

# 琵琶湖北湖集水域の貯水能力と湖水中難分解性有機物濃度との関係について —水と土壌の接触時間の推移に着目して—

Relationship between Concentration of Non-biodegradable Dissolved Organic Matters in  
Lake Biwa North Basin and Storage Capacity of the Catchment Area  
—A Change in Contact Time between Water and Soil—

○井手慎司<sup>1)</sup>, 小林文彦<sup>2)</sup>

滋賀県立大学環境科学部

○Shinji Ide<sup>1)</sup>, Fumihiko Kobayashi<sup>2)</sup>

The University of Shiga Prefecture

## Abstract

The concentration of COD has been increasing gradually in the northern basin of Lake Biwa for more than fifteen years. This is caused by the accumulation of non-biodegradable dissolved organic matters (NBDOMs) in the basin water. NBDOMs can be biodegradable or absorbable when they go into the soil whereas they are quite non-biodegradable in water. If one makes an assumption that NBDOMs are generated in the catchment area and then flowing into the basin, the increasing flow rate of NBDOMs into the basin would be explained by shortening of reaching time of rain water into the basin due to a wide range of changes in land and water uses in the catchment area. In this research, the authors hypothesized that increase in the amount of NBDOMs in the basin can be attributed to shortening of contact time between water and soil, and tried to verify the hypothesis by estimating secular changes in parameters of tank model that represents runoff mechanism of the catchment area and then changes in the contact time. As a result, it is revealed that the contact time of water and soil in the upper layer of the catchment area has been declining and the flow rate of first flash have been increasing, both which may increase the flow rate of NBDOMs into the basin.

**Key Words** : Lake Biwa, COD, tank model, flow rate analysis

## 1 はじめに

近年、琵琶湖北湖（以下「北湖」と呼ぶ）において COD 濃度が上昇しつづけている<sup>1)</sup>。その原因とされているのが、湖水中の難分解性溶存有機物（以下「NBDOMs」）の蓄積である。同様の現象が霞ヶ浦や和田湖、印幡沼などでも報告されている。同物質濃度の増加は、湖水中の植物組成に影響を与える恐れがあり、また、NBDOMs は浄水過程で、塩素殺菌によってトリハロメタンへと変化することから、同物質濃度の削減のための対策が急がれている。

北湖における NBDOMs の主要な発生源は未だに明らかになっていない。仮説としては大きく「内部生産説」と「外部由来説」の2つに分かれるが、少なくとも琵琶湖については、どちらが主要な要因かの決着がついていない。しかし、北湖湖水中においてクロロフィル a 濃度の上昇がみられないことから、植物プランクトンによる内部生産量の増加が原因であるとは考えにくい。また、湖水中と流入河川中の溶存有機物のクロマトパターンが似ていることが報告されており<sup>2)</sup>、集水域から北湖に流入している可能性が高い。

一方、NBDOMs は水中では分解されにくい、土壌中では吸着や土壌微生物の働きによってある程度、除去されることがわかっている<sup>3)</sup>。しかし、北湖集水域では近年、都市化や河川の三面張り・直線化、圃場整備など、土地利用や水利用の改変が進行しており、これらの改変は、すべて水と土壌の接触時間を短縮するという点で一致する。本来であれば、土壌への浸透または接触によって除去されていたはずの NBDOMs が水と土壌の接触時間の短縮によって、北湖にそのまま流れ込んでくるようになった可能性がある。

本研究では、北湖湖水中における NBDOMs 量の増加が、北湖集水域における水と土壌の接触時間の短縮によるものであるとの仮説をたて、北湖集水域のタンクモデルを構築、種々のデータからモデルのパラメーターの推移を求

め、そこから水（降雨）と土壌の接触時間の推移を推計することで、仮説検証のための第一歩とする。これにより、北湖湖水中のNBDOMs量増加の原因究明に貢献できるものと考えている。

## 2 研究方法

分析の対象期間としてはCOD濃度の増加が明らかになった1985年から2000年までの15年間とする。研究方法としては以下のステップで水と土壌の接触時間の推移の推計を試みる。

- ① 琵琶湖に関する総放流量データと平均水位データ、湖面からの蒸発量の推計値から、期間中の北湖への日流入量を求める。
- ② 北湖集水域全体を表現するタンクモデルを構築して、同モデルには降水量データと蒸発散量推計値を入力、北湖への日流入量を求める。
- ③ ①②で求めた2つの日流入量を一致させるように、タンクモデルのモデル構造とパラメータを最適化する。
- ④ ③で求めた年度ごとのパラメータの推移から、水と土壌の接触時間の推移を求める。

## 3 モデルシミュレーションに用いる各種データ

### 3.1 降水量 $r_t$ [m/day]

北湖集水域の11のアメダス観測点（柳ヶ瀬、今津、虎姫、荒川、春照、南小松、彦根、近江八幡、霜ヶ原、蒲生、土山）の降水量データ<sup>4)</sup>の算術平均から対象期間中の北湖流域の平均日降水量を求めた（Fig. 1）。

### 3.2 蒸発散量 $ET_t$ [m/day]

まず、日単位の最大可能蒸発散位を、三浦ら<sup>5)</sup>が提案しているペンマン式の簡便法で求め、それに集水域では月別、湖面では季節別の蒸発散比をかけて蒸発散量を求めた。最大可能蒸発散位の計算に必要な気象台の緯度の値や気温・湿度・風速（測定高度）・日照時間の日単位データは気象庁ホームページより入手、アルベドの値については、北湖集水域には草地の0.225、北湖湖面には水面の0.06を採用した。また、北湖集水域の月別蒸発散比については、集水域の土地利用形態を水田、水田以外、山地の3つに分類の上、滋賀県の土地利用データ<sup>6)</sup>から、対象期間におけるそれぞれの面積の平均的割合を算出、これらに土地利用形態別の月別蒸発散比の文献値<sup>7)</sup>をかけた積の和として求めた。ただし、水田も非灌漑期（10月～6月）は、水田以外として扱う。北湖湖面の蒸発散比としては季節別蒸発散比の文献値<sup>7)</sup>を用いた。体積換算した集水域における蒸発散量の計算結果のみをFig. 2に示す。湖面からの蒸発量の体積換算した平均は1,233,591 m<sup>3</sup>/dayで、変動のパターンは集水域からの蒸発散量に類似していた。

## 4 北湖水収支からの流入量の推計

北湖における水収支を(1)式に示す。本研究では(1)式から逆算によって同湖への流入量を求める。

$$\begin{aligned} & \text{水位変動 } (H_{24} - H_0) [\text{m/day}] \times \text{湖面面積} [\text{m}^2] \\ & = \text{流入量} [\text{m}^3/\text{day}] - \text{流出量} [\text{m}^3/\text{day}] + (\text{降水量 } r_t - \text{蒸発量 } ET_t) [\text{m/day}] \times \text{湖面面積} [\text{m}^2] \end{aligned} \quad \dots (1)$$

ここで $H_{24}$ と $H_0$ はそれぞれ当日24時（翌日0時）と0時の琵琶湖の平均水位、流出量は琵琶湖からの総放流量を面積比によって北湖からの流出量に補正した値である。ただし琵琶湖の平均水位については公式のデータが1992年以降しかないため、対象期間中のデータが存在する5地点（彦根、片山、大溝、堅田、三保ヶ崎）の平均とした。水位データは、琵琶湖からの総放流量データとあわせて、国土交通省琵琶湖河川事務所より入手した<sup>8)</sup>。Fig. 3は

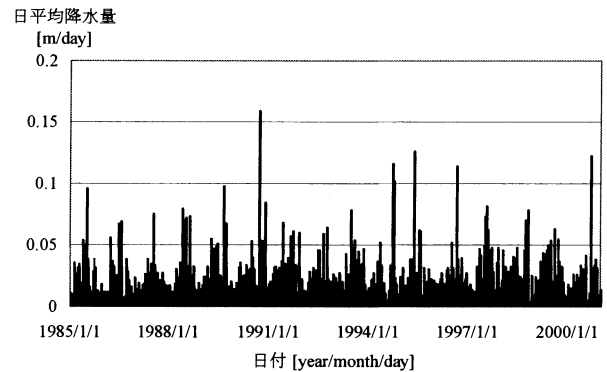


Fig. 1 北湖集水域の日平均降水量

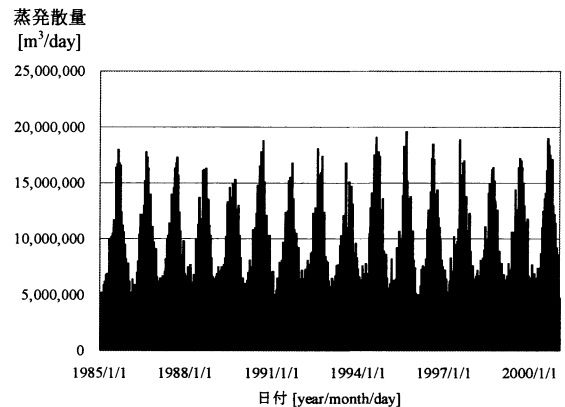


Fig. 2 北湖集水域における蒸発散量

以上の計算によって求めた北湖への推定流入量である。ただし、負の値となったものは0としている。

### 5 北湖タンクモデル

本研究では北湖集水域全体の流出過程をFig. 4のようなタンクモデル<sup>9)</sup>で表す。タンク数とタンク1の流出孔の数は先行研究<sup>10)</sup>において、北湖に流入する主要河川について構築されたタンクモデルの構造を参考にした。モデルパラメーターの初期値についても、同研究で報告されているパラメーターの平均値を用いる。

時間 $t$ から $t+\Delta t$  (以下、 $\Delta t=1$ 日)の間における、タンク $i$ の流出孔 $j$ からの流出量 $F_{ij}$  [m/day]と浸透孔からの浸透量 $Q_i$  [m/day]は(2)(3)式でそれぞれ計算する。ただし、タンク1のみ複数の流出孔をもち ( $j=a, b, c$ )、タンク4は浸透孔をもたない。

$$F_{ij} = \text{流出孔 } ij \text{ の流出係数 [1/day]} \times (X_i + (r_i \text{ or } Q_i - 1) \cdot \Delta t - ET_i \cdot \Delta t - h_{ij}) \quad \dots (2)$$

$$Q_i = \text{浸透孔 } i \text{ の浸透係数 [1/day]} \times (X_i + (r_i \text{ or } Q_i - 1) \cdot \Delta t - ET_i \cdot \Delta t) \quad \dots (3)$$

ここで、 $X_i$ : 時間 $t$ におけるタンク $i$ の水位 [m],  $(r_i \text{ or } Q_i - 1) \cdot \Delta t$ : 時間 $t$ から $t+\Delta t$ の間における、タンク1の場合は降雨量 $r_i \cdot \Delta t$  [m], タンク2-4では上段タンク $i-1$ からの浸透量 $Q_{i-1} \cdot \Delta t$  [m],  $ET_i \cdot \Delta t$ : 蒸発散量 [m],  $h_{ij}$ : 流出孔 $ij$ までの流出高 [m]. また時間 $t+\Delta t$ における各タンクの水位は次式で計算する。

$$\text{タンク 1} : X_{1,t+\Delta t} = X_{1,t} + (r_t - ET_t - \sum_j F_{1j,t} - Q_{1,t}) \cdot \Delta t \quad (4)$$

$$\text{タンク 2-4} : X_{i,t+\Delta t} = X_{i,t} + (Q_{i-1,t} - F_{i,t} - Q_{i,t}) \cdot \Delta t \quad (5)$$

以上の(2)から(5)式にFig. 1の日平均降水量とFig. 2の蒸発散量の値を代入して、計算を繰り返し、計算結果としての流出量 $F_{ij}$ の合計に集水域面積をかければ北湖への流入量となる。

ただし、タンク4の水位がみだされ、同タンクからの基底流出が安定するまでに5年程度の時間がかかる。そのため、タンクモデルそのもののシミュレーションは対象期間の5年まえの1980年から開始する。また、通常のタンクモデルであれば、上記で計算される流入量(タンクモデルにとっては流出量)に、さらに時間遅れの考え方を適用するが、本研究の場合は、後述する最適化の結果、時間遅れを与えないほうがよいという結果となった。

### 6 北湖タンクモデルの最適化

本研究では次に、上記タンクモデルによる北湖推定流入量がFig. 3の水収支から求めた推定流入量に一致するようにモデル構造とパラメーターの最適化を行なった。具体的な最適化のステップは以下の通りである。

- 1) タンク数1から4の4種類のタンクモデルそれぞれについて、すべてモデルパラメーター(流出高, 流出係数, 浸透係数)を対象期間15年間のデータを用いて最適化する。この結果、後述する評価関数値がもっとも高かったモデルはタンク数4のものであった。また、この操作によって同時に、Fig. 4のタンクモデル(タンク数4)のすべてのパラメーターについて最適値が得られた。最適化の結果による初期値からのもっとも大きな違いは、タンク1の流出孔1aの流出係数が0となり、1bの流出高が高くなったことである。これにより、1bが1aに代わって、タンクモデルで言うところの洪水成分を表すようになった。
- 2) 次に、集水域の表層部分における土地の改変による流出パターンの変化を見るために、タンク1の流出係数1b

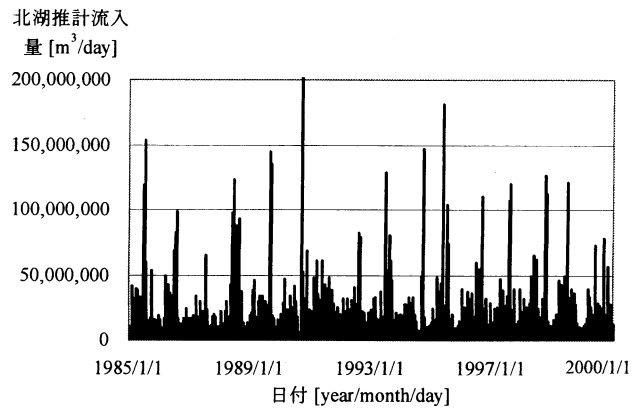


Fig. 3 北湖水収支から求めた北湖推計流入量

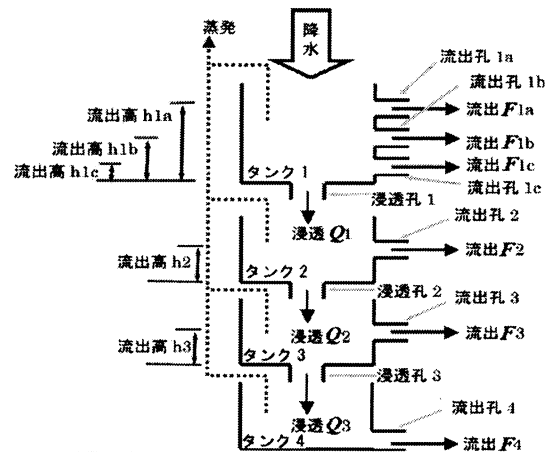


Fig. 4 北湖タンクモデルの概念図

および 1c のみに着目して、両パラメータを年度ごとに最適化することで、これらの係数の対象期間中の推移を求める。その他のパラメータを一定としたのは、北湖集水域において土地利用の改変が進んでいるとしても土壌表層部のみの変化であり、また、表層部（タンク 1）についても、帯水層の厚さを表す流出高まで、この 15 年間で変化しているとは考えにくいからである。

なお、最適化としては、北湖の水収支とタンクモデルから求めた双方の推計流入量について自然対数を取り、両者の相関係数を評価関数として、これを最大化するように所定のパラメータの最適化を行なった。自然対数をとったのは、そのままの値の相関係数を最大化しようとする、値の大きな洪水時における値の一致が優先され、タンク 4 からの流出量（基底流量）を過大評価し、タンク 1 からの洪水成分を過小評価する傾向があったためである。また、最適化の数値計算手法としては共役傾斜法を用いた。最適化の結果の相関係数  $r^2$  は自然対数同士では 0.9748、もとの値同士では 0.6814 であった。最適化後のパラメータを Table 1 に示す。

## 7 最適化の結果とまとめ

最適化後の流出係数 1b および 1c の推移（5 カ年移動平均）は Fig. 5 のようになった。流出係数 1c がほぼ一定であるのに対して、流出係数 1b は上昇傾向を示している。これは洪水成分の流出速度が速くなっていることを示唆している。さらに、流出係数の変化の影響を見るために、対象期間中におけるタンク 1 の滞留時間の推移を求めたのが Fig. 6 である。期間中を通して滞留時間は減少傾向を示しており、この結果は、水と土壌の接触時間が短縮しているとした本研究の仮説を支持している。また、洪水成分（流出 1b）がタンクモデルからの流出量全体に占める割合についても流出係数 1b に類似した変化を示し、特に 1990 年から 95 年にかけては 10% から 16% に増加していた。このことは降雨開始におけるファーストフラッシュの増加によっても、NBDOMs の北湖流入量が増加している可能性を示唆している。

以上のことより、北湖集水域の表層部分における水と土壌との接触時間の短縮、またファーストフラッシュ流量の増加によって、北湖への NBDOMs 流入量が増加している可能性が高いことがわかった。

## 8 参考文献

- 1) 滋賀県：平成 11 年度公共水域水質測定結果（2000）
- 2) 地域環境研究グループ湖沼保全研究チーム：湖沼において増大する難分解性有機物の発生原因と影響評価に関する研究（1999）
- 3) 琵琶湖・淀川水質保全機構：難分解性有機物削減実験、琵琶湖・淀川水質浄化共同実験センター年報第 1 号、pp.203-215、琵琶湖・淀川水質保全機構（1999）
- 4) 気象庁：アメダス観測年報 CD-ROM 1983 年～2000 年、(財) 気象業務支援センター
- 5) 三浦健志ほか：ペンマン式による蒸発散位計算方法の詳細、農土論集 164, pp.157-163（1993）
- 6) 滋賀県企画県民部土地対策課：滋賀県における土地利用の現状と対策、p.4（2002）
- 7) 大槻恭一：蒸発散（その 8）-蒸発散量の推定法-、農業土木学会誌、第 57 号、第 11 巻、pp.65-71（1989）
- 8) 建設省 近畿地方建設局 琵琶湖工事事務所：琵琶湖水文資料（洗堰操作関係資料その 2）昭和 56 年～昭和 61 年、p.11（1987）／建設省 近畿地方建設局 琵琶湖工事事務所：琵琶湖水文資料（洗堰操作関係資料その 3）昭和 62 年～平成 6 年、p.9（1996）／国土交通省琵琶湖工事事務所：瀬田川洗堰貯水位・流入量・放流量年表 昭和 60 年～平成 12 年
- 9) 菅原正巳：流出解析法、共立出版（1972）
- 10) 岩佐義郎 編：湖沼工学、山海堂、pp.75-76（1990）

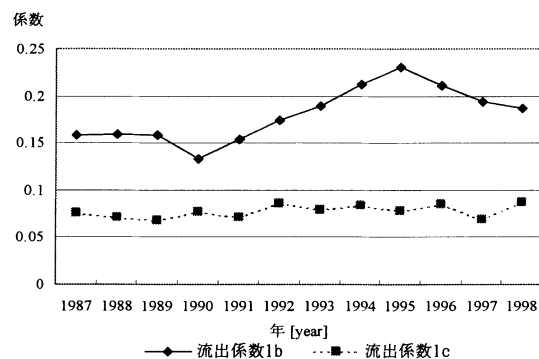


Fig. 5 最適化後の流出係数 1b・1c の推移（5 カ年移動平均）

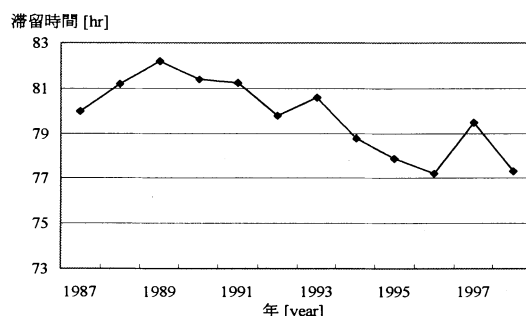


Fig. 6 タンク 1 の平均滞留時間（5 カ年移動平均）

Table 1 タンクモデルの最適化後パラメータ

	係数 [1/day]	流出高 [m]
タンク 1 (流出孔 1b)		0.0245
タンク 1 (流出孔 1c)		0.0042
タンク 1 (浸透孔 1)	0.2121	
タンク 2 (流出孔 2)	0.05333	0.0095
タンク 2 (浸透孔 2)	0.1097	
タンク 3 (流出孔 3)	0.01757	0
タンク 3 (浸透孔 3)	0.03283	
タンク 4 (流出孔 4)	0.001	0