

湖沼水質シミュレーションモデルの改良

宇都宮 高 栄・村 田 義 公

Improvement of Lake Water Qualities Simulation Model

Takae UTSUNOMIYA, Yoshikimi MURATA

1 はじめに

湖沼水質シミュレーションでは水理と汚濁負荷（内部生産を含む）の面から、集水域と湖沼からなる流域全体をシステム化する。このシステムは入出力項、水理項、水質（内部生産を含む）項で構成され、この各項に浄化対策等を組み込むことも可能である。行政的には流域別負荷削減対策や湖沼浄化諸対策を実施したときの水質予測のために簡易モデルが必要であり、シミュレーションソフトを対話型とすることも重要である。

前回（平成4年度）のシミュレーションでは、北潟湖および三方五湖について、水質の変動は降水による流入変動を表わす「流域タンクモデル」と湖水流動・生産を表わす「BOXモデル」を基本とした¹⁾。平成9年度には窒素およびリンにかかわる暫定基準の見直しを計画しており、現在、モデルの改良を行っている。

本報では、入出力項のうち蒸発散と流域タンクモデルの負荷パラメータについて、水理項のうち潮位変化と塩分挙動扱いについて改良案の概略を示す。

2 蒸発散量

今回は流域タンクモデルの蒸発として月ごとの蒸発量を固定し、晴天時に日割量をタンク表層（1段）から蒸発させ、また、湖水理モデルの湖面蒸発量は年間600mm蒸発と固定した。今回は流域の蒸発散をモデル化するために、流域タンクモデルに蒸発散の計算回路を付け加える。

流域蒸発散量の推定には、流域土地利用状況を加味する種々の式が考案されているが、実用上は色々な問題を含んでおり、パラメータの既知状況の制約からPenman式が簡便である。湖面蒸発散は水面から直接の蒸発であり草木に被覆された流域とは異なる。しかし、北潟湖のような浅い水体では熱容量が限られるため蒸発量は正味放射に支配されて、流域と実際上差がなく、Penman式でかなりの精度で推定できるといわれている。

2.1 Penman式と各項の組立て

この方法は熱収支法と空気力学法を組み合わせている²⁾。

正味放射量 $H_0 = (1 - \alpha) Q_0 (0.18 + 0.55 S) - \sigma T_a (0.56 - 0.092 e_a^{0.5}) (0.1 + 0.9 S)$

空気力学項 $E_a = (0.013 + 0.00016 u_z) (e_s - e_a)$

蒸発量 $E_0 = \Lambda H_0 / (\Lambda + \gamma) + \gamma E_a / (\Lambda + \gamma)$

可能蒸発散量 $E_i = f E_0$

上式の数値計算のために以下の準備を行う。

2.2 正味放射量式のパラメータ

α : 水面のアルベド（太陽光の反射率 0.05を使用）

Q_0 : 大気上限における大気外日射量

$$Q_0 = I_0 \cos [a - b_0 \cos (\omega D + A_0)]$$

a = 北緯35°35'（三方）、 b_0 = 23°27'（北回帰線）

I_0 = 大気外直達日射、 ω = 360°/365.25day

D = day、 A_0 = -81.807°（4月1日からの位相）

S : 日照率 = 日照時間 / 可照時間

日照時間は実測値を採用する。

可照時間 = 24 × (δ / 360°) hour

可照角度 δ = 360° - 2 θ とすると

$$\cos \theta = \tan[a] \cdot \tan[b_0 \cos(\omega D + A_0)]$$

BASIC組み込み関数を使用して

$$\arccos \theta = -\text{atn}[\theta / \text{SQR}(-\theta^2 + 1)] + 1.5708$$

σ : ステファント・ボルツマン定数 (1.17×10^{-7} cal/cm²·K⁴·day)

T : 気温

e_a : 空気の水蒸気圧 hPa

2.3 空気力学式のパラメータ

u_z : 地上2mにおける風速 Km/day

接地層の対数法則と上空のベキ乗を10m高さでこの両法則がほぼ一致するよう繋ぎ、高さ z mでは、 $U_z = U_{10} \cdot (Z/10)^{1/3}$ 、 $U_{10} = 0.260 \cdot U_{10} \cdot \log(Z) + 0.388 \cdot U_{10}$ の関係を作成した。地上10mの風速に0.568を掛けて地上2mの風速に変換する。

e_s : 気温 T の飽和水蒸気圧 マグナスの実験公式から、

$$e_s = 6.11 \exp \{ 2.30259 \times 7.5 T / (T + 237.3) \} \text{ hPa}$$

e_a : 空気の水蒸気圧 hPa

湖沼周辺の湿度は福井または敦賀の湿度で代用可能である。

2.4 蒸発量式のパラメータ

Λ : 平均気温での飽和水蒸気圧曲線の勾配値

$$\Lambda = 2.30259 \times 7.5 \times 237.3 e_s / (T + 237.3)^2$$

γ : 乾湿計定数

$$\gamma = C_p \cdot P / (0.6221)$$

C_p : 空気の定圧比熱 1.006 J·g/deg, cal=4.18605J

P : 気圧 hPa

l : 水の蒸発潜熱 597.31 - 0.563T cal/g

2.5 可能蒸発散量の係数

f は経験的な定数であり、中川の値(表1)を採用する。

表1 可能蒸発散量の係数(中川³¹⁾)

月	4	5	6	7,8,9	10	11	12	1,2,3
f	0.4	0.6	0.7	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3

表2 負荷の記号表と基本モデル式

タンク	上 段		中 段		下 段	
流 量	Q 1		Q 2		Q 3	
負 荷	定 常		定 常		定 常	
	変 動		変 動		変 動	
	P 1		P 2		P 3	
	P C 1	P V 1	P C 2	P V 2	P C 3	P V 3
負 荷 量	L 1		L 2		L 3	
	L C 1	L V 1	L C 2	L V 2	L C 3	L V 3

流量 $Q=Q1+Q2+Q3$

負荷量 $L=P1\cdot Q1+P2\cdot Q2+P3\cdot Q3=L1+L2+L3$

$P_i=P_{Ci}+P_{Vi}$, $L_i=L_{Ci}+L_{Vi}$ などの関係をもとに、

時系列関数 $P=P(t)$, $L=L(t)$ など

流域実状に合わせて種々のパラメータ関係を導く。

3 タンクモデルの負荷パラメータ

平成4年度の湖沼水質濃度シミュレーションで、北潟湖、三方五湖は共に生活系や産業系以外の汚濁負荷割合が高いと予測した。両湖では自然系負荷のうち農業が半分を占めている。流域の汚濁負荷削減には、とりわけ非特定汚染源の多い流域においては土地利用の実態をふまえることが重要であり、農業地帯では作付け種、施肥、時間の関係にもとづく汚濁負荷の流域管理対策が考えられる。

タンクモデルは流域流出のシミュレーションであり、流域汚濁負荷排出を表現している。流域内に排出された負荷は点源負荷、面源負荷を問わず一旦タンク負荷パラメータに変換され、タンク流出により湖に入力される。すなわち、タンク負荷パラメータの上で負荷管理対策が可能であり、この定式化の試みを行う。

3.1 負荷パラメータの算出方法の準備検討

前回は、3段直列タンクモデル(流出、負荷パラメータを用いる)による負荷流出を計算し、積算して年間負荷流出量(a)を求めた。しかし、流域の知見に乏しいため年間負荷流出量は背景調査による積み上げ値(b)を用い、入力のための流出パターンはタンクモデル負荷流出時系列値に(b/a)を掛けて用いた。

今回は、年間の流域土地利用情報および負荷原単位からタンク負荷パラメータを算出する。しかし、他流域の調査による原単位は必ずしも該当流域に合わないといわれるため、現地調査の解析結果を参照しながら、負荷パラメータを作成していく。平成元年～2年度に実施した降雨増水時負荷量調査の解析⁴⁾では下段(3段)パラメータを年間一定とした。これを補うために、平成7年度には平水時の負

荷量調査⁵⁾を行った。平水時の濃度は下段パラメータに相当すると考えられる。これらのパラメータの時系列変動に着目すると、定常的負荷と季節変動的負荷の区別ができる。

ここで、定常・変動負荷の基本的意味を表2に示す。負荷パラメータ時系列での最低値とこれより大きい値に着目し、最小値を定常 P_c と仮定して定常負荷 L_c を計算し、ここから変動負荷 L_v と変動パラメータ P_v が求められる。3段タンクモデルの表層、中層で一降雨直接流出を対応させ、下層で基底流出を対応させるとすると、北潟湖・三方五湖は共に流域が小さいため、非降雨時は基底流出 Q_3 となり、基底流出は負荷流出 L_3 に対応する。 L_3 には一定量排出とみなす工場、事業場および生活排水など点源負荷 L_{C3} と、季節変化の緩慢な変動を持つ自然系の山林・農業など面源負荷 L_{V3} が対応する。 $P_3=P_{C3}$, $P_{V3}=0$ と見なすことができる場合もあると思われる。

また、降雨時の負荷は面源を主としたタンク表層・中層(P_1, P_2)が対応する。ここでは平水時に積み残され河道内に堆積したものや、タンク表層、中層間の負荷成分挙動も複雑に関係する。これには、ライシメータ等の知見(植物吸収モデル、土壌吸着や年度にまたがる施肥層)に基づく負荷パラメータの層間の分割が必要であり、またさらには、硝化作用等に関する地温と土壌微生物の活動関係や、降雨経過日数を用いる乾土効果について考慮することも考えられる。

具体的な流域の現象に関する情報として、降雨増水時解析で求められた負荷パラメータ(P_1, P_2, P_3)の時系列、および平水時調査で求めた負荷パラメータ(P_3)の時系列がある。流域負荷の大半が水田による寄与と考えられる場合は、現地流域の水田の負荷パラメータと近似的に解釈する。流域負荷の大半が山林寄与と考えられる場合も同様である。畑地の物質収支は、栽培作物・作付回数・施肥量・肥培管理・降水量・地形・土質により様々であるため一般化は難しいといわれるが、畑地表面の負荷流出(P_1, P_2)は降雨のときのみに発生し、平水時は地下浸透(P_3)のみであるとする考え方は現地調査の手段として有効と思われる。

3.2 流域負荷パラメータの算出

負荷パラメータが決定したならば、これを原単位的に扱い、土地利用率(R_i)を掛ける。これに点源負荷項として α をつけ加えて、流域全体の負荷パラメータを作成することができる。 $P=\sum(P_i\cdot R_i)+\alpha$

以上のようにパラメータ時系列の現象的解釈を通して流域の土地利用実状を理解した後は、逆に作付けに着目して負荷パラメータを直接組み立てることも考えられる。水田など農耕地では肥料流出が負荷パラメータに直接関与すると考え、これの基礎的算定資料として栽培暦・施肥基準表・肥料の成分表・品種別作付表・転作実施状況があり、これらを用いた変動タンク負荷パラメータの作成は今後の課題である。

以上のようにして、流域タンクモデルにより、タンク負荷パラメータの上で負荷管理対策が可能と考えられる。

4 湖の水理モデルの改良

水理モデルは北潟湖、三方五湖が共に汽水湖であることを利用し、塩分濃度計算結果で妥当性を判断する。前回は「湖容積変化」と「流域流入水」およびBOX間の「交換水」量で湖水理変動を表した。潮汐は太陽年周潮だけであり、潮汐現象の代用として便宜的に「交換水」項を設け、短周期的な塩分の遡上が可能となった。

今回は、湖面位計測値をもとに潮位解析を行った⁶⁾ので、太陽年周潮に加えて、日月合成と主太陽の日周潮および主太陽と主太陽の半日周潮の合計5つの周潮位変動で潮位関数を入力することとする。半日の潮位変動まで入力するため、上記の意味での「交換水量」項は使用根拠がなくなる。しかし、BOX間の境界面は広い場合と狭い場合があり、この表現としてのBOX間の交換混合の取扱いは必要であり、これは実際のシミュレーション作業の中で検索する。

一方、BOXモデルは塩水楔や密度差の湖水流動影響を十分に表現することはできず、BOXを上下に分割したり、塩分拡散の「交換水」項や、密度差による移流量への配慮が必要である。ここでは、改良案の概略を示す。

4.1 湖の上下層間の塩分濃度差と塩分拡散(乱流拡散)の扱い

平成3年度北潟湖北部の塩素イオン濃度(C)の模式図を示す(図1)。このように塩分濃度差により躍層が生じて上下層に水塊が分かれている場合に湖を上下のBOXに分割した。このときの交換水量と塩分拡散を以下のように扱う。

上下層の水深Zと塩素イオン濃度Cの関係は下式のとおりである。 $\log(C)=aZ+b$ または $C=e^{(aZ+b)}$

$$a=\{\log(C_2)-\log(C_1)\}/(Z_2-Z_1)$$

乱流拡散は媒体の流れによって広がる現象であり、乱流拡散係数を用いて輸送塩素量を決め、これと塩素濃度から逆に交換水量fを求める。

Q_c を単位面積あたり輸送塩分量、 K を乱流拡散係数として、

$Q_c=-K(dC/dZ)$, $dC/dt=K \cdot (d^2C/dZ^2)$ の関係があり、ここで $dC/dt=\Delta C/\Delta t$ として、 $Q_c=-(\Delta C/\Delta t)/a$ となる。境界面積を L_s として、輸送塩分総量 L_c は、 $L_c=Q_c \cdot L_s$ 。交換水量 f は、 $f=L_c/C_1=Q_c \cdot L_s/C_1=-\{(\Delta C/\Delta t)/a\} \cdot L_s/C_1$ [m³/s]

ここで時間変化の平均値を ΔC として $\Delta C=\{(C_{1,t+1}-C_{1,t})+(C_{2,t+1}-C_{2,t})\}/2$ 計算単位時間を $\Delta t=1$ とする。

4.2 逆流入時の密度差の扱い

北潟湖北部や久々子湖では水塊が上下層に分かれて上流BOXへ平行移流する。海水の逆流は一般に塩水楔構造で進入すると考えられるが、上下層間で静水圧の差が生じるため移流圧力が異なると考え、これを完全混合BOXモデルでの移流量の差とした(図2)。下層圧力 P_1 と上層圧

力 P_2 の比率を移流量比率と考え、圧力の寄与をべき乗で表現し、最適 u を求めることとする。全移流量を f_{12} 、下層からの移流量を f_1 、上層からの移流量を f_2 として、 $f_1=f_{12} \cdot P_1^u/(P_1^u+P_2^u)$, $f_2=f_{12} \cdot P_2^u/(P_1^u+P_2^u)$

なお、湖容積変化量で、上げ潮・下げ潮を決めることとし、また、下げ潮時の移流比率は静水圧に逆比例することとする。ここで、潮位差による動圧(極端には津波的なもの)も考えられるが、現在は考慮していない。

以下では、北潟湖、三方五湖について水理概略を示す(図3)。

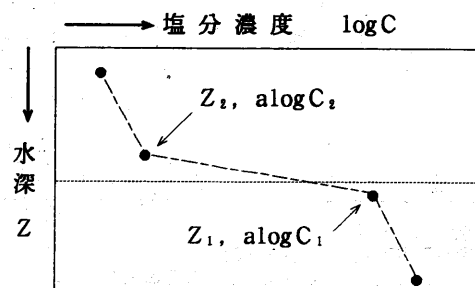


図1 北潟湖北部の塩分濃度

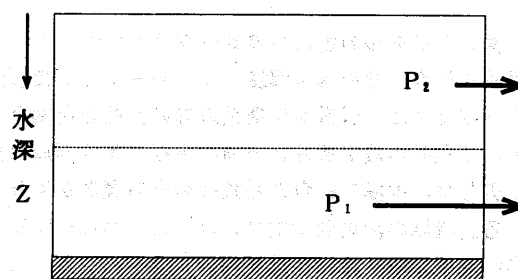


図2 逆流入時の移流圧力

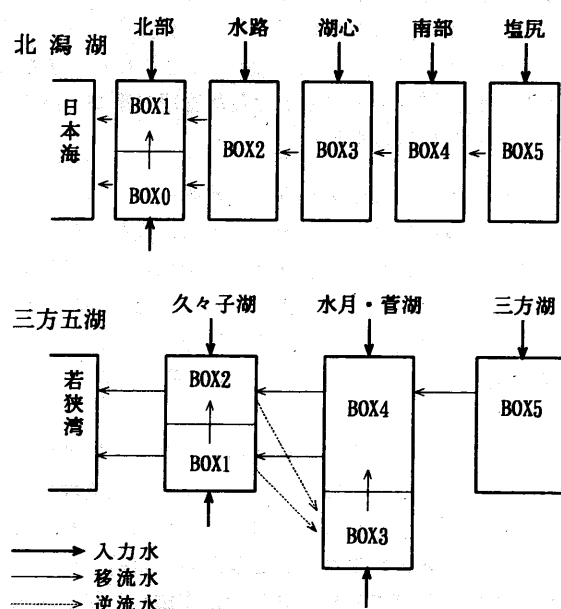


図3 湖BOXの構造

4.3 北潟湖の水理構造の改良

前回は北潟湖を北部、水路、湖心、南部に分け、さらに南部を二つに分けて5BOXモデルとした。

今回は、BOX分割とBOX接続方法を変更する。

北部は遡上した塩分のために水深約1mで二層に分かれていることがEC測定により明白である。しかし、塩分実測値は表層と下層(約1.5m)が同一濃度のときが多い。これは調査日に潮位が低いため、躍層の上位を下層として採水しているとも考えられる。今回は塩分の動きをモデル的に表すため北部を上下2層に分割する。このとき、逆流水の供給は、常時監視地点北潟末端よりも大聖寺河川口の方が合理的と考える。

南部の水理について、今回はBOX3に対してBOX4(赤尾側)とBOX5(塩尻側)を並列に接続したが、塩尻側と赤尾側とは塩分濃度が明瞭に異なり、塩尻側はより河川水に近い。BOX3→BOX4→BOX5と直列に接続する方が良いと考えられるが、BOXの境界設定と面積についても変更する必要があり、これらは平成8年度精密調査結果の適用時に詳細を検討する。

4.4 三方五湖の水理構造の改良

前回は久々子湖(BOX1, 2)と水月・菅湖(BOX3, 4)を上下に分割し、三方湖を接続して5BOXとした。今回も同一BOXを用いる。しかし、移流水について若干変更する。

湖水が久々子湖から浦見川を通じて水月・菅湖へ逆流するときは、水月湖の入り口で潮目が見られることから、久々子湖からの逆流水は、上下層(BOX1, 2)共に塩分比重が大きいため水月湖下層(BOX3)へ潜るとする。

また、水月・菅湖の上下層境界は水深8mにするが、それより下層の高塩分水が移流するのではない。塩素イオン濃度は、15mより浅い地点で季節変化し、8m以上の境界を越えて4mあたりのところまで指数関数的に連続変化するが、下層は30mで8000mg/l、15mで7500mg/lと年間一

定である。30mと15mの塩分を一定とし、時間変化させる第3点を4mに取り、この3点で指数関数回帰させて境界点8mの塩素イオンを求め、これをBOX3からBOX4への移流水濃度とする。

5 まとめ

北潟湖および三方五湖の水質シミュレーションモデルの改良作業を行っている。入出力項ではPenman式による蒸発散取り扱いと流域タンクモデルの現地調査結果に基づく負荷パラメータの改良について、水理項では潮位関数の組み込み、塩分躍層の取扱いとBOX構造の一部修正について改良の概略を示した。今後、水質項の改良を行い、最終的には、平成8年度の水質データをもとにモデルについて検証する予定である。

参考文献

- 1) 吉川昌範 他：湖沼水質シミュレーションモデルの開発，福井県環境科学センター年報，22，pp. 61-69, 1992.
- 2) 建設省河川局監修、(財)国土開発技術研究センター編集：「地下水調査および観測指針(案)」，pp. 110, 山海堂，1993.
- 3) 日本気象学会：「気象研究ノート第167号 水循環と水収支」pp. 33, 1989.
- 4) 福井県環境科学センター：降雨時汚濁負荷量調査結果報告 北潟湖流域の観音川、三方湖流域のはす川等からの湖内流入水量および負荷量，1992.
- 5) 片谷千恵子 他：平水時における湖沼流域の負荷量調査，福井県環境科学センター年報，25，pp. 82, 1995.
- 6) 吉田耕一郎 他：北潟湖における水位の変動関数について，福井県環境科学センター年報，24，pp. 117-126, 1994.