

11. 茶園における硝酸態窒素の浸透特性

杉田 文 (千葉商科大学)

岡田亮介・崔 榮恩・下平勇毅・蕪木佐衣子・

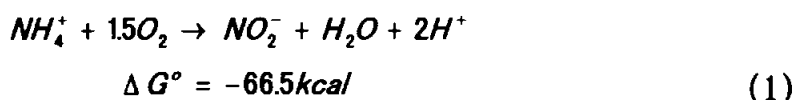
野村佳範 (筑波大学環境科学研究科)

11.1 はじめに

農業活動に伴う硝酸態窒素(NO_3^- -N)による地下水汚染がわが国を含む多くの国で問題となっている。埼玉県による調査 (農水省計画部資源課農村環境保全室、1991) では、地下水の硝酸態窒素濃度は水田地帯では軽微(0.3-1.7mg/L)であるが、畑地では増大(10.9-17.2mg/L)し、特に茶園地帯では極めて高い(23.8mg/L)と報告されている(坂本、2000)。わが国では主に窒素肥料としてアンモニア態窒素(NH_4^+ -N)が施用されている。地表に散布されたアンモニア態窒素は地中においてさまざまな形態に変化するが、その一部が硝酸態窒素となり土壌水と共に浸透して地下水に到達して高濃度の硝酸性窒素による広域汚染がひきおこされていると考えられる。しかし、実際にどのような物理的・化学的経路をたどってどの程度の量の窒素が地下水へ溶脱しているか評価することは、その複雑な過程のため容易ではない。地中における窒素の挙動に関する多くの研究は地表面下 1m 程度までの溶脱 (小川、1995 ; Ragab, *et al.*, 1996 など)、あるいは地下水中における脱窒過程(Korom, 1992 など)に注目しており、二者の中間にあたる地表面下 1m 程度から地下水への輸送過程を吟味したものはあまり多くはない。高濃度の硝酸汚染が報告されている畑地地帯の地下水位が地表面下 1m 以深であることがわが国では少なくない。そこで、本研究では農業的土地利用による施肥期間が長く、また地下水位が低いために浸透距離が長い埼玉県入間市地域の茶園と、比較のため過去に農業利用の記録がない隣接する神社(林地)で観測された土壌中における窒素のプロファイルから解析解をもちいた硝酸態窒素輸送パラメータの推定をおこなった。推定されたパラメータから地表-地下水位間の硝酸態窒素の挙動を評価することを試みた。

11.2 地中における窒素の挙動と支配方程式

主に肥料として地表面にまかれたアンモニア態窒素の多くは気化して空中に戻ったり、粘土鉱物等に吸着されたり、あるいは植物に吸収されたりして土壌中から失われる。そして、その一部が微生物による以下の二段階反応を経て硝酸となることが知られている (Evangelou, 1998)。



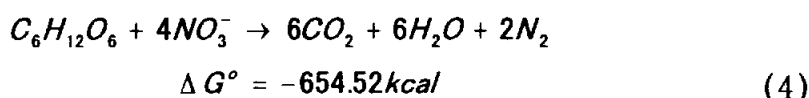
この二段階反応は G° の和が-84kcal であることからエネルギー的におこりやすい反応であることがわかる。また、多くの場合、反応(2)が反応(1)に比して早いので垂

硝酸態窒素が地中に蓄積することは稀でほとんどが硝酸態窒素の形になることが知られている。この硝化過程(1)(2)は総合して次に示す一次の反応式で表すことができるといわれている(Evangelou, 1998)。

$$\gamma(x) = k(NH_4^+(x)) \quad (3)$$

ここで、 (NH_4^+) はアンモニア態窒素の濃度(M/L³)、 k は硝化を表す一次反応係数(1/T)、 x は距離(L)である。

一方、上の硝化過程により生成された硝酸態窒素は陰イオンであることから吸着されにくく、土壤中を水と共に容易に移動することができる。したがって植物に吸収されなかった硝酸態窒素は土壤中を土壌水と共に降下していく。ただし、降下の途中で酸素が無く、かつ溶存有機炭素のある環境に硝酸態窒素が出会うと、微生物が介する脱窒反応により窒素ガスに還元され、空気中にもどる。たとえば以下のような反応である。



G° の値からこの反応もエネルギー的に起りやすい反応であることがわかる。この反応は一般的にゼロ次か一次の反応式で表現される(Kinzelbach, 1991)が、多くの種類の土壤中で一次反応式が適当である場合が多い(Evangelou, 1998)と報告されている。

以上ゼロ次反応による生成(硝化)および一次反応による分解(脱窒)を伴う、均質媒体中における一次元定常流による硝酸態窒素の移動は次式であらわすことができる。

$$\frac{\partial(NO_3^-)}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2(NO_3^-)}{\partial x^2} - v \frac{\partial(NO_3^-)}{\partial x} - k_1(NO_3^-) + \gamma(x) \quad (5)$$

ここで (NO_3^-) は硝酸態窒素濃度(M/L³)、 t は時間(T)、 D_1 は硝酸態窒素の分散係数(L²/T)、 v は流速(L/T)、 k_1 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/L³/T)を表す。ここで $\gamma(x)$ はアンモニア態窒素の一次反応により生成される硝化によるとすると(3)式となる。本研究が対象とする畑地や林地における不飽和帯では、植物を起源とする溶存有機炭素は豊富に存在することが推定される一方、酸素も豊富にあり脱窒がおこらない可能性もある。その場合この反応係数 k_1 はゼロとなる。

11.3 野外コアリングおよび輸送パラメータの測定

図2-1にしめした金子台の茶園(C地点)および林地(神社)(D地点)で地表面下20m深度までのボーリングコアからサブサンプルすることにより、各深度の土壌を得た。各深度の土壌は風乾ののち、2mmのふるいを全通させ、1:50の土壌:蒸留水の割合で土壌溶液の水抽出を行った。得られた抽出液は0.2μmのメンブランフィルターでろ過ののち、イオンクロマトグラフィーで NO_3^- の定量が行われた。各深度の含水量により土壌水濃度に換算された濃度プロファイルを図11-1に示す。本地点における地下水位は地表面下13m前後である。

農業的利用期間、すなわち施肥期間が長い茶園では地表面近くの硝酸態窒素濃度が非常に高く、100mg/Lに近い値をもつ。深度とともに濃度は減少するが、深度10.4mでも飲料水基準の10mg/Lを上回る値となっている。人工的な手が加えられていない

林地におけるプロファイルは地表面下 2 - 3m に 10mg/L 程度のピークをもち、それ以深では深度と共に濃度は減少する。

地表

面濃度に違いはあるが、どちらのプロファイルも深度とともに比較的スムーズな指数関数的な減衰曲線となっている。

地表面付近に高い硝酸態窒素濃度が得られたことから、アンモニア態窒素として施肥された窒素は地表面付近にて硝化されると推測された。そこで地表面下 1m 程度までの土壌を再度細かい深度間隔で採土し、同様の手順で土壌水の抽出をおこない、アンモニア態窒素濃度を測定した。地表面のアンモニア態窒素の濃度は茶園、神社ともに 40 - 60mg/L と高い値をもち、深度と共に急激に減少することが認められた (図 11-2 および図 11-3)。

地表面下 20cm および 100cm の土壌を用いてアンモニア態窒素の吸着実験を繰り返し吸着法 (和田、1981) により測定した。得られた等温吸着曲線を図 11-4 に示す。

どちらの土壌においてもほぼ線形の等温吸着曲線となっていることがわかる。深度 20cm に比して 100cm の土壌はより強く吸着する。

硝酸態窒素の吸着実験も

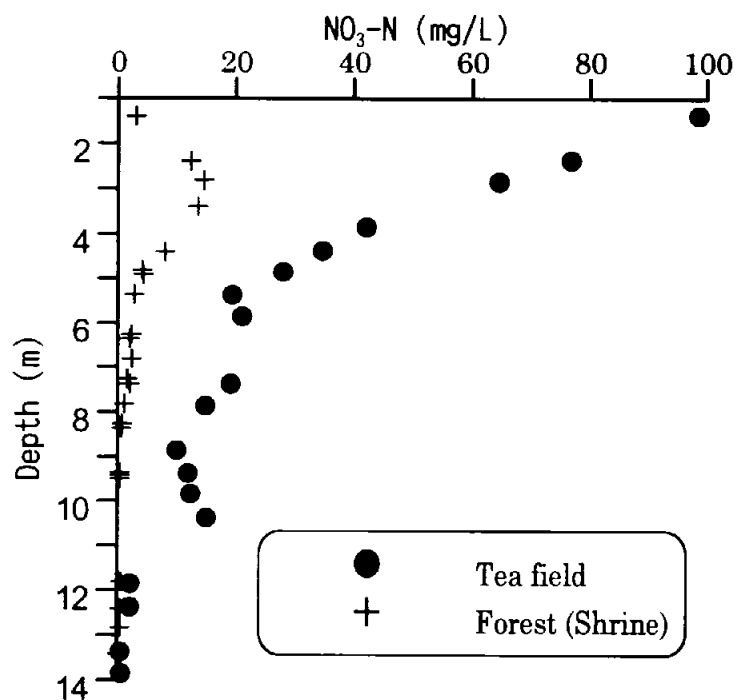


図 11-1 土壌水中の硝酸態窒素濃度プロファイル

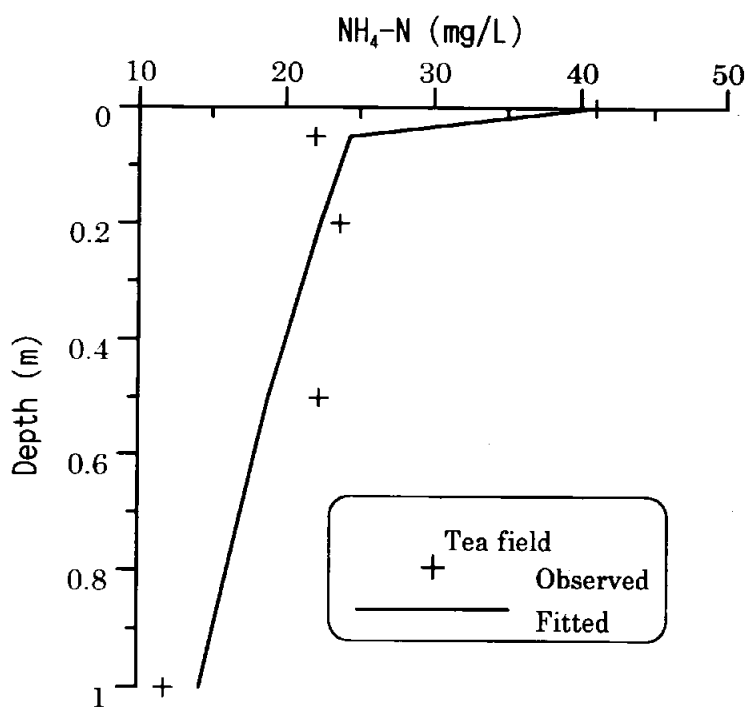


図 11-2 茶園の地表面付近におけるアンモニア態窒素濃度と解析解

おこなったが、硝酸態窒素は現場におけるイオン強度下ではほとんど土壤に吸着されないことがわかった。したがって、ロームへの陰イオンの吸着がしばしば報告されているが、本研究では硝酸態窒素の吸着は無視できるとした。

入間市付近における降水量は過去 30 年の平均が 1450mm、月平均気温を利用して推定された年間蒸発量（高橋、1979）を差し引くと年間浸透量は 843mm となる。茶園の土壤で測定された野外圃場容水量は 0.5661 から 0.6301 の値をとり、これらから年間浸透速度はおよそ 1.4m/年前後となることが推定された。ただし 1998 年は年間降水量 1893.5mm、同様に推定された年間浸透量は 1250mm であった。

11-4. 解析解によるパラメータの推定

1) 解析解

硝酸態窒素の移動をあらわす(5)式は移流、分散、1 次反応による減衰、0 次反応による生成を考慮した一般的な移流分散方程式の形を呈しており、さまざまな初期条件と境界条件におけるこの式の解析解が導かれている。むろん多くの数値モデルも存在する。解析解が成り立つためには、空間的に均質な媒体であること、

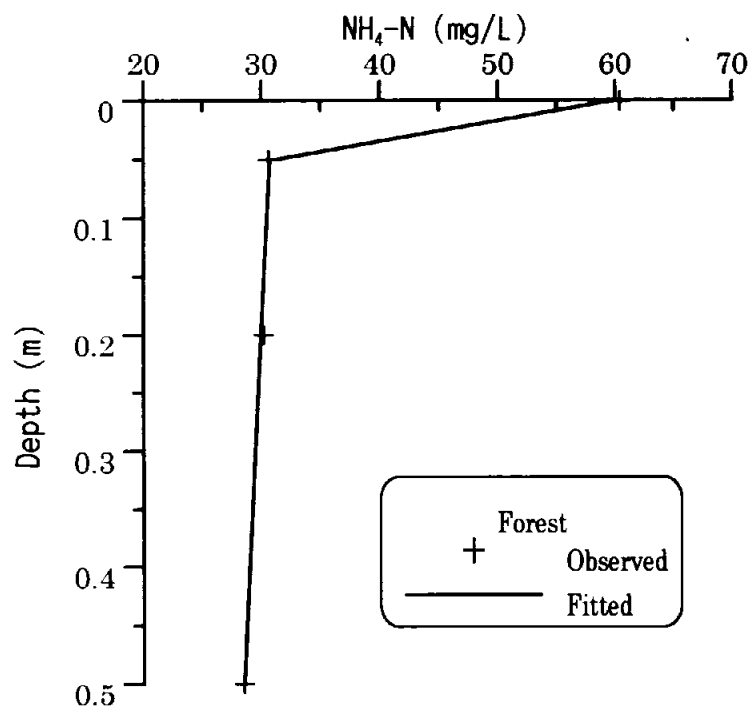


図 11-3 林地の地表面付近におけるアンモニア態窒素濃度と解析解

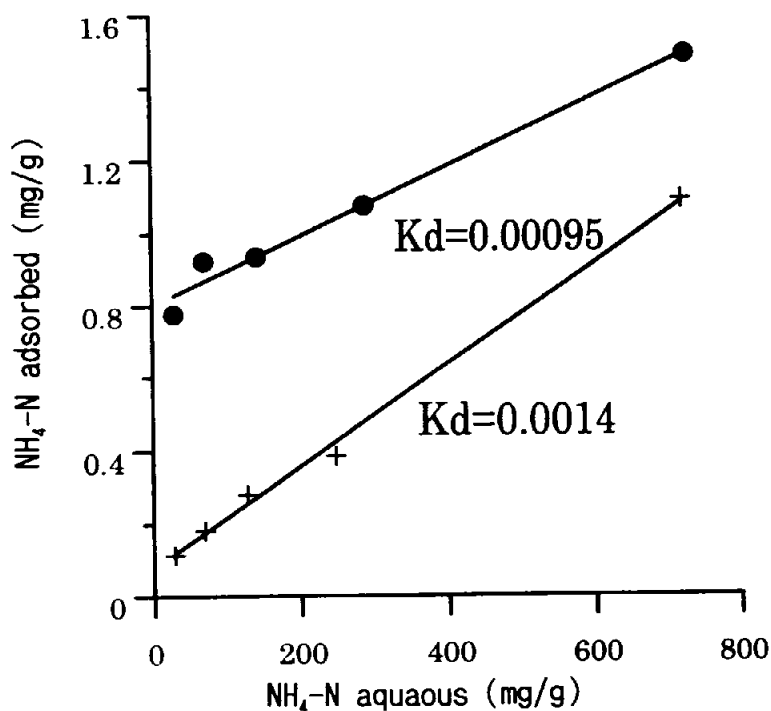


図 11-4 アンモニア態窒素の等温吸着曲線

土壌水流速が時空間的に一定であること等温吸着曲線が線形であるという条件が満たされる必要がある。実際の土壌試料から硝酸態窒素の吸着は考慮する必要がなく、またアンモニア態窒素では線形の等温吸着曲線は得られたが、土壌自体は不均質であり、さらに土壌水流速が一定でないことは明らかである。しかし、本研究では野外データが限られていて地中の不均質性等に関する情報が得られていないこと、14m深度までの浸透時間が少なくとも10年程度と推定され非常に長い時間スケールを対象としているために細かい水分変化を考慮する必要がない可能性が高いこと、さらに本研究の目的である物理化学過程をあらわすパラメータの詳細な吟味には解析解がより有用であるという3つの理由により解析解をもちいることとした。

観測された濃度プロファイル (図 11-1) は美しい指数関数的な減衰曲線の形を呈していて特異なピークは認められない。したがって、土壌中では地表面における施肥や季節によるインプットの変化の影響は緩和されほぼ定常状態となっていることが推定された。そこで、本研究では初期土壌中濃度をゼロとし、20年以上たってほぼ土壌中濃度分布が定常となったときのプロファイルを野外観測データと比較検討することとした。また、地表面上部境界は第3タイプとした。一様ゼロ初期条件、第3タイプ上部境界および γ を深度に対して n 段の階段関数とする場合の(5)式の解析解は Toride *et al.* (1995)によると以下のように表せる (一部の変数を原文から変更してある)。

$$\begin{aligned}
C(Z, T) = & C_o \left\{ \frac{1}{1+u} \exp\left[-\frac{P(1-u)Z}{2}\right] \operatorname{erfc}\left(\frac{RZ-uT}{\sqrt{4RT/P}}\right) \right. \\
& + \frac{1}{1-u} \exp\left[\frac{P(1+u)Z}{2}\right] \operatorname{erfc}\left(\frac{RZ+uT}{\sqrt{4RT/P}}\right) \\
& - \frac{2}{1-u^2} \exp\left[PZ + \frac{P(1-u^2)T}{4R}\right] \operatorname{erfc}\left(\frac{RZ+T}{\sqrt{4RT/P}}\right) \Big\} \\
& + \int_0^T \left(\sum_{i=1}^n (\gamma_i E_i - \gamma_{i-1} E_{i-1}) \exp\left(-\frac{\mu E_i \tau}{R}\right) \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left[\frac{R(Z-Z_i)-\tau}{\sqrt{4R\tau/P}}\right]\right] \right. \\
& - \sqrt{\frac{P\tau}{\pi R}} \exp\left[PZ - \frac{P(R(Z+Z_i)+\tau)^2}{4RT}\right] \\
& \left. + \frac{1}{2} \left[1 + P(Z+Z_i) + \frac{P\tau}{R}\right] \exp(PZ) \operatorname{erfc}\left[\frac{R(Z+Z_i)+\tau}{\sqrt{4R\tau/P}}\right] \right) d\tau \\
& (i = 1, 2, \dots, n; \gamma_o = 0)
\end{aligned} \tag{6}$$

ここで $R, T, Z, P, C, \mu E, \gamma E$ は以下の無次元下されたパラメータである。

$$\begin{aligned}
R = 1 \quad T = \frac{vt}{L} \quad Z = \frac{x}{L} \quad P = \frac{vL}{D_1} \quad C = \frac{c}{c_o} \\
\mu^E = \frac{Lk_1}{v} \quad \gamma_i^E = \frac{L\gamma_i}{vc_o}
\end{aligned} \tag{7}$$

ただし c は濃度 (M/L^3), L (L), c_0 (M/L^3) はある代表的な距離と濃度である。
また u は

$$u = \sqrt{1 + \frac{4\mu^E}{P}} \quad (8)$$

である。また C_0 は c_0 により無次元化された上部境界濃度である。

2) 入力輸送パラメータ

US salinity laboratory のフリーソフトウェア、CXTFIT (Toride, 1995) を用いて (6) 式を野外で観測された硝酸態窒素プロファイルにパラメータを最適化しながらフィットすることによって未知パラメータの推定をおこった。硝酸の輸送を表すために必要なパラメータは v 、 D_1 、 k_1 、 γ と c_0 である。この中で間隙流速 v 、分散係数 D_1 と一次反応係数 k_1 を未知パラメータとした。 D_1 と k_1 は土壌試料などから情報が得られていない未知のパラメータである。また v は近辺の気象データからおよそ 1.4m/年程度と推定されたが確実な値はやはり未知である。ただしここで、 D_1 と v を共にフィットしようとする無次元パラメータ P において明らかなように D_1 と v がお互いに連動しあって、ベストフィットパラメータが定まらない可能性が高い。そこで v の推定ではおよそ年間浸透速度 50cm から 5m にあたる 0.0015m/day から 0.015m/day の範囲という条件下で最適化をおこなった。50cm はおよそ通常の 2 倍の蒸発がおこった場合の浸透速度、5m はまったく蒸発が起らなかった場合の 2 倍の浸透速度にあたる。 c_0 は地表面で実際に測定された濃度 (茶園で 179mg/L, 林地で 176mg/L) とした。

γ は硝化過程が地表面で行われているとみなせる場合は全層でゼロである。硝化過程が地中で行われていることを考慮するにあいには (3) 式により、アンモニア態窒素濃度と反応係数からその値を求めなければならない。アンモニア態窒素プロファイルでは茶園、林地ともに急激な濃度減少が地表面に近い 0cm - 5cm 間でのみにみられた (図 11-2、図 11-3) ことから、 γ を考慮しなくてもよい可能性もある。しかしまず、 γ を次に示す方法で推定した値として計算をおこなった。

(3) 式における硝化反応の係数 γ は地中におけるアンモニア態窒素濃度のプロファイルを用いて以下のアンモニア態窒素の輸送をあらわす移流分散方程式の解と比較して k をもとめることにより推定することができる。

$$R_2 \frac{\partial (NH_4^+)}{\partial t} = D_2 \frac{\partial^2 (NH_4^+)}{\partial x^2} - v \frac{\partial (NH_4^+)}{\partial x} - k (NH_4^+) \quad (9)$$

ここで R_2 はアンモニアの吸着による遅延係数 (-)、 D_2 はアンモニア態窒素の分散係数 (L^2/T) である。ここではすでに気化や植物による吸収帯を通過して土壌中に入ったアンモニア態窒素に注目しており、アンモニア態窒素は吸着および一次反応式で表される硝化過程のみにより地中から失われると仮定している。(9) 式は (5) 式とほぼ同じ形をしているので $\gamma = 0$ として、同じ解析解 (6) を利用することができる。そこで 100cm 土壌から得られた K_d の値を代表的なアンモニア態窒素の分配係数として、土壌から得られた仮比重 ρ_b ($=0.72g/cm^3$)、間隙率 n ($=0.69$) から以下の式により R_2 を求めた。

$$R_2 = 1 + K_d \frac{\rho_b}{n} \quad (10)$$

茶園で得られたアンモニア態窒素のプロファイルに対してパラメータ k の他に D_2 と v の最適化をおこなった。ただし、 v は年間浸透量から推定された 0.0032m/day を初期値として 0.0015m/day から 0.015m/day の範囲内という条件をつけた。ここで、正確には(9)式は(3)式を通して(5)式と関連しておりこれらを同時に解かなければならない。しかし、ここでは硝酸態窒素のデータが 1.37m-14m であるのに対し、アンモニア態窒素のデータが 1m 深度まで、林地では 50 cm 深度までの数深度しかないこと、 v の変化に伴う k の変化が小さいことがわかったため完全なカップリングを行わなかった。得られたベストフィット曲線の k の値は茶園で 0.0044(1/day)、 v は 0.0048m/day であった。林地のアンモニア態窒素のプロファイルは 50 cm までと短く、測定点もより少ないため、 v を未知パラメータとするとベストフィットパラメータを得ることができなかった。そこで林地の v を仮に茶園の v と等しいとして k を求めたところ 0.0015(1/day) であった。茶園および林地で測定されたプロファイルとフィットしたプロファイルを図 11-2 および図 11-3 に示す。

これらのアンモニア濃度と反応係数から算定された茶園および神社における硝酸生成値を図 11-5 および図 11-6 に示す。地中における硝化を考慮した硝酸態窒素プロファイル計算においては連続関数として硝酸生成を入力する必要があるのではり図 11-5 および図 11-6 に示したステップ関数として硝酸態窒素の生成(γ)として入力した。以上のように本研究に用いた γ の値はオーダー程度の非常に大ざっぱな推定にすぎない。しかし、これらを考慮した場合を $\gamma=0$ とした場合と比較することにより、地中における硝化を考慮することが他のパラメータの推定におよぼす影響を明らかにすることができる。

そしてそれは今後の硝酸態窒素輸送のパラメータ推定において地中における硝化を考慮する必要があるか示唆すると考えられる。

3) 輸送パラメータの推定

以上の入力パラメータを用いて CXTFIT ((6)式)により硝酸態窒素の輸送パラメータ (v 、 D_1 、 k_1) の最適化をおこなった。予想されたように v と D_1 が互いに連動して測定プロファイルへの同様によりフィットを示すパラメータセットが複数存在することがわかった。CXTFIT はベストフィットパラメータと共にそのパラメータセットによる解析解と測定値のフィ

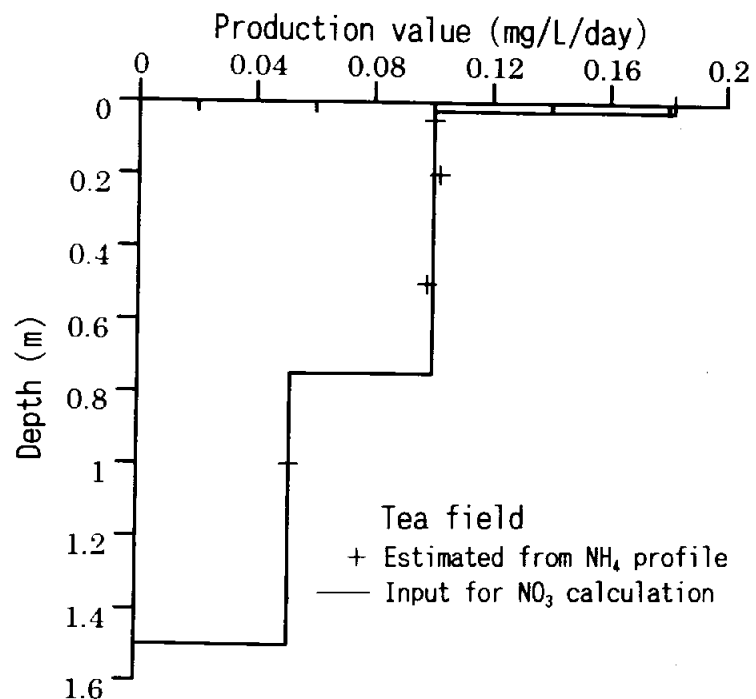


図 11-5 茶園の地表面付近において推定される硝酸態窒素の生成

ットの良さを示す次式であらわされる r^2 を算出する。

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$$

ここで O は観測値、 \bar{O} のバーは O の平均値、 f はベストフィットパラメータをもちいた解析解より得られた値である。

r^2 の値が茶園では 0.98 以上、神社では 0.94 以上が得られた最適パラメータの範囲を表 11-1 に示す。また得られたプロファイルの例を図 11-7 と図 11-8 に示す。最適化されたパラメータを用いた解析解は、茶園の方では 14m 深度まで観測されたプロファイルによく一致している。また、神社でも解析解と観測値はよく一致しているといえる。測定値と解析解のおおむね良い一致が得られたことから、これらの解析解に用いられたパラメータで、本地域における硝酸態窒素の輸送を表現できると考えられる。

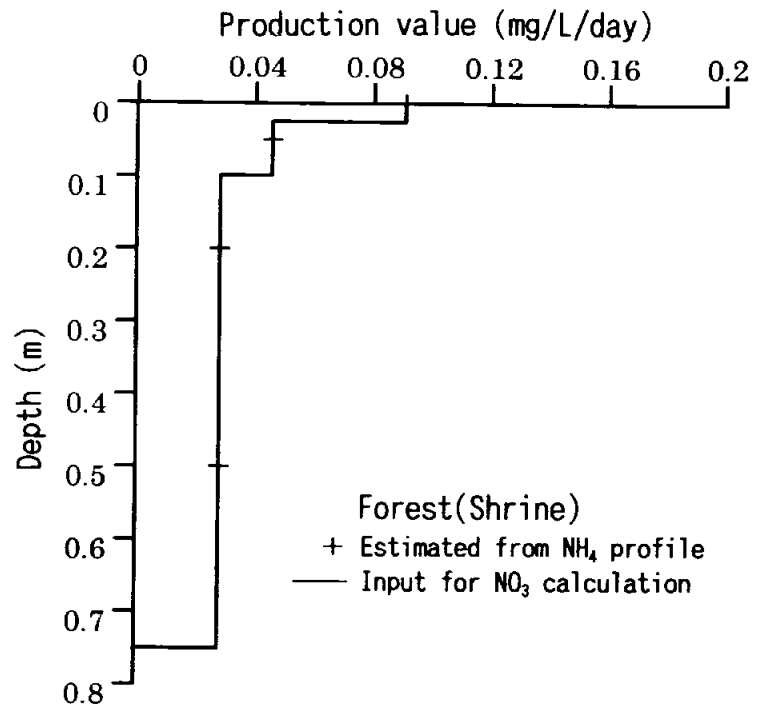


図 11-6 林地の地表面付近において推定される硝酸態窒素の生成

表 11-1 最適パラメータ

	v (m/day)	D_1 (m ² /day)	k_1 (1/day)	D_1/v (m)
茶園	0.0036-0.0064	0.0042-0.0056	0.0016-0.0026	0.87-1.17
神社	0.0015-0.0074	0.001-0.01	0.0023-0.0042	0.14-6.7

表 11-1 において間隙流速が表に示した範囲を外れるとわずかではあるが r^2 の値が下がった。茶園で得られた間隙流速は年間浸透速度に換算するとおよそ 1.3m/年か

ら2.3m/年となり、気象データから推定された1.4m/年とほぼ同様の値となった。 v と D_1 の比は1m前後を示した。この比は分子拡散を無視できるとすると分散定数となる。一般イオンの自由水中の分子拡散係数は 10^{-4} から $10^{-5}\text{m}^2/\text{day}$ 程度となり、本研究で対象としている土壌層は多孔体であることから水分の連続性が低い場合に分子拡散が強く制限されることが予測される。したがって本条件下では分子拡散は無視することができると推定される。得られた比1mは室内カラム実験で一般的に報告されている分散定数0.01-1cmと野外実験で報告されている10-100m (Bobba and Singh, 1995) のほぼ中間の値である。全体のスケールが14mであることから、分散定数とみなしても妥当な値である。

茶園における分解の一次反応係数 k_1 は0.0016-0.0026(1/day)となり、いくつかの文献で報告されている砂層飽和帯水層中における脱窒反応の係数 (Korom, 1992) と同じオーダーであることがわかった。したがって、不飽和帯においてもかなり強い脱窒反応がおきていることが示唆される。不飽和下では脱窒が起こる条件の一つである酸素

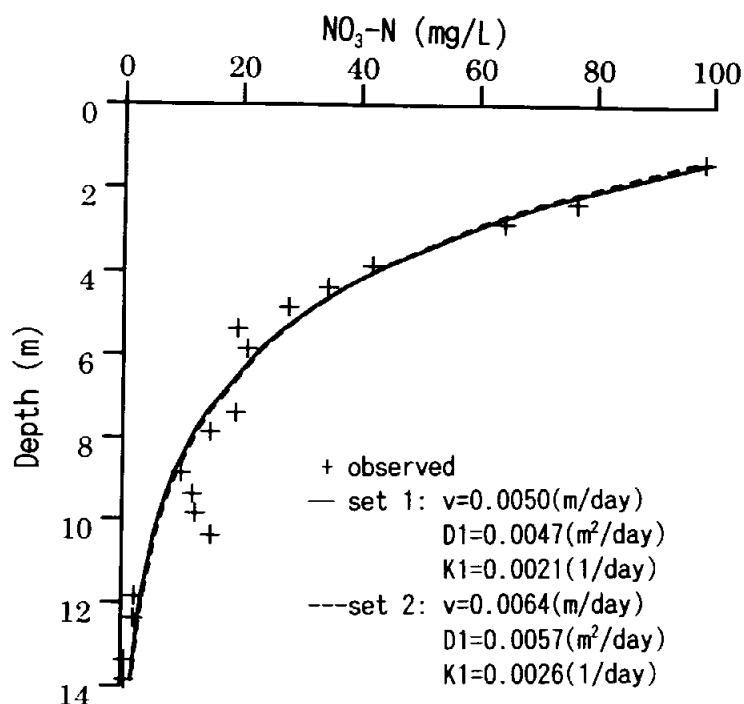


図 11-7 茶園における硝酸態窒素濃度プロファイルと解析解

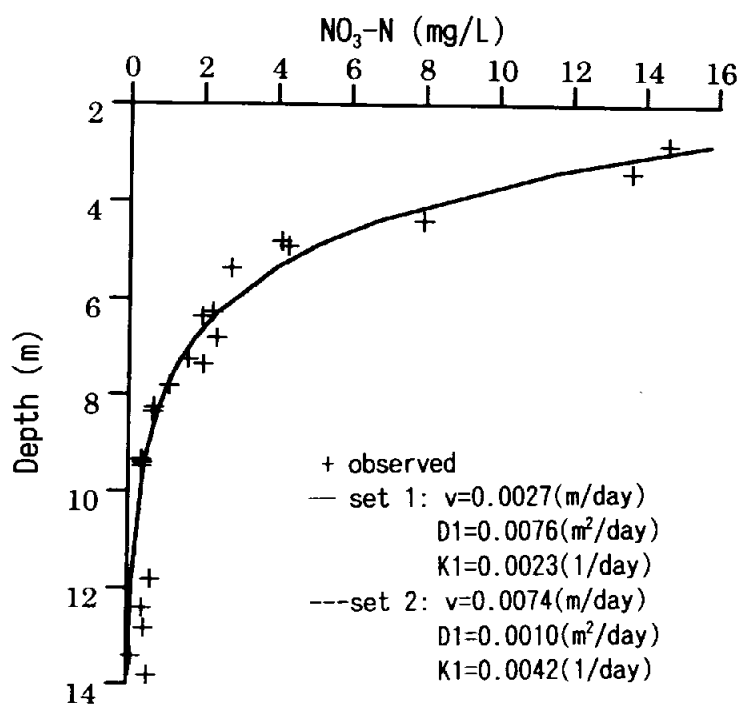


図 11-8 林地における硝酸態窒素濃度プロファイルと解析解

の枯渇がおきているか疑問であるが、植物の根による吸収の影響を受けない深度における硝酸態窒素の消失は脱窒反応以外には考えにくい。また、本地域がローム層であるため圃場含水量条件下でも体積含水率が高く (56.6–63.0%)、部分的に酸素が枯渇している所があり、そこを水が浸透中に通過して脱窒がおこっていると考えられる。

林地におけるプロファイルから得られた最適パラメータ v は 0.5m から 2.7m との範囲となり D_f とともに茶園で得られた範囲を含む広い範囲となっている。これは測定されたプロファイルの濃度変化が小さいためにパラメータがより広い範囲でしか定まらなかったためで、これらのパラメータの信頼性はあまり高くないと考えられる。一方 k_f の値は比較的狭い範囲で得られ、茶園に比し 2 倍程度の値となった。通気性の良くない林地の地表面下ではより強い脱窒がおこりうる環境になっているといえる。ただし、 k_f は反応係数であるので硝酸態窒素濃度が低い林地下では脱窒される窒素量も少ない。

アンモニア態窒素のプロファイルより硝化が非常に地表面に近いところでおきていることが推定された。そこで、アンモニア態窒素のプロファイルを得る必要があったか吟味するために、地中における硝化を考慮せず硝酸態窒素が全て地表面から供給されると仮定して同様のフィッティングをおこなった。茶園で r^2 が 0.98 以上となったのは $v=0.0026(\text{m/day})$ 、 $D_f=0.097(\text{m}^2/\text{day})$ 、 $k_f=0.078(1/\text{day})$ の場合だけであった。これらのパラメータから算出される D_f/v は 37.3m となり、全体のスケールが 20m であることからこれらのパラメータはよいフィットを示したが非常にエラティックである。一方、林地のプロファイルでは $v=0.0015 - 0.002(\text{m/day})$ 、 $D_f=0.0040 - 0.0053(\text{m}^2/\text{day})$ 、 $k_f=0.0026 - 0.0020(1/\text{day})$ となり、これらによる D_f/v 比は 2.65 - 2.69 であった。これらのパラメータは地中における硝化を考慮した場合に得られたパラメータの範囲内に入る。

これは林地においては硝化が 10cm 以浅で集中的におきている(図 11-6)のに対し、茶園では 1m 深度まで硝化がおきている(図 11-7)ためと考えらる。これらから、地表面を耕す畑地等では地中における硝化を考慮すること必要である可能性が高いことが示唆された。

本プロファイルが得られた地域の地下水位は 13m 前後である。地下水位が 12m-14m の硝酸態窒素の地下水への流入濃度は茶園で 2.1mg/L-3.5mg/L、林地では 0.037mg/L-0.11mg/L と推定される。濃度が深度とともに指数関数的に減少するため、地下水位が高くなると硝酸態窒素の地下水への流入量も指数関数的に増大することになる。地下水位が 8.6m に上がると流出濃度は飲料水基準である 10mg/L となり、6.3m では埼玉県調査による茶園下の地下水の平均値に近い 20mg/L となる。

次に茶園における現在の硝酸態窒素濃度プロファイルを近似した指数関数を初期条件として、現在の輸送パラメータが時間に関して一定であると仮定し、現在の施肥量による硝酸の地中への溶脱が維持された場合と施肥の工夫等により溶脱を半分に減らせた場合の地中濃度分布の時間変化を CXTFIT を用いて計算した。本条件下における解析解は(6)式にさらにいくつか項を加えた形になっており、van Genuchten and Alves(1982)に詳しい。結果を図 11-9 に示す。現在の溶脱量が維持された場合、20 年たっても現在と同じプロファイルを呈する。一方、溶脱量を半減させた場合 1 年後にはまだ変化が見られないが、10 年後には飲料水基準である 10mg/L 以下となるのが現在 8m 深度であるのに対し、6m 深度に上がることが推定された。

11.5 まとめ

埼玉県入間市地域における茶園と林地で得られた硝酸態窒素のプロファイルを解析解と比較することにより、硝酸態窒素の不飽和帯における輸送パラメータの推定を行った。推定されたパラメータは表1に示した通りであるが、そのほか以下の結論を得た。

① 長い時間スケールを対象とする不飽和帯における硝酸態窒素の移動のモデルとして解析解は有用である。

② 茶園、林地ともに不飽和帯であるにもかかわらず砂層飽和帯と同程度の脱窒反応が起きていると推定される。

③ 茶園におけるパラメータの推定においては地中における硝化過程を考慮することが必要である。

④ 推定された v と D_1 の信頼性は高くないが、茶園では両者の比がつねに1m前後となり、分散定数が1m前後であると推定される。

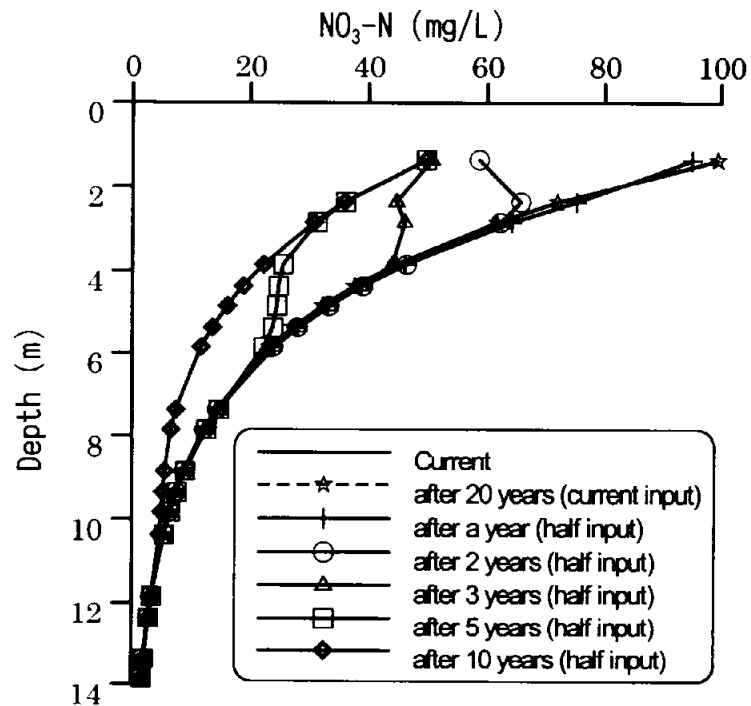


図 11-9 地表面における現在の硝酸態窒素入力が増加した場合と半減された場合のプロファイルの経時変化

上の結果②は不飽和帯も地中における硝酸性窒素の消失に重要な役割をしていることを示し、地下水位を低く保てば地下水への硝酸態窒素の溶脱を防ぐことができる可能性を示唆するものである。③は本研究では野外データが少ないために大ざっぱな推定値を入力するにとどまったが、畑地におけるパラメータ推定では硝化過程を硝酸態窒素の移動式にカップリングする必要があることを示す。

本研究の結果は14m深の2本のプロファイルのみに基づいており、空間的代表性がどの程度あるのか不明である。硝酸態窒素による地下水汚染は面源による広域汚染という状況を呈しており、今後、広い範囲で地中における硝酸態およびアンモニア態窒素濃度分布データを収集し、空間的に広い地域を代表するパラメータを得ることがより実用的なモデルの構築のためには必要である。

文献

小川吉雄(1995):「水環境」、庄子貞雄編「新農法への挑戦—生産・資源・環境の調和—」、博友社、43-62。

坂本一憲(2000):「地中における微生物と化学」、地下水学会編「地下水水質の化学」、理工図書。

- 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(12), 759 - 762.
- 農水省計画部資源課農村環境保全室(1991):「農業用地下水の水質調査の概要」
- 和田光史(1991):「粘土の陰・陽イオン交換容量測定」, 粘土科学, 21(4), 160 - 163.
- Bobba, A.G. and V.P.Singh(1995):Groundwater contamination modeling. edited by V.P.Singh in "Environmental Hydrology", Kluwer Academic Publishers.
- Evangelou, V.P.(1998):Environmental soil and water chemistry. John Wiley & Sons, Inc. 564p.
- Korom, S.F.(1992):Natural Denitrification in the Saturated Zone:Review. Water Resources Research, 28(6), 1657-1668.
- Mohanty, B.P., R.S.Bowman, J.M.H. Hendrickx, J.Simunek and M.Th.van Genuchten(1998):Preferential transport of nitrate to a tile drain in an intermittent- flood-irrigated field : Model development and experimental evaluation. Water Resources Research, 34, 5, 1061-1076.
- Ragab, R. D.M.Cooper, G.L.Harris and J.A.Catt(1996):Simulating nitrate leaching under winter wheat grown on a structured clay soil considering bypass Flow, Journal of Hydrology, 182, 157-173.
- Toride, N., F.J.Leij 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, USDA, Riverside, CA.
- van Genuchten M.Th. and W.J.Alves(1982):Analytical solutions of the one-dimensional convective-dispersive solute transport equation. Tech. Bull. U.S.Dep.Agr., 1661.