

## 2-2-1 生物反応槽における必要空気量の設計に係る

### 補正係数 $\alpha$ 値の測定方法について

施設管理部 環境管理課 亀井 葉子  
石井 裕樹  
土屋 葉月  
村山 康樹  
山本 央  
兼安 智也  
森田 健史

#### 1. はじめに

反応槽の設計においては、処理水量や流入水質、放流水質等から計算した必要酸素量がエアレーションにより供給されるように必要空気量を設定する。このとき、エアレーション装置の性能は一気圧で溶存酸素が存在しない清水状態における酸素移動効率で評価されているため、反応槽中での必要酸素量を清水状態での値に補正する必要がある。この補正に用いる係数として、総括酸素移動容量係数（以下「 $K_{La}$ 」という。）の補正係数  $\alpha$ （以下「 $\alpha$  値」という。）、飽和酸素濃度の補正係数  $\beta$ （以下「 $\beta$  値」という。）がある。

今回、小規模な机上試験を用いた  $\alpha$  値等の測定方法について検討し、いくつかの知見が得られたので、区部の水再生センター（以下「センター」という。）の  $\alpha$  値の測定結果と合わせて報告する。

#### 2. $\alpha$ 値と $\beta$ 値

「下水道施設計画・設計指針と解説（2019年版）」（以下「設計指針」という。）では、必要空気量の設計に当たって、まず式（1）により必要酸素量を酸素供給量に換算し、酸素供給量とエアレーション装置の酸素移動効率（ $E_A$ ）から必要空気量を求めるとされている。式（1）中、 $\alpha$  値は清水での  $K_{La}$  に対する反応槽混合液での  $K_{La}$  の比であり、 $\beta$  値は清水での飽和酸素濃度に対する反応槽混合液での飽和酸素濃度の比である。一般に反応槽混合液中では清水中と比較して酸素溶解速度が遅いとされ、設計指針では標準活性汚泥法や循環式硝化脱窒法、嫌気無酸素好気法等の高負荷型法の場合の  $\alpha$  値として 0.83、 $\beta$  値として 0.95 が示されており、当局でもこの値を用いて反応槽の設計を行っている。

$$\text{酸素供給量} = \frac{\text{必要酸素量} \cdot C_{S1} \cdot \gamma}{1.024^{(T_1 - T_2)} \cdot \alpha (\beta \cdot C_{S2} \cdot \gamma - C_0)} \times \frac{101.3}{P} \quad \dots \text{式 (1)}$$

酸素供給量： $T_1$ °Cにおける清水状態での酸素供給量（kgO<sub>2</sub>/d）

必要酸素量： $T_2$ °Cにおける1日当たりの酸素移動速度（kgO<sub>2</sub>/d）

- $T_1$  : エアレーション装置性能の前提となる清水温度 (°C)
- $T_2$  : 反応槽混合液の水温 (°C)
- $C_{S1}$  : 清水  $T_1$ °Cでの飽和酸素濃度 (mg/L)
- $C_{S2}$  : 清水  $T_2$ °Cでの飽和酸素濃度 (mg/L)
- $C_0$  : 反応槽混合液の溶存酸素濃度 (mg/L)
- $\alpha$  :  $K_La$  の補正係数
- $\beta$  : 飽和酸素濃度の補正係数
- $\gamma$  : 散気水深による飽和酸素濃度の補正係数
- $P$  : 大気圧

### 3. $K_La$ の測定原理

「下水試験方法 (2012年版)」(以下「下水試験法」)には、 $K_La$  の測定法として、酸素消費がない場合に適用できる非定常法と、稼働している反応槽で試験を行う定常法が挙げられており、定常法には反応槽内の溶解酸素濃度と酸素利用速度の関係より求める多点測定法と反応槽周りの酸素及び二酸化炭素の収支により求めるガス収支法の二つがある。 $\alpha$  値は清水と試料水 (反応槽混合液等) の  $K_La$  の比であり、清水と試料水の両方を同じ条件で測る必要があるため、本検討では非定常法を採用することとした。

非定常法による  $K_La$  の測定原理は次のとおりである。酸素溶解速度は、試料水等の溶存酸素 (以下「DO」という。) 濃度を  $C$ 、飽和酸素濃度を  $C_S$ 、酸素利用速度を  $r_r$ 、時間を  $t$  とすると式 (2) で表される。ここで、酸素消費がない場合  $r_r=0$  であり、式 (2) を積分すると式 (3) になる。式 (3) から、一定風量でエアレーション中の  $C$  を時間ごとに測定した後エアレーションを継続して  $C_S$  を把握すれば、 $t$  と  $\ln(C_S-C)$  の近似直線の傾きから  $K_La$  を求めることができる。 $K_La$  は水温  $T$ (°C) に依存するため、経験式 (4) を用いて 20°C における値に換算する。

$$\frac{dC}{dt} = K_La(C_S - C) - r_r \quad \dots \dots \dots \text{式 (2)}$$

$$\ln(C_S - C) = -K_La \cdot t + \text{const.} \quad \dots \dots \dots \text{式 (3)}$$

$$K_La_{(20)} = K_La_{(T)} \cdot 1.024^{(20-T)} \quad \dots \dots \dots \text{式 (4)}$$

清水中での  $K_La$  と試料水中での  $K_La$  を同一条件下で測定し、その比を算出することで  $\alpha$  値を求めることができる。また、試料水の  $C_S$  と清水の  $C_S$  の比が  $\beta$  値となる。

### 4. $K_La$ の測定方法の検討

下水試験法では  $K_La$  の非定常法の試験操作について次のように記載されている。

- ① 反応タンクに清水等を満たし、エアレーションしながら、亜硫酸ナトリウムを溶解し、溶存酸素濃度を 0mg/L にする。
- ② 引続きエアレーションして、溶存酸素濃度を上昇させる。このとき、各時間における  $(C_S-C)$  の対数と時間  $t$  との関係を図示すると直線が得られ、この直線の傾きが  $-K_La$  となる。

しかし、机上試験により  $\alpha$  値の測定を行おうとすると検討すべき事項がいくつか浮上した。例えば、DO の除去について、下水試験法では亜硫酸ナトリウムを用いるとされている

が具体的な添加量は示されていない。また、エアレーション時の空気量についても具体的な記載がない。これらの点について事前に検討し、最適な条件を検討することとした。

事前検討では、清水として水道水を、試料水として中野水再生センター好気槽中流部の反応槽混合液をフィルターバッグ（ろ紙 5A 相当）でろ過したものをを用いた。なお、フィルターバッグでろ過した試料水では酸素消費がほぼ 0 となることをあらかじめ確認している。また、水量、容器形状、ガラスボールフィルターや攪拌子の種類、スターラーの回転速度などは清水と試料水で揃えるようにした。

#### 4.1 D0 除去方法

亜硫酸ナトリウムの必要量として、添加後 30 分以内に安定して D0 を 1mg/L 以下に低減できる量を検討した。また、海外等では窒素ガス等の不活性ガスのパージにより D0 を除去している例<sup>1),2)</sup>もあることから、不活性ガスパージによる D0 除去についても検討し、比較することとした。

##### 4.1.1 亜硫酸ナトリウム添加

まず、下水試験法の記述に従い、亜硫酸ナトリウムのみを添加する場合の必要量について確認したところ、反応式から求められる理論量（D01mg に対し 8mg）では清水、試料水ともに D0 が十分に除去されず、D0 を 1mg/L まで低下させるには、清水では 150mg/L（理論量の約 2 倍）、試料水では 250mg/L（理論量の約 8 倍）の添加が必要であった。

次に、文献<sup>3)</sup>を参考に、亜硫酸ナトリウムとともに触媒としてコバルトを添加する場合について検討した。はじめに、塩化コバルト（II）を 0.05mg/L となるように添加したところ、D0 の低下が速まる傾向が見られたものの、D0 を 1mg/L 以下にするのに要する亜硫酸ナトリウムの添加量は変わらなかった。そこで、塩化コバルトの添加量を 1mg/L とすると、清水では 100mg/L（理論量の約 1.5 倍）、試料水では 150mg/L（理論量の約 5 倍）の亜硫酸ナトリウム添加で安定して D0 を 1mg/L 以下まで低減することができた。

これらの結果から、亜硫酸ナトリウムによる D0 除去では、塩化コバルト 1mg/L を添加した上で、清水では 100mg/L、試料水では 150mg/L の添加が必要と判断した。以下、この方法を「亜硫酸 Na 添加法」という。

##### 4.1.2 不活性ガスパージ

不活性ガスパージによる D0 除去について、アルゴン（Ar）ガス及び窒素（N<sub>2</sub>）ガスを用いて検討した。その結果、いずれのガスにおいても 1L/min の流量で約 10 分間パージすることで、清水及び試料水の D0 を 1mg/L 以下まで低減できることが確認できた。今回検討した条件では、Ar ガスの方が N<sub>2</sub> ガスよりも速やかに D0 を除去できる傾向が見られたことから、これ以降の検討では Ar ガスを用いることとした。以下、この方法を「Ar ガスパージ法」という。

##### 4.1.3 亜硫酸 Na 添加法と Ar ガスパージ法の比較

2L の清水及び試料水について、亜硫酸 Na 添加法又は Ar ガスパージ法を用いて D0 除去を行った後、0.5L/min でエアレーションし、D0 の挙動を比較した。D0 の推移を図 1 に示す。

清水（亜硫酸 Na 添加法）では、D0 の立ち上がりに若干の遅れが見られたが、これは余剰の亜硫酸ナトリウムが消費されるのに要した時間と考えられる。10 分間のエアレーションにより、清水（亜硫酸 Na 添加法）、清水（Ar ガスパージ法）、試料水（Ar ガスパージ法）では D0 が 7mg/L 程度まで上昇したのに対し、試料水（亜硫酸 Na 添加法）では D0 が 6mg/L

程度までしか上がらなかった。また、エアレーションを停止して静置すると、試料水（亜硫酸 Na 添加法）でのみ D0 の減少がみられた。これらのことから、試料水（亜硫酸 Na 添加法）では、エアレーション中も酸素消費があり、D0 の上昇に負の影響が生じていたと考えられる。

非定常法は酸素消費がない場合に適用できる方法であり、「酸素消費がある場合測定値が低くなることがある」と下水試験法の注にも記載がある。実際、エアレーション停止後、エアレーションを強めて  $C_s$  を計測し、 $\alpha$  値等を算出したところ、亜硫酸 Na 添加法で求めた  $K_L a$  は Ar ガスパージ法と比べてかなり小さい値となった。その結果、 $\alpha$  値も低く算出された。

この結果から、非定常法により  $\alpha$  値を求める際の D0 除去方法には不活性ガスによるパージを用いることが適当と判断した。

#### 4.2 エアレーション時の空気量

エアレーション時の空気量が高すぎる場合には水面からの空気供給の影響<sup>4)</sup>が、低すぎる場合には攪拌力が弱く、D0 が均一になりにくい等の課題が想定されることから、適切な空気量について検討した。今回の検討では、3L ビーカーに清水又は試料水を 2L 入れ、Ar ガスを用いて D0 を除去した後、空気量 0.3L/min、0.5L/min、2.0L/min 及び 4.0L/min の各条件でエアレーションを行い、 $K_L a$ 、 $\alpha$  値及び  $\beta$  値を測定した。各空気量における  $\ln(C_s - C)$  の経時変化を図 2 に、測定結果を表 2 に示す。いずれの空気量においてもプロットは良好な直線となったが、2.0L/min 及び 4.0L/min の空気量では実験系の水面が大きく波打っている状況が目視されたことから、これ以降の測定については空気量を 0.5L/min とした。

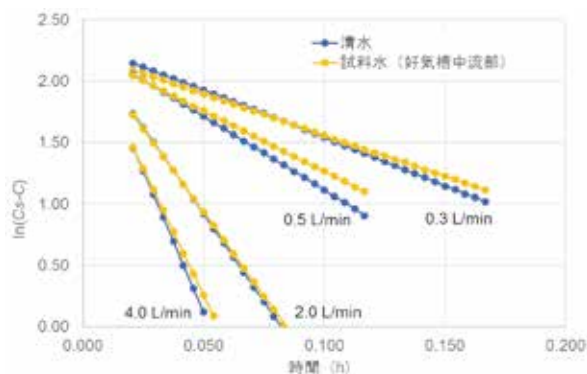


図 2 各空気量の  $\ln(C_s - C)$  の経時変化

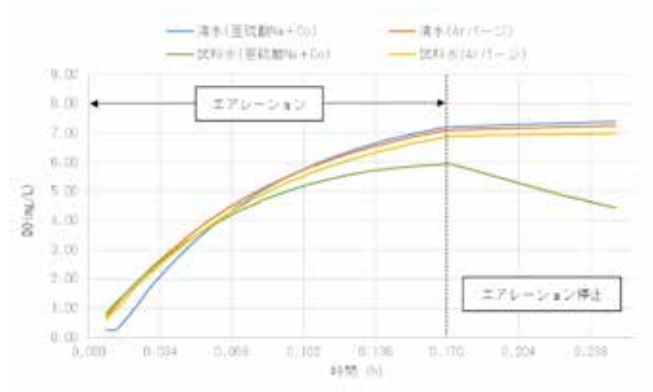


図 1 エアレーション時、エアレーション停止時の D0 の挙動

表 1 各 D0 除去方法の  $\alpha$  値等測定結果

D0除去方法	$K_L a_{(20)}$		$\alpha$ 値	$\beta$ 値
	清水	試料水		
亜硫酸Na添加	13.0	8.4	0.65	0.96
Arガスパージ	11.3	11.1	0.98	0.94

表 2 各空気量の  $\alpha$  値等測定結果

空気量	$K_L a_{(20)}$		$\alpha$ 値	$\beta$ 値
	清水	試料水		
0.3L/min	9.2	7.5	0.82	0.96
0.5L/min	14.1	11.1	0.78	
2.0L/min	33.3	30.6	0.92	
4.0L/min	53.9	46.8	0.87	

### 4.3 その他

検討中、D0計のセンサーやガラスボールフィルターの設置位置の小さな相違も $K_{La}$ に影響することが確認されたので、**図3**のような器具を用意してD0計、ガラスボールフィルターの設置位置を固定し、統一した状態で測定が行えるようにした。

また、採水した水道水や試料水を直ちに測定に供すると、エアレーションに伴い水温が変化することが見受けられた。測定中に水温変化があると飽和酸素濃度に変化してしまうので、試料水等は測定前に室温に静置し、十分室温に近づけた後測定を行うこととした。

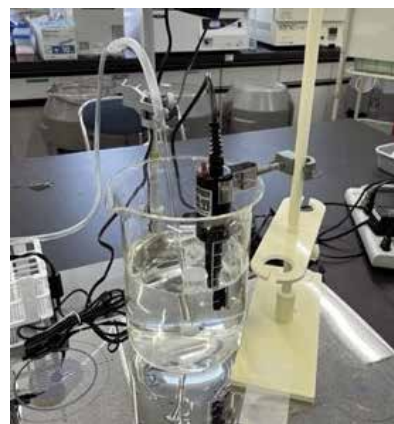


図3 測定に使用した器具

### 5. 測定方法

4章での検討を基に決定した机上試験による $K_{La}$ の測定方法を以下に示す。

- ・ 試料水は、活性汚泥等によるD0消費を防ぐため、フィルターバッグ（ろ紙5A相当）によりろ過したろ液を用いる。
- ・ 清水には、水道水を用いる。
- ・ 清水及び試料水等は測定中に水温変化に伴って飽和酸素濃度（ $C_s$ ）が変化しないよう、十分室温に近づけた後、測定に供する。
- ・ 3Lビーカーに試料水等を2L入れ、ガラスボールフィルター（JIS R3503-1994 細孔記号1：細孔径100~120 $\mu$ m）と隔膜電極式D0計を**図4**のように設置する。D0計やガラスボールフィルターの設置位置を適切に固定し、統一した状態で測定する。
- ・ Arガスのパージにより、D0を1.0mg/L以下まで低減する。
- ・ 引き続き、スターラーで穏やかに攪拌しながらエアポンプで0.5L/minの風量でエアレーションし、D0濃度の経時変化を15秒間隔で3~10分程度測定する。
- ・ その後エアレーションを強め、D0変化がなくなった値を記録し、 $C_s$ とする。

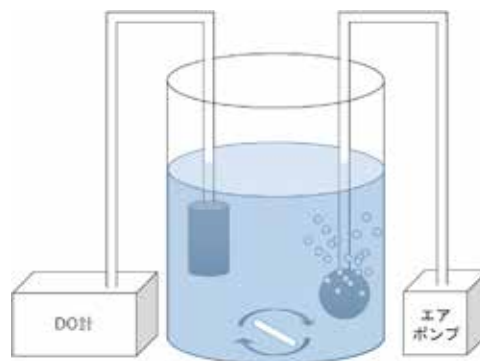


図4 測定装置

### 6. 実施設での測定

区部の13センターの各1系列（森ヶ崎水再生センターは2系列）において反応槽流入水と反応槽混合液（好気槽の上流部、中流部、下流部の3か所）を採取し、 $\alpha$ 値等の測定を行った。各センターの反応槽混合液の採取場所を表3に、測定結果を図5に示す。

表 3 各センターの反応槽混合液の採取場所

センター	系列名	採取場所			センター	系列名	採取場所		
		上流	中流	下流			上流	中流	下流
芝浦	深槽東2号	B回路	C回路	D回路	落合	北系1号	A回路	B回路	D回路
三河島	浅草南系3号	B回路	C回路	D回路	中野	5号	B回路	D回路	F回路
砂町	東陽1系3-1号	B回路	C回路	E回路	みやぎ	1号	A回路	B回路	D回路
有明	3号	兼用槽	好気1	好気2	新河岸	北系14号	B回路	C回路	E回路
中川	2系7号	A回路	B回路	D回路	浮間	北系4号	I回路	K回路	M回路
小菅	西系4号	B回路	C回路	D回路	森ヶ崎	西系9号	B回路	D回路	F回路
葛西	北系7号	B回路前半	B回路後半	C回路		東系3号	B回路	C回路	D回路

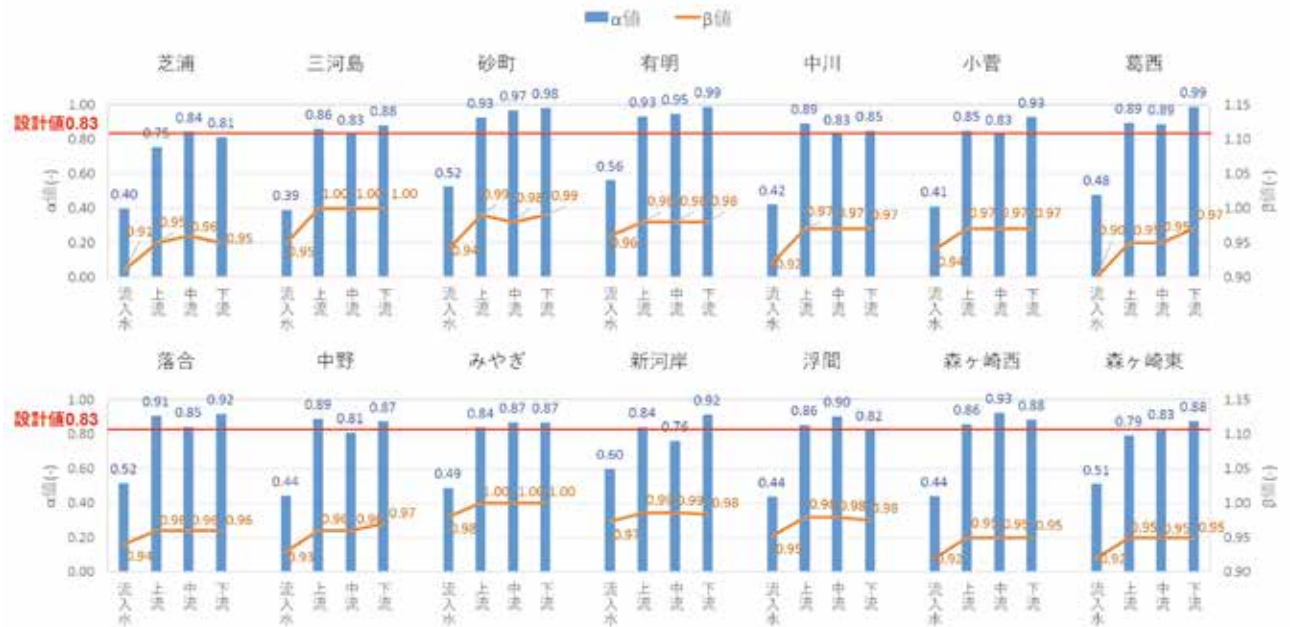


図 5 区部センターにおける  $\alpha$  値及び  $\beta$  値測定結果

$\alpha$  値は反応槽流入水で 0.39~0.60、反応槽混合液で 0.75~0.99 であり、センター間で顕著な差は見られなかった。また、同一センターの値を比較すると、反応槽流入水から反応槽上流部にかけて  $\alpha$  値が大幅に増加していたが、反応槽内での変化は少なく、14 系列 42 地点の平均値が 0.87（標準偏差 0.06）と設計指針の掲載値 0.83 を若干上回っている程度であった。

$\beta$  値は反応槽流入水で 0.90~0.98、反応槽混合液で 0.95~1.00 であり、 $\alpha$  値同様、センター間で顕著な差は見られなかった。また、反応槽内での変化も少なく、14 系列 42 地点の平均値が 0.97（標準偏差 0.02）と設計指針の掲載値 0.95 を若干上回っている程度であった。

設計においては、 $\alpha$  値や  $\beta$  値を低く設定するほど必要空気量が多くなる、つまり安全側の設計となるため、設計指針の掲載値は妥当であることが確認できた。

## 7. まとめ

調査に先立って、非定常法を用いた机上試験による  $K_{La}$  の測定条件を検討した結果、次のような知見が得られた。

- ・ 亜硫酸ナトリウムによる D0 除去を行う場合、触媒として塩化コバルトを 1mg/L 程度添加することで必要な亜硫酸ナトリウムの量を低減することができる。
- ・ 亜硫酸ナトリウムによる D0 除去は、清水においては問題ないが、反応槽混合液の上澄水を試料とした場合には酸素消費が生じ、 $K_{La}$  の測定に負の影響が見られた。その結果、 $\alpha$  値が本来より低く算出される。
- ・ 亜硫酸ナトリウム添加の代替として、不活性ガスでのパージによる D0 除去を検討したところ、Ar ガス、 $N_2$  ガスのいずれも D0 を十分低減することができ、 $K_{La}$  の測定に用いることが可能であった。
- ・ 特に小規模な実験系では、エアレーション時の空気量が高すぎる場合には水面からの空気供給の影響が懸念されるため、空気量の設定に留意する必要がある。
- ・ D0 計、ガラスボールフィルターの設置位置の小さな相違も  $K_{La}$  に影響するため、器具を用いて固定するなど設置位置を統一する。
- ・ 測定中の水温変化がないよう、試料水等は十分に室温に近づけてから測定を行う。

これらの知見を基に改良した測定条件（Ar ガスによるパージ、空気量 0.5 L/min）を用い、区部の 13 センターにおいて反応槽流入水及び反応槽内混合液の  $\alpha$  値等を測定した。結果は次のとおりである。

- ・ センター間で、反応槽内混合液の  $\alpha$  値及び  $\beta$  値に顕著な差は見られなかった。
- ・ 反応槽流入水から反応槽上流部にかけて  $\alpha$  値が大幅に増加するが、反応槽内での変化は少なかった。
- ・ 反応槽内混合液の  $\alpha$  値及び  $\beta$  値は、必要空気量の設計に現状使用している値（ $\alpha$  値 = 0.83、 $\beta$  値 = 0.95）を若干上回っている程度であり、この設計値は妥当であると考えられる。

## 参考文献

- 1) Michael K. Stenstrom: Theory to Practice: Oxygen Transfer and the New ASCE Standard、WEFTEC.06、p.4838-4852
- 2) 平山公明：表面ばっ気における総括酸素移動容量係数の算出方法に関する一考察、山梨大学工学部研究報告 29、1978、p.106-111
- 3) 社団法人土木学会：衛生工学実験指導書（プロセス編）、1977、p.44
- 4) United States Environmental Protection Agency: Development of Standard Procedures for Evaluating Oxygen Transfer Devices、1983、p.121-123