

## 2-1-4 下水試験方法の混合特性試験を用いた反応槽の逆流の定量化と脱窒調査への応用

西部第二下水道事務所 みやぎ水再生センター 水質管理担当 小林 克巳  
坂元 忠明  
江原 和宏

### 1 はじめに

反応槽の処理効率と密接な関係性がある混合特性を把握することは、水処理に影響を及ぼす短絡流など偏流の大きさの評価につながることから、水処理状況を詳細に把握する方法となる。

これらの解析には、混合特性を近似・単純化したモデルが用いられており、下水試験方法では「反応タンク混合特性試験」<sup>2)</sup> (以下「混合特性試験」という。)において「槽列モデル」が採用されている(図1)。さらに、「槽列モデル」の発展形である「逆混合モデル」により、短絡流の解析に留まらず周囲との置換性が低い水域である滞留域の解析が可能となった<sup>4)</sup>。

窒素処理に関しては、反応槽内で逆流の事象が脱窒反応に寄与することについて、これらの混合特性を壁がある反応槽でも簡単に算出できる解析モデル(以下「本モデル」という。)を作成した<sup>1)</sup>。

ただし、これらの逆流と脱窒反応を関連付けした解析手法は、水質管理分野ではまだなじみが少ないため、今後、これらのモデルを広く活用していく上では、現場での活用が容易となる新たな手法の考案が必要であると考えられた。

そこで身近に使用されている下水試験方法をベースに、逆流の定量化により脱窒の大きさを評価する手法を検討するとともに、その判断を容易にする「逆流指標」を考案した。

本報告では、逆流と脱窒反応の定量化に関するこれまでの取組について報告する。

### 2 本モデルの特徴

混合特性を解析する従来の方法は、槽列モデルを用いて「等容積の混合槽を直列に結合させて全体の反応槽の混合特性に近似させる」などの手段により論理式で算出する方法であるが、今回の調査で使用した本モデルでは、エクセル(Excel)とその四則演算だけで構成されていることが大きな特長である。これにより、簡単なマニュアルを用いることで、PC 端末上でモデルを容易に作成、計算することが可能となる。さらに、本モデルはこれまでの過年度調査<sup>3)</sup>で構築したvisual basicを使用したモデルと同程度の試算結果が得られる精度である<sup>4)</sup>。水質管理分野では今までは簡単に表現できなかった反応槽の上下流方向の流れを本モデルでは再現できるため、用途が広いことも特長の一つである。

なお、本モデルの考え方の基礎事項を文末の補足資料に示したので参照されたい。

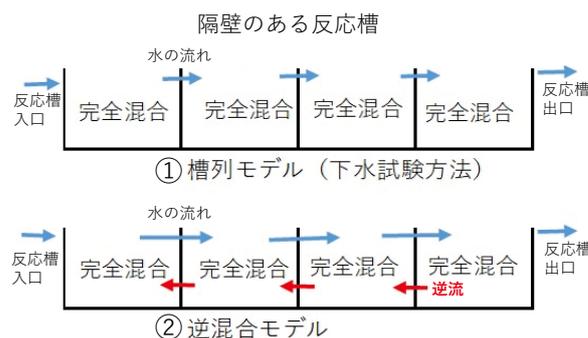


図1 隔壁のある反応槽の混合モデルと水の流れ(概念図)

### 3 従来の解析モデルと本モデルの精度

#### 3.1 過年度調査の結果

過年度の委託調査<sup>3)</sup>において、水再生センターで反応槽入口にトレーサーを加え各回路のトレーサー濃度実測値とこの実験をシミュレーションした逆混合モデルの演算値を比較、整合性検証を行い、実測値の近似度が最も高いモデルを逆混合の解析用に選定した。この実測データと本モデルによる演算値も同様に比較し、整合性検証を実施した。

#### 3.2 過年度調査結果と本モデルとの結果比較

過年度調査では、実測値は「各測定点トレーサー濃度/槽平均トレーサー濃度」(Ci) を用い、演算値(Xi) と同じ無次元にして用いた。整合性の指標は最小二乗法と同じ考え方の偏差平方和  $\sum (Ci - Xi)^2/n$  を用い、この値が小さいほどモデルと実測値の近似度が高いことになる。このことから、過年度調査で最小値となった偏差平方和と同条件を本モデルにおける演算に使用した。

その結果、ABCD 回路出口 4 測定点、各出口測定数合計 n=72 (ABC 回路各 16 回、D 回路 24 回) での偏差平方和は委託調査 0.091、本モデル 0.102 であり、本モデルの実測値近似度は過年度調査の逆混合モデルと同水準であることが確認された。参考のため本モデル演算値と実測値の関係を 2 測定点で示したグラフを図 2 に示す。調査槽は無隔壁槽で上流から出口に向けて測定点の呼称が ABCD となるが、モデル上では 7 区画で上流から出口に向けての演算点の呼称が No1~No7 であり、図 2 の実測 No2 は実機上では A 出口、実測 No7 は D 出口に相当する。

なお、図 2 では 7 区画モデルが使用されたが、今回の解析では隔壁と区画を重ねるため 8 区画モデルを使用した。

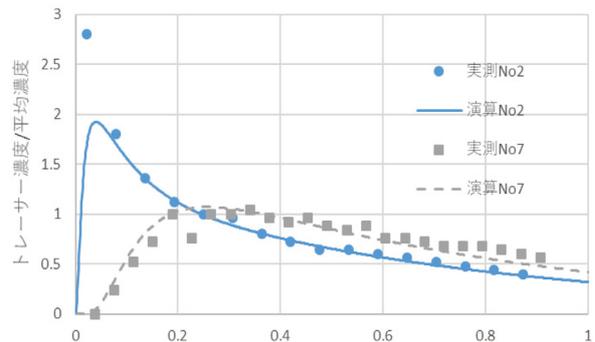


図 2 本モデルでの演算値と実測値<sup>1)</sup>

### 4 本調査の検討内容

#### 4.1 本調査における反応槽のモデル上の設定

本モデル上の反応槽の流れ方は、無隔壁と隔壁 3 枚 (4 区画の蛇行流と同じ) の 2 種類 (図 3) とし、さらに、演算では表 1 に示すように隔壁内での混合性の度合いも変えた (隔壁内混合性 n<sup>1)</sup> と隔壁の効果 q<sup>1)</sup> の条件の組み合わせを変更) 計 7 種類について設定した。

なお、解析で使用した反応槽の逆流に関する指標については「4.2 下水試験方法混合特性試験の N」で述べる。



図 3 本モデルで使用した 2 種類の反応槽構造 (隔壁の有・無)

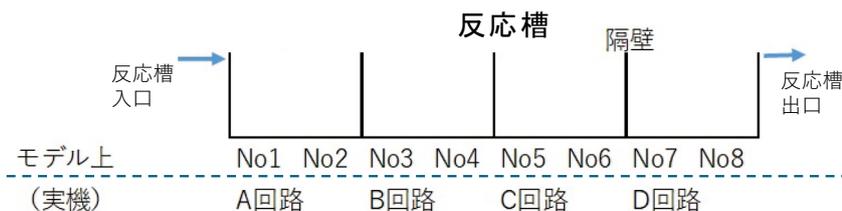
表 1 演算に使用した 7 種類の設定条件

反応槽構造	モデル流れ方設定値		
	混合性	隔壁内混合性 n	隔壁の効果 q
無隔壁	高混合	1.02	1
		1.1	1
	低混合	1.5	1
		2	1
隔壁3枚	高混合	1.02	0.02
	低混合	1.1	0.02
		1.5	0.02

## 4.2 下水試験方法混合特性試験のN

混合の程度を示すNを測定する実験手法（補足資料参照）を本モデル上でも表現し、Nを演算により求めた（図4 ①の下水試験方法混合特性試験）。反応槽は上流から下流への通常の流下方向以外にその途中で短絡流があり、短絡流が多いと  $t_{max}$  は短時間で検出される。上流から下流への短絡流があれば水量収支から下流から上流への逆流が存在することになるため（図5）、短絡流が多いほど逆流が多くなることが分かる。この結果、短絡流の大きさを示すNと逆流とは関連性があることになる。

【反応槽概略図】モデル上の番号と各回路の位置関係



### ① 下水試験方法混合特性試験

トレーサー投入量	1	0	0	0	0	0	0	0
測定地点								No8
測定内容	トレーサー投入後に測定地点でピークになるまでの時間( $t_{max}$ )からNを求める							
組み合わせ	単一							

### ② 今回の手法（逆流指標）

トレーサー投入量	0	0	0	0	0	0	0	1	略称	No8
	0	0	0	0	1	1	2	2		No5~8
測定地点	No1	No2								A回路
	No1	No2	No3	No4						AB回路
測定内容	各測定点トレーサー合計の最大値÷投入トレーサー量									
組み合わせ	2×2=4通り									

図4 モデル上の各種設定

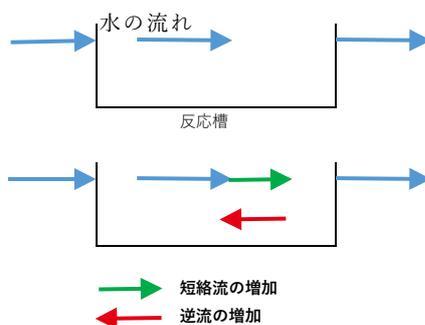


図5 短絡流と逆流のイメージ

### 4.3 逆流指標

#### 4.3.1 逆流指標の定義

反応槽の下流側にトレーサーを加え上流側で測定するとトレーサーの遡上による反応槽の逆流が観察できる<sup>4)</sup>。そこで硝化ゾーンにある硝酸が脱窒ゾーンに逆流する割合は逆流状況を反映すると考えた。本モデル上で硝化ゾーンにトレーサーを投入し、脱窒ゾーンに逆流したトレーサー量/投入トレーサー量を細分した時間ごとに演算した。

演算結果の最大値は逆流状況を反映すると考え、これを「逆流指標」と定義した。具体例を次で示す。演算はエクセル上の四則演算だけで構成され単純である<sup>1)</sup>。

#### 4.3.2 逆流指標の設定

実機水質測定から脱窒ゾーンは8区画ある本モデルのNo1~4とみなし、No1,2(以下A回路)又はNo1~4(以下AB回路)と演算上設定した。硝化に伴う硝酸生成をトレーサー投入で置き換えてみた。硝化ゾーンも水質測定からNo5~8とみなし、No5~8又はNo8で演算上設定し、No5~8でのトレーサー投入比は実機硝化を想定しNo5~8を1:1:2:2で設定した。硝化と脱窒どちらにもあたらない区画はセンターにより硝化脱窒ゾーンが異なる場合への対応を想定した。あらましを図4に示す。緑の網掛けはトレーサー投入部のイメージで青の網掛けはトレーサー測定部である。

## 5 結果と考察

### 5.1 Nと逆流指標の関係

#### 5.1.1 反応槽のモデル上の設定

本モデル上の反応槽の流れ方は、「4.1 本調査における反応槽のモデル上の設定」で説明したように無隔壁と隔壁3枚(4区画の蛇行流と同じ)の2種類(図3)とし、さらに、隔壁内での混合性の度合いも変えた計7種類について設定し、演算を行った。

表2 流れ方及びトレーサー条件とN, 逆流指標の関係

反応槽 構造	モデル流れ方設定値			N	逆流指標			
	混合性	隔壁内 混合性n	隔壁の 効果q	No1	No8		No5~No8	
				No8	AB	A	AB	A
無隔壁 ↑	高混合	1.02	1	1.08	0.43	0.21	0.44	0.22
		1.1	1	1.31	0.27	0.12	0.31	0.14
	低混合	1.5	1	2.12	0.06	0.02	0.10	0.03
		2	1	2.85	0.02	0.00	0.05	0.01
隔壁3枚 ↑	高混合	1.02	0.02	1.98	0.08	0.03	0.11	0.03
		1.1	0.02	3.15	0.01	0.00	0.02	0.00
	低混合	1.5	0.02	4.20	0.00	0.00	0.00	0.00
下水試験方法の槽列モデル N=4の近似(参考)					緑網掛け: トレーサー投入地点			
		1.02	0	4.02	青網掛け: トレーサー測定地点			

### 5.1.2 演算結果

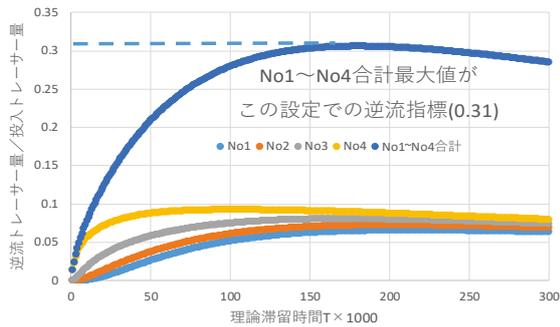


図6 逆流指標演算例

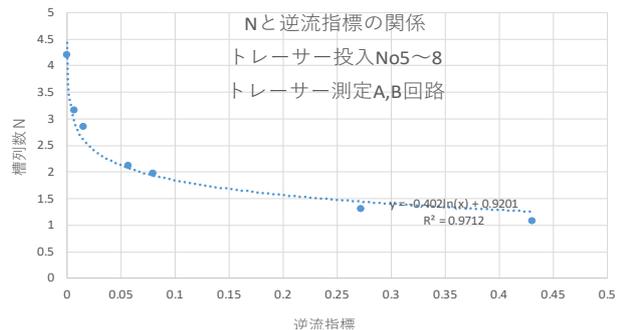


図7 Nと逆流指標の関係

表1の設定で演算し  $t_{max}$  から求めた  $N$  と「逆流指標」の関係を表2 ( $n, q$  については参考文献<sup>1)</sup>参照)にまとめた。一例として表2の黄色の網掛け部分の「逆流指標」の演算を図6に示す。表2からNo5~8、No8の投入パターンに依らず、A、AB回路で結果が二分されることがわかる。例えば、トレーサー測定AB回路で比較するとトレーサー投入No8とNo5~8によらず「逆流指標」はほぼ同じである。このように「逆流指標」は硝化ゾーン設定によらず脱窒ゾーンA、AB回路設定で決まる傾向が分かった。実機の硝化ゾーンに近いと思われるNo5~8トレーサー投入型で  $N$  と「逆流指標」の関係を示す(図7)。隔壁の有無によらず関係式上に乗り、寄与率も高いことから、 $N = -0.402 \ln(\text{逆流指標}) + 0.9201$  の相関式の精度は高い。相関式は各種試行したが対数相関が最大寄与率であり、対数の性質は  $N$  無限大で逆流がない状況にも整合する。以上から下水試験方法混合特性試験  $N$  からは直接読めなかった逆流情報が、今回の手法により定量化が可能となったと考えられる。実機の硝化や脱窒域に近いと思われる図7の相関式を、 $N$  から求める逆流指標の計算式として今後使用する。

### 5.1.3 Nの特性と逆流の関係

水質管理の水処理に関する式は慣例的に線形又は分数式でほとんど表されるが、 $N$  低下に伴い逆流が急増する特性がこの慣例外となるのが今回の調査で判明した(図7)。このため、線形を前提として  $N$  の評価を行うことは精度の低下を招く恐れがある。なお、逆流に関する事象すべてが「逆流指標」と高相関となるわけではない。例えば理論滞留時間  $T$  より短い時間でのトレーサー濃度も逆流に関連しそうだが、4.1で示した7種類の設定で逆流指標と  $0.3T$  でのトレーサー濃度の関係は図8のように極値がありデータもばらつく。図7のような単調減少型との相違は明確である。

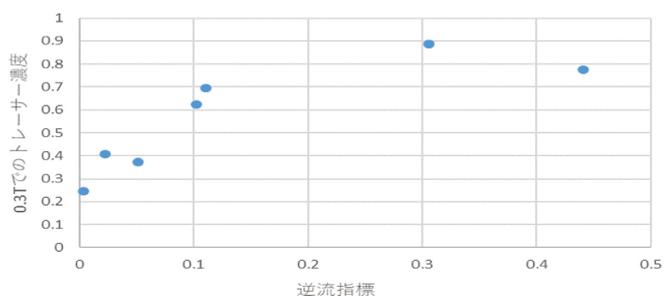


図8 逆流指標の無相関例

表3 調査委託の  $N$  実測値に基づく

調査回	無隔壁(標準法)			3枚(AO法)		
	窒素除去率	$N$	逆流指標	窒素除去率	$N$	逆流指標
第1回,第2回	0.41	1.65	0.16	0.30	3.39	0.00
第3回,第4回	0.51	2.06	0.06	0.32	2.82	0.01
第5回,第6回	0.51	1.76	0.12	0.05	3.00	0.01
平均	0.48	1.82	0.12	0.22	3.07	0.01

※水量不一定要降雨影響がある調査回が含まれる

## 5.2 過年度調査の実測データによる検証

委託調査<sup>3)</sup>での結果（N 実測値）と今回の試算結果（逆流指標）を示す（表 3）。この調査は 8H 毎×3 回コンポ値での評価で、窒素除去率は反応槽出入口窒素濃度により算出した。結果として無隔壁（標準法）での N は低く、「逆流指標」も高かった。一方、隔壁がある A0 法の N は 2.5 を超えており「逆流指標」も低かった。脱窒反応には諸要因が関係するが、表 3 から高逆流と低逆流では窒素除去率に差が認められ、逆流も脱窒反応の大きな要因であることが定量的に示唆された。

なお、低い N では短絡流が多い以外に混合性の低い滞留域が多く存在するとされ<sup>2)</sup> 水処理効率に悪影響を及ぼす可能性があるが、一方で滞留域での反応速度が増加する報告<sup>4)</sup> も出されている。このことを「逆流指標」により説明すると表 4 のようになる。低い N では短絡流が多いものの、図 7 の相関式の通り「逆流指標」は急増する。「逆流指標」が高いときの窒素除去率は比較的高いことが表 3 からわかっているため、まとめると低い N での処理水質は良好といえる。

N による考え方			逆流指標及び実測による評価			
N	短絡流	水処理効率	逆流指標	脱窒率	処理水質	滞留域
小	多い	低い	急増	大	良好	多い
大	少ない	高い	0 近い	小	良好	少ない

滞留域は流体力学では「淀み」

表 4 逆流指標と水処理の関係

## 6 まとめ

・本モデルはエクセルの四則演算だけで構成され、簡単なマニュアルによりモデルを容易に作成でき、visual basic によった委託調査モデルに匹敵する精度があることが分かった。水質管理分野ではいままで簡単に表現できなかった反応槽の上下流方向の流れを再現できるため、用途が広い。

・今回の検証により、N から反応槽での逆流の程度を示す「逆流指標」を実験データの相関式で求めることができ、多くのデータ蓄積がある N からの逆流の定量化が可能となった。新規調査をする場合でも N を求める手法は簡明であり、下水試験方法に詳述されている。

$$N = -0.4021 \ln(\text{逆流指標}) + 0.9021 \text{ の関係から}$$

$$\text{逆流指標} = e^{(0.9021 - N) / 0.402}$$

として N から簡単に求められる。

・水質管理の水処理に関する式は慣例的に線形又は分数式でほとんど表されるが、N 低下に伴い逆流が急増する特性がこの慣例外であった。

・新たな高度処理として注目される無隔壁槽だがトレーサー実験のピークが短時間側にあるため測定時間が短く、無隔壁槽でのトレーサー調査とその解析に本手法は向いている。また N2.5 以下では逆流が急増する性質があり、本報告のように過去の N 測定を再利用すれば新たな知見が得られる可能性がある。

・今回はシミュレーション上での条件比較により有用な知見が得られ、シミュレーションの有効性が分かる事例の一つとなった。

## 7 おわりに

以前はNの測定を時おり目にした。しかしNと水質の関係がはっきりせず、徐々に廃れて技術継承の危機が感じられた。今回の解析からNと逆流の関係が分かり、逆流は脱窒反応に関係している可能性があることから、現場職員がNと水質の関連性に目を向ける一石となる。N再評価により技術継承の面でも貢献できれば幸いである。

本モデルの応用例としては、制限曝気区画への下流区画からの逆流調査が考えられる。さらに本モデルは設備系でも適用が可能である。反応槽下流には豊富なD0、硝酸が含まれるが、逆流が少ない場合、このD0等は再利用されることなく流出するため、送風効率が低下する可能性がある。このような調査にも本モデルは応用できると考えられる。

### 参考文献

- 1) 小林克巳ほか編『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』東京都下水道局技術調査年報-2022- Vol.46 p.110 (2022)
- 2) 日本下水道協会編『下水試験方法-2012年版-』p.697 (2012)
- 3) 増田七彩 第12回 IWA ビジネスフォーラム (東京都下水道局環境管理課 平成30年度好気槽内脱窒要因調査委託)
- 4) 小林克巳ほか編『2-1-4 改良逆混合モデルを用いた反応槽の滞留域存在予想と滞留による脱窒の高速化について』東京都下水道局技術調査年報-2020- Vol.44 p.87 (2020)

### <補足資料>

混合特性試験から本モデルまで

混合特性試験は過去に多くの測定事例がある。

#### ・混合特性試験にある槽列モデル

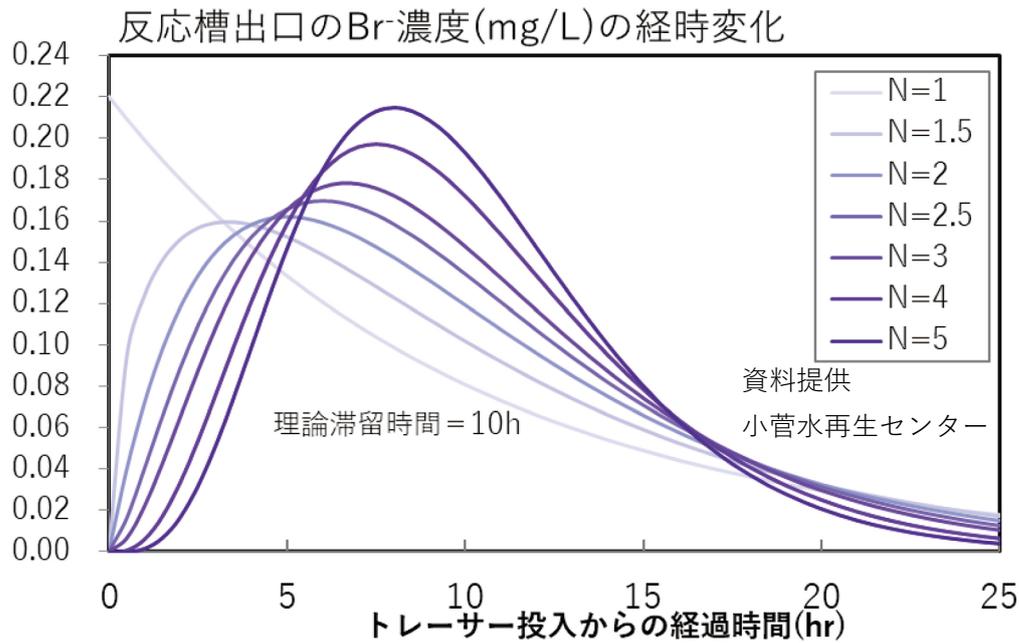
洗濯機を想定した槽(完全混合槽)を考える。槽の連結数(槽列数N)が多いと入口にトレーサーを加えた場合、出口でピークとなる時間は遅く、Nが少ないと出口でピークとなる時間は早い。この考え方を槽列モデルという(参考図1)。

#### ・Nを求める方法と意味

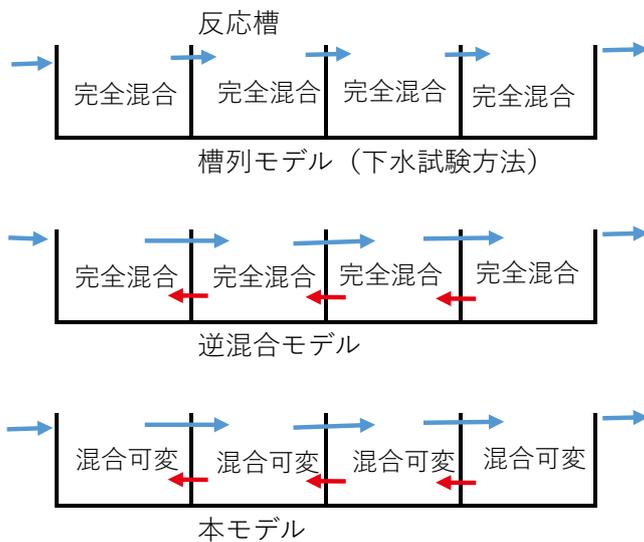
混合特性試験では反応槽入口にトレーサーを加え、出口のトレーサー濃度のピークになる時間( $t_{max}$ )を実測で求める。 $t_{max}$ は反応槽での理論滞留時間Tを用いて $N=T/(T-t_{max})$ に置き替えて使用される。Nは1以上となり、 $t_{max}$ が小さいとNも小さくなる。Nが大きいと短絡流が少ないという判断となる。

#### ・槽列モデル、逆混合モデル、本モデルの関係

3つのモデルの関係を参考図2に示す。槽列モデルに逆流を加えた逆混合モデルがある。この逆混合モデルをベースに隔壁を加えてシミュレーションした本モデルを解析に使用した。参考図2の完全混合は4つ設定した各区画内でN=1である。N=1とは $t_{max}=0$ であり、入口→出口の到達がただちに始まり、すべてが短絡流を意味する。混合可変は区画内のNを可変できるイメージである。今回、本モデルでは隔壁3枚モデルと無隔壁モデルを解析に使用したがモデル上の隔壁枚数設定は簡単に変えることができる。



参考図1 Nとトレーサー流出パターン



	逆流	区画内混合	実機近似
槽列モデル	×	完全混合	低い
逆混合モデル	取り込み	完全混合	↓
本モデル	取り込み	混合可変	高い

参考図2 各モデルの関係