

令和元年6月17日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K07932

研究課題名(和文) 低負荷施肥体系の確立を目標とした積雪地域の樹園地における窒素動態の解明

研究課題名(英文) Elucidation of nitrogen dynamics in a snow-covered area with the goal of establishing a low-load fertilization system

研究代表者

遠藤 明 (ENDO, AKIRA)

弘前大学・農学生命科学部・准教授

研究者番号：70450278

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の特色は、青森県内の灰色低地土(青森県藤崎町)、褐色森林土(青森県弘前市)および黒ボク土(青森県鶴田町)の各調査リンゴ園において、リンゴ樹木の休眠期間にあたる積雪時期を含め、通年にわたり土壌間隙水の化学組成分析やフィールドモニタリングシステムを用いた土壌環境観測を実施したことにある。電気伝導率等の諸観測と各種陰陽イオン濃度の定量結果から、融雪期間中において短期間のうちに土壌中の物質が一挙に溶脱することが明らかになった。以上のことから、多雪地域では溶脱の観点で秋肥施用の意義が小さく、環境に対する負にインパクトの方が大きいという、低負荷施肥体系を確立する上で重要な知見を見出すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

青森県のような積雪寒冷地のリンゴ生産では融雪水の浸透による肥料成分の溶脱を防止するため、融雪後に施肥を行う春肥が推奨されている。しかし秋肥を行わないと施肥遅れに起因する障害が見られることもあり、他県においては秋肥を指導している。樹園地における無機態窒素の浸透流出特性が、施肥と降水のタイミングおよび窒素吸収特性に依存することが近年になり明らかにされてきた。しかし、融雪を伴った無機態窒素の溶脱挙動や樹園地の窒素循環機構の詳細はまだ解明されていないため、果樹の生育面と土壌の環境面の双方から推奨可能な施肥体系・土壌管理技術を確立するために、樹園地の窒素循環機構を明らかにする意義は大きいといえる。

研究成果の概要(英文)：This study was conducted in the apple orchards of gray lowland soil (Fujisaki-cho), brown forest soil (Hirosaki-shi) and Andosol (Tsuruta-cho) in Aomori Prefecture. Specifically, we had carried out the soil pore water analysis and soil environmental observation using chemical composition analysis and field monitoring system during continuous period, including dormancy period of apple trees, which is the snowfall and/or snow melting season. From various observation results such as electrical conductivity and quantitative results of anion and cation concentrations, it was revealed that the substances in the soil leached out at the once in a short period during the snow melting period. From the above, we found important findings in establishing a low-load fertilization system that the importance of autumn fertilizer application is small in view of leaching in heavy snow areas and the negative impact on the environment is larger.

研究分野：農地環境工学

キーワード：積雪寒冷地 リンゴ園 土壌 窒素循環 施肥 溶脱

1. 研究開始当初の背景

1890年当時、地圏に供給可能な自然由来および人為由来の窒素量は1.15億tと報告されており、その100年後の1990年には2.07億tと2倍に増加した(Galloway and Cowling, 2002)。この増加した窒素量の約6割に相当する約5,500万tは、化学肥料由来であるとされている(国連環境計画(UNEP) GEO-2000)。わが国においても、近年、農耕地において、農作物の高品質・多収穫を目的に、施肥基準を超える施肥がなされてきた事例が見受けられる(農林水産省, 2003)。このことは、農耕地が過剰な養分状態であることを示唆している。さらに、この農畜産由来の窒素成分が地下に浸透あるいは河川に流出する結果、地下水・河川水・閉鎖系水域の富栄養化による水質汚濁が進行している。このことを受け、全国的な施肥基準の見直し・有機農業の推進に関する法律の制定、農地・水・環境保全向上対策(現、農地・水保全管理支払交付金)が実施(農林水産省, 2006; 2012)されてきた。そして、この間においても、持続可能な農業・農村の開発を推進するため、土壌物理学や環境水文学の各学術研究分野において、農耕地に投入した窒素肥料の動態、肥料成分が土壌中から河川に流出するメカニズムを解明する研究等が精力的に行われてきた。わが国の都道府県の農耕地における窒素フローの広域評価を行うため、栄養塩類の地表面収支計算システム(三島ら, 2010)を用いた農耕地の余剰窒素量が算定されてきた。本手法は、農業センサス年における農耕地への窒素投入量、主産物・副産物の窒素吸収量を算出することにより、農耕地を対象とした栄養塩類の地表面収支量を算定することができる。当然ながら、窒素投入量が多く且つ、窒素吸収量が少なれば養分過多状態の農耕地になります。露地栽培作物における野菜類や果樹類の一部の耕種においては、吸収窒素量よりも非吸収窒素量の方が多いものがある。これらの耕種の農耕地においては、環境へ排出される無機態窒素量が非常に多く、その中でも、青森県特産のリンゴは、窒素施肥量153 kgN/haに対して、吸収量68 kgN/ha、非吸収量85 kgN/haであり、施肥由来窒素の55.6%が吸収されていないことが報告されている(西尾, 2005)。青森県のリンゴの施肥については、1950年代から施肥量が急増し、1960年代には350 kgN/haと最大に達しました(農林水産省, 2009)が、土壌の酸性化と塩基組成の不均衡が見られ、病害や生理障害が多発したことを受け、窒素施肥量は減少傾向にある(土壌環境モニタリング調査1999-2003)。近年、農耕地における無機態窒素の浸透流出特性が、施肥と降水(土壌への水の浸透)のタイミングと窒素吸収特性に依存することが明らかになってきた(Endo et al., 2009; 2013)。すなわち、硝化作用により生成した硝酸イオンが土壌深部へと浸透流出していく中で、作物体が如何にして効率的に無機態窒素を吸収していくかということが問題解決の糸口になると研究代表者は考えている。青森県のリンゴ生産においては、融雪後に施肥を行う春肥が施肥基準として推奨されている。その理由は、他県で実施されている秋肥を本県において実施すると、融雪水により施肥窒素が土壌深部へと流亡してしまうためである。この秋肥は、翌春の花芽や新梢の初期生育を促進させる効果を持っている。このため、融雪季初期においてリンゴの根が肥料成分を欲していることから、他県では生産者に対して秋施肥を指導している。積雪地域の果樹生産において、秋肥・春肥施用による無機態窒素の浸透流出挙動は明らかではなく、また、本条件での樹園地における窒素循環機構は解明されていない。したがって、本研究を実施することにより、果樹の生育面と土壌の環境面の双方から推奨できる、施肥体系や土壌管理技術を確立することが可能になると研究代表者は考えている。遠藤ら(2014)は、青森県内の灰色低地土リンゴ園地から浸透流出する無機態窒素の時空間的な挙動を数値解析により明らかにした。また、遠藤ら(2017)は春先の3~4月の融雪量の観測結果を勘案して数値解析による無機態窒素の浸透流出挙動を調査し、融雪期間前までに農地土壌に蓄積されていた硝酸態窒素の90%以上が3~4月上旬の約1.5カ月間にすべて浸透流出することを明らかにした。しかし、既往の研究では青森県津軽地域の灰色低地土壌地帯(青森県全体の21%を占める)にしか対応しておらず、当県内に多く占める黒ボク土壌や褐色森林土壌における樹園地において、秋肥の有無が融雪期の土壌環境の形成にどのようなインパクトを与えるのか、また、最適施肥量や最適施肥時期を同定することが必要と考えている。このため、本研究では土壌中に蓄積されている余剰窒素と春肥施用の窒素が、春以降のリンゴ果樹の窒素吸収に対してどのように効いてくるのか、また、融雪や降水に起因する浸透水に溶解して、どのように溶脱するのかを、(1)定期的に各深さから土壌間隙水を採取として陰陽イオン種を定量分析、(2)自動連続測定(フィールドモニタリング)、(3)遠藤ら(2017)の無機態窒素の浸透流出に関する数理モデルを併用して明らかにする。最終的に、各土壌型のリンゴ園地における時期毎・深度毎の窒素溶脱特性を提示し、積雪寒冷地である青森県内における多種類の土壌型の樹園地における窒素循環機構を明らかにすることを目標とする。

2. 研究の目的

2014年の日本におけるリンゴの果樹面積は3万7100ha、収穫量は81万6300tであり、日本で生産されるリンゴの約57%に相当する約47万tが、積雪寒冷地である青森県で生産されている(農林水産省, 2015)。一般的に、日本のリンゴ園における施肥は秋~冬(秋施肥)に行われている(長野県, 2000)。一方、日本の青森県は、冬期間の降雪量が多いため、施肥は融雪後の4月中旬までに実施(春施肥)することが推奨されている(青森県, 2014)。春施肥を実施する理由は、春先の融雪浸透水により施肥窒素が土壌深部へと無駄に溶脱し、休眠期間中はリンゴの樹に窒素が供給されないためである。ところで、日本における窒素肥料の国内需要は、農作物の作付面積の減少と施肥量低減の取り組み(農水省の環境保全型農業の推進に関する文献を引用する)

を受けて減少傾向にある。他方、農地における窒素施肥量は、野菜と飼料作物については増加傾向にあり、果樹品目によっては多量の施肥がなされている(農林水産省, 2009)。Endo et al. (2009) は、黒ボク土畑に設置されたキャピラリーライシメーターを用いた化学肥料の長期連用試験結果をもとに、土壤中の無機態窒素移動に関する数理モデルを開発し、圃場実験結果と数値計算結果がおよそ合致したことを報告している。また、三島・神山(2010)は、施肥量と収穫量に基づく農地表面での窒素収支を解析し、農地土壌に残存する余剰窒素が、近年になってもさほど減少していないことを報告している。さらに、Endo et al. (2013)は、日本の農地土壌の余剰窒素が環境に対してどの程度の負のインパクトを与えるのかを定量するため、水田・普通畑・樹園地および草地の各農地の深度 100 cm から溶脱する硝酸態窒素量を数値計算により算定し、果樹園において慣行施肥を実施した場合には、平均で 150 kgN/ha にも達することを報告している。窒素溶脱量を減少させるためには、減肥による栽培のほか、肥効調節型肥料や硝化抑制剤を用いた方法やバイオ炭による無機態窒素の吸着特性を利用した方法 (Ventura et al., 2013; Hardie et al., 2015) など、様々な方法がある。遠藤ら(2017)は青森県における灰色低地土のリンゴ園において、春先の融雪水の浸透現象を勘案し、リンゴ園土壌の無機態窒素の時空間的動態と溶脱挙動を推定した。また、加藤ら(2016)は青森県内の腐植質黒ボク土のリンゴ園における施肥効果の検証を行うため、土壌センサーを用いて当該リンゴ園の土壌溶液 EC や土壌水分量を長期モニタリングすることにより、施肥後の土壌環境変化の「見える化」を可能にした。黒ボク土リンゴ園における春先(3月中旬~4月上旬)の融雪浸透水を勘案した窒素溶脱挙動に着目した研究は世界的に見ても皆無である。本研究の目的は、融雪浸透水を勘案した黒ボク土リンゴ園における窒素溶脱挙動を解明することにある。この目的を達成することにより、最終的には土壌環境面とリンゴ生育面の両者にとって有益な施肥体系を構築することが可能になると考えられる。

3. 研究の方法

本研究の調査リンゴ園地(3箇所のうちの1箇所)は、緯度(N40°45'34")、経度(E140°20'55")、標高(48.3m)の青森県鶴田町の黒ボク土リンゴ園にある。この地域は日本の東北地方北部に位置しており冬期間の降雪量が多い。このリンゴ園土壌の物理性と化学性を把握するために、100 mL コアサンプルと攪乱土壌を採取した。リンゴ園土壌の土性を判別するための土粒子密度と粒径加積曲線は、それぞれ JIS A1202 と A1204 に基づき測定した(JGS, 2010)。不飽和透水係数を推定するために必要な飽和透水係数と土壌水分保持曲線の測定は、それぞれ JIS A1218 と JGS 0151 に基づき実施した。これらの土壌水理特性情報をもとにして、土壌水分保持曲線のパラメータを非線形回帰法(Mathcad 15, PTC)により算出した(van Genuchten, 1980)。土壌 pH と EC は、それぞれガラス電極法と電気伝導率法(B-712 and B-772, Horiba)により測定した。アンモニウム態窒素と硝酸態窒素は、土壌 EC を測定した 1:5 土壌水抽出液を用いて、イオンクロマトグラフ(ICS-90, Dionex)法を適用して定量した。C/N 比を算出するために必要な全炭素と全窒素量は全自動元素分析装置(vario EL cube, Elementar)を用いて定量した。陽イオン交換容量とリン酸吸収係数は、それぞれセミマイクロ・ケルダール法(SuperKjel-1300, Actac)とバナドモリブデン酸法により測定した。

研究対象畑におけるリンゴ園土壌中の体積含水率、バルク EC および地温の同時計測を行うために、多機能土壌センサー(5TE, Decagon)を深度 4, 8, 16, 32, 64cm に埋設した。また、土壌センサー埋設深さの土壌間隙水中の無機態窒素濃度を把握するため、深度 4, 8, 16, 32, 64, 100cm に間隙水採取チューブ(DIK-8390, DAIKI)を埋設した。土壌センサーおよび間隙水採取チューブは樹幹から動径方向に約 1.5m の距離にある。土壌間隙水の採水は 1~2 週間おきに行い、採取試料を実験室に持ち帰りイオンクロマトグラフ法により採水試料のアンモニウムイオン等の陽イオンと、硝酸イオン等の陰イオンを測定した。

土壌溶液中の陰イオンの吸着能力の大小関係は、 HPO_4^{2-} 、 H_2PO_4^- > SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^- の順で高いことが示されている(Imai and Okajima, 1980)。Miki et al. (2000) が行った 4 種類の土壌型を対象にした硝酸イオンの流出実験の結果によれば、硝酸イオンの吸着能は比較的 low、硝酸流出率は未熟土 > 低地土あるいは台地土 > 黒ボク土の順で高かったことが報告されている。しかし、黒ボク土は地下水への硝酸の移動を遅延させるメリットを持ち合わせている。園地における施肥を適切に管理するためには、地表面~地下水位あるいは深部土壌まで溶脱する硝酸の排出過程を明らかにする必要がある(Maeda et al., 2008)。このため、アンモニウムや硝酸といった無機態窒素の移動の詳細を理解するために、これらのイオン種の吸着特性を知ることが重要である。土壌溶液中の無機態窒素濃度と土粒子表面に吸着された無機態窒素量の関係を理解するために、著者らは Tani et al. (2004) により提案された $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸着等温実験を実施した。吸着等温関係を定式化するために、Langmuir 型(Langmuir, 1918)シグモイド型(Endo et al., 2009)吸着等温式が適用された。

$$s_1(c_1) = \frac{a c_1}{1 + b c_1} \quad (1)$$

$$s_2(c_2) = \frac{d}{1 + f \exp(-g c_2)} \quad (2)$$

ここに、 s と c はそれぞれ土粒子への吸着量 (mg/g) と土壤溶液の溶質濃度 (mg/cm^3)、添え字の **1** と **2** はそれぞれ $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 a, b, f, g は非線形回帰によるフィッティングパラメータ、 d は $\text{NO}_3\text{-N}$ の最大吸着量 (mg/g) である。

春先の融雪による浸透現象を勘案したリンゴ園土壤中の無機態窒素の挙動を推定するため、Endo et al. (2013) が開発した数理モデルを改良した(図1)(遠藤ら, 2017)。リンゴ園土壤における水、無機態窒素および熱輸送の挙動は偏微分方程式(PDE)の観点から記述することができる。これらのPDEを解くために、著者らはFlexPDE V6(PDE Solutions Inc., 2009)を使用して数理モデルを改良した。土壤中の物質や熱移動解析を行うためにこのソフトウェアが適用された例は多数存在する(登尾, 2001; Endo et al., 2009; Endo et al., 2013; 遠藤ら, 2014, 遠藤ら, 2017)。土壤中の水、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ および熱輸送現象を記述する支配方程式は式(3)~(6)として表現される。

$$c_w \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(-K_u \left[\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right] \right) + K_c ET_0 S(z) \quad (3)$$

ここに、 ψ はマトリックポテンシャル (cmH_2O)、 t は経過時間 (d)、 c_w は水分容量 ($1/\text{cm}$)、 z は深度 (cm)、 K_u は不飽和透水係数 (cm/s)、 K_c は農林水産省(1997)による作物係数(=0.8~1.1)、 ET_0 は基準蒸発散量 (cm/d)、 $S(z)$ は黒田・千葉(2006)により提案されたリンゴ樹の根系密度関数 ($1/\text{cm}$) である。アンモニウム態窒素と硝酸態窒素の移動については、果樹根による窒素吸収や形態変化を考慮した移流分散方程式を適用した。アンモニウム態窒素の移動を記述する式は式(4)を適用した。

$$\frac{\partial (c_1 \theta + \rho_d s_1)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_1 \frac{\partial c_1}{\partial z} \right) - \frac{\partial (J_w c_1)}{\partial z} - k_{\text{nit}} (c_1 \theta + \rho_d s_1) - u_{\text{NH}_4\text{-N}} S(z) \frac{dU_1}{dt} + N_{\text{mine}} \gamma(z) + N_{\text{fix}} \gamma(z) - N_{\text{immol}} \gamma(z) \quad (4)$$

ここに、 U_1 は果樹の根による $\text{NH}_4\text{-N}$ の総吸収量 (mg/cm^2)、 dU_1/dt は $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸収に関する時間的分布 ($1/\text{d}$)、 N_{mine} は地力窒素の発現量 ($\text{mg/cm}^2/\text{d}$)、 N_{fix} は窒素固定量 ($\text{mg/cm}^2/\text{d}$)、 N_{immol} は $\text{NH}_4\text{-N}$ の有機化量 ($\text{mg/cm}^2/\text{d}$)、 k_{nit} は硝化速度定数 ($1/\text{d}$)、 γ は分布関数 ($1/\text{cm}$)、 ρ_d は乾燥密度 (g/cm^3)、 D_1 は $\text{NH}_4\text{-N}$ の分散係数 (cm^2/d)、 J_w は水フラックス密度 ($\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{d}$)、 θ は体積含水率 (cm^3/cm^3) である。リンゴ園の土壤表面を定期的に観察したところ、マメ科植物の繁茂が認められなかったため $N_{\text{fix}} = 0$ として設定した。また、1年間の地力窒素の発現量の設定値は、金野・杉原(1986)が提案した温度変換日数と、古江・上沢(2001)の反応速度論的パラメータを用いることで 0.462 mg/cm^2 を適用した。最後に、硝酸態窒素の移動を記述する式は式(5)を適用した。

$$\frac{\partial (c_2 \theta + \rho_d s_2)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_2 \frac{\partial c_2}{\partial z} \right) - \frac{\partial (J_w c_2)}{\partial z} + k_{\text{nit}} (c_1 \theta + \rho_d s_1) - u_{\text{NO}_3\text{-N}} S(z) \frac{dU_2}{dt} - N_{\text{immol}2} \gamma(z) - k_{\text{den}} (c_2 \theta + \rho_d s_2) \quad (5)$$

ここに、 U_2 は果樹の根による $\text{NO}_3\text{-N}$ の総吸収量 (mg/cm^2)、 dU_2/dt は $\text{NO}_3\text{-N}$ の吸収に関する時間的分布 ($1/\text{d}$)、 D_2 は $\text{NO}_3\text{-N}$ の分散係数 (cm^2/d)、 $N_{\text{immol}2}$ は $\text{NO}_3\text{-N}$ の有機化量 ($\text{mg/cm}^2/\text{d}$)、 k_{den} は脱窒速度定数 ($1/\text{d}$) である。 D_1 と D_2 はそれぞれ、 $1.536 \text{ cm}^2/\text{d}$ と $1.656 \text{ cm}^2/\text{d}$ を適用した(Ma et al., 1999)。本条件では有機化は生じないと仮定し $N_{\text{immol}1} = N_{\text{immol}2} = 0$ として設定した(遠藤ら, 2017)。Endo et al. (2014)は、リンゴ果根から1年間に 1.16 mg/cm^2 (116 kgN/ha) 吸収する条件を与えて、灰色低地土リンゴ園土壤中の無機態窒素濃度を推定した。埋設した土壤センサーや間隙水採取管はリンゴ樹幹の直下に存在せず、樹幹から約 1.5 m 離れている。したがって、本計算条件におけるリンゴ果樹根による吸収量を 0.5 mg/cm^2 (50 kgN/ha) と設定した。当リンゴ園では、農家によって下草が刈られた後で、再び地表面に戻している。このため、刈戻した下草からは窒素が再び無機化する(佐藤・佐々木, 1982)。このことから、下草による窒素吸収と刈り戻した下草の無機化窒素が相殺されるものとして考慮し、下草による窒素吸収量をゼロと仮定した。

4. 研究成果

調査リンゴ園の土壤 pH と EC はそれぞれ $5.15 \sim 5.87$ と $0.101 \sim 0.206 \text{ mS/cm}$ の範囲にあり、リンゴに生育に際して適性といえる(JA, 2008)。また、pH と EC は上層において高く、深くなるにつれて減少する傾向にあった。このことを受け、無機態窒素濃度も同様の傾向を示し、深度 10 cm の硝酸態窒素濃度においては日本の環境基準値 (10 mg/L) に近かった。T-C および T-N の平均値はそれぞれ 12% と 0.7% であり、代表的な黒ボク土が有する諸量を示した。また、T-C および T-N はそれぞれ深くなるほど、それぞれ増加および減少傾向を示した。リン酸吸収係

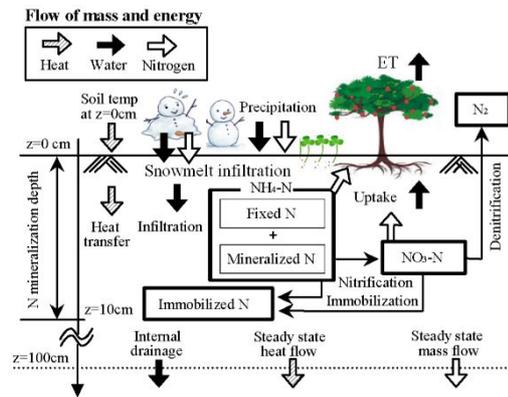


図1 春先の融雪による浸透現象を勘案したリンゴ園土壤中の無機態窒素の挙動を推定する数理モデル

数と CEC はそれぞれ $2000 \text{ mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ 以上と 40 cmol/kg 以上であることから、当リンゴ園土壌が代表的な黒ボク土であることがわかる。粒度試験の結果、砂分、シルト分、粘土分はそれぞれ **4-6%**、**20-29%**、**67-78%**であったので、壤学会法による土性は砂壤土 (SL) と判別された。土粒子密度は約 2.2 g/cm^3 程度であり、乾燥密度はすべての深度で 0.66 g/cm^3 を下回り小さく、深くなるにつれて減少傾向にあった。また、飽和体積含水率は $0.7 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 以上と高かった。飽和透水係数は $10^3 \sim 10^4 \text{ cm/s}$ のオーダーをとり、中程度の透水性を持っているといえる。すべての深度において、マトリックポテンシャルゼロの水分飽和 $\sim 100 \text{ cmH}_2\text{O}$ (pF2.0) にかけての体積含水率の増減が著しかった。マトリックポテンシャルゼロ $\sim 1000 \text{ cmH}_2\text{O}$ (pF3.0) における深度 **10 cm** の SWRC は、深度 **30 cm** 以深の SWRC よりも下方に位置した。このため、 $z=10 \text{ cm}$ の van Genuchten's SWRC パラメータ α が、 $z>30 \text{ cm}$ のよりも **10~18 倍** 高かった。

図2に示した吸着等温線から、液相の濃度領域 $0 \sim 0.05 \text{ mg/cm}^3$ における $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸着等温線の勾配は、深くなるにしたがって小さくなる傾向にあった。また、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の最大吸着量は $0.9 \sim 1.6 \text{ mg/cm}^3$ であることがわかった。一方、液相の濃度領域 $0 \sim 0.1 \text{ mg/cm}^3$ における $\text{NO}_3\text{-N}$ の吸着等温線の勾配は、深度に依存することなく、ほぼゼロであった。このことは、土壌間隙水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が 100 mg/L 未満である場合には、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が土粒子に吸着されないことを示唆している。また、液相の濃度領域 $0.1 \sim 0.2 \text{ mg/cm}^3$ にかけて $\text{NO}_3\text{-N}$ の吸着等温線の勾配が増加し、最終的に $\text{NO}_3\text{-N}$ の最大吸着量は 0.13 mg/cm^3 程度であった。このことから、このリンゴ園土壌における $\text{NO}_3\text{-N}$ の吸着量は $\text{NH}_4\text{-N}$ 量の $1/7 \sim 1/12$ 倍に相当し、非常に小さいことが明らかになった。

図3に各深度における土壌間隙水 EC の定量分析値と土壌センサーを用いた観測値の経日変化を示す。2016年5月中旬に施用した窒素肥料を受け、7月中旬までの深度 **4 cm** と **8 cm** では 1 mS/cm 程度と EC が高かった。深度 **4 cm** では EC 測定値と EC 観測値の間に差異が認められるものの、深度 **8 cm** では EC の減少傾向 (7月~9月) と不変傾向 (9月~11月) がほぼ合致している。また、深度 **4, 8 cm** の EC は7月~8月中旬まで減少傾向にあったが、7月末に追肥した窒素肥料を受け、8月中旬に EC が再度増加した。深度 **16 cm** では土壌センサーの不具合により7月中旬~12月中旬までの間の EC 観測値が得られなかったものの、8月中旬以降に EC 測定値が再び増加する傾向にあった。したがって、EC の観測値および測定値は追肥の影響を正確に反映していることが明らかになった。7月~9月にかけての EC の測定値は観測値とよく合致した。この深度の EC は浅部土層からの肥料成分の溶脱を受けて、7月~9月にかけて急激に増加した。EC のピークが観測された後からは、降水による降下浸透水による溶脱、根による吸収および有機化等により EC が減少傾向にあった。一方、深度 **64 cm** の EC は、深度 **4~32 cm** で認められたような顕著な増減傾向になかったものの、10月中旬にピークを迎えたあとで緩やかに減少する傾向にあった。以上のことから、地表面に施肥した肥料成分に起因する土壌間隙水の EC は、時間経過と深度方向への移動とともに、そのレベルが減衰しながら輸送されることがわかった。具体的には、肥料成分が地表面付近から深度 **64 cm** および **100 cm** に到達するまでには、それぞれ約4ヶ月および約7ヶ月要することが明らかになった。

土壌間隙水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の経時変化を図4に示す。中段に示したグラフは日降水量および

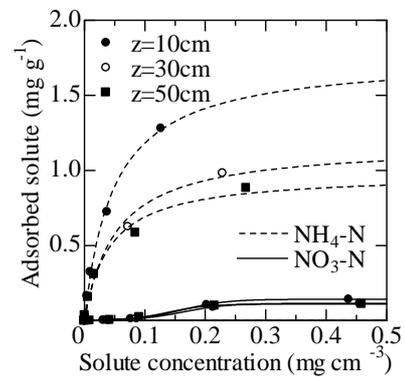


図2 調査リンゴ園における各深度の硝酸態窒素の吸着等温線

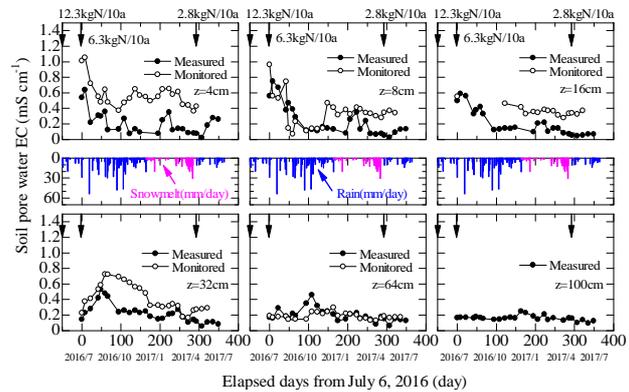


図3 各深度における土壌間隙水 EC の定量分析値と土壌センサーを用いた観測値の経日変化

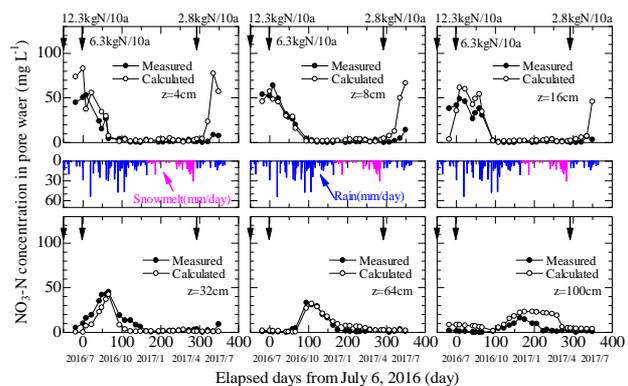


図4 各深度における硝酸態窒素濃度の定量分析値と数値解析による計算結果の経日変化

日融雪水量である。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の測定値と計算値において、ピーク濃度とピーク出現日は、深くなるにつれてそれぞれ減少および遅延する傾向にあった。深度 4 cm における $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は基肥実施から約 2 ヶ月後に 50 mg/L 程度のピークに至り、その後の降水により急激に減少した。その後、追肥を受けて $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が再び増加したものの秋雨の長雨により急激に減少した。この増減傾向は白抜きデータ点に示した計算値とほぼ合致したものの、2017 年 5 月以降における測定値と実測値の増加傾向は合致しなかった。深度 8 cm における $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、施肥後から 3 ヶ月程度かけて直線的に減少した。2017 年 5 月以降における測定値と計算値における $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度のピーク値は合致しなかったものの、 $t < 300 \text{ d}$ の濃度増減の傾向は合致した。2017 年 5 月以降において計算値が測定値を上回った傾向は、深度 16 cm においても確認された。この原因は、数値計算において地表面付近の硝酸化成作用を強く見積もり過ぎたことにあると考えられる。したがって、地表面付近における硝化パラメータの設定の難しさが浮き彫りになったので、このことが今後の解決すべき課題といえる。深度 16 cm および 32 cm においても測定値と計算値の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度のピーク値は完全に合致しなかったものの、濃度増減のタイミングは合致した。ピーク濃度の計算値と測定値が合致しなかった原因は、間隙水中の窒素吸収を行うリンゴ樹根と間隙水採取チューブの位置が、ある程度離れているためと考えられる。リンゴ樹根は浅い深さに多く存在して土壌間隙水中の窒素を吸収するため(黒田・千葉, 2006)、浅い位置ほど濃度の絶対量が整合しない傾向にあるものと考えられる。一方、深度の増加にともなって樹根量が減少するため、計算値が測定値に近似する傾向にあった。特に、深度 32 cm や 64 cm においてはその傾向が強く見られた。100 cm のような深い深度においても、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の測定値と計算値における増加傾向はおおよそ合致した。しかし、深度 100 cm での $t > 165 \text{ d}$ における濃度減少の過程において、測定値と計算値における $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の間に大きな不整合が認められた。この深度の濃度減少勾配に着目すると、計算値よりも測定値のほうが大きかった。上記の原因は、(1) 内部排水に起因して粗間隙中の水が一挙に浸透流出したことで、(2) 計算モデルにおいて $\text{NO}_3\text{-N}$ の脱着能力を大きく見積もりすぎていたことが原因と考えられる。深度 64 cm においては、2016 年 10 月頃に $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が約 35 mg/L のピークに至った。その後、約 1 ヶ月にわたり非常に高い濃度レベルを持続した後に 11 月頃から減少していた傾向にあった。土壌断面観察時には深度 60 cm 付近に地下水水位が観測されたことから、降雨後においてこのような地下水水位にすることが想定される。したがって、このような地下水水位および $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の状況であれば、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度に関する環境基準値の 3 倍を超えることになる。深度 100 cm においては、2016 年 12 月下旬に $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が約 23 mg/L (環境基準値の 2.3 倍) のピークに至り、その後減少する傾向にあった。以上のことから、積雪量が多い調査地域の当リンゴ園においては、6~7 月に施肥した肥料の大部分が、約 5~6 ヶ月経過して深度 100 cm に溶脱することが明らかになった。

以上のことから、本研究対象リンゴ園では、梅雨時期~降雪前までの無機態窒素の溶脱が著しく(4 ヶ月半で 85 cm 移動)、11 月頃に行われるリンゴの収穫のタイミングで、深度 60~80 cm における間隙水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が環境基準値の約 3 倍に達することが明らかになり、深部土壌の環境汚染の可能性が示唆された。また、このような多雪地域における黒ボク土リンゴ園においては、春先において融雪浸透水による極端な窒素溶脱(15 日間(0.5 ヶ月)で 35 cm 移動)が認められた。したがって、4 月中には土壌中の無機態窒素がほぼゼロにリセットされることが明らかになり、この頃にはリンゴの生育に必要な窒素成分の土壌への供給が早々に必要になることが示唆された。今後、数理モデルにおける表層土壌中の硝酸化成作用パラメータや、深部土壌における $\text{NO}_3\text{-N}$ の吸脱着特性のモデル化を精緻化(改善・改良)する必要があるものの、多雪地域の黒ボク土リンゴ園における窒素溶脱機構の詳細を引き続き検討していく意義は大きい。本研究において融雪浸透水に伴う窒素溶脱の挙動が明らかになった。したがって、今後も、融雪量が多い本リンゴ園を対象に、土壌環境面とリンゴ生育面の両者にとって有益な施肥体系を構築するための、最適施肥量および最適施肥時期を検討することが今後の課題である。

5. 主な発表論文等

- 〔雑誌論文〕(計 3 件)
- 〔学会発表〕(計 4 件)
- 〔図書〕(計 0 件)
- 〔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)研究分担者 なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 加藤 幸

ローマ字氏名: Koh KATO