

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：14101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18757

研究課題名(和文) 根圏土壤中の根の吸水・養分吸収を考慮した水分・窒素循環の評価と地下水硝酸汚染予測

研究課題名(英文) Estimation of water movement and nitrogen transport in a root zone with root water and solute uptake

研究代表者

坂井 勝 (Sakai, Masaru)

三重大学・生物資源学研究科・講師

研究者番号：70608934

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、蒸散にともなう植物根の吸水、形態変化をともなう窒素成分の移動と植物根による吸収を考慮し、畑地土中の水分・窒素動態について定量的に予測することを目的としたものである。ダイズ栽培畑における圃場実験とダイズ栽培ポットを用いた実験を行い、HYDRUS-1Dを用いた数値シミュレーションに必要な生育過程における蒸散比の変化、ダイズの水ストレス応答関数を明らかにした。得られたパラメータを用いて数値計算を行い、蒸発散を含むダイズ畑の水分移動、および根圏土壤中の窒素動態を予測した。

研究成果の概要(英文)：The main objective of this study is to estimate the fate of nitrogen and water movement in a crop field using numerical simulation. Field and pot experiments with soybeans were conducted to obtain a ratio of transpiration and evapotranspiration, and a water stress response function of soybeans. A numerical simulation using the HYDRUS-1D code was conducted with these parameters, and water movement with evapotranspiration and nitrogen transport with root uptake in a root zone were evaluated.

研究分野：土壌物理学

キーワード：数値シミュレーション 土中水分移動 窒素動態 蒸発散 根の吸水・吸収

### 1. 研究開始当初の背景

畑地における窒素成分の移動と形態変化  
畑地における過剰施肥の問題の一つとして、硝酸態窒素の下方浸透による地下水汚染が挙げられる。高濃度の硝酸態窒素を含む地下水の摂取は、乳幼児のメトヘモグロビン血症を引き起こす恐れがある。このため、国は1990年に環境基本法に基づく水質環境基準項目に硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素の基準値10 mg/Lを設定している。我が国の農業の持続的発展のためには、地下水の水質管理技術や施肥管理技術の確立が重要である。

土壌に施与された窒素肥料は、土壌微生物の働きにより、有機態窒素(Org-N)、アンモニウム態窒素(NH<sub>4</sub>-N)、硝酸態窒素(NO<sub>3</sub>-N)に形態変化しながら土中を移動する。特にアジアモンスーン地帯に位置する日本では、年間降水量が年間蒸発量よりもはるかに多いため、土壌から地下水へ多くの窒素成分の溶脱が起こり得る。そのため、窒素の形態変化に加え、不飽和土壌中の水分・溶質移動、植物根の吸水と養分吸収を正しく総合的に予測する必要がある。

### 2. 研究の目的

畑地に施肥された窒素肥料は、有機態窒素が無機化、硝化という変化をしながら土壌中を移動し、最終的には硝酸態窒素による地下水汚染を引き起す。この硝酸汚染を防止するためには、根圏土壌中の植物根の吸水速度とそれともなう養分吸収量を把握した上で、減肥計画を立てる必要がある。本研究では、植物根の吸水、窒素成分の吸収を定量的に評価し予測することを目的とした。そのため、ポット試験と圃場調査を行うことで、植物根の吸水予測モデルに必要なパラメータである、吸水の深さ分布を表す吸水強度分布、および土の乾燥によるストレス状態を表す水ストレス応答関数の評価を行った。また、作物の生長にともなう地表面蒸発と蒸散の割合の変化を評価した。得られたパラメータに基づき、数値シミュレーションを行うことで、作物の生長過程における蒸散・根の吸水を考慮した水分・窒素成分動態の予測を行った。

### 3. 研究の方法

#### (1) 圃場試験

三重大学附属農場のダイズ畑(フクユタカ)で、2015年と2016年に現場観測を行った。圃場の土性は、表層25 cmは砂質ロームで、25 cm以深の心土層はロームである。いずれの年も畝立ては行わず、株間20 cm、条間70 cmで6月上旬に播種を行った。また、地表面にはビニールマルチを設置することで、地表面蒸発を防いだ。

ロッド長30 cmの土壌水分センサーを水平方向に設置し、10、20、30、40 cm深の体積含水率を測定した。また、同センサーを地表面と30 cm深から鉛直下向きに設置し、0-30、30-60 cm深の平均体積含水率を測定した。地

上部では、降雨量、高度2 mの温湿度、風向風速、上下方向の日射量を測定した。センサー類は全てデータロガーCR1000に接続し、測定値を15分間隔で保存した。

ダイズの生育データとして、草高、根密度分布、LAI、地表面被覆率といった生育データを定期的に測定した。根密度は、ダイズを中心とする縦20 cm～横20 cmの面積について深さ3 cm毎の土から根の採取を行い、土体積当たりの乾燥重量から求めた。地表面被覆率は上方から撮影した写真を画像解析することで求めた。まず、地上約5.5 mから畑の3 m×3 mの領域についてデジタルカメラで撮影を行った(有効画素数1600万画素)。得られた写真についてPhotoshopで画像解析を行い、色相50～125(緑の領域)、彩度と明度に0～255(全領域)を規定して選択される面積を被覆面積とした。

鉛直方向に設置した土壌水分センサーで測定した土中水分量の減少量を用い、水収支式から植物根の吸水にともなう蒸散速度を算出した。また、観測した気象データを用いて、Penman-Monteith式から可能蒸発散速度を算出した。

#### (2) ポット栽培実験

ポット栽培実験は、2016年7月5日～11月1日に三重大学内のガラス室で行った。三重大学附属農場の畑土2mm篩通過分を1/2000aワグネルポット2個に充填し、フクユタカを直播した。発芽後、地表面にビニールマルチを施し蒸発を抑制した。ポットの3、9、15、21 cm深にTDT水分計、9 cm深にMPS-6土中水圧力計を設置した。また、電子天秤で測定した重量変化から蒸散速度を求めた。給水はポット下端からで行い、3日毎に十分に給水する湿潤ポットから可能蒸散速度 $T_p$ 、およそ6日毎の給水で乾燥ストレスを与える乾燥ポットから実蒸散速度 $T_a$ を求めた。そして、ダイズが十分に生長した期間において、水ストレス応答関数(=  $T_a/T_p$ )を推定した。

#### (3) 数値シミュレーション

圃場試験で得られた蒸散比( $T_p/ET_p$ )、およびポット栽培実験で得られた水ストレス応答関数( $h$ )を用いて、ダイズ生長過程における土中水分移動および窒素成分動態の数値計算をHYDRUS-1Dを用いて行った。計算対象は地表面から50 cm深の鉛直1次元土層とした。計算対象期間は2015年の6月1日の播種から9月23日の115日間とし、圃場試験で得られた降雨量とPenman-Monteith式で得られる $ET_p$ に基づき上部境界条件と可能吸水速度を与えた。また、吸水強度分布には圃場試験で得られた根密度分布を与えた。窒素動態の計算には、別途得られた三重大学附属農場畑土の硝化速度定数(0.07/d)、およびアンモニウム態窒素の吸着特性( $K_d=0.5$ )を用いた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 圃場試験

土中水分量の測定値から推定した実蒸散速度と  $T_a$  を Penman-Monteith 式で求めた  $ET_p$  とともに図 1 に示す。 $T_a$  は、6/22 から 7 月末に向けて増加し、地表面が葉で覆われるとともに  $ET_p$  の値に近づいた。その後、9 月から 10 月にかけておおよそ  $ET_p$  と同様な一定値を示し、10 月以降は老化により減少した。7 月末から 8 月中旬には、 $ET_p$  に比べて  $T_a$  の極端な低下が見られた。これは土が乾燥している期間と一致していることから、水ストレスが原因であると考えられる。10cm 深の水分量が 0.25 以上の期間については、土は十分に湿っており、蒸散は可能蒸散速度  $T_p$  で生じると仮定した ( $T_a = T_p$ )。水収支式に基づく可能蒸散速度  $T_p$  と Penman-Monteith 式で求めた  $ET_p$  の比 (蒸散割合  $T_p/ET_p$ ) を図 2 に示す。 $T_p/ET_p$  は播種以降増加し、8 月後半には 0.8 ~ 1 程度となった。値が大きくばらつくのは、 $ET_p$  の計算値が放射量の測定値に影響を受け大きく変動するためと考えられ、今後の課題である。図 3 に得られた  $T_p/ET_p$  と地表面被覆率の関係を示す。被覆率と  $T_p/ET_p$  はばらつきは見られたが、おおよそ一致した。LAI の測定と異なり被覆率の測定は、植物株の採取を必要とせず非破壊で行えることから、数値シミュレーションで用いるための蒸散割合  $T_p/ET_p$  を得るために有効であると考えられる。

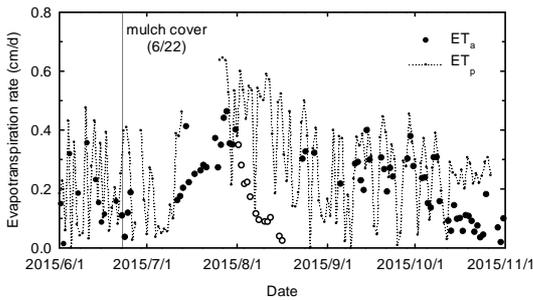


図 1 土中水分減少量と水収支式から求めた実蒸散速度 ( $T_a$ ) と Penman-Monteith 式から求めた可能蒸散速度 ( $ET_p$ )

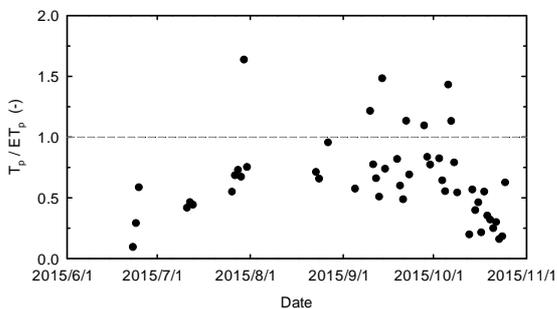


図 2 可能蒸散速度 ( $T_p$ ) と可能蒸散速度 ( $ET_p$ ) の比

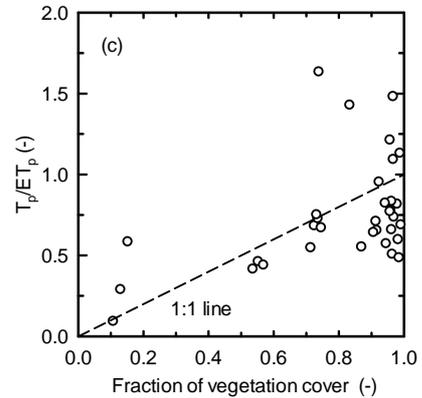


図 3 蒸散比 ( $T_p/ET_p$ ) と表面被覆率の関係

##### (2) ポット栽培実験

両ポットのサイズは、7/7 の発芽以降ほぼ同様の生長をした。図 4 に 8/16 ~ 8/18 の両ポットの蒸散速度  $T$  の変化を示す。乾燥ポットは 8/13、湿潤ポットは 8/15 に給水している。両ポットの蒸散は日中に最大となり、夜間は非常に小さかった。8/16 は両ポットの  $T$  は等しいが、8/17 の 9 時以降、乾燥ポットでは乾燥ストレスにより  $T$  が徐々に減少した。8/14 ~ 9/30 間の両ポットの蒸散量の比 ( $T_a/T_p$ ) から、 $\alpha$  を求めた。この時、蒸散が小さい夜間、ストレスの影響が現れない 10 時までの値は除いた。図 5 に  $\alpha$  と乾燥ポット 9 cm 深の体積含水率  $\theta$  及び土中水圧力  $h$  との関係を示す。全期間で見てもおおよそ  $\alpha = 0.17$  で  $\alpha = 1$  となり、 $h = -1,880\text{cm}$  からストレスを受け、 $h = -16,530\text{cm}$  で蒸散が 0 となる ( $h$ ) が推定できた。

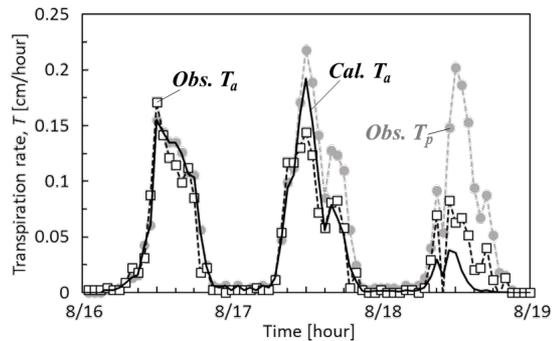


図 4 湿潤ポットと乾燥ポットの蒸散速度

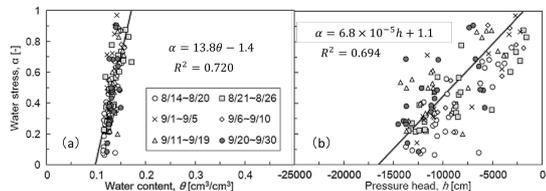


図 5 水ストレス応答関数  $\alpha$  と (a) 体積含水率、(b) 土中水圧力の関係

### (3) 数値シミュレーション

表面被覆率を蒸散割合  $Tp/ETp$  として用いて、Penman-Monteith 式で求めた可能蒸発散速度  $ETp$  を可能蒸発速度  $Ep$  と可能蒸散速度  $Tp$  に分割したものを図 6 に示す。被覆率の点間や  $ETp$  が欠損している期間については線形補間でも求めた値を用いた。ここでは、ダイズの黄化が始まるまでの期間(9/23まで)に注目した。ダイズの生長にともない地表面が被覆されるにつれ、 $Tp$  が大きくなり、逆に  $Ep$  が減少する。得られた  $Tp$  と  $Ep$  を条件として与え、数値計算で土中の水分移動および蒸発散の予測を行った。図 6 に計算で得られた実蒸散速度  $Ta$  と実蒸発速度  $Ea$  を示す。蒸発速度に注目すると、地表面蒸発が卓越するダイズの生育初期においても、十分に生育して  $Ep$  が小さくなる 8 月中旬以降においても、 $Ea$  が  $Ep$  を下回る日が多く見られた。これは、地表面近傍の土の乾燥で透水性が低下し、地表面への水の供給が不十分となったためである。一方、蒸散速度については、8 月中旬を除くほとんどの日で  $Ta$  が  $Tp$  と等しくなった。これは、また湿潤な地下部からも根の吸水が行われることから、乾燥の影響をほとんど受けなかったためである。現場観測でも土の乾燥によって蒸散の低下が見られた 8 月中旬については、数値計算においても同様に乾燥ストレスによって  $Ta$  が  $Tp$  の値を大きく下回った。

図 7(a)に、根圏(20cm 深)土壤溶液中のアンモニア態窒素( $NH_4^+$ )と硝酸態窒素( $NO_3^-$ )の濃度変化を示す。 $NH_4^+$ は栽培開始後から減少し、形態変化によって  $NO_3^-$ が増加している。またダイズ根の吸収と下方への浸透により  $NO_3^-$ の濃度も時間とともに減少している。図 7(b)にダイズ根に吸収された積算窒素濃度を示す。今回の試算では多くの量が  $NO_3^-$ として吸収されている。

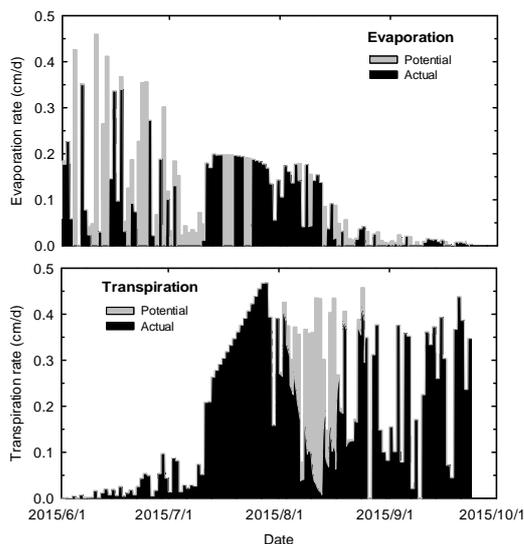


図 6 可能蒸発・可能蒸散速度と実蒸発・実蒸散速度の計算結果

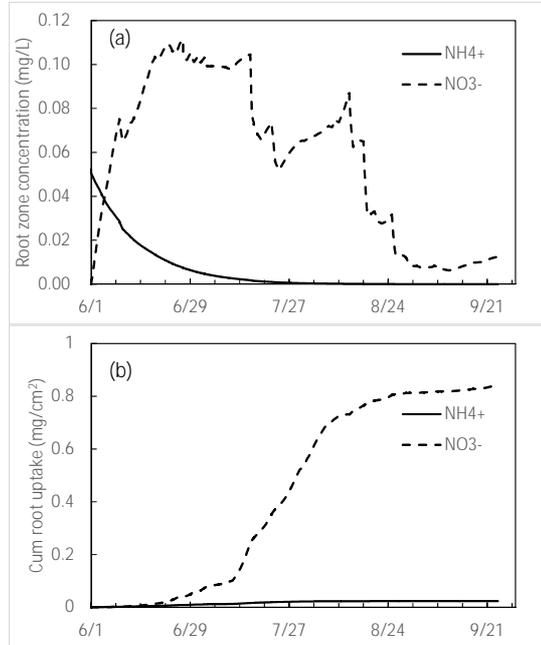


図 7 (a)根圏土壤溶液中の窒素濃度と(b)ダイズ根による積算吸収量

### 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 5 件)

坂井 勝, 土壤水分量から推定したダイズ栽培圃場における蒸発散の変化について, 土壤水分ワークショップ論文集, 査読有, 2016, 31-36

Sheng, W., K. Rumana., M. Sakai, F. Silfa, S.B. Jones, A Multi-Functional Penta-Needle Thermo-Dielectric Sensor for Porous Media Sensing, IEEE Sensor Journal, 査読有, No.16, 2015, 3670-3678

DOI:10.1109/JSEN.2016.2527020

Rudiyanto, M. Sakai, M.Th.van Genuchten, A.A.Alazba, B.I.Setiawan, B.Minasny, A complete soil hydraulic model accounting for capillary and adsorptive water retention, capillary and film conductivity, and hysteresis, Water Resour. Res., 査読有, No.51, 2015, 8757-8772

DOI:10.1002/2015WR017703

坂井 勝, 取出伸夫, 坂本祐樹, プロファイルプローブ Drill & Drop Probe の埋設方法と簡易補正の検討, 土壤の物理性, 査読有, 130 巻, 2015, 27-32

URL:<https://js-soilphysics.com/downloads/pdf/130027.pdf>

Sakai, M., N. Toride, Estimating evapotranspiration using field measurements, Engineering Geology and Hydrology, 査読有, No.29, 2015, 37-45

〔学会発表〕(計 13 件)

坂井 勝、土中水分量から推定したダイズ栽培圃場における蒸発散の変化について、土壌水分ワークショップ, 2016年12月10日, キャンパスイノベーションセンター東京(東京都・田町)

大西一平、坂井 勝、取出伸夫、成毛千尋、ダイズポット栽培実験における蒸散速度と蒸発散速度の日周期変化、土壌物理学学会, 2016年10月29日, 京都大学(京都府・京都市)

坂井 勝、池田和弥、取出伸夫、HYDRUS-3Dを用いたFOEAS設置圃場における暗渠近傍の3次元水分移動の数値計算、土壌物理学学会, 2016年10月29日, 京都大学(京都府・京都市)

坂井 勝、岡橋卓朗、取出伸夫、ダイズ栽培圃場における土壌水分変化から推定した蒸散割合 SCF、水文水資源学会, 2016年9月15日~2016年9月17日, コラッセ福島(福島県・福島市)

岡橋卓朗、坂井 勝、取出伸夫、ダイズ栽培圃場における土壌水分変化から推定した蒸散割合 SCF と草高の関係、農業農村工学会大会講演会, 2016年8月30日~2016年9月2日, 江陽グランドホテル(宮城県・仙台市)

大西一平、坂井 勝、取出伸夫、三石正一、スマートフィールドライシメータによる圃場の蒸発量、排水量の推定、農業農村工学会大会講演会, 2016年8月30日~2016年9月2日, 江陽グランドホテル(宮城県・仙台市)

岡橋卓朗、坂井 勝、取出伸夫、圃場におけるダイズ生長過程の土中水分変化と蒸発散について、土壌肥料学会中部支部例会, 2016年3月3日, 三重大学(三重県・津市)

成毛千尋、坂井 勝、取出伸夫、ダイズ生長過程の土中水分量に基づく根の吸水速度分布の推定、土壌肥料学会中部支部例会, 2016年3月3日, 三重大学(三重県・津市)

岡橋卓朗、坂井 勝、取出伸夫、ダイズ栽培圃場における可能蒸発散に対する可能蒸散の割合と草丈の関係、土壌物理

学会, 2015年10月24日, 佐賀大学(佐賀県・佐賀市)

成毛千尋、坂井 勝、取出伸夫、土中水分変化から推定したダイズ根の吸水速度分布と乾燥ストレス、土壌物理学学会, 2015年10月24日, 佐賀大学(佐賀県・佐賀市)

池田和弥、坂井 勝、取出伸夫、原口暢朗、宮本輝仁、HYDRUS-3Dを用いたFOEAS設置圃場における除塩の評価、土壌物理学学会, 2015年10月24日, 佐賀大学(佐賀県・佐賀市)

岡橋卓朗、坂井 勝、取出伸夫、土中水分量から推定したダイズ生長にともなう可能蒸発散速度の変化、農業農村工学会大会講演会, 2015年9月1日~2015年9月3日, 岡山大学(岡山県・岡山市)

成毛千尋、坂井 勝、取出伸夫、土中水分変化から推定したダイズ根の生長にともなう吸水強度分布の変化、農業農村工学会大会講演会, 2015年9月1日~2015年9月3日, 岡山大学(岡山県・岡山市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)  
なし

取得状況(計 0 件)  
なし

〔その他〕

ホームページ等  
<http://www.bio.mie-u.ac.jp/junkan/sec1/lab5/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者  
坂井 勝 (SAKAI, Masaru)  
三重大学・大学院生物資源学研究所・講師  
研究者番号: 70608934

(2) 研究分担者  
なし

(3) 連携研究者  
なし

(4) 研究協力者  
取出伸夫 (TORIDE, Nobuo)  
渡辺晋生 (WATANABE, Kunio)  
岡橋卓朗 (OKAHASHI, Takuro)

成毛千尋 (NARUKE, Chihiro)  
大西一平 (OHNISHI, Ippei)  
中山恵美子 (NAKAYAMA, Emiko)  
石田侑里 (ISHIDA, Yuri)  
奈良賢治 (NARA, Kenji)  
柏原光司 (KASHIWABARA, Koji)  
森 優奈 (MORI, Yuna)