

黒ボク土水田の浸透型が水稻栽培条件下の 物質動態に及ぼす影響

佐々木長市*・稲垣元昭**・松山信彦*・江成敬次郎***・小関 恭****

The Influence of Percolation Patterns on the Removal of Soluble Elements in Stratified Paddy Fields of Kuroboku Soil, with Rice.

Choichi SASAKI*・Motoaki INAGAKI**・Nobuhiko MATUYAMA*・Keijirou ENARI*** and Kyo KOSEKI****

* Hirosaki University, 3 Bunkyo-cho Hirosaki-shi Aomori-ken 036-8561, Japan

** Hokuriku-kousoku Co., Ltd., 3-4-40 Shimizu-cho Takaoka-shi Toyama-ken 933-0866, Japan

*** Tohoku Institute of Technology, 35-1 Yagiyama Kasumi-cho Taihaku-ku Sendai-shi Miyagi-ken 982-8577, Japan

**** Miyagi Agricultural College, 2-2-1 Hatadate Taihaku-ku Sendai-shi Miyagi-ken 982-0215, Japan

Abstract

Models of stratified paddy fields of Kuroboku soil were used and composed of 3 layers. These models were planted with rice and were fertilized. The models were used to investigate the relationship between the removal of soil solution element in percolation water and percolation patterns.

Concentrations of nitrate, dissolved oxygen and redox potential in the open system percolation (subsoil) increased more than those in the closed one (plow layer and plowsole). Also, electric conductivity and the concentration of iron element and manganese element tended to invert. Potassium element provided from the conventional fertilizer increased. Potassium concentrations in both plow layer and plowsole was more than that of subsoil during the 50 days from the beginning of this test. After 50 days, the concentration of soil solution in all layers became similar.

Concentrations of total nitrogen in the drainage of this model were higher than that of inundation during the first 50 days from the beginning of the test. Concentrations of total phosphorus had a similar tendency. But that tendency only continued for about 30 days. After 50 days, concentrations of total nitrogen in inundation became higher than those of drainage. After 30 days, concentrations of total phosphorus in inundation became higher than those of drainage.

Key words : Kuroboku soil, paddy field, percolation patterns, removal of soluble elements, electric conductivity

* 弘前大学 〒036-8561 弘前市文京町3, ** 北陸航測(株) 〒933-0866 高岡市清水町3-4-40, *** 東北工業大学 〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35-1, **** 宮城県農業短期大学 〒982-0215 仙台市太白旗立2-2-1
 キーワード: 黒ボク土, 水田, 浸透型, 物質動態, EC

1. はじめに

水稲根周囲の土壌溶液中の成分動態解明は、水稲の生育・収量および肥培管理にとって重要事項の一つである。これまでの土壌溶液の動態研究は、ワグネルポットに稲を植えた条件の試験が主（例えば石川ら, 1992; 山崎, 1971）で、土層も作土層のみを持つ条件が中心となっていた。このようなポットからの排水の経時的濃度変化を調査し、根域の土壌溶液中の成分環境を推測していた。それゆえ、根の周囲における深度別の土壌溶液濃度の動態解明等は未了であった。また、これらの変動を酸化還元環境の詳細な変動と対比させての検討も少ないようである。現実の圃場における水稲根は約50cm深まで伸びることが報告され（佐藤, 1991）、この深さまでの水稲根の土壌溶液環境を推定する研究は少ないと思われる。このような状況の中で、松浦ら（1977a, 1977b）は作土（18cm厚）と下層土（60cm厚）からなる円筒に稲を栽培し、水田下層土の役割を調査している。その結果、下層土は鉄、マンガン等の養分吸収に役立つことを述べている。また、この研究では、大まかではあるが酸化還元電位（作土で1箇所と下層土で2箇所）と円筒下端からの排水中の無機成分動態を測定している。根域が現実の水田に近くなり、かつ浸透のある条件で実験していることは、ポット試験と圃場試験の橋渡しの研究として位置づけられるであろう。しかしながら、根域の深度別土壌溶液中の成分変動は測定していない。かつ、土層を2層構成（作土層、心土層）とし、長年営農した場合の水田の成層構成である3層構成（作土層、スキ床層、心土層）とはなっていない。さらに、浸透型という概念も見あたらない。本研究では、水稲栽培条件下で、3層構成の水田モデルを作製し、作土層から心土層までの浸透型を明確にしつつ、根域での土壌溶液中の物質動態を深度別に解明することを目的とした。浸透型は、作土、スキ床層は閉鎖浸透とし、心土層の浸透型のみを閉鎖浸透となるモデルと開放浸透となるモデルの2種類を作製した。従って、浸透型の相違による土壌溶液中の成分比較は心土層のみとなる。また、現実の栽培条件に近づけるため施肥も行った。

なお、本報告は、1995年～1997年の3カ年にわたり実施した結果を取りまとめたものである。

2. 実験方法

1) 実験計画および供試試料

成層黒ボク土水田モデルは、表-1に示すような条件で4本作製した。浸透強度は、15～25mm/dを目標とした。浸透型は、実験①では第I層（作土層）および第II

表-1 土層構成と浸透型

Table 1 The soil layer composition and the percolation pattern

実験名	土柱浸透実験	
	①	②
成層状態	10～20 mm/d*	
第I層・作土 (代かき)	閉鎖浸透・黒ボク土	
第II層・スキ床 (突固め)	閉鎖浸透・黒ボク土 透水制限層	
第III層・心土 (突固め)	開放浸透 閉鎖浸透 黒ボク土	
第IV層・支持層 (突固め)	閉鎖浸透・砂	

実験①, ②は異なる土柱を使用した。

* は実測の日減水深の範囲を示す。

層（スキ床層）は閉鎖浸透で、第III層（心土層）は地下水位が低く開放浸透となる水田（乾田）とした。実験②では、地下水位が高く全層（第I～III層）が閉鎖浸透となる水田（湿田）を計画した。浸透型のコントロールは、第II層の透水性を最小とし、地下水位の上下により行った。

試料は、弘前大学附属千年農場の黒ボク土を全層に用いた。ただし、実験時には第III層の支持のため砂層を第IV層として作製した。土性は砂質壤土である。

供試試料の基本的理化学性は表-2に示した。ただし、全鉄、全マンガンは、6mol/L熱塩酸溶出法（船引・青峰, 1953）で、交換性塩基は、1mol/L酢酸アンモニウムで抽出後原子吸光度法（土壌養分測定法委員会編, 1970）で測定した。全窒素は、ケルダール法、全リンはモリブデン比色法を用い、有機物含有量は、重クロム酸法（土質工学会, 1982）で定量した。

2) 実験装置および作製方法

成層水田の模型は、内径30cm、長さ75cm、肉厚1cmの円筒（ポリ塩化ビニル製）内に作製した。模型は4層構成とし、第I層を12.5cm、第II層を10cm、第III層を35cm、第IV層を10cmの厚さを目安とした。第I層の作製は、代かき状にした土（乾燥密度: 0.50 Mgm⁻³）を、突固め作製した第II層（透水制限層, 乾燥密度: 0.75 Mgm⁻³）の上に載せて行った。第III層は黒ボク土を円筒内に5cm厚ずつ突固め、35cm区間が一定密度（乾燥密度: 0.5～0.6 Mgm⁻³）となるように作製した。第IV層は、砂を用い突固め（乾燥密度1.44 Mgm⁻³）作製した。

水稲の栽培品種は、つがるおとめとし、円筒中心部に2株（各1本、中苗）植えた。田植えは、毎年5月下

表-2 供試試料の理化学性

Table 2 Physical and chemical properties of soil

測定項目 試料	密度 (Mg/m ³)	土性	全鉄 *	全マンガン *	K ₂ O *	Na ₂ O *	T-N *	T-P *	全炭素 *
黒ボク土	2.59	SCL	57	0.92	0.16	0.08	4.4	6.0	5.8

土性は国際土壌学会区分による。*はg/kgを示す。

旬、稲刈りは10月中旬頃実施した。中干しは3カ年とも実施しなかった。肥料は、各円筒当たり成分で1g(窒素は40.0被覆尿素LP100号を、リン酸は過燐酸石灰を、カリは硫酸カリを使用)ずつ、更に珪カル20gを施用した。窒素肥料(緩効性)は根の直下に、他の肥料(速効性)は全層施肥とした。追肥は実施しなかった。

実験装置は、ビニルハウス内にセットし、灌漑水は大学構内の地下水を用いた。

圧力水頭測定装置は、前報(佐々木ら, 1998)と同じく円筒側壁にガラスフィルタ(長さ3.5cm, 径7mm)を設置し、これにガラス管を接続して作製した。採水装置は、圧力水頭測定用と同じ寸法のガラスフィルタと厚肉採水ガラス管(長さ70cm, 内径3mm, 外径9mm)を用いた。各層の酸化還元電位測定用の電極は、円筒側壁にほぼ水平に取り付け、この電極と対称位置の円筒側壁に孔(径10mm)を設けて、円筒内への通気孔とした。なお、この通気孔は負圧浸透時には大気に開放し、正圧時には閉じることとした。

3) 測定項目および方法

測定項目は、圧力水頭、酸化還元電位および浸透水の水質である。これらの測定は根域の浸透型と水質を調査するため深度別に実施した。採水は、採水側のフィルタに吸引圧を作用させて実施した。詳細については既報(佐々木, 1992)を参照されたい。降下浸透水の成分濃度は、鉄(Fe)およびマンガン(Mn)は原子吸光光度法、カリウム(K)、ナトリウム(Na)は炎光光度法で行った。これらの分析には日立偏光ゼーマン原子吸光光度計(日立製作所, Z8200型)を用いた。窒素(全窒素, 硝酸態, 亜硝酸態, アンモニア態)およびリン(全リンおよびリン酸)はN・P自動分析装置(ブランルーベ社, AACS2型)を使用した。酸化還元電位(Eh)の測定には、ORP電極と携帯用デジタルEh測定器(セントラル科学社, 本体: UC-23型, 電極: UC-702E型)を用いた。測定は、電極内部液と土壌との液絡開始後約15分経過後に実施した。電気伝導度(EC)の測定には、導電率メータ(堀場製作所, ES-14型)を用いた。各深度の降下浸透水中の溶存酸素量(DO)の値は、隔膜式白金センサ

によるDOメータ(セントラル科学社, 本体: UC-12型, 電極: UC-203型)を用い測定した。

浸透型の判別指標である限界負圧は、大型円筒を用いた測定法(佐々木, 1992)で測定した。開放浸透を計画した第Ⅲ層の限界負圧はほぼ5cmとなった。浸透強度の測定はメスシリンダを用い、水温・地温の測定は日記計を使用した。

測定は、圧力水頭、採水、酸化還元電位および稲の生育調査を週1回の目安で実施した。

3. 結果および考察

得られた結果を図-1~図-5に示した。濃度変動等の比較検討がしやすいように、実験初期と実験終了間近の値を示した。

1) 圧力水頭分布と浸透型

実験①の圧力水頭分布は、第Ⅰ層では正圧でかつ深さに対して近似的に45度勾配を持っていた(図-1参照)。第Ⅱ層上部は正圧、下部は負圧となり、ポテンシャルロスが発生していた。第Ⅲ層の圧力水頭は負圧の-10cm前後で、同層の限界負圧-5cmより低い圧となった。ゆえに、第Ⅲ層は開放浸透層と判断される。実験②では、排水位を地表下約25cmまで上昇させ全層正圧とした。したがって、全層閉鎖浸透と判断される。

この結果より、実験①と実験②の浸透型の違いは第Ⅲ層でのみとなった。

2) 酸化還元電位(Eh)、溶存酸素(DO)および電気伝導度(EC)

① Eh

実験①の値は、第Ⅰ層では-100mV以下の値となり、強還元層と判断された。第Ⅱ層の値は、ほぼ0mV以下となった。しかし、開放浸透である第Ⅲ層では、500mV以上の値を示し酸化層となっていた。実験②では、第Ⅲ層も還元層となり、全層還元状態となった。実験②の第Ⅲ層の値は上層の値に比べ若干高かった。この原因は、水稲根等の侵入量が下層は少なかったため、根からの分泌物や根の腐朽による微生物の基質となる有機物供給量が少ないことが原因の一つと考えられる。

以上の結果より、第Ⅲ層は、開放浸透層の場合は酸化層、閉鎖浸透層の場合は還元層となったと判断される。松浦ら(1977b)は、乾田の下層土が還元層となったことが従来の説に反するとしてその理由を詳細に検討している。しかし、彼らの実験は排水位の低いことのみが乾田の条件を満たしているに過ぎず、大気疎通条件を持つ乾田とはなっていない。従って、下層土は閉鎖浸透であり経時的に酸素不足条件となり、還元層が発生したのは当然と考えられる。ゆえに、浸透型の明確化は土層の酸化還元環境を考える場合は重要な要因の一つと思われる。また、水稻根は、酸化層で活性が高まることや養分吸収が旺盛になること(山崎, 1971)から判断し、水稻の生育収量が何らかの影響を受けるものと推測される。

② DO

実験①と②の田面水の DO 値は飽和に近くなっていたが、第Ⅰ層上部で約 4 mg/L と低下し、同じ値で第Ⅱ層下部まで至った。DO 値の低下は浸透水中における微生物の酸素消費および還元物の酸化に用いられた結果(渡辺, 1971)と考えられる。しかし、これらの酸素消費にもかかわらず実験①の第Ⅲ層では値が急上昇し 6 mg/L 以上の値となった。実験②では、第Ⅲ層が閉鎖浸透になったため、開放浸透層に比べ低い DO 値となった。水耕栽培時における根の養分吸収は、酸素が十分にある場合に旺盛であること(山崎, 1971)などが知られている。したがって、この土層の条件は、根の養分吸収環境にとっては好ましいと推測される。

③ EC

実験①の値は、第Ⅰ層から第Ⅲ層まで $5 \sim 20 \text{ mSm}^{-1}$ の範囲となった。実験終了時の第Ⅲ層の値は、上層 (10

mSm^{-1} 台)に比べ若干低下する傾向 (10 mSm^{-1} 以下)であった。この原因は、降下浸透水が酸化層を通過する場合に鉄等の溶解成分を減少させること、易移動性のイオン等の濃度低下が原因と推測される。実験②の値は、第Ⅰ層では実験①と同様の値であった。しかし、第Ⅱ層下部および第Ⅲ層の値は、上層に比べ増加し $20 \sim 30 \text{ mSm}^{-1}$ の値となった。この原因は、還元層のため上層からの降下浸透水中の鉄およびマンガン沈殿等が少なかったことならびに第Ⅲ層の還元化に伴う水溶性の成分の溶出によると推測される。

実験②の降下浸透水のように、作土層に比べその値を上昇させつつ排水路および河川等へ流出するならば、水域の水質悪化の原因となる可能性が予測される。水田の環境への負荷を少なくすると言う意味からも、地下水位が低く、第Ⅲ層が酸化層になる水田(乾田)は好ましいと推察される。

3) 降下浸透水の各種成分濃度

① Fe, Mn 濃度

Fe および Mn は土壌の酸化還元状態に対応しその溶解性を変えることは広く知られている。更に、その特性を利用して水田の土壌型の分類等に用いられている(山崎, 1971)。

i) Fe

実験①, ②の Fe 濃度(図-2 参照)は、実験初期にはその濃度が全層において 3 mg/L 以下で両実験の差異はあまり明確ではなかった。しかし、実験終了時には実験②の第Ⅲ層で鉄が検出 (20 mg/L 前後)され、実験①ではほとんど検出されないという傾向が明確となった。実験①の実験終了時の第Ⅱ層の値は、実験②ほど上昇し

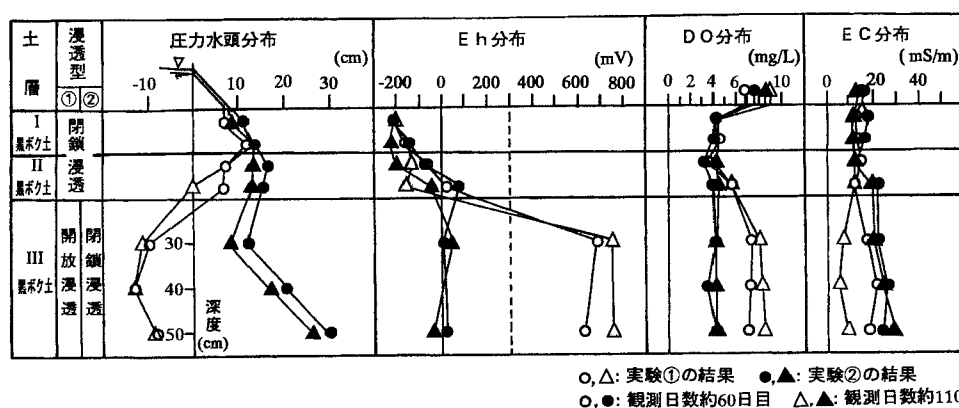


図-1 黒ボク土水田の圧力水頭, Eh, DO 及び EC 分布

Fig. 1 Distribution of hydraulic head profile in downward water, Eh, DO and EC in stratified kuroboku soil paddy fields

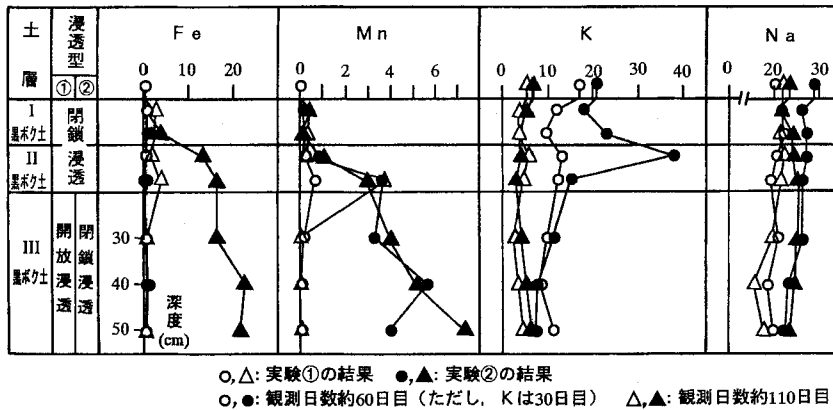


図-2 降下浸透水中の Fe, Mn, K, 及び Na 濃度 (mg/L)

Fig. 2 Concentrations of Fe, Mn, K and Na elements in downward water in the model columns of kuroboku soil paddy fields (mg/L)

なかった。この原因は、第Ⅲ層から上方への酸素補給の影響等によると推測されるが、詳細は今後の課題である。また、実験②では、第Ⅱ・Ⅲ層の下方の部位ほど濃度が上昇する傾向となった。

この結果は、実験①では第Ⅱ層下部とⅢ層上部の境界部で Fe が沈殿集積する現象が発生していることを示唆している。心土層の濃度の違いは、浸透型によりもたらされ、水稲根の周囲に鉄 (Fe^{II}) がある場合とない場合ではその生育・収量へ影響を及ぼす可能性が考えられる。因みに、実験終了後に円筒を解体し断面を観察した結果、開放浸透層に伸張した根の色は白く生き生きしている感じであった。これに対し、閉鎖浸透層に伸張した根の色は赤褐色となっていた。赤褐色根は一般の圃場でよく観察され、根が放出した酸素と浸透水中の鉄の反応が水稲根表面で発生したためと推測されている。しかしながら、開放浸透層では、根周辺の土壤溶液中に鉄がほとんど存在しないため、鉄錆色の鏝ができず白色根となったと推察される。

ii) Mn

実験①の Mn 濃度は、第Ⅰ層で 1 mg/L 以下、第Ⅱ層で 0.5~4 mg/L の値で検出された。かつその濃度もこれらの層の下層ほど大きくなる傾向であった。しかし、酸化層である第Ⅲ層では Mn はほとんど検出されなかった。全層閉鎖浸透で還元層となっていた実験②では、第Ⅰ・Ⅱ層の濃度は実験①と同様であったが、第Ⅲ層では Mn の濃度が 3~7 mg/L となり、第Ⅰ・Ⅱ層に比べ濃度の増大が明確に認められた。

以上の結果より、作土層から心土層までの水稲根域の Fe および Mn の降下浸透水中の濃度実態、およびこれ

らの成分が酸化還元に対応し移動集積する特性が判明した。

② K および Na 濃度

肥料の三要素の一つである K とこの元素と価数が同じ Na は、土壤コロイドによる保持力も類似している (川口ら, 1974)。それゆえその動態も類似していると推測された。

i) K

速効性の肥料として用いた K 濃度の動態を明確にするため、図-2 には実験開始 30 日目の値を記載した。実験初期の K 濃度は、実験②の第Ⅰ層が 20 mg/L 前後、第Ⅱ層が 15~40 mg/L となった。第Ⅲ層 (心土層) では、10 mg/L 前後と上層に比べ濃度が低下した。第Ⅰ・Ⅱ層が第Ⅲ層に比べ濃度が高まる傾向は、約 50 日間にわたり確認された。実験①の初期の第Ⅰ・Ⅱ層の濃度は 10~15 mg/L、第Ⅲ層ではやや低下し 10 mg/L 前後であった。実験初期の実験①と実験②の第Ⅰ・Ⅱ層における濃度の相違は、顆粒施肥のために分布が不均一になり、採水部に拡散が不十分なためとも考えられるが、詳細な検討は今後の課題である。また、両実験とも実験開始 50 日目頃からは、110 日目の値 (第Ⅰ~Ⅲ層まで 5 mg/L 前後) とほぼ同じとなった。作土・スキ床層で K 濃度が高いと言うことは、水稲根に有効に利用される可能性が高いことを示唆しているものと思われる。

松浦ら (1977b) の円筒下端からの排水の濃度と比較するならば、実験①および②の第Ⅲ層下部の値は、彼らの報告した値の約 2 倍となった。また、実験開始 50 日目からは第Ⅰ~Ⅲ層までの値がほぼ同じ値となり、かつ以後変化がほとんどないという結果は、追肥の時期が稲

作開始後 50 日目頃が妥当とする稲作指針を裏付ける結果と推察される。なお、初期には両実験とも田面水中の濃度が灌漑水の濃度(約 10 mg/L)に比べ高くなる傾向が認められた。この原因は、作土層から田面水への K 肥料の溶出によるものと推測される。

ii) Na

得られた結果を通覧するならば、実験①および②の値は、ほぼ田面水から排水部まで同じ値かやや第Ⅲ層で低下する傾向となった。なお、詳細に値を見るならば、初期の実験①の値は、第Ⅰ～Ⅲ層まで 20 mg/L 前後となったが、実験②の第Ⅰ～Ⅲ層の値は 25 mg/L 前後となった。本実験における供試水の Na 濃度は、20 mg/L 前後であった。それゆえ、土壌への供給は主に灌漑水からのみであると考えられる。しかし、実験①に比べ実験②の第Ⅲ層の値が高い傾向であった。

筆者らは、既報(佐々木ら, 1998)で Fe 濃度が高まればこれに対応して K および Na 濃度が高まることを報告した。今回の第Ⅲ層について Fe との関係でその濃度を検討してみるならば、Na については同じような関係が認められるようである。ただし、今回は K については傾向が明確には認められなかったといえよう。

③ 窒素, リン濃度

肥料の三要素であり、かつ水域の富栄養化をもたらす原因物質の一つである窒素, リン濃度について以下に検討する。

i) 窒素濃度

窒素濃度は、全窒素(T-N)、硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)、亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)、アンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)について測定した。実験①および②の結果(実験開始後約 30 日目と 110 日目の値)の一例を図-3 に示した。測定値を概観するならば、いずれの形態の窒素濃度も、30 日目の値に比べ 110 日目の値は低下傾向が認められた。むしろ、110 日目の値は両実験間で測定値に明確な差異は認めがたい。施肥および乾土効果により窒素濃度が高い傾向は、初期に明確であり、後期になるにしたがいその効果が低下したためと推測される。そこで閉鎖・開放浸透という浸透型を明確にしつつ、これらの成分動態を検討した。ただし、T-N の値(図-4 参照)は田面水および排水のみとした。

a) $\text{NH}_4\text{-N}$

実験①では、実験初期と終了時の第Ⅰ・Ⅱ層の濃度はほぼ同じ値(0.1 mg/L 前後)であった。実験初期の第Ⅲ層の値は、上層に比べ急上昇(1~2 mg/L)を示した。この原因は、同層が酸化層で乾土効果が実験②に比べ大きいことなどが考えられる。第Ⅲ層の濃度が第Ⅰ・Ⅱ層に比べ高まる傾向は、約 40 日間にわたり観測された。

その後は第Ⅰ・Ⅱ層と同じ値となった。実験②の第Ⅰ・Ⅱ層では、初期に比べ実験終了時に濃度が低下する傾向が認められた。しかし、第Ⅲ層ではこの傾向が明瞭とはならなかった。また、実験②の第Ⅰ～Ⅲ層の濃度が実験①の同層に比べ高い傾向となった(ただし、実験①の初期の第Ⅲ層の値を除く)。この原因は、実験①に比べれば少ない量であるが乾土効果があり、この時に生じた $\text{NH}_4\text{-N}$ が還元的环境において安定で、かつこの溶出が緩やかに進み実験①の値に比べ実験終了時には高い濃度となったと考えられる。これに対し、実験①の第Ⅲ層は、酸化層が継続し、アンモニア態窒素が酸化層で安定な硝酸態窒素等へ変わっていったと考えられる。それゆえ、実験①の第Ⅲ層の値が実験終了時には実験②の第Ⅲ層の値より低い濃度となったものと推測される。なお、実験②の第Ⅲ層の値も実験開始後約 20 日間は濃度が高まる傾向が認められた。この一因は、排水位を上昇させ第Ⅲ層を飽和させたため、封入空気除去が不十分で第Ⅰ・Ⅱ層に比べ酸化的であり乾土効果が発生したためと推測される。また、実験初期には、田面水の値が 0.5~1.6 mg/L と高く、灌漑水の値(約 0.2 mg/L)より高い傾向であった。この原因は、土壌および肥料からの田面水への溶出によるものと推察される。

b) $\text{NO}_3\text{-N}$

硝酸態窒素濃度は、実験①および②の第Ⅰ・Ⅱ層では全観測期間 0.1 mg/L 未満の値であった。しかし、実験初期の実験①の第Ⅲ層(酸化層)ではこれに比べ 10 倍ほどの値(0.8~1.7 mg/L)を示した。更に下部ほど濃度が上昇する傾向が認められた。アンモニア態窒素の一部および乾土効果により生じた窒素が硝酸態に変化したものと推測される。しかし、この値も 50 日目頃でほぼ 110 日目の値に近似したものとなった。実験②の第Ⅲ層は、実験初期の方が終了時に比べ濃度が高い傾向となった。この原因は、易移動性の成分の流出によるものと考えられる。

水田の下層が酸化層であるかあるいは還元層であるかの相違(浸透型の相違が規定)は、降下浸透水中の硝酸態窒素濃度の増減に影響を及ぼすと判断される。さらに、下層の環境は地下水や排水路の硝酸態窒素濃度を考える上で重要な要因となると思われる。

c) $\text{NO}_2\text{-N}$

実験①の初期の濃度は、第Ⅰ層から第Ⅲ層まで 0.015 mg/L 前後となった。第Ⅲ層における濃度の上昇傾向は認められなかった。実験終了時の実験①の第Ⅰ～Ⅲ層の値は、0.01 mg/L 以下の値となり、実験初期に比べ濃度が低下傾向となった。実験②の観測初期の値は、第Ⅰ層から第Ⅱ層まで実験①とほぼ同じ値となった。実験

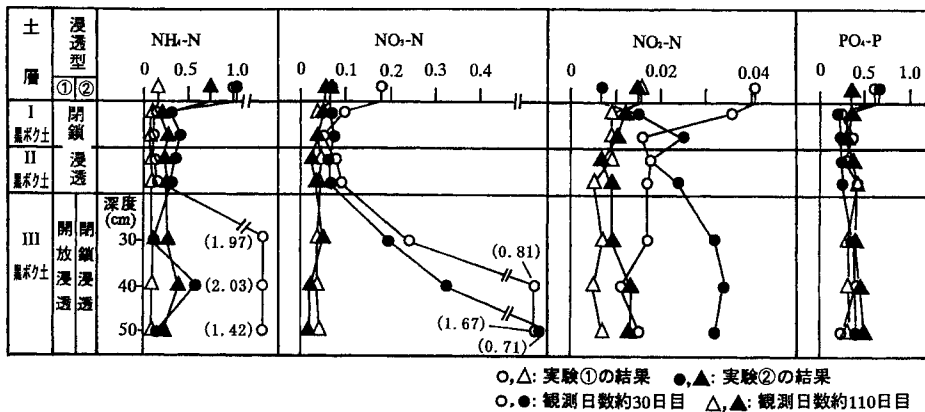


図-3 降下浸透水の窒素及びリン酸濃度 (mg/L)

Fig. 3 Concentrations of nitrogen and phosphate ions in downward water in these model columns (mg/L)

②の第Ⅲ層の値が実験①より高くなった原因は、実験②の土層が初期には酸化的であったことが亜硝酸態窒素への変化を促したためと考えられる。なお、亜硝酸態窒素濃度は、硝酸態窒素濃度に比較するならば1/10程度であった。この原因のひとつは、伊藤(1993)が述べているように「アンモニア態窒素から亜硝酸態窒素そして硝酸態窒素への反応は速やかでほとんど亜硝酸態窒素の検出がなされない」ことや脱窒現象によると推察される。

d) T-N

実験①, ②の田面水中の濃度は、実験開始から終了まで2mg/L前後の一定値となった(図-4参照)。しかし、排水の値は、両実験とも実験開始後12日目の値は10mg/L以上となり、その後30日目まで急激に濃度が低下した。30日目以降は緩やかに濃度が低下する傾向となった。排水中の濃度は、田面水に比べ50日目までの濃度が高くなった。この原因は、施肥および乾土効果によると推測される。50日目以降の排水中と田面水中の関係を詳細に検討すると、田面水の値が2mg/Lで排水の値1mg/Lに比べ高い傾向を示していた。この原因は、作土層内に施肥した緩効性の肥料の一部が田面水に長期にわたり溶けだしたためとも考えられる。また、降下浸透水中の成分は、土壌による濾過、土粒子への吸着および植物による吸収により、田面水に比べ低下傾向となったと考えられる。

以上の結果より、窒素濃度は実験開始50日目頃まで排水中の濃度が高まること、浸透型に対応し硝酸態の窒素濃度の増減が発生することが明らかとなった。なお、本実験結果は、松浦らの実験(1977b)の排水のT-N濃

度が50日目までは高く、それ以降は一定値となった結果と類似していた。

ii) リン濃度

リン濃度は、全リン濃度(T-P)とリン酸濃度(PO₄-P)の2種類について検討した。

a) PO₄-P

得られた濃度(図-3参照)は、実験①も実験②も第Ⅰ～Ⅲ層まで0.2～0.5mg/Lの範囲となった。その値も両実験で観測初期と観測終了時ではほぼ同じであった。しかし詳細に見るならば、実験②の実験終了時の第Ⅰ～Ⅲ層の値は、実験開始に比べ濃度が若干上昇する傾向が認められた。この原因は、鉄の溶出に伴い鉄型のリン酸が有効化(三好ら, 1983)してきているものと考えられる。この第Ⅲ層下層の値は、松浦ら(1977b)の円筒下層土からの排水の濃度にほぼ一致した経時変化となった。

b) T-P

実験①と実験②の田面水の値は、全観測期間0.2～0.4mg/Lの範囲となった(図-5参照)。これに対し、排水中の初期の値は、両実験とも1.3mg/L前後となった。このように高い値は、実験開始30日目頃まで続いた。その後は、田面水が排水に比べ多少大きな値となって実験終了時まで経過した。速効性の肥料を施肥したために、短期間にその濃度が低下していったものと推測される。松浦ら(1977b)も排水中のリン酸濃度を測定しているが、下層土からの排水中で濃度が高まる傾向は認められなかったとしている。この相違の原因は、供試土壌の違い等が影響していると予想される。

以上のT-NおよびT-Pの測定結果より、その初期浸

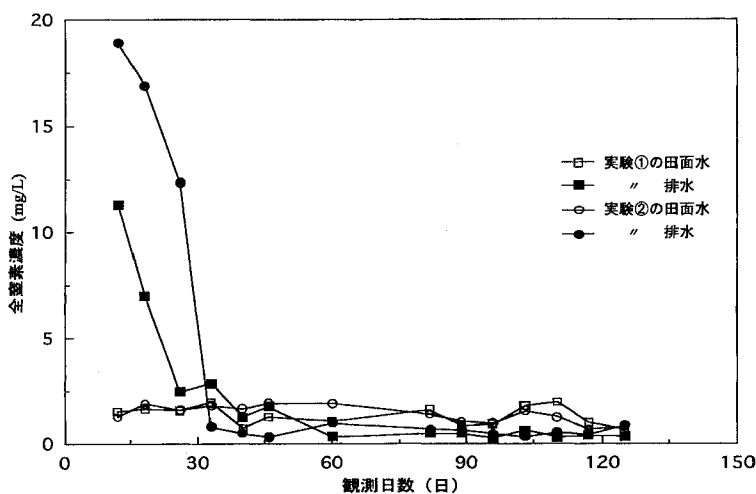


図-4 田面水中及び排水中の全窒素濃度

Fig. 4 Concentration of total nitrogen in surface water and drainage water of paddy field model

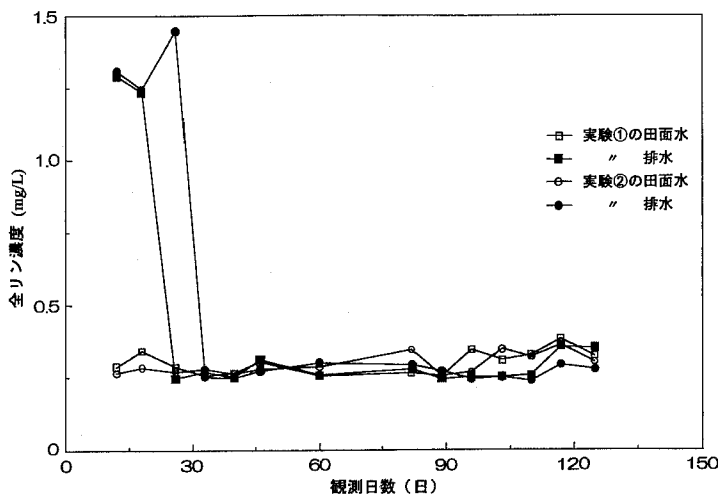


図-5 田面水中及び排水中の全リン濃度

Fig. 5 Concentration of total phosphorus in surface water and drainage water of paddy field model

透水の濃度は、浸透型の如何によらず高く、水田下層からの排水は河川や湖沼を富栄養化させる可能性が高いと判断される。また、佐々木ら (1998) は、本研究と同じく成層水田模型 (4層構成) を作製し、本研究の第Ⅲ層 (酸化層) の下に第Ⅳ層 (還元層) を設け、硝酸態窒素濃度を測定している。その結果、第Ⅳ層を浸透した土壌水の硝酸態窒素濃度が 1/100 以下に低下することを実証している。このように、心土の酸化層の下に還元層をもつ

ような環境が存在するならばその濃度の軽減等がなされるであろう。

鉛直方向の浸透水の水質浄化については、田面水と暗渠排水の値を比較し、この2つの値をもとに、土の鉛直浄化機能有りとする場合もあれば (増島, 1982)、浸透水の水質浄化が明確にならない (朴ら, 1998) とする場合もある。このように相反する報告がなされている原因の一つには、浸透水がどのような酸化還元環境の中を流下

していたのか、つまりこのような酸化還元を規定するどのような浸透型の土層中を浸透したのかということの明確化がなされていないことなどが考えられる。

この得られた一連の結果より、水稻根周辺の窒素、リン濃度等の実態および施肥（緩効性および速効性肥料）の肥効期間等が明らかとなった。

4. おわりに

本研究では、黒ボク土水田地帯を想定した水田模型を作製し実験に供した。模型は、作土、スキ床層および心土層の全層が閉鎖浸透で、かつ全層還元層となるもの（実験②）と心土層のみが開放浸透で、かつ酸化層となるもの（実験①）の2種類とした。この水田模型には、稲を付付けし、緩効性の肥料（窒素）と速効性の肥料（カリ、リン）を施肥し、この模型内を降下する根域の土壌溶液中における物質動態を深度別に検討した。

全層閉鎖浸透の模型の DO 値は、作土、スキ床層および心土層の値が約 4 mg/L、心土層が開放浸透の場合は 6 mg/L 以上に増大した。Fe 濃度は、閉鎖浸透である作土、スキ床層では全観測期間ほぼ 3 mg/L 以下となった。心土層では、閉鎖浸透の場合は 1~20 mg/L となったが、同層が開放浸透となった場合は全期間ほとんど Fe 濃度が検出されなかった。Mn 濃度は、作土層では全期間ほぼ 1 mg/L 以下となるが、スキ床層は 0.5~4 mg/L の範囲となった。心土層が開放浸透時にはほとんど検出されなかった。心土層が閉鎖浸透層の場合は 3~7 mg/L となった。閉鎖浸透層で Fe、Mn 濃度は、下層ほど濃度が増大する傾向となった。

カリ濃度は、作土、スキ床層で実験開始から約 50 日間 10~40 mg/L となった。心土層は閉鎖・開放浸透の双方で同期間 10 mg/L 前後となった。観測終了時には、全層 5 mg/L 前後の値となった。Na 濃度は、全観測期間全層で 15~30 mg/L の値となった。実験開始時に比べ濃度が多少低下傾向であった。K 濃度には、浸透型に対応した濃度の相違は明瞭とはならなかった。

NH₄-N 濃度は、全層閉鎖浸透層である場合は全観測期間 0.5 mg/L 以下となった。心土層が開放浸透の場合の実験初期には 2 mg/L へ濃度が高まった。上層に比べ濃度の高まりは、実験初期から約 40 日間に渡り観測されたが、それ以降は閉鎖浸透の値と類似したものとなった。NO₃-N 濃度は、全層閉鎖浸透の場合は全観測期間 0.1 mg/L 以下となった。心土層が開放浸透の場合は 1 mg/L 前後の値が実験開始から 50 日間にわたり観測された。しかしそれ以降は、閉鎖浸透層の値と近似した。NO₂-N 濃度は浸透型の如何にかかわらず実験初期には全層 0.01~0.02 mg/L の範囲となった。実験終了時には

同様に全層 0.01 mg/L 前後となった。PO₄-P の濃度は観測期間中第 I~III 層まで、0.2~0.5 mg/L の値で、浸透型による明確な差は認められなかった。

排水中の T-N 濃度は、実験初期には 10 mg/L 以上と高くなったが、その後減少し、50 日目を降は 1 mg/L 前後の値となった。T-P 濃度は、実験初期は 1 mg/L 以上の値であったが 30 日目を降は 0.3 mg/L 前後となった。以上の傾向は心土層の浸透型の如何にかかわらず認められた。

EC の値は、閉鎖浸透層である作土、スキ床層では全期間 10~20 mSm⁻¹ の範囲となった。心土層は、実験初期には浸透型の如何を問わず上層と近似した値であった。しかし実験終了時には、心土層が開放浸透層の場合は上層より値が低下（10 mSm⁻¹ 以下）し、閉鎖浸透層の場合には逆に増加傾向（20 mSm⁻¹ 前後）となった。

以上の結果より、稲の生育環境下で根域の浸透型を明確にした場合における物質動態の実態が判明した。また、施肥後の排水路等への浸透水の T-P および T-N 濃度は、富栄養化をもたらす目安の値（T-N : 0.2 mg/L, T-P : 0.02 mg/L）より高く、環境への影響が懸念される（田淵, 1986）。なお、試験終了後、円筒を解体してみると、根は 50 cm 深までも伸長していた。今後は、稲の養分吸収への浸透型の影響等を報告する予定である。

[謝 辞]

本研究は、弘前大学農学生命科学部工藤啓一助教授および東北工業大学土木工学科齊藤孝市助手の協力により遂行できた。記して厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 土質工学会編（1983）：土の試験実習書，p. 95~102，土質工学会，東京。
- 土壤養分測定法委員会編（1970）：土壤養分分析法，p. 335~341，養賢堂，東京。
- 船引眞吾・青峰重範（1953）：土壤実験法，p. 91~98，養賢堂，東京。
- 石川雅也・田淵俊雄・山路永司・中島淳（1992）：用水濃度と浸透量が水質浄化と水稻生育に与える影響について，農土論集，159：91~99
- 伊藤豊彰（久馬一剛他編）（1993）：土壤の事典，p. 2~3，朝倉書店，東京。
- 川口桂三郎ら（1974）：土壤学，p. 102~107，朝倉書店，東京。
- 増島 博（1982）：水界環境としての水田，山根一郎編，水田土壤学，p. 308~341，農文協，東京。
- 松浦勝美・福永明憲・坂上行雄（1977a）：水稻の生育と

- 無機養分吸収に及ぼす下層土の役割に関するモデル実験, 土肥誌, 48: 19~24.
- 松浦勝美・福永明憲・坂上行雄 (1977b): モデル実験による透水期間中の水田下層土の酸化還元電位および水稻養分の動態, 土肥誌, 48: 25~34.
- 三好 洋・嶋田永生・石川昌男・伊達昇 (1983): 土壌肥料用語事典, p. 102~103, 農文協, 東京.
- 朴 光来・日高 伸・熊澤喜久雄 (1998): 埼玉県櫛引台地の湧水により灌漑されている水田表面水の硝酸態窒素濃度および δ^{15} 値の変化, 土肥誌, 69: 287~292.
- 佐々木長市 (1992): 成層モデル土柱における開放・閉鎖浸透水の DO 値について, 農土論集, 159: 65~71.
- 佐々木長市・江成敬次郎・小関 恭・中山正与 (1998): 開放浸透層を心土層にもつ水田モデル土層における物質動態, 土壌の物理性, 78: 3~10.
- 佐藤照男 (1991): 不耕起田の土壌孔隙構造とその意義, 農業技術体系『作物編』追録, 13: 1~10.
- 田淵俊雄 (1986): 水質入門, 46~52, 農業土木学会, 東京.
- 和田秀徳 (1978): 湛水土壌の酸化・還元と水稻の存否, 川口桂二郎編, 水田土壌学, p. 67~71, 講談社, 東京.
- 渡辺巖 (1971): 農業と土壌微生物, p. 202~208, 農文協, 東京.
- 山崎不二夫 (1971): 農地工学 (上), p. 50~75, 東京大学出版会, 東京.

受稿年月日: 1999年9月22日
受理年月日: 2000年4月20日