

富栄養化モデルを用いた児島湖の水質改善に関する検討

株式会社エイトコンサルタント 正会員 ○北村大輔
岡山大学 正会員 河原長美
岡山大学 学生会員 陳 文

1. はじめに

岡山県南部に位置する児島湖は児島湾の1部を締め切られて形成された人口の汽水湖であり、また、流域の都市化や生活様式の変化が進んだことから富栄養化が進行し、全国的にも有数の水質汚濁湖沼となっている。現在、様々な対策が行われているものの、その水質は環境基準を達成していない¹⁾。

そのため、どのような水質改善策を採用すれば十分に速やかな水質改善が達成されるかを明らかにすることが課題となっている。そこで本研究では、まず児島湖の水質を再現するモデルの同定を行い、得られたモデルを用いて、各種の方策による水質改善効果について検討する。

2. モデル化

2.1 流入水質推定

児島湖の富栄養化モデルを作成するにあたり、まず児島湖への毎日の流入水質を推定した。1997年4月から2006年3月までの毎日の水位変動データを用い、流入水量、流出水量を算出した。得られた流入水量から児島湖流域下水道浄化センターからの放流量を除き、笹ヶ瀬川と倉敷川の流域面積比で流量を配分することでそれぞれの河川からの流入水量を求めた。笹ヶ瀬川、倉敷川以外の小河川の流量はこれらで代表させた。

次に、クロロフィルaを除く流入河川からの負荷量を次のように推定した。それぞれの河川について、かんがい期と非かんがい期ごとに負荷量-流量関係式($L=a \times Q^b$)を用い、水質測定がなされていない日について流入負荷量を推定した。表2.1、2.2に負荷量-流量関係式の係数を示す。

表2.1 負荷量-流量関係式の係数(笹ヶ瀬川)

水質項目	かんがい期			非かんがい期		
	a	b	決定係数 R^2	a	b	決定係数 R^2
COD	0.795	0.922	0.887	0.563	1.05	0.925
TN	0.141	0.926	0.823	0.189	0.948	0.907
TP	0.0187	1.01	0.853	0.0140	1.05	0.923

表2.2 負荷量-流量関係式の係数(倉敷川)

水質項目	かんがい期			非かんがい期		
	a	b	決定係数 R^2	a	b	決定係数 R^2
COD	0.737	0.992	0.847	0.741	1.01	0.865
TN	0.126	1.00	0.816	0.206	0.988	0.850
TP	0.0198	1.17	0.822	0.0203	1.03	0.902

クロロフィルa濃度については、水温 T [°C]、児島湖の滞留時間 t [日]を用い、最小二乗法によって得られた次式で算出した。また、水質が改善されていることを考慮して、2001年度以前と2002年度以降に分けて最小二乗法を行った。表2.3、2.4に係数を示す。

$$\text{Chl-a濃度} [\mu\text{g/L}] = a \times e^{bT} + c \times e^{dt}$$

表2.3 笹ヶ瀬川のクロロフィルa濃度推定式の係数

	a	b	c	d	決定係数 R^2
2001年度以前	2.4450	0.1341	1.0108	0.1623	0.5912
2002年度以降	1.6477	0.1264	1.0589	0.1281	

表2.4 倉敷川のクロロフィルa濃度推定式の係数

	a	b	c	d	決定係数 R^2
2001年度以前	3.1890	0.1097	5.1608	0.1512	0.4698
2002年度以降	4.4610	0.0864	7.6585	0.0937	

下水処理水の負荷量は、月平均水質と月平均放流量から求めた。

以上の結果から得られた流入水量と流入負荷量を用いて、児島湖への流入水質を推定した。

2.2 富栄養化モデル^{2),3)}

湖沼における生態系では様々な因子が関係しているが、本研究ではクロロフィルa、COD、TN、TPを取り扱った。COD、TN、TPに関しては、①植物プランクトン態として存在するもの、②植物プランクトン以外の粒子態として存在するもの、③溶存態として存在するものの3つに区別した。また、モデル中の植物プランクトン種として、①シアノバクテリア、②珪藻綱、③緑藻綱・その他を設定した。

本研究で用いた富栄養化モデルとモデル式を以下に示す。

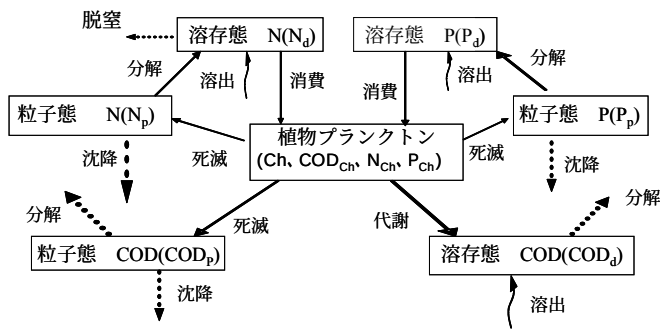


図2.1 富栄養化モデルの構造

(1) クロロフィル a(Ch)

$$d(Ch)/dt = (Ch_{in} \cdot Q_{in} - Ch_{out} \cdot Q_{out})/V + G_p \cdot Ch - k_d \cdot T \cdot Ch - k_s \cdot A \cdot Ch/V$$

・植物プランクトン増殖速度(G_p)

$$G_p = \mu_{max} \cdot N_d / (K_N + N_d) \cdot P_d / (K_P + P_d) \cdot I/I_s \exp(1 - I/I_{opt}) \cdot T/T_s \cdot \exp(1 - T/T_{opt})^3$$

(2) COD

・プランクトン態COD(COD_{Ch})

$$COD_{Ch} = \xi_{COD} \cdot Ch$$

・粒子態COD(COD_p)

$$d(COD_p)/dt = (COD_{pin} \cdot Q_{in} - COD_{pout} \cdot Q_{out})/V + \xi_{COD} \cdot k_d \cdot T \cdot Ch - f_c \cdot COD_p - k_s \cdot A \cdot COD_p/V$$

・溶存態COD(COD_d)

$$d(COD_d)/dt = (COD_{din} \cdot Q_{in} - COD_{dout} \cdot Q_{out})/V + k_{COD} \cdot \xi_{COD} \cdot G_p \cdot Ch - f_c' \cdot COD_d + A \cdot D_{COD}/V/1000 \cdot \theta^{(T-20)}$$

(3) 窒素

・プランクトン態 (N_{Ch})

$$N_{Ch} = \xi_N \cdot Ch$$

・粒子態窒素(N_p)

$$d(N_p)/dt = (N_{pin} \cdot Q_{in} - N_{pout} \cdot Q_{out})/V + \xi_N \cdot k_d \cdot T \cdot Ch - f_c \cdot N_p - k_s \cdot A \cdot N_p/V$$

・溶存態窒素(N_d)

$$d(N_d)/dt = (N_{din} \cdot Q_{in} - N_{dout} \cdot Q_{out})/V - \xi_N \cdot G_p \cdot Ch - f_c \cdot N_d + A \cdot D_N/V/1000 \cdot \theta^{(T-20)} - k_{dN} \cdot N_d \cdot \theta^{(T-20)}$$

(4) リン

・プランクトン態リン(P_{Ch})

$$P_{Ch} = \xi_P \cdot Ch$$

・粒子態リン(P_p)

$$d(P_p)/dt = (P_{pin} \cdot Q_{in} - P_{pout} \cdot Q_{out})/V + \xi_P \cdot k_d \cdot T \cdot Ch - f_c \cdot P_p - k_s \cdot A \cdot P_p/V$$

・溶存態リン(P_d)

$$d(P_d)/dt = (P_{din} \cdot Q_{in} - P_{dout} \cdot Q_{out})/V - \xi_P \cdot G_p \cdot Ch - f_c \cdot P_d + A \cdot D_P/V/1000 \cdot \theta^{(T-20)}$$

2.3 数値解析方法

水質の時間変化は非線形であり、非線形回帰分析方法としては種々のものがあるが、本研究ではその中の1つの手法である Marquardt 法を用い、モデル式の最適なパラメータを求めた。また、各水質の濃度を得るには常微分方程式を解く必要があるが、本研究では Runge-Kutta 法を用いて数値解析を行った。

図2.2～2.5に、1997年4月から2006年3月までのクロロフィル a、COD、TN および TP について富栄養化モデルから得られた計算値と、児島湖において観測された値をプロットしたものを示す。今回得られたパラメータで表現されるモデル式によって、児島湖の水質を概ね再現することが可能であると言える。

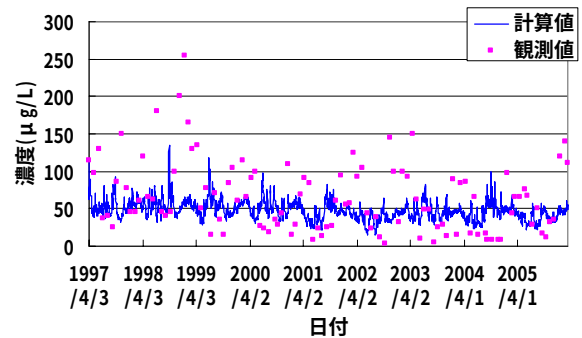


図2.2 クロロフィル a の再現性

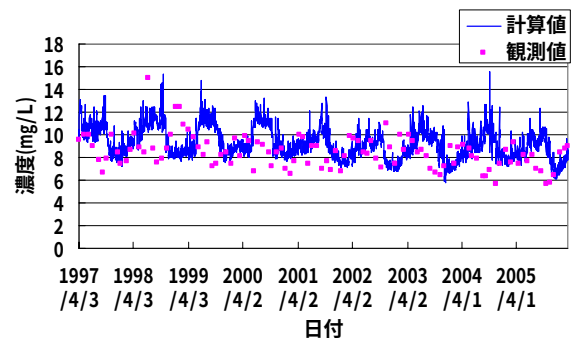


図2.3 COD の再現性

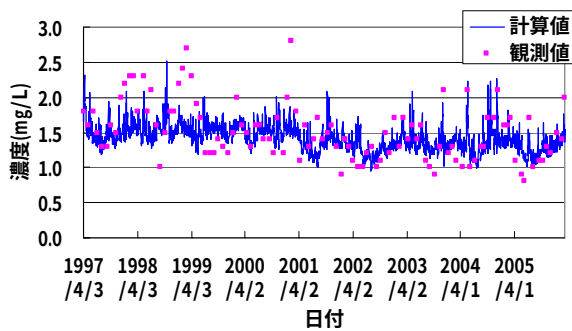


図 2.4 TN の再現性

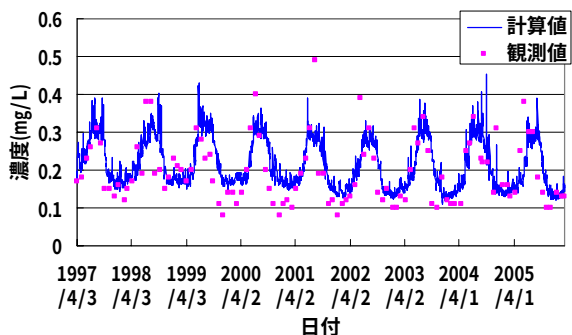


図 2.5 TP の再現性

3. 児島湖の水質改善に関する検討

得られたモデルを用いて水質シミュレーションを行うことにより、各種の方策による水質改善効果について検討を行った。気象条件や流入水量などは水文条件が平均的な季節変化をした 2002 年のデータを用い、流入水質は 2005 年における推定値を用いた。その状態が 3 年間周期的に繰り返すものと仮定してシミュレーションを行い、3 年目の 1 年間の値を基準値とし、これから水質の平均値を求めた。経過日数の始まりは、1 月 1 日とした。

3.1 下水道整備による水質改善効果

まず、下水道および類似施設の整備のみによる水質改善効果について検討した。

平成 18 年度児島湖水環境改善対策推進事業報告書によれば⁴⁾、2025 年度には下水道整備率、水洗化率が 95.8%となる見通しであり、下水道の整備により単独処理浄化槽の排水や未処理雑排水が下水道に取り込まれ、2005 年度と比較して COD 排出汚濁負荷量については 37.1%、TN 排出汚濁負荷量については 33.8%、TP 排出汚濁負荷量については 49.7%の削減が見込まれている。この値を参考にして、下水道整備が完了した場合

の児島湖への毎日の流入水質を推定し、シミュレーションを行った。気象条件や流入水量などはすでに述べたように 2002 年のデータを全ての場合に使用し、下水処理放流量は 2005 年のデータを用いた。下水道整備が完了した場合の汚濁負荷削減率での児島湖内の平均水質を表 3.1 に示す。

表 3.1 下水道整備が完了した場合の児島湖の平均水質

		基準値	下水道整備後	環境基準
クロロフィルa(μg/L)	平均値	37	20	
COD(mg/L)	平均値	8.4	5.1	
	75%値	9.3	5.8	5.0
TN(mg/L)	平均値	1.2	0.9	1.0
TP(mg/L)	平均値	0.18	0.11	0.1

下水道整備が完了した場合、クロロフィル a は 17 μg/L、COD75%値は 3.5mg/L、TN は 0.3mg/L、TP は 0.07mg/L 程度改善されるが、環境基準を上回るか、かろうじて達成する程度であるという結果となった。汚濁負荷量の削減率向上に努めたり、下水道整備以外の追加的な対策により浄化を進めるなどの必要が生じる可能性が高い。

3.2 付加的な水質改善対策

児島湖の水質改善のための付加的対策としては、浄化用水の増加と、樋門操作による滞留時間の短縮とが考えられる。以下にそれぞれの対策を行った場合のシミュレーション結果を示す。

3.2.1 浄化用水の増加による水質改善効果

高梁川からの浄化用水を増加させた場合に、児島湖の水質がどの程度改善されるかを検討した。浄化用水の増加量としては 20,000m³/日、50,000m³/日、100,000m³/日を設定した。流入水量、流入水質、湖の体積などは、浄化用水の増加による影響を考慮した推定値を用いた。

表 3.2 に浄化用水を増加させた場合の児島湖内の平均水質を示す。

表 3.2 浄化用水を増加させた場合の平均水質

		基準値	20,000(m ³ /日)	50,000(m ³ /日)	100,000(m ³ /日)
クロロフィルa(μg/L)	平均値	36.7	36.3	35.7	34.7
COD(mg/L)	平均値	8.4	8.3	8.2	8.0
	75%値	9.3	9.2	9.1	8.9
TN(mg/L)	平均値	1.24	1.23	1.22	1.20
TP(mg/L)	平均値	0.183	0.181	0.179	0.174

浄化用水を 100,000m³/日増加させた場合で、クロロフィル a が 2.0μg/L、COD75%値が 0.4mg/L、TN が 0.04mg/L、TP が 0.01mg/L 程度改善されると予測され、

付加的な対策としての効果はあると考えられる。

3.2.2 滞留時間の短縮による水質改善効果

児島湖では、滞留時間が長くなるにつれて水質が悪化する傾向が認められる⁵⁾⁶⁾。特に、平均滞留時間が長くなる冬季と春季にはその傾向が著しい。逆に、滞留時間を短縮することができれば水質が改善されと考えられる。そこで、樋門操作により滞留時間を短縮することでどの程度の水質改善効果が現れるかを検討した。

かんがい期には AP（児島湾飽浦港平均水面潮位）80cm、非かんがい期には AP50cm まで毎日必ず水位を下げるように樋門操作を行うと仮定した。この操作により、対策を行う前の平均滞留日数が 16.7 日であったのに対し、対策後の平均滞留日数は 15.8 日と、1 日程度短縮されることになる。

気象条件はすでに述べたように 2002 年のデータを使用し、流入河川水質、下水処理放流量などは 2005 年のデータを用いた。流出水量、湖の体積については、樋門操作を考慮した推定値を用いた。滞留時間を短縮させた場合の児島湖内の平均水質を表 3.3 に示す。

表 3.3 滞留時間を短縮させた場合の平均水質

		基準値	滞留時間短縮
クロロフィルa(μg/L)	平均値	36.7	36.9
COD(mg/L)	平均値	8.37	8.33
	75%値	9.30	9.23
TN(mg/L)	平均値	1.239	1.242
TP(mg/L)	平均値	0.183	0.182

COD75%値では 0.07mg/L 低下したが、全体的に大きな変化は認められなかった。

4. 結論

本研究では、児島湖における富栄養化モデルの最適なパラメータ値を求めた上でモデルの再現性について検討した。そして、水質改善対策を行った場合に、どの程度児島湖内の水質が改善されるか検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1)児島湖における富栄養化モデルを求めた。このモデルにより湖内水質が概ね再現された。
- 2)下水道整備により児島湖内の水質は、大きく改善されるが、環境基準と比較すると、幾分上回る程度であるという結果になった。
- 3)付加的な対策として、浄化用水の増加による水質改

善効果について検討した。浄化用水を 100,000m³/日増加させた場合、クロロフィルaが 0.5 μg/L、COD75% 値が 0.3mg/L、TN が 0.02mg/L、TP が 0.01mg/L程度改善されると予測された。

- 4)樋門操作によって滞留時間を短縮させた場合には、わずかではあるが改善が見られた。

水質再現性においては実測値のクロロフィルaが高濃度のときに、計算値が十分対応できていないという結果となった。再現性を高めるためには、流入河川からの負荷量の推定の精度を高めることや、蒸発による湖の体積の減少などを考慮する必要があると思われる。

滞留日数の短縮によるクロロフィルaの水質改善効果が十分でないことは、クロロフィルa濃度の再現性が高濃度の場合に十分でないことが関係している可能性があり、今後検討が必要と考えられる。

謝辞

浄化用水に関する貴重なご意見を頂きました岡山県環境保健センター鷹野洋氏をはじめ、データを頂いた関係各位の皆様に深く感謝致します。

また、ご協力頂いた岡山大学水環境学研究室の諸兄に感謝致します。

参考文献

- 1) 岡山県(2006)：児島湖ハンドブック
- 2) 河原長美、山下尚之(1992)：閉鎖性水域における水質保全計画に関する研究、pp.16-18
- 3) 岩佐義朗(1990)：湖沼工学、山海堂、pp.299-356
- 4) 岡山県(2007)：平成 18 年度児島湖水環境改善対策推進事業報告書、pp.103-111
- 5) 河原長美、名合宏之、高杉滋、安部文博(1995)：旭川ダム貯水池の富栄養化と湖水の水質に及ぼす影響に関する研究、環境工学研究論文集、第 32 巻、p.260
- 6) 陳文、前克弥、河原長美(2007)：児島湖における滞留時間短縮による水質改善効果の検討、第 59 回平成 19 年度土木学会中国支部研究発表会発表概要集、pp.447-448