

3. 3 浄水分野へのLCAの適用

3. 2で示した評価指標のうち、二酸化炭素及びエネルギーに関しては、ライフサイクルアセスメント（LCA）を適用することにより、浄水施設の材料製造・建設・運転・維持管理の各段階における環境負荷の定量化を行った。この節は、検討対象範囲、評価手法、並びに計算手順について取りまとめたものである。なお、仮想の浄水場を対象とした適用事例については、ケーススタディとして巻末に掲載した。

3. 3. 1 検討対象範囲

検討対象範囲は図3-3-1に示すように、浄水施設の建設及び運転段階とした。

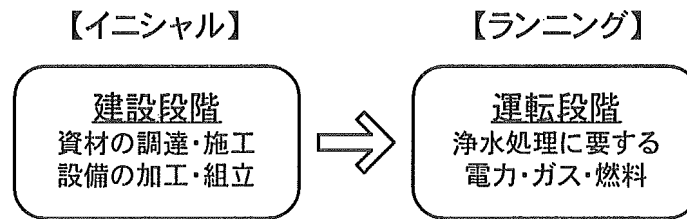


図3-3-1 検討対象範囲

3. 3. 2 評価手法（LCAについて）

ライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment：LCA）は、製品やサービスがそのライフサイクル全般にわたって環境に及ぼす影響を定量化する手法であり、算出方法としては、「積み上げ法」、「産業連関法」、「両者の組み合わせ」の3通りがある。

積み上げ法は、検討対象の素材、加工、輸送、組立等に係る各要素の数量を列挙し、別途検討されている原単位との積算によって算出する方法である。その概念が明確で分かりやすい反面、数多くの要素を抽出するという膨大な作業が必要となる。

産業連関法は、経済活動を構成する産業部門間の金額ベースでのやりとりを記述した産業連関表を用いて、別途定められている原単位によって、金額の入出力を物の入出力へと置き換え、各要素が環境に及ぼす直接及び間接の影響を推定する方法である。ある産業部門の活動によって発生する環境負荷を、その部門が直接発生させる負荷だけでなく、他部門に誘発させている間接的な負荷も含めて評価できる反面、構造の基となる産業連関表の部門数がおよそ400と限定されているため、数多くの素材から構成されている浄水施設への適用においては、十分な精度を得られるかどうか必ずしも明確ではない。

本研究において実施したケーススタディでは、各手法のこうした特徴を考慮の上、積み上げ法を採用して浄水施設に係る様々な資機材等を可能な限り列挙することとした。

◆積み上げ法による算出の例

$$\begin{aligned}
 & \text{コンクリートの使用に係るCO}_2\text{排出量 (kg-C)} \\
 &= \text{コンクリートの原単位 (kg-C/m}^3\text{)} \times \text{コンクリート使用量 (m}^3\text{)} \\
 &= 62.97 \text{ (kg-C/m}^3\text{)} \times 1,000 \text{ (m}^3\text{)} \\
 &= 62,970 \text{ (kg-C)}
 \end{aligned}$$

3.3.3 計算手順

(1) 調査対象の構造化

積み上げ法による算出の場合、検討対象施設の設計書等をもとに、素材、加工、輸送、組立等に係る各要素を列挙する必要がある。このようにして得られた各要素は、以下に示すような分類で構造化しておく、計算結果を様々な観点から集計する際に有効である。

表3-1-1は、「凝集沈澱+砂ろ過」施設を対象とした場合の構造化の一例である。

- 区分：イニシャル，ランニング
- 大分類：土木，機械，電気，建築
- 中分類：沈澱池，ろ過池，排水池等の単位処理プロセスまたは設備
- 小分類：管類，弁類，躯体等、中分類を構成する要素

表3-3-1 調査対象の構造化（「凝集沈澱+砂ろ過」の例）

イニシャルとランニングの区分	大分類	中分類	小分類	
建設 (イニシャル)	土木	沈澱池／ろ過池	管類／弁類，躯体，土工	
		浄水池	管類／弁類，躯体，土工	
		排水池／濃縮槽	管類／弁類，躯体，土工，複合工	
		場内配管	管類／弁類，土工	
		造成工事	管類／弁類，躯体，土工	
		場内整備工事	躯体，土工	
	機械	薬品混和槽	急速混和機	
		薬品注入設備	ポンプ，架台，管類／弁類，計器，貯槽	
		沈澱池／ろ過池	トラフ，フロッキュレータ，ポンプ，汚泥掻寄機，管類／弁類，傾斜板装置，付帯設備，コンプレッサ，ろ過砂／砂利，集水装置，洗浄装置，排水装置，付帯設備，複合工，流入装置	
		排水池／濃縮槽 監視制御／計装	ポンプ，汚泥掻寄機，架台，管類／弁類，給水装置	
	電気	動力／制御	ケーブルダクト，ケーブルラック，高低圧盤，電線，補助継電器盤	
		監視制御／計装	監視操作盤，高低圧盤，電子機器収納盤，電線，計器，高低圧盤，電線	
		受変電	高低圧盤，自家発連絡盤・変圧1次盤，電線，変圧器盤	
		自家発	高低圧盤，電線，発電機	
	建築	沈澱池／ろ過池	建屋	
		排水池／濃縮槽	建屋	
		脱水機	建屋	
		管理棟	建屋	
	運転 (ランニング)	機械	薬品混和槽	急速混和機
			沈澱池／ろ過池	フロッキュレータ，汚泥掻寄機，付帯設備，コンプレッサ，ポンプ
排水池／濃縮槽			ポンプ，汚泥掻寄機，付帯設備，コンプレッサ	
電気		動力／制御	補助継電器盤	
		監視制御／計装	電力	
		受変電	自家発連絡盤・変圧1次盤，発電機盤，主幹盤，受電盤，進相コンデンサ盤，柱上気中負荷開閉器，電源盤，変圧器盤	
		自家発	原動機，自動始動盤，電源盤，発電機盤	

小分類の下層には、「細目」として具体的な資機材の名称及び数量を与える

(2) エネルギー及び二酸化炭素の原単位

二酸化炭素及びエネルギーをLCAの積み上げ法によって算出するに当たり、既存の見解、及び参加企業で独自に実施した検討結果等をもとに、表3-3-2に示す原単位を使用した。

表3-3-2 本研究で使用したエネルギー及び二酸化炭素の原単位の例

項目	エネルギー	二酸化炭素
コンクリート	2.02 MJ/m ³ 1)	62.97 kg-C/m ³ 2)
ダクトイル鋳鉄管	25.7 MJ/kg 1)	0.9873 kg-C/kg 2)
鉄筋	25.7 MJ/kg 1)	0.2563 kg-C/kg 2)
鋼管	25.7 MJ/kg 1)	0.3911 kg-C/kg 2)
電動機	915.5 MJ/kW 5)	22 kg-C/kW 5)
高低圧盤_素材	28.205 MJ/kg 5)	0.401 kg-C/kg 5)
高低圧盤_組立	11.282 MJ/kg 5)	0.120 kg-C/kg 5)
計装設備_素材	67.583 MJ/kg 5)	1.746 kg-C/kg 5)
計装設備_組立	27.033 MJ/kg 5)	0.524 kg-C/kg 5)
監視操作盤_素材	30.699 MJ/kg 5)	0.454 kg-C/kg 5)
監視操作盤_組立	12.28 MJ/kg 5)	0.136 kg-C/kg 5)
RC工場	9266.3 MJ/m ² 3)	192.5 kg-C/m ² 3)
RC事務所	12523.9 MJ/m ² 3)	247.6 kg-C/m ² 3)
電力	9.45 MJ/kWh 1)	0.105 kg-C/kWh 4)

- 1) 電力中央研究所：発電のプラントのエネルギー収支分析，1991
- 2) 空気調和・衛生工学会：地球環境に関する委員会報告書，1995
- 3) 建築学会LCAデータベース
- 4) 環境庁：地球温暖化対策の推進に関する法律に基づく地方公共団体の事務及び事業に係る温室効果ガス総排出量算定方法ガイドライン，1999
- 5) 独自調査

（3）ライフサイクルの期間

本研究の対象とする浄水施設は、表3-3-1で示したように数多くの資機材等で構成されており、また、LCAによる検討では、図3-3-1に示すように建設段階から運転段階まで、施設のライフサイクルが対象となる。こうした様々な特性を有する施設を比較・評価するためには、ライフサイクルの期間、すなわち施設の寿命を定め、年間当たりの値に置きかえた上で比較することが一般的である。本研究のケーススタディでは、法定上の耐用年数を参考にして、表3-3-3に示すライフサイクル期間を定めることとした。

表3-3-3 ライフサイクル期間（各施設の寿命）

分類	ライフサイクル期間
土木	60年
建築	50年
機械	15年
電気	20年

3. 4 浄水シミュレーション

シミュレーションの特徴は、現象や運転をコンピュータによる仮想空間の中で再現し、現象の生起や時間的な推移などを、異なる条件のもと定量的に説明できる点にある。既に産業分野では、この利点が活かされており、化学プラントなどでは、運転の効率化、安全性確保などを目指した、運転計画、自動制御への利用が一般的になっている。

今後は浄水プロセスについても、外乱や動的な条件変動への応答評価など、細部の分析および理解に基づく運営が重視される方向に向かうと予想され、シミュレーション活用への期待は高まると考えられる。

本報告では、浄水プロセスシミュレーションの進展に役立つよう、現状の技術で対応が可能な範囲、および今後の課題を示すことを目的に、全体的な状況分析、代表的処理単位操作でのモデル例の解説、および関連する事例の紹介を行う。

なお、本文中では現象をモデル化しコンピュータ処理する技術一般を示す場合には「シミュレーション」という名称を、一方制作者以外が比較的容易に扱えるインターフェイスを備えたシステムとしては「シミュレータ」という名称を用いて区別する。

3. 4. 1 浄水処理とシミュレーション

(1) 水関係の事業におけるシミュレーションの意義

1) 一般的な状況

水関係の事業でも他産業同様、運転管理負担、環境負荷、経済性などにかかわる事業運営の改善、および対外説明責任など事業を取り巻く環境が厳しくなっており、プロセスの定量管理強化が課題として認識されつつある。

そのような状況のもと、上水道の管路施設においては、データベースとしてGIS(Geographic Information System:地図情報システム、マッピングシステム)を利用することによる、圧力分布管理、残塩管理、赤水予測など配水系を対象としたシミュレーションなどの取組みも行われている。

しかし、浄水処理につき国内をみた場合、一連の浄水プロセスを網羅し、実務への利用段階に到達したシミュレータというものは存在していない。そのような実情であるが、浄水プロセスについての理論的な研究は多くの実績があり、個別処理段階としてはシミュレータレベルにまで発展した実績も存在している。

一方、水関係のもう一つの大きな事業である下水道では、量・質両面とも比較的積極的に取組みが進められているといえる。

まず、量管理面では水理モデル利用した雨水・下水流入量のシミュレーションシステムが実用化されている。この面では、GISを利用した広域流出解析のシステムも開発が進んでおり、運転管理などへの適用が検討されている。

さらに、下水道においては質管理面でIWA（国際水協会）提案のASM（活性汚泥数学モデル）に基づいたシミュレータも実用化されており、処理システムの計画、設計、運転の各段階へのシミュレーションの適用が検討されつつある。

以下に各事業での現状について、若干具体的な状況を示す。

2) 上水道における管網解析を用いたシミュレーションについて

管網解析を用いた圧力分布や水量の適正化は、上水道にコンピュータが導入された初期段階から最も効果が期待される用途の一つとして認識され、積極的な取組みが行われてきた。

特に、コンピュータ性能の向上により GIS に関心が集まった時期には、その重要なアプリケーション技術として機能が向上されている。

このような事例として、水道技術研究センターにおいても、「報告書 No53 震災時水道施設復旧支援システム開発研究」で、災害シミュレーションの中心技術として報告されている。

また、最近ではコンピュータの性能向上が著しく、大容量計算の短時間処理が可能となったため、従来では難しかった現場制御への展開を目指した研究および開発も増えている。このような事例としては、動的な水理現象と制御の関係をシミュレーションし現場制御へ適用する方式、あるいは渇水時の運用のようなきめ細かな制御を目指す方式などが検討されている。

3) 海外での浄水シミュレータ事例

海外においても浄水プロセスに関するシミュレータは実績が少ない。しかし、管理の定量的評価への要求が必要となりつつある状況からか、最近になってシミュレータとして販売されるものが出現してきた。

下記の二例は、その存在が公開されているものである。

WRc 社 OTTER 浄水処理全般をカバーしたシミュレータ。

<http://www.mpassociates.gr/software/environment/otter.html>

ENVIROMEGA 社 WatPro 消毒および副生成物などを主目的としたシミュレータ。

<http://www.enviromega.com/watpro2.htm>

いずれも、ホームページレベルの紹介資料の範囲では、解析に利用した原理あるいはモデルの構造は公開されていない。シミュレーションの結果を正しく理解し利用するには、モデルを理解していることが不可欠と考えられるので、この点は注意する必要がある。

4) 下水道における IWA-ASM（活性汚泥モデル）に基づくシミュレータについて

下水道分野においては、IWA-ASM（活性汚泥モデル）が活性汚泥モデルの世界標準として国際的に認知されている。IWA-ASM は 1986 年に国際水質汚濁研究学会（IAWPRC: 現在は国際水学会 IWA）のタスクグループが公表した活性汚泥モデル ASM1、それ以降の ASM2（1995）、ASM2d(1999)、ASM3(1999)からなる。

IWA-ASM によるシミュレーションソフトも開発されており、ヨーロッパを中心に下水処理場への適用事例が増加し、既に、設計・運転管理の実務の場において利用されている。

日本国内では実務レベルでの利用は未だ見られないものの、研究レベルでは平成 11 年 11 月から平成 13 年 3 月まで実施された日本下水道事業団と東京大学大学院との共同研究など活発な取組みが行われている。

シミュレータを国内で実用化するためには、日本国内の処理施設に対応した数値解析条件の設定や測定技術の向上という課題が残っており、実データの収集と算出されたシミュ

レーション結果との比較による、初期条件および計算条件の検討、測定方法の検討が行われている。

研究発表会でも多数の研究結果が報告されており、例えば平成15年の下水道研究発表会では特定課題セッションが設けられ、12テーマが報告されるなど、関心の高さが続いている。

近い将来、シミュレータを用いた、設計支援、事前評価、安定した運転管理、活性汚泥モデルの教育ツール等が、下水処理分野で活躍するものと推察される。

（2） 浄水処理の持つ特性とモデル化に伴う課題

すでに述べたように、現状では浄水処理のシミュレーションに関する動きはあまり活発ではないが、その原因として以下のような浄水処理の持つ背景が考えられる。

1) 評価指標決定が困難であること

浄水プロセスの主要な対象である不溶解成分として、鉱物性のものと藻類等有機物性のものがあり、その光学的特性に差がある。そのため、個別成分の光学特性が解明されたとしても、濁質成分が明らかでない限り、基本的指標である濁度による処理状態の判定が難しく、解析的に取組む基本条件が欠けている。この状況は、粒子径および個数分布を計測するカウンタ方式を用いても残るため、光学的な評価基準を用いることの共通課題である。

溶解成分に関しても、鉱物イオンと有機物があり、これに関しても処理指標を確定することが難しい。

2) 濃度条件が厳しいこと

現在の浄水プロセスでの質管理では濁度0.1度以下のような極小な絶対値での評価が必要とされており、定量的な妥当性を確保できるモデル化は容易でない。

3) 特別なモデル化を要する

装置構造の精密な再現までは考えず、現象の基本特性のみを対象とした場合でも、基本反応について、一般の汎用化学工学シミュレータ、あるいは数値解析ソフトウェアによるモデル化をそのまま適用できない現象が存在する。例えば、初期フロック形成における凝集剤の効果、ろ過層構造の濁質捕捉特性への影響表現など。

反応についてモデルが実現できたとしても、実プロセスでは処理機能に占める流体力学的現象の影響が大きく、適切な物理モデルを用いないと定量的に大きな影響を及ぼすと考えられる。これについては、汎用CFD(Computational Fluid Dynamics)ソフトウェアを用いて取組む方法が考えられるが、汎用システムだけで浄水プロセスで課題となる流れの状態を表現することは難しい。例えば、ろ過層内の流れなど。

鉱物質と藻類のような多成分系の存在への対応は、まず単一成分での解析が全て進展してからでないと着手困難である。

（3） 浄水プロセスに関するシミュレーション要素について

前項に示すような課題点は存在しているが、浄水処理の単位操作に関する基礎研究は長年にわたり続けられており、すでに多数の研究結果が存在しており、教科書などからも比較的容易に参照できる。また、専門書あるいは水道協会雑誌論文などから、より詳しい情報を得る事も可能である。

本節では、このような状況を踏まえ、今後の展開に利用できるように、浄水プロセスの処理段階ごとにシミュレーションにかかわる基礎情報を表3-4-1および図3-4-1に整理した。

整理は以下の項目により行っている。

- 1) ある処理段階を構成する現象がどのような要素から成り立つか。
- 2) その現象を数値モデル化する理論が存在するか。
- 3) 当該現象の結果となるものは何か。
- 4) シミュレータとしての実現がなされているか。

表3-4-1の情報から判断する限りでは、日本国内においてシミュレータの段階まで到達しているものは凝集沈殿処理とオゾン処理と考えられる。

そのような状況ではあるが、その他の要素についても、主要なプロセスについて基礎理論は存在しているので、必要に応じこれらを組み合わせ、一連の浄水プロセスをモデル化することは可能と考えられる。

表3-4-1 日本国内での浄水プロセス理論とシミュレーション要素について

プロセス名称	シミュレーション要素	基礎理論の有無	出力される項目	参考：シミュレーションに適用可能と考えられる公式（土木学会 環境工学公式・モデル・数値集に掲載のもの）	水道用シミュレータの有無
凝集	マイクロフロック形成	○	粒子径分布	凝集速度式	○
	フロック成長	○	粒子径分布	凝集速度・フロックの破壊速度	○
	フロック密度	○	粒子径とフロック密度の関係	フロックのフラクタル次元と密度	-
沈殿	粒子沈降速度	○	粒子径と沈降速の関係	単粒子自由沈降速度式	○
	粒子除去率	○	粒子径分布	全除去率R	○
	流速・濃度分布を考慮した解析	○	沈澱水濁度	-	-
	沈澱池汚泥濃度	○	汚泥濃度	-	-
	汚泥の堆積	○	堆積汚泥量	-	-
	汚泥の排泥	○	排出量	-	-
	気泡の生成	○	気泡量	析出空気量・気泡径・気泡の浮上速度	-
浮上分離	気泡とフロックの接触付着	○	付着粒子数	付着粒子数	-
	集塊粒子の浮上速度	○	浮上速度	気泡-フロック集塊粒子の浮上速度	-
	浮上に必要な気泡量	○	気泡量	気-固比・浮上に必要な気体体積濃度とフロック径の関係	-
	浮上スラッジの処理	-	排出量	-	-
	濁質の抑留	○	ろ過水濁度	抑留の基礎式（清澄化方程式・連続方程式・ろ過係数）	-
急速砂ろ過	損失水頭変動	○	損失水頭	損失水頭の式	-
	生物膜モデル	○	生物膜内基質濃度分布	基質除去モデル、生物膜内の基質濃度分布、生物膜内の分子拡散	-
生物接触	生物膜型反応槽内の物質収支	○	反応槽内物質濃度	生物膜型反応槽内の菌体収支式、生物膜型反応槽内の基質収支式	-
	生物膜の増殖モデル	○	生物膜厚	生物膜の増殖モデル式	-
	自己分解速度	○	溶存オゾン濃度	-	○
オゾン接触	ラジカル生成	○	溶存オゾン濃度、ラジカル濃度	-	-
	臭素酸生成	○	溶存オゾン濃度、臭素酸濃度、臭化物イオン濃度	-	-
	臭気物質分解	○	溶存オゾン濃度、臭気物質濃度	-	-
	有機成分の酸化速度	○	溶存オゾン濃度、有機成分濃度	-	○
活性炭吸着	有機物等の吸着	○	吸着量、破過挙動	固定層吸着の物質収支式	-
膜ろ過	濁質の抑留	○	阻止率	阻止率、膜透過の輸送方程式（これらは、直接濁質の抑留を計算するものではないが、その基礎となる式である）	-
	ファウリングによる膜差圧	○	膜差圧、濃度分極	濃度分極、固液分離の基礎式、フラックス、膜差圧、温度補正係数と水の粘性係数、膜性能の変化、定圧清澄濾過理論	-
消毒・酸化理水	前または中塩素注入	○	注入量、酸化時間	C T値	-
	後塩素注入	○	残留塩素	配水管内残留塩素濃度予測式	-
	UV照射強度	○	照射強度、紫外線照射量、消毒性能予測	照射強度の算定式、照射量の算定式、消毒性能予測式	-

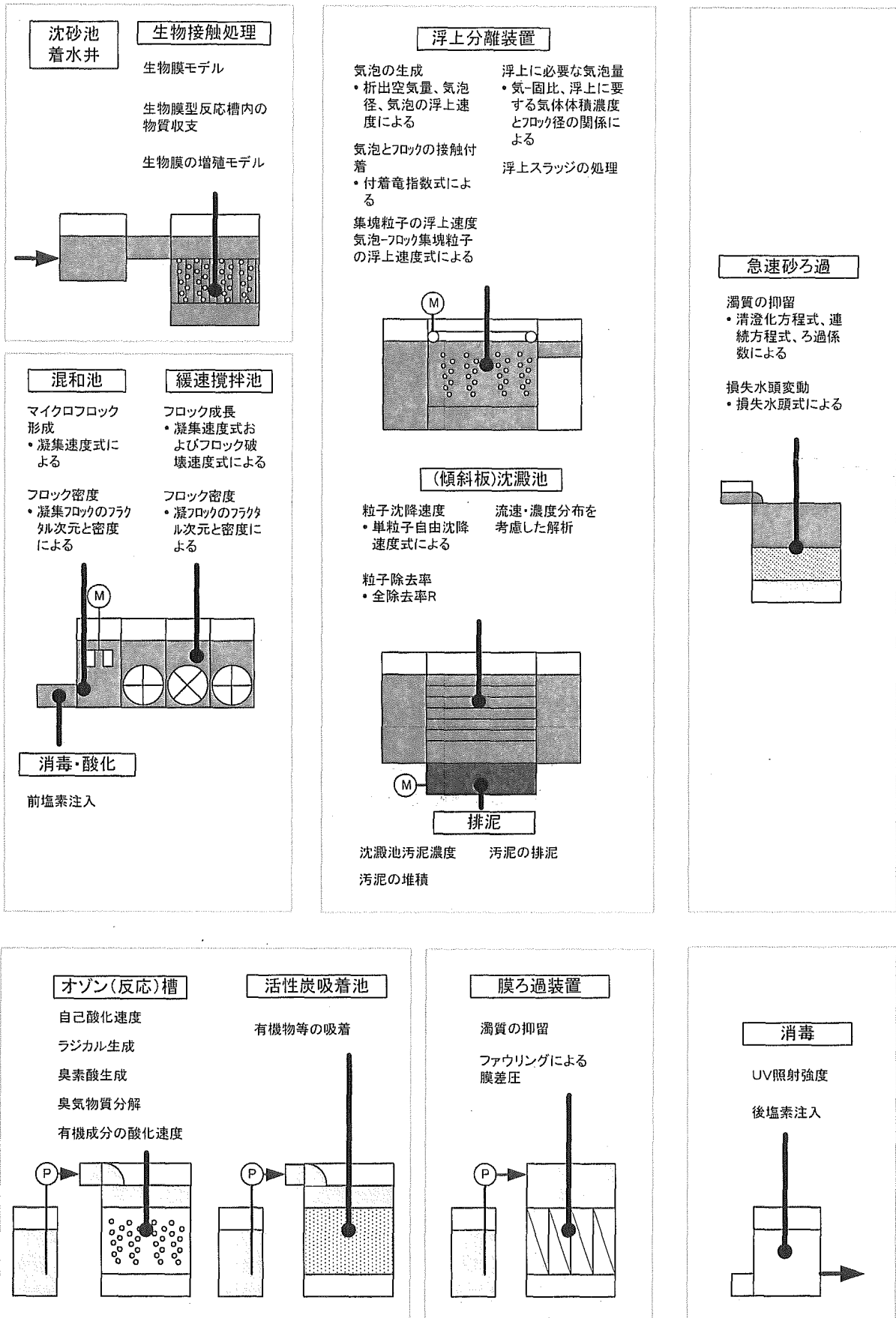


図3-4-1 浄水プロセス単位操作とシミュレーション要素の関係

3. 4. 2 凝集に関する事例紹介

(1) 凝集の基礎式

本項では、シミュレーションの具体的な構成要素を知ることがを目的に、日本国内での研究例が比較的多い凝集現象を中心に、基礎理論とモデル化の紹介を行う。

凝集反応の一般式としては、衝突とそれに続く一体化によるフロックの形成を示す凝集速度式と、外乱によるフロック破壊を示す式がある。以下に環境工学公式・モデル・数値集の表現に基づき、これらの式を説明する。¹⁾

凝集速度式：

$$r_c(w) = \frac{1}{2} \int_0^\infty \alpha \beta_c(\bar{w}, w - \bar{w}) n(\bar{w}) n(w - \bar{w}) d\bar{w} - \int_0^\infty \alpha \beta_c(\bar{w}, w) n(w) n(\bar{w}) d\bar{w} \quad \dots (3.4.1)$$

ここに、 $r_c(w)$ ：固相部の質量が w のフロック粒子が生成される正味の凝集速度（総括凝集速度）、 α ：衝突合一確率、 $\beta_c(\bar{w}, w - \bar{w})$ ：固相部の質量が \bar{w} と $w - \bar{w}$ のフロック粒子同士の凝集係数、 $n(\bar{w})$ 固相部の質量が \bar{w} のフロック粒子の個数濃度

凝集速度式は凝集 (coagulation) ・ フロック形成 (flocculation) によってある大きさのフロック (floc) 粒子が生成または消滅する速度を示す式である。凝集反応下では、ある大きさのフロック粒子は、より小さなフロック粒子同士の凝集によって生成され、また同時に他のフロック粒子との凝集による大きなフロック粒子への成長により消滅している。この速度は、式 (3.4.1) においてそれぞれ右辺第1項と第2項によって表現されている。

凝集係数は、式 (3.4.1) では固相部質量 \bar{w} で示されているが、基本的に球体2粒子間の衝突頻度から考えられており、粒子の衝突に有する運動要因ごとに定式化されている。浄水処理の凝集現象過程では層流と乱流についての式を適用する。

$$\text{層流} \quad \beta_s(d_i, d_j) n_i n_j = \frac{1}{6} \frac{du}{dy} (d_i + d_j)^3 n_i n_j \quad \dots (3.4.2)$$

$$\text{乱流} \quad \beta_T(d_i, d_j) n_i n_j = \frac{1}{6.18} \left(\frac{\varepsilon}{\nu} \right) (d_i + d_j)^3 n_i n_j \quad \dots (3.4.3)$$

β ：2粒子間の凝集係数、 d_i ：基本粒子が i 個集合したフロック粒子の粒径、 n_i ：基本粒子が i 個集合したフロック粒子の個数濃度、 du/dy ：速度勾配、 ε ：エネルギー消費率、 ν ：動粘性係数

フロック破壊式：

$$r_B(w) = -n(w)S(w) + \int_w^\infty \frac{\bar{w}}{w} n(\bar{w})S(\bar{w}) \frac{\partial B(\bar{w}, w)}{\partial w} d\bar{w} \quad \dots (3.4.4)$$

ここに、 $r_B(w)$ ：固相部の質量が w のフロック粒子が破壊によって生成する速度、 $n(w)$ ：固相部の質量が w のフロック粒子の個数濃度、 $S(w)$ ：破碎選択関数（固相部の質量が w のフロック粒子1個当たりの破壊確率頻度）、 $B(\bar{w}, w)$ ：破碎関数（固相部の質量が \bar{w} のフロック粒子が破壊したときに、質量が w 以下となる粒子の質量全量の割合を示し、 $w=0$ で0、 $w=\bar{w}$ で1となる関数により表現する）

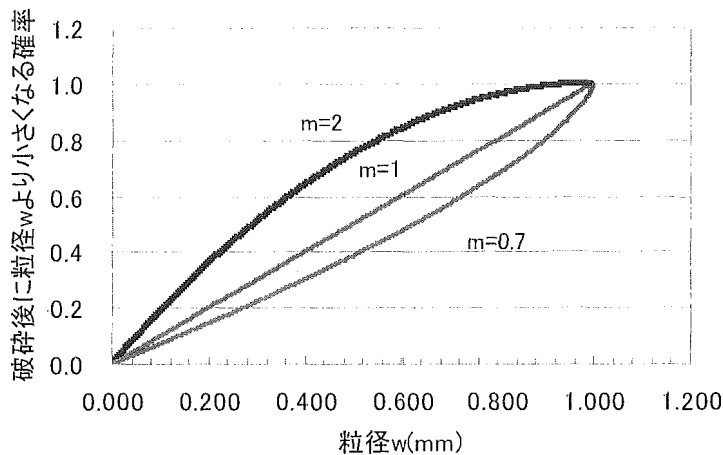
凝集が乱流下で行われる場合、生成したフロック粒子が高速度変動場に移動した際、フロックの強度が形状を維持するに足るものでなければ破壊が生じる。式(3.4.4)は破壊によってある大きさのフロック粒子が消滅または生成する速度を示す。右辺第1項は、固相部質量 w のフロック粒子個数濃度と破壊確率頻度の積により固相部質量 w のフロック粒子が破壊される速度を表現している。右辺第2項は、固相部質量 w より大きなフロック粒子 \bar{w} が破壊されて、固相部質量 w のフロック粒子になる速度を表現している。固相部質量 \bar{w} のフロック粒子の破壊速度は、第1項と同様に個数濃度と破壊確率頻度の積で表される。そして、破壊された \bar{w} のフロック粒子の質量の累加特性が $B(\bar{w}, w)$ で表現されるので、破壊された1個の粒子から生成される、固相部質量 w のフロック粒子の占める質量の比率は $\frac{\partial B(\bar{w}, w)}{\partial w} d\bar{w}$ となる。また、破壊された固相部質量 \bar{w} のフロック粒子から生成される固相部質量 w のフロック粒子基準の個数に変換するためには、 \bar{w} のフロック粒子1個から生成する w の比率に \bar{w}/w を乗ずる必要がある。さらに、破壊によって固相部質量 w のフロック粒子になるものは、固相部質量 w 以上のフロック粒子を考えるので、当該生成速度を得るには、固相部質量 $w \sim \infty$ までのフロック粒子に関して積分する。

$S(w)$ としては、フロック粒径基準で $\alpha G^{an} d^{bn}$ などの実験式がまとめられている。

α, an, bn : 定数、 G : G値、 d : フロック粒径

また $B(\bar{w}, w)$ に関しては定数 m を用いて、 $(w/\bar{w})^m, 1 - (1 - w/\bar{w})^m, \frac{1 - e^{-m\frac{w}{\bar{w}}}}{1 - e^{-m}}$ などが提案されている。

以下に、破碎関数およびそれに基づく破壊後の粒径分布計算例を示す。



$$B(\bar{w}, w) = 1 - (1 - w/\bar{w})^m, \quad \bar{w} = 1.0 \text{ mm のときの破碎関数}$$

図3-4-2 破碎関数例

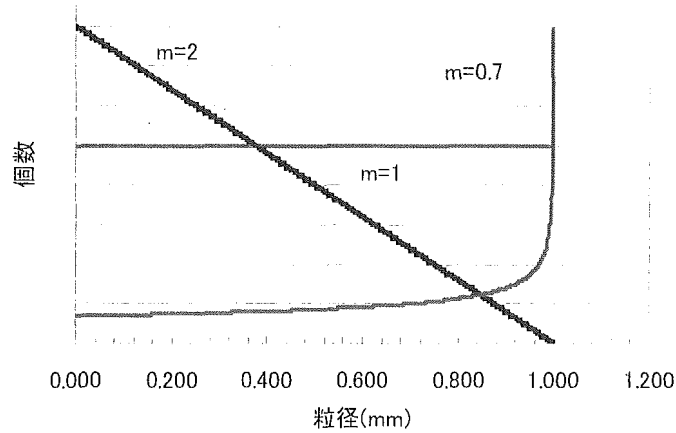


図3-4-3 破壊後の粒径分布

例えば、図3-4-2および図3-4-3から下記の特性が判る。

$m=1$ のとき、破碎関数は直線になり $\bar{w}=1.0\text{mm}$ の粒子が破碎され、それ以下の粒径区分に均等に分配される。

$m=2$ のとき、破碎関数は上に凸の曲線になり、破壊後の粒径分布は小さな粒径粒子が多くなる。

$m=0.7$ のとき、破碎関数は下に凸の曲線になり、破壊後の粒径分布は破碎前の粒径 1mm に近い大きな粒径粒子が多くなる。

なお、現象を支配する基礎式は、微小ブロックが形成される段階のマイクロブロック化の現象と、ブロック成長段階で同じであるが、基礎式の各項の内容および項自体の影響度が異なるため、それぞれに適した表現手法あるいは選択を行うことが必要である。

(2) フロック形成池シミュレーション例²⁾

以下に、フロックの成長と破壊が同時に推移するフロック形成池の現象につき、前項の基礎式を用いた下記の動力学式 式(3.4.5)により実施した粒度分布予測の例を示す。

$$V \frac{\partial n(w,t)}{\partial t} = Qn_0(w,t) - Qn(w,t) + \frac{1}{2} \int_0^w \alpha \beta(\bar{w}, w - \bar{w}) n(\bar{w}, t) n(w - \bar{w}, t) d\bar{w} - n(\bar{w}, t) \int_0^\infty \alpha \beta(\bar{w}, w) n(\bar{w}, t) n(w, t) d\bar{w} \cdots (3.4.5) - S(w)n(w,t) + \int_w^\infty n(\bar{w}, t) S(\bar{w}) \frac{\partial}{\partial w} B(\bar{w}, w) d\bar{w}$$

式(3.4.5)の、右辺第3、4項目がフロックの成長速度、第5、6項目が破壊速度を記述している。

- V : フロック形成槽の容積
- Q : 流量
- $n(w,t)$: 固相部質量の粒子数密度
- α : 粒子衝突合一確率
- $\beta(\bar{w}, w)$: 凝集係数
- w : 粒子固相部質量
- t : 時間
- $S(w)$: 破碎選択関数
- $B(\bar{w}, w)$: 破碎関数

以下に、この事例での計算条件を示す。

流れは完全混合の槽列モデルとした。

入力は粒度分布および流量、操作変数はG値としている。

凝集係数は、Saffman の式 $\beta_T(d_i, d_j) = 2.29 (\epsilon / \nu)^{1/2} (\frac{d_i + d_j}{2})^3$, Levich の式

$$\beta_T(d_i, d_j) = 12.94 \epsilon^{1/3} (\frac{d_i + d_j}{2})^{7/3}$$

を内挿したものとした。

成長に伴うフロック内間隙の増加、およびフロックの質量基準、粒径基準の変換には、フロック密度関数を用いた。フロック密度関数とフロックの破壊に関するパラメータは実験から決定した。フロック密度関数 $\rho_e = a \cdot d^{-Kp}$ の係数は $a = 0.0001 \text{ g/cm}^2$, $Kp = 1.0$ と固定した。

破碎選択関数は $S(w) = a_2 w^{bn}$, 破碎関数は $B(\bar{w}, w) = (w/\bar{w})^m$ を用いた。パラメータは、 $bn = 6$, $m = 6$ を用いた。 a_2 は、G値に対応しており、実験に基づき、G値 32 s^{-1} では $a_2 = 5 \times 10^6$ 、G値 18 s^{-1} では $a_2 = 1 \times 10^6$ 、G値 9.6 s^{-1} では $a_2 = 5 \times 10^5$ とした。

これらの条件に基づくフロック粒径分布計算の結果と、実測値の比較を図3-4-4に示す。図中、実線が計算結果を、○印が実測値を示す。この例により、上記の設定に基づくシミュレーションにより、フロック形成池での現象を再現可能なことが判る。

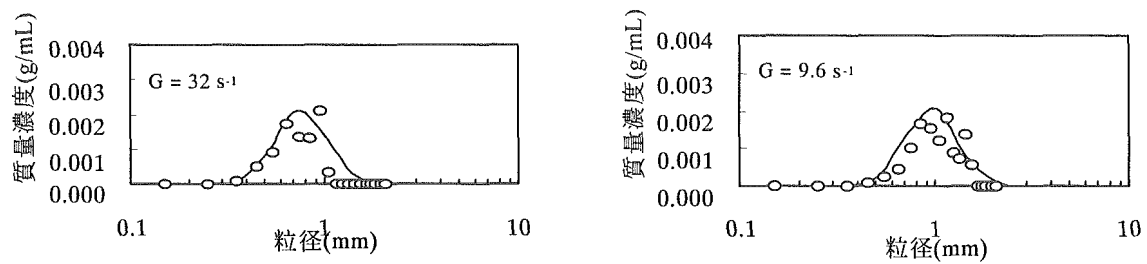


図3-4-4 粒径分布の計算例

最後に、(1)で説明した環境工学公式・モデル・数値集での一般的条件と、この計算での条件とを表3-4-2に比較する。

表3-4-2 本シミュレーションの特徴

プロセス	現象	本シミュレーションモデル	環境工学公式・モデル・数値集	
混和池	マイクロフロ ック形成	実験での検討は未実施だが、フロクの成長のみと仮定して対応可能。	<ul style="list-style-type: none"> ・凝集速度式 (フロク形成基礎式) 2粒子の衝突を基に、ある大きさの粒子の生成・消滅速度を記述。 	<ul style="list-style-type: none"> ・衝突合一確率 衝突後の粒子形態 (0~1) 0: 合一しない 1: 合一する ・凝集係数 衝突頻度を記述 (粒径、層流・乱流状態で多数の実験式有)
フロク形成池	フロク成長	<ul style="list-style-type: none"> ・公式集の凝集速度式を使用 衝突合一確率は1で固定。凝集係数は、層流と乱流に対する式を一つに内挿し、粒径とG値の関数とした。(粒径が大きくなる方向に作用) 		
フロク形成池	フロク破壊	<ul style="list-style-type: none"> ・公式集の破壊速度式を使用 選択関数 (2パラメータ)、破碎関数 (1パラメータ) とし、測定した粒径分布から決定する。選択関数の1つのパラメータをG値と関連づけする。PAC注入率、原水水質の影響は、このパラメータに入れる。(粒径が小さくなる方向に作用) 	<ul style="list-style-type: none"> ・フロクの破壊速度式 ある大きさの粒子の消滅と消滅後の粒子の増加速度を記述。 	<ul style="list-style-type: none"> ・破碎選択関数 単一の粒子が破壊される確率 (粒径と粒子に作用する力の実験式) ・破碎関数 破碎後の粒度分布 (多数の実験式有)

(3) 凝集沈殿プロセスのシミュレータ事例³⁾

1) 現象と定式化

(3) では、急速混和池、フロック形成池、及び沈殿池からなる凝集沈殿プロセスを対象としたシミュレータ事例について紹介する。当該シミュレータは、原水濁質と水量、凝集剤注入量、施設構造に基づき沈殿池流出水の濁質粒径分布及び濁度を出力するシミュレーション計算機能と、グラフィック画面などのヒューマンインタフェース機能を有している。

なお定式化している現象は、下記の4要素である。

- ・マイクロフロック形成（急速混和池）
- ・フロックの成長（フロック形成池）
- ・フロックの破壊（フロック形成池）
- ・沈殿池（フロック沈降分離）

以下、各現象の定式化について説明する。

a. マイクロフロック形成（急速混和池）

凝集剤注入操作の良否が直接に反映されるマイクロフロック生成については、一般には数値計算に供するレベルでは定式化されていない。そこで本シミュレータでは、マイクロフロックの形成を計算するために、マイクロフロック形成確率 α を「マイクロフロックを形成できた原水濁質粒子の割合」と定義した。図3-4-5に概念を示す。

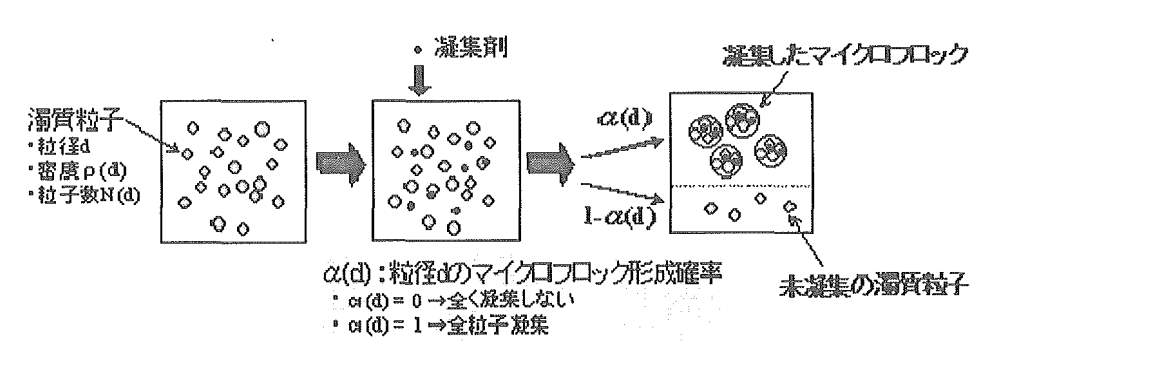


図3-4-5 マイクロフロック形成確率 α の概念

凝集剤注入により濁質粒子がマイクロフロックに形成する確率 α には、①ブラウン運動による粒子衝突、②凝集剤成分金属の水和物による架橋作用、③凝集剤成分金属陽イオンと濁質粒子の荷電中和、の3つが関与するとした。

①ブラウン運動強度 D

$$D(di) = \frac{k (temp + 273.15)}{6\pi \cdot \mu \cdot di} \quad \dots (3.4.6)$$

ここに、 $D(di)$: 粒径 di のブラウン運動強度、 di : i クラスの粒径、 k : Boltzmann定数、 μ : 水の粘性係数、 π : 円周率、 $temp$: 水温

②架橋作用強度 AP

$$AP = \frac{a \cdot al}{CR} \left\{ 1 - \left(\frac{ph_0 - b \cdot ph}{14} \right)^2 \right\} - c \cdot tu \quad \cdots (3.4.7)$$

ここに、AP：架橋作用強度、al：アルカリ度、CR：凝集剤注入、tu：濁度、ph₀：凝集剤最適、ph：急速混和池 pH、a,b,c：係数

③荷電中和強度 ALT

$$ALT = CR_m / tu \quad \cdots (3.4.8)$$

ここに、ALT：荷電中和強度、CR_m：金属量換算の凝集剤注入率、tu：濁度

マイクロフロック形成確率 α は上記の式(3.4.6)(3.4.7)(3.4.8)の相乗作用によって式(3.4.9)として定式化した。このように、マイクロフロック形成の現象を凝集剤注入量、原水濁度(あるいは粒径分布)、水温、pH、アルカリ度を変数とする関数として表現した。

$$\alpha(di) = f(D(di)) \cdot f(AP) \cdot f(ALT) \quad \cdots (3.4.9)$$

$$f(x) = 1 / (1 + \exp(-A \cdot x + B)) \quad \cdots (3.4.10)$$

ここに、 $\alpha(di)$ ：iクラスの濁質粒子 di がマイクロフロックに形成する確率(式(3.4.1)の衝突合一確率 α に相当する)、 di ：iクラスの粒径、 $f(x)$ ： x を変数とするロジスティック関数、 $D(di)$ ：粒径 di のブラウン運動強度、AP：架橋作用強度、ALT：荷電中和強度、A、B：係数

粒径 di の濁質粒子は、マイクロフロック形成確率 α で粒径 dj のマイクロフロックを形成するとし、式(3.4.11)で表した。ただし、形成されるマイクロフロックの粒径分布(体積濃度)の形状は、実測データ等に基づいて初期設定する。

$$N(dj) = N(di) \times di^3 \times \alpha / dj^3 \quad \cdots (3.4.11)$$

ここに、 di ：iクラスの原水濁質粒径、 dj ：jクラスのマイクロフロック粒径、 $N(di)$ 、 $N(dj)$ ：粒径 di 、 dj の粒子数濃度

b. フロック成長（フロック形成池）

衝突合については、式(3.4.12) (3.4.13) (3.4.14) に示す粒子数遷移式を用いた⁴⁾。これは粒径 d_i のフロックが衝突合によって d_j のフロックに成長し、同時に粒径 d_i の数は減少するものである。

$$N(d_j) = \frac{N(d_i)}{1 + t/T} \quad \dots (3.4.12)$$

ただし、 $T = \frac{1}{A \cdot N(d_i)} \quad \dots (3.4.13)$

$$A = 32 / 3 \cdot G \cdot d_i^3 \quad \dots (3.4.14)$$

ここに、 $N(d_i)$ ：衝突合前の粒径 d_i の粒子数濃度、 $N(d_j)$ ：衝突合後の粒径 d_j の粒子数濃度、 t ：滞留時間、 d_i, d_j ： i, j クラスの粒径、 T ：衝突合によってフロック粒子数半減に必要な時間(t/T は式(3.4.1)の衝突合確率 α に相当する。 t/T が大きいほど衝突合確率が大きく、フロックの粒子数が少なく、フロックが大きい)、 A ：凝集機構（大きいほど凝集しやすい；式(3.4.1)の凝集係数 β に相当する)、 G ： G 値

c. フロック破壊（フロック形成池）

所定サイズ以上のフロックは破壊され、それ以下の粒径に均等に分散する。破壊されるフロックサイズは実験的に与える。

4) 沈降分離（沈殿池）

フロックは重力沈降により除去される。フロックの沈降速度は Stokes の沈降速度式を Steinour の実験式にて補正したものである。

$$v(d_i) = \frac{1}{18} \frac{\rho(d_i) - \rho_w}{\mu} \cdot (d_i)^2 \cdot g \cdot \{ \varepsilon^2 \cdot 10^{-1.82(1-\varepsilon)} \} \quad \dots (3.3.15)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \sum_{i=1}^n [d_i^3 \cdot N(d_i)] \quad \dots (3.4.16)$$

ここに、 $v(d_i)$ ：粒径 d_i のフロックの沈降速度、 $\rho(d_i)$ ：粒径 d_i の密度、 ρ_w ：水の密度、 ε ：懸濁液中に占める水の容積率、 μ ：水の粘性係数、 g ：重力加速度、 d_i ： i クラスの粒径、 $N(d_i)$ ：粒径 d_i の粒子数濃度、 i ：粒径クラス ($i = 1 \sim n$)

5) 環境工学公式集との比較

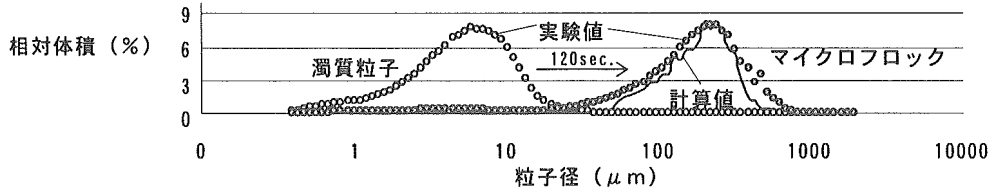
環境工学公式・モデル・数値集¹⁾と本シミュレータとの比較を表3-4-3にまとめて示す。

表3-4-3 本シミュレータの特徴

プロセス	現象	本シミュレータのモデル	環境工学公式・モデル・数値集
混和池	マイクロフロック形成	<p>・<u>マイクロフロック形成と原水濁質粒子の消滅をマイクロフロック形成確率にて定式化</u></p> <p>マイクロフロック形成確率を凝集剤、濁度、アルカリ度、pHを変数とする関数で記述。 (マイクロフロック形成確率は衝突合一確率に相当。)</p>	<p>・<u>凝集速度式</u> (フロック形成基礎式) 2粒子の衝突を基に、ある大きさの粒子の生成・消滅速度を記述。</p> <p>・<u>衝突合一確率</u> 衝突後の粒子形態 (0~1) 0: 合一しない 1: 合一する</p> <p>・<u>凝集係数</u> 衝突頻度を記述 (粒径、層流・乱流状態で多数の実験式有)</p>
	フロック成長	<p>・<u>粒子数遷移式にてフロック成長と消滅を定式化</u></p> <p>粒子数遷移式を滞留時間、粒径、G値により記述。 (粒子数遷移式は、衝突合一確率と凝集係数に相当。)</p>	
フロック形成池	フロック破壊	<p>・<u>所定サイズ以上のフロックが破壊することでフロック消滅と生成を定式化</u></p> <p>破壊フロックがそれ以下の粒径クラスに均等に分配される。</p>	<p>・<u>フロックの破壊速度式</u> ある大きさの粒子の消滅と消滅後の粒子の増加速度を記述。</p> <p>・<u>破碎選択関数</u> 単一の粒子が破壊される確率 (粒径と粒子に作用する力の実験式)</p> <p>・<u>破碎関数</u> 破碎後の粒度分布 (多数の実験式有)</p>
	沈殿池	<p>・<u>単粒子自由沈降式</u></p> <p>Stokesの式をベースにSteinour式で補正</p>	

6) ジャーテスト実験値とシミュレータ出力値の比較

図3-4-6に、本シミュレータによって計算した、濁質粒子から核フロックへの粒径遷移の結果を示す。実験値の粒径分布に対して、計算値がほぼ同様の分布傾向を示していることが分かる。



凝集反応水槽（有効容積3L）
 粒径分布計測装置（COULTER社レーザ回折装置LS230を基に製作）
 粒径範囲0.4~2000 μm を92分級して計測した。
 濁質：カオリン 凝集剤：ポリ塩化アルミニウム

図3-4-6 フロック粒径分布の実測値と計算値

(2) シミュレータの構成

急速混和池、フロック形成池、沈殿池の施設構造条件と、原水流入条件と、凝集剤注入条件からなる凝集沈殿プロセスを対象に、想定した原水流入条件、設計緒元、および運転条件に基づいて凝集や沈降を数値計算する構成としている。シミュレータの構成を図3-4-7に示す。

シミュレータはJavaアプレットで作成されているので、IE（Internet Explorer）などのブラウザを有するPC上で動作可能である。

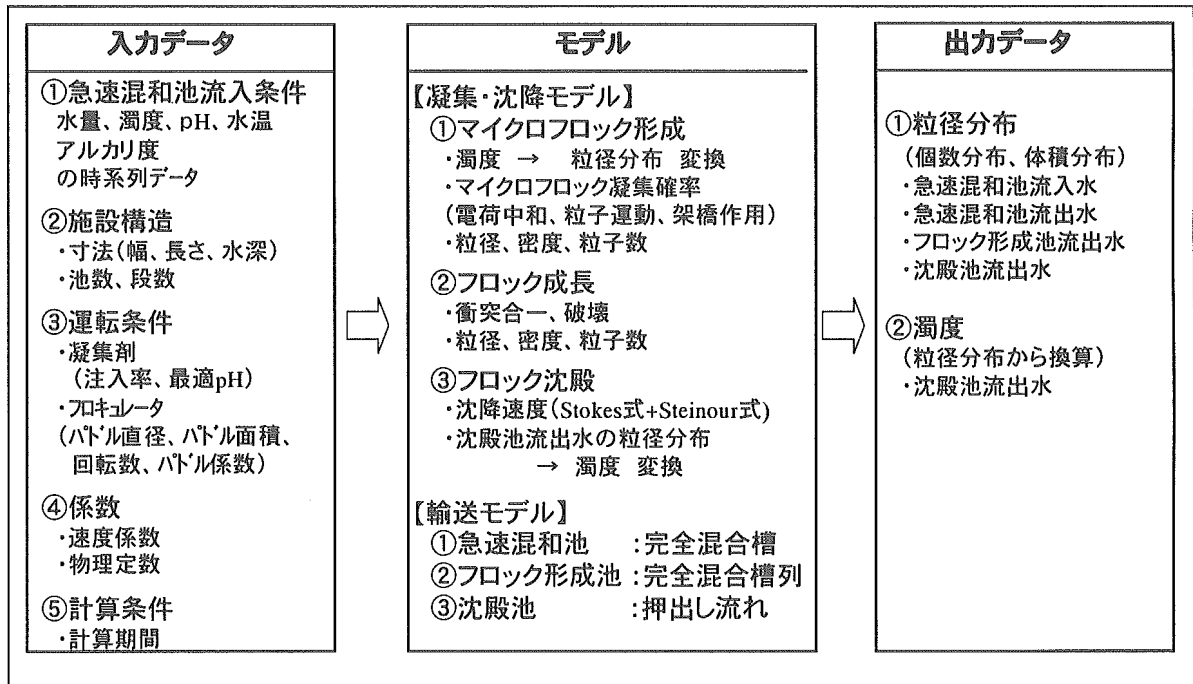


図3-4-7 シミュレータの概要