

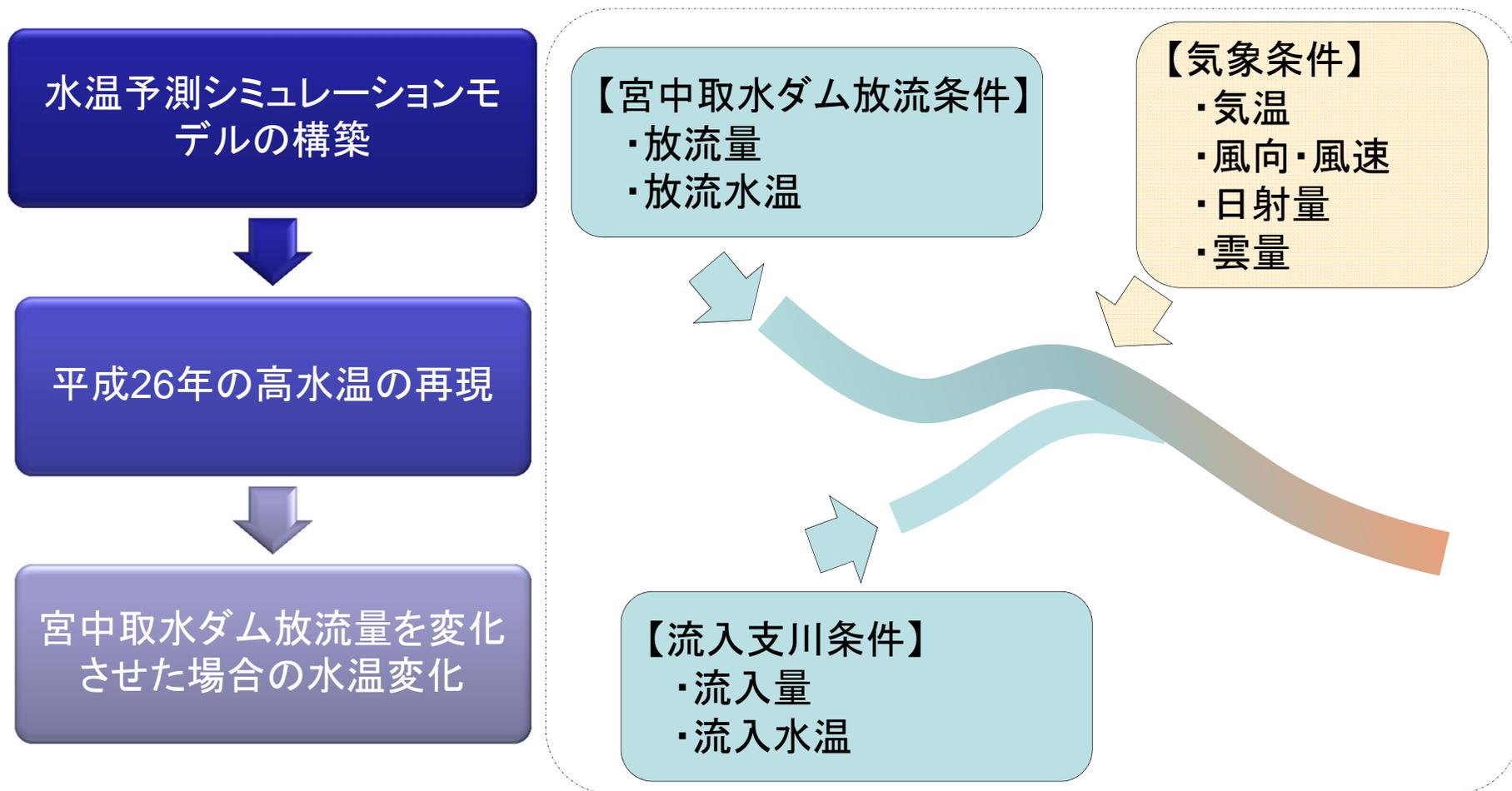
3次元水理水温解析モデル

平成26年12月18日

宮中取水ダム試験放流検証委員会

1-2 3次元水理水温解析モデルの構築

- 河川流量と水温との関係を検証するために、3次元のシミュレーションモデルを構築する。
- 河川水温が、日射量、最高気温、宮中取水ダム放流水温と正の相関があることを踏まえ、気象条件、宮中取水ダム放流条件、流入支川条件の影響等を考慮する。
- まずは、H26年に観測した縦断的な水温変化を再現する。



1-2 3次元水理水温解析モデルの構築

流れの解析に係る基礎方程式

[水の連続式]

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

[運動量保存式]

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} &= -\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} g + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \end{aligned}$$

ここで、 x 、 y ：流れの水平方向の座標、 z ：流れの鉛直方向の座標、 u 、 v 、 w ： x 、 y 、 z 方向における流速成分、 ζ ：水位、 g ：重力加速度、 σ_x 、 σ_y 、 σ_z ：各方向の有効(分子+渦動)応力成分、 D_{Th} 、 D_{Tz} ：水平および鉛直方向における熱の有効(分子+渦動)拡散係数、 ρ ：水温 T の水の密度、 ρ_0 ：水の基準密度である。

1-2 3次元水理水温解析モデルの構築

水温の解析に係る基礎方程式

[水温収支式]

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (D_{Th} \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_{Th} \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_{Tz} \frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{H_{sz}}{\rho C_p} + S_T$$

ここで、

$\tau_{xy} = \tau_{yx}$ 、 $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ 、 $\tau_{yz} = \tau_{zy}$: 各方向の有効(分子+渦動)応力成分

T : 水温

C_p : 水の比熱

D_{Th} 、 D_{Tz} : 水平および鉛直方向における熱の有効(分子+渦動)拡散係数

ρ : 水温 T の水の密度

ρ_0 : 水の基準密度

H_{sz} : 日射や大気との熱の授受

S_T : 日射や大気によるもの以外の熱の授受(河床、流入支川、湧水等)

1-2 3次元水理水温解析モデルの構築

日射や大気との熱の授受（その1）

【日射や大気との熱の授受】 H_{sz}

= 【太陽の日射による熱供給】 ϕ_z + 【大気との間の熱損失、熱供給】 ϕ_L

【太陽の日射による熱供給】 ϕ_z

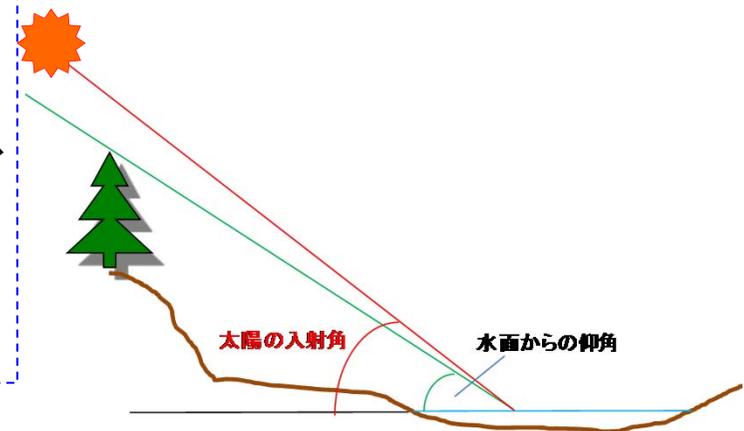
日射による熱放射量 ϕ_s は水面で反射されて ϕ_0 となり、そのうち $\beta\phi_0$ は水面で吸収され、残りの $(1-\beta)\phi_0$ が水中に吸収されながら水深の指数関数的に減衰していく。

$$\phi(z) = (1 - \beta)\phi_0 \cdot \exp\{-\eta(\zeta - z)\}$$

$$\phi_0 = (1 - a_r)\phi_s$$

ここで、 ϕ_s :日射量、 ϕ_0 :水面反射を差し引いた日射量、 a_r :水面反射率(≒0.06)、 $\phi(z)$:標高 z に達する放射熱、 β :水面吸収率(≒0.5)、 η :減衰係数、 ζ :水位である。

また、樹木や地形により水面に影が落ちる場合には、日射量を一定割合で減じることとした。



1-2 3次元水理水温解析モデルの構築

日射や大気との熱の授受（その2）

【大気との間の熱損失、熱供給】 ϕ_L

水面付近では、日射による影響のほか、蒸発・伝導など、大気との間の熱損失・熱供給がある。これらの影響について、次のとおりモデル化した。

蒸発・伝導による熱損失はRohwerの式、有効逆放射による熱損失をSwinbankの式を用いて計算した。

$$\phi_L = \phi_{ra} + \phi_e + \phi_c$$

$$\phi_e + \phi_c = (0.000308 + 0.000185W) \cdot \rho \cdot (e_s - \psi e_a) \times \left\{ L_v + C_p T_s + \frac{269.1 \cdot (T_s - T_a)}{(e_s - \psi e_a)} \right\}$$

$$\phi_{ra} = 0.97 \cdot k \cdot \left\{ T_w^4 - 0.937 \times 10^{-5} \cdot T_A^6 \cdot (1.0 + 0.17 \cdot C_l^2) \right\}$$

ここで、 ϕ_L :水面からの熱損失 (kcal/m²/日)、 ϕ_e :蒸発による熱損失、 ϕ_c :伝導による熱損失、 ϕ_{ra} :有効逆放射 (=水面からの長波逆放射 - 大気長波放射) による熱損失、 W :風速 (水面上15cmの位置における値、m/s)、 e_s :表面水温に相当する飽和蒸気圧 (mmHg)、 e_a :気温に相当する飽和蒸気圧 (mmHg)、 ψ :相対湿度、 L_v :蒸発の潜熱 (kcal/kg)、 C_p :水の比熱 (kcal/kg/°C)、 T_s :表面水温 (°C)、 T_a :気温 (°C)、 T_w :表面水温 (K、絶対温度)、 C_l :雲量 (=0.0~1.0)、 k :Stefan・Boltzmann常数 (= 1.171×10^{-6} kcal/(m²・日・K⁴)) である。

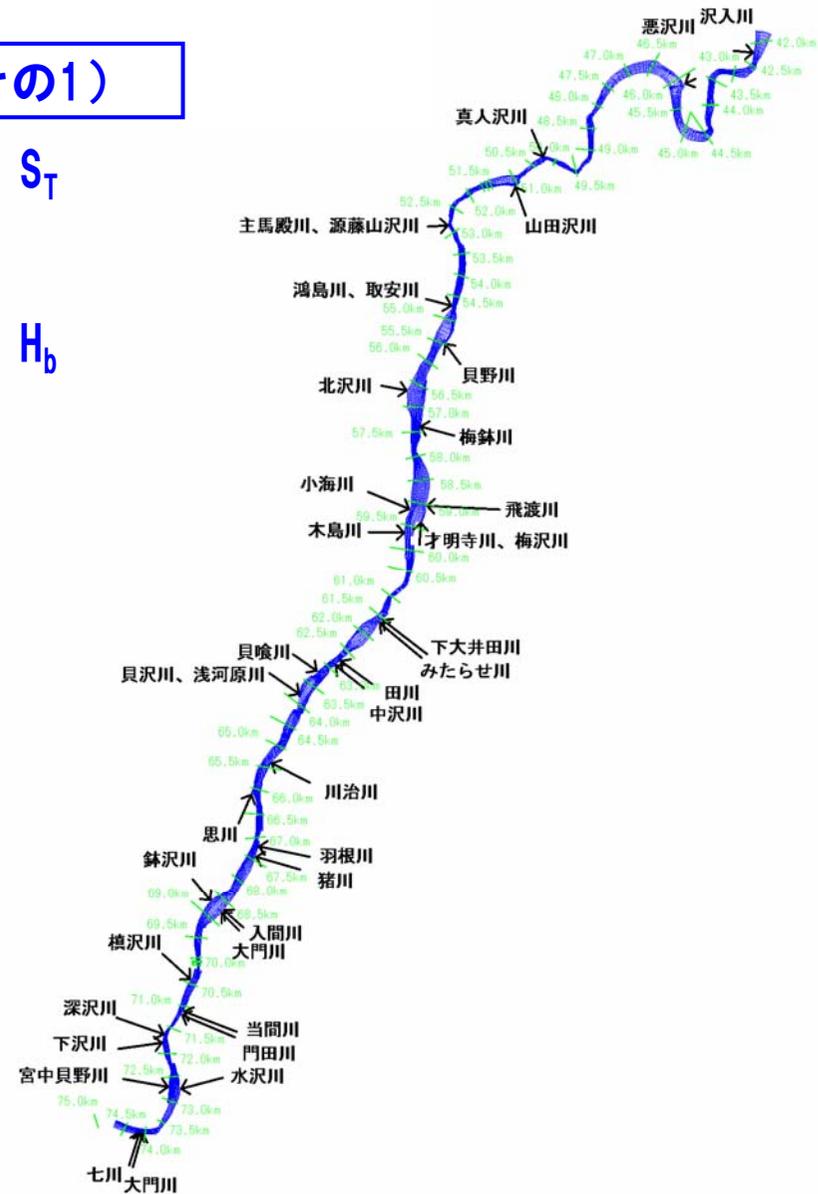
1-2 3次元水理水温解析モデルの構築

日射や大気によるもの以外の熱の授受（その1）

$$\begin{aligned} \text{【日射や大気によるもの以外の熱の授受】 } S_T \\ = \text{【支川流入】 } S_s + \text{【湧水】 } S_y \\ + \text{【河床との間の熱損失、熱供給】 } H_b \end{aligned}$$

【支川流入】 S_s

右図の39支川についてモデル化し、
本川の合流点に流入するものとした。
支川の流量と水温は平成26年度の
観測値から設定した。



1-2 3次元水理水温解析モデルの構築

日射や大気によるもの以外の熱の授受（その2）

【湧水】 S_y

夏期に恒常的に低温水であった場所を湧水箇所と想定した。

湧水の水温は、平成26年度の観測値の平均水温とした。

湧水量を現地で測定することが困難であるため、湧水想定箇所から本川合流までの水温分布が表現できる水量を想定した。



1-2 3次元水理水温解析モデルの構築

日射や大気によるもの以外の熱の授受（その3）

【河床との間の熱損失、熱供給】 H_b

底層付近では、河床との間の熱損失・熱供給がある。この影響について、次のとおりモデル化した。

$$H_b(m\Delta t) = K_{\theta b} \sqrt{\frac{T_b^* - T_b}{m\Delta t}}$$

ここで、 H_b :河床伝熱量、 $K_{\theta b}$:河床伝熱量に関する係数、 T_b :底層水温、 T_b^* :1時間前における底層水温、 m :1時間前からの計算ステップ数、 Δt :計算時間間隔である。

1-2 3次元水理水温解析モデルの構築

- 地形のモデル化は、複雑な現地地形をよりの確に表現できるように、一般的に使用される長方形メッシュのデカルト座標ではなく、直行曲線座標を用いた。
- また、水深方向についても、長方形メッシュのデカルト座標ではなく水深変化を表現しやすい σ 座標を用いた。

