J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 101, p. 17～26 (2005)

カドミウム汚染水田の浸透型が物質動態および水稲に及ぼす影響

Pongpattanasiri SUKTHAI*・佐々木長市*・松山信彦*・
野田香織**・殿内暁夫*

Influence of a Percolation Pattern on the Removal of Soluble Elememts in Downward Water and Rice Plant with Models of Cadmium Polluted Paddy Fields

Pongpattanasiri SUKTHAI*, Choichi SASAKI*, Nobuhiko MATUYAMA*,
Kaori NODA** and Akio TONOUTI*

* Faculty of Agriculture and Life Science, Hirosaki University,
3 Bunkyo-cho, Hirosaki-shi, Aomori 036-8561, Japan
** Faculty of Science and Thechnology, Hirosaki University,
3 Bunkyo-cho, Hirosaki-shi, Aomori 036-8561, Japan

Abstract

We investigated the influence of the percolation pattern on the removal of soluble elements and rice plant under inundation during the cultivation with models of strati-fied layers of cadmium polluted paddy fields. At that models, plow layer and plowsole consisted of cadmium polluted soil but gravel filled subsoil is not polluted. These models had different percolation pattern in the plowsole and subsoil. In the closed system model, every layer had water flow in a closed system while the open system model had water flow in an open system in plosole and subsoil over the groundwater.

The following results were obtained. At low groundwater levels, plow sole and subsoil over the groundwater had water flow an open system and hence oxidized layers. On the contrary, at high groundwater level, every layer had water flow in a closed system and hence reduced layers. The electrical conductivity values of water flow in a closed system were larger than those in water flow in an open system. In the same way, concentrations of iron, calcium and manganese in water flow in a closed system became larger than those in water flow in an open system. Plant height, number of stems and dry matter weight of rice plants under the closed system model are larger than those of open system model. But no significant difference is recognizedwhile considering leaf age and heading. The total weight of grains and filled grain ratio of rice plants under closed system treatment were better than those in open system. The root elongation depth of plants under both the models were about 60 cm. Cadmium concentration in the brown rice of plants grown under open system models are about ten times higher than that of plants grown under closed system.

The above results made it clear that under inundation conditions during the cultivation period, the removal of the soluble elements, concentration of cadmium in brownrice, growth and yield of rice plant were affected by the percolation patterns.

* 弘前大学農学生命科学部
** 弘前大学理工学部
キーワード：カドミウム汚染水田模型，生育収量，玄米中のカドミウム濃度，浸透型

Key words：Model of polluted paddy field with cadmium, Growth and yield of rice plant, Concentration of cadmium in the brown rice, percolation pattern

1. 緒 言

日本における土壌汚染の問題は，昭和 40 年代に顕在化し，昭和 45 年には農用地の土壌汚染防止等に関する法律が制定された（飯村康二，2001）。この対象となった汚染物質の一つが鉱山からの排水に含まれるカドミウムである。カドミウムを含む灌漑水利用により土壌が汚染（徳永ら，1975）され，このような水田で生産される玄米を食べイタイイタイ病などの健康被害がもたらされた。そのため，玄米中のカドミウム濃度が 1 mg kg^{-1} 以上のものが法律で汚染米と指定されている。しかし一方ではこの値が高すぎるという批判もある（浅見，1975）。農林水産省のホームページ（2002）では，pH 調整および出穂前後常時湛水栽培が汚染米防止対策として公開されている。吸収抑制対策としては，還元状態やアルカリ側でのカドミウムの不溶化が考えられてきた（浅見，1997，陽，1993）。最近では，コストが安く，低濃度で広範囲の重金属を除去できるファイトレメデイエーションによる方法も注目されている（王ら，2004）。しかし，安定してカドミウムを低濃度に抑える対策としては客土が中心で，その層厚は 20 cm〜30 cm（徳永ほか，1977，浅見，1997，直原，2001）が妥当とされている。この農業土木的対策による汚染水田の更生法は今日まで実施されてきている。

しかし，最近 FAO/WHO 合同食品規格委員会（通称コーデックス委員会）は，1996 年に米（精米）のカドミウム安全基準値を 0.1 ppm とする案を提案し，日本でもこれまでの基準値の見直しに迫られている（浅見，2004）。これまでの汚染米の基準値 1 ppm が仮に 0.2 ppm へ変更された場合，約 8 万 ha の汚染水田対策が予想されている（畑，2003）。こうした背景のもと，国や県等の関係機関で全国的な水田等の更生対策が検討されている（農環研，2004）。

これまでも，汚染土層厚が 30 cm と厚い場合，汚染土の一部がすき床層になり，還元力が弱い場合は酸化状態となり，常時湛水栽培を維持しても下層からの Cd の吸収があり汚染米の発生があるのではと懸念されていた（徳永ほか，1977）。これまでの試験は，ポットに栽培する試験が中心（Jiangou *et al.* 2003）で，現地における試験も下層の酸化還元状態の重要性は十分認識されず，客土厚のみが問題とされていた。氾濫原の水田断面調査時には，同一断面に鉄の集積層が 2 層以上散見される場合がある。この集積現象は，洪水時の土砂の堆積下に発生しており，自然の客土と推測される（佐々木・小関，1996）。また，一般に水稲根は 40〜50 cm 深まで到達する。このことより考えるならば，常時湛水条件下で稲を栽培しても，下層が酸化層となる場合はカドミウムの玄米への蓄積の危険性が予測される。また，佐々木ら（1999）および小関・佐々木（2004）により，すき床層および心土層は，浸透型の相違により，開放浸透となり，酸化層となること等が証明されている。このことより，下層からのカドミウムの吸収が懸念された。

本研究の目的は，これまでカドミウム汚染水田で実施されてきた常時湛水栽培が浸透型との関係でどのような影響を受けるのかを検討することとした。具体的な検討は汚染土厚が厚い水田のモデルを作製し，常時湛水を維持した。この条件下で稲を栽培して，作土層より下層の浸透型が異なる場合の物質動態，稲の生育収量およびカドミウム吸収にどのような影響をもたらすかを究明した。

なお，本研究は円筒中にカドミウム汚染水田より採取した土を充填し行った。

2. 実験方法

2.1 実験計画および供試試料

カドミウム汚染水田の模型は，Table 1 に示すような条件で各 2 本作製した。実験 ① では，作土層は閉鎖浸透，耕盤層および心土層の排水位より上部を開放浸透，排水位より下部を閉鎖浸透とした。実験 ② では，排水位を高く維持し全層閉鎖浸透とした。ゆえに，浸透型の相違による水稲および物質動態への影響は耕盤層および心土層内で起こると考えられる。浸透量は，最適減水深 20〜30 mm/d を目標にした。浸透量は初期には 30 mm/d 台であったが終期には 20 mm/d 前後に低下した。しかし，得られた全期間の平均値はいずれの円筒実験でもほぼ 20 mm/d となった。供試試料は，第Ⅰ・Ⅱ層で鉱山の排水で汚染された水田作土を用いた。ただし，肉眼で確認できる水稲根は除去した。第Ⅲ層には，岩木川の礫を用い，河川周囲に広がる砂礫水田を想定した。なお，第Ⅲ層の支持のため第Ⅳ層を砂で作製した。

供試試料の基本的理化学性は Table 2 に示した。一般にカドミウム汚染水田（乾土中）の全カドミウム含有量が 1.5〜2 mg kg^{-1} 以上であると言われている（渋谷，1980）。薬品等を混入して実験する方法もあるが，本研究では汚染地の水田から採取した土で，かつ全カドミウム濃度は 3.93 mg kg^{-1} のものを用いた。このことにより，

現地の条件に少しでも近い環境となると考えた。カドミウムの分析は，土壌は50℃の通風乾燥機を用いて乾燥の後，2 mm 篩を通過したものを用いた。抽出はジエチルジチオカルバミン酸でキレートを生成させた後，メチルイソブチルケトンで行ったものを原子吸光法で定量した（農水省農産園芸局，1979）。全鉄，全マンガンは，熱塩酸溶出法（船引・青峰，1953）で，交換性塩基（CaO, MgO, K_2O, Na_2O）は，置換性成分の測定法および原子吸光法で測定した（土壌養分測定法委員会編，1970）。全窒素は，ケルダール法，有効態リン酸はモリブデン比色法（ブレイ第Ⅱ法）を用いた。有機物含有量の測定には，重クロム酸法（土質工学会，1982）を用いた。

表-1　土層構成と浸透型

Table 1　The composition of soil layers and the percolation pattern

実験名	土柱浸透実験 ①	土柱浸透実験 ②
成層状態	10〜35 mm/d*	
第Ⅰ層・作土（代かき，0-10 cm）	閉鎖浸透・Cd 汚染土	
第Ⅱ層・すき床（突固め，10-22.5 cm）	開放浸透・閉鎖浸透 Cd 汚染土・透水制限層	
第Ⅲ上層・心土（突固め，22.5-57.5 cm）	開放浸透・閉鎖浸透 礫	
第Ⅲ下層・心土（突固め，57.5-92.5 cm）	閉鎖浸透・礫	
第Ⅳ層・支持層（突固め，92.5-97.5 cm）	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。
湛水深は 0.01-0.05 m とした。

2.2　実験装置および作製方法

実験①および②の模型は，塩ビ性の円筒（内径 0.30 m，高さ 1.20 m，肉厚 0.01 m）内に，試料を充填し作製した。模型は，第Ⅰ層（作土層）を 0.10 m 厚，第Ⅱ層（すき床層）を 0.125 m 厚，第Ⅲ層（心土層）を 0.70 m 厚，第Ⅳ層（支持層）を 0.05 m 厚とした。はじめに，第Ⅱ層上部（透水制限部，長さ 0.025 m，乾燥密度：0.88 Mg m^{-3}）を突固め作製し，その後第Ⅱ層下部を乾燥密度：0.63 Mg m^{-3} に作製した。このときの土の含水比はほぼ 60%，土粒子は，2 mm〜10 mm 篩に残ったものを用いた。その上に代かき状にした土（乾燥密度：0.65 Mg m^{-3}）をのせて第Ⅰ層とした。第Ⅲ層は礫（粒径 2〜4.76 mm）を乾燥密度が 1.40 Mg m^{-3} となるように突固め作製した。同じく第Ⅳ層も乾燥密度が 1.44 Mg m^{-3} となるよう砂を用い，突固め作製した。

稲は，円筒中心部に 4 株（各 1 本，中苗，品種：つがるおとめ）植え，2 週間ほどして生育の正常なものを 2 本残した。田植えは，2003 年 5 月下旬とした。円筒での中干しは，実施しなかった。肥料は，各模型に成分量で窒素，リン酸，カリウムをそれぞれ 1 g，ケイ酸を 6 g 施肥した。各肥料は全層施肥とした。この装置は，ビニルハウス内にセットし，供試水には，大学構内圃場の井戸水を使用した。供試水の測定期間中の平均濃度と変動係数を Table 3 に示した。

表-2　供試試料の理化学性

Table 2　Physical and chemical properties of samples

測定項目 / 試料	真比重	土性	全鉄 *	K_2O *	CaO *	MgO *	Na_2O *	T-N *	T-P *	Cd *	有機物含有量 (%)
沖積土	2.453	L	2,820	311	2,909	496	114	4,020	1,514	3.39	9.4
礫	2.681	—	2,223	58	540	150	18	—	—	0.05	0.0

土性は国際土壌学会区分による。* は mg/乾土 1 kg を示す。礫径（mm）は 2-4.75 である。

表-3　供試水の水質

Table 3　Water quality using the experiment

項目 / 測定値	DO mg/L	EC (mS/m)	pH	Fe (mg/L)	Cd (mg/L)	K (mg/L)	Na (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
平　均　値	6.6	16.1	8.3	0.17	0.00＞	4.06	20.06	8.45	3.07	0.62	0.02
変動係数（%）	13.4	5.1	20.1	97.9	—	70.6	6.7	36.6	25.2	68.5	82.0

圧力水頭測定および土壌水の採水には，円筒側壁にガラスフィルタ（長さ 0.035 m，外径 0.007 m）をセットして行った。圧力水頭はフィルタにガラス管を接続し，採水は厚肉採水ガラス管（長さ 0.70 m，内径 0.003 m，外径 0.009 m）を連結し行った。採水は約 3 時間を目安に終了した。円筒側壁には深度別の酸化還元電位（Eh）を測定できるように ORP 電極を取り付けた。円筒側壁には，ORP 電極と対称に孔（径 0.01 m）を設け，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開放し，正圧時は閉じた。第Ⅳ層下端からの排水は，浸透型の制御のため，実験①では，第Ⅰ層上面から約 0.60 m 下，実験②では約 0.20 m 下とした。

2. 3　測定項目および方法

測定項目は，大きく 2 つになる。一つは，円筒模型内の諸条件の項目であり，他方は稲の生育収量の項目である。

円筒模型内の測定項目は，降下浸透水の圧力水頭，酸化還元電位および浸透水の水質などで，これらの測定は深度別に実施した。採水は採水側のフィルタに吸引圧を作用させる吸引脱水方式とした。降下浸透水中の各種成分濃度は，鉄（Fe）は原子吸光分析法，カリウム（K），ナトリウム（Na）は炎光分析法で測定した。Eh および pH の測定には，pH/ORP メータを，DO 測定には同じく DO メータを使用した。電気伝導度（EC）の測定には導電率メータを用いた。

浸透型の判別指標である限界負圧の測定は，大型円筒を用いた佐々木の方法（1994）で実施した。その結果，第Ⅱ層下半部は，約 5 cm，Ⅲ層の限界負圧はほぼ 2.0 cm となった。日減水深はノギスを用い測定し，水温・地温の測定には自記計を使用した。

水稲生育の測定項目として草丈，葉齢，葉色，株数，出穂期，根量を，収量測定項目として総藁重，穂数，玄米重，登熟割合を選定した。調査方法は，岩手農試（1981）の作物調査基準に準じた。また，玄米試料のカドミウム濃度は硝酸および硫酸で分解後，原子吸光法で定量した（農水省農産園芸局，1979）。

減水深，採水および生育の調査等は月に 2〜3 回とした。

3.　結果および考察

得られた結果は Fig. 1 および 2 に示した。図には，濃度変化の比較のために実験初期と実験終了間近の値を掲載した。

3. 1　圧力水頭分布と浸透型

実験①の圧力水頭分布は，第Ⅰ層では正圧であるが，第Ⅱ層では正圧から負圧へ変化した。第Ⅲ$_{上}$層の圧力水頭は－3 cm 以下に分布し，かつ動水勾配がほぼ 1 の状態となった。しかし第Ⅲ$_{下}$層ではほぼ 45 度勾配の正圧と

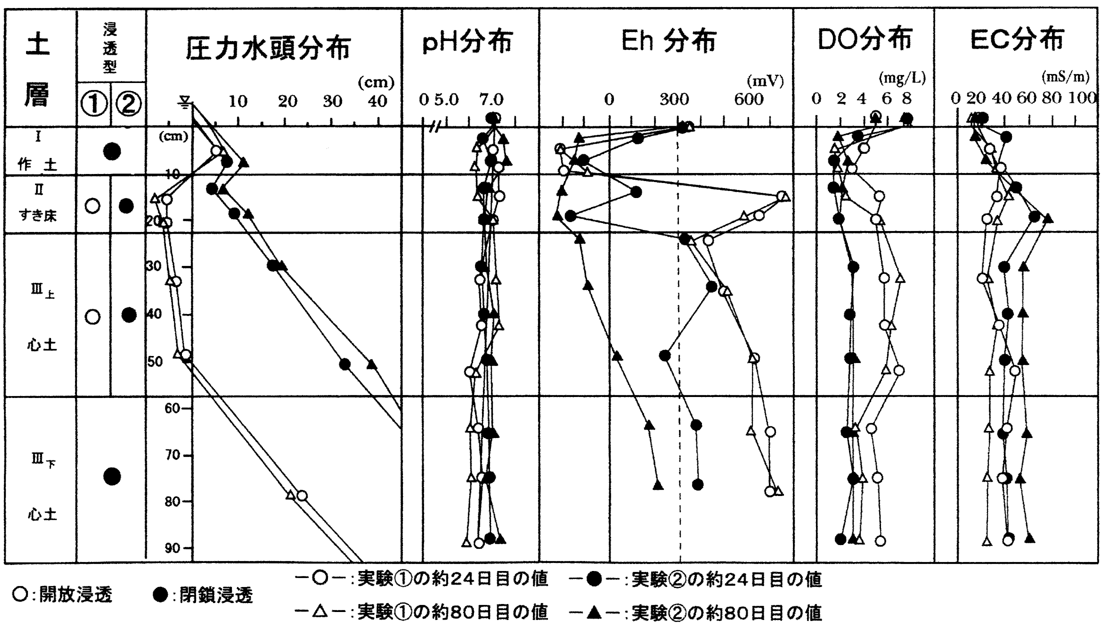
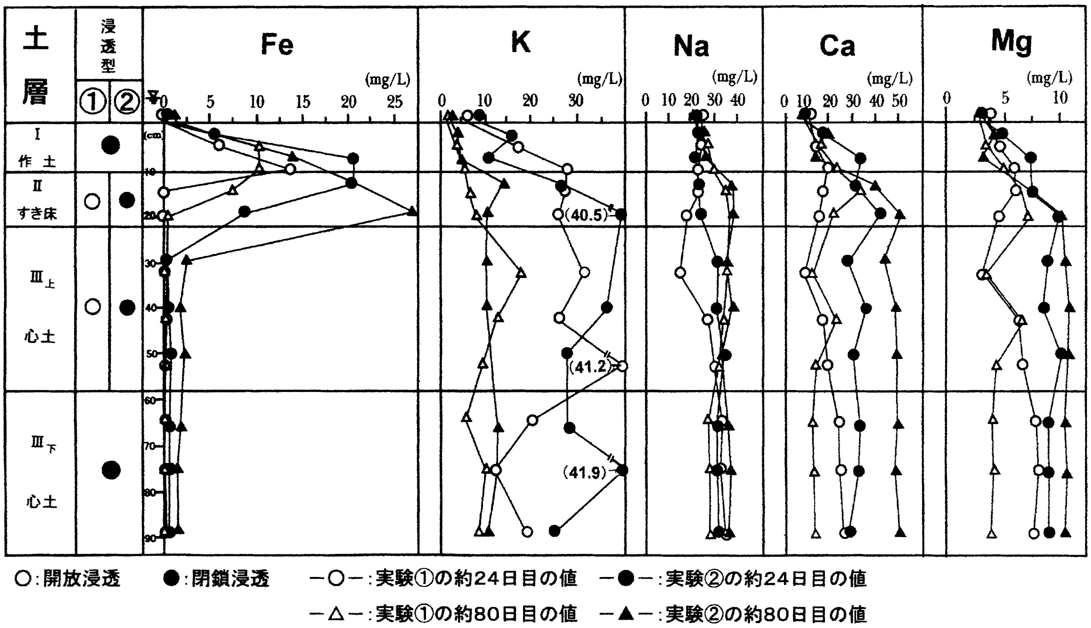


図-1　カドミウム汚染水田の圧力水頭，pH, Eh, DO, EC 分布

Fig. 1　Distribution of hydraulic head profile, pH, Eh, DO and EC on stratified paddy field with polluted soil of cadmium



図–2　降下浸透水中の Fe, K, Na および Mg 濃度

Fig. 2　Concentration of Fe, K, Ca and Mg elements in downward water in these model columns

なった。この分布パターンは観測期間中ほぼ変化がなかった。第II層および第III上層の圧力水頭は，各層の限界負圧より小さな値であり，開放浸透と判断された（宮崎毅，1991)。故に，実験①の浸透型は，上方から閉鎖浸透，開放浸透，閉鎖浸透という模型となった。実験②では排水の排出水位を上昇させ地表下約 22 cm としたため全層正圧浸透となった。従って，全層閉鎖浸透と判断された。

この結果より，本実験は第II層および第III上層で開放浸透となる場合と同層が閉鎖浸透となる場合の模型となり，浸透型の違いによる物質動態および水稲へ及ぼす影響の比較検討が可能となった。

3.2　pH, Eh, DO および EC

3.2.1　pH

実験①および実験②の湛水の pH 値は，実験期間中ほぼ 7 となった。第I層～第III層の値は両実験とも 5.5～7.5 の範囲となった。湛水の値に比べ，作土層以下で値が低くなる傾向は，佐々木ら（1999）の成層砂礫水田模型でも認められていた。この一因として本研究では，供試水の pH が 7 以上と高かったことがあげられる。本結果からは浸透型の相違による，明確な差異はないと判断される。

3.2.2　Eh

実験①の第I層の値は，マイナスの値となり，還元層となっている。しかし，第II層および第III上層では 300 mV 以上の値を示し，酸化層と判断される。第III下層は酸化層となったままで，還元化の進行は明確ではない。礫層では微生物活性も低く，かつ第III上層からの酸素濃度の高い浸透水の供給下となり還元化は進みがたいと推測される。これに対し，実験②では，第I～II層ともマイナスの値を示す還元層となった。しかし，初期の第III層の値は 300 mV 前後でやや酸化的であったが，封入空気等の除去によりこの値も 300 mV 以下となった。礫のような有機物含有量の少ない層では，微生物による酸素消費も少なく還元化は緩慢であると考えられる。

以上の結果より，実験①では第I層は閉鎖浸透で還元層，第II層および第III上層は開放浸透層でかつ酸化層，第III下層は閉鎖浸透であるが酸化層と判断される。これに対し，実験②では全層閉鎖浸透層でかつ全層還元となったといえよう。

3.2.3　DO

実験①および②の DO 値は，湛水で 5 mg L^{-1} 以上，第I層で 2～4 mg L^{-1} となり，湛水に比べ作土層内で低下した。実験②では，第II～III層まで第I層と同様の値となった。これに対し実験①の第II層および第III上層の

値は，5 mg L^{-1} と第Ⅰ層に比べ上昇したままとなった。開放浸透という酸素供給環境であることより，酸化層が醸成されたと考えられる。第Ⅲ$_{下}$層の閉鎖浸透層では，酸素濃度の低下が観測された。この結果より，降下浸透水の酸素濃度は，浸透型に対応した増減があると判断される。

3. 2. 4　EC

実験期間中の湛水の EC 値は，両実験とも 20 mS m^{-1} 前後となった。両実験の第Ⅰ層の値は，20～40 mS m^{-1} でかつ下部ほど値が高まる傾向となった。実験②の第Ⅱ層下部～第Ⅲ層末端までは，40 mS m^{-1} 以上で変動の少ない値となった。実験①では，ほぼ 40 mS m^{-1} 未満の値となった。第Ⅱ層以下では開放浸透に比べ閉鎖浸透で値が高まることが認められた。これらの原因としては，後述するが鉄やカルシウム等の浸透水中の濃度が高かったことによると推測された。また，同様の結果はこれまでの佐々木ら（1999）の模型実験でも示されているが，作土および耕盤層に使用した土壌の違いが濃度の大小を変化させているようである。

3. 3　降下浸透水の各種成分濃度

3. 3. 1　Fe, K, Na, Ca および Mg 濃度

得られた結果は Fig. 2 に示した。

①Fe 濃度　実験①および②の湛水の Fe 濃度は，実験期間中ほぼ 2 mg L^{-1} 以下となった。しかし，両実験とも第Ⅰ層で下方ほど濃度が増加し，実験終了時には約 20 mg L^{-1} となった。実験①の第Ⅱ層では，急激に濃度を低下させ 0 mg L^{-1} に近くなった。第Ⅲ層もほぼ同じ濃度となった。この原因は層内へ疎通した空気中の酸素と浸透水中の鉄が酸化層で沈殿あるいは溶解度を低下させるためと考えられる。実験②の第Ⅱ層は，上層に比べ実験初期には値が低下したが，実験終期には 25 mg L^{-1} 以上の値まで上昇した。第Ⅲ層では，鉄の検出はなされるが，第Ⅱ層に比べ著しく低下した。佐々木（1994）の砂および礫を第Ⅲ層に用いてた模型実験でも同じ現象が確認され，閉鎖条件でかつ還元状態でも有機物の少ない材料では鉄の移動が遅いと推察された。この現象には，鉄酸化菌等の微生物が関与していると考えられるが詳細解明は今後の課題である。

②K および Na 濃度　実験①および②の実験期間中の K 濃度は，湛水で 10 mg L^{-1} 以下となった。初期の値が高い一因としては，施肥の溶出の影響が大きいと考えられる。両実験の初期の値は，第Ⅰ層および第Ⅱ層では 10～40 mg L^{-1} でかつ下方にゆくほど値が高くなった。湛水に比べ値が増加した原因は，速効性の施肥による濃度上昇のためと推察される。しかしこの値も，実験終了時には，10.0 mg L^{-1} 前後となった。両実験の第Ⅲ層の値は，実験初期も終期も第Ⅱ層の値とほぼ類似した。この原因は礫層であり，同層からの供給がないためと推測される。

Na 濃度は，実験①も②も 20～40 mg L^{-1} の値に分布し，かつ全期間類似した値となった。深度による相違および浸透型の相違による変化は明確とはならなかった。二価鉄イオンが土中で多量に存在するようになると土壌の交換性塩基と置換が起こるというこれまでの知見（山根，1982）より推定するならば，両成分とも顕著な増加は認められない結果である。

以上の結果より，K も Na の濃度も浸透型の相違による顕著な差異は認められないと判断された。

③Ca および Mg 濃度　湛水の Ca 濃度は，両実験とも試験の初期および終期に関係なくほぼ 10 mg L^{-1} となった。同じく両実験の作土層中の値は 10～30 mg L^{-1} と下部ほど上昇した。実験①の第Ⅱ層の値は，20～30 mg L^{-1} となるが下層ほど低下傾向となった。これに対し，実験②の同層の値は，下部ほど上昇し，Ⅱ層下端で 40～50 mg L^{-1} となった。Ca 濃度は前述した山根の知見（1982）の指摘のとおり鉄の濃度の増加に対応し置換溶出したと考えられる。第Ⅲ層の値は，両実験とも第Ⅱ層下端の濃度と同じ値で末端まで経過した。この傾向は，礫層内からの供給がないことを示唆しているであろう。

両実験の Mg 濃度は，湛水で 5 mg L^{-1} 未満，第Ⅰ層で 2～8 mg L^{-1} となり，下方ほど濃度が上昇した。第Ⅱ層は，Ca 濃度と同じく，開放浸透で低下傾向となり，閉鎖浸透では上昇する傾向となった。第Ⅲ層の値はほぼ第Ⅱ層末端の値と同様になった。これらの増減の原因も Ca の場合と同じと考えられる。

以上の結果より，浸透型の相違による濃度差は，両成分とも存在することがわかった。

3. 4　生育収量へのカドミウムの影響

生育収量へのカドミウムの影響は，既に伊藤・飯村（1976）により試験がなされている。これはポットで中干し状態をつくり全層酸化状態あるいは常時湛水栽培で還元状態をつくるという試験である。本結果は，この知見と比較しつつ検討する。なお，得られた結果は Table 4 および 5 に示した。

3. 4. 1　生育

①草丈　実験①の各ポットの平均草丈（2 株）は開放浸透をもつ円筒で 94.6 cm と 95.0 cm，閉鎖浸透をもつ円筒で 106.8 cm と 109.2 cm となり，閉鎖浸透をもつ円筒の稲の草丈が高くなる結果となった。伊藤・飯村（1976）の水耕栽培による実験では，カドミウムの濃度（0.01～3.0 の範囲で試験）が高くなるに従い草丈が低下し，草丈が 3.0 mg L^{-2} 区で対照区の 6 割に低下してい

表–4　供試稲の生育収量

Table 4　Growth and yield of the rice plant using the experiment

実験名	円筒名	草丈（cm）	茎数（本/株）	葉齢（葉）	出穂期（日）	藁重（g/株）	穂数（本/株）	籾重（g/株） 稔実籾	不稔実籾	玄米千粒重（g）
実験①	A	94.6	23.5	14.0	64.0	32.1	18.0	12.9	1.2	20.3
	B	95.0	21.0	14.0	64.5	32.3	16.5	10.4	1.1	19.8
実験②	C	106.8	24.0	14.0	63.5	36.8	21.5	21.2	1.3	20.2
	D	109.2	24.5	14.0	64.5	41.1	22.5	33.2	1.9	20.0

A～Dの供試円筒の値は2株の平均値である。葉齢は出穂期の値である。出穂期は円筒へ稲移植後の経過日数である。

表–5　玄米中のカドミウム含有量

Table 5　Cadmium concentration in the brown rice

	開放浸透円筒	閉鎖浸透円筒
含有量（mg/kg）	0.167	0.018

る。本研究でも開放浸透をもつ円筒に比べ閉鎖浸透をもつ円筒で草丈が約13%程上昇し，同様な現象が発生したと判断される。

②葉齢　実験①および②のいずれの円筒でも出穂期には14齢となり，差異は認められなかった。また，8月末頃までの葉色（スパット値）にも差異は検出されなかった。この結果も，伊藤ら（1976）の結果と同じくなった。しかし，第13葉齢の葉色変化（光合成能力の持続期間）には差異が認められた。稲刈り時（10月中旬）の全葉長に占める黄変した部分の割合は，開放浸透をもつ稲で30%程度，全層閉鎖層となる稲で80%以上となった。このことより，葉の機能はむしろ開放浸透の方がよいと判断された。このように長い期間光合成能力を持つことは，冷害年の収量回復等に寄与すると推察される。この現象は既にSasaki *et al.*（2000）より確認されており，開放浸透と閉鎖浸透の特徴の一つと考えられる。これらの現象は，すき床層がカドミウムに汚染されていてもいなくても観測される現象であるといえよう。本実験では速効性肥料を用いたので，下層における窒素農度の差異は出穂期頃には少なくなっていると推察される。故に，下層に伸長した根の吸収力の差が今回の葉色の差異に重要，つまり根に酸化的環境をもたらす浸透型による影響が大きいと推測している。

③出穂期および茎数　両実験円筒とも出穂期は8月上旬となった。田植えからの日数に直すと約64日目で差異は認められなかった。渋谷（1980）はカドミウムの存在が生育抑制をもたらし，出穂の遅れが生じるとしているが，本試験のように作土層全体を中干しのように酸化状態にしないことが，差異をなくしたものと考えられる。

茎数は実験①の円筒の平均が22.3本/株，実験②の値が24.3本/株と，実験②の方がやや多くなった。生育環境は実験②，つまり全層閉鎖の方が良好という結果と判断される。しかしこれらの実験は，ハウスという良好な条件下のデータであり，圃場の環境とは異なる。しかしながら差異は生じると推察される。

③根　実験終了後，円筒を解体し根の観察および根量調査を実施した。

根量は各層を輪切りにし，根量を乾物重で測定した。実験①の円筒も②の円筒も作土は約9～10g，第Ⅱ層は2～3g，第Ⅲ$_{上}$層で1～3gとなった。第Ⅰ層から第Ⅲ$_{上}$層では根量にははっきりした差異は認められなかった。森（1959）は出穂期には45cm深まで根が伸びることを確認している。このことから考えるならば，出穂期というカドミウムを吸収しやすい時期に下層の汚染土中に根は存在すると推測される。第Ⅲ$_{下}$層の根量は，実験①の2円筒の（地表から約60cm以下）では0.02～0.05g，実験②では0.005g以下と差異が認められた。このことより，浸透型の相違により根の伸長深に違いが生じることも予想される。

以上のことより，根は確実にカドミウム汚染土層内に侵入し，Cdなどの成分を吸収する可能性があるといえよう。

根色は実験②では全層鉄錆色となることが確認された。実験①では第Ⅰ層は実験②の同層と同じ色であったが，第Ⅱ層は白い根色となった。この原因として，降下浸透水中の鉄含量の違いが根から放出される酸素との反応による根表面への鉄沈殿量に差を生み，この沈殿による被膜の存在が根色の差となったと考えられる。第Ⅰ層から第Ⅱ層にのびる一本の根でも，第Ⅰ層で赤い鉄錆色，第Ⅱ層内では白い色に変化した。佐々木（1995）のこれまでの円筒実験で共通して認められた現象と同じ傾

向となった。根色は土壌水中の鉄と反応し鉄錆色が形成されるとされてきた（Kohnke, 1968）が，本研究で降下浸透水中の鉄含有量に影響を受けることが明らかとなった。

3.4.2 収量

① **総藁重** 藁乾物重は，実験 ① の2円筒の平均が 32.2 g/株，実験 ② の円筒の平均値は 39.0 g/株となった。実験 ② に比べ実験 ① 円筒の値は約 83% に減少した。伊藤・飯村（1976）の試験でも根が酸化状態のポットは還元状態ポットに比べ低下傾向は認められているが，本研究でもその傾向が確認された。

②**穂数** 穂数は実験 ① の2円筒の平均が 18.8 本/株，実験 ② のそれが 22.3 本/株と実験 ① に比べやや多くなった。カドミウムの影響で穂数が減少することも伊藤・飯村（1976）の論文で明らかになっている。この論文では，カドミウム含有量が 3 mg L^{-1} のポット試験区での成熟期穂数がカドミウムを含まないポット試験区の二分の一の値となっている。このことより推測するならば，下層のみが吸収条件となっている場合は，被害穂の割合が2割弱で根全体が酸化条件に比べ軽減されるといえよう。

③**玄米重** 全玄米重の値は，実験 ① の2円筒の平均で 12.8 g/株，実験 ② では 28.8 g/株と差異が生じた。籾の登熟の善し悪しを登熟した籾（登熟籾）とそうでない籾（不登熟籾）の重さで示した。登熟した籾の重さは，実験 ① の円筒で約 12 g/株，これに対し実験 ② の円筒では約 27 g/株と2倍以上の差となった。不登熟籾の重量は，閉鎖浸透層をもつ円筒が開放浸透層に比べやや大きな値を示した。不登熟籾の重量差はあるが，全籾重に対する不登熟籾の比率で考えると，開放浸透層をもつ円筒が約 10%，閉鎖浸透層をもつ円筒が約 5% と倍の差となる。このように登熟の割合が低い現象は伊藤・飯村（1976）も認めている。この原因は，植物体から玄米への養分の転流阻害であるとして，全玄米重を総藁重で除した値の差をもって転流阻害の程度を比較している。本データから転流阻害値を計算するならば，実験 ① の円筒の平均は約 40%，実験 ② の円筒では約 73% と 30% 強の差となった。伊藤・飯村（1976）の差に比べ，10% 弱値が低くなった。本研究で確認されたように根も下層まで伸長しているが，吸収根の全体が酸化的か下層のみ酸化的かの相違により，転流阻害が低くなったと推測される。このことより，すき床層の酸化還元状態は，登熟に大きく影響すると考えられる。登熟時の窒素量等も生育収量に影響するが，速効性肥料を用い，追肥をしなかったことより，すき床層における窒素の影響は低いと考えられる。むしろ，根の活力が高く養分の吸収が旺盛なため，Cd を多く吸収し，被害穂の数が多くなったと推察される。

④**玄米千粒重** この値は，浸透型の相違によらず，ほぼ 20 g/株となった。千粒重での差異は認められない結果となった。

⑤ **玄米中のカドミウム濃度** 玄米中のカドミウム濃度は，実験 ① が 0.167 mg kg^{-1}，実験 ② が 0.018 mg kg^{-1} と9倍強の差となった。両円筒とも作土層及びすき床層の Cd 濃度は同じで，かつ両層中への根の侵入量は近似している。ゆえに，Cd 濃度の差は，すき床層からの吸収量の差によると考えられる。0.167 mg kg^{-1} という値は低い値とも感じられるが，タイ王国等の許容値（畑，2003）が 0.1 mg kg^{-1} であることから考えれば，決して低いとはいえないであろう。また，浅見（1975）は，0.14 mg kg^{-1} 以下の値に押さえることを腎障害回避のために必要であると主張している。故に，0.167 mg kg^{-1} という値は，低すぎるとはいえないであろう。

この結果は，すき床層が汚染土でその厚さが 10 cm に作製した結果であるが，現実にはもう少し汚染土が厚く吸収範囲が広くなる場合が想定される。そうした場合は，根の分布範囲が心土層まで及ぶことより判断し，さらに高い値となることが懸念される。

以上の結果より，カドミウムを含む作土層以下の層のおかれている酸化還元環境の相違は，稲の生育や収量に大きく影響するといえるであろう。

4. 要 約

カドミウムで汚染された成層水田の模型を作製（作土およびすき床層が汚染土，心土層は非汚染礫層）し，常時湛水栽培条件下ですき床層および地下水面上部に位置する心土層の浸透型を開放浸透および閉鎖浸透に制御した場合の物質動態および水稲の生育収量への影響を調査した。

その結果，常時湛水条件下でも地下水位が低い場合は，すき床層および地下水面上部の心土層が開放浸透となり，かつ酸化層となった。これに対し，地下水位が高い場合は両層とも閉鎖浸透でかつ還元層となった。

EC 値は，開放浸透層の値に比べ同層が閉鎖浸透層の値が大きくなった。同様に，鉄，カルシウムおよびマグネシウム濃度も，開放浸透層に比べ閉鎖浸透層の値が大きくなった。草丈，茎数および総藁重は，全層閉鎖浸透層の模型の方が開放浸透部をもつ模型より大きくなったが，葉齢および出穂期には差異は認められなかった。総籾重および登熟歩合は開放浸透をもつも模型に比べ全層閉鎖浸透の模型の方が良好となった。実験終了後の根の調査より，いずれの模型でも，約 60 cm 深まで根が到達

していた。玄米中のカドミウム濃度は，全層閉鎖浸透層の模型に比べ開放浸透層をもつ模型の値が約10倍高くなった。

以上の結果より，常時湛水条件下でも浸透型の相違により物質動態に差異を生じ，かつ生育収量および玄米中のカドミウム濃度に影響を及ぼすことが判明した。今後は，このような作土層下の土層の酸化還元状態を視点にいれた対策が進めれれるべきであろう。

謝　　辞

本研究の遂行にあたっては，東北工業大学土木工学科江成敬次郎教授，小浜明子助手および宮城県農業短期大学小関　恭教授の協力を得た。また，カドミウムの分析は，茨城大学農学部の久保田亜矢教授の協力を得た。記して各位に謝意を表します。

引 用 文 献

浅見輝男（1975）：玄米中のカドミウム許容基準について，農土誌，**43**（10）：42-45.

浅見輝男・山根一郎ほか（1997）：土壌学，pp. 196-204，文永堂出版，東京.

浅見輝男（2004）：CCFACによる食品中カドミウム濃度最大基準値案に対する日本政府の対案，人間と環境，**30**（1）：30-34.

土壌養分測定法委員会編（1972）：土壌養分分析法，pp. 171-296，406-418，養賢堂，東京.

土質工学会編（1983）：土の試験実習書，pp. 95-102，土質工学会，東京.

船引眞吾・青峰重範（1953）：土壌実験法，pp. 91-98，養賢堂，東京.

畑　明夫（2003）：カドミウム汚染国日本，週間金曜日，No. **469**：9-15.

飯村康二（日本土壌肥料学会編）（2001）：土壌の有害金属汚染，pp. 5-42，博友社，東京.

伊藤秀文・飯村康二（1976）：水稲によるカドミウムの吸収・移行および生育障害，北陸農試報，**19**：71-139.

Jiangou Liu, Kunquan Li, Jiankuan Xu, Jiansheng Liang, Xiaolog Lu, Jianchang Yang and Qingsen Zhu (2003) : Interaction of Cd and five mineral nutrients for uptake and accumulation in different rice cultivars and genotypes, Field crops research, **83** (3) : 271-281.

Kohnke, H (1968) : Soil Physics, p. 67, McGraw-Hill Book Company, NewYork.

小関　恭・佐々木長市・Pongpattanasiri Sukthai・諸泉利嗣（2004）：砂礫水田心土層における酸素および二酸化炭素の変動，農土論集，**229**：15-22.

陽　捷行（松井　健・岡崎正規編著）（1993）：環境土壌学，pp. 134-142，朝倉書店，東京.

宮崎　毅（1991）：閉鎖浸透・開放浸透，農土誌，**59**（8）：75.

森　敏夫（1959）：水稲根における組織の分化と発達に関する解剖学的考察，東北大農研彙報，**11**：159-203.

直原　毅（日本土壌肥料学会編）（2001）：土壌の有害金属汚染，pp. 59-88，博友社，東京.

農業環境技術研究所（2004）：主要作物のカドミウム吸収・蓄積を制御するための総合管理技術の開発，試験研究成績書，pp. 1-4.

農林水産省農産園芸局農産課（1979）：土壌環境基礎調査における土壌，水質及び作物体分析法，土壌保全調査全国協議会，pp. 113-115.

農林水産省農産園芸局農産課（1979）：土壌環境基礎調査における土壌，水質及び作物体分析法，土壌保全調査全国協議会，p. 176.

農林水産省（2002）：食品中のカドミウムに関する情報，http：//www.maff.go.jp/cd/index.html

佐々木長市（1994）：成層砂礫水田の浸透型が物質の移動集積に及ぼす影響，農土論集，**172**：9-16.

佐々木長市（1995）：水田土層における浸透型と層内諸現象に関する研究，宮城農大紀要，**8**：98-99.

佐々木長市・小関　恭（1996）：成層土水田の浸透型が物質の移動集積に及ぼす影響，農土論集，**182**：77-87.

佐々木長市・稲垣元昭・江成敬次郎・小関　恭（1999）：砂礫水田の浸透型が水稲栽培条件下の物質動態に及ぼす影響，農土論集，**204**：77-84.

Sasaki, C., Koseki, K., Matuyama, N., Enari, K. and Sato, K. (2000) : Studies on the correlation between percolation pattern and soluble elements in downward water using a stratified paddy field model, PROCEEDINGS OF THE XIV MEMORIAL CIGR WORLD CONGRESS 2000 (IN JAPAN), 1184-1189.

佐々木長市（2003）：砂礫水田の浸透型が水稲栽培条件下の物質動態に及ぼす影響，農土論集，**204**：77-84.

渋谷政夫・小山雄生・渡辺久男（1980）：重金属測定法，pp. 24-32，博友社，東京.

徳永光一・馬場秀和・石川武男・石幡　信・石川昌男（1975）：カドミウム汚染水田の更生工法について，農土誌，**43**（10）：24-30.

徳永光一・馬場秀和・佐藤裕一・古賀　潔・石川武男・平山　力・石川昌男・吉原　貢（1977）: カドミウム汚染水田の更生工法について（続），農土誌，**45**（12）: 23-31.

王　莉・東　照男・藤村達人（2004）: 水耕栽培下でのアブラナ科（*Brassica*）植物によるカドミウムと無機養分の吸収特性，日土肥誌，**75**（3）: 329-337.

山根一郎（1982）: 水田土壌学，pp. 29-30，農文協，東京.

要　　旨

本研究では，カドミウム汚染水田より採取した土を用いて成層水田の模型を作製し，常時湛水条件下で降下浸透水の浸透型と同層水中の物質動態及び稲への影響を調査した。この模型では，作土及びスキ床層は汚染土，心土層は非汚染の礫とした。

その結果，地下水位が高い条件の模型では，全層閉鎖浸透となりかつ全層還元層となった。地下水位が低い条件の模型では，スキ床層と地下水面上の心土上部のみが開放浸透となり，かつこれらの層のみ酸化層となった。降下浸透水中のEC，鉄，カルシウム及びマグネシウム濃度は，閉鎖浸透層の値が開放浸透層の値より大きくなった。草丈，茎数，乾物重，玄米重及び籾の稔実割合は，開放浸透層をもつ模型より，閉鎖浸透層のみの模型のほうが良好となった。根の伸張深さは約60 cmであった。玄米中のカドミウム濃度は，開放浸透層を持つ模型の値は，全層閉鎖浸透の模型　の約10倍高い値となった。

受稿年月日 : 2005年5月 2 日
受理年月日 : 2005年6月26日