J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 126, p.71 ～ 76 (2014)

解　説
Lectures

水田湛水層における物質輸送が湛水面近傍の大気環境へ及ぼす影響

臼井靖浩 [1]

Impacts of mass transport through ponded water in a paddy field on the atmosphere near the water surface

Yasuhiro USUI[1]

1. はじめに

農耕地の物理環境（例えば，水・熱・ガス・溶質の動的環境や光環境など）は，作物の生育・収量はもとより，農業生態系を構成するあらゆる生物の営みに直接影響を及ぼすことから極めて重要である．農耕地のうち，水田はアジアモンスーン地帯を代表する土地利用の主要な形態の一つである．イネの栽培面積は穀物全体の栽培面積6.97 億 ha のうち 1.64 億 ha に達し，そのうち約 88 % をアジア諸国が占めている．日本における水田面積は約157 万 ha であり（FAO, 2011），全耕作面積に占める割合が大きいことから，水田における諸現象が周辺環境に及ぼす影響も大きいと考えられる（臼井, 2013）．

水田はいわば人工の湿原であり，水田の湛水層をインターフェースとして生じる物質循環や熱交換の特徴を把握することが重要である．さらに水田の施肥管理への応用や多面的機能の理解増進のためにも，湛水層における物質・熱輸送の基礎データの活用が期待される（臼井・粕渕, 2013）．

一方，水田に関する物理的側面からの研究は，生産に深く関わる硬盤層の透水性など土そのものの機能に関するものに注力され（臼井, 2013），土壌 – 湛水 – 大気系における物理現象の動的な理解は十分に進んでいなかった（粕渕, 2002）．

その理由の一つとして，物理環境に関する多くの項目を同時かつ経時的に計測することが困難であったことが挙げられる．しかし，近年の計測技術のめざましい発展により，水田における土壌 – 湛水層 – 植物 – 大気系の物理現象をより詳細に理解することが可能になってきた（臼井, 2013）．

筆者らは，水田湛水層における物質輸送の測定技術の開発を中心に取り組んできた．本稿では，そうした測定技術と測定例を紹介する．そして，水田湛水層における物質輸送が湛水面近傍の大気環境に及ぼす影響について，これまでの研究事例をもとに解説する．その上で，水田環境における物質輸送現象の解明について，今後の展望を考察する．

[1]National Institute for Agro-Environmental Sciences, 3-1-3 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8604, Japan. Corresponding author：臼井　靖浩, 独立行政法人　農業環境技術研究所
2013 年 11 月 18 日受稿　2014 年 2 月 4 日受理

2. 水田の土壌 – 湛水層における温度分布

2.1 均一な温度分布と対流の発見

水田湛水層では，水温分布が均一である．その要因は，風による強制対流によるもので，自然対流によるものではないと考えられていた（矢吹, 1957）．しかし，詳細な温度測定を行ったところ，太陽放射のもとでは，土壌表面に放射エネルギーが吸収され，土壌表面温度が上昇する．そこで上昇した土壌表面と湛水には温度差が生じ，この温度差が対流の駆動力となり，空間的に一様な水温分布を形成することが明らかになった（Rose and Chapman, 1968; Mowjood et al., 1997）．

水田湛水層における均一な水温分布が，対流によるものであることが明らかになった次の課題は対流速度を測定することであった．そこで Fujimaki et al.（2000）は，対流速度を測定するセンサーの開発に取り組んだ．

基本的な構造は，ホイートストンブリッヂを応用したセンサーである（Fig. 1）．センサーを構成する 2 対の金属線は，直流電源から熱源を供給しヒーターとして使用するコンスタンタン（Co）線と温度測定用としてニッケル（Ni）線を組み合わせた Co + Ni 線と比較温度測定

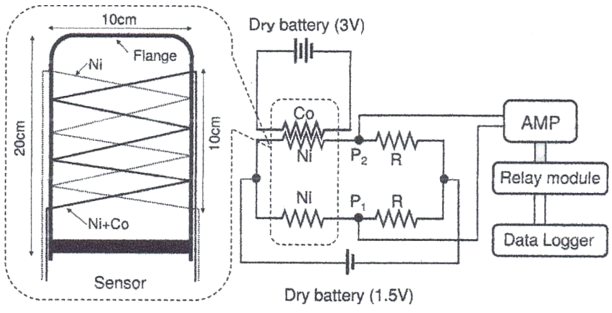


Fig. 1　対流速度測定装置の模式図.（Hanayama et al., 2009, Fig. 2）

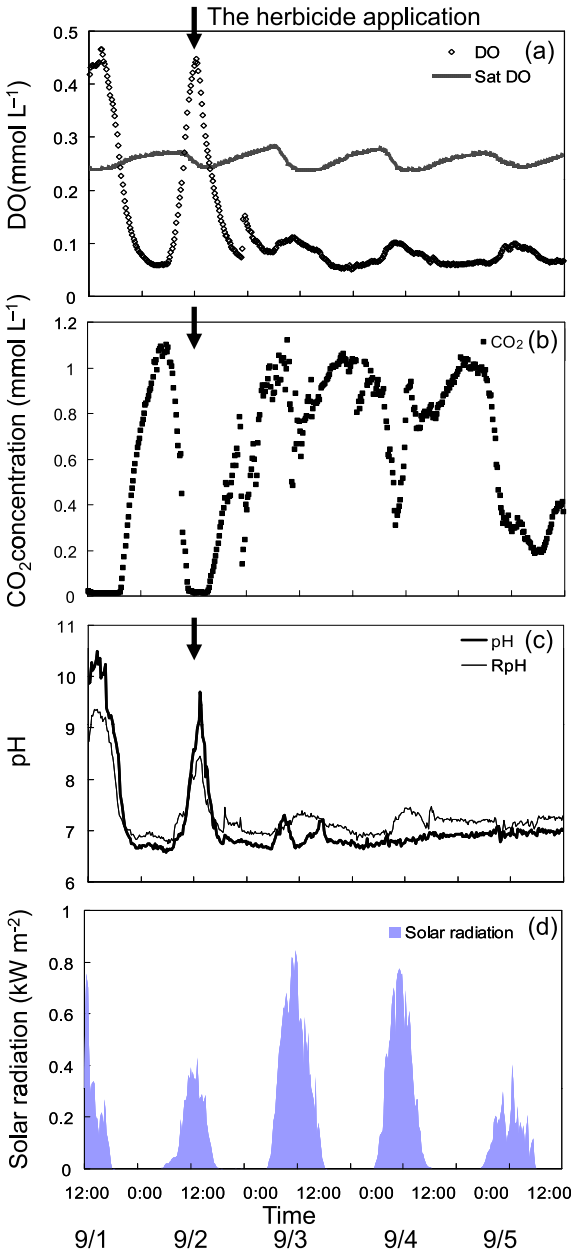


Fig. 2 水田湛水層における除草剤投与前後の溶存酸素（DO），飽和溶存酸素（SatDO），溶存 CO_2，pH，RpH および日射量の日周変化．（Usui and Kasubuchi, 2011, Fig. 3）

用の Ni 線である．対流速度は，水の流速による温度上昇の違いを利用して求める．センサーの温度上昇と対流速度との関係を決定するキャリブレーションには，一定の速度で回転するシンクロナスモーターを活用した．シンクロナスモーターの先には，一定の温度に保った水槽に浸したセンサーを取り付けた滑車があり，この滑車を一定の速度で引くことでセンサーを水中で動かす．ヒーターをオンにすると Co + Ni 線の温度が上昇する．温度が安定した後にセンサーを一定速度で動かし，温度測定を行う．このとき，引かれた速度の上昇とともに，Co + Ni 線の温度上昇は小さくなる．つまり，速度が大きければ，センサーの温度上昇は小さく，逆に速度が小さければ，上昇は大きくなる．この動作を 0 mm s^{-1} から 2 mm s^{-1} 程度の速度で数点行い温度上昇と対流速度との関係を求める．

キャリブレーションを行ったセンサーを水田圃場で試したところ，植生のない水田の対流速度は，0.1～1.4 mm s^{-1} 程度であることがわかった（Fujimaki et al., 2000）．仮に水深 5 cm に対して 1.0 mm s^{-1} の対流速度があるとすると，対流時間は 50 s である．一方，拡散による移動は著しく遅い．分子拡散係数を 10^{-5} cm^2 s^{-1} としたとき 5 cm に対する拡散時間はアインシュタイン – スモルコフスキーの関係式より 1.25×10^6 s となり，溶質の移動速度に約 1 万倍以上の違いがある（粕渕, 2010）．このように，極めて高い輸送能力である対流が水田で生じていることが明らかになった．

一方，植生のある水田では，植生の影響を受け最大でも 0.7 mm s^{-1} 程度であり，植生がない時の最大速度の 1.6 mm s^{-1} 程度と比べ，対流速度が減少することが示された（Hanayama et al., 2009）．植生がない場合，土壌表面温度が湛水面温度より高くなることで温度差が生じており，これが対流を発生させる要因であると考えられた．一方，植生下では，逆に土壌表面温度より湛水面温度の方が高くなり，その温度差で対流が生じていることが明らかになった（花山・安中, 2011）．

このように水田湛水層における対流速度測定装置の開発により対流速度が計測されるとともに，センサーの改良も進められてきた（花山ら, 2008; 花山・安中, 2009）．これらの対流速度の測定は湖沼などでも稀にしか行われていないため，こうしたセンサーが今後広く活用されることが望まれる．

3. 湛水層における溶存酸素（Dissolved Oxygen, DO）の動態と自動測定の試み

3.1 溶存酸素の分布と日変化

湛水層の溶存酸素（Dissolved Oxygen, DO）は，日周変化しており，特に日中は過飽和状態に達するほどの好気的環境を形成していることが多くの観測結果により明らかになった（Saito and Watanabe, 1978; 伊藤・増島, 1980; 伊藤・増島, 1984; Ito, 1987; Mowjood and Kasubuchi, 1998a; Mowjood and Kasubuchi, 1998b; Mowjood and Kasubuchi, 2002; Kishida et al., 2001; Usui and Kasubuchi, 2011; 臼井・粕渕, 2013）．この原因は，地表面近くに生息するシアノバクテリアや藻類などの光合成による O_2 の生成にある．湛水層の DO の垂直分布を測定したところ，前章の水温分布と同様に，対流の作用により均一な濃度分布が形成されていた（Mowjood and Kasubuchi, 1998a）．過飽和状態になった日中においても，対流によって大気面境界まで DO は過飽和になり，大気中への O_2 放出が促進されることが明らかになった（Mowjood and Kasubuchi, 1998a）．しかし，極めて好気的環境の湛水層であっても，除草剤の添加は湛水層における DO の変動に大きな影響を及ぼす．

Fig. 2（a）の DO の変化は，除草剤添加前（9/1 ～ 9/2 の 12 : 00 頃）までは，日射量の変動（Fig. 2（d））に連動して大きく変化し，特に日中は飽和溶存酸素量（20 °C,

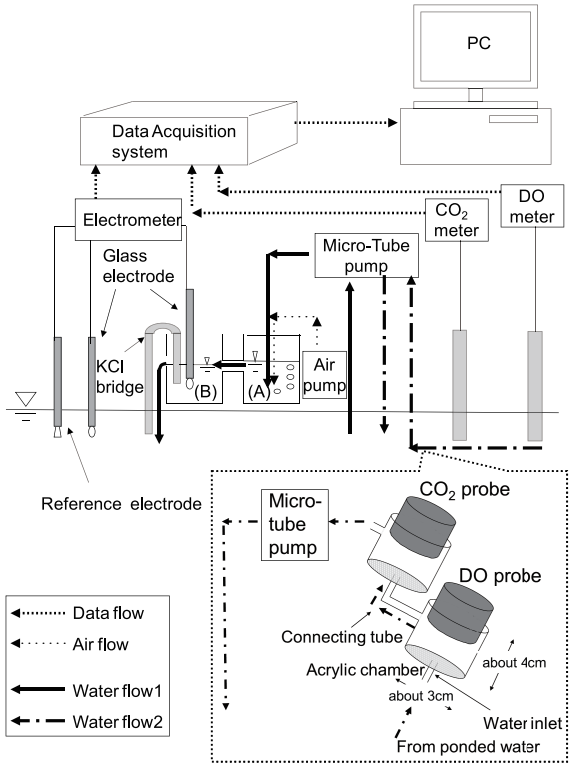


Fig. 3　溶存 CO_2，溶存酸素（DO），pH および RpH の測定法の模式図．（臼井・粕渕, 2013, Fig.1）

0.276 mmol L^{-1}）より高い過飽和の状態になっていた．しかし，除草剤添加後の 9/3 以降は，変動幅は小さくなり，また日中においても飽和溶存酸素量より小さくなった．除草剤の添加により O_2 供給源のシアノバクテリアや藻類などの光合成が阻害されると，湛水層の DO は大きく低下すると考えられた（Usui and Kasubuchi, 2011）．

3.2 溶存酸素測定の自動化

これまで水田湛水層における溶存酸素濃度の測定の多くは，ウィンクラー法による滴定と隔膜型ガルバニ電池方式を採用した DO メーターによって行われてきた（臼井, 2013）．隔膜式ガルバニ電池方式のセンサーは，その先端が薄い透過膜で覆われ，そこを透過した酸素がセンサーと反応して計測を行うため（粕渕, 2005），流速が遅い環境では過小評価しやすく，適度な流速をセンサーに与え，常に溶存酸素を供給し続ける必要がある．ほぼ滞留している水田湛水層における DO のモニタリングには，いずれの方法においても，定期的に水をサンプリングして測定する他なかった．

隔膜式ガルバニ電池方式のセンサーを用いて水田において連続した自動計測を行うためには，湛水層を撹乱することなく，流速を発生させながら新鮮な水を膜面に自動的に送り込む仕組みが必要である．そこで土壌表面から任意の高さの箇所から湛水をポンプで常時サンプリングし，この水を DO センサーに接続したカラムに常時流入させながら排出させる（臼井, 2013）．このとき，適度な流速を発生させつつ，湛水層を撹乱させないチューブポンプサンプリング法（Fig. 3）が提案された（Mowjood and Kasubuchi, 1998a）．この方法によって，時々刻々と変化する水田湛水層における DO の長期観測が可能となった．

このチューブポンプサンプリング法を用い，水田湛水層を対象に連続測定した例（各プロットは 15 分間隔）を Fig. 4 に示す．DO は日中に増加し，最大で約 0.4 mmol L^{-1} に達し，逆に夜間は減少する周期的変動が生じていた．このように現場で適した測定の仕組みを用いることにより，従来の隔膜型ガルバニ電池方式 DO センサーを用いた詳細なモニタリングが可能となる．近年では，改良した隔膜により拡散による酸素供給量で DO 値を計測できるセンサー（金野, 2004）や，隔膜や電解液を使用せずに無流速環境でも使用可能な蛍光式溶存酸素計も開発されている．しかし，現場での利用には，流速依存性の確認が必要であろう（臼井, 2013）．湛水層中の DO の長期的なモニタリングデータを蓄積することは，水田湛水層における O_2 輸送モデルの構築には必要不可欠である．

4. 湛水層における CO_2 濃度，pH および RpH の動態と自動測定

4.1 湛水層の CO_2 濃度および pH の日変化

光合成の結果生成される O_2 に並んでもっとも重要なガスとして，あらゆる生物から呼吸によって生成される CO_2 が挙げられる．

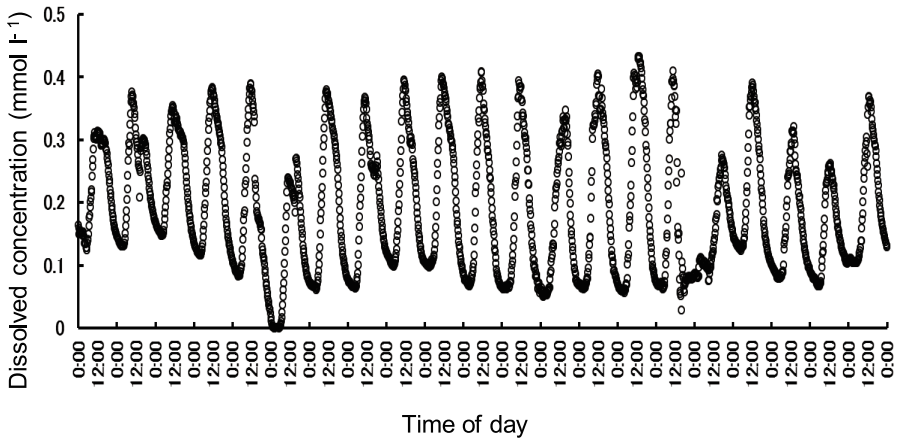


Fig. 4　水田湛水層における溶存酸素 (DO) 濃度の連続測定例（2003 年 6 月 1 日から 6 月 21 日）．

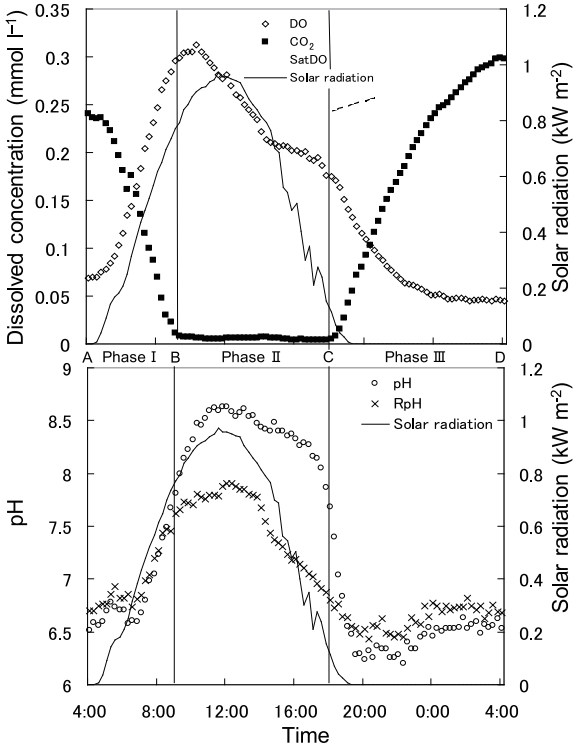


Fig. 5 水田湛水層における溶存 CO_2，溶存酸素（DO），pH，RpH および日射量の日変化.（臼井・粕渕, 2013, Fig. 2）

そこで水田湛水層では，一日にどのような CO_2 濃度の変動があるか調べる必要がある．高価な分析装置を用いず簡易的に CO_2 濃度を測定できる方法の一つに酸とアルカリによる中和滴定法がある．この方法では，定期的に水田から試料水を採取し，速やかに滴定により濃度を測定することで CO_2 濃度の経時的な変動が検討できる．そして，この詳細な観測から CO_2 濃度が減少すると DO は増加し，逆に DO が減少すると CO_2 濃度が増加することが明らかになった（Kishida et al., 2001; Usui and Kasubuchi, 2011; 臼井・粕渕, 2013）．Fig. 2（a）（b）と Fig. 5 は，水田湛水層における DO と CO_2 が関連して連動して変化する観測例である．日中湛水層に生息するシアノバクテリアや藻類の光合成により CO_2 が吸収され減少し，O_2 が生成され増加する．夜間は逆に呼吸により O_2 が吸収され減少し，CO_2 が生成・放出され増加する．しかし，CO_2 と DO との関係には，ヒステリシスが見られることも報告されている（臼井・粕渕, 2013）．

湛水層における CO_2 動態に関連して重要な指標となるのは pH である．水田湛水層の pH は CO_2 の増減とともに大きく変動することが報告されている（Mikkelsen et al., 1978; 伊藤・増島, 1980; 伊藤・増島, 1984; Ito, 1987; Kishida et al., 2001, Usui et al., 2003; Usui and Kasubuchi, 2011; 臼井・粕渕, 2013）．この pH の変動にも，湛水層に生息するシアノバクテリアや藻類の光合成および呼吸が関与していると考えられている．pH の上昇の理由として，水生植物に取り込まれた HCO_3^- が OH^- と CO_2 に分解して，CO_2 は光合成に利用され，葉の上部からは OH^- が放出されることが報告されている（Steemann, 1960）．このように湛水層の pH 環境を明らかにする上では，シアノバクテリアや藻類の役割はきわめて重要である（臼井, 2013）．

とくに高 pH となった場合は，pH の変動の影響は CO_2 以外の物質動態にも派生する可能性がある．例えば，アンモニア態窒素の揮散を引き起こす可能性（安藤, 2005）が挙げられる． pH 変動にともなう様々な現象の物質動態に及ぼす影響についての研究は少なく，今後の進展が期待される（臼井, 2013）．

4.2 pH と RpH の測定法と日変化

一般的にはガラス電極法が主流であり，水田湛水の pH 測定においてもよく用いられる（臼井, 2013）．水中の CO_2 の飽和度を判断する指標として RpH がある．RpH とは，きれいな大気で十分通気された水が示す pH である（半谷・小倉, 1995）．水田湛水層で pH と RpH を同時に測定すると，その差である Δ pH = pH − RpH により，接する大気中の CO_2 に対して飽和か不飽和かを判別し，CO_2 を吸収できるか否かを判断できる（Usui et al., 2003）．

RpH を連続測定する方法を Fig. 3 に示す．湛水された水をマイクロチューブポンプで常時サンプリングし，カラム（A）へ送り込んでエアーポンプでエアレーションする．この十分通気した試料水を隣接するカラム（B）へ送り込み，設置した pH 電極で RpH を測定する（Usui et al., 2003; Usui and Kasubuchi, 2011; 臼井・粕渕, 2013）．なお，カラム（B）では一定水量以上は排出口から排出され，常にエアレーションされた試料水がカラム（B）へ送られて RpH が測定される．さらに，カラム（B）の pH 電極と水田湛水に設置した比較電極との電気的接続を確保するために飽和塩化カリウム寒天橋を設けた．

Fig. 2（c）と Fig. 5 は，pH と RpH の観測例である（Usui et al., 2003; Usui and Kasubuchi, 2011; 臼井・粕渕, 2013）．日中，pH は日射量の増大とともに弱アルカリ性まで上昇した．RpH も上昇したが，pH と比較しその値は小さい．夜間は pH と RpH は 7 以下の値を示すが、RpH は pH よりやや高い値を示した．すなわち，日中は ΔpH が正の値を示し，CO_2 は不飽和の状態にある．逆に夜間は ΔpH が負の値を示し，CO_2 は飽和の状態にある．この ΔpH を大気 – 湛水界面での大気 CO_2 の吸収と放出に活用した事例を第 5 章で解説する．

5. 湛水層が近傍の大気境界層の物質輸送に及ぼす影響

5.1 湛水層からの酸素の放出

第 3 章において，水田湛水層では DO が過飽和になっていることを紹介した．一般的に水への飽和溶存酸素量は，水温，気圧，溶存塩類濃度などによって変化するが，1 気圧，25 °C で 8.11 mg L^{-1}（0.25 mmol L^{-1}）程度である．そのため，湛水層で過飽和になった溶存酸素は，O_2 として大気中に放出されていると考えられた．そこで Mowjood and Kasubuchi（2002）は，大気 – 湛水界面での O_2 輸送に関して，対流速度の違いによって，大気

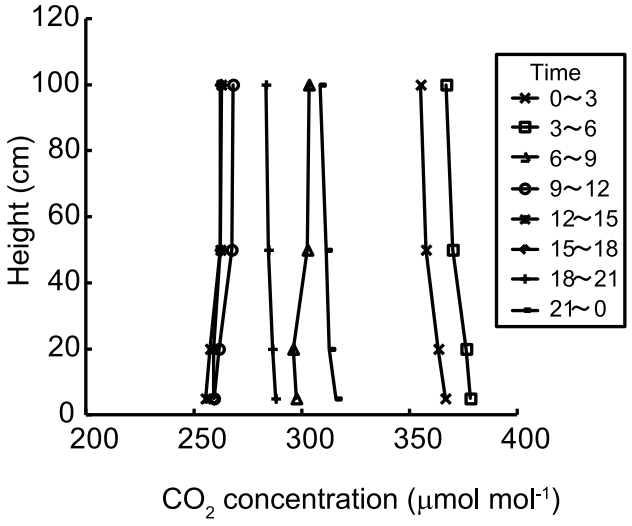


Fig. 6　水田湛水面上における大気 CO_2 の高さ別濃度分布.（Usui et al., 2003, Fig. 4）

からの湛水層への O_2 の吸収速度や湛水層から大気中への O_2 の放出速度が異なるのではないかと考えた．そこで，水田のモデル実験とモデル解析を行い，対流速度の変動による大気との O_2 のガス交換係数の違いを検証した．その結果，対流速度が大きいほど大気境界への O_2 の供給は増加し，また交換係数も増加することが明らかになった．さらに，フィールドの観測データを解析したところ，交換係数は，対流の影響により一日を通して大きく変動していることが明らかになった．

5.2 湛水層による大気 CO_2 の吸収

水稲群落における CO_2 フラックスの研究は，古くから多くなされていたが，大気 – 湛水界面での CO_2 交換については Koizumi et al.（2001）の研究事例などに限られていた．しかし，O_2 の大気 – 湛水界面での輸送同様に，CO_2 の挙動についても，湛水層における物理環境の変動が，大きな影響を及ぼす．

Fig. 6 に水田湛水面上における高度別の大気 CO_2 濃度分布を示す（横軸の単位 μmol mol^{-1} は ppm と同等である）．測定高度は湛水面より上方の 5, 20, 50, 100 cm である．日中における湛水面近傍の 5 cm における CO_2 濃度が，大気上部（20, 50, 100 cm）での測定値よりやや低くなる現象が観察された．これは，下向き方向への CO_2 の流れを意味する．一般的に畑地では，土壌呼吸による CO_2 の放出によって，土壌面近傍の CO_2 が高くなることが知られている．しかし，水田はその土壌表面が湛水層で覆われているため，畑地とは異なる濃度分布が生じたと考えられた．

4.2 節で示したように，pH の高い日中の湛水層は CO_2 が不飽和の状態にあり，pH の低い夜間は飽和の状態にある（Fig. 5）．そこで，湛水の pH の日変動と湛水面から高さ 5 cm と 20 cm の CO_2 濃度から求まる濃度勾配の日変動を比較した．その結果，日中の湛水層は大気から CO_2 を吸収し，夜間は逆に大気へ CO_2 を放出することが明らかになった（Usui et al., 2003）．ただし，3.1 節で述べた除草剤投与は，DO のみならず，湛水層における溶存 CO_2，pH，RpH の日変動を変化させ，大気 – 湛水層間での物質輸送に大きな影響を及ぼす可能性がある（Usui and Kasubuchi, 2011）．

6. おわりに

本稿では，水田湛水層を中心とした物質輸送とそれらが湛水面近傍の大気環境に及ぼす影響についての研究成果を筆者らの研究成果を中心に紹介した．特に，水田の湛水層 – 大気系における物理環境の連続観測装置と観測結果について焦点を当てて解説した．しかし，水田は土壌 – 湛水 – 植物 – 大気系として成立しており，今後は土壌も含めた詳細な物質やエネルギーの連続観測装置の開発とフィールド観測が重要である．とりわけ土壌の酸化還元電位（Eh）は土壌表層や根圏域における微生物の活動と関連していると考えられるが，これまでに連続計測の事例は少ない．微生物活動による温室効果ガスの消長と関連づけた研究を行うためには，Eh の連続計測と温室効果ガスフラックスの同時計測が不可欠である（臼井, 2013）．

水田における物質やエネルギーの移動や状態の物理環境連続計測は，まだ始まったばかりである．今後は，水田湛水層における対流の長期連続測定や湛水層における DO，CO_2 濃度，pH，また大気 CO_2 濃度の連続測定データなどが，水田における土壌 – 湛水 – 植物 – 大気系の物質輸送モデルへ活用されることが望まれる．

謝辞

本稿を執筆するにあたり，独立行政法人農業環境技術研究所常田岳志博士には，原稿をご校閲いただきました．また，機会を与えてくださった本誌編集委員会の方々に感謝を申し上げます．

引用文献

安藤　豊 (2005): 土壌サイエンス入門 第 5 章 水田の土壌. pp. 63–74, 文永堂, 東京.

FAO (2011): FAO STAT. Available at http://faostat3.fao.org/home/index.html# DOWNLOAD (accessed 20 March 2013).

Fujimaki, Y., Mowjood, M.I.M. and Kasubuchi, T. (2000): Measurement of convective velocity of paddy ponded water of a paddy field. Soil Sci., 165: 404–411.

花山　奨, 粕渕辰昭, 安中武幸 (2008): 田面水の対流速度を測定する装置の改良. 土壌の物理性, 109: 51–56.

花山　奨, 安中武幸 (2009): 対流センサーのコンスタンタン線の発熱が対流速度測定におよぼす影響. 土壌の物理性, 113: 21–24.

Hanayama, S., Kasubuchi, T. and Annaka, T. (2009): Convection velocity of ponded water in the vegetated paddy lysimeter. Paddy Water Environ., 7: 255–258.

花山　奨, 安中武幸 (2011): 植生下における田面水の対流を誘発する要因について. 土壌の物理性, 118: 19–24.

半谷高久, 小倉紀雄 (1995): 第 3 版 水質調査法. pp. 188–189, 丸善, 東京.

伊藤 信, 増島 博 (1980): 田面流水における窒素, リン濃度の変動と流速条件. 日本土壌肥料学雑誌, 51: 478–486.

伊藤 信, 増島 博 (1984): 水稲栽培および裸地条件下における田面水中の無機態窒素とリンの濃度低下. 日本土壌肥料学雑誌, 55: 123–128.

Ito A. (1987): Change of water temperature, pH, dissolved oxygen, inorganic nitrogen and phosphorus concentrations in flowing irrigation water on paddy surface. Soil Sci. Plant Nutr., 33: 449–459.

粕渕辰昭 (2002): フィールドから展開される土壌肥料学—新たな視点でデータを採る・見る— 5. 水田の物理環境の自動計測. 日本土壌肥料学雑誌, 73: 53–56.

粕渕辰昭 (2005): 続・環境負荷を予測する—モニタリングとモデリングの発展—. 波多野隆介・犬伏和之編, pp. 134–145, 博友社, 東京.

粕渕辰昭 (2010): 土と地球 土は地球の生命維持装置. pp. 170, 172, 学会出版センター, 東京.

Kishida, T., Iwata, T., Miura, T., Ohtaki, E., Nishimura, K., Higuchi, Y., Ohtou, A. and Miyata, A. (2001): Factors affecting the diurnal variation of carbon dioxide concentration in standing water in a rice field. J. Agric Meteorol., 57: 117–126.

Koizumi, H., Kibe, T., Mariko, S., Ohtsuka, T., Nakadai, T., Mo, W., Toda, H., Nishimura, S. and Kobayashi, K. (2001): Effect on free-air CO_2 enrichment (FACE) on CO_2 exchange at the flood-water surface in a rice paddy field. New Phytol., 150: 231–239.

金野裕子 (2004): 新しい無流速 DO 電極を使った環境測定への提案. EICA, 9: 265–268.

Mikkelesen D.S., De Datta S.K. and Obcemea W.N. (1978): Ammonia volatilization losses from flooded rice soil. Soil Sci. Soc. AM. J., 42: 725–730.

Mowjood, M.I.M., Ishiguro, K. and Kasubuchi, T. (1997): Effect of convection in ponded water on the thermal regime of a paddy field. Soil Sci., 162: 583–587.

Mowjood, M.I.M. and Kasubuchi, T. (1998a): Dynamics of dissolved oxygen (DO) in the ponded water of a paddy field. Soil Sci. Plant Nutr., 44: 405–413.

Mowjood, M.I.M. and Kasubuchi, T. (1998b): Heat and dissolved oxygen (DO) transfer phenomenon in ponded paddy field. 土壌の物理性, 79: 41–47.

Mowjood, M.I.M. and Kasubuchi, T. (2002): Effect of convection on the exchange coefficient of oxygen and estimation of net production rate of oxygen in ponded water of a paddy field. Soil Sci. Plant Nutr., 48: 673–678.

Rose, C.W. and Chapman, A.L. (1968): A physical analysis of diurnal temperature regimes in clear and turbid water layer: A problem in rice culture. Agric. Meteorol., 5: 391–409.

Saito, M. and Watanabe, I. (1978): Organic matter production in rice field flood water. Soil Sci. Plant Nutr., 24: 427–440.

Steemann, N.E. (1960): Uptake of CO_2 by the plant. In Handbuch der Pflanzenphysiologie 5, pp. 70–84, Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg.

Usui, Y., Mowjood, M.I.M. and Kasubuchi, T. (2003): Absorption and emission of CO_2 by ponded water of a paddy field. Soil Sci. Plant Nutr., 49: 853–857.

Usui, Y. and Kasubuchi, T. (2011): Effects of herbicide application on Carbon dioxide, dissolved oxygen, pH and RpH in paddy-field ponded water. Soil Sci. Plant Nutr., 57: 1–6.

臼井靖浩, 粕渕辰昭 (2013): 水田湛水層における CO_2 濃度, DO, pH および RpH の日変動とその相互関係. 陸水学雑誌, 74: 15–20.

臼井靖浩 (2013): 水田における物理環境計測の進歩と溶存酸素 (DO)・pH・酸化還元電位 (Eh) の動態解明および湛水層における対流の発見. 生物と気象, 13: 25–32.

矢吹万寿 (1957): 水田水温に関する研究. Bull. Univ Osaka Pref. Ser. B., 7: 113–146.

要　　旨

水田湛水層で生じる物質輸送およびそれらが周辺環境に及ぼす影響に関する方法および結果について概観した．水田湛水層は，土壌層および大気層とのインターフェースであり，湛水層で生じる物理現象の変動が，周辺の環境に大きな影響を及ぼす．このことを明らかにするために，土壌 – 湛水層 – 大気系における物理環境要素の連続測定によって明らかにするために考案された方法やそこで得られた結果を紹介した．水田における物質やエネルギーの移動や状態といった物理環境連続計測は，また始まったばかりである．これからも未だ明らかにされていない現象を，新たな方法を用いて解明していくことが望まれる．

キーワード：CO_2，溶存酸素（DO），水田湛水層，連続観測装置，フィールド計測