

窒素流出モデルの農業集水域への適用と問題点

—農業集水域の窒素流出解析に関する研究 (2)—

田淵俊雄*・黒田久雄**・志村もと子***・黒田清一郎****

Application of the Nitrogen Outflow Model for Agricultural Watershed

—Studies on nitrogen outflow analysis in agricultural watersheds—

Toshio TABUCHI*, Hisao KURODA**, Motoko SHIMURA*** and Seiichiro KURODA****

* Science Council of JAPAN

** School of Agriculture, Ibaraki University

*** Chugoku National Agricultural Experiment Station

**** National Research Institute of Agricultural Engineering

Abstract

Nitrogen concentration of stream waters are investigated in 13 small watersheds. Table 1 shows the land use and pig density of each watersheds. $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations are quite different in watersheds, maximum value is 19.7 mg/l, and minimum value is 0.7 mg/l (Table 2). It depends on land use and especially on pig density (Fig. 3). $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations measured in rice-growing season are lower than the values measured in non-ricegrowing season. During rice-growing season the water flowed out of upland area is almost irrigated and flooded within paddy fields in lowland area. Then nitrate caused from chemical fertilizer and pig slurry in upland is removed by both denitrification and aqua-plant uptake in the paddy.

The nitrogen outflow model with nitrogen removal function of paddy fields were proposed in previous paper. Measured values are compared with the values calculated by this model. For non-ricegrowing season (Fig. 5), and for rice-growing season (Fig. 7), the calculated values are nearly equal to measured values. Large difference is appeared in watershed L, where lots of pigs were fed in the past. It means that large amount of nitrogen flowed out of the pig farms in the past remains in the subsoil and groundwater.

Key words : Nitrogen outflow, Land use, Pig density, Outflow model, Watershed

1. はじめに

農業集水域からの流出水の窒素濃度はその集水域内の土地利用と畜産に大きく影響される。第1報ではそれを予測する流出モデルを提案したが(田淵1998)、本報では条件の異なる集水域で実測し、モデルの妥当性を検討した。

2. 調査方法と調査地域

1) 調査地域

調査地は霞ヶ浦流域にある農業地帯の13の集水域である(表-1)。集水域内の土地利用と畜産の状況を考慮して選定し、養豚の存在しない地域として7地区(記号A-G)を選び、養豚のある地域として6地区(H-M)を

* 日本学術会議会員 〒300-0331 茨城県阿見町阿見 4630-104

** 茨城大学農学部助教授 〒300-0393 茨城県阿見町中央 3-21-1

*** 農林水産省中国農業試験場 〒721-8514 福山市西深津町 6-12-1

**** 農林水産省農業工学研究所 〒305-8609 つくば市観音台 2-1-2

キーワード 窒素流出, 土地利用, 畜産負荷, 集水域, 流出モデル

選んだ。A から G までは畑地・樹園地率の順に、H から M までは養豚頭数密度の順に配列した。

畑地・樹園地率については、18-54% の範囲にあり、かなりの変動幅がある。林地率は27-70% の範囲にあり、これもかなりの変動幅がある。水田率は6-19% である。林地率が60% を超えるのはA と B の集水域で、畑地が多く畑地率が50% 以上なのはG と K の集水域である。D は多肥の野菜畑が多い集水域である。

表-1 調査集水域の土地利用と養豚状況

Table 1 Land use and pig density in watersheds

集水域	全面積 ha	畑地率 %	水田率 %	林地率 %	豚 頭/ha
A	71.9	18	10	70	0.0
B	165.8	24	6	66	0.0
C	139.2	26	19	50	0.0
D	73.5	31	15	51	0.0
E	72.0	40	14	41	0.0
F	151.1	42	6	49	0.0
G	234.3	54	6	33	0.0
H	126.9	43	16	39	2.7
I	173.0	36	9	46	3.7
J	207.6	32	8	49	8.3
K	165.3	54	10	27	9.7
L	29.5	40	13	41	9.8
M	58.6	36	16	45	33.4

豚の集水域面積1 ha 当たりの頭数密度は、最大がM 地区の33.4 頭/ha でかなり高密度である。L は9.8 頭/ha であるが、10 年ほど前にはもっと高密度で現在減少中の集水域である。

2) 調査方法

集水域から流出する河川の末端で稲作期2回、非稲作期3回の測定を行った。測定項目は流量、全窒素(T-N)、硝酸態窒素(NO₃-N)である。

土地利用別面積は地形図からプランメーターで求めた。養豚頭数は航空写真から畜舎の面積を求めて算出し、聞き取りと現地踏査で補正した。

3. 調査結果

(1) 硝酸態窒素

各集水域の稲作期と非稲作期の平均値を比べると、どの集水域でも非稲作期平均値が稲作期平均値よりも高い(表-2)。全集水域の非稲作期平均値は8.4 mg/l で、稲作期の全平均値3.6 mg/l の2.3 倍である。このように非稲作期と稲作期の濃度には明確な差がある。

濃度が高かった集水域の硝酸態窒素濃度の時期的変化を図-1 に示す。いずれの集水域も6, 7月の稲作期に低く、11, 12, 2月の非稲作期に高くなっている。またJ, K, L, M の養豚密度が8 頭/ha 以上の集水域と多肥の野菜畑が多いD の集水域の濃度が高いレベルで推移している。

表-2 全窒素と硝酸態窒素濃度および比流量の平均値

Table 2 Mean values of concentration of T-N, NO₃-N and specific discharge

集水域	T-N mg/l			NO ₃ -N mg/l			比流量 l/s, ha			地下水 補給
	年平均	稲作期	非稲作期	年平均	稲作期	非稲作期	全平均	稲作期	非稲作期	
A	2.2	1.7	2.5	1.2	0.8	1.5	0.22	0.34	0.15	
B	1.9	1.8	2.0	1.1	1.0	1.2	0.25	0.33	0.19	有り
C	3.8	2.1	5.0	2.6	1.3	3.8	0.23	0.42	0.10	有り
D	8.9	4.7	11.8	8.6	3.9	12.3	0.29	0.59	0.09	有り
E	2.1	1.6	2.5	0.7	0.4	1.0	0.22	0.43	0.07	
F	1.7	1.5	1.8	0.7	0.5	0.9	0.22	0.31	0.15	
G	3.3	2.0	4.1	2.1	1.3	2.8	0.23	0.46	0.07	
H	5.7	2.6	7.7	4.2	1.6	6.3	0.23	0.40	0.11	
I	5.2	3.8	6.1	4.0	2.8	5.1	0.39	0.55	0.29	有り
J	8.5	5.6	10.5	6.8	4.3	9.4	0.22	0.27	0.18	有り
K	11.1	5.5	14.8	9.2	4.2	14.0	0.23	0.52	0.04	有り(大)
L	23.2	14.2	29.2	19.7	13.4	26.1	0.33	0.61	0.14	
M	22.1	13.1	28.0	18.6	11.5	25.1	0.33	0.57	0.18	
平均	7.7	4.6	9.7	6.1	3.6	8.4	0.26	0.45	0.14	

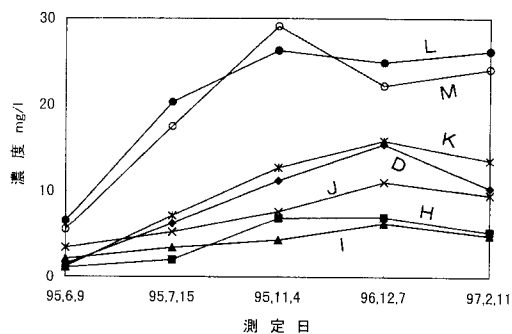


図-1 硝酸態窒素濃度の時期変化

Fig. 1 Seasonal change of NO₃-N concentration.

(2) 全窒素

全窒素濃度でも稲作期の全集水域の平均値は 4.6 mg/l, 非稲作期は 9.7 mg/l で, 非稲作期の方が 2.1 倍高い。集水域では硝酸態窒素と同じく, J, K, L, M, D の集水域の値が高い。

(3) 流量

流量を比流量 (単位は $l \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$) で表すと, 稲作期の平均値は 0.45, 非稲作期は 0.14 で, 降雨量が多い稲作期の流量が大きかった。集水域では D, I, K, L, M で稲作期の流量が大きく, F, J で小さかった。

灌漑期には地下水の汲み上げが B, C, I, J, K の集水域で行われているが, それによる比流量の増大は他の集水域に比べて特に大きくはなかった。それは地下水の汲み上げが K 以外では一時的 (稲作期間全体で 50 時間程度) で, かつ水量が 10 l/s (比流量で $0.06 l \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ 程度) と少ないためである。

4. 窒素濃度と土地利用・畜産との関係

1) 土地利用

各集水域の硝酸態窒素濃度の年平均値と土地利用との関係を調べたが, 畑地, 水田, 林地いずれとも相関はなかった。図-2 に畑地・樹園地率との関係を示したが畑地・樹園地率が大きくても集水域の濃度が必ずしも高いわけではない。その中では養豚のある集水域の値 (図中の黒く塗りつぶした点) が明らかに高い濃度を示している。養豚の影響が強くて, 土地利用の影響が隠されてしまったと考えられる。他の養豚地域で調査した結果でも同じことが得られている (志村・田淵, 1996 a)。

2) 畜産

養豚頭数密度との関係では, 頭数密度が大きくなると濃度は高くなった (図-3)。10 頭/ha で 10 mg/l 程度になる。これも別に報告した結果と同じである (志村・田淵 1996 b)。この中で集水域 L の濃度が頭数密度に比べ

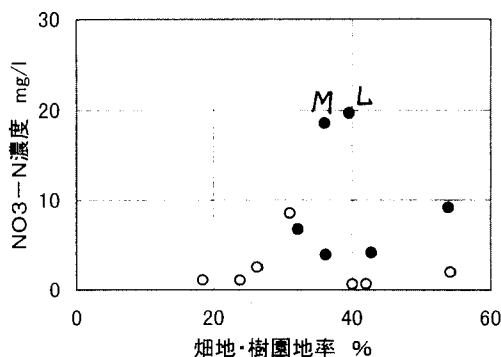


図-2 畑地・樹園地率と硝酸態窒素濃度との関係

Fig. 2 Relation between percentage of upland field and NO₃-N concentration.

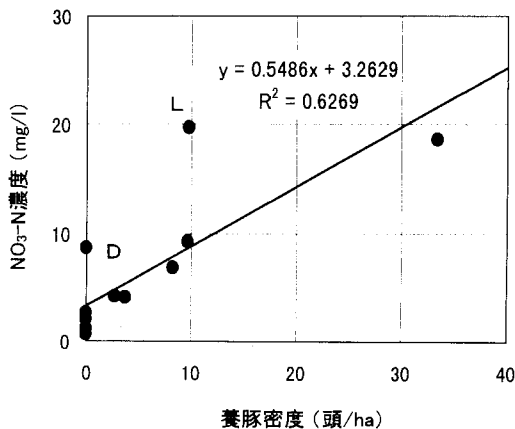


図-3 養豚密度と硝酸態窒素濃度との関係

Fig. 3 Relation between pig density and NO₃-N concentration.

て異常に高くなっている。これは頭数密度が過去に高かった地区なので, その蓄積が残っているためと思われる。

5. 窒素流出モデルによる解析

第1報で提案した「水田除去機能付き窒素流出モデル」を用いて, 上述した 13 集水域からの流出水の窒素濃度を推定し, 実測値と比較検討する。実測値としては硝酸態窒素濃度の稲作期と非稲作期の平均値を用いる。

1) モデルの基本構造

モデルについては第1報を参照していただきたいが, その基本構造は下記のようなものである。

土地利用としては林地, 畑地, 水田の3者とする。台地の上に林地と畑地があり, 低地に水田があるという地

形連鎖を前提にして、台地からの流出水が低地を通過して流出する構造にする。養豚場の素堀貯留池は台地の上に存在し、その浸透水が台地流出水に合流する。流出水が低地を通過する際に水田に流入すれば窒素が除去され、その除去機能は濃度比例式で計算する。

集水域からの流出水の窒素濃度 X_t は次式で求まる。

$$X_t = 36500 (N_f + N_h + N_s + N_p - R') / P_w \cdot A_t \quad (1)$$

ここで X_t : 集水域からの流出水濃度 (g/m^3 または mg/l)

N_f : 林地からの日排出負荷量 (kg/d)

N_h : 畑地からの日排出負荷量 (kg/d)

N_s : 素堀浸透による日排出負荷量 (kg/d)

N_p : 水田からの日排出負荷量 (kg/d)

R' : 水田での日窒素除去量 (kg/d)

P_w : 年流出水量 (mm/y)

A_t : 集水域の面積 (ha)

水田の日窒素除去量 R' は

$$R' = 10 \cdot A_p \cdot R \\ = 10 \cdot A_p \cdot F \cdot P \cdot q \cdot X_u (1 - \exp[-ao/q]) \quad (2)$$

F : 植生により変化する植生係数, 1~4

P : 水流の条件により変化する効率係数, 0~1

X_u : 台地からの流出水濃度 (g/m^3 または mg/l)

A_p : 水田面積 (ha)

ao : 除去係数

q : 処理水量を水深で示したもの (m/d)

2) モデル係数

計算に当たって使用した係数は表-3のように定めた。

面源の原単位; 年排出原単位として、水田 $10 \text{ kg}/\text{ha}$ 、林地 $3 \text{ kg}/\text{ha}$ とした。畑地は本地域の平均施肥窒素量を作物別栽培面積と標準施肥量から求め、それに排出率 30% を乗じて求めた。平均施肥窒素量は $130 \text{ kg}/\text{ha}$ なので、年排出窒素量は $39 \text{ kg}/\text{ha}$ になる。しかし本地域の多肥の畑地では $500 \text{ kg}/\text{ha}$ 程度の窒素が投入されているので、そこでは上記の値の 4 倍以上の流出が生じている可能性がある。

養豚排出窒素量; 豚の発生負荷量を $14.6 \text{ kg} \cdot \text{頭}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ とし、素堀貯留池方式が主体であったので排出率を 35% とした (志村・田淵 1996 b)。

流出水量; 霞ヶ浦流域の明治 34 年から平成 6 年までの 94 年間の年平均降雨量は $1,360 \text{ mm}$ (10 カ所の観測所の平均値, 茨城県 1995) である。また 1985 年から 1995 年の 10 年間に霞ヶ浦流域の河川流量から推定された流域からの流出水量は 714 mm で、この間の年降雨量は 1401 mm だったので流出率は 51% であった (茨城県

1996)。そこでこの 51% を $1,360 \text{ mm}$ に乗じると 694 mm になるので、今回の計算では年流出水量を 700 mm とした。

水田灌漑率 I ; 稲作期は 50% を中心に変化させ、非稲作期は 0% とした。したがって非稲作期には水田での窒素除去はないことになる。

窒素除去係数 ao ; 稲作期の水温を 25°C とし、第 1 報に示した式から求めて 0.0119 とした。

植生係数 F ; 稲作期で植生が繁茂している時期なので 3 とした (第 1 報参照)。

田面効率係数 P ; 0.5 とした。

したがって、 $F \times P$ の値は、1.5 となる。

流出水量比 C ; 1 とした。

以上のモデル係数は第 1 報で紹介した従来の研究成果から推定したものであるが、原単位、流出水量、水温、灌漑率などいずれも概算値として使用した。これらの係数は集水域によって異なるだけでなく、同じ集水域の中でも平面的にも、時間的にも変化しているが、今回は稲作期と非稲作期の違いだけを考慮し、その他の変動は無視した。

3) 計算結果 (養豚負荷を含めない場合)

図-4 に非稲作期についての計算値と実測値の比較を示したが、養豚のある集水域 (図中黒丸印) では実測値は計算値を大きく上回った。養豚負荷を無視した計算では適合しないことは明らかである。

4) 計算結果 (養豚負荷を含めた計算)

(1) 非稲作期の場合

非稲作期の計算結果と実測値との比較を図-5 に示し

表-3 使用したモデルの係数

Table 3 Values of model coefficients

排出原単位	林地	$3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$
	水田	10
	畑地	39 (排出率 30%相当)
畜産排出率	素堀	35%
流出水量		$700 \text{ mm}/\text{y}$
土地利用面積率		集水域ごとに変化
養豚頭数		集水域ごとに変化
稲作期の窒素除去		
窒素除去係数	ao	$0.0119 (25^\circ\text{C})$
灌漑率	I	50~90%
植生係数	F	3
田面効率係数	P	0.5
	$F \times P$	1.5
流出水量比	C	1

非稲作期は $I=0$ とし除去は見込まれていない

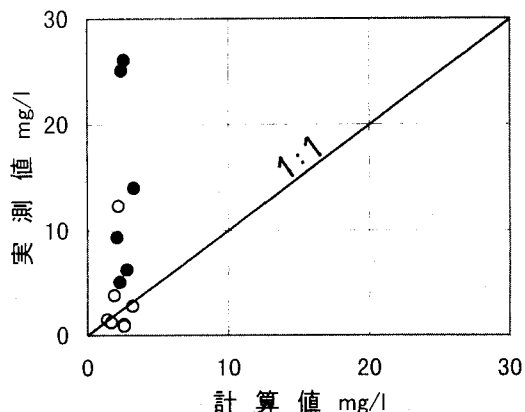


図-4 モデル計算値と実測値の比較
(非稲作期、養豚負荷を含めない計算)

Fig. 4 Calculated values by the model and measured values
(Non-rice-growing season, non-included the load by pig).

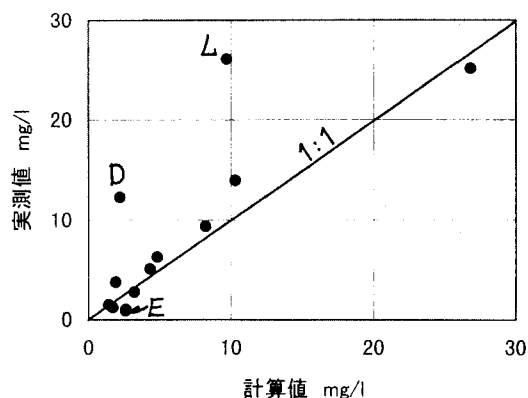


図-5 モデル計算値と実測値の比較
(非稲作期、養豚負荷を含む計算)

Fig. 5 Comparison of calculated values with measured values
(Non-rice-growing season, included the load by pig).

た。この場合には灌漑率Iを0%にしたので水田における窒素除去は見込まれていない。畜産負荷を組み込むとモデル計算値は実測値とほぼ一致した。しかし集水域D, Lでは一致しなかった。集水域Lでは養豚密度が減少中なので、過去の養豚の負荷が残留しており、それが実測値を高くしたと考えられる。

また養豚地域で素堀貯留池を使っていなければ、素堀りを前提にした今回の計算値は大幅に実測値を上回るも

のと考えられたが、結果はそうではなかった。このことは素堀貯留池の新たな使用を止めてもかなりの蓄積が古い貯留池や土中に存在し、流出が続いていることを示す。

集水域Dでは養豚はないが、野菜作地域なので畑地における施肥量の大きいことが濃度を高くした原因として考えられる。野菜畑では普通畑の3倍以上の500 kg/ha程度の窒素が施肥されている(田淵・黒田 1991)。

集水域Eでは逆に実測値の方が計算値よりも低くなっている。これは畑地での施肥量がほかの集水域よりも少ないことや、集水域Eが谷津田であることから、灌漑とは別に台地からの湧水が自然に流入しており、水田での除去が非稲作期でも存在することを示すものとみられる。谷津田では灌漑とは別に台地からの湧水が自然に流入するからである。

(2) 稲作期の場合

モデル係数の中では灌漑率が計算結果に大きく影響するが、灌漑率Iを変えて計算した結果は図-6に示した。濃度の高い集水域MではIの値によってかなり大きく変化するが、低濃度の集水域では変化は少ない。

灌漑率60%の場合のモデル計算値と実測値の比較を図-7に示した。LとDは非稲作期の場合と同じように実測値が計算値よりも高いが、ほとんどの集水域では実測値が計算値よりもやや小さい。第1報と同じ灌漑率(50%)で計算すると、計算値がさらに大きくなるのでその差は開く。今回の調査集水域では灌漑率60%が50%よりも妥当な値であった。

しかし灌漑率はその集水域の水文学的条件や水田面積率、それに農家の水管理などによって大きく変化するものである。たとえば流出水量に比べて水田面積が大きければ、ほとんどの水は水田に灌漑されて灌漑率は大きくなる。それを60%というひとつの値で計算したので、非稲作期よりも適合性が劣ることが考えられた。しかし前述した集水域DとLを除けば、ほぼ合っている。ただし

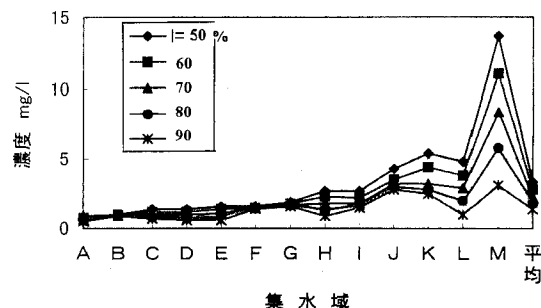


図-6 モデル計算値の灌漑率による変化 (25°C)

Fig. 6 The change of calculated values by irrigation rate I.

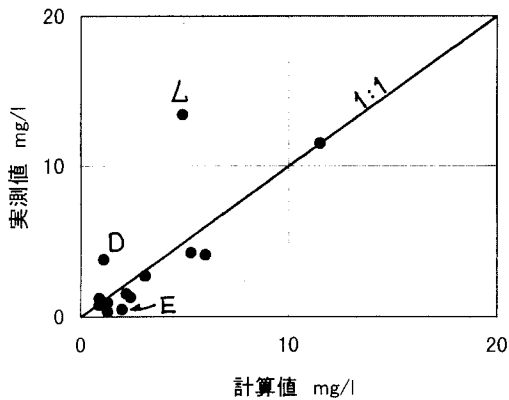


図-7 モデル計算値と実測値の比較
(稲作期 I = 60%, 養豚負荷を含む計算)

Fig. 7 Comparison of calculated values with measured values
(Rice-growing season, I=60%, included the load by pig).

低濃度の集水域で実測値が低くなる傾向がある。これは灌漑率がこれらの集水域では60%よりも大きいことが示唆された。

5) モデルの適用性と今後の課題

本モデルによって「畜産負荷」と「稲作期の水田除去」の二つの大きな影響についてはある程度表現できた。排出原単位や灌漑率などのモデル係数を同じにした計算にもかかわらず、13の集水域でこの程度の適合性が認められたことは評価されよう。畜産負荷が大きく窒素濃度が高い集水域や、水田除去の効果が大きい集水域についての濃度予測には有用であると考えられる。

また計算値と実測値との比較から、「素堀負荷の残留」、「施肥量の相異」、「他からの灌漑水の導入」の3点が予測を狂わす問題点として浮かび上がった。畜産の影響の少ない集水域では畑地の方の影響が大きくなるので、集水域ごとの「施肥量」の詳細なデータが必要になる。また稲作期の精度をあげるためには「灌漑率」の詳細なデータも必要である。

今後本報で無視した畑地からの流出過程での「下層土や地下水層中での窒素除去」の解明も必要である。さら

に「畜産ふん尿の農地利用の際の排出率」も明らかにする必要がある。

また今回は生活系や事業場などの点源負荷は無視した。農業集水域であるので量的に少ないと判断したからであるが、その影響度についても調べる必要がある。

6. おわりに

今回の調査により農業集水域からの流出水の窒素濃度が畜産と土地利用に影響されていることが明らかになった。また「水田の除去機能付き窒素流出モデル」による算出値は実測値と比較的良好な対応を示し、集水域管理に有用であることが示された。しかし問題点で述べたように、数多くの残された課題があり、本研究はその第1歩にすぎない。今後の多くの研究によって精度の高いモデルになることを期待したい。

本調査を行うにあたって茨城大学農学部院生の野村謙五、高阪快児の両君には協力を受け、茨城県生活環境部には研究費の援助を受けた。また銚田並びに江戸崎の土地改良事務所、大洋と羽賀沼の両土地改良区にはご協力をいただいた。これらの方々から心からお礼を申し上げる。

引用文献

- 茨城県生活環境部霞ヶ浦対策課 (1995) : 霞ヶ浦関係資料集
- 茨城県生活環境部霞ヶ浦対策課 (1996) : 霞ヶ浦水質予測モデル検討委員会資料 (第4回)
- 志村もと子, 田淵俊雄 (1996 a) : 素堀貯留池を伴う養豚場が河川の窒素濃度に及ぼす影響, 農業土木学会論文集, 182号, 177-183
- 志村もと子, 田淵俊雄 (1996b) : 養豚飼養頭数密度と河川水窒素濃度との関係, 農業土木学会論文集, 182号, 193-199
- 田淵俊雄, 黒田久雄 (1991) : 台地と谷津田の農業集水域の流出構造, 農業土木学会論文集, 154号, 65-72
- 田淵俊雄 (1998) : 水田除去機能付き窒素流出モデル, 土壌の物理性, 78, 11~18

受稿年月日: 1997年9月9日
受理年月日: 1998年4月23日