

# 長柄川下流域における水田群からの汚濁負荷流出特性に関する研究

水利用学分野 伊藤 勉

キーワード：年間汚濁負荷流出量, L-Q 式, 水質タンクモデル, 水田流域

## 1. はじめに

湖山池は鳥取平野の北西部に位置し、湖面積 6.81km<sup>2</sup>、周囲 17.5km、貯水量 1.9×10<sup>7</sup>m<sup>3</sup>であり、平均水深 2.8m、最大水深 6.5m の規模を有する海跡湖である。また、湖山池は閉鎖性の強い汽水湖で、近年、湖底の貧酸素化やアオコの発生など、富栄養湖の状態にある。

現在、富栄養化対策には様々なものが提案されているが、そのひとつに面源からの流出負荷削減が挙げられる。面源からの流出負荷を削減するためには、その流出量や流出時期を把握することが重要である。しかし、面源では水文条件や地域特性などの影響を強く受けることから、流出量を正確に測定することは困難とされている<sup>1)</sup>。さらに、面源の中でも水田では、降雨時に多量の負荷流出が起こるといふ面源の一般的な性質に加え、田植えや施肥といった農作業による影響を強く受ける。

そこで、本研究では湖山池への流入負荷削減対策の基礎研究として面源、特に水田群からの汚濁負荷流出特性を把握するため、無降雨時に定期観測を行った。また、降雨時には無降雨時の数倍から数百倍もの汚濁物質が流出することから、2004 年に行った降雨時集中観測のデータを用い、L-Q 式および水質タンクモデルによって降雨時の負荷流出量のシミュレーションを行い、得られた結果から 2006 年の年間負荷流出量を算定した。

## 2. 調査方法および対象地域概要

測定は流量と T-N, T-P, COD<sub>Mn</sub>, SS, DO, pH, EC について行った。流量は流速計を用い、水深方向には 1 点法で、水路幅方向には等間隔に 3 点で流速を測定し流積との積により求めた。調査対象地域は湖山池への流入河川のひとつである長柄川下流域の水田地域とし、対象地域の面積は長柄川右岸頭首工掛りの水田約 18.5ha である。対象地域と各測定地点を図 1 に示す。流入部の測定地点は長柄川右岸頭首工直下の用水路に 1 ヲ所(No.1)設置した。また、対象地域からの排水の出口地点を流出地点(No.2)とし、合計 2 ヲ所で測定を行った。

無降雨時観測は 2005 年 12 月 20 日から 2006 年 12 月 15 日までを行い、通水が始まる 5 月中旬までと、落水期である 9 月上旬以降を非灌漑期とし、2 週間に 1 回程度の頻度で採水を行った。さらに、代かき・田植期である 5 月中旬から 5 月末までは週に 3 回程度、その後 6 月から 9 月初めの落水期までは週に 1 回、合計で 40 回の調査・測定を行った。また、降雨時は、2004 年 6 月 11 日、8 月 30 日、9 月 29 日に 12~24 時間の集中観測を行った。

## 3. 無降雨時観測結果・考察

表 1 は、非灌漑期(測定開始日~2006 年 5 月上旬, 9 月上旬~測定終了日), 代かき・田植期(5 月中旬~5 月末), 中干し期(6 月末~7 月中旬), 普通灌漑期(6 月初め~6 月下旬, 8 月初め~8 月末)の測定期間 4 期における、流出地点での T-N, T-P, SS の期別平均濃度を示している。この表より、すべての水質項目について代かき・田植期と中干し期に濃度が上昇しており、非灌漑期と比較すると T-N で

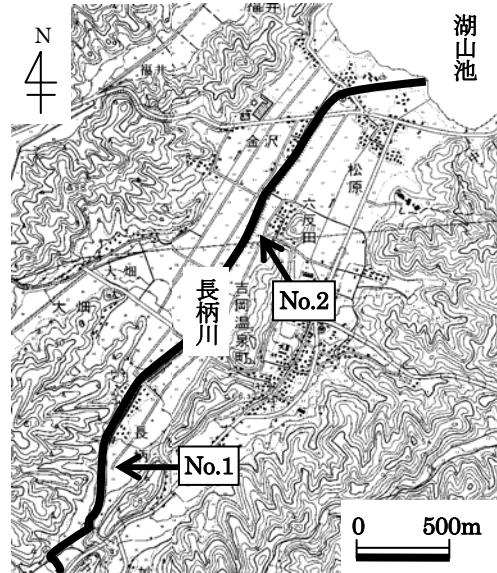


図 1 対象地域概略図

表 1 流出地点での期別平均濃度

	非灌漑期	代かき・田植期	中干し期	普通灌漑期
T-N	0.6	0.7	0.9	0.6
T-P	0.09	0.15	0.17	0.11
SS	4	12	27	5

は 1.2 倍～1.5 倍, T-P では 1.5 倍～2 倍程度, SS に至っては 3 倍～8 倍にもなる。これは, 代かき後の落水および中干し前の落水による影響が現れたものと考えられる。代かき後の排水中には, 代かきによって巻き上げられた土壌成分が大量に含まれており, さらに, 代かき前, 中干し期後に施肥が行われることから, 落水によって肥料成分も流出する。また, すべての水質項目において, 普通灌漑期と非灌漑期間に大きな差異が見られない。これは, 対象地域での灌漑形態が間断灌漑であり, 掛け流し水田と異なり暗渠からの排水が主であったことが示唆される。

次に, 各水質の差引負荷量を区間代表法を用いて積算し, 図 2 に示す。差引負荷量は, 流出地点の負荷量から流入地点の負荷量を差し引くことで求められ, 対象地域からの正味の流出負荷量を表している<sup>2)</sup>。この結果より, 代かき・田植期の T-N, T-P 流出量が減少, あるいは, 横ばいに推移していることが伺える。これは, 表 1 に示したとおり, 濃度の上昇は見られるものの, 積極的な水田への取水・貯留管理により流入流量に比べ流出流量が少量であったことによる。

その後, 中干し期～8 月上旬にかけて, すべての項目で流出量が増加している。T-N, T-P については, 中干し前の落水および中干し後の追肥による影響が強く現れたと推察される。また, SS については 7 月 20 日に高濃度の流出があったことが影響している。この原因として, 観測 2 日前の豪雨による影響や, 測定地点上流での草刈り, 農機具の洗浄などの農作業による影響が挙げられる。

全期間の変化は, 非灌漑期では負荷流出量は少量で, 灌漑期に流出量が増加しているように思われる。しかし, 図 3 に示すように期別に流出割合を比較すると, T-N, T-P については非灌漑期に全体の約 40%もの流出があるという結果となった。この要因として, (1)非灌漑期でも僅かではあるが流出水があったこと, (2) 灌漑期が 5 ヶ月程度であるのに対し, 非灌漑期は 7 ヶ月と時間的な差異があること, また, (3) T-N については非灌漑期においても普通灌漑期と同程度の濃度の流出水が観測されたこと等が挙げられる。

#### 4. 降雨時における流出特性

ここでは, 2004 年 6 月 11 日, 8 月 30 日, 9 月 29 日に観測された流量および各水質成分のデータを基に降雨時負荷流出量の推定を行い, その結果から 2006 年の降雨時負荷流出量を算出する。なお, 各観測日の諸情報を表 2 に示す。

##### タンクモデルによる流量推定

無降雨時における農業用水路への流出は, 水門操作による流出と地下水流出により起こる。また, 降雨時には無降雨時の流出に加え, 降雨による直接流出が発生する。そこで, 降雨時流出では基底流出を差し引いた値を用い, 降雨による直接流出を再現し, 無降雨時流出と合わせることで年間負荷流出を算定した。また, 一般にタンクモデルによる流出解析では直列 3 段タンクが用いられており, 各タンクはそれぞれ, 表面流出, 中間流出, 基底流出を表しているが, 本研究では, 直接流出の再現が

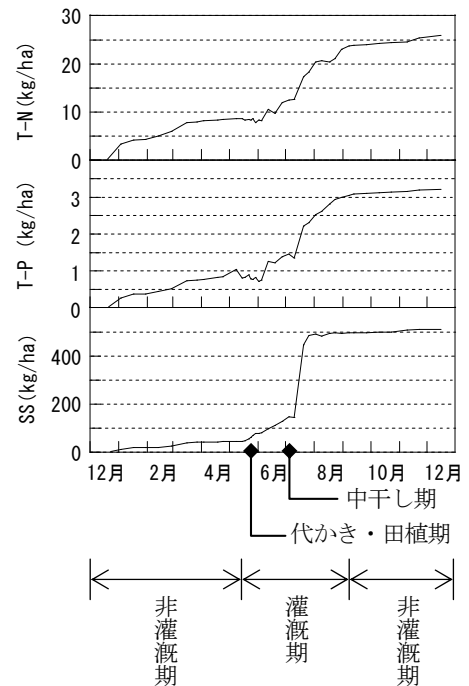


図 2 差引積算負荷量の経時変化

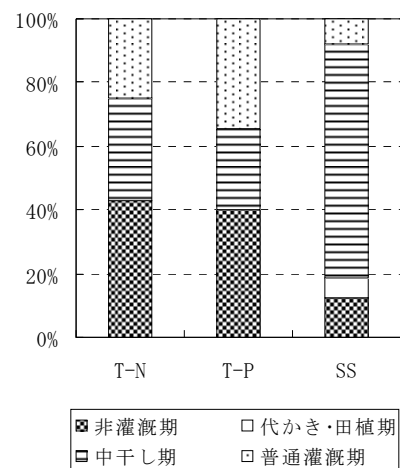


図 3 期別差引負荷量の流出割合

表 2 降雨時観測の諸情報

	観測時間 (h)	降水量 (mm)	ピーク流量 (m <sup>3</sup> /s)	平均流量 (m <sup>3</sup> /s)
6/11	18	24	0.14	0.05
8/30	12	62	0.34	0.13
9/29	24	152	1.54	0.55

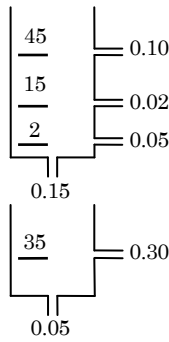
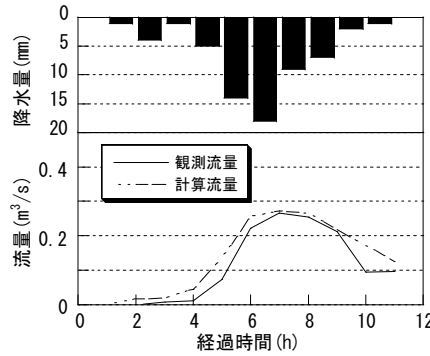
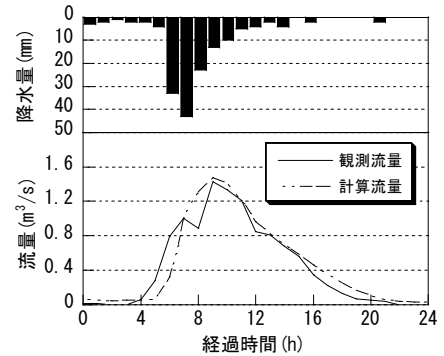


図4 各タンクの流出孔係数



(a) 8月30日



(b) 9月29日

図5 タンクモデルによる流量計算結果

目的であることに加え、より簡易にシミュレーションを行うため、直列2段タンクを採用した。

パラメータは試行錯誤の上、図4に示すように各流出孔の流出係数および高さを決定した。また、8月30日と9月29日のシミュレーション結果をそれぞれ、図5(a), (b)に示す。図5(a)より、観測流量と計算流量がよく一致している。また、図5(b)のような非常に大きな降雨に対しても、立ち上がりが若干遅れることを除けば高い再現性を示している。このモデルの誤差を、誤差評価関数のひとつであるRMSEを用いて評価すると0.10と良好であり、特にピーク時の再現性は高い。

#### L-Q式によるT-N・T-Pの流出量推定

降雨による負荷流出の推定法には現在様々なものが提案されているが、T-N, T-PについてはL-Q式による推定を行った。L-Q式とは、汚濁流出のモデルで最も一般的に用いられる統計回帰モデルの一種であり、次式で表される。

$$L = a \cdot Q^b \quad (1)$$

ただし、 $L$ : 負荷量,  $Q$ : 流量,  $a, b$ : 定数である<sup>3)</sup>。ここでは、直接流出を再現するため、流量と同様に基底流出を差し引いた値をデータとして与えた。

表3は各水質成分による式(1)の定数と相関係数を表したものである。定数 $a$ は流出する濃度のオーダーにより変化する。また、定数 $b$ は水質成分発生負荷量の流量との対応を示し、流出の特性を示すパラメータであり、 $b > 1$ のとき洗い流し型、 $b \approx 1$ のとき濃度一定型、 $b < 1$ のとき希釈型に分類される<sup>4)</sup>。この分類によると、T-Nでは希釈型～濃度一定型、T-Pでは洗い流し型～濃度一定型となる。これを実測濃度と比較すると、やはり

T-Nでは他の水質成分と異なり明確な濃度の上昇が少ない結果となった。また、T-N, T-Pと流量の相関係数(R)はともに0.95であり、両者とも流量と強い相関関係にある。

次に、9月29日の実測負荷量とL-Q式を用いて計算した負荷量を図6に示す。T-Pについては、降雨初期の立ち上がりが多少過小評価されているが、その他は高い再現性を示している。また、T-Nでは全体を通して実測負荷量と計算負荷量が良く一致する。

#### 水質タンクモデルによるSSの流出量推定

SSについては、L-Q式を用いると過小評価される<sup>5)</sup>ことが指摘されていることから、本研究では水質タンクモデルを採用した。水質タンクモデルとは、流出解析で用いられるタンクの各段に、降雨時には掃流し、無降雨日には堆積するような汚濁堆積物を付加する<sup>6)</sup>というもので、次式で表される。

表3 L-Q式による水質成分の流出係数

(a, b: 定数 R: 相関係数)				
	a	b	R	試料数
T-N	1.35	0.87	0.95	72
T-P	0.41	1.09	0.95	67

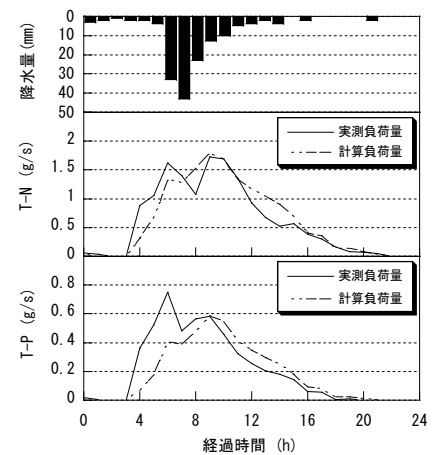


図6 L-Q式による計算結果

$$L_t = q_{1,t} B_{1,t} + q_{2,t} B_{2,t} \quad (2)$$

ここで、 $L_t$ : 流出負荷量,  $q_{1,t}$ ,  $q_{2,t}$ : 各流出孔からの流出量,  $B_{1,t}$ ,  $B_{2,t}$ : 流域に堆積している汚濁物質の濃度である。流域に堆積した物質は、降雨があると溶け出して無降雨時に再び堆積するが、それは次式で表される。

$$B_{t+\Delta t} = B_t \cdot \exp(-b \cdot q_t) \quad (3)$$

$$B_{t+\Delta t} = B_t \cdot \exp(c/t) \quad (4)$$

式(3)は、堆積した汚濁物質の減少過程を、式(4)は降雨停止後、時間の経過と共に汚濁物質が増加する過程を表したものである。その変化は様々な因子が関係し一義的に決めることは難しいが、今回のモデルでは指数関数的に変化すると仮定した。表4に、決定した初期濃度  $B_0$ , 減少量係数  $b$ , 堆積係数  $c$  を示す。これより、初期濃度  $B_0$  の数値を大きくすることによって実測値と計算値が一致する結果となった。

次に、9月29日の実測負荷量と計算負荷量を図7に示す。この図より、ピーク時にタイムラグがあるものの、変動パターンは実測負荷量と類似していることが伺える。

## 5. 年間汚濁負荷流出量の算出

無降雨時・降雨時の年間流出量を表5に示す。この表より、対象地域における降雨時の年間汚濁負荷流出量は、全流出量の40%~50%を占める結果となった。また、表6に示すように、2003年に行われた定期観測結果<sup>7)</sup>と比較すると、流出量はT-Nで10倍、T-Pで1.5倍、SSでは3倍程度の差があり、測定期間が5月~12月であったことを考慮しても、T-N, SSについては、これまでの長柄川下流域での測定方法ではかなり過小評価されている可能性が指摘される。

## 6. おわりに

本研究より、降雨時の年間汚濁負荷流出量は全流出量の40%~50%に達したことから、水田における負荷流出の算出は人為的な影響と降雨による影響の両面を考慮する必要があると考えられる。また、無降雨時観測より、対象地域水田群からの負荷流出量は、中干し期に増加すること、非灌漑期に全流出量の40%以上を占めることがわかった。このことから、今後の負荷流出対策は、これまで積極的に行われてきた代かき・田植期の対策だけでなく、年間を通じた対策を講じることが望まれる。

## 参考文献

- 1) 武田育郎(2001): 水と水環境の基礎知識, オーム社, pp.119~121.
- 2) 國松孝男ら(1989): 河川汚濁のモデル解析, 技報堂出版, p.54.
- 3) 田淵俊雄ら(1998): 清らかな水のためのサイエンス—水質工学—, 農業土木学会, pp.128~131.
- 4) 山田俊郎ら(1998): 森林集水域からの栄養塩負荷流出とその特性に関する比較研究, 土木学会環境工学研究論文集, 35, pp.85~93.
- 5) 多田明夫ら(2006): 集水域からの流出負荷量の推定法とその不確かさについて, 農土論集, 245(74-5), pp.109~122.
- 6) 中曾根英雄ら(1991): 水質の日流出負荷量の解析に関する研究, 農土論集, 151, pp.27~32.
- 7) 伊藤勉(2004): 湖山池への汚濁負荷についての研究, 平成16年度鳥取大学農学部卒業論文.

表4 水質タンクモデルで用いた各パラメータ

	$B_0$	$b$	$c$
1段目	300	0.1	0.1
	150	0.1	0.1
	80	0.1	0.15
2段目	150	0.1	0.1

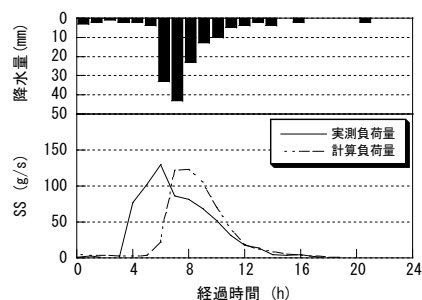


図7 SS成分の計算結果

表5 年間負荷流出量(2006年)  
(単位: kg/ha/yr)

	無降雨時流出	降雨時流出	計
T-N	25.9	18.3	44.2
T-P	3.2	3.1	6.3
SS	511	465	976

無降水日数 196 日, 降水日数 169 日

表6 年間負荷流出量(2003年)<sup>7)</sup>

	流出負荷量 (kg/ha)	測定期間	測定回数
T-N	4.3	5/18~	15
T-P	4.1	11/30	
SS	337		