

# 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

花山 奨<sup>1</sup>・安中武幸<sup>1</sup>

Effect of heated constantan line of the sensor on a measurement of convective velocity  
in a paddy field

Susumu HANAYAMA<sup>1</sup>・Takeyuki ANNAKA<sup>1</sup>

**Abstract:** This study investigated the effect of local water flow around the constantan (Co) line of a sensor caused by heating the line on the measured convective velocity of ponded water in a paddy field. Then, a method of calibrating the sensor, considering this effect, was examined. The output voltages of the sensor at a water temperature of 20°C were 6 % larger than those at 30°C when the energy supplied to the Co line was 0.52 W m<sup>-2</sup>, indicating that an increase in water temperature accelerated the local water flow. Based on this, a method of calibrating the sensor while supplying the Co line with 0.13 W m<sup>-2</sup> energy was developed. This calibration, which was expressed by a linear function, had a significant correlation ( $r^2 = 0.97$ ) between the sensor output and convective velocities in the 0.0 to 1.25 mm s<sup>-1</sup> range.

## 1. はじめに

田面水の対流は、大気と田面水間のガス交換を促進させるなど (Mowjood and Kasubuchi, 2002), 水田における物質循環に寄与するものである。例えば、酸素や二酸化炭素の大気と田面水間のガス交換は、田面水中の生物活動に影響を与え、水田の生態系にも深く関与する。それゆえ、田面水の対流速度を調べることは重要である。

植生のない水田において田面水の対流速度が昼夜を通して 0.1 ~ 1.4 mm s<sup>-1</sup> で変動し、一日の半分において対流速度は 0.6 mm s<sup>-1</sup> 以下になった (Fujimaki et al., 2000)。一方, Hanayama et al. (2009) は、植生のある水田の場合、田面水の対流速度の日変化において対流速度は 0.3 ~ 0.7 mm s<sup>-1</sup> で変動し、植生のない場合とくらべて遅くなることを示した。

上記の田面水の対流速度に関する研究は、Fujimaki et al. (2000) によって開発された対流速度測定法を用いて行われた。Fujimaki et al. (2000) の対流速度の測定法は、一定の電圧を印加して発熱させたコンスタンタン線

(以後、Co 線) を水中に置き、水の対流による Co 線の温度変化を測定することで、対流速度を算出するものである。この方法で問題となるのは Co 線の発熱によって Fig. 1 に示されるような Co 線周辺に水の流れ(以後、近傍流と称する)が生じてしまうことである。すなわち、田面水に対流が生じていなくても、Co 線の発熱による近傍流によって測定値は 0 mm s<sup>-1</sup> 以上を示すことになる。花山ら (2008) は、発熱による Co 線周囲の近傍流が 0.3 mm s<sup>-1</sup> 以下の対流速度の測定に影響することを示唆した。それゆえ、Co 線発熱による近傍流は夜間や植生がある条件下の田面水の低速の対流速度の測定に影響をおよぼすと考えられる。

また、水温が日変化する野外測定において、日中の水温上昇によって水の粘性が低下する。水の粘性低下が発熱による近傍流を発達させ、このこともまた低速の対流速度の測定に影響をおよぼすと予測される。

本研究では、発熱による Co 線周囲の近傍流とその水温への依存性を調べることで、近傍流の影響を考慮した対流センサーの較正法を提案することの二つを目的とした。

## 2. 実験方法

### 2.1 測定システムと測定原理

測定システムは前報 (花山ら, 2008) と同様のものを用いた。ここでは簡略して測定システムと測定原理を述べる。Fig. 2 が測定システムの概略図であり、センサー部、ブリッジ、自作アンプ、直流安定化電源 2 台 (PU-2604, イーケイジャパン), リレーコントローラー (SDM-CD16AC, Campbell Sci.), データロガー (CR10X

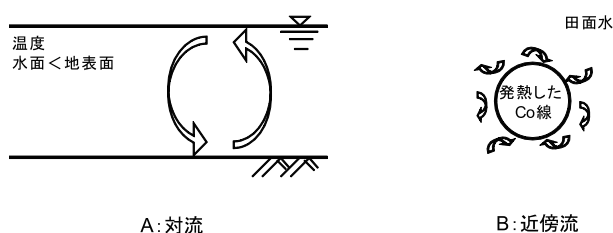


Fig. 1 対流と近傍流の概念図。  
Schematic diagrams of convection and local water flow.

<sup>1</sup>Faculty of Agriculture, Yamagata University, 1-23 Wakaba-machi, Tsu-ruoka, Yamagata, 997-8555, Japan. Corresponding author: 花山 奨, 山形大学農学部  
2009年2月12日受稿 2009年9月26日受理  
土壌の物理性 113号, 21-24 (2009)

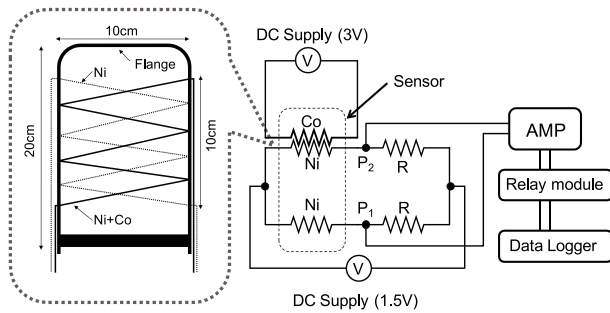


Fig. 2 対流速度測定装置の概略図.  
Outline of measurement apparatus for convective velocity.

Campbell Sci.) で構成される。なお、直流安定化電源、リレーコントローラー、およびデータロガーは 12 V のバッテリーで作動させた。センサー部は、単線のニッケル (Ni) 線 (直径 0.10 mm, 長さ 500 mm) と Ni 線 (直径 0.10 mm, 長さ 500 mm) に Co 線 (直径 0.11 mm, 長さ 500 mm) を張り合わせた Ni + Co 線から構成される。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 Co 線を発熱させた後の水の流れによる温度変化を Ni + Co 線の Ni 線の抵抗変化として計測する。この抵抗の変化  $\Delta R$  はブリッジ回路を利用して電圧  $e$  に変換され、その電圧  $e$  は次式であらわされる。

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

ここで、 $V_1$  はブリッジに印加する電圧、 $R_1$  は抵抗  $R$  の抵抗、 $R_2 = R_1 + R_{Ni}$  ( $R_{Ni}$  は Ni 線の抵抗) である。 $V_1$ 、 $R_1$  および  $R_2$  は定数であるから、(1) 式より  $e$  の増減は  $\Delta R$  に依存する。すなわち、水の流れが大きいほど Co 線の温度上昇が抑えられ、その結果  $\Delta R$  が小さくなり  $e$  は減少する。

## 2.2 発熱による Co 線周囲の近傍流に関する測定

発熱による Co 線周囲の近傍流が生じない条件における出力値の変化を調べるため寒天培地を用いた測定を行った。寒天培地は以下のようにして作成した。内寸縦 28 cm × 横 16 cm × 深さ 9 cm のプラスチック製容器に底面から 2.5 cm の高さにセンサーを固定した後、約 40°C の固化前の 0.5 % 寒天溶液を厚さ 5 cm になるよう流し入れ、常温で固化させた。固化後、この容器を恒温器内に設置し、温度 20°C と 30°C のもとで測定を行った。

次に、水温が発熱による Co 線周囲の近傍流におよぼす影響を調べるため、以下の測定を行った。内寸縦 32 cm × 横 24 cm × 深さ 11 cm のプラスチック製容器に底面から 5 cm の高さにセンサーを固定し、そこに水を深さ 10 cm になるよう入れた。この容器を恒温器内に設置し、温度 20°C と 30°C のもとで測定を行った。なお、蒸発による容器内の水の対流を抑えるため水面上に食品包装用の透明フィルムを浮かせて蒸発を抑制した。

それぞれの条件における測定は 5 反復とした。これらの測定においてブリッジに印加する電圧は 1.5 V とし、Co 線に印加する電圧は 1.5 V と 3.0 V とした。なお、Co 線に印加する 1.5 V および 3.0 V の電圧によって生ずる熱量はそれぞれ  $0.13 \text{ W m}^{-1}$  と  $0.52 \text{ W m}^{-1}$  になる。

## 2.3 対流速度とセンサーの出力値の関係

対流速度とセンサーの出力値の関係を Fujimaki et al. (2000) の方法を用いて調べた。水の対流速度をコントロールすることは困難なので、この方法は一定温度の水中でセンサーを移動させ、センサーの移動速度を水の対流速度とみなすものである。この方法で得られた関係を用いてセンサーの較正式が求められる。測定は、温度 20°C の水を満たした内寸縦 30 cm × 横 100 cm × 深さ 20 cm のアクリル製容器の上面にレールを設置し、レール上にセンサーを固定した台車を載せ、この台車をシンクロ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 180 秒間とし、測定開始 30 秒後に Co 線を加熱させ、150 秒後に加熱を停止した。それぞれの牽引速度で得られる出力値は、90 秒から 150 秒の間の電圧変化を平均したものとした。測定においてブリッジと Co 線に印加する電圧は前報 (花山ら, 2008) と同様にそれぞれ 1.5 V, 3.0 V とした。なお、後述される改良測定法では、ブリッジと Co 線に印加する電圧はともに 1.5 V とした。

## 3. 結果と考察

### 3.1 水温が Co 線周囲の近傍流におよぼす影響

水温が発熱による Co 線周囲の近傍流におよぼす影響について検討するにあたり、センサーの温度依存性を調べた。そこで、近傍流が生じないよう 0.5 % 寒天培地を使って、培地温度 20°C と 30°C におけるセンサーの出力値 (式 (1) 中の  $e$ ) を比較したものを Fig. 3 に示す。両温度において、出力値はほぼ同様に変化し、センサーの温度依存性はないといえる。

Fig. 4 は 20°C と 30°C の寒天で固化していない水を用いた場合におけるセンサー出力値の変化を示す。測定はそれぞれの水温において 5 反復行ったが、Fig. 4 には各水温における測定の代表例一つを選び、それらを描画した。その結果、センサーの出力値は水温の上昇によって低下することが示された。それぞれの水温において、

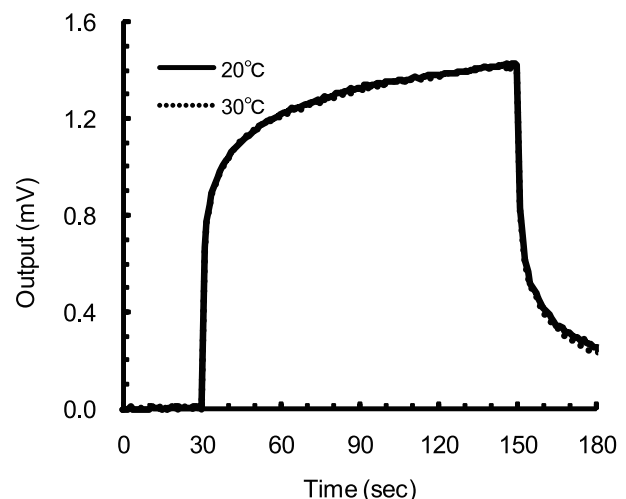
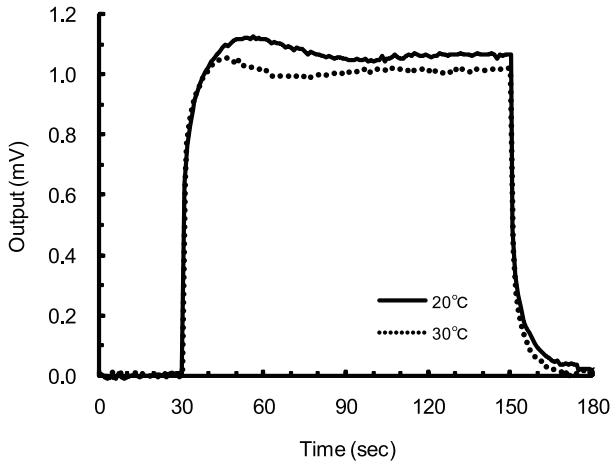
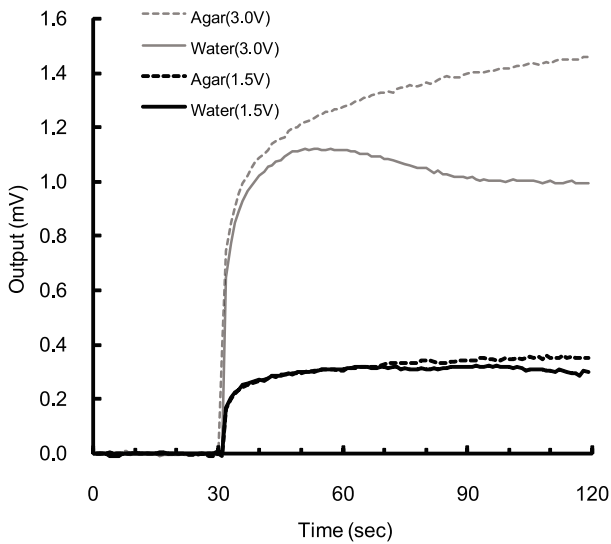


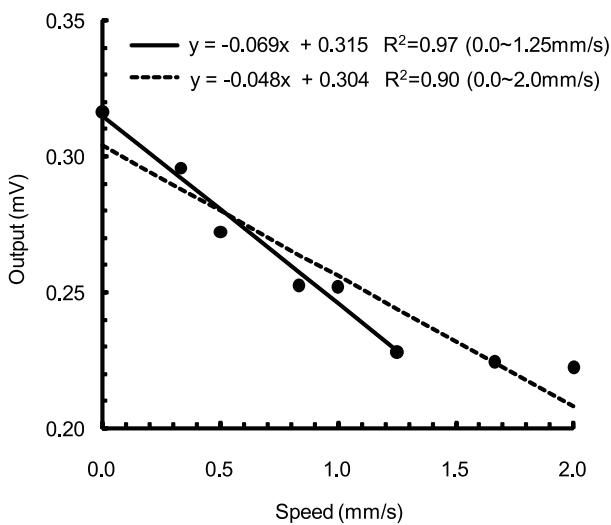
Fig. 3 センサーの温度依存性.  
Temperature dependence on the output voltages of a sensor.



**Fig. 4** 水温によるセンサー出力値の差異 (Co 線発熱量  $0.52 \text{ W m}^{-2}$ ).  
Change in the output voltages with different water temperatures when the energy supplied to the Co line was  $0.52 \text{ W m}^{-2}$ .



**Fig. 5** 異なる Co 線発熱量におけるセンサー出力値の変化 .  
Change in the output voltages with different energy supplied to the Co line.



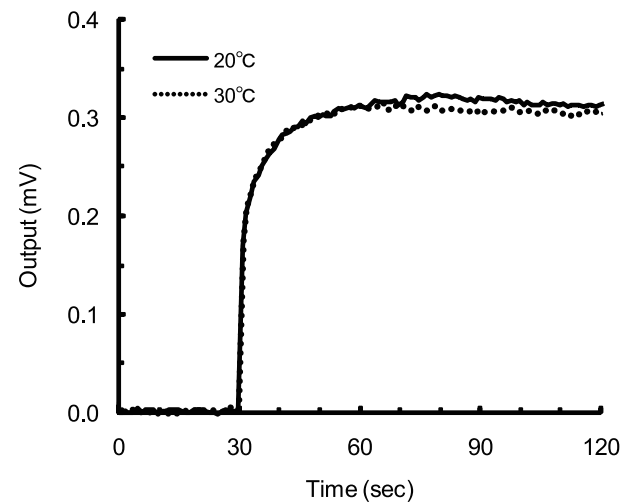
**Fig. 6** センサーの較正 (Co 線発熱量  $0.13 \text{ W m}^{-2}$ ).  
Calibration of sensor when the energy supplied to the Co line was  $0.13 \text{ W m}^{-2}$ .

出力値が安定した 90 ~ 150 秒の間の出力値を平均し、さらに平均化された出力値の 5 反復の平均値は  $20^\circ\text{C}$  で  $1.063 \text{ mV}$ 、 $30^\circ\text{C}$  で  $1.003 \text{ mV}$  となり、約 6 % の差となった。

前述の (1) 式より、水温上昇によるセンサー出力値の低下は近傍流の増加を意味する。水の動きが極めて少ない場合、発熱によって Co 線周囲に温度勾配が形成され、この温度勾配を駆動力として近傍流が生じる。水温  $20^\circ\text{C}$  と  $30^\circ\text{C}$  における水の定圧比熱容量はそれぞれ  $4.1816 \text{ J K}^{-1} \text{ g}^{-1}$ 、 $4.1782 \text{ J K}^{-1} \text{ g}^{-1}$  (国立天文台, 2008) であり、その差は約 0.1 % である。Co 線は一定の熱量で加熱されており、また水温  $20^\circ\text{C}$  と  $30^\circ\text{C}$  において水の比熱に差はあまりないことから、Co 線周囲の温度勾配は水温によって変化しないと考えられる。一方、水の粘度は  $20^\circ\text{C}$  から  $30^\circ\text{C}$  への水温変化において  $1.002 \times 10^{-3} \text{ Pa s}$  から  $0.797 \times 10^{-3} \text{ Pa s}$  (国立天文台, 2008) と約 20 % 低下する。この水温上昇による水の粘性低下が発熱による Co 線周囲の近傍流を増加させたと考えられる。

### 3.2 測定法の改良

これまでの結果から、低速の対流を測定するには Co 線の発熱が大きすぎることがわかった。そこで、Co 線の発熱を減少させて計測が可能であるか検討した。Fig. 5 は、Co 線に印加する電圧 3.0 V および 1.5 V におけるセンサー出力値の変化を水と 0.5 % 寒天培地を使って調べたものである。電圧 3.0 V の場合、水と寒天培地の間に於いて計測開始から 30 秒後に Co 線を発熱させ、発熱後数秒で出力値に差が生じ始めた。一方、電圧 1.5 V の場合、水および寒天培地の双方にて、出力値は発熱開始時の 30 秒から 70 秒の間ほぼ同様な変化を示した。70 秒より以降、寒天培地における出力値は水における出力値より大きくなった。発熱を減少させても時間の経過に伴い Co 線周辺に近傍流が生じてしまうが、発熱後短時間において近傍流はかなり抑制されることがわかった。そ



**Fig. 7** 水温によるセンサー出力値の差異 (Co 線発熱量  $0.13 \text{ W m}^{-2}$ ).  
Change in the output voltages with different water temperatures when the energy supplied to the Co line was  $0.13 \text{ W m}^{-2}$ .

ここで、60～70 秒の間の出力値を使ってセンサーの較正式を求めた。

Fig. 6 が上述の条件における対流速度とセンサー出力値の関係を示すものであり、対流速度 0.0 から 1.25 mm s<sup>-1</sup> の範囲において高い線形性が得られた。一方、対流速度 0.0 から 2.0 mm s<sup>-1</sup> の範囲における線形性は対流速度 0.0 から 1.25 mm s<sup>-1</sup> の範囲のそれより低下した。この低い線形性の原因は、対流速度 1.25 mm s<sup>-1</sup> 以上において出力値の差がきわめて小さかったことにある。

ところで、発熱を減少させても Co 線周囲に近傍流が生じた。この発熱量でも Co 線周囲の近傍流が水温の影響を受けるか調べた。水温 20°C と 30°C で 5 反復ずつ測定し、各水温の代表例一つを選び、それらを Fig. 7 に示した。発熱開始時の 30 秒からおよそ 40 秒後の 70 秒から少し出力値に差が生じた。この傾向は残り 4 反復の測定においても同様であった。発熱開始時の 30 秒から 70 秒の間において出力値が安定した 60～70 秒間の値を用いている限り水温の影響を測定において考慮する必要はないと判断される。

#### 4. まとめ

本研究は、発熱による Co 線周囲の近傍流とその水温への依存性を調べることで、近傍流の影響を考慮した対流センサーの較正法を提案することの二つを目的とした。それぞれの目的に対し以下の結果が得られた。発熱による Co 線周囲の近傍流が水温上昇に伴い増加する

ことを明らかにした。近傍流の影響を考慮した場合、Co 線の発熱を 0.13 W m<sup>-1</sup> 以下に制限することで、0.0～1.25 mm s<sup>-1</sup> の範囲において対流速度測定におけるセンサーの較正が可能となった。

#### 謝辞

本研究の実施にあたり山形大学農学部の富樫司氏（現庄内赤川土地改良区）および渡邊強氏（現福島県庁）にご助力をいただいた。ここに感謝の意を表す。

#### 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.
- 花山 奨, 粕淵辰昭, 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): Convective velocity of ponded water in the vegetated paddy lysimeter. *Paddy and Water Environ.*, 7: 255–258.
- Hanayama, S., Natsuga, M., Annaka, T. and Kasubuchi, T. (2006): Effect of vegetation on the convection of ponded water in a paddy field. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 52: 579–583.
- 国立天文台編 (2008): 理科年表. p.377, 丸善, 東京.
- 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.

#### 要 旨

対流センサーのコンスタンタン線 (Co 線) の発熱による Co 線周囲の近傍流が対流速度測定に及ぼす影響を明らかにし、加えてその影響を考慮した対流センサーの較正法について検討した。Co 線の発熱量を 0.52 W m<sup>-2</sup> とし、水温 20 と 30 における対流センサーの出力値を比較したところ約 6% の差が生じ、Co 線周囲の近傍流は水温上昇に伴い促進されることが明らかとなった。この影響を考慮して、Co 線の発熱量を 0.13 W m<sup>-2</sup> に減少させセンサーの較正をした。その結果、対流速度 0.0～1.25 mm s<sup>-1</sup> の範囲において高い相関 ( $r^2 = 0.97$ ) が示され、センサーの較正が可能となった。

キーワード：対流，コンスタンタン線，発熱，水温，近傍流