

## 環境制御指標としての水質マトリックス

Water quality matrices as an index  
for controls of water environments

北海道大学 工学部 衛生工学科

・丹保 壽仁, 魚井 翼

### I. はじめに

現今の高活動密度地域の都市群における個々の都市の水代謝系の施設群は単にその都市内におけるサービスの形態・レベルを定める: とつても地域水質源系の質・量の時空間分布との関連を持たずして議論を行うことが出来ず、都市用排水施設系は地域水環境系の一環として相互干渉をしつつその形態・規模に大きな制約を受けてくる。このような状況下での都市用排水系の設定は従来のことき先行設定された都市計画諸元に基づく直線的な整備計画によつてはなし得ず、都市諸元を決する重要な制御因子として水系を他の諸元と同一の制御平面に導入した都市計画とならざるを之ない。したがつて水環境施設系の設定も都市計画の様々な諸元との交互作用を明らかにしうる因子で内蔵した多元的なものでなければならぬ。多元的な用排水施設系の設定はその前提として出来ただけ多くの水質・水量制御のための互換・補償的システムを用意しなければならず、そのためには水質変換の手法、評価の方式が充分に用意されなければ画餅に終る。在來の計画論はややもすれば古典的水質制御・評価指標をそのまま用いて高度な水代謝系を論ずるきらいがあり、新しい多元的な水利用になじむ水質制御指標の創出が必要となる。

都市内部から見た水代謝施設群の形態・規模の設定が地域水環境の質・量から大きな制約を受けると云うことを裏返すならば、高活動密度地域における自然環境下の水の状態も相互干渉する人工の用排水系の形態・規模に大きく支配されることを意味する。現今の中市・産業活動の盛んな自然水域の多くはこのような状況下にあると考えてよい。このように人為的汚濁負荷量が天然のそれに対して圧倒的に大きく水量も充分でない水質ヒシテリシスを持って水環境を論ずる場合には、自然水域での水質の変化速度・変化ギャップに比してはるかに大きな値を持つ水処理系を環境の質制御手法の中心にすえねばならず、自然水域での水質変化は水質制御要素として期待するよりはむしろ他系との交互作用による汚染伝ばんの諸要因として扱い、一過型の自浄能としてよりはむしろ積分型の危険要因の一部として検討を加える方向を毎當と考へる。特に活動密度が高く、水源より河口までの距離の極めて短い河川に立地していき我が國の諸都市域では流下水塊の自浄作用を制御の一環に組み入れうる場合ほ多少ないと思われる。特に高次下水処理の導入が行なわれるような水環境系では自然河川での自浄作用に対する期待をほんとしないことが前提となると考へられるので人工の水質変換系の持つ水環境制御への重みは極めて大きい。

さうに多くの水質因子の内現在の水質変換技術の能力では充分な制御の保証しえないものもあるので、制御を行う水環境系の境界をなるべく小さくおさえて、規制によってヒシテリシスから自由な水域を出来ただけ多く確保するためにも水質の多段・多元利用が計られねばならない。

多元・連鎖型の水環境系を扱って行く場合のフロー、レベル、オペレーションの3者とそれを評価するための指標の内、量的なフローとレベルに力点をおく側からの評価は未石うの努力もあって漸く締につきつつある。一方質的なオペレーションに力点をおく側からの多元・連鎖系へのアプローチはほとんどなされておらず、質的面からの評価のための基礎を全く欠いたまま新しい系の論議が行なわれている状況である。すなわち、リンクされ不可分の水質系として運用された場合に同一の評価基準に立たねばならぬ用排水系や自然水域の水質指標（表示）に一貫性がなく、在来の独立な系のそれそれにて最も有用と考えられる主水質因子（他の因子は部分省略されている）を示す指標が統一なく用いられたり、またある系の主指標であったものを無理に借りて統一使用したりしたために有用性に欠ける場合が少ない。系が多元化し複雑に連なる、であれば水質因子の仕事な部分省略は系の評価を不能にするから、必要最少限の水質情報を与える統一使用しうる水質指標の新たな確立が必要となる。また、在来の水質指標では水質の制御性に対する情報をほとんど持たない水質状況の表示に止まつており、水質変換を水環境制御の中心にえた系の水質指標としての役割をはたさない。したがつて、水環境制御のための指標は施設系・自然水域を通じて有用であり、かつ制御のための変換性の評価を内蔵し、さらに水環境制御のための水量、コスト等の他の指標と連携を持つものでなければならぬ。このような有効な水質表示の方式をいかに創出するかとは困難であるが、その一つの試みとして次に述べようとする水質マトリックスを提案してみたい。

## II 水質マトリックスによる水質状態、制御性の表示

高活動密度地域における水環境の質制御の中心は水処理系であるからその処理性を個々の処理プロセスならびにプロセスの合成されたものについて評価しておかねばならない。このような水質の評価を処理性との関連で行なう研究資料は極めて乏しく、その適切な表現方法と評価の手順を確立しなければならない。

水質の評価を処理性に結びつけて一般化するための最も粗な見方の一つは丹保<sup>が</sup>示した表-1のような粒径による不純物の分類と処理性の対応である。粒子径が数ミリメートル程度までは処理性の判断を1次近似的な粗さで粒径によって行なうが、分子量が数千程度以下になってくるとその化学的

性質が極めて重要になってくる。したがつて処理性の判断、さらに処理系を主水質制御要素とする水環境系の水質評価は不純物寸法分布と重ね合わせて必要最少限の化学的水質因子の両者によつてなされねばならない。

このような水環境の制御を前提として水質の表示として図-2、図-3に示すような水質の諸マトリックスを考えていよう。ここに簡単にこれら水質マトリックス群を構成する水質表示マトリックス

表-1 水中に存在する不純物の粒径による分類と対応する処理の手法			
I 粒子の直径	上級分類 よどみ度上 の分類	II. 処理手法	
		III. 物質的 性質の分類	IV. 分離 と除去、分解 と無害化
1A <sup>-1</sup> $10^{-9}$ cm	4 浮遊 状態	水分子、单能分子 3. イオン、無機 化合物 無機酸 無機塩 無機物質 など	イオン交換、ガラス 交換、沈殿、蒸留 吸着
1μm $10^{-7}$	3 半固定 状態	微生物 活性汚泥 細菌 藻類 原生動物 など	微生物 活性汚泥 細菌 藻類 原生動物 など
$10^{-5}$	2 半固定 状態	微生物 活性汚泥 細菌 藻類 原生動物 など	微生物 活性汚泥 細菌 藻類 原生動物 など
$10^{-6}$	1 固定 状態	微生物 活性汚泥 細菌 藻類 原生動物 など	微生物 活性汚泥 細菌 藻類 原生動物 など
1μ $10^{-4}$	シルト粒子	ろ過	ろ過
$10^{-3}$	砂粒子	逆浸透 活性汚泥 スクリーン	逆浸透 活性汚泥 スクリーン
$10^{-2}$	1cm $10^{-1}$	沈殿、浮上	沈殿、浮上
$10^0$			70-70網版

と処理マトリックスの構成概念を若干説明してみよう。

水質表示マトリックスの各列は適当な方法（機械的・光学的粒度分析、ゲルクロマトグラフ分級など）によって分級された不純物のクラスをとる。この級分剖の幅の設定は対応処理法（水質因子の挙動）を考えて処理マトリックスと級をそろえ環境における水中不純物の一般的な粒度分布を考慮しつつ設定する。また各行は代表的な水質因子についての値を並べるが、この水質因子はなるべく総合因子を重複に採用し、不純物粒子寸法別的情報の導入と総合因子間の数値比を考慮

（後述）する事によって、測定すべき水質因子数を出来るだけ少くおさえるように配慮する。この場合の水質因子の選択にあたっても充分に処理のメカニズム、環境における影響のメカニズムを考慮して必要な因子の種類を定めねばならない。またこの水質因子をどのような順序で配列するかは水質変換プロセスの組み方と密接な関連があり、後述するような汎用的水処理の対象になりうるような水質因子を上位におき通常多用される処理システム（プロセス）でのグルーピングがよく反映されるような配列をとて、処理マトリックスとの対比が容易なように工夫する。

処理マトリックスはこのような水質マトリックスの小マトリックスであり、考える処理法によって水質表示マトリックス要素  $C_{ij}$  がどれだけ除去されるかを示すもので、粒子径と水質因子によって定まる行別の要素を除去率  $R_{ij}$  で示したものである。除去率は一般に濃度の閾数であり、さらに同一水質要素であっても濃度が異なれば異った処理プロセスの適用が必要になってくることもあるので処理マトリックスは濃度の軸をさらに加えた3次元のマトリックスとして示されその要素は除去率  $R_{ijk}$  で示されることとなる。実際に処理マトリックスを設定する場合にこの濃度軸のクラス幅をどの程度にとるかについては各対応処理法の適用濃度範囲が必ずしも一様ではないので連けいする処理法のマトリックスとの整合に不都合がないような配慮をしつつ個々のプロセスに適した幅をとることが出来よう。図-3はこのようにして作られたある処理法に対する処理マトリックスの概念図であり、水質表示マトリックスと水質因子配列順、粒度分布のクラス间隔を合わせて作られている。このような3次元処理マトリックスの内で除去性の期待しない場合は  $R_{ijk} = 0$ 、除去された要素については  $R_{ijk} > 0$ 、代謝産物などによつて新たに付加される要素は  $R_{ijk} < 0$  とする。ただ後者では元来その水質要素の原濃度の閾数として新たな成分が生ずるわけではないから、マイナス除去率算定の基準になら

粗粒度分類			粒径または相当分子量									
粒子 粒度 等級	$10^0$ $\sim 10^{-1}$ $\text{cm}$	$10^{-1}$ $\sim 10^{-3}$ $\text{cm}$	$10^{-3}$ $\sim 10^{-5}$ $\text{cm}$	$10^{-5}$ $\sim 10^{-6}$ $\text{cm}$	$10^{-6}$ $\sim 10^{-7}$ $\text{cm}$	$MW$	$2 \times 10^3$	$1 \times 10^4$	$5 \times 10^4$	$1 \times 10^5$	$\sim$	
S.S.	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	.	.	.						$C_{1m}$
Color	.											
TOC	.											
BOD	$C_{14}$											
UV <sub>260</sub>												
UV <sub>220</sub>												
EC												
etc	$C_{n1}$											$C_{nm}$

$J = 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ \dots \ m$

図-2 水質表示マトリックス

水質要素を指定して有効な数値としなければならない。また処理方式によっては他の水質因子との関連で（例えば活性汚泥法のマトリックスにおけるBOD, TOC, UV<sub>260</sub>の関係など）処理マトリックスの要素R<sub>ijk</sub>が単独で定まらない場合にはR<sub>ijk</sub>を他の水質要素の関数として示さなければならぬ。

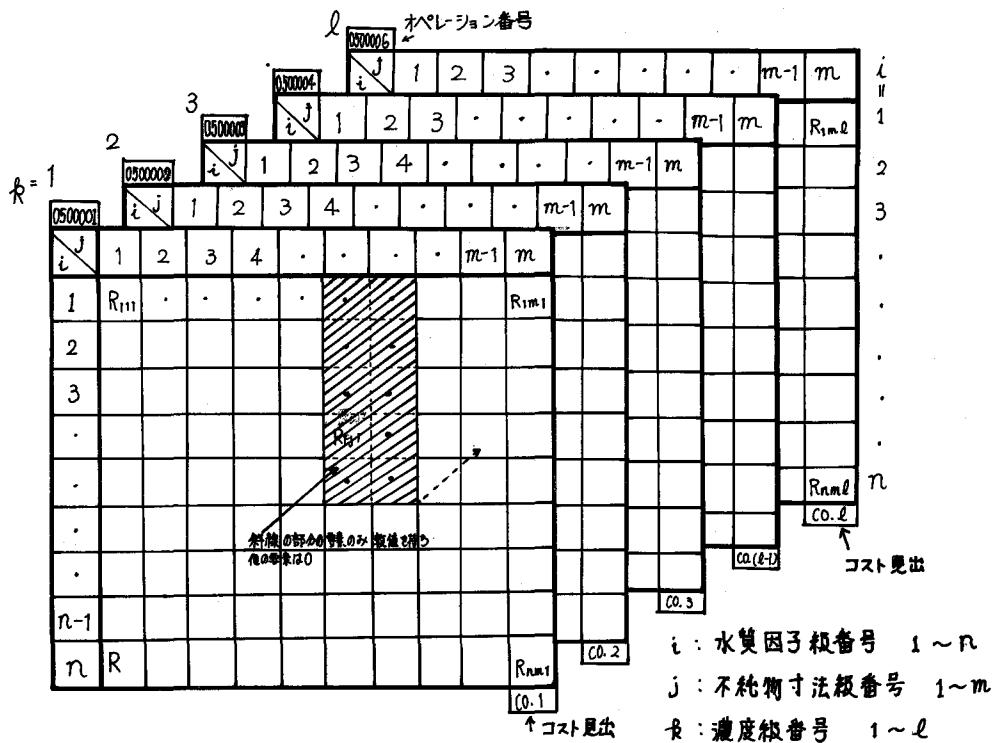


図-3 或る処理法についての処理マトリックス

またこのような3次元処理マトリックスの応用が可能である前提としてはマトリックスの要素R<sub>ijk</sub>において水質変換係数はリニアな系であることが必要となる。したがつて粒径、濃度のクラス別けはこの相加性を近似的に満す条件で行なわれねばならない。同じ処理法であつてもR<sub>ijk</sub>要素に及ぼす他の水質因子の影響を表す関数型が大きく異なる場合には同一処理法として扱いえず、別個の処理マトリックスを用ひねばならない（例 活性汚泥法を用いた一般都市下水処理と特殊工業廃水処理の場合）。また、k軸の濃度の幅の設定についてはその処理法が最も有効に働くと考えられる水質項目の総濃度を標準にして関連する水質項目を考慮しつつ設定する。要素*i*, *j*間の濃度分布に大きなかたよりのある水質についてこのような普遍的な濃度級別が難しそうにも思われるが、幸いなことに水処理システムは1次近似的な粗さで粒径分布を除去の指標としうる物理化学処理の各段を通じて対象水質要素の範囲がだんだんとしづられていくので、処理マトリックスとしての小マトリックスの*j*の数を過大にしないかぎり（精度は犠牲になる）一応の設定が可能でないかと考えている。またシステムの最初に物理化学処理を経たため生物化学処理では成分組成濃度に極端な歪のあらうる場合を別として一応BOD濃度を級別の指標因子とすることが出来たであろう。

上述のような観察を経て作られた処理マトリックスの各々はその水質変換のために要する費用を個

々に持つていふ。(当該プロセスに関連する費用、例えは凝聚沈殿プロセスの際の汚泥の処理・処分費用) もちろん個々の処理マトリックスに対応する処理費用は原水濃度のみで定まるものだけないが、概略の単位水量当たりの処理費用の標準値を与えることは可能であろう。この標準値もしくは標準値を与える実数形(スケール効果やシステムの存在する環境条件などを考慮して)を個々の処理マトリックスに対してコスト見出しとして付加することによって除去性とその費用を一对にして以後論ずることが出来る。

水処理システムは多くの単位プロセスまたはオペレーションを何段にも重ねて目的とする水質変換量をうながすわけであるが、この際プロセスを適用して行く際の順序が当を得ないとその効果を發揮しないプロセスが多い。通常は粗な不純物成分を除去し順次小さな成分の除去ではたゞプロセスを加えて行くことになるので、処理マトリックスの左肩に 1 行のオペレーション番号を並り、始めの 1 行をプロセス番号、次の 2 行をプロセスの変法番号、後の 2 行を濃度クラス別番号として、始めの 2 行の番号の若いプロセス順にシステムを組んで行くこととし、3 行目の数字は順序に關係しないとする。またこのプロセス番号を見出しとして当該プロセスを扱いうる水質濃度範囲(  $K$  軸の級の設定水質因子とともに適応数値幅)を指定する。

原状態を水質表示マトリックスによつて示し、処理マトリックスの組み合わせによつて次々と落ちこぼれなく水質変換量を増加し、最後に望む水質に到達するわけであるが、この場合は処理の目標値である水質値も水質表示マトリックスで現わされていなければならぬ。このような目標水質を示すマトリックスを用途マトリックスと称することとする。水質基準設定の基となる水質の生物・環境への影響は処理性を基準に作成し、水質マトリックスに全面的になじむものではないが、自然水域での変換、移行、生体内への取り込みのような問題を若える場合、在来のような乱暴な水質因子の扱いよりも少しだけ物理・化学・生物化学的の運動の判断基準となる水質要素を取り出しておくことによりてより明確な因果関係の究明とその結果の制御系へのフィードバックが果せらるものと考える。

水質表示マトリックスは別として、現在の段階では前記の処理マトリックスの成立条件のことからべつ種々の制約をすべて解決して、普遍的な水処理マトリックスを作りうるにはほど遠い状況である。しかしながら、原水組成を都市下水と指定し、通常の濃度範囲内で、生物化学処理、さらに物理化学処理の各ステップを付加して行く際の水質の変化状態をマトリックス表示し、各処理プロセスに如何なる水質要素を負荷として与え、どのような順序でプロセスを組み立てれば良いかの判断を行ふ事については、土木学会衛生工学委員会(水高度利用小委員会)昭和 46 年、47 年度報告書、昭和 46、47 年度土木学会年次講演会での筆者等の諸報告から明らかなものである。

### III 水質マトリックスの水環境制御への応用

#### (1) 水処理システムの設定

若える水利用目的に対する用途マトリックス(水質基準値)が指定され、原水の水質マトリックスが判明すれば、その間の水質落差をうめるにはどのような処理マトリックスを構成する処理プロセスを組み合わせればよいかを検討することによって組み合わせに無駄と欠落部分のないシステム構成が明確に与えられ、用いた処理マトリックスのコスト見出しの情報から大略の処理費用の推算が出来る。このようにして在来水処理系の入出力があいまゝまま極めて情報量の少い若干の水質因子で途中を

半ばブラックボックス的におこなうまで設定せざるをえなか。下諸水処理システムをその各プロセスが受け持つ役割、変換ギャップの大きさを指定しつつオペレーションの内容を判然とさせた形で設定しうるようになる。

### (2) 水質価格の評価

ある基準水質(環境許容値)の水質表示マトリックスと対象とする水の水質表示マトリックスの間の水質落差を埋めるために必要な処理マトリックスの組み合わせを設定することによりて、個別側の水質を改善して両水質を等しくするに必要なコストの算出が出来る。この場合常にコストの算出は水質が改善されると考える方向にとるものとし、同一水質落差を埋める複数のプロセスがある時は最低のコストの組み合わせを探して両水質間の水の価格の差とする。したがって、対比を工業用水の原水と排水にとれば、生産活動によってどれだけの水の価格の低下が水質的にに行なわれたかを算出することが出来る。水処理マトリックスは濃度の関数であるから、希釈などによって低濃度化した場合の水の価格の評価も可能になる。すなはち同一の水質成分量の除去を考える時濃度の低下(希釈)と共に処理コストは増大し、ある濃度レベル以下になると対応処理法を全く変えねばならずそのマイナスコストは膨大なものになる。図-3はこのようにして得られた水のマイナス価格がその存在状態を横軸にして評価されたことを示している。このことは水の利用が水の消費ではなく水の属性の利用が大部分であって、水質の変化分(低下分)を用いていふことを考える時に、環境計画の場合に不可欠である。

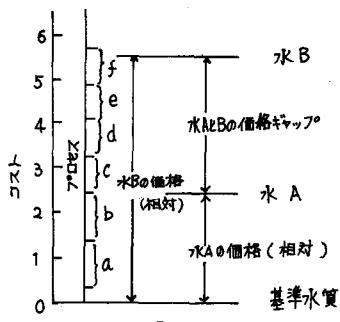


図-3

である水質因子と他の計画因子との整合を最も普遍的なコストで行なうための一つの考え方になりうるであろう。このような方式で水の価格を論ずることの出来るのは、水質レベルが自然系生態系における環境許容以上の場合であって、人工系による制御に主としてこの考え方方が適用されるのが至当であろう。唯環境に対する害といった面での水質低下の評価を行なう場合には害を受けている集団・対象が特定の(僅か)あるいは既得権を明確に持つてゐる部分に限られ水価値の低下が局部的な条件で評価され、僅かな保償のまま水質改善が放置される結果を招來することにもなるので、価格低下を明確にかきえた一方途として、このような考え方を導入が必要となる。

またこのような価格評価はある基準水質(用途マトリックス)に対して行うことによって任意の複数の水のある用途に対する相対的な価値判断が出来、黄河の水とミシシッピーの水の、それが水道原水として良好でその差はどの程度であるかを一定程度客観的に示しうることになる。

### (3) 沉用処理と生物循環系の構成

水質マトリックスの構成において水質を総合的因素で表示しその処理性を把握出来るよう各成分は一応処理対象の物質のマイクロな化学的組成に極端に左右されずに、マトリックスの行動構成を中心にして水質の変換を論じうる部分であり、現行の上下水道における中心的な水処理システムを構成している物理化学的・生物化学的処理などを代表とする沉用木処理プロセスの適用が可能な部分である。

それに対して総合的な因子での表示が難かしく、個々の化学組成・構造を明示した水質因子を導入

しなければ処理性の評価し難い成分（重金属のある濃度成分範囲のものなど）は汎用的な処理法を適用しえず、個々の因子に対して処理のステップ（反応と分離のプロセス）を一つづつ別個に付加しなければならない特殊処理に対応する成分である。

水処理システムの一つの特長は、用水処理システムの一部を除いて、システムの各ステップを構成する処理プロセスにおける水量負荷がほとんど変化することなく一貫した大きさを持っており、したがって汚濁物質量負荷が減じても水量負荷は変化せず、しかも処理コストの大きな部分を占める分離装置容量はほとんど水量負荷によって定ることである。それゆえ、汎用処理で処理し切れぬ成分に対して、個々の成分毎に独立の処理プロセスを付加して行く段階にまで処理システムが延びて行くと除去される物質量当たりの処理コストはいちじるしく大きくなり、単位水量当たりの処理コストは膨大なものとなるから、ある限度を越える特殊処理プロセスの附加は工学的に成り立たなくなる。

図-4はこれらの関係を模式的に描いたもので、横軸は各処理プロセスに対する処理コストを処理プロセスの配列順を考えた積算値にとり、縦軸には各々の処理法によって除去される不純物量をその処理コストで除したものにとってある。図中の面積は不純物量を示し、ヒストグラムの高さ(P)れ

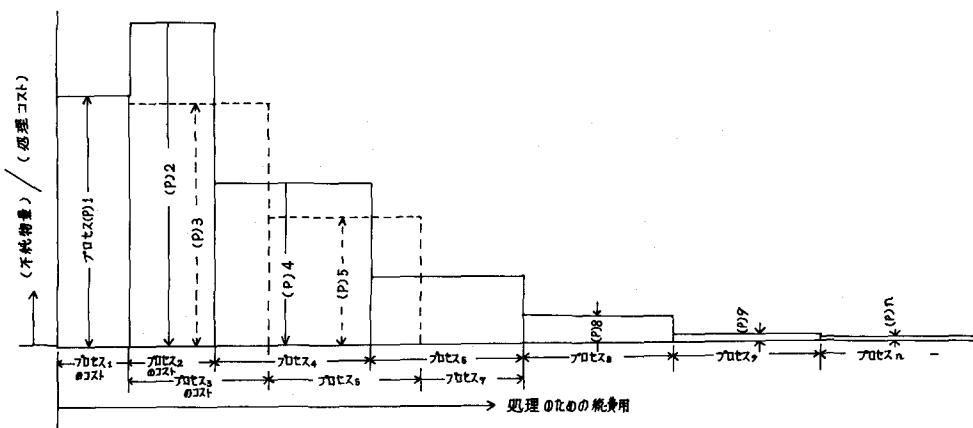


図-4

は各プロセスについて単位コスト当たり除去される不純物量を示す。一般に水中の不純物量は粒径分布の大きな方の側の絶対量が多く、汎用的処理でその大部分が除かれ、残余の成分に対応するプロセスを付加することにより、順次総合的水質因子で表示し難い、特殊微量成分を除くことになる。この場合極端に低濃度化した成分の単位質量当たりの処理コストは極めて高くつくから一般の水サイクルの中へ導入することは不可である。したがってこのような汎用処理プロセスにないまじめ微量成分は水利用の主サイクルに流入する以前に、発生源近くの水量負荷の低い處で処理すべきである。このようにすることによって主循環サイクルの制御指標である水質マトリックスの行因子数を減じ、制御の確実性を増し、検出の不確実性をもって主水利用系の安全を保ちやすくなる。このような不純物量/処理コストの比をどの程度まで一般の水サイクル（主循環系）の中で許すべきかは地域全体のシステムの経済性と安全性によって決まるが、この場合に水質因子の検出の不確実性とそれを補う方法の導入によるコストの増大もプロセスコストの中に導入されていかなければならない。