河川，湖沼の水質モデル*

川 島 博 之 岡 田 光 正

1. 緒 言

これまで提出された水質汚濁に関連する数値モデルは決定論モデル，確率論モデル，有機物質，化学物質，重金属の挙動と多岐にわたり，このような小論で全てを包括することは不可能である。このため，協会の諸兄姉が多くの関心を寄せてきた分野であり，かつ筆者らも幾分かの係わりを持ってきた河川と湖沼の有機汚濁富栄養化に関連するモデルに限って，言及することとする。

表1には河川と湖沼の水質について，数値モデルを用いた研究の流れを簡単に示してみた。これより，河川についての研究が湖沼についての研究より，かなり早い時期から行われていたことがわかつろう。もちろん，湖沼に対する陸水学的研究は18，19世紀より行われてきたが，モデルを用いたり，また，現象を数式により積極的に理解しようとした研究は，ほぼ1960年代より始まるといってよいであろう。河川水質のモデルを用いた研究が1920年代から行われてきたことは，河川の汚濁が地域によっては，その頃より重大な問題となっていたことを示すと思われる。これに対し湖沼の汚濁

は1960年代に入ってから深刻化した。

河川，湖沼の水質モデルの違いは，“水が流れているか，たまっているか”の違いで，本質的には大きな違いがないと思われがちである。しかし，河川ではBODに代表される水質が問題になってきたのに対し，湖沼では富栄養化問題に関連し，植物プランクトンの増殖（生物の挙動そのもの）にその関心が集まっており，この関心のあり方の違いが，モデルの発達の仕方に大きな影響を及ぼしている。だが従来，この点に関しては，あまり明確には整理されてこなかったように思われる。このため，本小論では河川と湖沼のモデルの発展を概括しながら，この主たる関心の違いがモデルのありように，どのような影響を及ぼしてきたかを振り返ることにする。

2. 河川水質モデル

河川や湖沼の有機汚濁に関連した水質モデルでは，水質は常に生物との係わりにおいて記述しなければならない。しかし河川においては，あくまでBOD，DO等で表される水質が関心の中心であり，生物の挙動は水質に影響を与える1つの因子と見なされる。このため，河川の水質問題を考える上では，物質収支を着実に記述するモデルでほぼ十分であり，生物の挙動を精緻に記述しようとする，一般に生態系モデルと呼ばれるモデルは，特殊な場合を除いて必要とされなかった。

2.1 Streeter-Phelps モデル

物質収支モデルとしての河川水質モデルの原型はStreeter-Phelpsモデル(1925)¹⁾までさかのぼることができよう。これ以前にも希釈率を考慮したモデルらしきものはあるにはあるが²⁾，数値モデルと呼べるものはStreeter-Phelpsの研究より始まるといって過言ではないであろう。Streeter-Phelpsモデルは河川を管型反応器と考え，内部でのBODとDOの挙動を記述するものであり，一般に次のように数式化される。

$$\frac{\partial \text{BOD}}{\partial t} = E_z \frac{\partial^2 \text{BOD}}{\partial z^2} - u \frac{\partial \text{BOD}}{\partial z} - k_1 \text{BOD} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \text{DO}}{\partial t} = E_z \frac{\partial^2 \text{DO}}{\partial z^2} - u \frac{\partial \text{DO}}{\partial z} - k_1 \text{BOD} + k_2 (\text{DO}^* - \text{DO}) \quad (2)$$

E_z ：流下方向混合拡散係数[m²/s]， u ：流速[m/s]， DO^* ：飽和DO濃度[g/m³]， k_1 ：BODの一次分解速

Hiroyuki Kawashima

昭和52年 東京水産大学海洋環境工学科卒業

58年 東京大学工学系大学院博士課程修了

同年 東京大学生産技術研究所助手工学博士

〔趣 味〕 読書（主に歴史関係），酒

Mitsumasa Okada

昭和48年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了

同年 ㈱日立製作所

49年 国立公害研究所

60年 東京農工大学工学部助教授工学博士

〔趣 味〕 キャンプ スキー

* Simulation Model for River and Lake Water Quality, 昭和61年8月11日受理

表1 河川と湖沼の水質モデル発達の概略史

年 代	河 川 モ デ ル	湖 沼 モ デ ル
1920	Streeter-Phelps モデル(1925)	
1930		
1940	Phelps(1944)自浄係数の提案	
1950	再曝気係数の決定 O' Connor and Dobbins(1956)	
1960	Streeter-Phelps モデルの拡張 Dobbins(1964) この頃より多くの河川モデルが作られる。	水深、リン濃度と一次生産量の関係 Sakamoto(1966) Vollenweider モデルの提案(1969)
1970	混合拡散係数の推定, Bansal(1971) 浅い河川への適用, 合葉ら(1975)	生態モデル, Jorgensen(1976) この頃より多数の生態系モデルが多数作られる。
1980		OECD の富栄養化に関する調査(1980)

度定数 $[1/s]$, k_2 : 再曝気係数 $[1/s]$

Streeter-Phelps モデルは BOD の一次分解と溶存酸素の大気との交換を仮定した点に特徴がある。BOD 物質の分解は通常好気的微生物により行われ、分解速度は微生物量に比例すると考えることが妥当であろう。しかし、一般に水域の微生物量を定量することは極めて困難である。このため、Streeter と Phelps は第一次近似として BOD の一次分解を考えたものと思われる。

図1には(1), (2)式を用い、定常状態を仮定し、また流下方向の混合拡散を無視した場合の河川中での BOD と DO の挙動の一例³⁾を示す。ここで DO 濃度は BOD 流入地点よりある距離をおいた地点で極小値をとり、その後は飽和濃度に漸近する。これは DO の Sag

図1 Streeter-Phelps Model による DO と BOD の関係 $k_1=0.5[1/day]$, k_2 はDobbins式により推算 $BOD_0=10[mg/l]$, $u=0.5[m/s]$, $d=1.5[m]$, 水温 $20^{\circ}C$ 飽和 DO 量 $9.1[mg/l]$ として計算

-curve と呼ばれている。

河川中の有機物質を BOD として把握し、これを DO との関連で記述しようとしたことは、卓抜な着想であったと思われる。Streeter と Phelps の考え方は今日に至るまで、河川水質研究の中心となっている。

モデルの提出後、パラメータの決定に関する研究が各種行われた。まず Phelps⁴⁾は BOD の分解速度定数の決定を試み、Ohio 川において $k_1=0.1[1/d]$ を与えている。しかし、このパラメータは抽象度の低いものであり、有機汚濁源、河川の形状（よどみの部分の割合）などにより大きく変化する。このため各河川モデルを適用させる場合に、観測データを満足させるように、このパラメータを決定していることが多く、系統的な研究を試みたものもあるが⁵⁾、あまり研究は進んでいない。

k_1 が抽象度の低いパラメータであるのに対して再曝気係数 k_2 は水面での物質移動係数を推算すること他にたらず、より一般性のある議論が可能である。このため、ちょうどその頃より発達した界面での物質移動に関する、Lewis-Whitman(1924)⁶⁾による二重境界膜説や Higbie(1935)⁷⁾による浸透説の成果を利用し、実験流路との比較を行う Dobbins(1956)ら⁸⁾、Churchill(1962)⁹⁾、Thackston(1969)ら¹⁰⁾による研究が行われた。河川の流れは実験流路と違い多様な形態をとるため、正確な推定はもとより困難であるが、現状では Dobbins らの推算式を用いれば、ほぼ満足のいく推定ができると思われる。

また、流下方向の混合拡散係数についても検討がなされている。研究の初期には円管内乱流の理論¹¹⁾よりの推算式を用いたものが多かったが、1971年になって Bansal¹²⁾により、河川に染料を投入した研究がなされ

ている。しかし、これは k_1 や k_2 に比べれば、計算結果への影響が少なく、このため研究例は少ない。

2.2 Streeter-Phelps モデルの拡張

1つの優れたモデルが提案された時、多くの拡張モデルが作られる場合がある。Streeter-Phelps モデルの場合にも多くの拡張モデルが作られたが、これらは大きく2つの流れに分けることができる。1つは、BOD と DO の挙動に関連する他の要因をモデルに組み入れようとするものである。他方は BOD の分解機構をより実体に即してモデル化を試みる方向である。

他の要因をモデルに組み入れる研究はいろいろな形で行われているが、Dobbins (1964)¹³⁾等の研究を概観すれば以下のように要約できよう。

- 1) BOD 成分の溶存態と懸濁態に分け、懸濁態については河床への沈殿を考える。
- 2) 底泥の酸素消費を考える。この際、微生物によるものだけでなく、化学物質(硫化物等)によるものも考える。
- 3) 流速が増加した場合に底泥が巻き上がり、急速に酸素消費が生じることを考慮する。
- 4) 浮遊性の植物プランクトンや付着性藻類、水性植物による光合成と、夜間は呼吸による酸素消費を考える。
- 5) 支流からの新たな汚濁負荷の影響。
- 6) 感潮域に適用できるよう、潮の満ち引きによる流れの変化を入れる。

このような拡張は1つのモデルが提出された場合にはよく行われる研究であり、モデル研究の1つあり様を示すものである。しかし、拡張したモデルは、パラメータの増加を招き、ある河川の現象はよく説明できるが、他の河川には適用しにくくなる等、一般性が乏しくなる傾向がある。

また、もう1つの方向である BOD 分解の機構をより実態に即した形でモデル化しようとする試みは Rutherford (1974) ら¹⁴⁾により試みられたが、BOD 分解機構が複雑であるためパラメータ数の増加を招き、Streeter-Phelps モデルを凌駕するものが作成できたとは、到底考えられない。このため、この方向への動きは、その後不活発である。

2.3 浅い河川の水質シミュレーション

Streeter-Phelps モデルの基本的な考え方は、河川に流入された BOD 物質が DO を消費しながら自浄されるというものであった。これに対し、富栄養化状態にある浅い河川では、河床まで太陽光線がよく到達するため、河床付着性藻類により、BOD 汚濁物質が新たに作り出される現象が生ずる。これは Streeter-Phelps が想定した汚濁現象とは根本的に異なり、自

浄に対し、自濁とも呼べる現象である。この現象は Whrmann (1972)¹⁵⁾により図2に示すように、有機物の除去より栄養塩の除去が遅れることと関連して、若干触れられていたが、深刻な汚濁問題として捉えられたのは、浅い中小河川が多いわが国においてである¹⁶⁾。特に排水の二次処理水を受け入れる河川では、BOD 物質の直接流入による汚濁は軽減するが、栄養塩濃度が十分高い処理水が流入するため、この現象が顕著に観察される¹⁷⁾。このような河川では図3¹⁸⁾に見られるように、昼間 DO 濃度が著しく上昇するが、夜間において DO 濃度が低下する現象が見られる。この傾向は特に夏期に著しく、定常的に魚類が棲息できない環境となる。このような河川の汚濁対策を考えるため、合業ら(1975)^{19),20)}、川島、鈴木(1983)²¹⁾等により、河床付着性藻類の挙動を考慮したモデルの作成が行われている。

図2 生態系の遷移に伴う DO 濃度変化
上：流下に伴う変化
下：各地点での日周変動

図3 野川(多摩川支流)中流域における DO 濃度日周変動

3. 湖沼水質モデル

河川の汚濁現象は上述したように流入した BOD 物質により生ずる場合が多いが、湖沼の汚濁においてはこのような直接的な有機物の流入が問題になる場合は少なく、ほとんどの場合栄養塩の過剰流入、すなわち富栄養化が問題にされている。このような湖では図 4²²⁾に見られるように、春期、夏期において植物性のプランクトンの大量発生がしばしば観察され、これにより夜間 DO 濃度の低下、魚類のへい死、上水の異臭味等の被害を生じる。このため、春期、夏期における植物プランクトンの増殖量を予測することが、モデル作成上の第一の目的となっている。

河川では水質そのものの予測がモデルの目的であったが、湖沼の場合はこの点でやや異なっている。もちろん、底層の貧酸素化のモデルなどでは、DO 等の物質収支が主な問題点となることもあるが、これとて植物プランクトンが異常増殖した場合にみられるケースが多く、湖沼富栄養化のモデルは、植物プランクトンの大量増殖をどのように予測するかに絞られているといつて過言ではないであろう。

このことは河川の場合より、生物が全面に押し出されているということを示す。プランクトンは種により、その出現の仕方に微妙な違いがあり、かつ、優先種は図 4 に見られるように、環境条件により左右される。このため、しばしば物質収支モデルのように粗いモデル化では、的確な予測が不可能となる。むしろ、生物

図 5 a) 物質循環モデル構造例

種をある程度考慮した生態系の変動を予測するモデルが必要とされることが多い。しかし、種の変化をも含む生態系の挙動はかなり複雑であり、簡単な生態系モデルでは的確な予測ができない。このため、現象をマクロに流入栄養塩濃度と増殖プランクトン量との関係として扱う、一般に Vollenweider モデル²³⁾と呼ばれるものが、生態系モデルと並列して研究が進められてきている。これは 3.3 節で検討するように他の分野のモデルと比較して奇妙な発展の仕方であるが、湖沼の場合現象が複雑であり、かつ、問題の解決が急を要していたために、生じたのだと考えられる。

次に、湖沼の生態モデルと、Vollenweider モデル²³⁾についてその概要を説明する。

3.1 生態系モデル

湖沼における物質循環モデルと生態系モデルの概念図の一例²⁴⁾を図 5 a), b) に示す。ここでは物質としてリンに着目しているが、リンは富栄養化現象にとって最も重要な役割をするものであり、通常リンの挙動と植物プランクトンの挙動が最も注目されている。もちろん窒素も重要な役割を行う場合があるが、一般にはリンの挙動の方が重要であると考えられている。

図 5 a) のように物質の流れを懸濁態、溶存態に分類した程度で記述しようとするものが物質循環モデルで

図 5 b) 生態系モデルの構造例

図 4 震ヶ浦(土浦入)における植物プランクトン数の経年変化

ある。ここで湖のモデルでは図 6 a), b) に示すように、表水層 (epilimnion) とそれより深水層 (hypolimnion) に分けることがよく行われる。図 5 b) には、一般に生態系モデルと呼ばれるものの一例を示すが、これは物質循環モデルでは形態別にだけ分けた分類を、動植物の分類をも考慮するようにより細かく分けたものである。必要に応じては、動植物はプランクトン種に分ける、魚類を考慮に入れる等より細かな分類にまで行ける。

このような水質モデルは、湖沼の富栄養化が進行した 1970 年代に入って多数作成された。(例えば^{25)~27)}しかし、多くのモデルは個々の湖沼の予測のために作成されており、汎用的なモデルは提出されていない。

3.2 Vollenweider モデル

湖の経験モデルとしては Vollenweider モデル²³⁾が有名である。これは、流入する河川の年平均栄養塩濃度と湖の年平均栄養塩濃度、最大濃度、また、湖中のクロロフィルや COD 濃度の関係を示すものである。近年最もよく用いられる関係式は次のようなものである²⁸⁾。

$$Ch_{max} = a \left(\frac{Pin}{1 + SQR(\tau)} \right)^b \quad (3)$$

Ch_{max} : 湖沼中のクロロフィルの年最大濃度 [g/m³], Pin : 流入する河川の年平均全リン濃度 [g/m³], τ : 湖沼の平均滞留時間 [year], a, b : 定数 [-]

ここで、 a, b は図 6 に示すように、データとの比較において、偏差を最小とするように定める。

同様の関係は年平均クロロフィル量、湖水中 COD 濃度、透明度と流入するリン濃度の関係等で求められており、また、流入する窒素濃度との間でも議論されている。

図 6 流入水中の年間平均全リン濃度及び水の滞留時間から求めた湖内の年間平均全リン濃度の推定値と年間平均クロロフィル a 濃度との関係

Vollenweider モデルは観測値と予測値のずれを最小にするようにパラメータの決定を行っている。このモデルに類する研究は多くの研究者により行われているが、(例えば^{29)~32)}実測値を得るのに多額の費用と時間がかかるため、OECD のプロジェクト³³⁾として行われた研究が、その基礎とするデータの多さ、広範囲さにより広く引用されている。

3.3 生態系モデルと Vollenweider モデル

河川モデルの場合、基本となるモデルが提出され、その後モデル中のパラメータ決定に関連研究が行われ、それに引き続きモデルの拡張、また、BOD 分解の基本に立ち帰っての現象の説明、などが行われた。これはモデル研究においては、極めてオーソドックスな発展のあり方であろう。

これに反して湖沼のモデルの場合には、同一の現象を扱うのに生態系モデルと経験モデルが並立している。再曝気係数の推定に関連しても、二重境界説、浸透説、界面更新説などが上げられてきたが、これらは、それぞれ抽象度の高い仮説により演えきされたモデルであり、これらの中には経験式は存在していない。しかし湖のモデルでは、ほとんど現象からの帰納により関係を定めた Vollenweider モデルがモデルとして扱われている。これは便宜上モデルと呼ばれるものであるが、本特集に示された鈴木を考え方に従えば、真の意味ではモデルとは言いがたいものである。通常の現象では研究の第一段階でこのような経験式が提示され、これに対しこの経験式を抽象度の高い原理により説明しようとしてモデルが提出される。しかし湖沼の研究においては、Vollenweider モデルと生態モデルは、ほとんど同時に研究が進められている。

ほとんどの生態系モデルは決定論モデルと考えてよく、全ての現象は初期条件があたえられれば、説明できるという立場に立脚している。このため、なるべく現実に近いモデルの作成を心がける傾向があり、一般にモデルは発達に伴い複雑になる傾向がある。この考えの行き着くところは湖の中の全ての現象を電算機の中に再現しようとするものである。しかし一般に、生態系の複雑さは、現在の研究水準では、容易に再現できないのみならず、ただ電算機的能力にたよる方法は、パベルの塔を立てて太陽にいたるという発想に似ていなくもない。生態系のような複雑な系においては、モデルを複雑にしていけることが、妥当かどうかについては、現在においてもなお、議論のあるところである。この結果、経験式の精度を上げる研究とモデルの研究が同時に行われることになったと考えられる。

4. 結 言

河川のモデルで取り上げられたように、物質収支モデルの扱いで解決がつく問題については、現在までにある程度解決が可能になったといえるであろう。これに対して、生物をマクロに見るだけではなく、種のレベルにおいても的確な議論が必要な問題では、現状のモデルは急に信頼性を失い、満足の行く解は得られていない。

モデルが、問題の現実的解決法を見いだす手段であるとするれば、河川の汚濁についてはある程度の成果を上げたが、湖沼の富栄養化問題については、まだ十全とは言い難い。しかしながら、人類が快適な環境を得る上では、富栄養化の制御は重要な課題であり、これにモデルは不可欠なものと考えられる。今後、基本原理を模索する研究と手を携え、モデル研究も単なる物質収支モデルに留まらず、より生態系深めていく必要があろう。

文 献

- 1) Streeter, H.W., and Phelps, E.B., (1925) A Study of the Natural Purification of the Ohio River, Public Health Bulletin, U.S. Department of Health Education and Welfare, No. 146.
- 2) 市川新 (1980) 都市河川の環境化学, 培風館.
- 3) 川島博之, 鈴木基之 (1982) 河川における自浄作用と自濁作用, 生産研究, 34, No. 7, 287-295.
- 4) Phelps, E.B. (1944), Stream Sanitation, New York.
- 5) Rinaldi, S. et al (1979) Parameter Estimation of Streeter-Phelps Models, J. of Environ. Eng. Div., ASCE, EE1, 75-88.
- 6) Lewis, W.K., and W.G. Whitman (1924) Ind. Eng. Chem., 16, 1215.
- 7) Higbie, R. (1935) Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., 31, 365.
- 8) O Connor, D.J., and W.E. Dobbins (1956) Mechanism of Reaeration in Natural Streams, Am. Society of Civil Engrs. Transactions, Paper No. 2934, 641-684.
- 9) Thachston, E.L., and P.A. Krenkel (1969) Reaeration Prediction in Natural Streams, J. of Sanitary Engr. Div., ASCE, SA1, 65-93.
- 10) Churchill, M.A., H.I. Elmore, and R.A. Buckingham (1962) The Prediction of Stream Reaeration Rates, J. of Sanitary Engr. Div., ASCE, SA4, 1-46.
- 11) Taylor, G.I. (1953) The Dispersion of Matter in Turbulent Flow through a Tube, Proceedings Royal Society of London, 219A.
- 12) Bansal, M.K. (1971) Dispersion in Natural Streams, J. of the Hydraulics Div., ASCE, 97, No. HY11, 1867-1886.
- 13) Dobbins W.E. (1964) BOD and Oxygen Relationships in Streams, Sanitary Engr. Div., ASCE, SA3, 53-77.
- 14) Rutherford, J.C., and O' Sullivan, M.J. (1974) Simulation of Water Quality in the Tarawera River, J. of Environ. Engr. Div., ASCE, 100, 369-390.
- 15) Whrmann, K. (1972) Water Pollution Microbiology, Wiley Interscience.
- 16) 川島博之, 鈴木基之 (1983) 中小都市河川の富栄養化, 水質汚濁研究, 6, 221-228.
- 17) Ohtake, H., Aiba, S. and Sudo, R. (1978) Growth and Detachment of Periphyton in an Effluent from the Secondary Treatment Plant of Wastewater, Jap. J. of Limnol., 39, 163-169.
- 18) 川島博之, 鈴木基之 (1983) 河床付着性藻類の増殖と剝離, 化学工学論文集, 9, 324-329.
- 19) 合葉修一, 岡田光正, 大竹久夫, 須藤隆一, 森忠洋 (1975) 浅い汚濁河川における BOD, DO 収支のシミュレーション (第 1 報), 下水道協会誌, 12, No.131, 33-38.
- 20) 合葉修一, 岡田光正, 大竹久夫, 須藤隆一, 森忠洋 (1975) 浅い汚濁河川における BOD, DO 収支のシミュレーション (第 2 報), 下水道協会誌, 12, No.132, 26-36.
- 21) 川島博之, 鈴木基之 (1984) 浅い富栄養化河川の水質シミュレーションモデル, 化学工学論文集, 10, 475-482.
- 22) 岡田光正 (1983) Microcystis による水の華の発生機構の解明とその制御に関する研究, 東京大学博士論文.
- 23) Vollenweider, R.A. (1969) Moeglichkeiten und Grenzen elementarer Modelleder Stoffbilanz von Seen, Arch. Hydrobiol., 66, 1-36.
- 24) 湖沼水質管理指針策定調査 (1983) 環境庁.
- 25) Jorgensen, S.E. (1976) An Eutrophication model for a lake, Ecological Modeling, 2, 73-90.
- 26) Edited by B.C. Patten (1975) "Systems Analysis and Simulation in Ecology," Academic Press.
- 27) Di Toro, O Connor, D.J., and R.V., Thomann (1971) A dynamic Model of the Phytoplankton Population in the Sacramento-San Joaquin Delta, Advances in Chemistry Series, American Chemical Society, 131, 131-180.
- 28) Vollenweider, R.A. (1974) Input-Output Models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology, Schweiz Z. Hydrol., 37, 53-84.
- 29) Dillon, P.J., and Rigler, F.H. (1974) A Test of a Simple Nutrient Budget Model Predicting the Phosphorus Concentration in Lake Water, J. Fish Res. Bd. Can., 31, 1771-1778.
- 30) Chapra, S.C., and Reckhow, K. (1979) Expressing the Phosphorus Loading Concept in Probabilistic Terms, J. Fish Res. Bd. Can., 36, 225-229.
- 31) Smith, V.H. (1982) The Nitrogen and Phosphorus Dependence of Algal Biomass in Lakes: An Empirical and Theoretical Analysis, Limnol. and Oceanogr., 27, 1101-1112.
- 32) Rast, W., Jones, R.A., and Lee, G.F. (1983) Predictive Capability of U.S. OECD Phosphorus Loading-Eutrophication Response Models, J. of Water Poll. Control Fed., 55, 990-1003.
- 33) OECD (1980) Eutrophication of Waters-Monitoring, Assessment and Control.