

ペルチェ素子を使った田面水中に発生する対流の強さの推定

花山 奨*・譚 夢旋*¹⁾・百瀬年彦**・安中武幸*

*山形大学農学部食料生命環境学科水士環境科学コース

**石川県立大学生物資源環境学部

(令和2年8月26日受付・令和2年11月25日受理)

Estimate of Intensity of Convection in Flooded Water with Peltier element

Susumu HANAYAMA*, Mengxuan TANI*¹⁾,
Toshihiko MOMOSE** and Takeyuki ANNAKA*

*Department of Food, Life, and Environmental Sciences,
Faculty of Agriculture, Yamagata University, Turuoka 997-8555, JAPAN

**Faculty of Bioresources and Environmental Sciences, Ishikawa Prefectural University, 1-308
Suematsu, Nonoichi, 921-8836, JAPAN

(Received August 26, 2020 · Accepted November 25, 2020)

Summary

The Peltier element has a structure in which metal electrodes, p-type and n-type semiconductors are alternately connected between two plates. When a temperature difference is applied between the two plates, a voltage is generated by the Seebeck effect. Then, we measured the output voltage generated by the temperature change in the flooded water due to convection using a Peltier element. The following results were obtained. (1) The Peltier element can detect temperature changes in the water due to convection. (2) The average and fluctuation of the output voltage of the Peltier element increased as the intensity of convection increased. (3) High positive correlations were confirmed between the averages of the output voltage of the Peltier element and the intensity of convection, and between the fluctuation ranges of the output voltage and the intensity of convection.

Key words : Convection, Flooded water, Intensity of Convection, Peltier element

1. はじめに

水田は、米を生産する場のみならず、多様な水生生物に生息環境を提供する。多様な水生生物は豊かな生態系を形成し、この豊かな生態系は、我々に多くの恩恵を与えている。

水生生物の生息場所である田面水では、対流にともなう田面水の流れが生じている。田面水の水深は浅いため、日射が土壌表面に到達し、土壌表面の温度を上昇させる。この温度上昇によって土壌表面直上の水の密度が小さくなり、上向きの水流が生じる。一方水面では、蒸発によ

って水面温度が低下する。この水面温度の低下によって水の密度が大きくなり、下向きの水流が生じる。これらの土壌表面からの上向きの水の移動と水面からの下向きの水の移動によって、田面水中に対流が発生する。この対流が田面水中に複雑な水流を発生させる。

田面水の対流は、田面水と土壌表面の間のエネルギーおよび物質循環に影響をおよぼしている。例えば、田面水の対流は、日射によって加熱された地表面の熱を、地中のみならず田面水に多く伝える (Mowjood et al., 1998)。また、田面水の対流は、大気と田面水間の酸素交換を促進させる (Mowjood and Kasubuchi, 2002)。擬似

¹⁾ 現在：中国在住

キーワード：対流、対流の強さ、田面水、ペルチェ素子

水田を使った研究では、田面水の対流は、夜間における土壌表面上の付着藻類および田面水中の藻類の呼吸にともなう溶存酸素の消費を促進させる（花山・安中, 2013）。

上記の研究例が示すように、田面水の対流は、水田におけるエネルギーおよび物質循環に多くの影響を与えていると考えられる。しかし、田面水の対流に関する研究は少ない。研究が少ない要因の一つとして、田面水の対流現象を測定することの困難さがあげられる。田面水の対流速の測定方法の一つとして、熱線風速計の原理を応用したものがある（Fujimaki et al., 2000）。測定方法は次のとおりである。田面水中にニッケル線にコンスタンタン線を張り合わせたもの（以後、ニッケル+コンスタンタン線とする）を設置し、コンスタンタン線に電圧を印加して発熱させる。発熱したコンスタンタン線は、田面水の対流によって熱を奪われ、ニッケル+コンスタンタン線近傍の温度が変化する。この温度変化は流速に依存するため、この温度変化にともなうニッケル線の抵抗変化を測定することで、対流速を推定するものである。筆者らは、この測定方法を使って、田面水の対流速を測定してきたが、その測定は、容易でなかった。その理由として、センサーを自作する必要がある。ニッケル線およびコンスタンタン線（直径0.3mm）が断線しやすい、などである。それゆえ、田面水の対流に関する情報を多くえるためには、より簡便な測定方法を開発する必要があると考える。

田面水の対流は、日射による土壌表面の加熱にともなう上向きの流れと蒸発による水面の温度低下にともなう下向きの流れによって生じる。上向きおよび下向きの流れは、それぞれ異なる熱量をもって移動する。これらの流れによって田面水が十分に攪拌されなければ、田面水中に不均一な温度分布が生じると予想される。

筆者らは、前述した水中の不均一な温度分布を測定するためのセンサーとして、ペルチェ素子に注目した。ペルチェ素子は、放熱板の間に、金属電極とn型およびp型半導体が交互に複数連結された構造をもつ（図1）。ペルチェ素子は、ペルチェ効果を利用し、直流電流を流すことによって、一方の面から吸熱し、反対側の面へ放熱して、冷却・加熱を制御するものである。一方、放熱板の両面に温度差があると、ペルチェ素子はゼーベック効果によって電圧を発生する。ペルチェ素子は、多数の異なる二つの半導体が直列に接続されていることから、放熱

板の両面間に生じる微小な温度差を検知できると予想される。

本研究では、水田に類似した環境を実験室で再現し、田面水の対流の発生を試みた。実験室では、水を入れた容器の下端を加熱し、水面を大気に開放することによって、容器内の水の対流を発生させることとした。このようにして発生させた対流について、1) 対流によって溶質が混合する時間を調べ、対流の強さを評価する、2) 対流にともなう水中の不均一な温度分布をペルチェ素子によって検出できるか調べる、3) その温度変化と水の対流の強さとの間の関係を検証する、といった3点を検討した。

2. 実験方法

2.1 対流による溶質の混合時間の測定

本研究では、水の対流の強さを、水中に添加した溶質が対流によって均一に混合するまでの時間で評価した。対流は、Fujimaki et al. (2000) によって示された方法を用いて制御した。図2は、対流を制御する実験装置の概略図を示す。実験装置は、気温20℃、相対湿度およそ51～57%の恒温室に設置した。水深50mmの水道水を入れたポリプロピレン製の円筒容器（内径100mm、深さ60mm）の底面は、恒温水槽の水で暖めた。恒温水槽の水温は、20℃、25℃、30℃、35℃、40℃、45℃にそれぞれ

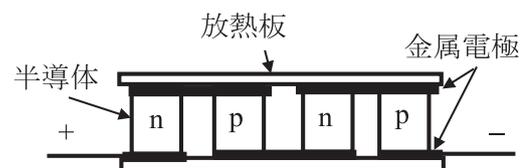


図1 ペルチェ素子の構造

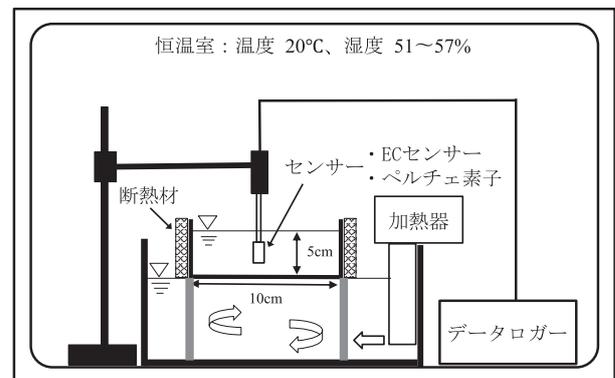


図2 実験装置の概略

れ設定した。そして、円筒容器の水面は大気に開放した。また、円筒容器の側面は断熱材で被覆した。

対流による溶質の混合は、電気伝導度の変化から評価した。電気伝導度 (EC) センサー (ES-2, METER) は、円筒容器内の中央に設置し、データロガー (CR10X, Campbell) に接続した。測定開始前に、それぞれの恒温水槽の温度において、円筒容器内の水を1時間暖めた。この処理は、円筒容器内の水の対流を安定させるためである。そして、容器中の水を1時間加温した後、3.3mol/Lの塩化カリウム溶液1mLを円筒容器の縁から添加し、ECが一定値になるまでの時間を測定した。また、拡散による溶質の混合について調べた。水を入れた円筒容器には、ECセンサーを取り付けるための穴と塩化カリウム溶液を添加するための穴をもったフタを取り付けた。円筒容器にフタを取り付けた理由は、水面蒸発にともなう水の下向きの流れを防ぐためである。センサーを固定した容器は、約12時間恒温室に静置した。そして、3.3mol/L塩化カリウム溶液1mLを添加し、ECが一定値になるまでの時間を測定した。これらの測定は、それぞれ3回繰り返した。なお、実験で得られたEC値は温度補正されたものである。

2.2 対流にともなうペルチェ素子の両板間の温度差の測定

水中の温度変動は、2.1で述べられた対流を発生させる装置に設置した円筒容器内の水中に、ペルチェ素子 (TES1-12705, EVERREDtronics Ltd.) を設置し、測定した。ペルチェ素子の大きさは、縦30mm、横30mm、厚

さ3.2mmである。実験装置の概要は、図2と同様であり、ECセンサーとペルチェ素子を交換しただけである。ペルチェ素子は、水中のほぼ中央に設置した。このとき、放熱板が水面に対し垂直になるように、ペルチェ素子を設置した。そして、ペルチェ素子は、データロガー (CR10X) に直接接続した。データロガーの分解能は1 μ Vである。水温変化にともなうペルチェ素子の出力電圧は、1秒毎に5分間測定した。測定は、それぞれの設定された恒温水槽の水温において10回繰り返した。

3. 結果と考察

3.1 対流の強さの推定

図3は、円筒容器内の水中で、添加した塩化カリウムが、拡散によって水中で均一に混合するまでの様子を、ECの時間変化でみたものである。0時間のECが0mS/cmになっているのは、測定されたEC値から水道水のEC値 (0.1~0.3mS/cm) を差し引いたためである。ECは、直線的に増加し、一定値になるまでの時間は、およそ6700分であった。またECは、3回ともほぼ同様な変化を示した。

図4は、恒温水槽の温度を変化させたときの円筒容器の水のECの時間変化を示す。それぞれの恒温水槽の温度において、ECの時間変化を3回ずつ測定し、図3と同様に再現性を確認できた。そのため図4では、それぞれの恒温水槽の水温でえられた3回の測定結果の中から1つを選択し、図示した。恒温水槽が20 $^{\circ}$ Cのとき、円筒容器内の水の対流は、蒸発によって発生するものである。ECが一定値になるまでに要する時間は、恒温水槽の水温

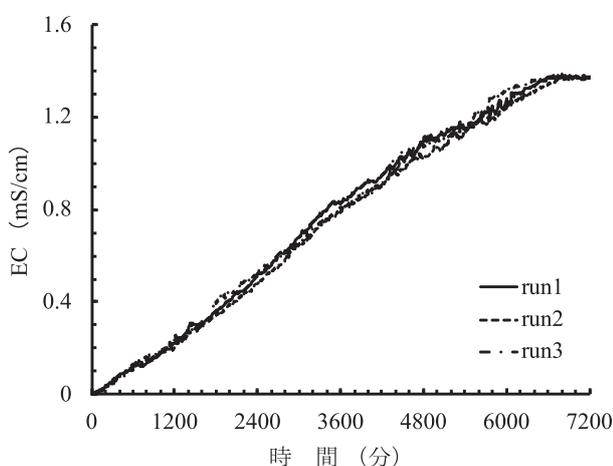


図3 水の対流がないときのECの変化

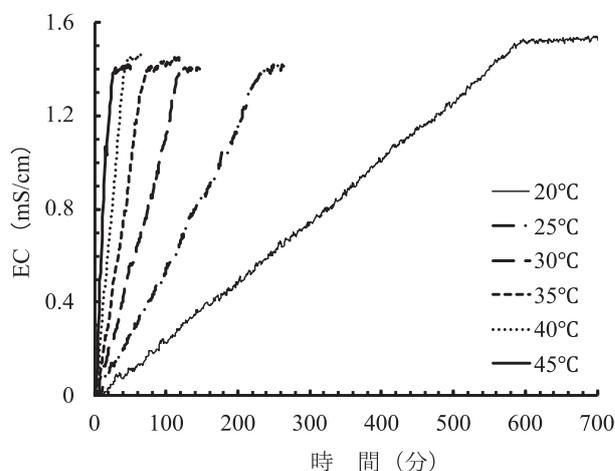


図4 恒温水槽の各温度におけるEC変化

上昇にともない短くなった。この結果は、恒温水槽の水
温上昇にともない、対流が強くなることを示す。恒温水
槽の水温上昇は、円筒容器底部の水温を上昇させ、円筒
容器内の水温も上昇させる。円筒容器内の水温の上昇は、
蒸発を促進させ、同時に水の粘性を低下させる。つまり、
円筒容器底面の加熱にともなう上昇流の増加、水温の上
昇にともなう蒸発の増加と粘性の低下、といった効果に
より、対流が強くなったと考えられる。

本研究では、対流の強さを、以下のように定義した。
対流の強さは、拡散によってECが一定になる時間（約
6700分）を、円筒容器底面の温度変化にともなうそれぞ
れの対流によってECが一定になるまでの時間で割った
ものとした。表1は、図3と図4の結果を用いて求められ
た対流の強さを示す。

表1 各温度条件における対流の強さ

温度条件 室温-底面温度	(a)混合時間	対流の強さ 6700min/(a)
20°C-20°C	600 min	11
20°C-25°C	230 min	29
20°C-30°C	120 min	56
20°C-35°C	70 min	96
20°C-40°C	42 min	160
20°C-45°C	27 min	248

3.2 ペルチェ素子で測られた温度差の変動と対流の強さとの関係

図5は、水を入れた円筒容器を恒温室（20°C）に静置
し、蒸発を防止して、対流を抑制した条件におけるペ
ルチェ素子の出力電圧の時間変化を示す。出力電圧はほぼ
0となり、対流を抑制すれば、ペルチェ素子の両面間に
温度差が生じないことを確認できた。

図6と図7は、表1で示された対流の強さ11と248にお
けるペルチェ素子の出力電圧の時間変化を示す。これら
の図には、10回の測定のうち、3回分の測定結果を記し
た。図6と図7の双方において、出力値は0mV以上とな
り、かつ変動した。この結果は、ペルチェ素子が微小な
温度変化を検出できることを示す。またこの結果は、1)
出力値が0mV以上となったことより、水中の温度に差異

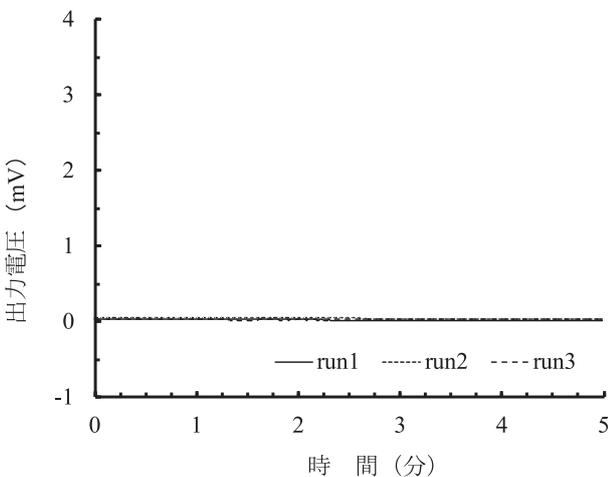


図5 ペルチェ素子の出力電圧の変動（対流無し）

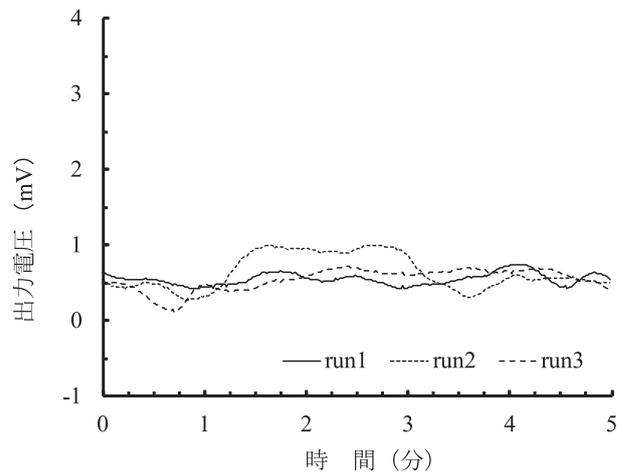


図6 ペルチェ素子の出力電圧の変動（恒温水槽20°C）

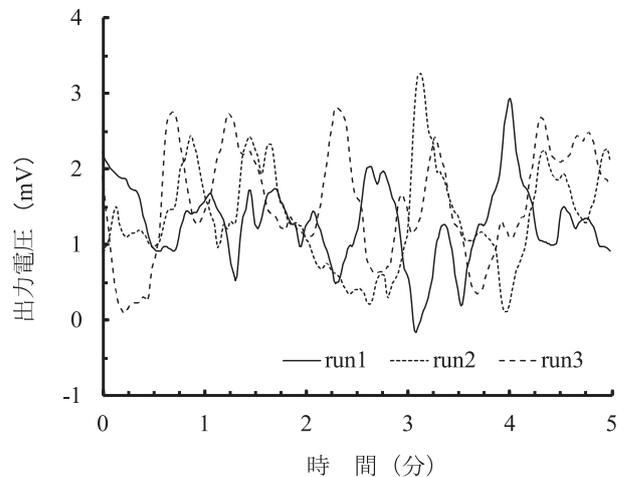


図7 ペルチェ素子の出力電圧の変動（恒温水槽45°C）

が生じたこと、2) 対流の強さが大きいと、出力電圧が大きく変動すること、を示す。

乱流の取り扱い方の一つとして、たとえば、流れ方向の瞬時流速を u とすると、次のような関係がある。

$$u = U + u' \quad (1)$$

ここで、 U は平均流速、 u' は U からの変動で、乱れである。そして、 u' から $\bar{u'^2}$ という2乗平均をつくり、この値を、「乱れの強さ」とする(佐藤, 1982)。本研究では、この乱流の取り扱い方法を利用した。(1)式右辺の U は出力電圧の平均値、 u' は出力電圧の変動幅とみなした。そして、出力電圧の平均値(U)および出力電圧の変動幅(u')は、それぞれ定常的および非定常的な要素を表していると想定した。

図8は、対流の強さとそれぞれの対流の強さにおける

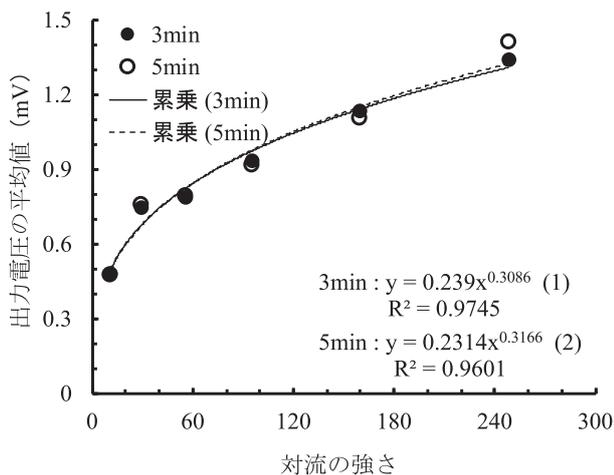


図8 対流の強さと出力電圧の平均値の関係

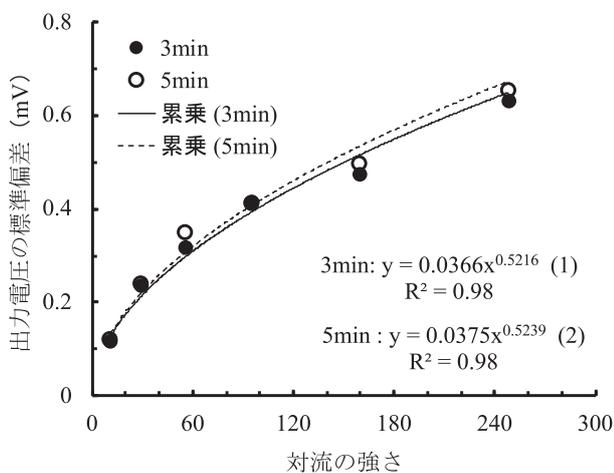


図9 対流の強さと出力電圧の変動幅の関係

出力電圧の絶対値の平均値 ($n=10$) との関係を示す。ペルチェ素子の出力電圧の平均値は、3分間および5分間のデータを使って求めた。その結果、対流の強さと3分間および5分間のそれぞれの出力電圧の平均値との間に高い相関がみられた。なお、各回帰式の有意性を示すP値は、計測時間3分と5分のそれぞれにおいて $P=0.0002$ および 0.0006 となり、有意水準5%以下であった。

図9は、対流の強さとそれぞれの対流の強さにおける出力電圧の変動幅との関係を示す。なお、出力電圧の変動幅は標準偏差の平均 ($n=10$) で評価した。ペルチェ素子の出力電圧の標準偏差は、3分間および5分間のデータを使って求めた。その結果、対流の強さと3分間および5分間のそれぞれの出力電圧の標準偏差との間に高い相関がみられた。なお、各回帰式の有意性を示すP値は、いずれも $P=0.0002 < 0.05$ となった。

対流の強さと出力電圧の平均値および標準偏差との間に高い相関がみられた。この結果から、容器底面の加熱と蒸発にともなう水の対流の強さは、水中の温度変動から推定できることが示唆される。本研究をさらに進歩させるにあたり、いくつかの問題点を解決する必要がある。本研究で使用したペルチェ素子のサイズは30mm (縦) × 30mm (横) × 3.2mm (厚さ) であり、水深50mmとなるように水を入れた容器 (直径100mm, 深さ60mm) に垂直に差し込んだ場合、水平の水の流れに大きな影響を与えたと考えられる。この問題に対して、より小さなサイズのペルチェ素子を利用する、あるいは、大型の容器を利用する、などの対策をして検討する必要がある。

また本研究は、室内で実施されたため、放射による影響は無視できた。しかし屋外の場合、ペルチェ素子を田面水中に固定したままだと、太陽の動きによってペルチェ素子の片面のみが放射の吸収によって加熱されることになる。この場合、出力値に大きな影響を与えることになる。本測定方法を屋外の水田で利用するにあたっては、さらなる検討を要する。

4. まとめ

本研究では、水田に類似した環境を実験室で再現し、田面水の対流の発生を試みた。実験室では、水を入れた容器の下端を加熱し、水面を大気に開放することによって、容器内の水の対流を発生させた。このようにして発生させた対流について、以下の情報が得られた。1) 水を入れた容器の下端温度と水面温度の差が増加すると、

対流によって溶質が混合する時間が短縮された。このことから、容器の下端温度と水面温度の差を調節することで、対流の強さが変化することが示された。2) それぞれの対流の強さともなう水中の不均一な温度分布をペルチェ素子によって検出できた。また、対流の強さとペルチェ素子の出力電圧の平均値および標準偏差との関係を調べたところ、対流の強さが大きくなるにともない、出力電圧の平均値および標準偏差も大きくなることが示された。3) 対流による不均一な温度分布によって生じたペルチェ素子の出力電圧の平均値と対流の強さとの関係、およびペルチェ素子の出力電圧の標準偏差と対流の強さとの関係には、高い相関が確認された。

謝辞：本研究は科学研究費補助金・基盤研究C（課題番号15K07642）の助成を受けて実施したものです。ここに記して謝意を表します。

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 Science*. 165: 404-411.
- 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. *土壤の物理性*. 113 : 21-24.
- 花山 奨, 安中武幸 (2013) 改良された田面水の対流制御装置による藻類の酸素消費実験. *農業農村工学会論文集*. 285 : 77-78.
- Hanayama, S., Kasubuchi, T. and Annaka, T.(2009) Convective velocity of ponded water in the vegetated paddy lysimeter. *Paddy and Water Environment*. 7: 255-258.
- Mowjood, M.I.M., Ishiguro, K. and Kasubuchi, T.(1998) Effect of convection in ponded water on the thermal regime of a paddy field. *Soil Science*. 162: 583-587.
- 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 Science Plant Nutrition*. 48: 673-678.
- 佐藤 浩 (1982) 乱流. 40-46. 共立出版. 東京.