

広幅水路における水温モデルの作成と各種気象条件下での水温上昇機能推定

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 水利基盤チーム
(独) 土木研究所 寒地土木研究所 水利基盤チーム
函館開発建設部函館農業事務所第2工事課

○酒井 美樹
伊藤 暢男
小野 隆司

将来の気候変動下では、渇水年の発生頻度の高まる可能性があるため、節水が必要な条件下でも水田水温を確保できる水管理を検討しておく必要がある。本研究では、水源から圃場内にいたる水温のモデル化の一環として、水温上昇施設である広幅水路の水温をモデル化し、各種気象条件下での水温上昇機能を推定した。水温上昇は、晴天日や、曇天でも高温の日には約3℃が見込めるが、曇天・低温日にはわずかであることがわかった。

キーワード：基礎理論、水温モデル、水温上昇施設、冷害

1. はじめに

食料・農業・農村基本計画や農林水産研究基本計画（いずれも平成22年3月）では、気候変動が水資源の利用に与える影響評価が喫緊の課題であると位置づけられている。

北海道のような積雪寒冷地では融雪水が重要な水資源であるが、気候変動によって融雪時間の早期化¹⁾が予測されており、農業用水は渇水傾向が強まることが考えられる。また、北海道においては、温暖化によって水稻の生育が早まり、冷害危険期の暦日が早期化し、低温との遭遇による障害型冷害発生の可能性は今後も継続する²⁾と言われており、将来に気温が上昇したとしても冷害の可能性がなくなるわけではない。冷害対策として、農家は水田内の水温上昇を確保するために、早朝取水や夜間取水を現在でも励行しているが、先に述べたように、将来の気候変動下で渇水傾向が強まると取水時間帯の自由度が小さくなり、年によって早朝取水や夜間取水を選べない期間が発生することが考えられる。

そのため、将来の灌漑システムには、冷害対策に必要な深水灌漑用水の確保とともに、水田の水温の確保に有利な送配水管理技術などが求められる。送配水管理技術

を具体化するためには、取水の時間帯によって水田での水温にどのような影響が出るのか、どれだけ湛水深を保持必要があるのか、節水が必要な条件下でも水温上昇施設が機能するのか、などを明らかにする必要がある。

本研究では、水源から圃場内にいたる用水の流下経路における水温のモデル化の一環として、水温上昇施設（以下「広幅水路」とする）の水温モデルを作成・検証した。その水温モデルでシミュレーションを行い、各種気象条件下での広幅水路の機能を推定した。

2. 研究方法

(1) 広幅水路の概要

水温モデルの適用対象施設は、北海道内にある、総延長約1.2km、水路幅10m~40m、水路高0.6mで18箇所落差工を有する頭首工直下の広幅水路である。この広幅水路は、用水路の幅を広げること、すなわち受熱面積を大きくし、流速を下げることで、灌漑用水の水温上昇を図っている。

本研究では、図-1に示す5地点において、平成22年から平成24年の3カ年の灌漑期間に水温を観測した。観測

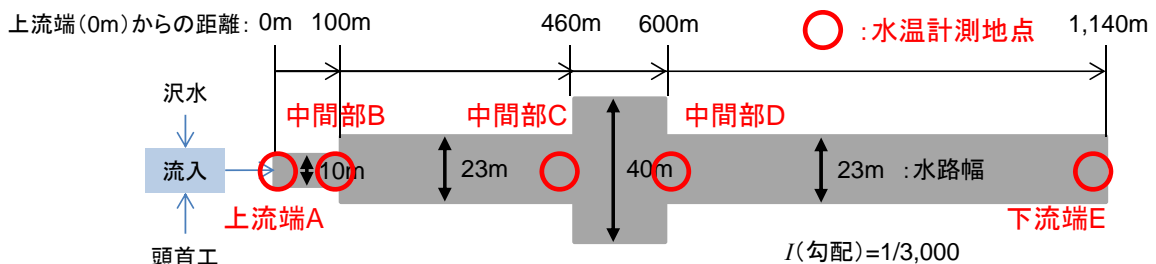


図-1 広幅水路での水温観測位置

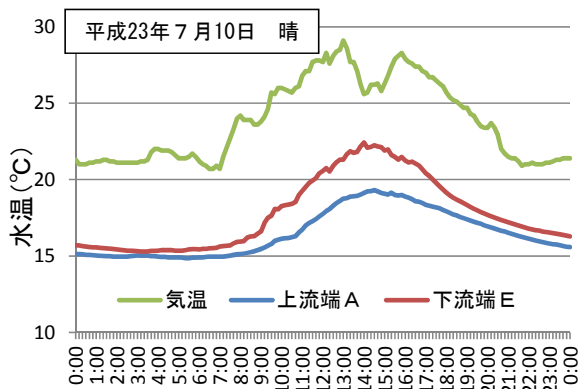


図-2 広幅水路の1日の水温変化

例として、晴天日の広幅水路上流端Aおよび下流端Eにおける実測水温を図-2に示す。広幅水路区間における水温上昇は、夜間にはわずかであるが、昼間には2~3℃に達した。最も水温上昇が大きい時刻は14時ころであった。

(2) 広幅水路の水温モデルの作成

水温モデルは、流量が比較的安定している状態における広幅水路内の水温毎時変化を表せるものとする。

モデルの入力値は、①広幅水路への流入水温、②広幅水路流入量、③気象データ（気温、湿度、全天日射、風速等）とする。

(3) 広幅水路の水温モデルの検証

水温モデルの検証は、観測期間のうち、前日と当日の流量が同じ値で雨量が0mmの日を選定して行った。各実測データとして、①流入水温は上流端Aの水温、②流入量は水路幅10m区間で観測した水深から算出した流量、③気象データは近傍のアメダス等から入手したものを用いて、広幅水路の中間部B、C、Dと下流端Eでの毎時の水温を算出し、実測水温と比較して推定精度を評価した。

(4) 各種気象条件下での広幅水路の機能推定

異なる気象条件を、表-1に示すとおり、I晴天・高温日、II晴天・低温日、III曇天・高温日、IV曇天・低温日の4パターンを設定し、過去5年間（平成20年～平成24年）の6月、7月、8月の各月から1ケースずつ抽出した。これらを水温モデルに③気象データとして入力して、広幅水路の下流端Eの水温毎時変化を推定した。

他の入力値として、①流入水温は、観測した全期間を通して、前日と当日の雨量が0mmであった日の上流端Aの平均水温、②流入量は観測した水深から算出した平均流量、を計算条件とした。

3. 結果と考察

(1) 広幅水路における水温モデル

水温モデルの式は、既往文献³⁾や成書⁴⁾を参考に次のようなものとした。

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} + v \frac{\partial T_w}{\partial x} = \frac{R_n - H - LE}{\rho_w c_w D}$$

ここで、 T_w :水温(°C)、 v :流速(m/s)、 R_n :純放射(W/m²)、 H :顕熱フラックス(W/m²)、 LE :潜熱フラックス(W/m²)、 ρ_w :水の密度(kg/m³)、 c_w :水の比熱(J/(kg·K))、 D :水理学的水深(m)

D （水理学的水深）は Manning式から求めた。また純放射、顕熱、潜熱はそれぞれ次の式で算出した。

$$R_n = (1 - \alpha)S - \epsilon \sigma T_w^4 + L \downarrow$$

ここで、 α :アルベド、 S :日射量(W/m²)、 ϵ :射出率、 σ :Stefan-Boltzmann定数(5.67×10⁻⁸W/(m²·K⁴))、 $L \downarrow$:下向き長波放射(W/m²)

表-1 各種気象条件の選定

| パターン | 気象条件 | 年月日 | 気象台天気 | | アメダス | | | | |
|------|--------|------------|-----------------|------------------|--------------|--------|------|---------------|-------------|
| | | | 昼 6:00-18:00 | 夜 18:00-翌6:00 | 日降水量 (mm) | 気温(°C) | | 平均風速 (m/s) | 日照時間 (h) |
| | | | | | | 平均 | 最高 | | |
| I | 晴天・高温日 | 平成21年6月27日 | 晴 | 晴 | 0.0 | 21.0 | 27.2 | 1.9 | 12.6 |
| | | 平成24年7月18日 | 晴 | 晴 | 0.0 | 21.8 | 28.5 | 2.2 | 13.7 |
| | | 平成23年8月12日 | 晴 | 快晴 | 0.0 | 24.0 | 29.3 | 2.0 | 11.2 |
| II | 晴天・低温日 | 平成22年6月5日 | 晴 | 快晴 | 0.0 | 13.1 | 18.1 | 2.1 | 13.3 |
| | | 平成20年7月1日 | 快晴 | 快晴 | 0.0 | 16.6 | 23.6 | 1.8 | 13.3 |
| | | 平成20年8月11日 | 晴 | 晴 | 0.0 | 20.1 | 25.6 | 1.6 | 10.7 |
| III | 曇天・高温日 | 平成22年6月27日 | 曇 | 曇 | 0.0 | 22.1 | 27.3 | 1.2 | 2.3 |
| | | 平成23年7月27日 | 曇 | 曇 | 0.0 | 23.2 | 27.4 | 1.3 | 2.9 |
| | | 平成20年8月13日 | 曇 | 曇 | 0.0 | 22.2 | 28.7 | 2.4 | 4.4 |
| IV | 曇天・低温日 | 平成21年6月15日 | 曇 | 曇 | 0.0 | 12.6 | 14.6 | 1.3 | 0.0 |
| | | 平成21年7月4日 | 曇 | 曇 | 0.0 | 17.7 | 22.9 | 2.3 | 0.8 |
| | | 平成24年8月4日 | 曇 | 曇 | 0.0 | 20.1 | 22.6 | 1.9 | 0.0 |

$$H = c_p \rho_a C_H U (T_w - T_a)$$

ここで、 c_p :空気の定圧比熱(J/kg・K)、 ρ_a :空気の密度(kg/m³)、 C_H :顕熱のバルク輸送係数、 U :風速(m/s)、 T_a :気温(°C)

$$IE = l \rho_a C_E U (q_w - q_a)$$

ここで、 l :水の気化の潜熱(J/kg)、 C_E :潜熱のバルク輸送係数、 q_w :水面の比湿(kg/kg)、 q_a :空気の比湿(kg/kg)

なお、設計基準⁵⁾にも水温変化を求める方法が示されている。しかしその方法は「水温上昇度の推定は日平均・旬平均などのある程度長い期間の平均上昇度を求める場合にのみ正しい」とされており、本研究の水温毎時変化を求める場合とは、算出における条件が異なる。このため設計基準に示されている算出方法は採用しなかった。

(2) 広幅水路の水温モデルの検証

検証結果の一例として、水温モデルで算出した水温と実測水温の毎時変化を図-3に示す。

広幅水路の各地点において、実測水温と近い水温変化を水温モデルによって再現することができた。

(3) 各種気象条件下での広幅水路の機能推定

各種気象条件における広幅水路下流端での水温推定結

果を図-4に示す。昼間において、下流端Eの水温は、IV曇天・低温日を除いては上流端Aよりも明らかに上昇していることがわかる。一方、1時~5時までの水温に着目すると、6月と7月のII晴天・低温日は上流端Aよりも下流端Eが低くなる結果となった。この2ケースは水温と気温の差が小さいことが他ケースとは異なっており、水

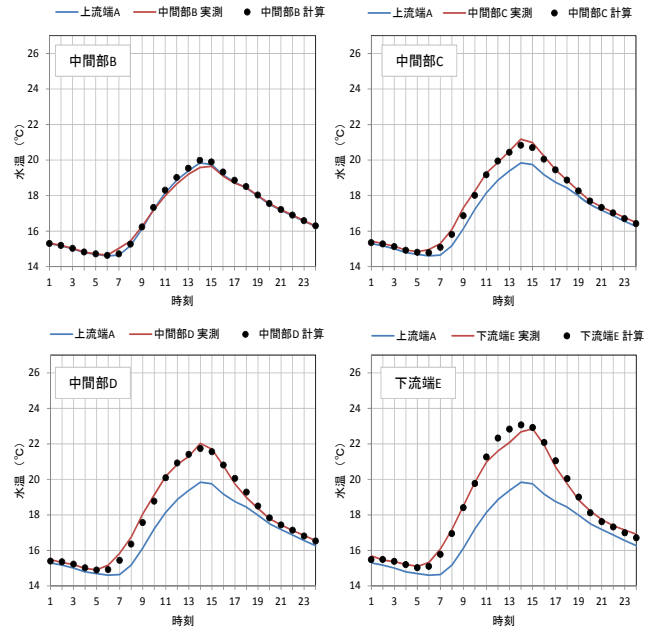


図-3 モデルの検証 (平成23年7月12日)

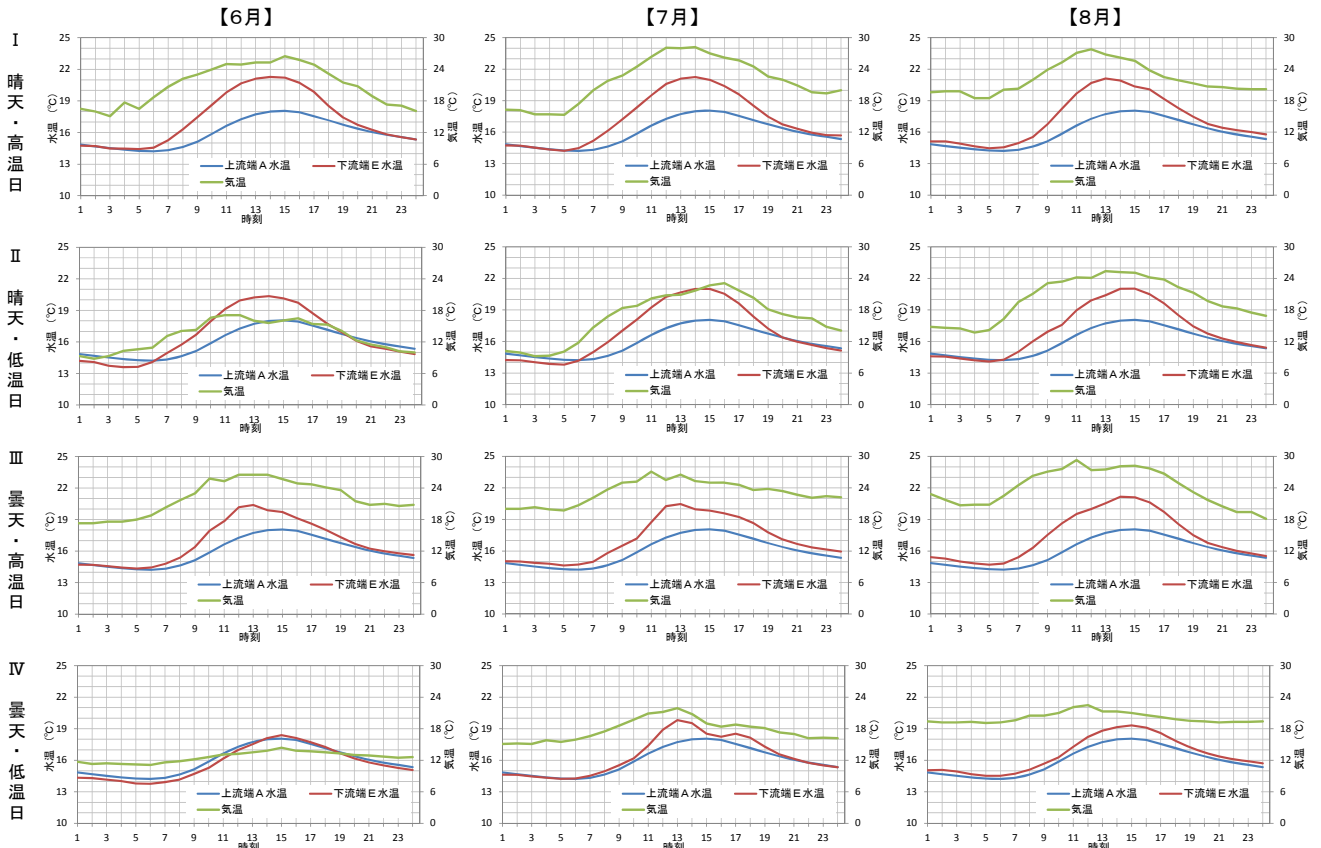


図-4 各種気象条件における広幅水路下流端での水温推定結果

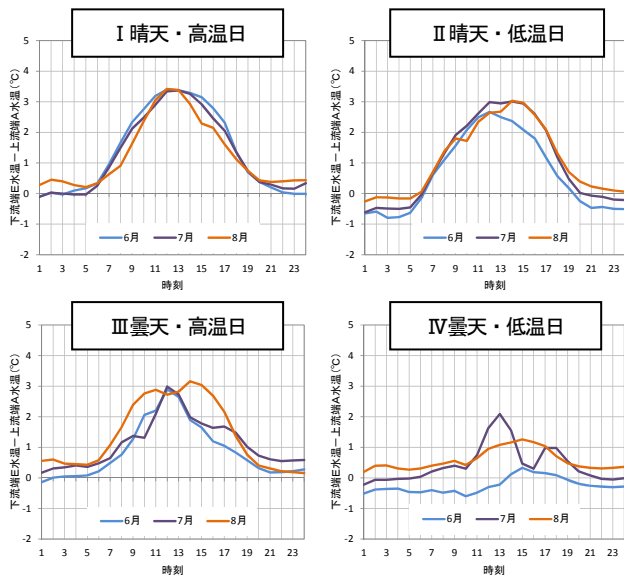


図-5 各気象条件における水温上昇の度合

面から大気に向かう放射量が大きくなったこと（放射冷却現象）により、水温が低下したものと考えられる。

次に、各気象条件下で上流端Aから下流端Eにかけての水温上昇の度合いを図-5に示す。I 晴天・高温日が最も大きく3°Cを超える水温上昇を示した。II 晴天・低温日、III 曇天・高温日でも3°C程度の水温上昇を示した。ただし、II 晴天・低温日では、先に述べた放射冷却現象により、夜間から早朝の水温上昇効果は期待できない。IV 曇天・低温日での水温上昇はわずかであった。

4. まとめ

本研究では、水温上昇施設（広幅水路）における水温モデルを作成・検証した。さらに、その水温モデルでシミュレーションを行い、各種気象条件下での広幅水路の機能を推定した。

水温モデルの作成・検証では、既存報文や成書を参考とした水温モデルを検証し、広幅水路の水温の毎時変化を精度良く再現していることを確認した。各種気象条件下での広幅水路の機能推定では、晴天日や、曇天でも高温の日には約3°Cが見込めるが、曇天・低温日にはわずかであることがわかった。

今後は、水源から圃場内にいたる灌漑システム全体での水温のモデル化を進め、気候変動下でも水源量の管理と適切な配水管理による用水の安定供給や水温の確保が可能な農業用水管理技術を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 文部科学省・経済産業省・気象庁・環境省：IPCC 第4次評価報告書政策決定者向け要約、p.2、2007、（オンライン）、入手先<<http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/>>
- 2) 北海道立総合研究機構農業研究本部中央農業試験場：北海道総合研究機構農業試験場資料第39号、p.15、2011.
- 3) 光安麻理恵・木村匡臣・飯田俊彰・西田和弘：用排兼用利用される用水路の水温変動に関する研究(II)、農業農村工学会大会講演会講演要旨集、p.262、2012.
- 4) 近藤純正：水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—、(株)朝倉書店、p.133、1996.
- 5) 農林省農地局：土地改良事業計画設計基準第2部計画第1編カンガイ第5章水温水質、p.26、1967.