

## 2.5 貧酸素水塊の発生及び拡大に関連する要因の抽出

諏訪湖の貧酸素水塊と各種要因の関係性を明らかにすることを目的として、観測データを時空間的に拡大して再現する数値シミュレーションモデル(諏訪湖貧酸素水塊モデル)を構築し、その結果を用いて諏訪湖における貧酸素水塊の発生及び拡大に関連する要因を抽出した。

本業務は貧酸素水塊の消長の分析であるため、水塊の空間的な移動などの影響も含めながら、水塊の拡大や解消の連続的な連動の様子をつつがなく可視化する必要があるため、諏訪湖貧酸素水塊予測モデルの計算結果を用いた分析が目的によく整合しているものと考えられる(図 2.17参照)。

このため、諏訪湖貧酸素水塊予測モデルのシミュレーション結果の分析を通じて、気象などの外部条件と貧酸素水塊の消長の関係を明らかにしていくこととした。

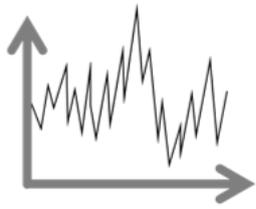
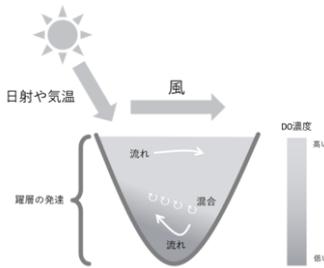
観測結果を分析する場合	計算結果を分析する場合
 <p>○ 実現象を分析できる</p>	 <p>△ あくまで実現証の近似を分析しているに過ぎない。</p>
<p>△ 時間・空間的なデータが少なく、水塊の立体構造や現象の連続性の分析が困難</p>	<p>○ 時空間すべてのデータそろっており、水塊の空間分布はその変遷の分析が可能</p>

図 2.17 観測結果・計算結果それぞれを条件分析する場合の利点と問題点

要因の抽出については、貧酸素水塊に関連する要因を図 2.36のとおり定義した上で、外的要因のうち貧酸素水塊の日々の消長に影響を与える気象条件に着目し、2.5.3 節～2.5.8 節に示すような分析を通じて要因を抽出して、これを参考にモデル構築を行った。

また、総合的な解析の結果の考察のためには、既存知見との整合性を確認するため、既存知見についても簡単に取りまとめた。

予測モデルの構築では、図 2.17に示す通り、物理・化学シミュレーション結果を活用した統計モデルを構築することから、内的要因・外的要因についても区別し、外的要因のみを用いて(なおかつ内的要因をある程度統計モデル自身が予測しながら)最終的な貧酸素水塊を予測するモデルとして構築した。

なお、外的要因は物理・化学シミュレーションにおいて境界条件として取り扱われる要因であり、内的要因は外的要因(境界条件)に紐づいて変動する要因である。内的要因は物理・化学シミュレーションの内部で計算される。例えば、図 2.17では、日射や風は外的要因であり、流れや混合は内的要因である。

既往の知見で知られている諏訪湖の貧酸素水塊の消長に関する概要を確認した。

基本的には水温躍層の発達と、風による水の動きに連動した貧酸素化と、貧酸素水塊の移動、解消がよく知られている現象だと考えられる。概略図を図 2.18に示す。

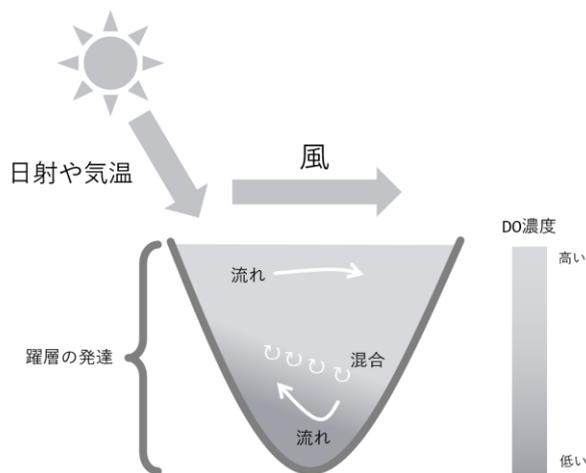


図 2.18 諏訪湖における貧酸素水塊の消長に関する概略

木村（平成 24 年）<sup>2</sup>らによれば、湖内 5 地点の湖底近傍における DO 連続観測の結果から、貧酸素水塊の発生・解消に関する時空間特性について以下のような結論が得られている。

- ✓ 貧酸素状況の解消には強風と降雨が関連  
ただし、気温の変動傾向や河川水温、湖水温によって傾向が異なる
- ✓ 3~6m/s 程度の強風が数時間吹いた後に内部セイシュによると思われる貧酸素状態の発生・解消がみられる
- ✓ 7~9m/s 程度の強風が 4 時間程度吹き続けると上下層が混合され貧酸素水塊が解消
- ✓ 晴天弱風時の夜間には強い水面冷却（一時的に貧酸素水塊解消されることも）

<sup>2</sup> 木村昌嗣・豊田政史・宮原裕一（2015）：現地観測に基づく諏訪湖における貧酸素水塊の空間特性の分析、土木学会論文集 B1（水工学） 71(4), I\_769-I774

## 2.5.1 数値シミュレーションモデルの活用

### (1) 流動モデルの概要

数値シミュレーションは、対象とする現象を必要な部分だけ抜き出して簡略化・抽象化してモデル化を行い、計算機上で模擬実験を行うことである。本業務において諏訪湖の物理場と水質生態系を計算する数値シミュレーションモデルである諏訪湖貧酸素水塊モデルは、「平成29年度 湖沼水質保全対策検討業務」（環境省委託業務）において諏訪湖の物理場及び水質の再現計算を行い、その再現性について客観的に妥当性の評価を行ったモデル（第17回世界湖沼会議（いばらき霞ヶ浦 2018）分科会にてポスター発表）の計算式を用い、各種条件と一部パラメータを変更して活用した。既存モデルから変更したパラメータは、参考資料のモデルパラメータ一覧において参考文献「M」として表記している。

モデルは物理場を計算する流動モデルと溶存酸素を計算項目に含む水質生態系モデルから構成される。

流動モデルは流体力学の基礎方程式を差分化することにより解く数値モデルで、基本式は、回転系の非圧縮流体を仮定した運動方程式、連続の式および水温の保存式であり、ブシネスク近似および静水圧近似が施されている。多層レベルモデルの概念図および各変数（流速・水位）の定義点位置を図 2.19に示す。

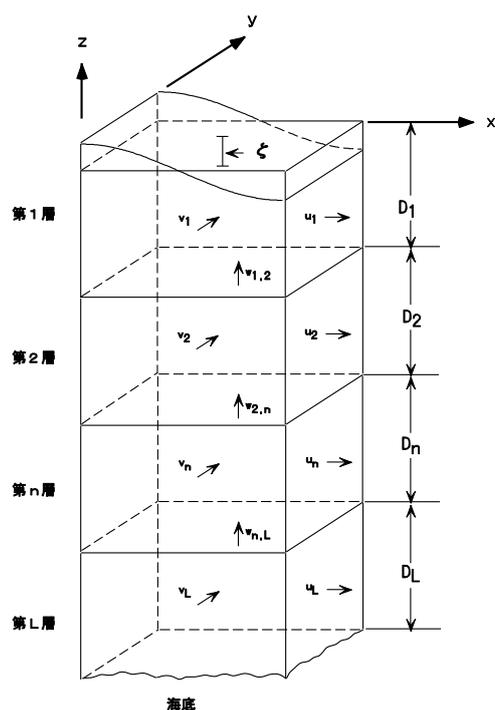


図 2.19 流動モデル(多層レベルモデル)の概念図

#### 1) 基礎方程式

基本式は、回転系の非圧縮流体を仮定した運動方程式、連続の式および水温の保存式であり、ブシネスク近似および静水圧近似が施されている。

<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>

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_y$$

$$\rho g = -\frac{\partial p}{\partial z}$$

<水温の保存式>

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_H \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + F_\theta$$

ここで、

$x, y, z$  : 右手系の直交座標系、上向きを正

$u, v, w$  :  $x, y, z$  方向の流速成分

$p$  : 圧力

$\theta$  : 水温

$f$  : コリオリ係数

$\rho_0$  : 代表密度

$\rho$  : 密度

$K_M$  : 鉛直渦動粘性係数

$K_H$  : 鉛直渦拡散係数

$A_M$  : 水平渦動粘性係数

$A_H$  : 水平渦拡散係数

$g$  : 重力加速度

$t$  : 時間

である。

<湖水の状態方程式>

湖水の密度は塩分を 0 とした上で、以下の国際海水状態方程式(EOS80)に従い水温により算定される。

$$\rho = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3 + a_4 \cdot T^4 + a_5 \cdot T^5$$

$$a_0 = 999.842594, \quad a_1 = 6.793952 \times 10^{-2},$$

$$a_2 = -9.09529 \times 10^{-3}, \quad a_3 = 1.001685 \times 10^{-4},$$

$$a_4 = -1.120083 \times 10^{-6}, \quad a_5 = 6.536332 \times 10^{-9},$$

<水平渦動粘性係数および水平渦拡散係数>

水平渦動粘性係数 ( $A_M$ )、水平渦拡散係数 ( $A_H$ ) は、Smagorinsky(1963)<sup>3</sup>による以下の計算式を用いて算出する。

$$A_{H,M} = C_{H,M} (\Delta x \cdot \Delta y) \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}$$

ここで、 $C_{H,M}$  は経験的な値で 0.05~0.5 程度の値となる。本検討においては 0.1 を設定した。

<鉛直渦動粘性係数および鉛直渦拡散係数>

鉛直渦動粘性係数 ( $K_M$ )、鉛直渦拡散係数 ( $K_H$ ) は、プラントルの混合距離理論に従って以下の様に表される。

$$K_M = \psi_M l^2 \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right|, \quad K_H = \psi_H l^2 \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right|$$

$\psi_m$ ,  $\psi_h$  は密度成層の効果による係数である。Munk and Anderson(1948)<sup>4</sup>に従い、以下のようになりチャードソン数  $Ri$  の関数で表される。

$$\psi_m = 0.06(1+10Ri)^{-1/2}, \quad \psi_h = 0.06(1+3.33Ri)^{-3/2}$$

リチャードソン数  $Ri$  は以下の式で表される無次元数である。密度成層の強さと水平流速の鉛直シアの比として表現される。

$$Ri = \frac{-\frac{g}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial z} \right)}{\left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2}$$

密度成層の効果が流速 (流れ) のシアによる混合のエネルギーより大きくなれば  $Ri$  は大きな値となり、その結果鉛直粘性・拡散係数は小さな値となる。これは、密度成層の発達が生じる混合を抑制する事に対応している。逆に、流れのシアによる混合エネルギーが大きくなれば  $Ri$  は小さな値となり、鉛直粘性・拡散係数は大きな値となる。これは、流れによる混合が密度成層を壊して上下に混合する事に対応している。

混合距離 ( $l$ ) は以下の経験式から求める。

$$l = \kappa H \left( 1 - \frac{|z|}{H} \right) \left( \frac{|z|}{H} \right)^{1/2}$$

<sup>3</sup> Smagorinsky,J.(1963) : General Circulation Experiments with the Primitive Equations I. The Basic Experiment, Monthly Weather Review,91,99-164

<sup>4</sup> Munk,W.H. and E.R.Anderson(1948) : Notes on theory of the thermocline.,J.Mar.Res.,7,276-295

混合距離は密度中立状態の鉛直方向の乱れを長さのスケールで表したもので、水面と湖底では水の動きが制限されることからゼロとなる。ここで、

- $R_i$  : リチャードソン数
- $\kappa$  : カルマン定数 (=0.4)
- $l$  : 混合距離
- $H$  : 水深
- $z$  : 基準面からの鉛直座標値

である。

## 2) ヒシ繁茂による流動抵抗

ヒシ繁茂による流動抵抗は、開水路に樹木が繁茂している場合の摩擦係数  $f$

$$f = \frac{1}{2} C_d a_w h$$

$C_d$ : 幹や枝葉に関する抵抗係数、 $h$ :水深(m)

$a_w$ : 投影面積密生度( $m^2/m^3$ )、流下方向にみた単位体積の流体塊中にあるヒシの総投影面積)

を用いることとする。抵抗係数は、既存文献値、投影面積密生度は、図 2.23におけるヒシ群落の株間距離を基に設定した。ヒシ帯における流れ場は、乱流域にあたると考えられることから、ヒシ分布に伴うせん断応力

$$\tau = \rho f |\mathbf{V}| \bar{V}$$

$\tau$ :ヒシ分布に伴う応力、 $\rho$ :密度、 $\mathbf{V}$ :流速  
が、最上層に加わるものとして計算を行った。

## (2) 水質生態系モデルの概要

構築した水質生態系モデルは水質と底質のサブモデルを結合した水質-底質結合生態系モデルである。モデルの概念図を図 2.20に示す。このモデルは、各構成要素間の物質輸送を炭素 (C)、窒素 (N)、リン (P)、酸素 (O) を指標元素として算定する物質循環型のモデルであり、水質と底質の相互作用を考慮したものである。藻場については、光量に応じた栄養塩吸収と酸素放出機能を考慮した。

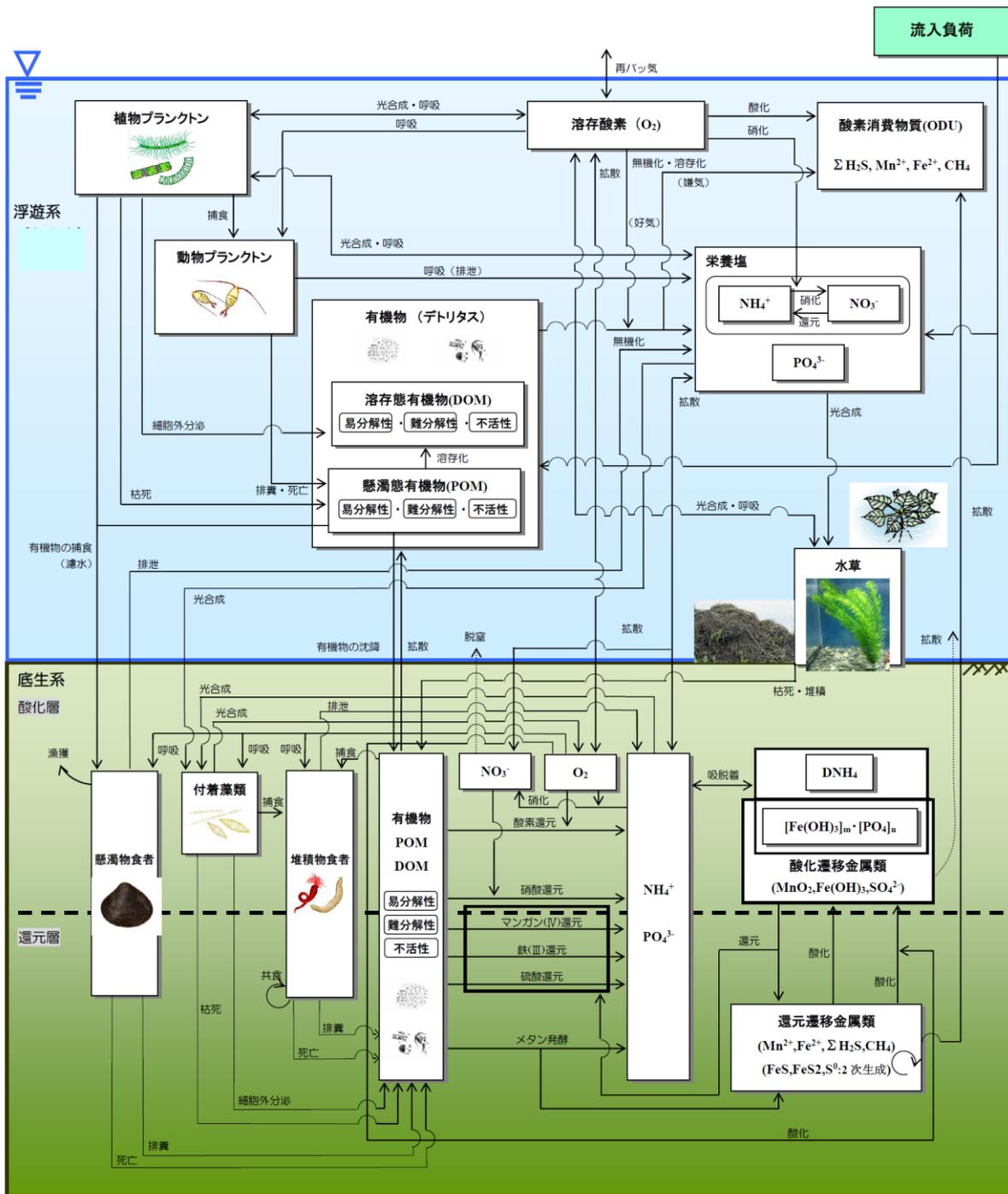


図 2.20 水質-底質結合生態系モデルの概念図

## 1) サブモデルの概要

水質-底質結合生態系モデルは水質サブモデル、底質サブモデル、底生生物サブモデルの3つのサブモデルから構成される。水質サブモデルは水中における動・植物プランクトンの生産や有機物や栄養塩の循環を解析するもの（低次生態系）であり、底質サブモデルは底泥内の溶存酸素や栄養塩、マンガン、鉄等の物質循環を解析するもの、底生生物サブモデルは生息環境（水質・底質）に応じた底生生物の代謝活性を解析するものである。底質サブモデルでは水質サブモデルで計算される底泥への有機物の沈降量が境界条件となり、逆に水質サブモデルは底質サブモデルで計算される栄養塩の溶出量や酸素消費量が境界条件となる形で、3つのモデルはそれぞれ相互に作用しあい結合している。

表 2.4 各サブモデルの解析内容と出力項目

サブモデル	解析内容・出力項目
水質サブモデル	解析内容： 低次生態系における物質循環を考慮した水質予測
	出力項目： 植物プランクトン、動物プランクトン、 有機物（デトリタス）、栄養塩類、溶存酸素、 酸素消費物質（ODU）  底泥への懸濁態有機物の沈降量（フラックス）
底質サブモデル	解析内容： 初期続成過程を考慮した底質予測
	出力項目： 有機物、栄養塩類、 マンガン、鉄、硫黄、メタン、溶存酸素  直上水-底泥間の物質循環量（フラックス）
底生生物サブモデル	解析内容： 底生生物現存量と底生生物が及ぼす物質循環量の予測
	出力項目： 付着藻類、懸濁物食者、堆積物食者、水草類  底生生物による水質に対する物質循環量 底生生物による底質に対する物質循環量

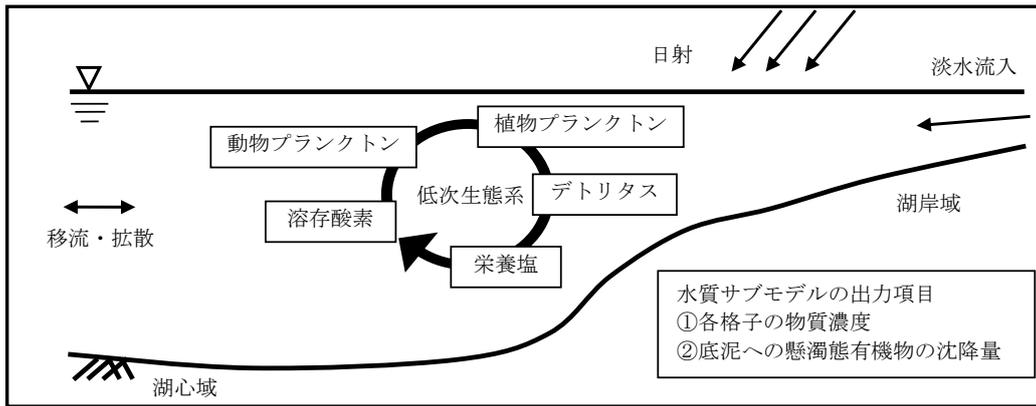


図 2.21(1) 水質サブモデルが解析する主な現象と出力項目

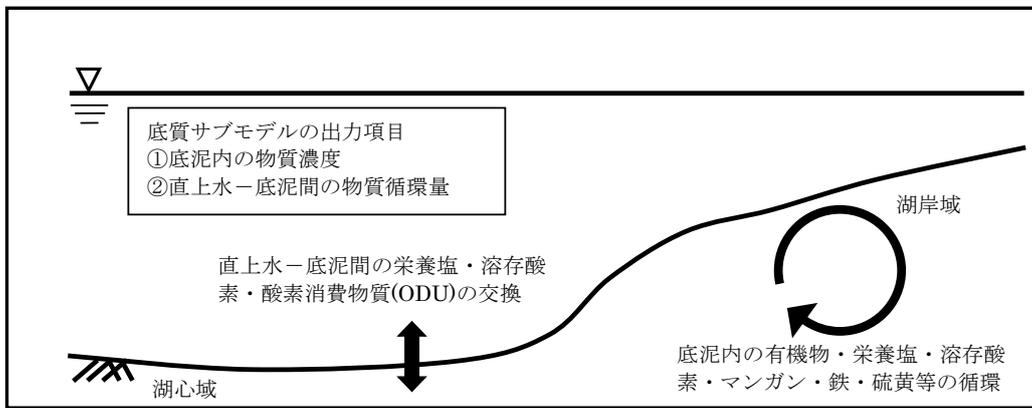


図 2.21(2) 底質サブモデルが解析する主な現象と出力項目

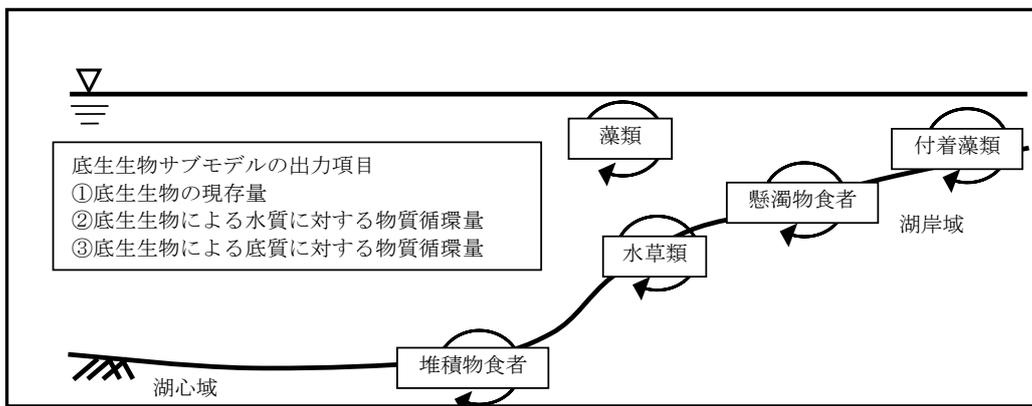


図 2.21(3) 底生生物サブモデルが解析する主な現象と出力項目

## 2) モデルの構成要素

水質-底質結合生態系モデルの計算項目を以下に示す。水質の計算項目として、懸濁態有機物を分解速度別に易分解性・難分解性・不活性物質の3種類に区分した。

表 2.5 水質の計算項目

変数名	計算項目	単位
<i>PHY</i>	植物プランクトン濃度	$\mu\text{g/L}$
<i>ZOO</i>	動物プランクトン濃度	mgC/L
<i>DO</i>	溶存酸素濃度	mgO/L
<i>POC<sub>fast</sub></i>	易分解性の懸濁態有機炭素濃度	mgC/L
<i>POC<sub>slow</sub></i>	難分解性の懸濁態有機炭素濃度	mgC/L
<i>POC<sub>refractory</sub></i>	不活性物質の懸濁態有機炭素濃度	mgC/L
<i>DOC</i>	溶存態有機炭素濃度	mgC/L
<i>PON<sub>fast</sub></i>	易分解性の懸濁態有機窒素濃度	mgN/L
<i>PON<sub>slow</sub></i>	難分解性の懸濁態有機窒素濃度	mgN/L
<i>PON<sub>refractory</sub></i>	不活性物質の懸濁態有機窒素濃度	mgN/L
<i>DON</i>	溶存態有機窒素濃度	mgN/L
<i>POP<sub>fast</sub></i>	易分解性の懸濁態有機リン濃度	mgP/L
<i>POP<sub>slow</sub></i>	難分解性の懸濁態有機リン濃度	mgP/L
<i>POP<sub>refractory</sub></i>	不活性物質の懸濁態有機リン濃度	mgP/L
<i>DOP</i>	溶存態有機リン濃度	mgP/L
<i>NH<sub>4</sub>-N</i>	アンモニア態窒素濃度	mgN/L
<i>NO<sub>x</sub>-N</i>	亜硝酸及び硝酸態窒素の合計濃度	mgN/L
<i>PO<sub>4</sub>-P</i>	リン酸態リン濃度	mgP/L
<i>ODU</i>	酸素消費物質濃度 ( $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ , $\text{Mn}^{2+}$ , $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{CH}_4$ の合計値)	mgO/L

水質サブモデルにおいては、COD、T-N、T-P濃度は、以下のようにモデルの中で計算される解析項目の濃度より換算して算出する。

$$\begin{aligned} \text{COD} &= (\text{植物プランクトン PHY} \times \text{係数 a}) + (\text{動物プランクトン ZOO} \times \text{係数 b}) \\ &+ (\text{非生物態 POC} \times \text{係数 c}) + (\text{DOC} \times \text{係数 d}) \\ \text{T-N} &= \text{TON} + \text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_x\text{-N} \\ \text{TON} &= \text{植物プランクトン態 N} + \text{動物プランクトン態 N} + \text{非生物態 PON} + \text{DON} \\ \text{T-P} &= \text{TOP} + \text{PO}_4\text{-P} \\ \text{TOP} &= \text{植物プランクトン態 P} + \text{動物プランクトン態 P} + \text{非生物態 POP} + \text{DOP} \end{aligned}$$

表 2.6 底質の計算項目

変数名		計算項目	単位
<i>TOC</i>	固相+液相	底泥中の全有機炭素	mgC/g-dry
<i>TON</i>		底泥中の全有機窒素	mgN/g-dry
<i>TOP</i>		底泥中の全有機リン	mgP/g-dry
<i>NH<sub>4</sub>-N</i>	液相	間隙水中のアンモニア態窒素	mgN/L
<i>NO<sub>x</sub>-N</i>		間隙水中の亜硝酸及び硝酸態窒素	mgN/L
<i>PO<sub>4</sub>-P</i>		間隙水中のリン酸態リン	mgP/L
<i>DO</i>		間隙水中の溶存酸素	mgO/L
<i>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></i>		間隙水中の硫酸イオン	mgS/L
<i>Mn<sup>2+</sup></i>		間隙水中の Mn(II)イオン	mgMn/L
<i>Fe<sup>2+</sup></i>		間隙水中の Fe(II)イオン	mgFe/L
<i>ΣH<sub>2</sub>S</i>		間隙水中の ΣH <sub>2</sub> S (=H <sub>2</sub> S+HS <sup>-</sup> )	mgS/L
<i>CH<sub>4</sub></i>		間隙水中のメタン	mgC/L
<i>MnO<sub>2</sub></i>		固相	底泥中の二酸化マンガン
<i>Fe(OH)<sub>3</sub></i>	底泥中の水酸化鉄		mgFe/g-dry
<i>FeS</i>	底泥中の硫化鉄		mgS/g-dry
<i>FeS<sub>2</sub></i>	底泥中の黄鉄鉱		mgS/g-dry
<i>S<sup>0</sup></i>	元素状硫黄		mgS/g-dry
<i>DNH<sub>4</sub><sup>+</sup></i>	吸着態のアンモニア態窒素		mgN/g-dry
<i>DPO<sub>4</sub></i>	吸着態のリン酸態リン		mgP/g-dry

表 2.7 底生生物の計算項目

変数名	計算項目	単位
<i>DIA</i>	付着藻類	gC/m <sup>2</sup>
<i>BSF</i>	懸濁物食者	gC/m <sup>2</sup>
<i>BDF</i>	堆積物食者	gC/m <sup>2</sup>
<i>WEED</i>	水草 (ヒシ)	gC/m <sup>2</sup>

### 3) モデルで考慮する現象

各サブモデルにおいて考慮する現象・過程を以下に示す。表中の「+、-、±」はそれぞれの計算項目にとって増える(+)、減る(-)、条件によって増減する(±)過程を表している。モデル式及びパラメータについては参考資料に示した。

表 2.8(1) 水質サブモデルで考慮する過程

計算項目	+	-	±
植物プランクトン(PHY)	光合成	細胞外分泌 呼吸 枯死 ZOOによる摂食 沈降 BSFによる摂食	—
動物プランクトン(ZOO)	PHYの摂食	排糞 呼吸 死亡	—
溶存酸素(DO)	光合成(PHY)による生産	PHYの呼吸 ZOOの呼吸 POCの好気分解・無機化 DOCの好気分解・無機化 硝化 底泥による消費 ODUの酸化	再ばっ気 底生生物による光合成・呼吸等
懸濁態有機物(POM)	PHYの枯死 ZOOの死亡 ZOOの排糞 流入負荷	分解・無機化 沈降 BSFによる摂食	—
溶存態有機物(DOM)	PHYの細胞外分泌 POMの溶存化 流入負荷	分解・無機化	底泥からの溶出
アンモニア態窒素(NH <sub>4</sub> -N)	PHYの呼吸 ZOOの呼吸 POMの分解・無機化 DOMの分解・無機化 流入負荷	PHYの光合成 硝化	底泥からの溶出 底生生物による取り込み・排泄等
硝酸態窒素(NO <sub>3</sub> -N)	硝化 流入負荷	PHYの光合成	底泥からの溶出 底生生物による取り込み・排泄等
リン酸態リン(PO <sub>4</sub> -P)	PHYの呼吸 ZOOの呼吸 POMの分解・無機化 DOMの分解・無機化 流入負荷	PHYの光合成	底泥からの溶出 底生生物による取り込み・排泄等
酸素消費物質(ODU)	POMの嫌気分解・無機化 DOMの嫌気分解・無機化 底泥からの溶出	DOによる酸化	—

表 2.8(2) 底質サブモデルで考慮する過程

計算項目	+	-	±
有機態炭素(TOC)	水中からの沈降 底生生物の遺骸	分解・無機化 堆積	分子拡散 (DOC)
有機態窒素(TON)	水中からの沈降 底生生物の遺骸	分解・無機化 堆積	分子拡散 (DON)
有機態リン(TOP)	水中からの沈降 底生生物の遺骸	分解・無機化 堆積	分子拡散 (DOP)
アンモニア態窒素(NH <sub>4</sub> -N)	有機物の無機化 硝酸還元	硝化 BDIA EEL の光合成(一部)	分子拡散 吸脱着
硝酸態窒素(NO <sub>x</sub> -N)	硝化	硝酸還元 脱窒 BDIA EEL の光合成(一部)	分子拡散
リン酸態リン(PO <sub>4</sub> -P)	有機物の無機化	BDIA EEL の光合成(一部)	吸脱着
溶存酸素(DO)	—	有機物の無機化 硝化 還元物質の酸化 (Mn <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , H <sub>2</sub> S, CH <sub>4</sub> , FeS, FeS <sub>2</sub> )	分子拡散
硫酸イオン(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	O <sub>2</sub> による H <sub>2</sub> S の酸化 O <sub>2</sub> による FeS の酸化 S <sup>0</sup> の水和反応	有機物の無機化 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> による CH <sub>4</sub> の酸化	分子拡散
マンガン(II)イオン (Mn <sup>2+</sup> )	有機物の無機化 Fe <sup>2+</sup> による MnO <sub>2</sub> の還元 H <sub>2</sub> Sによる MnO <sub>2</sub> の還元	O <sub>2</sub> による Mn <sup>2+</sup> の酸化	分子拡散
鉄(II)イオン(Fe <sup>2+</sup> )	有機物の無機化 H <sub>2</sub> Sによる Fe(OH) <sub>3</sub> の還元 O <sub>2</sub> による FeS の酸化 O <sub>2</sub> による FeS <sub>2</sub> の酸化	O <sub>2</sub> による Fe <sup>2+</sup> の酸化 Fe <sup>2+</sup> による MnO <sub>2</sub> の還元	分子拡散 HS <sup>-</sup> と Fe <sup>2+</sup> の沈殿作用
二酸化マンガン(MnO <sub>2</sub> )	O <sub>2</sub> による Mn <sup>2+</sup> の酸化 水中からの沈降	有機物の無機化 Fe <sup>2+</sup> による MnO <sub>2</sub> の還元 H <sub>2</sub> Sによる MnO <sub>2</sub> の還元	—
水酸化鉄 (Fe(OH) <sub>3</sub> )	O <sub>2</sub> による Fe <sup>2+</sup> の酸化 Fe <sup>2+</sup> による MnO <sub>2</sub> の還元 水中からの沈降	有機物の無機化 H <sub>2</sub> Sによる Fe(OH) <sub>3</sub> の還元	—
硫化鉄(FeS)	水中からの沈降	O <sub>2</sub> による FeS の酸化 FeS と H <sub>2</sub> S の沈殿作用 FeS と S <sup>0</sup> の沈殿作用	HS <sup>-</sup> と Fe <sup>2+</sup> の沈殿作用
黄鉄鉱(FeS <sub>2</sub> )	FeS と H <sub>2</sub> S の沈殿作用 FeS と S <sup>0</sup> の沈殿作用 水中からの沈降	O <sub>2</sub> による FeS <sub>2</sub> の酸化	—
元素状硫黄(S <sup>0</sup> )	H <sub>2</sub> Sによる MnO <sub>2</sub> の還元 H <sub>2</sub> Sによる Fe(OH) <sub>3</sub> の還元 水中からの沈降	FeS と S <sub>0</sub> の沈殿作用 S <sup>0</sup> の水和反応	—
硫化水素(ΣH <sub>2</sub> S)*	有機物の無機化 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> による CH <sub>4</sub> の酸化 S <sup>0</sup> の水和反応	O <sub>2</sub> による H <sub>2</sub> S の酸化 H <sub>2</sub> Sによる MnO <sub>2</sub> の還元 H <sub>2</sub> Sによる Fe(OH) <sub>3</sub> の還元 FeS と H <sub>2</sub> S の沈殿作用	分子拡散 HS <sup>-</sup> と Fe <sup>2+</sup> の沈殿作用
吸着態アンモニア態窒素 (DNH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	—	**	吸脱着
吸着態無機リン(DPO <sub>4</sub> )	—	**	吸脱着

\* 硫化水素は、硫化水素(H<sub>2</sub>S)と硫化水素イオン(HS<sup>-</sup>)の合計値(ΣH<sub>2</sub>S)として算出され、pH と酸解離定数によってそれぞれの存在比が決定される

\*\*吸着態の栄養塩類に対する生物作用に関しては、知見が乏しいため考慮していない

表 2.8(3) 底生生物サブモデルで考慮する過程

計算項目	+	-	±
付着藻類(DIA)	光合成	細胞外分泌 呼吸 枯死 BDFによる被食	—
懸濁物食者(BSF)	濾水による摂食	排糞 呼吸 死亡 漁獲	—
堆積物食者(BDF)	DIAの摂食 有機物の摂食 BDFの摂食(共食い)	排糞 呼吸 死亡	—
水草(WEED)	光合成	細胞外分泌 呼吸 枯死 除去	—

### (3) 計算条件の設定

諏訪湖の数値シミュレーションモデルとして、すでに設定されている計算条件（現況再現計算）を表 2.9に示す。また、平成 29 年度湖沼水質保全対策検討業務において設定した諏訪湖における計算格子を図 2.22に示す。さらに、平成 28 年度のヒシ分布（観測値）と計算格子上での表現例を図 2.23に示す。

表 2.9 本業務における流動計算条件(現況再現計算)

項目		設定方法
地形・水深条件		平成 29 年度湖沼水質保全対策検討業務報告書（環境省）から設定 貸与資料により必要に応じて修正
水平分割		全域 125m で実施
層分割		1m 毎に分割(全 7 層)
境界条件	水位	モデル内部で計算
	水温	モデル内部で計算
気象条件	風向、風速	近隣のアメダスデータ（諏訪）を利用
	気温、相対湿度、 全天日射量、雲量	気温・相対湿度：諏訪のデータを利用 全天日射量、雲量：長野、松本のデータを利用
淡水流入・ 流出条件	河川流量	流域水循環モデル（SWAT）により算出し、水収支を考慮して補正 ⇒国土数値情報の流域界・貯留関数法により算出し、水収支を考慮して補正
	河川水温	公共用水域水質データにおける気温と水温の相関関係から求めた値を採用
	下水放流量	貸与資料を基に設定し、水収支を考慮して補正
	下水放流水の水温	貸与資料を基に設定
	釜口水門 からの流出量	釜口水門管理日報に基づいて設定
ヒシの流動抵抗		貸与資料を基に設定
計算対象期間		2016 年、2017 年、2018 年

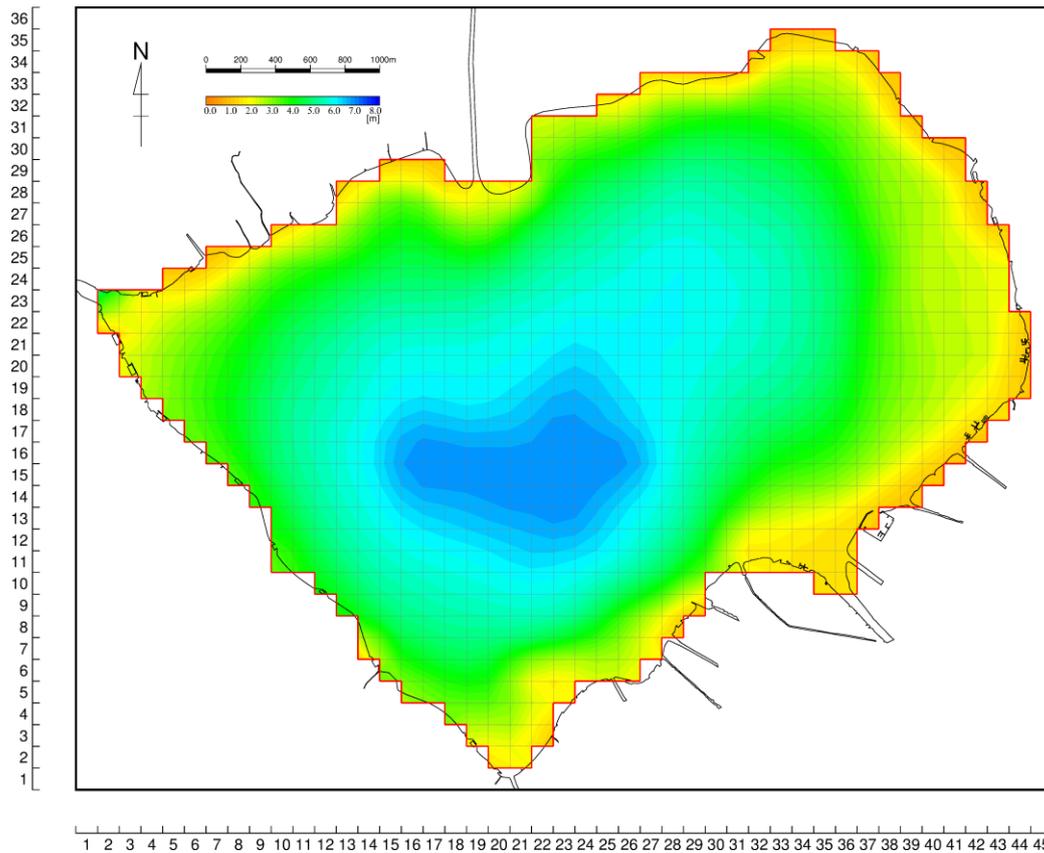


図 2.22 諏訪湖における計算格子及び水深の分布(水深 0m の基準:T.P.759m)

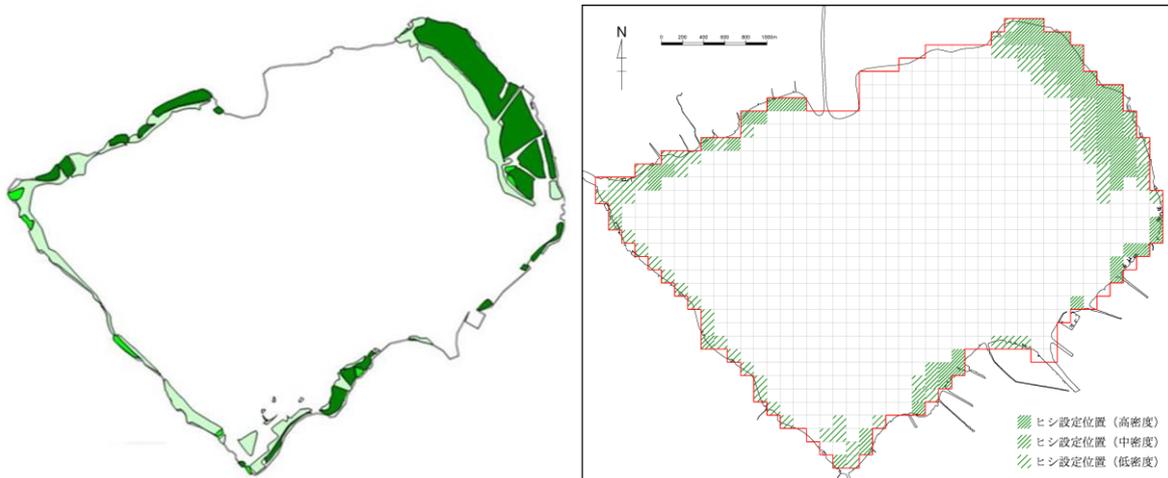


図 2.23 平成 28 年度のヒシ分布と計算格子上での表現例

## 1) 入力条件の整理

### ①. 気象条件

アメダス諏訪および長野地方気象台における気象データを図 2.24に示す。

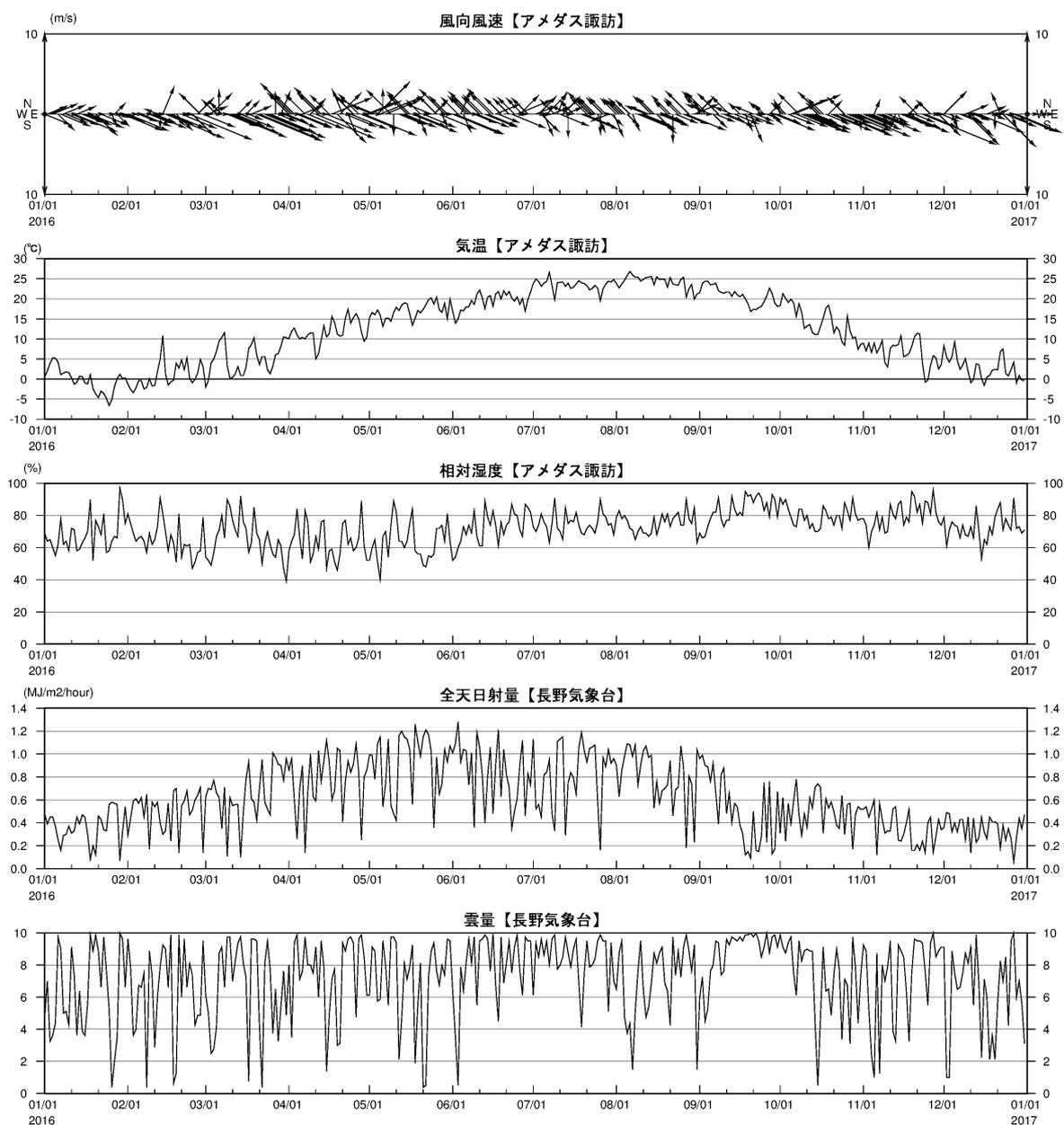


図 2.24(1) 数値シミュレーションに用いた気象データ(2016年)

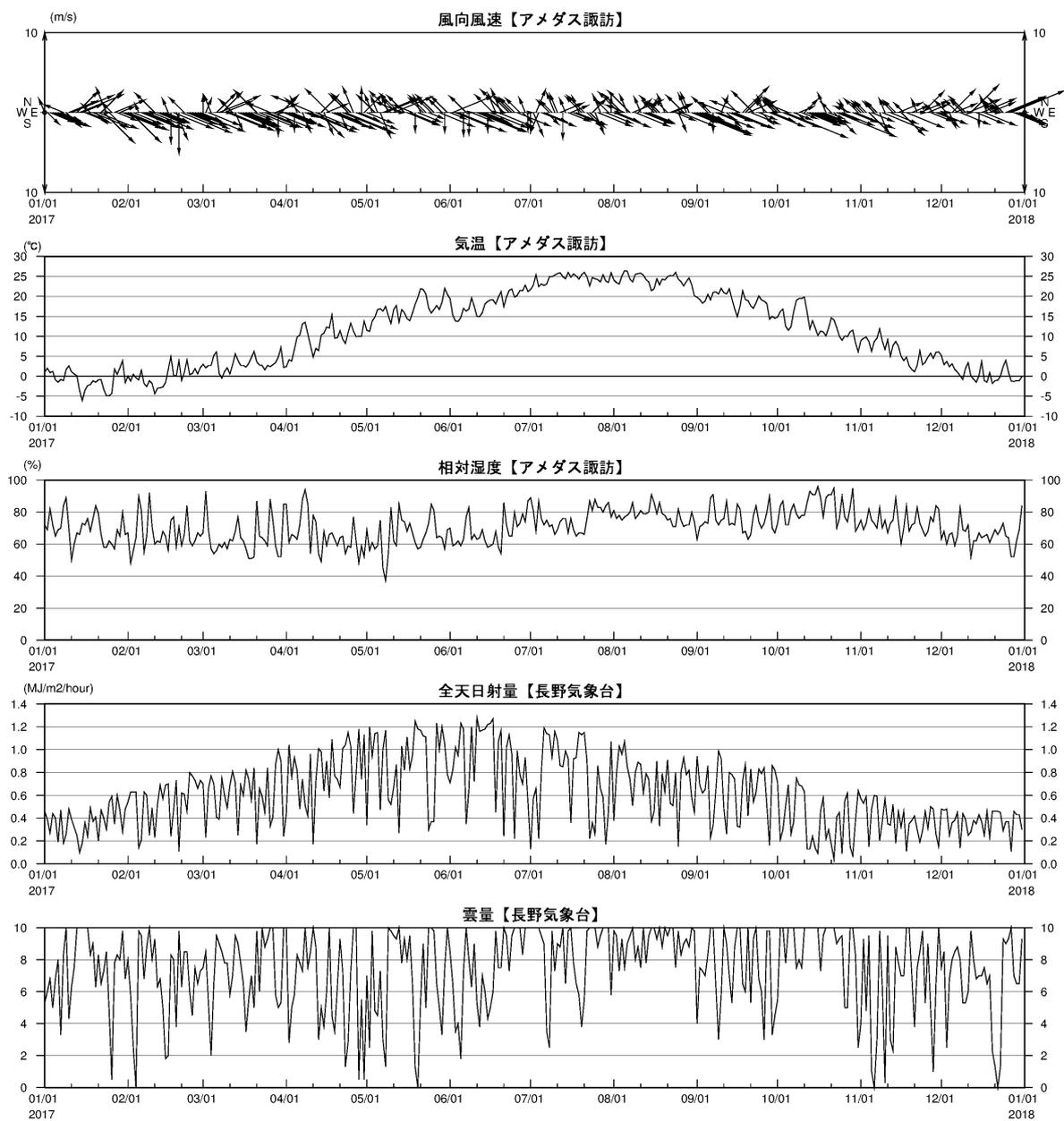


図 2.24(2) 数値シミュレーションに用いた気象データ(2017年)

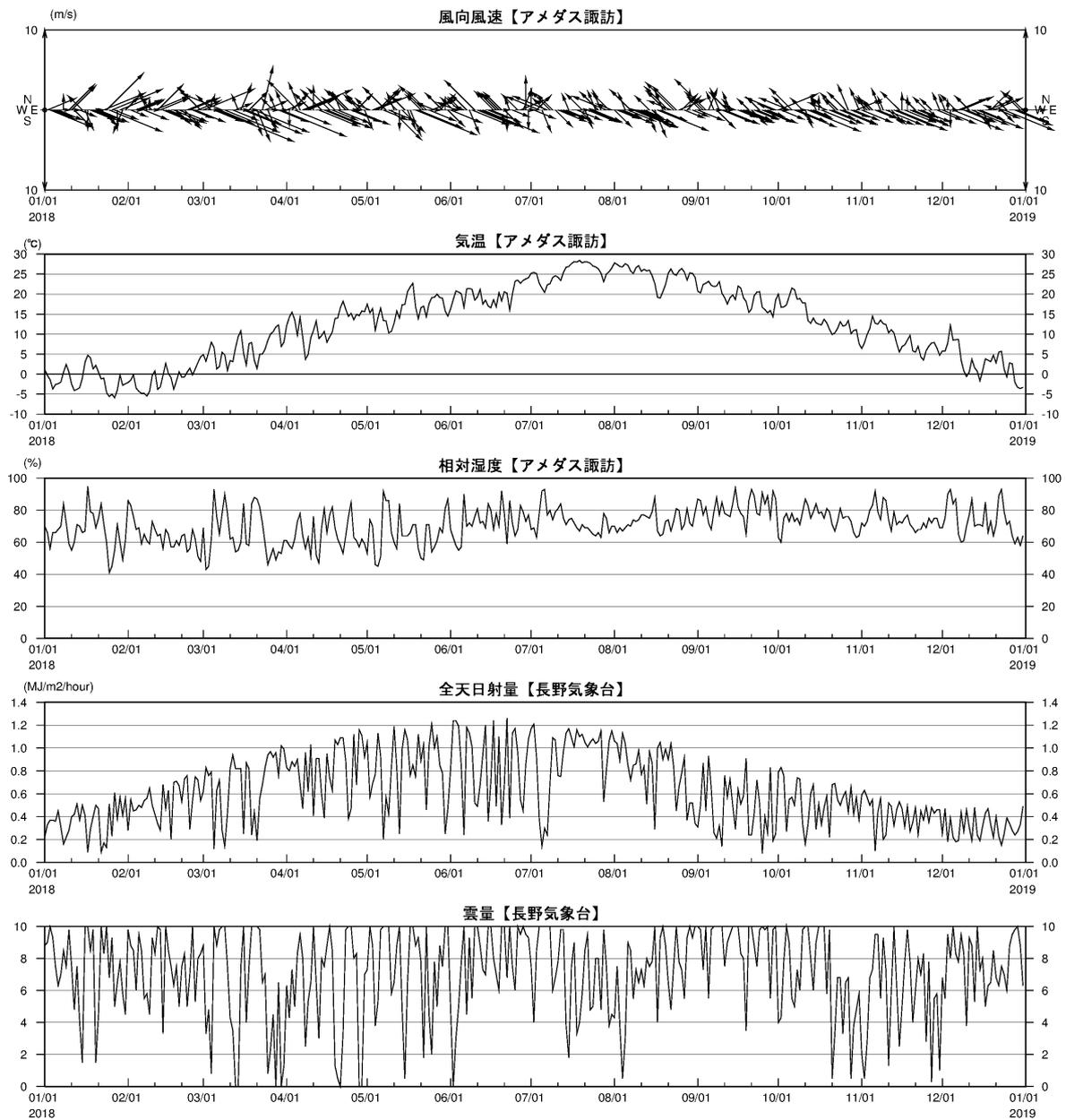


図 2.24(3) 数値シミュレーションに用いた気象データ(2018年)

## ②. 淡水流入・流出条件

諏訪湖周辺地は平地であり、地形データの地形勾配を基に流域分割すると、諏訪湖周辺では適切に流域界が作成されないことから、本業務では国土数値情報に基づく流域界を基に、図 2.25に示す小流域からの流入量を貯留関数法により算出した（各流入河川からの流入量は算出していない）。

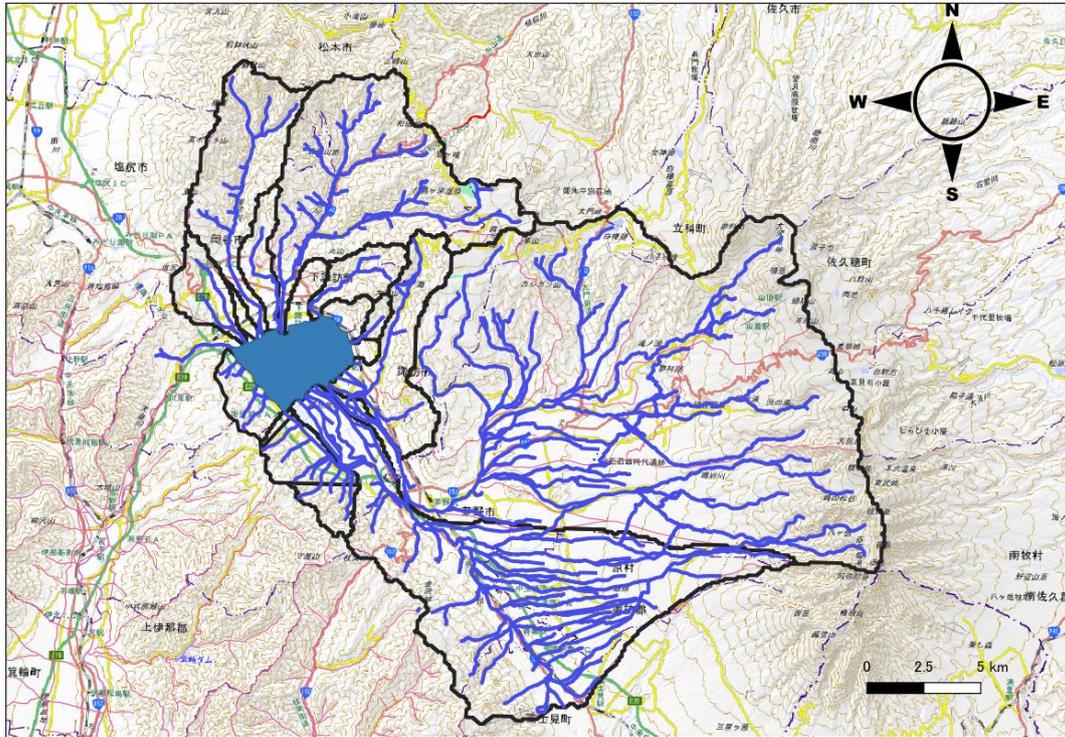


図 2.25 諏訪湖流域と考慮した小流域

貯留関数法においては、水理公式集(平成11年版)を参考に以下の計算式で流出量を算出した。

$$\frac{ds}{dt} = r_e(t - T_L) - q$$

$$s = kq^p$$

$$(\log s = \log k + p \log q)$$

ここで、s:貯留高、 $r_e$ :有効雨量強度、q:直接流出高、 $T_L$ :遅延時間  
パラメータ  $k, p$  や遅滞時間( $T_L$ )は、以下の式で設定した。

$$k = 2.5(n\sqrt{i})^{0.6} A^{0.24}$$

$$T_L = 0.45(n\sqrt{i})^{0.6} A^{0.24} (\bar{r}_e)^{-0.4}$$

$$p = 0.6$$

ここで  $n$ :等価粗度( $s/m^{1/3}$ )、 $i$ :斜面勾配、 $A$ :流域面積( $km^2$ )

降雨データは、レーダー・アメダス解析雨量から算出した小流域毎の流域平均雨量を用いた。

また計算条件上、湖水の水収支（総流入量と流出量、湖水位変化）を調整する必要があることから、各河川の流入量は、以下の式により補正を行った。

各流域からの流入量(補正值) = 各流域からの流入量(計算値)  
 $\times (\text{釜口水門からの放流量} - \text{下水道からの放流量(流入)}) / \text{全流域からの流入量(計算値)}$

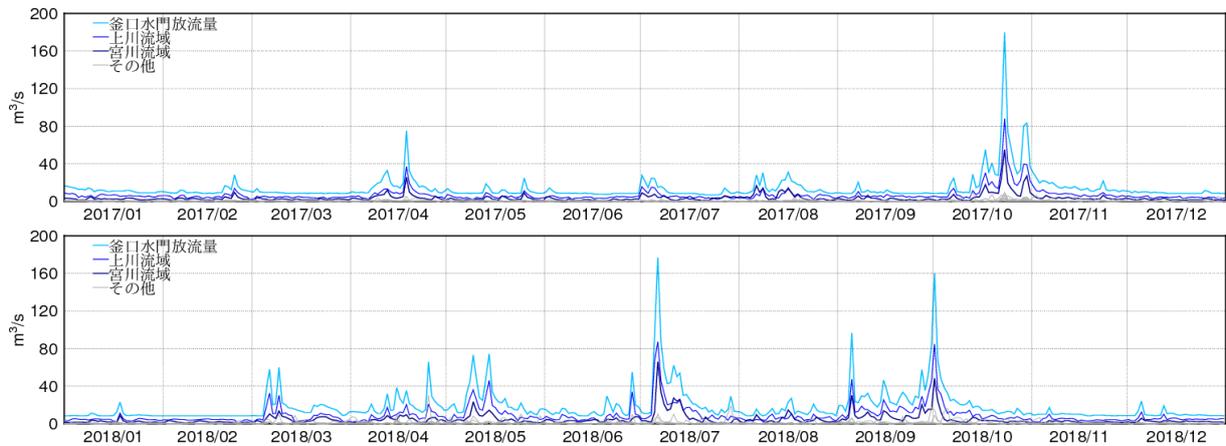


図 2.26 釜口水門放流量と流域からからの淡水流入量

承知川、塚間川、横河川について、平水時の河川水位及び観測結果に基づく H-Q 式による流量と、上記推算値との比較結果（観測データ及び推算値が存在する 2018 年 11 月以降のみで比較）を図 2.27 に示す。

実際の河川流入量は、河川水位と湖水位の関係によって決まるものであり、流入量は比較的安定していると想定されるが、貯留関数法で推定した流入量においても長期的な傾向および個々のイベントにおける日流量の変化は捉えていると考えられる。なお、シミュレーションに用いる流入量は、上記で推定した流入量に湖水位の変動を考慮した補正を加味して設定している。

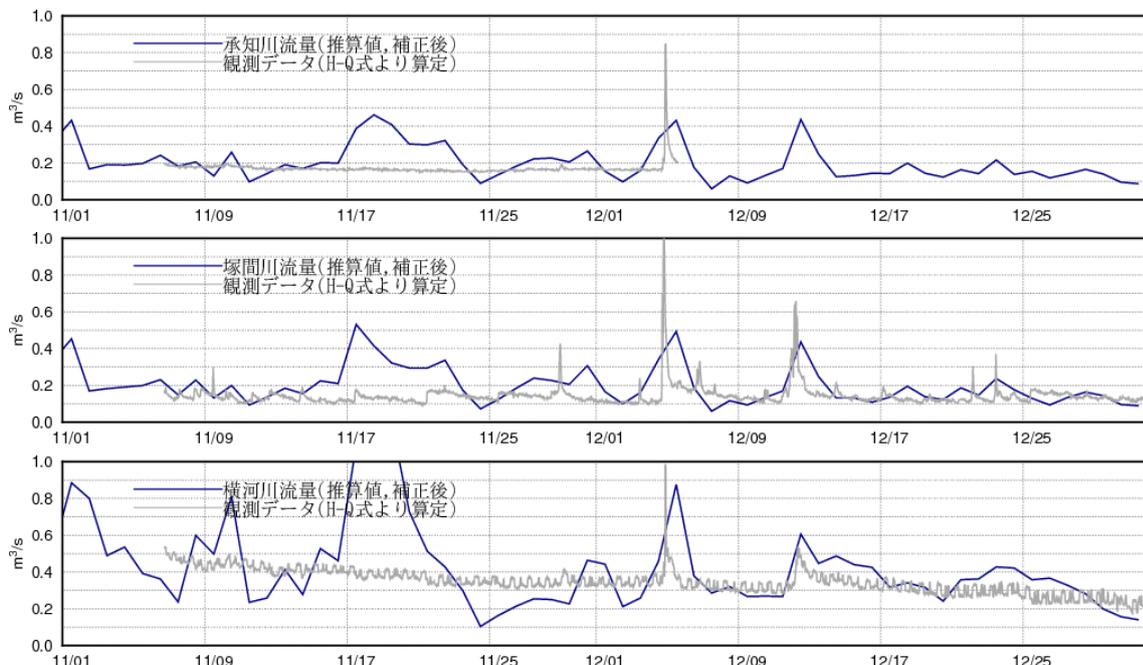


図 2.27 数値シミュレーションに用いる流入量と水位と H-Q 式による河川流量の比較  
 (承知川、塚間川、横河川)

河川からの水温は、2018年度までの上川、宮川、砥川、横川における公共用水域水質測定結果における気温と水温の関係から、近似式を用いて算出した（測定していない地点は、近隣河川の近似式を適用）。

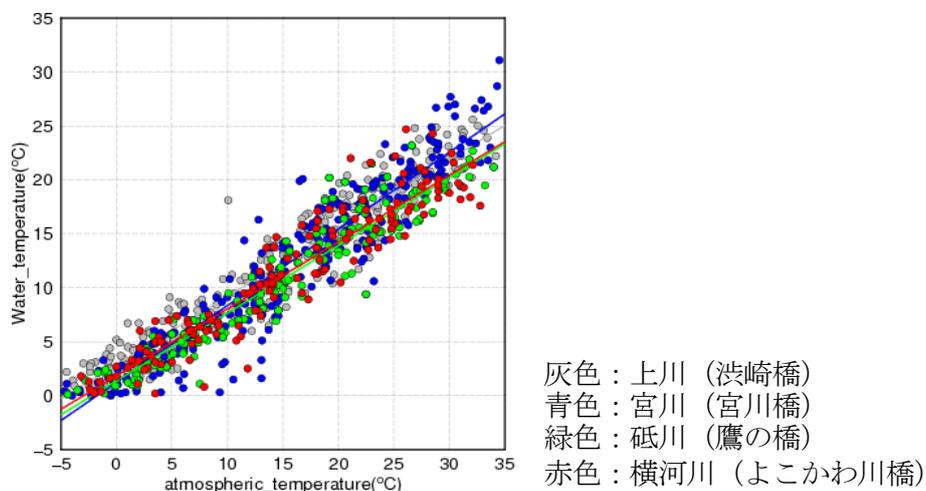


図 2.28 流入河川の気温と水温の関係(公共用水域水質測定結果より)

下水道からの流入量及び流入水温は、受領したデータを用いた。

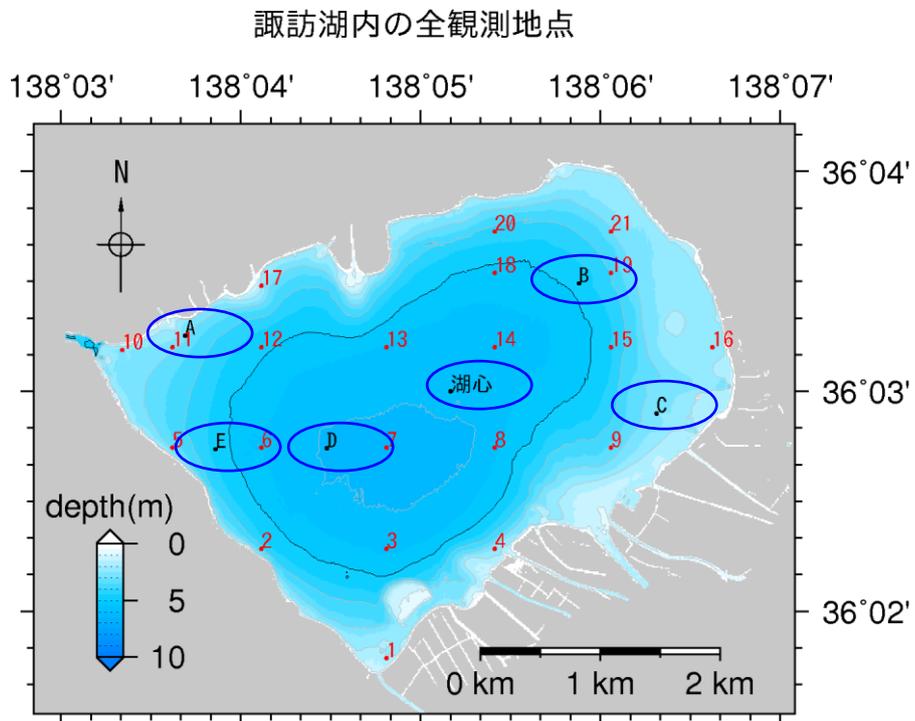
(参考文献)

- ・ 水理公式集[平成 11 年版]、土木学会
- ・ 永井明博・角屋睦・杉山博信・鈴木克英：貯留関数法の総合化、京大防災研年報、第 25 号 B-2, pp.207~220, 1982.

#### (4) 現況再現計算結果

##### 1) 再現計算結果（連続観測）

現況再現計算として、釜口水門の水位及び湖内連続観測 6 地点（2016 年は湖心 1 地点）の水温・底層 DO 濃度の時系列比較を図 2.30～図 2.32 に示す。水位及び水温の計算結果は連続観測結果と良い一致を示しており、流動モデルの現況再現性は良好であると言える。底層 DO の計算結果については、測点 A の計算結果が観測結果より貧酸素傾向が過大となっている他、短期間での大きな濃度の上下変動が追従できていない期間も見られるが、湖心を中心とした底層 DO 濃度の変動（貧酸素化しはじめる時期、継続期間、解消するタイミング等）について 3 か年通して概ね再現できている。



※赤：全域観測 21 地点、黒：連続観測 6 地点

図 2.29 再現計算結果の比較地点(○)

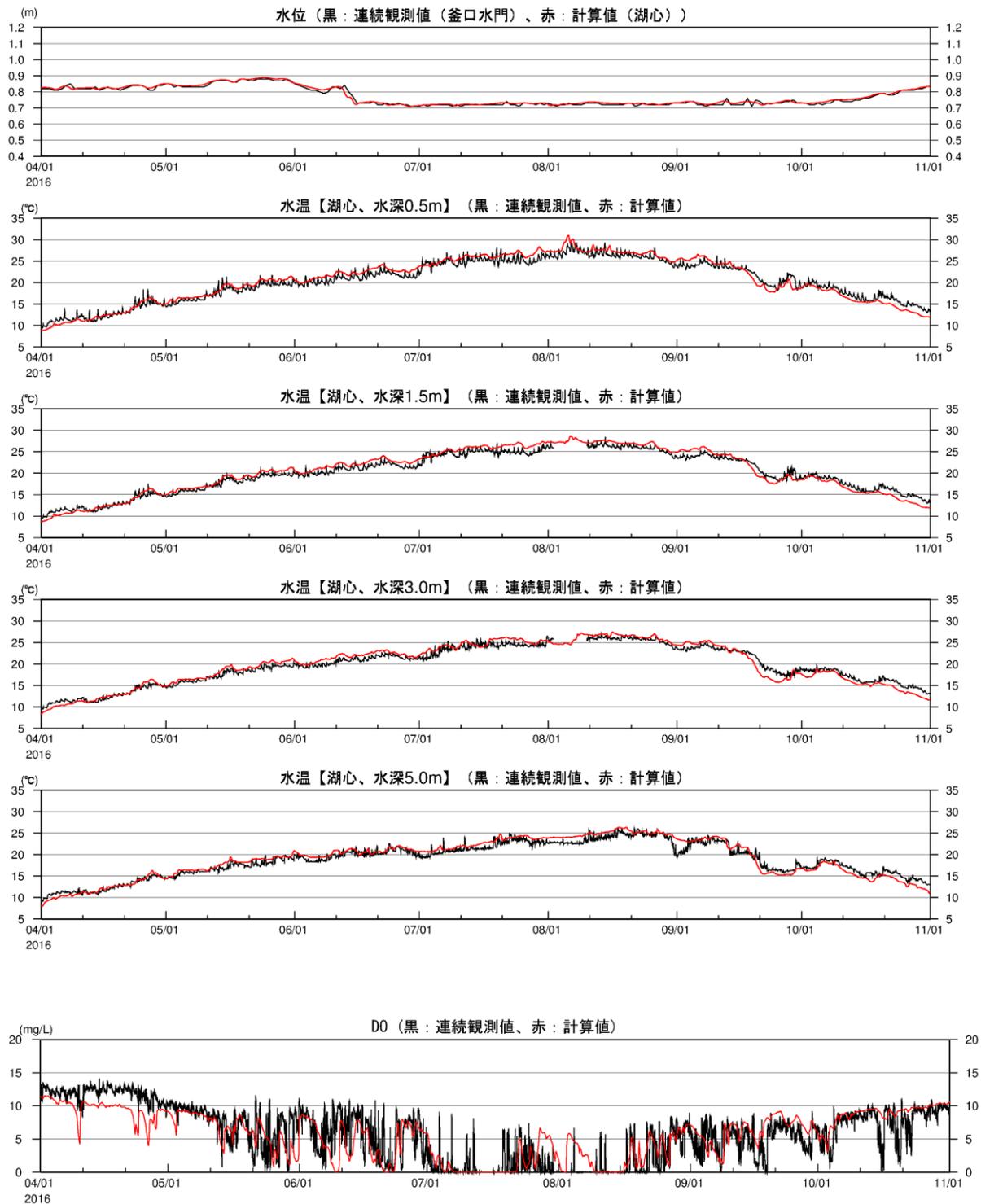


図 2.30 湖内定点の水温・最下層 DO 時系列(2016 年、観測結果との比較、湖心)

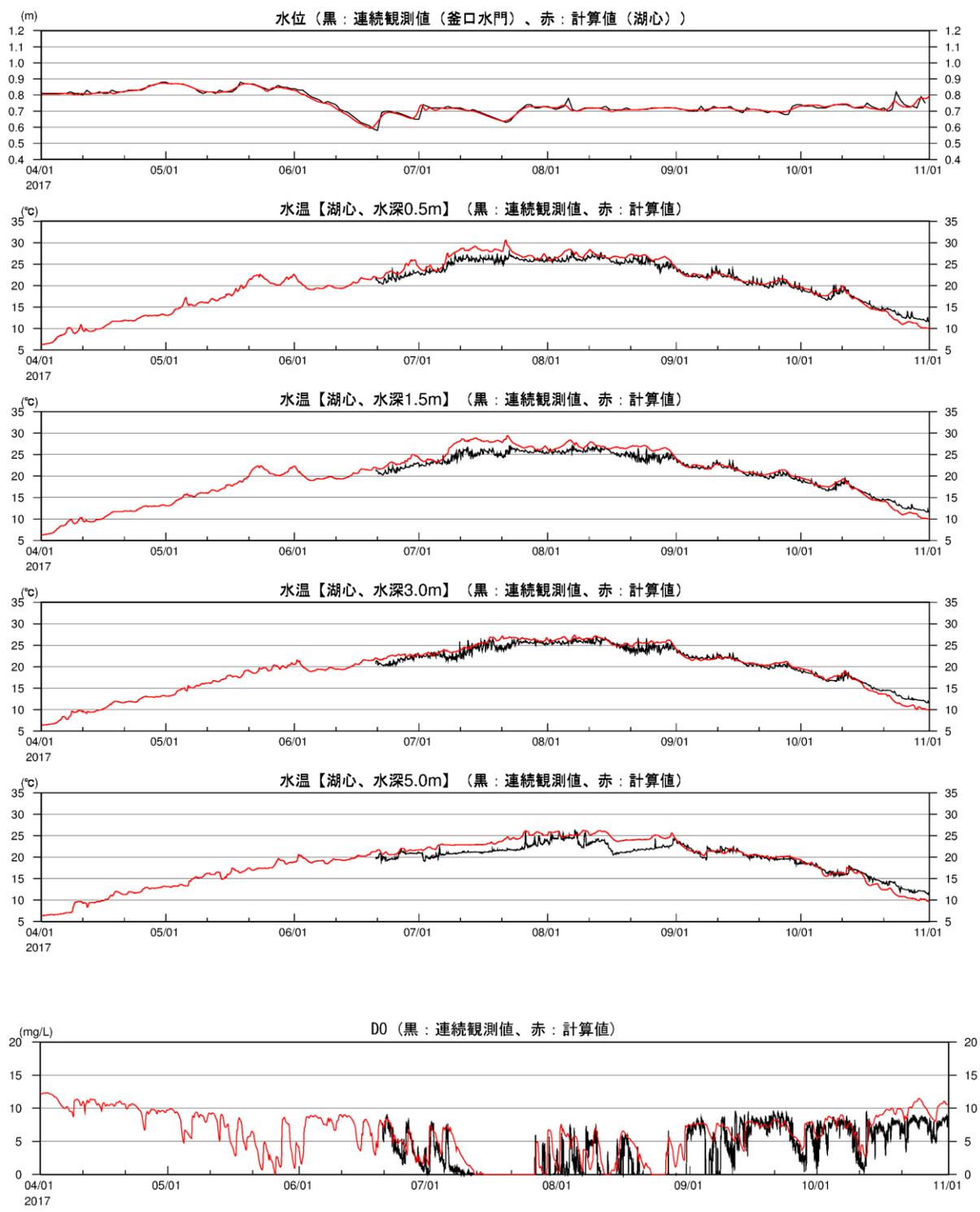


図 2.31(1) 湖内定点の水温・最下層 DO 時系列(2017 年、観測結果との比較、湖心)

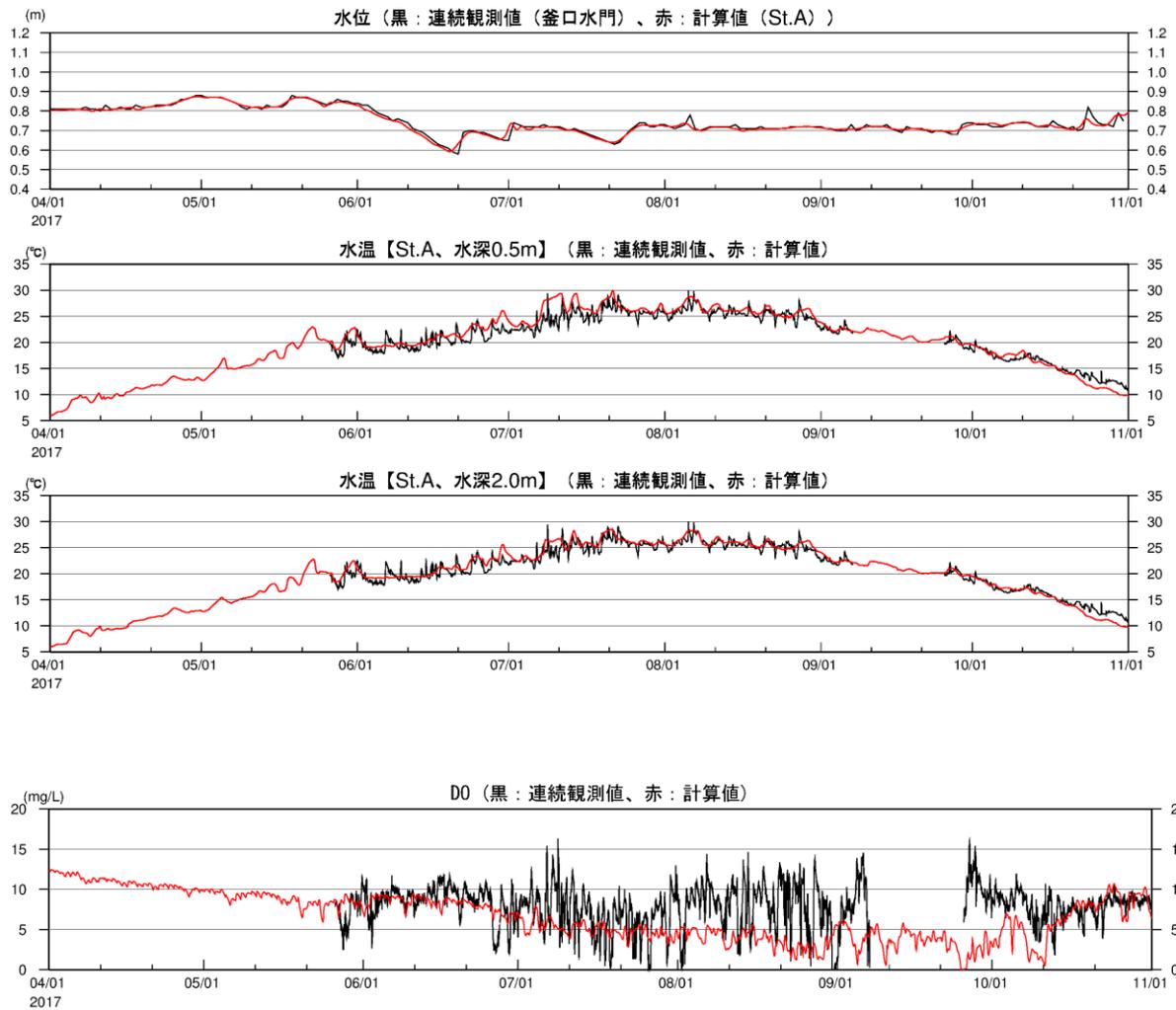


図 2.31(2) 湖内定点の水温・最下層 DO 時系列(2017 年、観測結果との比較、St.A)

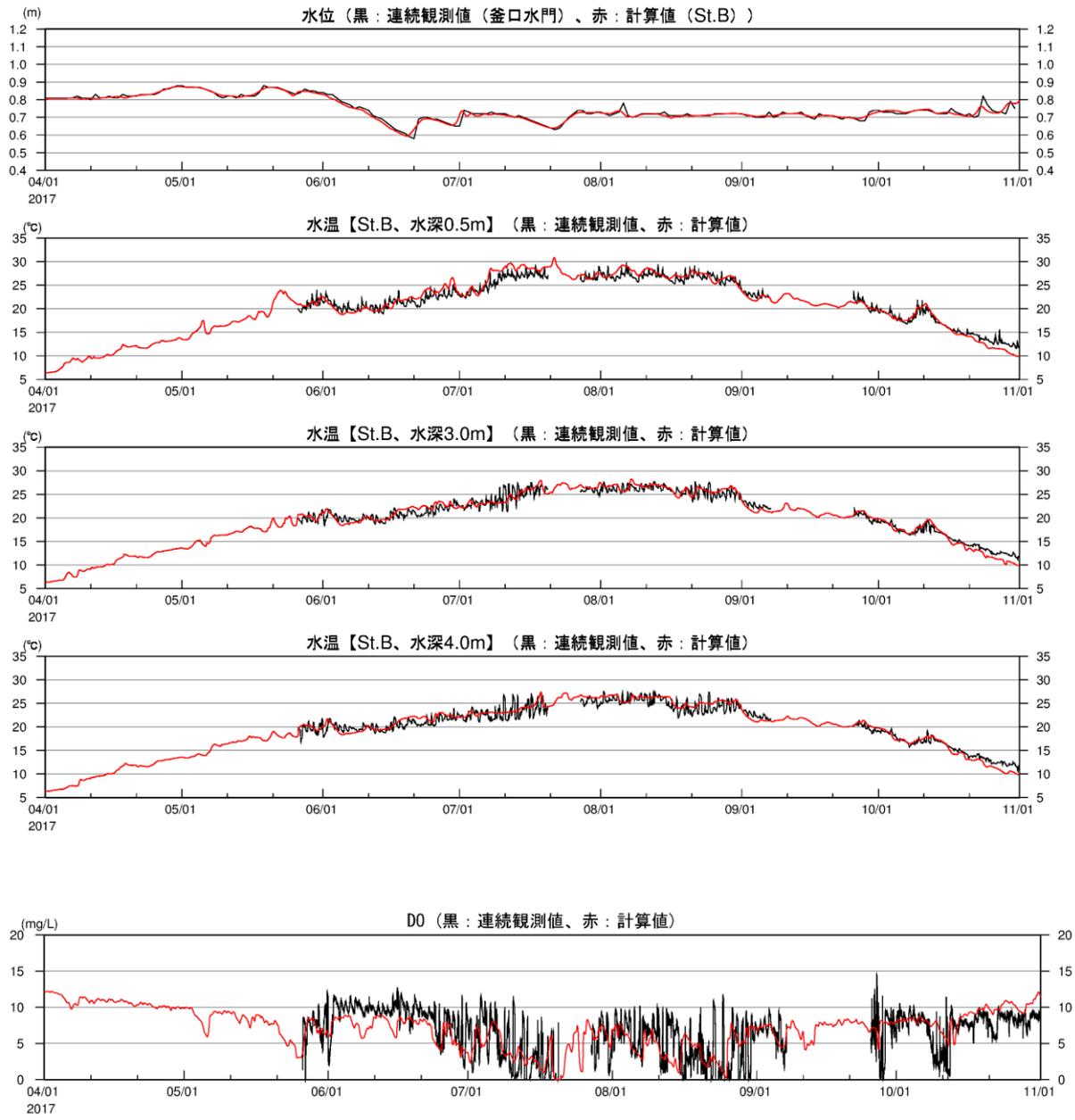


図 2.31(3) 湖内定点の水温・最下層 DO 時系列(2017 年、観測結果との比較、St.B)

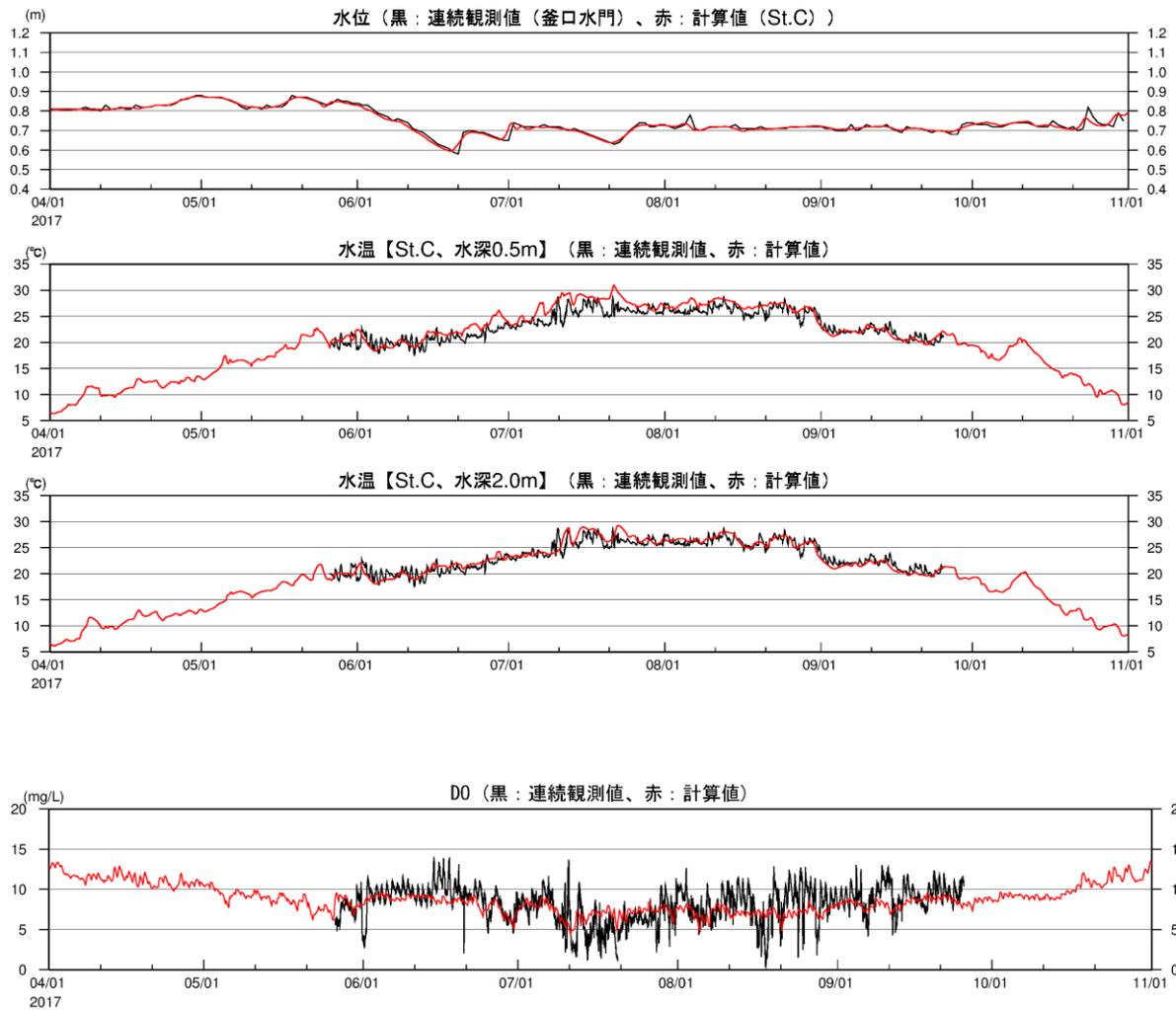


図 2.31(4) 湖内定点の水温・最下層 DO 時系列(2017 年、観測結果との比較、St.C)

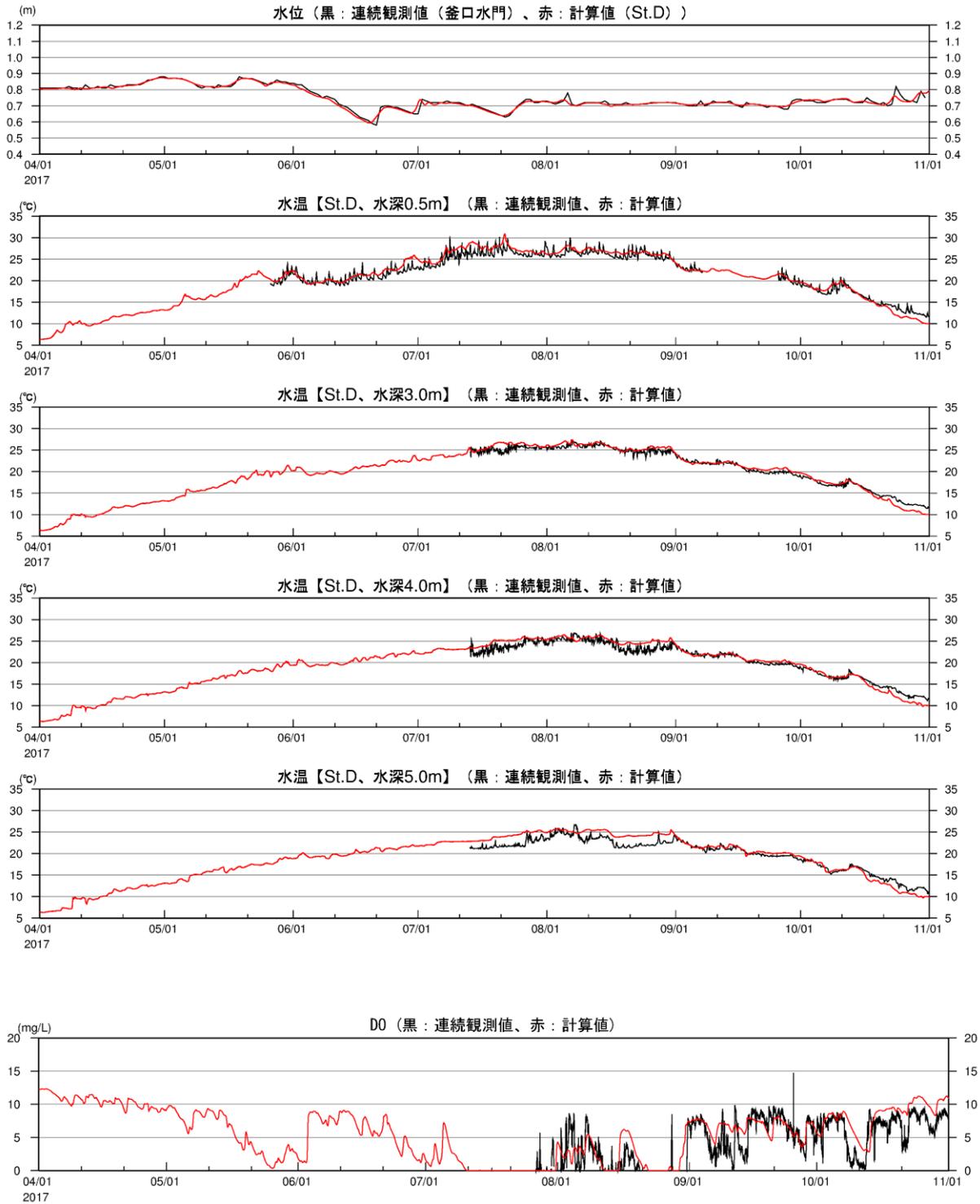


図 2.31(5) 湖内定点の水温・最下層 DO 時系列(2017 年、観測結果との比較、St.D)

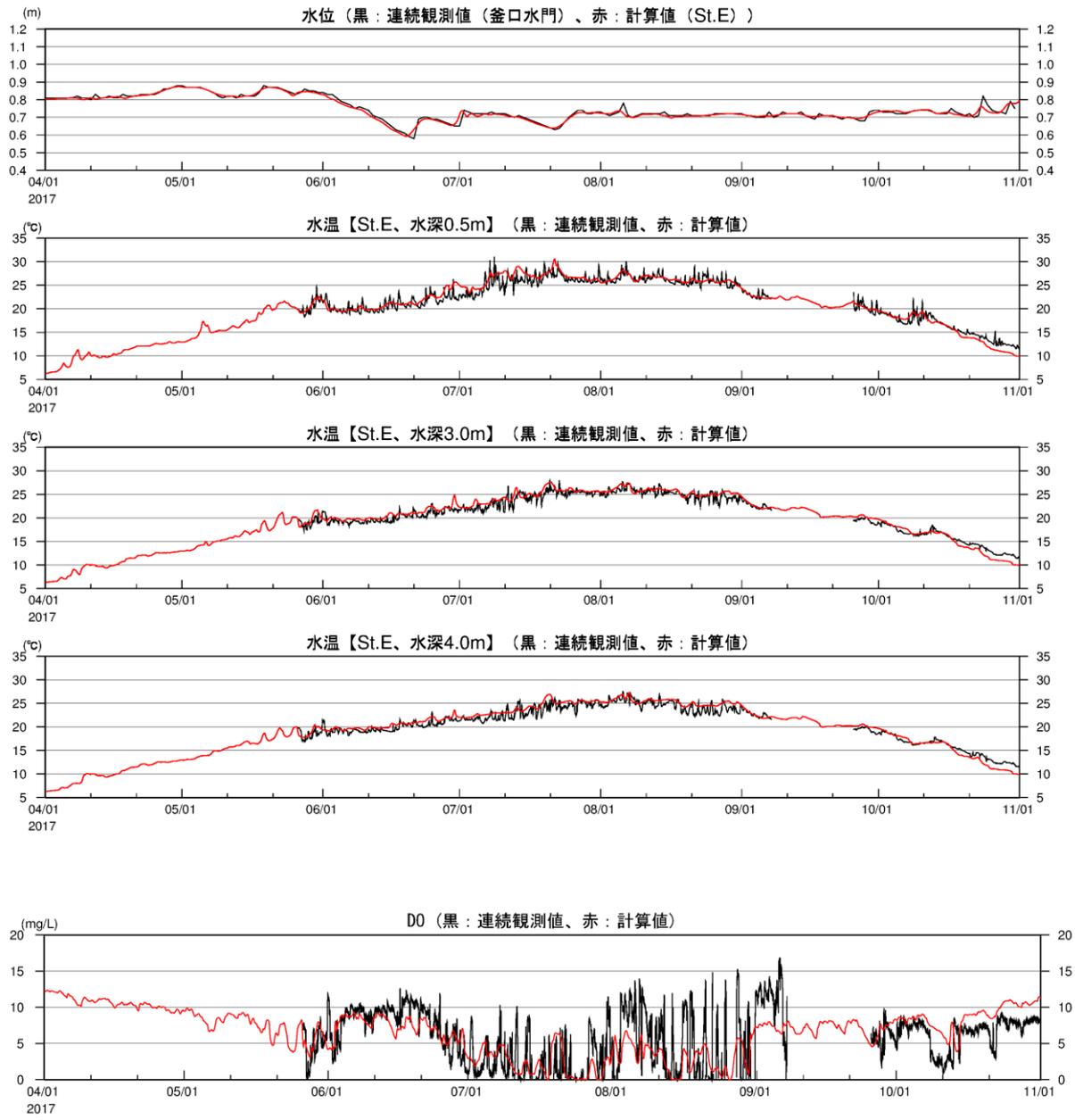


図 2.31(6) 湖内定点の水温・最下層 DO 時系列(2017 年、観測結果との比較、St.E)

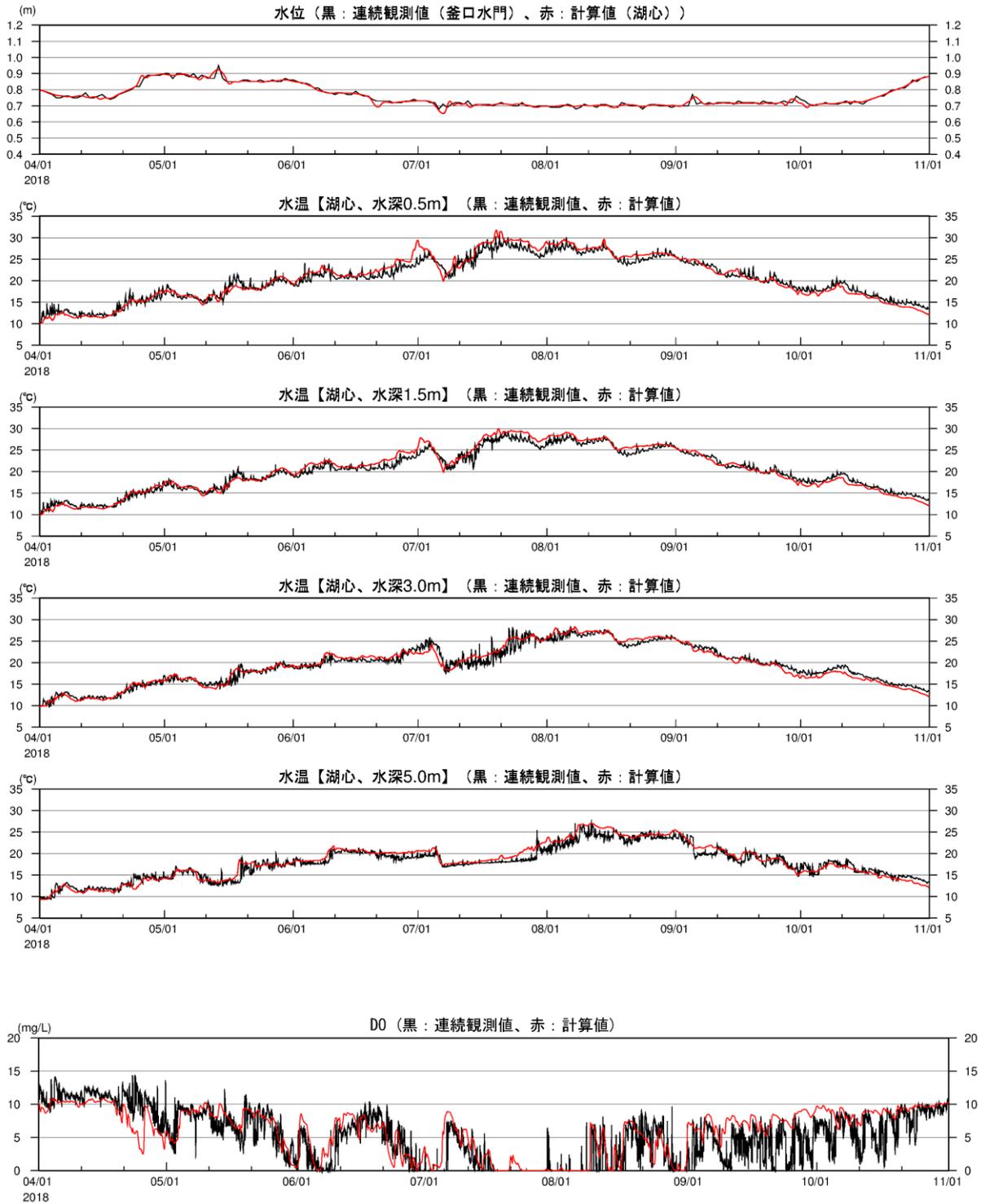


図 2.32(1) 湖内定点の水温・最下層 DO 時系列(2018 年、観測結果との比較、湖心)

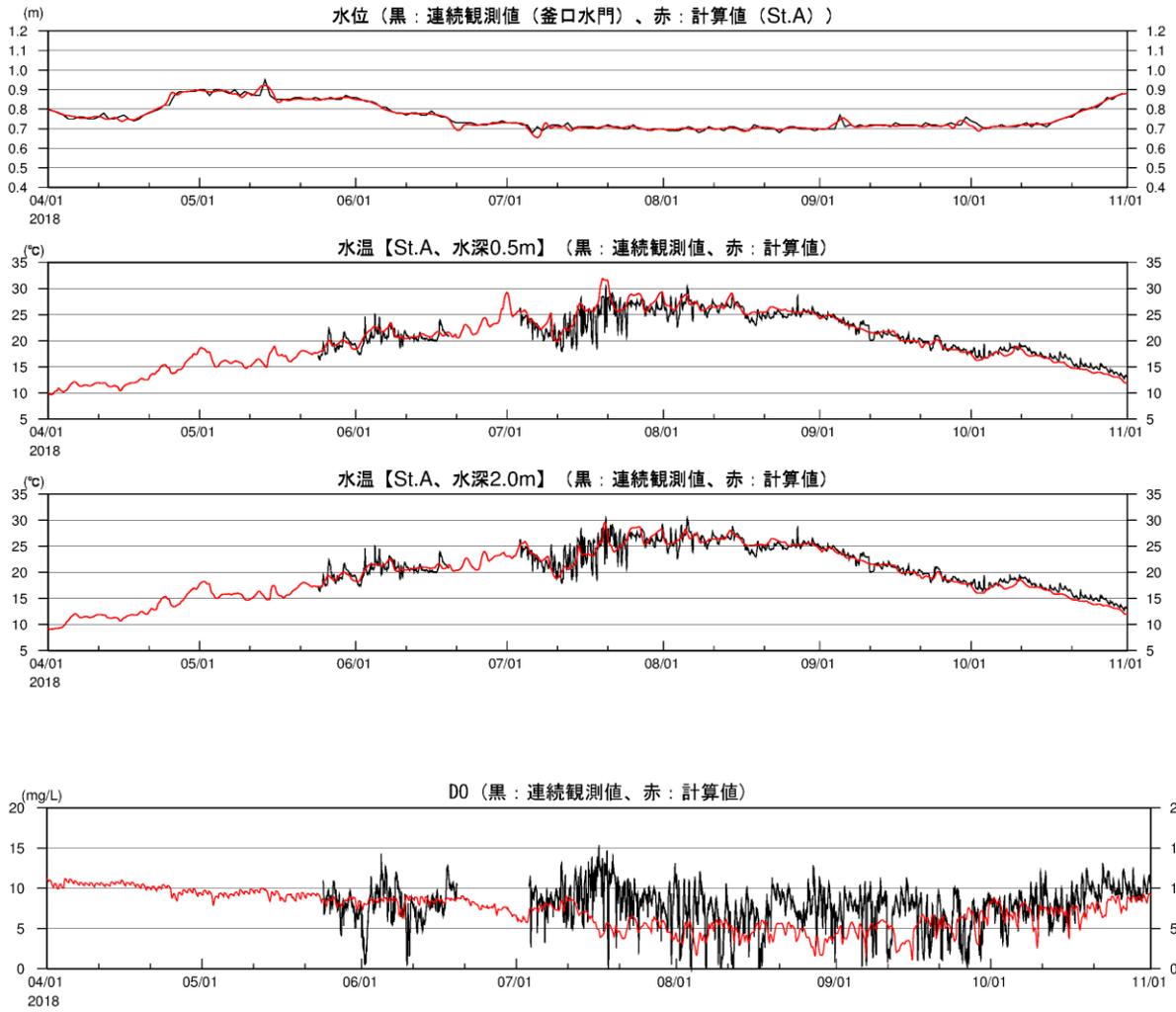


図 2.32(2) 湖内定点の水温・最下層 DO 時系列(2018 年、観測結果との比較、St.A)

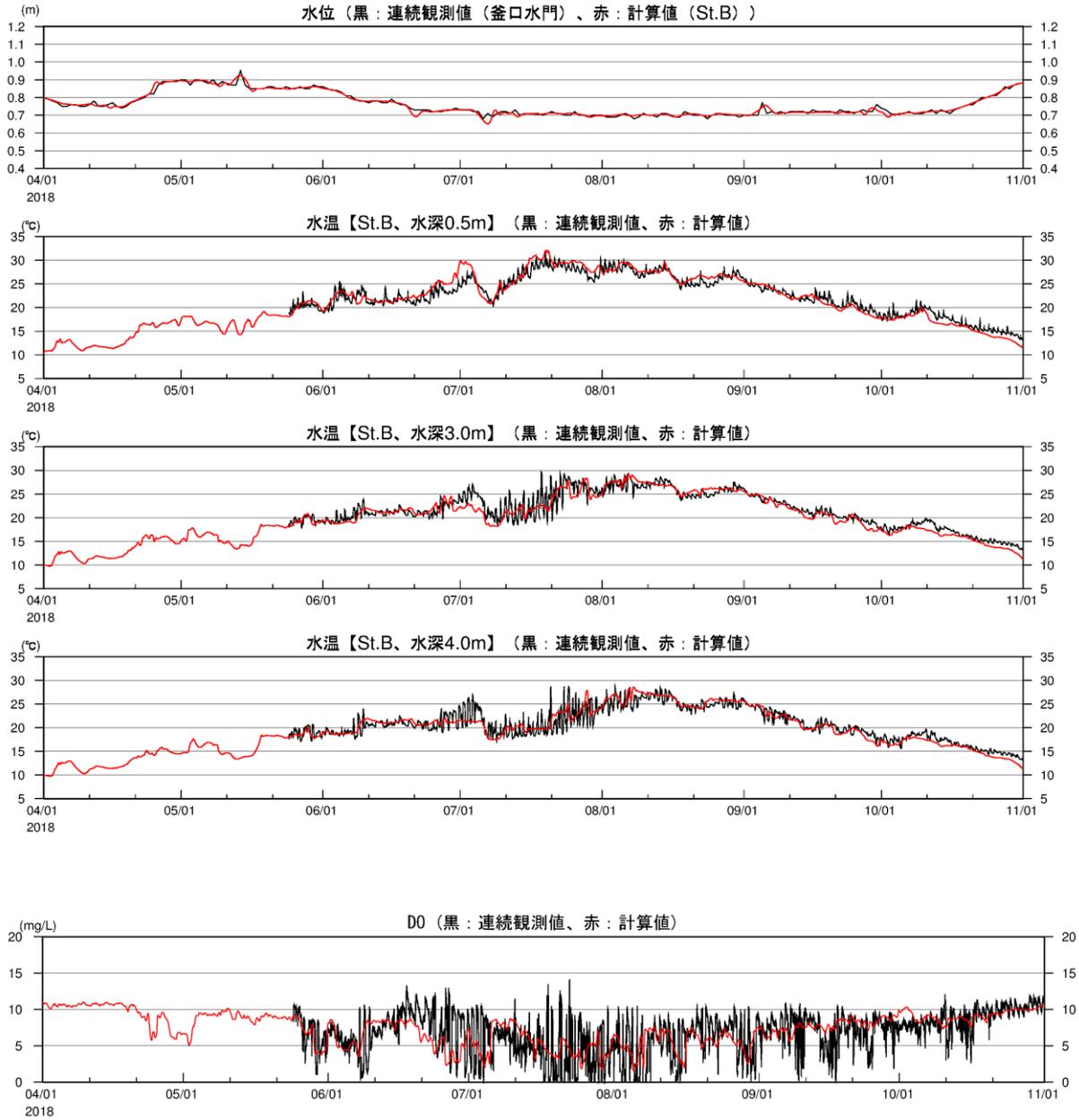


図 2.32(3) 湖内定点の水温・最下層 DO 時系列(2018 年、観測結果との比較、St.B)

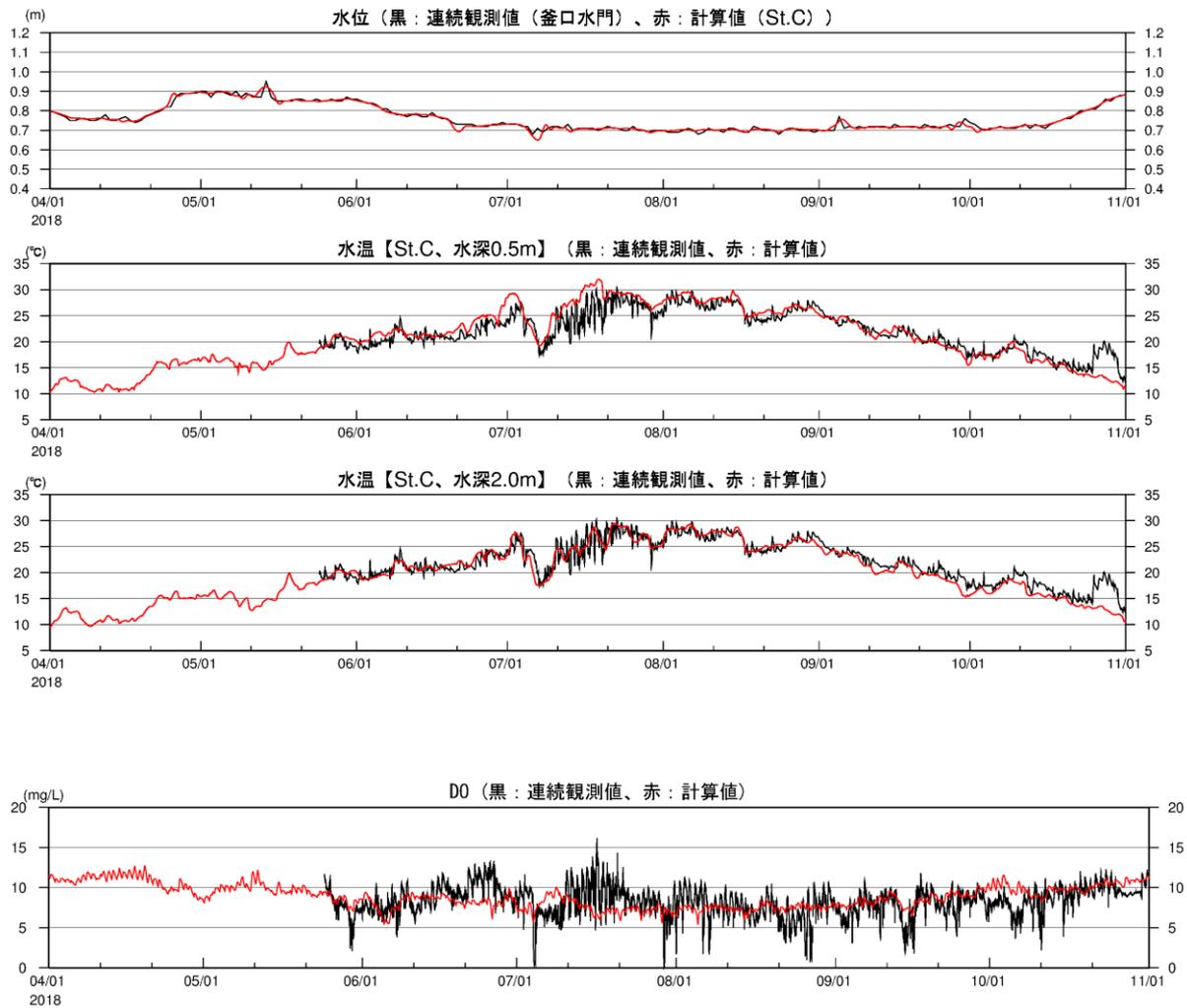


図 2.32(4) 湖内定点の水温・最下層 DO 時系列(2018 年、観測結果との比較、St.C)

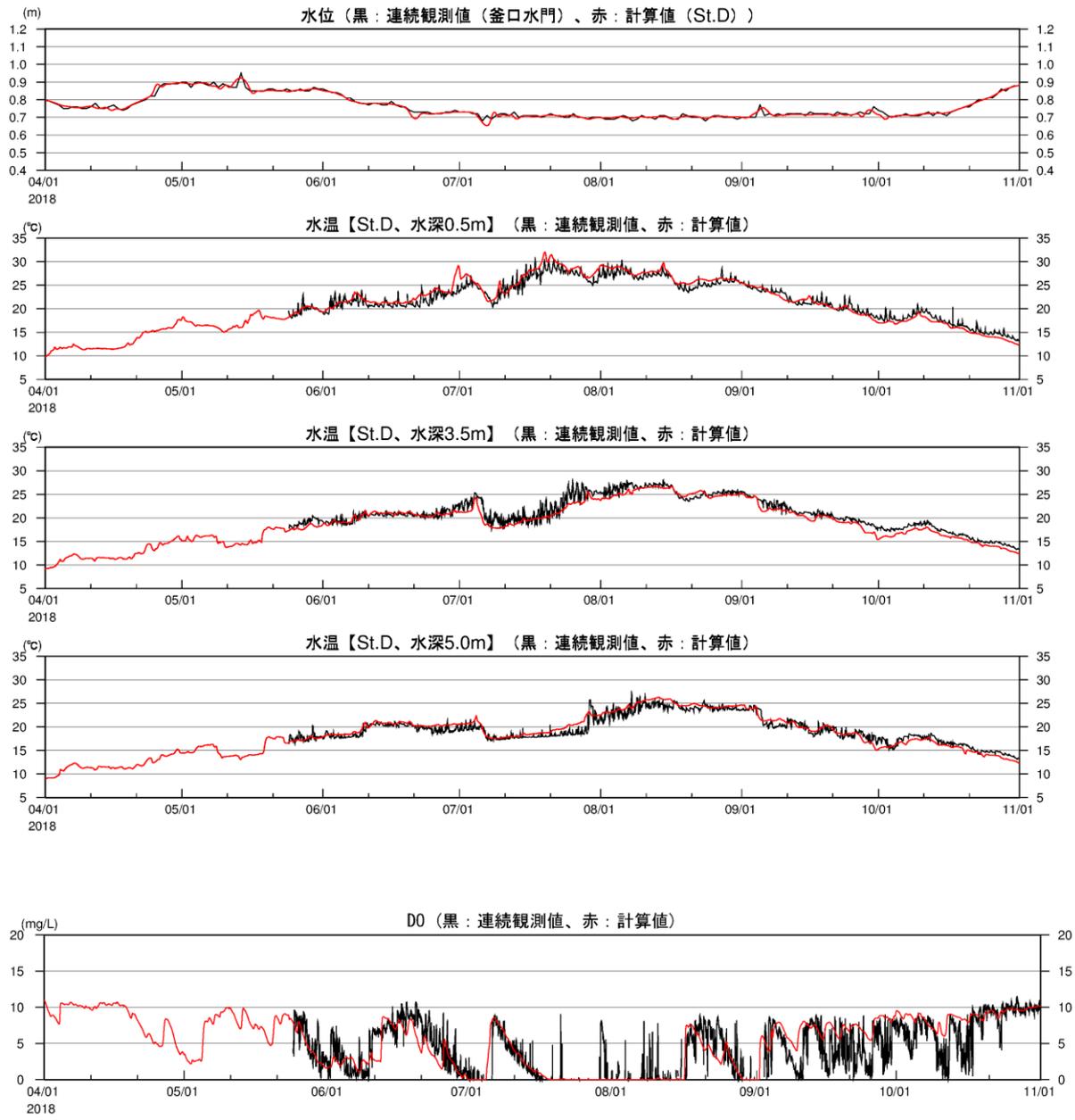


図 2.32(5) 湖内定点の水温・最下層 DO 時系列(2018 年、観測結果との比較、St.D)

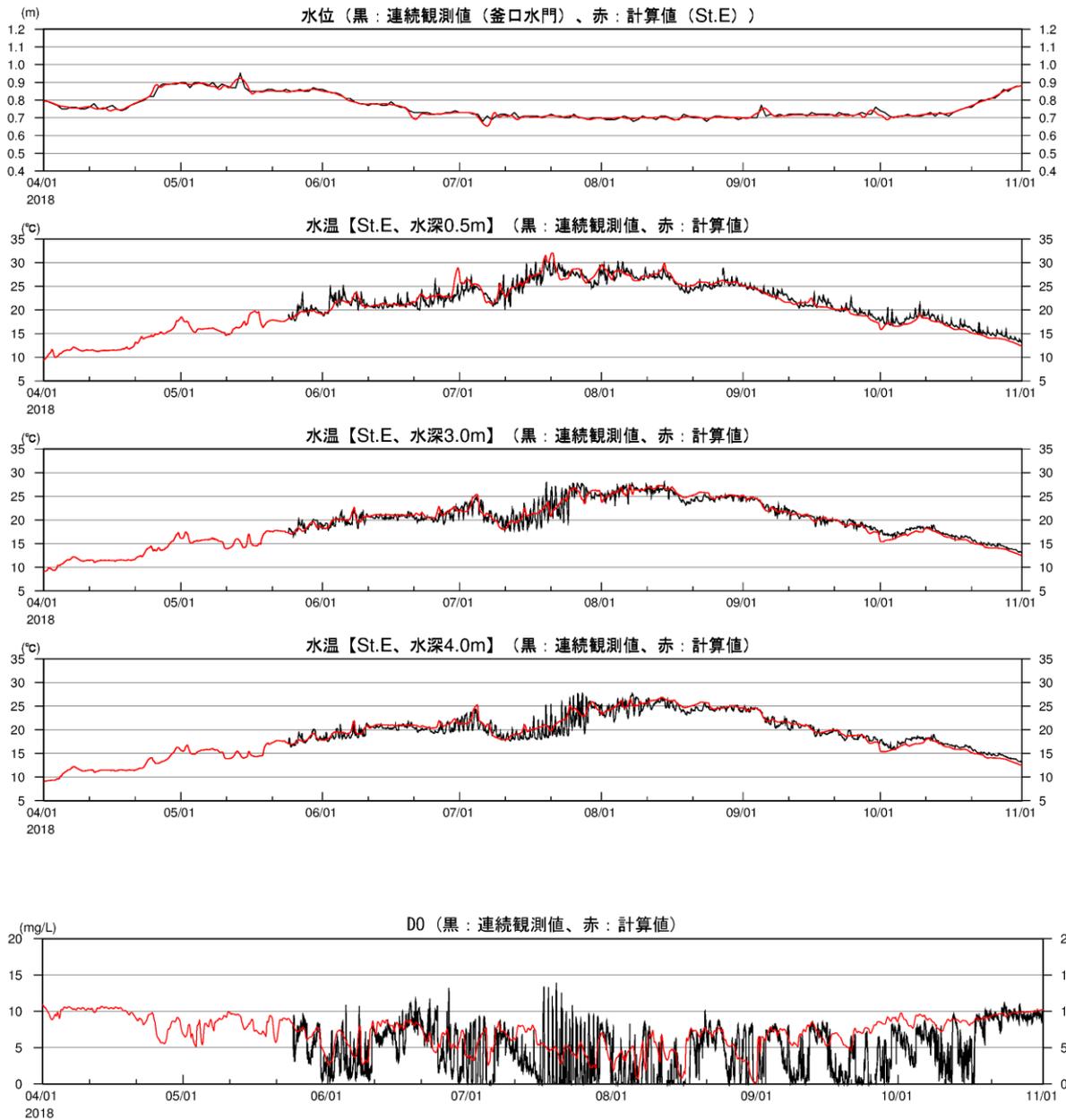


図 2.32(6) 湖内定点の水温・最下層 DO 時系列(2018 年、観測結果との比較、St.E)

## 2) 現況計算結果（分布図）

2016年7月26日朝、ワカサギなどの死骸が湖岸に大量に打ち寄せられている状況があったことを踏まえ、2016年7月24日00:00から7月26日18:00まで6時間おきの底層DO濃度計算結果平面分布図を図2.33に、同時刻の水温とDOの断面分布図を図2.34にそれぞれ示す。諏訪湖においては、2016年7月21日～24日にかけて南東風が続き、その後北風に変わったこと、および降雨があったことにより、計算結果においても25日～26日にかけて南西側の底層にあった貧酸素水塊が北東側に移動し、また上川からの流入水によって貧酸素水塊が北側に押されるなど、水温・DOの分布が変化する結果となった。

なお、この平面分布図および断面分布図は、諏訪湖貧酸素水塊予測モデルに気象観測データ等の数値を入力して計算した結果を示したものであり、実測値を示したものではない。

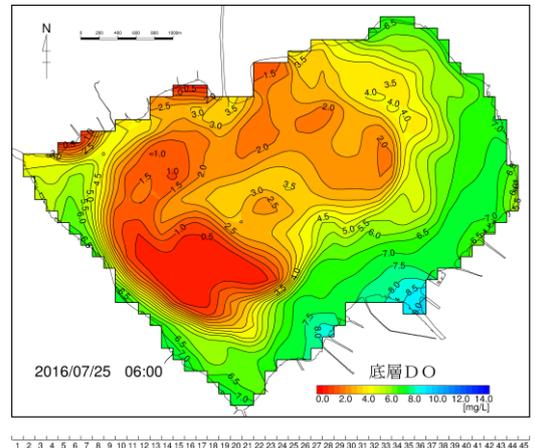
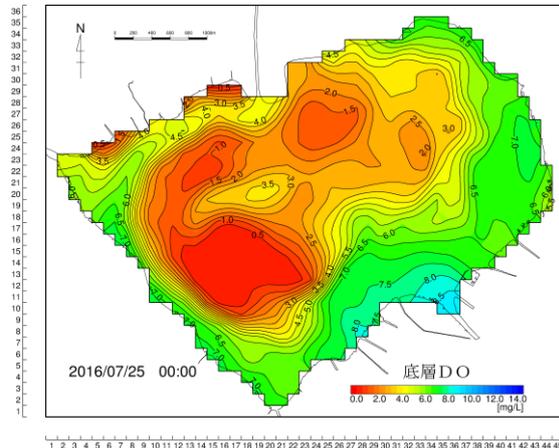
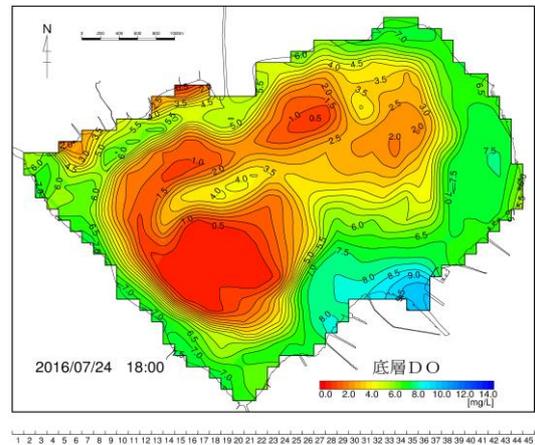
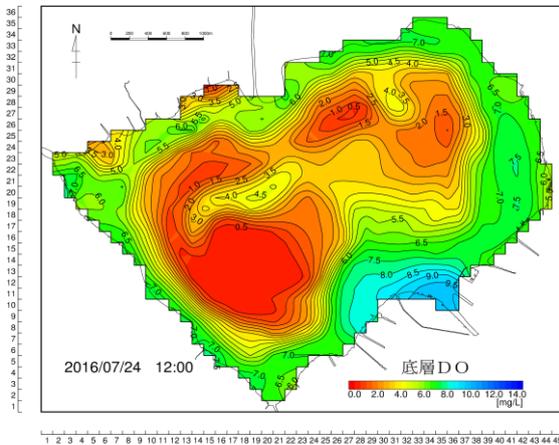
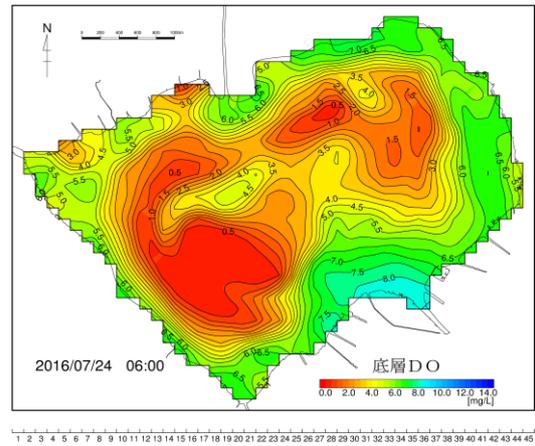
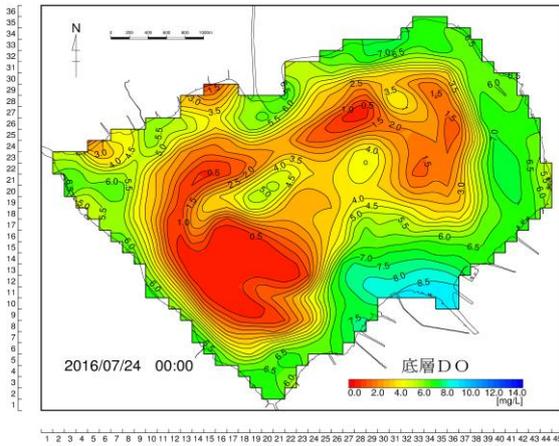


图 2.33(1) 底層 DO 平面分布(2016 年 7 月 24 日 00:00~25 日 06:00)

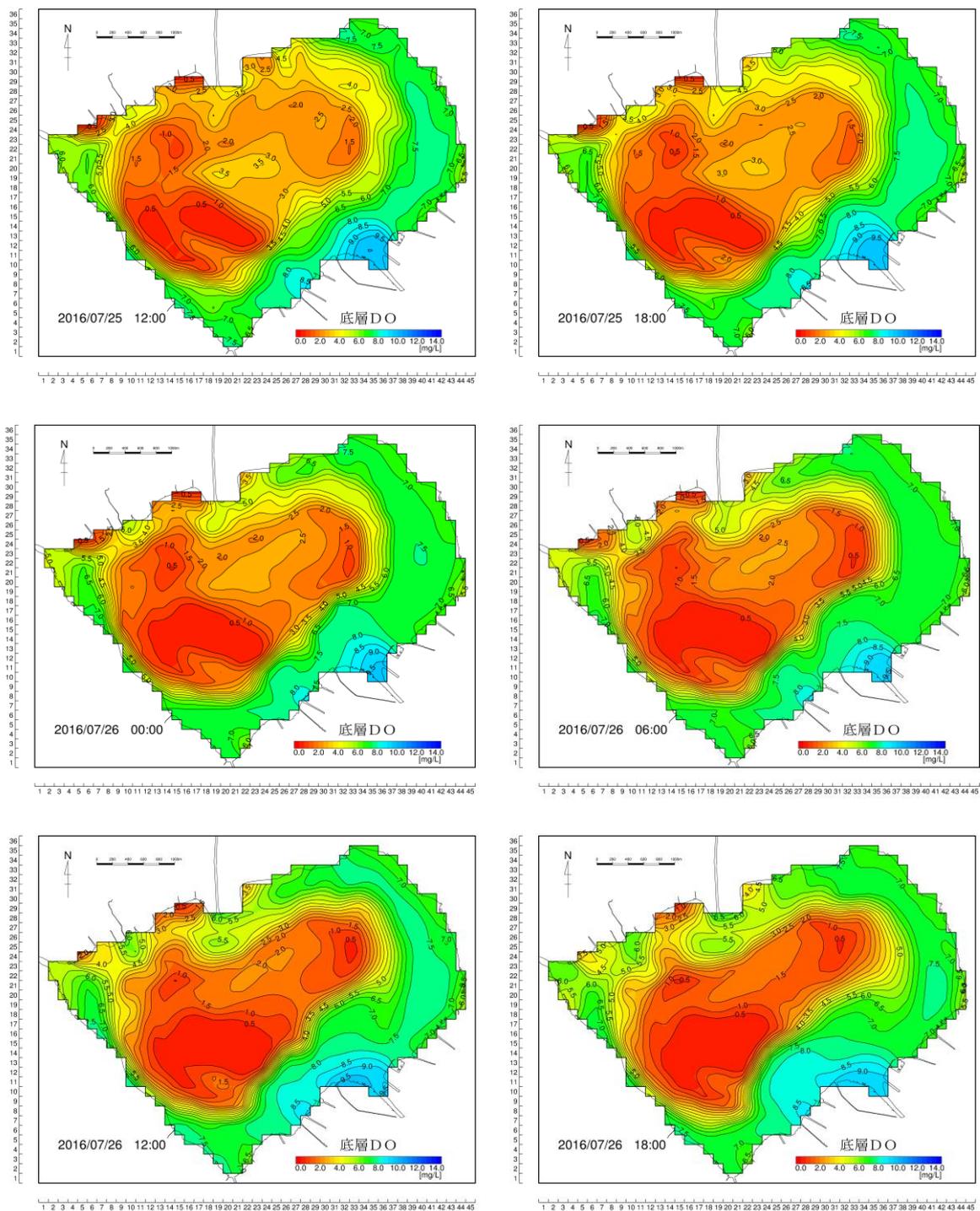


図 2.33(2) 底層 DO 平面分布(2016 年 7 月 25 日 12:00~26 日 18:00)

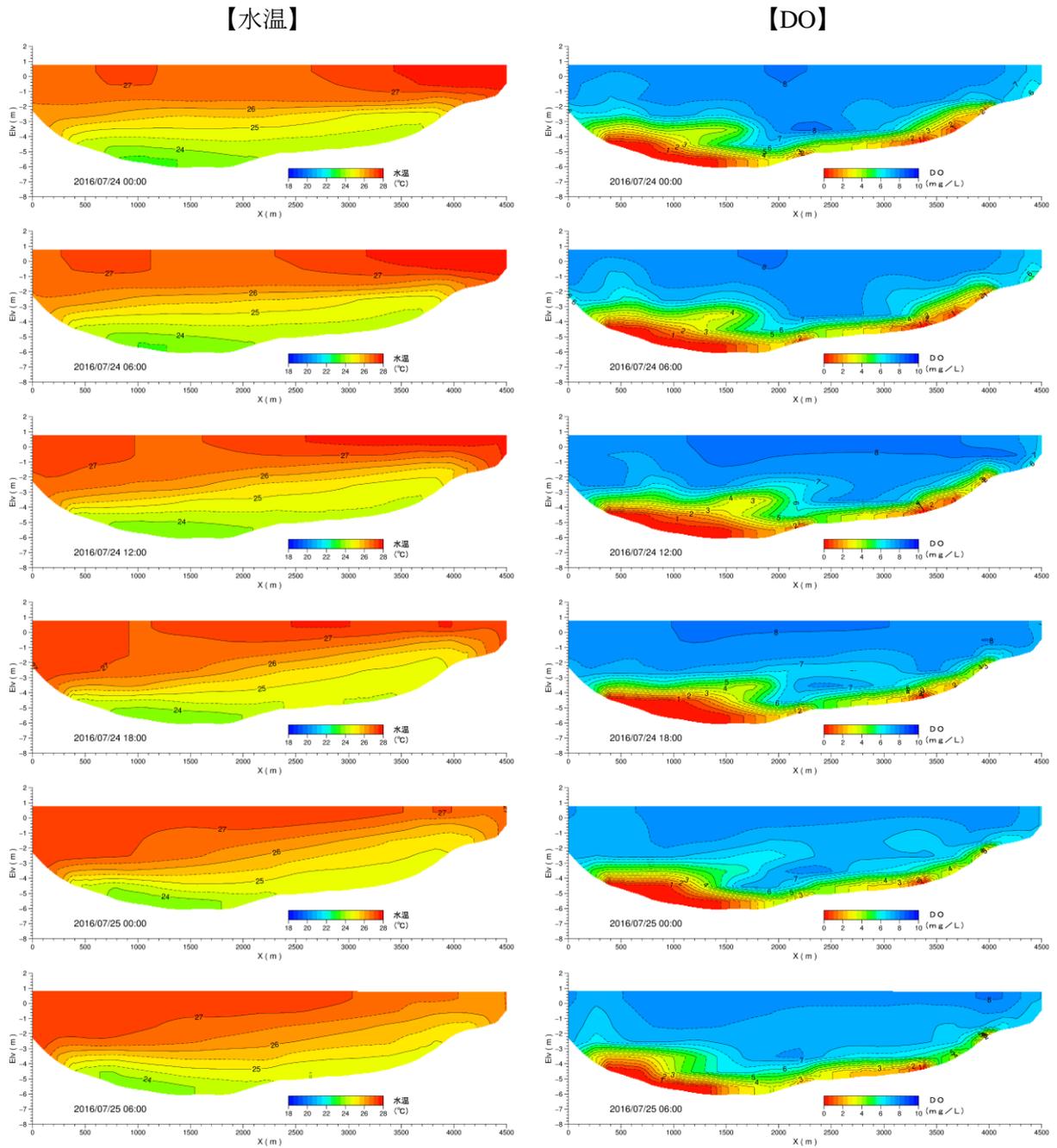
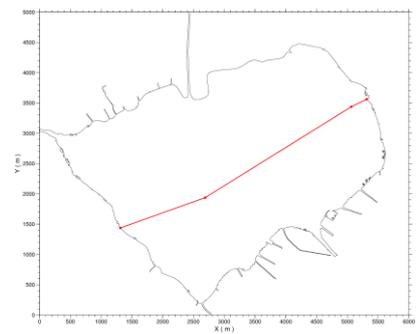


図 2.34(1) 水温とDOの鉛直断面図(2016年7月24日00:00~25日06:00)



鉛直分布抽出位置

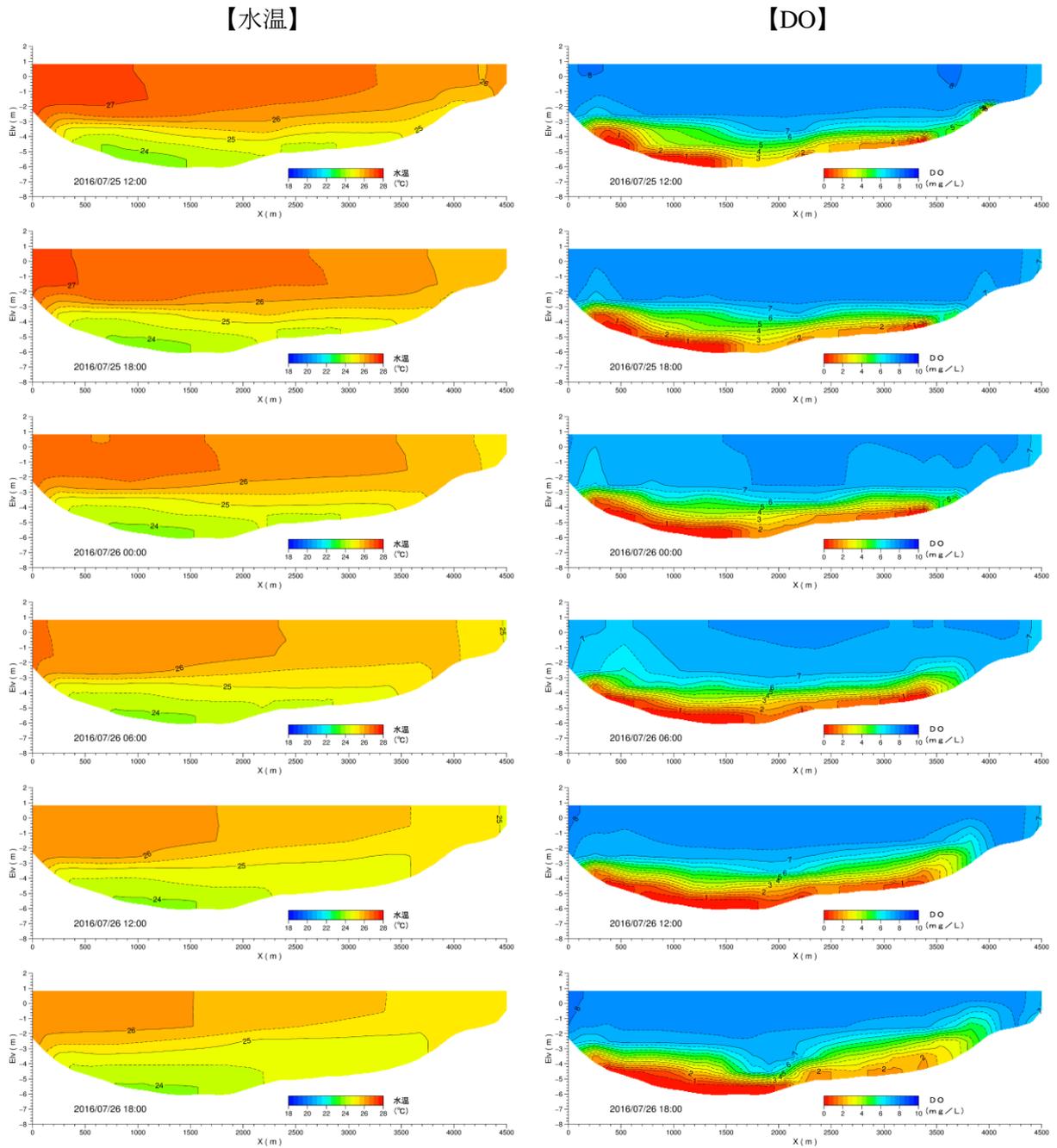
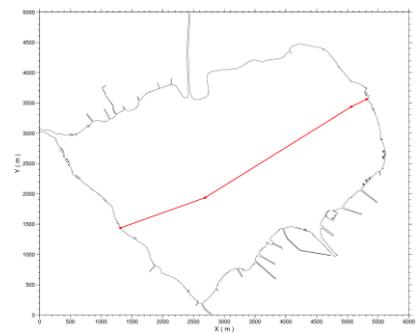


図 2.34(2) 水温とDOの鉛直断面図(2016年7月25日12:00~27日18:00)



鉛直分布抽出位置

年による水温・DOの分布状況の違いについて、2016年、2017年、2018年それぞれの7月26日6時の底層DO分布図と水温・DOの鉛直断面図を図2.35に示す。これによると、年により、気象条件の差に起因して水温成層の強さに差が生じており、この水温成層の強さの差が風による流動場への影響の現れ方、貧酸素水塊の拡大状況に大きく影響していると考えられる。貧酸素水塊の広がり方は2016年と2018年は類似しているが、図2.24に示したとおり2018年は2016年に比べて夏季の気温が高く成層の強さも強いため、同程度の風が吹いても2018年の貧酸素水塊は維持されると考えられる。

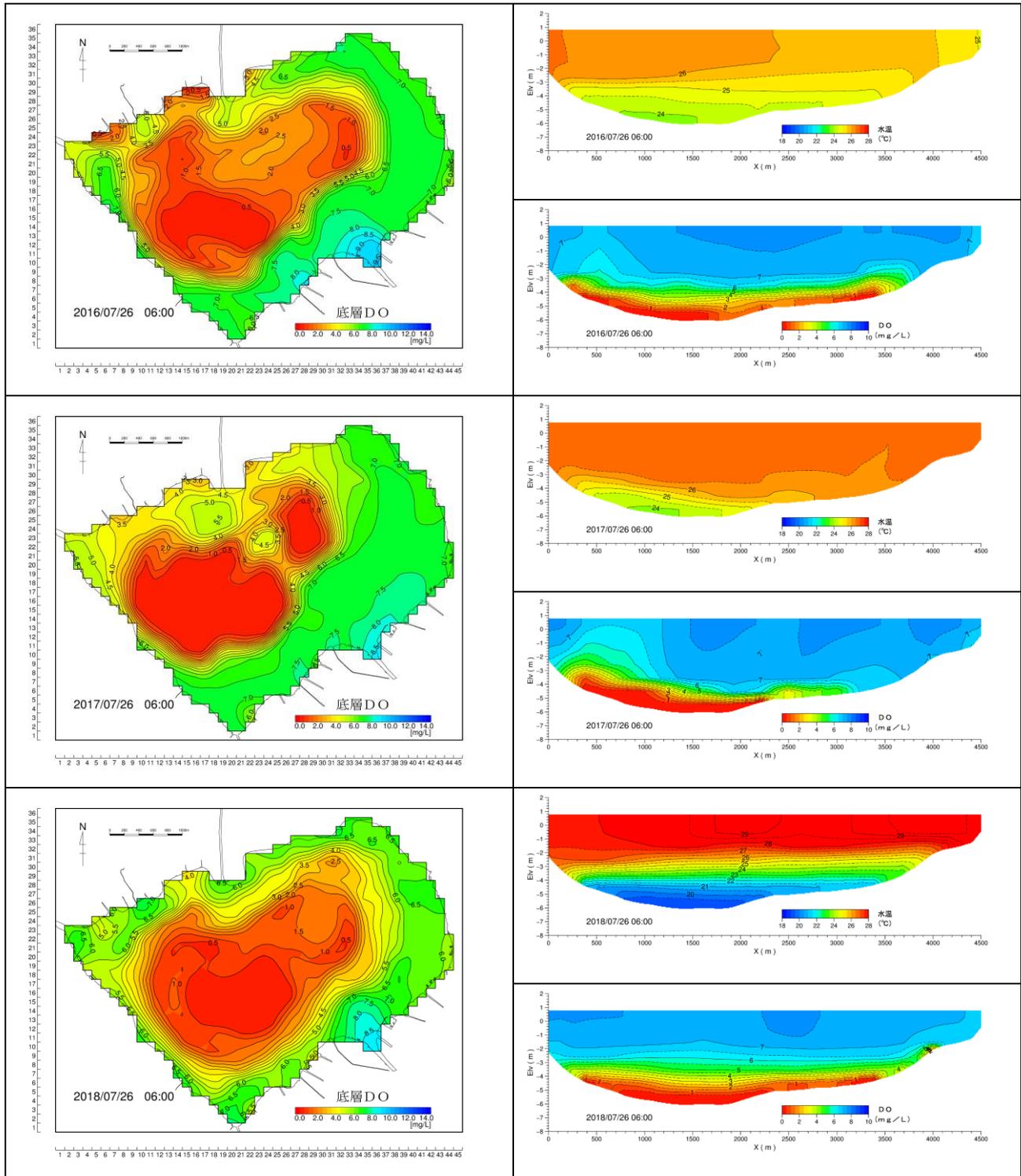


図 2.35 2016、2017、2018年7月26日06:00の底層DO分布と水温・DOの鉛直断面図

## 2.5.2 様々な要因の関連図の整理

湖沼の底層溶存酸素量（底層 DO 濃度）の低下は、基本的には、

「要因①：湖沼中・底泥中の有機物を微生物が分解する際に酸素を消費すること」及び

「要因②：底層の湖水が、酸素を多く含んだ（表層の）湖水と混合しなくなること」の2つによって引き起こされる。2つの要因がそろった時に底層溶存酸素量の低下が生じるが、湖沼によってはどちらかの要因の影響が大きいこともある。

要因①の有機物の起源は湖沼によって様々であり、典型的な要因としては、(1)河川等からの流入、植物プランクトンの過剰な増殖や、(2)湖内に既にヘドロなどの有機物が蓄積していることがあげられる。この他、水深の浅い湖沼では、水生植物の過剰な繁茂により水の流れが阻害され有機物が蓄積しやすくなることもある。

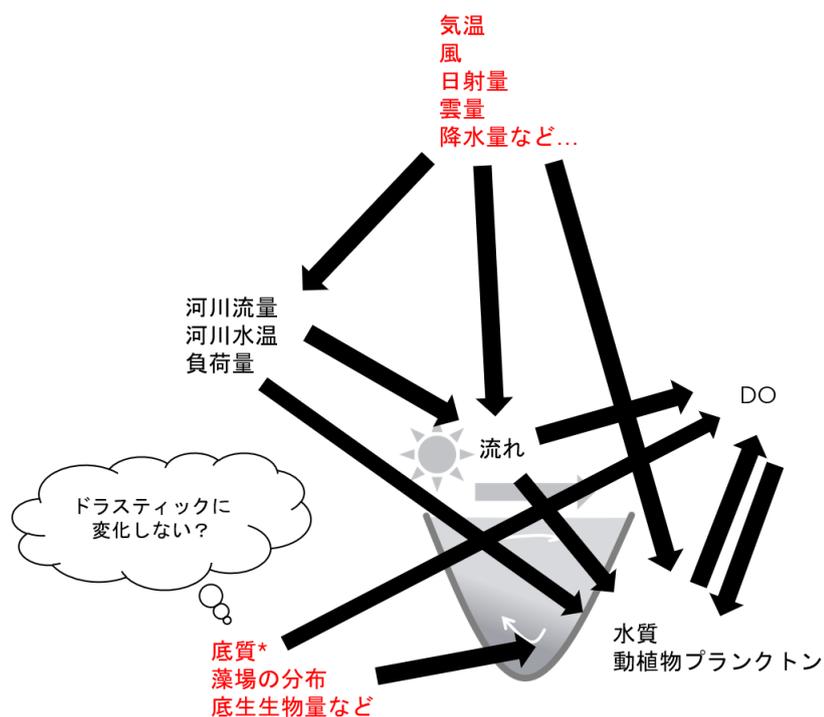
要因②の水の混合がなくなる理由も湖沼によって様々であり、典型的な要因としては(1)水温による成層、(2)汽水湖における塩分による成層、(3)流入量の減少（回転率の減少）、(4)部分的な窪地等の混合しにくい地形があげられる。

諏訪湖においては、湖底に有機物を多く含む底質が存在し、水温の上昇とともに活発な微生物の分解作用がおこり、酸素を消費する一方、夏季に表層と底層の水温に差が生じて成層化し、酸素を含んだ表層の湖水が底層に届かなくなる結果、底層 DO 濃度が貧酸素化する状況であると考えられる。諏訪湖の湖盆部では、毎年のように低い底層 DO 濃度の水塊である貧酸素水塊が生じているが、上述のように、貧酸素水塊は、非常に様々な要因の累積の結果である。

本検討の中では、様々な要因と貧酸素水塊（DO 濃度）との関連図を図 2.36のとおりに定義することとした。各要因は非常に複雑に絡み合っているが、日々の変化は気温や風などの気象条件に紐づいて変動していることを事前知識（前提条件）とすることとした。

底質、藻場の分布は本来 DO やプランクトン量などの水質と相互に関連しあうものと考えられる（藻場による酸素消費などにより DO 濃度が変動するなど）。ただし、藻場が一日で消失したり、急激に発生することは考えにくく、緩やかに変化すると考えられるため、日々の貧酸素水塊の消長を詳細に予測したいという観点から見れば、実質的に境界条件と捉えることができるもの（外的な要因と捉えることができる）と考えた。

貧酸素水塊の日々の消長に影響を与える外的な要因としては気温・風などの気象条件とし、河川流量・負荷量・流れ・水質はこれらに連動して変動する内的な要因と考えられる。



要因	諏訪湖貧酸素水塊モデルへの活用	要因の種類
気象条件 (日射、気温、風、雲量、湿度)	●	外的要因
河川流入量	●	内的要因
湖沼内の水位	●	内的要因
DO 濃度	●	(目的の要因)
水温	●	内的要因
各種水質 (COD、TN、TP、栄養塩等)	●	内的要因
動植物プランクトン量	●	内的要因
地形	●	外的要因 (ほぼ普遍)
ヒシなどの分布データ	●	外的要因 (ほぼ普遍)

図 2.36 様々な要因と貧酸素水塊(DO 濃度)との関連

様々な要因を総合的に解析する前に、既存知見も踏まえて、流動と貧酸素水塊との応答、気象条件と流動などとの関係などを整理し、その後、総合的な解析を行った。

### 2.5.3 流動と貧酸素水塊の応答

水温構造と貧酸素水塊の形状の比較を図 2.37に示す。図下側に示した断面 A における水温の偏差<sup>5</sup>を水温構造として可視化し、同じ日時の断面AのDO飽和度をそれぞれ可視化している。

貧酸素水塊は水温躍層の発達（表層と底層の水温差が大きい。図 2.37では表層が平均値より高く（偏差が+側に大きく：赤色が濃い）、底層が平均値より低い（偏差が-側に大きく：青色が濃い））に伴って発達し、水塊の流れとともに輸送されたり、流れの状況によっては解消したりすることから、水温の構造と貧酸素水塊の構造はよく整合したものとなることが確認できる。同様の関係は、2016年～2018年の全体の期間を通じて、水温の偏差が小さいほどDO飽和度も高い傾向として確認できる（図 2.38参照、第1層や第2層は濃度の変化が小さいため省略している）。鉛直格子については1mごとに区切られている。

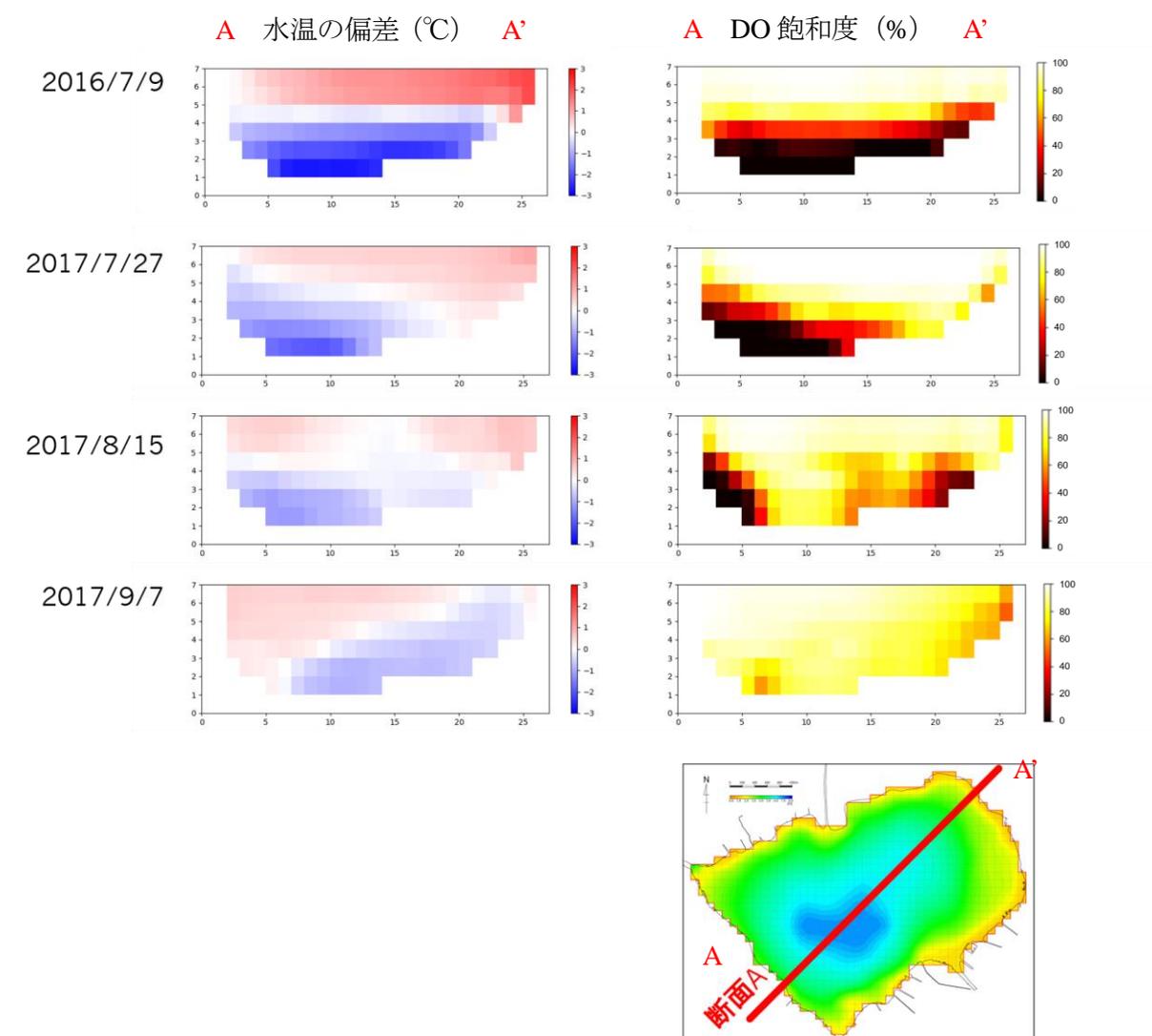


図 2.37 水温構造と貧酸素水塊の形状の比較  
(諏訪湖貧酸素水塊モデルの結果の一部を抜粋)

<sup>5</sup> 図 2.37の水温の偏差は、各日の A-A断面の水温データを抽出後に各日の断面全体の平均値を計算し、その平均値と各格子の値の差異を水温の偏差とした。図 2.38の水温の偏差は、全時刻の A-A断面、各層の水温のデータを抽出後に平均値を計算しその差を示した。

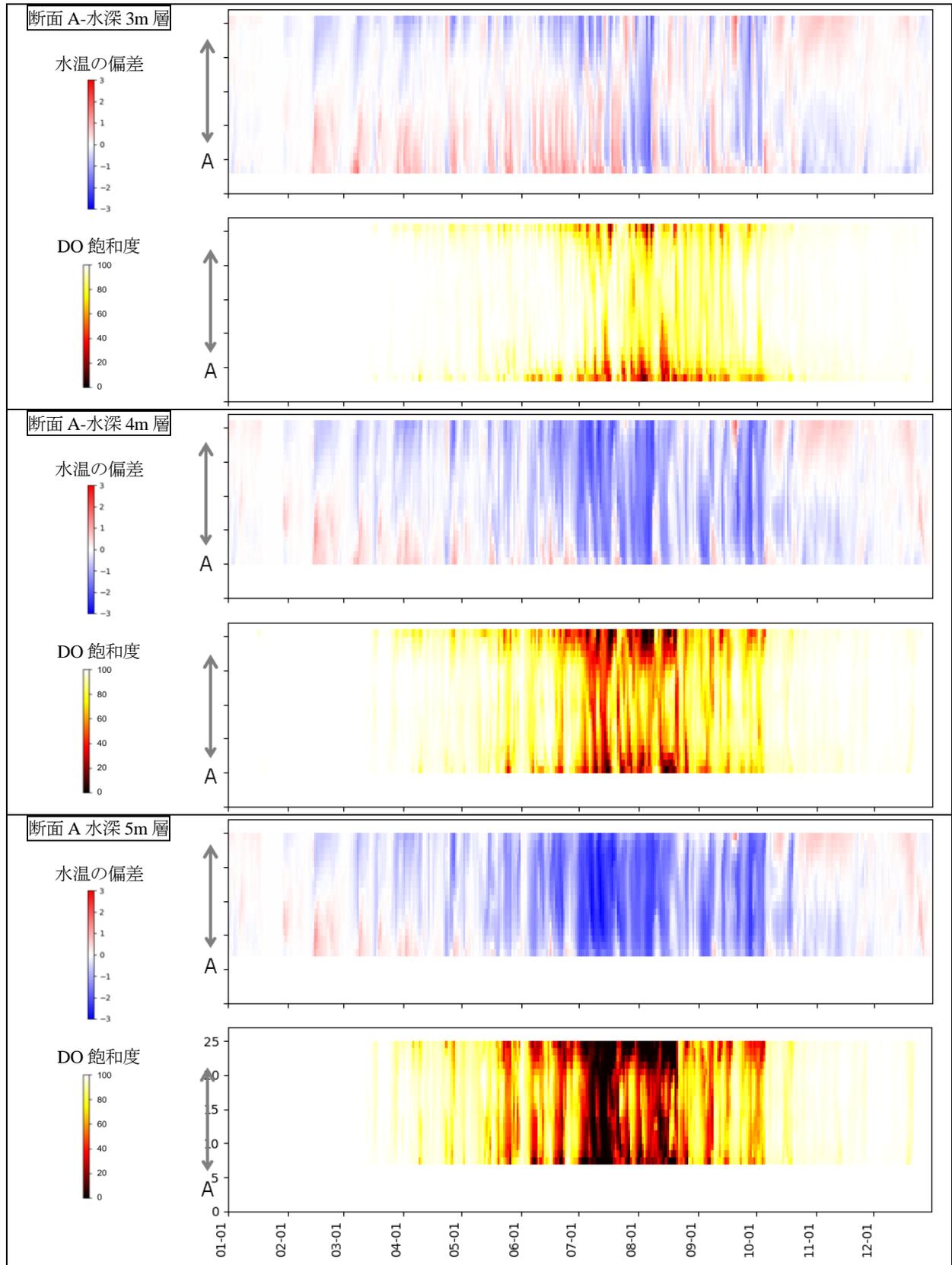


図 2.38 (1) 断面 A における水温偏差と DO 飽和度の時間変動 (2016 年)

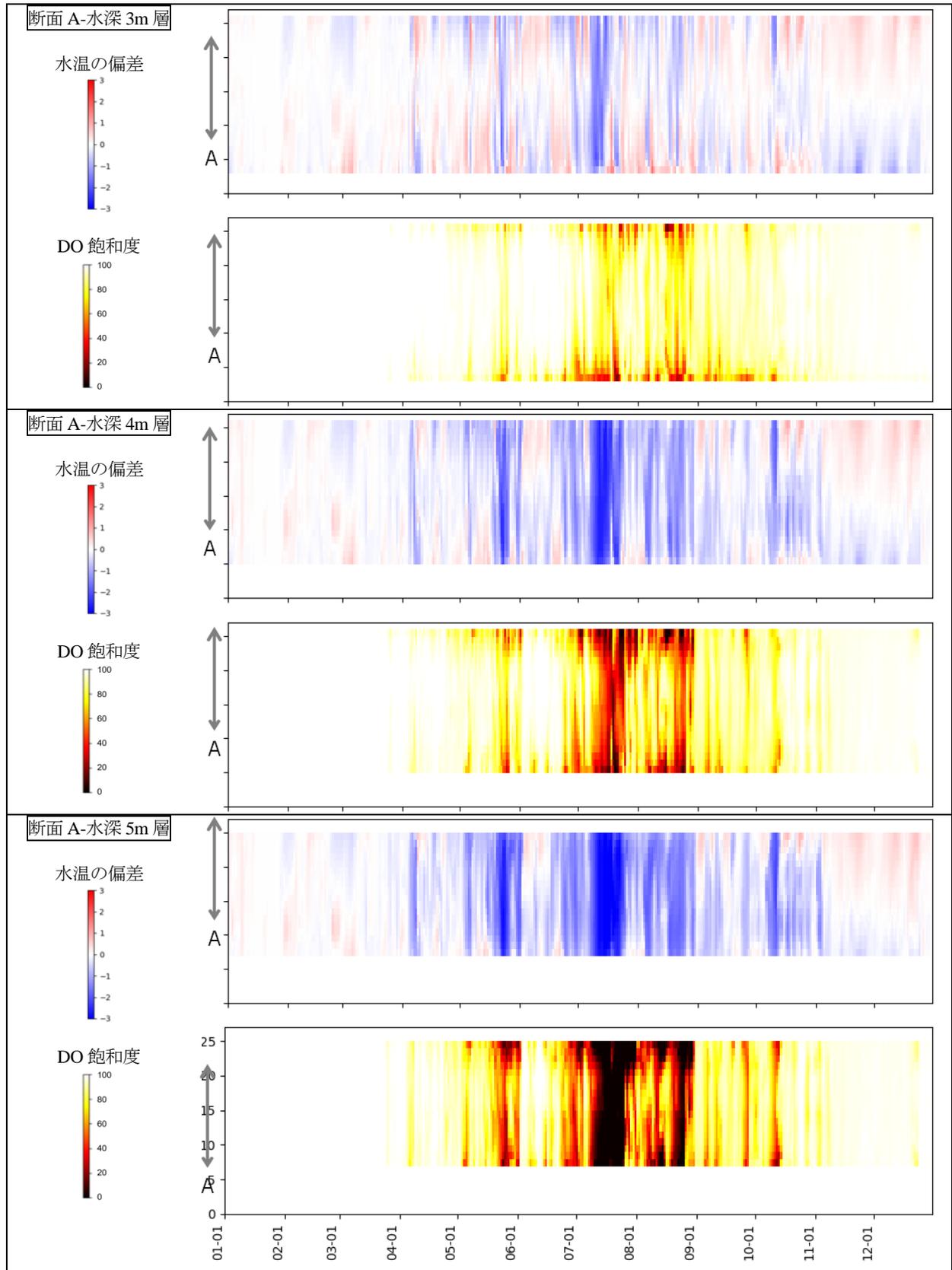


図 2.38 (2) 断面 A における水温偏差と DO 飽和度の時間変動 (2017 年)

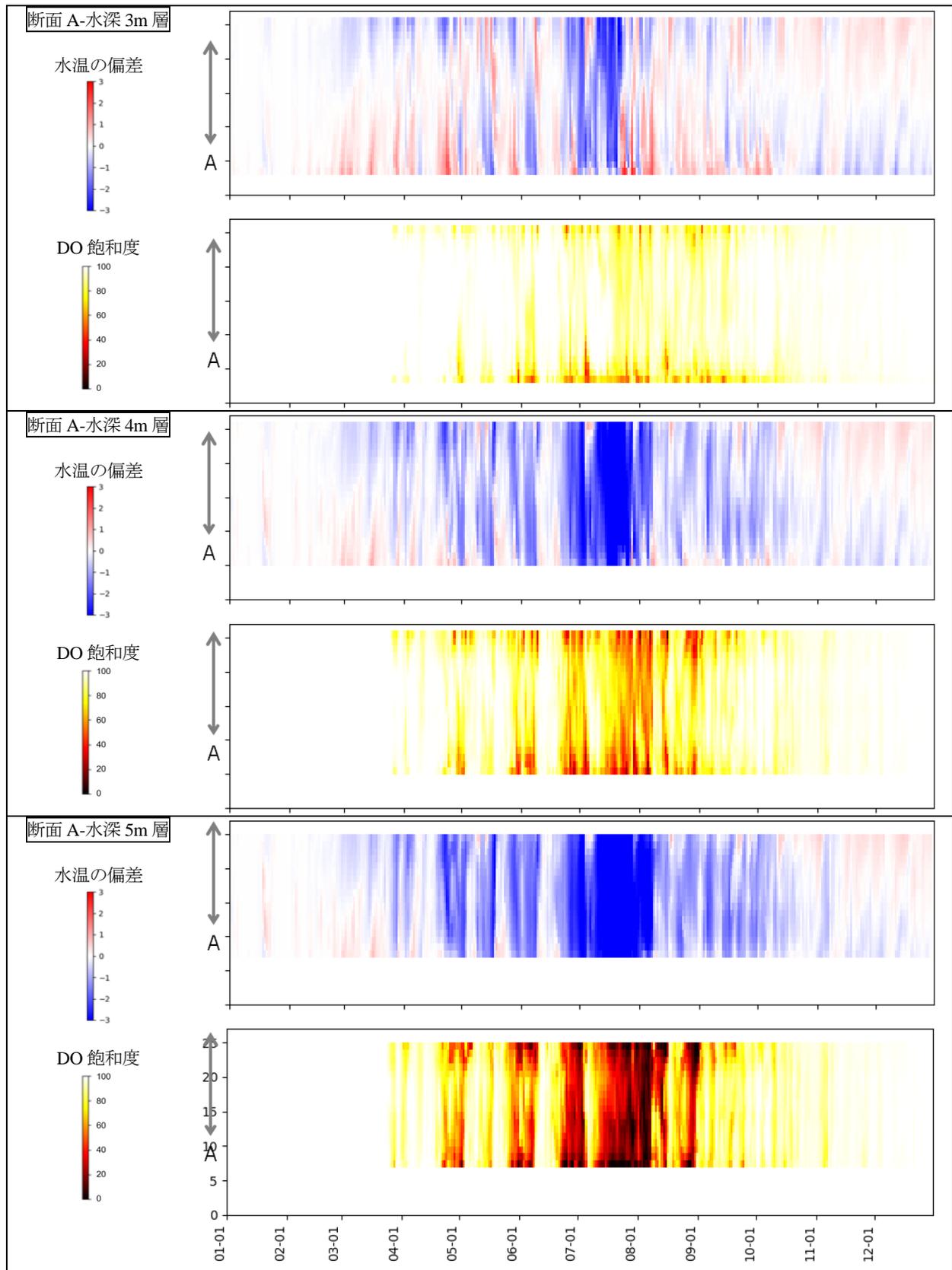
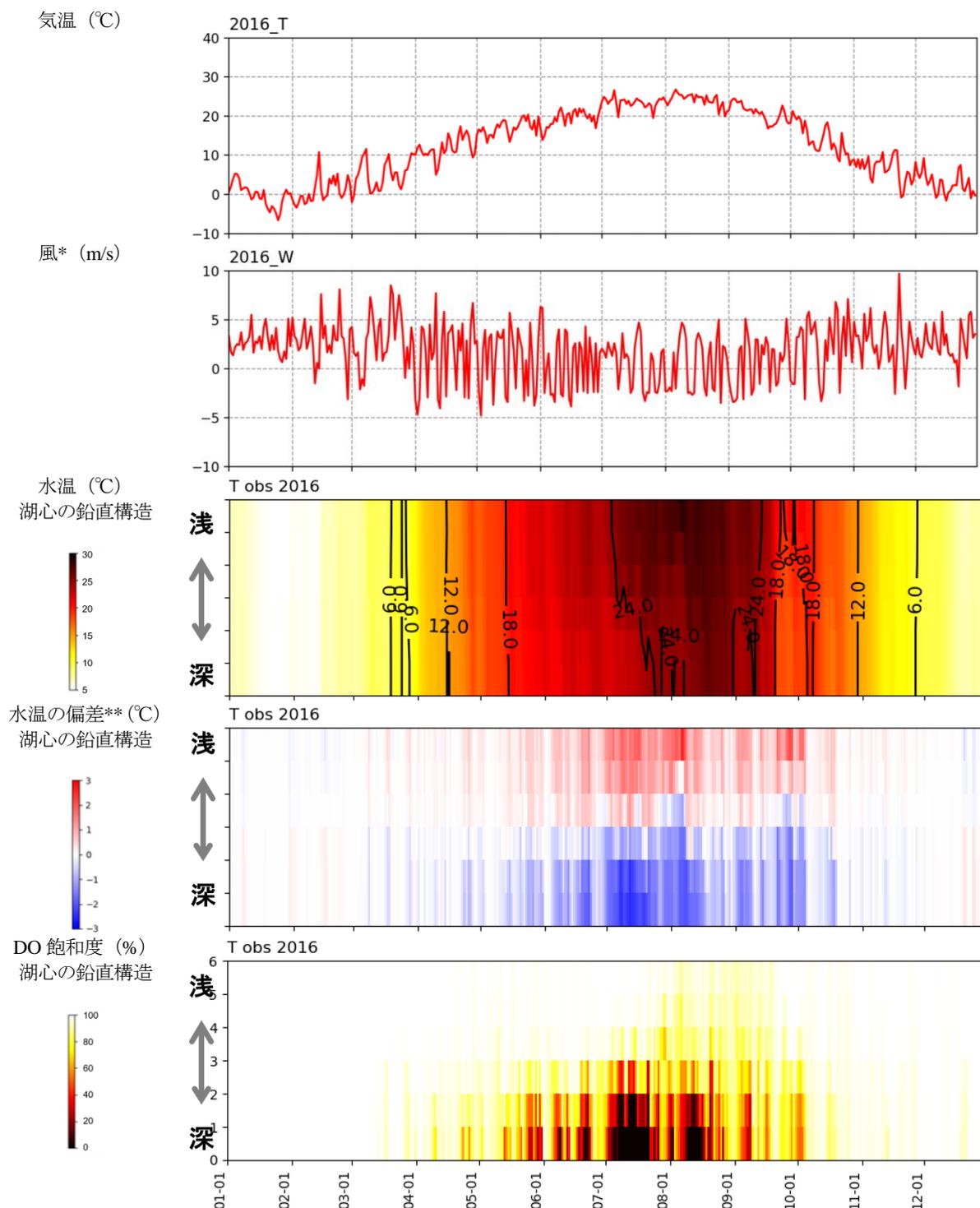


図 2.38 (3) 断面 A における水温偏差と DO 飽和度の時間変動 (2018 年)

## 2.5.4 気象条件と流動・DO 飽和度の関係

気象条件と流動・DO 飽和度の関係を図 2.39に示した。

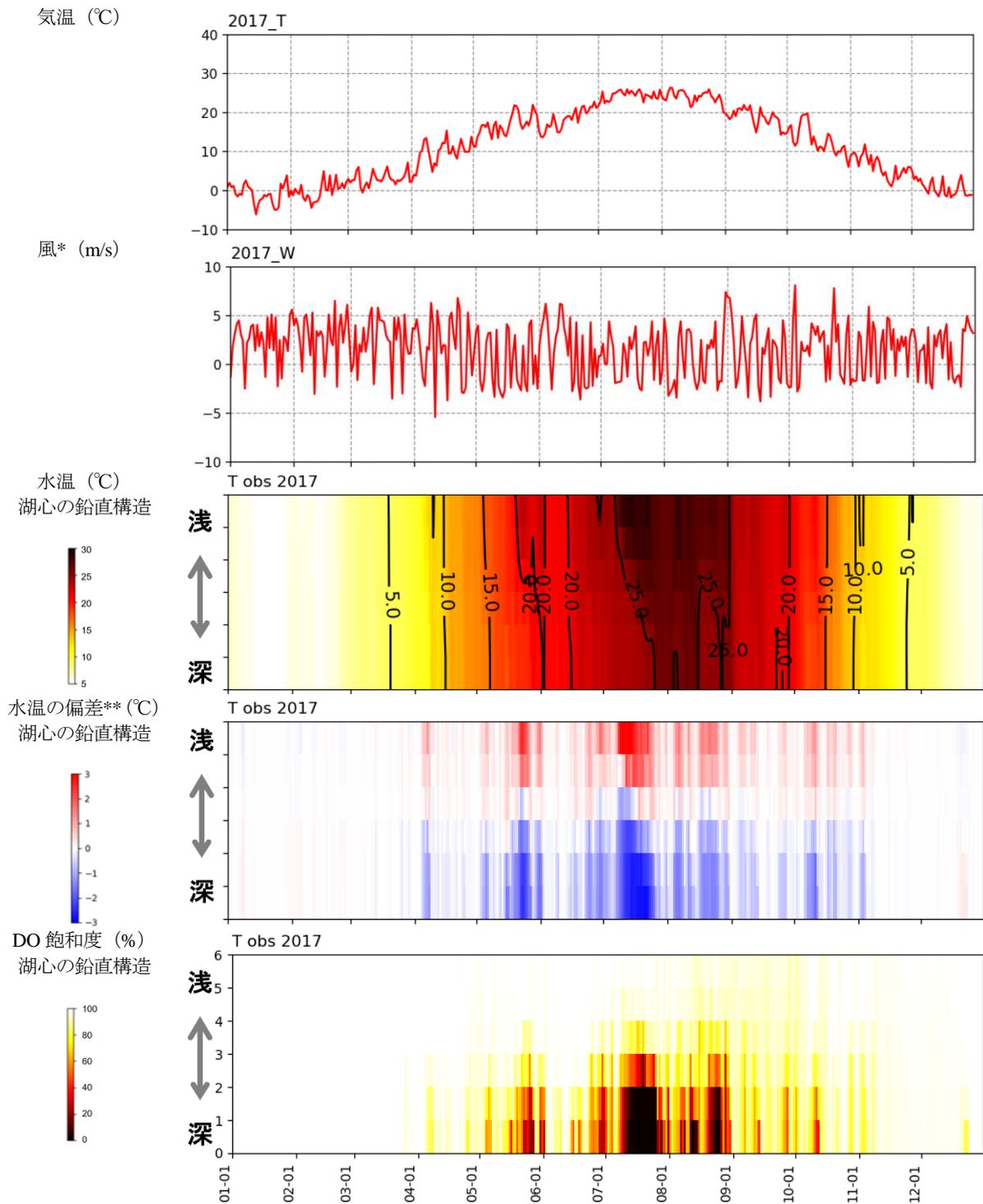


\* : 風は卓越風向きとして「東南東」「西南西」を可視化した (頻度分布は参考資料に掲載)。

\*\* : 湖心の鉛直分布の全時刻の平均値との差異を可視化した。

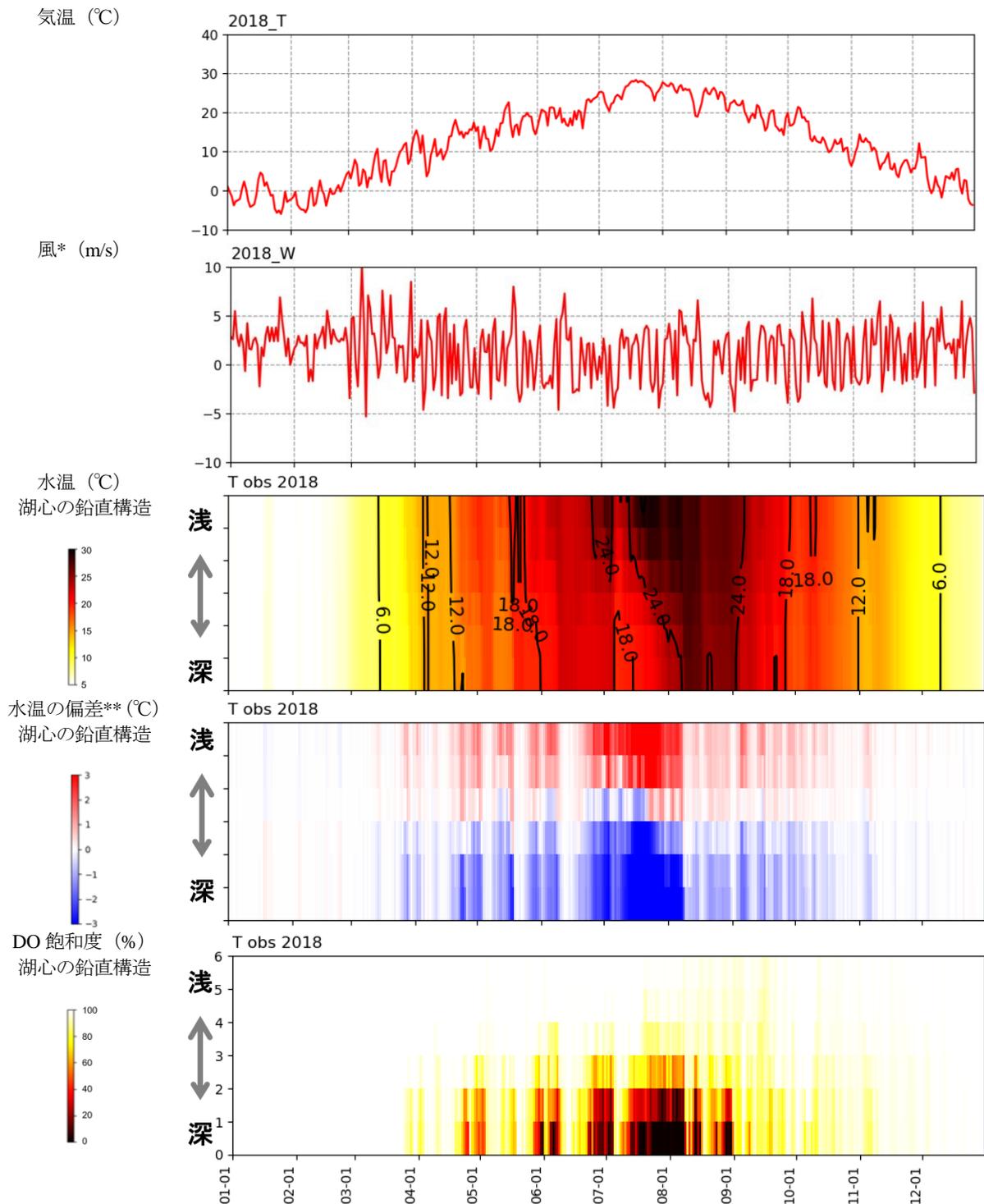
縦軸は水深 (m)

図 2.39 (1) 気象条件と湖心の水温・DO 飽和度の時間変動 (2016 年)



\* : 風は卓越風向きとして「東南東」「西南西」を可視化した (頻度分布は参考資料に掲載)。  
 \*\* : 湖心の鉛直分布の全時刻の平均値との差異を可視化した。  
 縦軸は水深 (m)

図 2.39 (2) 気象条件と湖心の水温・DO 飽和度の時間変動 (2017 年)



\* : 風は卓越風向きとして「東南東」「西南西」を可視化した (頻度分布は参考資料に掲載)。  
 \*\* : 湖心の鉛直分布の全時刻の平均値との差異を可視化した。  
 縦軸は水深 (m)

図 2.39 (3) 気象条件と湖心の水温・DO 飽和度の時間変動 (2018 年)

気温が高くなるほど水温躍層が発達し、貧酸素水塊が発達していく大まかな傾向は読み取れるが、風による流動の応答関係については、時系列データからは明確には確認できない結果となった。

### 2.5.5 風と流動の応答関係

風と流動の応答関係を分析するために、主成分分析という方法を用いて水塊の「水平方向の動き」を数値化（図中の「mode3<sup>6</sup>」）し（分析の詳細は参考資料に掲載）、風の折れ線グラフと重ねて可視化を試みた。その結果を図 2.40に示す。風と水平的な流動は、よく整合するタイミング（例えば、図中○の個所）もあれば、逆相関になっているようなタイミングもあり、風と流動の応答の様子は季節的に変化していることが考えられる。

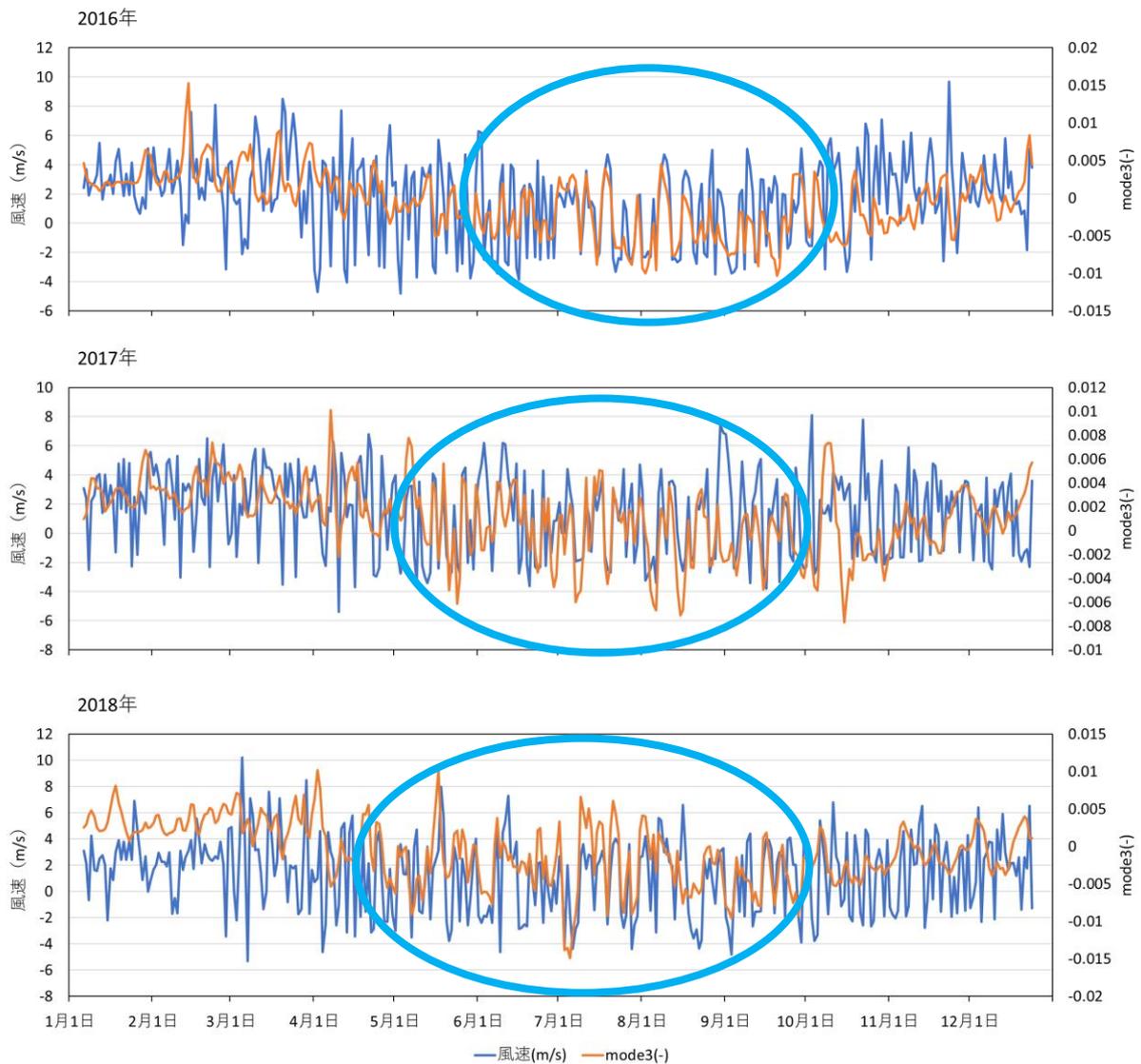


図 2.40 水塊の「水平方向の動き」と風の関係

<sup>6</sup> 各時間について全格子（3907 個）の水温データの平均値からの偏差のデータ（全時間数(3\*36X\*24)×全格子数(3907)）に対して主成分分析を行った結果、第 1 モードは季節変動、第 2 モードは鉛直構造の変動が抽出され、第 3 モードに水温の水平的な変動が抽出された。この第 3 モード（mode3）を水平的な水塊の動きの変化と捉えた。主成分分析の詳細は参考資料に記載した。

風・水平方向の動き (mode3) ・DO の FFT (高速フーリエ変換) の結果を図 2.41に示した。また、風と水平方向の動き (mode3) の FFT の結果を掛け算することで、同じ周波数帯で振動している個所を見えやすく可視化した図面も同時に示している。さらに、水温の鉛直構造と風・水平方向の動き (mode3) が同じ周波数帯で振動している状況の関係を図 2.42に示した。

FFT (高速フーリエ変換) とは、時系列データがどのような周期で振動しているかを分析する手法であり、縦軸に周期として示している。色が暖色であるほど、当該周期の振動成分が高い状況を示しており、いつ頃にどの周期が高いかを示している図となっている。

風・水平方向の動き (mode3) が同じ周波数帯で振動している状況が起こっている周波数帯は時々刻々と移り変わり、振動が小さいタイミングで上下層の水温躍層が発達している状況がよくわかる。ただし、風・水平方向の動き (mode3) が同じ周波数帯で振動している状況が起こっている周波数帯と躍層の位置などと明確な関係は読み取れないが、これは振動の状況と躍層の状態が相互に関係しあっているためと考えられる。図には併記していないが成層強度なども整理したが、振動の周波数帯との明確な関係を抽出するのは困難であった。なお、成層強度は、後述する図 2.48などに掲載されている。

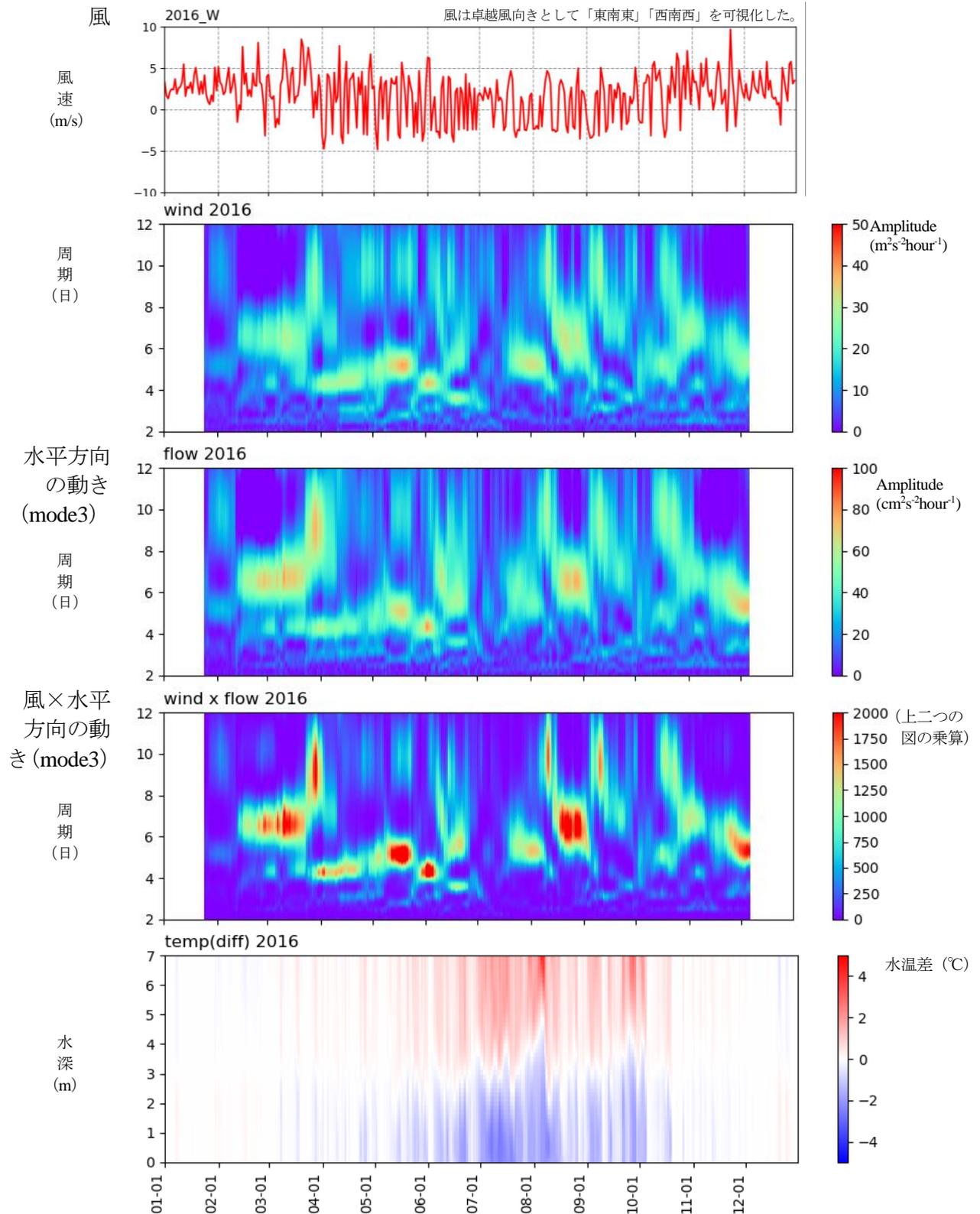
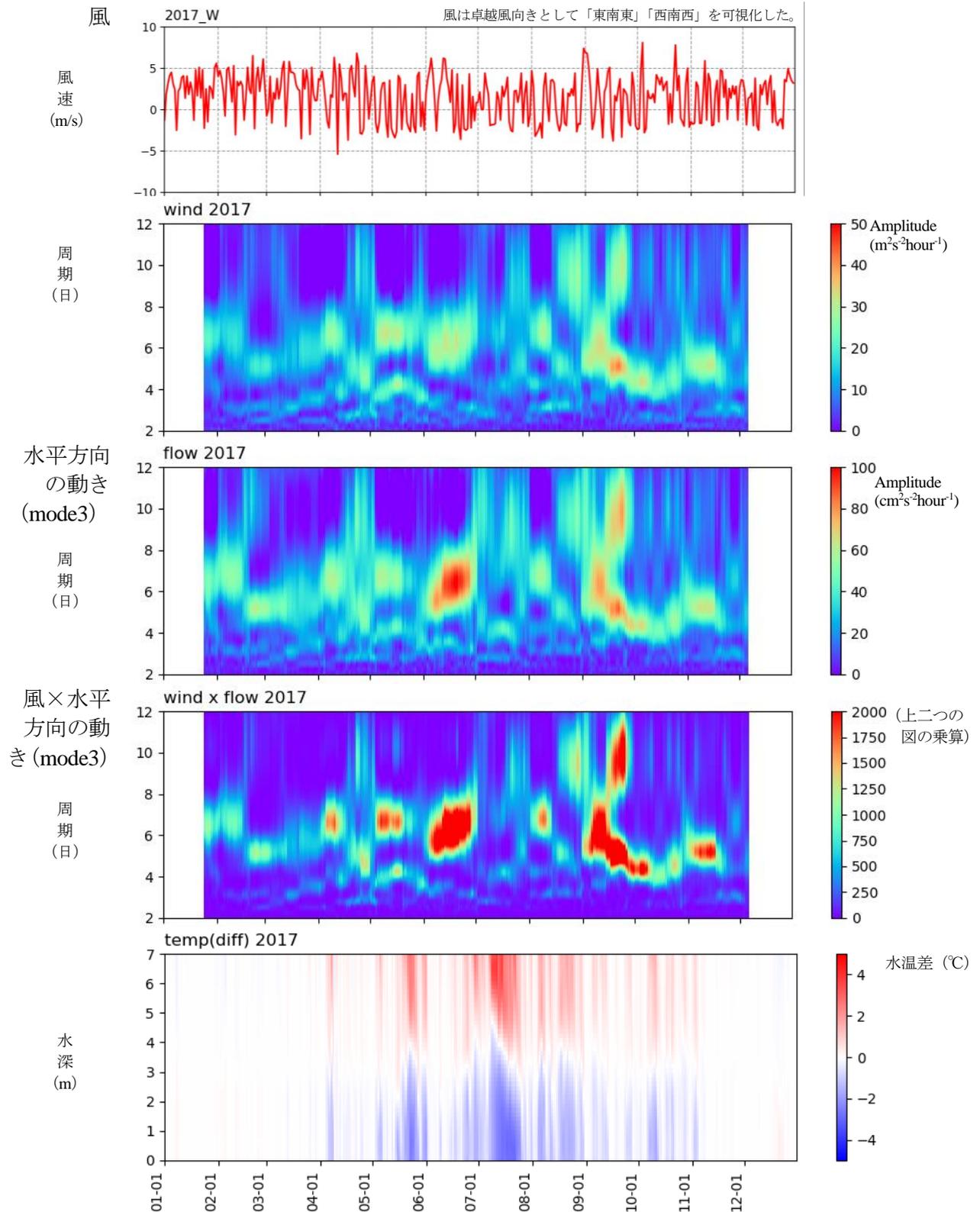
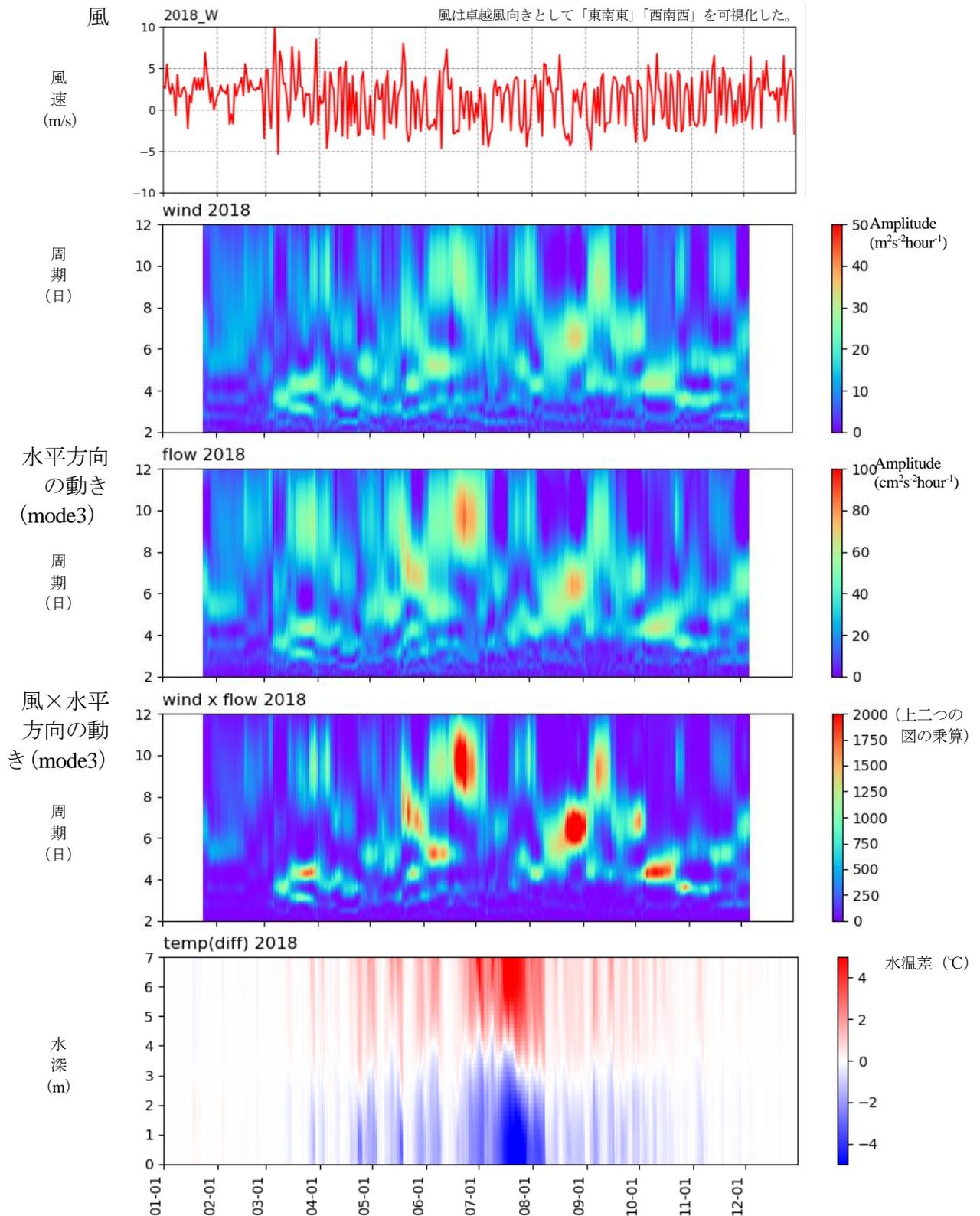


図 2.41 (1) 風・水平方向の動き(mode3)・DO の FFT(高速フーリエ変換)の結果(2016年)



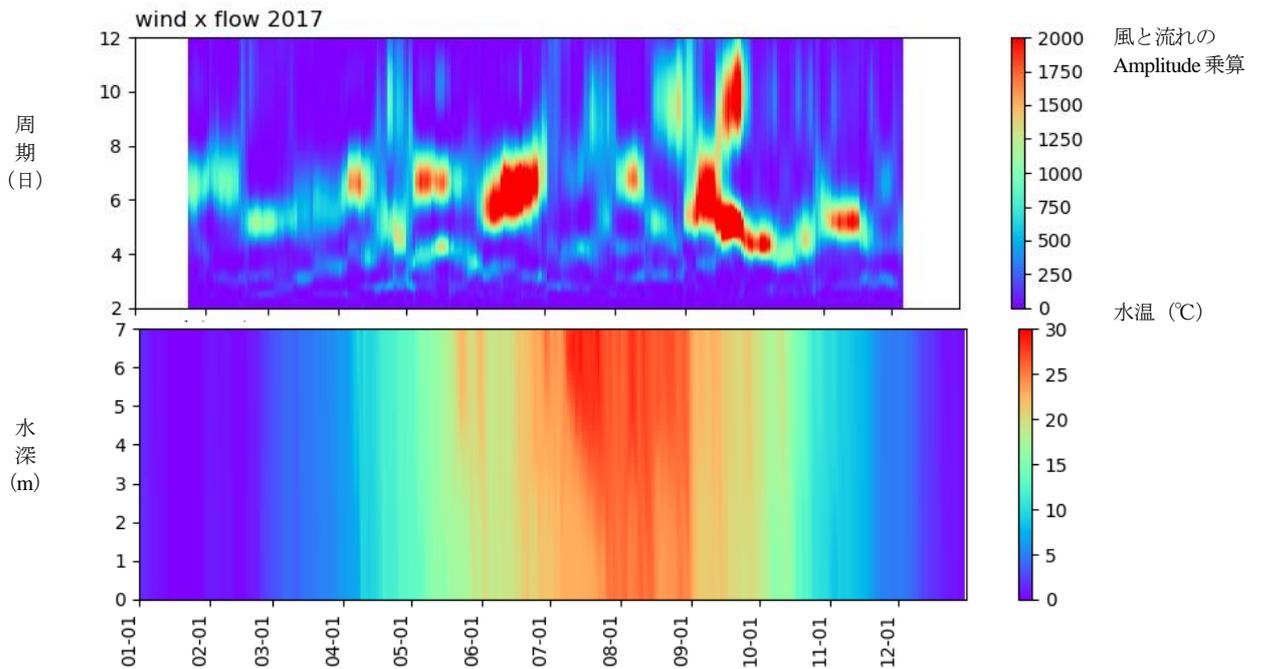
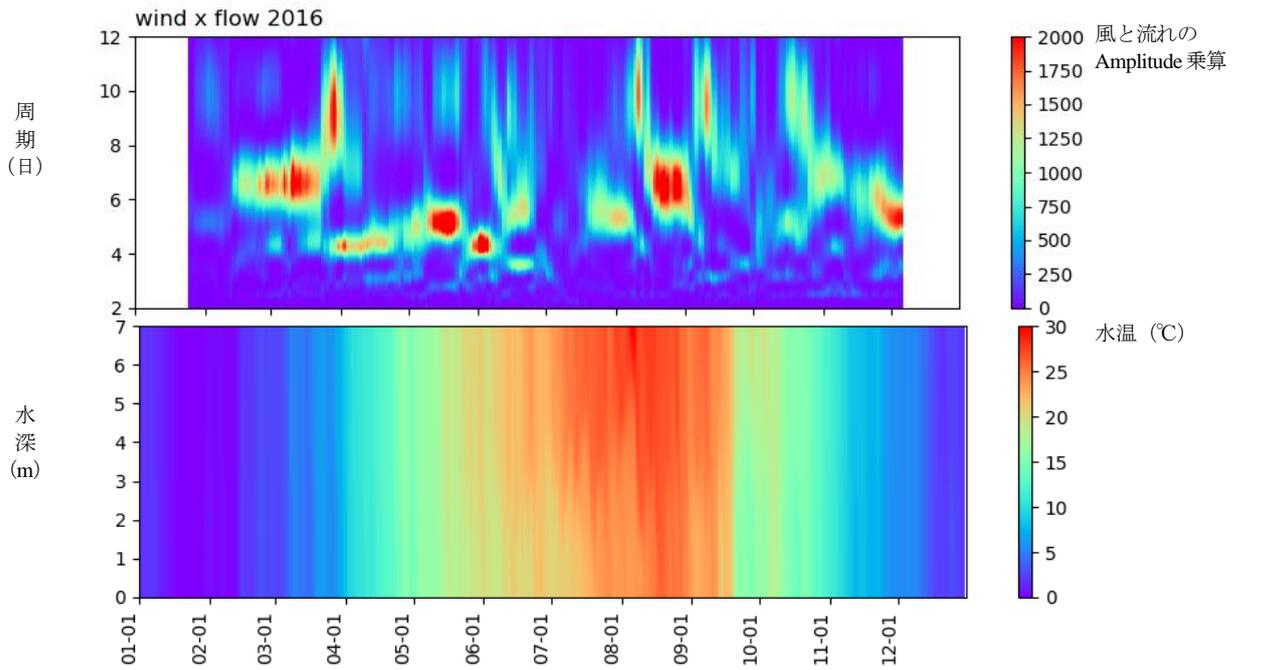
Amplitude は振幅の大きさとして捉えるもの

図 2.41(2) 風・水平方向の動き(mode3)・DO の FFT(高速フーリエ変換)の結果(2017年)



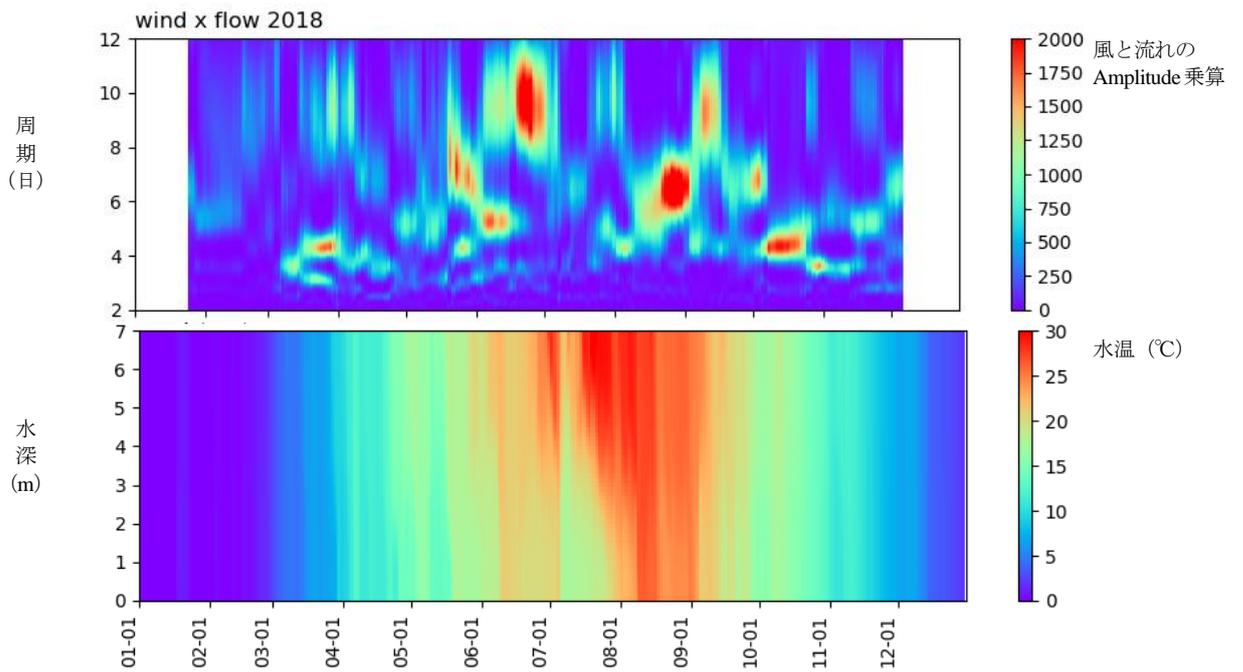
Amplitude は振幅の大きさとして捉えるもの

図 2.41(3) 風・水平方向の動き(mode3)・DO の FFT(高速フーリエ変換)の結果(2018年)



Amplitude は振幅の大きさとして捉えるもの

図 2.42(1) 水温の鉛直構造と風・水平方向の動き(mode3)が同じ周波数帯で振動している状況の関係



Amplitude は振幅の大きさとして捉えるもの

図 2.42(2) 水温の鉛直構造と風・水平方向の動き(mode3)が  
同じ周波数帯で振動している状況の関係

## 2.5.6 貧酸素水塊の規模と気温との関係

貧酸素水塊の規模と気温との関係を図 2.43に示した。ただし、貧酸素水塊の規模は、全域平均の DO 飽和度と、各閾値（2、3、4mg/L）以下の DO 濃度の体積を指標としてそれぞれ示した。気温が高いほど、貧酸素水塊の規模が大きくなっていることがわかる。

散布図は一見してばらつきがあるように見えるが、数日スケールでみると変動パターンはよく整合しており、例えば図 2.44に示す通り、移動平均して滑らかな変動成分で散布図を描画するとはっきりとした曲線が確認でき、何らかの履歴性のような関係性が確認できる（楕円を描くように見える）。

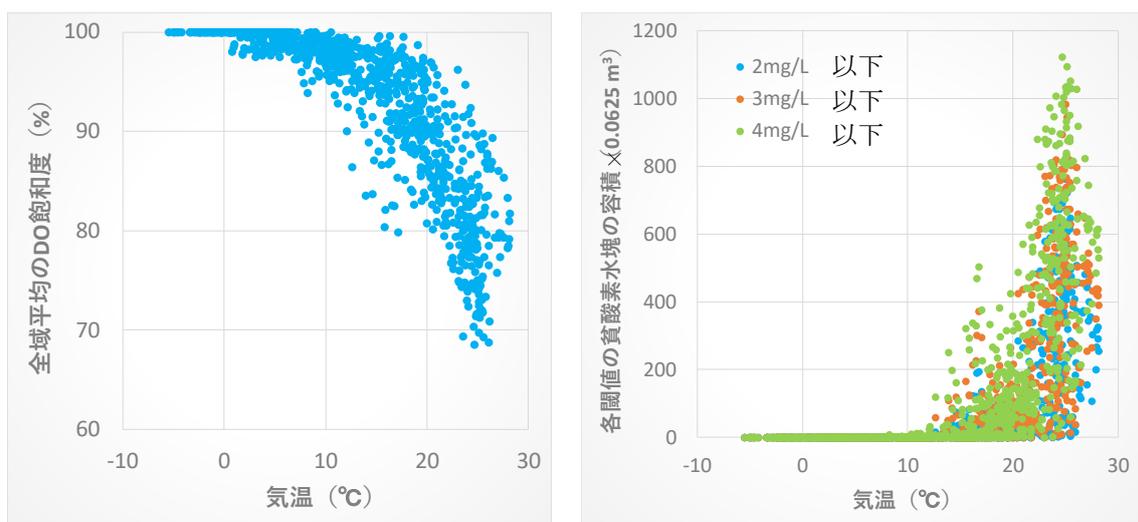


図 2.43 貧酸素水塊の規模と気温との関係

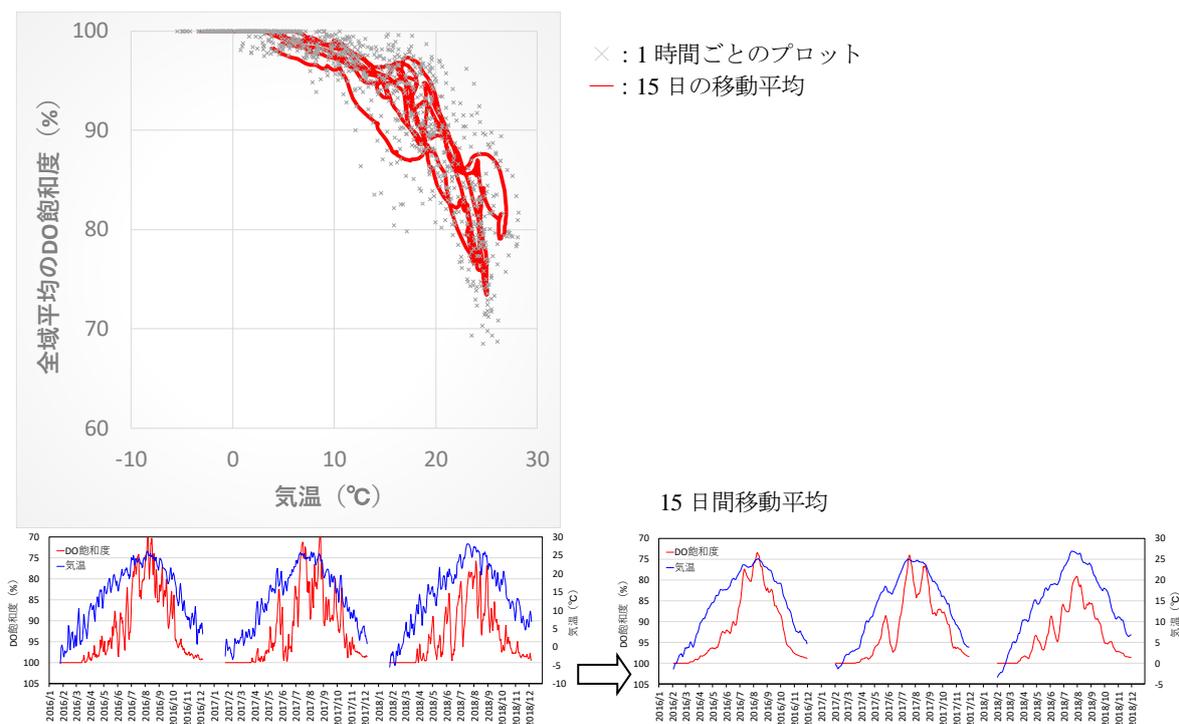


図 2.44 貧酸素水塊の規模と気温との関係 (15日移動平均)

これは、貧酸素水塊の規模の消長に気温が関与している可能性が高いことを伺わせる結果であると考えられる（1時間ごとの変動というよりも数日スケールの累積的な影響があると思われる）。

なお、各閾値（2、3、4mg/L）以下の DO 濃度の体積は離散値の集計結果であるため、連続値との関係性の解析には不向きであると考えられる。一方で、指標としてはより直感的に理解しやすい指標である。DO 飽和度と 2 mg/L 以下の DO 濃度の体積は、相関係数 0.87 程度の高い相関で回帰することができるため、ここでは DO 飽和度を対象に解析を行うこととした。

なお、貧酸素水塊の予測を行うシステムでは、DO 飽和度でも閾値以下の DO 濃度の体積でもなく、全ての計算格子で水温・流動・DO 飽和度（DO 濃度は水温と DO 飽和度を用いて算出可能）を予測する構成であるため、いずれの指標も再計算することが可能である。

## 2.5.7 貧酸素水塊の規模と風との関係

貧酸素水塊の規模はほとんど気温で説明が可能であるが、細かい時間変動は、風などに起因する湖沼内の流動に伴って規模の縮小が発生していることが考えられる。ここでは、全域平均の DO 飽和度から 15 日間移動平均の値を除いた結果（図 2.44 で示した左グラフの値から右グラフの値（15 日間移動平均）を除いた値）を貧酸素水塊の規模の細かい時間変動として整理し、これとの風との結果を図 2.45 に比較した。ただし、図は見やすさを勘案して、DO 飽和度の細かい変動成分、風のどちらも 5 日間の移動平均で処理してある（DO 飽和度は 5～15 日間の間の周期の変動成分を抽出したような状態）。

上段の時系列図を見ると、DO 飽和度の平均値は±6%程度の範囲で風とよく似た変動の様子が確認できるが、位相は時期によって少しずつずれている。下段には月別（7、8、9 月）の両者の散布図（位相のずれは考慮せずそのまま描画）を整理しているが、若干の相関（相関係数が-0.25 程度）がみられ、夏季においては、西南西の風の 5 日間程度の累積の影響で数%全域の DO 飽和度が上昇する傾向がみられた。なお、位相を考慮すると、時期によっては増加・減少は反転する場合も考えられる。

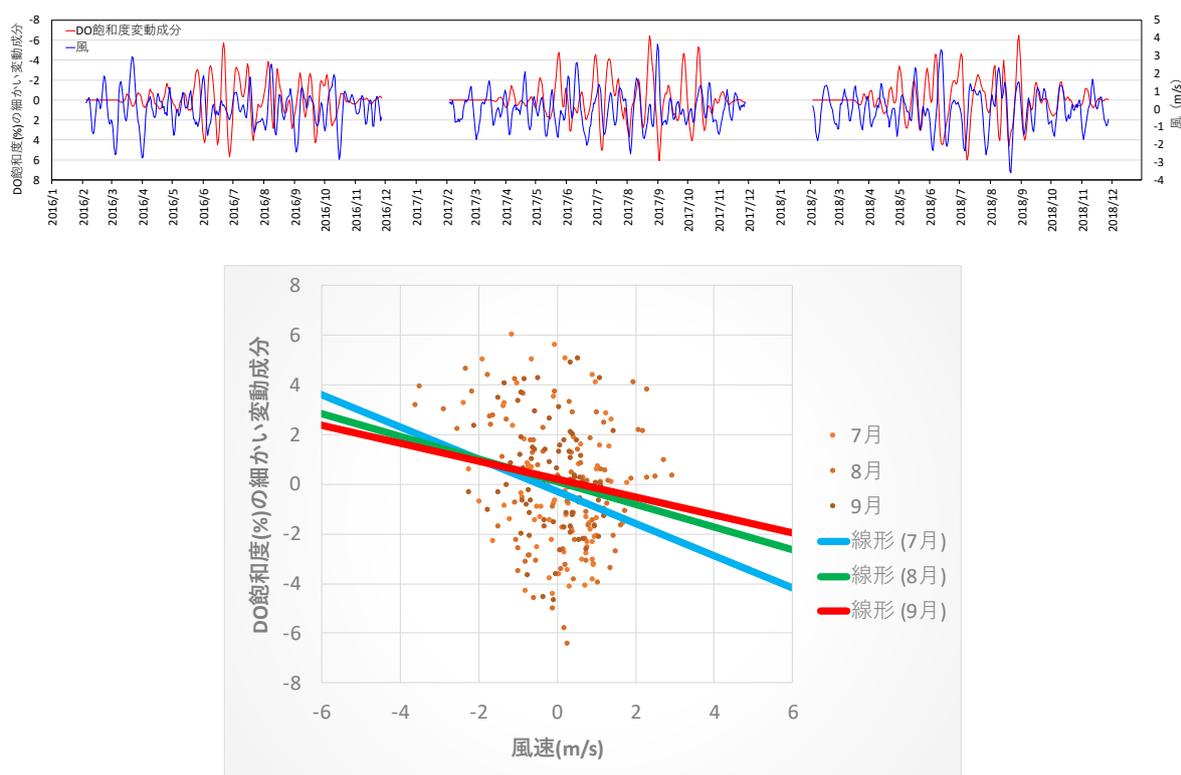


図 2.45 貧酸素水塊の規模の細かい変動成分と風との関係

## 2.5.8 総合的な分析

DO 濃度を予測するための各変数の重要さを定量的に評価する手法の一つとして、ここでは RF (Random Forest ; ランダムフォレスト) 回帰による重要度の評価を行った。結果を表 2.10 に示した。

RF は、データベースからランダムに抽出されたデータに対して決定木分析を大量に行う手法である (ランダムな決定木のアンサンブル予測なので、「森 (フォレスト) 」) と呼ばれる。決定木とは、どの変数が重要かを 2 分類しながら最終的な分類結果を得る古典的な多変量解析手法の一種である。

決定木分析は、各データを最もよく分類できる変数 (分類の良し悪しはジニ係数やエントロピーで評価) を 1 つ選んで分割することを繰り返していく手法であるので、どの変数が一番よくデータを分類できるかという明確なランキングが得られる。これをランダムなデータセットに対して、アンサンブル的に多数決で重要な変数のランキング (重要度 ; Importance) を得るのがランダムフォレストである。RF の回帰版の手法が「RF 回帰」である。ただし、気象条件などのデータは連続データがあるため、数日間の累積効果についても分析が可能であり、ここでは当日を含む前日 7 日間の平均値を用いて分析を行った。

表 2.10 RF 回帰による DO 濃度予測のための各変数の重要度

	瞬間値		日平均	7 日間平均
観測水深	0.1085	気温	0.4097	0.0697
水温	0.0170	湿度	0.0085	0.0082
最大水深	0.0051	全天日射量	0.0060	0.0014
透明度	0.0275	雲量	0.0021	0.0145
pH	0.1451	東西方向風速	0.0025	0.0062
COD	0.0591	南北方向風速	0.0030	0.0018
SS	0.0101	水位	0.0041	0.0183
TN	0.0098	河川流量	0.0029	0.0016
TP	0.0202			

水質項目については、観測水深と pH が DO の予測に重要と判定された。

水深については、貧酸素水塊はより深い水深で発達するため、自明の結果である。pH については、DO 濃度が低下していることは水中の二酸化炭素濃度が高い可能性が高く、結果として pH は低下することとなり、pH は DO を予測するための要因というより、DO 低下と関連した結果と考えられる。COD 等の水質項目の重要度が高いことも理解しやすい結果である。

気象条件等については、気温が明確に重要であるという結果が出ており、累積効果というよりも当日の影響がより大きい結果となったが、7 日間平均の期間の幅が大きすぎる可能性も考えられる。7 日間平均の雲量、湿度も重要であるが、これらは主成分分析の結果 (例えば図 4.9 のパイプロット) をみると、どちらも気温と比較的關係がある。

また、7 日間平均の東西方向風速も比較的關係性が強い。

7 日間平均の水位の重要度も高いが、これは水深が大きいほど貧酸素水塊が発達しやすい効果の帰結であると考えられる。また、時系列図を見ても水位の変動は 1 か月間以上ほとんど一定の期間も見られており、数日に状況が変化してしまう DO 濃度の変動よりも長い周期で変動しているため、貧酸素水塊の日々の消長の予測においてはそれほど重視しないこととした。