

## 〈研究発表〉

### 光散乱方式凝集センサーを用いた

### 凝集剤薬注制御システムの排水処理プロセスへの適用

渡辺 実<sup>1)</sup>, 竹林 哲<sup>2)</sup>, 長尾 信明<sup>3)</sup>, 穂積 直裕<sup>4)</sup>

栗田工業株式会社 ケミカル事業本部 (〒160-8383 新宿区西新宿 3-4-7, E-mail: minoru.watanabe@kurita.co.jp)<sup>1)</sup>

栗田工業株式会社 ケミカル事業本部 (〒160-8383 新宿区西新宿 3-4-7, E-mail: satoshi.takebayashi@kurita.co.jp)<sup>2)</sup>

栗田工業株式会社 開発本部 (〒329-0105 栃木県下都賀郡野木町川田五丁山 1-1, E-mail: nobuaki.nagao@kurita.co.jp)<sup>3)</sup>

愛知工業大学 電気学科 電気工学専攻 (〒470-0392 豊田市八草町八草 1247, E-mail: hozumi@aitech.ac.jp)<sup>4)</sup>

#### 概要

レーザー光散乱を利用した凝集状態をモニタできるセンサーを開発した。このセンサーは実系における凝集槽等に直接投入可能で、設置が容易である。机上における凝集諸特性(沈降性・残留濁度・ゼータ電位)との相関性から、凝集状態の連続観察が可能であることを確認した。本センサーにより凝集剤の過不足を判断し、凝集剤注入量を自動制御する薬注システムを構築し、実際の排水処理現場における凝集剤の自動薬注制御試験を行った結果、従来の人手による薬注量管理に比べて凝集剤使用量の低減、汚泥発生量の低減および安定処理を確認したので報告する。

キーワード: 光散乱、凝集、レーザー、制御

#### 1. はじめに

近年の生産プロセスでは、多種少量生産が行われる事が多くなり、排水の状態も短期間に変動することが多くなった。急激な排水処理負荷の変動に対して、凝集剤の注入量を実際の必要量以上に設定して、凝集処理の安定化を図る場合がある。しかし、凝集剤の余裕分は、スラッジの発生量を増加させるため、余裕分は少ないことが望ましく、そのためには凝集剤と排水負荷の関係をできるだけ早く判定する手段が必要となる。

凝集状態を早期に判定する方法として、例えば EISENLAUER ら<sup>1)</sup>や松井らによる方法<sup>2)~5)</sup>は、フローセル内に固液混合状態の試料水を一定流速で流し、これにレーザー光(以下レーザーとする)を照射したときの透過光量の変化が、フローセル内を通過する粒子の粒径の分布に依存することを用いている。凝集、特にポリ塩化アルミニウム(PAC)凝集時に、凝集状態により、微小な粒子と比較的大きなフロックの割合が変化することから、フロックの成長速度も加味して凝集状態を判断する手法である。しかし、透過光を使用するために、レーザー光の透過光路長を短くすると汚れや乱流の影響が大きくなり誤差が拡大する。一方、長くすると適用できるSS濃度(粒子濃度)の上限が低くなるという問題がある。

流動電流法<sup>7)~9)</sup>は、ゼータ電位に近い値を連続計測できる方法で、固液混合状態の試料水を計測槽に導入し、これをピストンによって一定速度で攪拌したときに、計測槽内に設けた電極間に発生する電位変動を観察することによる。しかし、粒子の荷電状態を水中に設けた電極間に誘起される電荷量で計測する事は、発生する電荷量の大きさを考えると、ノイズの低減が課題となる。

これらは、いずれも処理系より処理水をサンプリングして計測する方法であるのに対して、筆者らは直接凝集槽に設置して計測可能なオンラインセンサーの開発を目指した。本報告では、開発した計測システムと、実際の産

業排水の処理に適用し、無機凝集剤の安定制御の実現と、処理に伴う薬剤の低減効果を確認した結果について述べる。

#### 2. 計測系の概要

##### 2.1. 基本原理

基本原理は水中に発光された赤色レーザーが排水中のフロックによって散乱されたときの散乱光を捕らえ、その光エネルギーの強弱を電気的なアナログ信号に変換するものである。光散乱方式凝集センサー計測部の構造および原理を Fig.1,2 に示した<sup>10)</sup>。センサー計測部のレーザーの発光部と、これに直交する方向に配置された受光部(光ファイバー)により構成され、透過光路上に進入したフロックによって散乱された光を、この透過光路に直交する方向に設置した光ファイバーで受光し、その出力を検波回路で連続的に変化する電圧波形(100kHzのキャリア信号から復調(Demodulation)した信号)に変換する。検波回路でリアルタイムに散乱光強度の変化を得ることで、フロックの形成状態や粒子の分散状態についての情報が得られると考えた。また、検波信号の最も下がった部分(最低値)は、計測領域内にフロック等の大きな反射物が存在しない時の出力と推定されるため、検波信号の最低値を保持し、出力することで、固液混合状態においても、フロック沈下後の上澄み液と同等の濁度情報を得ることができると考えた。

Fig.3にセンサーの先端部(計測部)を示す。レーザー光の発光軸に直交して光ファイバを配置してある。レーザーは、光ファイバ前面で照射径が最も小さくなるように、レンズで焦点を合わせてある。

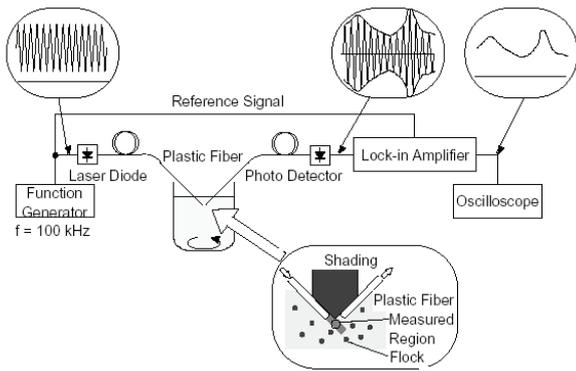


Fig.1 センサ計測部構成

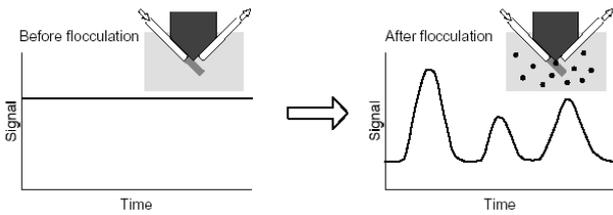


Fig.2 計測原理図



Fig.3 計測部

## 2.2. 凝集特性とセンサー出力特性の関係

凝集状態を判定する方法としては、荷電中和状態を表わすゼータ電位計測、凝集フロックの沈降速度、上澄み液の清澄度(残留濁度)の3つが広く知られている。フロック間の清澄度を計測する凝集センサーは、上澄み液濁度特性に近い情報を出力すると予想された。

懸濁物(SS)としてカオリン(20mg/l)を用い、無機凝集剤としてPACを使用したジャーテストにおいて、センサー出力変化を観察した結果を Fig.4.5 に示す。PAC添加濃度が20~200mg/lでは、反応時間の経過と共にフロックは成長し、それに伴ってセンサー出力(最低値)は減少した。SS20mg/lにおける必要最低限のPAC添加濃度は20~50mg/lの間にあると判断した。一方、ゼータ電位の荷電中和点と上澄み液濁度とフロック沈降速度のピークも、計測結果より20~50mg/lと判断され、レーザー散乱方式と一致することが確認できた(Fig.6~8 参照)。

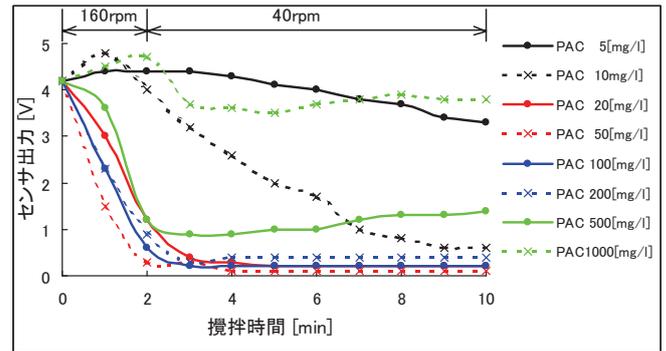


Fig.4 凝集反応経過時間とセンサー出力(SS20mg/l)

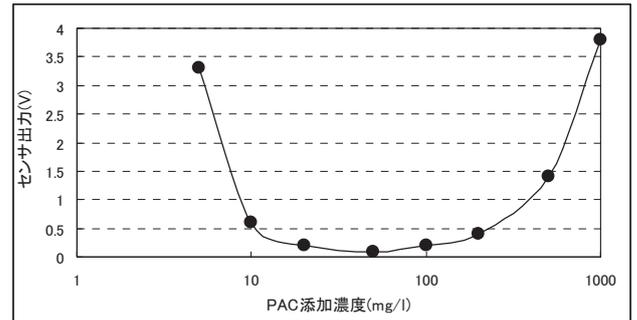


Fig.5 凝集剤添加濃度とセンサー出力(SS20mg/l)

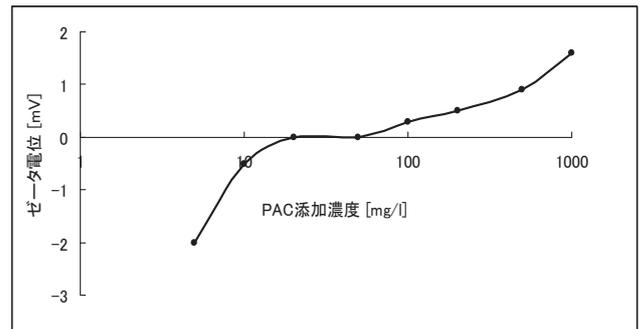


Fig.6 凝集剤添加濃度とゼータ電位(SS20mg/l)

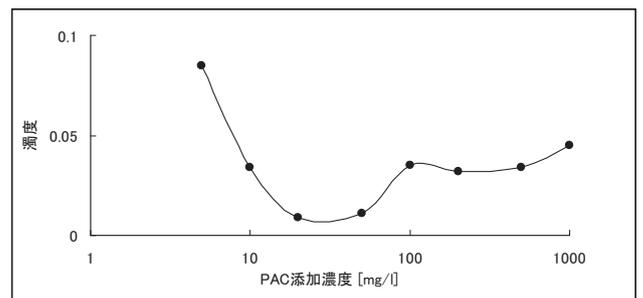


Fig.7 凝集剤添加濃度と上澄み液濁度(SS20mg/l)

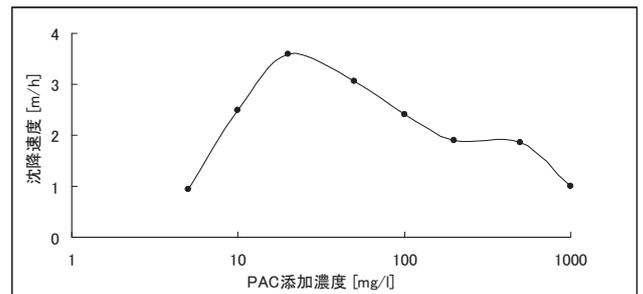


Fig.8 凝集剤添加濃度とフロック沈降速度(SS20mg/l)

### 2.3. 側方散乱光計測の採用と計測領域

計測には、発受光感度を落とさずに計測領域を最小にする為に、散乱光を側方からとらえる側方散乱方式を採用している。側方散乱光を使用することは、透過光や前方散乱光に比べて受光される光量は少なくなる。一方、センサーは原理にも述べたように、計測領域がフロック間のスペースに入った時に受ける散乱光量を計測する方法を採用するため、フロック量が多い場合でも計測を安定して実施するためには計測領域はできるだけ小さい事が望ましい。発光させたレーザーの輝線と受光する光ファイバの検知領域が重なった部分を計測領域と定義すると、発受光感度を高くする為には、発光させたレーザー光を対象となる計測領域にできるだけ多く照射し、散乱光を発生させる事が望ましく、そのためには輝線と検知領域の軸を合わせる事が必要と考えた。

今、レーザーの投影面を長方形とし、側方に設置した光ファイバの受光エリアを円柱で近似し、発光部であるレーザー光の光軸と受光部である光ファイバの受光軸が角度βで交差するとした時、計測領域Vはこの2つの投影面の重なる部分となるため

$$V = \frac{R}{\sin \beta} \times 2 \left\{ \int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{r^2 d\theta}{2} + \frac{r \cos \alpha \times r \sin \alpha}{2} \times 2 \right\} \dots (1)$$

つまり発光軸と受光軸とが直角に交わる時が、交差体積が最も小さくなる。

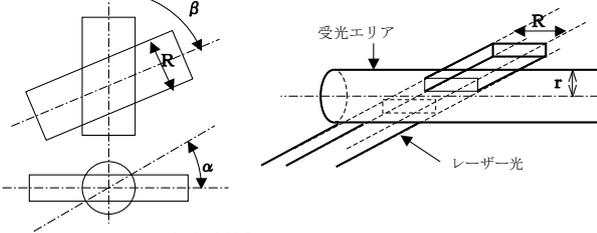


Fig. 9 凝集剤添加濃度とフロック沈降速度 (SS20mg/l)

ここでrは受光エリアの半径、αは受光ファイバの受光領域を直方体のレーザーが横切る時の最下端または最上端を受光軸から見た角度であり、Rはレーザー照射面の長手方向の長さである。実機を壁などに向けてレーザーを発光させて得た経験値より、レーザーの投影面の長手方向の長さRを3mm、短手方向の長さを0.8mmとし、光ファイバの断面実測値より受光領域の半径rを約2mmとすると、計測領域の体積Vは(2)のように推察された。

$$V = 3 \times 2 \times \left\{ \frac{r^2}{2} [\theta]_{-\alpha}^{\alpha} + r^2 \cos \alpha \times \sin \alpha \right\} \doteq 7.12 \text{ mm}^3 \dots (2)$$

### 2.4. 粒子密度とセンサー出力(最低値信号)の関係

センサーの計測領域はある有限の値を持ち、それに依存した計測限界を持つ。センサーが粒子間の濁度を計測するという性格上、その計測限界はフロック粒子密度に依存する。そこで、計測領域に粒子の存在しない状態が得られなくなった状態を計測限界と定義した。

計算を簡単にするために計測領域を半径1.2mmの球体(体積≒7.24mm<sup>3</sup>)で近似し、計測領域にフロック粒子が1つ隣接した粒子密度状態を考える。フロック粒子

密度がこれ以上に増えれば、フロックの一部が確率上は計測領域に常に存在することとなるため、上記で定義した計測限界となる。よって(計測領域の直径+フロック粒径)の球空間にフロックが1つ以下の存在になる状態を作り出す為には、SSの比重を1と仮定すると

フロック粒径: 140 μm で約117千個/l  
(SS約170mg/lに相当)

フロック粒径: 470 μm で約81千個/l  
(SS約4400mg/lに相当)

と見積ることができる。

無機凝集剤による凝集と高分子凝集剤添加後の凝集状態を比べた場合、前者に比べて後者で形成されるフロック粒子径は大きくなる。SS濃度が高く、無機凝集剤添加濃度も高い排水処理においては、高分子凝集剤投入行程後にセンサーを設置することが有利と判断した。

## 3. 実系における適用試験

### 3.1. 排水処理における制御の有効性

一般の排水処理では、無機凝集剤を数百～数千 mg/L 添加し、その後アルカリ剤でpHを中性付近に調整(微少なフロック0.2～0.5mm程度が形成)し、高分子凝集剤を数mg/L添加して粗大なフロック(2mm以上)を形成し、沈殿装置で固液分離する。代表的な処理フローを、Fig.10に示す。目標の清澄な処理水を得るためには、無機凝集剤の添加量による効果大きい。無機凝集剤の添加量が多いほど処理水水質は向上する。しかし、無機凝集剤の添加量が多いと、中和に要するアルカリ剤も多くなり、また無機凝集剤に伴う汚泥(水酸化アルミニウムなど金属水酸化物)発生量が増加して処理コストが増加する。

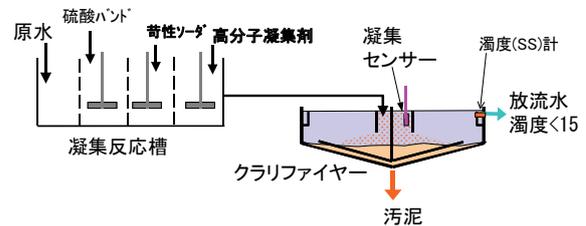


Fig.10 排水処理フロー

無機凝集剤の必要添加量は、排水の水質により異なる。従来処理の場合、排水の水質負荷が高い時に併せて無機凝集剤の添加量を設定している。そのため Fig.11 のように高い添加量が維持され、排水水質負荷が低い時は過剰添加量になる。凝集センサーを用いて制御することにより排水の水質に合った無機凝集剤添加量を調整すれば、常に適正な添加量を維持できると考えた。

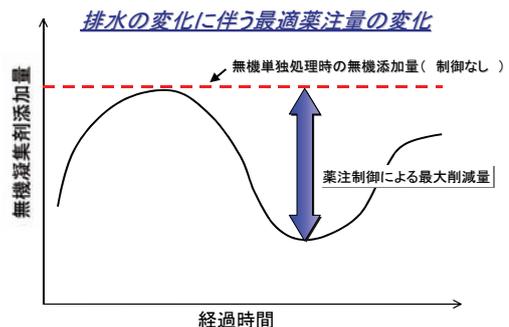


Fig.11 排水の負荷変化と無機凝集剤添加量

### 3.2. 排水の変化と凝集センサーの追従性

化学工場の総合排水処理において、無機凝集剤に塩化アルミニウムを添加し、苛性ソーダで中和後、アニオン高分子凝集剤で凝集沈殿処理した場合の実施例を Fig.12 に示す。無機凝集剤を一定量で添加した場合の、凝集沈殿装置のセンターコアに設置した凝集センサーと沈殿処理水の連続濁度計の経時変化データである。数時間の間で処理水水質が大きく変化していることがわかる。また凝集センサーの方が処理水よりも沈殿装置の滞留時間(約 2 時間)分、早く挙動を把握できることがわかる。

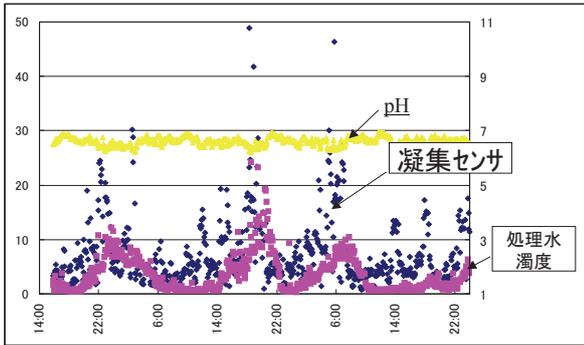


Fig.12 排水処理水の水質変化例

### 3.3. 薬注制御試験結果

自動車総合排水処理において、無機凝集剤としてポリ塩化アルミニウムを添加し、苛性ソーダで中和後、アニオン高分子凝集剤で凝集沈殿した場合の適用例を Fig.13 に示す。

高分子凝集剤の凝集反応槽に凝集センサーを設置して、目標の濁度を 3NTU としてポリ塩化アルミニウムの添加量を制御した場合、従来の制御をしない状態に比較して無機凝集剤使用量が 43%低減した。Table.1 に処理薬剤および汚泥発生量の低減量を示す。

無機凝集剤、苛性ソーダ、高分子凝集剤とともに汚泥発生量も大幅に低減できた。また、処理水の濁度から制御する方法に比較して、タイムラグが少ないために凝集剤の低減量が大きいとともに、処理水水質が安定した。

なお、センサーの洗浄は、発光部、受光部交互にエア洗浄を 30 分間隔で各 10 秒間実施した。1ヶ月程度では計測上で問題となる汚れは生じなかった。

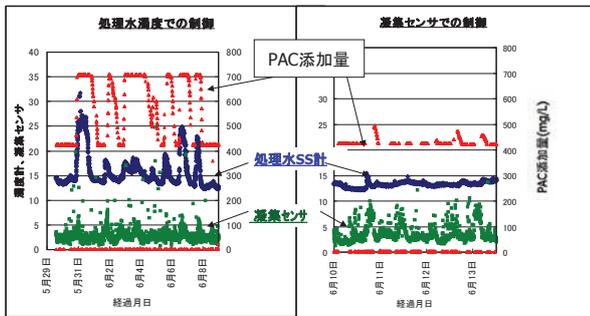


Fig.13 無機凝集剤の制御試験結果

その他各種排水処理での凝集センサーの適用実績は、Table.2 の通りである。各客先の運転管理状況にもよる

が、無機凝集剤添加量を 30%程度低減した例が多い。

Table.1 制御システムの実施例

		従来処理	凝集センサー制御時	削減率 (%)	備考
PAC	t/月	63	36	43	
苛性ソーダ	t/月	42	28	33	25%品
アニオンポリマー	kg/月	180	135	25	
汚泥発生量*	t/月	64	37	43	含水率85%

\* 汚泥発生量は、PACから発生する量で計算した。

Table.2 各業種・排水での凝集センサーの実績

	業種	排水量	無機凝集剤	従来添加率	変動幅	無機削減率
A社	化学	3,000m3/D	液体バンド	2,200mg/L	CODMn:150~800mg/l	10%
B社	鉄	1,000m3/D	液体バンド	550mg/L	N-Hex:500~10000	25%
C社	石油	6,000m3/D	含鉄バンド	400mg/L	N-Hex:10~100	30%
D社	化学	600m3/D	塩化アルミ	1,000mg/L	濁度:1000~3000	25%
E社	化学	3,000m3/D	液体バンド	600mg/L	CODMn:150~300mg/l	40%
F社	自動車	4,300m3/D	ホリ塩化アルミ	700mg/L	SS:100~1,200mg/L, COD:60~150mg/L	43%

## 4. 今後の課題

レーザー散乱光の動的変化を解析することで、フロック間の残留 SS(濁度)が測定できる凝集センサーを開発した。凝集液の上澄み液に相関した清澄度情報が素早く測定できる。実装置試験において、凝集剤の低減、汚泥発生量の低減および処理水の安定化がはかれることが確認できた。

今後、レーザーの寿命延長化対策(現在は1年間程度で交換)およびレーザー発光色の品揃えによる各種着色排水への適用拡大が必要と考える。

### 【参考文献】

- 1) J.EISENLAUER and D.HORN: FIVER-OPTIC SENSOR TECHNIQUE FOR FLOCCULANT DOSE CONTROL IN FLOWING SUSPENSIONS, Colloids and Surfaces, 14(1)121-134(1985)
- 2) 松井佳彦、丹保憲仁:凝集制御のためのフロック径のオンライン計測(I), 水道協会雑誌, 59(1)12~19(1990)
- 3) 松井佳彦、丹保憲仁:凝集制御のためのフロック径のオンライン計測(II), 水道協会雑誌, 59(3)2~12(1990)
- 4) 松井佳彦、丹保憲仁:他:2波長の吸光度変動を用いた有機着色成分の凝集沈殿除去の評価, 水道協会雑誌, 60(4)2~9(1991)
- 5) 松井佳彦、丹保憲仁:他: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, 61(9)2~10(1992)
- 6) JOHN GREGORY:Turbidity Fluctuations in Flowing Suspensions, Journal of Colloid and Interface Science, 105(2) 357~372(1985)
- 7) 古泉宣明 他、沖 芳紀 他:流動電流値による凝集反応監視結果中間報告, 第51回全国水道研究発表会(2000)
- 8) 大原一徳 他、山崎満佳 他、伊藤 崇 他:流動電流計による凝集剤注入制御, 第52回全国水道研究発表会(2001)
- 9) 澤島雅俊 他、美和清二 他:流動電流測定法による凝集剤自動注入制御実験(II), 第54回全国水道研究発表会(2003)
- 10) 原浩伸、穂積直裕 他/豊橋技科大:レーザー光を使用した光散乱による凝集センサーの評価 電気学会全国大会 4-251(平成14.3)