本明川延伸区間における夏季の 水温変化とその数値解析

WATER TEMPERATURE CHANGES AT HONMYO RIVER IN SUMMER AND ITS NUMERICAL SIMULATION

西田 渉¹・鈴木誠二²

Wataru NISHIDA and Seiji SUZUKI

¹正会員 博士(工) 長崎大学准教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14)

²正会員 博士(工) 長崎大学助教 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14)

Temporal and spatial variation of water temperature has predominant effects on physical transport processes and biological and chemical transformations of substances in water area. Consequently, adequate understanding of water temperature changes is important facet of water quality management.

In this study, field observations were carried out at the downstream reach of Honmyo River located at northern part of Isahaya Regulation pond. Furthermore numerical model for simulating water temperature changes was proposed and applied to this water area. Observed results show that thermal stratification is diurnally developed during dry weather condition. Redevelopment of the stratification after its dissipation due to the inflow of flood is subjected to temporal variation of wind speed. Although there is a room to tune the model parameters, proposed model simulates the observed results with acceptable error. Computed results show that thermal stratification is developed in all computed region. During the redevelopment of stratification, it takes a few days to raise water temperature in deeper layers.

Key Words : *water temperature, stratification, field observation, numerical simulation model, Honmyo River*

1. はじめに

水域における水温の時空間変化は、成層の形成要因や生物活動の制限因子となり、水域内部の物質循環に物理学的、生物学的等の側面から影響を与えることから、水環境の変化機構を明らかにする上で水温変化の把握が欠かせない。本研究で対象とする本明川延伸区間は、2008(平成20)年の延伸告示によって一級河川本明川の河道に指定された区間であり、諫早湾干拓調整池の北部承水路に相当する。そのため、当区間のとくに下流側の水質は、調整池の水質に影響されやすい状況にある。また、本明川は延伸前の時点において調整池流域面積の約35%を占め、流域人口の65%に相当する諫早市を貫流することから、流域での人間活動に由来した汚濁負荷を調整池にもたらす主たる河川とみられており¹⁾、この延伸区間における物質流動の把握は、調整池の水質変化に及ぼす外部負荷の影響を明らかにする上でも重要である。

ところで、諫早湾干拓調整池を対象にした水質解析に

ついては、鉛直方向に単層としたモデルの適用事例がある^{2,4)}。これは、当水域の管理水位時における平均水深が1.2m程度(最深部3m)であり、また、数ヶ月から数年間といった長期的な水質の変化予測に対応した手法としなければならないためである。その一方で、著者らが延伸区間で実施した無降雨期間における水温の観測結果からは、夏季に日成層が現れ、冬季については昼間に正列状態、夜間には逆列状態の水温成層が形成されることが予測された⁵⁾。これらの現象は、潮受堤からの海水浸透による塩分供給⁴⁾や懸濁物質濃度が高いために透過日射量の鉛直方向の減衰が大きい等の理由によって、当区間内に塩分と水温の多重成層が形成されることで生じたものと考えている。比較的浅い水域においても日成層の形成が流れや水質の変化に無視できない影響を与える場合があること⁶⁾を考慮すると、この延伸区間の水質変化機構の把握には、水温の時空間変化を明らかにする必要がある。成層の形成による物質輸送の変化を考慮し得るモデルを用いた解析が望ましいと思われる。

本研究では、夏季における水温の時空間変化の把握を

目的として本明川延伸区間において現地観測を行った。また、昨年度の冬季と夏季の観測結果を用いて水温変化の数値予測モデルの適用性を検証すると共に、夏季降雨流入後の水温の変化過程を予測、評価した。

2. 現地観測の概要と水温変化

(1) 観測の概要

本明川延伸区間は図-1に示す諫早湾干拓調整池の北部水域であり、旧河口から下流端である北部排水門までの流路延長は約6.9kmである。現地観測は3回（観測期間Ⅰ：2010（平成22）年7月2日～9日、観測期間Ⅱ：同年7月23日～8月6日、観測期間Ⅲ：同年8月6日～27日）実施された。観測期間Ⅰ、Ⅱは流下方向の水温変化を把握することを目的とし、延伸区間の上流部と中央部の二箇所（地点①、地点②）を観測地点とし、水深0.8mまでの水温を連続測定した。観測期間Ⅲでは、中央部（地点①）における中層部（水深1.35m）までの水温を連続観測している。測定時間間隔はいずれの期間も1時間である。次節に示す降雨量、風速、全天日射量、気温の値は、気象庁長崎海洋気象台の報告値⁷⁾を参照している。

図-1 本明川延伸区間と観測地点

(2) 水温の時間変化

まず、観測期間Ⅰ、Ⅱにおける気象諸量と、測定地点①、②で測定された水深0.1mでの水温、水深0.1mと水深0.8mの水温 ($T_{0.1}$, $T_{0.8}$) との水温差 ($T_{0.1}-T_{0.8}$) の時間変化を図-2, 3に示す。

図示した二回の観測期間には数回の降雨が観測されており、これに応じた水温の変化が見られる。とくに、7月3日や4日、28日など比較的降水量が多い日には水温の低下が顕著である。この変化については、河川からの流入水の水温に影響を受けると共に、日中の降雨のために雨雲等によって同日の直達日射量が減少した結果である

図-2 水温等の時間変化（観測期間Ⅰ）

図-3 水温等の時間変化（観測期間Ⅱ）

と考えられる。一方、降雨が観測されなかった日の水温には、昨年の観測結果と同様に、全天日射量の時間変化に連動した日周期変化が現れており、7月23日～27日のように無降雨期間が継続すると、いずれの観測地点においても日夜をとって大気温よりも3℃以上高い温度で推移する。また、流路軸方向には、下流側の観測地点①の水温が高い。水温差については、無降雨日には日中に最大となり、夜間には零、もしくは水表面側の温度が僅

かに低くなる。これら日中の水温差の程度については、測定前夜からの風速の時間変化と関連性が見られるようである。すなわち、まとまった降雨日の後にあたる7月7日までの期間や7月28日～30日までの期間のように、一日をとおして風速が1m/sを下回らない場合には水温差が小さくなり、その一方で、日没から翌朝にかけて風速が1m/sを下回る状態が続くと、昼間に2, 3m/s以上の風が連吹しても水温差が大きくなる傾向にある。このことについて該当日の全天日射量と風速の時間変化を比較すると、風速の増加は全天日射量のそれよりも遅れていることが分かる。そのことから、この風速が増していない間の受熱による水表面付近の水温上昇が密度の鉛直分布をもたらし、また、風応力による乱れが小さいために、Richardson数が大きくなり、熱の鉛直拡散を低減させたことがこうした時間変化となる要因になったものと推察される。夜間にも継続して風が吹く場合には、表層付近

での鉛直輸送が保たれ、先記の要因が形成され難かったものと思われる。

つぎに、観測期間Ⅲにおける気象諸量と測定地点①で測定された水温、水温差 ($T_{0.1}-T_{0.8}$, $T_{0.1}-T_{1.3}$)を図-4に示す。

この期間に測定された水温の時間変化には、先述の考察が適用できそうであり、8月10日や11日の降雨期間には流入水の水温と日射量の減少によって水温が低下し、風の連吹期間には水温差が小さい状態で水域の水温が上昇している。その後、風が日周期で変化する無降雨期間に日最高水温がさらに高くなり、水温差も大きくなるといった変化を呈している。ここで、8月23日からの数日間の水温差を見ると、水深0.8mとの差は明け方までに殆どなくなるが、水深1.3mとの差が残留する結果となっている。8月23日～24日正午までの水温の鉛直分布は図-5のとおりであり、水温の時間変化は表層側で大きく、昼間には水深0.6～1.0m付近に水温躍層が現れている。夜間の放熱時には、表層の温度低下に伴って一様分布に近づくが、表層の一部には水温勾配が逆転することもある。躍層の発生水深に関しては、以前に行った観測結果に塩分躍層が同等の水深で現れていたことから、無降雨日が継続したことで、潮受堤堤体からの浸透や水底からの溶出等⁴⁾によって延伸区間の塩分の鉛直分布が再生したことも要因の一つと考えられる。今回の観測では塩分等を測定しておらず、水温の変化過程を明らかにするためにも、これらの鉛直分布の実測が必要といえる。

3. 水温変化の数値予測モデル

(1) 数値モデルの概要

流体運動に関する基礎方程式は連続方程式と運動方程式であり、三次元レベルモデルとしてモデル化されている。流水の密度は水温ならびに塩分と懸濁粒子の濃度に応じて変化するものとした。そのため、熱量と各成分の収支式も基礎方程式に取り上げている。運動方程式の渦動粘性係数はPrandtlの混合距離モデルの形式で評価する。この内、鉛直方向成分については、成層の安定度によって変化するものとし、Richardson数の関数とした指数型の評価式で算定している。水表面に作用する風応力はバルク形式の表現とし、その抵抗係数については風速に応じて変化するものとして取り扱った⁸⁾。水底面での摩擦応力にはManning則を適用した。

熱量の収支に関しては、表層での短波放射、大気・水面からの長波放射、顕熱ならびに潜熱による熱輸送を取り上げる。各成分はHuberらの方法⁹⁾を基本として評価するが、後述の観測結果との比較から大気の有効放射率をBrunt型の式¹⁰⁾として、次のとおりに評価された。

短波放射

$$H_S = \beta(1-\alpha)H_{S0} \quad (1)$$

図-4 水温等の時間変化（観測期間Ⅲ）

図-5 水温の鉛直分布

(2010(平成22)年8月23日 0:00～8月24日 15:00)

大気からの長波放射

$$H_{La} = \varepsilon_a \sigma T_a^4 (1.0 + 0.17C^2) \quad (2)$$

水面からの長波放射

$$H_{Lw} = \varepsilon_w \sigma T_w^4 \quad (3)$$

潜熱

$$H_E = \rho (L + cT_w) f(W) (e_w - \psi e_a) \quad (4)$$

顕熱

$$H_T = B_o H_E \quad (5)$$

ここに、 α :(=0.03) アルベド、 β :(=0.3) 水表面における短波放射の吸収率、 H_{s0} : 全天日射量、 σ : Stefan-Boltzmann定数、 ε_a :($=a_1 + a_2 e_a^{1/2}$) 晴天時の大気の有効放射率 ($a_1=0.7$, $a_2=0.037$ とした)、 T_a : 大気温度、 C : 雲量、 ε_w :(=0.97) 水の放射率、 T_w : 表層の水温、 ρ : 水の密度、 L : 蒸発の潜熱、 c : 水の比熱、 $f(W)$: 潜熱・顕熱輸送量の水表面付近の風速 (W) への依存性を表す関数 (ここではRohwerの式⁹⁾¹¹⁾: $f(W)=0.000231+0.000139a_3W$ とされ、これに補正係数 a_3 を含め、計算結果と観測結果との比較から $a_3=0.425$ とした)、 e_w : 表層の水温に相当する飽和蒸気圧、 e_a : 大気蒸気圧、 ψ : 相対湿度、 B_o : Bowen比、である。Bowen比の乾湿計定数は 0.677hPa/K とした¹²⁾。水中を透過する短波放射の減衰はLambert-Beer則に従うものとし、この減衰率は流水中の懸濁粒子濃度に比例するとして取り扱った。

懸濁粒子については、前年度に延伸区間で行った測定結果から、濁度の鉛直分布がRouse式でほぼ表現されることが示されており、浮遊砂モデルとして表現された。ここでは粒子の水底からの離脱をPick up rateで表現した¹³⁾。粒子の沈降速度はRubeyの式で算定する。なお、水底への着底には沈降限界を課し、沈降速度が摩擦速度を超える場合に生じるものとした。塩分に関しては、潮受堤堤体からの浸透⁴⁾と河川からの流入量を境界条件として考慮した。各基礎方程式は、時間軸方向にLeap-Frog法を、空間方向にはDonor Cell法と中央差分法を適用、離散化している。

(2) モデルの検証

計算対象領域は、図-1に示す本明川延伸区間と諫早湾干拓調整池の全域である。空間差分間隔は、水平方向に $\Delta x = \Delta y = 50\text{m}$ とし、鉛直方向には $\Delta z = 0.1\text{m}$ とした。この検証計算では表層をT.P.-1.1m以浅とした。時間差分間隔は $\Delta t = 4.0\text{s}$ である。流入河川として本明川を含む13本を取り上げた。気象条件に関しては、全天日射量、気温、湿度を長崎海洋気象台の報告値とし、風向風速は気象庁による当領域付近の数値予報値を与えた。検証データとしては、モデルの季節的な適合性を確認する目的から、2009(平成21)年の夏季と冬季の観測結果(夏季期間: 同年8月28日～9月4日、冬季期間: 12月18日～24日)を

(a) 2009(平成21)年8月28日～9月4日

(b) 2009(平成21)年12月18～24日

図-6 水温の計算結果と観測結果

取り上げた。いずれも地点①での観測結果である。

図-6は各計算条件の下で得られた水温の計算結果と観測結果との比較図である。なお、冬季期間の計算については、全天日射量の報告値を用いると18日と21日の水温が過小、過大になるため、各日の値を2倍と0.68倍としている。各結果の比較から、夏季期間では9月1日と2日、また冬季期間には12月22日以降の水深0.8mでの水温の算出値の差が大きい。いずれも前日の日没からの水温低下過程が十分に再現されなかったためと考えており、顕熱・潜熱等による水表面からの熱放射量と水中での熱輸送の評価に検討の余地があるといえる。一方で、夏季の正列日成層と冬季における夜間の逆列成層の発達と昼間の消滅が再現されており、本モデルの構成によって両観測期間における水温変化を概ね計算できると思われる。紙面の都合でここでは示していないが、当延伸区間の表層と底層との塩分差は約0.5‰(表層1‰)であった。この鉛直分布を考慮しない解析では、とくに、冬季の結果で水温の逆列が再現されておらず、塩分のモデル化の必要性が改めて指摘されたものと考えている。構築したモデルは、塩分と水温の分布に由来した成層の消長が現れる河口域等での水温予測に有用と考える。

4. 降雨後の水温と流れの予測計算

(1) 計算条件

対象期間としては、観測結果の考察から、降雨期間と共に、降雨後に風が連吹状態から日周期変化へ遷移するまでの期間を取り上げる必要があると考えられる。今回の計算では、計算領域を細分化したことで計算に時間を

要することから、風の日周期変化への遷移日数が短い観測期間Ⅰ(7月3日零時から6日間)を対象とすることにした。数値計算上の条件は前章(2)とほぼ同様であるが、当水域の水位が観測前日の深夜からT.P.-1.3m程度まで下げられていたことから¹⁴⁾、表層をT.P.-1.4m以浅に変更した。降雨時の河川流量は、流出関数法を用いてその時間変化を評価し、各河川に流域面積に応じて配分、基底流量に上乗せした。流入水温は、上流側の地点②での観測結果を参考に洪水時を22℃、それ以外を24.5℃とした。調整池からの雨水排水は、資料¹⁴⁾から7月7日と8日の11時に南北両排水門からなされるものとし、これらのゲート開度を1mに設定した。

(2) 水温の計算結果と考察

図-7に計算から得られた水温の時間変化を示す。この結果を図中の観測結果と比較すると、計算は前半期の地点①の水温を0.5~1℃程度高めに評価する傾向にあり、地点②の結果には7月7日と8日の日中に観測された表層での低減は現れていない。これらは、モデルの検証で記したように表層付近での熱収支に関連する係数値の設定に起因するところが大いと考えられる。さらに地点②の水深0.1mの急激な変化は、排水門操作時刻に相当しており、上流からの流出水温に影響されたことも予想される。一方で、降雨日以降に水温の日変化が次第に大きくなり、日を追って各地点の日最高水温が高くなる過程を

再現できていると考えられる。

ここで、7月4日と7日の14時における延伸区間の上流側と下流側での水温の空間分布を示すと図-8のとおりである。表示区間は図-1に示されている。各時刻には南西からの風が吹いている。なお、延伸区間の法線は緩やかに湾曲しており、両区間は同一座標軸上で表示されないため、上流側区間は下流側区間より100m南側の断面の結果を示している。まず、7月4日の結果については、計算開始から表示時刻までに断続的な降雨(累積雨量32mm)があったことで、水位が既に0.37m上昇している。この時刻には南西からの風が吹いていることもあり、表層で東向きの流れであり、中・底層では表層の流れを補償するように西向きの流れが現れている。水温に関しては、洪水時に各河口から低温の河川水が流入しており、流域面積の最も大きい旧本明川からの流量が多いために、延伸区間内の上流側において水温が低い。鉛直方向には、表層で高くなる箇所もあるが、ほぼ一様分布となる。

つぎに、7月7日の結果では、短波放射等による熱供給がなされたことで、当区間内の水温は全体的に上昇し、また、鉛直方向の空間変化が明瞭に現れる。表層では、上流部で河川水の水温に影響されて低温であるが、水の流下中の受熱によって次第に高温になり、下流側区間では28℃以上となる。潮受堤付近では、風による水の吹き寄せによって鉛直下向きの流れが発生するため、表層水が深層に輸送されることで中層以深の水温が高まる。た

図-7 水温の計算結果と観測結果

図-8 延伸区間の水温の空間分布

図-9 地点①の水温の計算結果

だし、こうした鉛直流による変化は潮受堤付近に限られるようであり、底層では洪水流入後程度の低水温の状態が続くことが示されている。これは、潮受堤付近を深層へと潜った水塊には、周囲との水温差による浮力効果が生じるために水平方向への輸送がされ難かったこと、また短波放射による熱供給量の観点からは、流水中の懸濁物質濃度が高いために短波放射の減衰率が大きく、中層以深への短波放射の到達量が小さいこと等が原因として上げられる。水温の鉛直分布について、地点①における日平均値の計算結果を示すと図-9のとおりである。水温は、前日から当日にかけて降雨が観測された7月4日にはほぼ一様な状態であり、その後、水深約1.25mまでの表層から水温が上昇し始める。下層側の変化は上層よりも遅れて現れており、この計算条件では、水温が上昇するまでに3日間以上を要し、7月7日の上下層間の水温差は3.4℃以上に達する結果となっている。

6. おわりに

本研究では、諫早湾干拓調整池の一部である本明川延伸区間において現地観測を実施し、夏季における水温変化の実態把握を試みた。また、数値予測モデルの検証と夏季降雨後の水温変化過程への適用を行った。

連続観測の結果から、観測地点では、無降雨日に水温の正列成層が日周期で現れるものの、水温成層の程度は風の時間変化にも影響され、無降雨日であっても降雨後の数日間のように風が1日をとおして翌朝まで連吹する場合、水温の鉛直変化が弱まることが示された。各地点における降雨後の水温成層の発達については、限られた観測結果に基づくが、風の連吹期とその日周期への遷移から推定できるものと思われる。数値予測モデルに関しては、夏季と冬季の水温の日変化、さらに降雨後の変化過程を概ね再現しており、モデル化は妥当になされていると考えている。降雨後を対象にした計算として、観測結果Ⅰの条件下で得られた結果から、降雨の流入によって、河道法線方向の分布はあるが、当延伸区間の水温は鉛直方向にほぼ一様になることが示された。その後の短

波放射等の熱供給によって水温が全体的に上昇するものの、底層部では表層に比べて数日間の遅れを生じることが予測された。今回、現地観測と数値予測モデルの妥当性の検証は、本明川延伸区間の上・中流部を対象に行っているが、同区間の水温変化の全体像を明らかにするには、さらに下流部や調整池側での観測結果による検討も必要と考えている。数値モデルに関しては、他の観測結果への適用等をとおしてパラメータ値の推定を図ると共に、水質汚濁物質のモデル化を行い、当水域における水質変化機構の評価へと繋げたい。

謝辞：連続観測を実施するにあたって、装置の設置やデータの回収に協力頂いた学部4年生の山口慶直氏、岩尾良太郎氏、池永雄太氏に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 浦里実, 野口正人, 洲上雄作: 閉鎖性水域へ流出する汚濁量の削減方策の検討 諫早湾調整池とその流域, 水工学論文集, Vol.49, pp.1549-1554, 2005.
- 2) 古賀憲一, Vongthanasunthorn Narumol, 荒木宏之, 山西博幸, 川邊 学, 大和則夫: 諫早干拓調整池の水質解析, 環境工学研究論文集, Vol.40, pp.541-550, 2003.
- 3) 仁木将人, 西田 渉, 野口正人, 橋本篤史: 諫早調整池における水質変化の予測とその評価に関する研究, 水工学論文集, Vol.43, pp.1007-1012, 1999.
- 4) 細谷裕士, 横井 績, 富田友幸, 矢永純一, 梶原義範: 諫早湾干拓調整池への海水導入による水質への影響, 水環境学会誌, Vol.27, No.4, pp.281-286, 2004.
- 5) 西田 渉, 鈴木誠二: 本明川延伸区間における夏季・冬季の水温変化とその数値予測に関する研究, 環境工学研究論文集, Vol.47, pp.49-56, 2010.
- 6) 石川忠晴, 田中昌宏, 小関昌信: 浅い湖の日成層が水質に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.411/II-12, pp.247-254, 1989.
- 7) 気象庁ホームページ資料(URL <http://www.jma.go.jp/>)
- 8) 近藤純正: 水環境の気象学, 朝倉書店, pp. 168-174, 1994.
- 9) Huber C. H., and Harleman D. R. F.: Laboratory and analytical studies of the thermal stratification of reservoirs, *Hydrodynamics laboratory MIT*, R68-87, Rept. No.112, pp.16-34, 1968.
- 10) Anderson, E.R.: Energy-budget studies, *U.S.G.S. Professional Paper*, No.269, pp.71-119, 1954.
- 11) Rohwer, C.: Evaporation from a Free Water Surface, *U.S. Dept. of Agr., Tech. Bull.* No.271, p.96, 1931.
- 12) 前出 文献8), pp.132-138, 1994.
- 13) 村上正吾, 辻本哲郎, 中川博次: 河床砂礫のPick-up rateの推定式について, 土木学会論文集, No.443/II-18, pp.9-16, 1992.
- 14) 国土交通省ホームページ資料 (URL <http://www1.river.go.jp/>)

(2010. 9. 30受付)