

畑地地域を流れる小河川への 硝酸態窒素の負荷源と流入経路について：

カナダ・オンタリオ州ストロベリークリークの例

杉 田 文

1. はじめに

農業活動に起因する硝酸態窒素による地下水および地表水の汚染が多く、多くの国で報告されている。わが国でも環境省の2001年度の地下水水質調査では5.8%の井戸の水が硝酸態窒素および亜硝酸態窒素の飲料水水質基準である10mg/lを超過していたと報告されており、項目別の超過率としては最も高くなっている（環境省、2001）。高濃度の硝酸態窒素は人体に入ると乳児にメタヘモグロビン症を起こす原因物質になったり発ガン性物質になることが知られる。また、河川や湖沼に流入すると富栄養化を引き起こすため、硝酸態窒素による地下水および地表水の汚染は現在多くの国共通の重大な環境問題の一つとなっている。

窒素肥料や畜産排水などとして主にアンモニア態窒素の形で環境中に放出された窒素は地表あるいは地表近くで酸化されて硝酸態窒素となる。作物や植物の多くはこの硝酸態の窒素を吸収する。作物や植物に吸収されなかった硝酸態窒素は負に帯電していることから土壤中を動きやすく、雨水の浸透とともに地中深くへ浸透を始める。浸透過程において、低溶存酸素濃度、脱窒菌や有機炭素の存在といった一定の条件が整うと硝酸態窒素は還元（脱窒）されて空中窒素と亜酸化窒素となり大気中に放出されるため地中水から取り除かれる。しかし、地中が酸化的な環境であったり、土壤中の有機炭素含有量が少ない場合には硝酸態窒素は濃度低下することなく地下水や土壌水とともに自由に地中を移動し、地下水や河川水の汚染をひき起こ

すことになる。一般に不飽和帯は酸化的環境にあるため、硝酸態窒素は容易に地下水面に到達し地下水汚染をおこす一方、地下水中では条件が満たされれば脱窒反応を受けると考えられている。特に、河川近傍の緩衝帯ではこの脱窒により地下水中の硝酸態窒素濃度が河川への流出直前に低下することが知られており、河川の硝酸態窒素汚染を防ぐ自然の窒素浄化機能として注目されている (Jacob and Gilliam, 1985, Lawrence, 1984, Cey et al., 1998)。農業地帯を流れる小河川 (一次河川) では河川のすぐ近くまで畑となっていて緩衝帯の幅が非常に狭くなっている場合が多い。このような幅の狭い緩衝帯がどの程度窒素浄化機能を有しているか詳しい検証をした例は少なく、その機能についてよくわかっていない。大河川や湖沼に供給される硝酸態窒素の多くが小さな一次河川から供給されていると考えられている (Lawrence, 1996) ため、小河川への硝酸態窒素の流出プロセスを解明することは汚染防止対策を考える上で重要である。

本研究では一次河川近傍の畑地地帯で土地利用別に地表面から地下水面までの不飽和帯の窒素の分布を調査することにより一次河川への硝酸態窒素の主な負荷源を明らかにすることを第一の目的とした。さらに河川への土壌水・地下水の出入りを調査することにより複雑といわれる地表から地下水および河川への窒素の主な物理的・化学的輸送経路を推定することを第二の目的としている。

2. 調査地域

本研究はカナダ・オンタリオ州南部のウォータールー市 (北緯 $43^{\circ}33'10''$, 西経 $80^{\circ}23'15''$) 近くにあるストロベリークリーク流域と呼ばれる小流域でおこなった (図1, 図2)。ストロベリークリークは農業地帯を流れる全長およそ2 km, 流域面積約 3.5km^2 を有する一次河川である。このクリークはその二次河川であるホープウェルクリークへ流出した後、オンタリオ州最大の流域面積を持つグランドリバー (流域面積約 6800km^2) へ、ひいては五大湖の一つであるエリー湖へと流出している (Chapman and Putnam, 1984)。本河川の流量は融雪期に多くなり、夏は少なくなるといった年変化を呈し、1998年の年平均流量は 20l/sec であった (Cabrera, 2000)。近辺の年平均降水量は 917mm (1966-1990年), 月別降水量と平均気温より高橋の式 (高橋, 1979) を用いて推定される年平均蒸発量は 429mm となり、こ

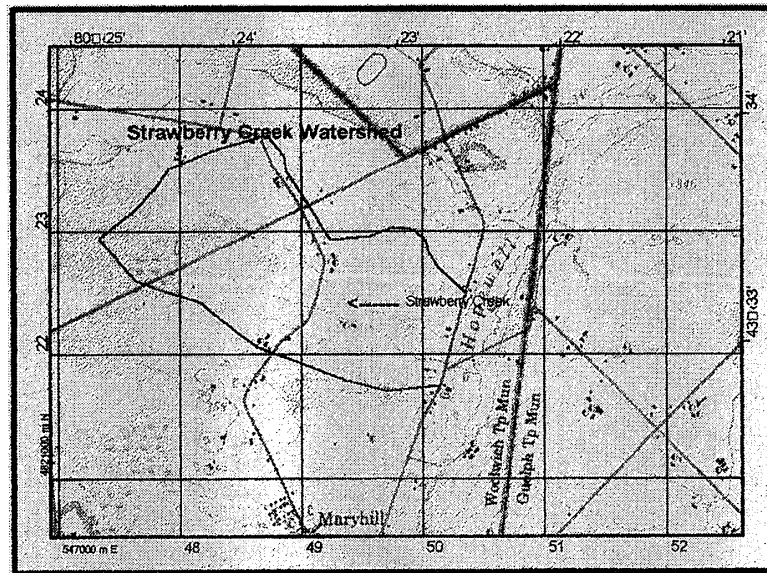
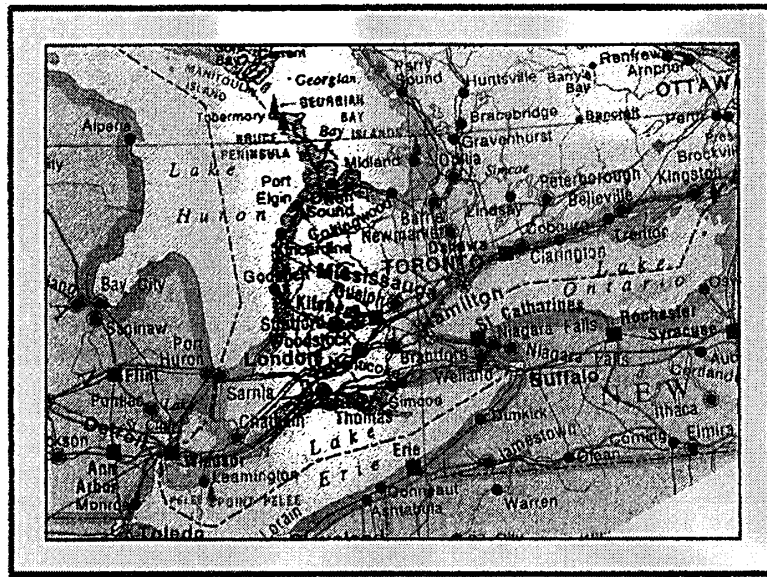


図1 調査地域：ストロベリークリーク流域

れらより年平均地下浸透量は488mmとなる。

流域内は図2に示すように全体的にクリークに向い緩やかな斜面となっていて、谷頭部とそのほかにパッチ状に存在する5つの林と数軒の民家を除くと全域が畑地となっており典型的なオンタリオ州南部の農業地帯である(図3)。流域内ではとうもろこし、大豆、冬小麦、大麦、アルファルファー、イチゴなどが栽培されている。主に春先(4-6月)と秋(10-11月)に堆肥と化学肥料による施肥が行われるがその時期および量は畑によりさまざまである。クリーク両側の二本の緩衝帯は



図2 ストロベリークリーク流域概観

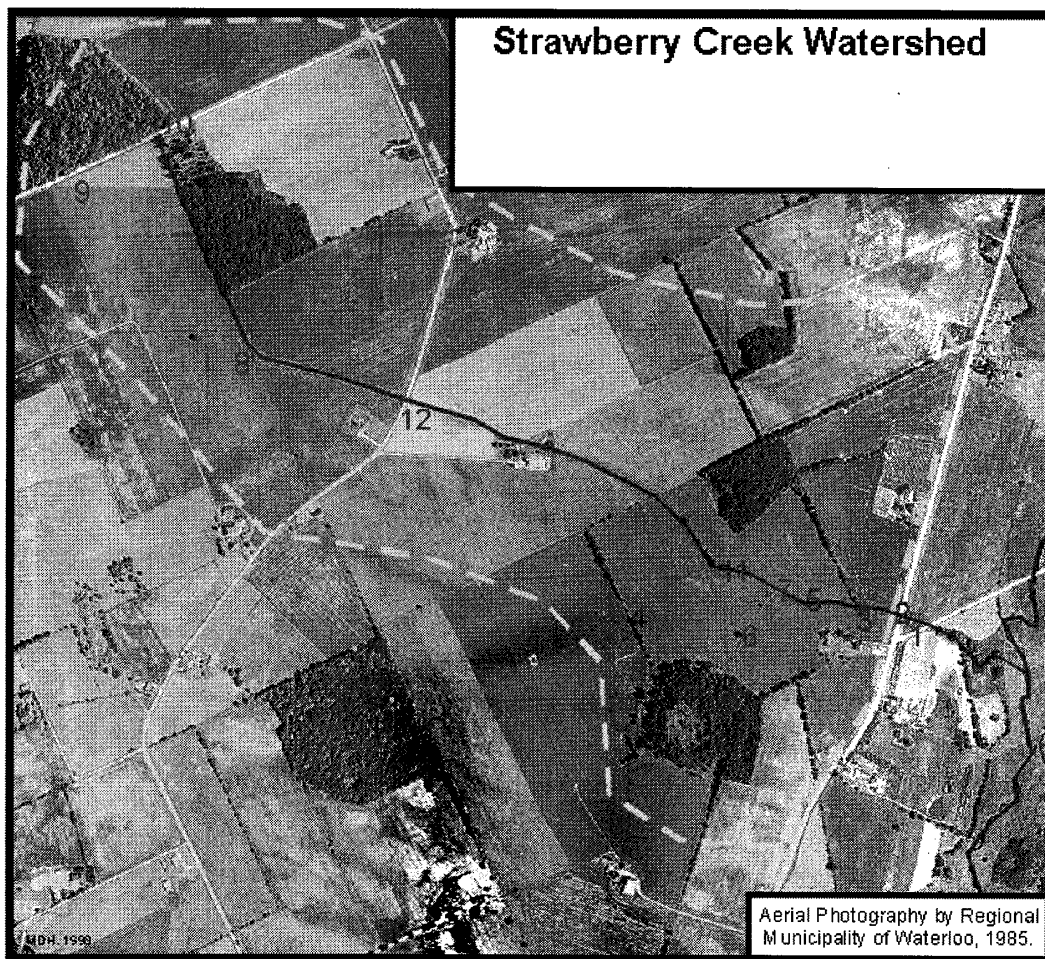


図3 ストロベリークリーク流域空中写真 (Waterloo市, 1985)

上流ほど狭くなっており，畑地の端から河川までの緩衝帯の幅は下流部でおよそ3～5 m，上流部では1 m以下である。下流部ではこの緩衝帯の飽和地下水帯中で硝酸態窒素の濃度低下がおきていることが確認されている (Cabrera, 2000)。

本流域内の地層はおよそ地表面下20-30cmまでの土壌層の下から深度25-50mのシルル紀の基岩との間に、ポートスタンレイティル、キャットフィッシュクリークティル、メアリーヒルティルと呼ばれる複数の氷性堆積物の層が複雑に入り組み構成されており (Barnett et. al., 1991, Karrow, 1974), その組成もレキ交じり粘土から砂層まで場所と深度により非常にバラエティに富んでいる。

3. 土壌水・河川水のサンプリングと水質分析

ストロベリークリーク沿いにある大麦畑, とうもろこし畑, 大豆畑と林地, また, 河川わきの緩衝帯において1999年7月から11月にかけて地表面下約20cmから地下水水面まで計32本の土壌コアのサンプリングを行った。河川に近いために地下水水面は浅く, その深度は1m前後であった。コアは打ち込み式オーガーを用いてできるだけ不攪乱状態で採取したが, 大きなレキなどにより打ち込み式オーガーで採土できなかったときはハンドオーガーにより採土した。不攪乱コアでも場所や深度によってはコアが縮んでいることが確認された。採取したコアは実験室に持ち帰り, 不攪乱で縮まなかったと思われるコアのみを用いて含水率の測定をおこなった。また, コアからは搾り出しにより土壌水を得て45 μ mのフィルターを通した後, 塩素イオン, 硝酸イオン, 亜硝酸イオン, アンモニアイオン, およびDOCについて化学分析をおこなった。化学分析に用いた方法および機器を表1に示す。検出限界はDOCが0.2mg/l, 他のイオン類は0.01mg/lである。

調査地と実験室の距離がおよそ15kmと近かったため, 野外で得た土壌コアからはその日のうちに採水し, 水質化学分析をおこなった。野外での採土から水質分析を終了するまでに要した時間はほとんどの場合8時間以内であった。翌日以降に持

表1 水質化学分析に用いた機器および方法

分析項目	方法および使用機器
塩素イオン	フェリシナイド法, Beckman DU530
硝酸イオン, 亜硝酸イオン	イオンクロマトグラフィー, Dionex2000
アンモニアイオン	インドフェノール法, Beckman DU530
DOC	Dohrman High Temperature TOC Analyzer

ち越して水質分析を行わなければならなかった場合は試料水を4℃の冷蔵庫で分析時まで保存した。

10月にクリークに沿って上流から下流まで28地点においてクリーク内の河川水および河川下の地下水の採取をおこなった。地下水採水に用いたミニピエゾメータは川底に設置してあり、河底下の地下水水頭を測定できるほか、河底直下の地下水が採取できる。設置深度は河底から0.5m～1mである。得られた地下水と河川水は土壌水と同じ項目について同じ手法で化学分析を行った。本クリーク中にはタイルの排水口が8箇所確認されているが、調査日においてはタイル排水口から目に見える排水は確認できず、採水できなかった。

4. 河川水と不飽和帯の硝酸態窒素の分布と動き

4. 1 河川水および河底下地下水の硝酸態窒素

全長約2kmのストロベリークリークの上流部500mほどは融雪時や降水直後などのみに水が流れる間欠河川である。本調査では下流部の恒常的に流れのある約1.5km区間において上流部から下流部まで28地点で河川水の採水と河道内に設置してあるミニピエゾメータより河底下の地下水の採水をおこなった。

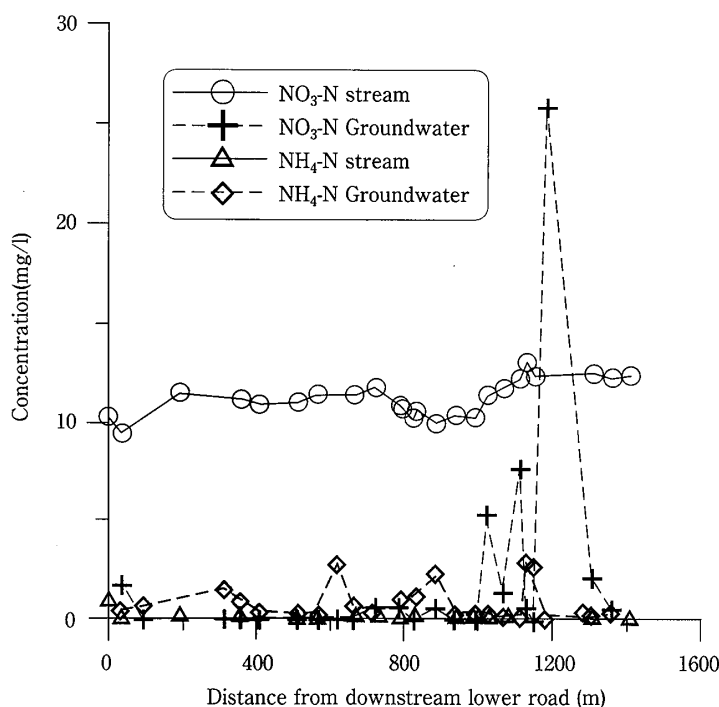


図4 河川水と河底下地下水の硝酸態窒素濃度とアンモニア態窒素濃度

河川水と河底下地下水の硝酸態窒素とアンモニア態窒素の濃度を図4に示す。河川の硝酸態窒素濃度は上流から下流に向かってわずかに低下するものの、全体的に常にほぼ10mg/l以上と高い濃度を保っている。河川のアンモニア態窒素はゼロに近く、河川水中の窒素はほとんど硝酸態となっていることがわかる。河底下地下水中の硝酸態窒素濃度は、下流端から約1200mに25mg/lを超える高濃度地点があり、その近辺で5 mg/l前後と比較的高くなっているが、そこを除くと河川水に比べ非常に低い。河底下地下水のアンモニア態窒素はスポット的に2 - 3 mg/lの濃度を持ち、河川水より若干高めであるが、下流端より約1200mの高濃度地点を除くと硝酸態窒素とアンモニア態窒素を合わせても河川の硝酸態窒素濃度に比べると低い値となる。

河川水のNO₃-N/Cl比を図5に示す。河川水の流下に伴う硝酸態窒素濃度の低下が脱窒によるものであると硝酸態窒素濃度のみが低下するのでこの比が低下する。図5に見られるようにNO₃-N/Cl比は上流から下流までほぼ一定の値を示し、これより河川水中の濃度低下は脱窒によるものではなく単に希釈によるものであることが示唆された。

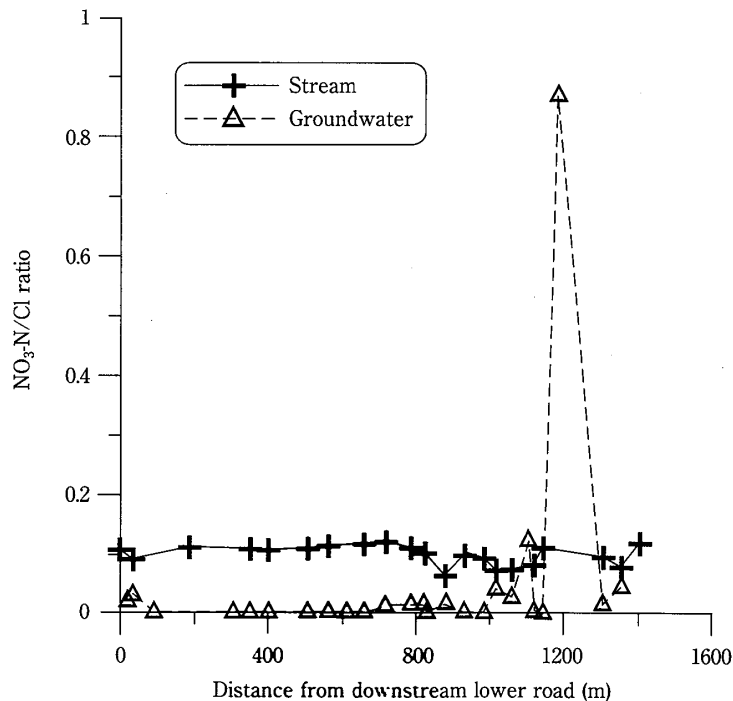


図5 河川水と河底下地下水のNO₃-N/Cl比

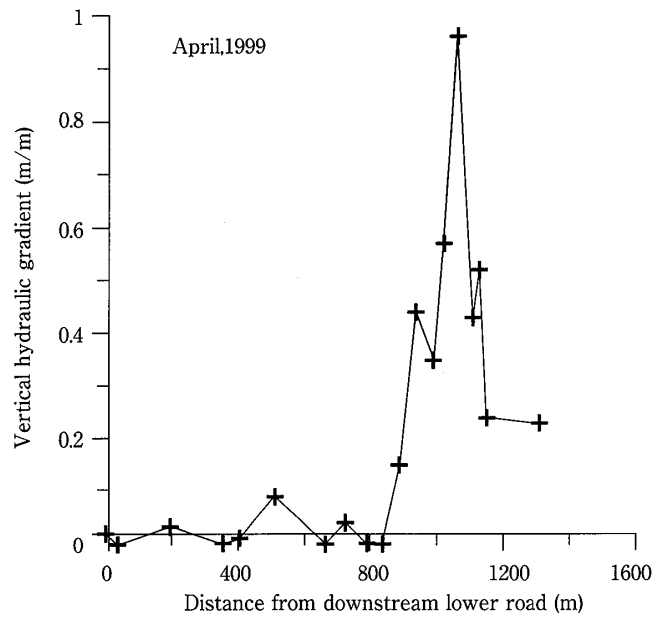


図6 ストロベリークリーク河底の動水勾配

1999年4月に観測された河底直下における鉛直方向の動水勾配を図6に示す(Cabera, 2000)。この動水勾配はミニピエゾメータ下端と川底の水頭差をミニピエゾメータの深さ(距離)で割ったものである。下流部での地下水と河川水はほぼ平衡状態となっているが、上流部300mほどの区間では強い上向きの動水勾配となっている。Cabrer(2000)によるとストロベリークリークではこの上流部300mの区間では一年を通じて上向きの流れがあり、下流部では高水時には下向き、低水時にはほぼ平衡の動水勾配をもつことが報告されている。強い上向き流れの観測された区間で25mg/lを超える高濃度の硝酸態窒素を有する地下水の存在が観測されていることから、この地下水が河川中の高い硝酸態窒素濃度の原因の一つとなっていると考えられる。しかし、この地点付近以外では地下水中の硝酸態窒素およびアンモニア態窒素の濃度が低かったことから、地下水からの負荷のみでは河川水の高い硝酸態窒素濃度を説明できないことが明らかである。これらから上流部における地下水以外にも河川への硝酸態窒素負荷源が存在することが示唆された。

4. 2 畑地不飽和帯の硝酸帯窒素

4. 2. 1 とうもろこし畑

とうもろこし畑で7月と11月に得られた典型的な硝酸態窒素濃度プロファイルを

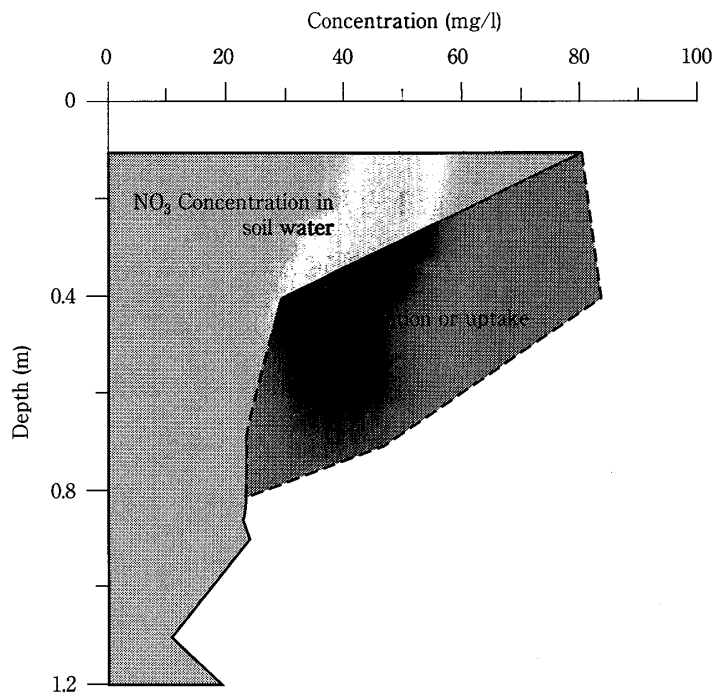


図7 (a) とうもろこし畑における硝酸態窒素濃度プロファイル (7月)

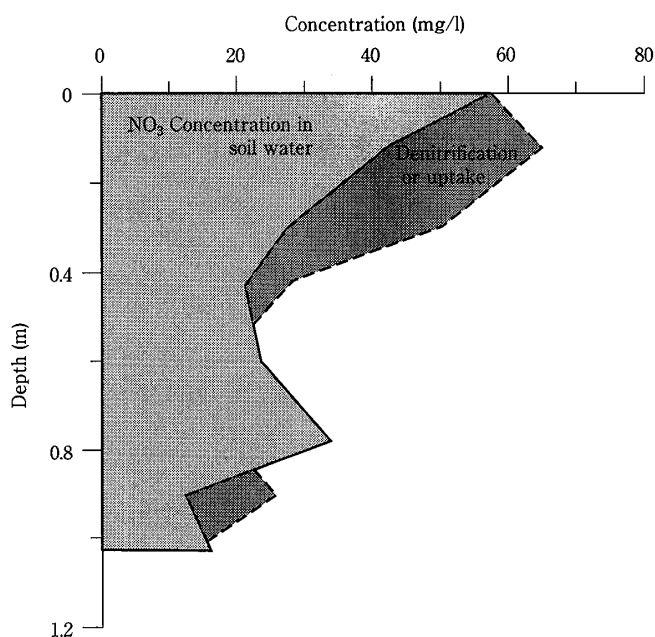


図7 (b) とうもろこし畑における硝酸態窒素濃度プロファイル (11月)

図7 (a), (b) に示す。7本のコアから得られたプロファイルのすべてで地表面付近で最も硝酸態窒素濃度が高く20~80mg/l, 深さとともに濃度は低下する傾向

が見られ、地下水面では10~20mg/l前後となっていた。つまり、不飽和帯では浸透とともに濃度低下がおきており、地表面近くでは高濃度だが地下水面では10~20mg/l前後と飲料水基準濃度を少し上回る濃度まで減少し、地下水へ流出していることがわかった。

NO₃-N/Cl比から希釈による濃度低下と脱窒または植物の吸収による濃度低下を分離することができる。NO₃-N/Cl比から推定された脱窒・植物の吸収量も図7 (a) (b) に示した。7月のプロファイル (図7 (a)) では深度50cm以浅でみられた著しい硝酸態窒素の減少は脱窒か植物の吸収によるものであることがわかる。一方、50cmより下では水分増加に伴う希釈によりわずかに濃度が減少しているといえる。

11月のプロファイル (図7 (b)) も7月のプロファイルと同様の形状を呈し、深さとともに濃度は低下して地下水面直上でおよそ飲料水基準の2倍の20mg/lとなっている。NO₃-N/Cl比から推定される脱窒・植物による吸収による濃度低下は深度50cm以浅と地下水面すぐ上の二深度で生じている。11月の時点で地表にとうもろこしは無いが夏の栽培期間には根が深度30cm程度までであったことから上部の濃度低下は穀物の成長期の吸収と脱窒の影響、下部の濃度低下は根が全く認められなかったことから脱窒のみによるものであると考えられる。

とうもろこし畑では穀物の栽培期間を通じて地表面近くで最大濃度、深さと共に濃度は低下する傾向が見られた。地下水面に到達する硝酸態窒素濃度は栽培期間を通して飲料水基準を超える10~20mg/l程度であった。

4. 2. 2 大麦畑

7月と11月に大麦畑で得られた硝酸態窒素の典型的なプロファイルを図8 (a), (b) にそれぞれ示す。7月のプロファイル (図8 (a)) では地表面下20cmでおよそ50mg/l、深さとともに濃度は低下して地下水面で10mg/l前後といったとうもろこし畑と同様の形のプロファイル得られた。NO₃-N/Cl比より上層に見られる濃度低下は希釈によるものと推定されるが、深度0.6-0.8mに見られる濃度低下は植物の根などが認められなかったことから脱窒反応によるものと考えられる。

11月のプロファイル (図8 (b)) でも地表面下20cmでおよそ37mg/l、深さとともに濃度は低下し地下水面より10cmほど上でおよそ10mg/lとなり、再び地下水面上で濃度は上昇している。地下水面より少し上の深度0.7-0.8mでは脱窒によると

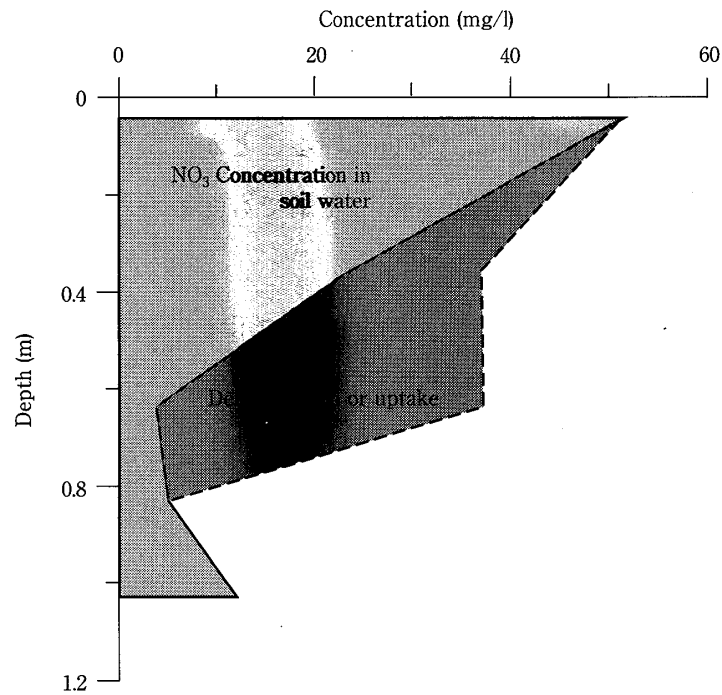


図 8 (a) 大麦畑における硝酸態窒素濃度プロファイル (7月)

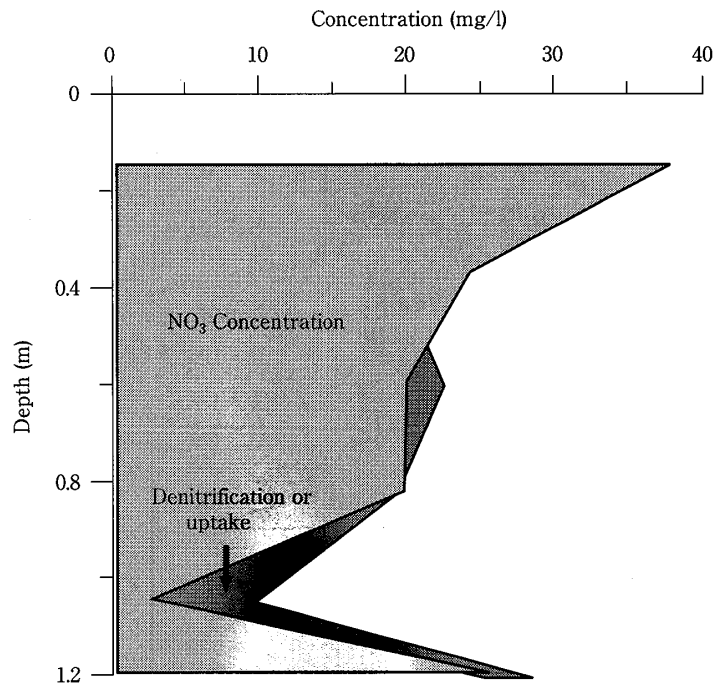


図 8 (b) 大麦畑における硝酸態窒素濃度プロファイル (11月)

考えられる濃度低下が認められた。地下水面上の高濃度は調査日においては地下水が不飽和帯の土壤水より高い硝酸態窒素濃度を有していたため、地下水の影響であ

ると考えられる。以上より大麦畑でもとうもろこし畑同様、地表面近くで最大濃度、深さと共に濃度は低下する傾向が見られ、栽培期を通じて飲料水基準を上回る硝酸態窒素を含む土壌水が地下水面に到達していることがわかった。また、地下水面近くで脱窒によると考えられる濃度低下が大麦畑でも認められた。

4. 2. 3 大豆畑

大豆畑で得られたプロファイルの一例を図9に示す。とうもろこし畑、大麦畑に比べると硝酸態窒素の濃度は非常に低く、最高濃度を持つ地表面近くでも13mg/lで、深度20-30cmまでに6 mg/lに低下したのち、ほとんど濃度を変えずに地下水面に到達している。大豆畑で得られたプロファイルはどれも濃度が低く、大豆畑からの地下水への溶脱量は多くないことがわかった。

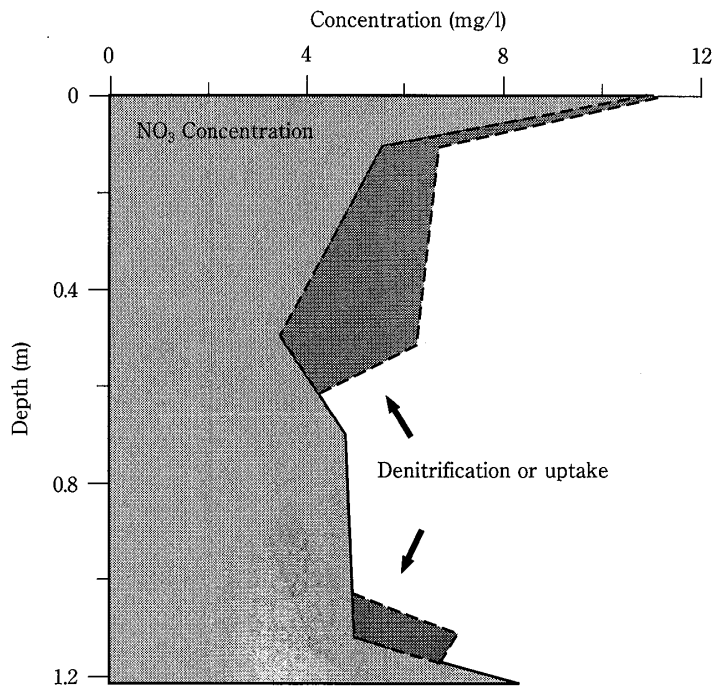


図9 大豆畑における硝酸態窒素濃度プロファイル（7月）

4. 2. 4 河川緩衝帯

河川すぐわきの草でおおわれた緩衝帯の不飽和帯における硝酸態窒素濃度プロファイルを図10に示す。草の根が少なくなる地表面下20cmより地下水面まではほぼ一定の10mg/l前後の濃度を有していた。本流域内では緩衝帯の幅が狭く畑に近接しているため、施肥の際に緩衝帯にも肥料が散布されてしまう。この肥料が浸透し、河川へ流出する直前の地下水へ到達していると考えられる。緩衝帯内の土壌水は河川水と同程度の比較的高い硝酸態窒素濃度を有することからこの土壌水が脱窒反応を受けずにそのまま河川へ流出し、河川の高い硝酸態窒素濃度を形成している可能性がある。緩衝帯上部の不飽和帯は硝酸態窒素濃度の低下に全く寄与していないことがわかった。

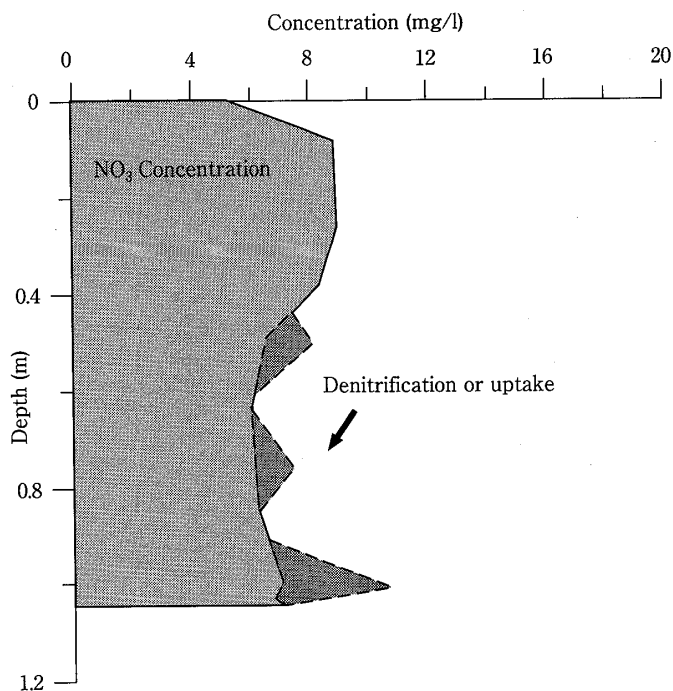


図10 緩衝帯における硝酸態窒素プロファイル (7月)

4. 2. 5 林地

河川に隣接した小さい林地で得られた硝酸態窒素プロファイルの一例を図11に示す。硝酸態窒素濃度は地表面下20cmで0に近いが、深さとともに増加し、地表面下40cmから地下水面までは7～9 mg/lとなっている。また、地下水面より20cm上と地下水面直上に二つの濃度ピークがある。この林地では土地の所有者の記憶の範囲内（60年ほど前から）では土地の転用はなく、したがって施肥もなく地表からは落ち葉などによる自然の負荷しかないと考えられる。しかし、本林地は流域内で河川に近く地下水の下流域に位置するため、林地には隣接する畑からの負荷を受け高濃度の硝酸態窒素を有する地下水が流れている。ピークを有する深度の土壌組織がその上下に比べ細かかったことから、地下水面の上下変動により高濃度硝酸態窒素の地下水が細かい土壌中に残り残されたことによりピークが形成されたものと考えられる。林地の不飽和帯内の硝酸態窒素濃度は低いが地下水は周囲の畑地からの負荷を受け高い濃度を有していることより、地表面を通過した降水は不飽和帯は鉛直方向に流れ、地下水は不飽和帯から流出してくる土壌水を積分する形で側方へ流れて河川へ流出していることが示された。

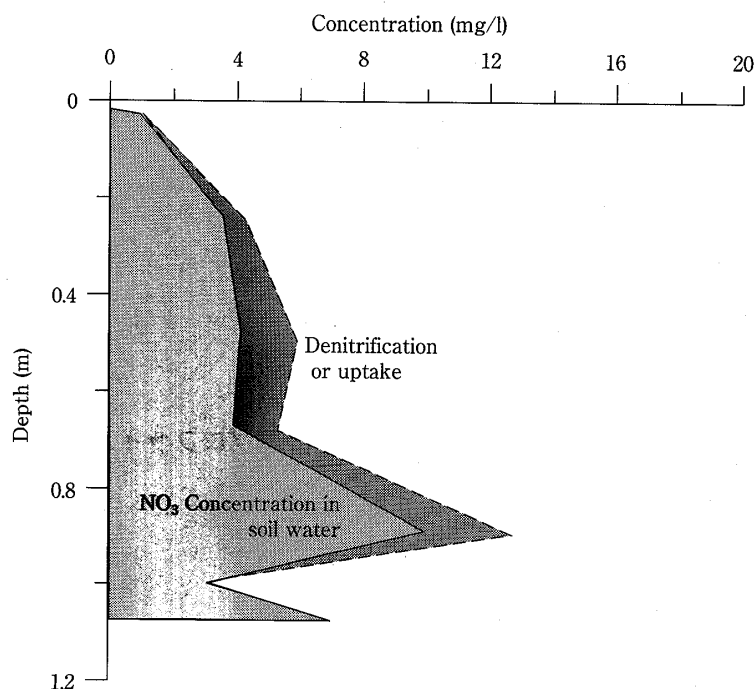


図11 林地における硝酸態窒素プロファイル（8月）

4. 2. 6 硝酸態窒素の輸送パラメータの推定

不飽和帯中の土地利用別硝酸態窒素プロファイルからとうもろこし畑と大麦畑は大きな負荷源となっていることがわかった。硝酸態窒素の不飽和帯における輸送速度と濃度低下の反応速度係数を推定するために、とうもろこし畑、大麦畑と大豆畑で得られたすべてのプロファイルを浸透式の解析解にフィットすることにより係数の最適化を行なった。

ゼロ次反応による硝化および一次反応による脱窒をともなう均質媒体中における一次元定常流による硝酸態窒素の輸送は次式で表すことができる。

$$\frac{\partial (NO_3)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 (NO_3)}{\partial x^2} - v \frac{\partial (NO_3)}{\partial x} - k(NO_3) + \gamma \quad \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

ここで (NO_3) は硝酸態窒素濃度 (M/L^3)、 t は時間 (T)、 D は分散係数 (L^2/T)、 v は流速 (L/T)、 k は脱窒の一次反応係数 ($1/T$)、 γ は硝化による硝酸の生成 ($M/L^3/T$) である。この式は均質媒体、一次元定常流、脱窒は一次反応で表せるといった仮定が成り立つ場合に適用できる。実際の不飽和帯を構成している土壤は礫を含むシルト～粘土層で高い不均質性を有していた。しかし、その不均質性に明瞭な深さとの相関や傾向が見られなかったことから均質媒体とみなしうると仮定した。また、不飽和流は時間スパンが長いため、その間に間欠的に降る降水入力も定常流とみなしうると仮定した。脱窒反応は多くの文献により一次反応とみなせると報告されている (Evangelou, 1998)。以上の仮定は現実とは大きく異なるが平均的なおよその輸送係数推定のためにはほぼ妥当であると考えた。

米国塩類集積研究所のフリーソフトウェアであるCXTFIT (Toride, 1995) を用いて定濃度流入境界、半無限領域、初期濃度ゼロといった条件下で得られている解と観測されたプロファイルを用い、パラメータの推定を試みた。最適化したパラメータは流速 v 、反応速度係数 k のほか、分散長 α (ただし、 $D = \alpha v$)、地表面濃度 C_0 である。硝化の係数 γ については土壤水中にアンモニア態窒素がほとんど検出されなかったため、地表面下20cm以浅でのみ硝化は生じていると仮定し、それ以深を対象とした本研究で得られたプロファイル中ではゼロとおいた。複数のパラメータを同時に最適化するため、最適パラメータセットがユニークに定まらない場合が少なくなかった。その場合最も現実的で妥当な浸透速度を持つパラメータセットを最適

表2 最適化により得られたパラメータの平均

	とうもろこし畑	大麦畑	大豆畑
v (m/day)	0.0067	0.0045	0.0026
k ₁ (mg/l/day)	0.002	0.011	0.006
α (m)	0.34	0.73	1.04
C ₀ (mg/l)	149	108	74
R ²	0.87	0.92	0.78

パラメータセットとした。

最適化により得られたパラメータの平均を表2に示す。推定された平均年浸透速度は年浸透距離に換算すると0.94m/年から2.44m/年の値をとり、年平均浸透量から推定された平均年浸透速度1.44m/年と同程度であるが若干大きな値となった。反応速度係数は 10^{-3} (1/day) から 10^{-2} (1/day) で、一般的に還元的な飽和帯水層中で観測される脱窒反応の反応速度係数とほぼ同じオーダーであった。このことは不飽和帯でも飽和帯と同等の濃度低下が生じていることを示す。この濃度低下は主に上層では植物による吸収、地下水面付近では脱窒、および希釈によるものであると考えられる。分散長は浸透距離に比し大きな値で0.3mから1m程度であった。すなわち不飽和帯では飽和帯に見られる分散より非常に大きな分散が生じている。本最適化で用いた①式は理想的な均質媒体を仮定しているが、実際の土壌中にはミミズなどによるマクロポアが多数あり、そこを通過して浸透する土壤水がより大きな硝酸態窒素の拡散に寄与している可能性が高い。

5. 結論

オンタリオ州南部の典型的な農業地域に位置し、高濃度の硝酸態窒素を有する小河川近辺で硝酸態窒素の分布および、河川への土壤水と地下水の出入りを調査した。調査結果は次のようにまとめることができる。

- ① 本河川では上流3分の1の区間のみで地下水が河川に流入しており、その地下水にスポット的に存在する高濃度の硝酸態窒素が河川水中硝酸態窒素の負荷源の一つになっている。しかし、この地下水のみでは河川水中で観測された

高濃度を形成することは不可能なため、地下水以外の負荷源の存在が示唆された。

- ② 調査した中ではとうもろこし畑と大麦畑下で高濃度の硝酸態窒素が不飽和帯中通過し地下水面に到達していたことからこれらの作物畑が地下水への主要な硝酸態窒素の負荷源となっていることがわかった。畑地では農作物の栽培期間を通じて常に地表面近くで最大濃度、深さとともに濃度が低下するプロファイルを持つことがわかった。この深さによる濃度低下は $\text{NO}_3\text{-N/Cl}$ 比と根の分布より上層では希釈ではなく主に植物の吸収、地下水面に近い下層では脱窒および希釈によるものと推定された。プロファイルフィッティングより、この脱窒反応の反応速度係数は一般的な飽和帯水層で観測される値と同程度であり、酸化的环境と推定される不飽和帯においてもかなりの脱窒反応によると考えられる濃度低下がおきていることが明らかになった。タイルから河川への排水は恒常的にはないが、不飽和帯では上層ほど高濃度となっており、また、緩衝帯中の土壤水も地下水面まで河川水と同じ 10mg/l 前後の硝酸態窒素を含むことからタイルなどを通じて不飽和帯から河川へ直接土壤水の流入があるときにはこれが河川への主な負荷源となる可能性が高い。
- ③ 地表面からの窒素負荷が少ない林地や大豆畑下の地下水は不飽和帯の土壤水より高い硝酸態窒素濃度を有しており、地下水は近隣から溶脱した硝酸態窒素を林地や大豆畑の下を横切って河川へ向かい側方へ運んでいる。
- ④ パラメータの最適化により得られた年平均浸透速度は $1\sim 2\text{ m}$ 前後で、分散長は $0.3\sim 1\text{ m}$ と共に大きく、これらのすばやい浸透と大きな拡散は不飽和帯におけるマクロポア流などバイパスの流れの影響を示すものと考えられる。

河川周囲の硝酸態窒素分布を調査した結果、河川下の地下水はスポット的に濃度の高い地点があるが、その他は比較的低い濃度を有し河川へ流出する地下水のみでは河川中の高い濃度を説明できない。緩衝帯にあたる河川わきの土壤水の硝酸態窒素濃度は河川濃度とほとんど同じであった。周囲の畑地の不飽和帯では上層の濃度は非常に高く、深度とともに濃度は脱窒と植物の吸収により低下する。不飽和帯上層の硝酸態窒素濃度は河川のその数倍であることから畑地の土壌水が直接河川に流出すれば河川の濃度が説明できる。河道内、

タイルおよび不飽和帯内ではみみずによると思われるマクロポアが多数確認されている。これらは濃度低下が観測された不飽和浸透や地下水流出をバイパスして不飽和帯中の高濃度の硝酸態窒素を直接河川に流出させる経路となりうる。本試験地内では不飽和帯の硝酸態窒素以外に河川への高濃度の負荷源がみあたらないことから、これらの経路を通して河川へ流出した水が河川の高い硝酸態窒素濃度を形成している可能性が高いことが示された。

参考文献

- 環境省 (2001) : 平成13年度地下水質測定結果 (概況調査)
- 杉田文・岡田亮介・崔榮恩・下平勇毅・蕪木佐衣子・野村佳範 (2000) : 茶園における硝酸態窒素の浸透特性65-76
- 高橋浩一郎 (1979) : 月平均気温・月降水量より蒸発散量を推定する式. 天気. 26, 29-32.
- Barnett, P. J., W. R. Cowan and A. P. Henry (1991): Quaternary geology of Ontario, southern sheet; Ontario Geological Survey, Map 2556, scale 1:1,000,000.
- Cabrera F. J. (2000): Nitrate attenuation in a first-order stream and associated riparian zone in an agricultural watershed in southern Ontario., M. Sc. thesis, University of Waterloo.
- Cey E. E., D. L. Rudolph, G. W. Parkin and R. Aravena (1998): Quantifying groundwater discharge to a small perennial stream in southern Ontario, Canada, *Journal of Hydrology*, 210:21-37.
- Chapman, L. J. and Putnum, D. F. (1984): The physiography of southern Ontario. Pp.270
- House, A. (2000): Examination of the role of macropores and subsurface drainage in the delivery of NO₃-N to a small first order agricultural stream in southern Ontario. M. ES thesis, Wilfrid Laurier University.
- Jacobs, T. C. and J. W. Gilliam (1985): Riparian losses of nitrate from agricultural drainage waters. *J. Environ. Qual.*, 14:472-478.
- Karrow, P. F. (1974): Till stratigraphy in parts of south-western Ontario. *Geological society of America Bulletin*, 85:761-768.
- Lawrence R. (1996): The potential role of riparian forests as buffer zones. In: N. Haycock, T. Burt, K. Goulding and G. Pinary (eds). *Buffer Zones: Their Processes and Potential in Water Protection*. Harpenden, UK: Quest Environmental. pp128-133.
- Lawrence, R. R. L. Todd, J. Fall Jr., O. Hendrikson Jr., R. Leonard and L. Asmussen (1984): Riparian forests as nutrient filters in agricultural watersheds. *Bioscience*, 34:373-377.
- Toride, N., F. J. Leih and M. Th. van Genuchten (1995): The CXTFIT Code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer experiments, version 2.0. Research Report No. 137. U. S. Salinity Laboratory, Riverside CA.