

施肥削減が進行する牧之原台地を集水域とした小河川、湧水および井水の硝酸性窒素濃度の推移[†]

高橋智紀¹⁾・新良力也²⁾・宮地直道³⁾・戸田任重⁴⁾・村中康秀⁵⁾・
廣野祐平⁶⁾・渥美和彦¹⁾・福島務¹⁾・杉浦秀治⁷⁾

¹⁾農林技術研究所本所, ²⁾(独)農研機構 中央農業総合研究センター, ³⁾日本大学文理学部,
⁴⁾信州大学理学部, ⁵⁾環境衛生研究所環境科学部, ⁶⁾(独)農研機構 野菜茶業研究所,
⁷⁾西部健康福祉センター

Nitrate Concentration Trends in Streams, Springs, and Wells, from Catchment Areas Located on Fields Using Reduced Fertilizer Application

Tomoki Takahashi¹⁾, Rikiya Nira²⁾, Naomichi Miyaji³⁾, Hideshige Toda⁴⁾,
Yasuhide Muranaka⁵⁾, Yuuhei Hirono⁶⁾, Kazuhiko Atsumi¹⁾, Tsutomu Fukushima¹⁾ and
Shuji Sugiura⁷⁾

¹⁾ Shizuoka Res. Inst. of Agric. and For., ²⁾ Natl. Agr. Res. Center, ³⁾ Nihon Univ., College of Humanities and Sci.,
⁴⁾ Shinshu Univ., Faculty of Sci., ⁵⁾ Shizuoka Prefectural Inst. Environ. and Hygiene, ⁶⁾ Natl. Instit. of Vegetable
and Tea Sci., ⁷⁾ Shizuoka Public Health and Welfare Center

Abstract

The nitrate concentration in streams, springs, and wells, from catchments areas that were located on intensified tea fields, were monitored for 6 – 12 years. Nitrate concentration decreased significantly in 17 of 22 streams observed by the Mann-Kendall test. The decrease was caused by the reduction in the application of N fertilizers in tea fields for water quality conservation. On the other hand, the total load of nitrate calculated by multiplying the concentration of N and water flow of streams, did not show a significant decreasing trend. These results were that the result of nitrate loading that mainly depends on water flow and that the dispersion of water flow was relatively high. In 7 of 9 springs nitrogen concentration also showed a decreasing tendency. Only one of 6 wells showed a significant decreasing tendency in nitrogen concentration.

キーワード：硝酸性窒素, 水質, チャ, 環境保全型農業

I 緒 言

多肥傾向であった茶園地帯では、90年代後半から窒素肥料に由来する水系への環境負荷が顕在化し⁵⁾、現在でも負荷低減のための減肥の取り組みが進行している⁴⁾。集団

茶園を有する牧之原台地を対象とした新良らの報告⁵⁾では、2002年段階においてはこの地域を集水域とした小河川の硝酸性窒素流出量には低下傾向は認められていない。一方、2006年には廣野ら²⁾によって牧之原台地北部の調査が取りまとめられ、硝酸性窒素濃度に関して有意

[†]本報告は農林水産省指定試験事業「環境負荷物質の動態解明」として行われた成果の一部をとりまとめたものである。

な低下傾向が認められることが報告されている。わが国においては茶園に限らず様々な農地において施肥削減の努力がなされている。しかし廣野ら²⁾のように施肥削減が水質改善に貢献したことを示す報告例は極めて少ない³⁾。施肥削減の効果の現れ方に関する知見を得て、それを把握する手法を普遍化していくためには、このような事例の蓄積は重要であると考えられる。

そこで本報告では、牧之原台地南部の茶園地帯を集水域とした河川、湧水および井水の水質の長期観測を行い、水質改善の特徴について考察した。

II 材料及び方法

1. 調査地域の概要

調査地域は牧之原台地の南端に位置している。東側の海岸と北東部を流れる勝間田川と南西部の萩間川に挟まれており、北西部で牧之原台地の他の部分に連なるが、連結部の幅が140mと狭いため、ほぼ独立した930haの集水域を形成している⁴⁾。この台地上には540haの茶園



図1 調査対象とした台地と台地上の小河川、湧水、井戸の位置

が広がっており、茶園以外に大きな窒素排出源がない。このため、この台地を集水域とする河川の窒素は主に茶園の施肥に由来すると考えられる。

表1 調査対象とした小河川・湧水・井戸の番号、採取位置情報および測定期間

番号	北緯(34°)	東経(138°)	測定期間	その他
小河川 R1	42°02.2"	12°36.6"	'99.6-'06.3, '08.6	
R2	42°25.5"	12°39.0"	'99.6-'06.3, '08.6	
R3	42°27.0"	12°40.5"	'99.6-'06.3, '08.6	
R4	42°33.8"	12°41.2"	'99.6-'06.3, '08.6	
R5	42°43.2"	12°42.5"	'99.6-'06.3, '08.6	
R6	43°04.0"	12°40.7"	'94.6-'06.3, '08.6	
R7	43°09.6"	12°45.6"	'99.6-'06.3, '08.6	
R8	43°24.4"	12°40.7"	'99.6-'06.3, '08.6	
R9	43°33.8"	12°49.9"	'99.6-'06.3, '08.6	
R10	43°54.7"	12°53.8"	'99.6-'06.3, '08.6	
R11	44°00.2"	12°06.8"	'99.6-'06.3, '08.6	
R12	44°23.2"	12°36.5"	'99.6-'06.3, '08.6	
R13	44°20.5"	11°53.5"	'99.6-'06.3, '08.6	
R14	43°57.6"	11°23.3"	'99.6-'06.3, '08.6	
R15	43°20.1"	11°19.3"	'99.6-'06.3, '08.6	
R16	42°48.3"	11°26.0"	'99.6-'06.3, '08.6	
R17	42°47.5"	11°44.6"	'99.6-'06.3, '08.6	
R18	42°40.0"	11°52.7"	'99.6-'06.3, '08.6	
R19	42°26.3"	12°12.3"	'99.6-'06.3, '08.6	
R20	41°50.9"	12°20.9"	'99.6-'06.3, '08.6	
Rb	43°43.9"	12°52.8"	'03.2-'06.3, '08.6	
Rc	44°00.3"	12°36.1"	'03.2-'06.3, '08.6	
番号	北緯	東経	測定期間	水平距離 ¹⁾
湧水 S1	42°44.6"	12°40.4"	'98.1-'06.3, '08.6	80
S2	43°02.3"	12°41.4"	'98.1-'06.3, '08.6	90
S3	43°17.4"	12°45.5"	'97.7-'06.3, '08.6	5
S4	43°12.9"	12°13.4"	'97.7-'06.3, '08.6	50
S5	43°15.8"	12°12.5"	'99.11-'06.3	50
S6	43°44.2"	12°52.2"	'97.6-'06.3, '08.6	9
S7	43°56.5"	12°35.2"	'97.6-'06.6	28
S8	44°03.8"	12°14.1"	'97.6-'06.3, '08.6	9
S9	42°49.4"	11°26.3"	'97.6-'06.3	13
番号	北緯	東経	測定期間	採取深さ ²⁾
井戸 W1	43°15.8"	12°48.7"	'99.11-'06.3, '08.6	0.3
W2	43°11.7"	12°56.7"	'98.2-'06.3, '08.6	0.9
W3	43°21.6"	12°17.1"	'99.5-'06.3, '08.6	23
W4	43°18.1"	12°54.4"	'99.2-'06.3, '08.6	1.3
W5	42°52.8"	12°15.8"	'99.6-'06.3, '08.6	20
W6	42°50.5"	12°08.0"	'99.6-'06.3, '08.6	0.2

1) 水平距離は最近傍の茶園からの水平距離 (m)。

2) 採取深さは測定期間の採取深さの平均値 (m)。

表2 小河川の硝酸性窒素濃度および流出量のトレンド分析

	NO ₃ -N 濃度			NO ₃ -N 流出量
	濃度の中央値 (mgN/L)	変化速度 ¹⁾ (mgN/L/y)	tau ²⁾	tau ²⁾ (kgN/d)
R1	25.8	-0.51	-0.21**	0.10
R2	22.0	-0.51	-0.25**	0.11
R3	7.3	0.18	0.14*	0.12
R4	17.3	-0.06	-0.03	0.22**
R5	13.2	0.12	0.10	-0.01
R6	27.5	-0.40	-0.31**	0.00
R7	16.0	-0.44	-0.29**	0.07
R8	25.4	-0.62	-0.29**	0.11
R9	17.1	-0.40	-0.22**	0.19**
R10	11.6	-0.77	-0.18*	0.07
R11	24.4	-0.44	-0.41**	0.16*
R12	25.2	-1.10	-0.36**	0.03
R13	13.1	-0.88	-0.49**	0.08
R14	9.7	-0.77	-0.40**	0.13
R15	15.8	-0.21	-0.09	-0.11
R16	18.7	-1.57	-0.53**	0.03
R17	23.5	-1.42	-0.43**	-0.12
R18	18.4	-0.66	-0.25**	0.17*
R19	16.0	-0.66	-0.20**	0.16*
R20	0.9	0.10	0.24**	0.00
Rb	45.4	-2.74	-0.69**	0.11
Rc	9.1	-0.80	-0.36**	0.07

1) Sen の方法による変化速度の中央値。

2) Mann-Kendall 検定による tau 値と有意差検定結果. *, ** はそれぞれ 5, 1% 以下での危険率で有意を示す。

2. 調査方法・解析方法

地域内からの窒素流出量の実態を把握するために、この地域を集水域とし、常時流水が観測されるすべての河川（全 22 河川、以降は小河川と記す）を調査対象とした。また台地上およびその周縁部に位置する 9 地点の湧水と 6 地点の井水の調査もおこなった。各調査地点の名前、位置および測定期間を図 1 と表 1 に示した。

小河川、湧水、井水の調査はおおよそ月に 1 回の頻度でおこなった。降水があった場合は、数日経過後の平水時に近い条件を選び調査した。サンプルの採取はすべての調査地点で行い、小河川については同時に回転式流量計（広井電気式、三映測量器）で河川流量を測定した。採取サンプル中の硝酸性窒素濃度と亜硝酸性窒素の測定にはイオンクロマトグラフィ（DX-100、ダイオネクス、USA）を用いた。また、硝酸性窒素濃度と河川流量の積から硝酸性窒素流出量と亜硝酸性窒素を算出した。なお、亜硝酸性窒素はすべての測定地点および測定期間を通じて検出できないか無視しうる量だった。そこで、この報

表3 湧水・井水の硝酸性窒素濃度のトレンド分析

	濃度の中央値 (mgN/L)	変化速度 ¹⁾ (mgN/L/y)	tau ²⁾
S1	15.8	0.95	0.32**
S2	15.9	0.27	0.21**
S3	24.5	-3.07	-0.78**
S4	39.1	-0.73	-0.19**
S5	36.4	-2.01	-0.50**
S6	47.5	-0.14	-0.07**
S7	38.0	-1.42	-0.22**
S8	43.7	-3.43	-0.76**
S9	28.9	-4.38	-0.81**
W1	2.7	-0.11	0.06
W2	5.4	-0.12	-0.05
W3	25.8	-0.05	-0.06
W4	18.3	-0.55	-0.36**
W5	27.5	-0.15	-0.06
W6	33.1	-0.69	-0.24

1) Sen の方法による変化速度の中央値。

2) Mann-Kendall 検定による tau 値と有意差検定結果. *, ** はそれぞれ 5, 1% 以下での危険率で有意を示す。

告では便宜上両者の合量を硝酸性窒素として表現した。

水質のトレンド分析にはノンパラメトリックな統計手法を用いた。トレンド分析には正規分布を仮定した回帰分析が一般的に利用されている。しかし、水質・水量の分布は正規分布に従わない例が多く¹⁾、我々の解析においても濃度の回帰直線からの残差は正規分布に従わなかった。そこでトレンド分析には正規分布を仮定する必要がなく、河川の水質データによく用いられる Mann-Kendall 検定を利用した。同検定は正規分布を仮定せず、検出力が直線回帰分析と同等以上であるとされている¹⁾。同検定では tau 値を用いてトレンドの判定を行うが、tau 値は -1 ~ +1 の間をとり、絶対値が大きい程明確な傾向を示す。単調減少・単調増加の tau 値はそれぞれ -1, +1 となる。変化速度の推定には同じくノンパラメトリックな手法である Sen の方法⁵⁾を用いた。これは任意の 2 つプロット間の傾きをすべての組み合わせについて求め、その中央値を変化速度とする手法である。

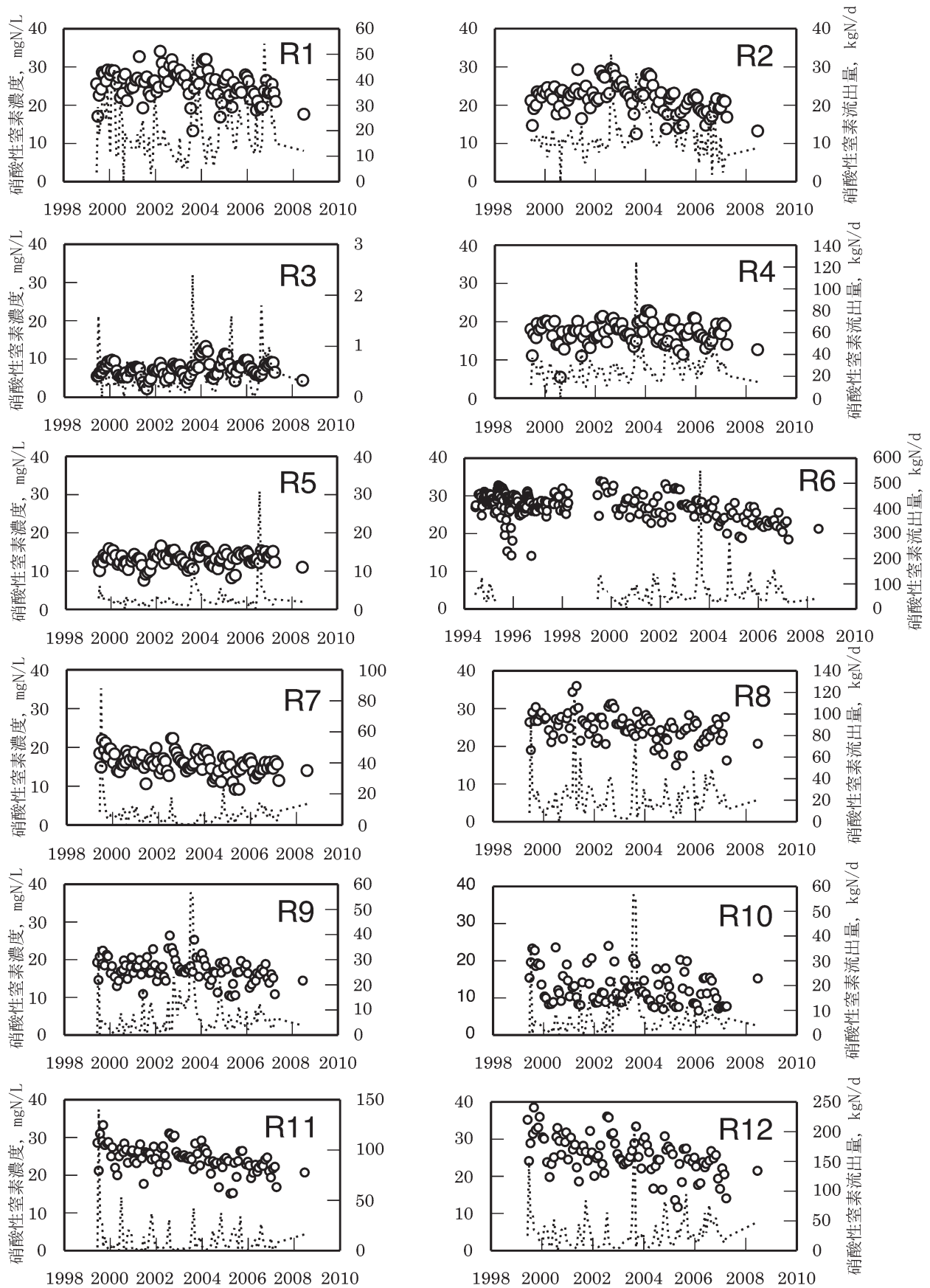


図2-1 小河川の硝酸性窒素濃度および硝酸性窒素流出量の推移

○は硝酸性窒素濃度，破線は硝酸性窒素流出量をあらわす。

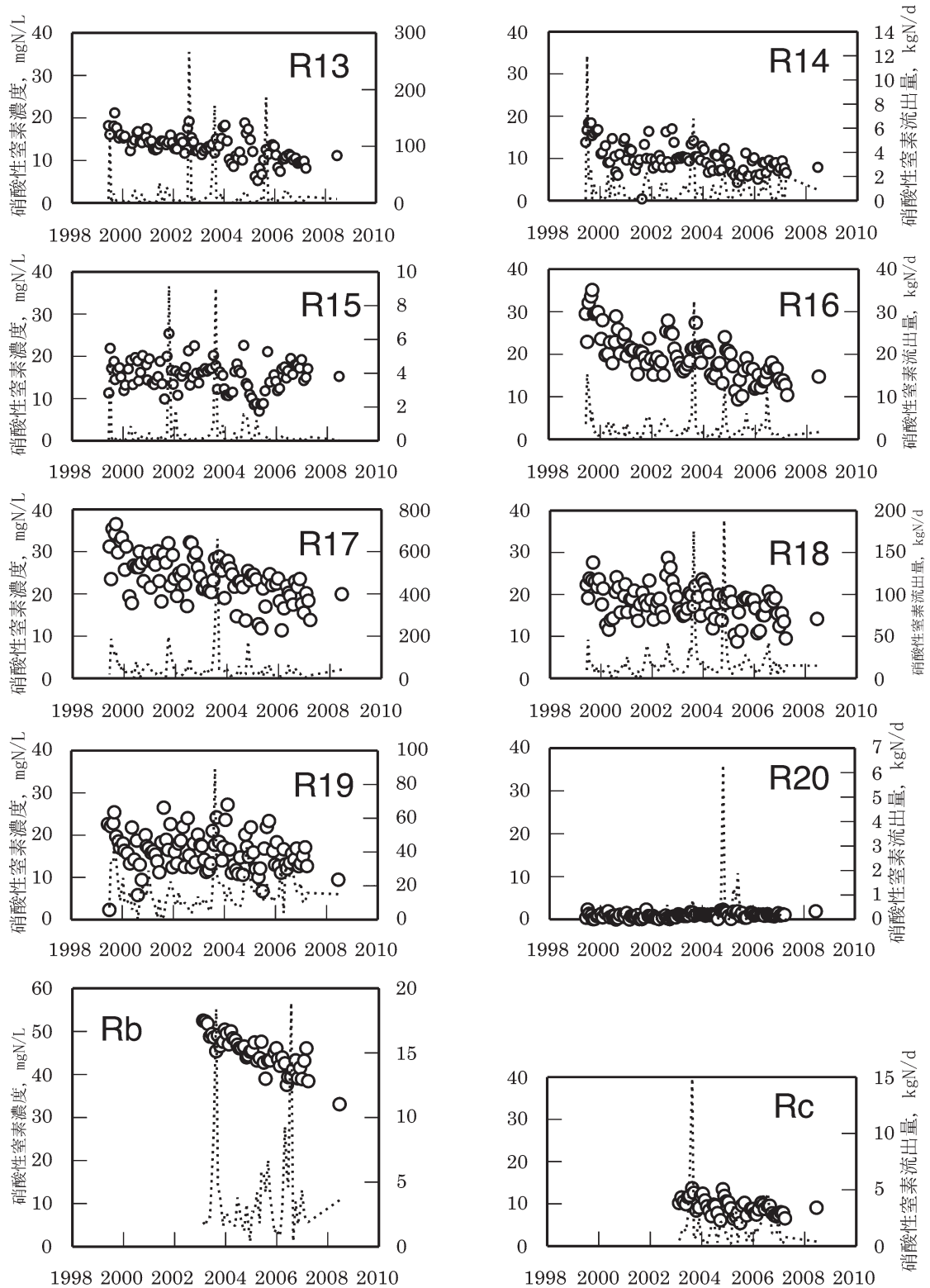


図 2-2 小河川の硝酸性窒素濃度および硝酸性窒素流出量の推移

○は硝酸性窒素濃度，破線は硝酸性窒素流出量をあらわす。

III 結 果

1. 小河川からの硝酸性窒素流出の実態

調査した小河川の硝酸性窒素濃度および硝酸性窒素流出量の推移を図2および表2に示した。調査した22河川中18河川において硝酸性窒素濃度の中央値は環境基準値である10mgN/Lを上回った。トレンド分析の結果では17河川において有意な減少傾向が、2河川においては増加傾向が示された。有意な傾向が認められる小河川についてみると、硝酸性窒素濃度の変化速度は $-2.7 \sim 0.18 \text{ mgN/y}$ の範囲であった(表2)。これは廣野ら²⁾が示した河川の直線回帰の傾き $-0.7 \sim 0.4$ に較べ分布範囲が広く、平均値は同程度だった(図3)。また、小河川の硝酸性窒素濃度と変化速度との間には有意な負の相関が認められた(図3)。

小河川からの窒素流出速度は変動が大きく、長期にわたる有意な減少傾向は認められず(図2)、有意な増加傾向を示す小河川が5河川存在した(表2)。有意な増加を示した小河川は流水量が有意に増加した小河川と一致した(データ省略)。

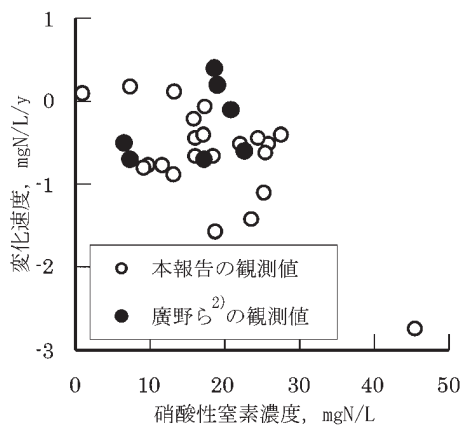


図3 小河川の硝酸性窒素濃度(中央値)と硝酸性窒素濃度の変化速度の関係

廣野ら²⁾の観測値は「直線回帰の傾き」として示されているものを用いた。

2. 湧水および井水の硝酸性窒素流出の実態

湧水の硝酸性窒素濃度については、すべての地点で環境基準値を超過しており、9地点中7地点で有意な減少傾向が、2地点については有意な増加傾向が認められた(図4、表3)。変化速度は $-4.4 \sim 0.95$ の間に分布し、分布の範囲は小河川のそれよりも大きかった。変化速度の分布範囲が河川のそれよりも大きいという結果は廣野

ら²⁾の結果と同様である。最近傍の茶園と湧水との水平距離を算出し、濃度との関係を見ると、茶園からの水平距離が小さい湧水ほど硝酸性窒素濃度が高く、その減少速度が大きかった(図5)。

井水については6地点中1地点でのみ、有意な減少傾向が認められた(図6、表3)。

IV 考 察

硝酸性窒素濃度に有意な変化がある小河川、湧水、井水の大部分は低下傾向を示しており、この地域の水系の硝酸性窒素濃度は概ね低下の傾向を示した。これは廣野ら²⁾が得た、施肥削減が水質改善に寄与したという可能性をより高い確度で示している。野中³⁾によるアンケート調査によると、静岡県内の茶園の施肥窒素量は1993年には 105 kgN/10a 、1998年で 80 kgN/10a 、2002年に 60 kgN/10a と調査期間中に徐々に削減されてきている。また地域JAによると2000年以降は施肥量を 54 kgN/10a とする取組が始まっている。本調査においては集水域が明確であり、茶園以外に大きな窒素源がないことが明らかになっていることから、硝酸性窒素濃度の低下は茶園からの窒素排出量の低減が主な理由である可能性が極めて高い。

水質の変化速度に着目してみると、小河川の硝酸性窒素の変化速度と濃度との間には負の相関関係が認められた(図3)。小河川の硝酸性窒素濃度は、集水域の降水量、窒素溶脱量、揮散・脱窒量等の因子で決定される。当該地域の窒素負荷源は主に茶園であること、地域内の降水量に大きなばらつきがないと想定されること、一般的に揮散・脱窒量は溶脱量に較べて小さいことを考えると小河川の硝酸性窒素濃度は主として集水域の面積あたりの施肥量を反映していると考えられる。すなわち、茶園割合が高い等の理由で面積あたりの施肥量が大きいほど施肥削減による硝酸性窒素濃度の低下速度が大きくなり、これが硝酸性窒素濃度の高い小河川で施肥削減の影響が大きく現れた理由の一つだと考えられた。図5のように湧水においては最近傍の茶園からの水平距離と濃度の変化速度との間に正の相関があった。小河川には複数の湧水が合流するため、小河川の変化速度は湧水のそれを反映する。従って図5の結果も小河川の変化速度は茶園の面積割合を反映する、という考え方を支持するものである。

施肥削減の影響の捉えやすさは小河川、湧水、井水で異なった。硝酸性窒素濃度のトレンドが有意である確率は、湧水(100%) > 小河川(86%) > 井水(17%)の順

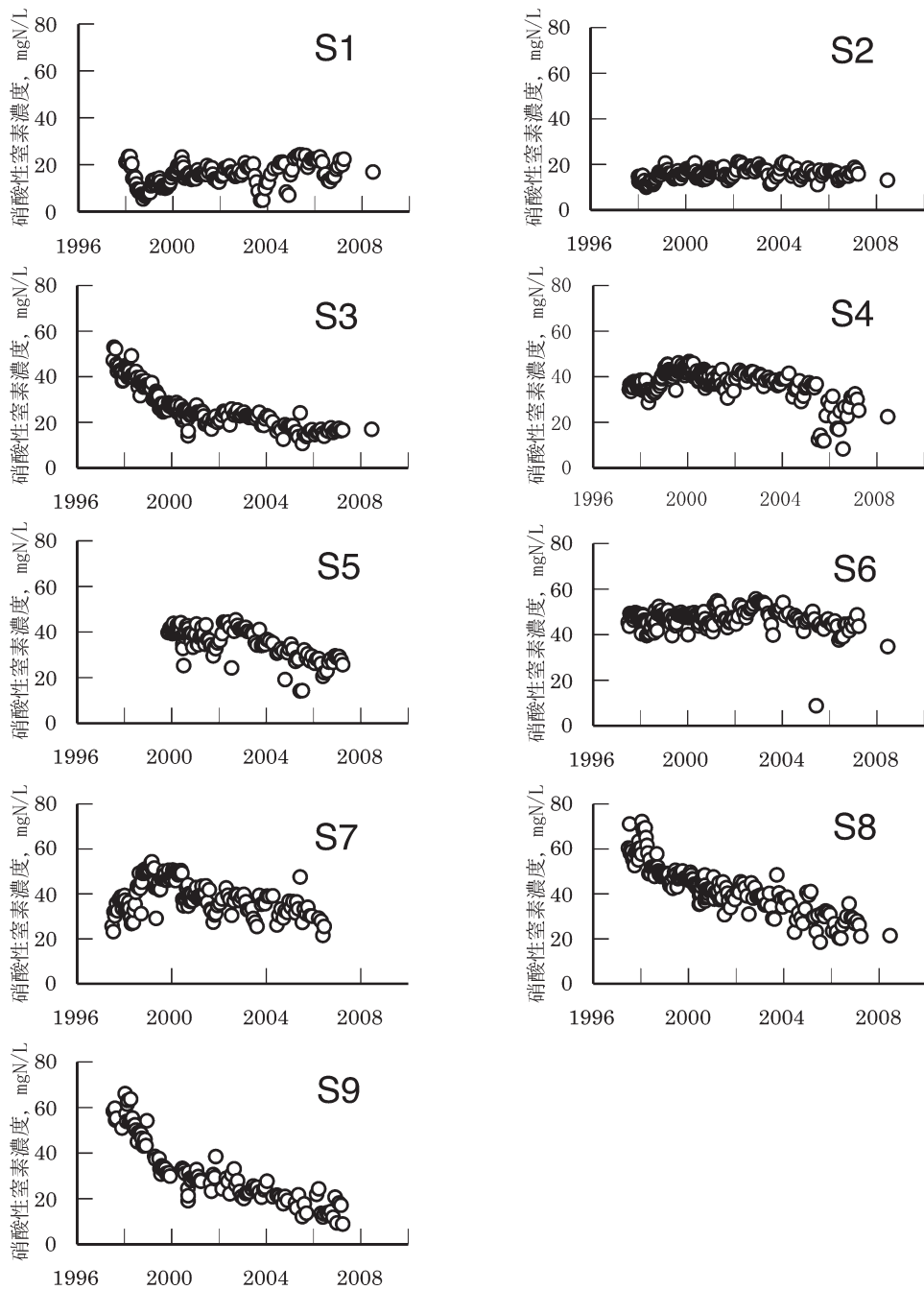


図4 湧水の硝酸性窒素濃度の推移

であった。湧水では河川に較べトレンドが明確である、という結果は廣野ら²⁾と一致した。河川は複数の湧水の水質を反映するため、トレンドが不明確になりやすいことによると考えられる。井水においては有意なトレンドは1井水に限られた。小河川、湧水と異なり、井水では必ずしも水の移動が確認できていない。井水では地下部での水の移動速度が水質の変化速度に影響を与えていることが予想される。井水での水質改善トレンドの現れ方を把握することは今後の大きな課題であろう。また小河川からの硝酸性窒素の流出量に関しては有意な低減トレ

ンドを観測できなかった。この結果は新良ら⁵⁾と同様であった。河川水流量は降水によって変動しやすく、そのばらつきは濃度のそれに比べて大きい。窒素流出量と濃度との決定係数 (r^2) は0.0～0.25の範囲であるのに対し、流量との決定係数は0.32～0.98と高く(データ省略)、すなわちここで計算された硝酸性窒素流出量は流量に大きく規定されていた。また、硝酸性窒素流出量が有意に増加した5河川は流量が増加した河川と一致していた。このように硝酸性窒素流出量は流量の影響を大きく受けるために、硝酸性窒素濃度が低下して

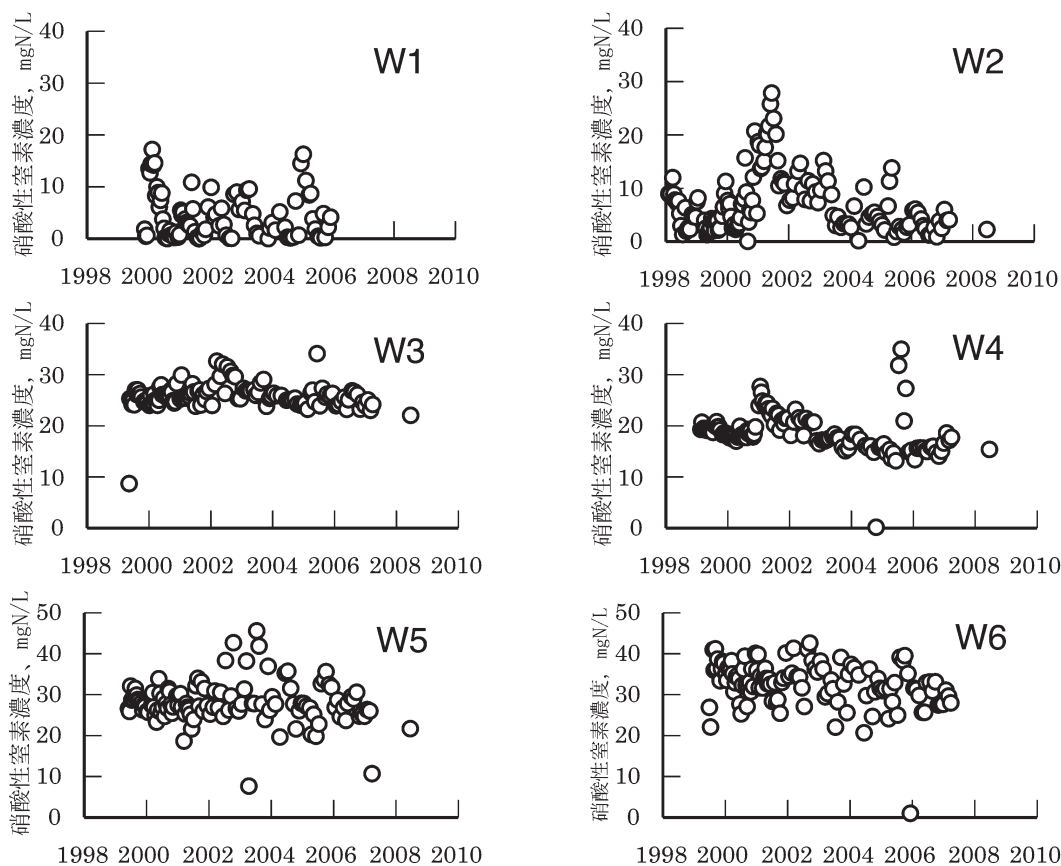


図6 井水の硝酸性窒素濃度の推移

いるにも関わらず、硝酸性窒素流出量としては施肥量削減効果を検出できなかったものと考えた。これは施肥削減の影響を硝酸性流出量の低減として捉えることの技術的な難しさを示している。

本報告においては対象地域全体の水質調査の結果について考察したが、個別の小河川に関する詳しい考察はできなかった。近年、徳橋ら⁸⁾はR1の上流部の地質および湧水を調べ、帯水層等の地質的な要素が脱窒に関与し

河川の硝酸性窒素濃度に影響を与えていることを明らかにしている。今後、このように水系毎に茶園面積、湧水、地質および脱窒量等を検討することによって、施肥削減が水系の硝酸性窒素濃度に与える影響がより定量的に捉えられると思われる。

IV 摘 要

減肥が進行している茶園が集積した台地とその周縁部の小河川、湧水、井水を長期にわたりモニタリングした。22河川中18河川において地下水の環境基準値である10mgN/Lの基準値を超過しており、22河川中17河川で有意な硝酸性窒素濃度の減少が認められた。これは茶園での施肥量削減の影響であると考えられる。硝酸性窒素流出量には、減少傾向は認められなかった。この理由として、流量の期間変動が大きく、窒素流出量はこれに大きな影響を受けていることが一因であると考えた。湧水においても9地点中7地点で硝酸性窒素濃度の減少傾向が見られた。井水については有意な減少傾向を示した地点は6地点中1地点のみだった。

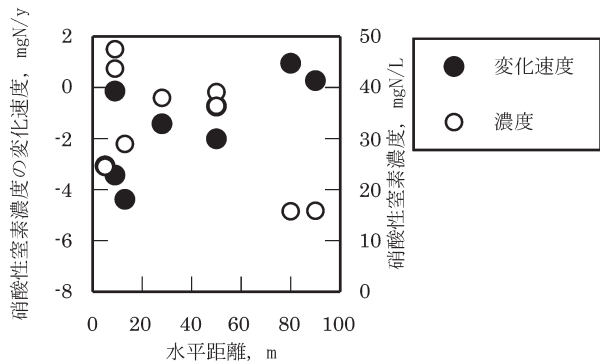


図5 最近傍の茶園からの水平距離と湧水の硝酸性窒素濃度および変化速度との関係

引用文献

- 1) Hipel, K. W. and McLeod A. I. (2004): Nonparametric tests for trend detection In *Time Series modeling of water resources and environmental systems*, Elsevier, Amsterdam, 853-938.
- 2) 廣野祐平・渡部育夫・野中邦彦 (2006): 集団茶園地域の周辺水系に見られる硝酸性窒素濃度の変化. 平成 18 年度野菜茶業成果情報集, 55 ~ 56.
- 3) 寺尾宏 (1996): 第Ⅲ部硝酸性窒素における汚染と対策 第 8 章わが国の観測事例と対策 対策とその効果, 環境庁水質保全局水質管理課・土壌農薬課編, 土壌・地下水汚染と対策, 日本環境測定分析協会, 東京, 239 ~ 247.
- 4) 野中邦彦 (2004): 茶園における施肥基準の推移と今後の展開方向, 農業技術, 59, 311 ~ 315.
- 5) 新良力也・渥美和彦・宮地直道 (2005): 静岡県牧ノ原台地の茶園地帯における硝酸性窒素の流出量と水田による除去可能性. 土肥誌 76, 901 ~ 904.
- 6) Sen, P. K. (1968): Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *J. Am. Statist. Assoc.* 63, 1379 ~ 1389.
- 7) 戸田任重・望月康英・川西琢也・川島博之 (1997): 静岡県牧ノ原における茶園-水田連鎖系による窒素流出負荷低減効果の推定. 土肥誌, 68, 369 ~ 375.
- 8) 徳橋良治・宮地直道・尾坂兼一・加藤英孝・高橋智紀 (2008): 静岡県牧ノ原台地茶園地帯における深層土壌および湧水中の硝酸性窒素濃度. 日本土壌肥料学会講演要旨集, 54, 5.