

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23380137

研究課題名(和文) 土壌根圏における窒素収支基本構造の解明

研究課題名(英文) Basic Structure of nitrogen budget in root zone

研究代表者

塩澤 昌 (Shiozawa, Sho)

東京大学・農学生命科学研究科・教授

研究者番号：80134154

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：土壌も気象条件も同じで施肥が異なる4つの試験区畑地(堆肥区、化学肥料標準量区、化学肥料半量区、無施肥区)および長年、施肥も収穫もない雑草区において、根圏下の土壌水を採取して年間の地下水への窒素流出量と収支を求めた結果、流出量は施肥量の10-25%であるが、収支としては、過去に根圏に蓄積された窒素の消費が流出量を超えるレベルで一定施肥管理後約10年でもなお続いていること、雑草区では降雨流入と脱窒がほぼ釣り合う定常状態であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Nitrogen (N) concentration in soil water and N-flux from root zone to groundwater has been measured in four experimental plots of different fertilizer application (organic, standard chemical, half chemical, and no fertilizer) and natural grass field with no fertilizer and no harvesting. N-budget in zoot zones was also obtained. As the results, N-flux to groundwater was 10-25% of fertilizer input, but consumption of stored nitrogen continued, which exceeded the N-leaching, even after 10 years of constant fertilizer application. On the other hand, in the grassland denitrification is almost equal to N-input from atmosphere.

研究分野：農地環境工学

キーワード：窒素収支 降雨浸透 根圏 脱窒 硝酸汚染

土壤根圏の窒素収支基本構造の解明

1. 研究開始当初の背景

農地から地下水や河川への窒素流出量を決めるのは根圏の窒素収支である。窒素投入の過剰分(施肥量+大気からのネット沈着量-収穫量)が大気へのネット生化学的損失(脱窒量-生物的固定)と地下水への浸透流出に配分されるが、どのような割合で2者に配分されるかはこの過剰量に依存するはずで、この関係が窒素収支と流出濃度予測モデル一般における未解明の核心的問題と考える。本研究は、同一の気象・土壤条件の、異なる施肥

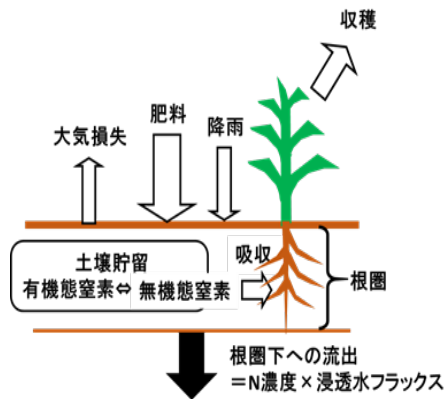


Fig.1 窒素流出の概念図

量および無施肥の畑地、草地、林地において窒素収支における(測定が容易でない)未知量である浸透流出窒素量とネット大気損失量を測定・算出し、過剰量との一般的な関係を解明する。

土壤根圏の窒素収支の(定常状態における)基本的なメカニズムを、人為活動(農業)で決まる窒素過剰量(=「施肥量-収穫+ネット沈着」)が2つの排出経路、ネット生化学的窒素放出(NG)と浸透流出(NL)に分配されると考え、窒素過剰量と2者への配分割合を、農地の環境への影響に焦点を当てた窒素収支の基本構造と考える。

2. 研究の目的

窒素(N)は植物の生育に必須の栄養元素の筆頭であるが、土壤の起源となる母岩に含まれず、空気中の窒素ガスを固定できるのは一部の微生物に限られるため、土壤中の窒素の含有量が地力として農業生産を決める重要な要因であったが、空気中の窒素を工業的に固定した化学肥料が多量に農地の投入されるようになって、農業生産が高まる一方で窒素の地下水や流域等の環境への流出による地下水の硝酸汚染と湖沼の富栄養化が環境問題となっている。農地(畑地)に肥料として投入された窒素(N)の大部分は、作物に吸収されて収穫されるが、一部は根圏土壤に

多量に蓄積されている有機態窒素に加わり、無機化・有機化・根の吸収等のプロセスを経て、土壤溶液の浸透と共に根圏下へ流出する(Fig.1)。また、地下水の硝酸濃度の高まりは周辺環境悪化を引き起こす。本研究は、土壤と気象条件が同じで施肥履歴の異なる畑地および施肥も収穫もない雑草地において、(1)地表から根圏下までの土壤水中の窒素濃度(硝酸態・アンモニア態、有機体、全窒素)の分布とその変動を調べて根圏内の窒素フラックスの特徴を明確にし、(2)根圏下の土壤溶液のサンプリングを年間を通して継続して行い窒素フラックスの季節的変動との年間流出量を求めて施肥区の比較を行い、(3)根圏土壤に個体として存在する窒素含有量の鉛直分布を測定して根圏全体の存在量を求めて土壤水中の無機態窒素量や施肥・収穫窒素量と比較してその大きさを評価した。

3. 研究の方法

調査地: 東京都西東京市の東大生態調和農学機構内の畑地及び雑草地で行った。調査した畑地は、長辺 150m、短辺 40m の短辺を 10m 幅の 4 つの区に分けて、堆肥区、化学肥料標準量区、化学肥料半量区、無施肥区それぞれに異なる窒素の施肥条件を設定し、作物の収量を調べる長期試験が別途行われていた。1993 年以降の施肥履歴は Fig.2 で、2008 年に無施肥区が追加された。夏作としてトウモロコシ、冬作としてコムギを栽培しており、施肥が行われるのは、堆肥区では 7 月、化学肥料区では 7,11 月である。この畑地に加えて、畑地から 30m 程離れた雑草地も調査地とした。雑草地は、長年、施肥も収穫も行われておらず、自然状態の土地の窒素流出と収を示すと考えられる。土壤はいずれもクロボク土である。

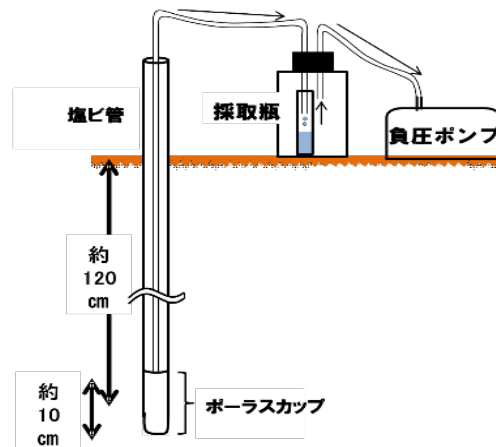


Fig.3 土壤溶液採取の方法

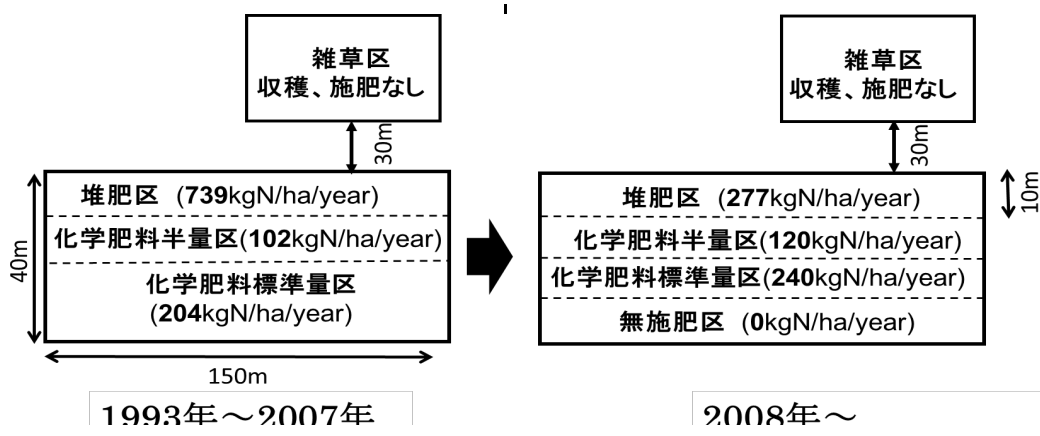


Fig.2 対象区の配置と施肥履歴

土壌水濃度分布：ハンドオーガの先端に直径 20mm の半円形断面の専用についた採土器を付けて深度 10cm ~ 20cm ごとに深さ別に土壌サンプリングを行った。採取した土壌試料の一部で含水率を測定するとともに、別の部分に水を加えて攪拌し土壌水を抽出した。水抽出した土壌溶液中の各種イオン濃度をイオンクロマトグラフで測定し、全窒素 (TN) と有機炭素の濃度を TN 計で測定した。測定した溶質濃度から、希釈倍率と現場含水比を使ってサンプリング時の現場における土壌水濃度を算出した。

根圏下土壌水濃度の経時変化：根圏下に流出する窒素を求めるには年間を通した根圏下土壌水の採取が必要である。そこで、根圏下に土壌水採取管を設置し、定点で土壌水を継続的に採取して水質を分析した。各区で 1 m 程度に近接して 2 カ所ずつ 根圏下(深さ 120 cm)の土壌溶液を採水した。装置は、塩ビ管の先端の素焼きカップ部から負圧ポンプで吸水する仕組みである (Fig.3)。土壌溶液の採水は 2013 年の 12 月から 2 週間おきに継続し、全窒素計にて窒素濃度測定を行った。また、収穫後の作物を、窒素含量を CN コーダーにて測定した。

土壌中の窒素存在量測定：土壌中に存在する全窒素量を、サンプリングした土壌中の含有量を N/C コーダーで測定して求めた。

4. 研究成果

土壌根圏の全窒素濃度分布

土壌水中の全窒素 (TN) の濃度分布は、地

表から 0-60cm では 10 ~ 80 mg/L と高く、この濃度は施肥区によってまた時期によって異なる。これ以深では、深さとともに減少して 110cm 以深では深さによらず、ほぼ一定となる。0-60cm では根の窒素吸収が大きく、また土壌中の有機態窒素 (固体) の量が多く、有機化・無機化による窒素の形態変化とそれに伴う土壌水中の無機態窒素 (硝酸) の濃度変化が盛んに生じていることを反映している。土壌水中の全窒素濃度と水フラックスとの積は、浸透水とともに下方に移動する窒素フラックスを表す。水フラックスは「浸透量 (= 降水量) - 蒸発散量」であり地下水面上の根圏下では深さによらず一定 (約 1000mm/y) であるから、窒素のフラックスは土壌水中の窒素濃度に比例する。全窒素濃度がなくなる 110cm 以下において窒素フラックスは深さによらず一定であり、これが根圏下に流出する窒素フラックスを表すといえる。しかし、地点によって 2m 以深の深部で窒素濃度が増加する。これは地下水では水平方向の水移動が生じており上流側の濃度の影響を受け、地下水中の濃度が地下水に向かう不飽和土中の浸透水より高い場合があるためである。地下水中の水平方向の水移動の影響がある深度では窒素濃度からフラックスを求めることはできない。調査地の地下水位は地表から 2m 付近にあっておよそ 1.5 ~ 2.5m の範囲で変動している。したがって、調査地点において地下水に向かう根圏下の窒素フラックスを求めるには、深度 110cm ~ 140cm の土壌水の窒素濃度を用いることが適切である。

Table 1 2014 年 1 月 ~ 12 月の 1 年間の施肥量と流出量

	施肥量 (kgN/ha)	根圏下土壌溶液平均 窒素濃度(mg/L)	窒素流出量 (kgN/ha)	流出率(%) (= 流出量 / 施肥量)
堆肥区	277	5.4	54	19
化学肥料標準量区	240	3.3	33	14
化学肥料半量区	120	2.8	28	23
無施肥区	0	1.5	15	-
雑草区	0	0.5	5	-

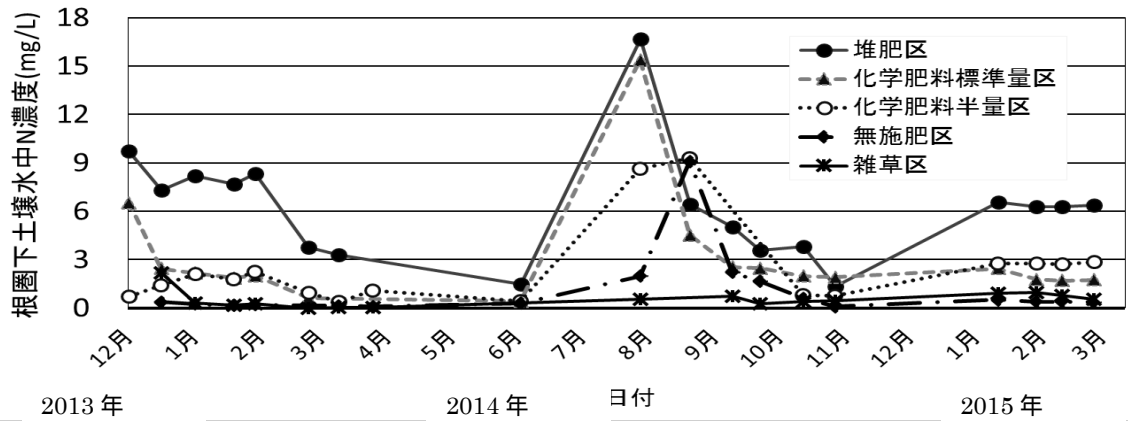


Fig.4 根圏下土壌溶液中窒素濃度の推移 (2013年12月~2015年3月).各プロットは2サンプルの平均値である.

Fig.4 は各区の根圏下土壌溶液の窒素濃度の経時変化である。窒素濃度が8,9月と1,2月に高く,4~6月と10,11月に低い。これは2つの作物の窒素吸収によると思われる,特に8,9月のピークは,根圏地温が上昇して無機化が進むにも関わらず5,6月に根の窒素吸収がないために,上昇した濃度が遅れて120cm深度に達したと思われる(濃度の下方への伝達速度は,間隙流速(=約2m/year)以下である)。

施肥管理別の窒素流出量と窒素収支:
Table 1 に,年間の窒素流出量,流出率等を示す。窒素流出量は,堆肥区,化学肥料標準量区,化学肥料半量区,無施肥区,雑草区の順に54,33,28,15,5(kgN/ha)となった。現在の施肥量が同程度にも関わらず,堆肥区で化学肥料標準量区の約1.7倍の流出量,無施肥区が雑草区の約2倍の流出量である。これは,2007年以前に現在より多くの窒素肥料が与えられ土壌蓄積量が大きいと考えられる。

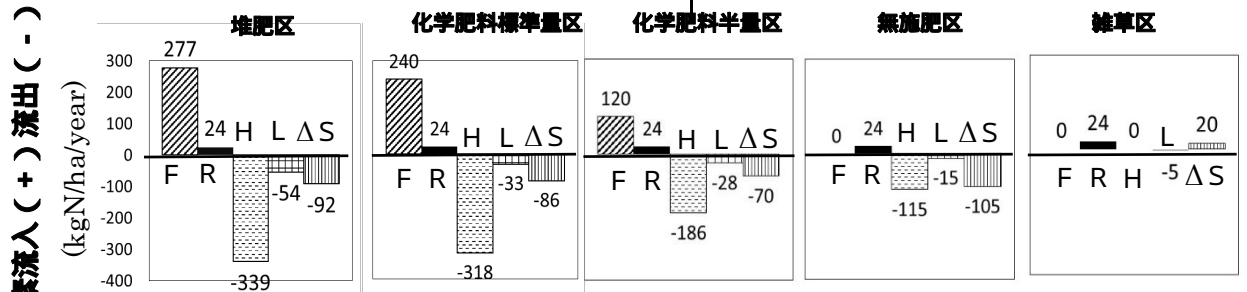
次に,以下の根圏窒素収支式の各項目を2014年について求めた(Fig.5)。

$$F + R - H - L = S$$

ここで,Fは肥料による流入,Rは降雨による流入,Hは収穫による持出し,Lは根圏下への流出,Sは残差=大気損失+土壌貯留増加である。Rは練馬区の年間降雨量に降雨中窒素濃度を1.4mg/Lとして乗じて求め,Lは測定した根圏下土壌溶液中の窒素濃度に根圏下への浸透量を1000mm/yearとして乗じて求めた。畑地の残差Sは,堆肥区,化学肥料標準量区,化学肥料半量区,無施肥区の順に-92,-86,-70,-105(kgN/ha)となっている。雑草区にて残差=大気損失=20kgN/haとなるが,主に脱窒によるものである。肥料が与えられ硝酸濃度が高い畑地では脱窒もより多くアンモニア揮散も生じるので大気損失は雑草区より大きいはずであり,したがって畑地における実際の土壌貯留減少量はSの数値よりかなり大きいと考えられる。

土壌中の窒素存在量と存在形態

土壌中に存在する全窒素量を,サンプリングした土壌中の含有量をN/Cコーダーで測定して求めた。地表から0~40cmでは3000~5000g/m³であるがこれ以深では深度とともに含有量が低下し,深さ100cm以深では500~600g/m³となって深さによらず一定とな



F: 肥料による流入 R: 降雨による流入 H: 収穫による持出し L: 根圏下への流出 ΔS: 残差 = 大気損失 + 土壌貯留増加

Fig.5 各区の窒素収支 (2014年)

る傾向がみられる(標準区と無施肥区)。0~1mの土層の窒素存在量はおよそ3000 g/m³で(深度0~1mまで3 kg/m²)である(4区の平均)。土壤水中には、体積含水率を0.5、全窒素濃度を10mg/Lとして、5 g/m³であるから、土壤水中に存在する窒素の500~1000倍の窒素が固体として存在する(ほとんど有機態であろう)。また、標準区の施肥量、約200kg/ha/y(20 g/m²/y)と比較すると150倍で、標準施肥量の150年分の窒素が有機体として(固体として)土壤中に存在する。このように多量の窒素が有機体として(固体として)土壤中に存在するため、土壤根圏の窒素収支が定常状態($\Delta S=0$; input=output)になるには、施肥量と耕作条件を一定状態にして100年程度はかかるであろう。施肥量と耕作条件を変えて数年~十数年では定常状態にはほど遠く、過去の施肥量と耕作条件に強く影響された有機体窒素の貯留量(S)が収量や浸透流出に影響する。実際、調査地の無施肥区に存在する固体(有機態)窒素量は標準区より多く、過去の長年の施肥によって蓄積された有機態窒素が大量にあり、これが少しずつ無機化されて作物に吸収され根圏下にも流出しているといえる。

まとめ(根圏の窒素収支基本構造)

堆肥区、化学肥料標準量区、化学肥料半量区、無施肥区、雑草区における根圏下への窒素流出量は、大きさの順番としては、「肥料として投入された窒素量-収穫量」の順番になっている。しかし、無施肥区をはじめ施肥の少ない農地では根圏に蓄積した窒素の減少が大きく、インプットとアウトプットとが釣り合う定常状態にはなっておらず、過去に施肥量が多かった農地において根圏蓄積量の減少が7年(無施肥区)または12年(化学肥料標準施肥区、化学肥料1/2施肥区)を経ても根圏貯留量の減少が続いており、根圏下流出が多い原因となっている。

施肥も収穫もない雑草地においては根圏下への窒素流出は少なく、大気からのインプットと同程度の大気損失(20 kgN/ha)があり脱窒によると考えられる。施肥農地においては、土壤硝酸濃度がこれより高いため、雑草地以上の脱窒があると推定される。我が国の非農地の大半を占める森林も施肥も(窒素蓄積量が一定になった成熟林では)収穫もない点で雑草区と同様の窒素収支構造にあると考えられる(2014年度から田無演習林にも調査地を設定して、農地と同様の調査を行っているが、根圏が農地よりもはるかに深いことを示唆する結果である)。

放射性セシウムの土壤中の挙動・水系への流出

2011年の福島第一原発事故による放射性セシウムのフクシマの農地、森林への降下と農

作物汚染問題が生じ、土壤中の水・物質移動問題の研究者として、急遽、この問題に取り組むことになり、2011年度に科研費でシンチレーションサーベーターを購入し、土壤中のセシウムの移動モニタリング手法、ため池内の底泥のセシウム存在量を現場測定する方法を開発し、土壤中の移動速度のモニタリング、水系への流出がどこから生じたかなど、重要な成果を上げた。本来の予定した研究ではなかったが、科研費があったために原発事故の直後の重要な研究を開始することができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3件)

塩沢昌、田野井慶太郎、根本圭介、吉田修一郎、西田和弘、橋本健、桜井健太、中西友子、二瓶直登、小野勇治(2011) 福島県の水田土壤における放射性セシウムの深度別濃度と移流速度、Radioisotopes 60,pp.323-328

塩沢昌(2012) 水田の放射能汚染と稲への移行、農業農村工学会誌、86-5、p.15-18

Katori Miyasaka, Sho Shiozawa, Kazuhiro Nishida, Shuichiro Yoshida. 2014: Solute electrical charge effects on molecular diffusion coefficients in unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J. 78:1852-1858, doi: 10.2136/sssaj2014.05.0201

〔学会発表〕(計 2件)

山田祐大、塩沢昌、吉田修一郎、西田和弘 異なる施肥量の畑地根圏への窒素の流出量の比較、農業農村工学会大会講演会、2012年9月18-20日、札幌

奥長知之、塩沢昌、吉田修一郎、西田和弘、山岸順子、施肥量の異なる畑地等からの窒素流出、農業農村工学会大会講演会、2015年9月1-3日

〔図書〕(計 2件)

Sho Shiozawa: Vertical migration of radiocesium fallout in soil in Fukushima. (2013) in "Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident" ed. T. Nakanishi and K. Tanoi, Springer p.49-60

塩沢昌: 放射性セシウムの土壤中の挙動、水稲への移行、水系への流出(2013)放射能の土壤科学 - 森・田・畑から家庭菜園まで -, 日本学術協力財団, ISBN978-4-9904989-6-2 C0353 p.64-94

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

6 . 研究組織

(1)研究代表者

塩沢 昌 (Sho Shiozawa)
東京大学・農学生命科学研究科・教授
研究者番号：8013415

(2)研究分担者

吉田修一郎 (Shyui thiro Yoshida)
東京大学・農学生命科学研究科・準教授
研究者番号：90355595

西田和弘 (Kazur iro Nishida)
東京大学・農学生命科学研究科・助教
研究者番号:9055494