

実稼働浄化槽の総括酸素移動容量係数（酸素供給速度）及び酸素消費速度の測定方法の考案と水質悪化浄化槽の原因究明への利用

公益財団法人鹿児島県環境検査センター 江原 賢一郎

1. はじめに

現在、浄化槽の汚水処理機能を評価する目的で、化学的量であるpH, DO, NO_2^- , BOD等々が測定されているが、これらの値は、その高低や“適正值”との比較にしか用いられておらず、定量的な解析は十分とは言えない。このため、水質が悪化した浄化槽の原因究明には、これらの値と（浄化槽内の状況）及び（使用状況）などの状況証拠に基づく「定性的」な方法がとられており、原因の未特定や有効な改善策を提示できない場合も少なくない。

浄化槽（好気処理槽）は、汚水に酸素を供給し、水中の汚濁物質（BOD成分）を好気性細菌等により酸化分解し除去する装置である。このため、浄化槽の汚水処理機能の「定量的」な評価にとって、酸素供給能力と酸素消費能力（速度）は重要な指標である。

現在、実稼働浄化槽（活性汚泥法）の酸素供給能力（総括酸素移動容量係数）の測定には、活性汚泥を採取し、この酸素消費速度を実測して求める「定常法」が用いられている。これに対して、浄化槽で主に採用されている生物膜法では、槽内を代表する生物汚泥の採取が極めて困難であるため、酸素消費速度及び酸素供給能力は、一部の例外^{*)、**)}を除き測定されていない。

そこで本研究では、好気処理槽内のばっ気を一旦停止し、その後ばっ気を再開した後のDO時間変化率に着目することにより、実稼働浄化槽の総括酸素移動容量係数と酸素消費速度を同時に測定する方法を考案し検証を行った。また、総括酸素移動容量係数と酸素消費速度を用いた、水質悪化浄化槽の原因究明の可能性についても述べる。

2. 総括酸素移動容量係数と酸素消費速度の測定方法

(1) 実稼働好気処理槽のDO(t)と酸素供給速度K(t)及び酸素消費速度Rr(t)との関係

好気処理槽のDO(t)は、ばっ気による O_2 供給と微生物活動による O_2 消費だけではなく、嫌気槽からの O_2 供給と、沈殿槽への流出及び循環由来の O_2 持出しによって決まる。図-1より、t (min)後の好気処理槽の平均DO(t)は次の式になる。

$$\text{DO}(t) = \text{DO}(0)$$

$$- \frac{1}{V} \left[\int_0^t (\text{DO}_2(T) - \text{DO}_1(T)) (Q(T) + J(T)) dT \right] + \int_0^t K(T) dT - \int_0^t Rr(T) dT \quad (\text{mg/L})$$

DO(0)：初期平均DO (mg/L), V：好気処理槽の有効容量(L), Q(t)：流入量(L/min), J(t)：循環水量(L/min), K(t)：酸素供給速度(mg/L·min), Rr(t)：酸素消費速度(mg/L·min)

上式を時間tで微分すると、

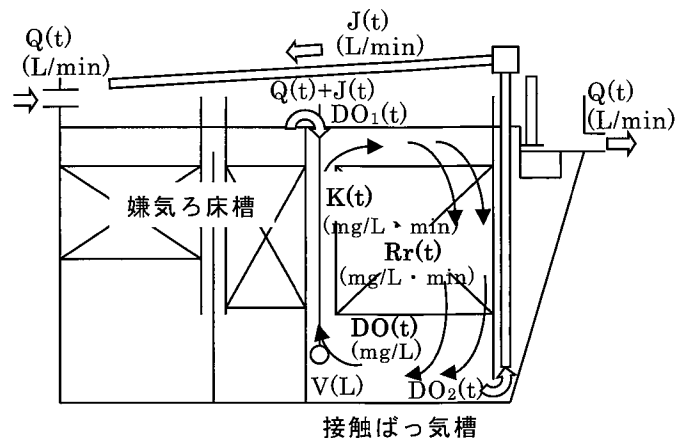


図-1 好気処理槽の O_2 収支

$$\frac{dDO(t)}{dt} = -\frac{1}{V} \frac{d}{dt} \left[\int_0^t (DO_2(T) - DO_1(T)) (Q(T) + J(T)) dT \right] + K(t) - Rr(t) \text{ (mg/L}\cdot\text{min)}$$

となる。

また、無流入・定循環状態 [$Q(t) = 0$, $J(t) = J$ (一定), $Rr(t) = Rr$ (一定)] において上式は、

$$\frac{dDO(t)}{dt} + \frac{J}{V} (DO_2(t) - DO_1(t)) = K(t) - Rr \text{ (mg/L}\cdot\text{min)} \quad \dots \textcircled{1}$$

となる。

(2) 総括酸素移動容量係数 (K_{La}) と酸素消費速度 (R_{req}) の算出

気相から液相への酸素の移動速度(酸素供給速度 $K(t)$) は、Lewis と Whiteman の二重境膜説より、 $K(t) = K_{La} (DO_s - DO(t)) \dots \textcircled{2}$ と表される。 K_{La} : 総括酸素移動容量係数(通常は 1/h, 以下では 1/min), DO_s : 飽和溶存酸素濃度(mg/L) によって、式①に式②を代入すると、以下のようになる。

$$\frac{dDO(t)}{dt} + \frac{J}{V} (DO_2(t) - DO_1(t)) = K_{La} (DO_s - DO(t)) - Rr$$

$$= -K_{La} \cdot DO(t) + K_{La} \cdot DO_s - Rr \quad \dots \textcircled{3}$$

式③を、各時間における左辺を $DO(t)$ に対してプロットしたとき、得られる直線の傾きから K_{La} (1/min) が求められることが分かる。また定常状態 ($dDO(t)/dt = 0$) において、式③は、

$$R_{req} = K_{La} (DO_s - DO_{eq}) - \frac{J}{V} (DO_{2eq} - DO_{1eq}) \quad \dots \textcircled{4}$$

となることから、定常状態の各 DO と循環水量から定常状態時の酸素消費速度 (R_{req}) を求めることができる。

(3) $DO(t)$ の測定点についての考察

接触ばっ気槽では、水流が分岐と混合を繰り返す、槽内を循環していることから、槽全体として

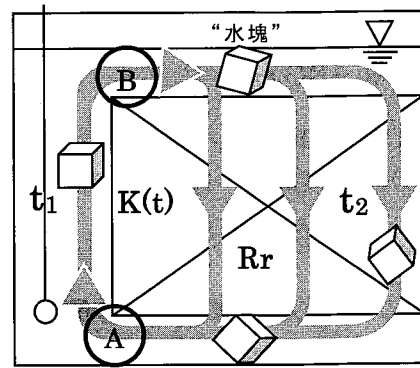


図-2 接触ばっ気槽の水流

の DO 変化率を表すのは、水流の収束するばっ気直前の点 A とばっ気直後の点 B と考えられる。また、酸素供給速度の式 $K(t) = K_{La} (DO_s - DO(t))$ とは、酸素供給速度が、飽和溶存酸素濃度 DO_s と“ばっ気前”(点 A) の DO との差に比例することを示している。ここで、図-2 のように、接触ばっ気槽を、一定体積の「水塊」が循環する系とし、水塊が点 A から点 B で酸素が供給(時間 t_1) され、点 B から点 A で酸素が消費(時間 t_2) されるとおくと、式③より

$$\frac{dDO_A(t)}{dt} + \frac{J}{V} (DO_2(t) - DO_1(t)) = K_{La} (DO_s - DO_A(t)) - Rr \quad \dots \textcircled{5}$$

となり、また点 A, 点 B は、 $DO_A(t) = DO_B(t - t_2) - Rr(t_1 + t_2) < *$ 実際の酸素消費は接触材部分に集中していることから、接触材を通過する間 (t_2) の DO 消費量は $Rr(t_1 + t_2)$ となる > の関係にあることから、これを式⑤に代入し整理すると、

$$\frac{dDO_B(t - t_2)}{d(t - t_2)} + \frac{J}{V} (DO_2(t) - DO_1(t)) = K_{La} (DO_s - DO_B(t - t_2)) + Rr [K_{La} (t_1 + t_2) - 1]$$

となる。ここで、 $T = t - t_2$ と置くと

$$\frac{dDO_B(T)}{dT} + \frac{J}{V} (DO_2(T + t_2) - DO_1(T + t_2)) = K_{La} (DO_s - DO_B(T)) + Rr [K_{La} (t_1 + t_2) - 1] \quad \dots \textcircled{6}$$

となる。

よって式⑤⑥より、点 B で $DO(t)$ を測定した場合でも、点 A と同様に K_{La} が測定できることが分かる。また、定常状態 ($dDO(t)/dt = 0$) のとき、

式⑤⑥より

$$\begin{aligned} & \frac{J}{V}(DO_{2eq}-DO_{1eq}) \\ &=K_{La}(DO_s-DO_{Aeq})-R_{req} \\ &=K_{La}(DO_s-DO_{Beq})-R_{req}[1-K_{La}(t_1+t_2)] \\ \therefore t_1+t_2 &= \frac{DO_{Beq}-DO_{Aeq}}{R_{req}} \quad \dots ⑦ \end{aligned}$$

となることから、定常状態時の酸素消費速度 R_{req} と点A点Bの DO_{eq} より水流の循環時間 (t_1+t_2) が求められる。

(4)測定

測定は流入が無く、循環水量や流量調整量が安定している午前11時以降の不在宅で実施した。まず、BOD測定試料採水と予備測定 (DO_{eq} , 循環水量等) を行った後、ばっ気を停止し DO を低下させ、再度ばっ気を開始し、各点の $DO(t)$ を1秒間隔で記録した。

(5)「 K_{La} と R_r の関係式」(式③)の適用

$DO(t)$ の連続データを最少二乗法により4次から10次の間で多項式近似し、各近似式を時間微分して $DO(t)$ の時間変化率 ($dDO(t)/dt$) を求め

る。次に2の(2)の方法により、各時間の $DO(t)$ に対して式③の左辺をプロットし、これの近似直線の傾き ($-K_{La}$) より K_{La} を求める。最後に、各次数の多項式近似から求めた近似直線の「決定係数 R^2 」「説明変数選択基準 R_U 」「相対誤差」を比較し、最適となる次数の K_{La} を採用値とする。

3. 結果と考察

(1) K_{La} の測定

本法を用いて性能評価型浄化槽A<流量調整式嫌気濾床・生物膜濾過循環方式>(以下、浄化槽A)と構造例示型浄化槽B<嫌気濾床・接触ばっ気方式>(以下、浄化槽B)の K_{La} の測定を行った。浄化槽Aのばっ気直前及び浄化槽Bのばっ気直前と直後において、高い直線性のある式③のプロットを得た。また、 $DO(t)$ の最適近似次数は、浄化槽A、Bともに5次又は6次となった。

(2) K_{La} の測定精度

本法の測定精度を確認するため、運転状態の安定した浄化槽で、短期間に連続して測定を行った(表-1: K_{La} は20°C換算)。浄化槽A、B共に、ばっ気直前で精度の高い値が得られた。また、浄化

表-1 浄化槽A・Bの K_{La}

| 浄化槽A | | | | 浄化槽B | | |
|-----------------|-----------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|-----------------------|---------|
| 測定日 | K_{La} (20) (1/min) | | | 測定日 | K_{La} (20) (1/min) | |
| | ばっ気直前 | ばっ気直後 (AR型ばっ 気槽直上) | ばっ気直後 (生物ろ過 槽上部) | | ばっ気直前 | ばっ気直後 |
| 2013.5.15 | 0.140 | 0.133 | | 2013.7.1 | 0.0895 | 0.0914 |
| 2013.5.16 | 0.140 | 0.137 | | 2013.7.3 | 0.0885 | 0.0909 |
| 2013.5.17 | 0.134 | 0.129 | | 2013.7.5 | 0.0884 | 0.0863 |
| 2013.5.20 | 0.127 | 0.130 | | 2013.7.8 | 0.0798 | 0.0813 |
| 2013.5.21 | 0.125 | 0.124 | | 2013.7.9 | 0.0816 | 0.0802 |
| 2013.5.23 | 0.122 | | 0.112 | | | |
| 2013.5.24 | 0.129 | | 0.123 | | | |
| 2013.5.27 | 0.111 | | 0.092 | | | |
| 2013.5.28 | 0.134 | | 0.134 | | | |
| 2013.5.29 | 0.129 | | 0.128 | | | |
| 平均 (1/min) | 0.133 (0.125) | 0.131 | 0.118 | 平均 (1/min) | 0.0856 | 0.0860 |
| 標準偏差 (1/min) | 0.00721 (0.00886) | 0.00502 | 0.0165 | 標準偏差 (1/min) | 0.00452 | 0.00521 |
| 変動係数 (%) | 5.41 (7.07) | 3.84 | 14.1 | 変動係数 (%) | 5.28 | 6.06 |

*浄化槽A「ばっ気直前」の平均値等の()有りは5/23~5/29を計算、()無しは5/15~5/21を計算。

槽Aのばっ気直後(生物ろ過槽上部)を除き、ばっ気直前と直後は近い値を示しており(平均値はほぼ一致)、2の(3)の考察が正しいことを示している。浄化槽Aのばっ気直後(生物ろ過槽上部)では、生物ろ過部の通水抵抗により水流の停滞混合があり、実水流のDO(t)変化率を正確に計測できないことから、ばらつきが大きく、ばっ気直前の値と比べ、少し低い値を示している。これは、ばっ気時間の異なる水塊が混合することにより、DO変化を打消しあい、見かけ上DO上昇が遅くなるためだと思われる。

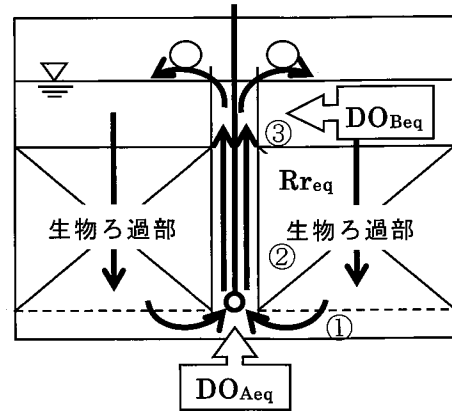


図-4 浄化槽Aの水の流れ

(3) K_{La} 及び R_{req} の正確さの検証

浄化槽Aは、ばっ気停止一再開後のばっ気直前の $DO_A(t)$ を観察すると、図-3のような変化が見られる。これは図-4のように、ばっ気再開後、①生物ろ過部直下の水がDOセンサーを通過し、

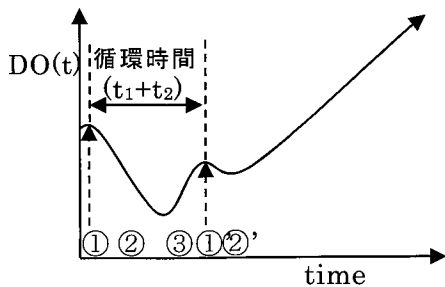


図-3 ばっ気再開後のDO変化

次に②生物ろ過部の低DO水が通過し、最後に③生物ろ過部直上とばっ気部分の水が通過後、水流が一循環するためだと考えられる。よって、図-3のばっ気再開直後のDO低下開始時間と極大値を示す時間との差は、循環時間(t_1+t_2)を示すと考えられる。そこで式⑦を用いて K_{La} と R_{req} より循環時間(t_1+t_2)を算出し、これと比較することにより本法の正確さの検証を行った(表-2)。 K_{La} と R_{req} による循環時間の算出値は、DO(t)観察による値と比べ、全体として数%の誤差しかないことから、本法により、高い正確さで K_{La} と R_{req} を測定できると考えられる。

表-2 循環時間の算出方法による比較

| 日付 | R_{req} (mg/L·min) | ばっ気直後 DO_{Beq} (mg/L) | ばっ気直前 DO_{Aeq} (mg/L) | 循環時間(t_1+t_2) | | DO(t) 観察 値から見た R_{req} 算出値 との誤差 (%) |
|-----------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|----------------------|---|
| | | | | R_{req} より 算出(s) | DO(t) 観察より (s) | |
| 2013.5.15 | 0.151 | 7.60 | 7.42 | 72 | 68 | 5.9 |
| 2013.5.16 | 0.132 | 7.70 | 7.54 | 73 | 71 | 2.8 |
| 2013.5.17 | 0.137 | 7.62 | 7.47 | 66 | 69 | -4.3 |
| 2013.5.20 | 0.132 | 7.60 | 7.44 | 72 | 70 | 2.9 |
| 2013.5.21 | 0.114 | 7.65 | 7.53 | 63 | 73 | -13.7 |
| 2013.5.23 | 0.106 | 7.68 | 7.55 | 74 | 71 | 4.2 |
| 2013.5.24 | 0.146 | 7.47 | 7.31 | 66 | 72 | -8.3 |
| 2013.5.27 | 0.137 | 7.37 | 7.21 | 70 | 72 | -2.8 |
| 2013.5.28 | 0.119 | 7.61 | 7.47 | 70 | 72 | -2.8 |
| 2013.5.29 | 0.117 | 7.51 | 7.38 | 66 | 73 | -9.6 |
| | | | 平均 | 69 | 71 | -2.6 |
| | | | 標準偏差 | 3.71 | 1.66 | |
| | | | 変動係数(%) | 5.36 | 2.34 | |

4. K_{La} と R_{req} を用いた水質悪化浄化槽の原因究明の可能性

(1) K_{La} の利用

K_{La} は、好気処理槽の酸素供給能力を「定量的」に表しており、散気量、散気水深、気泡径、ばっ気槽容量、ばっ気槽水の性状に依存する。これまで現場レベルでは、酸素供給について送風量のみが注目されがちであったが、 K_{La} の測定により、散気管やディフューザの散気効果(気泡径等)の評価や、酸素の溶解を阻害する物質の存在等を確認できる可能性がある。従来、浄化槽やディフューザの開発段階では、「非定常法」により K_{La} を測定し、酸素供給能力を定量的に評価しており、今回現場レベルで K_{La} の測定が可能になったことには大きな価値があると思われる。

(2) R_{req} の利用

R_{req} は、「BOD成分の酸化分解除去に消費される」部分と「内生呼吸に消費される」部分との和と考えられることから、

$$R_{req} = (\text{BOD除去速度}) \cdot \alpha + \beta$$

$$= \frac{J}{V} (\text{BOD}_{\text{好気槽流入}} - \text{BOD}_{\text{循環水}}) \cdot \alpha + \beta$$

(mg/L・min) …⑧

α : BOD除去の内、酸化分解に関わる係数、 β : 内生呼吸速度(mg/L・min) <ただしBODはC-BOD>と定義し、浄化槽Aの結果を適用した(図-5 : ◇プロット)。浄化槽AのBOD流入負荷は極めて小さく、 R_{req} の値は内生呼吸速度に近いと思われたが、それでも僅かなBOD除去速度の変化に対して正の相関が見られた。ただし、調査期間が約1ヶ月間と長く、槽内の状態が経時変化していると考えられることから、「調査日近傍の状態」を評価する試験方法として、次のような負荷試験を行った。生物汚泥の酸素消費速度は、ある一定以上のDO環境下では、DOに無関係であることから、循環水量を1日おきに増加させることにより、BOD除去速度を変化させ、同様の測定を行った。これにより、高い直線性のある結果を得た(図-5 : ●プロット)。この近似式の傾きが式⑧の α であり、切片が β を表す。この α は、調査日近傍における好気処理槽のBOD(成分)酸化性

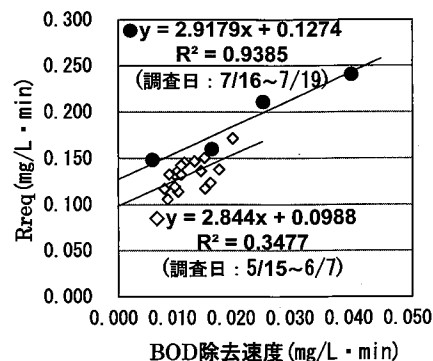


図-5 BOD除去速度と R_{req} の関係

能を表しており、この α を比較することによって処理性能を定量的に評価できる可能性がある。たとえば、 α が高ければ高酸化型好気槽であり、 α が低ければ汚泥蓄積型好気槽であるとか、流入水の栄養バランスが悪い、又は生物活動を阻害する物質の流入がある、などの定量的な評価が可能になるとと思われる(なお、 β は生物量と直接関係のある値であり、これも重要な指標である)。特に、今まで水質悪化浄化槽の原因究明にとって、栄養バランスの悪さや阻害物質の影響を、手軽に定量的に評価する方法が無かったことから、本法は極めて大きな可能性を秘めていると思われる。

5. 今後の予定

- (1) 4の(2)で考案した方法により好気槽の処理性能を評価するためのデータ蓄積と解析
- (2) K_{La} と R_{req} を用いた定量的で総合的な『水質悪化原因究明パッケージ』の開発

参考文献

- 1) 北尾高嶺：生物学的排水処理工学 コロナ社(2003)
- 2) W.W.Eckenfelder, Jr., D.O'Connor, 岩井重久 訳：廃水の生物学的処理 コロナ社(1965)
- 3) (社)日本下水道協会：下水試験方法(1997)

*) 大坪政美・田中克幸：エアリフトポンプ型合併処理浄化槽における酸素利用速度の決定, 浄化槽研究 Vol. 8 No. 2 pp.15~ pp.24(1996)

**) 田中克幸：エアリフトポンプ型接触ばっ気槽における総括酸素移動容量係数の推定, 浄化槽研究 Vol.10 No. 1 pp.47~ pp.56(1998)