

浅いため池底層水の夏季における冷熱源としての可能性

佐藤恵一・吉越恆・長崎裕司¹

キーワード：ため池，ヒートポンプ，熱交換器，成層，浅層埋設

目 次

I 緒 言	65	2 ため池および実験圃場における熱交換器	
II 材料および方法	66	周辺の温度環境の比較	69
1 試験区の設定と試験経過	66	3 層別水温分布の季節変化と気象変動の影響	70
2 熱交換器の作製および設置	67	IV 考 察	71
3 熱交換器の性能評価試験方法	67	V 摘 要	71
4 ため池内における冷水資源の把握	69	謝 辞	72
III 結 果	69	引用文献	72
1 熱交換器の放熱特性	69	Summary	73

I 緒 言

近畿中国四国地域にはため池が多数分布し、農林水産省³⁾による都道府県別の分布箇所数集計では、上位10府県の内8府県が近畿中国四国地域に属する府県である。ため池は、歴史的には、農業用水確保に関する手段として成立してきたが、気候変動による高温化への対応が急務とされつつある現在、農地に隣接した夏季の冷熱源としての可能性が期待されている。特に、水深が数mの浅いため池は、湖岸に設置した循環ポンプと池底に設置した熱交換器の間の高低差が小さいため、揚程が小さい循環ポンプが利用可能であり、コスト的に有望である。

湖沼設置型のヒートポンプについては、国内でも民間企業による開発事例が存在し、ミサワ環境技術(株)の森山・田中^{1,2)}は同社の製品として開発されたポンド内熱交換方式による熱供給システムを用いて、ため池底部に設置した熱交換器の特性を明らか

にしている。海外においては、米国のWaterFurnace社⁷⁾などの企業が湖水熱利用ヒートポンプを提供している。しかし、日本では、未利用熱源の活用に積極的な企業が多いにもかかわらず、熱交換器を湖沼に設置したヒートポンプ製品の導入事例は少ない。とりわけ、ため池への熱交換器設置に関しては、香川県のように農地に隣接した小規模のため池が数多く分布する農村地域においても、これまでに導入された事例は無い。これには、複数の理由が存在すると考えられ、主たる理由として、奥島⁶⁾が指摘している水利権の問題が、社会的要因として存在する。確かに、河川や湖沼、巨大なため池については水利権問題の解決は容易ではない。しかし、利水先の営農者数が少ない小規模のため池については、水利権を調整して熱交換器設置の合意を形成することは可能と考えられる。また、ため池へ熱交換器設置が進まなかった要因には、熱交換器の湖沼設置の優位性について、営農者にもわかりやすい方法で実証的に説明した研究がほとんどなかったことも関係してい

るものと考えられる。

そこで、本研究では西日本農業研究センター（以下当研究センター）四国研究拠点内に存在する浅いため池に熱交換器を設置して夏場の冷却性能を評価し、同型の熱交換器を地中に浅層埋設した場合の結果と比較した。さらに、ため池内の水温分布の測定結果に基づいて、水温成層の発生・消失による冷熱源の持続性について検討し、ため池底層域に形成される冷水塊の実態について考察した。

Ⅱ 材料および方法

1 試験区の設定と試験経過

二つの熱交換器を、一方は、ため池底部に設置し、一方は棚田状態の実験圃場の地中に浅層埋設した（写真1）。次に、それぞれの熱交換器に加熱循環水を通して、夏季における熱交換器の冷却性能および、熱交換器周辺の温度分布の変化を比較した。

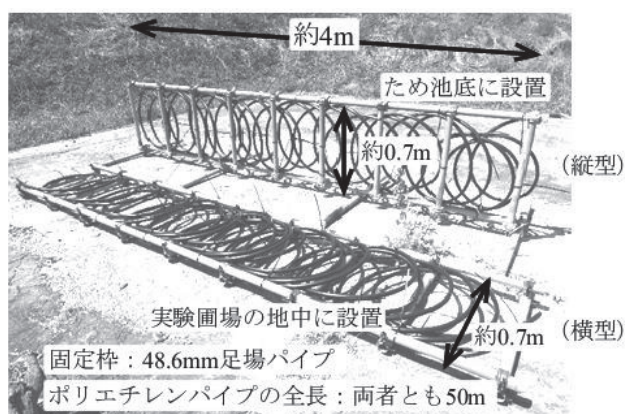
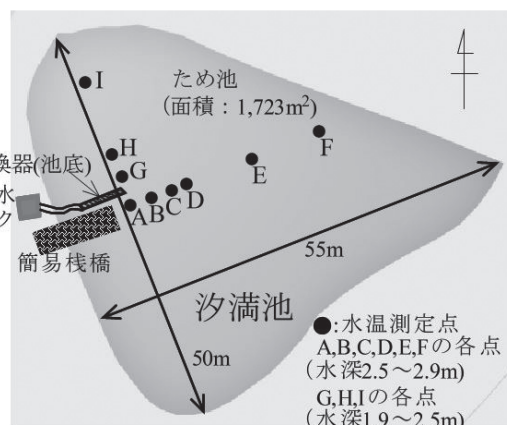


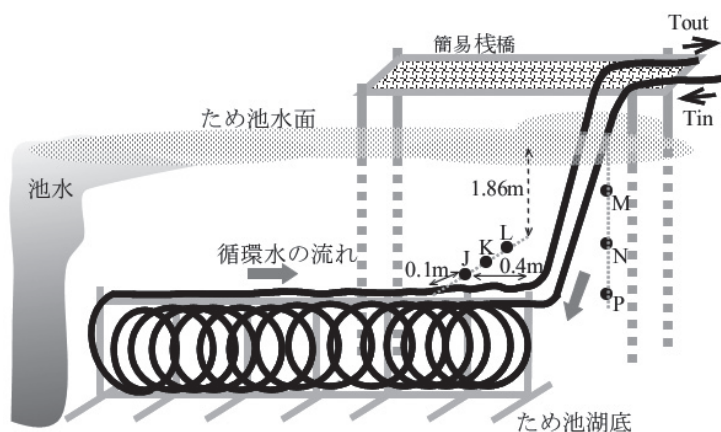
写真1 設置した熱交換器の形状と構造

ため池底部に設置した熱交換器は、低層域での池水熱交換を実現するため、水深約3mの池底に縦スlinky状に設置した。地中浅層埋設の熱交換器は、小規模施設園芸農家への導入を想定した上で、導入・設置に際しての作業性も考慮して、横スlinky状にして地中0.7mに設置した。

2013年に、熱交換器の作製と設置を行った。その熱交換器を用いて、2015年の夏季に、熱交換器からため池への放熱量を測定した。また、熱交換器からの放熱がため池内水温に及ぼす影響も調査した。さらに、2016年夏季には、熱交換器周辺の水温の変化を詳細に測定した。実験圃場に設置した熱交換器については、2016年5～6月に放熱量を測定し、熱交換器近傍の地温の変化を測定した。



第1図 ため池の形状と熱電対の配置



第2図 熱交換器の配置形態

2 熱交換器の作製および設置

1) ため池湖底への設置

熱交換器を設置した当研究センター四国研究拠点生野地区内のため池（名称：汐満池）の形状を示す（第1図）。

熱交換器は、N社製の25mmポリエチレンパイプ（外径25mm，肉厚1.9mm，長さ50m）を，外径48.6mmの足場パイプと直交クランプを用いて組んだ長方形の枠（約0.7m×4m）に縦スリンキー状に固定したものである（写真1）。この熱交換器の枠部分をロープで吊して，簡易栈橋（第1図）先端部の北側先端直下に，池の底（約2.5m深）まで降ろして池底に設置した（第2図）。

2) 実験圃場の浅層地中への設置（対照試験）

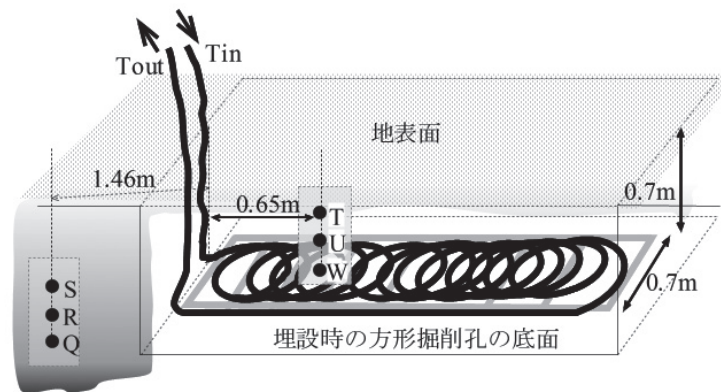
当研究センター四国研究拠点生野地区内の棚田に，ため池と同一の熱交換器を地中0.7mに埋設した（第3図）。実験圃場の地表面は防草シートで被覆した。

3 熱交換器の性能評価試験方法

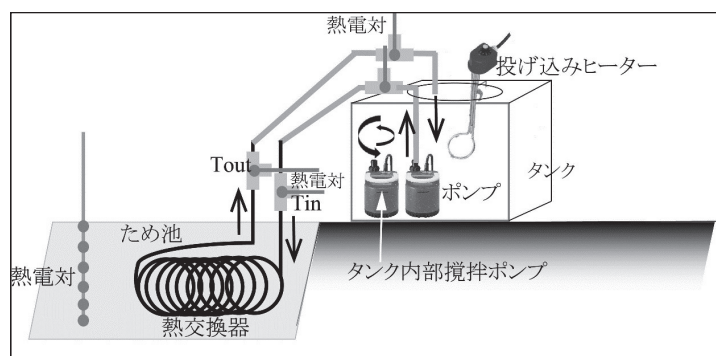
1) ため池に設置した熱交換器

(1) 水の加温循環方法

熱交換器内を循環させる水は，ポリタンク（500リットル）内に設置したT社製投げ込み式ポンプ1台（タンク内の攪拌専用）で水温成層を解消しつつ，別のポンプにより熱交換器とタンクの間を循環させた（第4図）。熱交換器のポリエチレンパイプ（50m長）の両端部分に接続した同径のポリエチレンパイプを簡易栈橋上まで延長して発泡断熱ホース（内径12mm×外径28mm）に接続し，戻りの循環水をタンク内まで環流させた。断熱ホースは約20mの長さで，部分的にVP13の塩化ビニールパイプを継ぎ手として用いた。2015年および2016年ともに，投げ込みヒーターを用いてタンク内水温を40-55℃に加熱した後に熱交換機内を循環させ，熱交換器への流入水温(T_{in})と出口水温(T_{out})との水温差($T_{in}-T_{out}$)，池内の水温分布を調査した。投げ込みヒーターとして，温度調整付きサーモスタットヒーター1kw（D社製）を利用し，循環中のタンク内の水温が設定温



第3図 実験圃場浅層への熱交換器の埋設形態



第4図 ため池における加温循環系

度以下になった場合に、ヒーターが自動的に ON 状態になるように設定した。なお、ほとんどの実験日においては 1kw ヒーターのみを用いて加温を行ったが、一部の実験日については、補助の投げ込みヒーターとして H 社製 2kw ヒーターおよび 3kw ヒーターを用いて、高水温を持続させるように調整した。

(2) 水温および循環水流量の測定方法

熱交換器への流入前後の水温差を測定するため、ポリエチレンパイプが池水の水面下に入る手前および水面下から出る直後の配管部分（発泡断熱ホース）に VP13 塩化ビニールパイプを接続して、流れ方向と垂直の方向から熱電対を挿入し、 T_{in} 、 T_{out} を計測した。また、タンク内のポンプから排出された直後の水温と循環水がタンク内に戻る直前の水温も測定した（第4図）。さらに、2016年の夏季には、J、K、L、および M、N、P の位置における水温を測定した（第2図）。J、K、L における測定は熱交換器の上部周辺の水溫分布を明らかにするために行った。なお、M、N、P は、タンク内で暖められた高温の循環水が、簡易栈橋から水面下に入り込む部分（水冷効果が始まる領域：熱交換パイプのうち循環水温が最も高いと推定される部分）の近傍である。

循環水の流量は簡易デジタル流量計（S 社製）を用いて、2015 年は 7 月 27 日、8 月 11 日、9 月 14 日に測定した。2016 年 7 月～8 月の実験期間中は、加温循環を行ったすべての日に、指示部回転式水道メーター（A 社製）を用いて、循環開始時および循環終了直前に流量を測定した。

2) 実験圃場に浅層埋設した熱交換器

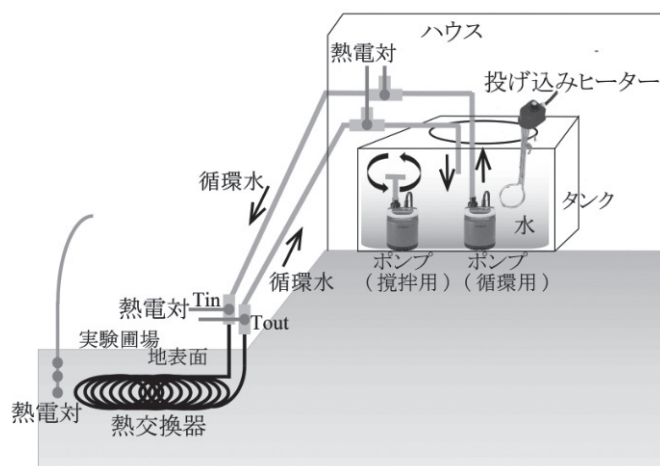
(1) 水の加温循環方法

実験圃場に地中浅層埋設した熱交換器への水の加温循環方法を示す（第5図）。循環用ポンプおよび投げ込みヒーターは、ため池で利用したものと同一の機材を用いた。熱交換器とタンクを結ぶ配管については、前述の N 社製外径 25mm ポリエチレンパイプを 20m 用いた。同一の循環ポンプを用いた場合の流量比較では、ため池循環系の流量が小さい値を示した。流量差が生じた理由として、発泡断熱ホース利用区間の有無、配管系に挿入した塩化ビニールパイプの長さの違い、ポリエチレンパイプ継ぎ手の形状や管径の違い、ポンプと熱交換器間の高低差の違いなどが影響していると考えられる。

(2) 地温、循環水温および循環水流量の測定方法

熱交換器への流入前後の水温差を測定するため、ポリエチレンパイプが地下に入る手前および地下から出る直後にチーズ継手を接続して、流れ方向と垂直の方向から熱電対を挿入し、 T_{in} 、 T_{out} を計測した（第5図）。

熱交換器（地中 0.7m 埋設）と地表面の間への放熱状況を明らかにするため、T、U、W および Q、R、S の位置における地温を測定した（W、Q：地表面下 0.7m 深、U、R：地表面下 0.6m 深、T、S：地表面下 0.5m 深）（第3図）。循環水の流量やタンクの直近部分での管内水温については、ため池と同じ方法で測定した。



第5図 実験圃場における加温循環系

4 ため池内における冷水資源の把握

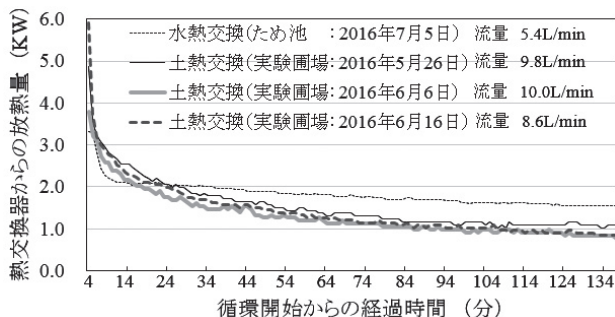
ため池を夏季における冷熱源として捉える場合、水面下における成層の形成状態の把握が不可欠である。そこで、2015年および2016年を通じて、A, B, C, D, G, Hで示した位置では6層(水面下0.3m, 0.8m, 1.3m, 1.8m, 2.3m, 2.8m), E, F, Iで示した位置(I点は2015年のみ)は3層(水面下0.3m, 1.8m, 2.8m)について、熱電対で水温を測定した(第1図)。熱電対は、ペットボトルの浮きをエスター線に紐で繋留して水面からの深さが各位置で同一になるように設置した。なお、試験期間中には池水が利用されることはなく、夏季を通じてほぼ満水の状態が維持された。降雨時には、周辺斜面上の水路を通じて水が流入し、上限水位を超えると、水路を通じて水が排出された。

水深については、ゴムボート上から長尺を用いて、A, B, C, D, E, F, G, H, Iで示した位置における水深を測定した(第1図)。

Ⅲ 結 果

1 熱交換器の放熱特性

ため池および実験圃場に設置した熱交換器による放熱量の、循環開始後の時間変化を示す(第6図)。放熱量は、 ρ ：水の比重、 C ：水の比熱、熱交換器への流入前後の水温差($\Delta T = T_{in} - T_{out}$)の測定値および循環水の流量測定値 Q を用いて、 $\rho \cdot C \cdot Q \cdot \Delta T$ により計算した。熱交換パイプの両端部分に接続したポリエチレンパイプ(延長部分)の長さの違いはあるものの、ため池に設置した熱交換器からの放熱量の時間的減衰が相対的に小さいことは興味深い(第6図)。



第6図 熱交換器からの放熱量の時間変化

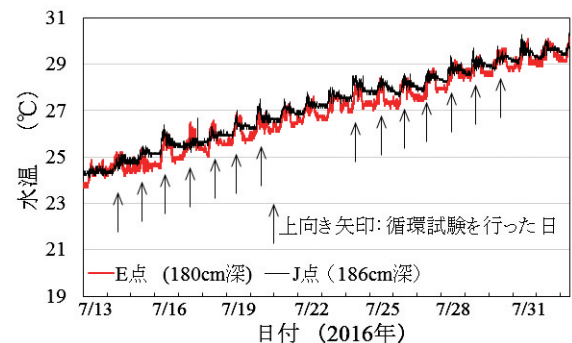
実験圃場における放熱量の推移では、1回前の温水循環試験で上昇した地温の低下が不十分な段階(循環停止後2日)での試験(2016年5月26日)と、T点、U点、W点の地温が十分に低下した後に行った循環試験(2016年6月6日、2016年6月16日)との間に、特に大きな差はないことが確認された。

2 ため池および実験圃場における熱交換器周辺の温度環境の比較

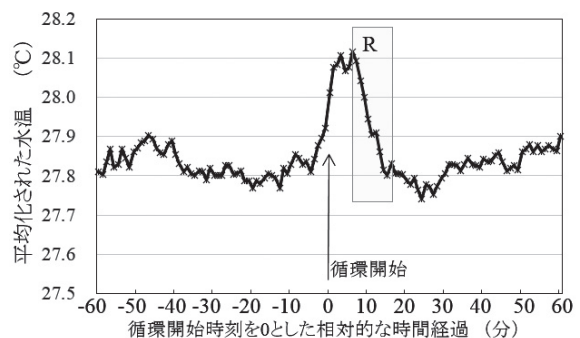
1) ため池に設置した熱交換器

ため池底部に設置した熱交換器の上側の枠部材から水平方向に約10cm離れたJ点での水温は、熱交換器から10m以上離れたE点における同水深の水温と大きな差は認められなかった(第7図)。また、A, B, C, D, E, F, G, H, I点における各層およびK, L, M, N, P点における水温には循環開始に伴う顕著な水温上昇は認められなかった。

ただし、循環開始直後のJ点では、毎回0.2℃程度上昇した後に、短時間で0.2℃下がるという変化が実験中に確認された。この水温上昇について解析するためにノイズを除去して、循環開始前後(±60



第7図 高温循環水の循環試験期間中の周辺水温の推移



第8図 平均化によって抽出した水温変動

分)の水温(毎分値)のみ抽出した(Tw1, Tw2…Tw119, Tw120). 次に31日分(2016年7月上旬～8月中旬の期間)の時系列データについて分別平均値($\overline{\text{Tw1}}$, $\overline{\text{Tw2}}$ … $\overline{\text{Tw119}}$, $\overline{\text{Tw120}}$)を計算した.

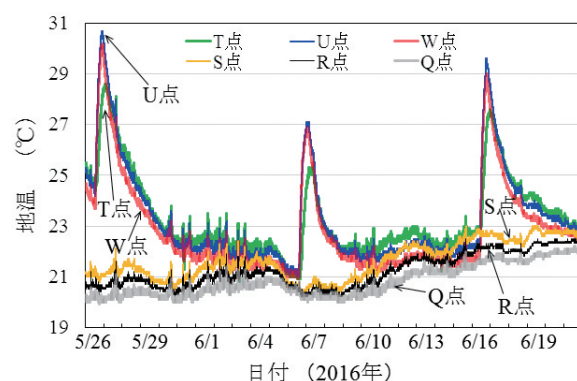
J点の水温は, 循環開始直後に $0.2\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ 上昇するものの10分程度で循環開始前の水温まで低下することが認められた(第8図). タンク内水温は, 循環開始後の数時間は循環開始直後と大きくは変わらず, また, すべての試験日で循環継続時間は少なくとも4時間以上継続したことを考慮すると, 第8図中にRで示した時間領域では, 高温状態が持続するか, さらに上昇する変化を示すはずである. しかし, そのような変化は生じていない. R領域での水温低下は, J点近傍に形成される暖かい水塊が移動し, そこに冷水塊が流れ込むという池水循環が, 熱交換器の稼働によって副次的に生じていることを意味するものと考えられる.

J点のように, ノイズ除去により循環開始前後の水温変動が検出できた水温観測点は他にも存在することがわかった. A点の水面下0.3mの点では, $0.3\sim 0.4^{\circ}\text{C}$ の, 同じ様な水温変動が認められた. また, F点(水面下0.3mおよび水面下1.8m)においても, 循環開始前後の水温トレンドの変化が同様に認められた.

第8図中のRに示した変化は, 熱交換器の放熱量を高める方向に作用している可能性が高いものの, この現象が, 池の深さや面積が異なる条件でも同様に生じるのかは不明である. また, 熱交換器の設置が池水の自然対流に及ぼす影響の有無は, 熱交換器設置に際して必ず問われる問題であることから, まず, この現象のメカニズム解明が不可欠であると考えられる.

2) 実験圃場に浅層埋設した熱交換器

実験圃場の地中に埋設した熱交換器に温水を循環させた日(5月26日:約9時間循環, 6月6日:約11時間循環, 6月16日:約8時間循環)の前後における, 熱交換器周辺の地温の推移を示した(第9図). 熱交換器(地中0.7m)の直近および真上方向に位置するT, U, Wの各点では, 水平方向に約1.5m離れたS, R, Qの各点と比較して, 循環停止後も高地温が継続することが明らかとなった. また, 6



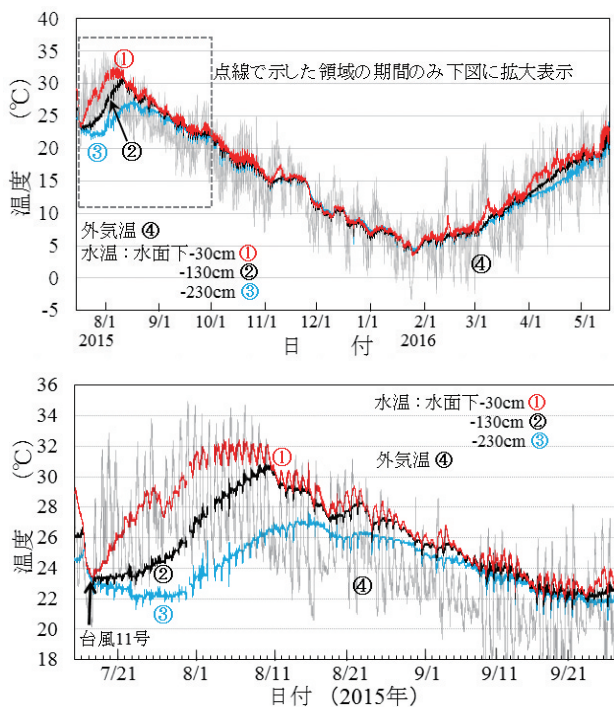
第9図 高温循環水の循環試験に伴う周辺地温の推移(T, U, W, S, R, Q点は第3図中に示した熱電対の設置位置)

月6日の事例では, T, U, Wの各点での顕著な地温上昇は, 循環開始後約30分から始まり, 2時間後には 2°C 以上昇温している. 同じ深さで1.5m離れた測定点との温度差は最大で 9°C 程度に達し, 循環停止後の数日は 2°C 程度の温度差が継続する. 熱交換器近傍(T, U, Wの各点)と約1.5m離れた場所(S, R, Qの各点)の間の温度差が, ほぼ解消されるのには10日程度の循環休止日が必要であることが確認された. 温水の循環を長期間休止して周辺地盤の「熱だまり(熱がこもっている領域)」を一旦解消しても, 再び温水を循環開始した直後に, 熱だまりが急速に形成される. このことは, 熱交換器の性能を改善するためには, まず, 熱だまりの形成を抑制する手法の開発に取り組む必要があることを意味する.

ただし, 本実験における実験圃場の地表面の状態とは異なる条件, 例として, 地表面が湛水状態で管理されているような条件下では, 水の対流伝熱の効果によって, 熱だまりの形成規模が小さくなることも予想される. 地表面の状態と熱だまり形成の関係について, 今後, 基礎的な研究を深める必要がある.

3 層別水温分布の季節変化と気象変動の影響

Aで示した位置における深さ別の水温分布の変動を示す(第10図). 成層は3月末頃から形成され始め, 9月初旬には消滅することが確認された. また, 4月～8月の期間は, 成層が消滅せず安定した状態にあることが明らかとなった. ただし, 2015年については, 7月17日前後の台風11号による降水(116mm/



第10図 ため池底に設置した熱交換器の近傍における層別水温の季節変化（第1図中のA点における測定結果）

上図：2015年7月～2016年5月，下図：2015年7月～9月。

day) や風の影響で、鉛直混合状態が生じた。他にも降雨日は存在するが底層域への影響は認められなかった。このことから、通常の降雨程度では混合は上層域にとどまり、底層域の冷熱源は夏場の間は消失せず、台風により鉛直混合が生じて、すぐに再形成されるものと推定された。

季節変化については、冬季の1月～2月に夜間気温が0℃以下に低下する日でも、池水は約5℃で安定していることが明らかとなった（第10図（上図））。この結果は、冬季における温熱源としての可能性を示している。

IV 考察

地中埋設の熱交換器に比較して、ため池設置の熱交換器では、水の対流効果が、熱交換パイプと近傍水温の上昇抑制に貢献していることを実験的に示すことができた（第6図，第7図，第8図，第9図）。この対流効果が、熱交換器の設置形態や熱交換コイルの構造などによって、どのように変化するのか明

らかにできれば、より高性能の熱交換器の設計も可能になると考えられる。

また、本研究が明らかにした広域的な水温分布に及ぼす熱交換器の影響評価は、現在農業用ヒートポンプを開発・提供している企業が、浅いため池に設置するヒートポンプ開発に新たに取り組む場合に、事例データとして参考になるものと考えられる。ため池は、公共性の高い水資源であり、池内熱環境の中長期的な変動に及ぼす影響について慎重な対応が求められている⁵⁾。池水の熱環境への影響評価は、熱収支シミュレーションモデルなどを用いることで可能となるが、現実のため池における測定事例の蓄積も不可欠である。

ため池が多数分布する西日本地域は、夏季の気温の高温化によるイチゴの花芽分化遅延が問題化し、その解決が求められている地域でもある。沖村ら⁴⁾は、イチゴ栽培におけるクラウン冷却にヒートポンプを活用する手法を開発しており、15℃前後の冷水資源を用いることで低コストのクラウン冷却が可能となることを示している。本研究が対象としたため池では、夏場の底層域水温は20℃以下にはならないが、イチゴ産地に隣接するため池群の中には、底層域に15℃前後の水塊が存在する池もあると予想されることから、ため池底層域の冷熱源を活用したクラウン冷却の実現が期待される。

本研究で解析対象としたため池で認められた夏季の底層域冷水塊が、深さや面積の異なるため池でも同様に形成されているか、さらに調査を進める必要がある。

V 摘要

農業用ヒートポンプの熱源としての浅いため池の可能性を検討するため、ため池底に熱交換器を設置し、地中浅層埋設の場合と比較しつつ、ため池底に設置することによって性能が向上する理由を明らかにした。水中に設置した場合、熱交換器の周辺水温は、熱交換器から10cm程度離れたポイントで0.2℃程度の水温上昇しか認められないのに対して、地中に浅層埋設した熱交換器の上部10cm～20cmの地層では、約10℃の地温上昇が認められ、高温状態が約10日間継続した。水中設置の場合、パイプ近傍

の排熱滞留を短時間で解消させる対流が働き、熱交換器の性能を優位にしているものと考えられた。

謝 辞

ここで紹介した研究成果は、農水委託プロジェクト研究（施設園芸における熱エネルギーの効率的利用技術の開発）で得られた成果の一部である。また、本報告の一部には、科学研究費補助金（基盤C：課題番号17K08027）の交付を受けて推進している研究から得られた知見が含まれている。

農水委託プロジェクト研究の推進リーダーをはじめ、研究推進に協力いただいた皆様および熱交換器の作製や設置で支援をいただいた当研究センター技術支援センター業務第2科の皆様には、記して深く感謝の意を表します。

引用文献

1) 森山和馬・田中雅人 2002. ため池内の熱エネ

ルギー活用と環境整備. 農土誌. 70 (2) : 37-40.

2) 森山和馬・田中雅人 2004. 解説「湖水熱利用ヒートポンプ」. ヒートポンプとその応用. ヒートポンプ研究会. 56-59.

3) 農林水産省 ため池とは. http://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/tameike/pdf/tameike_data.pdf

4) 沖村誠・曾根一純・壇和弘・北谷恵美・光後広恭・北島伸之・佐藤公洋・伏原肇 2007. 促成イチゴ栽培で早期収量の増加と収穫の平準化が可能なク라운温度制御技術. 九州沖縄農業研究センター研究成果情報.

5) 奥島里美・森山英樹・石田聡 2012. 地下水, 農業用水の賦存量. 施設園芸における水熱源式ヒートポンプの利活用 第Ⅱ部 要素技術・事例編 第10章. 60-70.

6) 奥島里美 2014. 施設園芸での地中熱ヒートポンプ熱利用. 施設と園芸. 165 : 13-16.

7) Pond (Lake) Loops. http://www.waterfurnace.com/earth_loops.aspx

Bottom-Layer Water in a Shallow Pond as a Heat Source in Summer

Keiichi SATO, Hisashi YOSHIKOSHI and Yuji NAGASAKI¹

Key words: Storage reservoir, Heat pump, Heat exchanger, Stratification of water temperature, Shallow burying

Summary

To determine if a shallow pond could act as a heat source for a heat exchanger, of an agricultural heat pump, submerged under the pond surface, a heat exchanger was installed in a shallow pond. Tests were carried out to compare this system with an identical system buried in the ground. The reason for the performance improvement in the case with the heat exchanger submerged in the pond was shown. In the case of the submerged system, the ambient water temperature rose by only 0.2°C even at a distance of 10 cm from the heat exchanger, while an approximately 10°C rise in soil temperature was observed in the buried system, which continued over lasting days. The present study suggests that some thermal convection mechanism is formed around the submerged heat exchanger and it contributes to the high heat-exchange performance in the water.

