

圃場条件下の不飽和帯及び浅層地下水帯を通じた 水移動と硝酸塩輸送の定量化に関する研究

学位論文内容の要旨

1. 背景と目的

集水域スケールでの正味の窒素 (N) 負荷量と河川を通じた N 流出量の関係についての既往の研究は、両者の関係が時間的、量的に必ずしも一致しないことを示している。この原因を明らかにするためには、土壌-地下水を通じた硝酸塩 (NO_3^-) の輸送時間と形態変化 (脱窒による N 除去量と系内の有機態 N 増加量) に関する情報が不可欠である。特に、N 負荷量の多い農地が広がる台地からの土壌-地下水を通じた NO_3^- 輸送過程については、これまでライシメータ規模の研究にとどまり、圃場条件下での定量的知見がほとんどない。そこで、本研究は、洪積台地上の黒ボク土 (国内の畑地面積の約半分を占める) 畑圃場を対象として、不飽和帯及び浅層地下水帯を通じた水移動を定量化すると共に、 NO_3^- 輸送量、 NO_3^- 輸送時間、 NO_3^- 除去量及び有機態 N 増加量を明らかにすることを目的とした。

2. 不飽和帯及び浅層地下水帯を通じた水移動の定量化

黒ボク土畑圃場 (24.5 × 38.5 m, 夏作スイートコーン, 秋作ハクサイ, 緑肥として冬作コムギ) を対象として、1995 年から 9 年間、深さ 1 m までの保水量と深さ 1 m における動水勾配を 30 分間隔で計測した。作物の根群域下端に相当する深さ 1 m を対象として、マトリックス流 (鉛直一次元の Darcy 式で算出) と選択流 (降雨開始から直後までの期間の深さ 1 m までの土層内水収支から算出) を求め、両者の合計である年浸透水量 (230~799 mm) は年降水量 (987~1531 mm) に比例して増加すること、水移動の主体はマトリックス流であること (年浸透水量の 73~84%), 選択流は年 2~7 回しか発生しないが年浸透水量の 16~27% を占めることを明らかにした。

根群域下から粘土質の難透水層 (深さ約 2.6~5.5 m) 上面までの間に存在する浅層地下水位を圃場内に約 5 × 5 m 間隔で設置した観測井により測定し、水平二次元の Darcy 式に基づき水平方向の流出量を算出した。約 1 年間 (2001 年 11 月~2002 年 10 月, 降水量 894 mm) を対象として、深さ 1.0~2.6 m の水収支を求めたところ、深さ 1 m からの浸透水量は 203 mm, 浅層地下水の水平流出量は 29 mm, この土層内の保水量変化は 2 mm となり、水収支の残差である難透水層を通じた鉛直下方への流出量は 172 mm と計算された。また、難透水層の透水係数は、 $7.1 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ と推定された。次に、この透水係数を用いて他の年の年間の鉛直下方への浅層地下水流出量を計算すると共に、年間の深さ 1 m からの浸透水量と鉛直下方への浅層地下水流出量の差から浅層地下水の水平流出量を求めた。その結果、9 年間 (1995~2003 年) の平均では、水平方向への浅層地下水流出量 (58%) が鉛直下方 (42%) を上回ると推定され、多雨年 (1531 mm) は水平方向 (78%), 少雨年 (987 mm) は鉛直下方 (87%) が卓越した。このようにして、根群域下の不飽和帯及び浅層地下水帯の水収支を定量化することができた。

3. N収支に基づく有機態N量と脱窒N量の推定

約8年間(1995年4月~2002年12月)を対象とすると、降水由来N量 94 kg N ha^{-1} 及び施肥N量 3989(化成肥料 2873 + 稲わら堆肥 1116) kg N ha^{-1} に対して、作物吸収N量は $2411 \text{ kg N ha}^{-1}$ であり、そのうち $1136 \text{ kg N ha}^{-1}$ が収穫物として圃場外へ持ち出された。その結果としての地表面における正味のN負荷量 $2947 \text{ kg N ha}^{-1}$ (100%) に対して、水フラックスと $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の積により求めた深さ1 mからの $\text{NO}_3\text{-N}$ 溶脱量は $1255 \text{ kg N ha}^{-1}$ (43%)、実測した深さ1 mまでの土層内 $\text{NO}_3\text{-N}$ 増加量は 270 kg N ha^{-1} (9%) であった。したがって、この期間、深さ1 mまでの土層内N収支の残差は $1422 \text{ kg N ha}^{-1}$ (48%) となり、これは実測した深さ0~30 cmの土壌中有機態N増加量とおおよそ一致した。すなわち、深さ1 mまでの土層内N収支の残差は、脱窒N量ではなく、主として有機態N増加量に相当することが明らかとなった。

約1年間(2001年11月~2002年10月)を対象として、深さ1.0~2.6 m(根群域下の不飽和帯と浅層地下水帯)の土層内 $\text{NO}_3\text{-N}$ 収支を求めたところ、深さ1 mからの $\text{NO}_3\text{-N}$ 溶脱量は 52 kg N ha^{-1} 、浅層地下水帯を通じた水平方向への正味の $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出量は 6 kg N ha^{-1} 、深さ2.6 mの難透水層上面から鉛直下方への $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出量は 30 kg N ha^{-1} 、土層内の不飽和帯中の NO_3 吸着量を考慮した $\text{NO}_3\text{-N}$ 増加量は 5 kg N ha^{-1} と推定された。土層内 $\text{NO}_3\text{-N}$ 収支の残差 11 kg N ha^{-1} については、浅層地下水帯では NO_3^- の窒素安定同位体自然存在比が上昇すること、室内培養実験では脱窒が生じることから、浅層地下水帯中での脱窒N量に相当すると考えた。さらに、脱窒速度が NO_3^- 濃度の一次反応式に従うと仮定し、この浅層地下水帯中での NO_3^- 濃度の半減期を求めると3.30年であった。

4. 不飽和帯及び浅層地下水帯を通じた NO_3^- 輸送時間

深さ1 mにおける土壌中 NO_3^- 含量と液相中 NO_3^- 存在量を比較したところ、 NO_3^- の半分近くが固相吸着されていた。このことは、 NO_3^- 輸送を遅らせる方向に作用する。一方、選択流はピストン置換(流入水が土壌中に元々ある水をピストンで押し出すように均一に流出させる)を仮定した場合よりも NO_3^- 輸送を速める方向に作用する。これらの相反する作用により、不飽和帯及び浅層地下水帯を通じた鉛直下方への NO_3^- 濃度ピークの移動速度は、見かけ上、ピストン置換を仮定した水移動速度とほぼ一致した。そこで、この圃場では NO_3^- 輸送時間をピストン置換による水移動時間で近似できると考えて、次の結果を得た。

1995~2003年を対象とすると、地表面から根群域下端(深さ1 m)及び浅層地下水面(平均2.04 m)までの不飽和帯中の NO_3^- 輸送時間は、それぞれ、平均1.24及び2.81年と推定され、いずれも多雨条件下(1531 mm yr^{-1})で小さく(0.75及び1.54年)、少雨条件下(987 mm yr^{-1})で増大した(2.51及び5.88年)。浅層地下水面から難透水層上面(深さ2.6 m)までの NO_3^- 輸送時間は、平均1.85年と推定され、不飽和帯とは反対に、多雨条件下(1531 mm yr^{-1})で大きく(2.64年)、少雨条件下(987 mm yr^{-1})で減少した(1.55年)。これは、主として、多雨年ほど浅層地下水位が高く、飽和帯保水量が増加したことによる。浅層地下水帯中での鉛直下方への NO_3^- 輸送時間(1.85年)は、 NO_3^- 濃度の半減期3.30年より小さく、浅層地下水中の NO_3^- は十分に除去されないまま、その68%が難透水層中へ移行すると考えられる。したがって、この黒ボク土畑では、浅層地下水帯での脱窒による大きな NO_3^- 除去量は期待できず、根群域からの NO_3^- 溶脱量を減らす肥培管理が、唯一の地下水汚染軽減対策である。

5. 結論

対象とした黒ボク土畑(施肥Nの28%が稲わら堆肥由来)では、地表面における正味のN負荷量を100とすると、48が有機態Nとして表層0~30 cmに蓄積するが、残りの52は $\text{NO}_3\text{-N}$ となり、地表面でのN負荷の発生から1.2年後、根群域(深さ1 mまで)以下へ溶脱する。溶脱した NO_3^- は、地表面でのN負荷の発生から2.8年後、深さ2 mにある浅層地下水面へ到達する。浅層地下水帯中の $\text{NO}_3\text{-N}$ は、17が脱窒により除去されるが、地表面

での N 負荷の発生から 4.7 年後には、 $\text{NO}_3\text{-N}$ として 35 が難透水層中へ移行する。これらの定量値は、集水域スケールでの土壌－地下水を通じた NO_3^- 輸送時間、 NO_3^- 除去量及び有機態 N 増加量を説明、予測するための新しい知見となる。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	長谷川 周 一
副 査	教 授	波多野 隆 介
副 査	教 授	長 澤 徹 明
副 査	准教授	中 原 治

学 位 論 文 題 名

圃場条件下の不飽和帯及び浅層地下水帯を通じた 水移動と硝酸塩輸送の定量化に関する研究

本論文は 6 章からなり、図 42, 表 15, 引用文献 223 を含む 141 ページの和文論文である。他に参考論文 5 編が添えられている。

集水域スケールでの正味の窒素 (N) 負荷量と河川を通じた N 流出量は、時間的、量的に必ずしも一致しないことが知られている。これを定量的に説明、予測するためには、土壌－地下水を通じた硝酸塩 (NO_3^-) の輸送時間と形態変化 (脱窒による N 除去量と系内の有機態 N 増加量) に関する情報が不可欠であるが、これまでの研究はライシメータ規模にとどまり、圃場条件下での定量的知見がほとんどない。

そこで、本研究は、国内の畑地面積の約半分を占める黒ボク土の畑圃場を対象として、不飽和帯及び浅層地下水帯を通じた水移動を定量化すると共に、 NO_3^- 輸送量、 NO_3^- 輸送時間、 NO_3^- 除去量及び有機態 N 増加量を明らかにすることを目的とした。

作物根群域に相当する深さ 1 m までの土層を対象として、9 年間 (1995~2003 年)、保水量と深さ 1 m における動水勾配を 30 分間隔で測定し、マトリックス流 (鉛直一次元の Darcy 式により算出) と選択流 (降雨開始から直後までの期間の深さ 1 m までの土層内水収支から算出) を求めた。両者の合計である年浸透水量 (230~799 mm) は、年降水量 (987~1531 mm) に比例して増加すること、水移動の主体はマトリックス流であること (年浸透水量の 73~84%)、選択流は年 2~7 回しか発生しないが年浸透水量の 16~27% を占めることが明らかとなった。

約 1 年間 (2001 年 11 月~2002 年 10 月、降水量 894 mm) を対象に、深さ 1.0~2.6 m (根群域下の不飽和帯と浅層地下水帯) の間に存在する浅層地下水位の圃場内分布の測定値を用いて、水平二次元の Darcy 式に基づき水平方向への正味の浅層地下水流出量 (29 mm) を算出した。さらに、この土層内の水収支より、粘土質の難透水層 (深さ 2.6~5.5 m) 中へ流入する

鉛直下方への浅層地下水流出量 (172 mm) と難透水層の透水係数 ($7.1 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$) を求めた。難透水層の透水係数と浅層地下水位の年平均値 (1995~2003 年) を用いて、鉛直下方への浅層地下水流出量を計算し、深さ 1.0~2.6 m の水収支から水平地下水流出量を求めると、浅層地下水の流出方向は、水平方向 (58%) が鉛直下方 (42%) をやや上回ると推定された。

地表面の N 収支は、約 8 年間 (1995 年 4 月~2002 年 12 月) を対象とすると、降水 N 量 94 kg ha^{-1} 及び施肥 N 量 3989 (化成肥料 2873 + 稲わら堆肥 1116) kg ha^{-1} に対して、作物吸収 N 量は 2411 kg ha^{-1} 、そのうち 1136 kg ha^{-1} は圃場外への持ち出しであった。地表面の正味の N 負荷量 2947 kg ha^{-1} (100%) に対して、深さ 1 m からの $\text{NO}_3\text{-N}$ 溶脱量は 1255 kg ha^{-1} (43%)、深さ 1 m までの土層内 $\text{NO}_3\text{-N}$ 増加量は 270 kg ha^{-1} (9%) であり、N 収支の残差 N 量 1422 kg ha^{-1} (48%) は、深さ 0~30 cm の土壌中有機態 N 増加量とおおよそ一致した。

約 1 年間 (2001 年 11 月~2002 年 10 月) の深さ 1.0~2.6 m (根群域下の不飽和帯と浅層地下水帯) における $\text{NO}_3\text{-N}$ 収支は、深さ 1 m からの $\text{NO}_3\text{-N}$ 溶脱量 52 kg ha^{-1} 、浅層地下水帯を通じた水平方向への正味の $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出量 6 kg ha^{-1} 、深さ 2.6 m の難透水層上面から鉛直下方への $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出量 30 kg ha^{-1} 、不飽和帯中の NO_3^- 吸着を考慮した $\text{NO}_3\text{-N}$ 増加量 5 kg ha^{-1} と計算され、N 収支の残差 N 量 11 kg ha^{-1} は浅層地下水中での脱窒 N 量と考えられた。脱窒速度が NO_3^- 濃度の一次反応式に従うと仮定すると、 NO_3^- 濃度の半減期は 3.30 年と推定された。

不飽和帯及び浅層地下水帯を通じた鉛直下方への NO_3^- 濃度ピークの移動速度は、見かけ上、ピストン置換を仮定した水移動速度とほぼ一致した。そこでこの圃場では NO_3^- 輸送時間をピストン置換による水移動時間で近似できると考え、1995~2003 年を対象に、地表面から深さ 1 m 及び浅層地下水面 (平均 2.04 m) までの不飽和帯中の NO_3^- 輸送時間を求めると、それぞれ、平均 1.24 及び 2.81 年であった。また浅層地下水面から難透水層上面 (深さ 2.6 m) までの NO_3^- 輸送時間は平均 1.85 年と推定され、 NO_3^- 濃度の半減期 3.30 年よりも小さかった。すなわち、浅層地下水中の NO_3^- は十分に除去されず、その 68% が難透水層中へ移行すると計算された。

要約すると、地表面における正味の N 負荷量を 100 とすると、48 が有機態 N として表層 0~30 cm に蓄積するが、残りの 52 は $\text{NO}_3\text{-N}$ となり、地表面での N 負荷の発生から 1.2 年後、根群域 (深さ 1 m) 下へ溶脱する。溶脱した NO_3^- は、地表面での N 負荷の発生から 2.8 年後、深さ 2 m にある浅層地下水面へ到達する。浅層地下水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ は、脱窒で 17 が除去されるが、地表面での N 負荷の発生から 4.7 年後、 $\text{NO}_3\text{-N}$ として 35 が難透水層中へ移行する。

以上のように本論文は、黒ボク土畑圃場を対象として、不飽和帯及び浅層地下水帯を通じた水移動と NO_3^- 輸送過程を定量的に明らかにした。これらの定量値は、これまで圃場条件下では得られておらず、集水域スケールでの土壌-地下水を通じた NO_3^- 輸送時間、 NO_3^- 除去量及び有機態 N 増加量を説明、予測するための基礎となる新しい知見であり、関連学会においても高く評価されている。よって審査員一同は、江口定夫が博士 (農学) の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。