

木曽川ワンドにおける水温変動と その数値解析モデルに関する研究

STUDY ON WATER TEMPERATURE CHANGE AND ITS NUMERICAL SIMULATION MODEL IN KISO RIVER WANDO

武田 誠¹・木村一郎²・松尾直規³・山崎美彦⁴・藤田晶子⁴
Makoto TAKEDA, Ichiro KIMURA, Naoki MATSUO, Yoshihiko YAMAZAKI
and Akiko FUJITA

¹正会員 博士(工) 中部大学講師 工学部土木工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

²正会員 博士(工) 四日市大学助教授 環境情報学部 (〒512-8512 三重県四日市市萱生町1200)

³フェロー 工博 中部大学教授 工学部土木工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

⁴非会員 中部大学 工学部土木工学科 (同上)

The aim of this study is to investigate water temperature change in Kiso River wando and to develop the numerical simulation model of the phenomena. The wando for this study is located nearby the right bank at 19.0km upstream from the mouth of Kiso River. The temporal change of water temperature obtained from observation results indicates that strong thermal stratification exists in the center-bottom part of observed area. It is presumed that the groundwater inflow of low temperature causes this thermal stratification. The numerical simulation model is developed for the analysis of the flow and temperature change in wando. From the numerical analysis of the phenomena, it is found that the velocity distribution of flow is changed by water level change due to tide. Furthermore, it is represented that the water of low temperature stays in bottom layer and the thermal stratification develops.

Key Words : Wando, Water temperature change, Thermal stratification, Observation,
Numerical analysis model

1. はじめに

平成9年の河川法の改定に伴い、これまでの「治水」「利水」というキーワードに新たに「環境」が加わり、これに基づく河川整備が進められている。いわゆる、多自然型川づくりの取り組みであり、これは1975年ごろから都市部の河川を中心に始まり、旧建設省がその推進を呼びかけた1990年以降、全国で広く展開されるようになった。しかし、その設計手法は、現在試行錯誤的に進められているものと思われる。一方、河川環境として近年見直されているワンドは、魚類の成育や洪水時の避難の場としての機能だけでなく、水質改善効果や人々の憩いの場としての価値が認められ、極めて重要なものと位置付けられよう。

ところで、木曽川の下流部には大規模なワンド群が形成されている。これは、明治期に形成されたケレップ水制により形成されたものであり、当初の目的が川船の航路確保、堤防の保護であったにも関わらず、現在におい

ては、作り出した大規模なワンド群が河川環境機能の向上に極めて重要な働きを担っている。しかも、築造から1世紀近い年月が経過し、幾多の洪水を経た現在においても、特に大掛かりなメンテナンスを必要とせず、その機能が維持されている。したがって、先に述べたように多自然型川づくりに代表される河川整備事業の一つの成功例として木曽川水制群をとらえ、多角的視点から検討を加えなおすことは、極めて有意義であり、かつ、今後の河川整備の一つの指針を与えるものと考ええる。

現在、木曽川ワンドを対象として、ワンド内および堆積土砂内の水質変化ならびに土砂堆積機構と樹木生育からみた洪水履歴調査などの共同研究が進められている¹⁾²⁾³⁾。そのメンバーは、木村(四日市大)、北村、鷺見(名大)、鬼塚(京大)、庄(名工大)、武田(中部大)である。本研究は、これまでに行われた水温および水深の時間変化の観測結果をまとめるとともに、木曽川ワンドにおける水温変動を表現するための数値モデルの開発を目指しモデル領域における検討を行った。

2. 現地観測

図1に示す木曽川河口から19kmの右岸に位置するワンドがここでの研究対象領域である。このワンドにおいて平成13年9月5日～6日と平成13年9月17日～19日に図2のように深度計、水温計を設置し、表層、表層下1m、底層の水温と水深の時間変化を計測した。用いた機材はアレック電子社製の深度計 (Compact-TD) (水温も計測可能) : ワンド開口部および中央部、MDS-MkV/D: ワンド奥部) と水温計 (MDS-MkV/T) である。なお、平成13年9月5日～6日の観測においては、ワンド奥部の表層水温は観測不備のため、また、ワンド開口部では満潮時に計測装置が浮いてしまい観測場所が移動したため、十分な観測が行えなかった。さらに、平成13年9月17日～19日の観測では、ワンド奥部において満潮時にわずかながら浮いてしまっている。図3に観測日の気象条件として名古屋地方気象台で観測された気温と日射量の時間変化と観測により得られた水深と水温の時間変化を示す。図3(b)から、ワンド奥部における表層の水温は日射の影響に伴う変動が見られるが、底層の水温はその影響にすぐわない変動を示している。さらに、水深が低下している

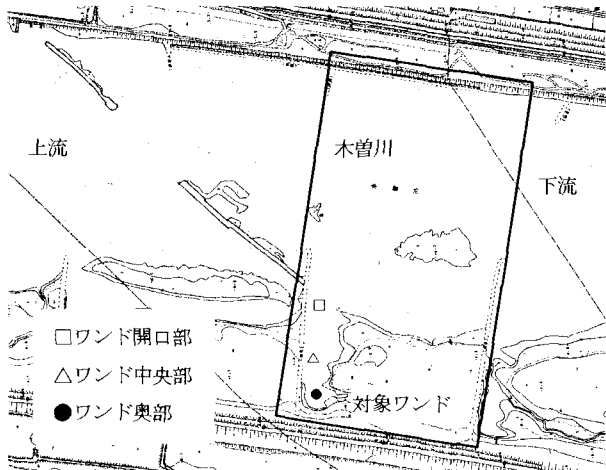
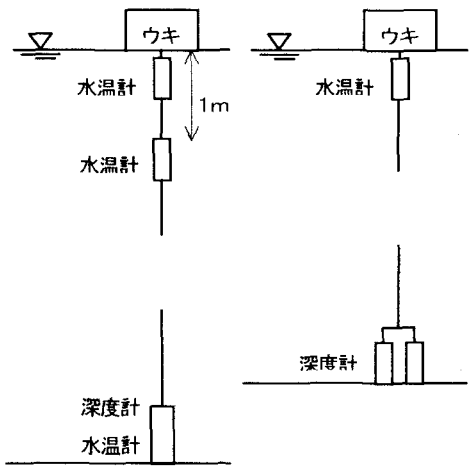


図1 木曽川19km地点付近の地形図
(図中の枠は計算領域)

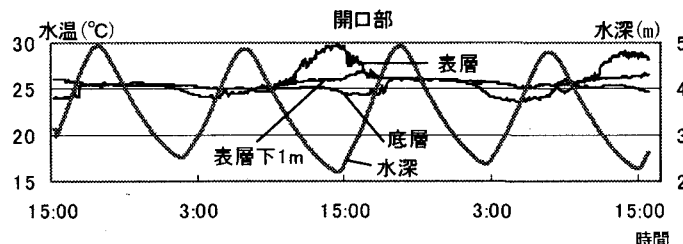
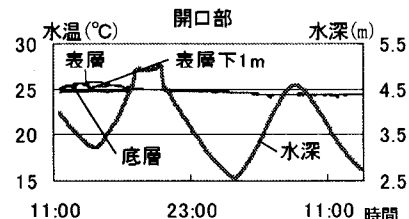
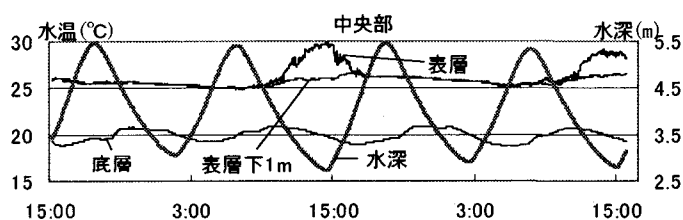
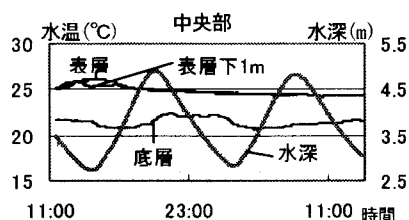
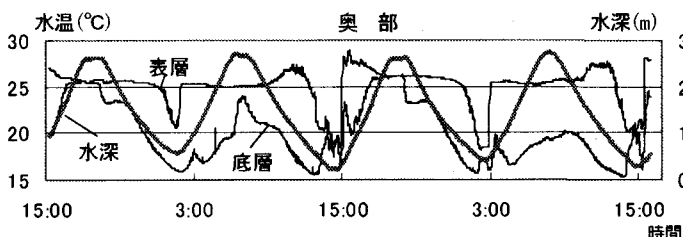
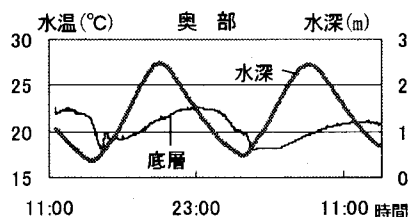
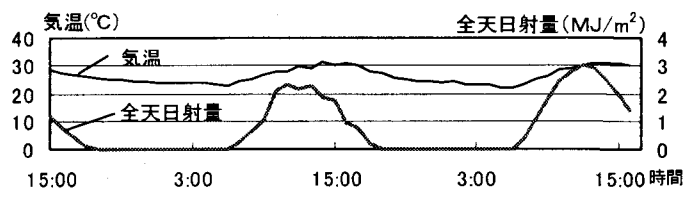
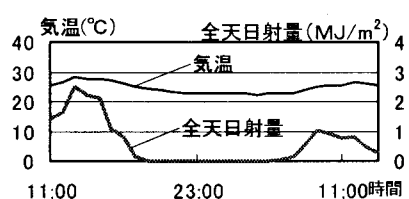


(a) ワンド開口部、中央部 (b) ワンド奥部

図2 観測装置の設置状況

干潮時には表層水温が急激に低下している様子がみとれる。これは、底層では伏流水の影響を受けていると考えられ、干潮時には水深が浅くなるため表層水は底層水の影響を受けやすくなり混合が促進されて水温が低下したものと考えられる。また、図3(a)(b)からワンド中央部における表層の水温は、日射の影響を強く受け日中はその影響に依存する変動を示し、夜間は水温が低下している。ただし、9月6日の午後から雨が降ったため水温の上昇は生じていない。さらに、表層下1mの水温変動は表層と比べて日射の影響が弱まっているものの、ほぼ表層と同様な水温変化を示している。一方、底層の水温変化は、表層、表層下1mと同様ではなく、伏流水の影響と思われる水温変動があり、その変動の周期はおおよそ潮汐の周期と類似していることが分かる。ただし、潮汐と底層水温の変化には位相差がある。これは、低温水温の流入・輸送形態、およびその場の混合形態に原因があると考えられる。最後に、図3(b)から、ワンド開口部における表層および表層下1mの水温変化はワンド中央部と同様に日射の影響により変化している。また、底層の水温変化は、ワンド中央部と異なりほぼ表層、表層下1mと同様である。これは、鉛直混合が強い状況であるとともに、陸域から離れているため底層の水温が伏流水の影響を受けにくいことも考えられる。ただし、細かな変動を見ると、底層の水温変化はワンド中央部の底層の水温変化とその傾向が類似しており、わずかながらワンド中央部の底層に存在する低温水の影響を受けているものと考えられる。

また、9月5日～6日には、多項目水質計測装置クロロテック (アレック電子社製) を用い水温、塩分、DO、クロロフィルa、濁度、Ph、深度を観測した。図4にワンド奥部、中央部、開口部の水温とDOの鉛直分布を示す。本図より、9月5日には日射の影響により表層水が温まり温度成層が形成されているが、9月6日には降雨の影響により表層水が冷まされ鉛直方向に一樣な水温分布となっていることが分かる。また、9月6日の上げ潮時には、ワンド中央部で底層に低温水の存在が確認される。また、この場合DOも4mg/lというかなり低い値を示している。したがって、ここで対象としたワンドでは日射による温度成層とは別に伏流水による水温成層が夏季に発達し、それによる成層が主にワンド中央部の窪み部で形成される。その成層が極めて強いいため、水の動きがなく酸素低下を引き起こし、しかも、伏流水の溶存酸素も低下している (先に示した研究グループの観測で確認されている) ため、その複合効果によって底層における溶存酸素の低下が生じているものと考えられる。ただし、このような底層における温度成層の発達 (低水温水塊の存在) とDO低下現象は観測中の上げ潮時のみで観測された。観測にはゴムボートを使用しており、毎回観測場所を一致させるのは難しい。さらに、対象としたワンド内の地形が複雑であることを考えると上記の現象は



(a) 9月5日～9月6日の観測結果

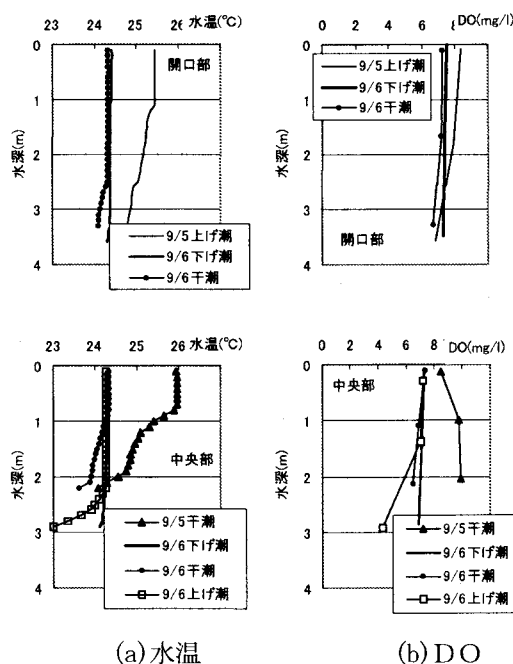
(b) 9月17日～9月19日の観測結果

図3 水温の時間変化

局所的な現象であるとも考えられる。また、ここで示した低温水塊の源として次の二つが考えられる。対象とするワンドには図1に示すように多大な堆積土砂が存在し水位の干満に伴うそこからの伏流水の流入が支配的な影響を与えていることが考えられる。また、このワンドの右岸側堤防をはさんで長良川が存在する。長良川の水位は河口堰によっておおよそT.P. +1.0あたりに保たれているため、導水勾配が大きく多大な伏流水が供給されることも考えられる。現段階では、その支配的な供給源がどこであるか明確ではなく、今後の調査の一つの視点でもあるが、今回の現地観測からは、夏季に上記のような成層発達が見られることが示された。

3. 数値解析

上記の現象を検討するにあたり、現地観測のみではその現象の解釈が不十分であるため、数値解析モデルを作成しそれによる検討を行う。堆積土砂とワンド内の水交換を評価するためには、その水の輸送をも考慮に入れたモデル化が必要であろう。さらに、ワンドという複雑な地形を対象とするために、解析途中で水面の不連続をきたす(例えば、水溜りの発生)場合もある。この現象



(a) 水温

(b) DO

図4 水温とDOの鉛直分布

(9/6上げ潮は図3の観測期間後に計測)

が対象としているワンドの流れと水温の構造にどれだけ寄与しているのかは定かではないが、できるだけ忠実に地形や現象を再現するように解析モデルを構築した。

3.1 数値解析モデル

ここで取り扱った支配方程式は以下のとおりである。

1) 表面流 (本川、ワンド内および水溜り)

連続式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

運動量方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$p = \rho_0 g(z_s - z) + \int_z^{z_s} \Delta \rho g dz \quad (4)$$

水温の収支式

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho C_w} \frac{\partial \phi}{\partial z} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 x, y : 平面の空間座標 (x : 流下方向, y : 横断方向), z : 鉛直方向の空間座標, t : 時間, u, v, w : それぞれ x, y, z 方向の流速, T : 水温, p : 圧力, ρ : 密度 ($\rho = \rho_0 + \Delta\rho$, ρ_0 : 基準密度, $\Delta\rho$: 密度偏差), g : 重力加速度, $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$: それぞれ x, y, z 方向の渦動粘性係数, z_s : 水位, K_x, K_y, K_z : それぞれ x, y, z 方向の渦動拡散係数, C_w : 水の比熱, ϕ : 日射量 ($\phi = (1-\alpha)(1-\beta)\phi_0 \exp(-\eta(z_s - z))$), ϕ_0 : 水表面における日射量, α : 水面反射率, β : 水面吸収率, η : 減衰係数) である。

2) 地下水

連続式

$$\frac{\partial u_g}{\partial x} + \frac{\partial v_g}{\partial y} + \frac{\partial w_g}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

運動方程式 (ダルシー則)

$$u_g = -K_g \frac{\partial H}{\partial x}, \quad v_g = -K_g \frac{\partial H}{\partial y} \quad (7)$$

ここで、 u_g, v_g, w_g : それぞれ土砂内における x, y, z 方向の断面平均流速, K_g : 透水係数, H : 水位である。

有限体積法を用いて格子の平均量で定義された式に展開した。なお、壁面の境界条件として拡散における熱の輸送は考慮していない。表面流の表層格子では、水表面における境界条件を考慮して以下の式および項を用いた。連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{M_1 - M_2}{\Delta x} - \frac{N_3 - N_4}{\Delta y} + w_5 + \frac{q}{\Delta x \Delta y} \quad (8)$$

運動量方程式

$$\varepsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\rho_a \gamma^2 W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho} \quad (9)$$

$$\varepsilon_z \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\rho_a \gamma^2 W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho} \quad (10)$$

水温の収支式

$$K_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\phi_s - \phi_a - \phi_L}{\rho C_w} \quad (11)$$

ここに、 M, N : それぞれ x, y 方向の流量フラックス ($M = uD, N = vD$, D : 層厚, M_1, M_2 はそれぞれ x 方向に正および負の法線ベクトルを持つ面で、 N_3, N_4 はそれぞれ y 方向の正および負の面で定義されている), $\Delta x, \Delta y$: それぞれ x 方向および y 方向の格子幅, w_5 : 格子の下面の鉛直方向流速, h : 水深, q : 表層格子より上部から流入する流量, W_x, W_y : それぞれ x, y 方向の風速である。また、 ϕ_s : 水表面で吸収される日射量 ($\phi_s = (1-\alpha)\beta\phi_0$)、 ϕ_a : 長波による大気輻射熱、 ϕ_L : 顕熱、潜熱である⁴⁾。

底面格子では、底面における境界条件を考慮して以下の式および項を用いた。

連続式

$$w_6 = -\frac{M_1 - M_2}{\Delta x} - \frac{N_3 - N_4}{\Delta y} + w_{b1} - w_{b2} \quad (12)$$

$$H_g > z_b \text{ then } w_{b1} = w_{gs}, \quad H_g < z_b \text{ then } w_{b1} = 0$$

$$w_{b2} = \min(w_{*1}, w_{*2}, w_{*3})$$

運動量方程式

$$\varepsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (13)$$

$$\varepsilon_z \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (14)$$

ここに、 w_6 : 格子上面の鉛直方向流速, w_{b1} : 底面において湧出する場合の鉛直方向流速, w_{b2} : 底面において浸透する場合の鉛直方向流速, H_g : 土砂内の水位, z_b : 地盤高, w_{gs} : 土砂内の表層格子の上面流速, w_{*1} : 浸透能, w_{*2} : 表面水量による最大流下速度, w_{*3} : 土砂内空隙の体積から計算される最大流下速度, n : マニングの粗度係数である。

地下水の連続式（地下水面の存在する格子）

$$\lambda \frac{\partial H_g}{\partial t} = -\frac{M_1 - M_2}{\Delta x} - \frac{N_3 - N_4}{\Delta y} + w_5 + \frac{q_g}{\Delta x \Delta y} + w_{b2} \quad (15)$$

ここに、 λ ：土砂の空隙率、 q_g ：土砂内表層格子より上部から流入する流量である。(7)式を用いる場合、土砂内は $H = H_g$ 、壁面境界の水域は $H = z_g + h$ である。

数値解析には差分法の陽的解法であるLeap-Frog法を用いる。移流項にはDONORスキームを、時間項には前進差分を、粘性項には中央差分を用い、底面摩擦項にはVasilievの安定性を考慮し陰的な取り扱いを行った。対象としたワンドが潮汐変動の影響を受け2m以上の水位差が生じるため、表層を移動させて計算格子を増減させた。ワンド内で表層層厚の最小値が基準層厚の1.6倍の場合は表層を一つ増やし、0.4倍の場合は表層を一つ減らしている。さらに、堆積土砂内の窪み部（水溜り）および地下水の表層でもその格子の層厚を用いて上記の操作を行っている。また、図5の場合、実際は表層と定義した箇所(ks層)の一つ上の計算格子(ks+1層)にも水が進行するはずであるから、その場合の水の挙動を式(1)～(4)を用いて取り扱っている。ただし、先端の取り扱いには移動限界水深(0.001m)を採用し、計算格子の水深が移動限界水深以下の場合、または、段落ちとなる場合には、次の本間の越流公式を用いて流量フラックスを求める。

$$u = \mu \sqrt{2gh} \quad (16)$$

ここに、 μ には0.35を用いている。

このようなモデル化を行うことによって、ワンドで生じる一連の水の動きが解析可能となった。ただし、土砂内の水温変化のモデル化は考慮しておらず、土砂内水温を一定値として取り扱っている。したがって、水域との境界においてダルシー則で計算された流速（流量）により土砂内の一定水温が水域に流入する。

3.2 計算条件

本研究では、ワンドを対象とした水の挙動に関する数値解析モデルの作成を第一の目標としている。ここでは、定性的な検討を実施することとし、図6のような領域を取り扱う。なお、この領域は概ね対象としているワ

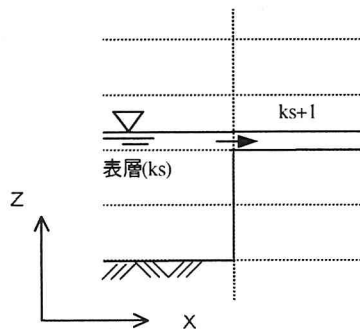


図5 陸域に進入する水の取り扱い

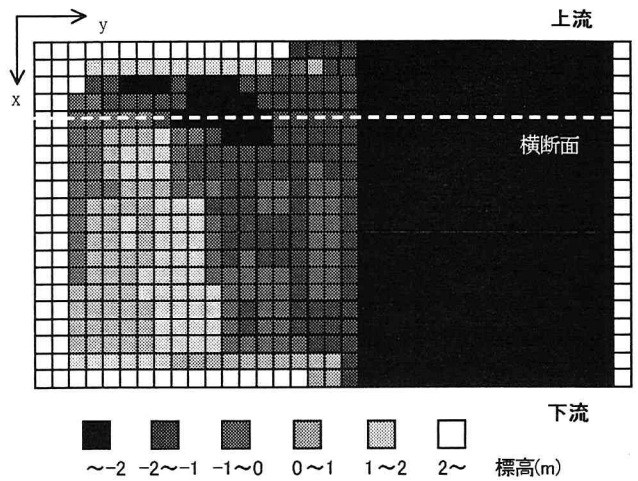


図6 計算領域

ンドを模している。この領域を x 方向20m、 y 方向20m、 z 方向0.25mの格子で分割した。計算は夏季を対象とし10日間の想定解析を行った。河川の上流端条件として、横断方向の水位を一定であるとみなして、運動方程式((2)式)から得られた流量が100.0m³/sとなるように収束計算で水位を決定し、その下での水位、流速を上流端境界条件としている。また、下流端境界条件には大潮時の潮汐変動を考慮して振幅1.0m周期12時間の正弦波を与えている。気温、日射量などの気象データは平成12年8月11日12:00から21日12:00までの名古屋地方気象台で観測された値を用いた。さらに、流入水温は著者らが平成13年8月9日に行った観測結果から27℃とした。

水平方向の渦動粘性係数および渦動拡散係数は一定値1.0m²/sとし、鉛直方向のそれらにはリチャードソン数(R_i)の関数として $0.001 \exp(-0.5R_i) + 0.000001 \text{ m}^2/\text{s}$ を与えた。熱収支における係数について、 $\alpha = 0.06$ 、 $\beta = 0.5$ 、 $\eta = 0.5$ とした。 w_{*1} （浸透能）は裸地の値80mm/h^[5]をカニ穴等を考慮して10倍しており、 $\lambda = 0.5$ 、 $K_g = 0.01 \text{ m/s}$ 、土砂内の水温を19℃とした。

3.3 計算結果および考察

ここでは、10日目(8月21日)の結果を示す。流速の平面分布を図7に示す。これより、満潮干潮などの水位変化に伴い解析されている領域が変化し、例えば、干潮時における堆積土砂の露出した状況が再現されていることがわかる。また、本図から上げ潮時には開口部の主に上流部分からワンド内に流入しており、下げ潮時にはワンド奥部から本川下流へ向かう流れがみられる。下げ潮時の流れの様子は観測中にも確認され定性的な傾向は再現されているようである。次に、図8に図6に示した横断面における流速分布と水温分布を示す。本図の流れは横断方向および鉛直方向へのものである。これらの図から、ワンドへ出入りする横断方向の水の流れが見て取れ、かつ、水温分布図からワンド内の底層に低温水の存在が見

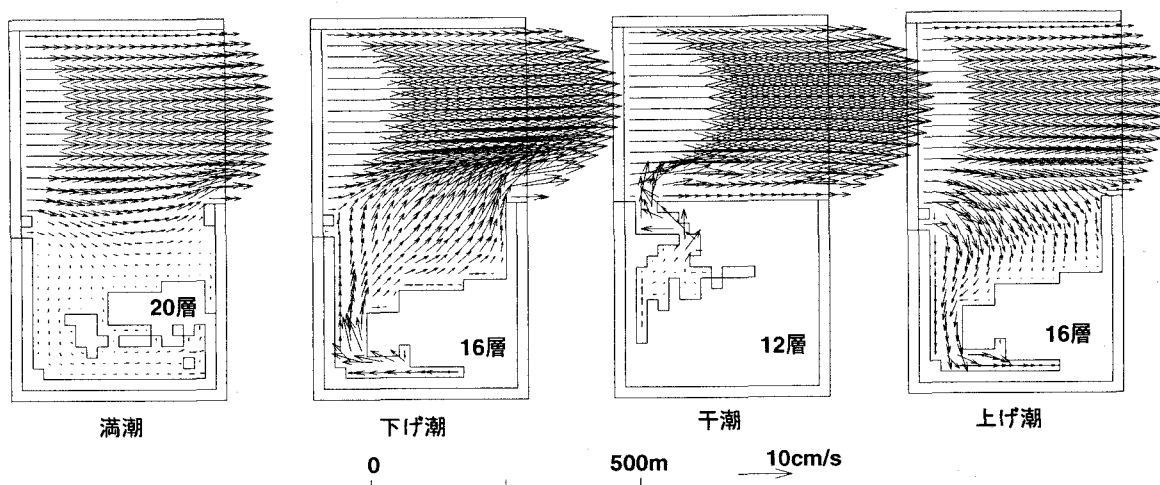


図7 表層における流速の平面分布

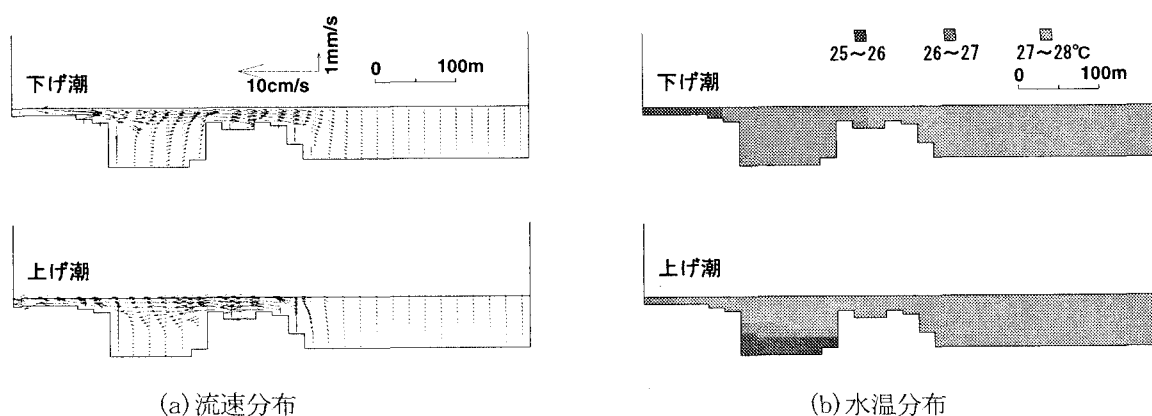


図8 流速と水温の横断分布

られた。ただし、詳細な検討を進めるためには、ワンドの正確な領域データの下で、種々の係数を適切に設置し流量等の境界条件を定めて計算する必要がある。

4. おわりに

本研究では木曽川河口から19.0kmの右岸に位置するワンドを対象として、水温と水深の時間変化の観測結果から、ワンド内の水温構造の検討を行った。その結果、夏季においてワンド内中央部では底層に低水温水塊が存在し強固な成層を形成することと、それに伴いDO低下が認められることを示した。この原因として伏流水の流入が考えられる。

つぎに、ワンド内の水温構造の把握を目的に、流動と水温変化を表現する数値モデルを土砂内地下水の挙動も含めて構築した。モデル領域を用いて解析を行った結果、その流れは定性的観点から概ね妥当であると考えられる。また、ワンド中央部において低水温水塊が存在しており、これも観測結果と一致した。

今後は詳細な計算条件の下で解析を行い、ワンド内の流れと水温の変化機構を明らかにし、さらに水質モデルを導入して、水環境の視点から考察を進めていきたい。

謝辞：本研究は土木学会河川懇談会共同研究「わんどの水理特性と河川環境（代表：四日市大学・木村一郎）」における研究の一部であり、現地観測や研究会での議論を大いに参考とした。参加された方々および国土交通省木曽川下流工事事務所の皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 木村一郎他：平成12年度河川懇談会共同研究「ワンドの水理特性と河川環境」研究成果報告書，2000.
- 2) 北村忠紀・山田淳夫・辻本哲郎：水制背後の局所的河床低下によるわんど地形の形成、河川技術論文集 Vol.7, pp.327-332, 2001.
- 3) 山下洋平・伊藤昭文・武田誠・松尾直規：木曽川ワンド群の堆積状況の支配的要因に関する研究、土木学会中部支部研究発表会講演概要集、II-52, 2001.
- 4) 岩佐義朗編者：数値水理学，丸善，1995.
- 5) 土木学会：水理公式集，p.24, 1999.
- 6) 鷺見哲也・岩崎充宏・辻本哲郎：木津川砂州上のたまりの平水および洪水時の物理環境、河川技術論文集 Vol.7, pp.339-344, 2001.

(2001.10.1受付)