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

臼井靖浩[†]

(独立行政法人 農業環境技術研究所)

A review of improvements to methods for the measurement of dissolved oxygen, pH, and soil redox potential and the discovery of convective flow in ponded water of paddy fields

Yasuhiro USUI[†]

(National Institute for Agro-Environmental Sciences, 3-1-3 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8604, Japan)

Abstract

To analyze how physical factors vary from hour to hour in ponded water of paddy fields, techniques that allow continuous measurement of these factors are required. Until recently, a lack of proper instrumentation made this type of measurement difficult to do. The development of measurement instrumentation and information processing technology has now made the continuous measurements of these physical factors feasible. Making these types of measurements practical has also required the design of instruments suitable for use under field conditions. This paper reviews the progress in the development of these measurement and instrumentation technologies with respect to four specific physical parameters of ponded water in paddy fields. Dissolved oxygen (DO) in paddy fields is important for the creation of an aerobic environment. DO in ponded water is considered one of the most abundant forms of DO in the world. The improvement of DO-measuring methods is reviewed, ranging from earlier methods requiring periodical manual sampling to current continuous automated sampling methods. The acidic or alkaline nature of the environment is critical for plant growth. The large variation in pH throughout the day in ponded water, factors that affect pH, and the influence of ponded water pH on the surrounding environment are discussed. Methods for measurement of pH in the field are reviewed. Soil redox potential (Eh) has been an area of great interest. Methods for the measurement of soil Eh have been improved. Two types of approaches are used to measure soil Eh: direct and indirect. However, continuous measurement of paddy soil Eh in the field remains difficult. Finally, convective flow is an important physical parameter in ponded paddy water. The discovery of convective flow and the progress made to date in meeting the challenge of developing methods to measure convection velocity in the field are reviewed.

Key words: ponded water, dissolved oxygen (DO), pH, Eh, Convection

キーワード: 湛水層, 溶存酸素(DO), pH, 酸化還元電位(Eh), 対流

1. はじめに

1.1 水田における物理計測の重要性

米はトウモロコシ、小麦とともに世界の三大穀物の一つであり、人類にとって不可欠な作物である。米の2011年の生産量は、世界で約7億2千万トンであるが、生産地は中国、インド、インドネシア、バ

ングラデシュ、ベトナムなどのアジア諸国に偏在しており、アジアでの生産量は、約6億53百万トンに及ぶ。なお、日本は約840万トンの生産量を有する。収穫面積は、穀物の全体6.97億haのうち、米は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。日本では、約157万haの収穫面積となっている(FAO, 2011)。このように、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となっている。日本においても、水稻収穫面積の全耕作面積に占める割合が大きいことから、水田

2013年3月25日 受付, 2013年6月6日 受理

[†]Corresponding Author: yasuusui@affrc.go.jp

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。

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は、施肥管理への応用や多面的機能の理解増進、さらには湿原・湿地の管理といった点でも、基礎データとして活用が期待される(白井・粕渕, 2013)。しかし、これまで、水田における研究は、化学性や生物性の側面からのものが多く、物理性についてのものは少なかったといえる。物理性に関する場合でも、生産に深く関わる透水性や地盤の硬さなど土そのものの機能に関するものに注力されてきた。これに対し、エネルギーと物質の移動や状態、すなわち、水田の動的な物理環境については、十分明らかにできていない(粕渕, 2002)。理由としては、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、近年の計測および情報処理技術のめざましい発展により、これらが可能となり、水田における大気—湛水層—植物(生物)—土壌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。

そこで本総説では、水田の湛水層およびその近傍における物理環境・物理現象の中でとりわけ重要な湛水層の溶存酸素(DO)および pH、表層土壌の酸化還元電位(Eh)、湛水層における対流現象に焦点をあて、それらの計測技術の進歩と得られた知見について整理し、フィールドにおけるモニタリングについての今後の課題についても論じる。

2. 水田における物理的環境

2.1 湛水層における溶存酸素(DO)

2.1.1 水中における溶存酸素の動態

水田湛水層における溶存酸素は、湛水直播での種子の発芽、水稻の生育、湛水層に生息する魚や水生昆虫はもとより、水田に自生する雑草種子の発芽(片岡・金, 1978)にも関与するなど、その動態と溶存酸素が及ぼす影響を把握することは重要な課題である。

水田土壌表層の大きな特徴は、易分解性有機炭素に富む嫌気的環境と O_2 生成の盛んな好気的環境が、非常に狭い空間領域内で隣接しているという点である。土壌表層の易分解性有機炭素はその分解過程で溶存酸素を消費するため嫌気的環境形成に寄与する(江口, 2012)。一方、湛水層の溶存酸素は、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(Saito and Watanabe, 1978; 伊藤・増島, 1980, 1984; Ito, 1987; Mowjood and Kasubuchi, 1998a, 1998b, 2002; Kishida *et al.*, 2001; Usui and Kasubuchi, 2011; 白井・粕渕, 2013)、地球上で最も溶存

酸素濃度が高い水域の一つ(粕渕, 2010)とも言われている。溶存酸素が日周変化するのは、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によると考えられる(Saito and Watanabe, 1978; 伊藤・増島, 1980, 1984; Ito, 1987; Mowjood and Kasubuchi, 1998a, 1998b, 2002; Kishida *et al.*, 2001; Usui and Kasubuchi, 2011; 白井・粕渕, 2013)。さらに、日中、過飽和状態になった溶存酸素は、輸送能力の高い対流によって大気中に放出されているとの報告もある(Mowjood and Kasubuchi, 1998a)。ただし、極めて好気的環境の湛水層であっても、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、湛水層の溶存酸素は大きく低下する(Usui and Kasubuchi, 2011)。

2.1.2 水田湛水層における溶存酸素の測定とその発展

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、滴定を用いるウィンクラー法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いる。水中に O_2 が存在するとき、試料水に硫酸マンガン溶液と水酸化ナトリウム水溶液を加えると、次式のように $MnO(OH)_2$ が生成され、褐色の沈殿が生じる。これに I^- イオンを共存させ、塩酸を加えると O_2 に当量の I_2 が遊離する。この I_2 をチオ硫酸ナトリウムで滴定するのがウィンクラー法である(半谷・小倉, 1995)。

一方、隔膜型ガルバニ電池方式を採用した DO メーターを用いた測定では、ウィンクラー法と比較し、手軽に溶存酸素を調べることができる。水田での溶存酸素測定に用いられる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することで計測を可能とする(粕渕, 2005)。

かつては、湛水層における溶存酸素の経時的な動態を調べるには、数時間おきの昼夜にわたるサンプリング(Saito and Watanabe, 1978; Kishida *et al.*, 2001)を必要とした。ウィンクラー法や携帯型 DO メーターを用いても、大変な労力を要していた。しかし、近年の情報通信機器の発達水田における溶存酸素の動態を自動で観測することを可能とした。

一般的には定期的にサンプリングを行い、サンプリングした水を実験室等でスターラー等により攪拌することにより適度な流速が得られるため測定が可能となる。また、河川などでの計測では、流速が生

じているため、センサーを設置することで連続計測を可能とする。しかし、水田のように湛水が滞留している系では、湛水層を攪乱することなく、流速を発生させながら新鮮な水を膜面に接する仕組みが必要となる。そのため、適度な流速を発生させつつ、湛水層を攪乱させない仕組みのチューブポンプサンプリング法が提案された (Mowjood and Kasubuchi, 1998a)。このサンプリング法は、土壌表面から任意の高さの箇所から常時湛水をポンプでサンプリングし、この水を DO センサーに接続したカラムに滞留することなく常時流入させたのち排出させる仕組みである。このポンプサンプリング法と合わせることで、圃場での溶存酸素の連続計測が可能となり、現地観測およびモデル観測での連続計測に用いられるようになってきた (Mowjood and Kasubuchi, 1998a, 1998b, 2002; Usui and Kasubuchi, 2011; 臼井・粕渕, 2013)。近年では、拡散速度程度の流速でも隔膜を透過し、DO 値が計測できるセンサー (金野, 2004) や隔膜や電解液を使用しない無流速環境でも使用可能な蛍光式溶存酸素計が開発されているが、現場で用いるときは、必ず流速を与えた時と同じ値を示すか事前に確かめておく必要がある。時々刻々と変化する物理現象を捉えるためには、測定法やセンサーの発達はもちろんのこと、センサーの特性を生かす仕組みや工夫が必要不可欠である。このような物理現象を捉える仕組みは、環境制御技術にも応用されることが考えられるため、今後もセンサーの開発とともに、センサーを生かす仕組みも提案されていくことが望まれる。

2.2 水田湛水層における pH

2.2.1 水田における pH 測定の意義

水田での pH はおもに土壌 pH について多く調べられてきた。土壌 pH は、土壌の酸性・中性・アルカリ性の程度を測る物差しとして重要である。土壌は外からの酸やアルカリによる影響を和らげる能力を有しており、これを土壌の pH 緩衝能と呼ぶ。土壌の種類によって緩衝能は異なる (西尾ら, 2000)。土壌の pH は微生物の活動や植物の生育に大きな影響を与える (高橋, 2005)。土壌 pH は土壌診断項目のなかでも重要項目の一つとして挙げられる。植物によりその好適土壌 pH の範囲は異なり、水稻では 6.0~6.5 の範囲といわれている。土壌の酸性化の影響として以下のようなことが挙げられる。①低 pH により溶出するアルミニウムイオンが作物の生育を直接阻害する、あるいはリン酸イオンと結合して不溶化し、リン酸欠乏を生じさせる。②強い酸性土壌では微生物活性も低く、土壌有機物分解による窒素供給が少ない (西尾ら, 2000)。土壌 pH に関する研究蓄積は水

田湛水層における pH 研究と比しても、膨大なものとなる。しかし、水田の湛水層の pH は、湛水層を介した大気-土壌系の物質循環に影響を与えることから、土壌 pH と同様に、湛水層の pH を計測することも重要である。

2.2.2 水田湛水層における pH の変動要因

pH 測定法としては、大きく分けると指示薬法、金属電極法およびガラス電極法の 3 つが挙げられる。一般的にはガラス電極法が主流であり、水田湛水の pH 測定においても同様である。

古くは水田湛水の pH に着目し、肥料となるアンモニアの揮散と関連づけて研究が行われた (Mikkelsen *et al.*, 1978)。Mikkelsen *et al.* (1978) は太陽放射のもと、浅い湛水中では、そこに生息している水生生物の作用により pH が 9.5 から 10 と高い値へと上昇することでアンモニアの揮散が生じることを報告している。土壌 pH のみならず、湛水の pH の測定には、肥培管理の指標として重要な側面があり、水田湛水の pH の挙動を知るとは、作物の栽培管理の上でも重要な役割があると考えられる (臼井・粕渕, 2013)。このほか、水田湛水中における高 pH については多くの報告がなされており (Mikkelsen *et al.*, 1978; 伊藤・増島, 1980, 1984; Ito, 1987; Kishida *et al.*, 2001; Usui *et al.*, 2003; Usui and Kasubuchi, 2011; 臼井・粕渕, 2013)、高 pH となった湛水層が、湛水層近傍の大気中 CO₂ を吸収していることも明らかとなっている (Usui *et al.*, 2003)。湛水層は水田土壌と大気のインターフェースとなるため、大気-土壌系での物質循環を考える上で、大気中の CO₂ と湛水層の関わりに付いての研究は重要であるが、Usui *et al.* (2003) や Koizumi *et al.* (2001) などのほかには報告例は少ない。

水田湛水層において、高 pH になる理由として、水生植物に取り込まれた HCO₃⁻ が HCO₃⁻ = OH⁻ + (CO₂) として光合成に利用されたのち葉の上部より放出されることで水の pH の上昇を導く (Steemann, 1960) と報告されている。このほか、高 pH の上昇には、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も関与していると考えられている。伊藤・増島 (1980, 1984) は実験区において、フシマダラ等の藻類や細菌等が湛水層全域にわたって繁殖していると述べている。このように水田湛水層における pH の変動にはシアノバクテリアや藻類の光合成や呼吸が深く関わっていると考えられ、湛水層の環境を明らかにするうえで、シアノバクテリアや藻類の役割はきわめて重要である。除草剤の添加は、シアノバクテリアや藻類の光合成や呼吸に影響を及ぼし、pH を低下させる (Usui and Kasubuchi, 2011)。藻

類、浮き草などの生物活動が活発なことが、水田の生産力が維持されている一つの理由として考えられるが、藻類の活動による湛水層の pH の日中の上昇は、アンモニア態窒素の揮散を引き起こす可能性があり、湛水中の生物活動は水稻生産にとってプラス面とマイナス面の両面がある(安藤, 2005)。しかし、これまで、湛水層における藻類等の生物活動のプラスの面とマイナスの面についてのトレードオフについての研究は少なく、今後の進展が期待される。

2.3 水田土壌における酸化還元電位の測定

2.3.1 水田土壌における酸化還元電位測定とその活用

pH と同様に、水田土壌の酸化還元電位(Eh)は、古くから関心がもたれている。酸化還元電位については、脱窒現象(塩入, 1942)、微生物活動(高井, 1952; Takai and Kamura, 1966)、Eh と鉄化合物の挙動(高井, 1956)、イネの生育診断(泉ら, 1961)、土層の分化(高井・江, 1967)、土壌中における窒素肥料分の指標(山根, 1982)、間断灌漑等の水管理(長谷部ら, 1986)、水田雑草タイヌビエの休眠・発芽・幼芽の土壌中伸長(荒井・宮原, 1962, 1963a, 1963b)および温室効果ガスの生成(八木, 1994)など、幅広く活用されてきた。

2.3.2 水田土壌における酸化還元電位測定法の進展

Eh は、土壌の酸化層と還元層を測る指標として、作用極に白金等の電極、もう一方に比較電極を用い、それらの電位差を電位差計で測定し、得られた出力を mV の相対値として評価する。ただし、比較電極は、標準水素電極、飽和カロメロ電極、飽和塩化銀電極および 3.3 molL^{-1} 塩化銀電極があり、得られた電位差を使用する比較電極固有の値で補正する必要がある。

一般に、水田土壌の Eh 測定法は、間接法と直接法に大別される(長谷部・飯村, 1982)。間接法とは、圃場から土壌を定期的に採取したものを測定する。具体的には、採取した土壌を、2 mm 篩に通した後、その一部をサンプル瓶にとり、徐々に蒸留水を加えながら湛水し、白金電極を差し込み、これを 2-3℃ の低温に 24 時間に放置する。白金電極と土壌との接触時間を十分にとった後、室温にて電位差計で Eh を測定する方法である(青峰・船引, 1956; 長谷部・飯村, 1982)。

一方直接法は、試験圃場内に湛水し、土壌を攪拌後、土壌表面を均一に整え、作土内部に白金電極を設置して、経時的に電位差計を用い Eh を測定する方法である(松尾・加藤, 1956; 長谷部・飯村, 1982, 1983; 長谷部ら, 1986)。しかし、湛水土壌に白金電極を挿入しても、Eh 値は電極挿入時間によって著しく異なっていたため、Brown(1934)は 30 分後、瀧

嶋・今野(1959)は 1 時間後、青峰・船引(1956)は 3 時間後、Goto and Yamashita(1966)は 5 時間後の値を用いている。また、西垣ら(1960)は電位差計の条件と電極面積について論じている。山根・佐藤(1968)は、これら白金電極について問題を検証し、①白金電極の前処理の方法によって値が異なること、②電極の面積が小さいと電位の降下が遅く、土壌固有の Eh 値に達するのに長い時間がかかるため、白金電極の面積は 100 mm^2 以上のものが望ましいこと、③土壌挿入後、30 分、3 時間の値はいずれも高くなる傾向があるため、6 時間以上、一般には 24 時間以上の値を用いる必要があることを指摘している。

また、以前は、ガラス管の先端に白金線を封入し、Eh メーターとの接続に水銀を使用した電極が用いられたが、現場での取り扱いに不便であり、市販のセンサーでは白金部分の表面積が小さいことから、ビニール被覆した銅線の先に白金線を半田付けし、半田付け部分をエポキシ系樹脂で絶縁したセンサーが試作された(駒田・粕渕, 1988)。このセンサーは、既知の酸化還元電位を有する溶液で市販センサーと比較したところ十分利用可能であることが示された。なお、既知の酸化還元電位を有する溶液には、ゾーベル(Zobell)溶液を用いるのが妥当である。ゾーベル溶液とは、塩化カリウムを 0.1 molL^{-1} になるよう純水 1 L 中に溶解させ、これにフェロシアン化カリウムとフェリシアン化カリウムをそれぞれ $1/300 \text{ molL}^{-1}$ 溶解させた溶液であり、温度補正することによって Eh が常に一定電位(25℃で 428 mV)を示すことが知られている(Starky and Wight, 1946)。複数のセンサーを用いて測定する際、測定システムが正常に作動しているかをゾーベル溶液にもセンサーを設置し、同時に測定し器差を確かめることが重要である。

山根・佐藤(1968)が指摘した白金電極の問題について、駒田・粕渕(1988)の方法を準用し、村上・粕渕(2007)はサイクリックボルタンメトリーを用い、以下の検証結果を報告している。

①白金電極の前処理の違い—白金電極の研磨の有無—

白金電極の研磨の有無で、酸化還元電位が平衡電位に到達する時間が異なった。これはこれまで言われたように、白金電極表面における酸化皮膜形成の影響と考えられ(山根・佐藤, 1968)、研磨による時間の短縮は、白金表面の酸化皮膜が除去されることによる(藤嶋ら, 1984)。

②白金電極の表面積の影響

表面積を大きくすることにより計測時間が短縮されることから、電極表面の荷電密度が測定に関係していることが推測される。

③白金電極の土壤挿入を繰り返すことの影響

白金電極表面の荷電が土壤から引き抜くたびにリセットされ、再挿入した場合は、電極の電位が周囲と平衡するために長時間が必要になる。

以上の検証をもとに土壤では、固相による物理的要因と粘土鉱物の荷電特性が電極反応に現れ、白金電極表面で様々な電子授受反応が生じた可能性がある」と結論付けている。

一方、これまでの報告のように、酸化還元電位を測定するには、ある程度の表面積を有する白金電極を用いる必要があるため、土壤の微小領域の E_h を測定することは困難であった。そこで、村田ら (2011) は土壤微細構造の酸化還元状態を定量的に測定できる可能性のあるアレイセンサーの開発をした。

これまで紹介したように、水田土壤における E_h の測定には、バルク溶液中で行われている電気化学測定では見られない現象 (村上・粕淵, 2007) もあることから、さらなる検証を必要とする項目もあるが、従来の白金電極を用いる方法はもちろんのこと、サイクリックボルタンメトリー、マイクロアレイセンサーを用いる方法などを併用した連続測定の発展が期待される。

2.4 水田湛水層の対流の発見とその計測

2.4.1 水田湛水層の対流の発見

水稻の生育ならびに収量に著しい影響を及ぼしている水稻植被下の水田湛水層の水温および植被層内の微気候を明らかにすることは非常に重要である。特に、一般の接地気象と異なった特性を具えている植被層内の微細気象現象を解析的に研究しなければならない (Uchijima, 1961)。微気象的研究での水温の重要性のほか、作物学的研究においても、湛水直播イネの苗立ち (Chapman and Peterson, 1962)、稲の生育収量の前期 (穂首分化期頃まで) での水温の強い影響 (松島ら, 1964a, 1964b)、湛水直播水稻での初期生育に及ぼす影響 (越水, 1973)、幼穂発育期間中の生育に及ぼす影響 (和田・寺中, 1978) など、水温と稲の生育について多くの報告がある。このように水田湛水層における水温分布は、作物栽培における重要な物理的指標の一つである。

水田湛水層では、水温分布が均一であることがわかり、その均一になる要因は、風による強制対流であり、自然対流によるものはないと考えられていた (矢吹, 1957)。しかし、その後の研究で、水田での均一な温度分布は自然対流が関与していることがわかり (Rose and Chapman, 1968; Mowjood *et al.*, 1997)、対流による攪拌作用により、湛水層の溶存酸素濃度 (DO) が温度分布同様に均一であること (Mowjood and Kasubuchi, 1998a, 1998b) が分かってき

た。

2.4.2 水田湛水層の対流速度計測の試み

情報処理技術の発展とともに、パソコンを用いた土壤の物理環境の自動計測・解析システムについての試みが行われるようになり (粕淵, 1983)、自動かつ多くの項目を同時に計測できるようになってきた。これらの情報処理技術を用い、水温分布を詳しく測定・解析した結果、空間的に一様な水温分布が対流によるものであることがわかった (Mowjood *et al.*, 1997)。ホイートストンブリッジ回路を応用した対流速度測定装置の開発および装置による水田圃場での実測を試みた (Fujimaki *et al.*, 2000) 結果、植生のない水田の対流速度は、0.1-1.4 mm/s 程度であり、拡散と比べきわめて輸送能力が高いことがわかった。対流しない場合と対流速度が 1 mm/s の場合とでは、溶質の移動速度に約 1 万倍の違いがある (粕淵, 2010)。一方、植生のある水田では植生の影響を受け最大でも 0.3-0.7 mm/s 程度であり、植生がない時と比べ、対流速度が減少することが示された (Hanayama *et al.*, 2009)。植生下における湛水層の対流を誘発する要因について、蒸発による放熱を抑制することで植生下と同様な水温分布を模したモデル水田において調べたところ、湛水層の対流は蒸発により誘発されることを突き止めた (花山・安中, 2011)。また、水田圃場における対流速度の計測では、センサーに湛水層で発生する泡が付着し計測に影響が出ることからセンサーの改良 (花山ら, 2008) がなされた。さらに水田圃場では、交流電源の確保が難しい場合が多く、直流電源でも作動するための改良も同時に行われた (花山ら, 2008)。センサーに用いる Co 線 (コンスタンタン線) の発熱は、0.3 mm/s 以下の対流に影響を及ぼすことがわかり、ヒーターの発熱量を 0.13 W/m 以下に制限することにより、0.0-1.25 mm/s の範囲でセンサーの較正を可能とした (花山・安中, 2009)。

2.4.3 対流速度計測の今後の展開

今後は対流速度測定装置およびセンサーの改良、ならびにそれに基づく自動で長期にわたる対流速度の測定が望まれる。対流が気と湛水層間のガス交換を促進させる (Mowjood and Kasubuchi, 1998a, 2002) ことから、水田における温室効果ガスの湛水層を介しての挙動に対して対流がどのように関わってくるのかを検討することが期待される。

また、湖沼において水の対流は生態系を維持する上で重要と認識されている (Horne and Goldman, 1994; 花里, 1998; 奥宮ら, 2001)。対流の抑制は湖底への酸素供給を減少させ、底泥直上の溶存酸素が底泥表面に蓄積された有機物の様々な生物による分解作用によって消費・枯渇された結果、底泥からリン酸やア

ンモニアが放出され水質汚濁を招く。水田ではこのような水質汚濁はあまり生じない。この理由として湛水層の対流が関与していると推察される(花山・安中, 2011)。水田湛水層での対流測定法を、湿原や湖沼などにも適用し、表層における対流と溶存する物質の大気-表層-低層の循環について研究することも期待される。

3. 水田の湛水層およびその近傍での物理現象計測の今後の展開

本総説では、水田湛水層における対流、溶存酸素、pH および酸化還元電位の変動現象やその計測法の進展について、連続測定へのアプローチも含め概説してきた。水田湛水層は大気と土壌のインターフェースとして物質循環の要になると考えられることから、以下の事柄について今後の展開が期待される。

①水田湛水層における対流の長期連続自動測定法の確立

湛水層における対流は、熱および物質輸送の重要な駆動力として拡散と比べても大きな輸送能力を有しているが、研究事例は限られている。駆動力の大きい対流は、湛水層における pH および CO₂ 濃度の変動と湛水面近傍での大気 CO₂ 濃度分布にも大きな影響を及ぼしていると考えられるため、これらも同時に連続モニタリングし、得られたデータから対流輸送を考慮したより精緻な熱および物質輸送モデルの開発が望まれる。

②水田土壌における Eh の連続計測

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。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり、山形大学農学部 安中武幸教授、独立行政法人 農業環境技術研究所 小野圭介博士には、原稿を校閲いただきました。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

青峰重範・船引真悟, 1956: 第3版 土壌実験法. 養賢堂, 東京, pp. 252-260.
荒井正雄・宮原益次, 1962: 水田雑草タイヌビエの生理生態学的研究: 第3報 種子の二次休眠について, 日本作物学會紀事, **31**, 186-189.
荒井正雄・宮原益次, 1963a: 水田雑草タイヌビエの

生理生態学的研究: 第5報 発芽について, 日本作物学會紀事, **31**, 362-366.
荒井正雄・宮原益次, 1963b: 水田雑草タイヌビエの生理生態学的研究: 第6報 幼芽の土壌中伸長について, 日本作物学會紀事, **31**, 367-370.
安藤 豊, 2005: 土壌サイエンス入門 第5章 水田の土壌. 文永堂, 東京, pp. 63-74.
Brown, L. A., 1934: Oxidation reduction potentials in soils: I. Principles and electrometric determination. *Soil Sci.*, **37**, 65-76.
Chapman, A. L., and Peterson, M. L., 1962: The seedling establishment of rice under water in relation to temperature and dissolved oxygen. *Crop. Sci.*, **2**, 391-395.
江口定夫, 2012: 水田および浅層地下水中の脱窒による環境浄化. 土壌の物理性, **120**, 29-38.
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.
藤嶋 昭・相澤益男・井上 徹, 1984: 電気化学測定法(上). 技報堂出版, 東京, p.79.
Goto, S., and Yamashita, K., 1966: Oxidation—Reduction—Potential of a paddy soil *in situ* with special reference to the production of Ferrous iron, Manganous Manganese and sulfide., *Soil Sci. Plant Nutr.*, **12**, 230-238.
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.
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.
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.
Hanayama, S., Kasubuchi, T., and Annaka, T., 2009: Convection velocity of ponded water in the vegetated paddy lysimeter. *Paddy Water Environ.*, **7**, 255-258.
花里孝幸, 1998: ミジンコ その生態と湖沼環境問題, 名古屋大学出版会, 名古屋, pp. 125-139.
半谷高久・小倉紀雄, 1995: 第3版 水質調査法. 丸善, 東京, pp. 217-218.
長谷部亮・飯村康二, 1982: 水田土壌 Eh 測定比較. 日本土壌肥料学雑誌, **53**, 545-546.
長谷部亮・飯村康二, 1983: 北陸地域強グライ強粘質水田土壌における酸化層・還元層の分化発達過程. 日本土壌肥料学雑誌, **54**, 273-276.
長谷部亮・関矢信一郎・飯村康二, 1986: 水管理条件

- が酸化層・還元層の分化発達に及ぼす影響. 日本土壤肥科学雑誌, **57**, 544-550.
- Horne A. J., and Goldman C. R., 1994: *Limnology*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, pp.70-99.
- 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.
- 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. 日本土壤肥科学雑誌, **51**, 478-486.
- 伊藤 信・増島 博, 1984: 水稻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. 日本土壤肥科学雑誌, **55**, 123-128.
- 泉 清一・姫田正美・及川俊昭・野本俊雄, 1961: 水田における耕耘の栽培技術的研究: 第3報 耕耘法の差異が水稻の生育に及ぼす影響, 日本作物学会紀事, **29**, 353-355.
- 粕渕辰昭, 1983: 土壌の物理環境計測へのコンピュータの利用. 土壌の物理性, **47**, 3-7.
- 粕渕辰昭, 2002: フィールドから展開される土壌肥科学—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. 日本土壤肥科学雑誌, **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. 博友社, 東京, pp. 134-145.
- 粕渕辰昭, 2010: 土と地球—土は地球の生命維持装置, 学会出版センター, 東京, pp. 170, 172.
- 片岡孝義・金昭年, 1978: 数種雑草種子の発芽時の酸素要求度. 雑草研究, **23**, 9-12.
- 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 CO₂ enrichment (FACE) on CO₂ exchange at the flood-water surface in a rice paddy field. *New Phytol.*, **150**, 231-239.
- 駒田充生・粕渕辰昭, 1988: 水田土壌酸化還元電位の圃場測定法の検討. 日本土壤肥料学会講演要旨集, **34**, 224.
- 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.
- 越水幸男, 1973: 湛水直播水稻の初期育成安定技術確立に関する研究 I 有孔ポリの水面被覆による直播田の水温上昇. 東北農業研究, **14**, 88-90.
- 松尾秀俊・加藤敦, 1956: 現地水田土壌の酸化還元電位測定器について. 九州農業試験彙報, **3**, 347-358.
- 松島省三・田中孝幸・星野孝文, 1964a: 稲作には気温と水温のいずれが大切か [1] —生育各期の気温・水温の各種の組み合わせが水稻の生育収量その他諸形質に及ぼす影響—. 農業及園芸, **39**, 902-906.
- 松島省三・田中孝幸・星野孝文, 1964b: 稲作には気温と水温のいずれが大切か [2] —生育各期の気温・水温の各種の組み合わせが水稻の生育収量その他諸形質に及ぼす影響—. 農業及園芸, **39**, 1040-1046.
- Mikkelsen, 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. *Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn.*, **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.
- 村上大亮・粕渕辰昭, 2007: 水田土壌の Eh 測定に用いる白金電極の反応. 土壌の物理性, **106**, 3-10.
- 村田光明・池田貴昭・三枝正彦・石田 誠・澤田和明, 2011: 水田土壌における酸化還元電位のオンサイト測定に用いるアレクサセンサーの開発. 分析化学, **60**, 499-506.
- 西垣 晋・渋谷政夫・花岡郁子, 1960: 続作物試験法. 第16章 植生に関連した土壌の Eh とその測定法. 農業技術協会, 東京, pp. 497-640.
- 西尾道徳・古在豊樹・奥 八郎・中筋房夫・沖 陽子, 2000: 作物の生育と環境, 農山漁村文化協会, 東京, pp. 92-101.
- 奥宮英治・中村由行・中山恵介・井上徹教・石飛裕, 2001: 湖沼の物質循環に及ぼす水面冷却の影響. 水工学論文集, **45**, 1147-1152.
- 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.
- 塩入松三郎, 1942: 水田の脱窒現象に就いて 日本土壤肥料学雑誌, **16**, 104-116.
- Starky, R. L. and Wight, K. M., 1946: *Anaerobic corrosion of iron in soil: With particular consideration of the soil redox potential as an indicator of corrosiveness*, American Gas Association, New York, 108pp.
- Steemann, N. E., 1960: Uptake of CO₂ by the plant. In *Handbuch der Pflanzenphysiologie* 5, Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, pp. 70-84.
- 高橋 正, 2005: 土壌サイエンス入門 第 7 章 土壌の化学. 文永堂, 東京, pp. 129-137.
- 高井康雄, 1952: 水田土壌の微生物学的研究(第 1 報), 日本土壤肥料学雑誌, **23**, 37-41.
- 高井康雄, 1956: 水田土壌における鉄化合物の行動について(第 1 報): 酸溶 2 価及び 3 価鉄の定量, 日本土壤肥料学雑誌, **26**, 467-470.
- Takai, Y., and Kamura, T., 1966: The mechanism of reduction in waterlogged paddy soil. *Folia Microbiologica.*, **11**, 304-313.
- 高井康雄・江景村, 1967: 水田状態土壌の実験モデルと物質代謝(第 1 報): Eh, アンモニア生成およびリン酸代謝について, 日本土壤肥料学雑誌, **38**, 59-64.
- 瀧嶋康夫・今野喜一, 1959: 泥炭地水田土壌に関する研究(第 6 報): 土壌の窒素代謝に及ぼす風乾, 攪拌の影響について. 日本土壤肥料学雑誌, **29**, 473-476.
- Uchijima, Z., 1961: On characteristics of heat balance of water layer under paddy plant cover. *Bull. Nat. Inst. Agr. Sci., Ser. A.*, **8**, 243-262.
- 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.
- 白井靖浩・粕渕辰昭, 2013: 水田湛水層における CO₂ 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.
- Usui, Y., Mowjood, M. I. M., and Kasubuchi, T., 2003: Absorption and emission of CO₂ by ponded water of a paddy field. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **49**, 853-857.
- 和田道宏・寺中吉造, 1978: 水稻の幼穂発育期間中の水温・日射条件が生育に及ぼす影響. 東北農業研究, **21**, 63-64.
- 矢吹万寿, 1957: 水田水温に関する研究. *Bull. Univ. Osaka Pref. Ser. B.*, **7**, 113-146.
- 八木一行, 1994: メタン, 「土壌圏と大気圏 土壌生態系のガス代謝と地球環境」. 陽 捷行 編著, 朝倉書店, 東京, pp. 55-84.
- 山根一郎, 1982: 水田土壌学, 第 4 章水田土壌の化学(1), 農文協, 東京, pp. 132-150.
- 山根一郎・佐藤和夫, 1968: たん水土壌の Eh 測定法に関する二三の問題. 日本土壤肥料学雑誌, **39**, 535-542.