気圧により汚泥が圧搾される。このときバルブ(Vd)を開けて、時間の経過に伴う濾液量の増大の様子を測定して、圧搾の進行状態を調べた。本実験の場合、圧搾終了と判断されるまでには20～24時間を要した。脱水終了時には加圧空気圧がすべて汚泥ケーキに作用するとして、このときの有効応力(加圧空気圧)と空隙率との関係を求めた。脱水ケーキの水分率は水分率計(加熱装置つき電子天秤)で直接測定した。またこの値を実験開始前の汚泥重量、水分率と終了時のケーキ重量、排出濾過量から逆算してチェックした。

2. 2 実験結果

図3～5に実験結果を示す。実験の材料はいずれも北九州市内の下水処理場(現在名:浄化センター)から採取したものである(表1参照)。図3～5中の○印が60℃で約1時間加温したのち圧搾したもので、×印は無処理の汚泥の実験結果である。

汚泥の加温は60℃の水槽中に、汚泥を入れた容器を浸し間接的に温める方式をとった(加温実験の詳細は前報^{1,2)}参照)。これらの図によると実験値にかなりのばらつきがあるが、全般的に加温処理により脱水性が増加していることが認められる。なお、脱水実験はすべて常温で行った。また、余剰汚泥よりも生汚泥の方が加温による脱水促進効果は大きい。しかし余剰汚泥も、2～4 Kg_f/cm²に加圧すれば、水分率70%にまでは実験室レベルでは圧搾脱水が可能ながわかる。

図3～5中の直線は次の(1)式を当てはめたもので、パラメータa、bの値は表2にまとめら

Table.1 Properties of sewage sludge

Sample No	Kind of sludge	Sampling place	moisture content	thermal treatment condition
1	primary sludge	H sewage treatment plant	94.3	無処理
2				60℃,1h
3	waste activated sludge	H sewage treatment plant	97.2	無処理
4				60℃,1h
5		S sewage treatment plant	96.7	無処理
6				60℃,1h

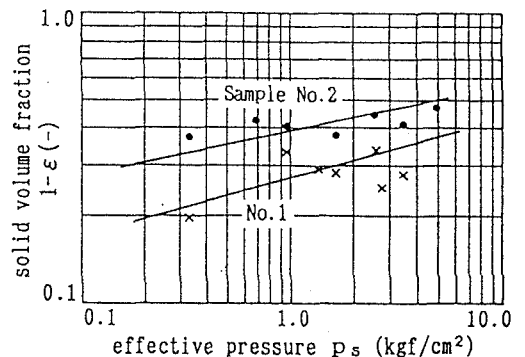


Fig.3 Compressibility of sewage sludge primary sludge No.1, No.2

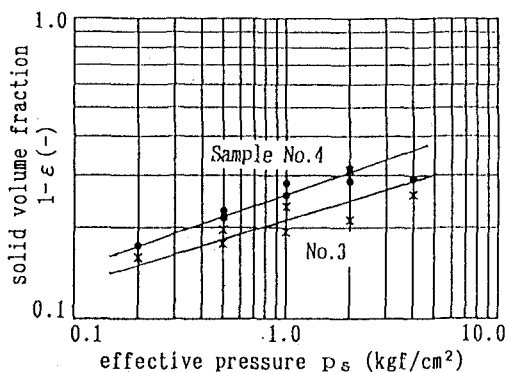


Fig.4 Compressibility of sewage sludge waste activated sludge No.3, No.4

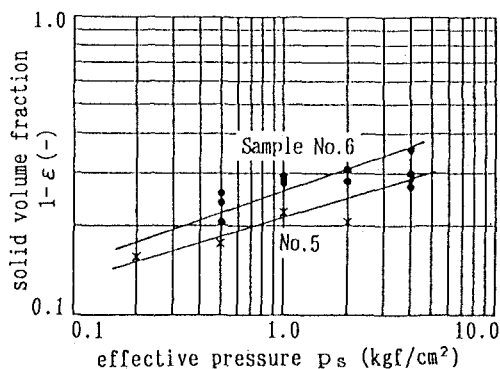


Fig.5 Compressibility of sewage sludge waste activated sludge No.5, No.6

れている。

$$1 - \varepsilon = ap_s^b \quad a, b \text{ 定数} \quad (1)$$

図3の室内実験と平行して、同じ生汚泥試料を同様に60℃で一時間加熱した後、直ちにH浄化センター内の実地のベルトプレスで圧搾を行い、水分率63%のケーキを得た¹⁾。実機のベルトプレスでの圧搾圧は不明であり、圧搾のメカニズムも本実験とは異なるが、最終的なケーキ水分率については実験値に近い値となっている。このことを考慮すると、濃縮余剰汚泥についても実用的な成果が得られる可能性もあり、さらに検討を進める必要が認められる。

本実験で得られたデータを、これまでに報告されている他の凝集体の例^{4, 5)}も加えて図6に示した。空隙率 ε と有効応力 p_s との間には(1)式の他に

$$\varepsilon = a'p_s^{-b'} \quad a', b' \text{ 定数} \quad (2)$$

の関数形^{3, 6)}あるいは他の形^{7-11, 13)}が用いられているため、ここでは図示したような形式でまとめた。図6の縦軸は有効応力の増加に対する空隙率の減少の程度を表す。図6の形式で ε と p_s との関係を表すと生汚泥と余剰汚泥は似た傾向を示している。加熱により汚泥の圧縮が促進される効果は有効応力の小さな部分でより顕著に現れている。また、この図によると本報で得た汚泥の脱水性は例示されている上水汚泥などの脱水性と類似の傾向を有していることがわかる。

Table.2 Numerical values of parameter a and b

Sample No	a	b
1	0.27	0.20
2	0.37	0.16
3 and 5	0.21	0.21
4 and 6	0.26	0.26
sludge from water plant A	0.18	0.21
sludge from water plant B	0.055	0.33
Kaolin floc	0.082	0.34

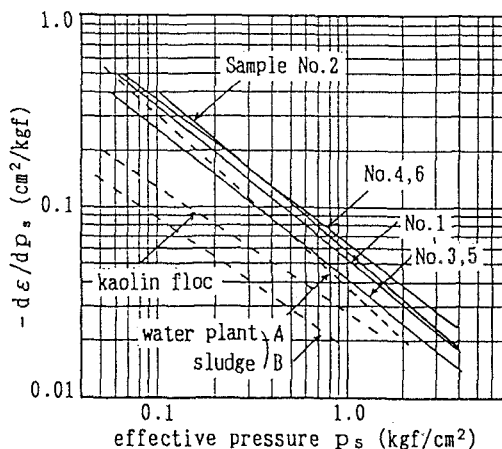


Fig.6 Relationship between $d\varepsilon/dp_s$ and p_s

3. 圧搾脱水過程の解析

3. 1 基礎式

ケーキ端部より濾液の流動方向と逆方向に x 座標をとると、汚泥粒子基準の透水現象がこの場合の運動方程式となり、次式で与えられる。

$$-\frac{K}{\mu} \frac{\partial p_x}{\partial x} = \varepsilon(v_l - v_s) = q \quad (3)$$

ここに v_l 、 v_s はそれぞれ流体及び粒子の移動速度、 μ は粘性係数、 K は上式で定義される透水係数、 q は汚泥粒子基準の流体移動速度（空塔）である。ここで現象の取り扱いを簡単にするため質量座標 w を用いる。

$$w = \int_0^x (1 - \varepsilon) \rho_s dx, \quad dw = (1 - \varepsilon) \rho_s dx \quad (4)$$

w は底部より x までの粒子質量で、 ρ_s は粒子密度である。このとき質量保存の式は次式で与えられる。

$$\frac{1}{\rho_s} \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial w} = 0 \quad (5)$$

$$e = \varepsilon / (1 - \varepsilon) \quad (6)$$

t は圧搾時間、 e は間隙比である。ここで現象は圧搾軸方向に1次元とし、有効応力 p_s と過剰間隙水圧 p_x との和は常に圧搾圧力 σ に等しいとする。つまり、

$$p_x + p_s = \sigma \quad (7)$$

また、空隙率 ε は有効応力 p_s により一意的に定まると仮定する。つまり

$$\varepsilon = \varepsilon(p_s) \quad (8)$$

とする。(6)、(7)、(8)式から

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\frac{1}{(1 - \varepsilon)^2} \frac{d\varepsilon}{dp_s} \frac{\partial p_x}{\partial t} \quad (9)$$

となり、この式と(3)、(5)式とから次式が得られる。

$$\frac{\partial p_x}{\partial t} = -\frac{(1 - \varepsilon)^2}{d\varepsilon / dp_s} \frac{\partial}{\partial w} \left(\frac{K}{\mu} (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial p_x}{\partial w} \right) \quad (10)$$

この式は過剰間隙水圧が圧搾現象の進行に伴って時間と共に減少して、粒子に作用する有効応力に変わっていく過程を表す式で、類似の関係式は圧搾脱水をはじめ凝集体の圧密沈降などの現象の解析に広く利用されている。^{5, 8, 12, 14, 15, 16)}

3. 2 汚泥の透水係数

透水係数 K を $f(\varepsilon)$ と粒子の比表面積 S_v を用いて次の式で表す¹⁹⁾

$$K = \frac{2}{S_v^2} \frac{1}{1-\varepsilon} f(\varepsilon) \quad (11)$$

透水係数 K と空隙率 ε との関係については、Kozeny-Carman の (12) 式が最も広く用いられており、本報でもまずこの式を基本に考える。

$$K = \frac{1}{S_v^2} \frac{1}{k} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}, \quad f(\varepsilon) = \frac{1}{2k} \frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon}, \quad k = 5.0 \quad (12)$$

一方ここで対象としたような下水汚泥の圧搾などの操作では、初期段階での濃度が非常に薄く、このような範囲にまで (12) 式を利用することには無理があることが報告されている^{17, 18)}。(12) 式はもともと粒子がかなりの高濃度で充填された状態を想定してモデル化されたものであり、これを極端な低濃度域まで拡張して利用することに無理があると考えられる。

粒子と流体との相互作用は透水現象の他に干渉沈降や固液系流動層内の流動現象とも関係が深く、粒子と流体の相互作用という点ではこの三つの現象は共通の取り扱いが可能である。粒子群の沈降速度 u は

$$u = u_0 \cdot \phi(\varepsilon) \quad u_0 = \frac{(\rho_s - \rho_l) d_p^2}{18\mu} g \quad (13)$$

と表される。 ρ_l は流体の密度、 u_0 は粒径 d_p の単粒子の沈降速度であり、 ϕ は空間率関数とよばれ、濃度の増加にともなう沈降速度の減少の度合いを与える。空間率関数としては多くの関数形が提案されているが

$$\phi(\varepsilon) = \varepsilon^2 \cdot 10^{-1.82(1-\varepsilon)} \quad (14)$$

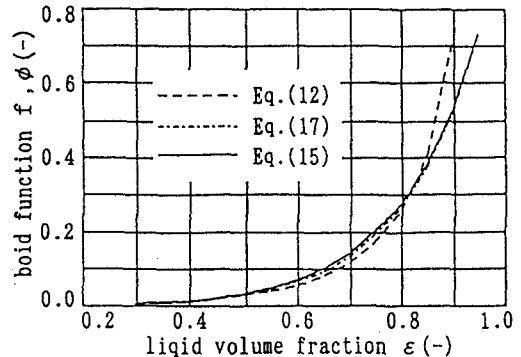
$$\phi(\varepsilon) = \varepsilon^{4.65} \quad (15)$$

などが簡便でもあり広く用いられている。この ϕ と (11) 式の f との間には次の関係がある。

$$f(\varepsilon) = \phi(\varepsilon) \quad (16)$$

つまり両者は類似の現象を異なった視点から検討していることになる^{18, 19, 20)}。このことを考慮して、本報では次の (17) 式を用いた。

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{2k} \varepsilon^3 (1 + \varepsilon + \varepsilon^2 + \varepsilon^4 + 6\varepsilon^{4.5}) \quad (17)$$



(17) Fig.7 Relationship between f, ϕ and ε

図7に (17) 式の値が (12)、(15) 式と比較されている。上式は (12) 式の $1/(1-\varepsilon)$ を Taylor 展開して4項までとり、残りの部分で (15) を近似している。図7に示されているように ε が小さくなるにつれて、(17) 式はKozeny-Carmanの式に、 ε が1に近づくにつれて干渉沈降の式に近似されている。

図3～5の ε と p_s との関係を近似的に(1)式で表しパラメータの値を表2に示した。この関係式と(17)、(11)式を用いると、有効応力と透水係数との関係が図8に示すように求められる。この図は汚泥の圧縮→空隙率の減少→透水係数の低下の様子を示しているが、同じ p_s の値に対しては加温処理された汚泥のほうがより圧縮されるため透水係数が小さくでている。

3.3 数値解

(17)(11)式を(10)式に代入して数値解を求める。この種の式は非線形性が非常に強く数値計算が困難であるが、本報では線形放物形偏微分方程式に関するDufort-Frankelのスキームを応用したものをを用いた⁵⁾。

計算結果と実験値との比較が図9に示されている。図9の横軸は圧搾時間、縦軸は排出液量を示している。このとき計算値を対数目盛の横軸上で平行移動して汚泥粒子の比表面積 S_v の値が求められていて、本実験の場合、約10000(1/cm)であった。図9に示されているように計算値は実験値を満足できる程度に再現している。このことから、ここで示した手法が下水汚泥の圧搾脱水性の評価や装置の開発、あるいは操作などに十分利用できるものと考えられる。

4. おわりに

下水汚泥の圧搾脱水性を調べた。新しく作製した装置を用いて、生汚泥と濃縮余剰汚泥の脱水性を調べて、加温処理が汚泥の脱水性を促進することを確認した。また、この装置を用いて種々の圧搾圧力と汚泥の平衡濃度との関係を求めて、圧搾脱水過程のシュミレーションを行った。このとき、空隙率と透水係数との関係には、従来よく用いられているKozeny-Carmanの式を修正して低濃度からも利用できる関係式を用いた。そして、シュミレーションの数値解が実験値を再現できることを示した。今後、この装置を用いて、各種汚泥の脱水性の比較、より高効率の脱水装置の開発などを進める予定である。

おわりに、本研究には新日本製鐵株式会社と北九州市環境科学研究所アクア研究センターの援助を受けた。また、九州工業大学技術補佐員の原田成光、中村祐弥氏の両君ならびに同4年次生の石田昇、川田昌司の両君は本研究の実験に協力された。これらの方々に感謝する。

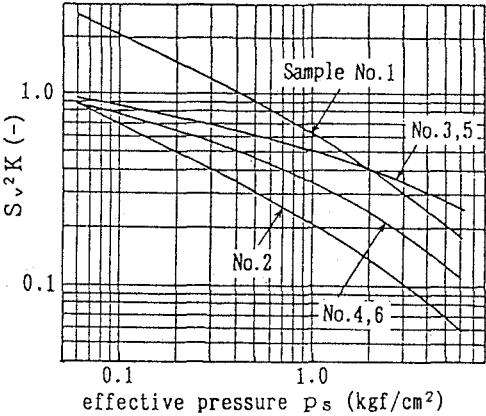


Fig.8 Permeability as function of p_s

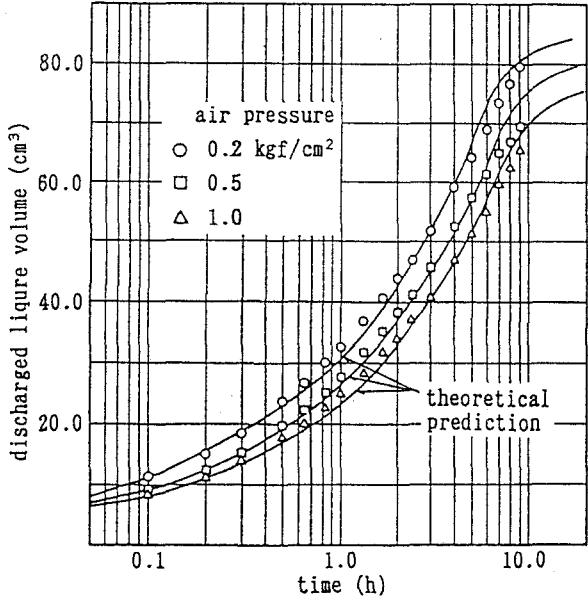


Fig.9 Constant pressure filtration process

参考文献

- (1) 藤崎一裕、河野一輝、寺師政広、鶴田暁:加温浮上による下水汚泥の濃縮、第30回環境工学研究フォーラム講演集、pp.28-30、1993
- (2) 藤崎一裕、原田成光、寺師政広、神代和幸、篠原良太:余剰汚泥の加温浮上濃縮、第31回環境工学研究フォーラム講演集、pp.43-45、1994
- (3) Shirato, M., Sanbuchi, M., and Murase, T.: Hydraulic Pressure Distribution in Filter-cakes under Constant Pressure Filtration, *Memories of the Faculty of Eng., Nagoya Univ.*, 16, 1-2, pp. 68-79
- (4) 後藤光亀、西村修、佐藤敦久:定率ひずみ圧縮実験による低圧力領域における上水汚泥の脱水特性、水道協会雑誌、Vol. 58, No. 10, pp. 10-18, 1989
- (5) Fujisaki, K. and Shahrel, A.: Sedimentation of Flocculent Suspension, *Proc. of the 6th World Filtration Congress, Nagoya*, pp. 100-103, 1993
- (6) 矢木栄、山崎弥三郎:沈澱濃縮における圧縮脱水過程についての基礎的研究、化学工学、Vol. 24, No. 2, pp. 81-92, 1960
- (7) Landman, K. A., S Sirakoff, C. and White, L. R.: Dewatering of Flocculated Suspensions by Pressure filtration, *Phys. Fluids A3(6)*, pp. 1495-1509, 1991
- (8) Corapcoglu, M. Y., Mathur, S. and Bear, J.: Dynamic Compaction of Saturated Porous Columns, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 119, No. 8, pp. 1558-1578, 1993
- (9) Tiller, F. M., Khatib, Z.: The theory of Sediment Volume of Compressible, Particulate Structures, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 100, No. 1, pp. 55-67, 1984
- (10) Font, R.: Analysis of the Batch Sedimentation Test, *Chemical Engineering Science*, Vol. 46, No. 10, pp. 2473-2482, 1991
- (11) Tiller, F. M., Yeh, C. S. and Chen W.: Generalised Approach to Thickening, Filtration and Centrifugation, *Filtration and Separation*, March/April, pp. 121-216, 1987
- (12) 西村修、後藤光亀、佐藤敦久:重力脱水機構—高速天日乾燥方式への応用—、土木学会論文集、No. 497/II-28, pp. 119-126, 1994
- (13) Font, R.: Calculation of Compression Zone Height in Continuous Thickeners, *AIChE Journal*, Vol. 36, No. 1, pp. 3-12, 1990
- (14) 楠田哲也、古賀憲一、栗谷陽一:汚泥の沈降濃縮に関する研究、土木学会論文報告集、294号、pp. 59-71, 1980
- (15) 栗谷陽一、藤崎一裕:凝集物の圧縮沈降過程に関する一検討、粉体工学会誌、Vol. 16, No. 11, pp. 637-646, 1979
- (16) Kos, P. and Adrian, D. D.: Transport Phenomena Applied to Sludge Dewatering, *Journal of the Environmental Division, Proceedings of ASCE*, Vol. 101, No. EE6, pp. 947-965, 1974
- (17) Wakeman, R. J.: Thickening and Filtration: A Review and Evaluation of Recent Research, *Trans IChemE*, Vol. 59, pp. 147-160, 1981
- (18) Wakeman, R. J.: A Numerical Integration of the Differential Equations Describing the Formation of and Flow in Compressible Filter Cakes, *Trans IChemE*, Vol. 56, pp. 258-265, 1978
- (19) Davies, L. and Dollimore D.: Theoretical and Experimental Values for the Parameter k of the Kozeny-Carman Equations, as Applied to Sedimenting Suspensions, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 13, pp. 2012-2020, 1980
- (20) Landman, K. A. and White, L. R.: Determination of the Hindered Settling Factor for Flocculated Suspensions, *AIChE Journal*, Vol. 38, No. 2, pp. 184-192, 1992