

2-2-4 反応槽の流れ方の簡易な手法による可視化と

反応槽混合特性試験の簡易化有効化

担当者 西部第二下水道事務所みやぎ水再生センター 小林克巳
 中村紀和
 (現 東部第二下水道事務所葛西水再生センター)
 降矢るみ子 井上文恵 山本孝幸
 (現 東部第二下水道事務所中川水再生センター)

1. はじめに

下水試験方法の反応槽混合特性試験(以下従来法)は槽列モデルがベースで広く用いられるが、現実には起きている逆流現象を考慮しきれない等のデメリットがある。そこで、従来の槽列モデルの考え方を発展させてエクセル上で順流、逆流を考慮した計算モデル(逆混合モデル)を作成した。当局のほとんどの施設で該当する隔壁型反応槽を対象に、上記の計算モデルを用いて実験したところ、従来法にはない有効な知見が得られたので報告する。

2. 方法

実施槽分けを図1のように均等割する。

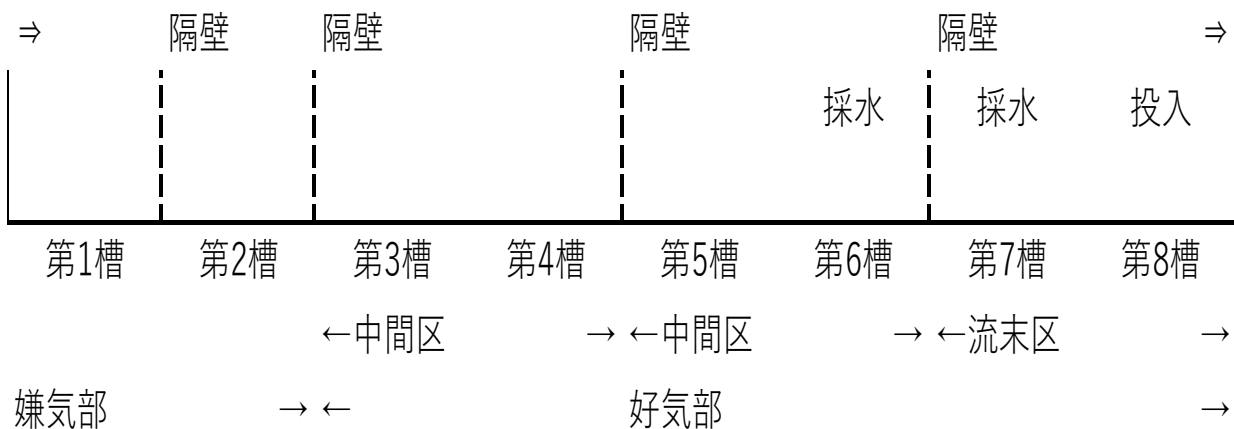


図1 中川水再生センター(AO法)構造図

これに合わせエクセル上でセル横並びで槽分けを表現しセルは1行8つで、一つのセルがモデル上の槽を表している。水の流れは左→右で時間経過は行方向への連続処理で表す。任意の g, f において $g-1$ 行から g 行の進行は時間幅 t (h) に対応しており、実施槽流入水量 v (m^3/h) = モデル上の順流水量 a (m^3/h) - モデル上の逆流水量 b (m^3/h) とする。 g 行第 f 槽には $f-1$ 槽から順流流入 $a \cdot t$ 、 $f+1$ 槽からの逆流流入 $b \cdot t$ があり、セル容積 $1m^3$ とすると f 槽は $1-at-bt$ が未置換となる。1 演算前の $g-1$ 行での $f-1, f, f+1$ 槽濃度を A, B, C とすると g 行での f 槽濃度は $(Aat+B(1-at-bt-d)+Cbt)$ となる(両端槽は別演算)。横並び全セルでこの演算が行ごとに連続的に行われる。この方式(以下本方式)では t, v は初期設定するので変数は槽列数(図1だと8)、 b の2つである。 補足資料 1, 2

3. 結果及び考察

3.1 本方式の検証

図 2 から実測値を本方式の演算値は概ね近似できていることがわかった。

(補足) 周囲と置換が遅い水域をモデルに加えて演算すると、初期に 1

点だけ離れている地点も演算値とほぼ一致した。 1) 補足資料 3

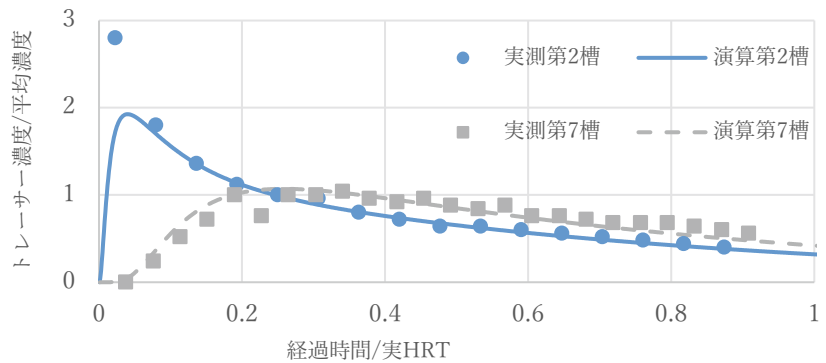


図 2 本方式での演算値と実測値

3.2 逆流の存在と反応槽流れの可視化

実施設においては、逆流が存在するが槽列モデルでは逆流を考慮できない。逆流を確認した例として無隔壁反応槽での中間部トレーサー投入例を図 3-1 に示す 1)。経過時間は返送汚泥量を含めた実 HRT 除算で無次元化され、経過時間/実 HRT で 0.01 が 5 分前後である。図 3-2 に、逆混合モデル及び槽列モデルでの演算例を示す。逆混合モデルに対し槽列モデルは全く逆流せず中間点からの流れ再現には向かないことがわかる(図 3-2)。本方式は実施設に存在する逆流も表現できることから中間地点からの流れも再現でき、上下流方向の 1 次元流れの可視化が可能である。ここまでは隔壁がない無隔壁反応槽を扱った。

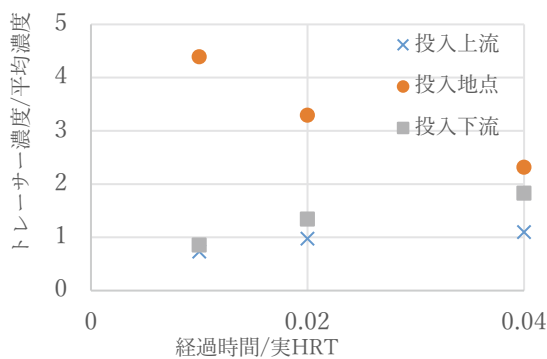


図 3-1 中間地点投入実測例

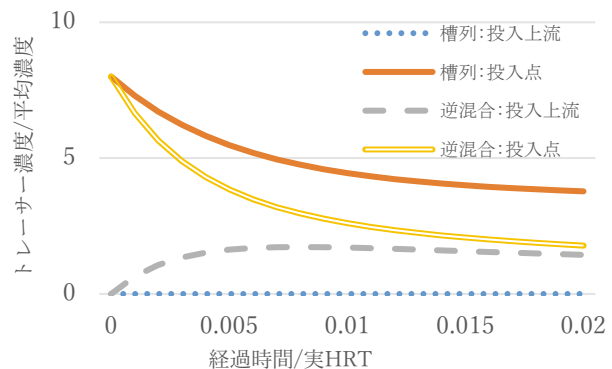


図 3-2 中間地点投入演算例

3.3 隔壁型反応槽とモデル組み立て

以降は隔壁型反応槽を対象とする。蛇行流構造反応槽では折り返し点を隔壁として処理できる。好気部隔壁内を 2 槽に分画してモデルを組み立てた(図 1)。モデルの槽列数は実施設の好気部隔壁数から定まる。 補足資料 1

図 1 を例とすると第 1-2、2-3・・・7-8 槽間に流れの指標 n を $n = \text{順流量} a / \text{逆流量} b$ と定義した。 n が小さい程混合性が大きく逆流も多く、槽列モデル N に似た性質があり 1 以上である。また隔壁がない部分(例えば図 1 第 7-8 槽間)に比べ隔壁(第 6-7 槽間)では逆流が抑えられると考えられることから、 b が X だけ減少するとして隔壁の効果 q を $(b-X)/b$ と定義した。 $X=0$ では $q=1$ で隔壁が存在せず第 7-8 槽間はこれに該当する。 $q=0$ で演算すると隔壁で全く逆流せず、第 6-7 槽間は部分的に槽列モデルと同じ扱いとなる。隔壁型モデルでの変数は槽列数、 n 、 q の 3 つとなる。 補足資料 4

3.4 反応槽混合特性試験の簡易化有効化

3.4.1 トレーサー実験の簡易化

本方式を用いる場合、トレーサー実験は逆流を測定するのが主目的となるため、下流側にトレーサーを投入して上流側で採水する(図 1)。このやり方であれば従来法に比べて測定時間が 30 分程度と短くトレーサー量も少なく、特に臭化カリウム¹⁾だとトレーサー量は 1kg 程度と少量で済む。補足資料 5, 6, 7, 8

3.4.2 混合性の数値化

流末区は最下流隔壁から出口までの閉鎖的水域である(図 1)。8 槽逆混合モデルで流末区である第 8 槽にトレーサー投入し、投入点上流の第 7 槽トレーサー濃度がピーク時間になる投入後経過時間の演算を表 1 に示す。

表 1 では例えば例えば n1.1 では 0.012~0.021、n1.2 では 0.023~0.034 と n1.1 のピーク時間範囲と n1.2 のピーク時間範囲に重なりがなく、各 n のピーク時間範囲は q の全範囲に対応しているため表のピーク時間から n を求めることが可能である。槽列数 6 又は 10

の逆混合モデルで同様の流末区演算をすると表 1 のピーク時間の 8/槽列数倍とほぼ同じであり、槽列数が変わっても表 1 からピーク時間が求められる。逆混合モデルの槽列数が変数になる課題がクリアされ、データ処理は従来法同様の簡易性が維持された。図 1 の中間区において下流側隔壁 q を変えて演算しても表 1 は成立しており、表 1 には不偏性が認められた。補足資料 10

小菅、中川センター(表 2)での流末区での下流トレーサー投入上流測定例を図 4 に示す。

表 1 n, q と第 8 槽投入第 7 槽ピーク時間の関係 (経過時間/実 HRT)

隔壁 効果q	隔壁内混合性 n						
	1.03	1.1	1.2	1.3	1.4	2	10
1	0.003	0.012	0.023	0.032	0.040	0.068	0.114
0	0.007	0.021	0.034	0.044	0.051	0.077	0.116

表 2 反応槽形状と調査時実 HRT

センター	全長(m)	幅(m)	水深(m)	隔壁間(m)	実HRT(h)
中川	63.2	12.2	10.0	24	11.0
小菅*	82.3	11.5	10.0	35	14.1

*西系AO法隔壁撤去前

好気槽隔壁値

両者には明確な差が存在し、n は中川 1.03、小菅 1.3 以上と見られた。小菅は図 1 の第 3, 4 槽がない 6 槽型である。全長、幅が同じで隔壁間長さが全長である両センター無隔壁槽でも類似した挙動が見られた¹⁾。

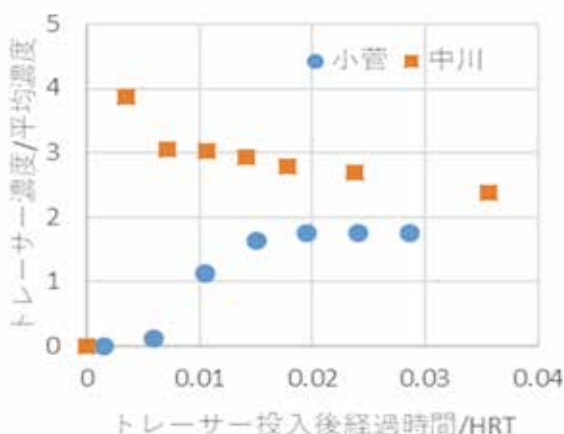


図 4 末端区下流投入上流測定実測値

3.4.3 隔壁効果の数値化

隔壁効果を数値化するためには、隔壁をまたいだ2地点（図1の第6,7槽）のトレーサー濃度実測値、演算値が必要である。隔壁内混合性 n の値は、先に3.4.2で求めた値を使用する。前節の実験の場合、最下流隔壁上流の第6槽トレーサー濃度も同時測定した。第6槽トレーサー濃度/第7槽トレーサー濃度のモデルでの演算結果（図5）から流末区では上流側隔壁 q が濃度比/経過時間の傾きから求められることがわかる。一方中川において実測した結果を図6に示す。図6から q は0.1程度と見られた。この求め方は槽列数の他に中間区では下流側隔壁 q により図が変わるため、図5はモデルごとに作成する必要がある。

補足資料 11, 12

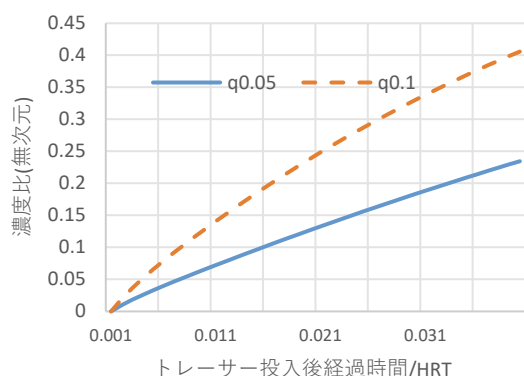


図5 演算での第6槽/第7槽濃度比

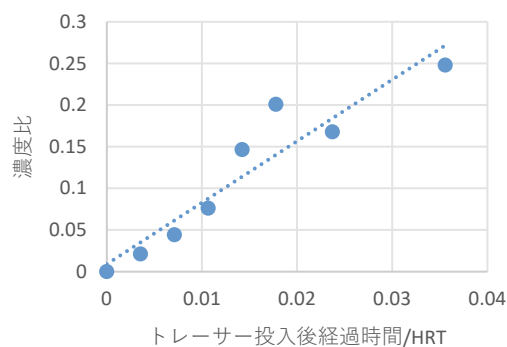


図6 実測での第6槽/第7槽濃度比

4. 硝化脱窒への応用

定風量曝気²⁾で行うと硝化が良好な場合 $\text{NH}_4\text{-N}$ が $0.5(\text{mg/L})$ 以上あれば硝化速度は一定で、脱窒による減少を補正（以下条件①）した生成 NO_3 は曝気時間比例で増加する傾向がわかっている（東京都実験）、この現象は現場測定値からも確認される。これにより条件①では送風量一定の場合、曝気時間は NO_3 生成量に比例する状況があると判断した。以上の事実からモデルを組むと実施設で送風量に比例する条件①での各槽 NO_3 の連続生成はモデル上の好気部各槽への NO_3 連続投入と同じとみなすことができる。モデル上の演算結果は平衡になった各槽 NO_3 濃度を表す。補足資料 9

以上に基づき条件①を満たした中川 A0 法（図1 $n=1.03$ $q=0.1$ ）を例に、モデル上で第3～8槽への NO_3 連続等量投入での平衡後各槽 NO_3 を演算した（表3）。隔壁の演算条件で条件Aは実測 q の0.1を使用し条件Bは仮定の隔壁無逆流（ $q=0$ ）である。条件A, Bの比較から少しでも隔壁で逆流する（ $q=0.1$ ）と送風効果が上流部に波及していることが読み取れた。また

表3 NO_3 連続投入演算による平衡後各槽 NO_3 濃度比

隔壁の演算	嫌気部		好気部(第3～8槽 NO_3 連続等量投入)						各槽 累計	
	q	第1槽	第2槽	第3槽	第4槽	第5槽	第6槽	第7槽		第8槽
条件A	0.1	7	9	12	12	14	14	16	16	100
条件B	0	0	0	6	6	11	11	17	17	68

※網掛けは実施設 NO_3 無検出域

条件A各槽累計を100

実施設では第1～4槽では NO_3 がほぼ無検出であるため、表3からこの部分で反応槽生成 NO_3 全体の約40%も脱窒していることになり、逆流の効果が予想外に大きいと考えられる。この事例は n が小さいため、 n と上流遡上の関連は今後検証が必要である。補足資料 13, 14

5. 槽列モデルと逆混合モデルの比較

反応槽混合特性で用いる槽列モデルは取り扱いが容易だが、測定時間が長い、トレーサー使用量が多い、情報量が少ない課題があった。今回は逆混合モデルを使用することによりこれらの課題を解決し、逆混合モデルの欠点であったデータ処理が複雑になる点については槽列モデルと同水準の容易さを保てた

表 4 従来法と今回の方法の比較

		従来法	今回報告の方法
原理	ベース	槽列モデル	逆混合モデル
	道路でいうと	一方通行	両通
トレーサー実験 (隔壁3枚の標準例)	所要時間	8時間	30分 (短時間で終了)
	トレーサー量*	4Kg	1Kg (少量で済む)
トレーサー投入	投入地点	最上流	投入点任意
	投入方式	パルス	パルス、多点連続
結果	可視化	適切ではない	グラフ上で1次元表示可能
	隔壁内混合性	合算(分離できない)	単独で把握
	隔壁の効果		単独で把握
隔壁枚数の違いの影響		問題がない	混合性演算には影響がない

*小林が開発しH28下水道局職員提案で最初に報告した臭化カリウムを使用した場合

(表 4)。

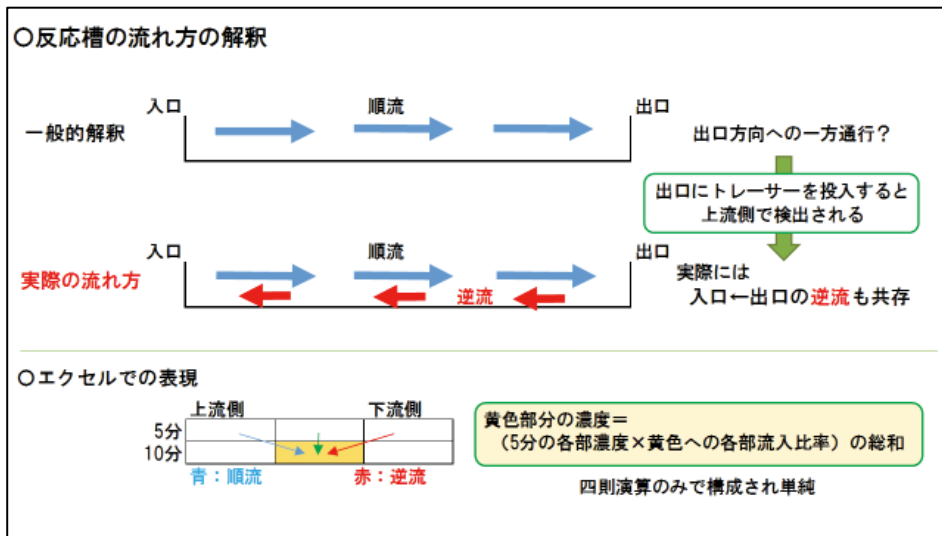
6. 結論

- ・逆混合モデルのパソコンでの平易な組み立てが可能となり、モデル上でのトレーサーの広がりから流れの可視化が容易となった。
- ・モデルでの連続投入演算により、条件次第では硝化脱窒反応のある程度の推定も可能となった。補足資料 15

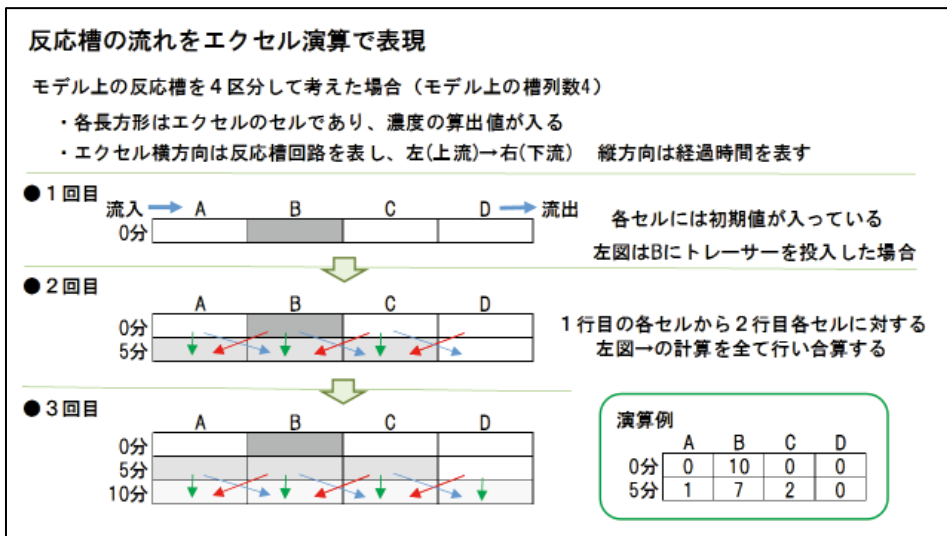
参考文献

- 1) 東京都下水道局技術調査年報 2020 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存在予想と滞留域による脱窒高速化について」
- 2) 東京都下水道局技術調査年報 2014 3-1-3 「硝化測定における新手法の導入について」

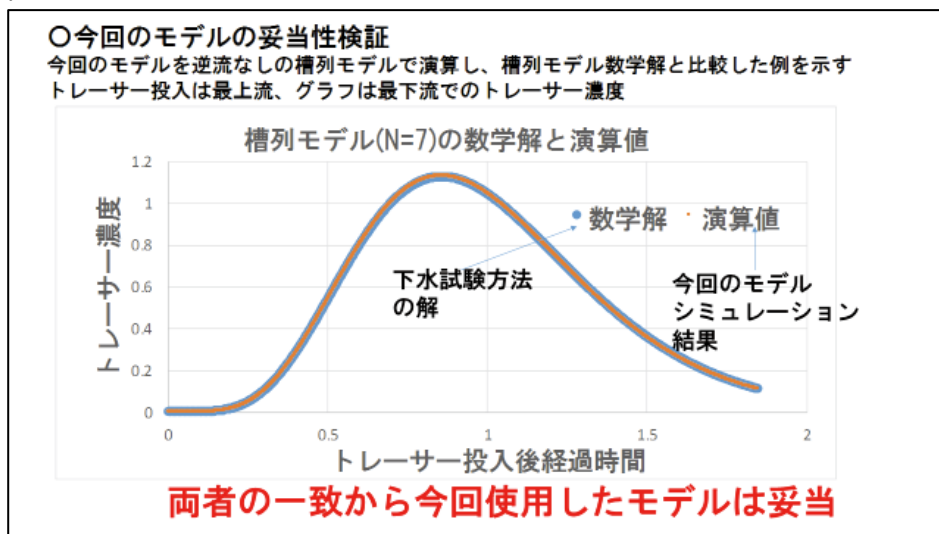
補足資料 1

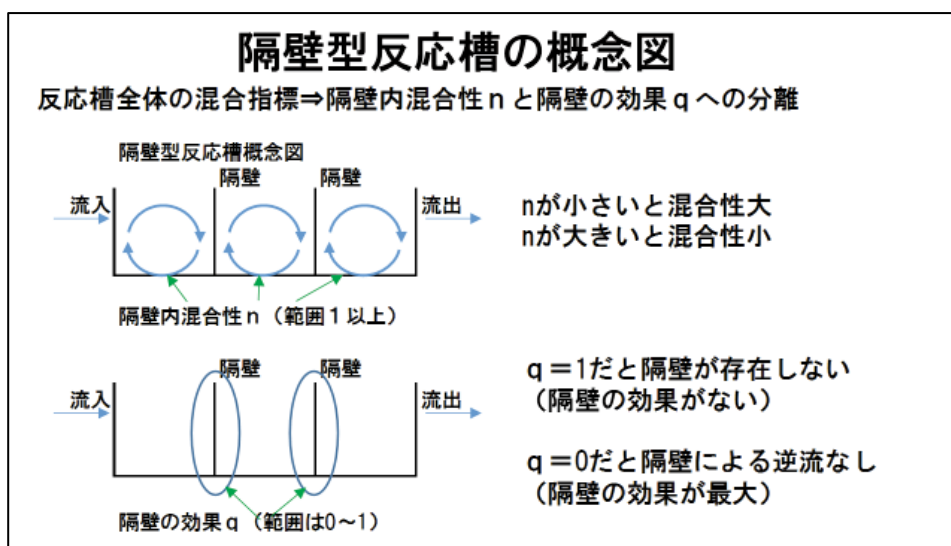


補足資料 2



補足資料 3





トレーサーとして用いる臭化カリウムの長所

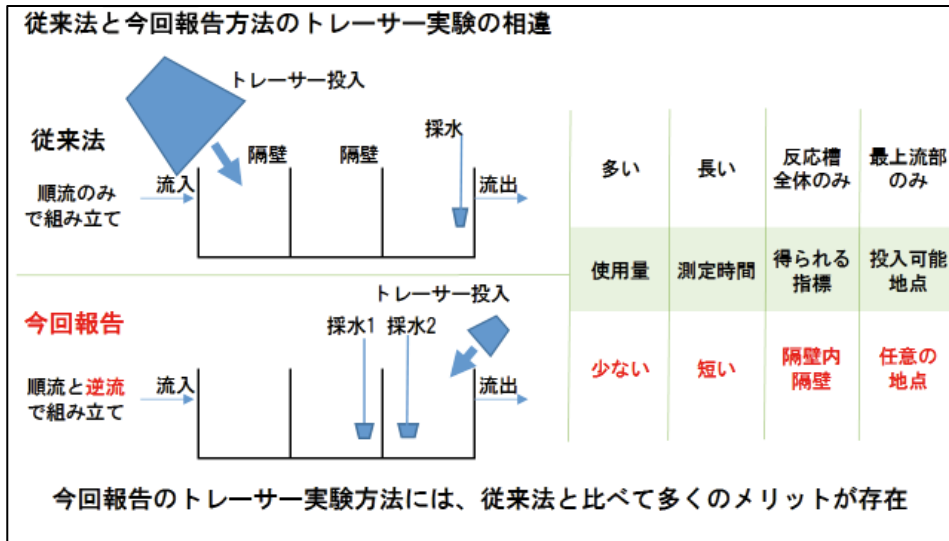
- 下水試験法の塩化物に比べ、バックグラウンドが低い**ため極少量で済む**。(容積10,000m³で約1kg)
- 溶解度も高く、トレーサー溶解作業の負担も低下
- イオンクロマトによりろ過だけで分析可能
- トレーサー実験が簡易に行えるため、異条件の複数槽同時比較調査が現実的になった
- 無着色無害であり、環境負荷がない

臭化カリウムの使用方法

- 臭化カリウム試薬瓶1本(500g)をスターラー攪拌しながら熱水約1Lに溶解する。
- トレーサー液は比重が1.5で沈降がやや速く、30秒程度かけて投入し拡散をうながす。
- トレーサー液は高濃度だが無色でありコンタミに留意する。投入時は使い捨て手袋を使用し、投入後に手袋は破棄し、投入容器等は採水作業完了まで残置する。
- イオンクロマトでの分析は、ピーク間に線を引けば低い値も測定可能

(一般事項：実験中は水量、風量の変動を避ける)

補足資料 7



補足資料 8

○トレーサー実験

凡例
 条件入力
 測定値
 データ処理後

上流区画 投入区画 トレーサー投入

入口 採水 採水 投入 出口

A上 A下 B上 B下 C上 C下 D上 D下

バックグラウンド (0分値)を引いた値

・トレーサー実験結果

経過時間	経過時間	トレーサー濃度		濃度比
		C下	D上	C下/D上
分	無次元	mg/L	mg/L	無次元
3	0.003	0.017	0.804	0.021
6	0.007	0.028	0.633	0.044
9	0.011	0.048	0.628	0.076
12	0.014	0.089	0.608	0.146
15	0.018	0.116	0.580	0.201

実HRT

時間軸を実HRTあたりにすることで無次元化され異なる条件での比較が可能

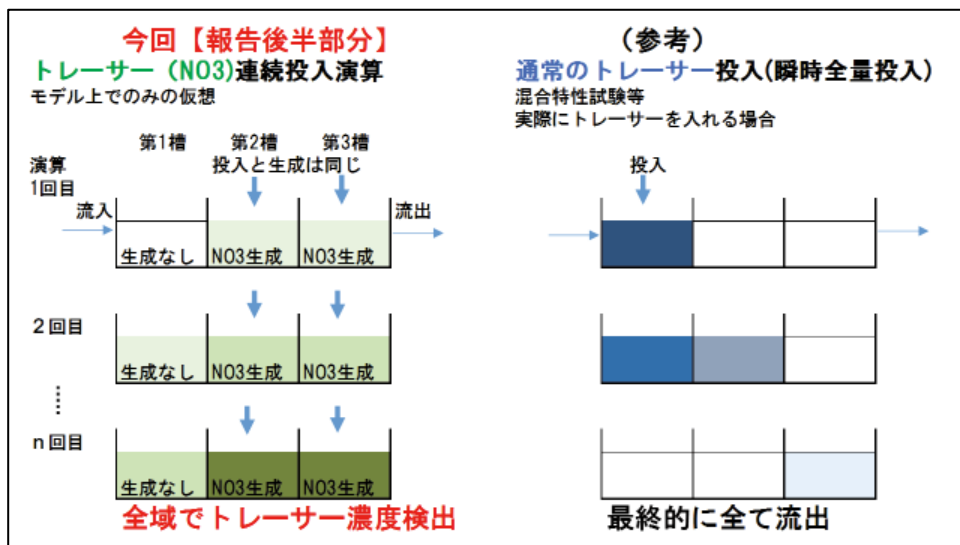
回路末(D下) にトレーサーを投入し、区画内上流側(D上)と隔壁へ隔てたC下で採水

・実験条件

投入量	Br(g)	1553
容積(b)	m ³	7450
流入量(c)	m ³ /h	300
返送量(d)	m ³ /h	230
実HRT	分	850

実HRT=60b/(c+d)

補足資料 9



○トレーサー実験による混合性nの求め方

凡例
測定値
データ処理後

・トレーサー実験結果(前出)

経過時間 分	経過時間 /実HRT	トレーサー濃度		濃度比
		C下 mg/L	D上 mg/L	C下/D上 無次元
3	0.003	0.017	0.804	0.021
6	0.007	0.028	0.633	0.044
9	0.011	0.048	0.628	0.076
12	0.014	0.089	0.608	0.146
15	0.018	0.116	0.580	0.201

トレーサ投入した隔壁内でトレーサー濃度が最大となる経過時間(ピーク時間)を選ぶ

ピーク時間と混合性(n)の表
(モデルによらない固定値の表(抜粋))

ピーク時間/実HRT	0.002	0.003	0.004	0.010
混合性(n)	1.02	1.03	1.04	1.10

隔壁の効果qの求め方シートで使用

○トレーサー実験から隔壁の効果qを求める準備

・トレーサー実験結果(前出)

経過時間 分	経過時間 /実HRT	トレーサー濃度		濃度比
		C下 mg/L	D上 mg/L	C下/D上 無次元
3	0.003	0.017	0.804	0.021
6	0.007	0.028	0.633	0.044
9	0.011	0.048	0.628	0.076
12	0.014	0.089	0.608	0.146
15	0.018	0.116	0.580	0.201

濃度比C下/D上のグラフ

隔壁の効果qの求め方シートで使用

凡例
測定値
データ処理後

○実験結果とモデル演算の比較によるqの求め方

nの求め方シートから

・モデルへの変数入力

混合性	n	1.03	混合性nと求めた隔壁効果qは硝化演算シートで使用
隔壁効果	q	0.1	

実測と合うようにqを変える

・モデル演算(実験結果に合わせる)

qを求める準備シートから
・実験結果(基準)

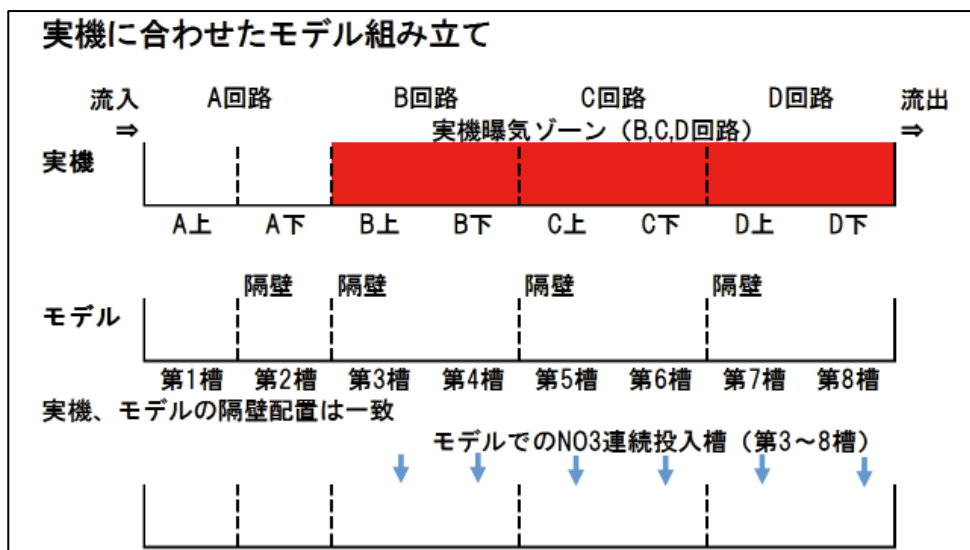
比べる

n,qによりグラフ表示が変わるエクセルワークシートを使用(作成)

混合性nは求めた値を使用。隔壁の効果qを変えて演算グラフを変更し、実験結果グラフに近似がよいqを求める

凡例
モデルに可変入力
演算結果
実験結果

補足資料 13



補足資料 14

従前得られなかった新たな情報の取得

- ・隔壁があっても下流→上流に大きな逆流が存在するケースがある。
- ・この場合、反応槽で硝酸が検出されていないゾーンに好気部から硝化液が逆流しており、今回の事例では**硝化液の約40%も逆流脱窒**していた。
- ・この結果は流入アンモニア濃度、返送率からの単純計算により得られた**窒素濃度と整合した**。

補足資料 15

「逆流脱窒」を把握する作業手順要約

- ・トレーサー物質として少量で済む臭化カリウムを使用
- ・短時間で済む新たな反応槽トレーサー実験を適用 (モデルの構築と解析)
- ・センター毎にモデルを組む(又は当方で作成、配布)
- ・モデル演算と実験結果から反応槽混合特性に関する**2つの定数決定** (各センターに適合したモデルの完成)
- ・完成したモデルに硝化を疑似的に**投入演算し**、硝化液の流入先を特定
- ・実機での脱窒状況と演算での硝化状況を比べて、**今まで解明されていなかった脱窒状況の把握**