

田面水の対流速度を測定する装置の改良

花山 奨*・粕渕辰昭*・安中武幸*

Improvement of the Measurement Apparatus for Convective Velocity of Poned Water in Paddy Fields

Susumu HANAYAMA*, Tatsuki KASUBUCHI* and Takeyuki ANNAKA*

* Faculty of Agriculture, Yamagata University, 1-23 Wakaba-machi, Tsuruoka, Yamagata, 997-8555, Japan

Abstract

We improved the measurement apparatus for convective velocity of poned water in paddy fields, proposed by Fujimaki *et al.* (2000). Since the effect of air bubbles accumulated along the sensor on the measurement values was observed, we developed a new equipment to prevent air bubbles from accumulating along the sensor. Another improvement was that the power sources of all measurement devices in the apparatus were exchanged from AC power supplies to DC power supplies. This improvement allowed us to measure convective velocity of poned water in paddy fields without AC power supplies. The good performance of the improved apparatus was verified by the measurement of convective velocity of poned water in a paddy field.

Key words : poned water, convective velocity, bubbles, DC power supply

1. はじめに

田面水の温度分布や溶存酸素の実測にもとづき、田面水が対流によって動いていることが報告されている (Rose and Chapman, 1968; Mowjood *et al.*, 1997; Mowjood and Kasubuchi, 1998)。対流は物質循環において大きな駆動力として作用するため、田面水の対流は水田における大気-田面水-土壌間の物質循環およびエネルギー輸送・移動において重要な役割を果たしていると考えられる。

Fujimaki *et al.* (2000) は田面水の対流速度を測定する装置を開発し、水田での実測値を報告している。彼らの対流測定の原理は、金属線の抵抗変化における温度依存性を利用したものである。すなわち、一定の発熱させた金属線を流体中に置くと、流体の流速に比例して金属線の温度は変化する。この金属線の温度変化にともなう金属線の抵抗変化を測定することである。彼らは、昼夜を通して田面水の対流速度が $0.1\text{--}1.4\text{ mm s}^{-1}$ の範囲で変動すること報告するとともに、測定における問題点を

指摘した。それは、対流速度を測るための金属線を水中に放置し続けると金属線に気泡が付着してしまうことである。この金属線への気泡の付着は、田面水中の溶存酸素および二酸化炭素の気化によって生じる。金属線周辺における気泡の存在は金属線周辺の断熱効果を上昇させ、発熱させた金属線の温度変化にも影響をおよぼすと考えられる。しかし、金属線への気泡の付着にともなう測定値への影響はこれまで調べられていない。

また、Fujimaki *et al.* (2000) の測定システムは各種の測定機器を動作させるのに交流電源を必要とするため、電力供給が容易でない圃場における測定は困難であった。

本研究では、①金属線に付着する気泡が測定におよぼす影響を明らかにすること、②気泡除去および電源の直流化を目的とした装置の改良、③改良された測定システムを利用して現地圃場での実測値を得ることを目的とした。

2. 気泡の付着による測定値への影響

2.1 測定原理

Fujimaki *et al.* (2000) の対流速度測定装置の概要に

* 山形大学農学部 〒997-8555 鶴岡市若葉町 1-23

キーワード: 田面水, 対流速度, 気泡, 直流電源

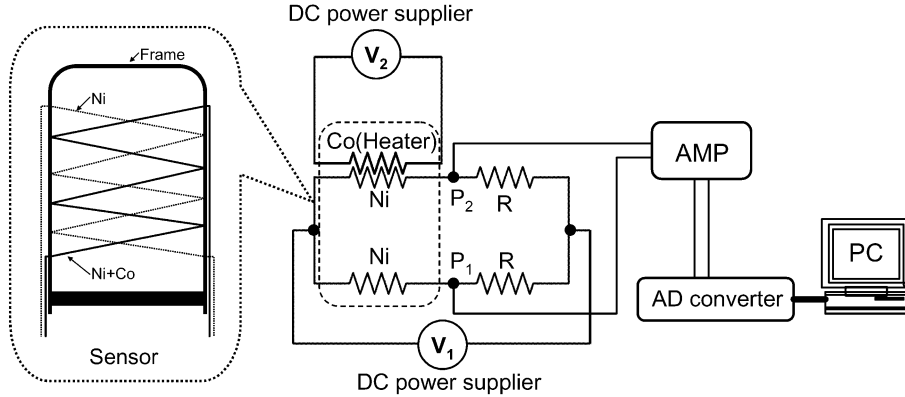


図-1 対流速度測定装置 (Fujimaki *et al.*, 2000) の概略図

Fig. 1 Outline of measurement apparatus for convective velocity (Fujimaki *et al.*, 2000)

ついて説明する。図-1が測定システムの概要であり、センサー部、ブリッジ、アンプ (DCA111F, DEICY), 直流安定化電源2台 (PA18-1.2A, KENWOOD), AD変換器 (Greenkit88, ESD), コンピューター (PC9801UV, NEC) で構成される。センサー部は、直径0.10 mm, 長さ500 mmのニッケル線とそれぞれ同じ直径および長さのニッケル線とコンスタンタン線 (直径0.11 mm) を張り合わせたニッケル+コンスタンタン線できている。このセンサーを田面水中に設置し、ヒーターとして機能するコンスタンタン線を発熱させた後の水の流れによる温度変化をニッケル+コンスタンタン線のニッケル線の抵抗変化として計測する。この抵抗の変化を精密に測定するためホイートストンブリッジを利用して電圧に変換し、この電圧をアンプで増幅し、コンピュータに記録する。

図-1のP₁点とP₂点の間の電圧差 e は以下のようにして求められる。P₁点とP₂点のそれぞれにおける電圧 e_1 , e_2 は次式で表される。

$$e_1 = V_1 R_1 / (R_1 + R_{Ni}) \quad e_2 = V_1 R_1 / (R_1 + R_G) \quad (1)$$

ここで、 R_1 は抵抗Rの抵抗、 R_{Ni} はニッケル線の抵抗、 R_G はニッケル+コンスタンタン線のニッケル線の抵抗、 V_1 はブリッジに付加する電圧である。これらより、P₁点とP₂点の間の e は e_1 と e_2 の差として次式にまとめられる。

$$e = V_1 R_1 [1 / (R_1 + R_{Ni}) - 1 / (R_1 + R_{Ni} + \Delta R)] \quad (2)$$

ここで、 $R_G = R_{Ni} + \Delta R$ とした。 ΔR はコンスタンタン線の発熱にともなう温度変化によるニッケル線の抵抗の変化量である。さらに、 $R_2 = R_1 + R_{Ni}$ として(2)式を整理すると

$$e = V_1 R_1 / R_2 [1 / (1 + R_2 / \Delta R)] \quad (3)$$

となる。 V_1 , R_1 および R_2 は定数であるから、(3)式より e の増減は ΔR に依存する。すなわち、コンスタンタン線の発熱による温度上昇量が大いほど ΔR が大きくなるので、 e は増加する。一方、水の流速が大いほど温度上昇が抑えられ、その結果 ΔR が小さくなり e は減少する。

2.2 気泡の付着による測定値への影響

金属線への気泡の付着は金属線周辺の断熱効果を高めるため、気泡の有無によってコンスタンタン線の温度上昇量に差が生じると考えられる。そこで気泡の付着がコンスタンタン線の温度上昇にともなうニッケル線の抵抗変化量に与える影響を調べた。センサーを内寸縦16 cm × 横39 cm × 深さ10 cmの容器に水深8 cmになるよう水を張り、その容器にセンサーを設置し、センサーに気泡を付着させた状態で測定した。測定時の水温は18°Cであった。センサーへの気泡の付着は容器内の水に炭酸水素ナトリウムを溶解させ、そこに気泡(二酸化炭素)が発生するまで適宜クエン酸を加えることによって再現した。写真-1はセンサーに気泡が付着した状態を示している。この気泡が付着した状態および同様にセンサーに気泡がない場合について、それぞれ3反復測定した。この測定においてブリッジに付加する電圧とヒーター線に付加する電圧をそれぞれ1.5 V, 3.0 Vとした。これらの値はFujimaki *et al.* (2000)の結果を参考にして設定した。

図-2はセンサー上の気泡の有無によるニッケル線の抵抗変化量を調べた結果であり、センサーへの気泡の付着は測定値に影響をおよぼすことがわかった。計測開始から60秒後ヒーターを加熱し、100秒から180秒の間におけるセンサーに気泡を付着させた場合の出力電圧は気泡のない場合に比べ約10%大きくなった。気泡の断熱効果によって金属線周辺の温度が金属線に気泡が付着し

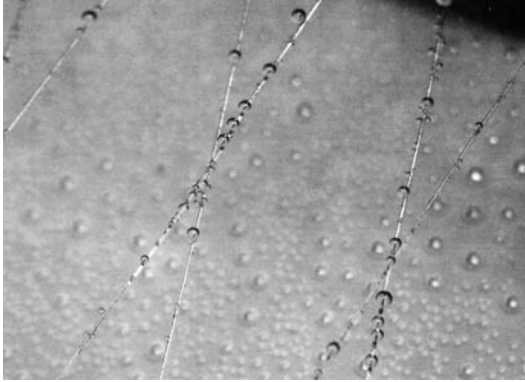


写真-1 気泡が付着した対流速度測定センサー
Photo 1 Sensor with bubbles accumulated

でない場合より高くなり、気泡の付着にともなう ΔR の増加が e を増加させたと考えられる。つまり、気泡の付着によって対流速度は過小評価されることになる。

3. 装置の改良

3.1 気泡付着防止対策

センサーを長時間水中に放置すると水中で気化した酸素や二酸化炭素がセンサーに付着する。そこで測定終了後センサーを水面上に持ち上げ、測定直前に水中にセンサーを降下させる装置を作製した。その装置の概要を図-3に、実物の様子を写真-2に示す。センサーを滑車、市販の工作用のギアボックス（4速クランクギヤボックスセット、田宮模型）とモーター（FA-130RA、マブチモーター）を使って上下に移動できるようにした。モーターの電源は単1型乾電池2個（3.0V）を使用した。この電源のON/OFFをリレーコントローラー（SDM-CD16AC, Campbell Sci.）で制御し、センサーを昇降させた。センサーの昇降速度は 2mm s^{-1} とした。なお、降雨に対する防水対策としてモーターを食品包装用ラップフィルムで被覆した。

センサーを水中から出し入れすることは田面水を攪乱することになる。つまり、センサーを水中に降下した後、田面水の攪乱が収まってから測定を開始する必要がある。図-4はセンサー昇降器を用いたセンサー降下後から計測を開始するまでの経過時間によって測定値に差が生じるかを調べたものである。その結果、センサー降下1分後と10分後の間で測定値に差は生じなかった。そこで本システムでは、少し早めの測定5分前にセンサーを水中に降下するよう設定した。

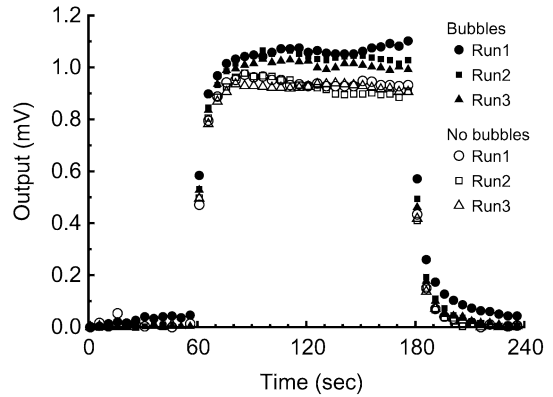


図-2 対流速度測定における気泡の影響

Fig. 2 Effect of air bubbles accumulated along sensor on measurement for convective velocity of ponded water

3.2 電源の直流化

Fujimaki *et al.* (2000) のシステムでは、サーキットおよびヒーターに供給する電源装置として AC 電源で作動する直流安定化電源を用いた。ここではこれらの電源を乾電池（直流電源）で代用できないかを検討した。乾電池を用いた場合、測定の繰り返しにより電圧低下が問題となる。そこで、ブリッジに付加する電圧（1.5V）は単1型アルカリ電池を並列で2個使って供給され、ヒーター用の電圧（3V）は前述と同様の電池を2個直列につないだものを並列で4個使って供給した。この設定において、1回の測定でブリッジおよびヒーターに電圧を付加する時間はそれぞれ6分と2分とし、1時間間隔で24回測定した。そのときのそれぞれの電池の電圧は、ブリッジ用で1.57Vから1.55V、ヒーター用で3.00Vから2.99Vへと低下した。それぞれの電池の電圧低下は2%以下であり、電圧低下をより少なくするには並列で電池の数を増やすことで対処可能である。

測定電圧の増幅において電池で動作できるようオペアンプを使って増幅装置を作製した。図-5に増幅装置の回路図を示す（中村ら, 2007）。増幅率は図-5の抵抗の比 R_1/R_0 で決まる。本装置では抵抗 R_0 と R_1 それぞれの抵抗値は $1.00\text{ k}\Omega$ 、 $4.96\text{ k}\Omega$ なので増幅率は約5倍となる。オペアンプはLM358N（Texas Instruments Inc）を使用し、電源は9V形006P型の乾電池を1個使用した。

図-6は作製したアンプの出力特性である。本測定で使用する範囲の電圧（0.0-0.3mV）に対して十分な線形性を有することが示された。

図-1で示されたAD変換器およびコンピュータは直

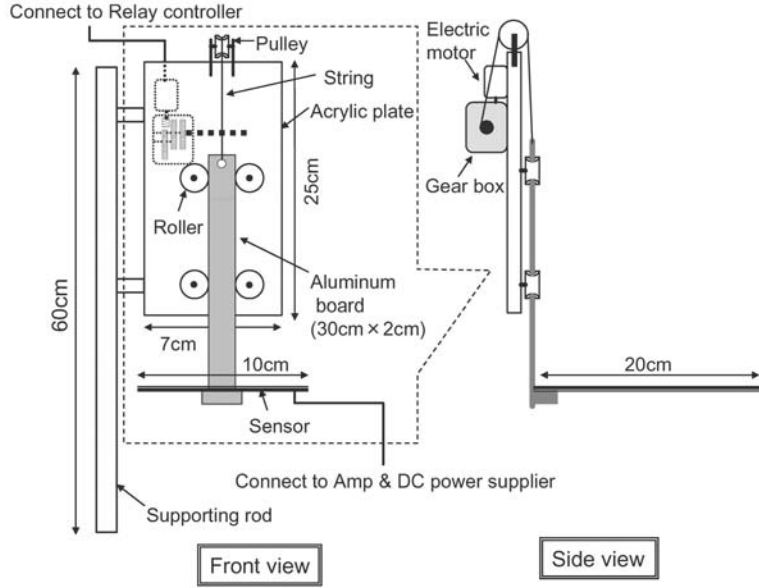


図-3 センサー昇降器の概略図

Fig. 3 Outline of equipment to lift up/down sensor

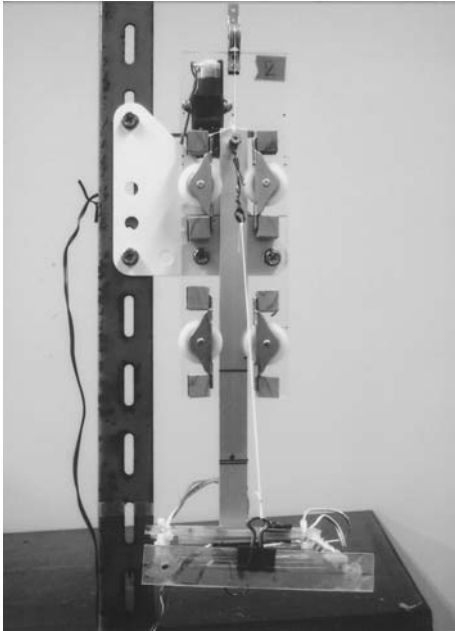


写真-2 センサー昇降器

Photo 2 Equipment to lift up/down sensor

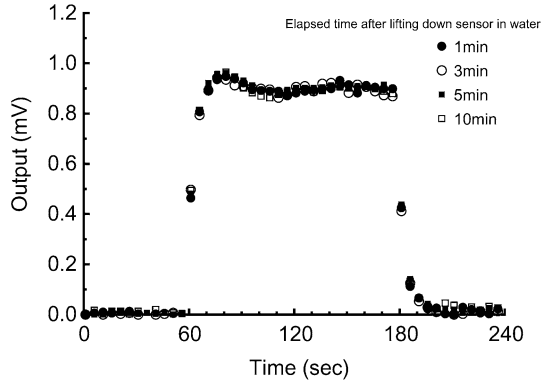


図-4 センサーの昇降による田面水の攪乱の影響

Fig. 4 Disturbance of ponded water by lifting up/down sensor

(PS100, Campbell Sci.) を用いた。

4. 改良された測定システムによる測定例

現地圃場での測定の前に改良システムでセンサーのキャリブレーションを Fujimaki *et al.* (2000) の方法に準じて行った。キャリブレーションは内寸縦 30 cm × 横 100 cm × 深さ 20 cm の容器に水を充填し、その容器の上面にレールを設置し、センサーを固定した台車をシンク

流電源で動作するデータロガー (CR10X, Campbell Sci.) で代替した。データロガーの電源は 12 V のバッテリー

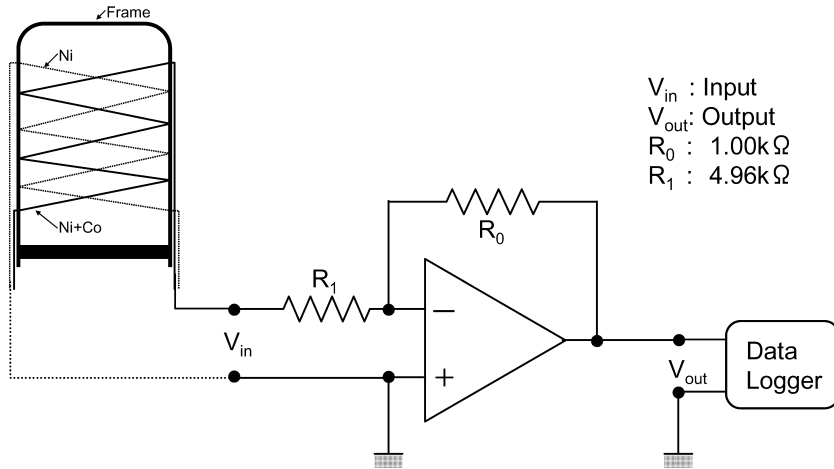


図-5 増幅器の回路図 (中村ら, 2007 (改))

Fig. 5 Circuit diagram of amplifier (Nakamura *et al.*, 2007)

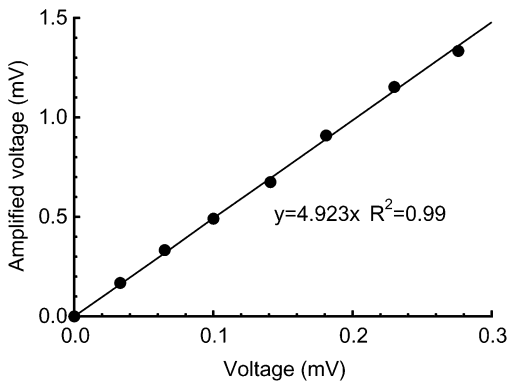


図-6 アンプの出力特性

Fig. 6 Output characteristics of amplifier

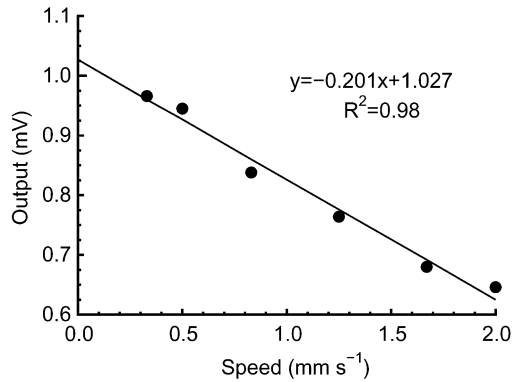


図-7 改良装置を用いたセンサーのキャリブレーション

Fig. 7 Calibration of sensor using improved measurement apparatus

ロナスモーターによってさまざまな速さで牽引して行った。測定時間は120秒間（ヒーター線に電圧を付加する時間）とし、それぞれの牽引速度で得られる測定値は、ヒーター線の加熱後、測定値が安定した後の30-120秒における電圧変化を平均したものとした。図-7はキャリブレーションの結果であり、改良システムにおいても十分に線形性が確保された。

測定は2007年8月に山形大学農学部実験圃場内のライシメーター（1区画1.8m×1.8m）を使って行った。ライシメーター内の土壌は沖積土壌であり、全炭素量14.0 g kg⁻¹、全窒素量1.3 g kg⁻¹、C/N比10.8、陽イオン交換容量11 cmol. kg⁻¹であった。測定時のライシメーターの状態は、湛水深10 cmの裸地水田とした。測定時の天

候は1日を通して晴れであった。測定は2時間毎とし、1回の測定時間はキャリブレーションの場合と同様に120秒間とした。なお、センサーの昇降は、測定開始5分前にセンサーを水中に降下させ、センサーを降下させてから10分後に水中から持ち上げた。測定時の水中におけるセンサーの位置は水面から約5 cm下に位置するように制御した。

図-8は対流速度の測定例である。対流速度は5時で最小となり、その後から13時にかけて上昇し、15時以降低下した。図-8で示された対流速度が日変化するといった傾向は、Fujimaki *et al.* (2000) が示した結果と一致した。対流速度の最低値と最高値はそれぞれ約0.4 mm s⁻¹と約1.6 mm s⁻¹となり、一日の対流速度の変動幅は、本

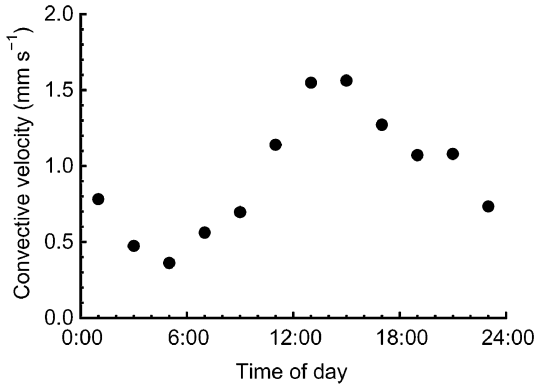


図-8 裸地水田における田面水の対流速度の日変化
 Fig. 8 Diurnal change in convective velocity of ponded water with time

計測で約 1.2 mm s^{-1} となった。測定条件は異なるものの本計測で得られた対流速度の日変動は Fujimaki *et al.* (2000) の計測における約 1.3 mm s^{-1} とほぼ等しかった。

以上より、改良装置は従来装置と同等の測定能力を有すると判断された。しかしながら、対流速度の絶対値に対する精度はまだ十分とはいえない。センサーのキャリブレーションにおいて、対流速度（キャリブレーションにおける台車の牽引速度）が 0.3 mm s^{-1} 未満のとき、ヒーター線の発熱によるヒーター線周辺の水の動きが測

定に影響しているように思われた。ヒーター線の発熱による水の動きが測定に与える影響については今後さらに検討が必要である。また、実際の稲作における湛水深は本計測で設定した 10 cm より浅いことから、湛水深 5 cm 以下においても測定できるよう装置および制御プログラムを改良する予定である。

引用文献

- Fujimaki, Y., Mowjood, M.I.M and Kasubuchi, T. (2000): Measurement of convective velocity of ponded water in a paddy field, *Soil Sci.*, **165**: 404-411.
- 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. (1998): Dynamics of dissolved oxygen (DO) in ponded water of a paddy field, *Soil Sci. Plant Nutr.*, **44**: 405-413.
- 中村邦夫, 石垣武夫, 富井 薫 (2007): 計測工学入門第2版. p. 190, 森北出版, 東京.
- 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.

要 旨

Fujimaki *et al.* (2000) によって提案された田面水の対流速度を測定する装置の改良を行った。センサーに気泡がつくことで測定値に影響がでることを確認し、気泡を付着させない装置を作製した。また、測定機器の作動に必要な交流電源を確保しにくい圃場での測定を可能にするため、直流電源で測定できるよう測定装置を改良した。そして、この改良装置を用いて現地圃場で測定した結果、改良装置は十分な測定能力を有すると判断された。

受稿年月日: 2007年12月7日
 受理年月日: 2008年4月5日