

畑地における硝酸性窒素溶脱のモニタリングとモデル化

前田守弘（中央農業総合研究センター）

mun@affrc.go.jp

黒ボク土畑の圃場試験により、堆肥を連用すると窒素無機化量が徐々に増大し、数年後には化学肥料と同濃度の硝酸性窒素が溶脱して環境負荷が増大することを明らかにした。また、構造が発達した粘質土壌においては、不均一な浸透水流を数量化できる完全混合槽列改変モデルを構築し、窒素と重金属の溶脱パターンを解析した。さらに、圃場埋設型の溶脱量モニタリング手法を開発し、実態に合った溶脱量の計測を可能にした。

はじめに

農業生産活動と関連した硝酸性窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)による地下水汚染の広がりが懸念されている^{1),2)}。作物の施肥窒素利用率は平均で50%程度であるといわれており、作物に吸収されなかった余剰窒素は $\text{NO}_3\text{-N}$ として地下水などの水環境へ移行する可能性が高い。作物の生産を保証しながら $\text{NO}_3\text{-N}$ の溶脱を低減できる合理的な肥培管理技術を確立するためには、肥培管理や土壌・気象条件など $\text{NO}_3\text{-N}$ の溶脱に関する影響因子を適切に評価する必要がある。

本研究は、堆肥や化学肥料の施用および土壌構造が $\text{NO}_3\text{-N}$ の溶脱に与える影響を明らかにするとともに、圃場埋設型の $\text{NO}_3\text{-N}$ 溶脱量モニタリング手法を開発することを目的としたものであり、窒素溶脱量などのモニタリングを圃場レベルで実施し、その結果を数学モデルによって整理・解析した。

1. 堆肥および化成肥料を連用した黒ボク土畑における $\text{NO}_3\text{-N}$ の溶脱^{3),4)}

$\text{NO}_3\text{-N}$ の溶脱に関する研究は、1)施用された窒素が深層に到達するまでに長期間を要する、2)有機質資材や土壌中の有機態窒素は長時間をかけてゆっくりと無機化する、3)自然条件の影響を強く受けるなどの理由から、長期モニタリングに基づいた解析が求められる。そこで、淡色黒ボク土畑圃場(0.12 ha、茨城県谷和原村)に、速効性肥料区(1作あたり 200 kg N ha^{-1})、被覆尿素区(同 200 kg N ha^{-1})、豚ふん堆肥区(同 400 kg N ha^{-1} 、肥効率を50%と仮定)、無肥料区の4処理(7×8m)を2反復で設け、スイートコーン(5~8月)-ハクサイあるいはキャベツ(9~12月)を栽培して7年間の連用試験を行った。

堆肥の連用にともなって作土の全窒素含有量は増加し、6年間の連用後には無肥料区と比べて 2.5 g kg^{-1} 高い値であった。試験開始前および両区における連用後の全窒素と $\delta^{15}\text{N}$ 値を用いた収支計算によると、堆肥区における土壌由来窒素無機化量は無肥料区と同等であり、堆肥由来窒素の68%が作土に蓄積していることが推定された。

速効性肥料および被覆尿素を連用した場合、深度1mの土壌溶液中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は約1年半後に上昇しはじめ、その後は速効性肥料区で $40\sim 60\text{ mg L}^{-1}$ 、被覆尿素区で $30\sim 50\text{ mg L}^{-1}$ の高濃度で推移した(図1)。窒素・水収支モデル式による推定 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は両区とも実測値と一致し、作物に吸収されない窒素の大半は下層土へ溶脱することがわかった。また、被覆尿素区で作物による窒素吸収量が高いことが、両区の濃度差(約 10 mg L^{-1})に反映したと推測された。降水量の多い

年の翌年に土壌溶液中 NO₃-N 濃度が低下したが、土壌溶液の δ¹⁵N 値の変動は小さいことから、濃度低下の原因は脱窒ではなく、降雨による希釈効果と作物による窒素吸収量が年によって異なることに起因すると判断された。

一方、豚ふん堆肥連用区の深さ 1 m の土壌溶液中 NO₃-N 濃度は、最初の 3 年は無肥料区と同濃度であったが、4 年目以後徐々に上昇して 6 年目には化学肥料と同レベルに達した (図 1)。

これは、土壌中に蓄積した堆肥由来の有機態窒素の無機化量が連用とともに増大してくるためと考えられる。

以上のように、黒ボク土畑に化学肥料を連用すると、作物に吸収されない窒素は NO₃-N として翌年には溶脱した。また、短期間でみると堆肥由来窒素の溶脱量は小さいが、連用すると溶脱量が増加して地下水を汚染する危険があることを圃場レベルで明らかにした。

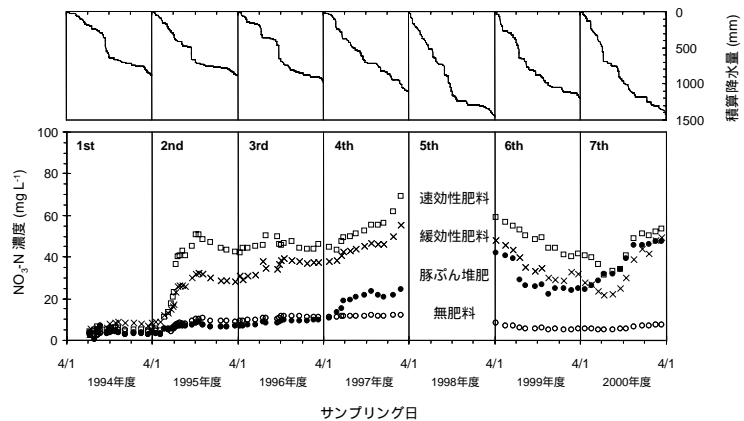
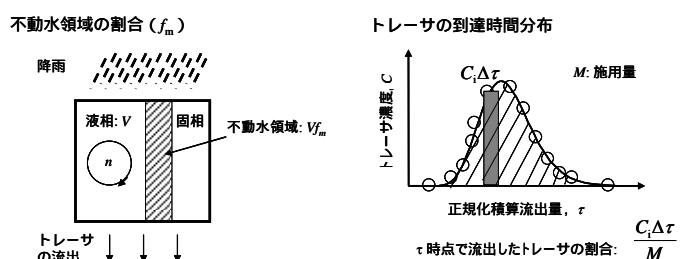


図 1 深さ 1 m 土壌溶液中 NO₃-N 濃度の推移と積算降水量

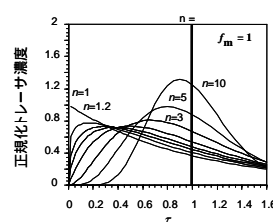
2. プレファレンシャルフローが硝酸性窒素および重金属の溶脱に及ぼす影響⁵⁾

構造の発達した土壌で生じる不均一な水・溶質移動 (プレファレンシャルフロー) が NO₃-N および重金属の溶脱に与える影響を調査・解析した。不攪乱土壌採取装置を用いて直径 30 cm 深さ 50 cm の粘質土壌を採取し、その地表面に窒素および堆肥中で濃度が高いとされる銅、亜鉛を施用 (N : 100 kg ha⁻¹、Zn : 100 kg ha⁻¹、Cu : 40 kg ha⁻¹) した。同時に、土壌中での水動態に関する情報を得るために非反応性トレーサとして 100 kg ha⁻¹ の Br を施用した。不攪乱土壌は地中に設置し、自然条件を含む 3 降雨条件下 (3 連) で、浸透水量と溶質濃度を約半年間調査した。

少量の降雨により、施用された Br の溶出が認められたことから、土壌中でのプレファレンシャルフローの存在が明らかとなった。ライシメータ下端までのトレーサ到達時間の分布はパラメータ n (仮想混合槽の数) と f_m (最大保水量に対する可動水領域の割合) からなる完全混合槽列改変モデルから導出した関数で表現することができた (図 2)。また、異なる降雨条件下でも 2 つのパラメータに差が認められなかったことから、分布関数の横軸として積算浸透水量を用いることが適切であることがわかった。



不均質な水の流れを完全混合層の数 (n) で評価



導出されたモデル式:

$$E(\tau) = \frac{CV}{M} = \frac{\left(\frac{n}{f_m}\right) \cdot \left(\frac{n}{f_m}\tau\right)^{n-1}}{\Gamma(n)} e^{-\frac{n}{f_m}\tau}$$

ただし、 Γ はガンマ関数

図 2 完全混合槽列改変モデルの概念

供試した粘質土壌ではプレファレンシャルフローにより、施用した窒素は $\text{NO}_3\text{-N}$ として高濃度で速やかに溶脱した。亜鉛の溶脱はプレファレンシャルフローにより増大したが、銅濃度の上昇は認められなかった。各施用処理区の平均濃度は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ で 15 mg L^{-1} 、Zn で 0.3 mg L^{-1} を超える高濃度となり、最高値はそれぞれ 44 mg L^{-1} と 1.4 mg L^{-1} に達した。

以上のように、プレファレンシャルフローは重金属と窒素の溶脱に大きな影響を及ぼすことがわかった。また、土壌表面に散布した非反応性のトレーサの目的深における濃度と積算浸透水量を情報として、土壌浸透水がマクロポアなどを通過する際に生じるプレファレンシャルフローを n と f_m の 2 つのパラメータで特徴づける完全混合槽列改変モデルを開発した。

3. 圃場埋設型の硝酸性窒素溶脱量モニタリング装置の開発^{6), 7), 8), 9)}

毛細管現象を利用したウイックサンプラーは、圃場での $\text{NO}_3\text{-N}$ 溶脱量のモニタリングに適した手法のひとつである。ウイックサンプラーの集水効率（サンプラーに集水された水と周辺の浸透水フラックスの比）は常に 100%になることが望ましいが、サンプラーの構造あるいは降雨強度と集水効率の関係は未解明であった。そこで、サンプラー円筒部の長さが異なる 3 種類のウイックサンプラーを黒ボク土に埋設し、土壌水の流動が定常になるまで人工降雨を一定強度（ $1 \sim 5 \text{ mm h}^{-1}$ で 6 段階）で供給し、集水効率を調査・解析した。

人工降雨下におけるウイックサンプラーの集水効率は、円筒部が長いほど、あるいは降雨強度が大きいほど増大した。これは、ウイックサンプラー内部の全ポテンシャル分布がその周辺のポテンシャル分布に近づくためであることをリチャーズのマトリックポテンシャル方程式を用いた数値シミュレーション解析などで明らかにした。

続いて、ウイックサンプラーの原理と素焼きの吸引板を組み合わせた、差圧制御型と一定吸引圧型の 2 種類のテンションキャピラリーライシメータ（特許第 3317906 号）を考案し、実圃場における土壌浸透水（深さ 45 cm）のモニタリングを行った。差圧制御モデルの吸引圧は、採水面と同一深度の土壌マトリックポテンシャルより常に $0.3 \sim 0.5 \text{ kPa}$ 高くなるよう制御した。一定吸引圧モデルは 3 種類の吸引圧（3.9、6.2、9.8 kPa）に設定した。

差圧制御モデルの年間浸透水採取量は同時期・同地域での下方浸透水量（Hasegawa and Eguchi 2002）とほぼ一致し、土壌浸透水のモニタリングに有効であることがわかった。また、一定吸引圧モデルでは、吸引圧が高くなるほど年間浸透水採取量が増加する傾向にあり、6.2 kPa と 9.8 kPa の中間吸引圧で浸透水を採取することが適当であると推察された。

ハクサイ、トウモロコシ、イタリアンライグラスなどを栽培した黒ボク土畑の下層土（深さ 45 cm）では、一度に 50 mm 程度のまとまった降雨がないと浸透水は採取できないことが判明した。また、ハクサイ栽培の間作として無肥料でイタリアンライグラスを栽培することにより、浸透水中の全窒素濃度を顕著に低減できることがわかった。

以上のことから、本研究で開発した手法によって実圃場における窒素溶脱量を簡易にモニタリングできることが示された。しかし、埋設時の土壌攪乱の影響などについては改良の余地が残っている。

今後の課題

今後に残された課題のうち重要なものは、1) 有機質資材および土壌に含まれる窒素の中長期的

な動態解明、2) NO₃-N の溶脱に対するプレファレンシャルフローの影響評価、3) NO₃-N の溶脱を中長期的に予測できる数学モデルの開発などであり、現在はこれに関連した研究を進めている。

謝辞

本研究は、農業・生物系特定産業技術研究機構中央農業総合研究センター（旧農業研究センター）土壌肥料部水質保全研究室で行いました。本研究の遂行にあたっては、同研究室の尾崎保夫氏（現秋田県立大学）、阿部薫氏に適切なご指導と多大なご協力をいただきました。また、プレファレンシャルフローの研究においてはスウェーデン農科大学の Lars F. Bergström 氏にご指導・ご助言を賜りました。Bingzi Zhao 氏（現南京土壤研究所）ならびに Bandunee C. Liyanage 氏（現スリランカオープン大学）とは共同で研究を進めました。米山忠克氏（現東京大学）、長谷川周一氏（現北海道大学）、原田靖生氏（現 JA 全農）、太田健氏、長野間宏氏からは貴重なご意見をいただきました。圃場試験においては中央農研業務 3 科の方々にご支援いただきました。その他にも研究所内外の多くの方々にも助けられながら研究を進めて参りました。この場を借りて心より感謝申し上げます。

引用文献

- 1) Maeda, M. (2004) Nitrate contamination of groundwater and soil management, 79-98, In Lin et al. (ed.) The 3rd APEC Workshop on Sustainable Agricultural Development, Agricultural Research Institute, SC Press, Taichung.
- 2) 前田守弘 (2003) 硝酸性窒素の動態, 地下水学会誌, 45:189-199.
- 3) Maeda, M., Zhao, B., Ozaki, Y. and Yoneyama, T. (2003) Nitrate leaching in an Andisol treated with different types of fertilizers. *Environmental Pollution* 121:477-487.
- 4) Zhao, B., Maeda, M. and Ozaki, Y. (2002) Natural ¹⁵N and ¹³C abundance in Andisols influenced by long-term fertilization management in Japan. *Soil Science and Plant Nutrition* 48:555-562.
- 5) Maeda, M. and Bergström, L.F. (2000) Leaching patterns of heavy metals and nitrogen evaluated with a modified tanks-in-series model. *Journal of Contaminant Hydrology* 43:165-185.
- 6) Maeda, M., Liyanage, B.C. and Ozaki, Y. (1999) Water collection efficiency of wick samplers under steady state flow conditions. *Soil Science and Plant Nutrition* 45:485-492.
- 7) 尾崎保夫・前田守弘・関口浩昭 (2003) 畑地からの窒素溶脱量モニタリングのためのテンションキャピラリーライシメーターの試作, 日本土壌肥料学雑誌, 74:773-780.
- 8) 尾崎保夫・前田守弘・亀和田國彦・本島俊明・関口浩昭, 2001, 畑地における硝酸態窒素等の溶脱量モニタリング技術の開発 - 埋設型ライシメーターを用いた黒ボク土畑での浸透水の採取 -, 農業および園芸, 76:490-496.
- 9) 特許 (1998) 肥料成分・環境汚染物質等の溶脱量高精度簡易計測装置, 第 3317906 号.

Monitoring and modeling approaches for nitrate leaching in upland fields

Morihiro Maeda (National Agricultural Research Center)

mun@affrc.go.jp