

講座

水質環境解析(その1)

— 広域レベルの水質解析の目的と解析手法 —

柚山 義人[†]
(Yoshito YUYAMA)

I. はじめに

近年、農村地域における水質汚濁の問題が顕在化している。農業土木分野においては、農地造成や干拓の事業計画に対する環境影響評価、水質を改善するための各種の事業実施に際し、水質予測が求められる場合が多い。

水質に関する基礎知識は、本学会誌の講座「農業土木技術者のための水質入門」(52(8), (1984)～53(7), (1985)) および同タイトルの農業土木学会選書¹⁾において紹介された。

この「水質環境解析」の講座は、解析手法を重視した実務的な講座を目指すものである。対象は、集水域および用・排水路、河川、湖沼、沿岸域等の水域とした。

現場技術者と打合せを行っている時、問題解決のためにどのような調査を行い、どのようなモデルや手法で解析をすべきかという相談をよく持ちかけられる。本講座では、実際の問題解決に役立つよう、事例紹介を通して、いろいろな目的に応じた解析法を紹介していく予定である。執筆するには、かゆいところに手が届くように解析に必要なデータの明示と実測が困難なパラメータ等の取扱い方(便法)の説明をお願いしている。

執筆者は、若手を中心に構成した。「講座を通して成長する」を合い言葉に努力し、これをきっかけに水質関係の研究者の横の連携を強化したいと考えている。と言っても、力不足の部分は、年輩の方々に助けていただいている。

また、会員(読者)参加型の講座をめざし、後述

のように皆様方から情報・質問をお寄せいただきたいと考えている。心意気をくみとっていただき、よろしく御協力願いたい。

執筆予定は、次のとおりである。

- ① 広域レベルの水質解析の目的と解析手法
- ② フローダイヤグラムによる解析
- ③ 非定常な汚濁負荷流出量の推定
- ④ 生態系モデルによる解析
- ⑤ 差分法による解析
- ⑥ FEMによる環境水理モデリング
- ⑦ 濁り環境の解析手法
- ⑧ 主要湖沼における解析モデルと水質保全対策
- ⑨ 地理情報システムによる広域水質の把握
- ⑩ 解析のためのプレ・ポスト処理とシステム構成
- ⑪ 講座を終わるに当たって(仮題)

①では、広域レベルの水質解析の全体像を明確にする。②は、農村地域の水環境を理解し、水質保全対策を立てる上で、第1に行うべき解析である。③は、④～⑦で扱う水域内での水質の時間変化を求めるモデルにおいて、境界条件を与える。②の解析は、③の結果を時間的平均値として扱うものである。後述のモデル分類の中で、④はボックスモデル、⑤～⑦はメッシュモデルに属する。⑧は、解説してきた解析法が主要湖沼においてどのように使われているかの紹介である。⑨は、全ての解析に共通する現地データの収集を支援する方法の紹介である。⑩は、これらの解析を電算システムを利用して行うための手段の紹介である。⑪では、講座の総括と皆様方からの情報の整理を予定している。

Water Quality Analysis (1) — Purpose and Method of Water Quality Analysis —

[†] 農業工学研究所水利システム研究室



水質汚濁, 水質保全, 水質解析モデル, 水域, 水質診断, 生物反応

II. 水質汚濁と水質保全対策

発生した汚濁物質は、その発生源において一部が除去され、水域へ排出される。水域内では、物理・化学・生物作用により水質が変化する。対象とする水域へ到達する負荷を「流達負荷」と呼ぶ。流達負荷と排出負荷の比を「流達率」と呼ぶ。流達率を考える地点は、水質解析におけるモデル化の範囲や解析目的によって異なる。図-1は、集水域内の汚濁物質の流れを模式的に表わしたものである。本講座では、田淵¹⁾を踏襲し、用語を表-1のように定義する。

河川や湖沼の水質解析に当っては、集水域全体における物質循環（水質の時間的および場所的変化の現象）をトータルシステムとしてとらえる必要がある。降雨流出や灌漑のための取水と排水等に伴う非定常な流入負荷量や排出負荷量、水域内での水質変化、水管理法等のモデル化は、サブシステムを構成するものである。水収支の解析は、水質解析の前提になる要素である。

水質の予測・評価を行い、各種の水質保全対策案を検討する一連の作業を「水質診断」と呼ぶ。水質診断に当っては、水質基準点の設定が問題となる。たとえば、農業用水の水質を問題とする場合には、

表-1 用語の定義

発 生 源	汚濁物質を排出する源
発 生 負 荷 量	発生源で発生した負荷で処理前のもの
点 源 負 荷 量	流域に点の形で存在する発生源(工場, 下水)
面 源 負 荷 量	点源から排出される負荷
面 源 負 荷 量	流域に面として存在する発生源(農地, 山林)
面 源 負 荷 量	面源から排出される負荷
排 出 負 荷 量	発生負荷を処理した後に排出される負荷量(点源) 地表排出負荷+浸透排出負荷(面源)
排 出 率	排出負荷量/発生負荷量(×100)
除 去 (処 理) 率	(発生負荷量-排出負荷量)/発生負荷量(×100)
地 表 排 出 負 荷 量	地表水によって面源から排出される負荷量
浸 透 排 出 負 荷 量	浸透水によって面源から排出される負荷量
降 水 負 荷 量	降水によって面源にもたらされる負荷量
用 水 負 荷 量	灌漑用水によって面源にもたらされる負荷量
面 源 流 入 負 荷 量	降水負荷量+用水負荷量
差 引 排 出 負 荷 量	排出負荷量-流入負荷量
流 達 負 荷 量	対象となる水域に到達した負荷量
流 達 率	流達負荷量/排出負荷量(×100)
水 域	河川や湖沼など、水が貯留されている場
集 水 域	山林, 農地, 市街地など、水域の背後地を含む流域全体
水 質 基 準 点	水質の評価を行うおとする場所

(田淵編「農業土木技術者のための水質入門」¹⁾ pp. 177-178に加筆・微修正)

取水地点が水質基準点になる。湖沼や集落内水路の汚濁が問題となる場合には、それぞれの中心地点が水質基準点の候補となる。水質基準点は、対象とする水域に1つとは限らない。親水性を議論する場合には、水路に沿う全線または水域全体が基準になることもあり得る。水質解析結果は、評価対象となる

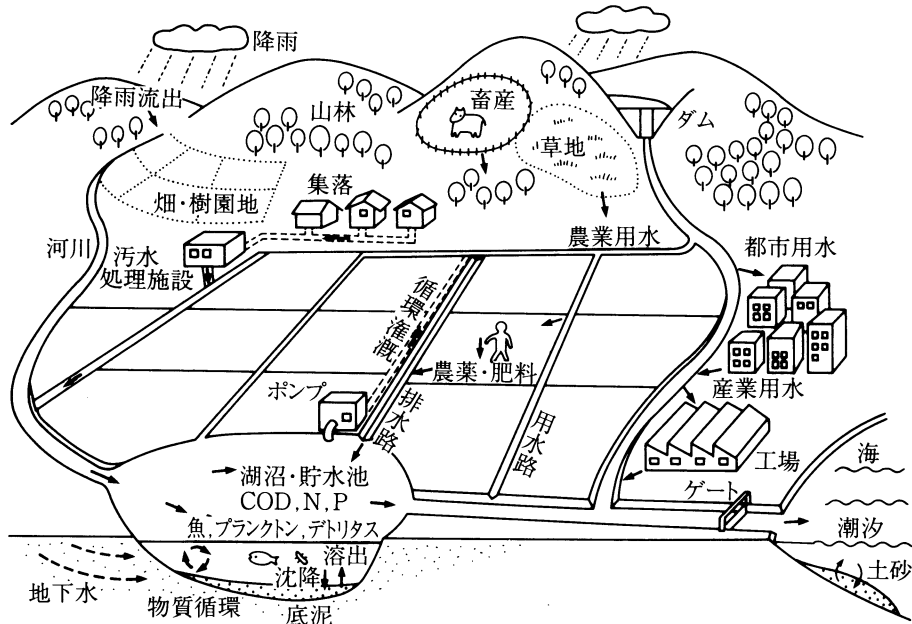


図-1 集水域内の汚濁物質の流れ

水質基準点を明確にした上でとりまとめる。

水質保全のための具体的対策としては、点源からの発生負荷を污水处理装置を用い水域に流達する前に削減する、農地における施肥や水管理を厳密に行う、畜産ふん尿のリサイクルや循環灌漑など資源を有効活用するシステムを構築する、自然生態系の浄化機能を活用する、静澄な水資源を確保できる場合はこれを用いて希釈する、水利施設の水管理操作により汚濁水を自浄能力に余裕のある水域の水と交換する、土地利用計画などの規制によって発生源を押し込む、等が考えられる。

III. 予測・評価が求められる問題

図-2, 3, 4 は、それぞれ水質の水平分布、鉛直分布、時間変化の調査例である。水質解析は、これらをモデル上で再現することからはじまる。

水質解析によって予測・評価が求められる問題の例を以下に示す。

- (1) A地区のクリーク網の窒素濃度の季節変化を、下水道整備率、クリーク内の自浄作用の期待度別に予測せよ。
- (2) A地区のクリーク網の水質汚濁が、豪雨時の河川水の導水によるフラッシュ効果により改善されるかどうか、また湛水被害を生じさせないためのフラッシュ水量について検討せよ。
- (3) B地区において、循環灌漑システムの導入による河川水質の変化を予測せよ。
- (4) C湖において、農業用水基準を満たすために必

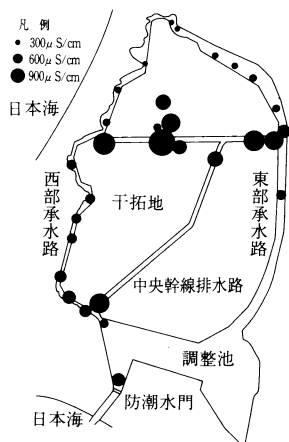


図-2 八郎潟の電気伝導度の調査結果 (1985年9月2日～3日)

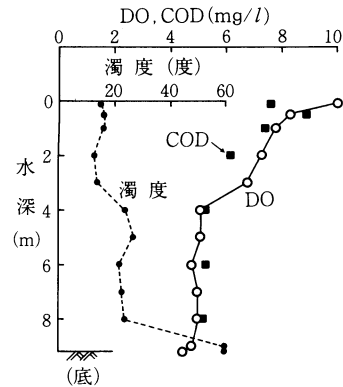


図-3 長浜原貯水池の水質調査結果 (1992年12月21日11:25～13:00)

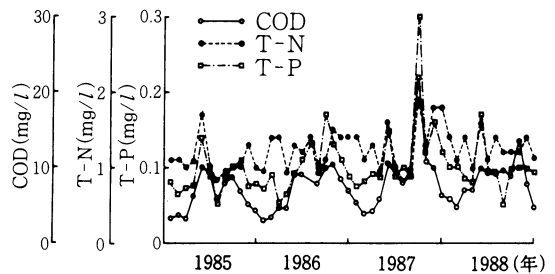


図-4 木場潟の水質調査結果 (石川県：公共用水域水質測定結果報告書より)

- 要な希釈水の導水量と適切な導水位置を求めよ。
- (5) アオコの発生しているD承水路の水理学的滞留時間を3週間から1週間にした場合のクロロフィルa濃度の変化を予測せよ。
- (6) Eダムにおいて、攪拌機と間欠曝気筒の設置による鉛直方向の水質分布の変化を予測せよ。
- (7) F調整池において、導流堤の設置、ミオ筋の確保、排水ゲートの操作法が、水の流動化促進による水質改善に寄与するかどうかを検討せよ。
- (8) G汽水湖において、塩分濃度を1,000～1,500 mg/lに保つための防潮水門の操作法について検討せよ。
- (9) H湾において、背後地から浮遊土砂の流入があり、流入後の沈降と潮汐による底泥の再浮上を受ける場合のSSの挙動を予測せよ。

本講座の終了時点で、それぞれの問題に対する解を得るためのモデルの選択とそれに必要な調査内容が御理解いただけたら、本講座の目的は半ば達成されたことになる。

IV. 水質解析モデルの類型化

水質解析モデルは、解析の目的、対象地区の水質汚濁現象、水文・水理特性、地形条件、水質改善目標（水質項目、濃度、評価地点等）、収集可能データ、必要な精度、確保できる時間・予算・人員・機械、対策案等に応じて使い分ける。このため、水域の空間分割法、時間の定常性、生物反応の取扱い、考慮する要因等により、多くの種類が存在する。

通常取扱われる水質汚濁に関わる水質項目は、①保存系溶存物質 (CI)、②非保存系溶存物質 (BOD, COD, N, P, 農薬)、③植物プランクトン (クロロフィル a)、④沈降・浮遊物質 (土砂, SS) 等である。これらとは別に、水温も古くからの問題である。

水域の分割法には、図-5 に示すように、① 1ボックス1層、② 1ボックス多層、③ 数ボックス1層、④ 数ボックス多層、がある²⁾。水域は、汚濁物質の流入条件、水域内での水質の分布、地形条件、水管理上の要点等を考慮して分割される。

水質解析モデルの分類例を図-6 に、その特徴の比較を図-7 に示す。モデルの呼称については、いろいろな分野で用いられている最大公約数的な名称を用いた。

流況予測方法は、物質収支（連続条件）のみを考慮する「ボックスモデル」と、運動方程式を解く「メッシュモデル」に大別される。流況予測は、水域分割が①、②、③の場合は物質収支のみから求め

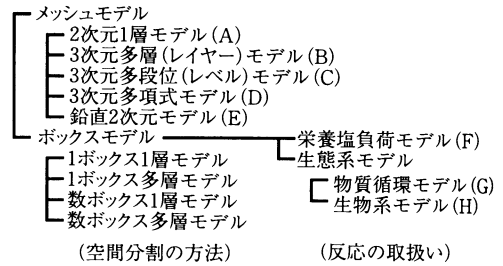


図-6 水質解析モデルの分類

る場合が多い。④の場合で水域分割数が多いときには運動方程式を解く。実際の分割数は、ボックスモデルでは十数個以内、メッシュモデルでは数十個以上である。フローダイアグラムは③に属し、排出負荷、流入負荷の集水域内での連結性を明らかにするのに有効である。

メッシュモデルのうち、2次元1層モデルでは、鉛直方向の流速は断面平均流速で代表させて取扱う。水深が浅く、風の影響などで深層まで混合され、塩分・水温成層を形成しない水域の解析に適する。河川や用・排水路等の水路系を対象とした解析では、水平方向は主流方向のみが考慮され、1次元モデルとして取扱われる場合が多い。

レイヤーモデルでは、層間の運動量の移動はないとし、層間の水移動はボックスモデル的に取扱う。レベルモデルでは、各段位の格子点ごとに水理量を

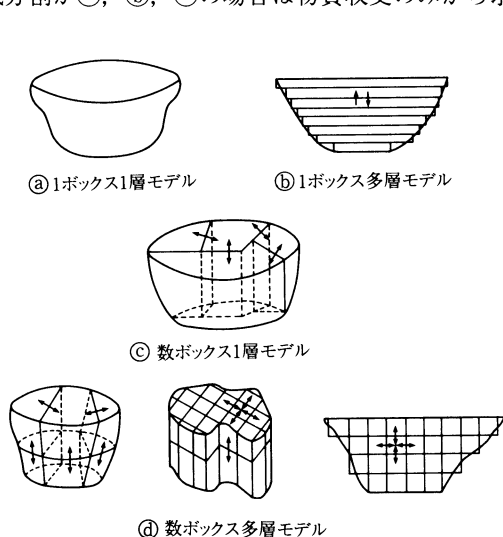


図-5 水域の分割法

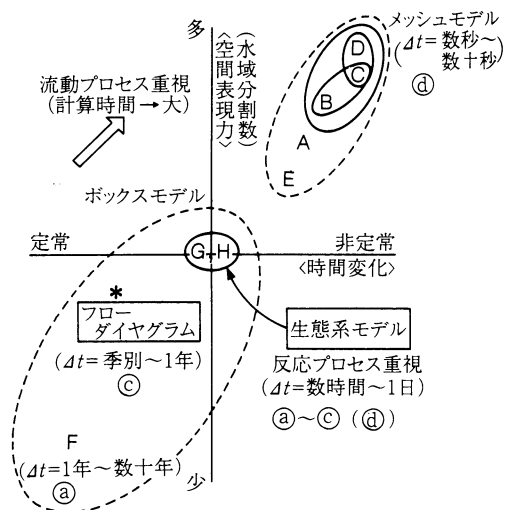


図-7 水質解析モデルの特徴の比較 (記号は、図-5、図-6を参照のこと)

計算する。水温、塩分、風等による鉛直循環を考慮した複雑な地形まわりの解析に用いる。

3次元多項式モデル³⁾は、レイヤーモデルやレベルモデルでは鉛直方向に分割されたメッシュ間の水量計算を離散化して解く必要があるのに対し、鉛直方向の水量を多項式近似することにより連続的に求めることを可能にした、より汎用的なモデルである。

鉛直2次元モデルでは、2次元平面を1次元化し、水平方向の1次元と鉛直方向について分割する。鉛直循環を詳しく表現する必要のあるダム貯水池等の解析に適する。

メッシュモデルの解析に当っては、偏微分方程式を解くことになる。数値解析法としては、差分法(FDM)と有限要素法(FEM)がよく用いられる。離散化する単位時間は、一般に数秒～数十秒である。

ボックスモデルには、現象の内容をブラックボックスとし、入出力の対応関係に注目する「栄養塩負荷モデル」と、水域内における物理的、生物・化学的変化過程を数式化して解析する「生態系モデル」がある。前者では、水質を時間的にも空間的にも平均値として求める。後者では、それらが変化するものとして取扱う。生態系モデルは、各物質に関する連立常微分方程式を解くことになる。解析の単位時間は、一般に数時間～1日程度である。

栄養塩負荷モデルとしては、Vollenweiderのリン負荷モデル⁴⁾が有名である。彼が見出した年平均全リン濃度 $[P]_{\lambda}$ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)の近似式は(1)式のとおりである。

$$[P]_{\lambda} = (L(P)/q_s) \cdot \frac{1}{1 + \sqrt{\tau_{\omega}}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $L(P)$: リンの年間負荷量 ($\text{mgP}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$), q_s : 水量負荷 ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$), τ_{ω} : 水の滞留時間 (y), である。

生態系モデルのうち、対象物質を有機態と無機態に分けて水質予測を行うモデルを「物質循環モデル」と呼ぶ。この中には有機態をさらに溶存態と懸濁態に分けて取扱うモデルもある。鉛直方向は、光の到達条件を考慮し2層に分割することが多い。このモデルでは、種々の生物と無機態栄養塩との間の反応が生産と分解のみであるため、モデルの構造が簡単で、計算も容易である。水中と底泥間の物質移

動は、有機態栄養塩の沈降による堆積および底泥からの無機態栄養塩の溶出が考慮される。

有機態の栄養塩を生物ごとに取扱うモデルを「生物系モデル」と呼ぶ。無機態の栄養塩と植物プランクトンは必須である。動物プランクトン、デトリタス、溶存有機物は、必要に応じて考慮する。植物プランクトンは、1つの構成要素として取扱う場合と、藍藻や珪藻等の要素に分ける場合がある。

ここで、水域内での物理・生物反応に伴う水質変化を唯一のパラメータ「除去速度係数」*で表現する場合の「連続の式」の数学的取扱いを、メッシュモデル(2次元1層モデル)とボックスモデルについて記述すると、それぞれ(2)式、(3)式ようになる。(2)式は、移流・分散方程式と呼ばれている。(3)式は、古典的なStreeter-Phelps式⁵⁾と同じ形である。

$$\frac{\partial C \cdot h}{\partial t} + \frac{\partial C \cdot Q_x}{\partial x} + \frac{\partial C \cdot Q_y}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \cdot h \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \cdot h \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \right) - k \cdot h \cdot C \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{dC}{dt} = -k \cdot C \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 C : 物質の濃度 (mg/l), k : 除去速度係数, Q_x : x方向単位幅当り流量 (m^2/s), Q_y : y方向単位幅当り流量 (m^2/s), h : 水深 (m), K_x : x方向分散係数 (m^2/s), K_y : y方向分散係数 (m^2/s), t : 時間, である。

生物反応の取扱いという観点からは、メッシュモデルでは、10年位前まではこの程度が限界であった。ボックスモデルでは、物質循環モデルを最も単純化した形といえる。一方、水の流動に関する空間表現力および時間刻みは、メッシュモデルの方がはるかに詳細である。

生物反応が卓越するのは、水理学的滞留時間が2週間を越える水域においてであるといわれている⁶⁾。滞留時間が数時間の水域において生態系モデルを適用したり、年間平均値としての水質を求める場合にメッシュモデルを用いるというのは、ナンセ

* 水域内での生産または除去を $[T^{-1}]$ の次元で表すものであり、 $[d^{-1}]$ または $[s^{-1}]$ 等の単位を用いる。表-1に示す発生源での除去率とは概念が異なる。自浄係数と呼ばれることもある。

ンスである。メッシュモデルに生態系モデルで扱う複雑な反応系を考慮することも理論的には可能であるが、複雑な地形まわりの解析が必要な場合には、解析目的を区別・限定して、複数のモデルを使い分ける方が実用的である。

V. モデルの要件と作成手順

良いモデルは、次の要件を具備したものである。

- ① 目的が明確である。
- ② 仮定が明確である。
- ③ 適用範囲が整理されている。
- ④ 含まれるパラメータが、できる限り調査や実験によって個別に決定できる。
- ⑤ 取扱いが簡単である。

たとえば、生態系のモデルの場合、状態変数が増えるほど詳細な記述ができる。しかし、それに伴って状態変数間の相互関係を表す反応諸係数が増加する。これらの中には、実験や調査等での推定が困難なものが出てくる。あまりにも複雑なモデルは、実用上、望ましくない。

水質の時間変化を求めるタイプのモデル作成の一般の手順を 図-8 に示す。モデル化の作業は、当該集水域における水質汚濁現象の理解から始まる。

数値計算で得られた結果の信頼性を確認する方法には、物質収支の検討、定常性の検討、使用したパラメータに関する感度の検討、がある。

パラメータの同定では、まず、連続の条件および化学量論の上から理論的に定まるものを整理する。つぎに、個別の現地調査や実験および定常解析によ

って求まるものを決定する。未知のパラメータの数を少なくした後、非定常なモデルによる計算結果と実測値を比較し、各々の最適値を得る。この作業は、キャリブレーションと呼ばれる。

パラメータが同定されたモデルは、解析対象期間の水質を再現しうるが、これは単に出力が一致したに過ぎない。次の段階として、作成されたモデルについて、パラメータの同定に用いた期間と独立な過去の時系列データを用いて出力を比較する作業を行う。その適合度が良い場合に、モデルは「検証」されたと判断される。

適合度が悪い場合には、パラメータの修正作業を繰り返す。どうしても適合度が改善されない場合には、モデルの設計自体を再考する。

水質診断では、計画目標年次における諸元、水質保全対策案をモデルに組込む。水質診断に用いるモデルは、本来、検証されたモデルであることが望ましい。ただし、問題によっては、水質の専門家の間でも、本当の意味での検証は不可能であるという方や、将来予測に用いる環境条件は不確定な要因があまりにも多いので、モデルによる予測の意義について疑問視する方もいる。

VI. おわりに

水質解析においては、汚濁物質の水域への流入負荷プロセス、水域内での水理的流動プロセス・反応プロセスをバランスよくモデル化することが重要である。ある特定のサブシステムのモデル化がどんなに優秀であっても、別のサブシステムの精度がオーダー的に劣る場合には、それによりトータルシステムとしてのモデルの精度が支配される。

説得力のあるモデルを作成するためには、周到に計画された調査に基づく信頼性の高い実測値が集められることが前提条件になる。しかし、実際の調査は、限られた人員、期間、予算の中で行われるので、解析に必要な全てのデータを同じ精度で網羅的に収集することは不可能である。水質解析の一連の作業を自らやってみると、データの必要性、力を注ぐべきデータ収集項目、データ収集のラフさ加減等が見えてくる。

広域レベルの水質解析は、複数の関係機関の協力のもとに実施される場合が多い。本講座が、水質解

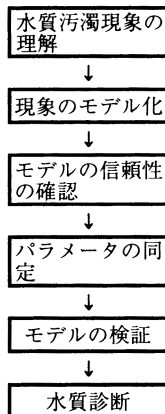


図-8 水質解析モデル作成の一般の手順

析に対するさらなる理解と、現場技術者、行政者、研究者の連携が円滑に進むことにお役に立てればと念願する次第である。

本報は、本講座の執筆予定者全員に目を通していただき助言をいただいた。図-1は、筆者のイメージを広島県尾道農林事務所の今井敏雄主任にイラストにいただいた。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 田淵俊雄編：農業土木技術者のための水質入門，農業土木学会(1986)

- 2) 環境庁水質保全局：湖沼の窒素及び磷に係る水質予測マニュアル，p. 30 (1985)
 3) T. Kawachi：Three-Dimensional Finite Element Model of Density-Stratified Flow using Depth-Dependent Polynomial Basis Functions，農土論集 156，pp. 93～100 (1991)
 4) 日本水質汚濁研究協会編：湖沼環境調査指針，公害対策技術同友会，pp. 210～211 (1982)
 5) 國松孝男・村岡浩爾編：河川汚濁のモデル解析，技報堂出版(株)，p. 99 (1989)
 6) 岩佐義朗編：湖沼工学，山海堂，pp. 220～221 (1990)

[1993. 8. 9. 受稿]

<会員諸氏へのお願い>

本号から始まった「水質環境解析」の講座では、開かれた学会誌、農業土木分野の組織としてのレベルアップを目指し、多くの会員の参加を得、かつ内容のグレードアップを図るための新しい試みを取り入れたいと思います。

第1に、会員(読者)の皆様から情報を募り、それをまとめるという作業を行いたいと思います。情報とは、広域レベルの水質に関わる「私の論文・報文の紹介」，「私が勉強に用いた文献，雑誌，単行本」，「私の所属する学会・研究グループ」，「農業農村整備事業に関わる現場の水質問題」，「わが社(わが機関)の水質解析ソフト，水質浄化工法，水質調査のノウハウ等のPR」，「水質解析のためのコンピュータシステムおよびその周辺機器」等です。手に入りやすい文献等はリストだけで結構ですが、手に入りにくいものについては、別刷りまたはコピーを御譲りいただけると助かります。「あまりにも有名だから、だれかが出すだろう」ということで紹介するのをためらうということは決してなさらないで下さい。大学等で使われた教科書や研修会のテキストも大歓迎です。というのは、重複は、それが多くの方にオーソライズされている証で、文献検索では読取れない生の情報なのですから。

この講座の内容からすると、この分野の第1人者であるにもかかわらず、若手に執筆の機会をお譲りいただいた諸先輩方には、教育的配慮をもってよろしく御指導・御協力願います。もちろん、執筆者には、最大限の情報の提出を自らに課すものです。

収集した情報は、「その10」と「その11」の一部

として報告したいと思います。一定の水準または情熱をもつ情報(提供者)には、紙面の都合で紹介できない部分を含む情報をフィードバックします。これらの作業結果は、会員の大部分を占める現場技術者や、若手研究者に有益な情報を提供すると確信しております。

第2に、水質に関わる質問をお受けし、可能な限り回答させていただこうと思います。ただし、この講座の執筆者だけで解決できない場合は、より専門的な知識をお持ちの方にお問い合わせするつもりです。質問は、対象を限定しないで前もってでも結構ですし、特定の回の講座を読まれた後でも結構です。匿名でも受け付けます。回答の場としては、講座のあとの補足ページ、または「Q & A」コーナーの活用を考えています。

まずは、この企画の心意気をくみとっていただき、この講座づくりを進めて下さった学会の担当者の方々と参画下さった執筆予定者の方々に感謝します。現在の心境は、片方の頭の隅に、反響がなかったときの悲しさと反省の弁を描き、もう片一方には、あまりにも多くの反響の交通整理にあくせくしている姿を想像しています。

情報および質問は、学会事務局の菊辻宛にお願いします。

(情報等の送付先)

〒105 東京都港区新橋5丁目34-4

農業土木会館3F

農業土木学会 菊辻 猛

(農業工学研究所 柚山義人 記)