

地下水汚染地区における硝酸態窒素濃度の
井戸間変動とそれに影響を及ぼす要因の解析：
硝酸態窒素の由来の検討と回帰モデルの構築
平田昌彦（農学部）



1. 要旨

宮崎県 Y 地域において地下水の平均硝酸態窒素濃度が最も高い J 地区内の 49 の井戸から得られた水質、井戸の立地条件や利用状況、畜産経営との関連などに関するデータを解析した。その結果、硝酸態窒素濃度が水道水の水質基準(10 mg/l)を超える井戸が全体の約 65%にも及び、調査地区における地下水汚染が深刻であることが確認された。硝酸態窒素濃度に影響を及ぼす要因の解析から、地上に散布された家畜排泄物に由来する硝酸態窒素が地下水を汚染している直接的・間接的な証拠が得られるとともに、硝酸態窒素が水平方向にある程度移動している可能性が示唆された。さらに、回帰モデルを用いて、硝酸態窒素濃度を制御する方策の可能性(水質基準を満たすための半径 100 m 圏内の畜舎面積の上限)についての探索も試みた。

2. 緒言

持続可能な農業システムの構築においては、農業活動により散布される物質(肥料、家畜排泄物、農薬)の動態を把握し、土壌、地下水、河川、大気などの汚染を防止することが重要である。畜産が盛んな宮崎県においては、家畜排泄物による農耕地単位面積当りの窒素負荷量が全国で最も高い(築城・原田 1997, 杉本 1998)ことから、特に、家畜排泄物に由来する物質の動態を把握し、予測可能にすることが急務である。

杉本ら(2000)は県内でも窒素負荷量が高い Y 地域(杉本 1998)において、約 800 の井戸からの地下水の硝酸態窒素濃度を調査し、窒素負荷量の大きい地区(集落)ほど平均硝酸態窒素濃度が高かったことから、家畜排泄物由来の窒素が地下水に到達し、硝酸態窒素濃度に影響を及ぼしている可能性を示した。しかしながら、この研究では、地下水の汚染源推定のための根拠は不十分であり、また、個々の井戸のレベルでの硝酸態窒素濃度に影響を及ぼす要因についても解析されなかった。このような理由から、杉本ら(2000)において平均硝酸態窒素濃度が最も高かった J 地区では、その後、地区内の約 50 の井戸について、水質、立地条件、利用状況、畜産経営との関連などの点から、より詳細な調査が行われた。硝酸汚染源の推定において現在のところ唯一利用可能な指標である $\delta^{15}\text{N}$ 値(日本土壌協会 2000)も測定された。

本研究は、この詳細データを利用して、地下水汚染地区における硝酸態窒素濃度の井戸間変動とそれに影響を及ぼす要因について解析したものである。解析では、硝酸態窒素濃度に影響を及ぼす要因から、窒素の由来(汚染源)について重点的に検討するとともに、その動態についても若干の検討を加えた。また、回帰モデルを用いて、硝酸態窒素濃度を制御する方策の可能性についての探索も試みた。これらにより、家畜排泄物に由来する硝酸態窒素の動態を解明する端緒としようとした。

3. 方法

宮崎県 Y 地域 J 地区において 2000 年 11 月に調査された 49 の井戸からのデータを用いた。各井戸について調査された変数は水質、井戸の立地条件や利用状況、畜産経営との関連などに関する 20 項目であり、連続尺度だけでなく名義尺度も含んでいた(表 1)。なお、実際に調査された井戸の数は 54 であったが、すべての変数において欠測値のない 49 の井戸が選ばれた。

水質の井戸間変動は最小値 (Min)、最大値 (Max)、平均値 (Mean) および標準偏差 (SD) により評価した。硝酸態窒素濃度と連続尺度変数の関係は Pearson の相関係数により評価した。硝酸態窒素濃度に及ぼす名義尺度変数の影響は、変数が 2 水準の場合には Wilcoxon の順位和検定により、3 水準以上の場合には Kruskal-Wallis 検定により評価した。

硝酸態窒素濃度の重回帰モデルは、説明変数の線型効果の和とし(切片を含む)、変数の交互作用は考慮しなかった。説明変数の候補としては、立地、利用、畜産経営との関連およびその他に属する 10 変数(表 1)を用い、変数増加法 ($F_{IN}=0.1$) による変数選択を行った。名義尺度変数については水準を数量化し、3 水準以上の場合には水準全体で変数の有意性を評価した。

表 1. 調査された変数^{a)}.

グループ	変数(単位)	タイプ	名義尺度の場合の分類(データ数)
水質	NO ₃ -N (mg/l)	連続尺度 ^{b)}	—
	Cl (mg/l)	連続尺度	—
	SO ₄ (mg/l)	連続尺度	—
	Na (mg/l)	連続尺度	—
	K (mg/l)	連続尺度	—
	Ca (mg/l)	連続尺度	—
	Mg (mg/l)	連続尺度	—
	δ ¹⁵ N (‰)	連続尺度	—
	pH	連続尺度	—
	水温 (°C)	連続尺度	—
立地	標高 (m)	連続尺度	—
	井戸深度 (m)	連続尺度	—
	周辺耕地	名義尺度	田 (1), 畑 (22), 田畑 (12), なし (14)
	半径 100 m 圏内の畜舎面積 (m ²)	連続尺度	—
利用	用途	名義尺度	畜産 (24), その他 (25)
	飲用	名義尺度	使用 (15), 不使用 (34)
畜産経営との関連	畜種	名義尺度	牛 (22), 豚 (2), 鶏 (2), なし (23)
	飼養家畜単位 ^{c)}	連続尺度	—
	耕地への糞尿散布	名義尺度	あり (25), なし (24)
その他	市水	名義尺度	あり (43), なし (6)

^{a)}n=49. ^{b)}比尺度もしくは間隔尺度. ^{c)}牛=1, 豚=0.2, 鶏=0.01.

4. 結果

地下水の水質は井戸によって変動した(図 1)。硝酸態窒素濃度は 1.1~28.4 mg/l の範囲にあり、32 (約 65%) の井戸で水道水の水質基準 (10 mg/l) を超えた。硝酸態窒素の δ¹⁵N 値は 4.2~17.8‰ の範囲にあり、19 (約 39%) の井戸で 9‰ を、5 (約 10%) の井戸で 12‰ を超えた。

硝酸態窒素濃度は Ca イオン濃度と水温を除くすべての水質変数と有意 ($P<0.05$) な相関を示

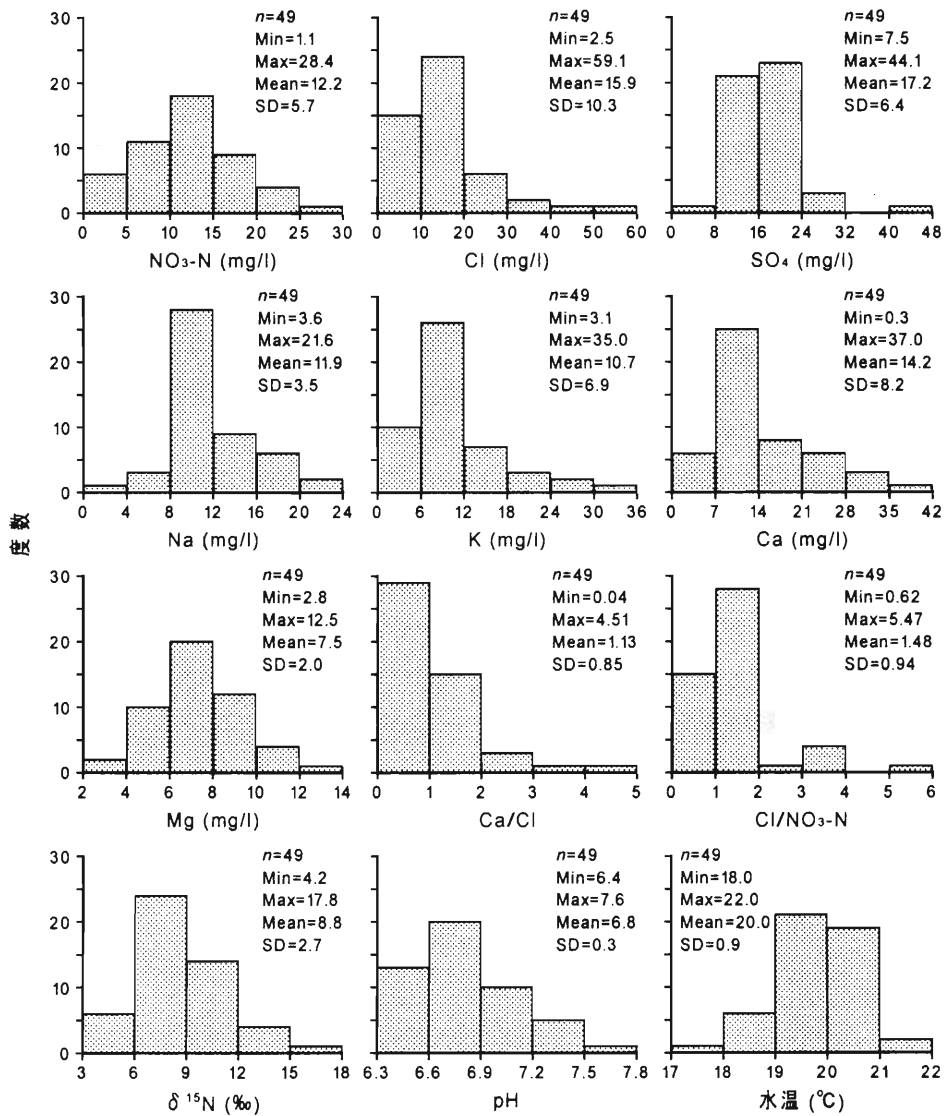


図 1. 地下水の水質に関する変数値の分布。

統計量はデータ数(n), 最小値(Min), 最大値(Max), 平均値(Mean)および標準偏差(SD)である。

表 2. 地下水の硝酸態窒素濃度とその他の水質変数との相関係数(r)。

変数	r	P
Cl	0.527	0.000
SO ₄	0.520	0.000
Na	0.448	0.001
K	0.306	0.032
Ca	0.249	0.084
Mg	0.434	0.002
Ca/Cl	-0.386	0.006
Cl/NO ₃ -N	-0.406	0.004
δ ¹⁵ N	0.444	0.001
pH	-0.322	0.024
水温	0.121	0.408

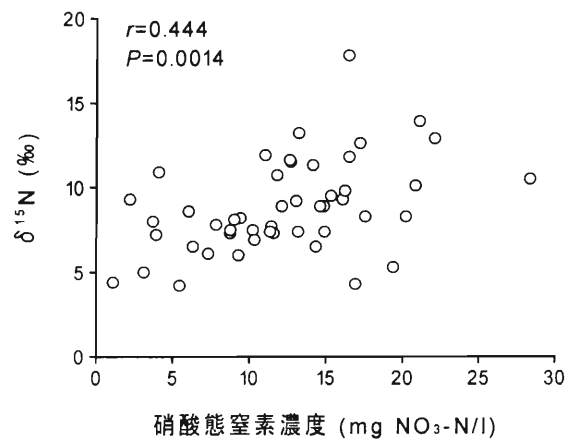


図 2. 地下水の δ¹⁵N 値と硝酸態窒素濃度の関係。

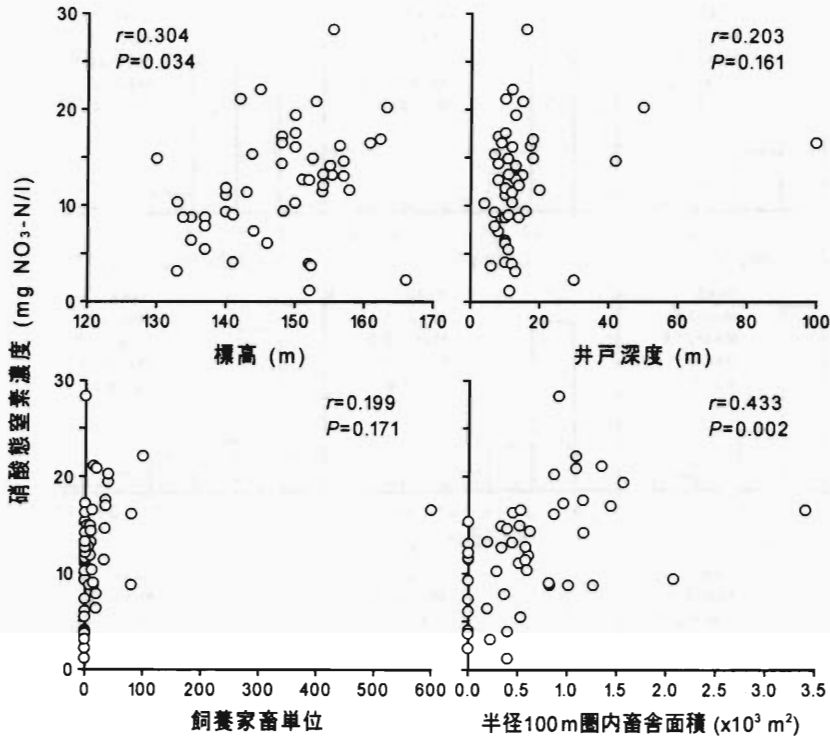


図3. 地下水の硝酸態窒素濃度と標高, 井戸深度, 飼養家畜単位および半径100 m 圏内畜舎面積の関係.

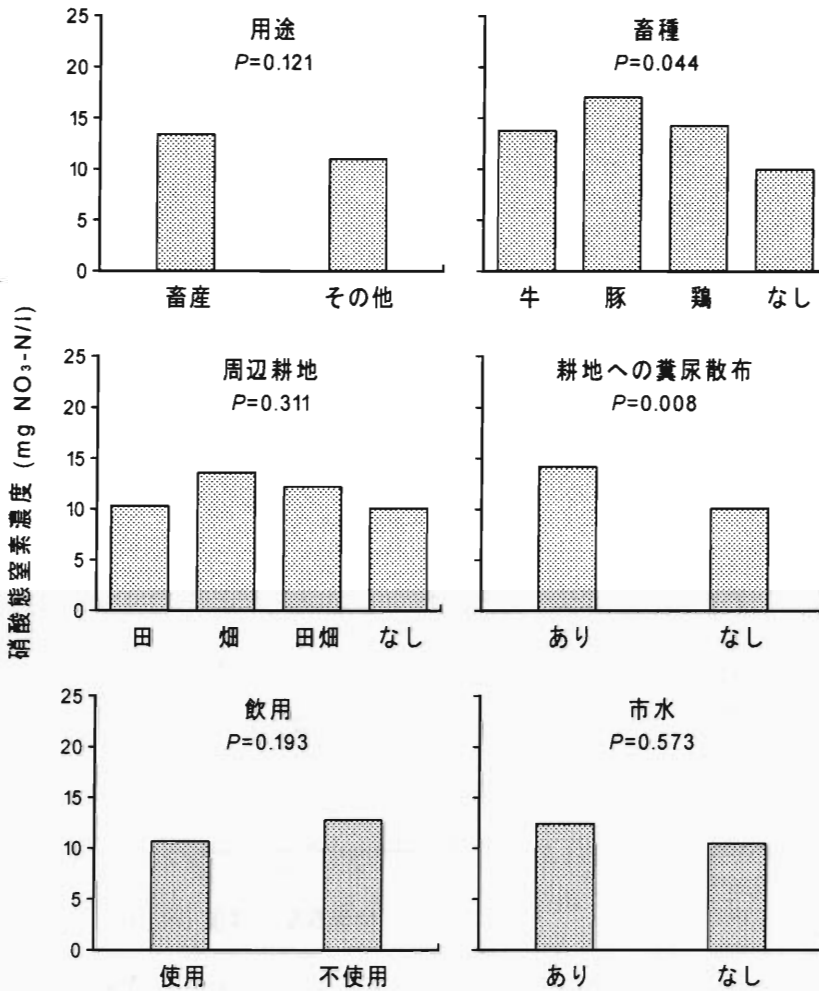


図4. 地下水の硝酸態窒素濃度に及ぼす井戸の用途, 飼養家畜種, 周辺耕地の種類, 耕地への糞尿散布の有無, 飲用の有無ならびに市水の有無の影響.

し(表 2), Ca/Cl 比とは負の関係($r=-0.386$, $P=0.006$)に, $\delta^{15}\text{N}$ 値とは正の関係($r=0.444$, $P=0.001$; 図 2)にあった。また, 硝酸態窒素濃度は, 標高が高い井戸ほど($r=0.304$, $P=0.034$), 半径 100 m 圏内の畜舎面積が大きい井戸ほど($r=0.433$, $P=0.002$)高かった(図 3)。さらに, 硝酸態窒素濃度は飼養畜種($P=0.044$)や耕地への糞尿散布の有無($P=0.008$)により有意に異なり, 豚>鶏>牛>“なし”の順に高く, 耕地への糞尿散布“あり”の場合が“なし”の場合より高かった(図 4)。井戸の用途の効果も比較的有意($P=0.121$)であり, 畜産>その他であった。

硝酸態窒素濃度の井戸間変動の約 45%($P=0.0000$)が 5 種類の説明変数をもつ重回帰モデルにより説明できた(表 3)。モデルによる推定誤差(RMSE)は 4.52 mg/l であった。硝酸態窒素濃度は, 標高が高いほど, 半径 100 m 圏内の畜舎面積が大きいほど高く, 標高 1 m の増加につき 0.19 mg/l, 畜舎面積 100 m² の増加につき 0.33 mg/l 増加した。また, 周辺耕地が“なし”や田の場合に比べて, 畑の場合には約 3.41 mg/l 高く, 田畑の場合には約 0.65 mg/l 高かった。さらに, 家畜(牛, 豚もしくは鶏)を飼養している場合には飼養していない場合よりも約 2.97 mg/l 高く, 市水がある場合にはない場合よりも約 5.58 mg/l 高かった。説明変数の有意性は半径 100 m 圏内の畜舎面積($P=0.011$)で最も高く, 市水の有無($P=0.015$)と標高($P=0.020$)がこれに続いた。

表 3. 地下水の硝酸態窒素濃度に対する重回帰分析の結果^{a)}。

変数(単位)	推定値 ^{b)}	P	名義尺度の場合の値
切片	-20.79	—	—
標高 (m)	0.190	0.020	—
周辺耕地	-1.015	0.083	畑, 田畑= -1; 田, なし= 1
周辺耕地	-1.376	0.119	畑= -1; 田畑= 1; 田, なし= 0
半径 100 m 圏内の畜舎面積 (m ²)	0.0033	0.011	—
畜種	-1.484	0.052	牛, 豚, 鶏= -1; なし= 1
市水	-2.791	0.015	あり= -1; なし= 1

^{a)} $R^2=0.448$, $P=0.0000$, $RMSE=4.52$. ^{b)}切片以外は偏回帰係数。

5. 考察

本研究のデータがとられた J 地区(集落)の地下水の平均硝酸態窒素濃度(8.6 mg/l)は, Y 地域内の 11 地区の中で最も高いことが報告されている(杉本ら 2000)。本研究では, J 地区内の 49 の井戸からのデータから, 硝酸態窒素濃度が水道水の水質基準(10 mg/l)を超える井戸が全体の約 65%にも及び(図 1), 調査地区における地下水汚染が深刻であることが確認された。

5.1. 硝酸態窒素の由来

$\delta^{15}\text{N}$ 法は, 一般的な野外条件のもとでの地下水の硝酸汚染源の推定において, 現在のところ唯一利用可能な方法である(日本土壌協会 2000)。硝酸態窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値は化学肥料由来では -6~+2.6‰, 土壌窒素由来では平均+8.8‰, 生活排水の土壌処理の結果では平均+11.1‰, 家畜排泄物由来では平均+14.4‰とされている(熊澤ら 1997)。したがって, $\delta^{15}\text{N}$ 値が 12‰を超えた 5(約 10%)の井戸(図 1)の硝酸態窒素は家畜排泄物に由来する部分が多いものと推察される。同時に, 硝酸態窒素濃度が高い井戸ほど $\delta^{15}\text{N}$ 値が高かった(表 2, 図 2)ことから, 汚染が進んだ井戸ほど家畜排泄物に由来する部分が多いことも推察される。本研究で得られたような $\delta^{15}\text{N}$ 値と硝酸態窒素濃度の正の相関関係は, 化学肥料の影響が比較的大きいとみられる畑作地

帯における関係(赤井ら 2000)とは対照的である。

以上に加えて、本研究からは、地下水の汚染源としての家畜排泄物の関与を示唆するいくつかの間接的な証拠が得られた。まず、硝酸態窒素濃度は、人畜の影響の指標とみなされる(熊澤ら 1997) Ca/Cl 比と有意な負の相関を示した(表 2)。また、硝酸態窒素濃度は、半径 100 m 圏内の畜舎面積が大きいほど高く(図 3, 表 3)、家畜(牛, 豚もしくは鶏)を飼養している場合には飼養していない場合よりも高く(図 4, 表 3)、畜産用途の方がその他の用途よりも高かった(図 4)。なかでも、重回帰モデルでは半径 100 m 圏内の畜舎面積の重要性が示された(表 3)。

さらに、硝酸態窒素濃度は、標高が高いほど高く(図 3, 表 3)、耕地への糞尿散布“あり”の場合が“なし”の場合より高く(図 4)、周辺耕地が畑の場合に高かった(表 3)。これらは、家畜排泄物もつばら畑に散布され、畑が他の土地(田など)よりも標高の高い場所に分布することを反映するものととらえられる。

このように本研究の結果は、“Y 地域において家畜排泄物由来の窒素が地下水の硝酸態窒素濃度に影響を及ぼしている”という杉本ら(2000)の推察を、より多くの証拠によって支持するものである。なお、硝酸態窒素濃度が市水あり > 市水なしの順で高かったのは、汚染が深刻な井戸は飲用に使えないため、市水を必要とする結果ととらえられる。

5.2. 硝酸態窒素の動態

井戸から半径 100 m 圏内の畜舎面積は地下水の硝酸態窒素濃度と有意な正の相関を示し(図 3)、重回帰モデルに取り込まれた説明変数のうちで最も重要な(有意性の高い)変数であった(表 3)。対照的に、井戸の存在する場所における飼養家畜単位は硝酸態窒素濃度と密接な関係を示さず(図 3)、重回帰モデルにも取り込まれなかった(表 3)。これらのことは、硝酸態窒素濃度が、井戸の存在する場所よりも、その近傍も含めた空間的範囲における家畜飼養状況を反映することを示し、硝酸態窒素が水平方向にある程度移動する可能性を示唆するもので、物質動態との関連から興味深い。水平方向の移動経路については、地上での人間による運搬、地下水での拡散などが考えられるが、その実態の解明は今後の調査・解析を待たねばならない。

5.3. 硝酸態窒素濃度制御の可能性

重回帰モデルを用いて、経験モデルという制限下ではあるが、硝酸態窒素濃度を制御する方策の可能性について探索することができる。例えば、標高 148 m(調査対象となった井戸の平均値)に位置する畜産農家が糞尿を周辺耕地の畑に散布すると想定し、市水に頼らずに、水質基準である 10 mg/l 以下の硝酸態窒素濃度を維持するためには、半径 100 m 圏内の畜舎(自身と近隣の畜舎)面積は 500 m² 未満でなければならないことになる。すなわち、この畜舎面積が調査地区においてどの程度の家畜頭羽数に相当するのかが明らかになれば、地下水の硝酸態窒素濃度を安全なレベルに維持するための具体的な基準について推定できることになる。

6. 結論

本研究により、地上に散布された家畜排泄物に由来する硝酸態窒素が地下水を汚染している例が示された。家畜排泄物は、地下水の汚染だけでなく、河川などの地表水や大気汚染源ともなりえる(平田 2001)。したがって今後は、家畜排泄物に由来する物質の動態を、陸圏・水圏の

広範囲にわたって把握し、予測可能にするための研究を、さらに進めることが必要であると考えられる。特に物質動態の予測という観点からは、本研究で得られた知見を取り入れ、硝酸態窒素の動態のより機構的なモデル(例えば, Follett et al. 1991)を開発することが必要である。

7. 引用文献

- 赤井直彦・石橋英二・大家理哉(2000)畑作地帯における浅層地下水の実態調査。δ¹⁵N 法による地下水の硝酸態窒素汚染源の推定事例集。日本土壌協会。pp. 89-95.
- Follett, R.F., D.R. Keeney and R.M. Cruse (Eds) (1991) Managing Nitrogen for Groundwater Quality and Farm Profitability. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- 平田昌彦(2001)南九州地域における持続型畑作農業の将来展望。3. 畜産との関わりからみた南九州の畑作農業の課題。日作紀 70, 309-313.
- 熊澤喜久雄・中西康博・山本洋司・朴光来・田村幸美(1997) δ¹⁵N 法による地下水の硝酸態窒素汚染源の推定法について。—沖縄県宮古島の地下水調査から—。農大総研紀要 9, 32-50.
- 日本土壌協会(2000) δ¹⁵N 法による地下水の硝酸態窒素汚染源の推定事例集。
- 杉本安寛(1998)農耕地由来の窒素による水質汚染機構の解明と、汚染防止対策に関する研究。平成 7・8・9 年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(2))研究成果報告書。
- 杉本安寛・東善敏・武藤勲・豊満幸雄(2000)宮崎県内 Y 地域における硝酸による地下水汚染。システム農学 16(別 2), 40-41.
- 築城幹典・原田靖生(1997)家畜の排泄物量推定プログラム。システム農学 13, 17-23.