

開放ライシメータを用いた水田土壌の酸化還元電位 および土壌溶液の調査

佐々木長市*・小関 恭**・富田道久**・小黒仁司**・谷口 健*

Investigation on the Redox Potential and Soil Solution Using a
 Open Lysimeter at Paddy Field

Choichi SASAKI*, Kyo KOSEKI**, Michihisa TOMITA**, Hitoshi OGURO** and Ken TANIGUCHI**

* Hirosaki University

** Miyagi Agricultural Collage

Abstract

A new method that can measure dissolved oxygen (DO) in soil solution and redox potential (Eh) and others in several constant depths was developed. This method was used at two paddy fields, with different organic content, under farming conditions over three years.

Findings are listed as follows.

① The installation was made up of a simple box (50 cm×50 cm×60 cm) and other instruments. Filters for sampling soil solutions and several electrodes of redox potential were set horizontally at the observation box (open lysimeter).

② Concentrations of DO in inundation were 5-8 mg/L during the ponding irrigation period. After translation of rice plants, DO in soil solution of plow layer(at 3-4 depths) became about 2 mg/L during the irrigation period. DO in soil solution increased to 5-8 mg/L during the non-irrigation period.

③ The value of Eh in plow layer decreased gradually after inundation and became a reduction layer (about -150 mV) until mid-summer drainage. If the period of mid-summer drainage did not received rain for seven days, the plow layer became oxidation layer. But the higher Eh values in the plow layer would return to similar low Eh before mid-summer drainage when inundation continued over two weeks. After the ponding water was released the values of Eh gradually increased and became the oxidation layer (over 400 mV).

As the above results show, the new method clarifies that DO and Eh values of plow layer at constant depths show seasonal fluctuation.

Key word : Paddy field, Redox potential, Soil solution, Dissolved oxygen, Lysimeter

1. はじめに

水田の酸化還元環境および根の周囲の土壌溶液の実態の解明は、水田における諸現象を考える上で重要性が高い。特に、地球温暖化の原因物質の一つとして知られている水田からのメタン等の発生を考えるうえで、実際の土層の酸化還元状態を把握することは意義が高いと思わ

れる。

しかしその測定法は、十分確立されているとは言い難いと推測される。土壌の酸化還元の測定は、地表面からの電極の挿入による方法（長谷部ら、1986）がとられ、かつ現場における測定深は電極の長さ及び内部液の補充口等に規定されている。現場の土壌溶液の採取は、不攪乱採土した試料から遠心力を用い脱水する方法（山崎、

* 弘前大学農学生命科学部 〒036-8561 弘前市文京町3, ** 宮城県農業短期大学 〒982-0215 仙台市太白区旗立2-2-1
 キーワード：水田、酸化還元電位、土壌溶液、DO、ライシメータ

1970) やテンションカップを利用する減圧法 (Jeffrey, 1994) などが知られている。遠心機による採水は採水地の土壌構造を乱し定点経時観測が困難となる。テンションカップ等を用いる場合は、土壌水とカップ内の水の平衡時間やテンションカップ立ち上がり部周囲に隙間ができやすく、この部分を通じた浸透が発生するなどの危険がある。このような原因が複雑に絡み、現地での土壌水の採取には困難性が伴う。

現場における採水は、真空圧で吸引する装置や真空ポンプを用い吸引圧を作用させるため、その集水範囲が大きくなる。ゆえに、吸引圧の大小は易移動性の溶質の収集域に影響し、深度別の濃度変動を考えるとときには重要な要素と考えられる。現場における経時的な土壌水のポテンシャル変動を考慮し、この値に対し僅かな吸引圧で採水する事例はないようである。また、水田等における定点の土壌溶液の水質の経時的な変動の測定は皆無に近い。本研究では、現場で簡易に測定できる装置を考案し、土層の酸化還元状態と降下浸透水の酸素濃度 (DO) 等のデータを得たので報告する。

2. 実験方法

1) 圃場の概要および土壌

観測は宮城県仙台市太白区坪沼の宮城県農業短期大学附属農場水田 (以後坪沼水田と記す、面積 16 a) および仙台市太白区旗立の宮城県農業短期大学学内水田 (以後学内水田と記す、面積 1.4 a) の2ヵ所で実施した。坪沼水田は連綿として水田利用であるが、学内水田は、1981年に開田され試験田として利用されている。

これらの土の理化学性は表-1に示すとおりである。作土層の土性 (国際法) は坪沼水田がシルト質埴壤土、学内水田が軽埴土である。坪沼水田作土層直下には中・巨礫が多数存在し、実験装置の埋設深は学内水田に比べ浅くなった。有機物含有量は、坪沼水田が学内水田に比べ多い。学内水田の地下水位は周年地表面下 30 cm 前後である。坪沼水田の地下水位は湛水期は学内水田と同じような地下水位であるが、落水期には 70 cm 以下まで低下する。減水深は、どちらの水田でも 15 mm/day 前後であった。作付け品種はササニシキで、施肥および水管理等は地区の標準的管理とした。収量は約 500 kg/10 a で地区の平均的な値である。

2) 測定装置および作製方法

降下浸透水の採水及び酸化還元電位の測定には、図-1に示す装置を用いた。各測定装置の平面的配置は図-2に示す。

測定装置は、錆止め加工 (内外とも3回塗り) を施した鉄箱 (縦 50 cm, 横 50 cm, 深さ 60 cm, 鉄板厚 3.2 mm, 総重量約 37 kg, 以後観測箱と呼ぶ) を水田にセッ

表-1 調査田作土の理化学性

Table 1 Physical and chemical properties of plow layer at the investigated paddy field

	真比重	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	土性 (国際法)	有機物含有量 (%)
学内水田	2.672	47.8	31.3	LiC	2.2
坪沼水田	2.640	84.2	42.3	SiCL	5.8

1986年10月採土。有機物含有量は重クロム酸法による。

トして、その中に取り付けた。浮力による浮き上がりの防止のためにはこの程度の重量が必要となる。なお、必要に応じて観測箱底面には荷重を増加するために鉄板を置いた。今回は、作土層を中心に測定を計画したので観測箱の深さは 60 cm とした。埋設深は約 40 cm とし、地上部に 20 cm 飛び出ることにより低温時の深水管理等に対応できるようにした。観測箱の埋設は、予め箱の寸法より 5 cm ほど大きな穴を設けた後に行い、埋設した観測箱の底部および側面には周囲からの漏水防止のためベントナイトを充填した。なお、箱の水平安定をはかるため、箱底面には杭 (長さ約 50 cm, 杭頭部は同じ高さ) を4隅に打ち込んだ。観測箱側面には径 30 mm の穿孔を開け、採水及び酸化還元電位測定装置を取り付けた。

これまでのライシメータによる研究は、現地の土壌を採取して充填し、この充填容器内の物質収支を調査するのが通例だった。ゆえに気候や土の構造の再現性が不十分であった。しかし、本報告のような装置を現地に設置することにより、より現場に近い条件で土壌溶液等の採取・分析が可能となり、水稻の生育ステージ毎の変動を調査できるものと考えられる。本研究では、この装置のことをこれまでの閉鎖系の物質動態を調査するライシメータに対し「開放ライシメータ」と呼ぶ。

採水装置は、厚肉毛細ガラス管 (内径 3 mm, 外径 9 mm, 長さ 16 cm) の両端に三方活栓をつけ、土中側にはフィルタが取り付けられている。ただし、毛細ガラス管は予めゴム栓を貫通させておく。フィルタの作製 (佐々木, 1992) は、ガラス粉末 (G4) を用い燐等の濃度に影響を及ぼさないものとした (久馬ら, 1993)。なお、接合部にはシリコン系のボンドを塗布し漏水の有無をチェックした。採水時以外は、採水装置の一端の三方活栓を箱内のマンメータに接続させ、各深度の圧力水頭を測定した。採水フィルタの位置 (土中へ水平挿入) は、今回は稲の株から 8 cm 地点とした。箱から水田内へは 18 cm ほど突き出たところにフィルタの中心部がある。測定目

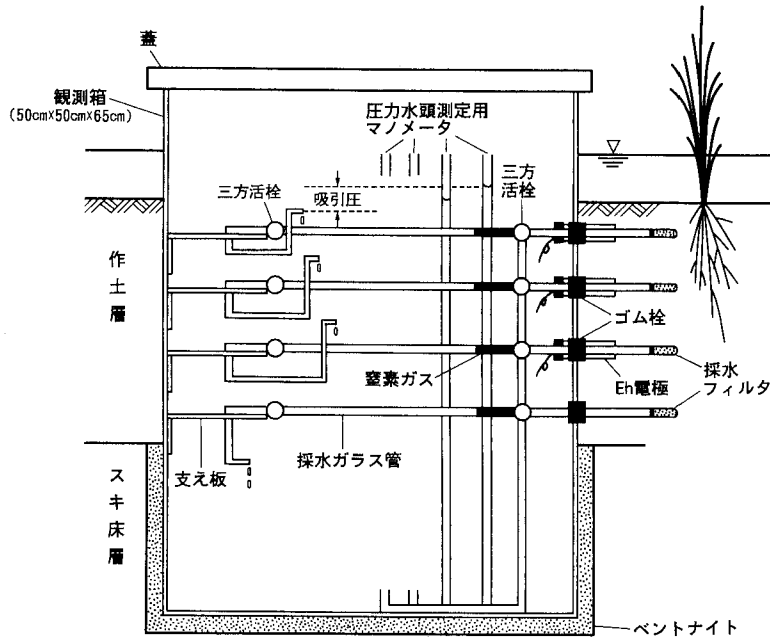


図-1 土層環境測定装置 (開放ライシメータ)

Fig. 1 Simple box device for measurement of soil condition (Open lysimeter).

的により、フィルタ位置はコントロール可能である。測定深は、作土層を中心とし、5 cm 間隔で4点を計画した。今回は最上位の位置が地表下2.5-4.5 cm となった。この位置も、目的に応じて任意である。

酸化還元電位 (Eh) 測定用のガラス電極は、予めゴム栓を貫通させておき、このゴム栓部を箱の穴に差し込みセットした。電極先端部は、箱からの土中へ水平挿入距離が8 cm 程度となるようにした。

以上のように各センサおよびフィルタを水平方向に土中へ挿入することにより、水稻根の任意の部位の採水が可能で、かつ鉛直方向からの水移動の影響が少なくなるものと考えられる。

なお、電極およびフィルタは、予定埋設部の作土層を除去したのちにセットした。その後代かき状にした作土層を戻した。

3) 測定項目および方法

測定項目は、深度別の降下浸透水の圧力水頭、酸化還元電位、浸透水の水質、地温、一筆減水深および地下水位等である。

圧力水頭は、水マノメータを用い、水頭の変化は物差しを用いて測定した。

採水は、開放ライシメータに取り付けた厚肉ガラス管 (長さ約50 cm, 内径3 mm, 外径9 mm, 25 cm 部より直角に曲げライシメータ内にセットできるようにしている。以後採水ガラス管と記す) を用い、吸引圧を作用さ

せ実施した (図-1 参照)。

最初にガラス管内を蒸留水で満水し、その後、土壌側の三方コックから窒素ガス (土壌水の成分に影響しないように目的によりガスの種類を変更する) を注入し、土壌水と蒸留水を分離する。最初の採水1 cm³ (フィルタ末端から箱内の三方コックまでの15 cm 区間の水) は捨て新たに採水を開始した。このときの吸引圧は、各測点の全ポテンシャルに対しほぼ5 cm 以内の負圧とし、採水による集水範囲を限定するようにした。なお、各測点の全ポテンシャルの測定は採水開始前に必ず実施した。採水速度は、エクステンションチューブ末端を上下させコントロールした。採水は、土壌水が採水ガラス管内を満したら終了とした。採水ガラス管は両端の三方コックを閉じた後観測箱から取り外し、直ちに室内に持ち帰り水質分析に供した。採水時間はほぼ3時間を目処にした。このようにして、大気酸素・二酸化炭素の影響を受けないように土壌水との接触を極力少なくした。

土壌溶液の水質分析は、降下浸透水の DO, pH について行った。DO 測定は、DO メータ (本体: UC-12 型, 電極: UC-203 型, セントラル科学社製) を用いた。pH 測定は、pH/ORP メータ (本体: UC-23 型, 電極: UC-502 E 型, セントラル科学社製) で行った。

酸化還元電位の測定は、pH 測定本体と同じ機械を用いた (ただし電極は UC-702 型)。

地温は、自記計 (測定深: 10 cm) および屈曲地温計

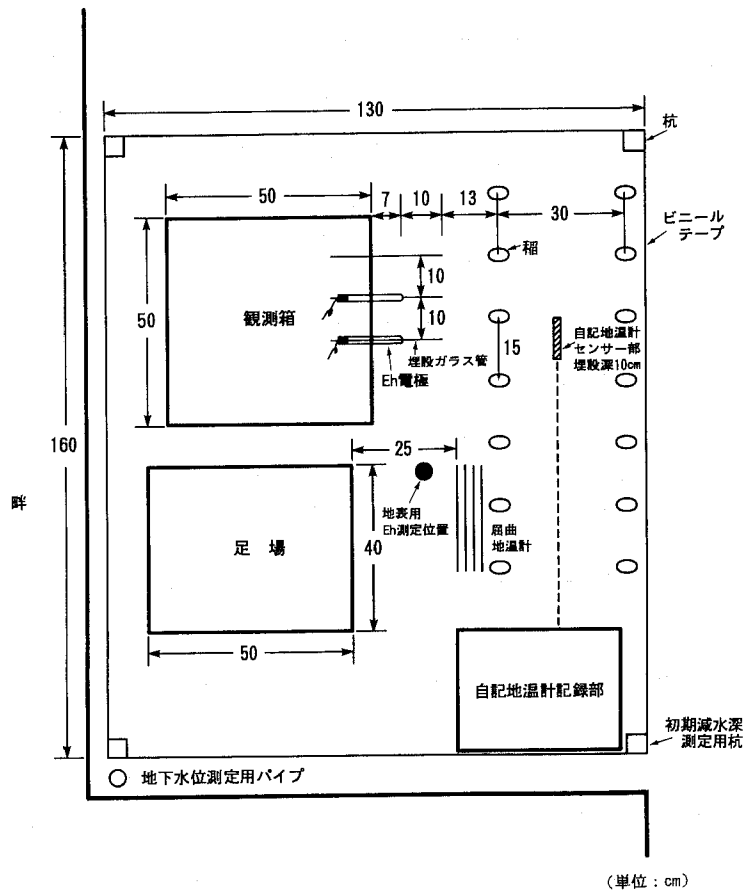


図-2 観測器材配置図

Fig. 2 Layout of instruments used for investigation.

(測定深: 2.5 cm, 5.0 cm, 10.0 cm, 15.0 cm) を用いた。測定時には気温, 水温も併せて測定した。一筆減水深は杭とノギス (杭の上から深さゲージで水面までの距離を測定) で, 地下水位は, 塩ビ管 (径 5 cm, 1 m 程埋設, 周囲にはベントナイトを充填) および竹尺を用いて測定した。

降雨等の気象データは, 仙台気象台の値を用いた。

圧力水頭, 酸化還元電位の測定および採水した土壤溶液の分析は週 1 回 (午後 1 時頃開始) の目安で実施した。調査は 1986 年~1988 年の 3 ヶ年にわたり実施した。

3. 結果および考察

得られた結果は図-3~5 に示した。以下にその結果について検討する。

学内水田および坪沼水田の 1986 年~1988 年の 3 ヶ年の灌漑期および非灌漑期の圧力水頭分布, pH, DO および Eh のデータを通覧するならば, その変動傾向は類似

したものとなった。ゆえに, ここでは 1988 年の値を代表として図-3 に示し検討することとした。また, DO, Eh の詳細な変動データは図-4・5 (いずれも 1987 年の値) に示した。

1) 圧力水頭分布, pH および DO

① 学内水田 水田作土の圧力水頭は, 初期は正圧でポテンシャル差は, 5-10 cm 区間が大きくなる傾向が認められる。11 月の値には欠測はあるが下方から上方への水移動が発生していることを示している。

降下浸透水の pH の値は, 観測期間中どの深度でも 6 前後の値となる。しかし湛水の値は 同観測期間中 7 前後となり, 降下浸透水に比べ高くなる。この原因は, 湛水中の藻類の炭酸同化作用による二酸化炭素の減少が水素イオン濃度を高めることによる影響 (内藤, 1974, 田淵, 1986) と考えられる。

湛水の DO 値は, 5 mg/L 以上と高く, 水田に給水されるまでに酸素の溶解があり, ほぼ飽和に近い状態と

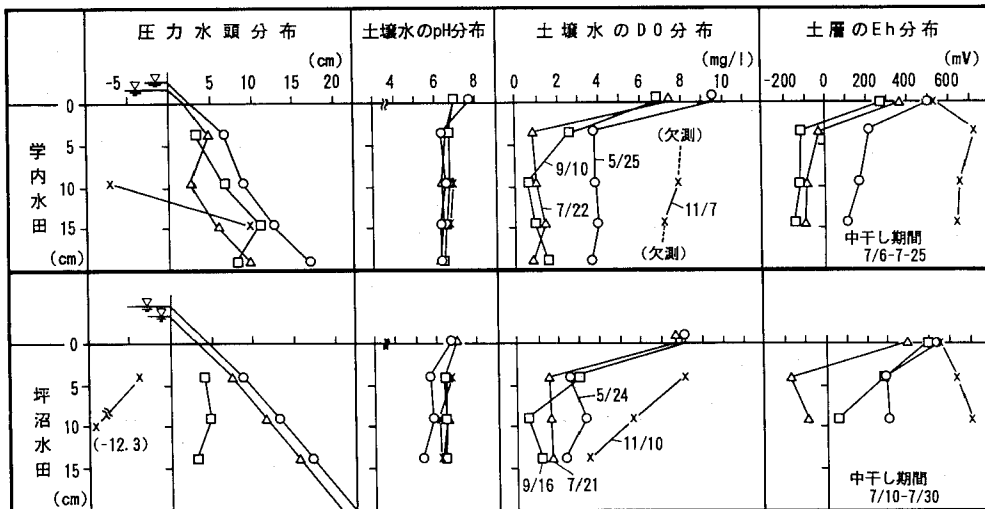


図-3 調査田作土の環境変動 (1988年)

Fig. 3 Fluctuation of plow layer condition at two investigated paddy fields (1998).

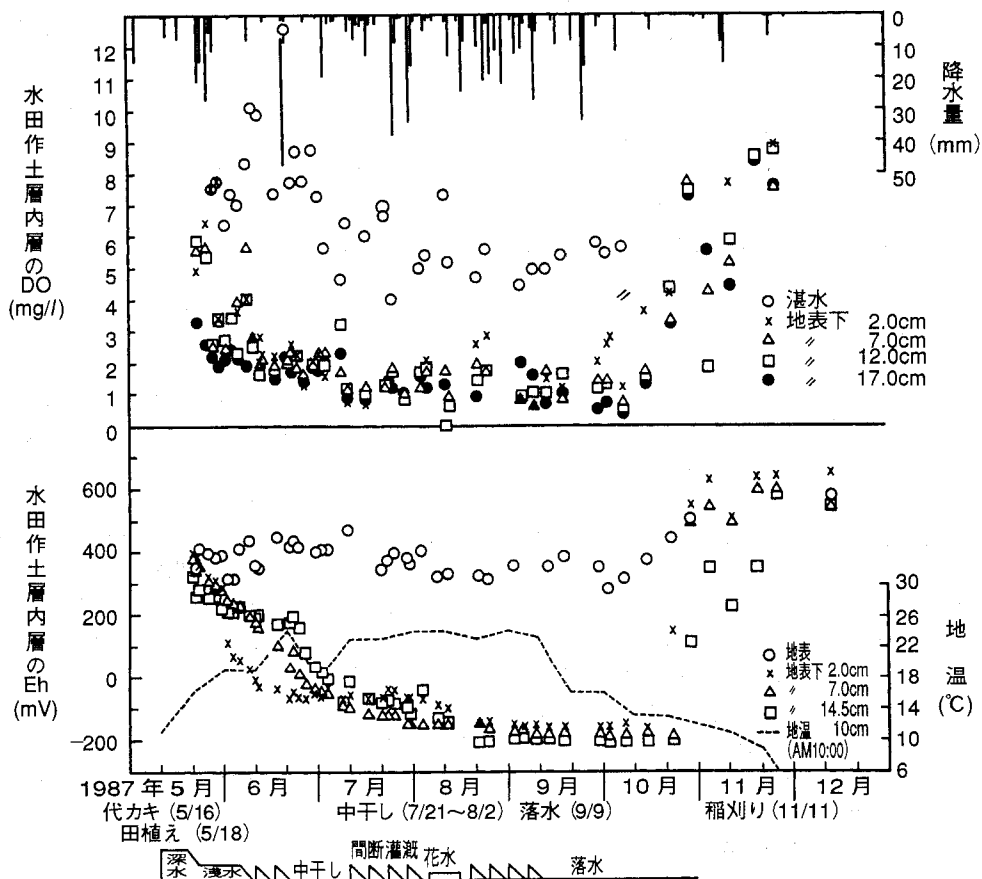


図-4 学内水田のDO・Eh変動 (1987年)

Fig. 4 Fluctuation of DO and Eh values in the paddy field at Miyagi Agricultural College (1987).

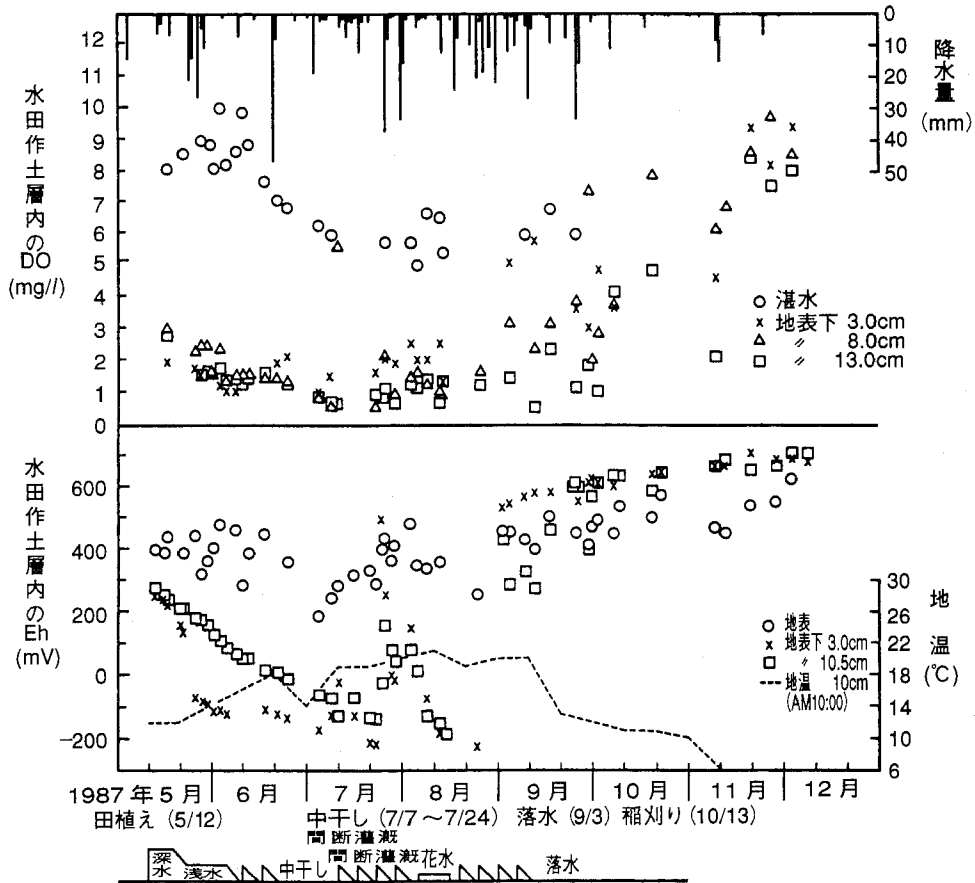


図-5 坪沼水田の DO・Eh 変動 (1987年)

Fig. 5 Fluctuation of DO and Eh values in the paddy field at Tubonuma area (1987).

なったと考えられる。しかし、地表下2cm程の点では降下浸透水中の酸素濃度は著しく低下し、2mg/L前後となる。この原因は、作土層中の微生物の酸素消費量が大きいと考えられる。渡辺(1971)によると降下浸透水中の酸素濃度は、減水深が100mm/dayでも作土層内の2価鉄の酸化に使われる量が多く、作土層の酸化領域は2mm前後であると試算している。しかしながら、降下浸透水中の酸素濃度が0とならなかった。この原因は、この測定法において酸素との接触による濃度上昇等が考えられる。しかし、ケロシン等の中に採取した降下浸透水を注入し、大気と接触しないようにして濃度を測定した場合でも値は0とはならなかった。この原因の解明は今後の課題である。

測定深が4cm, 9cm, 14cm, 19cmのDO値は、ほぼ一定になっていることから考えるならば、湛水の引き込みによる酸素濃度の増大は少ないと推測される。5月の値は全般的に高く、作土層内の封入空気の影響が考えら

れる。11月には、その濃度が再び7mg/L以上となり酸素消費が低下するものと考えられる。この原因は地温の低下や水分環境の変動が微生物等の酸素消費活動を低下させたことによると推測される。

圃場におけるDOの周年変化の詳細を図-4に示した。1987年の値を用い検討する。湛水の値は、変動はあるが5mg/L以上の値を示すものと推定される。農業用水の水質基準が5mg/L以上であることを考えるならば、妥当な値と考えられる。この値は、湛水初期に7mg/L前後と値が高く、その後9月下旬頃まで緩やかに値が低下し、10月以降再び値が上昇する傾向にある。この値の変動は、地温の変動と逆の傾向にあると考えられる。つまり、温度が高くなれば酸素消費が増し、湛水のDO値は低下するが、温度が低下すると消費が低下し湛水のそれが上昇すると推測される。落水期の湛水とは降雨等の田面における溜まり水である。

地表下2-17cmのDO値は、ほぼ類似した値となって

変動している。5月の田植え直後は多少高い値を示している。しかし、6月上旬からはほぼ2mg/L前後の値となり、この値のまま10月の中旬まで経過する。その後値が上昇し11月下旬頃は7mg/L前後の値となっている。この変動傾向は湛水と類似している。中干しの期間は7月の下旬から2週間ぐらいであるが、この期間に降雨がありそのためDO値にはほとんど変動をもたらさないと判断される。その後の間断灌漑期も同じくDO値の変動には大きな影響をもたらしていないと考えられる。しかし、落水期以降の値は、降雨間隔の長短により生じる田面亀裂等が影響し値が高まると推測される。

② 坪沼水田 図-3に示す圧力水頭分布は、灌漑期は正圧であるが、各深度のポテンシャル差はほぼ0に近くなっている。このことより、日減水深は畦畔浸透量が支配的であると推測される。

降下浸透水のpHの値は、観測期間中どの深度でも6前後の値となる。しかし湛水の値は同観測期間中7前後となり、降下浸透水に比べ高くなる。以上の数値傾向は学内水田とほぼ類似している。

湛水のDO値を通覧するならば、5mg/L以上と高く、農業用水の水質基準を満たす水が供給されていると考えられる。地表下2cm深以下の値は、ほぼ3mg/L以下となる。灌漑期にはその変動は少ないようである。しかし落水期には、その値が8mg/L以上となり土中における酸素消費が低下するものと判断される。この原因は、落水後の不均一な亀裂の発生が原因となり、このような部分を流下する土壌水はその濃度が高いまま下方に至るためと推測される。ゆえに、落水時におけるDO値変動は、地温等のほかに降雨間隔の長短が素因となる亀裂の存在が重要な原因となると予測される。

圃場におけるDO値の周年変動を図-5(1987年)で詳細に検討する。湛水の値は、多少変動はあるが学内水田同様5mg/L以上の値を示す。これらの周年変動は、湛水初期に8mg/L前後と値が高く、その後8月下旬頃まで緩やかに値が低下し、9月以降再び値が上昇する傾向にある。この変動は、学内水田と比べ時期的なズレ等が少し見られるが、変動傾向は同じと考えられる。

地表下3-13cmのDO値は、ほぼ類似した傾向で変動している。すなわち、5月の田植え直後は多少高い値を示しているが、6月からはほぼ2mg/L前後の値となり、この値のまま8月下旬まで経過する。その後値が上昇し11月下旬頃は7mg/L以上の値となっている。この変動傾向は湛水と類似している。中干しの期間は7月7日から24日までであるが、この期間の最終日にはDO値が多少上昇する傾向が見られる。その後の間断灌漑期には再び中干し前のDO値に戻るようである。しかし落水後

は、再びDO値を上昇させていく傾向(浅い測点ほど早い)が認められる。

このDO濃度の上昇勾配は、降雨間隔が長くなりかつ降雨量も少なくなる10月下旬がさらに大きくなるようである。9月下旬には田面亀裂も顕著になり、DO値上昇へ亀裂の存在と地温低下の相乗効果も推測される。現実の水田では、微生物の活性や有機物の存在等の酸素消費作用の影響が加味されて値が変動しているものと推測される。根穴の腐朽によるフィルタ周辺へのバイパス的通水によるDO上昇を懸念していたが、その影響は現段階では明瞭とは言えないようである。

以上の結果より、DO値は湛水直後よりほとんどその濃度を消費限界まで低下させ、中干し時に作土上層のDO値が多少上昇するが、その後再び中干し前の値となる。落水期には、降雨等による田面水が無くなるにしたがい、再びDO値を上昇させる。また、中干しは、7日間以上降雨が無い条件で田面を乾かし、初めて1mg/L程度のDO値上昇をもたらすのみである。仙台の降雨間隔が、この時期は7日より短いこと(1977年~1986年の10年間で7日以上回数は6回)から考えるならば、中干しによる層内への酸素供給による根腐れ防止効果は2年に一度位の目安で期待できるものと思われる。さらに、これらの効果を上げるためには、湿田等の土層環境を還元層が薄い乾田になるように排水性を改良するか、あるいは中干し時には暗渠の水甲等を開き地下水位を低下させる対策等を取る必要があると判断される。

2) Ehの周年変動

① 学内水田 Ehの値を田植え後、中干し中、落水後の時期別に図-3に表示した。このように表現することにより、その周年変動傾向がより明確になると考えた。地表面の数mmはいずれの時期も酸化層となり、これまで指摘されているような表層酸化層を形成している(久馬ら, 1984年)。しかし、その下の作土層は、田植え後は15cm深まで100~200mVの高い値であるが還元層となっている。この原因は、耕起、代かきにより作土層内へ供給された酸素残存効果と推測される。その後値は低下し、中干し終了後から9月下旬までは還元層を呈している。浸透水中のDO値は、田植え直後からほとんど表層の数mmで消費限界まで低下し、作土層への酸化作用の可能性はなくなっていると考えられる。また、中干しの効果は十分に発揮されなかったことを意味する。さらに、この水田は、根腐れの危険性はあるがメタン等が発生すると言われているEhの値(-200~-300mV)には、中干し効果が不十分でもその値まで達しないことを意味していると考えられる。11月頃になるとEhの値も600mV前後まで上昇し、再び層全体が酸化層とな

る。この頃の降下浸透水の DO 値は約 7 mg/L と高くなっている。ゆえに、浸透水が酸化層を拡大する可能性があると判断される。

周年変動を示した図-4 (1987年) を見る限り、中干しはよほど気象条件に恵まれない限り、酸化層の形成に寄与する可能性が低いと思われる。さらに、落水後における作土における酸化層の形成も、中干し同様降雨間隔等に左右されると判断される。

② 坪沼水田 作土層の Eh の値 (図-3 参照) は、田植え後はやや酸化的で、その後還元化が進行することを示している。落水後には再び値が上昇し酸化層を形成する。これらの変動傾向は、学内水田とほぼ同じである。

図-5 の Eh の値の周年変化を見る限り、中干しの効果が認められるようである。中干し最終日の 3.0 cm 及び 10.5 cm の 2 点の値が 200 mV 以上上昇している。しかし、8月8日頃には中干し前の値に戻っている。酸化的効果はあるが、その持続期間は今回は2週間程度と判断される。この酸化が作物に与える影響およびメタン発生等との関係は今後の課題である。

以上の結果より、水田作土層の酸化還元は、周年変化をもち、かつ土性等の土壌条件及び地下水位等の水理条件が層内の酸化還元状態発生の遅速を規制すると判断される。さらに、これらの変動と降下浸透水の DO 値にも対応関係が認められるようである。

4. ま と め

本研究では、現場で簡易に深度別の浸透水中の酸素濃度と土層の酸化還元電位等を定点で測定する装置を考案した。この装置を有機物含有量の異なる2地点の水田 (坪沼水田, 学内水田) に設置し、3ヵ年にわたり現場観測を行った。以下に、得られた結果を述べる。

① 新装置 (開放ライシメータ) は、観測箱 (50 cm × 50 cm × 60 cm, 鉄製) を水田にセットし、この箱から水田土壌中へ土壌水を採取するフィルタおよび酸化還元電位を測定するセンサを水平に挿入し作製した。この装置により、各深度の土壌の酸化還元の判断および土壌溶液の採取が可能となった。さらに、土壌溶液の採取は降下浸透水中のポテンシャルを測定し、この圧に対し吸引圧を 5 cm ほど作用させ採水する簡便な方法を考案した。

② 湛水期の両水田作土層の圧力水頭は、鉛直変化が小さくかつ正圧を示した。同じく pH の値は、湛水で約 7 と高いが作土層内 (層厚 15~20 cm) では 6 台の値と

なった。

③ 水田の湛水および土壌水 (ほぼ 3 cm, 8 cm, 13 cm および 19 cm の 4 点で採取) の DO 分析を周年実施した。その結果灌漑期の湛水は、5~8 mg/L と高い値を示すが、田植え後の土壌中の DO 値はどの深度もほぼ 2 mg/L 台の値を示し、酸素濃度の消費限界まで値が低下傾向となった。中干しの効果は多少認められたがその効果は2週間程であった。落水期には、土壌中の DO 値は上昇する周年変動が認められた。

④ 作土層の Eh の値は、湛水後徐々に低下し還元状態になり、中干し期まで経過した。この中干し期に7日間ほど降雨がなければ土層が酸化状態になるが、その値も再湛水後2週間程度で、中干し前の還元値に戻った。落水期には、徐々に値が上昇し酸化状態になる。

以上の結果より、簡便な方法で土層の定点における環境の変化の一部を明らかにした。すなわち、Eh および DO の値は、周年変動をもつことである。また、水田からのメタン等の発生については、有機物含有量が5%以下の水田では可能性が低いと予想される。今後は、水稻根の周囲における土壌水中の肥料成分の深度別変動等を経時的に検討する予定である。

引用文献

- 長谷部亮・関矢信一郎・飯村康二 (1986) : 水管理条件が酸化還元層の分化発達に及ぼす影響, 土肥誌, 57 (6) : 544~550.
- Jeffrey D.W. (1994) : Soil solution chemistry, New York, John Wiley & Sons, 121-143.
- 久馬一剛ほか (1993) : 土壌の事典, 349~350, 朝倉書店, 東京.
- 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.
- 田淵俊雄 (1986) : 水質入門, 21~22, 農業土木学会, 東京.
- 内藤幸穂・藤田賢二 : 上水道工学演習, 12~15, 学献社, 東京.
- 渡辺 巖 (1971) : 農業と土壌微生物, 201~212, 農文協, 東京.
- 山崎慎一郎 (1970) : 総説 土壌溶液の採取法およびその化学的組成, 土肥誌, 41 (10) : 424~432.

受稿年月日 : 1998年5月19日

受理年月日 : 1998年11月10日