

高度なガス吸収能力や混合能力を有する ノンクログ静止型混合器の 余剰汚泥減容化への応用

須藤 芳雄¹, 鈴木 茂生², 山田 賢一³, 荻野 和夫⁴, 田部井 康一⁵

¹正会員 佐藤工業株式会社 土木本部環境事業部門 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町 4-12-20)

²佐藤工業株式会社 土木本部環境事業部門 (同 上)

³正会員 佐藤工業株式会社 土木本部環境事業部門 (同 上)

⁴国立群馬工業高等専門学校 技術専門職員 物質工学科 (〒103-8659 群馬県前橋市鳥羽町 580)

⁵国立群馬工業高等専門学校 助教授 物質工学科 (同 上)

20~30年前に開発・実用化された静止型混合器は、製造工程での攪拌・混合する部分をインライン化する有力な装置として採用されてきたが、目詰まりしやすいことなどから普及が限られていた。筆者らは円筒内に交点を持たない抵抗体よりなる目詰まりしにくいタイプのノンクログ静止型混合器の基礎実験を行い、高度なガス吸収能力や混合能力を有することを明らかにしてきた。本論文では、ノンクログ静止型混合器の基本性能を明らかにすると共に排水処理施設への適用事例、およびこの装置とオゾン発生器を組み合わせた装置による余剰汚泥減容化への応用事例を述べる。

キーワード：ノンクログ静止型混合器，酸素総括移動容量係数，気液界面積，活性汚泥法，余剰汚泥，オゾン処理，汚泥減容化

1. はじめに

筆者等は、ノンクログ静止型混合器を用いてその基本性能を明らかにしてきた^{1)~3)}。ノンクログ静止型混合器は液体と液体、液体と気体、あるいは液体と粉体などを攪拌翼などで攪拌、混合させることなく効率的に混合させるミキサーである。

筆者らは、この装置を排水処理施設に適用した。ノルマルヘキササン抽出物質の前処理段階での大幅な除去や活性汚泥法の安定処理を実現し、効果的で省力的な装置であることを実証した。

ノンクログ静止型混合器とオゾン発生器を組み合わせた汚泥減容化装置を開発し、現在、新潟県と共同で下水汚泥の減容化試験(六日町浄化センター)を行っている。排オゾンがないこと、オゾンによる化学的破壊と静止型混合器による物理的破壊により効率的に活性汚泥が失活することを確認している。

ここでは、ノンクログ静止型混合器の基本性能と排水処理システムへの適用および余剰汚泥減容化への応用を述べる。

2. ノンクログ静止型混合器

(1) 概要

ノンクログ静止型混合器は、円筒内に挿入した「ハ」の字状の抵抗体に流体を衝突させて、圧力変動(負圧)を生じさせ、乱流を発生させて混合するものである。1つの円筒をエレメントと称し、45度ずつ回転させながら繋げて8エレメントで基本1ユニットになる。この装置は従来の動力がかかりすぎることや目詰まりするという欠点を大幅に改善したものである。図-1に装置の概要を示す。

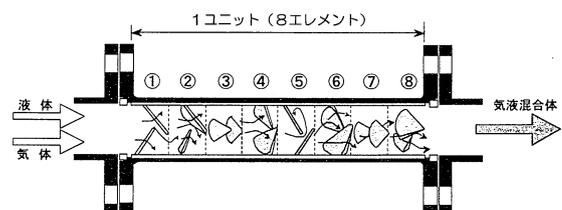


図-1 ノンクログ静止型混合器

(2) 基本性能

a) 酸素総括移動容量係数 (K_{La})

K_{La} は液体中への酸素の溶解しやすさを表す。筆者らの性能試験によれば、液量 400 ℓ、送風量 5 ℓ/分 の時、ノンクログ静止型混合器の K_{La} は 24.6 (1/時) であった(図-2)。これとは別に、液量、送風量を変えて通常の散気管の K_{La} を求めた(図-3)。表-1 には超微細気泡散気装置の K_{La} を含めた比較表を示す(送風量を 10 ℓ/分に調整)。

通常の散気管でノンクログ静止型混合器と同量の酸素を溶解させるには 60 倍(表-1: 24.6/21.6×800/15)程度の送風が必要である。

超微細気泡散気装置は通常の散気管より 50% 少ない送風量で水処理ができるとの指摘がある⁴⁾。ノンクログ静止型混合器の K_{La} は超微細気泡散気装置より 4 倍ほど値が大きい。

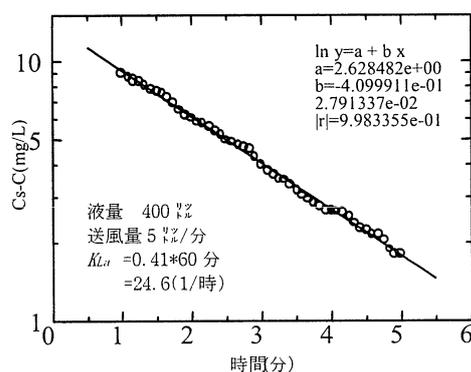


図-2 ノンクログ静止型混合器の K_{La} 試験

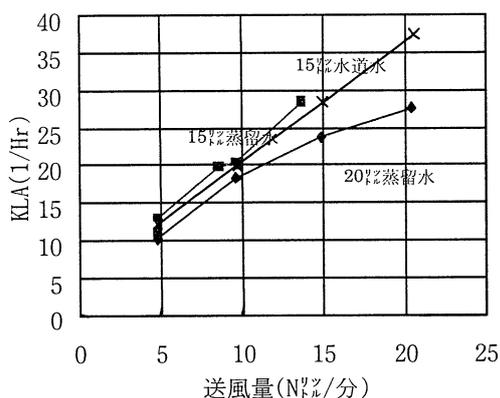


図-3 通常の散気管の KLa

表-1 物質移動容量係数の比較

	水質	容水量 (ℓ)	送風量 (ℓ/分)	K_{La} (1/時)
超微細気泡散気装置	曝気槽流入下水	1149	10.0	4.0
ノンクログ型静止型混合器	水道水	800	10.0	24.6
散気管	水道水	15	10.0	20.6
散気管	蒸留水	15	10.0	21.6

b) 気液界面積 (aL)

aL は液体中の気体の被表面積であり、大きいほど気体粒子は小さい。ノンクログ静止型混合器と別タイプの静止型混合器である「スタティックミキサー」および気泡塔の aL を図-4, 5 に示す。

ノンクログ静止型混合器と「スタティックミキサー」の最適な気液流量比 (Q_g/Q_L) は、それぞれ 0.1, 0.4 程度⁵⁾と言われている。

ノンクログ静止型混合器の aL は気液流量比 0.1 の時に約 250 m^2/m^3 である。「スタティックミキサー」、気泡塔の aL は約 90 m^2/m^3 である。

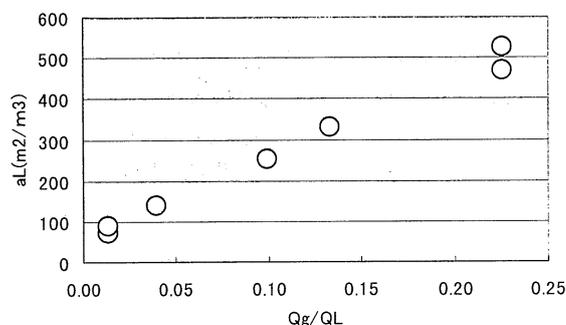


図-4 気液界面積 aL (ノンクログ静止型混合器)

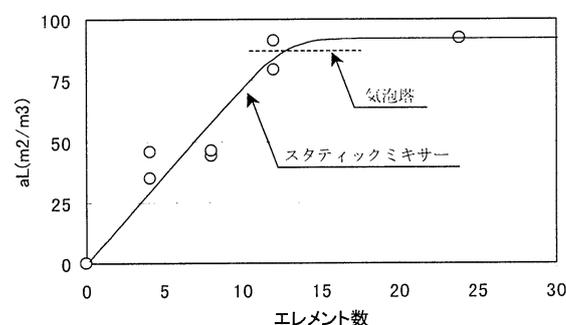


図-5 気液界面積 aL (スタティックミキサー)⁵⁾

3. ノンクログ静止型混合器の排水処理施設への適用

作業の省力化、臭気対策、維持管理費の低減を目的に、ノンクログ静止型混合器を排水処理システムに適用した(図-6, 図-7)。

(1) 処理条件

表-2 に処理条件を示す。

表-2 排水処理条件

平均設計排水量	100 t/日	
最大設計排水量	120 t/日	
	原水 (mg/ℓ)	処理水 (mg/ℓ)
SS	1,000	30
BOD	2,000	20
CODmn	690	20
N-Hex	220	15

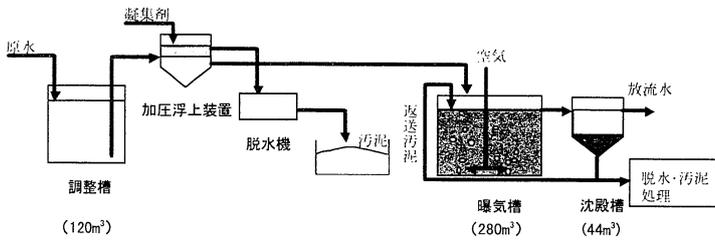


図-6 変更前の排水処理の流れ(加压浮上方式)

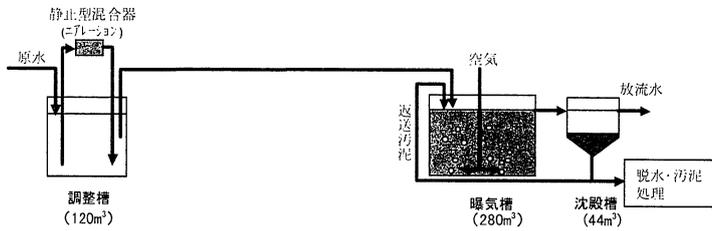


図-7 変更後の排水処理の流れ(前処理エアレーション方式)

表-3 前処理エアレーションによる負荷低減効果

事例1(設置2カ月後)

	貯留槽流入水 (エアレーション処理前)	貯留槽排水水 (エアレーション処理後)	減少率
SS (mg/l)	1,410	608	56.9%
COD (mg/l)	535	381	28.8%
BOD (mg/l)	1,430	775	45.8%
N-Hex (mg/l)	380	73.8	80.6%

*曝気槽MLSS濃度:3.920mg/l

事例2(設置4カ月後)

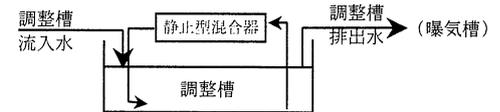
	貯留槽流入水 (エアレーション処理前)	貯留槽排水水 (エアレーション処理後)	減少率
SS (mg/l)	880	286	67.5%
COD (mg/l)	407	160	60.7%
BOD (mg/l)	1,120	637	43.1%
N-Hex (mg/l)	124	67.8	45.3%

*曝気槽MLSS濃度:3.180mg/l

事例3(設置9カ月後)

	貯留槽流入水 (エアレーション処理前)	貯留槽排水水 (エアレーション処理後)	減少率
SS (mg/l)	551	358	35.0%
COD (mg/l)	375	197	47.5%
BOD (mg/l)	936	595	36.4%
N-Hex (mg/l)	152	78	48.7%

*曝気槽MLSS濃度:3.930mg/l



(2) ノンクログ静止型混合器の適用効果

a) ノルマルヘキサン抽出物質等の負荷低減効果

表-3 に調整槽に流入, 排出する排水の濃度を示す. ノンクログ静止型混合器による調整槽でのエアレーションにより, SSが35~67%, ノルマルヘキサン抽出物質が45~80%, BOD, CODが30~60%減少した. 溶存酸素による酸化分解効果, 微細気泡による浮上分離効果によるものと考えられる. 浮上したスカムは月に何回かの頻度で回収している.

b) 曝気槽内の温度

夏季(6月) 冬季(12月)の気温, 水温を図-8, 表-4に示す. 夏, 冬ともに平成14年の気温は低かったにも拘わらず, 水温は高いという結果になった. 平成13年, 14年における処理条件の最大の違いは処理方式を変更したことである. ノンクログ静止型混合器を用いた前処理エアレーション処理になり曝気槽内での微生物の活動が活発になってことが水温上昇をもたらした原因の一つとして考えられる.

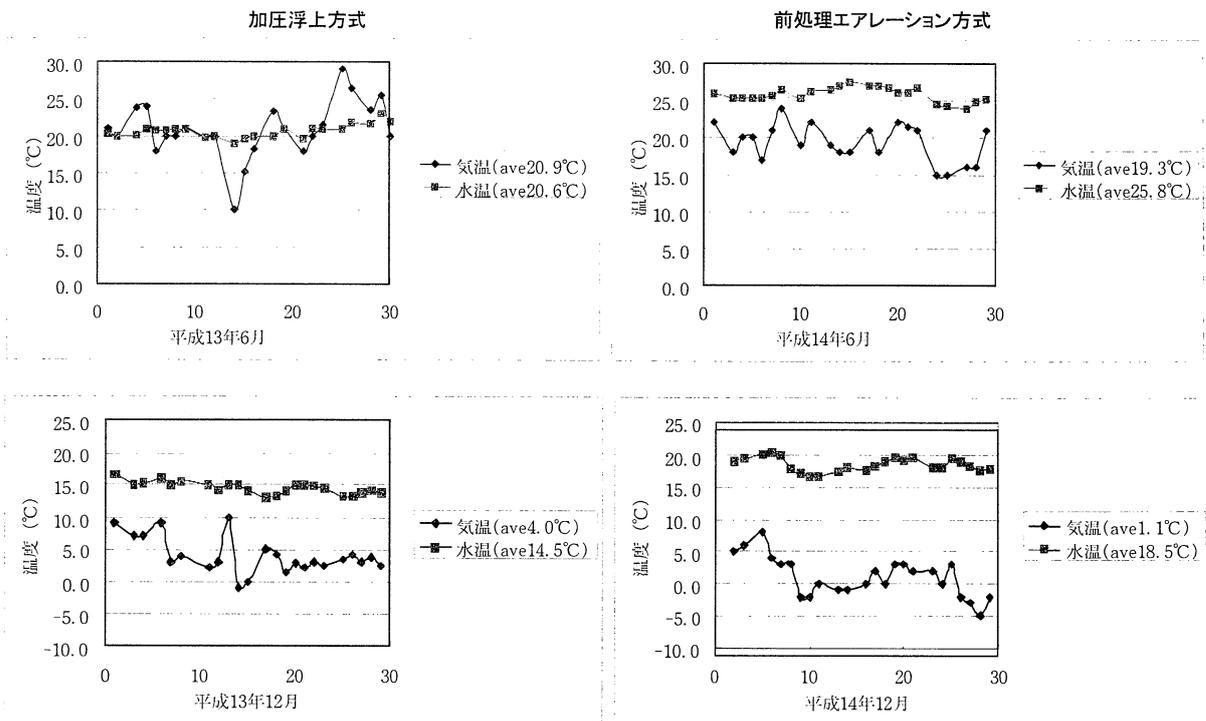


図-8 外気温と曝気槽内水温

	処理方式	平均水温 Tw(°C)	平均気温 Ta(°C)	温度差ΔT ΔT=Tw-Ta
夏季 (6月)	加圧浮上方式 (H13)	20.6	20.9	-0.3
	前処理エアレーション方式 (H14)	25.8	19.3	6.5
冬季 (12月)	加圧浮上方式 (H13)	14.5	4.0	10.5
	前処理エアレーション方式 (H14)	18.5	1.1	17.4

表-4 処理方式の違いによる曝気槽内の水温

c) 曝気槽内の溶存酸素量

夏季(6月)と冬季(12月)の溶存酸素量を図-9に示す。12月の溶存酸素量は2~6mg/ℓ(平均3.3mg/ℓ)の範囲にあり、活性汚泥法で最適条件と言われる1~3mg/ℓの2倍を維持している。一方、夏季(6月)の溶存酸素は0.5~4.5mg/ℓ(平均2.1mg/ℓ)である。季節による溶存酸素量の違いが良く出ている。線が切れている日は休日である。休日明け直後の酸素消費が大きいことが夏冬通じて観察される。

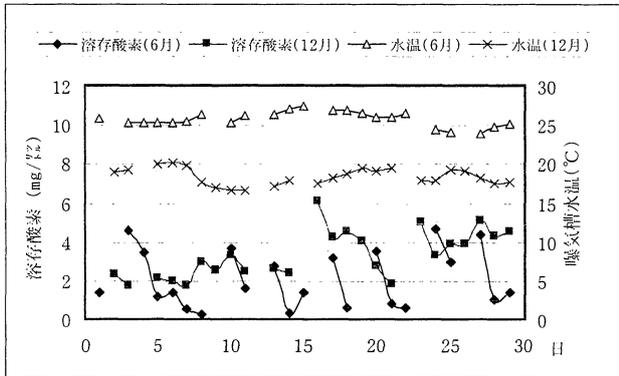


図-9 曝気槽内の溶存酸素の変動

d) 排水処理量の増加と余剰汚泥発生量の減少

排水処理量と汚泥発生の変化を図-10に示す。処理方式を切り替えてから1,2ヶ月間は排水処理量に変化はなかったが、3ヶ月後には増加に転じ、11月~今年3月は180m³/日前後の処理をしている。これは最大設計排水量の1.5倍にあたる量である。

処理方式を変えた直後には沈殿槽内の沈殿物除去などにより脱水ケーキは増えたが、6月には減少に転じ、その後、排水1m³当たりには生じる脱水ケーキは2kg台になり、今年に入ると1kg台になった。

e) 放流水質, 臭い

平成14年4月に処理方式を変え処理量を増やしたが放流水質は基準をクリアしている(表-5)。

水質とは別に、排水処理では臭いが問題になる事が多い。加圧浮上処理により生じる脱水ケーキは腐

敗しやすく夏になると悪臭が発生していたが、平成14年の夏には臭い問題は起こらなかった。

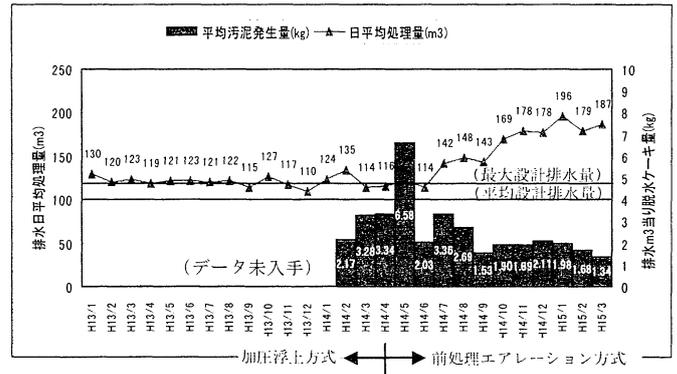


図-10 排水処理量と余剰汚泥量

表-5 処理水質

日付	BOD(mg/ℓ)			ノルマルヘキサン抽出物質(mg/ℓ)		
	流入水	放流水	放流基準	流入水	放流水	放流基準
H14.2	459	3	20	31.4	0.5	15
H14.4	1,020	3		70.4	0.5	
H14.6	1,430	6		380.0	0.5	
H14.8	1,120	6		124.0	0.8	
変 更 H14.10	1,290	14		87.3	0.5	
H15.1	936	11		152.0	0.6	

f) 経済性

前処理エアレーション方式への変更により加圧浮上処理で使用していた凝集剤が不要になり、脱水ケーキの処分費も減じられるなどランニングコストが大幅に減少した。また、それまで凝集剤の調査や管理に多くの労力を要していたが、前処理エアレーション方式でほとんどメンテナンスフリーになった。

4. ノンクログ静止型混合器の余剰汚泥減容化への応用

4.1 余剰汚泥の減容化

有機性排水処理における好気性生物処理では、好気性条件下で、微生物がBODを酸化分解し、それに伴い自己増殖、自己酸化を行っている。曝気槽で増殖した微生物のうち不必要のものは、余剰汚泥として系外に排出し処理・処分される(図-11)。この余剰汚泥が大量に発生するので処分方法が課題になっている。

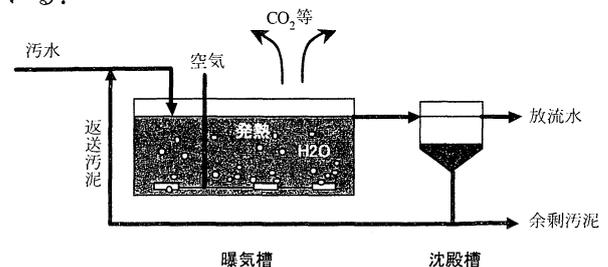


図-11 一般的な排水処理の流れ

4.2 余剰汚泥減容化装置

オゾンは自然界の中ではフッ素について酸化力が強い⁶⁾。このオゾンの酸化力を利用した汚泥減容化技術が開発されている。多くは散気管によりオゾンを余剰汚泥に吸収させ、微生物の細胞壁(膜)を傷つけて細胞液等を再基質化し、再び生物処理をすることにより余剰汚泥を減量化しようとするものである。しかし、通常の散気管の場合には、オゾンを有効に吸収させる装置や排オゾン処理装置などが必要である。例えば、ある設備の場合、オゾンの有効利用の為に密閉式タンクを複数並べているが、それでもオゾンの有効利用は80%程度であり、20%は利用されずに排オゾン処理されている。

ノンクログ静止型混合器とP S A付きオゾン発生器を組み込んだ余剰汚泥減容化装置を写真-1に示す。この装置はオゾンによる化学的破壊、ノンクログ静止型混合器による物理的破壊を企図したものである。装置自体は開放系のタンクを連結したシンプルなものであるが、150g/Nm³という高濃度オゾンを使用している。現在、六日町浄化センターで新潟県と共同研究を行っている。

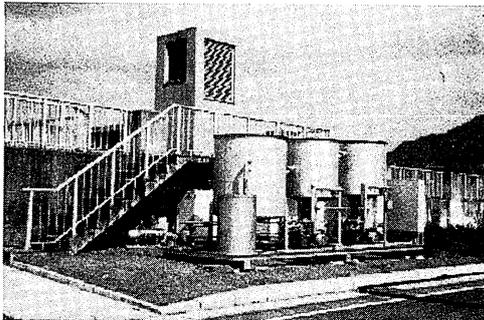


写真-1 余剰汚泥減容化装置の概要

4.3 汚泥減容化試験

(1) 試験ケース

ノンクログ静止型混合器を組み込んだ装置は気液混合比として1/10~1/6まで送気できる。本試験ではオゾンを安全・確実に吸収させるために、300ℓ/分の汚泥循環量に対して15ℓ/分の酸素ガス量を目安に回分試験を行った。表-6に試験ケースを示す。

表-6 試験ケース

Run No.	汚泥循環量(ℓ/分)	オゾン発生量(g/h)
1	400	(150)
2	400	90
3	400	110
4	235	110
5	330	110
6	400	125

(2) オゾン吸収性能

排オゾン濃度の計測によりオゾン吸収性能を調べた。タンクの上蓋を外し、液面上でオゾンを計測したが検出されなかった。計測には中濃度オゾン濃度計(0~500ppm)とポータブルな低濃度オゾン濃度計(0~10 ppm)を使用した。

一方、タンク内の溶存酸素は図-12の通りである。注入酸素濃度をおよそ90%とし、反応タンク内での酸素の消費を考えると、ほぼ飽和状態と考えられる。なお、汚泥濃度は表-7の通りであった。

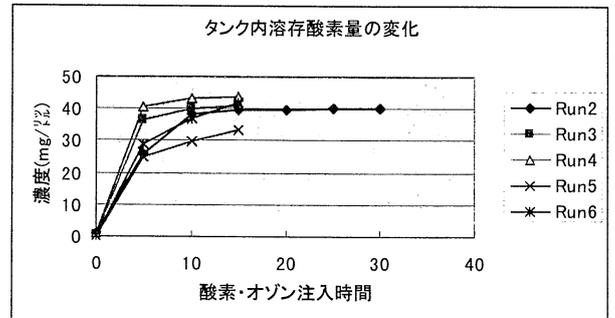


図-12 反応タンク内の溶存酸素

表-7 汚泥濃度

試験ケース	BOD	COD _{Mn}	MLSS
Run1	1,400	1,100	3,500
Run2	1,200	1,100	2,500
Run3	1,400	1,300	3,200
Run4	700	600	1,600
Run5	1,100	1,000	2,500
Run6	870	810	2,100

(3) オゾンによる化学的破壊

オゾン注入量を変数とする可溶化率の変化を Run 2, Run3, Run6 で比較した(図-13(a))。MLSS 1kg に対する15分間のオゾン注入量はRun2=8.9, Run3=8.8, Run6=14.8(gO₃/kgMLSS)、同時に注入される酸素量は Run2=9.7, Run3=13.1, Run6=15.1(ℓ/分)である。

オゾン注入量, 注入酸素量が最も多いRun6の可溶化率が最も高い。15分間で溶解性のBOD, COD, TOCは10倍ほど増えている。

なお、Run2とRun3のオゾン注入量はほぼ同じであるが、可溶化率は大きく異なる。両者の酸素ガス量が異なることから、オゾン注入量とともに、オゾンの混合方法の重要性が示唆されている。

(4) 静止型混合器による物理的破壊

静止型混合器内の抵抗体による物理的破壊の程度をみるために、汚泥循環量(=抵抗体への衝突回数の多少)という指標により、Run3, Run4, Run5の試験ケースで可溶化物質の変化を比較した(図-13(b))。

MLSS 1kg に対するオゾン注入量(15 分間)は Run3=8.8, Run4=17.5, Run5=11.2(gO₃/kgMLSS)であった。当初、オゾン注入量の最も多い Run4 の可溶化が最も進むと考えられた。しかし、オゾン注入量が最も少なく、汚泥循環量の最も多い Run3 の可溶化が最も進んだ。オゾン注入量が最も多く、汚泥循環量の最も少ない Run4 の可溶化率が最も少なかった。汚泥の可溶化では、静止型混合器による物理的破壊の効果があることが示唆されている。

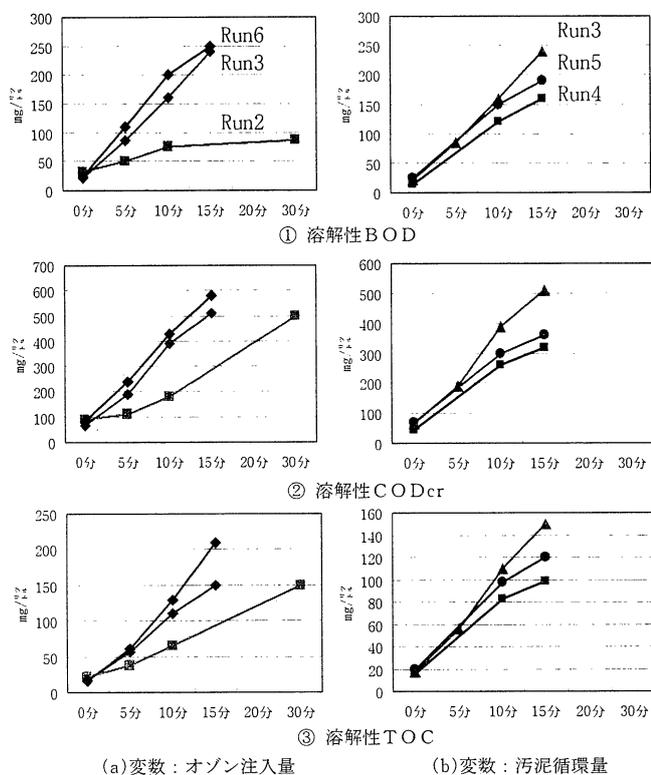


図-13 溶解性物質の変化

(5) 酸素利用速度係数 Kr

Kr は、単位時間に単位重量の活性汚泥によって利用される酸素量である。Kr を測定することによりオゾンによる活性汚泥の不活性化が推定できる。MLSS が 3480 mg/l, 2280 mg/l である 2 種類の活性汚泥

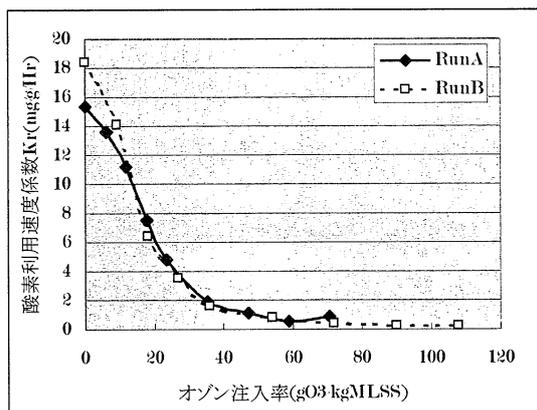


図-14 酸素利用速度係数 Kr

を試料として Kr を求めた(図-14)。オゾン注入率が 10gO₃/kgMLSS 以上になると両者はほぼ重なる。また、オゾン注入率が 35gO₃/kgMLSS を超えると Kr は 1/10 までに減少する。本結果は他文献⁷⁾に見られる活性汚泥活性度ともほぼ符合しているが、本結果の方が少量のオゾン注入率で微生物の失活を認めた。

(6) まとめ

本試験は現在進行中であるが、これまでのところノンクロック静止型混合器を組み込んだ装置により、通常の散気管等を用いた試験報告と比べて以下の違いを確認できた。

- ・ 排オゾンが出ない。オゾンはほぼ完全に活性汚泥と反応していると考えられる。
- ・ オゾンによる化学的破壊と静止型混合器による物理的破壊の両方の効果。
- ・ 微生物の失活とオゾン注入率の関係。従来、試験室規模で確認されていたものを、実規模でしかも少量のオゾン注入率で実現した。

5. おわりに

静止型混合器は処理システムのラインに組み込んで使用できるので、システムの合理化、省力化のために化学プラントなどで広く使われてきた。しかし、目詰まりしやすいことから土木建設においては採用が限られていた。ノンクロック静止型混合器は下水処理、汚泥処理、スラリー処理、廃液処理、あるいは閉鎖性水域の水質改善など多くの分野に適用できるので、今後、これらの分野に普及していきたい。

参考文献

- 1) 田部井康一ほか：ポンプミキサーの気液界面積，化学工学会第 64 回年会講演集，1999，S307
- 2) 田部井康一ほか：静止型気液混合器の基本的性能解析(気泡径と気液界面積)，化学工学会第 60 回年会講演集，1995，pp. 97
- 3) 阪野 昇：目詰まりしないミキサーとその応用，配管技術，1996. 11，pp. 52-54
- 4) 尾松良太ほか：超微細気泡散気装置の実負荷運転における省エネルギー効果について，第 39 回下水道研究発表会講演集，2002，pp. 704-706
- 5) 株式会社ノリタケカンパニーリミテド：スタティックミキサーの基礎技術，技法 No. 20，pp. 14
- 6) 杉光英俊：オゾンの基礎と応用，光琳，pp. 18，1996
- 7) 荒川清美ほか：オゾンを用いた活性汚泥法における汚泥減容化の研究，環境衛生工学研究，2000 No. 3，pp. 164-169