

水田地域の水利利用を考慮した
水温予測モデルの構築

2018年1月

新村麻実

水田地域の水利利用を考慮した
水温予測モデルの構築

筑波大学

生命環境科学研究科

国際地縁技術開発科学専攻

博士(農学)学位論文

新村 麻実

目次

1. 本研究の背景と目的	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 本研究の目的	3
1.3 本論文の構成	3
2. 既往研究	4
2.1 河川における水温変化	4
2.2 水田地域内における水温変化	5
3. 小貝川流域における水温変化の実態	7
3.1 はじめに	7
3.2 調査方法	7
3.2.1 小貝川流域の概要	7
3.2.2 観測方法	9
3.2.3 水位・水温計の設置方法	13
3.3 調査結果および考察	14
3.3.1 流域における水温変化	14
3.3.2 幹線用水路の流下過程における水温変化	17
3.3.3 水田地域における水温変化	20
3.3.4 農業用水の反復利用による温度変化	24
3.3.5 水田地域での水利用が流域水温に与える影響	28
3.4 本章のまとめ	29
4. 用水路の流下過程における水温変化	30
4.1 はじめに	30
4.2 対象地の選定	30
4.3 福岡堰の概要	34
4.4 調査方法	36
4.5 調査結果および考察	38
4.5.1 幹線用水路の流下過程における水温変化	38
4.5.2 支線用水路の流下過程における水温変化	41
4.5.3 小用水路の流下過程における水温変化	43
4.6 本章のまとめ	45

5. 用水路における水温予測モデルの構築	46
5.1 はじめに	46
5.2 本章のまとめ	46
6. 排水路の流下過程における水温変化	48
6.1 はじめに	48
6.2 調査方法	48
6.2.1 排水路における水位・水温観測	48
6.2.2 水田内における水位・水温観測	50
6.2.3 排水路における集中観測	51
6.3 調査結果および考察	52
6.3.1 小排水路の流下過程における水温変化	52
6.3.1 (1) 水田通過後の水温変化	52
6.3.1 (2) 流入水が小排水路水温に与える影響	56
6.3.2 排水路の流下過程における水温変化	60
6.3.2 (1) 出穂期前後における水温変化	60
6.3.2 (2) 灌漑期間における水温変化の傾向	63
6.4 本章のまとめ	64
7. 排水路における水温予測モデルの構築	66
7.1 はじめに	66
7.2 本章のまとめ	66
8. 水田地域内の水温予測モデルの構築	68
8.1 はじめに	68
8.2 本章のまとめ	68
9. 総括	70
引用文献	73
謝辞	78

1. 本研究の背景と目的

1.1 本研究の背景

日本では、国土面積の約 11.9%を農地に利用しており、農地のおよそ半分は水田稲作に利用されている(国土交通省、2017；農林水産省、2017)。コメの生産量と消費量はそれぞれ日本をはじめとするアジア地域が世界の 9 割を占めており、コメはアジア地域の主要な作物と言える。このように、水田地域は日本では食糧生産の場として非常に重要な役割を果たしている。

また、日本では河川水の多くを水田灌漑に利用しており、豊富な水資源により灌漑された水田地域は、生物の生息環境の役割も担っている。ため池、用水路、排水路、水田を含む水田地域では、水域だけではなく水田のような湿地、草地があることで多様な動植物が生息できる環境が整っている。生物生息状況調査によって中間農業地域、平地農業地域にそれぞれ 1,000 種、500 種を超える動植物が生息しており、こうした生息環境は農作業など人の手によって保たれてきたことが明らかにされている(農林水産省、2006)。

こうした生物の生息環境や多様性に対する関心は、工業化や都市化といった開発が進み、公害が顕在化していく中で高まっていった。1972 年にスウェーデンでおこなわれた国連人間環境会議の開催を皮切りに、1992 年には「持続可能な開発」という理念のもと、リオデジャネイロで国連環境開発会議が開かれ生物多様性の保護を推進する生物多様性条約が締結された。こうした世界的な関心を受け、日本では 1997 年に河川法が改正され、目的規定に河川環境の整備と保全が加えられたほか、動植物の生息地または生息地の状況を維持するための必要水量も河川維持流量に加えられた(河川法研究会、2006)。また、水田地域においては 2001 年の土地改良法の改訂にともない第一条に環境との調和が言及されるようになった(全国土地改良事業団体連合会、1965)。この改訂によって、農業農村整備における事業実施の原則として環境との調和への配慮が位置付けられるようになった。そのため、整備事業に関する計画や施工に関する手引きが発行され、生物の生息環境としての水田地域の整備が進められた(農林水産省、2004a；農林水産省、2004b；農林水産省、2004c)。また、水田地域内の整備のほかに、水辺環境の改善のために環境用水の水利権が認められ、環境用水によって生物の生息環境を維持する取り組みや汚濁水を希釈するといっ

た水質改善が実施されている(国土交通省河川局、2006；松・秋山、2012)。生態系の保全には水深や流速といった水理条件を整えるだけでなく水質の維持・改善が重要である。例をあげると、懸濁物質は魚類のへい死や植物の光合成の阻害をまねくことや、溶存酸素の不足が水中生物の窒息死をまねくことが一般に知られており、水質を向上させることが生態系の保全につながる。

特に、水質の一項目である水温は生態環境ならびに生産環境に影響を与えることが知られている(新井ら、2014；Raney et al. 1957)。水田地域内に限定した例を挙げれば、日本の固有種であるニホンザリガニやゲンジボタルについて生息適温が明らかになっており、それぞれ20°C以下、14°Cから20°C程度であり、いずれの種も高温への耐性が弱いとの報告がある(中田、2007；関根ら、2007)。また、水田内において繁茂している藻類の種類は、水温によって変動するという報告がある(山岸・橋爪、1974)。

さらに、食糧生産分野においても低温・高温それぞれの場合においてコメの収量や生育に対する被害が報告がされている(宮本、1958；佐々木、1992)。雪解け水を灌漑用水として使用している地域では、冷水害による被害が多く、その対策として温水路や落差工を設けている(村上・栗田、1969)。近年では、水稻の高温障害(生育不良や品質低下)が問題となっており(農林水産省、2010；渡邊、2012)、その対策の一つとして低温の用水を供給する、もしくは、掛け流すことで高温障害を軽減させる方法が検討されている(永畠ら、2005)。このように水田地域内における水温変化に近年関心が高まっており、それらを把握することは生態保全においても食糧生産の観点から見ても重要である。

水田地域の主な水源は河川からの取水であるため、水田地域では河川の水温の影響を受けていると考えられる。しかし、水田地域内では農家の水管理によって複雑な水循環がおこなわれているため、人為的な水循環の影響を受けて水田地域内の水温が変動する可能性がある。上流水田地域で取水された用水は河川に還元され、下流水田地域において再び用水として利用(用水の反復利用)されている。そのため、水田地域における水温変化が水田地域外の河川や下流水田地域においても影響を及ぼすと考えられる。水田地域内の水温変化をモデルによって再現することが出来れば、既存の河川水温予測モデルと組み合わせて河川や水田地域の水温を一体として把握可能なモデルの構築が期待できる。しかし、水田地域全域における水温変化や水田地域が河川水温に与える影響を把握した事例は少ない。

1.2 本研究の目的

本研究では、幹線用水路・幹線排水路に囲まれた受益範囲を水田地域と定義し、用水、湛水、排水といった水動態に着目し、河川水が水田地域を通過すること、ならびに水田地域からの排水が河川に還元されることによって生じる水温変化の構造を観測によって明らかにする。さらに、観測結果をもとに既存の河川水温モデルを水田地域における一支線用水路受益地区内の用・排水路に適用し、その再現性を検討し改良を加えることで、水田地域全域の水温予測モデルの構築に必要な要素を明らかにすることを目的とした。

1.3 本論文の構成

本論文は9章で構成されている。第1章では、本研究の背景と目的、ならびに構成について示す。第2章では、水田地域における水温観測に関する既往研究を整理し、本研究の意義を明確にする。第3章では、小貝川流域における水温観測の結果を整理し、水田地域を多く含んだ流域において水田地域の水利用が河川水温に与える影響を明らかにする。第4章では、用水路における水温観測結果を検討した。第5章では、第4章で得られた結果をもとに河川水温予測モデルを用水路に適用し、用水路の水温予測モデルの構築に必要な要素について述べた。第6章では各排水路における水温観測結果を分析し、排水路の水温変化について論じた。第7章では、第6章の観測結果をもとに農家の水管理を考慮した小排水路・支線排水路における水温予測モデルについて記述した。第8章では、第5章と第7章で構築した用水路・排水路における水温予測モデルを組み合わせて一支線受益地区内の水温を一体として予測可能な水温予測モデルを構築し、支線排水路、幹線排水路の推定結果について述べた。さらに、これまでの推定結果を整理することで水田地域内の水温予測に必要な要素について論じた。第9章では、本研究の総括をおこなった。

2. 既往研究

本章では、流域内での水温変化、特に河川水および水田地域内の用水・水田湛水・排水の温度変化に関する既往研究を整理することで、本研究の意義を明確にする。

2.1 河川における水温変化

近藤(1995)は、河川の流下過程における熱収支をラグランジュ的に計算することで、日射や気温のほかに水深や流速、さらに大気や地中との熱交換によって水温が変化することを明らかにした。また、八鍬(1962)は、日平衡水温は海拔高度とともに直線的に変化し、河川流下に伴って水源からの高低差が大きくなるにつれ日平均水温が日平衡水温へと近づくことを報告した。

このような考えにもとづいて、河川における水温変化の推定・予測は世界的に試みられており、様々な河川水温の予測モデルが開発されている。

河川水温予測モデルは、1) 回帰式モデルと 2) 熱収支モデルに大別できる。

代表的な回帰式モデルには、Stefan and Preud'homme(1993)、山辺(1970)などがある。Stefan and Preud'homme はミネソタ州の河川において気温に対する水温の位相の遅れや時間単位を解析し、週単位に以下の回帰式を示した。

$$T_w = 2.91 + 0.864 T_a \quad (2.1)$$

ここで、 T_w は河川水温[°C]、 T_a は気温[°C]である。一方、山辺は日本全国の計19カ所の山地河川において気温と水温の回帰式を求め、切片は流域の源流水温もしくは地下水温、傾き(気温に対する水温の変化率)は各河川の地形特性と水文特性で決まることを明らかにした。

熱収支モデルについては、熱交換係数が大きく、水深が浅く、周期が長いほど、河川・湖沼などの水温は平衡温度との振幅差や位相差が小さくなることが明らかになっている(佐渡、1983)。また、熱収支モデルでは、河道だけでなく河川の周辺環境が水温に与える影響についても検討されている。吉田ら(2005)は、河畔林の植生の高さや密度、河川からの距離を考慮した河川水温解析モデルを提案し、農地開発や焼畑による河畔林の減少にともなって河畔林の日射遮断効果が低下するため、河川水温が著しく上昇することを明らかにした。

以上のように、河川水温については多くの既往研究があり、モデル化も進んでいる。しかし、河川水温に対する水田灌漑の影響についてはほとんど検討されて

いない。前章で述べたとおり、灌漑期の河川水の多くは河道ではなく水田地域を通過し、水田地域からの還元水が再び河川水となって流下する。水田地域内では土地改良区や農家による水管理が行われるため、河道とは異なる水動態が存在する。水理・水文学的な河川流下だけを考慮したモデルでは、このような人為的な水管理の影響を再現できないため、特に灌漑期の河川水温を予測する際に誤差が生じやすいと考えられる。

2.2 水田地域内における水温変化

用水路における水温変化について、内島・大沼(1961)は、水温上昇度が用水路壁面に接する水塊との混合比によって決まることを明らかにしている。また、水路構造の違いによる水温への影響についても検討が進んでいる。渡辺ら(1973)は、温水路における水温上昇度を観測し、冷害障害対策としての温水路の有効性を明らかにした。大塚・坂田(2013)は、パイプラインの流下過程では水温の変動が小さく、開水路よりも低温の用水を水田に供給できることを示した。このように、温水路やパイプラインといった水路構造の違いと水温変化との関係についても徐々に明らかにされている。

さらに、灌漑用水と水田の湛水温に着目し、坂田ら(2012)は出穂期以降水温が水田湛水よりも高温になる場合があることを明らかにしている。しかし、水田地域を通過した前後での用水と排水温の比較はこれまでおこなわれていない。

水田の水温変化に関して、西田ら(2013)は、夜間の連続灌漑が水田水口付近の水温を低下させる一方で、水温低下効果が水尻まで及ばないことを明らかにした。また、継続的な冷水灌漑は、穂温と湛水温度を低下させることを明らかにした。左村・中村(2005)は、低温な用水が取水されている水田地域において昼間水止め灌漑を実施することで、水田湛水温が 1.7-8.1°C 上昇したと報告している。

水田内の水温変化については、現地観測だけでなく、水温モデルの構築も進んでいる。Ku wagata et al. (2008)は葉面積指数、日射量、風速に基づいて水田の日平均水温予測モデルを構築した。また、松林ら(2013)は水温と葉温を用いて、水塊と植生の熱収支を計算する 2 層モデルを構築した。Yoshida et al. (2013)は植物群落と水田内の 2 層の熱収支を計算するモデルを用い、水田湛水深が水田の最高水温と最低水温の両方に影響することを報告した。Fukuda et al. (2007)は、気温、相対湿度、日照時間と葉面積指数の入力値を用いた平衡水温モデルによって感度分析をおこない、気温、相対湿度、日照時間、葉面積指数の順で水田水温に

強い影響を与えていることを示した。Ohta and Kimura (2009)は、水稲田の水温は4月下旬から7月上旬にかけて、裸水田の水温よりも高温であることを示した。以上のように、水田内水温に関しては、観測とモデルの両面での研究が進んでいる。

水田地域内の水温度変化に関する研究の多くは、冷害や高温障害の影響を評価・検討することを目的としている。そのため、主な対象は用水路や水田内の水温度変化であり、排水温度に関する知見は少ない。

Sugiyama et al. (2013)は、循環灌漑下において排水温度は小用水路からの流入の影響を受けることを数値シミュレーションによって明らかにしている。また、用排兼用水路において木村ら(2013)は気象要素に加えて水田からの排水の影響を受けて水温度が上昇し、特に下流ほど水温度変化が著しいことを明らかにした。

以上のように、排水温度に関する既往研究は、用排兼用水路や循環灌漑といった排水を同一水田地域内で反復利用する地域に限られており、用排分離水路や水田地域間での反復利用における水温度変化については検討されていない。

3. 小貝川流域における水温変化の実態

3.1 はじめに

既往研究では、河川や水田地域内の特定の地点(例えば、用水路や水田)での水温を個別に観測・予測している事例が多く、これらの相互影響についての検討は不十分である。特に、複数の水田地域にまたがる広域な用水の反復利用(河川から取水された用水が水田地域を通過し、排水として河川に還元した後に下流の水田地域で再利用される状況)と水温との関係については観測されていない。

本章では、複数の水田地域を含む一流域を対象に、河川水温ならびに水田地域内の用・排水温を実測することで、水田地域内での水温変化ならびに河川と水田地域内の水温の大小関係を明らかにし、水田地域の水利用が河川水温に与える影響を検討する。

3.2 調査方法

3.2.1 小貝川流域の概要

小貝川流域を対象として水位・水温観測を実施した(図 3-1)。小貝川は栃木県と茨城県を流れる利根川水系の一級河川であり、全長は 111.8 km、流域面積は 1,043 km² である。本流域は流域面積の 85% が平地であり、その多くが水田として利用されている。流域内には約 300 の農業用水が存在し、用水の反復利用が行われている。

また、山地面積の割合が小さいため、河川の自流水は約 2 m³/s と少ない。そのため、流域内の用水のほとんどは鬼怒川から取水されており、佐貫頭首工、勝瓜頭首工、岡本頭首工の 3 頭首工での最大取水量は合計で 34 m³/s である。鬼怒川からの用水は 1 万 ha の水田に灌漑され、さらに、その下流の 2 万 1 千 ha の水田で反復利用される(佐藤、2002)。つまり、灌漑期間における流域内の主要な水源は鬼怒川であり、流域内の水田の約 6 割が上流水田地域からの落水を利用している。

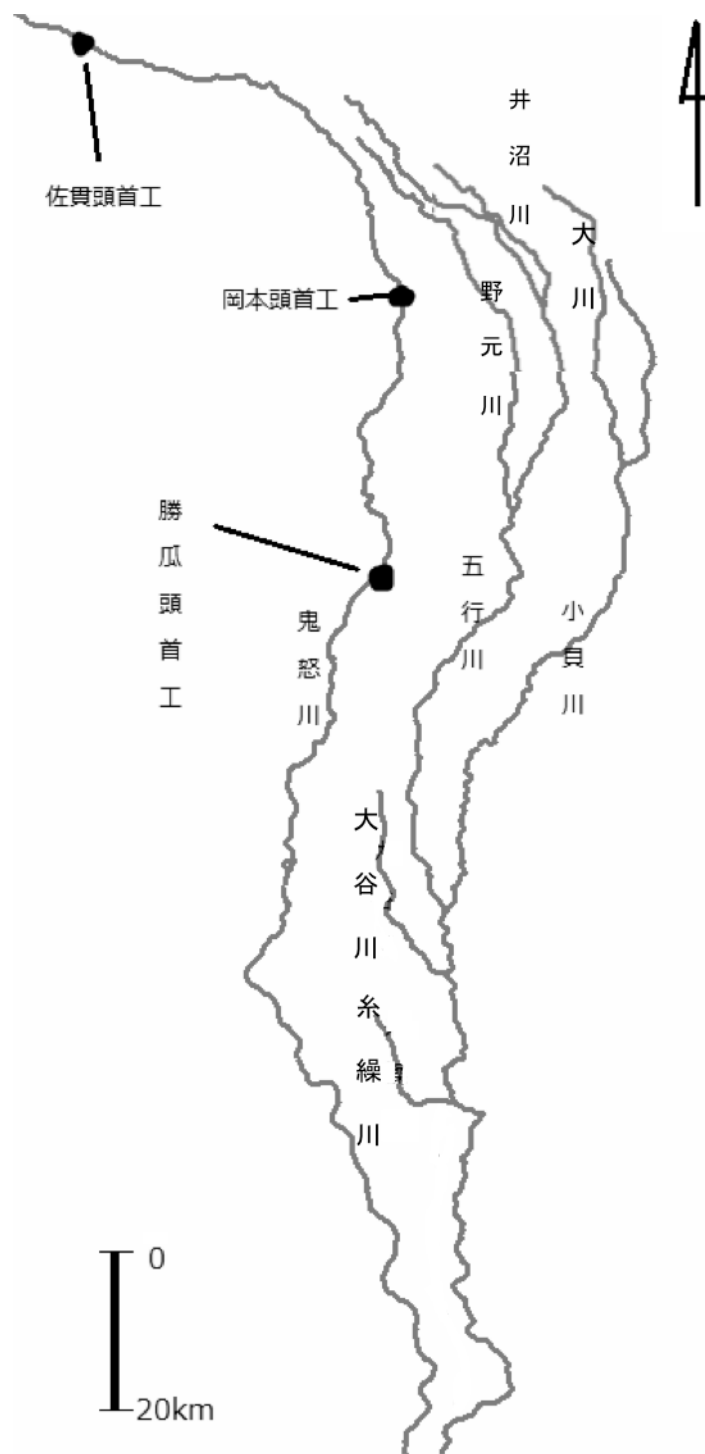


図 3-1 鬼怒川の 3 頭首工の位置と小貝川流域の概略図

3.2.2 観測方法

河川水温ならびに水田地域内での水温変化を把握するため、以下の地点に自記水位・水温計(Solinst社 Levellogger Edge Model 3001、水温の観測精度は0.1℃、図3-2)を設置し、10分間隔で連続観測をおこなった(図3-3)。

1) 小貝川の本川と支川

小貝川流域の河川水温を把握するため、本川3地点、支川である五行川3地点、井沼川1地点に水位・水温計を設置した。小貝川本川の最上流設置地点を上流地点とし、上流地点から約8km下流に中流地点、約45km下流に下流地点を設定した。同様に、五行川についても最上流設置地点を上流地点とし、上流地点から約6km下流に中流地点、約17km下流に下流地点を設定した。井沼川については、五行川との合流地点の約6km上流に観測地点を設定した。観測期間は2012年5月9日から8月27日である。

2) 幹線水路の上流・中流・下流地点

水路流下過程での水温変化を把握するため、小貝川流域最上流部に位置する市の堀幹線水路の3地点に水位・水温計を設置した。佐貫頭首工から約12km下流を上流地点とし、上流地点から17.4km下流、37.8km下流をそれぞれ中流地点、下流地点とした。観測期間は2012年4月11日から9月10日である。

3) 水田地域の取水地点と河川への還元地点

水田地域内での水温変化を把握するため、複数の水田地域において河川から取水した直後の地点(用水)と河川へ還元する直前の地点(排水)に水位・水温計を設置した。灌漑面積500ha以上、取水量3m³/s以上を条件に大前堰、赤井戸堰、田谷川堰、福岡堰の4つの水田地域を選定した(表3-1)。観測期間は2012年4月9日から9月10日である。

上記の各観測地点では集中流量観測を実施し、水位-流量曲線を作成した。流量観測には、超音波多層流向流速計(ADCP)と電磁流速計を用いた。本章では、最も高温となる夏期の連続干天期間(2012年8月20日から24日)を含む8月の分析結果について述べる。



図 3-2 自記水位・水温計

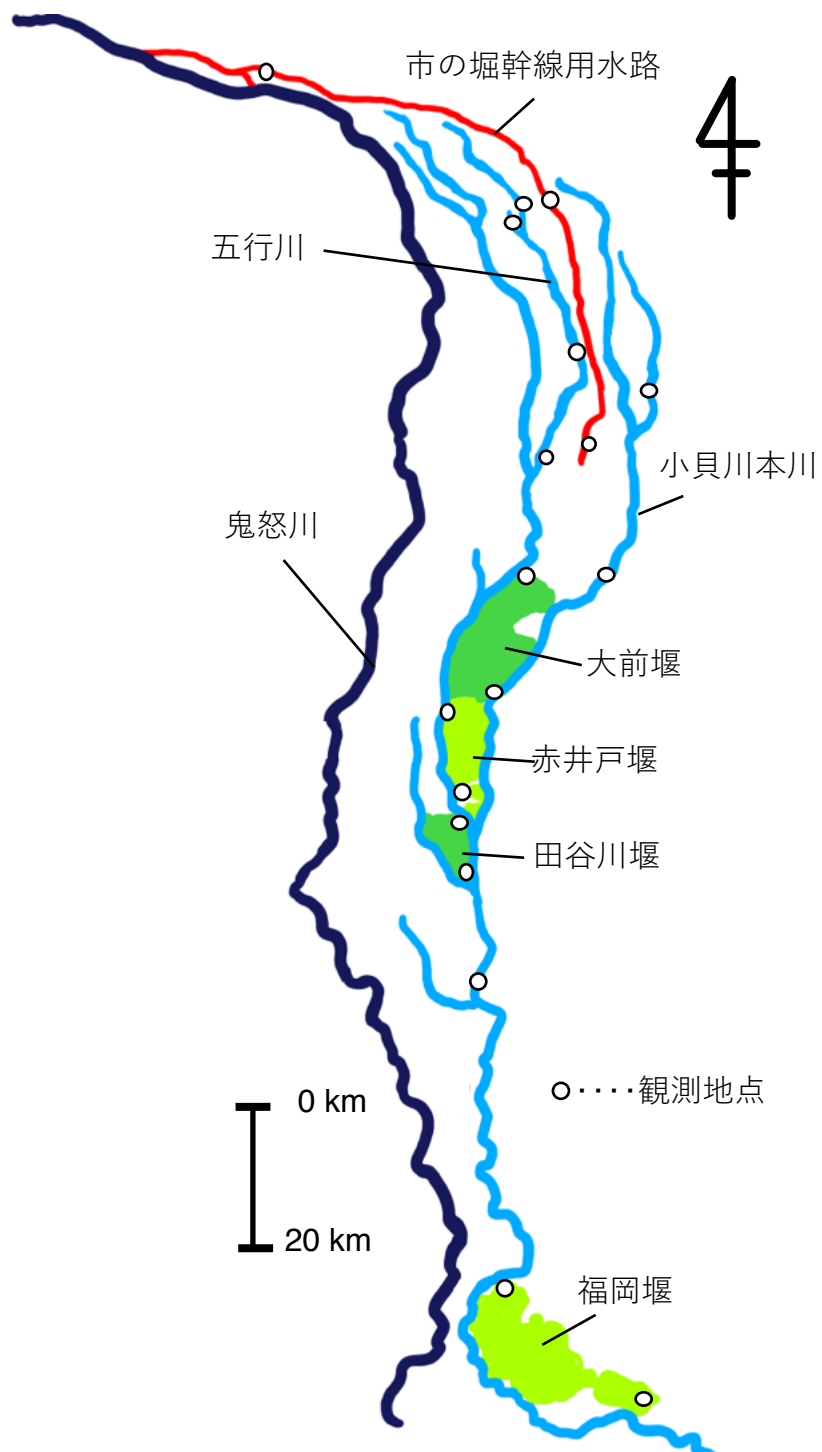


図 3-3 小貝川流域における水位・水温観測地点

表 3-1 対象 4 水田地域の灌漑面積と最大取水量
(昭和 53 年 農業用水実態調査成績書より引用)

堰名	灌漑面積(ha)	最大取水量(m ³ /s)
大前堰	1,350	7.5
赤井戸堰	885	3.6
田谷川堰	590	3.1
福岡堰	2,818	15.0

3.2.3 水位・水温計の設置方法

水位・水温計は以下の手順で設置した(図 3-4)。

- 1) 塩ビパイプ(外径 48 mm、内径 40 mm)内外で水位差が生じないように、パイプ側面にドリルで穴をあける。
- 2) 護岸の高さにあわせてパイプを切断する。
- 3) 水位・水温計の 0 点が変わらないように、パイプ下部側面に穴を 4 か所あけ、針金を交差させて固定する。
- 4) サドルバンド(パイプの固定具)を取り付けるため、護岸にドリルで直径 4.3 mm の穴をあける(固定具 1 つに対して 2 つの穴を開ける。サドルバンドの数はパイプの長さで調整する)。
- 5) サドルバンドの穴に合うように固定用のゴム板にも穴をあける。
- 6) サドルバンド、ゴム板の順にアンカー(直径 4 mm、首長下 25 mm)を通す。
- 7) サドルバンドとゴム板の間にパイプを通す。
- 8) アンカーを 4)の穴に挿入し、ハンマーで打ち込む。
- 9) パイプ用のフタ(直径 54 mm、高さ 25 mm)に 2 か所穴をあけ、ボルトを通しナットで固定する。
- 10) 水位・水温計にヒモを通し、片側をフタ内側のボルトにくくりつけ、パイプ上部をフタで閉じる。
- 11) ビニールテープでフタを固定する。



図 3-4 水位・水温計設置完了後の写真

3.3 調査結果および考察

3.3.1 流域における水温変化

小貝川本川の流下過程における水温変化の検討をおこなった。小貝川の本川の上流・中流・下流地点の水温は、日内変動していた(図 3-5)。それぞれの日平均水温は、上流から 26.5°C、28.2°C、27.7°Cであり、中流地点が最も高かった。上流・中流地点間の河川水は取水されるのみであり、水田地域等からの排水は中流地点より下流に還元する。そのため、本区間では流下過程での水温上昇のみが起きたと考えられる。一方、中流・下流地点間では水田地域の取水と排水が繰り返され、加えて、いくつかの支川が合流することによって、水温が平均化されたと考えられる。また、小貝川の下流地点の水温は上流・中流地点に比べると日較差が小さく、流量が多い下流地点では水温変化が起きにくい傾向が見られた。

五行川でも本川と同様の日内変動が確認された(図 3-6)。五行川本川の日平均水温は、上流から 21.0°C、23.5°C、22.3°Cであり、中流地点が最も高かった。上流・中流地点間では井沼川が五行川に合流するが、この期間の井沼川の日平均水温は 23.0°Cである。上流地点、中流地点、井沼川の水温を比較すると、日最高水温の平均値は上流地点が 24.2°C、中流地点が 26.6°C、井沼川が 25.0°C、日最低水温の平均値は、上流地点が 19.1°C、中流地点が 21.2°C、井沼川が 21.6°Cであった。また、上流地点と井沼川の平均流量は、上流地点が 0.90 m³/s、井沼川が 1.37 m³/sであった(図 3-7)。井沼川の水温は日中、夜間ともに常に上流地点よりも高く、さらに流量も多いため、中流地点の水温は井沼川の影響を強く受けた結果、五行川では中流地点の水温が最も高くなったと考えられる。また、日最高水温は上流地点、井沼川の水温よりも中流地点の方が 1.5°C以上高温であったことから、井沼川の流入に加えて河川の流下過程において日中は水温が上昇していたことが示唆された。

また、期間中、下流地点の日最高水温は次第に低下した。水深が浅いほど水温は上昇しやすいことから(木村ら、2013)、対象区間の下流地点の水位を確認したが、20日を除いて約 0.8 mで安定しており(図 3-8)、水位変動の影響は考えにくい。一方、現地調査中、下流地点付近では河川内で地下水湧出が確認された。一般に夏季の地下水水温は河川水温より低いので、このような地下水の湧出が河川水温に影響した可能性が考えられる。

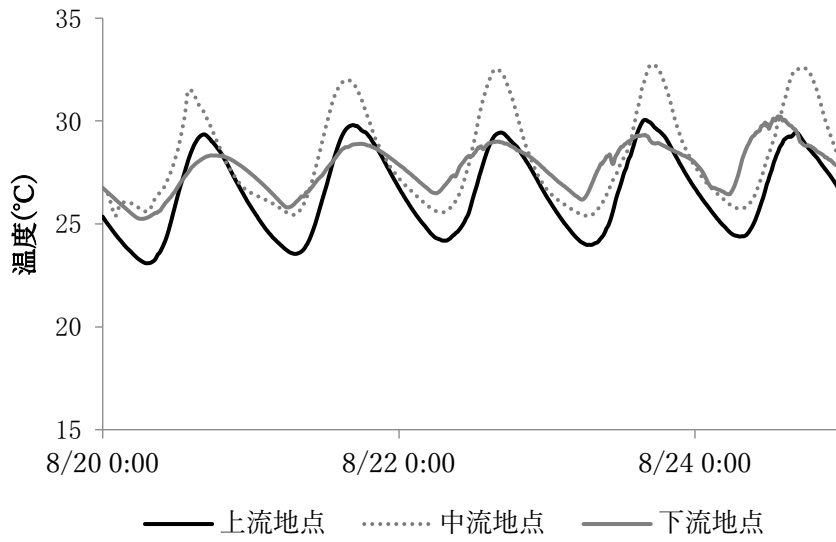


図 3-5 小貝川本川の各地点の水温変化
(2012年8月20~24日)

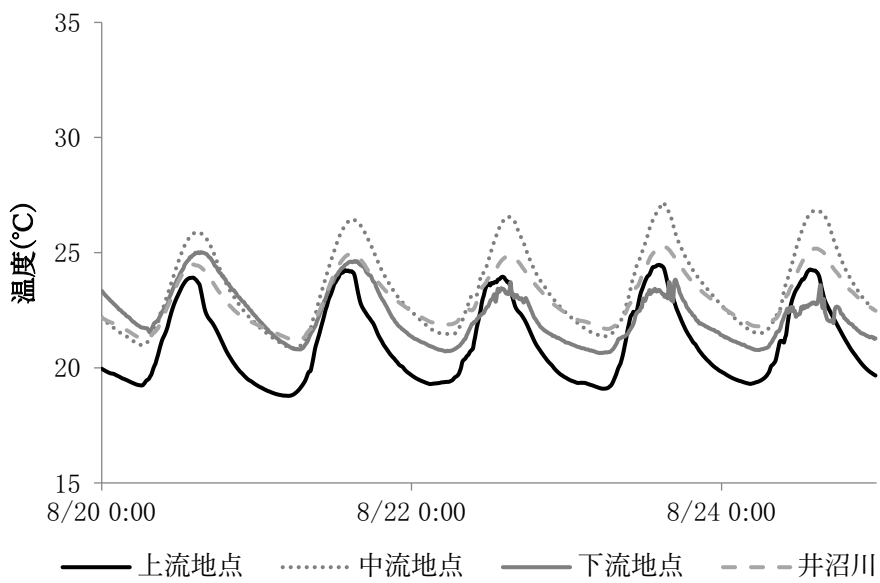


図 3-6 五行川の各地点と井沼川の水温変化
(2012年8月20~24日)

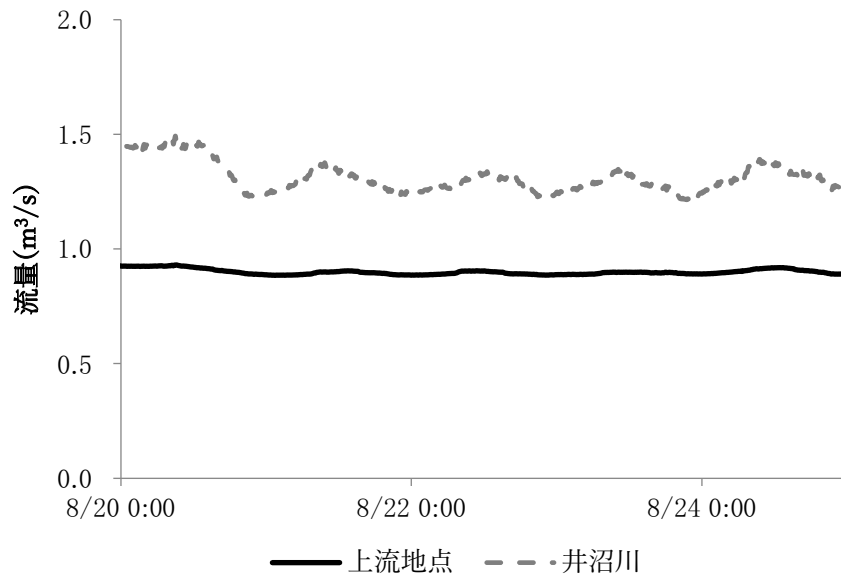


図 3-7 五行川の上流地点ならびに井沼川の流量変動 (2012年8月20～24日)

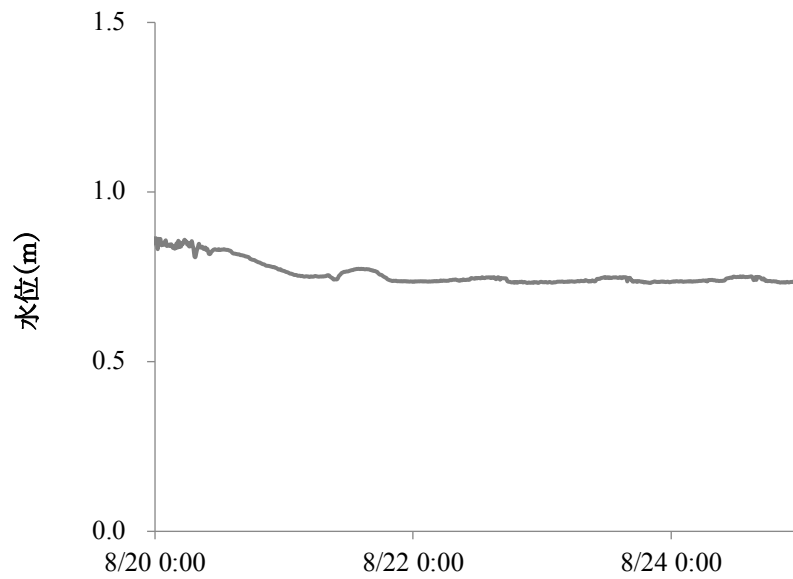


図 3-8 五行川の下流地点の水位変動 (2012年8月20～24日)

3.3.2 幹線用水路の流下過程における水温変化

市の堀幹線用水路の上流・中流・下流地点における水温変化を図 3-9 に示す。それぞれの日平均水温は、上流から 20.2°C、23.6°C、24.7°Cであり、上流・下流間の 37.8 km で水温は 4.5°C上昇した。上流を通過した水が中流・下流地点に到達するには数時間の流下時間がかかる(仮に上流・下流間を 1 m/s で流下した場合には 10 時間半を要する)。しかし、日最高水温を記録した時刻は上流地点が 16:00 頃、中流地点が 15:00 頃、下流地点は 12:00 頃もしくは 16:00 頃であり、想定される流下時間と各地点で日内最高水温を記録した時刻のずれは一致しない。

そこで、各時刻に上流地点を通過した用水の温度とその水が中流地点に到達した時刻の温度をより詳細に比較するため、 Manning 式から上流・中流地点間の流下時間を推定した。

$$V = 1/n \cdot I^{1/2} \cdot R^{2/3} \quad (3.1)$$

ここで、 V は平均流速、 n は粗度係数、 I は導水勾配、 R は径深である。 n と I は水路固有の値であるため $1/n \cdot I^{1/2}$ を α とおくと、 α は V と R の関数となる。現地観測によって V と R を複数回測定することで α を決定し、別途、水位計の結果から得られる R を用いて各時刻の V を推定した。この処理を上流・中流地点でおこない、それぞれの V の平均を流下速度とした。さらに、流路延長 L を V で除して流下時間を求めた。

8 月 20 日 12:00 に上流地点を通過した水は、8.7 h で中流地点へ到達した(図 3-10)。このとき、水温は上流地点で 20.4°C、中流地点で 23.2°Cであり、流下過程で 2.8°C上昇した。一方、8 月 21 日の日内最高水温を観測した 16:30 に上流地点を通過した水は、9.3 h で中流地点へ到達した。このときの水温は、上流地点で 22.7°C、中流地点で 22.7°Cであり、流下過程で変化しなかった。このように、流下する時刻によって水温変化には明確な差がある。

そこで、上記の流下時間をもとに、各時刻の上流地点の水温(流下前の水温)とその水が中流地点に到達したときの水温(流下後の水温)の差を比較した(図 3-11)。流下過程での水温上昇は、上流地点を 6:00 前後に通過した場合に平均 7.4 °Cで最も大きく、18:00 前後に通過した場合に平均-0.2 °Cで最も小さかった。つまり、用水路の流下過程では、水温は日中のみ上昇し、夜間は変化しない、もしくは、わずかに低下することが確認された。

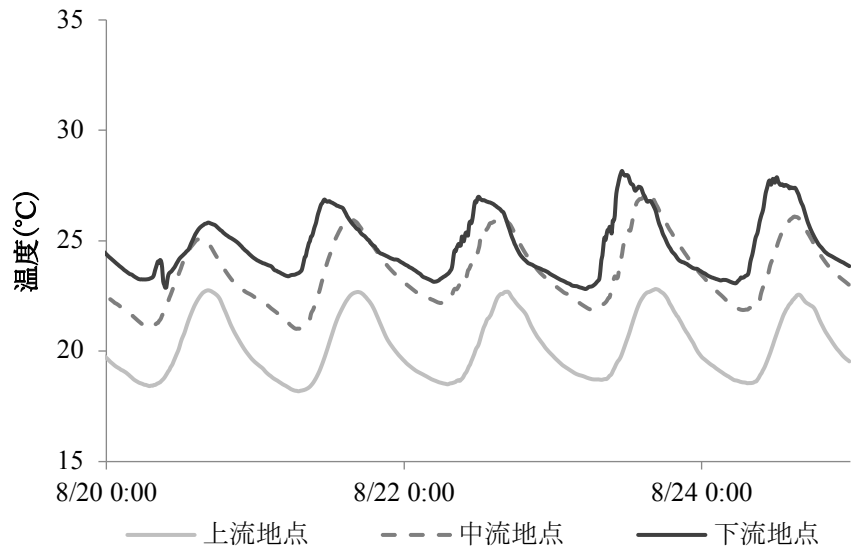


図 3-9 幹線用水路内の各地点の水温変化 (2012年8月20~24日)

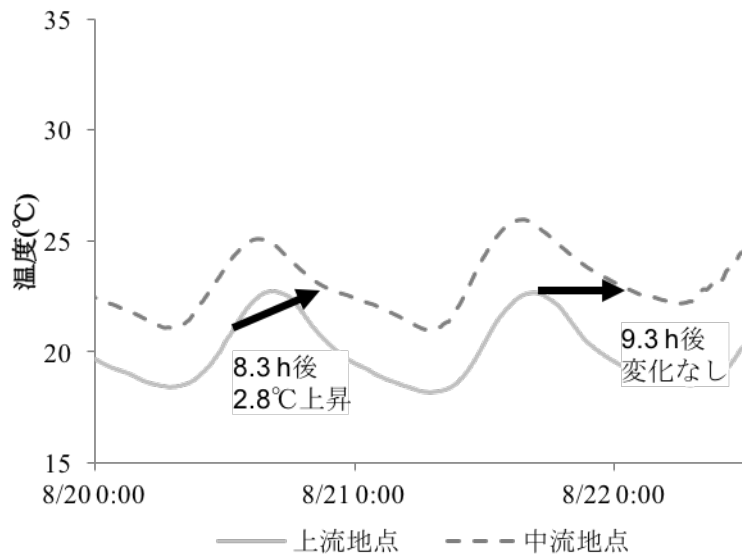


図 3-10 幹線用水路内の上流・中流地点の水温変化 (2012年8月20~22日)

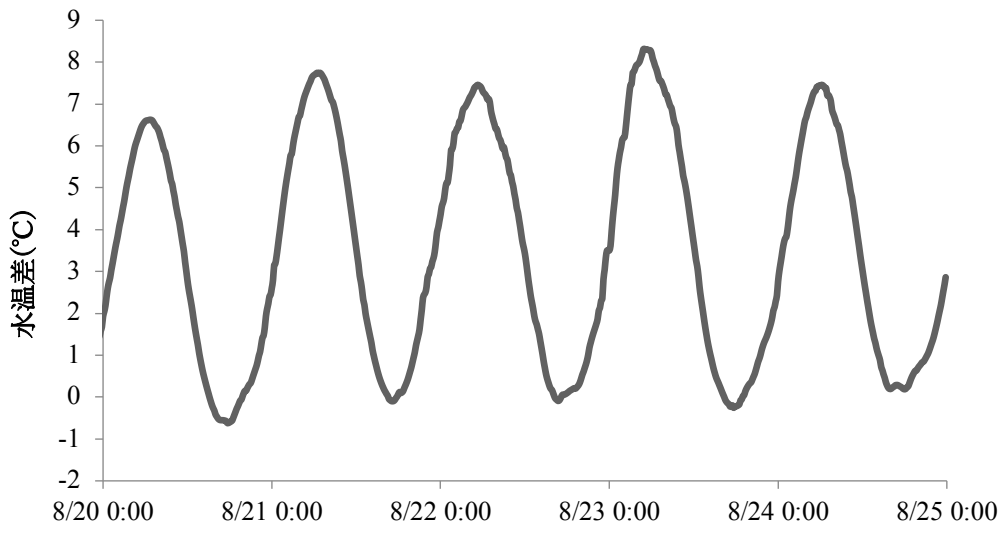


図 3-11 幹線用水路内の上流・中流地点間の水温差

3.3.3 水田地域における水温変化

大前堰の用水と排水の温度は、河川や幹線用水路の水温変化と同様に日内変動していた(図 3-12)。また、日最高水温と日最低水温の平均値は、それぞれ用水が 27.4℃、23.1℃、排水が 26.4℃、23.7℃であった。排水は用水よりも日最高水温が低く、日最低水温が高いため、日較差は排水のほうが 1.6℃小さかった。

赤井戸堰では、日最高水温の平均値は用水と排水ともに 28.0℃、日最低水温の平均値は用水が 24.2℃、排水が 23.2℃であった(図 3-13)。日平均水温は用水が 26.1℃、排水が 25.2℃であり、日較差は排水の方が 1.0℃大きかった。

田谷川堰では、日最高水温と日最低水温の平均値は、それぞれ用水が 29.8℃、24.6℃、排水が 29.0℃、24.2℃であった(図 3-14)。排水は用水よりも最高水温、最低水温ともに低く、日較差は排水の方が 0.6℃大きかった。また、水温が上昇する時間帯では用水と排水の温度はほぼ等しく、水温が低下する時間帯では排水のほうが常に低温となる特徴が見られた。

福岡堰では 8 月 24 日に配水が停止したため、8 月 20 日から 23 日の観測結果を用いた(図 3-15)。日最高水温と日最低水温の平均値は、それぞれ用水が 28.5℃、27.0℃、排水が 29.9℃、24.3℃であり、用水と排水の大小関係は大前堰とは逆であった。また、本地域の特徴として、用水温の日内変動が他の地域と比べて小さいため、日較差は排水の方が 4.1℃大きかった。

以上の結果を表 3-2 にまとめた。日最高水温は福岡堰を除いて用水の方が高く、日最低水温は大前堰を除いて用水の方が高い傾向を示した。3.3.2 項で述べたとおり、用水路の流下過程で水温は上昇するため、水田に達する用水温は観測された用水温よりもさらに高いと予想される。つまり、排水の日最高水温が用水よりも低い傾向を示したことは、水田もしくは排水路を通過する過程で水温が低下したことを示唆している。また、用水と排水の日内変動の傾向や大小関係は 4 地域で異なっている。これには、各水田地域の水路構造(形状や材質)や水管理などが影響していると予想される。

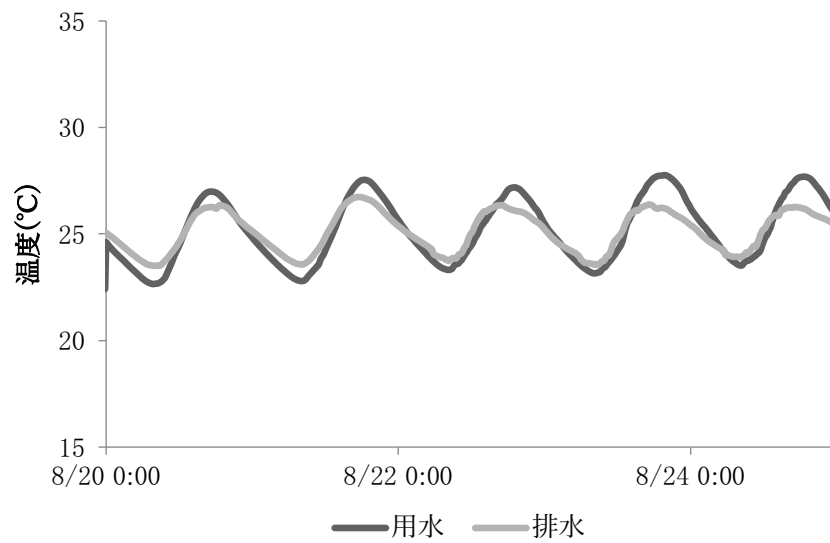


図 3-12 大前堰の用水と排水の水温変化
(2012年8月20~24日)

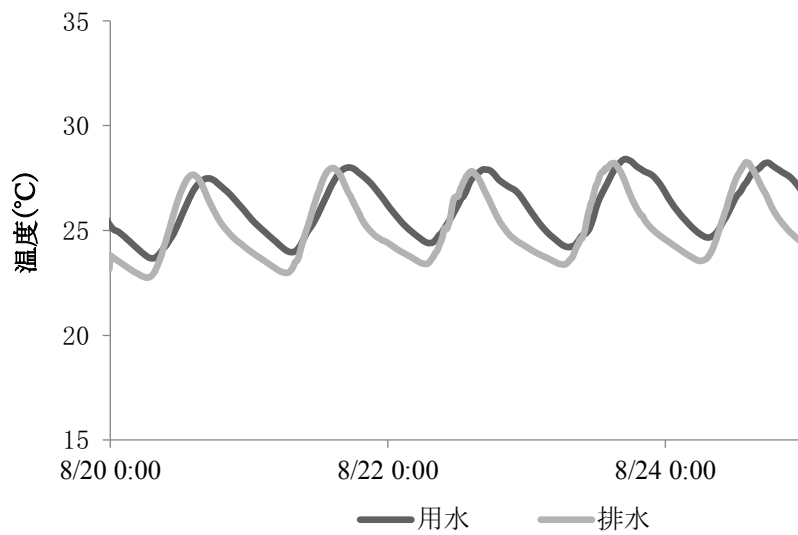


図 3-13 赤井戸堰の用水と排水の水温変化
(2012年8月20~24日)

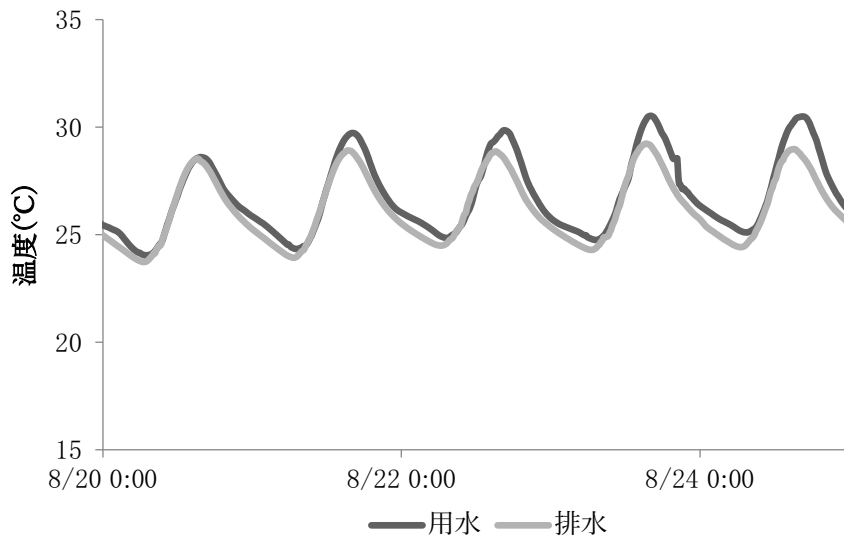


図 3-14 田谷川堰の用水と排水の水温変化
(2012年8月20～24日)

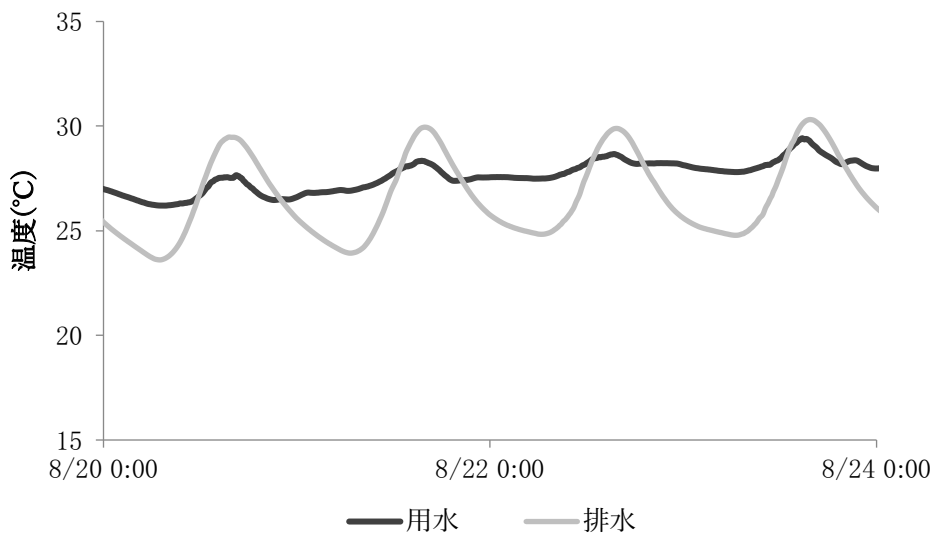


図 3-15 福岡堰の用水と排水の水温変化
(2012年8月20～23日)

表 3-2 各地域の用水・排水の日最高水温と日最低水温

(単位:°C)

	日最高水温		日最低水温	
	用水	排水	用水	排水
大前堰	27.4	26.4	23.1	23.7
赤井戸堰	28.0	28.0	24.2	23.2
田谷川堰	29.8	29.0	24.6	24.2
福岡堰	28.5	29.9	27.0	24.3

3.3.4 農業用水の反復利用による温度変化

前項では、水田地域からの排水が取水した用水よりも低温になる場合があることを示した。そこで本項では、農業用水の反復利用による河川水温への影響について検討する。

対象区間は、赤井戸堰、田谷川堰を含む区間とした。本区間では、五行川から取水した赤井戸堰の受益水田地域からの排水が五行川へ還元し、2 km 下流で田谷川堰が再び取水するという反復利用が行われている(図 3-16)。赤井戸堰の用水と排水、田谷川堰の用水の日最高水温を比較したところ、対象区間の 8 月 20 日から 5 日間の平均は赤井戸堰の用水が 28.3°C、排水が 26.6°C、田谷川堰の用水が 29.9°Cであった(図 3-17)。一概に比較はできないが、小貝川本川の上流・中流地点の流下過程(3.3.1 項)では 1 km あたり約 0.2°C、市の堀幹線用水路の流下過程(3.3.2 項)では 1 km あたり約 0.1°Cの水温上昇であったことを考えると、赤井戸堰の還元地点から田谷川堰の取水地点までの区間で起こる水温上昇は地点間の水温差と比べて無視できるほど小さいと予想される。よって、赤井戸堰の排水が五行川に還元することで五行川の水が冷やされ、その下流の田谷川堰の用水温度が低く抑えられたと考えられる。

一方、8 月 11 日から 12 日の連続干天期間においては、上記と異なる傾向を示した(図 3-18)。11 日では田谷川堰の用水が常に高温であったが、12 日の日最高水温は赤井戸堰の用水が 25.8°C、排水が 26.9°C、田谷川堰の用水が 25.8°C、日最低水温は赤井戸堰の用水が 23.0°C、排水が 23.1°C、田谷川堰の用水が 23.3°Cであり、日最高水温は赤井戸堰の排水が最も高かった。

水温の大小関係が異なった原因を明らかにするため、8 月 20 日から 24 日ならびに 8 月 11 日から 12 日の各地点の水位変動を比較した(図 3-19、3-20)。8 月 20 日から 24 日ならびに 11 日の水位は安定していたのに対して、11 日の 21 時頃から 12 日の 2 時頃にかけて赤井戸堰の用水の水位が急激に低下し、逆に田谷川堰の用水の水位は上昇していた。これほどの短期間に五行川の流量が急変したとは考えにくいため、この期間では赤井戸堰が取水量を減らし、その結果として田谷川堰への供給水量が増加したと考えるのが妥当である。このとき、赤井戸堰から田谷川堰の区間における五行川の流量は 12 日の方が大きく、流下過程での水温上昇も抑えられるため、赤井戸堰の排水温と田谷川堰の用水温の大小関係が逆転したと考えられる。このように、水田地域の取水が河川流量を急激に増減させた場合には、河川の流下過程での水温変化にも大きな影響を及ぼす。

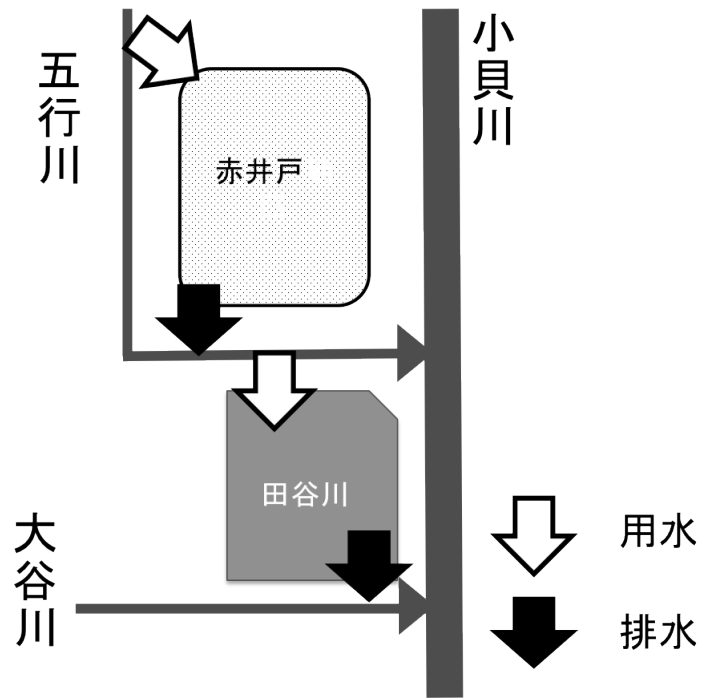


図 3-16 赤井戸堰と田谷川堰の概略図

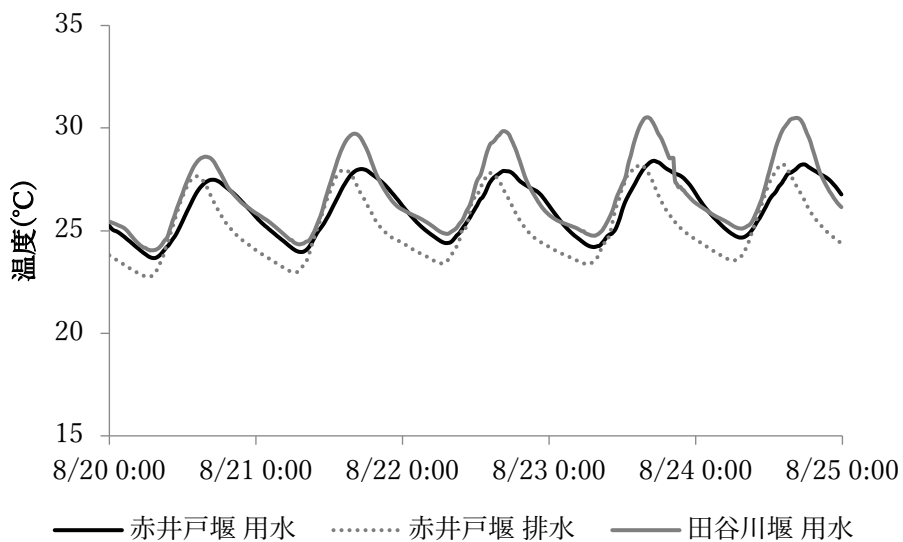


図 3-17 赤井戸堰の用水と排水、ならびに田谷川堰の用水の水温変化 (2012年8月20~24日)

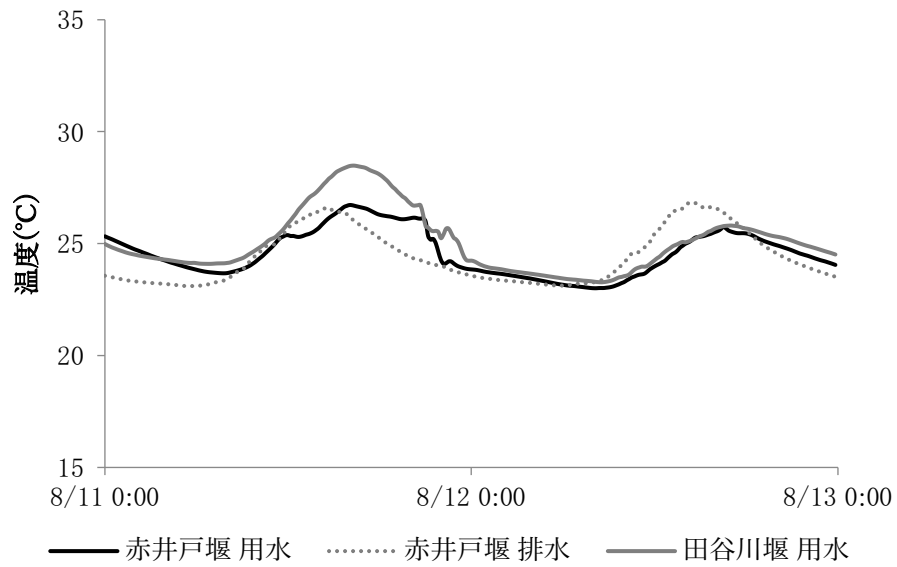


図 3-18 赤井戸堰の用水と排水、ならびに田谷川堰の用水の水温変化 (2012年8月11～12日)

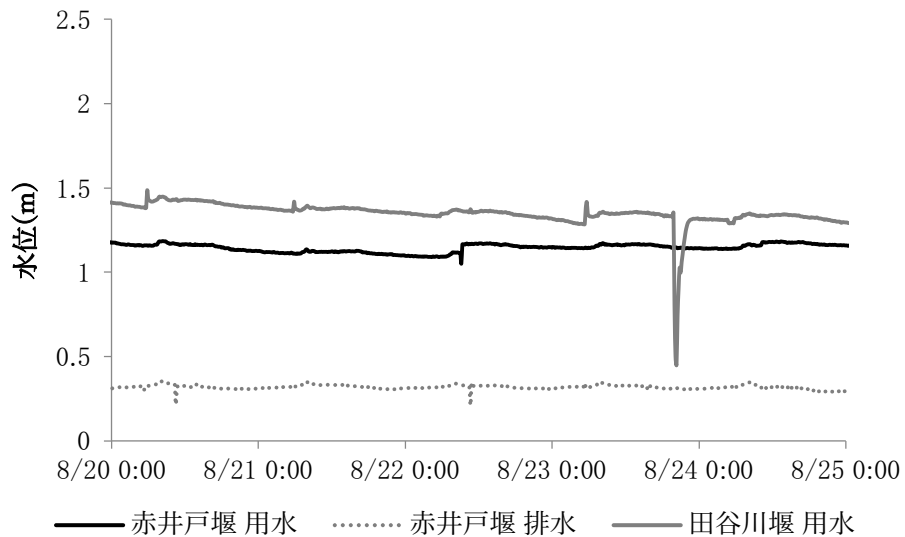


図 3-19 赤井戸堰の用水と排水、ならびに田谷川堰の用水の水位変動 (2012年8月20～24日)

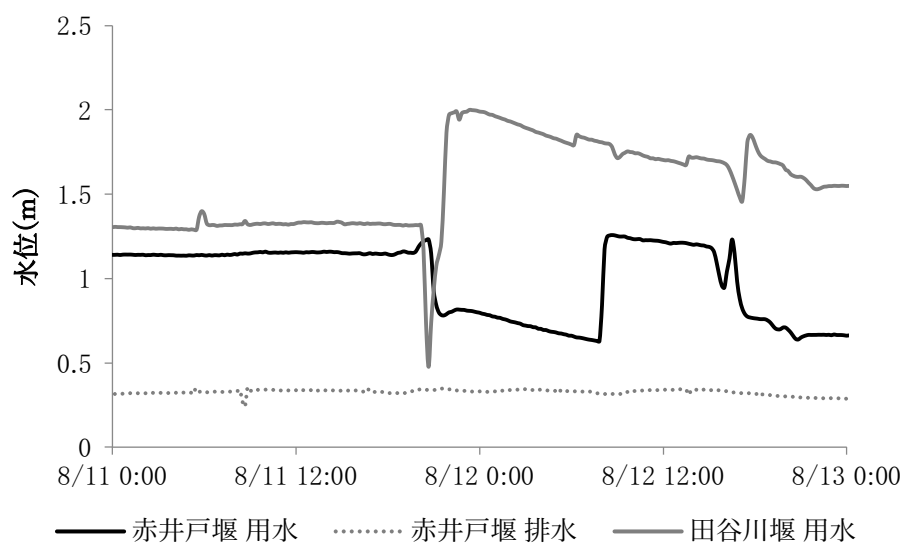


図 3-20 赤井戸堰の用水と排水、ならびに田谷川堰の用水の水位変動 (2012年8月11~12日)

3.3.5 水田地域での水利用が流域水温に与える影響

これまでの結果を踏まえて流域全体での水温変化について考察する。流域内で日最高水温、平均水温が最も高温になったのは、小貝川本川の中流地点であった。小貝川本川の中流・下流地点間では、大前堰の排水、五行川、大谷川が小貝川に流入する。各地点の水温を比較すると、小貝川本川は支川や水田地域からの排水よりも高温であった。小貝川本川からは多くの水田地域が取水するが、その排水のほとんどは小貝川ではなく桜川へ還元する。そのため、3.3.4 項で示した水田地域を通過することによる水温上昇の抑制は起きない。一方、大谷川や五行川には市の堀用水や赤井戸堰など、規模の大きい水田地域の排水が還元するため、河川流下による水温上昇が抑えられた。つまり、小貝川本川では、中流・下流間に水田地域からの排水、ならびに、排水が還元して水温上昇が抑えられた支川が流入することで、中流よりも下流で低温になったと考えられる。以上のことから、水田の影響がない河川流下では、一方的に水温は上昇するため下流ほど高温になる。一方、水田地域を含む流域では、用水が水田地域を通過し、排水として還元する過程で水温上昇が抑えられる場合がある。例えば、低温の用水を下流に送りたい場合、時期によっては農業用水の反復利用を積極的におこなうことが効果的である可能性がある。

さらに、8月の連続干天期間において田谷川堰の用水は水位が安定している際は赤井戸堰の用水・排水よりも高温であったにも関わらず、赤井戸堰が取水量を減少させた際は、田谷川堰の用水は赤井戸堰の排水よりも日中は低温であった。五行川や小貝川では複数の堰が点在しているため、上記のように上流の取水堰での取水量の増減が下流の河川における水深や流速に影響を及ぼすと考えられる。

このことから、流域内の水温変化を正確に予測するには、河川流下過程の水温上昇だけでなく、水田地域の灌漑と排水が水温に及ぼす影響も考慮することが不可欠であることが明らかになった。

3.4 本章のまとめ

本章では、複数の水田地域を含む流域内において水田地域の水利用が河川水温に与える影響を明らかにするため、河川ならびに水田地域において水温と流量の観測をおこなった。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 河川の流下過程では水温上昇が起きた。同様に、用水路の流下過程においても水温上昇が起こることが確認された。また、用水路内では水温上昇は昼間のみ起こり、夜間の流下過程では水温変化しない、もしくは水温が低下することが確認された。
- (2) 複数の水田地域内の用水と排水の温度を比較すると、いずれの地域も排水の方が用水よりも低温である傾向を示した。これは、水田ならびに排水路を流下する過程で水温が低下したためと考えられる。
- (3) 農業用水の反復利用がおこなわれている区間では、上流水田地域の排水が河川に流入することで河川水温が低下し、下流水田地域の用水の温度が低く抑えられた。また、上流水田地域の取水量の増減によって河川流量が変化し、その結果として河川の流下過程での水温変化の度合いも異なることが示唆された。
- (4) 水田の影響がない河川流下では、一方的に水温は上昇するため下流ほど高温になる。一方、水田地域を含む流域では、用水が水田地域を通過し排水される過程で水温上昇が抑えられる。よって、水田地域を多く含む流域において水温変化を正確に予測するには、河川流下過程の水温上昇だけでなく、水田地域の灌漑と排水が水温に及ぼす影響を考慮する必要があることが明らかになった。

4. 用水路の流下過程における水温変化

4.1 はじめに

3章では、水田地域の水利用と河川水温との関係に注目し、それらが相互に影響していることを明らかにした。これは、水田地域を含む流域で水温を正確に予測するためには、単独の河川水温モデルだけでは不十分であり、水田地域内での水動態や水温変化を把握し、その現象をモデル化する必要があることを意味している。

水田地域内での水温変化をより詳細に分析するためには、幹線用水路、支線用水路、小用水路を通じて水田や排水路に用水が到達するという一連の水動態を追い、各地点での水温を把握する必要がある。3章では、水田地域の最上流と最下流にあたる幹線用水路上端と幹線排水路末端の水温変化を示したが、その間の水温変化については明らかにできていない。また、幹線用水路の分析対象とした市の堀幹線用水路は、各観測地点間の距離が10 km以上離れており、地点間での水理条件の違いや気象条件との関係を詳細に検討するには、区間距離が長すぎた。

本章では、一つの水田地域内の用水路系に注目し、各用水路の流下過程における水温変化の状況を現地観測によって明らかにする。

4.2 対象地の選定

本章の目的に適した対象水田地域を選定するため、前章で得られた大前堰、赤井戸堰、田谷川堰、福岡堰の用水温を再度分析する。

図4-1に2012年4月23日から8月23日における大前堰用水の日最高水温と日最低水温を示す。灌漑期間を通じて用水温は緩やかに上昇しており、また、日較差は3.8°C程度で安定していた。一方、福岡堰も用水温が徐々に上昇する点は共通していたが、日較差は1.5°C程度であり、大前堰に比べると日内変動が小さかった(図4-2)。表4-1に、4堰の月別の日最高水温、日最低水温、日較差の平均値を示す。なお、5月の平均値に4月の6日間の観測結果を含めた。いずれの地域においても4月下旬から8月下旬にかけて緩やかに水温が上昇しているが、赤井戸堰、田谷川堰、大前堰の用水温の日較差は3.4 - 4.3°Cであるのに対して、福岡堰の日較差は1.2 - 1.8°Cと明らかに小さかった。

大前堰、赤井戸堰、田谷川堰は小貝川支川の五行川、福岡堰は小貝川本川から

取水しているため水源が異なる(図 3-3)。水源の違いが日較差の差を引き起こしている可能性を検討するため、各河川水温の日較差を比較した。2012年8月20日から24日の五行川の上・中・下流地点における日較差は、それぞれ5.0°C、5.4°C、3.3°Cであった(図 3-6)。一方、小貝川本川の上・中・下流地点における日較差もそれぞれ5.8°C、6.8°C、3.1°Cであり、五行川の水温と比較して明確な差はなかった(図 3-5)。つまり、水源水温の違いが用水温の日較差の差をもたらしたとは考えにくい。

4堰の用水温とそれぞれの水源水温の日較差を比較すると、五行川から取水している3堰の用水温は水源水温よりも1.0°C前後小さいのに対して、小貝川本川から取水している福岡堰では時期によっては5.0°C程度小さい。福岡堰の日較差が小さい理由として、灌漑方法の影響が挙げられる。福岡堰は小貝川をせき止めて河道内に用水を貯留しており(溜井灌漑)、河川水温の日内変動は河道内でならされる。その結果、福岡堰の用水温度は、他の3堰よりも変動が小さくなったと考えられる。

インプットとなる河川水温が大きく変動していると、水田地域での水温変化が地域内で生じたものか、地域外である河川水温の変動によるものかの判断が難しい。よって、水田地域内部の水温変化のみに焦点を当てて解析するためには、福岡堰のように水源水温が安定していることが望ましい。また、3.3.4項で明らかにしたように、複数の水田地域が密集している区間では上流水田地域からの還元水の影響を受ける恐れがあるが、福岡堰の上流には大きな水田地域がなく、その点からも本章の解析に適している。よって、福岡堰土地改良区受益地区を研究対象地に選定し、以降の水温観測ならびに水温予測モデルの構築をおこなった。

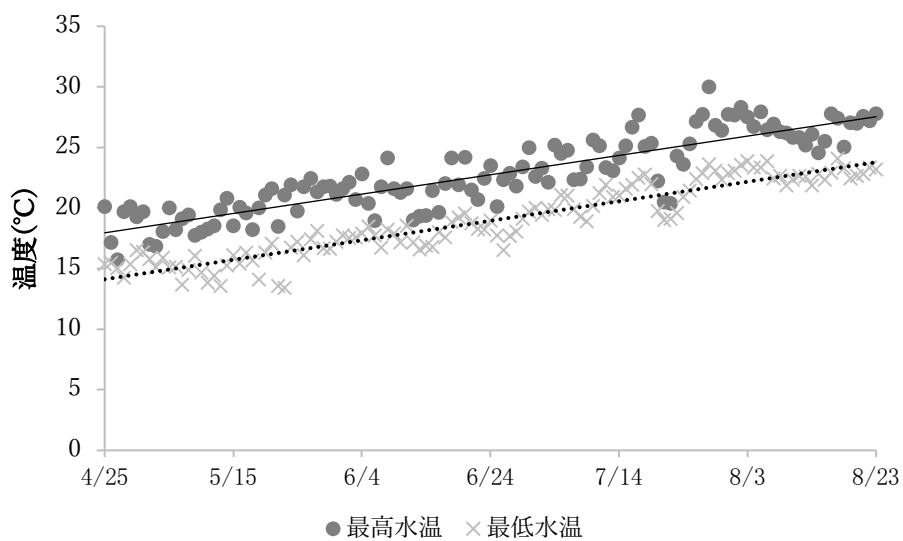


図 4-1 大前堰における最高水温と最低水温
(2012年4月25日～8月23日)

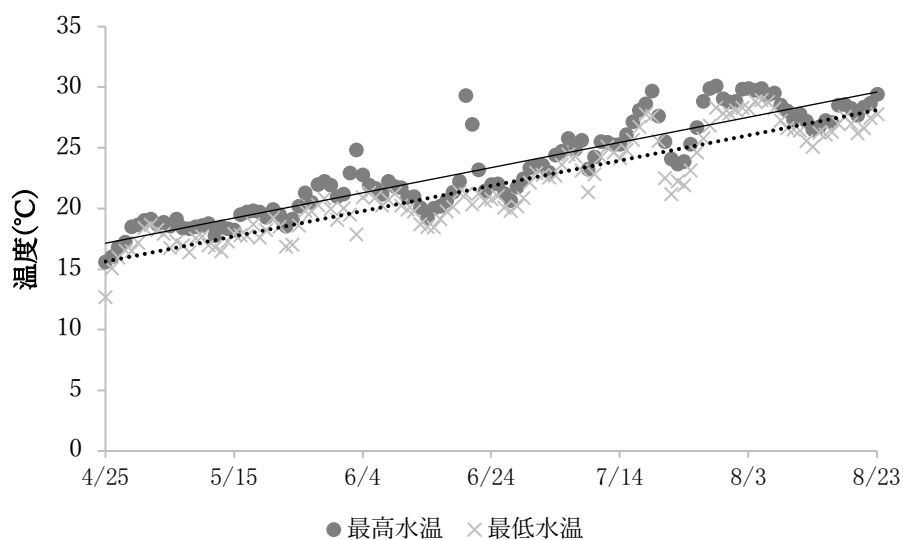


図 4-2 福岡堰における最高水温と最低水温
(2012年4月25日～8月23日)

表 4-1 4 堰における最高水温・最低水温・日較差
(2012 年 4 月 25 日～8 月 23 日)

(単位:°C)

	大前堰		赤井戸堰		田谷川堰		福岡堰	
	最高水温	最低水温 (日較差)	最高水温	最低水温 (日較差)	最高水温	最低水温 (日較差)	最高水温	最低水温 (日較差)
5 月	19.6	15.5 (4.0)	19.7	16.2 (3.5)	20.5	16.3 (4.2)	19.1	17.7 (1.4)
6 月	21.7	18.0 (3.8)	22.2	18.7 (3.5)	22.8	19.1 (3.7)	22.1	20.2 (1.8)
7 月	24.6	21.0 (3.6)	25.5	22.1 (3.4)	26.5	22.5 (4.0)	26.0	24.5 (1.6)
8 月	26.7	22.9 (3.8)	27.3	23.9 (3.4)	28.6	24.3 (4.3)	28.4	27.2 (1.2)

4.3 福岡堰の概要

本節では、水田地域内の水温変化について重点観測をおこなった福岡堰土地改良区受益地区の概要を述べる。茨城県つくばみらい市、常総市、取手市にまたがる福岡堰土地改良区受益地区は小貝川本川を水源としており、土地利用の多くが水田である(図 4-3)。福岡堰では前述の通り溜井灌漑を実施している。本対象地域は、温暖な気候を有しており、水質も安定しているため湛水の温度調節や水質維持のための掛け流し灌漑はおこなわれていない(谷口・佐藤、2006)。灌漑期間は4月25日から8月23日であり、降雨日を除いて24時間連続通水がおこなわれている。

取水された用水は台通用水路と川通用水路の2つの幹線用水路を通じて配水される。台通用水路の延長は約13 km、観測期間中の最大流量は6.2 m³/s、川通用水路の延長は約10 km、最大流量は6.2 m³/sである。幹線用水路から支線用水路への分土工より下流の水管理は農家がおこなっている。排水は幹線排水路(中通川)から小貝川へ還元する。福岡堰の受益地区東には台地があり、中通川には地下水が湧水している。地下水の流入による水温変化の影響を排除するため、川通用水路受益地区において観測を実施した。

福岡堰の用水供給は比較的安定しているため、排水路のせき上げや地区内での反復利用などはほとんどなく、幹線排水路へは一回使いの排水が流出している。用水路(幹線、支線、小用水路)はすべてコンクリート三面張り、排水路(幹線、支線、小排水路)はほとんどの区間が柵渠であるが、幹線排水路の一部のみコンクリート三面張りである。また、一部の水田には暗渠が敷設されている。

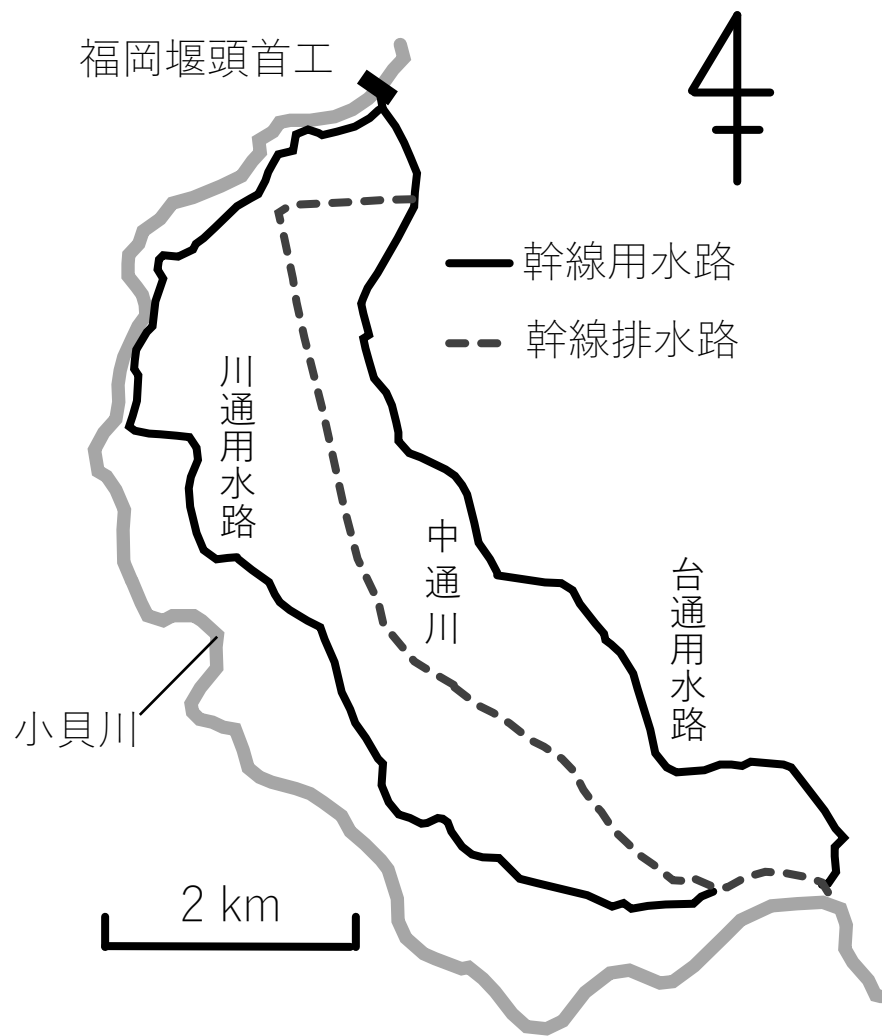


図 4-3 福岡堰土地改良区受益地の概要

4.4 調査方法

用水路における流下過程での水温変化を把握するため、以下の地点に水位・水温計(Solinst社 Levelogger Edge Model 3001、水温の観測精度は0.1°C)を設置し、10分間隔で連続観測した。幹線用水路の流下過程における水温変化を把握するため、川通用水路において、台通用水路との分水地点から0.4 km、4.7 km、10.4 km下流をそれぞれ上流・中流・下流地点に選定した(図4-4)。次に、より短い区間での水温変化を把握するため、川通用水路上端から2.6 km地点で分水している五ヶ村用水路の分水直下を上流地点、分水から1.2 km下流を下流地点に選定した。観測は2013年～2017年の4月25日から8月25日の5年間で実施した。ただし、年による大きな違いは見られなかったため、本章では各観測地点において比較的安定した結果が得られた2015年のデータを主に使用した。

さらに、小用水路における流下過程の水温変化を把握するために、川通用水路中流地点の640 m上流で小用水路に分水し、分水地点から300 m下流で取水をおこなっている水田一筆の水口において水位・水温観測を2015年7月15日から8月25日、2017年6月22日から8月25日に実施した(図4-5)。本稿では、上記の用水路の観測結果と比較検討するため、分析に2015年の観測結果を用いた。

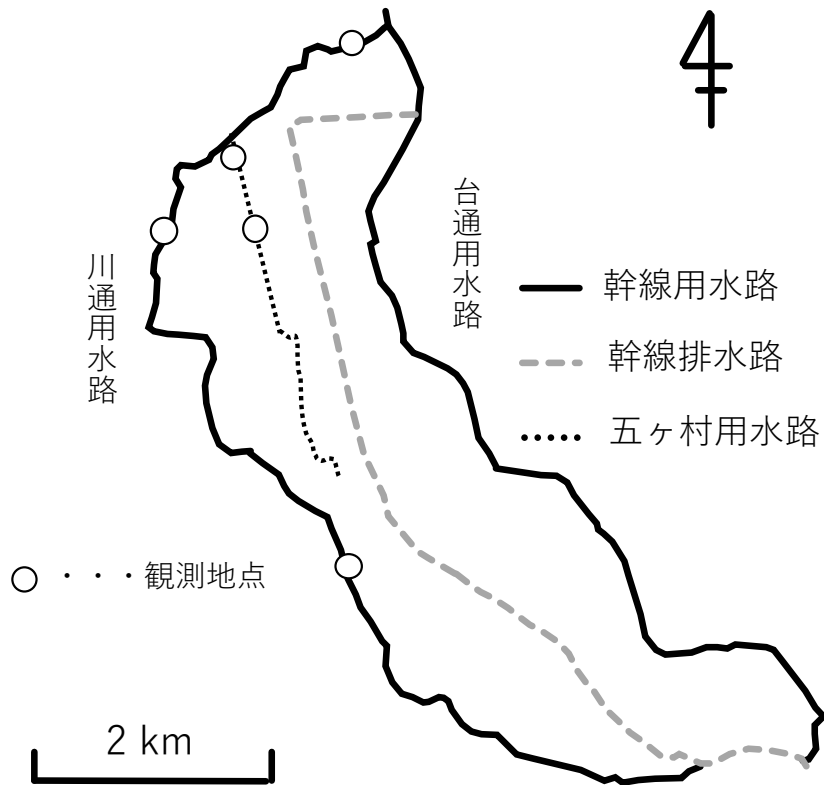


図 4-4 観測地点の概略図

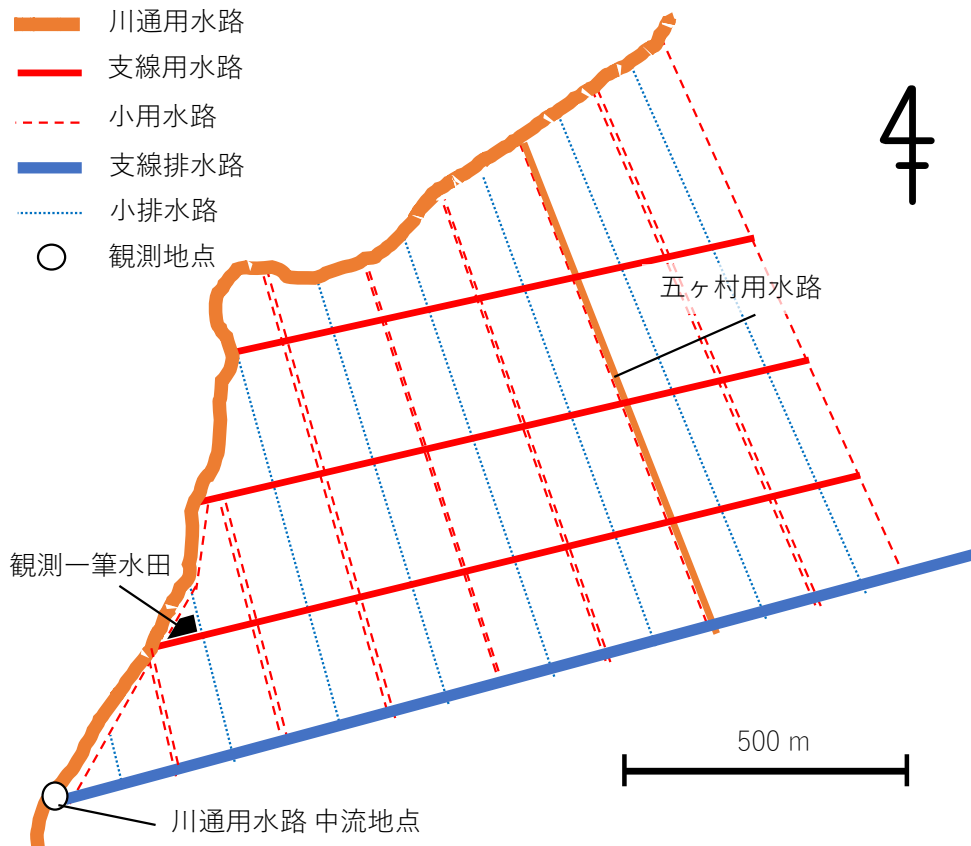


図 4-5 川通用水路中流地点近傍の概略図

4.5 調査結果および考察

4.5.1 幹線用水路の流下過程における水温変化

8月の晴天日における川通用水路の上流・中流・下流地点の水温変化を図4-6に示す。各地点の平均水温は、上流から29.5°C、30.4°C、30.0°Cであった。水温日較差の平均は1.6°C、1.8°C、2.4°Cであり、下流ほど大きくなった。4.2節で述べたとおり、福岡堰では溜井灌漑の影響を受けて河川水温の日変化は河道内ではならされるが、幹線用水路の流下に伴って日内変動が大きくなることが確認された。3.3.2項と同様の方法で流下時間を計算した結果、各区間の流下時間は上流・中流区間が2.3h、中流・下流区間が2.7hであった。流下時間をもとに水塊が上流地点と中流地点を通過したそれぞれの時刻の水温を比較すると、上流・中流区間(流下距離4.3km)では日中、夜間ともに水温が上昇した(図4-7)。一方、中流・下流区間(流下距離5.7km)においては、水温は日中に最大0.7°C上昇し、夜間に最大1.0°C低下していた(図4-8)。

中流・下流地点間の水温は、日中に上昇、夜間に低下した。幹線用水路の用水は流下にともなって支線用水路に分水される。そのため、下流ほど流量が少なく、各地点の日平均流量は上流から4.03 m³/s、2.32 m³/s、0.56 m³/sであった。流量が少ないほど熱容量も小さくなるため、流下過程で同じ熱量が日射などで与えられた場合には、上流よりも下流で水温が変化しやすかったと考えられる。このように、下流地点では水温が温まりやすく、冷えやすい傾向が確認された。

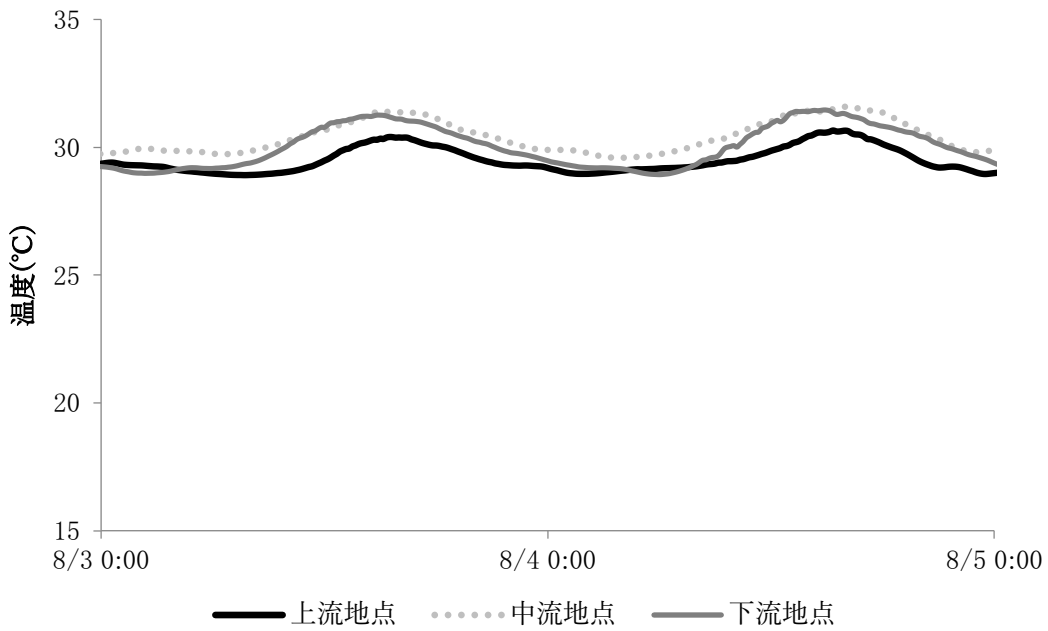


図 4-6 川通用水路の各地点の水温変化
(2015年8月3~4日)

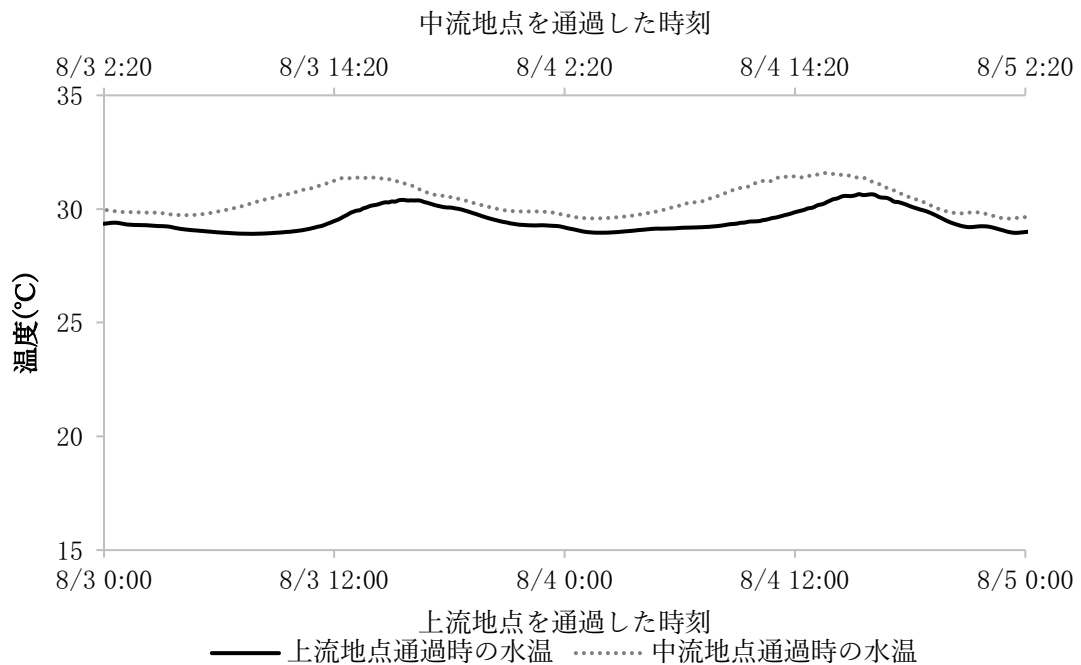


図 4-7 川通用水路における上流地点通過時と
中流地点到達時の水温の比較 (2015年8月3~4日)

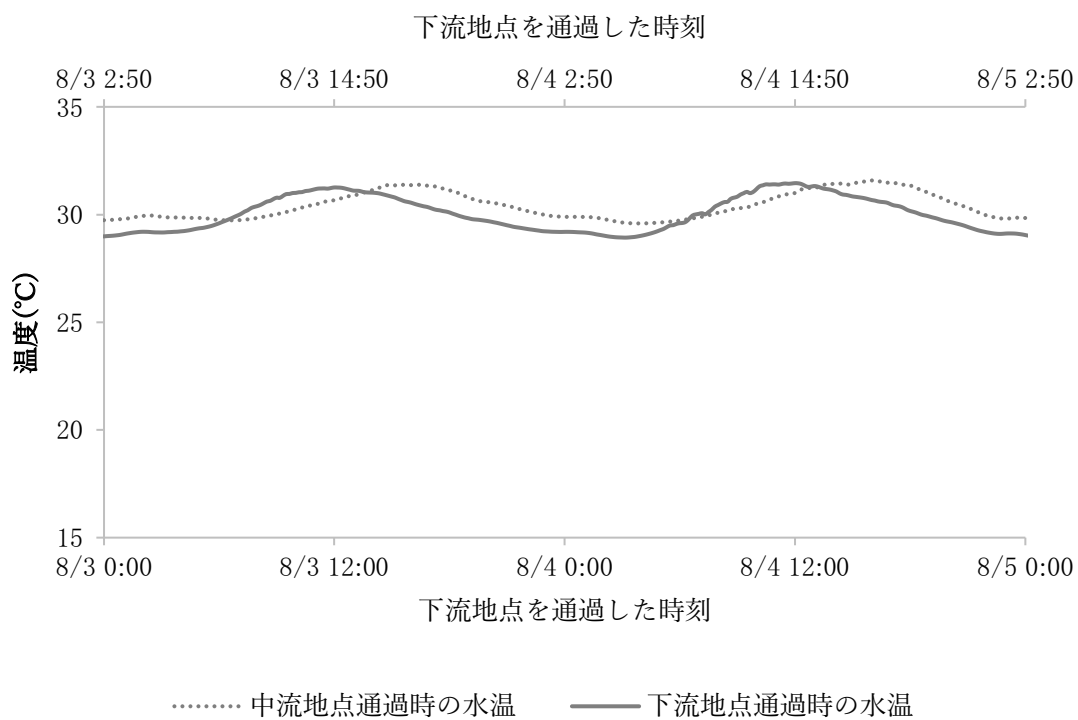


図 4-8 川通用水路における中流地点通過時と下流地点到達時の水温の比較(2015年8月3~4日)

4.5.2 支線水路の流下過程における水温変化

8月の晴天日における五ヶ村用水路の上流・下流地点の水温変化を図4-9に示す。各地点の平均水温は、上流から30.8°C、31.4°Cであった。水温日較差は平均で1.7°C、1.9°Cであり、川通用水路と同様に下流ほど大きかった。流下時間は0.5hであり、それぞれの上流・下流地点の通過時刻をもとに比較をおこなうと、最大で日中は0.9°C、夜間は0.3°C水温が上昇した(図4-10)。五ヶ村用水路の上流・下流区間は、川通用水路の上流・中流区間と同様の傾向を示した。一方、五ヶ村用水路では0.5hの間に最大で0.9°C水温が上昇したが、川通用水路上流・中流区間では2.3hの間に最大で1.7°C、中流・下流区間では2.7hの間に最大で0.8°C上昇していた。五ヶ村用水路では川通用水路よりも単位時間あたりの水温上昇度が大きいことが明らかになった。

五ヶ村用水路の日平均流量はそれぞれ0.57 m³/s、0.45 m³/sであり、川通用水路の各地点の流量よりも小さい。また、川通用水路と五ヶ村用水路の水路構造を比較すると、川通用水路上流地点、中流地点、下流地点の水路幅はそれぞれ5.2 m、4.1 m、2.7 mであり、五ヶ村用水路の上流地点、下流地点はそれぞれ1.8 m、1.7 mであった。灌漑期間の平均の水深は、川通用水路上流地点から順にそれぞれ1.13 m、0.71 m、0.65 m、五ヶ村用水路の上流地点、下流地点はそれぞれ0.56 m、0.41 mであった。このように、支線水路の方が水路の規模も小さいため川通用水路よりも水温が変動しやすい構造を持っていたと考えられる。

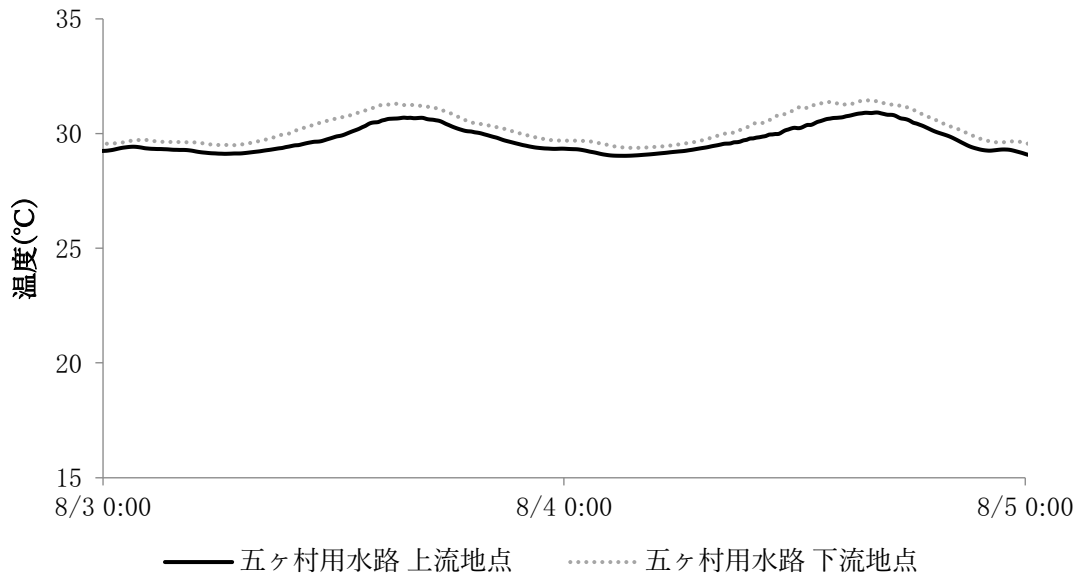


図 4-9 五ヶ村用水路の各地点の水溫変化
(2015年8月3~4日)

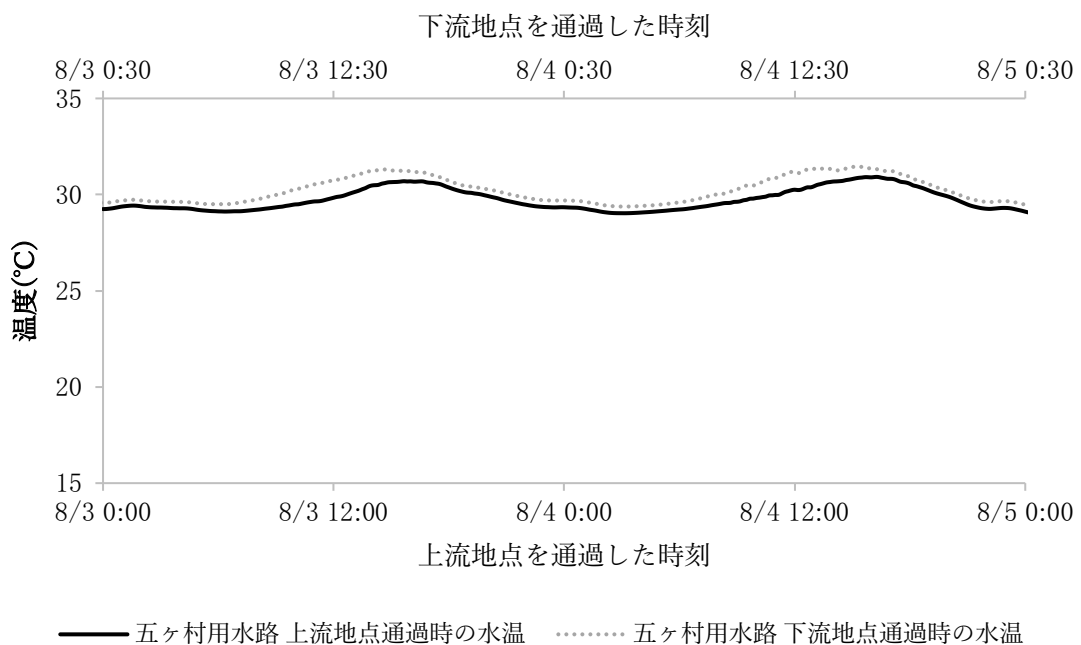


図 4-10 五ヶ村用水路における上流地点通過時と下流地点到達時の水溫の比較(2015年8月3~4日)

4.5.3 小用水路の流下過程における水温変化

2015年8月3日から4日における川通用水路の上流・中流地点ならびに水田水口の水温を図4-11に示す。川通用水路の上流・中流地点の日最高水温の平均値は30.5°C、31.5°Cであり、日最低水温の平均値は28.9°C、29.7°Cであった。4.5.1項で述べた川通用水路の上流・中流区間の水温変化と同様に、日中・夜間ともに水温が流下過程で上昇していた。

一方、解析期間における水田水口の水温、日最高水温、日最低水温の平均はそれぞれ30.0°C、34.3°C、27.3°Cであった。川通用水路の上流地点の水温と比較すると、日中は最大でおよそ3.8°C高く、夜間は最大で1.6°C低かった。川通用水路の上流・中流区間で分水された用水は、小用水路を通過して対象水田に供給される。小用水路の規模は幹線用水路や五ヶ村用水路よりも小さく、水深は小用水路上端であっても水深は0.1-0.2 m程度である。そのため、熱容量が小さく、熱交換の影響が強く現れたと考えられる。このように、水路規模が小さいほど水温変化が大きくなるという現象は、水路の規模によらず、用水路系全体を通して確認された。

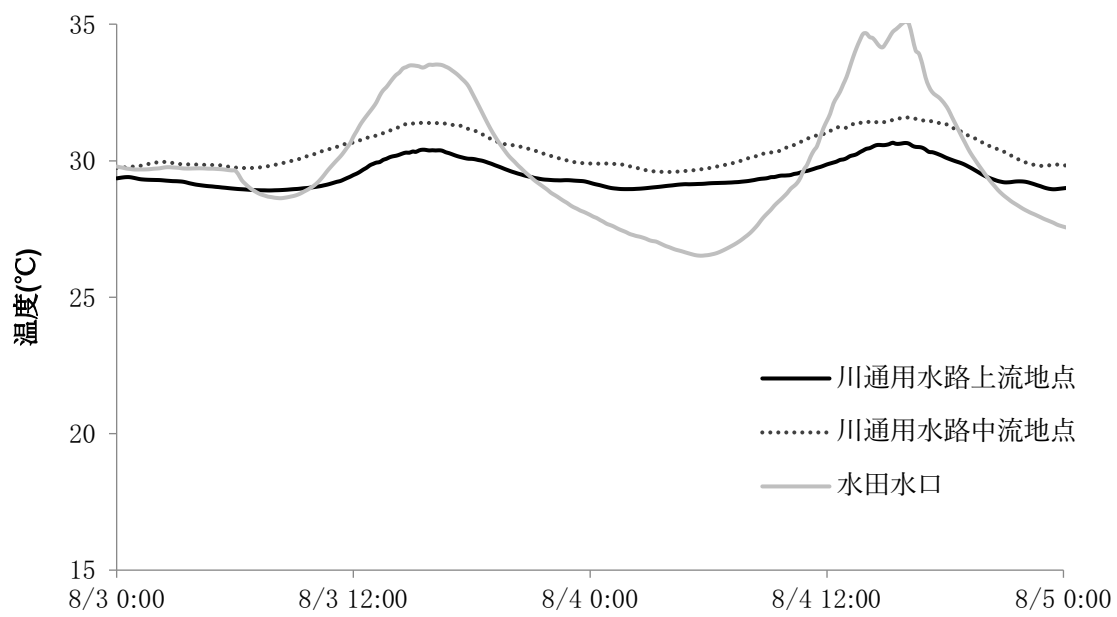


図 4-11 川通用水路と水田水口の水温変化
(2015年8月3~4日)

4.6 本章のまとめ

本章では、福岡堰土地改良区受益地区内の川通用水路を対象に、各用水路の流下過程での水温変化を調査・分析した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 幹線用水路の上流・中流区間では、流下過程で日中、夜間ともに水温が上昇した。一方、中流・下流区間では日中は水温が上昇し、夜間は水温が低下した。このことから、同一の幹線用水路であっても、区間によって水温変化の傾向は異なることが明らかになった。
- (2) 幹線用水路における水温の日較差は下流ほど大きくなる傾向を示した。用水路では取水や分水が行われるため、下流ほど水深・流速が小さく、水温が変化しやすいと考えられる。
- (3) 支線用水路の流下過程では、幹線用水路の上流・中流区間と同様に日中、夜間ともに水温が上昇した。また、幹線用水路よりも単位距離あたり、単位時間あたりの水温上昇が大きかった。この傾向は、小用水路の流下過程においても同様であった。支線用水路や小用水路は幹線用水路よりも水深が小さく、流速が遅いため気象条件による熱交換の影響を受けやすいことが明らかになった。
- (4) 用水路系においては、水深や流速が小さいほど水温変化の度合いが大きくなるため、流量が少なく、水路規模も小さい末端(同一の用水路であれば下流、地区全体であれば小用水路)ほど水温が変化しやすいことが確認された。

5. 用水路における水温予測モデルの構築

5.1 はじめに

4章では、用水路の流下過程における水温変化を分析した結果、流量が少なく、水路規模が小さい末端ほど水温変化が大きいことを明らかにした。本章では、既存の河川水温予測モデルを用水路に適応し、その再現性を検討することで、用水路の水温予測に必要な要素を明らかにした。さらに、観測結果をもとに水温予測モデルを改良し、用水路の水温予測モデルの構築をおこなった。

5.2 本章のまとめ

本章では、河川水温予測モデルを用水路に適用し、その再現性を検討することで、用水路の水温予測に必要な要素を明らかにした。さらに、観測結果をもとに河川水温予測モデルを改良し、用水路の水温予測モデルの構築をおこなった。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 幹線用水路の上流・中流区間ならびに中流・下流区間、支線用水路において河川水温予測モデルを適用すると、幹線用水路の上流・中流区間と支線用水路の水温は常に過小に推定された。一方、中流・下流区間では最低水温は再現できたものの、最高水温は過大に推定された。モデルの推定精度は区間によって異なった。
- (2) モデル計算に用いた気象台観測値と用水路内外の風速・湿度の観測値を比較した。湿度は大差がなかった一方で、水路内の風速は気象台の観測値よりも常に小さく、また日内変動も小さかった。しかし、計算に用いた風速を水路内の風速の値に置き換えても、モデル推定結果への影響は小さく、限定的であった。
- (3) 支線用水路において用水路壁面と用水の温度観測を実施した結果、用水路壁面温度は水温よりも最大で30°C程度高かった。また、熱交換は水と接している壁面のみで起きることが示唆された。
- (4) 用水路の水温予測モデルに用水路壁面温度の予測モデルを組み込み、幹線用水路上流・中流区間、中流・下流区間、支線用水路において精度検証をおこなった。その結果、幹線用水路上流・中流区間、支線用水路において

は精度を向上させることができた。一方、幹線用水路中流・下流区間では推定精度が低下した。

- (5) 推定精度が区間によって異なる原因としては、用水路天端から水面までの距離が影響していることが示唆された。すなわち、水路天端に近いほど壁面温度は高温であるため、流下にともなって水面と水路天端の距離が離れると壁面との熱交換が用水温に与える影響が逡減したことが考えられる。

6. 排水路の流下過程における水温変化

6.1 はじめに

4章では各用水路において水温観測をおこない、用水路のいずれの区間でも水温上昇がおこることが確認された。このことから、水田地域内では水田に湛水する過程もしくは排水路の流下過程において水温が低下するため、3.3.3項では8月の晴天日において用水よりも排水の方が低温になったと考えられる。しかし、排水路における水温観測は幹線排水路の末端でのみ実施しており、水田地域内部の排水路の流下過程における水温変化は明らかになっていない。

そこで、本章では水田地域内の排水路における水温変化の実態を明らかにするために水位・水温観測を実施し、その観測結果ならびに考察を述べる。

6.2 調査方法

6.2.1 排水路における水位・水温観測

研究対象地は4章・5章と同様に福岡堰受益地区とした。小排水路、支線排水路を流下する過程での水温変化を把握するため、5章と同様に台地からの地下水の流入のない川通用水路受益地区内に重点観測水田区を設けて、水位・水温計(Solinst社 Levelogger Edge Model 3001、水温の観測精度は0.1°C)を設置した(図6-1)。川通用水路受益地区内の排水の堰上げや反復利用のおこなわれていない地域を重点観測水田区として選定した。観測間隔は10分とした。重点観測水田区は、周囲を支線用水路、小用水路、支線排水路で囲まれた8つの農区によって構成されており、支線用水路上端から農区をそれぞれBL1、BL2、BL3…BL7、BL8とした。BL1-BL5までは川通用水路から、BL6-BL8は五ヶ村用水路から支線用水路、小用水路へと分水し用水が配分されている。

排水路は浸透水、栽培管理用水、配水管理用水によって構成されている。栽培管理用水は取水に伴う落水量や減水深操作に伴う強制落水量、配水管理用水は水田を通過せずに用水路から直接排水路へ流下しブロック内の配水を支えている水量と定義されている(渡辺ら、1998)。しかし、本対象地で発生している栽培管理用水と配水管理用水の多くは、農家の水口や分水口の管理作業の節減に起因して発生しており、栽培管理用水や配水管理用水の本来の目的として利用されていない(谷口・佐藤、2006)。そこで、本研究では各管理用水を水田内で利用されることなく排水された用水として扱った。

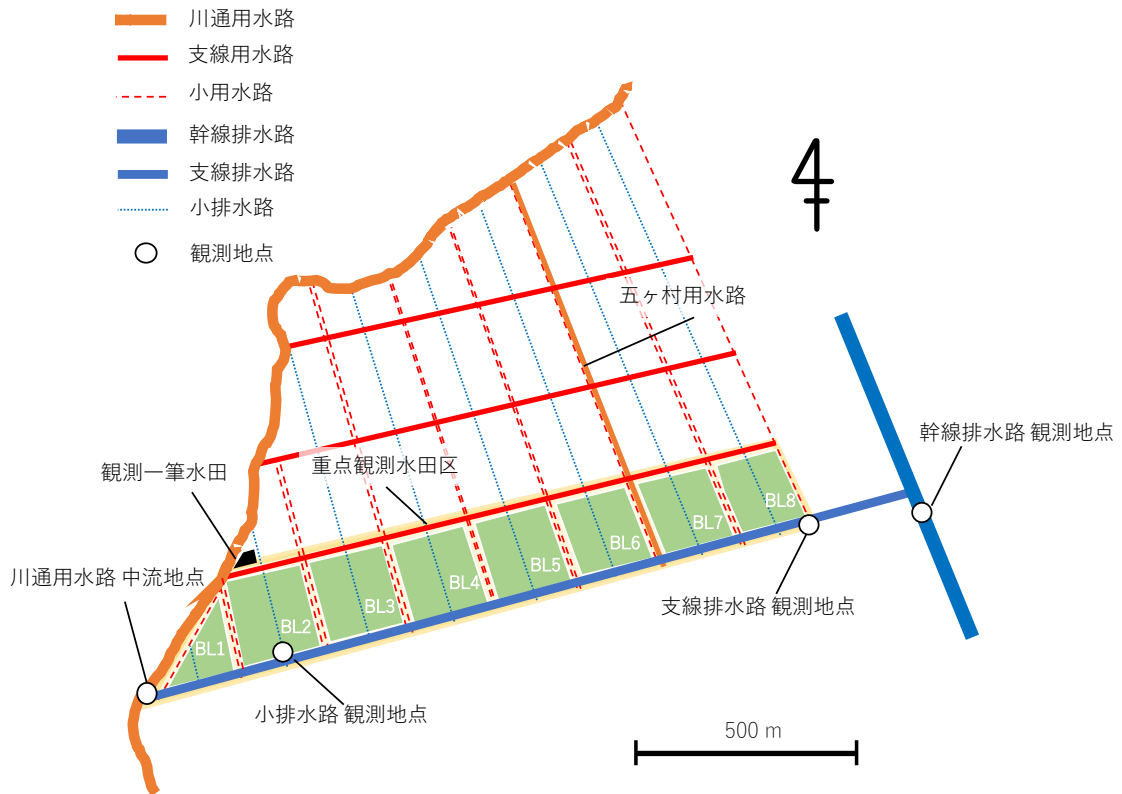


図 6-1 重点観測水田区における観測地点の概要

小排水路にはそれぞれ複数の水田からの栽培管理用水と浸透水が流入している。そこで、複数の水田からの排水の流入や小排水路の流下過程の水温変化を把握するために BL2 からの排水が集まる全長約 0.4 km の小排水路末端を小排水路観測地点とした。なお、対象小排水路には受益水田以外からの流入がないことを確認した。用水温度は川通用水路の中流地点における観測値を用いた。

さらに、対象小排水路を含む BL1 から BL8 までの小用水路と小排水路が合流する支線排水路において、小用水路と小排水路の流入ならびに流下過程の水温変化を把握するために小排水路観測地点の合流地点から 1.4 km 下流に支線排水路観測地点を設定した。さらに、幹線排水路の流下過程の水温変化を把握するため、対象支線排水路と幹線排水路の合流地点の約 0.1 km 下流地点を幹線排水路観測地点とした。

観測は 2013～2017 年の 5 年間、灌漑期間である 4 月 25 日から 8 月 23 日まで実施した。

6.2.2 水田内における水位・水温観測

小排水路は前述の通り地表排水である栽培管理用水と水田湛水から地中へと下向きに浸透する浸透水によって構成されている。そこで、それぞれの水温変化を明らかにするため、5.4 節と同様に重点観測水田区内近傍の一筆水田において水口、水尻周辺の地表水ならびに水田直下の地下水の水位・水温観測をおこなった(図 6-1、6-2)。川通用水路受益地区は幹線排水路の西に位置しているため、台地からの地下水の流入がなく、水田直下の地下水は浸透水によって構成されていると考えた。そこで、水田直下で観測された地下水温を浸透水温として扱った。水位・水温計は 6.2.1 項と同様のものを用いた。

浸透水の観測は以下の手順で行なった。まず、ハンドオーガーによって水田内に直径 0.05 m、深さ 0.8 m の孔を掘り、パイプを固定できるように孔底に砂利を敷き詰めた。この孔に下部に小さな穴を空けたパイプを埋めてパイプ内の水位が地下水位と等しくなるようにした。最後に、パイプ内部に水位・水温計を設置することで浸透水温を観測した。

観測は 2015 年 7 月 15 日から 8 月 20 日(地表水のみ)と 2017 年 6 月 22 日から 8 月 28 日まで実施した。

6.2.3 排水路における集中観測

水田ごとの排水温度の違いを空間的に把握するため、2015年8月12日に重点観測水田区内の複数の水田からの地表排水の水温ならびに流量の集中観測を実施した。また、小排水路の流下過程の水温変化を明らかにするため、水田排水が流入する各農区の小排水路の末端とその200m上流の水温を観測した。なお、集中観測は定点観測をおこなった小排水路とは異なる農区で実施した。

同様に、支線排水路に流入する配水管理用水の水温を把握するため、各BLからの配水管理用水とその流量を観測した。配水管理用水の集中観測は2015年8月5日に実施された。水温計にはマルチ水質チェッカ(HORIBA社、水温測定精度 $\pm 0.3 + 0.005 | t |$ (tは温度[°C]))を用いた。

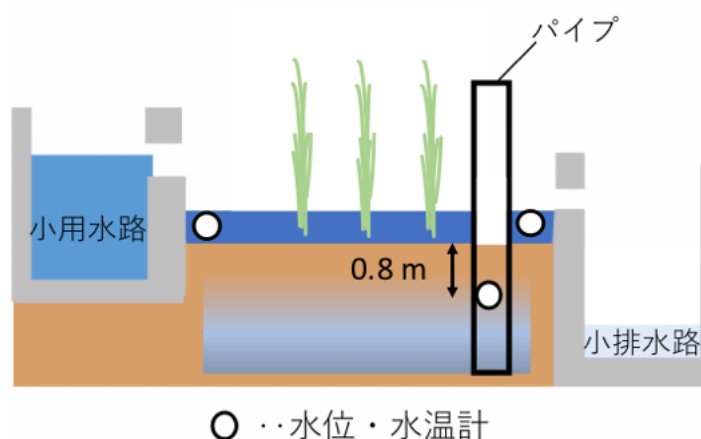


図 6-2 水田内における水温観測の概要

6.3 調査結果および考察

6.3.1 小排水路の流下過程における水温変化

6.3.1 (1) 水田通過後の水温変化

水田を通過前後の水温変化を明らかにするため、用水温と小排水路水温の比較をおこなった。2015年7月13日から15日、8月5日から7日の2期間の晴天日における用水と小排水路の水温変化を図6-3、6-4に示す。7月の晴天日において、用水は25-29°C、小排水路では23-33°Cの日内変動を持ち、日較差はそれぞれ2.3°C、8.4°Cであった。小排水路水温は、日中は用水温よりも高く、夜間は低温であった。一方、8月の晴天日では、用水はおよそ30°C前後を保っていたのに対して、小排水路で26-32°Cの日内変動があり、日較差はそれぞれ2.1°C、5.9°Cであった。小排水路における水温日較差は7月から8月にかけておよそ2.5°C減少した。また、小排水路水温は日中の数時間を除いて、常に用水温よりも低温であった。

用水温と小排水路水温の各月における平均の日最高水温、日最低水温、日較差を表6-1に示す。用水の平均の日最高水温は、5月が22.4°C、8月が30.3°Cであり、その間の上昇幅は7.9°Cだった。最低水温の上昇幅は8.1°Cであり、最高水温にほぼ等しかったため、日較差は灌漑期間を通して約2.0°Cで安定していた。

一方、小排水路の最高水温は5月が26.3°C、8月が30.7°C、最低水温は5月が16.4°C、8月が25.8°Cであり、最高水温と最低水温の水温上昇幅はそれぞれ4.4°C、9.4°Cだった。その結果、5月と8月における日較差はそれぞれ9.8°C、5.0°Cとなり、灌漑期間中に徐々に小さくなった。4.5節の観測結果より、各用水路では流下過程で日中は水温が上昇することが確認されている。そのため、水温低下は水田内、もしくは小排水路の流下過程で生じたと考えられる。

Webb and Zhang(1997) は入力放射量が水温の熱収支において最も影響を与えることを明らかにしている。そこで、日較差が逡減する要因を検討するため、7月と8月それぞれの晴天日において日射量と小排水路水温を比較した。気温、日射量の条件がほとんど同じであった7月13~15日と8月5~7日の晴天日(日照時間9時間以上)における日射、気温と水温の関係をそれぞれ図6-5、6-6に示す。7月の晴天日における日最高気温、小排水路の日最高水温の平均値はそれぞれ33.4°C、32.3°Cであった(図6-5)。日最低気温と小排水路の日最低水温の平均はともに23.9°Cであり、日較差はいずれもおおよそ9°C程度であった。一方、8月の晴天日では日最高気温は7月よりも高く、最低気温は7月とほぼ同じである

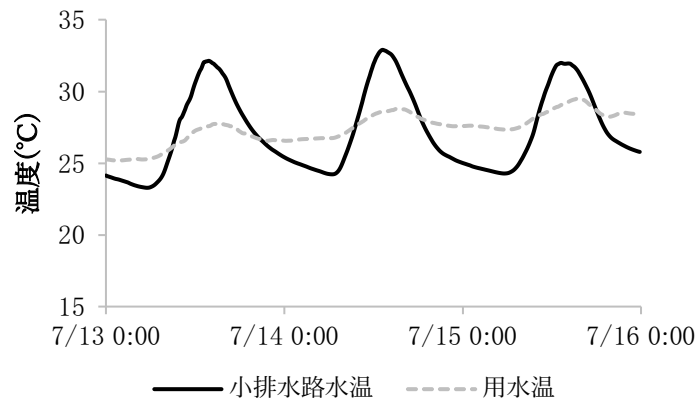


図 6-3 小排水路と用水温の日変化(2015年7月13～15日)

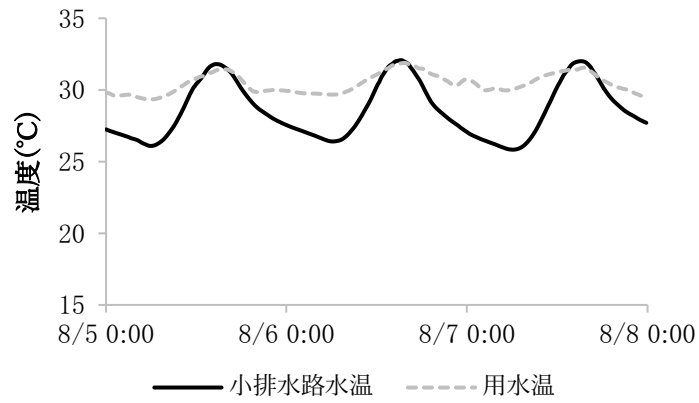


図 6-4 小排水路と用水温の日変化(2015年8月5～7日)

表 6-1 川通用水路(中流地点)と小排水路における日最高水温、日最低水温、日較差の月平均値

(単位:°C)

	川通用水路 中流地点	小排水路
5月 最高水温	22.4	26.3
5月 最低水温	20.3	16.4
5月 日較差	2.1	9.8
6月 最高水温	24.1	28.5
6月 最低水温	21.9	19.7
6月 日較差	2.2	8.8
7月 最高水温	27.9	28.5
7月 最低水温	24.0	23.2
7月 日較差	3.9	5.2
8月 最高水温	30.3	30.7
8月 最低水温	28.4	25.8
8月 日較差	1.9	5.0

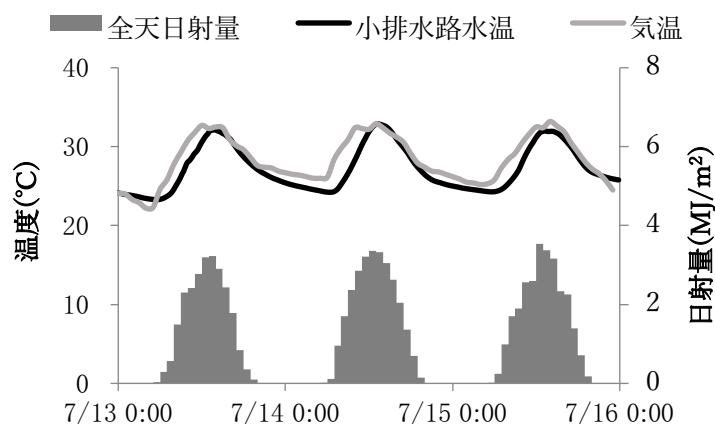


図 6-5 晴天日における日射・気温と小排水路水温の関係 (2015年7月13~15日)

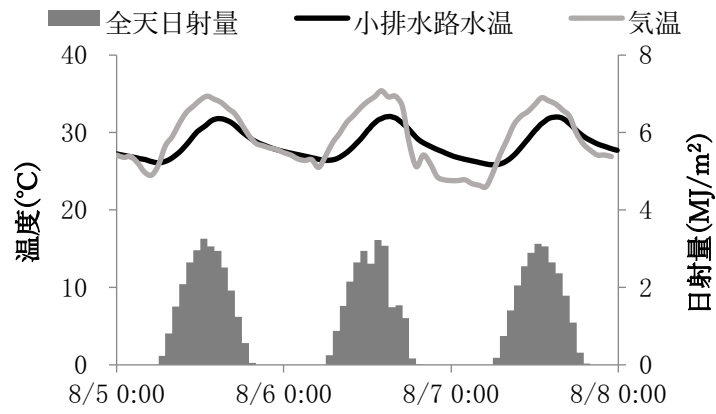


図 6-6 晴天日における日射・気温と小排水路水温の関係 (2015年8月5~7日)

にも関わらず、8月の日最高水温は常に最高気温を下回った(図6-6)。そのため、日較差は気温、小排水路水温でそれぞれ11.6°C、5.9°Cであった。このように、7月と8月の晴天日において日射量や気温がほぼ同じ条件であるのにも関わらず、小排水路の日較差は小さくなっていた。

ここで、7月と8月の晴天日における小排水路の流量を比較すると、いずれも0.01 m³/sであった。このことから小排水路における水理的条件や流入量の変化によって日較差の逡減がもたらされたとは考えにくい。この関係は、水田内の水稻葉形の変化に伴う水田湛水の温度変化の様子と酷似している。水田内では出穂期を境に水稻の葉形が変化し、水稻群落下の水面に日射が届きにくくなり、水温の上昇が鈍化する、もしくは、低下することが明らかになっている(市村、1965)。すなわち、水田内における水稻の生育によって水田内の水温は水温上昇が抑えられ、その後、水田からの排水が流入することによって小排水路の水温の上昇も抑制されたと考えられる。このことから、小排水路水温は、水田からの排水の影響を受けて水温が変動していることが示唆された。

6.3.1 (2) 流入水が小排水路水温に与える影響

前項より、小排水路では水田からの排水の流入によって水温が変化することが示唆された。そこで、水田からの地表排水(栽培管理用水)の流入が小排水路の水温変化に与える影響を検討した。2015年8月12日午後2時ごろに実施した集中観測では、小排水路末端から200m上流地点と末端の水温はそれぞれ30.6°C、31.3°Cを記録した。小排水路へ流入する3枚の水田からの地表排水の温度は32.3°C、32.5°C、31.6°Cであった。また、小排水路よりも水田からの栽培管理用水の温度の方が高かった。このことから、小排水路では流下過程において栽培管理用水が流入することにより、水温が上昇することが示された。重点観測水田区の上流の水田においても上記のような高温の栽培管理用水が小排水路へ流入していると仮定すると、小排水路の水温は今回の観測値よりも高温になるはずである。小排水路の水温が水田からの栽培管理用水よりも低かった要因として、重点観測水田区の上流の小排水路では、浸透水の流入によって冷やされた、もしくは流下過程で水温が低下したことが考えられる。

2017年7月7日から8日における水田水尻、小排水路の水温観測結果を図6-7に示す。水田水尻、小排水路の日最高水温の平均値はそれぞれ、35.7°C、34.5°C

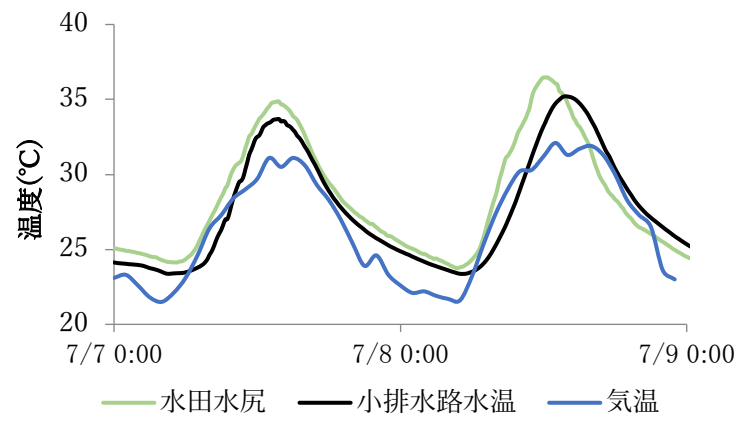


図 6-7 水田水尻・小排水路の水温と気温変化(2017年7月7~8日)

であり、日最低水温はそれぞれ 23.9°C、23.4°Cであった。最高気温、最低気温はそれぞれ 31.6°C、21.6°Cであり、水田水尻、小排水路よりも日中、夜間ともに低温であった。

図 6-8 に 2017 年 7 月 30 日から 31 日における水田水尻、小排水路末端の水温の観測結果を示す。晴天日であった 7 月 31 日の水田水尻、小排水路の最高水温がそれぞれ 30.7°C、31.9°C、最低水温はそれぞれ 23.7°C、24.0°Cであった。最高気温、最低気温はそれぞれ 32.3°C、22.9°Cであった。最高気温と小排水路の最高水温は差が小さいにも関わらず、水田水尻の最高水温は最高気温を 1.6°C下回った。水田水尻水温と気温の大小関係について、大上・紙井(2002)は水稻の生育初期では水田内水温は気温よりも数°C高温であり、出穂期前後になると植被の影響を受けて気温より低温になることを明らかにしている。本観測では、既往の報告と同様の傾向を確認することができた。また、7 月 31 日の観測結果では小排水路に流入する水田水尻の水温は小排水路水温と気温よりも低温であったことから、流下過程において気象との熱交換によって水温が上昇したことが示唆された。このことから、水田水尻の水温は水稻の生育状況に応じて気温との大小関係が変化するため、流下過程における水温変化が期別に異なることが示された。

次に、浸透水の流入による小排水路の水温変化を検討するため、図 6-9 に 2017 年 7 月 24 日から 8 月 23 日における浸透水、小排水路水温ならびに気温を示す。浸透水温は水温変動が非常に小さく、平均水温はおよそ 24.5°C程度であった。日平均気温と比較しても変動が非常に小さく、変動の幅は月平均気温と同程度であることが確認された。

また、小排水路水温の平均の日最高水温は 28.3°Cであり、浸透水温は日中において小排水路の水温よりも数°C程度低温であった。このことから浸透水の流入により小排水路水温が低下することが示唆された。小排水路に流入する浸透水と水田からの栽培管理用水の流入量は一定ではなく、農家の水管理によって変動するため、栽培管理用水(地表排水)と浸透水の流入比率の変動にともなって小排水路水温が変動することが示唆された。

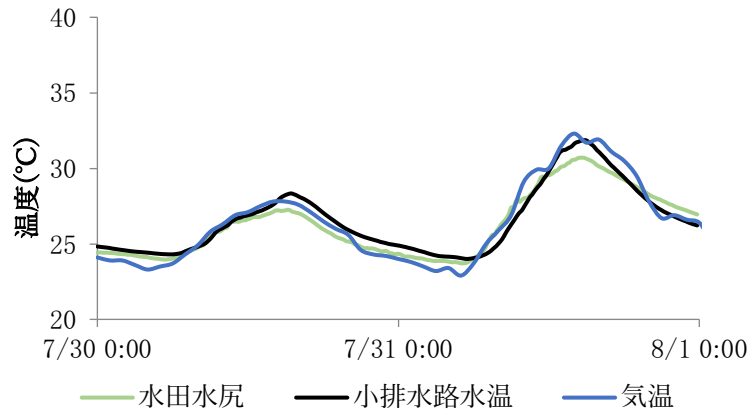


図 6-8 水田水尻・小排水路の水温と気温変化(2017年7月30～31日)

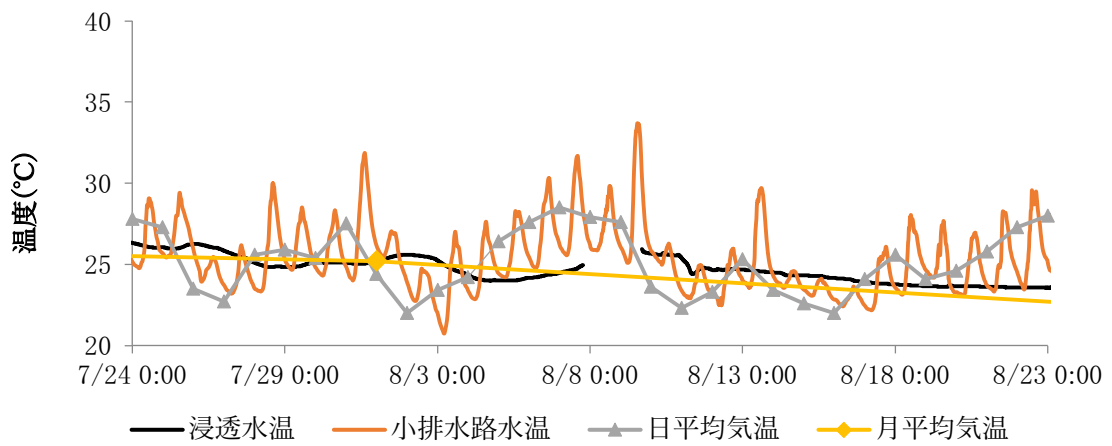


図 6-9 浸透水・小排水路の水温変化と平均気温 (2017年7月24日～8月22日)

6.3.2 排水路の流下過程における水温変化

6.3.2 (1) 出穂期前後における水温変化

本項では、小排水路から幹線排水路への流下過程における水温変化について検討をおこなった。2015年における出穂期以前の7月晴天日(7月13~15日)の小排水路、支線排水路、幹線排水路の日最高水温は、それぞれ32.3°C、32.2°C、30.1°Cであった(図6-10)。7月の晴天日では、最高気温は小排水路水温と同程度であったにも関わらず(図6-5)、排水路の流下過程で水温が低下した。支線排水路は小排水路と小用水路からの流入(配水管理用水)によって構成されている。そのため水温低下の要因を明らかにするために用水温についても検討した。用水温は、日中において小排水路水温よりも約5°C低温であった(図6-3)。5章で用いた河川水温予測モデル(近藤、1995)によって最も下流に位置しているBL8における小用水路末端までの水温変化を求めると、配水管理用水は日中において用水温よりも最大で約2°C程度高温であることが明らかになった(図6-11)。つまり、配水管理用水の温度は、流下過程の水温上昇を考慮しても小排水路の水温よりも低温であった。このことから、配水管理用水の流入により支線排水路の水温が低下することが示唆された。

谷口・佐藤(2006)は、灌漑取水量の内、配水管理用水が占める割合は20~35%であると報告した。この結果は、支線排水路の水温を変化させるために十分な配水管理用水が支線排水路に流入していることを示している。

一方、出穂期以後の8月晴天日(8月5~7日)における各排水路の日最高水温はそれぞれ32.0°C、32.8°C、31.1°Cであり、支線排水路の流下過程で水温が上昇した(図6-12)。支線排水路の流下過程では、最高水温は出穂期前では低下し、出穂期後には上昇したことが明らかになった。小排水路、支線排水路、幹線排水路の日最高水温と日最高気温の灌漑期間における回帰式の決定係数はそれぞれ、0.62、0.82、0.80であり、小排水路よりも支線排水路と幹線排水路の方が気温との相関が高くなった(表6-2)。

図6-13に2015年8月5日における各BLの配水管理用水の集中観測結果を示す。集中観測は午前10時ごろならびに午後4時ごろに2回実施された。午前の観測ではBL5、BL6、BL8の配水管理用水は30-32°C前後であった。一方、BL3ではおよそ33.5°Cであり、BL3の配水管理用水温は特に高温であった。また、午後の観測ではいずれのBLの配水管理用水も30-31°C前後であった。BL3、BL5は川通用水路から直接分水しているのに対し、BL6、BL8は五ヶ村用水路を經由

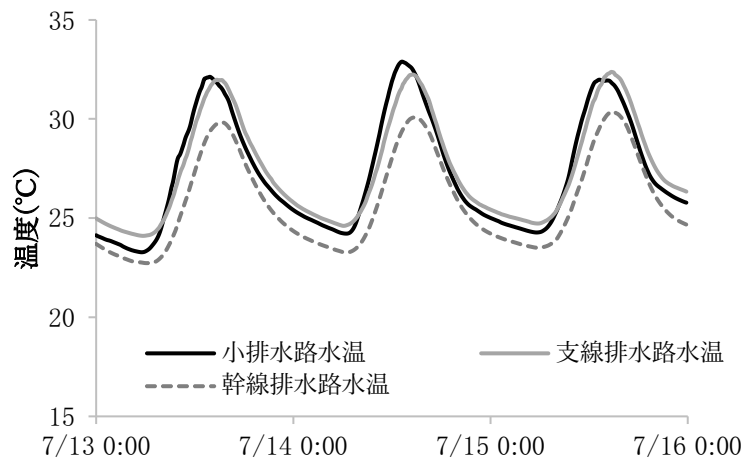


図 6-10 2015 年 7 月の晴天日(13~15 日)における各排水路の水温変化

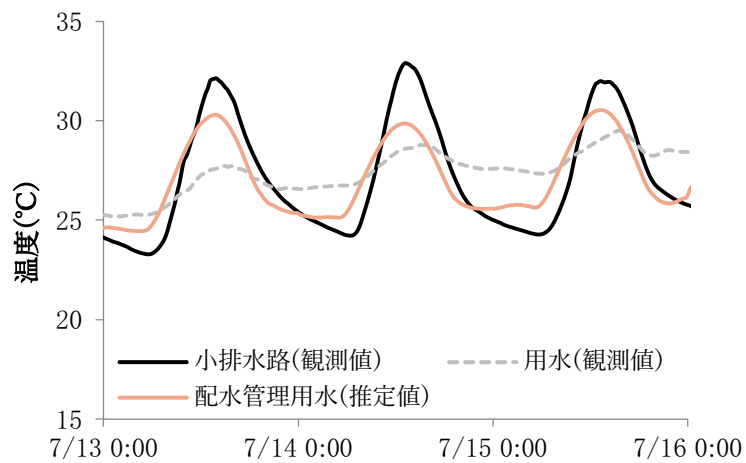


図 6-11 2015 年 7 月の晴天日(13~15 日)における小排水路・用水の温度変化

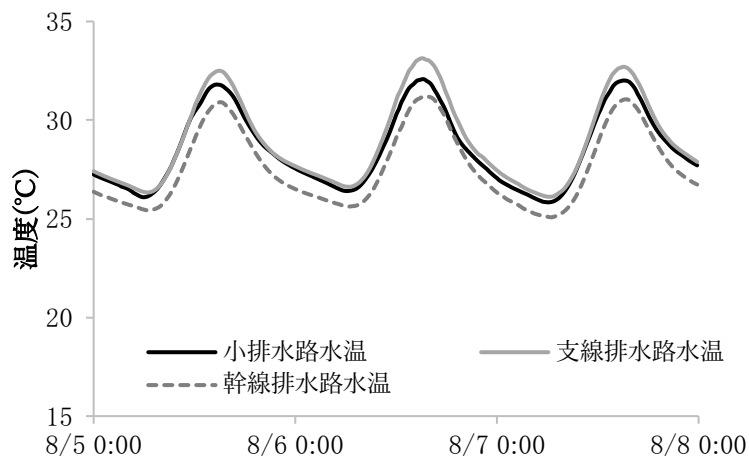


図 6-12 2015 年 8 月の晴天日(5~7 日)における各排水路の水温変化

表 6-2 最高気温と各水路の最高水温における回帰式の傾きと決定係数
 (※ ()内は決定係数を示す)

	小排水路	支線排水路	幹線排水路	幹線用水路
灌漑期間	0.66(0.62)	0.73(0.82)	0.69(0.80)	0.67(0.72)
5月	1.03(0.55)	0.90(0.63)	0.77(0.56)	0.31(0.30)
6月	0.98(0.55)	0.75(0.60)	0.74(0.71)	0.23(0.22)
7月	0.79(0.94)	0.85(0.96)	0.75(0.90)	0.59(0.69)
8月	0.57(0.74)	0.65(0.91)	0.73(0.76)	0.50(0.73)

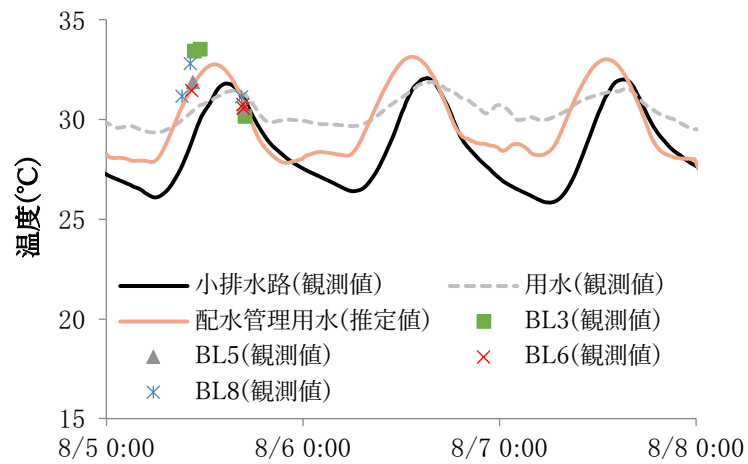


図 6-13 2015 年 8 月の晴天日(5~7 日)における小排水路・用水の温度変化

して用水が配分されている。BL5、BL6、BL8 の水温差は小さいため分水地点の違いによる水温差は小さいことが確認された。一方で、比較的流下経路の短いBL3において最も水温が高くなった。要因として、BLごとに水管理が異なるため、BL3の小用水路内の流速や水深が他のBLに比べて小さかったことが考えられる。このことから、流下距離よりも各BLにおける水管理の影響を受けて配水管理用水温が変動することが示唆された。BL8における配水管理用水の推定値と比較すると、BL3の観測結果よりも過小ではあるが他のBLの水温と同様の傾向を示し、幹線用水路との分水地点から小用水路の末端に至るまでに2°C程度水温が変動することが確認された。配水管理用水と小排水路の水温を比較すると、配水管理用水は日中において小排水路水温よりも高温であることが確認できる。このように、8月の晴天日では小排水路水温は気温ならびに用水温よりも低温であったため(図6-6)、気象との熱交換や配水管理用水の流入により流下過程で水温が上昇したと考えられる。

次に、7月、8月の晴天日における各排水路の最低水温の比較をおこなった。7月の晴天日における最低水温の平均は小排水路から順にそれぞれ23.9°C、24.5°C、23.2°Cであった(図6-10)。8月の晴天日における最低水温の平均値は小排水路から順に26.1°C、26.4°C、25.4°Cであった(図6-12)。7月、8月ともに支線排水路の最低水温は0.5°C程度小排水路よりも高く、幹線排水路の最低水温は支線排水路よりも1.0°C程度低かった。7月、8月の配水管理用水の推定値における最低水温は小排水路よりも高温であったことから、夜間においても配水管理用水によって小排水路よりも支線排水路の最低水温がわずかに高温になったと考えられる。同様に、幹線排水路は複数の支線排水路から水が合流したものであるため、最低水温は支線排水路と近い値を示すことが予想されるが、灌漑期間を通じて常におよそ1.0°C低温であった。このことから、低温な地下水の流入により幹線排水路の水温は支線排水路水温よりも低温であることが示唆された。

6.3.2 (1) 灌漑期間における水温変化の傾向

各地点の灌漑期における日最高気温と日最高水温の関係から、灌漑期における排水路の流下過程の水温変化について検討した。小排水路における5月から8月にかけての日最高気温と日最高水温の回帰線の傾きは、1.03、0.98、0.79、0.57であった(表6-2)。同様に、支線排水路と幹線排水路では8月の日最高気温と日最高水温の回帰式の勾配は、灌漑期間中において最も小さかった。一方、その傾

向は幹線用水路では観察されなかった。8月は、植被の影響により水田内水温は気温よりも低温になるため、この効果が支線排水路の流下過程においても持続したと考えられる(図6-8)。5月から8月の小排水路と気温における日最高温度の回帰直線の決定係数はそれぞれ、0.55、0.55、0.94、0.74であった。支線排水路の決定係数は4月から順に0.63、0.60、0.96、0.91であり、小排水路と同様に5月と6月は低く、7月は高かった。幹線排水路でも同様の傾向が確認された。5月と6月には、晴れた日でも最高気温が極端に上昇しなかったため、水温との相関は低くなったと考えられる。また、8月の最高気温と支線排水路の最高水温における決定係数は小排水路よりも大きかった。前述のように、7月から8月の間の支線排水路における最高気温の差は、小排水路よりも小さかった。このことから、気象条件との熱交換や配水管理用水の流入によって、水稻植被による水温上昇の抑制効果が徐々に逡減することが明らかになった。

6.4 本章のまとめ

本章では、福岡堰土地改良区受益地区において排水路の水温変化構造を明らかにするために水温観測を実施した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 小排水路の最高水温は8月以降逡減し、灌漑期間の日較差は5月から8月にかけて次第に小さくなった。このような水温変化は水田内の水温に関する既往研究の結果と一致することから、小排水路の水温は水田からの排水の影響を受けていることが示された。
- (2) 地表排水と浸透水の流入が小排水路水温に与える影響を明らかにするために、集中観測と定点観測を実施してそれぞれの水温を比較した。地表排水は小排水路上流の水温よりも高温であり、地表排水の流入により小排水路水温が上昇することが明らかになった。一方、浸透水は水田水尻、小排水路よりも日中は低温であるため、浸透水の流入によって小排水路水温が低下することが明らかになった。
- (3) 支線排水路の流下過程においては、水温は出穂期以前は低下し、出穂期以後は上昇していた。また、7月と8月における用水と各排水観測地点の水温には明らかな差がみられた。以上のことから、大気との熱交換、ならびに、配水管理用水としての用水の流入が発生することにより、植被による水田内の水温低下の影響が排水路の流下過程で次第に小さくなっていることが明

らかになった。また、幹線排水路の水温は期間を通じて支線排水路よりも常に低温であり、灌漑期間を通じて幹線排水路には低温な地下水が流入している可能性が示唆された。

- (4) 上記の結果から、小排水路ならびに支線排水路の流下過程では気象条件との熱交換の他に地表排水、浸透水、配水管理用水の流入によって水温変動することが明らかになった。それぞれの流入量は農家の水管理によって変動するため、排水路の水温変化を明らかにするには物理現象としての水温変化だけではなく農家の水管理の影響を考慮する必要があることが示唆された。

7. 排水路における水温予測モデルの構築

7.1 はじめに

6章では、現地観測結果をもとに各排水路における水温変化について解析をおこなった。その結果、気象との熱交換のほかに小排水路では水田からの地表排水(栽培管理用水)、浸透水、支線排水路では用水の落水(配水管理用水)、小排水路の流入によってそれぞれ水温が変化することが明らかになった。これらの流入水が各排水路へ流入する割合は農家の水管理によって変動するため、排水路の水温を予測するには水管理の影響を考慮する必要がある。

そこで、7章では小排水路、支線排水路それぞれにおいて農家の水管理を考慮した排水路の水温予測モデル構築を行い、その推定結果について論じる。

7.2 本章のまとめ

本章では、小排水路、支線用水路において河川水温予測モデル(近藤、1995)を適用し、推定精度の検証をおこない排水路の水温予測モデルの精度向上における課題を整理した。その結果、下記のことが明らかになった。

- (1) 小排水路にモデルを適用した結果、栽培管理用水と浸透水の流入比率によって推定精度に差があった。これは、小排水路の流下時間が非常に短く流入比率の違いによる水温差がモデルの推定結果に直接反映されたためである。また、推定精度の高い流入比は月毎に異なり、栽培管理用水と浸透水の流入比が変動していることが示唆された。
- (2) 各月における小排水路水温の推定精度が最も高い流入比を元に栽培管理用水と浸透水の流入量を推定した。栽培管理用水は灌漑後期に増加、浸透水は灌漑後期に減少し、既往の観測結果と異なる傾向を示した。要因として、中干しによって透水性が増加し、地下へ浸透した水田湛水が地中で熱交換せず小排水路に流出していたため、計算上では浸透水の流入量が減少したと考えられる。このように、浸透構造は期別によって変化し、小排水路に流入する浸透水温は地中での滞留時間によって異なることが示唆された。
- (3) 支線排水路にモデルを適用した結果、小排水路よりも全体の傾向としてそれぞれの流入比における推定結果の精度が高かった。また、小排水路の適用結果と同様に配水管理用水と小排水路からの流入比によって推定精度に差

が生じ、2つの流入を考慮することで推定精度が向上することが示唆された。推定精度の高い流入比は月毎に異なり、配水管理用水と小排水路の流入比が変動していた。

- (4) 各月における小排水路水温の推定精度が最も高い流入比を元に小排水路と配水管理用水の流入量を推定した。その結果、既存の観測結果よりも小さい値を示したものの、配水管理用水の期別の変動が一致していた。このことから、実際の流入量の変動を推定でき、支線排水路の水温推定に必要な配水管理用水と小排水路の各月における流入比率を得ることができた。

8. 水田地域内の水温予測モデルの構築

8.1 はじめに

5章、7章において各用水路、各排水路の流下過程における水温予測モデルの構築をおこなった。その結果、幹線用水路では用水路壁面との伝達熱を、排水路では流入水量ならびに流入水温を考慮することで水温を推定することができることが明らかになった。そこで、本章ではこれまで個別に推定した用水路、排水路の流下過程における水温予測モデルと組み合わせ、一支線用水路受益地区内の水温を一体として予測可能な水温予測モデルの構築し、その推定精度の検証をおこなった。また、一支線用水路受益地区内の水温予測モデルを組み合わせ、幹線排水路の水温予測モデルの構築し、その精度を検証することで水田地域全体の水温予測に必要な要素を明らかにした。

8.2 本章のまとめ

本章では、用水路と排水路における水温予測モデルを組み合わせ、一支線用水路受益地区内の水温予測モデルを構築した。また、一支線用水路受益地区内の水温予測モデルを組み合わせ、幹線排水路の水温を推定した。これらの推定精度を検証することで、水田地域内を一体として水温予測が可能な水田地域の水温予測モデルの構築に必要な要素について検討をおこなった。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 支線用水路受益地区内の水温予測モデルを構築し支線排水路末端の水温を推定した結果、4年間平均の流入比率を用いた場合と各年の流入比率を用いた場合ではおよそ0.1°C程度しか精度に差がなかった。このことから、平均割合を用いることで支線用水路受益地区内における小排水路、支線排水路の水温を推定可能であることが確認された。
- (2) 支線用水路受益地区内の水温予測モデルを組み合わせることで幹線排水路の水温を推定した。その結果、誤差1°C前後で水温を再現することができた。今回、地下水温を年平均気温から推定し、年較差を考慮していないため、今後地下水温を観測し年較差を考慮することで幹線排水路における水温の推定精度の向上が期待できる。

- (3) これまでのモデル構築ならびに推定精度を整理すると、水田地域内の水温変化を推定するには用水路では用水路壁面との伝達熱、排水路では各排水路にそれぞれ流入している水量とその水温を考慮する必要があることが明らかになった。また、排水路へ流入する水量は地域ごとに異なっており、また、流入水量を観測によって把握することは非常に困難である。そこで、地域ごとに水温観測点を各排水路に設けて水温をトレーサーとして各地域における流入水量を特定することで水田地域内の水温を予測することが可能であることが示唆された。

9. 総括

本研究では、幹線用水路・幹線排水路に囲まれた受益範囲を水田地域と定義し、用水、湛水、排水といった水動態に着目し、河川水が水田地域を通過すること、ならびに水田地域からの排水が河川に還元されることによって生じる水温変化の構造を観測によって明らかにした。さらに、観測結果をもとに既存の河川水温モデルを水田地域における一支線用水路受益地区内の用・排水路に適用し、その再現性を検討し改良を加えることで、水田地域全域の水温予測モデルの構築に必要な要素を示した。

水田地域を含む流域内での水温変化の構造を明らかにするため、河川ならびに水田地域において水温と流量の観測を行った。その結果、河川と用水路の流下過程において、水温上昇が確認された。一方、複数の水田地域内の用水と排水の温度を比較すると、8月の晴天日においていずれの地域も排水の方が用水よりも低温である傾向を示した。これは、水田ならびに排水路を流下する過程で水温が低下したためと考えられる。

農業用水の反復利用がおこなわれている区間では、8月の晴天日において上流水田地域の排水が河川に流入することで河川水温が低下し、下流水田地域の用水の温度が低く抑えられた。また、上流水田地域の取水量の増減によって河川流量が変化し、その結果として河川の流下過程での水温変化の度合いも異なることが示唆された。水田の影響がない河川流下では、一方的に水温は上昇するため下流ほど高温になる。一方、水田地域を含む流域では、用水が水田地域を通過し排水される過程で水温上昇が抑えられる。よって、水田地域を多く含む流域において水温変化を正確に予測するには、河川流下過程の水温上昇だけでなく、水田地域の灌漑と排水が水温に及ぼす影響を考慮する必要があることが示唆された。

そこで、水田地域内の水温予測モデルを構築するために、一つの水田地域内の用水路系に着目し、水温観測ならびに用水路に河川水温予測モデルを適用した。さらに、モデルに改良を加えることで用水路の水温予測モデルの構築をおこなった。その結果、幹線用水路の上流・中流区間、中流・下流区間ともに水温上昇していることが確認されたもの、水温変化の傾向が異なることが明らかになった。また、支線用水路、小用水路の流下過程では、水深が小さく、流速が遅いため、幹線用水路よりも単位時間、単位距離あたりの水温上昇が大きかった。

幹線用水路の上流・中流区間ならびに中流・下流区間、支線用水路において河

川水温予測モデルを適用すると、幹線用水路の上流・中流区間と支線用水路では水温が常に過小に推定され、中流・下流区間では最低水温は再現できたものの、最高水温は過大に推定された。モデルの推定精度は区間によって異なった。

次に、誤差要因を検討した結果、計算に用いた気象台の観測値と実際の気象条件の違いがモデル推定精度に与える影響は限定的であることが明らかになった。次に、用水路壁面温度が水温に与える影響を検討し、用水路壁面と用水が熱伝達していると仮定してモデルの計算をおこなうと幹線用水路の上流・中流区間と支線用水路において精度を向上させることができた。これにより、用水路では用水路壁面温度の影響を受けて水温が変動していることが示唆された。一方で、幹線用水路中流・下流区間では熱伝達を考慮した方が推定精度は低くなった。このことから、用水と用水路壁面との熱交換は用水路の流下過程における水深低下にともなって逡減することが示唆された。

また、排水路の水温変化については同一の水田地域内に重点観測水田区を設けて小排水路、支線排水路において水温観測を実施し、支線排水路に河川水温モデルを適用した。観測結果、小排水路の最高水温は8月以降逡減し、灌漑期間の日較差は5月から8月にかけて次第に小さくなった。こうした水温変化は水田内の水温に関する既往研究の結果と一致するため、小排水路の水温は水田からの排水の影響を受けていることが示唆された。

支線排水路においては、水温は出穂期以前は低下し、出穂期以後は上昇していた。また、7月と8月における用水と各排水観測地点の水温には明らかな差がみられたことから、大気との熱交換ならびに配水管理用水としての用水の流入が発生することにより、水田内で起きている水温変化の影響が排水路の流下過程で次第に小さくなっていることが明らかになった。

小排水路にモデルを適用した結果、栽培管理用水と浸透水の流入比率によって推定精度に差があった。これは、小排水路の流下時間が短く流入比率による水温差がモデルの推定結果に直接反映されたためである。また、推定精度の高い流入比は月毎に異なり、栽培管理用水と浸透水の流入比が変動していることが示唆された。また、支線排水路にモデルを適用した結果、小排水路よりも全体の傾向としてそれぞれの流入比における推定結果の精度が高かった。また、小排水路の適用結果と同様に配水管理用水と小排水路からの流入比によって推定精度に差が生じた。推定精度の高い流入比は月毎に異なり、配水管理用水と小排水路の流入比が変動していた。各月における支線排水路水温の推定精度が最も高い流

入比を元に小排水路と配水管理用水の流入量を推定した結果、配水管理用水の期別の変動を再現することができた。これにより、支線排水路の水温推定に必要な配水管理用水と小排水路の各月における流入比率を得ることができた。

用水路、排水路の水温予測モデルを組み合わせて支線用水路受益地区内の水温を一体として予測可能な水温モデルを構築した。支線排水路末端の水温を推定した結果、4年間平均の流入比率を用いた場合と各年の流入比率を用いた場合ではおよそ 0.1°C 程度しか精度に差がなかった。このことから、平均割合を用いることで支線用水路受益地区内における小排水路、支線排水路の水温を推定可能であることが確認された。

さらに、支線用水路受益地区内の水温予測モデルを組み合わせることで幹線排水路の水温を推定した。その結果、誤差 1°C 前後で水温を再現することができた。今回、地下水温を年平均気温から推定し、年較差を考慮していないため、今後地下水温を観測し年較差を考慮することで幹線排水路における水温の推定精度の向上が期待できる。

これまでのモデル構築ならびに推定精度を整理すると、水田地域内の水温変化を推定するには用水路では用水路壁面との伝達熱、排水路では各排水路にそれぞれ流入している水量とその水温を考慮する必要があることが明らかになった。また、排水路へ流入する水量は地域ごとに異なっており、また、流入水量を観測によって把握することは非常に困難である。そこで、地域ごとに水温観測点を各排水路に設けて水温をトレーサーとして各地域における流入水量を特定することで水田地域内の水温を予測することが可能であることが示唆された。

また、今後の展望として水田地域内の水温予測モデルを利用することで、圃場整備などにともなう水管理の変化が水田地域内の水温変化に与える影響の検討が期待できる。

引用文献

- 1) 新井涼允, 糠澤 桂, 風間聡, 竹門康弘 (2014): 水温環境の変化に伴う源流域における底生動物群集の将来変化. 土木学会論文集 B1(水工学), **70**(4), I_1303-I_1308.
- 2) Erbs DG, Klein SA, Duffie DA (1982): Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly-Average Global Radiation. *Solar Energy*, **28**(4), 293-302.
- 3) 江崎要, 竹中肇, 大塚嘉一郎, 丸山利輔, 渡辺紹裕, 堤聡 (1984): パイプライン系水田における水管理の特性. 農業土木学会誌, **52**(11), 999-1005.
- 4) Fukuda S, Huy TQ, Cuong PV, Araki T, Hai DN, Tra HTL, Mori Y, Shimasaki Y, Matsumoto M, Cuong HV, Kurosawa K (2007): Sensitivity analysis on the daily water temperature model for paddy fields in Red River Delta, Vietnam. *Bulletin of the Institute of Tropical Agriculture, Kyusyu University*, **30**(1), 67-81.
- 5) 市村一男 (1965): 水稻植被が水田の水温較差におよぼす影響. 農業気象, **20**(4), 155-159.
- 6) 井関農機株式会社 (2013): コシヒカリ栽培歴(茨城県全域 37 株植). <<http://www.iseki.co.jp/farmiland/soshoku/koyomi/ibaraki-koshihikari.pdf>> (2017/10/20 確認).
- 7) 一色尚次, 北山直方 (1971): 最新機械工学シリーズ 7 伝熱工学. 森北出版株式会社, 68.
- 8) 岩切敏 (1964): 水稻植被の繁茂にともなう水面熱収支特性の変化について. 農業気象, **19**(3), 89-95.
- 9) Jakob M (1949): *Heat transfer*, v.2., John Wiley, 522-542.
- 10) 河川法研究会 (2006): 改訂版 河川法解説. 大成出版, 9-14.
- 11) 関東農政局利根川水系農業水利調査事務所 (1978): 農業用水実態調査成績書 利根川水系(ブロック別)編. 68-74.
- 12) 木村匡臣, 飯田俊彰, 光安麻里恵, 久保成隆 (2013): 掛流し灌漑による高温障害対策時の用排兼用水路の水温形成, 農業農村工学会誌, **81**(4), 289-292.
- 13) 国土交通省 (2017): 平成 29 年版 土地白書.
< <http://www.mlit.go.jp/statistics/file000006.html> > (2017/11/10 確認)
- 14) 国土交通省河川局 (2006): 地域の水環境の改善を目指した「まちの清流」

の再生(環境用水(※))に係る水利使用許可の取扱い基準の策定)。

<http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kankyo/press/200601_06/060320/index.html> (2017/11/10 確認)

- 15) 近藤純正 (1995): 河川水温の日変化 (1) 計算モデル: 異常昇温と魚の大量死事件. 水文・水資源学会誌, **8**(2), 184-196.
- 16) 近藤純正 (2000): 地表面に近い大気の科学. 東京大学出版会, 140-145.
- 17) Kondo J, Watanabe Y (1992): Studies on the bulk transfer coefficients over a vegetated surface with a multilayer energy budget model. *Journal of Atmospheric Sciences*, **49**, 2183-2199.
- 18) Kuwagata T, Hamasaki T, Watanabe T (2008): Modeling water temperature in a rice paddy for agro-environmental research. *Agricultural and Forest Meteorology*, **148**, 1754-1766.
- 19) Liu BYH and Jordan RC (1963): A rational procedure for predicting the long term average performance of flat-plate solar energy collectors. *Solar Energy*, **7**(2), 53-74.
- 20) 丸山利輔 (1966): 暗キヨ排水に伴う土壌透水性の変化. 農業土木学会論文集, 16, 9-13.
- 21) 松優男, 秋山道雄 (2012): 環境用水導水の成立要因 先行事例地区の分析を中心に. 水資源・環境研究, **25**(2), 76-87.
- 22) 松林周磨, 吉田貢士, 塩沢昌, 友正 達美, 山下正 (2013): 水管理に伴う熱移動を考慮した水田内温度予測モデルの構築. 農業農村工学会誌, **81**(3), 215-221.
- 23) 宮本硬一 (1958): 水稻の生育及収量と水温との関係についての現地調査. 農業気象, **13**(4), 147-152.
- 24) 村上成一, 栗田亘 (1969): 温水路の水温調査について-長野県千ヶ滝地区-. 農業土木学会誌, **37**(7), 477-480.
- 25) 村下敏夫 (1968): 地下水の温度. 工業用水, **118**, 51-58.
- 26) 永畠秀樹, 中村啓二, 猪野雅哉, 黒田晃, 橋本良一 (2005): 高温登熟条件下における乳白粒および胴割粒の発生軽減技術. 石川県農業総合研究センター研究報告, **26**, 1-19.
- 27) 中田和義 (2007): ザリガニ類の保全および増殖に関する研究. 日本水産学会誌, **73**(4), 664-667.

- 28) 西田和弘, 宇尾卓也, 吉田修一郎, 塚口直史 (2013): 夜間掛流し灌漑による水田水温と葉温低下. 水土の知(農業農村工学会誌), **81**(4), 31-34.
- 29) 農林水産省 (2004a): 環境との調和に配慮した事業実施のための調査計画・設計の手引き 1-基本的な考え方・水路整備-. 農業土木学会.
- 30) 農林水産省 (2004b): 環境との調和に配慮した事業実施のための調査計画・設計の手引き 2-ため池整備 農道整備 移入種-. 農業土木学会.
- 31) 農林水産省 (2004c): 環境との調和に配慮した事業実施のための調査計画・設計の手引き 3-ほ場整備(水田・畑)-. 農業土木学会.
- 32) 農林水産省 (2006): 水田生態系の保全技術.
< http://www.maff.go.jp/j/nousin/kankyo/kankyo_hozen/k_gaido/> (2017/11/10 確認)
- 33) 農林水産省 (2010): 平成 22 年度高温適応技術レポート. 6-9.
- 34) 農林水産省 (2017): 農林水産統計.
<<http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/menseki/attach/pdf/index-16.pdf>> (2017/11/10 確認)
- 35) Ohta S, Kimura A (2009): The effects of plant growth on the temperature of paddy waters. *Journal of Agricultural Meteorology*, **65**(2), 167-178.
- 36) 大上藍, 紙井泰典 (2002): 水田の水・熱収支に関する調査研究. 高知大学学術研究報告, 農学 **51**, 45-76.
- 37) 大塚直輝, 坂田賢 (2013): パイプラインを利用した夜間灌漑実証試験. 水土の知(農業農村工学会誌), **81**(4), 35-38.
- 38) Raney FC, Hagan RM, Finfrock DC (1957): Water temperature in irrigation. *California Agriculture*, **11**(4), 19-20.
- 39) 佐渡公明 (1983): 河川水の水熱収支に関する基礎的研究. 土木学会論文報告集, **330**, 69-79.
- 40) 坂田賢, 友正達美, 内村求 (2012): 宮城県南東部における高気温下での出穂期以降の水温環境. 応用水文, **24**, 21-29.
- 41) 左村公, 中村好男 (2005): 冷水温下にある水田灌漑地区での水管理と圃場の水環境. 農業土木学会誌, **73**(4), 273-276.
- 42) 佐々木修 (1992): 高水温が水稻の葉と冠根の形態におよぼす影響. 日本作物学会紀事, **61**(3), 388-393.
- 43) 佐藤政良 (2002): 鬼怒川・小貝川 水と暮らし. 高田印刷, 75.

- 44) 関根雅彦, 後藤益滋, 伊藤信行, 田中浩二, 金尾充浩, 井上倫道 (2007): 息場評価手法を用いたホタル水路の建設. 応用生態工学, **10**(2), 103-116.
- 45) Stefan HG, Preud'homme EB (1993): Stream temperature estimation from air temperature. *Water Resource. Res.* , **29** (1), 27-45.
- 46) Sugiyama S, Hama T, Osuga K, Iwasaki D (2013): Clarification of temporal variations in water temperature of drainage canals in a paddy-field district implementing cyclic irrigation. *Journal of Water and Environment Technology*, **11**(3), 197-207.
- 47) 谷口智之, 佐藤政良 (2006): 灌漑用水の安定性が末端水田地区における用水の配分と利用に与える影響. 農業土木学会論文集, **246**, 825-831.
- 48) 豊田勝, 鈴木光剛, 西出勤, 四方田穆 (1984): 開水路系水田における水管理の特性. 農業土木学会誌, **52**(11), 991-998.
- 49) 内島善兵衛, 大沼一已 (1961): 迂回温水路の熱収支特性について, 農業気象. **17**(1), 1-8.
- 50) 渡辺二郎, 宮腰金作, 中本憲治, 石川尚, 藤田弘志 (1973): 大野川幹線温水路の設計概要と水温上昇度について. 農業土木学会誌, **41**(9), 609-613.
- 51) 渡邊朋也 (2012): 農業生産への気候変動の影響はどの程度か? どう対応するか? 農林水産業は気候変動にどう対応するか? 農林水産省委託プロジェクト研究「気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のための技術開発」研究成果発表会要旨集, 11-16.
- 52) 渡辺紹裕, 丸山利輔, 三野徹 (1988): 栽培管理用水量の実態と推定について:水田圃場の用水需要に関する実証的研究 (III). 農業土木学会論文集, **135**, 9-15.
- 53) Webb BW, Zhang Y (1997): Spatial and seasonal variability in the components of the river heat budget. *Hydrological Processes*, **11**, 79-101.
- 54) 八鍬功 (1962): 河流の流体力学的特性と水温日変化との関係について. 北海道大學工学部研究報告, **30**, 153-220.
- 55) 山辺功二 (1970): 山地河川の流水水温について, 水温の研究, **14**(3.2), 42-47.
- 56) 山本莊毅 (1983): 新版 地下水調査法. 株式会社 古今書院, 354-367.
- 57) 山岸淳, 橋爪厚 (1974): 水田の緑藻類の生態と防除に関する 2,3 の知見. 雑草研究, **18**, 39-43.
- 58) Yoshida K, Azechi I, Kuroda H (2013): Application of two layer heat balance model for calculation of paddy thermal condition. *Journal of Japan Society of Civil*

Engineers series. Hydraulic Engineering, **69**(4), I_139-I_144.

- 59) 吉田貢士, 宗村広昭, 樋口克宏, 戸田修, 丹治肇 (2005): 河畔林密度の違いが河川水温環境に与える影響について. 水工学論文集, **49**(1), 1543-1548.
- 60) 全国土地改良事業団体連合会 (1965): 土地改良法解説. 一世印刷株式会社, 21.

謝辞

本研究を実施するにあたり、指導教員の石井敦教授には、研究や論文の書き方についてご相談に乗っていただき、大変お世話になりました。教員として時に優しく、研究者として時に厳しくご指導をいただき、本研究に限ることに関することに限らず大学卒業後の研究者としての在り方についても指針を与えていただきました。また、九州大学の谷口智之助教の存在がなければ、この論文も研究も完成することが出来ませんでした。谷口助教には研究室に配属されてから6年に渡って現地観測のノウハウからデータ解析に至るまで根気よくご指導いただきました。お二方から数年に渡り多大なるご支援を賜り、衷心より御礼申し上げます。

さらに、本研究は国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究部門 連携大学院 増本隆夫教授、樽屋啓之教授からご指導をいただきました。お二方のご指摘によって自覚していなかった課題などに気付くが出来、研究のより深い部分まで考察をおこなうことが出来ました。心より感謝いたします。農村工学研究部門 気候変動定例研究会の皆様には、様々なご助言をいただきました。特に、北川巖博士、土原健雄博士、白旗克志主任研究員には浸透水の観測の相談やアドバイスをいただき、1年と短い期間ながらも研究に必要なデータを得ることが出来ました。また、吉田武郎博士、皆川裕樹博士には、五行川での現地調査にご同行させていただき、調査のノウハウを教えていただいたほかに、モデルについてご相談に乗っていただきました。坂田賢博士には、近い分野で研究をおこなっていたため、研究会を通じてたくさんのご指摘をいただくだけでなく、坂田博士の研究会や学会での発表によりたくさん刺激をいただきました。研究だけではなく進路のご相談まで乗っていただきました。こうした皆様アドバイスを解析や調査に反映させることで、より研究をおこなうことが出来ました。本当にありがとうございました。

本研究の観測を実施するにあたり、国土交通省地方整備局下館河川事務所、栃木県・茨城県の土木事務所、関連土地改良区、今市発電管理事務所の皆様にご協力いただきました。調査へのご協力を快諾してくださり、誠にありがとうございました。

水資源環境工学研究室に在籍していた先輩や同期、先に卒業して行った後輩たち、現在在籍している皆さまには調査の手伝いや車出し、論文の添削やスラ

イドの作成など研究に関してご支援を受けました。特に、同期の奥谷貴大さん、竹内夏希さん、後輩の高達良典さん、島田実禄さん、安立麻莉さん、清水結衣さんには調査に何度付き合っていたいただき、さらに、私生活の面でも支えていただきました。この場をお借りしてお礼を申し上げます。

博士後期課程と一緒に進学した杉本卓也さん、経隆悠さん、水落裕樹さんの3人の同期の存在は非常にありがたく、研究のモチベーションにつながりました。頭の片隅では常に3人を意識しており、3人と肩を並べられるような立派な研究者になりたいと意欲的に研究に取り組むことが出来ました。今後の研究生活においても3人の存在は目標でありライバルで在り続けます。素敵な同期に恵まれて私は本当に幸せでした。また、内海真生准教授には筑波大学入学当初からクラス担任、コース担任としてだけでなく特別研究員の申請書の添削に至るまでご支援とご指導いただきました。内海准教授の授業で博士課程への進学のきっかけをいただきました。本当にありがとうございました。

なお、本研究はJSPS 科研費 JP16J00747 の助成を受けて実施されました。最後に、特に何の相談もなく博士課程へ進学したにも関わらず、英文の添削や私生活の支援を厚くしていただいた家族の皆様に深く感謝の言葉を申し上げます。

研究で関わった皆様に改めて深く感謝いたします。本当にありがとうございました。