

琵琶湖における水質解析

日本水道コンサルタント

明石 哲也

1. はじめに

琵琶湖に関する調査は、多方面でなされているが、特に昭和36年から昭和41年にかけて「琵琶湖生物資源調査」がなされ、昭和40年からは、土木学会による「琵琶湖の将来水質に関する調査」がなされている。又昭和46年、建設省により「琵琶湖周辺下水道基本計画策定のための調査報告書」がまとめられている。前二者においては、特に琵琶湖の生物相および水質の定量化が論じられている。

後者においては、特に、下水道の整備から琵琶湖への汚濁物質の流入による影響について種々の検討がなされている。本論文では、最近、新しく算定した汚濁負荷量を用い、後者の報告書の中で用いられている琵琶湖のモデルを使って、将来水質の予測を行う。

琵琶湖の水理モデルを、降雨量、琵琶湖からの流出量、湖内の流動、貯留量から月別に設定した。水理事象の定量化を行った後、現況時長でのシミュレーションを行い、湖内における浄化率を求めた。更にこのシミュレーションを将来に適用する事により、将来水質の予測を行った。

汚濁指標として、一般的なものである、BOD、CODを採り、湖での富栄養化の指標としてT.N、T.Pを採用した。

その結果、南湖の4指標は、現在、かなりの汚染度を示しており、将来、ますます、悪化することが考えられる。(現状のまま、放置し、適切な環境保全対策をとらないとした場合。以下同様)

北湖は、現在、T.Nが危険域に入っている程度であるが、将来はT.Pを除いた指標が早い時期に危険域に入り(環境基準を超過)、かなり、水質悪化するのではないかとと思われる。

2. 琵琶湖の発生負荷量と流入負荷量

発生負荷とは、現在、52市町村があるが、水質予測の時にも用いるモデルに合わせて、北湖を3つに分けⅠ～Ⅲとし、南湖を1つとしⅣとする。図-1に示すのが概略図である。

2-1. 発生負荷量

発生負荷量を算定する際の基本量として次のものを用いた。

- ・人口(家庭汚水等)
- ・工業出荷額(工場廃水)
- ・家畜(家畜汚水)
- ・田畑面積(農耕地流出量)
- ・山地・山林面積(山地・山林からの流出量)

いずれもBOD、COD、T.N、T.Pについて算定したが、田畑、山地・山林面積はT.N、T.P算定のみに用いた。

表-1に基本量を示す。人口は、昭和45年で88万人(湖への流入分のみ)だが、昭和65年で146万人を見込んでいる。工業出荷額は、現在、6,700億円ほどが昭和65年30兆円、300億円(4.8倍)とかなりの伸びを見込んでいる。

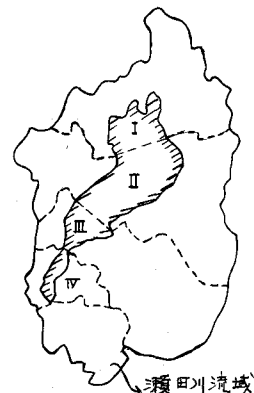


図-1. 琵琶湖の流入区域

又、家畜は、昭和45年と45年の3倍弱を見込んでいるが、田畑面積、山地・山林面積は、都市化の進展等を考えれば現状維持とした。

原単位は、人口、家畜、田畑、山地・山林について、建設省調査指針を用いた。工業出荷額については中分類別原単位を設定した。

2-2. 流達負荷量

発生負荷量が琵琶湖へ流入する時の量を流達負荷量とする。表-2に示した流達率を用いた。又、現在の下水処理、し尿処理を将来時まで固定した時の流達負荷量を算定した。発生負荷量、流達負荷量は表-3に示す。

①家庭汚水は、人口を1人処理、下水処理に分け、更に市街化区域内外、DID内外に分け、それぞれ流達率を乗じた。

②工場廃水は、下水処理と未処理に分け、未処理の負荷には、水質汚濁防止法による、一律規制がかけられた。

③家畜汚水は、市街化区域外の流達率とを与えた。田畑、山地・山林からの流出量は、ha当りの流出原単位を用いている。

表-1. 基本量

基本量		人口(千人)		工業出荷額(10億円)		家畜(頭)	
年次		昭和45年	65年	昭和45年	65年	昭和45年	65年
北湖	I	14.8	96.8	35	162	1,714	3,427
	II	295.9	434.1	231	1,023	6,366	12,772
	III	230.3	382.1	130	1,064	15,488	58,600
	計	801.0	912.9	396	2,219	23,568	74,799
南湖		275.9	544.5	270	979	3,868	860
総計		876.9	1,455.4	666	3,228	27,436	75,659

表-2 流達率

名称			BOD	COD	T.N	T.P
自然流出	市街化区域内	D I 家庭汚水	0.6	0.6	0.4	0.4
		D I 工場廃水	0.6	0.6	0.4	0.4
		D I 外 家庭汚水	0.3	0.3	0.4	0.4
		D I 外 工場廃水	0.3	0.3	0.4	0.4
	市街化区域外	家庭汚水	0.1	0.1	0.4	0.4
		家畜廃水	0.1	0.1	0.1	0.1
		農業肥料			27.84	0.36
		山地・山林			2.37	0.04
人為流出	下水処理場		20PPM放流	20PPM放流	除去率30%	除去率50%
	し尿処理場		30PPM放流	30PPM放流	除去率30%	除去率50%

表-3. 発生負荷・流達負荷・総括流達率

名称		昭和45年			昭和65年		
		発生負荷	流達負荷	流達率	発生負荷	流達負荷	流達率
BOD(kg)	I	6,685	1,255	0.19	20,484	5,817	0.28
	II	28,953	7,435	0.26	103,236	30,325	0.29
	III	39,652	9,267	0.23	122,241	27,376	0.22
	小計	75,290	17,957	0.24	245,961	63,518	0.26
	IV	55,017	19,831	0.36	146,287	32,873	0.22
	計	130,307	37,788	0.29	392,248	96,391	0.25
COD(kg)	I	4,383	977	0.22	14,183	4,636	0.33
	II	22,705	6,130	0.27	74,416	24,220	0.33
	III	26,662	6,593	0.24	98,308	20,925	0.23
	小計	54,750	13,700	0.25	178,907	48,781	0.28
	IV	32,874	11,850	0.36	95,252	24,793	0.26
	計	87,624	25,550	0.29	274,159	74,574	0.27
T.N(kg)	I	2,440	1,710	0.70	3,595	1,903	0.53
	II	8,834	4,478	0.57	13,253	5,649	0.43
	III	9,902	4,142	0.42	22,045	6,082	0.28
	小計	20,176	10,330	0.51	38,893	13,634	0.35
	IV	3,321	1,870	0.56	7,030	3,234	0.46
	計	23,497	12,200	0.52	45,923	16,868	0.37
T.P(kg)	I	301	97	0.32	534	186	0.35
	II	1,025	354	0.35	2,348	779	0.33
	III	1,255	286	0.23	3,748	746	0.20
	小計	2,531	737	0.29	6,630	1,711	0.26
	IV	530	205	0.39	1,352	546	0.40
	計	3,061	942	0.31	7,982	2,257	0.28

I~III:北湖, IV:南湖

3. 琵琶湖のモデル

琵琶湖は、湖質のほぼ全域が流入区域で、流出河川は、瀬田川のみで、人工調節されているので、湖水位は、ほぼ安定している。

湖の形状は、水深が深く、水質のせいで北湖と、水深が4〜5mと浅く、汚濁が進んでいる南湖とに分かれる。北湖は滞留時間が4〜5年と長く、南湖は、1週間程度で汚濁機構が、非常に異なるものと思われる。

3-1 モデル

図2にあるモデルを用いる。北湖を図-2にある湖流と、地形の關係から区分する。

北湖は、成層期と非成層期に分かれ、成層期には、水温躍層が発達する。成層期は6〜10月であるが、水温の水深分布を見ると0〜10mが表水層、10〜20mが変水層、20m以上が深水層となっている。琵琶湖の場合、10mまでが、栄養生成層とされているが、ここでは、変水層の半かまでを表水層(水深15mまで)とし、それ以下を深水層とする。I〜IVの体積、流域面積を表4に示す。

表-4. 体積、流域面積

名称	I	II	III	北湖(IV)	南湖(V)	琵琶湖計
表水層(Km³)	1,560	5,988	1,013	8,561	0.228	8,789
深水層(Km³)	4,144	13,304	0,216	17,664		17,664
計(Km³)	5,704	19,292	1,229	26,225	0,228	26,453
流域面積(Km²)	911	1,525	955	3,391	269	3,660
比率	0.2487	0.4167	0.2610	0.9264	0.0736	1.0000
水面積(Km²)	160	374	94	628	58	686
比率	0.2330	0.5452	0.1374	0.9156	0.0844	1.0000

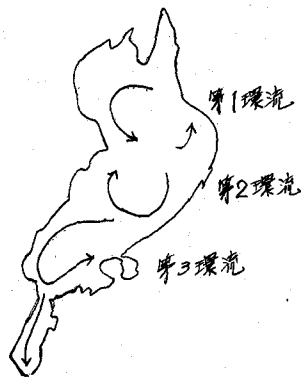


図-2 琵琶湖の湖流(昭和44年「琵琶湖の湖質調査」より)

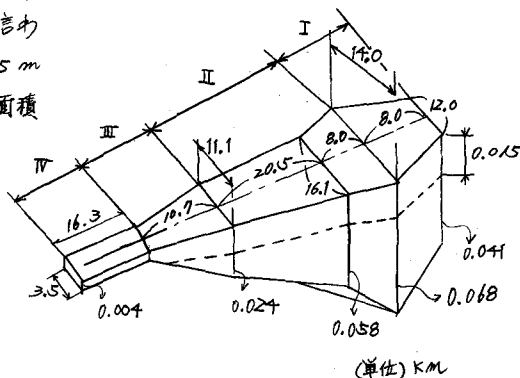


図-3. 琵琶湖のモデル

図-4. 水理モデル

3-2. 水理量の決定

図1のような流入、流出から次の式が導かれる。

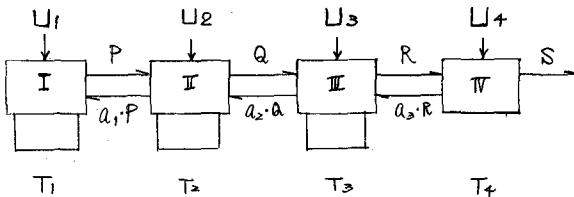
$$(I) \quad U_1 = (P - a_1 P) + T_1 \quad P = \frac{1}{a_1} (U_1 - T_1)$$

$$(II) \quad \begin{cases} U_2 + (P - a_1 P) = (Q - a_2 Q) + T_2 \\ Q = \frac{1}{(1-a_2)} \{ U_2 + (1-a_1)P - T_2 \} \end{cases}$$

$$(III) \quad \begin{cases} U_3 + (Q - a_2 Q) = (R - a_3 R) + T_3 \\ R = \frac{1}{(1-a_3)} \{ U_3 + (1-a_2)Q - T_3 \} \end{cases}$$

$$(IV) \quad \begin{cases} U_4 + (R - a_3 R) = S + T_4 \\ S = U_4 + (1-a_3)R - T_4 \end{cases}$$

(表水層) (深水層)



U_i : I区分湖への流入水量 P, Q, R, S : 区分湖間の移動水量

T_i : I区分湖の貯留水量 a_1, a_2, a_3 : それぞれの逆流移動水量比

琵琶湖の湖水位を、全湖で一一定と仮定すると、次のようになる。湖全体の貯留量を T_0 、各区分湖の流域面積比を V_i ($i=1\sim4$)、水面積比を U_i ($i=1\sim4$)とし、

$$U_i = (S + T_0) \times V_i, \quad T_i = T_0 \times U_i$$

①琵琶湖からの流出水量は、南湖から流出する

瀬田川（洗い堀流量）流量と洗い堀直前で取水される宇治沼流量と、南湖から京都へ行く、第1、第2疎水をもって流出水量とする。

②貯留量は湖水位一定として瀬田川流量に換算する。（ $2.645 \text{ (cm}^3\text{) / (cm}^3\text{)}$ ）

③降雨量による流入水量は、換算降雨量と実際の降雨量が、かなり異なるので、換算降雨量が全湖一様であるものとして算定する。（ $1.412 \text{ (mm}^3\text{) / (mm}^3\text{)}$ ）

④五ヶ湖間移動水量を求めたため、 $Q_1=0.9$, $Q_2=0.5$, $Q_3=0.2$ と設定する。

4. シミュレーション

ここで説明したモデルを用い、シミュレーションを行なう。

4-1. 方法

前述したように6~11月が、成層期であるが5月を非成層期と成層期の過渡期とし、2層の計算を行なう。表水層と深水層の内の物質移動は、表水層への流入負荷量の日量の5%と仮定する。深水層へ移った物質は、湖底に沈殿するものとし、沈殿した物質が、深水層内で微生物分解を受けることは、ここでは考慮しない。1年を30(日/月) $\times 12 \text{ (月)} = 360 \text{ (日)}$ とし、日量単位で完全混合とせよ。現実時刻でのシミュレーションをまず行い、湖内浄化率を決定する。KループとJループも、比較的、容易に収束するが、Jループ時は、各区分湖間で変動が生じる場合がある。

将来物質を推定する時は、現実から決定した湖内浄化率を用いて推定した。（Jループをはずす。）又、10日毎にアウトプットさせておき、季節変動を見る事ができる。

4-2. 湖内浄化率

表9の現実物質のうち、北湖と南湖の平均物質を用いて、湖内浄化率を決定した。表10にその結果を示すが、流達率は仮定値を用いたため、CODのように浄化率が1を越えるものが出てくる。これは、流達率が小さすぎたためである。南湖と北湖での流出率をみると、COD, T.Nの場合、北湖が30%くらいで、かなり高い値を示している。これは、北湖における藻類生産との関係で捉える必要がある。BODの流出率は、北湖で1%と、南湖の1/3程度しかない。北湖に流入する河川が比較的、大きいのと、市街化が南湖に比べ、遅れているため、流達率が小さい値を示すものと思われる。又、北湖における自浄作用が、大きく作用している。T.Pは、北湖で4%と非常に小さいのは、吸着、沈殿効果が大きいのと、北湖内における「浄化」が作用しているのイはないか。

表-5. 琵琶湖流出水量(平均値) (単位) $\text{m}^3/\text{日}$

月別	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
洗い堀	61	78	204	262	216	416	242	118	94	94	105	139
疎水	8	8	9	16	22	21	22	23	23	13	8	8
宇治沼	48	48	57	59	57	52	56	53	53	52	57	60
流出水量	117	134	270	337	295	489	220	194	170	159	170	207

表-6. 琵琶湖の貯留量 (単位) cm^3

琵琶湖貯留量	-48	-10	+28	+23	+14	+14	+12	-3	-6	+18	+6	+20
前月との増減	-5	+38	+38	-5	-9	0	-2	-15	-3	+24	-12	+24
換算流量	-13	+101	+101	-13	-24	0	-5	-40	-8	+63	-32	+63

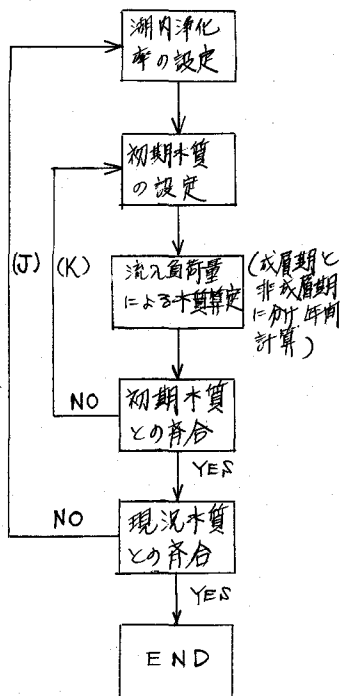
表-7. 琵琶湖の降雨量 (単位) mm

流域水量+貯留量	104	235	371	324	271	489	315	154	162	222	138	270
換算降雨量	74	166	263	229	192	346	223	109	115	157	98	191
実際の降雨量	79	144	175	136	151	312	112	89	233	83	169	93

表-8. 移動水量 (単位) $\times 10^6 \text{ m}^3/\text{日}$

P	25	31	59	72	63	105	69	41	36	35	36	45
Q	14	13	29	39	34	56	37	23	20	17	20	23
R	12	14	27	34	29	49	32	19	17	16	17	21
S	10	12	23	29	25	42	28	17	15	14	15	18

図-5. シミュレーション



4-3. 将来水質の推定

図6に示すような結果がシミュレーションの結果である。これは、前述の通り、流入負荷量を、下水処理、し尿処理を現状のまま、固定した場合について算定した。従って、将来の対策を立てる指標になると考えられる。

① 環境基準

琵琶湖の環境基準はCODでAAである。BODについては、 $BOD:COD=1:1$ として、やはり1ppmを目安とする。又、T.Nは0.15ppmが、T.Pは、0.02ppmが、富栄養化の限度といわれているのでこれを基準とする。

② BOD

南湖は現在で、基準を上回り、北湖は昭和55年までに上回る。昭和65年で、南湖が3ppm、北湖が、1.5～1.9ppmとなる。

③ COD

CODは昭和50年までに基準を越えてしまう。

④ T.N, T.P

T.Nは、現在、イビト基準の倍くらいである。又、その後ク上昇傾向は鈍い。T.Pは、南湖が基準を大きく上回るが、北湖は流出率が4%と小さいため、将来まで基準を上回る事はない。しかし、湖内での局所汚染は、特にT.Nが豊富なことから深刻になる恐れがある。

5. 問題点と今後の方向

① 水理モデルの水理量決定は、仮定値を使っている。

その具体的なデータがない。又、降雨量から流入量を求めるための流出解析が必要である。

② 湖内浄化率と流速率は、湖内の汚濁機構を明らかにするため、分けて算出するべきであるが、琵琶湖流入河川の水質、水量の不揃いのため、今回は、できなかった。

③ 現状水質と過去からの蓄積は、北湖の滞留年数が、4～5年と長いから、考慮すべきであろう。琵琶湖の測定値が、不足していたため、今回は見送った。

④ 湖内の生物活動の定量化は、本文では行っていない。1970年、第5回国際水質汚濁会議で、Tennyらの発表したモデルは、CODと制限因子として磷酸塩を考へ、COD予測も行ったものがあるが、種々のパラメータを決定するのは容易ではない。しかし、湖の解析としては、生態モデルを考へるべきで、今後の研究課題であろう。

参考文献

1. 「琵琶湖の将来水質に関する調査報告書」(昭和44年、土木学会)
2. 「琵琶湖河川下水道基本計画策定のための調査報告書」(昭和46年、建設省)

表-9. 現状水質 (単位) ppm

名称	BOD	COD	T.N	T.P
北湖	0.48	0.76	0.28	0.0057
南湖	1.51	1.19	0.348	0.016

表-10. 流出率

名 称		BOD	COD	T.N	T.P
北湖	流速率	0.24	0.25	0.51	0.29
	净化率	0.5017	1.2712	0.5696	0.1380
	流出率	0.120	0.318	0.290	0.040
南湖	流速率	0.36	0.36	0.56	0.39
	净化率	0.9770	0.6826	0.5854	0.9417
	流出率	0.352	0.246	0.328	0.367

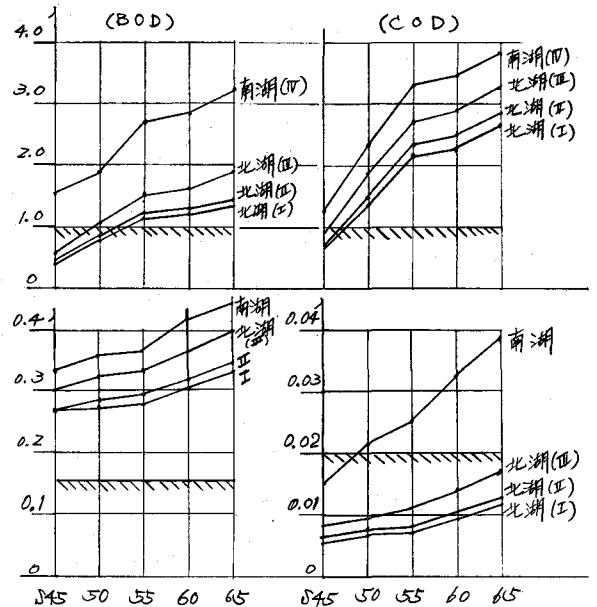


図-6. 将来水質推定値。