

赤外吸光度変動解析による汚泥凝集状態の計測と制御

井上 公平* 大戸 時喜雄* 夜明 徹**
 沢田 芳夫*** 片山 雅義*** 菅谷 謙三***

* (株)富士電機総合研究所 水処理・バイオ研究所 神奈川県横須賀市長坂2-2-1
 ** 富士電機(株) 公共システム事業部 東京都日野市富士町1
 *** (株)石垣 エンジニアリング事業部 香川県坂出市江尻町483-16

概要

下水の汚泥調質プロセスにおいて、高分子凝集剤の注入は汚泥の固形物濃度比例によるものが主流であり、汚泥性状変化への追従性や汚泥濃度計の信頼性等の問題から適切な薬注制御が難しい。

そこで、筆者らは、吸光度変動解析理論に基づく凝集状態計測機「凝集センサ」を試作し、このセンサを適用した汚泥凝集状態の計測方法、及び、テーブルテストでのバッチ計測とベルトプレス脱水機での実証試験で得た本手法の有効性について報告する。本結果から、汚泥性状や種類に関わらず、脱水ろ過液中の残さフロクの体積率計測により、ケーキ含水率最小となる薬注量を決定できることがわかった。

キーワード

汚泥調質、高分子凝集剤、薬注制御、脱水ろ過液、残さフロク体積率、ケーキ含水率

1. はじめに

下水汚泥処理における汚泥調質プロセスは、汚泥の固液分離・脱水性を向上させる重要なプロセスである。従来、このプロセスでの高分子凝集剤の注入は、凝集状態監視に依るものではなく、供給汚泥の固形物濃度に比例して行われるのが主流である。それ故、汚泥性状変化に対する追従性や汚泥濃度計の信頼性等の問題により適切な薬注制御を行うことが難しい。

そこで、筆者らは、既に上水用として開発した凝集計測原理「吸光度変動解析法^{1), 2)}」を下水処理分野にも適用し、凝集状態の検出方法について検討を行った。本報では、この原理に基づいて試作した計測装置「凝集センサ」による汚泥凝集状態の計測方法、種々の実試料をバッチ計測して得た本手法の妥当性、及び、ベルトプレス脱水機（パイロット試験機、実機）での実証試験結果について報告する。

2. 計測装置の原理

流れ系などでランダムサンプリングされた懸濁水の吸光度は、濃度や懸濁粒子の径に応じて平均値の回りに変動成分を持つ。そこで、汚泥フロク主成分である濁質検出用の近赤外光(820nm)の吸光度の測定結果より、式(1)～(2)を用いてフロクの平均粒径D(cm)と平均個数濃度N(個/mL)が算出され、また、式(3)からフロクの平均体積率 C_V が演算される。

$$D = \sqrt{\frac{4A\sigma^2}{\pi QE_m}} \quad (1)$$

$$N = V \left(\frac{E_m}{\sigma} \right)^2 \quad (2)$$

$$C_V = \frac{\pi D^3 N}{6} \quad (3)$$

ここで、 σ は吸光度変動の標準偏差 (—)、 E_0 は吸光度の平均値 (—)、 A は光ビームの有効断面積 (cm^2)、 Q は光散乱係数 (—) である。 E_0 と σ は透過光量を対数化して得られる吸光度の所定時間 (サンプル数) の統計量である。

図1は計測装置の基本光学系を示すブロック図である。光学センサ部において、変換部の光源から光ファイバによって伝送された近赤外光を試料中に照射し、受光した光を光ファイバに入射させ変換部へ伝達する。また、図2、3は、ポリスチレンラテックス (PSL) 標準粒子懸濁液を測定して得られる、本装置の粒径と個数濃度出力性能を示したものである。何れも標準粒子公称値と良好な相関があり、本装置は、粒径及び個数濃度を精度良く測定できる。

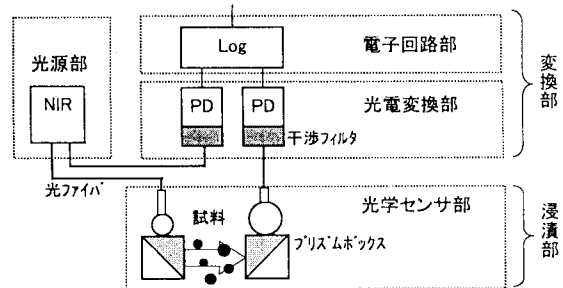


図1. 計測装置の基本光学系

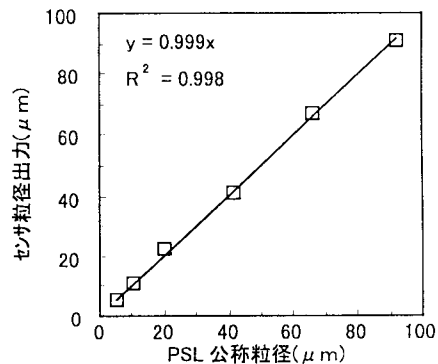


図2. センサ粒径出力性能

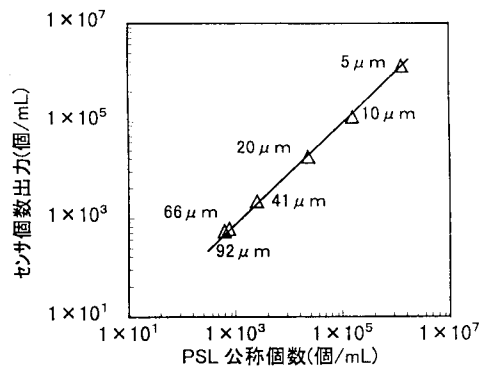


図3. センサ個数濃度出力性能

3. 汚泥凝集状態の計測方法

本来、凝集状態を直接的に反映しているのは、凝集混和槽のフロックである。しかし、下水汚泥の場合、凝集混和槽内の光透過率は極めて少なく、光学的な計測手法では困難である。そこで、脱水機のろ液中のフロック (透過残さ成分) を測定することによって、間接的に凝集状態を知る方法を考案した。

図4は、薬注率の違いによるろ布透過粒子の状態を推定し模式化したものである。上段の薬注率過少の場合、荷電中和不足でフロック化が進行せず、供給汚泥の多くがろ液側へ漏れる。中段の適正の場合、フロックは成長しその大半がろ布に補足されるため、ろ布透過フロックが少ない。また、下段の過剰の場合、成長フロックと共に正電荷反発によるフロック分散で生じた小さなフロックが増えるため、ろ布透過粒子が多くなる。つまり、薬注率に対して、ろ布透過粒子の体積率 (単位体積あたりのろ液に占めるろ布透過粒子体積の割合) は、適正薬注点を最小としたU字カーブを描くことが推定される。以上のような仮定のもと、汚泥凝集状態の計測対象は、ろ液中のフロック (透過残さ成分) の体積率と決定し、その妥当性・有効性を実試料測定により検証することとした。

4. 実験方法

4.1 テーブルテストでの検証

容器に分取した汚泥に凝集剤を添加・攪拌し凝集

薬注率	ろ布透過粒子の様子	透過粒子
過少	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">〈母液〉 ●●●●●●●●</div> <div style="text-align: center;">ろ布 </div> <div style="text-align: center;">〈ろ液〉 ●●●●●●●●</div> </div>	多い
適正	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">○ ○ ○ ○ ○</div> <div style="text-align: center;">ろ布 </div> <div style="text-align: center;">● ● ● ● ●</div> </div>	少ない
過剰	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">○ ○ ○ ○ ○</div> <div style="text-align: center;">ろ布 </div> <div style="text-align: center;">○ ○ ○ ○ ○</div> </div>	多い

図4. 薬注率とろ布透過粒子 (推定)

させた後、凝集汚泥をろ布を通して固液分離した。得られたろ液は、容器中で攪拌しながら凝集センサでフロック体積率を連続10回測定した(0.5分周期)。一方、ろ布上の濃縮汚泥は、空気圧搾後、乾燥処理(105℃、12時間)し、乾燥前後でのケーキ重量計測からケーキ含水率を算出した。尚、汚泥は、A処理場生汚泥、B処理場消化汚泥、C処理場生汚泥・消化汚泥(何れも水処理方式は標準活性汚泥法)である。また、凝集剤はDAM系のカチオンポリマー(5種の銘柄I~V)を用いた。その他諸条件を表1に示す。

表1. 実験条件

項目	条件
急速攪拌	1分(300~400rpm)
緩速攪拌	1分(250~300rpm)
ろ布種類	T-1175L、PE50
空気圧搾	0.3~1.0kg/cm ² (2分)

4.2 ベルトプレスパイロット試験機での検証

図5にパイロット試験のフロー図を示す。薬注率の異なる種々の凝集汚泥をベルトプレス試験機(ろ布有効巾:0.5m)の重力脱水部に供給して、ろ布を通して得られるろ液を、ろ液測定槽に設置した凝集センサで連続測定した(1分周期)。また、脱水処理後のケーキ重量測定により、ケーキ含水率を算出した。尚、汚泥は、1バッチ200LのA処理場生汚泥、B処理場消化汚泥を使用し、凝集剤はDAM系のカチオンポリマーを用いた。

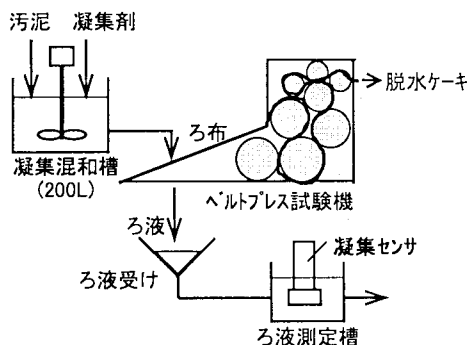


図5. パイロット試験のフロー図

4.3 実機運転での検証

A処理場の消化汚泥脱水プロセス(ベルトプレス脱水機:ろ布有効巾2.0m)に凝集センサを設置し、凝混槽直後のトロンメル(前濃縮機)より分離したろ液を、測定槽に引込み凝集センサで連続測定した(1分周期)。尚、実験は、比較的安定した汚泥性状時に、薬注量一定又は段階的に薬注量を変化させて行った。

5. 実験結果

5.1 テーブルテストでの検証結果

種々汚泥とポリマーの組み合わせ試料における、薬注率(対SS%)に対するフロック体積率とケーキ含水率の関係の一例(ろ布は1175L使用)を図6~9に示す。

はじめに、図6はA処理場生汚泥をポリマーIで凝集させた試料の場合である。薬注率0.6~1.6%の範囲において、フロック体積率は、薬注率0.8%で最小の0.03%となった。一方、ケーキ含水率は、フロック体積率と同様な挙動を示し、体積率と同じ薬注率0.8%で最小値89.4%となった。また、図7はC処理場生汚泥をポリマーIIで凝集させた試料の場合である。薬注率0.6~1.4%の範囲において、フロック体積率は薬注率0.8%から徐々に減少し、薬注率1.2%を超えると急激に増加した。この間、フロック体積率は、薬注率1.0~1.2%で最小(0.1%程度)となった。一方、ケ

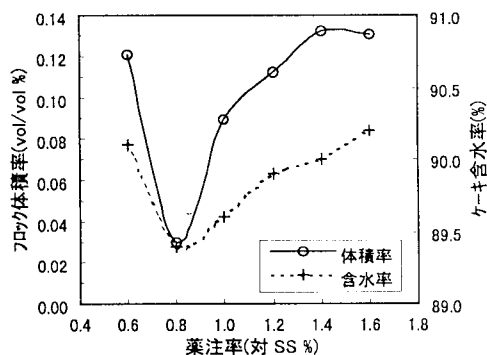


図6. A処理場生汚泥+ポリマーIの結果

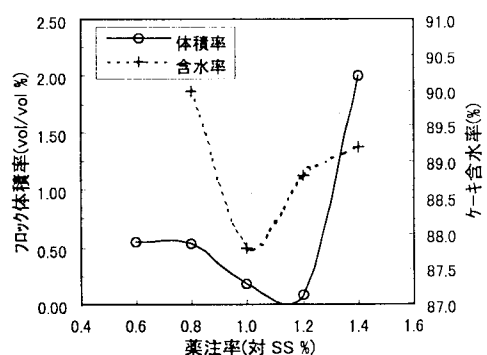


図7. C処理場生汚泥+ポリマーIIの結果

一キ含水率は、薬注率 1.0% で最小値 87.8% となり、それ以上の薬注率では上昇傾向を示した。これらの有機物含有率が高い生污泥試料の場合、一般的に薬注率適正域が狭いことが知られており、上述の体積率の挙動はこれを支持する結果と考えられる。

次に、図8はB処理場消化污泥をポリマーIで凝集させた試料の場合である。薬注率 0.6~1.6% の範囲において、フロック体積率は薬注率 0.6~0.8% で急激に減少し、薬注率 1.0% で最小値 0.01% となった。更に、1.0% を超えると体積率は緩やかに上昇した。一方、ケーキ含水率の挙動は、フロック体積率とほぼ同様に推移し、薬注率 1.0% で最小の 90% となった。また、図9はC処理場消化污泥をポリマーIIで凝集させた試料の場合である。薬注率 1.0~2.2% の範囲において、フロック体積率は薬注率 1.6% までに急激に減少し、ここで最小値 0.01% となった。そして、図7と同様に高薬注側の体積率は緩やかに上昇する傾向となった。含水率も同様に、薬注率 1.6% で最小値 87.4% となり、高薬注率側は緩やかな上昇を示した。これらの消化污泥対象のフロック体積率挙動は、主として無機質凝集であるためにポリマーの凝集効果が良く、特に過剰域でも比較的広範に良好な凝集状態を維持しているためと考えられる。

5.2 ベルトプレスパイロット試験機での検証結果

図10は、A処理場生污泥を種々の薬注率で処理したときの残さのフロック体積率とケーキ含水率の挙動を示したものである。薬注率 0.8~1.6% の範囲において、フロック体積率は、薬注率 1.0~1.2% の間で最小値 0.007% となり、その両側では急激に上昇する傾向を示した。一方、ケーキ含水率の挙動は、フロック体積率とほぼ同様に推移し、薬注率 1.0~1.4% の間で最小 (72~73% 程度) となる傾向を示した。

また、図11は、B処理場消化污泥を種々の薬注率で処理したときの残さのフロック体積率とケーキ含水率の挙動を示したものである。薬注率 1.0~1.6% の範囲において、フロック体積率は、薬注率 1.0~1.2% の間で最小の 0.003% となり、それより高い薬注率側では急激に上昇する傾向を示した。このとき、ケーキ含水率は、薬注率 1.2% 付近で最小 (80% 程度) となり、その両側では上昇傾向を示した。尚、低薬注率条件では、明らかに母液の凝集不良状態が認められ、凝集センサの測定に十分なる液確保ができず、データを取得できなかった。

以上、いずれの污泥の処理においても、フロック体積率

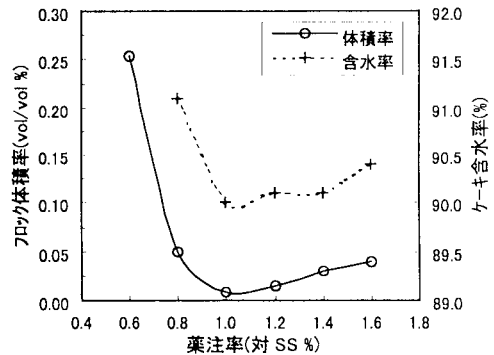


図8. B処理場消化污泥+ポリマIの結果

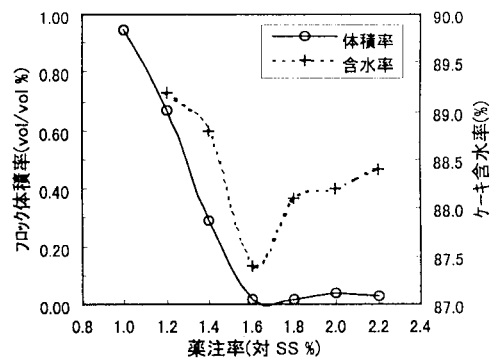


図9. C処理場消化污泥+ポリマIIの結果

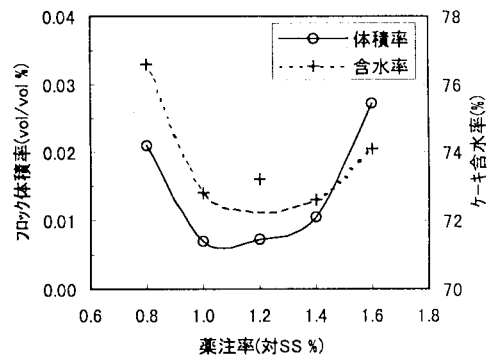


図10. A処理場生污泥の結果

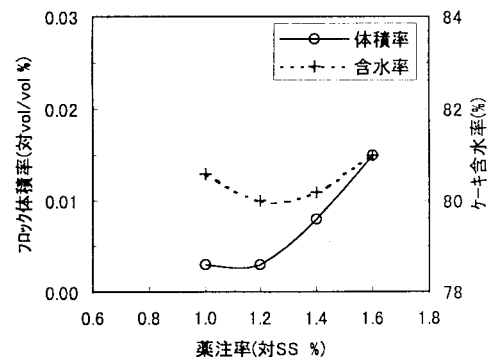


図11. B処理場消化污泥の結果

とケーキ含水率は、薬注率に対してU字カーブを描き、かつ、その最小となる薬注率は良く一致することがわかった。これらの傾向は前述のテーブルテスト結果と良く一致しており、パイロット試験においてもその再現性が確認できた。

5.3 実機運転による検証結果

図12は、A処理場消化汚泥脱水において、汚泥供給量及び薬注量を一定の状態、トロンメル分離ろ液を連続2時間測定した結果である。この間のフロック体積率は、平均0.167%、変動係数10.3%と非常に安定して推移していた。また、同期間の供給汚泥TS濃度は約1.6%、ケーキ含水率は平均82.0%(81.8~82.1%)ではぼ一定であった。これより、安定した性状の汚泥に対し一定の薬注処理を行った場合、トロンメル分離ろ液中の残さフロック体積率は一定水準を示すことがわかった。

次に、図13は、TS濃度が比較的安定した条件で、汚泥供給量 $9.0\text{m}^3/\text{h}$ 一定において、ステップ的に薬注率を上下させたときのフロック体積率変化を示したものである。また、図14は、このときの薬注率に対してフロック体積率をプロットしたものである。図13から、フロック体積率は、運転開始時の薬注率1.3%を1.25%へ下げたとき、及び、1.25%から1.4%へ上げたときに、それぞれ急激な上昇と減少を示すことがわかる。これは、数分程度の遅れ(トロンメルろ液分離部から測定槽までの流達時間)はあるものの、本センサが残さフロックの増加・減少を鋭敏にとらえることができることが示された。また、図14から、実機のトロンメル分離液においても、フロック体積率は薬注率に対してU時カーブを描くことがわかった。更に、先述の図8と図9と同様に、消化汚泥対象の残さフロック体積率は、適性薬注域を境として薬注過少側は急激な上昇、薬注過剰側では鈍い上昇を示す傾向が実機においても再現した。

次に、図15は、SS濃度計を使って求められる薬注率に代わって、薬注量そのものを手動で操作したときの体積率と薬注量のトレンドグラフである。このときの汚泥供給量は $8.5\text{m}^3/\text{h}$ 一定であった。図中に示した区間b、eでフロック体積率の急激な上昇が観測された。区間bは、フロック体積率の急激な減少局面で薬注量を下げ過ぎたことによる凝集不良の結果である。また、区間eも、区間c、dで最適領域の薬注量を維持していたところで、薬注量を下げたことによる凝集不良と考えられる。しかし、いずれもその後の薬注量の増加によって約20分程度で、体積率0.2%付近に安定させることができた。この期間の最適薬注量は、

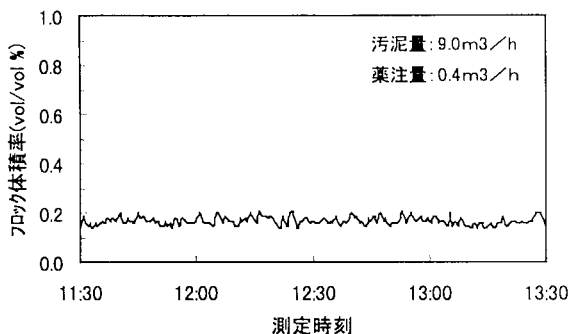


図12. 薬注量一定時の体積率変動

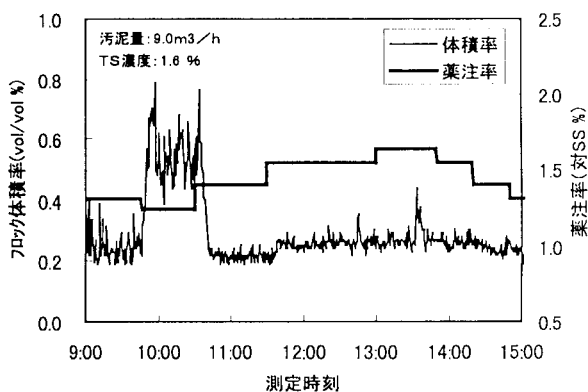


図13. 薬注率変更時の体積率変化

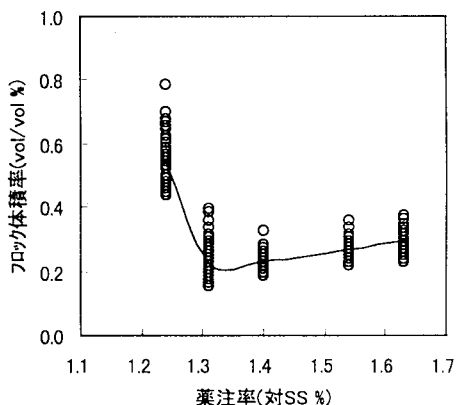


図14. 薬注率と体積率の関係

区間 e、d、g の薬注量 (540~600 L/h) と推定され、この薬注量から増減させると体積率上昇傾向を示した。また、図 16 は、このときのフロック体積率とケーキ含水率の関係を示したものである。図 16 より、体積率と含水率の間には良好な相関がみられ、フロック体積率の値から含水率の良否が判別できることがわかる。以上の結果より、残さフロックの体積率を指標として薬注量を操作し、適正な凝集状態及び最適な脱水処理性を維持できることがわかった。

6. 結論と考察

以上の結果をまとめると次のようになる。

- 1) テーブルテスト結果から、残さフロック体積率の最小となる薬注率は、ケーキ含水率の最小となる薬注率と良く一致し、汚泥や凝集剤の種類に依存しない。
- 2) 生汚泥と消化汚泥の薬注率に対する残さフロック体積率カーブは、薬注率過剰側での上昇率に特徴的な違いがあり、このことは含水率の挙動と一致した。
- 3) 上記 1)、2) の傾向は、パイロット試験及び実機運転においても再現された。
- 4) 実機運転結果から、残さフロック体積率とケーキ含水率の間に高い相関がみられ、体積率を指標とし、かつ、SS 濃度計の出力を使わない薬注量制御の可能性が確認された。

これらの結果より、脱水ろ過液の残さフロック量とケーキ含水率とが関係付けられた。フロックの機械的強度が大きい程、ろ布による圧搾過程においてフロック粒子間隙水の透過性が向上し、結果的に脱水後のケーキ含水率は下がると考えられる。一方、ろ布を透過した残さフロックの量は、フロックの機械的強度が大きい程少なくなるはずである。したがって、ろ液中の残さフロック量はフロックの機械的強度を反映し、結果的にケーキ含水率を推定できると考えられた。

以上から、汚泥の性状や種類に関らず、脱水機ろ過液中の残さフロックの体積率計測によってケーキ含水率を推定することができる。したがって、体積率が最小となる薬注率を自動的に維持することによって、最適薬注制御が実現可能と考えられる。今後は、計測機単体としての信頼性の向上、及び、開発中の体積率最小を維持するための薬注制御アルゴリズムとそのシステムを完成し、実プラントでの実証データを蓄積予定である。

【参考文献】

- 1) 松井佳彦ほか「2波長の吸光度変動を用いた凝集・フロック形成の計測」、水道協会雑誌, 第 696 号, pp. 2-10 (1992)
- 2) 松井佳彦ほか「凝集制御のためのフロック径のオンライン計測 (I) - 解析法の理論的考察 -」、水道協会雑誌, 第 664 号, pp. 12-19 (1990)

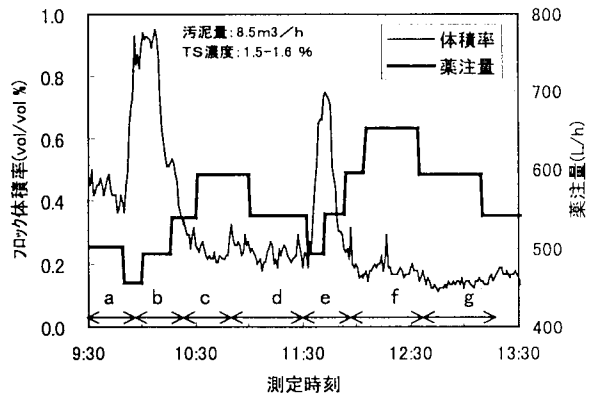


図 15. 薬注量変更時の体積率変化

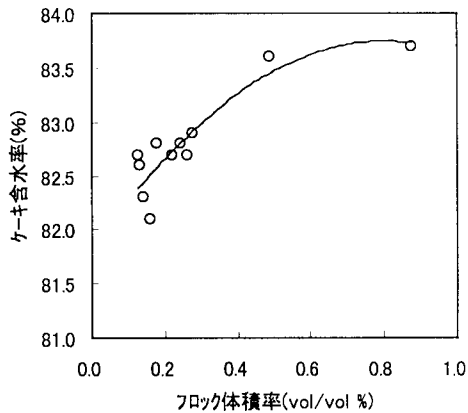


図 16. フロック体積率と含水率の関係