

II-53

停滞性水路における水温成層解析

日本データサービス(株) 正会員 袖野 宏 樹
 日本データサービス(株) 三船 修 司
 北海道開発局 正会員 中津川 誠
 北海道開発局 正会員 坂井 一 浩
 北海道開発局 正会員 山崎 真 一

1. はじめに

湖沼・貯水池など内陸性の停滞性水域においては、特に夏期に水温成層が形成されやすい。この水温成層は、ある条件下では継続的に維持され、あるいは短時間で解消されることもある。このような水温成層の形成および解消といった現象は、おおよそ日射や風などといった気象条件や水路内の流動現象等の要因によって影響を受けていると考えられる。本報告では、北海道千歳市に位置するネシコシ排水池において平成7年7月1日～同年11月30日の間に行われた現地観測結果をもとに、水温成層の形成および解消に関わる要因を推定し、さらにこの推定された要因を数値計算に組み込むことにより水温成層の予測手法の確立を試みることにする。

2. 現地観測

現地観測を行ったネシコシ排水池は、千歳川流域の農業排水路（第14号幹線排水路）として掘削されたもので、横断幅約130m、延長約2,000mの停滞性の排水路である。現地の観測地点は図-1に示した全12地点であり、これらの地点（E-1を除く）において水位および流速、さらには水温の自記観測を行った。このうち排水池の中央部よりやや下流に位置する観測地点ST-1については、水温成層の形成・解消の現象をとらえることができるように、水温センサーを鉛直方向に10cm毎に設置した。これと同時に河床下の地中にも温度センサーを埋め込み（河床から河床下1mまでは20cm毎、それ以下5mまでは1m毎）地温の観測も行った。また観測地点E-1においては各種気象要素（気温、湿度、日射量、風向、風速等）が観測されている。観測結果のうち観測地点ST-1の水温経時変化を図-2に示す。ただしこの図には、水面に最も近いセンサーと河床上10cmのセンサーの値のみを図示している。また本報告ではこれら2つのセンサーの示す値の差をネシコシ排水池における水温成層時の水温差と定義することとした。



図-1 観測地点位置図

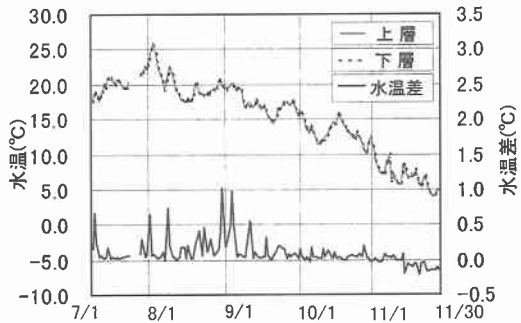


図-2 観測水温経時変化図

Analysis of Thermocline in the Stagnant Channel

by Hiroki Sodeno, Syuji Mifune, Makoto Nakatsugawa, Kazuhiro Sakai, Shinichi Yamazaki

3. 水温差を生じさせる要因の推定

図-2によると、ある時期に生じた水温差がある時間経過すると解消されるということが繰り返されていることがわかる。では現地ではどのような要因によって水温差が生じたり解消されたりするのであろうか。

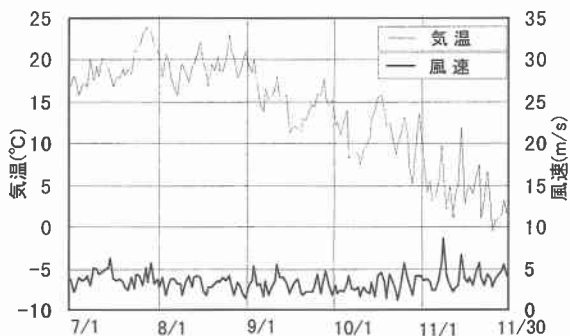


図-3 気温・風速経時変化図

ここでは現地において観測された「水温差」を目的変数、他の外的要因（気象条件等）を説明変数とした重回帰分析を行うことにより、その原因になると考えられる要因を抽出することを試みた。説明変数として「気温」、「日射量」、「風速（及びこの2乗）」、「湿度」、「流入流速（及びこの2乗）」の組み合わせを考えたが、結果として最も相関のよかった説明変数の組み合わせは、水温差が生じたときに同時に計測された「気温」と「風速」であった。（相関係数0.73）この気温と風速の経時変化を図-3に示す。このときの相関式は式（1）の通りであった。これは

ネシコシ排水池における水温差が現地の気温が高く、風が弱いときに生じやすいことを示している。

$$【水温差】 = 0.16 \times 【気温】 - 0.78 \times 【風速】 + 0.49 \quad (1)$$

4. 水温予測計算モデル

本報告における水温予測計算モデルは、水温成層を再現できる2次元多層モデル¹⁾を用いることとする。この基本方程式を以下に示す。またモデルの略図を図-4に示す。

○連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

○運動方程式（y方向に関して同様）

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(u^2) - \frac{\partial}{\partial y}(uv) - \frac{\partial}{\partial z}(uw) + f_0 v - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho} \int_0^z \frac{\partial}{\partial x} \rho dz - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_0}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (3)$$

○自由表面の式

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-H}^{\zeta} u dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-H}^{\zeta} v dz \right)$$

○熱移流拡散方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(uT) - \frac{\partial}{\partial y}(vT) - \frac{\partial}{\partial z}(wT) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (\text{水中}) \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (\text{地中}) \quad (6)$$

※地中では、鉛直方向の熱拡散のみが行われていると仮定している。

○状態方程式（Knudsenの式）

$$\rho = \frac{\sigma_T}{1000} + 1$$

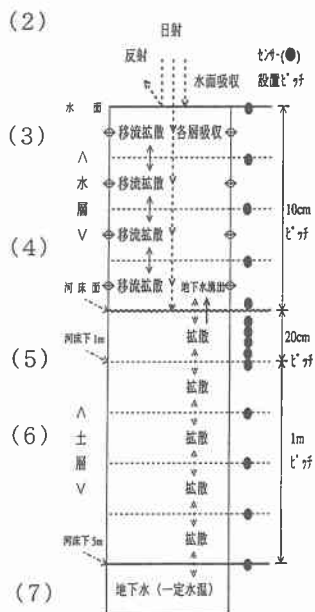


図-4 モデル略図

$$\sigma_t = \sum_i + (\sigma_0 + 0.1324) \{1 - A_t + B_t(\sigma_0 - 0.1324)\} \quad (8)$$

$$\sigma_0 = -0.069 + 1.4708Cl - 0.00157Cl^2 + 0.0000398Cl^3 \quad \text{ただし淡水のため } cl = 0.0 \quad (9)$$

$$\sum_i = -\frac{(T - 3.98)^2}{50357} \frac{T + 283.0}{T + 67.26} \quad (10)$$

$$A_t = T(4.7867 - 0.0981857T + 0.00108437T^2) \times 10^{-3} \quad (11)$$

$$B_t = T(18.030 - 0.8164T + 0.01667T^2) \times 10^{-6} \quad (12)$$

5. 鉛直拡散係数の推定

本予測モデルでは、特に停滞性の水域においては鉛直拡散係数が鉛直方向の水温差に大きく寄与する。一

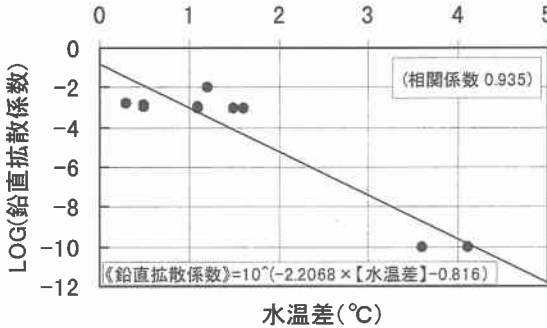


図-5 本モデルでの水温差と鉛直拡散係数との関係

般に同様の手法を用いた水温予測計算では、鉛直拡散係数をある一定の値に固定して行われることが多い。しかし今回の現地観測が示すような水温差の変動が激しい場合には、鉛直拡散係数が常に変化していると考えた方が妥当である。そこで本モデルにおいて、鉛直拡散係数を変化させて水温予測計算を行うために、ある水温差を生じさせるときの鉛直拡散係数を推定することにした。これは様々に境界条件を変化させて水温差と鉛直拡散係数の関係を調べることで求めた。このときの水温差と鉛直拡散係数との関係を図-5に示した。またこのときの相関式は式(13)のようになった。

$$\text{【鉛直拡散係数】 (m}^2\text{/s)} = 10^{(-2.2068 \times \text{【水温差】} - 0.816)} \quad (13)$$

この式(13)と前述の式(1)を組み合わせることで、モデル内に組み込むことで、境界条件に応じた鉛直拡散係数を推定しつつ水温予測計算を行っていくこととした。水温予測計算における境界条件は、気象条件(気温、日射量、風速、湿度)とネシコシ排水池への流入出量とした。地温予測計算においては、現地観測結果をもとに河床下5mを地温一定(10℃)の境界条件の層とした。また地中の温度鉛直拡散係数に関しては、地中が水中よりも安定した環境であることを考慮し一定値で与えることとした。この値は計算の再現性が良好であった $2.0 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$ とした。

6. 予測結果

本予測手法において、鉛直拡散係数の与え方によって計算結果にどのような違いが生じるのを見ることとする。鉛直拡散係数を常に一定の値として計算した時の結果を図-6に、また鉛直拡散係数を前述の推定式により算出しながら計算したときの結果を図-7に示す。このとき水温差に関してのみ実測値と比較させて図化している。さらに地温の実測値と計算値に関しての経時変化を図-8、図-9にそれぞれ示す。

水温の計算結果に関しては、図-6、図-7より、鉛直拡散係数を一定として与えた場合は、ほぼ常時水温差を生じており明らかに実測値と異なった傾向を示しているが、これに対して境界条件に応じて鉛直拡散

係数を変化させている場合では、計算により求められる水温差はより実測値に近い傾向を示すことがわかる。また地温の計算結果に関しては、図-8、図-9を比較するとわかるように、計算は実測をよく再現していることがわかる。本報告では河床部にある土の部分を考慮するという、より現実に近い形で予測計算を行っているが、河床部にある土の部分を考慮しない場合、つまり断熱条件を与えた場合の水温計算でも再現性は十分良かった。すなわち、実用的には従来より行われている水塊のみの水温計算でも十分な再現が可能であるということがいえる。

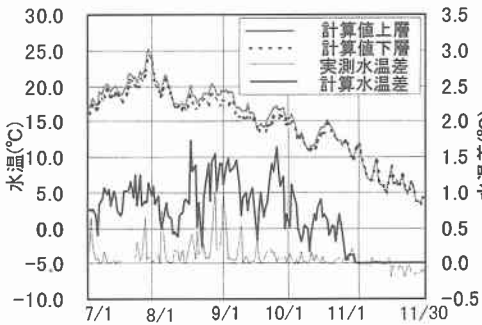


図-6 水温経時変化図 (鉛直拡散係数 1.0E-3)

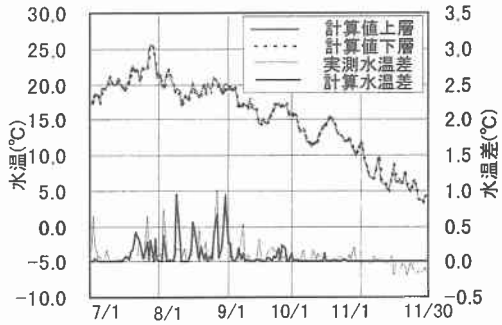


図-7 水温経時変化図 (鉛直拡散係数変動)

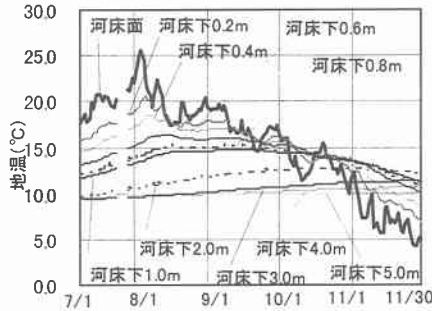


図-8 地温経時変化図 (実測値)

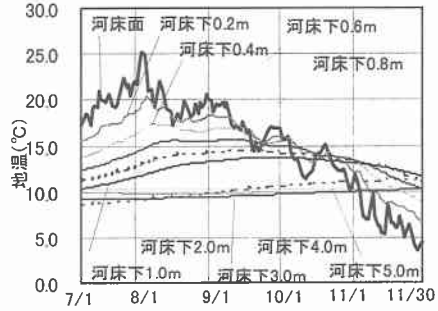


図-9 地温経時変化図 (計算値)

7. おわりに

本計算モデルを停滞性の水域の水温予測に適用した場合、鉛直拡散係数を常に一定値として与えた場合には再現性は十分ではないが、鉛直拡散係数を気象要因の逐次変数として与えることで、水温予測の再現性を高めることができた。このような手法は類似の水域への適用が可能と考えられる。今後は現地データの蓄積により汎用性を確認するとともに、これらの結果を水温成層の消長を支配する物理的メカニズムの解明に生かしていきたい。

参考文献

- 1) 藤原・明田・武内：マルチレベル密度流モデルの開発と人工湧昇流への適用、水工研技報水産土木14, 13-35, 平4