

図・本館

スラッジの電気浸透脱水に関する研究

| |
|----------|
| 名古屋大学図書 |
| 和 984684 |

吉田裕志

| | |
|------|------------|
| 報告番号 | 2 第 3156 号 |
|------|------------|

目 次

| | | |
|---|-------|----|
| 目 次 | ----- | i |
| 主要記号表 | ----- | iv |
| 緒 論 | ----- | 1 |
| 第一章 電気浸透脱水に関する既往の研究 | | |
| 1.1 緒 言 | ----- | 5 |
| 1.2 界面動電現象の固液分離操作への応用 | ----- | 5 |
| 1.3 電気浸透脱水に関する研究 | ----- | 15 |
| 1.3.1 研究の概観 | ----- | 15 |
| 1.3.2 理論的研究 | ----- | 17 |
| 第二章 定電流および定電圧条件におけるスラッジの電気浸透脱水 | | |
| 2.1 緒 言 | ----- | 27 |
| 2.2 脱水進行層および脱水終了層の2層からなる電気浸透脱水モデル に基づく解析 | ----- | 28 |
| 2.2.1 定電流条件における電気浸透脱水式 | ----- | 28 |
| 2.2.2 定電圧条件における電気浸透脱水式 | ----- | 32 |
| 2.3 実験装置および方法 | ----- | 38 |
| 2.4 結果および考察 | ----- | 41 |
| 2.4.1 電気浸透による脱水効果 | ----- | 41 |
| 2.4.2 定電流条件における実験結果と脱水式による計算値との比較 | ----- | 45 |
| 2.4.3 定電圧条件における実験結果と脱水式による計算値との比較 | ----- | 50 |
| 2.5 総 括 | ----- | 56 |
| 第三章 操作条件による電気浸透脱水特性および脱水効率 | | |
| 3.1 緒 言 | ----- | 58 |

| | | |
|----------------------|-------------------------------|-----|
| 3.2 | 定電流条件および定電圧条件における脱水特性 | 58 |
| 3.3 | 操作条件による脱水効率 | 66 |
| 3.4 | 定電圧条件における最適印加電圧の簡易決定法 | 68 |
| 3.5 | スラッジ層内含水率分布および電位差分布の測定 | 72 |
| 3.5.1 | 測定方法 | 73 |
| 3.5.2 | 実測結果および考察 | 74 |
| 3.6 | 総括 | 81 |
| 第四章 電気浸透脱水過程の推定 | | |
| 4.1 | 緒言 | 83 |
| 4.2 | 含水率分布および電位差分布を考慮した電気浸透脱水過程の解析 | 83 |
| 4.2.1 | 定電流条件における脱水過程を表す基礎式 | 83 |
| 4.2.2 | 定電圧条件における脱水過程を表す基礎式 | 86 |
| 4.3 | 実験装置および方法 | 88 |
| 4.3.1 | スラッジ層の実効電場強度の測定 | 88 |
| 4.3.2 | 脱水過程の測定 | 88 |
| 4.4 | 結果および考察 | 91 |
| 4.4.1 | 脱水基礎式および推算法 | 91 |
| 4.4.2 | 定電流条件における脱水過程の推定 | 98 |
| 4.4.3 | 定電圧条件における脱水過程の推定 | 103 |
| 4.5 | 総括 | 107 |
| 第五章 スラッジ層平均含水率の近似推定法 | | |
| 5.1 | 緒言 | 109 |
| 5.2 | 平均含水率に関する理論的考察 | 109 |
| 5.2.1 | 定電流条件における平均含水率 | 109 |
| 5.2.2 | 定電圧条件における平均含水率 | 112 |
| 5.3 | 平均含水率の近似推定 | 113 |
| 5.3.1 | 定電流条件における近似推算式 | 114 |

| | | |
|---------------------------|--|-----|
| 5.3.2 | 定電圧条件における近似推算式 | 117 |
| 5.3.3 | 実測値と推算値との比較 | 118 |
| 5.4 | 総括 | 120 |
| 第六章 電気浸透脱水法の応用および電気浸透脱水装置 | | |
| 6.1 | 緒言 | 122 |
| 6.2 | 活性汚泥法における余剰汚泥の電気浸透脱水 | 122 |
| 6.2.1 | 実験装置および方法 | 123 |
| 6.2.2 | 結果および考察 | 123 |
| 6.3 | 真空脱水を併用した電気浸透脱水 | 130 |
| 6.4 | ベルトコンベヤ方式によるスラッジの連続式電気浸透脱水装置 の試作試験 | 133 |
| 6.4.1 | 試作装置および方法 | 133 |
| 6.4.2 | 試作装置による試験結果 | 137 |
| 6.5 | 総括 | 139 |
| 総括 | | 141 |
| 付記 | | 144 |
| Appendix I | Eq. (2-30) の誘導について | 145 |
| II | スラッジの比電導度 λ と含水比 e_w の関係について | 146 |
| III | 含水率 e_w の算出方法について | 147 |

主 要 記 号 表

| | | |
|------------|-----------------------------|-----------------------|
| A | = 分離面積あるいはスラッジ層断面積 | $[m^2]$ |
| a, b | = 粒子形状に関する定数 | $[-]$ |
| C | = スラッジ固体濃度 | $[wt\%]$ |
| D | = 分散媒の誘電率 | $[F/m]$ |
| E | = 電場強度 | $[V/m]$ |
| E_{av} | = 平均電場強度 | $[V/m]$ |
| E_{cr} | = 臨界電場強度 | $[V/m]$ |
| E_i, E_0 | = 初期電場強度 | $[V/m]$ |
| e | = 空隙比 | $[-]$ |
| e_w | = Eq. (4-7) で定義される含水比 | $[-]$ |
| g | = 重力加速度 | $[m/s^2]$ |
| H | = スラッジ層高さ方向における距離 | $[m]$ |
| H_i, H_0 | = スラッジ層初高 | $[m]$ |
| H_s, H_t | = t 時間におけるスラッジ層高さ | $[m]$ |
| H_∞ | = 脱水終了後のスラッジ層高さ | $[m]$ |
| h | = ろ材面から測定したスラッジ層の任意の高さまでの距離 | $[m]$ |
| I | = 電流密度 | $[A/m^2]$ |
| I_t | = t 時間における電流密度 | $[A/m^2]$ |
| I_0 | = 定電流密度 | $[A/m^2]$ |
| i | = 電流 | $[A]$ |
| i_i | = 初期電流 | $[A]$ |
| i_t | = t 時間における電流 | $[A]$ |
| i_0 | = 定電流 | $[A]$ |
| J | = ろ過流束 | $[m^3/(m^2 \cdot s)]$ |
| J_E | = 電気限外ろ過流束 | $[m^3/(m^2 \cdot s)]$ |
| J_H | = 限外ろ過流束 | $[m^3/(m^2 \cdot s)]$ |
| K_C | = Eq. (4-25) で定義される係数 | $[(kg/m^2)/s]$ |

| | | |
|-----------------|---------------------------|-------------------------|
| K_R | = Ruth の定圧ろ過係数 | $[m^6/s]$ |
| K_V | = Eq. (4-38) で定義される係数 | $[(kg/m^2)/s]$ |
| k | = Kozeny-Carman 定数 | $[-]$ |
| k_E | = $D / 4 \pi \mu$ で表される定数 | $[S \cdot s^2/kg]$ |
| L | = ケーク層の厚さ | $[m]$ |
| \mathcal{L} | = ろ材面からの距離 | $[m]$ |
| \mathcal{L}_c | = 毛細管の長さ | $[m]$ |
| n | = 毛細管の数 | $[-]$ |
| Q_E | = 電気浸透脱水量 | $[m^3]$ |
| $Q_{E\infty}$ | = 定電圧条件における限界脱水量 | $[m^3]$ |
| Q_s | = スラリー流量 | $[m^3/s]$ |
| Q_T | = 全脱水量 | $[m^3]$ |
| q_E | = 電気浸透流量あるいは見かけの電気浸透流速 | $[m^3/s], [m/s]$ |
| q_H | = 機械的ろ過圧によるろ過流量 | $[m^3/s]$ |
| R_c | = ケーク抵抗 | $[Pa \cdot s/m]$ |
| Re | = レイノルズ数 | $[-]$ |
| R_f | = 濃度分極層の抵抗 | $[s/m]$ |
| R_m | = ろ材抵抗あるいは膜抵抗 | $[Pa \cdot s/m], [1/m]$ |
| r_c | = 毛細管半径 | $[m]$ |
| S | = 飽和度 | $[-]$ |
| Sc | = シュミット数 | $[-]$ |
| S_0 | = 粒子比表面積 | $[m^2/m^3]$ |
| T | = Eq. (1-29) で定義される時間 | $[s]$ |
| t | = 時間 | $[s]$ |
| t_e, t_∞ | = 脱水終了（完了）時間 | $[s]$ |
| U | = 毛細管群内の含水量に対する移動液量の割合 | $[-]$ |
| u_E | = 電気浸透速度 | $[m/s]$ |
| u_e | = 電気泳動速度 | $[m/s]$ |
| u_g | = Stokes 域の重力沈降速度 | $[m/s]$ |

| | | |
|--------|--------------------------------|-------------------|
| u_H | = 機械的ろ過圧によるろ過流速 | [m/s] |
| V | = 電位差 | [V] |
| V_s | = スラッジ層に加わる実効電圧 | [V] |
| V_T | = 電極間印加電圧 | [V] |
| V_t | = t 時間における印加電圧 | [V] |
| V_0 | = 定電圧 | [V] |
| v_c | = 機械的圧力による毛細管群内の移動液量 | [m ³] |
| v_c' | = 電気浸透による毛細管群内の移動液量 | [m ³] |
| v_f | = ろ液量 | [m ³] |
| v_0 | = ろ材抵抗に相当する抵抗を示す仮想のケーキを形成するろ液量 | [m ³] |
| W | = 電力消費量 | [W · s], [J] |
| w | = スラッジの湿乾質量から求まる体積基準の含水率 | [—] |

<ギリシャ文字>

| | | |
|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| α | = 電気浸透度 | [m ² /(V · s)] |
| α_c | = ろ過ケーキ層の電気浸透度 | [m ² /(V · s)] |
| α_m | = ろ材層の電気浸透度 | [m ² /(V · s)] |
| β | = 粒子群の電気泳動度 | [m ² /(V · s)] |
| ΔP | = ろ過圧力 | [Pa] |
| ΔP_E | = 電気浸透ろ過圧 | [Pa] |
| ΔP_{EF} | = 電気限外ろ過圧 | [Pa] |
| ΔP_F | = 機械的圧力 | [Pa] |
| ΔP_H | = 機械的ろ過圧 | [Pa] |
| ε | = 空隙率 | [—] |
| ε_0 | = 初期空隙率 | [—] |
| ε_a | = スラッジ層単位体積当りの空気の体積分率 | [—] |
| ε_w | = 含水率 (スラッジ層単位体積当りの液体の体積分率) | [—] |
| ε_{wav} | = 平均含水率 | [—] |
| $\varepsilon_{wav\infty}$ | = 脱水終了時における平均含水率 | [—] |

| | | |
|-------------------------------------|------------------------------------|----------------------|
| ε_{wf} | = 脱水終了時における電極近傍のスラッジ層含水率 | [—] |
| $\varepsilon_{wi} \varepsilon_{w0}$ | = 初期含水率 | [—] |
| ζ | = 界面動電位 (ζ 電位) | [V] |
| η | = Eq. (2-15) で定義される脱水率 | [—] |
| θ | = Eq. (4-27) で定義される t の無次元項 | [—] |
| κ | = 粒子の形状係数 | [—] |
| λ | = 比電導度 | [S/m] |
| λ_i | = 分散媒の比電導度 | [S/m] |
| λ_p | = 粒子の比電導度 | [S/m] |
| μ | = 分散媒あるいはろ液の粘度 | [Pa·s] |
| ν | = 単位ろ液量当りの乾燥ケーキ質量 | [kg/m ³] |
| ξ | = Eq. (4-27) で定義される ω の無次元項 | [—] |
| ρ_i | = 分散媒の密度 | [kg/m ³] |
| ρ_p | = 粒子の密度 | [kg/m ³] |
| σ | = スラリーの比抵抗 | [m/kg] |
| σ_c | = ケーキのろ過比抵抗 | [m/kg] |
| σ_g | = ゲル層のろ過比抵抗 | [m/kg] |
| τ_c | = Eq. (5-10) で定義される変数 | [S/m] |
| τ_v | = Eq. (5-18) で定義される変数 | [m] |
| ϕ_0 | = スラリーの初期粒子体積濃度 | [—] |
| Ψ | = Eq. (4-27) で定義される q_E の無次元項 | [—] |
| ψ | = Eqs. (5-10) および (5-18) で定義される変数 | [—] |
| ω | = 高さ H における単位脱水面積上に堆積した固体質量 | [kg/m ²] |
| ω_0 | = 高さ H_s における単位脱水面積上に堆積した全固体質量 | [kg/m ²] |

多孔性隔膜または粒子充填層で隔てた液の両側に直流電圧を加えると、隔膜または粒子層を通して液の移動が起こる。この現象が電気浸透であり、異相界面に形成される電気2重層が原因となって外部電場によってひきおこされると考えられている。電気2重層に起因する電気浸透および電気泳動のような界面動電現象に関する研究はコロイド化学や電気化学の分野において発展したものであるが、これらの諸現象を利用した応用研究が化学工業をはじめさまざまな分野で行われてきた。電気浸透現象は泥状物質の脱水および液の浸透などに応用でき、脱水操作の工業的応用として最初に泥炭の電気浸透脱水が試みられている。また、電気浸透脱水法がこれまでに実用された主な例は、陶土、土壌、水晶粉末、水酸化マグネシウム、叩解パルプ、カゼイン、顔料、コンクリートなど極めて多く、また多岐にわたっている。すなわち、多孔性物質あるいは粒子層のような物質と液体の接触界面に電気2重層による界面動電位（一般にζ電位と呼ばれている）を有し、液が適当な電導性をもつならば電気浸透による脱水（脱液）が可能であり、スラッジ、ろ過ケーキ、ゲル状物質など半固体状の固液混合物の脱水に応用することができる。

スラッジの脱水は、再資源化を目的とする場合はもちろん、乾燥および焼却処理を行う場合にも必要不可欠な固液分離操作であり、各種工業プロセスにおいて排出される大量のスラッジあるいは分離困難な各種スラッジの高度分離技術の必要性から、近年ますます重要視されてきている。従来、スラッジの脱水法は、重力による自然脱水のほか、遠心脱水、真空または加圧による通気脱水、圧搾脱水、および振動脱水などの機械的な脱水操作によるものが大部分であり、これらの脱水装置が工業的に広く実用されている。しかしながら、微細なコロイド粒子からなるスラッジやゲル状のスラッジなどに対しては、これら機械的脱水法を適用することは極めて困難であり、この種の難脱水性スラッジを対象として有用な脱水技術および脱水装置の開発が最近強く要望されている。

電気浸透脱水は、広範に利用されている機械的脱水法とはその脱水機構が異なり、粒子層内に発生する電気力を利用して脱水するため、微粒子を含むスラッジやゲル状スラッジなどのいわゆる難脱水性スラッジに対して特に有効である。電気浸透脱水法についてはこのようにその有用性が認められるので比較的多くの研究が行われてきたが、限定された条件での実験的研究がほとんどで理論的研究は極めて少なく、装置の設計および操作に対す

る基礎理論は皆無といえる現状であり、またその高性能化のための技術開発もほとんど行われていないといえる現状である。

スラッジの電気浸透脱水を行う場合、その操作は定電流あるいは定電圧の条件のもとで直流電場を加えることによって実施でき、電気浸透脱水操作は定電流および定電圧の操作条件に大別して扱うのが合理的と考えられる。本研究は、このような見地から、操作条件による電気浸透脱水特性を考察するとともに、各操作条件における脱水過程の解析方法を検討し、脱水操作および装置の設計上の理論的指針を提出することを目的として行った。また、電気浸透脱水法の実用化において考慮すべき知見および連続式の電気浸透脱水装置の考案試作例を提示した。

本論文の第一章においては、沈降濃縮、ろ過、脱水などの各種固液分離操作への界面動電現象の応用に関する研究を概説するとともに、電気浸透脱水法に関する研究の経過および現況を概観した。つづいて、本研究の解析方法との関連を考慮して、スラッジ層内の空隙を毛細管構造と見なして電気浸透脱水に関係する諸量を解析した駒形の研究、および重力沈降において最大圧縮濃度に達したスラッジに電場を加えた場合の電気浸透脱水過程の解析に関する油川の研究を概説し、電気浸透脱水に関する数少ない理論的研究の現状を述べた。

第二章では、定電流条件および定電圧条件における非圧縮性および圧縮性スラッジの電気浸透脱水操作の理論的解析法を得ることを目的として、脱水過程におけるスラッジ層の内部を脱水進行層および脱水終了層の2層からなるものと見なした比較的単純な電気浸透脱水モデルを提案し、各操作条件における脱水過程の理論的解析を行い、脱水速度、脱水量、および電力消費量などについての電気浸透脱水式を得た。また、電気浸透による脱水効果を主としてより一般的な圧縮性スラッジについて定電流および定電圧の両操作条件のもとで実験的に検討し、電気浸透脱水が機械的方法では脱水困難なベントナイトのようなゲル状スラッジに対して特に有効であることを明らかにするとともに、電気浸透脱水式の妥当性を検討してその有用性を示した。

第三章では、圧縮性スラッジについて各操作条件における電気浸透脱水特性を実験的に

明らかにするとともに、脱水速度および電力消費量と脱水量の関係など脱水効率に及ぼす操作条件の影響を実験結果および電気浸透脱水式を用いて検討し、脱水量を増大するためには定電流条件の方が有効であるが、消費電力に対する脱水量は定電流条件の場合より定電圧条件の方が大きくなることを示した。また、定電圧条件において限界脱水量に対する印加電圧の最適値が実験的に簡易決定できることを示した。さらに、脱水過程におけるスラッジ層内の含水率分布および電位差分布の経時変化を実測して脱水に伴って生ずるスラッジ層の内部状態の変化を示すとともに、電気浸透脱水過程における含水率分布は電位差分布と密接な関係をもち両者が相互に影響を及ぼし合って脱水が進行することを実験的に明らかにし、これらの実測結果から、操作条件による脱水特性および脱水効率について考察を加えた。

第四章では、スラッジ層内の含水率分布および電位差分布の変化を考慮して圧縮性スラッジの電気浸透脱水過程のより厳密な理論的解析を行い、定電流条件および定電圧条件における脱水過程の理論的推定法を得た。各操作条件についてそれぞれ理論解析して得た脱水推定式にスラッジの含水率と比電導度との実験的関係を用いて、脱水過程における含水率分布、電位差分布、脱水量、スラッジ層高、および平均含水率などの諸特性値の経時変化を推算し、これらの推算値と実験結果との比較検討を行い、各操作条件における電気浸透脱水過程がほぼ推定できることを明らかにした。また、本推定法をさらに発展させる場合に考慮すべき問題点を示した。

第五章では、電気浸透脱水過程における圧縮性スラッジ層の平均含水率の簡易推定のために、脱水終了後のスラッジ層の平均含水率およびスラッジ層高を用いて脱水進行中の平均含水率の理論的推定式を導出し、この理論式に立脚して実験式を求めることによって各操作条件における平均含水率の近似推定法を得た。この近似推定法による推定結果と、平均含水率の実測結果および含水率分布の推定結果から算出した平均含水率の値とを比較して推定法の妥当性を検討し、電気浸透脱水過程における平均含水率が各操作条件において近似推定できることを示した。

第六章では、電気浸透脱水法を工業的に応用する場合の指針を得ることを目的として、

下水，廃水処理における活性汚泥法により発生する難脱水性の余剰汚泥を電気浸透脱水した場合の有効性を明らかにするとともに、電気浸透脱水操作を実用する場合に生ずる若干の問題点を指摘し、その改善策の1つとして機械的脱水法と電気浸透脱水法との併用を検討した。また、回分式電気浸透脱水装置で得た知見に基づき、大量のスラッジの連続処理を目的として、ベルトコンベヤ方式による連続式電気浸透脱水装置を考案試作し、その試験結果を考察して実用の可能性のあることを示した。

第一章 電気浸透脱水に関する既往の研究

1.1 緒 言

電気浸透現象は、電気泳動現象とともに1808年に F. Reussによって発見されたといわれており^{1, 2)}、その後これらの現象を利用した応用研究がさまざまな分野で行われてきた。電気浸透および電気泳動は、異相界面に生ずる電気2重層が電場によって相対運動する現象であり、微粒子分散系の固-液および液-液分離、スラッジの脱水、タンパク質の分離精製、イオンの除去などの広範な分離操作に応用できる。1900年、C. B. Schwerinが泥炭の脱水に最初に電気浸透現象を応用して以来、電気浸透脱水法は極めて多くまた多岐にわたる物質を対象に利用されてきた^{1~3)}。しかしながら、既往の研究はいずれも特定試料を対象とした実施例についての実験的研究が大部分であり、電気浸透脱水操作に一般に利用できる理論的解析方法は皆無といえる現状である。

本章では、電気浸透および電気泳動などの界面動電現象を、沈降濃縮、ろ過、脱水などの各種固液分離操作に応用した既往の研究について概説するとともに、電気浸透脱水に関する既往の研究および現況を概観し、電気浸透脱水法の特徴と問題点について述べる。また、本研究における解析方法と既往の研究との関連を明らかにするために、電気浸透脱水に関する数少ない理論的研究である駒形^{3, 5)}および油川⁴⁾の研究について概説する。

1.2 界面動電現象の固液分離操作への応用

一般に、沈降濃縮、ろ過および脱水などの固-液系混合物の分離操作には、重力、遠心力、加圧または減圧などを推進力とした機械的分離法が主として用いられている。しかしながら、分散粒子が微細なコロイド粒子の場合や、分散粒子と分散媒の密度差が極めて小さい粒子分散系では、重力や遠心力を利用する機械的分離の適用が極めて困難となるが、電場を用いればこのような微粒子分散系においても、粒子の電荷に作用する電気力を推進力として効果的に分離操作を行うことができる⁶⁾。

固-液、気-液、液-液分散系の粒子異相界面には、正または負の電荷が発生し、一般に0.01~0.1V程度の電位差すなわち界面動電位（ ζ 電位）が生ずる。したがって、これらの分散系に直流電場を加えれば、分散粒子は電気力を受けて電極方向に移動し（電気泳動）、また固定粒子層の場合には分散媒が粒子層内を移動する（電気浸透）。換言すれば、

電気泳動および電気浸透現象は、異相界面に生ずる電気2重層が原因となって外部電場によってひきおこされる粒子-分散媒間の相対運動であり、界面動電現象は、このような異相界面の電気2重層に起因して起こる一連の動的現象の総称である。界面動電現象に関する基礎的研究は、コロイド化学および電気化学の分野において現象論的および理論的發展を遂げたものであるが、これらの現象を利用した応用研究が、化学工業をはじめさまざまな工業分野で行われ、その応用範囲は広く、脱水、濃縮、電着、精製、分離、洗浄、回収および分析などの諸操作にわたっている^{1~3)}。電気泳動および電気浸透は、分散粒子と分散媒が相対運動する現象であるから、特に微粒子分散系の分離法として優れた特性と応用の可能性をもっており、1960年代頃より電場を利用した分離操作についての多くの工学的研究が行われるようになった^{4, 6~34)}。以下には、その中から沈降、ろ過、脱水などの固液分離操作へ界面動電現象を応用した主な研究を概説した。

油川^{4, 8)}は、スラリーに直流電場を加えて沈降実験を行い、電気泳動作用によって沈降が著しく促進されると同時に、沈積したスラッジ層では電気浸透によって脱水が起こりスラッジの濃縮度が増大することを実証し、スラリーのような比較的高濃度の沈降界面の電気泳動速度を得るため、粒子間の相互作用を考慮して希薄懸濁液を対象とした Henry の電気泳動速度式³⁾を修正し、Eq. (1-1)を提出した。

$$u_e = \frac{\zeta D E_{av}}{\kappa \pi \mu} \left(\frac{a \lambda_1}{b \lambda_1 + \lambda_p} \right) (1 - \phi_0)^{2.5} \quad (1-1)$$

ここに、 u_e [m/s] は電気泳動速度であり、 ζ [V] は ζ 電位、 D [F/m] および μ [Pa·s] はそれぞれ分散媒の誘電率および粘度、 λ_1 および λ_p [S/m] はそれぞれ分散媒および粒子の比電導度、 E_{av} [V/m] は沈降槽内の平均電場強度、 κ [—] は粒子の形状係数、 a [—] および b [—] はそれぞれ粒子形状に関する定数、 ϕ_0 [—] は沈降開始時におけるスラリー中の懸濁粒子の体積濃度である。また油川は、後に詳述するように、沈積スラッジ層の電気浸透脱水過程における圧縮沈降区間についてスラッジ層の界面高さ H_t [m] と時間 t [s] の関係を次式で表した。

$$\frac{H_0 - H_t}{H_0} + \phi_0 \ln \left(\frac{H_0 - H_0 \phi_0}{H_t - H_0 \phi_0} \right) = \frac{\zeta D E_{av}}{\kappa \pi \mu} t \quad (1-2)$$

ここに、 H_0 [m] はスラッジ層の初高である。Eqs. (1-1) および (1-2) について実験的に検証するとともに、これらの式に基づき、電場を加えたときの沈降濃縮過程における回分沈

降曲線の推定法を提示し、重力沈降の場合に成立するWork-Kohlerの相似法則が電場を加えた場合にも適用できることを明らかにした¹¹⁾。さらに油川⁹⁾は、スラリーに電場を加えたときの特性を水平流式矩形沈降槽に応用して、分離効率 η_e [-]がEq.(1-3)で表されることを報告し、電場を加えることにより分離効率が增大することを明らかにするとともに、 η_e が印加電場強度に比例し、また所要電力の0.5乗に比例して増加することを示した。

$$\eta_e = \eta_g + (p_g - p_e) + \frac{A}{Q_s} \left(\int_0^{p_e} u_e dp - \int_0^{p_g} u_g dp \right) \quad (1-3)$$

ここに、 η_g [-]は重力沈降のみによる分離効率、 $A[m^2]$ は分離面積、 $Q_s[m^3/s]$ はスラリー流量、 $u_g[m/s]$ は、Stokesの沈降速度式で表される重力沈降速度、 p_g [-]は、スラリー粒子の中で重力沈降によって完全に分離される粒子より小さい粒子径をもつ懸濁粒子（沈降速度 u_g ）の割合、 p_e [-]は、電場を加えたときに沈降速度が u_g と u_e の合速度になると仮定した場合に完全に分離できる沈降速度を有する粒子より小さい粒子径の懸濁粒子の割合である。また油川¹²⁾は、電場を利用してスラリーの連続式沈降濃縮槽を試作し、装置の設計および操作に対する指針を与えている。

白戸ら²⁰⁾は、沈降初期から圧密期間に入る高濃度スラリーの場合を対象として、圧密沈降層に直流電場を作用させると印加電場強度の増加とともに沈降速度が著しく増大することを示した。また、電場を加えたときの圧密沈降について、粒子は電気力を受けるので粒子の自重が見かけ上増大して層内に過剰液圧が発生すると考え、粒子に作用する電気力を考慮して粒子の自重のみによる圧密沈降理論を修正し、電場を加えた場合の圧密沈降過程を次の基礎方程式で表した。

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 P_s}{\partial r^2} - \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{d\sigma}{dP_s} \left\{ \left(\Gamma - \sigma \frac{d\Gamma}{d\sigma} \right) + \frac{\partial P_s}{\partial r} \right\} \frac{\partial P_s}{\partial r} \\ = \mu \rho_p \sigma \left(- \frac{de}{dP_s} \right) \frac{\partial P_s}{\partial t} \end{aligned} \quad (1-4)$$

上式における $\Gamma[N/m^3]$ は電気力を考慮した見かけ粒子比重量であり、次式で表される。

$$\Gamma \equiv (\rho_p - \rho_l)g + F \quad (1-5)$$

ここに、 $P_s[Pa]$ は沈降層内の部分粒子圧縮圧力、 $r[m]$ は層底から測った任意の高さにおける単位断面積当りの固体体積、 $\sigma[m/kg]$ は部分比抵抗、 ρ_p および $\rho_l[kg/m^3]$ はそれぞれ

れ粒子および分散媒の密度、 g [m/s²]は重力加速度、 F [N/m³]は固体単位体積当りの電気力、 e [－] は部分空隙比であり、部分空隙率 ε [－] を用いて $e = \varepsilon / (1 - \varepsilon)$ で表される。白戸らはこのように、前述の油川の解析方法とは異なって、圧密現象という観点から電場を加えた場合の沈降濃縮過程を解析し、Eq. (1-4)に基づいて圧密沈降層内の ε 分布および沈降界面高さの変化を推定して電場の影響について検討した。また白戸ら³⁴⁾ は、最近、横流式沈降槽の流路に流れに直交するようにある高さのフィン（一種の邪魔板）を一定間隔に配置したフィン付沈降槽について、希薄スラリーに電場を加えた場合の分離特性および分離効率の検討を行い、分離効率が增大することを明らかにするとともに、懸濁粒子の電気泳動速度を考慮した表面（面積）負荷率を定義して分離効率に及ぼす電場の影響が評価できることを示した。

松本ら²⁶⁾ は、アルミホイル製造の圧延工程より生ずる廃ケロシン中のアルミナや酸化鉄などの不純物粒子を除去する目的で、非水溶液系スラリーに電場を加えて電気泳動現象を利用した沈降分離実験を行い、界面沈降速度を測定することによって電場印加の有効性を示した。また、溶液の電気伝導度が非常に小さいケロシンのような非水系の場合には、微粒子群の電気泳動度 β [m²/(V·s)] ($=u_e/E_{av}$) がRichardson-Zakiの関係式を用いて次式のように表現できることを示した。

$$\beta = \beta_s (1 - k_h \phi_0)^{4.65} \quad (1-6)$$

ここに、 β_s [m²/(V·s)] は単一粒子の β の値、すなわちRichardson-Zakiプロットにおいて $\phi_0 = 0$ のときの β 値、 k_h [－] は水力学的体積係数である。Eq. (1-6)によって整理した結果より、廃ケロシン中の微粒子群の β 値は、 $\phi_0 < 0.03$ のような低濃度の範囲では印加電場強度の影響を受けるが高濃度ではほとんど受けないことを明らかにした。

界面動電現象をろ過操作に応用した研究は、主に、Moulikら^{10, 15)} および油川ら^{14, 17, 24)} によって行われ、スラリーに電場を加えながらろ過する場合には、スラリー層における電気泳動作用によってろ材面に生成するケーキ量が減少し、かつケーキ層およびろ材層内に生ずる電気浸透作用によってろ過抵抗が減少するという2つの効果によってろ過速度が著しく増大することを明らかにした。Moulikらは、この操作を "Electrophoretic Filtration" あるいは "Electrofiltration"、また油川らは、ケーキろ過では電気浸透がろ過速度に大きく影響することから、"電気浸透ろ過 (Electrokinetic Filtration)" と称している。

通常の定圧ろ過では、ろ過方程式は次式のように表される。

$$\frac{t}{v_f} = \frac{v_f}{K_R} + \frac{2v_0}{K_R} = \left(\frac{\sigma_c \mu \nu}{2 \Delta P_H A^2} \right) v_f + \frac{\mu R_m}{\Delta P_H A} \quad (1-7)$$

ここに、 v_f [m³] は時間 t におけるろ液体積、 v_0 [m³] はろ材抵抗 R_m [1/m] と等価の抵抗を示す仮想ケーキを形成するのに必要な仮想ろ液体積、 K_R [m⁶/s] はRuthの定圧ろ過係数、 σ_c [m/kg] は平均ろ過比抵抗、 ν [kg/m³] は単位ろ液体積当りの乾燥ケーキ質量、 ΔP_H [Pa] はろ過圧力、 A [m²] はろ過面積である。Moulikら¹⁰⁾ は、機械的ろ過圧 ΔP_H を作用させながら電場を加えてろ過する場合は、ろ材層に電気浸透が起こりろ材抵抗が減少すると考え、電場を加えた場合の見かけろ材抵抗 R_m' が次式で表せるとした。

$$R_m' = \frac{R_m}{(u_H + u_E)/u_H} = \frac{R_m}{(1 + k_E \xi E/u_H)} \quad (1-8)$$

ここに、 u_H [m/s] および u_E [m/s] はそれぞれ機械的ろ過圧によってろ材層を通過するろ過流速および電気浸透流速、 k_E [m²/(V·s)] は $k_E = D/4\pi\mu$ で表される定数、 E [V/m] は印加電場強度である。電場を加えたろ過では、Eq. (1-7) の R_m の代りに Eq. (1-8) の R_m' を用いて修正する必要がある、また、スラリー中の粒子は電気泳動によってろ液の流れとは反対方向に移動するので、ろ材面に向かう液流速と電気泳動速度が等しくなると粒子が静止することを指摘した。このときの電場強度を臨界電場強度 E_{cr} [V/m] と定義し、 $E < E_{cr}$ の条件において、ケーキ層内の電気浸透効果が無視できる場合の定圧ろ過が、Eqs. (1-7) および (1-8) を用いて次式で表せることを示した。

$$\frac{t}{v_f} = \left(\frac{\sigma_c \mu \nu}{2 \Delta P_H A^2} \right) \left(\frac{E_{cr} - E}{E_{cr}} \right) v_f + \frac{\mu R_m}{\Delta P_H A (1 + k_E \xi E/u_H)} \quad (1-9)$$

なお、 $E \geq E_{cr}$ では、ケーキはまったく生成されずケーキ抵抗が0となるので、電場を加えることによってケーキをまったく生成させないでろ過操作を行える可能性を示唆した。この条件では Eq. (1-9) の右辺第1項は無視できる。

Eq. (1-9) がケーキ層に生ずる電気浸透作用については無視して得られたのに対して、油川ら¹⁴⁾ は、ケーキ層内の電気浸透効果が実際には無視できないほど大きくケーキろ過速度に影響を与えたとし、ケーキ層には ΔP_H に加えて電気浸透ろ過圧 ΔP_E [Pa] が作用するものと考え、 ΔP_E が粒子層内の電気浸透流れに関する理論的考察から次式で表せることを示した。

$$\Delta P_E = -\frac{q_E \mu L}{A} \int_0^1 \frac{k S_0^2 (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} d\left(\frac{\mathcal{L}}{L}\right) \quad (1-10)$$

ここに、 $q_E [\text{m}^3/\text{s}]$ は定常状態における電気浸透流量で、 $q_E = A \varepsilon u_E$ の関係がある。 $k [-]$ はKozeny-Carman定数、 $S_0 [\text{m}^2/\text{m}^3]$ は比表面積、 $\mathcal{L} [\text{m}]$ はろ材面から測ったケーキ層の厚さ $L [\text{m}]$ 方向の距離である。電場のみを加えてケーキろ過を行う場合、電気浸透ろ過流量 q_E は、Eq. (1-10) より次式のように表すことができ、Darcy式と同形となることを示した。

$$q_E = \frac{K_m A \Delta P_E}{\mu L}, \quad K_m = -1 \int_0^1 \frac{k S_0^2 (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} d\left(\frac{\mathcal{L}}{L}\right) \quad (1-11)$$

したがって、 ΔP_H および ΔP_E が同時に加えられたときの全ろ過流量 $q_T [\text{m}^3/\text{s}]$ は、機械的ろ過圧によるろ過流量を $q_H [\text{m}^3/\text{s}]$ として Eq. (1-12) で表すことができ、これらの解析結果に基づいた実験的検討によれば、 ΔP_E および q_E は、ともに E に比例する。

$$q_T = q_H + q_E = \frac{K_m A}{\mu L} (\Delta P_H + \Delta P_E) \quad (1-12)$$

また油川ら¹⁷⁾ は、電場を加えた回分式定圧ろ過について、スラリー層における電気泳動およびケーキ層並びにろ材層における電気浸透の両者の作用を考慮して、Ruthの定圧ろ過式と形式的にまったく同様な次式を提出し、電気浸透ろ過では電場の影響を考慮した修正Ruth式が適用できることを示した。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dt}{dv_f} &= \frac{\sigma_c \mu \nu}{(\Delta P_H + \Delta P_E) A^2} \left(\frac{E_{cr} - E}{E_{cr}} \right) v_f + \frac{\mu R_m}{(\Delta P_H + \Delta P_E) A} = \frac{2}{K_E} (v_f + v_0) \\ \text{ここに、} \quad K_E &= \frac{2(\Delta P_H + \Delta P_E) A^2}{\sigma_c \mu \nu'}, \quad v_0 = \frac{R_m A}{\sigma_c \nu'}, \quad \nu' = \nu \left(\frac{E_{cr} - E}{E_{cr}} \right) \end{aligned} \right\} (1-13)$$

また、ケーキ層およびろ材層に生ずる電気浸透ろ過圧 ΔP_E は E に比例して増大し、ケーキの比抵抗 σ_c は E の増大とともに著しく減少することを明らかにした。さらに、界面動電現象を利用した実用的な連続式ろ過装置として、一般に実用されているOliver型回転円筒真空ろ過機に電場が印加できるように改良を加えて、連続式の電気浸透ろ過装置に関する実験的検討を行い、その装置の有用性を示すとともに、Eq. (1-13) に基づいてOliver型ろ過機を用いた電気浸透ろ過の基礎方程式として次式を与えた²⁴⁾。

$$\frac{dv_f}{dt} = \frac{K_E}{2K_E r (B/N) + v_0^2} \quad (1-14)$$

ここに、 $r[-]$ はろ過機の回転数、 $B[-]$ および $N[1/s]$ はそれぞれろ過機の浸液率および回転速度である。また、ろ液量 v_f が電力消費量 $W[J]$ と次式の関係で表されることを示した^{17, 24)}。

$$v_f = c W^d \quad (1-15)$$

ここに、 $c[m^3]$ および $d[-]$ はそれぞれ実験定数である。

Henry ら¹⁸⁾ は、ろ過面に平行な流れを与える十字流式ろ過においてろ過面に直角方向に電場を加えるCross Flow and Electrofiltrationについて、微粒子懸濁液およびO/W型のエマルションを用いて実験的検討を行い、流れのせん断力とともに電気泳動作用によってろ材面の粒子の堆積が抑制されると同時に、ケーキ層およびろ材層に電気浸透が作用してろ過速度が増大することを明らかにした。また、ろ過抵抗が、ろ材層，ケーキ層およびケーキ層近傍に形成される濃度分極層による3つの抵抗からなると考え、十字流式ろ過に電場を加えた場合のろ過流束 $J[m^3/(m^2 \cdot s)]$ が次式で表されることを示した。

$$J = \frac{\Delta P}{R_f \Delta P + R_m + R_c}$$

$$= \Delta P \left/ \left\{ \frac{\Delta P}{k_M \ln(C_p/C_b) + \beta E} + \frac{R_{m0}}{1 + (\alpha_m E R_{m0} / \Delta P)} + \frac{R_{c0}}{1 + (\alpha_c E R_{c0} / \Delta P)} \right\} \right. \quad (1-16)$$

ここに、 $\Delta P[Pa]$ はろ過圧力、 $R_f[s/m]$ ， R_m および $R_c[Pa \cdot s/m]$ はそれぞれ濃度分極層，ろ材層およびケーキ層のろ過抵抗である。 $k_M[m/s]$ は物質移動係数、 C_p および $C_b[kg/m^3]$ はそれぞれろ材あるいはケーキ表面での粒子濃度および流体本体の濃度、 R_{m0} および $R_{c0}[Pa \cdot s/m]$ はそれぞれ $E=0$ すなわち電場を加えないときの R_m および R_c 値、 α_m および $\alpha_c[m^2/(V \cdot s)]$ はそれぞれろ材層およびケーキ層における電気浸透度である。また、 E が臨界電場強度 E_{cr} より大きくケーキが生成しない場合、すなわち $R_c=0$ となる $E \geq E_{cr}$ の操作条件では、ろ過流束 J が Eq. (1-16) より Eq. (1-17) で表されることを示し、 $E \geq E_{cr}$ では J は E と比例関係にあることを実験的に確認している。

$$J = \left(\frac{\beta \alpha_m}{\beta + \alpha_m} \right) E + \frac{\alpha_m k_M \ln(C_p/C_b) + \beta (\Delta P / R_{m0})}{\beta + \alpha_m} \quad (E \geq E_{cr}) \quad (1-17)$$

さらに、 J とレイノルズ数 $Re[-]$ との関係について実験的に検討し、 $E \geq E_{cr}$ の条件では Re が増加するにつれて J が減少するが、他方、 $E < E_{cr}$ では Re が増加するとともに J が増大することを示し、十字流式ろ過におけるろ過速度に及ぼす電場の影響を明らかにした。

Bollingerら³⁰⁾は、最近、製紙工業で用いられるカオリン粘土や塗装材料のポリビニルクロライド(PVC)ラテックスのような微粒子分散系の脱水のために、電気泳動現象による濃縮効果および電気浸透現象による脱水効果を利用したElectrofilterを検討し、Electrofiltrationが、実用されている噴霧乾燥の熱的脱水操作に比べてエネルギー消費量が3~10%と極めて小さくエネルギー効率の良い微粒子分散系の分離操作であることを提示している。

最近になって化学、食品、発酵、製薬、廃水処理などの諸工業における微粒子懸濁液の分離精製および濃縮法として、膜(Membrane Filter)を用いた限外ろ過法(Ultrafiltration)が広く実用化されるようになったが、タンパク質のようなコロイド溶液を限外ろ過法で分離、濃縮する場合、膜面上に堆積する微細コロイド粒子は濃縮されてゲル状となり極めて大きなろ過抵抗を示す。このタンパクコロイド溶液の限外ろ過におけるゲル層のろ過抵抗を低減させ、ろ過速度の増大をはかる1つの方法として、油川ら^{25, 27, 28)}は、限外ろ過に電場を印加するいわゆる電気限外ろ過(Electro-Ultrafiltration)を行い、そのろ過特性および装置設計の基礎となるろ過式について実験的および解析的な検討を行った。その結果、コロイド溶液の電気限外ろ過においては、濃度分極層内の濃度こう配による粒子の拡散と同じ方向すなわちろ液の流れとは反対方向に生ずる電気泳動効果によって膜面へのゲル層の形成が抑制されると同時に、生成したゲル層およびろ過膜内には電気浸透効果が作用することによって、ろ液流束が限外ろ過と比べて著しく増大することを明らかにした。また、電気限外ろ過過程が、濃度分極層成長過程、ゲル層形成過程および定常過程の3段階よりなることを示し、それぞれの過程におけるろ過式を解析的に求めて、ろ液流束が濃度分極層成長過程では膜の透過流束にほぼ等しいことを明らかにするとともに、ゲル層形成過程およびゲル層の厚さが一定になった後の定常過程におけるろ液流束 J をそれぞれEqs. (1-18) および(1-19) で表した。

$$J = \Delta P_{EF} \left/ \left[X + Y \left\{ - \left(\frac{XZ + \Lambda X^2}{YZ} \right) + \sqrt{\left(\frac{XZ + \Lambda X^2}{YZ} \right)^2 + \frac{2(Z + \Lambda X)^2}{YZ}(t - t_g)} \right\} \right] \right. \quad (1-18)$$

ここに、 $X = R_m \mu$, $Y = (\sigma_g / A) \mu$,
 $Z = AC_b \Delta P_{EF}$, $\Lambda = -A \{k_M(C_g - C_b) + \beta EC_b\}$

$$J = k_M \ln(C_g / C_b) + \beta E \quad (1-19)$$

上式において、 ΔP_{EF} [Pa] は電気限外ろ過圧、 R_m [1/m] は膜のろ過抵抗、 μ [Pa·s] はろ液の粘度、 σ_g [m/kg] はゲル層のろ過比抵抗、 C_g および C_b [kg/m³] はそれぞれゲル濃度およびコロイド溶液本体の濃度、 k_M [m/s] は濃度分極層における拡散による物質移動係数、 t_g [s] はゲル層が形成し始めるろ過時間である。また、定常過程における J は、 $E \geq E_{cr}$ の場合はゲル層の形成がなく膜のみの透過となり、 $E < E_{cr}$ では次式のように表されとした。

$$J = \Delta P_{EF} \left/ \left\{ R_m + \sigma_g \frac{M_p}{A} \left(\frac{E_{cr} - E}{E_{cr}} \right) \right\} \right. \mu \quad (1-20)$$

ここに、 M_p [kg] は定常過程になるまでに膜面に堆積した粒子質量である。

また油川らは、ろ過比抵抗 σ_g に及ぼす限外ろ過圧、電場強度 E およびコロイド溶液の濃度 C_b などの影響を実験的に検討²⁵⁾ するとともに、Electrofiltration を十字流式ろ過法に応用した Henry ら¹⁸⁾ と同様に、電気限外ろ過を十字流式ろ過に応用して十字流式電気限外ろ過法 (Cross Flow Electro-Ultrafiltration) について検討を行い、ろ液流束が電気泳動および電気浸透効果によって十字流式ろ過法より著しく増大することを明らかにした。また、コロイド溶液の十字流式電気限外ろ過について、定常状態におけるろ過流束 J を Eq. (1-19) に基づいて次のように表した²⁸⁾。

$$J = J_H + J_E = a' Re^{-b'} Sc^{c'} \ln \left(\frac{C_g - C_f}{C_b - C_f} \right) + m' Re^{-n'} E \quad (1-21)$$

ここに、 J_H および J_E [m³/(m²·s)] はそれぞれ限外ろ過流束および電気限外ろ過流束、 a' [m/s]、 b' [−]、 c' [−]、 m' [m²/(V·s)] および n' [−] はそれぞれ実験定数、 Re [−] はコロイド溶液のレイノルズ数、 Sc [−] はシュミット数、 C_f [kg/m³] はろ液の粒子濃度で

ある。Eq. (1-21) に基づいて、十字流式電気限外ろ過装置の設計式を、 C_b 、 Re および E の条件範囲で実験式として求めてその有用性を示すとともに、 J_E が所要電力の 0.5 乗に比例することを報告している。

以上のように、電場を利用した微粒子分散系の沈降濃縮やろ過操作において、電気浸透現象は濃縮スラッジ、ろ過ケーキおよびろ材層内に発生し、電気泳動現象とともに濃縮度およびろ過速度を増大することが明らかにされたが、電気浸透を脱水操作に応用した場合の特性についても、毛細管モデルを用いた駒形^{3, 5)}の理論的考察によって明らかにされ、その有効性が示唆されている。すなわち、半径 r_c [m]、長さ l_c [m]の毛細管内を機械的圧力 ΔP_F [Pa]によって液が流動する場合、 t [s]時間に n [—]本の毛細管群を移動する液量 v_c [m³]の含有水分に対する割合 U [—]は、Poiseuilleの法則より次式で表される。

$$U = \frac{v_c}{n \pi r_c^2 l_c} = \frac{r_c^2 \Delta P_F}{8 \mu l_c^2} t \quad (1-22)$$

一方、電極間に一定電圧 V_0 [V]を加えて電気浸透を行う場合の液の移動量を v_c' [m³]とすれば、 U は次式のように表される。

$$U = \frac{v_c'}{n \pi r_c^2 l_c} = \frac{\xi D V_0}{4 \pi \mu l_c^2} t \quad (1-23)$$

したがって、Eq. (1-22) によれば、機械的な推進力による通常の流動の場合、 U は r_c^2 に比例し、毛細管径が小さくなるとともに水の移動が著しく困難となるが、電気浸透による流動の場合、 U は、Eq. (1-23) で表されるように、毛細管径すなわち毛細管構造には無関係となるので、機械的方法では脱水が困難な場合に電気浸透脱水の適用が特に有効的となる。また、 ξ 電位が大きく液の比電導度が小さいほどその効果が大となることを明らかにした。さらに、定電圧条件について電気浸透による毛細管内の脱水過程を解析し、電流 i [A]と t の関係を次式で表し、 i が \sqrt{t} の関数として漸減することを示した。

$$\frac{i}{i_i} = \frac{1}{\sqrt{1 + \Pi t}}, \quad \Pi = 2 \left(\frac{\lambda_i - \lambda_{eq}}{\lambda_{eq}} \right) \frac{\xi D V_0}{4 \pi \mu l_c^2} \quad (1-24)$$

ここに、 i_i [A] は $t=0$ のときの電流、 λ_i および λ_{eq} [S/m] はそれぞれ液の比電導度および脱水後の毛細管内の等価比電導度である。簡易型プレスを使用して、圧搾脱水と同時に電場を加えた簡便な電気浸透脱水実験を粘土、水酸化ニッケルおよび微粉炭に対して行い、電気浸透脱水効果を明らかにするとともに、 i の経時変化について Eq. (1-24) の妥

当性を示した。

以上が、電気泳動および電気浸透現象を沈降、ろ過、脱水などの固液分離操作に応用した主な研究の概要であるが、これらの研究は、界面動電現象を微粒子分散系の分離法として応用した場合の利点や特性を明確にするとともに、その理論的方法は、電場を利用した固液分離操作の解析に有用な知見を与えている。

1.3 電気浸透脱水に関する研究

1.3.1 研究の概観

固液混合物の濃縮脱水操作は、資源の有効利用の目的だけでなく乾燥の前処理操作としても重要視されている。スラッジの脱水法として、一般に、重力による自然脱水のほか、真空脱水、加圧脱水、遠心脱水および圧搾脱水などの機械的脱水法が工業的に広範な分野で利用されており、これらの機械的脱水装置および操作に関しては理論的にも実験的にも極めて多くの研究が行われてきている。しかしながら、微細粒子からなるスラッジ、ゲル状スラッジおよびコロイド性粒子を含む生物処理汚泥などに対しては、固-液界面に生ずる電気2重層に起因する電気浸透現象をスラッジの脱水に応用したいいわゆる電気浸透脱水法* が有利である。電気浸透脱水は、従来の一般的な機械的脱水法とはその脱水機構が異なり、粒子層内に発生する電気力によって脱水するため、ゲル状スラッジなどのいわゆる難脱水性スラッジに対して特にその有効性が認められ、これまで比較的多くの研究が行われてきた。

電気浸透脱水法は、今世紀の初頭にドイツのSchwerinが泥炭の工業的脱水に試みたのが

* スラッジに直流電場を加えて脱水操作を行う場合、スラッジ層内には濃度によって電気泳動あるいは電気浸透現象が生ずるので、この脱水法を、Rampacek²⁾は Electrophoretic Dewatering あるいは Electro-Osmotic Dewatering、Spruteら³⁵⁾は Electrokinetic Dewatering、Lockhart³⁶⁾は Electroosmotic Dewatering、駒形^{3,5)}は電気脱水あるいは電気浸透的脱水などとさまざまに称しているが、脱水は液が移動する（電気浸透）ことによって起こると考えるのが妥当であるため、電気浸透脱水 (Electro-osmotic Dewatering) と呼ぶのがより適切と思われる。また、一般的にこの表現が用いられている^{37~39)}。

最初とされている^{1~3)}。この研究でSchwerinは、通常80~90%程度の水分を有し、その水分が毛細管水であるために乾燥が困難な泥炭を細分して適量のアルカリを加え、機械的圧力と同時に直流電圧を加えて電気浸透脱水を行うと、泥炭粒子は陽極に集まり、水は正に帯電し泥炭層を通過して陰極に向かって移動して脱水が進行し、90%水分の泥炭が468kJ/kgの電力消費量で約65%水分に減少できることを示した。また、これを天日乾燥で60%程度の水分にすると水性ガス発生炉用として使用でき、さらにその35%を燃料とすれば含水量15%の練炭を作ることができると報告している^{1, 3)}。

電気浸透脱水法は、その後、機械的脱水法では脱水が困難とされる物質に対して主に利用され、各種の粘土、土壌、水晶粉末、水酸化マグネシウム、炭酸カルシウム、水酸化ニッケル、叩解バルブ、各種毛状沈殿物、カゼイン、顔料、セメント、コンクリート、微粉炭、鉱物洗浄泥、下水汚泥など極めて多くまた多岐にわたるスラッジを対象として応用されてきた^{1~5, 40~42)}。それと同時に、Schwerinによって開発された数種類の電気浸透脱水機が、1910~1930年代にかけてドイツおよびチェコスロバキヤなど東ヨーロッパで、主として粘土スラッジの脱水分離に利用された²⁾。また、第2次世界大戦後は、米国でもこれらの脱水機を改良した電気浸透脱水装置が種々の粘土および鉱物洗浄泥などの脱水用として開発され²⁾、米国鉱山局 (U.S. Bureau of Mines) のSpruteら³⁵⁾によって最近に至るまで研究が続けられており、限定された分野での少数例ではあるが実用化されている。また、Casagrande^{2, 41, 42)}によって、粘土質土壌や道路床土壌の硬化安定のために電気浸透脱水による排水工法が提案され、1940年代以降、ドイツ、イギリス、カナダ、米国およびソ連などで利用されてきた²⁾。

駒形⁵⁾は、スラッジ層を毛細管構造と見なしたいわゆる毛細管モデルを用いて電気浸透脱水に関係する諸量間の関係を初めて理論的に取扱い、一般的な機械的脱水法では脱水困難な微細な毛細管構造を有するスラッジに電気浸透脱水法が特に有効であることを明らかにした。また、油川⁴⁾は、重力沈降によって最大圧縮濃度に達したスラッジに電圧を加えると電気浸透によって脱水濃縮が行われ、スラッジの濃縮度は、圧ろ機や真空ろ過機による脱水と同程度あるいはそれ以上の脱水効果となることを、炭酸カルシウム（ ξ 電位は正）および製紙用白色粘土（ ξ 電位は負）を実験試料に用いて明らかにするとともに、このような場合の電気浸透脱水過程について理論的検討を行った。

最近では、前述のSpruteらや Bollingerら³⁰⁾の研究の他に、オーストラリア連邦科学

産業研究機構（CSIRO）のLockhart³⁶⁾によって、カオリン粘土や石炭洗浄泥などの電気浸透脱水の実験的研究が行われており、脱水速度に及ぼす印加電圧の影響、各種の電解質（塩）、酸および高分子凝集剤などの添加濃度の影響、電極材料などの問題について詳細な検討が行われ、工業的規模の電気浸透脱水装置の研究が活発に進められている。また、国内では、最近、林・平井ら^{43, 44)}、山口ら⁴⁵⁾、油川ら⁴⁶⁾によって、近年の下水、廃水処理施設の整備普及に伴って多量に排出されるようになった余剰活性汚泥の脱水処理への電気浸透脱水法の応用が研究され、電気浸透脱水法は、脱水困難な微細な有機性分解生成物を含む生物処理汚泥に対して有用であり、その応用によって脱水効率の向上が期待できるという報告が散見されるようになった。

以上が既往の研究の概略であるが、電気浸透脱水に関してはこのように長い間に比較的多くの研究が行われてきたにもかかわらず、いずれも特定のスラッジ試料を対象とした実施例についての実験的研究がほとんどであり、上述の駒形および油川の理論的研究を除けば、装置の設計操作のために必要とされる工学的研究は極めて少ない。したがって、電気浸透脱水法に関する技術は工学的にはほとんど進展していないといえる現状であり、またそのためにあまり実用化もされていないと考えられる。

次に、電気浸透脱水に関する数少ない理論的研究と考えられる駒形および油川の研究について概説する。

1.3.2 理論的研究

1) 駒形の研究（毛細管モデルに基づく電気浸透脱水式）^{3, 5)}

駒形は、スラッジ層内の空隙を毛細管構造と見なし、管径分布のない簡単な毛細管モデルを用いて電気浸透脱水の関係諸式について解析し、電気浸透脱水法の特徴や有効性を理論的に明らかにした。すなわち、比電導度 λ_l [S/m]の液が満たされた半径 r_c [m]の毛細管（長さ l_c [m]）の両端に一定電圧 V_0 [V]を印加すると、電気浸透によって液は一方から流出して、 t 時間後における脱水状態は Fig.1-1 のようになる。図示したように、液が一方から排出されるのみで他方から流入しない脱水過程において、印加電圧 V_0 の一部 V [V]が電気浸透に関与して毛細管内の液が矢印の方向に移動し、脱水後には等価比電導度* λ_{eq}

* λ_{eq} は、固体壁面上に残る液の薄層等で生ずるもので、これを等価的に考えた値である。

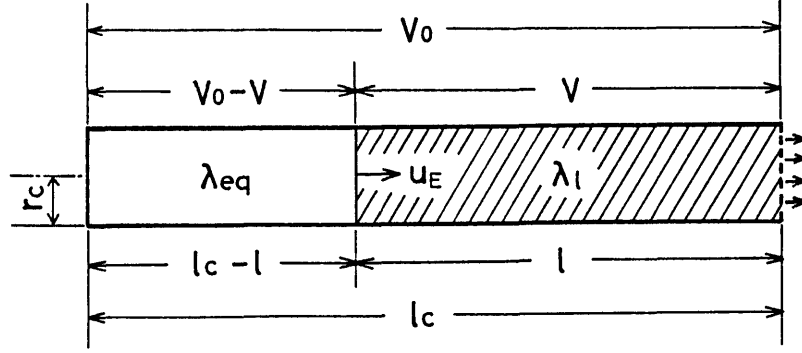


Fig.1-1 Schematic diagram of electroosmotic dewatering process based on straight capillary tubes model

[S/m] ($\lambda_{eq} < \lambda_l$)なる部分を残すとすれば、次のような関係式が成立する。

$$V_0 - V = \frac{\lambda_c - \lambda}{n \pi r_c^2 \lambda_{eq}} i \quad (1-25)$$

$$V = \frac{\lambda}{n \pi r_c^2 \lambda_l} i = - \frac{\lambda}{\alpha} \cdot \frac{d\lambda}{dt} \quad (1-26)$$

ここに、 $n[-]$ は毛細管の数、 $i[A]$ は、固体部分の電導性を無視したときに毛細管群内を流れる電流、 $\alpha[m^2/(V \cdot s)]$ は、Helmholtz-Smoluchowskyの電気浸透速度式より、 $\alpha = D \xi / 4 \pi \mu$ で定義される電気浸透度である。Eqs. (1-25) および(1-26) より、 i を消去して λ と t の関係を表す次式を得る。

$$\lambda = \frac{\lambda_l \lambda_c - \sqrt{(\lambda_{eq} \lambda_c)^2 + 2 \lambda_{eq} (\lambda_l - \lambda_{eq}) \alpha V_0 t}}{\lambda_l - \lambda_{eq}} \quad (1-27)$$

したがって、電気浸透脱水量 $Q_E[m^3]$ は t の関数として次式のように表される。

$$\begin{aligned} Q_E &= n \pi r_c^2 (\lambda_c - \lambda) \\ &= n \pi r_c^2 \lambda_c \left\{ \frac{\lambda_{eq}}{\lambda_l - \lambda_{eq}} \left\{ \sqrt{1 + 2 \left(\frac{\lambda_l - \lambda_{eq}}{\lambda_{eq}} \right) \frac{t}{T}} - 1 \right\} \right\} \end{aligned} \quad (1-28)$$

ここに、

$$T = \frac{\lambda_c^2}{\alpha V_0} = \frac{\lambda_c}{(D \xi V_0 / 4 \pi \mu \lambda_c)} \quad (1-29)$$

上式において、 $D \xi V_0 / 4 \pi \mu \lambda_c$ は $t=0$ のときの電気浸透速度であるから、 $T[s]$ は、この初速度でもって λ_c を移動するのに要する時間を意味する。Eq. (1-28) で $Q_E = n \pi r_c^2 \lambda_c$ と置いて t を求めれば、それが脱水完了時間 $t_e[s]$ となり、次式で表される。

$$t_e = \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_{eq}}{2\lambda_{eq}} \right) T = \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_{eq}}{2\lambda_{eq}} \right) \left(\frac{4\pi\mu\varrho_c^2}{D\xi V_0} \right) \quad (1-30)$$

また、電流 i は、Eqs. (1-25) ~ (1-27) および (1-29) から Eq. (1-24) と同様の次式で表される。

$$i = i_1 / \sqrt{1 + 2 \left(\frac{\lambda_1 - \lambda_{eq}}{\lambda_{eq}} \right) \frac{t}{T}} \quad (1-31)$$

ここに、 $i_1 = n\pi r_c^2 \lambda_1 V_0 / \varrho_c$ であって $t=0$ における電流であり、上式は、 i が \sqrt{t} の関数として漸減することを示している。Eq. (1-31) から、脱水開始後 t 時間までの電力消費量 $W[J]$ は次式のようになる。

$$W = \int_0^t V_0 i dt = \frac{n\pi r_c^2 \lambda_1 \lambda_{eq} V_0 \varrho_c}{\alpha (\lambda_1 - \lambda_{eq})} \left\{ \sqrt{1 + 2 \left(\frac{\lambda_1 - \lambda_{eq}}{\lambda_{eq}} \right) \frac{t}{T}} - 1 \right\} \quad (1-32)$$

したがって、Eqs. (1-28) および (1-32) より、脱水率 ($Q_E / n\pi r_c^2 \varrho_c$) および単位脱水量当りの電力消費量 (W/Q_E) はそれぞれ次式のように表される。

$$\frac{Q_E}{n\pi r_c^2 \varrho_c} = \frac{\lambda_{eq}}{\lambda_1 - \lambda_{eq}} \left\{ \sqrt{1 + 2 \left(\frac{\lambda_1 - \lambda_{eq}}{\lambda_{eq}} \right) \frac{t}{T}} - 1 \right\} \quad (1-33)$$

$$\frac{W}{Q_E} = \frac{\lambda_1 V_0}{\alpha} = \frac{4\pi\mu\lambda_1 V_0}{D\xi} \quad (1-34)$$

Eq. (1-33) は、電気浸透による脱水率が r_c すなわち毛細管半径には無関係であることを示し、また、Eq. (1-34) は、 W/Q_E が V_0 に比例し r_c および ϱ_c などの毛細管構造には無関係であることを示している。

以上の解析結果より、電気浸透脱水は、スラッジが微細な毛細管構造を有する場合すなわち一般に脱水困難な場合に有効であることが明らかにされ、その有用性が理論的に示唆された。

2) 油川の研究 (電気浸透脱水による圧縮沈降曲線) ^{4, 6)}

Fig.1-2 に示すように、スラリー中の粒子が沈降によって槽底に堆積し粒子自体の組織力によって固定支持されるような状態になった沈積スラッジ層に電場を加えると、電気浸透現象が生じ、スラッジ層内の水は上方へ移動してスラッジ層の脱水濃縮が行われる。油川は、このような重力沈降完了後のスラッジに電場を加えたときの電気浸透脱水過程における圧縮沈降について、Fig.1-3 に示すような圧縮脱水過程のモデル化を行い理論的

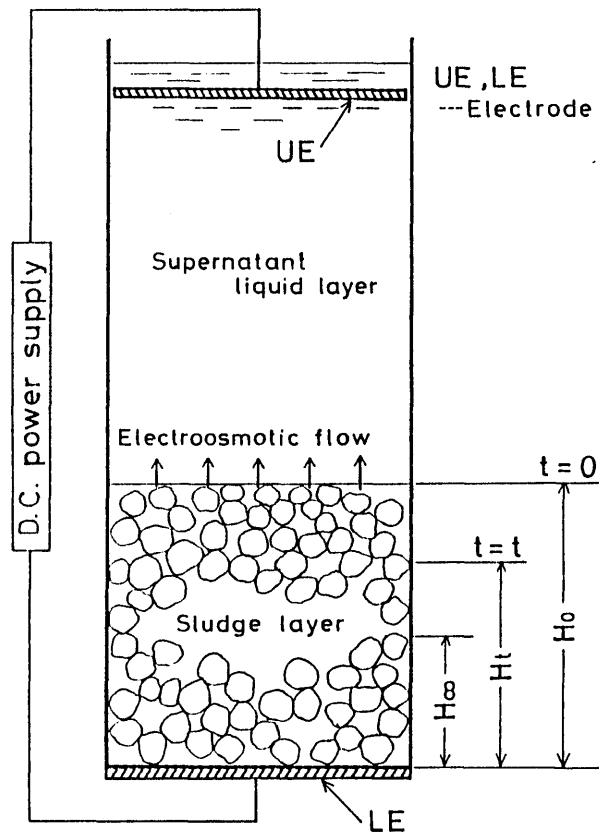


Fig.1-2 Electroosmotic dewatering of sludge thickened by sedimentation

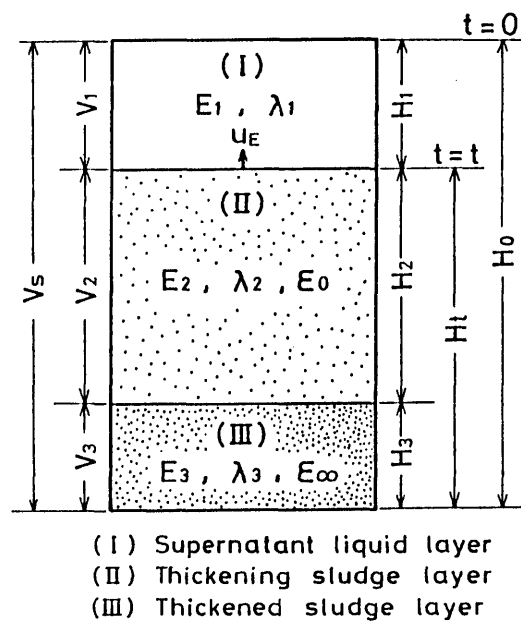


Fig.1-3 Schematic diagram for electroosmotic dewatering process of sludge thickened by sedimentation

に解析した。すなわち、重力沈降による最終圧縮高さ H_0 [m] を初高、このときの空隙率を ε_0 [－] として電場を加えれば、電気浸透による圧縮脱水の進行に伴ってスラッジ層内には、脱水が完了して平衡空隙率 ε_∞ [－] に達したⅢ層，脱水が進行しつつあるⅡ層および清澄液層Ⅰの3層が形成されるとし、スラッジ層の印加電圧を V_s [V]、各層の高さ、電場強度および比電導度をそれぞれ $(H_1, E_1, \lambda_1), (H_2, E_2, \lambda_2), (H_3, E_3, \lambda_3)$ とすれば、脱水が行われるⅡ層の電気浸透速度 u_E [m/s] は、電気2重層理論に基づく次の Debye-Hückel の式で表される。

$$u_E = \frac{\zeta D}{\kappa \pi \mu} E_2 \quad (1-35)$$

また、Fig.1-3 において Ohm の法則を適用すると Eq. (1-36) を得るので、脱水層Ⅱの電場強度 E_2 [V/m] は、Eq. (1-36) より Eq. (1-37) のように表される。

$$V_s = V_1 + V_2 + V_3 = E_1 H_1 + E_2 H_2 + E_3 H_3, \quad I = \lambda_1 E_1 = \lambda_2 E_2 = \lambda_3 E_3 \quad (1-36)$$

$$E_2 = \frac{V_s}{(\lambda_2 / \lambda_1) H_1 + H_2 + (\lambda_2 / \lambda_3) H_3} \quad (1-37)$$

ここに、 I [A/m²] はスラッジ層断面を流れる電流密度であり、 H_1, H_2, H_3 は時間的に変化するから E_2 も時間 t [s] の関数となる。スラッジ層内の脱水が、下方から上方へ押し出されながら行われると仮定すれば、液体（水）の物質収支式に関する Eq. (1-38) より、各層の高さは Eq. (1-39) でそれぞれ表される。

$$H_1 + H_2 \varepsilon_0 + H_3 \varepsilon_\infty = H_0 \varepsilon_0 \quad (1-38)$$

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= \varepsilon_0 \int_0^t u_E dt \\ H_2 &= H_0 - \left(\frac{1 - \varepsilon_\infty}{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty} \right) \varepsilon_0 \int_0^t u_E dt \\ H_3 &= H_0 - (H_1 + H_2) \end{aligned} \right\} \quad (1-39)$$

したがって、Eqs. (1-35), (1-37) および (1-39) より、 E_2 と t の関係は次式のように表される。

$$E_2 = V_s / \sqrt{\left(\frac{2 \zeta D V_s}{\kappa \pi \mu} \right) t + H_0^2} \quad (1-40)$$

ここに、

$$Z = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} - \frac{\lambda_2}{\lambda_3} \right) \varepsilon_0 - \left(\frac{1 - \varepsilon_\infty}{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty} \right) \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_3} \right) \quad (1-41)$$

である。次に、 t 時間におけるスラッジ層の界面高さを H_t [m] とすれば、界面の沈降速度 ($-dH_t/dt$) は、スラッジ層の平均空隙率を ε_{avt} [—] として、次式で表される。

$$-\frac{dH_t}{dt} = \varepsilon_{avt} u_E = \varepsilon_{avt} \frac{\xi D}{\kappa \pi \mu} E_2 \quad (1-42)$$

なお、 ε_{avt} は、スラッジ層の初期粒子体積濃度 ϕ_0 [—] を用いれば、次式のように表される。

$$\varepsilon_{avt} = (H_t - H_0 \phi_0) / H_t \quad (1-43)$$

したがって、Eqs. (1-40) および (1-43) を Eq. (1-42) に代入して積分すると、次式のような H_t と t の関係式が得られる。

$$\begin{aligned} \Phi(H_t) &= \frac{H_0 - H_t}{H_0} + \phi_0 \ln \left(\frac{H_0 - H_0 \phi_0}{H_t - H_0 \phi_0} \right) \\ &= \frac{1}{ZH_0} \left\{ \sqrt{\left(\frac{2 Z \xi D V_s}{\kappa \pi \mu} \right)^2 t + H_0^2} - H_0 \right\} \end{aligned} \quad (1-44)$$

上式が H_t と t の一般的な関係を表す式であるが、Eq. (1-37) において $\lambda_1 \doteq \lambda_2 \doteq \lambda_3$ と見なせる場合は、Eq. (1-40) より $E_2 = V_s / H_0$ となり E_2 が平均電場強度 E_{av} に等しくなるので、 $\Phi(H_t)$ と t の関係は前述の Eq. (1-2) となる。

$$\Phi(H_t) = (\xi D E_{av} / \kappa \pi \mu) t \quad (1-2)$$

Eq. (1-2) は、 $\Phi(H_t)$ が t と直線関係にあることを表しており、炭酸カルシウムおよび製紙用白色粘土スラッジを用いた $\Phi(H_t)$ 対 t の実測結果と一致し、いずれのスラッジ試料の場合も圧縮沈降終了時近傍を除いてほぼ成立することを明らかにした。

以上が電気浸透脱水に関する理論的研究の概要である。このように電気浸透脱水の理論的研究は極めて少ない上に、駒形の毛細管モデルによる解析結果は、毛細管の管径分布を考慮せずに、またスラッジ層を非圧縮性（毛細管の長さが変化しない）として得られたものであり、この解析結果を実際に対象とする圧縮性湿潤粒子層に利用することは不便である。すなわち、実際のスラッジの電気浸透脱水を考える場合には、湿潤粒子層の空隙率あるいは含水率を用いる方が便利であり、スラッジ層は圧縮性（脱水に伴ってスラッジ層の高さが減少する）として取扱うのがより適切であると考えられる。また、油川の研究は、

濃厚スラリーに電圧を加えた場合の沈降曲線を推定することを目的として、電気浸透脱水過程における圧縮沈降を理論的に考察したものであり、半固体状のスラッジの脱水操作に適用するには不十分である。さらに、両者の研究とも一定電圧の操作条件における解析結果であり、電気浸透脱水が、定電圧だけでなく定電流の操作条件のもとで直流電場を加えることによっても実施できることを考えると、電気浸透脱水の理論が工学的に十分に研究されているとはいえない現状である。したがって、本研究は、電気浸透脱水操作および装置の設計上の指針を提出するために、定電流および定電圧の操作条件に大別して電気浸透脱水過程の理論的考察を行い、一般に適用できる解析方法を得ることを主目的とした。なお、スラッジ層に直流電場を加えると層内には濃度によって電気泳動あるいは電気浸透現象が生ずるが、重力沈降における最大圧縮濃度以上では主に電気浸透による脱水作用が起こることが推定される⁴⁾ので、本研究では、電気浸透脱水が生ずると考えられる比較的高濃度のスラッジに限定して実験的な検討を行うとともに、理論的考察においても電気浸透現象のみを考慮して解析を行った。

電気浸透脱水法の特徴として次の事項が考えられる^{39, 47)}。 1) 脱水速度および脱水率は電圧によって調整できるので制御が容易である。 2) スラッジ層内の液を押し出す駆動力は層内の各部分に発生するので、層の厚さが比較的大きい場合でも脱水速度の減少は小さい。 3) 電気浸透による駆動力は機械的ろ過圧と異なり、ろ材の損傷が少なく目詰まりの影響も小さい。 4) 微細粒子からなるスラッジやゲル状スラッジなどの難脱水性スラッジに対しても脱水効率が低い。 5) 加圧脱水や真空脱水などの機械的脱水操作と併用することによって脱水速度の増大を図ることができると同時に、スラッジの含水率をさらに減少することができ、機械的脱水装置の容量を軽減できる。一方、欠点として考えられることは、スラッジ層に直流電場を印加するために、スラッジと電極との接触不良の問題や電気分解による電極腐蝕の問題、また電極の腐蝕によってスラッジの汚染を生ずる可能性がある。また、液の電導性が大きすぎるときにはジュール熱のために電流効率が低下し、他方、小さすぎる場合は高い電圧が必要となり、電力消費や電源装置の費用が増大する。したがって、スラッジの電気的特性によって適用範囲が限定される欠点がある。

電気浸透脱水法には、上述のようにいくつかの利点があるが、実用化されている例は極めて少ない。この理由は、前述したように、電気浸透脱水に関する従来の研究では装置の設計および操作についての理論的研究が十分に行われておらず、また多量の電力を消費す

る方法であるためと考えられる。しかしながら、電気浸透脱水技術は、スラッジ処理が現在抱えている難題を解決する有用な1つの方法として期待できると考えられ、今後の研究開発によって、実用化を阻害している多くの問題を解決していく必要があると思われる。

Literature cited

- 1) Denki Kagaku Kyokai(ed.): "Denki Kagaku Benran", 2nd ed., p.940, Maruzen, Tokyo(1974)
- 2) Rampacek, C., in J.B.Poole and D.Doyle(eds.): "Solid-Liquid Separation", p.100, HER MAJESTY'S STATIONERY OFFICE, London(1966)
- 3) Komagata, S.: "Kaimen Denki Kagaku Gaiyo", p.71, Shokodo, Tokyo (1969)
- 4) Yukawa, H.: *Kagaku Kogaku*, 29, 579(1965)
- 5) Komagata, S.: *Denki Kagaku*, 11, 13(1943)
- 6) Kagaku Kogaku Kyokai(ed.): "Saikin no Kagaku Kogaku", p.111, Maruzen, Tokyo(1972)
- 7) Jorden, R.M.: *J. Am. Water Works Assoc.*, 55, 771(1963)
- 8) Yukawa, H.: *Kagaku Kogaku*, 28, 732(1964)
- 9) *idem: ibid.*, 31, 151(1967)
- 10) Moulik, S.P., F.C.Cooper and M.Bier: *J. Colloid and Interface Sci.*, 24, 427(1967)
- 11) Yukawa, H. and S.Egawa: *Kagaku Kogaku*, 32, 901(1968)
- 12) Yukawa, H. and Y.Yushina: *ibid.*, 32, 909(1968)
- 13) Yukawa, H., S.Kanai, O.Shimoyama and T.Karino: *ibid.*, 35, 657(1971)
- 14) Yukawa, H., H.Chigira, T.Hoshino and M.Iwata: *J. Chem. Eng. Japan*, 4, 370(1971)
- 15) Moulik, S.P.: *Environ. Sci. and Technol.*, 5, 771(1971)
- 16) Porter, M.C.: *AIChE. Symposium Ser.*, 68, 120(1972)
- 17) Yukawa, H., K.Kobayashi, Y.Tsukui, S.Yamano and M.Iwata: *J. Chem. Eng. Japan*, 9, 396(1976)
- 18) Henry, J.D., L.F.Lawler and C.H.Alex Kuo: *AIChE. J.*, 23, 851(1977)
- 19) Stotz, S.: *J. Colloid and Interface Sci.*, 65, 118(1977)

- 20) Shirato, M., T. Aragaki, A. Manabe and N. Takeuchi: *AIChE. J.*, 25, 855 (1979)
- 21) Yukawa, H., K. Kobayashi, H. Yoshida and M. Iwata, in R. J. Wakeman (ed.): "Progress in Filtration and Separation, Vol. 1", p. 83, Elsevier, Amsterdam (1979)
- 22) Kobayashi, K., M. Iwata, Y. Hosoda and H. Yukawa: *J. Chem. Eng. Japan*, 12, 466 (1979)
- 23) Kobayashi, K., M. Hakoda, Y. Hosoda, M. Iwata and H. Yukawa: *ibid.*, 12, 492 (1979)
- 24) Yukawa, H., K. Kobayashi and M. Hakoda: *ibid.*, 13, 397 (1980)
- 25) Yukawa, H., H. Obuchi and K. Kobayashi: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 6, 288, 323 (1980)
- 26) Matsumoto, K., O. Kutowy and C. E. Capes: *Powder Technol.*, 28, 205 (1981)
- 27) Yukawa, H.: *Maku (MEMBRANE)*, 6, 253 (1981)
- 28) Yukawa, H., K. Shimura, A. Suda and A. Maniwa: *J. Chem. Eng. Japan*, 16, 246, 305 (1983)
- 29) Tagawa, M.: *Hyomen*, 22, 482 (1984)
- 30) Bollinger, J. M. and R. A. Adams: *Chem. Eng. Prog.*, 80, (11), 54 (1984)
- 31) Reed, P. B.: *ibid.*, 80, (12), 47 (1984)
- 32) Yukawa, H. and H. Yoshida, in A. S. Mujumdar (ed.): "DRYING '84", p. 365, Hemisphere, New York (1984)
- 33) *idem*: "DRYING OF SOLIDS", p. 217, Wiley Eastern Ltd., New Delhi (1986)
- 34) Shirato, M., T. Murase, M. Iwata, K. Ito, N. Takagi and H. Yoshida: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, to be published
- 35) Sprute, R. H. and D. J. Kelsh: World Congress II of Chemical Engineering, Vol. 4, p. 142 (1981)
- 36) Lockhart, N. C.: *Colloids and Surfaces*, 6, 229, 239, 253 (1983)
- 37) Kagaku Kogaku Kyokai (ed.): "Sludge no Shori Gijutsu to Sochi", p. 112, Baifukan, Tokyo (1978)
- 38) Hiraoka, M. and Z. Yoshino: "Odei Shori Kogaku", p. 32, Kodansha, Tokyo (1983)
- 39) Yukawa, H.: *Kagaku Kojo*, 17, (7), 50 (1973)
- 40) Yosui Haisui Benran Henshu Iinkai (ed.): "Yosui Haisui Benran", 2nd ed., p. 486, Maruzen, Tokyo (1973)
- 41) Terzaghi, K. and R. B. Peck: "Soil Mechanics in Engineering Practice", 2nd ed., pp. 147, 383, John Wiley and Sons, Inc., New York (1967)

- 42) Mogami, T.: "Doshitsu Rikigaku", pp.52,86, Iwanami Shoten, Tokyo (1974)
- 43) Hayashi, Y., E. Hirai and T. Tsuji: Preprint of the 50th Annual Meeting of The Soc. of Chem. Engrs., Japan, p.211(1985)
- 44) Hirai, E., Y. Hayashi and A. Matsuoka: Preprint of the 51th Annual Meeting of The Soc. of Chem. Engrs., Japan, p.248(1986)
- 45) Yamaguchi, M., T. Arai and H. Matsushita: *Yosui to Haisui*, 28, 370 (1986)
- 46) Yukawa, H., M. Hakoda, H. Okonogi and H. Yoshida: *ibid.*, 28, 602(1986)
- 47) Yoshida, H., T. Shinkawa and H. Yukawa: *Kagaku Kogaku*, 47, 657(1983)

第二章 定電流および定電圧条件における スラッジの電気浸透脱水

2.1 緒 言

スラッジの電気浸透脱水を行う場合、その操作は定電流条件あるいは定電圧条件のもとでスラッジに直流電場を加えることによって実施できる。したがって、電気浸透脱水操作は、定電流および定電圧の操作条件に大別して扱うのが便利であり、電気浸透脱水速度および電力消費量などに及ぼす操作条件の影響について明らかにするとともに、各操作条件における電気浸透脱水過程を明確にすることが必要となる。しかしながら、従来の電気浸透脱水に関する研究では、前章でも述べたように、定電圧条件における結果が大部分であり、操作条件についての検討はほとんど行われていない。また、定電圧条件下での電気浸透脱水過程については、駒形^{1, 2)}が毛細管モデルを用いて理論的に解析し、定電圧条件における電気浸透脱水式として提出しているが、粒子充填層を毛細管構造と見なした毛細管モデルによるこの解析結果は、スラッジの圧縮性は考慮されずにスラッジを非圧縮性として得られたもので、これを実際の湿潤粒子層すなわち圧縮性スラッジ* に適用するには不十分であり、また、適用するためには毛細管の管径分布を知る必要があるなど実際に利用するには不便である。

本章では、定電流および定電圧条件における電気浸透脱水操作の理論的解析方法を得るために、脱水過程におけるスラッジ層内を単純に脱水進行層と脱水終了層の2層からなると見なした粒子充填層内の電気浸透流れに基づく脱水モデルを用いて、各操作条件について圧縮性および非圧縮性スラッジの脱水過程をそれぞれ理論的に解析し、脱水速度、脱水量、電力消費量、および単位脱水量当りの電力消費量などの電気浸透脱水式について検討した^{3~6)}。また、より一般的な圧縮性スラッジの電気浸透による脱水効果を各操作条件のもとで実験的に明らかにするとともに、電気浸透脱水式の妥当性について実験結果との比較検討を行い、その有用性を検討した^{5~7)}。

* 実際のスラッジ層は、電気浸透脱水に伴って粒子の変形や破壊は起きずにただ粒子の充填状態がち密になり空隙率が小さくなるために縮小し、層の高さ（厚さ）は脱水の進行に伴ってしだいに減少する。

2.2 脱水進行層および脱水終了層の2層からなる電気浸透脱水モデルに基づく解析

2.2.1 定電流条件における電気浸透脱水式^{3~5)}

1) 圧縮性スラッジの場合

脱水過程におけるスラッジ層内を脱水進行層と脱水終了層の2層からなると見なした粒子充填層内の電気浸透流れに基づく脱水モデルは、Fig.2-1のように示される。スラッジ層上下の電極の極性は、粒子のと電位の極性に従って選択され、初期含水率分布がなく一様であるスラッジ層の初高 H_0 [m] に直流電圧 V_0 [V] が印加される。定電流条件では、液の流れに垂直な断面積 A [m²] のスラッジ層を流れる電流密度 I_0 [A/m²] は脱水期間中一定であり、図に示されるように、スラッジ層内の水は電気浸透速度 u_E [m/s] で下方（矢印の方向）へ移動して脱水し、時間の経過とともに脱水進行層（Ⅰ）および脱水終了層（Ⅱ）が形成される。Ⅰ層は脱水開始時における含水状態と同じであり、Ⅱ層は印加電圧に対応する含水状態である。圧縮性スラッジの場合、脱水の進行とともにスラッジ層の高さが減少し、脱水時間 t [s] には H_0 から H_t [m] になる。また、脱水に伴ってスラッジ層全体の電気抵

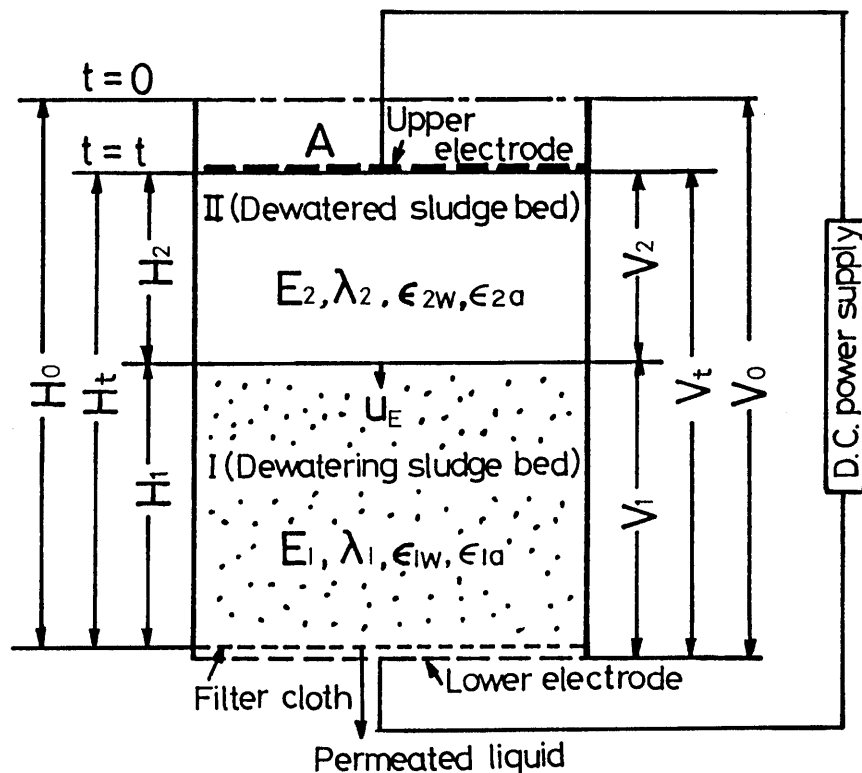


Fig.2-1 Schematic diagram of electroosmotic dewatering under condition of constant electric current

抗が変化するので、定電流条件では印加電圧が経時変化し、 t 時間に層全体に加わる電圧は V_t [V] となる。I, II 各層においてそれぞれ含水率分布はなく一様であり、各層における E_1, E_2 [V/m], λ_1, λ_2 [S/m] はそれぞれ電場強度およびスラッジの等価比電導度、 ε_{1w} , ε_{2w} [—] はそれぞれ含水率で、スラッジ単位体積当りの液体の占める体積割合（分率）を表す。また、 ε_{1a} , ε_{2a} [—] はそれぞれスラッジ層中に含まれる空気の体積分率である。

脱水進行層の電気浸透速度 u_E は、粒子を電気絶縁体とすれば Debye-Hückel の式を用いて次式で表される^{2, 8)}。

$$u_E = \frac{\zeta D}{\kappa \pi \mu} E_1 \quad (2-1)$$

ここに、 ζ , D , κ , μ および E_1 はそれぞれ、 ζ 電位、液体の誘電率、粒子の形状係数、液体の粘度および脱水進行層（I）の電場強度である。I 層における層高および電圧をそれぞれ H_1, V_1 とすれば、 E_1 は Ohm の法則より次式のように表される。

$$E_1 = V_1 / H_1 = I_0 / \lambda_1 \quad (2-2)$$

Eq. (2-2) を Eq. (2-1) に代入すると、 u_E は次式のようになる。

$$u_E = \alpha (I_0 / \lambda_1) \quad , \quad \alpha = \zeta D / \kappa \pi \mu \quad (2-3)$$

ここに、 α は電気浸透度で、単位断面積、単位電場強度における電気浸透流量を表し、実験的に求めることができる。上式における α および I_0 は定電流条件では定数となるので、脱水期間中 λ_1 が変化しない限り u_E は一定となる。

電気浸透流量 q_E は、 u_E を用いて次式のように表される。

$$q_E = A \varepsilon_{1w} u_E \quad (2-4)$$

Eq. (2-4) に Eq. (2-3) を代入し、 t に関して積分すると、電気浸透脱水量 Q_E は Eq. (2-5) で表される。

$$Q_E = \int_0^t q_E dt = A \varepsilon_{1w} u_E \int_0^t dt = A \varepsilon_{1w} \alpha \left(\frac{I_0}{\lambda_1} \right) t \quad (2-5)$$

上式は、 Q_E と t の関係が I_0 をパラメータとして直線関係であることを示す。

次に、経済的評価を行うのに必要とされる電力消費量 W と脱水時間 t との関係については、以下のようにして求めることができる。 t 時間における印加電圧 V_t は、I, II 各層の層高 H_1, H_2 および電圧 V_1, V_2 を用いて次式で表される。

$$V_t = V_1 + V_2 = E_1 H_1 + E_2 H_2 = I_0 (H_1 / \lambda_1 + H_2 / \lambda_2) \quad (2-6)$$

また、Fig. 2-1 においてスラッジ層の液体と固体の物質収支を取ると次式が得られる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{液体 ; } AH_1 \varepsilon_{1w} + AH_2 \varepsilon_{2w} + A \varepsilon_{1w} \int_0^t u_E dt = AH_0 \varepsilon_{1w} \\ \text{固体 ; } A (H_0 - H_1) \{1 - (\varepsilon_{1w} + \varepsilon_{1a})\} = AH_2 \{1 - (\varepsilon_{2w} + \varepsilon_{2a})\} \end{array} \right\} \quad (2-7)$$

Eq. (2-7) より、 H_1 および H_2 を求めると、

$$\left. \begin{array}{l} H_1 = H_0 - \frac{\varepsilon_{1w} \{1 - (\varepsilon_{2w} + \varepsilon_{2a})\}}{\varepsilon_{1w}(1 - \varepsilon_{2a}) - \varepsilon_{2w}(1 - \varepsilon_{1a})} \int_0^t u_E dt \\ H_2 = \frac{\varepsilon_{1w} \{1 - (\varepsilon_{1w} + \varepsilon_{1a})\}}{\varepsilon_{1w}(1 - \varepsilon_{2a}) - \varepsilon_{2w}(1 - \varepsilon_{1a})} \int_0^t u_E dt \end{array} \right\} \quad (2-8)$$

となり、Eq. (2-8) を Eq. (2-6) に代入すると、 V_t と t の関係が次式で表される。

$$V_t = \frac{I_0}{\lambda_1} \left[\frac{\alpha I_0 \varepsilon_{1w}}{\varepsilon_{1w}(1 - \varepsilon_{2a}) - \varepsilon_{2w}(1 - \varepsilon_{1a})} \left\{ \frac{1 - (\varepsilon_{1w} + \varepsilon_{1a})}{\lambda_2} - \frac{1 - (\varepsilon_{2w} + \varepsilon_{2a})}{\lambda_1} \right\} t + H_0 \right] \quad (2-9)$$

したがって、 W は、Eq. (2-10) から Eq. (2-11) のように t の 2 次式として表される。

$$W = \int_0^t A I_0 V_t dt = A I_0 \int_0^t V_t dt \quad (2-10)$$

$$W = \frac{A I_0^2}{\lambda_1} \left[\frac{\varepsilon_{1w}}{\varepsilon_{1w}(1 - \varepsilon_{2a}) - \varepsilon_{2w}(1 - \varepsilon_{1a})} \left\{ \frac{1 - (\varepsilon_{1w} + \varepsilon_{1a})}{\lambda_2} - \frac{1 - (\varepsilon_{2w} + \varepsilon_{2a})}{\lambda_1} \right\} \frac{\alpha I_0}{2} t^2 + H_0 t \right] \quad (2-11)$$

ここで、I, II 各層において、空気の体積分率 ε_{1a} , ε_{2a} が水の体積分率 ε_{1w} , ε_{2w} に比べて非常に小さければ、 ε_{1a} および ε_{2a} は無視することができる。ゆえに、Eq. (2-11) より、 W と t の関係は近似的に次式のように書き表すことができる。

$$W = \frac{A I_0^2}{\lambda_1} \left\{ \frac{\varepsilon_{1w}}{\varepsilon_{1w} - \varepsilon_{2w}} \left(\frac{1 - \varepsilon_{1w}}{\lambda_2} - \frac{1 - \varepsilon_{2w}}{\lambda_1} \right) \frac{\alpha I_0}{2} t^2 + H_0 t \right\} \quad (2-12)$$

Eqs. (2-5) および (2-11) から、装置設計や経済的評価の指針となる単位脱水量当りの電力消費量 (W/Q_E) が次式のように表される。

$$\frac{W}{Q_E} = \frac{1}{\epsilon_{1w}} \left[\frac{\epsilon_{1w}}{\epsilon_{1w}(1 - \epsilon_{2a}) - \epsilon_{2w}(1 - \epsilon_{1a})} \left\{ \frac{1 - (\epsilon_{1w} + \epsilon_{1a})}{\lambda_2} - \frac{1 - (\epsilon_{2w} + \epsilon_{2a})}{\lambda_1} \right\} \frac{I_0^2}{2} t + \frac{H_0 I_0}{\alpha} \right] \quad (2-13)$$

また、含水量の大きいスラッジすなわち ϵ_{1a} および ϵ_{2a} を無視できる場合には、Eqs. (2-5) および (2-12) を用いて、 W/Q_E に関して次のような近似式を得る。

$$\frac{W}{Q_E} = \frac{1}{\epsilon_{1w}} \left\{ \frac{\epsilon_{1w}}{\epsilon_{1w} - \epsilon_{2w}} \left(\frac{1 - \epsilon_{1w}}{\lambda_2} - \frac{1 - \epsilon_{2w}}{\lambda_1} \right) \frac{I_0^2}{2} t + \frac{H_0 I_0}{\alpha} \right\} \quad (2-14)$$

Eqs. (2-13) および (2-14) は、 I_0 をパラメータとして、 W/Q_E が t と直線関係になることを示す。

脱水率 η [－] を、スラッジ層の初期含水量に対する電気浸透脱水量の割合と定義すれば、 η は Eq. (2-15) で表される。

$$\eta = \frac{Q_E}{A H_0 \epsilon_{1w}} = \frac{\alpha I_0}{\lambda_1 H_0} t \quad (2-15)$$

また、脱水終了時間 t_e は、脱水終了時のスラッジ層の高さを H_∞ として、層全体の含水率が ϵ_{2w} すなわち印加電圧に対応する平衡含水率に到達したときのスラッジ層の液体および固体の物質収支式 Eq. (2-16) より、Eq. (2-17) のように表される。

$$\left. \begin{array}{l} \text{液体； } A \epsilon_{1w} \alpha (I_0 / \lambda_1) t_e = A H_0 \epsilon_{1w} - A H_\infty \epsilon_{2w} \\ \text{固体； } A H_0 \{1 - (\epsilon_{1w} + \epsilon_{1a})\} = A H_\infty \{1 - (\epsilon_{2w} + \epsilon_{2a})\} \end{array} \right\} \quad (2-16)$$

$$t_e = \left[1 - \frac{\{1 - (\epsilon_{1w} + \epsilon_{1a})\}}{\{1 - (\epsilon_{2w} + \epsilon_{2a})\}} \left(\frac{\epsilon_{2w}}{\epsilon_{1w}} \right) \right] \frac{\lambda_1 H_0}{\alpha I_0} \quad (2-17)$$

Eq. (2-17) において ϵ_{1a} および ϵ_{2a} を無視すれば、 t_e は近似的に次式のようになる。

$$t_e = \left\{ 1 - \frac{(1 - \epsilon_{1w})}{(1 - \epsilon_{2w})} \left(\frac{\epsilon_{2w}}{\epsilon_{1w}} \right) \right\} \frac{\lambda_1 H_0}{\alpha I_0} \quad (2-18)$$

2) 非圧縮性スラッジの場合

圧縮性スラッジにおける解析結果に対して、非圧縮性スラッジの場合についても同様の脱水モデルで解析し、その結果を比較検討した。非圧縮性スラッジの場合、層の高さは脱水期間中変化せず一定となり、Fig. 2-1 において $t = t$ のときの H_t は初高 H_0 となる。非圧縮性スラッジ層についても、脱水進行層における電気浸透速度 u_E は Eq. (2-3) で表すこ

とができ、脱水量 Q_E および脱水率 η は、圧縮性スラッジの場合と同様にそれぞれ次式で表される。

$$Q_E = A \varepsilon_{1w} \alpha (I_0 / \lambda_1) t \quad (2-5)$$

$$\eta = (\alpha I_0 / \lambda_1 H_0) t \quad (2-15)$$

非圧縮性スラッジ層では、 H_1 および H_2 はそれぞれ

$$H_1 = H_0 - H_2, \quad H_2 = u_E t = \alpha (I_0 / \lambda_1) t \quad (2-19)$$

で表されるので、上式を Eq. (2-6) に代入すると、 t 時間における印加電圧 V_t が次式のように表される。

$$V_t = \frac{I_0}{\lambda_1} \left\{ \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \alpha I_0 t + H_0 \right\} \quad (2-20)$$

したがって、非圧縮性スラッジの場合の電力消費量 W については、Eq. (2-20) を Eq. (2-10) に代入して次式を得る。

$$W = \frac{A I_0^2}{\lambda_1} \left\{ \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \frac{\alpha I_0}{2} t^2 + H_0 t \right\} \quad (2-21)$$

圧縮性スラッジのときと同様に、単位脱水量当りの電力消費量(W/Q_E)を求めると、Eqs. (2-5) および (2-21) より次式のようにになる。

$$\frac{W}{Q_E} = \frac{1}{\varepsilon_{1w}} \left\{ \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \frac{I_0^2}{2} t + \frac{H_0 I_0}{\alpha} \right\} \quad (2-22)$$

Eqs. (2-21) および (2-22) より、非圧縮性スラッジの場合の W および W/Q_E の式は、圧縮性スラッジの場合の結果と比べて、 ε_{2w} を含まないことがわかる。また、脱水終了時間 t_e は、脱水終了時における次のような液体の物質収支式 Eq. (2-23) から、Eq. (2-24) のように表される。

$$A \varepsilon_{1w} \alpha (I_0 / \lambda_1) t_e = A H_0 \varepsilon_{1w} - A H_0 \varepsilon_{2w} \quad (2-23)$$

$$t_e = \left(\frac{\varepsilon_{1w} - \varepsilon_{2w}}{\varepsilon_{1w}} \right) \frac{\lambda_1 H_0}{\alpha I_0} \quad (2-24)$$

2.2.2 定電圧条件における電気浸透脱水式^{3, 6, 7)}

1) 圧縮性スラッジの場合

前述のように、定電圧条件における電気浸透脱水式については駒形によって提案されているが、これを実際の圧縮性スラッジ層に適用するには不十分であるので、定電圧条件の

場合のより実用的な電気浸透脱水式を得るために、定電流条件の場合と同様に、粒子充填層内の電気浸透流れの脱水モデルに基づいて解析を行った。

Fig.2-2 は、定電圧条件における圧縮性スラッジの電気浸透脱水モデルを示したものであるが、定電流条件の場合のモデル図とほとんど同様であり、定電圧条件では Fig.2-1 における $t = t$ のときの V_1 が V_0 に置き換えられる。すなわち、スラッジ層に定電圧 V_0 を加えると、層内の水は電気浸透速度 u_E で下方に移動し、 V_0 に対応した含水状態の脱水終了層（Ⅱ）が形成される。

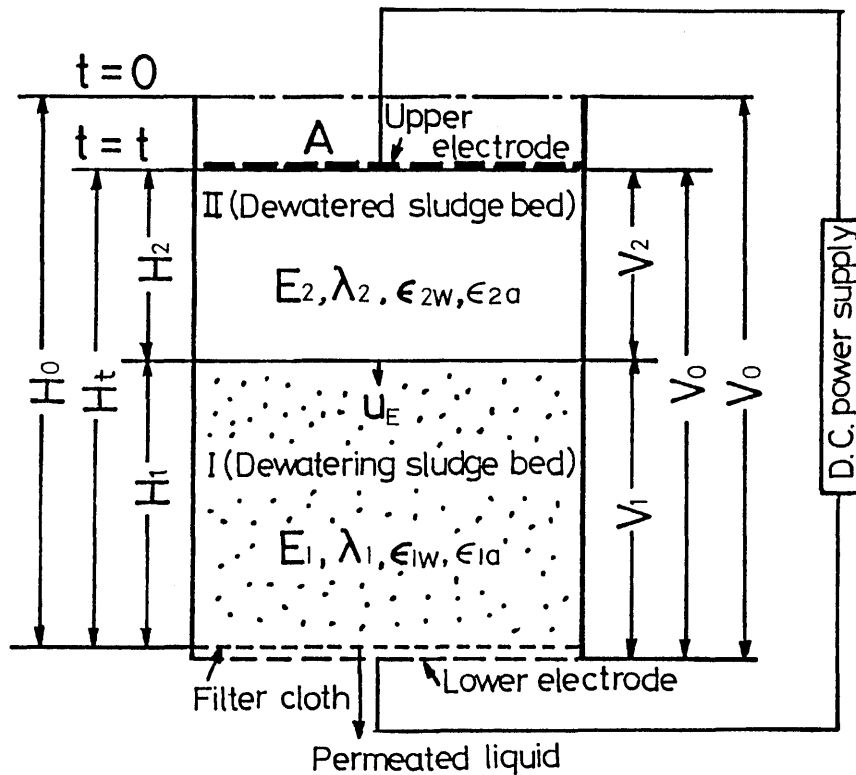


Fig.2-2 Schematic diagram of electroosmotic dewatering under condition of constant voltage

定電圧条件における脱水進行層（Ⅰ）の u_E は、定電流条件の場合と同様に、電気浸透度 α および脱水進行層の電場強度 E_1 を用いて次式で表される。

$$u_E = \alpha E_1 \quad (2-25)$$

定電圧条件における E_1 は、次のような Ohm の法則に基づく関係式 Eq. (2-26) を用いて、Eq. (2-27) のように表される。

$$V_0 = V_1 + V_2 = E_1 H_1 + E_2 H_2 \quad , \quad \lambda_1 E_1 = \lambda_2 E_2 \quad (2-26)$$

$$E_1 = \frac{V_1}{H_1} = \frac{V_0}{H_1 + (\lambda_1 / \lambda_2) H_2} \quad (2-27)$$

したがって、Eq. (2-27) を Eq. (2-25) に代入すると、 u_E は次式で書き表される。

$$u_E = \frac{\alpha V_0}{H_1 + (\lambda_1 / \lambda_2) H_2} \quad (2-28)$$

定電圧条件での圧縮性スラッジ層の H_1 および H_2 は、Fig. 2-2 におけるスラッジ層の液体と固体の物質収支式から、定電流条件の場合と同様に、次の Eq. (2-8) で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= H_0 - \frac{\epsilon_{1w} \{1 - (\epsilon_{2w} + \epsilon_{2a})\}}{\epsilon_{1w}(1 - \epsilon_{2a}) - \epsilon_{2w}(1 - \epsilon_{1a})} \int_0^t u_E dt \\ H_2 &= \frac{\epsilon_{1w} \{1 - (\epsilon_{1w} + \epsilon_{1a})\}}{\epsilon_{1w}(1 - \epsilon_{2a}) - \epsilon_{2w}(1 - \epsilon_{1a})} \int_0^t u_E dt \end{aligned} \right\} \quad (2-8)$$

したがって、Eq. (2-8) を Eq. (2-28) に代入すると、次式のような u_E に関する積分方程式が得られる。

$$\frac{\alpha V_0}{u_E} = \left\{ \frac{\epsilon_{1w}}{\epsilon_{1w}(1 - \epsilon_{2a}) - \epsilon_{2w}(1 - \epsilon_{1a})} \right\} \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \{1 - (\epsilon_{1w} + \epsilon_{1a})\} - \{1 - (\epsilon_{2w} + \epsilon_{2a})\} \right] \int_0^t u_E dt + H_0 \quad (2-29)$$

上式を t について微分し、初期条件 $t=0$ のとき $u_E = \alpha V_0 / H_0$ で積分すれば、 u_E は結局次式のように表される (Appendix I 参照)。

$$u_E = \alpha V_0 \left[2 \alpha V_0 \left\{ \frac{\epsilon_{1w}}{\epsilon_{1w}(1 - \epsilon_{2a}) - \epsilon_{2w}(1 - \epsilon_{1a})} \right\} \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \{1 - (\epsilon_{1w} + \epsilon_{1a})\} - \{1 - (\epsilon_{2w} + \epsilon_{2a})\} \right] t + H_0^2 \right]^{-1/2} \quad (2-30)$$

定電圧条件における u_E は、定電流条件での u_E が脱水時間 t には依存せずに一定となったのに対して、Eq. (2-30) に示されるように t の関数で表される。Eq. (2-30) を Eq. (2-4) に代入し、 t に関して積分すると、電気浸透脱水量 Q_E は次の Eq. (2-31) のように表される。

$$Q_E = \int_0^t q_E dt = A \varepsilon_{1w} \int_0^t u_E dt = \frac{A \{ \varepsilon_{1w}(1 - \varepsilon_{2a}) - \varepsilon_{2w}(1 - \varepsilon_{1a}) \}}{[(\lambda_1/\lambda_2) \{1 - (\varepsilon_{1w} + \varepsilon_{1a})\} - \{1 - (\varepsilon_{2w} + \varepsilon_{2a})\}]} \\ \times \left[\left[2\alpha V_0 \left\{ \frac{\varepsilon_{1w}}{\varepsilon_{1w}(1 - \varepsilon_{2a}) - \varepsilon_{2w}(1 - \varepsilon_{1a})} \right\} \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \{1 - (\varepsilon_{1w} + \varepsilon_{1a})\} - \{1 - (\varepsilon_{2w} + \varepsilon_{2a})\} \right] t + H_0^2 \right]^{1/2} - H_0 \right] \quad (2-31)$$

また、層内の含水量が大きい場合には、定電流条件の場合と同様に、I、II 各層における空気の体積分率 ε_{1a} および ε_{2a} をそれぞれ無視することができるので、 Q_E は近似的に次式で書き表すことができる。

$$Q_E = \frac{A(\varepsilon_{1w} - \varepsilon_{2w})}{\{(\lambda_1/\lambda_2)(1 - \varepsilon_{1w}) - (1 - \varepsilon_{2w})\}} \\ \times \left[\sqrt{2\alpha V_0 \left\{ \frac{\varepsilon_{1w}}{\varepsilon_{1w} - \varepsilon_{2w}} \right\} \left\{ \frac{\lambda_1}{\lambda_2} (1 - \varepsilon_{1w}) - (1 - \varepsilon_{2w}) \right\} t + H_0^2} - H_0 \right] \quad (2-32)$$

Eqs. (2-31) および (2-32) は、定電圧条件における Q_E が \sqrt{t} の関数で表されることを示す。

定電圧条件の場合の電力消費量 W と時間 t との関係は次のようにして求められる。 t 時間にスラッジ層断面を流れる電流密度を I_t [A/m^2] とすると、 I_t は Ohm の法則によって次式で表される。

$$I_t = \lambda_1 E_1 \quad (= \lambda_2 E_2) \quad (2-33)$$

Eqs. (2-25) および (2-30) から E_1 を得て上式に代入すると、 I_t は次式のように表すことができる。

$$I_t = \lambda_1 V_0 \left[2\alpha V_0 \left\{ \frac{\varepsilon_{1w}}{\varepsilon_{1w}(1 - \varepsilon_{2a}) - \varepsilon_{2w}(1 - \varepsilon_{1a})} \right\} \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \{1 - (\varepsilon_{1w} + \varepsilon_{1a})\} - \{1 - (\varepsilon_{2w} + \varepsilon_{2a})\} \right] t + H_0^2 \right]^{-1/2} \quad (2-34)$$

したがって、 W は次の Eq. (2-35) より Eq. (2-36) のように表される。

$$W = \int_0^t A V_0 I_t dt = A V_0 \int_0^t I_t dt \quad (2-35)$$

$$W = \frac{A \lambda_1 V_0 \{ \epsilon_{1w}(1 - \epsilon_{2a}) - \epsilon_{2w}(1 - \epsilon_{1a}) \}}{\alpha \epsilon_{1w} [(\lambda_1 / \lambda_2) \{ 1 - (\epsilon_{1w} + \epsilon_{1a}) \} - \{ 1 - (\epsilon_{2w} + \epsilon_{2a}) \}]} \\ \times \left[\left[2 \alpha V_0 \left\{ \frac{\epsilon_{1w}}{\epsilon_{1w}(1 - \epsilon_{2a}) - \epsilon_{2w}(1 - \epsilon_{1a})} \right\} \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \{ 1 - (\epsilon_{1w} + \epsilon_{1a}) \} \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - \{ 1 - (\epsilon_{2w} + \epsilon_{2a}) \} \right] t + H_0^2 \right]^{1/2} - H_0 \right] \quad (2-36)$$

上式において、 ϵ_{1a} および ϵ_{2a} を無視すれば、 W に関する次の近似式が得られる。

$$W = \frac{A \lambda_1 V_0 (\epsilon_{1w} - \epsilon_{2w})}{\alpha \epsilon_{1w} \{ (\lambda_1 / \lambda_2) (1 - \epsilon_{1w}) - (1 - \epsilon_{2w}) \}} \\ \times \left[\sqrt{2 \alpha V_0 \left(\frac{\epsilon_{1w}}{\epsilon_{1w} - \epsilon_{2w}} \right) \left\{ \frac{\lambda_1}{\lambda_2} (1 - \epsilon_{1w}) - (1 - \epsilon_{2w}) \right\} t + H_0^2} - H_0 \right] \quad (2-37)$$

Eqs. (2-36) および(2-37) より、 W は、 Q_E と同様に、 \sqrt{t} の関数で表される。Eqs. (2-31) , (2-36) あるいはEqs. (2-32), (2-37) より、定電圧条件における単位脱水量当りの電力消費量(W/Q_E)は次式で表される。

$$W/Q_E = (\lambda_1 / \alpha \epsilon_{1w}) V_0 \quad (2-38)$$

上式における α , λ_1 および ϵ_{1w} は、スラッジ試料が決まれば定数になると考えられるので、定電圧条件では、 W と Q_E の関係は V_0 をパラメータとして直線関係になる。

定電圧条件における脱水率 η は、Eq. (2-31) あるいは Eq. (2-32) で表される脱水量 Q_E を用いて、初期含水量 $AH_0 \epsilon_{1w}$ に対する比として表される。また、脱水終了時間 t_e は、 ϵ_{1a} および ϵ_{2a} を無視することによって、次のような脱水終了時における層高 H_∞ のスラッジ層の液体および固体の物質収支式 Eq. (2-39) から、Eq. (2-30) を用いて近似的にEq. (2-40) で表される。

$$\left. \begin{array}{l} \text{液体 ; } A \epsilon_{1w} \int_0^{t_e} u_{ED} dt = AH_0 \epsilon_{1w} - AH_\infty \epsilon_{2w} \\ \text{固体 ; } AH_0 (1 - \epsilon_{1w}) = AH_\infty (1 - \epsilon_{2w}) \end{array} \right\} \quad (2-39)$$

$$t_e = \frac{(\epsilon_{1w} - \epsilon_{2w})}{2 \epsilon_{1w} (1 - \epsilon_{2w})} \left\{ \frac{\lambda_1 (1 - \epsilon_{1w})}{\lambda_2 (1 - \epsilon_{2w})} + 1 \right\} \frac{H_0^2}{\alpha V_0} \quad (2-40)$$

2) 非圧縮性スラッジの場合

定電流条件の場合と同様に定電圧条件においても、圧縮性スラッジの場合の解析結果と比較するために、非圧縮性スラッジに対する解析的検討を行った。定電圧条件における非

圧縮性スラッジ層の高さは、Fig.2-2 における H_1 が H_0 となり、定電流条件の場合とまったく同様である。

Fig.2-2 において、脱水終了層（Ⅱ）の微小変化 dH_2 を考えると、 $dH_2/dt = u_E$ であるので、定電圧条件における非圧縮性スラッジ層では、 H_1 および H_2 はそれぞれ次式のように表される。

$$H_1 = H_0 - H_2 \quad , \quad H_2 = \int_0^t u_E dt \quad (2-41)$$

したがって、 H_1 および H_2 を Eq. (2-28) に代入すると、次のような u_E に関する積分方程式を得る。

$$\frac{\alpha V_0}{u_E} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} - 1 \right) \int_0^t u_E dt + H_0 \quad (2-42)$$

圧縮性スラッジの場合と同様に、Eq. (2-42) を t について微分し、 $t=0$ のとき $u_E = \alpha V_0/H_0$ の初期条件で積分すれば、 u_E は次式となる。

$$u_E = \alpha V_0 / \sqrt{2 \alpha V_0 \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} - 1 \right) t + H_0^2} \quad (2-43)$$

したがって、Eq. (2-43) より、非圧縮性スラッジの場合の定電圧条件における電気浸透脱水量 Q_E は次式で表される。

$$\begin{aligned} Q_E &= A \varepsilon_{1w} \int_0^t u_E dt \\ &= \frac{A \varepsilon_{1w}}{\{(\lambda_1/\lambda_2) - 1\}} \left[\sqrt{2 \alpha V_0 \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} - 1 \right) t + H_0^2} - H_0 \right] \end{aligned} \quad (2-44)$$

上式は、非圧縮性スラッジの場合の Q_E が、圧縮性スラッジの場合の結果 Eq. (2-32) と同様に、 \sqrt{t} の関数で表されることを示し、また、定電流条件の場合と同様に、 Q_E が ε_{2w} には依存しないことを示している。

圧縮性スラッジの場合と同様にして、Eqs. (2-25), (2-33) および (2-43) から、非圧縮性スラッジの場合の I_t は次式で表される。

$$\begin{aligned} I_t &= \lambda_1 E_1 = \lambda_1 (u_E / \alpha) \\ &= \lambda_1 V_0 / \sqrt{2 \alpha V_0 \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} - 1 \right) t + H_0^2} \end{aligned} \quad (2-45)$$

したがって、電力消費量 W は Eq. (2-46) のように表され、また、 W/Q_E については、Eqs. (2-44) および (2-46) から、圧縮性スラッジの場合と同じ Eq. (2-38) で与えられる。

$$W = AV_0 \int_0^t I_t dt = \frac{A \lambda_1 V_0}{\alpha \{(\lambda_1 / \lambda_2) - 1\}} \times \left[\sqrt{2 \alpha V_0 \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} - 1 \right) t + H_0^2} - H_0 \right] \quad (2-46)$$

$$W/Q_E = (\lambda_1 / \alpha \varepsilon_{1w}) V_0 \quad (2-38)$$

また、脱水率 η ($=Q_E/AH_0 \varepsilon_{1w}$) は、Eq. (2-44) で表される Q_E を用いることによって求めることができ、脱水終了時間 t_e は、次の脱水終了時における液体の物質収支式 Eq. (2-47) に Eq. (2-43) で表される u_E を代入し、Eq. (2-48) のように表される。

$$A \varepsilon_{1w} \int_0^{t_e} u_E dt = AH_0 \varepsilon_{1w} - AH_0 \varepsilon_{2w} \quad (2-47)$$

$$t_e = \frac{\varepsilon_{1w} - \varepsilon_{2w}}{2 \varepsilon_{1w}} \left\{ \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} - 1 \right) \left(\frac{\varepsilon_{1w} - \varepsilon_{2w}}{\varepsilon_{1w}} \right) + 2 \right\} \frac{H_0^2}{\alpha V_0} \quad (2-48)$$

2.3 実験装置および方法

実験装置の概要を Fig. 2-3 に示した。脱水槽は、内径90mmまたは110mm の絶縁性のアクリル樹脂製円筒①の底部に、20meshの網状電極あるいは多孔板電極を取付け、この下部電極⑤の上面に密着させてろ布(SP#7)⑥を重ねて設置した構造になっている。図のSの部分に脱水試験用の含水率が一樣な高濃度スラッジを詰め、このスラッジ層の上部表面に接触するように孔径 3mm の多孔板電極を設置して上部電極④とした。上部電極に多孔板を用いた理由は、電気分解によって電極板近傍にわずかに発生するガスを抜けやすくするためである。また、電極材料としては、電気分解による陽極側の電極材料の溶解を防止するために白金電極が最適であるが、実用性を考慮して、銅およびステンレス製金網、または、銅、ステンレス、炭素板などを電極材料として使用した。上部電極板は、スラッジの脱水の進行に伴ってスラッジ層の高さが減少すると同時に、層上面に接触しながら自重で降下するように調節した。この場合、電極板によるスラッジの機械的圧縮は行っていない。固体粒子の ζ 電位の極性を考慮して、電気浸透によって水が下方に向かって移動するように上下部両電極の極性を決め（粒子の ζ 電位が負の場合は、上部電極を正、下部電極を負と

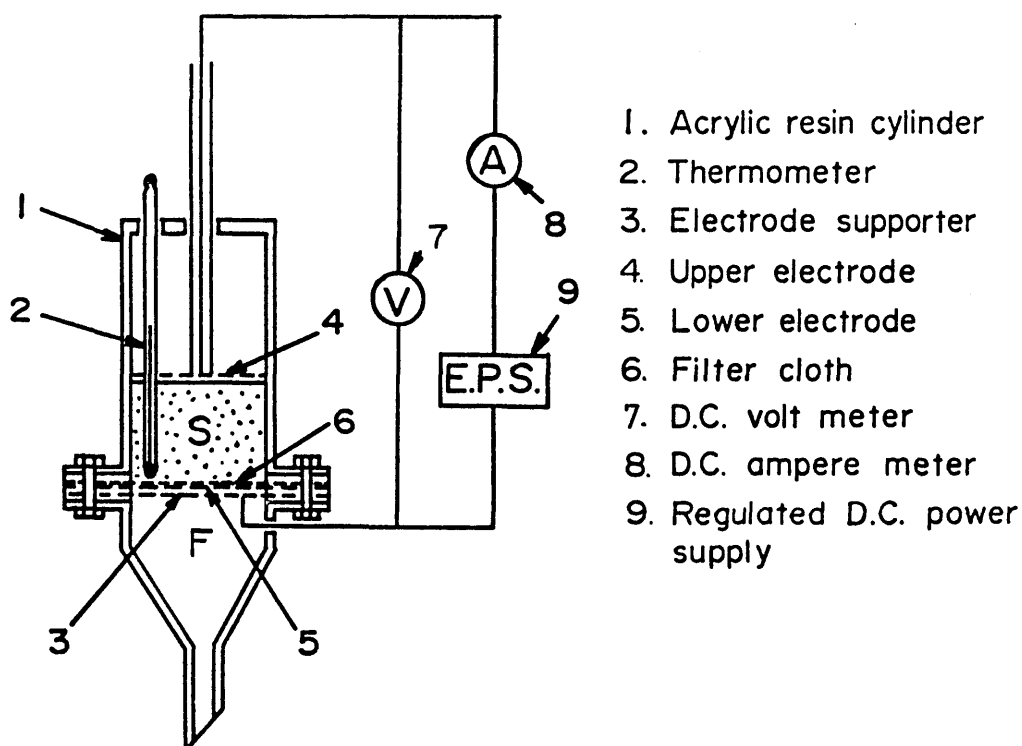


Fig.2-3 Schematic diagram of experimental apparatus

する。)、直流安定化電源⑨を用いて定電流あるいは定電圧の操作条件のもとでスラッジ層に直流電場を印加すると、重力作用と電気浸透作用によって図のFの部分に水が流出するので、ビューレットで脱水量を測定した。また同時に、定電流条件においては直流電圧計⑦を用いてスラッジ層に加わる電圧の経時変化を、定電圧条件では電流の経時変化を直流電流計⑧を用いてそれぞれ測定した。なお、電気浸透脱水量 Q_E は、重力と電気浸透による全脱水量 Q_T から近似的に同一経過時間における重力のみによる脱水量 Q_G を減ずることによって補正して求めた。

実験に使用したスラッジ試料は、製紙用白色粘土、ベントナイトおよび水酸化マグネシウムの各圧縮性スラッジで、固体濃度が重力沈降による最大圧縮濃度にほぼ等しくなる程度に、粉体試料を脱イオン水と十分に攪はん混合して調製した。製紙用白色粘土およびベントナイト粒子の ζ 電位は負、水酸化マグネシウムの ζ 電位は正であった。ベントナイトスラッジは、機械的方法では脱水困難なゲル状物質であり難脱水性スラッジの一例として使用した。定電流および定電圧の各操作条件のもとで用いたスラッジの諸特性値をTables 2-1 および 2-2 にそれぞれ示した。電気浸透度 α は、Fig.2-3 においてスラッジ層

Table 2-1 Properties of sludges used under condition of constant electric current

| Kinds of sludge | Solid conc. [wt%] | Initial height H_0 [cm] | Density of particle [kg/m ³] | Porosity of water part ϵ_{1w} [-] | Specific conductivity λ_1 [S/m] | Electroosmotic coefficient α [m ² /(V·s)] |
|------------------------|-------------------------|---------------------------------|--|--|---|---|
| White clay | 60.0 | 4.4 | 2660 | 0.643 | 8.30×10^{-2} | 5.10×10^{-9} |
| Bentonite | 20.0 | 2.7 | 2590 | 0.914 | 1.21×10^{-1} | 3.91×10^{-9} |
| Magnesium hydroxide | 50.0 | 3.7 | 2230 | 0.707 | 7.43×10^{-2} | 1.90×10^{-9} |

Initial water content of sludge is 200 cm³, respectively.

Table 2-2 Properties of sludges used under condition of constant voltage

| Kinds of sludge | Solid conc. [wt%] | Initial height H_0 [cm] | Density of particle [kg/m] | Porosity of water part ϵ_{1w} [-] | Specific conductivity λ_1 [S/m] | Electroosmotic coefficient α [$m^2/(V \cdot s)$] |
|------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--|---|---|
| White clay | 55.3 | 3.7 | 2350 | 0.655 | 2.93×10^{-2} | 8.03×10^{-9} |
| Bentonite | 20.0 | 2.7 | 2590 | 0.912 | 1.42×10^{-1} | 5.35×10^{-9} |
| Magnesium hydroxide | 50.4 | 3.7 | 2230 | 0.687 | 7.43×10^{-2} | 1.90×10^{-9} |

Initial water content of sludge is 270 cm^3 for White clay, and 200 cm^3 for Bentonite and Magnesium hydroxide, respectively.

の上の部分に一定水位の脱イオン水を満たしながら電気浸透による透過流量を実験的に求め、近似的に次式より算出した。

$$\alpha = q_E' / \varepsilon_{1w} E_{av} \quad (2-49)$$

ここに、 q_E' [m^3/s] は測定初期における透過流量、 E_{av} [V/m]はこの期間における平均電場強度である。また、脱水終了層の含水率（スラッジ単位体積当りの水の体積分率） ε_{2w} および等価比電導度 λ_2 は、脱水終了時における全脱水量、スラッジ層高、電圧あるいは電流の測定値からそれぞれ近似的に求めた。

2.4 結果および考察

2.4.1 電気浸透による脱水効果^{3, 5~7)}

定電流条件における全脱水量 Q_T と脱水時間 t との関係について、製紙用白色粘土（略して、白色クレー）およびベントナイトスラッジの場合を Fig.2-4 に、水酸化マグネシウム ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) スラッジの場合を Fig.2-5 に、それぞれ定電流密度 I_0 をパラメータとして示した。 Q_T は重力脱水量 Q_G と電気浸透脱水量 Q_E の和である。これらの図から、重力脱水のみによる結果に対して、電場下の全脱水流速(dQ_T/dt)は、各スラッジ試料において I_0 の増

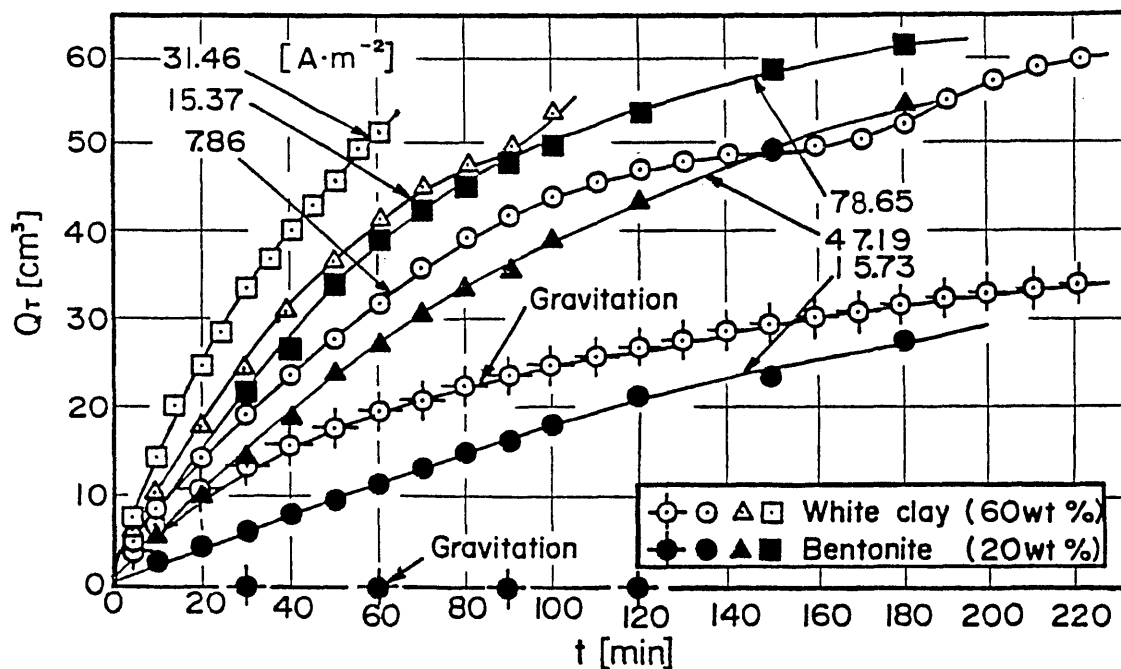


Fig.2-4 Relations between Q_T and t for White clay and Bentonite under condition of constant electric current

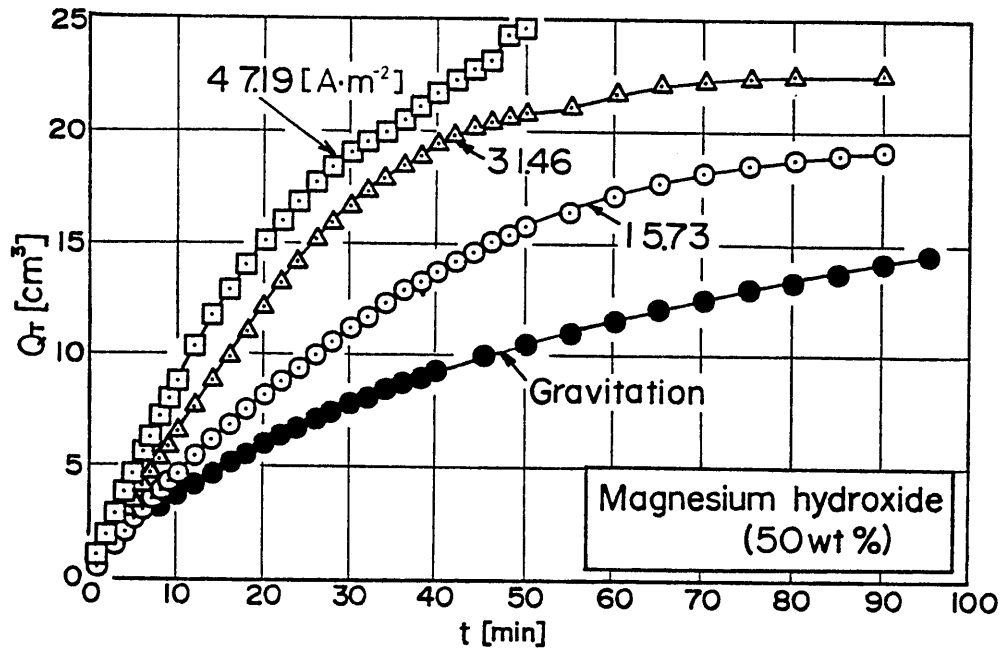


Fig.2-5 Relation between Q_T and t for $Mg(OH)_2$ under condition of constant electric current

加とともに大となり Q_T が増加することがわかる。特に、重力によってはほとんど脱水困難なゲル状のベントナイトスラッジに対して電気浸透脱水は顕著な効果があることが認められる。また、Fig.2-4における白色クレースラッジの場合の結果は、それぞれの I_0 の条件で Q_T が約 50cm^3 付近に達すると脱水流速が急増する傾向を示している。このようにある脱水量に達してから再び脱水流速が増加する現象は、Fig.2-5における $Mg(OH)_2$ スラッジの場合にも $I_0 = 47.19\text{ A/m}^2$ の条件においてその傾向が見られ、次のように考えることができる。 Q_T がこのような変化を示す経過時間になるとスラッジに加わる電圧 V_t が急速に増大することが観察されることから、 dQ_T/dt の急増を伴う Q_T の値付近ではスラッジ層全体の含水率が初期含水率 ϵ_{1w} から ϵ_{2w} に減少して1次的な脱水が終了し、含水量の減少に伴ってスラッジ層の電気抵抗が増大するので、定電流条件を維持するために印加電圧 V_t が急増するようになって層全体の電場強度が著しく大きくなり、あらたに脱水速度(dQ_T/dt)の増大を生ずるようになる。したがって、定電流条件における電気浸透脱水では、1次的脱水期間の終了後に消費電力の大きい2次的な脱水過程に移行すると考えられ、2次的脱水期間において脱水量の一層の増大を期待できることになる。しかしながら、2次的脱水過程では消費電力が極めて大きくなるため、スラッジ層のクラックの生成、ジュール熱による

スラッジの温度上昇や乾燥などの複雑な脱水状態を呈するようになる。

Figs.2-6 および 2-7 には、定電圧条件における Q_T と t の関係を印加電圧 V_0 をパラメータとして示した。これらの結果より、定電圧条件では V_0 の増加とともに dQ_T/dt が大となることがわかる。また、電気浸透脱水は、定電圧条件においてもゲル状ベントナイトスラッジに対して特に有効であり、著しく脱水量を増加することが注目される。ベントナイトスラッジの場合、Fig.2-6 において、最終脱水量を初期含水量に対する比で表した脱水効率 η は、 $V_0=12V$ の条件で約28.5%となる。このベントナイトスラッジの真空脱水による脱水効率は、600mmHg の真空度で約7.3 %であった。したがって、1例として、これらの脱水効率を比較すると、電気浸透脱水量は真空脱水量の約4倍となり、いわゆる難脱水性スラッジに対して電気浸透脱水が有用であることが示唆される。

Figs.2-6 および 2-7 より、電気浸透によって脱水終了時間は一般に短縮されることがわかる。しかしながら、最終脱水量は、白色クレーおよび $Mg(OH)_2$ スラッジの結果に示されるように、 V_0 には無関係にそれぞれほぼ一定の Q_T の値に近づく傾向がある。この結果は、脱水に伴ってスラッジの電気抵抗が増大するために、定電圧条件ではスラッジ層を流れる電流がしだいに減少して消費電力が小さくなるという理由によるものであり、脱水量

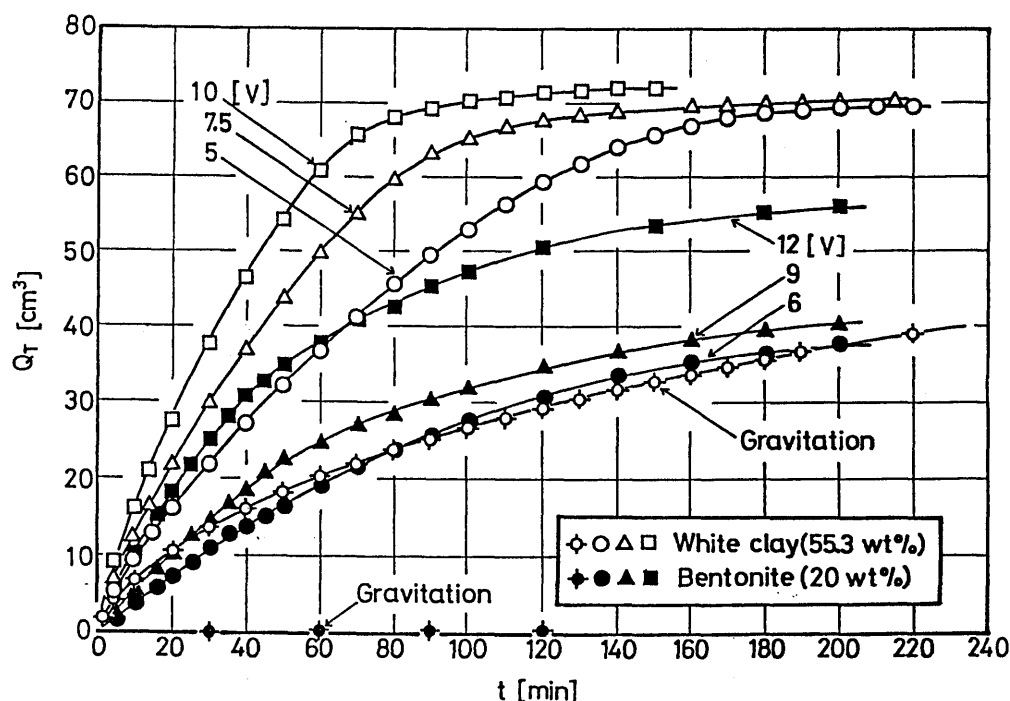


Fig.2-6 Relations between Q_T and t for White clay and Bentonite under condition of constant voltage

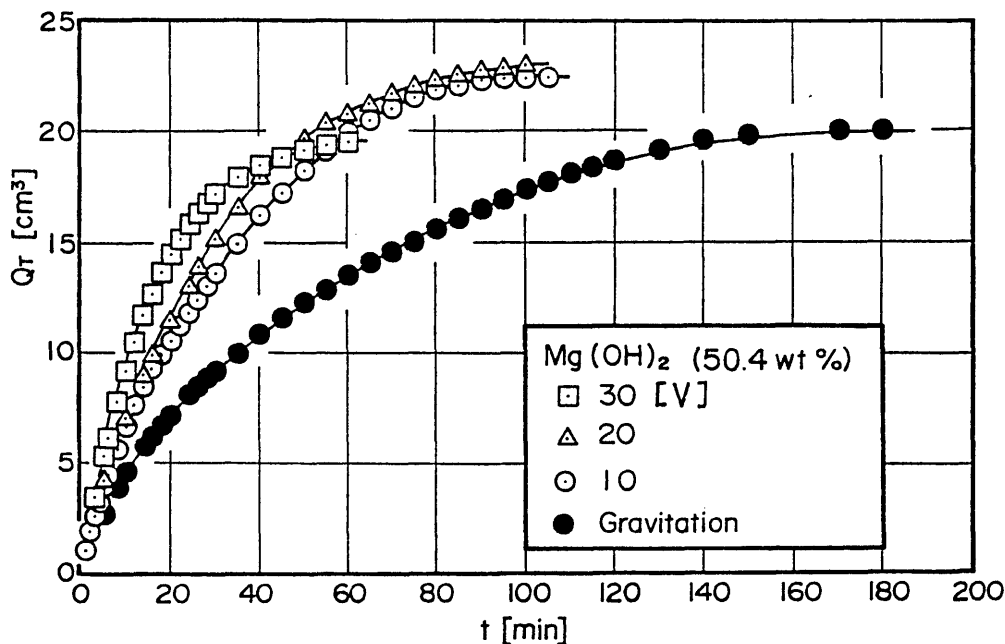


Fig.2-7 Relation between Q_r and t for $Mg(OH)_2$ under condition of constant voltage

が最終的に限界点に達することを示している。したがって、定電圧条件における電気浸透脱水では、定電流条件のときのような2次的脱水過程は観察されず、限界脱水量が存在すると考えられる。この限界脱水量は、Fig.2-7 の $Mg(OH)_2$ スラッジの場合には、印加電圧が30 Vのように大きくなるとかえって減少する傾向を示す。これは、印加電圧が大となると上部電極板近傍のスラッジ層が著しい脱水状態となるために、スラッジの電気抵抗の急激な増大によって消費電力が激減することによるものであると考えられる。よって、定電圧条件においては、限界脱水量に対して適当な印加電圧を選定することが必要となる。また、これらの結果において、 $Mg(OH)_2$ スラッジの電気浸透による脱水効果がほかの2つのスラッジ試料に比べてやや小さいのは、 $Mg(OH)_2$ 粒子の電位が正であるのに対しろ材として用いたろ布の電位が負の極性を有するために、ろ材部における電気浸透流れの方向がスラッジ層内の脱水方向とは反対の上向きになるという理由によると考えられる。

次に、先に得た電気浸透脱水式の妥当性を検討するために、解析結果と実験結果との比較検討を行うが、実験に使用したスラッジはすべて圧縮性スラッジで、脱水の進行とともにスラッジ層の高さが徐々に減少することを実測して確認した。したがって、以下の実験結果との比較検討には、圧縮性スラッジの場合の各操作条件における解析結果を用いた。

2.4.2 定電流条件における実験結果と脱水式による計算値との比較⁵⁾

Figs.2-8, 2-9 および 2-10は、各スラッジの定電流条件における電気浸透脱水量 Q_E と脱水時間 t の関係を、両対数紙上で電流密度 I_0 をパラメータとして示したものである。これらの図において、各プロットは実測値であり、実線は、それぞれの I_0 の条件における Eq. (2-5) による計算値である。各スラッジの場合とも計算値は実測値に対して脱水終了時近傍を除いて $\pm 20\%$ の誤差範囲内ではほぼ一致しており、Eq. (2-5) が示すように、 Q_E と t の関係は実測値においてもほぼ直線関係となっている。

定電流条件における圧縮性スラッジの場合の電力消費量 W と t の関係は近似的に Eq. (2-12) で表される。Figs.2-11および 2-12には、Eq. (2-12) による計算値と実測値との比較結果を、各スラッジについてそれぞれ I_0 をパラメータとして示した。前図の場合と同様に、実測値をプロットし、計算値を実線で示した。Eq. (2-12) による W の計算に必要な ε_{2w} および λ_2 の値は、1 次的な脱水が終了したと見なせる時点での層全体の平均含水率の実測値および電圧の測定値から Ohmの法則によって算出した値を用いた。Eq. (2-12) は、 W が t の2次式となることを表しており、Fig.2-12に示した $Mg(OH)_2$ スラッジ

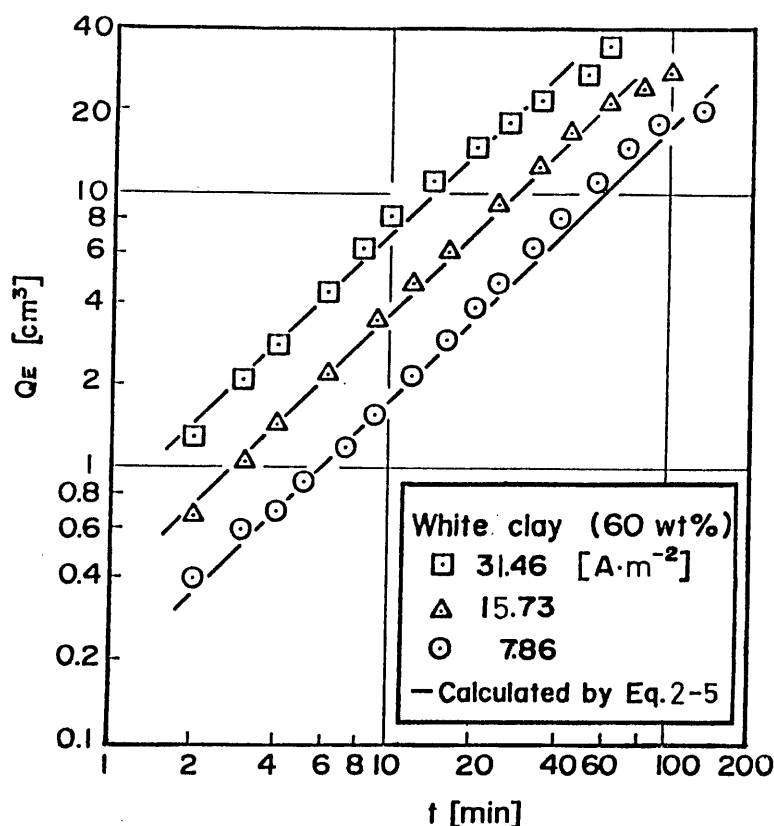


Fig.2-8 Relation between Q_E and t for White clay under condition of constant electric current

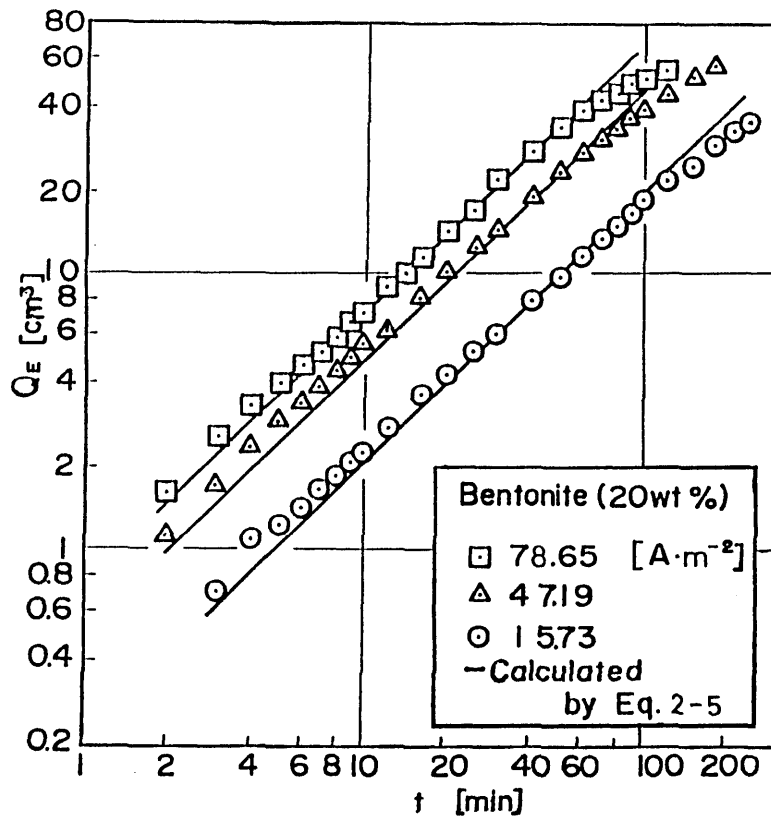


Fig.2-9 Relation between Q_E and t for Bentonite under condition of constant electric current

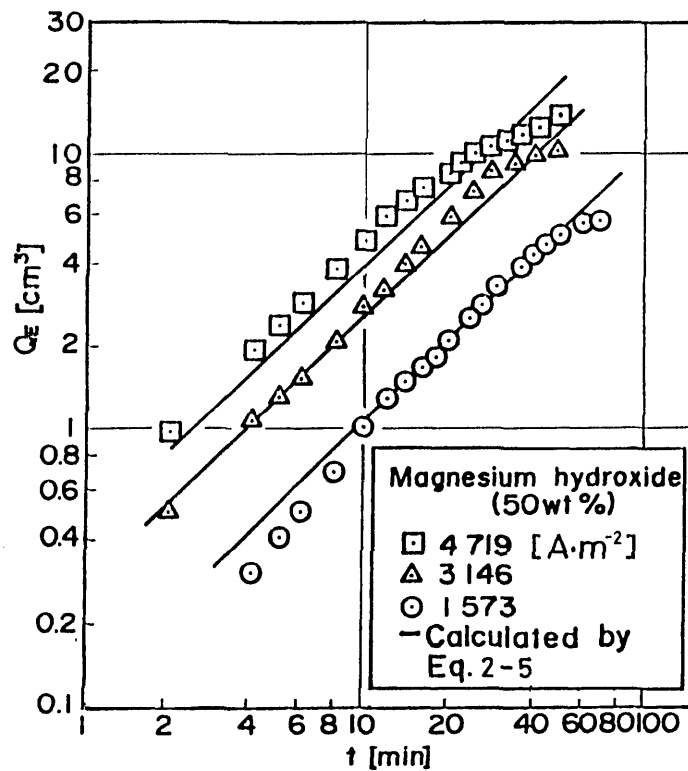


Fig.2-10 Relation between Q_E and t for $Mg(OH)_2$ under condition of constant electric current

の場合の実験結果もこれと同様の傾向を示し、それぞれの I_0 において計算値とほぼ一致する傾向を示している。しかしながら、Fig.2-11に示されるように、白色クレーおよびベントナイトスラッジの場合における W と t の関係は、実験結果および Eq. (2-12) による計算結果ともほぼ直線関係となり、また計算値と実測値は良い一致を示すことがわかる。 W と t の関係がこのような直線関係を示すのは、Eq. (2-12) における t の2次の項が1次の項に比べて非常に小さくなるために、 W と t の関係が近似的に次式のように表されるからと考えられる。

$$W = (AI_0^2 H_0 / \lambda_1) t \quad (2-49)$$

Figs.2-11および 2-12における W と t の関係の相違は、次のような理由によると考えられる。脱水に伴うスラッジ層の電気抵抗すなわち印加電圧の経時変化が、 $Mg(OH)_2$ スラッジの場合、時間の経過とともにしだいに増大するのに対して、他方、白色クレーおよびベントナイトスラッジの場合には脱水が進行してもほとんど変化せず一定であるためであ

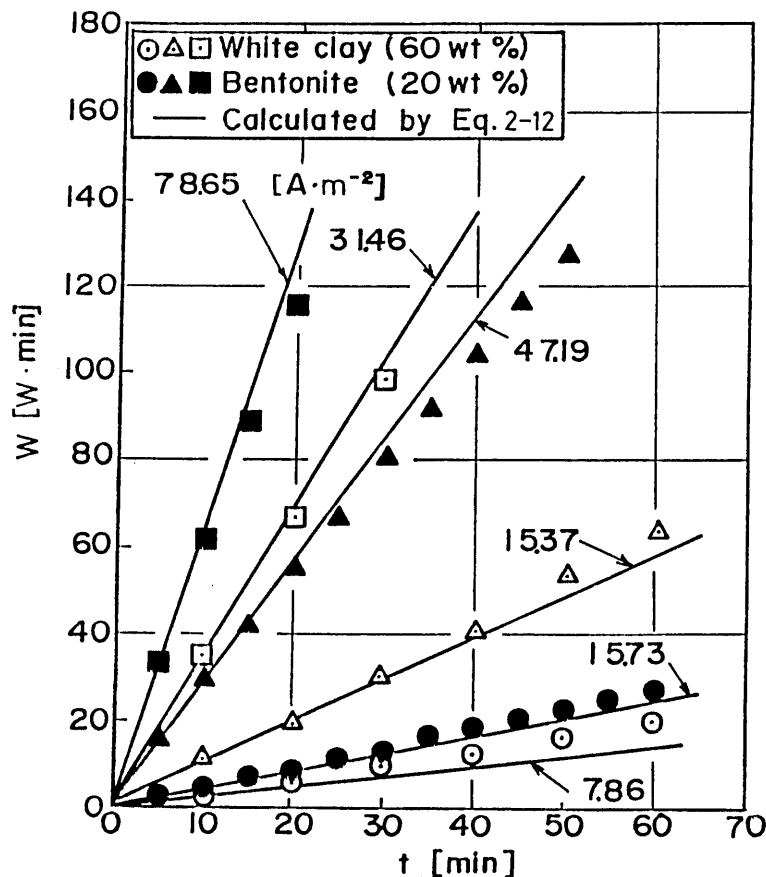


Fig.2-11 Relations between W and t for White clay and Bentonite under condition of constant electric current

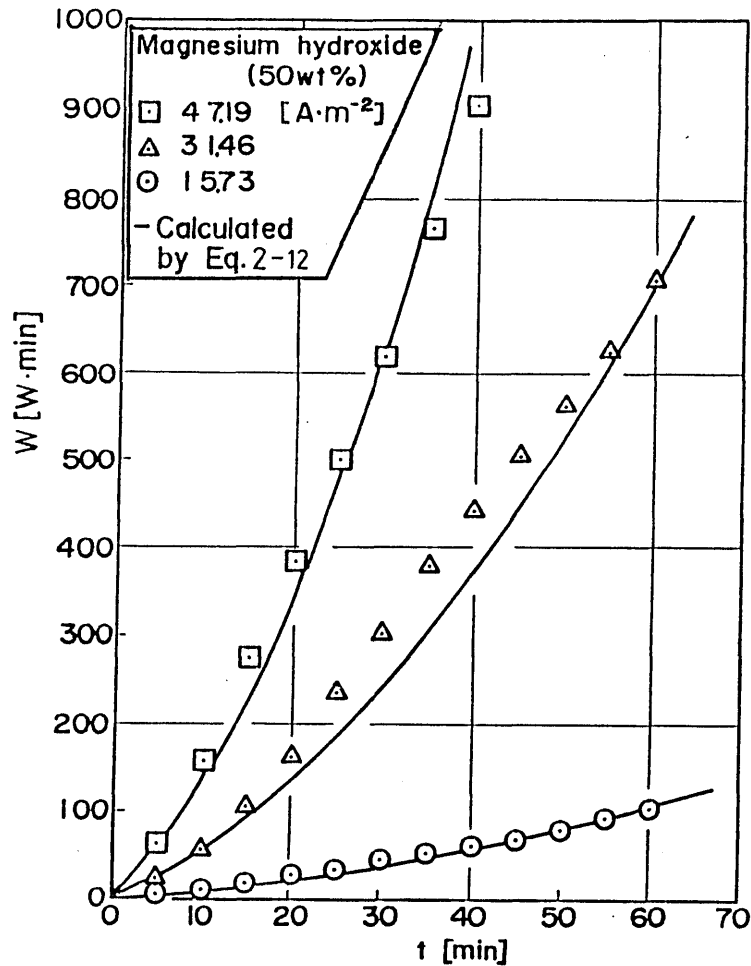


Fig.2-12 Relation between W and t for $\text{Mg}(\text{OH})_2$ under condition of constant electric current

る。したがって、Wとtの関係は、スラッジの電気的特性の影響を受けて変化することがわかる。

定電流条件における単位電気浸透脱水量当りの電力消費量(W/Q_E)は、Eqs. (2-13) および(2-14) のように表され、Eq. (2-14) による計算値と実測値の比較結果をFigs.2-13 および 2-14に示した。白色クレーおよびベントナイトスラッジの場合、 Q_E およびWは、Figs.2-8, 2-9 および 2-11で示されたように、それぞれtに関してほぼ1次の関係にあるので、 W/Q_E は近似的にもには無関係となる。したがって、Fig.2-13に示されるように、任意のtにおける W/Q_E の実測値は、それぞれの I_0 の値でほぼ一定となり I_0 とは近似的に直線関係で示され、実線のEq. (2-14) による計算結果とほぼ一致する傾向を示すことがわかる。ここで、Eq. (2-14) は、 W/Q_E が I_0 の2次式となることを表すが、 I_0 の2次の項が1次の項に比べて非常に小さいときは、Eq. (2-14) を近似的に次式のように書き表

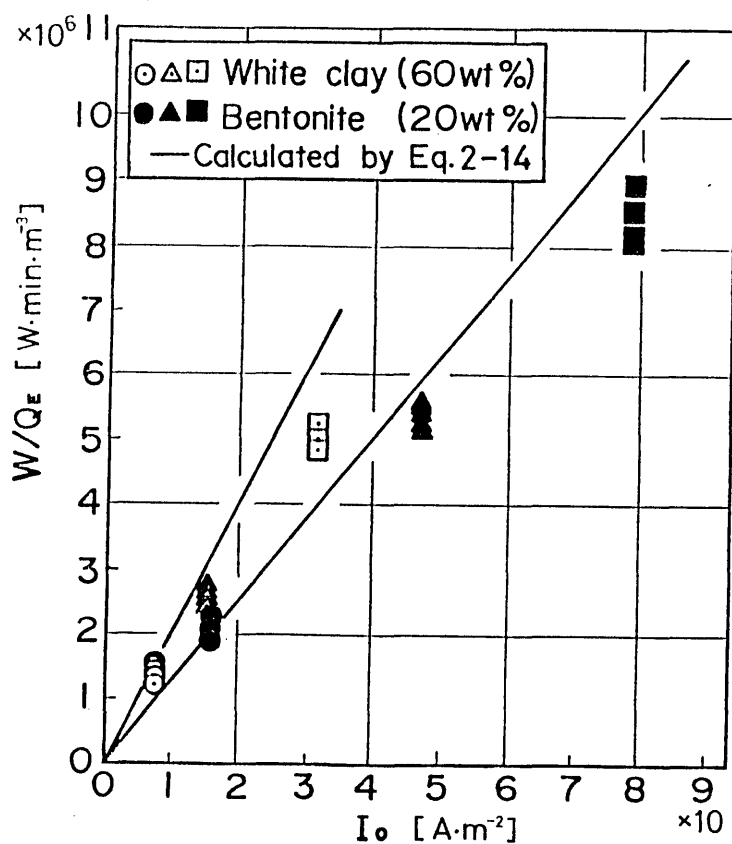


Fig.2-13 Relations between W/Q_E and I_0 for White clay and Bentonite under condition of constant electric current

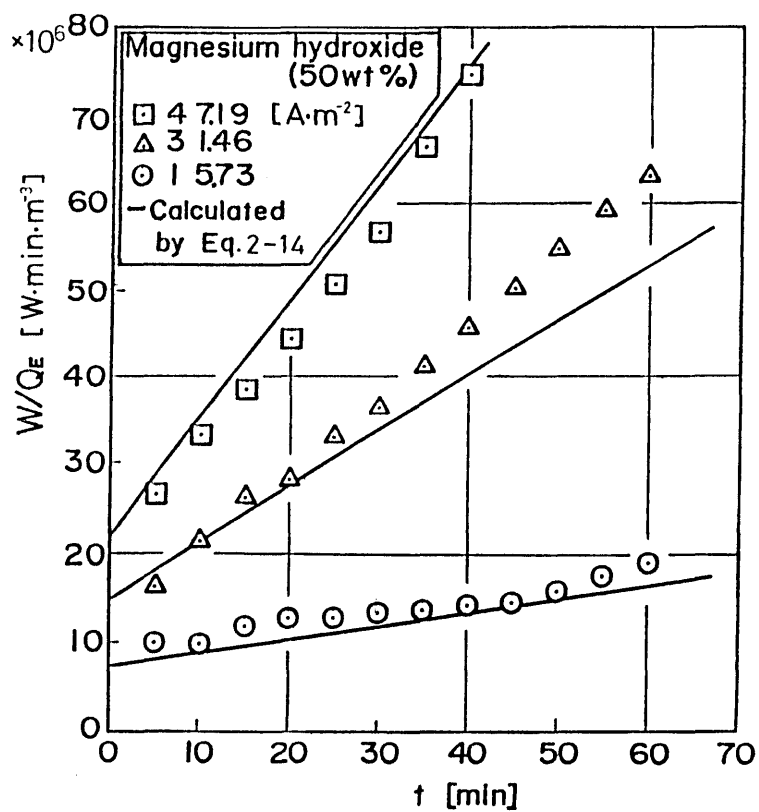


Fig.2-14 Relation between W/Q_E and t for $Mg(OH)_2$ under condition of constant electric current

することができる。

$$W/Q_E = (H_0 / \epsilon_{1w} \alpha) I_0 \quad (2-50)$$

したがって、これらのスラッジの場合の実験結果に対しては、上式で表される I_0 に関する1次式が近似的に適用できるものと考えられる。しかしながら、Eq. (2-14)における I_0 の2次の項が無視できないときには、 W/Q_E は t に関して1次式となる。このことより、 $Mg(OH)_2$ スラッジの場合は、Fig. 2-14に示されるように、 W/Q_E がそれぞれの I_0 の値においてもほぼ直線関係で示されることがわかる。また、この直線の傾きは I_0 が増加するにつれて大きくなり、 $t=0$ における W/Q_E の値は、Eq. (2-50)で表される $(H_0 / \epsilon_{1w} \alpha) I_0$ の値を与える。したがって、単位脱水量当りの電力($t=0$ のときの W/Q_E)は I_0 の増加とともに増大するので、電力効率は I_0 が増加するにつれて減少することになる。このことは、定電流条件における電気浸透脱水操作を行う上で考慮しなければならないことである。

電気浸透による脱水終了時間 t_e はEq. (2-18)で表されるので、1例として、各スラッジの $I_0 = 15.73 \text{ A/m}^2$ の場合について、 t_e の計算値を求めると、白色クレー、ベントナイトおよび $Mg(OH)_2$ スラッジに対してそれぞれ $t_e = 113, 264, 51 \text{ min}$ となる。これらの計算値は、Figs. 2-8, 2-9 および 2-10における実験結果とそれぞれほぼ良好な一致を示すことがわかるので、Eq. (2-18)はほぼ妥当であると考えられる。

以上の結果より、定電流条件における圧縮性スラッジの電気浸透脱水について、脱水過程におけるスラッジ層内を脱水進行層と脱水終了層の2層と見なした粒子充填層内の電気浸透流れに基づく脱水モデルを用いて理論的に得た電気浸透脱水諸式は、実験的にはほぼ妥当であることが確認された。

2.4.3 定電圧条件における実験結果と脱水式による計算値との比較^{6, 7)}

Figs. 2-15, 2-16 および 2-17は、定電圧条件における各スラッジの Q_E と t の関係を印加電圧 V_0 をパラメータとして両対数紙上でプロットし、実測値とEq. (2-32)による計算値を比較したものである。定電圧条件における Q_E と t の理論的關係はEq. (2-32)で表されるが、Eq. (2-32)における λ_2 の値は、脱水終了時点でのスラッジ層の電流値の測定によって得た。Fig. 2-15の白色クレースラッジの場合、実線のEq. (2-32)による計算値と実測値は、脱水終了時近傍を除いてほぼ良好な一致を示している。また、このスラッジの場合は、定電圧条件にもかかわらず、スラッジ層を流れる電流の時間的変化がその電気的特性からほとんどなくほぼ一定であるという実測結果より、定電流条件における電気

浸透脱水とも見なされる。したがって、このようなスラッジの Q_E と t の関係は、Fig.2-15に示されるように、定電流条件の場合と同様にほぼ直線関係となる。すなわち、脱水が進行してもスラッジ層の電気抵抗があまり変化しないような電気的特性を有するスラッジに対しては、Fig.2-2 に示した脱水モデルにおける脱水終了層の電場強度 E_1 が近似的に V_0/H_0 として表され一定となるので、Eq.(2-25) から u_E もまた一定となり、 Q_E は次のような近似式で表され、 Q_E と t は直線関係になると考えられる。

$$Q_E = A \epsilon_{1w} \alpha (V_0/H_0) t \quad (2-51)$$

ベントナイトおよび $Mg(OH)_2$ スラッジの場合には、Figs.2-16および2-17に示されるように、 Q_E と t の関係は曲線で示され、Eq.(2-25) による計算値と実測値は脱水終了時近傍を除いて $\pm 20\%$ の範囲内ではほぼ一致している。

定電圧条件での脱水終了時間 t_e は Eq.(2-40) で表され、 t_e と V_0 とは反比例の関係にある。各スラッジに対する Eq.(2-40) による t_e の計算値は、白色クレースラッジの場合、 $V_0 = 5, 7.5, 10$ Vに対してそれぞれ $t_e = 184, 93, 72$ min、ベントナイトでは、 $V_0 = 6, 9, 12$ Vに対してそれぞれ $t_e = 221, 181, 124$ min、 $Mg(OH)_2$ では、 $V_0 = 10, 20, 30$ Vに対して $t_e = 79, 67, 38$ minであり、これらの値は、Figs.2-15,2-16および2-17におけ

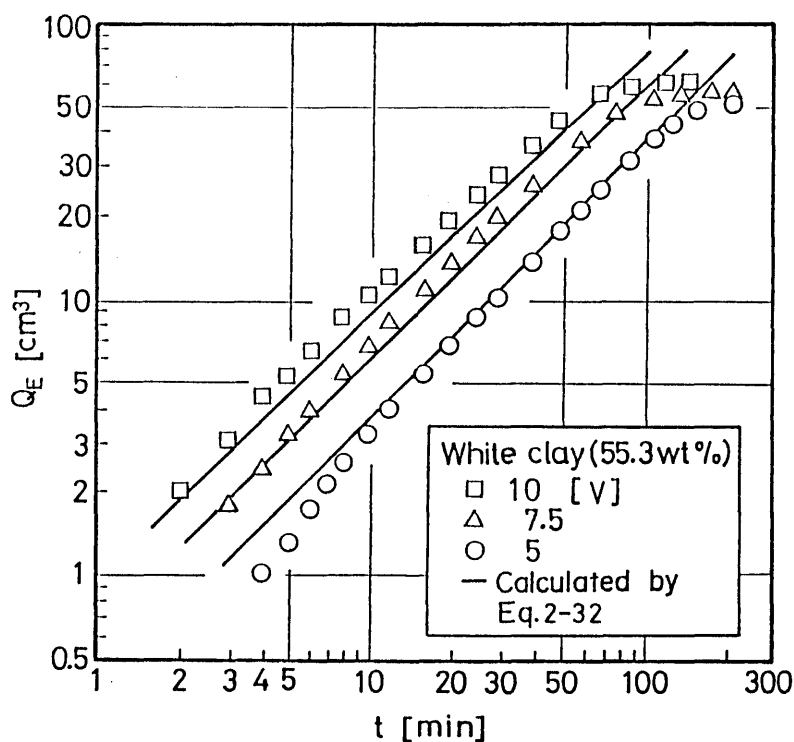


Fig.2-15 Relation between Q_E and t for White clay under condition of constant voltage

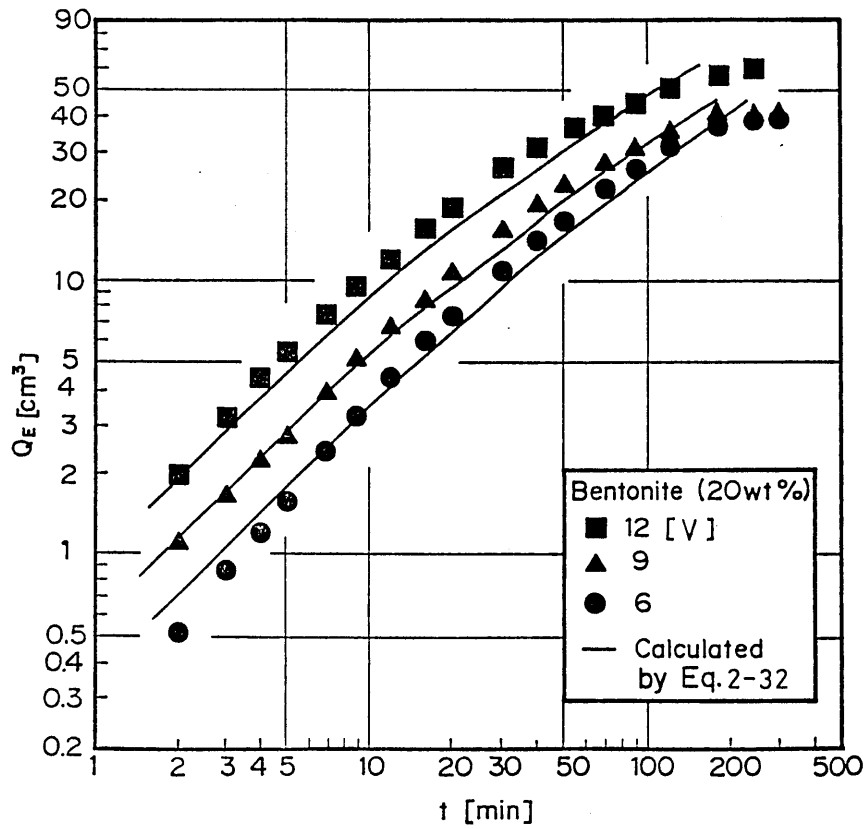


Fig.2-16 Relation between Q_E and t for Bentonite under condition of constant voltage

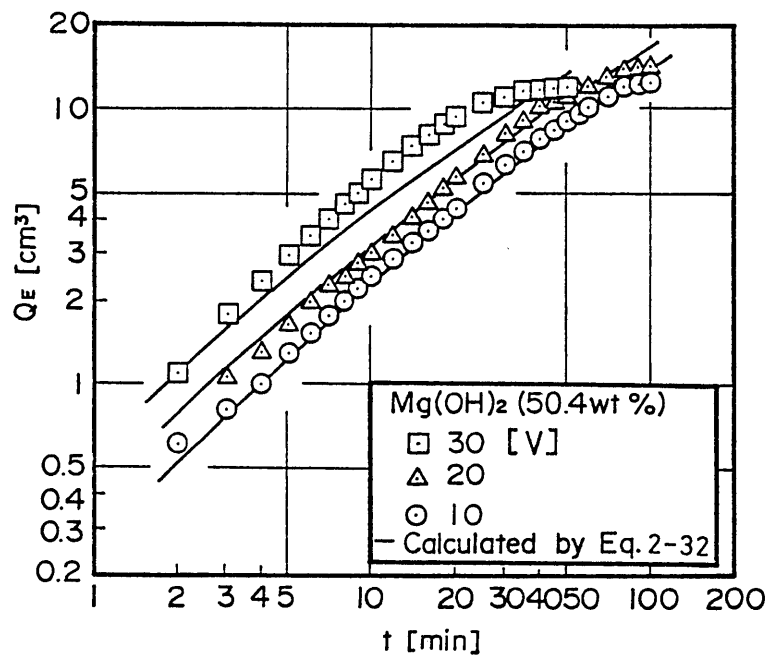


Fig.2-17 Relation between Q_E and t for $Mg(OH)_2$ under condition of constant voltage

るそれぞれの実験結果とほぼ一致し、Eq. (2-40) の妥当性が認められる。

次に、定電圧条件における W と t の関係について、実測値と Eq. (2-37) による計算値の比較結果を、Figs. 2-18 および 2-19 に両対数紙上で V_0 をパラメータとして示した。定電圧条件においては、 W は \sqrt{t} の関数で表されるが、Fig. 2-18 における白色クレー斯拉ッジの場合、 W と t はほぼ直線関係となり、Eq. (2-37) による計算値と実測値はほぼ良好な一致を示すことがわかる。この結果は、白色クレー斯拉ッジの電気抵抗が脱水過程においてほとんど変化しないという前述の電気的特性によるためである。したがって、このようなスラッジに対しては、Eq. (2-33) で表される I_t がほぼ一定値となり、 W と t の関係は、Eq. (2-35) から近似的に次のような t の 1 次式で表されることが考えられる。

$$W = (A \lambda_1 V_0^2 / H_0) t \quad (2-52)$$

また、同図中のベントナイトスラッジの場合は、実測値が計算値に比べてやや大きい値を示し、 V_0 が大となるほどその差は大きくなることがわかる。これは、次のような理由によ

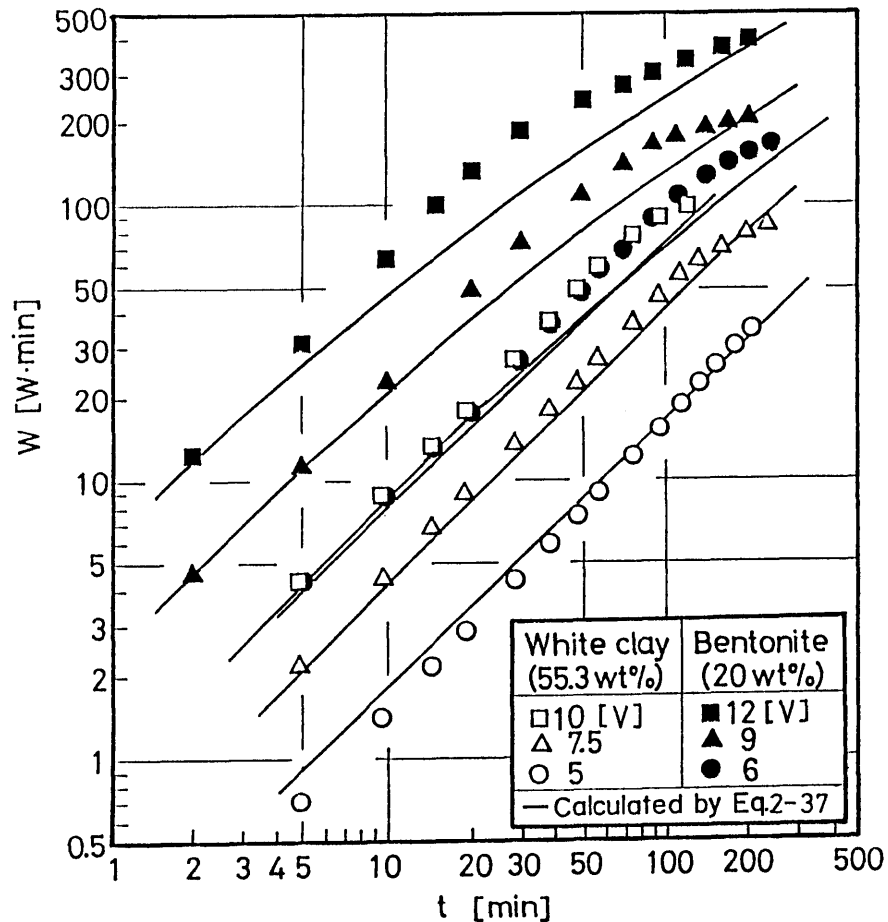


Fig. 2-18 Relations between W and t for White clay and Bentonite under condition of constant voltage

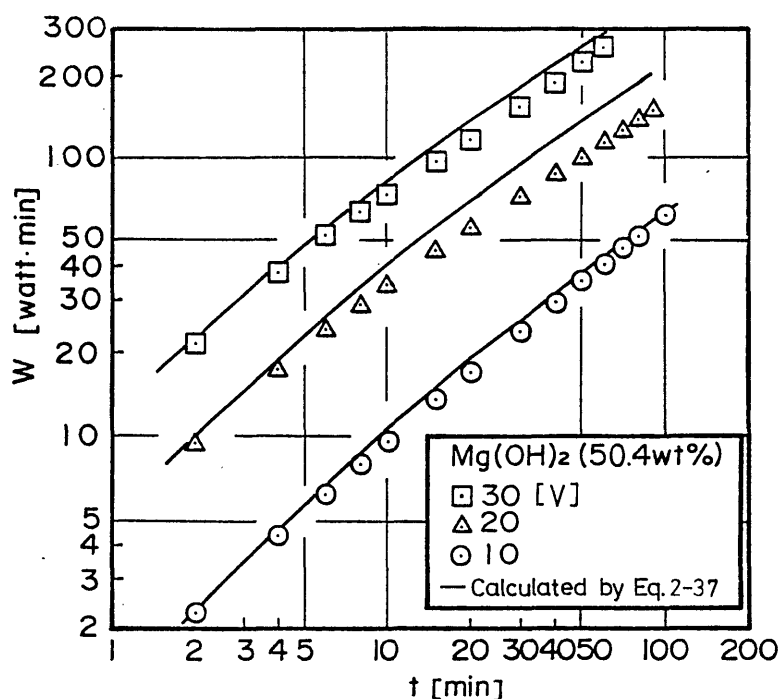


Fig.2-19 Relation between W and t for $Mg(OH)_2$
under condition of constant voltage

と考えられる。実測によれば、実験初期には電気分解に起因する陽極酸化によって上部電極板表面からのイオンの溶出の影響が顕著であると考えられるために、電流値が一時的に増加するが、脱水の進行とともにスラッジ層の電気抵抗が増大するので電流値はやがて漸減するようになる。一方、Eq. (2-34) における I_t および Eq. (2-37) における W は、この電極材料のイオン化によるスラッジ層の電気伝導性の変化は考慮されずに求められたものであって電流値は単調に減少することを表しており、このことによる差異が生じたものである。なお、Fig.2-19に示されるように、 $Mg(OH)_2$ スラッジの場合も実測値と Eq. (2-37) による計算値はほぼ良い一致を示すことがわかる。

定電圧条件における Q_E と W の関係は、Eq. (2-38) で表されるように、 V_0 をパラメータとして直線関係となる。 Q_E と W の関係についての実測値と Eq. (2-38) による計算値の比較結果を、Figs.2-20および 2-21に示した。Fig.2-20における白色クレーおよびベントナイトスラッジの場合とも、実測値は脱水終了時近傍を除いて計算値とほぼ一致し、 Q_E と W はほぼ直線関係で示されることがわかる。また、 $Mg(OH)_2$ スラッジの場合も、実測値と計算値はほぼ一致する傾向を示すが、Fig.2-21に示されるように、 V_0 が大となると実測値が実線の計算値よりわずかに大きくなる傾向を示す。これは、前述したように、 V_0 が大きくなると上部電極板近傍で急激な脱水状態が生じ、印加電圧が激減するためである。

これらの図から、 W に対する Q_E の値すなわち消費電力に対する脱水効率(Q_E/W)は、印加電圧 V_0 が小さくなるほど大きくなることがわかる。したがって、定電圧条件では、脱水速度および電力消費量に関して印加電圧の最適操作条件がある。このことは、定電圧条件のも

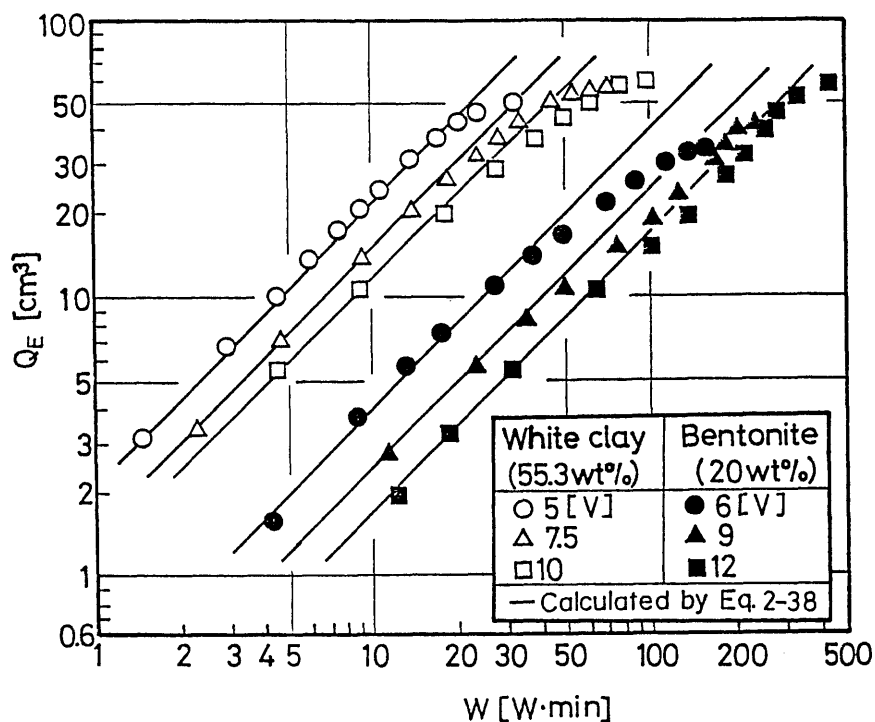


Fig.2-20 Relations between Q_E and W for White clay and Bentonite under condition of constant voltage

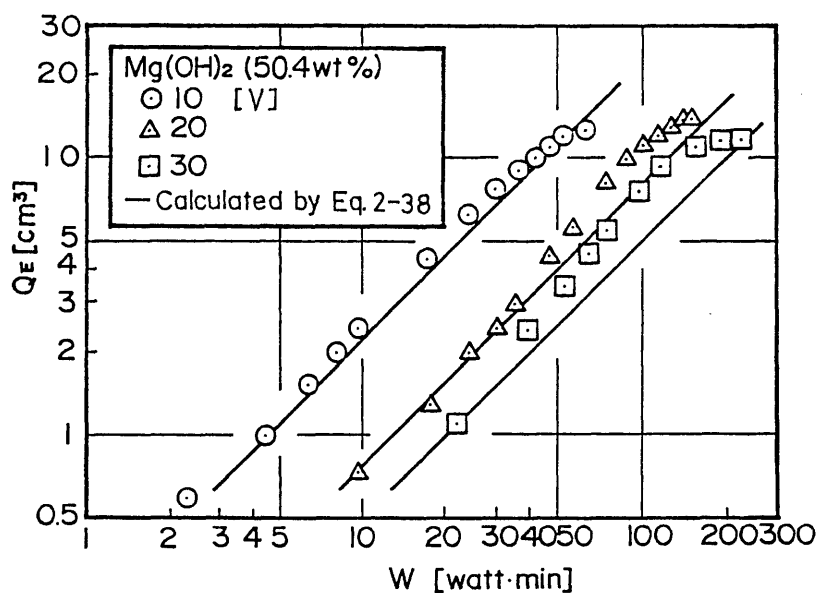


Fig.2-21 Relation between Q_E and W for $Mg(OH)_2$ under condition of constant voltage

とで電気浸透脱水を行う場合には、一般に、脱水速度および電力消費量を考慮して印加電圧の最適値を選定することが必要となることを示唆している。

以上述べたように、定電流条件において用いた粒子充填層内の電気浸透流れに基づく脱水モデルは、定電圧条件における電気浸透脱水操作の場合についても十分に適用でき、電気浸透脱水量、電力消費量および単位脱水量当りの電力消費量などに関する理論計算値と実測値はほぼ良好な一致を示し、圧縮性スラッジの定電圧条件における電気浸透脱水式の妥当性が実験的にほぼ認められた。

2.5 総 括

電気浸透脱水操作は定電流および定電圧の操作条件に大別でき、粒子充填層内の電気浸透流れに基づく脱水モデルを用いて、定電流条件および定電圧条件における電気浸透脱水操作の理論的並びに実験的検討を行い、次のような結果を得た。

1) 定電流および定電圧の各操作条件における圧縮性スラッジの電気浸透脱水過程は、粒子充填層内の電気浸透流れに基づく脱水モデルによってほぼ説明することができ、電気浸透脱水量、電力消費量および単位脱水量当りの電力消費量などに関する各操作条件における電気浸透脱水式は、その妥当性が実験的に認められるので、電気浸透脱水装置の設計式として有用である。

2) 白色クレー、ベントナイトおよび $Mg(OH)_2$ などの圧縮性スラッジの電気浸透脱水速度は、定電流条件では電流密度、定電圧条件では印加電圧の増加とともに大となる。すなわち、各操作条件において印加電場強度を増加すると脱水速度は大となり、脱水量を増大することができる。また、電気浸透脱水法は、ゲル状のベントナイトスラッジのような機械的方法では脱水困難ないわゆる難脱水性スラッジに対して特に有効である。

3) 定電流条件における電気浸透脱水過程においては、脱水に伴うスラッジ層の電気抵抗の増加により印加電圧がしだいに増大し、消費電力の大きな2次的な脱水過程を生じるために脱水量の増加が期待できる。しかしながら、定電圧条件では脱水が進行するにつれて電流値が減少するので、最終的にはある限界脱水量に達し、定電流条件による脱水過程で示される2次的脱水過程は現れない。また、定電圧条件では、単位脱水量当りの電力消費量が印加電圧に比例して増大するので、一般に、脱水速度および電力消費量を考慮して最適な印加電圧を選定する必要がある。

Literature cited

- 1) Komagata, S.: *Denki Kagaku*, 11, 13 (1943)
- 2) *idem*: "Kaimen Denki Kagaku Gaiyo", pp. 71, 83, Shokodo, Tokyo (1969)
- 3) Yoshida, H.: Master's thesis, Gunma Univ. (1973)
- 4) Yukawa, H.: *Kagaku Kojo*, 17, (7), 50 (1973)
- 5) Yukawa, H., H. Yoshida, K. Kobayashi and M. Hakoda: *J. Chem. Eng. Japan*, 9, 402 (1976)
- 6) *idem: ibid.*, 11, 475 (1978)
- 7) Yoshida, H. and T. Shinkawa: Annual Research Reports of Oyama Technical College, 10, 118 (1978)
- 8) Kitahara, F. and A. Watanabe (eds.): "Kaimen Denki Gensho", p. 102, Kyoritsu Shuppan, Tokyo (1972)

第三章 操作条件による電気浸透脱水特性 および脱水効率

3.1 緒 言

ゲル化するような難脱水性スラッジに対して特に有効である^{1, 2)}電気浸透脱水法は、定電流条件あるいは定電圧条件いずれの操作条件でも実施することができるが、従来の電気浸透脱水に関する研究では定電圧条件の場合が大部分であり、操作条件による電気浸透脱水特性についてはほとんど明らかにされていない^{3~5)}。しかしながら、第二章において若干言及したように、定電流および定電圧の各操作条件における圧縮性スラッジの電気浸透脱水過程においてはそれぞれ特徴的な脱水特性が示され、操作条件による脱水速度および消費電力に対する脱水効率などの電気浸透脱水特性を明確にすることは、脱水操作の最適化を考える上で重要なことである。

本章では、定電流および定電圧の各操作条件における圧縮性スラッジの電気浸透脱水特性を実験的に明らかにするとともに、脱水速度、脱水後の含水率、および消費電力に対する脱水量などについて、実験結果および前章で示した粒子充填層内の電気浸透流れの脱水モデルより得た電気浸透脱水式を用いて、各操作条件における脱水効率の比較検討を行った^{6, 7)}。また、定電圧条件における限界脱水量に対する最適印加電圧の実験的な簡易決定法を提示した⁸⁾。さらに、電気浸透脱水過程を明確にするために、各操作条件下での脱水過程におけるゲル状スラッジ層内の含水率分布および電位差分布の経時変化を実測し、含水率分布と電位差分布との相互関連性を実験的に明らかにするとともに、これらの実測結果から、操作条件による脱水特性および脱水効率について考察を加えた⁷⁾。

3.2 定電流条件および定電圧条件における脱水特性^{6, 7)}

定電流および定電圧の各操作条件における圧縮性スラッジの電気浸透脱水特性を比較検討するために、Fig.2-3 で概要を示した実験装置とほとんど同様の回分式電気浸透脱水装置を用いて、各操作条件のもとで初期電場強度 E_0 [V/m]およびスラッジ層初高 H_0 を変え

* 初期電場強度 E_0 は、脱水開始時における印加電圧およびスラッジ層高をそれぞれ V_0 および H_0 とすれば、 $E_0 = V_0 / H_0$ で表される。

て実験的検討を行い、脱水量を測定するとともに、脱水に伴うスラッジ層の電気抵抗の変化を、定電流条件では電圧変化、定電圧条件では電流変化として記録測定し、同時にスラッジ層高の経時変化も測定した。実験には、電極材料として、電気分解による陽極溶解を防ぐためにチタンおよび白金の多孔板を使用し、スラッジ試料は、 $Mg(OH)_2$ およびベントナイトを用いた。なお、各スラッジの初期固体濃度および初期含水率* ϵ_{w0} [－] は、それぞれ、 $Mg(OH)_2$ スラッジでは26.9wt%および $\epsilon_{w0}=0.861$ 、ベントナイトスラッジでは20.0wt%および $\epsilon_{w0}=0.917$ であった。また、第二章で示した粒子充填層内の電気浸透流れに基づく脱水モデルより理論的に得た各操作条件における圧縮性スラッジの電気浸透速度 u_E 、脱水量 Q_E 、電力消費量 W 、および単位消費電力当りの脱水量(Q_E/W)などの電気浸透脱水式は、Table 3-1 のように要約されるので、これらの理論式および実験結果を用いて操作条件による脱水特性を検討した。なお、表の式中における ϵ_{1w} は、Figs.2-1 および 2-2 に示した電気浸透脱水モデルにおける脱水進行層の含水率を表し、理論式の計算には、 ϵ_{1w} の値として初期含水率 ϵ_{w0} の値を用いた。また、Eqs.(3-1)および(3-3)は、Eqs.(2-14) および(2-38)をそれぞれ展開整理し、Eq.(3-2)は、Eq.(2-30)においてスラッジ層中の空気の体積分率 ϵ_{1a} および ϵ_{2a} を無視して表したものである。

Figs.3-1 および 3-2 は、 $Mg(OH)_2$ およびベントナイトの各スラッジに対して、定電流および定電圧条件における電気浸透脱水量 Q_E と脱水時間 t との関係の実験結果を、それぞれ初期電場強度 E_0 をパラメータとして示したものである。Fig.3-1 に示した $Mg(OH)_2$ スラッジの場合は、両操作条件において E_0 の値が同一になるように印加電圧あるいは電流値を調整して行った結果であり、脱水初期における電気浸透脱水速度(dQ_E/dt)は、 E_0 の各値で両操作条件ともほぼ等しくなることがわかる。Table 3-1 のEqs.(2-3)および(3-2)に示されるように、定電流条件における電気浸透速度 u_E は、 t には無関係に $E_0(=I_0/\lambda_1)$ に比例する。一方、定電圧条件における u_E は、 t が小さいときには近似的に $u_E=\alpha(V_0/H_0)$ で表され、定電圧条件においても、脱水初期における u_E は $E_0(=V_0/H_0)$ と比例関係になる。したがって、 E_0 が同じ場合は、Fig. 3-3 に示した u_E と t の関係が示すように、各操作条件における脱水初期の u_E の値はほぼ同じになる⁹⁾。しかしながら、Figs.3-1 お

* スラッジ単位体積当りの液体の占める体積割合、すなわちスラッジ層中の水の体積分率を表す。

Table 3-1 Equations obtained theoretically based on a model of electroosmotic flow through a compressible-particle packed bed

Constant electric current condition

$$u_E = \alpha \frac{I_0}{\lambda_1} \quad (2-3) \quad Q_E = A \epsilon_{1w} \alpha \frac{I_0}{\lambda_1} t \quad (2-5) \quad W = \frac{A I_0^2}{\lambda_1} \left\{ \frac{\epsilon_{1w}}{\epsilon_{1w} - \epsilon_{2w}} \left(\frac{1 - \epsilon_{1w}}{\lambda_2} - \frac{1 - \epsilon_{2w}}{\lambda_1} \right) \frac{\alpha I_0}{2} t^2 + H_0 t \right\} \quad (2-12)$$

$$\frac{Q_E}{W} = 1 / \left\{ \frac{I_0^2}{2(\epsilon_{1w} - \epsilon_{2w})} \left(\frac{1 - \epsilon_{1w}}{\lambda_2} - \frac{1 - \epsilon_{2w}}{\lambda_1} \right) t + \frac{H_0 I_0}{\alpha \epsilon_{1w}} \right\} \quad (3-1)$$

Constant voltage condition

$$u_E = \alpha V_0 / \sqrt{2 \alpha V_0 \left(\frac{\epsilon_{1w}}{\epsilon_{1w} - \epsilon_{2w}} \right) \left\{ \frac{\lambda_1}{\lambda_2} (1 - \epsilon_{1w}) - (1 - \epsilon_{2w}) \right\} t + H_0^2} \quad (3-2)$$

$$Q_E = \frac{A(\epsilon_{1w} - \epsilon_{2w})}{\{(\lambda_1/\lambda_2)(1 - \epsilon_{1w}) - (1 - \epsilon_{2w})\}} \left[\sqrt{2 \alpha V_0 \left(\frac{\epsilon_{1w}}{\epsilon_{1w} - \epsilon_{2w}} \right) \left\{ \frac{\lambda_1}{\lambda_2} (1 - \epsilon_{1w}) - (1 - \epsilon_{2w}) \right\} t + H_0^2} - H_0 \right] \quad (2-32)$$

$$W = \frac{A \lambda_1 V_0 (\epsilon_{1w} - \epsilon_{2w})}{\alpha \epsilon_{1w} \{(\lambda_1/\lambda_2)(1 - \epsilon_{1w}) - (1 - \epsilon_{2w})\}} \left[\sqrt{2 \alpha V_0 \left(\frac{\epsilon_{1w}}{\epsilon_{1w} - \epsilon_{2w}} \right) \left\{ \frac{\lambda_1}{\lambda_2} (1 - \epsilon_{1w}) - (1 - \epsilon_{2w}) \right\} t + H_0^2} - H_0 \right] \quad (2-37)$$

$$\frac{Q_E}{W} = \frac{\alpha \epsilon_{1w}}{\lambda_1 V_0} \quad (3-3)$$

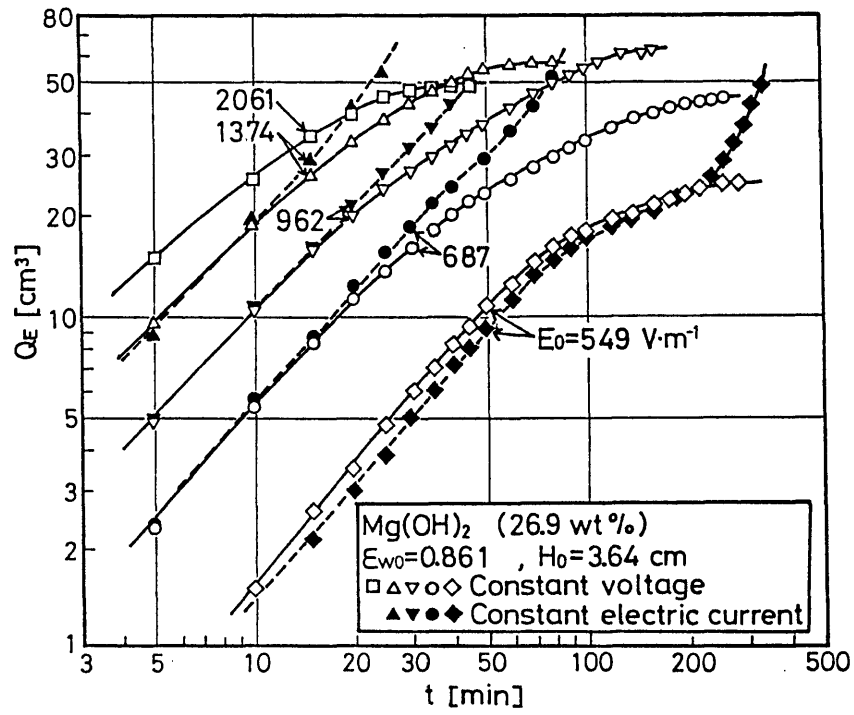


Fig.3-1 Relations between Q_E and t for $Mg(OH)_2$ under conditions of constant electric current and constant voltage

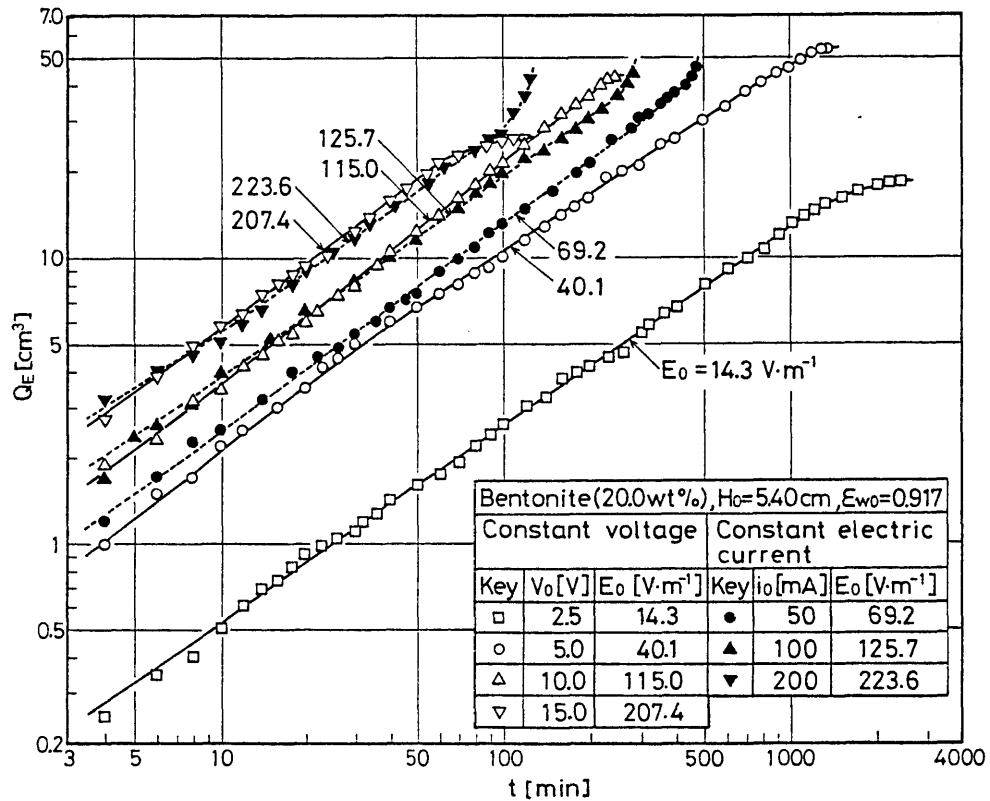


Fig.3-2 Relations between Q_E and t for Bentonite under conditions of constant electric current and constant voltage

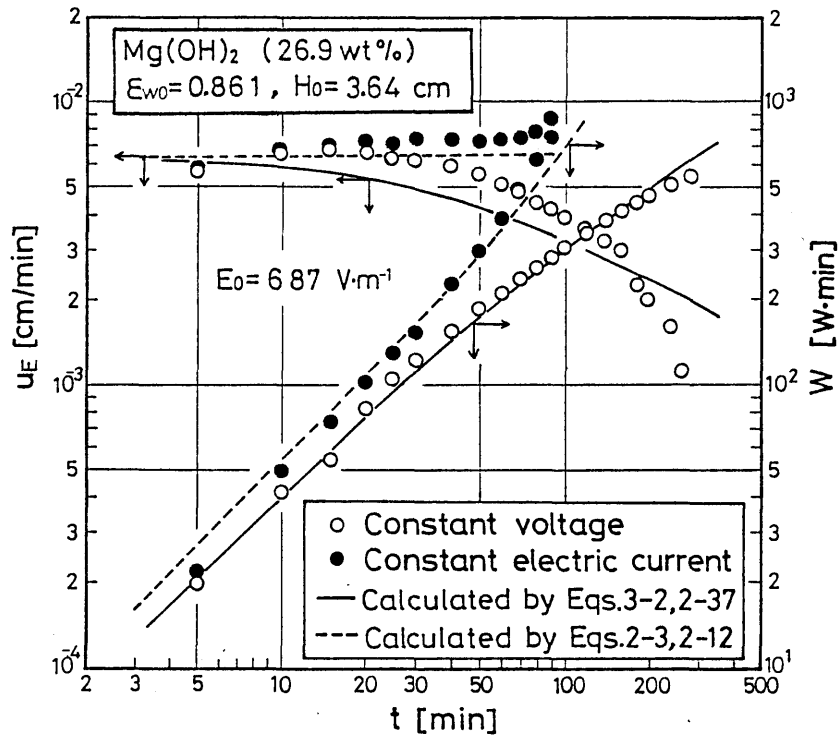


Fig.3-3 u_E vs. t and W vs. t under conditions of constant electric current and constant voltage

よび 3-2 に示されるように、定電圧条件における Q_E は、脱水が進行するにつれてそれぞれの E_0 においてほぼ一定の値に近づき、各 E_0 の値に対して限界脱水量 $Q_{E\infty}$ [m³]があることがわかる。また、この $Q_{E\infty}$ は E_0 の増加とともに大きくなる傾向を示すが、Fig.3-4 に例示したベントナイトスラッジの場合の $Q_{E\infty}$ と E_0 の関係からわかるように、 E_0 がある値以上になると $Q_{E\infty}$ の値は反対に小さくなる。したがって、定電圧条件では、 E_0 の増加とともにある E_0 の値で限界脱水量 $Q_{E\infty}$ が最大になることがわかる。これは、 E_0 すなわち印加電圧 V_0 が大きくなると u_E が極めて大となり、上部電極板近傍のスラッジ層が著しい脱水状態となって含水率が激減するため、この脱水されたスラッジ層の電気伝導度が脱水初期に急激に減少し、印加電圧のほとんどがこの部分で降下してしまつて層全体の脱水が困難になるからであると考えられる。

定電流条件において、 Q_E と t の関係は、Eq. (2-5)に示されるように、直線関係で表される。Fig.3-1 の定電流条件における Q_E の実測値も、 E_0 の各値において t とほぼ直線関係になっているが、それぞれの E_0 の条件で、 Q_E が定電圧条件での $Q_{E\infty}$ の値付近に達すると急激に脱水速度(dQ_E/dt)が増大する傾向が見られる。これは、第二章で述べたように、脱

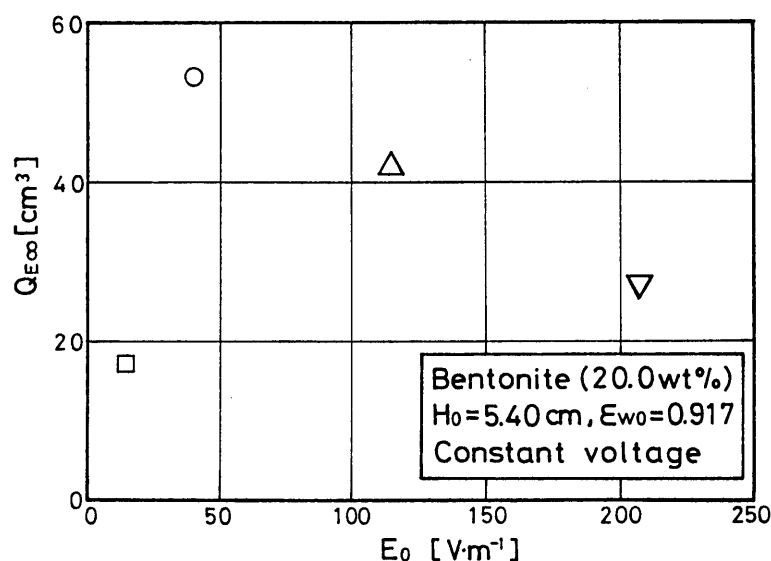


Fig.3-4 Relation between $Q_{E\infty}$ and E_0 under condition of constant voltage

水量が E_0 の値に対する限界値 $Q_{E\infty}$ 付近に達するとスラッジ層全体の電気抵抗が急激に増加し、定電流条件では印加電圧が増大するようになるので、Fig.3-3に示されるような電力消費量 W の急増を伴う脱水速度の大きい2次的な脱水過程に移行するためである。この2次的脱水過程は、Fig.3-2のベントナイトスラッジの場合にも同様に示されることがわかる。したがって、これらの結果から、脱水量 Q_E を増加するためには、定電圧より定電流の操作条件の方が有効であると考えられる。なお、脱水に伴うゲル状ベントナイトスラッジ層の電気抵抗の時間的变化を、定電流条件では印加電圧 V_t の変化、定電圧条件では電流 i_t の変化としてFig.3-5に例示したが、図からわかるように、定電流条件における V_t の経時変化は、各 E_0 において最終的には V_t が極端に増大し、実験を継続することが困難となることを示している。したがって、Figs.3-1および3-2における定電流条件の場合の実験結果は、実験を停止した時間を脱水終了時間と見なしたときの結果である。

Fig.3-6には、 $Mg(OH)_2$ スラッジにおいてスラッジ層初高 H_0 を変えたときの Q_E ともの関係について、 E_0 の値を両操作条件において同一にしたときの結果を示した。前述のように、脱水初期における u_E は両操作条件とも E_0 に比例する。したがって、 H_0 を変えても E_0 が同じならば u_E は同じとなり、Fig.3-6におけるEqs. (2-5)および(2-32)による計算値が示すように、各操作条件における脱水速度(dQ_E/dt)は脱水初期において同じ値となる。

Fig.3-6は、実測値においてもこれとほぼ同様の結果となることを示している。また、定電圧条件において、限界脱水量の初期含水量に対する割合は、 H_0 には関係なく E_0 の値に

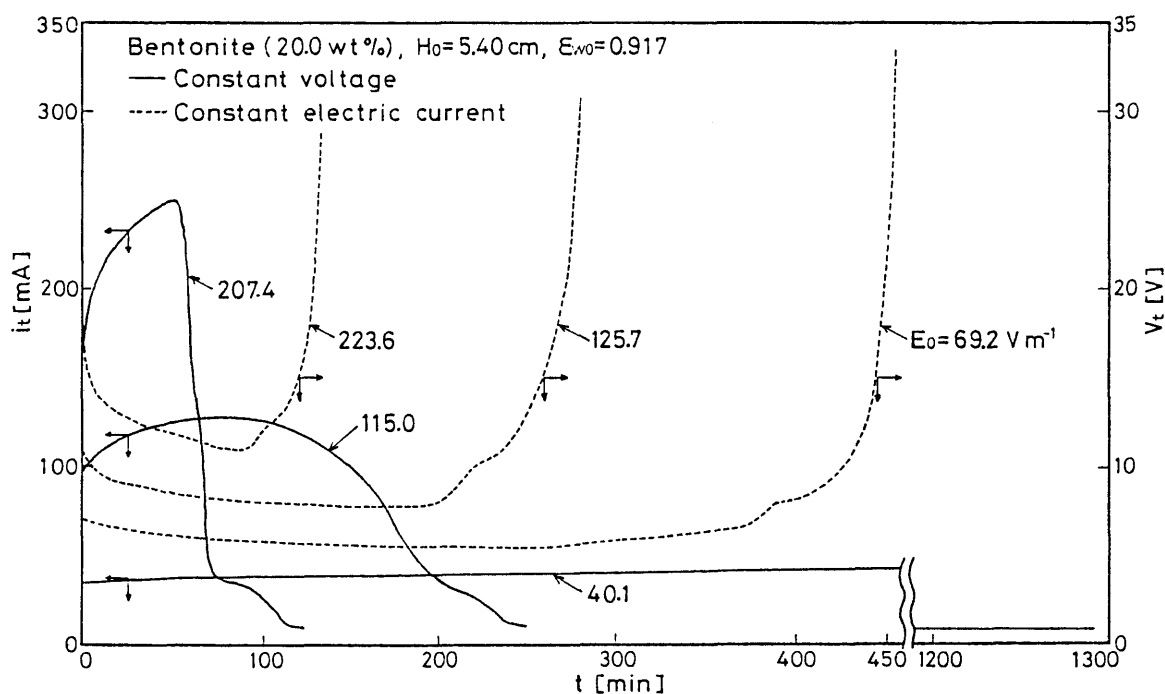


Fig.3-5 Variation of V_t with t under condition of constant electric current, and variation of i_t with t under condition of constant voltage

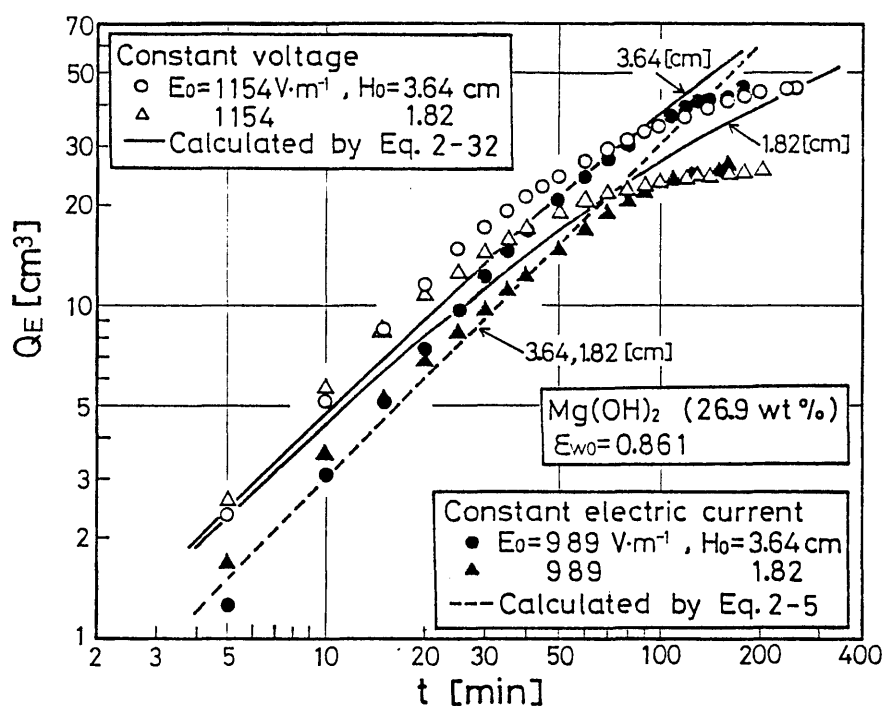


Fig.3-6 Effect of H_0 on relations between Q_E and t under conditions of constant electric current and constant voltage

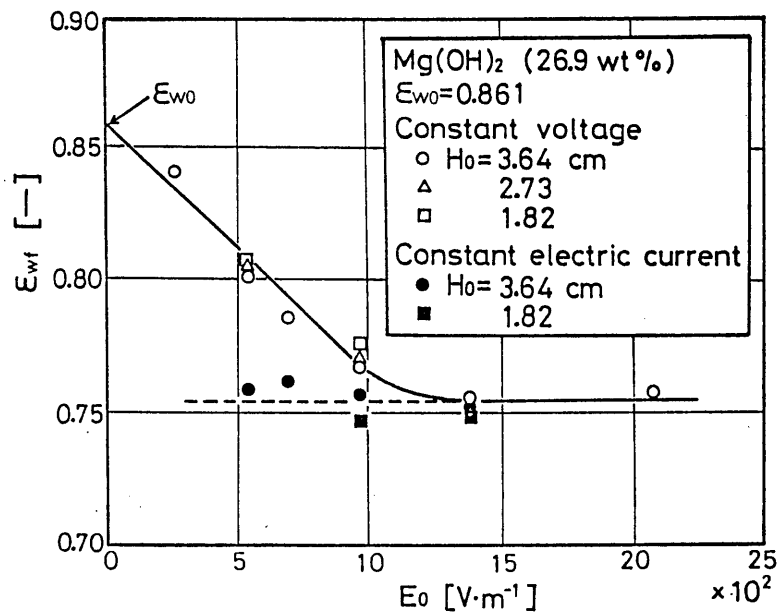


Fig.3-7 Relations between ϵ_{wf} and E_0 under conditions of constant electric current and constant voltage

依存することを示している。

脱水終了時における上部電極近傍のスラッジ層は完全に脱水終了層と見なすことができるので、脱水終了後にこの部分のスラッジを採取し、湿乾質量を測定して体積基準の含水率* ϵ_{wf} [—] を求めた。Fig.3-7 に、Mg(OH)₂ スラッジの場合の両操作条件における ϵ_{wf} と E_0 との関係を示した。破線が定電流条件の場合、実線が定電圧条件の場合の結果をそれぞれ示す。図より、 ϵ_{wf} と E_0 の関係は、両操作条件において H_0 にはほとんど依存しないことがわかる。また、定電圧条件における ϵ_{wf} の値は、 E_0 すなわち印加電圧の増加とともに直線的に減少し、 $E_0 \approx 9.6 \text{ V/m}$ の付近ではほぼ一定の値に漸近するようになることを示しており、この ϵ_{wf} の一定値を与える E_0 の最小値は、Fig.3-1 において $Q_{E\infty}$ の最大値を示す E_0 にはほぼ一致する。これより、定電圧条件では、 $Q_{E\infty}$ および ϵ_{wf} の限界値に対して E_0 の最適値があると考えられる。また、定電流条件においては、 ϵ_{wf} の値は E_0 には無関係にはほぼ一定値を示し、しかも定電圧条件における ϵ_{wf} の最小値とほぼ一致することがわかる。この結果は、Fig.3-5 に示されたように、脱水に伴うスラッジ層の電気抵抗の増大によって、定電流条件では印加電圧 V_i がそれぞれの E_0 で最終的には測定限界まで増大するため

* スラッジ全体積を固体粒子と水分の体積の和として計算される水の体積分率で、スラッジ層が不飽和の場合、気相すなわち空隙部分の体積は考慮されていない。

に生ずると考えられる。これらの結果から、 ε_{wf} の最小値すなわち限界含水率は、両操作条件においてほぼ等しくなることが明らかとなった。

3.3 操作条件による脱水効率⁶⁾

電気浸透脱水操作を実施する場合、電気浸透脱水量 Q_E と電力消費量 W との関係すなわち消費電力に対する脱水効率(Q_E/W)に及ぼす操作条件の影響を明らかにすることは、装置の設計や経済的評価を行うのに重要である。

Fig.3-8 には、 $Mg(OH)_2$ スラッジの場合の両操作条件における Q_E と W の関係を、初期電場強度 E_0 をパラメータとして示し、各操作条件における脱水効率を比較した。破線および実線は、それぞれEqs. (3-1)および(3-3)による計算結果である。定電流および定電圧の各操作条件において、実験結果と計算結果は脱水終了時近傍を除いてほぼ一致し、 W に対する Q_E の値すなわち Q_E/W は、両操作条件において、 E_0 すなわち印加電圧あるいは電流値を小さくするほど大となることがわかる。また、 E_0 が同じときの Q_E/W の値は、定電流条件の場合より定電圧条件の方が W の増加とともにわずかに大きくなることを示している。これらの結果は、次のような理由によると考えられる。前述したように、電気浸透速度 u_E は

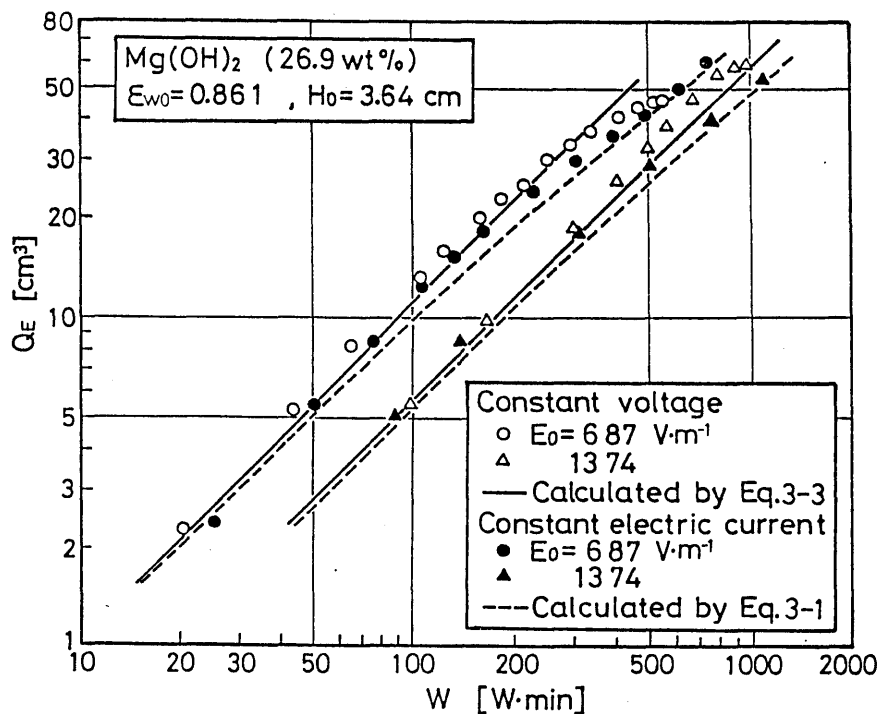


Fig.3-8 Comparison between Q_E/W values under conditions of constant electric current and constant voltage

両操作条件において E_0 の増加とともに大きくなるので、脱水終了スラッジ層の形成速度も E_0 が増加するにつれて大となると推察される。この脱水終了層の電気抵抗は大きいので、 E_0 の増加とともに脱水終了層における電力の損失が増大し、 Q_E/W の値は E_0 が大きくなるほど減少する。また E_0 が同じときには、Fig.3-3 に示したように、各操作条件における u_E は脱水初期においてほぼ等しくなるが、定電圧条件における u_E は、定電流条件の場合と比べて時間 t の経過とともにしだいに小さくなる。したがって、上述の電力損失は、脱水の経過とともに定電流条件の方が定電圧条件の場合より増大するようになると推察される。その結果、両操作条件において E_0 が同じ場合、消費電力に対する脱水効率(Q_E/W)は、定電流条件の場合より定電圧条件の方が大きくなる。

Fig.3-9 は、スラッジ層初高 H_0 を変化させた場合の両操作条件における Q_E/W に及ぼす H_0 の影響を示したもので、各操作条件において E_0 は同じである。Table 3-1 の Eq. (3-1)に示されるように、定電流条件における Q_E/W は H_0 に反比例する。また、定電圧条件における Q_E/W を表す Eq. (3-3)は、 $E_0 = V_0/H_0$ の関係から次式のように書き換えられる。

$$Q_E/W = \alpha \epsilon_{1w} / \lambda_1 E_0 H_0 \quad (3-4)$$

したがって、上式より、定電圧条件での Q_E/W も H_0 に反比例することがわかる。Fig.3-9

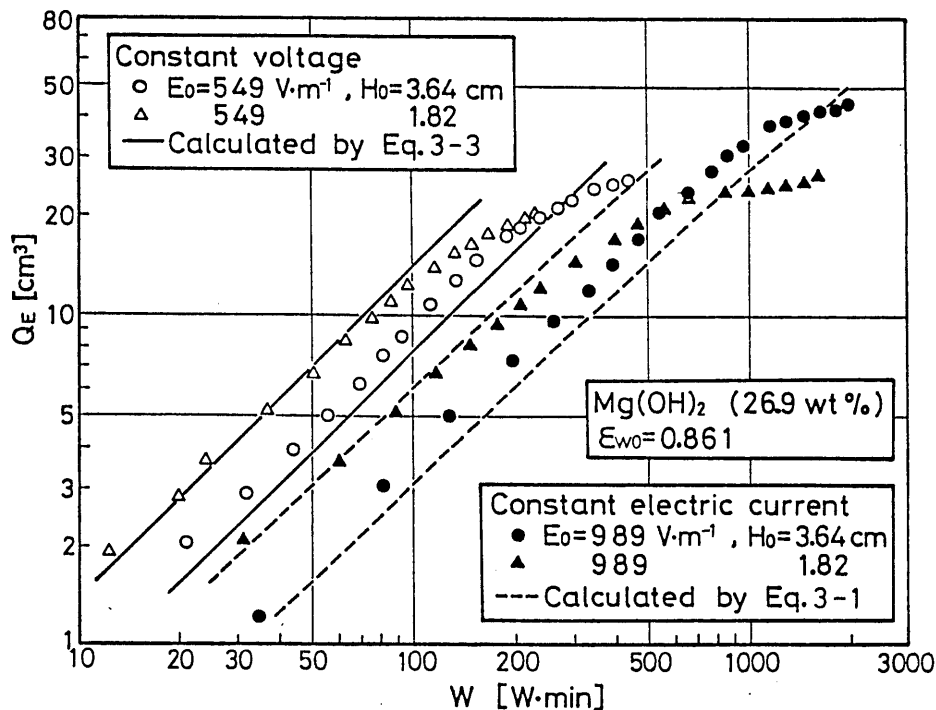


Fig.3-9 Effect of H_0 on Q_E/W under conditions of constant electric current and constant voltage

において、両操作条件における実験結果は、脱水終了時近傍を除いてEqs. (3-1) および (3-3) による計算結果とほぼ良い一致を示し、 W に対する Q_E の値は、両操作条件において H_0 が小さくなるほど増大することがわかる。これは、 H_0 を小さくしたときに E_0 の値を同一にするためには、両操作条件とも印加電圧が小さくなるので W の値が小さくなるにもかかわらず、Fig. 3-6 に示したように、脱水量 Q_E は、 H_0 が小さくなくても E_0 が同じならば脱水初期においてはほとんど変わらないためである。Figs. 3-8 および 3-9 の結果より、消費電力に対する脱水効率 (Q_E/W) は、両操作条件において、初期電場強度 E_0 およびスラッジ層初高 H_0 を小さくするほど増大する。また、 E_0 および H_0 が同じときは、 Q_E/W の値は定電流条件の場合より定電圧条件の方が大きくなることが明らかとなった。

3.4 定電圧条件における最適印加電圧の簡易決定法⁸⁾

定電圧条件のもとで電気浸透脱水を行う場合には、先に明らかにしたように、脱水速度や限界脱水量、消費電力に対する脱水効率などを考慮して適切な印加電圧を選定することが必要となる。したがって、電気浸透脱水操作の最適化を考える上で、定電圧条件における印加電圧の選定方法について提示することは有用であると考えられる。

白色クレー、ベントナイトおよび $Mg(OH)_2$ スラッジに対する定電圧条件における電気浸透脱水量 Q_E と脱水時間 t との関係は、印加電圧 V_0 をパラメータとすれば、Figs. 3-10 および 3-11 のように示され、各スラッジの場合とも、脱水速度 (dQ_E/dt) は V_0 の増加とともに増大するが、 V_0 の各値に対してそれぞれ Q_E の限界値すなわち限界脱水量 $Q_{E\infty}$ があり、 $Q_{E\infty}$ の値は V_0 の増加とともにある V_0 の値で最大になる。したがって、 $Q_{E\infty}$ は必ずしも V_0 に比例するとは限らず、 $Q_{E\infty}$ に対しては V_0 の最適値があると考えられる。これは、前述したように、 V_0 が非常に大きくなると上部電極近傍のスラッジ層が脱水初期に著しい脱水状態となって含水率が激減するため、スラッジ層の電気抵抗の急激な増大によって V_0 の大部分が脱水されたスラッジ層で降下して層全体の脱水が困難になるという理由によるものである。また、消費電力に対する脱水効率に関しては、各スラッジの場合の Q_E と W の関係について V_0 をパラメータとして示した Fig. 3-12 における実測結果および Eq. (3-3) による計算結果が示すように、単位電力消費量当りの脱水量 (Q_E/W) の値は V_0 の増加とともに減少する。なお、この結果は、脱水されたスラッジ層での電力損失が V_0 が大きくなるほど増大するためである。したがって、消費電力に対する脱水効率については、脱水時間は長くなるが小

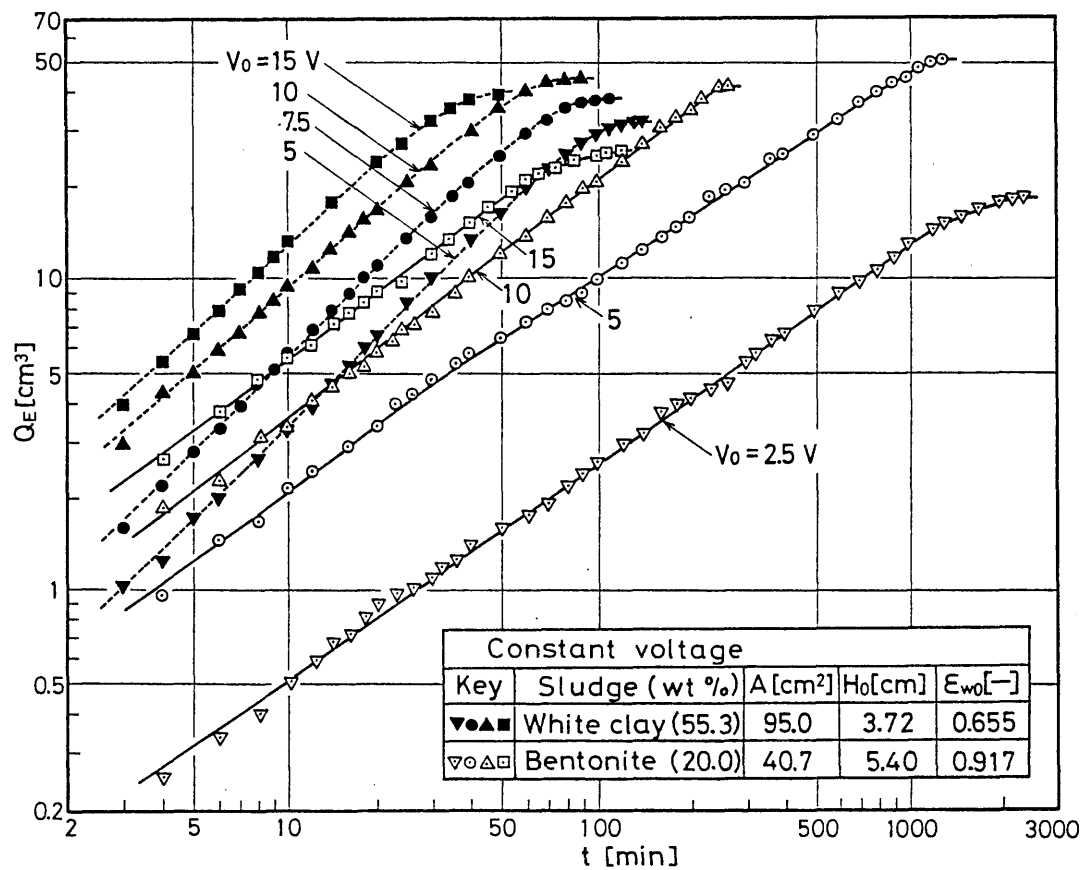


Fig.3-10 Relations between Q_E and t for White clay and Bentonite under condition of constant voltage

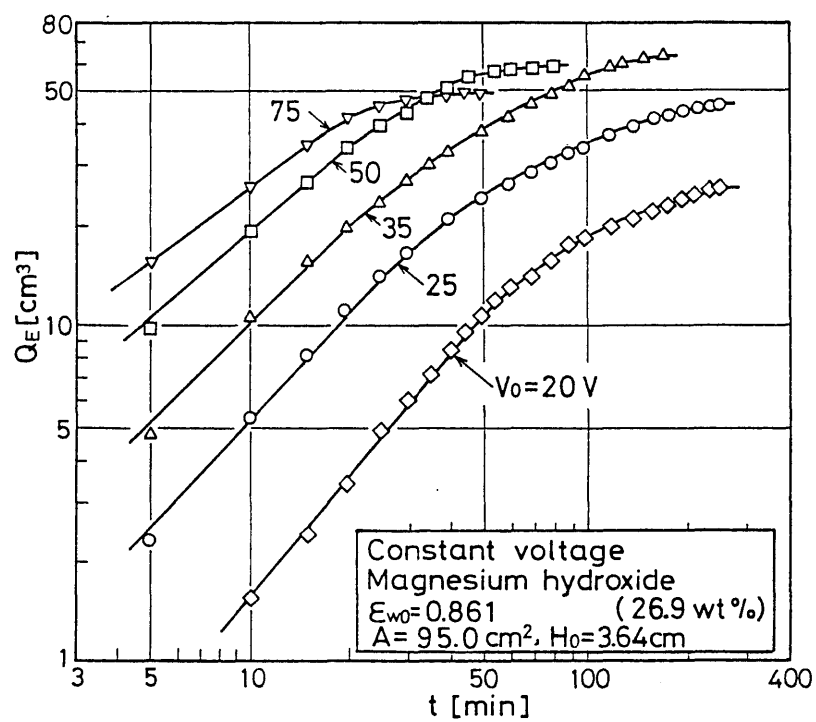


Fig.3-11 Relation between Q_E and t for $Mg(OH)_2$ under condition of constant voltage

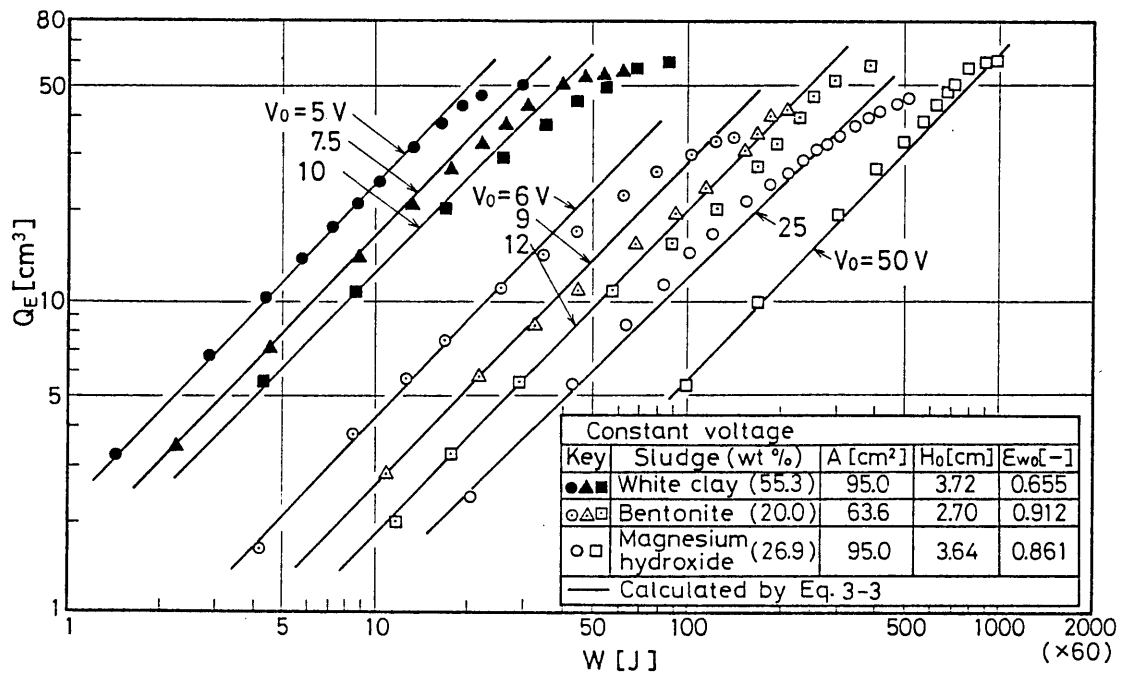


Fig.3-12 Relation between Q_E and W under condition of constant voltage

さい V_0 の方が適当である。これらの結果より、脱水速度(dQ_E/dt)、限界脱水量 $Q_{E\infty}$ および消費電力に対する脱水効率(Q_E/W)を考慮すると、最大の限界脱水量を与える印加電圧が、スラッジの含水率を低減するためにも最適であると考えられ、この最適印加電圧の決定法について検討した。

前節で述べたように、限界脱水量 $Q_{E\infty}$ の最大値は、脱水終了後の上部電極近傍におけるスラッジ層の含水率 ε_{wf} と初期電場強度 E_0 の関係(Fig.3-7)において、定電圧条件における ε_{wf} が一定の値すなわち限界含水率を示す E_0 の最小値でほぼ与えられる。したがって、 E_0 の代りに印加電圧 V_0 を用いて、Fig.3-7の ε_{wf} と E_0 の関係を $H_0=3.64\text{cm}$ の場合について示すと、Fig.3-13のようになる。Fig.3-7の場合と同様に、実線が定電圧条件での結果で、破線が定電流条件における結果である。図において、定電圧条件における ε_{wf} の値は、定電圧 V_0 の増加とともに初期含水率 ε_{w0} から直線的に減少し、 V_0 のある値(約35V)以上ではほぼ一定の限界値となる。一方、定電流条件における ε_{wf} は初期印加電圧 V_0 には無関係にほぼ一定値を示し、定電圧条件における ε_{wf} の最小値すなわち限界含水率とほとんど同じ値となる。これは、定電流条件の場合、印加電圧が脱水時間の経過とともに増大し、最終的には定電圧条件における ε_{wf} の限界値を示す V_0 の最小値より大きくなるためである。Figs.3-11および3-13から、定電圧条件で限界含水率を示す V_0 の最小値(約35V)

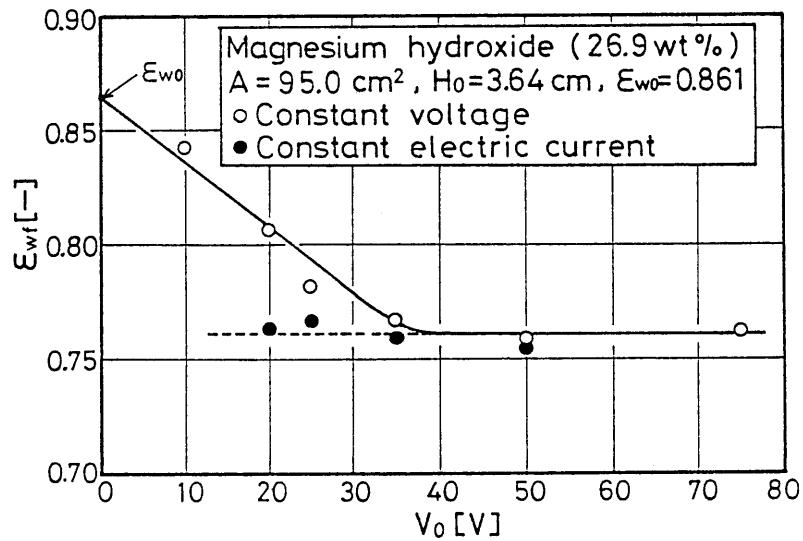


Fig.3-13 Relations between ϵ_{wf} and V_0 under conditions of constant electric current and constant voltage

は、 $Q_{E\infty}$ の最大値を与える V_0 の値とほぼ一致することがわかる。したがって、定電圧条件における最適印加電圧 $V_{0,opt}$ [V] は、両操作条件における ϵ_{wf} と V_0 の関係に基づいて図式的に求めることができると考えられる。

Fig.3-14は、ベントナイトスラッジについて、両操作条件における ϵ_{wf} と V_0 の関係を近似的に求める簡便的な方法を示したものである。Fig.3-14に示されるように、定電流条件における ϵ_{wf} の値 $(\epsilon_{wf})_c$ と、定電圧条件では推定値 $V_{0,opt}$ より小さい V_0 の値におけ

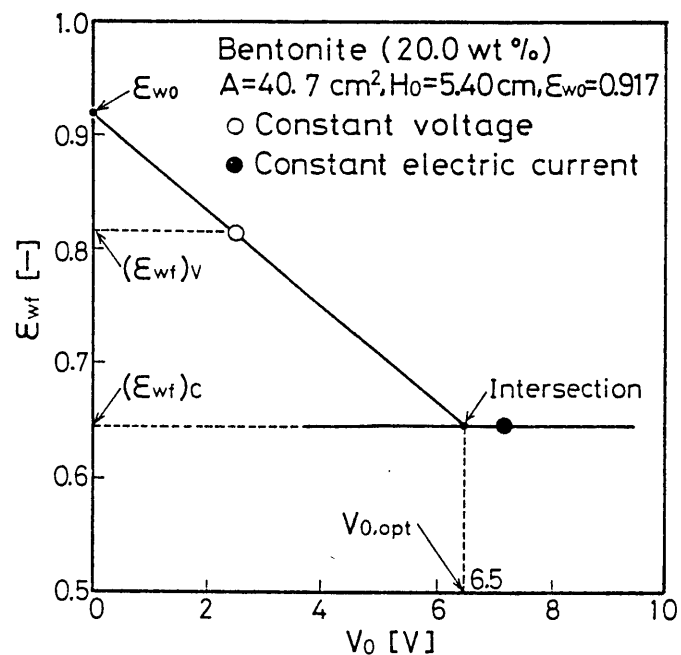


Fig.3-14 Schematic diagram for evaluation of $V_{0,opt}$

る ε_{wf} の値 $(\varepsilon_{wf})_v$ を実験によってそれぞれ一点ずつ (●○) 求めると、 ε_{w0} と $(\varepsilon_{wf})_v$ の値を通る定電圧条件における直線、および $(\varepsilon_{wf})_c$ の値を通る定電流条件における水平の直線が、それぞれ図のように引けるので、これら 2 つの直線の交点における V_0 が限界含水率を与える定電圧条件での V_0 の最小値となり、図上で $V_{0,opt}$ ($=6.5$ V) の値が求まる。

Fig.3-10 におけるベントナイトスラッジの結果から、 $Q_{E\infty}$ と V_0 の関係は Fig.3-15 のように示され、 $Q_{E\infty}$ は推定値 $V_{0,opt}$ 付近でほぼ最大値を示すことがわかる。なお、図中の実線は最小自乗法で求めた結果である。したがって、 $V_{0,opt}$ の推定法としてここに提示した方法はほぼ妥当であるといえる。

以上の結果より、定電圧条件における限界脱水量に対する最適な印加電圧は実験的に簡易決定でき、最適操作条件の選定方法として有用であると考えられる。

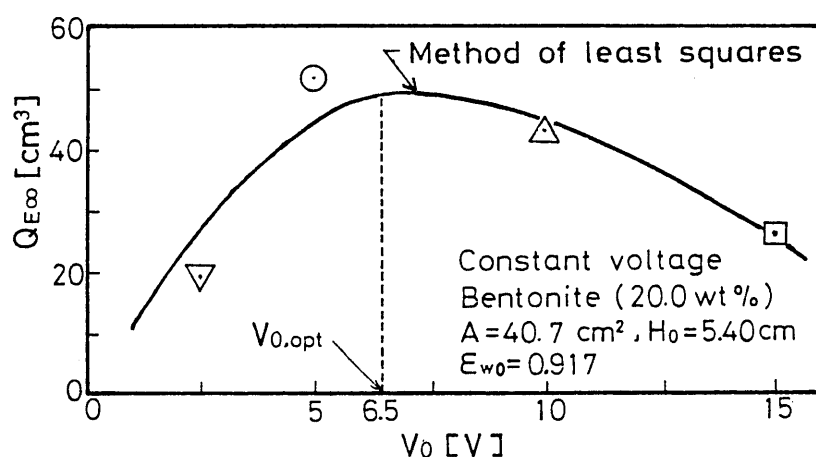


Fig.3-15 Relation between $Q_{E\infty}$ and V_0 for Bentonite

3.5 スラッジ層内含水率分布および電位差分布の測定⁷⁾

定電流および定電圧の各操作条件におけるスラッジの電気浸透脱水について、第二章においては、脱水過程におけるスラッジ層内の含水率分布の経時変化を無視し、スラッジ層内が初期含水率を有する脱水進行層と印加電場に対応する含水率の脱水終了層からなると見なした比較的単純な粒子充填層内の電気浸透流れに基づく脱水モデルを用いて理論的解析を行ったが、スラッジ層内の含水率分布は上記モデルと実際には異なると考えられるので、電気浸透脱水過程についての解析方法としては十分であるとはいえない。また、電気浸透脱水過程においては、電気浸透速度が理論的に電場強度すなわち電位差こう配に比例するので、含水率は電位差こう配に依存して変化し、含水率の変化は電気抵抗の変化を伴

うために含水率と電位差こう配とは相互依存性があり、脱水に伴うスラッジ層内の含水率分布が時間的に変化するにつれてスラッジ層内の電位差分布も同時に経時変化すると考えられる。したがって、電気浸透脱水過程を明確にするためには、脱水過程におけるスラッジ層内の含水率分布および電位差分布の時間的な変化を明らかにすることが必要となる。このことから、スラッジ層内含水率分布および電位差分布の経時変化について、ゲル状ベントナイトスラッジを用いて定電流および定電圧条件のもとで実験的検討を行った。

3.5.1 測定方法

回分式電気浸透脱水装置で、上下部電極に白金多孔板および24meshの白金網状電極をそれぞれ用い、Fig.3-16に示すように、スラッジ充填槽の内径72mmの亚克力円筒側壁には、スラッジ層内の含水率分布測定用の孔（直径4mm）を層高さ方向に10mm間隔で4個所、また電位差分布測定用の孔（直径1.2mm）も同様に5mm間隔で8個所設けた。スラッジ層高さ方向の含水率の測定には内径3mmのガラス管を用い、これを直径4mmのサンプリング孔を通してスラッジ層上部から順に層内へ挿入してスラッジを採取し、湿乾質量を測定することによって、体積基準の含水率 $\varepsilon_w[-]$ として $\varepsilon_w = (m_i / \rho_i) / (m_i / \rho_i + m_p / \rho_p)$ を用いて算出した。ここに、 m_i および m_p [kg] は、それぞれスラッジ中の水および粒子の質量であり、 ρ_i および ρ_p はそれぞれ水および粒子の密度である。また、スラッジ層高さ

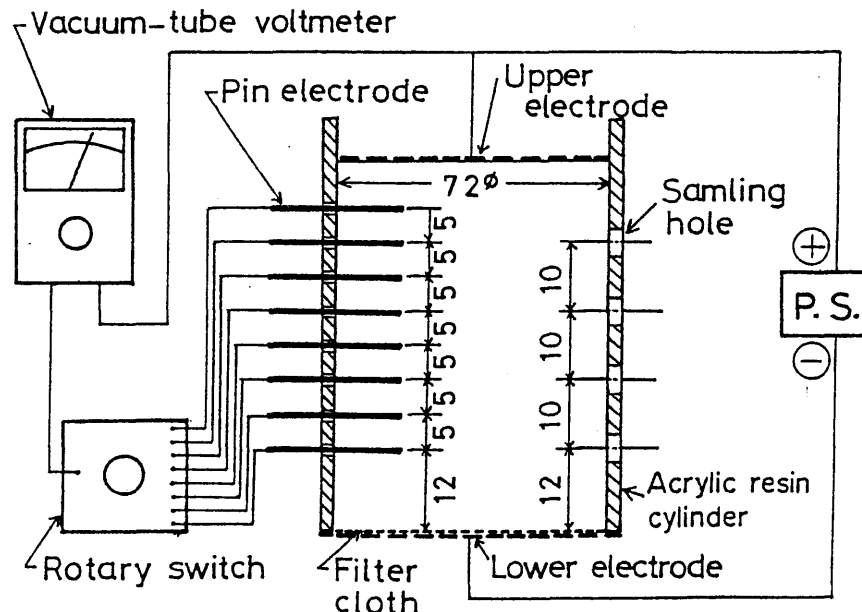


Fig.3-16 Experimental procedure for measurements of water content and electric potential difference in sludge bed

方向における電位差の測定は、脱水の進行に伴ってスラッジ層高さがしだいに減少するので、測定時に直径1mmのステンレス製針状電極を直径1.2 mmの孔を通して層内へ挿入し、真空管電圧計を用いて測定した。なお、電位差測定法については、上部電極板が脱水に伴うスラッジ層高の減少とともに降下するために、塩化カリウムの塩橋を取付けることが困難でもあり、またあらかじめ脱水を行わない状態でスラッジ層内の電位差をルギン毛管塩橋を用いて照合電極で測定し、本実験条件範囲では上述のような方法で直接測定しても差し支えないことを確認した。

実験に使用したスラッジは、粉体試料を脱イオン水と攪はん混合することによって膨潤ゲル化するベントナイトスラッジを、重力脱水が起こらない程度の濃度（固体濃度20.0wt%，初期含水率 0.917）に調製したものを使用し、スラッジ層の初高は 5.40 cmとした。なお、このスラッジ試料は水でほとんど飽和された状態のものであった。

3.5.2 実測結果および考察

Fig.3-17に、定電流条件におけるスラッジ層高さ方向の含水率（ ϵ_w ）分布の経時変化を例示した。図において、横軸の $h/H_t[-]$ はスラッジ層の高さ方向の位置を表し、脱水に伴ってスラッジ層高 H_t が時間とともに減少するので、層底部からの測定高さ $h[m]$ と H_t の比をとって無次元化したものである。したがって、横軸の右側が層上部、左側が層下部を表し、 h/H_t が 1.0の位置は脱水時間 t には関係なくスラッジ層上面を表す。また、 $t=0$ における含水率分布は初期含水率 ϵ_{w0} で一定である。実測結果から、脱水速度を考慮して分布曲線を描くと図のように示される。図より、脱水初期においては層下部における ϵ_w の値はほぼ ϵ_{w0} に維持されたまま層上面近傍の ϵ_w が急速に減少し、長時間を経過すると層下部の ϵ_w は ϵ_{w0} よりわずかに大きくなる傾向を示すことがわかる。

Fig.3-18は、Fig.3-17に示した ϵ_w 分布を求めたときに同時に得られたスラッジ層高さ方向の電位差分布の経時変化を示したものである。図中の縦軸 $V/V_t[-]$ は無次元化電位差を表し、定電流条件ではスラッジ層全体に加わる電圧 V_t が脱水に伴って変化するので、層高さ方向の測定電位差 $V[V]$ を t 時間における V_t で除して無次元化した。また、横軸は Fig.3-17の場合と同様に h/H_t で示した。図より、 V/V_t の値は t の経過とともに層上面近傍において急減し、電位差こう配は層上部において著しく増大するのに対して、層下部における電位差こう配はしだいに小さくなることがわかる。この結果は次のように説明することができる。Fig.3-19は、定電流および定電圧の両操作条件における H_t と t の関係

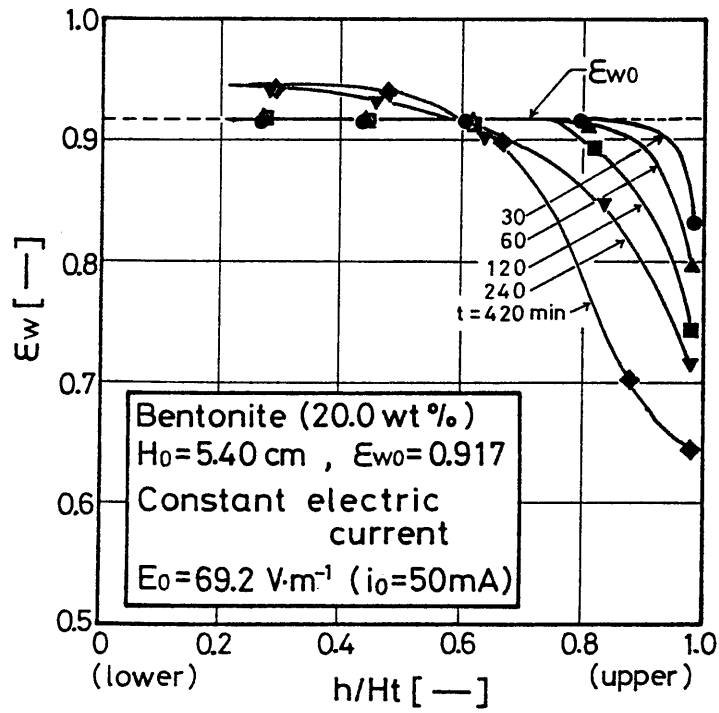


Fig.3-17 Variation of ϵ_w distribution with t under condition of constant electric current

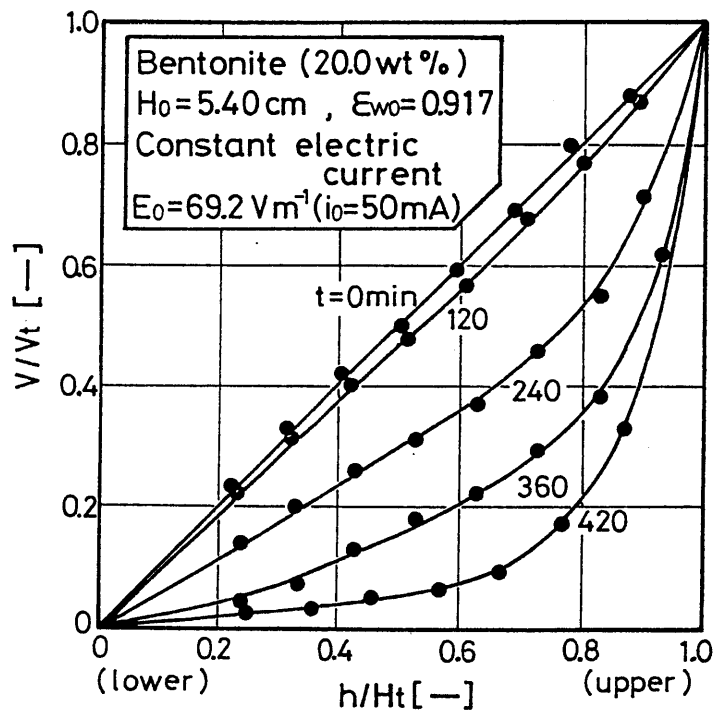


Fig.3-18 Variation of electric potential difference distribution with t under condition of constant electric current

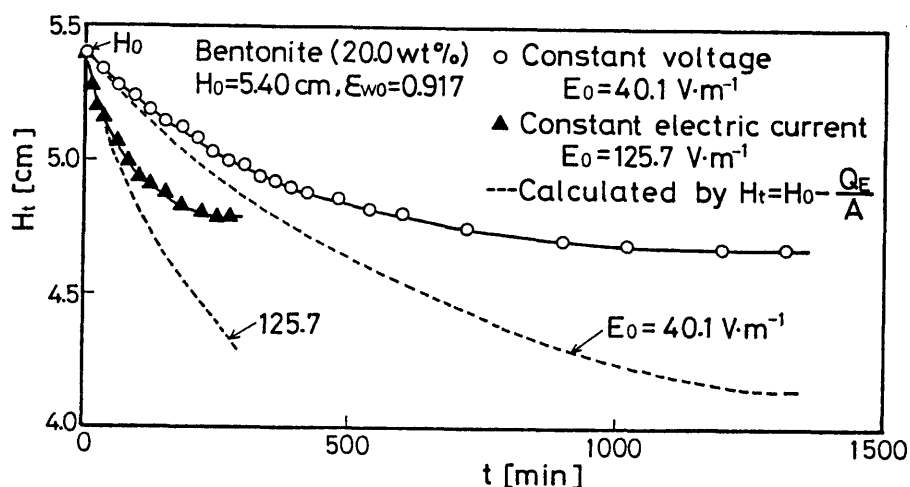


Fig.3-19 Relations between H_t and t under conditions of constant electric current and constant voltage

すなわちスラッジ層高の経時変化を示したものであるが、プロットされた H_t の実測値は、脱水量 Q_E の実測値から $H_t = H_0 - Q_E/A$ を用いて計算される H_t の値（破線）より大きくなることを示しており、脱水に伴ってスラッジ層内にはしだいに不飽和スラッジ層が形成することを示唆している。このことから、Fig.3-17に示した含水率分布において、層上面近傍の ε_w が減少した部分すなわち脱水された部分にはしだいに不飽和スラッジ層が形成されるようになると考えられる。この不飽和スラッジの電気抵抗は非常に大きくなるので、層上面近傍における電位差こう配すなわち電場強度はOhmの法則によって増大する。また、電気浸透速度は電場強度に比例するため、電場強度が増大すれば含水率は一層減少するようになると考えられる。したがって、Figs.3-17および3-18に示されたように、 ε_w および V/V_t の値は、脱水の進行とともに相互に関連し合ってスラッジ層上部において同時に減少するようになる。他方、スラッジ層下部における電場強度は t の経過とともにしだいに小さくなるので、Fig.3-17に示されたように、 ε_w の値は層下部においてはほとんど減少せず、経過時間が長くなると ε_{w0} の値よりむしろ大きくなる傾向を示す。

Figs.3-20および3-21には、定電圧条件における ε_w 分布および電位差分布の経時変化をそれぞれ例示した。定電圧条件では印加電圧 V_0 は一定値であるが、Fig.3-21に示したように、スラッジ層高さ方向の電位差 $V/V_0[-]$ は、定電流条件の場合と同様に無次元化して表した。これらの結果から、定電圧条件における ε_w 分布および V/V_0 分布も定電流条件の場合とほぼ同様の傾向を示すことがわかる。なお、 ε_w 分布の結果は、層上面近傍の ε_w の値がある限界値すなわち限界含水率に達した後維持されることを示している。

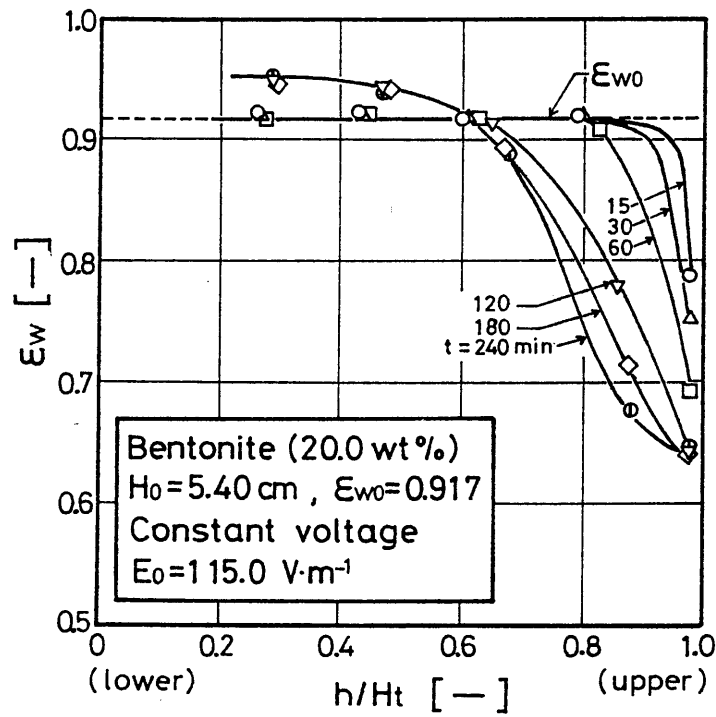


Fig.3-20 Variation of ϵ_w distribution with t under condition of constant voltage

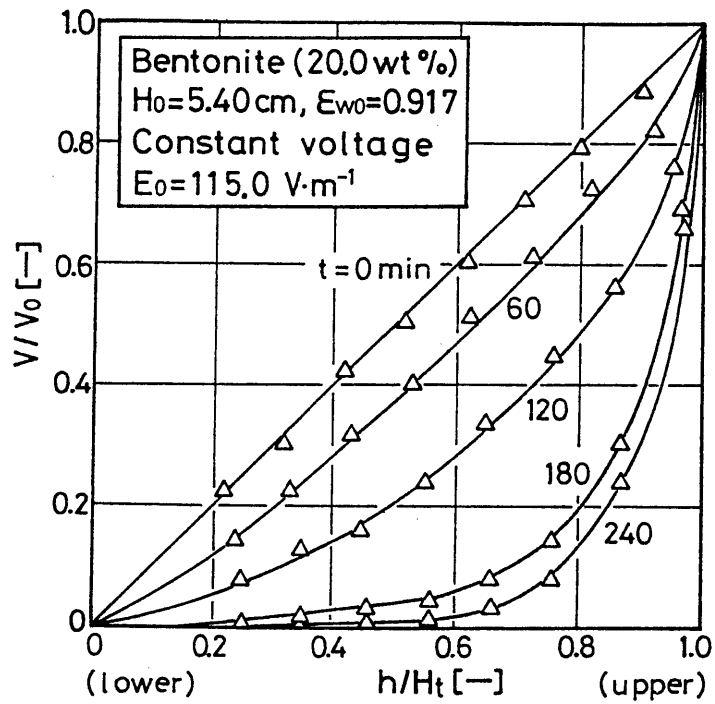


Fig.3-21 Variation of electric potential difference distribution with t under condition of constant voltage

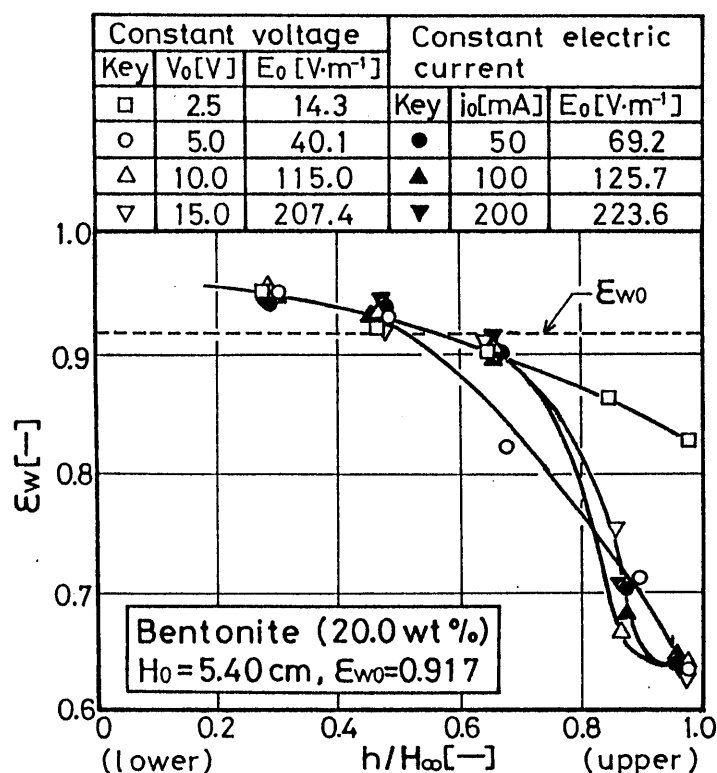


Fig.3-22 Final distribution of ϵ_w under conditions of constant electric current and constant voltage

Fig.3-22は、両操作条件における脱水終了時の ϵ_w 分布について、初期電場強度 E_0 をパラメータとして示したものである。図中の H_∞ は脱水終了時におけるスラッジ層高である。定電圧条件においては、 ϵ_w の最終分布曲線は E_0 の増加とともに変化することがわかる。すなわち、層上面近傍の ϵ_w の値は、 E_0 が増加するとともに減少するが、 E_0 がある値以上になるとほぼ一定値となる。また、 E_0 が115.0および207.4V/mのような大きい値のときには、 ϵ_w の値はスラッジ層上部で主として減少することがわかる。この E_0 の大きさに依存する ϵ_w の最終分布曲線の相違は、次のような理由によると考えられる。 E_0 が大きい場合は層上面近傍に不飽和スラッジ層が顕著に形成されるので、印加電圧 V_0 がこの不飽和スラッジ層の部分で極端に降下してしまうために、 ϵ_w の減少は層上面近傍だけに制限される。したがって、Fig.3-4に示されたように、定電圧条件では E_0 の増加とともにある E_0 の値で限界脱水量 $Q_{E\infty}$ が最大になる。一方、定電流条件における ϵ_w の最終分布は、本実験条件の範囲では E_0 に無関係で、定電圧条件における E_0 の大きいときの結果とほとんど一致する傾向を示し、層上面近傍の ϵ_w の最小値すなわち限界含水率は定電圧条件の場合とほぼ一致する。これは、定電流条件における印加電圧 V_t が、Fig.3-5に示されたよう

に、 t の経過とともに最終的には著しく増大することによるものである。

ゲル状ベントナイトスラッジを用いたこれらの結果より、電気浸透脱水過程について次のように考えることができる。脱水開始時にスラッジ層内の水は層全体を通じて下方に移動するので、含水率は層上面近傍から減少し始め、それと同時に層上面近傍における電場強度は Ohm の法則によって増大するようになる。電気浸透脱水は電場強度に比例して促進されるので、時間の経過とともにしだいに層上部における含水率は減少し、最終的には印加電圧の大部分が脱水された層上部で降下するようになる。その結果、層下部における電場強度は非常に小さくなり、層下部の含水率は脱水期間を通じてほとんど減少しない。

白戸ら¹⁰⁾ は、電場を加えた場合の高濃度スラリーの圧密沈降について、沈降層内の電位差こう配すなわち電場強度が電気力によって圧密された小さい含水率を有する部分で非常に大きくなることを報告しており、この引用結果と本実験結果とは類似したことを表していると考えられる。

両操作条件における任意の経過時間での電位差分布は E_0 をパラメータとして Fig.3-23 のように示される。図において、脱水時間 t は各操作条件においてそれぞれ同じである。層上面近傍における電位差 (V/V_0 , V/V_t) は、両操作条件において E_0 の増加とともに顕著に減少することがわかる。このことは、前述したように、 E_0 が大きくなると印加電圧が層上面近傍の脱水されたスラッジ層で極端に降下することを示している。したがって、 E_0 を大きくすることは必ずしもスラッジ層全体の脱水に効果的であるとはいえない。

Fig.3-24 には、定電流および定電圧条件における電位差分布の同一経過時間における比較結果を例示した。両操作条件において E_0 の値は同じである。図から、定電流条件における層上部での電位差こう配は定電圧条件の場合より大きくなることがわかる。この結果は、層上部における ϵ_w が同じ経過時間では定電流条件の方が定電圧条件の場合より小さくなることを示唆している。したがって、 E_0 が同じときには、定電流条件における脱水速度は定電圧条件の場合より大きくなり、先に述べたように、脱水速度を増大させるためには定電流の操作条件の方が適切となる。

以上の結果より、電気浸透脱水過程における ϵ_w 分布は、一般に電位差分布と密接に関連していることが確認された。しかしながら、スラッジ層内の電位差こう配は不飽和スラッジ層の形成や電気分解によるスラッジの電気的特性の変化によって過度に影響を受けるため、実測結果からこれらの分布の間の定量的関係を求めることは極めて困難である。

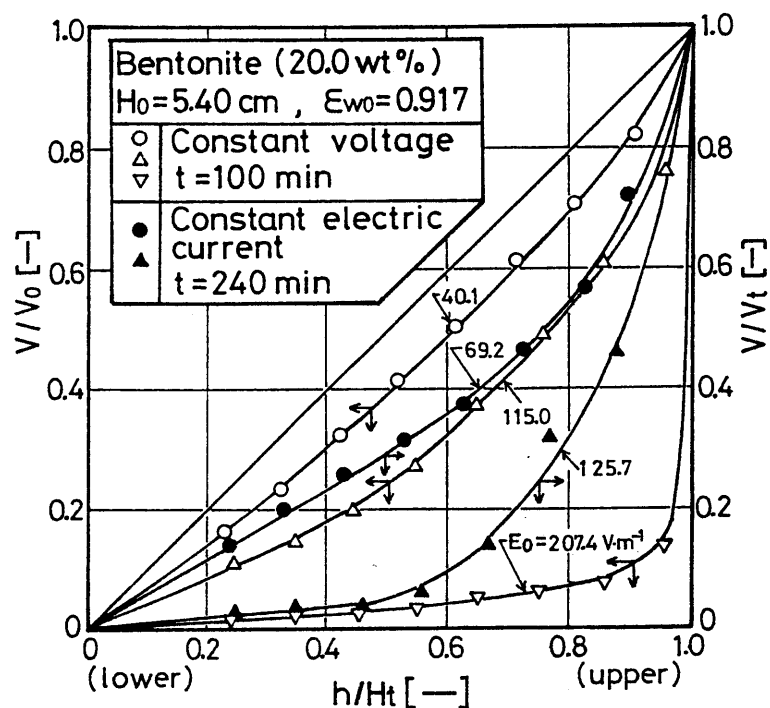


Fig.3-23 Effect of H_0 on electric potential difference distributions under conditions of constant electric current and constant voltage

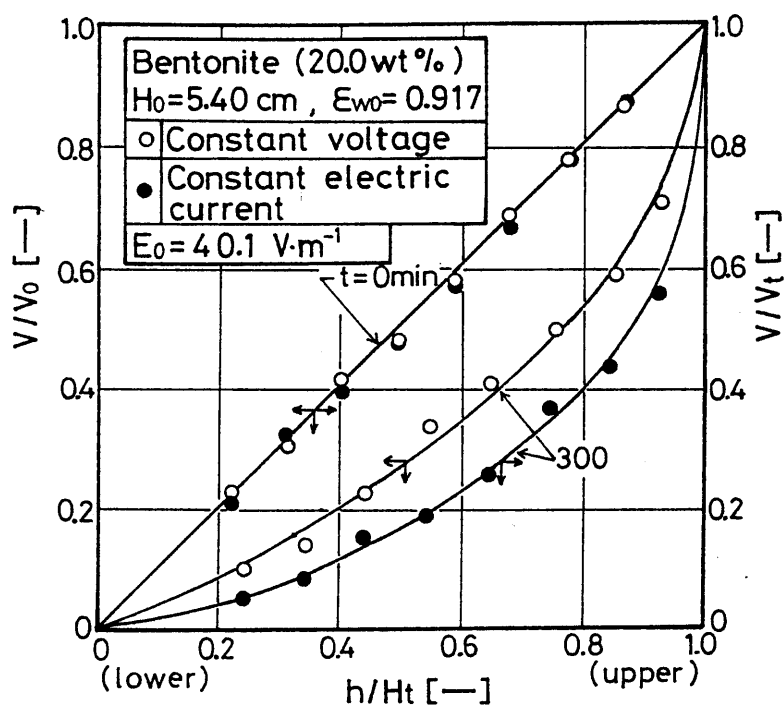


Fig.3-24 Comparison of electric potential difference distribution under constant electric current with that under constant voltage

3.6 総 括

定電流および定電圧の各操作条件における圧縮性スラッジの電気浸透脱水特性並びに操作条件による脱水効率について実験的検討を行うとともに、電気浸透脱水過程を明確にするために、脱水に伴うスラッジ層内の含水率分布および電位差分布を両操作条件のもとで実測し、次のような結果を得た。

1) 両操作条件において初期電場強度およびスラッジ層初高が同じ場合、定電流条件における脱水速度は、時間の経過とともに定電圧条件の場合より大きくなる。したがって、脱水量を増加するためには定電流の操作条件の方が有効である。しかしながら、単位電力消費量当りの脱水量すなわち消費電力に対する脱水効率は、定電圧条件の方が定電流条件の場合より大きくなる。また、両操作条件において初期電場強度およびスラッジ層初高が小さくなるほど消費電力に対する脱水効率は大きくなる。

2) 脱水終了スラッジ層における含水率の最小値すなわち限界含水率は両操作条件においてほぼ同じである。また、定電圧条件において、印加電圧を増大することは必ずしもスラッジ層全体の脱水に対して効果的ではなく、限界脱水量は印加電圧の増加とともにある値で最大となる。したがって、限界脱水量に対して印加電圧の最適値があり、この最適印加電圧は、各操作条件における脱水終了スラッジ層の含水率の実測結果から、図式的に簡易決定できる。

3) 電気浸透脱水過程におけるスラッジ層内の含水率は、両操作条件においてスラッジ層高さ方向における上部すなわち上部電極近傍のスラッジ層で著しく減少し、この脱水した部分の電位差こう配は 0hm の法則によってしだいに増大する。電位差こう配は一般に含水率に依存するので、脱水過程におけるスラッジ層内の含水率分布は、脱水期間を通じてスラッジ層内の電位差分布と密接に関係し、両者が相互に影響を及ぼし合って脱水が進行する。

Literature cited

- 1) Yukawa, H., H. Yoshida, K. Kobayashi and M. Hakoda: *J. Chem. Eng. Japan*, 9, 402 (1976)
- 2) *idem: ibid.*, 11, 475 (1978)
- 3) Rampacek, C., in J. B. Poole and D. Doyle (eds.): "Solid-Liquid Separation", p. 100, HER MAJESTY'S STATIONERY OFFICE, London (1966)
- 4) Komagata, S.: "Kaimen Denki Kagaku Gaiyo", p. 71, Shokodo, Tokyo (1969)
- 5) Denki Kagaku Kyokai (ed.): "Denki Kagaku Benran", 2nd ed., p. 940, Maruzen, Tokyo (1974)
- 6) Yoshida, H., T. Shinkawa and H. Yukawa: *J. Chem. Eng. Japan*, 13, 414 (1980)
- 7) *idem: ibid.*, 18, 337 (1985)
- 8) *idem*: Preprints of the 45th Annual Meeting of The Soc. of Chem. Engrs., Japan, p. 389 (E304), Osaka (1980)
- 9) *idem*: Preprints of the 44th Annual Meeting of The Soc. of Chem. Engrs., Japan, p. 111 (B109), Tokyo (1979)
- 10) Shirato, M., T. Aragaki, A. Manabe and N. Takeuchi: *AIChE. J.*, 25, 855 (1979)

第四章 電気浸透脱水過程の推定

4.1 緒 言

電気浸透脱水法は、広範に実用されている機械的脱水法とはその脱水機構が異なり、微細粒子を含むスラッジやゲル状スラッジなどの機械的方法では脱水困難なスラッジに対して特に有効性が認められ、比較的多くの研究^{1~3)}が行われてきたにもかかわらずあまり実用化されていない。これは、理論的な研究が極めて少ないために、装置の設計および操作に対する工学的研究がほとんど行われていないことが1つの理由になっているものと考えられる。このことから、第二章においては、スラッジの電気浸透脱水操作の理論的解析法を得る目的で、脱水過程におけるスラッジ層内の含水率分布の変化を無視し、層内が脱水進行層と脱水終了層の2層からなると見なした簡単な脱水モデルに基づいて理論的解析を行い、脱水速度や電力消費量などについての電気浸透脱水式を提出した^{4, 5)}。しかしながら、第三章で示したように、スラッジ層内には脱水に伴って実際には含水率分布が生じ、含水率分布はスラッジ層内の電位差分布と密接に関連し合って経時変化する⁶⁾。したがって、電気浸透脱水過程を明確にするためには、さらに、スラッジ層内の含水率分布および電位差分布の経時変化を考慮した理論的検討が必要となる。

本章では、電気浸透脱水過程のより厳密な推定方法を得るために、これまでと同様に操作条件として定電流条件および定電圧条件の2つに大別し、各操作条件における圧縮性スラッジの電気浸透脱水について、スラッジ層内の含水率分布および電位差分布を考慮して理論的解析を行い、スラッジの含水率と比電導度との関係については実験式を用いて、半理論的な脱水過程の推定基礎式を各操作条件についてそれぞれ得た^{7, 8)}。また、脱水過程における含水率分布、電位差分布、脱水量、スラッジ層高、および平均含水率などの経時変化について、ゲル状ベントナイトスラッジを用いた場合の実験結果と推定基礎式による推算値との比較検討を両操作条件について行い、電気浸透脱水過程の理論的推定法の妥当性を検討した^{7, 8)}。

4.2 含水率分布および電位差分布を考慮した電気浸透脱水過程の解析

4.2.1 定電流条件における脱水過程を表す基礎式⁷⁾

定電流条件における電気浸透脱水過程では、前章で述べたように、脱水の進行に伴って

電極近傍におけるスラッジ層の含水率が著しく低下することによって、局部的な電気抵抗の増大が顕著となって印加電圧が急増するようになり、消費電力の大きい2次的脱水過程に移行する^{4, 6, 9)}が、ここでの理論解析においてはこの2次的脱水期間については考慮しない。また、解析を行うにあたり次のことを仮定する。

- (i) 電気浸透流れは Henry の式²⁾に従う。
- (ii) 電気泳動による粒子の移動はない。
- (iii) 側壁およびろ材はスラッジ層内の電気浸透流れに影響を及ぼさない。
- (iv) 液の電気的特性の変化およびジュール熱による温度変化は無視できる。

電気浸透脱水過程における圧縮性スラッジ層は、スラッジ層の高さを表す変数として単位面積の脱水面上に堆積した固体質量 ω [kg/m²] を用いる¹⁰⁾ と、模式的に Fig.4-1 のように示される。微小薄層 $d\omega$ における電気浸透速度 u_E は、局所電場強度を E 、液および粒子の比電導度をそれぞれ λ_l 、 λ_p とすれば、次のような Henry の式で表される。

$$u_E = \frac{\zeta D E}{\kappa \pi \mu} \left(\frac{a \lambda_l}{b \lambda_l + \lambda_p} \right) \quad (4-1)$$

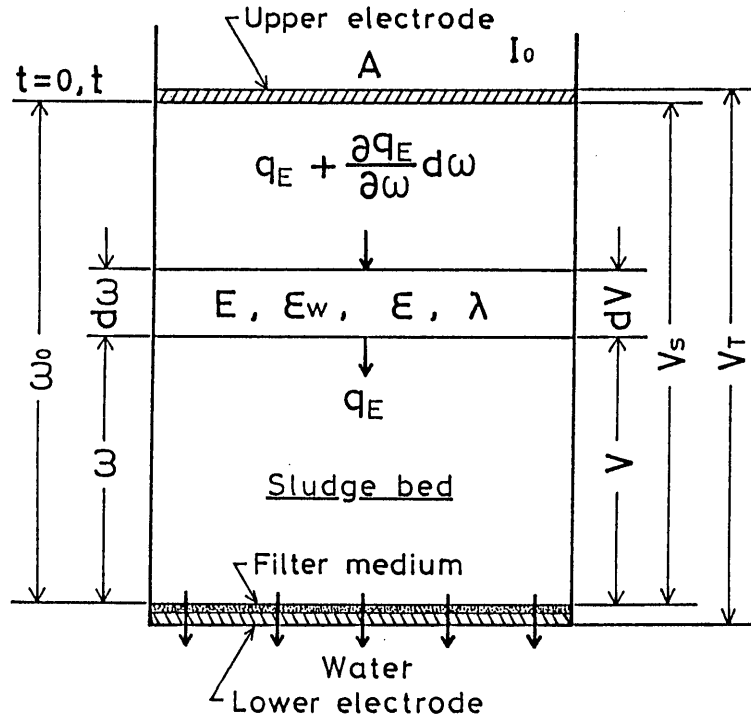


Fig.4-1 Schematic diagram of sludge dewatered by electroosmosis under condition of constant electric current

ここに、 ζ および κ はそれぞれ粒子の ζ 電位、粒子の形状係数、 D および μ はそれぞれ液の誘電率、液の粘度である。また、 a, b はそれぞれ粒子形状に関する定数である。Eq. (4-1) は電気浸透度 α を用いて次式のように表される。

$$u_E = \alpha E, \quad \alpha = \frac{\zeta D}{\kappa \pi \mu} \left(\frac{a \lambda_1}{b \lambda_1 + \lambda_p} \right) \quad (4-2)$$

$d\omega$ における電位差を dV 、空隙率を ε 、スラッジの等価比電導度を λ とすれば、Ohm の法則より次式を得る。

$$E = dV / \{d\omega / \rho_p (1 - \varepsilon)\} = I_0 / \lambda \quad (4-3)$$

ここに、 ρ_p は粒子の密度、 I_0 は定電流密度である。したがって、位置（高さ） ω における電気浸透流の見かけの線速度 $q_E [\text{m/s}]^*$ は、 $d\omega$ における含水率**を ε_w とし、Eqs. (4-2) および (4-3) より

$$q_E = \varepsilon_w u_E = \varepsilon_w \alpha E = \varepsilon_w \alpha I_0 / \lambda \quad (4-4)$$

で表される。また、スラッジ層の断面積を A とすれば、 $d\omega$ における含水量 $v_w [\text{m}^3]$ は Eq. (4-5) で表され、 dt 時間の $d\omega$ 部分の液体の物質収支式は Eq. (4-6) のように表される。

$$v_w = A \varepsilon_w d\omega / \rho_p (1 - \varepsilon) \quad (4-5)$$

$$A \left(q_E + \frac{\partial q_E}{\partial \omega} d\omega \right) dt = A q_E dt = \frac{\partial v_w}{\partial t} dt \quad (4-6)$$

Eq. (4-6) は、Eq. (4-7) のように定義した含水比 $e_w [-]$ を用いると、Eq. (4-8) のようになる。

$$e_w \equiv \varepsilon_w / (1 - \varepsilon) \quad (4-7)$$

$$\frac{\partial q_E}{\partial \omega} = \frac{1}{\rho_p} \cdot \frac{\partial e_w}{\partial t} \quad (4-8)$$

ここで、 λ は e_w に依存すると考えられる (Appendix II 参照) ので、 λ を e_w の関数 $f_c(e_w)$ で

* 本章で用いる記号 q_E は、第一章および第二章で用いた電気浸透流量を表す $q_E [\text{m}^3/\text{s}]$ とは異なる。

** 含水率は、スラッジ層単位体積当りの水の占める体積割合（体積分率）で表し、本章で使用する含水率の記号 ε_w は、第三章においてスラッジ中の気相分の体積を考慮しないで湿乾質量の測定から求まる体積分率を含水率として用いた ε_w とは異なる。

表すと、Eq. (4-4)は次式のように書き換えられる。

$$q_E = \varepsilon_w \alpha I_0 / f_c(e_w) \quad (4-9)$$

上式より q_E は ε_w および e_w の関数となるので、Eq. (4-8)の解を得ることは困難である。もし e_w が ε_w の関数として近似的に表されるならば、Eq. (4-10)のように、 ε および λ はそれぞれ ε_w の関数となるので、Eq. (4-4)はEq. (4-11)のように書き表すことができる。

$$\varepsilon = g_c(\varepsilon_w) \quad , \quad \lambda = I_0/E = h_c(\varepsilon_w) \quad (4-10)$$

$$q_E = \alpha I_0 F_c(\varepsilon_w) \quad (4-11)$$

ここに、 $F_c(\varepsilon_w)$ は ε_w の関数である。したがって、定電流条件における電気浸透脱水過程を表す基礎式は、Eqs. (4-8) , (4-10) および(4-11) より次式のように表され、Eq. (4-13)で書き表すことができる。

$$\frac{\partial q_E}{\partial \omega} = \frac{1}{\rho_p} \left\{ \left(\frac{d e_w}{d \varepsilon_w} \right) \left/ \left(\frac{d q_E}{d \varepsilon_w} \right) \right\} \frac{\partial q_E}{\partial t} \quad \text{ただし、} \frac{d q_E}{d \varepsilon_w} \neq 0 \quad (4-12)$$

$$\frac{\partial q_E}{\partial t} = \rho_p \alpha I_0 G_c(\varepsilon_w) \frac{\partial q_E}{\partial \omega} \quad (4-13)$$

これより、Eq. (4-10)の関数形を実験的に求めればEq. (4-13)を解くことができる。

4.2.2 定電圧条件における脱水過程を表す基礎式⁸⁾

印加電圧 V_0 の定電圧条件下での電気浸透脱水過程における圧縮性スラッジ層は、前述の定電流条件の場合と同様に、スラッジ層の高さを単位脱水面積上に堆積した固体質量 ω で表すと、Fig.4-2のように示される。同様に、微小薄層 $d\omega$ における電場強度を E 、含水率（スラッジ単位体積当りの液体の体積分率）を ε_w とすると、高さ ω における電気浸透流れの見かけの線速度 q_E は次式で表される。

$$q_E = \varepsilon_w \alpha E \quad (4-14)$$

脱水時間 t にスラッジ層断面を流れる電流密度を I とすれば、 $d\omega$ における空隙率 ε 、比電導度 λ 、電位差 dV から、定電流条件の場合と同様にOhmの法則によって次式を得る。

$$E = I / \lambda = \rho_p (1 - \varepsilon) (dV/d\omega) \quad (4-15)$$

定電圧条件では I が経時変化するので、 λ と E の関係は t の経過とともに変化する。したがって、定電圧条件においては I の時間的变化を求めることが必要となり、Eq. (4-15)を $\omega = 0 \sim \omega_0$ において積分すると、 I はEq. (4-16)のように表される。

表される。

$$\frac{\partial q_E}{\partial \omega} = \frac{1}{\rho_p} \left\{ \left(\frac{d e_w}{d \epsilon_w} \right) / \left(\frac{d q_E}{d \epsilon_w} \right) \right\} \frac{\partial q_E}{\partial t} \quad (4-12)$$

したがって、定電圧条件における電気浸透脱水過程を表す基礎式は、Eqs. (4-12) および (4-17) より次のように表される。

$$\frac{\partial q_E}{\partial t} = \rho_p^2 \alpha V_s \left\{ \frac{F_v(\epsilon_w)}{\int_0^{\omega_0} G_v(\epsilon_w) d\omega} \right\} \frac{\partial q_E}{\partial \omega} \quad (4-18)$$

上式における $F_v(\epsilon_w)$ および $G_v(\epsilon_w)$ は、それぞれ $f_v(\epsilon_w)$ や $g_v(\epsilon_w)$ を包括した ϵ_w の関数である。以上のことから、定電流条件の場合と同様に、Eq. (4-10) で表される ϵ vs. ϵ_w および λ vs. ϵ_w の関数関係を実験的に求めれば Eq. (4-18) を解くことができる。

4.3 実験装置および方法

4.3.1 スラッジ層の実効電場強度の測定

Eq. (4-10) におけるスラッジの等価比電導度 λ と含水率 ϵ_w の関係は、定電流条件では I_0 が一定なので、電場強度 E と ϵ_w の関係を求めることによって得られる。 ϵ_w に対する E を実験的に求めるために Fig. 4-3 に示したような装置を使用した。ベントナイト粒子 ($\rho_p = 2767 \text{ kg/m}^3$) を脱イオン水と十分に攪はん混合し、種々の ϵ_w のスラッジを調製した。このスラッジを装置内に一定容量充填して定電流を通じ、白金製の針状電極を用いてスラッジ層高さ方向の電位差を測定した。この場合、電気浸透脱水は行っておらず、界面動電現象や電気分解の影響を無視できる短時間内に測定を行った。また、図示したような方法で、スラッジの電気抵抗を LCRメータで同時に測定した。

Fig. 4-4 に電位差測定結果の 1 例を示したように、層高 $H_s [\text{m}]$ のスラッジ層の実効電場強度 $E (=V_s/H_s)$ は、印加電圧 (極間電圧) $V_T [\text{V}]$ から求まる $E (=V_T/H_s)$ とは異なる。したがって、 λ と ϵ_w の関係を求めるには、スラッジ層の実効値 E を求め、 $\lambda = I_0/E$ の関係を用いて λ を算出する必要がある。

4.3.2 脱水過程の測定

電気浸透脱水実験には Fig. 4-5 に示す装置を用いた。スラッジ層内の電場強度の測定は、Fig. 4-3 に示した方法で行い、電位差測定用針状電極をスラッジ層高さ方向に 5mm

間隔で、周方向に 120 度ごとに螺旋状に設置した。また、スラッジ層高さ方向の含水率の測定には、厚さ 5mm のアクリル製リングを重ね合わせた脱水槽を使用し、上部のリングから順に水平方向に切断分割してスラッジを採取し、湿乾質量を測定した。 ϵ_w の値は一定

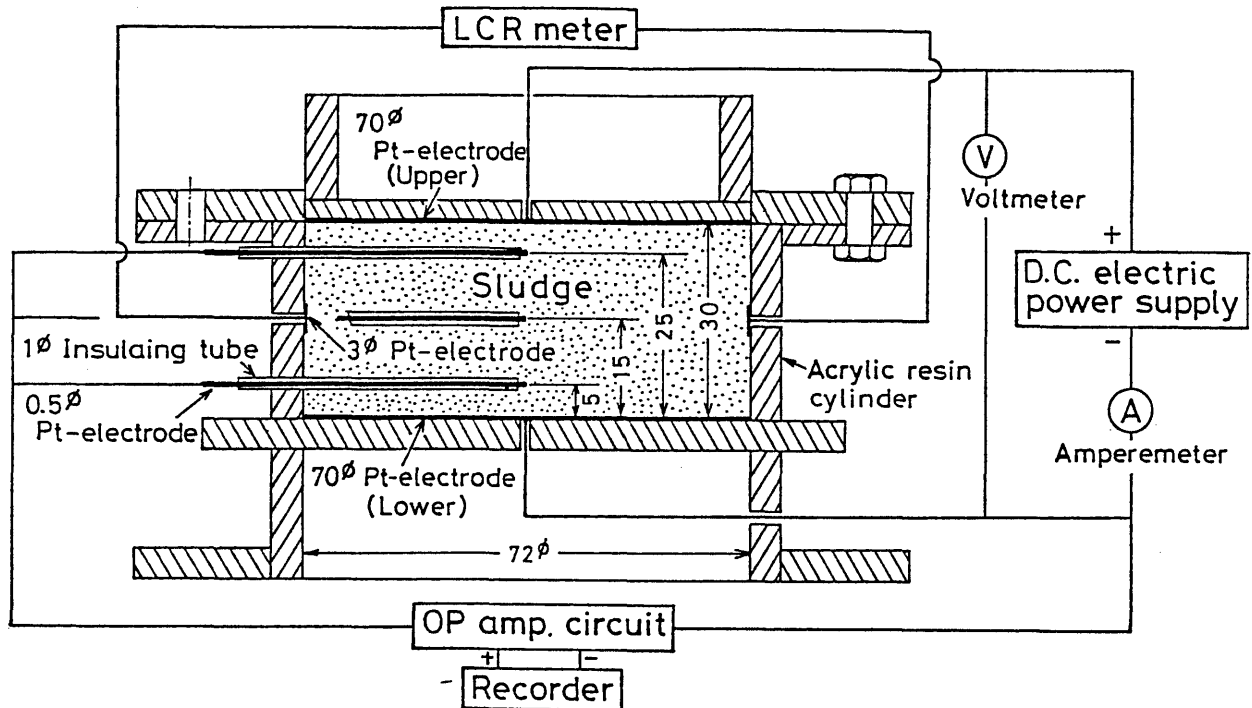


Fig.4-3 Schematic diagram of apparatus for measurement of strength of electric field in sludge

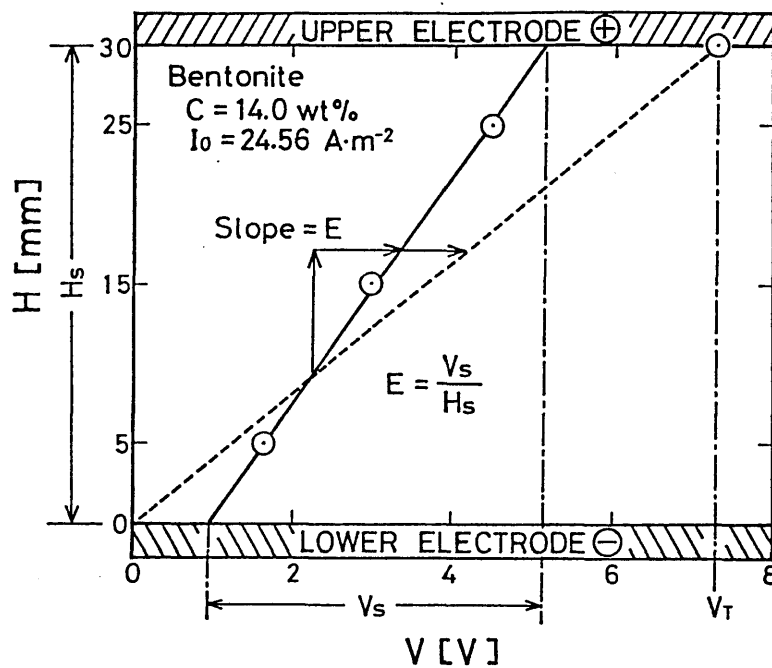


Fig.4-4 Evaluation of E in sludge

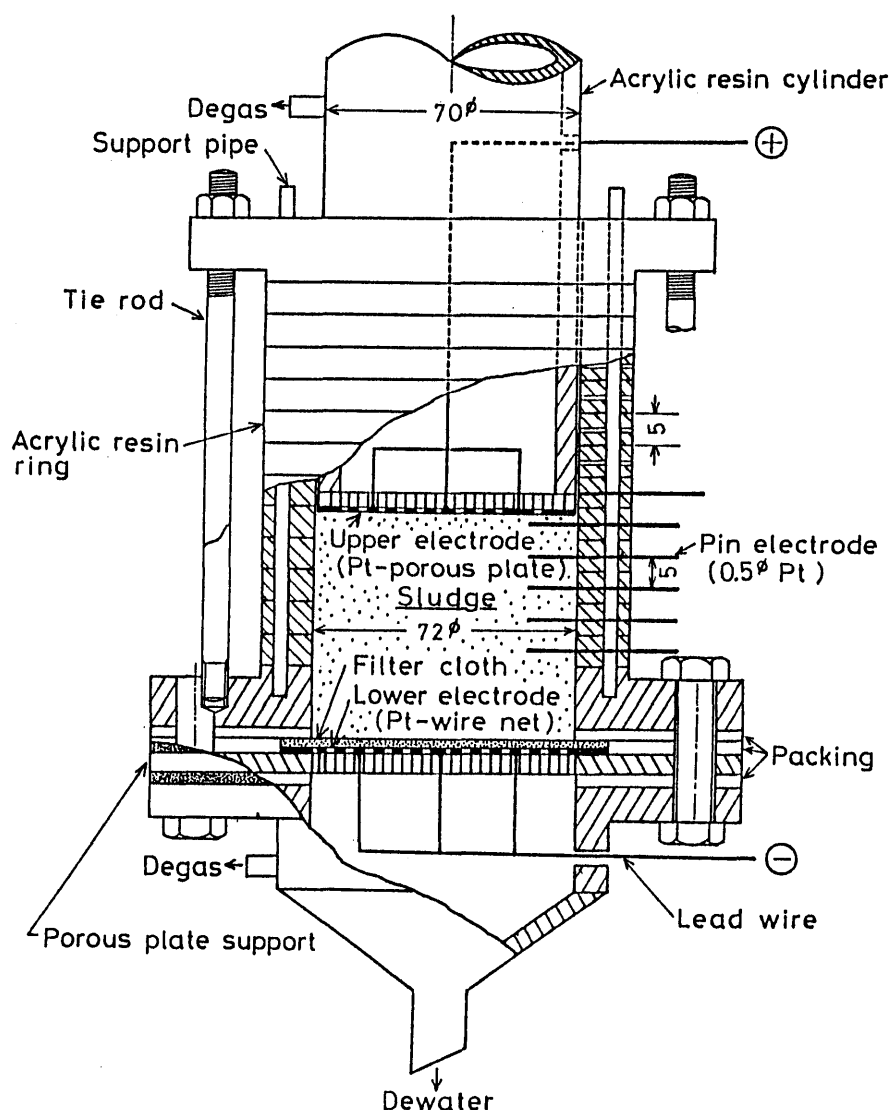


Fig.4-5 Schematic diagram of electroosmotic dewatering apparatus

体積のスラッジを採取すれば直接求められるが、一定体積のスラッジの採取は極めて困難なので、湿乾質量より求まる体積基準の含水率* を w [－] として、 ε_w と w との関係式 Eq. (A-8) (Appendix III 参照) より ε_w の値を得た。

脱水実験に使用したベントナイトスラッジ ($\alpha = 8.085 \times 10^{-9} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$) は、脱イオン水でほとんど飽和された状態のゲル状スラッジで、重力下ではほとんど脱水されず、スラッジ層内の初期含水率は一様である。スラッジ層 ($A = 40.7 \text{ cm}^2$) 上面に白金製の上部多孔板電極 (正極) を設置し、スラッジ層が電極板によって圧縮されない程度に層上面と電極を接触させた状態で、直流安定化電源によって定電流および定電圧の各操作条件のも

* 第三章では ε_w の記号を用いたが、本章では w の記号を用いた。

とでスラッジ層に電場を印加し、脱水に伴うスラッジ層高さ方向における含水率分布および電位差分布を測定すると同時に、脱水量、印加電圧あるいは電流、スラッジ層高などの経時変化の測定を行った。また、脱水液の比電導度および pH の経時変化も測定した。

4.4 結果および考察

4.4.1 脱水基礎式および推算法

1) 定電流条件の場合⁷⁾

定電流条件における脱水基礎式 Eq. (4-13) を解くためには、Eq. (4-10) で示した $\lambda - \varepsilon_w$ 関係および $\varepsilon - \varepsilon_w$ 関係についての実験式を求めることが必要となる。

Fig.4-6 は、Fig.4-3 に示した方法で測定したスラッジの電気抵抗 R [Ω] とスラッジ固体濃度 C [wt %] との関係を示したものである。図において、 $C=20$ wt % 以上の高濃度スラッジは攪はん混合による調製が困難であったので、約 20wt % に調製した攪はん混合スラッジを乾燥法によってより高濃度のスラッジとして R 値を測定した結果である。Fig.4-7 は、攪はん混合スラッジ ($C \leq 20$ wt %) に対して、Fig.4-3 の装置を用いて得た E と R の関係であり、 I_0 をパラメータとしてほぼ直線関係となることがわかる。したがって、

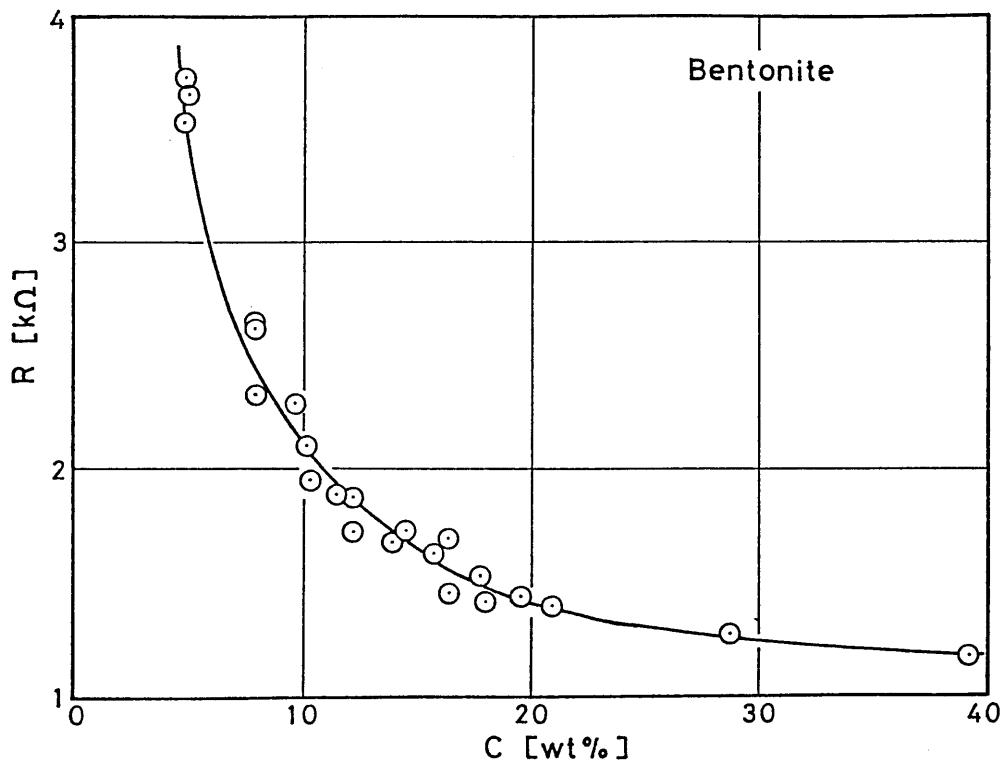


Fig.4-6 Relation between R and C

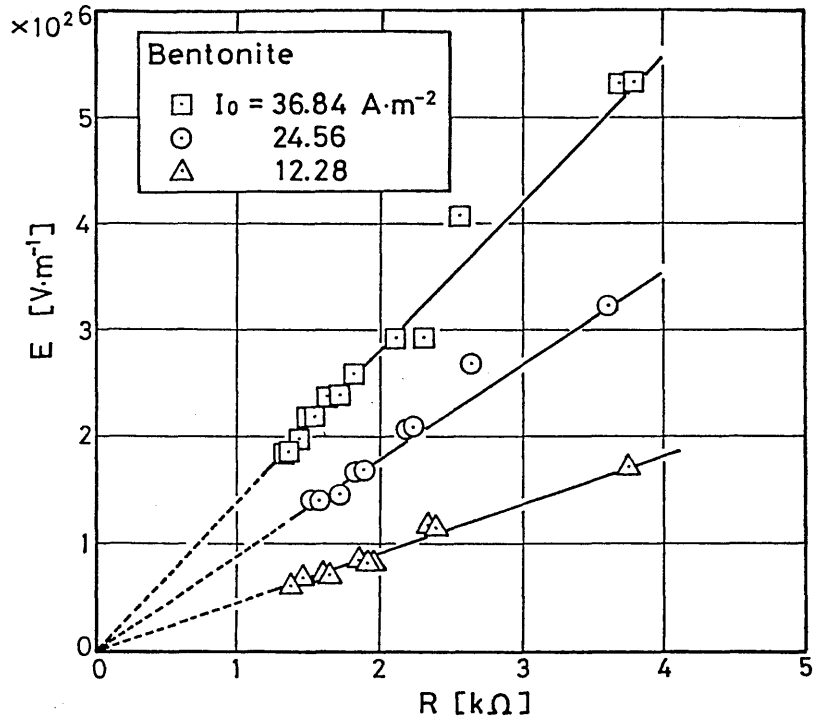


Fig.4-7 Relation between E and R with I_0 as parameter

C) 20wt%の場合の E の値は、Fig.4-7 に示された直線関係を外挿することによって、R の測定値から求めた。このようにして求めた E より、 $\lambda = I_0/E$ を用いて得た λ と ϵ_w との関係を Fig.4-8 に示した。図から、 λ の値は ϵ_w の減少とともに近似的に $\lambda_\infty = 0.25$ に漸近するとして、 $\lambda_\infty \lambda / (\lambda_\infty - \lambda)$ の値を ϵ_w に対してプロットすると同図中に示されるようにほぼ直線関係が得られた。この結果より、最小自乗法によって Fig.4-8 に示す $\lambda_\infty \lambda / (\lambda_\infty - \lambda)$ と ϵ_w の関係式を得た。したがって、この関係式を書き換えると、Eq. (4-10) における λ と ϵ_w の関係は次の実験式で表される。

$$\lambda = \lambda_\infty \left(1 - \frac{c}{1 - \epsilon_w} \right), \quad (\lambda_\infty = 0.25, \quad c = 0.02) \quad (4-19)$$

なお、Fig.4-8 に示されるように、 λ は ϵ_w に対してほぼ直線関係にあることがわかる。

Fig.4-9 は、 λ と ϵ_w の関係を求めたときのスラッジ層の ϵ と ϵ_w の関係である。図中の $\epsilon_{wi} [-]^*$ は、定電流条件における脱水実験で用いたスラッジ試料の初期含水率を表し、 $S [-]$ は飽和度を表す。ベントナイトスラッジの場合、 $\epsilon_w \approx 0.94$ より小さい領域で

* 前章では初期含水率に ϵ_{w0} を用いたが、本章から初期含水率として ϵ_{wi} を用いた。

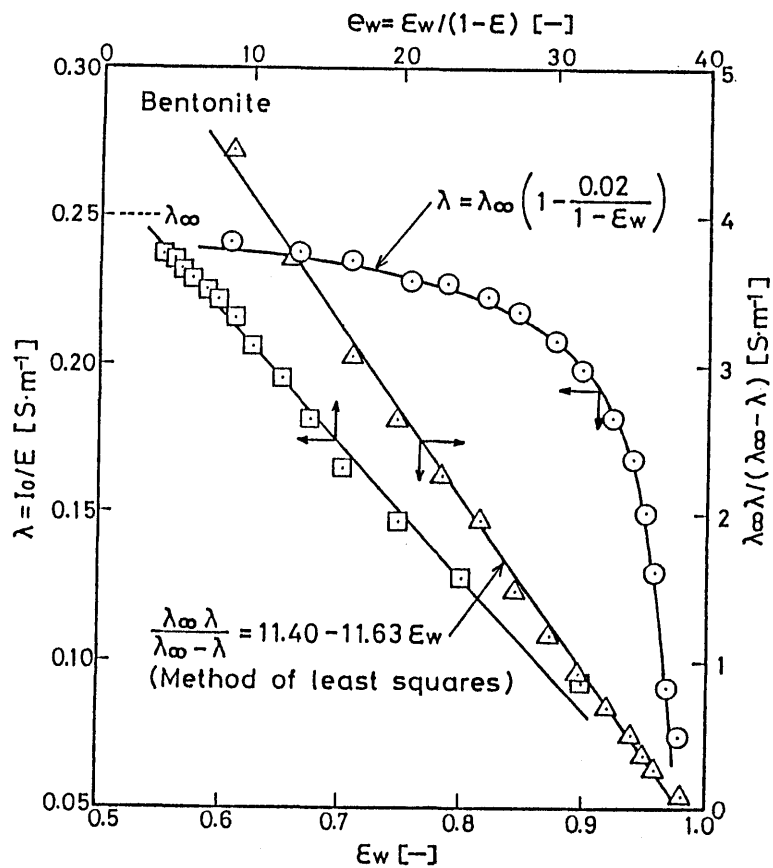


Fig.4-8 λ vs. ϵ_w , $\lambda_\infty \lambda / (\lambda_\infty - \lambda)$ vs. ϵ_w and λ vs. ϵ_w

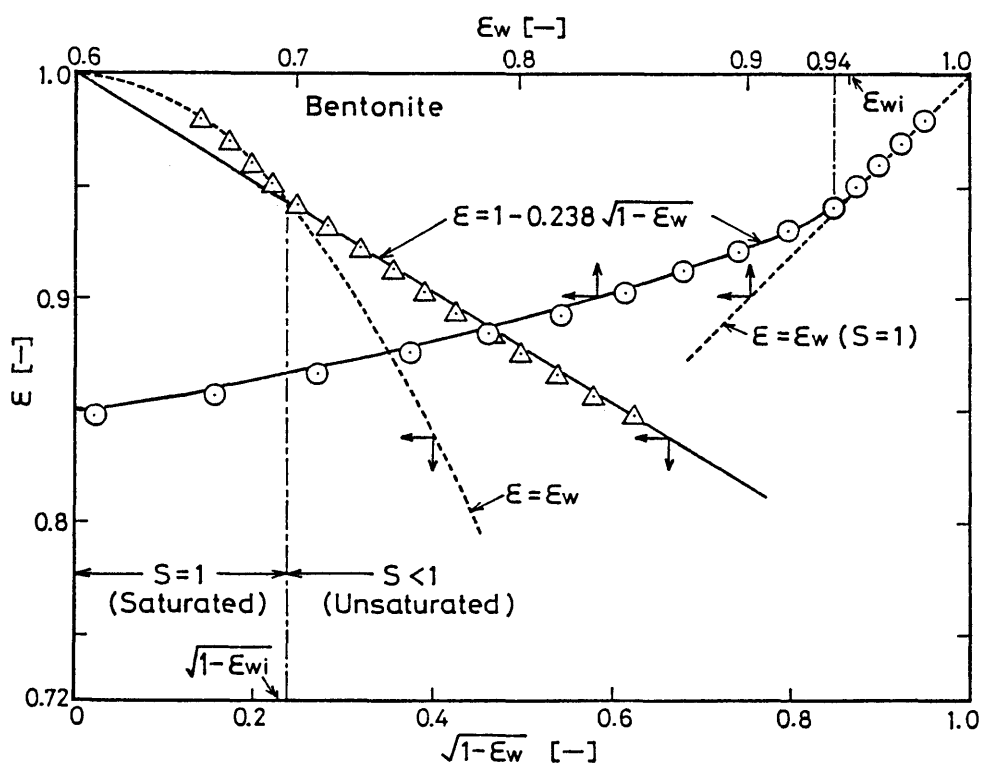


Fig.4-9 ϵ vs. ϵ_w and ϵ vs. $\sqrt{1 - \epsilon_w}$

は $\varepsilon = \varepsilon_w$ の関係からはずれて不飽和状態 ($S < 1$) となり、脱水実験用スラッジの ε_{wi} の値付近より小さい範囲では、 ε と $\sqrt{1 - \varepsilon_w}$ との関係のプロットにおいてほぼ直線関係となった。この結果より、Eq. (4-10) における ε と ε_w の関係は次の実験式で表される。

$$\varepsilon = 1 - k\sqrt{1 - \varepsilon_w} \quad (k=0.238, \quad 0 \leq \varepsilon_w \leq \varepsilon_{wi}) \quad (4-20)$$

したがって、 e_w と ε_w の関係はEqs. (4-7) および (4-20) より次式となる。

$$e_w = \varepsilon_w / k\sqrt{1 - \varepsilon_w} \quad (4-21)$$

これより、電気浸透脱水過程におけるスラッジ層内の局所的な ε および ε_w の値を直接実測することが困難なので、脱水過程における ε と ε_w の関係は Eq. (4-20) を適用できるとした。

以上の結果から、Eq. (4-11) における q_E は、Eqs. (4-4) および (4-19) より次式のよう表される。

$$q_E = \alpha I_0 \varepsilon_w (1 - \varepsilon_w) / \lambda_{\infty} \{ (1 - c) - \varepsilon_w \} \quad (4-22)$$

よって、Eqs. (4-21) および (4-22) を用いて

$$\left. \begin{aligned} \frac{de_w}{d\varepsilon_w} &= \frac{2 - \varepsilon_w}{2k\sqrt{1 - \varepsilon_w} (1 - \varepsilon_w)} \\ \frac{dq_E}{d\varepsilon_w} &= \frac{\alpha I_0 \{ (1 - c) - 2(1 - c)\varepsilon_w + \varepsilon_w^2 \}}{\lambda_{\infty} \{ (1 - c) - \varepsilon_w \}^2} \end{aligned} \right\} \quad (4-23)$$

が得られ、 $dq_E/d\varepsilon_w > 0$ となるので、Eq. (4-12) より、次のような定電流条件における脱水基礎式を得る。

$$\frac{\partial q_E}{\partial t} = K_C \frac{\partial q_E}{\partial \omega} \quad (4-24)$$

ここに、

$$K_C \equiv \frac{2\rho_p \alpha I_0 k \sqrt{1 - \varepsilon_w} (1 - \varepsilon_w) \{ (1 - c) - 2(1 - c)\varepsilon_w + \varepsilon_w^2 \}}{\lambda_{\infty} (2 - \varepsilon_w) \{ (1 - c) - \varepsilon_w \}^2} \quad (4-25)$$

ε_{wi} はスラッジ層内で一様であり、スラッジ層上面で層内への液の流入はないので、次の初期条件および境界条件のもとで Eq. (4-24) を解くことができる。

$$\left. \begin{aligned} t=0, \quad 0 \leq \omega < \omega_0 &: q_E = \varepsilon_{wi} \alpha E_i = q_{Ei} \\ \omega = \omega_0, \quad t \geq 0 &: q_E = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4-26)$$

上式における E_i および q_{Ei} は、それぞれ E および q_E の初期値を表し、ここで、次のように

変数変換（無次元化）を行う。

$$\Psi = q_E / q_{Ei} \quad , \quad \xi = \omega / \omega_0 \quad , \quad \theta = K_C^+ t / \omega_0 \quad (4-27)$$

Eq. (4-27) において、 K_C^+ は $t = \infty$ のときの $\omega = \omega_0$ (測定上ではスラッジ層上面近傍) における K_C [(kg/m²)/s] の値である。すなわち、Eq. (4-25) における ε_w を限界含水率 ε_w^+ (Appendix III 参照) とした関数値である。Eq. (4-27) を用いて Eq. (4-24) は次のように書き換えられる。

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \theta} = \frac{K_C}{K_C^+} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial \xi} \quad (4-28)$$

また、上式における初期条件および境界条件は、Eq. (4-26) より次式となる。

$$\left. \begin{array}{ll} \theta = 0 \quad , \quad 0 \leq \xi < 1 & : \quad \Psi = 1 \\ \xi = 1 \quad , \quad \theta \geq 0 & : \quad \Psi = 0 \end{array} \right\} \quad (4-29)$$

無次元電位差 Φ ($=V/V_s$) を用いて、初期条件は Fig.4-10 のように図示され、Eq. (4-28) について前進差分法に基づく陽解法によって数値解を得た。なお、差分近似式とし

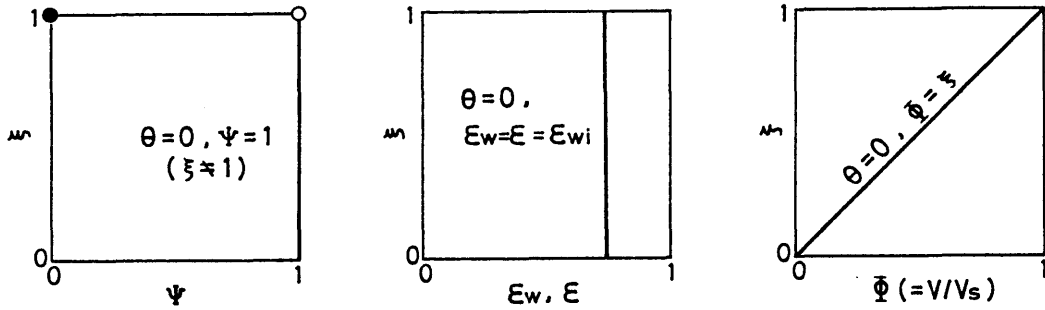


Fig.4-10 Initial conditions for solution of Eq.(4-28)

てTaylor展開式の第2次導関数以下の項は無視した。また、数値計算において、スラッジ層高さ方向における格子数は、含水率の実測精度を考慮して10とした。計算手順は次の通りである。

(i) Eq. (4-28) より求まる Ψ から、Eq. (4-27) より q_E を求める。

(ii) Eq. (4-22) を展開整理した次式を用いて ε_w を求める。

$$\varepsilon_w = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{\lambda_{\infty} q_E}{\alpha I_0} - \sqrt{\left(1 + \frac{\lambda_{\infty} q_E}{\alpha I_0} \right)^2 - 4(1-c) \frac{\lambda_{\infty} q_E}{\alpha I_0}} \right\} \quad (4-30)$$

(iii) ε_w から、Eqs. (4-3) および (4-19) より E を、また Eq. (4-20) より ε をそれぞれ求める。

(iv) $dH = d\omega / \{\rho_p(1 - \epsilon)\}$ により、変数 ω を実際のスラッジ層の高さを表す変数 $H[m]$ に変換する。

(v) dH および E から、 H_s と V_s をそれぞれ次式で求める。

$$H_s = \int_0^{H_s} dH = \int_0^{\omega_0} \frac{d\omega}{\rho_p(1 - \epsilon)} \quad (4-31)$$

$$V_s = \int_0^{V_s} dV = \int_0^{H_s} E dH \quad (4-32)$$

(vi) H/H_s および V/V_s を求め、 H 方向における位置および電位差を無次元化する。

(vii) 上下両電極およびろ材部における電圧降下（実測値）を V_s に加えて V_T を求める。

(viii) 電気浸透脱水量 Q_E および平均含水率 $\epsilon_{wav}[-]$ をそれぞれ次式より求める。なお、 $Q_i[m^3]$ は初期含水量である。

$$Q_E = Q_i - A \int_0^{H_s} \epsilon_w dH \quad (4-33)$$

$$\epsilon_{wav} = \frac{1}{H_s} \int_0^{H_s} \epsilon_w dH \quad (4-34)$$

2) 定電圧条件の場合⁸⁾

定電圧条件における脱水基礎式 Eq. (4-18) を解くためには、定電流条件の場合と同様に、 ϵ vs. ϵ_w および λ vs. ϵ_w の関数形を実験的に求めることが必要であり。定電圧条件で使用したベントナイトスラッジに対しても、これらの関係は近似的に次の実験式でそれぞれ与えられる。

$$\lambda = \lambda_\infty \left(1 - \frac{c}{1 - \epsilon_w} \right) \quad (4-19)$$

$$\epsilon = 1 - k\sqrt{1 - \epsilon_w} \quad (4-20)$$

したがって、Eq. (4-17) における q_E および I はそれぞれ

$$q_E = \alpha I \epsilon_w (1 - \epsilon_w) / [\lambda_\infty \{(1 - c) - \epsilon_w\}] \quad (4-35)$$

$$I = \rho_p V_s k \lambda_\infty \int_0^{\omega_0} \frac{\sqrt{1 - \epsilon_w}}{(1 - c) - \epsilon_w} d\omega \quad (4-36)$$

で表される。また、 ϵ_w は ϵ_w を用いて Eq. (4-21) で表されるので、Eq. (4-18) は Eqs. (4-21), (4-35), および (4-36) を用いて Eq. (4-12) より次式のように表される。

$$\frac{\partial q_E}{\partial t} = K_V \frac{\partial q_E}{\partial \omega} \quad (4-37)$$

ここに、

$$K_V \equiv \frac{2 \rho_p^2 \alpha V_s k^2 \sqrt{1 - \varepsilon_w} (1 - \varepsilon_w) \{ (1 - c) - 2(1 - c) \varepsilon_w + \varepsilon_w^2 \}}{(2 - \varepsilon_w) \{ (1 - c) - \varepsilon_w \}^2 \int_0^{\omega_0} \frac{\sqrt{1 - \varepsilon_w}}{(1 - c) - \varepsilon_w} d\omega} \quad (4-38)$$

ここで、定電流条件の場合と同様に、次のように変数変換を行って無次元化する。

$$\Psi = q_E / q_{E1} \quad , \quad \xi = \omega / \omega_0 \quad , \quad \theta = K_V^+ t / \omega_0 \quad (4-39)$$

上式において、 K_V^+ は Eq. (4-38) における K_V [(kg/m²)/s] を限界含水率 ε_w^+ の関数としたもので、 ε_w が ε_w^+ になったときの K_V の値である。Eq. (4-37) は、Eq. (4-39) を用いれば次式のように書き換えられ、定電流条件の場合と同形の式となり、Eq. (4-40) が定電圧条件での電気浸透脱水過程の推定基礎式となる。

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \theta} = \frac{K_V}{K_V^+} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial \xi} \quad (4-40)$$

Eq. (4-40) は、スラッジ層上面 ($\omega = \omega_0$) で層内への液の流入はないので、定電流条件の場合と同様の次の初期条件および境界条件の基で数値解を得ることができる。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{I.C.} & \theta = 0 \quad , \quad 0 \leq \xi < 1 \quad : \quad \Psi = 1 \\ \text{B.C.} & \xi = 1 \quad , \quad \theta \geq 0 \quad : \quad \Psi = 0 \end{array} \right\} \quad (4-29)$$

したがって、定電流条件の場合と同様に、Eq. (4-40) を差分近似して前進差分法に基づく陽解法で数値計算し、以下のような計算手順によって、定電圧条件下での脱水過程における含水率 (ε_w) 分布、電位差分布、脱水量 Q_E 、電流密度 I 、スラッジ層高 H_s 、および平均含水率 ε_{wav} の経時変化を推算した。

(i) Eq. (4-40) より求まる Ψ の値から、Eq. (4-39) を用いて q_E を求める。

(ii) 定電圧条件においては、スラッジ層内の初期電位差分布の実測結果より、スラッジに加わる実効電圧 V_s (一定値) を定めて、Eq. (4-36) より I を求める。

(iii) Eq. (4-35) を展開整理した次式を用いて ε_w を求める。

$$\varepsilon_w = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{\lambda_{\infty} q_E}{\alpha I} - \sqrt{\left(1 + \frac{\lambda_{\infty} q_E}{\alpha I} \right)^2 - 4(1 - c) \frac{\lambda_{\infty} q_E}{\alpha I}} \right\} \quad (4-41)$$

(iv) ε_w から、Eqs. (4-19) および (4-20) を用いて λ および ε をそれぞれ求め、 λ および先に求めた I から Eq. (4-15) により E を求める。

(v) $dH = d\omega / \{\rho_p(1 - \varepsilon)\}$ および $dV = EdH$ の関係を用いて、スラッジ層の高さを表す変数 ω を変数 H に変換して、 H_s および層高さ方向の電位差 V をそれぞれ次式で求める。

$$H_s = \int_0^{\omega_0} \frac{d\omega}{\rho_p(1 - \varepsilon)} \quad (4-31) \quad , \quad V = \int_0^H EdH \quad (4-42)$$

(vi) H/H_s および V/V_s を求めて、スラッジ層内の高さおよび電位差を無次元化する。

(vii) Q_E および ε_{wav} を Eqs. (4-33) および (4-34) よりそれぞれ求める。

4.4.2 定電流条件における脱水過程の推定⁷⁾

1) 電圧および電位差分布の経時変化

スラッジ層の電気抵抗は脱水に伴って変化し、定電流条件においては印加電圧が変化するので、Fig.4-11に、極間電圧* V_T の経時変化についての実測値と脱水基礎式 Eq. (4-28) に基づく計算結果を示した。図中の H_i [m] はスラッジ層初高**を表す。図より、実測値は実線で示した計算値に対して小さい値を示していることがわかる。この理由については後述する。また、 V_T の実測値は、脱水初期に急減した後直線的に減少し、 $t \approx 6$ h 経過すると1次的脱水がほぼ終了してスラッジ層全体の電気抵抗が増大する結果、 V_T は減少傾

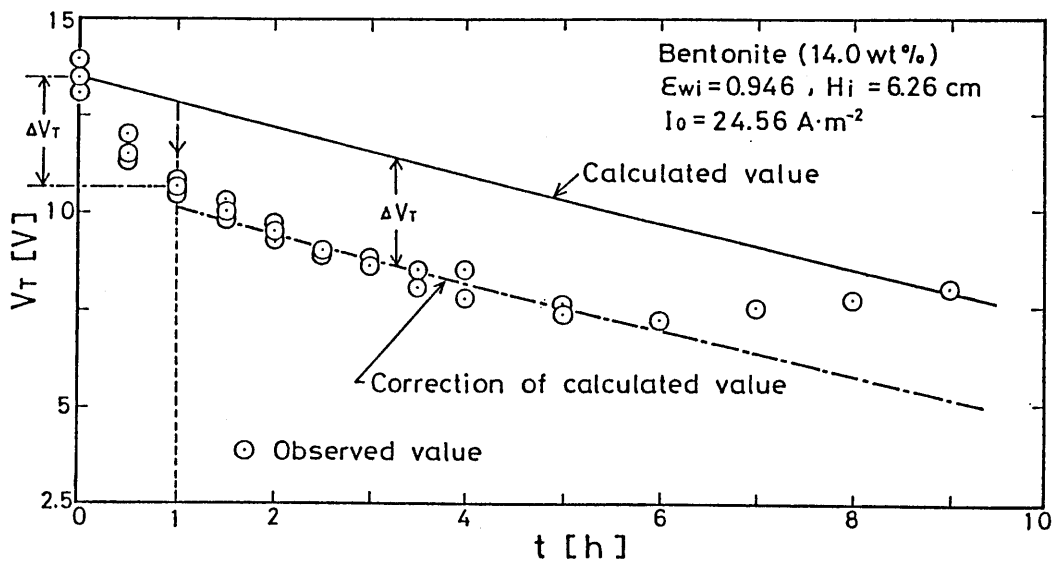


Fig.4-11 Variation of V_T with t under condition of constant electric current

* 前章では極間電圧として V_i を用いたが、本章では、極間電圧 V_T とスラッジ層自体に加わる電圧 V_s とを分けて扱った。

** スラッジ層初高として、前章では H_0 を用いたが、本章では H_i を用いた。

向から逆にやや増大するようになり、2次的脱水過程に移行することを表している。したがって、電位差分布および含水率分布についての実測値と理論推定値の比較は、本理論解析で対象とした1次的脱水期間について行った。

定電流条件下での脱水に伴うスラッジ層内の電位差分布の経時変化を Fig.4-12に示した。脱水時間の経過とともにスラッジ層高* H_s および印加電圧 V_s が経時変化するので、第三章で示したように、スラッジ層高さ方向の位置および電位差は無次元項 H/H_s および V/V_s で表した。図において、実測値は実線の計算結果例に対して $t=0h$ の初期電位差分布（直線）を間にして対称的な分布曲線となっている。これは、 V/V_s の実測値が H/H_s の小さい部分すなわちスラッジ層下部において t の経過とともに著しく減少するためである。Fig.4-13は、脱水液の比電導度 λ_1 および pH の経時変化を示したものであるが、この結果より、スラッジ層下部において実測された電位差の著しい減少の理由を次のように推測する

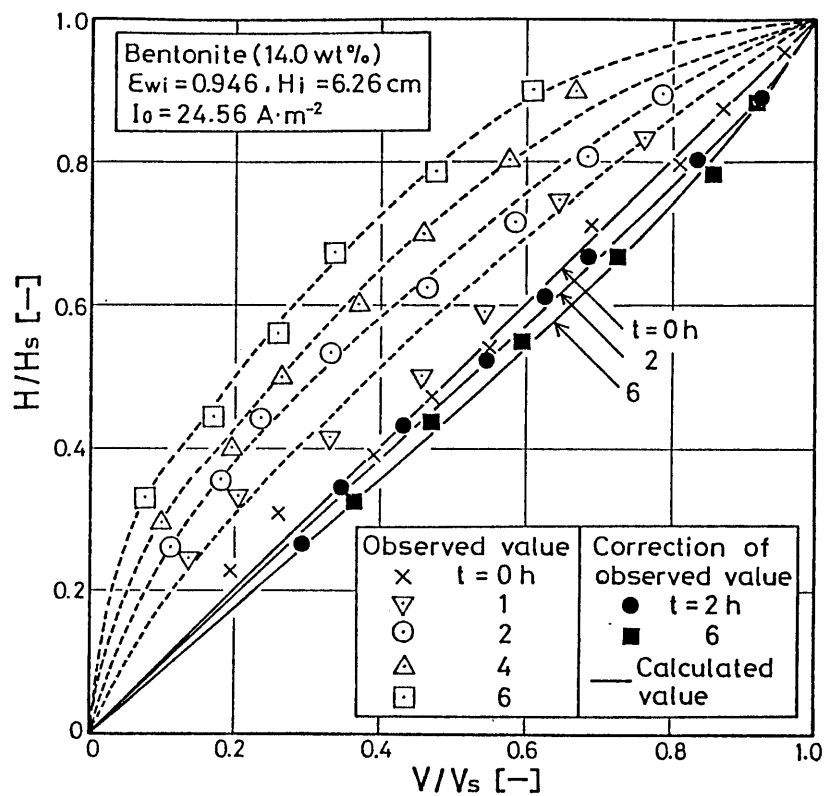


Fig.4-12 Variation of electric potential difference distribution with t under condition of constant electric current

* t 時間におけるスラッジ層高さを、前章では H_t で表したが、本章では H_s で表した。

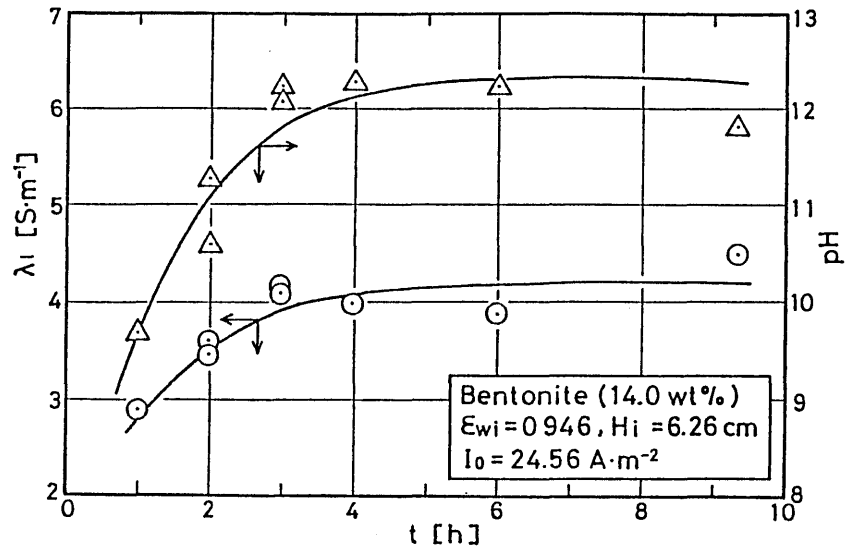


Fig.4-13 Variations of λ_i and pH with t

ことができる。スラッジ層に電流が通ずることによって水の電気分解を生じ、下部負極では H_2 ガスが発生し、脱水液中の OH^- イオン濃度が増加するので pH が大となり比電導度も増大する。また、下部負極近傍の層内の一部の OH^- イオンは上部正極に向かってイオン泳動によって拡散するため、層下部においてしだいに λ が大となり、その結果電位差が減少する。上記のことから、層下部における電位差こう配の変化は、 ϵ_w の変化によるものではなく、電気分解に起因していると考えられる。したがって、実測した V を無次元化せずに直接整理した電位差分布曲線において、層下部における電位差こう配 dV/dH の顕著な減少変化を無視し、この部分の dV/dH として、 ϵ_w が変化していないとした場合に対応する電位差こう配を近似的に図上より求め、 V および V_s の値を補正して整理し直すと、Fig.4-12中に例示されたようなプロット (●■) となりほぼ計算値と一致した。

なお、Fig.4-11において V_T の実測値が脱水初期に急減するのも前述の電気分解の理由によると考えられ、近似的に $t=1h$ までの実測値 V_T の減少分 ΔV_T (図中) を無視し、 $t=1h$ 以後の実線の計算値を $-\Delta V_T$ だけ減じて補正すると図中の1点鎖線のようになり、1次的脱水期間では実測値に対してほぼ良好な一致を示す。

2) 含水率分布の経時変化

スラッジ層内の ϵ_w 分布の経時変化について実測値と計算値との比較結果を Fig.4-14 に示した。図より、実線の計算結果は実測値と比較的良好な一致を示していることがわかる。したがって、Eq.(4-28) は ϵ_w 分布の推算式としてほぼ妥当であると考えられる。

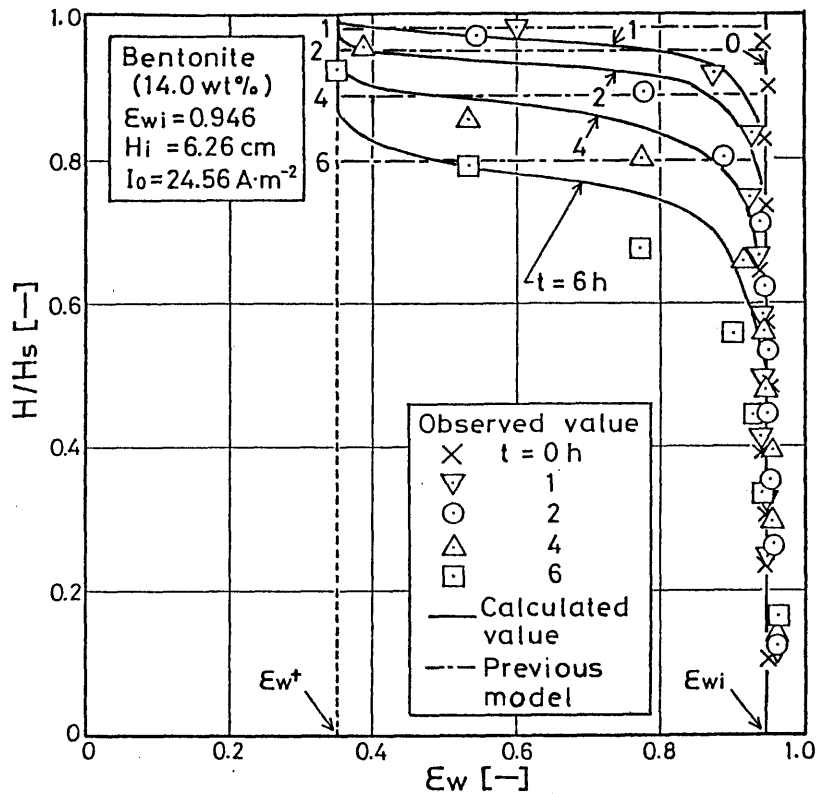


Fig.4-14 Variation of ϵ_w distribution with t under condition of constant electric current

また、図中の1点鎖線は、第二章で示した含水率分布を無視した脱水モデルに基づいて求めた計算結果であり、この結果は、先の単純なモデルでも近似的には適用できることを示唆している。なお、層下部においては、 ϵ_w の実測値が初期値 ϵ_{wi} よりわずかに大きくなる傾向を示している。これは、前述の層下部における電位差こう配 E が時間 t の経過とともに減少することによって、 q_E が小さくなるためと考えられる。

3) 脱水量，スラッジ層高および平均含水率の経時変化

Fig.4-15に、脱水量 Q_E の経時変化の実測値と Eq. (4-33) による計算値との比較結果を示した。図より、計算値（実線）は実測値に対して良好な一致を示していることがわかる。また同図中には、先の脱水モデルに基づく Eq. (2-5) による計算結果を前図と同様に1点鎖線で示したが、脱水初期を除いてほぼ妥当な結果となっていることがわかる。Fig. 4-16には、スラッジ層高 H_s および平均含水率 ϵ_{wav} の経時変化についての実測値と Eqs. (4-31) および(4-34) によるそれぞれの計算値との比較結果を示した。 ϵ_{wav} の実測値は、測定時間9hの場合の Q_E および H_s の実測値を用いて、 $\epsilon_{wav} = (Q_i - Q_E)/AH_s$ より算出した値である。 H_s および ϵ_{wav} とも、1次的脱水期間においてはそれぞれ実測値と計算値

はほぼ良い一致を示した。

以上の結果より、 V_T および電位差分布の実測結果において顕著に見られた電気分解の影響は、 ϵ_w 分布、 Q_E 、 H_s 、 ϵ_{wav} などの理論計算にはあまり考慮する必要がなく、これらについてはほぼ妥当な推定ができることがわかった。

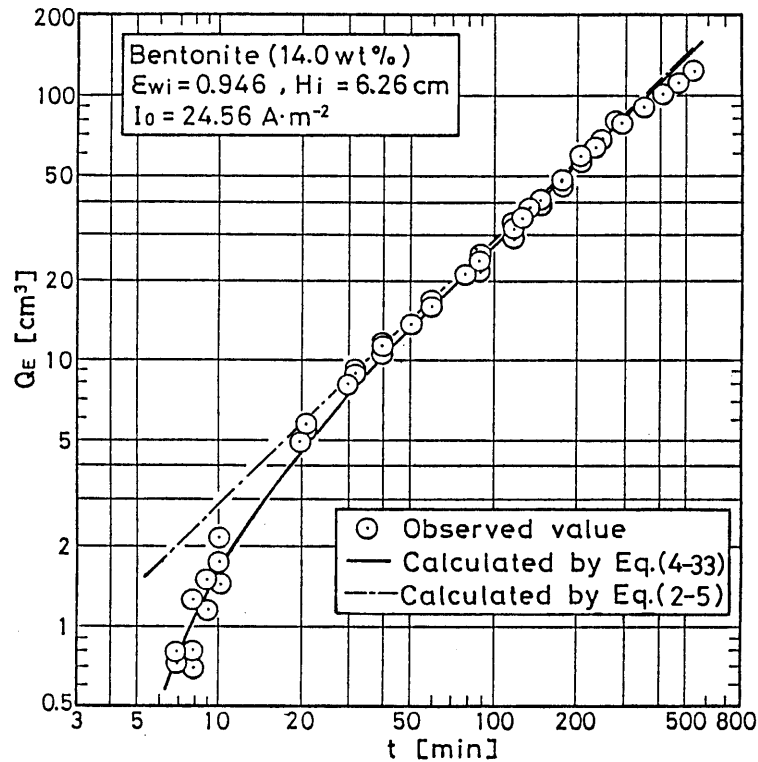


Fig.4-15 Variation of Q_E with t under condition of constant electric current

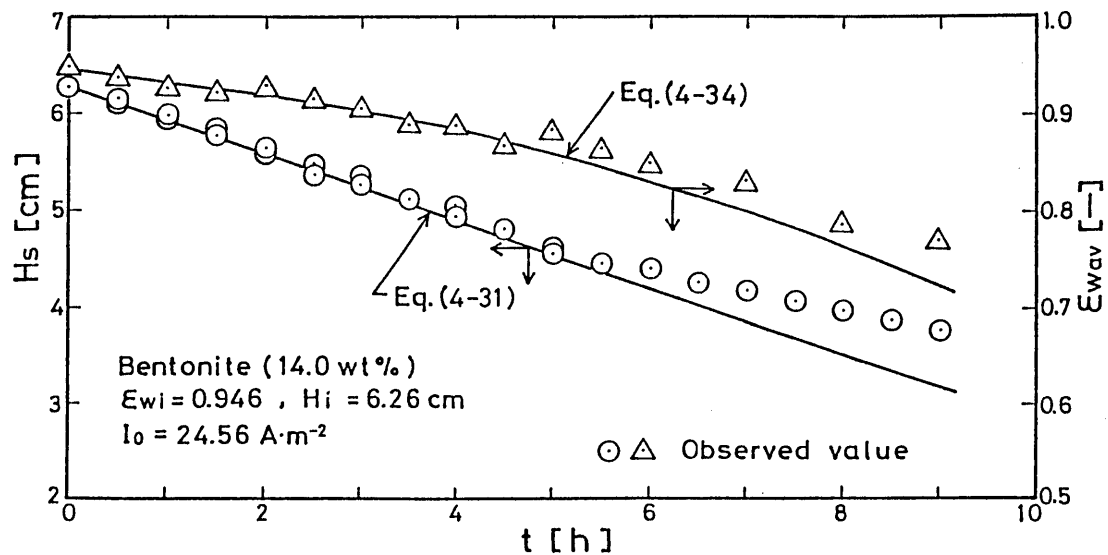


Fig.4-16 Variations of H_s and ϵ_{wav} with t under condition of constant electric current

4.4.3 定電圧条件における脱水過程の推定⁸⁾

定電圧条件における脱水過程についても、定電流条件の場合と同様に、実測値と推算値の比較検討を行った。

1) 電流，脱水量およびスラッジ層高の経時変化

定電圧条件における Q_E 、 H_s および電流 $i (=AI)$ [A]の経時変化について、印加電圧 V_0 の値が5Vおよび10Vの場合のそれぞれの実測値と推算値との比較結果をFigs.4-17および4-18に示した。これらの図において、実線で示した i の計算結果が t の経過とともに徐々に増加するのに対して、 i の実測値は、脱水初期においてやや急速に増加しその後暫時増加する傾向を示した後で逆に減少に転ずる結果となっている。実測値 i のこのような経時変化および実測値と推算値の差異が生ずる理由は次のように考えることができる。前述したように、スラッジ層に電圧を印加することによって生ずる水の電気分解の影響によって、下部電極（負極）近傍のスラッジ層の λ が局所的に増大するため、脱水初期におけるスラッジ層全体の電流値は急増するようになる。しかしながら、理論解析においてはこの電気分解に起因するスラッジ層内の電気的特性の変化は考慮していない。したがって、脱水初期の i の実測値は推算値に比べてやや大きい値になるものと考えられる。また、実測値 i が増加傾向から逆に減少するようになる理由は、脱水が進行するにつれてスラッジ層上面

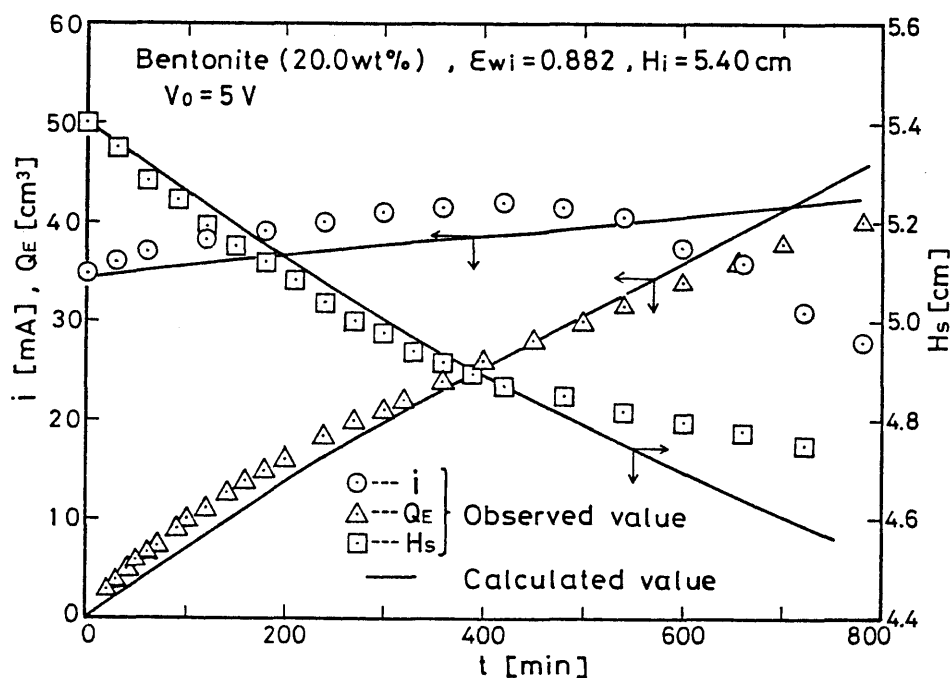


Fig.4-17 Variations of i , Q_E and H_s with t under condition of constant voltage of 5 V

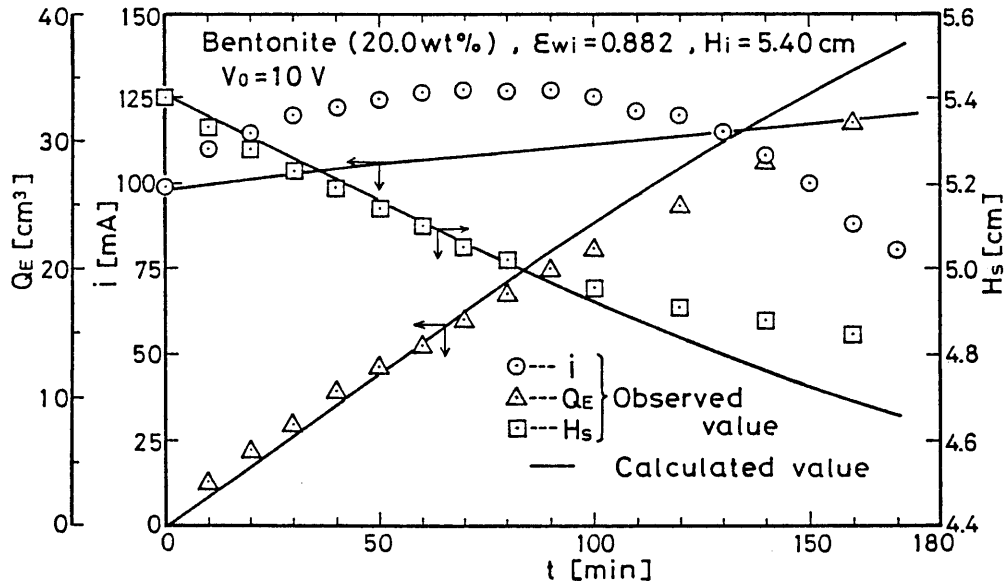


Fig.4-18 Variations of i , Q_E and H_s with t under condition of constant voltage of 10 V

近傍の含水率が減少して著しい脱水状態となり、上部電極とスラッジ層との接触電気抵抗が大きくなるためと考えられる。なお、この接触電気抵抗の増大の原因の1つとして、上部電極近傍に発生する電解生成ガス（ O_2 ガス）も影響していると考えられる。以上のことから、 i の実測値は減少傾向を示すまでの脱水期間において推算値より大きい値となる。したがって、Figs.4-17および4-18に示されるように、電気浸透速度は電流値 i に比例するので、脱水初期における Q_E の実測値は推算値よりわずかに大となり、 H_s の実測値は脱水初期に推算値に対して反対に小さくなる傾向を示す。しかしながら、前述の接触電気抵抗の増大による影響が現われる脱水過程を除けば、推算値と実測値はほぼ一致する傾向を示していることがわかる。また、定電流条件における脱水速度(dQ_E/dt)が脱水初期を除いてほぼ一定値を示すのに対して、定電圧条件での脱水速度は、実測値および推算値とも経過とともにしだいに減少する傾向を示す。

2) 含水率分布、電位差分布および平均含水率の経時変化

Figs.4-19および4-20には、定電圧条件におけるスラッジ層高さ方向の含水率分布および電位差分布の経時変化について、定電流条件の場合と同様に、実測値と推算値の比較結果を例示した。Fig.4-19の ε_w 分布の経時変化において、実線の計算結果は H/H_s の大きい部分すなわちスラッジ層上部での実測値 ε_w の時間的な減少傾向を比較的良く示していることがわかる。したがって、Eq.(4-40)は定電圧条件における ε_w 分布の推定式と

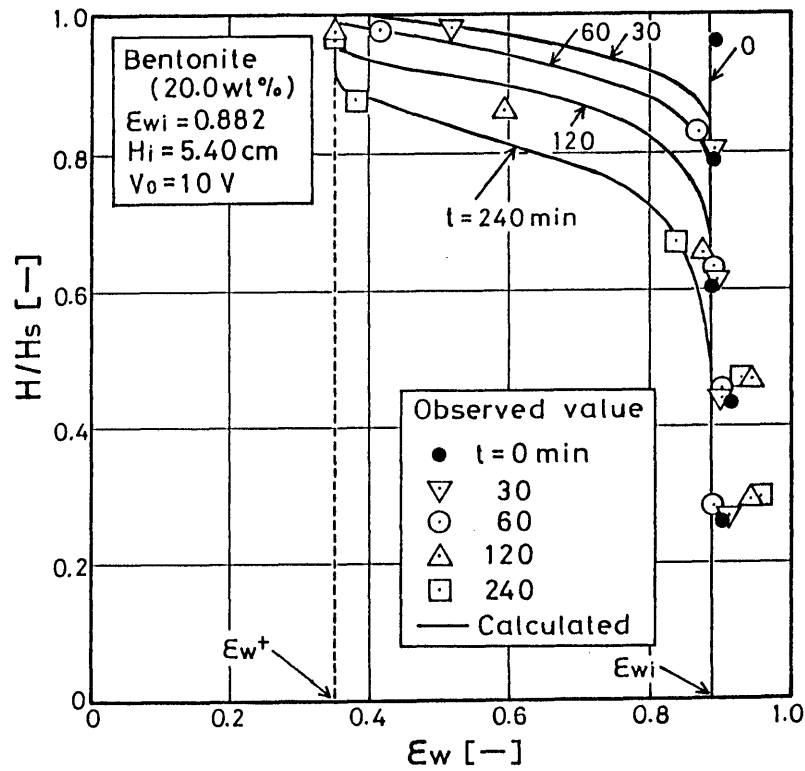


Fig.4-19 Variation of ϵ_w distribution with t under condition of constant voltage

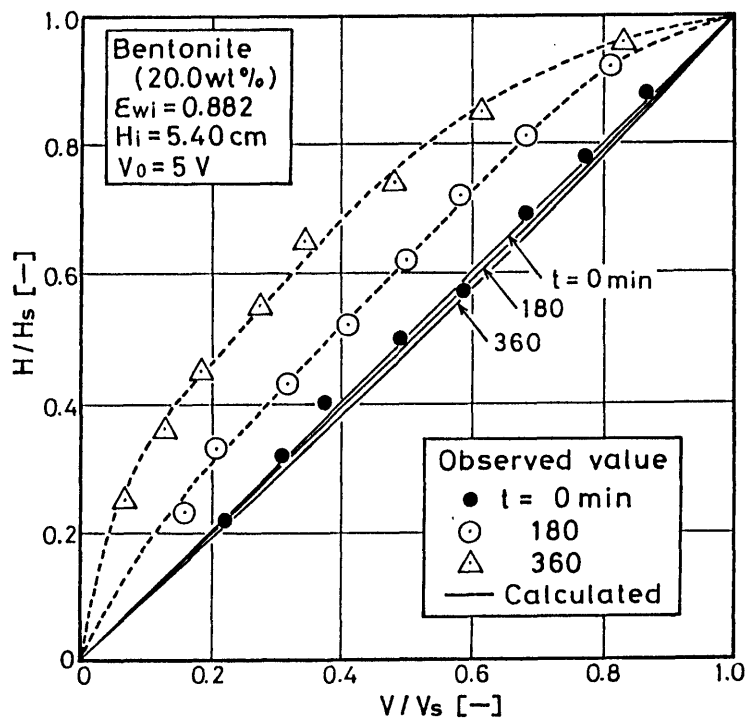


Fig.4-20 Variation of electric potential difference distribution with t under condition of constant voltage

してほぼ妥当であるといえる。なお、前述のように、定電圧条件における脱水速度は、定電流条件の場合と比べて時間の経過とともに小さくなるので、両操作条件において初期電場強度が同じ場合には、スラッジ層上部における ϵ_w の減少速度は、定電流条件の場合より定電圧条件の方が小さくなるものと推察される。

Fig.4-20に示した電位差分布は、Fig.4-17で i の実測値が減少傾向を示す以前の経過時間における結果である。図において、推算値である実線の電位差分布曲線は、破線で示した実測値の分布曲線に対して $t=0$ min の初期電位差分布（直線）を間にして対称的な結果となっており、その分布曲線の傾向は実測結果に対して著しい相違を示している。このような結果は定電流条件のときと同様であり、その理由は、前述したように、電気分解の影響によって下部電極近傍のスラッジ層の λ が増大するために、Fig.4-20における V/V_s の実測値が H/H_s の小さい部分（層下部）において時間の経過とともに著しい減少を示すことによるものである。したがって、定電圧条件においても、定電流条件の場合と同様に、電位差分布の推定には ϵ_w 分布の変化だけでなく電気分解の影響による局所的電位差の変化を考慮しなければならない。また、スラッジ層下部における電位差こう配が電気分解の影響で t の経過とともに減少し q_E が小さくなるために、Fig.4-19において、層下部における ϵ_w の実測値が、定電流条件の場合と同様に、 ϵ_{wi} よりわずかに大きくなる傾向を示している。

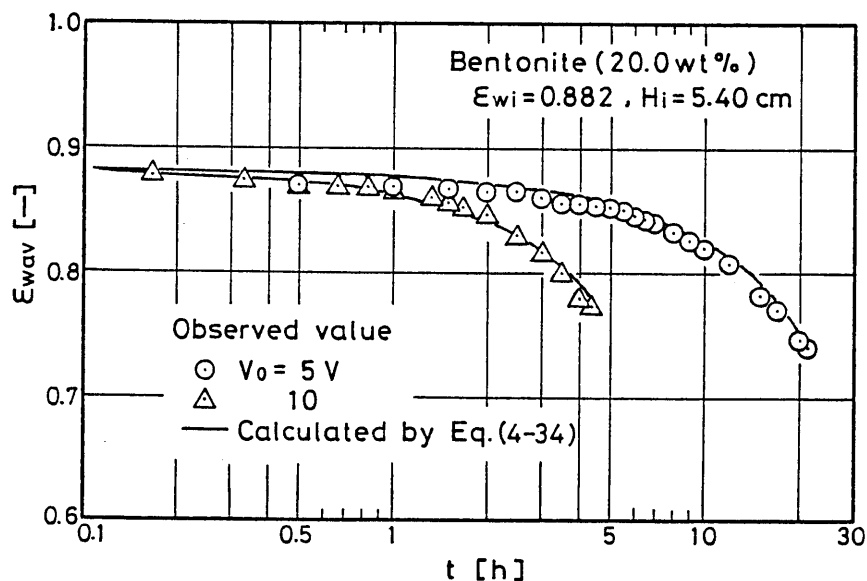


Fig.4-21 Variations of ϵ_{wav} with t under condition of constant voltage

Fig.4-21には、 ϵ_{wav} の経時変化について実測値と Eq.(4-34) による計算値との比較結果を示した。図より、 V_0 のそれぞれの条件において、実線の計算結果は実測値とほぼ良い一致を示していることがわかる。

以上の結果より、脱水の進行に伴って電極とスラッジ層の接触電気抵抗が著しく増大し影響を及ぼすようになる脱水過程を除けば、Eq.(4-40) は、定電圧条件における ϵ_w 分布、 Q_E 、 H_s 、 ϵ_{wav} などの経時変化の推定式としてほぼ妥当であることがわかった。

4.5 総 括

定電流および定電圧の各操作条件における圧縮性スラッジの電気浸透脱水過程の理論的推定法について、脱水過程におけるスラッジ層内の含水率分布および電位差分布の変化を考慮して理論的考察を行い、各操作条件における電気浸透脱水過程の推定基礎式をそれぞれ得るとともに、ゲル状ベントナイトスラッジを用いた実測値と推定基礎式による推算値との比較検討から、次のような結果を得た。

1) 電気浸透脱水過程を表す推定基礎式は、理論的に導くことが困難なスラッジの含水率と比電導度との関係については実験式を用いることによって、定電流条件では Eq.(4-28)、定電圧条件では Eq.(4-28) と同形の Eq.(4-40) でそれぞれ表され、これらの推定基礎式を用いて、脱水過程におけるスラッジ層内の含水率分布、電位差分布、脱水量、スラッジ層高など諸特性値の経時変化が推定できる。

2) 定電流および定電圧条件における電気浸透脱水に伴うスラッジ層内の含水率分布、脱水量、スラッジ層高、および平均含水率などの経時変化は、定電流条件における2次的脱水過程または電極近傍のスラッジ層の著しい脱水状態が顕著な影響を及ぼすようになる脱水過程を除けば、各操作条件における推定基礎式に基づいてそれぞれほぼ妥当な理論推定ができる。しかしながら、スラッジ層内電位差分布、印加電圧あるいは電流の経時変化については、電気分解の影響によるスラッジ層内の局所的な電位差の変化を考慮して推定しなければならない。

Literature cited

- 1) Rampacek, C. in J.B.Poole and D.Doyle(eds.): "Solid-Liquid Separation", p.100, HER MAJESTY'S STATIONERY OFFICE, London(1966)
- 2) Komagata, S.: "Kaimen Denki Kagaku Gaiyo", pp.71,84, Shokodo, Tokyo(1969)
- 3) Denki Kagaku Kyokai(ed.) "Denki Kagaku Benran", 2nd ed., p.940, Maruzen, Tokyo(1974)
- 4) Yukawa, H., H.Yoshida, K.Kobayashi and M.Hakoda : *J. Chem. Eng. Japan*, 9, 402(1976)
- 5) *idem:ibid.*, 11, 475(1978)
- 6) Yoshida, H., T.Shinkawa and H.Yukawa: *ibid.*, 18, 337(1985)
- 7) Yoshida, H. and H.Yukawa: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 12, 707(1986)
- 8) *idem:ibid.*, to be published
- 9) Yoshida, H., T.Shinkawa and H.Yukawa: *J. Chem. Eng. Japan*, 13, 414(1980)
- 10) Shirato, M., T.Murase, H.Kato and S.Fukaya: *Kagaku Kogaku*, 31, 1125(1967)

第五章 スラッジ層平均含水率の近似推定法

5.1 緒 言

スラッジの脱水操作を行う場合、脱水過程におけるスラッジの含水率の経時変化および最終含水率を知ることが装置の設計を行う上で重要な問題となる。しかしながら、これまでも度々述べたように、電気浸透脱水法に関しては理論的研究が少なく、その脱水過程におけるスラッジ層の平均含水率を推定する方法についてはこれまでほとんど報告されていない。第四章においては、電気浸透脱水過程におけるスラッジ層内の含水率分布が半理論的にほぼ推定できる^{1, 2)}ことを明らかにするとともに、含水率分布から Eq. (4-34) を用いて得られる平均含水率の経時変化について検討して平均含水率が推定できることを示した。しかしながら、脱水過程における含水率分布を推定するためには、理論的に導くことの困難なスラッジの含水率と比電導度との関係について精密な実験を行う必要があり、また平均含水率を推算するまでの解析方法には煩雑な面がある。したがって、より簡便な平均含水率の推定方法を提示することは有用であると考えられる。

本章では、電気浸透脱水過程における圧縮性スラッジ層の平均含水率について理論的解析を行い、脱水終了後の平均含水率およびスラッジ層高を用いて脱水過程における平均含水率の理論的推定式を導出し、この理論式に立脚して実験式を求めることによって、定電流および定電圧の各操作条件における平均含水率の近似推算式をそれぞれ得た。また、この近似推算式による推定結果を、ゲル状ベントナイトスラッジの場合の実測結果および含水率分布の推定結果から求まる厳密な推算値と比較し、電気浸透脱水過程における平均含水率の近似推定法の妥当性について検討した^{3, 4)}。

5.2 平均含水率に関する理論的考察

5.2.1 定電流条件における平均含水率³⁾

脱水過程における圧縮性スラッジ層の平均含水率 ϵ_{wav} は、脱水時間 t におけるスラッジ層高さに実際の長さを表す $H_t[m]$ を用いれば次式のように表される。

$$\epsilon_{wav} = \frac{1}{H_t} \int_0^{H_t} \epsilon_w dH \quad (5-1)$$

したがって、第四章においては、スラッジ層の高さを表す変数として単位面積の脱水面上

に堆積した固体質量 ω [kg/m²] を用いて理論解析を行ったが、本章では、層の高さを表す変数として実際の長さ H [m]を用いて解析的検討を行った。ただし、定電流条件において生ずる2次的脱水過程^{5~7)}については前章と同様に考慮しない。

電気浸透脱水過程における圧縮性スラッジ層は、層の高さに実際の長さを表す変数 H を用いると Fig.5-1 のように示される。微小薄層 dH における電気浸透速度 u_E は、電場強度 E に比例するので次式で表される。

$$u_E = \alpha E, \quad E = dV/dH \quad (5-2)$$

ここに、 α は電気浸透度、 dV は局所電位差である。 dH における含水率（スラッジ層単位体積当りの水の占める体積分率）を ε_w 、比電導度を λ として、定電流密度 I_0 の条件において dH 部分に Ohm の法則を適用すると Eq. (5-3) となる。

$$dV/dH = I_0 / \lambda \quad (5-3)$$

したがって、高さ H における電気浸透流れの見かけの線速度 q_E は、Eqs. (5-2) および (5-3) より次式で表される。

$$q_E = \varepsilon_w u_E = \varepsilon_w \alpha I_0 / \lambda \quad (4-4)$$

また、スラッジ層の断面積を A として、 dH 部分の dt 時間における液体の物質収支式は、次

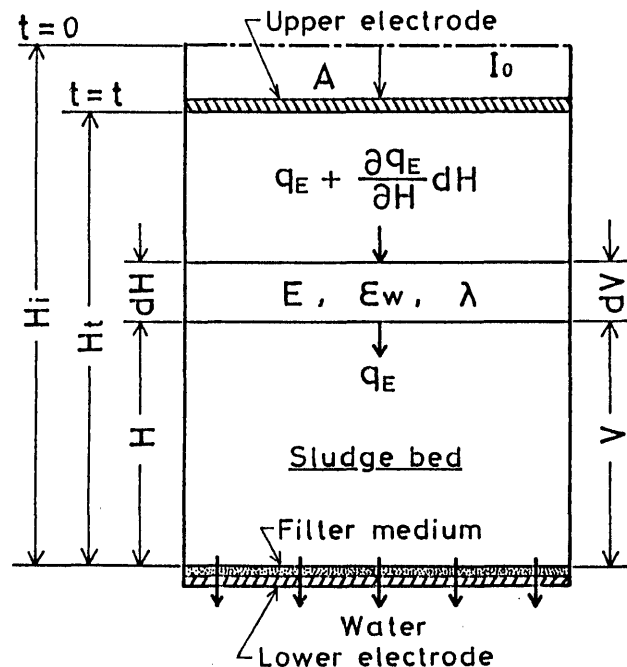


Fig.5-1 Schematic diagram of sludge by electro-osmotic dewatering under condition of constant electric current

の Eq. (5-4) より Eq. (5-5) で表される。

$$A \left(q_E + \frac{\partial q_E}{\partial H} dH \right) dt - A q_E dt = A dH \frac{\partial q_E}{\partial t} dt \quad (5-4)$$

$$\frac{\partial q_E}{\partial H} = \frac{\partial \varepsilon_w}{\partial t} \quad (5-5)$$

ここで、 λ は近似的に ε_w の関数として表すことができる¹⁾ ので、Eq. (4-4) の ε_w / λ を ε_w の関数 $f(\varepsilon_w)$ で表すと、 q_E は次式のように書き表すことができる。

$$q_E = \alpha I_0 f(\varepsilon_w) \quad (5-6)$$

したがって、Eq. (5-6) を Eq. (5-5) に代入すると次式となる。

$$\alpha I_0 \left\{ \frac{\partial f(\varepsilon_w)}{\partial H} \right\} = \frac{\partial \varepsilon_w}{\partial t} \quad (5-7)$$

また、上式を $H = 0 \sim H_t$ において積分すれば、

$$\alpha I_0 \int_0^{H_t} \left\{ \frac{df(\varepsilon_w)}{d\varepsilon_w} \cdot \frac{\partial \varepsilon_w}{\partial H} \right\} dH = \frac{d}{dt} \int_0^{H_t} \varepsilon_w dH \quad (5-8)$$

を得る。平均含水率 ε_{wav} は Eq. (5-1) のように定義されるので、Eq. (5-8) より ε_{wav} に関して Eq. (5-9) が得られる。

$$\alpha I_0 \int_0^{H_t} \left\{ \frac{df(\varepsilon_w)}{d\varepsilon_w} \cdot \frac{\partial \varepsilon_w}{\partial H} \right\} dH = \frac{d(H_t \varepsilon_{wav})}{dt} \quad (5-9)$$

ここで、初期含水率 ε_{wi} が一様なスラッジ層の初高を H_i 、脱水終了時のスラッジ層高および平均含水率をそれぞれ H_∞ 、 $\varepsilon_{wav\infty}$ として、 ε_{wav} および t について、それぞれ次のように変数変換する。

$$\psi = \frac{H_t \varepsilon_{wav} - H_\infty \varepsilon_{wav\infty}}{H_i \varepsilon_{wi} - H_\infty \varepsilon_{wav\infty}}, \quad \tau_c = \frac{\alpha I_0 t}{H_i \varepsilon_{wi} - H_\infty \varepsilon_{wav\infty}} \quad (5-10)$$

ここに、 ψ [—] は t 時間における脱水が可能な残留液量の脱水可能な全液量に対する割合、 τ_c [S/m] は脱水時間をスラッジ層の比電導度の変化として表したものである。Eq. (5-9) の左辺の積分値はスラッジ層内の残留液量の関数と考えられるので、Eq. (5-10) より次式のように書き表すことができる。

$$\int_0^{H_t} \left\{ \frac{df(\varepsilon_w)}{d\varepsilon_w} \cdot \frac{\partial \varepsilon_w}{\partial H} \right\} dH = g \left(\frac{H_t \varepsilon_{wav} - H_\infty \varepsilon_{wav\infty}}{H_i \varepsilon_{wi} - H_\infty \varepsilon_{wav\infty}} \right) = g(\psi) \quad (5-11)$$

ここに、 $g(\psi)$ は ψ の関数である。したがって、Eq. (5-9)は、Eqs. (5-10) および(5-11) より次式のように書き表されるので、結局 Eq. (5-13) のように表すことができる。

$$\alpha \log(\psi) = \left\{ \frac{d(H_t \epsilon_{wav})}{d\psi} \right\} \left(\frac{d\psi}{d\tau_c} \right) \left(\frac{d\tau_c}{dt} \right) \quad (5-12)$$

$$g(\psi) = d\psi/d\tau_c \quad (5-13)$$

Eq. (5-13) は、 ψ と τ_c が関数関係にあることを示し、 ψ と τ_c の関係を実験的に求めれば、含水量の経時変化すなわち $H_t \epsilon_{wav}$ と t の関係式を得ることができる。

5.2.2 定電圧条件における平均含水率⁴⁾

印加電圧 V_0 の定電圧条件における脱水過程の圧縮性スラッジ層は、定電流条件の場合と同様に、層の高さに実際の長さを表す変数 H を用いると、Fig.5-2 のように示される。

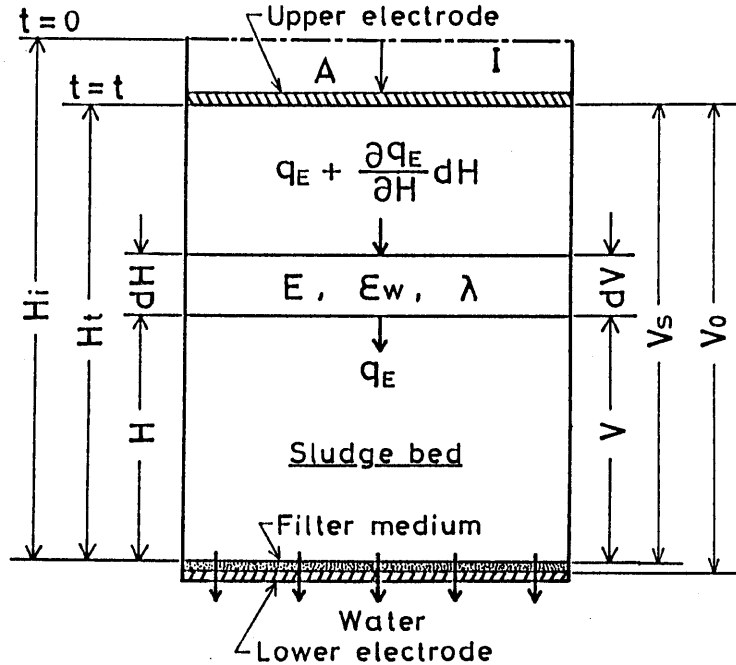


Fig.5-2 Schematic diagram of sludge by electroosmotic dewatering under condition of constant voltage

時間 t における電流密度を I として、微小薄層 dH 部分に Ohmの法則を適用すると、

$$E = dV/dH = I/\lambda \quad (5-14)$$

となり、上式を $H = 0 \sim H_t$ において積分すれば次式を得る。

$$I = V_s / \int_0^{H_t} \frac{dH}{\lambda} = V_s / \int_0^{H_t} \frac{dH}{h(\epsilon_w)} \quad (5-15)$$

ここに、 V_s はスラッジ層全体に加わる一定の実効電圧で、 $h(\epsilon_w)$ は ϵ_w の関数である。定

電圧条件においても、 dH 部分の dt 時間における液体の物質収支式は次式で表される。

$$\frac{\partial q_E}{\partial H} = \frac{\partial \varepsilon_w}{\partial t} \quad (5-5)$$

また、Eq. (5-6) より、定電圧条件では $q_E = \alpha I f(\varepsilon_w)$ で表されるので、これを Eq. (5-5) に代入して、 $H = 0 \sim H_t$ において積分すると、

$$\alpha I \int_0^{H_t} \left\{ \frac{df(\varepsilon_w)}{d\varepsilon_w} \cdot \frac{\partial \varepsilon_w}{\partial H} \right\} dH = \frac{d}{dt} \int_0^{H_t} \varepsilon_w dH \quad (5-16)$$

となる。したがって、Eqs. (5-15) および(5-16) より、 ε_{wav} に関して次式を得る。

$$\alpha V_s \left[\int_0^{H_t} \left\{ \frac{df(\varepsilon_w)}{d\varepsilon_w} \cdot \frac{\partial \varepsilon_w}{\partial H} \right\} dH \right] / \left[\int_0^{H_t} \frac{dH}{h(\varepsilon_w)} \right] = \frac{d(H_t \varepsilon_{wav})}{dt} \quad (5-17)$$

ここで、定電流条件の場合と同様に、スラッジ層の初期含水率 ε_{wi} および初高 H_i と、脱水終了時の平均含水率 $\varepsilon_{wav\infty}$ およびスラッジ層高 H_∞ を用いて、定電圧条件では、 ε_{wav} および t についてそれぞれ次のように変数変換を行う。

$$\psi = \frac{H_t \varepsilon_{wav} - H_\infty \varepsilon_{wav\infty}}{H_i \varepsilon_{wi} - H_\infty \varepsilon_{wav\infty}}, \quad \tau_v = \frac{\alpha V_s t}{H_i \varepsilon_{wi} - H_\infty \varepsilon_{wav\infty}} \quad (5-18)$$

ここに、 ψ は、定電流条件の場合と同様に、 t 時間における脱水可能な残留液量の全脱水可能液量に対する割合、 $\tau_v [m^{1/2}]$ は脱水時間を一種のスラッジ層高の変化を表す変数としたものである。定電圧条件において、Eq. (5-17) の左辺のそれぞれの積分値はスラッジ層内の残留液量 ψ の関数と考えることができるので、Eq. (5-17) は、Eq. (5-18) より Eq. (5-19) のように書き換えられる。

$$\alpha V_s G(\psi) = \left\{ \frac{d(H_t \varepsilon_{wav})}{d\psi} \right\} \left(\frac{d\psi}{d\tau_v} \right) \left(\frac{d\tau_v}{dt} \right) \quad (5-19)$$

ここに、 $G(\psi)$ は ψ の関数である。したがって、Eq. (5-17) は、Eqs. (5-18) および(5-19) より、次式のような定電流条件の場合と同形の式で表すことができる。

$$G(\psi) = d\psi/d\tau_v \quad (5-20)$$

以上の結果より、定電圧条件では、 ψ と τ_v の関数関係を実験的に求めれば、 $H_t \varepsilon_{wav}$ と t との関係式が得られる。

5.3 平均含水率の近似推定

5.3.1 定電流条件における近似推算式³⁾

実験試料として用いたベントナイトスラッジの諸性質および実験条件を Table 5-1 に示した。スラッジ層内の初期含水率 ε_{wi} が一様なゲル状ベントナイトスラッジを用いて定電流条件のもとで得られた脱水量 Q_E およびスラッジ層高 H_t の経時変化の実測値より、Fig. 5-3 に示したようなプロットによって、2 次的脱水過程における Q_E の変化を無視して、近似的に脱水終了時の全脱水量 $Q_{E\infty}$ およびスラッジ層高さ H_{∞} の値を推定することができる。 $Q_{E\infty}$ および H_{∞} の推定値と、これらの値を用いて $\varepsilon_{wav\infty} = (AH_i \varepsilon_{wi} - Q_{E\infty}) / AH_{\infty}$ より算出される脱水終了時の平均含水率 $\varepsilon_{wav\infty}$ の値を Table 5-2 に示した。 $Q_{E\infty}$ を用いて液量についての物質収支式が次の Eq. (5-21) で表されるので、Eq. (5-10) の ψ および τ_0 はそれぞれ Eq. (5-22) のように表される。

Table 5-1 Properties of sludge and experimental conditions

| A [cm ²] | ρ_p [kg/m ³] | α [m ² /(V·s)] | I_0 [A/m ²] | ε_{wi} [-] | H_i [cm] |
|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------|
| 40.72 | 2767 | 8.09×10^{-9} | 24.6 | 0.946 | 6.26 |

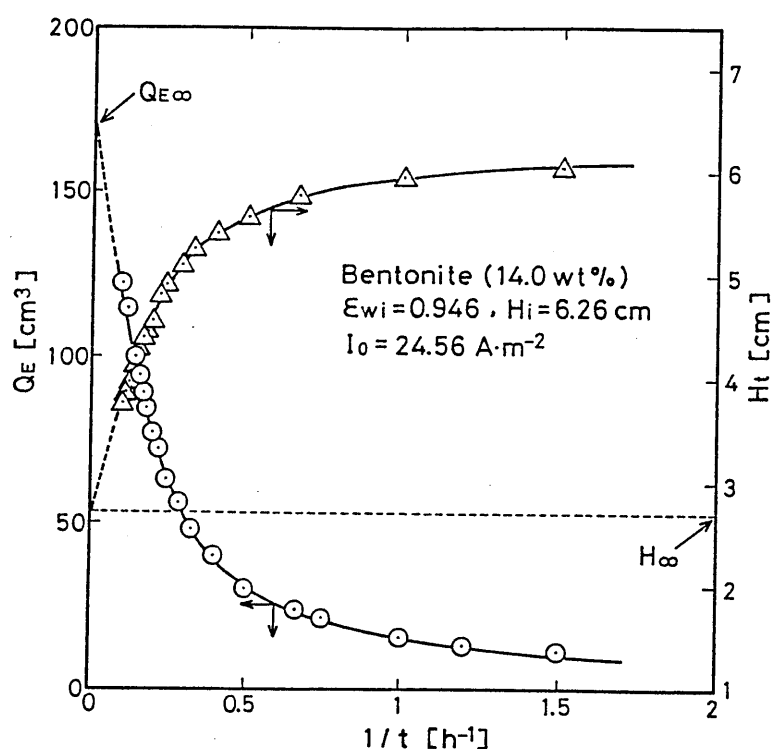


Fig.5-3 Evaluation of $Q_{E\infty}$ and H_{∞}

| Table 5-2 Values used for calculation of $\epsilon_{wav\infty}$ | | | | |
|---|----------------------|-----------------------|-------------------------------|---------------------|
| $Q_{E\infty}$ [cm ³] | H_{∞} [cm] | H_{∞}' [cm] | $\epsilon_{wav\infty}$ [-] | t_{∞} [h] |
| 170 | 2.70 | 2.08 | 0.644 | 11.8 |

$$AH_i \epsilon_{wi} = AH_t \epsilon_{wav} + Q_E = AH_{\infty} \epsilon_{wav\infty} + Q_{E\infty} \quad (5-21)$$

$$\psi = (Q_{E\infty} - Q_E)/Q_{E\infty}, \quad \tau_c = (A \alpha l_0 / Q_{E\infty}) t \quad (5-22)$$

したがって、 Q_E の実測値とTables 5-1 および 5-2 に示した A, α, l_0 および $Q_{E\infty}$ の値を用いて Eq. (5-22) における ψ と τ_c の関係をプロットすると Fig.5-4 のようになり、Eq. (5-13) は測定範囲内で $g(\psi) = -4.88$ となるので、本実験条件における ψ と τ_c の関係は近似的に次の実験式で表される。

$$\psi = 1 - 4.88 \tau_c \quad (5-23)$$

上式において、 $\psi=0$ のときの τ_c すなわち Fig.5-4 における $\tau_{c\infty}$ 値より、Eq. (5-22) から Table 5-2 に示した脱水終了時間* t_{∞} が得られる。この $\tau_{c\infty}$ より求まる t_{∞} の値は、2 次的な脱水過程については無視して求めた $Q_{E\infty}$ の近似推定値を用いて得た値であり、近似的に 1 次的な脱水期間の終了時間になると考えられる。また、この t_{∞} の値が Fig.5-3 で示される結果と相違する理由は、Fig.5-4 における ψ の値が τ_c の増加と

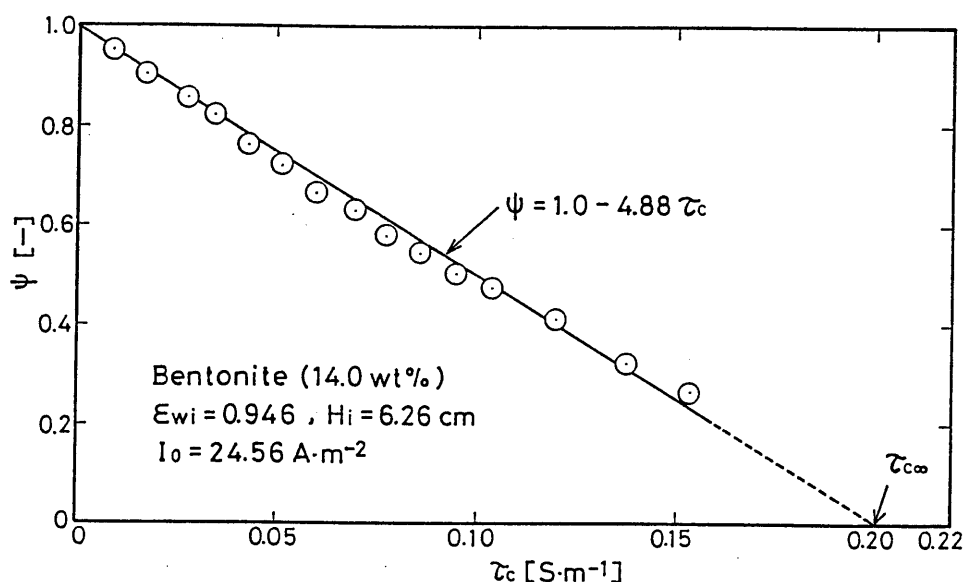


Fig.5-4 Plot of ψ vs. τ_c

* 脱水終了時間は、第二章では t_e で表したが、本章においては t_{∞} で表した。

ともに徐々に 0 に漸近するようになるためであると推察される。

Eqs. (5-10) および (5-23) より、 $H_t \epsilon_{wav}$ と t の関係は次式となる。

$$H_t \epsilon_{wav} = H_i \epsilon_{wi} - 4.88 \alpha I_0 t \quad (5-24)$$

ここで、平均含水率の経時変化すなわち ϵ_{wav} と t の関係を求めるために、Eq. (5-24) における時間 t の変数である H_t を近似的に次のようにして求める。Fig.5-5 は、実測値 H_t と、 Q_E の実測値を用いて $H_t' = H_i - Q_E/A$ より求まる H_t の推算値 H_t' の経時変化を示したものである。図中には、Fig.5-3 で得た H_∞ と、 H_t' と同様に $Q_{E\infty}$ の推定値より求まる H_∞ の推算値 H_∞' も示した。Fig.5-5 の結果は、脱水の進行に伴ってしだいに不飽和スラッジ層が生成することを示唆しており、 H_t と H_t' の差 ($H_t - H_t'$) が t に比例して大きくなると見なすと次の Eq. (5-25) が成立する。

$$(H_t - H_t') / (H_\infty - H_\infty') = t / t_\infty \quad (5-25)$$

なお、上式は実測値に対して約 $\pm 20\%$ の誤差範囲内ではほぼ良い一致を示した。また、 H_t' は、 $H_t' = H_i - (H_i \epsilon_{wi} - H_t \epsilon_{wav})$ なる関係があるのでこれを Eq. (5-25) に代入すると、 H_t と t の関係は次のように表すことができる。

$$H_t = \{H_i (1 - \epsilon_{wi}) + (H_\infty - H_\infty') t / t_\infty\} / (1 - \epsilon_{wav}) \quad (5-26)$$

したがって、Eqs. (5-24) および (5-26) より、 ϵ_{wav} と t の関係は Eq. (5-27) のように表され、Eq. (5-27) が、定電流条件における平均含水率 ϵ_{wav} の経時変化を表す近似推算式となる。

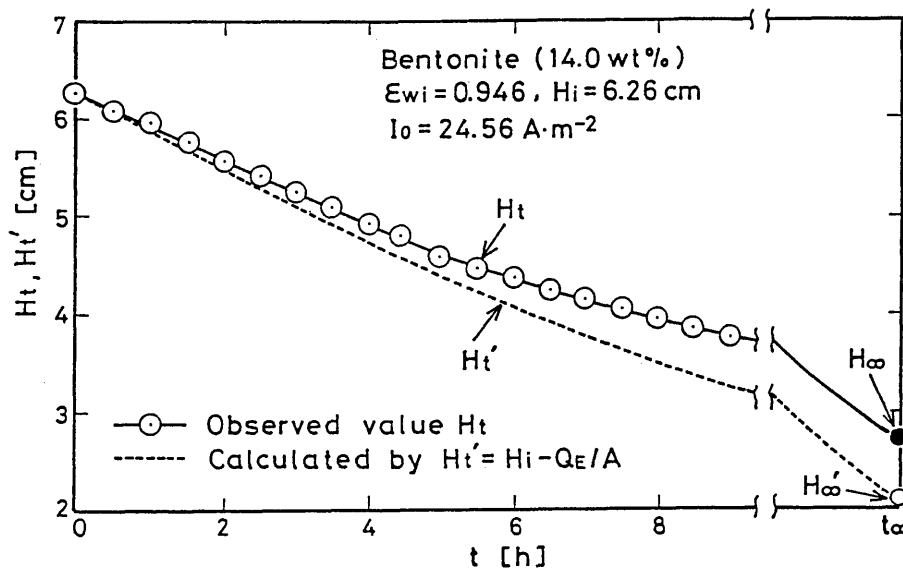


Fig.5-5 Relations between H_∞ , H_∞' and t

$$\frac{\varepsilon_{wav}}{1 - \varepsilon_{wav}} = \frac{H_i \varepsilon_{wi} - 4.88 \alpha I_0 t}{H_i (1 - \varepsilon_{wi}) + \{(H_{\infty} - H_{\infty}')/t_{\infty}\}t} \quad (5-27)$$

5.3.2 定電圧条件における近似推算式⁴⁾

Table 5-3 には、定電圧条件の場合の実験条件を示した。定電圧条件では、印加電圧に対応する限界脱水量を $Q_{E\infty}$ とすると、 $Q_{E\infty}$ を用いて Eq. (5-21) から、Eq. (5-18) における ψ および τ_v はそれぞれ Eq. (5-28) のように表される。

$$\psi = (Q_{E\infty} - Q_E)/Q_{E\infty} \quad , \quad \tau_v = (A \alpha V_s / Q_{E\infty}) t \quad (5-28)$$

Table 5-3 に、 $Q_{E\infty}$ および H_{∞} の実測値と、これらの値を用いて算出した $\varepsilon_{wav\infty}$ の値を示した。これより、 Q_E の経時変化の実測値および Eq. (5-28) の計算に必要とされる諸数値を用いて算出した ψ と τ_v の関係を Fig.5-6 のようにプロットするとほぼ直線関係が得られた。したがって、Eq. (5-20) が示す ψ と τ_v の関数関係は、それぞれの V_0 の条件のもとで脱水初期を除けば次のような実験式で近似的に表される。

Table 5-3 Experimental conditions and values used for calculation

| V_0 [V] | V_s [V] | ε_{wi} [-] | H_i [cm] | $Q_{E\infty}$ [cm ³] | H_{∞} [cm] | H_{∞}' [cm] | $\varepsilon_{wav\infty}$ [-] | t_{∞} [h] |
|--------------|--------------|---------------------------|---------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------|---------------------|
| 5 | 2.2 | 0.882 | 5.40 | 53 | 4.68 | 4.10 | 0.740 | 21.1 |
| 10 | 6.3 | 0.882 | 5.40 | 43 | 4.79 | 4.34 | 0.775 | 4.4 |

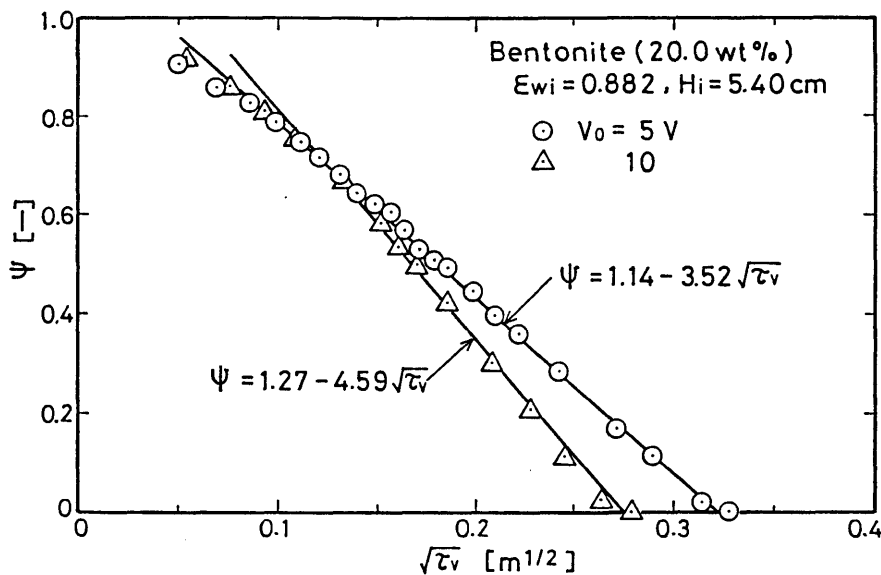


Fig.5-6 Plots of ψ vs. $\sqrt{\tau_v}$

$$\left. \begin{aligned} \psi &= a - b\sqrt{\tau_v} \\ (V_0 = 5V : \quad a &= 1.14 \quad , \quad b = 3.52) \\ (V_0 = 10V : \quad a &= 1.27 \quad , \quad b = 4.59) \end{aligned} \right\} (5-29)$$

ただし、 a, b は実験定数であり、Eq. (5-20) の $G(\psi)$ は、上式より $G(\psi) = b^2 / \{2(\psi - a)\}$ となる。Eq. (5-29) において $\psi = 0$ のときの τ_v 値より、Eq. (5-28) から脱水終了時間 t_{∞} が求められる。このようにして得た t_{∞} の値を Table 5-3 に示した。Eqs. (5-18) および (5-29) より、定電圧条件における $H_t \epsilon_{wav}$ と t の関係は次式となる。

$$H_t \epsilon_{wav} = aH_i \epsilon_{wi} - (a-1)H_{\infty} \epsilon_{wav\infty} - b\sqrt{(H_i \epsilon_{wi} - H_{\infty} \epsilon_{wav\infty}) \alpha V_s t} \quad (5-30)$$

ここで、 ϵ_{wav} と t の関係を求めるために、次のような H_t と t の関係式を用いる。すなわち、前述したように、定電流条件下でのベントナイトスラッジの脱水過程における H_t と t の関係は、脱水時間の経過に伴ってスラッジ層内にはしだいに不飽和層が形成されるので近似的に次式で表される³⁾。

$$H_t = \{H_i(1 - \epsilon_{wi}) + (H_{\infty} - H_{\infty}') t/t_{\infty}\} / (1 - \epsilon_{wav}) \quad (5-26)$$

ここに、 H_{∞}' は、 $H_{\infty}' = H_i - Q_{E\infty}/A$ で与えられる。定電圧条件下においても、定電流条件の場合と同様に、 Q_E および H_t の実測結果は時間の経過とともに不飽和スラッジ層が形成されることを示唆するので、Eq. (5-26) を適用することができると考えられる。したがって、Eqs. (5-26) および (5-30) より ϵ_{wav} と t の関係が次式のように表され、Eq. (5-31) が、定電圧条件における平均含水率の経時変化を表す近似推算式となる。

$$\frac{\epsilon_{wav}}{1 - \epsilon_{wav}} = \frac{aH_i \epsilon_{wi} - (a-1)H_{\infty} \epsilon_{wav\infty} - b\sqrt{(H_i \epsilon_{wi} - H_{\infty} \epsilon_{wav\infty}) \alpha V_s t}}{H_i(1 - \epsilon_{wi}) + \{(H_{\infty} - H_{\infty}')/t_{\infty}\}t} \quad (5-31)$$

5.3.3 実測値と推算値との比較

1) 定電流条件の場合³⁾

Fig. 5-7 には、定電流条件における ϵ_{wav} の経時変化について実測値と Eq. (5-27) による計算値（実線）との比較結果を示した。また、同図中には、含水率 ϵ_w のスラッジ層内分布の推算値から Eq. (5-1) を用いて得た計算結果を破線で示した。図より、Eq. (5-27) による計算値は、Eq. (5-1) による破線の計算結果に対して $t \approx 6h$ の経過時間まで良く一致し、また、実測値に対してはほぼ良好な一致を示すことがわかる。したがって、 ϵ_{wav} の近似推算式 Eq. (5-27) はほぼ妥当であるといえる。なお、この近似推算式が適

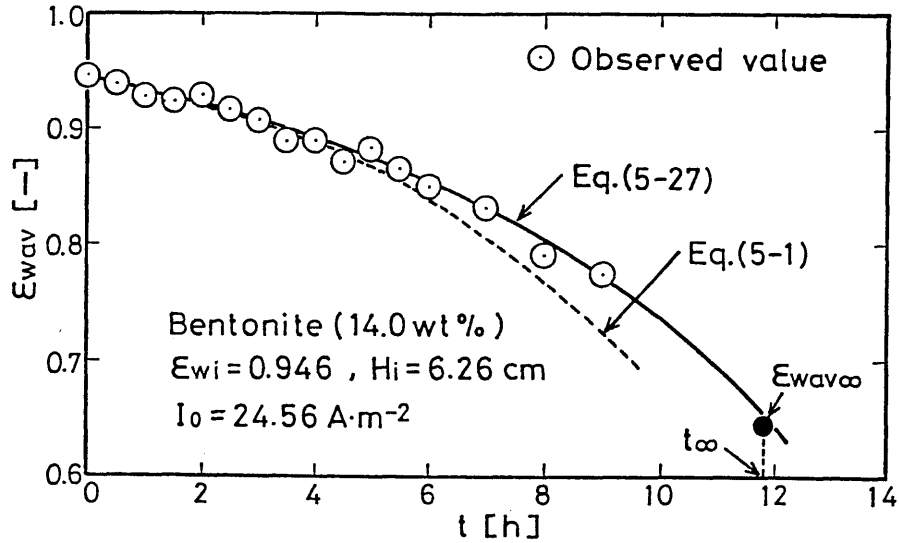


Fig.5-7 Variation of ϵ_{wav} with t under condition of constant electric current

用できる時間範囲は、前述したように、1 次的脱水期間の推定値と考えられる t_{∞} までである。

2) 定電圧条件の場合⁴⁾

定電圧条件における ϵ_{wav} の経時変化について、実測値と Eq. (5-31) による計算値との比較結果を Fig.5-8 に示した。定電流条件の場合と同様に、 ϵ_w 分布の推定結果から Eq. (5-1) を用いて得た計算結果を破線で示した。図より、近似推算式 Eq. (5-31) によ

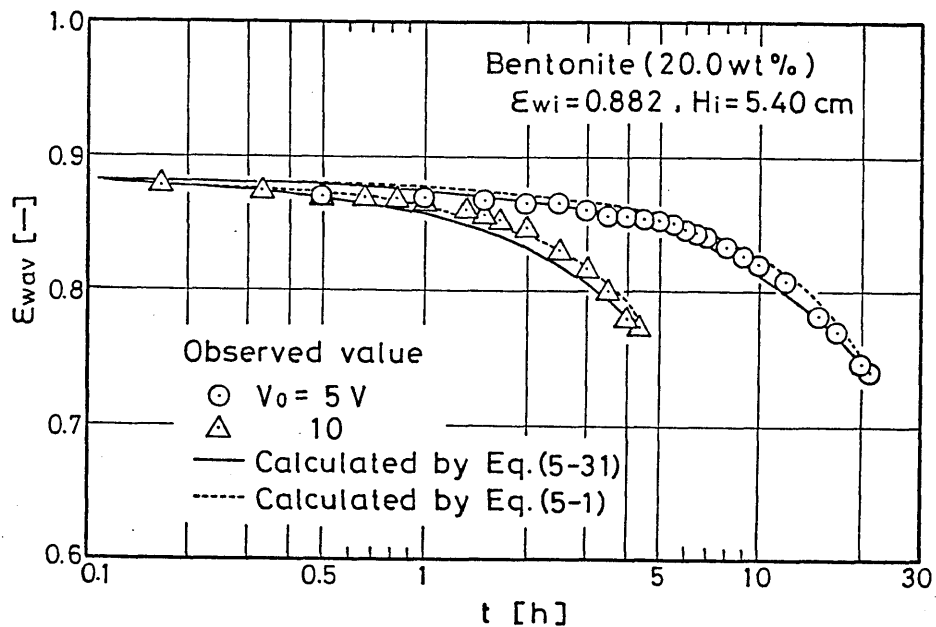


Fig.5-8 Variations of ϵ_{wav} with t under condition of constant voltage

る実線の計算結果は、それぞれの V_0 の条件において Eq. (5-1) による破線の計算結果とほぼ一致し、またこれらの計算値は実測値とも良好な一致を示していることがわかる。したがって、Eq. (5-31) は、定電圧条件における ε_{wav} の近似推算式としてほぼ妥当であるといえる。

以上の結果より、定電流および定電圧の各操作条件下での電気浸透脱水過程における平均含水率 ε_{wav} の経時変化は、Eqs. (5-22) および(5-28) で表される ψ と τ 。および ψ と τ_v の関数関係をそれぞれ実験的に求め、スラッジ層高 H_t の経時変化を近似的に Eq. (5-26) で表すことによって、本実験試料および本実験条件の範囲ではほぼ近似推定できることが明らかとなった。

5.4 総 括

定電流および定電圧の各操作条件下での電気浸透脱水過程における圧縮性スラッジ層の平均含水率について理論的解析を行い、スラッジ層の最終脱水状態すなわち脱水終了時における全脱水量およびスラッジ層高を用いて脱水過程における平均含水率の理論的推定式を導出し、この理論式に立脚して実験式を求めることによって、各操作条件における平均含水率の経時変化の近似推算式をそれぞれ得るとともに、ゲル状ベントナイトスラッジの場合の実験結果を用いて、電気浸透脱水過程におけるスラッジ層の平均含水率の近似推定法について検討し、次のような結果を得た。

1) 電気浸透脱水過程における圧縮性スラッジ層の平均含水率に関する理論推定式として、定電流条件では Eq. (5-13)、定電圧条件では Eq. (5-13) と同形の Eq. (5-20) でそれぞれ表される。

2) 理論推定式に立脚して、脱水終了時における全脱水量およびスラッジ層高を用いて平均含水率についての実験式を各操作条件について得ることができる。また、脱水過程におけるスラッジ層高の経時変化が近似的に Eq. (5-26) のように表されるので、実験式と Eq. (5-26) を用いると、各操作条件における平均含水率の近似推算式がEqs. (5-27) および(5-31) のように表され、これらの推算式によって脱水過程における平均含水率の経時変化が本実験条件の範囲ではほぼ近似推定できる。

Literature cited

- 1) Yoshida, H. and H. Yukawa: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 12, 707 (1986)
- 2) *idem*: Preprints of Gunma Meeting of The Soc. of Chem. Engrs., Japan, p. 347 (E118), Minakami (1986)
- 3) *idem*: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, to be published
- 4) *idem*: *ibid.*, to be published
- 5) Yukawa, H., H. Yoshida, K. Kobayashi and M. Hakoda: *J. Chem. Eng. Japan*, 9, 402 (1976)
- 6) Yoshida, H., T. Shinkawa and H. Yukawa: *ibid.*, 13, 414 (1980)
- 7) *idem*: *ibid.*, 18, 337 (1985)

第六章 電気浸透脱水法の応用および 電気浸透脱水装置

6.1 緒 言

電気浸透脱水法は、主として粘土スラッジや選鉱プロセスで発生するさまざまな微細粒子のスラッジに対して応用されてきた^{1~3)}が、その工学的研究は極めて少なく、また電力を消費する操作すなわちエネルギー消費型の操作であるためか、広範に実用されるまでには至っていない。しかしながら、最近になって、下水、廃水処理における活性汚泥法によって発生する難脱水性の余剰汚泥の脱水処理に電気浸透脱水法を利用した研究が行われるようになり^{4~6)}、実用的な電気浸透脱水装置に関する報告も散見されるようになってきた^{6~8)}。したがって、余剰活性汚泥に対する電気浸透脱水法の有用性について明らかにするとともに、電気浸透脱水操作および脱水装置などに関する知見を提示し、電気浸透脱水を実施する上での問題点を指摘することは、電気浸透脱水法を工業的に応用する場合の指針を与える上で有用であると考えられる。

本章では、活性汚泥法における難脱水性の余剰汚泥に対する電気浸透脱水の有効性を明らかにする⁹⁾とともに、電気浸透脱水法の改善策として、真空脱水と電気浸透脱水の併用操作について検討しその有用性を示した^{9, 10)}。また、回分式装置で得た知見に基づき、大量のスラッジを工業的規模で連続処理することを目的として、ベルトコンベヤを用いた連続式電気浸透脱水法を提案しその試作装置および試験結果を示した¹¹⁾。

6.2 活性汚泥法における余剰汚泥の電気浸透脱水⁹⁾

近年、下水、廃水処理施設が普及し整備されるに伴い、活性汚泥法により多量に排出される余剰汚泥の処理、処分が大きな社会的問題となっており、より効率的で経済的な汚泥の脱水処理法の開発が強く要望されている。

従来、下水処理場における余剰汚泥の脱水処理法としては、主に、真空ろ過、圧搾、遠心分離などの機械的脱水法が用いられている。しかしながら、下水汚泥のような生物処理によって排出される汚泥は、微細な生物体や有機性分解生成物のようなコロイド粒子を含んでいるので、一般に難脱水性で、従来の機械的操作では脱水が極めて困難であり、脱水効率および経済性などの点から改善が期待されている。

前章においては、ベントナイトのような難脱水性のゲル状スラッジに対して電気浸透脱水法が特に有効であることを示したが、本節では、通常下水汚泥中のコロイド性粒子が水に対して負の電位をもっていることに着目し、活性汚泥法における余剰下水汚泥に対する電気浸透脱水法の有用性について、定電圧および定電流の両操作条件のもとで電場を加えた場合の下水汚泥の電気浸透脱水速度について検討するとともに、第二章で提案した粒子充填層内の電気浸透流れに基づく脱水モデルより得た電気浸透脱水式^{12, 13)}の下水汚泥に対する適用性について検討を行った。また、下水汚泥の沈降速度に及ぼす電場の影響についても検討した。

6.2.1 実験装置および方法

脱水実験には Fig.2-3 に示した回分式電気浸透脱水装置とほぼ同様の装置を用いた。汚泥充填槽は内径64mmの亚克力樹脂製円筒で、上部電極（陽極）には、電解による生成ガスを除去するために白金多孔板を使用した。また、14meshのステンレス製金網をろ紙の下側に密着し下部電極として設置した。

活性汚泥法における余剰汚泥は、群馬県桐生市環境衛生センターのものを使用した。この下水汚泥の含水率は約99.5wt%であったが、脱水実験には、これを所定の時間真空ろ過し、沈殿濃縮によって得られる程度の濃度（初期含水率98.1wt%）に調製したものをを用いた。調製した汚泥 322cm³ を Fig.2-3 のSの部分に入れ、脱水開始時の上下両電極間距離は10cmとした。汚泥の電位は負であるので、上部電極を正、下部電極を負として、直流安定化電源によって定電圧および定電流の各操作条件のもとで電場を加え、脱水量の経時変化を測定した。脱水の進行とともに汚泥層の高さはしだいに減少するので、上部電極は汚泥層表面に常時接触するように調節した。なお、このとき汚泥層の圧縮は行っていない。また、脱水終了後の汚泥の湿乾質量を測定して最終含水率を求めた。

沈降実験に使用した装置は脱水実験の場合とほぼ同様であるが、汚泥層底面に板状下部電極を設置し脱水を行わないようにした構造のものである。初期含水率99.5wt%の下水汚泥を沈降管に入れて、電極間距離を20cmに設置固定し、沈降界面高さの時間的变化を測定した。なお、沈降実験の場合は、電気泳動速度と重力沈降速度の向きが一致するように、上部電極を負、下部電極を正として電場を加えた。

6.2.2 結果および考察

実験に使用した下水汚泥の重力および真空脱水による脱水量 Q_T の時間的变化をFig.6 -1

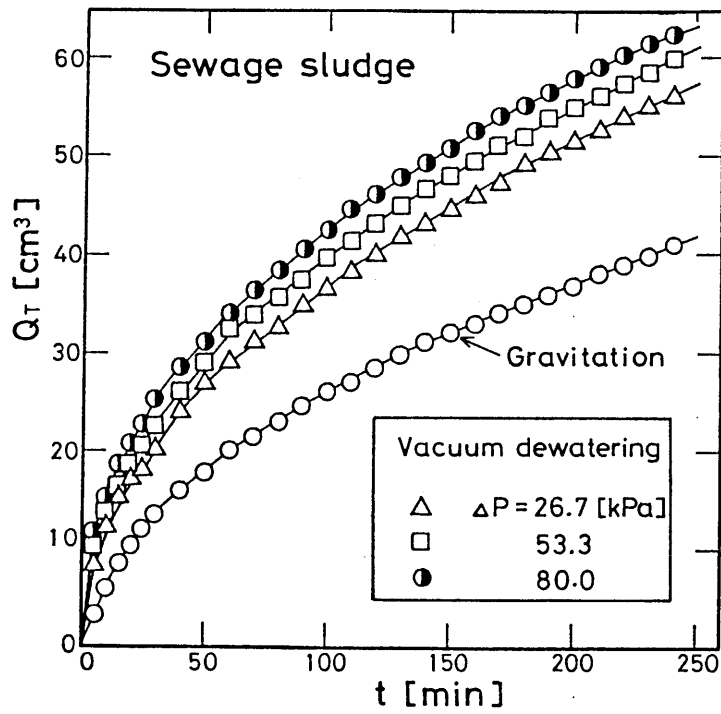


Fig.6-1 Relations between Q_T and t under vacuum and gravitation of sewage sludge

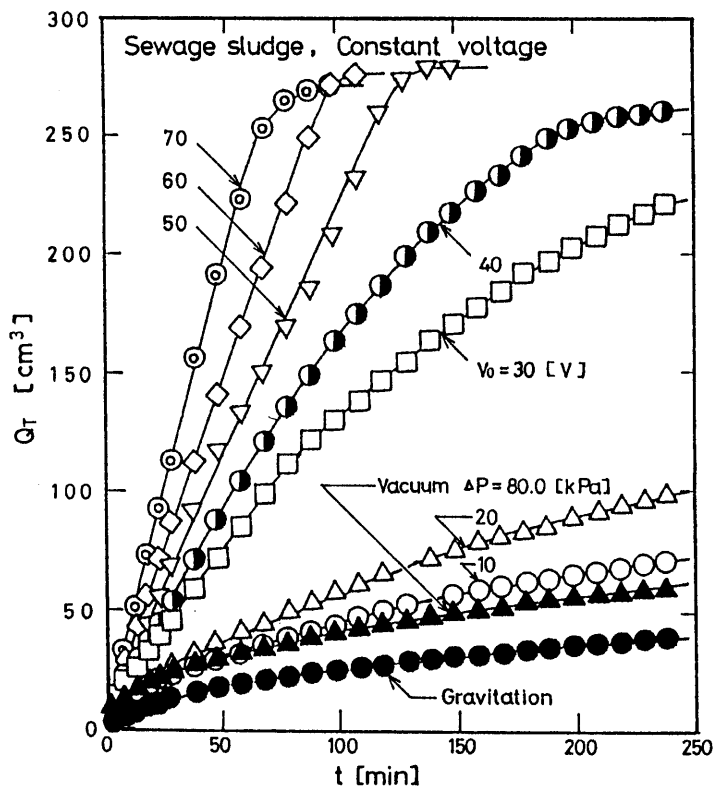


Fig.6-2 Effect of V_0 under constant voltage on relation between Q_T and t for sewage sludge

に示した。図より、真空脱水の場合は、真空度 ΔP を増大しても脱水速度に顕著な差は見られず、下水汚泥の真空脱水は大変困難であることがわかる。これは、下水汚泥の性状から、脱水初期にろ材が閉塞（目詰まり）するためであると考えられる。

Fig.6-2 は、定電圧条件において電場を加えたときの脱水量 Q_T と時間 t との関係について、印加電圧 V_0 をパラメータとして示したものである。図中には、重力脱水および真空脱水（ $\Delta P = 80.0$ kPa）の結果も比較のために示した。この図の結果は、下水汚泥に対して電気浸透脱水が極めて有効であることを示しており、脱水速度は V_0 の増加とともに著しく増大する。しかしながら、下水汚泥の場合にも、最終脱水量は V_0 を増加していくと逆に減少する傾向が見られる。これは、前章で述べたように、印加電圧が大きくなると上部電極近傍において特に著しい脱水状態となり、この部分の電気抵抗が局部的に急増してスラッジ層全体の脱水効率が低下するためである。電場下の最終平均含水率は、最も小さい場合で 83.0wt% であった。また、印加電圧が高い場合にはジュール熱によるスラッジの温度上昇が認められた。

Fig.6-3 には、定電流条件における Q_T と t との関係を、電流密度 I_0 をパラメータとして示した。定電流条件においては、 I_0 の増加とともに脱水速度が増大することがわかる。また、図より、 I_0 の各条件とも、 Q_T がある値に達すると急激に増大してから一定の値に漸近する傾向を示すことがわかる。これは、定電流条件においては、脱水の進行とともに前述の上部電極近傍の電気抵抗の急増によって印加電圧が増大し、電力消

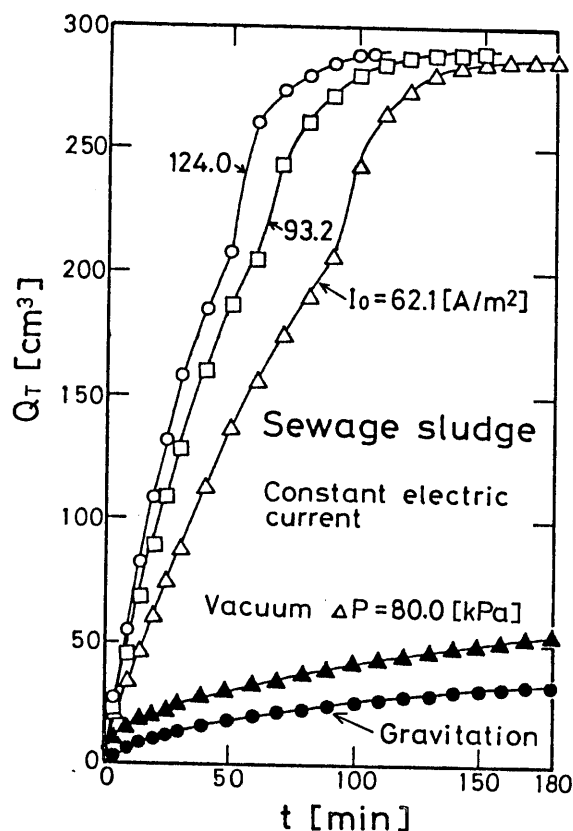


Fig.6-3 Effect of I_0 under constant electric current on relation between Q_T and t for sewage sludge

費量の大きい2次的な脱水過程^{12, 14)}に移行するためである。したがって、下水汚泥の場合も、定電圧および定電流の各操作条件によって脱水過程が異なり、定電流条件では電流密度に依存せずにはほぼ一定の限界含水率となり、最終平均含水率は約80.1wt%で、定電圧条件の場合よりいくぶん小さい値となった。なお、定電流条件ではジュール熱による汚泥の温度上昇が比較的大きいので、蒸発乾燥による脱水効果も若干あると考えられる。

次に、粒子充填層内の電気浸透流れに基づく脱水モデルを用いて得た各操作条件における電気浸透脱水量 Q_E 、電力消費量 W および脱水終了時間 t_e についての電気浸透脱水式は、Table 6-1のように要約されるので、これらの理論式の下水汚泥に対する適用性について検討した。

Fig.6-2の結果より、脱水量 Q_T から同一時刻における重力脱水量を減じて近似的に電気浸透脱水量 Q_E とし、定電圧条件における Q_E と t との関係を両対数紙上にプロットしたのが Fig.6-4 である。 V_0 が30, 50, 70 Vの場合について例示した。図中の実線はEq. (2-32)

Table 6-1 Design equations of electroosmotic dewatering ^{12,13)}

Constant voltage condition

$$Q_E = \frac{A(\epsilon_{1W} - \epsilon_{2W})}{\{(\lambda_1/\lambda_2)(1 - \epsilon_{1W}) - (1 - \epsilon_{2W})\}} \left[\sqrt{2\alpha V_0 \left(\frac{\epsilon_{1W}}{\epsilon_{1W} - \epsilon_{2W}} \right) \left\{ \frac{\lambda_1}{\lambda_2} (1 - \epsilon_{1W}) - (1 - \epsilon_{2W}) \right\}} t + H_0^2 - H_0 \right] \quad (2-32)$$

$$W = \frac{A\lambda_1 V_0 (\epsilon_{1W} - \epsilon_{2W})}{\alpha \epsilon_{1W} \{(\lambda_1/\lambda_2)(1 - \epsilon_{1W}) - (1 - \epsilon_{2W})\}} \left[\sqrt{2\alpha V_0 \left(\frac{\epsilon_{1W}}{\epsilon_{1W} - \epsilon_{2W}} \right) \left\{ \frac{\lambda_1}{\lambda_2} (1 - \epsilon_{1W}) - (1 - \epsilon_{2W}) \right\}} t + H_0^2 - H_0 \right] \quad (2-37)$$

$$t_e = \frac{(\epsilon_{1W} - \epsilon_{2W})}{2\epsilon_{1W}(1 - \epsilon_{2W})} \left\{ \frac{\lambda_1(1 - \epsilon_{1W})}{\lambda_2(1 - \epsilon_{2W})} + 1 \right\} \frac{H_0^2}{\alpha V_0} \quad (2-40)$$

Constant electric current condition

$$Q_E = A\epsilon_{1W} \alpha \frac{I_0}{\lambda_1} t \quad (2-5)$$

$$W = \frac{AI_0^2}{\lambda_1} \left\{ \frac{\epsilon_{1W}}{\epsilon_{1W} - \epsilon_{2W}} \left(\frac{1 - \epsilon_{1W}}{\lambda_2} - \frac{1 - \epsilon_{2W}}{\lambda_1} \right) \frac{\alpha I_0}{2} t^2 + H_0 t \right\} \quad (2-12)$$

$$t_e = \left\{ 1 - \frac{(1 - \epsilon_{1W})}{(1 - \epsilon_{2W})} \left(\frac{\epsilon_{2W}}{\epsilon_{1W}} \right) \right\} \frac{\lambda_1 H_0}{\alpha I_0} \quad (2-18)$$

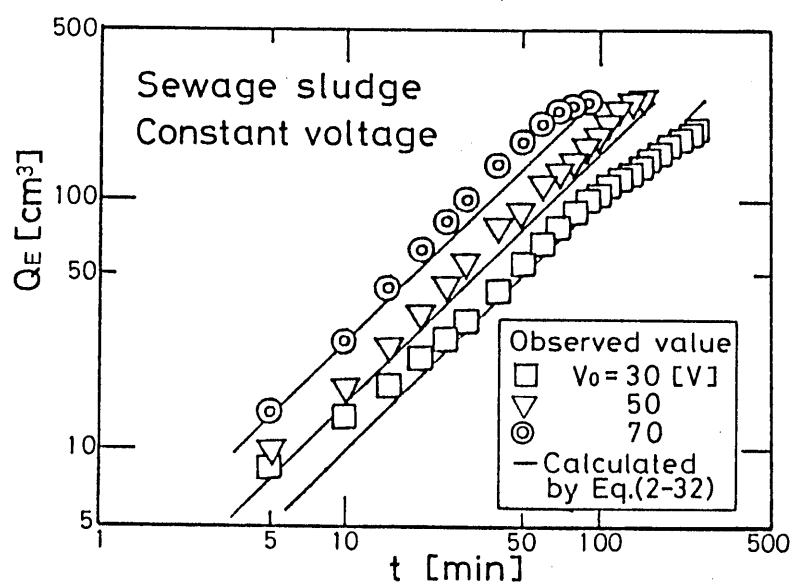


Fig.6-4 Relation between Q_E and t for sewage sludge under condition of constant voltage

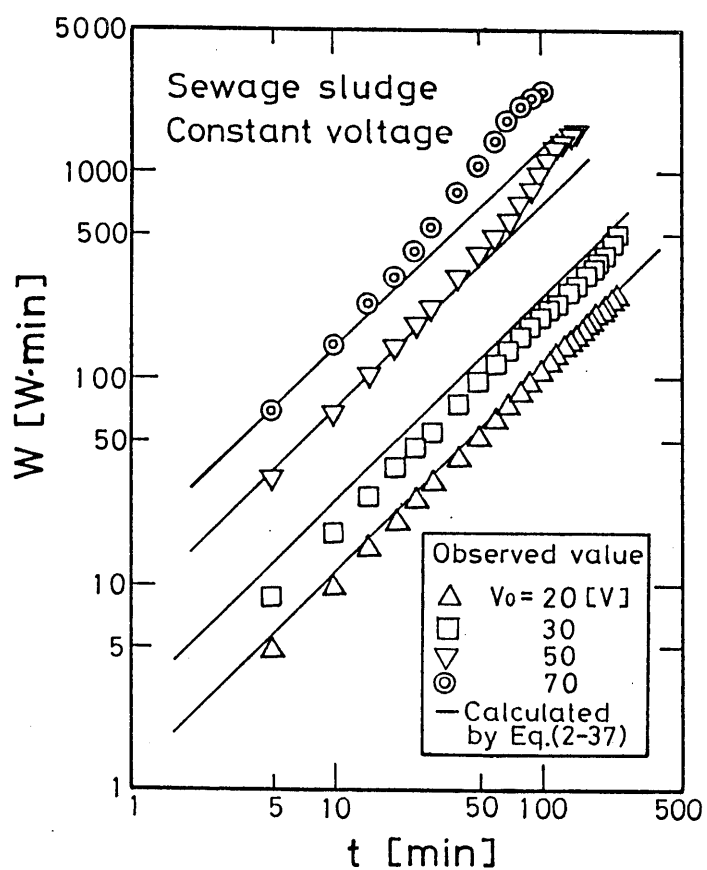


Fig.6-5 Relation between W and t for sewage sludge under condition of constant voltage

による計算値で、線の終点が Eq. (2-40) より得られるそれぞれの脱水終了時間 t_e を表している。実測値に対して Eq. (2-32) による計算値は脱水終了時近傍を除いて比較的良く一致しており、また t_e の計算値もほぼ妥当な値を示した。

Fig.6-5 は、定電圧条件における電力消費量 W と脱水時間 t との関係を両対数紙上で例示したものである。図中の実線は Eq. (2-37) による計算値で、実線の終点は同様に計算値 t_e を示している。 W と t の関係においても、計算値は実測値に対して脱水終了時近傍を除いて約 $\pm 30\%$ の範囲内ではほぼ一致した。

Figs.6-6 および 6-7 は、定電流条件の場合における Q_E 対 t および W 対 t の関係の実測値とEqs. (2-5)および(2-12) による計算値の比較を行ったものである。これらの結果より、前述の2次的脱水過程の部分を除けば定電流条件においても、それぞれの計算値は実測値とほぼ良好な一致を示すことがわかる。また、Fig.6-7 の結果は、2次的脱水過程では電力消費量 W が急増することを示している。

以上の結果より、下水汚泥の脱水速度に及ぼす電気浸透による促進効果は顕著であり、粒子充填層内の電気浸透流れに基づく脱水モデルより得た電気浸透脱水式は、下水汚泥に対してもほぼ適用できることがわかった。また、Fig.6-8 は、下水汚泥の沈降速度に及ぼす電場の影響について、定電圧条件における沈降界面高さ H_t の時間的变化を印加電圧 V_0 をパラメータとして例示したものであるが、図から明らかなように、電場を加えることによって沈降速度も著しく促進されることがわかった。

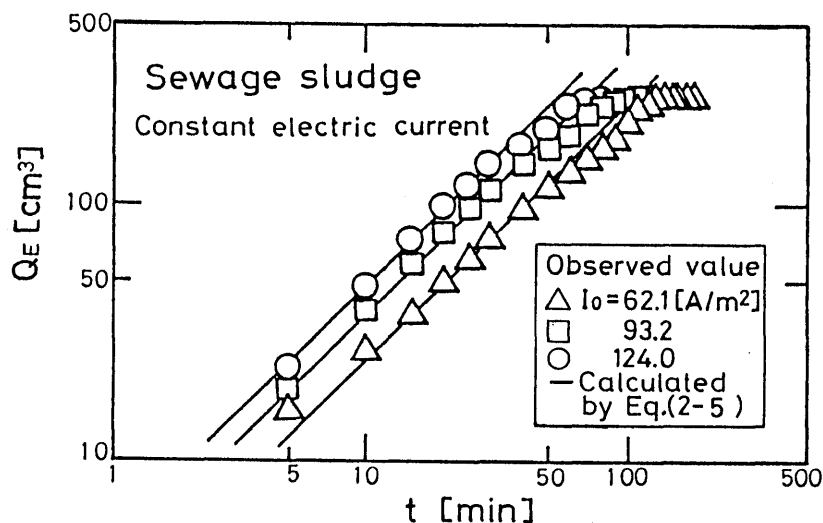


Fig.6-6 Relation between Q_E and t for sewage sludge under condition of constant electric current

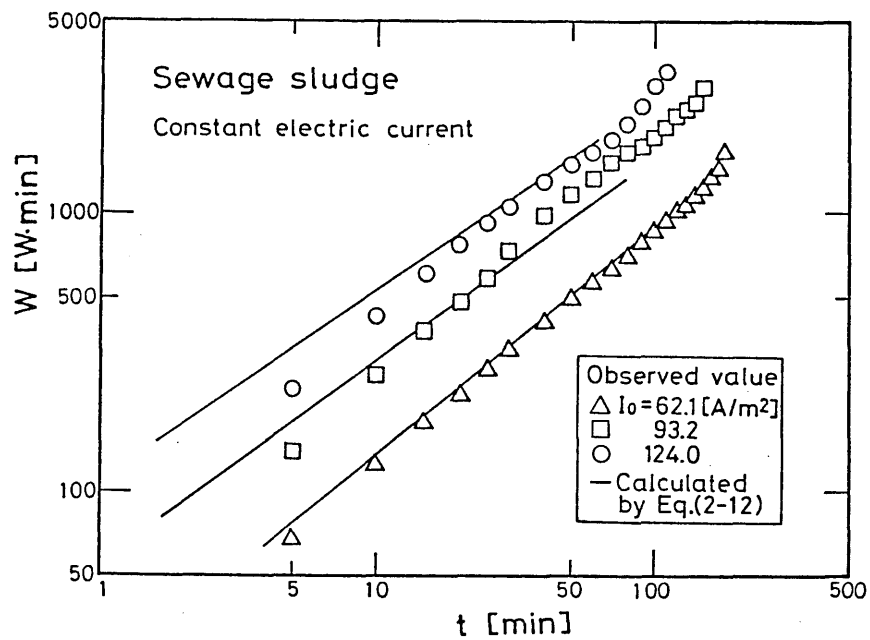


Fig.6-7 Relation between W and t for sewage sludge under condition of constant electric current

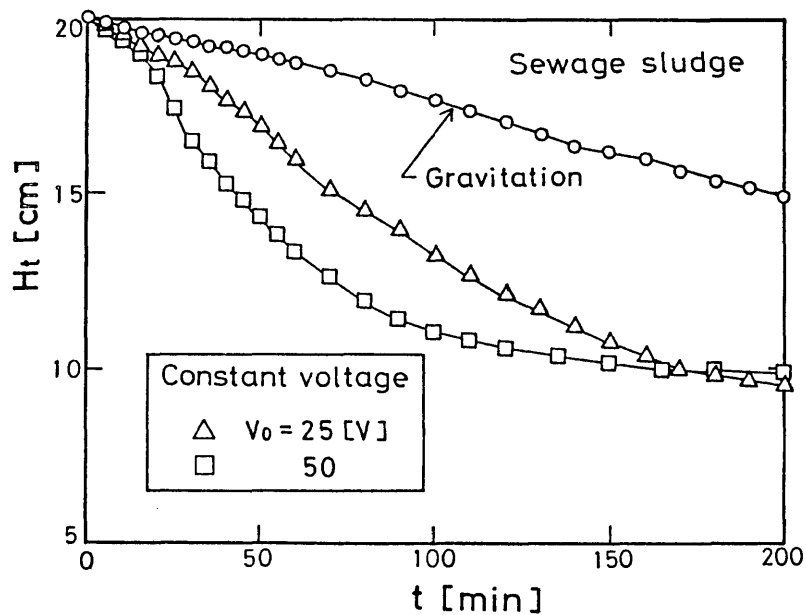


Fig.6-8 Settling curves of sewage sludge in a D.C. electric field

6.3 真空脱水を併用した電気浸透脱水^{9, 10)}

電気浸透脱水法では、脱水に伴って電極近傍におけるスラッジ層が著しい脱水状態となり、含水率が激減することによって不飽和スラッジ層が形成されるので局部的に電気抵抗が増大するため、印加電圧のほとんどが脱水された部分で降下するようになり、スラッジ層全体の効率の良い脱水が困難となる。したがって、その改善策として、機械的脱水法の1つである真空脱水と併用した場合の電気浸透脱水操作について主に定電圧条件のもとで実験的検討を行い、スラッジ層内の含水率分布および電位差分布の実測結果から、その有用性について考察した。

難脱水性のゲル状ベントナイトスラッジについて、定電圧条件下での電気浸透脱水に真空脱水を併用して得られた全脱水量 Q_T と脱水時間 t との関係を Fig.6-9 に示した。図中には、真空脱水だけの場合と電気浸透脱水だけの場合（破線）の結果も示した。図より、真空脱水に比べて電気浸透脱水はゲル状スラッジに対して極めて効果的であることがわかる。また、真空脱水を併用した電気浸透脱水の場合には、脱水速度（ dQ_T/dt ）および Q_T の最終値すなわち限界脱水量とも電気浸透脱水だけの場合より大きくなることわかる。このような結果は、定電流条件において真空脱水を併用した電気浸透脱水操作の場合にも認

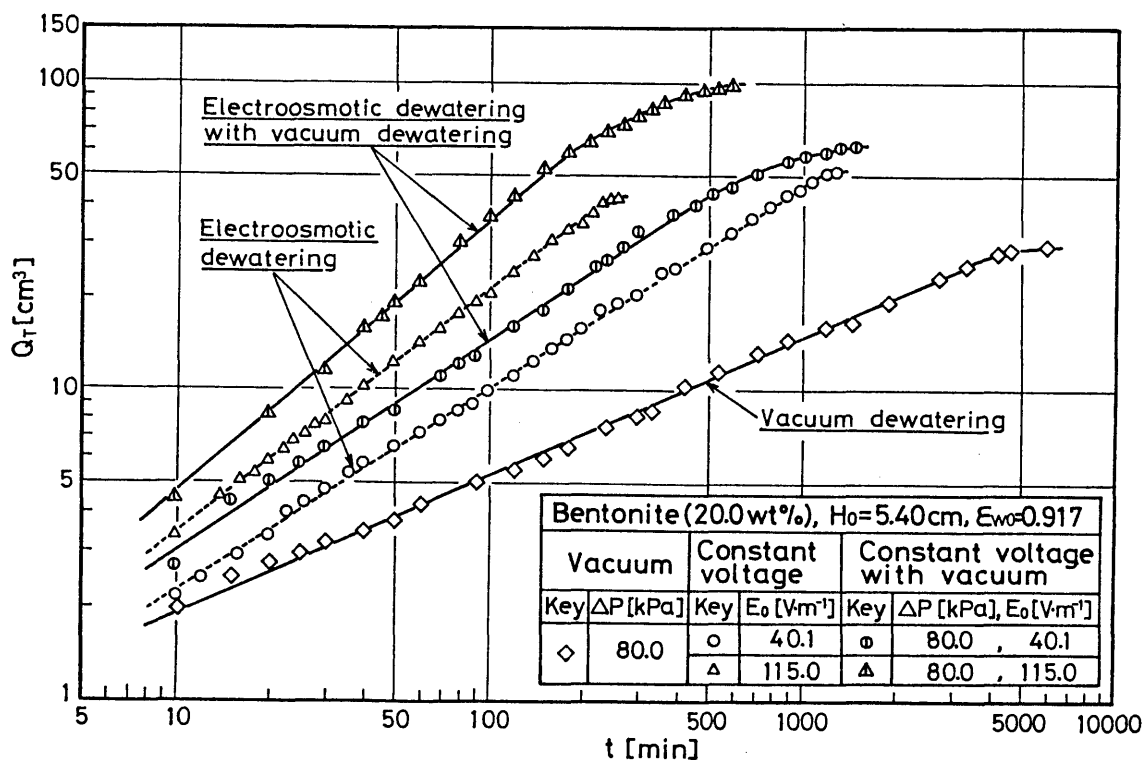


Fig.6-9 Relation between Q_T and t under condition of constant voltage combined with vacuum

められた。

真空脱水を併用した定電圧条件下での電気浸透脱水について、脱水終了時におけるスラッジ層内の含水率 ε_w の最終分布および脱水過程におけるスラッジ層内の電位差分布の時間的变化を、前章と同様に図示すると、それぞれFigs.6-10および 6-11のように例示される。Fig.6-10において、真空脱水だけの場合の最終含水率分布は、スラッジ層下部においてわずかに ε_w の値が減少する傾向を示している。また、電気浸透脱水だけの場合と比べて真空脱水を併用した電気浸透脱水では、層上面近傍の ε_w の値はほとんど同じであるが、層全体を通じて ε_w が小さくなることを示している。この結果より、電気浸透脱水に真空脱水を併用するとスラッジ層全体の脱水効率を向上できると考えられる。Fig.6-11における電位差分布の実測結果は、実線が電気浸透脱水に真空脱水を併用した場合であり、破線が電気浸透脱水だけの場合である。図より、スラッジ層上部における電位差こう配は、同じ経過時間では真空脱水を併用した電気浸透脱水の方が電気浸透脱水だけの場合より小さくなることがわかる。これは、電気浸透脱水と真空脱水の併用操作では、印加電圧のスラッジ層上部における降下が電気浸透脱水だけの場合ほど過度にならないことを示しており、真空脱水を併用することによって、脱水に伴う上部電極近傍における電気抵抗

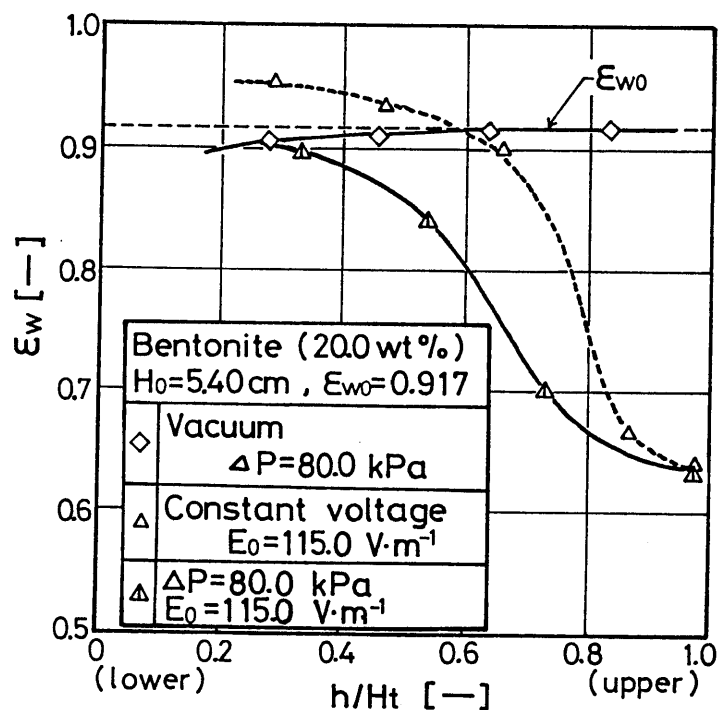


Fig.6-10 Final distribution of ε_w under condition of constant voltage combined with vacuum

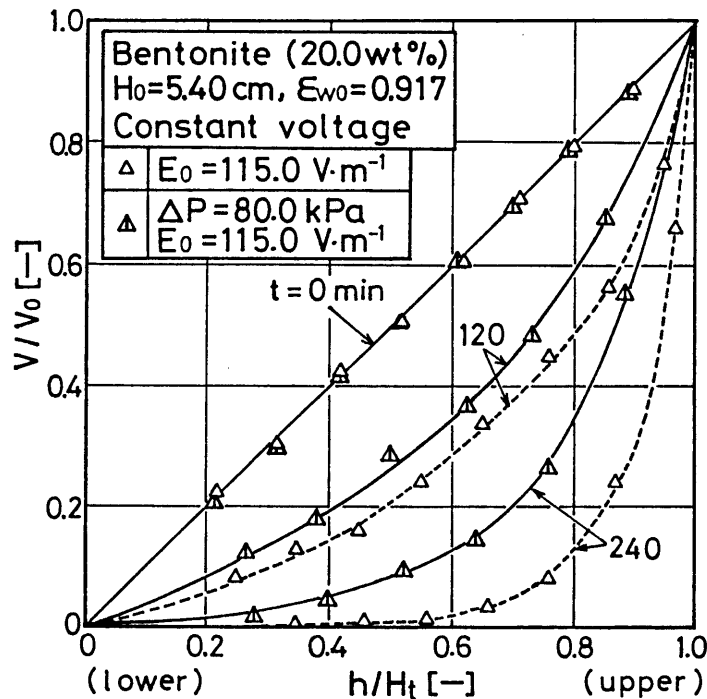


Fig.6-11 Variation of electric potential difference distribution with t under condition of constant voltage combined with vacuum

の大きい不飽和スラッジ層の形成が抑制されることを示唆している。電気浸透によってスラッジ層全体の効率の良い脱水を行うためには、層内の電場強度を一様にする 것이望ましい。したがって、真空脱水を併用した電気浸透脱水操作は、Fig.6-10に示されたように、スラッジ層全体の脱水により効果的であり、電気浸透脱水効率の向上が期待できる有用な1つの方法であると考えられる。

Fig.6-12は、前述の活性汚泥法における余剰下水汚泥に対して、定電圧条件下で電場を加えると同時に真空脱水を併用した場合の Q_T と t の関係の結果である。印加電圧 V_0 が50および70Vの場合について真空度 ΔP をパラメータとして例示したものである。図より、下水汚泥の場合には真空脱水を併用しても電気浸透による脱水が支配的であるが、真空脱水を併用することによってわずかながら脱水速度および限界脱水量が増大することがわかる。この結果から、電気浸透脱水はろ材の閉塞によるろ材抵抗の増大の影響はほとんど受けず、ろ材における電気浸透効果によって脱水が可能となることがわかる。また、 Q_T の限界値は V_0 および ΔP の操作条件にはほとんど依存せずにはほぼ一定の値となり、電気浸透脱水に真空脱水を併用した場合の下水汚泥の最終平均含水率は78.3wt%で、電気浸透脱水だ

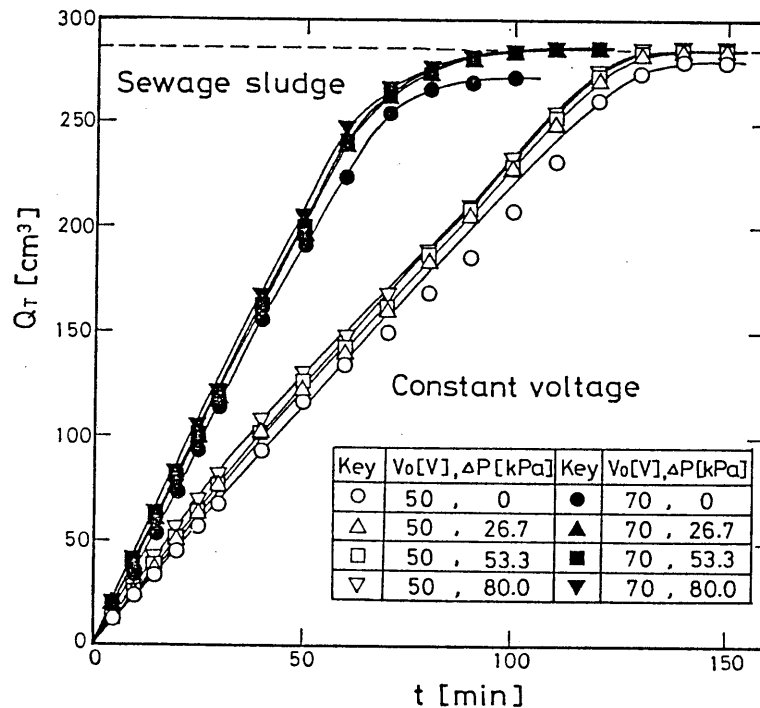


Fig.6-12 Relation between Q_T and t for sewage sludge under condition of constant voltage combined with vacuum

けの場合よりいくぶん含水率を小さくすることができる。これより、印加電圧を大きくして適当な真空度で真空脱水を併用すれば脱水速度および脱水量を増大することができる。

以上、真空脱水を併用した場合の電気浸透脱水操作の有用性について述べたが、効率の良い電気浸透脱水は、脱水に伴う不飽和スラッジ層の形成を抑制してスラッジ層内の電場強度をできるだけ一様に維持することによって行うことができる。したがって、電気浸透脱水法の改善策としては、真空脱水だけでなく、加圧脱水あるいは圧搾脱水などの機械的脱水法についても上記の趣旨に沿うように適切に併用すれば、より効果的な電気浸透脱水が実施できる可能性をもっていると考えられる。

6.4 ベルトコンベヤ方式によるスラッジの連続式電気浸透脱水装置の試作試験¹¹⁾

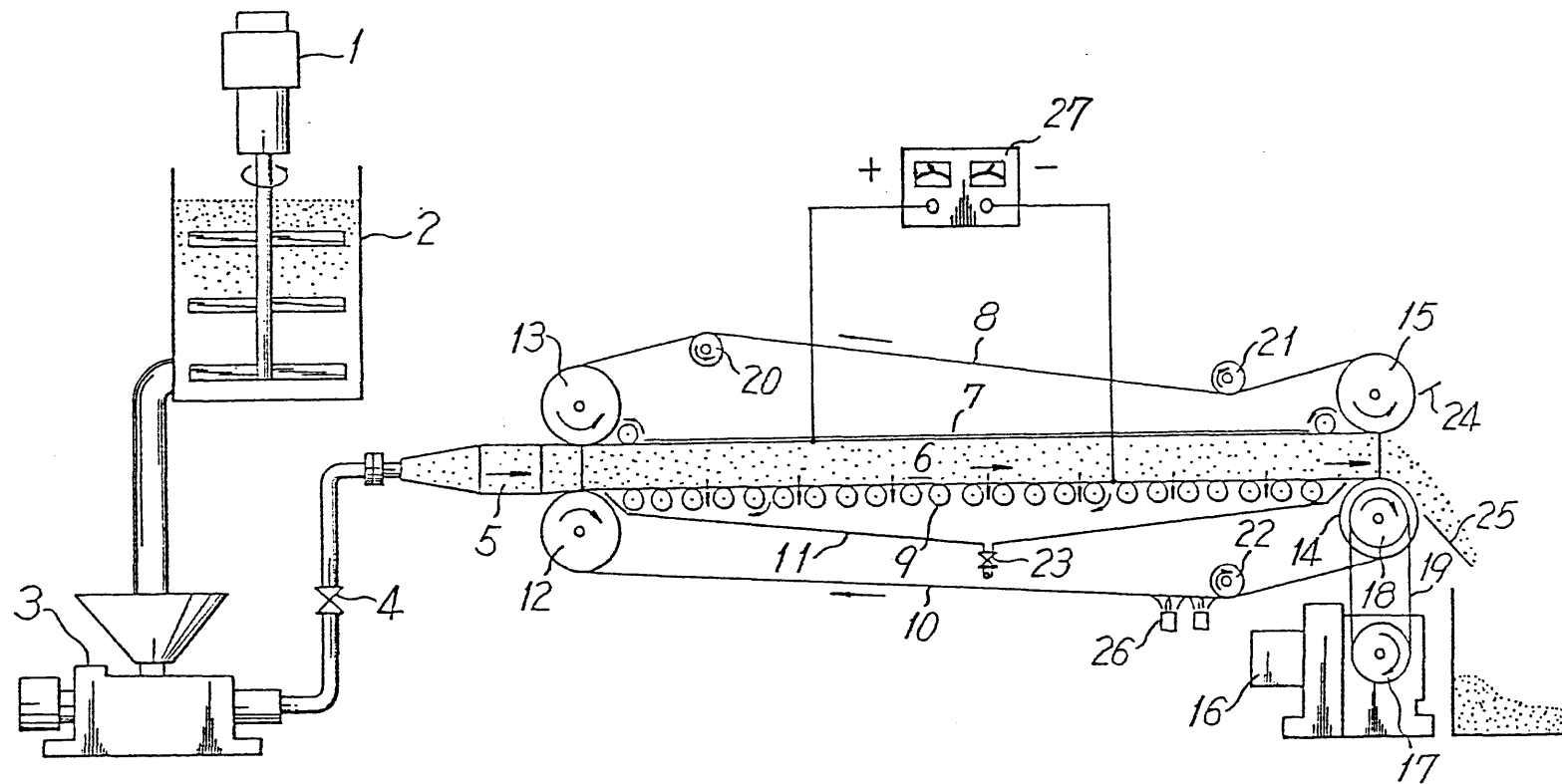
6.4.1 試作装置および方法

電気浸透脱水法をスラッジの脱水操作に応用するに当っては種々の装置構造や方法が考えられるので、これまでいくつかの形式の実用的な電気浸透脱水装置が研究開発されてきた^{1~3, 6, 7, 15)} が、実用化されている例は少なく、工業的に広範に利用されるまでには至

っていない。このような現状を踏まえて、回分式装置を用いた場合の電気浸透脱水操作に関する理論的並びに実験的検討結果に基づき、大量のスラッジを工業的規模で連続的に処理することを目的として、ベルトコンベヤを利用した連続式の電気浸透脱水装置を考案しその試作試験を行った。

Fig.6-13は試作装置の概要である。本装置の要点は、スラッジを横長の上下2つの板状ベルト間に連続的に送入し、上下部ベルトがスラッジ移送方向と同じ方向に、かつスラッジ移送速度と上下部ベルトの走行速度が同一で循環走行するベルトコンベヤを備え、これらの上下部ベルトを電極として直流電場を印加することによって、スラッジが両電極間を入口側より出口側に向かって進行する間に電気浸透作用によって下部ベルトの下方に脱水される。脱水濃縮されたスラッジは、ベルトコンベヤの後部先端において連続的にはく離し回収されるような機構になっている。

Fig.6-13について詳細に説明すると、攪はん機1を取り付けた貯槽2内で均一にされたスラッジは、移送ポンプ3によって流量調節弁4およびスラッジ導入部5を経て、上下2つの横長の板状ベルト8および10を平行に設置したベルトコンベヤ部の電気浸透脱水区間6に送入される。試作した装置の脱水区間は、長さ 1,850mm，高さ 30mm，幅（奥行き）100mmである。上部ベルト8には厚さ 0.1mmの銅板あるいはステンレス板を電極として使用し、下部ベルト10は、固液分離用のろ布（SP #7）およびその下側に接して16meshの銅製あるいはステンレス製金網を重ねて一体にした構造のベルトで、適当数の絶縁性塩ビ樹脂製ローラー（直径 30mm）9で支持されている。なお、下部ベルトとして炭素繊維のような導電性ろ材を用いることができれば構造上および製作上簡単になる。これらの上下2つのベルト状電極間を連続的に移送されるスラッジに直流電源27によって電場を印加する。すなわち、Fig.6-14にベルトコンベヤ部分の脱水区間6における電気回路図を示したように、電源27によって脱水区間6を走行する導電性の上下部ベルト8および10に導線28を接触させ、脱水区間を移送されるスラッジに直流電場を印加する。ここで、導線28は、上下部ベルトの両電極間に与える電位差を一樣とするため、図示するようにスラッジ移送方向に適当な間隔で、またスラッジ移送方向に対して直角方向すなわち奥行き方向にも適当な間隔でそれぞれのベルトに接触させる。なお、図中の29および30は直流電圧計および直流電流計を示す。電極の極性は、下部ベルト下方の受水器11の方へ脱水液が流出するように固体粒子の電位の極性に応じて決める。上下各ベルトの起動は、アクリル樹脂管の上に



1: Agitator 2: Storage tank 3: Sludge pump 4: Regulative valve 5: Induction section
 6: Dewatering section 7: Plate supporter 8: Upper belt 9: Insulated roller supporter 10: Lower belt
 11: Liquid acceptor 12, 13, 14, 15: Rotary drum 16: Variable speed driver 17, 18: Pulley 19: V-belt
 20, 21, 22: Roller strainer 23: Drainage valve 24, 25: Scraper 26: Washer 27: Regulated D.C. power supply

Fig.6-13 Outline of continuous-type electroosmotic dewatering apparatus

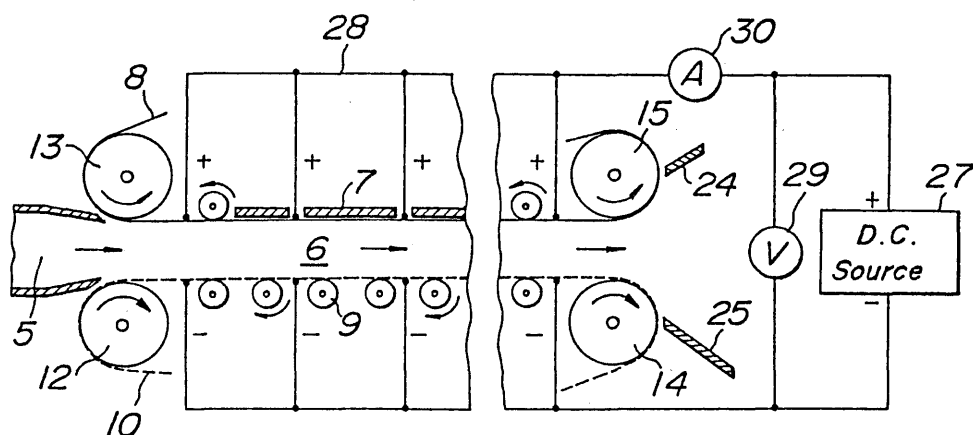


Fig.6-14 Diagram of electric circuit in electroosmotic dewatering section

ゴム板を巻いて滑りにくくした回転ドラム12, 13, 14および15を駆動用無段変速機16に連結して行った。脱水が進行するとともに上部電極板近傍のスラッジは含水率が著しく減少する¹⁰⁾ので上部ベルトに粘着するようになり、下部ベルト近傍のスラッジに比較して流動性が悪くなる。したがって、上下部ベルトとスラッジの相対移動速度が零になるようにして、スラッジにせん断力が作用しないようにベルトを循環走行させる。なお、スラッジ移送速度はスラッジの物性および印加される電場強度によって決まる脱水に必要な滞留時間を与えるものでなければならない。脱水区間の入口部に連続的に送入されたスラッジが、脱水区間の出口部に向かって進行する間に電気浸透作用と重力作用とによって下部ベルトを通して下方に脱水される。脱水濃縮されたスラッジは、脱水区間の出口部外側においてかき取り器24および25によってベルトコンベヤから自動連続的にはく離され排出される。また、下部ベルトは脱水区間の出口部で反転した後に洗浄器26によって水洗される。

本試作装置は、受水器を真空室とすれば、電気浸透脱水に真空脱水を併用して脱水効果を促進することが可能である。また、Fig.6-15に示したように、真空室31を適当数に分割して設置することによって、各真空室ごとに異なる真空度すなわちスラッジの含水率の減少に応じて出口部方向により大きい真空度を与えるようにすれば、より効果的な真空脱水が併用できる。さらに、Fig.6-15に示されるように、上下部ベルト間隔すなわち脱水区間の高さがスラッジ移送方向に向かって小さくなるように上部ベルトに傾斜をつけることによって、移送されるスラッジにしだいに増加する圧搾力が加わるようにすれば、電気浸透脱水に圧搾脱水を併用することも可能である。このような構造では、スラッジ移送方

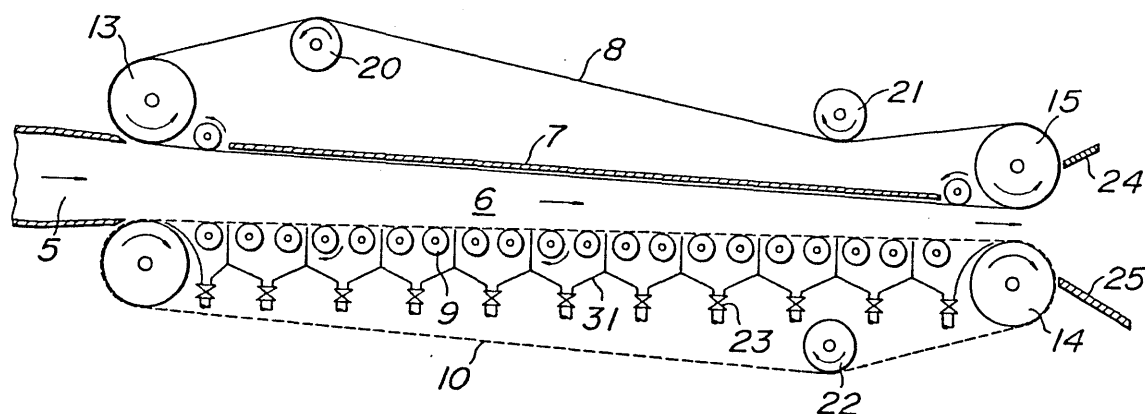


Fig.6-15 Diagram of improvement of electroosmotic dewatering section

向へ電極間距離がしだいに小さくなるので、定電圧条件ではしだいに増加する電場強度を与えることができ、より効率の良い電気浸透脱水を行うことができる。

以上述べたように、本装置は電気浸透によるスラッジの脱水をベルトコンベヤ方式で連続的に実施できるものであり、装置に多少の改良を加えるならば、真空脱水および圧搾脱水の機械的脱水操作をそれぞれ別個にあるいは両方を同一装置で併用でき、さらに脱水効果が高められるものである。

6.4.2 試作装置による試験結果

Fig.6-13に示した試作装置（ベルトコンベヤ方式によるスラッジの連続式電気浸透脱水装置）を用いて、白色クレー（製紙用白色粘土）スラッジの脱水実験を行った結果の1例を以下に示す。

使用した白色クレー粒子は密度 $2,350\text{kg/m}^3$ ，平均粒径 $9.7\mu\text{m}$ で、水に対する電位が負であるので、電極の極性は、上部ベルトを正，下部ベルトを負とした。また、スラッジの初期固体濃度は重力沈降で得られる最大濃度より若干高濃度の70.0wt%とし、流量は $9.06\text{cm}^3/\text{s}$ で連続的に供給した。ベルトコンベヤの走行速度とスラッジ移送速度は 0.302cm/s で、スラッジの脱水区間滞留時間は 10.3min であった。定電圧条件下で上下両電極間に直流電圧10および 20V （電場強度はそれぞれ 333.3 および 666.7V/m となる。）を印加して電気浸透脱水を行った。

Fig.6-16は、脱水区間全体の脱水流量 $q_T[\text{m}^3/\text{s}]$ と印加電圧 V_0 との関係を示したものである。 q_T は、 V_0 が0の場合すなわち重力脱水に比べて、 V_0 が 10V のときは約5倍、 20V のときは約20倍となり、 V_0 の増加とともに増大することがわかる。また、図には示していな

いが、脱水流量は脱水区間入口部において大きく、出口部に近づくにつれて減少する傾向を示した。

Fig.6-17は、Fig.6-16の場合と同一条件での排出スラッジ濃度 C と V_0 との関係を示

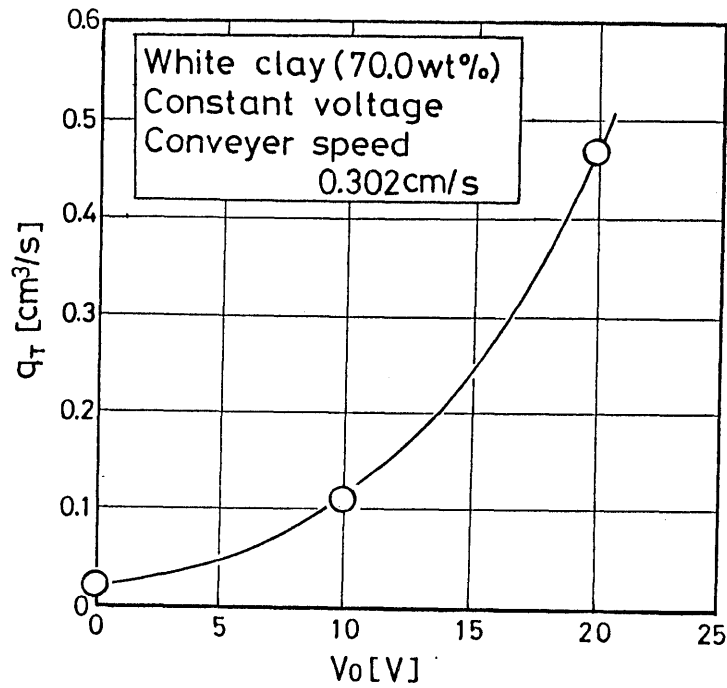


Fig.6-16 Relation between total flow rate q_T and applied voltage V_0

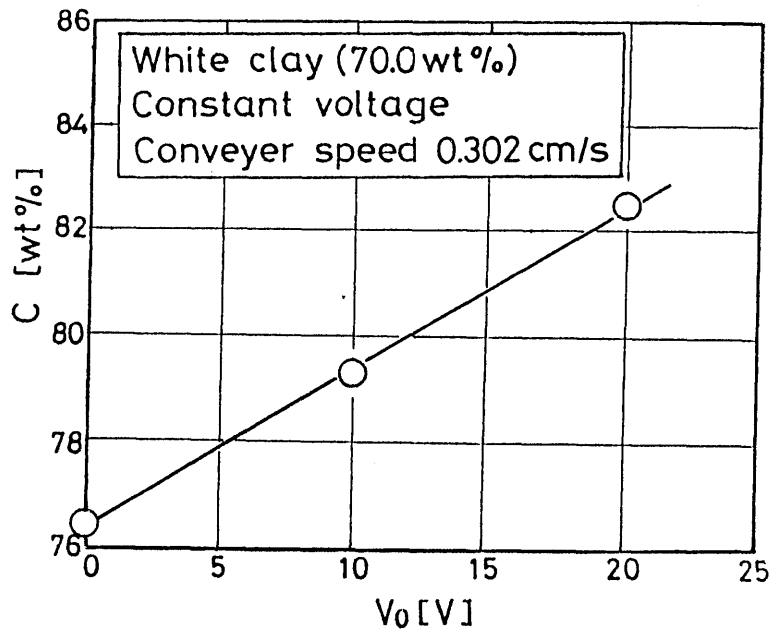


Fig.6-17 Relation between solid concentration C in discharged sludge and applied voltage V_0

したものである。上部ベルト近傍における排出スラッジは、下部ベルト近傍のスラッジに比べて著しく脱水されておりスラッジ濃度が大きくなっていることが観察されたが、本図においてはその平均値を示した。図からわかるように、 C は V_0 に対してほぼ直線関係で増加し、 V_0 が20 Vのときには82.5wt%にまで脱水され、脱水率（スラッジの初期含水量に対する排出スラッジの含水量の百分率）は約58%であった。ちなみに、この場合の上部ベルト近傍におけるスラッジ濃度は約85wt%であった。

以上、実施結果の1例を示したが、粘土の場合、真空ろ過機においては一般に含水率が20~25wt%程度が限界とされているので、本試作装置による Fig.6-17の結果から、電気浸透脱水法による脱水効果は大であり、十分実用の可能性をもっていると考えられる。

先に述べたように、電気浸透脱水法はいくつかの利点をもっているにもかかわらず、あまり実用化されていない。したがって、電気浸透脱水に関する技術は今後の研究開発に待つところが多く、実用する段階においては多くの問題に当面することと思われる。また、本試作装置も、今後改良改善を加えなければならない点が多く残されている。しかしながら、電気浸透脱水法は、スラッジの特性あるいは処理目的などに対して適切に応用することによって、現在のスラッジ処理の難題を解決する有用な1つの方法として期待できる可能性をもっていると考えられる。

6.5 総 括

活性汚泥法における余剰下水汚泥に対する電気浸透脱水法の有効性について実験的検討を行うとともに、電気浸透脱水法の改善策の1つとして、真空脱水を併用した場合の電気浸透脱水操作について検討した。また、回分式装置で得た電気浸透脱水特性についての知見に基づき、大量のスラッジの連続処理を目的として考案試作したベルトコンベヤ方式による連続式電気浸透脱水装置を用いて脱水試験を行い、次のような結果を得た。

1) 下水汚泥の脱水速度に及ぼす電場の促進効果は顕著であり、電気浸透脱水法は、機械的方法では脱水困難な活性汚泥法における余剰汚泥の脱水法として実用の可能性が大きいと考えられる。また、粒子充填層内の電気浸透流れに基づく脱水モデルより得た電気浸透脱水式は下水汚泥に対してもほぼ適用できる。

2) 電気浸透脱水では、電極近傍におけるスラッジ層の局所的な含水率の低下によって層全体の脱水が困難となるが、真空脱水を併用した電気浸透脱水操作の場合には、スラッ

ッジ層全体の電気浸透脱水効率を向上できるので、電気浸透脱水法の改善策の1つとして有用である。

3) スラッジの電気浸透脱水操作をベルトコンベヤを利用して連続的に実施できるようにした本試作装置は、大量のスラッジを電気浸透脱水法によって処理する工業用装置として、十分実用の可能性をもっていると考えられる。

Literature cited

- 1) Rampacek, C., in J. B. Poole and D. Doyle (eds.): "Solid-Liquid Separation", p. 100, HER MAJESTY'S STATIONERY OFFICE, London (1966)
- 2) Sprute, R. H. and D. J. Kelsh: World Congress II of Chemical Engineering, Vol. 4, p. 142 (1981)
- 3) Lockhart, N. C.: *Colloids and Surfaces*, 6, 229, 239, 253 (1983)
- 4) Hayashi, Y., E. Hirai and T. Tsuji: Preprint of the 50th Annual Meeting of The Soc. of Chem. Engrs., Japan, p. 211 (1985)
- 5) Hirai, E., Y. Hayashi and A. Matsuoka: Preprint of the 51th Annual Meeting of The Soc. of Chem. Engrs., Japan, p. 248 (1986)
- 6) Yamaguchi, M., T. Arai and H. Matsushita: *Yosui to Haisui*, 28, 370 (1986)
- 7) Kurita, T. and S. Suwa: World Congress III of Chemical Engineering, Vol. 3, p. 188 (1986)
- 8) Yukawa, H. and H. Yoshida: "DRYING OF SOLIDS", p. 217, Wiley Eastern Ltd., New Delhi (1986)
- 9) Yukawa, H., M. Hakoda, H. Okonogi and H. Yoshida: *Yosui to Haisui*, 28, 370 (1986)
- 10) Yoshida, H., T. Shinkawa and H. Yukawa: *J. Chem. Eng. Japan*, 18, 337 (1985)
- 11) *idem*: *Kagaku Kogaku*, 47, 657 (1983)
- 12) Yukawa, H., H. Yoshida, K. Kobayashi and M. Hakoda: *J. Chem. Eng. Japan*, 9, 402 (1976)
- 13) *idem*: *ibid.*, 11, 475 (1978)
- 14) Yoshida, H., T. Shinkawa and H. Yukawa: *ibid.*, 13, 414 (1980)
- 15) Yukawa, H. and H. Yushina: *Kagaku Kogaku*, 32, 909 (1968)

スラッジの脱水操作は、各種工業プロセスから排出される大量のスラッジあるいは分離困難な種々のスラッジの高度固液分離技術の必要性から、最近ますます重要視されつつある。電気浸透脱水法は、現在広範な分野で実用されている機械的脱水法とはその脱水機構が異なり、粒子層内に発生する電気力を利用する脱水法であるため、機械的方法では脱水困難な微細粒子を含むスラッジやゲル状スラッジなどのいわゆる難脱水性スラッジに対して特に有効となる。電気浸透脱水を行う場合、その操作は定電流あるいは定電圧の条件のもとでスラッジに直流電場を加えることによって実施できる。したがって、本研究では、電気浸透脱水操作を定電流および定電圧の操作条件に大別して、各操作条件における電気浸透脱水特性を明らかにするとともに、電気浸透脱水操作の解析に一般に利用できる理論的方法を得てその妥当性について検討した。また、活性汚泥法において発生する余剰下水汚泥への電気浸透脱水法の適用性を検討するとともに、電気浸透脱水操作の改善策およびベルトコンベヤを利用した連続式電気浸透脱水装置の試作とその試験的検討を行った。以上の結果を結論的に要約すると次の通りである。

1) 電気浸透脱水法は、ゲル状スラッジのような機械的方法では脱水困難なスラッジへの適用が特に有効であり、その脱水速度は、定電流および定電圧の各操作条件において印加電場強度すなわち電流密度または電圧を増加すると大となり、脱水量を増大させることができる。しかしながら、単位脱水量当りの電力消費量は電場強度に比例して増大するので、スラッジに加える電流密度や電圧は、一般に、脱水速度および電力消費量を考慮して選定する必要がある。また、両操作条件による圧縮性スラッジの電気浸透脱水過程は、脱水中のスラッジ層が脱水進行層と脱水終了層の2層からなると見なした粒子充填層内の電気浸透流れに基づく比較的簡単なモデルによって近似理論的に説明することができ、脱水速度、電力消費量および単位脱水量当りの電力消費量などに関する各操作条件における電気浸透脱水式は、その妥当性が実験的に認められ、電気浸透脱水操作および装置の設計式として有用と考えられる^{1, 2)}。(第二章)

2) 定電流条件では、脱水の進行とともに消費電力が大きい2次的な脱水過程へ移行す

るので、脱水量を増加するためには、定電圧条件より定電流条件による操作の方がより有効と考えられる。消費電力に対する脱水効率、両操作条件の場合とも初期電場強度およびスラッジ層の初高が小さくなるほど増加し、初期電場強度およびスラッジ層初高が同じであれば、定電圧条件による操作の方が定電流条件の場合より大となる。また、定電圧条件では、限界脱水量を最大にできる印加電圧の最適値があるが、この最適印加電圧は本研究の方法で実験的に容易に決定できる。電気浸透脱水過程においては、スラッジの含水率と電場強度すなわち電位差こう配との間には相互依存性があり、脱水に伴ってスラッジ層内に生ずる含水率分布は電位差分布と密接に関係し、両者が影響を及ぼし合って脱水が進行することが明らかとなった。したがって、電気浸透脱水過程の解明のためには、脱水過程におけるスラッジ層内の含水率分布および電位差分布の時間的変化を明らかにすることが必要となる^{1~3, 5)}。(第三章)

3) 電気浸透脱水過程は、スラッジ層内の含水率分布および電位差分布の経時変化を考慮してより厳密な理論的解析を行うことができ、スラッジの含水率と比電導度との実験的な関係を併用することによって、定電流および定電圧の各操作条件における脱水過程の推定基礎式を得ることができる。この推定基礎式に基づいて、脱水過程におけるスラッジ層内の含水率分布、脱水量、スラッジ層高および平均含水率の経時変化が各操作条件においてほぼ理論的に推定できる。しかしながら、スラッジ層内の電位差分布、印加電圧あるいは電流の経時変化の推定においては、電気分解によって生ずるスラッジ層内の局所的な電位差の変化の影響を考慮する必要がある。また、定電流条件における2次的脱水過程および電極近傍のスラッジ層における著しい脱水状態が影響を及ぼすような脱水過程については、今後さらに検討していくことが必要である^{7, 9)}。(第四章)

4) 電気浸透脱水過程における圧縮性スラッジ層の平均含水率の経時変化については、スラッジ層の最終状態すなわち脱水終了時の全脱水量およびスラッジ層の最終高さを基礎データに使用することによって理論的な解析を行うことができ、その解析結果より、スラッジ層の含水量を推定できる実験式を求めることができる。また、脱水過程におけるスラッジ層の高さの経時変化についても妥当性のある近似推定式を得ることができるので、これら両式を用いると、定電流および定電圧の各操作条件について平均含水率の推算式が求

められる。両操作条件の場合とも、推定値は実験結果と本実験条件の範囲で比較的良い一致を示し、電気浸透脱水におけるスラッジ層の平均含水率の簡易推定法として使用することができると考えられる^{8,9)}。(第五章)

5) 下水処理における活性汚泥法によって発生する余剰汚泥に対しても、電気浸透脱水法は極めて有効であり、その脱水過程は、粒子充填層内の電気浸透流れに基づく脱水モデルより得た電気浸透脱水式を適用して解析できる。また、真空脱水を併用した電気浸透脱水操作によると、スラッジ層全体の脱水効率を向上させることができるので、電気浸透脱水法の改善策の1つとして有用と考えられ、回分式装置で得た知見に基づいて考案試作したベルトコンベヤ方式による連続式電気浸透脱水装置は、その試験結果より、大量のスラッジを工業的規模で連続的に処理できる可能性をもつ実用的な装置として期待できることを示した^{4~6)}。(第六章)

以上、電気浸透脱水に関する研究結果を示したが、本研究における考察が、電気浸透脱水装置の設計操作並びに電気浸透脱水技術の利用を計画、発展する上で多少なりとも参考になるならば幸いである。

Literature cited

- 1) Yukawa, H., H. Yoshida, K. Kobayashi and M. Hakoda: *J. Chem. Eng. Japan*, 9, 402 (1976)
- 2) *idem: ibid.*, 11, 475 (1978)
- 3) Yoshida, H., T. Shinkawa and H. Yukawa: *ibid.*, 13, 414 (1980)
- 4) *idem: Kagaku Kogaku*, 47, 657 (1983)
- 5) *idem: J. Chem. Eng. Japan*, 18, 337 (1985)
- 6) Yukawa, H., M. Hakoda, H. Okonogi and H. Yoshida: *Yosui to Haisui*, 28, 370 (1986)
- 7) Yoshida, H. and H. Yukawa: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 12, 707 (1986)
- 8) *idem: ibid.*, to be published
- 9) *idem: ibid.*, to be published

付 記

本研究を行うに当り、終始御懇切なる御指導・御教授を賜りました群馬大学工学部教授油川博先生に深甚なる感謝の意を表します。

また、本研究に対して御懇篤な御教示と御指導を賜りました名古屋大学工学部教授白戸紋平先生並びに同学部助教授村瀬敏朗先生に厚く感謝致します。

なお、本研究に際しまして、小山工業高等専門学校工業化学科元教授新川正先生には御配慮を頂き、同学科助教授西脇昭雄先生には常に温かい御助言・御援助を頂きました。また、群馬大学工学部化学工学科基礎工学講座および小山工業高等専門学校工業化学科の教職員並びに卒業生の方々の御協力を頂きました。ここに記して、深く謝意を表します。

Appendix I Eq. (2-30) の誘導について

Eq. (2-29) は次式のように書き換えられる。

$$\int_0^t u_E dt = \left(\frac{\alpha V_0}{u_E} - H_0 \right) / \left\{ \frac{\epsilon_{1w}}{\epsilon_{1w}(1 - \epsilon_{2a}) - \epsilon_{2w}(1 - \epsilon_{1a})} \right\} \\ / \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \{ 1 - (\epsilon_{1w} + \epsilon_{1a}) \} - \{ 1 - (\epsilon_{2w} + \epsilon_{2a}) \} \right] \quad (A-1)$$

両辺を t について微分すると次式を得る。

$$\frac{1}{u_E^3} \cdot \frac{du_E}{dt} = - \frac{1}{\alpha V_0} \left\{ \frac{\epsilon_{1w}}{\epsilon_{1w}(1 - \epsilon_{2a}) - \epsilon_{2w}(1 - \epsilon_{1a})} \right\} \\ \times \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \{ 1 - (\epsilon_{1w} + \epsilon_{1a}) \} - \{ 1 - (\epsilon_{2w} + \epsilon_{2a}) \} \right] \quad (A-2)$$

上式を t について積分して、

$$-\frac{1}{2u_E^2} = - \frac{1}{\alpha V_0} \left\{ \frac{\epsilon_{1w}}{\epsilon_{1w}(1 - \epsilon_{2a}) - \epsilon_{2w}(1 - \epsilon_{1a})} \right\} \\ \times \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \{ 1 - (\epsilon_{1w} + \epsilon_{1a}) \} - \{ 1 - (\epsilon_{2w} + \epsilon_{2a}) \} \right] t + P \quad (A-3)$$

を得る。ここに P は積分定数であり、初期条件 $t=0$ のとき $u_E = \alpha V_0 / H_0$ より、 $P = - (H_0 / \alpha V_0)^2 / 2$ となる。したがって、 P を Eq. (A-3) に代入すると Eq. (2-30) を得る。

Appendix II スラッジの比電導度 λ と 含水比 e_w の関係について

電気浸透脱水過程におけるスラッジ層は、Ohmの法則が適用できると考えられるので、Fig.A-1 のような等価回路図で表される。図において、 R_p , R_l , R_g はそれぞれ固相、液相および気相の電気抵抗であり、また、 λ_p , λ_l , λ_g はそれぞれ固相、液相および気相の比電導度である。ここに、 $R_g = \infty$, $\lambda_g = 0$ と置けるので、スラッジ層は R_p と R_l の並列抵抗回路となり、スラッジ層の等価電気抵抗 R は次式のように表される。

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_l} = \frac{\lambda_p A (1 - \varepsilon)}{H_s} + \frac{\lambda_l A \varepsilon_w}{H_s} \quad (A-4)$$

また、 R はスラッジ層等価比電導度 λ を用いると次式で表される。

$$R = H_s / \lambda \{ (1 - \varepsilon) + \varepsilon_w \} \quad (A-5)$$

Eqs. (A-4) および (A-5) より、含水比 $e_w (= \varepsilon_w / (1 - \varepsilon))$ を用いて次式を得る。

$$\lambda = (\lambda_p + \lambda_l e_w) / (1 + e_w) \quad (A-6)$$

上式より、 λ_p および λ_l がそれぞれ一定であれば、 λ は e_w の関数として表される。

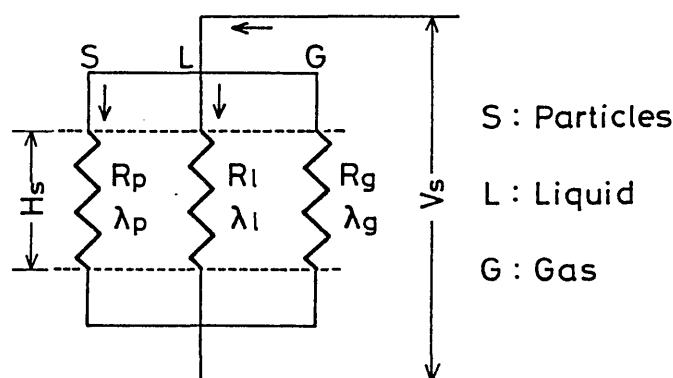


Fig.A-1 Equivalent electric circuit of sludge

Appendix III 含水率 ε_w の算出方法 について

電気浸透脱水終了時のスラッジ層上面近傍の含水率は限界値を示し、定電流条件においては、スラッジの湿乾質量の測定から得られる体積基準の限界含水率 w^+ は I_0 に関係なくほぼ一定となり^{1), 2)}、ベントナイトスラッジでは $w^+ = 0.643$ である²⁾。 ε_w と w との関係は、 ε_w が Eq. (A-7) のように表されるので、Eqs. (4-21) および (A-7) より Eq. (A-8) で表される。

$$e_w = \varepsilon_w / (1 - \varepsilon) = w / (1 - w) \quad (A-7)$$

$$\varepsilon_w = \frac{k}{2} \left(\frac{w}{1-w} \right) \left[\sqrt{\left\{ k \left(\frac{w}{1-w} \right) \right\}^2 + 4} - k \left(\frac{w}{1-w} \right) \right] \quad (A-8)$$

Eq. (A-8) を用いて w から ε_w が求まり、 $w^+ = 0.643$ のときに $\varepsilon_w^+ = 0.351$ となる。なお、Fig. 4-3 の装置を使用した場合に得られた w と ε_w の実測値と Eq. (A-8) による計算値の比較結果は、Fig. A-2 に示されるようにほぼ良い一致を示した。

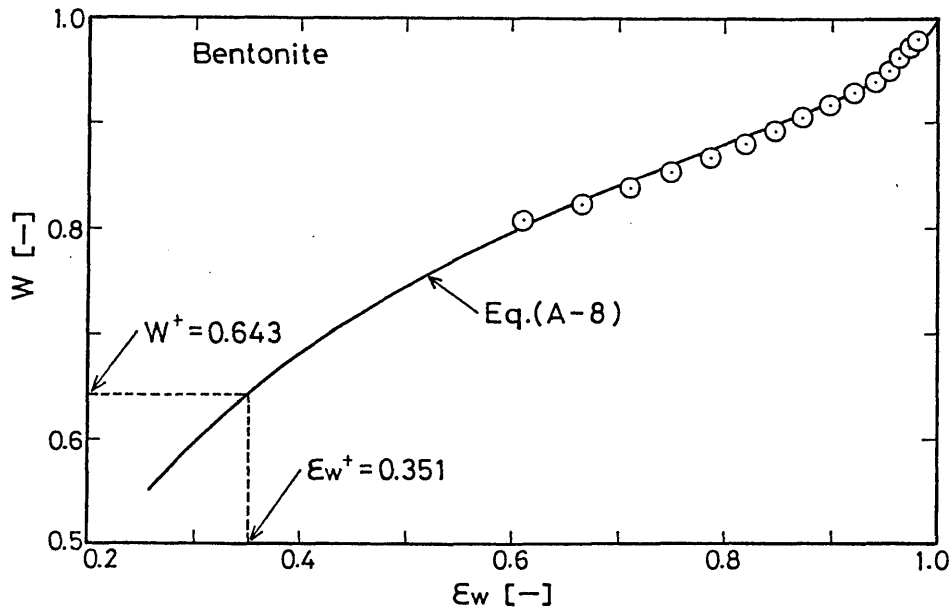


Fig.A-2 Evaluation of ε_w^+

Literature cited

- 1) Yoshida, H., T. Shinkawa and H. Yukawa: *ibid.*, 13, 414 (1980)
- 2) *idem*: *ibid.*, 18, 337 (1985)

発表論文および業績リスト

| 論 文 題 目 | 発 表 雑 誌 | 共 著 者 |
|--|---|--|
| Fundamental Study on Electroosmotic Dewatering of Sludge at Constant Electric Current | J. Chem. Eng. Japan, <u>9</u> , 402 (1976) | H. Yukawa K. Kobayashi M. Hakoda |
| Electroosmotic Dewatering of Sludge under Condition of Constant Voltage | J. Chem. Eng. Japan, <u>11</u> , 475 (1978) | H. Yukawa K. Kobayashi M. Hakoda |
| Comparison between Electroosmotic Dewatering Efficiencies under Conditions of Constant Electric Current and Constant Voltage | J. Chem. Eng. Japan, <u>13</u> , 414 (1980) | T. Shinkawa H. Yukawa |
| 電気浸透を応用したスラッジの連続式脱水装置について | 化学工学, <u>47</u> , 657 (1983) | 新川 正 油川 博 |
| Water Content and Electric Potential Distributions in Gelatinous Sludge with Electroosmotic Dewatering | J. Chem. Eng. Japan, <u>18</u> , 337 (1985) | T. Shinkawa H. Yukawa |
| 活性汚泥法における余剰汚泥の電気浸透脱水 | 用水と廃水, <u>28</u> , 602 (1986) | 油川 博 箱田 優 小此木弘考 |
| スラッジの電気浸透脱水過程に関する理論解析 | 化学工学論文集, <u>12</u> , 707 (1986) | 油川 博 |
| 電気浸透脱水におけるスラッジ層の平均含水率の推定 | 化学工学論文集, 印刷中 | 油川 博 |
| 横流式フィン付沈降槽における電場下の希薄スラリーの分離効率 | 化学工学論文集, 印刷中 | 白戸紋平 村瀬敏朗 岩田政司 伊東一仁 高木信浩 |
| 定電圧条件における電気浸透脱水過程の解析 | 化学工学論文集, 印刷中 | 油川 博 |