

2-1-4 改良逆混合モデルを用いた反応槽における滞留域の 存在予想と滞留による脱窒の高速化について

東部第二下水道事務所 小菅水再生センター 小林 克巳
 中村 紀和
 松本 博夫
 臼井 ゆかり
 林 紀子
 中川水再生センター 宗吉 統
 降矢 るみ子
 井上 文恵
 杉山 修

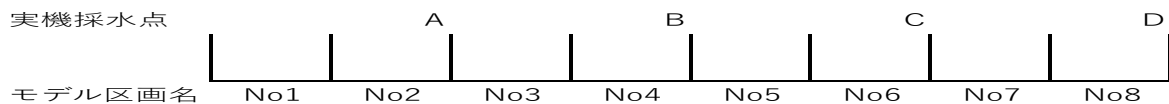
1. 背景・目的

中川水再生センターの標準法系列処理水は、2019年度通日試験での全窒素平均値が4.1mg/lと高度処理にも劣らない窒素処理能力を持っている。この窒素処理能力がどこから来るかについてはいくつかの調査がなされているが、十分な結果が出ていない。

今回は、

- ・新しい調査法を用いて流動特性を再検討する。
- ・構造が類似（直線、無隔壁）した小菅標準法施設の流動特性との比較を柱として、中川反応槽の特性を調査した。

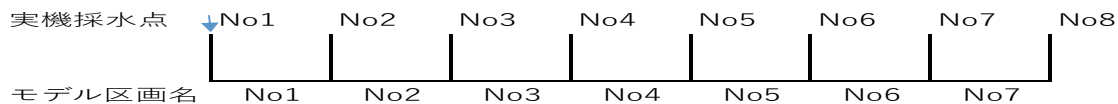
中川（小菅共同調査含む）



共同調査投入採水点（○投入採水点 △採水点）

中川No2投入	△	○	△					
中川No6投入					△	○	△	
小菅No4投入			△	○	△			
小菅No5投入				△	○	△		

小菅下流投入



前後区平均化例

モデル上採水点

$(No2+No3)/2$
モデルNo3

※モデルと実機の採水地点は平均化により一致させた

図1 実機、モデル上の採水地点と区画

2. 方法および結果

2.1 臭化カリウムトレーサーの開発

中川で実施した H30 調査（以下局調査¹⁾）以外のトレーサー実験ではトレーサーに臭化

ナトリウム又は臭化カリウム²⁾を用いた。

この方法では、トレーサー投入後 30～60 分間、投入点および近傍で採水してトレーサー濃度を測定、後述する数値モデルで測定結果と整合する流動特性をシミュレートすることで状況を把握した。

湾岸以外では臭化物のバックグラウンド値は低いため少量、(10000m³ の槽で 2 kg 程度)のトレーサー、短時間の採水で実験することができ、またパラメータを変更したときの流動特性の変化をシミュレートできる。

2.2 モデルによる解析

図 1 の区画間での移動状態、および区画内での分布状態が測定結果と合致するように数値モデルを作成した。採水口配置の都合上、採水点が区画と区画の境界近くとなるため、数値モデルは採水点前後の区画の平均濃度が実測と合致するようにパラメータを設定した。モデルとしては従来から用いられているモデルと、今回調査のために考案した改良モデルを用いた。

2.2.1 逆混合モデルの改良と実用

(1) 逆混合モデル改良の考え方

従来、槽内を「十分に攪拌されている可動水域」と「水の交換が無い死水域」の 2 つに分け可動水域での順流、逆流で流動特性を考える逆混合モデルを用いていた。

今回は、「可動水域と、死水域とまではいかないが攪拌が不十分で、水の入れ替わりに時間がかかる滞留域 (図 2-4) の 2 つで構成されている」と考える 2 域モデル、「可動水域、滞留域に加えて滞留域より水のさらに交換が遅い準死水域がある」と考える 3 域モデルを比較検討した (図 2)。可動水域を旋回流に沿う外周部としその内側を滞留域とした。

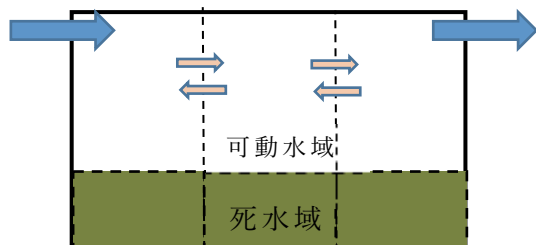


図 2-1 逆混合モデルのイメージ

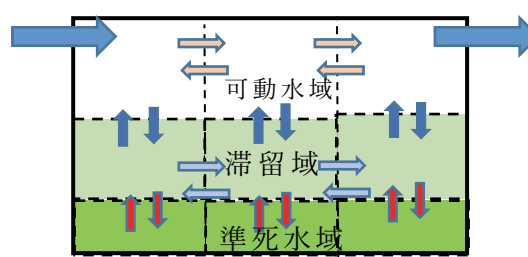


図 2-2 3 域モデルのイメージ

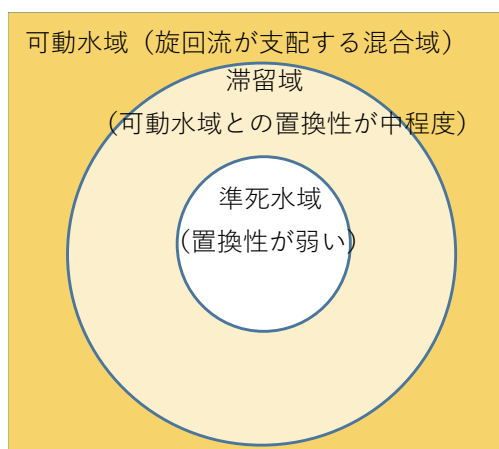
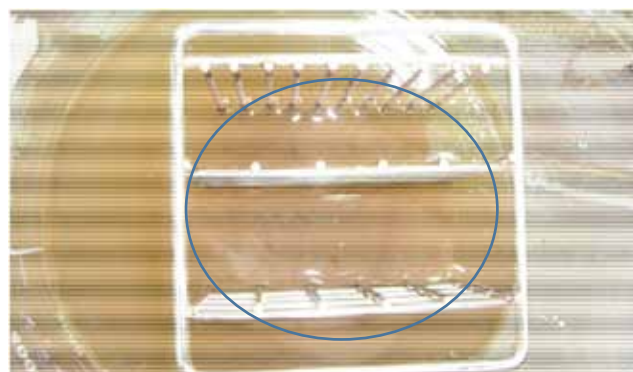


図2-3 好気槽の断面イメージ図
(散気板から水面までは可動水域とする)



ビーカーに構造物を入れて攪拌し真上から撮影

図 2-4 滞留域イメージ (青い円内)

解析は、反応槽を上流から下流まで8区画(小菅下流投入のみ7)に区分し、各区画を流動状態に応じて2または3域に分けて延べ16~24のブロックを設定する。ブロック間の水の移動(図2の矢印)比率をパラメータとして、一定時間(今回はHRTの1/1000、およそ30秒)後にトレーサーがどのように移動したかを算出する。その算出結果に同じ処理を行うことで1分後のトレーサーの分布が判る。これを繰り返して1時間後までのトレーサー分布を求めた結果の実測値との差が最小になるようパラメータを設定することで流動特性を把握する。各モデルにつき、実測値との差が最小になるようパラメータを設定した結果が表1となる。

表1 各モデル誤差最小条件での設定値

	中川			小菅
	基本モデル	2域モデル	3域モデル	3域モデル
ライザー管開度	全開			A10%D50%
逆流比	6.7	4.0	4.0	3.9
存在比	可動水域	0.80	0.40	0.40
	滞留域	0.00	0.45	0.39
	死水域(3域モデルは準死水域)	0.20	0.15	0.21
水量/流入水量	可動水域⇔滞留域	0.00	3.00	3.90
	滞留域⇔準死水	0.00	0.00	0.10
	滞留域内反流	0.00	1.00	1.00
トレーサー投入域設定	可動水域			滞留6:準死水1
モデル誤差	0.024	0.006	0.010	0.008
測定数	48	48	48	30
逆流比増加区間				No2-3
逆流比減少区間				No6-7

※小菅逆流比は7区画モデル最適値(3.3)を8区画換算(逆流比=0.63区画数-0.87)
 参考 H30中川 局調査モデル モデル誤差0.010

トレーサー濃度経時変化での実測値との整合性はどのモデルも高かった。演算の区画数は8(小菅下流投入のみ7)に固定してある。区画数と逆流比の関係はR1局調査³⁾と同じ線形の関係があり、演算時の区画数が異なっても同一区画数に換算して逆流比^{#1}を比較することは可能とみられた。

(2) 死水率経時変化

トレーサー濃度経時変化^{#2}と死水率経時変化をモデルと実測値で比べた。

トレーサー投入時に表層(可動水域)に流入した場合、置換性が低い槽内部(滞留域、準死水域)と置き換わるまで時間がかかるため、収支計算上死水域が存在するよう見える。

そこで、槽全体に対する死水域の割合を死水率^{#3}とした。槽全体のトレーサー減少量(A)と出口からのトレーサー流出量(B)の相違から求められる。

基本モデルは死水率経時変化が実機とは乖離しており、改良モデルによる解析の方が実測に合っていた(図4-1)。死水率変化を含めると2域より3域モデルの実機整合性は高く以下3域モデルを使用する。滞留域、準死水域での置換の差による混合プロセスの相違を図4-2に示す。

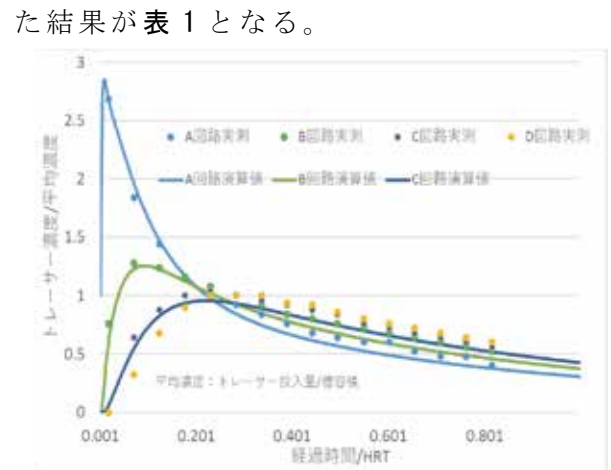


図3 トレーサー濃度経時変化
 中川実測値と演算値(3域モデル)

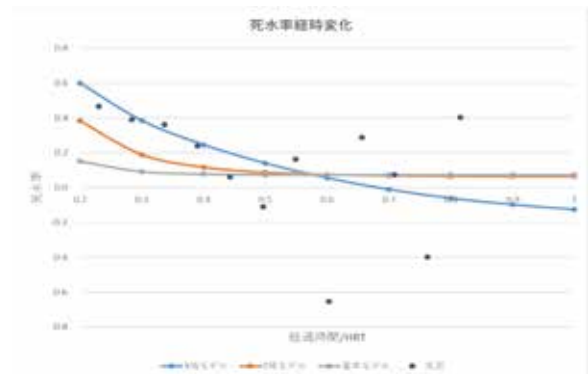


図4-1 死水率経時変化
 (実測と各モデル演算の比較:中川)

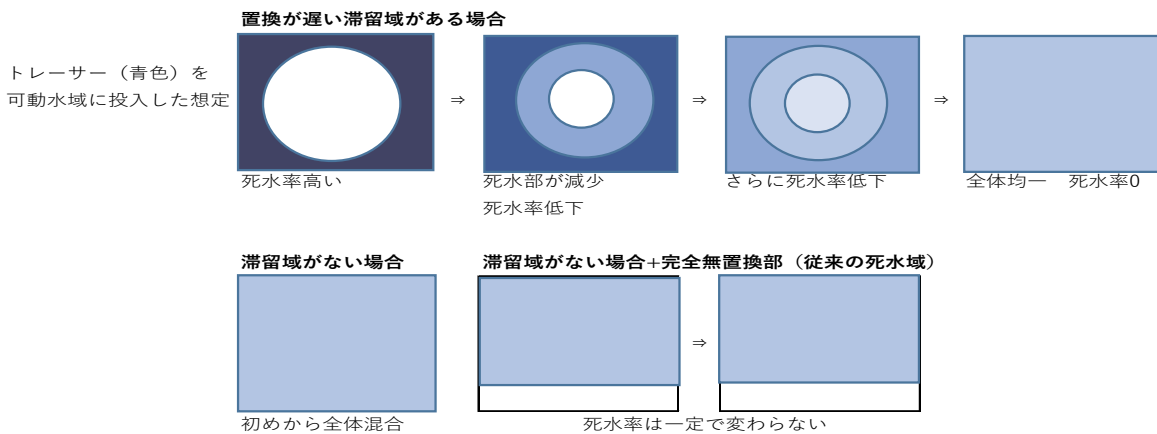


図 4-2 滞留の置換性と混合のイメージ

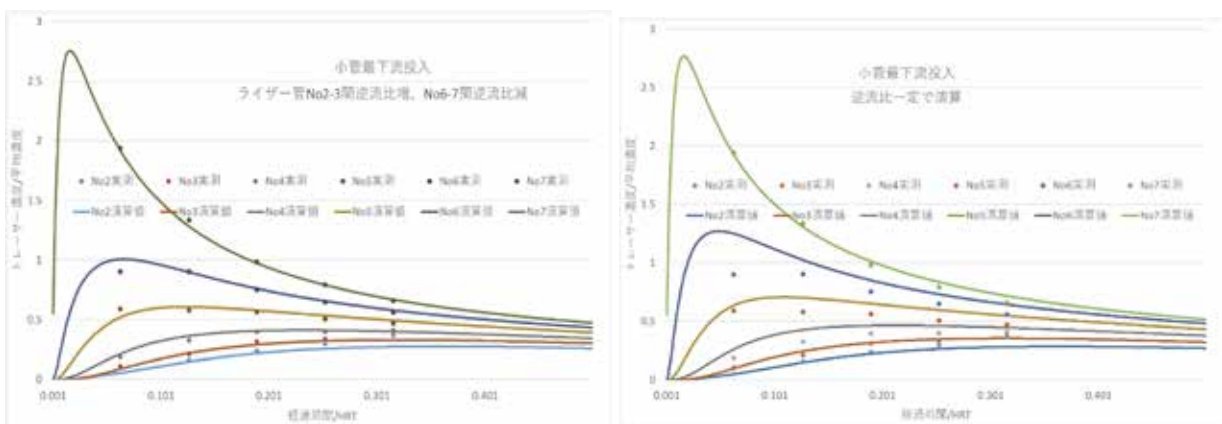


図 5 小菅下流投入事例とライザー管開度の関係

2.2.2 ライザー管開度と逆流

小菅下流投入事例でも改良モデルは実測との高い整合性が認められた(表 1)。調査時のライザー管開度は A 回路 10%、D 回路 50%であった。ライザー管の開度が一定でない場合、ライザー管開度が上流より下流が低くなる点では局所的に逆流比減少作用が、逆の場合は局所的に逆流比増加作用^{#4}が認められる。逆流比の変動を考慮した図 5 左に対し、逆流比一定、つまりライザー管開度は全て等しいという条件で試算した図 5 右は演算値と実測値に乖離が生じている(下流の No5~No7 が顕著)。上流側のライザー管絞りの効果はトレーサー投入点が最下流であり上流ではトレーサー濃度が薄いため読みにくい。

2.2.3 トレーサー投入域の影響

中川小菅共同調査実測値を 3 域モデルでトレーサー投入域を変えて整合性を検証した。通常のトレーサー投げ込み投入方式で幅方向中央部に投入すると滞留域に大部分投入され、一部は準死水域に投入される演算結果となった(小菅)。上向流側投げ込み投入では可動水域に大部分入り、一部が準死水域投入となった(中川)。中川ではモデル誤差の開きが大きく準死水域はトレーサーが到達しにくい散気板下にあることが示唆される(図 6)。

狙った領域へ確実にトレーサーを投入するには、局調査¹⁾のように配管を用いた投入が必要と思われる。

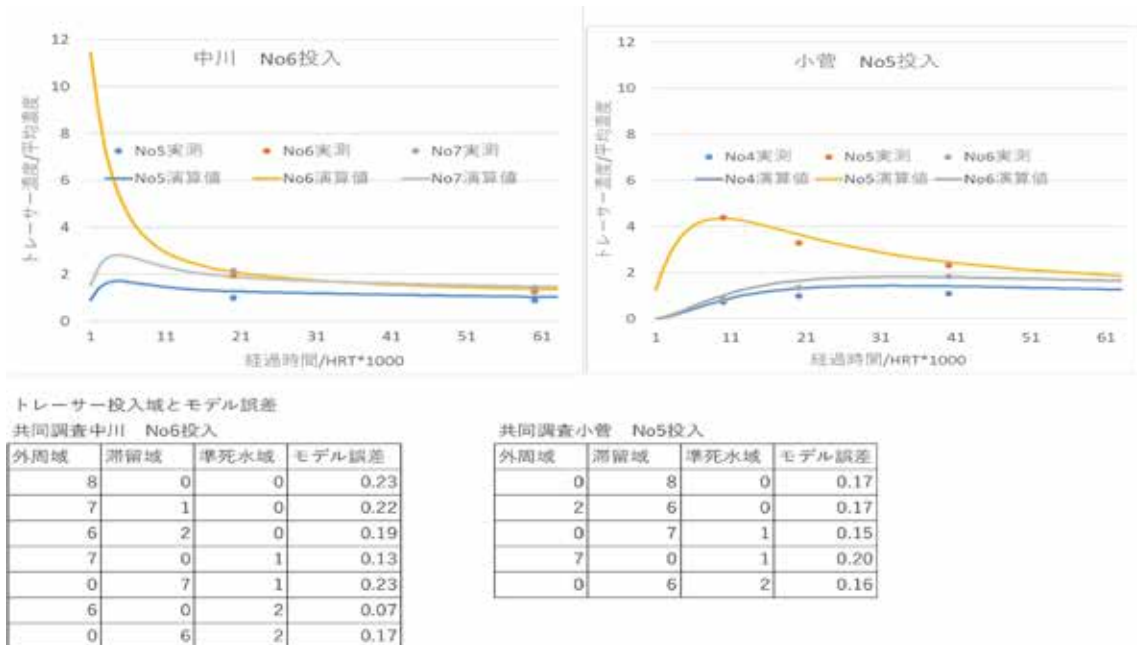
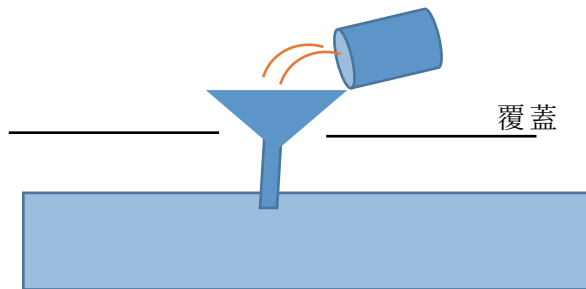


図6 中川小菅共同調査 トレーサー投入域とモデル誤差の関係



参考図 配管を用いたトレーサー

2.2.4 逆流比の簡易的算出

(1) 算出方法

図6の中川と小菅を比べると測定区間でのトレーサー残留性に明らかな差があるので残留性の数値化を試みた。投入点(A)その上流地点(B)で採水を時間 t_1 、 t_2 で各地点で行った場合の残留性を数値化した。投入点及びその上流地点の t_1, t_2 でのトレーサー濃度をトレーサー濃度槽平均値で除算し A_1, A_2, B_1, B_2 とする。反応槽全長 $L(m)$ 、A, B間の距離を $a-b(m)$ とする。採水時間差、測定地点間距離の影響を低減するためそれぞれ無次元化すると残留性の指標は以下ようになる。

$$\begin{aligned} & \text{測定区間トレーサー残留性}/(\text{測定時間差}/\text{採水地点間距離}) \\ & = \{(A_1 \cdot B_1) - (A_2 \cdot B_2)\} / \{(t_2 - t_1) / \text{HRT}\} \cdot \{L / (a - b)\} \end{aligned} \quad (1) \text{式}$$

を指標(X)にしてモデル上の順流量/逆流量(nとする)との関連を調べた。No2-No7(図1上の図)投入の場合トレーサー投入域や上下流投入地点の差はあまりなく、 $t_2 - t_1$ が10(20)分ではnと指標Xは直線になり $n = 9.0 \times 10^{-4} X + 1.02$ ($n = 1.1 \times 10^{-3} X + 1.01$) となった。逆流比は $1/(n-1)$ で求まる。最下流のNo8投入の場合は、下流からの逆流が無いため式が異なる。

(2) 簡易法の実用

共同調査での逆流比を求めると前者簡易法、後者モデル誤差最小化法として中川 No2 投入（逆流比 15 4）、No6（5.2 4）、小菅 No4（3.6 2.5）、No5（3.3 2.5）となった。両計算法を比べると中川 No2 投入以外は簡易法がやや大きい傾向は一致している。しかし中川 No2 投入は大差となった。

これは共同調査では測定域が槽の一部で、投入したトレーサーは特に高逆流では大部分測定域から流出するため、測定域部分の寄与が低下することによると考えられた。2.2.2 項に示すように A 回路ライザー管絞り地点近くでは高逆流である傾向があり、測定区間を限定した場合は簡易法により局所的逆流比の傾向が把握できるとみられた。

2.3 脱窒速度の検討

2.3.1 硝化脱窒組込改良モデル

滞留域は攪拌が不十分、すなわち酸素の供給も不十分であり、反応槽下流から逆流により滞留域に硝酸イオンが供給されれば脱窒されるであろう。

中川の窒素処理が良好なのは、逆流による硝酸の供給と滞留域の発生のバランスが取れた逆流状況なのではないかと考え、中川で最適であった 3 域モデルを用い、シミュレーションにより検証した。

以下に演算条件と結果を示す。

・流入と硝化設定

硝化速度は室内実験⁴⁾ 最終回路最大値 4mgN/L/h 程度をベースに、実測 DO¹⁾ を用いた monod 式⁵⁾ で計算した。流入 NH₄-N は実機水準の 18mgN/L を用い、最終回路でも NH₄-N は 1 以上残存し、NH₄ 消失による硝化速度低下はないとした。

・D0

可動水域、滞留域は水深方向の D0 差に対応させるため上下半分に分画してデータ処理した。2.2.3 から散気板下を準死水域とした。無酸素ゾーンは A 回路下半分と ABC 回路散気板下とした³⁾。

表2-1 硝化脱窒組込モデルでの演算結果

条件	脱窒設定A回路				準死水域	NO3-N(mg/L)		
	可動水域		滞留域			採水地点		
	上部	下部	上部	下部		最上流	A	D
①：硝化のみ	0	0	0	0	0	8.5	10.7	16.9
②：全域通常脱窒	2	4	2	4	4	2.6	3.9	8.7
③：②+準死水域高速脱窒	2	4	2	4	20	2.4	3.7	8.1
④：③+滞留域下部高速脱窒	2	4	2	20	20	0.8	1.9	6.7
局調査実測値	ライザー管全て100%					-	1.7	6.6

脱窒速度設定（単位：mgN/L/h）

表2-2硝化速度設定

可動水域、滞留域共通

A	B	C	D
No1,2	No3,4	No5,6	No7,8
1.4	2.6	2.7	4

（単位：mgN/L/h）

表2-3 条件④での脱窒設定

反応槽位置	可動水域		滞留域		準死水域
	上部	下部	上部	下部	
A回路	c	b	c	a	a
BC回路	なし	なし	なし	なし	a
D回路	なし	なし	なし	なし	なし

a:高速脱窒(20mgN/L/h)

b:通常脱窒(4mgN/L/h)

c:好気性脱窒(2mgN/L/h)

太枠内は滞留域又は準死水域

網掛けは無酸素ゾーン

・脱窒速度

通常の室内実験での反応槽上流部の無酸素性脱窒速度最大値は 4mgN/L/h 程度、好気性では 2mgN/L/h 程度であり、これを使用した。流下に伴う有機物消耗により室内脱窒速度は低下するので B 回路以降では好気性脱窒は起きないとした。条件④では滞留（又は準死水）かつ無酸素ゾーンでは無酸素通常脱窒速度 4 の 5 倍になる高速脱窒とし 20mgN/L/h とした。

以上の条件で処理水 NO₃-N をモデルで予想すると条件①～③に比べ、滞留又は準死水の滞留条件と無酸素の両条件で高速脱窒が起きるとした条件④は実測と整合した(表 2-1、2-3)。

脱窒速度を上げる要因として 2 つの機構が想定された。

中川、小菅ともに 3 域モデルでの試算上では反応槽容積の約 4 割が滞留域であり(表 1)、この滞留域の一部が無酸素槽の働きをする可能性があり、無隔壁槽の中川と小菅の差は、硝酸イオンの供給状態によると考える。

室内実験で、滞留域では脱窒自体が完全混合状態や静置より高速で進む可能性が示されている。無隔壁槽ではこれが起きているのではないか。

後者について、以下説明する。

2.3.2 室内実験

(1) 室内実験での検証

実機では返送汚泥や硝化循環液由来の NO₃ は DO が低い場合はただちに脱窒されるが、室内実験ではいままでこのような高速脱窒は観測されなかった。今回、ろ紙でのろ過中やビーカー中に構造物を設けスターラー攪拌した場合のように滞留が起きると脱窒が高速化し最大 50mgN/L/h(図 8)にも達し、滞留は脱窒の高速化と関連していることがわかった。gSS 換算脱窒速度はろ過に伴い濃度が上がったろ紙上 MLSS (ろ液量からの計算値) で除算している。なお、好気性では高速脱窒が起きないことが確認されている。

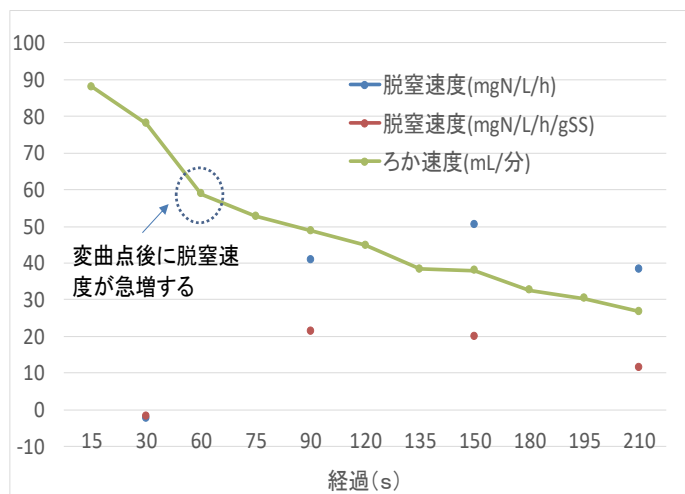


図 8 ろ過による滞留と高速脱窒

ろ紙ろ過での脱窒速度は返送汚泥 100mL に流入水 200mL と NO₃-N 0.3mg を加えて 24cm5A ろ紙でろ過し、ろ液を少量ずつ分取しその NO₃、NO₂ 濃度から求めた。ビーカー中に構造物を設けスターラー攪拌した場合(図 2-4)でも外周部の脱窒速度 3.8mgN/L/h に対して図の青い円内は 10 mgN/L/h あり、滞留部の脱窒速度は約 3 倍速く、滞留により脱窒が速くなることがわかった。

(2) 実機での検証

上記のろ過脱窒測定で初留 100mL 分離後に脱窒が高速であるその後 130mL 分のろ液と初留の NO₃ 濃度の差を高速脱窒指標として、返送汚泥を適宜測定した(表 3)。

$$\text{指標値} = (100\text{ml 留出時 NO}_2\text{-N+NO}_3\text{-N 濃度}) - (100\sim 230\text{ml 留出時 NO}_2\text{-N+NO}_3\text{-N 濃度})$$

高速脱窒指標は実HRTで5時間以上では1mg/lを超えているが、5時間以下になると0.3mg/l以下に低下した。実機処理水窒素負荷変化も水量変化と関連が認められた表3の水量と高速脱窒指標と同じ結果である(図9横軸10/10と10/30ころ)。単純比較はできないが局調査¹⁾各回の処理水窒素濃度はほぼ同じだが各回

水量が大きく異なるため水量が多いほど処理水窒素負荷が大きいのも類似点がある。図8の変曲現象は大水量時でも観測されるので変曲は高速脱窒の必要因子だが、これだけではないこともわかる。ただし返送汚泥では高速脱窒は起きたが、最終回路汚泥では放置しても返送レベルの高速脱窒が起きなかった。

以上から実機で水量が多いと滞留状態が起きないと思われる。その場合は室内で高速脱窒がみられなくなる。高速脱窒には二沈や返送のプロセスが関与しているが詳細は今後解明する必要がある。室内高速脱窒実験では無酸素+疑似滞留を主因に高速脱窒が誘導できる現象と、硝化脱窒組込モデルで無酸素+滞留で高速脱窒が起きる演算結果は共通性がある。

2.4 実機脱窒と滞留の関係

深槽好気部無隔壁槽では両者のバランスが取れた最適逆流比が存在し、その逆流比で脱窒が最大になると考えられ、中川無隔壁槽はその逆流比に近いため脱窒が良好とみられた(表4)。

好気槽区画内が長いほど逆流が低下するが滞留は形成されやすくなる関係が示唆された。なお小菅改良西系は構造に近い旧東系逆流比を代用した。

表4 実機逆流比と処理水窒素濃度

好気槽隔壁型AO法※3を対照にした標準法無隔壁槽(A回路寸開)の効果(平成30年度)

	処理水窒素濃度		AO法-標準法		標準法 逆流比	好気部 長さm	断面積 m ²
	標準法	AO法	単純差	※2			
小菅西系(※1)	7.6	10.5	2.9	2.9	4	82	115
中川	3.3	7.2	3.9	5.0	7~15	63	122
中川(ライザー管全開)					4		

※1: 月曜測定最終回路液

※2: AO法が標準法と同じ返送率の場合

※3: 小菅AO法は旧型(好気部中間に隔壁1枚)

小菅東系のような好気槽長さ中水路では好気槽上流ライザー管絞りによる脱窒増加が確認されている。上流ライザー管を絞った場合は滞留形成に関しては不利と思われる逆流増加作用と旋回流速低下により滞留域形成が有利となる面があると思われ、滞留形成に関し正逆両方向の現象が起きる可能性がある(表5)。表5で滞留の欄を加えることで好気槽形状による脱窒の良し悪しが説明しやすくなることがわかる。

表3 水量変動と高速脱窒指標の変化

	時刻	高速脱窒指標 mg/L	時間水量 m ³ /24h	実HRT (返送込)
	1/10	1.63	50000	8.1
	1/29	-0.20	115000	4.6
	1/30	0.37	118000	4.5
1/31	1100	0.32	131000	4.1
	1530	1.16	74000	6.3
	1630	1.13	70000	6.5
2/3		1.84	85000	5.7

水量急減30分後



図9 実機高水量での処理水窒素負荷(令和元年度小菅西系)

反応槽出口溶解性T-N(令和2年度)

	逆流比	隔壁間(m)	T-N	測定数
小菅西系標準法	4	82	7.3	53
小菅西系現AO法	6~30	56	8.2	28
小菅西系旧AO法	20以上	28		

旧AOは遡上障害隔壁もあり比較は妥当でなくT-Nは高い

実機脱窒に関連が強いとみられる滞留域の形成因子は高すぎない逆流比、多すぎない水量と思われた。深槽、低風量について滞留形成との関連は推定されるがデータ不足で確定できない。

表 5 好気槽構造、ライザー管開度と脱窒関連事項のおよその目安

好気槽構造		長水路×1		中水路×1		短水路 ×複数
上流ライザー管		全開	絞り	全開	絞り	
上流部無酸素		△	○	△	○	△~○
上流部への 遡上	隔壁内	△	○	○	◎	◎(過大)
	隔壁間	-				△
滞留		○		△		×
脱窒		○	◎	△	○	×
代表例		中川、小菅無隔壁槽		小菅西系改良AO法		西系旧AO

3. まとめ

いままでの各項は関連があり総合すると以下のようになる。

- (1) 中川・小菅のような無隔壁好気槽では完全混合に近い水域と死水域の間ともいべき滞留域があると考えられる。
 - (2) 滞留域での脱窒は完全混合状態（又は静置）より高速で起きている可能性がある。室内実験、モデル解析から高速脱窒が起きるには複数条件があるとみられ、主要な2つは滞留、無酸素であることが示唆された。
- 以上2点に集約される。そのほかに有用な新知見もあり以下にまとめる。

3.1 要約

- (1) 従来の可動水域と死水域で構成された逆混合モデルに、中間的な置換性があるゾーン（滞留域）を算入し、実験実測値と整合性が得られた。
- (2) このモデルに硝化脱窒を組込んだところ、滞留域の存在が脱窒に寄与することが示唆された。室内実験で疑似滞留では完全混合や静置より脱窒高速化する結果が得られており、同様の現象が起きているともみられる。返送汚泥の高速脱窒性を簡単な方法で数値化(2.3.2(1)項)したところ、実機水量が多いと高速脱窒が起きない可能性があることがわかった。
- (3) 好気槽で逆流が少ないと滞留は形成されやすくなる関係が予想された。一方で逆流が少ないと上流への硝酸供給が減る。深槽好気部無隔壁槽では両者のバランスが取れた最適逆流比が存在し、その逆流比で脱窒が最大になると考えられ、中川無隔壁槽はその逆流比に近いたため脱窒が良好とみられた。試算上では隔壁を設けると滞留を形成しにくいとみられる。
- (4) 実機脱窒に関連が強いとみられる滞留域の形成因子は高すぎない逆流比、多すぎない水量と思われた。

3.2 その他の知見

- ・ 臭化カリウムトレーサー法の開発により小使用量でのトレーサー実験を可能にした。
- ・ 4点の測定だけで簡単に局所的逆流比が算出可能とみられた。2.2.4項(1)式参照。
- ・ ライザー管開度変更点で変更方向により逆流比増加や減少のような働きがある。A回路ライザー管絞りによる局所的逆流比増加の可能性が認められた。

- ・トレーサーの投入場所や方式によりモデル上でトレーサー投入域が異なるとみられた。目的に合わせた投入方式が必要となる。

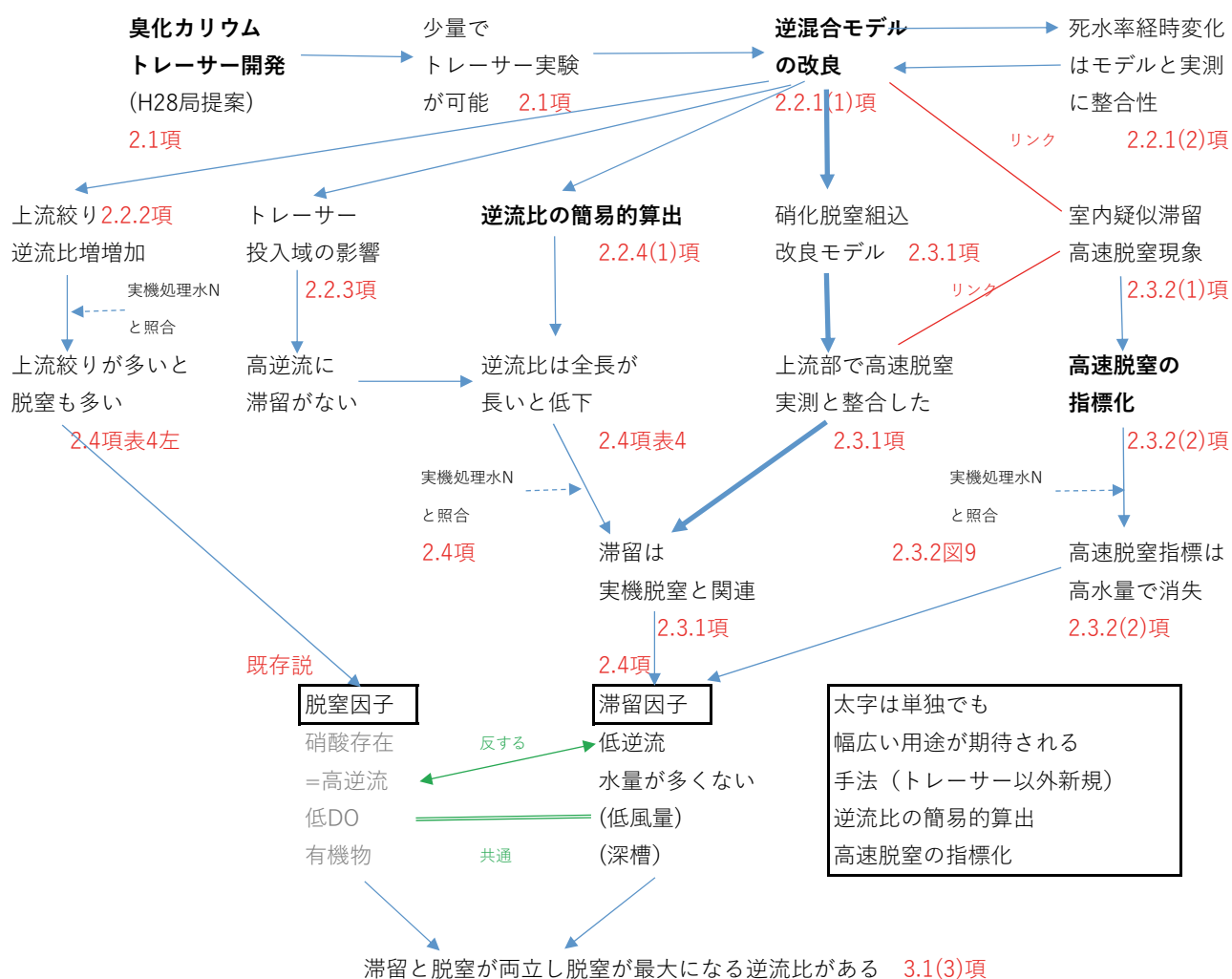
4. 今後

脱窒速度が上がる機構について滞留域が無酸素槽の役割を果たす、滞留域では脱窒速度自体が上がる、の二つの可能性を想定したので機構の検証を進める。

隔壁などがあり水路が短い、あるいは浅槽の場合の脱窒向上策検討。短水路では逆流比低下が課題と思われた。2.2.2 項に示したライザー管開度調整により逆流比低下の可能性があり検討の余地がある。

浅槽反応槽は断面積が少ないため送風の影響が全域に受けやすいことから滞留域の形成が難しいと思われ、深槽短水路同様に脱窒しにくいことが考えられる。浅槽での改良モデルを用いた検討がある。また中川は小菅より反応槽断面積が大きいとその滞留や逆流への効果も検討がある。

高速脱窒の成立条件の内 2 つは滞留と無酸素であるが、他の条件も把握して高速脱窒の全体像を探る。



(参考図) 論文構成図

- #1 逆混合モデル上で順流量-逆流量=流入水量となるが、逆流比=逆流量/流入水量であり混合の大きさを表す。返送率や硝化液循環率と計算上の考え方は同じ。
- #2 $\sqrt{(\sum(\text{測定値}-\text{演算値})^2)/\text{測定数}}$ で局調査1)の評価指標をベースに標準偏差の考え方を参考に異なる測定数でモデルと実測を比較できるようにした。モデル誤差という表現にした。測定値、演算値ともトレーサー濃度/槽平均トレーサー濃度を使用する。
- #3 槽平均値は槽の長さ方向等間隔地点(3以上)採水で求められる。トレーサー投入後30分値と60分値での死水率の場合、Aは(槽平均値₃₀-槽平均値₆₀)・槽容積。Bは(出口トレーサー濃度₃₀+出口トレーサー濃度₆₀)/2・30分間の水量となる。
- #4 上流ライザー管絞りによる逆流増加はR1局調査³⁾においても演算で確認されている。

参考文献

- 1)平成30年度好気槽内脱窒要因解明調査委託報告書 東京都下水道局施設管理部環境管理課
- 2)小林克巳 平成28年度局提案最優秀賞「臭化カリウムを使ったトレーサーの開発」
臼井ゆかり 令和元年度 東京都下水道局水質管理研修資料
- 3)令和元年度好気槽内脱窒要因解明調査委託報告書 東京都下水道局施設管理部環境管理課
- 4)小林克巳 「リン除去及び硝化状況の実施設の疑似的再現に関する室内実験の高精度化」
2002年度 東京都下水道局水質管理研修資料
- 5)監訳：味埜 俊 活性汚泥モデル 環境新聞社