

電気浸透脱水機

Electroosmotic Dehydrator

技術開発本部

近藤 史 朗
Shiro Kondo
佐野 滋
Shigeru Sano

This paper describes our newly developed "Electroosmotic Dehydrator" which is applied to the dewatering of organic compressible sludge such as excess activated sludge, digested sludge and the like.

It also introduces a model of dehydrating mechanism of this Dehydrator. The filtered cake has a moisture content of 55%, or less which is unable to be attained by conventional mechanical methods.

まえがき

下水及び産業廃水処理プロセス等より発生する汚泥は、下水道の普及と処理水質の高度化に伴い年々増大の一途をたどり、汚泥処理処分は、ますます重要な課題となってきた。特に汚泥処理において、脱水処理の占める位置は極めて重要であって、処理処分の経済性、埋立地の制約などの面から、限界脱水技術の開発が急務となっている。そこで従来の機械脱水ではおよばなかったレベルまで脱水するため、界面動電現象の一つである電気浸透現象を、スラッジ脱水に応用し、理論的、実験的検討を踏まえその実用化に成功したのでここに紹介する。

電気浸透脱水において、実用化された例は少ないが、研究は古くから行われており、例えば、1931年には、Schwering 伯が、電気浸透現象を利用し、泥炭の脱水をした例があり、1920年代初頭には独国で2件、英国で1件の特許も出願されている。そして電気浸透と電気泳動に関する定量的な理論は、これよりもさらに40~60年前に Quincke, Helmholtz, Wiedeman らによって与えられている。

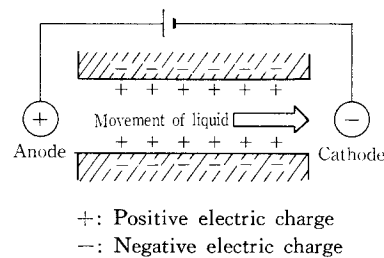
本稿では新しい分野の応用例として、特に余剰汚泥のような圧縮性を持った難沝過性スラッジの脱水における電気浸透メカニズムについて詳しく述べてみたい。

1. 現状脱水技術の壁

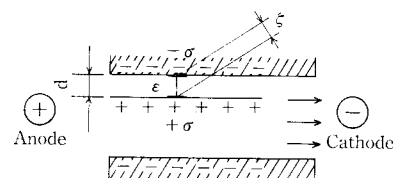
生物処理汚泥やフロックは、固体粒子と比べて結合水、水和水が多く、内部水を保有している。また形状の変形性、圧縮性があり、単に機械的に圧搾圧力を高めても、十分に水分を除去することは難しい。この種の汚泥では、沝過の進行に伴う汚泥の濃縮と、変形による圧密および粒子の集積密度が増すことによって生ずる粒子間の相互作用が、沝液の流出を著しく妨げている。従って沝過圧力を増した場合、含水率が減少するのは、水流出において障害のない、沝材に接するケーキ表面のみであり、ケーキの内部はほとんど沝過が進まない。また沝過圧力を高めれば高めるほど沝過抵抗も増し、ケーキ全体の平均含水率はごくわずかに減少しない。ここに現状の機械的脱水技術の機構上の「壁」がある。従ってVSSが80%と高く、圧縮、変形性の大きな活性余剰汚泥等を機械脱水してもケーキの含水率が80%以下とすることは困難である。

そこで、汚泥の性質を変えることにより脱水性を高める手段として、凍結融解や熱処理などの方法が行われる。これらの方法は、加熱や、氷結作用を通して汚泥自身を、非

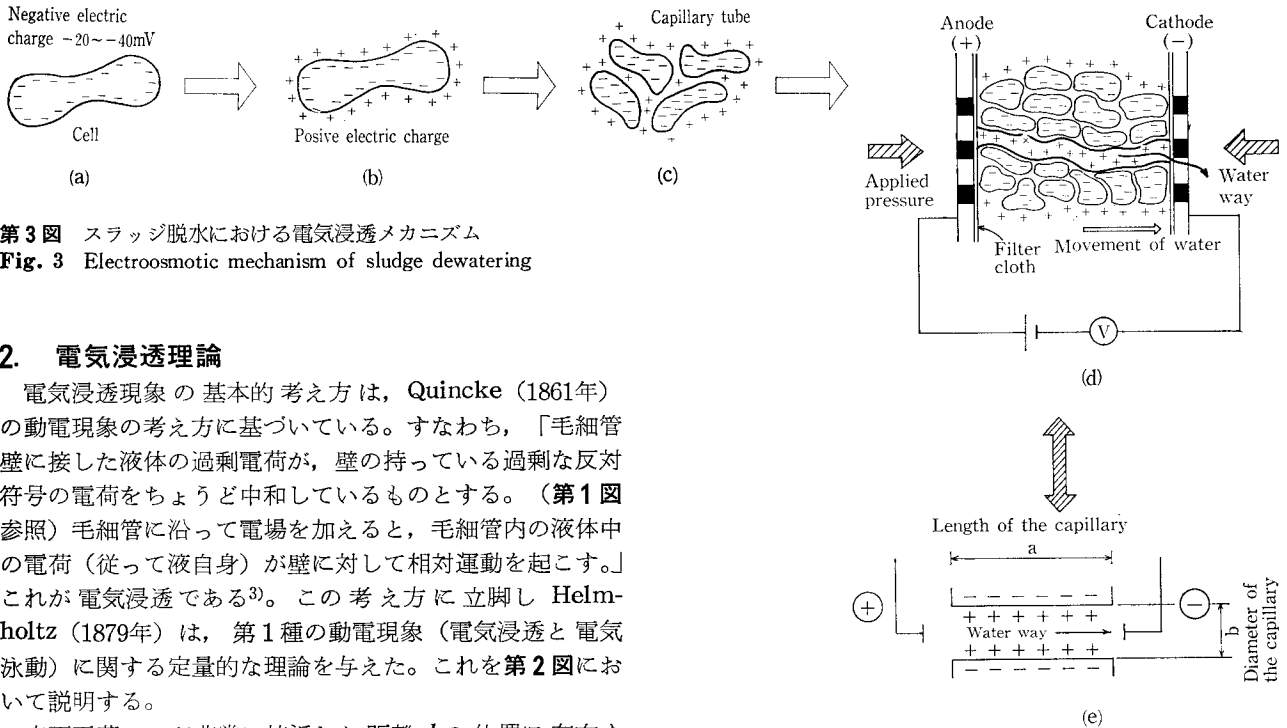
圧縮性にしたり、親水性コロイドを疎水性コロイドに変えたり、ゲル構造を破壊し、その間隙に含まれていた水分を分離したりするものである。これらの方により改質された汚泥をフィルタープレスなどの高圧脱水機で絞ると、活性余剰汚泥においても、脱水ケーキの含水率は40~50%となる。これは現状では最もケーキの含水率を下げることのできる方法である。しかしながら凍結融解法は、凍結時、微生物、細菌等の生物が氷の生長や、汚泥の圧密によって細胞破壊を起こすし、熱処理法においては、熱と圧力によってやはり細胞が破壊され、その分離液は水処理施設にそのまま返送を行った場合、放流水の水質の面から、問題を生じることが各種報告されている²⁾。従って細胞破壊を起こすことなく間隙水はもとより、結合水、水和水までも絞り出す方法が求められることになる。電気浸透脱水法は、この目的にかなった方法であると考えられ、また、その水抜けメカニズムも、定圧沝過と異なり非常に合理的であると考えられるのでここに紹介する。



第1図 毛細管の電気二重層
Fig. 1 Electric double layer in capillary tubes



第2図 毛細管における Helmholtz の電気二重層
Fig. 2 "Helmholtz double layer" in capillary tubes model



第3図 スラッジ脱水における電気浸透メカニズム
Fig. 3 Electroosmotic mechanism of sludge dewatering

2. 電気浸透理論

電気浸透現象の基本的考え方は、Quincke (1861年)の動電現象の考え方に基づいている。すなわち、「毛細管壁に接した液体の過剰電荷が、壁の持っている過剰な反対符号の電荷をちょうど中和しているものとする。(第1図参照)毛細管に沿って電場を加えると、毛細管内の液体中の電荷(従って液自身)が壁に対して相対運動を起こす。」これが電気浸透である³⁾。この考え方に立脚し Helmholtz (1879年)は、第1種の動電現象(電気浸透と電気泳動)に関する定量的な理論を与えた。これを第2図において説明する。

表面電荷 $-\sigma$ が非常に接近した距離 d の位置に存在する液体の電荷 $+\sigma$ によって中和されているものとする(この状態は、電気的には電荷 σ 、電極間距離 d 、電位差 ζ のコンデンサーに等価である。)

極板間の電位差 ζ は

$$\zeta = \frac{d\sigma}{\epsilon} \quad (1)$$

ζ ; 極板間の電位差 (V)
 d ; 〃 の距離 (m)
 ϵ ; 媒質の誘電率 (F/m)
 σ ; 単位面積当りの電荷 (C/m^2)

界面に平行に強さ E の電界を加えた時、液体に作用する力 f_1 は

$$f_1 = \sigma E \quad (2)$$

f_1 ; 単位面積当りの電荷が電界から受ける力 (N)

E ; 界面に平行に与える電界の強さ (V/m)

この f_1 により液体は壁に沿って運動する。そしてこの f_1 が、液体と壁との摩擦抵抗力に等しくなると毛細管内での液体の流速は一定になる。

ニュートンの法則より、この摩擦力 f_2 は

$$f_2 = \frac{\mu \cdot u}{d} \quad (3)$$

f_2 ; 液体と壁との単位面積当りの摩擦抵抗力 (N)

μ ; 液体の粘度 ($kg/m \cdot s$)

u ; 流速 (m/s)

また半径 r の毛細管を通して、単位時間に輸送される液量 v_0 は

$$v_0 = u \cdot \pi r^2 \quad (4)$$

r ; 毛細管の半径 (m)

v_0 ; 移動する液量 (m^3/sec)

電磁気学の法則より

$$E = \frac{\rho I}{s} \quad (5)$$

(1)~(5)より

$$v_0 = \frac{\epsilon \cdot \zeta \cdot I}{\mu k} \quad (6)$$

ρ ; 抵抗率 ($\Omega \cdot m$)

I ; 電流 (A)

s ; 断面積 (m^2)

k ; 導電率 (s/m)

$$= \left(\frac{1}{\rho} \right)$$

(6)式は v_0 (電気浸透力によって生じる移動液量) が多孔性隔膜の厚さと断面積に依存しないことを表わしており [Wiedemann] の法則と言われる。

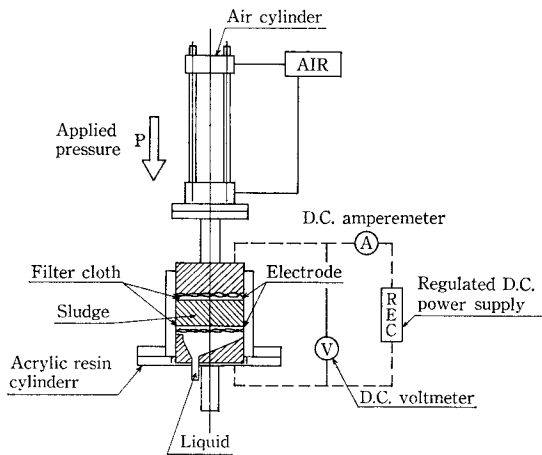
しかし、閉鎖領域における汚泥の脱水を考える時は、各種の境界条件が存在し、液の流れは必ずしも(6)式に一致しないことが判った。

3. 汚泥脱水における電気浸透 Model

各種産業廃水、下水処理より発生する活性余剰汚泥の脱水における電気浸透モデルを次のように考えてみる。そのモデルを第3図に示す。

1) 活性汚泥処理によって発生する余剰汚泥は、その量の約70%が微生物体で占められている。この汚泥の粒子は第3図(a)のように多くの場合 $-10 \sim -39 m \cdot V$ のゼータ電位を持つことが報告されている⁴⁾。(もちろん汚泥の粒子は、この菌体のフロック化した集合体である場合も少なくない。)従って Quincke の考え方によれば、この粒子に接している水は、粒子の持っているマイナスの電荷と釣り合うプラスの電荷を持つことになる。(第3図(b))

2) これらの汚泥粒子の集合体を圧縮すれば第3図(c)のように粒子と粒子の間隙は、水路と考えることがで



第4図 実験装置
Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

- き、毛細管でもある。そしてこの管内はプラスに帯電した液体（水）で満たされることになる。
- 3) 第3図(d)のように脱水カラムの中に、汚泥を入れ、2枚の汙布と穴明の金属板でこれを挟み込み、約 1 kg/cm^2 程度の圧力を加えると、このカラム内での粒子の状態は第3図(c)のようになっていると考えられる。この状態で直流電源を印加する。粒子の間隙は第3図(d)に示されるように、1つの水路と見なすことができる。当然のことながらこの水路はプラスに帯電した水で満たされており、電源の印加により、水はマイナス電極側に引っ張られることになる。
- 4) この状態は第3図(e)の毛細管における Helmholtz の電気2重層モデルで考えることができる。
また以上より汚泥の脱水における電気浸透モデルを考える時、注意すべき条件として次のことが推察される。

理論

実際

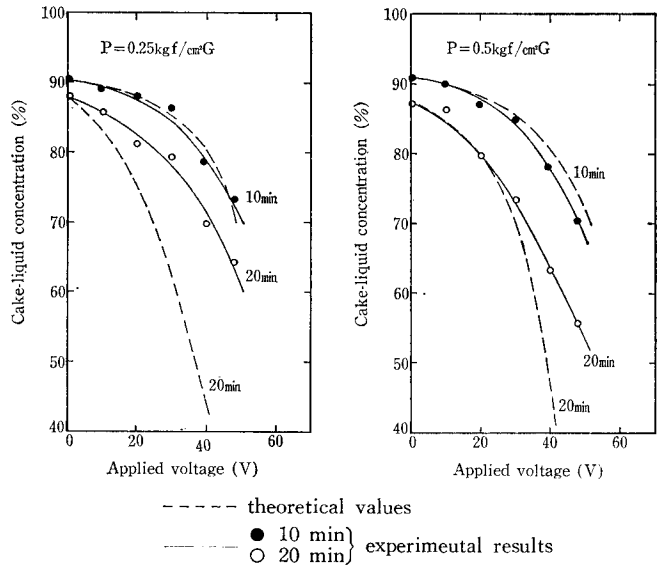
- | | |
|-------------------|----------------|
| (1) 反対電荷の層は平行である。 | 曲りくねっている。 |
| (2) 分岐路はない。 | 多くの分岐路を有する。 |
| (3) aは無限に長い。 | aは有限の長さである。 |
| (4) 管の断面積は一定。 | 毛細管の断面積は一定でない。 |

4. 理論値と実験値

第4図は脱水カラムテスト装置を示す。この装置はカラム内径が 95 mm であり、エアシリンダーにより二枚の汉布と電極板に挟まれた汚泥に、機械的圧搾圧力を加えることができる。電極板の材質はSUS 304、汉布はポリプロピレン製、カラムはアクリル樹脂製である。

テストは汚泥に、 $0.25 \sim 4 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$ の範囲の圧力を加えながら、電極板を通して、この汚泥に $0 \sim 48 \text{ V}$ の直流電圧(電流)を印加する。

このカラムテスト装置での実験結果と(6)式に従って算出した電気浸透理論による計算値との比較を第5図に示す。第5図は圧搾圧力 $0.25 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$, $0.5 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$ 印加電圧 $0, 10, 20, 30, 40, 48 \text{ V}$ 、電圧印加時間 $10, 20 \text{ min}$ の時のそれぞれの関係を示したものである。



第5図 理論値と実験値の比較
Fig. 5 Comparison between theoretical values and experimental results

この結果より次のことが判った。

1) 電圧印加時間10 minの時

- 圧搾圧力 $0.25 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$
—— 実験値と理論値は比較的よく一致している。
- 圧搾圧力 $0.5 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$
—— 実験値と理論値は $0 \sim 20 \text{ V}$ の間はよく一致しているが電圧が $30, 40, 48 \text{ V}$ と上がるにつれて一致しにくくなる。

(6)式に従う理論値よりもさらに含水率は低下する。

2) 電圧印加時間20 minの時

- 実テストにより得られる含水率は(6)式によって計算された理論値ほどには下がらない。
- 印加電圧が高いほど実験値と理論値は一致しなくなる。

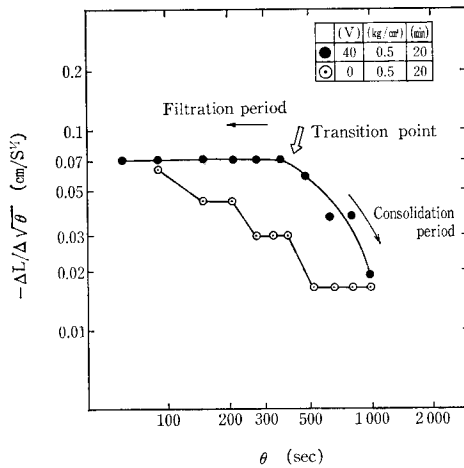
ここで注目したいのは

圧搾時間 10 min —圧搾圧力 $0.5 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$ のデータである。印加電圧が 0 の時は、脱水ケーキの含水率は約 90% であり、しかも 0.5 kg/cm^2 の圧力のみでは、これ以上汚泥を絞ることは難しく、汉液もほとんど出てこないことが確かめられている。ところがこのデータでは、(6)式に従う理論値よりも多くの水が出ていることが分る。すなわち電圧が印加されていない時には、効果が薄かったと思われる定圧圧搾力が電圧の印加と共に効果を発揮し、電気浸透力と相まって水を移動させたものと思われる。また $0.5 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$ で脱水時間が 10 min の条件において、追加テストをしたすべてのデータとも、これと同様の傾向を示した。また 20 min と脱水時間が長くなると、定圧圧搾力と電気浸透力を合せても、それ以上に液の流出を妨げる力が働いていると考えられ、ケーキの含水率は理論値ほどには下がらない。これは3.章の電気浸透モデルのところでも述べたような理論と実際との条件の違いによるものと思われる。特に脱水が進行し含水率が低下してくると、毛細管が細くなるため、毛管吸引力も大となり、液移動の駆動力は弱くなるものと思われる。

第 1 表 汚泥性状

Table 1 Nature of sludge

pH	6.4
SS (mg/ℓ)	7 700
TS (mg/ℓ)	8 400
VSS (mg/ℓ)	6 400
ζ-potential of particles (mV)	-20
Specific electric conductivity (1/Ω·cm)	2.27
Viscosity of filtrate (poise)	0.01



第 6 図 沝過期間より圧密期間への移行点の測定

Fig. 6 Determination of transition point between filtration and consolidation period

5. 定圧沝過法と電気浸透法の相違

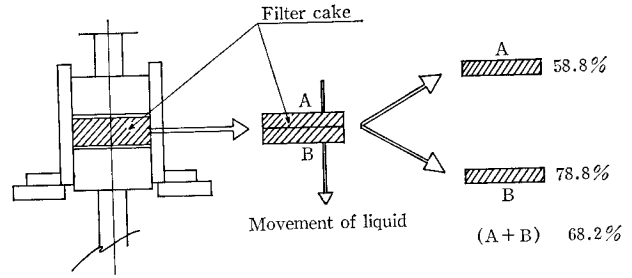
5.1 沝過期間の長さ比較

電気浸透法脱水と従来の定圧圧搾沝過法との相違についてももう少し深く考えてみる。白戸⁵⁾らの方法を使えば、脱水工程は、沝過と圧密の二期間に分けられ、沝過期間より圧密期への移行点をも知ることができる。ここで、できるだけ沝過期間の長いことが、沝過速度が大きく、含水率を効率よく下げ得る条件である。そこで沝過期間から圧密期間への移行点を調べることで、定圧沝過法と電気浸透脱水法（正確には圧力を併用しているので電気浸透+定圧沝過法）を比較した。

テスト装置は第 4 図、テストに使用した汚泥は第 1 表に示す。テストに使用した試料は第 1 表の汚泥に、カチオン系高分子凝集剤を対 D S 比 0.8 % 添加し、これを約 4 ~ 5 % 濃度にしたものである。

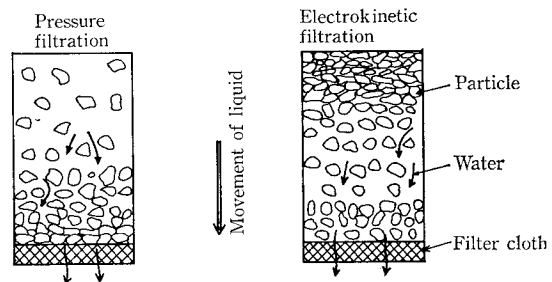
第 6 図より電圧（電流）を印加した場合、沝過期間は約 400 秒。電圧の印加のない定圧沝過法では約 90 秒である。またそれぞれの沝過期間終了時（400 秒、90 秒後）の脱水ケーキ含水率は、別途測定した結果、約 80 %、93 % であった。

これより電気浸透を併用した脱水においては、約 400 秒の間沝過期間が継続したことがわかり、比抵抗の影響を、脱水ケーキの含水率が約 80 % になるまでの長期間にわたり



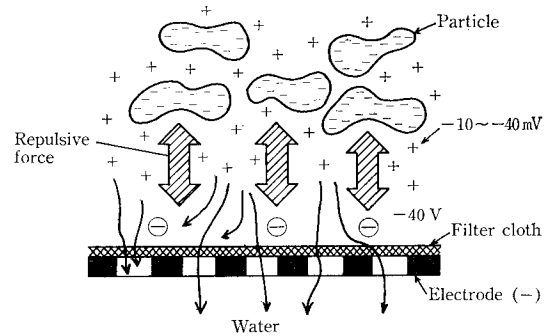
第 7 図 脱水ケーキの水分状態

Fig. 7 Distribution of water in filter cake



第 8 図 脱水メカニズム

Fig. 8 Dewatering mechanism



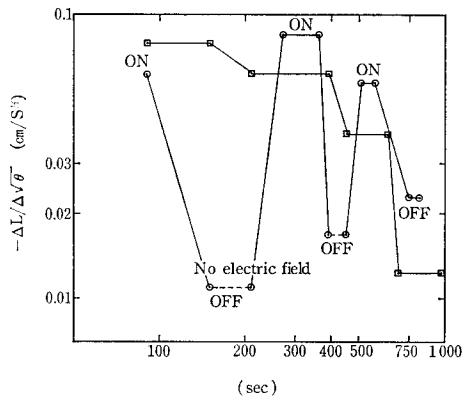
第 9 図 (-) 極付近の反発モデル

Fig. 9 A Model of phenomena on cathode

取除くことができることがわかった。すなわちこの方法は、非常に効率の良い脱水方法と考えられる。

5.2 脱水のメカニズム

次に、なぜこのように沝過期間が長く続くのか、そのメカニズムを考えてみたい。このことを考える上で、一つの示唆を与えてくれると思われる現象がある。それを第 7 図に示す。電気浸透法により脱水した汚泥（条件；P=0.5 kgf/cm²G, V=40 V, t=15 min）を水の移動方向に対し垂直な面で 2 分割し、それぞれの脱水ケーキの含水率を測定した。その結果、水の移動方向側（電極のマイナス極側—第 7 図の B 側）の脱水ケーキ含水率は 78.8 %、反対側（プラス極側—第 7 図の A 側）は 58.8 % であった。他の多くの試料の結果もすべてプラス極側の含水率が低い傾向を示した。ところが第 8 図より、定圧沝過脱水でのケーキ含水率



□ 40 V constant voltage
○ 40 V on, off applied voltage

第10図 電場の影響
Fig. 10 Effect of electric field

は、水の移動方向側の方が低い。このことは従来の定圧沝過脱水法と電気浸透脱水法とでは水抜けのメカニズムが異なっており、定圧沝過脱水を行った時に生じる水抜け側の沝材近辺面での圧密現象が電気浸透脱水法では起っていないことを示している。

この原因は第9図のように考えることができる。沝泥のフロックは、沝過面で沝過による水抜けを通じ、粒子の再配列、崩壊、変形等により、ち密で空隙率の小さい粒子の集まりとなっている。ところが粒子の持つ -20 mV と電極が持つ -40 V の電荷は、沝材を介して反発し合い、この反発力は沝材面付近での沝泥粒子の集積、圧密を妨いでいると考えられる。このメカニズムは従来の機械脱水の最大の難点であるケーキの目づまりを解消している。

6. 電場の効果

上記の反発モデルを検証するため、電場の印加による沝過速度への影響を調べる実験を行った。その一例を第10図に示した。所定の条件下で、圧搾沝過を始めると、時間と共に沝材面付近で圧密が起り、沝過速度が減少する。次にこの状態のまま電場を印加すると(第10図のonの点)沝過速度は急激に上昇し、電場を切ると(offの点)再び沝過速度は減少した。

第10図からわかるように、電場のon, offはまさに沝過速度に即答している。これらにより電場をかけることは沝材面でのケーキ粒子の圧密を抑制し、電気浸透による水の流れを起すと共に、定圧沝過の効率も良くするという効果をもたらしていることがわかった。

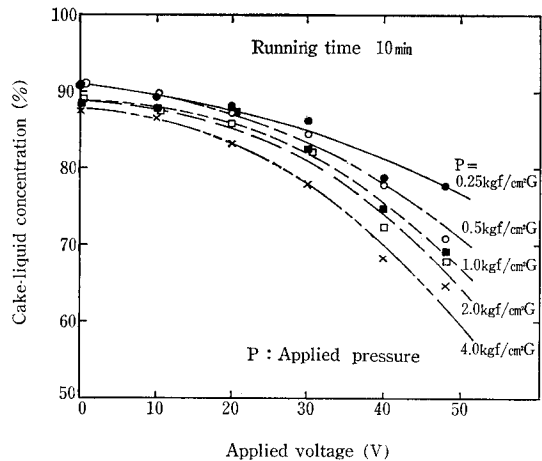
7. テスト結果

カラムテスト機によるテスト結果を簡単にまとめると次のようになる。(テスト機は第4図, テストに使用した沝泥は第1表)

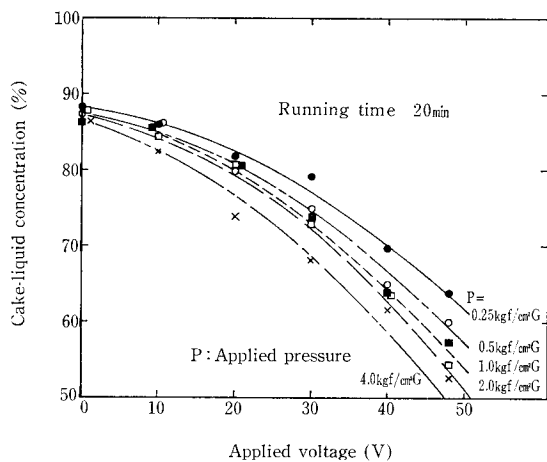
脱水率は電流, 電圧によって調整でき, プロセスに応じた最適な含水率に絞ることができる。

脱水時間を一定とした時の圧力-電圧-含水率の関係を第11図, 第12図に示す。これによると

1) 含水率は50%程度まで下げることができる。しかし



第11図 ケーキ含水率-圧搾圧力-印加電圧の関係
Fig. 11 Cake-liquid concentration, vs. V and P.



第12図 ケーキ含水率-圧搾圧力-印加電圧の関係
Fig. 12 Cake-liquid concentration, vs. V and P.

それ以上は、電圧を上げて、時間を長くしても絞ることはできない。

- 2) 電気浸透と併用する圧搾圧力は高いほど(印加電圧が同じならば)含水率は低下する。もちろん印加電圧の高い方が(圧搾圧力は同じ)含水率は低下する。
- 3) 沝液量と $W \times \theta$ (電力 \times 時間)の関係を第13図に示す。これによると直線の勾配は $1/2$ となる。定圧沝過の場合の沝過期間におけるRUTHの式は沝材の抵抗を無視すれば

$$V = \left(\frac{2A^2 \cdot gc \cdot k}{\alpha \cdot \mu} \cdot P\theta \right)^{1/2} \text{ で}$$

P ; 圧力差 ($\text{kgf}/\text{m}^2\text{G}$)

θ ; 沝過時間 (sec)

V ; 沝液量 (m^3)

α ; ケーキ比抵抗 (m/kg)

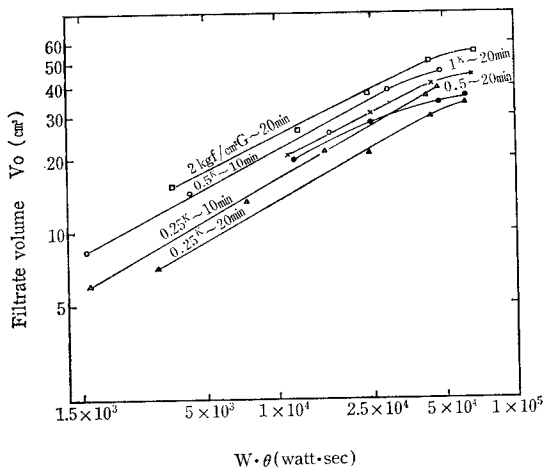
μ ; 沝液粘度 ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)

A ; 沝過面積 (m^2)

gc ; 重力換算係数 ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{kgW}\cdot\text{s}^2$)

k ; 乾ケーキ単位質量当りの沝液量 (m/kg)

V (沝液量) と $P \times \theta$ (圧力 \times 時間) を両対数にプロット



第13図 $W \cdot \theta$ (電力×時間) と V_0 (濾液量) との関係
 Fig. 13 Relation between $W \cdot \theta$ and V_0 at constant voltage

すれば直線の勾配はやはり $\frac{1}{2}$ である。

従って、電気浸透脱水の $W \cdot \theta$ は定圧濾過脱水の $P \cdot \theta$ に対応しているものと思われる。

- 4) 電気浸透によるスラッジの脱水は加圧脱水と併用すると効果がある。第9図で示したように電場の効果により粒子が反発されるものと思われる。また加圧力不足だと毛細管の発生が押えられ、電気浸透現象は起こりにくい。
- 5) 濾液の流れの方向は ZETA (ζ) ポテンシャルによって決まり、有機汚泥の場合は粒子自身がマイナス故、粒子に接する水はプラスとなる。従って水は電極のマイナス側に引き寄せられ移動する。
- 6) 脱水に要するエネルギーは、汚泥中の水分量に比例する。従って効率良く脱水するには、できるだけ電気浸透脱水を行う前に濃縮しておくことが肝要である。また電気浸透により移動する液量は、理論的には(6)式より、流れた電流に比例し、電圧には直接関係しないが、ケーキの厚み(抵抗)等により、最低の初期電圧は必要である。電圧はちょうど定圧圧搾脱水時の圧力に対応していると考えられる。
- 7) 一方向のような欠点もあるため、それぞれの対策が必要である。
 - (1) 電気分解によって陽極の溶出が生じる可能性もあり電極の選定には注意が必要
 - (2) 電極の温度が上昇する。(電極表面温度約 70°C)
 - (3) 電気分解により、下記反応が起こり、ガス発生がある。

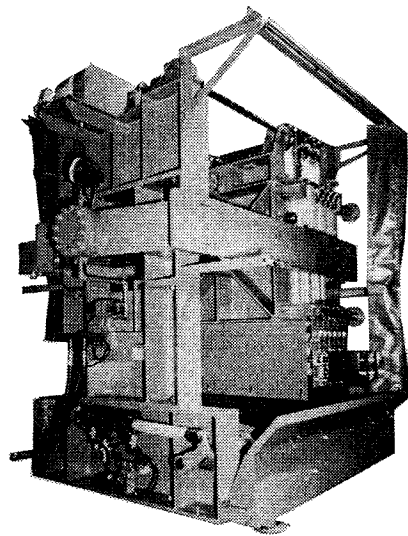
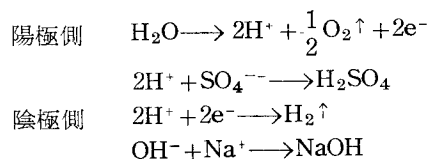


写真1 電気浸透脱水機
 Photo. 1 Electroosmotic dehydrator

むすび

本稿では主として原理、メカニズムを中心に電気浸透法脱水と定圧圧搾濾過法との相違、および電気浸透脱水法の特長、特異性、優位性などをカラムテスト機の実験結果をふまえて述べた。

電気浸透脱水法によれば、活性余剰汚泥等において従来の機械脱水法では達成困難な60%以下の含水率が得られ、新しい脱水法となることが確かめられた。しかし未知の部分も多く、仮定と推測の上に成り立っている部分もあり、本稿についてのご教示、ご指摘等があればいただきたい。

なお現在、当社ではすでに写真1のような実規模大の装置を開発しており、この装置でのテストを行っている。それらの運転結果、特長、経済性などについては次稿で詳述したい。

【参考文献】

- 1) 田島 栄：電気化学通論(1974)第9章 共立出版
- 2) 大宮一夫ほか：試験部報(1979)神戸市における汚泥処理小規模プラントに関する技術調査 日本下水道事業団編 真田和扶：下水道研究発表(1979)分離液性状へ及ぼす熱処理条件の影響について。 大友和雄：下水道研究発表(1977)熱処理分離液の処理について。
- 3) A. シェルドコ：コロイド化学(1968) 共立出版
- 4) 佐藤了ほか訳：生体膜と細胞活動(1981) 培風館
- 5) 白戸紋平：化学工学(1980) 機械的操作用の基礎 丸善