

(6) 凝集剤添加による既設下水処理施設の機能改善 (第4報)

— 硫酸第一鉄のエアレーションタンクへの添加 —

建設省土木研究所 安 中 徳 二
" " " " 〇酒 井 憲 司
名古屋市下水道局 北 村 至

1. ま え が き

湖沼、海域等の富栄養化の進行に伴ない、窒素、リンなどの栄養塩類除去のための施設の設置を要求される下水処理場がかなりの数に達するものと予想されている。我が国の場合、新しく計画される下水処理場は別として既設の下水処理場においては栄養塩類除去を含めた処理機能向上のための施設を別途に設けることは用地の獲得の面から困難な場合が多いと考えられる。このため既設施設の大幅な増設・改設をすることなく処理機能の改善を図る方策が求められている。その一つの手段として金属塩等の凝集剤を処理施設に添加する方法がある。この方法では凝集剤貯留タンクと凝集剤注入ポンプを新たに設置し、凝集剤添加の結果増加する汚泥量に見合った汚泥処理能力の増設を行なうことで対応することができる。

建設省土木研究所では名古屋市下水道局と共同で同市内の西山下水処理場を調査用施設として若干改造し凝集剤を既設施設に添加した場合の処理機能向上の程度、処理場の全体的機能に与える影響などについて調査してきた。これまで第1報、第2報で硫酸バンドをエアレーションタンクに添加した場合について、第3報で硫酸バンドを最初沈殿池に添加した場合について報告してきた。⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾ 本報告は凝集剤として硫酸第一鉄を用い、エアレーションタンクに添加した場合についての運転結果をまとめたものである。

2. 調査施設の概要及び調査方法

西山下水処理場は計画日最大水量が3万 m^3 /日の比較的小規模の下水処理場で、分流式を採用し、住宅地の排水を処理している。流入下水水量の変動が激しいことが特徴であるが、1978年7月よりピークカットを実施しピーク時の流量の一部は他の処理場へ振り向けられることとなった。施設は標準活性汚泥法で設計されており、2系列ある施設の一方を凝集剤添加系列（以下、薬注系と略す）、他方をコントロール系列として運転した。最

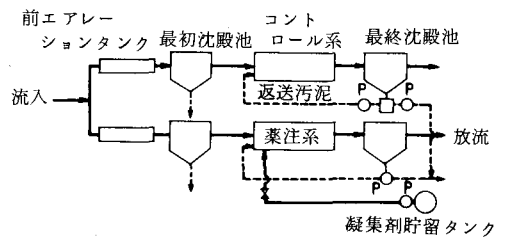


図-1 施設のフロー図

終沈殿池は3池あり薬注系に2池、コントロール系に1池という変則的な条件で運転を行なった。なお一部の時期においては各系列とも1池ずつで運転した。本処理場では汚泥は他の処理場で処理しており、汚泥処理系からの返送水はない。施設のフローを図-1に示す。

凝集剤として用いた硫酸第一鉄は近郊の工場の生産工程から発生したものをF。として約5%になるよう調整したものである。硫酸第一鉄はタンクローリで場内に搬入して貯留タンクに貯留したのちストローク及び回転数可変のプランジャー式ポンプで所定位置へ注入した。なお硫酸第一鉄は外気温が0℃付近まで低下すると結晶化あるいは氷結する恐れがあるので冬期には貯留タンクにヒーターを投入して加温するとともに保温を行なった。

サンプルは日常的には自動採水器を用いてグラブ試料を採取し流量に合わせて作成した24時間の混合試料の他、適宜手汲みにより採取した。混合液と返送汚泥はグラブサンプルによった。分析はリンについては混合試薬法、その他については下水試験法によった。汚泥の引抜き量及び固形物濃度はそれぞれ電磁流量計、超音波濃度計により測定し引抜き固形物量を算出した。

3. 調査結果

第一鉄塩による実験は1978年2月から開始し、1979年5月に終了した。凝集剤の添加濃度、注入方式により8種の実験期間に分けられる。各実験期間の運転条件を表-1にまとめて示した。なお1978年9月から1979年1月までの間は薬注関係の故障のため実験を中断したものである。

実験期間中の汚泥の性状を汚泥中の F_e の含有率と汚泥中のリンの含有率を指標として比較したのが図-2である。

水質分析の結果のうち汚泥の性状が比較的安定している時期のもののみをデータとして採用した。表-2はこのようにして各実験期間中汚泥が安定していると見られる時間の水質分析結果をまとめたものである。次章以下で報告するエアレーションタンク追跡調査、汚泥の脱水試験についてもこれらの時期に行なったもののみを対象とした。なお実験Ⅰは馴養期間、実験Ⅲ、Ⅳは処理場における工事の影響が残っているため表-2から省いた。

表-1 運転条件の総括

区 分	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅷ
実験期間	1978 2/13~4/25	4/26~6/14	6/14~7/17	7/22~9/9	1979 1/17~3/1	3/1~3/31	4/2~4/23	5/2~6/24	
区 分	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅷ
薬注水量 (m ³ /日)	11,270	12,800	15,100	10,000	7,480	7,880	7,250	9,180	
初生汚泥時間 (hrs)	1.93	1.70	1.44	2.17	2.9	2.75	3.00	2.37	
エアレーションタンク 汚泥滞留時間 (hrs)	315	297	284	270	248	226	345	316	432
送 風 量 (m ³ /分)	266	341	234	300	199	318	203	420	388
MLSS (mg/l)	526	1163	491	1,116	442	1,147	863	1,542	949
MLVSS (mg/l)	415	791	370	718	326	717	671	893	773
MLSS/MLVSS (倍)	760	680	753	643	738	625	717	573	815
SVI	194	71	220	146	215	129	95	83	474
BOD・SS比 (mg/l)	129	359	123	354	113	344	339	322	345
SS/T	1.4	8.1	1.2	1.8	1.9	4.3	7.2	7.4	4.0
初生汚泥時間 (hrs)	189	378	166	332	141	282	213	284	27
汚泥含水率 (%)	481	223	512	256	604	302	440	289	316
F_e^{2+} 添加率 (mg/l)	0	10	0	111	0	104	0	52	0
F_e^{2+} 添加率 (mg/l)	0	10	0	111	0	104	0	52	0

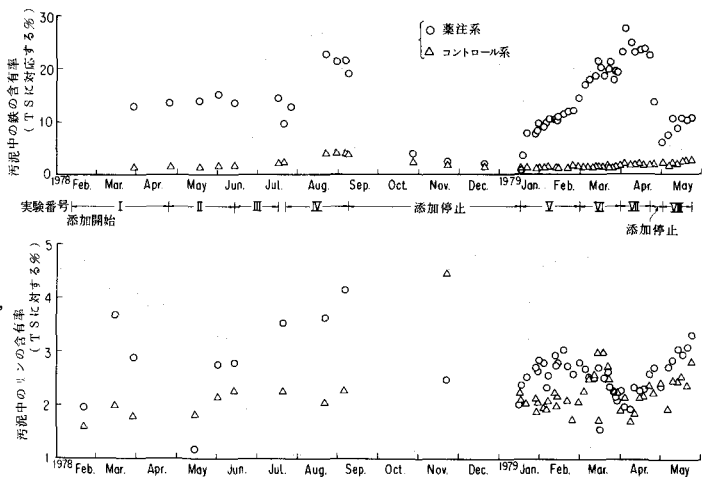


図-2 実験期間中の汚泥の性状の変化

表-2 流入流出水質の総括

区 分	試験番号	Ⅰ (Fe ²⁺ 1.1 % _ℓ)				Ⅱ (Fe ²⁺ 7.9 % _ℓ)				Ⅲ (Fe ²⁺ 19.5 % _ℓ)				Ⅳ (Fe ²⁺ 25.0 % _ℓ)				Ⅴ (Fe ²⁺ 4.3 % _ℓ)			
		流入下水	初 生 流出水	終 生 流出水	備 注	流入下水	初 生 流出水	終 生 流出水	備 注	流入下水	初 生 流出水	終 生 流出水	備 注	流入下水	初 生 流出水	終 生 流出水	備 注	流入下水	初 生 流出水	終 生 流出水	備 注
水 温 ℃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
PH	7.0~7.2	7.2	7.33	7.29	6.9~7.2	7.0~7.2	7.0~7.4	7.0~7.4	7.1~7.2	7.1~7.2	7.1~7.3	6.9~7.1	6.9	7.0	6.6	6.6	7.0~7.2	7.0~7.2	7.0~7.1	7.2~7.3	1.90
溶 解 度 cm	4.5	6.2	30<	24<	3.8	4.5	30<	30<	4.3	5.9	30<	30<	4.5	7.0	28.5	50<	5.7	8.1	4.5	4.0	
濁 度	5.7	3.9	5.7	5.7	9.1	6.3	4.7	4.1	5.7	4.0	2.9	2.2	6.0	4.1	5.4	1.3	5.5	3.6	4.8	4.9	
SS % _ℓ	132	4.7	1.2	117	139	5.7	4.9	4.5	151	5.2	4.2	3.8	149	4.1	1.0	4.0	126	4.5	6.9	6.3	
全アルカリ度	101	9.8	102	8.4	9.6	9.9	8.7	8.2	9.5	103	8.8	6.5	100	105	5.5	4.0	7.4	8.7	6.1	7.7	
全-BOD	149	88.3	10.3	7.7	156	107	6.1	5.9	166	102	8.8	4.7	186	110	186	4.2	140	8.1	128	8.4	
初-BOD	55.0	48.2	7.6	7.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
ATU-BOD	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.2	4.7	—	—	7.9	4.0	—	—	6.3	5.6	
酸性法COD	691	473	136	125	798	603	131	137	855	565	119	11.1	651	441	127	8.6	704	484	162	119	
全-TOC	6.8	4.7	143	13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
初-TOC	2.7	2.2	8.0	8.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
T-K-N	278	244	20.4	20.2	28.8	29.1	30.1	20.0	31.0	27.8	19.1	21.0	31.2	263	15.1	19.9	23.3	21.6	12.1	15.8	
NH ₄	15.8	15.1	15.1	16.9	14.2	16.1	13.7	14.1	15.7	15.1	13.1	13.6	15.4	14.7	9.5	15.1	11.0	10.3	8.8	10.0	
NO ₃	0.09	0.09	0.02	0.02	0.10	0.10	0.14	0.06	0.02	0.00	0.37	0.06	0.01	0.00	0.42	0.04	0.02	0.03	0.86	0.37	
NO ₃ -N	0.10	0.10	0.03	0.04	0.12	0.10	0.19	0.13	0.19	0.19	0.91	0.19	0.14	0.15	4.17	0.23	0.20	0.10	2.60	0.30	
T-P	404	339	1.94	0.62	478	386	1.48	0.49	448	380	1.87	0.35	436	354	2.25	0.19	466	2.98	1.82	0.81	
Ort-P	247	1.95	1.63	0.44	239	2.35	1.14	0.27	253	249	1.49	0.21	260	260	1.96	0.10	194	1.88	1.44	0.59	
S-T-P	247	234	1.65	0.30	304	2.83	1.32	0.30	293	276	1.63	0.25	286	268	2.08	0.11	222	2.07	1.86	0.60	
ABS	6.5	6.9	0.95	0.93	6.4	6.1	0.38	0.54	6.9	7.2	0.19	0.53	6.9	8.1	0.30	1.32	6.2	6.1	0.17	0.27	

4. 考 察

調査結果に関する考察に入る前に硫酸第一鉄の反応性について行なった実験について述べる。

エアレーションタンクにおける硫酸第一鉄の反応としては2つのケースが考えられる。一つは Fe^{2+} から Fe^{3+} に酸化されその後 Fe^{3+} が PO_4^{3-} ないし OH^- と反応するというケース、もう一つは Fe^{2+} のままで反応するというものである。いずれにしても何らかの形で反応した Fe^{2+}

は水中から消失するから Fe^{2+} の挙動を測定することにより Fe^{2+} の反応性を把握することができると思われる。ま

ず全長80mのエアレーションタンクの入口から3/4の位置へ硫酸第一鉄を添加した場合の Fe^{2+} の変化を図-3に示す。添加した Fe^{2+} は十分反応しないうちに流出していることが分かる。そこで添加位置をエアレーションタンクの入口から5mの所に移した。その結果も図-3に示した。これを見るとエアレーションタンクの中間点（滞留時間にして約1.5時間）でようやく Fe^{2+} の値がゼロに近くなる。 Fe^{2+} がゼロになるまでの時間はエアレーションタンク内の条件（例えばpHとかDO）により変化するが概ね1.5時間以上必要であると考えられる。本調査における硫酸第一鉄の添加位置は実験Iの開始直後を除き全てエアレーションタンク入口より5mの地点とした。

4.1 水処理への影響

表-2の結果並びに運転中の観察に基づき硫酸第一鉄添加による影響についてまとめると次のようになる。

- 有機物の除去については両系列とも良好な結果を出している。コントロール系に比べると薬注系の方がわずかながら除去率が高い。BODについては薬注系の除去率の方が高いのは主に硝化によるBODが少ないためと思われる。凝集剤の添加率と除去率の向上程度との間にははっきりした相関は見られなかった。
- 濁度、SSの除去については両系列でほとんど差がなかった。しかしながら処理水の外観では薬注系で濁って見えることがあった。この濁りは赤茶色のいわゆる鉄分による濁りとは異なり白色からやや茶色味を帯びた白色の濁りであった。コールターカウンターや浮紙の分画分析で処理水中のSSの粒径分布を調べたところ10 μ 以下の小粒径の粒子の割合は常に薬注系の方が高いということはなく一定していない。薬注系における濁りはSSの粒径で説明できる類いのものでないと思われるがどういう原因によるのか分かっていない。
- リンの除去は硫酸第一鉄の添加によりかなり改善される。コントロール系の全リン、溶解性全リンの除去率は各々36~64%, 20~53%となっているが凝集剤の添加により73~95%, 71~96%と大幅に向上した。リンの除去率は凝集剤と流入水中のリンとのモル比により左右される。本調査における Fe^{2+} と溶解性のPとのモル比と処理水中の残留リン濃度との関係性をプロットしたのが図-4である。

薬注系処理水で全リンに占める溶解性全リンの割合を求めると48~74%となる。この値はコントロール系処理水の85~92%と比べると低くなっているが、硫酸バンド添加実験の時の薬注系処理水の25~37%という値に比べるとかなり高くなっている。²⁾

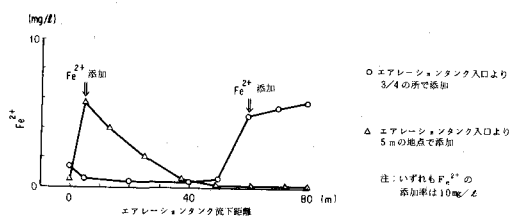


図-3 エアレーションタンクの流下に伴う Fe^{2+} の変化

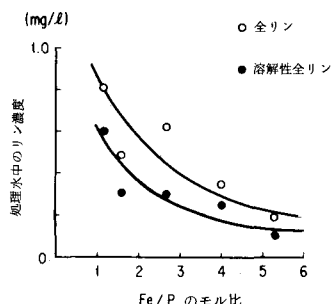


図-4 Fe/P のモル比と処理水中のリン濃度の関係

d. 硝化については薬注系ではほとんど生じなかった。コントロール系に比べてSRTが短いこと、汚泥中の鉄の含有率が高くVSSの割合の低いことなどが原因と考えられるが、後者については確証は得ていない。

e. ABSの除去率はコントロール系の方が少し高い。薬注系では硫酸第一鉄の添加率が高いほど除去率は低くなる傾向がある。

以上エアレーションタンク流入水と最終沈殿池流出水の水質を比較するという形で硫酸第一鉄添加の効果について述べてきたが、より詳しく把握するため実験Ⅱ、Ⅴ、Ⅶにおいてエアレーションタンクの追跡調査を行なった。この調査はある時刻に流入した水がエアレーションタンクを流下する間にどのように変化するかを調べるもので、流れはプラグフローを仮定している。以下報告する追跡調査は午前ないし午後の流入量の高い時間帯に流入した水を対象としたものである。

まず有機物の除去について溶解性BODと溶解性CODを指標として比較したのが図-5である。溶解性BODで薬注系の方がわずかながら初期除去能力が大きい点を除けばどちらの指標においても薬注系とコントロール系とで差はほとんど見られない。

つまり溶解性BOD、溶解性CODで評価する限り有機物除去においては硫酸第一鉄の添加は益もなく害もなしといえる。

次にリンの除去について溶解性全リンを指標として比較したのが図-6である。ここでは両系列のリン除去パターンの違いが明確に表現されている。コントロール系ではエアレーションタンクの流入とともに少しずつ減少しており、流下とともに減少する量が小さくなっている。これに対し薬注系では下水と返送汚泥が混合された時点で大きく減少し、それ以後はわずかしこ減少しない。硫酸第一鉄の添加位置の前後でもリン濃度はほとんど変化していない。これらの結果より薬注系でのリン除去はほとんどが返送汚泥の有する除去能力により行なわれていると思われる。返送汚泥中にはイオン態の鉄はほとんど存在しないから、鉄イオンとリン酸イオンが反応してリンが除去されるという形ではなく、返送汚泥中に蓄積された不溶解性の鉄と下水中のリンとが何らかの形で反応しリンが水中から除去されたものと推定される。

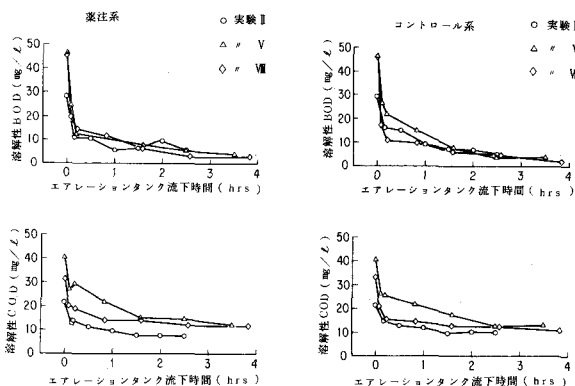


図-5 エアレーションタンクの流下に伴う溶解性BOD、溶解性CODの変化

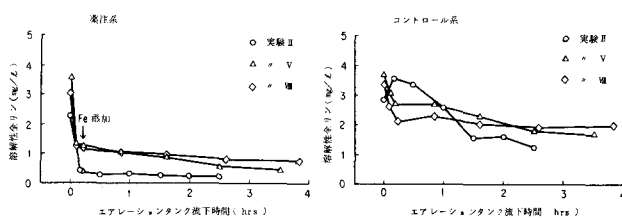


図-6 エアレーションタンクの流下に伴う溶解性全リンの変化

これまで述べたことから硫酸第一鉄の効果を要約すると、微細な浮遊物質を凝集させてより大きな塊りを作るといいうゆる凝集剤としての効果は通常の下水処理の運転条件では期待できそうもないが、リン除去剤としてはかなりの効果が期待できるといえる。処理水中のリンの半分ないしそれ以上が溶解性であるというのは鉄とリンの化合物の溶解度（例えばF₂PO₄では中性で1mg/ℓ程度）から見てもうなずけるものであり、pH 7付近で運転している生物処理における限界といえる。ただし本調査では浮遊性のリンの流出は少なく一度鉄と反応したリンはほとんどが汚泥にとどまり処理水中に流出していない。図-3を見るとF/Pのモル比を上げるとリンの除去率は良くなる傾向があるが添加率をあまりあげるとABSなどの除去に

好のましくない影響も出ており、本処理場のような特性を有する家庭下水の処理場ではF。として20mg/ℓ以下の添加とするのが適当と思われる。

4.2 汚泥処理への影響

鉄の多量に蓄積した汚泥が汚泥処理にどのような影響を及ぼすかという問題は本プロセスの実用化においてきわめて重要な問題である。ここでは汚泥処理に対する影響として汚泥の発生量と脱水性の2点を取りあげ硫酸第一鉄を添加することによる変化について調査した。

まず汚泥発生量については実験Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ、Ⅷで汚泥の引抜きが安定し汚泥の性状が落ち着いてきた時期の結果をまとめたのが表-3である。表-3で示した薬注量と薬注による汚泥の増加量との関係をプロットしたのが図-7である。この図を見るとF。として1kgの添加により約2.8kg汚泥発生量が増えることがわかる。この値は添加したF。₂³⁺がF。₂³⁺を経てF。₂PO₄になったと仮定した時の値、2.75に非常に近い。但し汚泥中のF。とPの比は重量比3.3~1.0でF。₂PO₄におけるF。とPの比1.8よりかなり高いから汚泥中の鉄が全てF。₂PO₄になっていると仮定するのは正しくない。

汚泥発生量の値としては添加したF。の量×2.8で概ね正しいものと思われる。

汚泥の脱水性においては小型の加圧脱水試験機を用いて調査した。試験に用いた汚泥は各系列の余剰汚泥と初沈汚泥をTS比で1対1になるように混合したものである。脱水性の比較として石灰と塩化第二鉄の添加率をかえた時の戸過速度と脱水ケーキ含水率とを測定した。試験は実験Ⅴと実験Ⅶで一度ずつ行なった。結果を図-8に示す。実験Ⅴの結果では含水率、戸過速度で両系列にはほとんど差はなかった。実験Ⅶではコントロール系の方が若干優れていた。この違いは供試汚泥のTSの差による所が大きいと思われる。薬注系の余剰汚泥でもコントロール系と同じ濃度にまで濃縮されていれば脱水性にはほとんど差がなくなるものと思われる。また薬注系の脱水において塩化第二鉄の添加率を減らすことが

表-3 薬注による汚泥発生量の変化

項 目	実験番号	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ
STRID		2.5	1.6	2.3	4.3
薬注系発生汚泥量 (kg/日)		706	1,084	1,100	498
コントロール系発生汚泥量 (kg/日)		520	604	539	405
薬注による増加量 (kg/日)		186	480	561	93
薬注量 (F。としてkg/日)		62	155	204	45

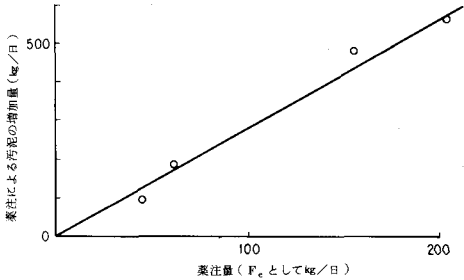
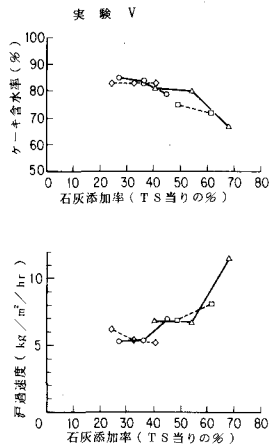
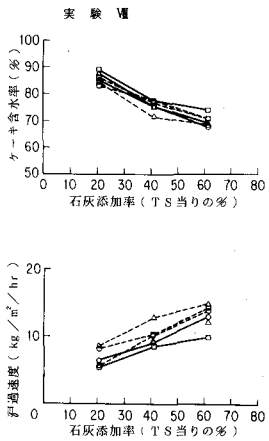


図-7 薬注による汚泥の増加



○ 薬注系 FeCl₃ 9.1% (対TS)
△ " " 13.6% (")
◇ コントロール系 " 8.2% (")
□ " " 12.3% (")
混合比は初沈汚泥と余剰汚泥のTS比を1とした。
脱水条件：打込み4kg/cm² 6分
脱水 10 " 6"
供試汚泥のTS
薬注系混合汚泥 13,900mg/ℓ
コントロール系 " 12,500mg/ℓ



○ FeCl₃ 4.1% (対TS)
△ " " 8.2% (")
□ " " 12.3% (")
— : 薬注系混合汚泥
--- : コントロール系混合汚泥
但し混合比は初沈汚泥と余剰汚泥のTS比を1:1とした。
脱水条件：打込み4kg/cm² 6分
脱水 10 " 6"
供試汚泥のTS
薬注系混合汚泥 17,500mg/ℓ
コントロール系 " 22,500 "

図-8 汚泥の脱水性

できるかどうかについてははっきりした結論を出すまでに至らなかった。

硫酸第一鉄の添加が汚泥処理に及ぼす影響としては主に汚泥発生量の増加にある。薬注系の汚泥の濃縮性は表-1のSVIで見ると限りコントロール系とあまり変わらない。つまり汚泥発生量の増加は汚泥濃縮槽に対する固形物負荷だけでなく容量負荷を大きくするものと予想される。

4.3 凝集剤としての硫酸第一鉄と硫酸バンドの比較

これまで硫酸第一鉄をエアレーションタンクに添加した場合の調査結果をまとめてきたが、ここで第1報第2報で既に報告した硫酸バンドをエアレーションタンクへ添加した場合との比較を試みた。両者の水処理及び汚泥処理に与える影響について表-4にまとめて示す。

表-4を見ても分かるように硫酸バンドは凝集力、リン除去能力のいずれも優れた薬品であるが、硫酸第一鉄は凝集力は乏しいがリン除去能力の優れた薬品である。処理機能改善の対象がリンであり、その目標値が溶解性全リンとして0.2mg/ℓ程度であれば硫酸第一鉄で十分対応できコストは硫酸バンドの1/4程度ですむものと思われる。

表-4 凝集剤の比較(コントロール系に対する処理機能の変化)

	硫 酸 第 一 鉄	硫 酸 バ ン ド
凝集剤の添加位置	エアレーションタンク入口付近	エアレーションタンク末端付近
水処理への影響		
a. 有機物の除去	若干良くなる。	良くなる。
b. 浮遊物の除去	ほとんど変わらない。	良くなる。
c. 処理水の外観	濁って見えることがある。	清澄感が良くなる。
d. リンの除去	良くなる。モル比4で溶解性全リンが0.2mg/ℓ程度	良くなる。モル比2で溶解性全リン0.2mg/ℓ以下
e. 硝化	(SRTの短縮,その他の原因により)硝化率は少し低下する	
汚泥処理への影響		
f. SVI	ほとんど変わらない	低くなりSVIの値が安定する
g. バルキング	(調査期間中に)あり, コントロールもあり	(調査期間中に)なし, コントロールはあり
h. 汚泥発生量	Fe ²⁺ 1kgの添加に対し, 汚泥は2.8kg増加	Al ³⁺ 1kgの添加に対し, 汚泥は4.0kgの増加
i. 脱水性	ほとんど変わらない。	少し良くなる。
コ ス ト	Fe 1kg当り32円(溶解費用込み) 15mg/ℓ添加で0.48円/㎡	Al 1kg当り330円 6mg/ℓ添加では2.0円/㎡
備 考	産業廃出物の使用可能	

5. あとがき

エアレーションタンクに硫酸第一鉄を添加した場合の運転結果について報告し、硫酸第一鉄がリン除去剤として有用であることを確認した。硫酸バンドの場合も同様であるが凝集剤をエアレーションタンクに添加する方法では凝集剤のコストと汚泥発生量の増加が重要な問題となる。今後は資源とエネルギーの消費の面もふまえて凝集剤添加活性汚泥法について総合的に評価していく予定である。

最後になりましたが本実験に御協力いただいた各位に感謝の意を表します。

参考文献

1) 安中, 当田 凝集剤添加による既設下水処理施設の機能改善(第1報)第12回本討論会論文集
2) 安中, 当田 " (# 2 #) # 1 3 # "
3) 安中, 酒井, 当田 " (# 3 #) # 1 4 # "