

平成23年度 環境研究総合推進費補助金

総合研究報告書

可逆凝集を用いたステップ超高压圧搾による
難脱水性有機汚泥の高速減量化技術の開発
(K2122, K22051, K2310)

平成24年3月

(研究代表者)	名古屋大学	入谷 英司
	名古屋大学	片桐 誠之

補助事業名	環境研究総合推進費補助金研究事業 (平成21年度～平成23年度)
所 管	環境省
国庫補助金	27,313,000 円
研究課題名	可逆凝集を用いたステップ超高压圧搾による難脱水性有機汚泥 の高速減量化技術の開発
研 究 期 間	平成21年4月1日～平成24年3月31日
研究代表者名	入谷 英司 (名古屋大学)
研究分担者名	片桐 誠之 (名古屋大学)

研 究 概 要

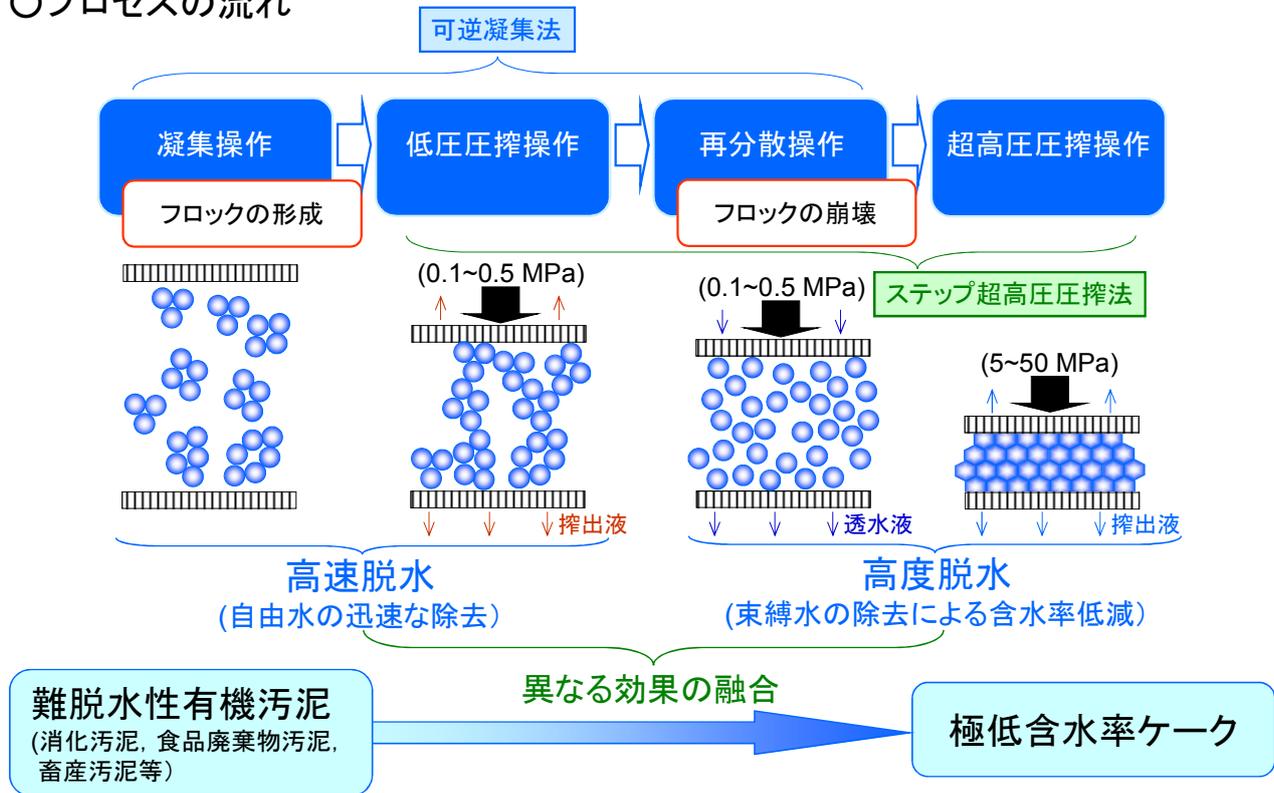
産業廃棄物の中で最も大きな排出量割合を占める汚泥を減量化するための高効率な脱水技術の開発が、現在ますます切望されている。特に、下水の余剰汚泥・消化汚泥や食品廃棄物汚泥などの難脱水性有機汚泥は、現在の脱水技術では脱水度と処理速度の両面で不十分である。

本研究では、研究概要説明図に示すように可逆凝集とステップ超高压圧搾を融合させた脱水技術を提案し、その有効性を検証する。すなわち、汚泥を緩く凝集させて粗大フロックを形成させ、0.1～0.5 MPa の低圧下で圧搾して自由水を迅速に除去し脱水ケーキを得た後、可逆凝集によりフロックを崩壊させ、さらに圧力のステップ増加により 5～50 MPa の超高压を作用させ束縛水を除去し極低含水率ケーキを得て、汚泥の高速減量化を図る。

難脱水性有機汚泥として下水余剰汚泥を例にとり、可逆凝集とステップ超高压圧搾とを融合した高効率の高速脱水法について、圧搾速度と脱水度の両面から検討した。超高压用圧搾セルの作製と材料試験機の大型化により 50 MPa までの超高压圧搾を行うことが可能となり、圧搾圧力の増加に伴い、ケーキ脱水度が飛躍的に向上することを見出した。汚泥減量化の観点では、多価イオンのポリ塩化アルミニウムを用いる可逆凝集が最適で、50 MPa の超高压圧搾により極めて顕著な効果が見られ、ケーキ含水率は 23 %となり、現存技術の 60～70 %を遙かに凌ぎ、前例のない極めて小さな値が得られた。汚泥原液を基準に、99.87%もの減量を実現したこととなり、含水率として 25 %減の目標を大きく超える成果が得られた。総脱水時間についても、プロセスの最適化により 60 %短縮という本研究の数値目標を達成した。

可逆凝集を用いたステップ超高压圧搾による 難脱水性有機汚泥の高速減量化技術の開発

○プロセスの流れ



○研究の流れ

	凝集	低压圧搾	再分散	超高压圧搾
H21年度	可逆凝集法の確立 (pH調整, 無機電解質添加) 担当: 片桐, 入谷			
	凝集操作による低压圧搾の高性能化 担当: 片桐		再分散操作による超高压圧搾の高性能化 担当: 入谷	
H22年度	可逆凝集法の確立 (バイオ凝集剤, アルコール, 界面活性剤添加) 担当: 片桐, 入谷			
			可逆凝集の手法に応じた超高压圧搾の手法の開発 担当: 入谷	
H23年度	超高压圧搾の性能向上のための低压圧搾の最適化 担当: 片桐			
	可逆凝集とステップ超高压圧搾の融合によるプロセスの最適化 担当: 入谷, 片桐			

研究概要説明図

研 究 目 的

本研究では、現在の機械的固液分離技術では高効率な減量化が困難な下水余剰汚泥、消化汚泥や食品廃棄物汚泥、畜産汚泥などの難脱水性有機汚泥を対象に、汚泥の高速減量化を実現できる手法の提案を行い、その有効性を明らかにするとともに、操作の設計指針を得ることを目的とする。

本手法は、提案する可逆凝集法を脱水操作に応用するため、ステップ超高压圧搾を難脱水性有機汚泥の脱水に適用するものであり、従来の技術では不可能な脱水度の低含水率ケーキを高速度で得て、汚泥による環境負荷を低減させることを目指す。可逆凝集による脱水速度の向上とステップ超高压圧搾による脱水度の向上が生じるそれぞれの機構を解明し、得られた成果に立脚して、両者を融合することによって初めて達成される最も効率的な脱水性能を得るための設計指針を提示することを最終目的とする。

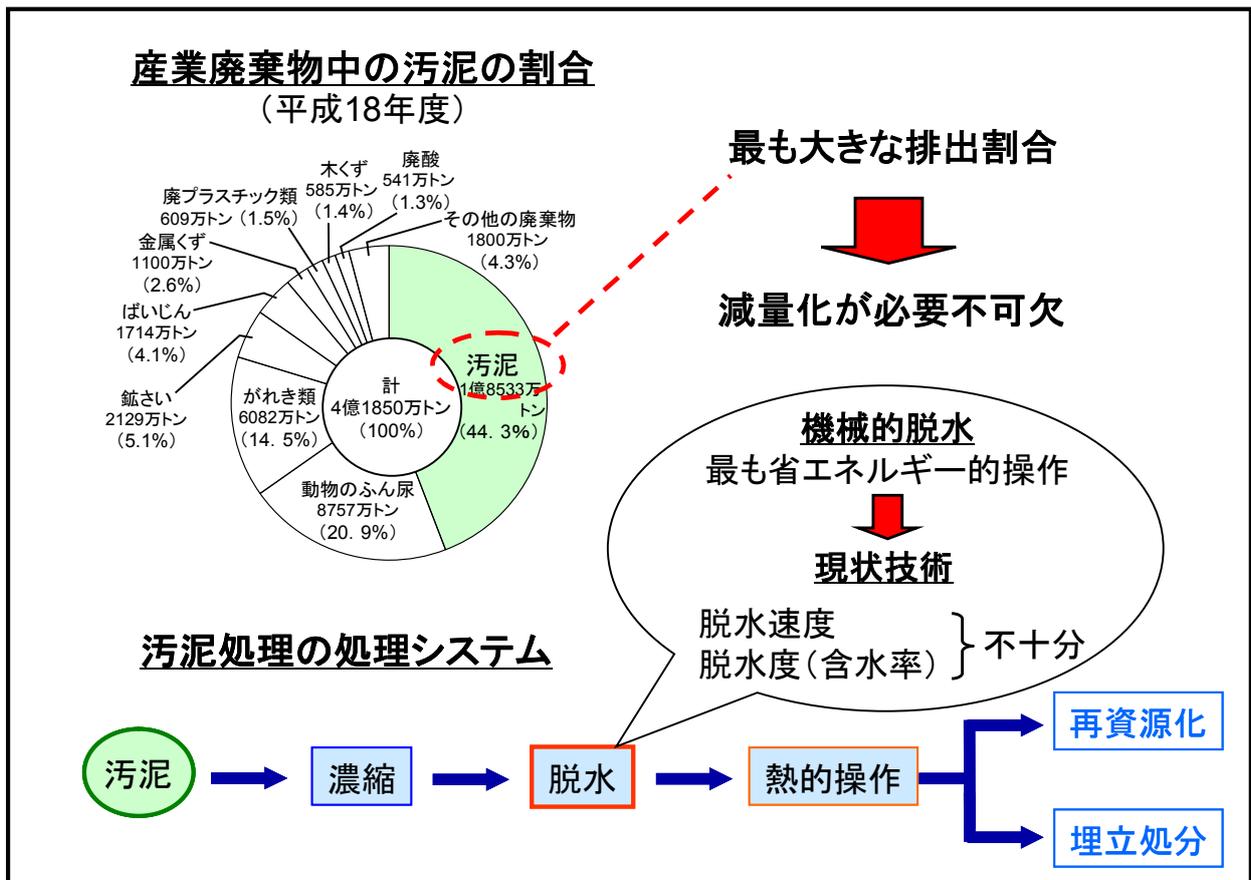
可逆凝集では、pH 調整や無機電解質、バイオ凝集剤、界面活性剤等の添加など、種々の手法を試み、それらの優劣を検討して第一段階の低圧圧搾で脱水速度を最大にするために最も効果的な操作法と操作条件を見出す。ステップ超高压圧搾では、フロックの崩壊が容易な可逆凝集の操作指針を得るとともに、超高压作用下で達成できる脱水ケーキの含水率の限界値を汚泥性状と関連付けて明らかにし、超高压圧搾の最適操作条件を見出す。これらを総合して、可逆凝集とステップ超高压圧搾からなる難脱水性有機汚泥の一連の高速減量化プロセスに対する最適操作法を提示する。数値目標として、総脱水時間として現存技術に対して 60 %短縮、含水率として 25 %減を掲げる。

研 究 の 背 景

平成 20 年に発表された平成 18 年度における産業廃棄物の排出量に関するデータによると、ほぼ半数にあたる 44.3 %を汚泥が占めている。したがって、難脱水性有機汚泥の高効率な脱水法の開発は、汚泥の減量化や脱水汚泥の資源としての有効利用の見地から現在急務とされている課題である。代表研究者が長年にわたり研究を続けている濾過、圧搾等の機械的固液分離が最も省エネルギー的であることから、現在も国の内外で機械的分離に関して多くの研究や技術開発が行われている。これらのほとんどは、強固で粗大なフロックを形成する高性能な高分子凝集剤の開発による脱水速度の向上、あるいは圧搾における操作圧の増大による脱水度の向上（ケーキ含水率の低減化）を目指すものである。しかし、高分子凝集剤を使用すると高圧を作用させても強固なフロック内の水分の除去は困難で低含水率ケーキは得られないという致命的な欠点をもつ。一方、凝集剤を使用せずに高圧を作用させると、ケーキの高い圧縮性のため脱水速度は低圧下より減少することもあり、現在の技術では難脱水性有機汚泥の高効率な脱水は困難な状況にある。（研究背景説明図）

本研究では、両者の欠点を克服する革新的な技術として可逆凝集とステップ超高压圧搾を融合させた新たな手法を提案して、その有効性を検証し、脱水機構の解明に基づき最適な操作法を提示する。可逆凝集の手法を提案し、緩い凝集フロックを形成させ、比較的低い圧搾圧力で高速で粗分離を行った後、フロックを崩壊させる。次いで圧力をステップ状に増加させ超高压を作用させて、ケーキ内に残存する束縛水を機械的圧力で可能な限界まで除去する。高い脱水速度と高い脱水度の両者を同時に満足する省エネルギー的な脱水プロセスの確立が期待できる。

背景



研究背景説明図

<現存技術・理論>

汚泥の減量化において、最も省エネルギー的な操作である機械的固液分離には、種々のタイプの脱水機が使用されている。また、脱水機による汚泥の高度な脱水は、圧搾操作によってもたらされる。現存技術である主な脱水機および脱水過程の解析に必要な圧搾理論を以下に示す。

○脱水機

有機汚泥に対して用いられている脱水機として、真空脱水機、加圧脱水機（フィルタープレス）、ベルトプレス、遠心脱水機、圧入式スクリープレスなどがある。各脱水機の長所と短所を以下に示す。

・真空脱水機

真空圧により脱水を行う装置。

長所：連続運転でメンテナンスが容易。

短所：脱水ケーキの含水率が大きい。消費電力が大きい。濾布の交換が必要。

・加圧脱水機（フィルタープレス）

加圧により脱水を行う装置で、真空圧よりも大きな圧力を作用させることができる。

長所：脱水ケーキの含水率が小さい。

短所：バッチ運転。補機が多く、機器設置面積が大きい。濾布の交換が必要。

・ベルトプレス

2枚のベルト間にスラリーを挟んで、多数のロールの間をベルトにより屈曲移送させて脱水を行う装置。

長所：脱水ケーキの含水率が小さい。連続運転でメンテナンスが容易。

短所：多量の濾布洗浄水が必要。濾布の交換が必要。

- ・遠心脱水機

高速回転による遠心力により脱水を行う装置。

長所：脱水ケーキの含水率が小さい。連続運転でメンテナンスが容易。

短所：消費電力が大きい。高速回転のため振動・騒音対策が必要。

- ・圧入式スクリープレス

固定された外筒のバレルとその中で回転するスクリー軸からなり、スクリー軸の回転によってスラリーを出口方向へ送って次第に狭げき部へ押し込み、その際に受ける高圧によって脱水を行う装置。

長所：脱水ケーキの含水率が小さい。連続運転でメンテナンスが容易。

短所：スクリーンの交換が必要。回収率が小さい。

最近では、3.9 MPa の高圧フィルタープレスが開発され、更なる高圧化への取り組みがなされつつあり、実用スケールにおける超高压圧搾操作に利用できる。なお、現存技術における下水汚泥脱水ケーキの含水率の最高水準は 60～70% である。

○圧搾理論

本研究では、圧搾操作により有機汚泥の減量化を試みる。圧搾および圧搾操作による脱水挙動の解析方法について以下に示す。

圧搾とは、固液混合物を収容する分離室の隔壁を移動させることによって圧縮作用を起こさせて固液分離を行う操作である。一般に、圧搾操作は原料のポンプによる圧送が困難な場合や、濾過よりもさらに完全な固液分離を目的として、化学工業、窯業及び食品工業、特に搾油や醸造部門において広く利用されている。

一般に、圧搾によるスラリーの固液分離過程は濾過期間とそれに続く圧密期間とに分けることができ、前者は濾過理論、後者は土質力学における Terzaghi の圧密理論を修正した、修正 Terzaghi モデルにより解析される。なお、圧密期間において、粒子のクリープ的塑性変形による二次圧密が存在する場合には、これを考慮した理論解析が行われる。

・修正 Terzaghi モデル

圧密進行中のケーキ内部では、液体だけではなく固体粒子も濾材方向に移動し、圧密によって搾出される液体の流速は、液体の真の移動速度と固体の移動速度との速度差で表される。このような系においては、位置を表す座標として固定座標を用いると、内部の液体および固体粒子の移動を記述する運動方程式と物質収支式との関係、および境界条件などが複雑となり、基礎式の解を得るのが困難となる。

時間によって変化しない量、例えば Fig. 1-1 に示すように固定された濾材面上から測った単位断面積当たりの固体体積 ω を位置座標として採用することにより、基礎方程式が単純化され、また境界面を固定することができる。

圧縮ケーキ内のある位置 ω (Fig. 1-1 (b))におけるケーキ部分比抵抗を α とおけば、位置 ω における微小薄層を過ぎる液体の固体粒子に対する見掛け相対速度 u は、式(1-1)で表すことができる。

$$u = \frac{1}{\mu\alpha\rho_s} \cdot \frac{\partial p_L}{\partial \omega} = -\frac{1}{\mu\alpha\rho_s} \cdot \frac{\partial p_s}{\partial \omega} \quad (1-1)$$

ここに、 p_s は固体圧縮圧力、 p_L は液圧である。

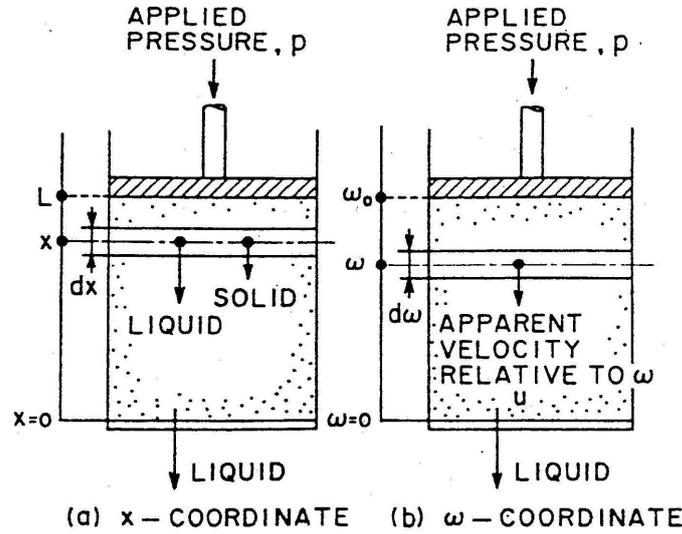


Fig. 1-1 (a) x 座標と(b) ω 座標

ケーキ微小薄層 $d\omega$ における液体の物質収支式は式(1-2)で与えられる。

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_c} = \frac{\partial u}{\partial \omega} \quad (1-2)$$

ここに、 e は空隙比、 θ_c は圧密時間である。なお、固定座標 x を用いると、液体および固体についての物質収支式が必要となる。式(1-1)を(1-2)に代入し次式を得る。

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_c} = \frac{\partial}{\partial \omega} \left(-\frac{1}{\mu\alpha\rho_s} \cdot \frac{\partial p_s}{\partial \omega} \right) \quad (1-3)$$

ここに、 μ は溶液の粘度、 ρ_s は固体の真密度である。圧密期間中の α の平均値をとり、一定とし、また、空隙比 e が固体圧縮圧力 p_s に対して直線関係にあると仮定すると、式(1-3)は修正圧密方程式(1-4)となる。

$$\frac{\partial p_s}{\partial \theta_c} = C_e \cdot \frac{\partial^2 p_s}{\partial \omega^2} \quad \text{または} \quad \frac{\partial e}{\partial \theta_c} = C_e \cdot \frac{\partial^2 e}{\partial \omega^2} \quad (1-4)$$

$$C_e \equiv -\frac{1}{\mu\alpha\rho_s(-de/dp_s)} \quad (1-5)$$

Terzaghi が導いた圧密方程式は固体粒子の移動を無視し固定座標 x を用いているが、式(1-4)では Terzaghi 式のこの欠点が修正されている。また、式(1-5)で与えられる C_e は修正圧密係数と呼ばれている。

修正圧密係数 C_e の値に圧密開始時と終了時の平均値を用いることとし、式(1-4)を圧搾圧力 p が一定（定圧圧搾）の下で解くと、圧密の進行状態を表す平均圧密比 U_c が以下のように得られる。

スラリー原料の圧密

$$U_c = \frac{L_1 - L}{L_1 - L_\infty} = 1 - \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{i^2 C_e \theta_c}{\omega_0^2}\right) \quad (1-6)$$

均質な半固体状原料の圧密

$$U_c = \frac{L_1 - L}{L_1 - L_\infty} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{(2n-1)^2 \pi^2} \exp\left\{-\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{4} \cdot \frac{i^2 C_e \theta_c}{\omega_0^2}\right\} \quad (1-7)$$

ここに、 L_1 、 L 、 L_∞ はそれぞれ圧密初期、時間 θ_c 、圧密平衡時のケーキ厚さ、 i は排水面数、 ω_0 は単位断面積毎の固体体積である。平均圧密比 U_c は、圧密開始時に 0、終了時に 1 となる。

二次圧密を考慮した Terzaghi-Voigt モデル

Terzaghi モデルでは、粒子構造の力学的挙動をスプリングで表しており、固体圧縮圧力 p_s が増加すると粒子構造が p_s に対応した状態まで瞬間的に圧縮されると仮定している。

しかし、実際に粒子構造が圧縮される場合は、変形にある程度の時間経過が必要である。材料中の微小要素における粒子構造のこのようなレオロジー的性質を考慮するため、空隙容積の減少が圧力 p_s の増加に即応して変化する部分（一次圧密）と時間的に遅れて変化する部分（二次圧密またはクリープ変形）の二つから成り立っていると仮定し、Fig. 1-2 に示すように、後者のクリープ特性をスプリングとダッシュポットを並列結合した Voigt

要素で近似し、これをスプリング 1 個からなる Terzaghi 要素とを直列結合したのが Terzaghi-Voigt モデルである。

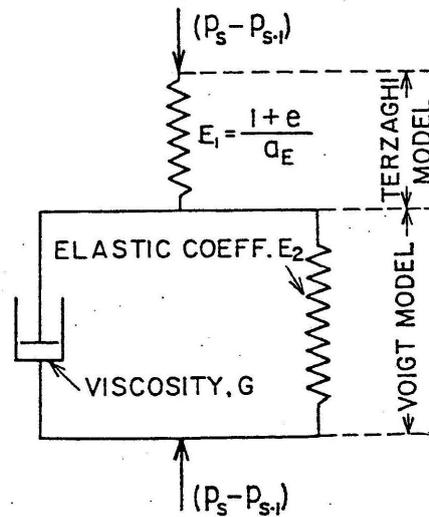


Fig. 1-2 圧密に対するレオロジーモデル

Terzaghi-Voigt モデルでは、平均圧密比 U_c は次のように表される。

スラリー原料の圧密

$$U_c = (1-B) \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{i^2 C_e \theta_c}{\omega_0^2} \right) \right\} + B \{ 1 - \exp(-\eta \theta_c) \} \quad (1-8)$$

均質な半固体状原料の圧密

$$U_c = (1-B) \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{(2n-1)^2 \pi^2} \exp \left\{ -\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{4} \cdot \frac{i^2 C_e \theta_c}{\omega_0^2} \right\} \right] + B \{ 1 - \exp(-\eta \theta_c) \} \quad (1-9)$$

ここに、 B は全圧密量に対する二次圧密の割合、 η はクリープの進行速度を表す定数（遅延時間の逆数）である。

圧密が二次圧密のみによると仮定すれば、 $B=1$ となり、式(1-8)および(1-9)は次式で表される。

$$U_c = B \{ 1 - \exp(-\eta \theta_c) \} \quad (1-10)$$

上式からわかるように、クリープ定数 η は、二次圧密速度を支配する因子である。

式(1-8)および(1-9)を用いて圧密比 U_c を推定するためには、 B 、 η および C_e の値を決め

る必要がある。 B , η については、以下のように定めることができる。

一般に、二次圧密速度は一次圧密速度に比べて小さく、 $\eta \ll (\pi^2/4)(i^2 C_c / \omega_0^2)$ とおけるので、式(1-8)および(1-9) θ_c が大きいところで、次式で近似できる。

$$U_c = 1 - B \exp(-\eta \theta_c) \quad (1-11)$$

これを書き改めると次式を得る。

$$\ln(1 - U_c) = \ln B - \eta \theta_c \quad (1-12)$$

したがって、圧搾実験結果を $\ln(1 - U_c)$ vs. θ_c として、Fig. 1-3 のように点綴すると、 θ_c の大きい領域において直線関係を示す。この直線の勾配より η の値を、また、この直線の切片より B の値をそれぞれ実験的に決定できる。

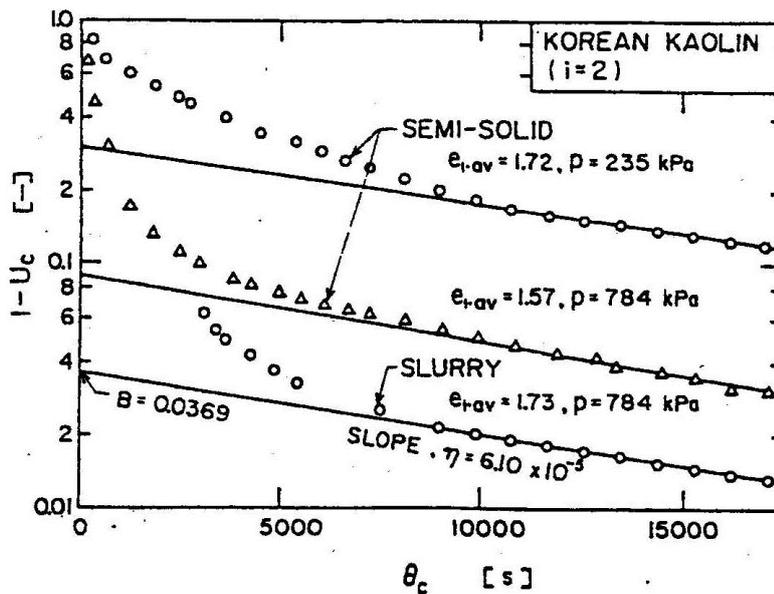


Fig. 1-3 B , η の決定法

修正圧密係数 C_c は圧密速度を支配する最も重要な操作変数である。その値は圧搾実験結果より Fitting 法で決定するか、あるいは圧縮透過実験結果を用いて決定することができる。また、 U_c vs. $\sqrt{\theta_c}$ 曲線の初期勾配から求めることができる。Fitting 法は、実測した U_c vs. $\sqrt{\theta_c}$ 曲線が理論曲線式(1-6)あるいは式(1-7)と相似であるとして決定する。

スラリー原料の定圧圧搾実験で得た圧密期間でのケーキ厚さ(L_1-L) vs. $\sqrt{\theta_c}$ の関係を Fig. 1-4 のごとく点綴して、得られた実測曲線に対し原点を通る接線 OB を描き、その傾度の 1.08 倍の傾度をもって原点を通る OC と実測曲線との交点 C' を求める。この交点の横座標が $\sqrt{\theta_{c,90}}$ で、次式により C_e を決定する。

$$C_e = 0.933\omega_0^2 / i^2\theta_{c,90} \quad (1-13)$$

均質な半固体状原料を定圧圧搾した場合には、実測曲線(L_1-L) vs. $\sqrt{\theta_c}$ (Fig. 1-5)の直線部 OB の傾度の 1.15 倍の傾度をもつ原点を通る直線 OC を描く。この OC と実測曲線との交点 C' より $\sqrt{\theta_{c,90}}$ を求め、次式により C_e を決める。

$$C_e = 0.848\omega_0^2 / i^2\theta_{c,90} \quad (1-14)$$

クリープ特性を有する圧縮ケーキの修正圧密係数 C_e の決定法には、修正が必要であり、Fitting 法を適用するには、 U_c の実測値を次式で表される修正圧密比 $U_{c,corr}$ に変える必要がある。

$$U_{c,corr} = \frac{1}{1-B} [U_c - B\{1 - \exp(-\eta\theta_c)\}] \quad (1-15)$$

実測値をプロット(Fig. 1-6)し、 $U_{c,corr} = 0.9$ となる圧密時間 $\theta_{c,90}$ を求める。

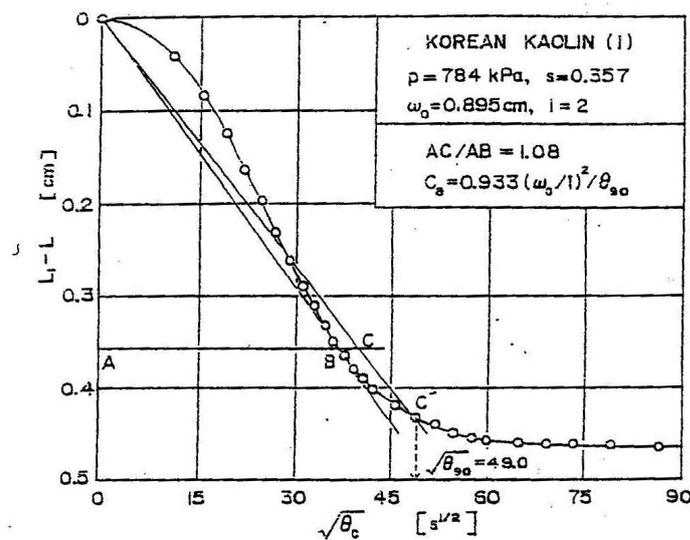


Fig. 1-4 Filter ケーキの Fitting 法

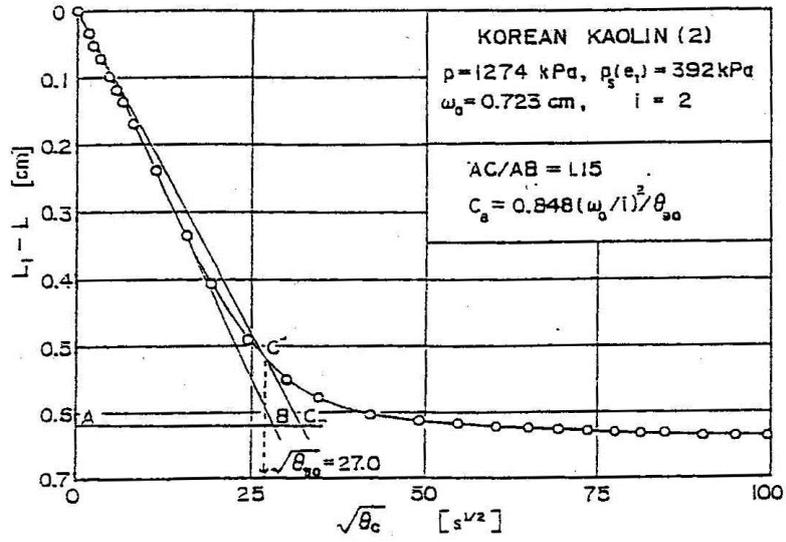


Fig. 1-5 半固体状原料の Fitting 法

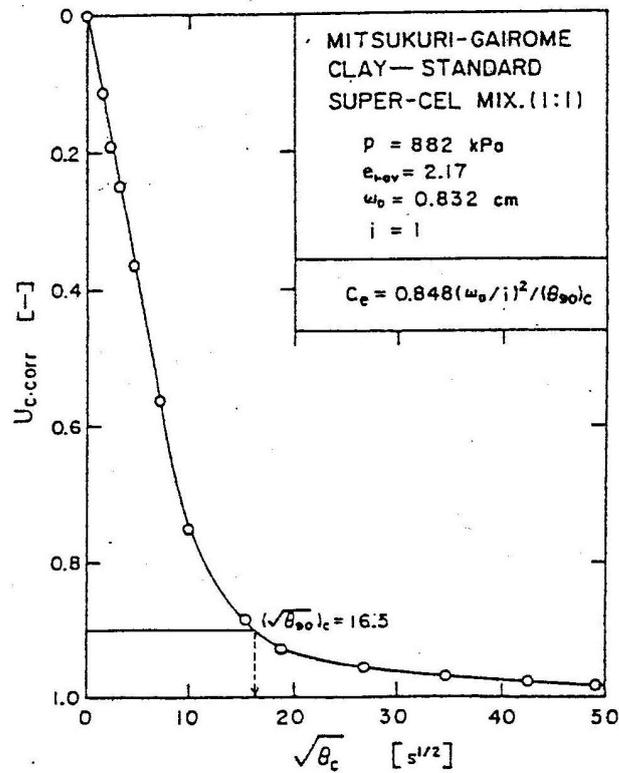


Fig. 1-6 $U_{c,corr}$ の Fitting 法

本研究の基礎となる研究成果

<可逆凝集を利用した濾過操作による高速脱水法>

凝集フロックの形成とその崩壊による可逆凝集を利用した無機汚泥の濾過操作による高速脱水法を開発した。濾過操作による脱水は、濾過ケーキの特性に大きく左右されるため、その制御が高速脱水を実現させるのに重要となる。濾過ケーキ特性を決定する重要な因子は、懸濁粒子間の相互作用であり、その主要なものは、ロンドン・ファンデルワールス引力と粒子の表面電荷に起因する静電的反発力である。ロンドン・ファンデルワールス引力は与えられた系において一定であるが、一般に等電点をもつ金属酸化物微粒子は、pH や電解質濃度、有機溶媒濃度の変化によって粒子の荷電量や正負が複雑に変化し、有機溶媒については誘電率も大きく変化することから、粒子間の静電的反発力はこうした溶液環境の影響を受ける。無機汚泥のモデルとして金属酸化物微粒子を用いた研究において成果として得られた、溶液環境の制御による可逆凝集を利用した高速脱水法を以下に示す。

・ pH 調整による可逆凝集

pH 調整により比較的緩い構造の凝集フロックを形成させ、短時間に濾過ケーキを形成させた後、ケーキ中に適切な pH に調整した溶媒（水）を透過させることにより凝集フロックを直ちに崩壊させ、低含水率の脱水ケーキを得る方法。

金属酸化物微粒子は通常スラリー中で荷電を帯び、スラリーの pH に応じて種々の荷電状態をとり、正味荷電が 0 となる等電点をもつ。これは、粒子表面上のヒドロキシル基が粒子を取りまく溶液中の H^+ あるいは OH^- と反応を起こすためである。等電点より酸性側では正、アルカリ側では負の電荷をもつ。また、等電点から離れた pH では、粒子間に働く静電的反発力により分散状態となり、一方等電点近傍の pH では、粒子は電荷をほと

んどもたないため、ロンドン・ファンデルワールス引力により粒子同士が接近して凝集する。種々の pH で行った二酸化チタン懸濁液の濾過における濾過ケーキの平均濾過比抵抗 α_{av} と平均空隙率 ε_{av} を Fig. 2-1 に示した。 α_{av} は極小値をもつ曲線となり、粒子が荷電をもたない等電点付近で最小、すなわち最も濾過速度が大きくなった。一方、 ε_{av} は極大値をもつ曲線となり、同じく等電点付近にその極値が存在し、最も含水率の大きなケーキが形成された。ある粒子が他の粒子と接触して凝集すると、その粒子はその接触点に固定されるため、一般に凝集粒子は空隙の大きな緩い構造となる。したがって、こうした凝集粒子から形成される濾過ケーキも、凝集体を破壊するような大きな剪断力が加わらない限り、その空隙率は大きくなると考えられ、その結果ケーキ内を流れる液の抵抗は小さくなり、 α_{av} は小さくなる。

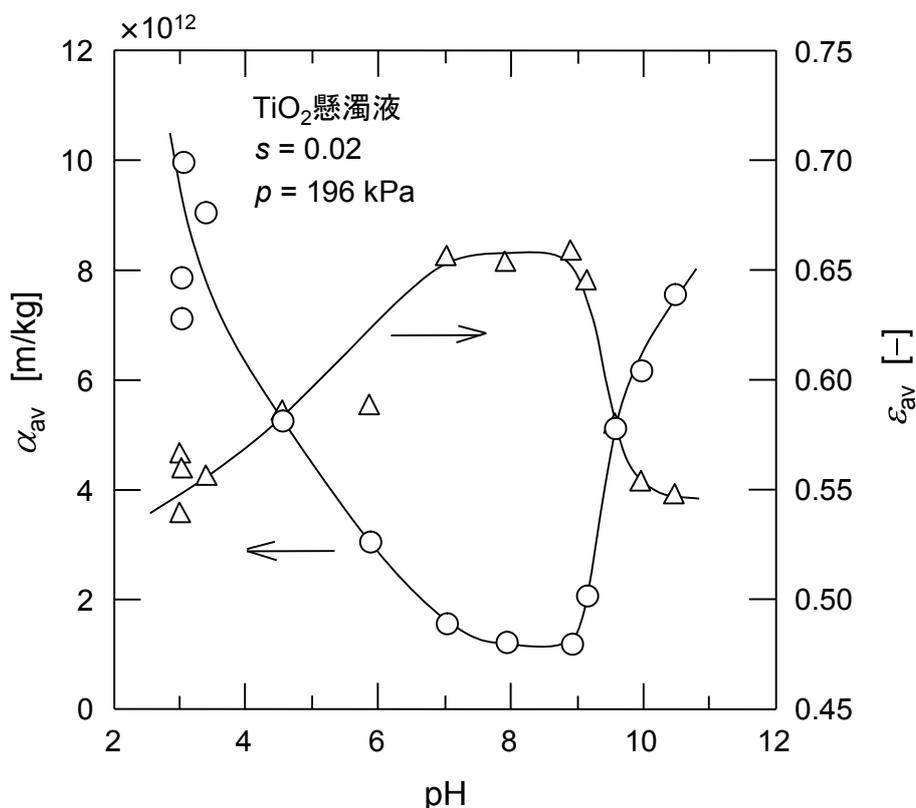


Fig. 2-1 ケーキ構造に及ぼす pH の影響

微粒子懸濁液から低含水率の脱水ケーキをできる限り短時間で得ることは、高度な固液分離の達成のために極めて重要な課題である。しかしながら、高い濾過脱水速度で、なおかつ低含水率のケーキを得ることは、Fig. 2-1 の結果から示唆されるように難しい。すなわち、等電点付近で濾過操作を行うと濾過速度は大きいが緻密な濾過ケーキは得られず、一方等電点から離れると緻密なケーキは得られるが濾過速度は小さくなる。このように、いずれの場合にも濾過で要求される高い濾過速度と低含水率ケーキの両者を同時に満足することは不可能である。

濾過対象物の物理化学的特性を利用すると、高い濾過速度が得られる条件下で濾過を行い、なおかつ低含水率ケーキを得ることも可能となる。たとえば、高い濾過速度が得られる等電点付近の pH 条件でスラリーを濾過してケーキを形成させた後、得られた濾過ケーキにゼータ電位が大きくなる pH の水を同一圧力で透過させると、空隙率が著しく減少することがわかった。この現象の理解をより深めるため、この操作におけるケーキ構造の変化について模式的に Fig. 2-2 に示した。

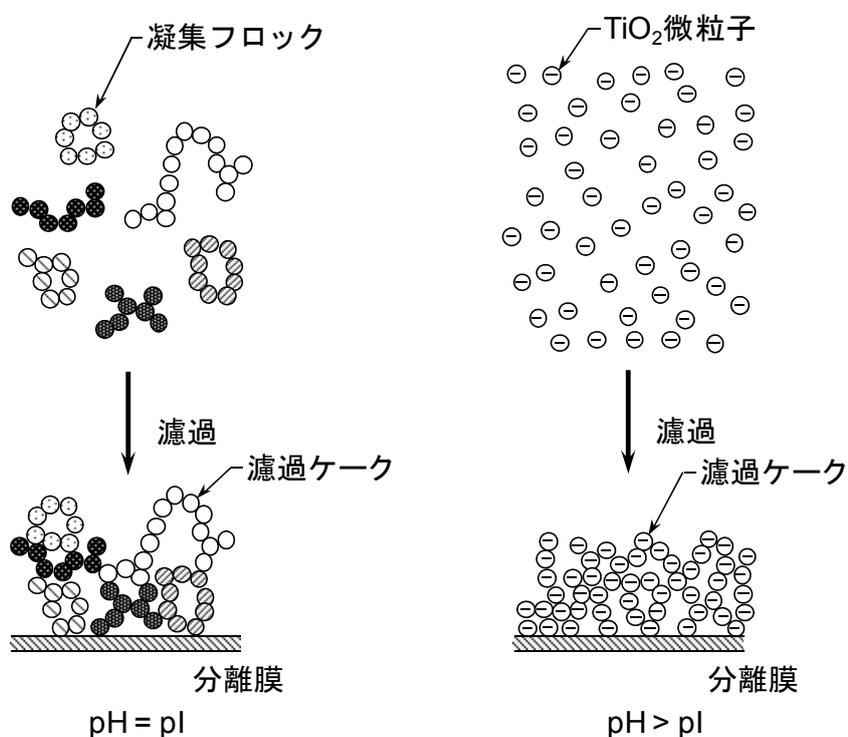


Fig. 2-2 pH 調整によるケーキ構造の変化

・無機電解質を利用した可逆凝集

無機電解質の添加によりフロックを形成させて高速で濾過を行った後、ケーキにわずかな量の水を透過させ無機電解質を洗い流してフロックを崩壊させ、低含水率の脱水ケーキを得る方法。

無機電解質を多量に添加すると粒子の荷電状態が著しく変化し、ゼータ電位が 0 に近づくため、この場合にも凝集フロックが形成される。このような条件下での濾過ケーキは、平均空隙率 ε_{av} が増大し、平均濾過比抵抗 α_{av} は減少するため、高速での濾過脱水が可能となる。しかしながら、先に述べたように、高い濾過脱水速度と低含水率ケーキの両者を同時に満足することは難しい。そこで、微粒子懸濁液への電解質添加の影響に着目し、微粒子の荷電特性を変化させることにより、ケーキの含水率の制御を行った。すなわち、微粒子懸濁液に電解質を添加して微粒子のゼータ電位を低下させ、凝集体を形成させて高い分離速度で濾過を行った後、生成ケーキに水を透過させ再び微粒子のゼータ電位を高めることにより、凝集フロックを崩壊させてより低含水率のケーキを得ることを試みた。単位濾過面積あたりの透過液量 v_p を種々に変化させて実験を行い、生成ケーキの平均空隙率 ε_{av} を v_p に対してプロットしたのが Fig. 2-3 の□である。比較のため電解質を添加した溶液を透過した場合の結果も▽として図中に示した。 $v_p = 0$ におけるプロットは溶液を透過させない場合の結果であり、○が電解質を添加したとき、△が電解質を添加しないときの結果である。図より、電解質を添加した溶液を透過させるとケーキの空隙率はほとんど変化しないのに対し、電解質を添加しない水を透過させると空隙率が著しく減少することがわかる。また、透過初期の段階で空隙率は大きく減少し、わずかな水の透過によってケーキの空隙率を大きく減少できることがわかった。

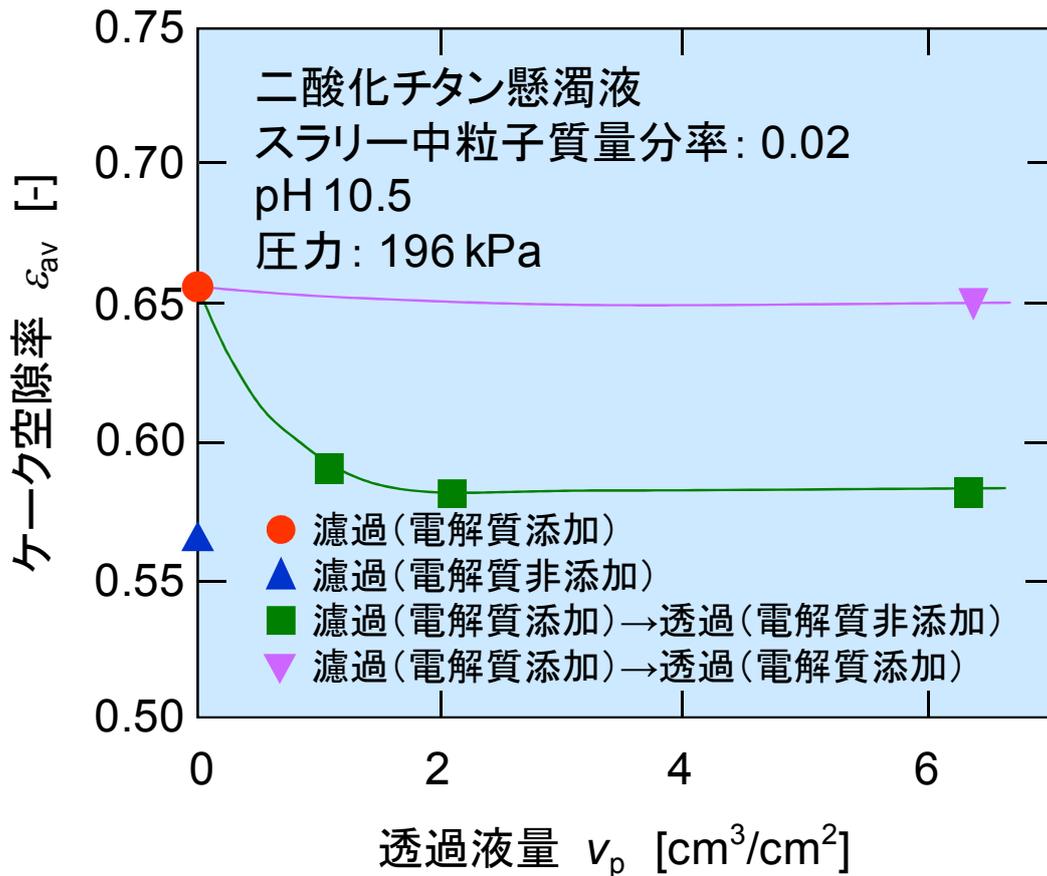


Fig. 2-3 ケークの空隙率と透過液量の関係

Fig. 2-4 には、ケーキの平均空隙率 ε_{av} と全操作時間 θ の関係を示した。○が本法の結果であり、△が透過を行わず種々の条件下で濾過を行った場合の結果である。濾過操作に引き続き透過を行い空隙率を減少させた方が、透過を行わない場合と比べ、透過時間を加味しても、より短時間で低含水率のケーキが形成されており、本法が高速脱水法として極めて有効であることが示された。

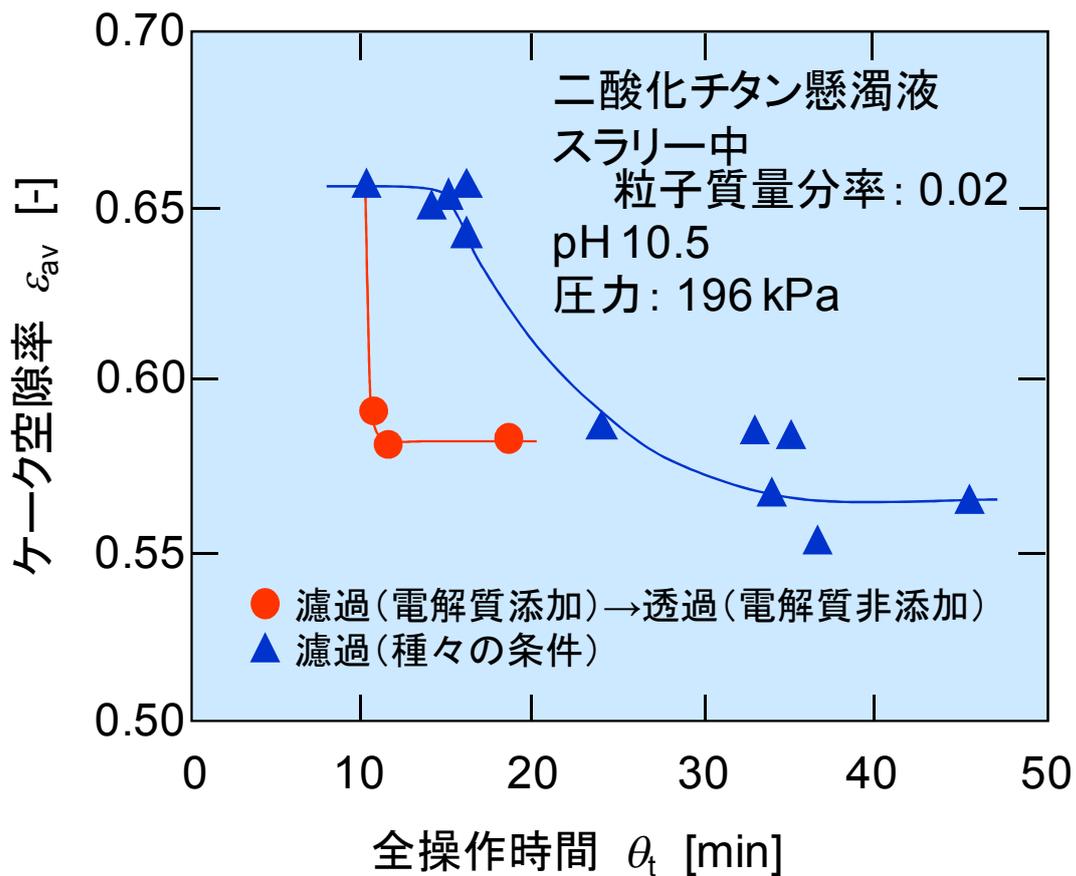


Fig. 2-4 ケークの空隙率と全操作時間の関係

・アルコールを利用した可逆凝集

微粒子懸濁液にアルコールを添加すると凝集フロックが形成されることを利用して、アルコール共存下で濾過を行った後、ケーキ中に水を透過させて凝集フロックを破壊し、短時間で低含水率の脱水ケーキを得る方法。

この場合にも、pH 調整や無機電解質添加の場合と同様に可逆凝集による高速脱水が実現された。

本研究では、無機汚泥のモデル物質で得られた以上の知見を基に、難脱水性の有機汚泥に本技術を応用するとともに、Fig. 2-5 に示すようにより大きな圧力を作用させることでケーキの空隙比が減少する、すなわちより低含水率のケーキが得られる可能性があることから、可逆凝集操作とステップ超高压圧搾操作のハイブリッド操作による難脱水性有機汚泥の高速減量化を検討する。

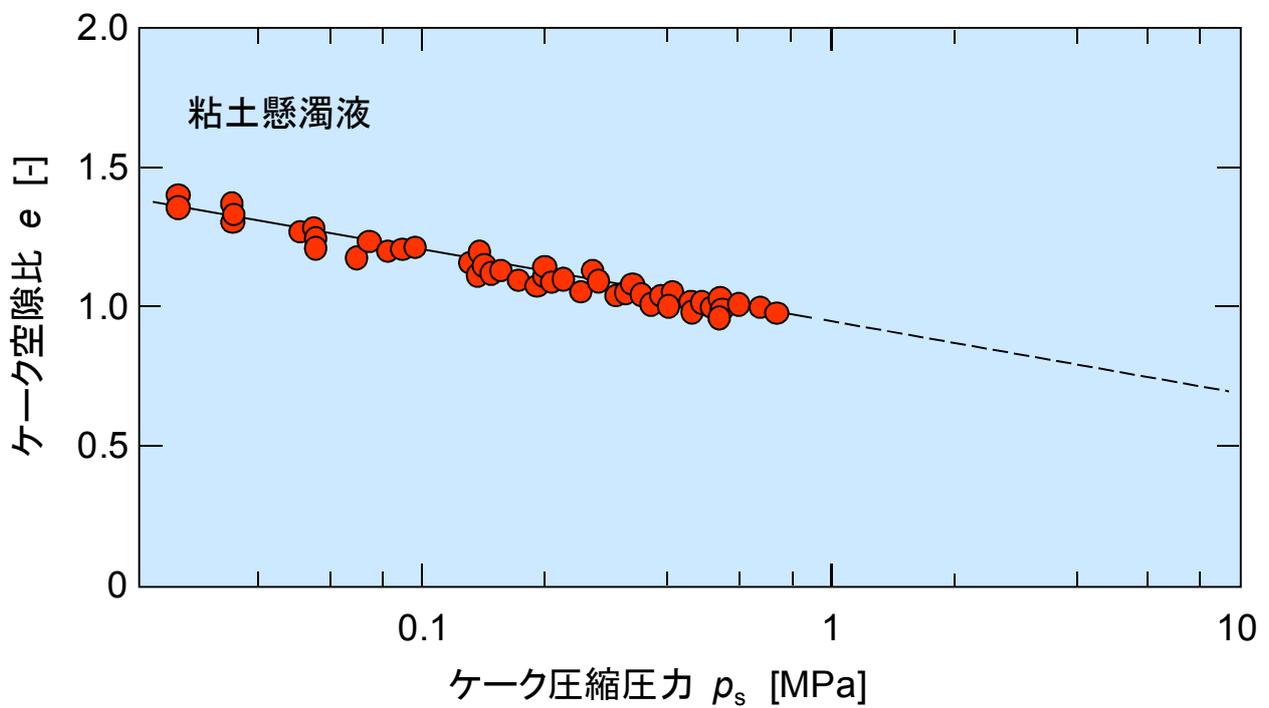


Fig. 2-5 ケーキの空隙率と圧力の関係

研 究 方 法

可逆凝集とステップ超高压圧搾の各々について検討を進めるとともに、両者を融合させた難脱水性有機汚泥の高速減量化プロセスの最適化を行う。具体的には、以下の検討項目について研究を進める。

1) 可逆凝集法の確立

凝集操作により高速分離が可能な緩い凝集フロックを形成し、低圧下で高速脱水を行った後、溶媒環境の変化によりケーキ中のフロックを崩壊させ、微粒子の凝集・分散状態の制御に基づく可逆凝集法を開発する。酸・アルカリ、無機電解質、バイオ凝集剤、アルコール、界面活性剤等を汚泥に添加して凝集フロックを形成させ、0.1~0.5 MPa の低圧下で高速圧搾し、その圧搾特性を明らかにする。また、低圧圧搾で得た凝集脱水ケーキに水透過を行うことにより、ケーキ中のフロックを崩壊させる。得られた非凝集ケーキの特性を究明し、可逆凝集に最も適した pH やイオン強度、イオン種、添加剤の種類や濃度などの制御条件を明らかにする。

・ pH 調整による可逆凝集

pH 調整により比較的緩い構造の凝集フロックを形成させ、短時間にケーキを形成させた後、ケーキ中に適切な pH に調整した溶媒（水）を透過させることにより凝集フロックを直ちに崩壊させる。

・ 無機電解質、バイオ凝集剤、アルコール、界面活性剤等を利用した可逆凝集

無機電解質、バイオ凝集剤、アルコール、界面活性剤等の添加によりフロックを形成させて高速で脱水を行った後、ケーキにわずかな量の水を透過させ添加物を洗い流してフロックを崩壊させる。

2) 超高压圧搾法の確立

材料試験機を用いて圧搾セルに 5~50 MPa の超高压を作用させ、1) で得た非凝集ケーキの低含水率化を図り、超高压作用化で除去可能な水分量を明らかにし、本手法の有効性を検証する。粒径、表面電荷、束縛水量などの微粒子特性と圧搾脱水速度やケーキの最終脱水度（含水率）との関係を究明する。前段の低圧圧搾におけるケーキ脱水度が超高压圧搾における脱水速度に与える影響を検討し、低圧圧搾と超高压圧搾の両者を総合した圧搾プロセスの最適化を行う。

3) 融合プロセスとしての最適操作法の確立

可逆凝集とステップ超高压圧搾の融合プロセスとしての操作法を検討する。種々の性状の汚泥に対して、効果的な可逆凝集を実現させるための添加剤の種類や添加濃度、低圧圧搾と超高压圧搾における各圧搾圧力と圧搾時間について検討し、脱水度と脱水速度の両面から最適条件を明らかにし、汚泥の高速減量化法としての本手法の操作指針を確立する。

<実験試料>

・活性汚泥

活性汚泥とは、種々の細菌を含有したゼラチン状（高分子有機体）を主体とした「フロック（flocs）」とその周りに棲息している原生動物をいう。浄化を行う細菌類が粘性物質を分泌して無生物のフロックを形成し、その中に細菌類は棲息する。そのフロックの主成分は多糖類、タンパク質、核酸であるといわれている。活性汚泥では、このフロック形成能（floc forming）をもつ細菌集団のみが活性汚泥に定着することができる。なぜなら、フロックは重力をもつので、フロックの中に棲んでいれば、沈殿槽で上澄液と沈降分離して、曝気槽へ返送され、その菌数を一定に保つことができるからである。フロック形成能のない細菌群は曝気槽から沈殿槽へ行ったとき、上澄液中に懸濁し、処理水と一緒に流される。正常な活性汚泥は 1 ml 中 $10^7 \sim 10^8$ の細菌密度で棲息している。

本実験では、名古屋市上下水道局植田水処理センターから採取した活性汚泥（余剰汚泥）を用いた。乾燥濃度測定の結果、汚泥濃度は 4000～5000 ppm で、ピクノメーターを用いた密度測定の結果、汚泥密度 $\rho_s = 1.451 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ であった。20 時間のデカンテーションで約 2 倍に濃縮し、質量濃度 $s = 0.01$ に調整したものを実験試料とした。

・凝集剤ポリ塩化アルミニウム（PAC）

凝集剤には、水処理分野で広く使用されているポリ塩化アルミニウム（PAC）を選定した。一般式は、 $[\text{Al}_2(\text{OH})_n\text{Cl}_{6-n}]_m$ で表される凝集剤である。 $[\text{Al}_6(\text{OH})\text{Cl}_{15}]^{3+}$ 、 $[\text{Al}_3(\text{OH})\text{Cl}_{20}]^{4+}$ 、 $[\text{Al}_{13}(\text{OH})\text{Cl}_{34}]^{5+}$ などの塩基性で、かつ高い陽電荷を持った多核縮合イオンを有効成分として含んでいる。凝集沈殿の機構は、水中で濁質を分散安定させている原因である濁質表面の反発負電荷を中和する過程と、その結果として生じる微細な濁質を架橋によりさらに粗大化する過程を通して行われる。PAC は荷電中和能力の高い溶解性重合アルミニウム（4 価、5 価）をあらかじめ含んでいる点で有効であり、また凝集剤として作用するのに必要なアルミニウムの加水分解の大部分をあらかじめ行ってあるので、水に添加し

た際もアルカリ度をほとんど消費しない。

本実験では、多木化学（株）製の水処理用凝集剤 PAC・250A を用いた。PAC・250A の物性値を Table 3-1 に示す。

Table 3-1 PAC の物性値

項目	標準値
外観	無色ないし淡黄、 褐色透明な液体
比重 (20℃)	1.20±0.01
酸化アルミニウム (Al ₂ O ₃) %	10.3±0.3
塩基度 %	51±4
pH 値	2.6±0.3
硫酸イオン (SO ₄ ²⁻) %	3.0±0.5
アンモニア性窒素 (N) %	0.003 以下
ヒ素 (As) ppm	0.5 以下
鉄 (Fe) %	0.006 以下
マンガン (Mn) ppm	10 以下
カドミウム (Cd) ppm	0.3 以下
鉛 (Pb) ppm	1 以下
水銀 (Hg) ppm	0.1 以下
クロム (Cr) ppm	1 以下
凍結点 (℃)	-12±1

<実験装置>

Fig. 3-1 に、本研究において設計・製作した、窒素加压による低圧圧搾と材料試験機による超高压圧搾の両操作が可能なセル断面積 9.62 cm^2 の超高压圧搾セルを示した。これを用いて Fig. 3-2 に示すシステムにより、圧力 $p_d = 98 \text{ kPa}$ で汚泥の低圧圧搾を行い、脱水量 v の経時変化を測定した。次いで、タンクから純水が供給できる経路に切り替え、同一圧力 p_p で生成汚泥ケーキに純水を透過させた。濾材には、保留粒子径 $1 \mu\text{m}$ の濾紙 4A (ADVANTEC 製) および濾布 TRG803K (岡山中尾フィルター製) を用いた。

超高压圧搾セルの試作



Fig. 3-1 超高压圧搾セル

低圧圧搾・純水透過

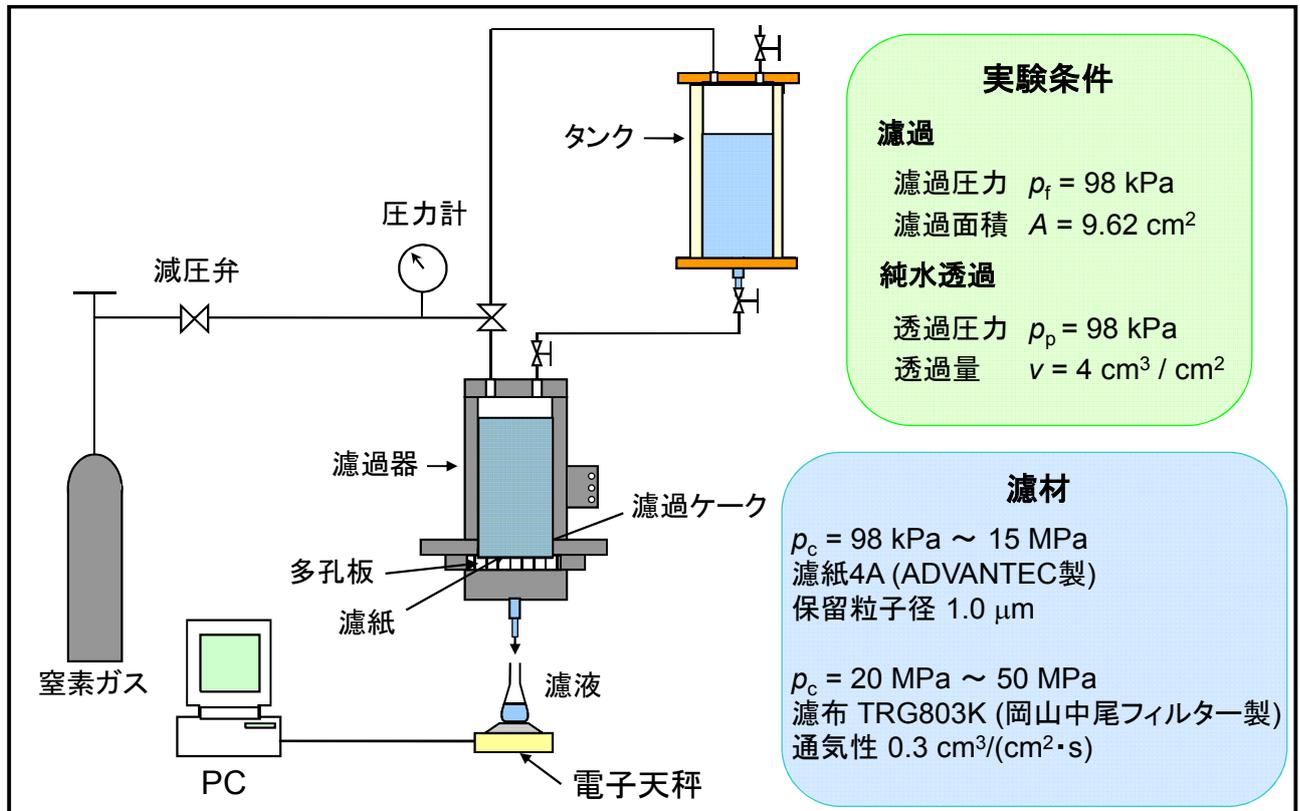


Fig. 3-2 脱水（低圧圧搾）装置の概略図

次に、圧搾試験器の上部フランジを外してピストンと付け替え、また下部フランジに接続されたステンレス製の管とネジを付け替えて、Fig. 3-3 に示すように材料試験機（JT トーシ製）により荷重圧 $p_c = 98 \text{ kPa} \sim 50 \text{ MPa}$ を作用させ両面排水で定圧圧搾を行い、ケーキ厚さ L の経時変化を測定した。圧搾終了後、ケーキ含水率を赤外線式水分計（Kett 製）にて測定した。

超高压圧搾

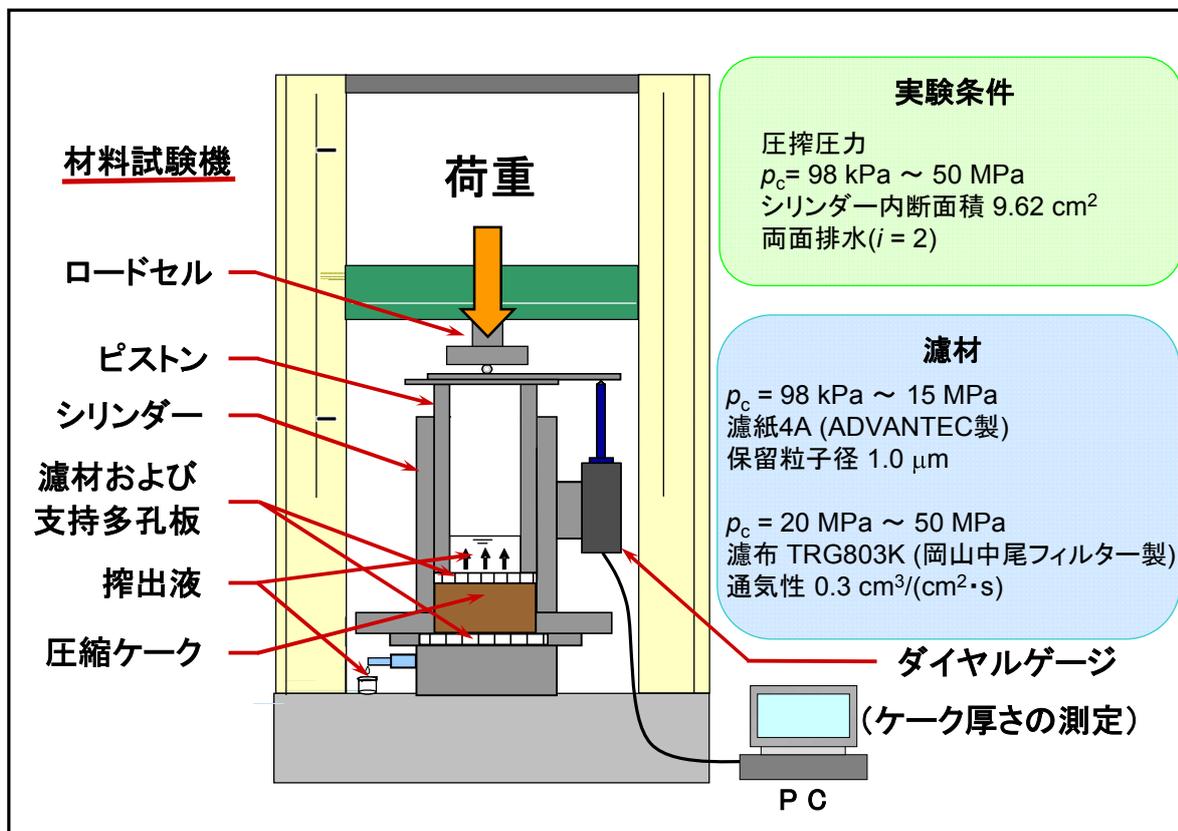


Fig. 3-3 脱水（超高压圧搾）装置の概略図

結果および考察

<可逆凝集を用いたステップ超高压圧搾>

提案するプロセスのコンセプトは、凝集処理をあらかじめ行い、低圧圧搾操作で迅速に汚泥中の多量の水分を除去した後、透水操作による溶媒環境の変化と引き続いて行う超高压圧搾操作による圧縮作用の両者によって、生成濾過ケーキ内の凝集ブロックが崩壊し、直ちにケーキの低含水率化が行われるというものである。下水余剰汚泥について、Fig. 4-1 のように、本研究で提案する脱水法の有効性を検証した。

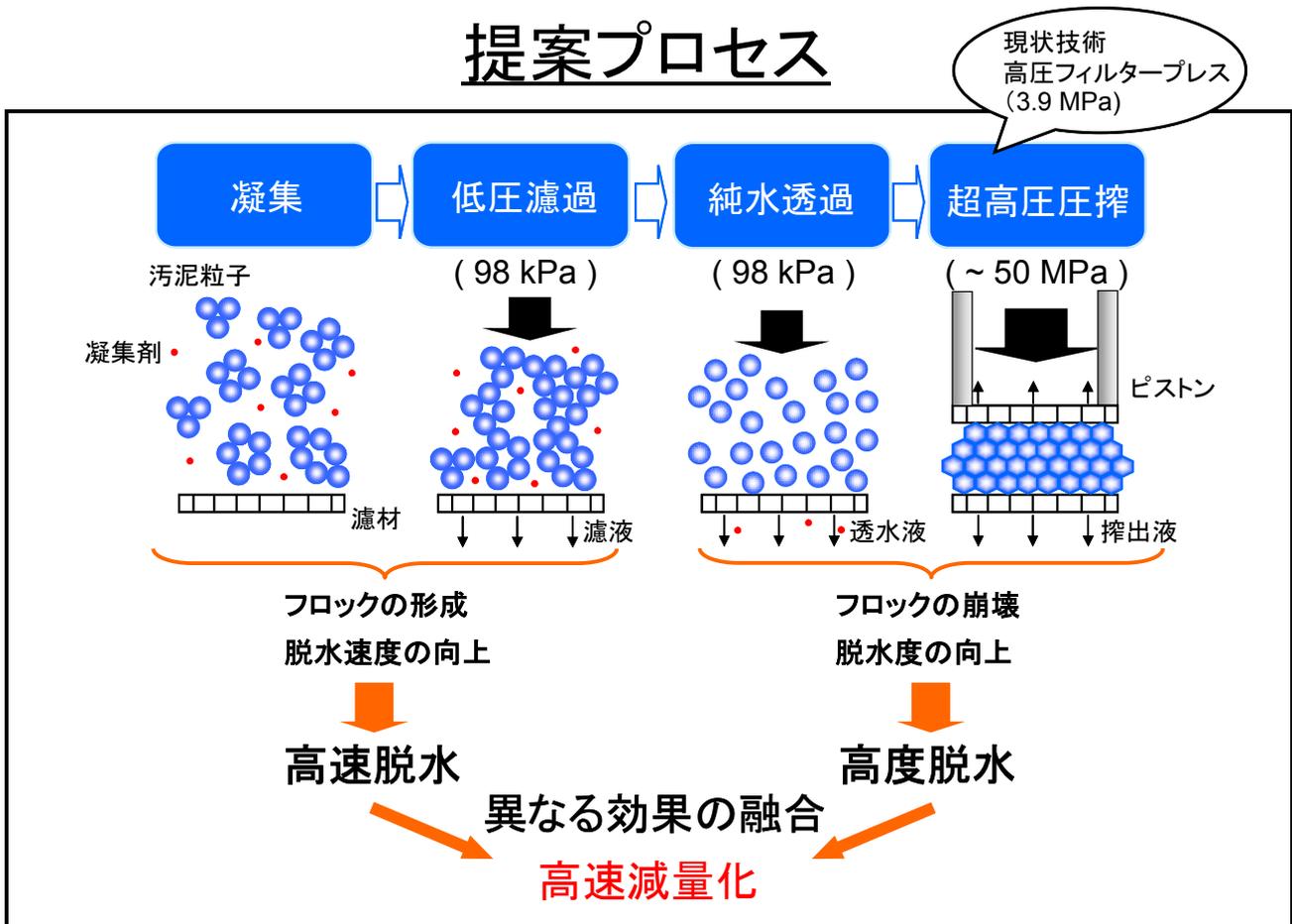


Fig. 4-1 本研究における高効率高速脱水法

<下水余剰汚泥の凝集処理>

pH 調整、無機電解質、バイオ凝集剤、アルコール、界面活性剤等の添加による下水余剰汚泥の凝集処理を行い、レーザ回折式粒度分布測定装置（島津製作所製）により凝集効果の確認を行ったところ、特に多価イオンのポリ塩化アルミニウム（PAC）を用いると顕著な凝集効果が確認された。そこで PAC 添加による凝集効果の検討を詳細に行った。汚泥スラリーに PAC を種々の AlT 比（アルミニウム量 対 濁質量 比）で添加し、得られた凝集汚泥フロックの面積平均径 d_s と AlT 比との関係を Fig. 4-2 に示した。図より AlT 比を大きくすると大きな凝集フロックが形成されるようになり、0.15 の時に最も凝集効果が大きくなることがわかった。以後、PAC 添加量は、AlT 比が 0.15 となるように設定した。

下水余剰汚泥の凝集特性

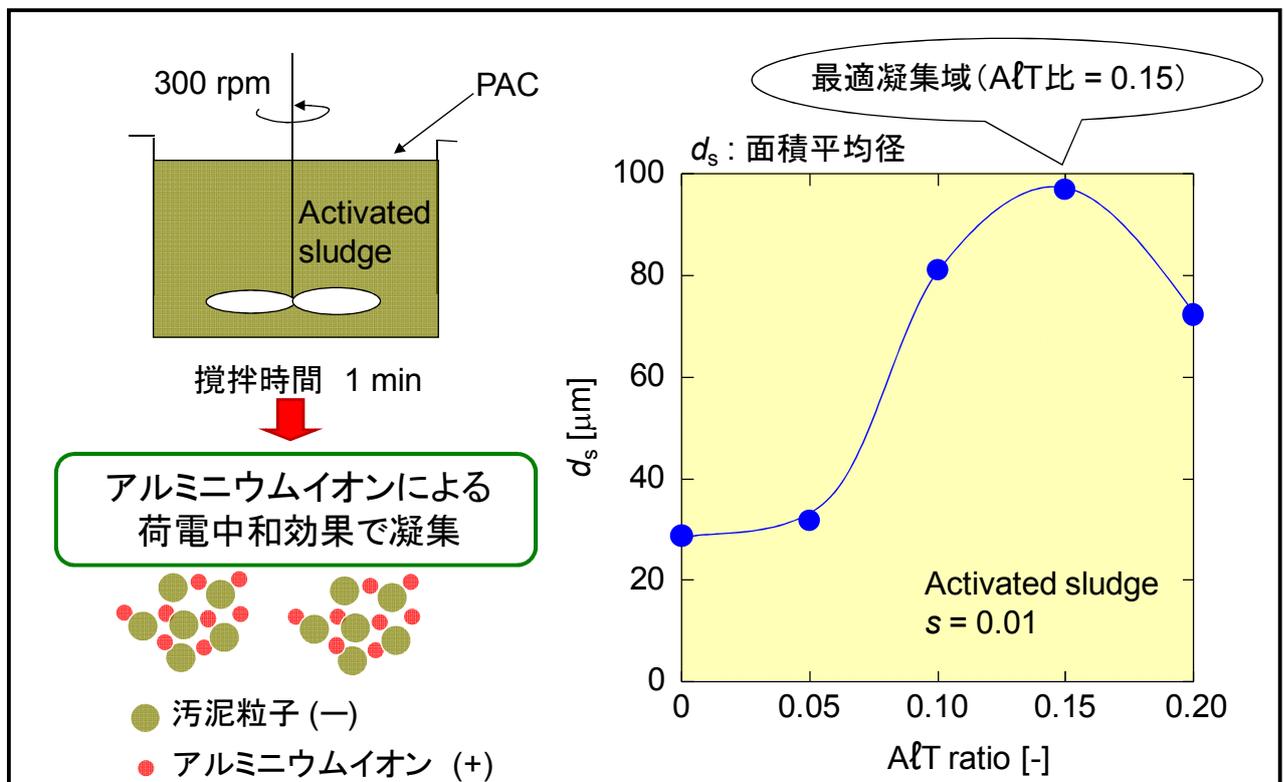


Fig. 4-2 下水余剰汚泥のフロック径と AlT 比の関係

<凝集・低圧圧搾>

下水余剰汚泥に A/LT 比が 0.15 となるように PAC 添加をした後、圧力 $p_d = 98 \text{ kPa}$ で低圧圧搾を行った。また、比較として下水余剰汚泥をそのまま低圧圧搾する実験も行い、両実験結果を、単位濾材面積あたりの脱水量 v 対 脱水時間 θ_d として、Fig. 4-3 に示した。凝集操作を行った○の場合では、Fig. 4-2 で示したように汚泥フロックが形成されるため濾過抵抗が低下し、未凝集の△の場合に比べ、著しく脱水速度が大きくなり、本操作による全脱水時間は 93 %短縮された。このことから、凝集処理が低圧圧搾に極めて有効なことがわかる。

凝集効果による濾過速度の向上

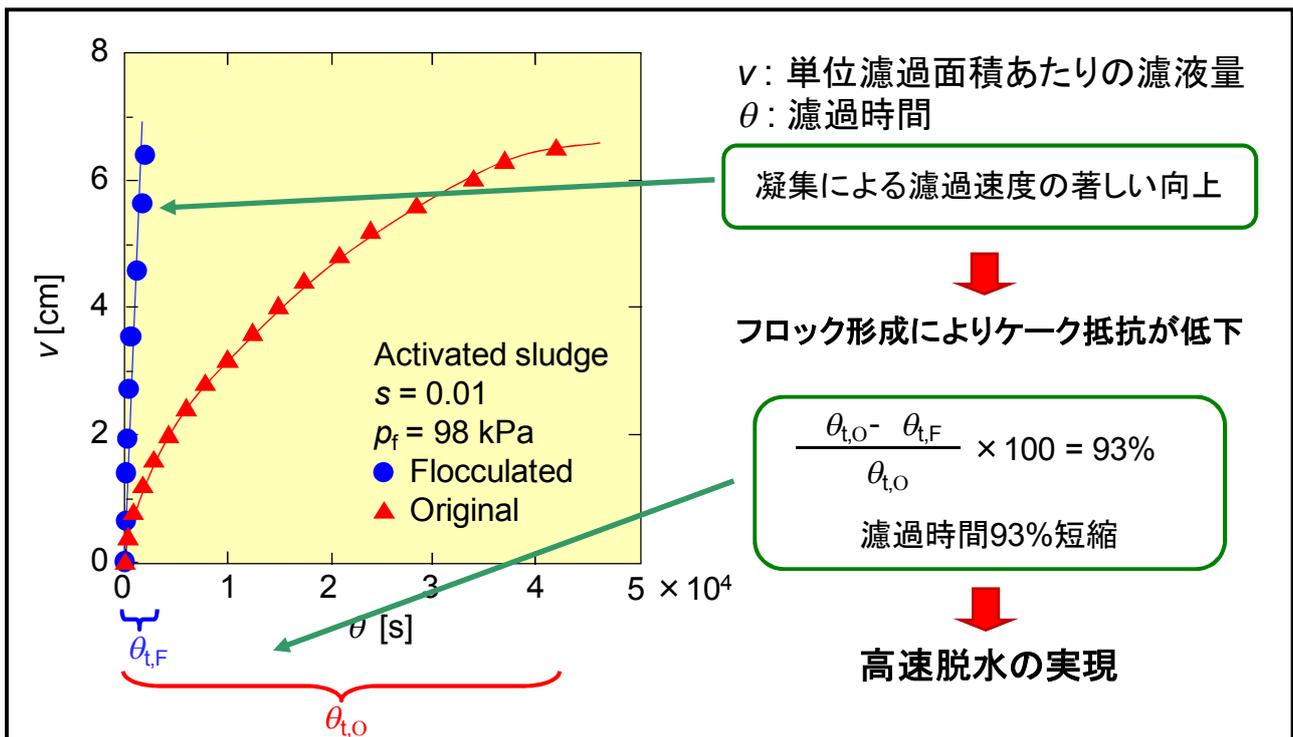


Fig. 4-3 下水余剰汚泥の脱水挙動

<純水透過>

次に、含水率を更に低下させるため、低圧圧搾操作で形成された汚泥ケーキに超高压を作用させる操作を試みることにしたが、汚泥ケーキを直接 15 MPa の超高压で圧搾すると、理論上、ケーキ表面では 15 MPa の高い液圧が発生することとなり、ケーキ含水率が大きい場合には、圧搾の実施が不可能なことが予想された。実際に、種々の圧搾圧力で検討を行ったところ、10 MPa 以上の超高压圧搾は困難であった。そこで、低圧圧搾をさらに継続してケーキの含水率をできるだけ小さくすることを試みた。

Fig. 4-4 には、低圧圧搾を継続したときのケーキ含水率 R の経時変化を示した。□の未凝集ケーキでは脱水速度が著しく小さく、含水率を約 2% 下げるのに 5 時間以上の時間がかかった。また、○の凝集ケーキでは、フロック中に水が取り込まれているため、低圧圧搾をつついても含水率はほとんど低下しなかった。無機汚泥を対象としたこれまでの知見から、透水操作を行うことにより凝集フロックを破壊できることが考えられたので、凝集ケーキに透水操作を行いつつ圧搾を続ける操作を行った。その結果、図中の△で示したように、短時間に含水率が低下することがわかった。このことから、透水操作によりフロックが崩壊し、再分散状態となり、脱水速度と脱水度の向上に繋がったものと推察され、Fig. 4-5 に示すように顕微鏡観察と粒度分布測定により実際にフロックの崩壊が生じていることが確認された。

純水透過の効果

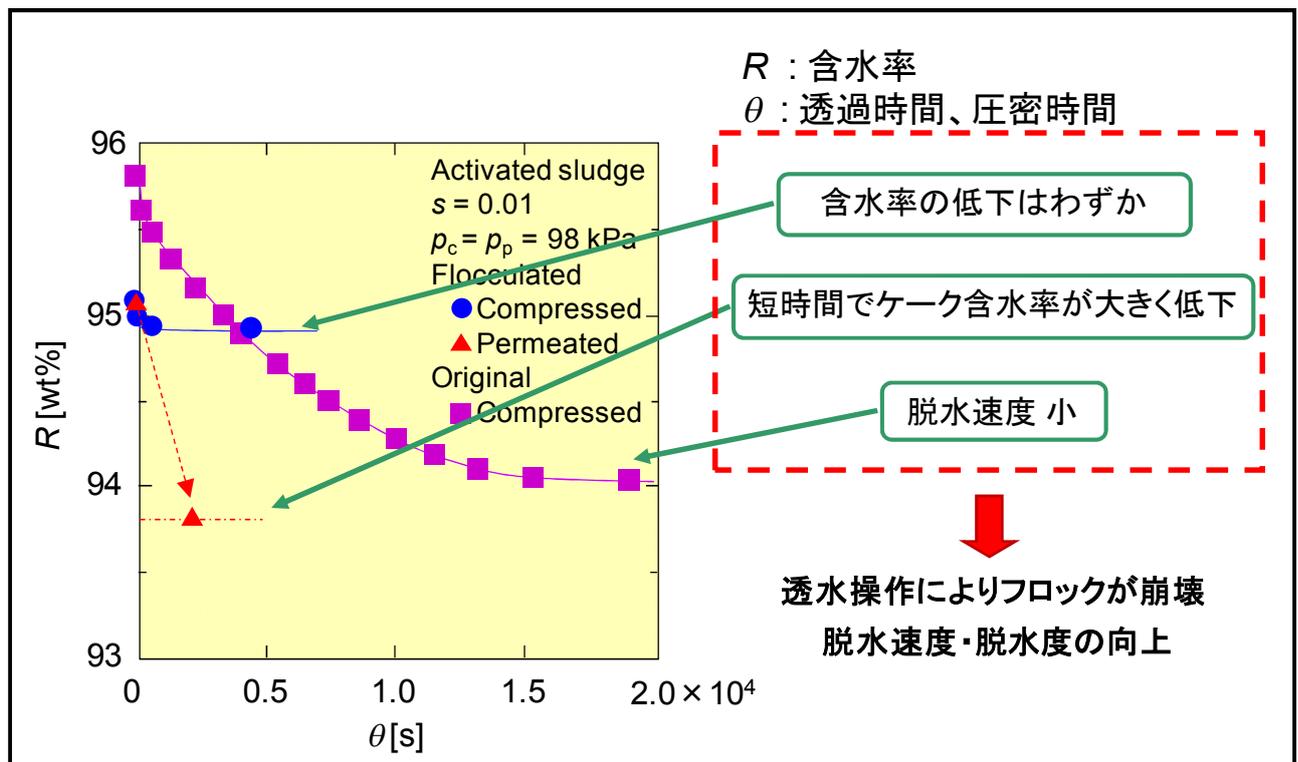


Fig. 4-4 下水余剰汚泥の低圧圧搾に及ぼす水透過の影響

顕微鏡観察と粒度分布測定

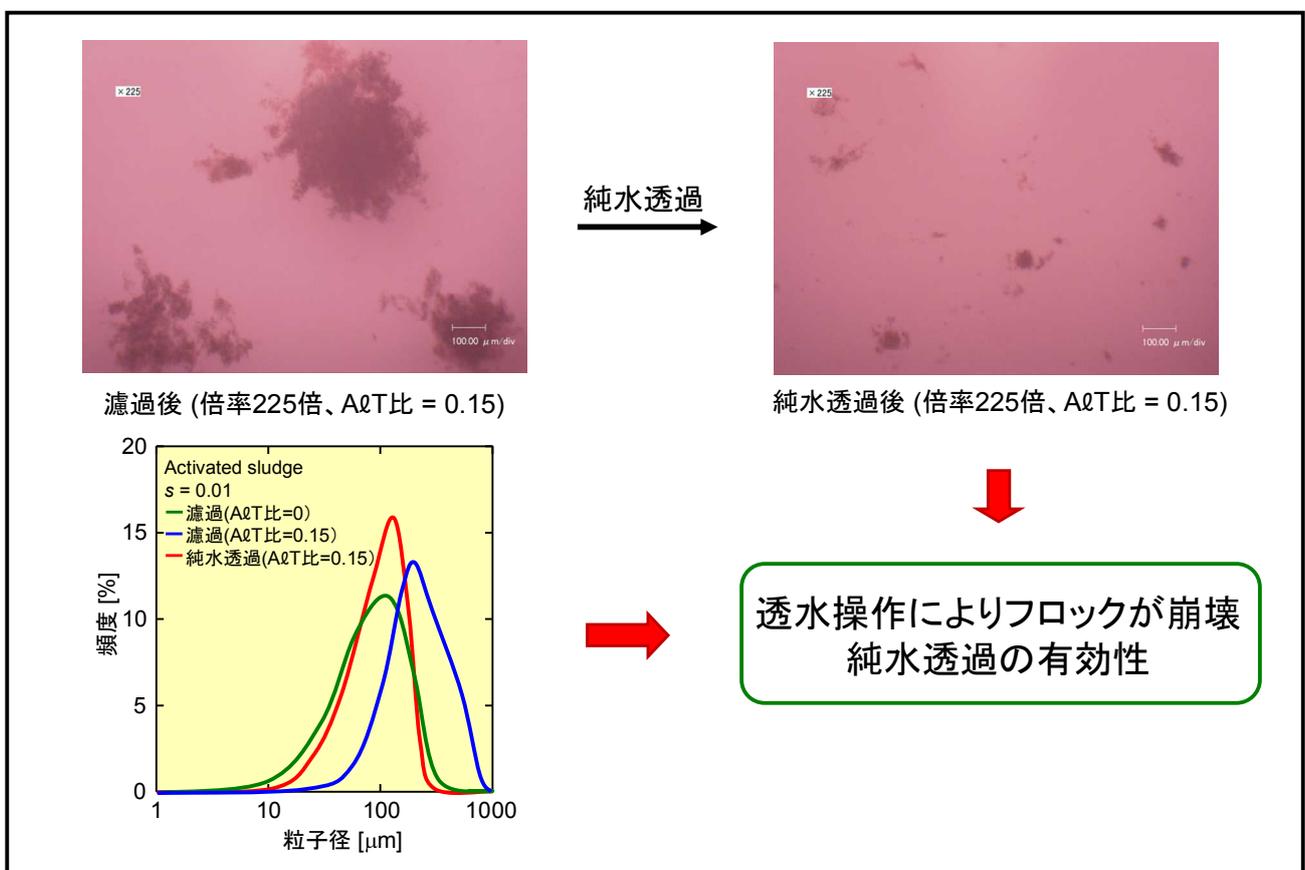


Fig. 4-5 可逆凝集法によるフロックの崩壊

<超高压圧搾>

Fig. 4-6 には、透水操作を行いつつ低圧圧搾した場合に得られた透水ケーキを種々の圧力で超高压圧搾した場合のケーキ含水率 R の経時変化を示した。圧搾圧力が大きいほど脱水速度・脱水度とも大きくなり、多価イオンのポリ塩化アルミニウム (PACl) を用いる可逆凝集法で 50 MPa の超高压圧搾した場合には、ケーキ含水率は 23 % となった。この結果は、現存技術の最高水準である 60 ~ 70 % を遙かに凌いでおり、併せて脱水速度の観点からも満足のいくものであった。減量化の程度で数値化すると、99.87 % の減量化が達成されている。微生物細胞内の水分が 70 ~ 80 % であることを考えると、この 23 % という低い含水率は、単にフロックの崩壊による汚泥粒子間の自由水や粒子表面の付着水だけでなく、細胞内に含まれる束縛水も除去されていることを示している。なお、Fig. 4-6 から可逆凝集法が脱水速度に与える影響は大きいですが、最終的な脱水度については超高压を作用させると可逆凝集の方法によらず十分な効果が望めることがわかる。

超高压压搾による高度脱水

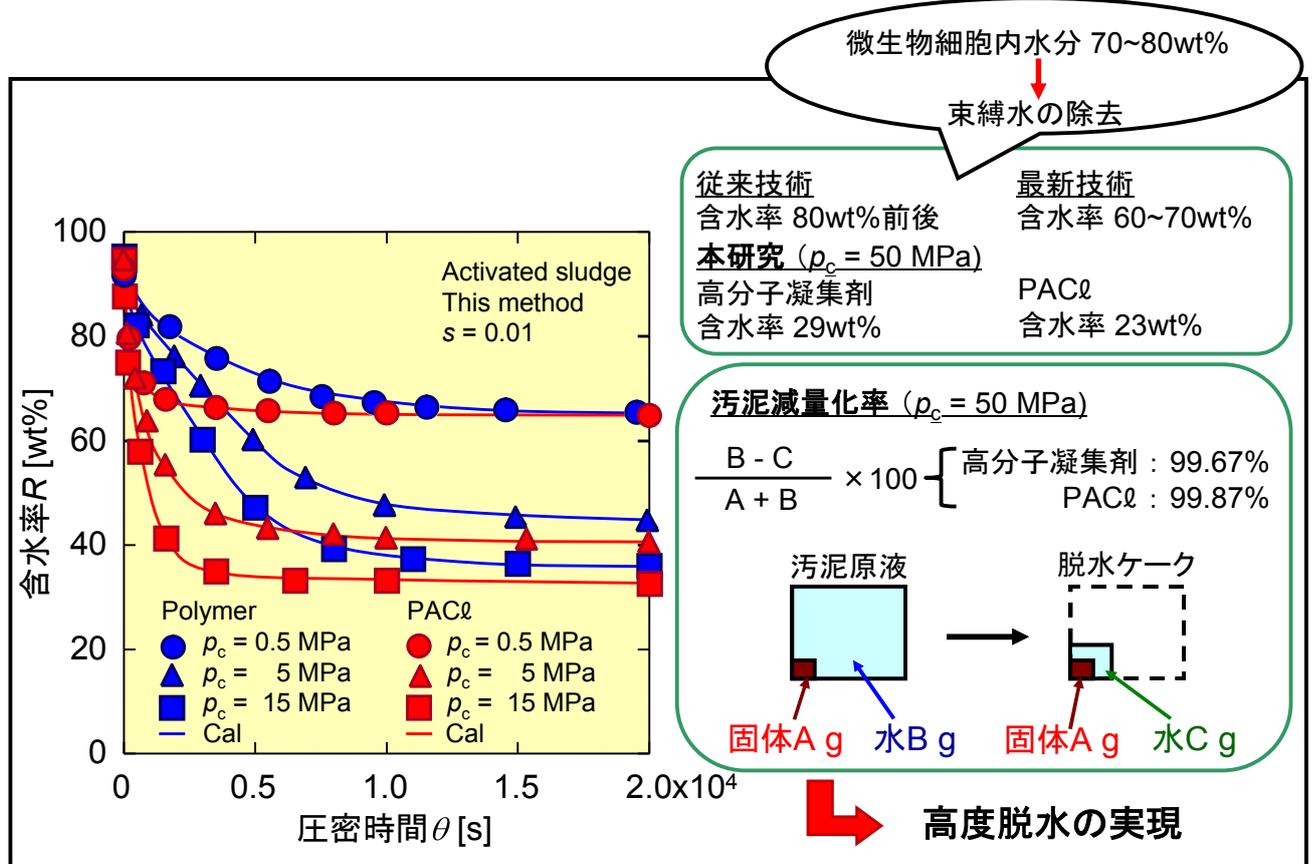


Fig. 4-6 超高压压搾による下水余剰汚泥の脱水挙動

Fig. 4-7 には、種々の圧搾圧力 p_c を作用させた場合の汚泥ケーキの最終空隙率 ε を、 ε vs p_c の両対数プロットで示した。圧搾圧力の増加とともに空隙率がほぼ直線的に小さくなっており、 $\varepsilon = \varepsilon_1 p_c^{-\lambda}$ で表される関係が得られた。したがって、下水余剰汚泥については圧力を更に大きくして超高压圧搾を行うことにより脱水度の更なる向上が見込める。また、このようなデータの整理により従来法では不正確であった空隙率の推算がより正確にできることを示した。

超高压下の平衡空隙率 ε の推算

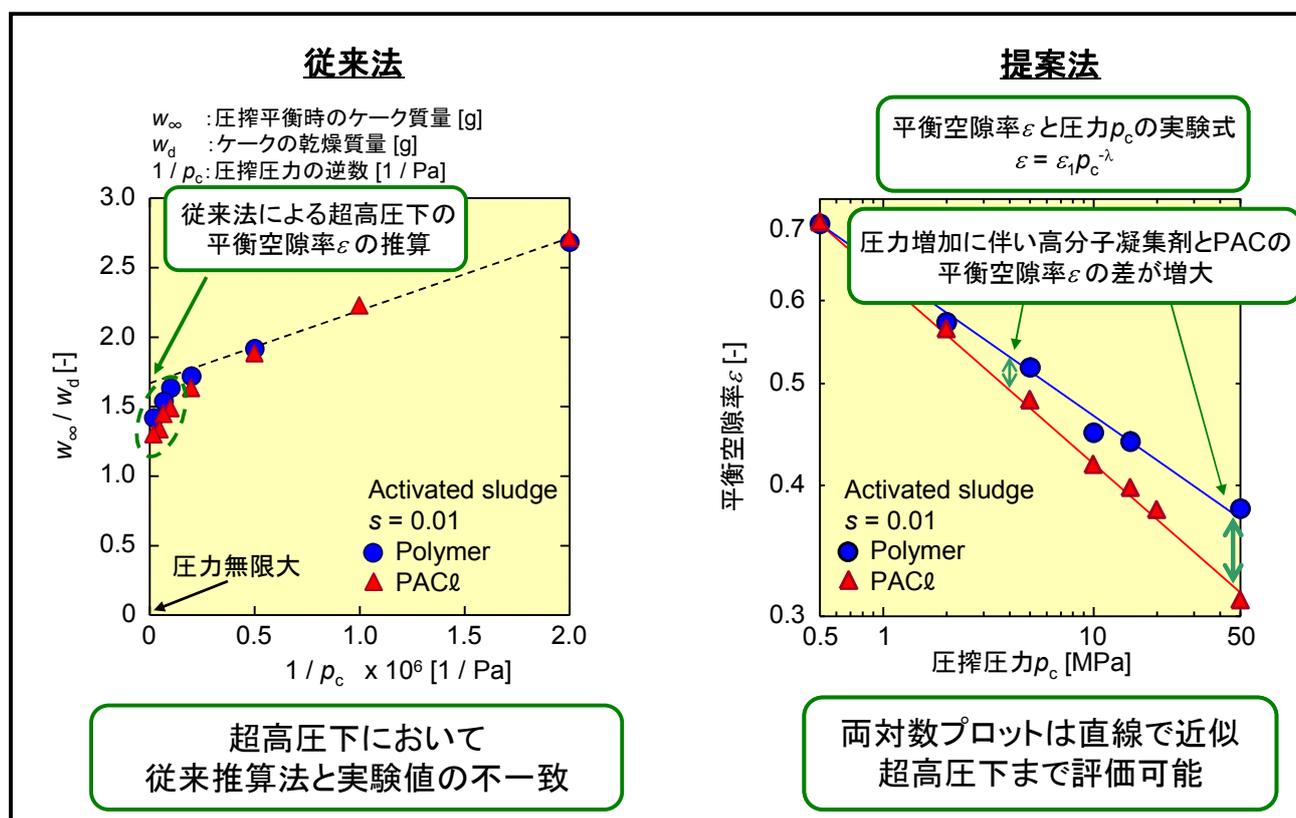


Fig. 4-7 脱水ケーキの空隙率と圧搾圧力の関係

<新規圧搾モデルの提案>

一般に圧搾挙動は、従来モデルである Terzaghi モデルあるいは Terzaghi-Voigt モデルで記述できる。しかしながら、下水余剰汚泥や豆腐、おから、ニンジンなどの有機質モデル試料では、特徴的な圧搾挙動を示し、従来モデルでの解析が不可能であった。そこで、Fig. 4-8 に示す Terzaghi モデルに Voigt モデルを複数個直列に接続した Terzaghi-一般化 Voigt モデルを提案し、本圧搾解析に適用した。Terzaghi モデルでは(1-6)式、Terzaghi-Voigt モデルでは(1-8)式で表された平均圧密比 U_c は、本モデルでは次式のように表される。

$$U_c = \left(1 - \sum_{k=1}^K B_k\right) \left\{1 - \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{i^2 C_c \theta_c}{\omega_0^2}\right)\right\} + \sum_{k=1}^K B_k \{1 - \exp(-\eta_k \theta_c)\} \quad (2-1)$$

ここで、 i は排水面数、 C_c は修正圧密係数、 θ_c は圧密時間、 ω_0 は単位断面積毎の固体体積、 B_k は全圧密量に対する各クリープ圧密の割合、 η_k は各クリープの進行速度を表す定数（遅延時間の逆数）である。

段階的に発生するクリープ挙動は、式(2-1)に基づき Fig. 4-9 左図のように $(1 - U_c)$ 対 θ_c の片対数プロットの直線性から決定でき、下水余剰汚泥の場合、三段階で近似できることから、四次圧密までを考慮する必要があることがわかった。<圧密理論>「二次圧密を考慮した Terzaghi-Voigt モデル」で先述した B と η の求め方と同様な方法で B_3 と η_3 を求め、続いて四次圧密分を差し引いてから、 B_2 と η_2 を、三次、四次圧密分を差し引いてから、 B_1 と η_1 を求めた。その後、二次～四次圧密分を差し

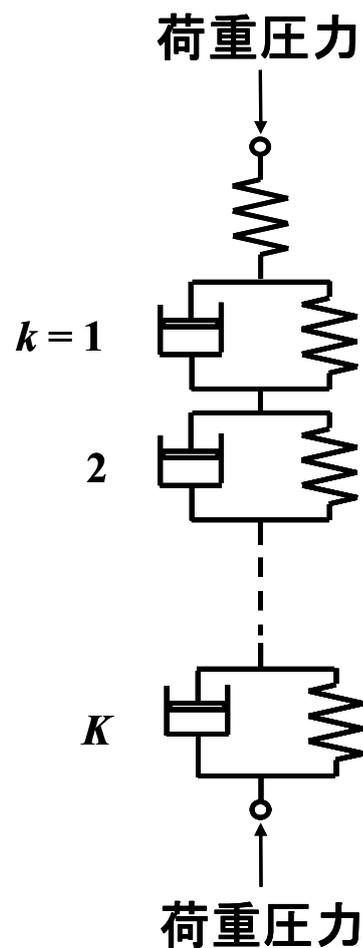


Fig. 4-8 Terzaghi-一般化 Voigt モデル

引いて修正圧密比 $U_{c,corr}$ に変えてから、Fitting 法により修正圧密係数 C_e を求めた。Fig. 4-9 右図は、下水余剰汚泥の圧密挙動を平均圧密比 U_c の経時変化として示した。実線は、式 (2-1) で四次圧密 ($k = 3$) まで考慮し、フィッティングにより得た修正圧密係数や各クリープ定数を用いて求めた計算値であり、プロットの実験値と精度良く一致していることから、脱水過程をモデル化できたと判断される。また、一次から四次までの各圧密量の割合 A, B_1, B_2, B_3 を図中に示した。 A の値が最も大きく、一次圧密が全圧密量の 60% を占めることがわかった。Fig. 4-10 には、各圧密過程での圧密速度の指標となる修正圧密係数 C_e および各クリープ定数 η_k と圧搾圧力 p_c との関係を示した。修正圧密係数 C_e は、圧搾圧力の増大とともに値が大きくなり、圧搾圧力が 5 MPa 以上では、ほぼ同程度となる傾向が見られた。一方、各 η_k には、1 オーダー以上の顕著な差が見られ、クリープ現象が段階的に生じていることがわかる。

なお、あらかじめ低圧圧搾により半固体状にしてから行った豆腐やおからの圧密挙動も、従来モデルの Terzaghi モデルや Terzaghi-Voigt モデルでは記述ができず、四次圧密までの考慮が必要で、三次圧密が全圧密量の 50% を占めていた。半固体状原料の場合には、式(2-2)を用いた。

$$U_c = \left(1 - \sum_{k=1}^K B_k\right) \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{(2n-1)^2 \pi^2} \cdot \exp\left\{-\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{4} \cdot \frac{i^2 C_e \theta_c}{\omega_0^2}\right\}\right] + \sum_{k=1}^K B_k \{1 - \exp(-\eta_k \theta_c)\} \quad (2-2)$$

このような有機汚泥の特徴的な圧密挙動は、その物質のレオロジー特性と密接に関係していると考えられ、今後圧密特性とレオロジー特性との関係について詳細な検討が必要となる。

Terzaghi - 一般化Voigtモデルによる解析

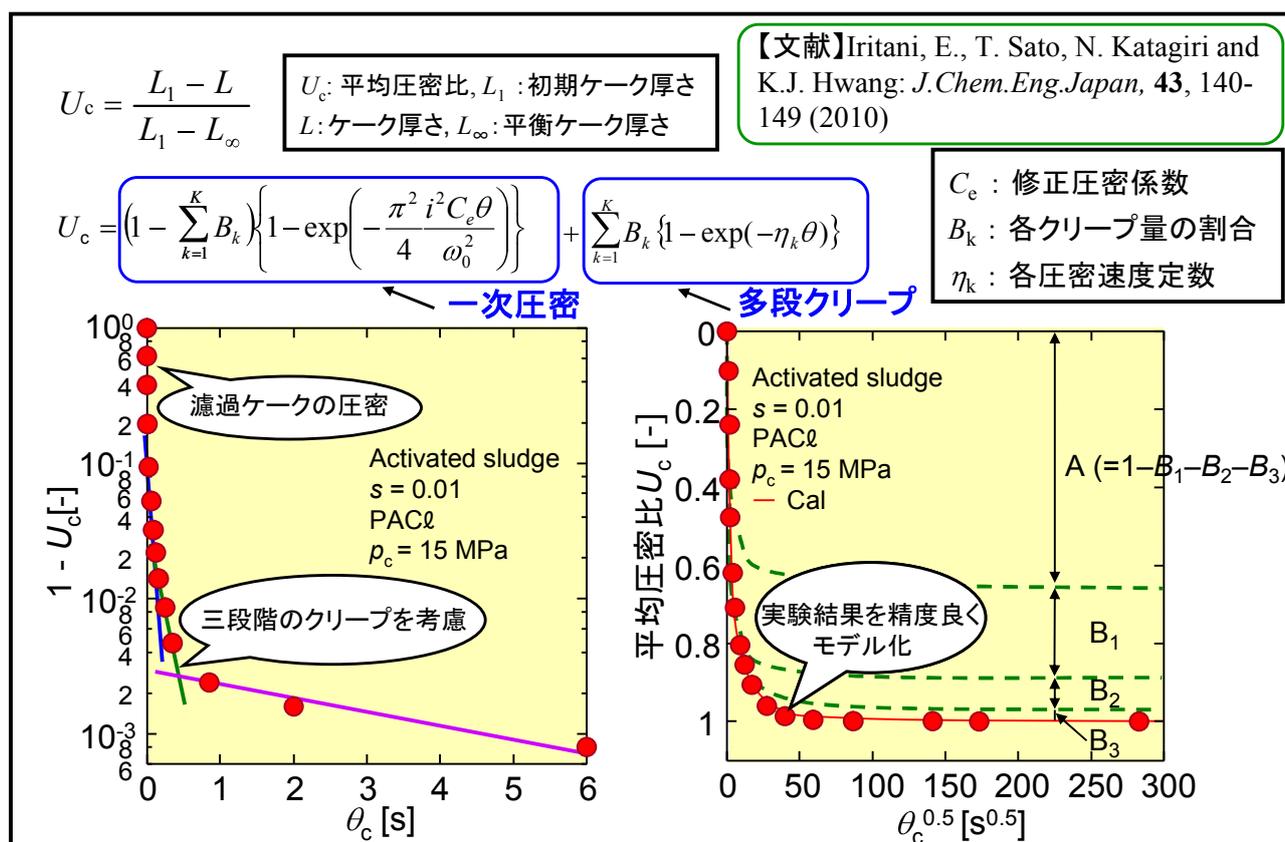


Fig. 4-9 多段クリープモデルによる下水余剰汚泥の超高压圧搾挙動の解析

各圧密速度の比較

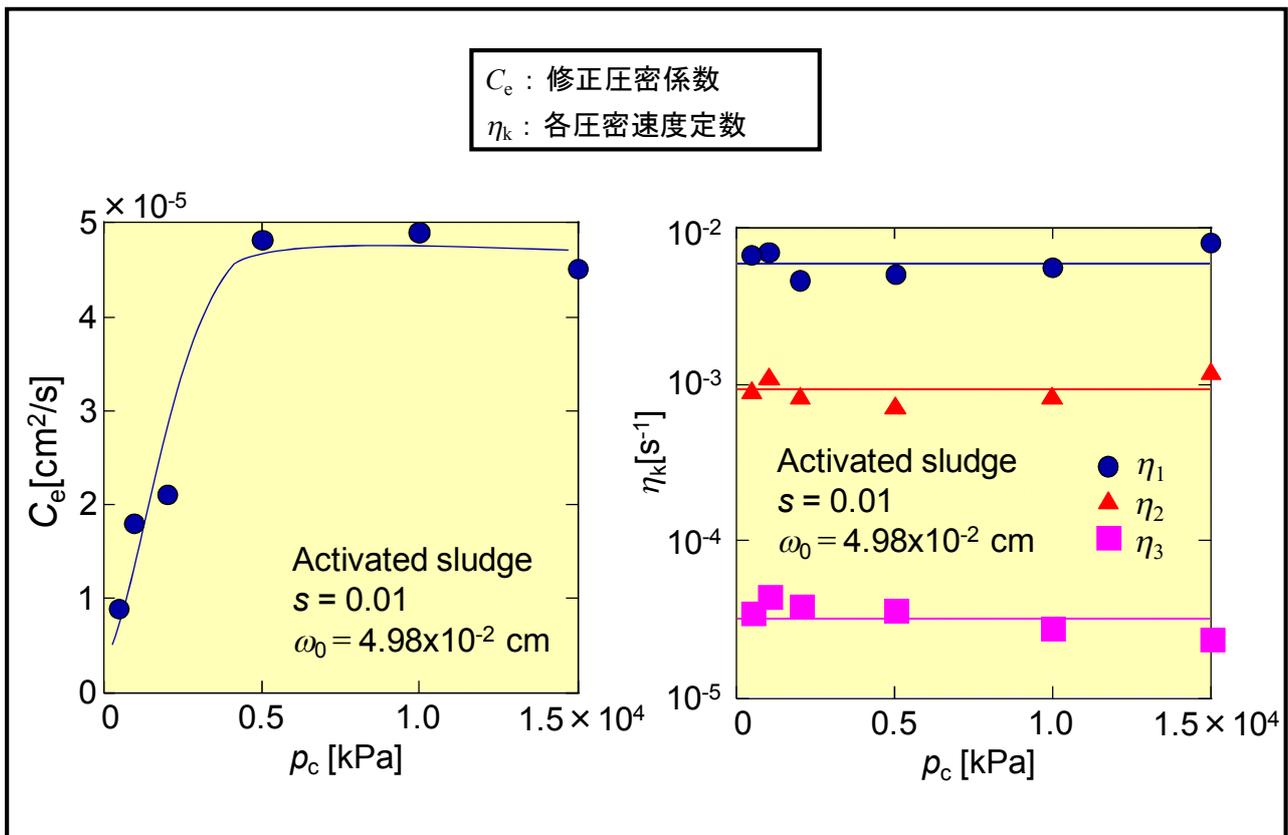


Fig. 4-10 各圧密速度と圧搾圧力との関係

結 論

可逆凝集とステップ超高压圧搾とを融合した高効率の高速脱水法を提案し、脱水時間と脱水度の両面から、現存技術に比べ格段に優れていることを実証した。難脱水性有機汚泥として下水余剰汚泥を例にとり、多価イオンの無機電解質の添加による可逆凝集操作と 50 MPa の超高压圧搾とを組み合わせた脱水操作により、ケーキ含水率は 23 %まで低減された。汚泥原液を基準とすると、99.87 %もの減量化を実現したこととなる。また、適切な可逆凝集法を選択することにより脱水速度が著しく向上することが明らかとなり、現存技術に対して総脱水時間で 60 %短縮、ケーキ含水率で 20 %減の本研究の目標を達成できる条件を見出した。可逆凝集の方法により差があるものの、脱水ケーキの含水率と圧搾圧力との関係から、圧搾圧力を更に大きくすることで、より高度な脱水が可能となることも示唆された。また、超高压圧搾におけるケーキ脱水挙動のモデル化も可能となった。以上より、本法による難脱水性有機汚泥の高速減量化が実現できることが明らかとなり、今後、スケールアップ等、実用化に向けた取組みを行うことで、現在の汚泥処理問題への貢献が期待できる。

英語概要

- ・ 研究課題名

Development of Technology for Reducing Difficult-to-Dewatering Organic Sludge at High Rate by Step-up Ultrahigh-Pressure Expression Combined with Reversible Flocculation

- ・ 研究代表者名及び所属

Eiji Iritani, Nagoya University

- ・ 共同研究者名及び所属

Nobuyuki Katagiri, Nagoya University

- ・ 要旨

High rate reduction in volume of difficult-to-dewatering organic sludge was achieved by step-up ultrahigh-pressure expression combined with reversible flocculation. Flocculation with inorganic electrolyte with multivalent cation such as poly aluminum chloride was extremely effective for the increase in the dewatering rate of excess activated sludge, and the water content of the compressed cake was finally reduced to 23 wt% by expression under action of ultrahigh-pressure of 50 MPa combined with reversible flocculation. This new method shortened the total dewatering time of activated sludge by 60 % compared to the conventional method, and reduced the sludge volume by 99.87 %. The relation between the porosity of the compressed cake and the applied expression pressure suggests that the water content of activated sludge may be further reduced by greater expression pressure. The results derived from a series of experiments attained the research goals from the viewpoint of both the rate in dewatering and the water content of the compressed cake. It was shown that the complicated kinetics of expression of activated sludge under the ultrahigh-pressure condition were accurately described using the newly developed multi-stage creep model and that the model will be useful for evaluating the dewatering performance under various operating conditions.

- ・ キーワード

Reversible Flocculation, Ultrahigh Pressure, Dewatering, Expression, Organic Sludge

研 究 発 表

< 論文発表 >

- 1) Iritani, E., T. Hashimoto and N. Katagiri; Gravity Consolidation-Sedimentation Behaviors of Concentrated TiO₂ Suspension, *Chem. Eng. Sci.*, **64**(21), 4414-4423 (2009)
- 2) Hwang, K.J., Y.T. Wang, E. Iritani and N. Katagiri; Effects of Porous Gel Particle Compression Properties on Microfiltration Characteristics, *J. Membrane. Sci.*, **341**(1-2), 286-293 (2009)
- 3) Iritani, E., T. Sato, N. Katagiri and K.J. Hwang; Multi-Stage Creep Effect in Consolidation of Tofu and Okara as Soft Colloids, *J. Chem. Eng. Japan*, **43**(2), 140-149 (2010)
- 4) Iritani, E., Y. Takaishi and N. Katagiri; Two-Stage Process of Single-Pass Inclined Ultrafiltration for Affinity Chiral Separation, *Filtration*, **10**(3), 211-218 (2010)
- 5) Hwang, K.J., Y.T. Wang, E. Iritani and N. Katagiri; Effect of Gel Particle Softness on the Performance of Cross-Flow Microfiltration, *J. Membrane. Sci.*, **365**(1-2), 130-137 (2010)
- 6) Iritani, E., N. Katagiri, Y. Takaishi and S. Kanetake; Determination of Pressure Dependence of Permeability Characteristics from Single Constant Pressure Filtration Test, *J. Chem. Eng. Japan*, **44**(1), 14-23 (2011)
- 7) Iritani, E. and N. Katagiri; Determination of the Pressure Dependence of Permeability Characteristics from a Single Constant Pressure Filtration Test, *Filtration*, **11**(1), 46-50 (2011)
- 8) Katagiri, N., T. Hashimoto and E. Iritani; Evaluation of Consolidation-Sedimentation Properties for the Batch Gravity Sedimentation of Concentrated Suspension, *Filtration*, **11**(2), 123-128 (2011)
- 9) 入谷英司, 片桐誠之, 佐野泰之; PACI で凝集処理したフミン酸溶液の精密濾過特性, 化学工学論文集, **37**(3), 246-250 (2011)
- 10) 入谷英司, 片桐誠之, 杉山悠生; 希薄コロイドの定速および定圧精密濾過における膜閉塞特性, 化学工学論文集, **37**(4), 323-326 (2011)

- 11) Iritani, E., N. Katagiri and D. Nakano; Flux Decline Behaviors in Inclined Dead-End Ultrafiltration of BSA Solutions, *Chem. Eng. J.*, **184**, 98-105 (2012)

<学会発表>

・国際学会

- 1) Iritani, E. and N. Katagiri; Determination of Pressure Dependence of Permeability Characteristics from Single Constant Pressure Filtration Test, Proceedings of Filtech 2009, Vol. I, Wiesbaden (Germany), 239-246 (2009)
- 2) Iritani, E., T. Sato and N. Katagiri; Multi-Staged Creep Effect in Consolidation of Tofu and Okara as Soft Colloids, Proceedings of Filtech 2009, Vol. I, Wiesbaden (Germany), 268-275 (2009)
- 3) Katagiri, N., T. Hashimoto and E. Iritani; Evaluation of Consolidation-Sedimentation Properties in Batch Gravity Sedimentation of Concentrated Suspension, Proceedings of Filtech 2009, Vol. I, Wiesbaden (Germany), 95-102 (2009)
- 4) Iritani, E., N. Katagiri and H. Tsuchiya; Osmotic Dehydration Behaviors of Bentonite Slurry, Proceedings of the 5th Joint China/Japan Chemical Engineering Symposium (CJCES), Xi'an (China), CD-ROM (2009)
- 5) Katagiri, N. and E. Iritani; Development of New Method for Obtaining Filtration Characteristics of Yeast Suspension Based upon Step-up Pressure Filtration Test, Proceedings of the 5th Joint China/Japan Chemical Engineering Symposium (CJCES), Xi'an (China), CD-ROM (2009)
- 6) Katagiri, N., Y. Nozaki and E. Iritani; Fermentation and Microfiltration Characteristics of D-Lactic Acid, Proceedings of the 5th Joint China/Japan Chemical Engineering Symposium (CJCES), Xi'an (China), CD-ROM (2009)
- 7) Katagiri, N., T. Sengoku and E. Iritani; Separation Properties in Microfiltration of Activated Sludge, Proceedings of the 5th Joint China/Japan Chemical Engineering Symposium (CJCES), Xi'an (China), CD-ROM (2009)

- 8) Iritani, E. and N. Katagiri; Comprehensive Survey of Practical Methods of Testing for Particle-Liquid Separation Characteristics, Proceedings of Filtration and Separation Symposium 2009, Tokyo (Japan), 51-55 (2009)
- 9) Katagiri, N. and E. Iritani; New Method for Obtaining Filtration Characteristics Based upon Step-up Pressure Membrane Filtration Tests, Proceedings of the 5th Conference of Aseanian Membrane Society (AMS5), Kobe (Japan), CD-ROM (2009)
- 10) Katagiri, N., T. Sengoku and E. Iritani; Membrane Fouling in Dead-End Microfiltration of Activated Sludge and Its Supernatant, Proceedings of the 5th Conference of Aseanian Membrane Society (AMS5), Kobe (Japan), CD-ROM (2009)
- 11) Iritani, E., N. Katagiri and S. Kanetake; Evaluation of Cake Compressibility Based on Single Constant Pressure Filtration Test, Proceedings of 19th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2010, Prague (Czech Republic), CD-ROM (2010)
- 12) Iritani, E., N. Katagiri, Y. Sugiyama and K. Yagishita; Modeling of Membrane Fouling in Filtration of Dilute Suspensions, Proceedings of 19th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2010, Prague (Czech Republic), CD-ROM (2010)
- 13) Katagiri, N., T. Sato and E. Iritani; Analysis of Creep Effect in Consolidation of Tofu and Okara as Soft Colloids, Proceedings of 19th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2010, Prague (Czech Republic), CD-ROM (2010)
- 14) Katagiri, N., Y. Ogi and E. Iritani; Decolorization Properties of Dye by Laccase-Immobilized Membrane, Proceedings of 19th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2010, Prague (Czech Republic), CD-ROM (2010)
- 15) Iritani, E., N. Katagiri and S. Kanetake; Evaluation of Filtration Characteristics Based on Single Constant Pressure Filtration Test, Proceedings of European Conference on Fluid-Particle Separation (FPS) 2010, Lyon (France), 19-20 (2010)
- 16) Iritani, E., N. Katagiri, Y. Sugiyama and K. Yagishita; Membrane Fouling in Filtration of Dilute Suspensions under Constant Pressure Conditions, Proceedings of European Conference on Fluid-Particle Separation (FPS) 2010, Lyon (France), 39-40 (2010)

- 17) Katagiri, N., T. Sato and E. Iritani; Consolidation Properties of Tofu and Okara as Soft Colloids, Proceedings of European Conference on Fluid-Particle Separation (FPS) 2010, Lyon (France), 9-10 (2010)
- 18) Katagiri, N., Y. Ogi and E. Iritani; Decolorization of Anthraquinone Dye by Enzyme-Immobilized Membrane, Proceedings of European Conference on Fluid-Particle Separation (FPS) 2010, Lyon (France), 37-38 (2010)
- 19) Katagiri, N., Y. Ogi and E. Iritani; Decolorization of Wastewater by Laccase-Immobilized Membrane, Proceedings of the 5th International Symposium on Material Cycling Engineering, Osaka (Japan), P45-P46 (2010)
- 20) Katagiri, N., K. Hayashi and E. Iritani; Removal of Zn from Soil with Extremely Low Hydraulic Permeability by Electrokinetic Method, Proceedings of the 5th International Symposium on Material Cycling Engineering, Osaka (Japan), P55-P56 (2010)
- 21) Katagiri, N., T. Sato and E. Iritani; Compression Mechanism of Deformable Materials, Proceedings of the 6th Joint China/Japan Chemical Engineering Symposium (CJCES), Wuhan (China), CD-ROM (2011)
- 22) Katagiri, N., T. Nozaki and E. Iritani; Effect of pH on Fermentation and Microfiltration Characteristics of D-Lactic Acid Producing Bacterium, Proceedings of the 6th Joint China/Japan Chemical Engineering Symposium (CJCES), Wuhan (China), CD-ROM (2011)
- 23) Katagiri, N., Y. Sugiyama, E. Iritani and K. Yagishita; Analysis of Membrane Fouling in Filtration of Pool and Pond Water, Proceedings of the 6th Joint China/Japan Chemical Engineering Symposium (CJCES), Wuhan (China), CD-ROM (2011)
- 24) Katagiri, N., T. Sengoku and E. Iritani; Flux Decline Behaviors in Microfiltration of Activated Sludge and Its Supernatant, Proceedings of the 6th Joint China/Japan Chemical Engineering Symposium (CJCES), Wuhan (China), CD-ROM (2011)
- 25) Fujita, K., Y. Ogi, N. Katagiri and E. Iritani; Decolorization of Wastewater by Laccase-Immobilized Membrane, Proceedings of the 6th Joint China/Japan Chemical Engineering Symposium (CJCES), Wuhan (China), CD-ROM (2011)
- 26) Katagiri, N., T. Sato and E. Iritani; Analysis of Consolidation Behaviors of Tofu and Okara as Soft Colloids, Proceedings of CHEMECA 2011, Sydney (Australia), CD-ROM (2011)

- 27) Katagiri, N., D. Shimokawa, T. Suzuki and E. Iritani; Development of Purification Process of Plasmid DNA Using Affinity Membrane Filtration, Proceedings of the 9th International Conference on Separation Science and Technology (ICSST11), Jeju (Korea), CD-ROM (2011)
- 28) Kanetake, S., N. Katagiri and E. Iritani; Development of Testing Methods for Obtaining Pressure Dependence of Average Specific Cake Resistance in Cake Filtration, Proceedings of the 9th International Conference on Separation Science and Technology (ICSST11), Jeju (Korea), CD-ROM (2011)
- 29) Wasgizu, T., N. Katagiri and E. Iritani; Volume Reduction of Activated Sludge at High Rate by Step-Up Ultrahigh-Pressure Expression Combined with Reversible Flocculation, Proceedings of the 9th International Conference on Separation Science and Technology (ICSST11), Jeju (Korea), CD-ROM (2011)
- 30) Iritani, E., T. Washizu and N. Katagiri; Developments of High-Speed and High-Level Deliquoring Process of Sewage Sludge by Ultrahigh-Pressure Expression Combined with Flocculation, Proceedings of Filtration and Separation Symposium 2011, Tokyo (Japan), 1-5 (2011)
- 31) Iritani, E., M. Tukamoto, S. Kanetake and N. Katagiri; Accurate Determination of Cake Compressibility Based on Single Step-up Pressure Ultrafiltration Test, Proceedings of Filtration and Separation Symposium 2011, Tokyo (Japan), 83-87 (2011)
- 32) Katagiri, N., D. Shimokawa, T. Suzuki and E. Iritani; Development of Purification Process of Plasmid DNA for Gene Therapy Using Affinity Membrane Filtration, Proceedings of Filtration and Separation Symposium 2011, Tokyo (Japan), 104-108 (2011)

・国内学会

- 1) 片桐誠之, 佐藤 崇, 入谷英司; 豆腐・おからの圧密脱水特性の評価, 分離技術会年会 2009 講演要旨集, 明治大学生田校舎 (神奈川県), 110 (2009)
- 2) 入谷英司; 最近の濾過技術の動向－濾過機の紹介と濾過試験法・濾過機の選定法－, 食品膜・分離技術研究会(MRC)第 21 回春季研究例会講演要旨集, 川口総合文化センター (埼玉県), 1.1-1.13 (2009)
- 3) 荒井康広, 片桐誠之, 入谷英司; 微生物懸濁液のデッドエンド精密濾過で形成されるケーキ特性の評価, 化学工学会第 41 回秋季大会講演要旨集, 広島大学 (広島県), D105 (2009)

- 4) 片桐誠之, 高石有希子, 入谷英司; 限外濾過で生成したケーキの充填構造と分散相変形挙動の評価, 化学工学会第 41 回秋季大会講演要旨集, 広島大学 (広島県), D124 (2009)
- 5) 金武章吾, 片桐誠之, 入谷英司; ケーキ圧縮性評価のためのシングル定圧濾過試験法の最適化, 化学工学会第 75 年会講演要旨集, 鹿児島大学 (鹿児島県), B302 (2010)
- 6) 入谷英司; 粒子・液体系分離技術の今後を探る, 分離技術会年会 2010 講演要旨集, 明治大学 (東京都), 16 (2010)
- 7) 片桐誠之, 金武章吾, 入谷英司; シングル定圧濾過試験法によるケーキ圧縮性の評価, 分離技術会年会 2010 講演要旨集, 明治大学 (東京都), 116 (2010)
- 8) 片桐誠之, 柳景旻, 入谷英司; エマルションスラリーの膜濾過における濾過・圧密・油滴透過特性, 分離技術会年会 2010 講演要旨集, 明治大学 (東京都), 125 (2010)
- 9) 鷺津拓也, 入谷英司; 可逆凝集ー多段超高压圧搾システムによる下水汚泥の高速減量化プロセスの開発, 化学工学会第 42 回秋季大会講演要旨集, 同志社大学 (京都府), R121 (2010)
- 10) 金武章吾, 片桐誠之, 入谷英司; シングル定圧濾過試験法に基づく固液分離特性評価法の開発, 化学工学会第 42 回秋季大会講演要旨集, 同志社大学 (京都府), W2P11 (2010)
- 11) 荒井康広, 片桐誠之, 入谷英司; 酵母懸濁液のデッドエンド精密濾過特性の評価, 化学工学会第 42 回秋季大会講演要旨集, 同志社大学 (京都府), W2P12 (2010)
- 12) 入谷英司, 片桐誠之, 鷺津拓也; 可逆凝集を用いたステップ超高压圧搾による難脱水性有機汚泥の高速減量化技術の開発, 第 21 回廃棄物資源循環学会研究発表会, 金沢市文化ホール (石川県), B7-1 (2010)
- 13) 鷺津拓也, 入谷英司; ステップ超高压圧搾による余剰汚泥の高速減量化プロセスの開発, 分離技術会年会 2011 講演要旨集, 明治大学 (神奈川県), S6-P1 (2011)
- 14) 高橋宏紀, 片桐誠之, 入谷英司; 微生物代謝モデル多糖類の精密濾過特性, 化学工学会第 43 回秋季大会講演要旨集, 名古屋工業大学 (愛知県), H103 (2011)

- 15) 塚本昌利, 入谷英司; シングル・圧カステップ状限外濾過に基づくケーキ圧縮性の評価, 化学工学会第 43 回秋季大会講演要旨集, 名古屋工業大学 (愛知県), H104 (2011)
- 16) 鷺津拓也, 入谷英司; 凝集・ステップ超高压圧搾の複合プロセスによる難脱水性スラッジの高速減量化, 化学工学会第 43 回秋季大会講演要旨集, 名古屋工業大学 (愛知県), P2C25 (2011)
- 17) 入谷英司; 粒子・液体系分離プロセスの高度化・体系化に関する研究, 化学工学会第 43 回秋季大会講演要旨集, 名古屋工業大学 (愛知県), I306 (2011)

<図書>

- 1) 入谷英司, 川崎健二; 分離プロセス工学の基礎, 化学工学会分離プロセス部会編「分離プロセス工学の基礎」, 第 1 章, 朝倉書店, 1-11 (2009)
- 2) 川崎健二, 入谷英司, 岩田政司, 中倉英雄; 固液・固気分離, 化学工学会分離プロセス部会編「分離プロセス工学の基礎」, 第 7 章, 朝倉書店, 154-181 (2009)
- 3) 入谷英司; 濾過, 世界濾過工学会日本会編「濾過工学ハンドブック」, 第 1 章, 丸善, 1-111 (2009)
- 4) 入谷英司; ろ過と沈降分離, 内藤牧男, 牧野尚夫編「初歩から学ぶ粉体技術」, 第 9 章, 工業調査会, 109-116 (2010)
- 5) 入谷英司; ろ過・圧搾現象の基礎, 分離技術会編「分離技術ハンドブック」, 14.1.2, 分離技術会, 897-903 (2010)
- 6) 入谷英司; ろ過「冷凍空調便覧 基礎編 -第 6 版-」, 8.6, 日本冷凍空調学会, 266-272 (2010)
- 7) 入谷英司; 「絵とき 濾過技術 基礎のきそ」, 日刊工業新聞社, 1-180 (2011)
- 8) 入谷英司; 固液分離装置内の流動, 化学工学会監修・化学工学の進歩 45「最新 装置内の移動現象の解析と可視化」, 2. 装置編, 第 1 章, 三恵社, 107-126 (2011)
- 9) 入谷英司; ろ過と沈降分離, 内藤牧男, 牧野尚夫編「初歩から学ぶ粉体技術」, 第 9 章, 森北出版, 109-116 (2011)

- 10) 入谷英司, 片桐誠之; 水処理膜の透過・ろ過の基本メカニズムと評価法, 「水処理膜の製膜技術と材料評価」, 第2章, サインス&テクノロジー, 21-47 (2012)

知的所有権の獲得状況

特許

なし

実用新案登録

なし

關 連 論 文

