総説 REVIEW**湖沼・貯水池の環境評価モデル**

天野 邦彦

(独) 土木研究所 水環境研究グループ 河川生態チーム 〒305-8516 つくば市南原1-6

Kunihiko AMANO: Environmental evaluation models for lakes and reservoirs.
Ecol. Civil Eng. 10(2), 199-208, 2007.*River Restoration Team, Water Environment Group, Public Works Research Institute,
1-6 Minamihara Tsukuba 305-8516, Japan*

Abstract: I have briefly reviewed the research progress made in practical environmental evaluation models for lakes and reservoirs since 1970's and summarized the relation between practical demand and model modification. Vertically one dimensional models for the prediction of water temperature in reservoirs were developed during the first stage of the model development. Practical demand for the appropriate management of dam reservoirs stimulated the development of these models. Also developed were turbidity models for reservoirs during this stage. As ecological modeling, eutrophication models were developed to assess the water quality control plan. Since practical models must be operated to predict for the period of years, complexity of the models have been determined by the capacity of computer at the time of development. Thus, though model structure of eutrophication models have been similar, division of components have been progressed following the development of computers. Recent practical water quality models for lakes and reservoirs contain a number of parameters of which values must be determined arbitrarily. The number of these parameters are increasing. I pointed out it is important to develop the appropriate method to determine parameter values during model calibration to take advantage of the recent detailed models. Also, acquisition of precise field data for input data is important. For the future direction of practical environmental models for lakes and reservoirs, I emphasized the necessity of the development of the structurally dynamic ecological model to deal with the environmental change of large degree, coupling of water quality model and sediment model, and the development of habitat model to better assess the environmental impact of human activities.

Key words: ecosystem, environmental model, lake, reservoir, water quality

はじめに

現在、自然環境の保全を検討する際には、人間活動による影響を考慮することなしには十分な検討になり得ない。人間活動による影響について、いくつかの選択肢を準備して、気象など変動する自然条件の基でこれらの選択肢のうちいずれのものが自然環境保全と社会の要請を

より良く満たしうるかについて可能な限り客観的かつ定量的に科学的評価を与えることが環境評価モデルの役割であると考えられる。このように考えると、環境評価モデルは、地球温暖化に関連して、二酸化炭素排出量を変化させた場合の気温上昇量を評価するような時間的空間的に非常に大きなスケールの事象を対象にするものから、自然環境の改変を伴う公共事業による環境影響評価を行うためのものまで、多くの種類が存在する。

湖沼や貯水池の環境評価モデルは、種々の環境評価モ

2006年8月24日受付, 2007年7月17日受理

e-mail: amano@pwri.go.jp

デルの中でも、実際に湖沼や貯水池を管理するために従来数多く利用されてきている。この意味で、湖沼や貯水池の環境評価モデルの実用化は相当程度進んでいると言える。特に環境影響評価法の施行に伴い新たに計画される比較的大規模なダム貯水池については、環境影響評価が義務化されると共に、国土交通省所管の建設中ダムについては、環境影響評価法施行以前に着工していた事業についても環境影響評価法に定められた方法に準じて環境影響についての評価が実施されている。環境影響評価においては、水環境に与える影響が項目の一つとして評価されており、この際には通常、貯水池水質解析モデルが使用されている。このため、貯水池の環境評価モデルとしての貯水池水質解析モデルは、これから建設される貯水池、すなわち現段階では存在していない水域の環境評価に数多く適用されているという実態がある。本稿では、湖沼や貯水池の環境影響評価モデルについて生態系を含めて環境をどのように取り扱っているか、また実用という観点でどのような課題が存在するか、また今後の発展性について述べることにする。

湖沼と貯水池環境の比較

湖沼や貯水池の環境評価モデルについて、議論を始める前に、まず湖沼と貯水池環境について比較を行う。こ

れにより、両者に共通して議論できる部分と区別が必要な部分を抽出する。

水系としてみた場合、湖沼や貯水池は共に水文状況、流域特性、湖沼・貯水池形状、湖水、底泥から影響を受ける構造である。しかし、湖沼と貯水池には類似点と相違点が存在する。外部からの影響や、内部での変化を物理、化学、生物学的に見た場合、個々の過程を規定する法則は湖沼、貯水池とも同じはずであるが、一般的に湖沼と貯水池では種々の過程の程度や変動量に違いがあるため、湖沼で適用される解析手法をそのまま貯水池に適用することが困難な場合もあり、注意する必要がある。Table 1 に生態系に関連する特性についての湖沼と貯水池との比較を示す (Wetzel, 1990)。

湖沼や貯水池の存在は河川水の流下を遅らせる。湖沼や貯水池に流入した水は、その中に滞留した後に流出する。この過程に費やされる時間を滞留時間と呼ぶ。滞留時間は、変動する河川流量やその時々湖水容量（水位変化により変動する）により変化する。平均滞留時間は湖沼・貯水池の容積を平均流入量で除することで求められる。滞留時間の長短は、流入水質の変化に対して湖水・貯水池水の反応が起こるまでの時間差や植物プランクトンの発生状況に影響するため、非常に重要なパラメータである。Table 1 に示されるように、一般的に貯水池は、湖沼よりも滞留時間が短く、その水質は流入水質により

Table 1. Comparative characteristics and properties between reservoir and natural lake ecosystems (modified from Wetzel 1990)

Properties	Reservoirs	Natural lakes
Water level fluctuations	Large, irregular	Small, stable
Thermal stratification	Variable, irregular	Natural regime; often dimictic or monomictic
Inflow	Most runoff to lake via river tributaries (high stream orders); penetration into stratified strata complex (over-, inter-, underflows); often flow is directed along old riverbed valley	Runoff to lake via small tributaries (low stream orders) and diffuse sources; penetration into stratified waters small and diversive
Outflow	Highly irregular with water use; withdrawal from surface layers or from hypolimnion	Relatively stable; surface water
Flushing rates	Short, variable (days to several weeks); increase with surface withdrawal, disruption of stratification with hypolimnetic withdrawal	Long, relatively constant (one to many years)
Suspended sediment in water	High, variable; high percentage clay and silt particles; turbidity high	Low to very low; turbidity low
External nutrient loadings	Generally higher than a natural lakes (larger drainage basin, more human activity, greater water level fluctuations); variable, often unpredictable	Variable but relatively predictable; loadings often moderated by biogeochemical influences of wetland/littoral interface zones

大きく影響を受ける。滞留時間が数日といった貯水池では、植物プランクトンが増殖するのに十分な時間がなく、大量増殖が起こらないのに対して、滞留時間が長くなるにつれて、十分な栄養塩があれば植物プランクトンの大量増殖が起こりうる。

また貯水池には、湿地帯や沿岸の遷移領域を経ずに河川が直接流入するため、流入水の影響を大きく受ける。このことは、非定常的でパルス状の栄養塩及び土砂負荷を受けることとなり、栄養塩濃度変化や水中の光環境が自然湖沼と異なり、生態系に複雑な影響を与える。特に出水時の貯水池環境の変化は急激であり、貯水池は一般的に非常に動的な湖沼とも見ることが出来る。このため貯水池の物理的特徴、生態系特性は湖沼と河川の中間に位置するものと考えることができ、滞留時間の違いにより湖沼、河川の特性にどの程度近いかが判別される (USEPA 1990) (Fig. 1)。

また、湖沼の水域は大きく分けて2つの領域に分類される (Fig. 2)。沿岸帯 (littoral zone) は岸において波の影響を受ける部分の上から夏季においても混合した温かい表層水が底部まで到達する深さまでを指し、その沖に広がる岸や湖底と接触のない領域を沖帯 (pelagic あるい

は limnetic zone) と呼ぶ (Horne 1994)。沿岸帯に生息する生物は強い波に耐えるものでなくてはならず、多くは岩や植物に強固に付着している。過度の光、波、また岩や流動的な砂は植物の付着を妨げるが、沿岸帯では動植物が多く存在することがしばしばある。沖帯に生息する生物は遊泳するか浮遊する。これらの能力が無い場合底部に沈降してしまう。通常の貯水池では、沿岸帯に属する部分があり認められない。

春から秋にかけての期間は、湖沼・貯水池の水温は鉛直方向に変化する。ある程度以上深い湖沼・貯水池では、この変化が顕著となり、これを水温成層と呼ぶ。このような湖沼・貯水池の水柱は、上部の温かい水が存在する部分を表層 (epilimnion)、中間の水温変化の大きい層を変温層・水温躍層 (thermocline) あるいは中間層 (metalimnion)、それより深い部分を底層 (hypolimnion) と呼び、3つに分類される (Fig. 3)。気温が低下する晩秋には水温成層が消滅し、ほとんどの湖沼では水温が一樣になる。寒冷地では冬季に表層が凍結し、表層水温が低い水温成層が形成されることもある。この成層は、春に混合され、その後再度水温成層が形成される。

湖沼と貯水池は、河川の流水を一定時間貯留し、水域

Fig. 1. Characteristics of rivers, dam reservoirs and lakes regarding hydraulic retention time (USEPA 1990).
河川、ダム湖、湖沼の特性と滞留時間との関係

Fig. 2. Zones in lakes (Horne 1994).
湖沼水域の領域区分

Fig. 3. Profiles of temperature and light in lakes (Horne 1994).

湖沼の水温及び光分布状況

を形成しているという点において、類似の環境を形成しているが、滞留時間の違い、沿岸帯の有無、水温構造の形成に関して差異を有しているといえる。この様な類似点から、湖沼および貯水池の水質モデルについては、流動や水質変化のモデルは基本的には同様のものを利用出来る。しかし、湖沼・貯水池の滞留時間や形状の相違は、水温構造により大きく特徴づけられる湖沼や貯水池の環境特性の違いにつながるため、典型的に選択されるモデル構造は、浅い湖沼、深い湖沼、ダム貯水池により異なる。たとえば水温成層が形成されにくい浅い湖沼では、平面2次元モデルが採用されることが多く、一般的に谷部をせき止めて建造されることの多い貯水池は、もとの河川の流下方向に対して水平横方向の水質変化が少ない特性があるため、鉛直2次元モデルが採用されることが多い。

貯水池では、底部や中間部に放流口が存在することがあり、これら放流口から放流がある場合、この放流口標高付近に水温が大きく変化する層（水温躍層）が形成されることがあり、これは貯水池固有の水温分布である。このため貯水池における種々の標高における放流口の存在は、貯水池水質シミュレーションを行う際には、重要なモデル化の要素となっている。深い湖沼では、鉛直方向の変化を表現することが重要なため、鉛直一次元モデルや平面的な変化を再現するために3次元モデルが採用

されることが多い。

湖沼・貯水池環境評価モデルの変遷

湖沼・貯水池の環境評価モデルとしては、生態系を含む水質変化を評価する水質・生態系モデルが最も多く開発され、利用されてきていると考えて間違いないと考えられる。ここでは、水質・生態系解析のための数値モデルを中心に、湖沼・貯水池の環境評価モデルがどのように変遷してきたかについて述べる。以下に述べる諸モデルについては、研究事例が非常に多いため、参考文献として紹介しきれない点に関しては、ご了承頂きたい。

湖沼や貯水池における水質変化を規定する要因として最も重要なものは水温分布である。水温は、生物活動を規定する重要な環境要素であるばかりでなく、湖沼や貯水池における流動をも規定するので、数値モデルにおいて必ず対象となる項目である。湖沼や貯水池水質モデルは、対象とする環境要素やモデル特性によりいくつかの種類に分類出来るが、近代的な数値モデルとしては、前述した湖沼・貯水池の水温構造の鉛直方向の変化を模擬するために鉛直一次元モデル (Orlob & Selna 1970; Huber et al. 1972; 安芸・白砂 1975; 森北ほか 1987 など) が1970年代より数多く開発された。これは、新たに建設

された貯水池により放流水温が流入水温に比べて大きく変化してしまう問題や、日本ではさらに放流濁水の長期化問題解決のために開発が進められてきたものである。

鉛直一次元モデルでは、流量から水温成層場における流動層厚を求め(Kao 1965; Koh 1964; 日野・大西 1969), その層内での流速分布をガウス分布と仮定して与えることで流動(移流)による水温変化を計算する工夫が行われた。このような取り扱い、実現現象を平均的には良好に再現することが可能であり、現在でも有効に利用されている。しかし電子計算機の処理能力上昇に伴って、運動方程式を解いて流動を扱う二次元モデル(平面二次元、鉛直二次元(岩佐ほか 1976)), 三次元モデル(岩佐ほか 1985)が開発され、計算に乱流モデルを組み込んだものも出現している。このような流動計算の精度向上によって荒天時に見られる水塊構造の急変も再現することが出来るほか、局所的な現象の解明に利用できるため、種々のモデルが開発されている(湖沼技術研究会 2003)。

生態系モデルについては、窒素・リン負荷量の増大に伴う湖沼・貯水池における一次生産の増加(富栄養化現象)の対策の評価を行うために、植物プランクトン増殖のモデルを組み込んだ低次生態系モデル(たとえば, Di Toro et al. 1971)が開発されてきた。Di Toro et al. (1971)のモデルでは、植物プランクトン(クロロフィル)、植食性動物プランクトン、肉食性動物プランクトン、有機および無機リン、有機窒素、アンモニア態及び硝酸態窒素の8つの変数を動的に組み合わせて水質変化を模擬している。このモデルは、1960~1970年代にかけて富栄養化に伴う水質汚濁から「北米の死海」と呼ばれたエリー湖における水質解析に用いられた。当初は、電子計算機の処理能力に限界があったため、モデルにおいては流動に関して水の運動方程式を解くことは行われず、湖を分割してそれぞれの構成部分間の移流量を定常値として与えることで水の流れによる水質変化を表現していた。米国においては、ほぼ同時期に湖沼や貯水池における時空間的な水質変化を追跡するための一般モデルとして開発されたWASP(Water Analysis Simulation Program)も使用されるようになった。このモデルは現在でも米国環境保護局により維持管理されており(Ambrose et al. 1993)、北米における水質研究に多く利用されている。

わが国においても、初期の水質・生態系解析の数値モデルとして、1970年代から1980年代にかけて、琵琶湖を対象にしたモデル(土木学会 1978; Ikeda & Adachi 1978; Ikeda et al. 1978; 宗宮ほか 1979; 宗宮 1981)、霞ヶ浦を対象にしたモデル(松岡 1984)、貯水池を対象に

したモデル(松尾 1982; 森北ほか 1987)など数多く開発されている。

現在に至るまで数値モデルにおける水質・生態系の扱いについては、栄養塩類の分画が詳細になってきたことや、生態系についても魚類など高次の生態系要素を組み込んだモデルも開発されてきているが、基本的な構造は、初期のモデル群(松岡(1984)が詳細に整理している)とあまり大きな変化は見られないものが多い。ただし、計算機的能力増大に応じて、流れについて三次元で計算すると共に、水柱における水質変化を計算するだけでなく、底質における物質変化過程も詳細に記述するモデルも開発されてきている(Fig. 4, 例えば Cerco & Cole 1995)。

上記のような生態系の食物連鎖を通して生元素の変化や生態系要素の変化を追うモデルに加えて、近年では湖沼の物理的改変による生物・生態系への環境影響評価を生息環境変化に重点をおいて行うことをねらったモデルも開発されている(鶴田ほか 2002)。

課題要素

湖沼・貯水池の水質・生態系モデルの変遷について見ると、電子計算機的能力向上に伴い、計算格子の分割が進み空間的な変化に関する解析が詳細になるとともに、水質・生態系モデルは、栄養塩類、植物プランクトン、動物プランクトン、その他2次消費者といった計算要素の関係について詳細化、複雑化した定式化が行われることで、動的な解析が可能となってきた。また、モデルの進歩と共に、実験や現地観測が数多く行われてきたことから植物プランクトンの増殖と栄養塩類との関係を中心に、バクテリア、魚類、動物プランクトンといった湖沼・貯水池において重要な生態系要素について、生態特性に関する種々の特性が整理されており(例えば Jørgensen et al. 1991)、湖沼や貯水池で生じる生態系反応を含む水質変化現象をかなり定量的に再現出来るようになってきている。

しかし、湖沼や貯水池の水質・生態系モデルは、実用的には将来の管理におけるいくつかのシナリオに基づいた条件下での環境予測を行うことに用いられるため、このような利用に際してはいくつかの課題があると考えられる。以下では、これらの課題と共に今後の展望について述べることにする。

計算モデルパラメータ同定の妥当性

湖沼・貯水池の水質・生態系モデル計算においては、現場における水質や生態系要素の変動をモデルが適切に

Fig. 4. Example of water quality and ecosystem model for lakes and reservoirs (modified from Cerco & Cole 1995).

貯水池水質・生態系モデルの例

再現出来るようにモデルパラメータの同定を行う必要がある。貯水池水質予測に多く用いられている土木研究所のモデルで使用されているものについて見ても、水質変化計算に必要なパラメータとして、植物プランクトン増殖率の算定に関するものが7種類、動物プランクトンの増殖に関するものが3種類、植物プランクトンの死滅に関わるものが2種類、動物プランクトンの死滅に関わるものが2種類、溶存酸素の生産及び消費に関するものが5種類、懸濁物の沈降速度に関するものが5種類、有機物の分解に関わるものが6種類、底泥からの溶出速度に関するものが7種類、物質の変換率に関するものが6種類ある（森北・天野 1991）。この他にも、いくつかのパラメータを設定して計算する必要がある。これらのパラメータがとりうる値については、既往事例から一般的な範囲が設定されているものの、採用したパラメータ値の組み合わせによって予測結果が異なるため、パラメータ値の感度分析を行い、鋭敏なパラメータ設定には十分配慮すると共に、現地における水質変化特性を十分に咀嚼して、妥当な設定をする必要がある。

しかし、このような作業は、以下のような事情により高度な技術を要する。例えば、植物プランクトンや動物プランクトンなど主要な生態系要素は、鉛直移動を行うものが存在するため、実際の湖沼や貯水池においては、パッチ状に濃度の高い場所が存在するなど、空間的な濃度変化が激しい場合がある。ただし、検証用に測定されているデータには限りがあり、特別な目的を持って実施された調査（例えば天野ほか 2000）以外では、このようなパッチを追跡するに足りる程、空間的に詳細なデータは通常取得されない。このため、定期的な調査観測データの中に、大量に存在した植物プランクトンのパッチを採取したものが混ざっている場合、植物プランクトン集積現象をモデル化した計算モデルを使用するならば別だが、実用化モデルにおいては、このようなモデル化はあまり行われないことから、他のデータとの取り扱いを区別する必要が出ることもある。このような場合、顕著な集積が生じていたと考えられない観測データを対象にパラメータの同定を行い、このような集積の結果と考えられるデータについては考慮の対象から外すといった場合もある。

る。将来予測計算において重要な観点は、空間的にも時間的にも急激な変化を予測するよりも、平均的な環境の様相を定量的に予測することが重要であることが多いので、このような作業は妥当と思われるが、このためアオコや淡水赤潮と言った目立ちやすい現象についての再現や予測は困難な場合もあり、今後の課題と考えられる。時間的・空間的に有限な観測データをいかに利用すると共に、パラメータ値を妥当に同定するかという問題は実用化モデルにおいて、極めて重要な課題である。現在、研究者や技術者の力量に負うことが大きいパラメータ設定に関して、実用性の見地からは一般性と客観性を有する手法の開発が今後強く望まれる。特に、近年開発が進んでいる詳細なモデルにおいては、パラメータ数の増加が顕著であり、実用モデルとしての利用においてパラメータ値の妥当な設定は、ますます重要度を増している。

流入負荷の算定

生態系を含む水質変化のシミュレーションにおいては、湖沼・貯水池の系外からの流入負荷量を入力して計算を行う必要がある。河川からの流入負荷は、流量と水質濃度の積で表されるが、流域特性により流入水質が多様に変化するため、負荷量の算定は個別に行う必要がある。計算対象期間を通じて高頻度に水質調査が行われることはまれであるため、通常は既存の水質調査結果と水質調査時の流量とを関係させた流量-負荷曲線（L-Q式）を個別に作成して、観測された流量の関数として負荷を与える。このL-Q式の精度が結果的に水質計算の精度を決定するため、モデル自体の課題ではないが、流入負荷の算定は湖沼・貯水池の水質・生態系解析において大きな課題である。

現在実施されているダム貯水池の環境影響評価における水環境の検討でも、流入負荷の算定に大きな努力が払われている。新設ダム貯水池における水質予測を行う前に、既設ダム貯水池における水質解析を行うことで解析の妥当性を検証するための同定計算を行うが、この過程において、流入負荷算定の精度が再現計算の精度を大きく左右することが示されている。Table 1に示したように、一般的にダム貯水池の水質変化は自然湖沼に比べて流入水質変化に強く影響を受けるため、流入負荷の算定を正確に行うことが実用上非常に重要になる。特に出水時の河川水質は平常時に比べて激変することが知られており、出水時の水質変化状況を正確に推定する作業が不可欠である。出水時の懸濁物濃度の推定は粒径分布の変化を含めて、詳細な調査を行わない限り困難であるし、粒径が数 μm 以下の細粒分の沈降速度の設定やその存在割合を

同定する過程は計算結果を大きく左右するものであり、この過程を客観的に行う一般的手法の開発が急務である。また、生態系に係わる水質予測で最も重要な過程である植物プランクトン増殖を規定する必須栄養塩類であるリンの流入負荷特性について見ると、出水時には全リンとして見た場合でもリン酸態リンとして見た場合でも懸濁態の割合が増加することが多くの河川で観測されている（リン酸態リンの分析についても試料をそのまま分析した結果と1 μ 径のフィルターでろ過した後に分析した溶存態の結果を比較すると出水時には溶存態の割合が減少する）。一般的にダム貯水池において、出水後はリン等の栄養塩類が貯水池に多く流入することで植物プランクトンの大量増殖が見られることが多く、これは貯水池水質の再現計算においても重要な現象である。しかし懸濁態として流入した部分は貯水池内で比較的速やかに沈降するため、貯水池に流入したリンの一部しか速やかに植物プランクトンに利用されることはない。このため出水時に河川から貯水池の水柱に実際に供給される利用可能な栄養塩類の量を正確に算定出来ない限り、精度高い再現は困難である。このようなことから、ダム貯水池の水質予測を行う際には、出水時の懸濁物濃度や、溶存態及び懸濁態に分画した栄養塩類濃度の精度高い推定が必要である。

新規ダム貯水池において、貯水池からの放流水質が、流入水質と極力変わらないようにするための運用方法が環境影響評価の中で検討されるが、上記のような推定が正確に行われない限り、精度高い検討は不可能であり、実用を考える上で、流入水質の推定は極めて重要な項目である。このため新規ダム貯水池の環境影響評価においては、出水時の懸濁物粒径分布や沈降速度について詳細な測定や実験が行われている。詳細モデルの威力を発揮するためには、要求される入力条件が質量共に増大することに留意する必要がある。

環境条件が大きく変化した場合の生態系応答

湖沼・貯水池の水質・生態系モデルによる環境評価を行う場合、多くは何らかの将来のシナリオに基づく環境変化を予測することになる。種々の施策を実施した場合の水質予測を行う場合が多いが、湖沼・貯水池水質は植物プランクトンなどの低次生態系による影響を強く受けることから、施策に対する低次生態系の応答を適切に反映したモデルを作成しなければならない。例えば、流入する窒素やリンなどの栄養塩類濃度変化によっては、優占的に増殖する植物プランクトン種が変化することが容易に予想されるし、水温変化などが主な原因と考えられ

るが、季節による優占植物プランクトン種の変遷は実際にもよく見られる現象である。このような問題に対応するため、植物プランクトン種を3種類程度、計算項目として設定し、それぞれの生態特性を異なるパラメータ値で表して計算するモデルが実用化されている。

湖沼や貯水池がおかれている状況が大きく変化しなければ、このようなモデルでかなり定量的な将来予測を行うことは可能となると考えられるが、対策等により将来の流入水質が大きく改善されることが予測される場合、モデルの前提条件自体が変更を余儀なくされる。例えば、浅い湖沼においては大型植物が優占的で透明な状況と植物プランクトンが優占的で濁った状況という2つの安定的な状態が存在することが示されている (Scheffer 2001)。これら2つの状態を想定して、大型植物の水質影響と言った生態的機能について限定的に取り扱うことで予測を行うことは可能であるが (天野・時岡 2005)、水質悪化、改善のどちらの過程においても、どのような要因がどの程度変化した段階でこの2つの状態がシフトするのかを定量的に評価することは極めて困難な作業となると考えられる。このように環境条件が大きく変化した場合、生態系の構成要素がどのように反応するかについて定量的に予測するモデルは、生物の環境変化に対する順応性が高いことから、開発の難易度が高い。このような課題に対して、全ての生物要素は、存在量を最大にしようと活動する。すなわち熱力学の概念であるエクセルギーで計測出来る平衡状態から最も離れた地点を目指すという仮説を採用したモデルが提案されている (Jørgensen 1999)。しかし、このようなモデルについては、発展途上でありその妥当性について広く認知されている訳でもないのに、実用化されるまでには、まだ時間がかかると考えられる。大きな環境状況の変化を予測するという目的で開発されたものではないが、Asaeda & Van Bon (1997) や Manatunge et al. (2000) の様に大型植物を含めた多くの生態系要素間の関連性について定量的評価を加えて、生態系相互の作用を強く意識したモデルも開発されてきており、このようなモデル開発で得られた知見を実用モデルに活かしていくことが当面の課題と考えられる。

底泥の取り扱い

回転率の高い貯水池においては、比較的影響は小さいが、回転率の低い湖沼・貯水池、特に浅い湖沼においては、水質に与える底泥の影響は非常に大きい。底泥の湖沼水質への寄与については、Mortimer (1941) による古典的な研究以来、多くの検討がなされてきている。底泥が湖沼や貯水池の水質・生態系に与える影響については、

多くの実用化モデルにおいて、底層の溶存酸素濃度や水温の関数として底泥からのリン及び窒素の回帰を表している。しかし底泥と水柱間の物質移動は、相互的なものである上に、動的な特徴を持つことから、Di Toro (2001) が記述するように詳細な動的モデルが開発されてきている。また、わが国の湖沼を対象としたモデルでも、松梨ほか (2002) が浅い富栄養化した湖沼である手賀沼を対象に底泥と水柱との相互物質移動を考慮したモデルを開発し、沼内での水質変化に対する底泥の役割について評価している。このモデルでは、詳細な流動モデルと水質モデルとを結合することで時空間的水質変化を再現すると共に、さらに底泥モデルを用いて底質の時空間変動予測を行い、水質モデルに結合させている。このような底泥と水柱との相互物質移動を考慮した底泥の取り扱いをしたモデルが実用化されることで、将来の流入水質改善が、底泥をどのように変化させて、さらにこの変化が湖沼水質変化にどう影響するかといった評価が可能になる。富栄養化した湖沼において、底泥からの栄養塩類の溶出は水質改善を遅らせる要因として認識されているが、底泥環境の変化をも予測することで、今後各湖沼で進むと考えられる流入水質改善が湖沼環境改善に寄与するまでの時間遅れについても検討の可能性が出てくると考えられる。

生物生息場の環境評価

種々の人為的行為が湖沼や貯水池に与える環境影響評価を行うためのモデルとして開発され利用されているもののうち圧倒的に多くの事例は、水質変化を中心にしたものである。これは、湖沼や貯水池における環境問題として、富栄養化に代表される栄養塩類の過剰に伴う水質汚濁対策を進めることを目的として、モデル開発が行われてきたことによる。栄養塩類の過剰による水質汚濁の評価であれば、多くの場合、生態系要素としては栄養レベルとして動物プランクトン程度までを対象とすれば十分であり、水柱での物質動態を比較的単純なモデルで記述することで対応が可能であったと考えられる。

しかし、湖沼や貯水池における環境についての理解が深まると共に、湖沼水質 (環境) には、低次生態系だけではなく、より栄養レベルの高い生物の影響や、大型植物の影響が強く作用する場合があることが分かってきた (特に湖沼)。また、物理環境の改変が生態系に与える影響について評価するという要求が高まってきていることから、今後は湖沼の物理環境 (光、流動、水温、底泥組成など) 変動を水質変動に加えて、生物の生息場としての湖沼環境を評価するモデルの開発が望まれている。こ

のようなモデルは、従来開発が進んでいる水質・生態系モデルを基礎として、各種の環境変化が生態系との相互作用を通して湖沼環境をどの様に変化させるかということについて、よりダイナミックに予測することを目指すものであり、従来モデルの発展型として位置づけられる。このようなモデルの適用方法としては、湖沼の自然再生事業を計画するにあたり、当該湖沼における上記の物理環境の長期間の変化を再現して、過去に生じた湖沼環境変動と生態系応答を定量的に評価することで（例えば、水位変化と植生の遷移など）、自然再生事業として当該湖沼の物理環境をどの様に再生すれば、自然環境の回復や復元が可能になるのかについて定量的に評価することを目指すといったことが考えられる。このような環境変動と生態系応答の評価については、時間遅れや、累積的影響が重要になることも予想されることから、一層の知見の蓄積が必要になると考えられる。

摘 要

湖沼・貯水池の環境評価モデルとして、主に 1970 年代より本格化してきた湖沼・貯水池水質・生態系モデルの変遷について振り返り、これらモデルが、貯水池の流入水温と放流水温との変化の緩和、濁水放流の長期化の緩和対策策定のためや湖沼・貯水池における富栄養化対策策定のために開発されてきた経緯について記した。実際の施策の基礎資料として利用される実用化モデルという特性から、計算対象期間は短くとも一年間程度となるため、開発時点での電子計算機の処理能力にモデル構造の精粗が規定されてきたと考えられる。低次生態系を対象とした水質・生態系モデルについては、初期のものから現在のものまで、基本的なモデル構造には大きな変化はないものの、より分画が詳細になると共に、元素の動態を分画した形態ごと個別に定量的に表現するモデルへと発展してきていることを記した。このようなモデルの発展により、より定量的に正確を期した評価が可能となる一方、詳細なモデルの威力を十分発揮させるために、同定が必要なパラメータ数増大への対応や流入負荷の算定など計算入力条件の精度向上といった点が実用モデルの利用において重要な課題となっていることを記した。また、モデル構造にも関わる課題として、環境条件が大きく変化するような場合の予測を行うためのモデル開発、底泥の役割を動的に解析するモデル開発、生物生息場の環境評価を行うモデル開発を挙げた。下水道整備などによる流入水質改善事業については、まだ完全ではないも

のの相当の進展がなされて来ている。このため今後の湖沼・貯水池の環境管理における生態モデルの利用は、水質改善が進行する中での環境変化を予測したり、生物生息場としての湖沼・貯水池管理を適切に行うための手法策定に用いられることが増加すると考えられる。このような方向性の中で、課題を指摘すると共に、試みられている事例について述べた。

引用文献

- 安芸周一・白砂孝夫（1975）貯水池流動形態のシミュレーション解析-その 1 発電専用貯水池の流動形態，発電水力 **134**。
- 天野邦彦・田中康泰・鈴木宏幸・安田佳哉（2000）貯水池末端における持続的な淡水赤潮に関する研究，水工学論文集 **44**: 1083-1088。
- 天野邦彦・時岡利和（2005）浅い湖沼の水質への水生植物の影響解析，水工学論文集 **49**: 1219-1224。
- Ambrose, R. B, Wool T. A. & Martin J. L. (1993) The water quality analysis simulation program, WASP5. Part A: Model documentation. USEPA ERL, Athens.
- Asaeda, T. & Van Bon T. (1997) Modelling the effects of macrophytes on algal blooming in eutrophic shallow lakes. Ecological Modelling **104**: 261-287.
- Cerco, C. F. & Cole T. (1995) User's Guide to the CE-QUAL-ICM Three-Dimensional Eutrophication Model, Technical Report EL-95-15, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station.
- Di Toro D. M., O'Connor D. J. & Thomann R. V. (1971) A dynamic model of the phytoplankton population in the Sacramento-San Joaquin delta, In Non Equilibrium Systems in Natural Water Chemistry, Advances in Chemistry Series, n. 106, American Chemical Society.
- Di Toro, D. M. (2001) Sediment Flux Modeling, John Wiley & Sons, New York.
- 土木学会（1978）琵琶湖の将来水質に関する調査，昭和 52 年度。
- 日野幹雄・大西外明（1969）密度成層流におよぼす point sink の高さの効果，土木学会論文報告集，**v. 163**, 39-48。
- Horne A. J. (1994) Limnology 2nd ed., McGraw-Hill, New York.
- Huber W. C, Harleman D. R. F. & Ryan P. J. (1972) Temperature prediction in stratified reservoirs, Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, **HY4**, 645-666.
- Ikeda, S. & Adachi N. (1978) A dynamic water quality model of Lake Biwa — a simulation study of the lake eutrophication. Ecological Modelling **4**: 151-172.
- Ikeda, S., Inoue Y. & Iwai S. (1978) Multispecies of planktons and nutrients model of lake eutrophication. A simulation study in Lake Biwa, In State-of-the-Art in Ecological Modelling, v. 7, (ed.) Jørgensen, S. E., 501-526.
- 岩佐義朗・松尾直規・遠藤正昭（1976）ダム貯水池の水温予測，京都大学防災研究所年報，第 **19** 号 **B**, 221-236。
- 岩佐義朗・井上和也・松岡隆之（1985）三次元解析法による琵琶湖湖流に関する二、三の検討，水理講演会論文集，**V**。

- 29, 751-756.
- Jørgensen S. E., Nielsen S. N. & Jørgensen L. A. (1991) Handbook of ecological parameters and ecotoxicology, Elsevier.
- Jørgensen S. E. (1999) State-of-the-art of ecological modeling with emphasis on development of structural dynamic models. *Ecological Modelling* **120**: 75-96.
- Kao T. W. (1965) The phenomenon of blocking in stratified flow. *Journal of Geophysical Research*, **v. 70**, **n. 4**, 815-822.
- Koh R. C. Y. (1964) Viscous stratified flow towards a line sink, W.M. Keck Laboratory Report KH-R-6, California Institute of Technology.
- 湖沼技術研究会 (2003) 湖沼管理のための流動機構調査—より高度な湖沼管理に資するための調査に向けて—, 湖沼技術研究会編 (座長: 福岡捷二).
- Manatunge J., Asaeda T. & Priyadarshana T. (2000) The influence of structural complexity on fish-zooplankton interactions: a study using artificial submerged macrophytes. *Environmental Biology of Fishes* **58**: 425-438.
- 松尾直規 (1982) 貯水池における水温, 濁度ならびに富栄養化指標の予測に関する水理学的研究, 京都大学学位論文.
- 松岡譲 (1984) 霞ヶ浦の富栄養化モデル, 国立公害研究所研究報告, 第 **54** 号, 53-242.
- 松梨史郎・井野場誠治・下垣久・宮永洋一 (2002) 手賀沼における流動・水質・底質の時空間変動シミュレーションと底泥からの栄養塩溶出の水質への影響, 土木学会論文集, **n. 712**, **II-60**, 161-173.
- 森北佳昭・畑孝治・三浦進 (1987) 貯水池の冷濁水ならびに富栄養化現象の数値解析モデル (その 1), 土木研究所資料, 第 2443 号.
- 森北佳昭・天野邦彦 (1991) 貯水池水質の予測・評価モデルに関する研究, 土木研究所報告, 第 **182** 号, 1-109.
- Mortimer C. H. (1941) The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes, Part I, *Journal of Ecology*, **29**, pp. 280-329.
- Orlob G. T. & Selna L. G. (1970) Temperature variations in deep reservoirs, *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, **HY2**, 391-410.
- Scheffer M. (2001) *Ecology of Shallow Lakes, Population and Community Biology Series 22*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- 宗宮功・海老瀬潜一・奥川光治 (1979) Eutrophication simulation in the southern basin of Lake Biwa, 環境衛生工学研究論文集, 1, 京都大学衛生工学教室, 19-30.
- 宗宮功 (1981) 湖沼の物質循環モデル, 国立公害研究所調査報告, 第 **18** 号, 114-151.
- 鶴田泰士・石川忠晴・西田修三・成田舞・藤原広和 (2002) 小川原湖におけるヤマトシジミの繁殖環境について, 土木学会論文集, **n. 705**, **II-59**, 175-187.
- USEPA (1990) *The Lake and Reservoir Restoration Guidance Manual*, EPA-440/4-90-006.
- Wetzel R. G. (1990) *Reservoir Ecosystems: Conclusions and Speculations*, In: *Reservoir Limnology* (eds. K. W. Thornton, B. L. Kimmel & F. E. Payne). John Wiley & Sons, New York.