令和元年度　卒業論文

カンボジア国･トンレサップ湖における
2 次元数値流動モデルを用いた大腸菌の流動解析

Escherichia coli Transport Simulation
in Tonle Sap Great Lake, Cambodia
Using a Two-Dimensional Hydraulic Model

指導教員　　中村　恭志　准教授

東京工業大学
環境・社会理工学院
土木・環境工学系

16B05828

桑垣　晶乃

目次

第 1 章　序論 3

1-1.　研究背景 3
1-2.　既往研究 3
1-3.　研究概要 4
第 1 章 参考文献 5

第 2 章　流動計算モデルと GPGPU による計算高速化処理 6

2-1.　流動計算モデル 6
2-1-1.　基礎方程式
2-1-2.　離散化手法
2-1-3.　外力項の付与
2-2.　水域･陸域判定 9
2-3.　GPGPU による計算高速化処理 10
2-3-1.　GPGPU の概要
2-3-2.　GPGPU による計算高速化の効果
第 2 章 参考文献 12

第 3 章　湖内流動の解析 13

3-1.　トンレサップ湖の水理学的状況 13
3-2.　計算条件 14
3-2-1.　計算範囲・地形
3-2-2.　計算期間・入力条件
3-3.　通年の水位変化の検証 15
3-4.　流速データを用いた検証 16
第 3 章 参考文献 19

第 4 章　大腸菌流動の解析＿＿＿

第 1 章 序論

本研究は、カンボジア国・トンレサップ湖における住民の衛生状態の改善のため、2 次元数値流動モデルを用いて大腸菌の流動を解析するものである。第 1 章では研究背景、既往研究および本研究の概要について述べる。

1-1. 研究背景

トンレサップ湖はカンボジア中央部に位置する東南アジア最大の淡水湖である。その概要図を**図 1-1**[1]に示した。この湖の最大の特徴は、1~6 月にかけての乾季と 7~12 月にかけての雨季でその面積と水位が大きく変化することにあり、その面積は乾季の 2,500~3,000km^2 から雨季には約 4~5 倍の 13,000km^2 まで増加する。また、水位は乾季で約 1.5m であるのに対し、雨季には 8~10m にも及ぶ[2]。

乾季と雨季の間でこれほど面積と水位に差が生じる理由として、トンレサップ湖特有の Flood pulse という現象がある。乾季には、水はトンレサップ湖からトンレサップ川へと流れ出ており、これが順流状態とされる。しかし雨季に入ると、トンレサップ川が下流で接続するメコン川が大量の降雨によって流量を増し、それによってトンレサップ川の水位がトンレサップ湖よりも高くなる。そのためトンレサップ川は逆流を始め、水がトンレサップ湖へと流れ込むようになり、湖は大量の水を蓄えることとなる。したがって、雨季のトンレサップ湖は乾季に比べて非常に体積が大きくなるのである。

トンレサップ湖上には多くの水上集落が存在し、人の住民が湖の上に浮かぶ家で生活している。このような水上集落には上下水道が存在しておらず、人々は汚水を直接湖に排出している。一方で住民は飲用水・生活用水として湖内の水を直接利用しており、水利用の状況は衛生的に安全とは言えないものである。実際に、2017 年に行われた住民へのアンケート[3]では、水上を拠点とする住民のうち 52.9%が湖の水を飲用しており、そのうち水の浄化を行っているのは 64.9%であった。また同アンケートでは水上を拠点とする住民の 79.8%が下痢等の疾病に罹患した経験があると答えており、トンレサップ湖内の病原体の動態把握が求められている。

1-2. 既往研究

トンレサップ湖において大腸菌の流動を解析した研究としては、竹村[4]による 3 次元数値流動解析を用いた病原体輸送の把握が行われている。しかし、これはトンレサップ湖に

位置する水上集落の一つである Chhnok Tru を対象にしたものであり、トンレサップ湖全体についての大腸菌流動の解析は行われていない。また、この研究は 2018 年 3 月を計算期間としているため、年間を通した解析を行い季節ごとの流動傾向を把握した例は未だ存在していない。

村上[1]はトンレサップ湖全体を対象とした 2 次元数値流動モデルを開発した。これは全長最大 250km にも及ぶ広大なトンレサップ湖全域を対象に水理の解析を行うことを目的とするもので、大きさを固定した直交格子と単純な計算手法、ならびに GPGPU と呼ばれる高速化手法を用いることで、広大な湖全域を対象とした高計算負荷となる解析を可能にしている。

1-3. 研究概要

本研究では、村上による 2 次元数値流動モデルを用いて、湖全体について年間を通した大腸菌の流動解析を行う。

トンレサップ湖全体についての解析とした理由は、湖内に 30 程度存在する水上集落同士で汚染の相互作用がみられる可能性を考慮したためである。1 つの集落を対象とした解析では、ある集落から排出された大腸菌が別の集落付近まで到達し、排出元でない集落の水質を悪化させるという現象を再現することができない。そのため、この現象が発生する可能性を考慮して湖全体で解析を行うこととした。

また、通年での計算を行う理由は季節ごとの流動の傾向を把握するためである。上に述べた通り、トンレサップ湖は Flood pulse という現象によって雨季と乾季でその流れを大きく変える。その変化に応じて大腸菌の流動も大きく傾向を変えると考えられるため、その把握のために計算を通年で行うこととした。本論の構成を次に示す。

第 2 章「流動計算モデルと GPGPU」では基礎方程式として用いる浅水方程式およびその離散化手法、水域・陸域判定の方法と GPGPU による計算の高速化について述べる。

第 3 章「湖内流動の解析」では、第 2 章で説明したモデルを用いて 2017 年における水の流動計算を行った。村上[1]が行った解析では 2002 年の水位上昇期のみを対象期間としており、パラメータ設定のための検証には水位変化のみを使用していた。本研究で行う通年の大腸菌流動解析のためには、通年での検証を流れの向きや大きさについても行う必要がある。そのため、この章では計算期間である 2017 年において、水位変化と流速変化の両方について検証を行い、それを踏まえて適切にパラメータを設定する。

第 4 章「大腸菌流動の解析」では、従来のモデルに大腸菌濃度についての計算を加えてその流動を解析した。通年での計算を行った後月ごとに特徴的な流動を再現した解析も行い、それぞれについての計算結果と考察について述べる。第 5 章「結論と今後の課題」では本研究で得られた結論をまとめ、解析における今後の課題について述べる。

第 1 章 参考文献

1. 村上駿: カンボジア国・トンレサップ湖の流動把握に向けた 2 次元数値流動モデルの開発, 東京工業大学大学院 総合理工学研究科修士論文, 2017
2. Mak Sithirith: Tonle Sap Lake, Cambodia: A perspective on its transborder hydrological and resources governance, Lakes and Reservoirs: Research and Management, pp.187-205, 2015
3. Sokneang In, Hengsim Phuong, Sivmey Hor, Jian Pu and Toru Watanabe: Hygine and Sanitation of people living on and around Tonle Sap Lake: Comparison of water based, water-land based and land based zones, The 2nd International Symposium on Conservation and Management of Tropical Lakes, pp. 154, 2017
4. 竹村康平: カンボジア王国トンレサップ湖 Chhnok Tru 集落への 3 次元数値流動解析モデルの適用, 東京工業大学大学院 環境社会理工学院修士論文, 2019

第 2 章 流動計算モデルと GPGPU による計算高速化処理

広大な対象領域を長期間計算するにあたって非常に大きくなると想定される計算コストを可能な限り小さくするため、計算格子に固定直行格子を用いている、村上[1]が作成した水平 2 次元モデルを用いた。

本章ではモデルが用いる基礎方程式およびその離散化・時間発展式の導出、計算速度の上昇のための GPGPU を用いた CUDA プログラミングについて述べる。

2-1. 流動計算モデル

2-1-1. 基礎方程式

本モデルの基礎方程式となる浅水方程式は、Navier-Stokes 方程式と連続の式から導出され、それぞれの式は次のように表される。

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} \tag{2-1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} \tag{2-2}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}-g \tag{2-3}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{2-4}$$

ここに、u、v、wはx、y、z方向流速、ρは密度、pは圧力、gは重力加速度である。これらの式から、水平 2 次元の浅水方程式は以下のように求められる[1]。

$$\frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{w}+\frac{\partial}{\partial x}\boldsymbol{F}+\frac{\partial}{\partial y}\boldsymbol{G}=\boldsymbol{S} \tag{2-5}$$

$$\boldsymbol{w}=\begin{pmatrix}w_1\\w_2\\w_3\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}h\\hu\\hv\end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{F}=\begin{pmatrix}hu\\hu^2+\frac{1}{2}gh^2\\huv\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}w_2\\{w_2}^2+\frac{1}{2}g{w_1}^2\\w_2w_3/w_1\end{pmatrix},\quad \boldsymbol{G}=\begin{pmatrix}hv\\huv\\hv^2+\frac{1}{2}gh^2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}w_3\\w_2w_3/w_1\\{w_3}^2+\frac{1}{2}g{w_1}^2\end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{S}=\begin{pmatrix}0\\-gh\dfrac{\partial b}{\partial x}+\tau_x\\-gh\dfrac{\partial b}{\partial y}+\tau_y\end{pmatrix}$$

ここに$\boldsymbol{w}$は h、u、v からなる保存量ベクトル、$\boldsymbol{F}$、$\boldsymbol{G}$は流束、$\boldsymbol{S}$はソース項、bは河床高、τ_x、τ_yは外力である。

2-1-2. 離散化手法

2-1-1 で表された浅水方程式から、有限体積法を用いた離散化を行う[1]。まず時間発展式として、セル i における浅水方程式(2-20)の x 方向の伝播は、

$$\boldsymbol{w}_i^{n+1}=\boldsymbol{w}_i^n+\frac{\Delta t}{\Delta x}\left(\boldsymbol{F}_{i-1/2}-\boldsymbol{F}_{i+1/2}\right) \tag{2-6}$$

と表される。ここで、nは時間ステップ、iはセルのインデックス、Δxはセルの幅、Δtは時間ステップ幅、$\boldsymbol{F}_{i+1/2}$はセル境界$x_{i+1/2}$における数値流束である。この数値流束について、

$$\boldsymbol{F}_{i+1/2}=(\boldsymbol{J}_x\boldsymbol{w})_{i+1/2}=(\boldsymbol{L}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{L}^{-1}\boldsymbol{w})_{i+1/2} \tag{2-7}$$

が成り立つ。この式において、$\boldsymbol{J}_x$、$\boldsymbol{J}_y$は(2-20)式における流束$\boldsymbol{F}$、$\boldsymbol{G}$の Jacobian 行列であり、以下のように表される。

$$\boldsymbol{J}_x=\frac{\partial(F_1、F_2、F_3)}{\partial(w_1、w_2、w_3)}=\begin{pmatrix}0&1&0\\-\dfrac{{w_2}^2}{{w_1}^2}+gw_1&\dfrac{2w_2}{w_1}&0\\-\dfrac{w_2w_3}{{w_1}^2}&\dfrac{w_3}{w_1}&\dfrac{w_2}{w_1}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0&1&0\\-u^2+gh&2u&0\\-uv&v&u\end{pmatrix} \tag{2-8}$$

$$\boldsymbol{J}_y=\frac{\partial(G_1、G_2、G_3)}{\partial(w_1、w_2、w_3)}=\begin{pmatrix}0&0&1\\-\dfrac{w_2w_3}{{w_1}^2}&\dfrac{w_3}{w_1}&\dfrac{w_2}{w_1}\\-\dfrac{{w_3}^2}{{w_1}^2}+gw_1&0&\dfrac{2w_3}{w_1}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0&0&1\\-uv&v&u\\-v^2+gh&0&2v\end{pmatrix} \tag{2-9}$$

ここで、浅水方程式(2-20)において、"C-property"と呼ばれる静止状態($h=const.$、$u=v=0$、$\tau_x=\tau_y=0$)では以下の関係が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{2}gh^2\right)=-gh\frac{\partial b}{\partial x} \tag{2-10}$$

この関係を満たさずに定式化を行った場合、運動量に数値振動が生じるため、この関係を時間発展式で保持できるように定式化する必要がある。そのため、時間発展式(2-6)を、河床勾配と外力を表現するソース項を含めた形に拡張し、

$$\boldsymbol{w}_i^{n+1}=\boldsymbol{w}_i^n+\frac{\Delta t}{\Delta x}\left(\boldsymbol{F}_{i-1/2}-\boldsymbol{F}_{i+1/2}\right)+\frac{\Delta t}{\Delta x}\int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}}\boldsymbol{S}_x dx \tag{2-11}$$

と表す。ソース項$\boldsymbol{S}$は、水位 H を用いて次のように変形される。

$$\boldsymbol{S}_x = \begin{pmatrix} 0 \\ -gh\dfrac{\partial b}{\partial x} + \tau_x \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dfrac{\partial}{\partial x}\left(\dfrac{1}{2}gh^2\right) \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -gh\dfrac{\partial H}{\partial x} + \tau_x \\ 0 \end{pmatrix} \tag{2-12}$$

$$= \boldsymbol{S}_x^* + \boldsymbol{S}_x^{Force}$$

ここから、時間発展式は

$$\boldsymbol{w}_i^{n+1} = \boldsymbol{w}_i^n + \frac{\Delta t}{\Delta x}\left(\boldsymbol{F}_{i-1/2} - \boldsymbol{F}_{i+1/2}\right) + \frac{\Delta t}{\Delta x}\int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \boldsymbol{S}_x^{Force} dx \tag{2-13}$$

$$\boldsymbol{F}_{i+1/2} = \frac{1}{2}\left(\widehat{\boldsymbol{F}}^+ + \widehat{\boldsymbol{F}}^-\right) + \frac{1}{2}\left|\boldsymbol{F}_{i+1/2}\right|\left(\boldsymbol{w}_{i+1/2}^- - \boldsymbol{w}_{i+1/2}^+\right) + \frac{1}{2}sgn\boldsymbol{F}(\boldsymbol{\Phi}^- - \boldsymbol{\Phi}^+)$$

$$\int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \boldsymbol{S}_x^{Force}\, dx = \frac{\Delta x}{2}(\boldsymbol{S}_x^{Force})_{i-1/2} + \frac{\Delta x}{2}(\boldsymbol{S}_x^{Force})_{i+1/2} + \frac{\Delta x}{2}(sgn\boldsymbol{F})_{i-1/2}(\boldsymbol{S}_x^{Force})_{i-1/2} - \frac{\Delta x}{2}(sgn\boldsymbol{F})_{i+1/2}(\boldsymbol{S}_x^{Force})_{i+1/2}$$

で表される。これは x 方向についてのみの式である。x 方向だけでなく、y 方向についても同様に処理を行うこととする。

2-1-3. 外力項の付与

モデル開発において考慮する外力項として、コリオリ力、底面摩擦力、レイノルズ応力、風応力の 4 種類を考慮する。

まず、コリオリ力を考慮した外力項は次の式で表される。

$$\tau_{c_x} = f_c w_3、\quad \tau_{c_y} = -f_c w_2、 \tag{2-14}$$

この式においてコリオリ力f_cは地球の自転角速度$\omega = 7。292 \times 10^{-5}$[rad/sec]、緯度$\phi$を用いて、

$$f_c = 2\omega sin\phi \tag{2-15}$$

で表される。

次に、底面摩擦力を考慮した外力項は次の式で表される。

$$\tau_{f_x} = -\frac{gn^2}{h^{7/3}} w_2\sqrt{{w_2}^2 + {w_3}^2}、\quad \tau_{f_y} = -\frac{gn^2}{h^{7/3}} w_3\sqrt{{w_2}^2 + {w_3}^2}、 \tag{2-16}$$

ここで、n は Manning 係数である。このモデルにおいては、Manning 係数は自然水路の標準値として統一した値を用いており、n=0.03 としている。

定式化にあたって、底面摩擦力をコリオリ力と同様に$\boldsymbol{S}_x^{Force}$の外力項として取り扱うと、(2-20)式から$\partial \boldsymbol{w}/\partial t$との間に次の関係が成り立つ。(ここでは$w_2$のみについて考える)

$$\frac{\partial w_2}{\partial t} = \tau_{f_x} = -\alpha w_2 \tag{2-17}$$

$$\left(\alpha = \frac{gn^2}{h^{7/3}}\sqrt{{w_2}^2 + {w_3}^2} > 0\right)$$

この関係式においてαを定数とみなすとその理論解は$w_2(t) = w_2(0)e^{-\alpha t}$となる。ここで、陽解法で離散化を行うと$\alpha\Delta t > 1$の場合に${w_2}^{n+1}$と${w_2}^n$の符号が逆になり、数値発散が生じるこ

ととなる。そこで陰解法で離散化を行い、

$$\frac{{w_2}^{n+1} - {w_2}^{n}}{\Delta t} = -\alpha {w_2}^{n+1} \qquad (2\text{-}18)$$

$${w_2}^{n+1} = {w_2}^{n}/(1+\alpha\Delta t)$$

とすることで、先ほどの数値誤差を防ぐことができた。そのため、これまでの時間発展とは別に底面摩擦項の計算フェーズを設ける必要がある。

また、レイノルズ応力を考慮した外力項は次のように表される。

$$\tau_{s_x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\nu h \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\nu h \frac{\partial u}{\partial y}\right),\quad \frac{\partial}{\partial x}\left(\nu h \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\nu h \frac{\partial v}{\partial y}\right) \qquad (2\text{-}19)$$

ここでνは渦動粘性係数であり、

$$\nu = 0.01\Delta x^{4/3}[\mathrm{cm}^2/\mathrm{s}] \qquad (2\text{-}20)$$

で表される。

さらに、風応力は次のバルク式[2]から

$$\tau_x = \rho_{air} C_D |V| U_a \qquad (2\text{-}21)$$

$$\tau_y = \rho_{air} C_D |V| V_a \qquad (2\text{-}22)$$

で表される。ここで、ρ_{air}は空気の密度、C_Dはバルク係数、$|V|$は風速の絶対値、U_a、V_aはそれぞれ風速の東西・南北成分である。

2-2. 水域・陸域判定

本研究で取り扱うトンレサップ湖のように、長期間で見ると水域と陸域が変化する場合、陸域セルが水域セルに変化、または水域セルが陸域セルに変化する現象を解析で再現する必要がある。その再現が可能になるよう、計算の各ステップにおいて各セルが水域・陸域のどちらに該当するのか判定するために、水深の閾値として限界水深h_εを定め、セルの水深hが限界水深を下回るときは陸域セル、それ以上となるときは水域セルとして扱う。

具体的な判定方法については、村上[1]が以下のように述べている通り行う。

氾濫過程においては対象陸域セルの 4 つの隣接セルのうち 1 つでも「水域セルであり、水位 H が対象セルの底面高 z を上回っている」場合は対象セルを新たに水域とし水深$h_{i,\,j} = h_\varepsilon$を与える。なお保存性を満足するため、水域化した場合その増加分$(h_\varepsilon \Delta x \Delta y)$の水深を隣接水域セルから差し引く。**図 2-1** にその表現を図示する。図の場合、対象の陸域セル(i、j)の 4 隣接セルの内、セル(i、j-1)とセル(i+1、j)が水域となっており、セル(i+1、j)の水位が対象セルの底面高を上回っている$(H_{i+1,\,j} > z_{i,\,j})$。そのため対象セルが新たに水域となり水深として$h_\varepsilon$を与え、同時にセル(i+1、j)の水深から$h_\varepsilon$を差し引くことによってセル(i+1、j)からの遡上を表現している。また陸地化過程においても対象セルの水深が

限界水深を下回った場合($h_{i,\ j} < h_{\varepsilon}$)、そのセルを陸域セルとみなし、流動計算対象から除外する。

2-3. GPGPU による計算高速化処理

2-3-1. GPGPU の概要

GPGPU とは、当初画像処理を目的として設計された GPU(Graphics Process Unit)プロセッサを一般的な目的に使用することの総称である[3]。本研究では、特に GPU を用いた並列計算によって計算を高速化させる手法のことを指す。最新の CPU プロセッサでも CPU コアが数個程度であるのに対して、GPU は演算処理ユニットを 1 チップ当たり数百～数千コア搭載しており、最新のものでは数 TFlops を超える演算性能を持つ。また、GPU はシンプルな並列処理においては CPU に比べて遥かに高速で計算が可能であるが、条件分岐等が発生する複雑な処理に関しては CPU と計算速度に大きな違いはない。そのため、本モデルでは並列計算に GPU を用いて計算の高速化を行っている。また、本研究で使用する数値流動モデルの開発にあたって、村上[1]はアメリカの半導体メーカーである NVIDIA 社が提供している Tesla シリーズを GPU として使用し、また CUDA と呼ばれる総合開発環境を用いて GPGPU プログラミングを行った。

GPU の特徴として、上に述べたように演算処理ユニットを多数搭載していることが挙げられる。Tesla 世代 GPU である Tesla C1060 では、GPU に 30 個の SM(Streaming Multiprocessor)が搭載されており、さらに SM の内部には SP(Streaming Processor)という最小単位の演算処理ユニット 8 個と 16KB のシェアードメモリがある。そのため演算処理ユニットについては GPU1 チップに 240 個という、CPU に比べて非常に多くの計算コアを保持しているということがいえる。

この GPU はビデオメモリとともにビデオカード上に搭載されている。GPU とビデオメモリはメモリ・インターフェースで接続されており、CUDA プログラミングではまず CPU からビデオメモリに変数の数値などを転送した後 GPU で計算が行われ、出力を行うときには GPU から CPU へ結果が返される。このビデオメモリに SM がアクセスすることは可能であるが、その速度は非常に低速であるため、より高速でアクセスできるシェアードメモリに必要なデータを確保し、できる限り SM 内で計算を完結させることが計算の高速化において重要である。

2-3-2. GPGPU による計算高速化の効果

村上[1]は GPGPU による高速化処理の効果を示すため、CPU を用いた計算と GPU を用

いた計算でその速度にどれほど差異があるか評価を行っている。**図 2-2**[1]は、2 次元数値流動モデルをトンレサップ湖全域に適用して計算期間を 6 時間としたときの、計算終了までにかかる時間がプロセス別に示されたものである。ここで最も左にある「全計算」の項目に注目すると、CPU では約 1800 秒を要しているのに対して GPU ではかかる時間が 40 秒程度であったことが分かる。本研究では 1 年を通した流動計算を行うことを目的としているため、GPU を用いた高速化が行われたことで、本モデルが現実的に実行可能な所要時間で長期の計算を行うことが可能になった。この点で、GPGPU による高速化処理は本研究において非常に重要なものであるということができる。

第 2 章 参考文献

1. 村上駿: カンボジア国・トンレサップ湖の流動把握に向けた 2 次元数値流動モデルの開発, 東京工業大学大学院 総合理工学研究科修士論文, 2017
2. 西村玲輔, 和田明, 長谷川一幸: 太平洋の流動計算に用いる風応力の検討, 土木学会第 56 回年次学術講演会, pp.544-545, 2001
3. 青木 尊之、額田 彰: はじめての CUDA プログラミング, 工学社, 2009

第 3 章 湖内流動の解析

第 2 章で説明を行った村上[1]による流動計算モデルは、2002 年の水位上昇期のみが計算対象期間であり、また水位変化のみについての検証を行うことでパラメータが設定されている。今回は乾季も含む通年を対象期間としているため、通年での観測データを用いて改めてパラメータの検討を行うことが必要である。また、今回は病原性大腸菌の流動計算が目的であるため、水位変化についての検証だけでなく、流れの向きや大きさについても検証を行う必要がある。2017 年は ADCP 観測によって流速についての観測データが存在しており、流れについての検証が可能であるため、この年を今回の計算対象期間とした。そして、2017 年において，より観測値に近い結果を得られるパラメータを設定するため、長期的な水位変化と短期的な流速変化について、観測値と計算値の検証を行った。

本章では当初の計算条件および、長期的・短期的検証を踏まえて適切に設定したパラメータについて述べる。

3-1. トンレサップ湖の水理学的状況

第 1 章で述べた通り、トンレサップ湖は Flood pulse と呼ばれる現象によって季節ごとにその流れを大きく変える。ここでは観測もしくは解析によって得られているデータを用いて湖の流量や水位の季節変化について述べ、水理学的状況を説明する。

Prek Kdam における流量を**図 3-1** に示し、Prek Kdam と Kampong Luong それぞれにおける水位を**図 3-2** に示した。ここで、Prek Kdam と Kampong Luong の位置は第 1 章において**図 1-1** に示した通りである。**図 3-1** においては、トンレサップ川からトンレサップ湖へと水が流れ込む方向、すなわち逆流の方向を正としている。

図 3-1 より、湖の流れが順流・逆流をとる時期と流量のピークについて説明する。1 月から 5 月半ばまでは流れは順流の状態にありながら次第に流量は 0 に近づいてゆき、5 月中旬には流れが逆転し 6 月下旬まで逆流状態となるが、この時の流量は 2000[m^3/s]程度である。7 月上旬に数日のみ流量がほぼ 0 になった後は一気に流量が増加し、8 月上旬に逆流状態の流量のピークを迎え、その流量は 8000[m^3/s]を超える。その後の流れは順流状態へと戻り始め、9 月上旬に流量の正負が逆転した後 11 月上旬に順流での流量のピークを迎え、その際の流量は-8000[m^3/s]程度である。順流のピークを迎えた後は年末まで順流状態が続く。

次に**図 3-2** から、水位の季節変動についても説明する。1 月から 5 月上旬までは順流状態であることにより水位が低下し続け、5 月上旬には一年で最も低い水位が観測される。その値は Prek Kdam で 1.5m、Kampong Luong で 2.4m である。ここから逆流の時期に入ることによって水位は上昇を開始し、10 月上旬ごろにそのピークを迎える。水位の最高値は

Prek Kdam、Kampong Luong ともに約 9m である。その後は流れが順流に転じるため、水位は低下していく。

3-2. 計算条件

3-2-1. 計算範囲・地形

計算対象となる領域を**図 3-3**[1]に示した．この対象領域は縦横およそ 200km に及び，直行格子の格子幅は$\Delta x = \Delta y = 250m$としている。これは、湖が幅数十 km のスケールであるのに対し、トンレサップ川は乾季の狭小部で幅 400m 程度のスケールとなるためである。このモデルでは全てのセルサイズが同一である直行格子型の正方形格子を使用するため、広大な計算領域に対する計算コストを抑えた上で川の通水能力を再現できる格子幅を選択する必要があり、上記の格子幅で計算を行うこととなった。

計算地形の作成にあたっては、水域の河床データと陸域の標高データの 2 種類を使用した。水域の河床データは、MRC 作成の測深図から河床標高を数値化することで作成した。また、陸域の標高データに関してはスペースシャトル立体地形データ(SRTM)の 3 秒(約 90m)メッシュデータと MRC 作成の DTM(Digital Terrain Model)50m メッシュデータを参照し、SRTM データにバイアス補正を施すことで作成した。

3-2-2. 計算期間・入力条件

乾季・雨季を通した再現計算を行うため、計算期間は 2017/1/1~2017/12/31 の通年とした。2017 年は入力に必要な流量・水位データが揃っているほか、ADCP を利用した流量・流速観測が数回行われた年であり、流動の精度検証を行うことが容易であるため、この年を計算期間とした。

本モデルでは境界条件として、トンレサップ川の Prek Kdam 地点における流量と水位、トンレサップ湖支流 11 河川における流量を入力する。Prek Kdam における水位と流量は、1 次元水理モデルである MIKE11 を用いて計算されたものである。トンレサップ湖の支流 11 河川の流量は、GBHM モデルによって得られたデータを用いた。また、風による流れへの影響も考慮するため、Siem Reap において観測された風速データも入力した。さらに、初期条件としてトンレサップ湖の Kampong Luong、Kampong Chhnang 地点における水位も入力する。Kampong Luong における水位は、11 河川と同じく GBHM モデルから計算されたものである。

Prek Kdam と Kampong Luong における水位はそれぞれの観測所における基準標高からの変位として求められているが、その基準標高は観測所ごとに異なっているため、統一さ

れた基準レベルを用いる必要がある。ここで基準とされるのはベトナムの Hatien における MSL(平均海面水位)であり、Prek Kdam の基準標高は Hatien の MSL から+8cm、Kampong Luong の基準標高は+64cm の高さにある。そのため、Prek Kdam における水位には 8cm、Kampong Luong における水位には 64cm を足すことで、それぞれを Hatien を基準とした値に変換した。ただし、経済的・人的資源が不足しているカンボジアでは現地観測体制が十分に整備されているとは言えない状態であり、この基準標高そのものも正確に与えられていない可能性がある。また、Kampong Chhnang における水位は Prek Kdam および Kampong Luong における水位から求めた。

以上の条件を用いて、次の 3-3 節から計算を行っていく。

3-3. 通年の水位変化の検証

3-2 節で述べた条件で計算を行い、Prek Kdam における水位の観測値と計算値の比較を**図 3-4** に示した。また、Kampong Luong における水位の観測値と計算値の比較を**図 3-5** に示した。

図 3-5 によると、Kampong Luong においては、計算値が最大で 1.3m 程度観測値を上回っている。一方、**図 3-4** によると、Prek Kdam においては観測値が計算値を上回っているものの、その差は 30cm 程度であった。Prek Kdam で観測値と計算値に大きな差が見られなかった理由は、この地点が計算領域の下流側境界に近いためである。領域の境界では水位と流量が入力データによって定められているため、境界に近い地点では計算値と観測値の乖離が生じにくい。そのため、ここからは Kampong Luong における水位により注目し、観測値と計算値の差異が減少するようにパラメータを設定していく。

まず、水面の勾配に注目する。1 月から 3 月までの期間は、Kampong Luong における水位の観測値が Prek Kdam における水位の観測値より高い。また、**図 3-4、3-5** におけるこの期間の結果を見ると、Prek Kdam では計算値が観測値より低い値を示しており、Kampong Luong では計算値が観測値を上回っている。そのため、計算値から求められる Kampong Luong – Prek Kdam 間の勾配は、観測値から求められる勾配より急なものとなっていると考えられる。この原因としてマニングの粗度係数が大きすぎることを考え、その値を当初の 0.035 から 0.01 へと変更し計算を行った。しかし、変更前とほぼ全く変わらない結果が得られたため、粗度係数は観測値と計算値の差異の改善には寄与しないと考えられた。

ここで、水位の大小関係と流れの方向に注目する。本モデルではトンレサップ川からトンレサップ湖へ流入する流れを正方向の流れとしているため、流量の値が正であるならば、Prek Kdam における水位は Kampong Luong における水位より高いはずであり、その逆も成立すると考えられる。また同時に、流量が 0 となるとき、Prek Kdam における水位と

Kampong Luong における水位は等しくなるはずである。そこで、この関係が入力データにおいて成立していることを検証するため、Prek Kdam と Kampong Luong における水位の観測値の差と Prek Kdam における流量の観測値を**図 3-6** に同時に示した。観測値が正しいものであるならば前述の関係が成り立つはずであり、流量の正負と水位差の正負が入れ替わる時期が同時になると考えられるが、ここではその関係が見られない。そのため、入力データとして用いた観測値のいずれかを修正し、流量と水位差の正負を一致させる必要があると考えられる。

Prek Kdam と Kampong Luong における水位差と Prek Kdam における流量のうち、ここでは水位差に補正を行うこととし、特に Kampong Luong の水位に補正をかけてより観測値に近い結果を得ることを考える。3-2-2 節で述べた通り、Prek Kdam と Kampong Luong における水位にはすでに補正を行っているものの、この補正値は経験的に得られているものであり、観測方法や条件によってはこの補正値が正確でない可能性があるためである。

図 3-6 によると、Prek Kdam における流量の正負が入れ替わる箇所は 5 月の 1 箇所、7 月の 2 箇所の合計 3 箇所あり、そのうち 7 月の 2 箇所は 5 日程度の短い間隔に集中している。そのため、7 月の 2 箇所はほぼ差異がないものとみなし、5 月と 7 月それぞれの正負の入れ替わりについて、水位差の正負がそれと同時に入れ替わるように Kampong Luong の水位差に補正を行った。**図 3-7** は流量の正負が初めて入れ替わる 5 月 23 日に水位差の正負も入れ替わるよう補正を行った状態を示した図であり、この時 Kampong Luong の水位には+1.322m の補正を行っている。また、**図 3-8** は 7 月 1 日、5 日に水位差の正負も入れ替わるよう補正を行った図であり、この時の Kampong Luong の水位への補正値は+1.578m である。2 つの入れ替わり箇所でそれぞれ異なる補正値が得られたため、それぞれの補正値を用いた計算を行い、より良い結果が得られた方を適切な補正値とみなすこととする。

図 3-9 に、それぞれの補正値を用いて得られた Kampong Luong の水位を示した。比較のためこれまで用いてきた補正値(+64cm)による結果も示し、それぞれの補正値で得られた計算値に合わせて観測値も示している。**図 3-9** から、最も良い結果を得られる補正値は +1.578m であると考えられる。これまでの経験的な補正値に比べると、補正値+1.578m では計算値と観測値のズレが最大で 80cm 程度に抑えられ、また 6 月 1 日以降の水位が上昇する挙動をより正確に計算で再現できるようになった。そのため、ここからは Kampong Luong の水位の補正値を+1.578m として計算を行う。

3-4. 流速データを用いた検証

3-2 節で、長期的な水位変化については正しい補正値を求めたことである程度高い精度で計算を行うことが可能になった。しかし、目標としている病原性大腸菌の流動解析の精度

を高めるという観点からは、長期的な検証のみでは不十分であり、短期的な流れについても検証を行うことが必要である。これは、病原性大腸菌は半減期が 10 時間程度と短く排出が 1 日単位で繰り返されるため、流動のタイムスケールが短い現象であり、その解析を精度よく行うには短期的な流れの計算が高い精度で行われていなければならないためである。そこで、短期的な流れについては流速を観測値と比較することで検証を行う。

短期的な流速を検証するのにあたって、観測値として 2017 年に SATREPS プロジェクトによって行われた ADCP 観測データを利用する。ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)観測は、超音波のドップラー効果を用いて流速を求めるものである。観測機器を取り付けたボートを水上で走らせながら機器から超音波を放出し、浮遊粒子に反射して跳ね返ってきた超音波の周波数変化から流れの速度を計算する[2]。ADCP 観測は鉛直流速分布について面的・3 次元的連続計測が可能であるという他の観測方法にはない利点を持っているが、流速が数 cm/s 程度しかない場合はその流速に対して観測ボートを 1～2m/s で走らせるため、流速が小さい場合の精度は高くないという欠点も挙げられる。

観測は 5 月 28 日、8 月 14 日、8 月 21 日、11 月 26 日、12 月 9 日、12 月 23 日の 6 日間で行われ、5 月 28 日以外は観測船の行き帰りで 1 回ずつ観測が行われたため、総合して 11 回の観測分のデータが存在する。出力される計算結果には各メッシュにおける流速も含まれるため、そこから観測時の測線と同じ位置における流速を抜き出し、可視化することで比較を行うこととする。

8 月 14 日、8 月 21 日、12 月 23 日の観測についての計算値と観測値の比較を**図 3-10~15** に示した。6 日間の観測のうち 3 日間についての結果のみを示した理由は、これら 3 日間では行き帰りの観測値が比較的一致していたためである。2 時間程度の観測の前後で湖の流れが大きく変化するとは考え難いため、観測船の行き帰りそれぞれの測定で得られた観測値はかけ離れたものにならないと考えられる。他の観測では、そもそも片道でしか観測が行われていない日や流速分布に飛び値が見られる結果が得られた日があったため、これら 3 日間を特に信用できる観測値として用いた。ただし、考察では残りの 3 日間における結果についても参考として考える。

黒い矢印が描かれた図が計算値を、赤い矢印が描かれた図が観測値を示しており、図の左下には観測時刻が記載されている。ただし、実際には観測には 2 時間程度を要するため、観測時刻は示された時刻から 2 時間程度前後している可能性がある。観測値については、観測ごとに水深 2m より浅い領域での流速、深い領域での流速、それらの平均流速の 3 系統が存在するため、一つの図につき 3 つの流速が描かれている。上述の通り、観測には 2 時間程度がかかっているため、計算値としては 0:00、2:00、4:00、…の出力時刻のうち、観測時刻に最も近い時刻における結果だけでなくその前後 2 時間における結果も示した。

図 3-10~15 から比較結果についての傾向を見ると、いくつかの観測において計算値の方が観測値よりも小さく求められていた。上記の通り観測値そのものの精度が高いとは言えないため、定量的な比較は行わず傾向の比較のみを行ったが、全体として計算値が観測値

より小さい傾向がみられた。これはバルク係数を実際より過小評価していたため、風が流れに及ぼす影響が小さくなり、流速が実際より小さく求められたものであると考えられる。そこで、バルク係数を現在の値より大きくした状態で再び計算を行い、適切なバルク係数の値を求める。

バルク係数は、2-1-3 節「外力項の付与」で述べた風応力を表す式に登場するパラメータであり、水面の凹凸が風によって力を受ける程度を表している。風応力を表すバルク式は 2-1-3 節に登場したように

$$\tau_x = \rho C_D |V| U_a \tag{3-1}$$

$$\tau_y = \rho C_D |V| V_a \tag{3-2}$$

であり、ここまでバルク係数は近藤の式(**表 3-1**)[3]から設定していた。しかし、トンレサップ湖のように水面が開けた湖では、吹送距離が長いため波浪が発達しやすく、水面の凸凹が大きくなり風による力を受けやすいと考えられる。そのため、トンレサップ湖の状態を解析で再現するためにはバルク係数を大きく設定することが必要ではないかと考えた。

バルク係数を何倍とするのが適切であるか検討する。**図 3-16~21** は、バルク係数を 2 倍、4 倍に変更して計算を行った結果を、1 倍の場合とともに観測ごとにまとめたものである。**図 3-16~21** においては、**図 3-16~21** で図示した 3 つの時刻ステップのうち最も観測値と近い結果が得られた 1 つの時刻についてのみ流速を示した。その時刻における風の向きおよび速さを右下の図で表している。これらの結果と観測値を比較すると、観測によってばらつきがあるものの、バルク係数を 4 倍にした場合では流速が過剰に大きくなる場合があり、2 倍のときが最も観測値から大きく外れることのない結果が得られていた。そのため、ここからはバルク係数をこれまでの 2 倍として計算を行うことを考える。

バルク係数の設定を 2 倍とするときには、この変更が 3-3 節で検証を行った水位変化に影響を及ぼしていないか確認する必要がある。**図 3-22** は Kampong Luong の水位の補正値を+1.578m、バルク係数をこれまでの 2 倍として計算を行ったときの、Kampong Luong における水位の観測値と計算値を比較したものである。バルク係数を 2 倍としても、1 倍の場合と大きく変わらない結果を得られたことがわかる。

したがって、ここからは Kampong Luong の水位の補正値を+1.578m、バルク係数をこれまでの 2 倍として解析を行うこととする。

第 3 章 参考文献

5. 村上駿: カンボジア国・トンレサップ湖の流動把握に向けた 2 次元数値流動モデルの開発, 東京工業大学大学院 総合理工学研究科修士論文, 2017
6. Hideto Fujii, Takashi Nakamura, Sarann Ly, Sambo Lun, Sokchhay Heng, Yoichi Fujihara, Keisuke Hoshikawa and Masato Nakata: Flow Observation of the Tonle Sap River by ADCP and Cause of Decrease in Observation Accuracy, Journal of Rainwater Catchment Systems, Vol. 24, No. 2, pp. 17-25, 2019
7. 西村玲輔, 和田明, 長谷川一幸: 太平洋の流動計算に用いる風応力の検討, 土木学会第 56 回年次学術講演会, pp.544-545, 2001

第 4 章 大腸菌流動の解析

第 3 章で求めた適切なパラメータを用いて、第 4 章では従来のモデルに大腸菌濃度についての計算を加え、その流動に関する解析を行った。通年での大腸菌流動をみたところ、季節ごとの流れだけでなく風も大腸菌流動に影響を及ぼしているという傾向が見られた。そこで、季節ごとの大腸菌流動の特徴を把握するため、各月で風速データの平均をとり典型的な 1 日の風の変動を作り出し、それを入力することで月ごとに特徴的な流動を再現した。

この章では大腸菌入力に関する条件および、通年・月ごとの計算結果とその考察について述べる。

4-1. 大腸菌の入力条件

大腸菌は水上集落の住民の排泄物によって湖内に放出される。今回の計算では、大腸菌は毎朝朝 7 時に各住戸から一斉に投入されると仮定して計算を行った。朝 7 時という投入時刻は、水上集落の住民に漁業従事者が多く、多くの人が日の出とともに活動を開始するという生活傾向があると考えられることから設定した。カンボジアでは午前 5 時 30 分～6 時 30 分に日の出を迎えるため、日の出時刻の 30 分～1 時間 30 分後となる午前 7 時を放出時刻とする。Google Map より特定した水上集落の位置と大規模な集落の住戸数を、**図 4-1** に示す。大腸菌の投入量については既往研究[1]より、住戸 1 戸あたりの人数を 7.1 人、人間 1 人の 1 日あたりの排泄量を 105g、排泄物 1g あたりの大腸菌数を1.0×10^9CFU として、集落ごとの家屋数に応じて投入量を決定した。住戸 1 戸あたりの人数は正確なデータが存在しないため、水上集落の一つである Chhnok Tru の 2009 年の人口を Google Map から特定された住戸数で割ることで、多くとも 7.1 人であると求めている。

大腸菌は水中において一定の割合で死滅していくとし、その半減期は 10 時間とした[2]。水の安全性の判定基準としては、WHO の基準を利用する。WHO は飲み水の安全基準として「大腸菌が 100mL 中に検出されない」ことを定めているため、ある時刻のある領域において大腸菌濃度が 1CFU/100mL、すなわち$1.0 \times 10^4 \mathrm{CFU}/m^3$を超えていなければ、その時刻の領域の水は、少なくとも集落から放出された大腸菌によっては危険な状態になっていないと言える。

これらの条件のとおり大腸菌を湖内に投入し計算を行い、水質の安全性についての検証を行う。

4-2. 通年計算

大腸菌流動の計算を 2017 年通年で行い、各月の最終日 8:00~翌日 6:00 までの 2 時間ごとの結果を**図 4-5** から**図 4-144** に示した。なお、12 月は 31 日 22:00 までの結果のみを示しているが、これは支流の流量および風向・風速データを 2017 年末までのものしか入手できなかったためである。上部の図は大腸菌濃度のコンター図を示しており、**図 4-2** はその凡例を低濃度域について拡大したものである。安全基準となる濃度の値は 4-1 節に示したとおり$1.0 \times 10^4 \mathrm{CFU}/m^3$であるため、基準を満たさない箇所が一目で分かるよう、その値を超えない箇所は群青・青で着色し、その値を超える高濃度領域は明るい水色～赤で着色されるように設定した。**図 4-5** から**図 4-144** の下部の図は各時刻における流速分布を矢印で示したものである。また、各図における右の図はその時刻における風向と風速を矢印で表している。

4-2-1. 観測値との比較

計算結果が実際と大きく外れたものでないかを確かめるために、2019 年 6 月 16 日から 22 日にかけて行われた大腸菌濃度の観測結果との比較を行った。**図 4-3** が、大腸菌濃度の観測値と計算値を比較した図である。この図の中で黒い四角形の点は大腸菌の放出源である水上集落を示しており、大腸菌濃度の計算値はカラーコンターで示されている。大腸菌濃度の観測値は図上の赤く丸い点を用いて表し、その位置が観測を行った場所を示しており、濃度の高さは点の大きさによって表されている。計算値は 6 月 17 日 10:00 のものを図示した。

ここで図示した観測値は 2019 年の観測によって得られたものである一方、本研究の解析対象期間は 2017 年であるため、**図 4-3** に示した観測値と計算値には異なる年度のものが用いられており、値に相違があることは自然なことといえる。そのため、この節で行う比較は大腸菌濃度の分布について見るのに止め、定量的な比較は行わないこととする。

まず観測値の分布を見ると、湖の沿岸で大腸菌の濃度が高いという傾向がある。計算値でも、大腸菌の排出源である水上集落が沿岸部に集まっているため、その周辺の沿岸部に WHO の基準を超える高濃度の領域が存在するという結果がみられた。また、湖の中央部は計算値では WHO 基準を満たしているとされる一方で観測値では大腸菌が存在しているように見えるものの、中央部の観測値は多くとも 70CFU/100mL、すなわち$7.0 \times 10^3 \mathrm{CFU}/m^3$程度であり、$1.0 \times 10^4 \mathrm{CFU}/m^3$という WHO の基準を満たしている。そのため、湖の中央部において観測値と計算値のいずれも WHO の基準を超えてはいないという点で傾向は一致しており、湖の沿岸部・中央部のそれぞれにおいて共通した濃度の傾向をもつということが確認できた。そのため、ここで行った解析はある程度実際の流況に沿った精度で行うことができたものであると言える。

4-2-2. 大腸菌流動の方向についての考察

まず、大腸菌流動の方向について考察を行う。トンレサップ湖の水域が狭まりトンレサップ川に変化する周辺の領域は、湖中心部に比べて水路が狭く流速が大きくなっていると考えられるため、大腸菌の流動が他地域に比べて大きく分かりやすい。そこで、トンレサップ湖がトンレサップ川に注ぐ周辺の大腸菌の広がりに注目し、その向きを月ごとに見ていく。1 月から 4 月、10 月から 12 月にかけては湖から川に向かって濃度の高い領域が広がっており、5月と7月は湖の内部に向かって高濃度域が広がっていくという流れが見られた。そして、6 月、8 月、9 月は大腸菌の広がりがほとんど見られないか、時間によって広がる向きが変化するという結果が得られた。

これは季節ごとの順流･逆流の変化を正しく反映しているといえる。**図 3-1** に示した Prek Kdam における流量をみると、1 月~4 月、10 月~12 月の最終日は流量が負の値をとっている。この図においてはトンレサップ川からトンレサップ湖に水が流れ込む方向、すなわち逆流する向きを正として流量の値をとっているため、1 月~4 月、10 月~12 月の末日は流れが順流状態にあることになり、大腸菌が湖から川に広がっていくという結果はその流れに従ったものとして説明することができる。

一方、5 月と 7 月の最終日は流量が正の値をとっているため、流れは逆流状態にあることになり、その向きの流れに従って大腸菌が流動することで、湖の内部に向かって高濃度域が広がっていくという結果が得られたといえる。6 月、8 月、9 月の最終日は図から分かるとおり流量が小さく、かつ流れの方向が頻繁に変わって一定しない時期にあたるため、大腸菌の広がりが小さく、その向きも定まらないという結果が得られたのではないかと考えられる。このように、大腸菌の流動の向きは順流・逆流という流れの向きを反映しているということができる。

4-2-3. 乾季と雨季における大腸菌流動の差異

次に、大腸菌の拡散する範囲についての考察を行う。1 月~6 月の乾季と 7 月~12 月の雨季では湖の面積に大きく差があるため、乾季と雨季それぞれに分けて考察する。

まず乾季と雨季の差異について述べる。乾季は**図 3-1,3-2** から分かるように水位が低く流量も小さいことから、水が入れ替わりづらく高濃度の大腸菌が存在する領域が広く残り続けると予想されたが、結果はそれに反し、北西部の集落を除いたどの地域でも雨季にあたる 7 月、10 月の方が広い高濃度領域をとるという傾向が見られた。

これは集落の位置を固定したことが大きな要因であると考えられる。今回は水上集落の家屋が乾季の間陸揚げされ住民は年間を通して同じ場所に居住していると仮定を行ったため、集落の位置を固定した。陸域に住む住民の排泄物は湖に直接放出されることはないた

め、陸域に存在する集落からの大腸菌放出は計算では考慮していない。そのため、いくつかの集落が陸域に判定される乾季では雨季に比べて湖に大腸菌を放出する集落自体が少なくなり、高濃度領域の広がりが小さくなったのではないかと考えられた。実際は水上集落の住民は漁業に従事する者が多いため、湖が小さくなる乾季は湖内に家屋を移動させている。そのため乾季においては、実際の汚染状況は計算結果よりも深刻である可能性がある。

一方、WHO の基準を超える領域の広さだけでなく濃度の高さにも注目すると、乾季は雨季に比べて赤く着色された領域、すなわち濃度$3.0 \times 10^6 \mathrm{CFU}/m^3$を超える領域がより長く残るという傾向が見られる。これは水位が低く希釈による濃度の低下が起こりにくい上に、流速が小さく、非常に高濃度で汚染された水がその場に留まり続けるためであると考えられ、水位が低く流量も小さい乾季の流れの特徴を反映した結果が得られた。

4-2-4. 大腸菌の広がりに対する集落規模の影響

前節において、1 年を乾季と雨季に二分した場合の大腸菌流動の広がりに関する傾向が把握できた。次に、集落ごとの規模の違いが大腸菌流動に及ぼす影響について考察する。

4-1 節に示した通り、解析にあたっては各集落における大腸菌の放出量をその家屋数に応じて決定したため、集落の家屋数と大腸菌の放出量は比例関係にある。しかし計算結果を見てみると、大腸菌の放出量、すなわち集落の家屋数と大腸菌の高濃度領域の大きさは必ずしも比例しているとは言えない。

全ての集落が水域上にあると判定された月のうち、大腸菌流動が大きく図から読み取りやすい 10 月に注目する。ここでいくつかの集落に**図 4-1** に示すアルファベットの名前を割り当て、ここからはその名前を用いて集落の家屋数と大腸菌流動との関係について述べていく。

図 4-1 から読み取れるように、トンレサップ湖上の水上集落で最も家屋数が多いのは集落 B である。2 番目に家屋数の多い集落 E との家屋数の差は 300 以上あり、集落 B はトンレサップ湖の集落の中でひときわ規模の大きいものであることが分かる。

しかし 10 月の結果を見ると、集落 B 周辺の高濃度領域の広がりは集落 A などの北部集落に比べると確かに大きいものの、集落 E から放出された大腸菌の流動の方が広範囲にわたっている様子が確認できる。また集落 D 周辺の小規模集落が高い密度で集まっている地域では、汚染領域が連結して長い帯状に広がっていることが分かった。集落 E はトンレサップ湖とトンレサップ川の合流地点である狭窄部に位置しているため、その付近では流速が他の地域よりも速まっていると考えられ、実際に流速分布図では集落 E 周辺で流速を表すベクトルが常に大きいことが確認できる。ここから、大腸菌の高濃度領域の広がりにおいては大腸菌の放出量よりも周辺の流速の大きさの方が重要な決定因子となっていることが言える。

一方、コンター図の上で赤色に着色されている領域、すなわち$3.0 \times 10^6 \mathrm{CFU}/m^3$を超える

ような非常に高濃度の汚染が見られる領域については、家屋数が多く大腸菌を大量に放出する集落ほど赤色の領域が長時間残り続けるという傾向が見られた。集落 E はより家屋数の少ない集落 A や D よりも早く赤色の領域を失っているが、これは前段落で述べたように集落 E の付近では流速が他地域より大きいためであり、速い流れによって超高濃度の大腸菌が希釈されるような効果がもたらされたと説明できる。

以上のことから、集落の家屋数は WHO 基準の 300 倍を超える非常に高濃度の汚染範囲の広さには影響を与えていると見なせるが、WHO 基準そのものを超える程度の汚染が見られる範囲の広さには影響しているとは言えず、湖の流れや集落の位置の方が主要な影響要因であると言うことができる。

4-2-5. 大腸菌の流動に影響を及ぼす要因

次に、大腸菌流動に影響する要因について考察を行う。

大腸菌流動に影響を及ぼす要因としては、水位、流速、風が挙げられる。一般的には、水位が高くなる、すなわち水深が深くなるほど大腸菌が希釈され、大腸菌濃度は低くなると考えられる。また、流速と風については速度が大きいほど大腸菌の流動が加速されるため、高濃度領域も広がりやすいと考えられる。

12 ヶ月の中で大腸菌の高濃度領域の広がりが特に顕著であるのは、7 月と 10 月の最終日である。これら 2 つの期間では、**図 4-77~88, 4-113~124** の下部に示した水位のコンター図が示す通り、水位は 8 月、9 月の最終日(**図 4-89~100, 4-101~112**)より湖全体で低くなっている。また、**図 3-1** に示した Prek Kdam における流量図より、7 月と 10 月の最終日はそれぞれ逆流・順流の流量が 1 年で最も大きくなる期間に含まれていることがわかる。**図 4-77~88, 4-113~124** の下部に示した流速のベクトル図からも、これらの期間で流速が大きくなっていることが読み取れる。さらに、**図 4-4** に示した各月最終日の最小・最大・平均風速および**図 4-77~88, 4-113~124** の右側に示した各時刻における風速のベクトル図より、7 月と 10 月の最終日は他の月に比べて風速が一日を通して大きい。したがって、7 月 31 日、10 月 31 日は低水位で流速と風速が大きいという高濃度領域が大きく広がりやすい条件が揃っており、これらの条件の下で確かに高濃度領域の広がりが大きくみられるという結果を確かめることができた。

次に、10 月と 11 月の結果を比較する。湖の南部でトンレサップ川と接続される付近では大腸菌の高濃度領域の広がりに大きく差はない一方、湖の中部～北部では 10 月の結果の方が 11 月の結果より広がりが大きいという傾向がみられた。

まずトンレサップ川との接続部付近で大腸菌の広がりに差が大きくみられなかった理由については、流速の影響が大きかったためであると考えた。**図 3-1** から分かるように、10 月と 11 月の最終日では流量の差異は小さなものであることから、平均流速にも大きな違いはないと考えられる。湖の狭窄部にあたるこの部分では他地域よりも流速が速まっている

ため、流速による影響が水位・風といった要因の影響を凌駕し、流速に大きな違いがないことによって大腸菌の広がりにも大きな差異が見られないという結果をもたらしたと考察できる。

次に湖の中部～北部で 10 月の方が大腸菌の広がりが大きかった理由としては、風の影響が大きかったことが挙げられる。前述の通り、大腸菌がより広い範囲に拡散される際には、水位が低い、もしくは流速または風速が大きいという状況があるはずであると考えられるが、10 月と 11 月の間でそれらの状況に当てはまっているのは風速のみである。そのため、中部～北部にかけての結果は風が大きく影響していたと考えられる。湖の南部では水路の狭まりのため流速の影響が大きいとされたのに対し、湖が狭まることなく広がっている中部～北部では流速が小さいためその影響も大きくならないと考えると、南部との違いを説明することもできた。

これらのことから、大腸菌の拡散には水位、流速、風の 3 つの要素が影響しており、時刻や場所ごとの流れの状況によってより強く影響する因子は変化すると考えられる。

ここで、住民の安全な水利用のためには、月ごとの一般的な汚染傾向を把握しておくことが重要である。安全な水が存在する場所を細かい時間単位で求め、リアルタイムで住民に提供することが可能であるならば理想的な水の安全管理を行うことができるが、計算精度や入手可能なデータの問題から今回の研究でそれを行うことは困難である。そこで、季節・月ごとに、集落からどれだけ離れれば安全な飲み水を手にいれることができるのかという大まかな方針を求めることを考える。そのためには、季節・月ごとの典型的な流れを計算によって作成し、各月における大腸菌の広がりを求める必要がある。次の節では、各月で一般的な流れを作成した手順と、それらのうち特徴的な 4 ヶ月分について行った考察について述べる。

4-3. 各月における計算

4-3-1. 風データの平均化・月ごとの風の傾向

前節で、大腸菌流動を決定する要素として流れの向き・流速・水位といった水理的要素と風という気象的要素を挙げた。水理的要素は季節による変動といった面が大きく、各月の一般的な流れを作成する際にそのまま用いて差し支えないと考えたが、風という気象的要素は日々の変動が大きいため、ある一日のみの風データがその月の一般的な風の変動を象徴するとは言えないと考えられる。そのため、風データについては月ごとに各時刻の平均をとり、それを各月における一日の代表的な風データとした。

図 4-145 は、各月における一日の代表的な風速データを求め、その大きさに共通した傾向がみられる 3 グループに分類し、その分類ごとに図に示したものである。1 月～5 月はグ

ループ 1 に分類された。このグループでは、風速は最大でも 3[m/s]以下であり、夕方から夜にかけて最も風速が強い。6 月～8 月はグループ 2 に分類され、ここでは日中の風速が弱く、夜から未明にかけての風速の方が強いという傾向がみられた。また、残りの 2 グループに比べて全体的に風速が大きいと言え、風速が 3[m/s]を超えることがあるのはこのグループ 2 に含まれる 3 ヶ月間のみであった。9 月～12 月を含むグループ 3 は、風速の大きさはグループ 1 と同程度であったが、未明から朝にかけての風速が一日の中で最も大きいという傾向がみられた。

ここまで風速の大きさと風速が大きくなる時間帯で 12 ヶ月を 3 グループに分類したが、この分類が風向についても当てはまるのか考察を行う。**図 4-146** は、各月における一日の代表的な風速データのうち最も大腸菌流動に影響を及ぼすと考えられる最大風速をとる時刻において、風向・風速を表すベクトル図を描いたものである。まずグループ 1(1 月～5 月)については、北向きの成分が卓越しており、風は北西から北北東を向いているという点で共通した特徴を持っている。グループ 2(6 月～8 月)の風も北東～東北東を向いているという点で、風速だけでなく風向についても共通した特徴を持っていると言える。グループ 3(9 月～12 月)については、9 月のみが外れた特徴を示した。10 月～12 月は南向きの風が吹くという点で風向についても共通点を見出すことができたが、9 月は東向きに近い東北東の風が吹いているためグループ 3 の他の月とは異なる特徴を持っていると言える。ここで 9 月はグループ 2 からグループ 3 への移行期間にあると考えると、北東～東北東の風が吹くグループ 2 から南向きの風が吹くグループ 3 へと風向が変化していく途中であるため、東向きに近い東北東の風が吹いていると説明することができる。これらのことから、風速の大きさと風速が大きくなる時間帯から分類した 3 グループは風向という観点でもそれぞれに共通した特徴を持っており、共通した特徴から外れる 9 月についても 2 グループの移行期にあると考えることで、季節ごとの風の特徴を見出すことができた。

4-3-2. 考察対象とする月の選定

ここからは、月ごとの典型的な一日の風データを用いて実際に各月の大腸菌流動を計算し考察していくが、ここで考察の対象とするのは水理学的に特徴を持つ 4 つの月のみとする。水理学的な特徴を強く持つ月を選定し考察を行うことで、ある状態の流れにおける大腸菌流動の特徴を容易に把握することができるため、4 つの月を選定する。

考察対象とする月を 4 つ選定するのにあたって、順流から逆流に転じる直前の最も水位が低い時期、逆流が最も激しい時期、逆流から順流に転じる直前の最も水位が高い時期、順流が最も激しい時期の 4 つを、水理学的特徴を強く持つ時期とし、それらに当てはまる月を選ぶ。**図 4-?**に示された通年の水位変化のグラフによると、水位が最も低下するのは 5 月上旬～中旬ごろであるため、まずこの時期を代表する月として 5 月を選ぶこととした。次に、逆流が最も激しい時期、すなわち逆流時期で流量が最も大きい時期は**図 3-1** の流量図

から分かる通り 7 月末～8 月上旬の期間であるため、今回は 8 月を選んだ。逆流から順流に転じる直前の最も水位が高い時期は**図 3-1** から 10 月上旬であると読み取れたため、3 つ目の月として 10 月を選ぶ。そして順流が最も激しい時期は、**図 3-1** の流量図から 11 月上旬であると分かることから、最後の月として 11 月を選んだ。

以上のことから、5 月、8 月、10 月、11 月をピックアップして考察を行う。大腸菌流動の考察に入る前に、各月の風の傾向をより細かく見ることで、4-3-1 節で見出した季節ごとの風の傾向と正しく合致しているかを確認する。

図 4-147~150 は、5 月、8 月、10 月、11 月それぞれにおける一日の風速の大きさ、風速の東方向成分、北方向成分をグラフと 2 時間おきの風速ベクトル図に示したものである。5 月は 4-3-1 節に示したグループ 1、8 月はグループ 2、10・11 月はグループ 3 に属するため、前節で述べたグループごとの特徴と**図 4-147~150** にみられる特徴を比較する。

5 月、10 月、11 月については、風速が小さい時刻では 4-3-1 節でグループごとに述べた特徴と異なる様相を示すこともあるが、風速が大きい時刻では前節に述べた特徴と同じ向きの風が吹いていることが分かった。5 月が属するグループ 1 では夕方から夜にかけて風速が強まっており、風は北西から北北東を向いて吹くという傾向が前節で確認されたが、**図 4-147** では 1 時・7 時・8 時以外は風速の北方向成分が正の値をとっており、前節で確認された風の傾向と一致することが読み取れる。1 時・7 時・8 時の風向はグループ 1 の傾向に一致していないものの、図から分かる通りこれらの時刻における風速は一日の最大風速の 0.2～0.4 倍程度と小さなものである。**図 4-149** に示される 10 月、**図 4-150** に示される 11 月についても、いくつかの時刻ではグループ 3 の傾向に一致しない北向きの風が確認されるものの、それらの時刻における風速は最も大きいものでも一日の最大風速の 0.3～0.4 倍であった。そのため、風速が大きい時刻の風向の特徴はグループ 3 の傾向に概ね一致しているとみなすことができる。

図 4-148 が示す 8 月については、どの時刻においても前節に述べたグループ 2 の特徴である北東～東北東の風が確認されたため、グループ 2 の特徴が全ての時刻で現れていると言える。

以上のことから、5 月、8 月、10 月、11 月の 4 ヶ月において、それぞれの風向についての傾向は概ね 4-3-1 節で見出した季節ごとの風の傾向に一致すると考えることができた。

4-3-3. 計算条件

ここからは、4-3-2 節で選定した月ごとに流動計算を行っていく。まず、計算条件について述べる。

計算期間は、各月の 1 日 0:00 から 8 日 6:00 までの 7 日と 6 時間である。計算開始時は湖内の大腸菌濃度を一律で 0 としているため、1 週間の間計算を行うことで大腸菌流動を定常状態に近い状態として、その最終日に注目して考察を行う。計算期間を 6:00 までとした

のは、大腸菌の放出時刻が毎朝 7:00 であるため、放出の直前まで結果をみることを目的としたものである。初期条件・境界条件として、通年計算と同じ流量・水位データを使用した。ただし、風データについては日ごとの風の差異をなくすことを目的として 4-3-1 節で作成した一日の代表的な風速データを用い、毎日同じデータを入力し続けることとする。

4-3-4. 結果

4-3-3 節に示した条件を用いて計算を行い、計算を開始して 7 日目の 8:00 から 8 日目の 6:00 までの結果を 2 時間おきに**図 4-151~4-198** に示した。図の上部は大腸菌濃度のコンター図を表しており、下部の図は流速分布をベクトルで示している。また、右のベクトル図はその時刻における風の方向と大きさを表している。

ここからは、湖の北部と南部それぞれの大腸菌流動の傾向について考察を行う。

4-3-5. トンレサップ湖南部における大腸菌流動の特徴

まず湖の南部について、大腸菌流動の特徴を考察する。特徴の一つとして、流れの影響が大きいことが挙げられた。これは各月の大腸菌流動の傾向がその時の流れの特徴によって説明できたことから得られた特徴である。

5 月はトンレサップ川への接続部分が高濃度領域に覆われており、その広がりは 13km 程度の広さに及んでいる。しかし高濃度領域の流動はわずかなもので、大腸菌の投入から 23 時間が経った 8 日目の 6:00 においても、WHO の基準を満たさない領域は投入直後とほぼ変わっておらず、赤色で着色された WHO 基準の 300 倍を超える非常に高濃度の汚染が見られる領域がわずかに東へ移動していることが確認される程度である。大腸菌の流動が小さかったという結果は、**図 3-1** に示されている 5 月の流量が-700$[m^3/s]$という年間最大流量の 10 分の 1 程度の値しかないことから説明できる。5 月上旬は年間で最も流量の絶対値が小さい期間の一つであり、そのため湖全体の流れが緩やかになっており、大腸菌の流動も緩やかなものとなっていたと考えられる。また、5 月は流れの方向が湖から川に向かっている順流期間であり、この流れの方向に影響されたことで非常に高濃度の汚染が見られる領域も川の方向である東に移動しているのであると説明できる。

8 月は集落から放出された大腸菌が広い範囲に拡散されており、例えば集落 E が放出した大腸菌による高濃度領域は約 10km 四方に及んでいる。また大腸菌の流動も激しく、特に集落 E においてトンレサップ川から湖の内部に入る向きの流動が顕著に見られた。この結果は、8 月上旬は一年で最も逆流による流量が大きい期間であるため湖内部に川から湖への激しい流れが発生しており、その影響を受けたことによるものであると説明することができる。また、近い集落間で汚染された領域が繋がり合うことで一つの巨大な汚染領域が生まれているという特徴も 8 月の結果には見られた。一つの集落を対象にした流動解析で

は集落同士の汚染の相互作用を確認することが不可能であるため、今回トンレサップ湖全域を解析対象としたことで、その相互作用が存在していることを明らかにすることができたと言える。

10 月の結果において最も大きい高濃度領域が見られるのは集落 E の付近であり、隣の集落から放出された大腸菌と一体となっている幅約 15km の高濃度領域が形成されている。しかし、それ以外の集落から放出された大腸菌の拡散はそれほど広がっておらず、8 月のような集落同士の汚染の相互作用も見られなかった。10 月上旬は一年で最も水位が高い時期であり、この近辺で逆流が順流に転じるため、流量がさほど大きくない。そのため、**図 4-?** に見られるような結果が得られたと考えられる。

11 月は 8 月と同様に高濃度の大腸菌が広い範囲に拡散されている。しかし、集落 E の付近に現れているように流動の向きは 8 月と反対であり、湖内部からトンレサップ川に向かって高濃度領域が広がっている。また、この月でも 8 月の結果で見られたような集落間の汚染の相互作用が見られ、各集落によって汚染された領域が繋がることで幅約 55km にも及ぶ帯状の高濃度領域が現れた。この結果も前の 3 ヶ月と同様に流れの影響を大きく受けたものであり、順流が一年で最も激しいという 11 月上旬の流れによって、湖から川へ向かって高濃度の大腸菌が広く拡散したと言える。

4-3-6. トンレサップ湖北部における大腸菌流動の特徴

次に湖の北部に注目し、各月の大腸菌流動の特徴を整理する。

5 月は集落 A と集落 C 周辺で流動の特徴が異なっている。集落 C とその周辺に位置するいくつかの集落ではそれぞれ独立した高濃度領域が広がっているものの、その広さは広くとも東西 4km、南北 2km 程度であり、前節で述べたように南部では幅 13km 程度の高濃度領域が広がっていることを考えると、さほど大きくはないと考えられる。一方集落 A では東西約 5km、南北約 8km の三角形の高濃度領域が広がっており、集落 A の住民にとっては安全な水にアクセスすることが難しい状態であると言える。これは 5 月においては細い支流が集落 A のすぐそばに位置しており、この地域のみ流速が大きくなっているため、大腸菌がそれに従って大きく拡散されていることによるものではないかと考えられる。

8 月の高濃度領域は最大で幅 8km 程度の広がりを見せており、他の 3 ヶ月に比べて明らかに高濃度領域の広がりが大きい。この時期は逆流状態の流量が一年で最も多い時期でありながら、水位はまだ一年で最大の状態には達しておらず、しかも風が強い時期であるため、大腸菌の拡散が広範囲に及ぶ条件が揃っている。そのためこの結果は予測通りのものであったと言えるが、一つ予想に反した特徴として、北岸周辺の 4 集落で高濃度領域が東に広がる動きを見せたことが挙げられる。8 月の流れは逆流状態であり、東側のトンレサップ川から西側のトンレサップ湖へと流れ込む方向に水が流れているため、大腸菌もそれに従って西側へ流されるような流動を行うと予測しており、実際に湖の南部では逆流に従う

流動が再現されていた。北岸周辺の 4 集落ではその予測に反した結果が得られた要因として、水位が低下した湖に年間で最大の流量の水が入り込んできたことによって循環流が発生していたことが考えられる。実際に 8 月の様子を示した**図 4-163~174** を見てみると、時間によって流速に大小はあるものの、いずれの時刻においても北岸周辺の集落の近辺には西から東へ向かうような循環流が発生している。

10 月、11 月は 8 月ほど大きな高濃度領域の広がりは見られなかった。10 月は前節でも述べた通り流量が小さい時期であるため、そこから今回の結果を説明することができる。しかし、11 月上旬は一年で最も順流状態の流量が多い時期であり、南部においては 8 月と同様に広範囲の高濃度領域が確認されているため、流れの状態からはこの結果の説明がつかない。ここから、11 月の湖北部の結果は流れの影響ではなく風の影響を大きく受けたものであり、湖北部は南部に比べて風の影響で流れが左右され、大腸菌流動もその影響を受けると考えることができる。11 月の風の傾向は**図 4-150** に示されている通り、風速がどの時刻においても 3[m/s]を超えず、8 月に比べると弱い風が吹いている。このことが湖北部における 8 月と 11 月の大腸菌流動の差異を生み出したのではないかと考えた。5 月、10 月の風も 8 月に比べると強いものではないため、湖北部では風が流れと大腸菌流動の重要な決定因子であると考えると、8 月のみで大きな広がりが確認されたことを説明することができた。

4-3-5 節とこの節で述べた流動の特徴をまとめると、北部と南部のどちらにおいても大腸菌流動には流れが大きく影響するが、南部ではトンレサップ川からの流入・流出が流れを決めている一方で、北部では風によって流れが規定されるところが大きいと言える。また各月の状況を比較すると、WHO の基準を超える高濃度の大腸菌が湖全体で最も広く拡散されるのは、逆流の流量が最も大きい 8 月であるということができる。しかし 4-2-2 節で述べたように、今回設定した集落の位置は乾季における実情と異なっている部分があると考えられ、それによって乾季における大腸菌による湖の汚染が過小評価されている可能性がある。従って、この研究においては 8 月で最も大腸菌が広く拡散されると結論づけられるものの、乾季の流動については今後も検討を行う必要があるといえる。

4-4. 安全な水利用のための指針

月ごとの流動の特徴を確認したところで、実際に安全な水を手にいれるためにはどこの水を利用する必要があるのか、いくつかの集落について考察する。ただし、トンレサップ湖の汚染要因には水上集落からの排出物だけでなく支流を通して近隣の都市から流入する下水などもあるため、ここで言う「安全な水」とはあくまで水上集落から放出される大腸菌について基準を満たす水のことを指すことに留意する必要がある。

まず、全ての集落において大腸菌投入から 1 日後も集落周辺に WHO の基準を満たさな

い大腸菌濃度の水が確認されたことから、安全な水を利用するためには集落から離れた場所で水を手に入れる必要があると言える。安全な水を入手できる場所は集落の位置や季節によって変わるということも明らかになった。

安全な水を手に入れることができる場所が季節によって大きく変化するのは、湖とトンレサップ川の接続地点に位置する集落 E とその近隣の集落である。流れが順流の場合は上流にあたる西側の、逆流の場合はその時の上流にあたる東側の水を利用する必要があるが、これらの集落は湖の狭窄部に位置しており付近の流速が大きいため、上流側の汚染は広がりが小さく、WHO の基準を満たす領域までの距離はさほど遠くない。そのため、集落から上流側に 2〜3km 移動することで安全な水を入手できると考えられる。

また、安全な水のある場所は集落同士の汚染の相互作用によっても変化する。湖南部の南岸に位置する集落 D およびその周辺の集落は、付近の集落との相互作用に留意する必要がある位置に存在している。相互作用が見られる時期は、沿岸部の集落の汚染が連結し合うことで湖の沿岸から 5〜8km 程度までが全て基準を満たさない領域となるため、湖の中心部に向かって 5〜8km 程度離れた場所の水を利用する必要がある。

相互作用が見られなかった地域の集落については、高濃度領域が集落の周囲に円や楕円状に広がっているため、その半径を超える距離を移動すれば安全な水を利用できるといえる。集落 C とその周辺の湖北部南岸に集まる集落や、集落 A、B などの湖北部北岸の集落がこれに該当するが、湖北部の南岸の集落は季節を問わず高濃度領域の広がりが最大で 3〜4km 程度であるため、方向関係なくその程度の距離を移動することで安全な水を利用できると考えられる。湖北部北岸の集落についても流れが順流の場合は同様のことが言えるが、逆流の時期は循環流によって大腸菌の広がりが扁平なものとなっていることがあるため、その時期は循環流に対して上流側、すなわち北西の方向に 1〜2km 移動する必要がある。

このように、季節ごとの大腸菌流動を湖全体について計算したことで、基準を満たす水質の水が手に入る場所を季節ごとにそれぞれの集落について大まかに示すことが可能となった。

第 4 章 参考文献

1. 竹村康平: カンボジア王国トンレサップ湖 Chhnok Tru 集落への 3 次元数値流動解析モデルの適用, 東京工業大学大学院 環境社会理工学院修士論文, 2019
2. T. Nakamura, K. Takemura, H. Fujii, S. Ly, S. Lun, S. Heng, S. Siev, Y. Fujihara, K. Hoshikawa, C. Peng, Y. Tanji, K. Miyanaga, T. Watanabe and C. Yoshimura: Hydraulic Simulation of Escherichia coli Distribution in Chhnok Tru Floating Village, the Tonle Sap Great Lake, The 4th International Symposium on Conservation and Management of Tropical Lakes, pp.42-45, 2019

第 5 章 結論と今後の課題

5-1. 結論

本研究ではカンボジア国・トンレサップ湖の全域を対象に、2 次元数値流動モデルを用いて大腸菌の流動解析を行った。使用した数値流動モデルが用いる基礎方程式とその離散化手法、水域・陸域の判定方法、および計算高速化のために利用する GPGPU の概要については第 2 章で述べた。

大腸菌の流動を解析する前に、第 3 章において 2017 年における水の流動計算を行った。本研究で使用した数値流動モデルは2002年の水位上昇期を対象期間としてパラメータが設定されていたため、2017 年を計算対象期間とした本研究では、2017 年の観測値により近い結果を得られるように改めてパラメータを設定した。また、村上(2017)は水位の観測値のみについての検証を行うことでパラメータを設定していたが、本研究では大腸菌の流動計算を最終的な目的としているため、ADCP 観測で得られた流速の観測値についても検証を行った。

第 4 章では、数値流動モデルを用いて大腸菌濃度について計算を行い、まず大腸菌の流動を通年で解析した。通年計算によって大腸菌の流動が影響を受ける要素としては水位、流速、風の 3 つが挙げられ、その中でより強く影響を及ぼす要素は時刻や場所によって変化するという知見を得られた。住民の安全な水利用のために月ごとの一般的な大腸菌流動の傾向を把握することを考えると、月ごとの典型的な流れを作成し考察を行う必要がある。そこで、大腸菌流動に影響を及ぼす上記の 3 つの要素のうち日々の変動が大きい風については各月で代表的な風データを作成し、月ごとに典型的な流動を解析した。

本研究で新たに得られた知見を以下に示す。

- Kampong Luong における水位の観測値は、観測所によって異なる基準標高を Hatien の MSL に統一するために 64cm を足して他観測所と基準標高を揃えていた。しかしこの値では Prek Kdam と Kampong Luong の 2 地点において下流側が高い水位となる場合があり、その状態が解消されるためには水位に加える値として 1.578m が適切であるという結果が得られた。
- 大腸菌の流動に影響を及ぼす要因には、水位、流速、風の 3 要素があると分かった。一方集落の規模、すなわち大腸菌の放出量はその拡散する広さにさほど影響しないという知見を得られた。
- トンレサップ湖における季節による風の傾向を把握することができた。風の傾向は 1 月～5 月、6 月～8 月、9 月～12 月という 3 つの時期に分けられ、風速・風向の両方について時期ごとに共通した特徴を見出すことができた。

- 湖全体で大腸菌の流動は水の流れの影響を大きく受けていることが分かった。しかし、湖の北部と南部の傾向の違いとして、南部ではトンレサップ川からの流入・流出によって流れが規定されるところが大きく、北部では風によって流れが強く影響を受けていることが示された。流量が大きい時期は南部では流速の大きい流れが発生しているため、近い集落間で汚染された領域が一つの巨大なかたまりとなっているという結果がみられた。北部ではそのような相互作用は確認されなかったが、北部のみで現れた特徴として 8 月の循環流があった。
- WHO の基準を超える濃度の大腸菌が湖全体で最も広い範囲に拡散されている時期は、逆流状態の流量が最も大きく水位が上昇途中にある 8 月であるという結果が得られた。
- 集落からの大腸菌排出による汚染の程度が WHO の基準を超えない水を入手できる場所の目安を、湖上にある水上集落についていくつかのグループに分けて示すことができた。湖とトンレサップ川の接続地点に近い集落では、季節によって上流側が変わることに留意しつつ上流側に 2~3km 移動することで WHO の基準を超えない水を入手できる。湖南部沿岸では近隣の集落の汚染が連結し合っているため、それを避けるためには湖の中心部に向かって 5~8km 移動する必要がある。湖北部南岸に位置する集落では、方向に関係なく 3~4km 移動することで安全な水を入手できる。湖北部北岸の集落についても順流の時期は同様の傾向がみられたが、逆流の時期は上流側に 2km 程度移動する必要がある。

5-2. 今後の課題

上記の結論を踏まえ、今後の課題点を次に示す。

- 本研究では集落の位置を固定したため、湖が縮小する乾季はいくつかの集落が陸域にあると判定され、そこからの大腸菌放出は考慮されなかった。しかし、集落の住民は漁業従事者が多いため、湖の面積が小さい乾季は湖の内部に水上家屋を移動させている。そのため、乾季においては大腸菌を放出する集落の数を過小評価しており、実際の乾季の汚染状況は本研究における結果より深刻なものである可能性がある。この改善のためには、乾季における集落の位置を別途衛星写真より求めて入力する必要がある。
- 本モデルでは水中に投入された大腸菌のみについて計算を行っており、陸上からの大腸菌の流入については考慮していない。この点を考慮してモデルの改善を行うことで、さらに現実に即した結果が得られると考えられる。しかし数値流動モデルは正しく動作させることができたため、これを重金属汚染などについても応用できるのではないかという展望も得られた。

謝辞

本研究をすすめるにあたり、指導教官の中村先生からは多くのご指導を賜り、解析がなかなか改善しないときも解決の助けとなるような助言を数多くいただきました。厚く感謝を申し上げます。また、毎月のゼミの際に木内先生からは鋭い質問をいただき、自分では気づけなかった問題点や考慮すべき点に気づくことができました。ありがとうございました。

データの提供をしていただいた荒井さん、昨年の輪講やゼミ発表において様々な助言をしてくださった殿山さんを初めとして、中村研究室・木内研究室の皆様には、研究の上での知識や研究生活についてのアドバイスをいただき、研究・生活面で大変お世話になりました。また、昨年 9 月まで研究室にいらっしゃった Sokly さんにはカンボジア帰国後も様々なデータをいただき、解析を行う上で必須となるデータを入手することができました。ここに感謝いたします。

山形大学・藤井先生と学生の米田さん、富山県立大学・星川先生、石川県立大学・藤原先生、そしてカンボジア当局の関係者の皆様がたには、昨年 9 月のカンボジアでの現地調査の際に大変お世話になりました。研究対象としている地域を実際に訪れながら、トンレサップ湖に関する水理学的知識だけでなくその周辺地域の社会についてのお話を伺えたことで、自分が行っている研究が現実と地続きのものであると改めて実感することができました。ありがとうございました。

最後に、今日まで私を見守り、経済面・生活面で多大な支援をしてくださった家族、様々な場面で助言をして支えてくださった皆様に再度感謝を申し上げます。

図表集
第1章

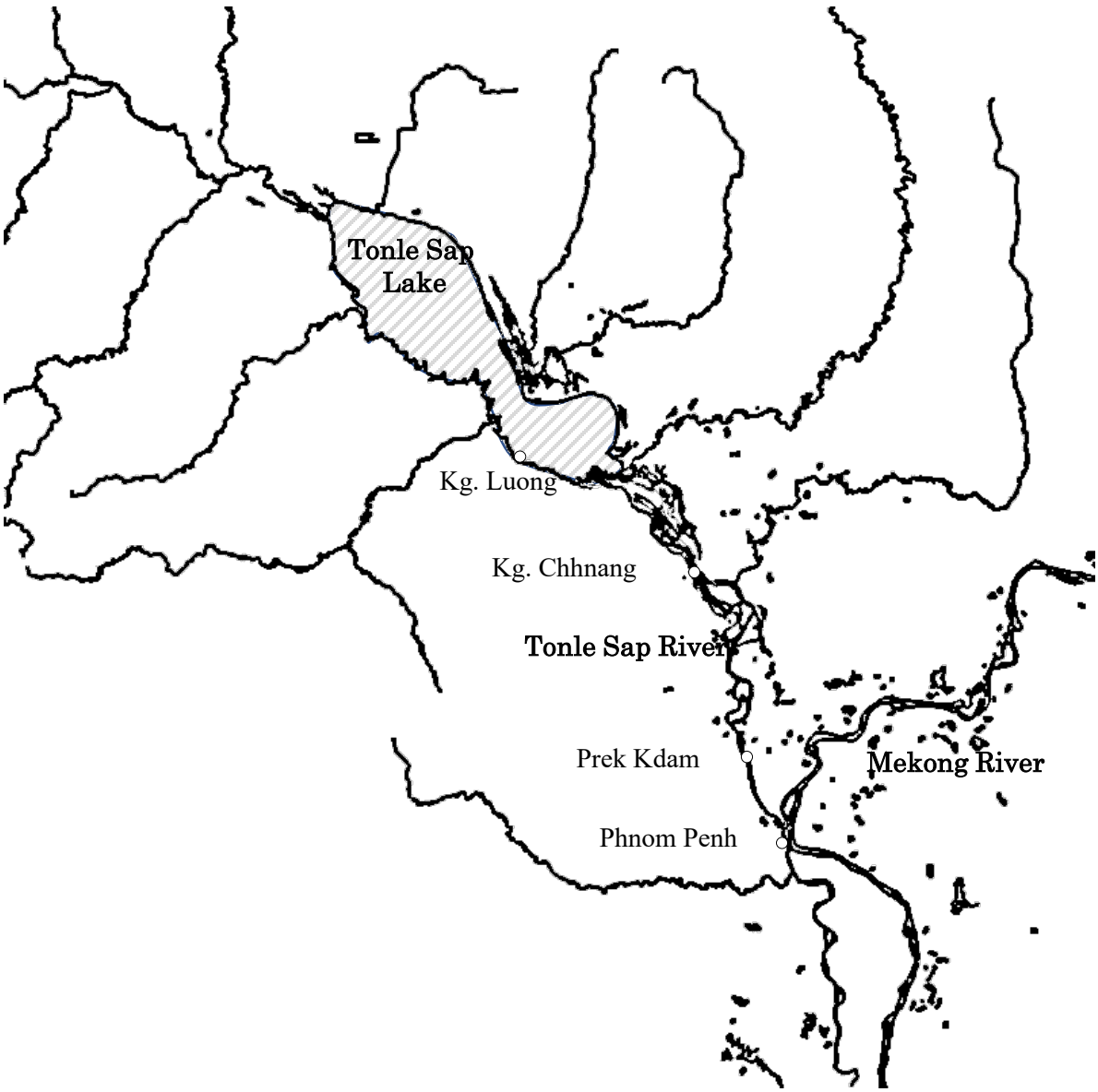


図1-1 トンレサップ湖・トンレサップ川概要図(出典: 村上(2017))

図表集
第2章

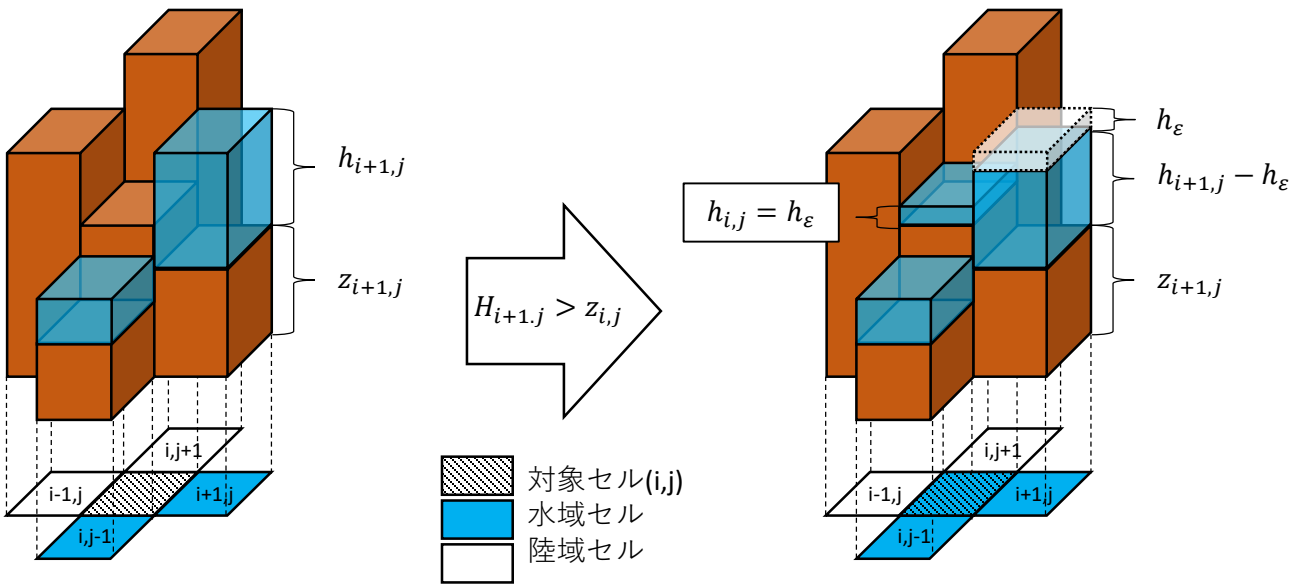


図2-1 セルの水域化の表現(出典: 村上(2017))

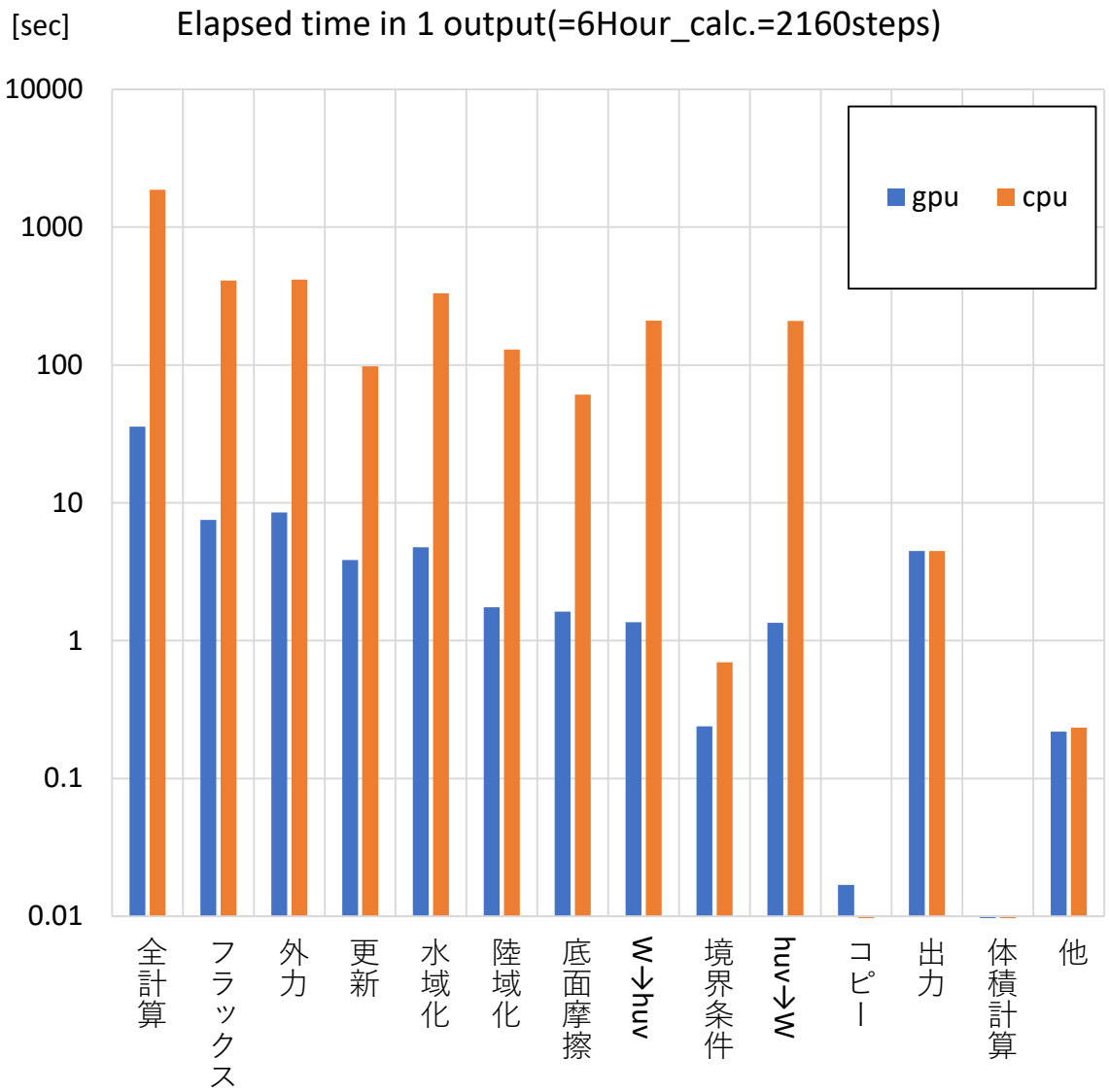


図2-2 各計算プロセス別CPU/GPUによる計算時間(出典: 村上(2017))

図表集
第3章

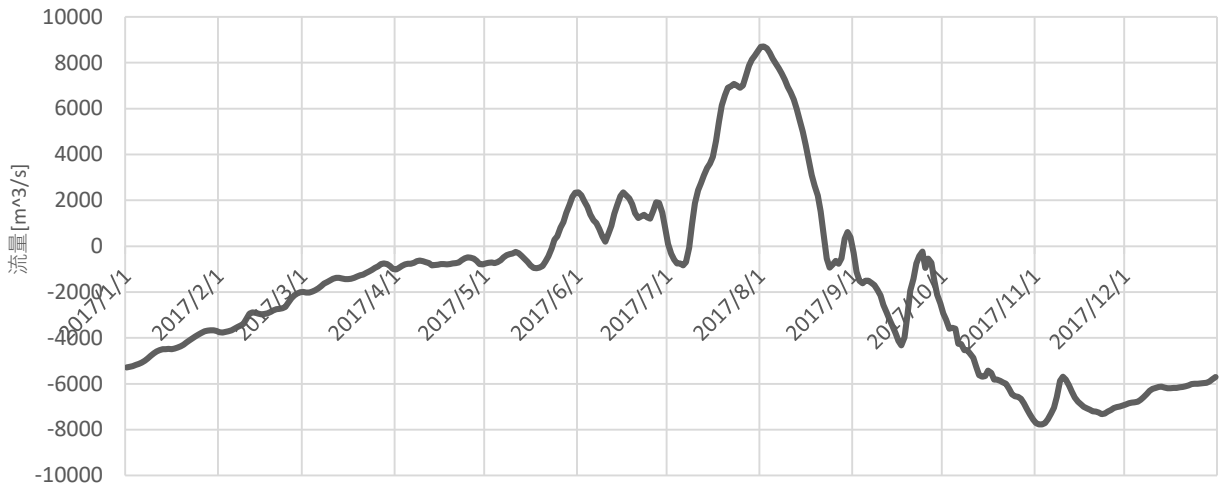


図3-1 Prek Kdamにおける流量

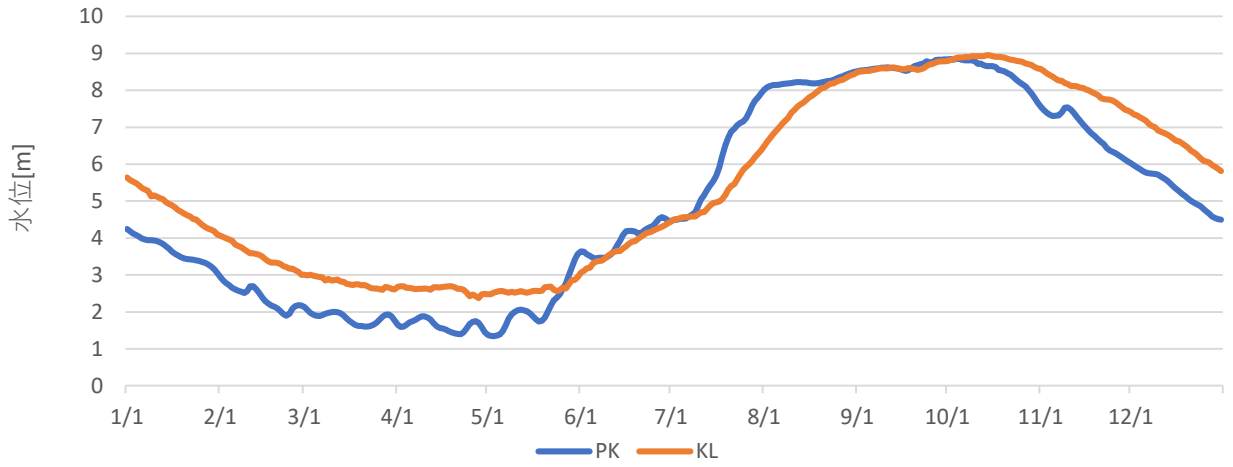


図3-2 Prek KdamとKampong Luongにおける水位

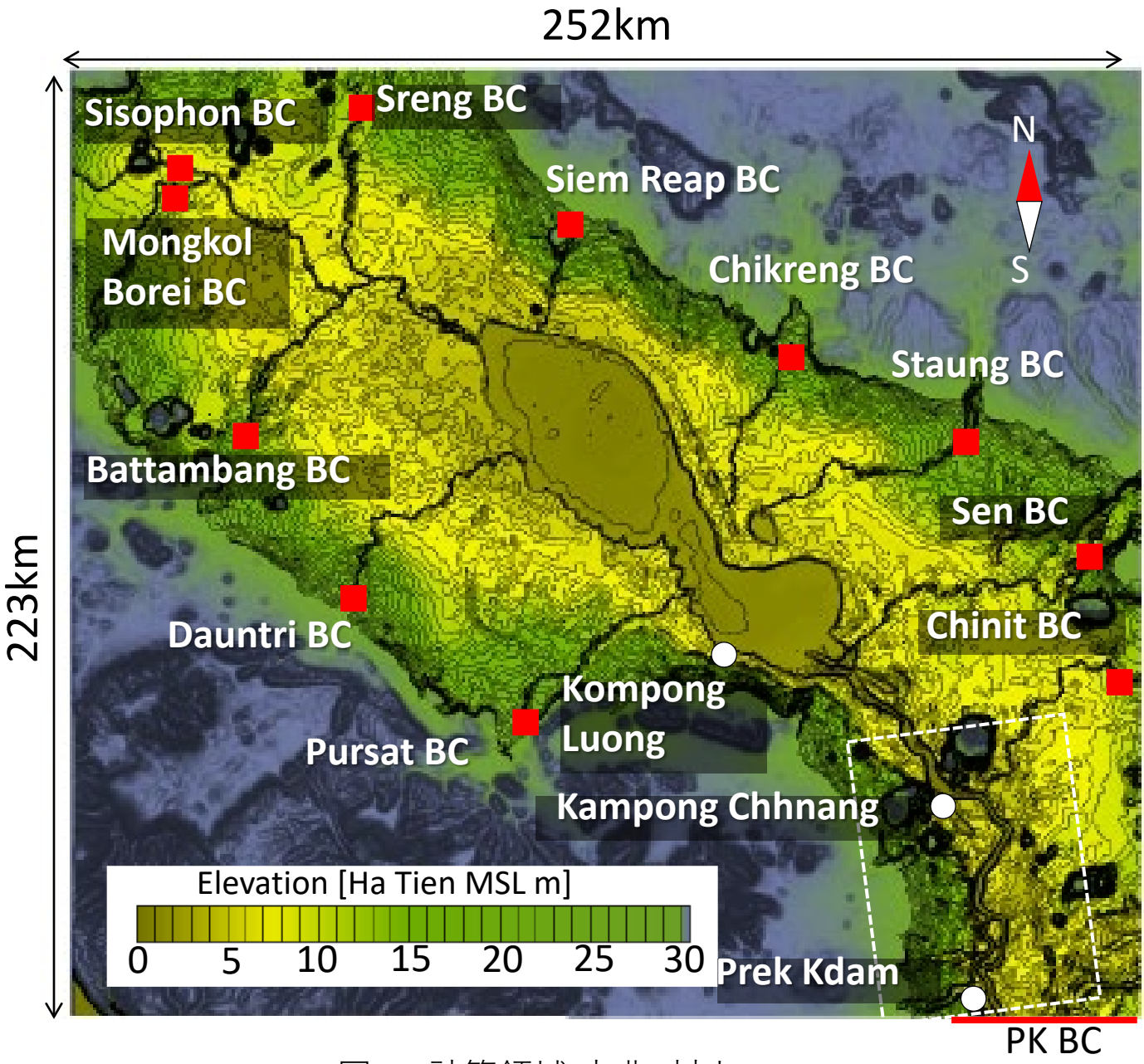


図3-3 計算領域(出典: 村上(2017))

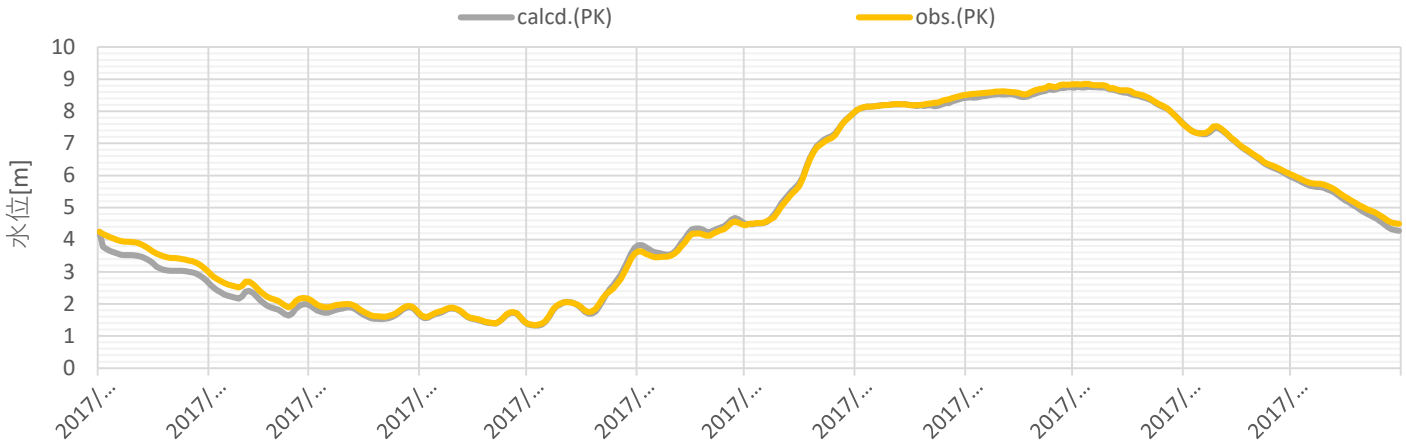


図3-4 Prek Kdamにおける水位(観測値と計算値の比較)

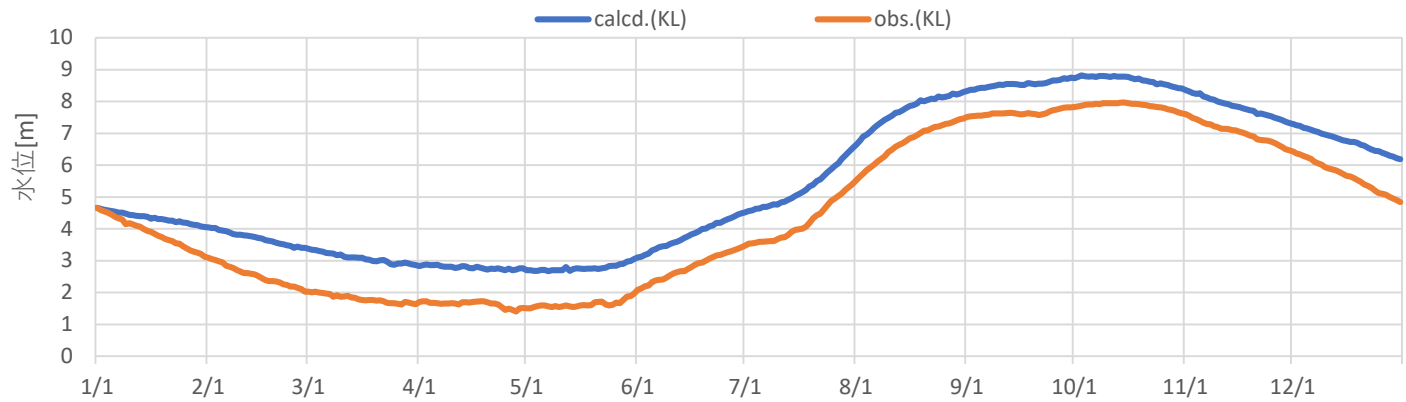


図3-5 Kampong Luongにおける水位(観測値と計算値の比較)

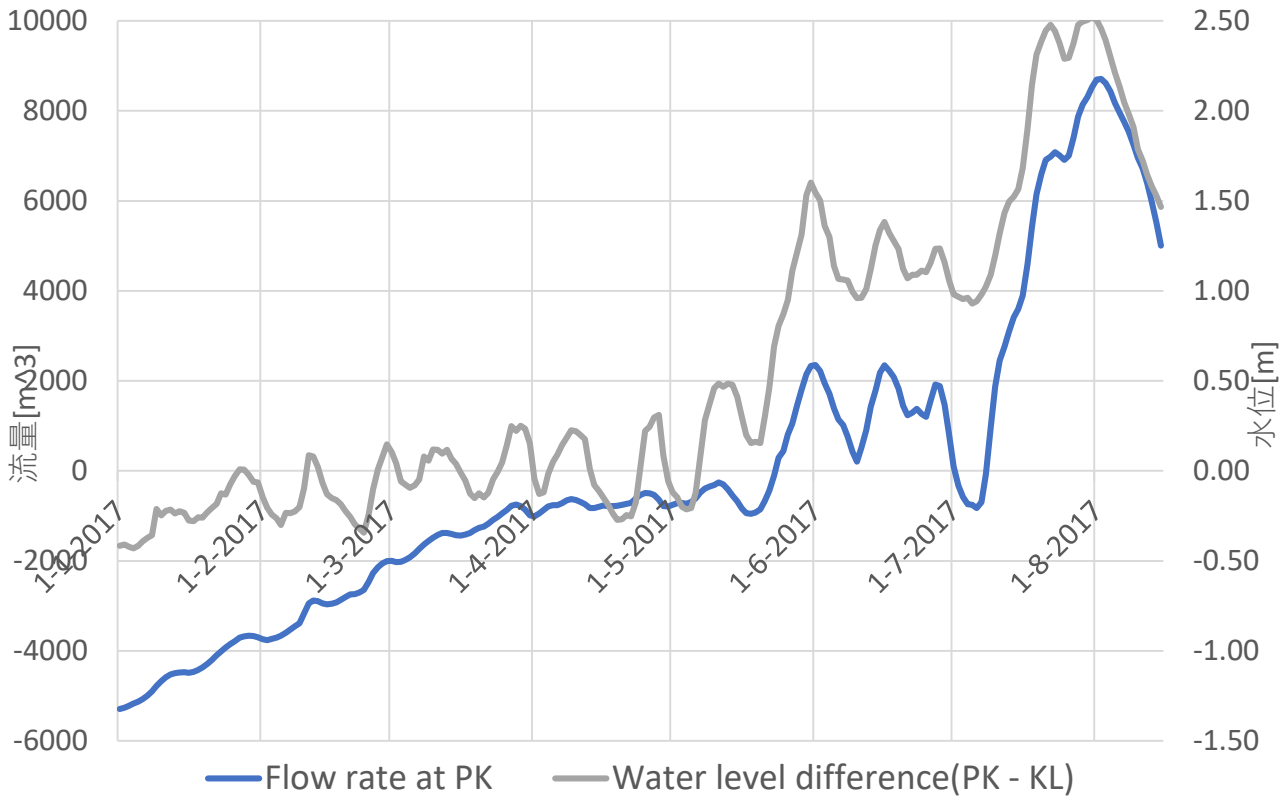


図3-6 Prek Kdam-Kampong Luongの水位差とPrek Kdamの流量

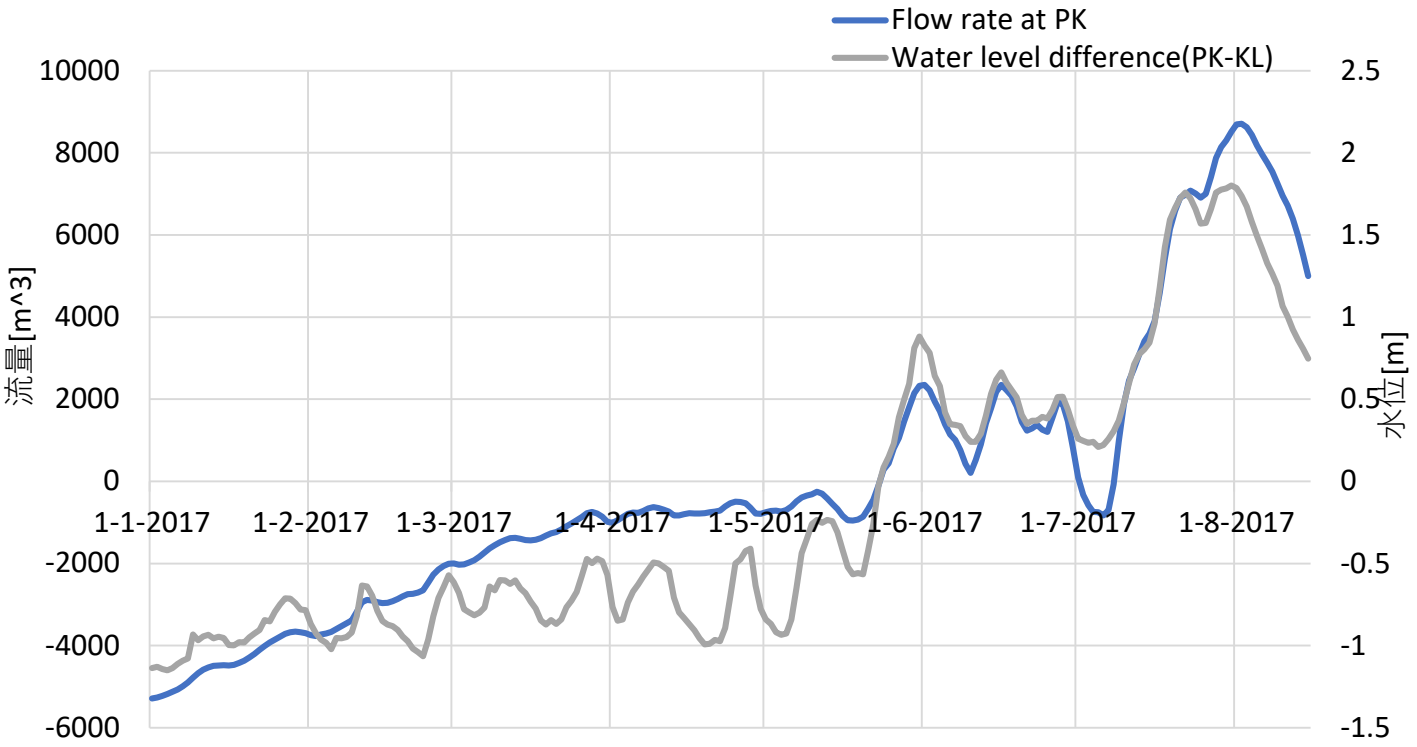


図3-7 補正後の水位差と流量(5/23基準)

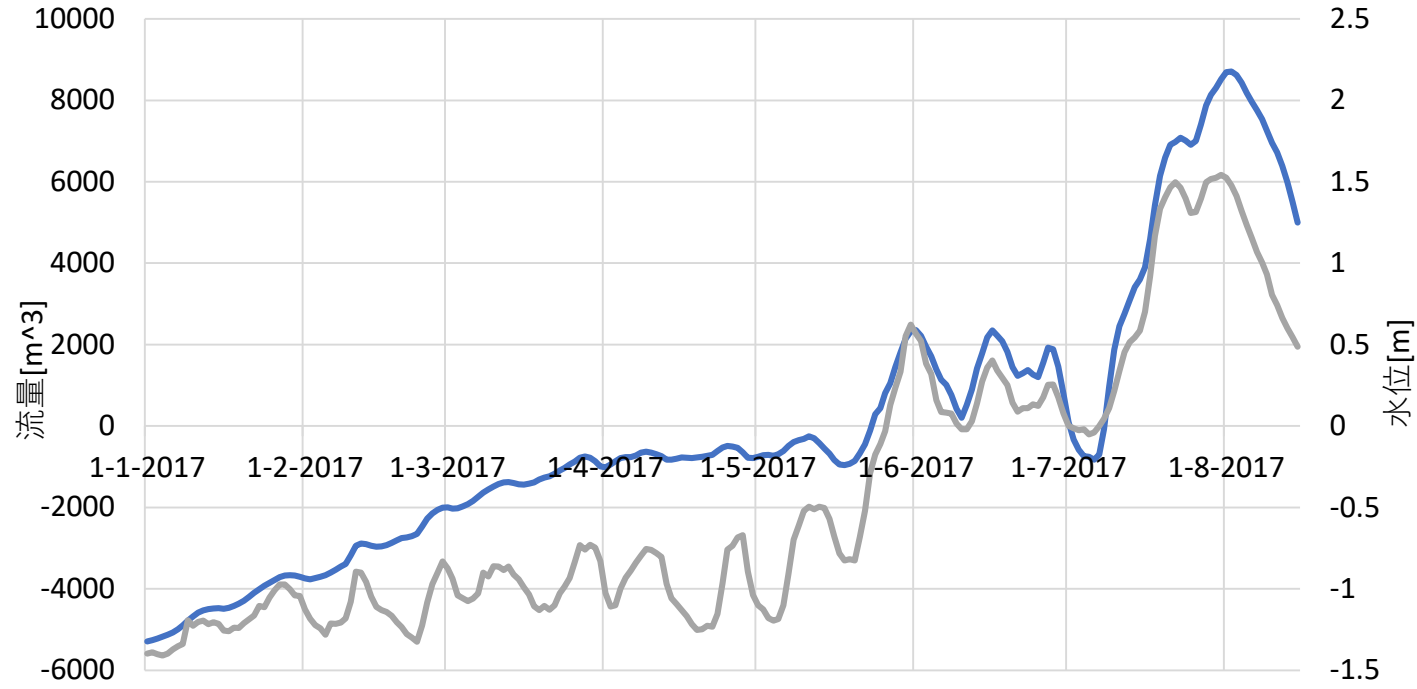
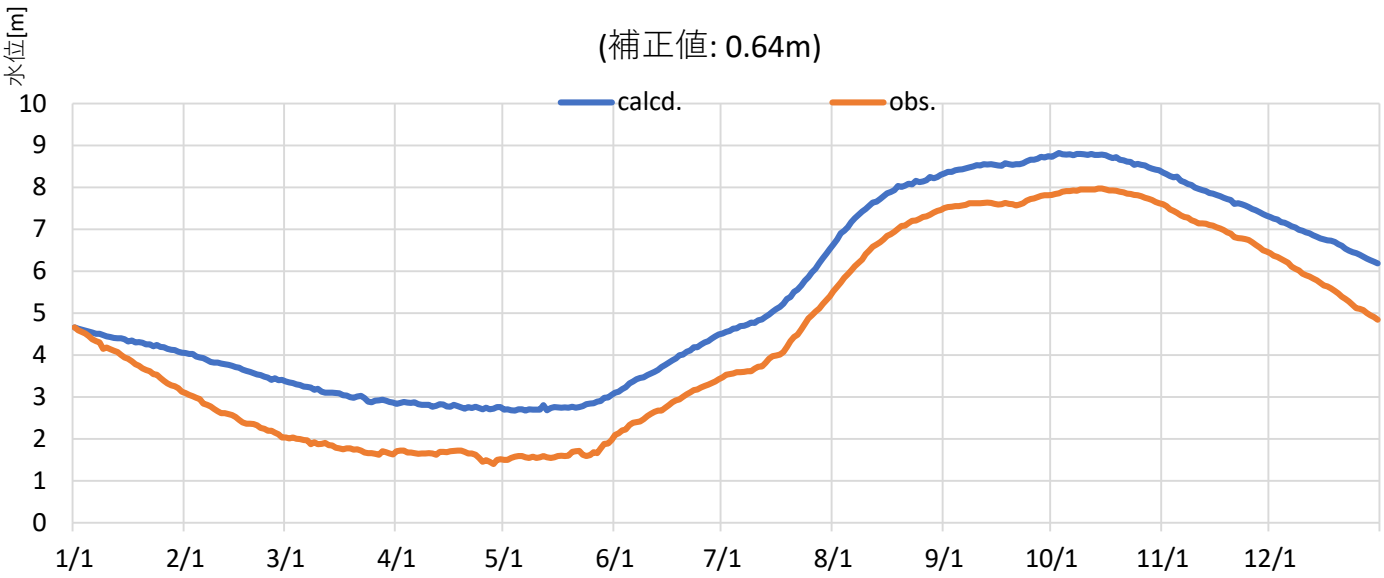
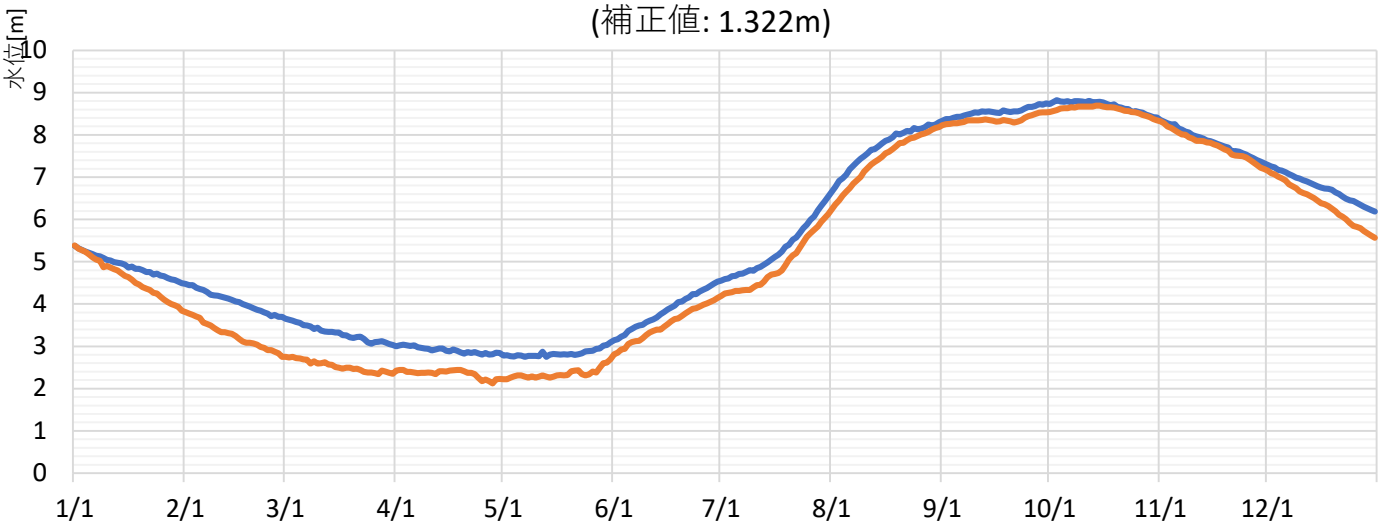


図3-8 補正後の水位差と流量(7/1,5基準)





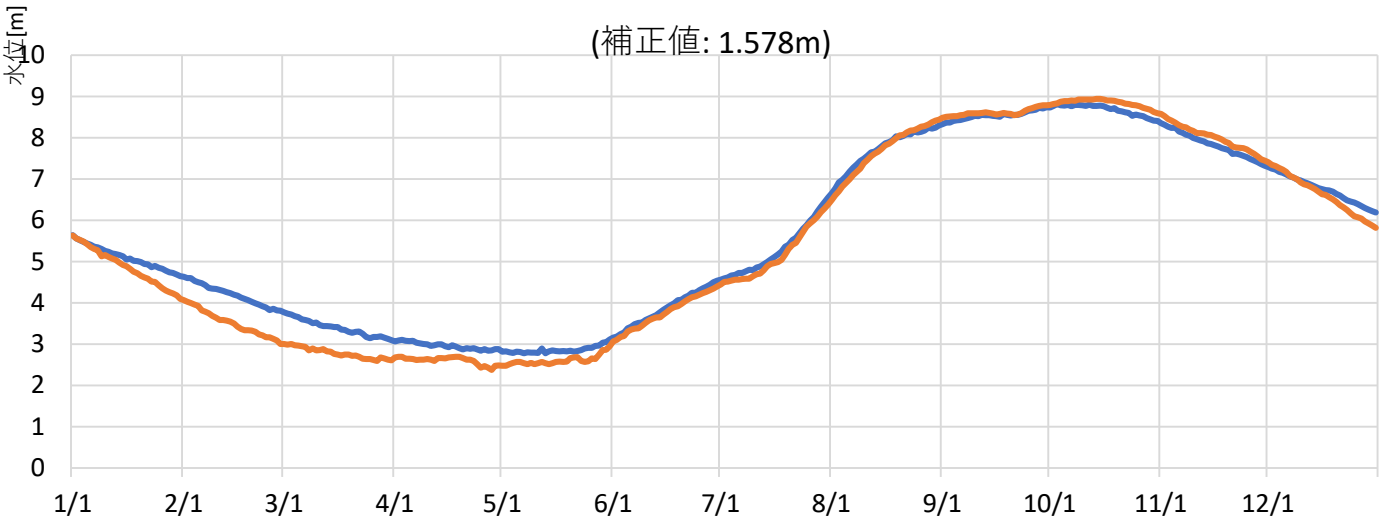


図3-9 各補正値を用いて得たKampong Luongの水位

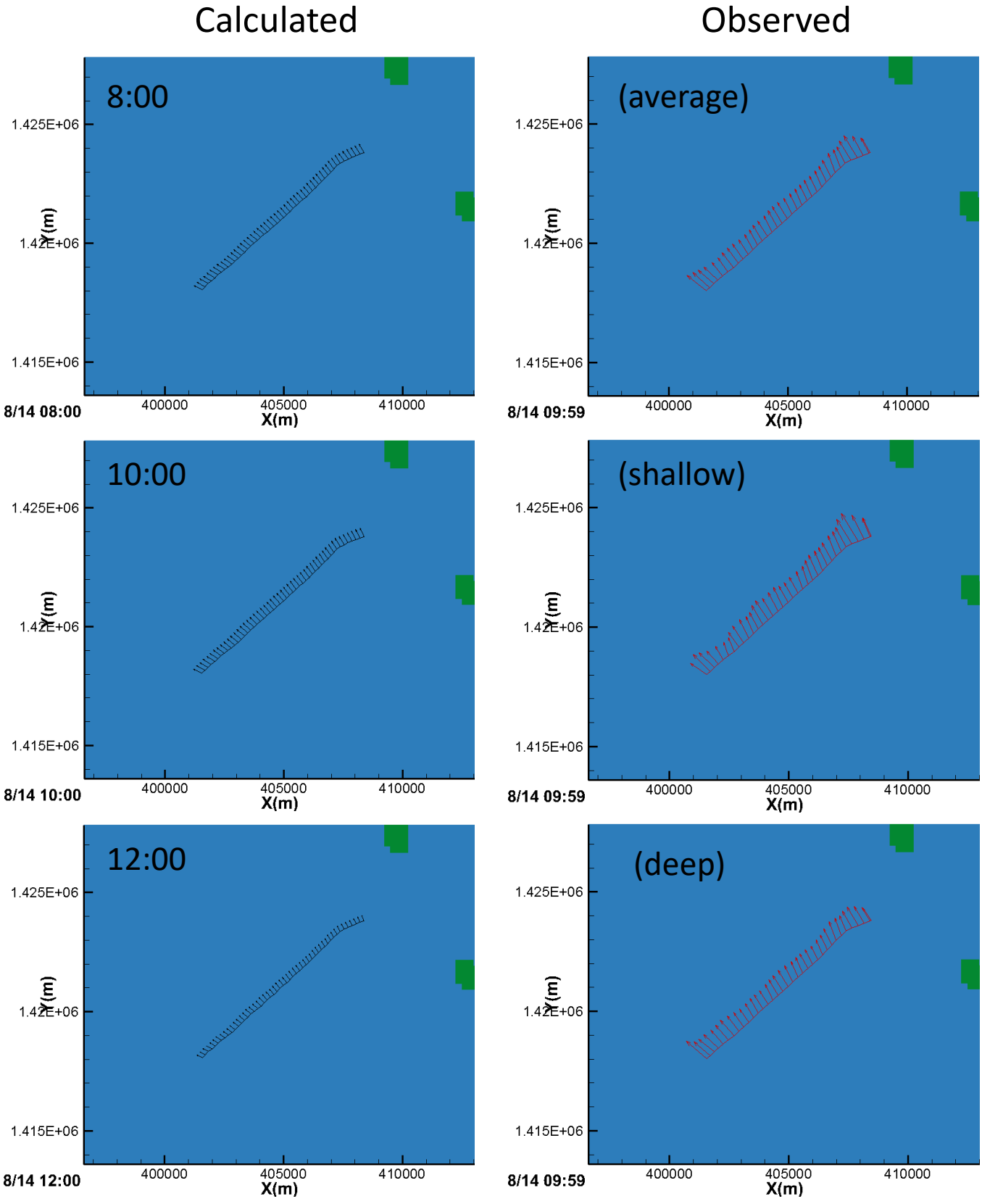


図3-10 8/14(行き)における流速

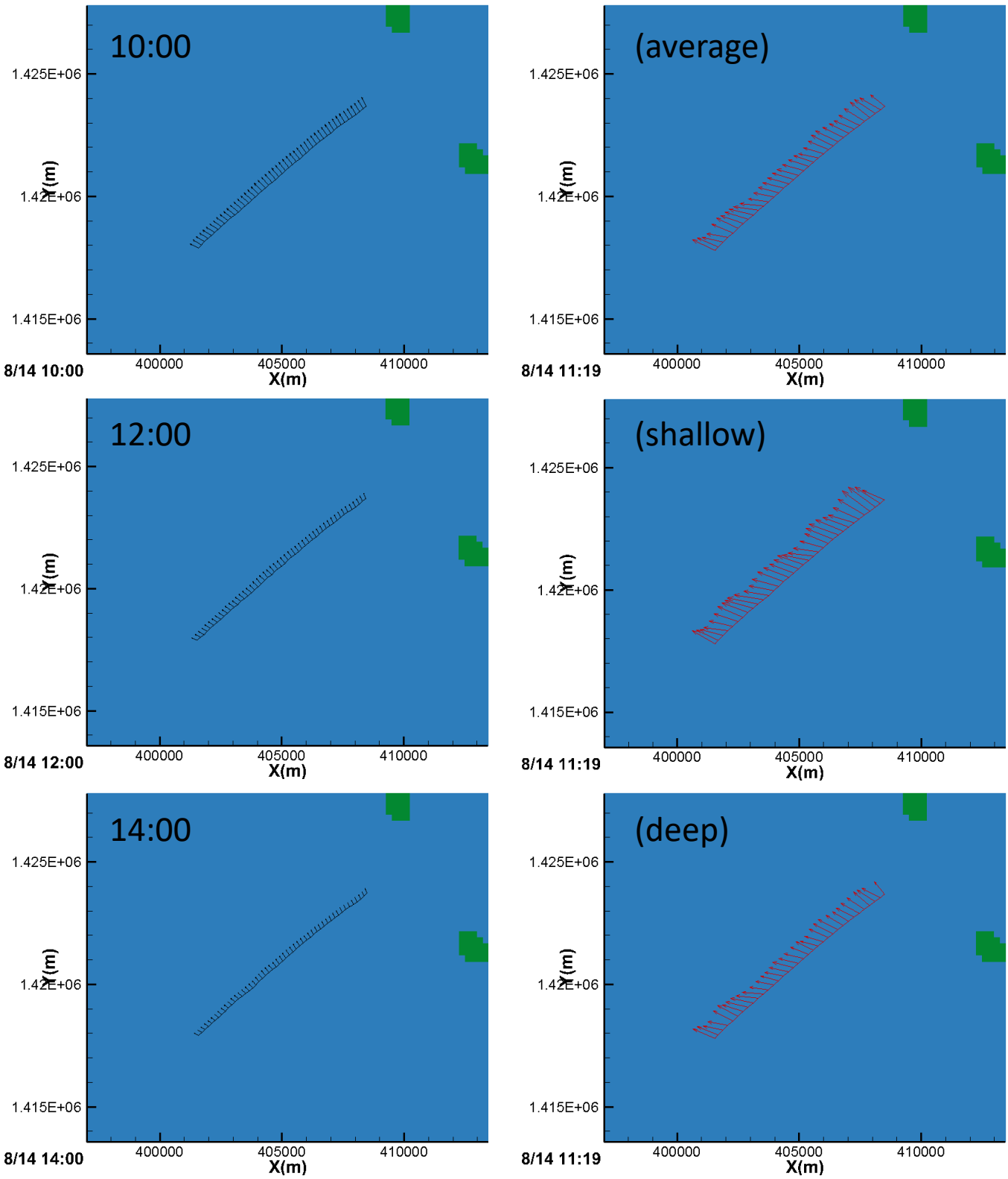


図3-11 8/14(帰り)における流速

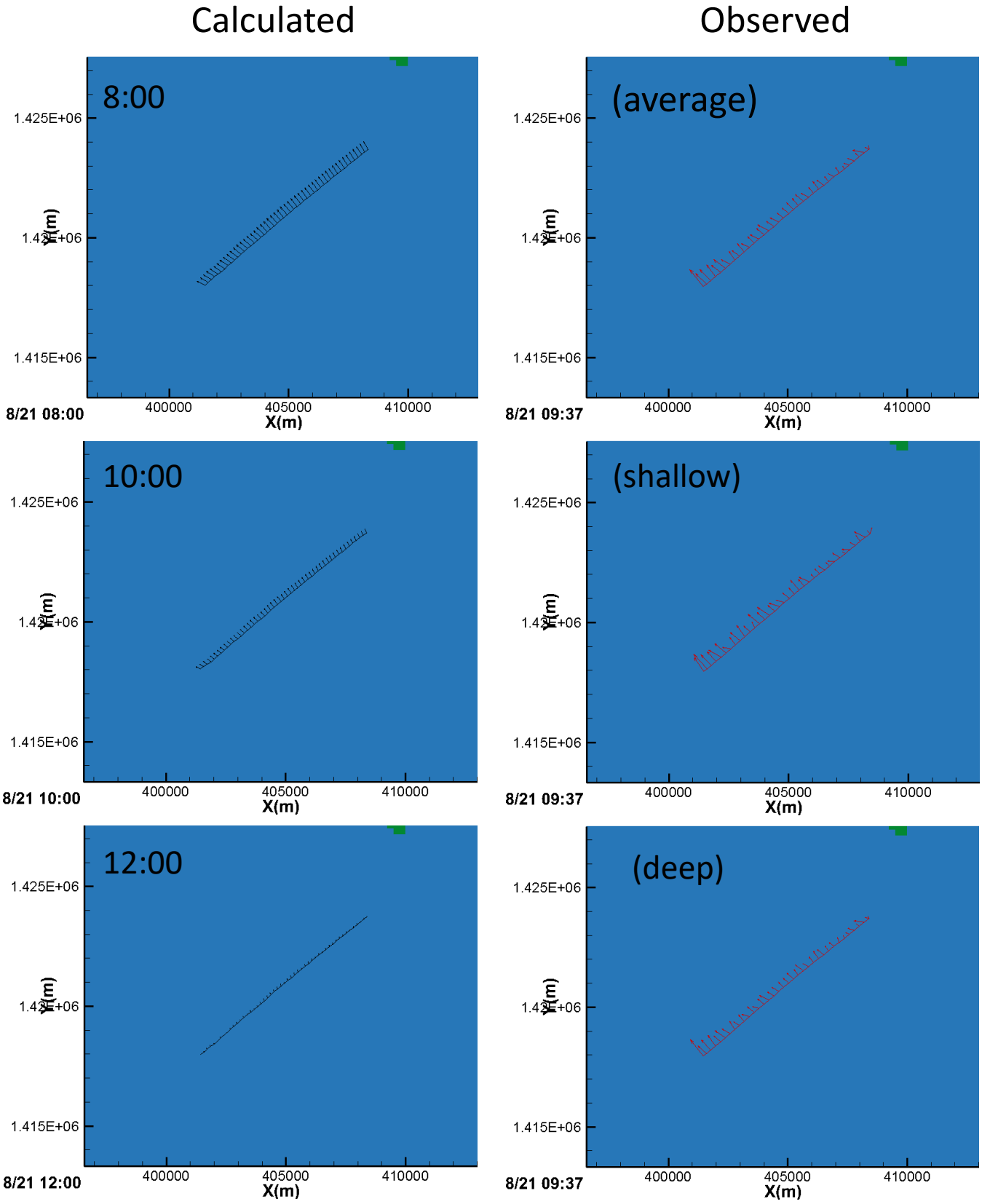


図3-12 8/21(行き)における流速

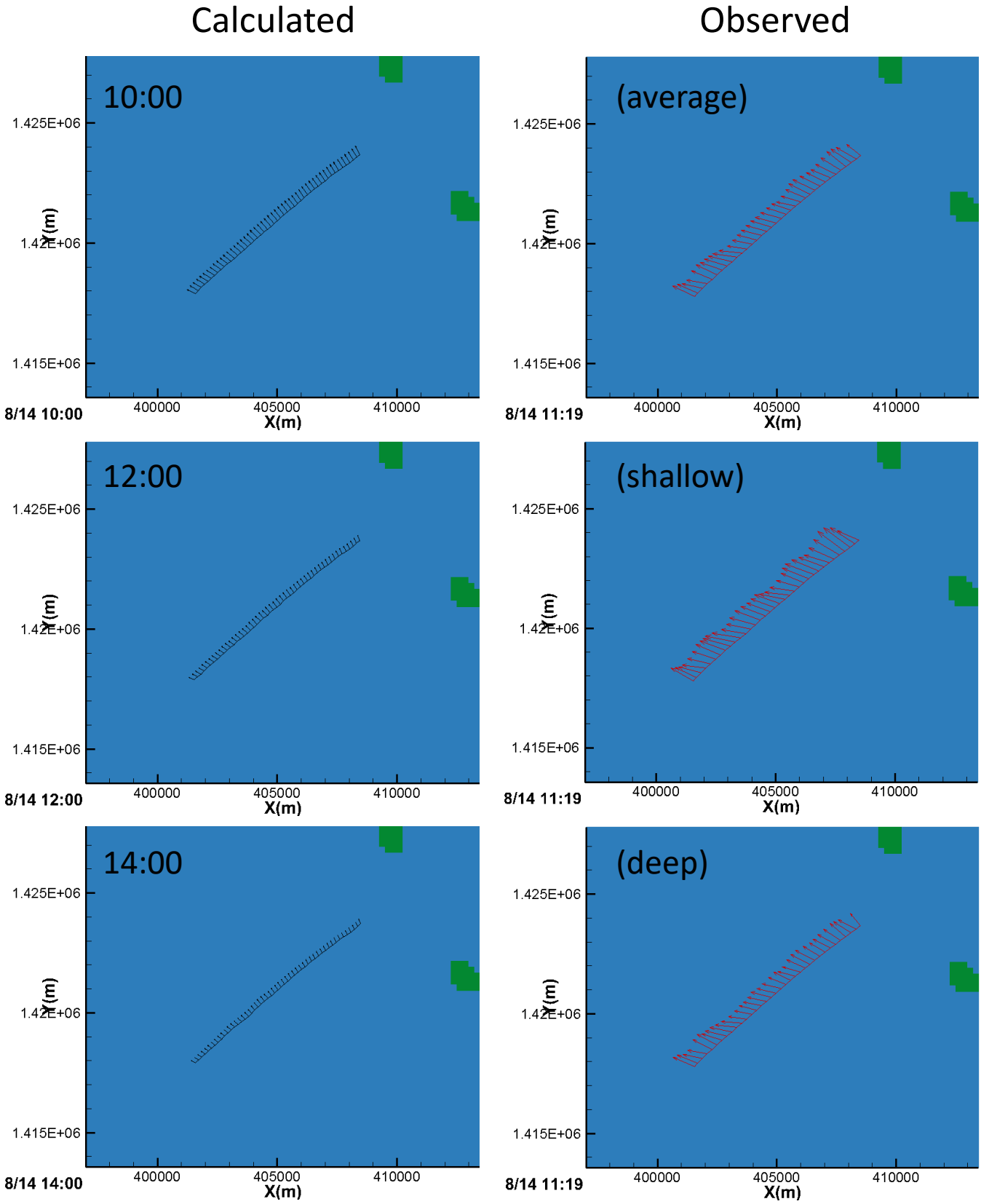


図3-13 8/21(帰り)における流速

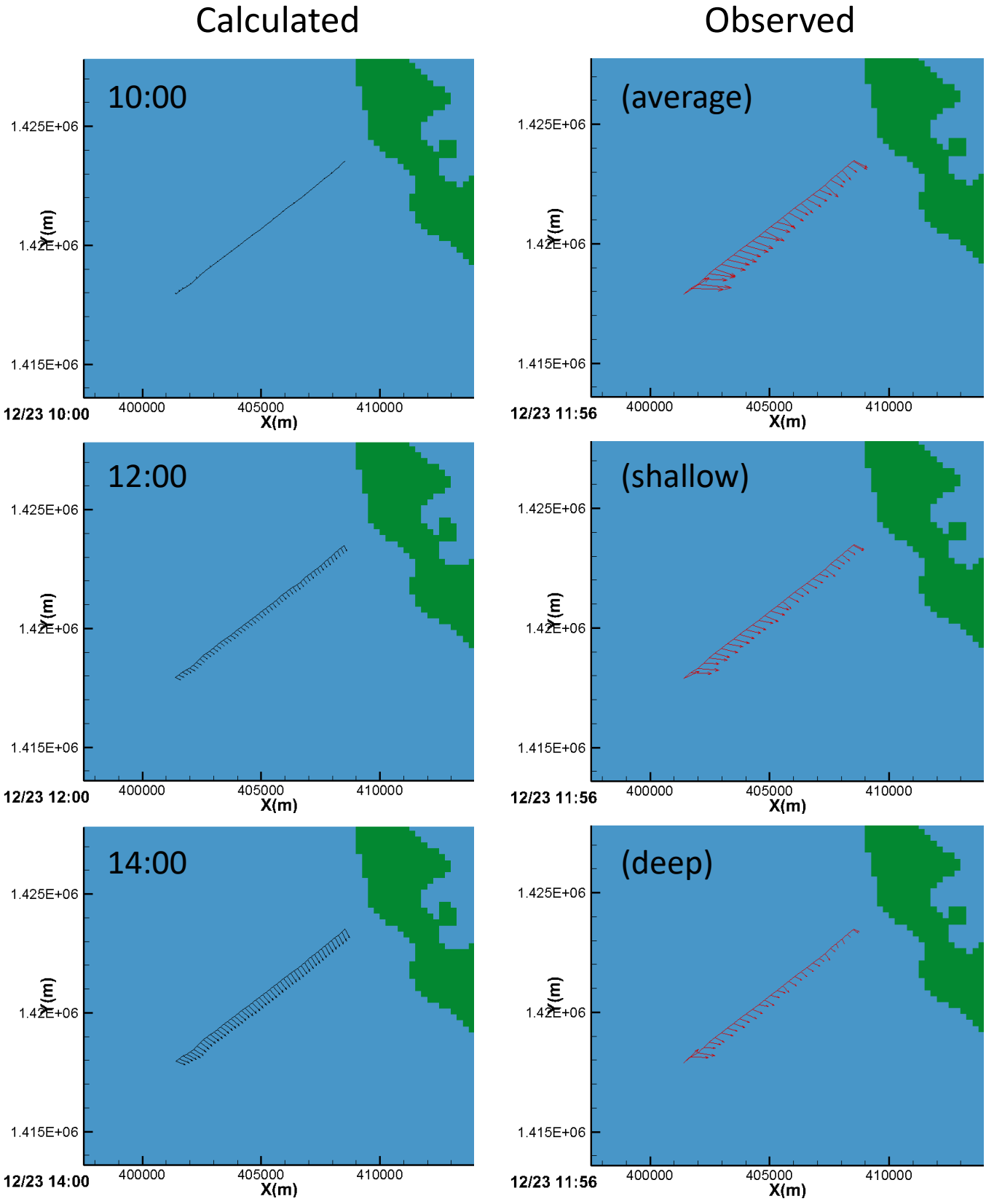


図3-14 12/23(行き)における流速

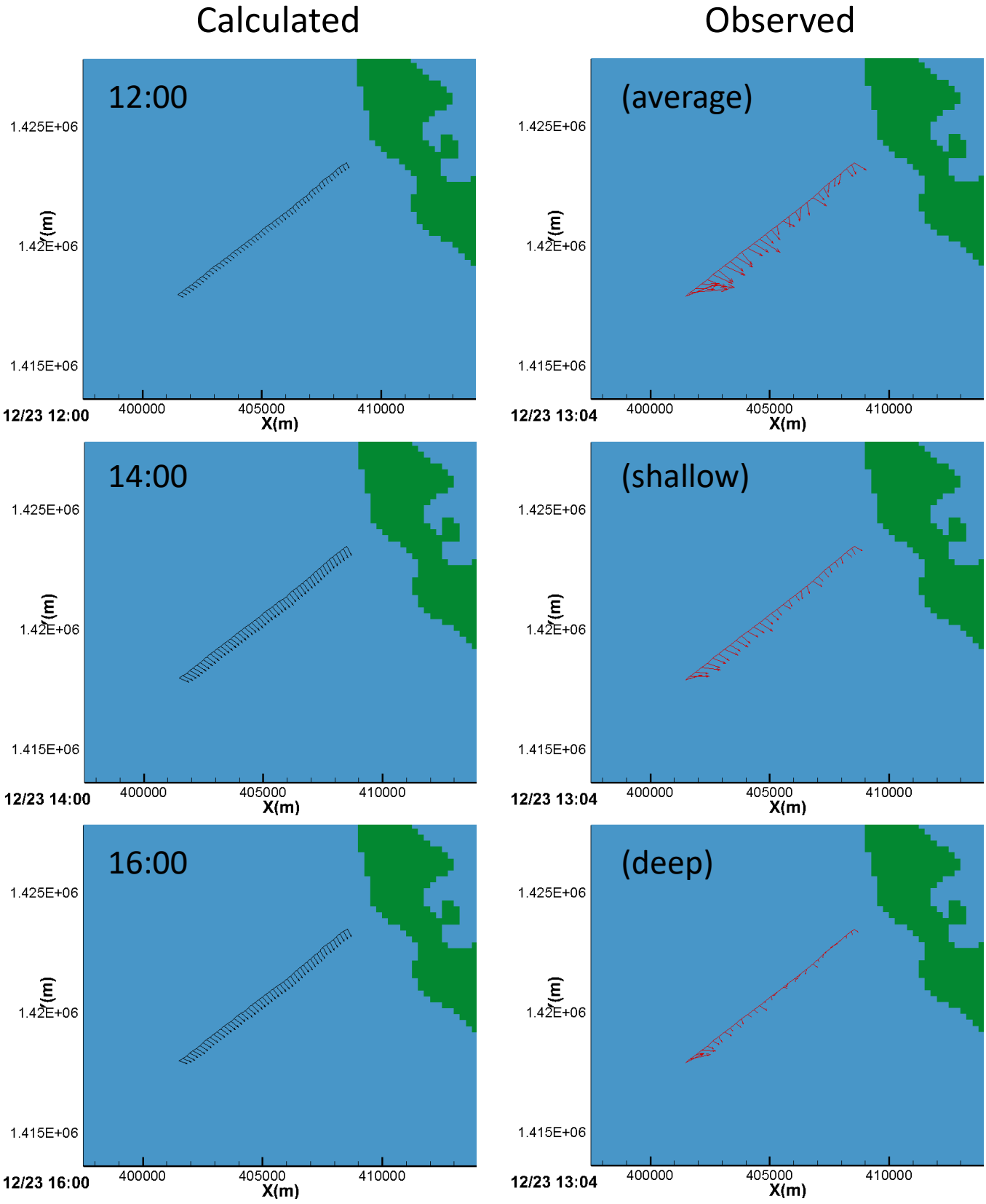


図3-15 12/23(帰り)における流速

風速[m/s]	$C_D \times 10^3$
$0.3 \leq U_{10} < 2.2$	$1.08{U_{10}}^{-0.15}$
$2.2 \leq U_{10} < 5.0$	$0.771 + 0.0858U_{10}$
$5.0 \leq U_{10} < 8.0$	$0.867 + 0.0667U_{10}$
$8.0 \leq U_{10} < 25.0$	$1.2 + 0.025U_{10}$
$25.0 \leq U_{10} < 50.0$	$0.073U_{10}$

表3-1 近藤の式によるバルク係数(出典: 西村(2001))

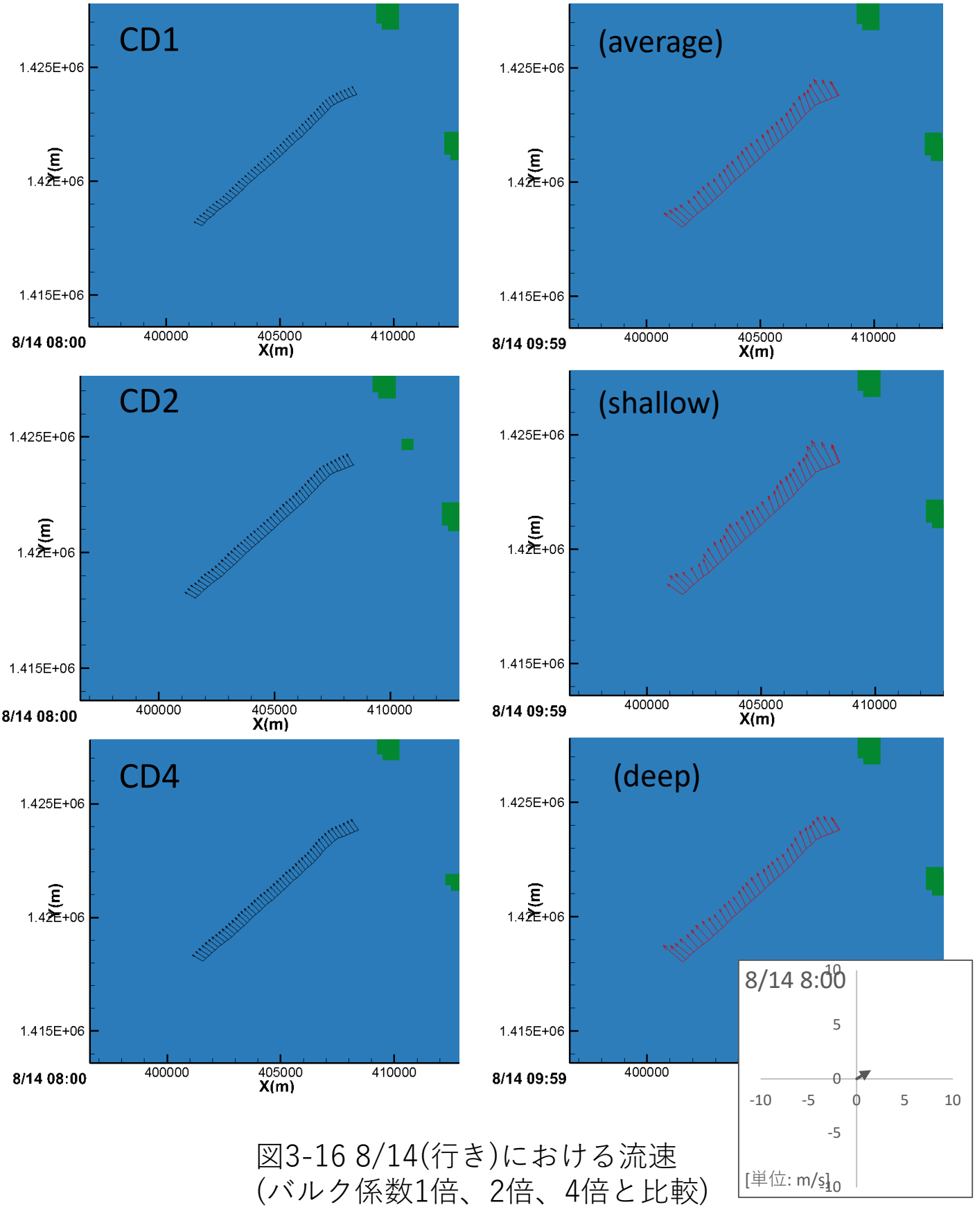
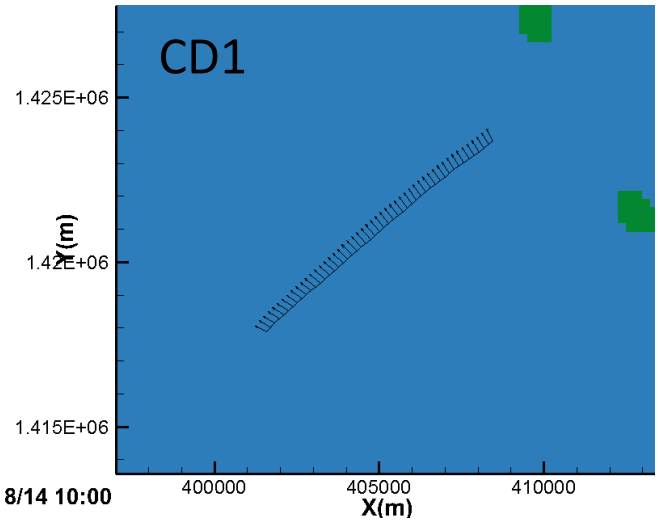
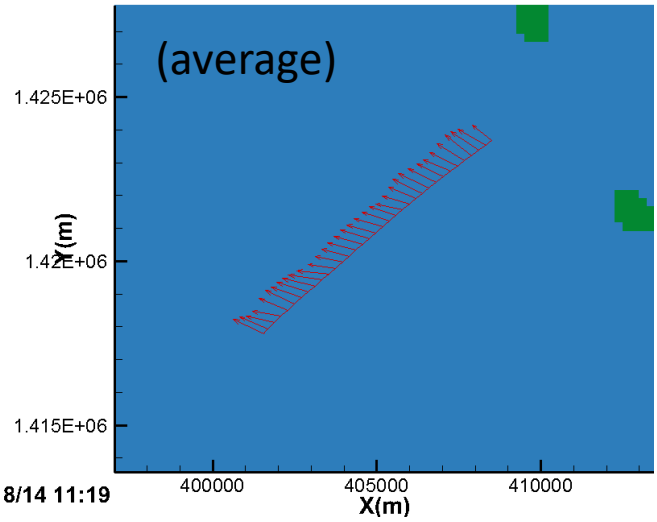
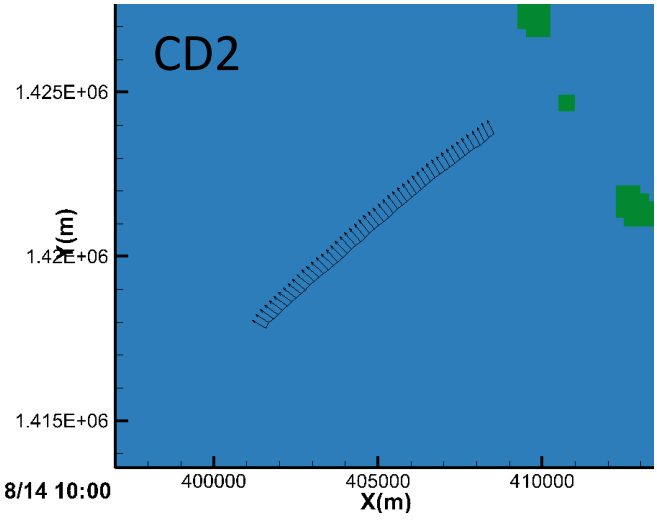
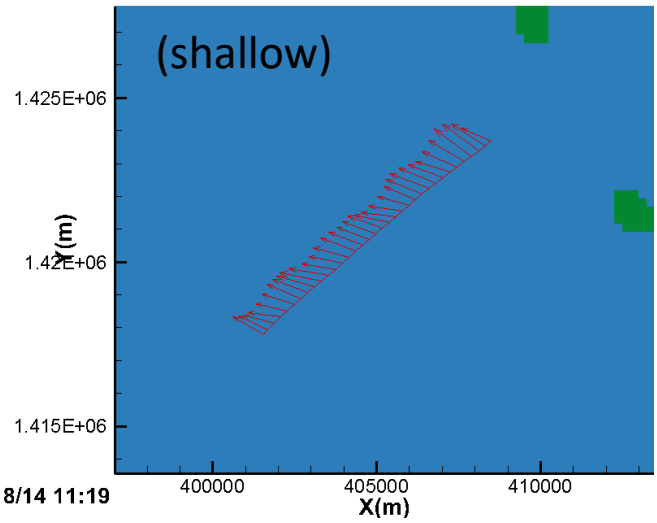


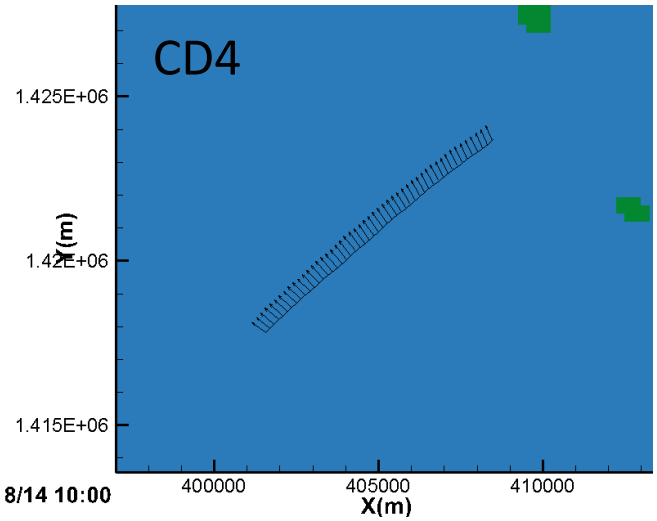
図3-16 8/14(行き)における流速
(バルク係数1倍、2倍、4倍と比較)

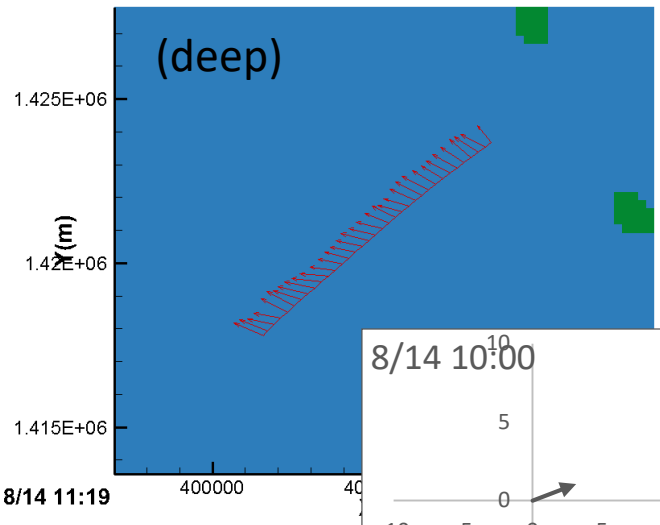












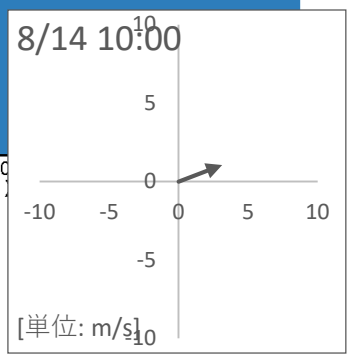


図3-17 8/14(帰り)における流速
(バルク係数1倍、2倍、4倍と比較)

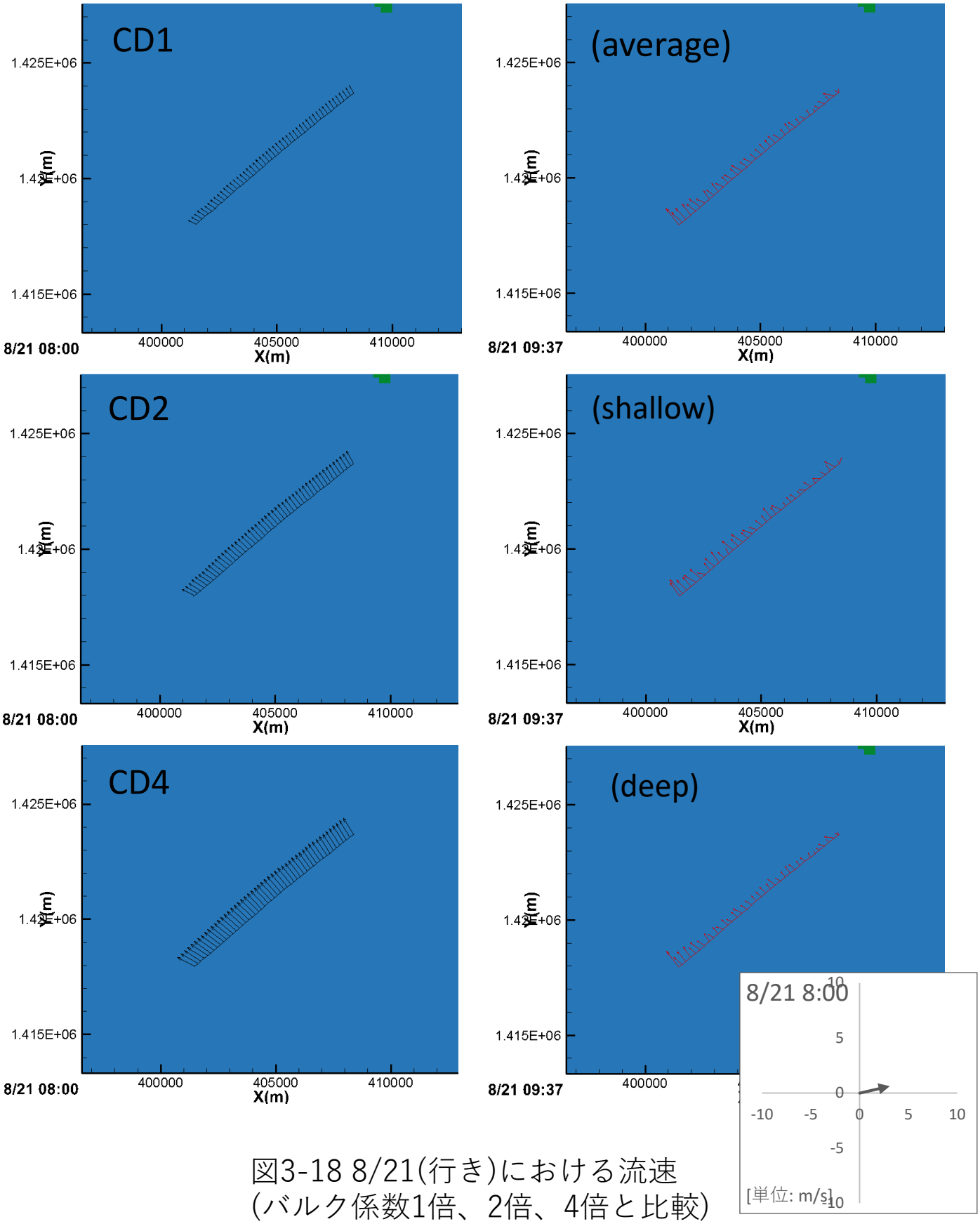
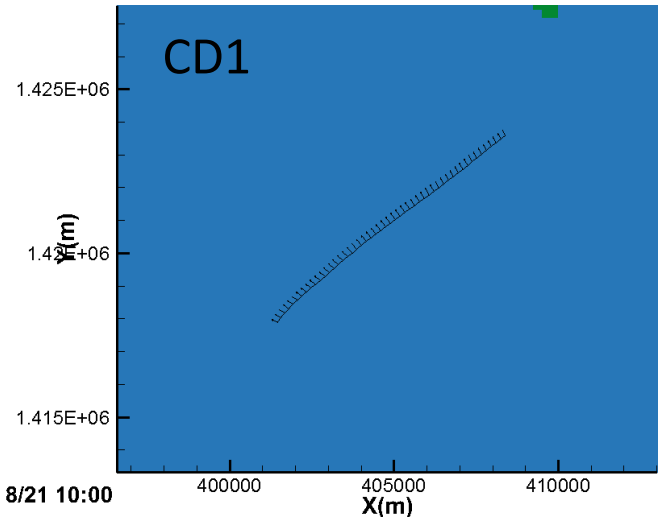
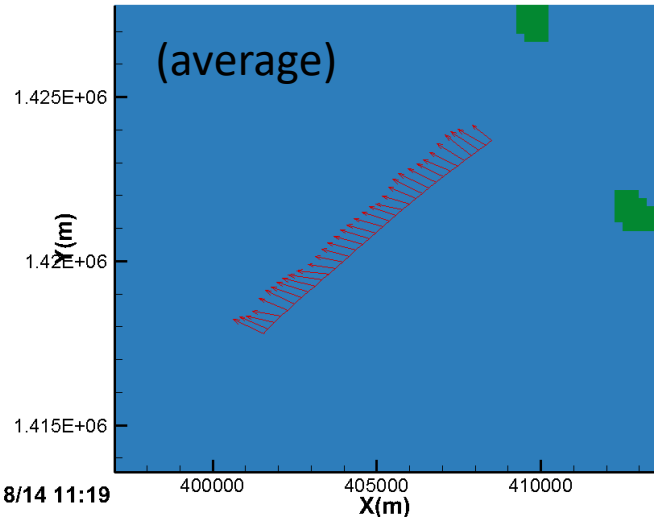
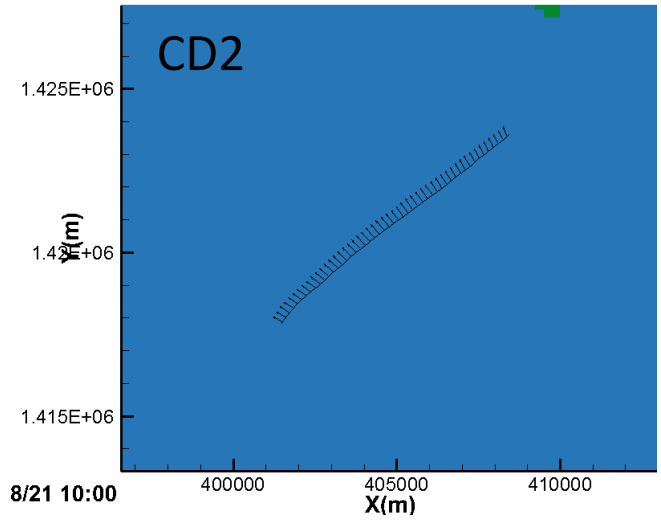
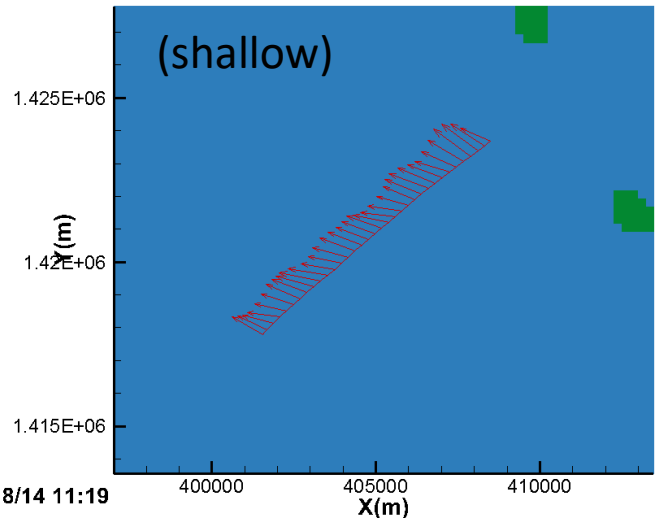


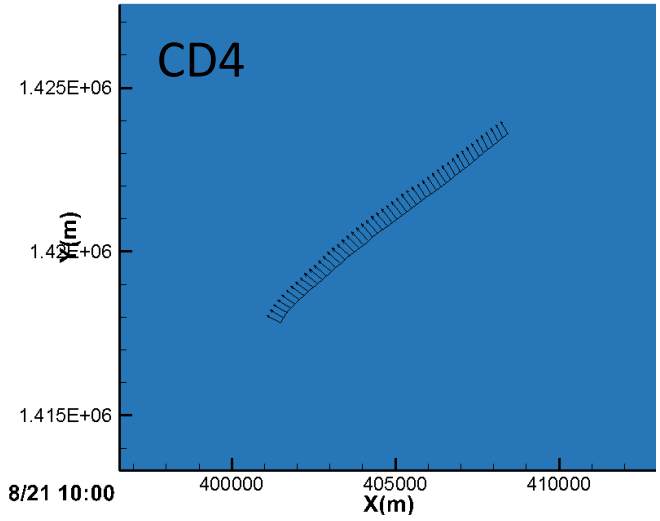
図3-18 8/21(行き)における流速
(バルク係数1倍、2倍、4倍と比較)

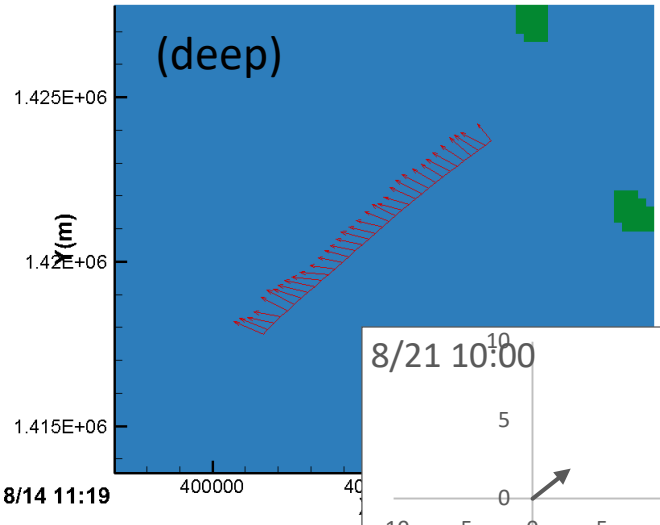












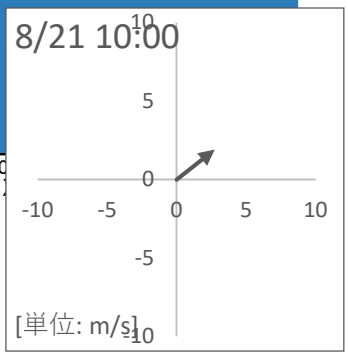
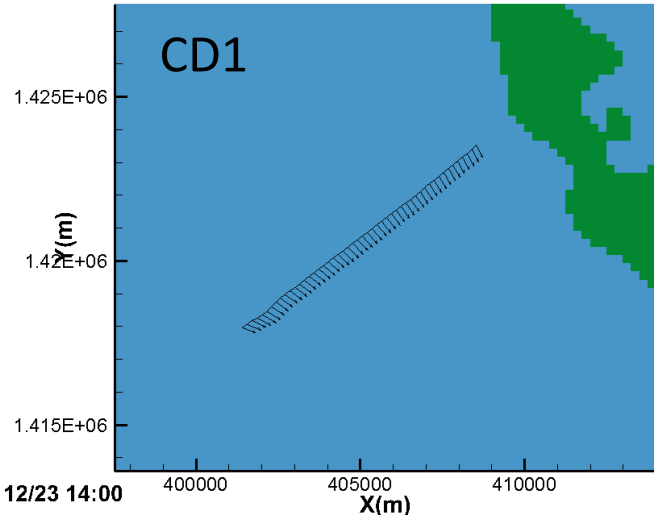
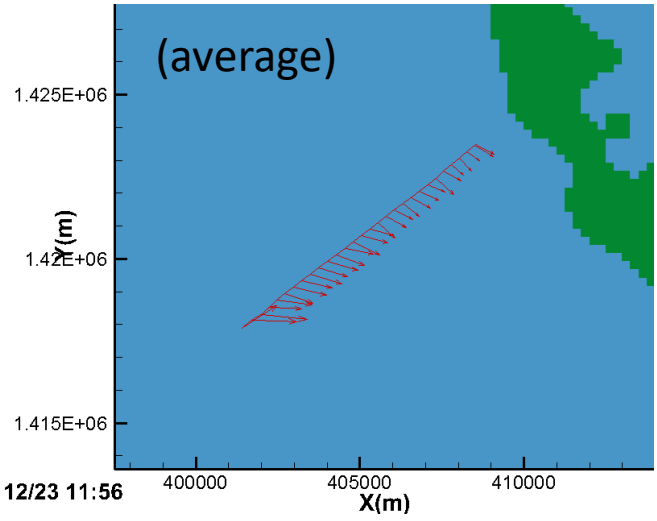
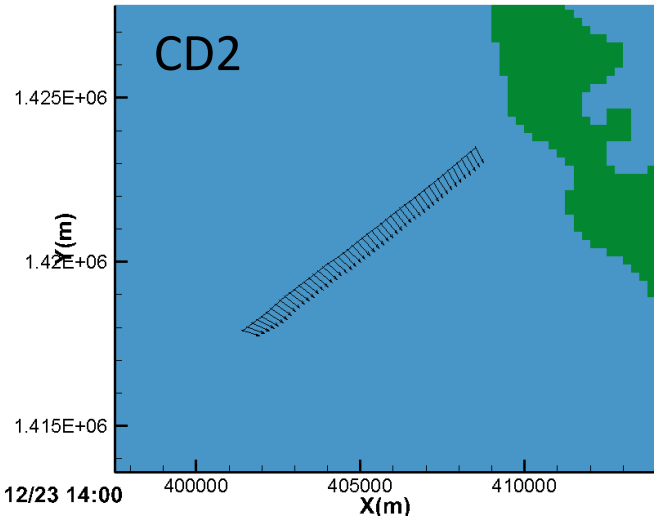
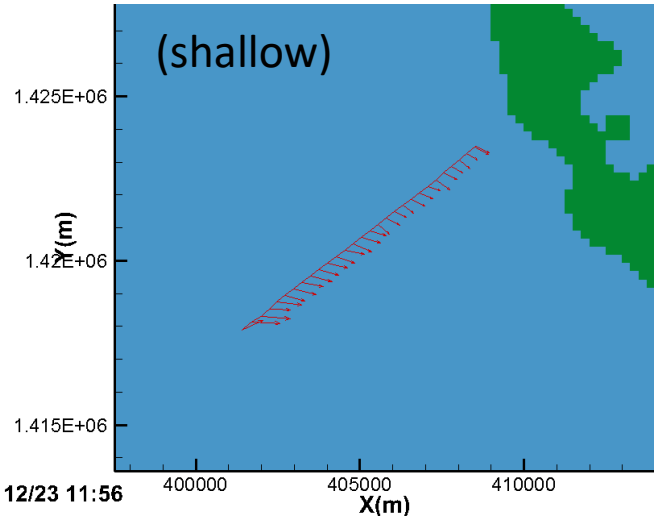


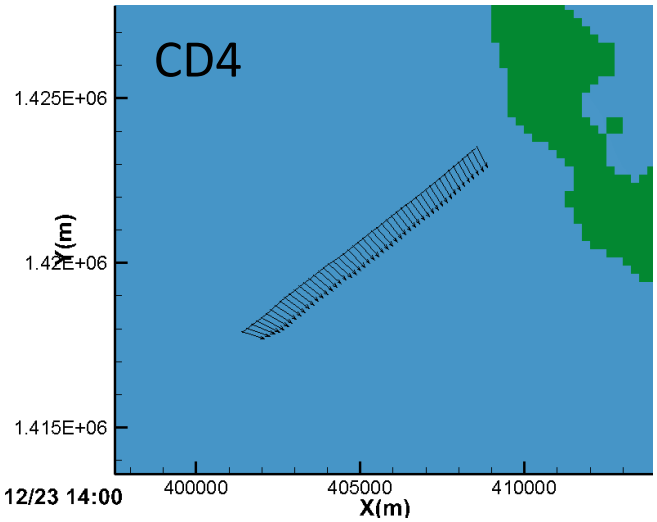
図3-19 8/21(帰り)における流速
(バルク係数1倍、2倍、4倍と比較)

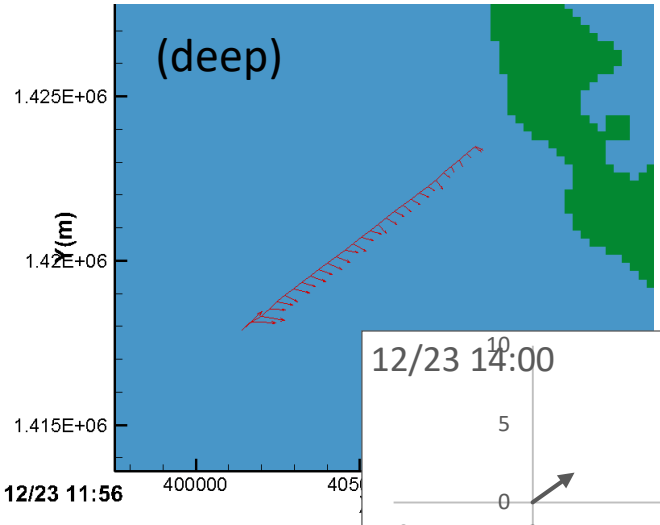












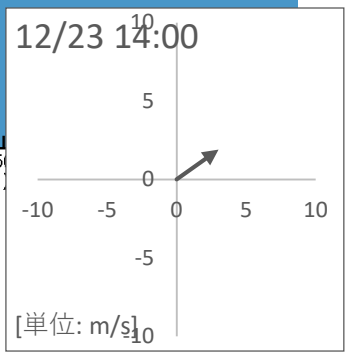


図3-20 12/23(行き)における流速
(バルク係数1倍、2倍、4倍と比較)

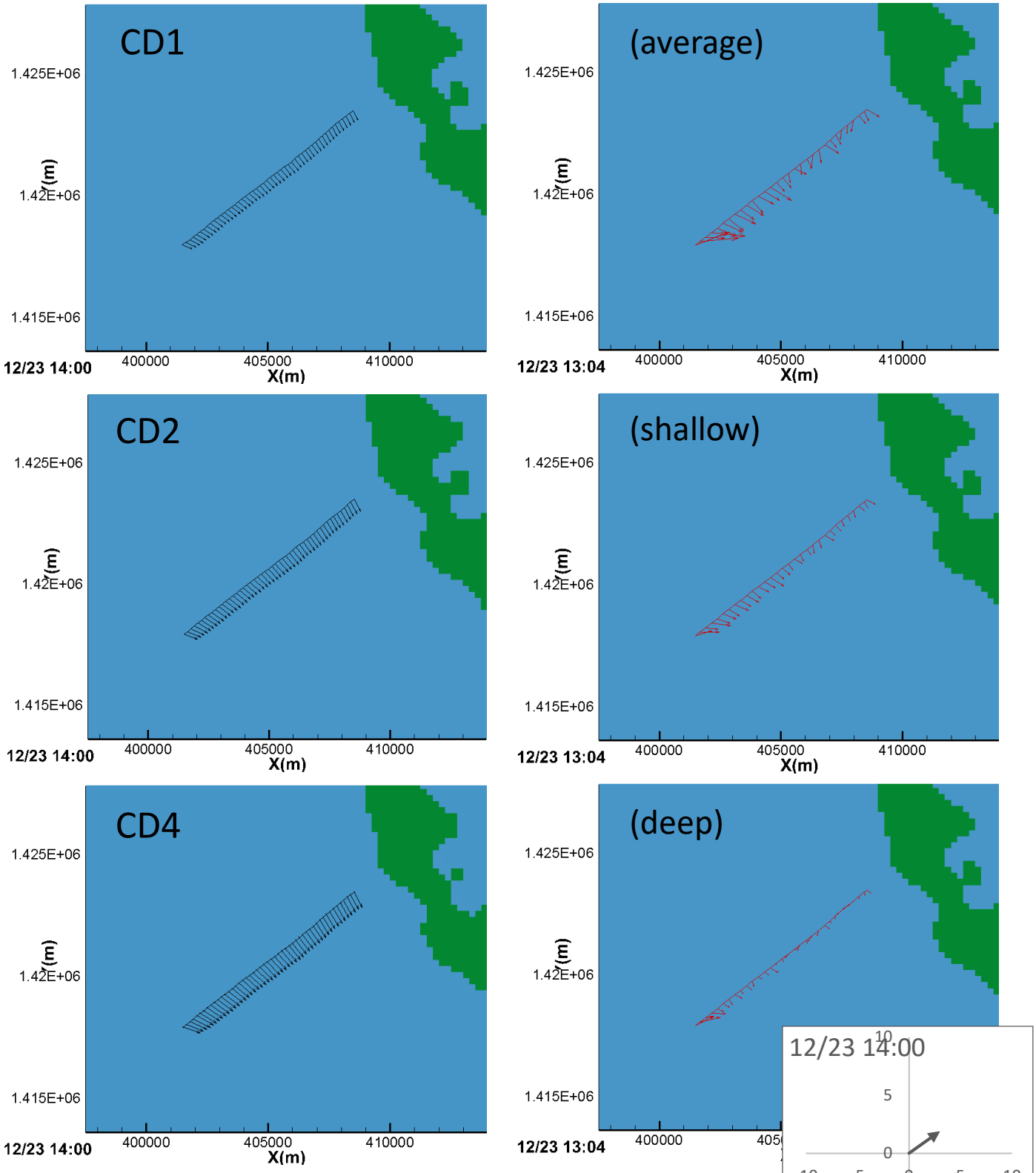


図3-21 12/23(帰り)における流速
(バルク係数1倍、2倍、4倍と比較)

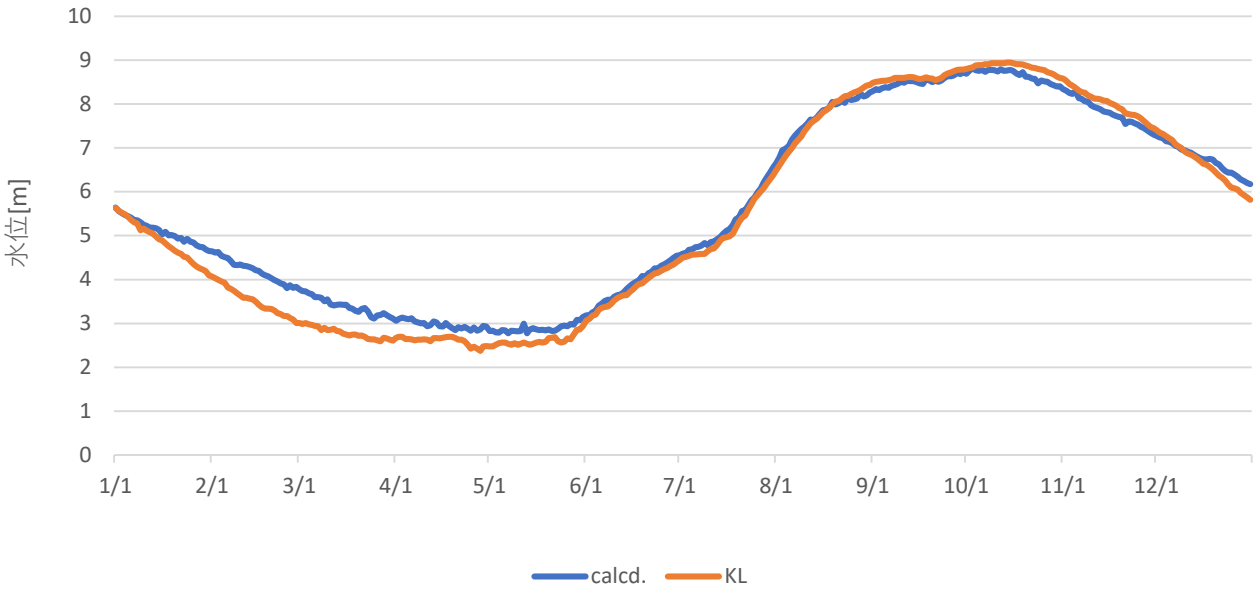


図3-22 Kampong Luongにおける水位
(バルク係数を従来の2倍として求めた計算値と観測値の比較)

図表集
第4章

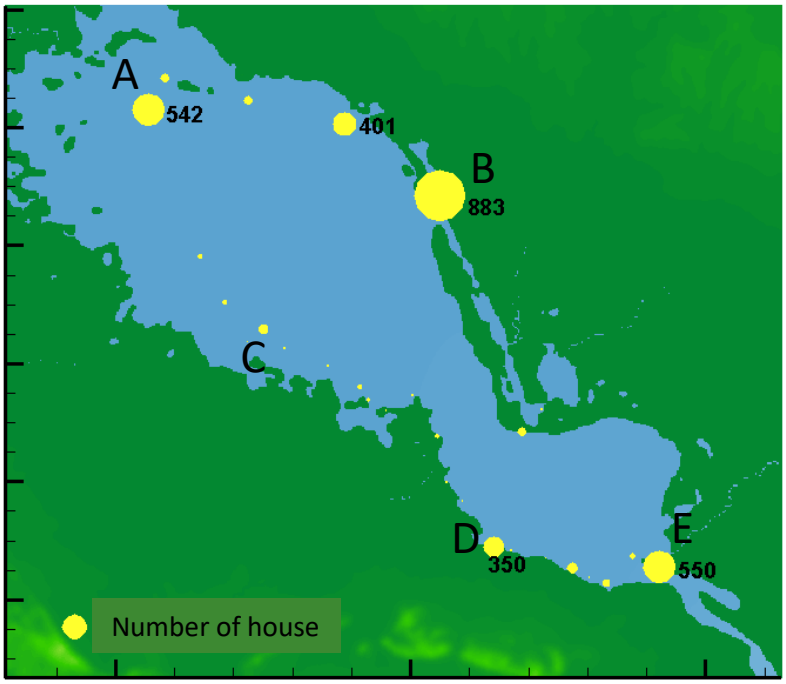


図4-1 水上集落の位置と主要な集落の住戸数

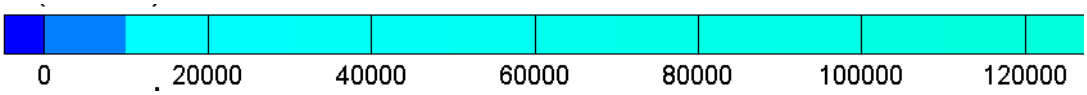


図4-2 大腸菌濃度コンター図の凡例(低濃度域)

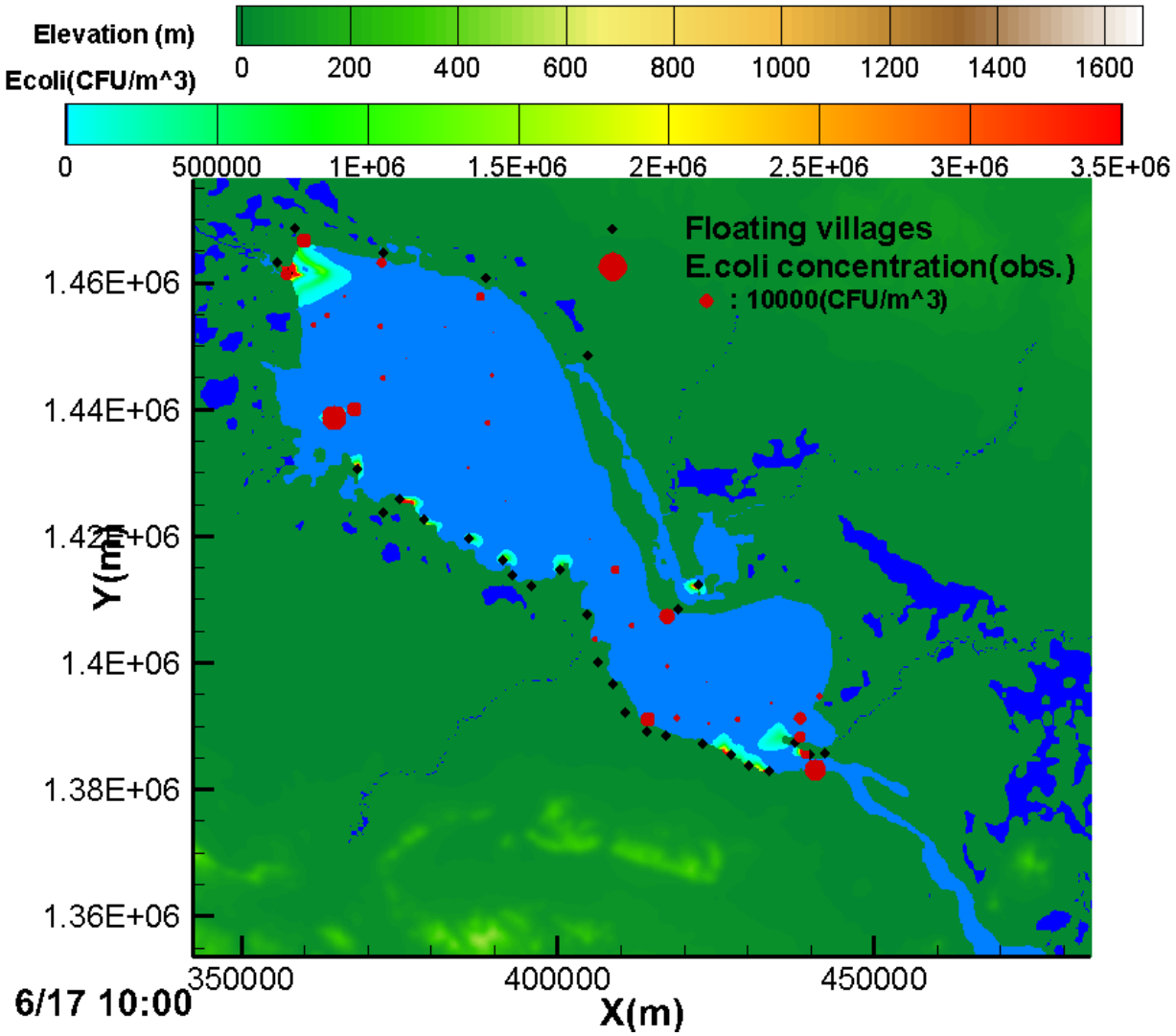


図4-3 大腸菌濃度の観測値と計算値の比較

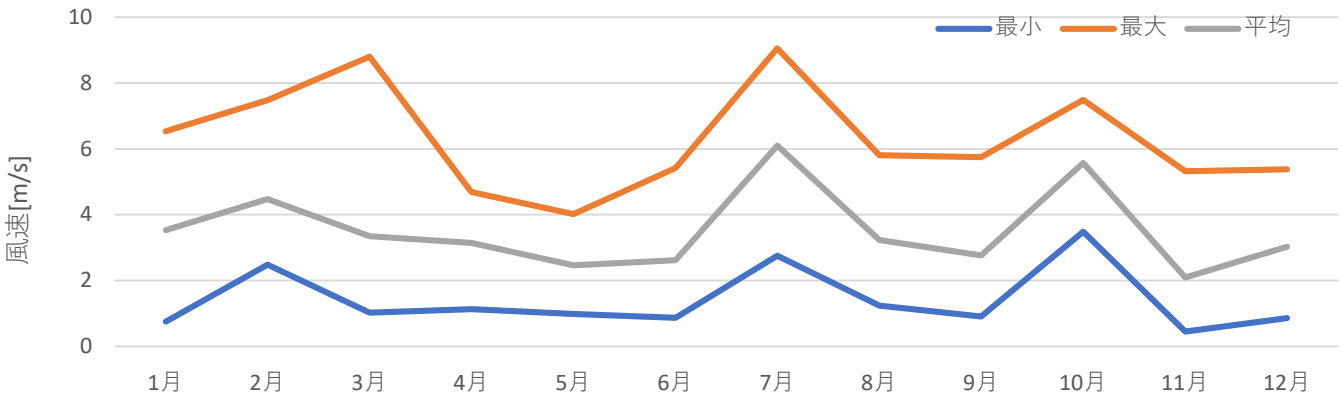
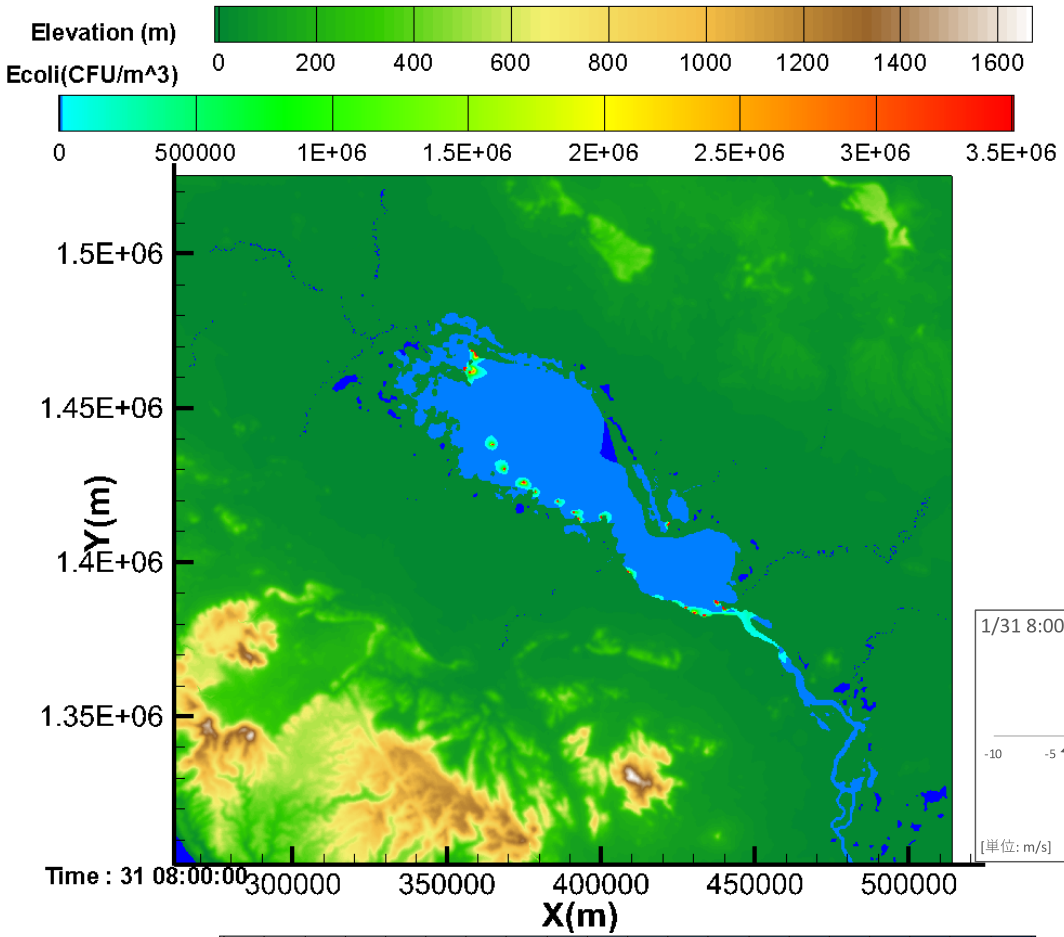


図4-4 各月最終日の最小・最大・平均風速



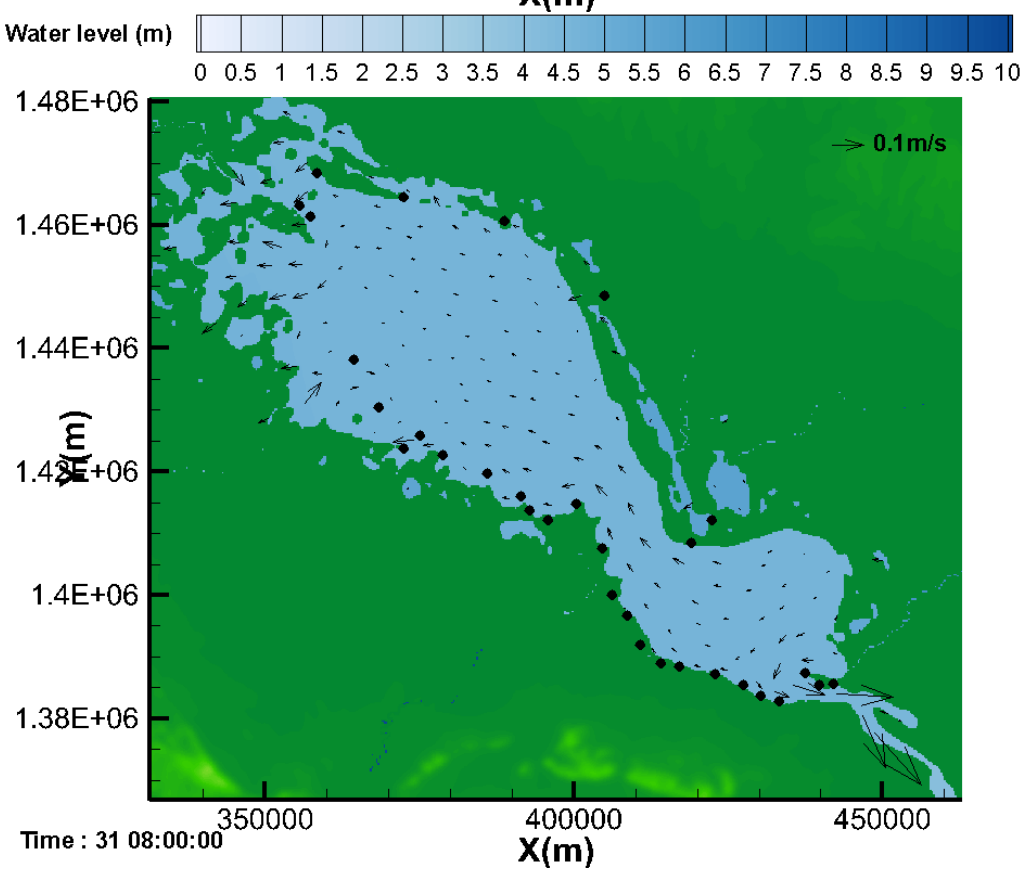
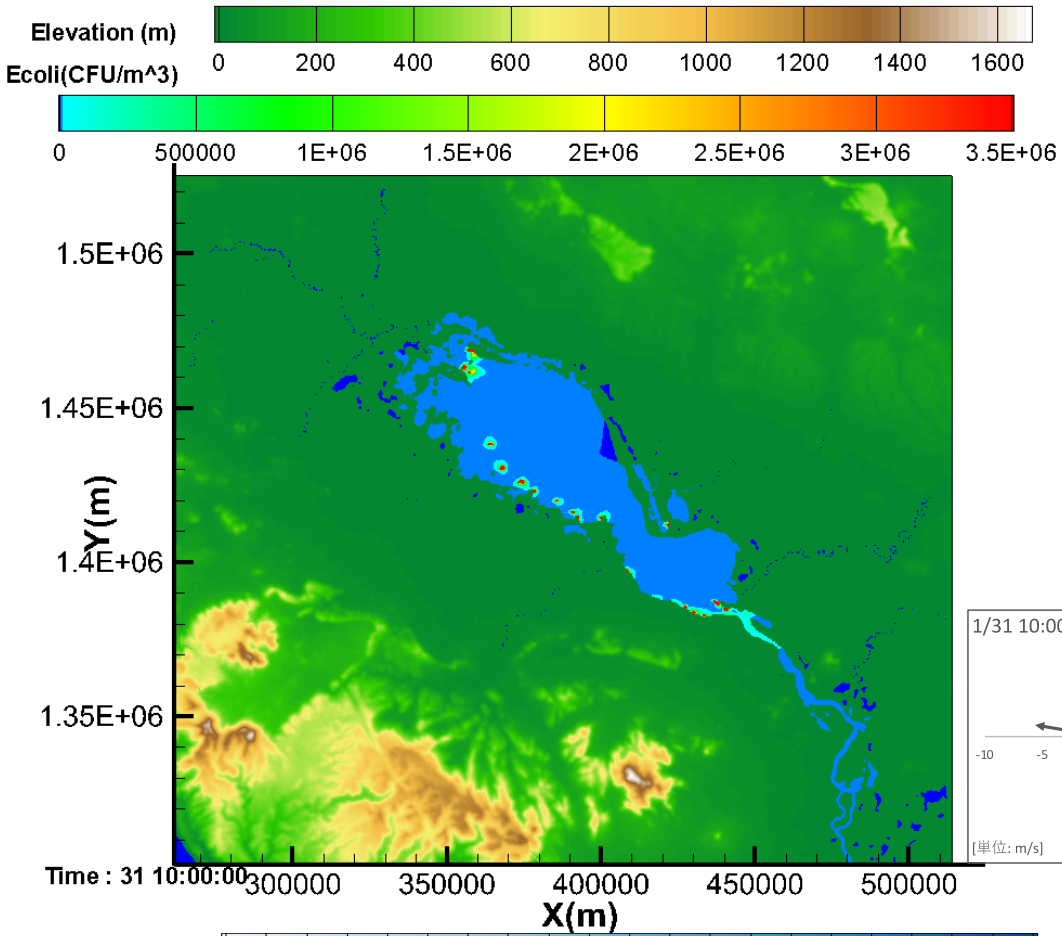


図4-5 1月31日8:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



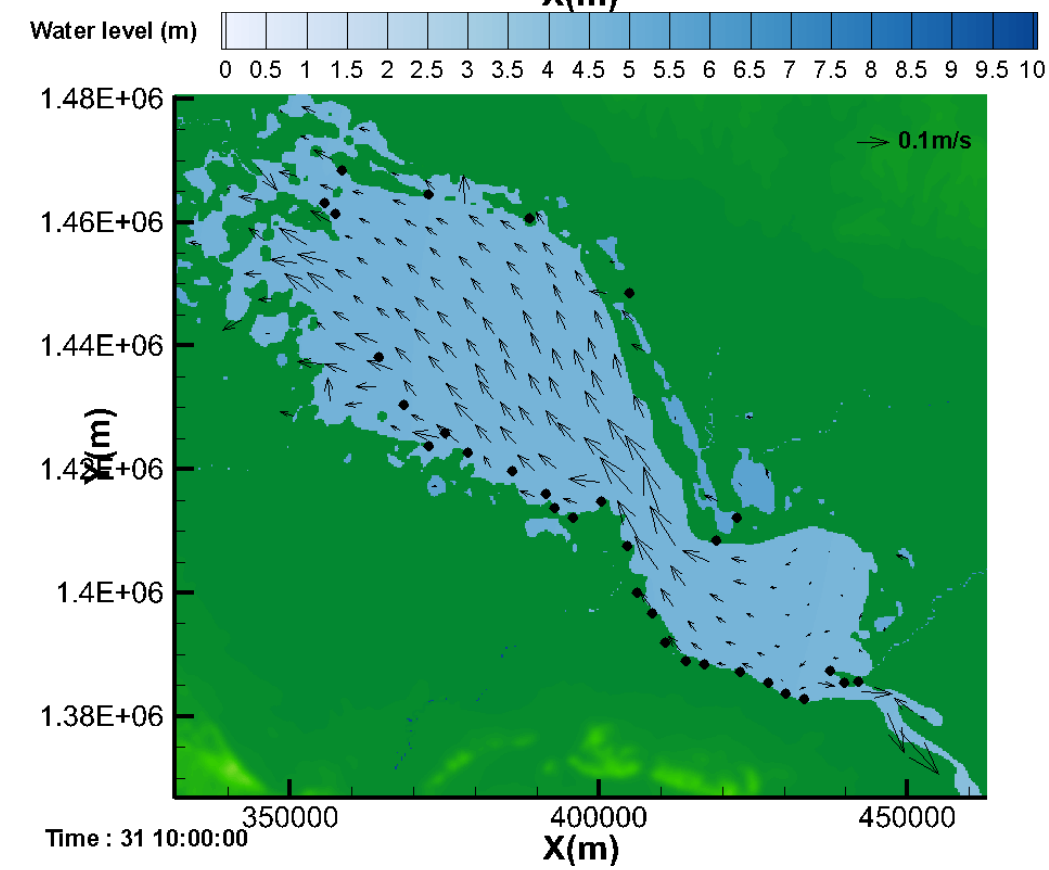
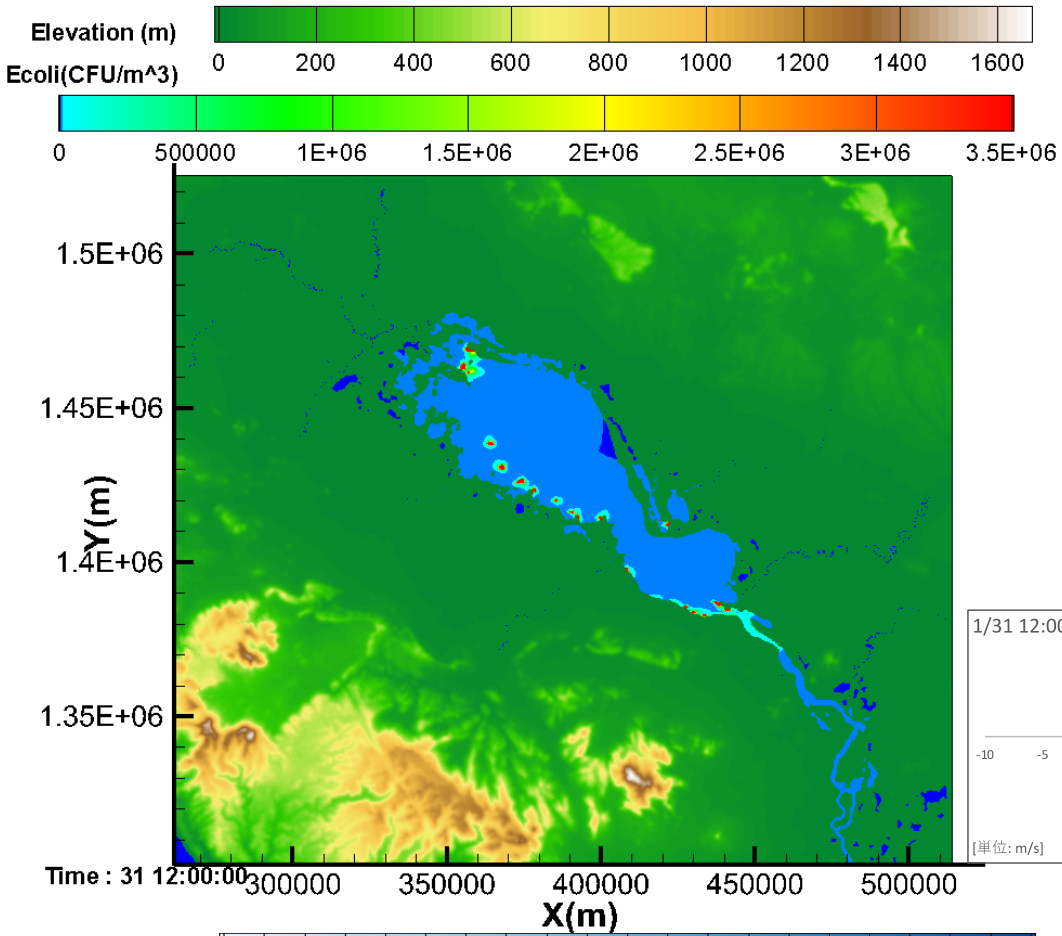


図4-6 1月31日10:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



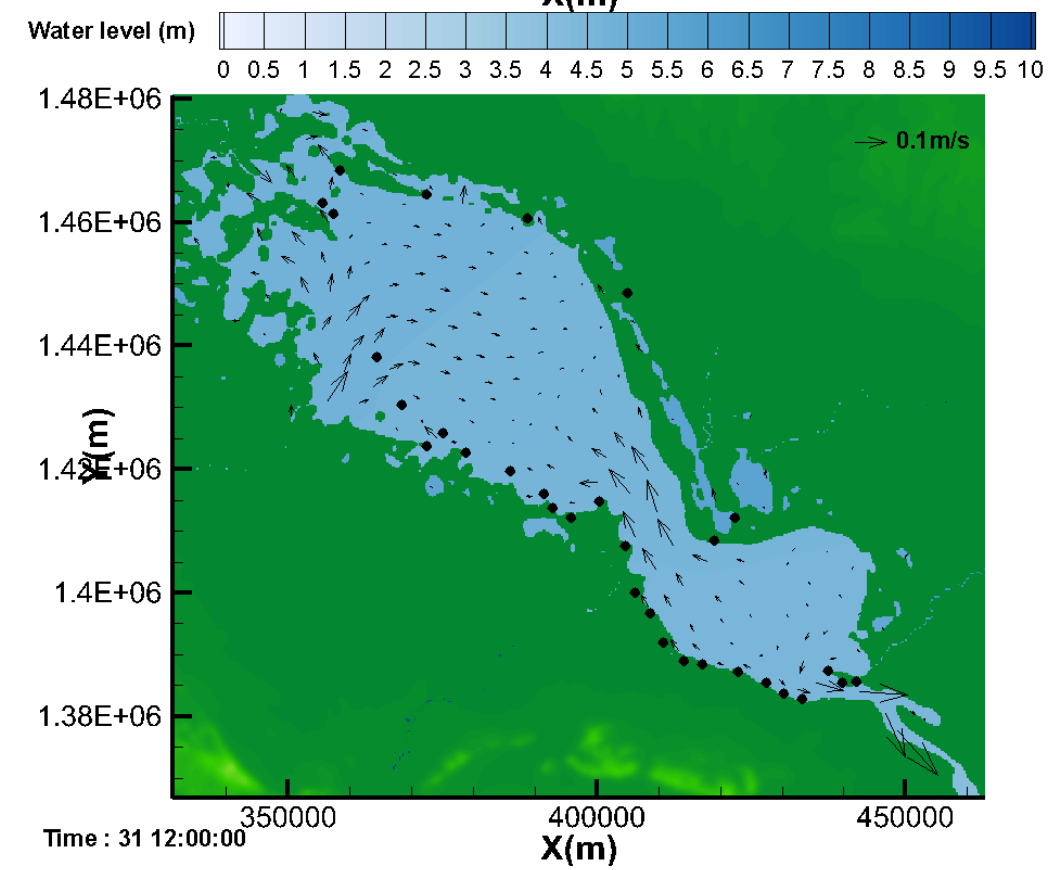


図4-7 1月31日12:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

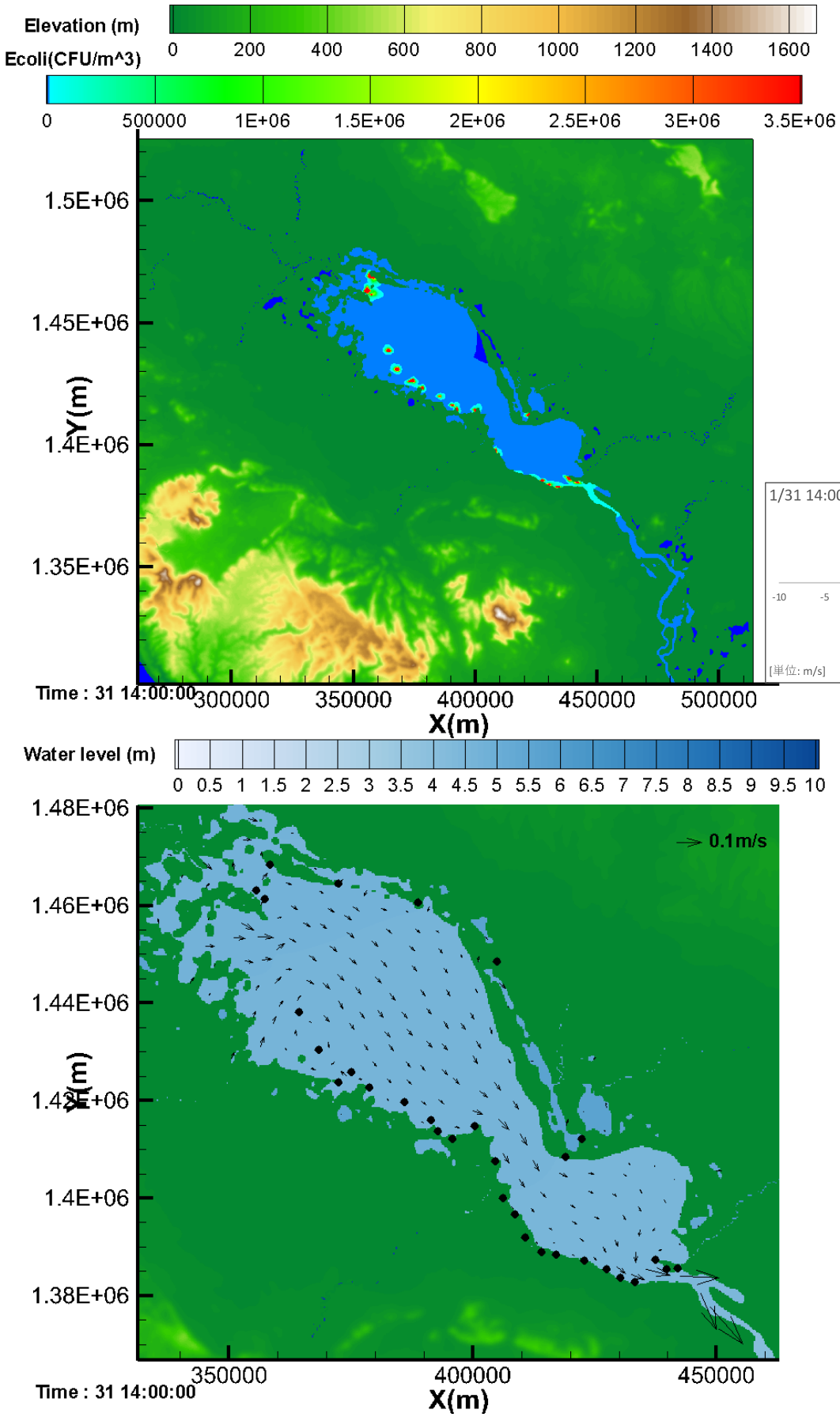


図4-8 1月31日14:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

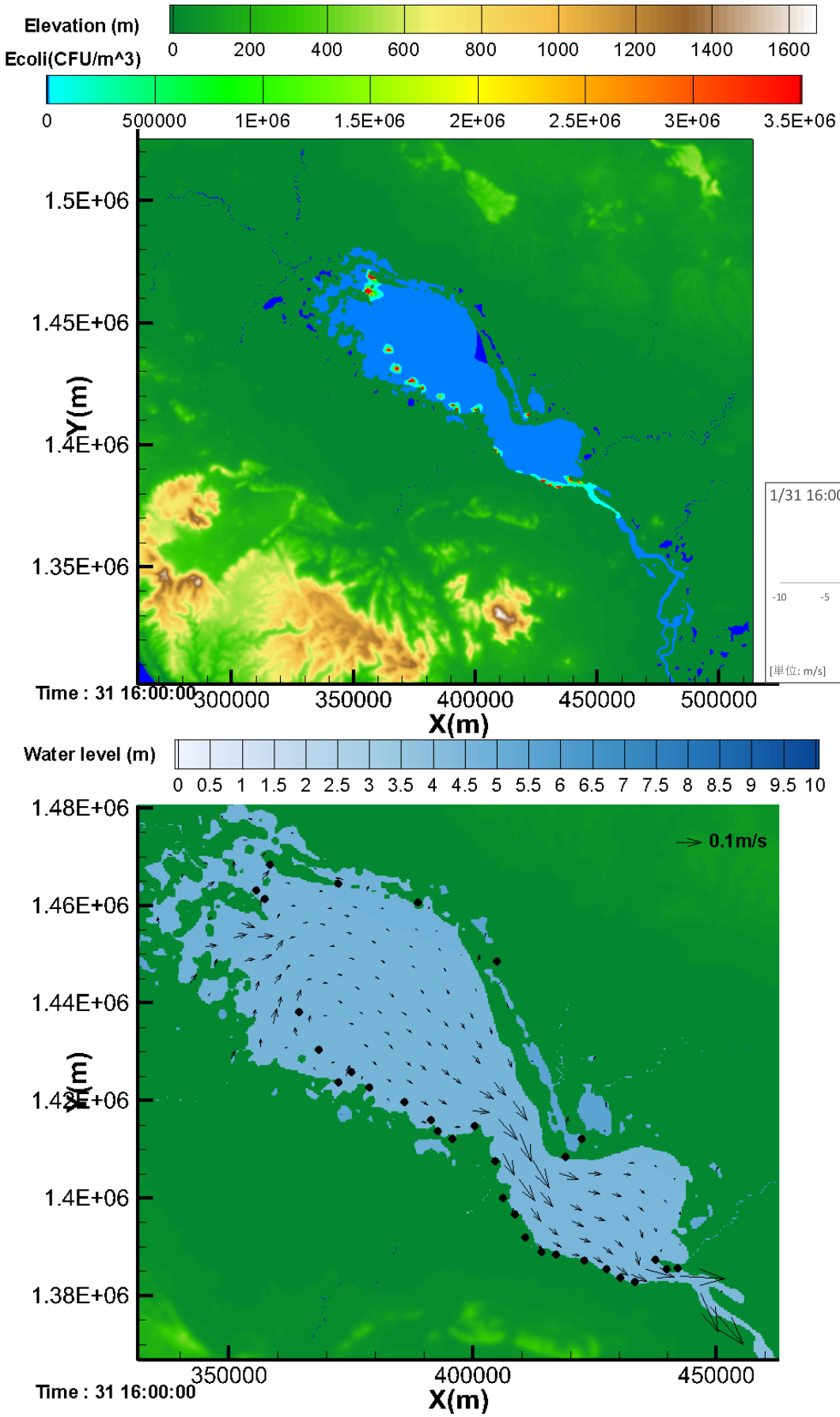


図4-9 1月31日16:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

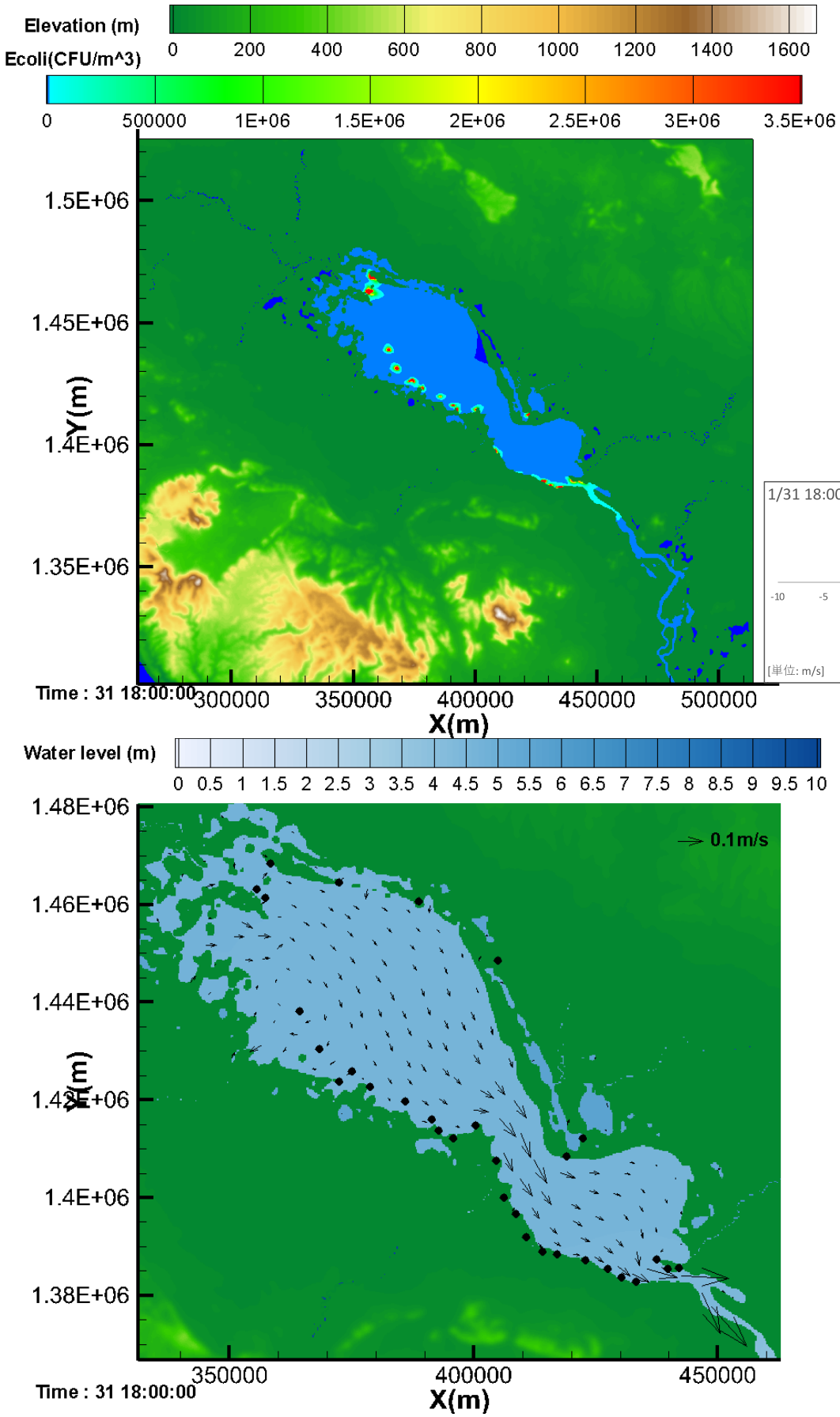
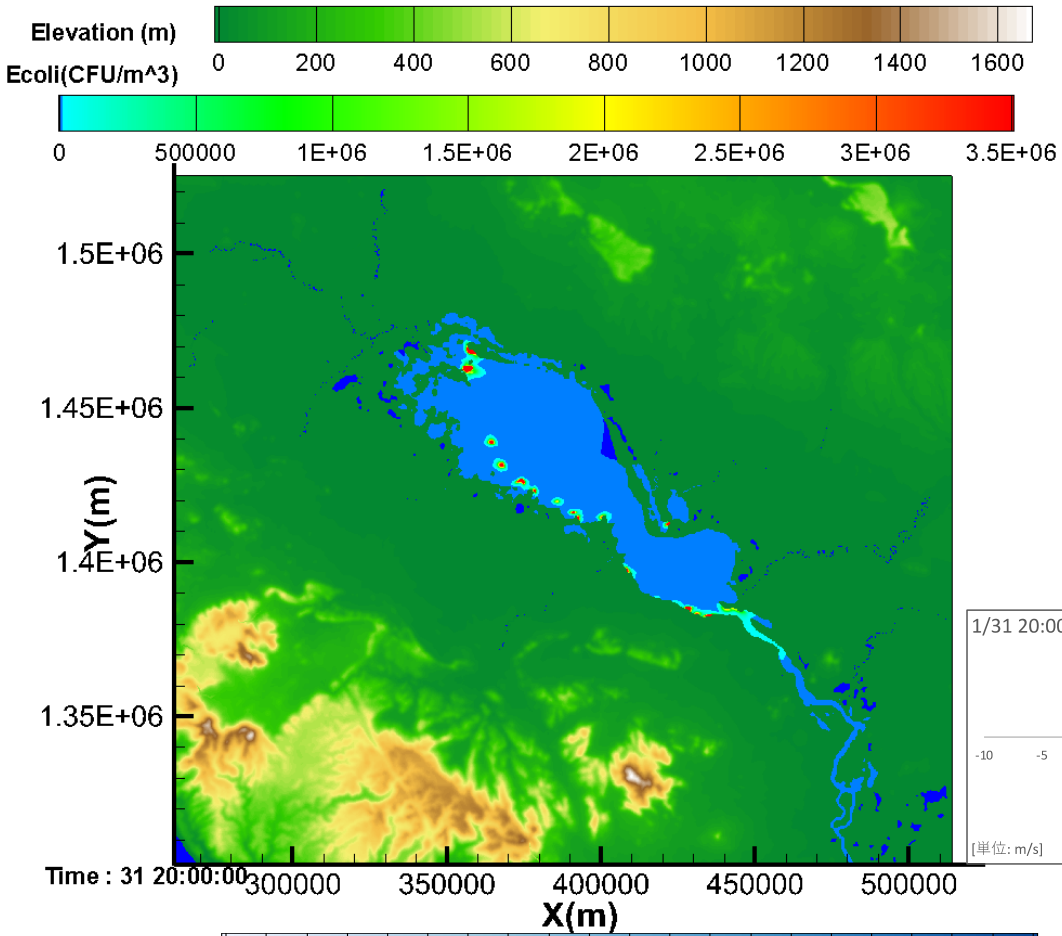


図4-10 1月31日18:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



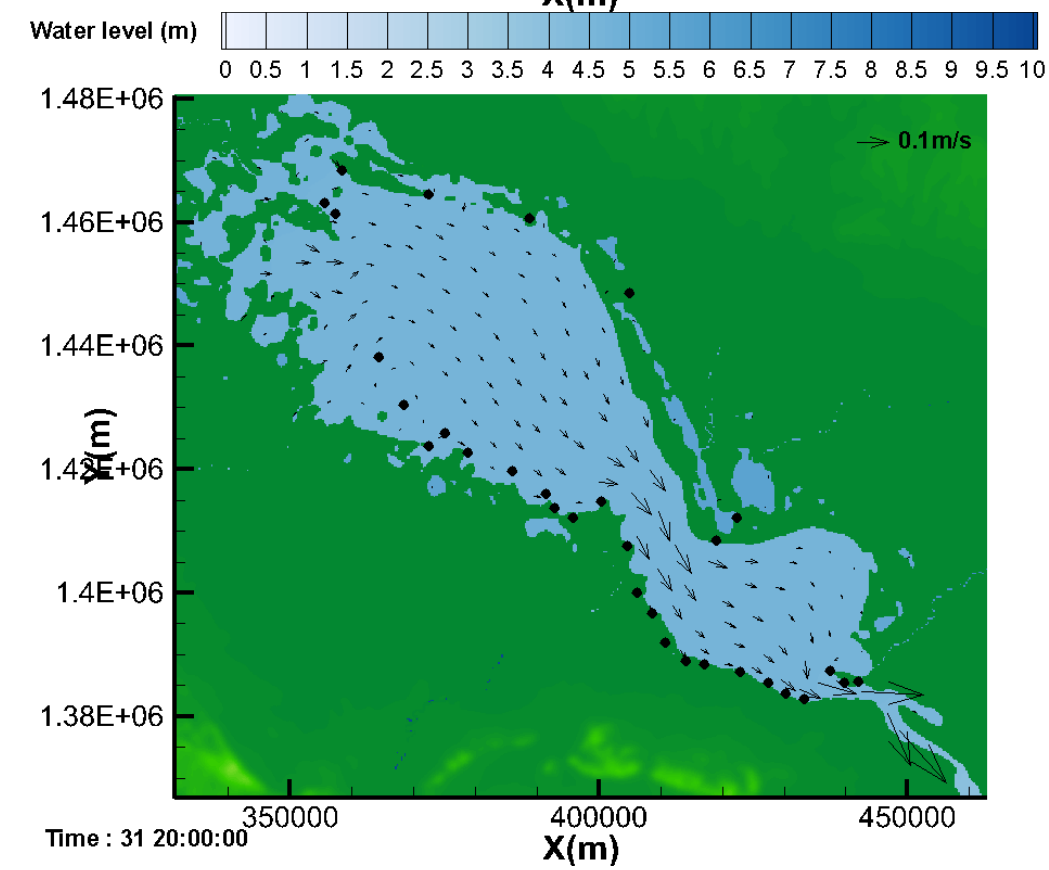
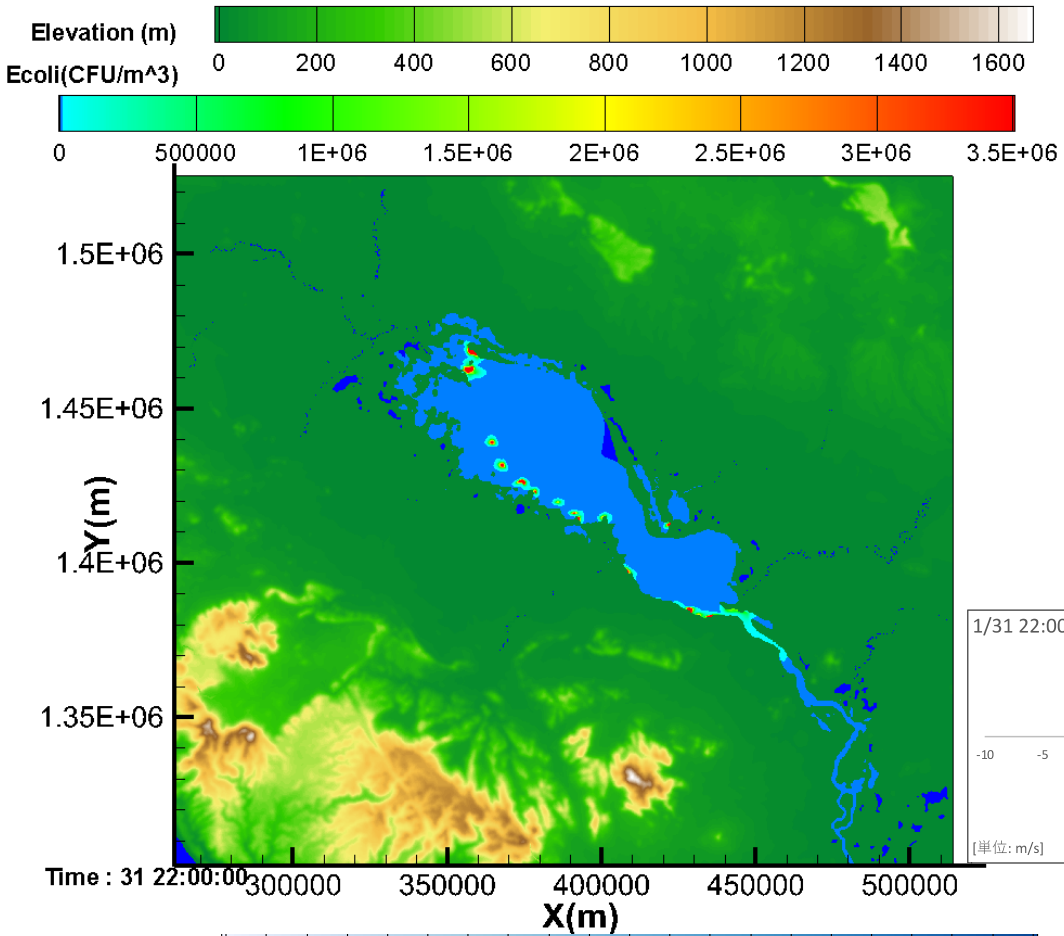


図4-11 1月31日20:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



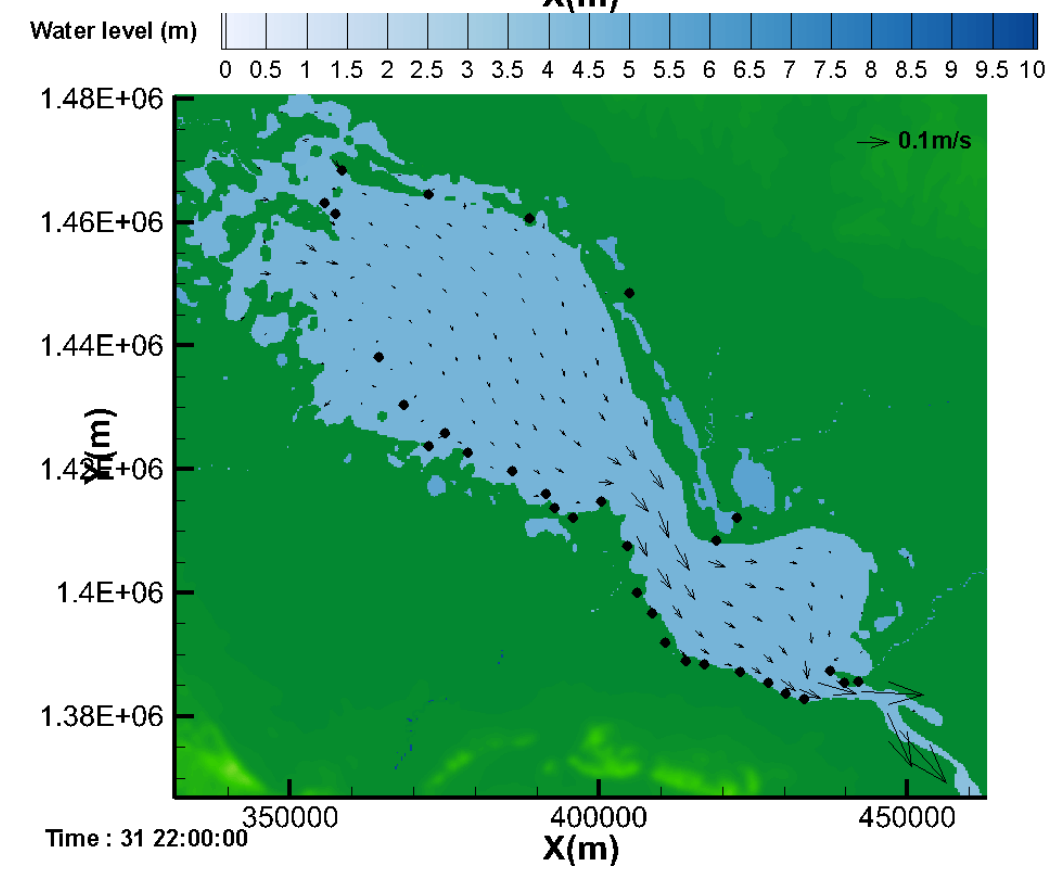
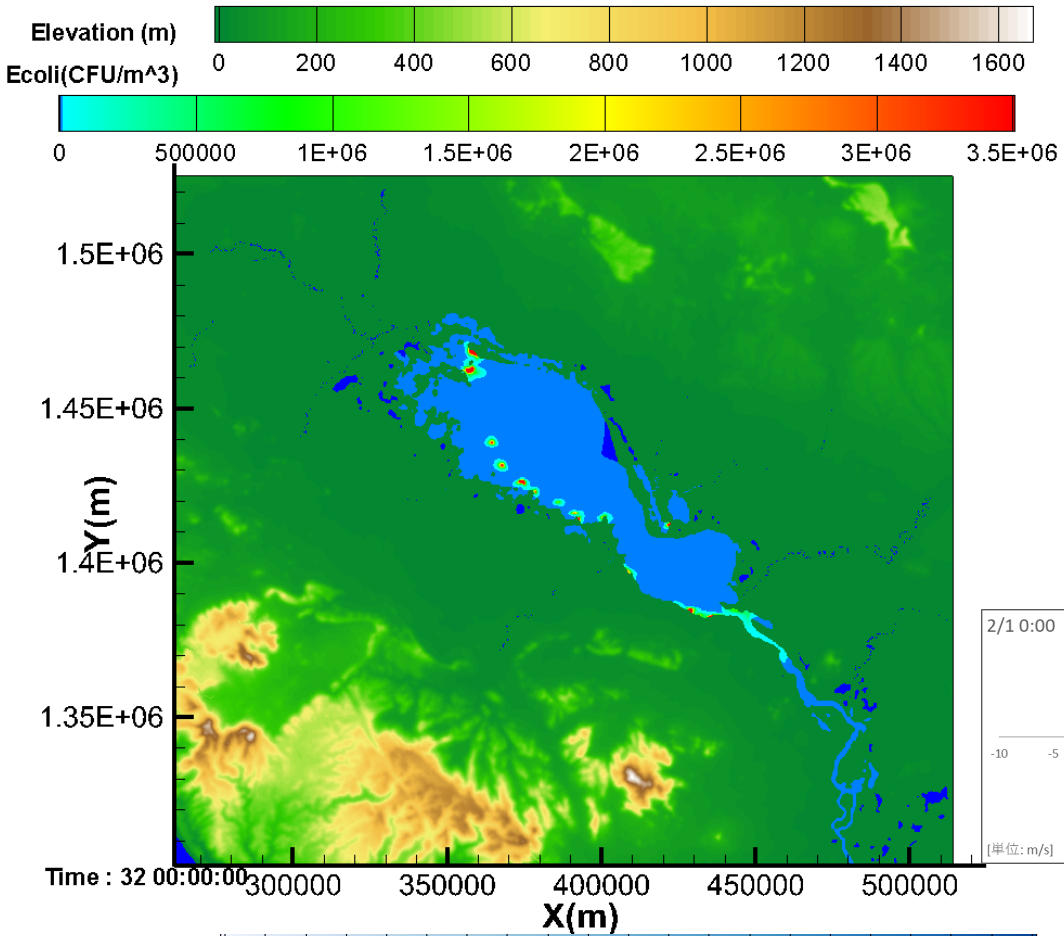


図4-12 1月31日22:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



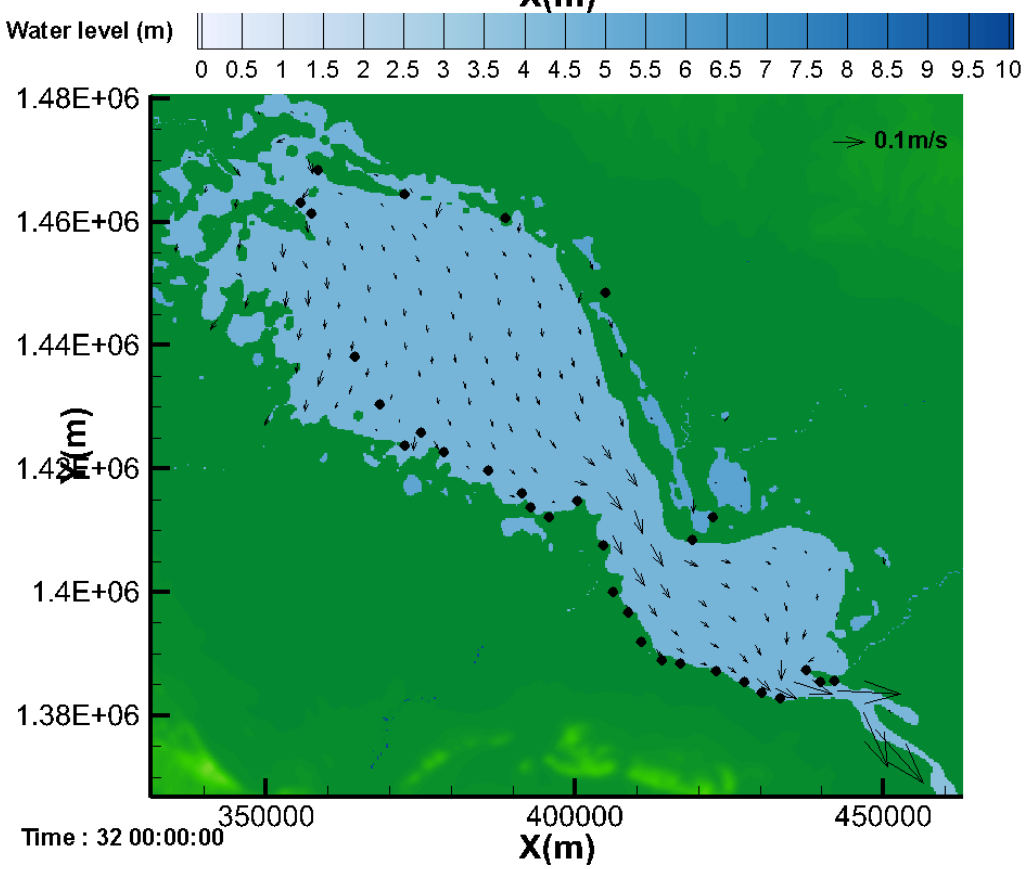
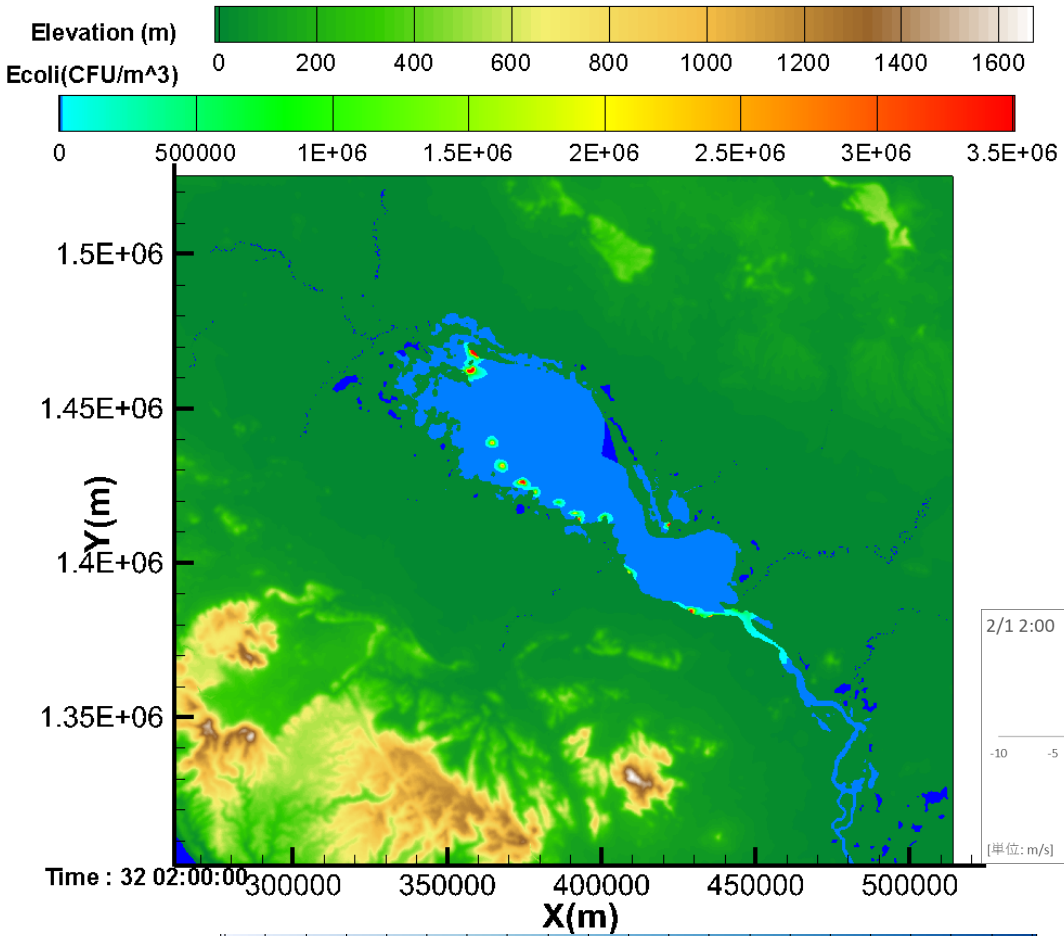


図4-13 2月1日0:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



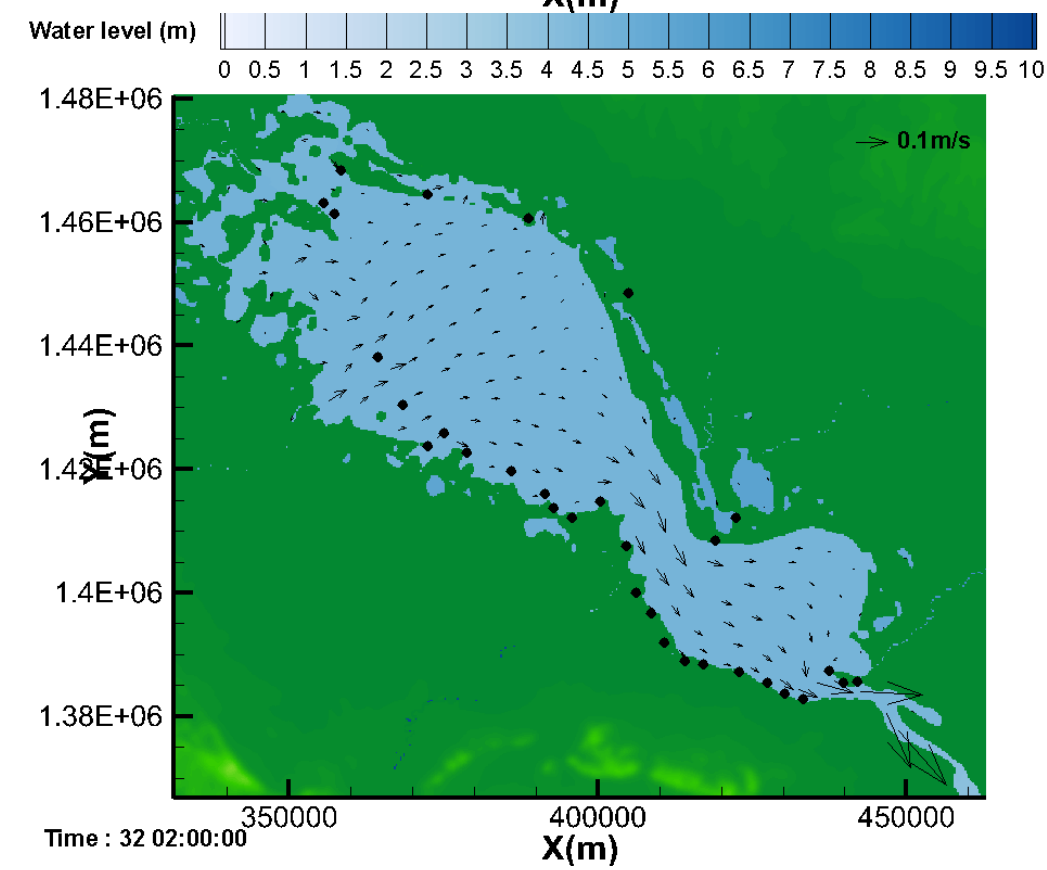
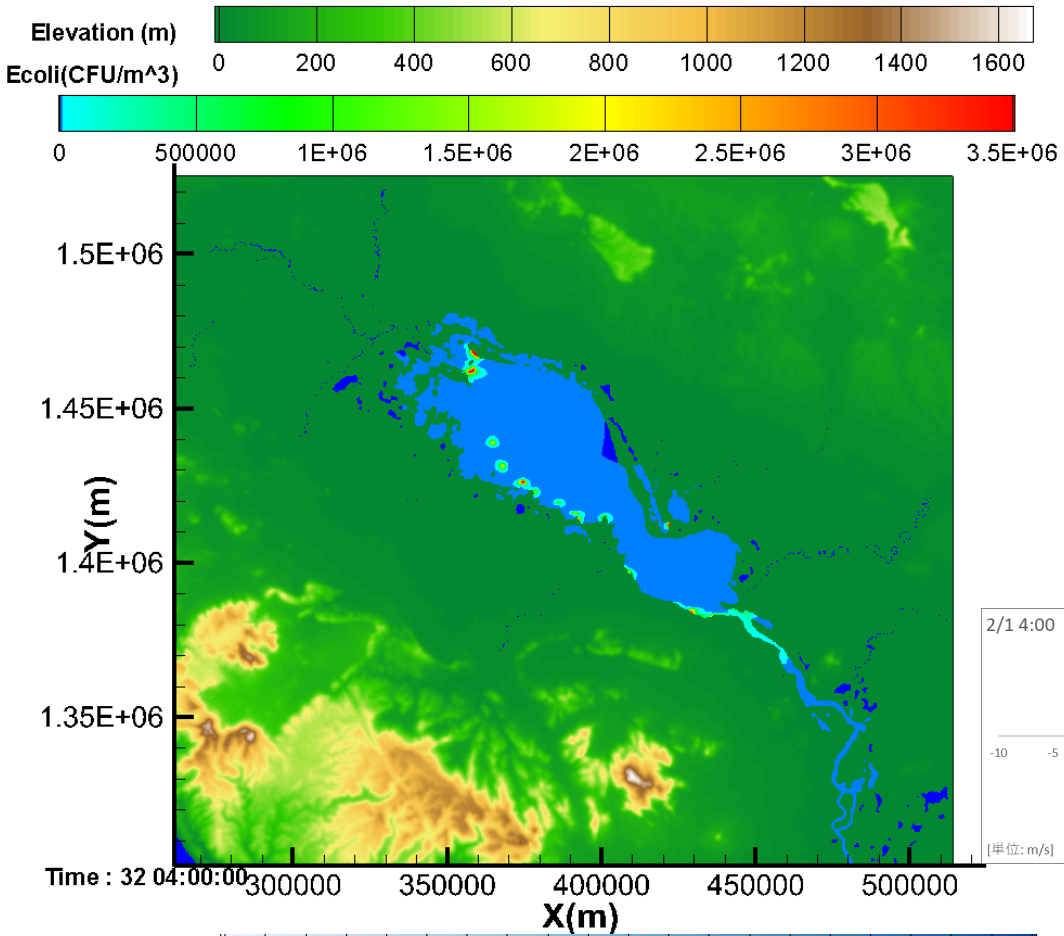


図4-14 2月1日2:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



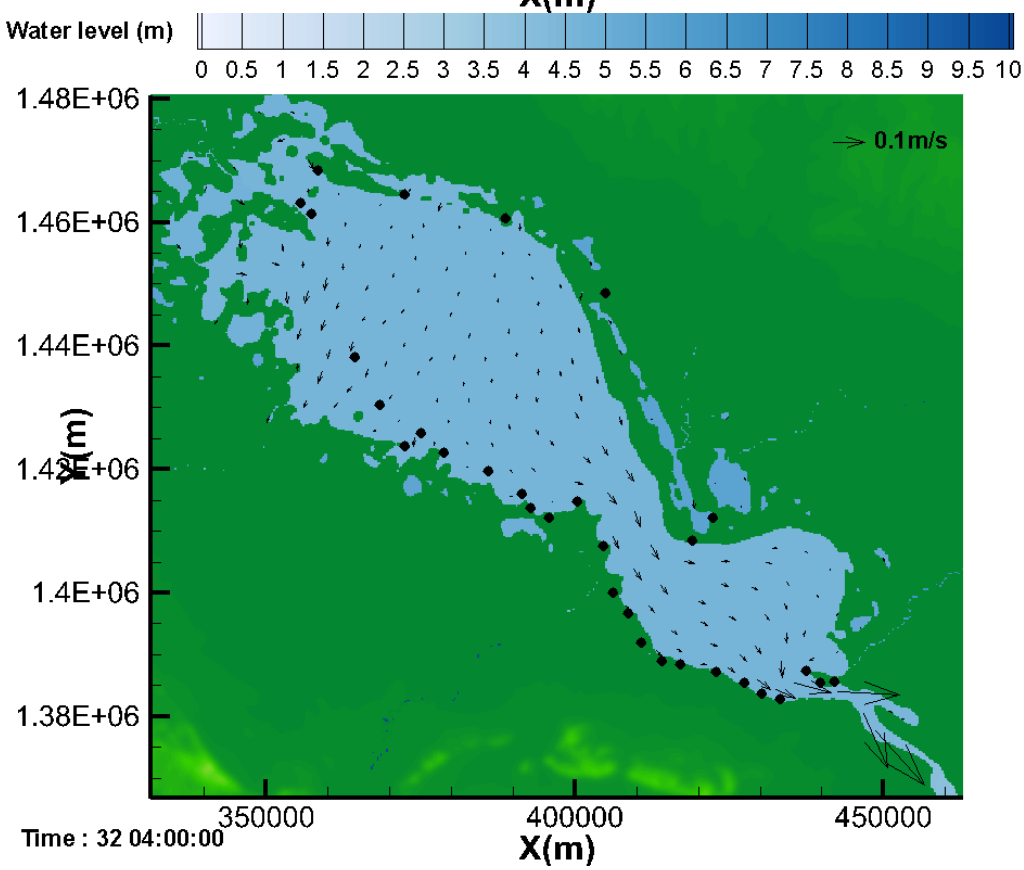
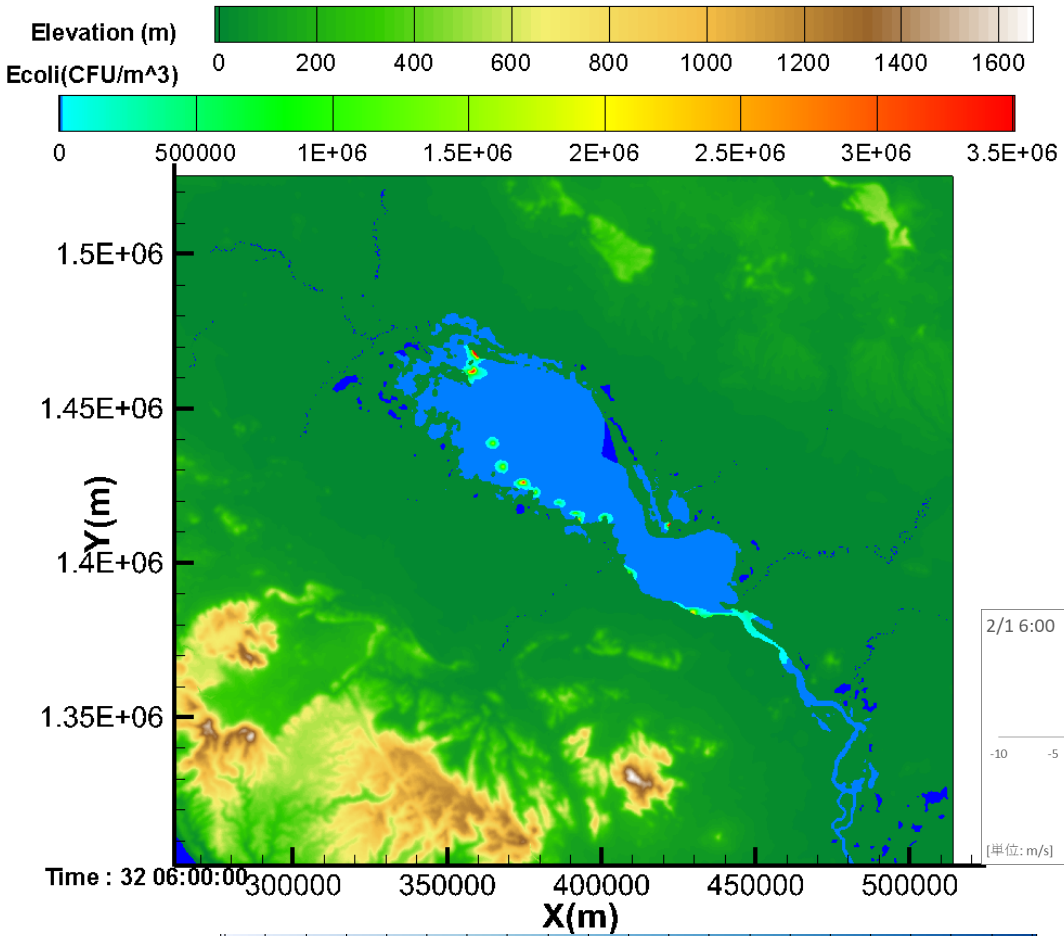


図4-15 2月1日4:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



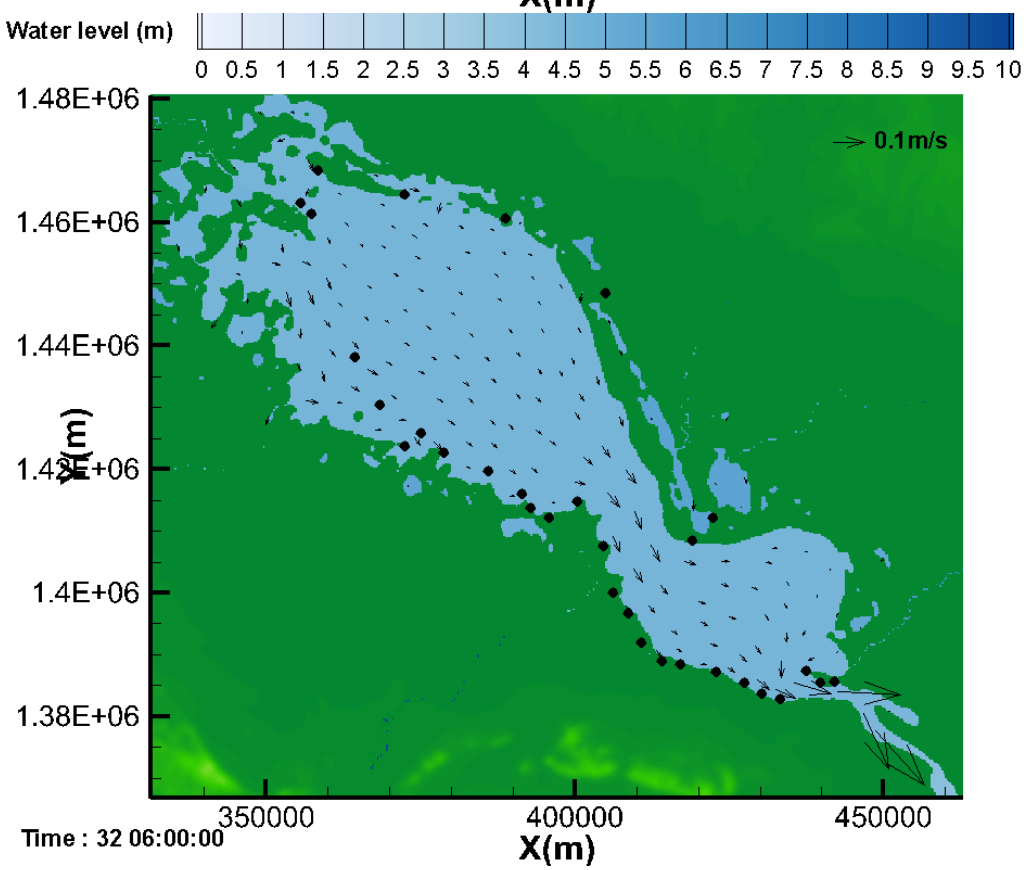


図4-16 2月1日6:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

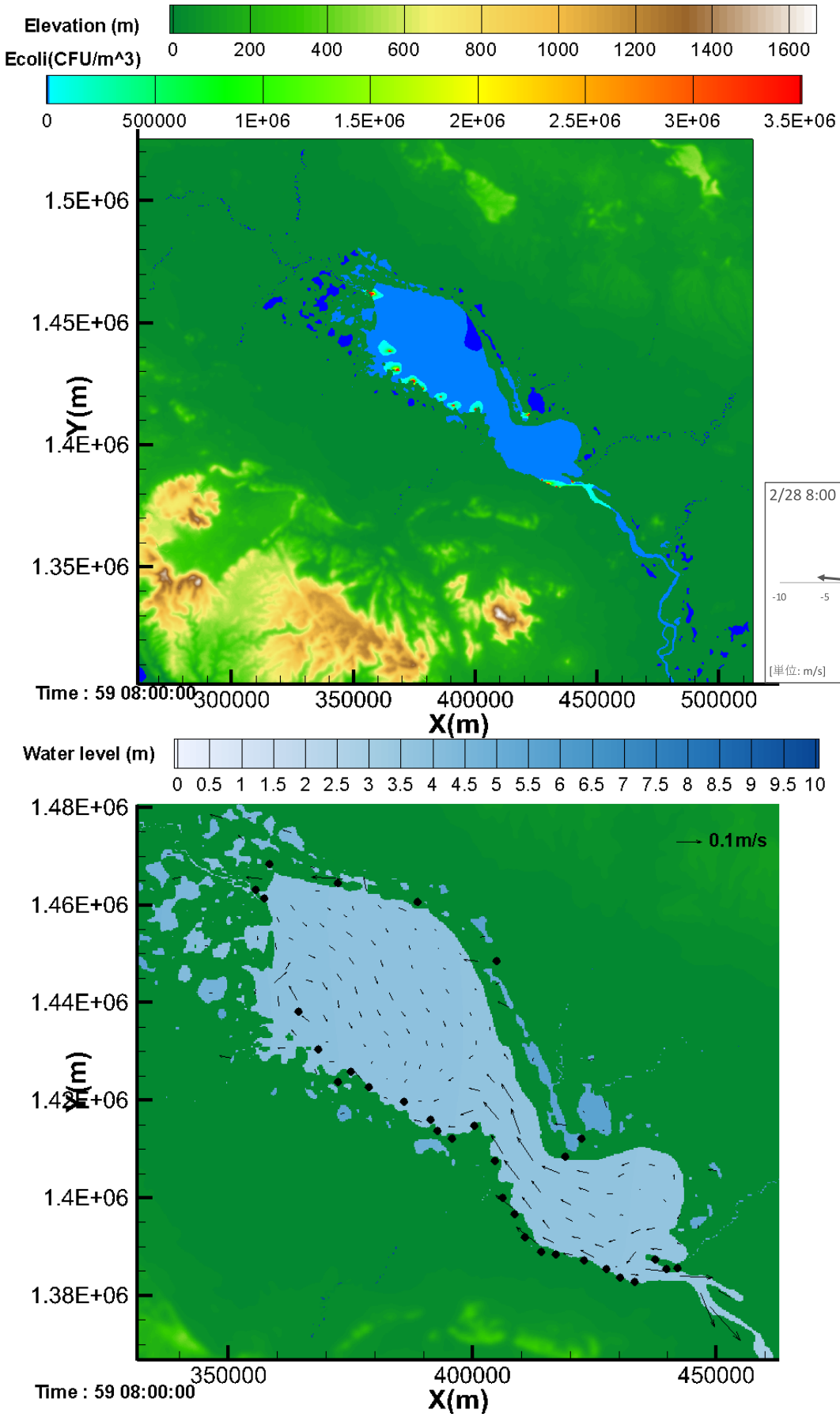


図4-17 2月28日8:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

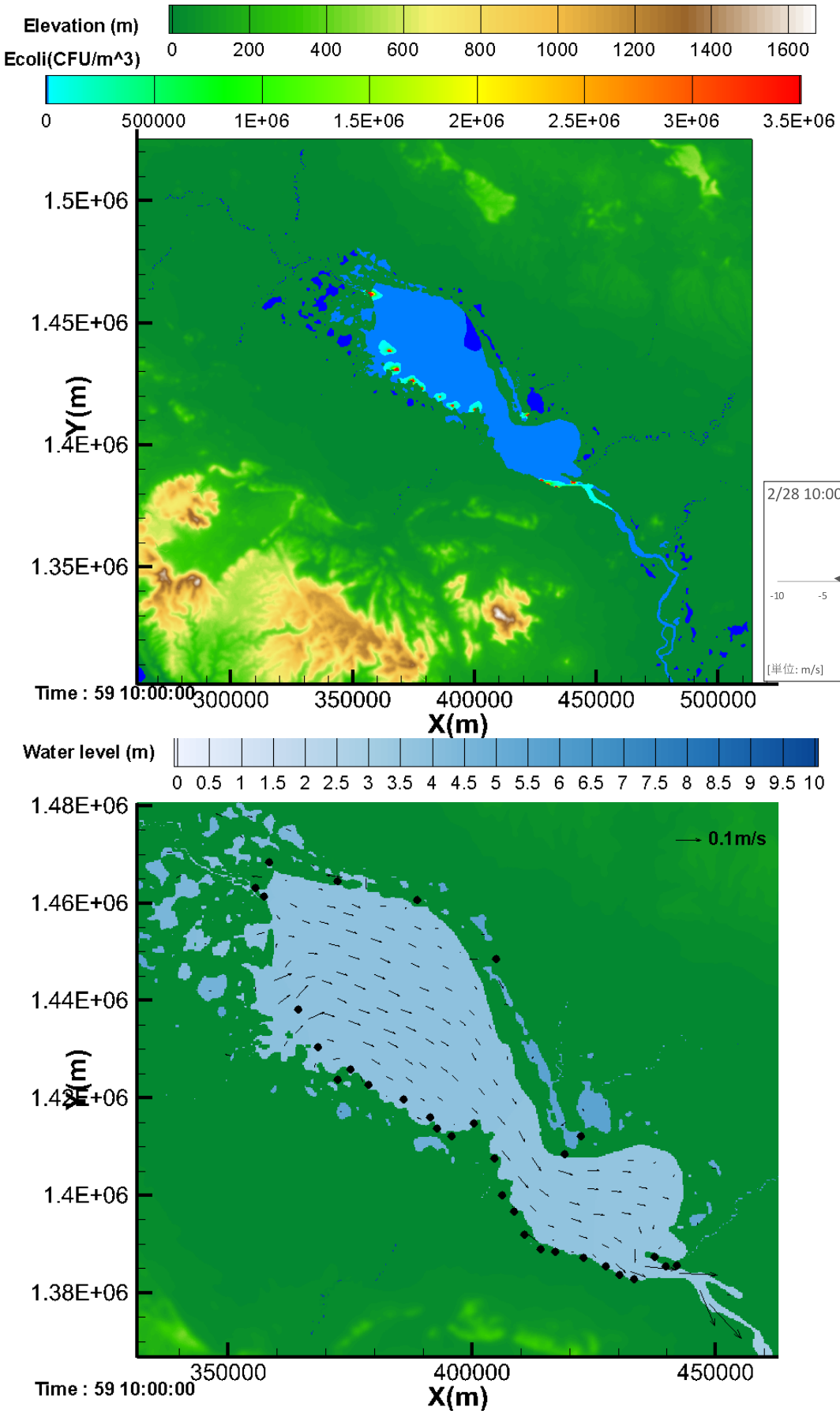


図4-18 2月28日10:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

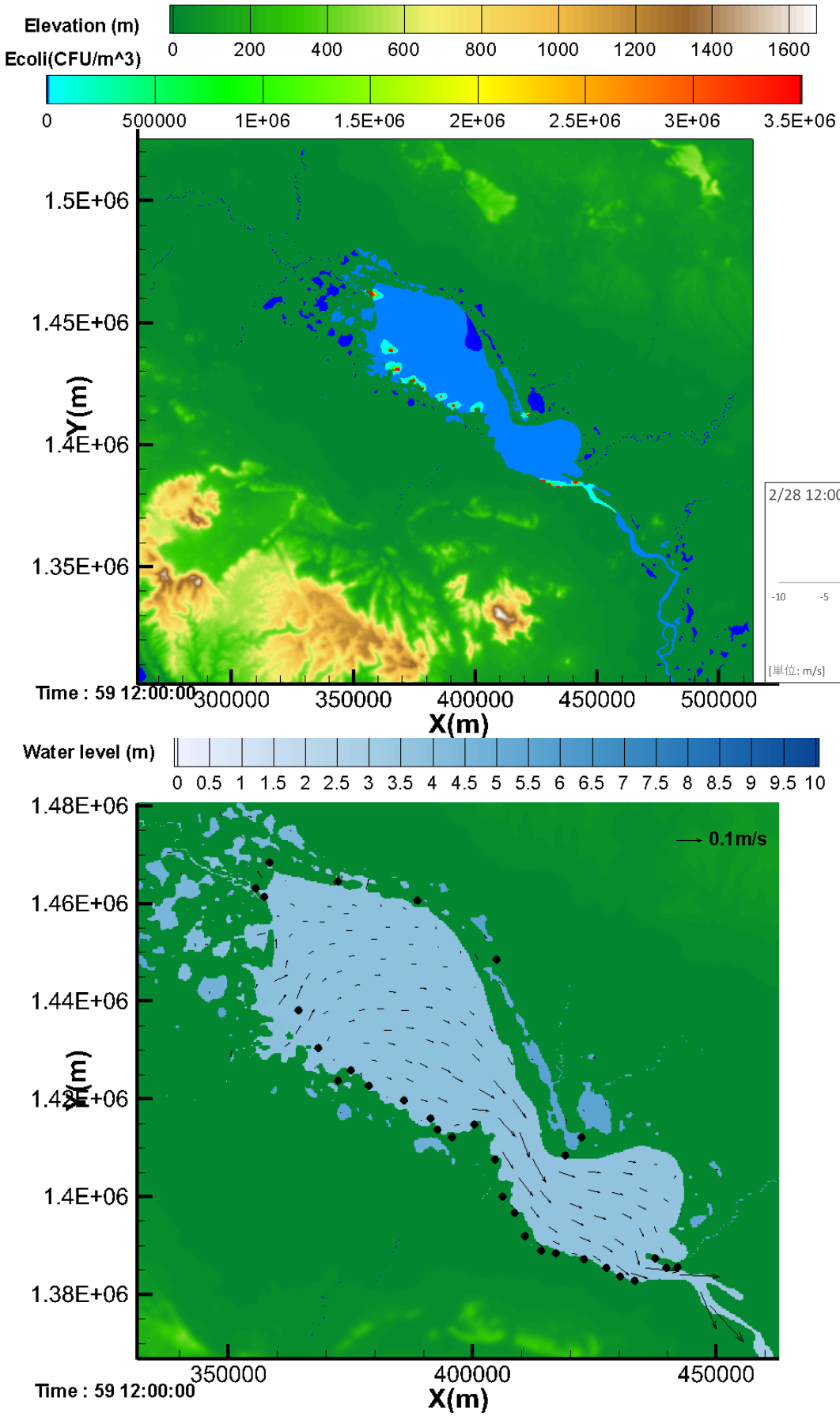


図4-19 2月28日12:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

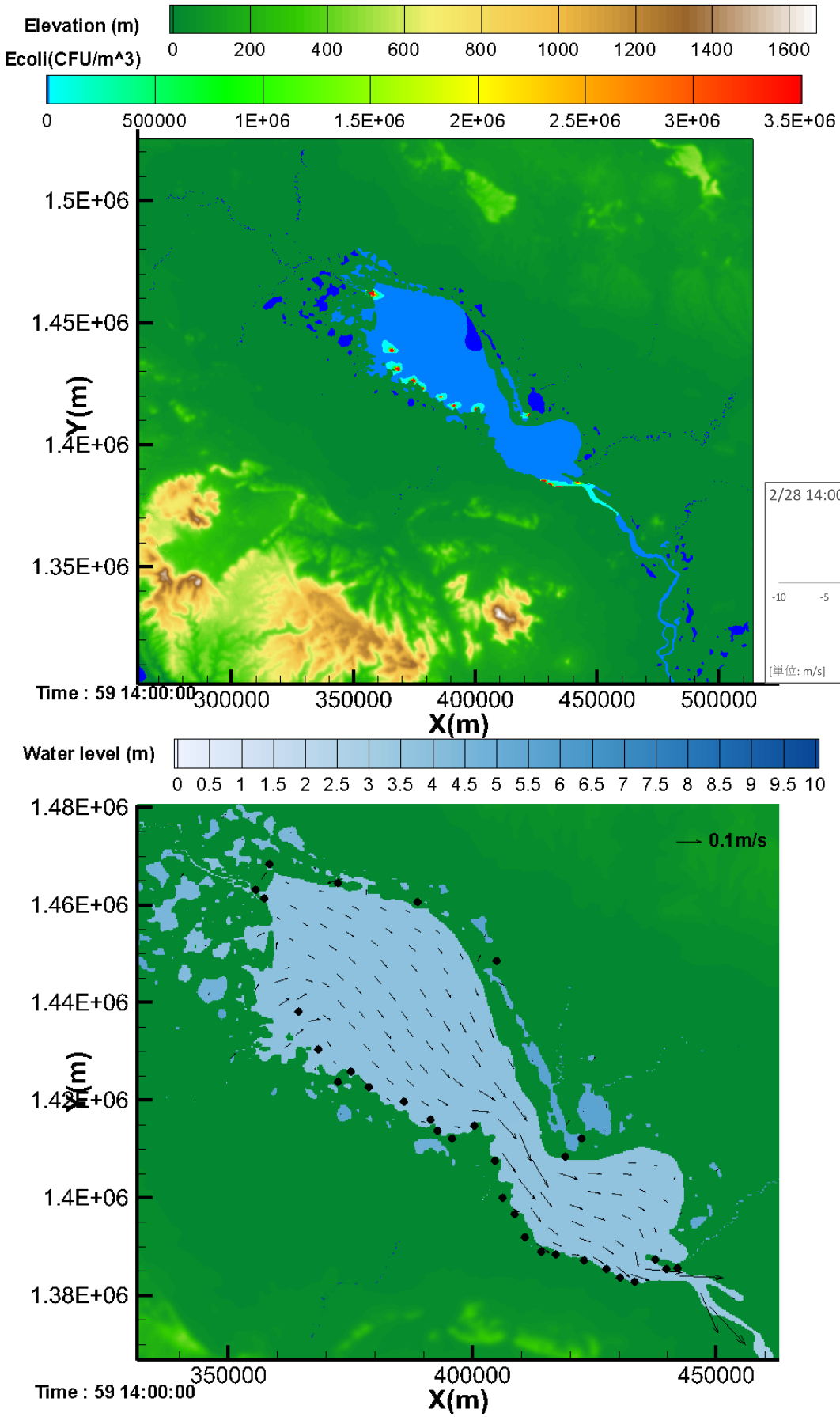


図4-20 2月28日14:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

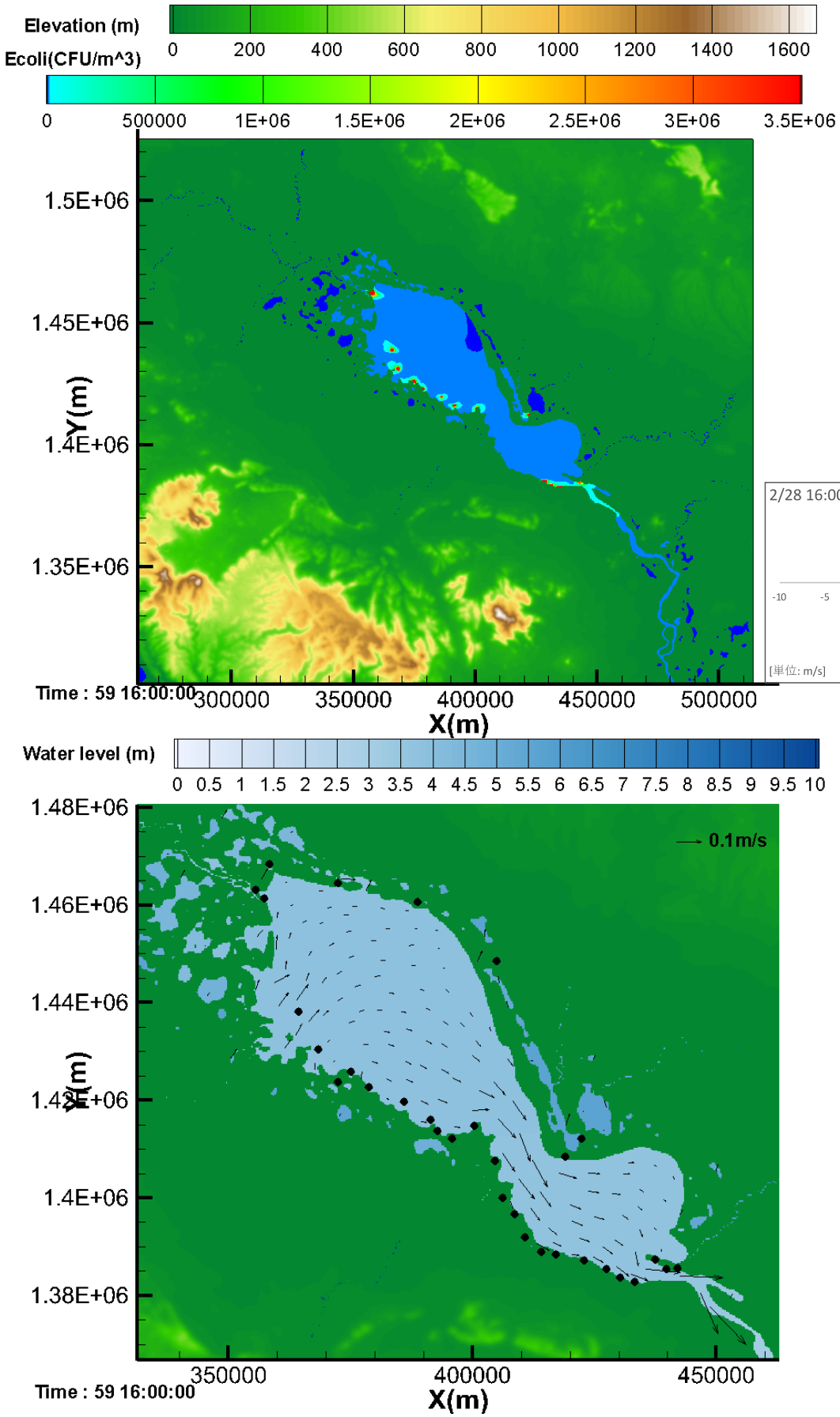


図4-21 2月28日16:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

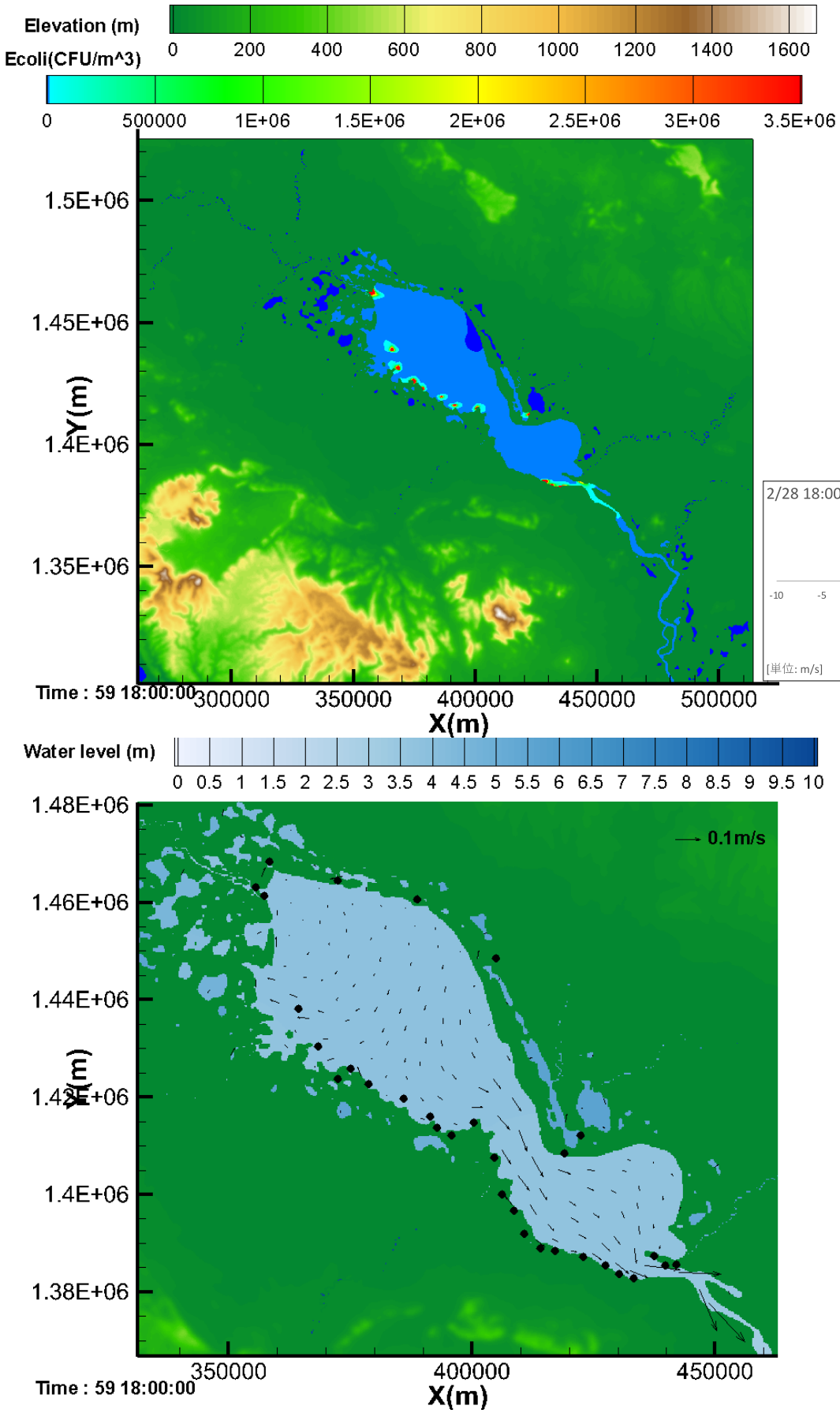


図4-22 2月28日18:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

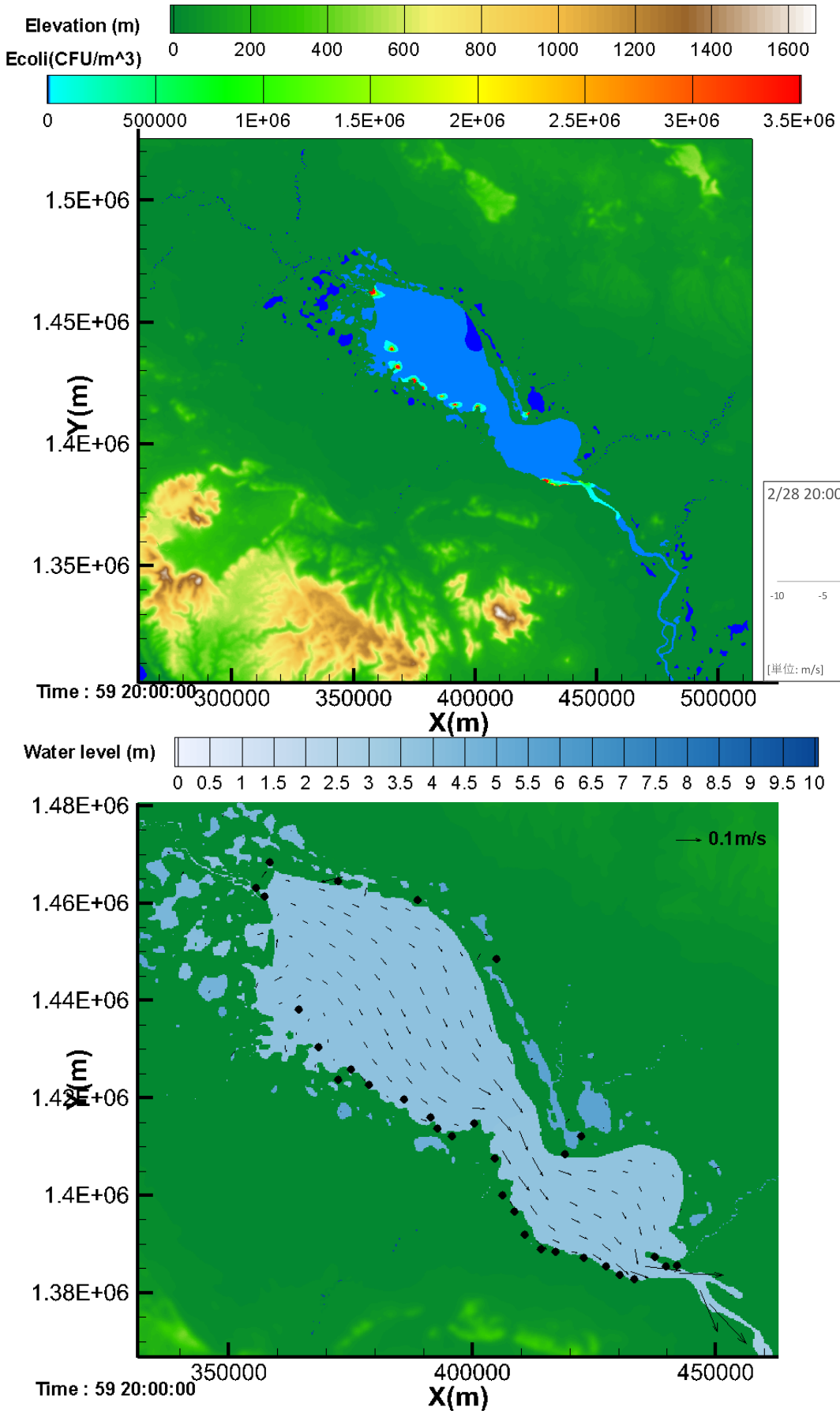


図4-23 2月28日20:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

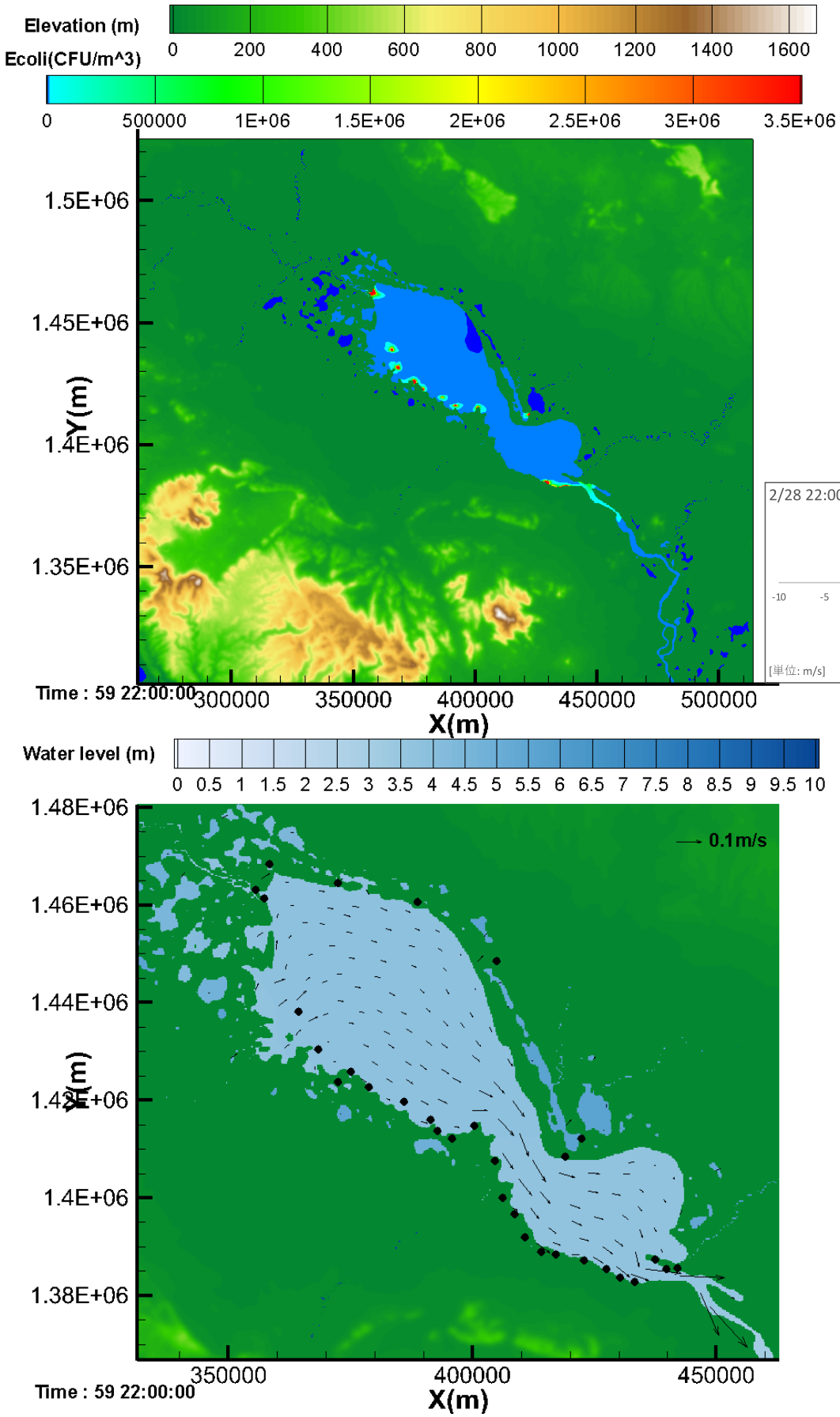


図4-24 2月28日22:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

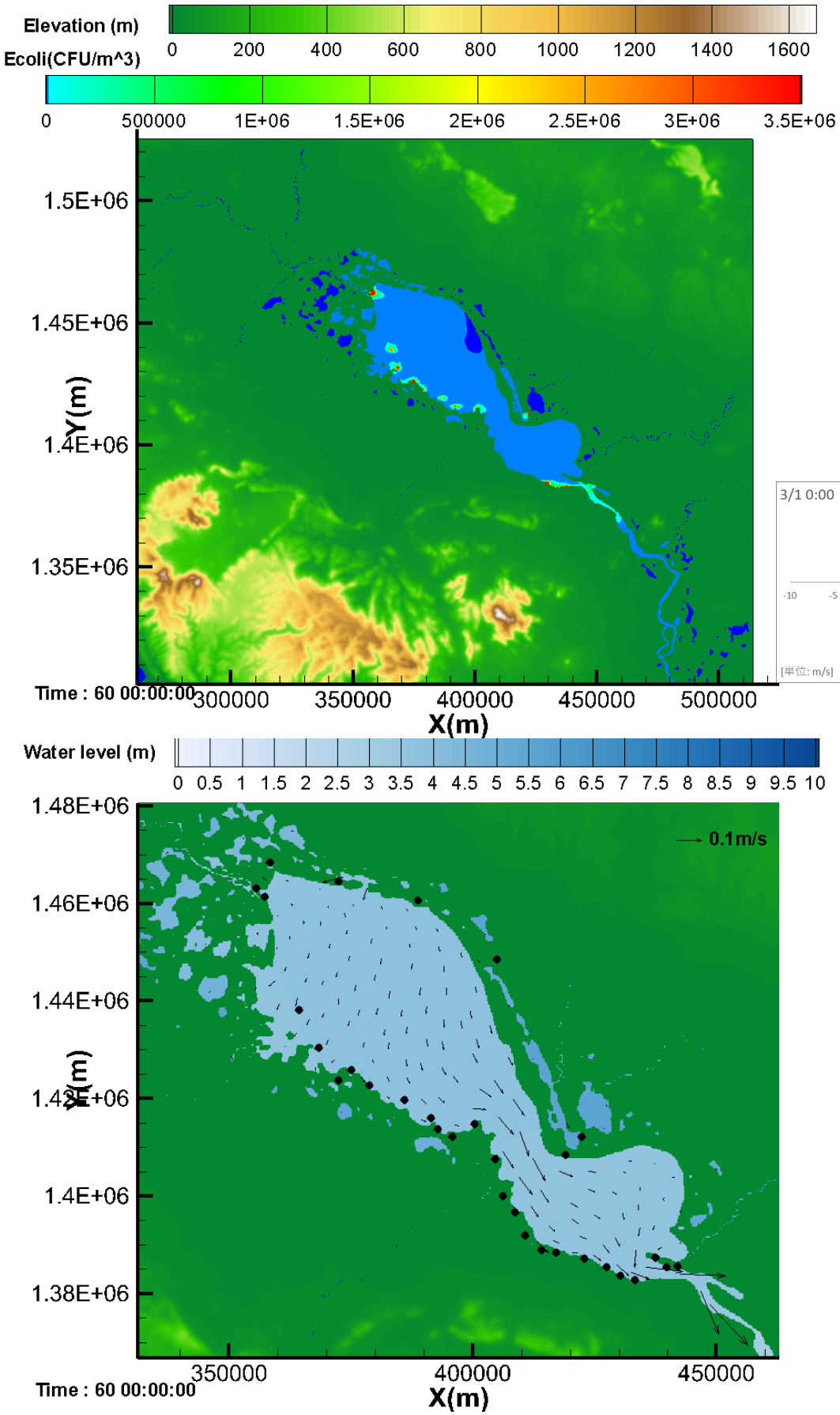


図4-25 3月1日0:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

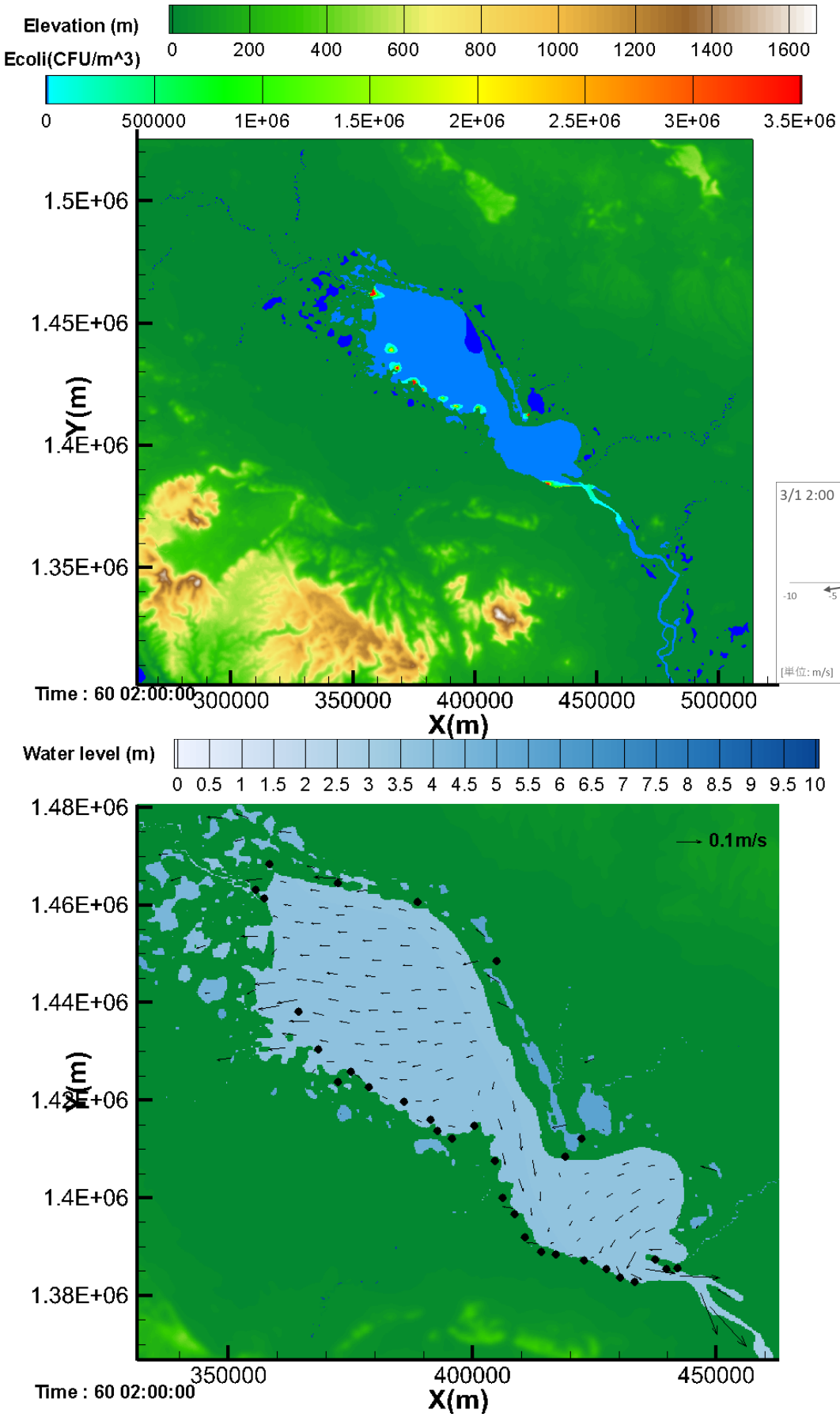


図4-26 3月1日2:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

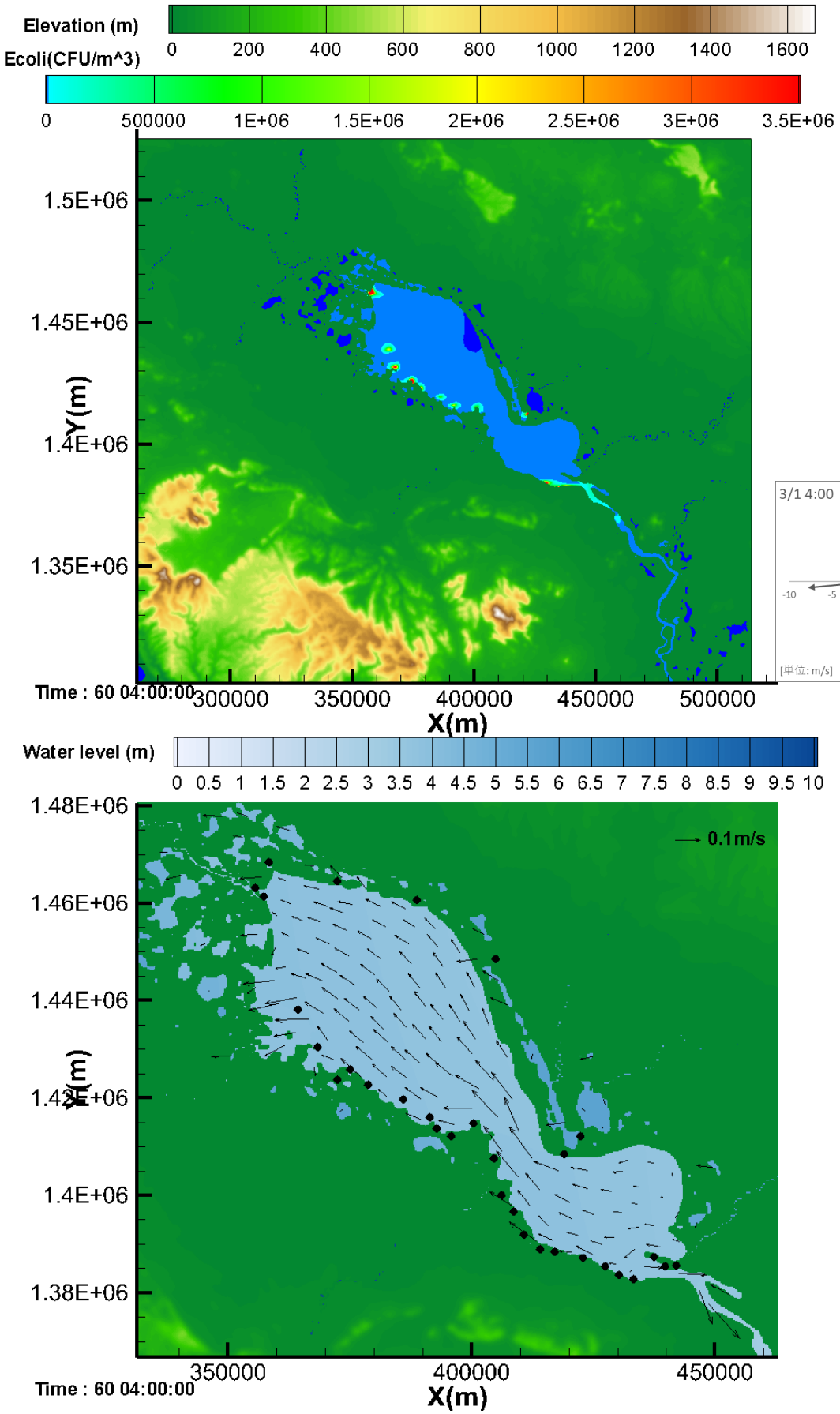


図4-27 3月1日4:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

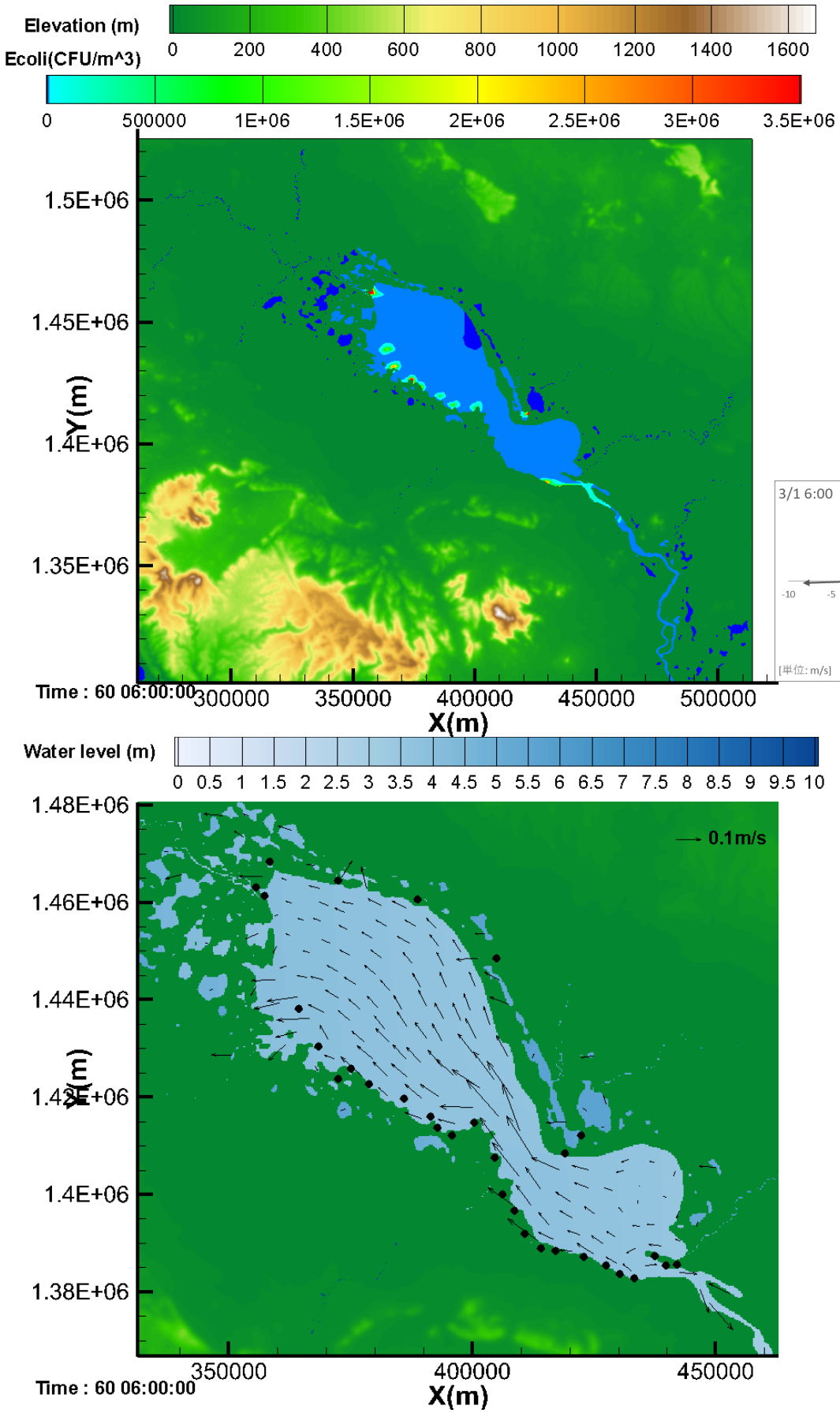
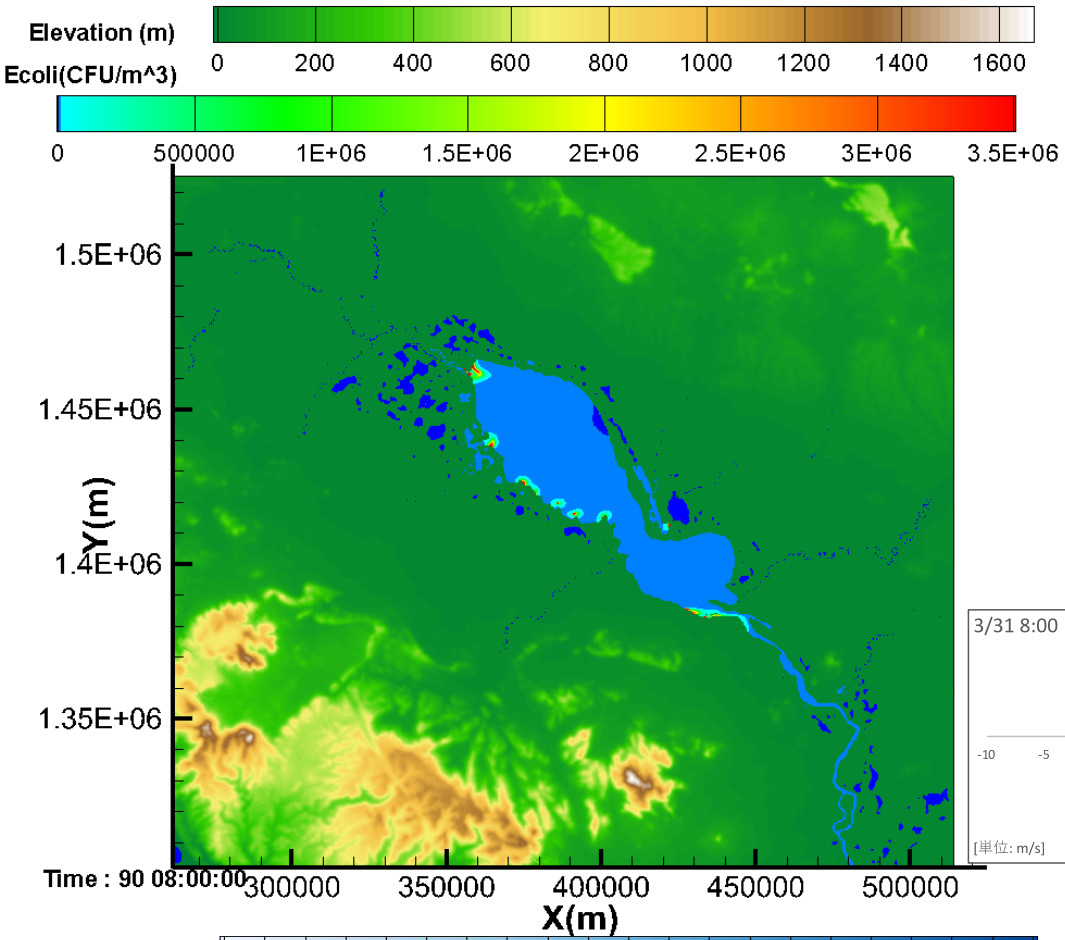


図4-28 3月1日6:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



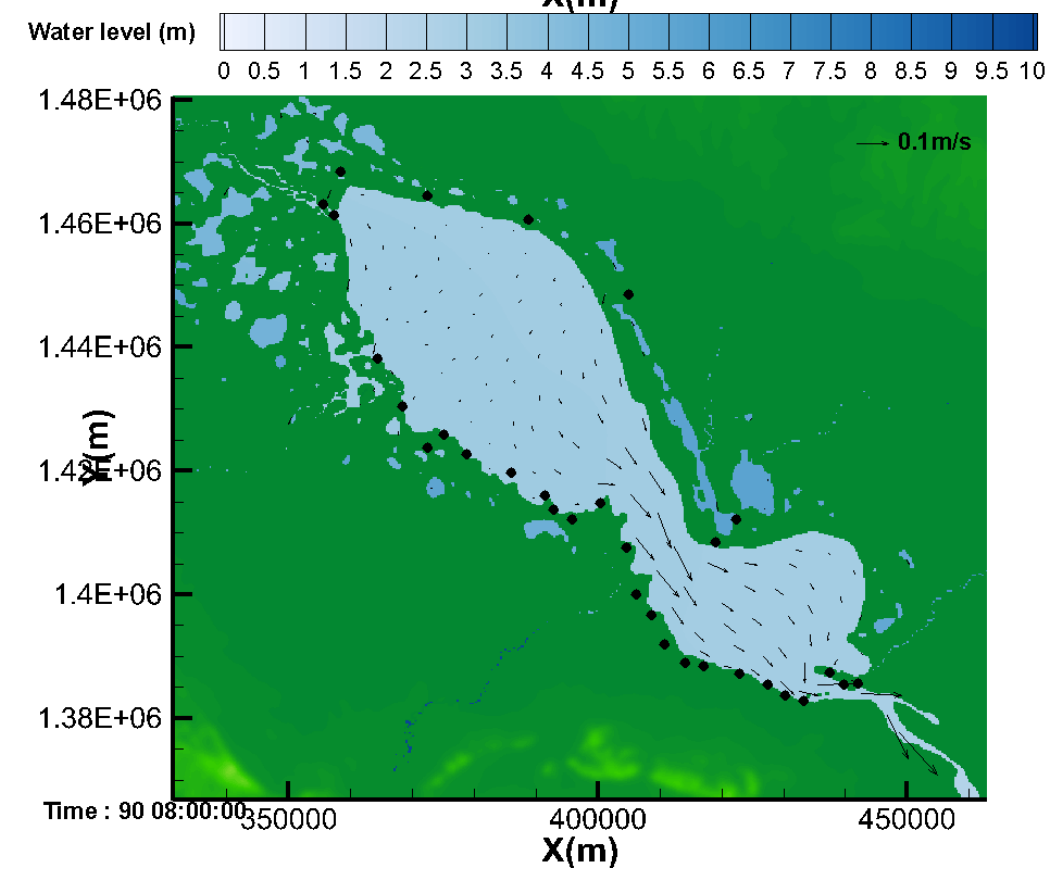


図4-29 3月31日8:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

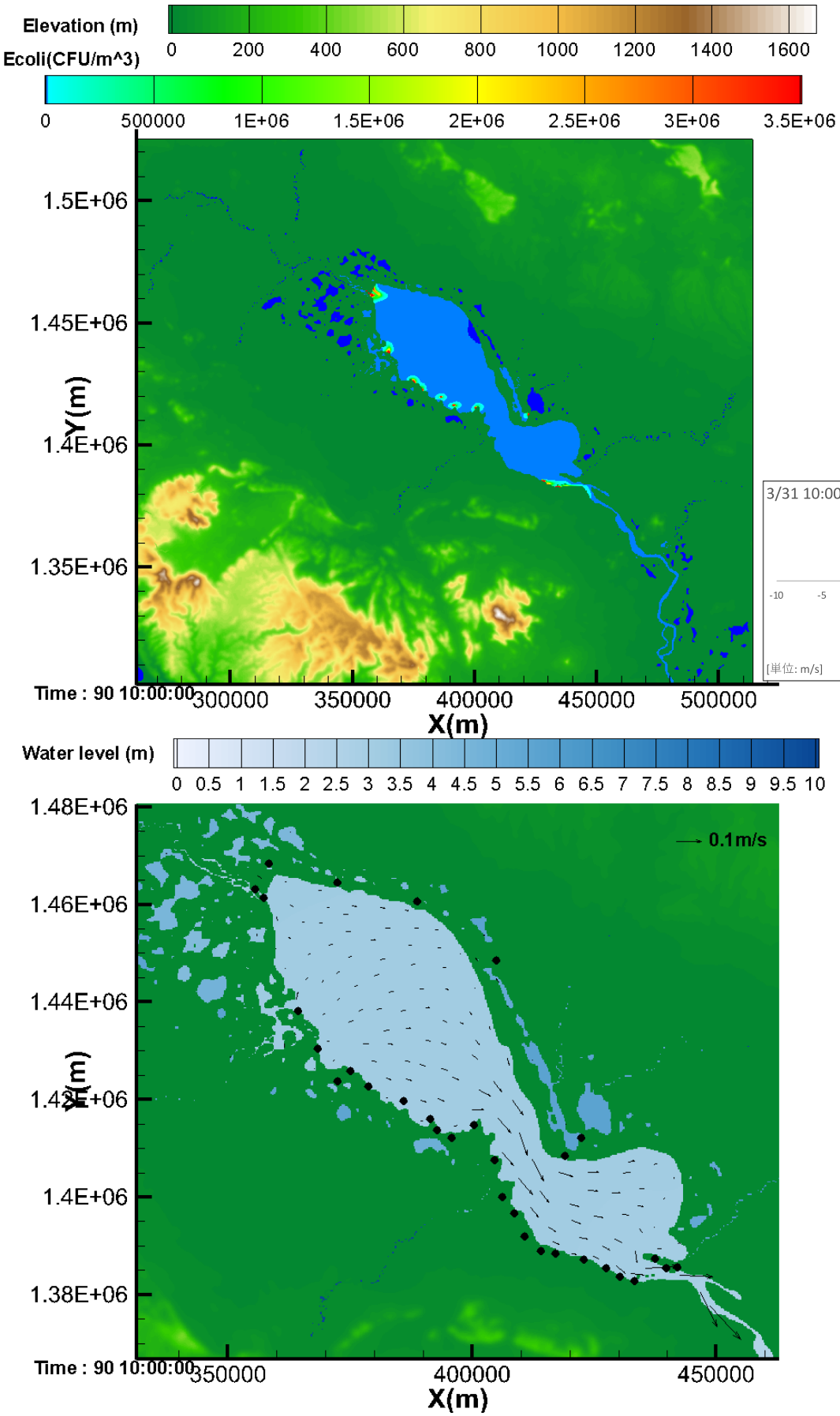
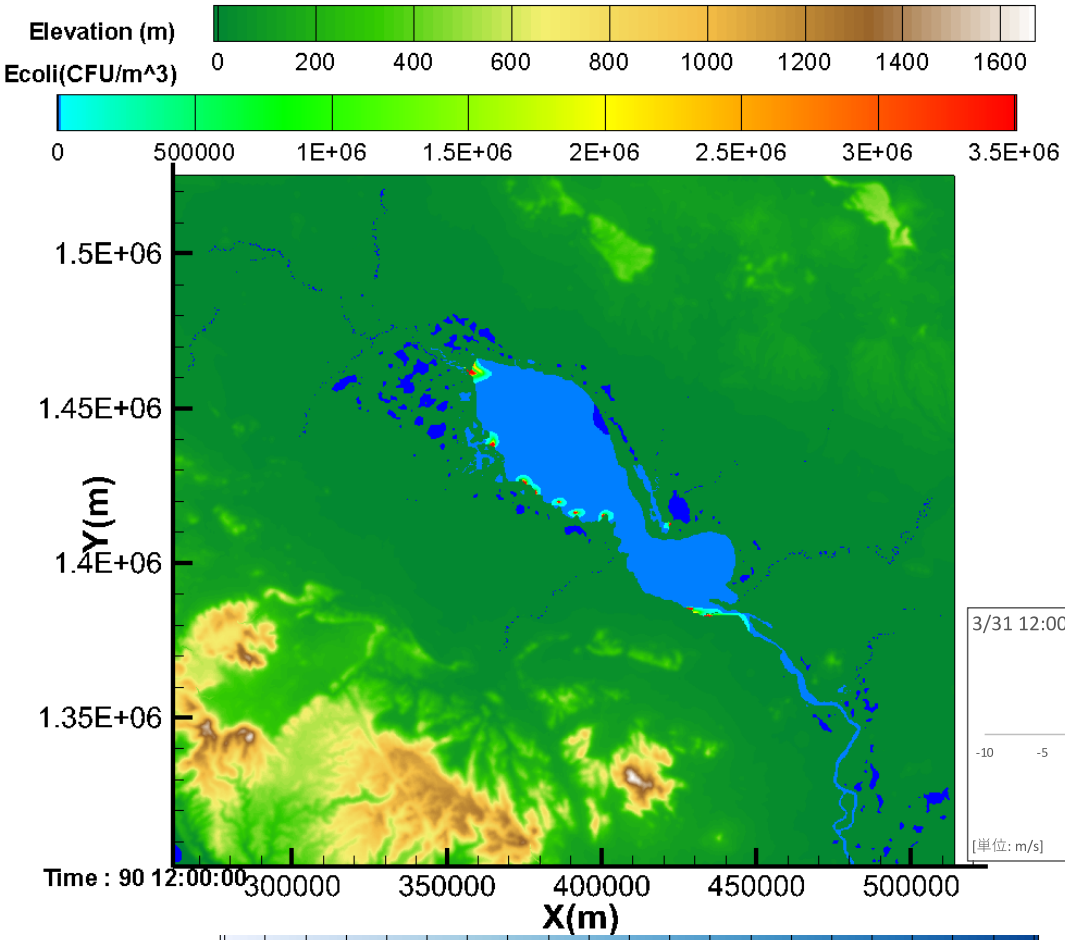


図4-30 3月31日10:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



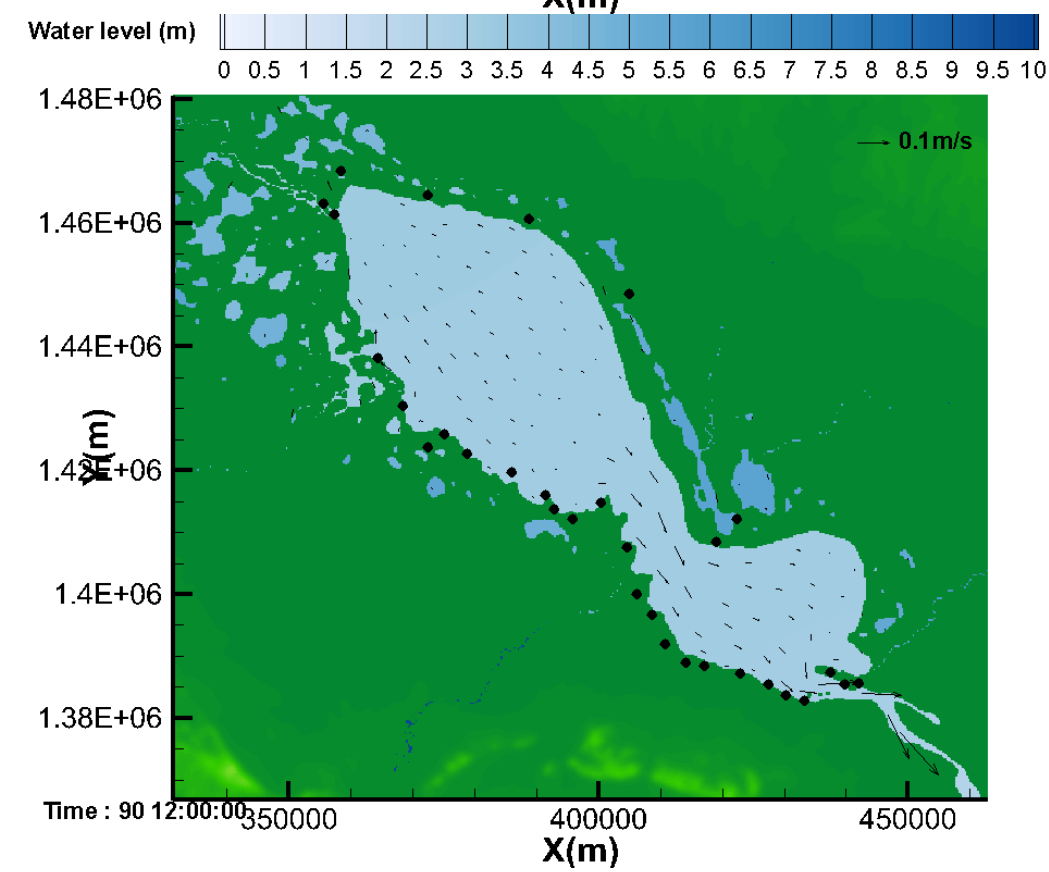
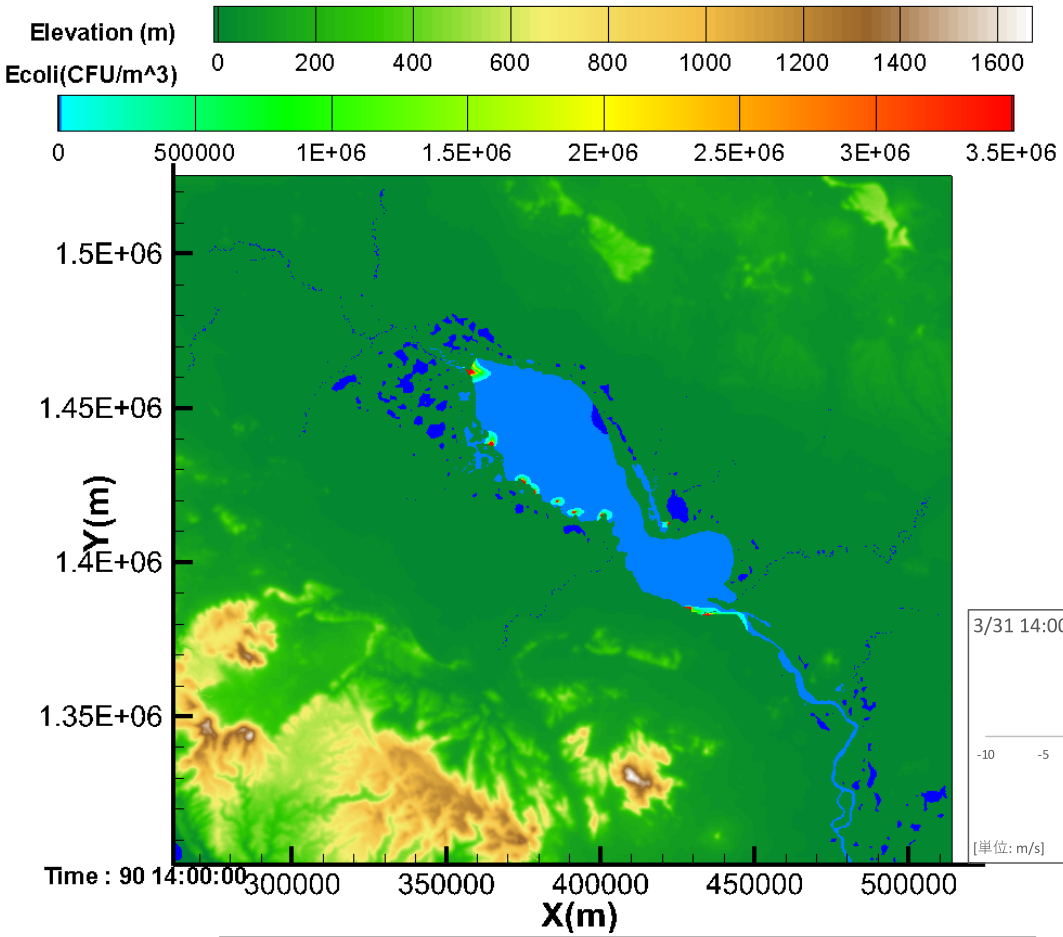


図4-31 3月31日12:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



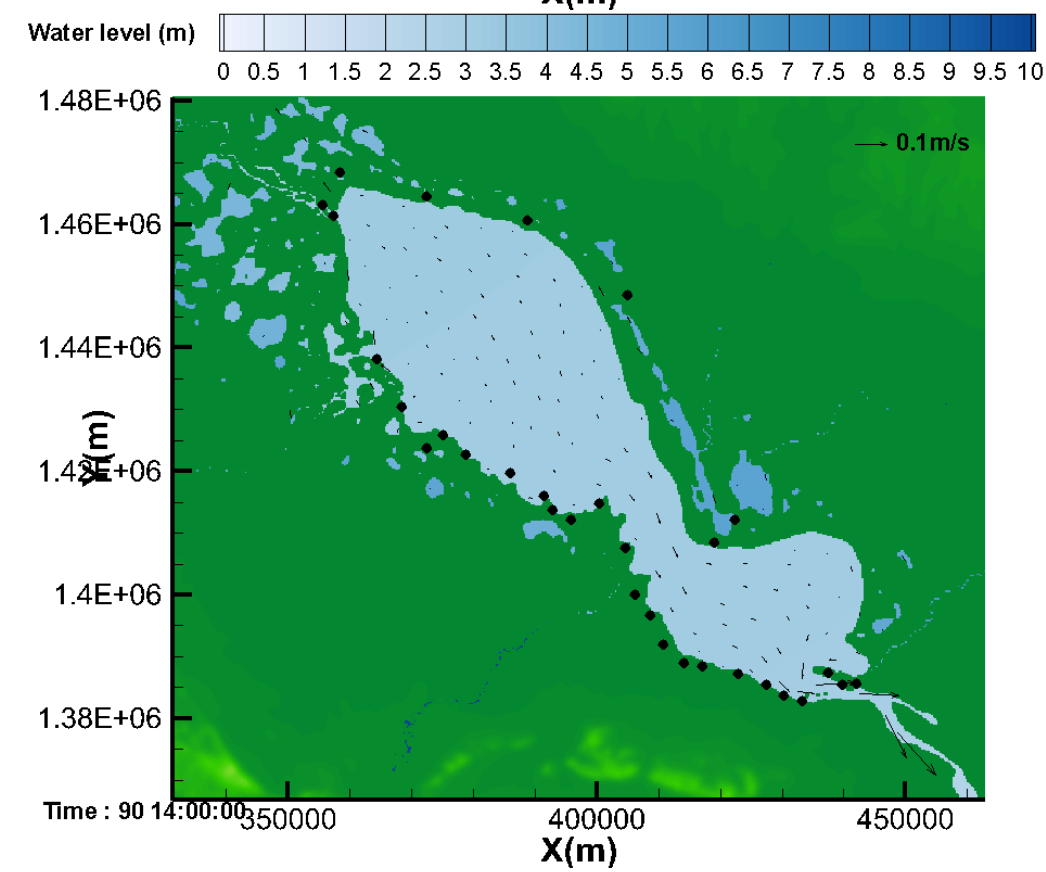


図4-32 3月31日14:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

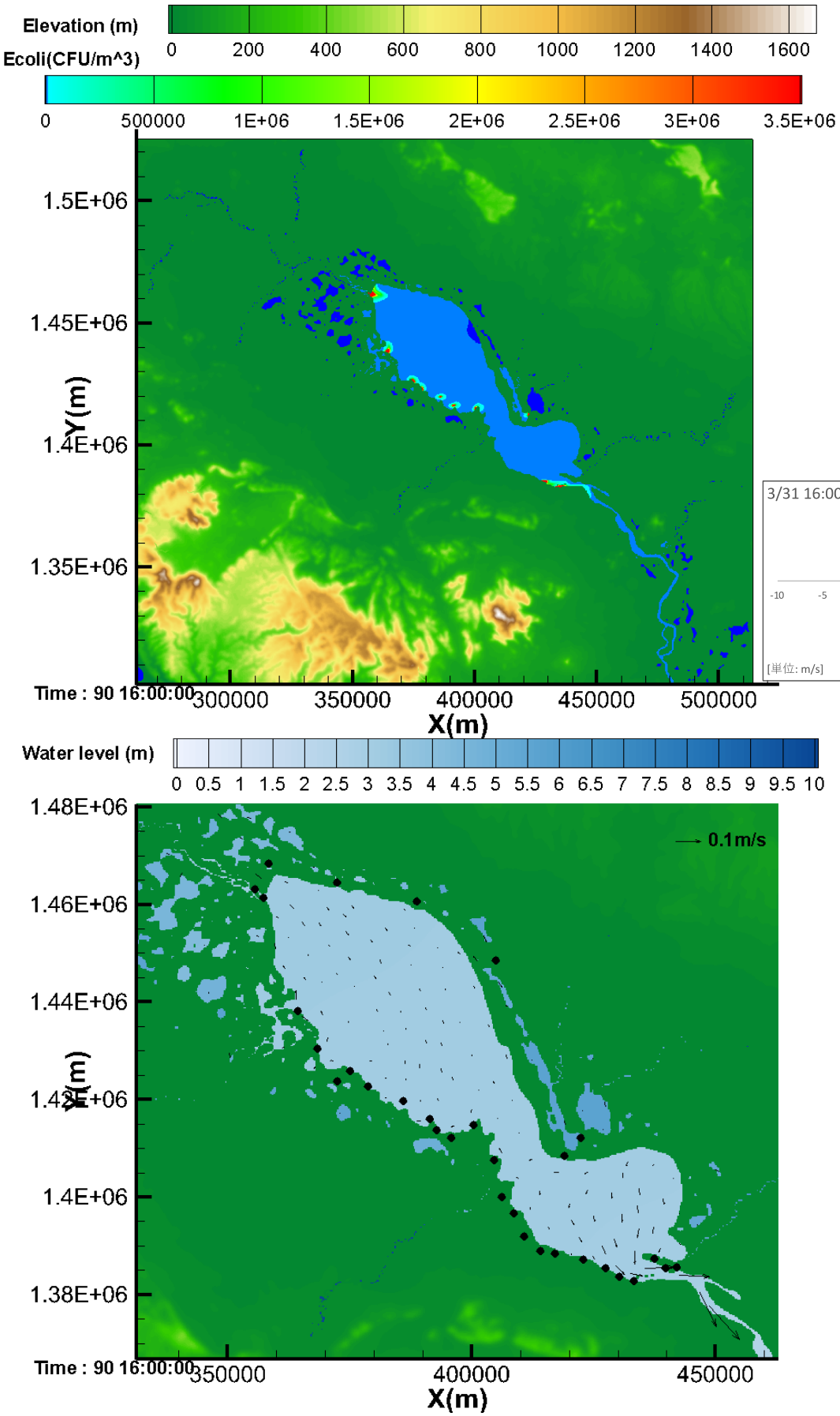
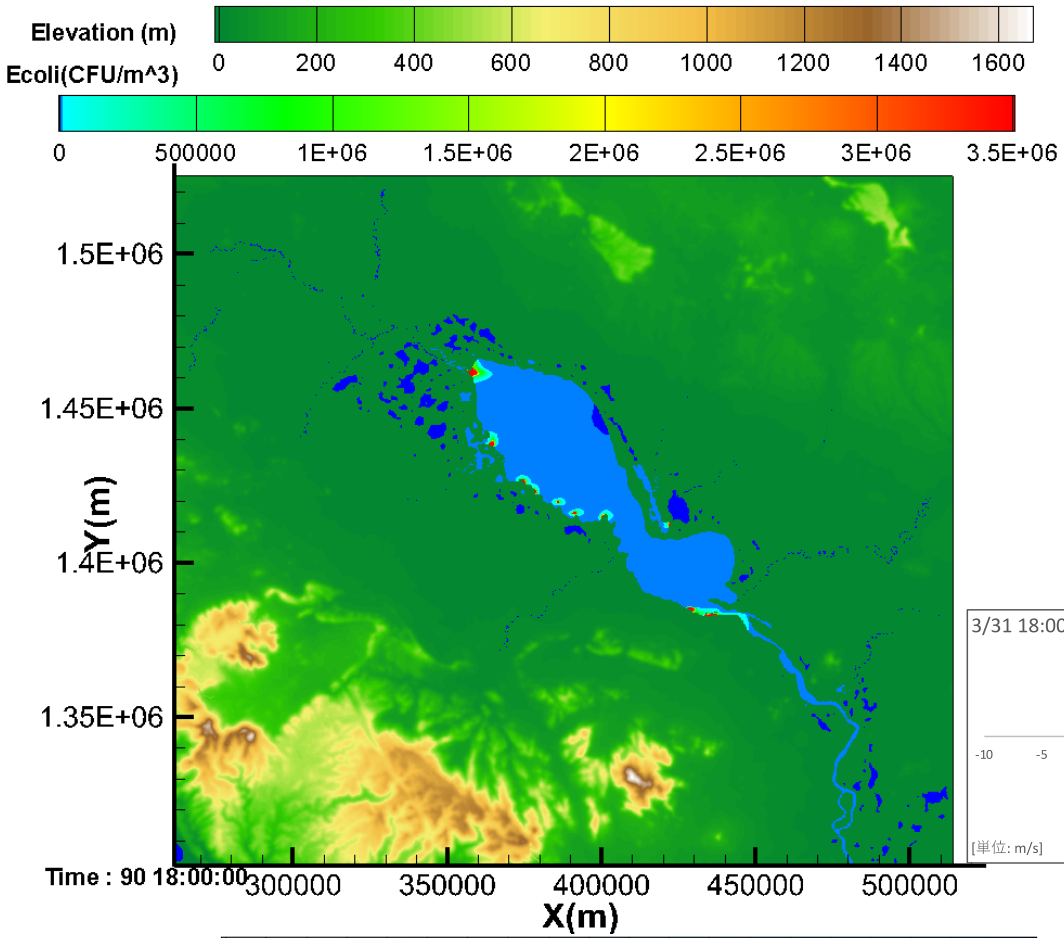


図4-33 3月31日16:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



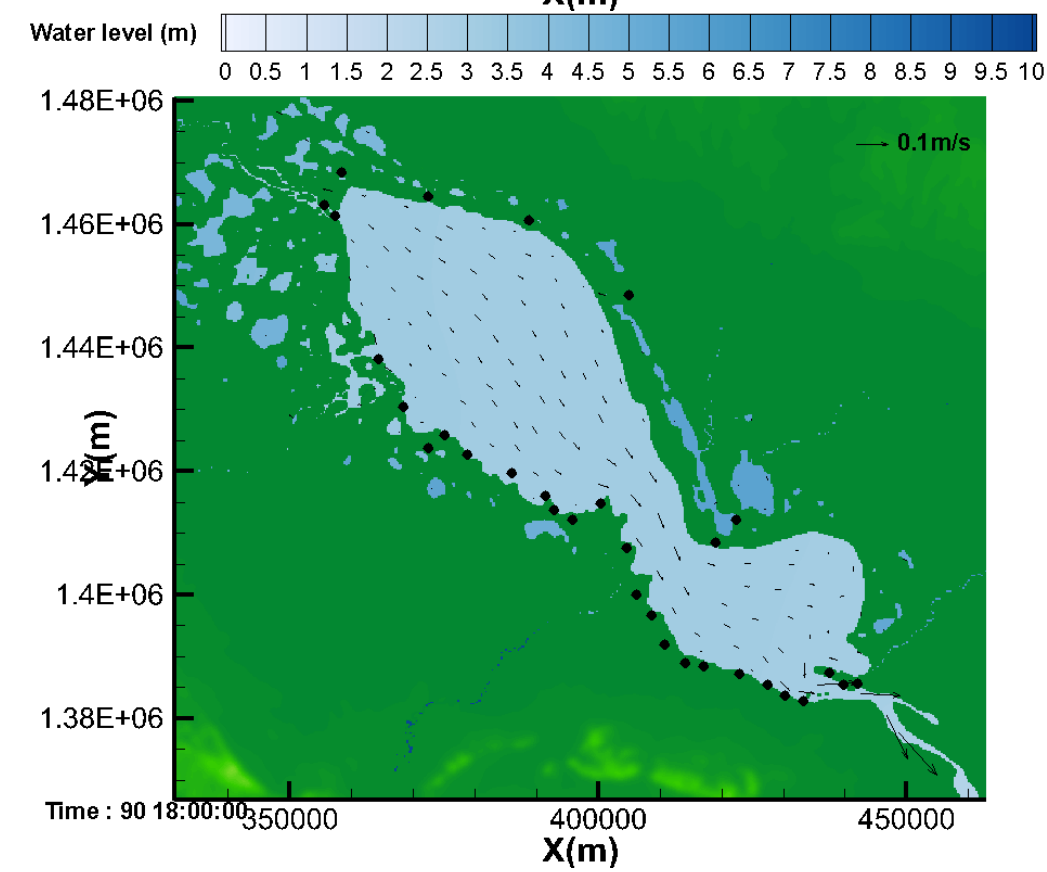


図4-34 3月31日18:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

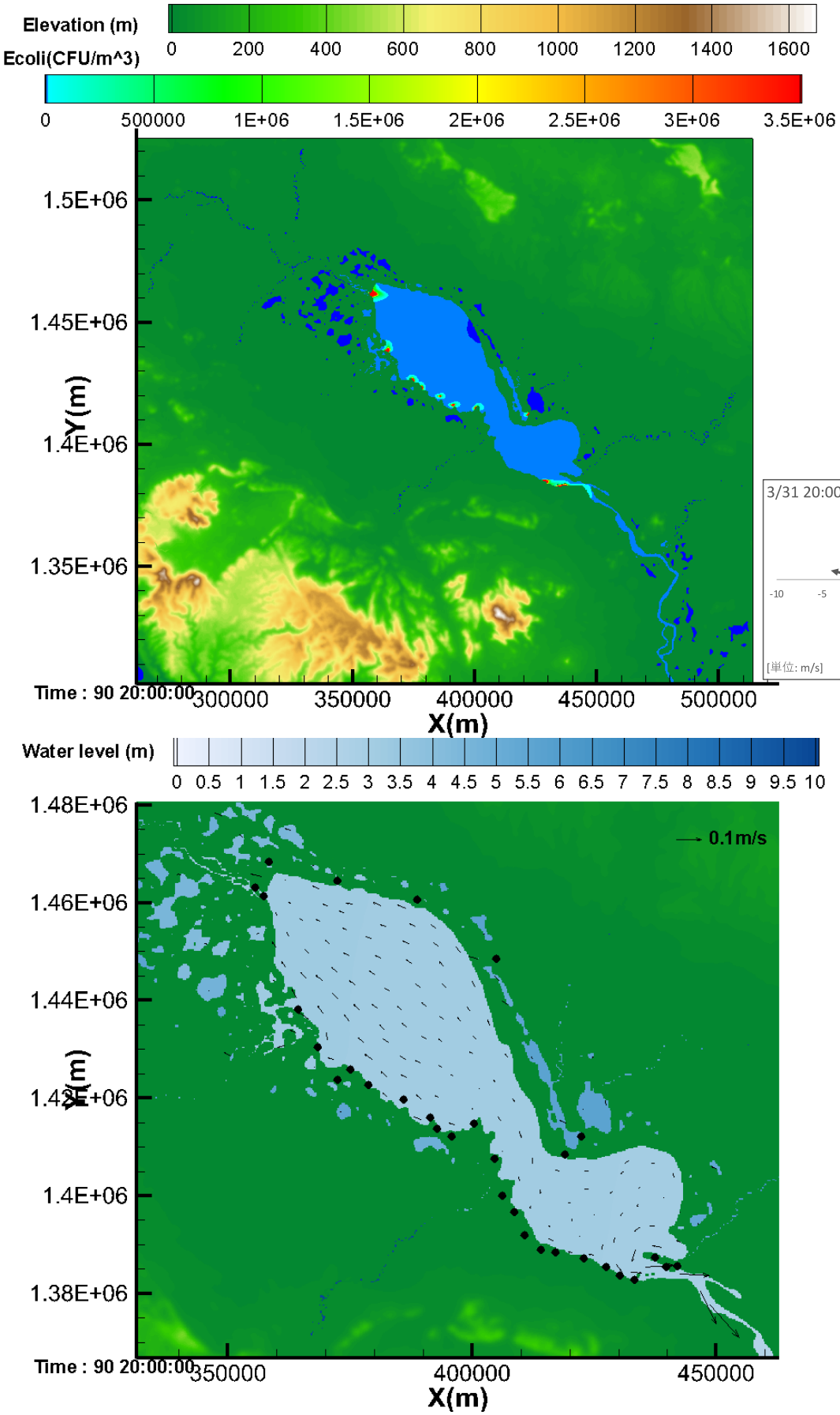
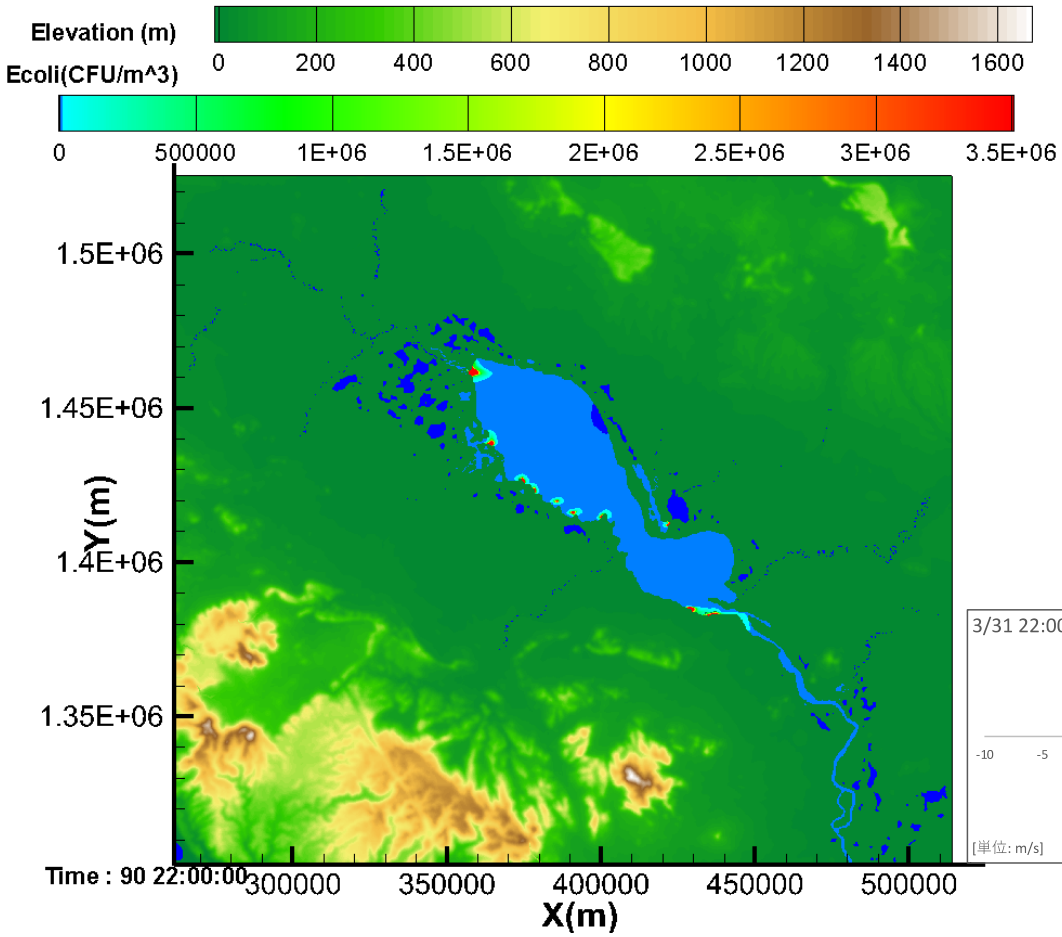


図4-35 3月31日20:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



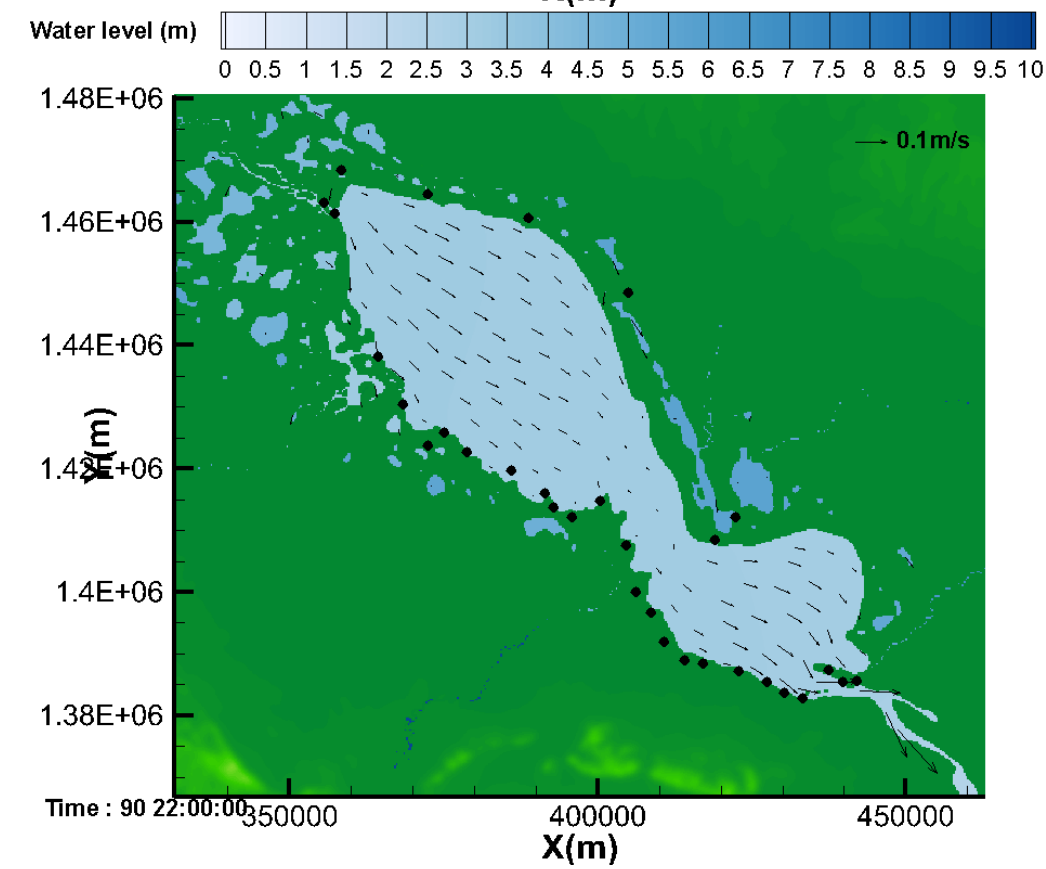


図4-36 3月31日22:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

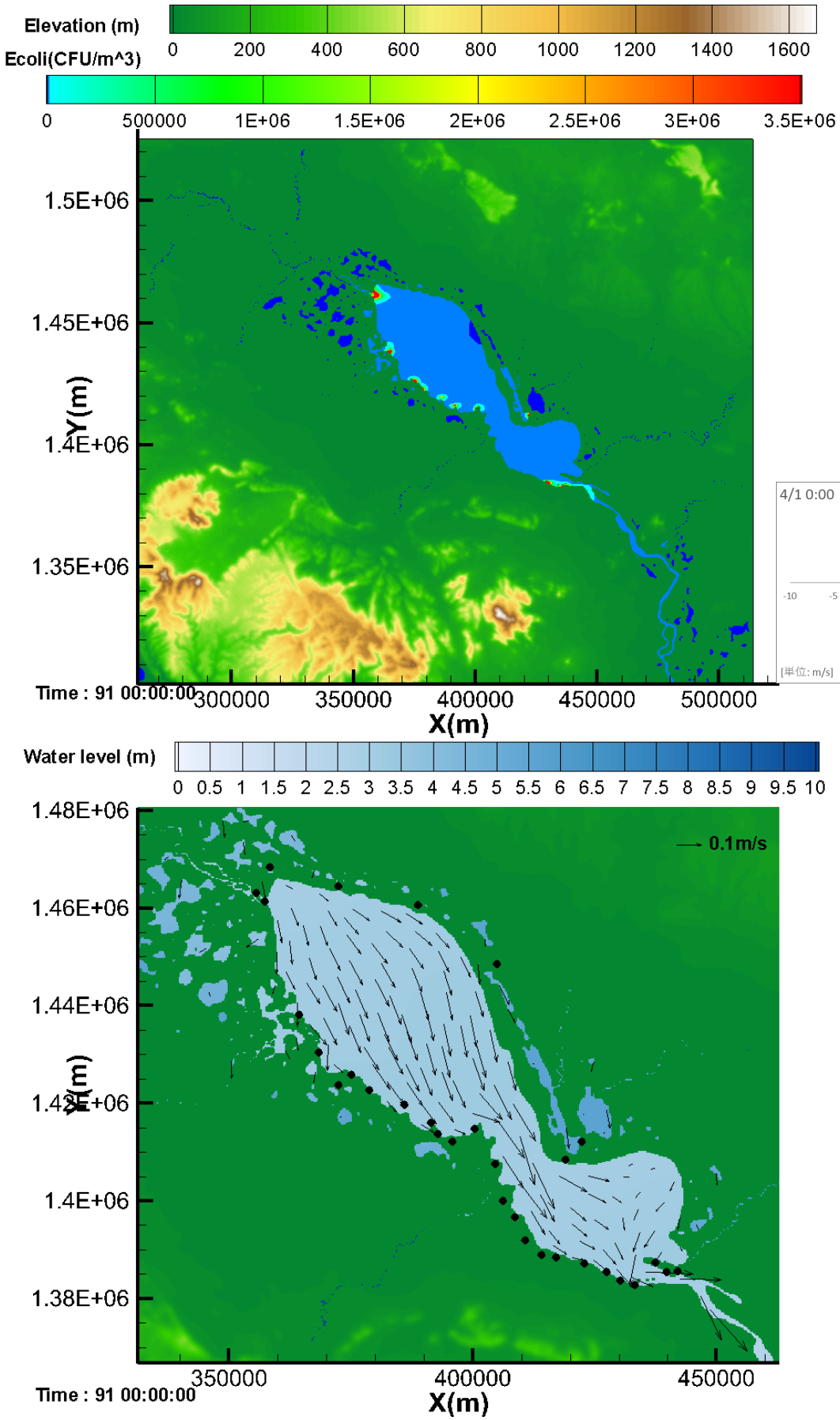


図4-37 4月1日0:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

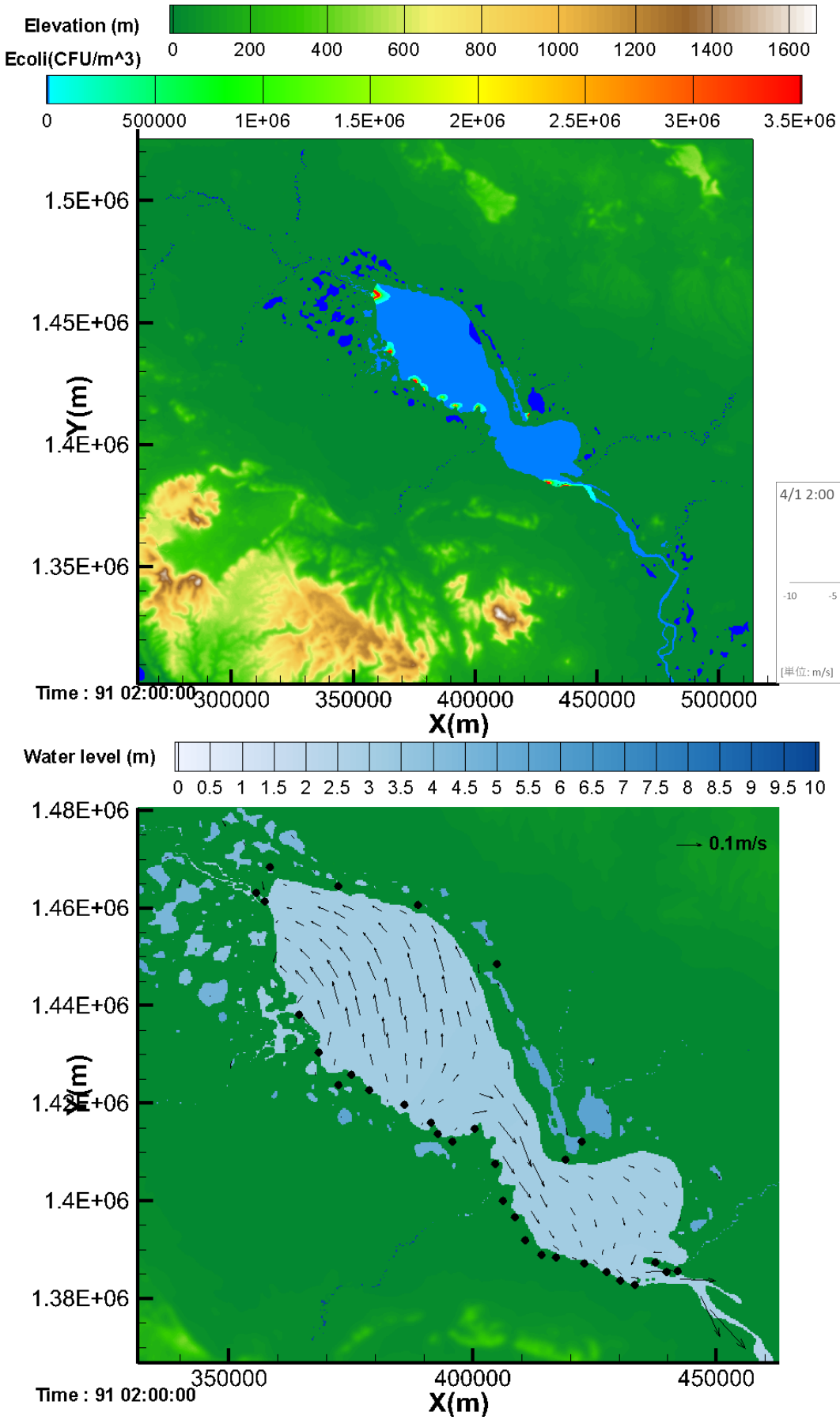


図4-38 4月1日2:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

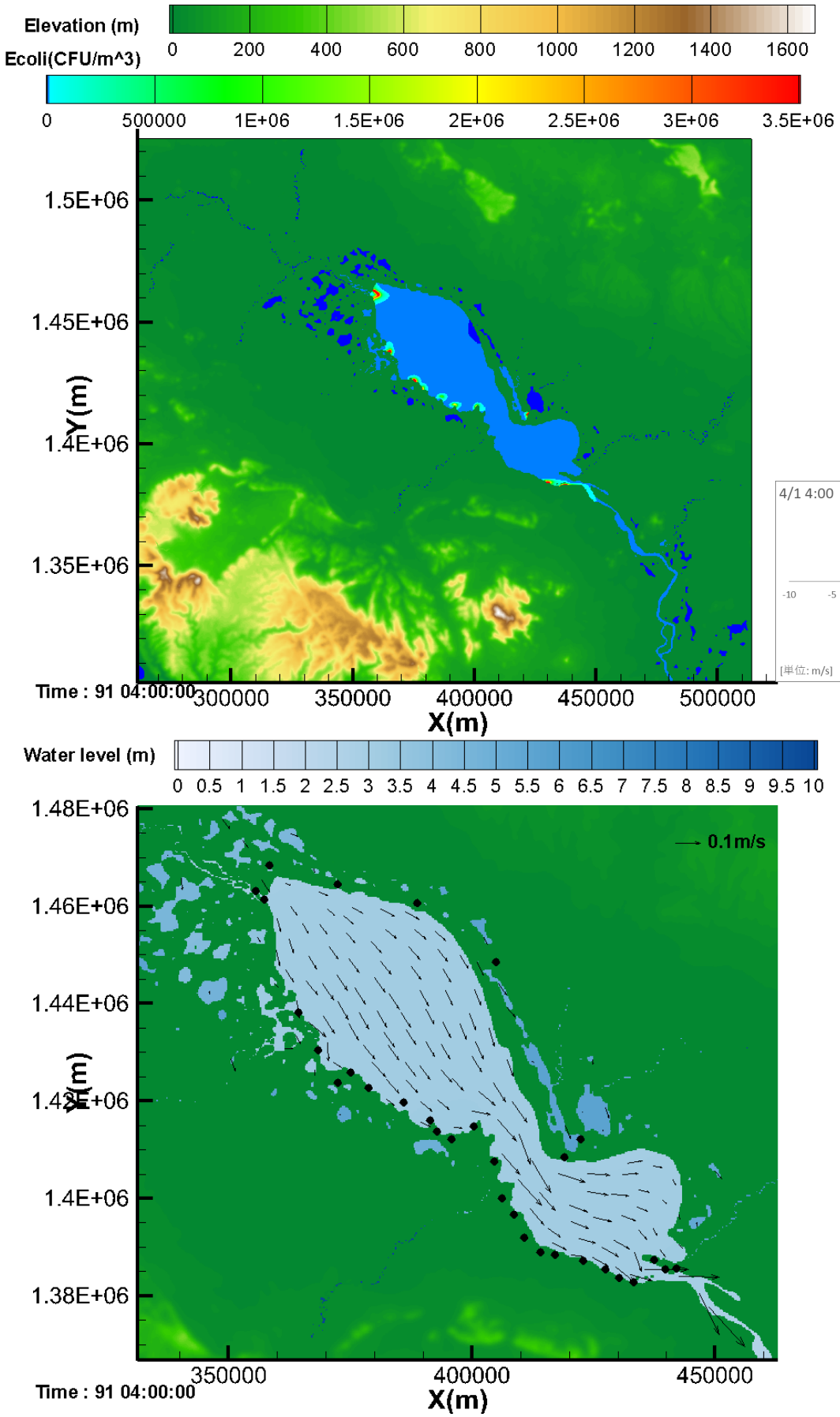


図4-39 4月1日4:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

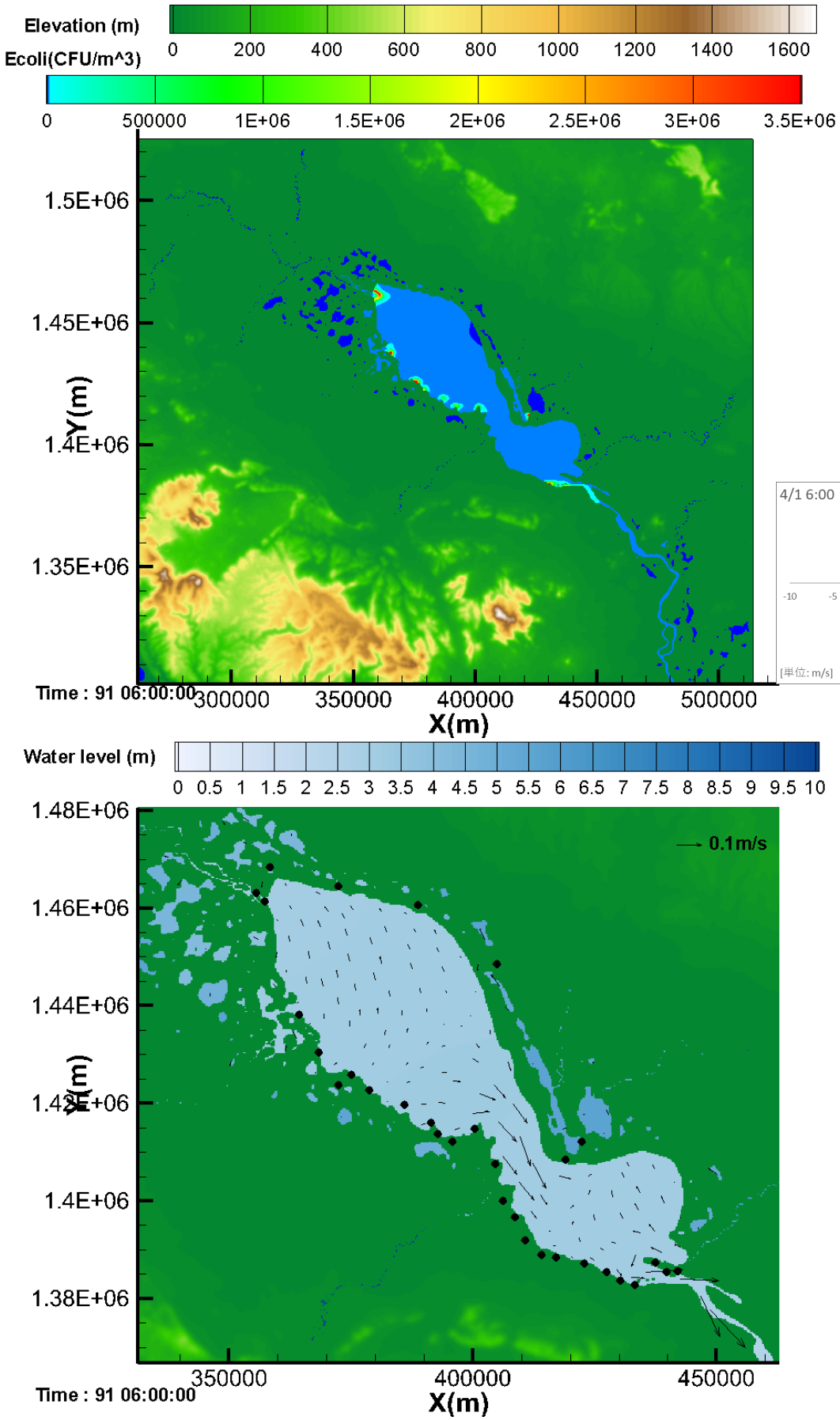
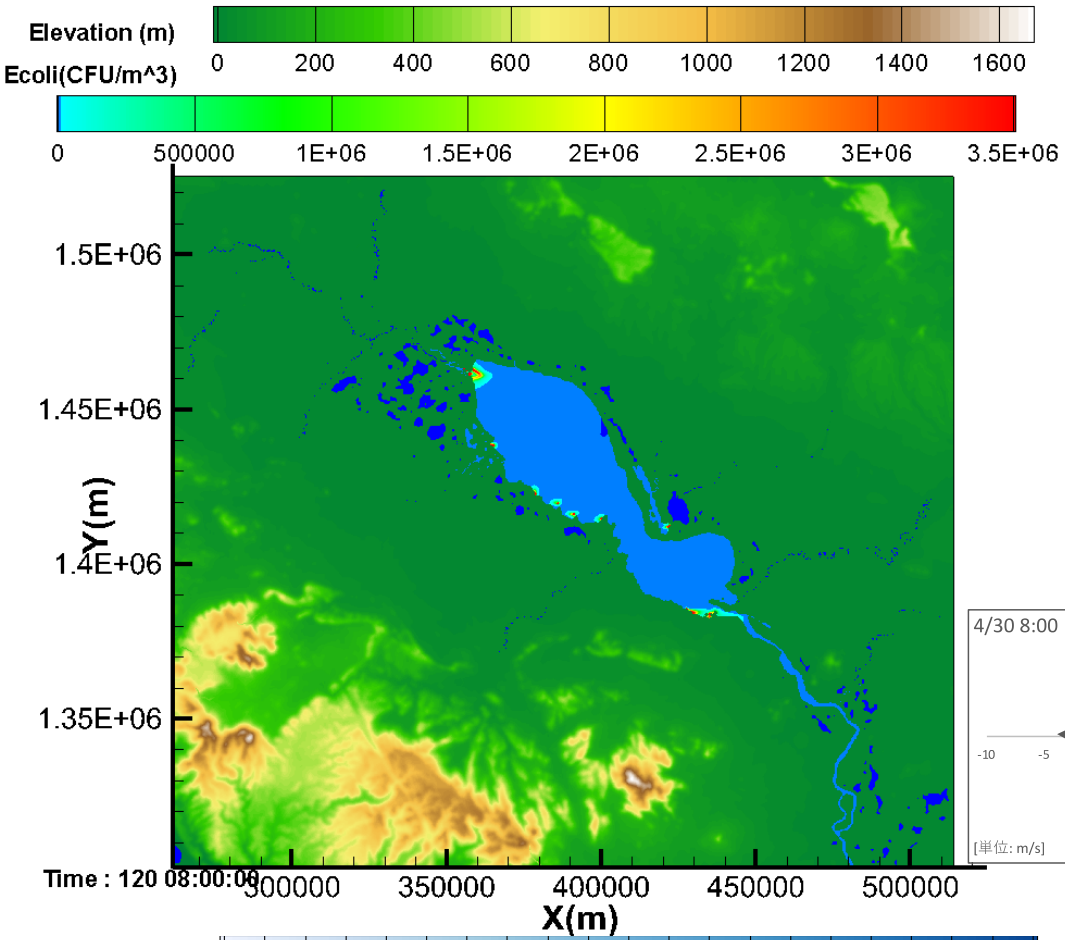


図4-40 4月1日6:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



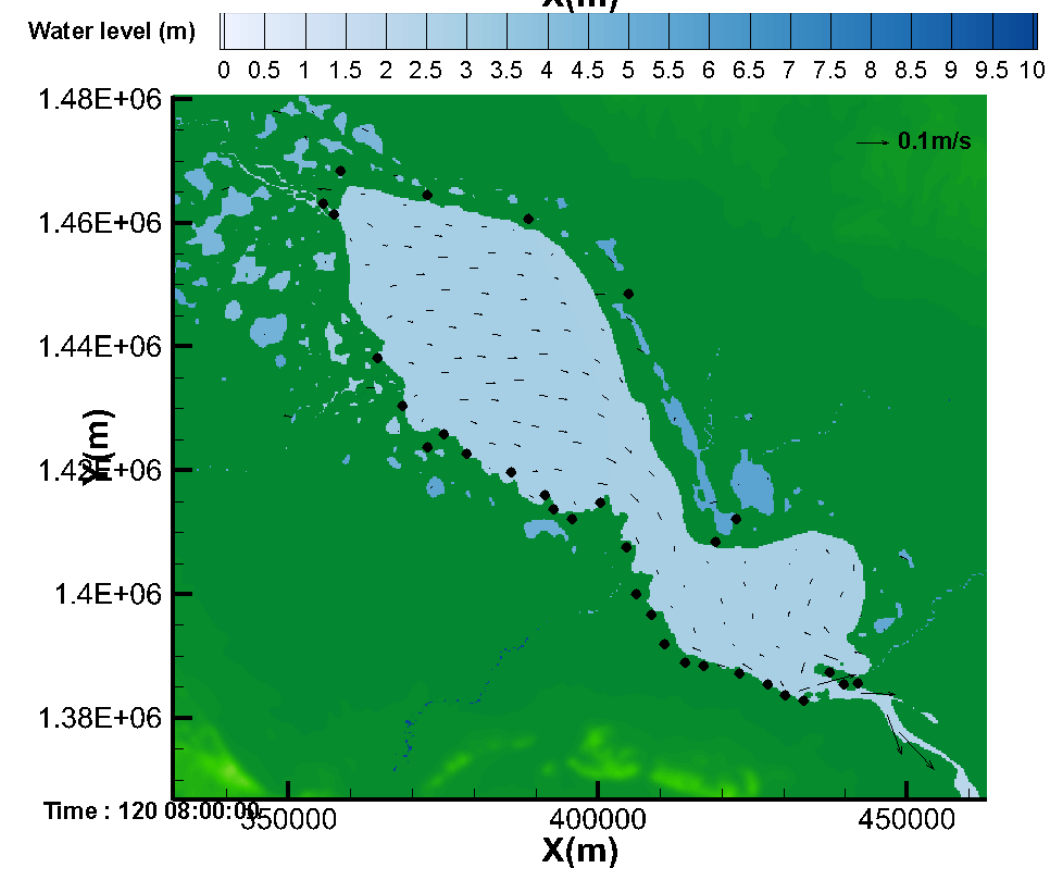


図4-41 4月30日8:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

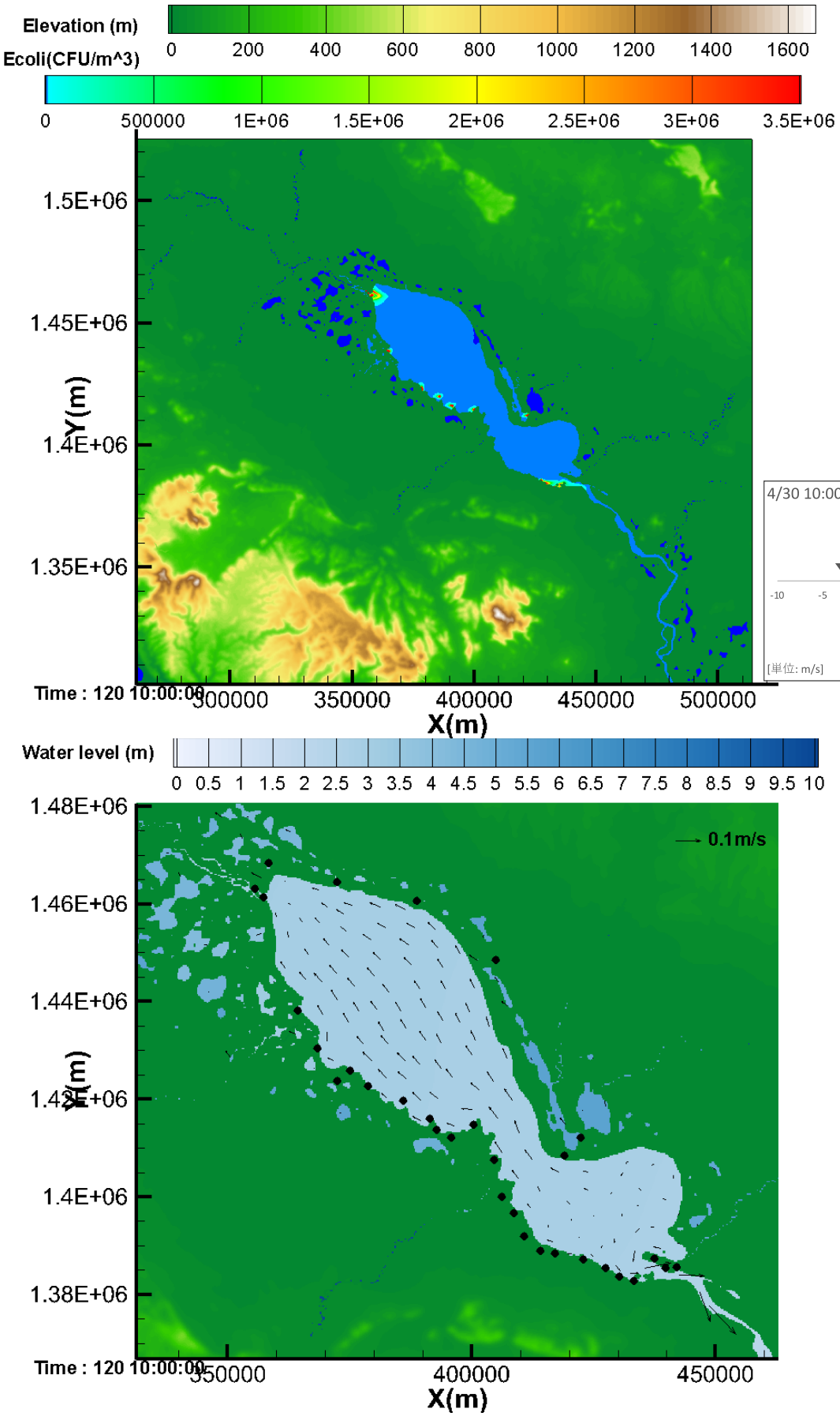
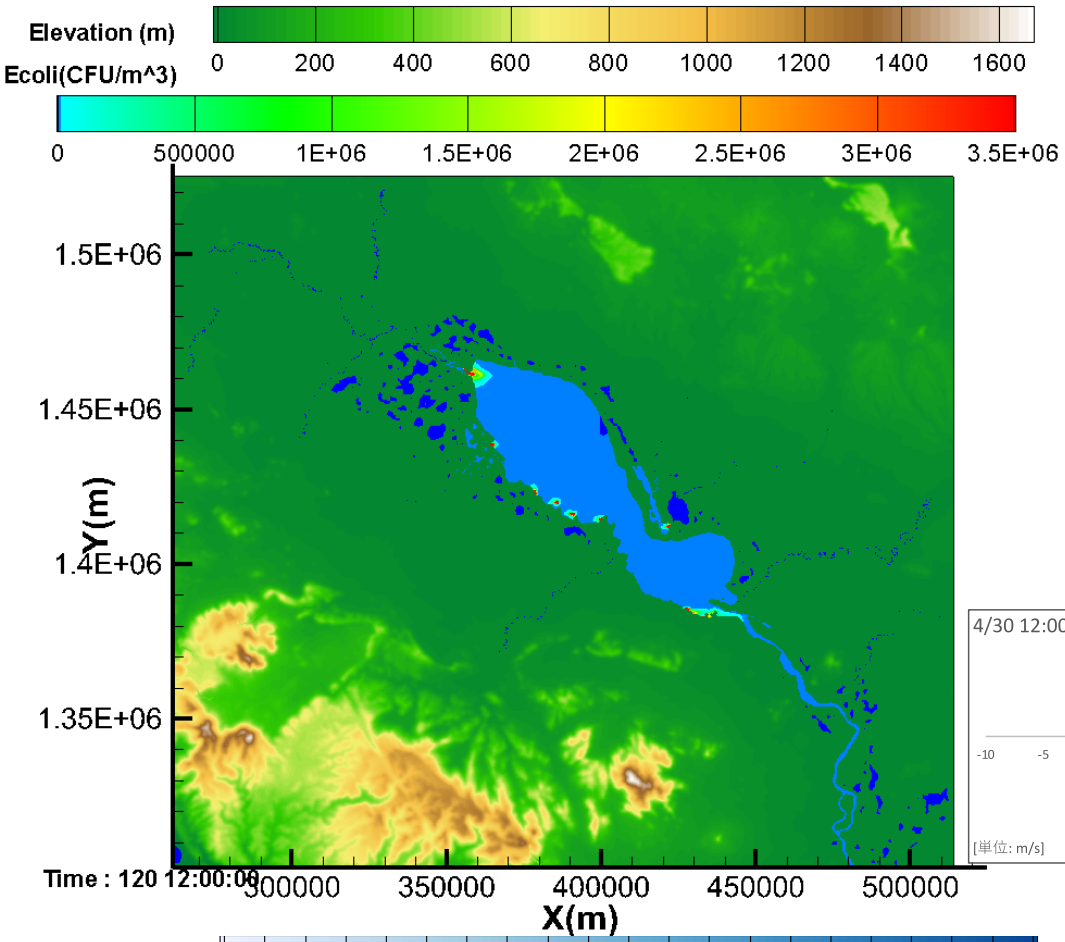


図4-42 4月30日10:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



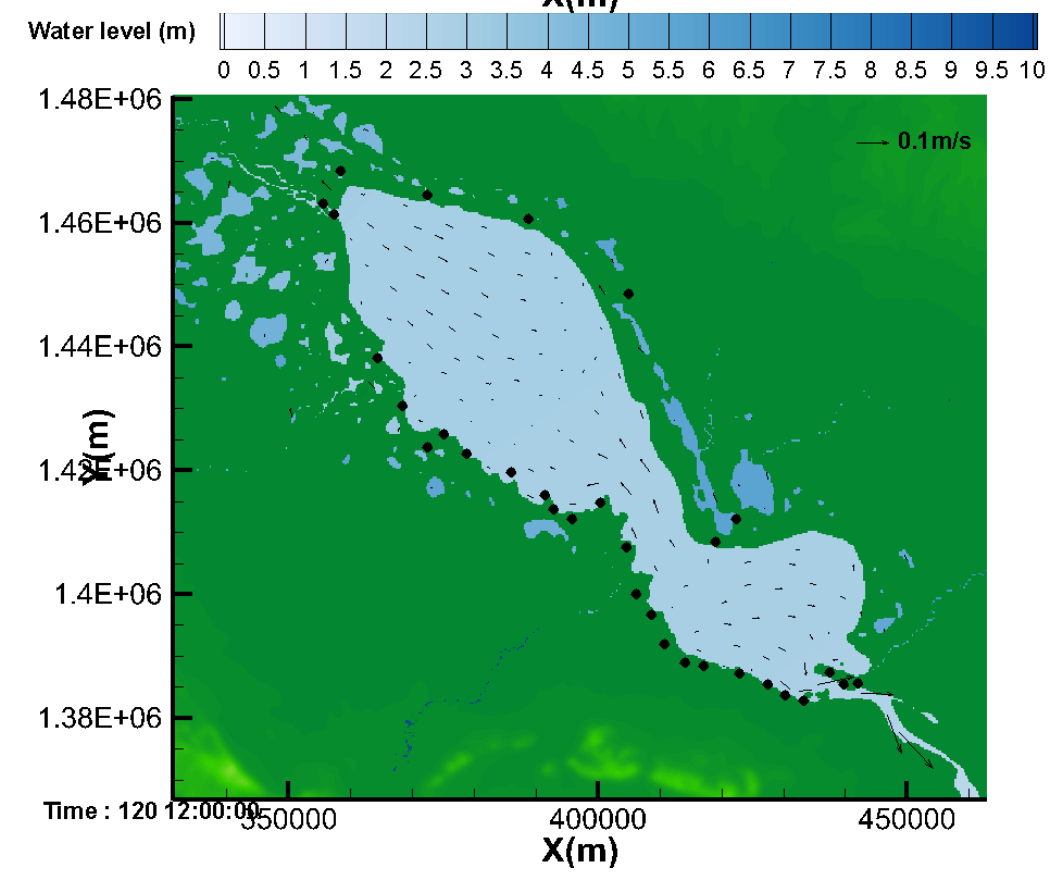


図4-43 4月30日12:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

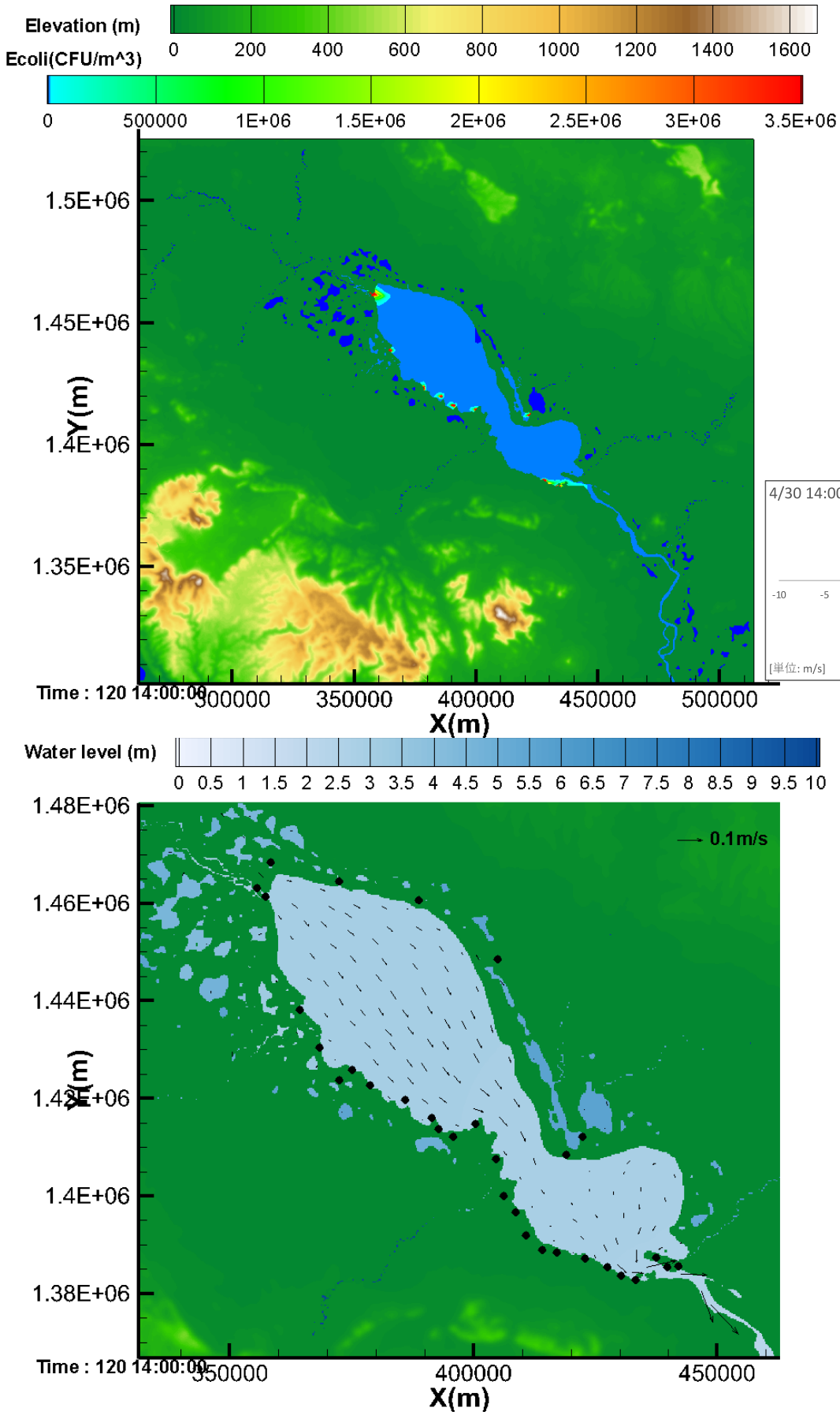
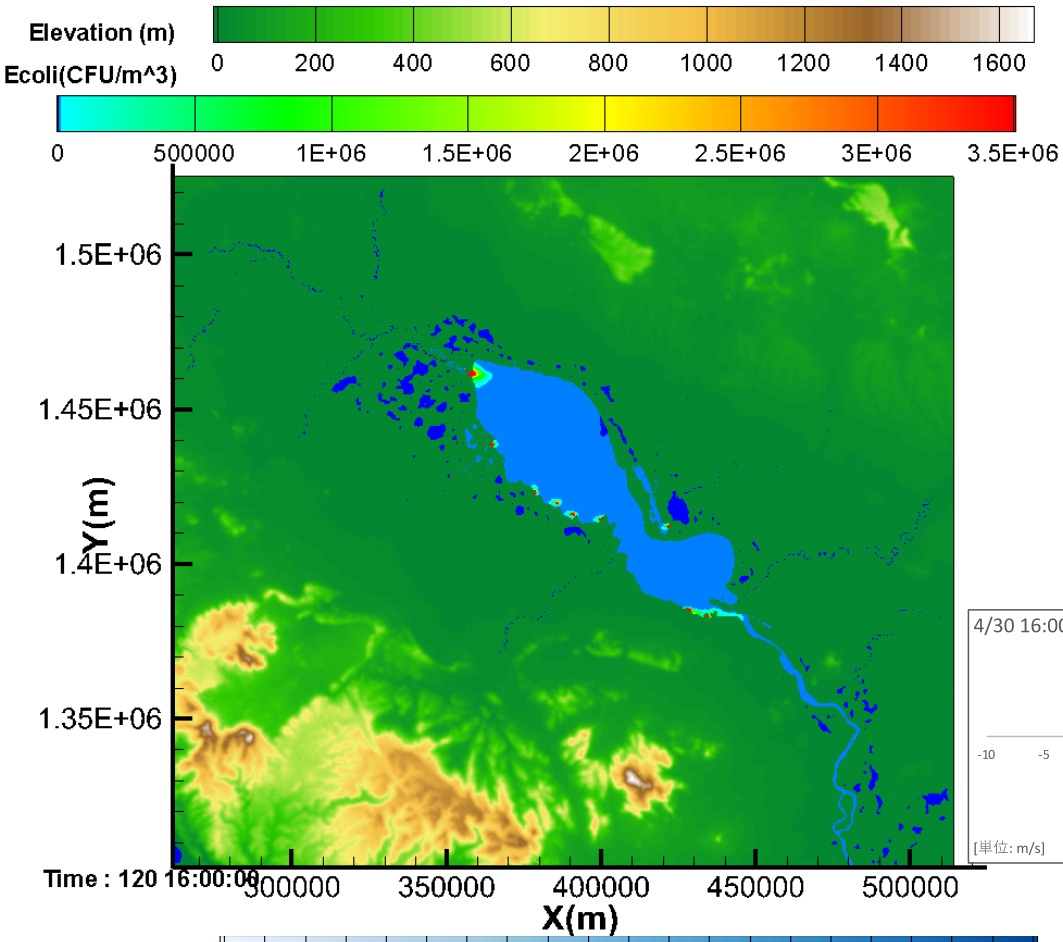


図4-44 4月30日14:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



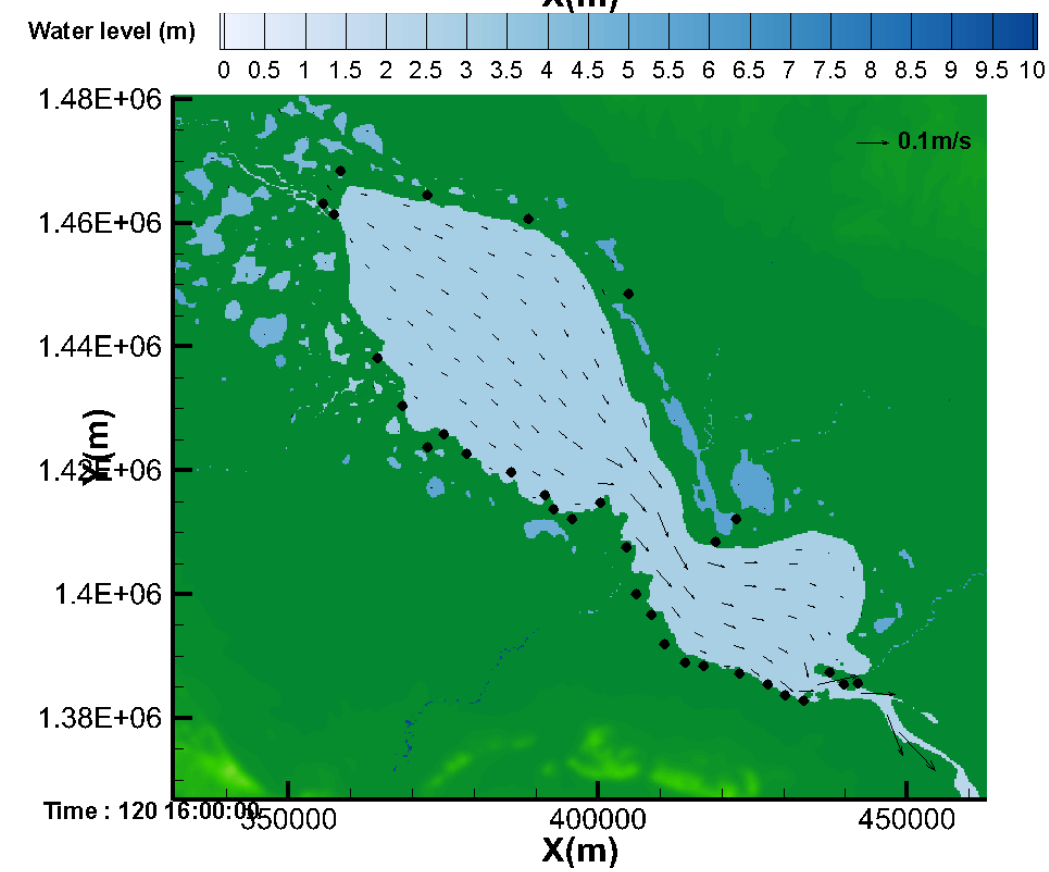


図4-45 4月30日16:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

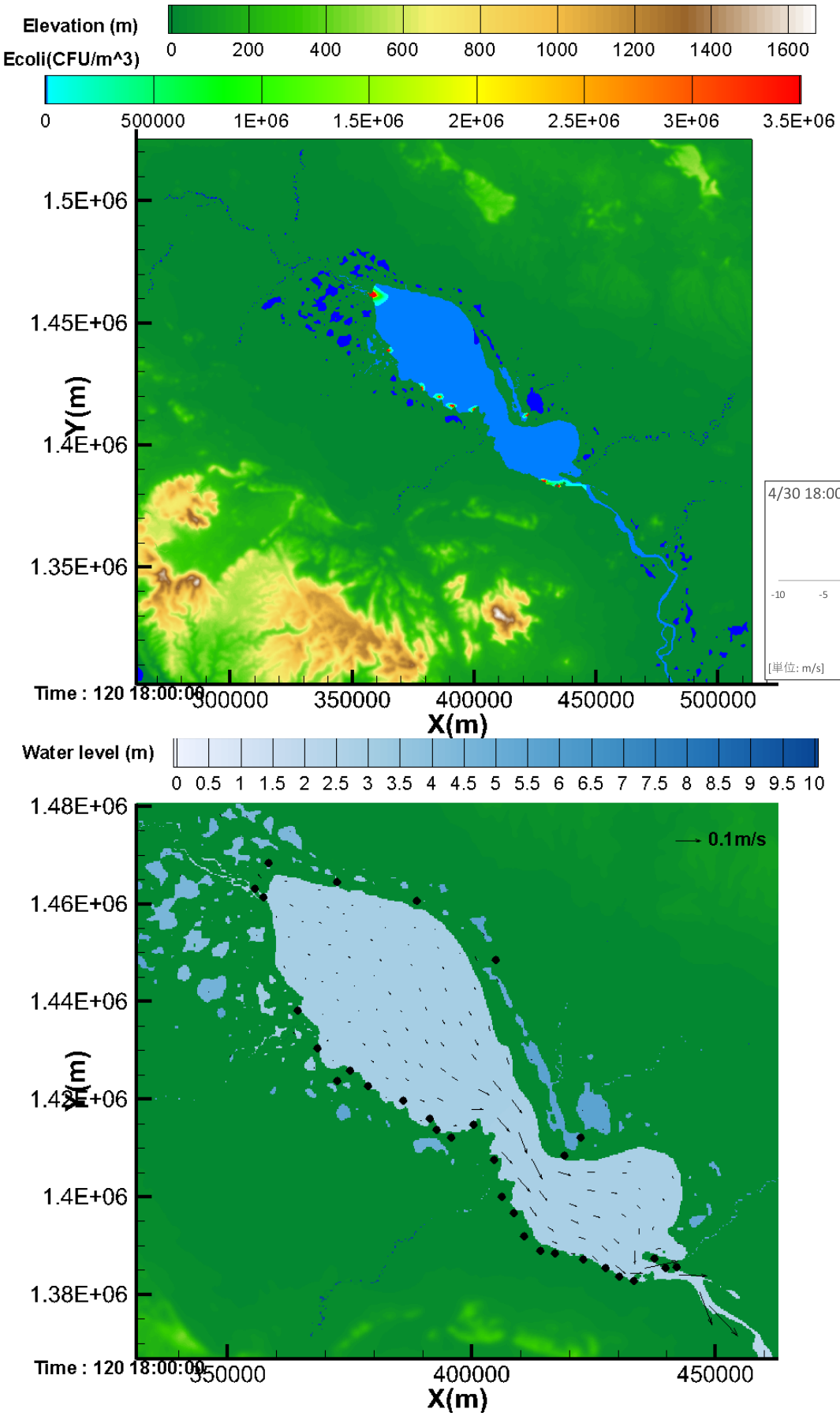
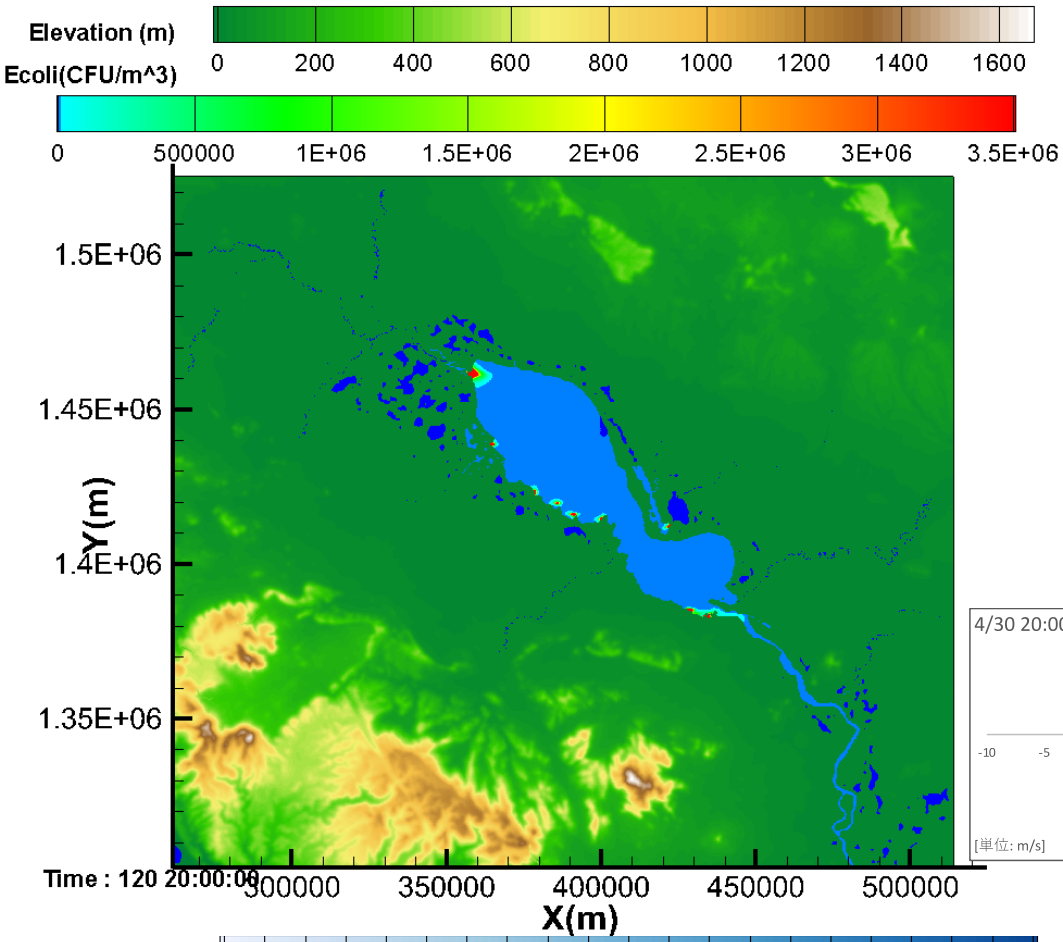


図4-46 4月30日18:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



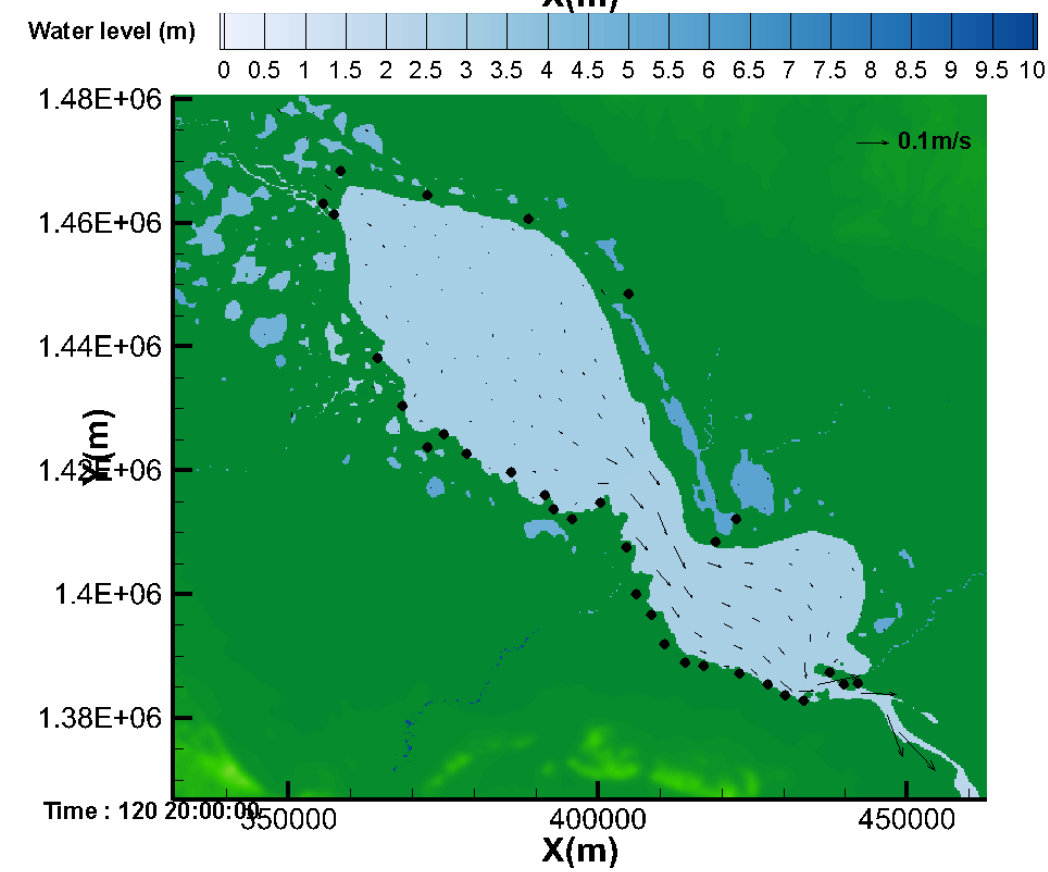
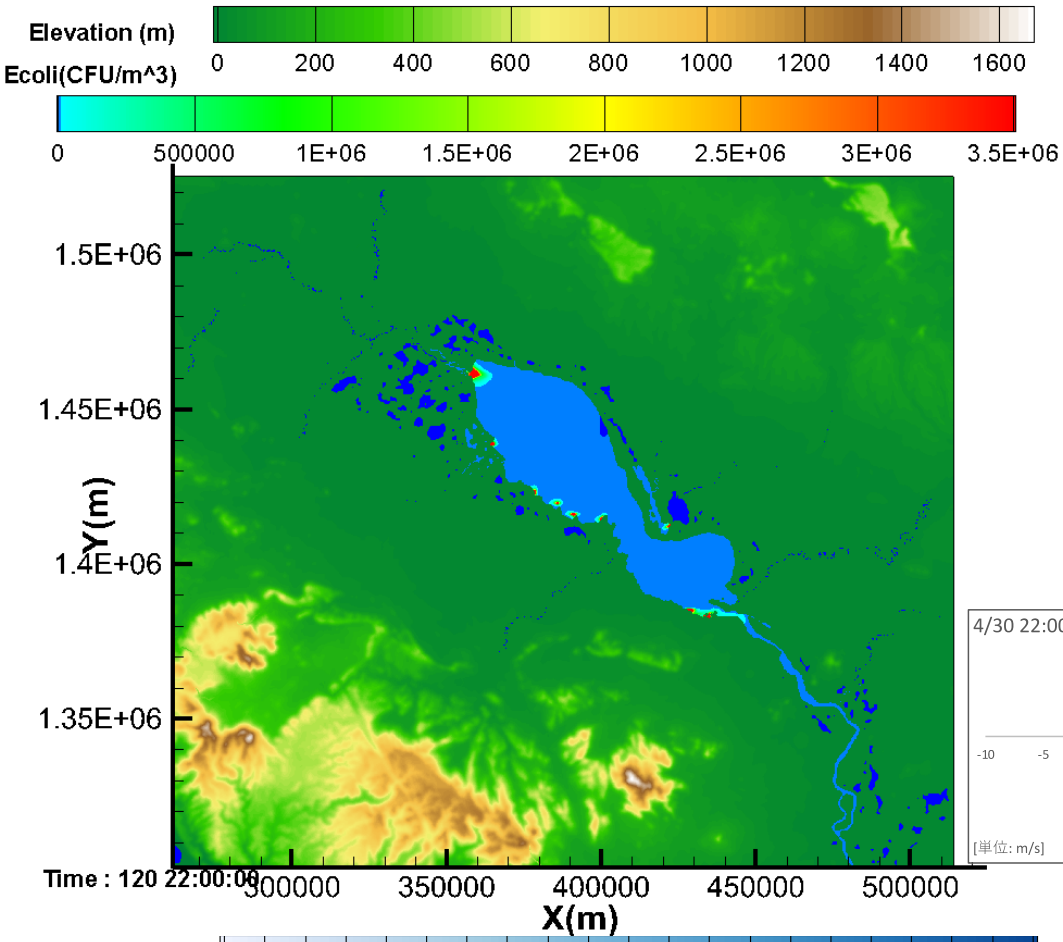


図4-47 4月30日20:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



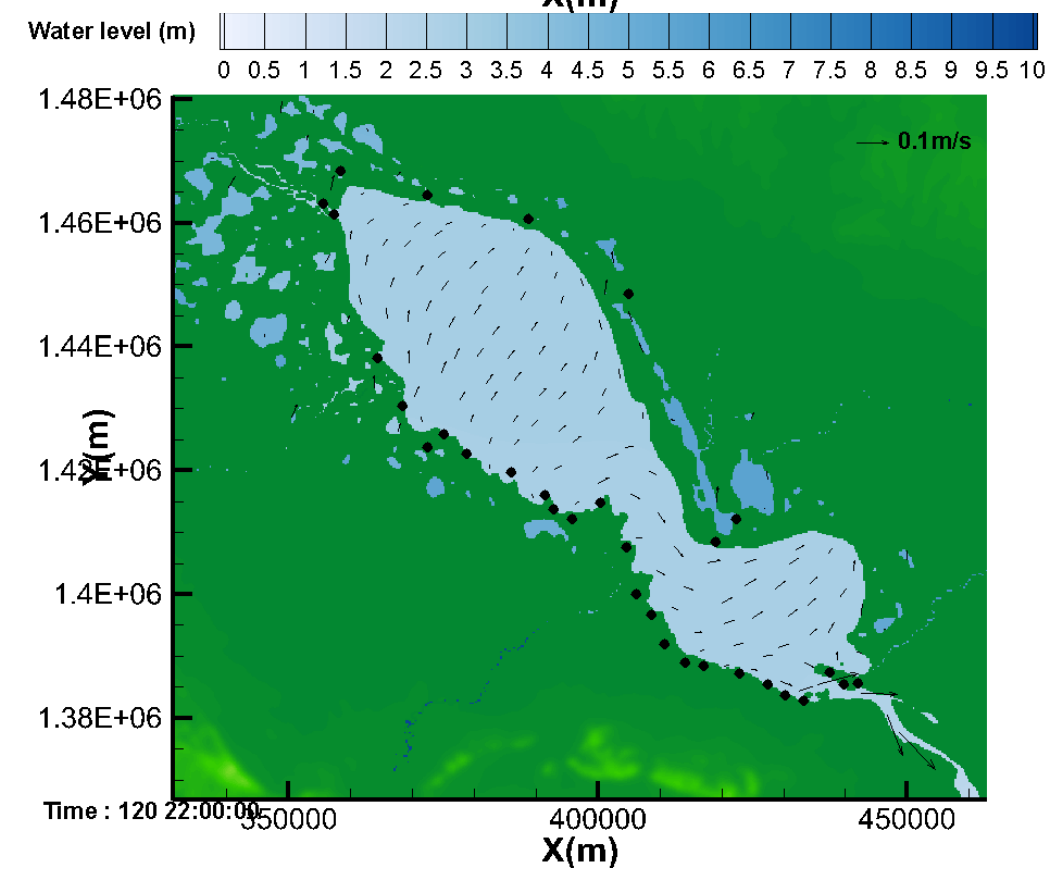
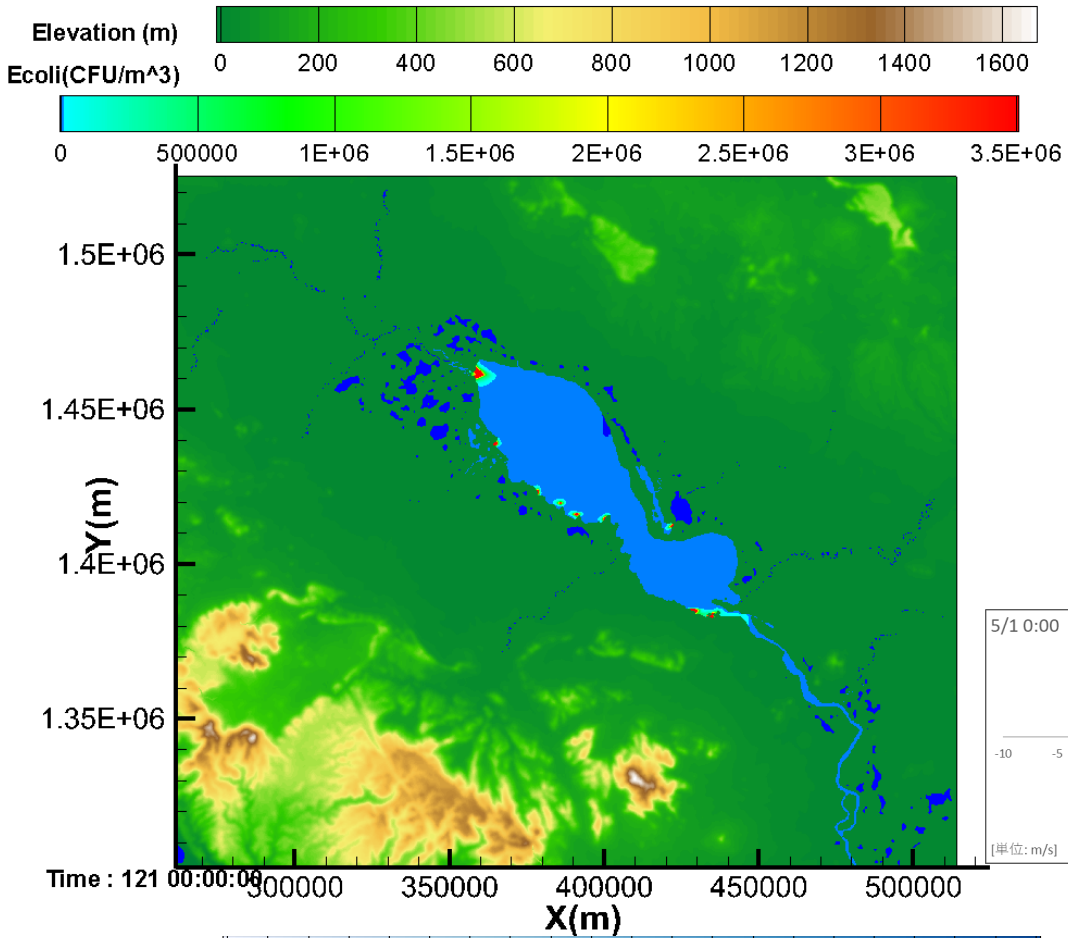


図4-48 4月30日22:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



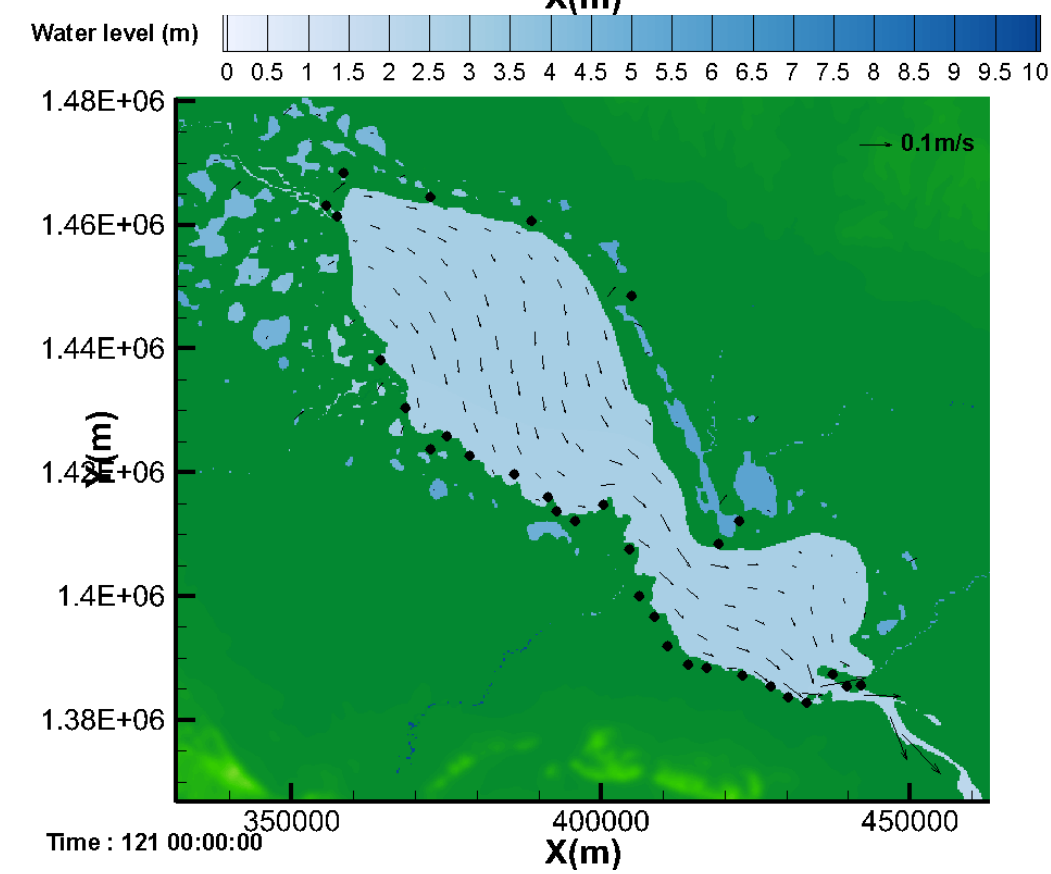


図4-49 5月1日0:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

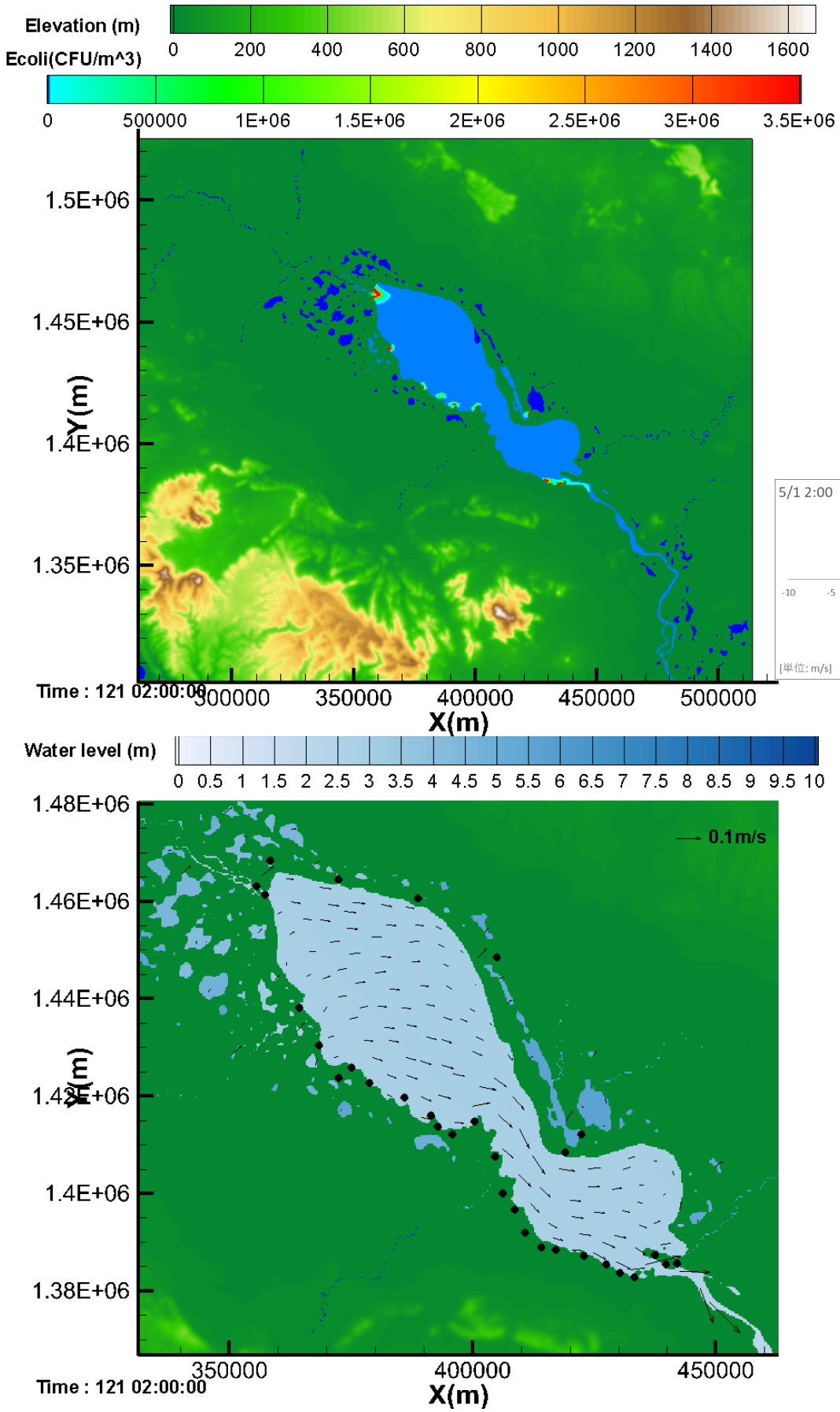


図4-50 5月1日2:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

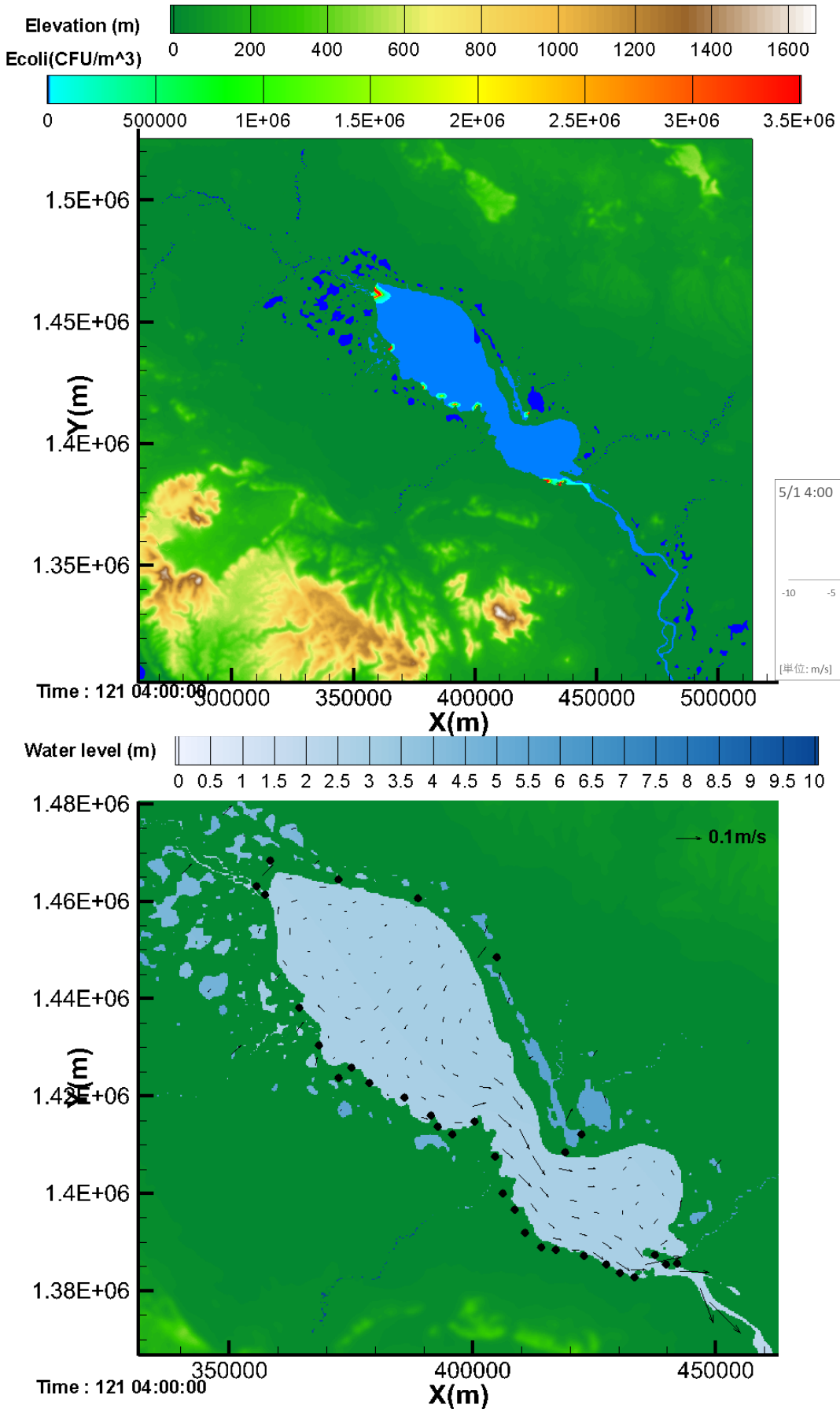


図4-51 5月1日4:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

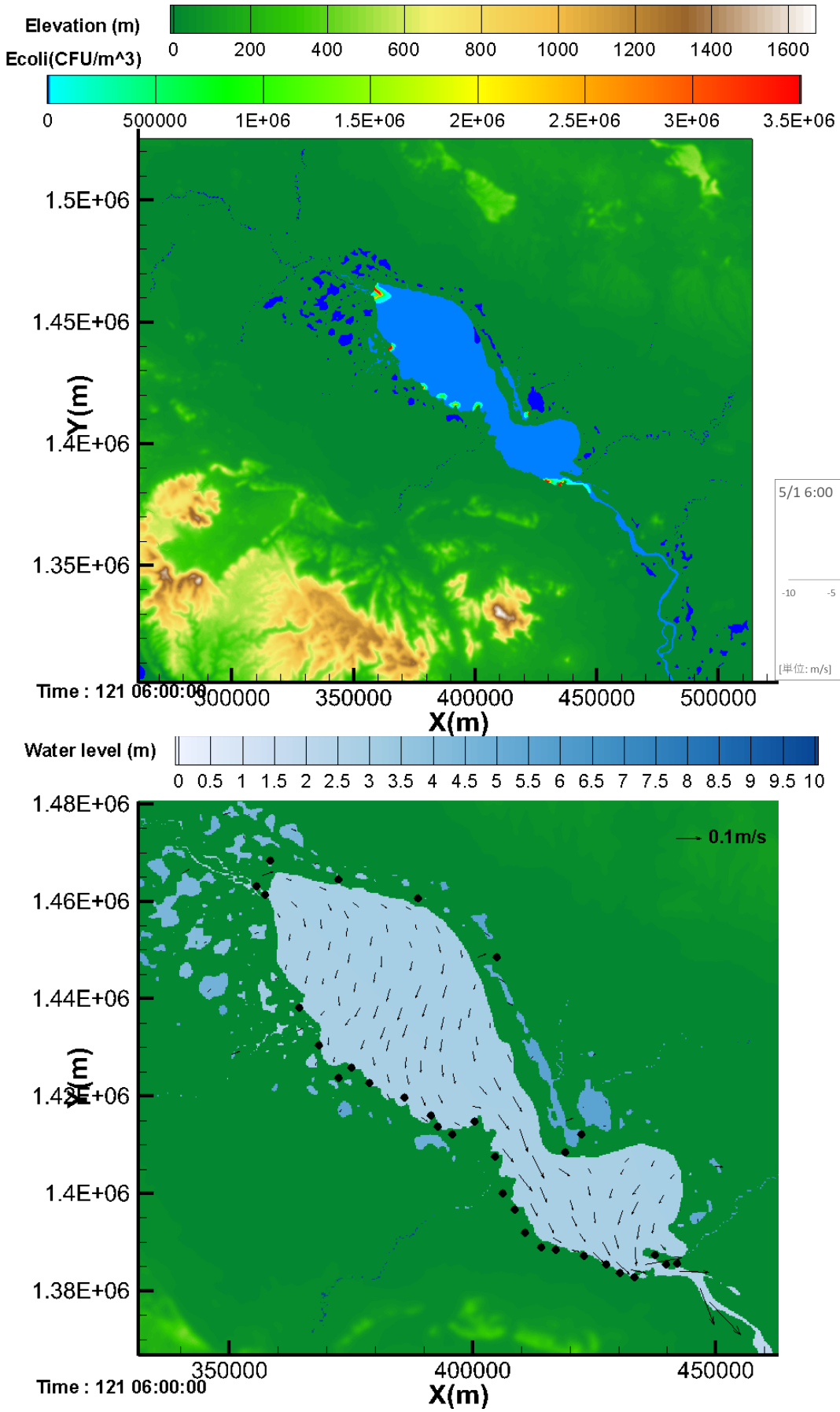
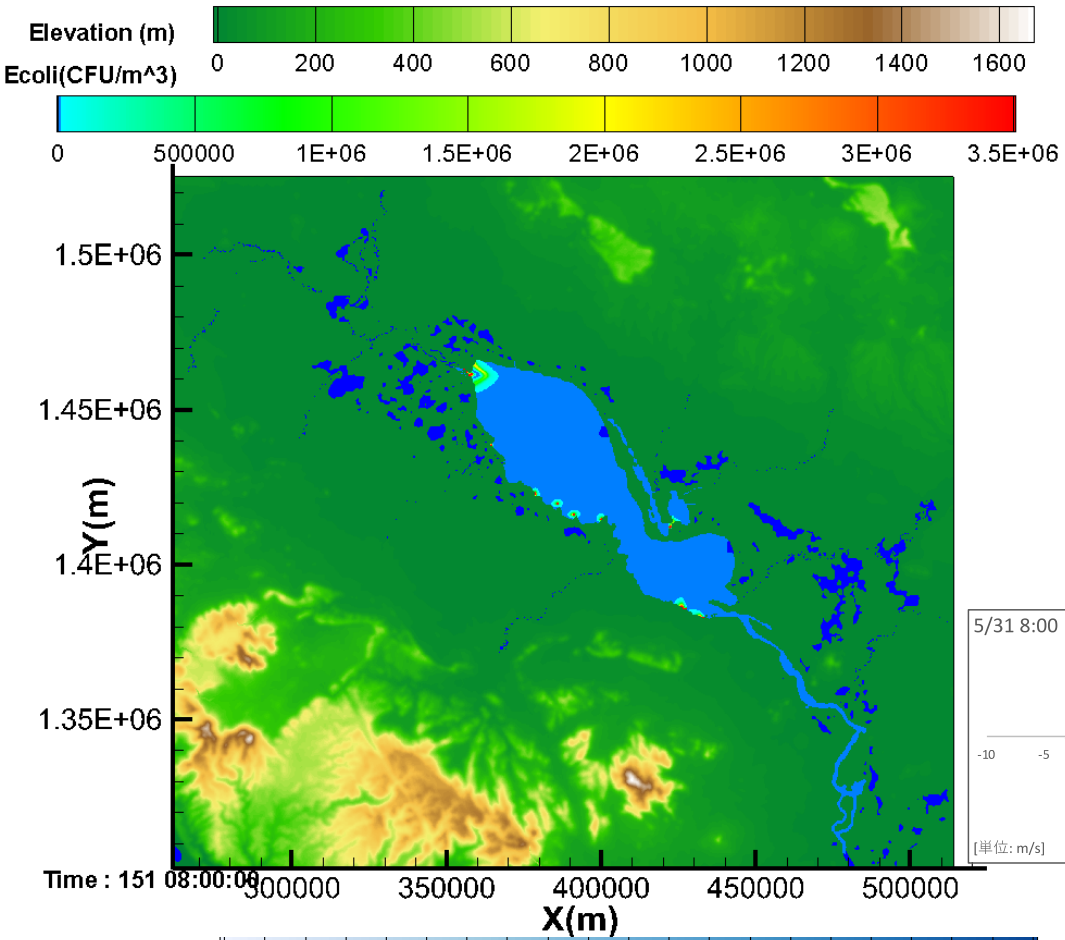


図4-52 5月1日6:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



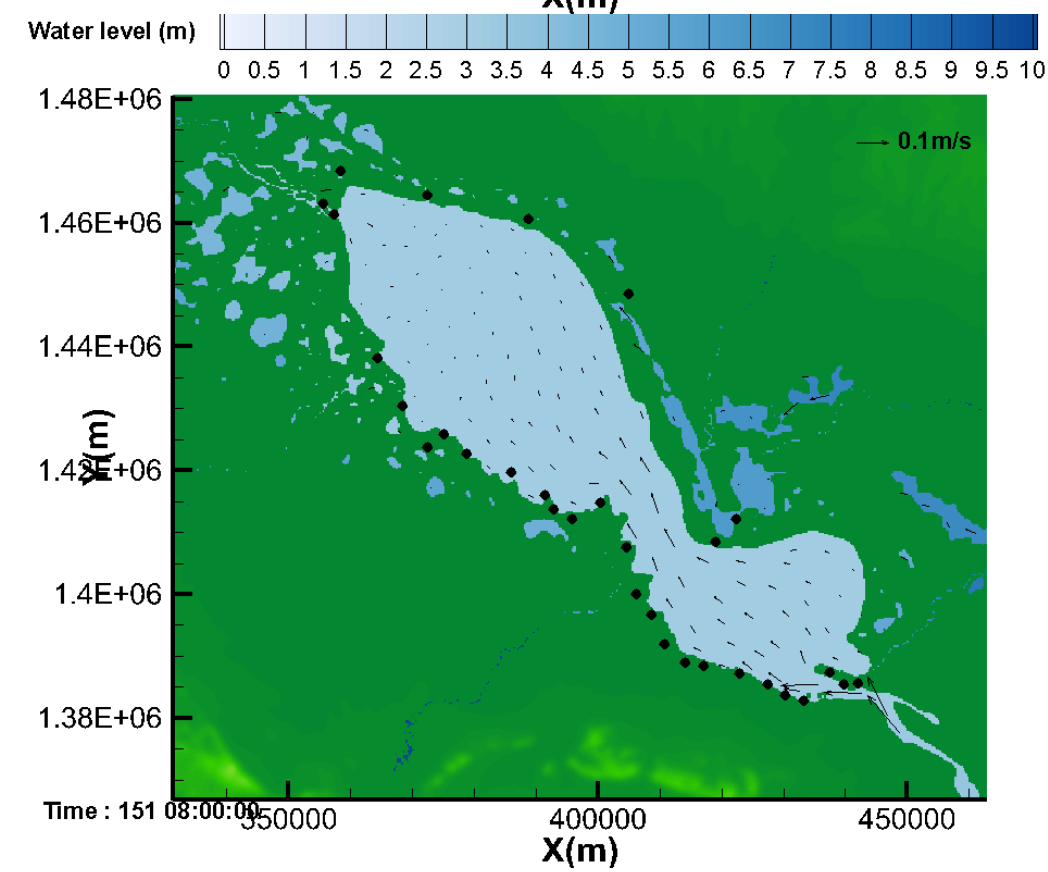
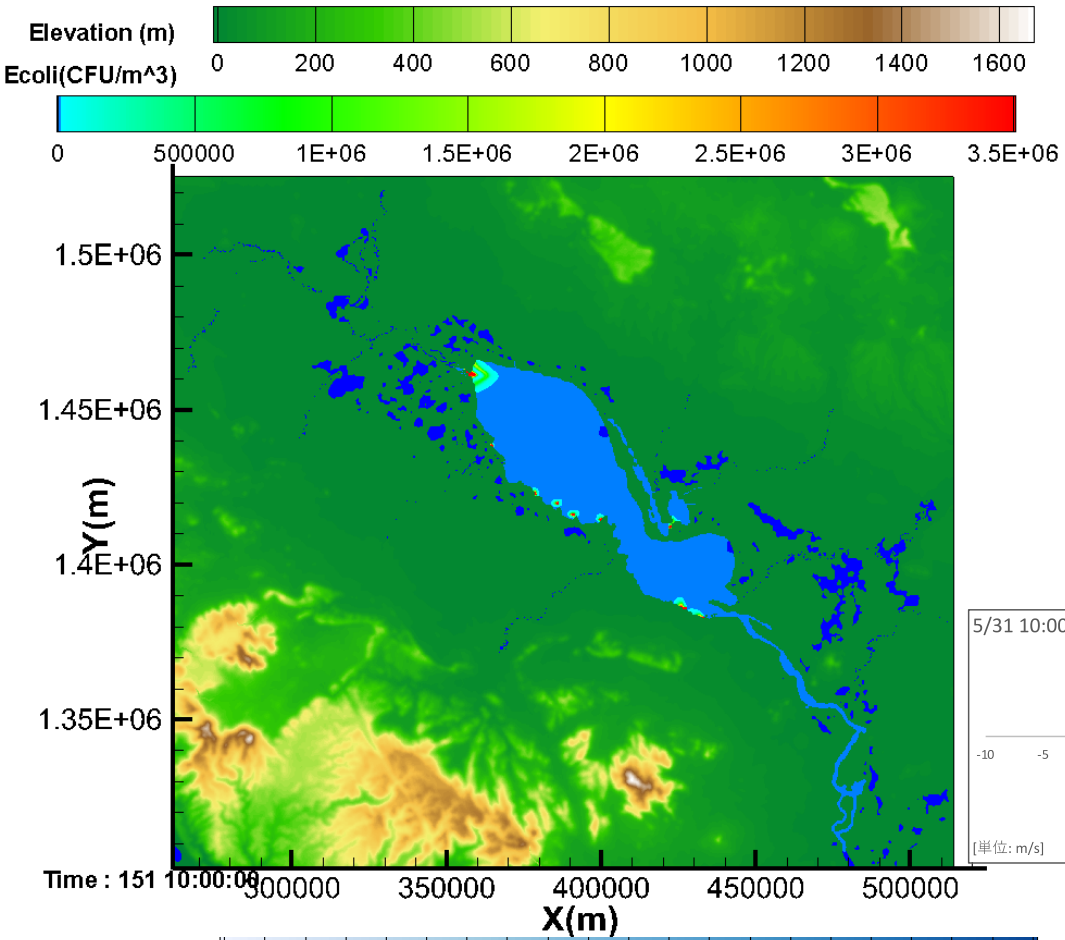


図4-53 5月31日8:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



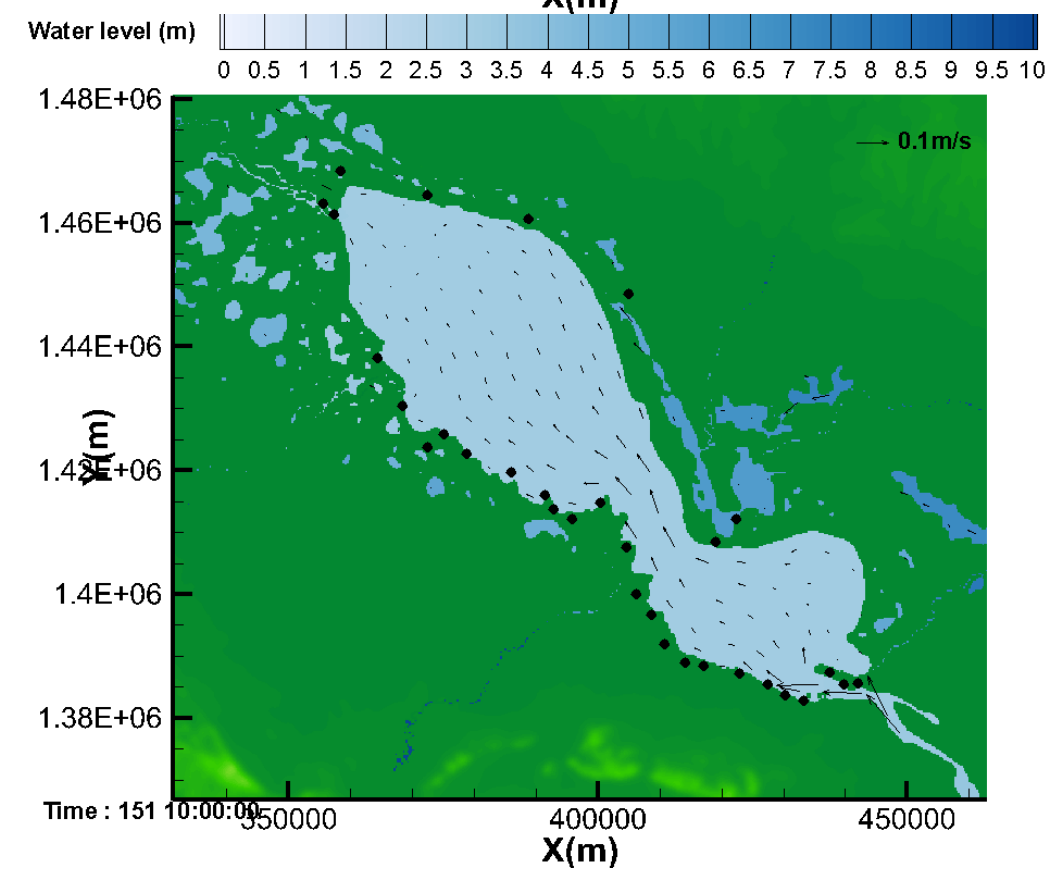


図4-54 5月31日10:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

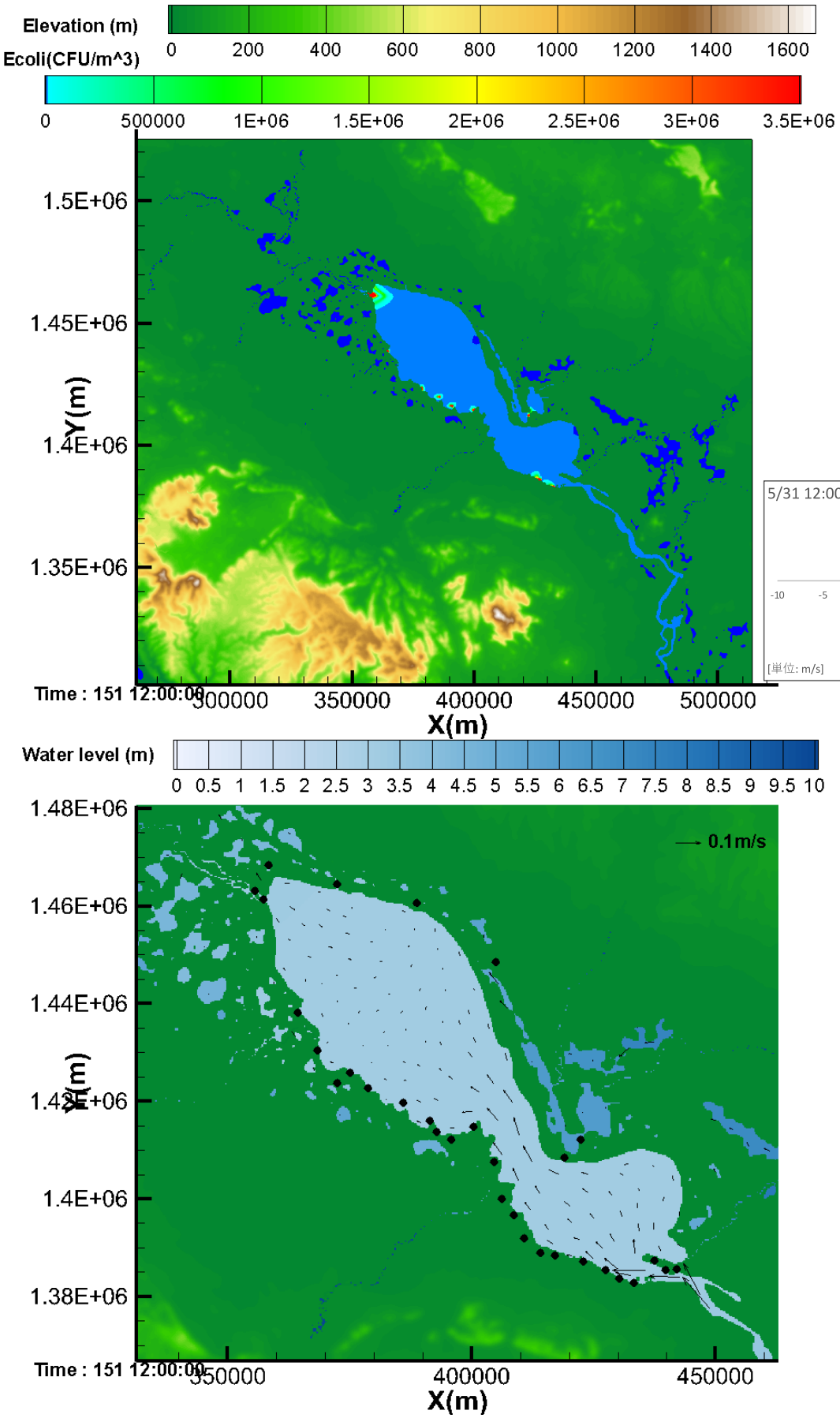


図4-55 5月31日12:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

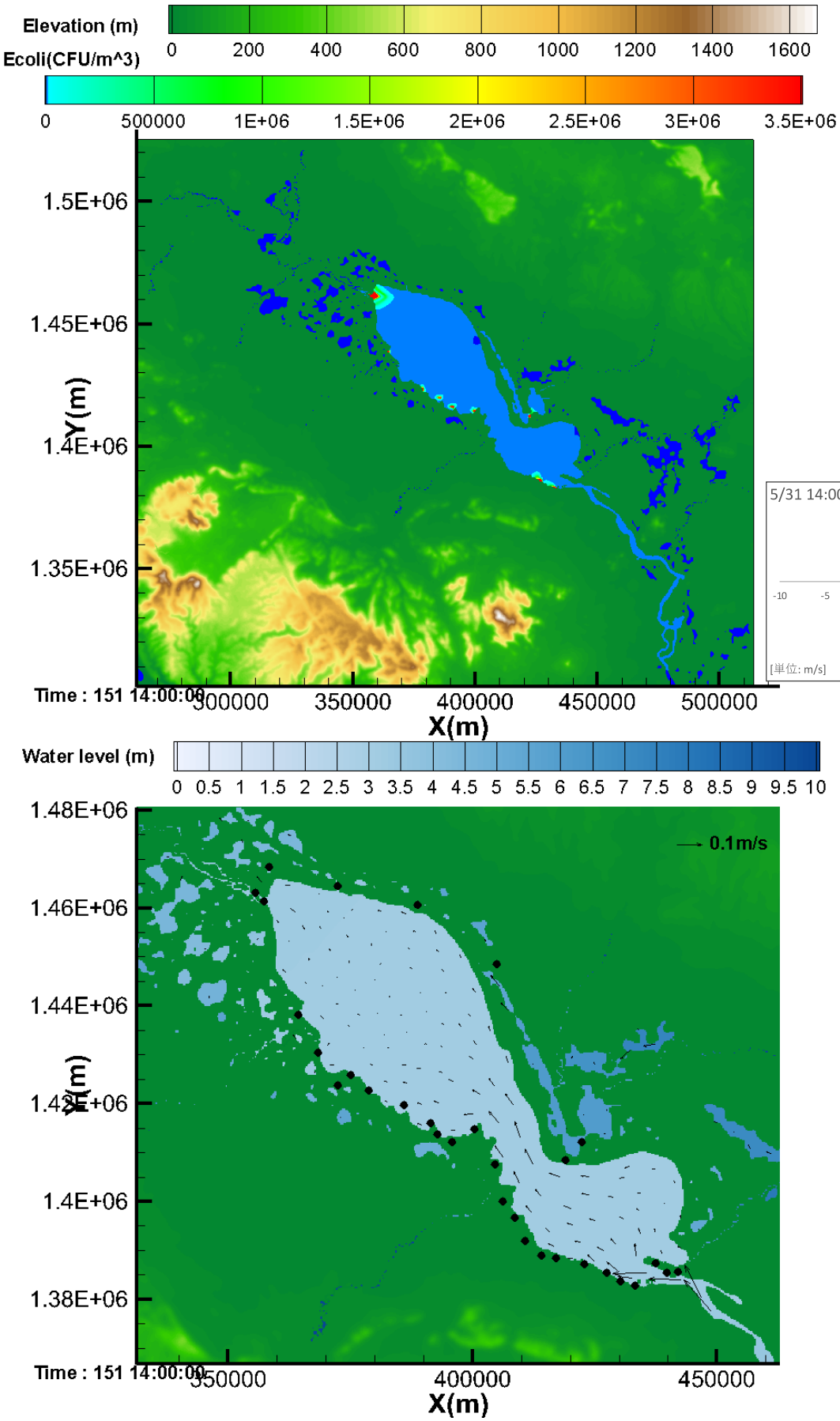
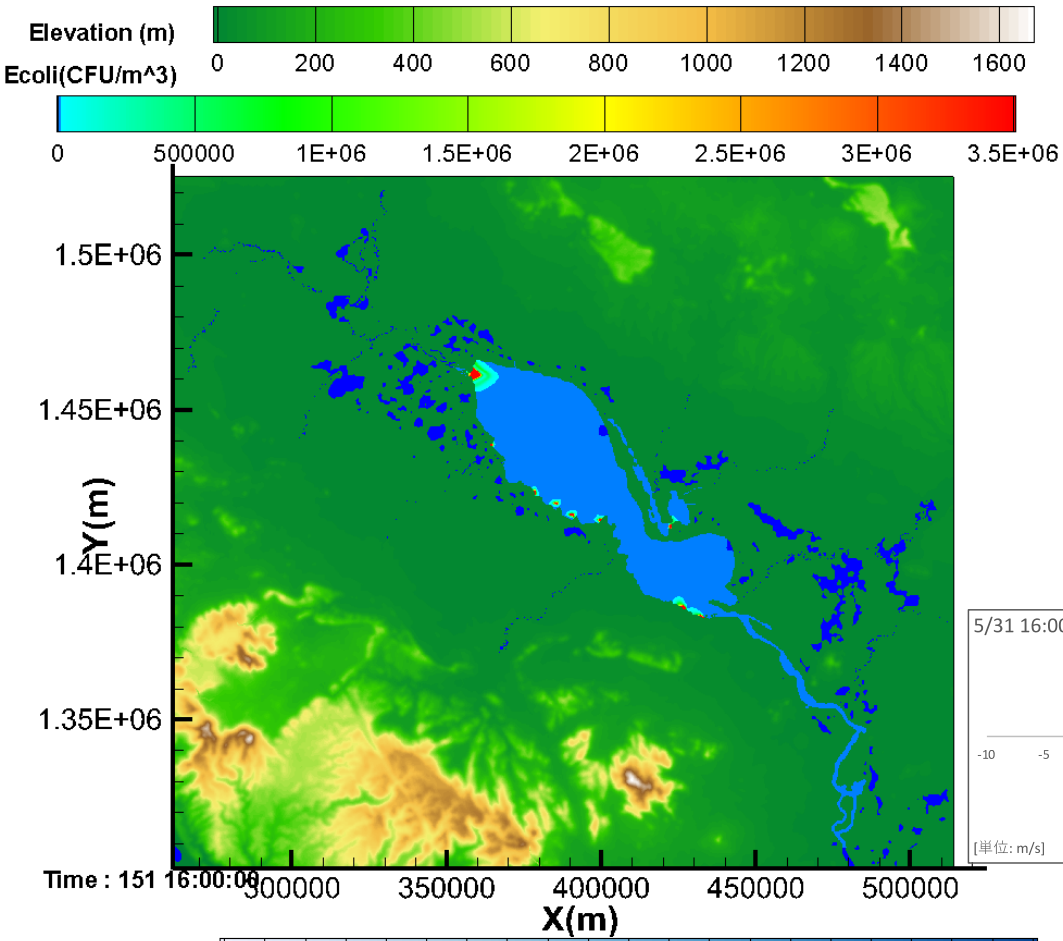


図4-56 5月31日14:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



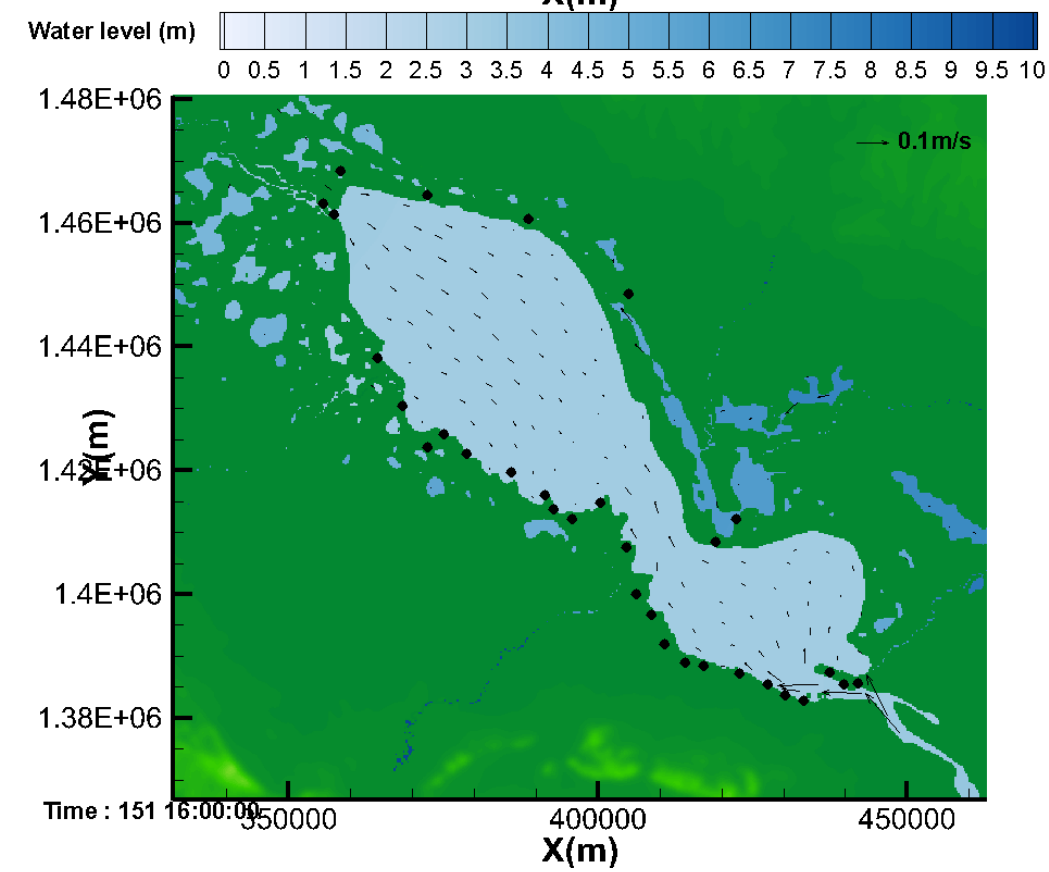


図4-57 5月31日16:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

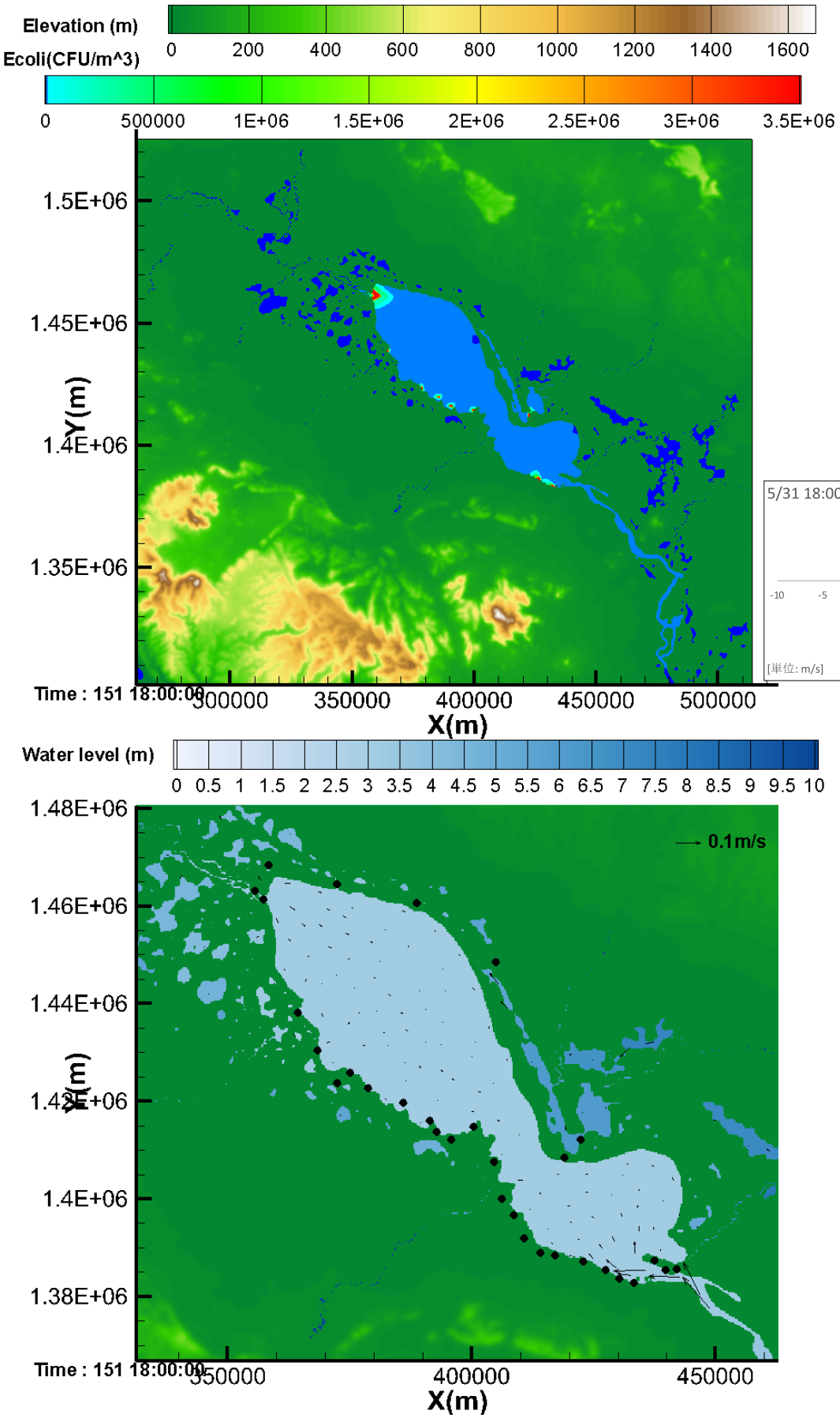


図4-58 5月31日18:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

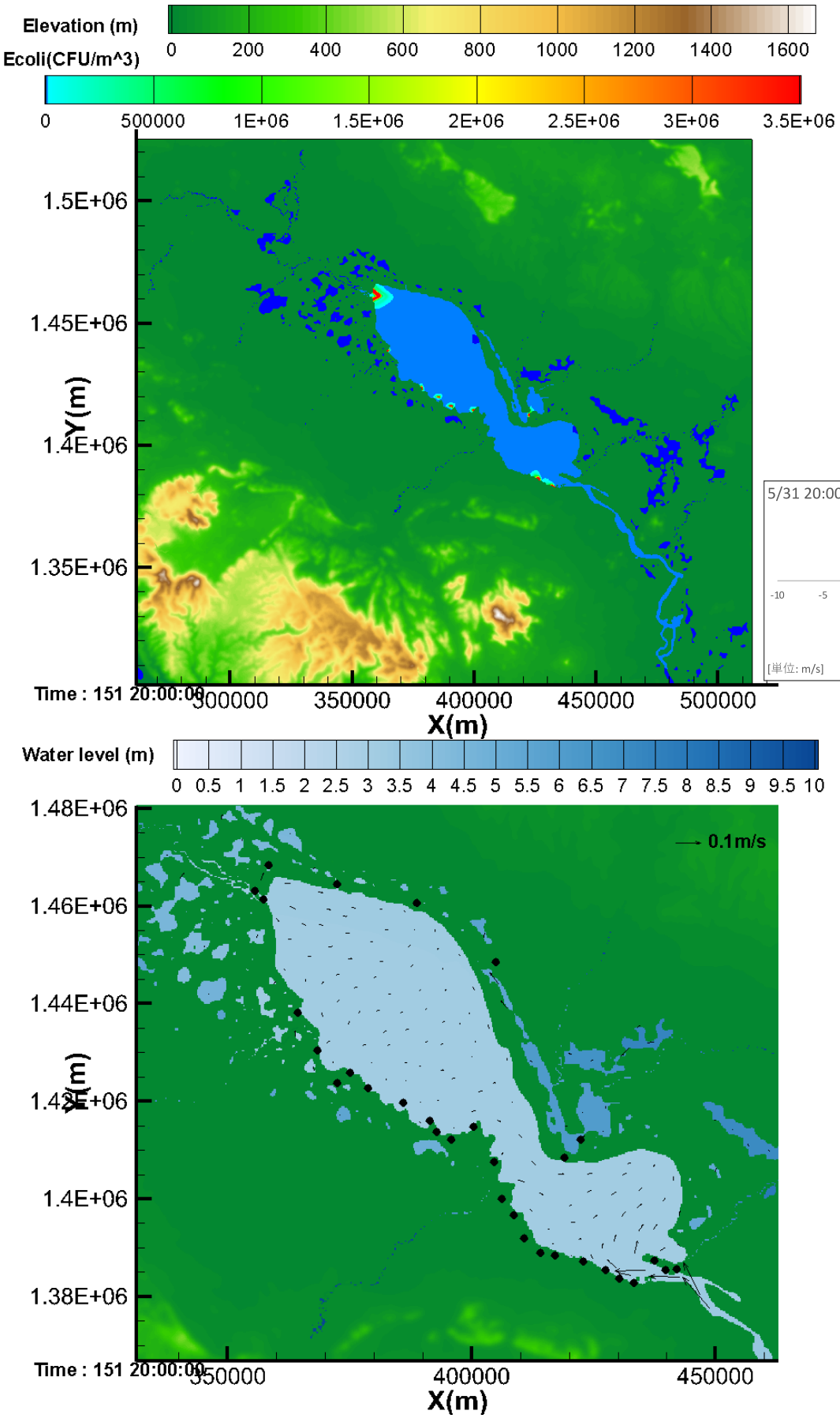
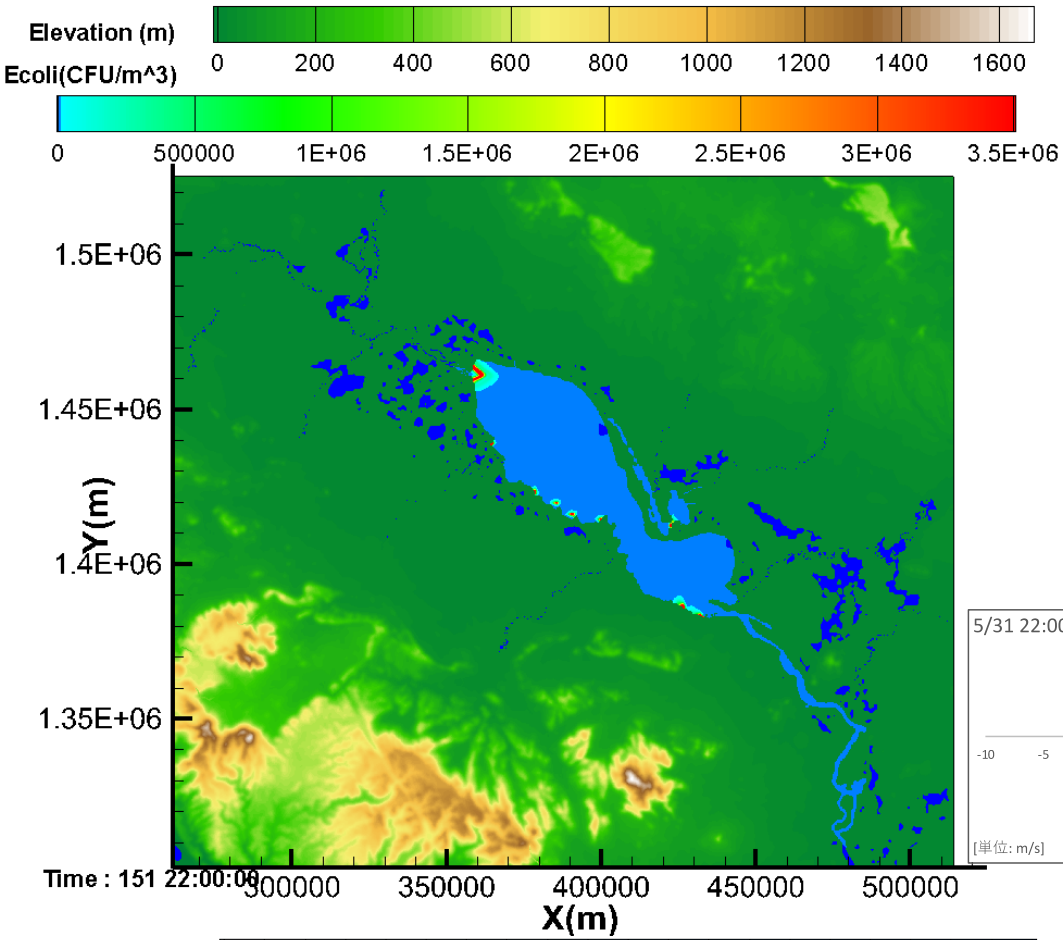


図4-59 5月31日20:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



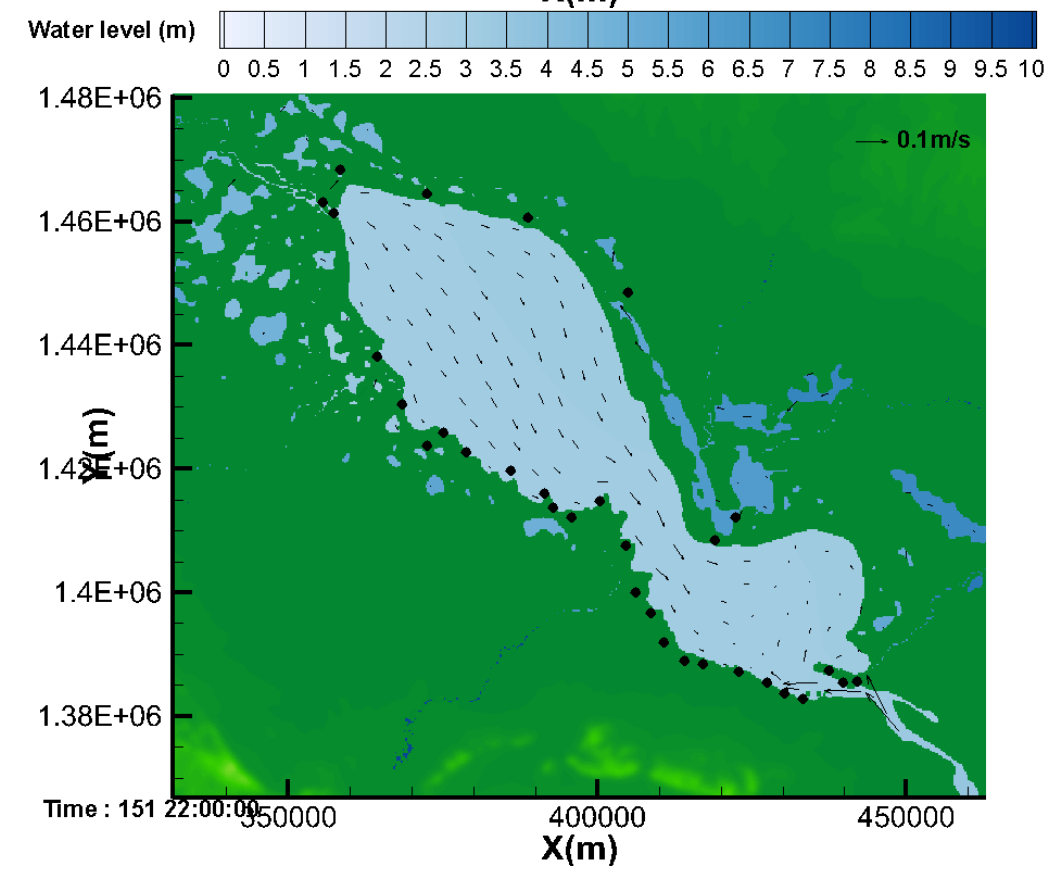


図4-60 5月31日22:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

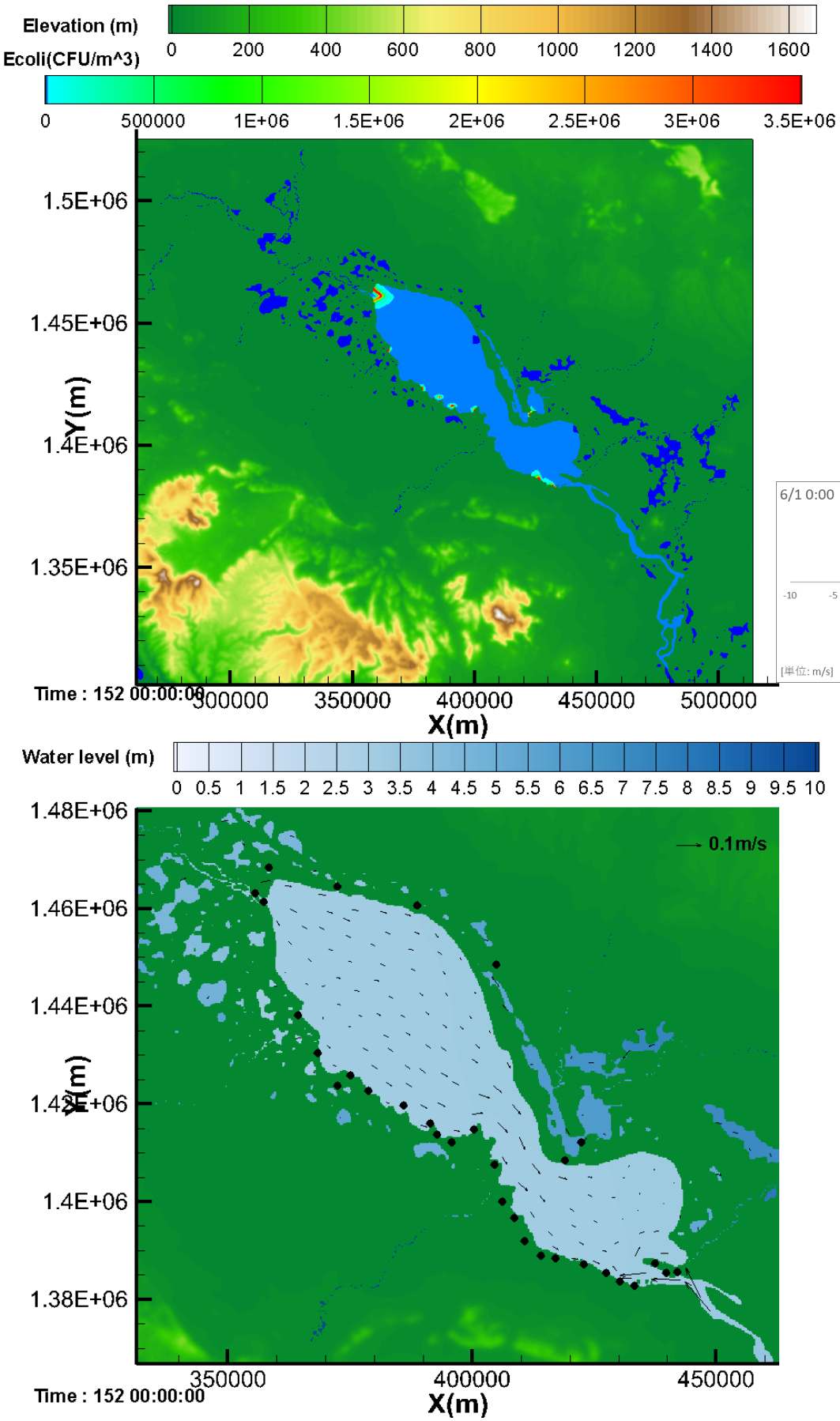
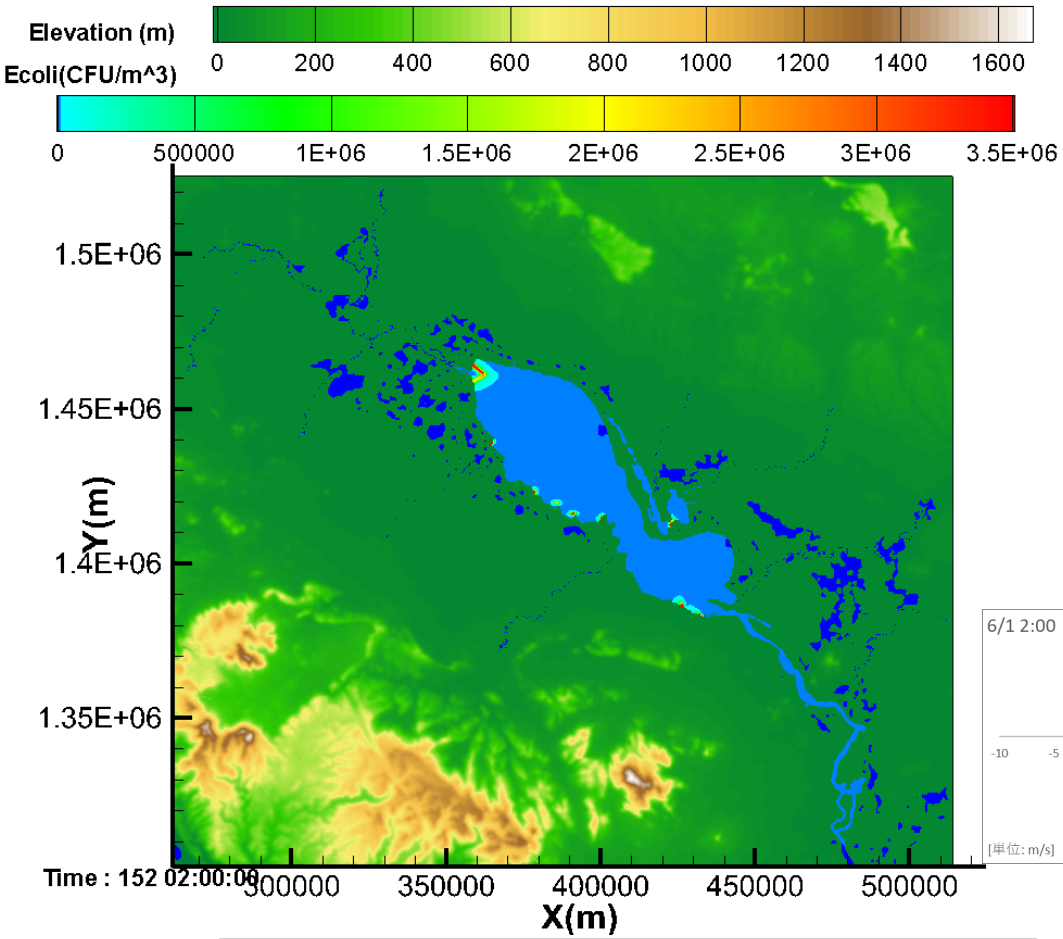


図4-61 6月1日0:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



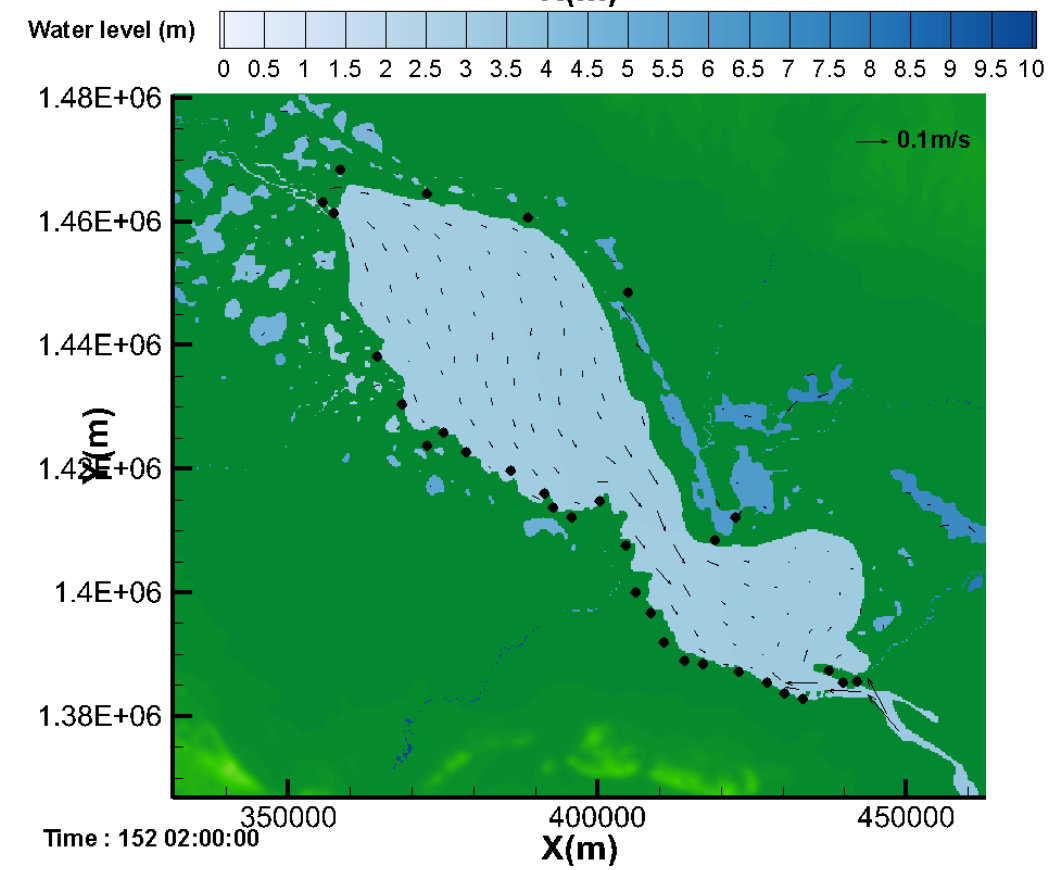
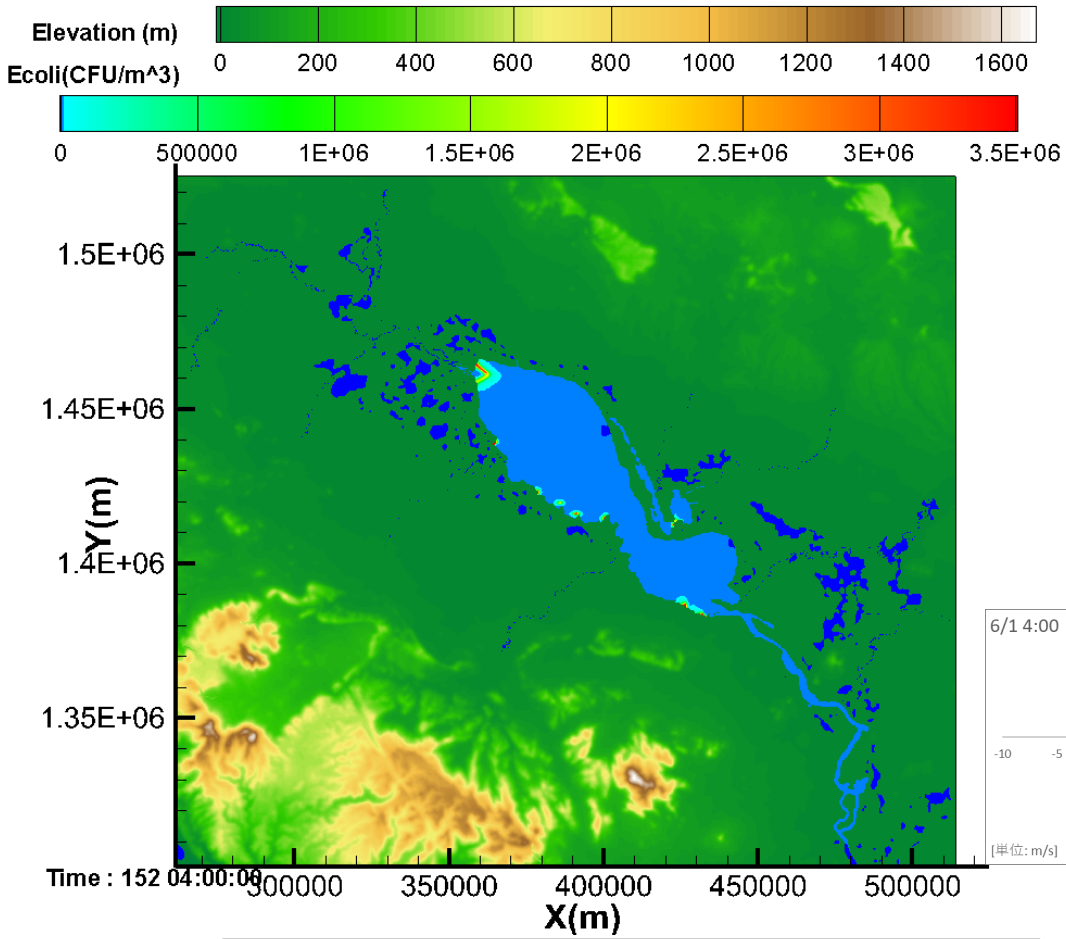


図4-62 6月1日2:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



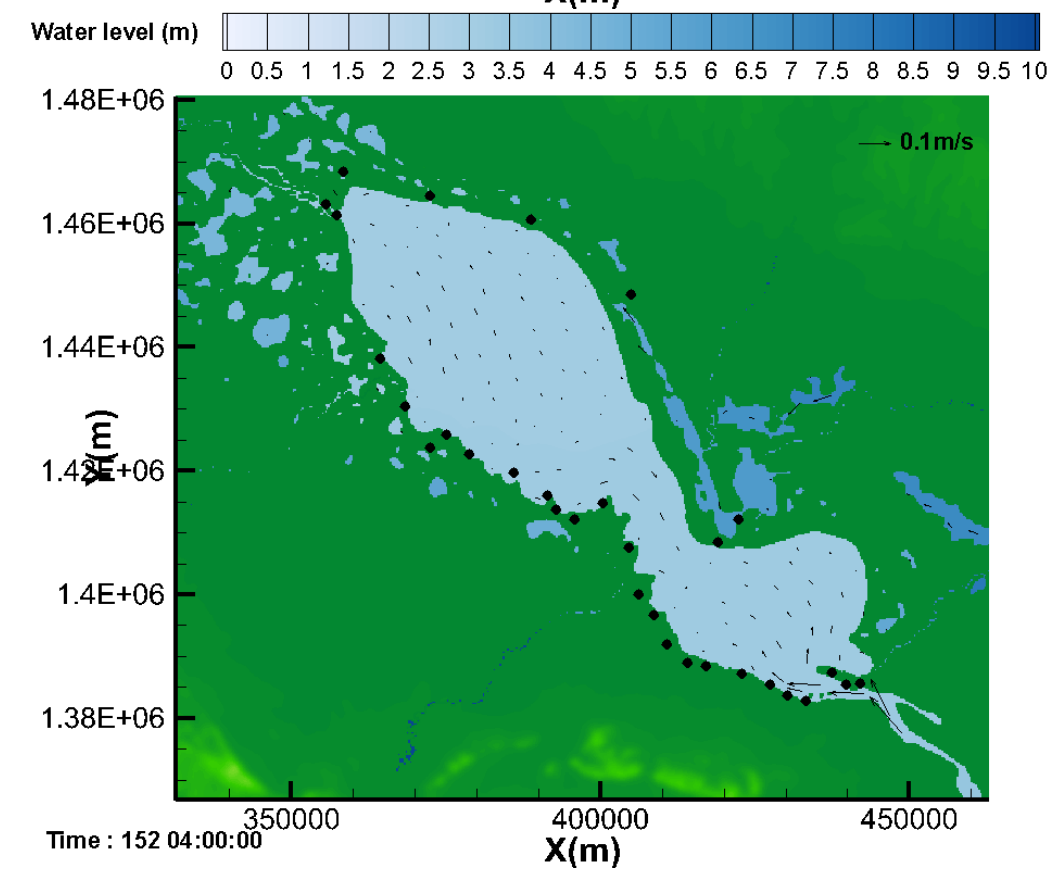


図4-63 6月1日4:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

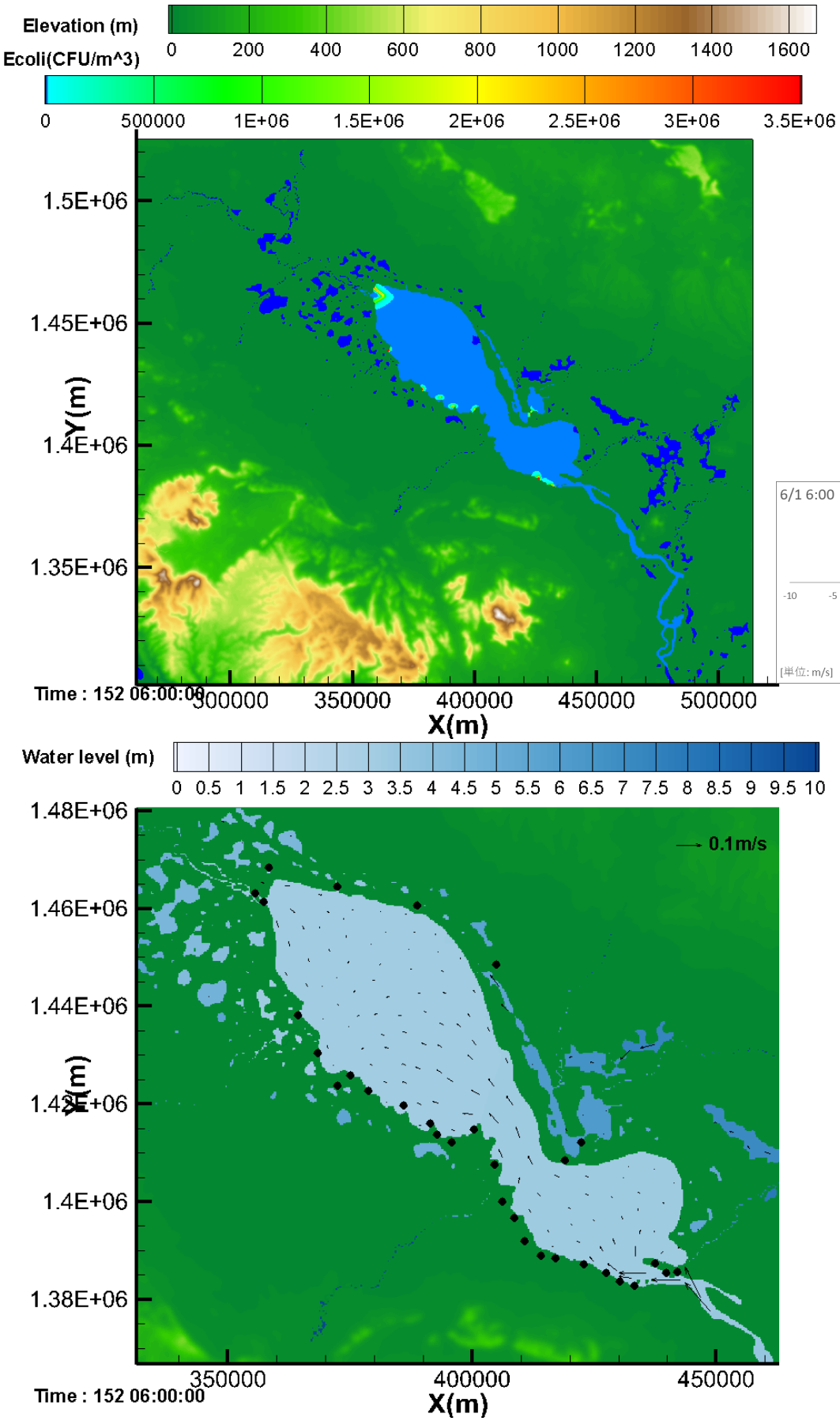
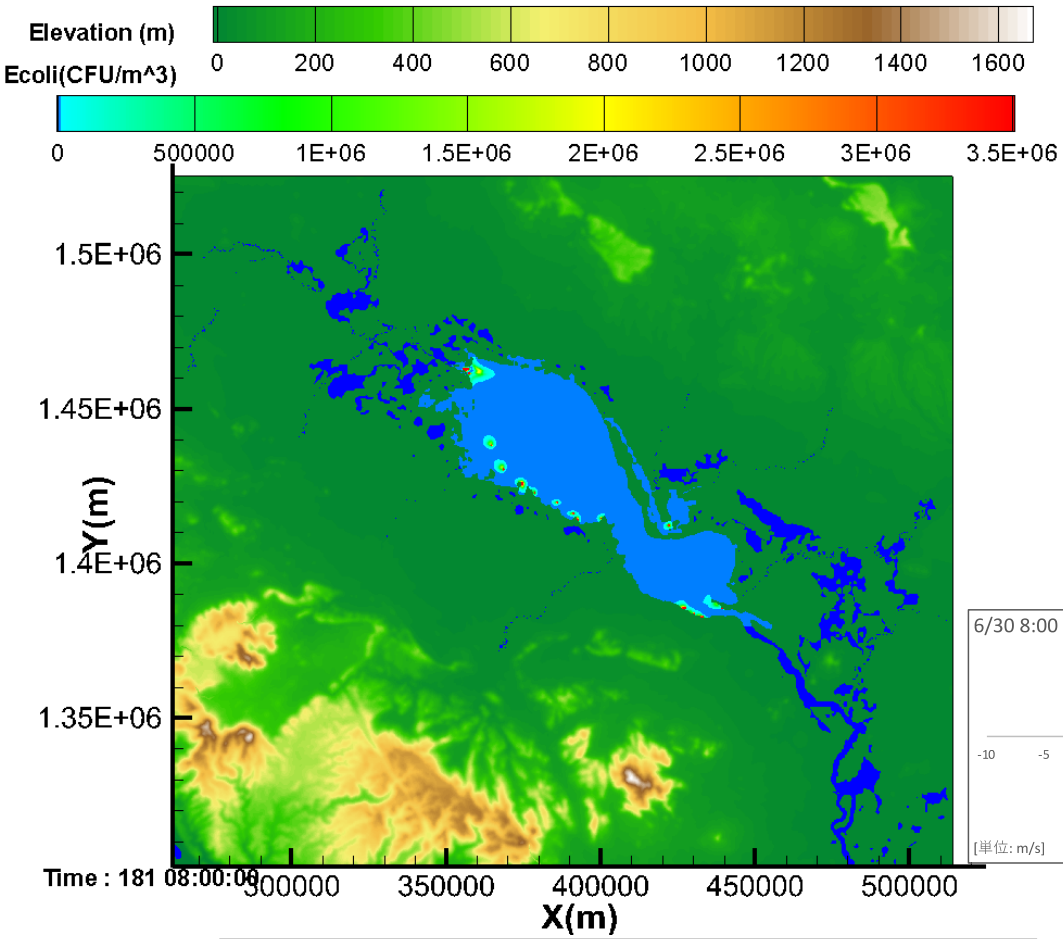


図4-64 6月1日6:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



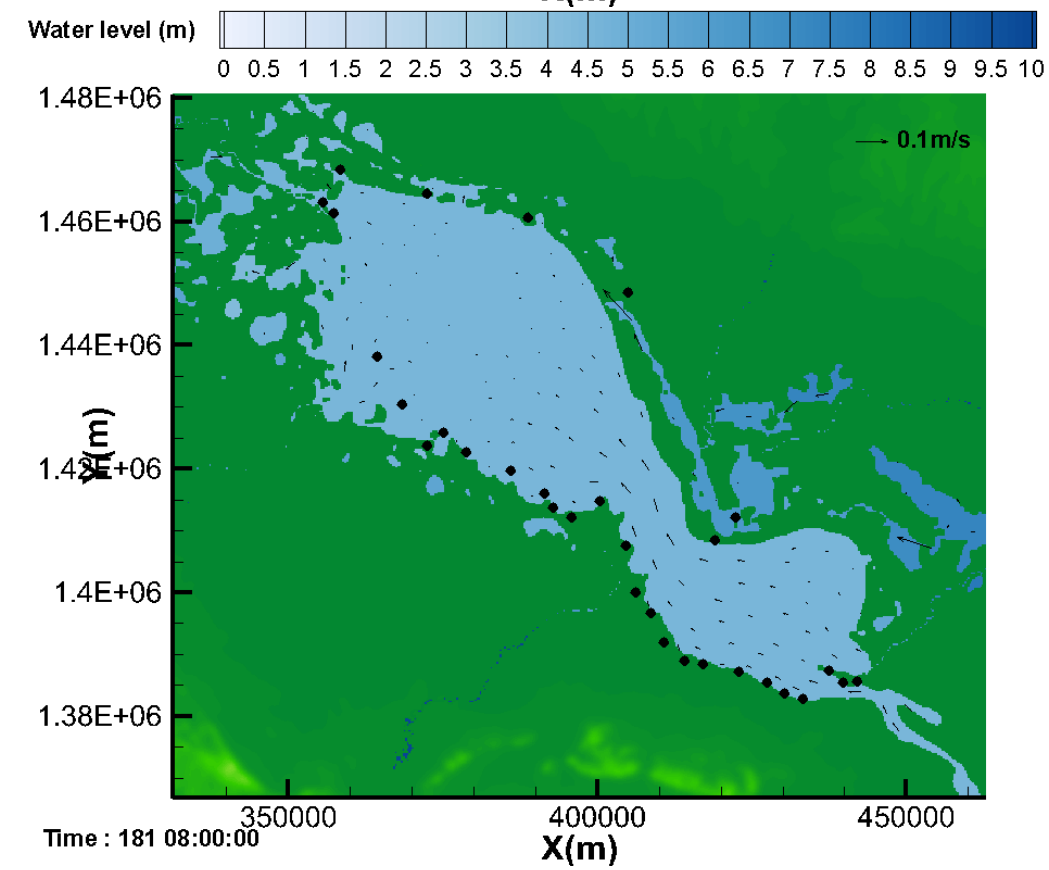
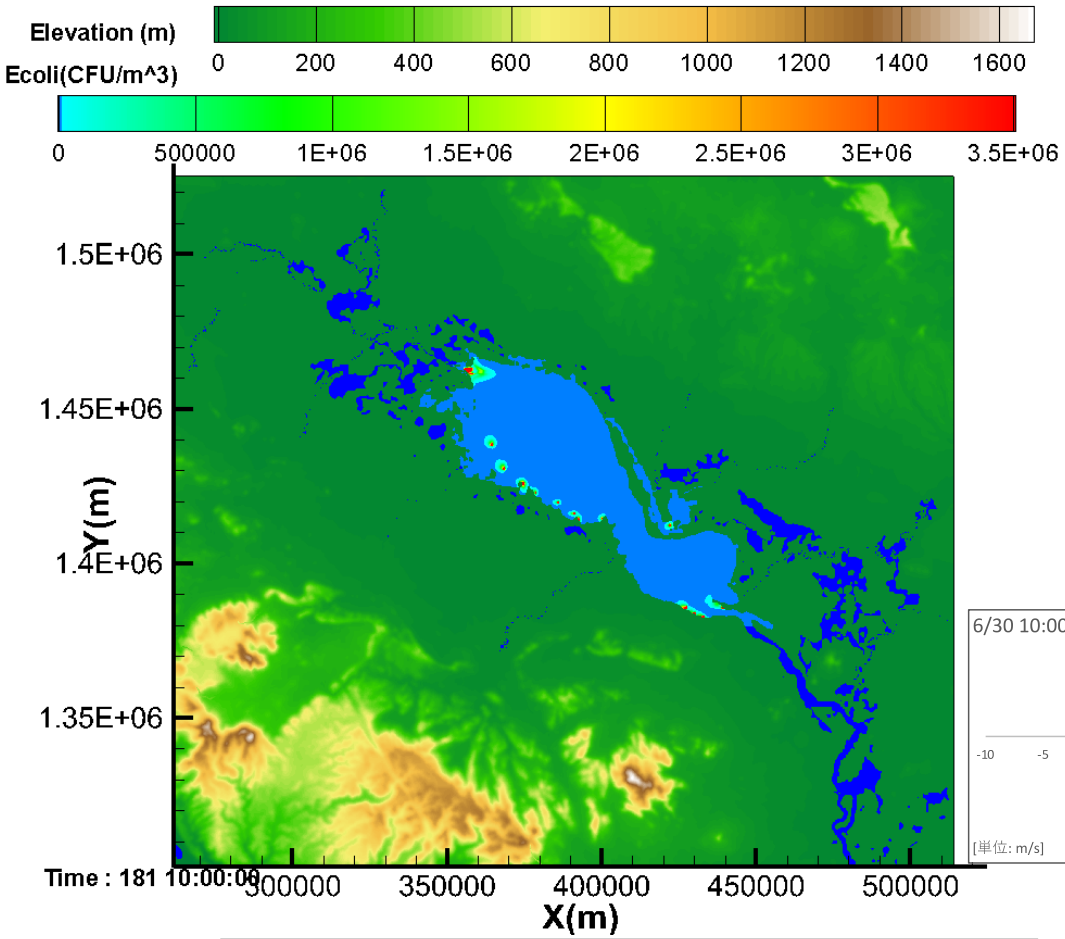


図4-65 6月30日8:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



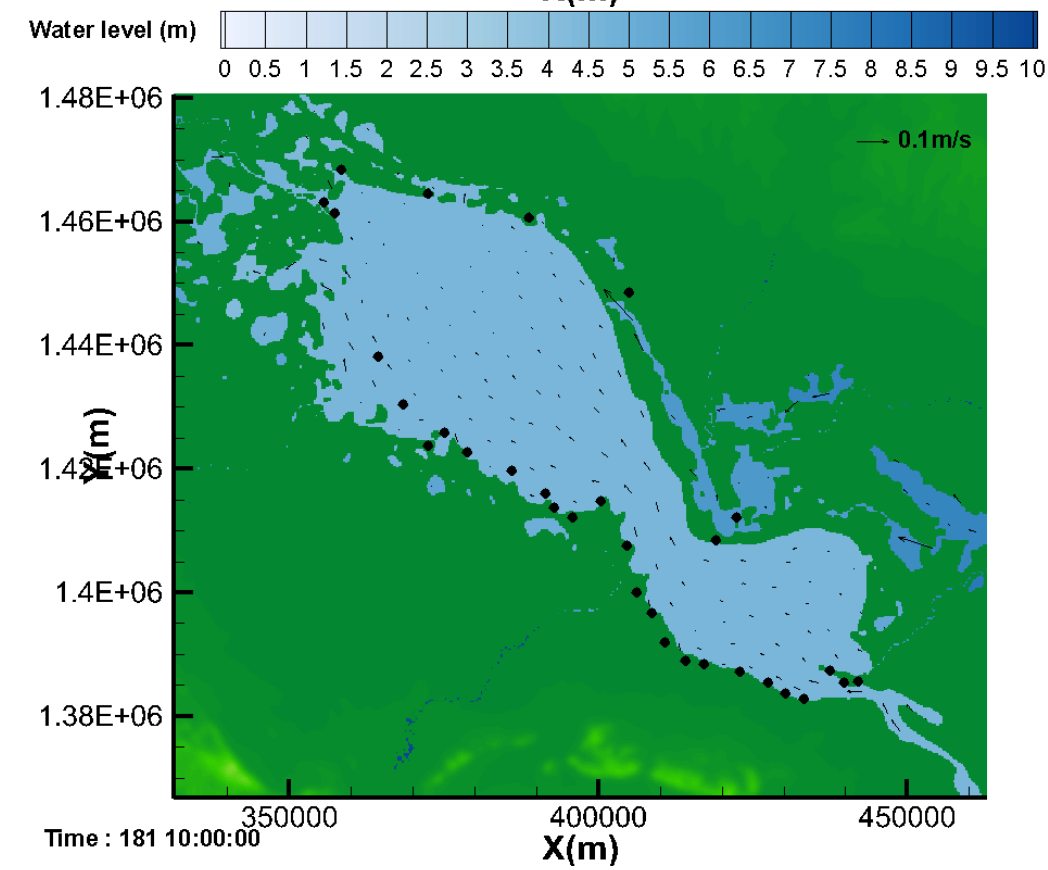


図4-66 6月30日10:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

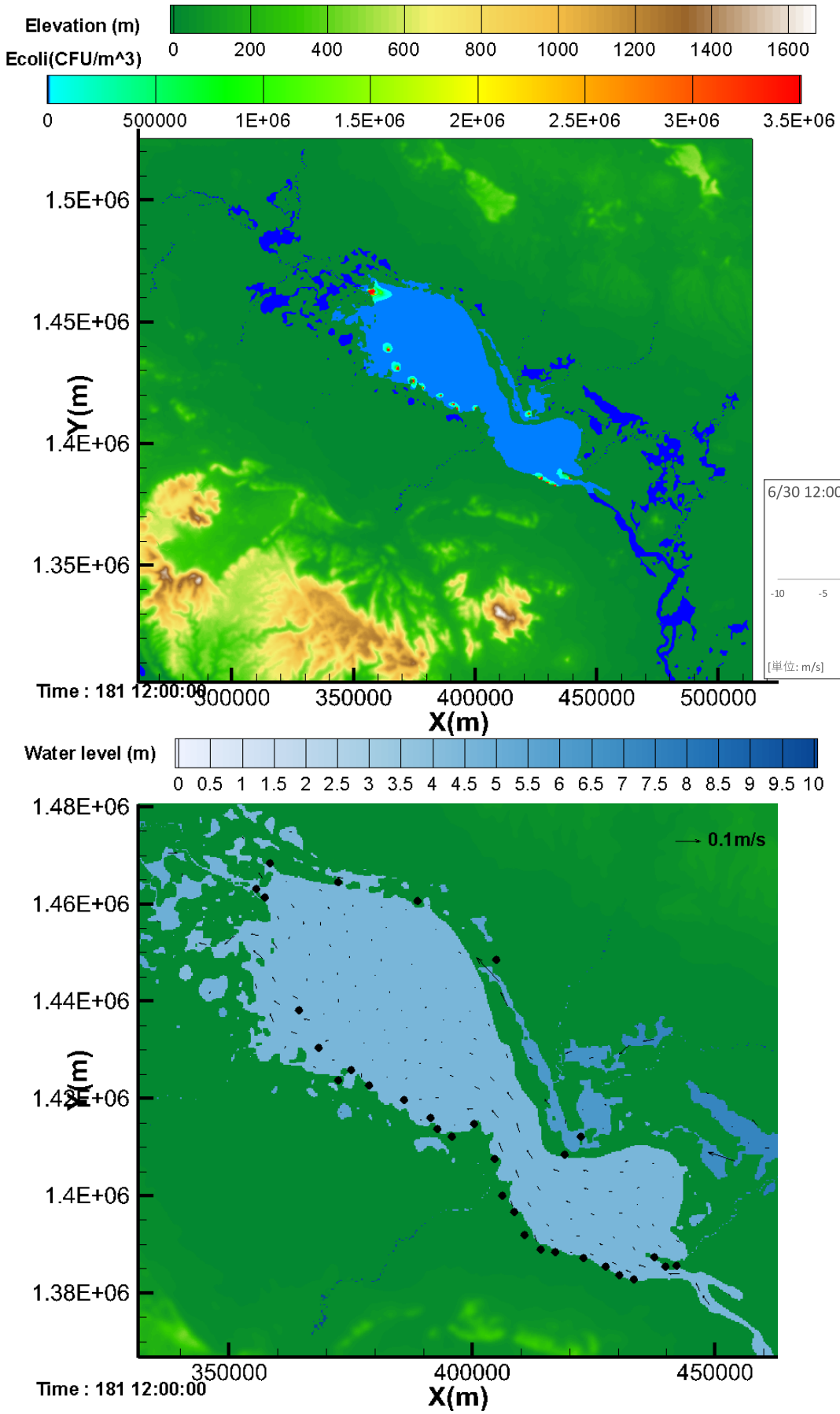
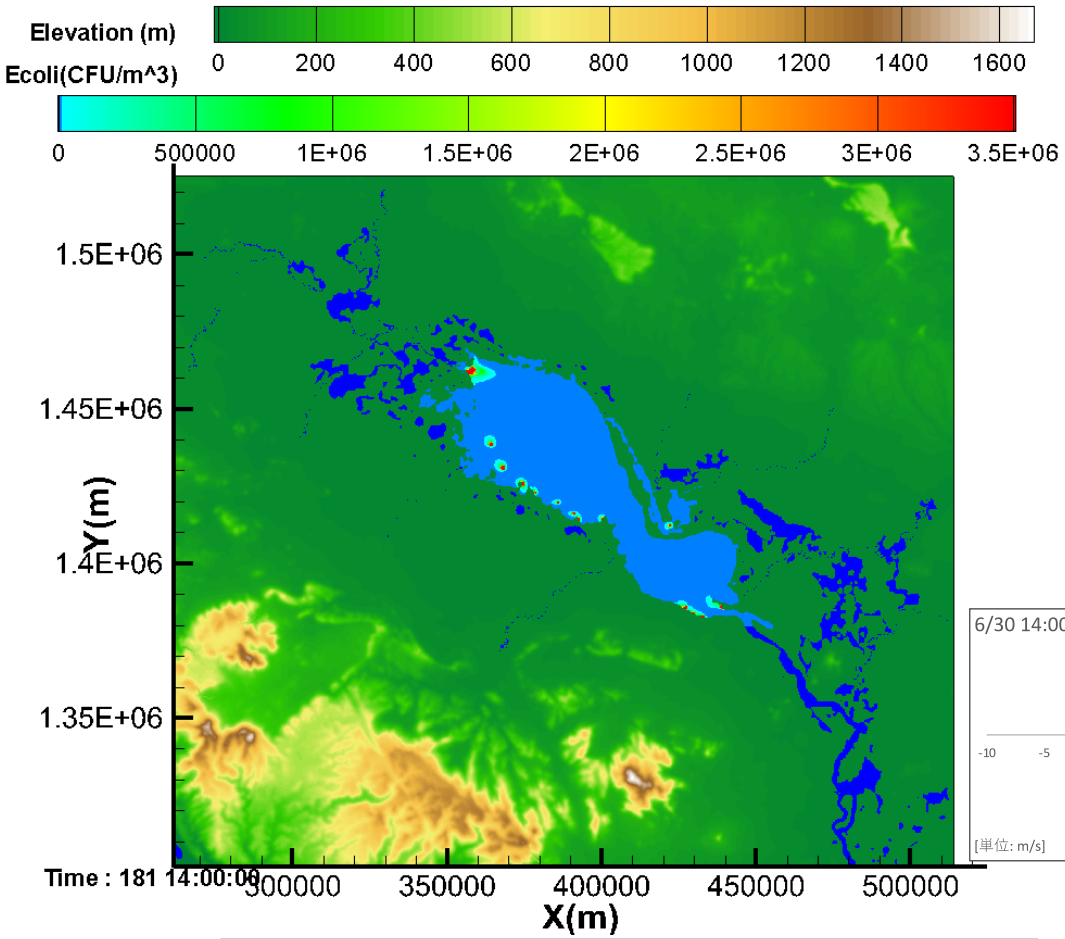


図4-67 6月30日12:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



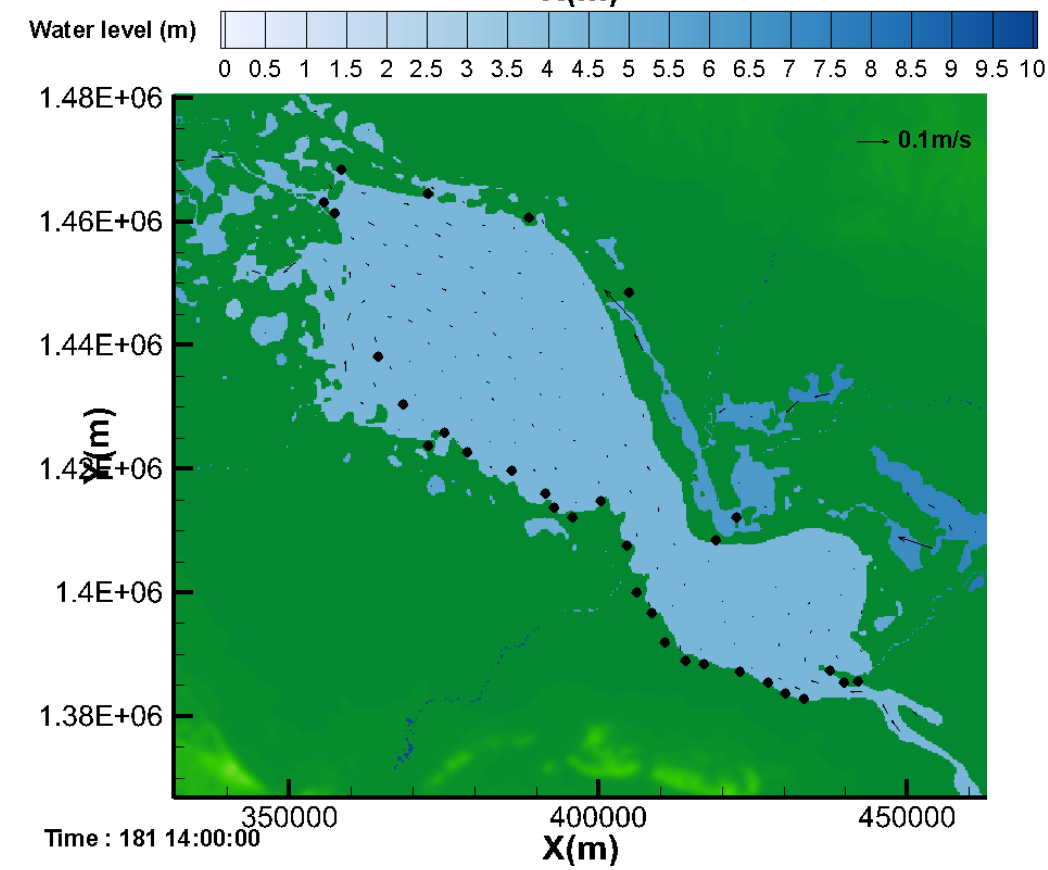
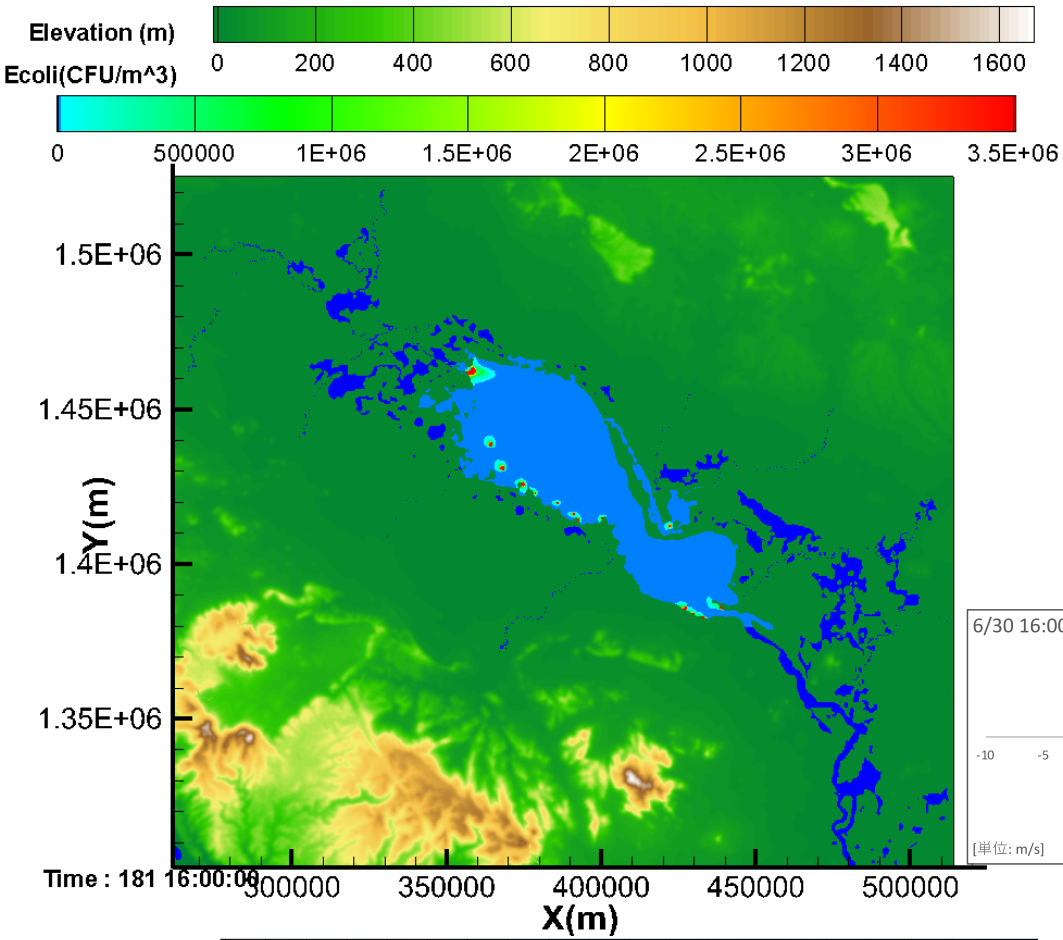


図4-68 6月30日14:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



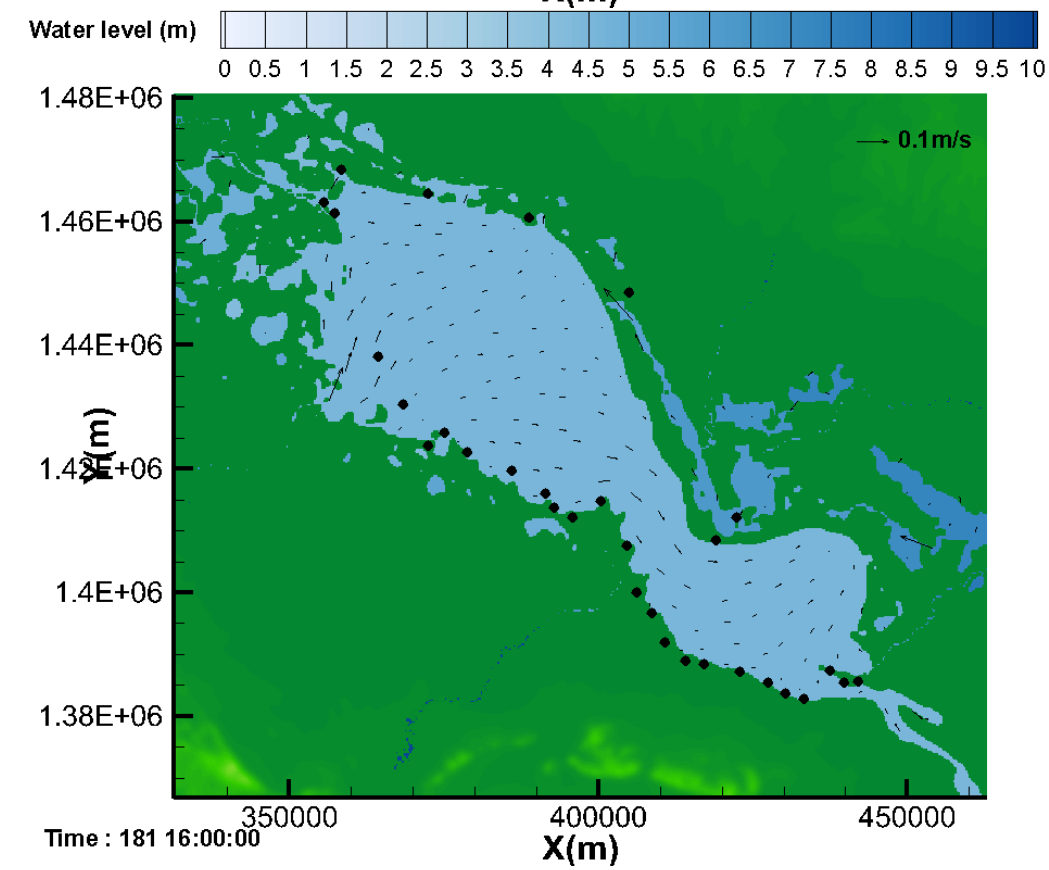


図4-69 6月30日16:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

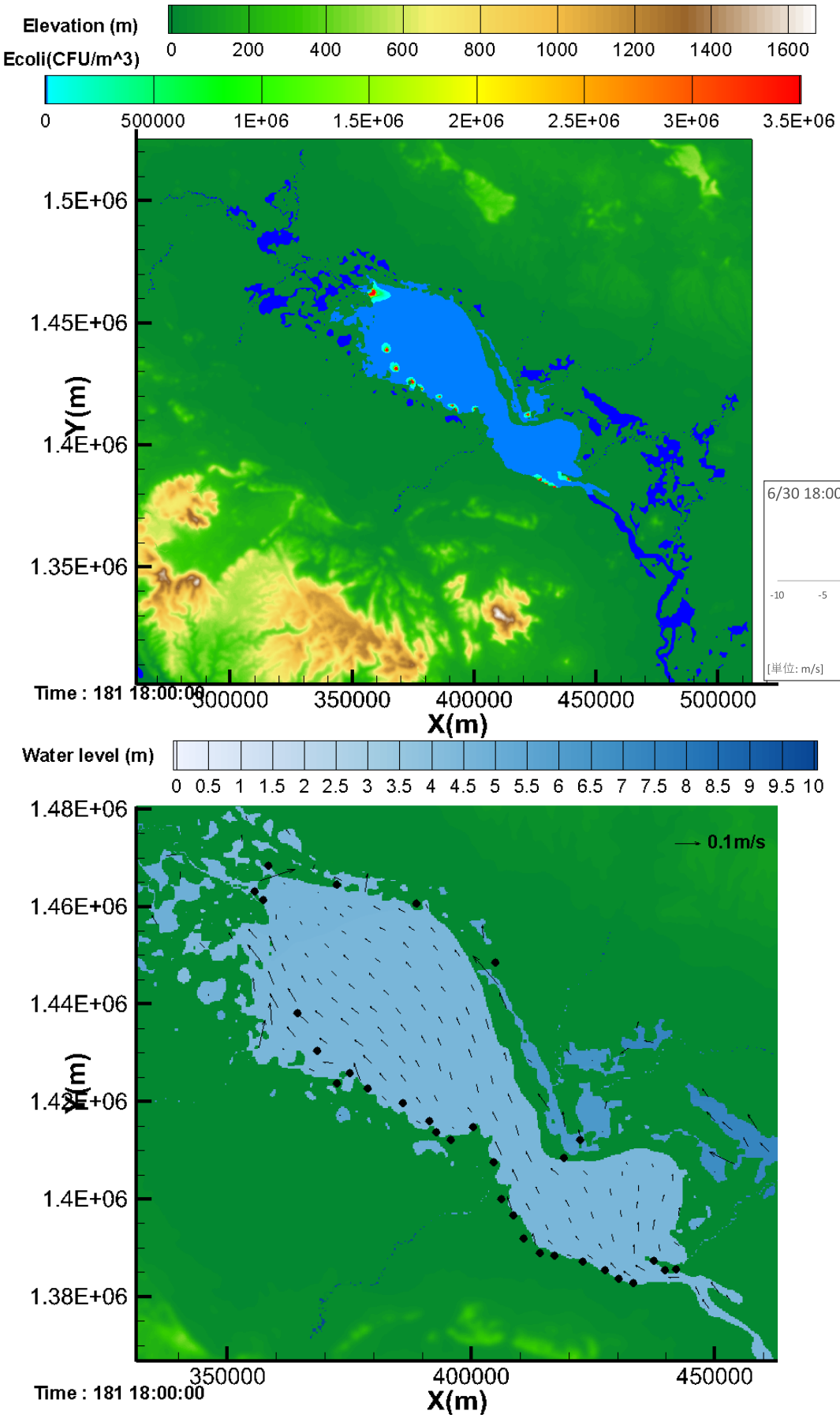
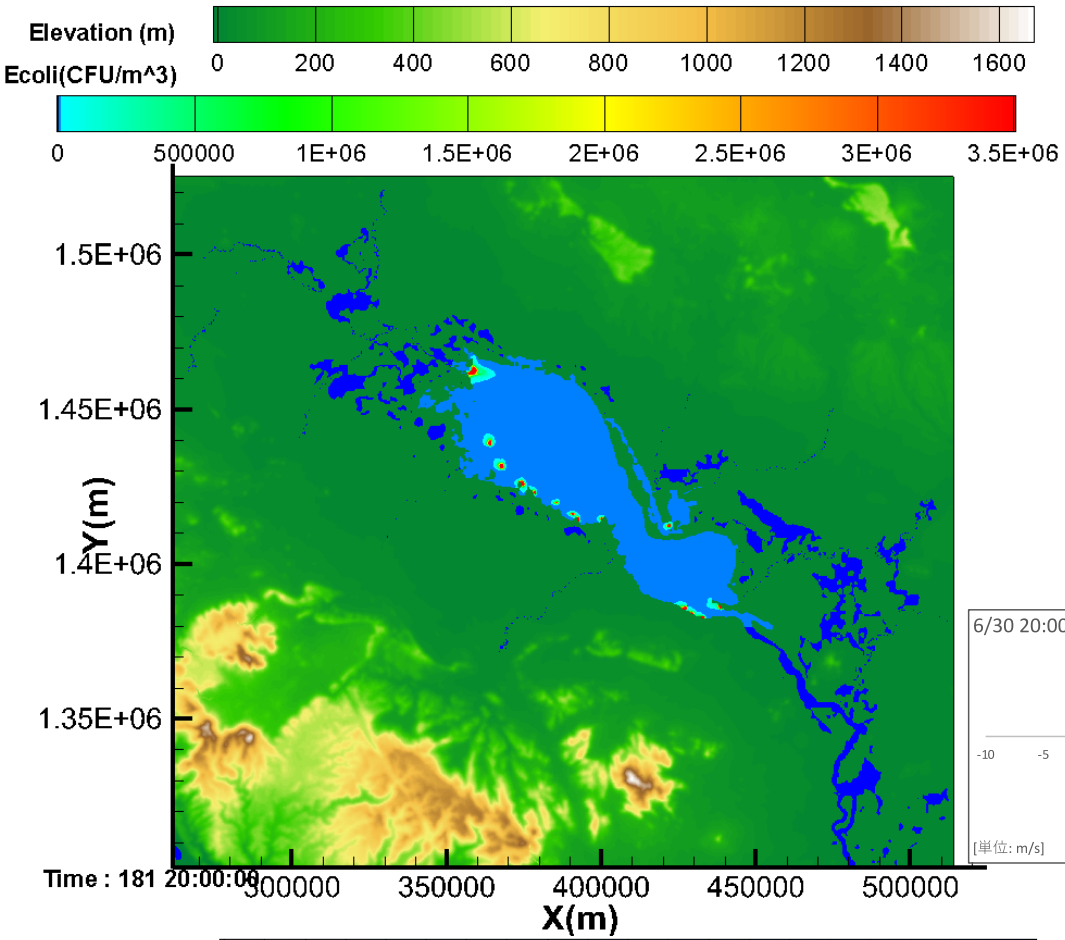


図4-70 6月30日18:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



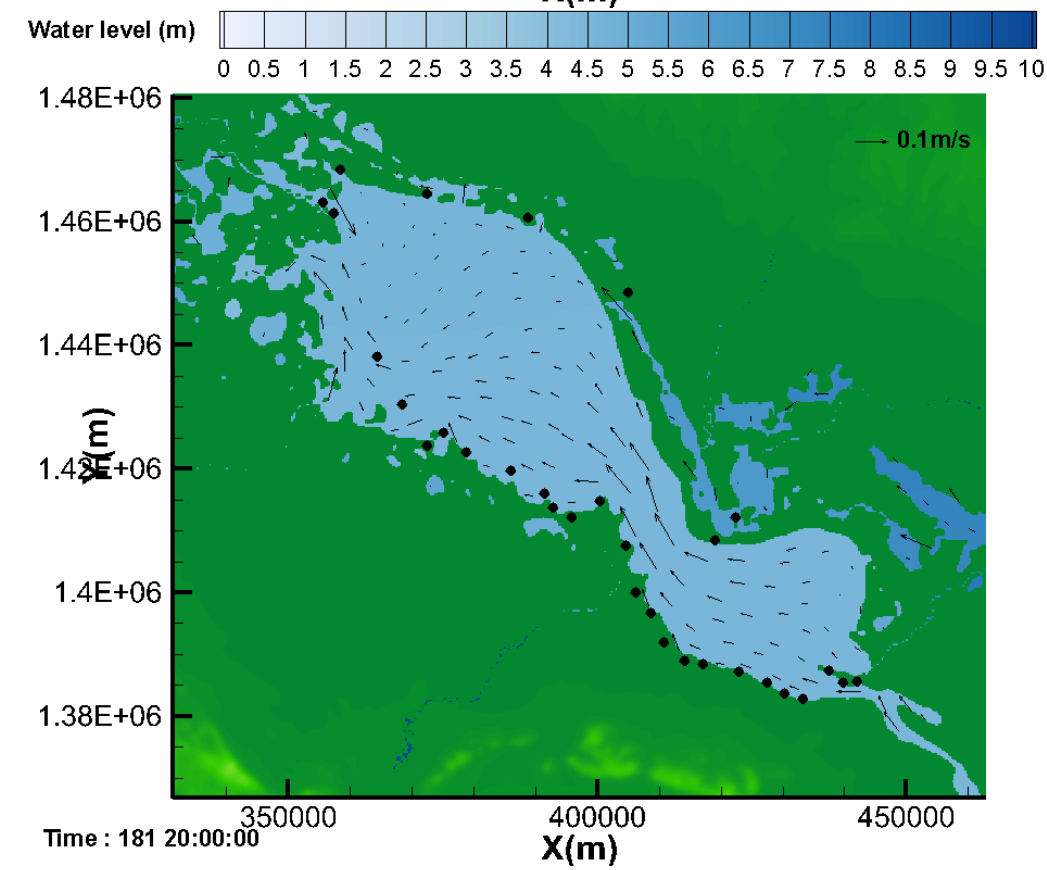


図4-71 6月30日20:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

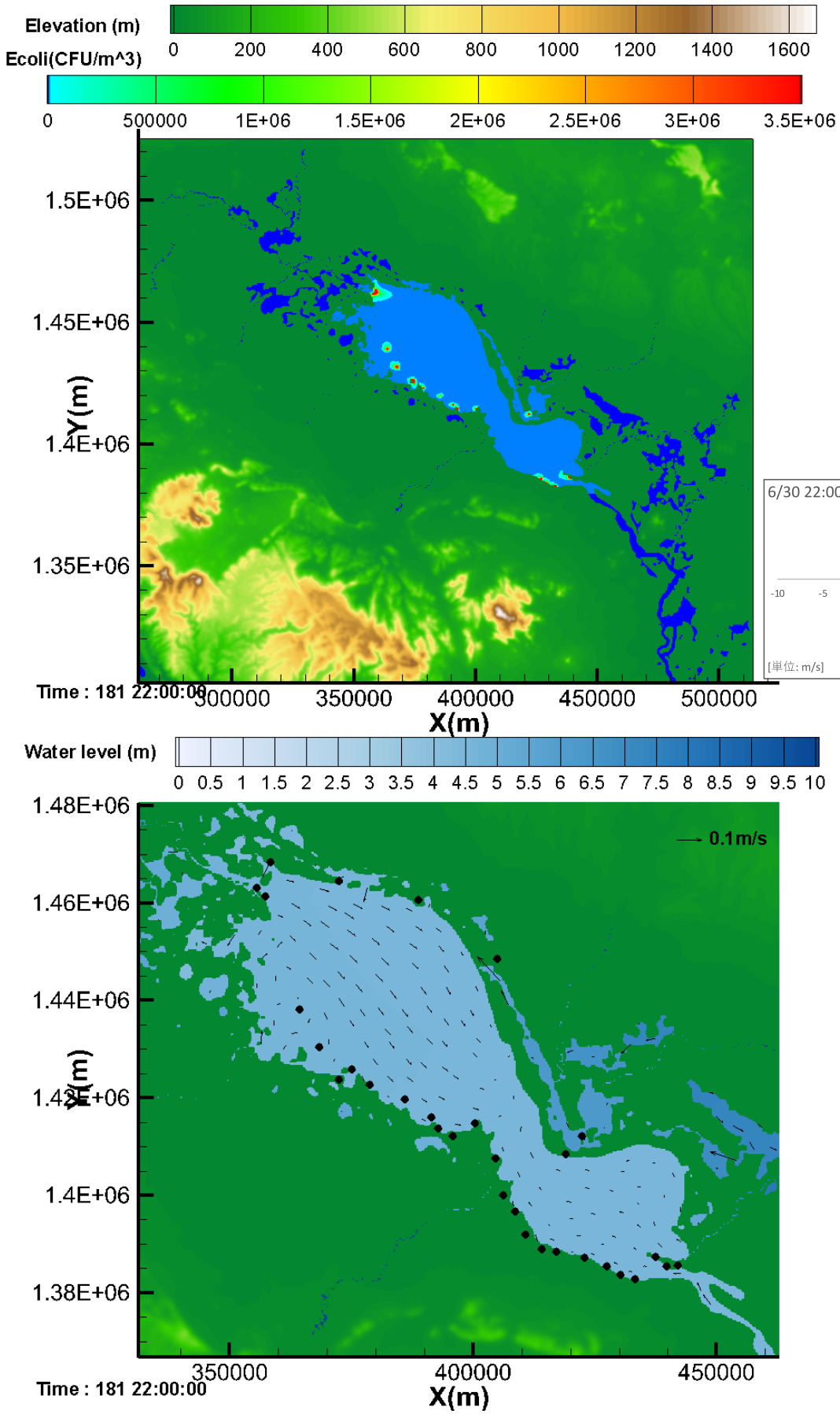


図4-72 6月30日22:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

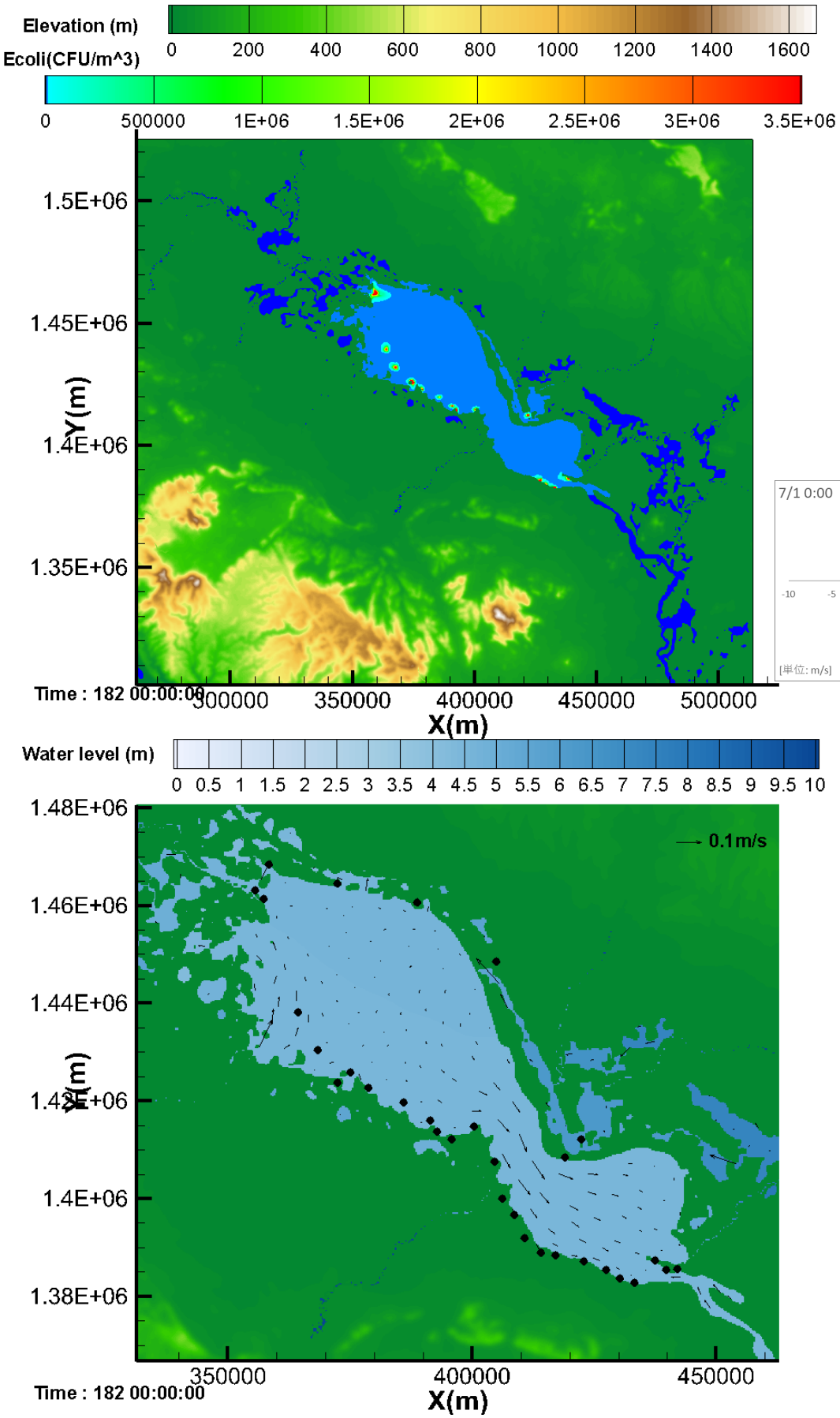


図4-73 7月1日0:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

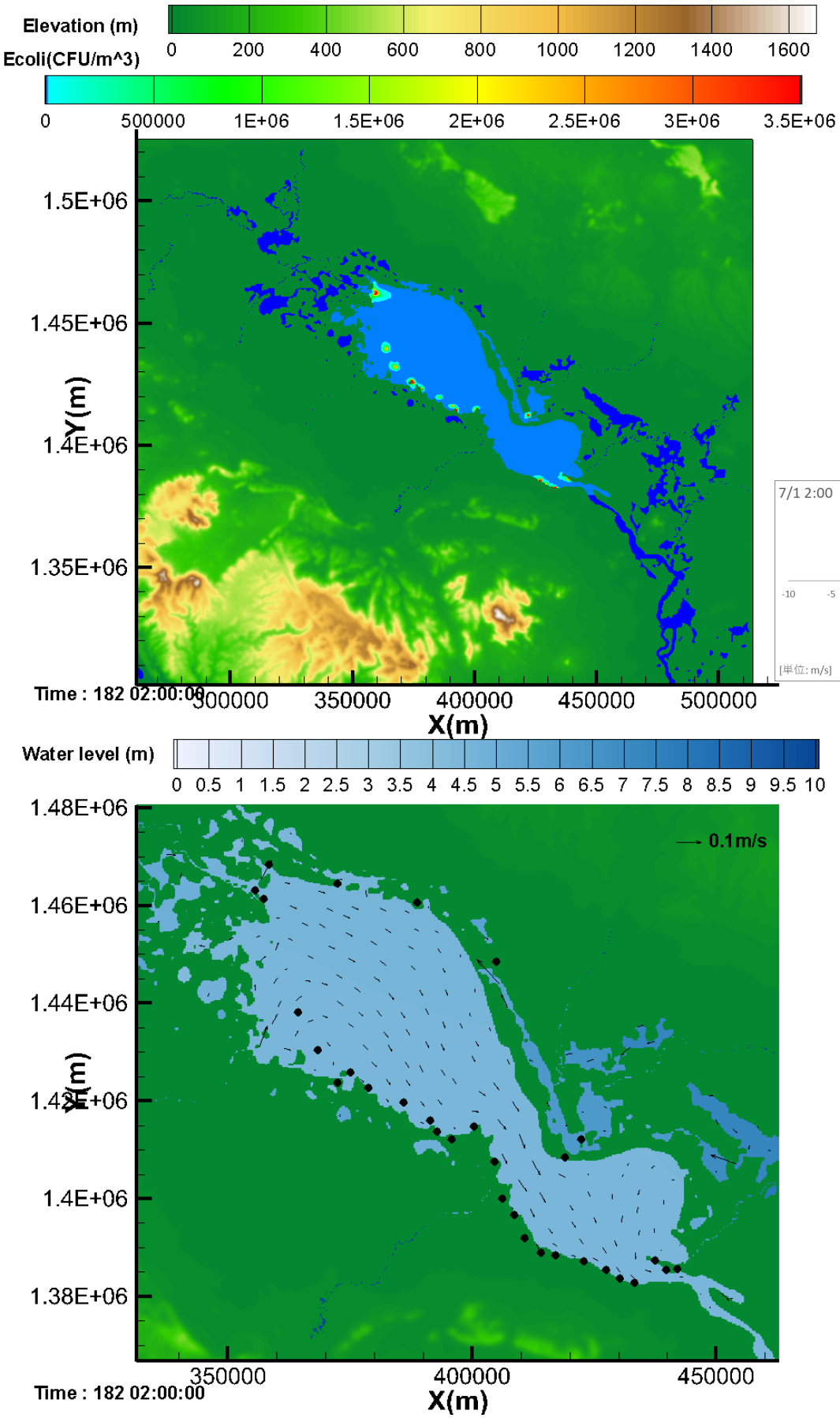
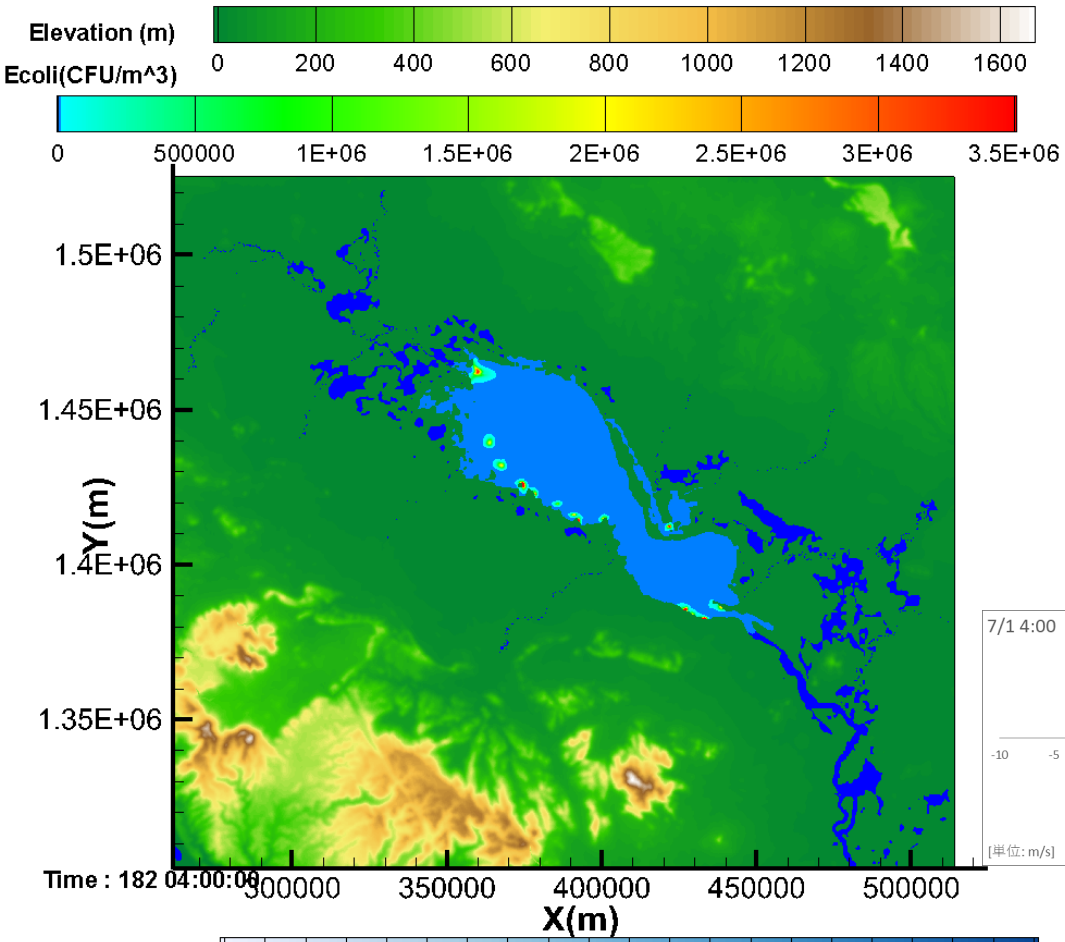


図4-74 7月1日2:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



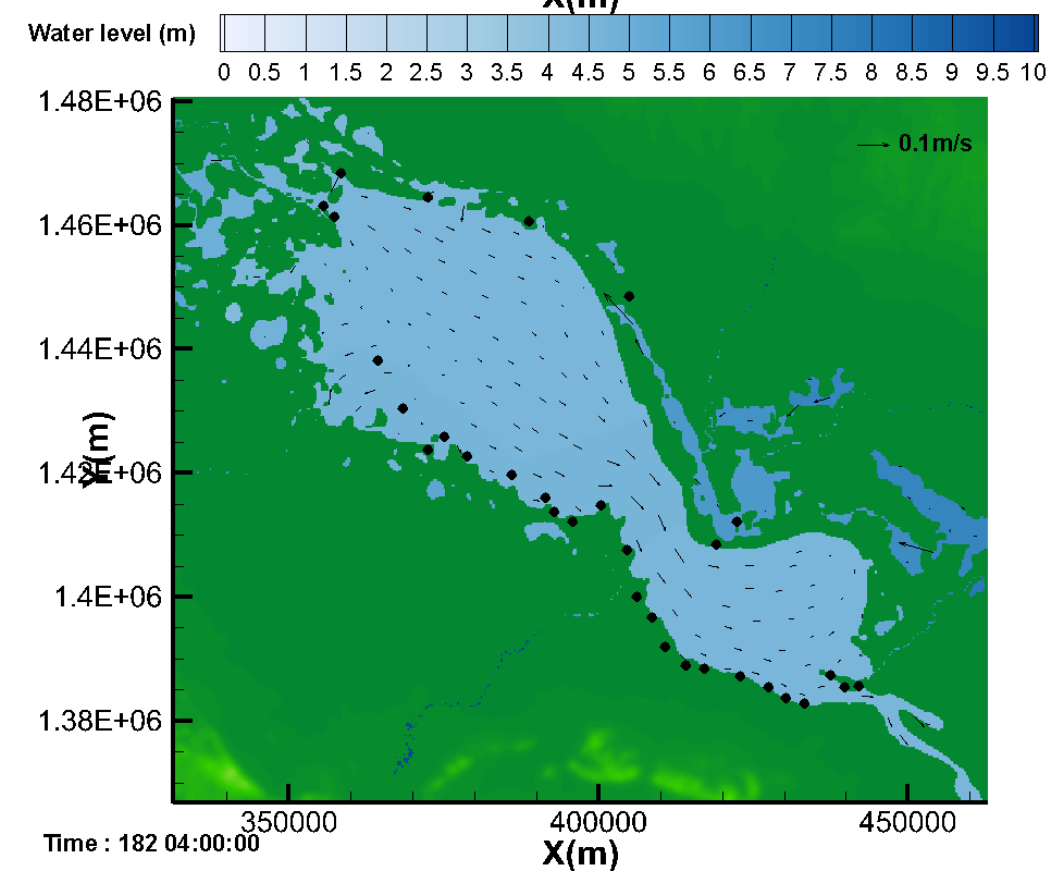


図4-75 7月1日4:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

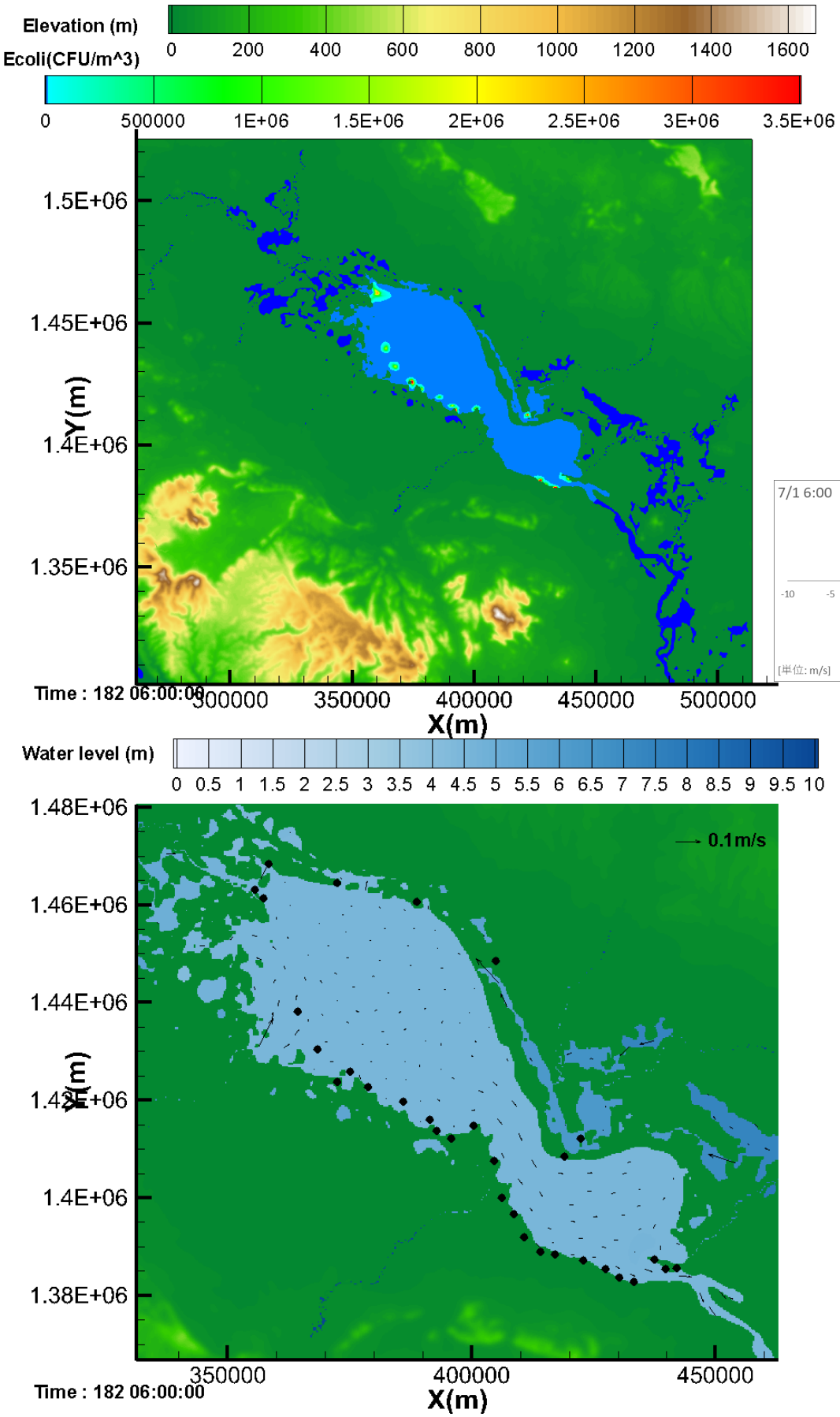
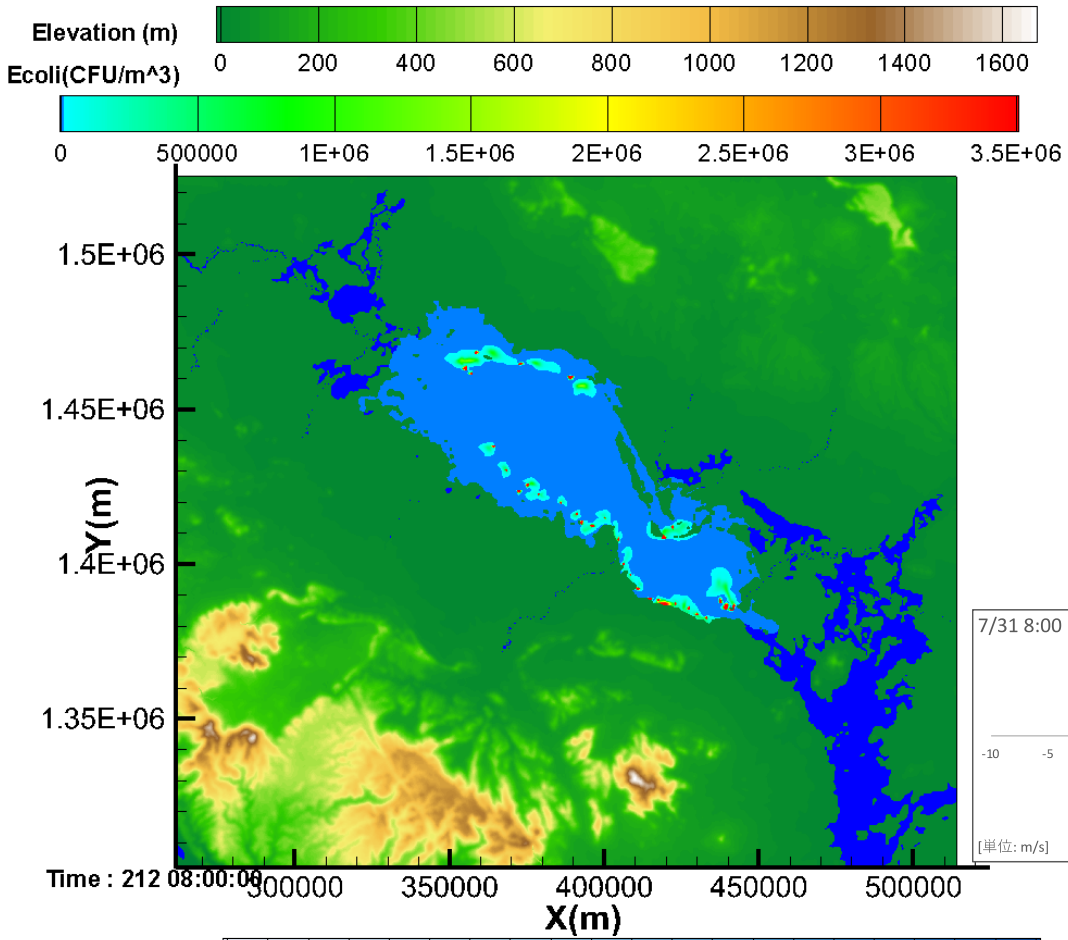


図4-76 7月1日6:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



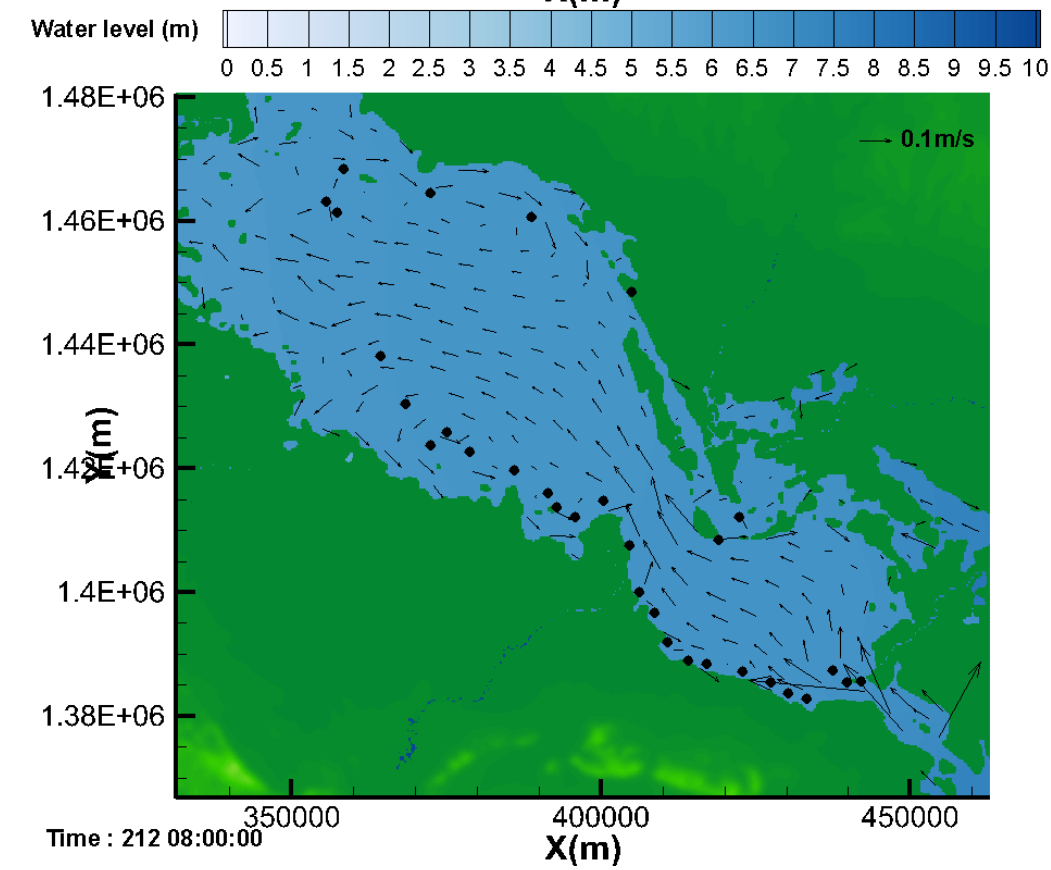


図4-77 7月31日8:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

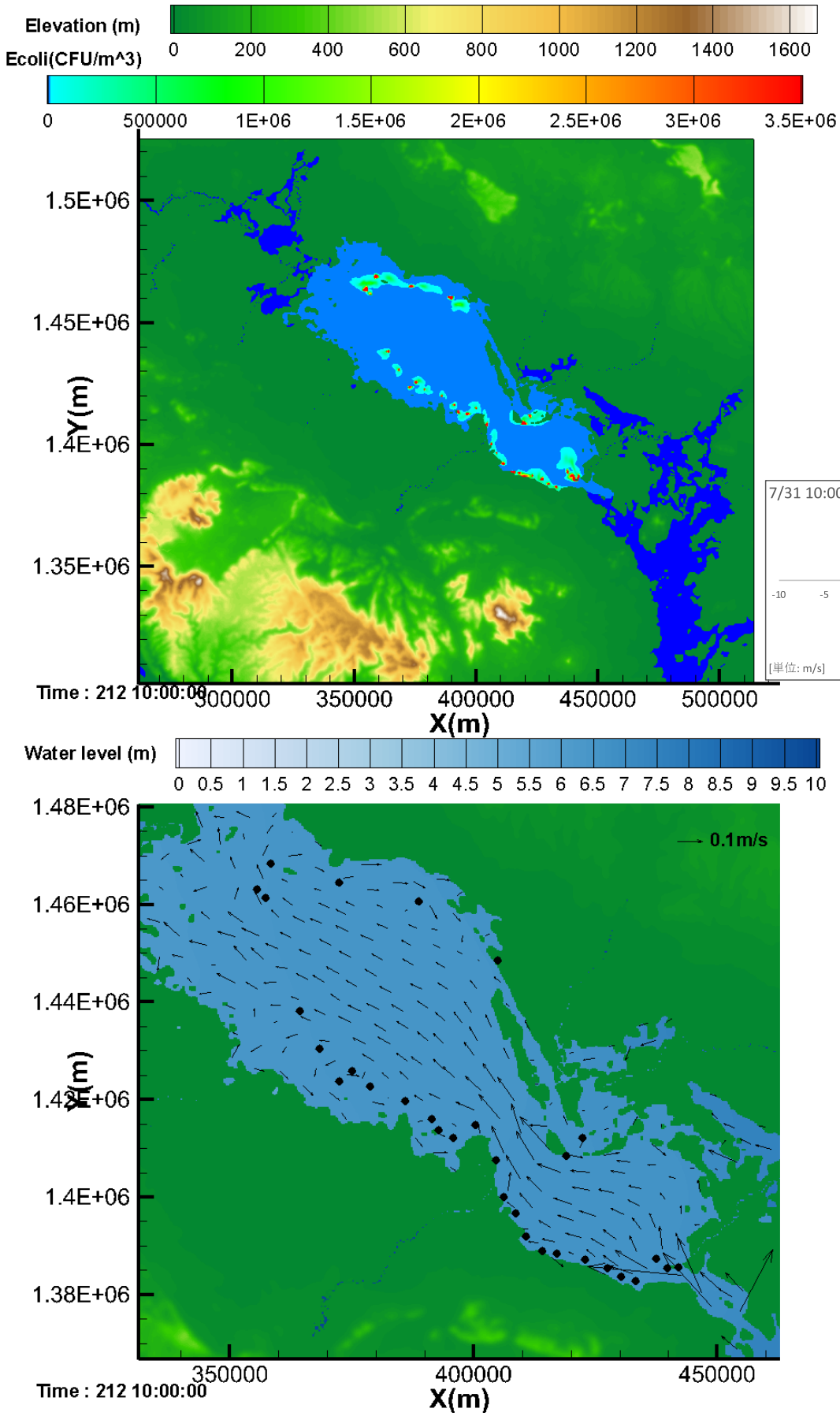
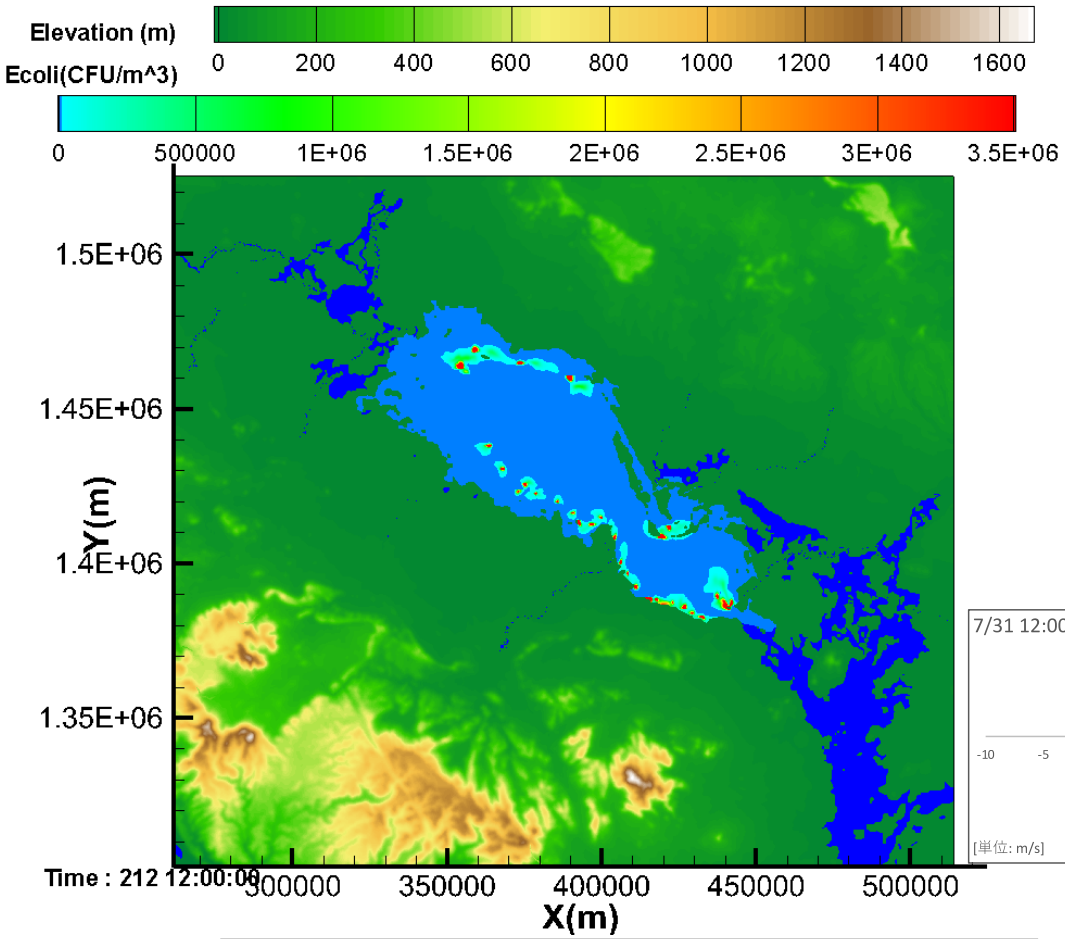


図4-78 7月31日10:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



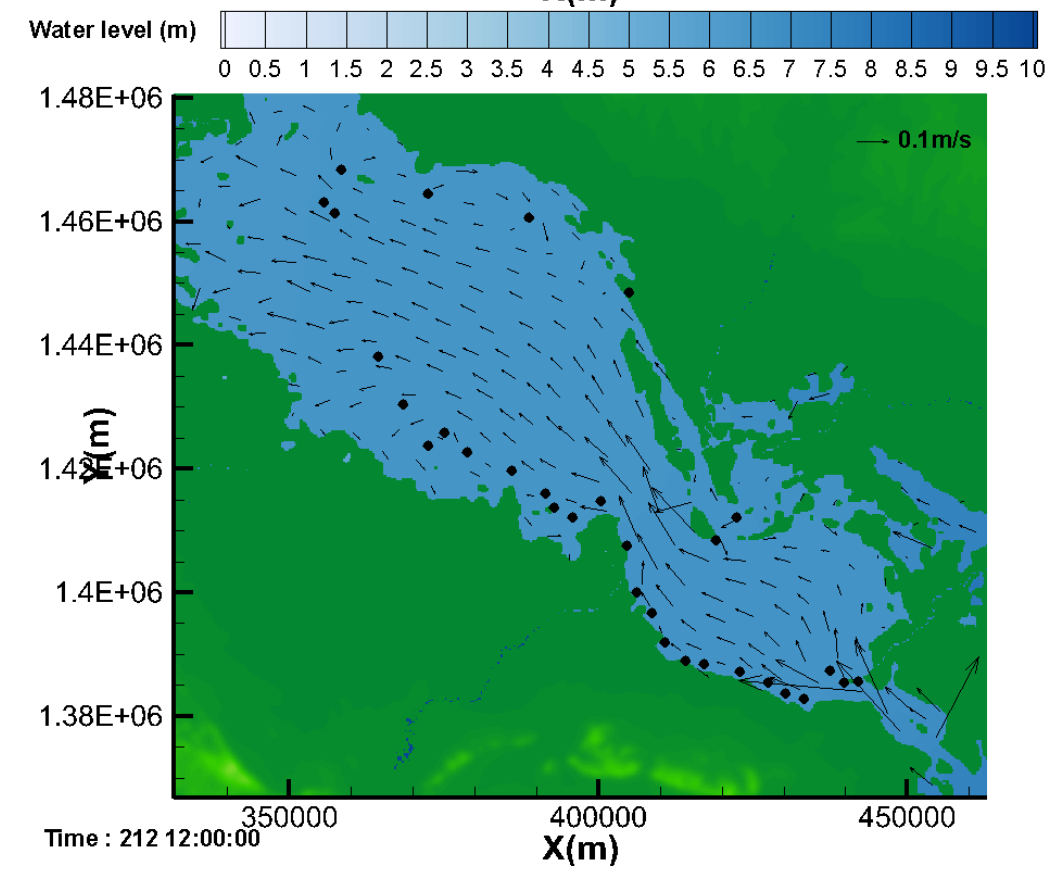


図4-79 7月31日12:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

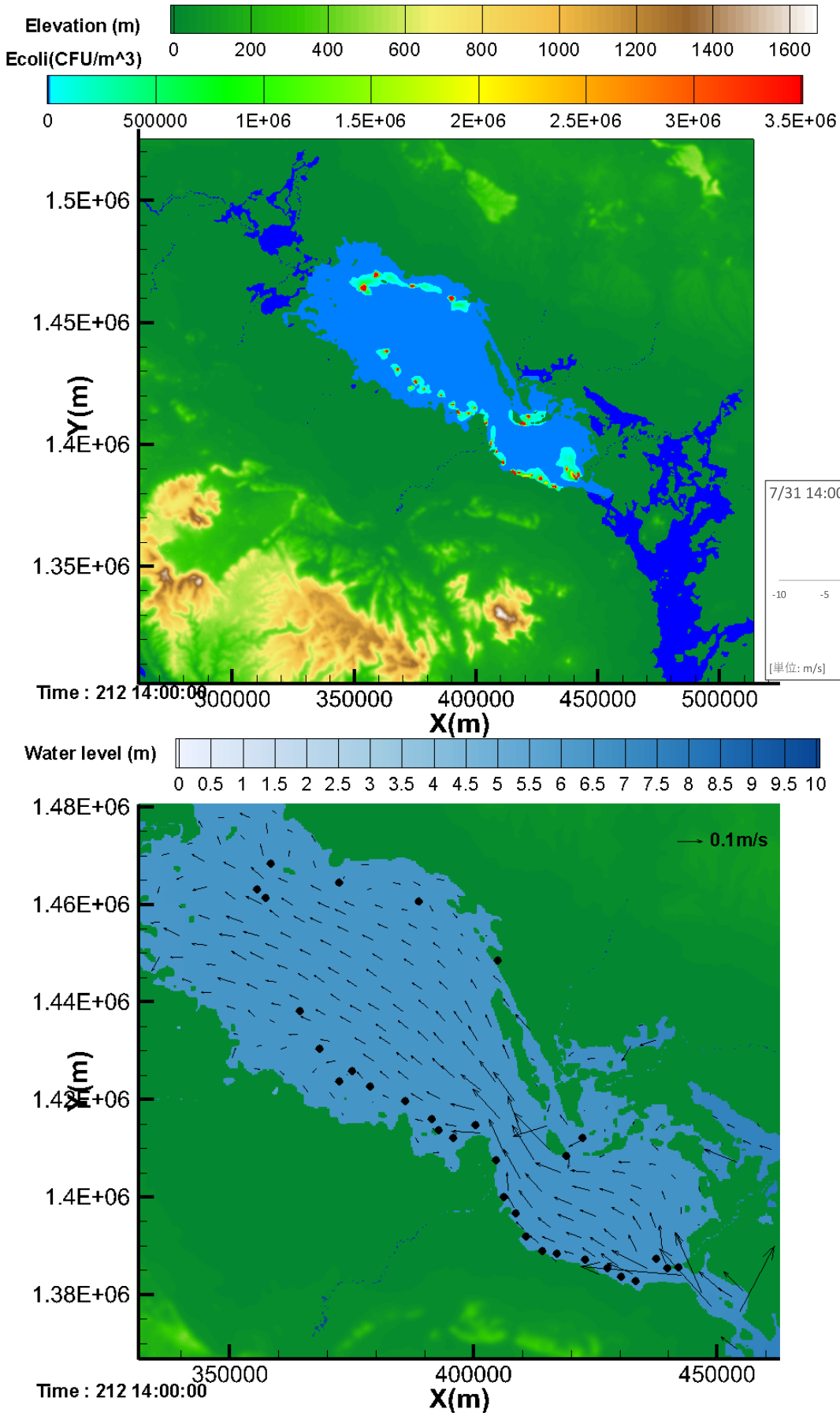


図4-80 7月31日14:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

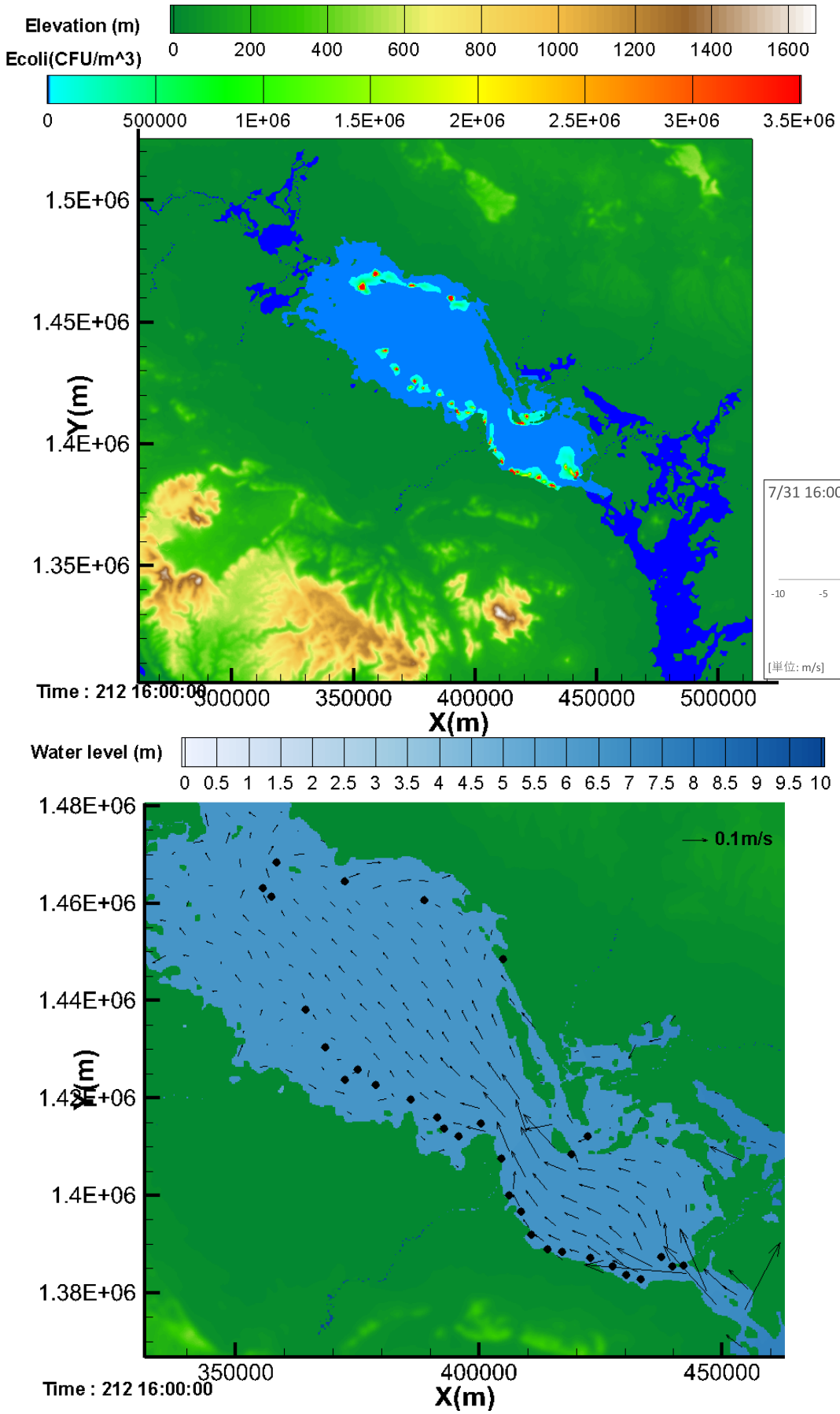
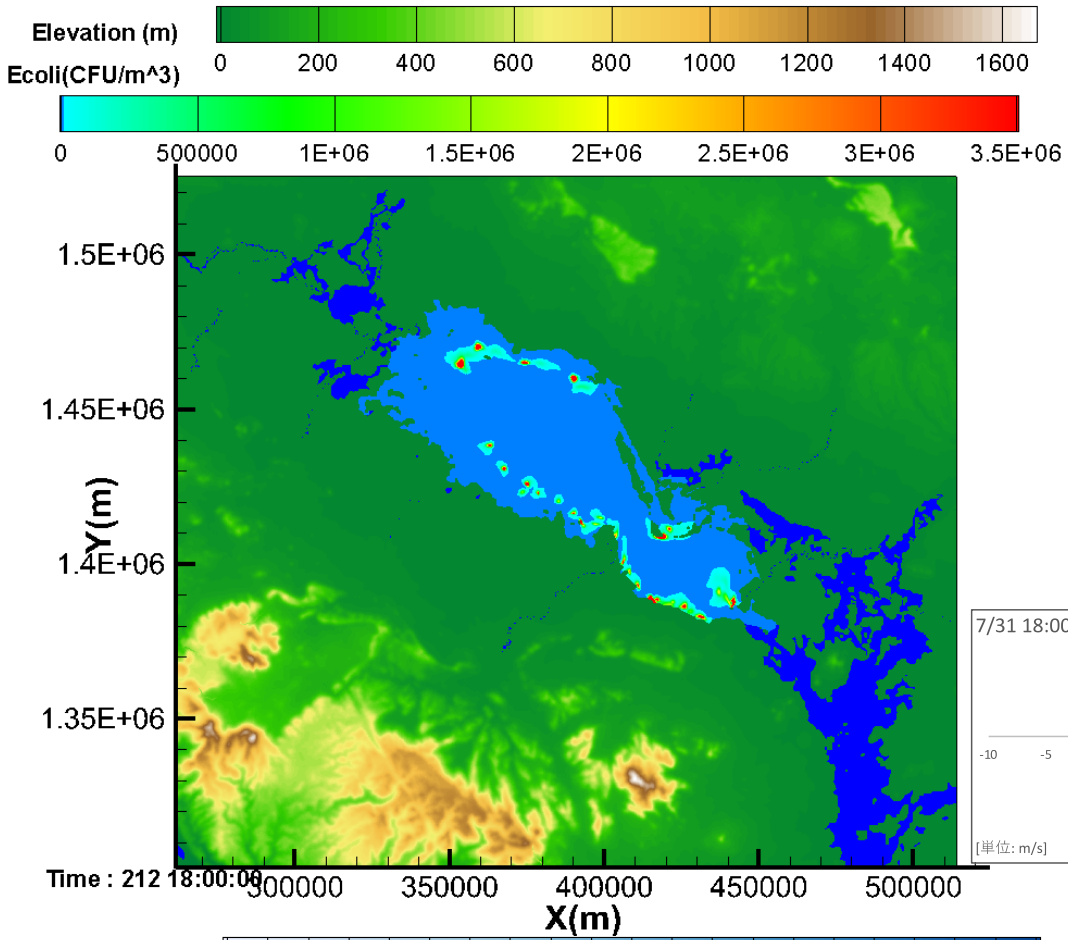


図4-81 7月31日16:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



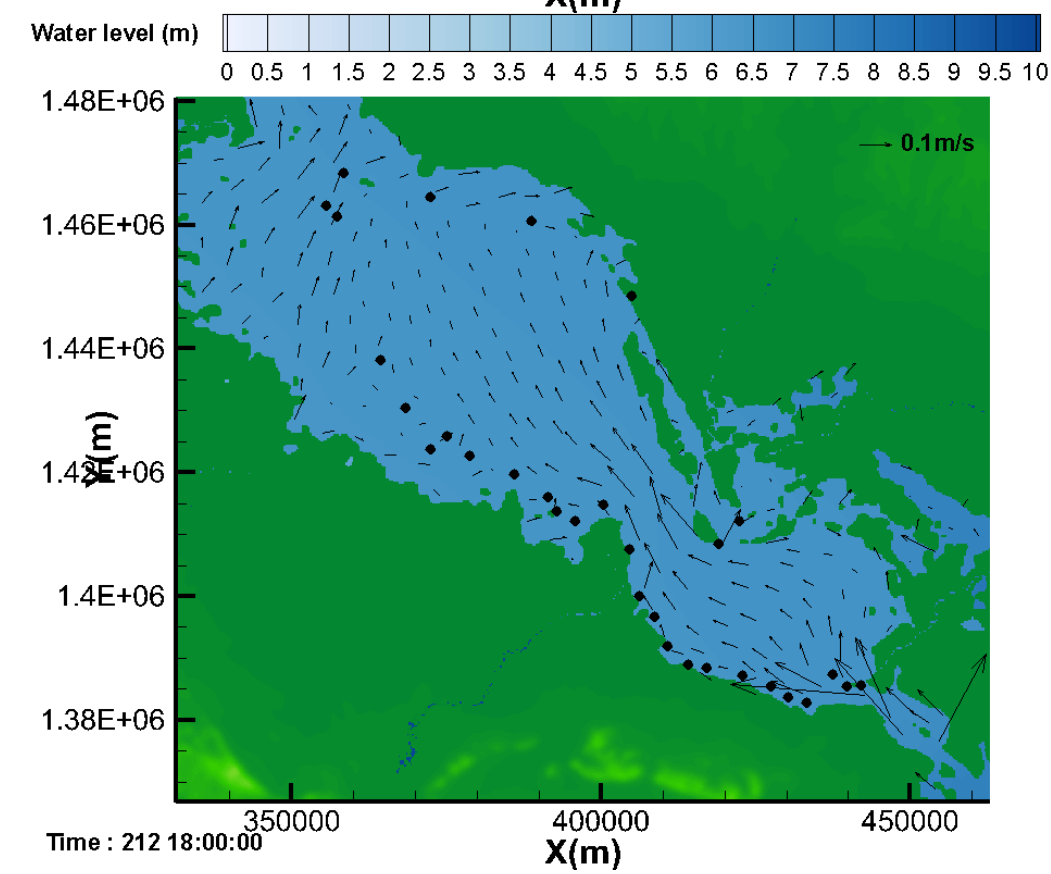
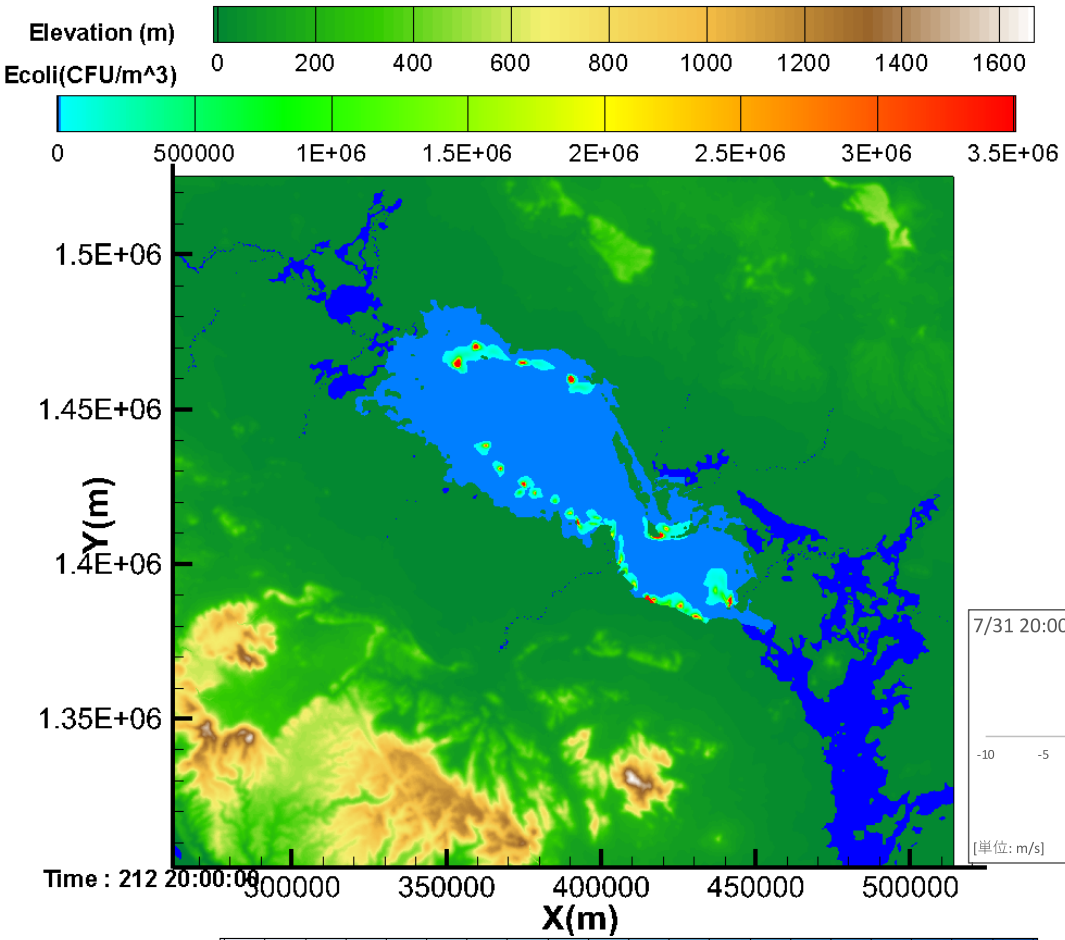


図4-82 7月31日18:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



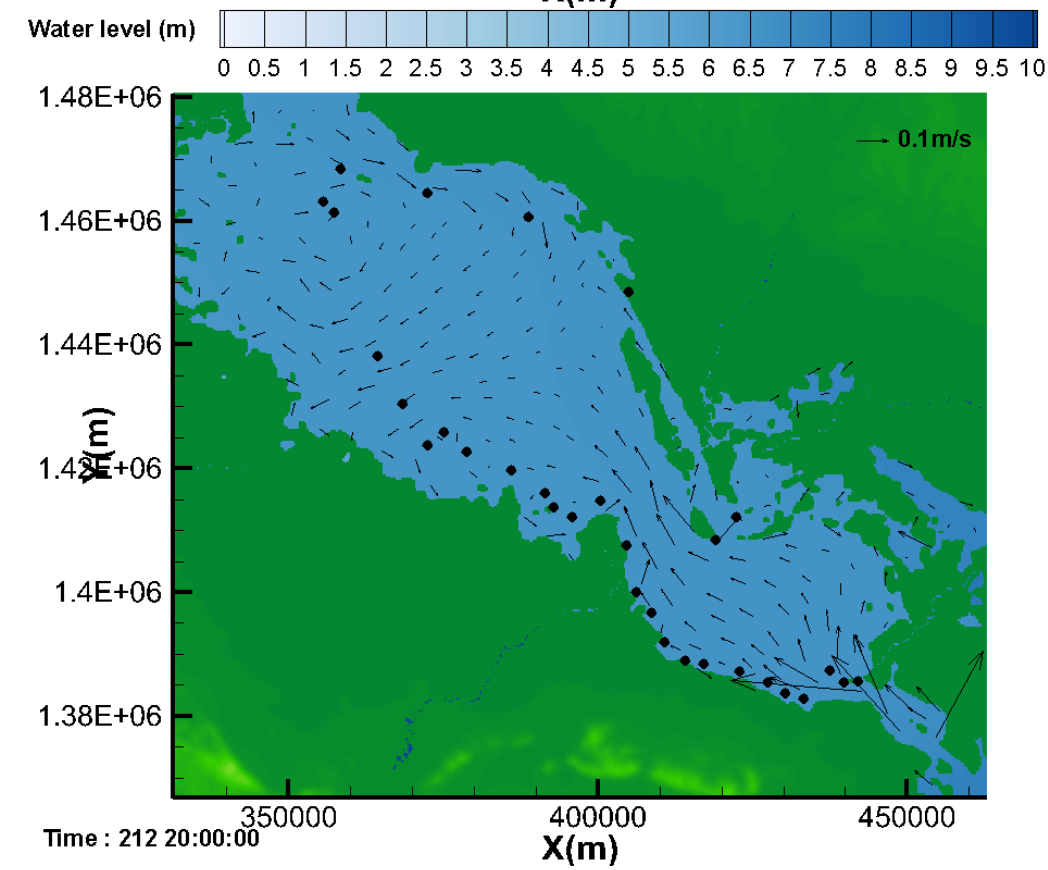
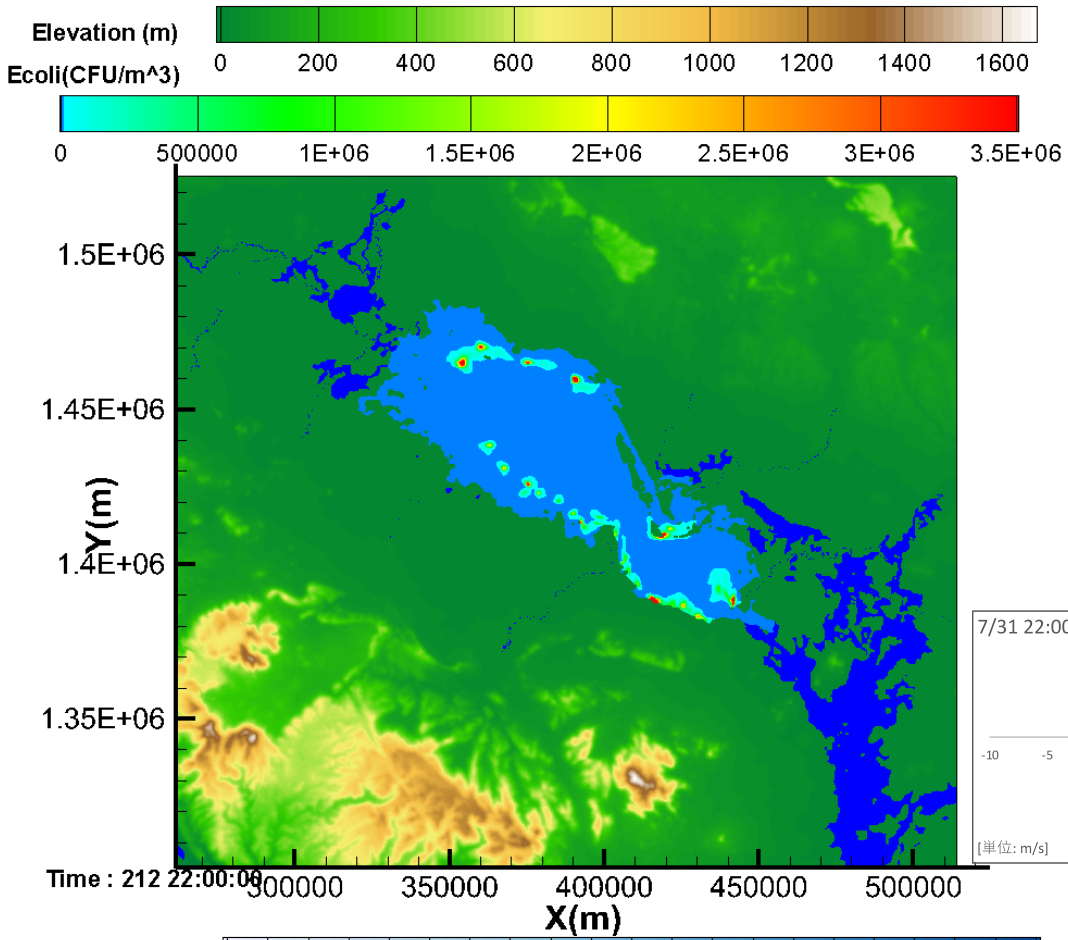


図4-83 7月31日20:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



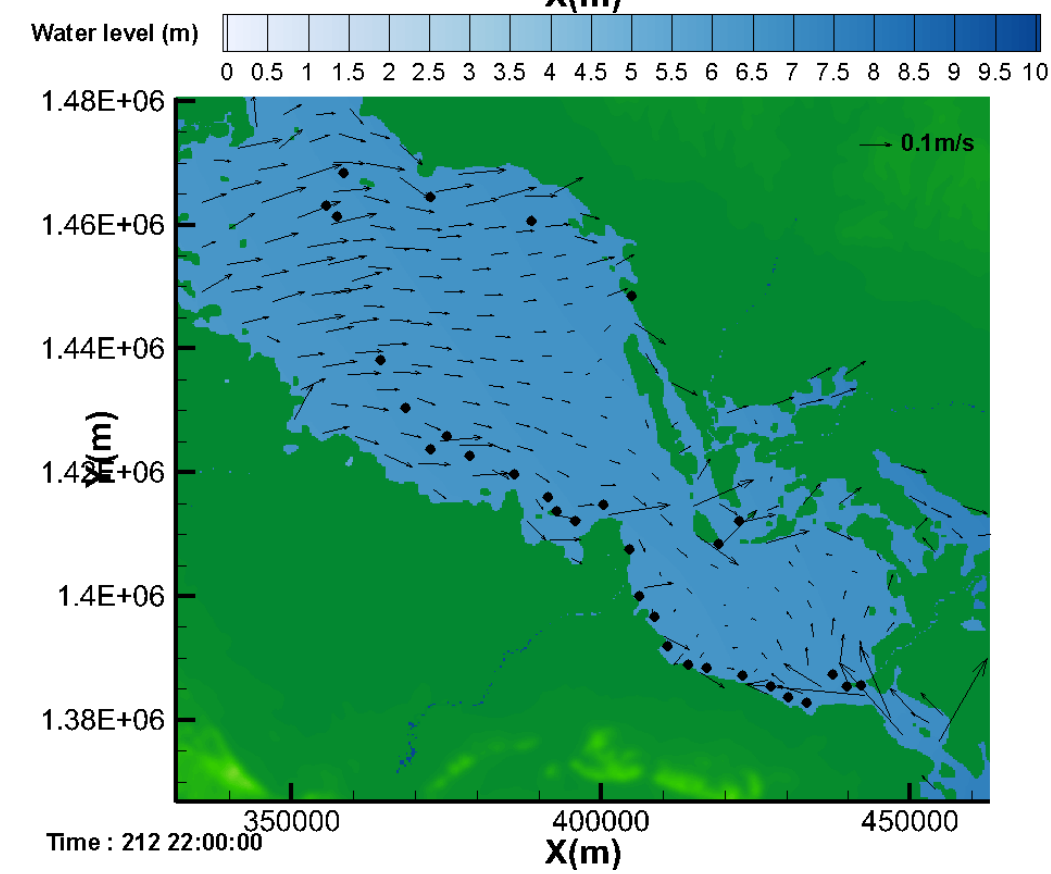
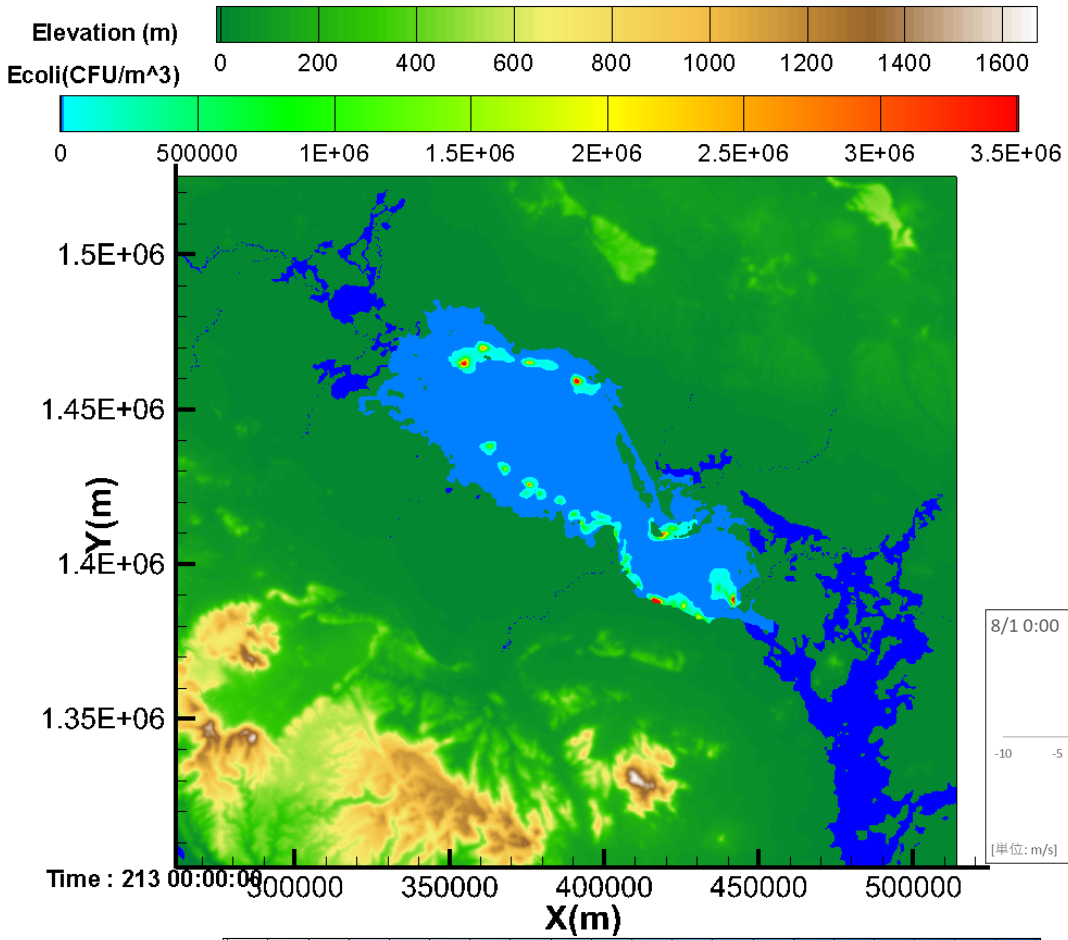


図4-84 7月31日22:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



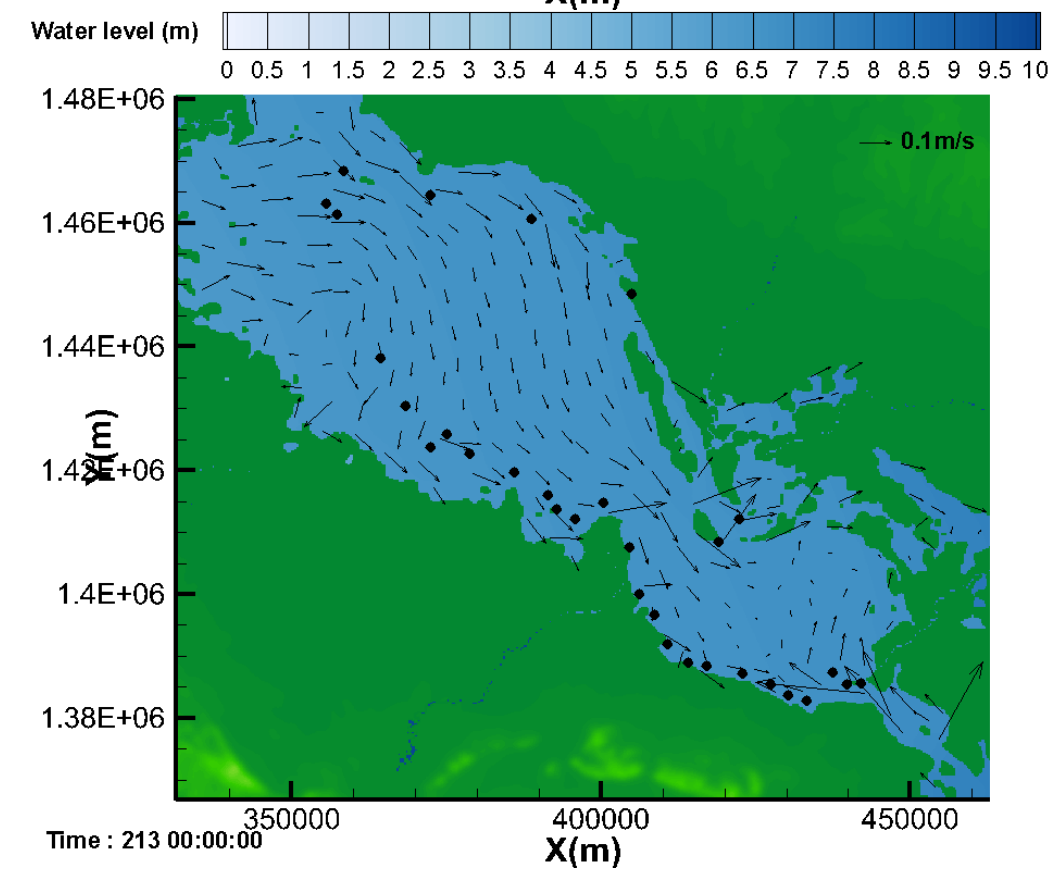


図4-85 8月1日0:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

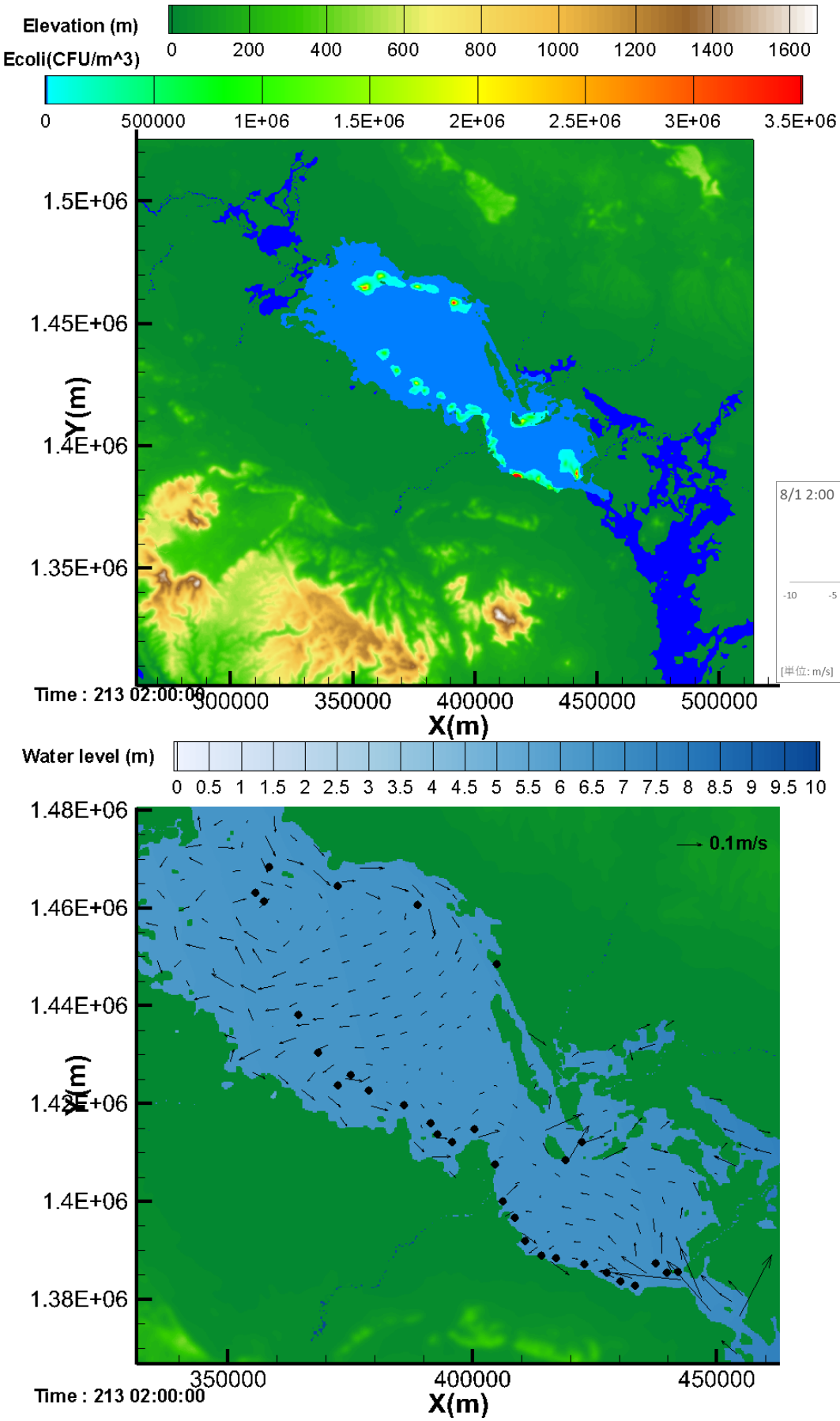


図4-86 8月1日2:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

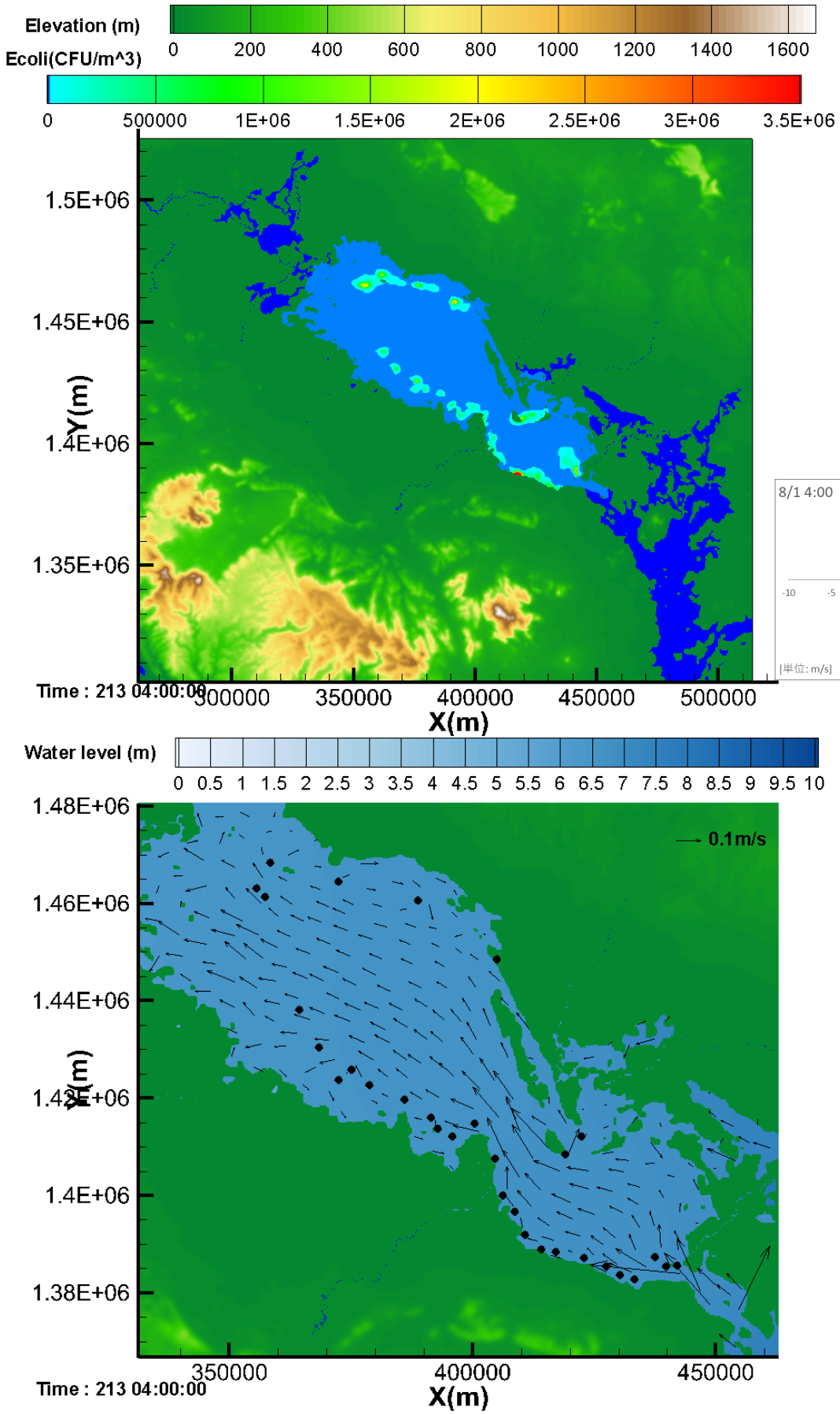


図4-87 8月1日4:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

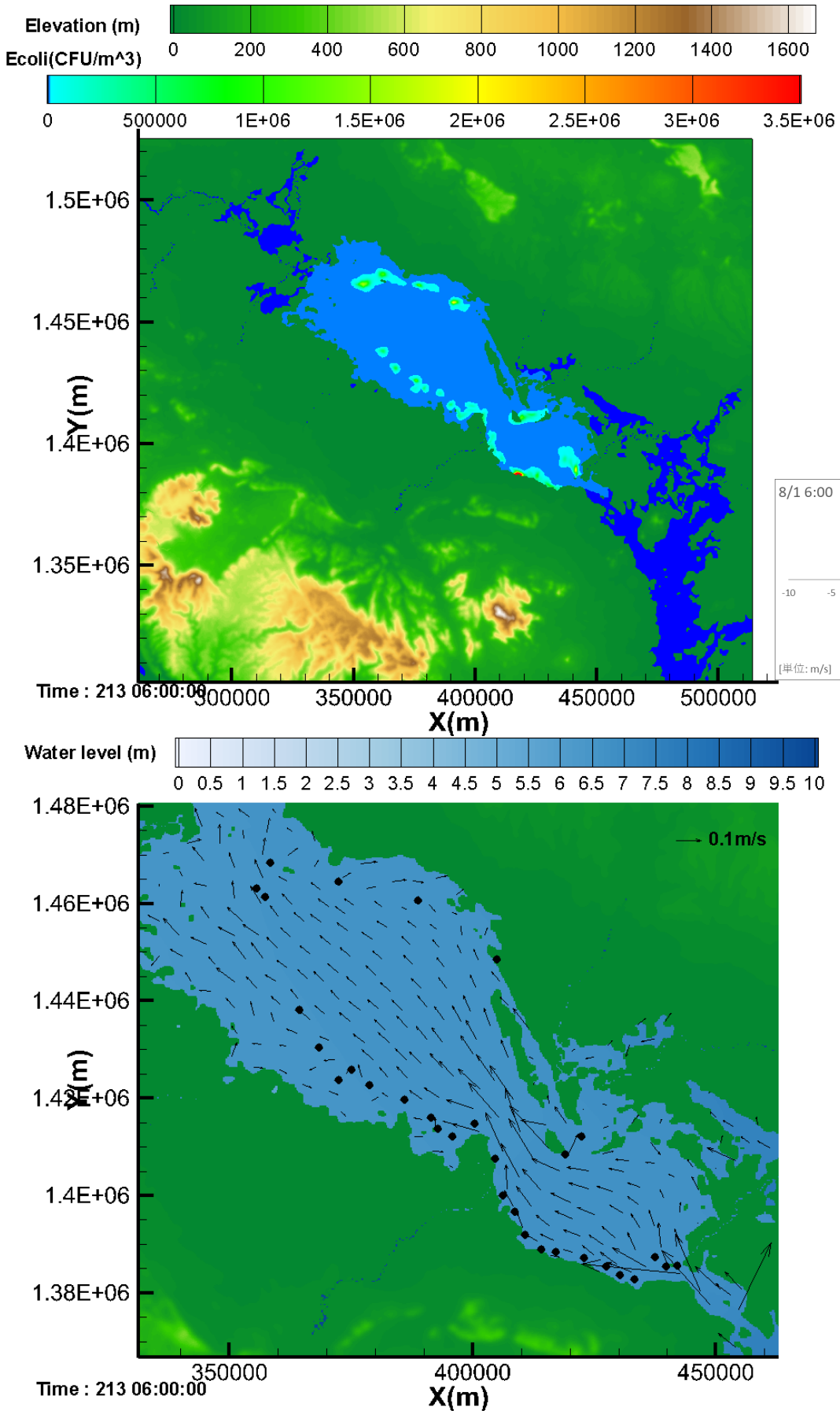
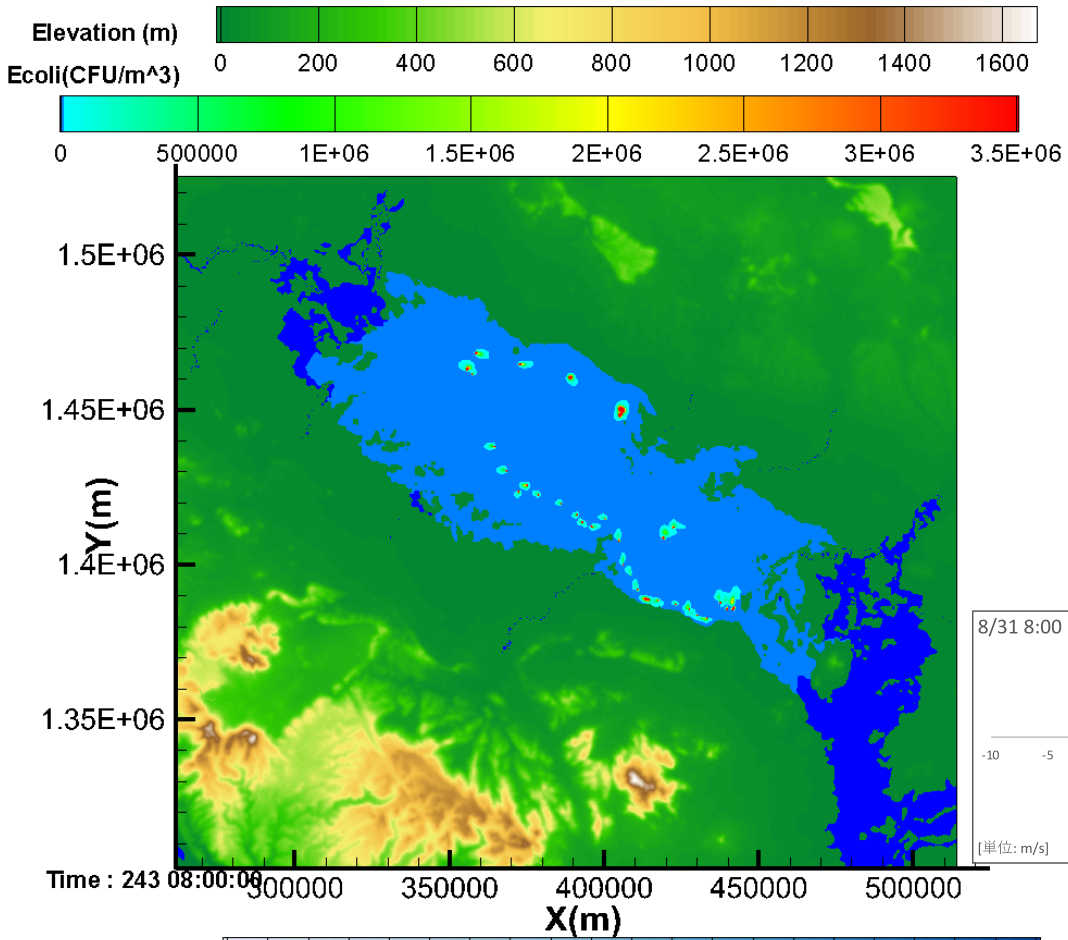


図4-88 8月1日6:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



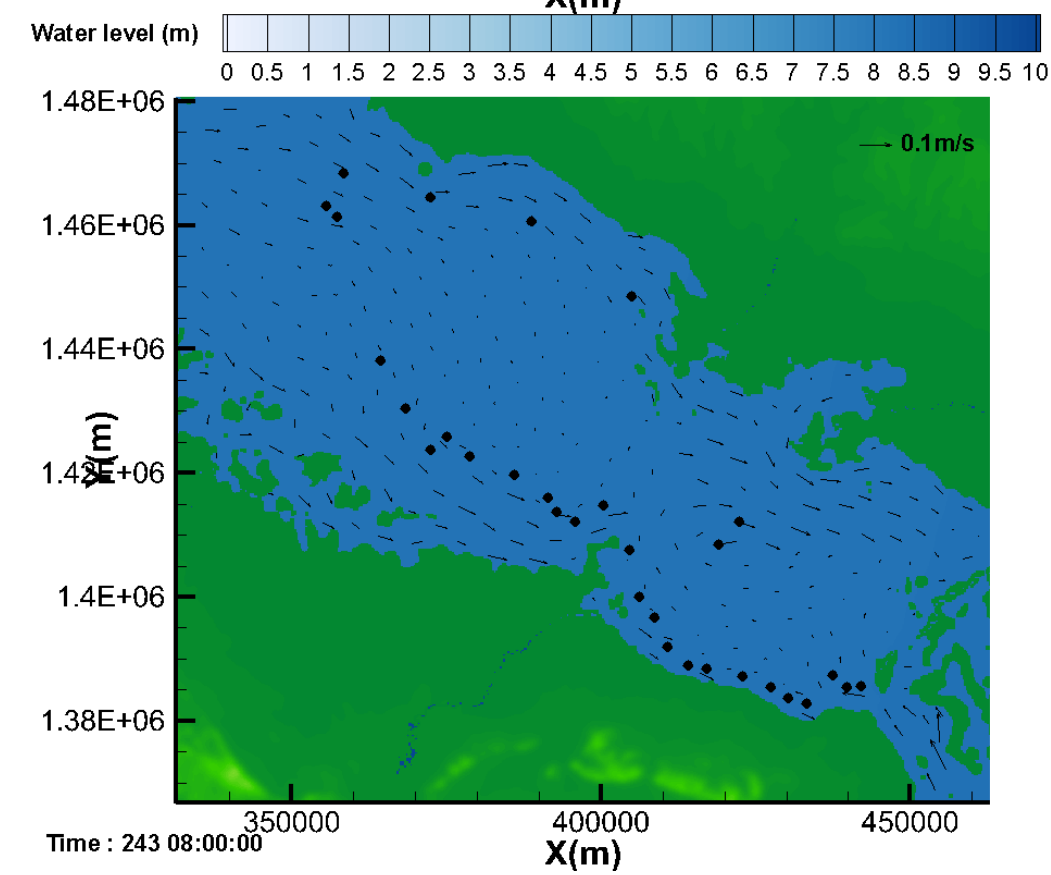


図4-89 8月31日8:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

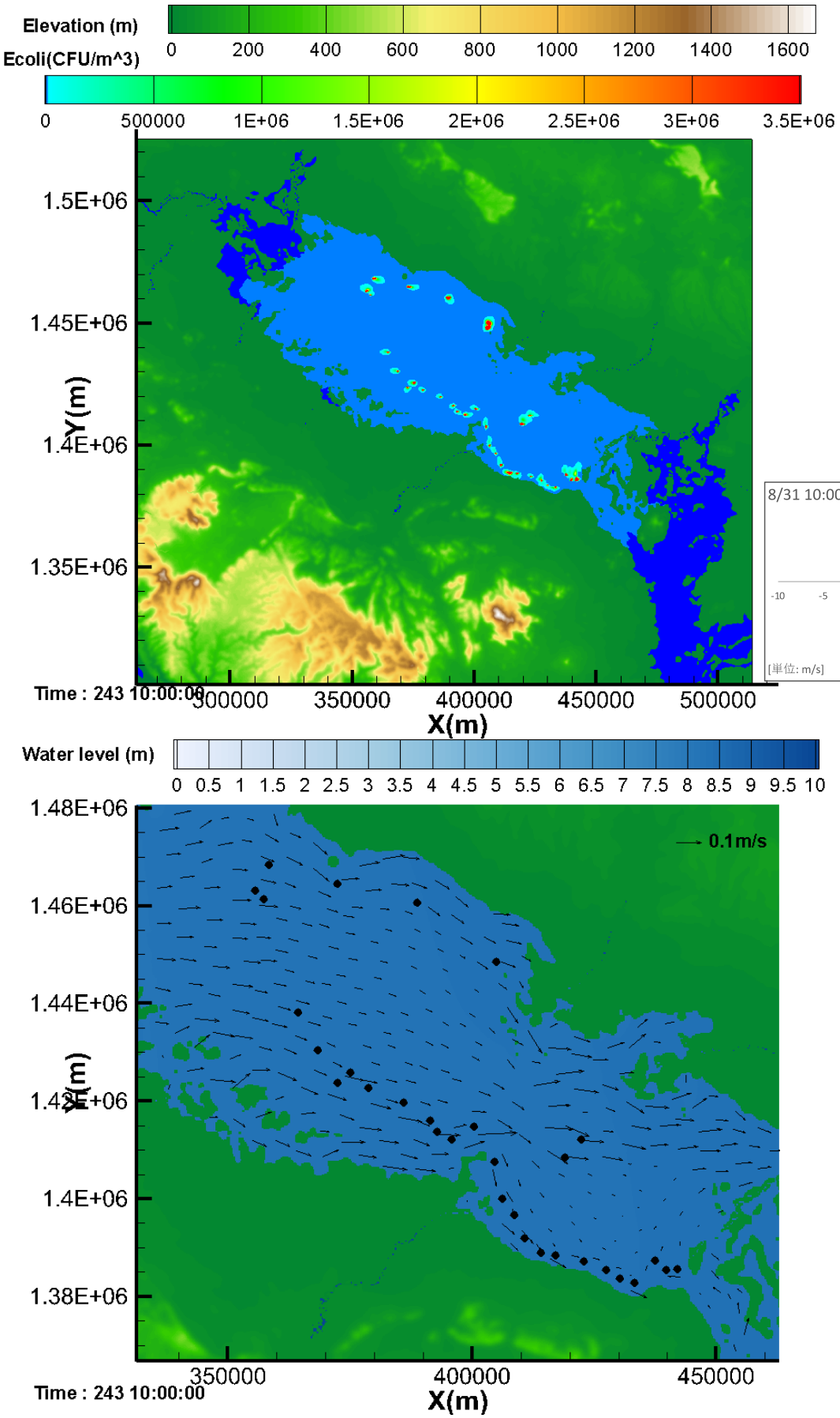


図4-90 8月31日10:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

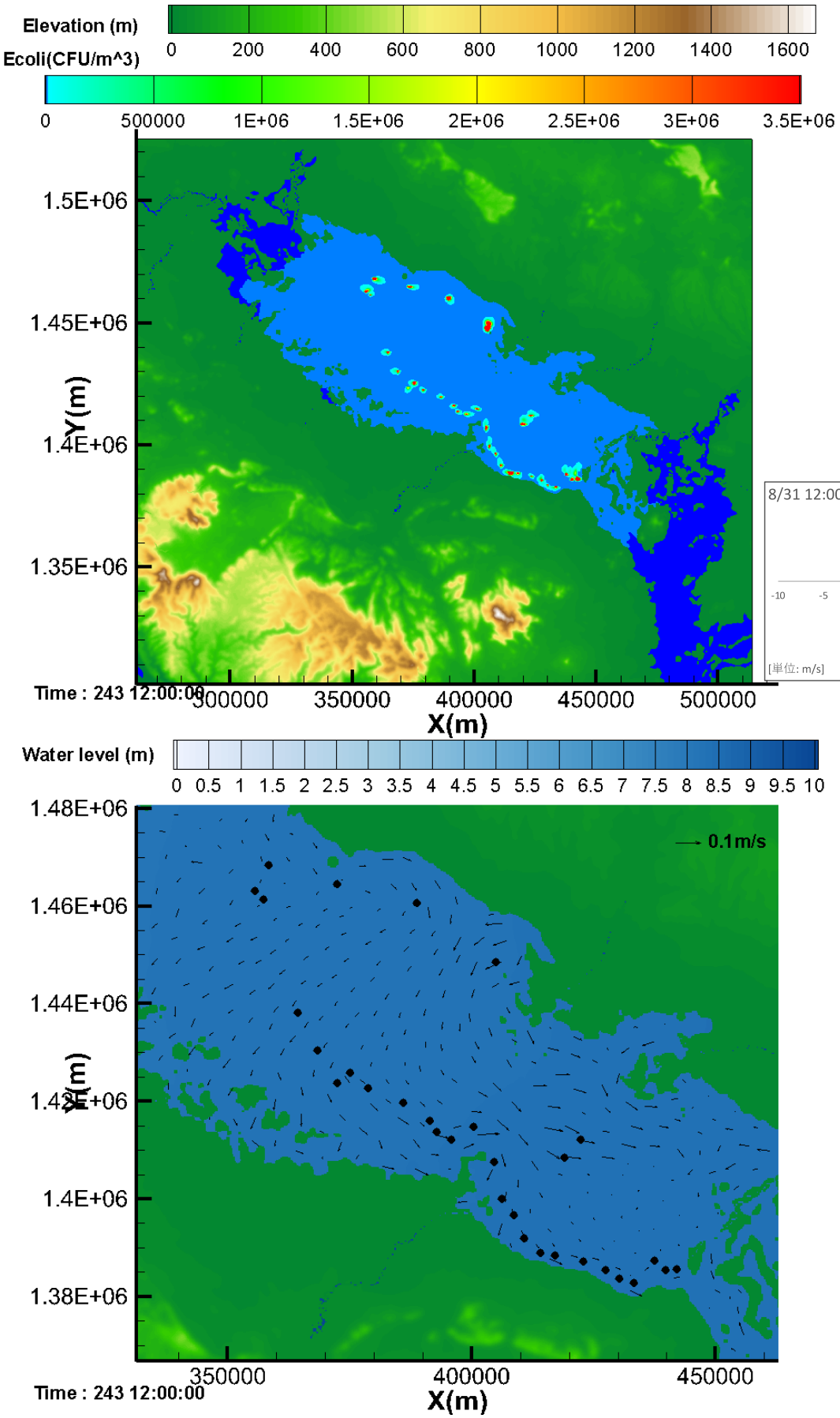
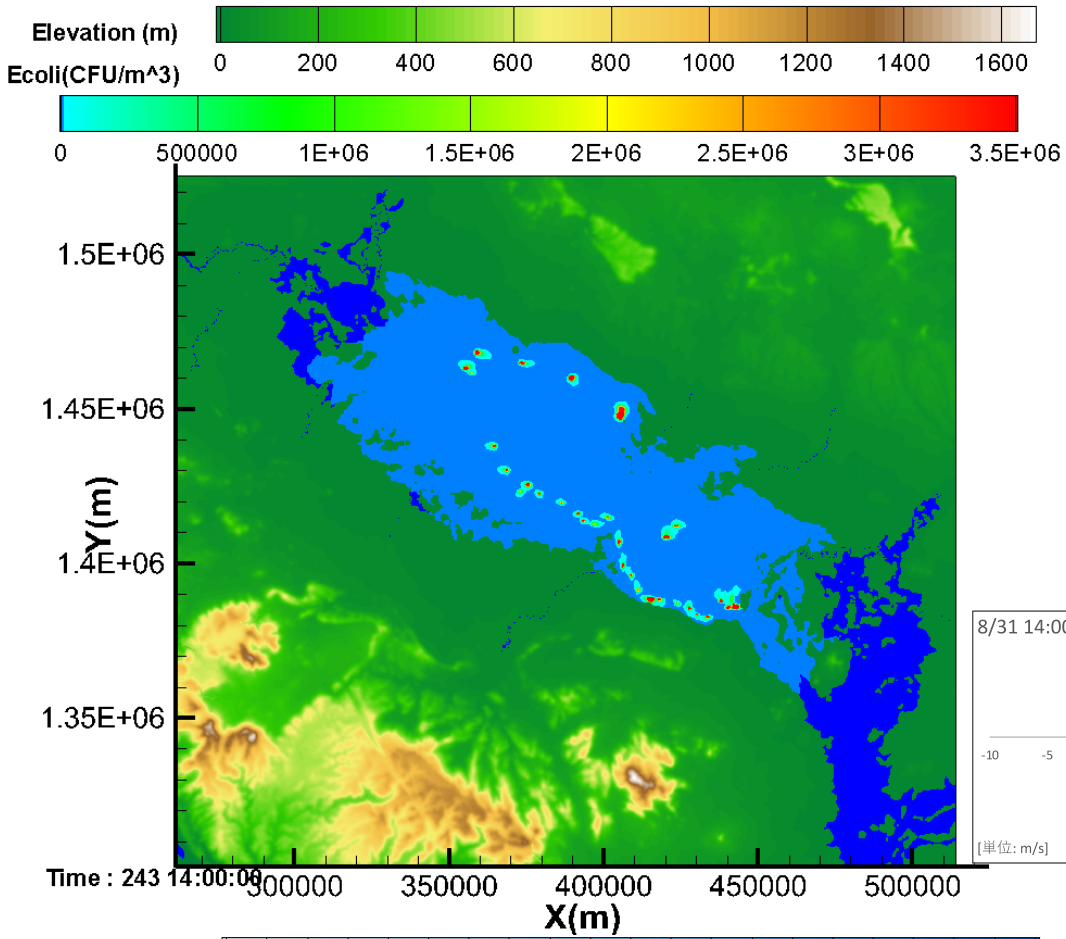


図4-91 8月31日12:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



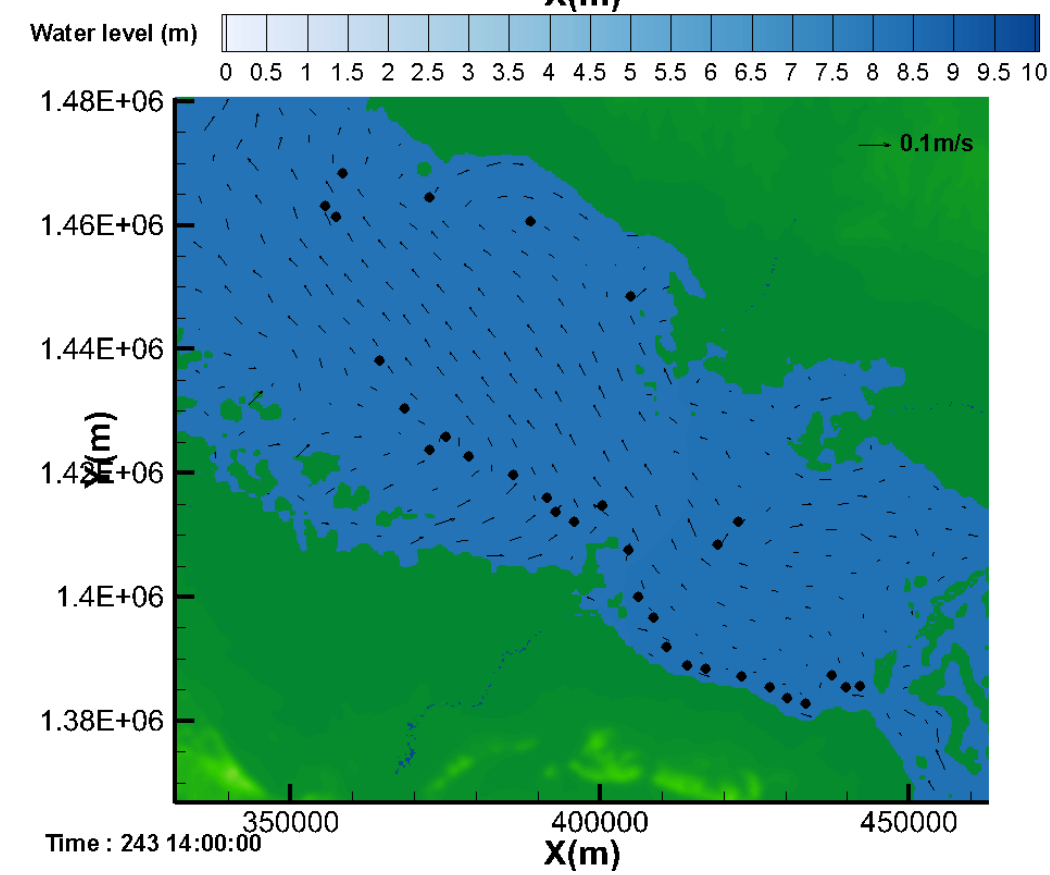
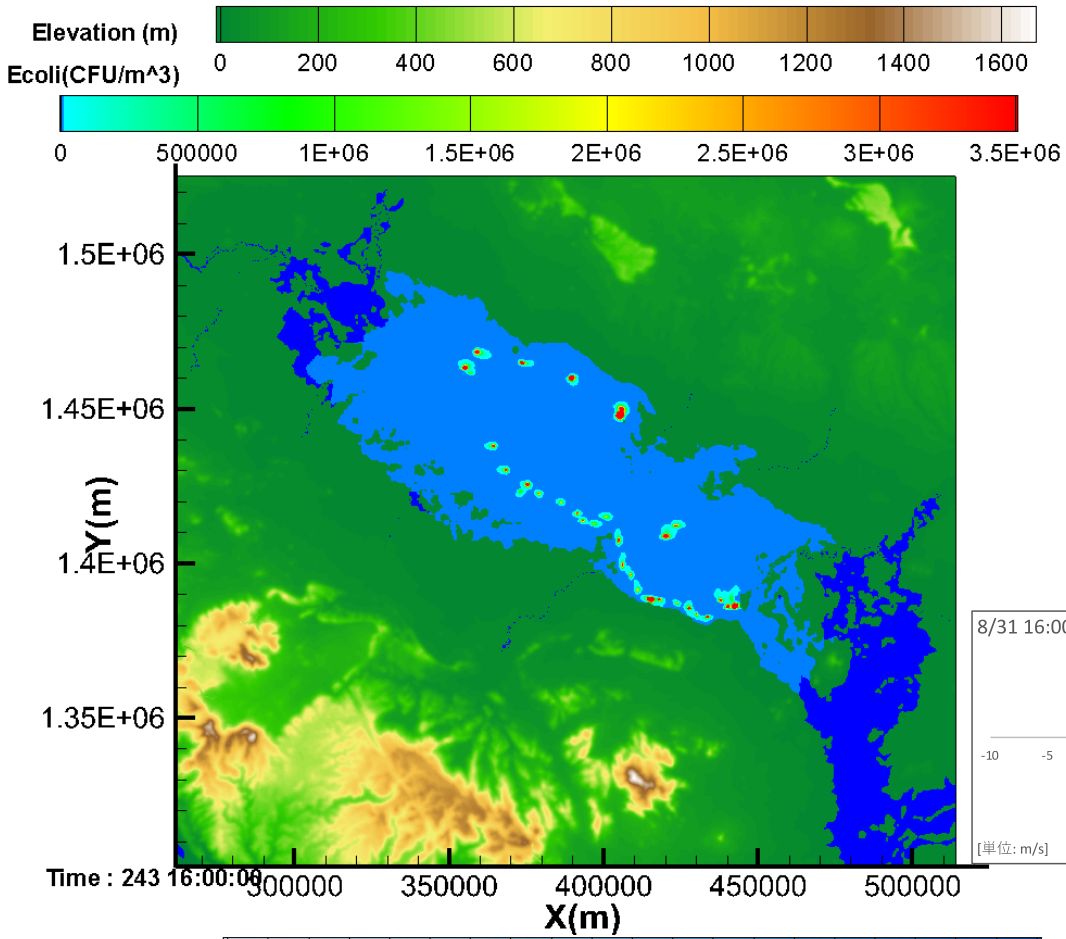


図4-92 8月31日14:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



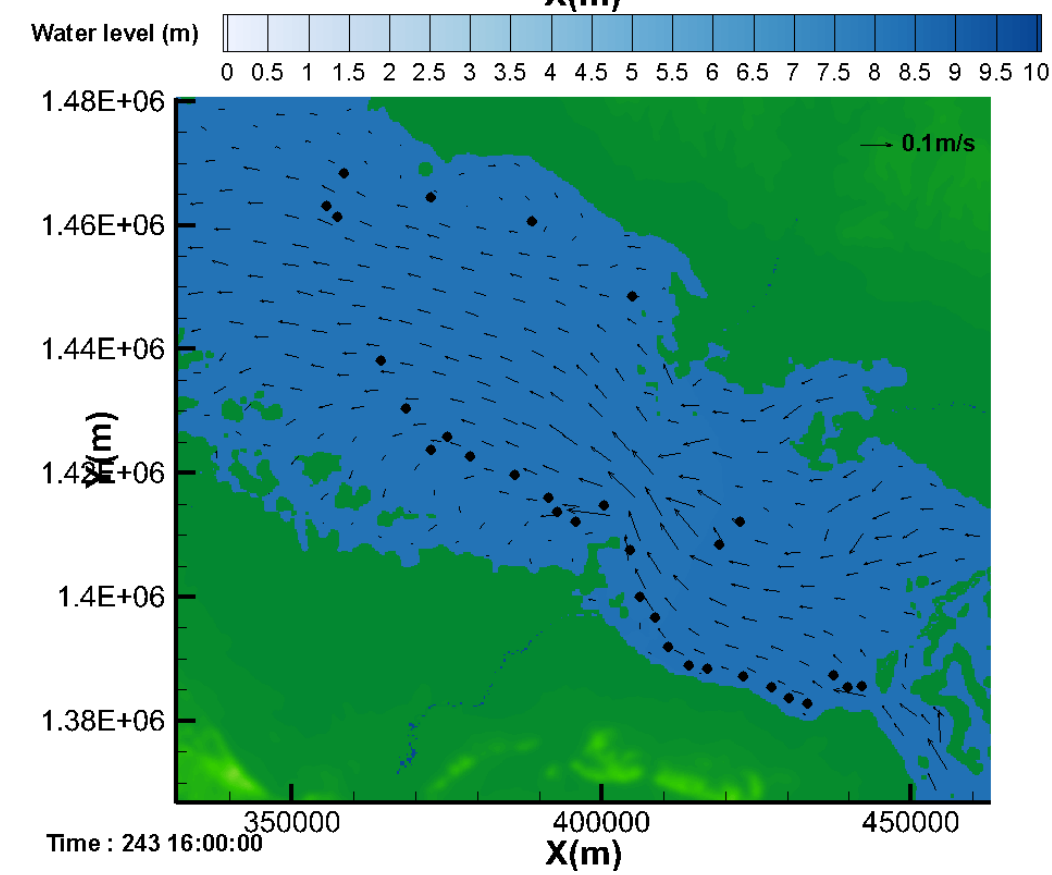


図4-93 8月31日16:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

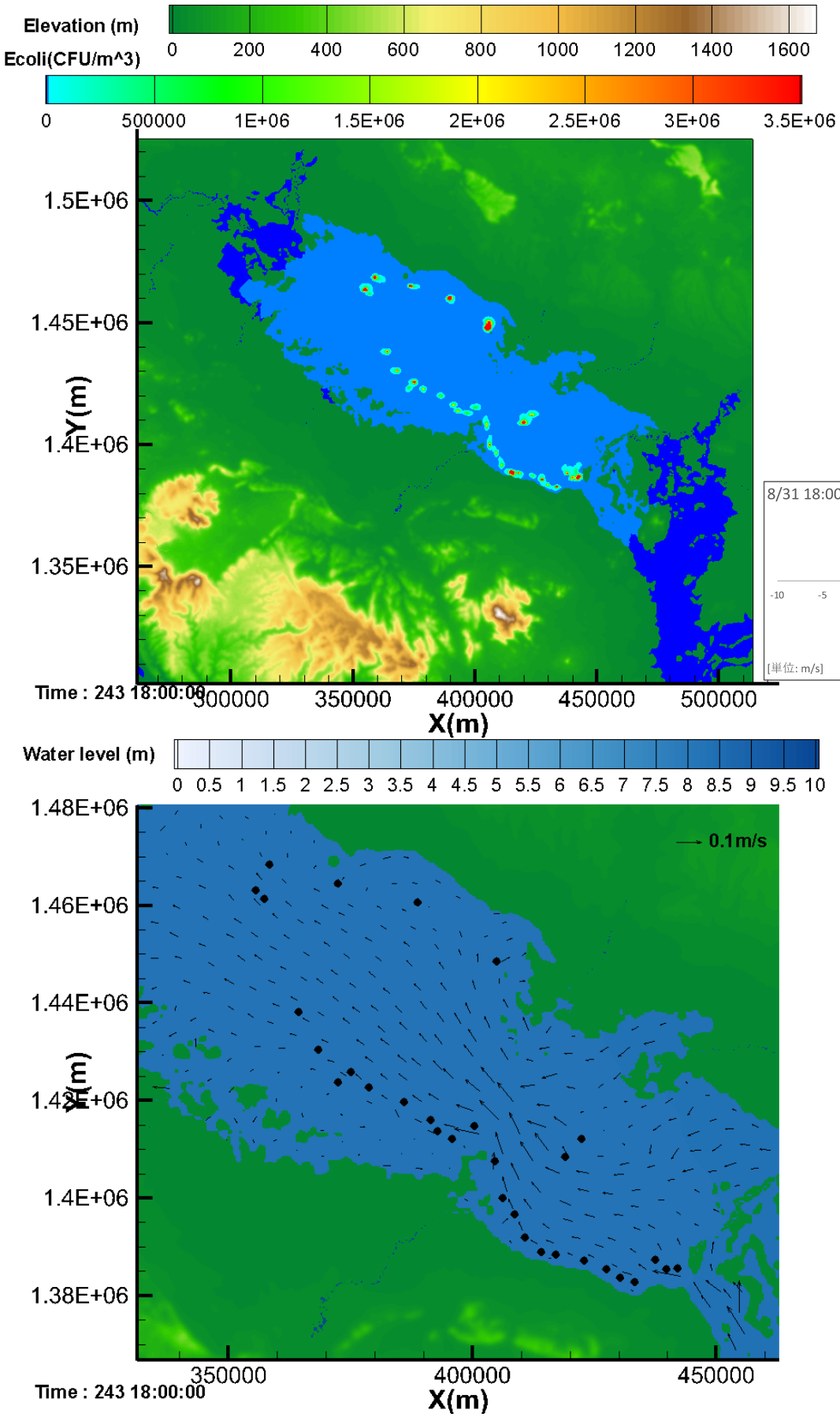


図4-94 8月31日18:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

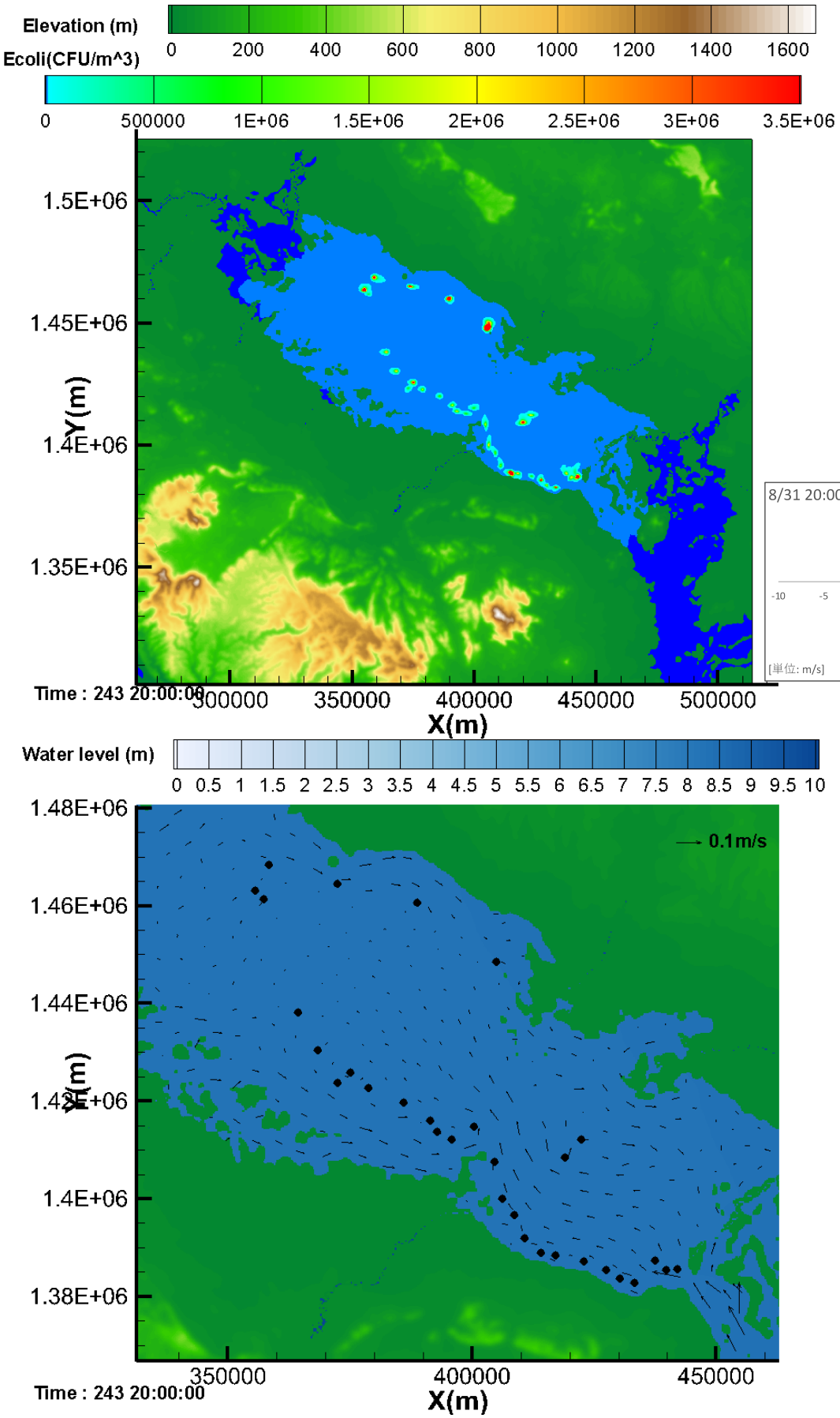


図4-95 8月31日20:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

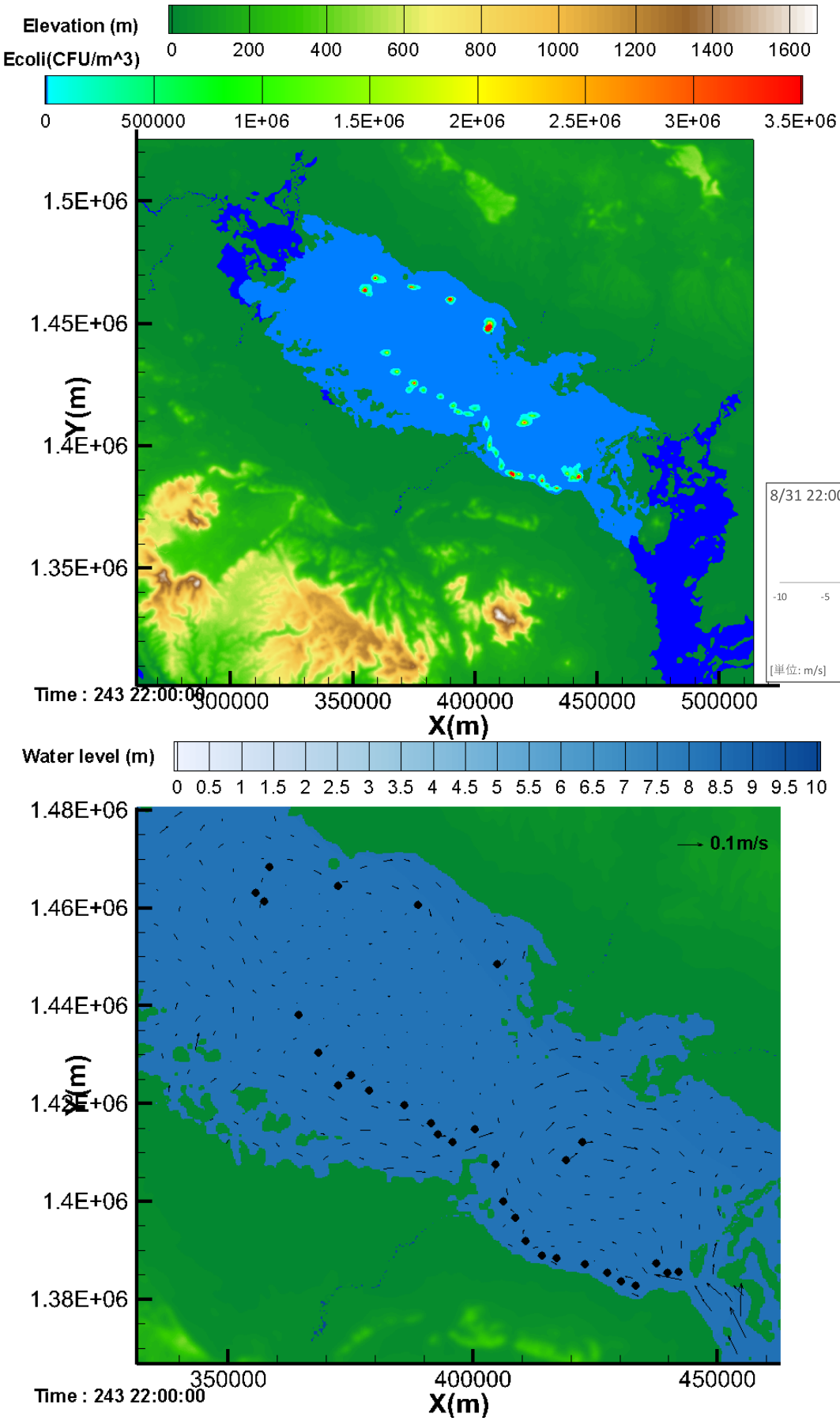
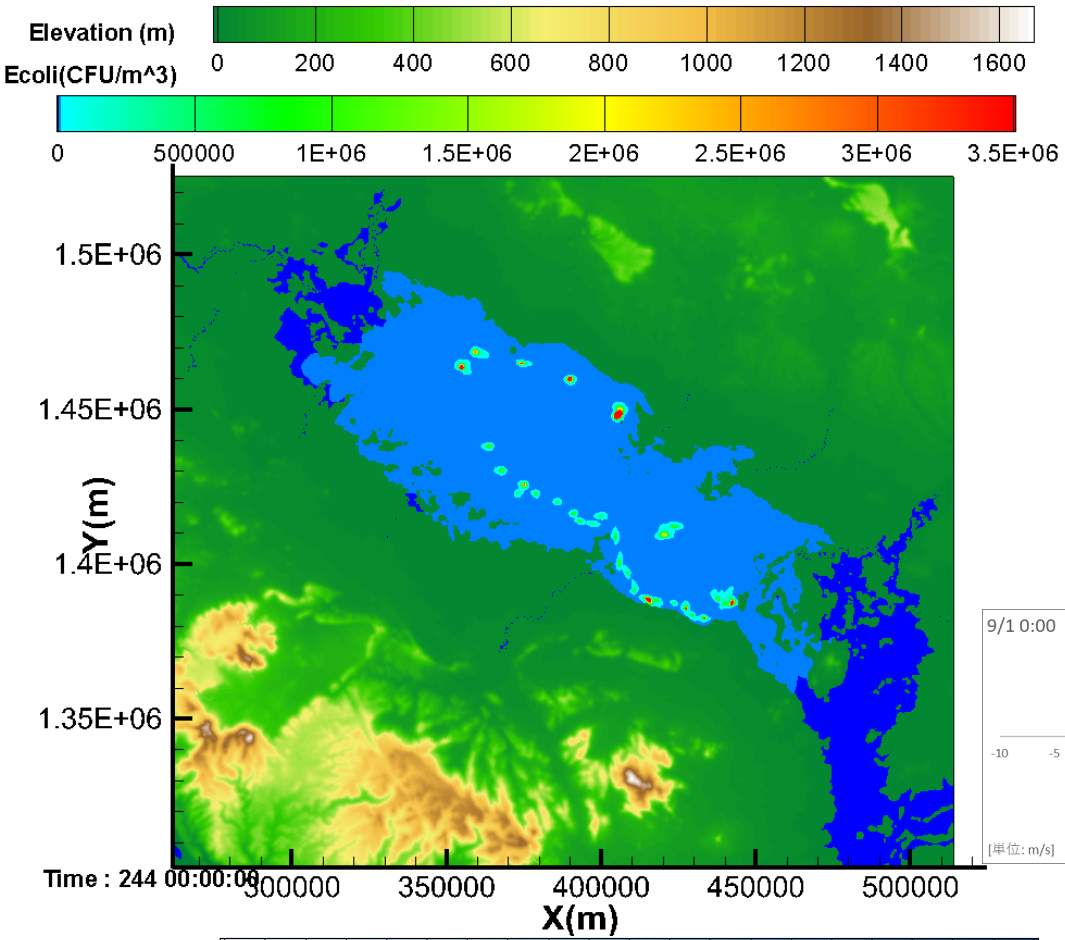


図4-96 8月31日22:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



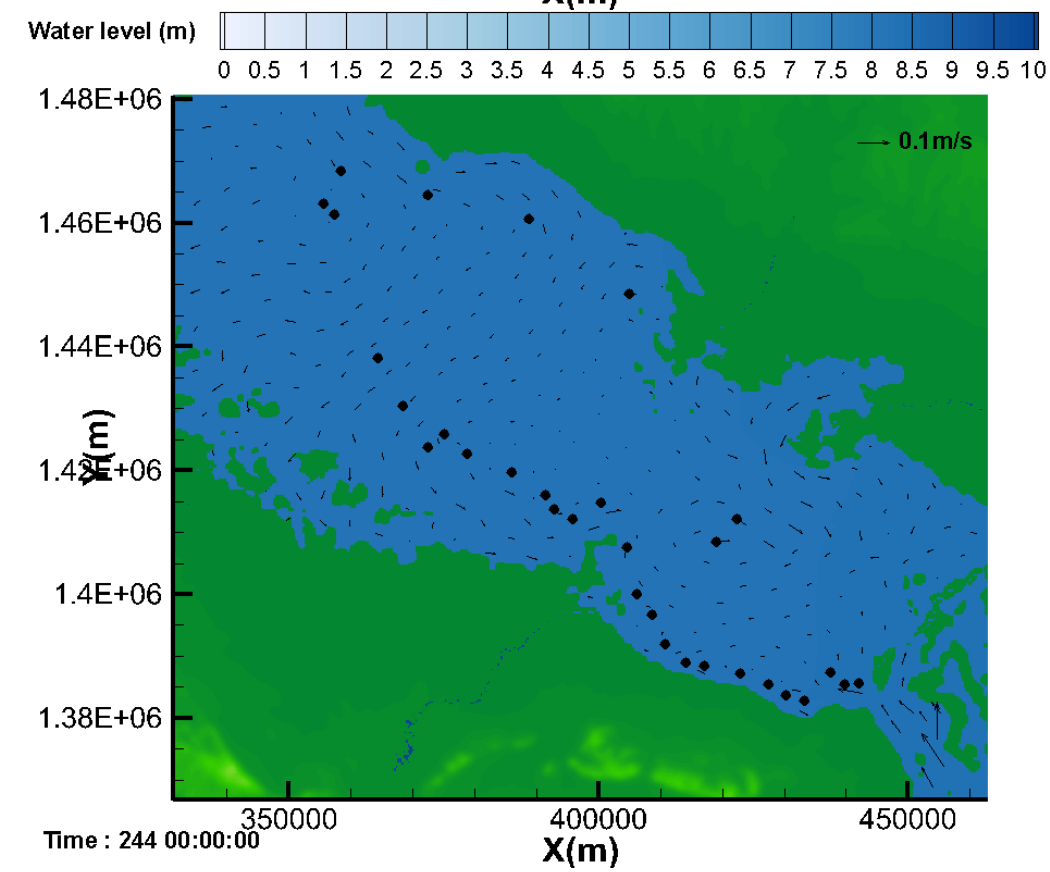


図4-97 9月1日0:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

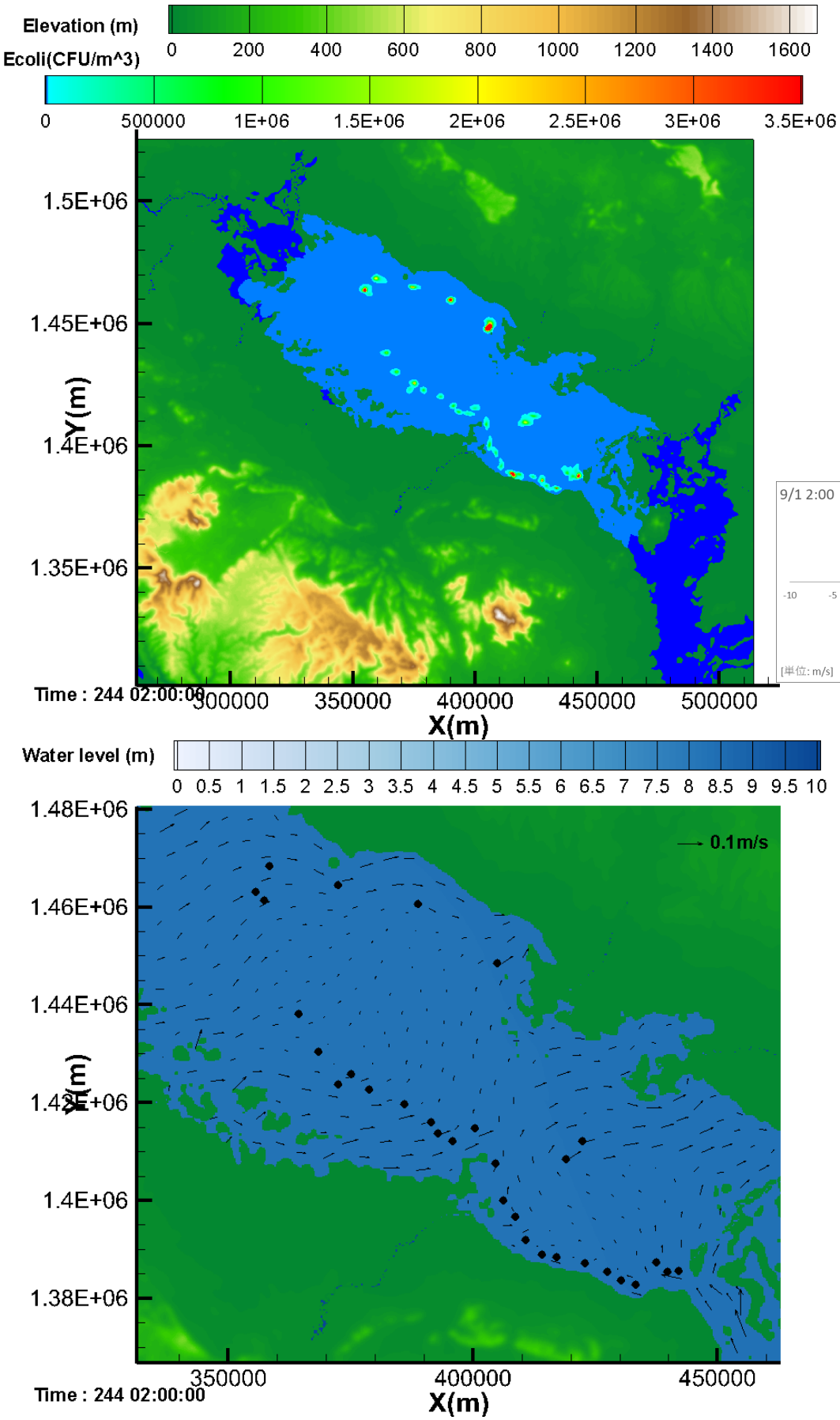


図4-98 9月1日2:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

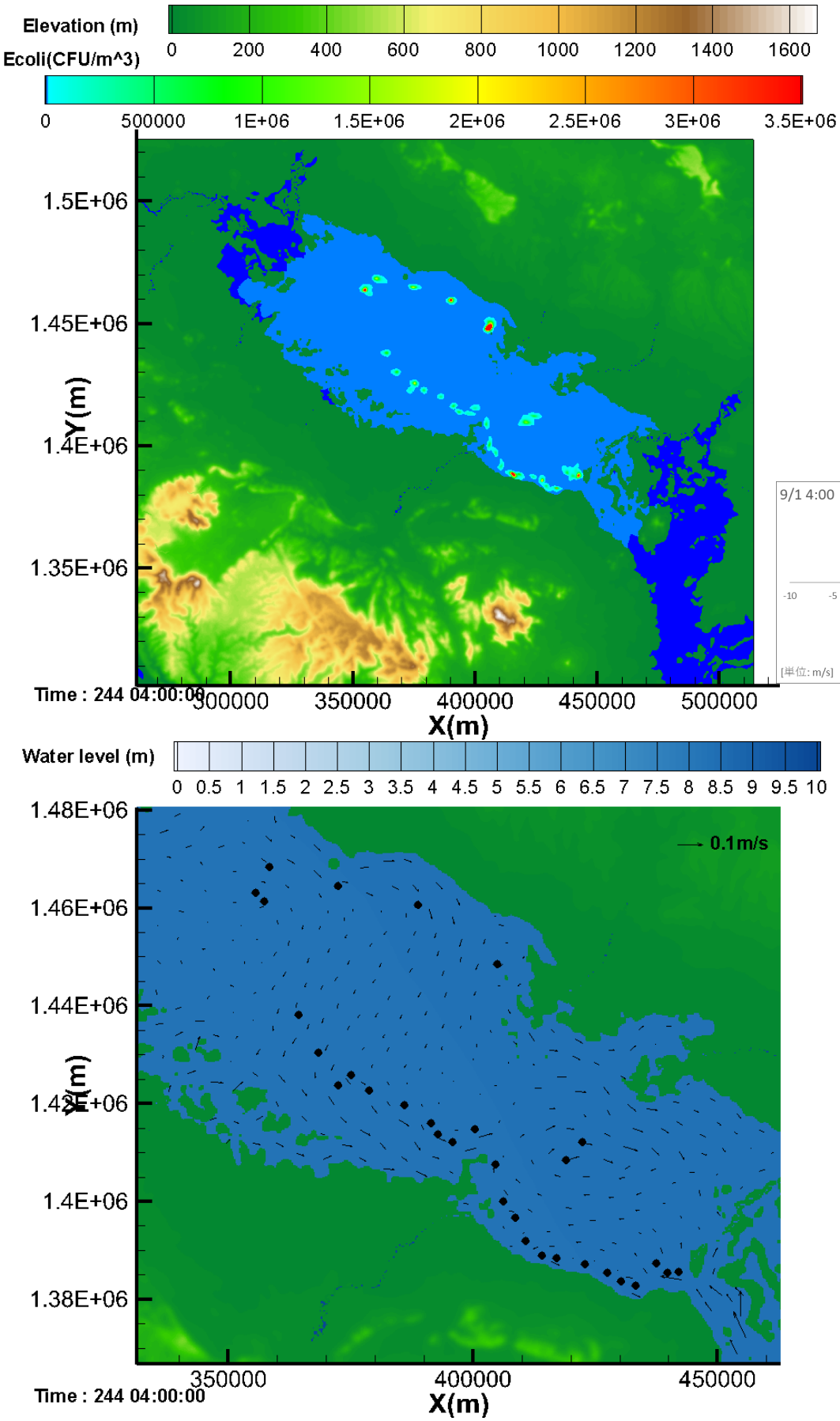


図4-99 9月1日4:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

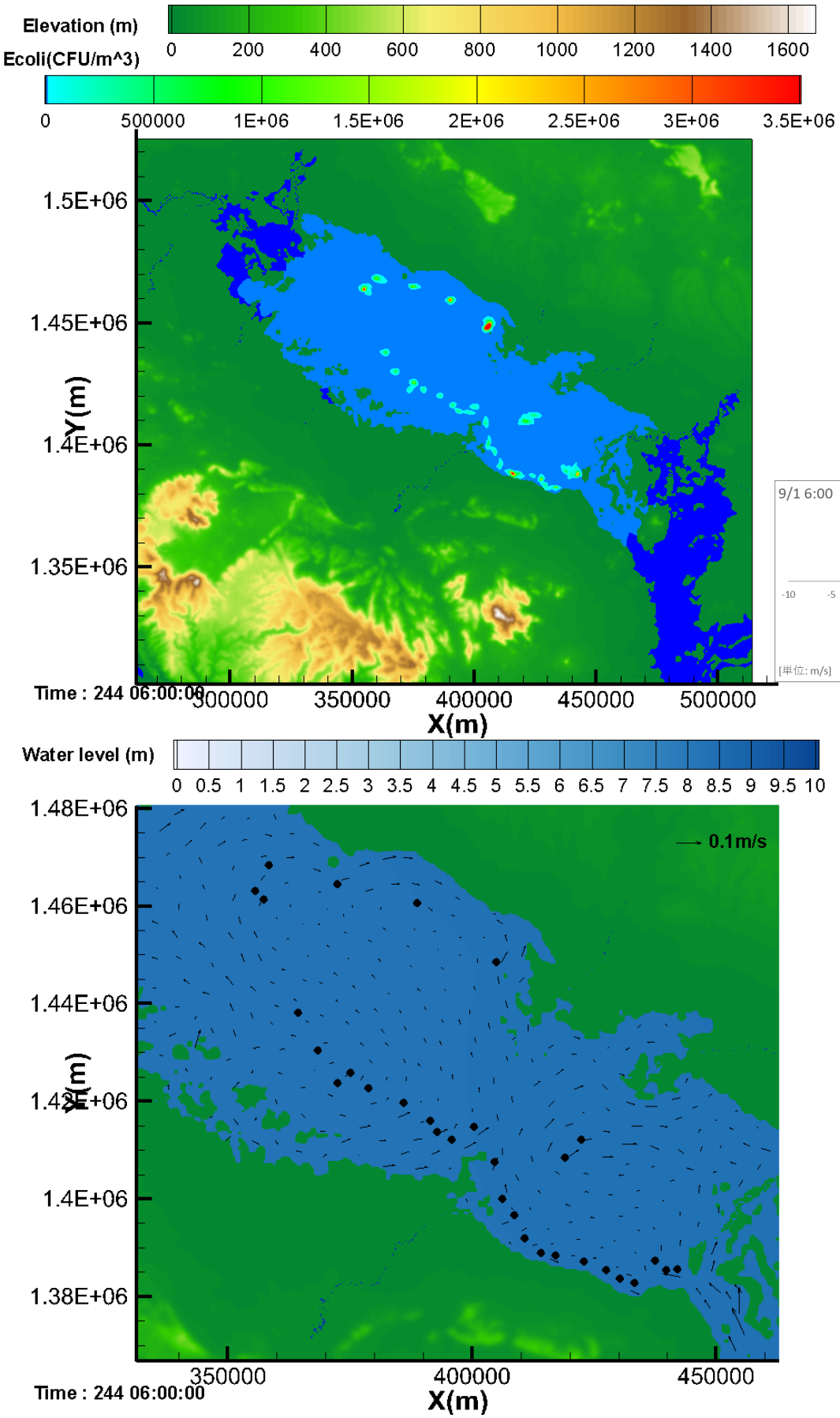
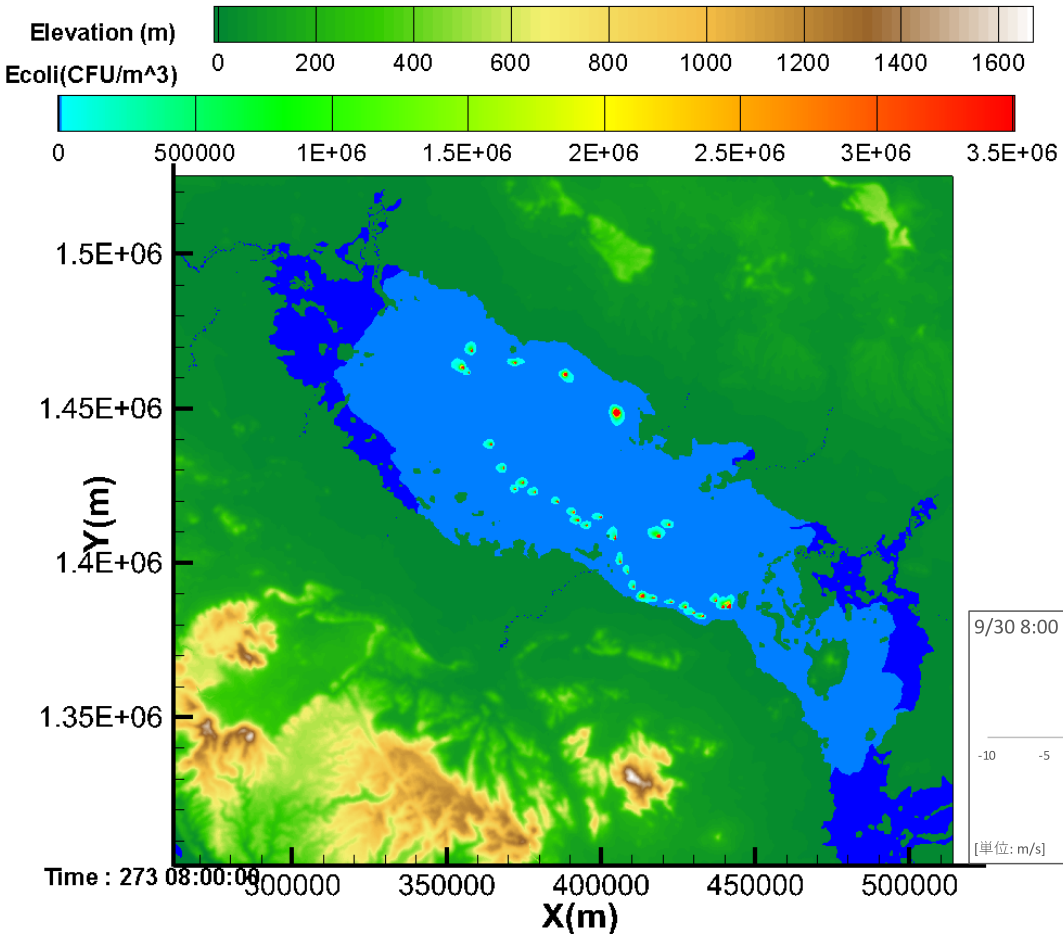


図4-100 9月1日6:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



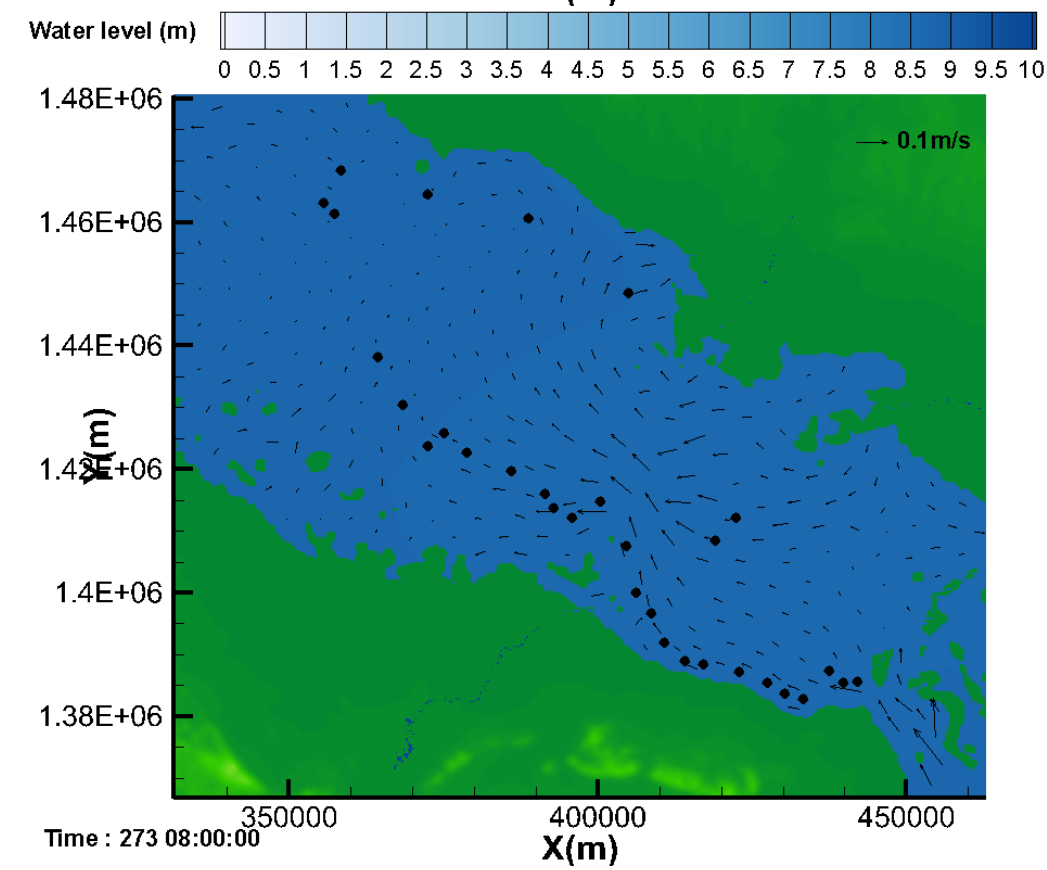
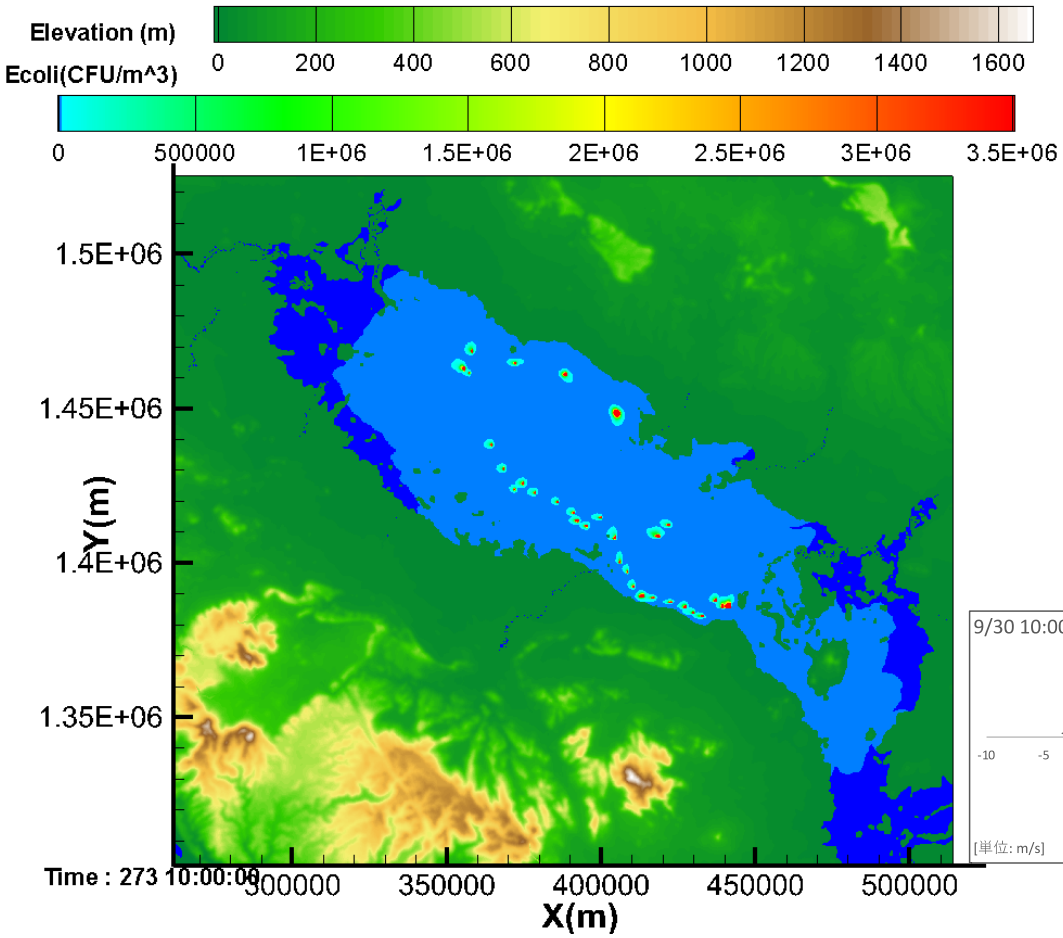


図4-101 9月30日8:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



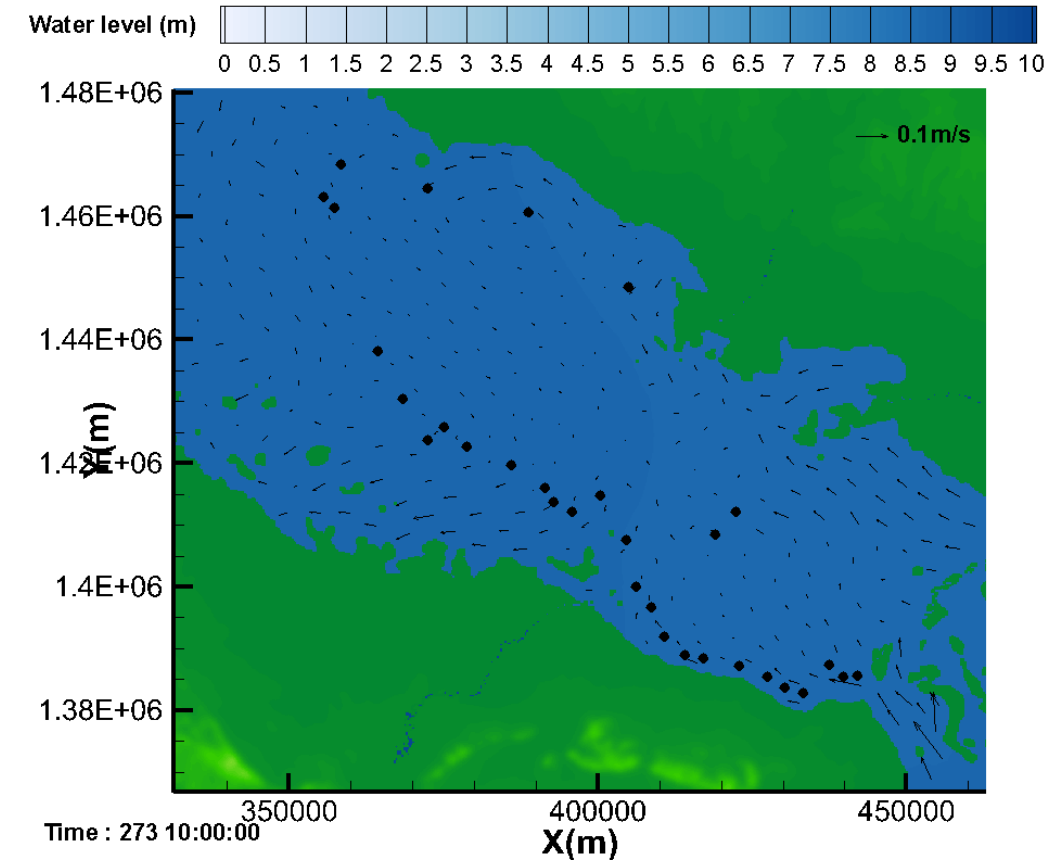
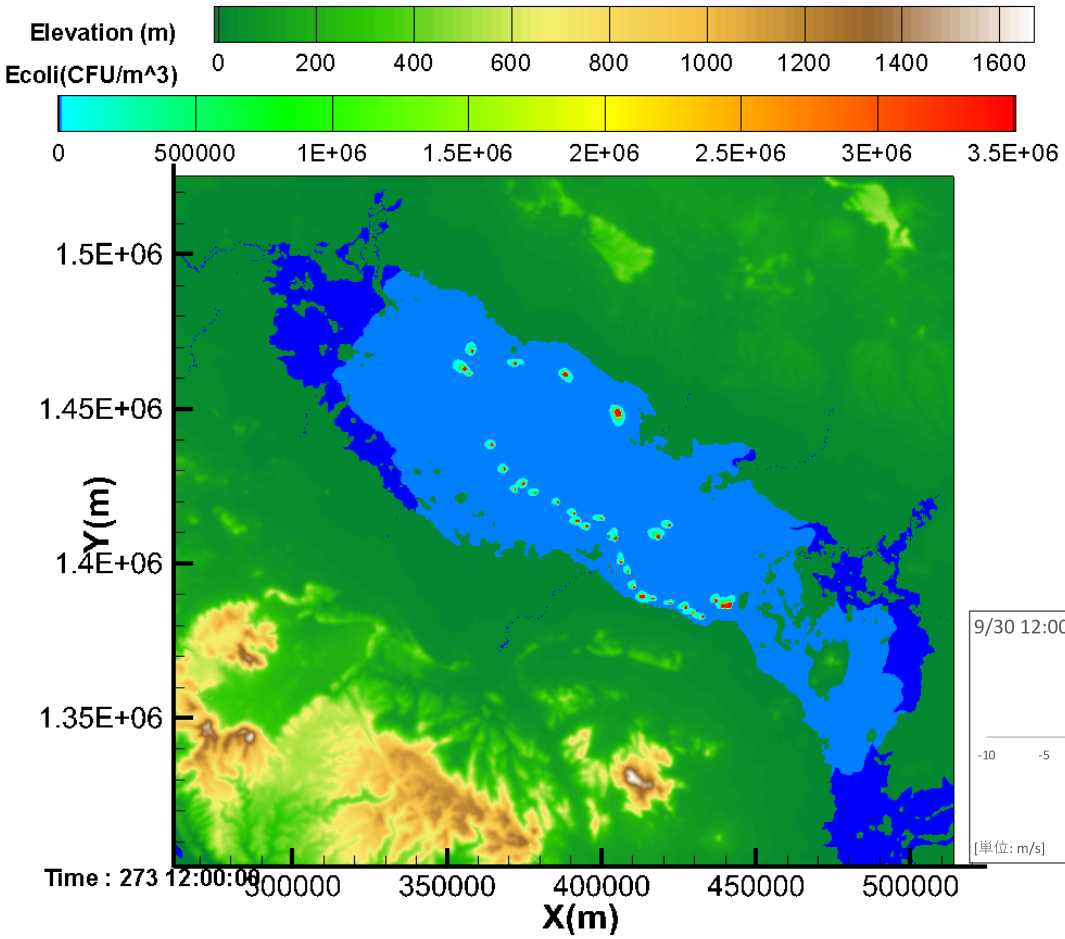


図4-102 9月30日10:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



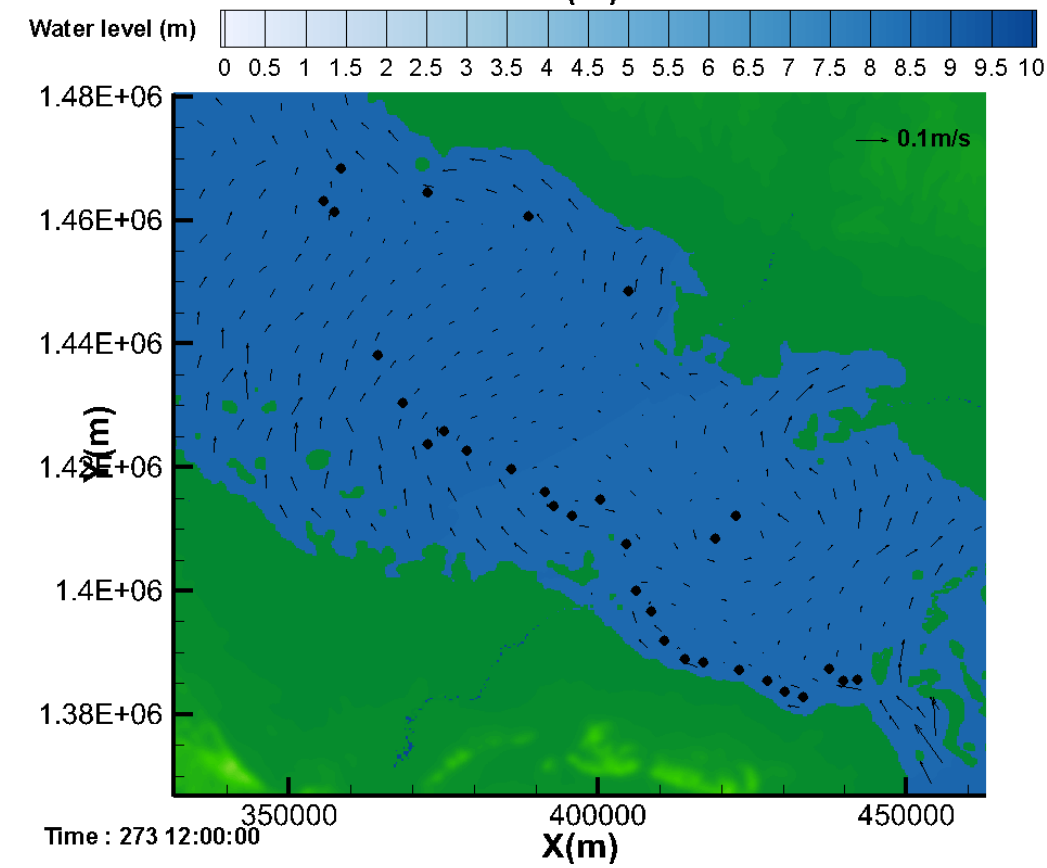
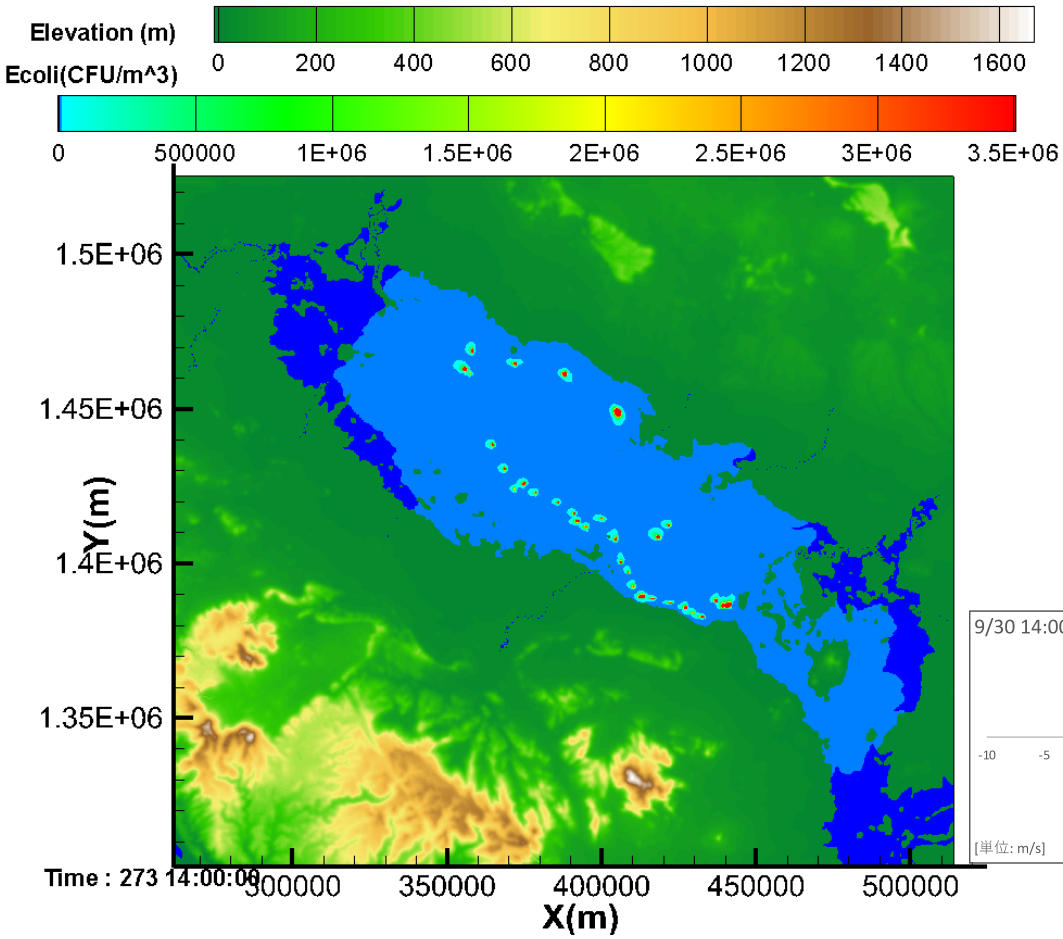


図4-103 9月30日12:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



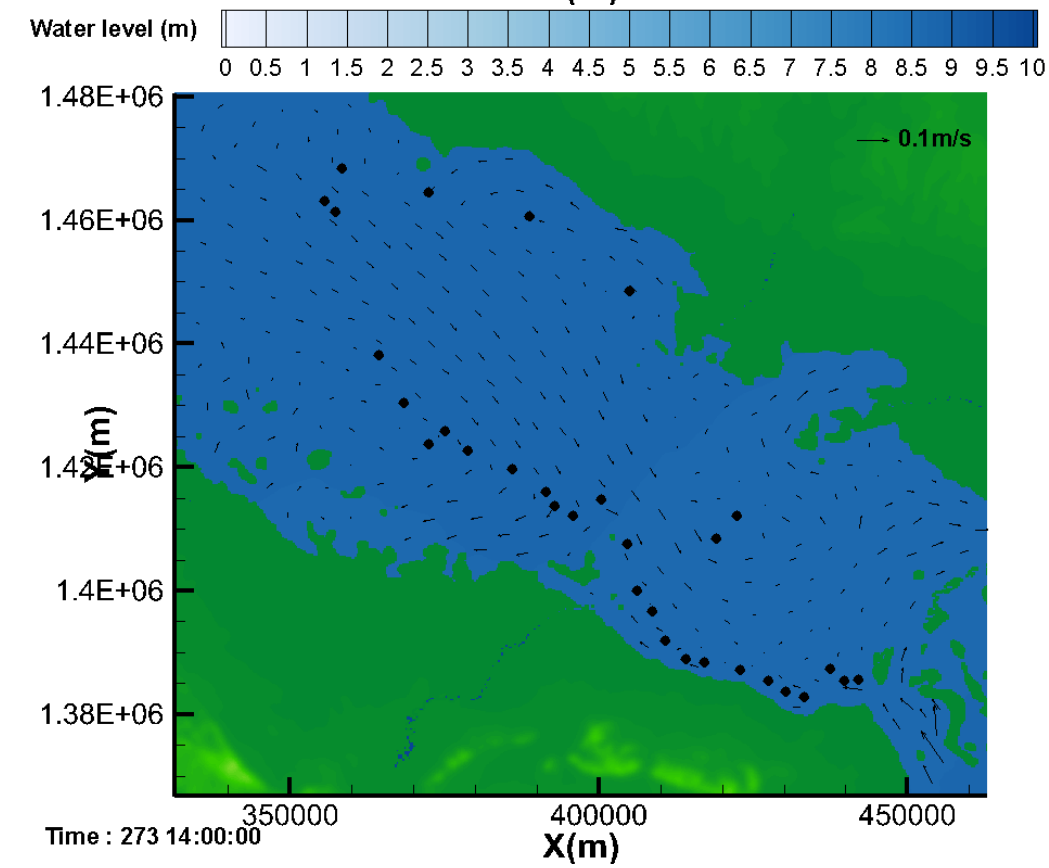


図4-104 9月30日14:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

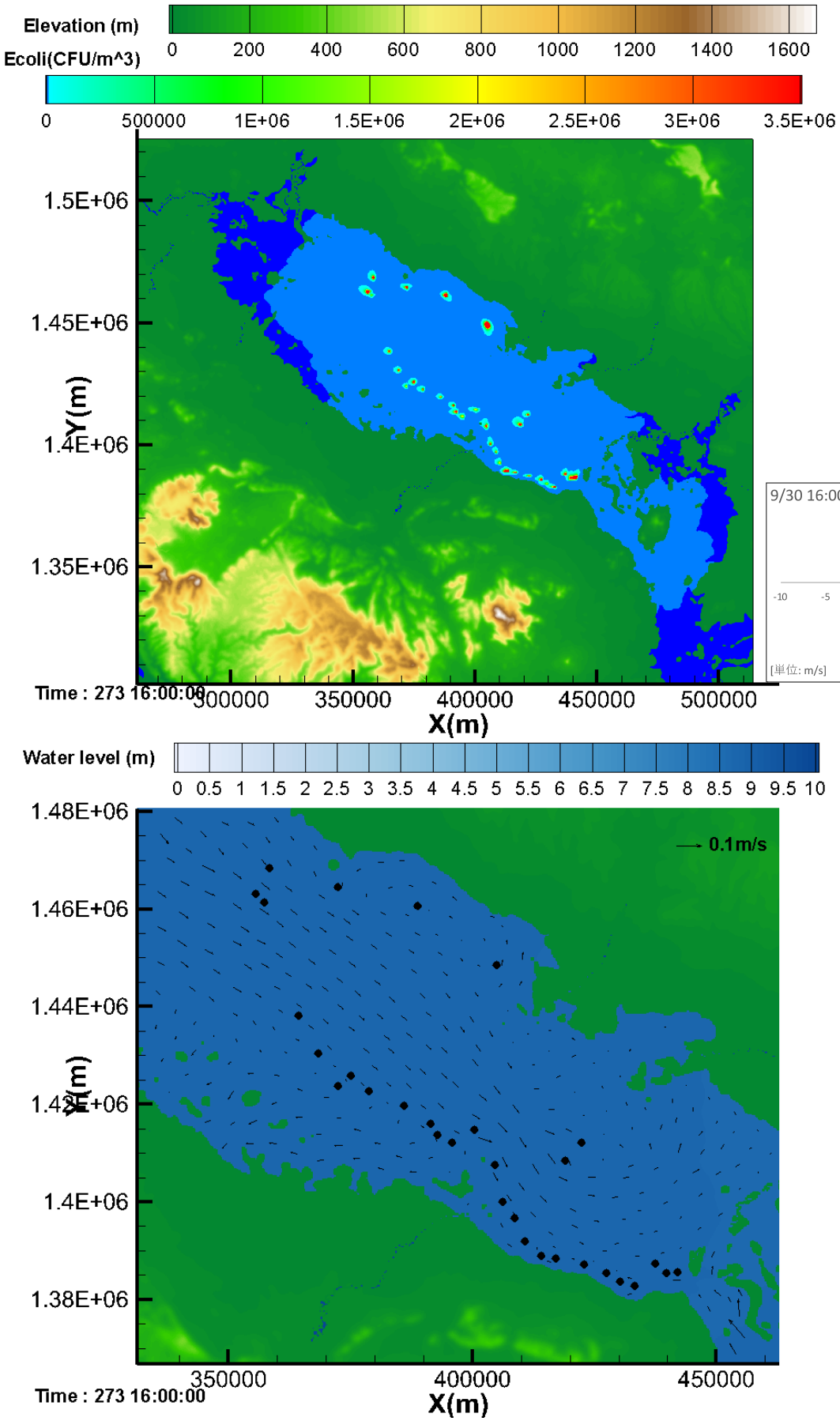


図4-105 9月30日16:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

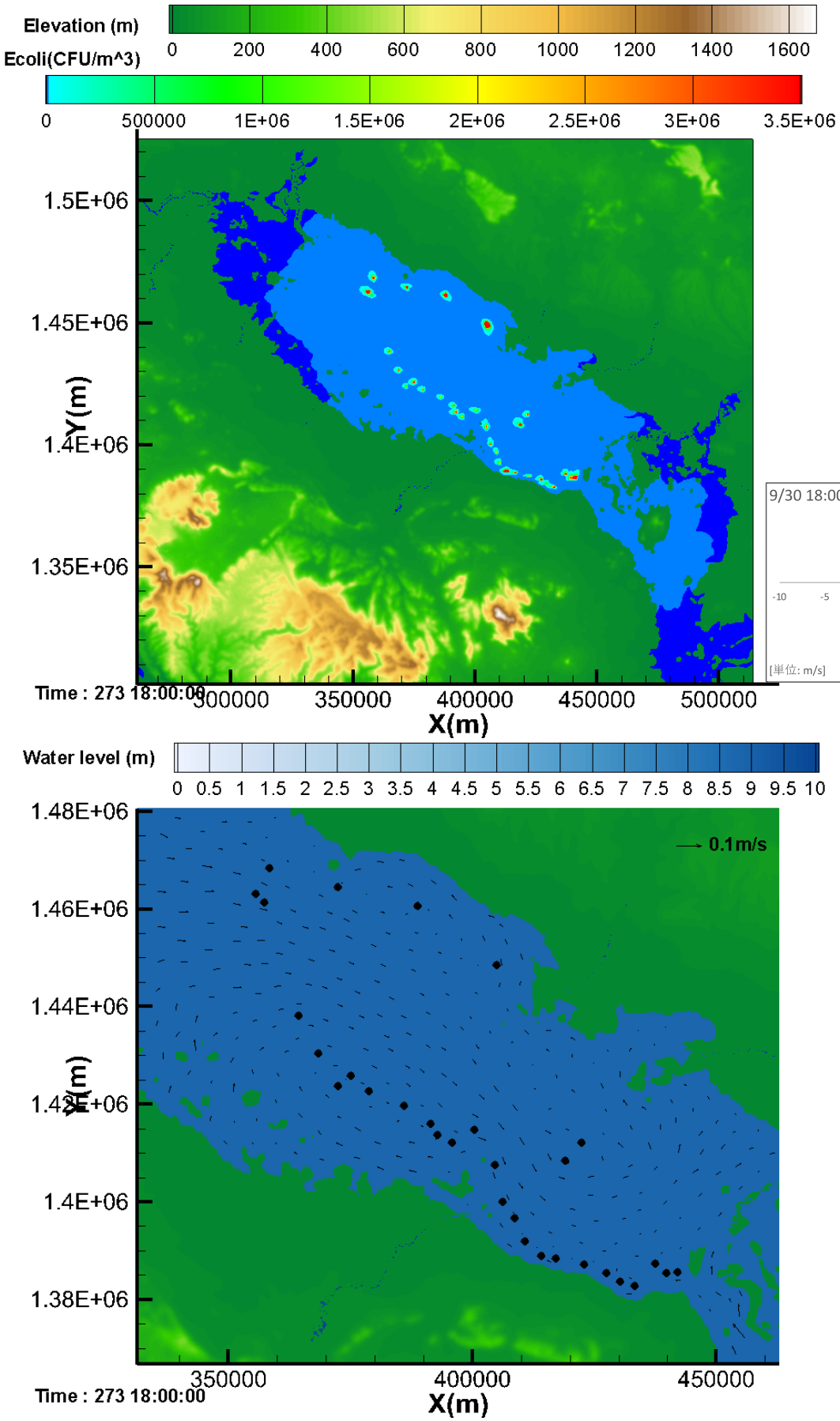
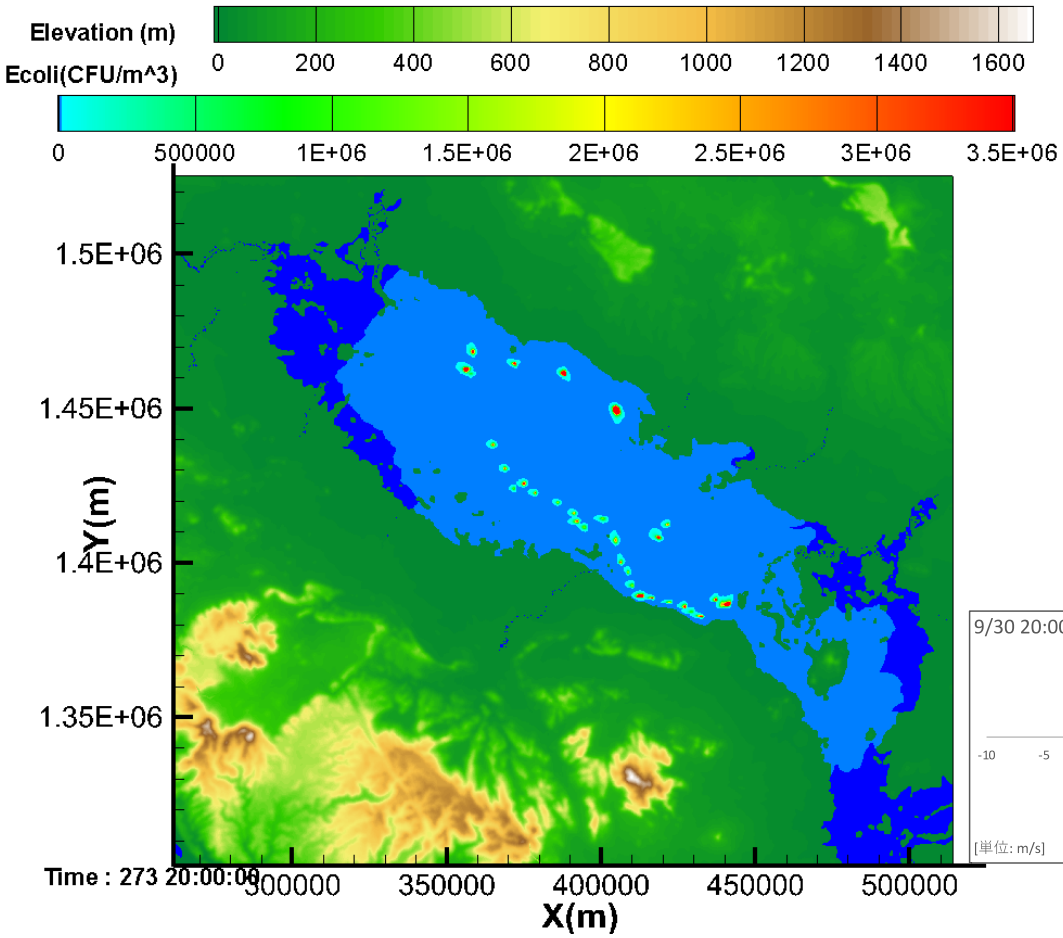


図4-106 9月30日18:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



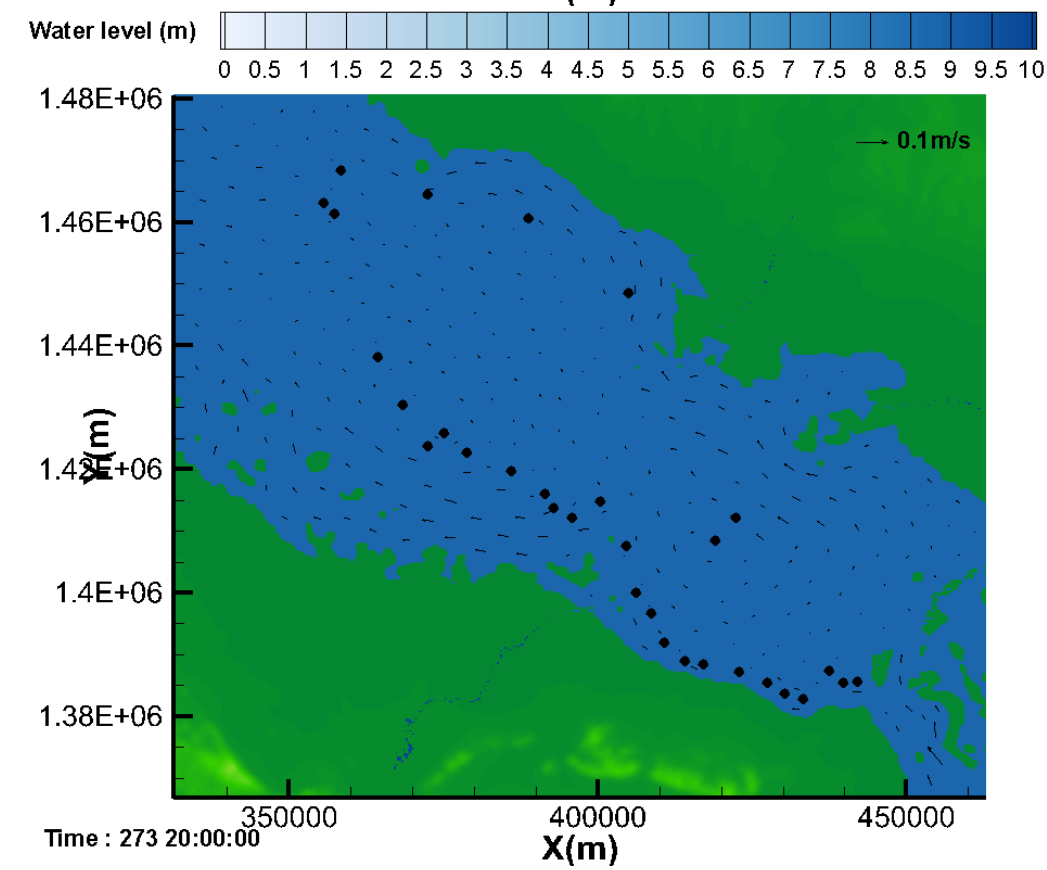


図4-107 9月30日20:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

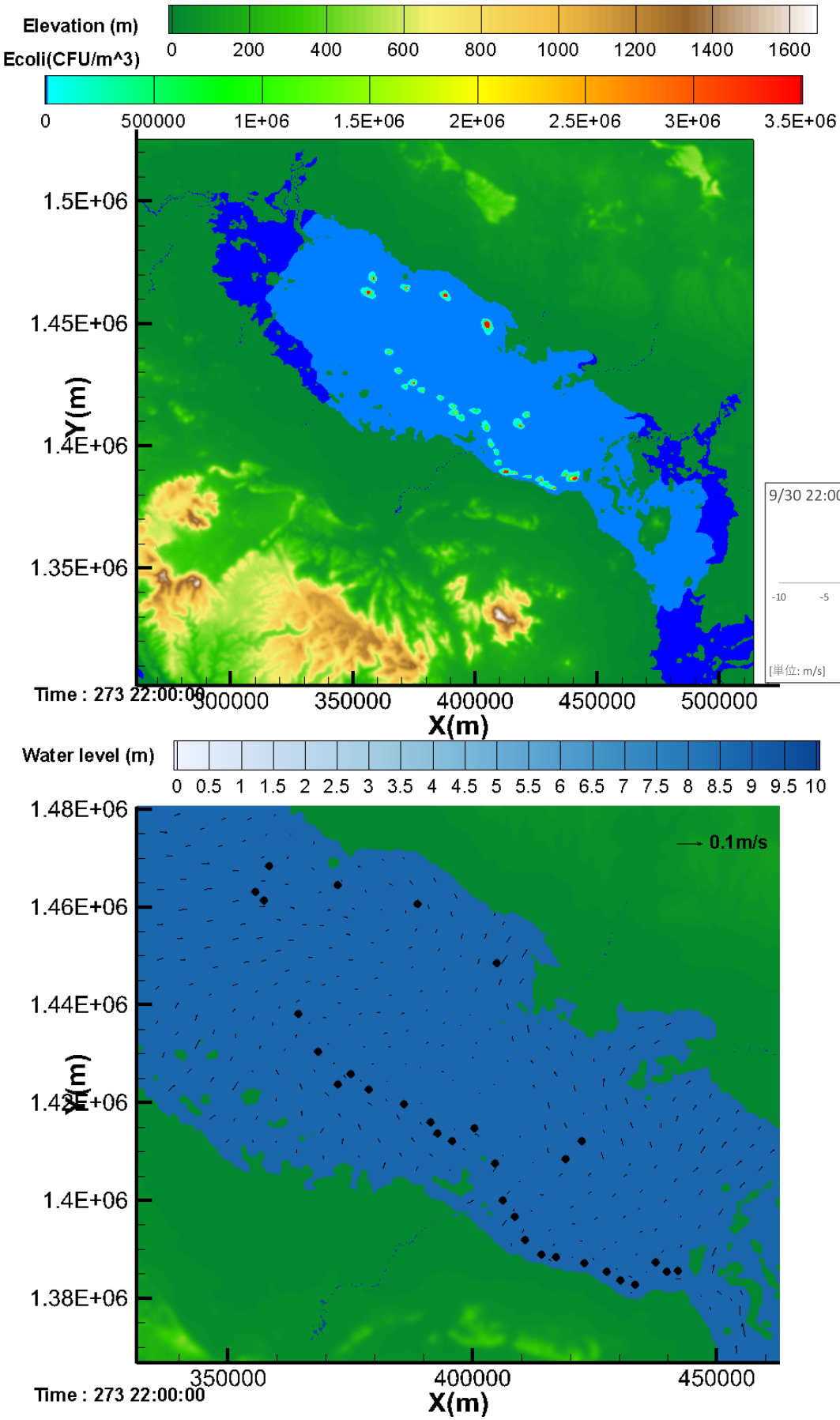
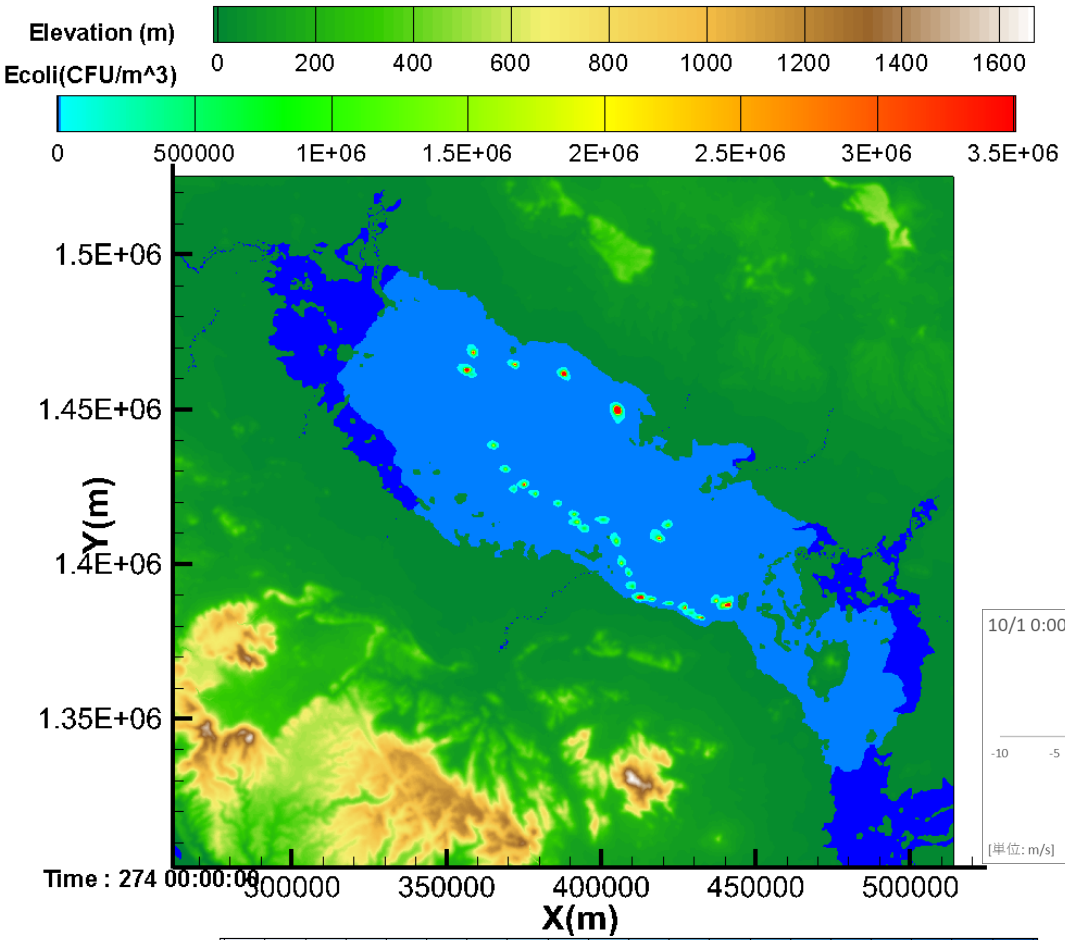


図4-108 9月30日22:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



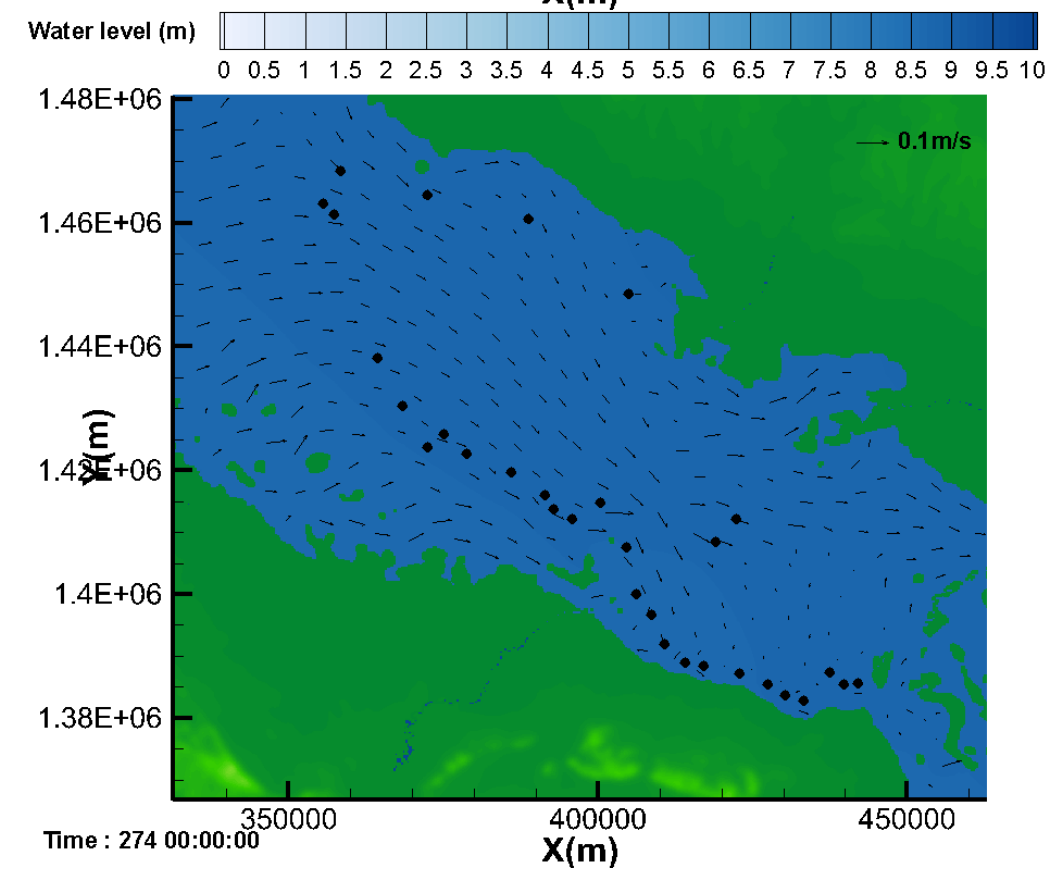
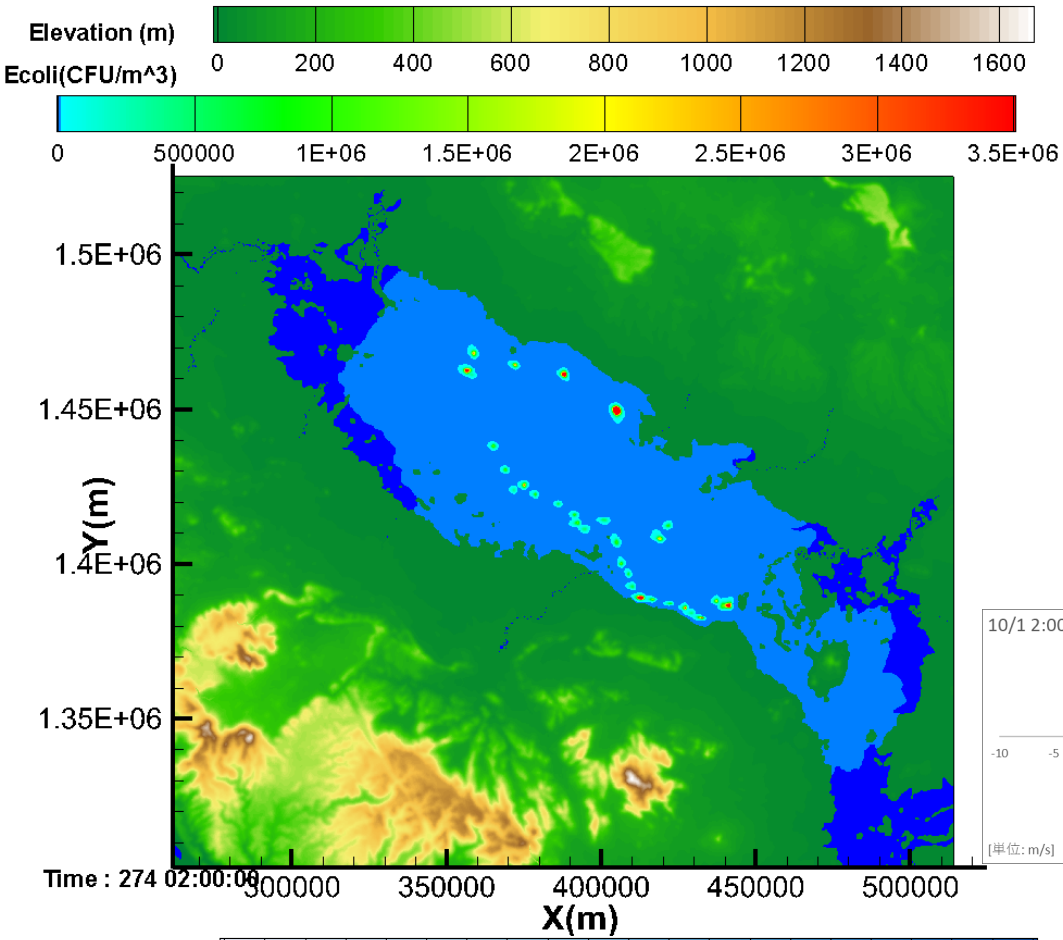


図4-109 10月1日0:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



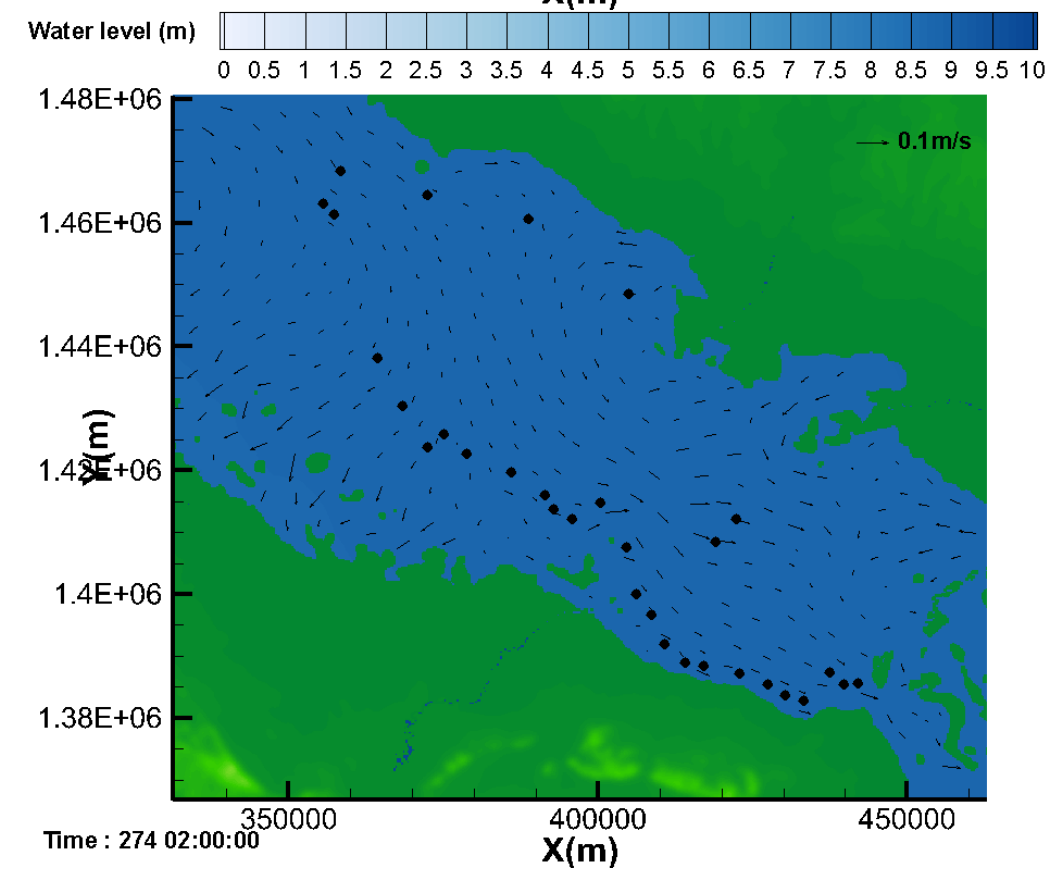


図4-110 10月1日2:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

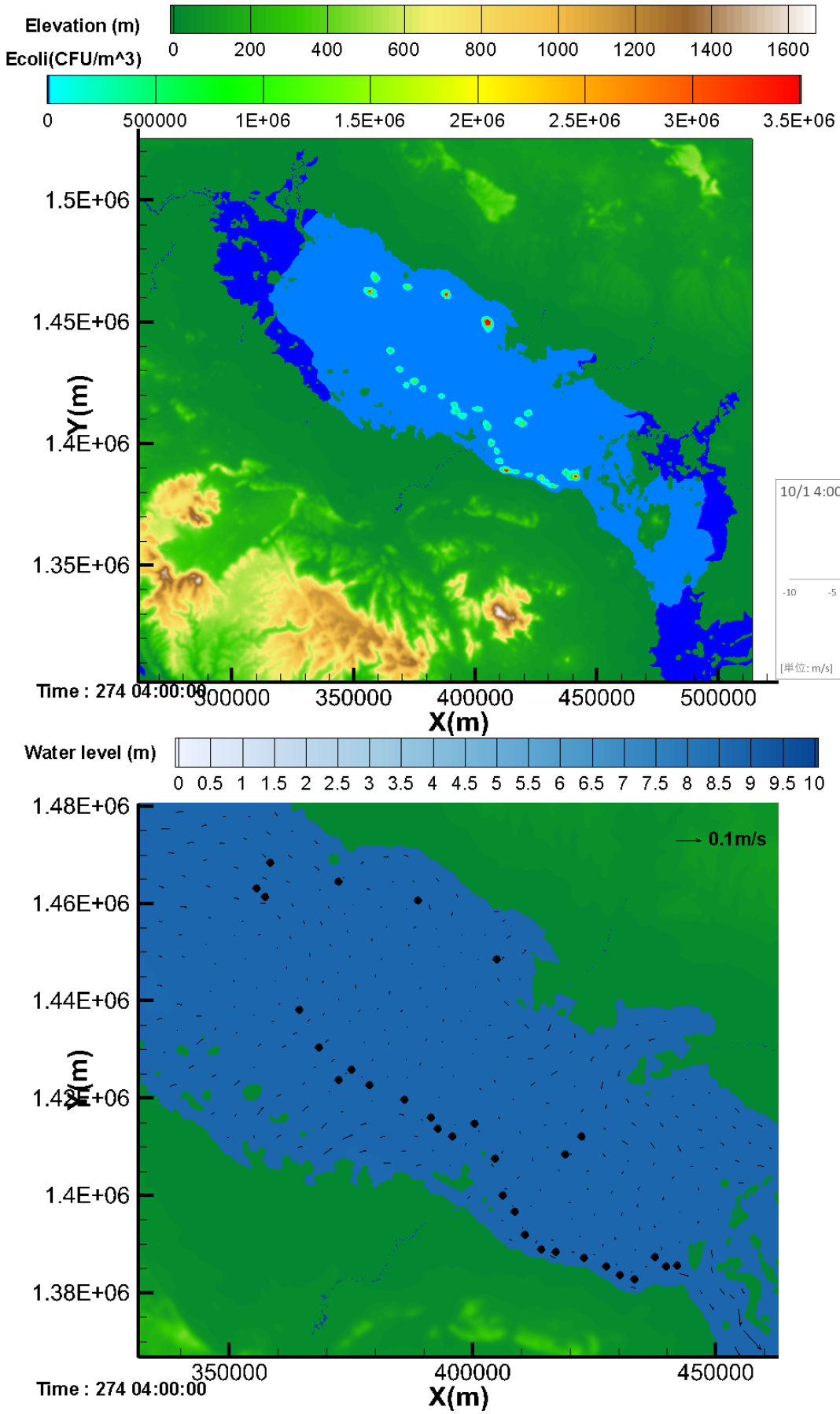
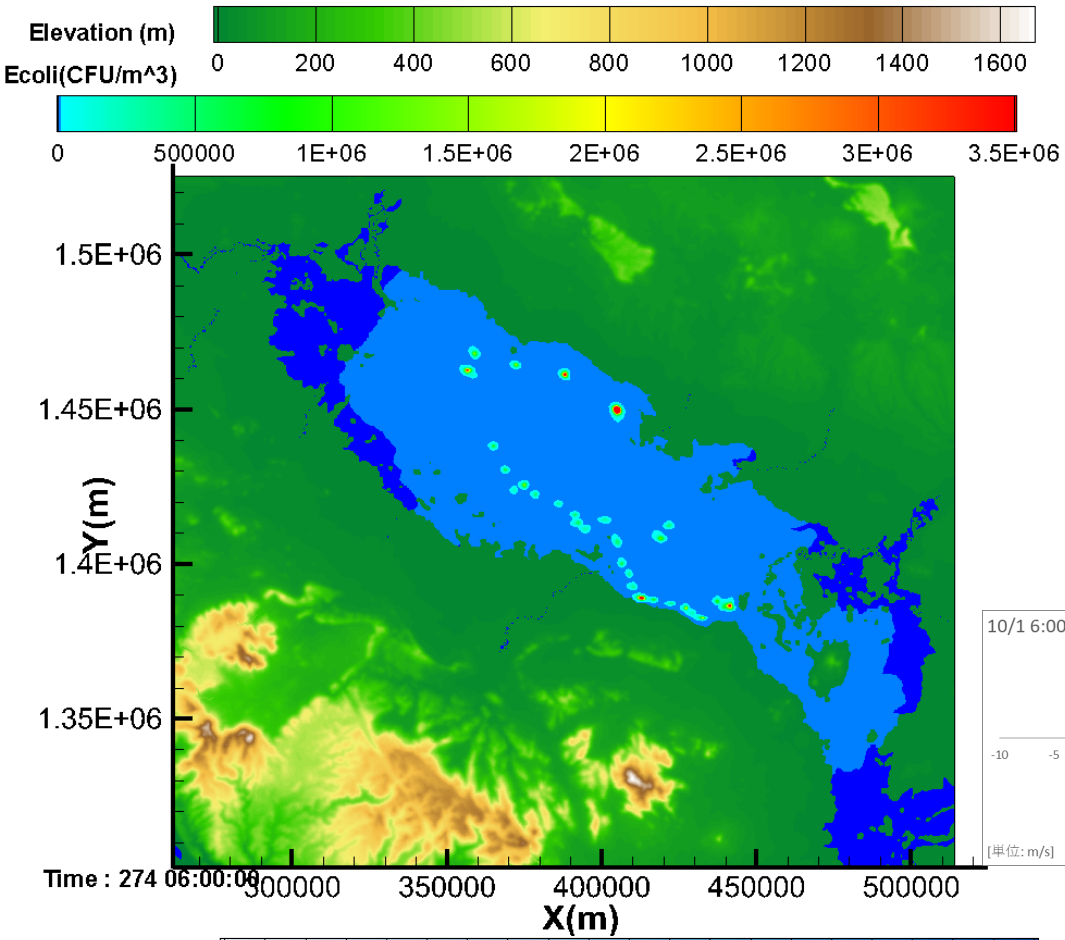


図4-111 10月1日4:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



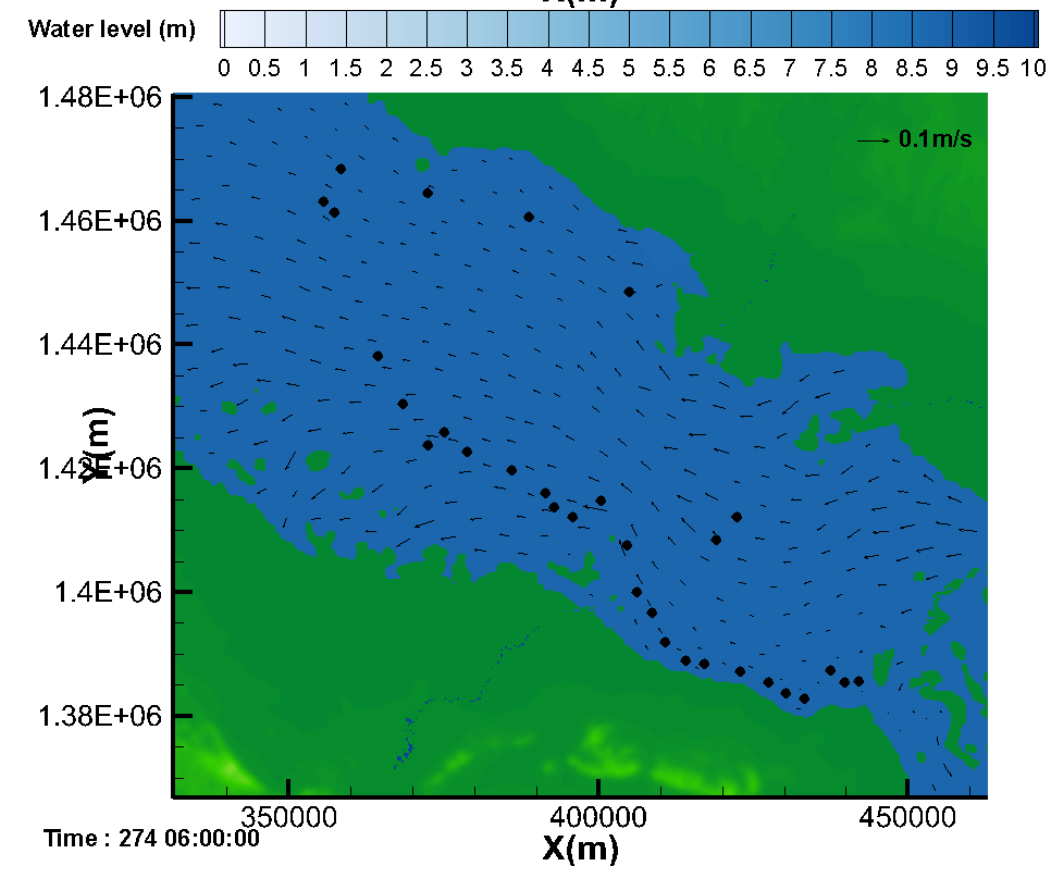
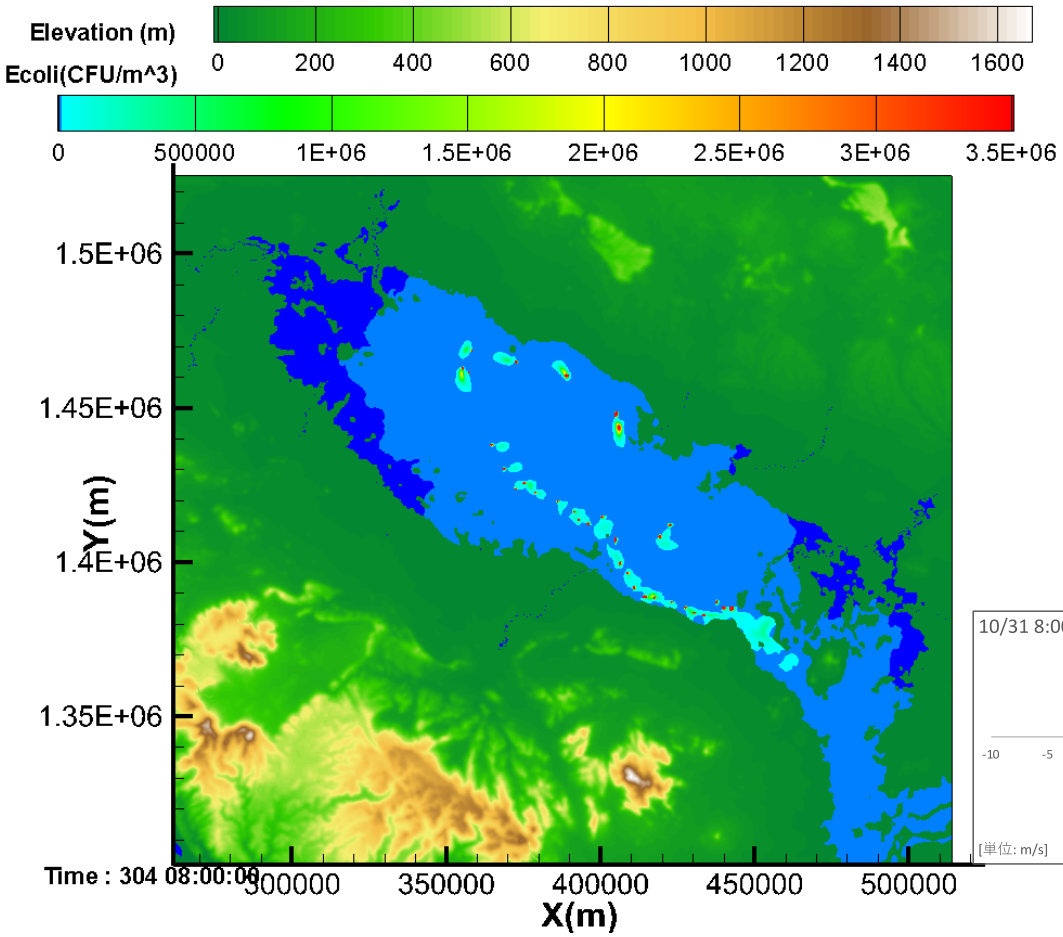


図4-112 10月1日6:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



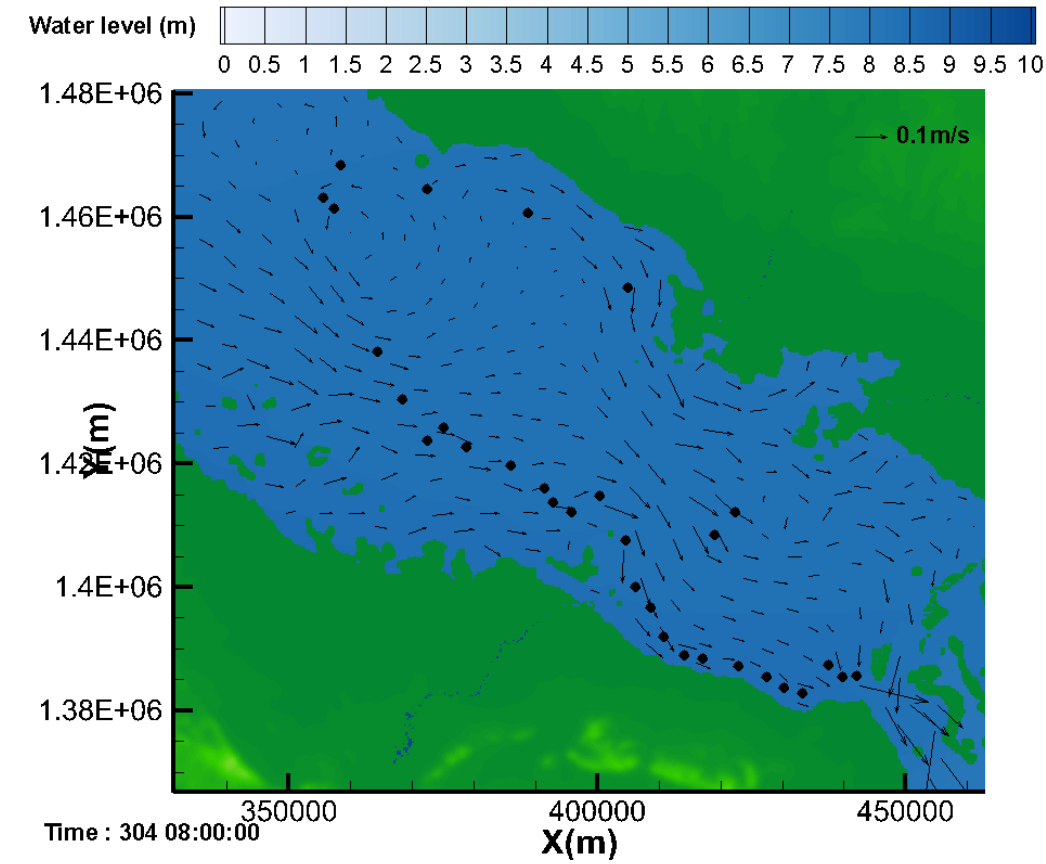
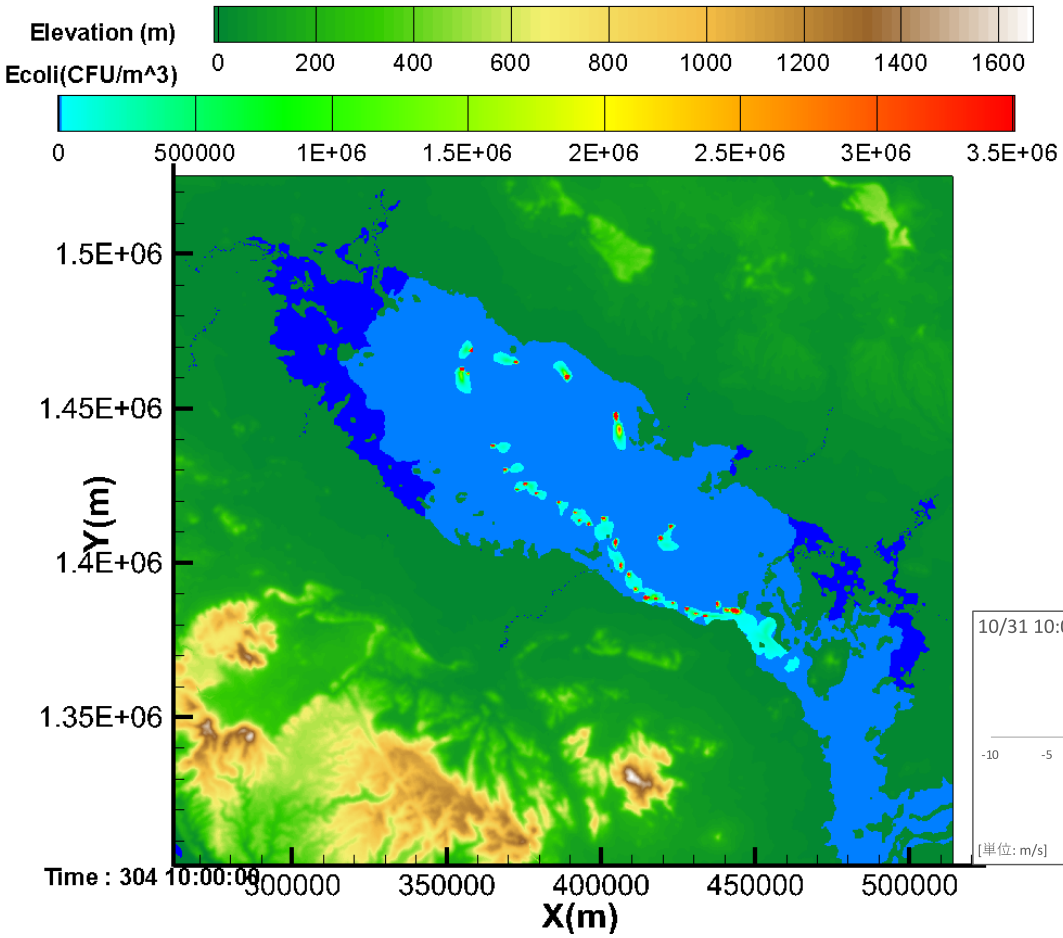


図4-113 10月31日8:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



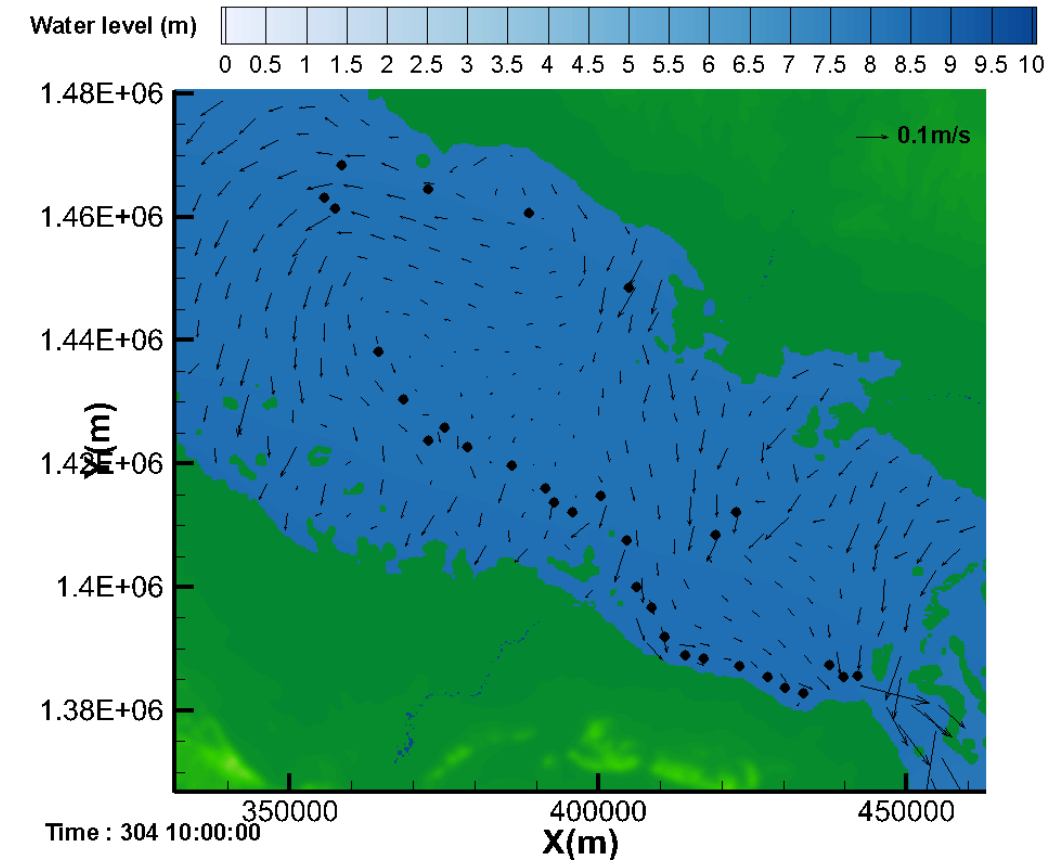
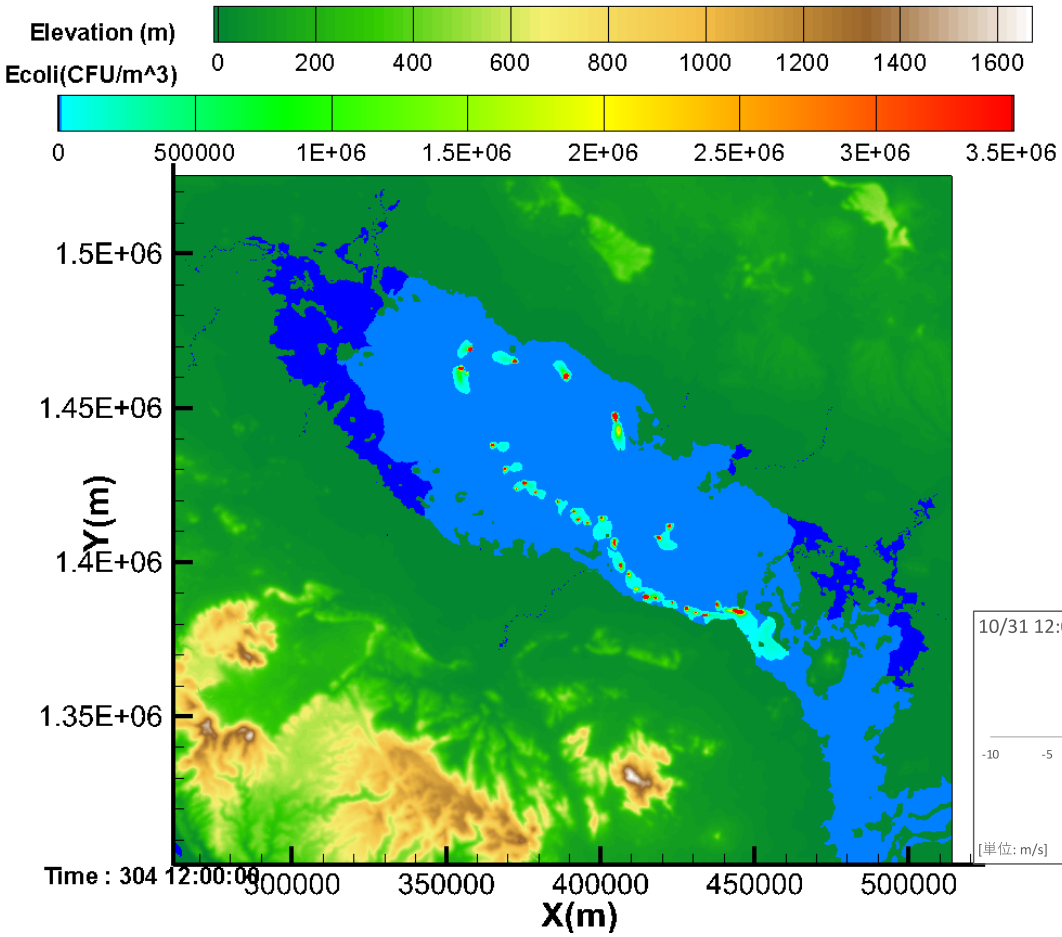


図4-114 10月31日10:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



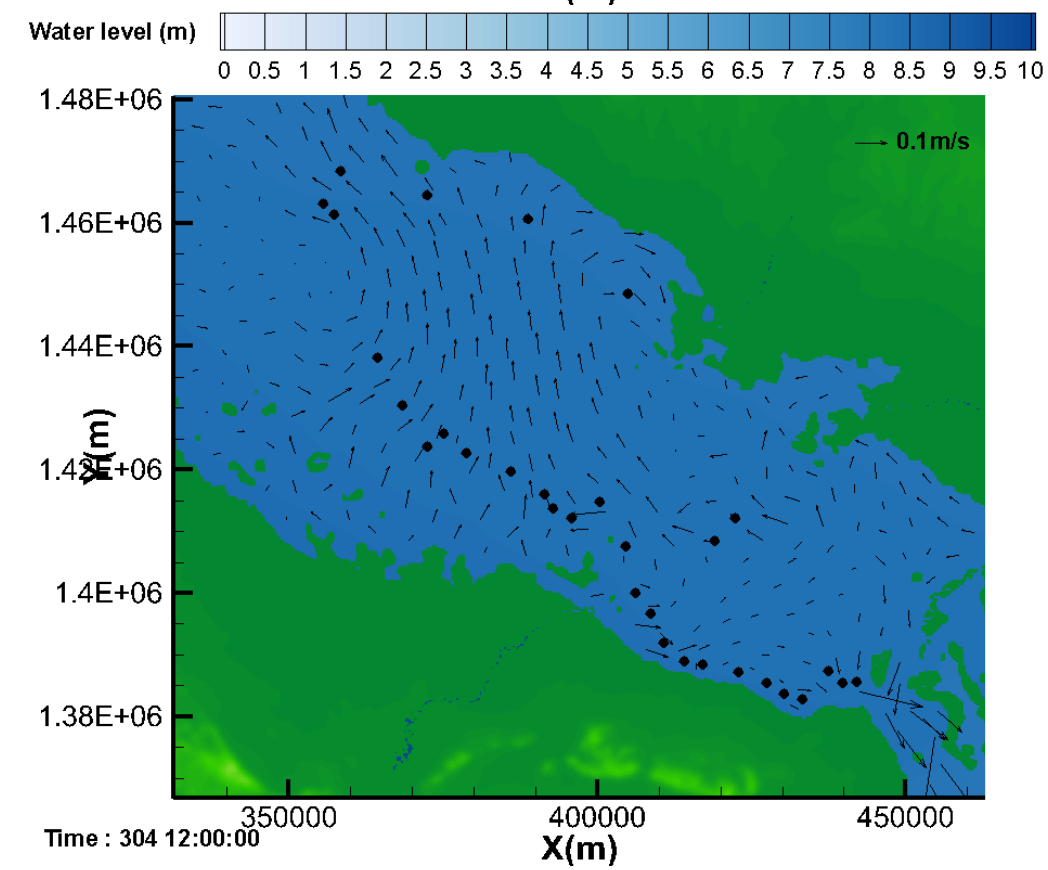
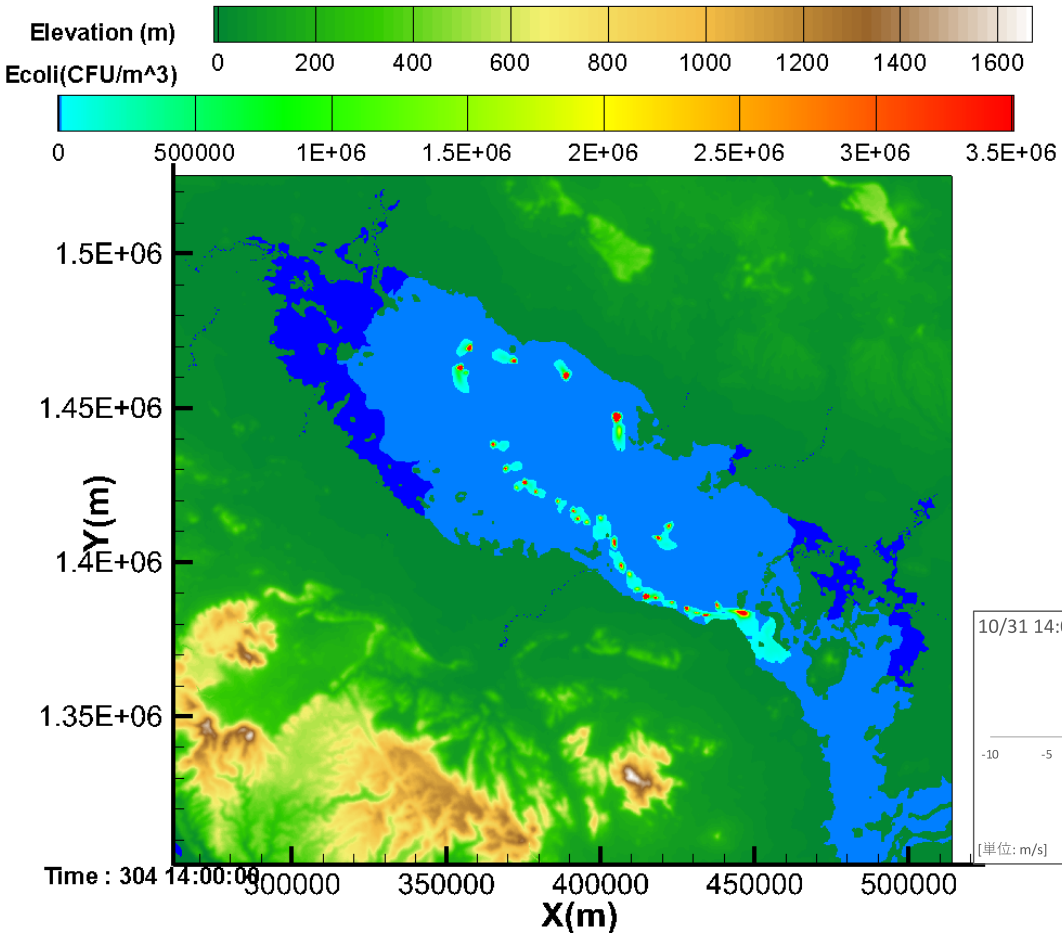


図4-115 10月31日12:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



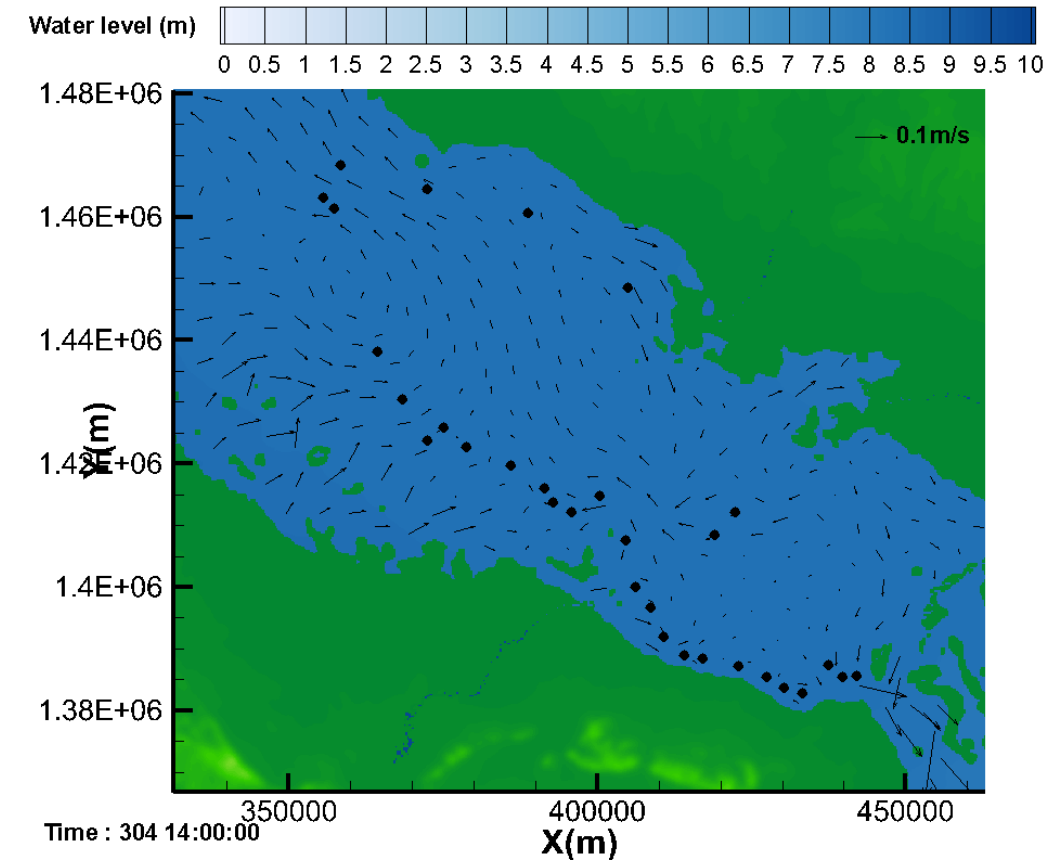
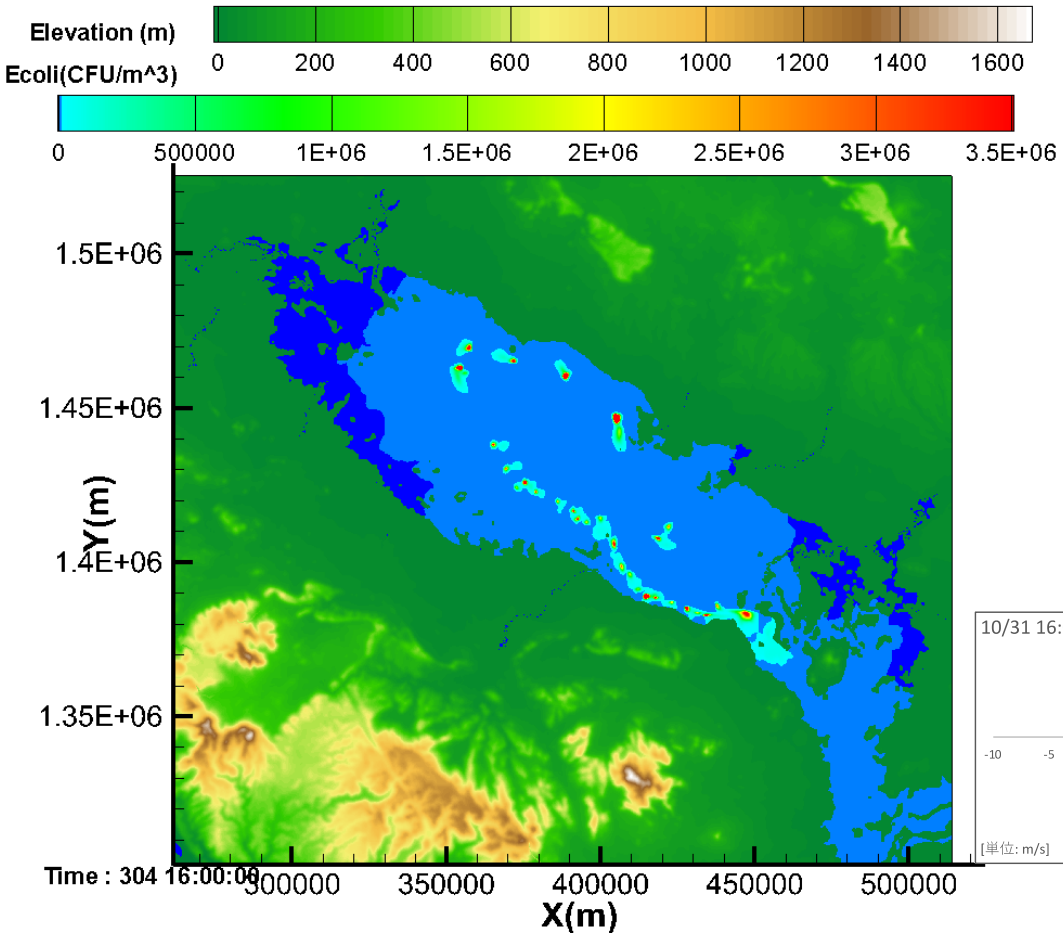


図4-116 10月31日14:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



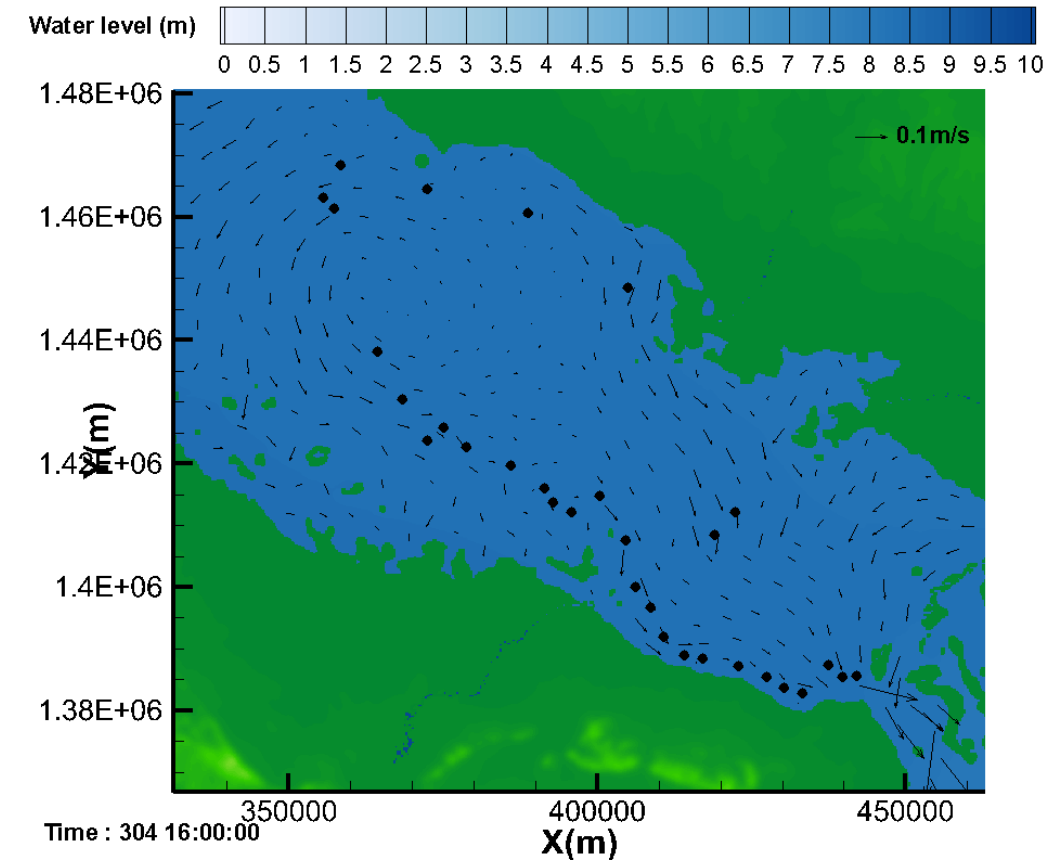
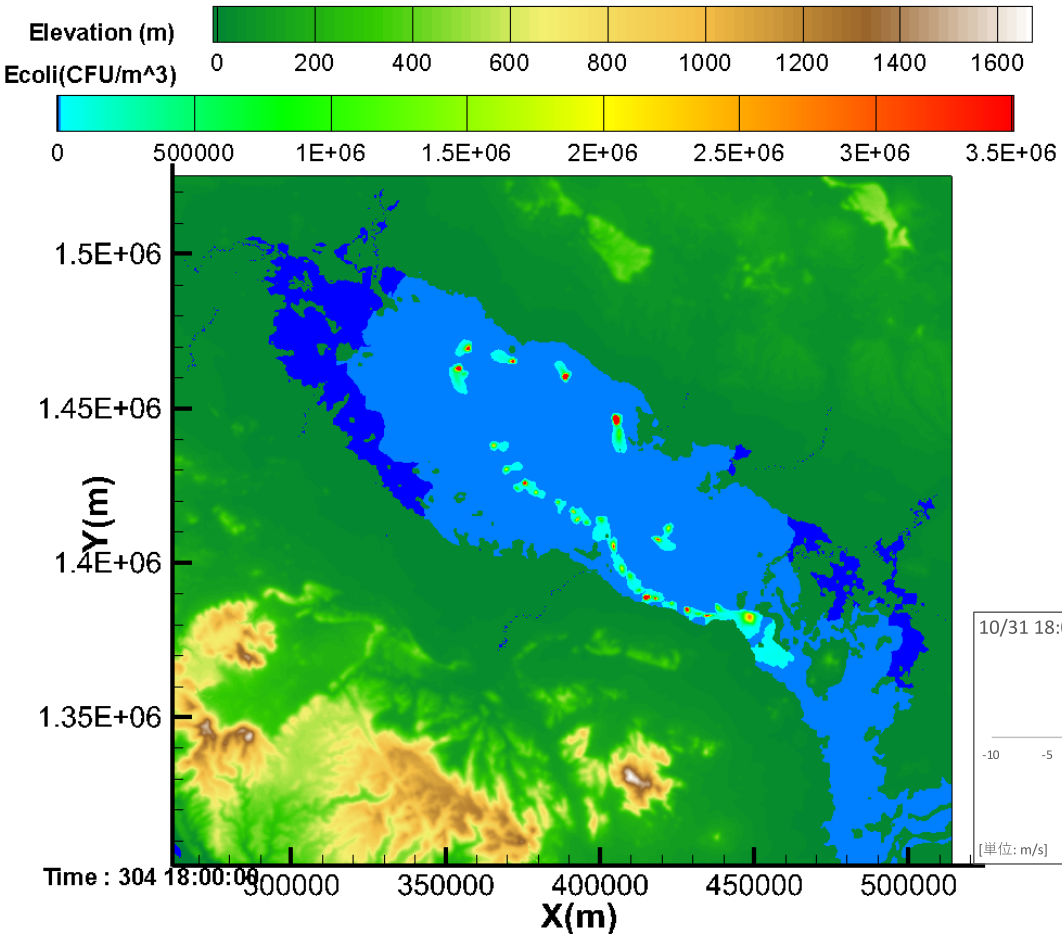


図4-117 10月31日16:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



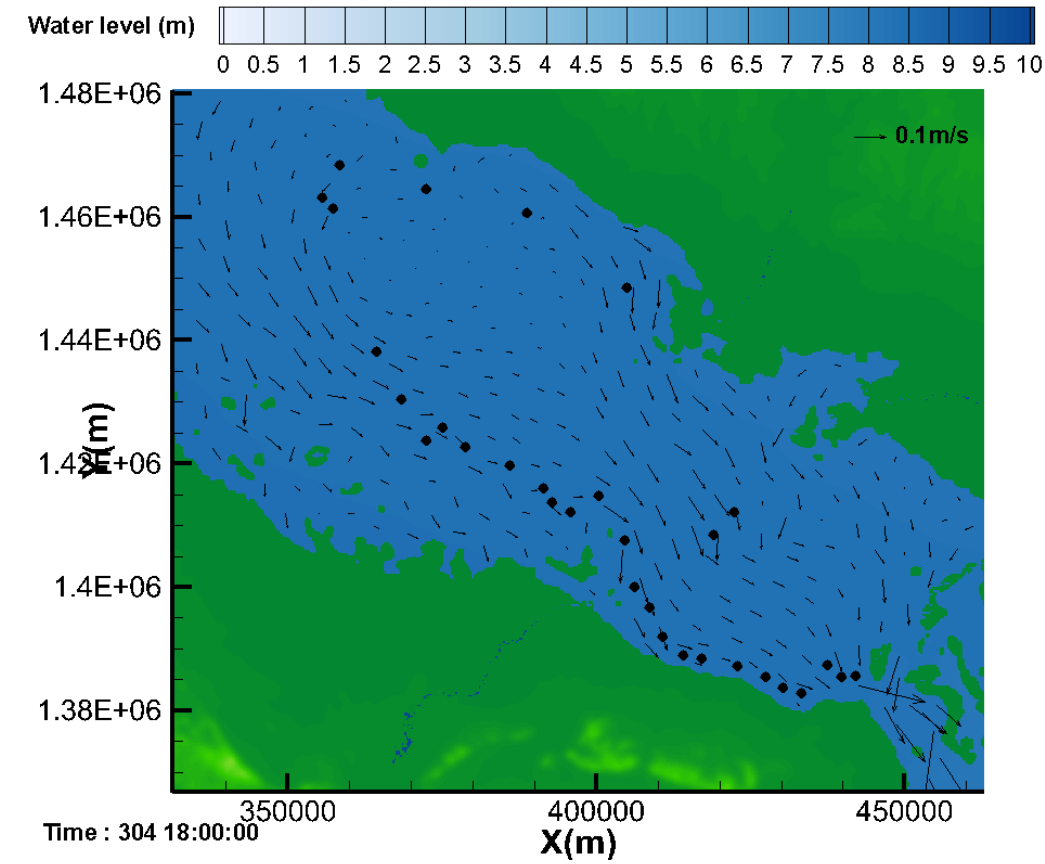
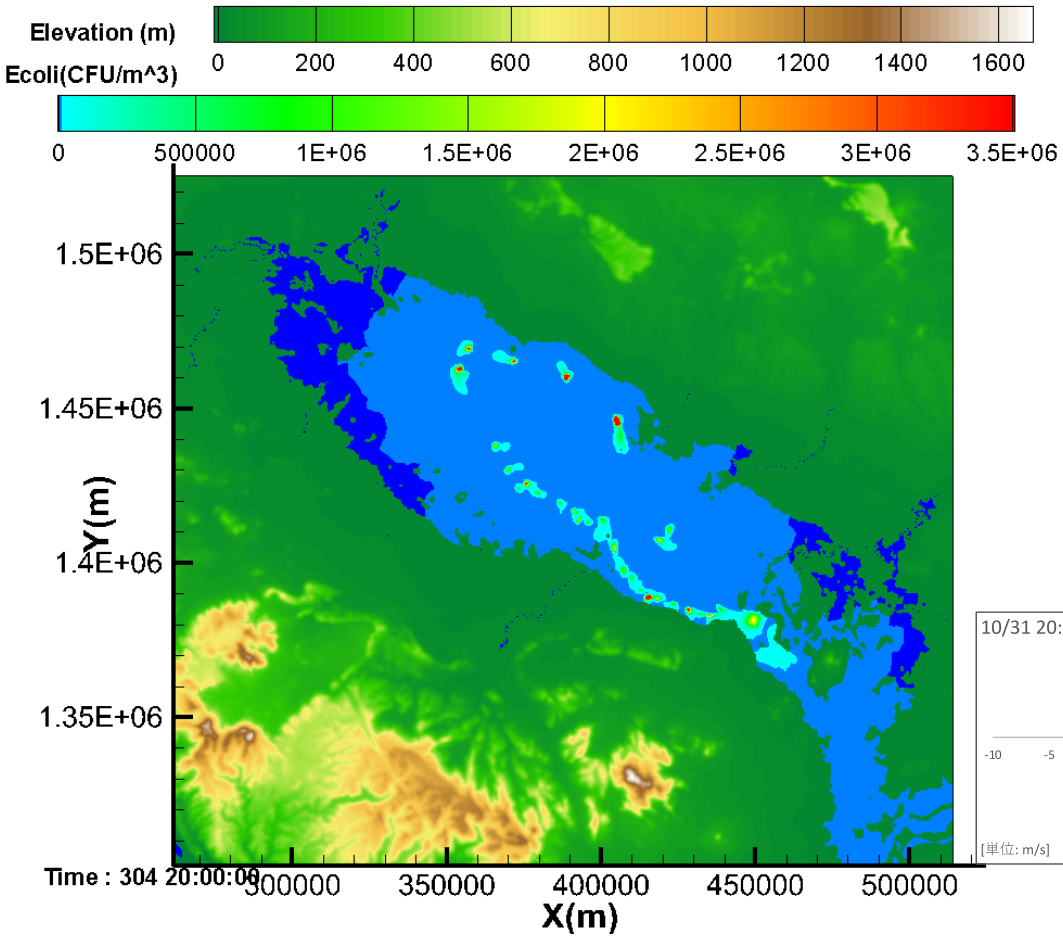


図4-118 10月31日18:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



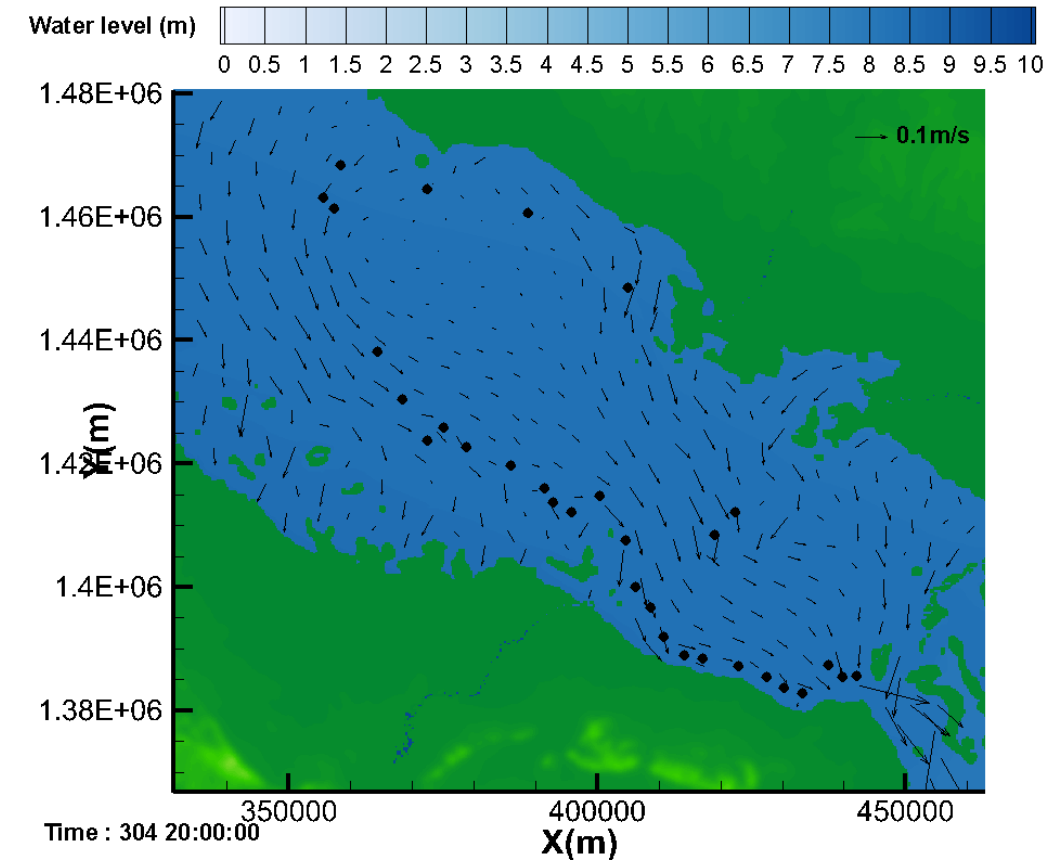
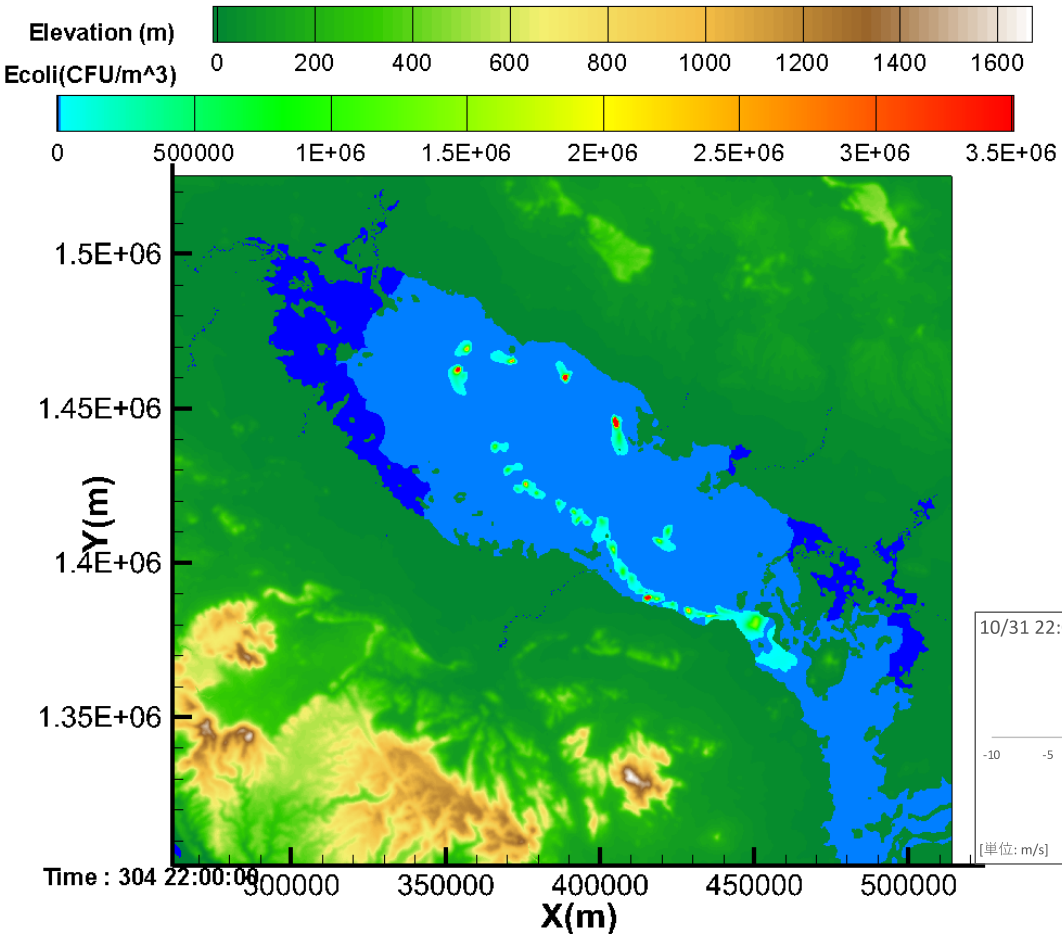


図4-119 10月31日20:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



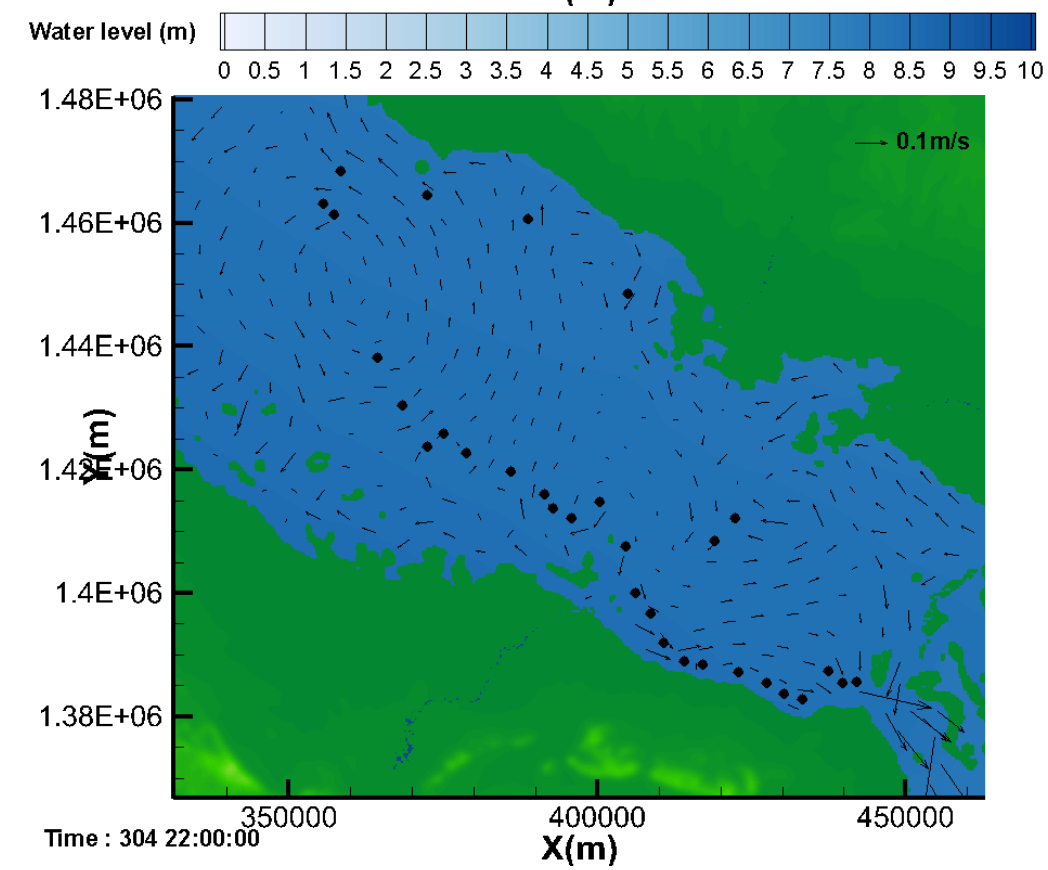
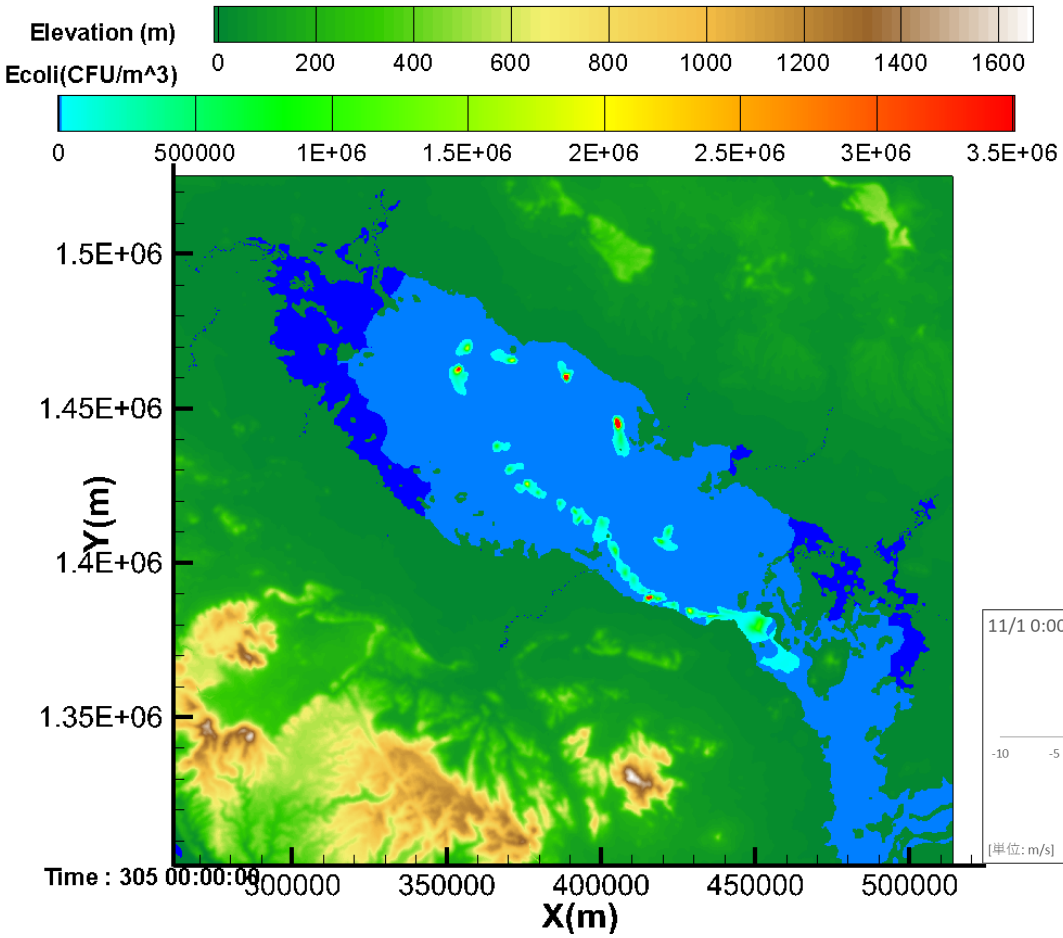


図4-120 10月31日22:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



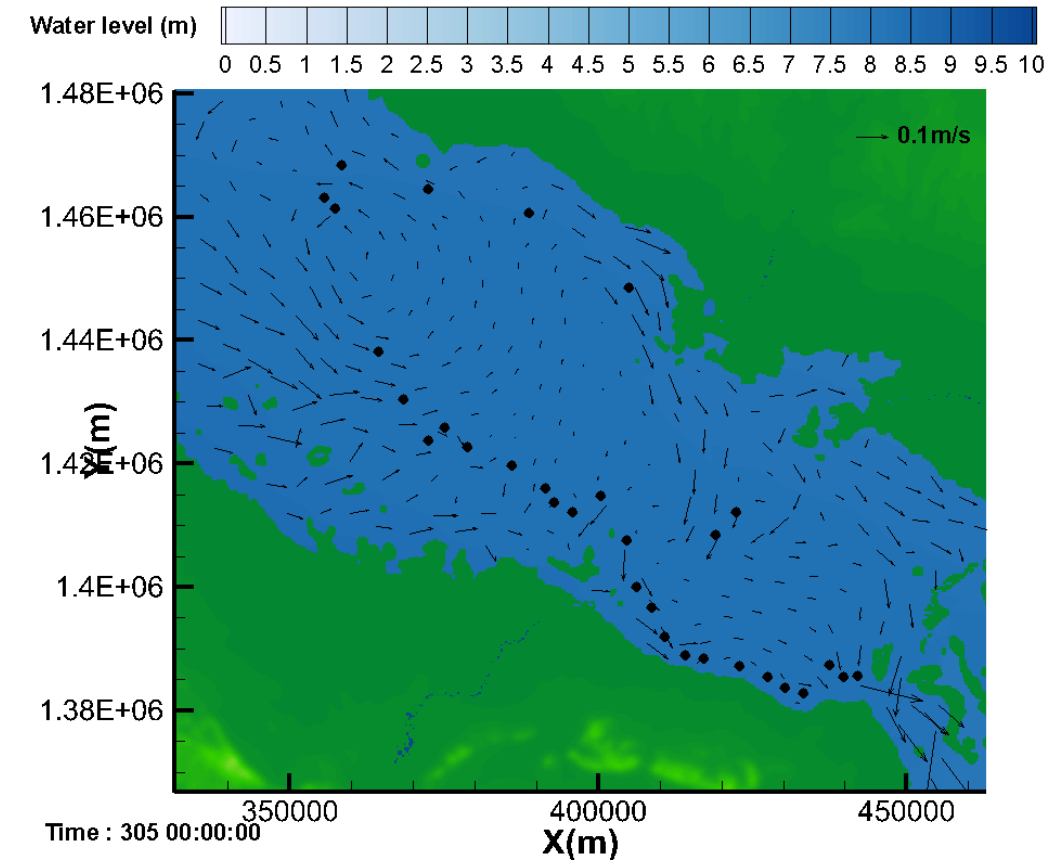
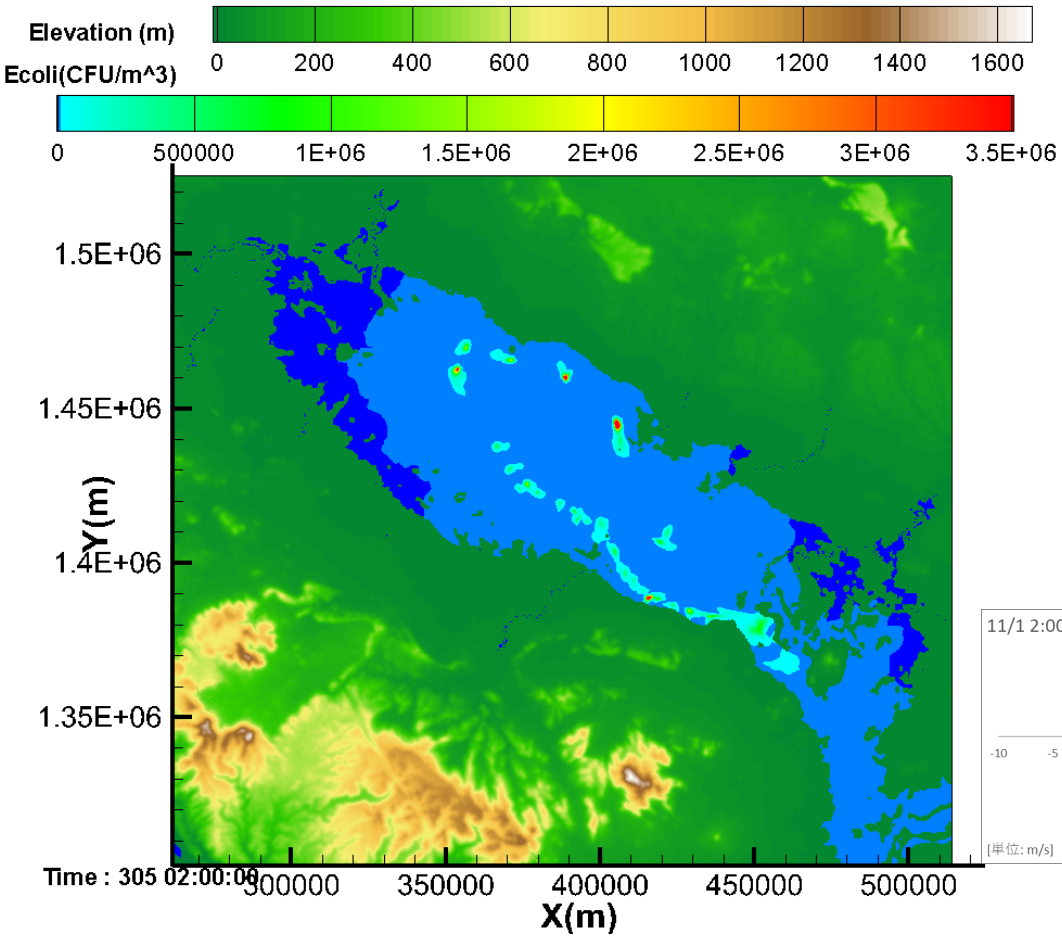


図4-121 11月1日0:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



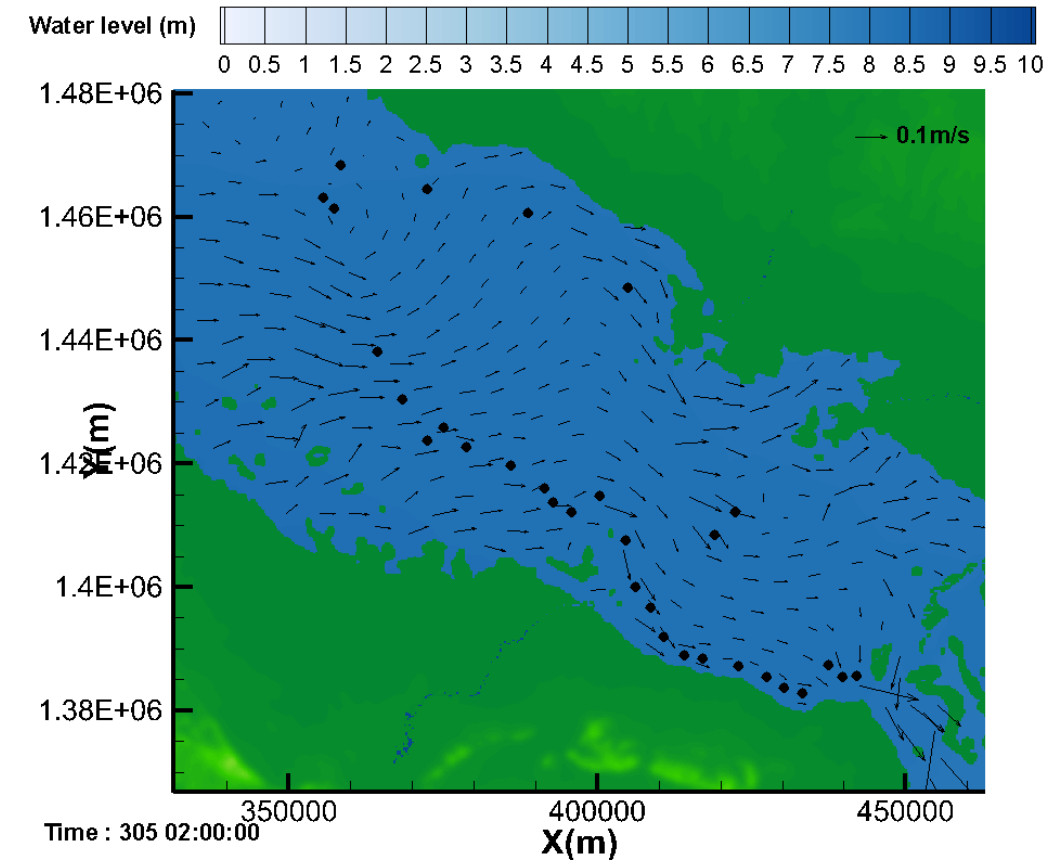


図4-122 11月1日2:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

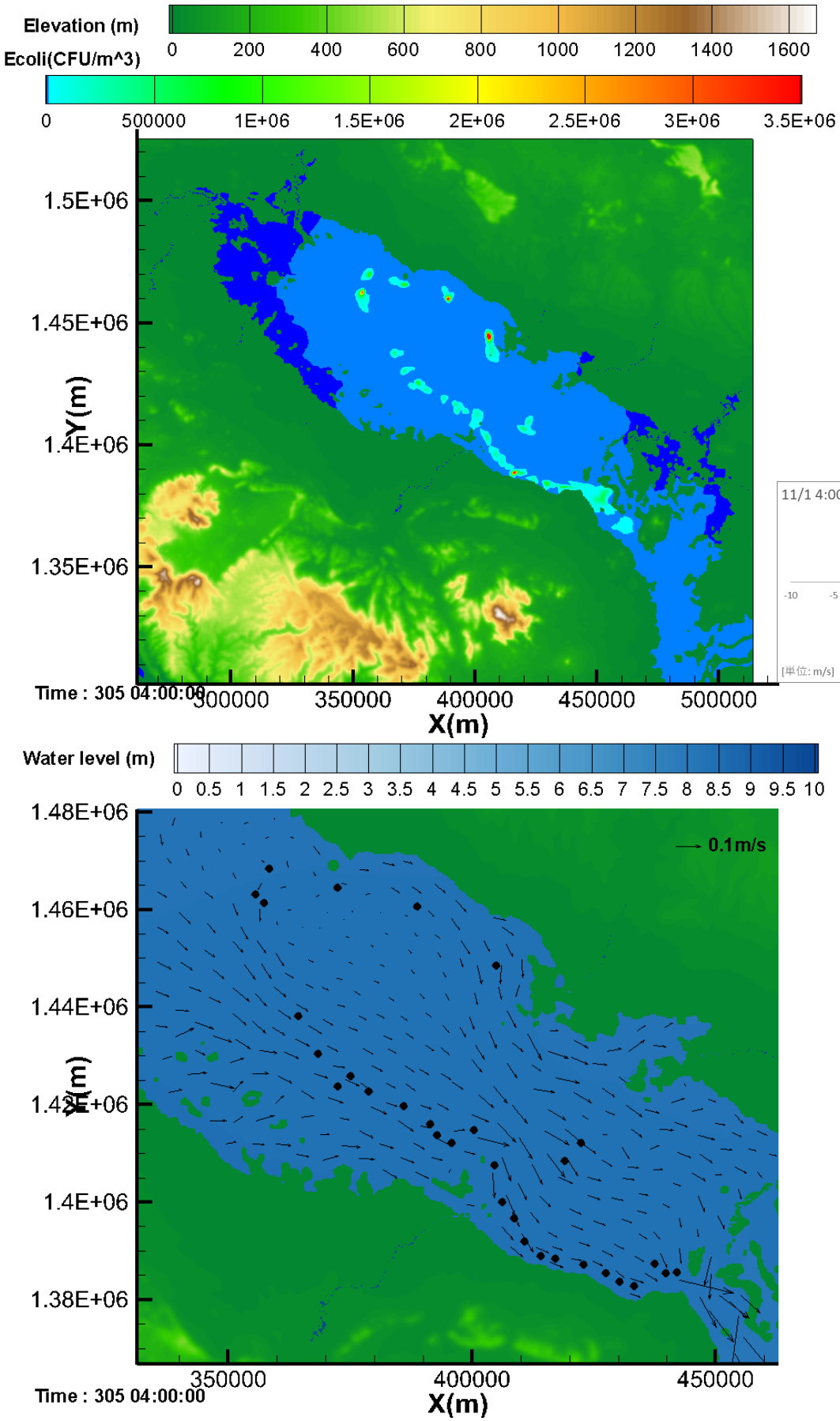
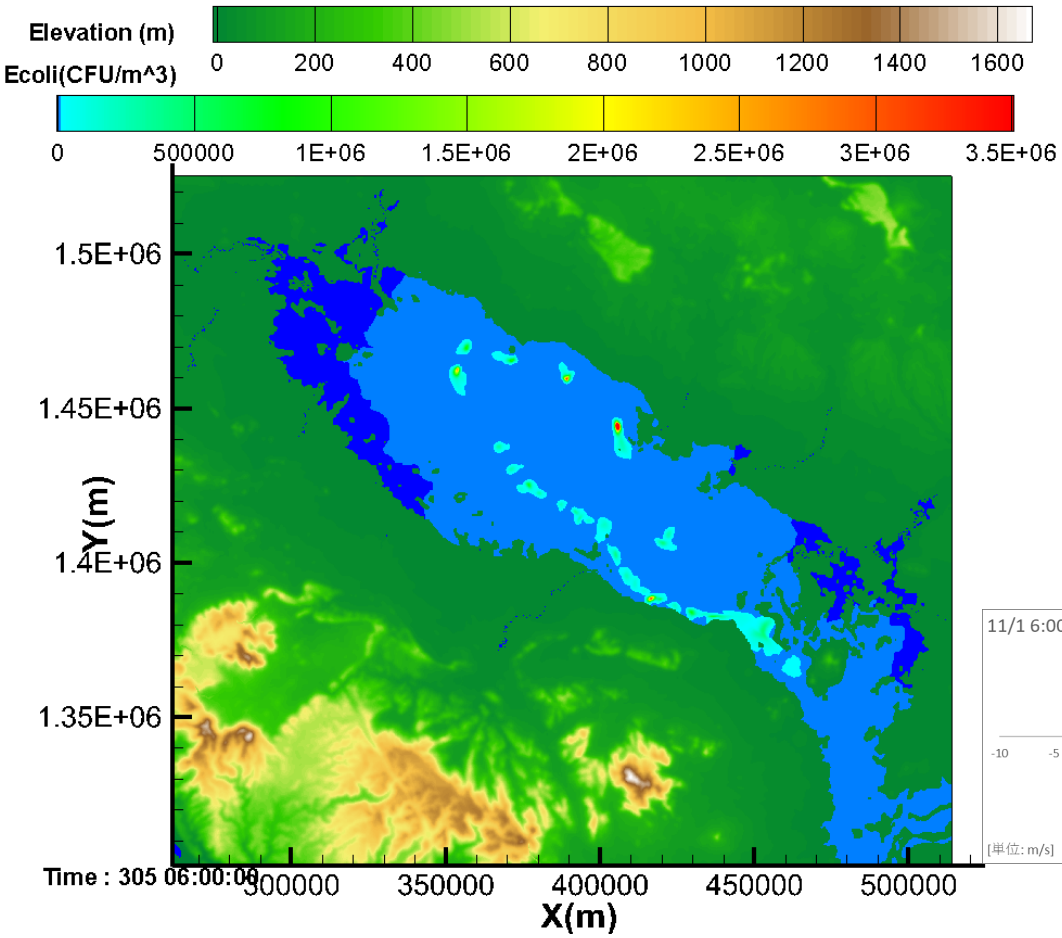


図4-123 11月1日4:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



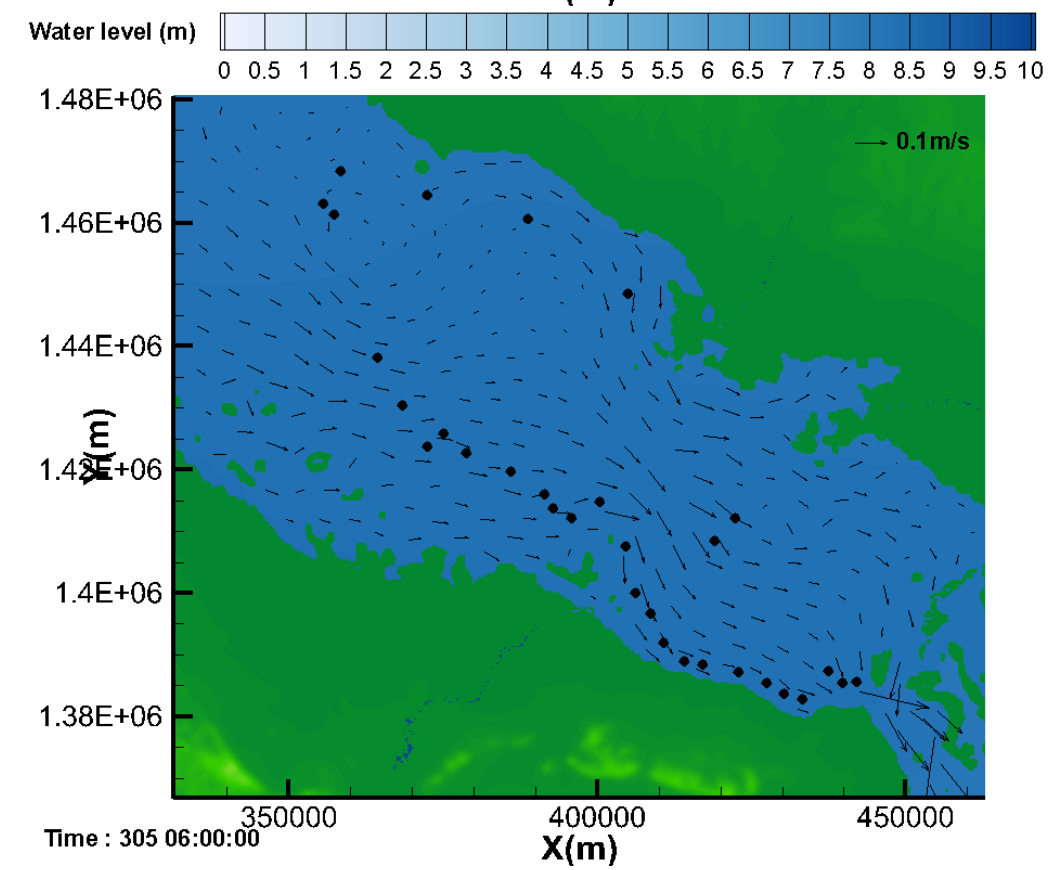
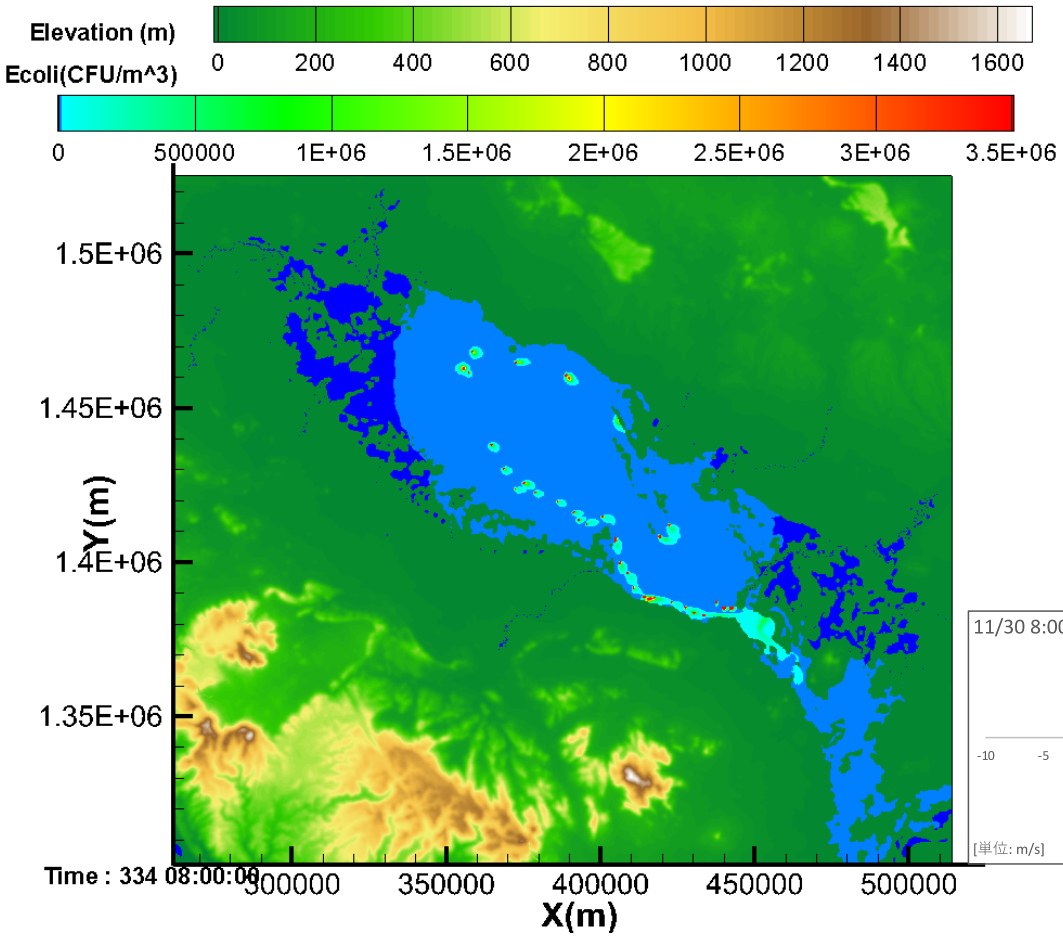


図4-124 11月1日6:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



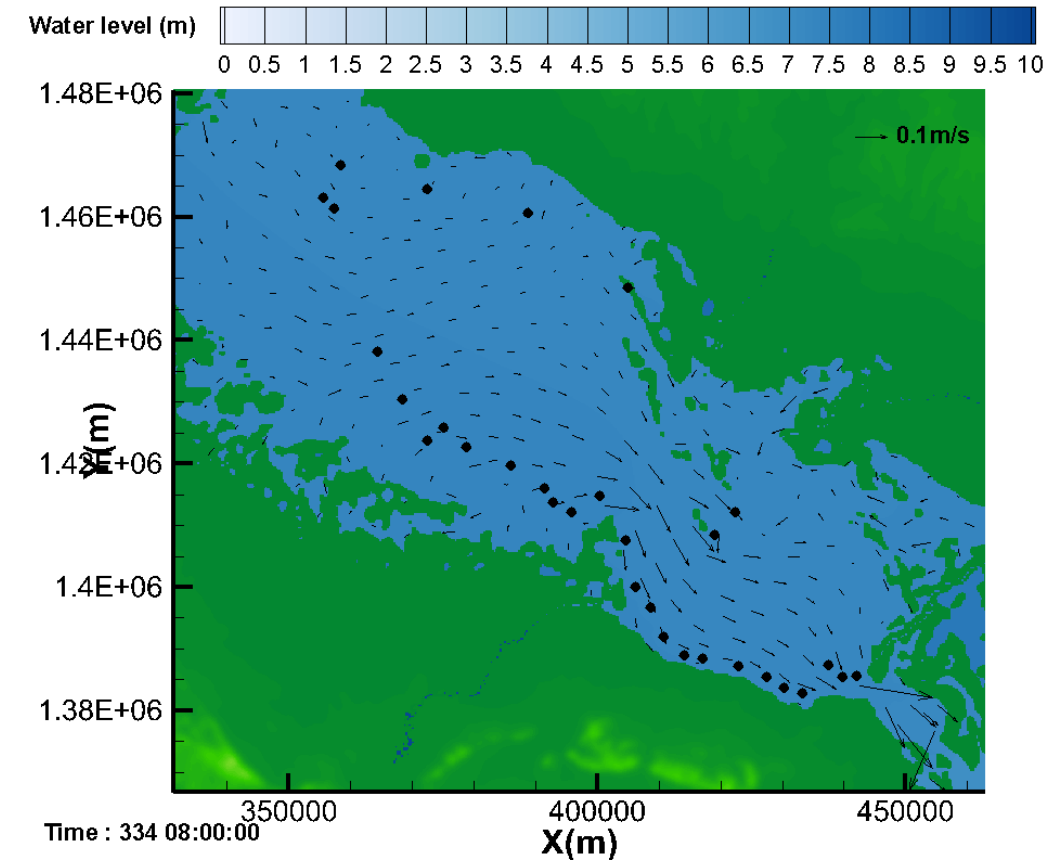
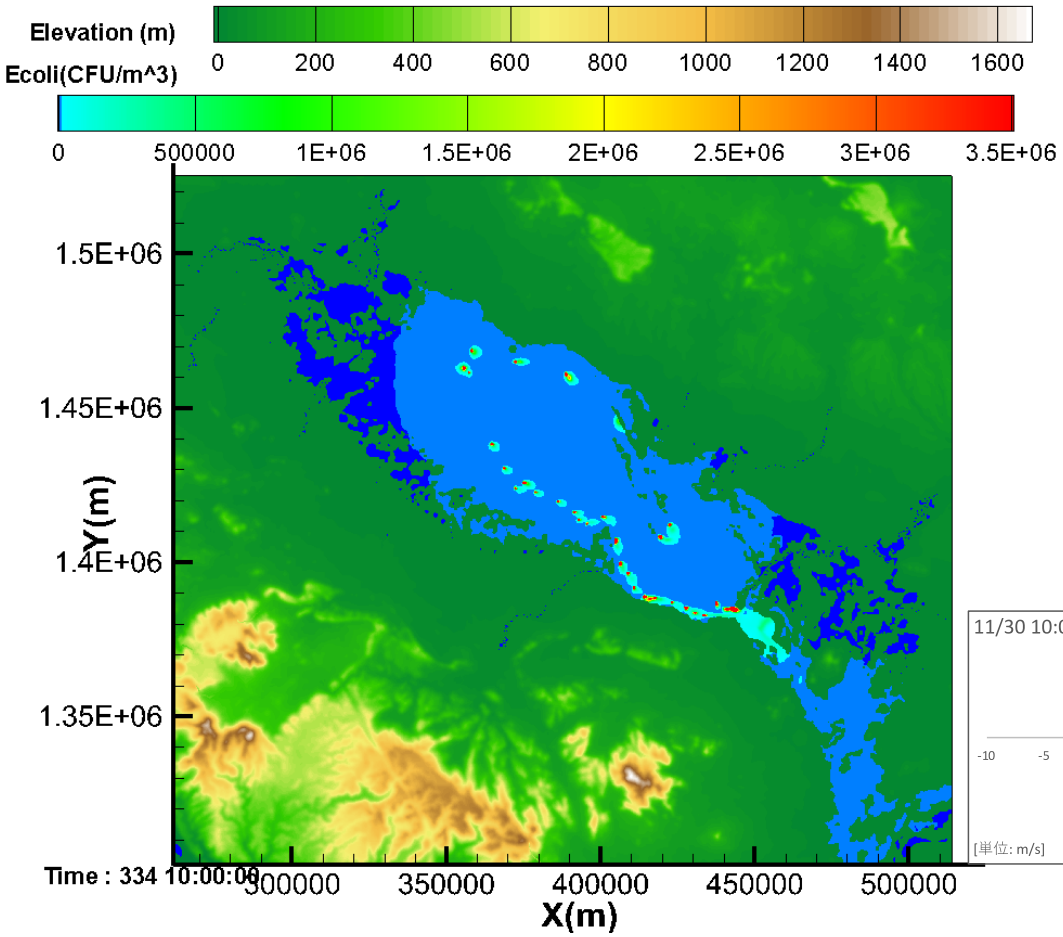


図4-125 11月30日8:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



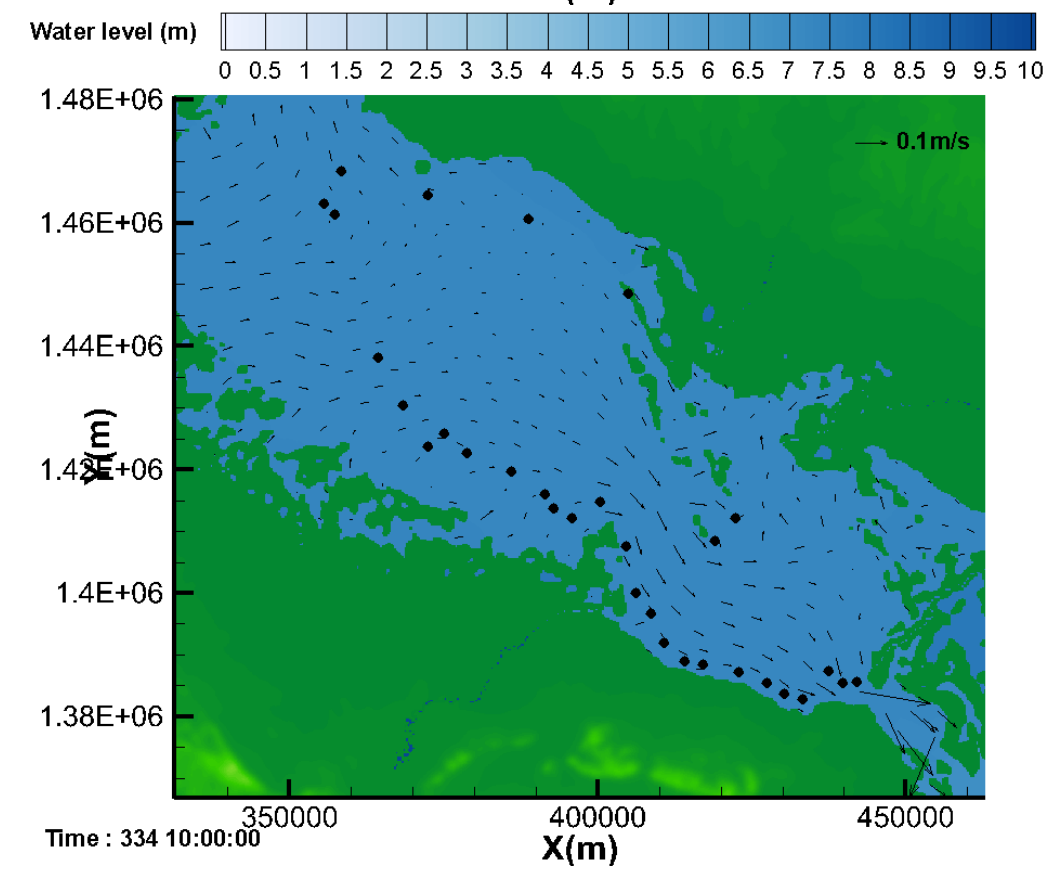


図4-126 11月30日10:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

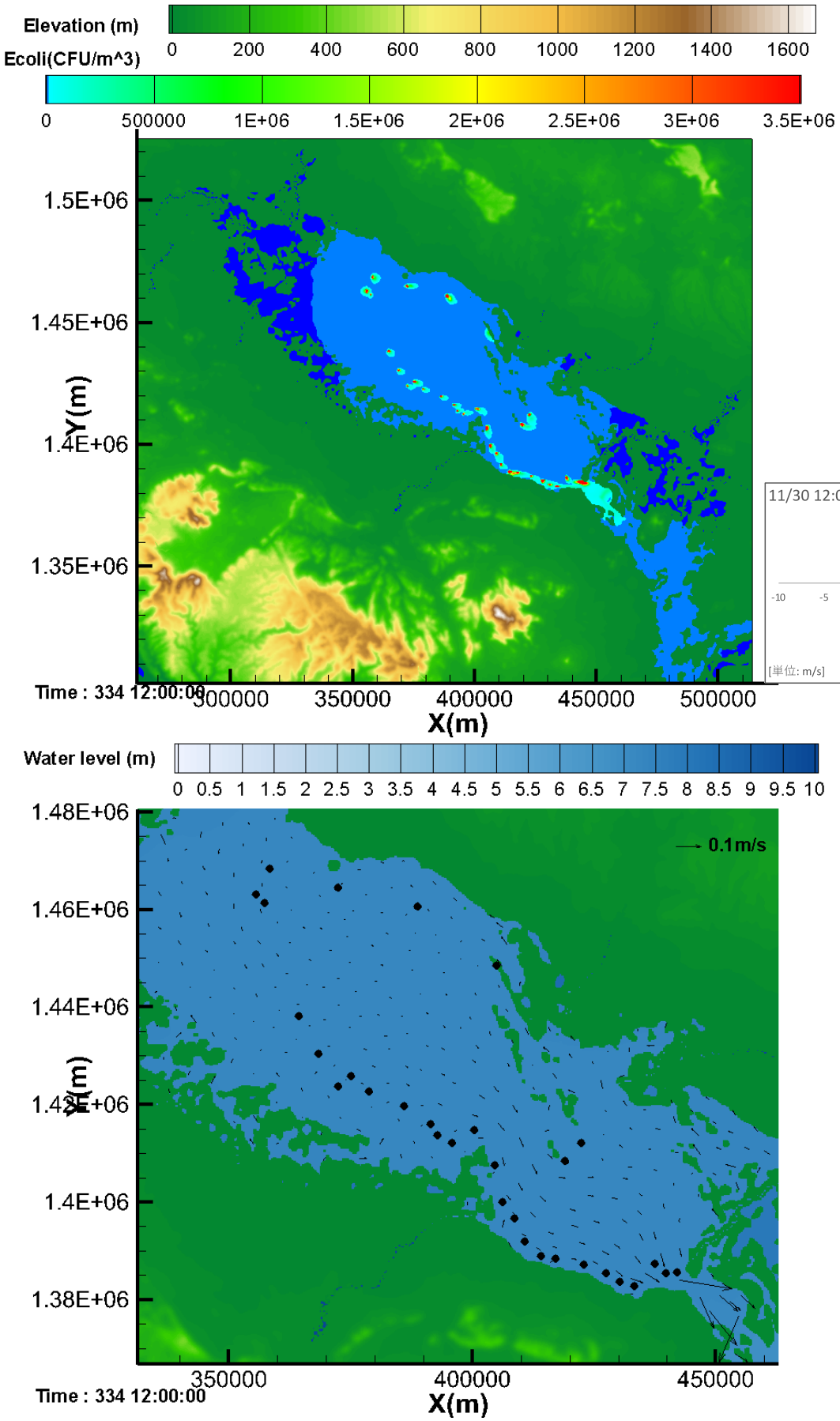
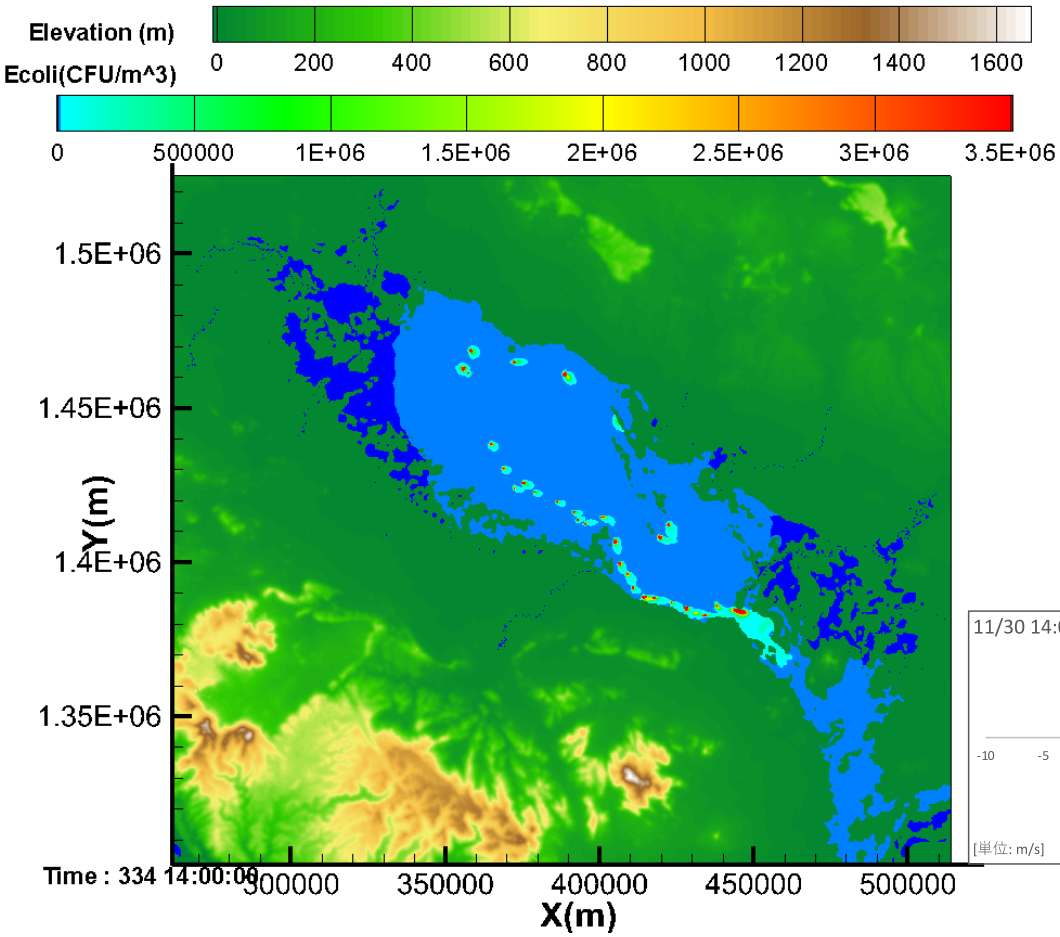


図4-127 11月30日12:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



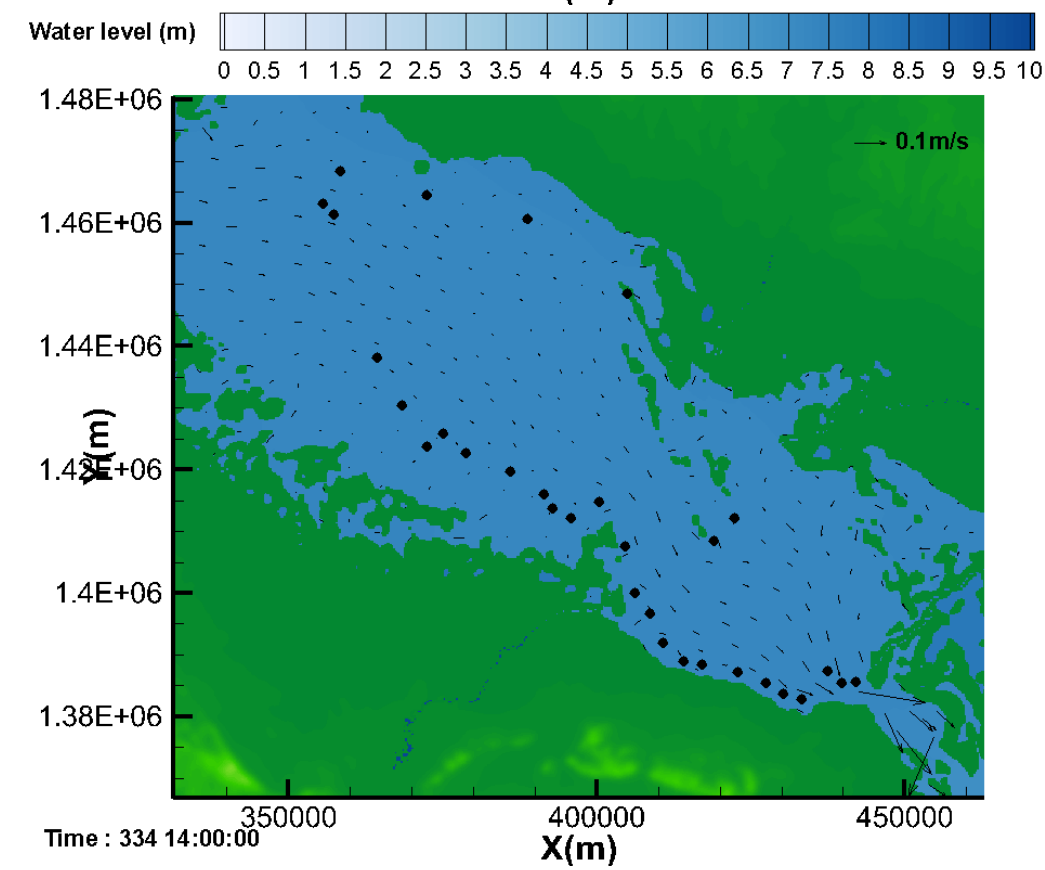
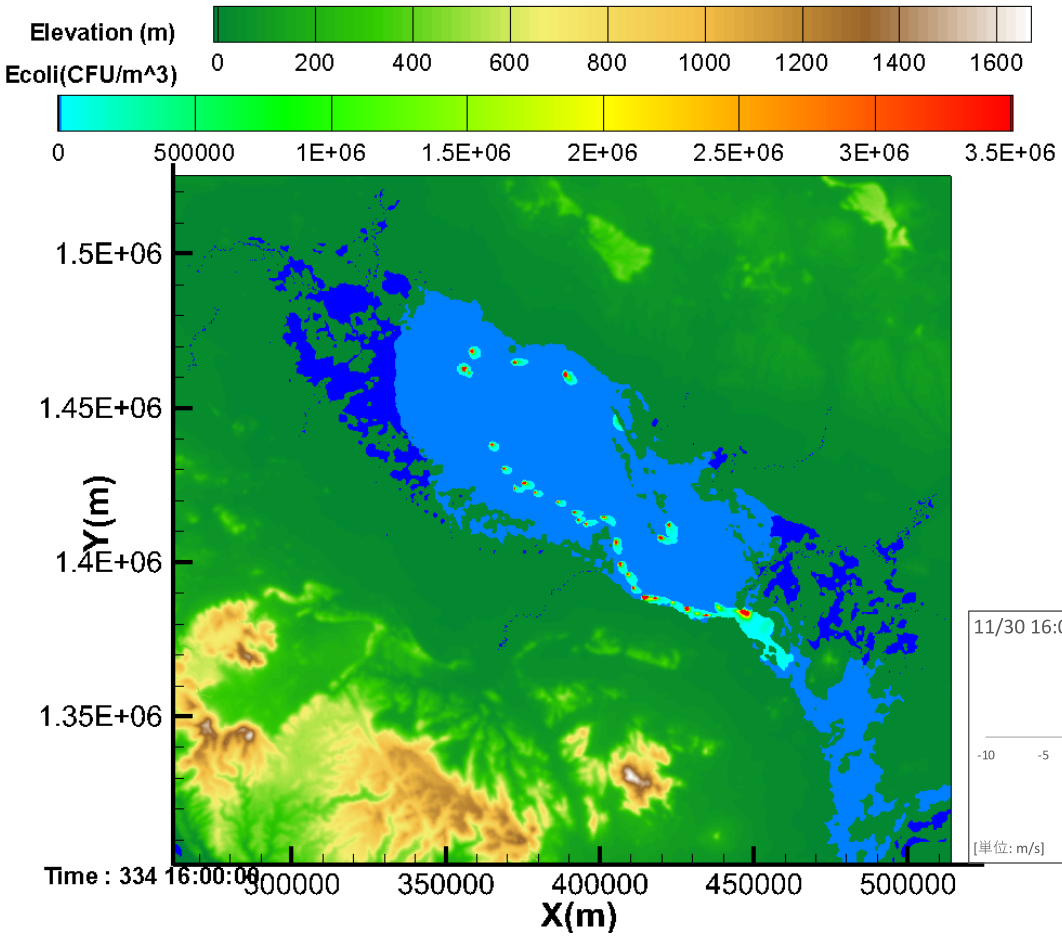


図4-128 11月30日14:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



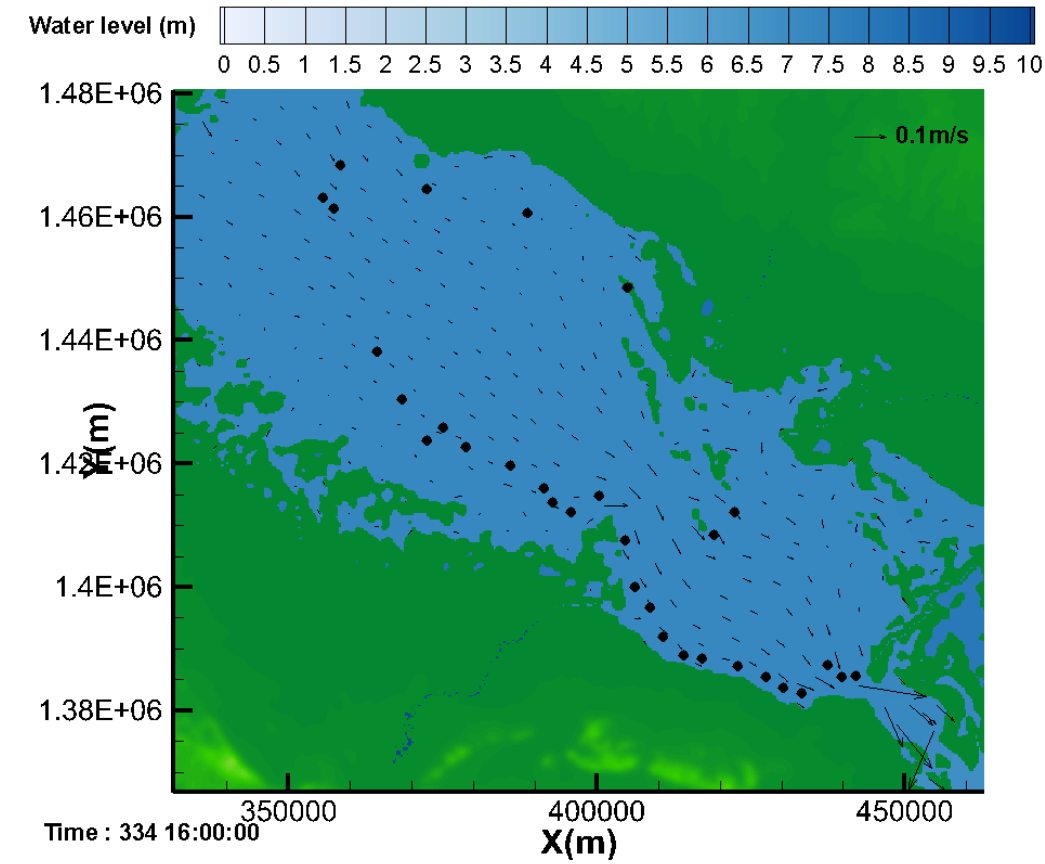
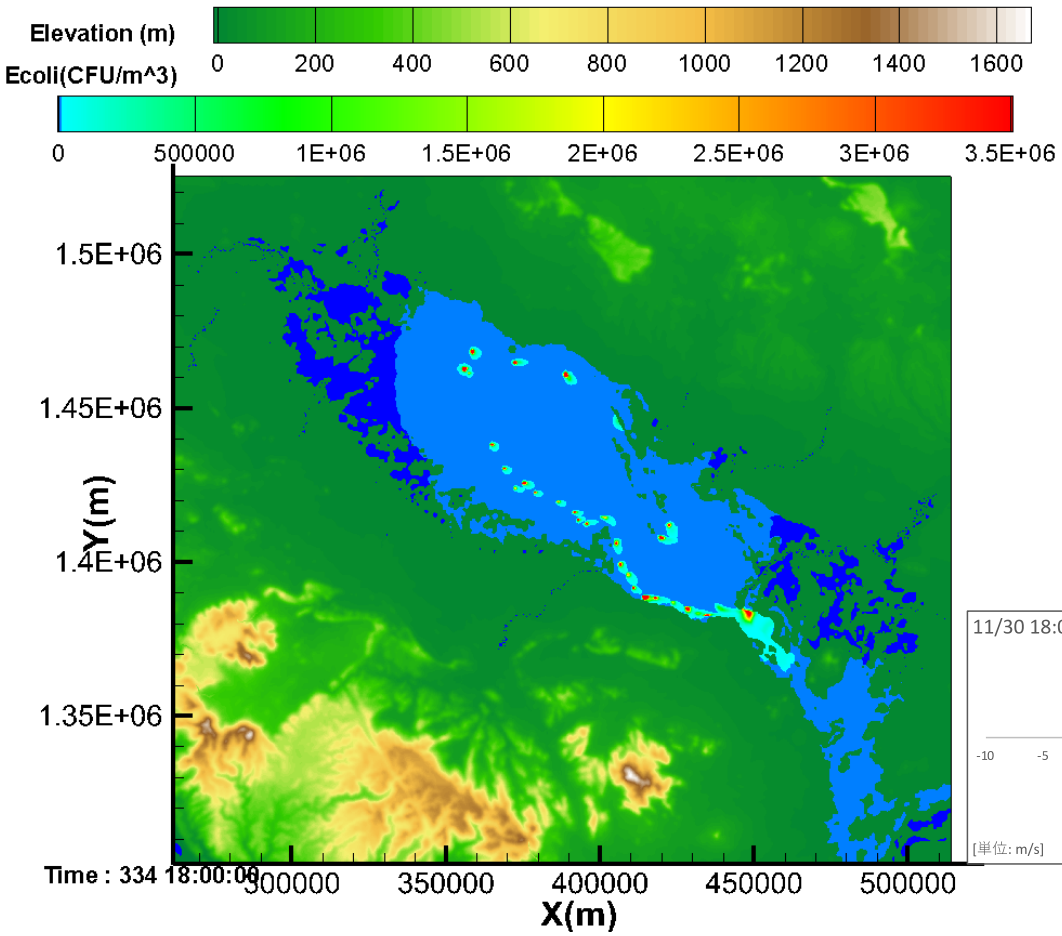


図4-129 11月30日16:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



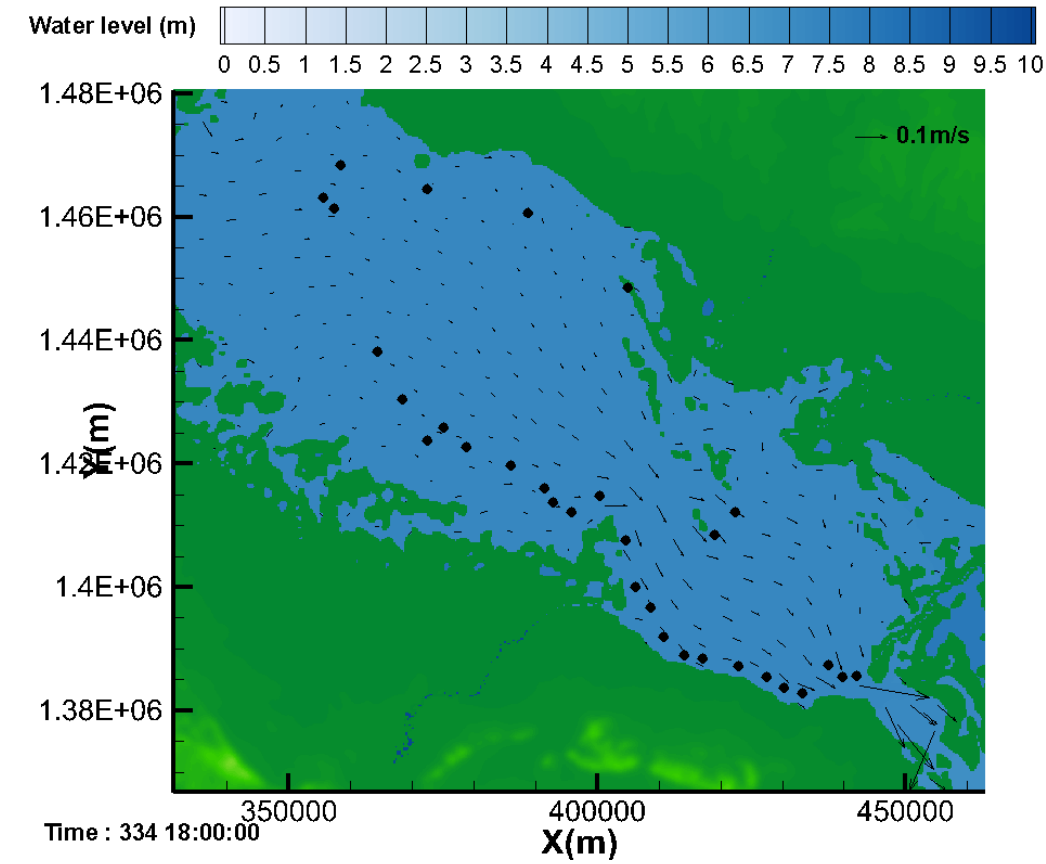
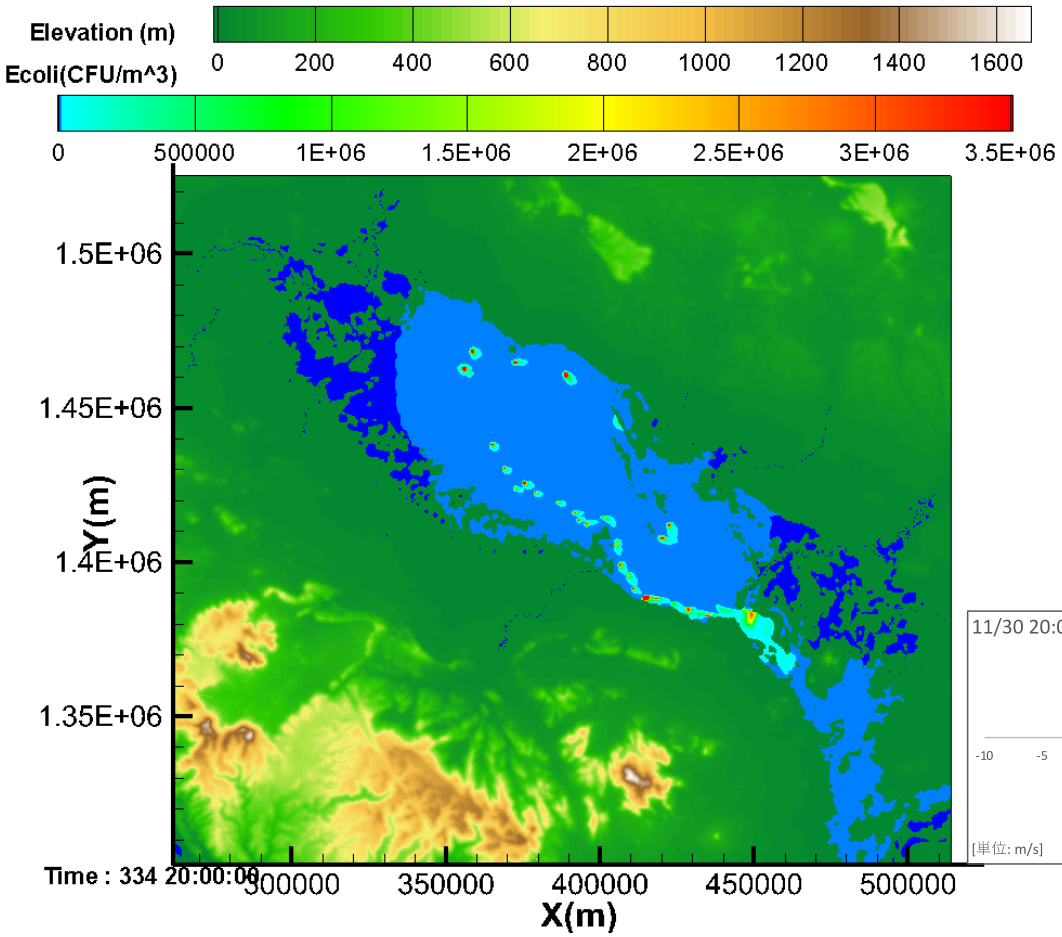


図4-130 11月30日18:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



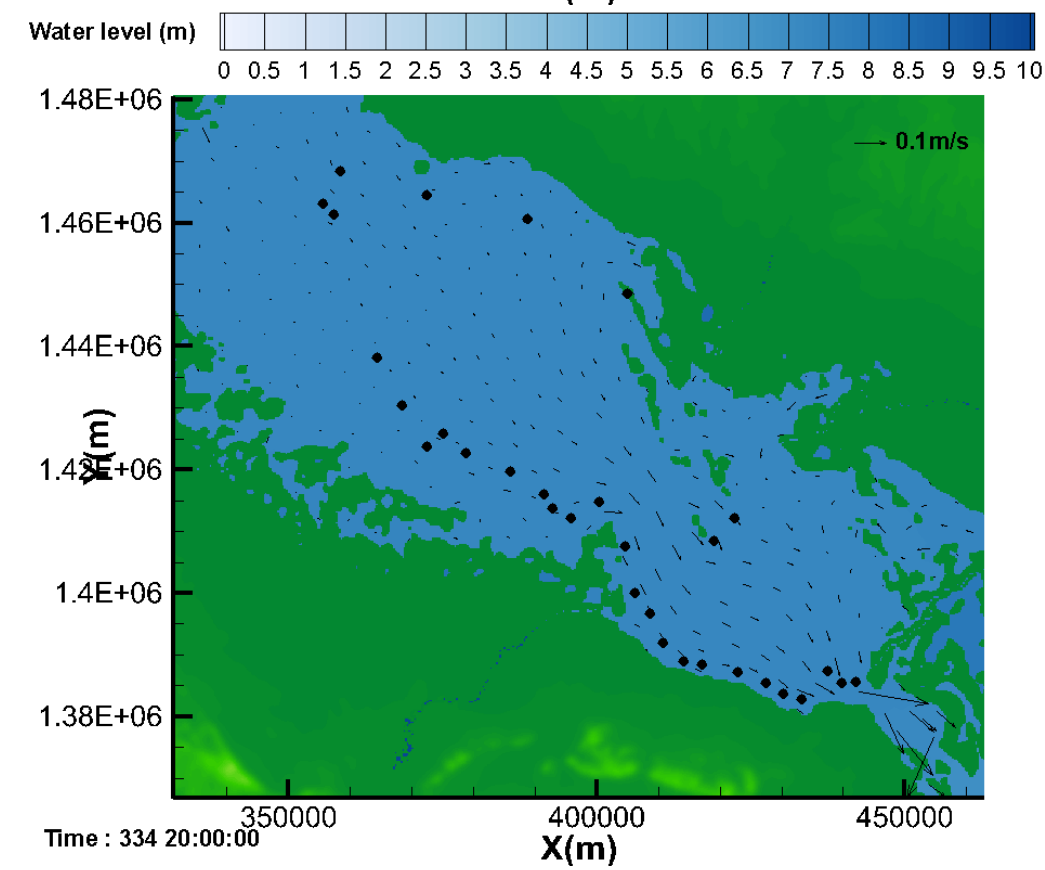
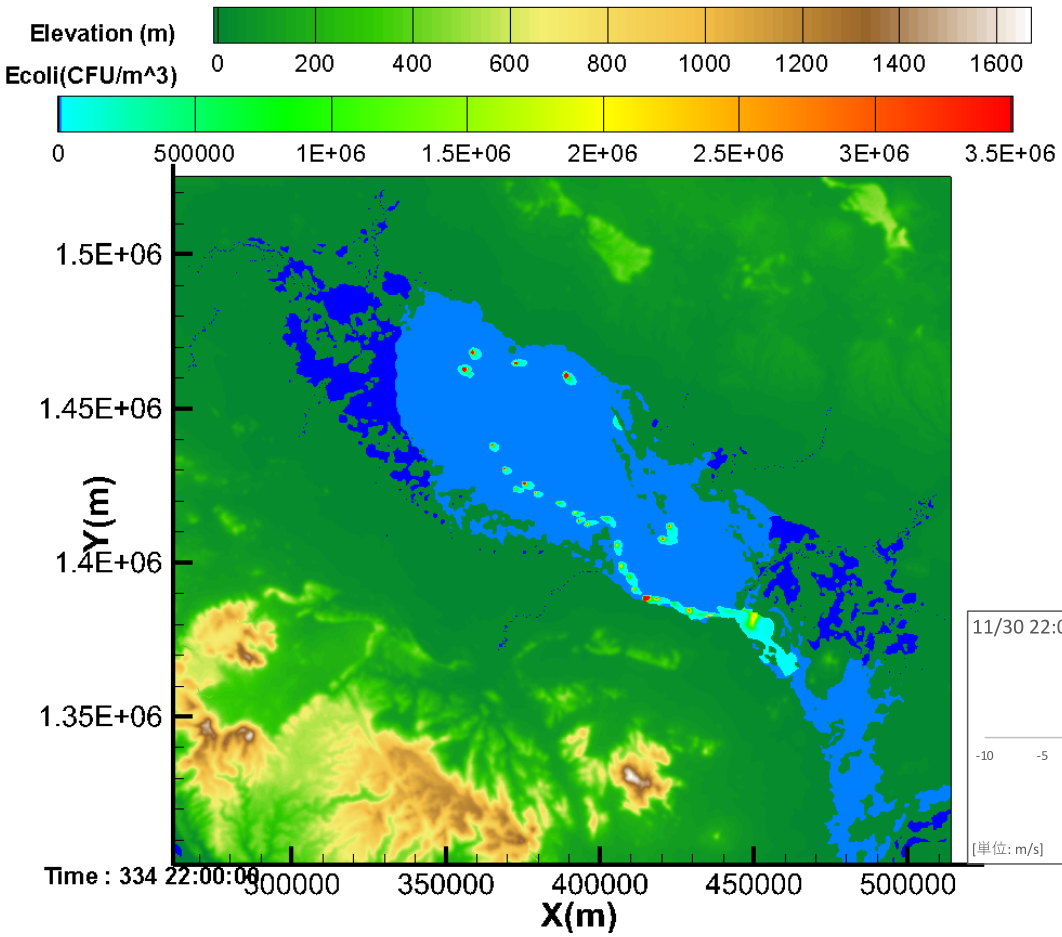


図4-131 11月30日20:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



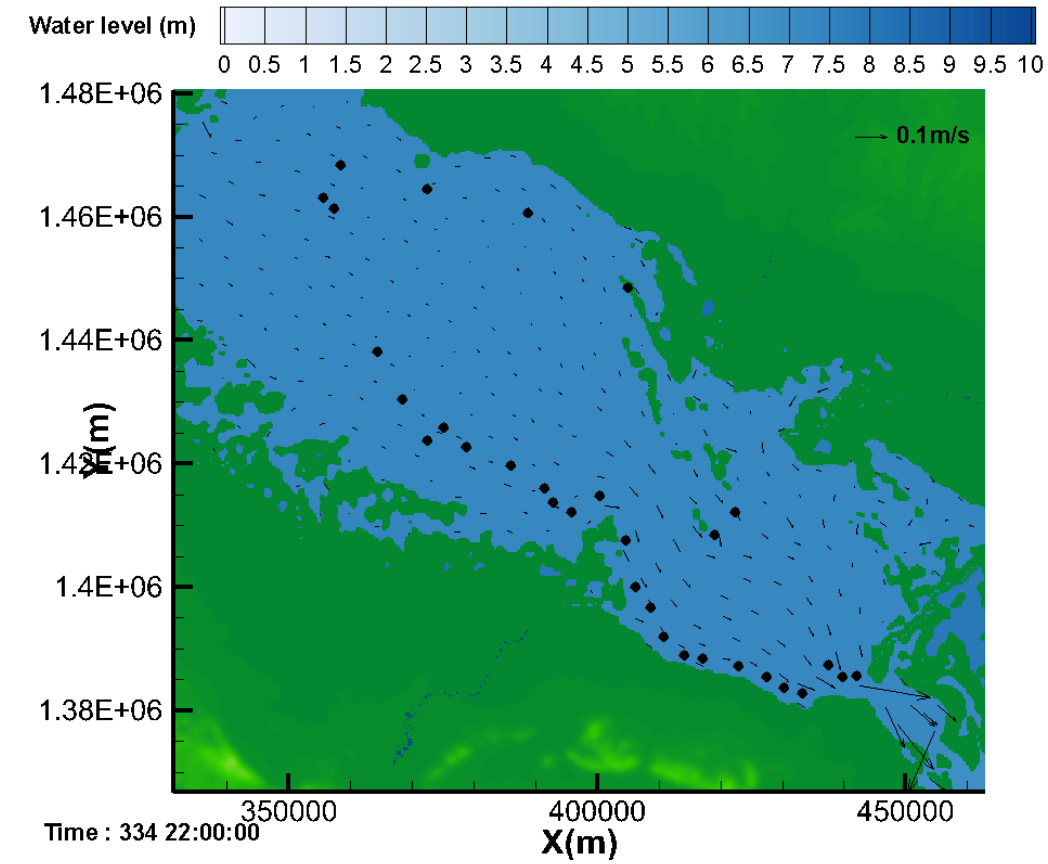
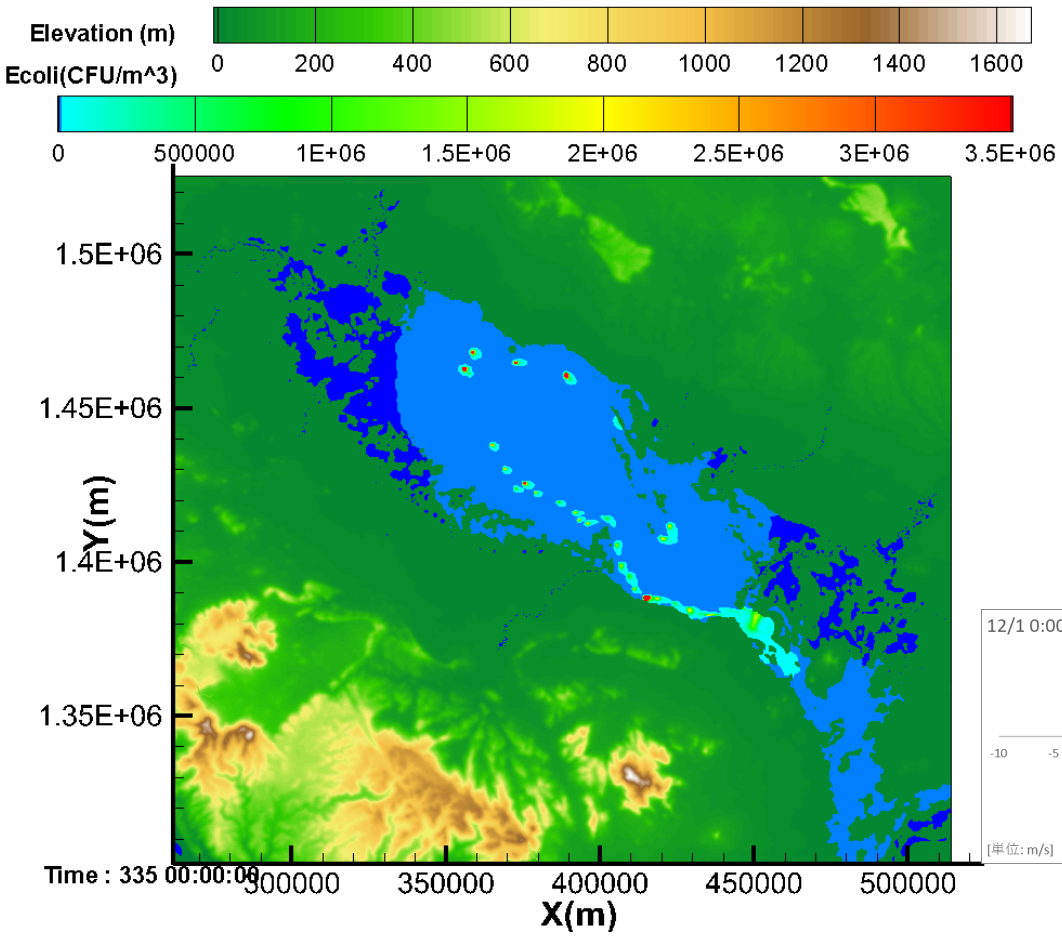


図4-132 11月30日22:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



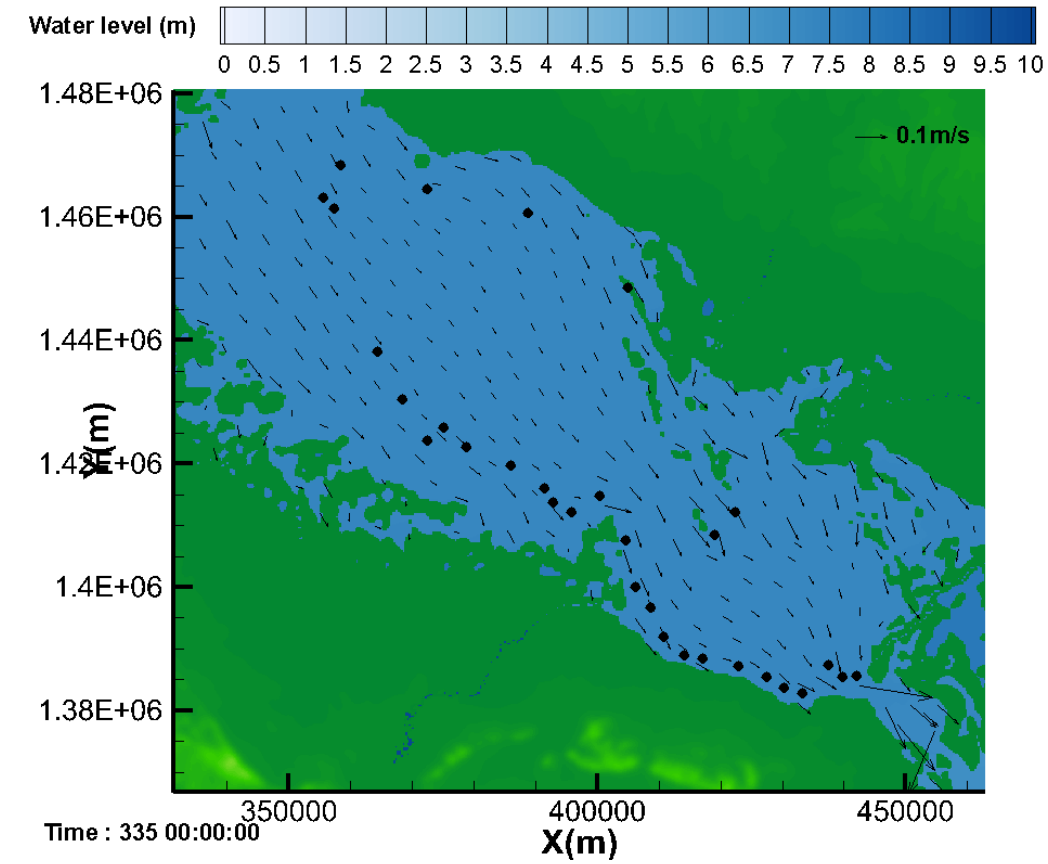
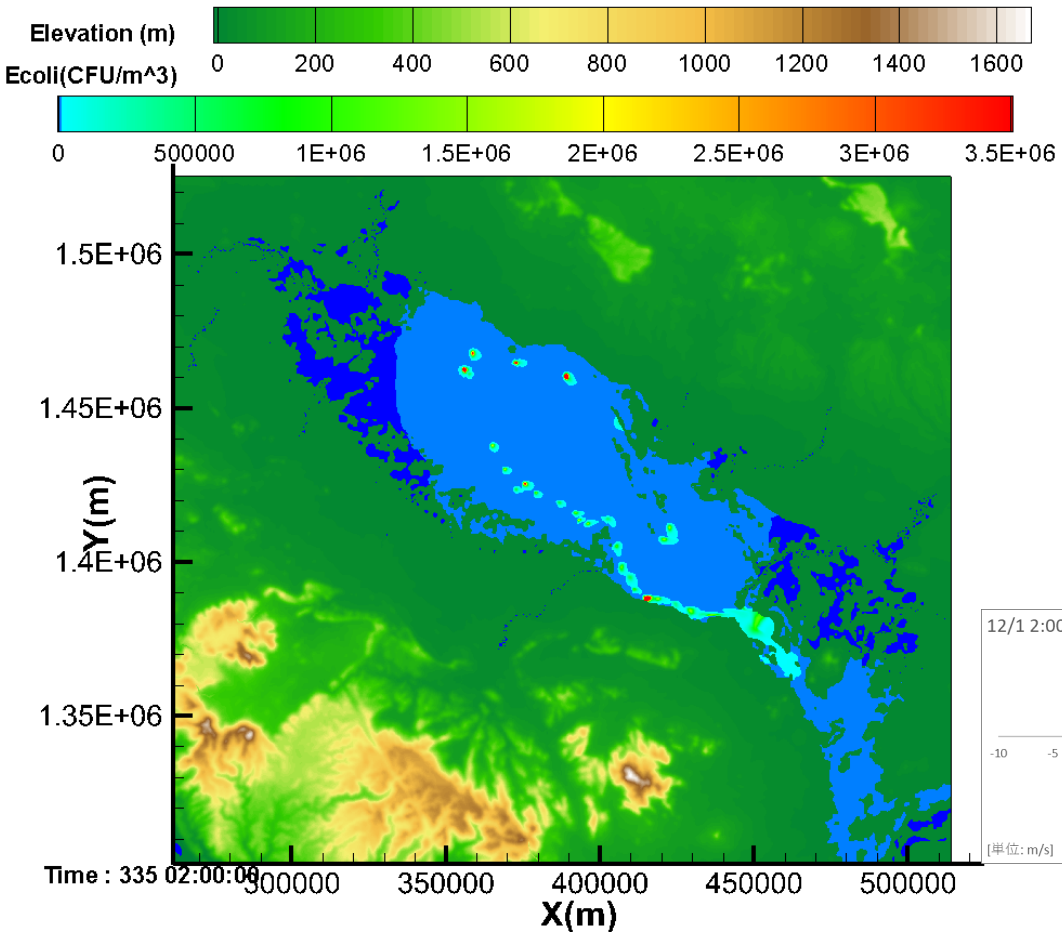


図4-133 12月1日0:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



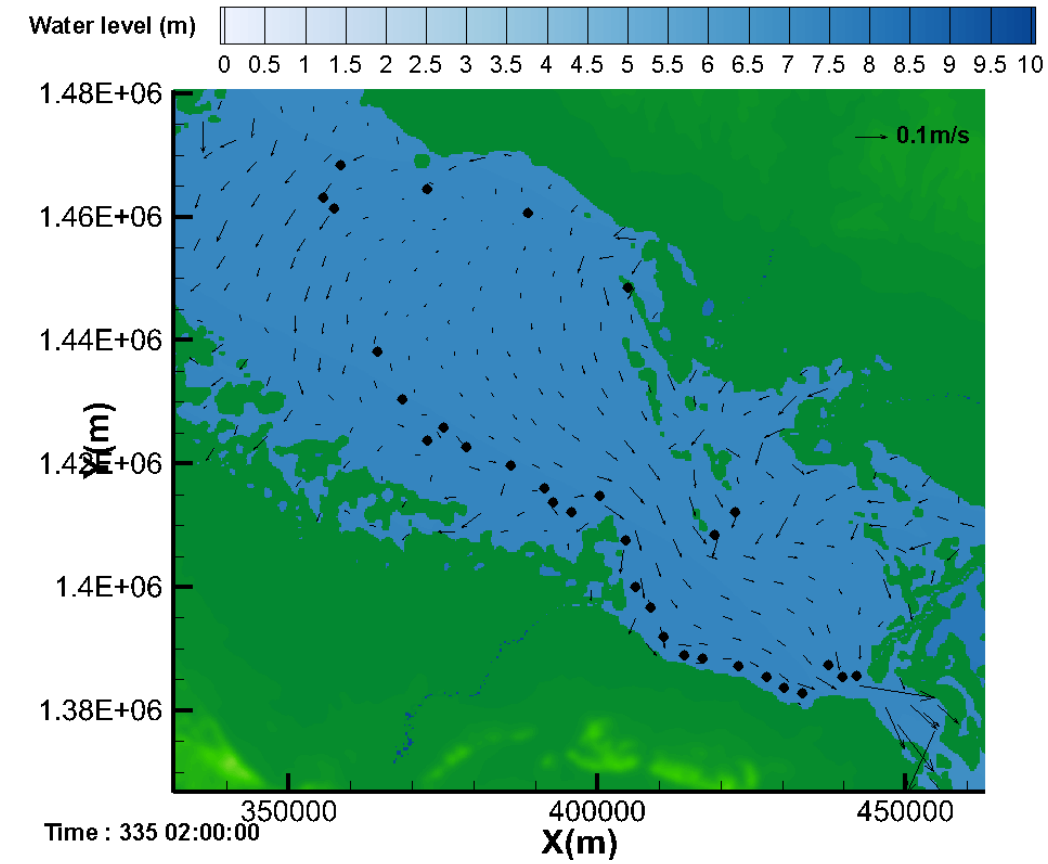
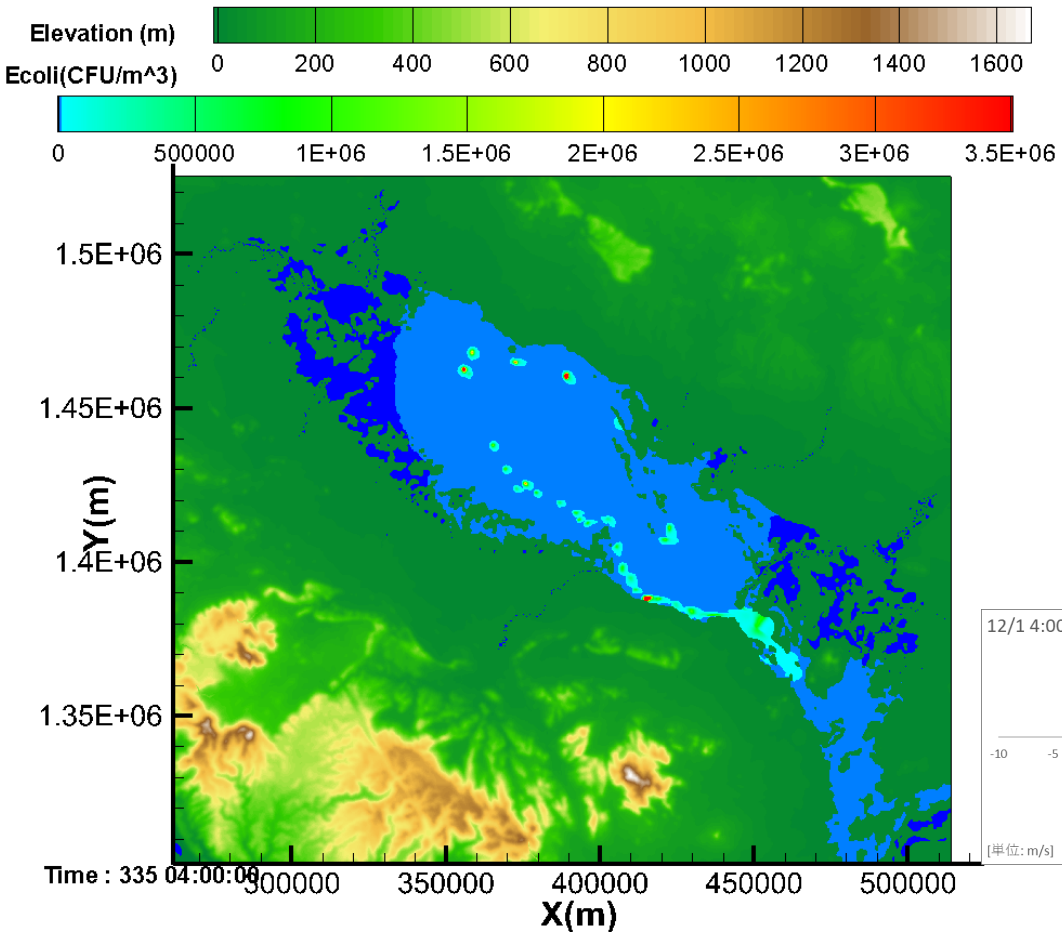


図4-134 12月1日2:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



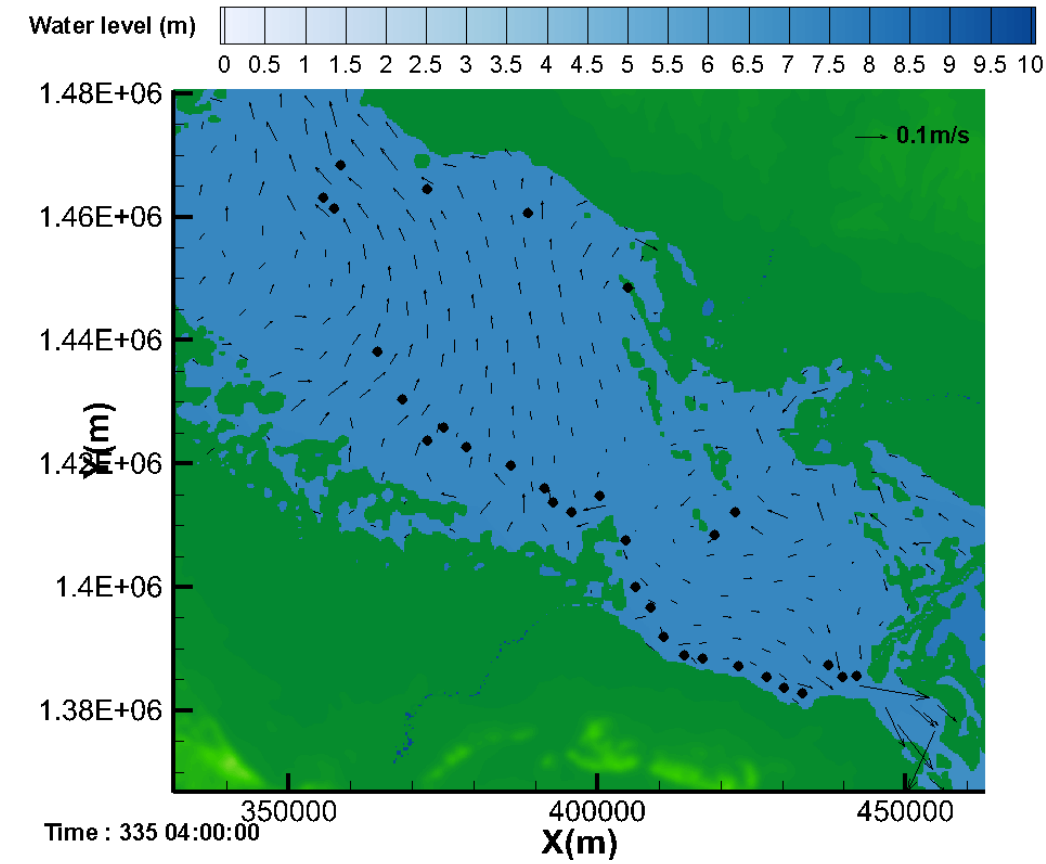
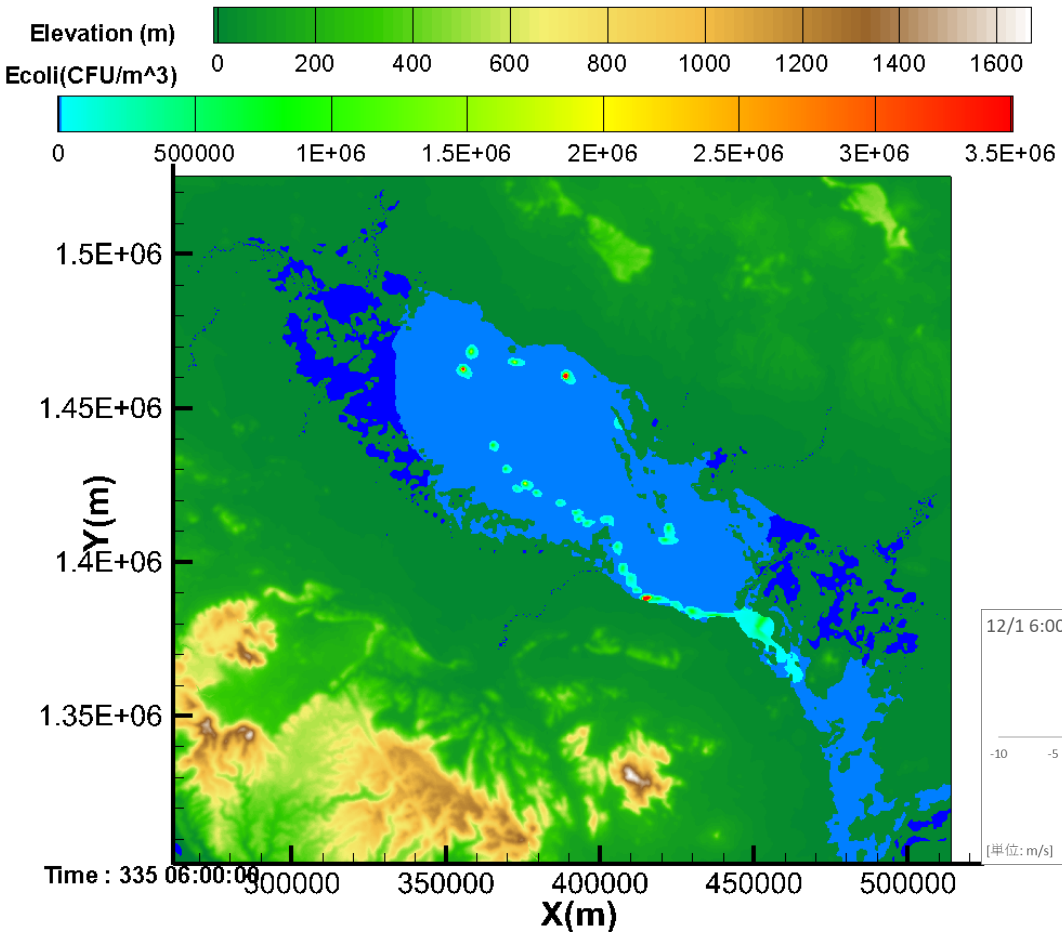


図4-135 12月1日4:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



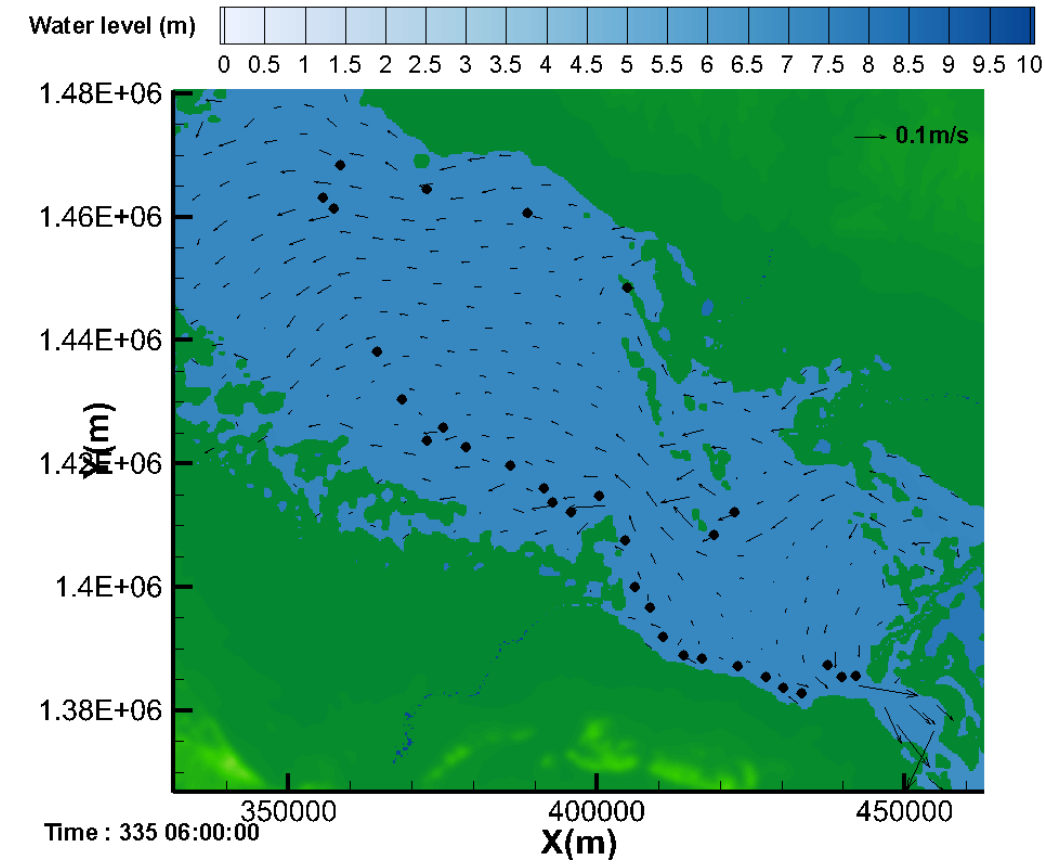


図4-136 12月1日6:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

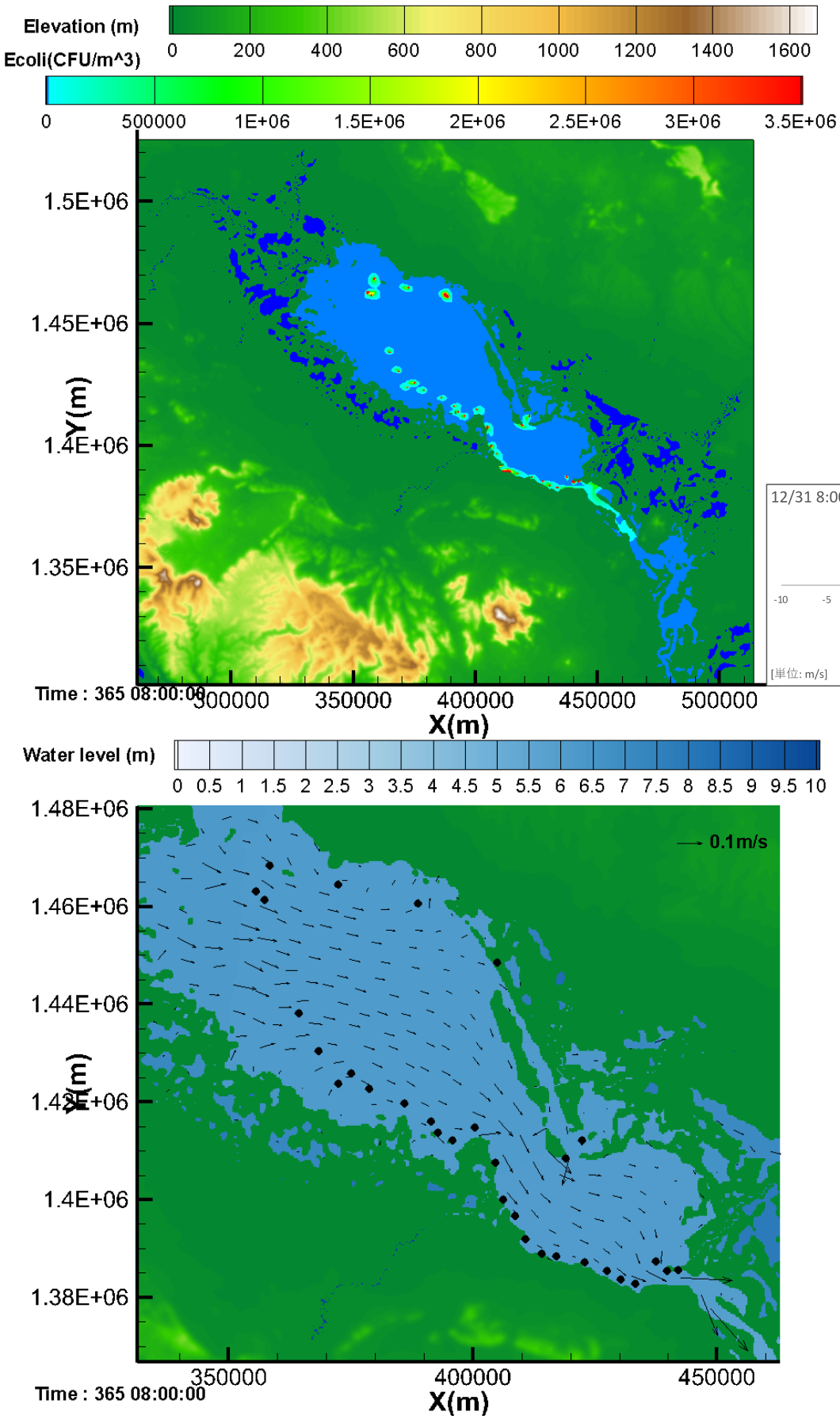
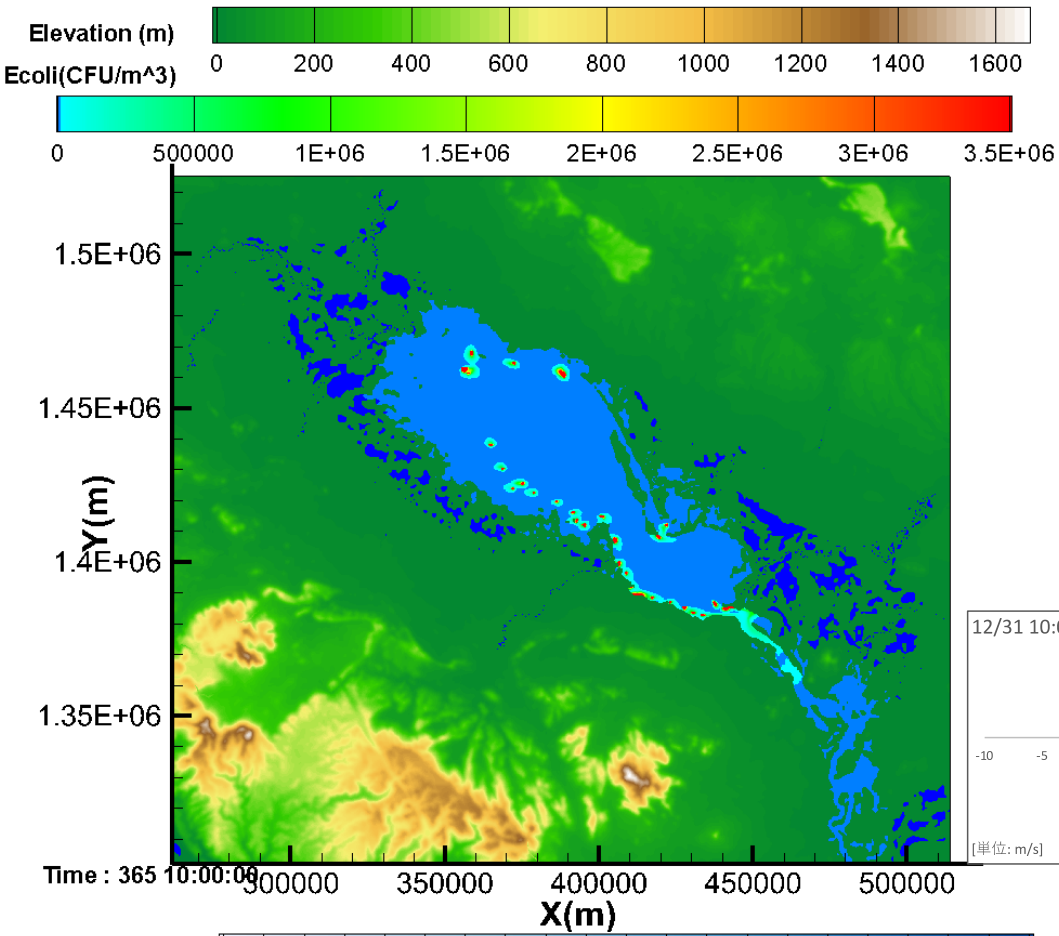


図4-137 12月31日8:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



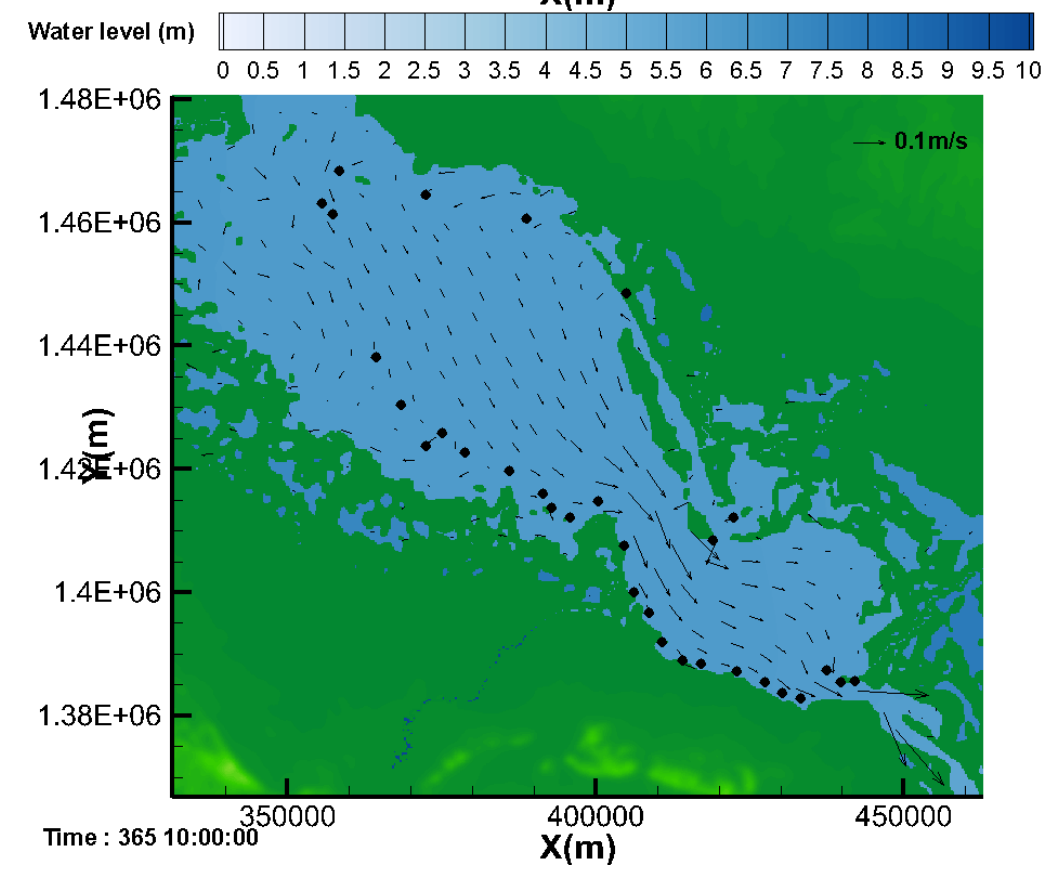
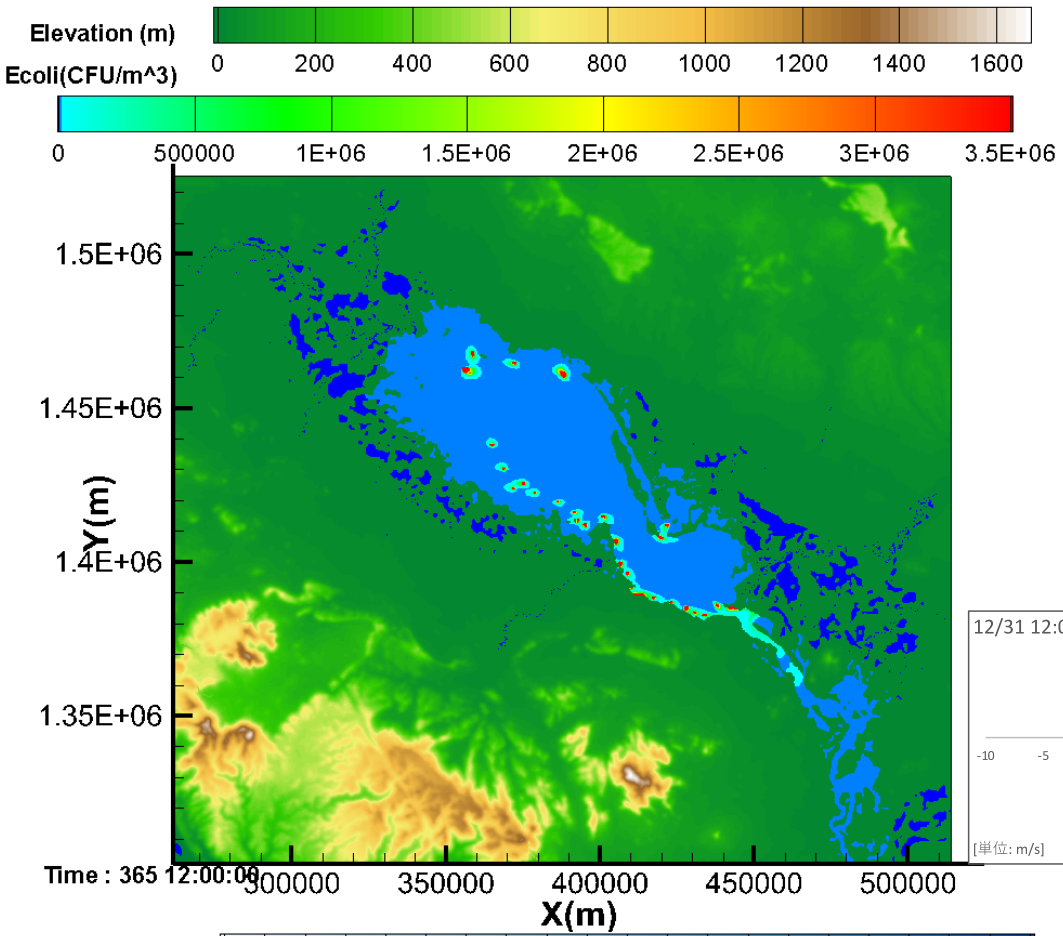


図4-138 12月31日10:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



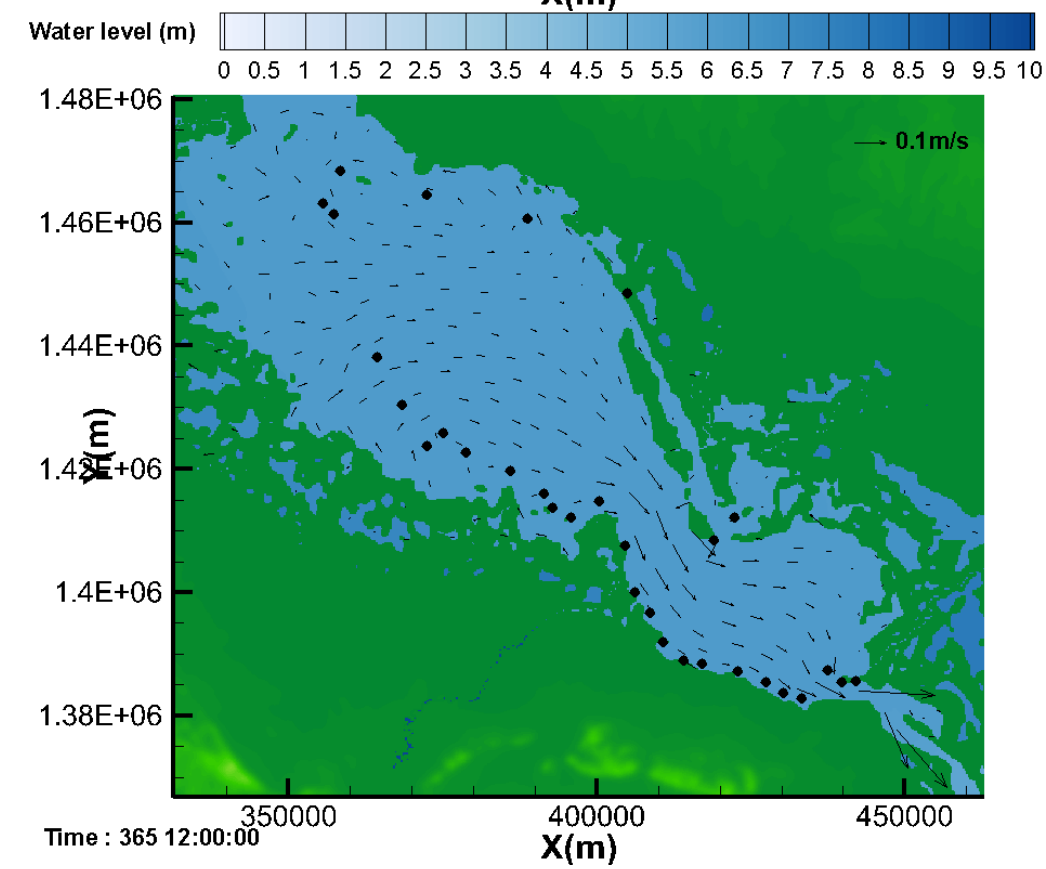
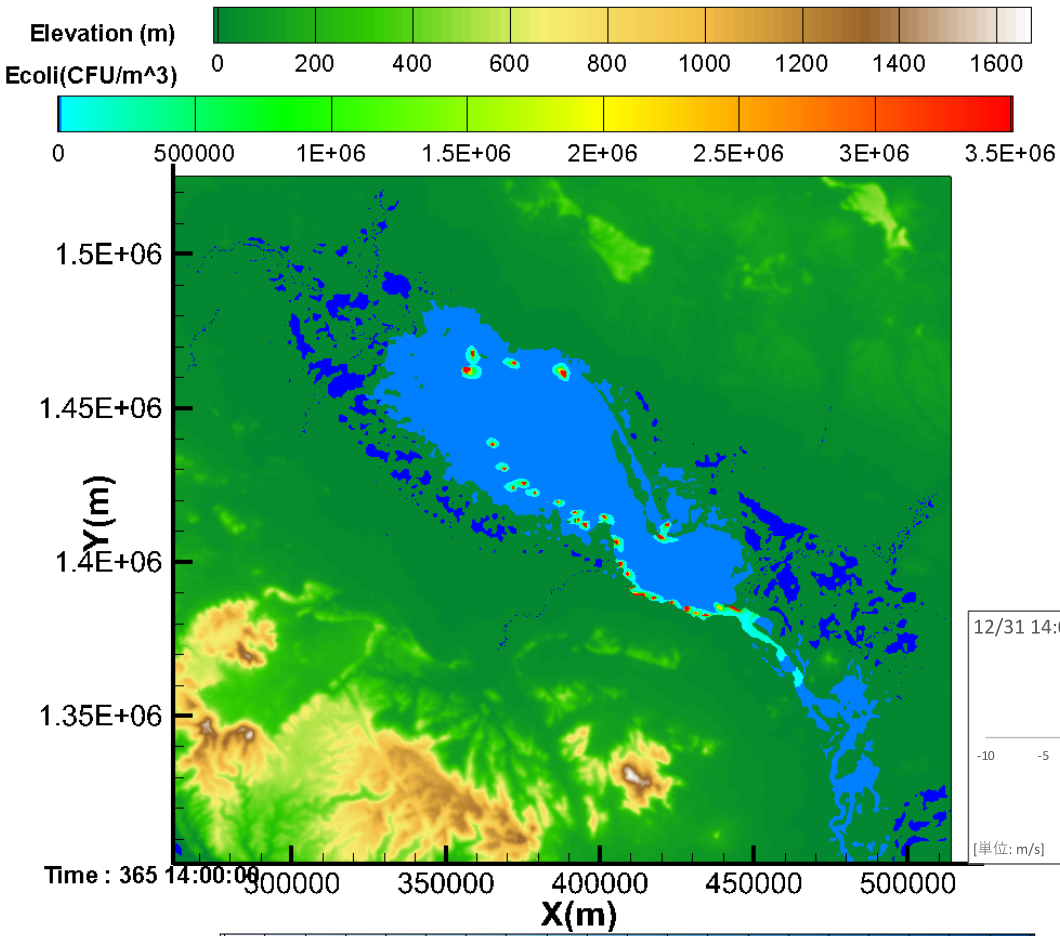


図4-139 12月31日12:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



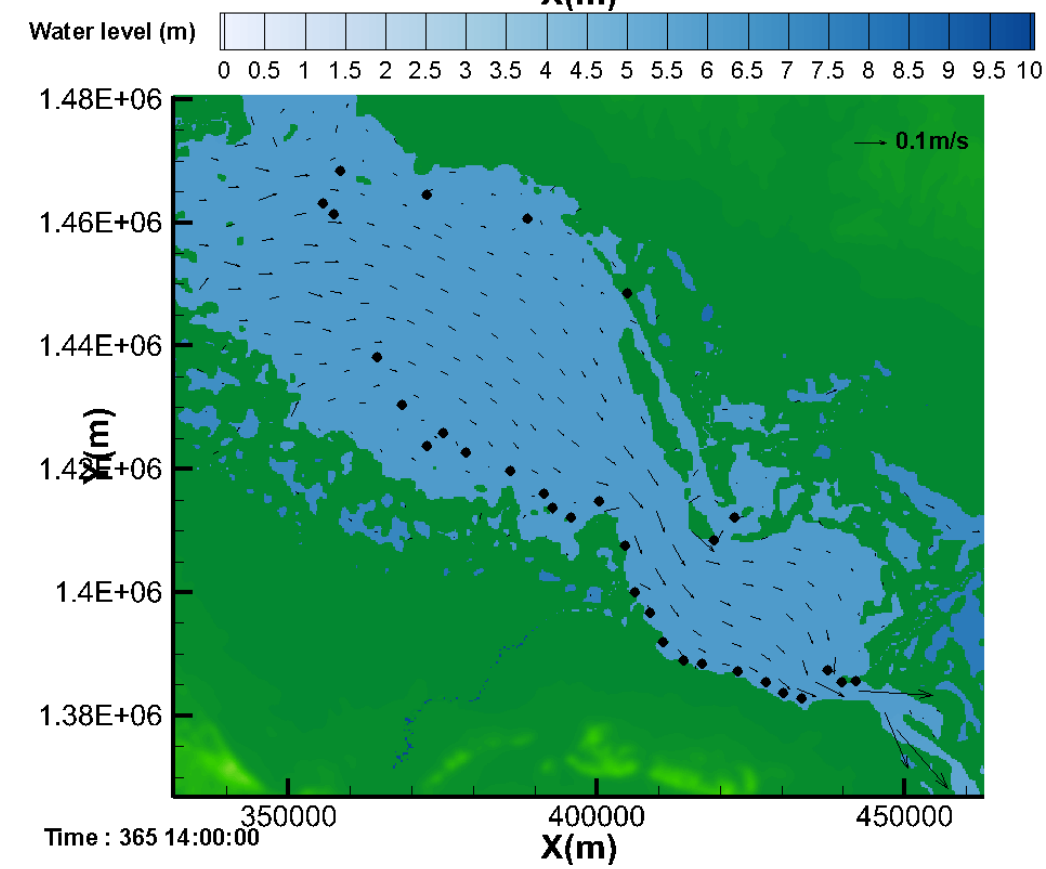


図4-140 12月31日14:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

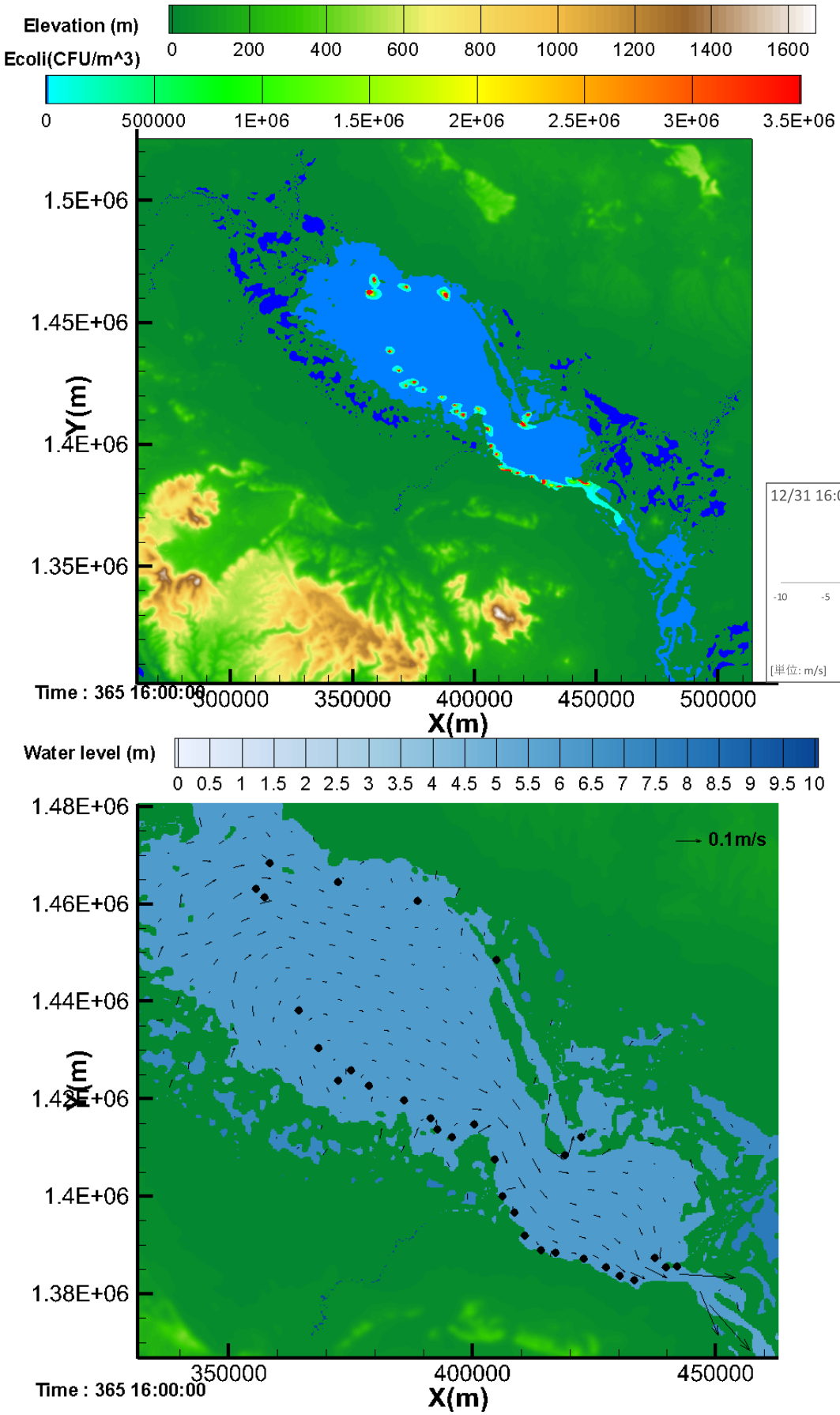
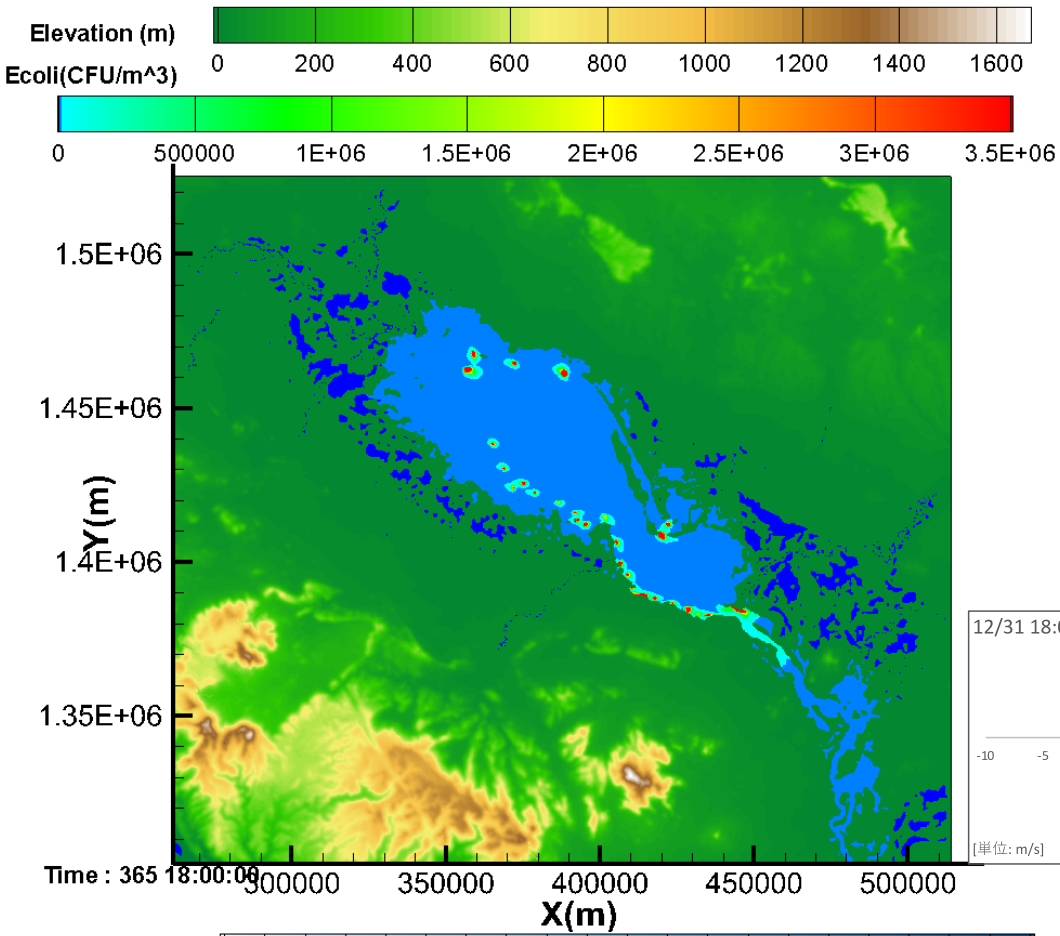


図4-141 12月31日16:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



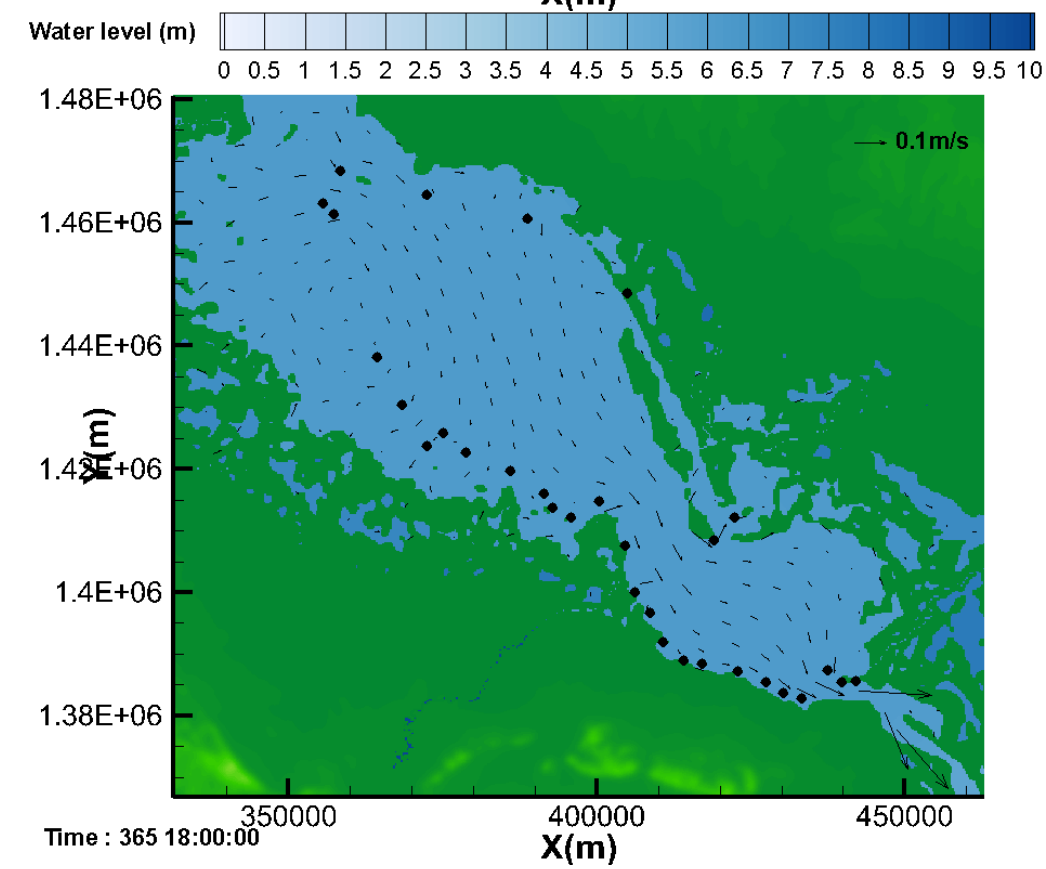
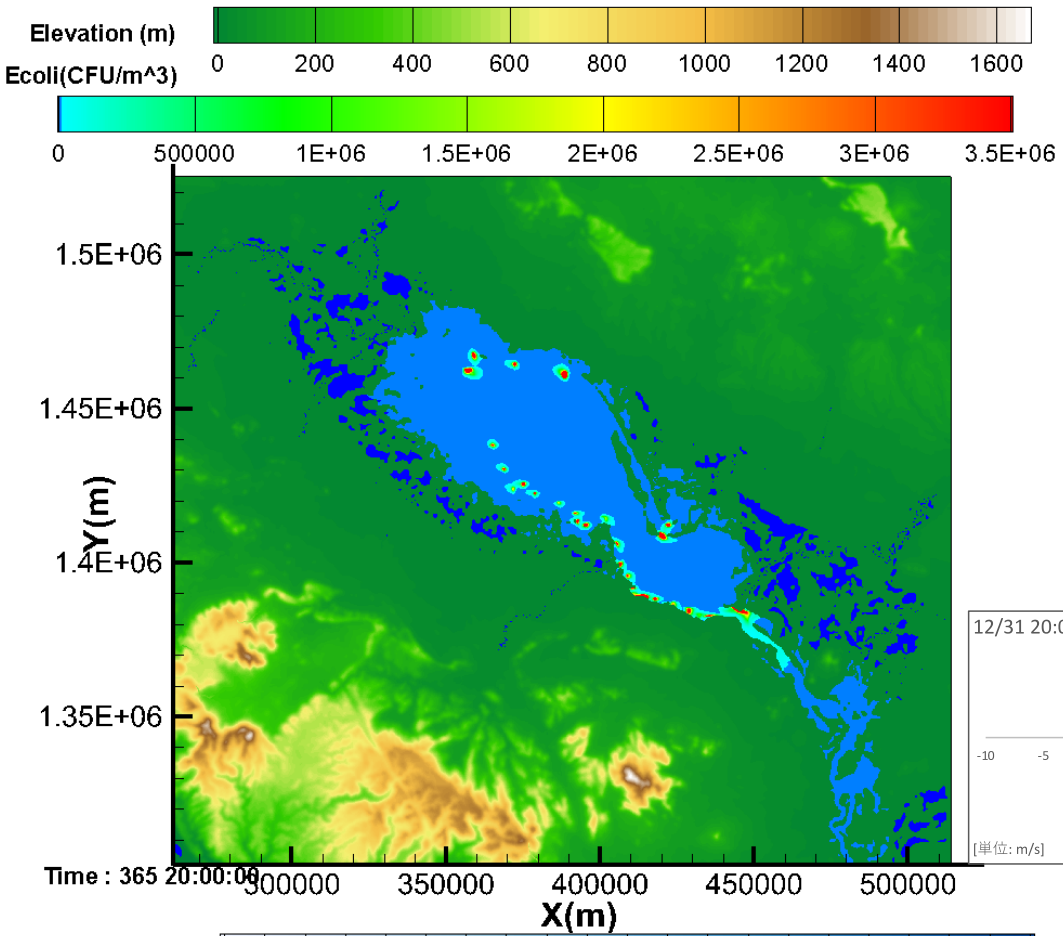


図4-142 12月31日18:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



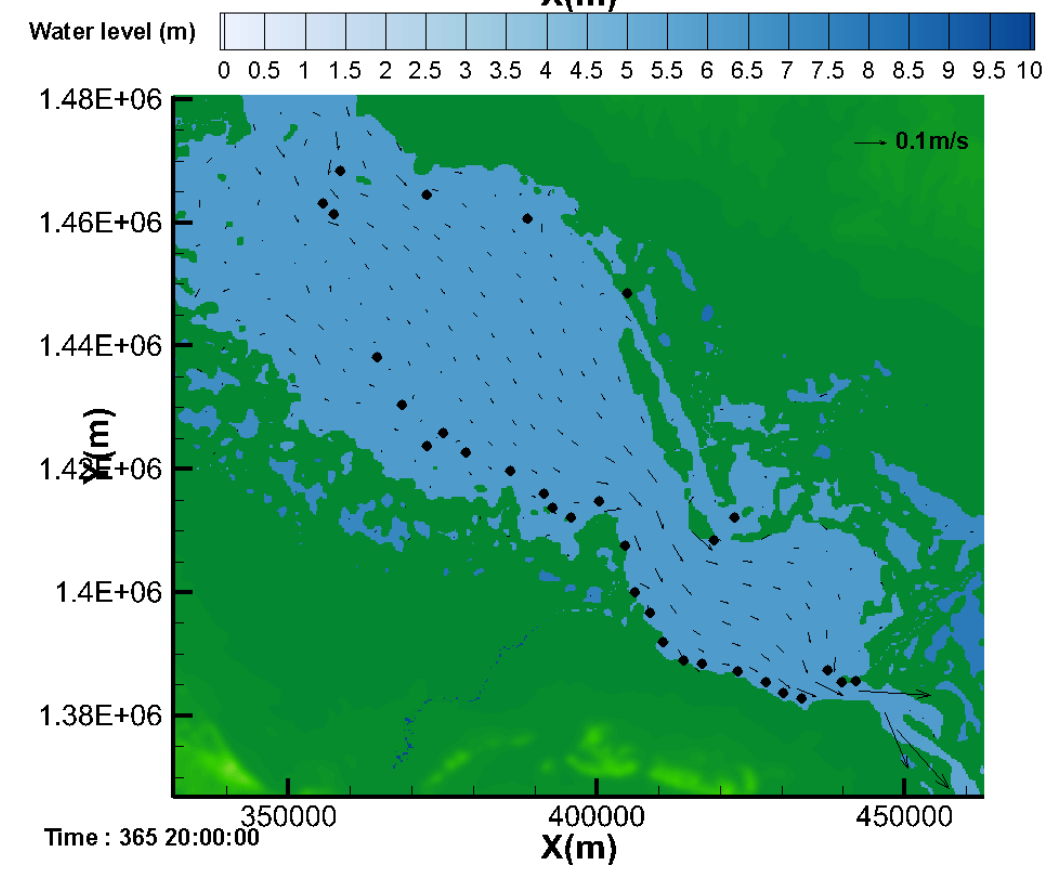
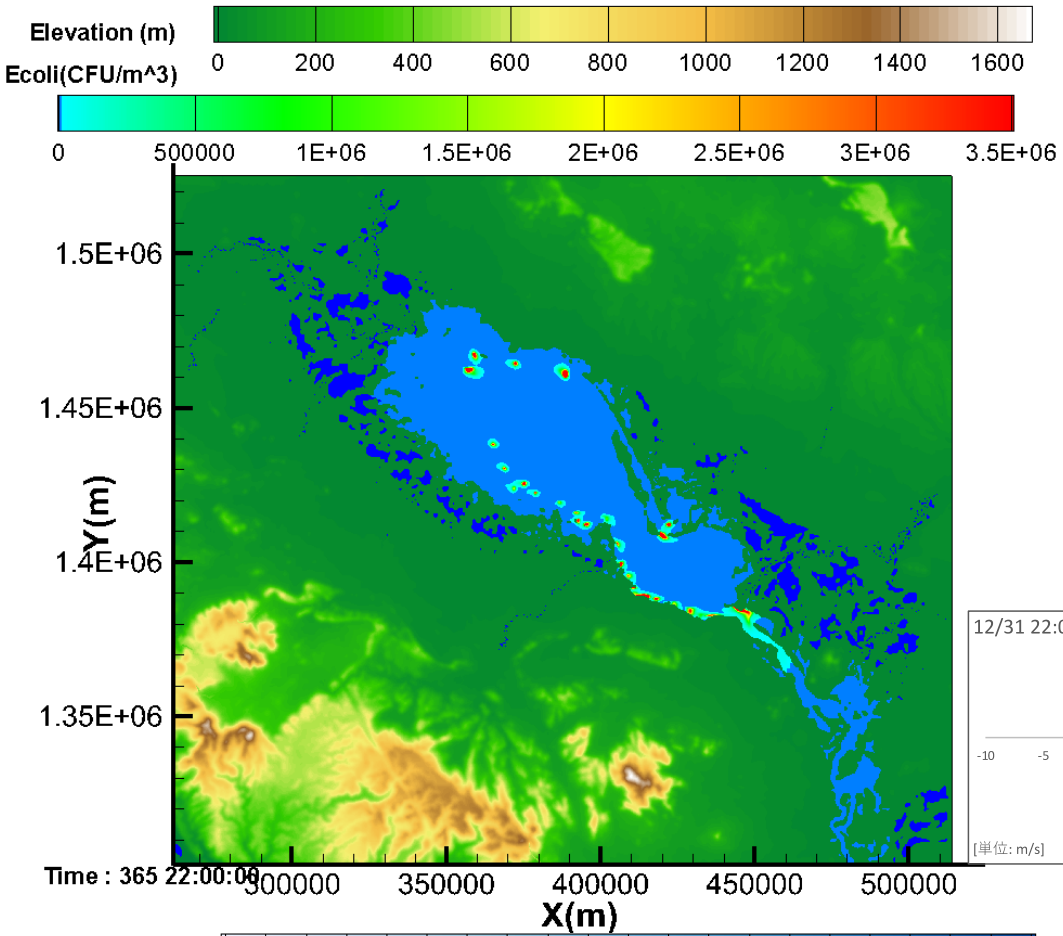


図4-143 12月31日20:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



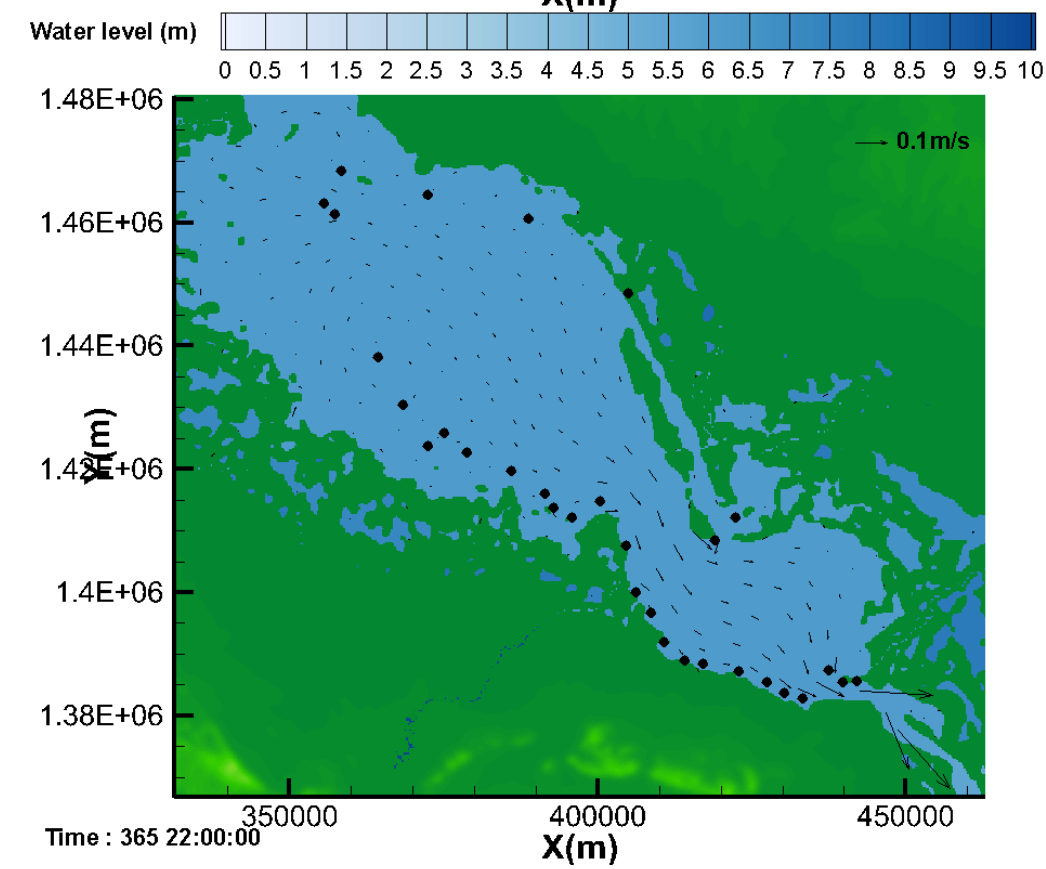
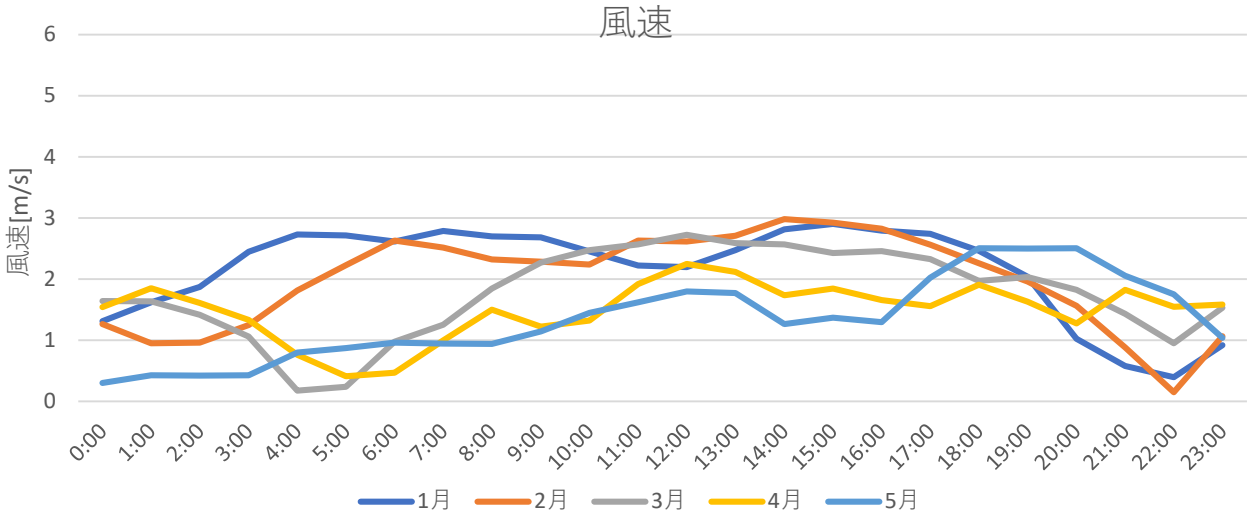
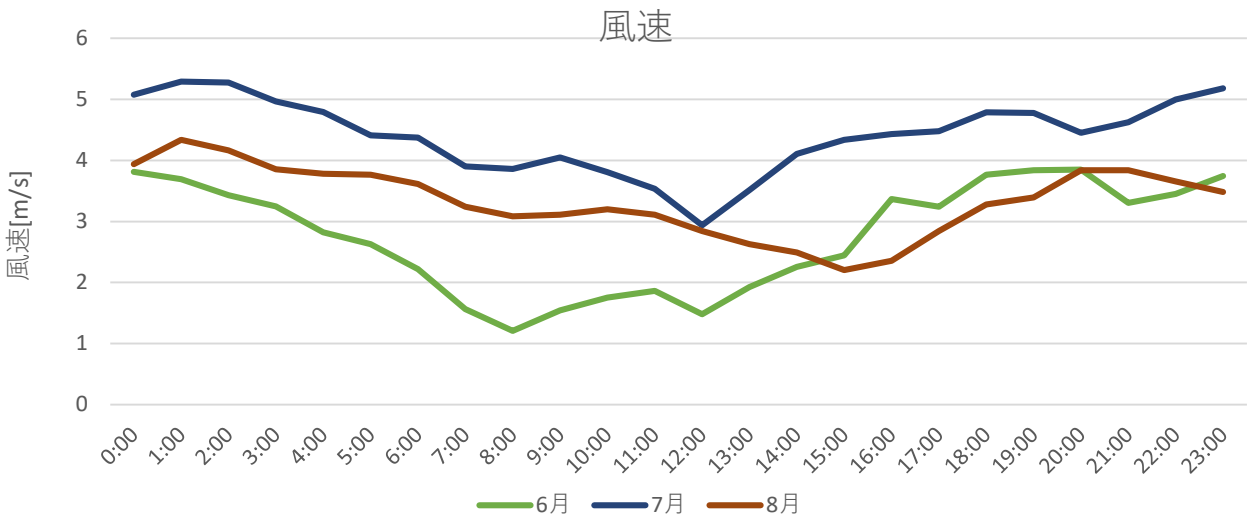


図4-144 12月31日22:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル





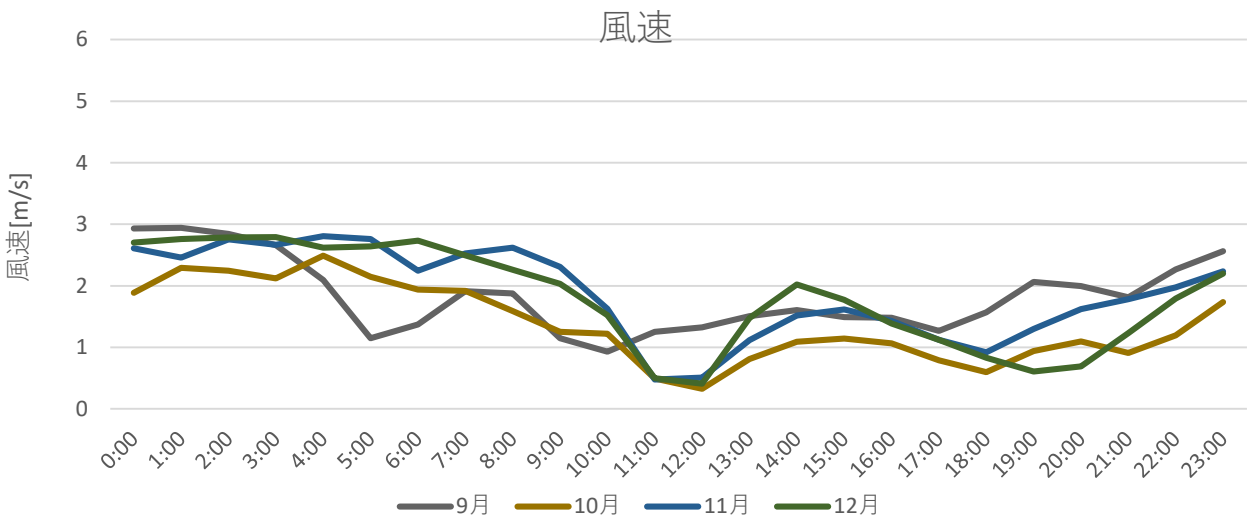


図4-145 各月における一日の代表的な風の流動

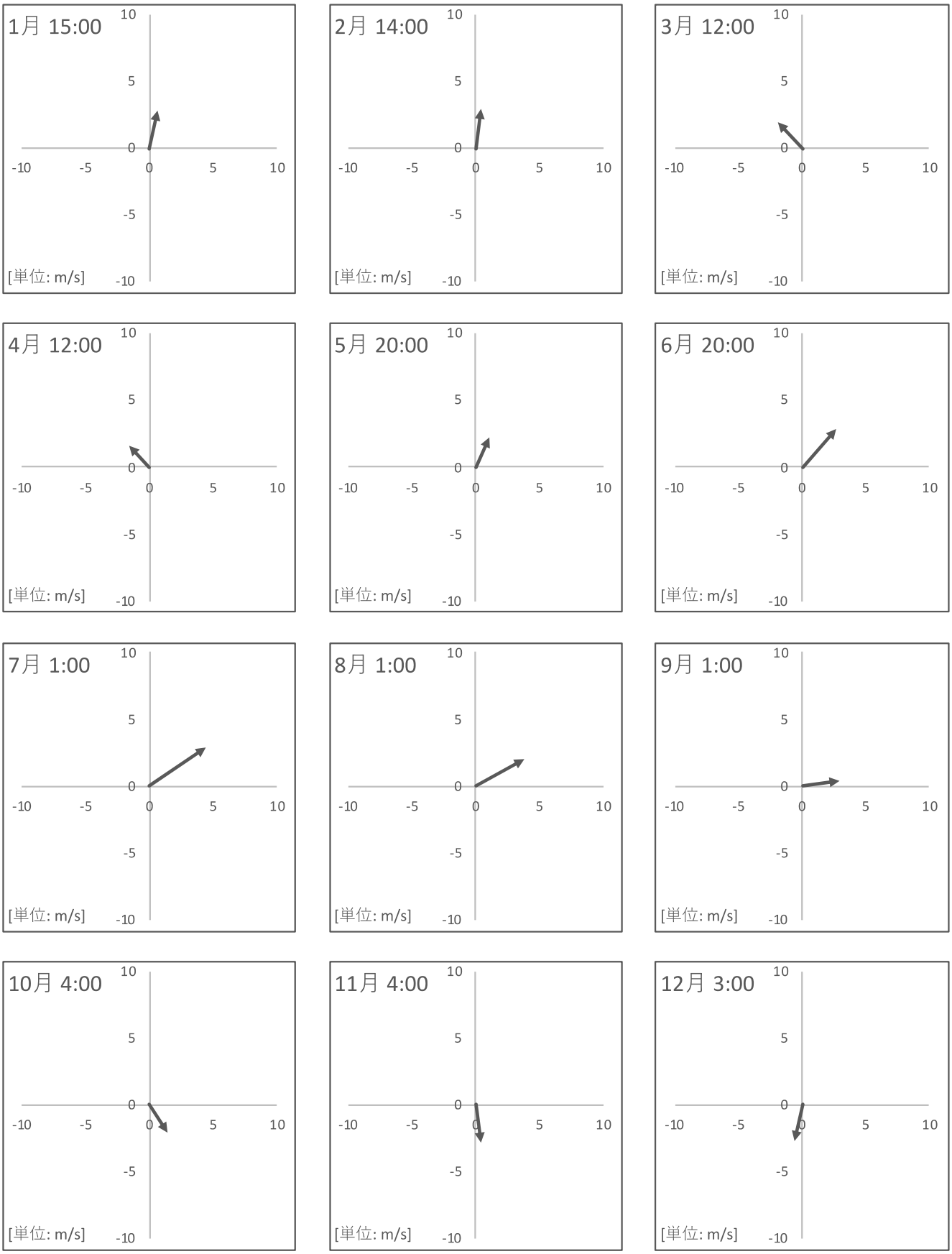
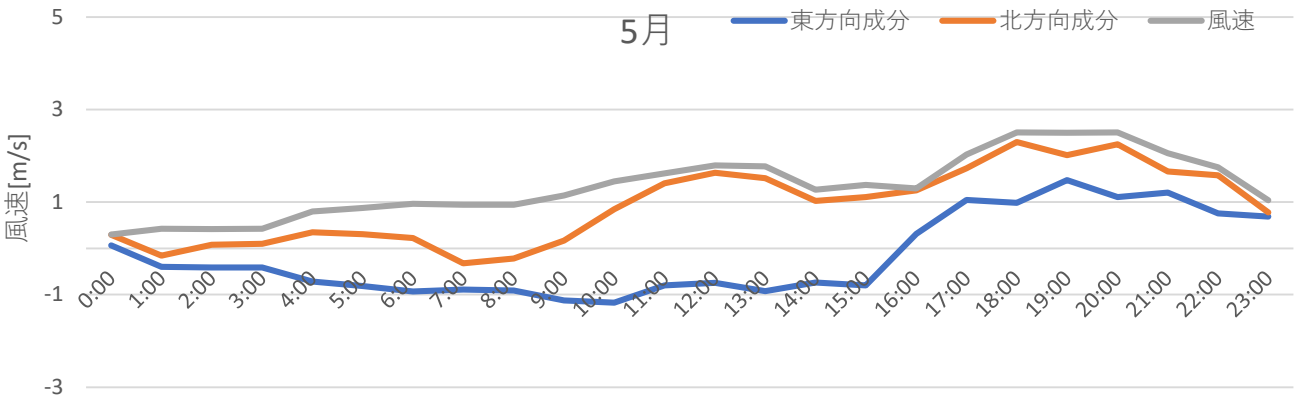


図4-146 各月で最大風速をとる時刻の風



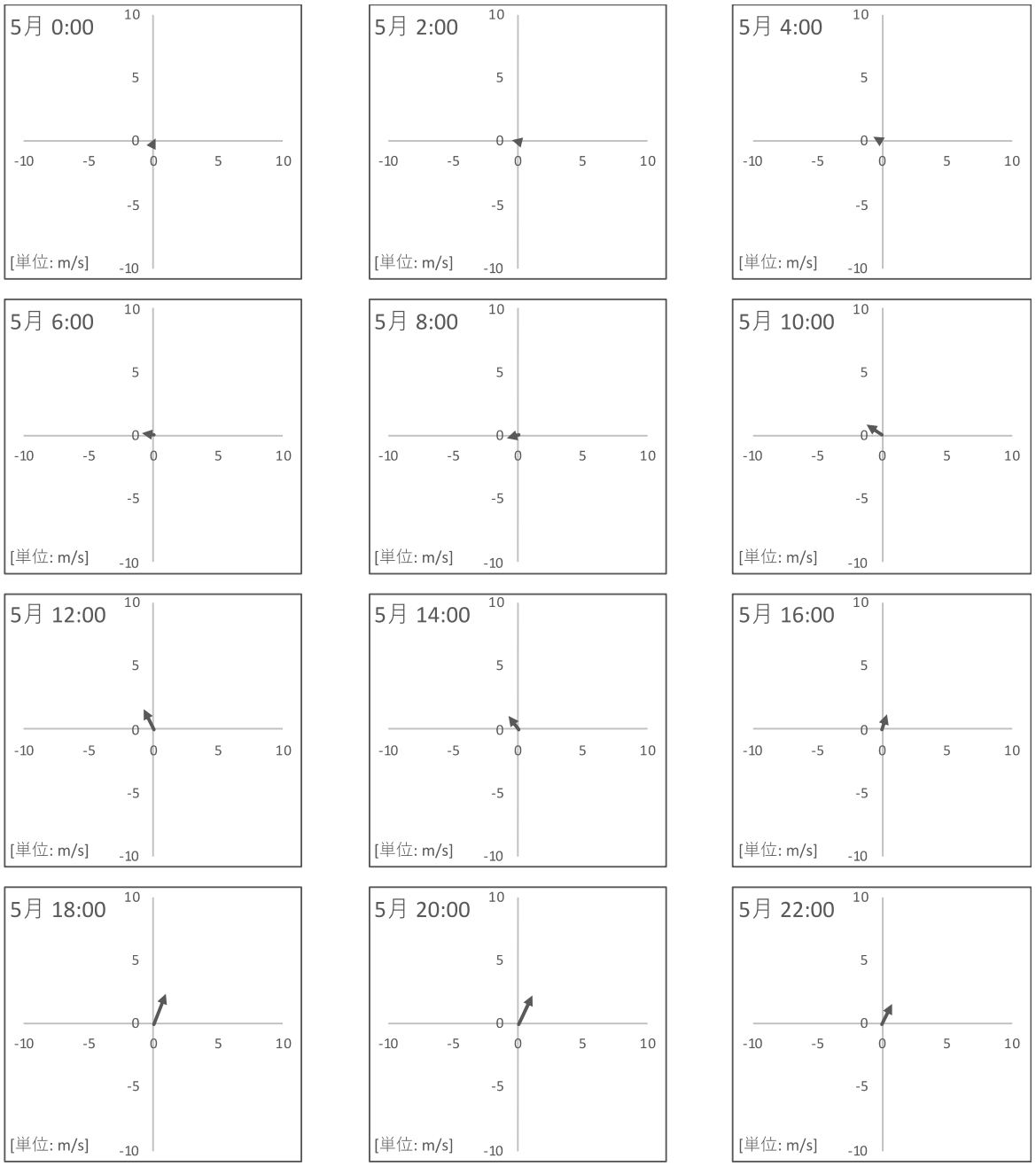
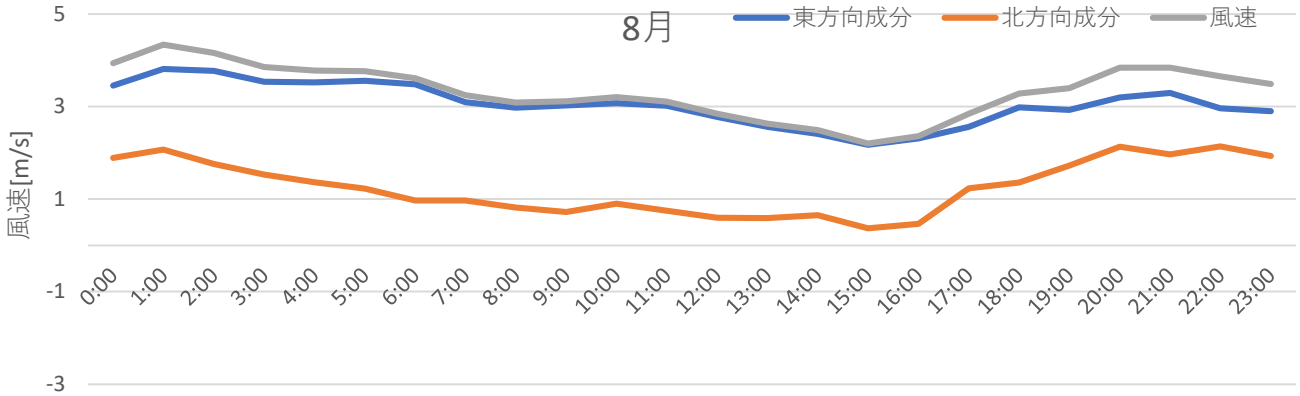


図4-147 5月における平均的な風の一日の変動



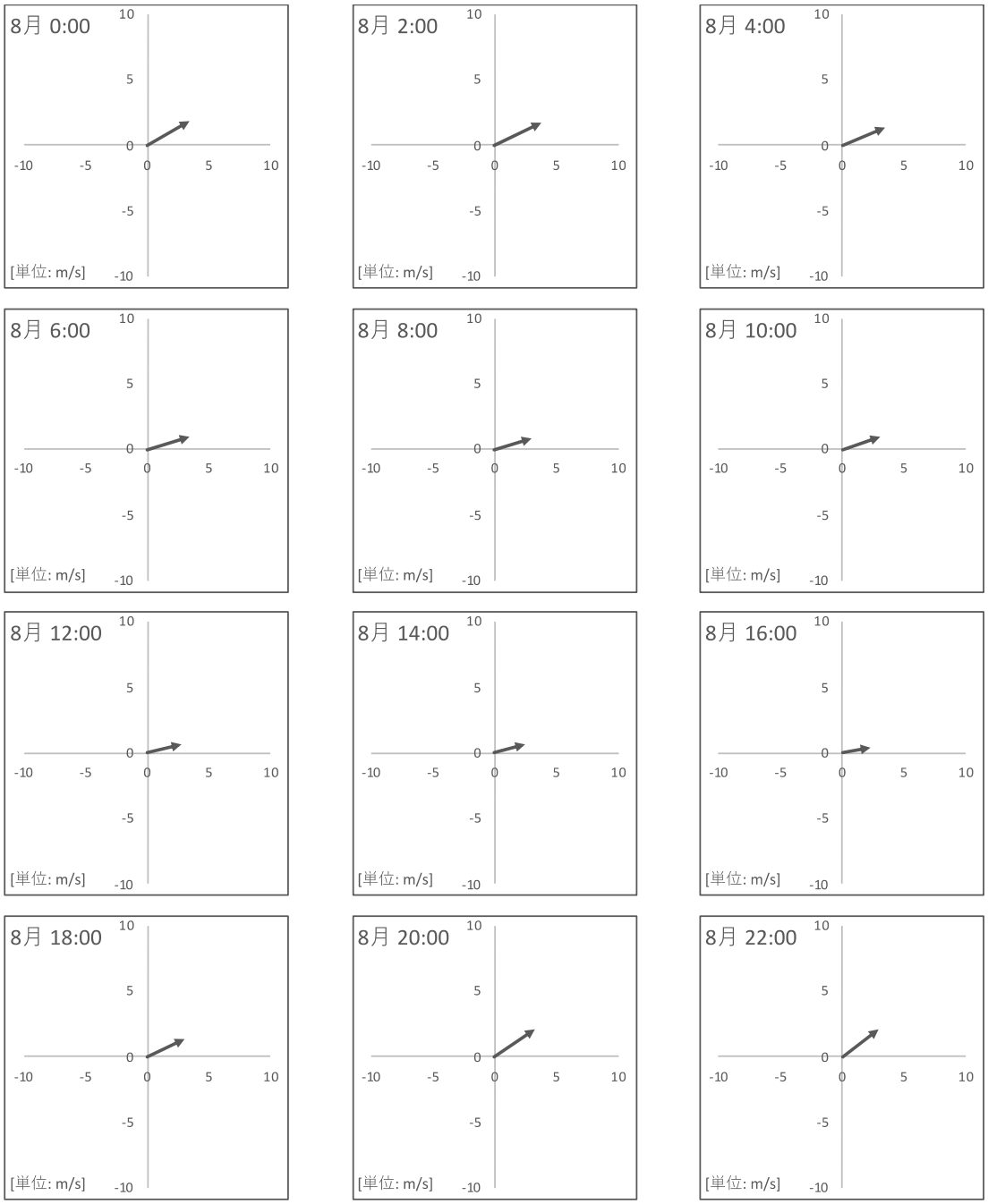
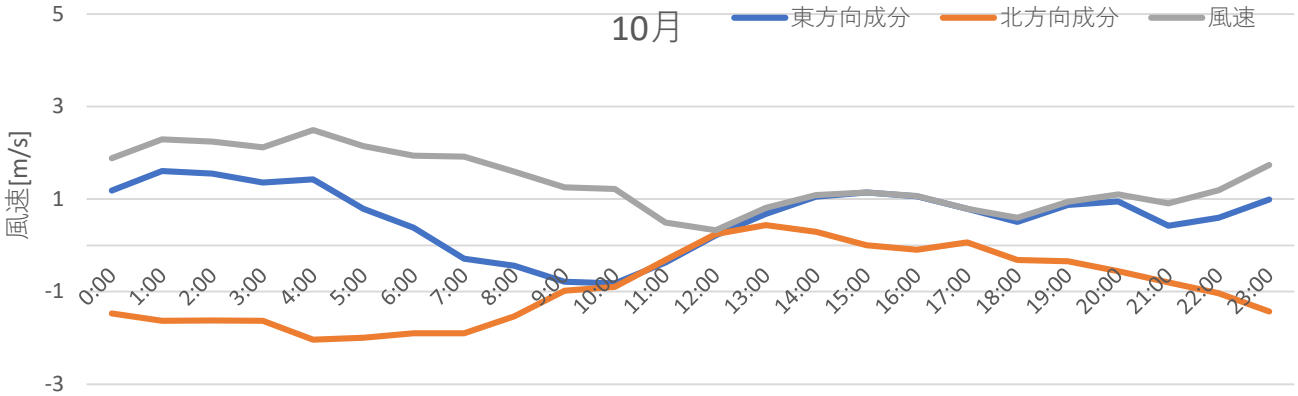
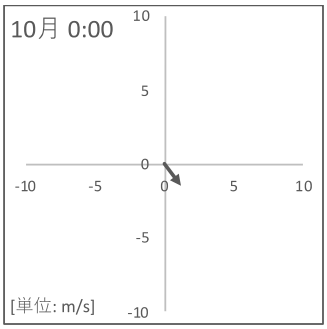
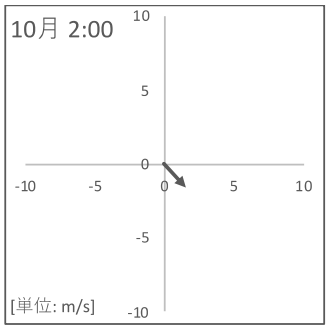
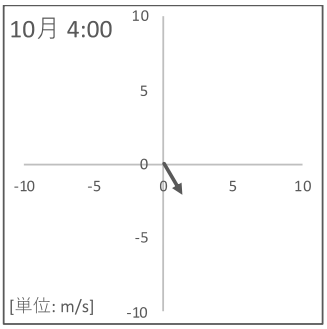


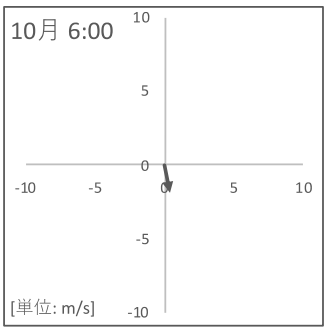
図4-148 8月における平均的な風の一日の変動

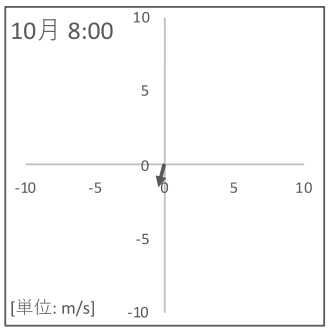


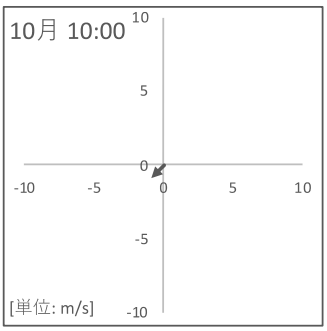


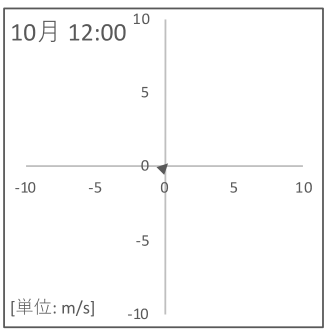


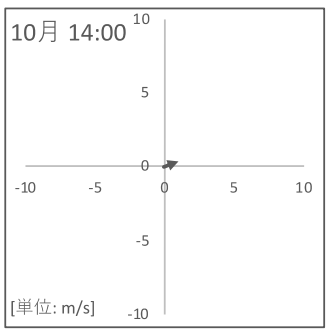


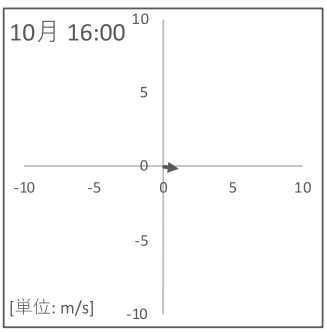


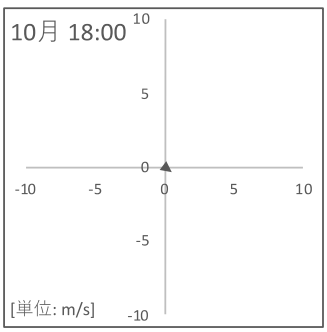


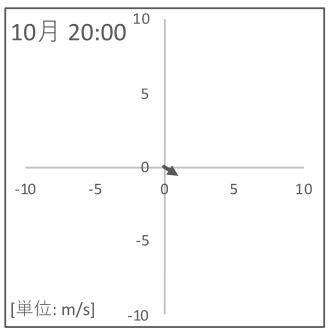












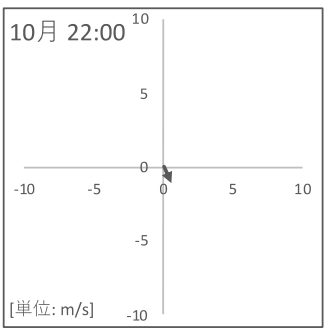
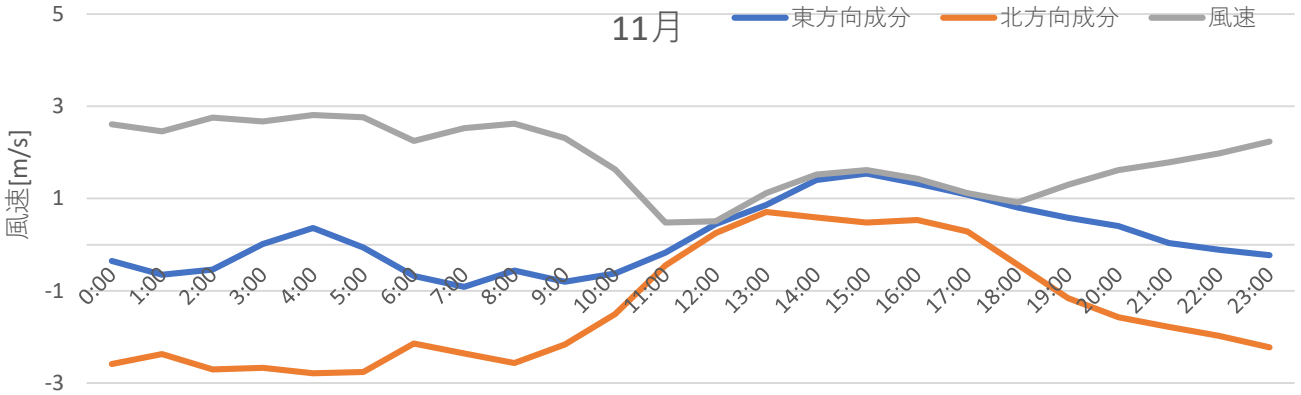
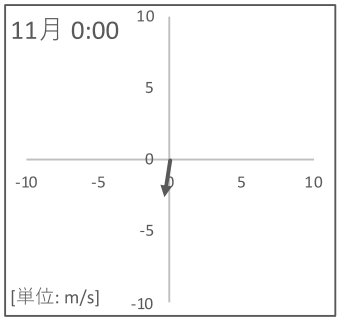
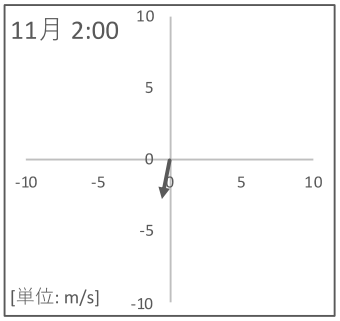
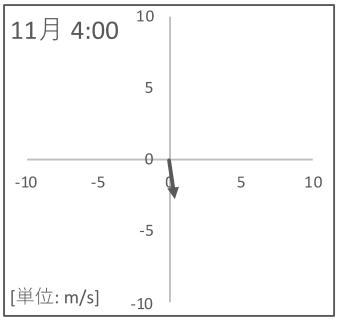


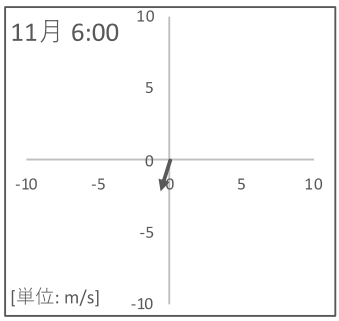
図4-149 10月における平均的な風の一日の変動

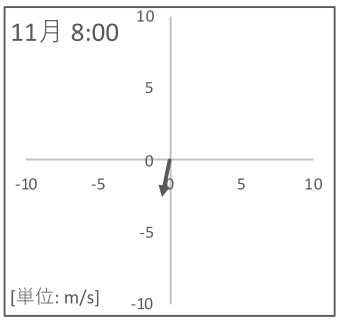


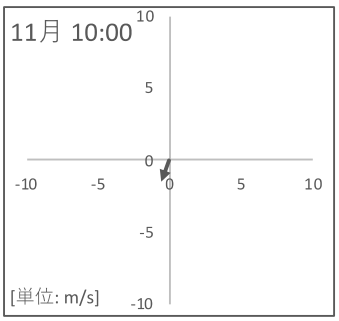


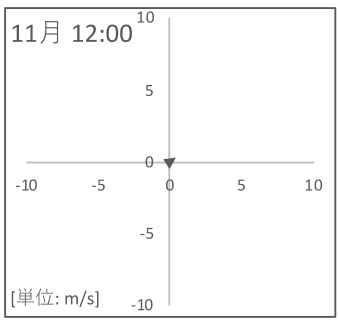


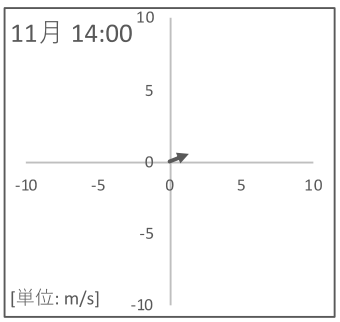


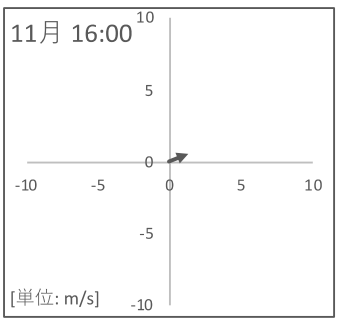


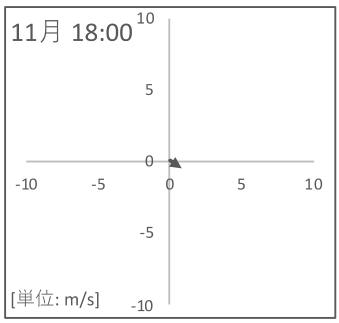


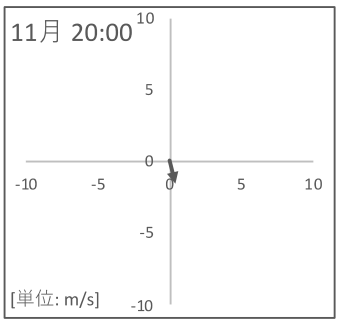












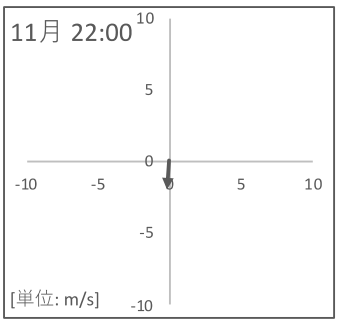


図4-150 11月における平均的な風の一日の変動

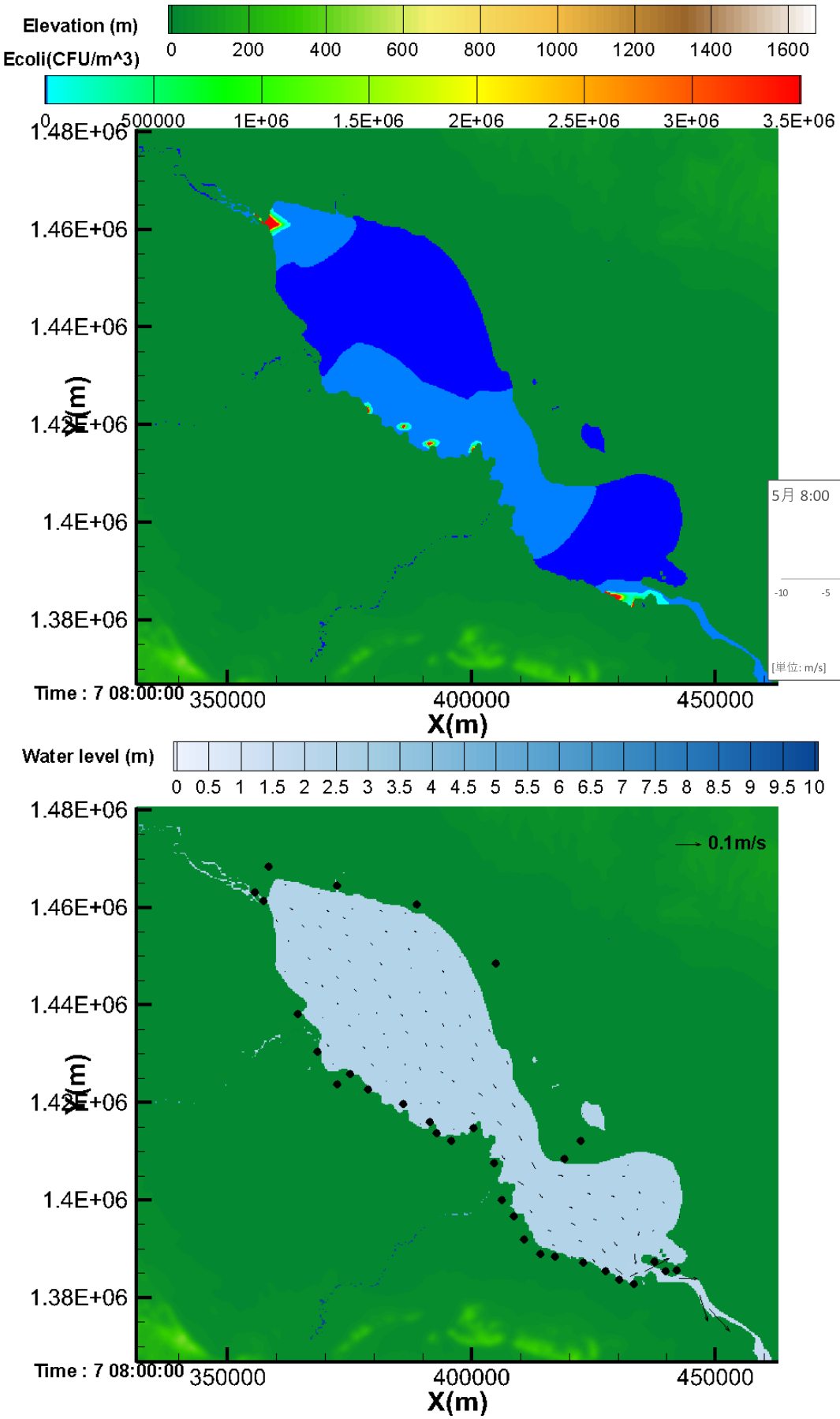


図4-151 5月 8:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

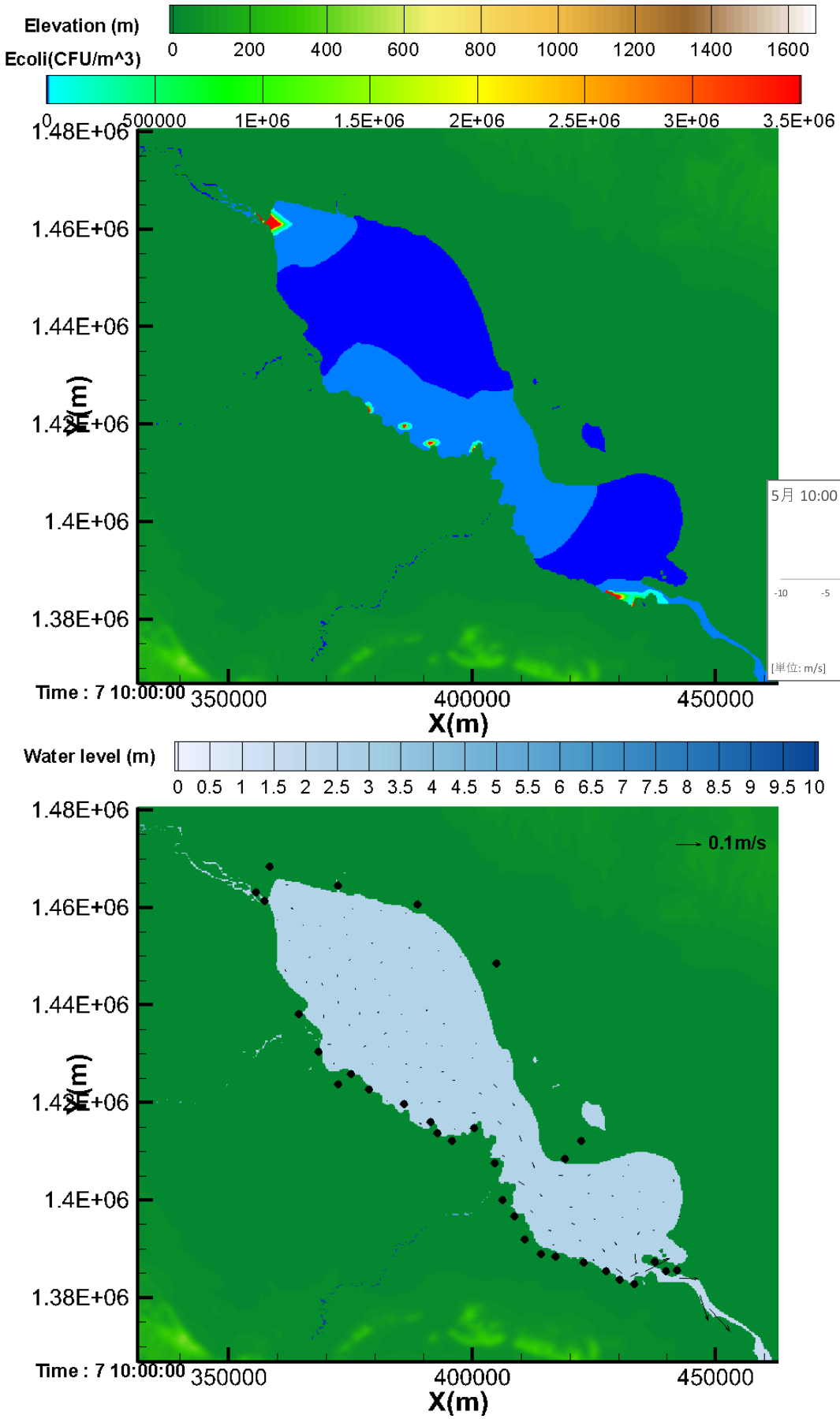


図4-152 5月 10:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

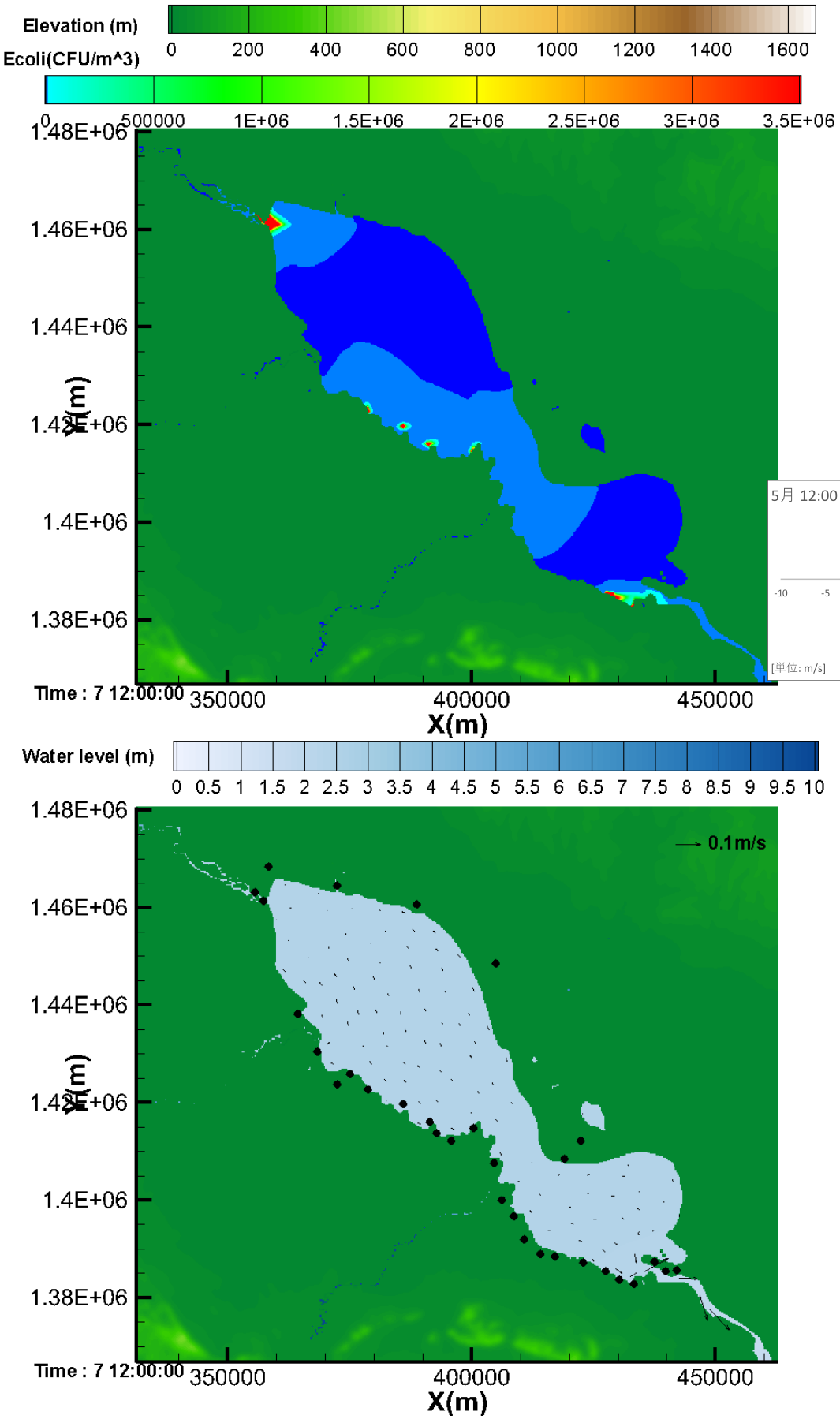
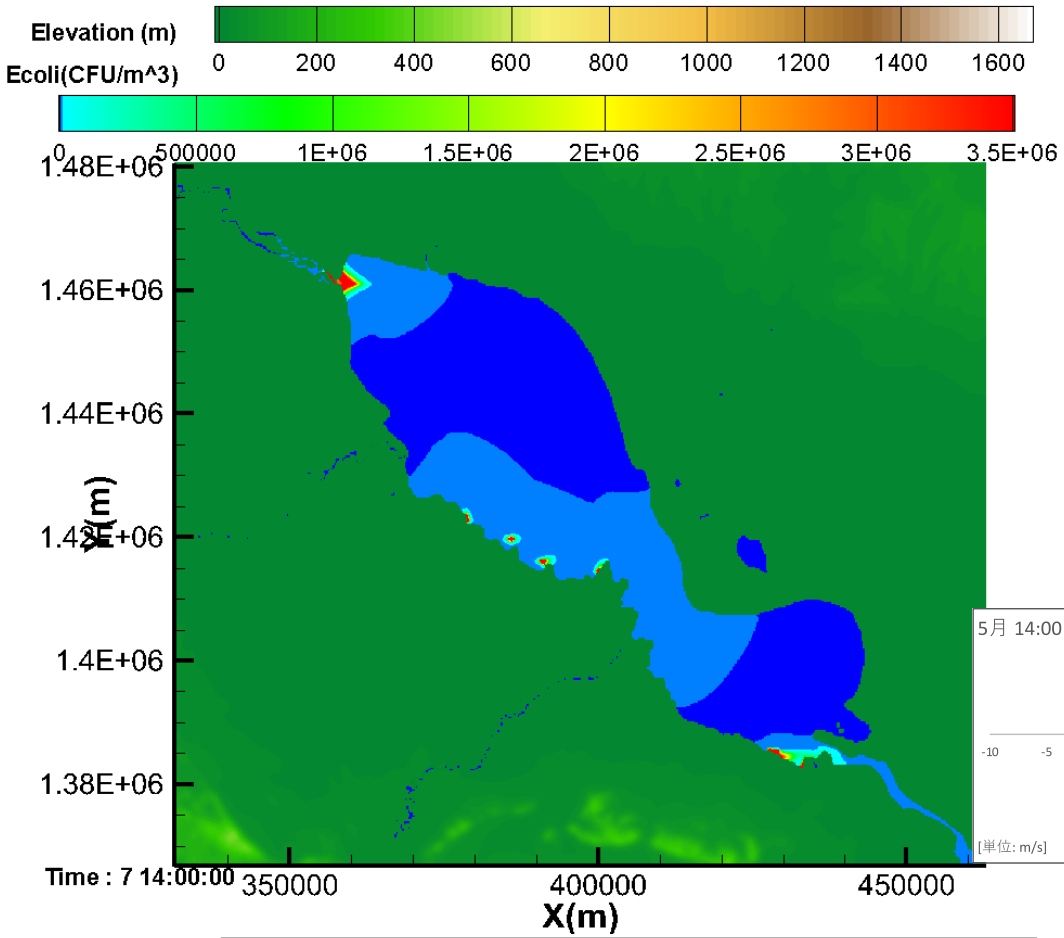


図4-153 5月 12:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



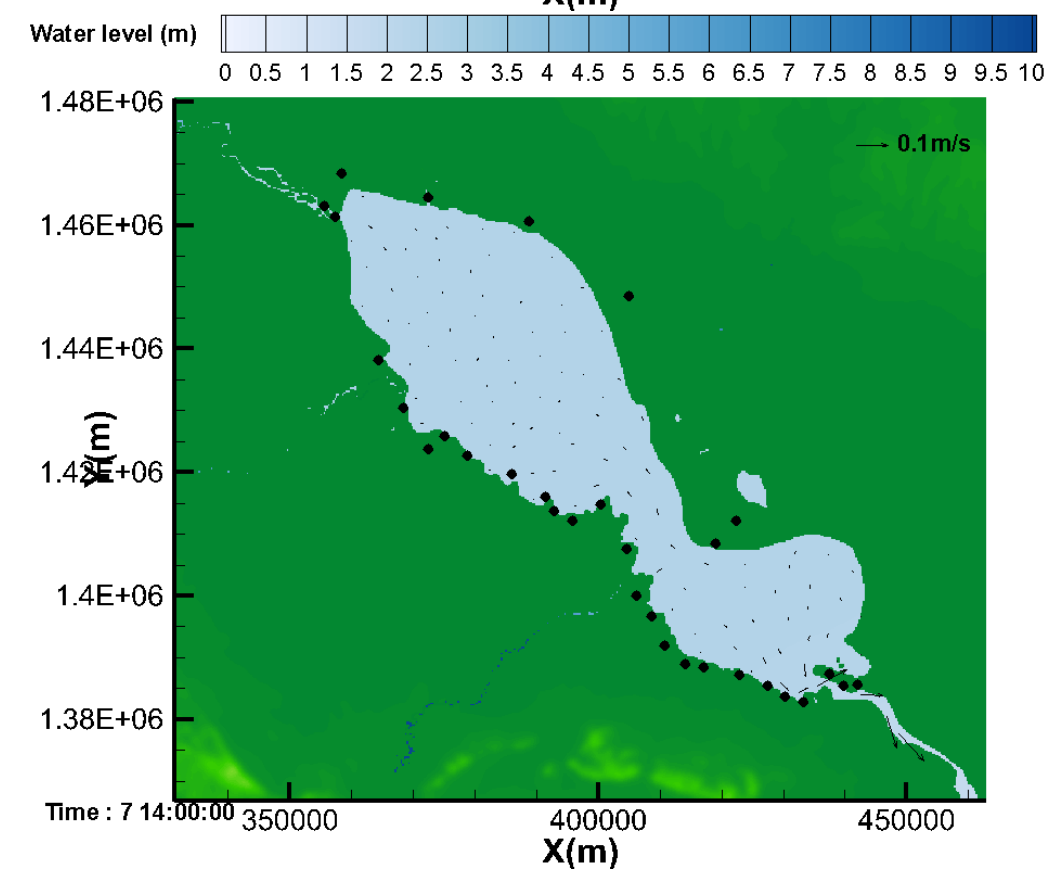
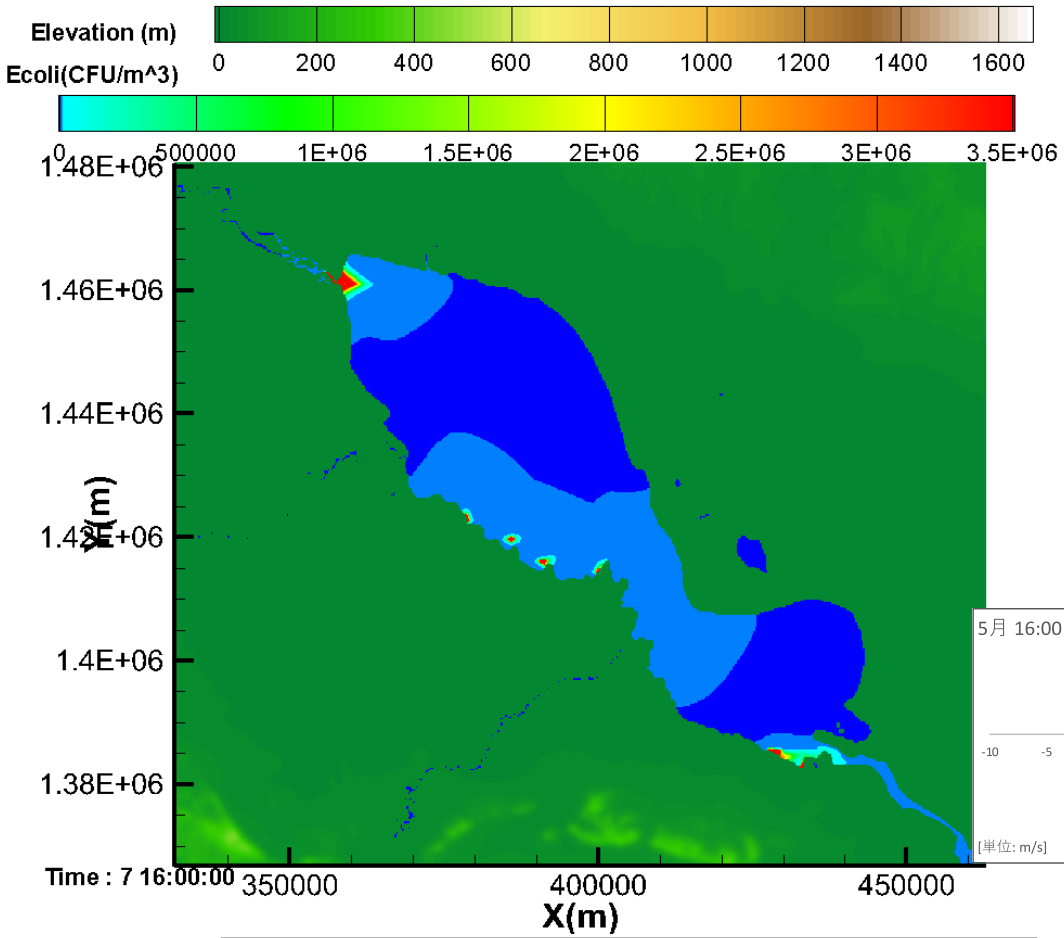


図4-154 5月 14:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



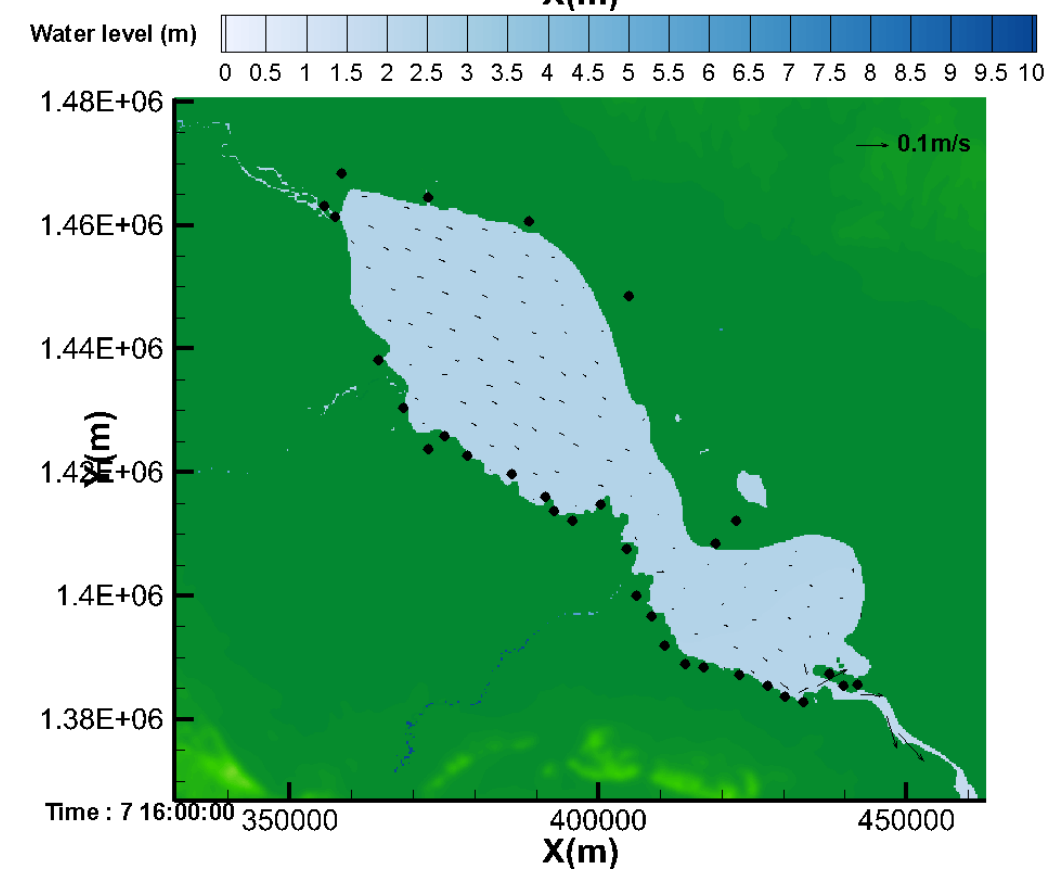


図4-155 5月 16:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

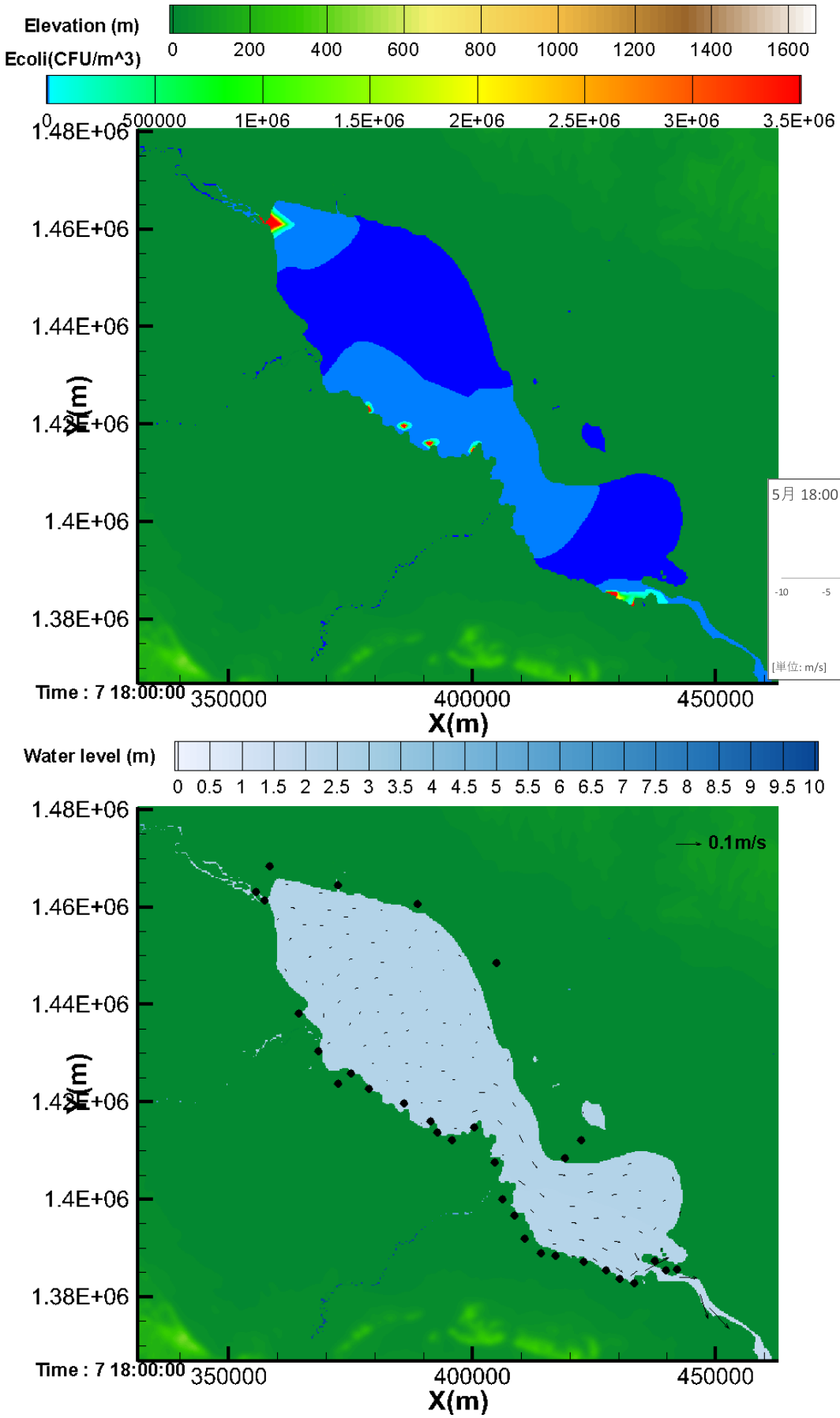


図4-156 5月 18:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

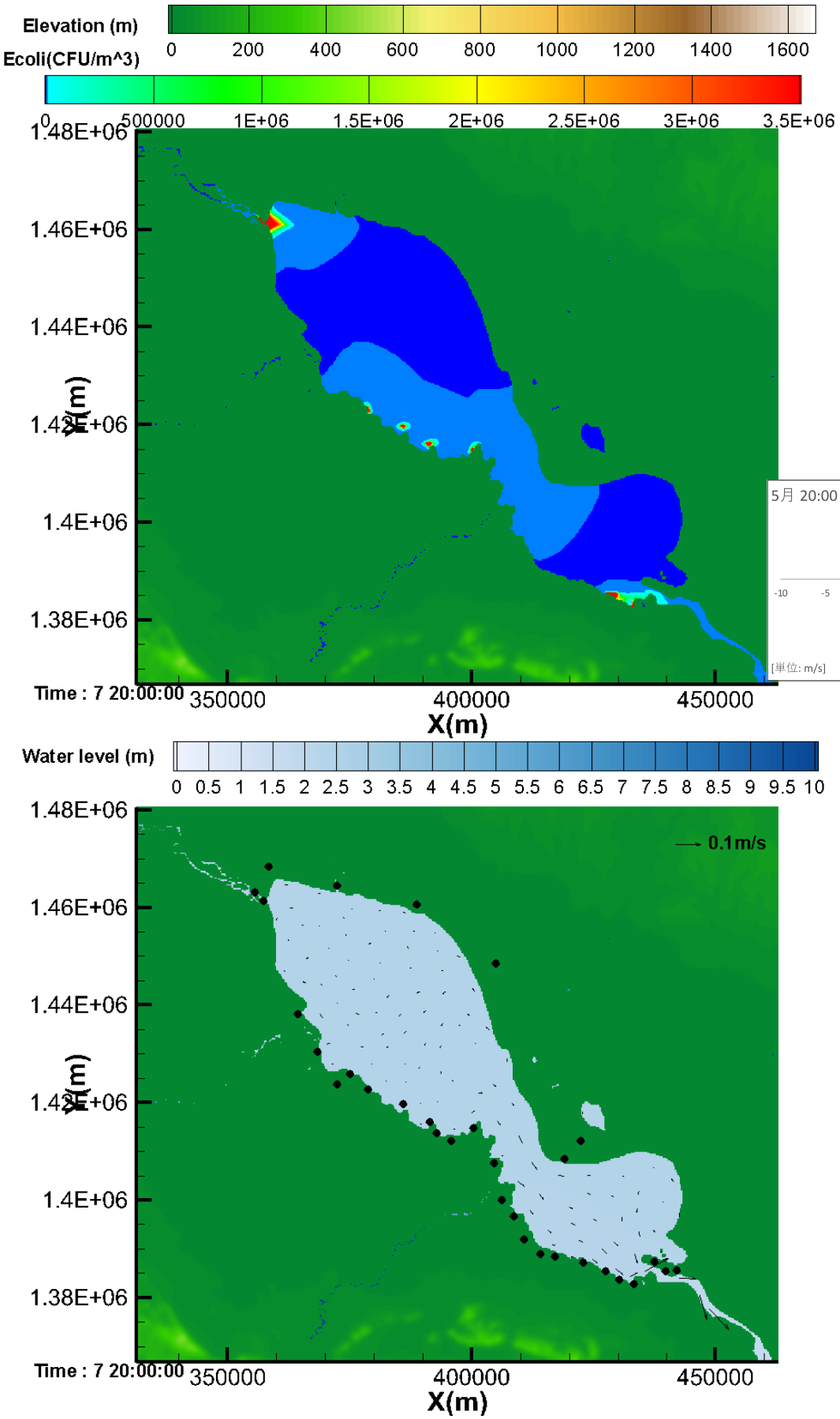


図4-157 5月 20:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

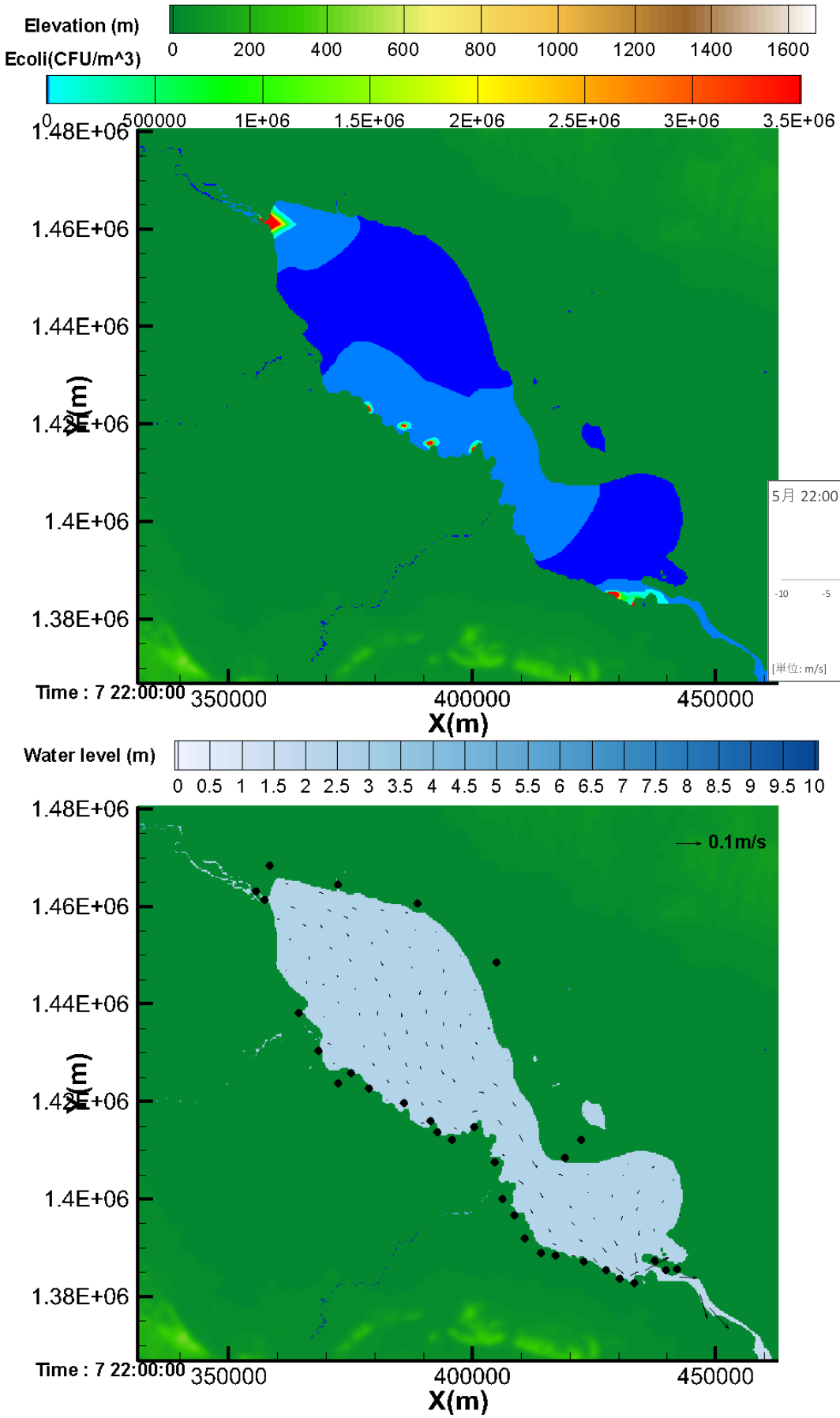


図4-158 5月 22:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

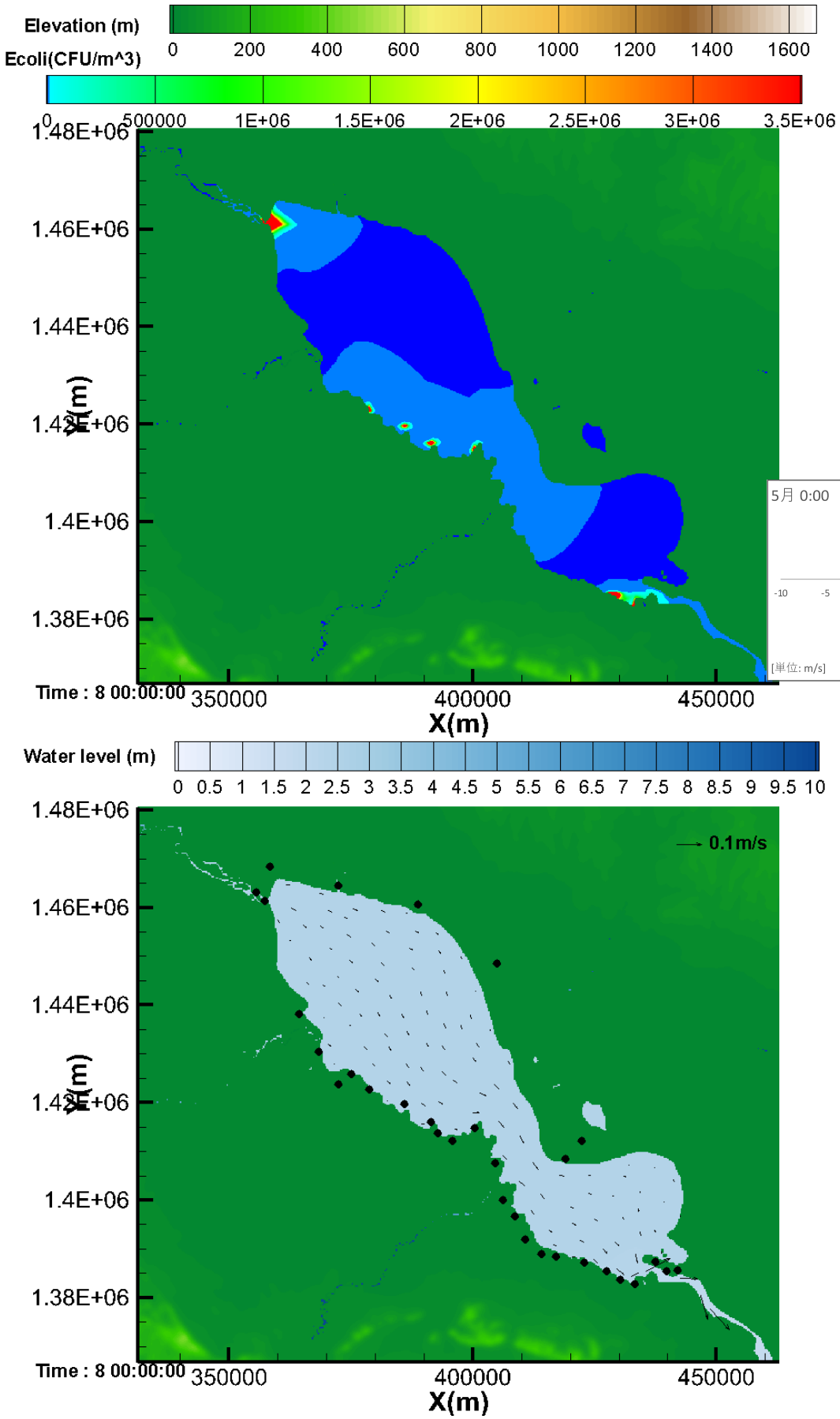
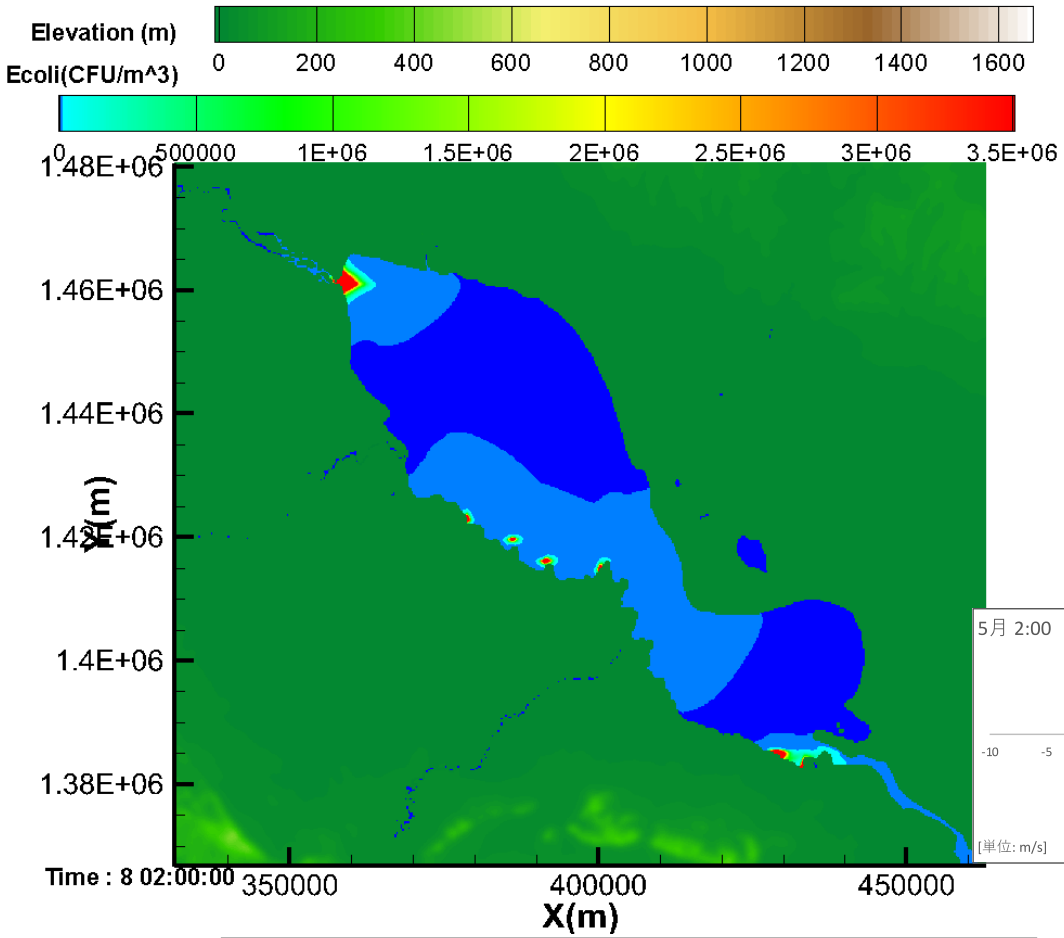


図4-159 5月 0:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



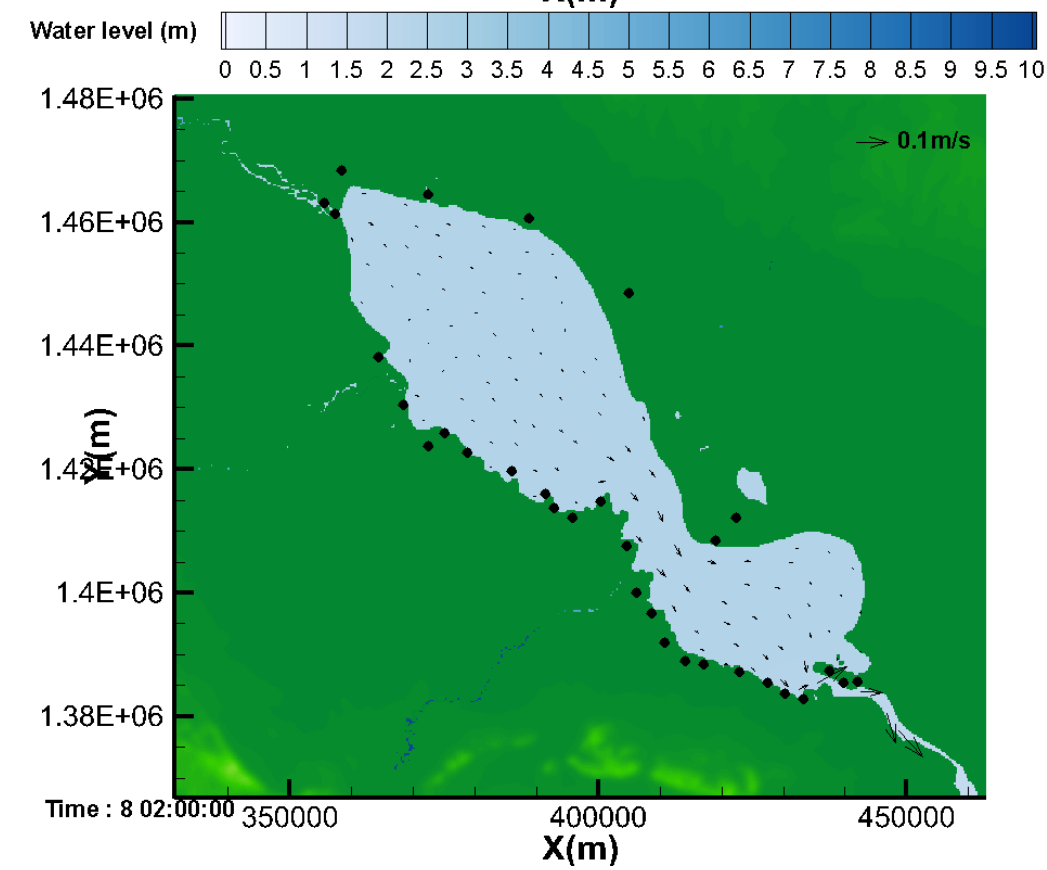
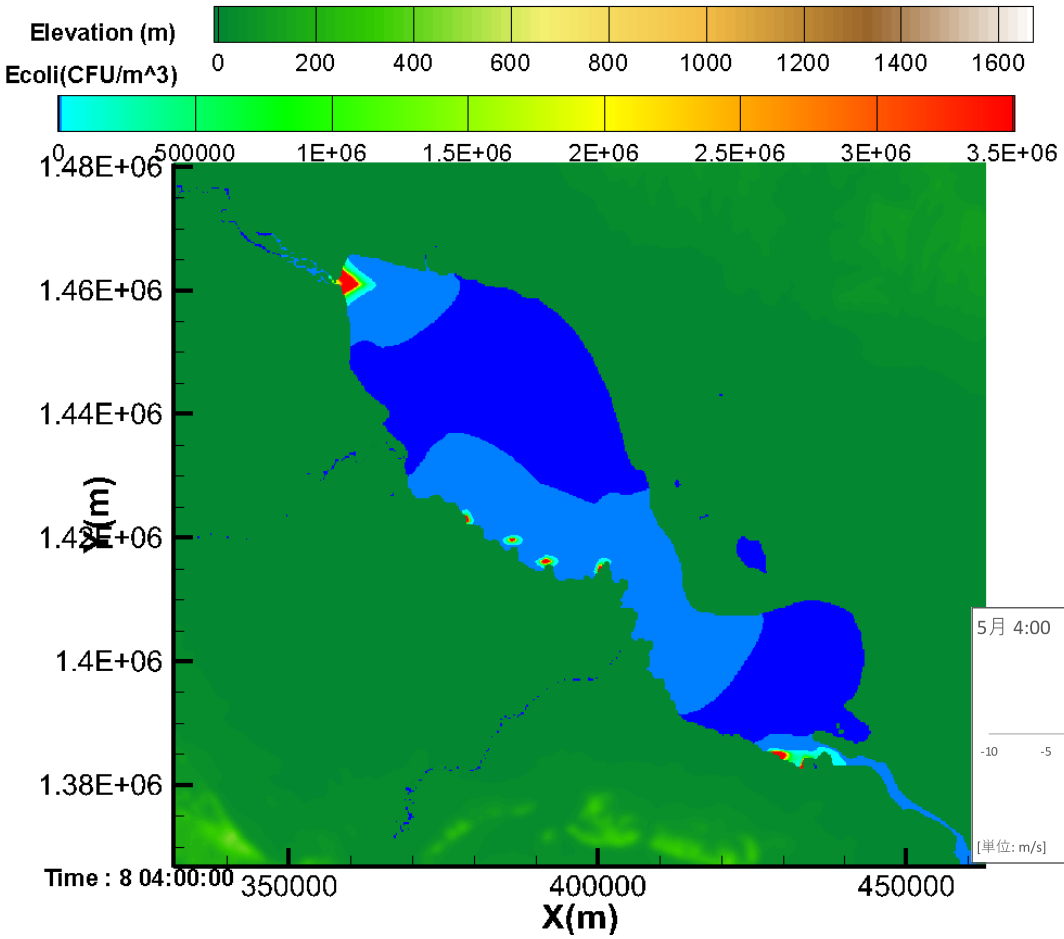


図4-160 5月 2:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



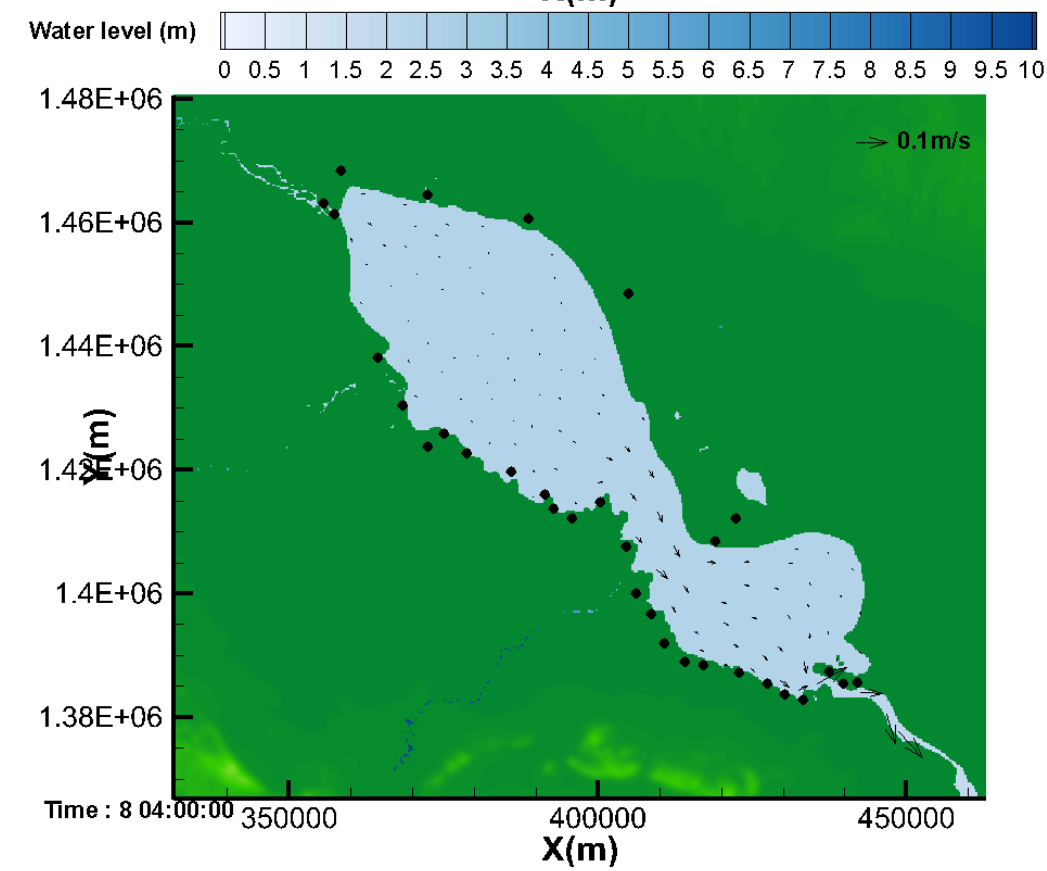
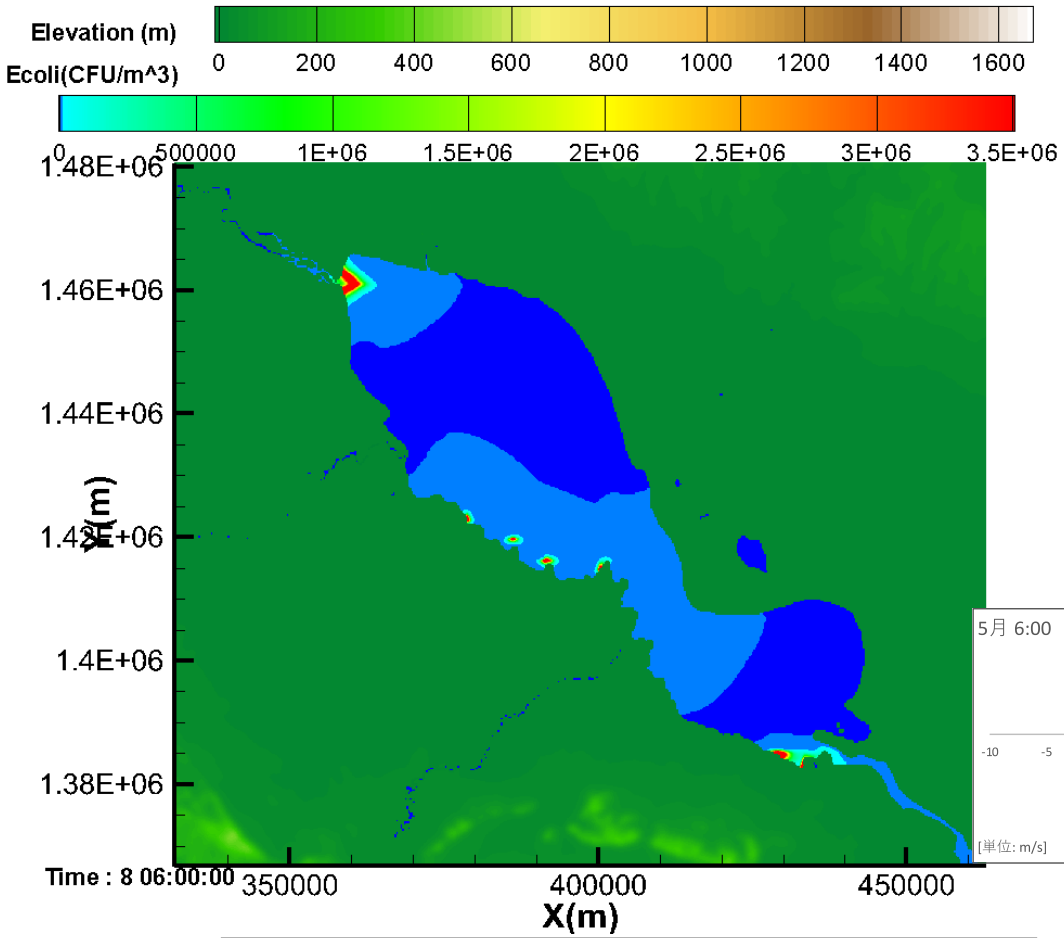


図4-161 5月 4:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



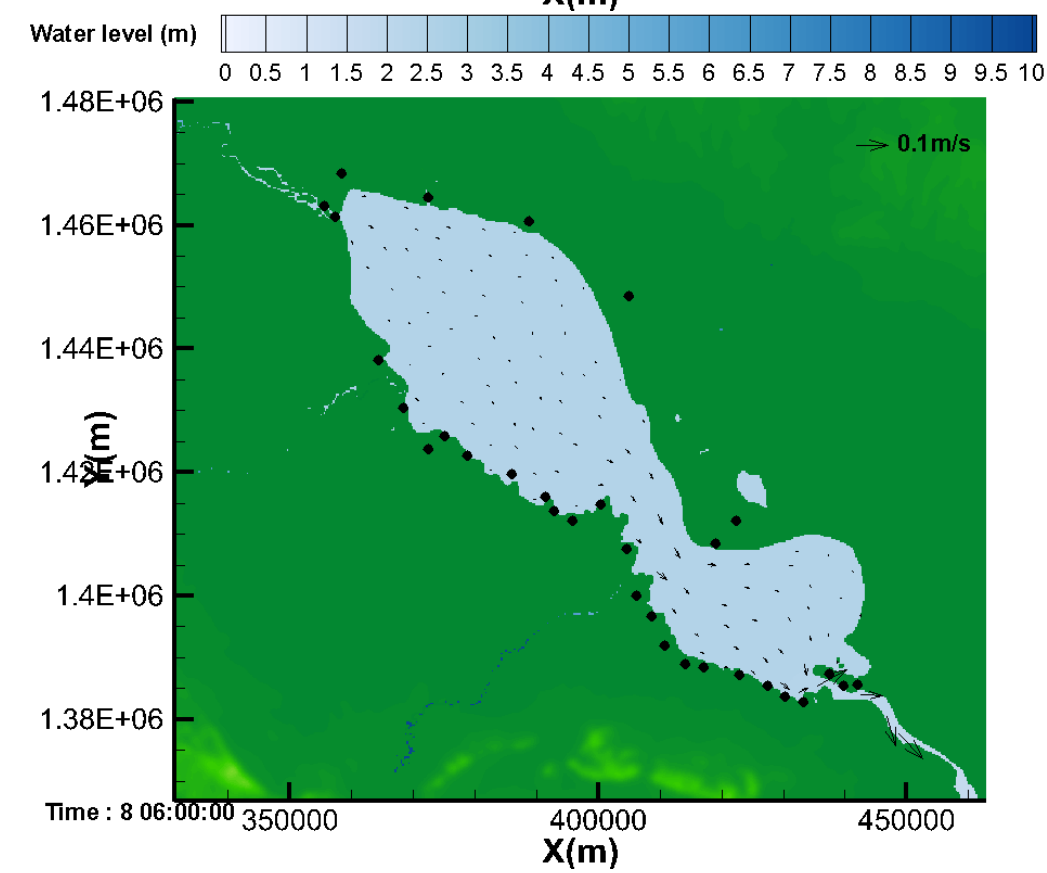


図4-162 5月 6:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

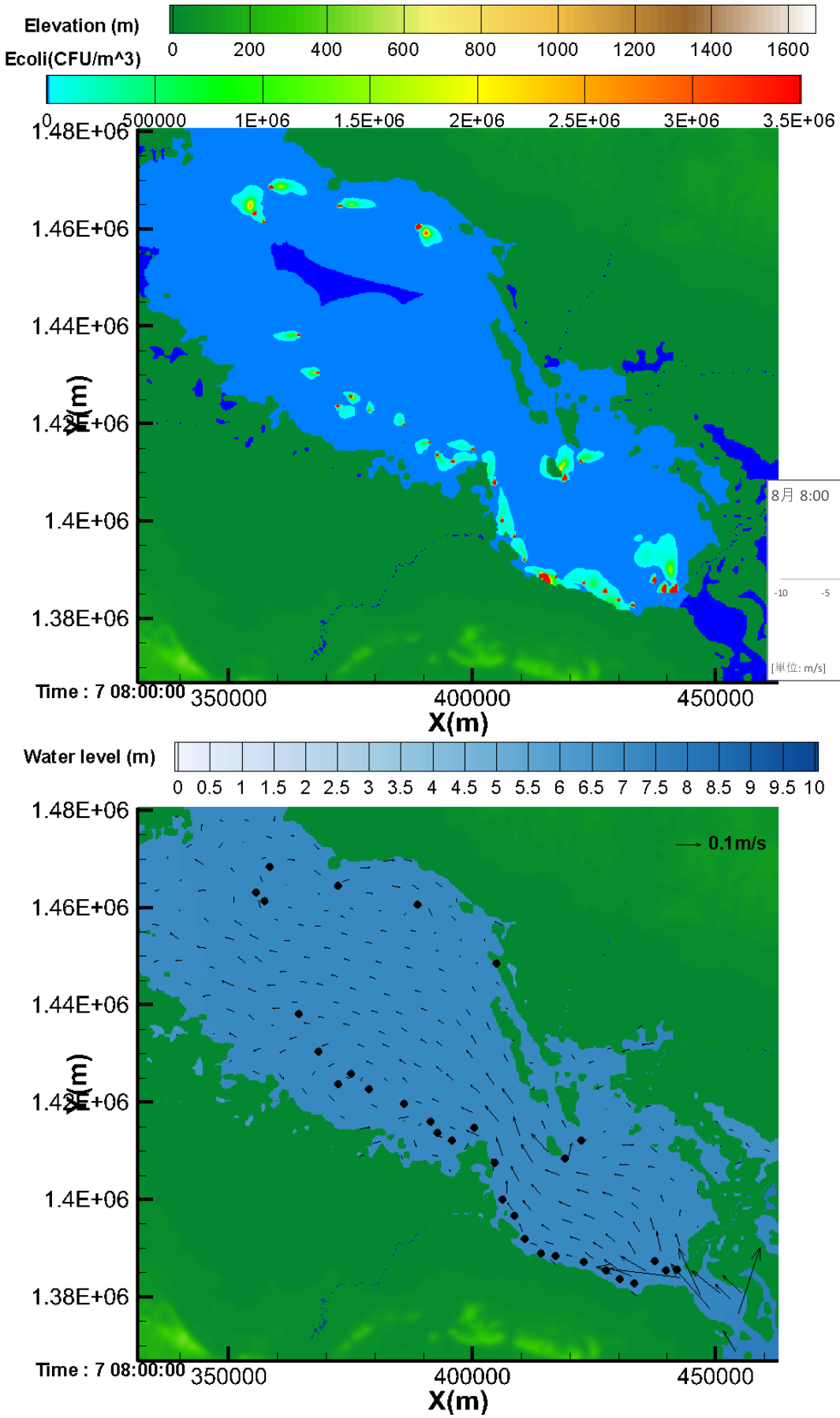
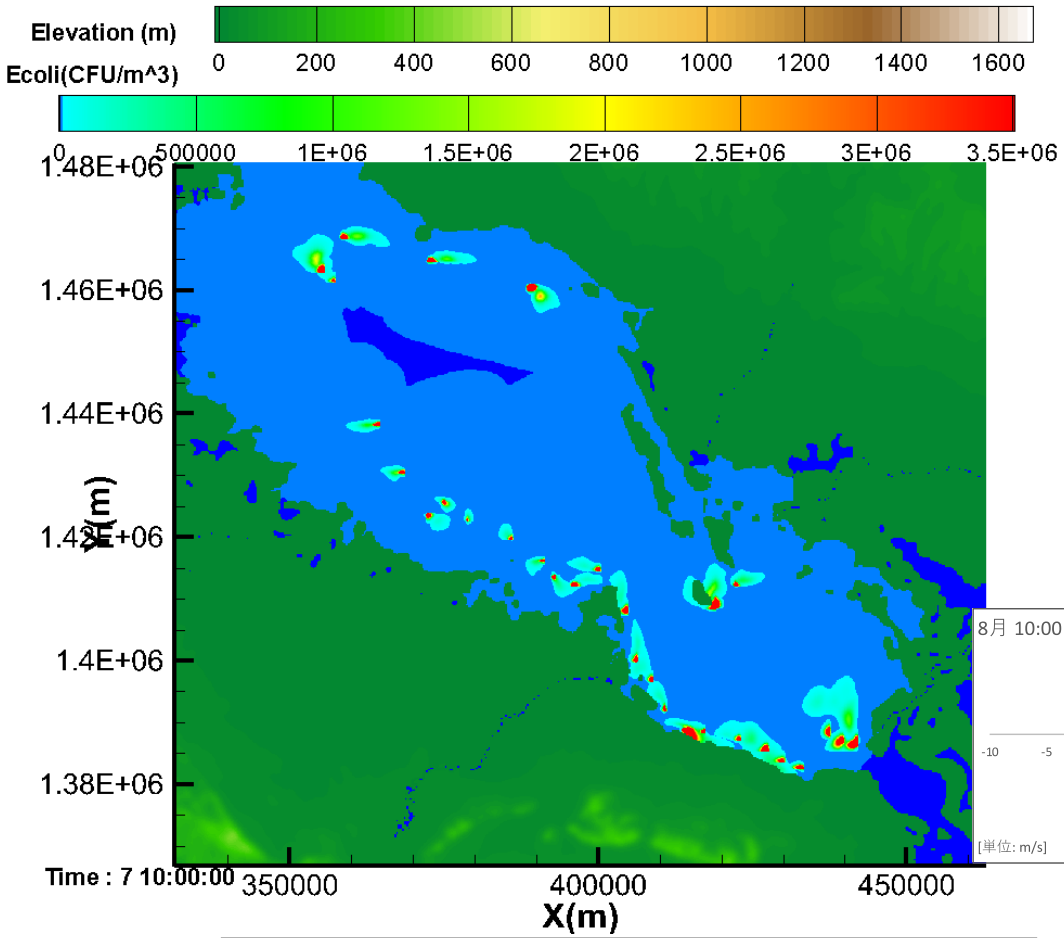


図4-163 8月 8:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



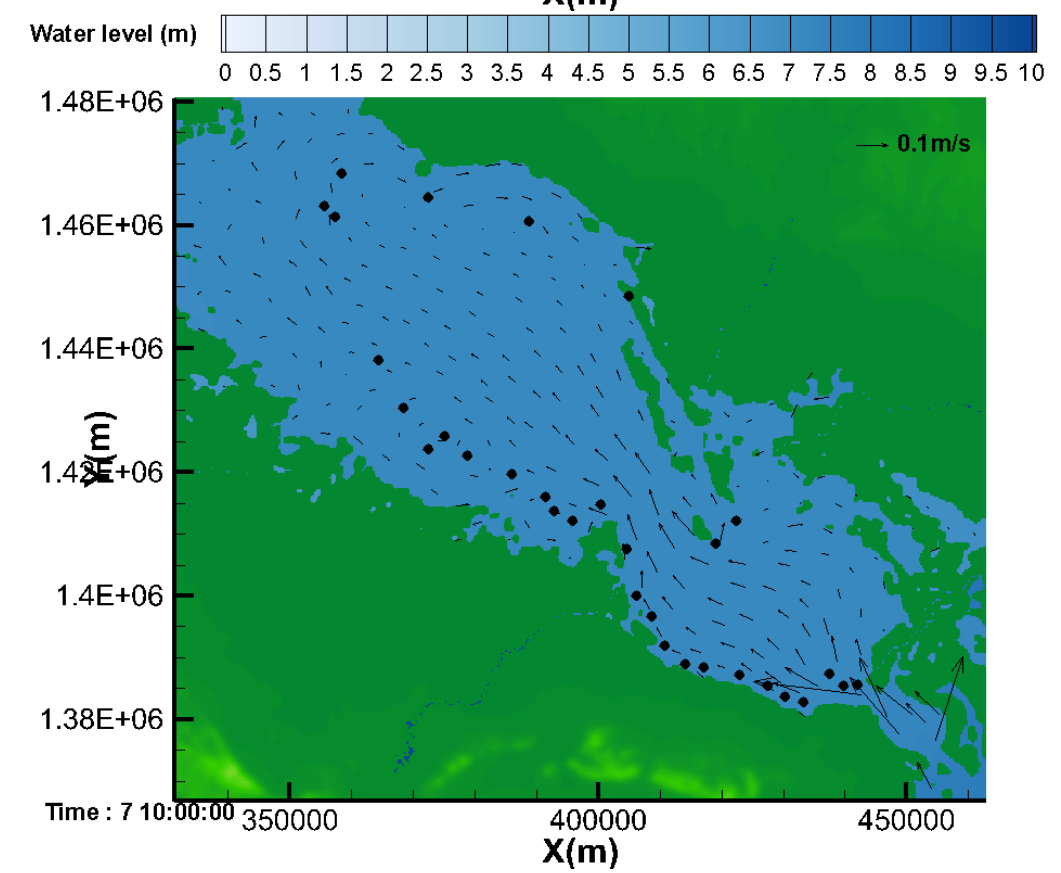


図4-164 8月 10:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

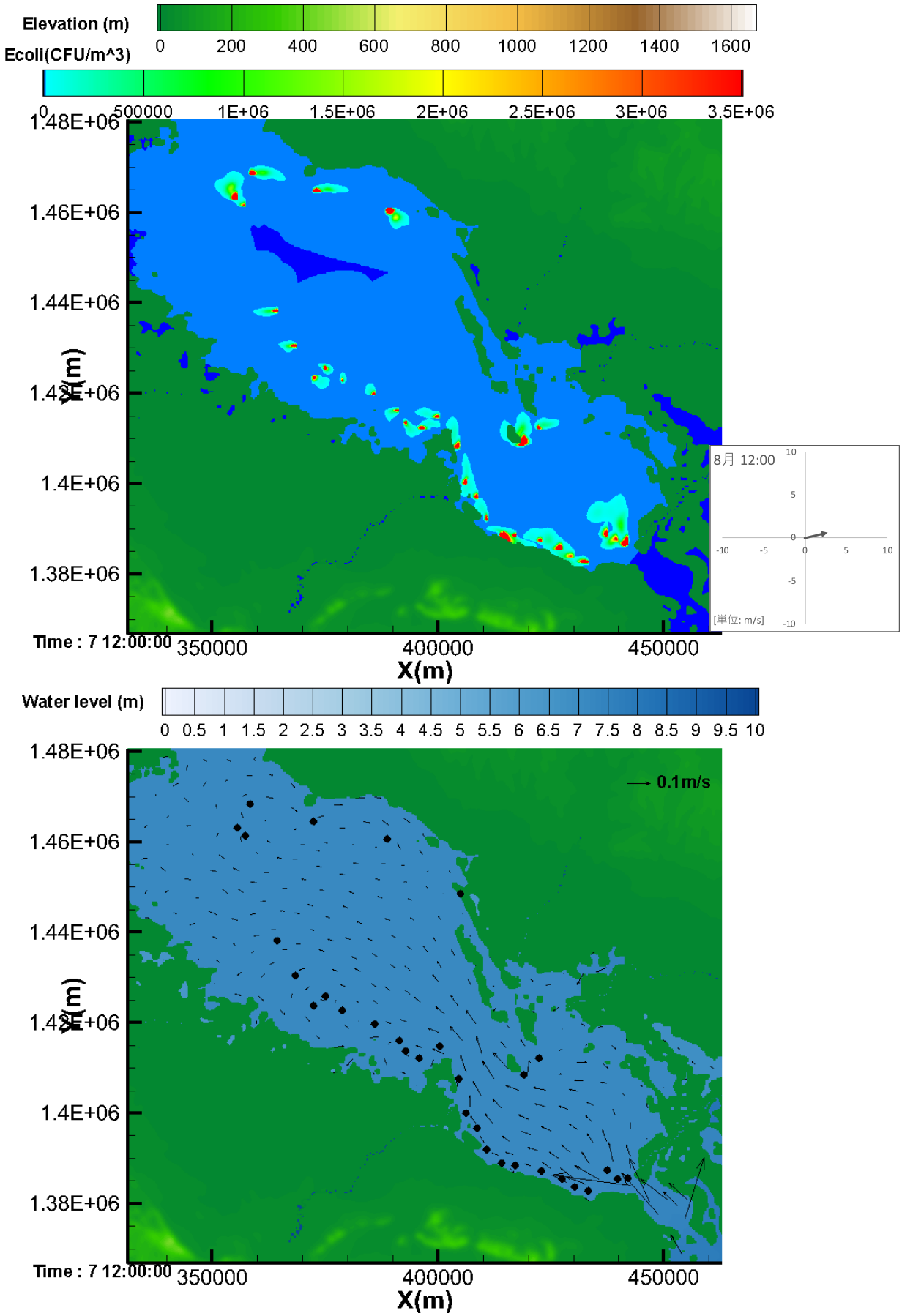
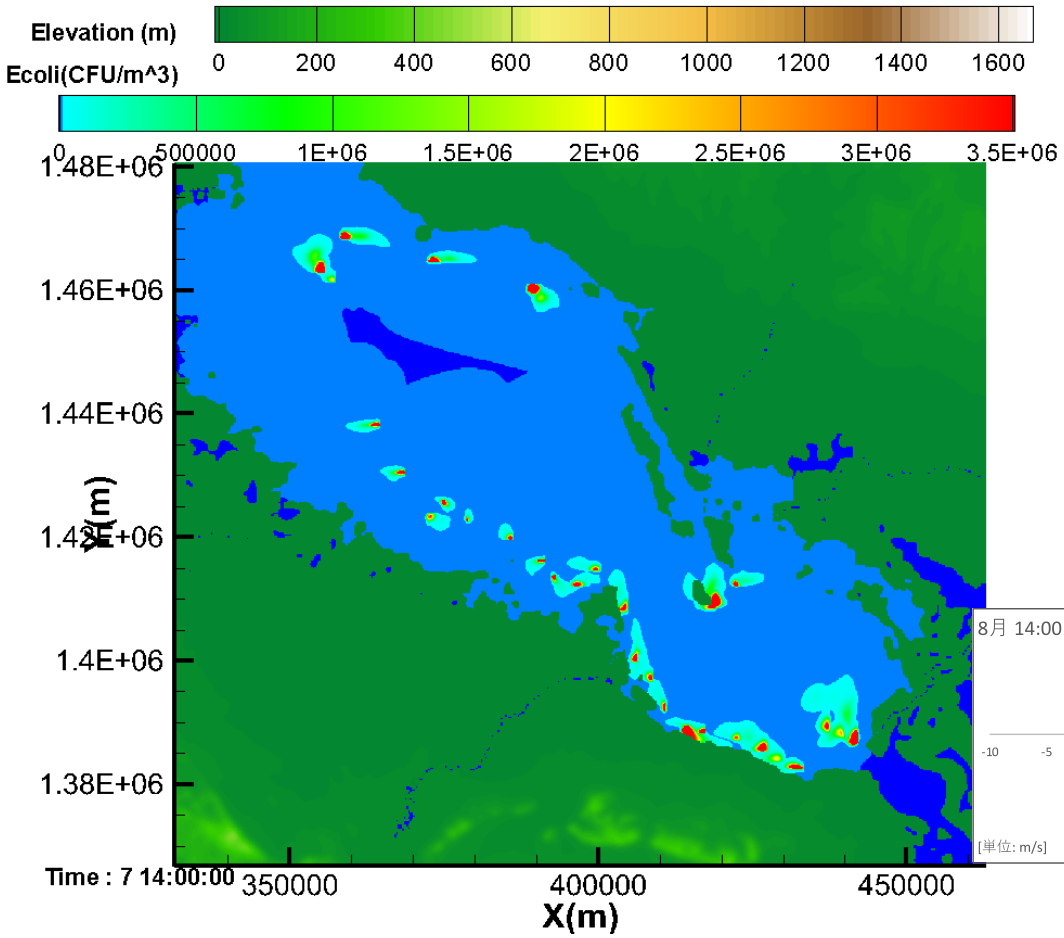


図4-165 8月 12:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



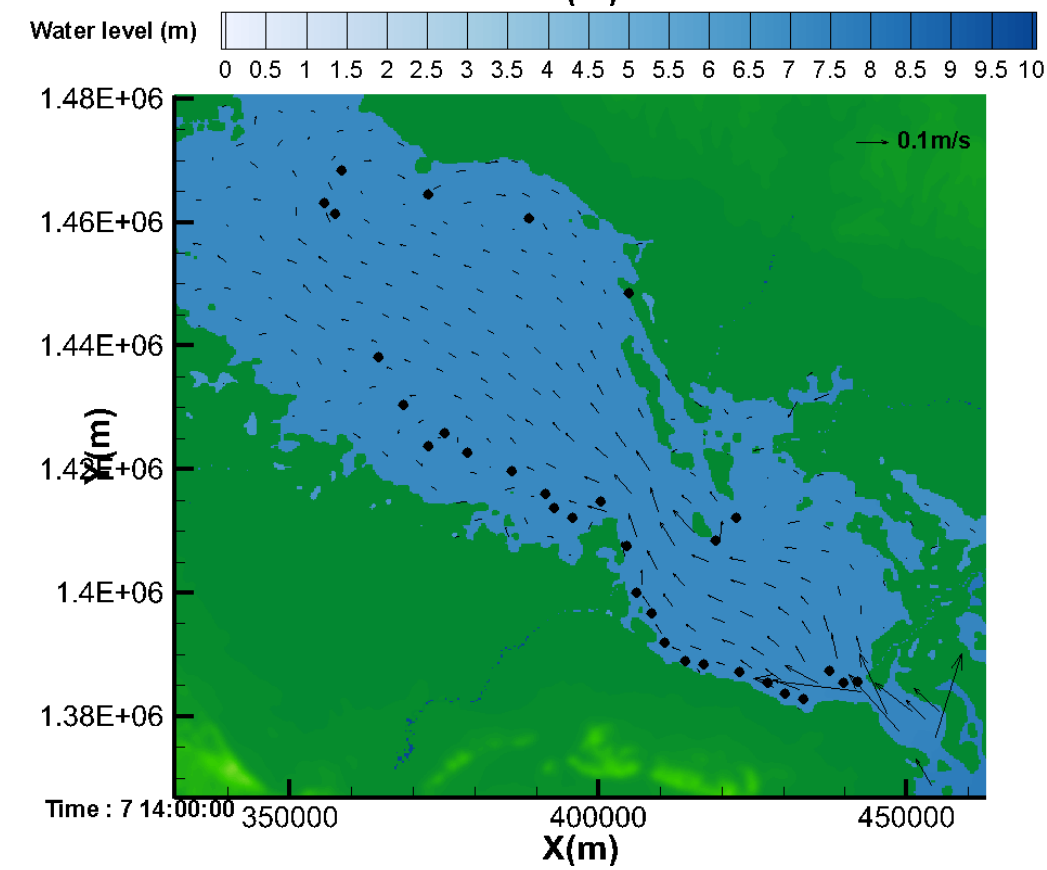
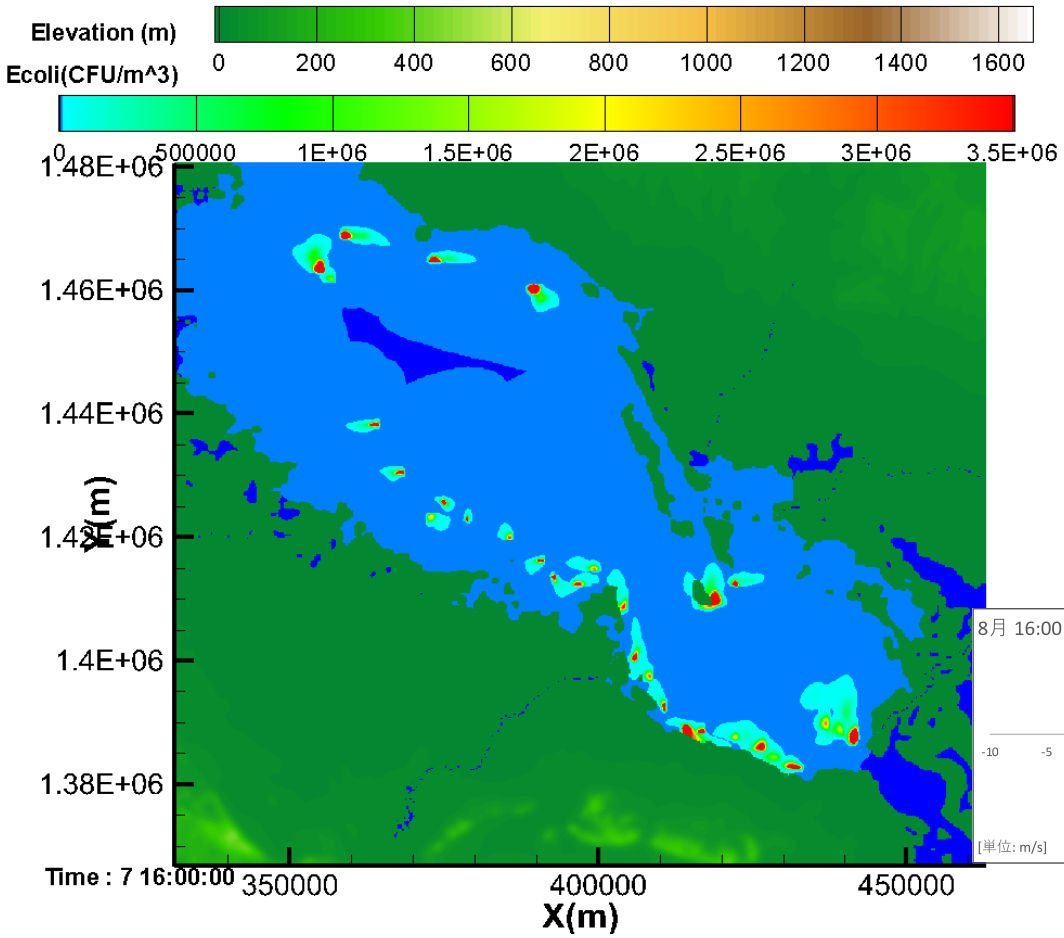


図4-166 8月 14:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



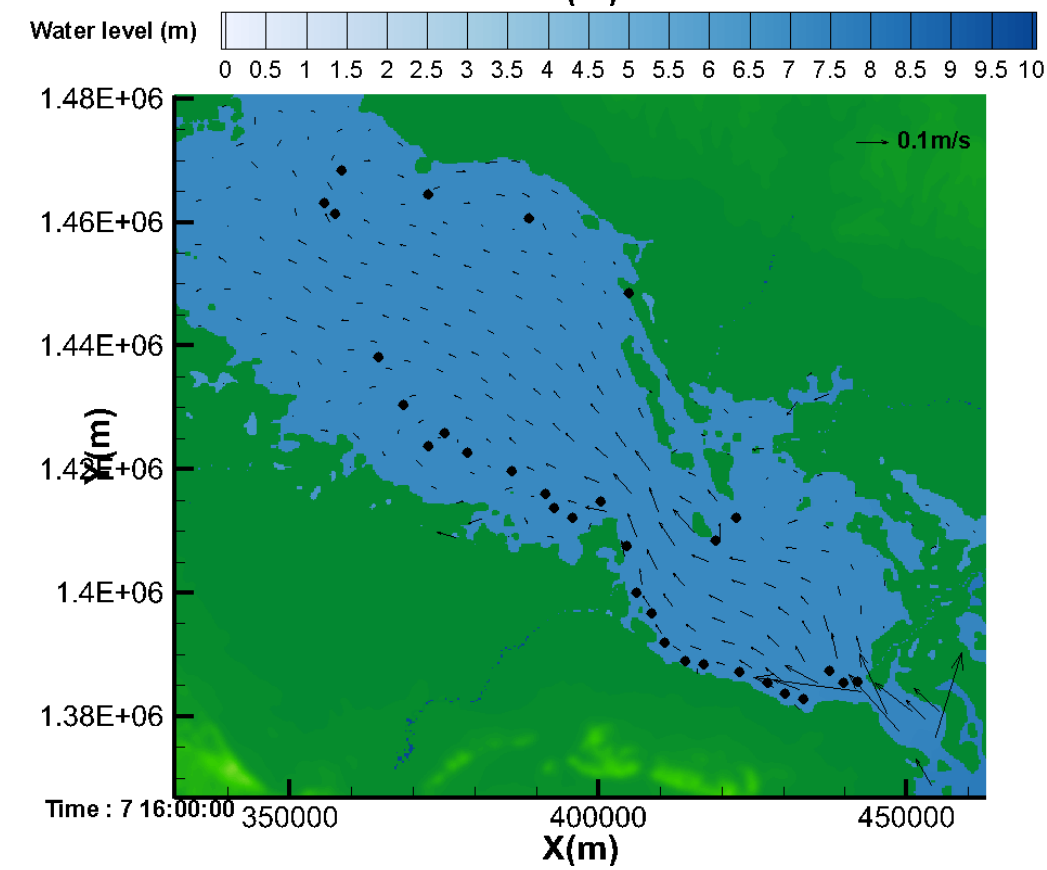
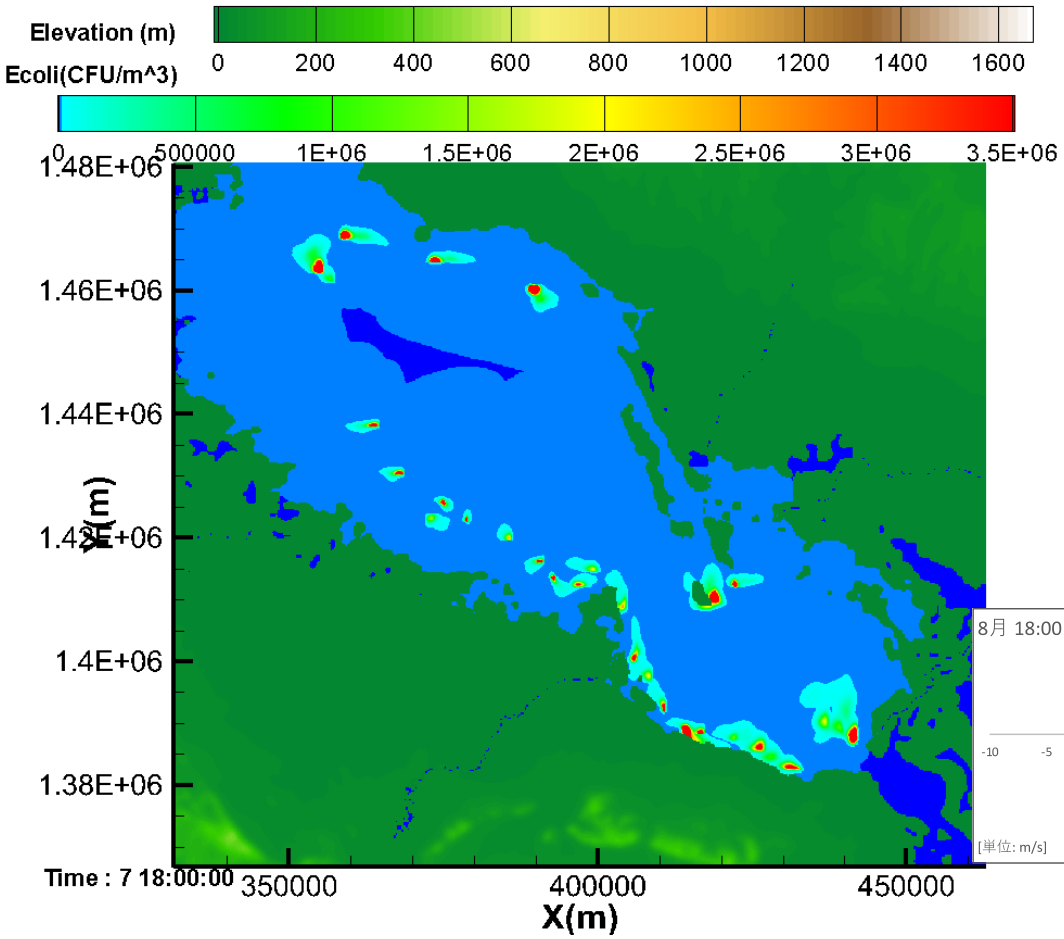


図4-167 8月 16:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



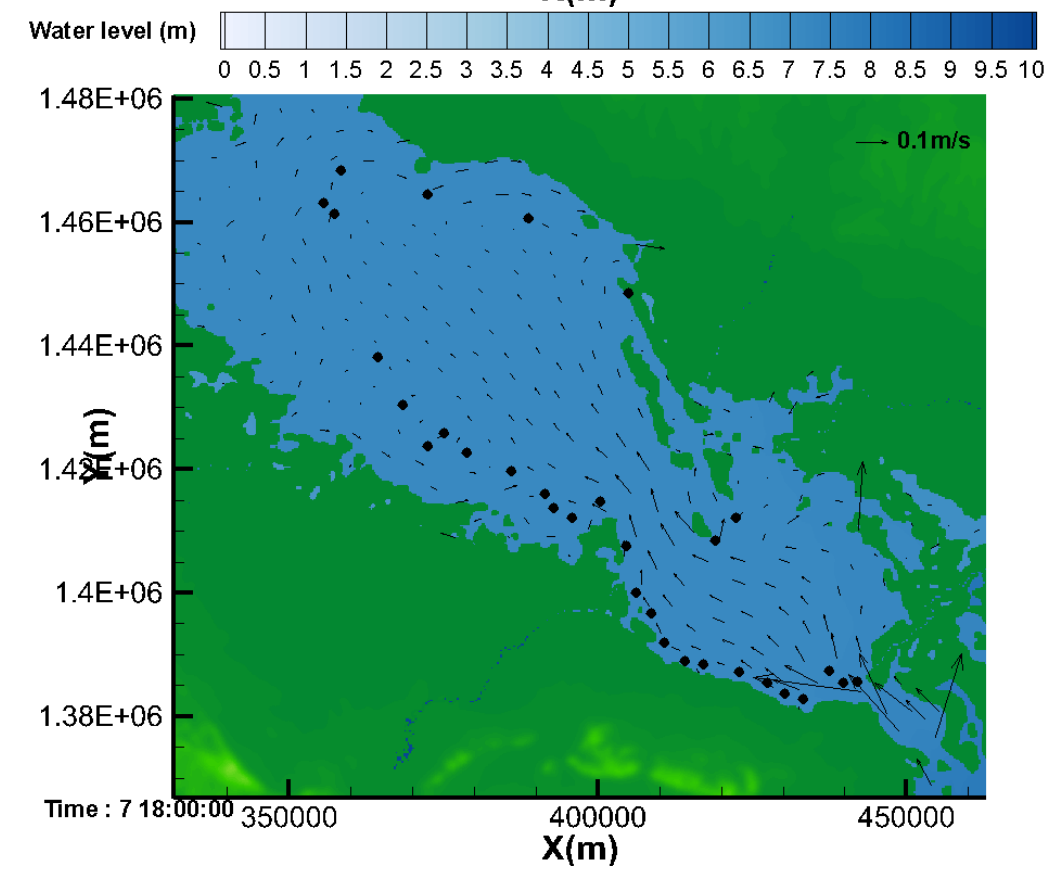
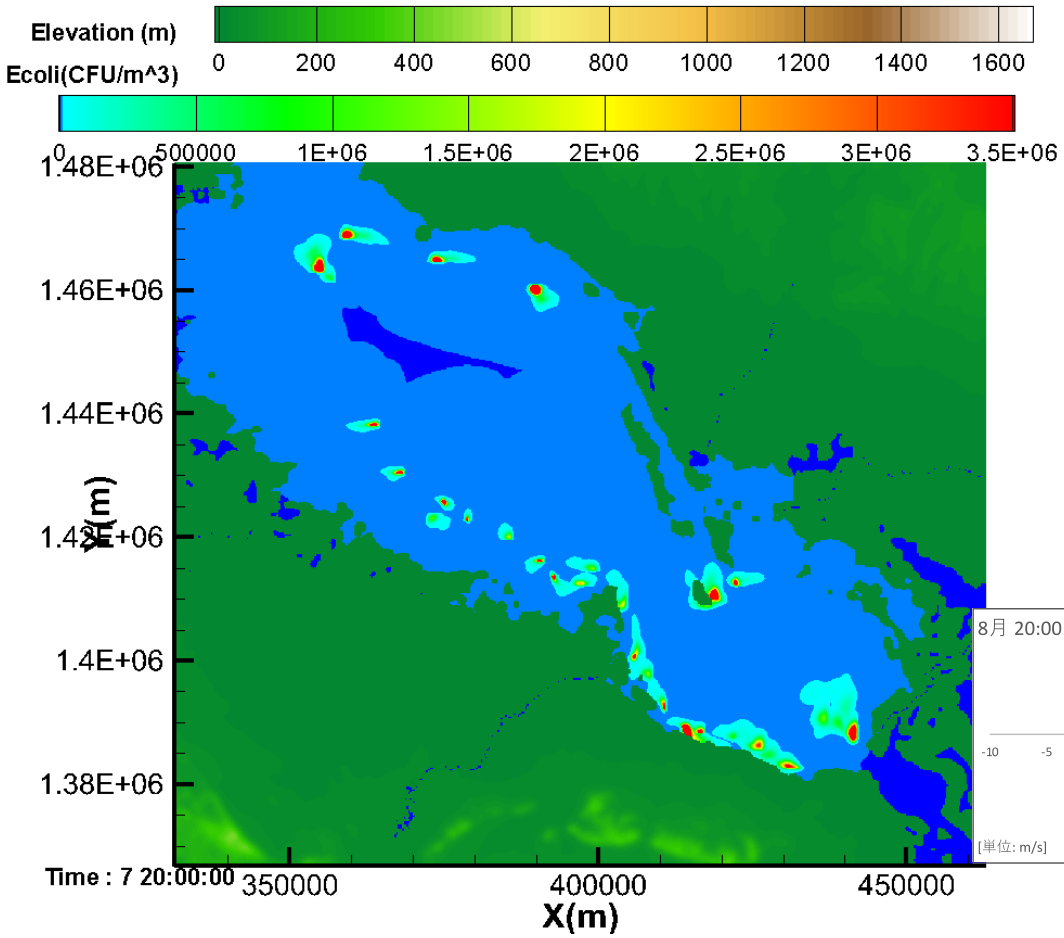


図4-168 8月 18:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



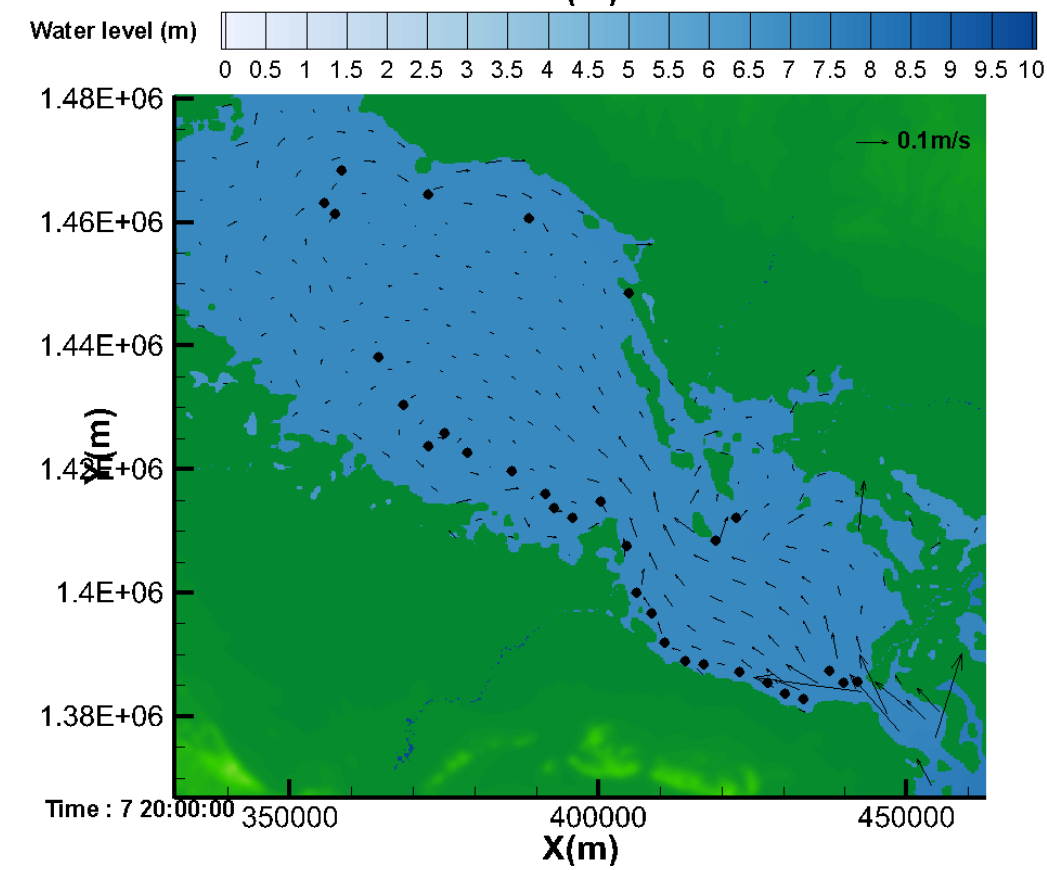
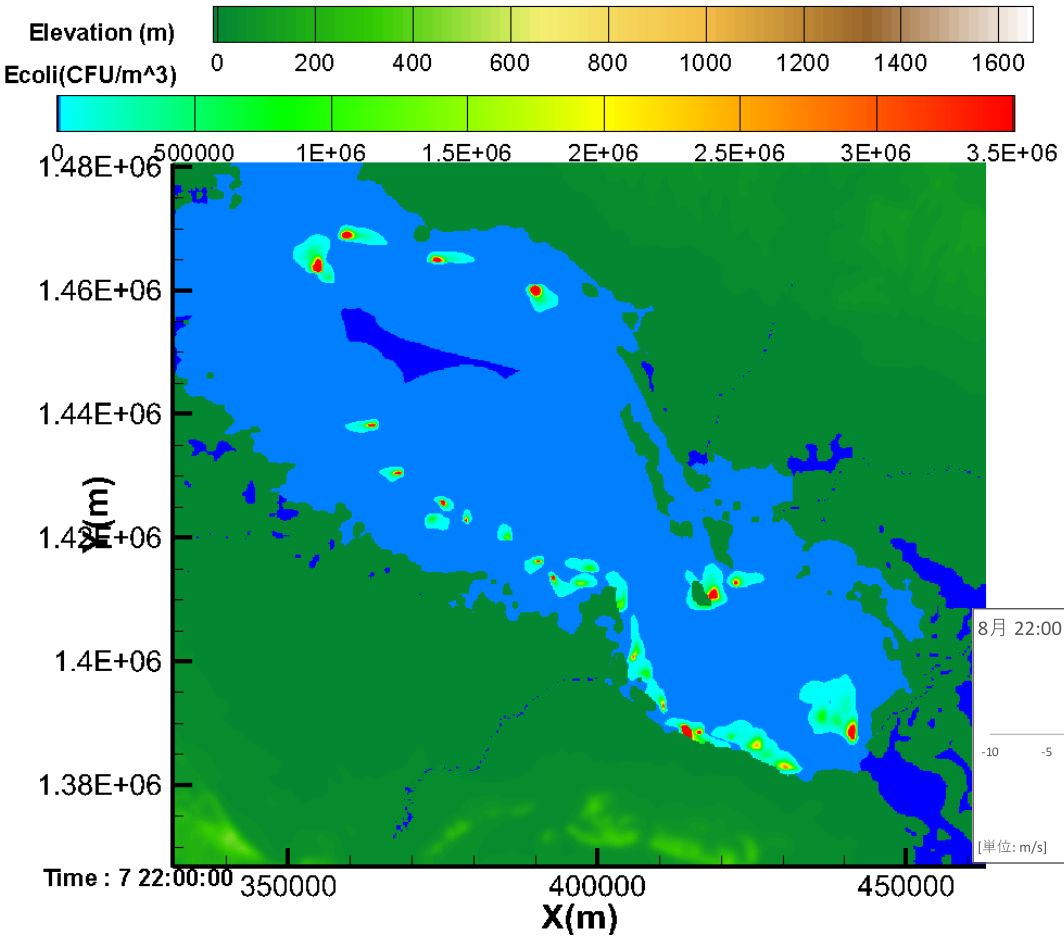


図4-169 8月 20:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



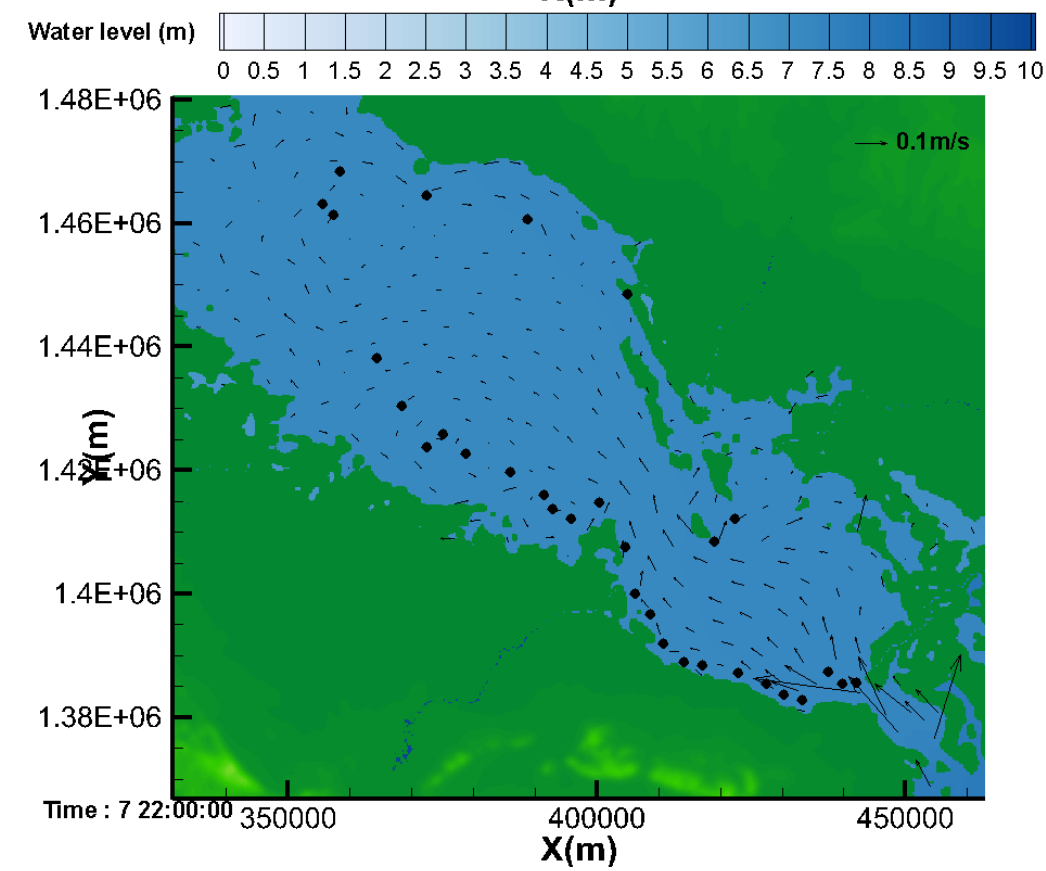
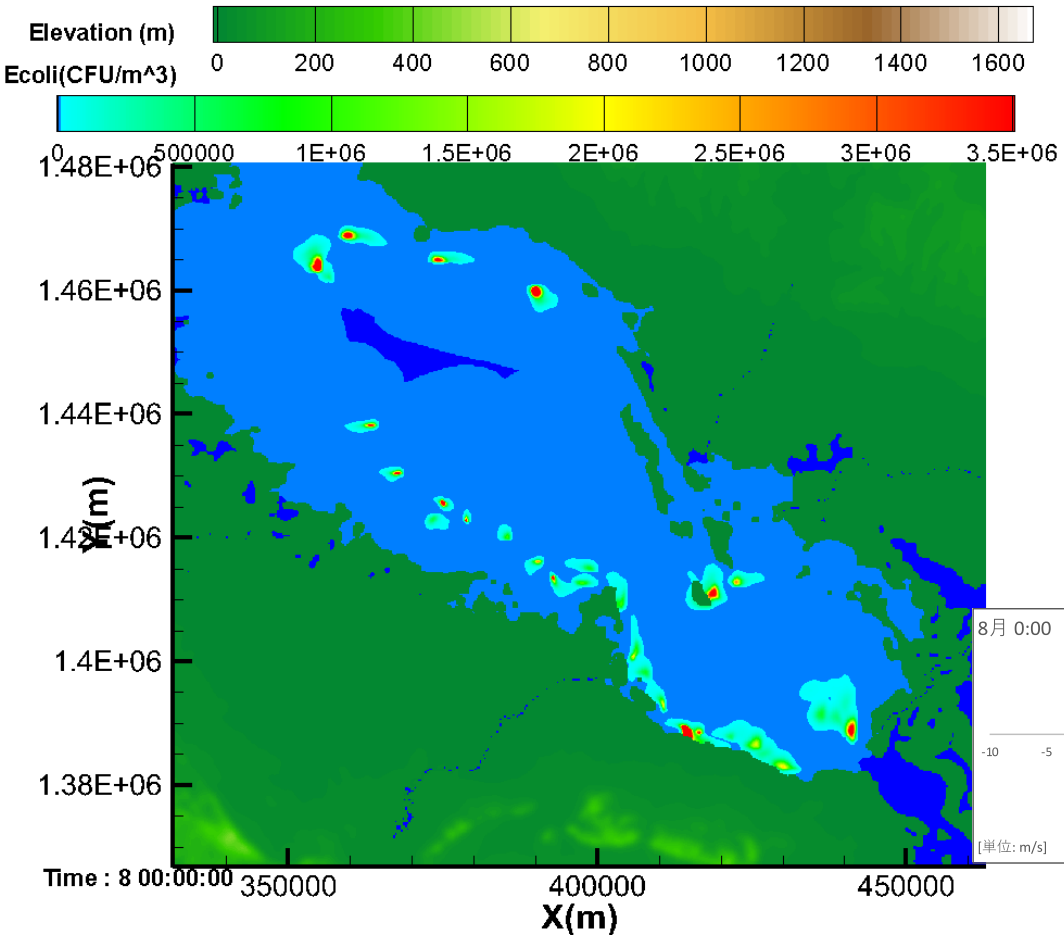


図4-170 8月 22:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



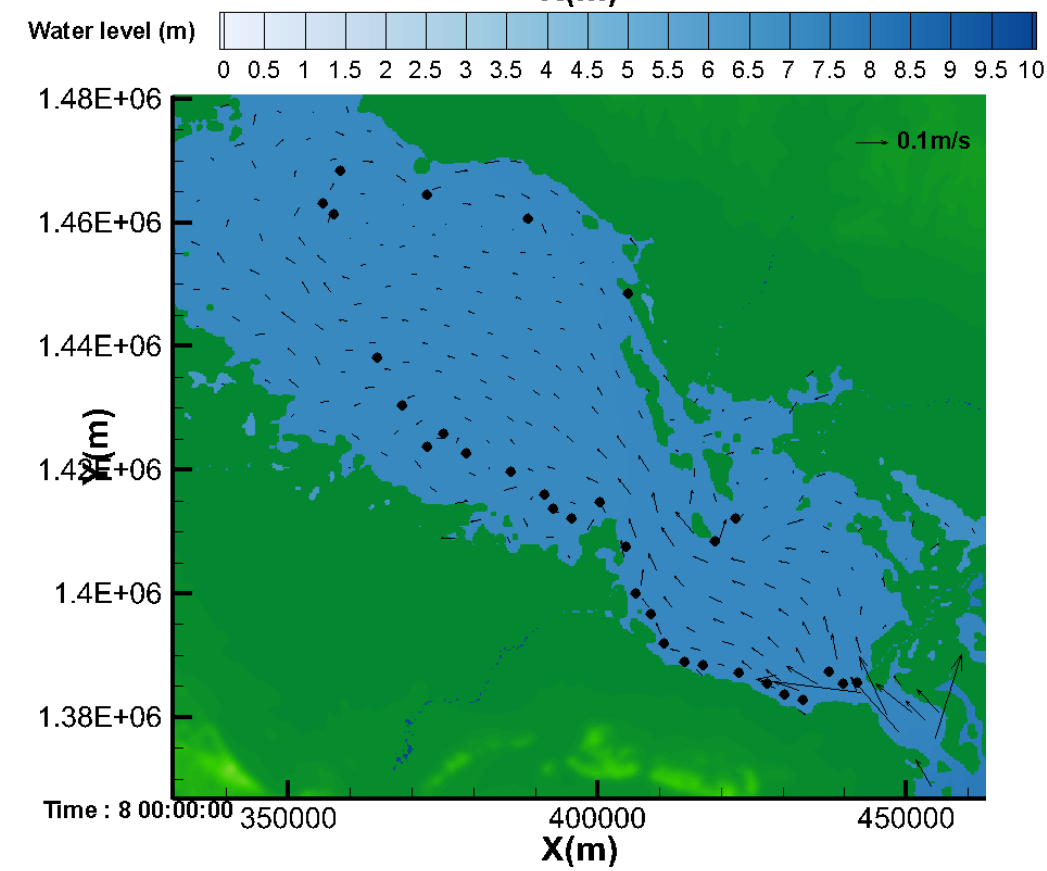
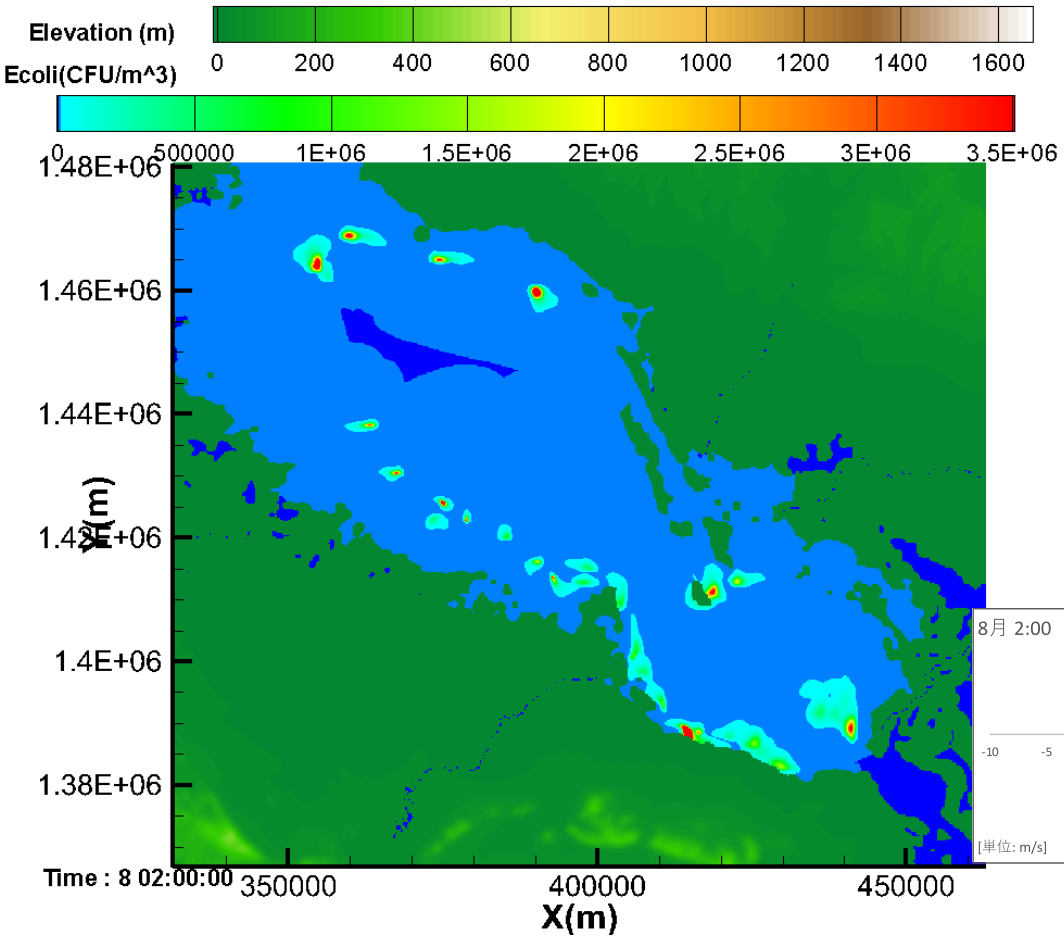


図4-171 8月 0:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



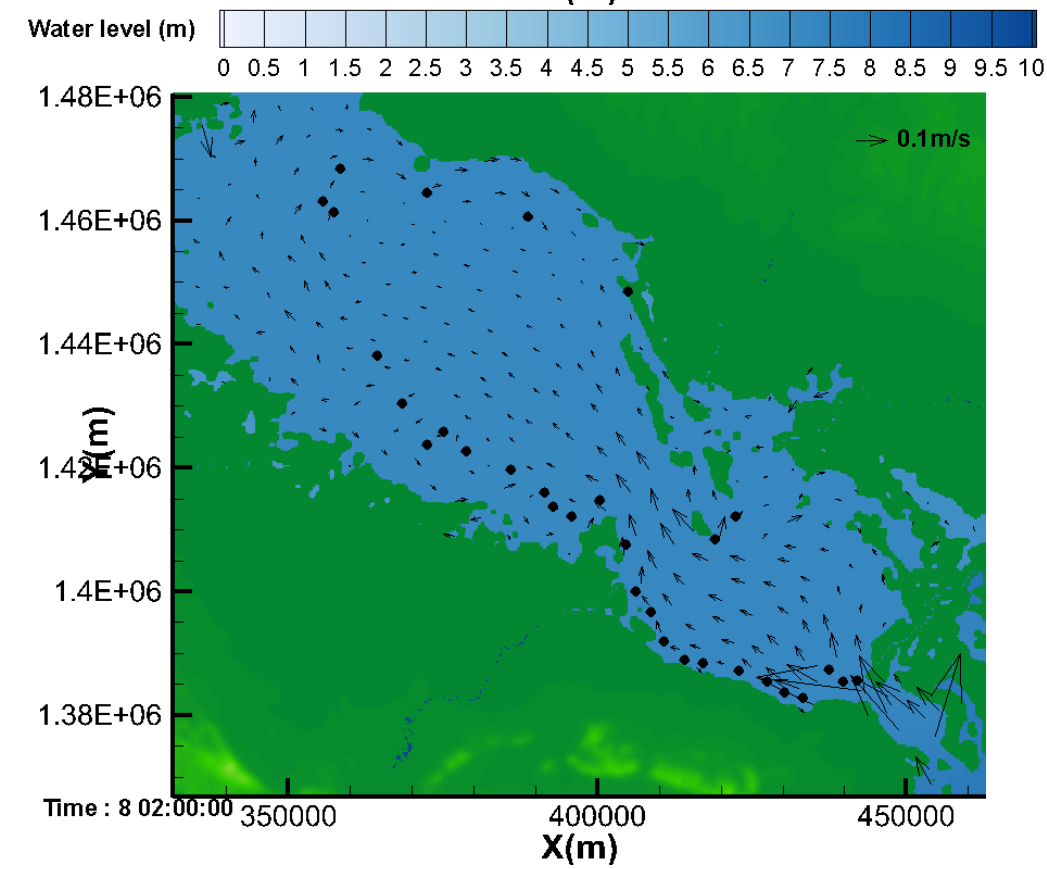
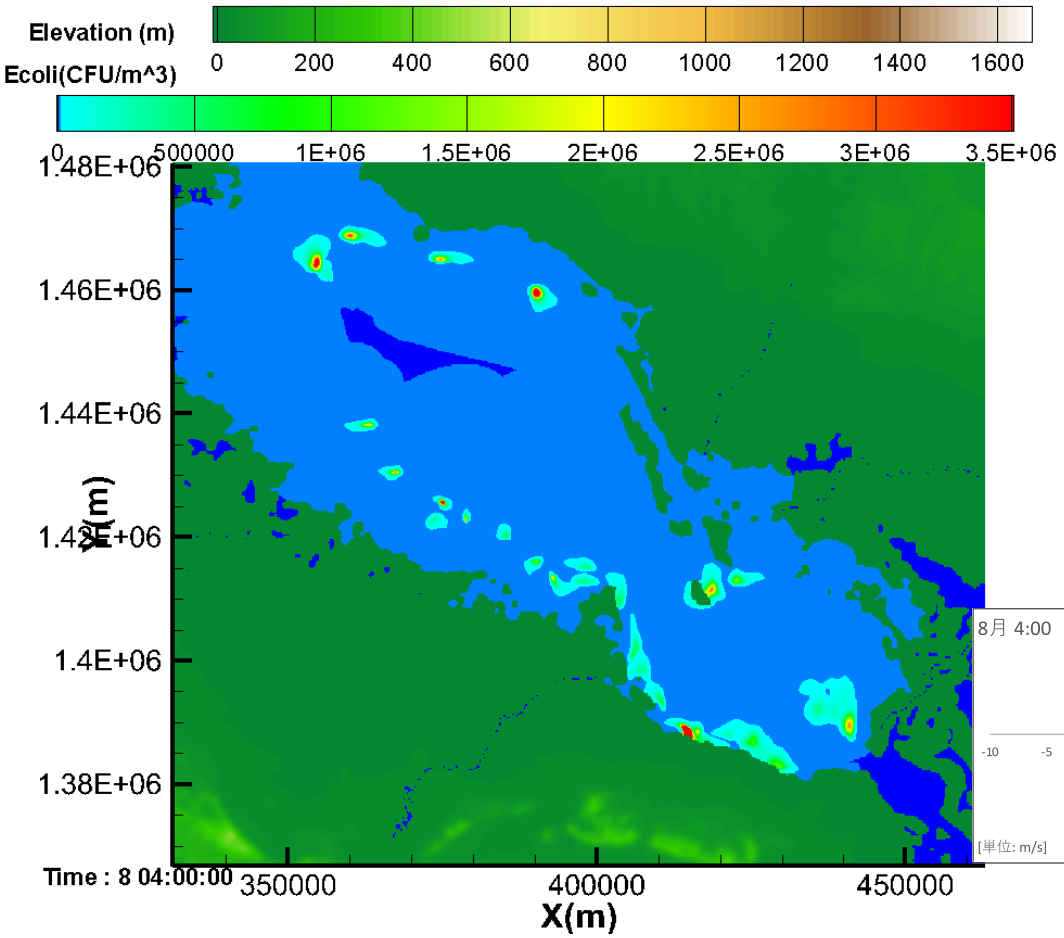


図4-172 8月 2:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



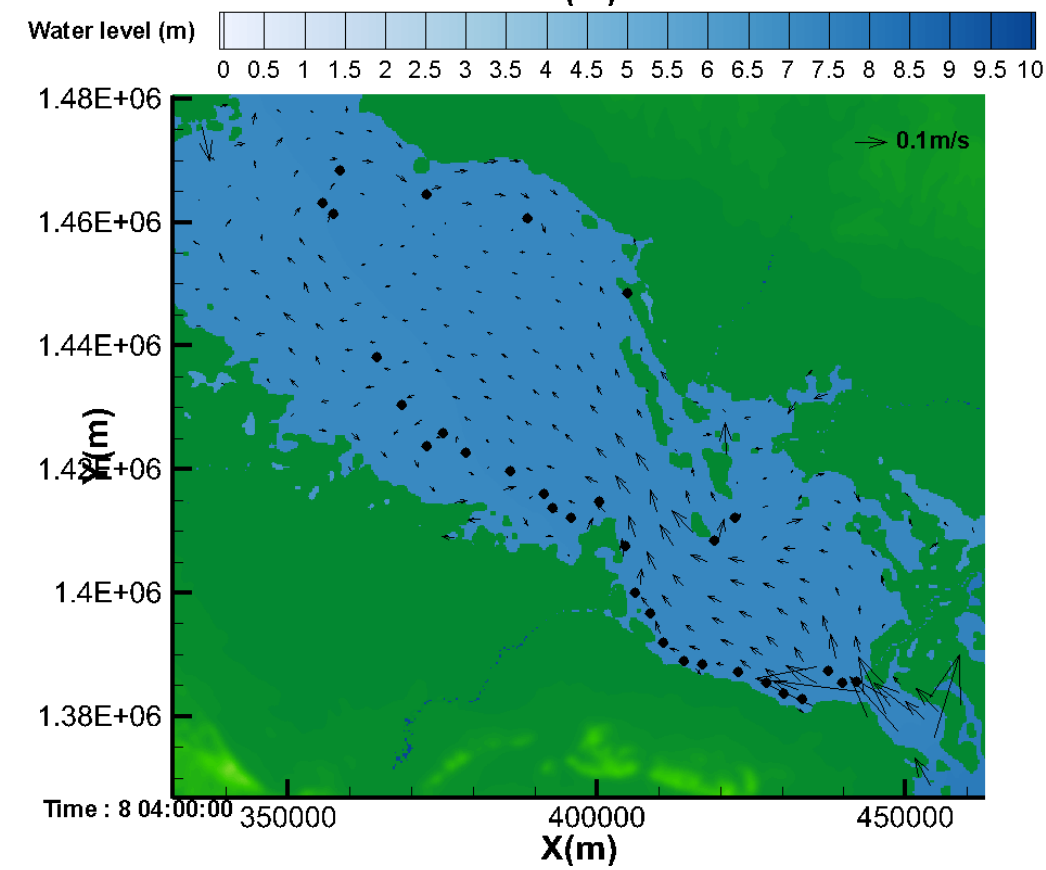
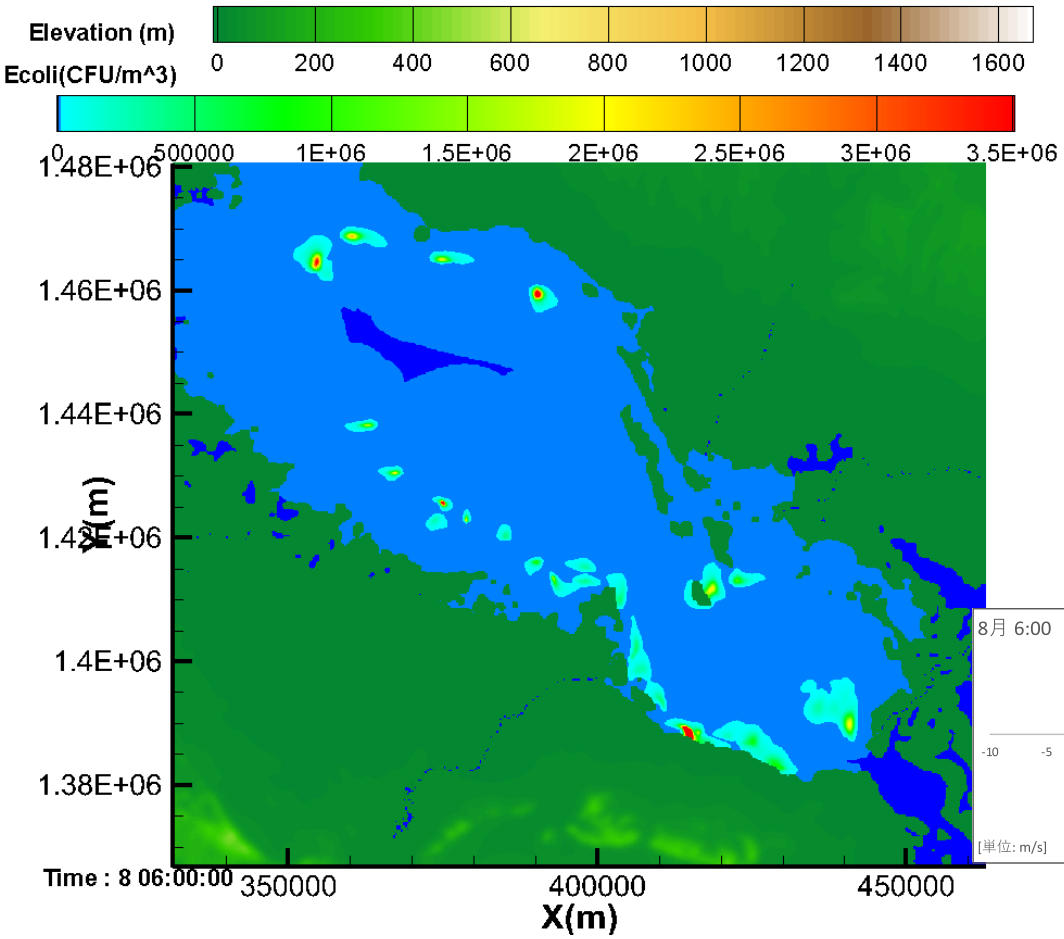


図4-173 8月 4:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



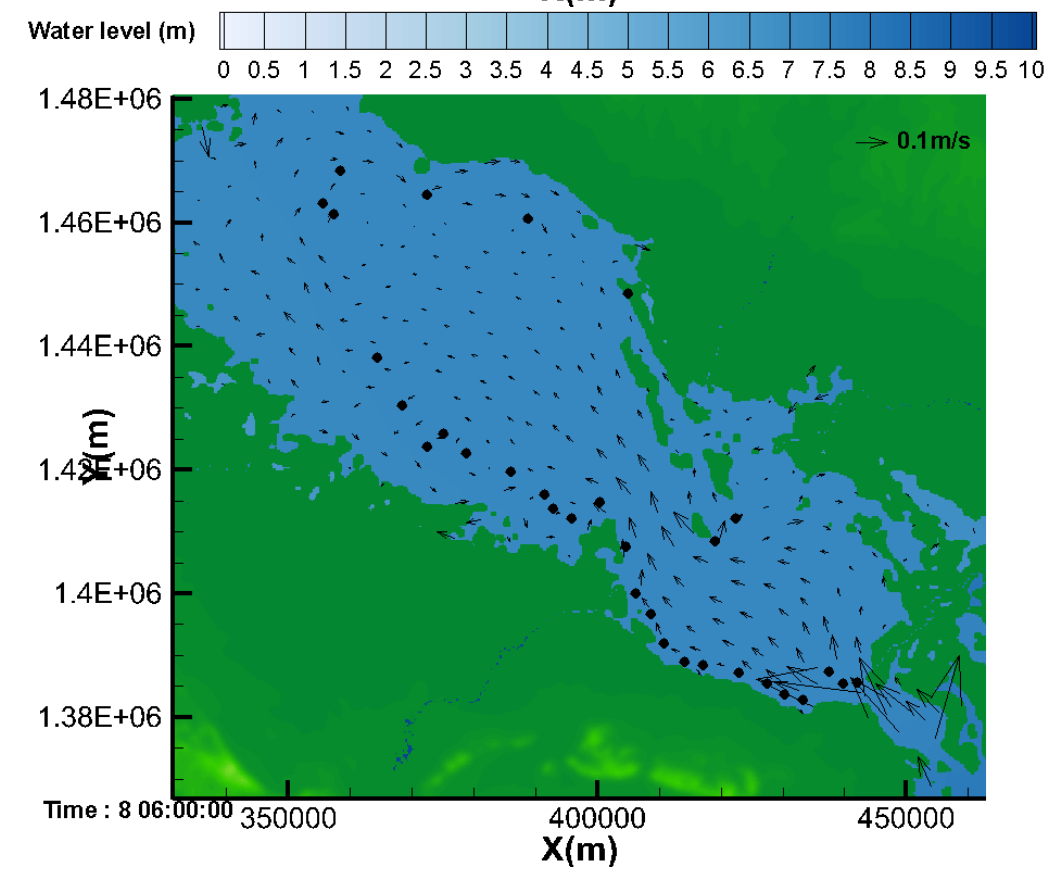
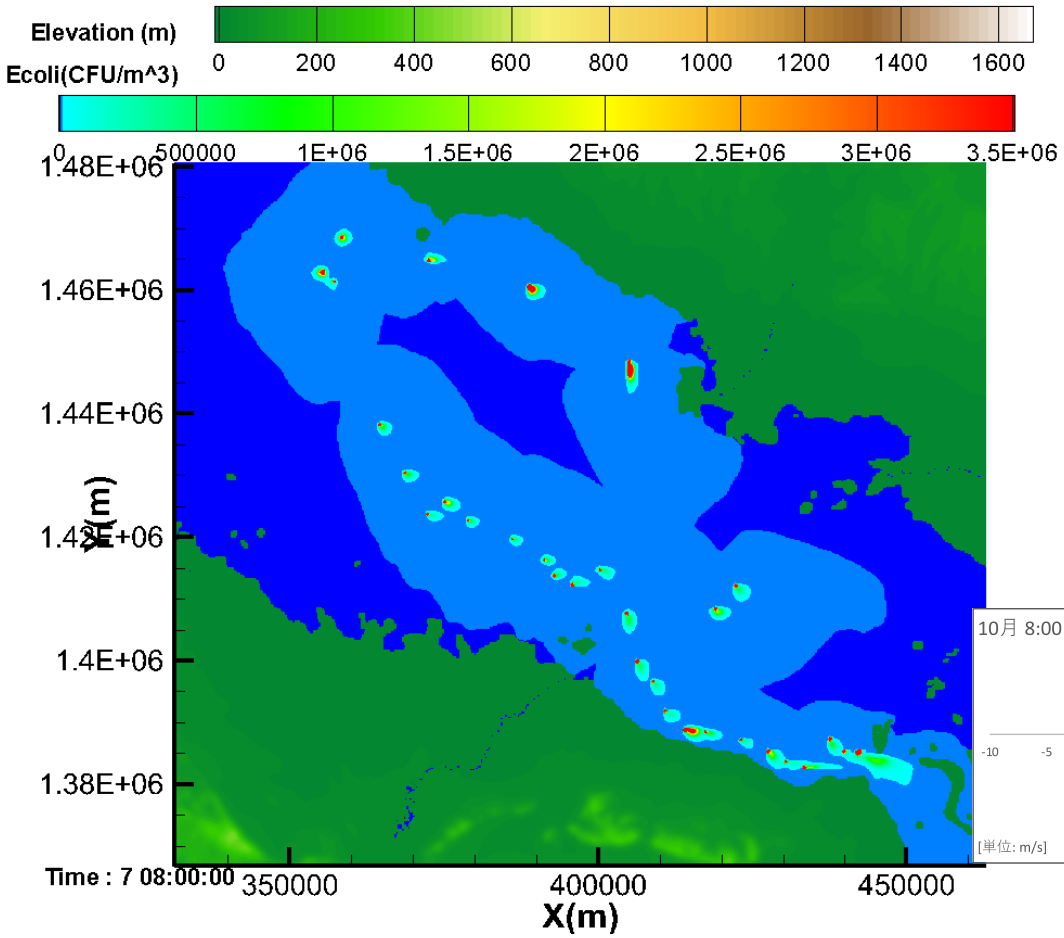


図4-174 8月 6:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



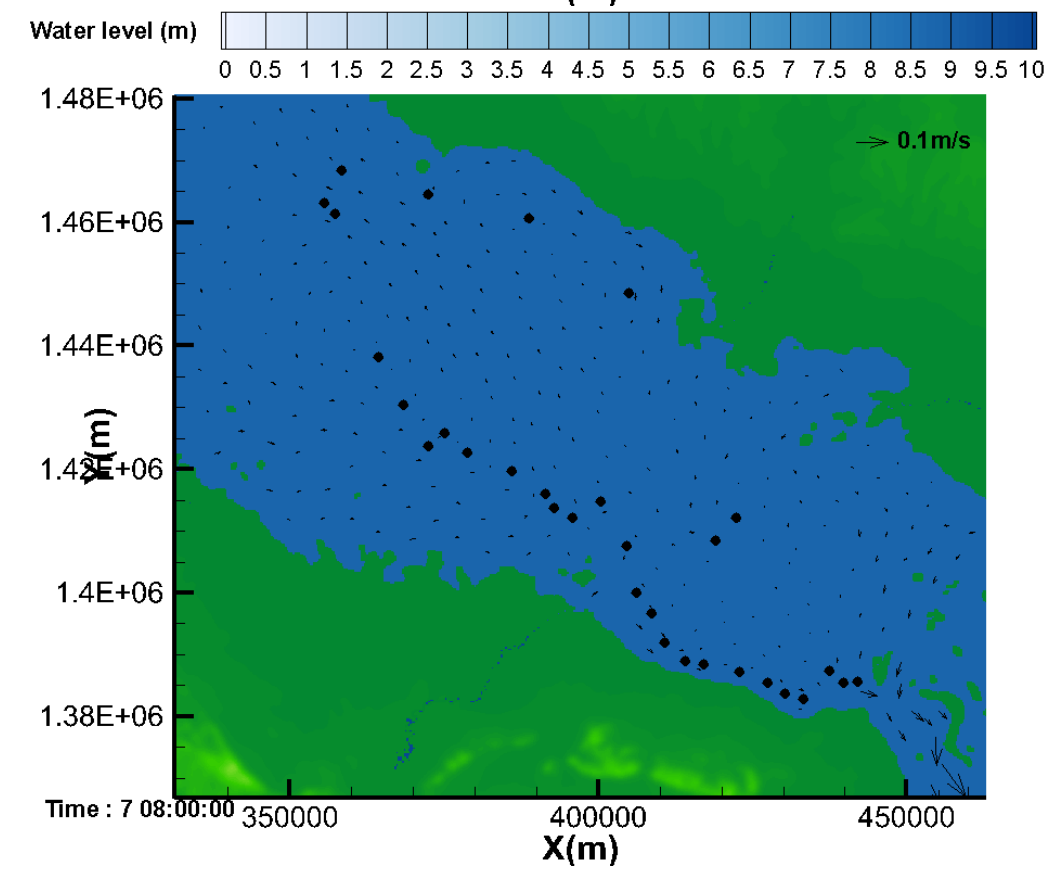


図4-175 10月 8:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

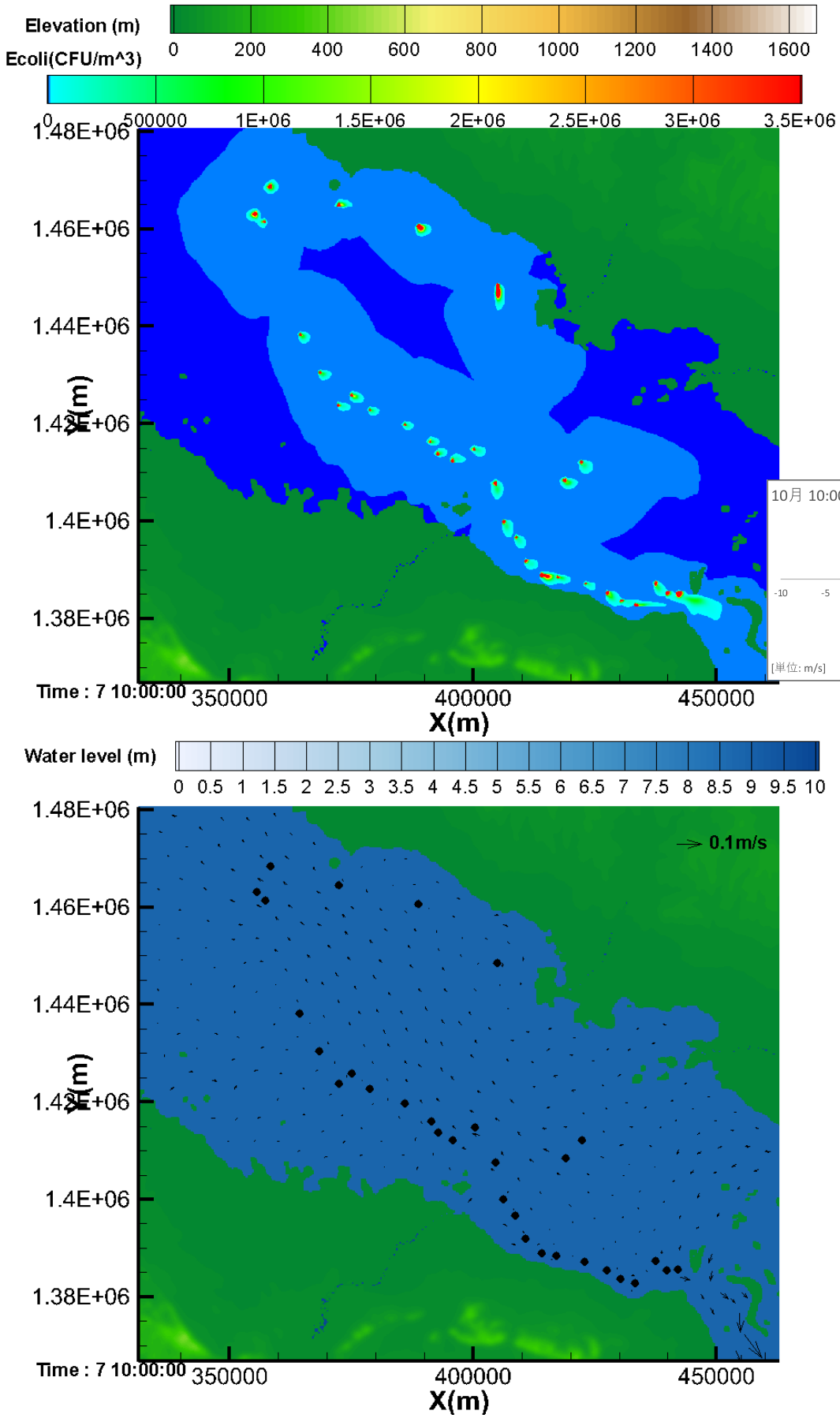
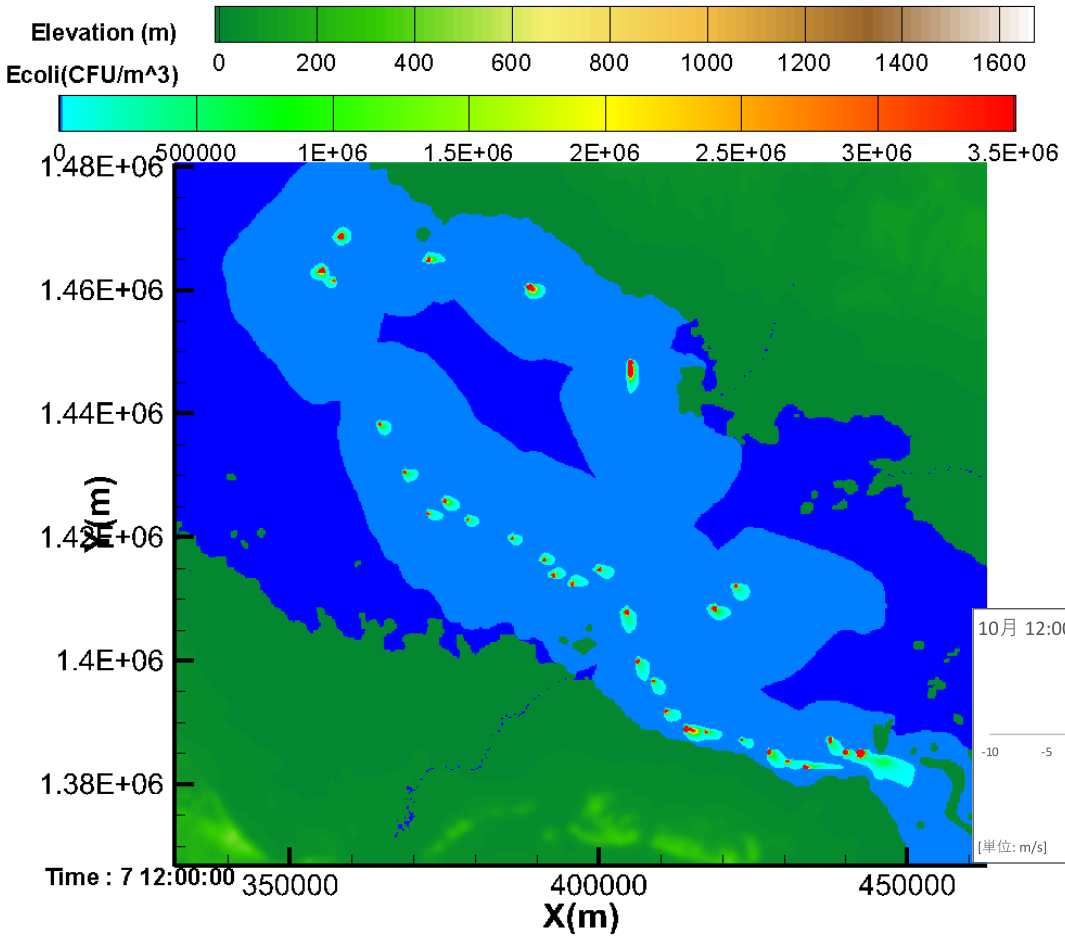


図4-176 10月 10:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



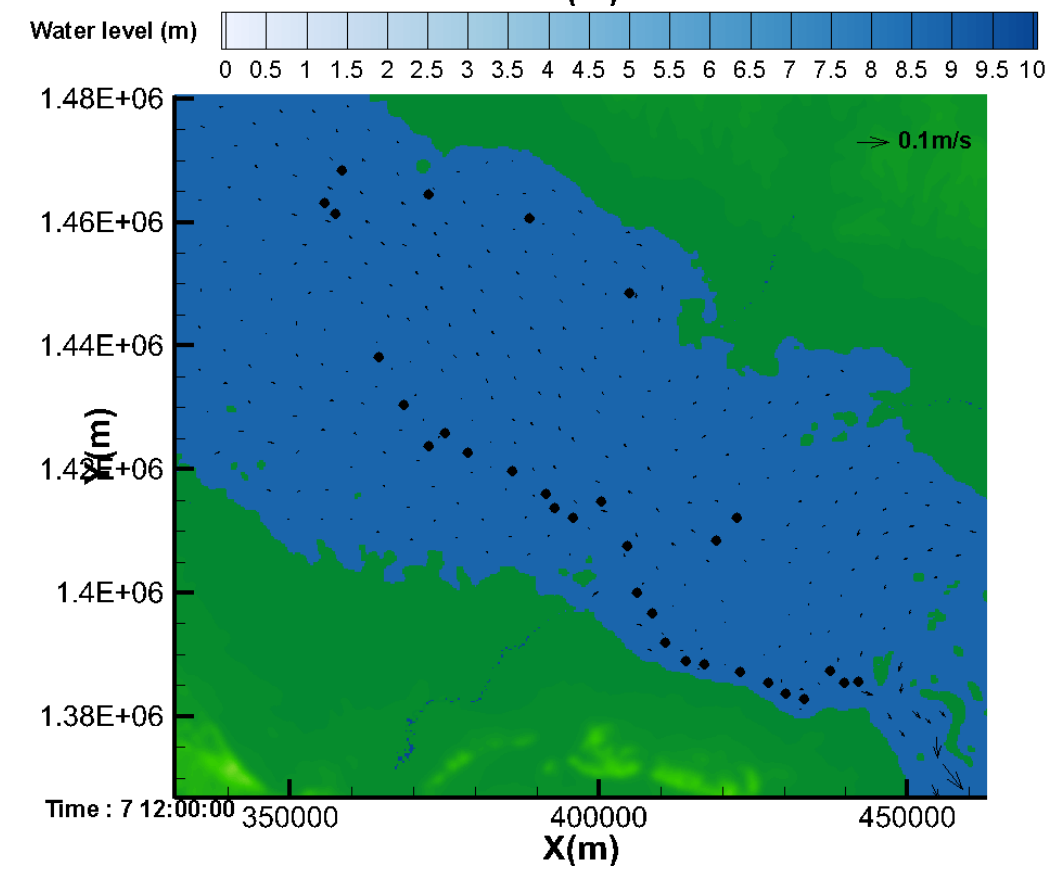


図4-177 10月 12:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

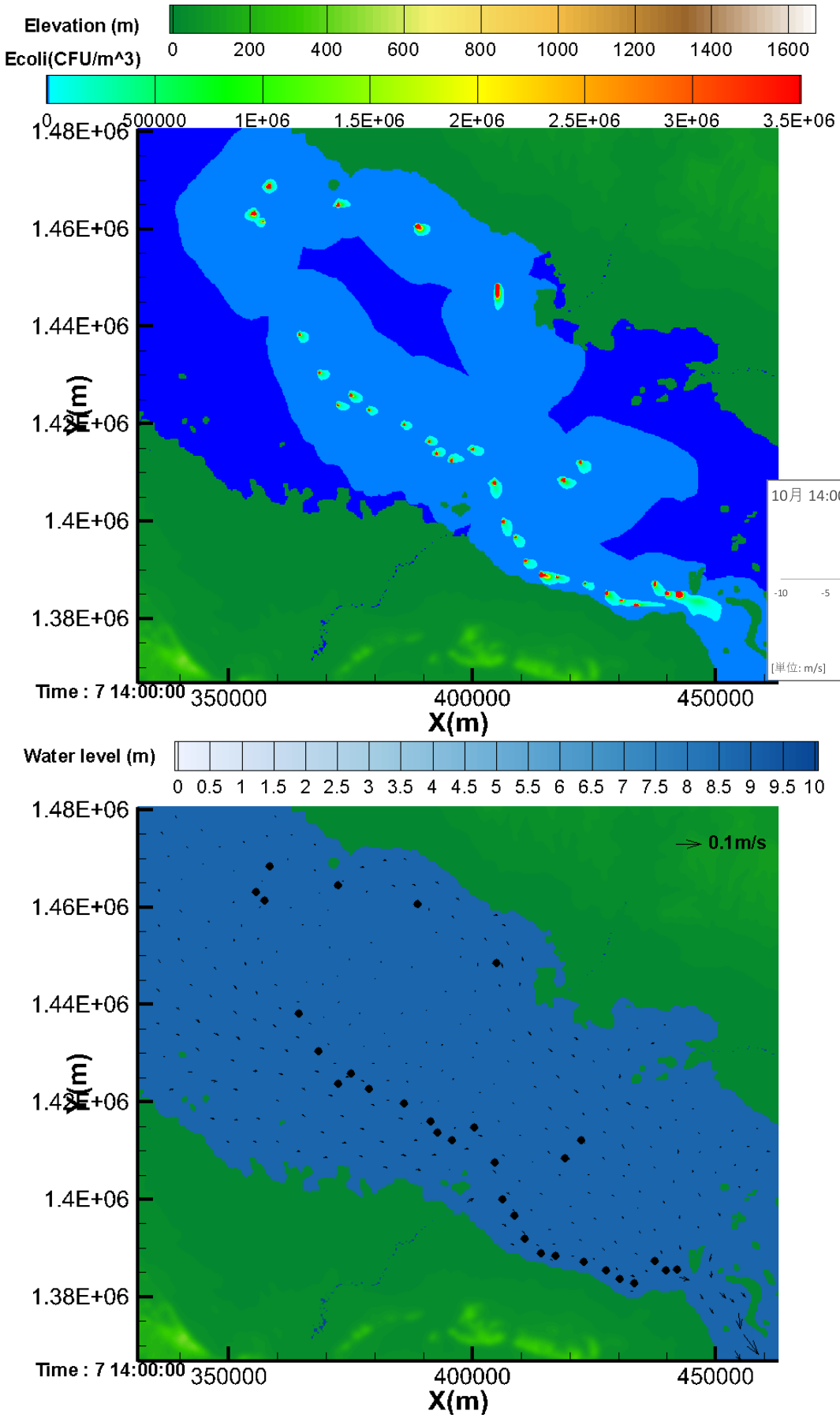


図4-178 10月 14:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

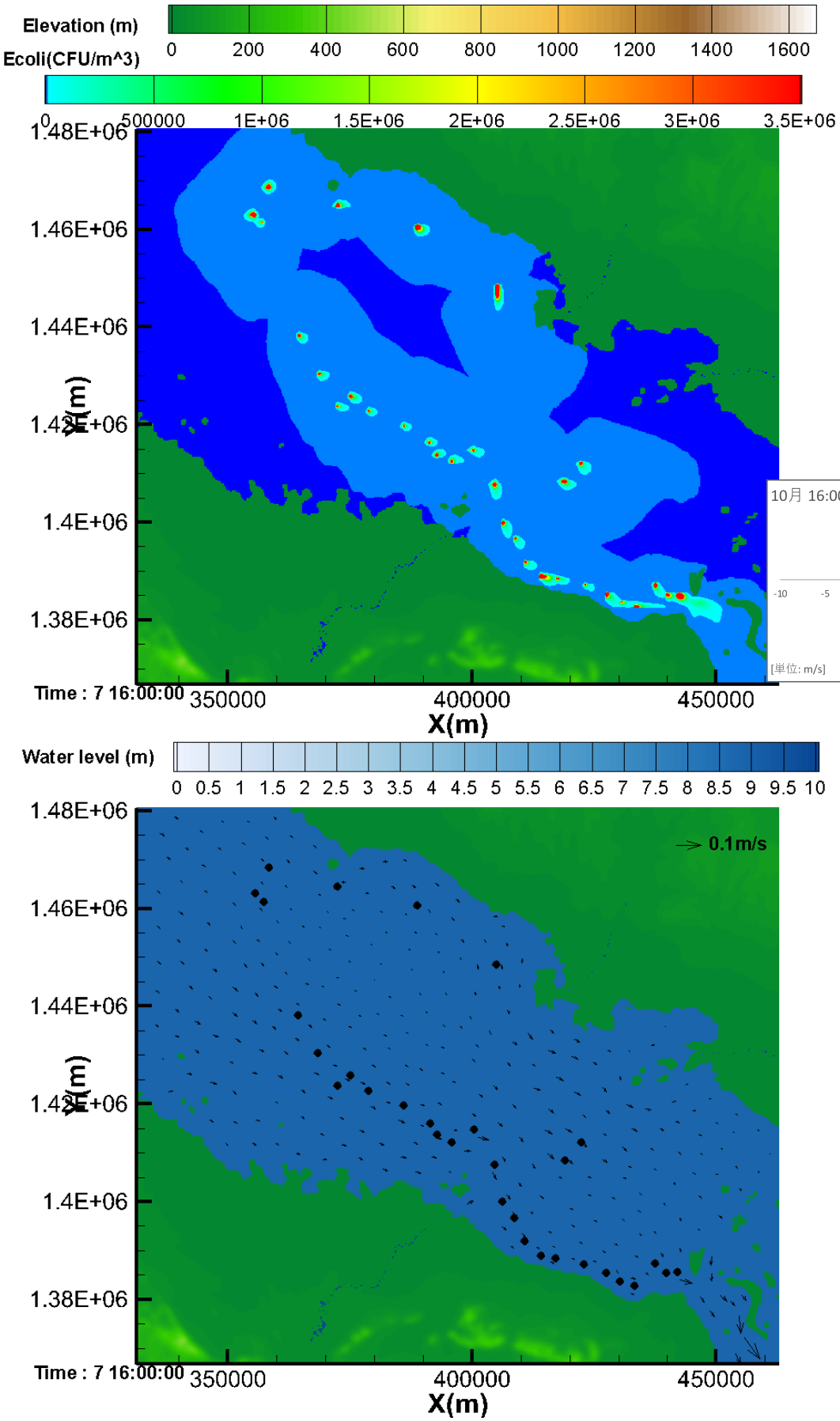
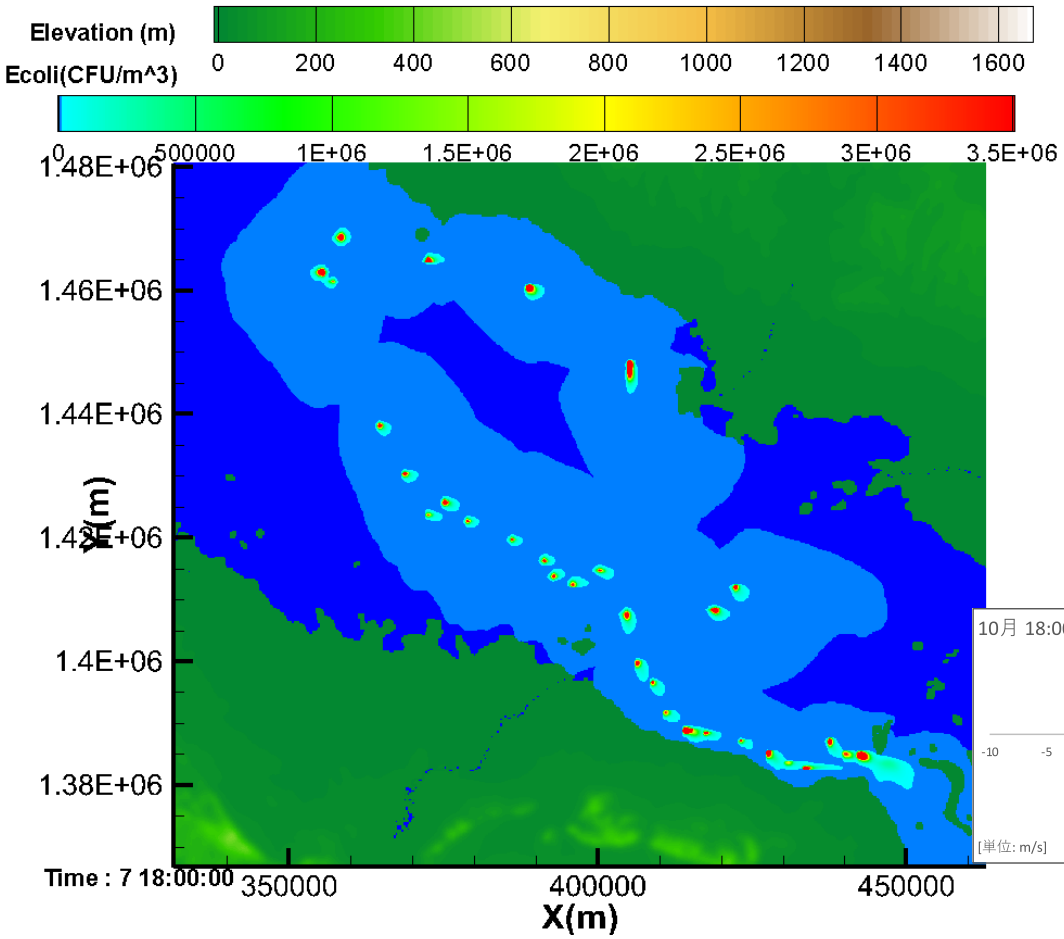


図4-179 10月 16:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



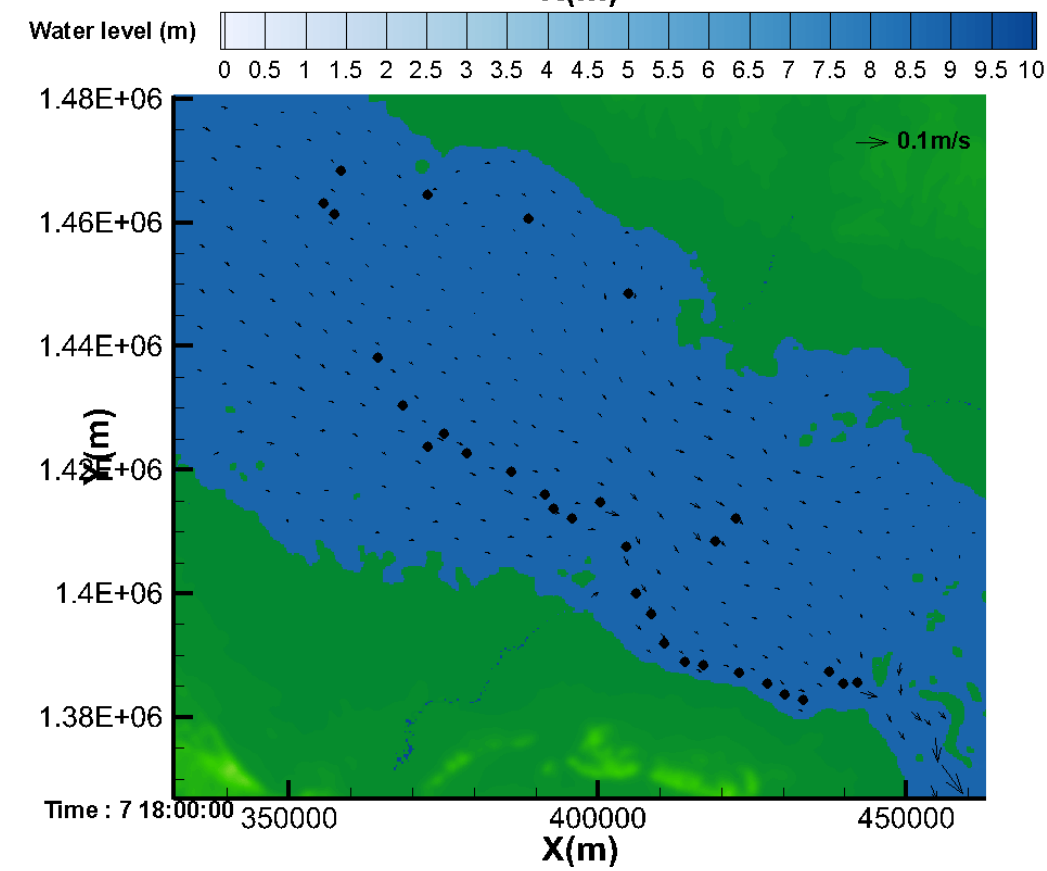


図4-180 10月 18:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

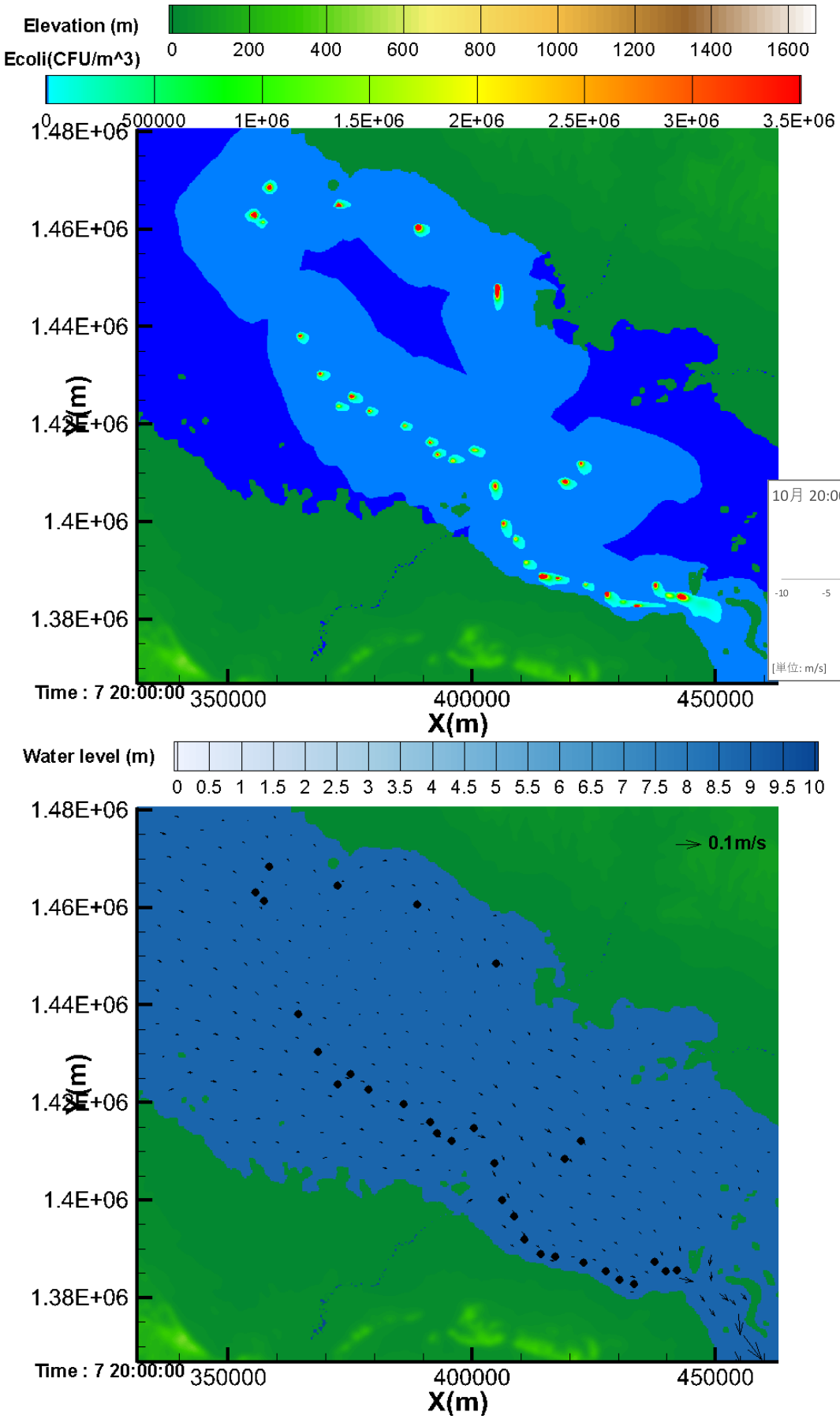
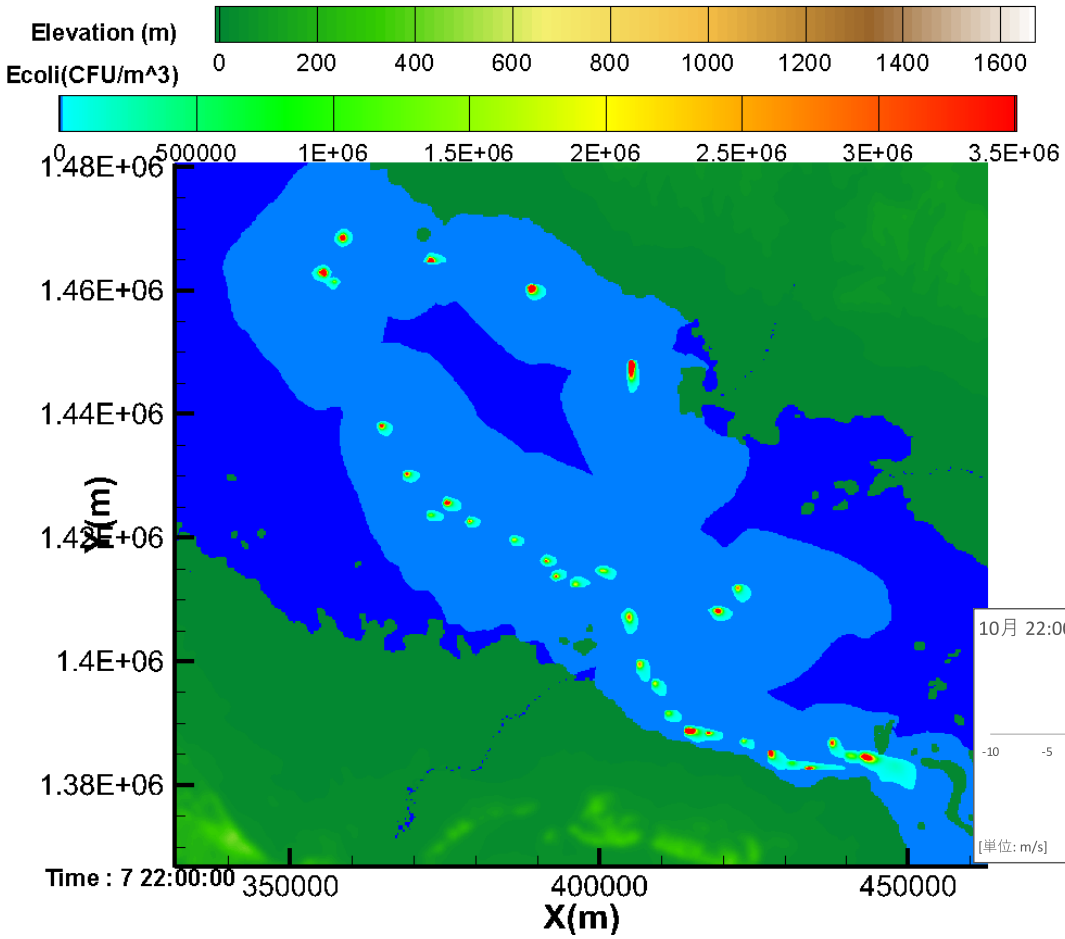


図4-181 10月 20:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



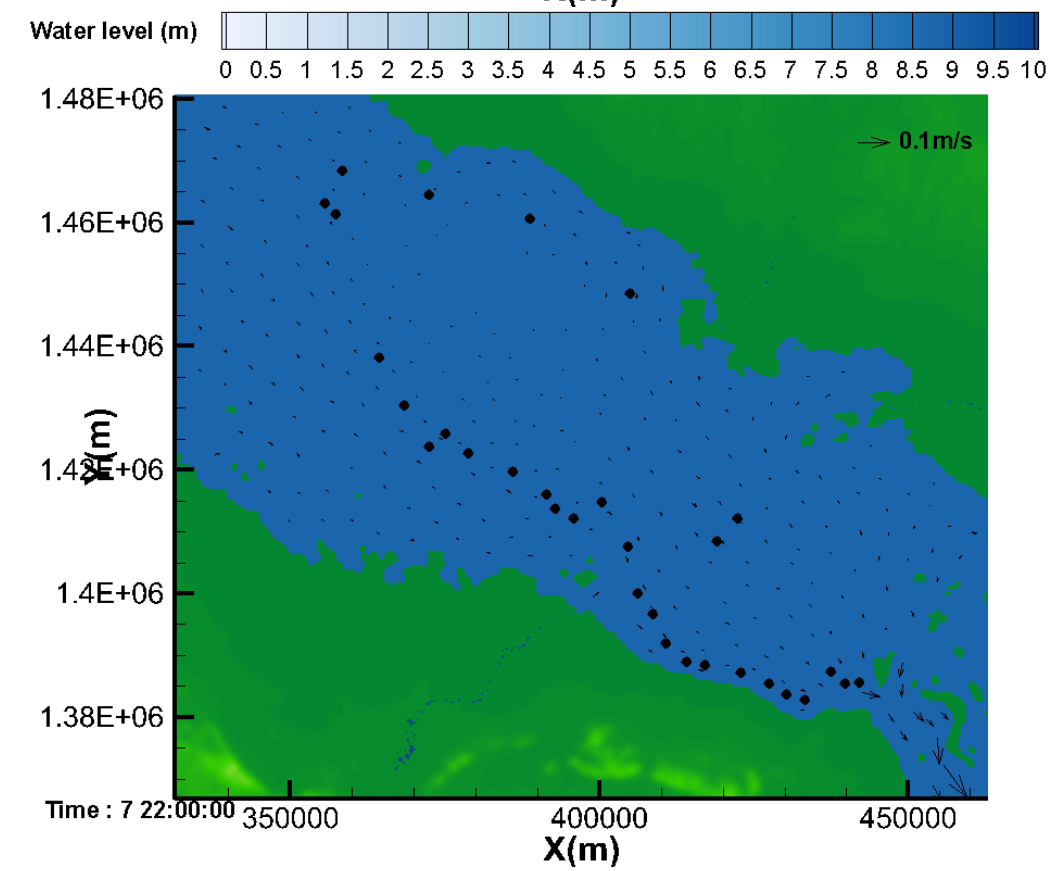
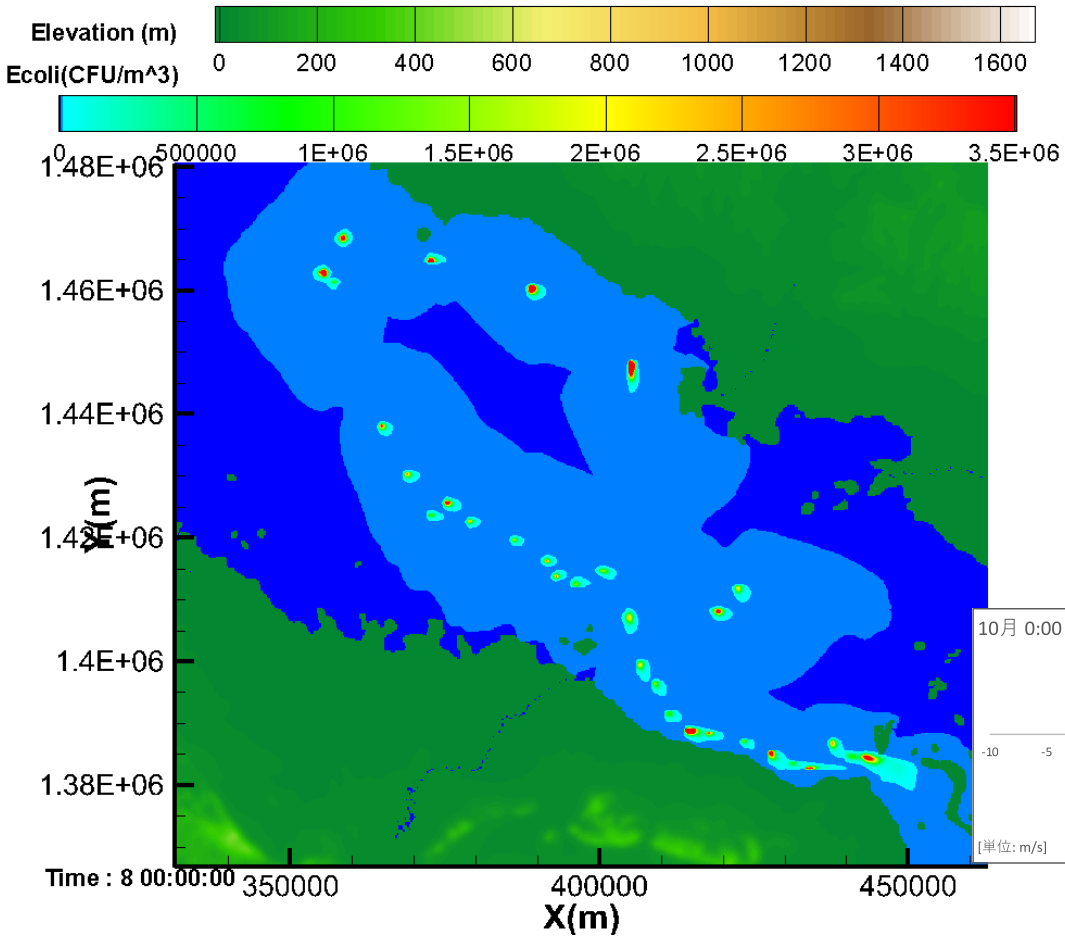


図4-182 10月 22:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



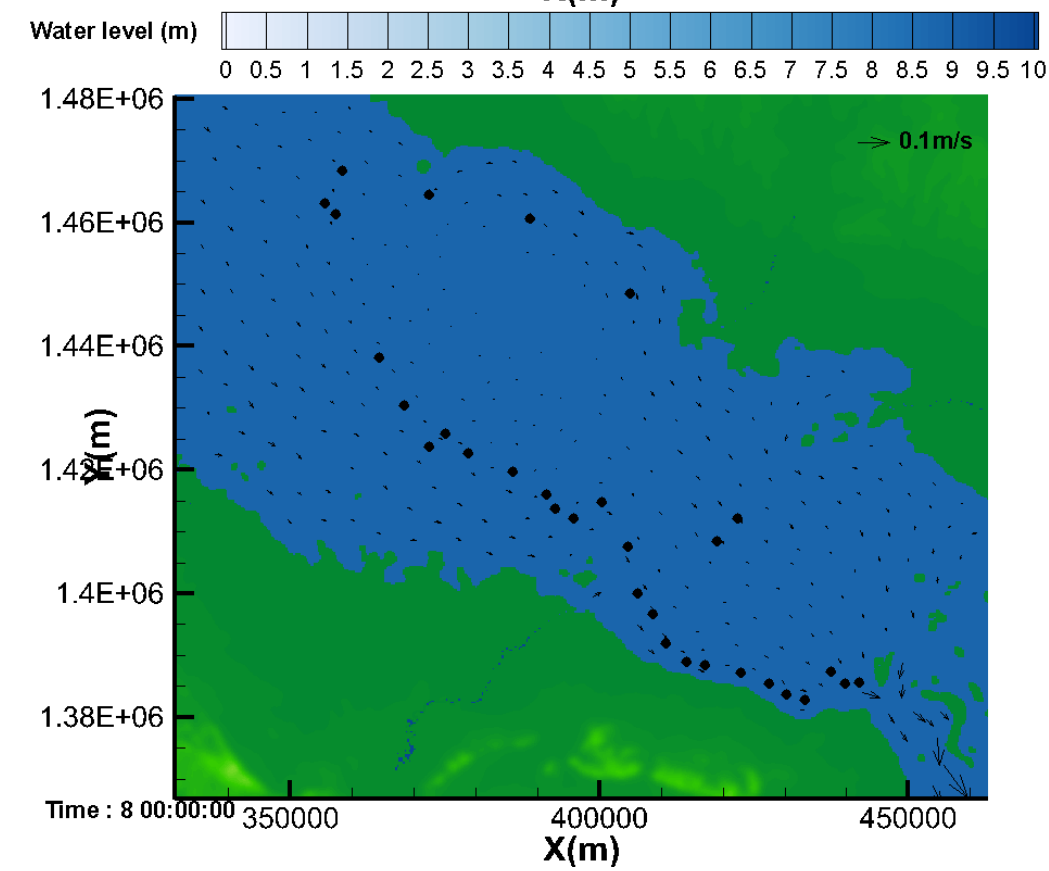
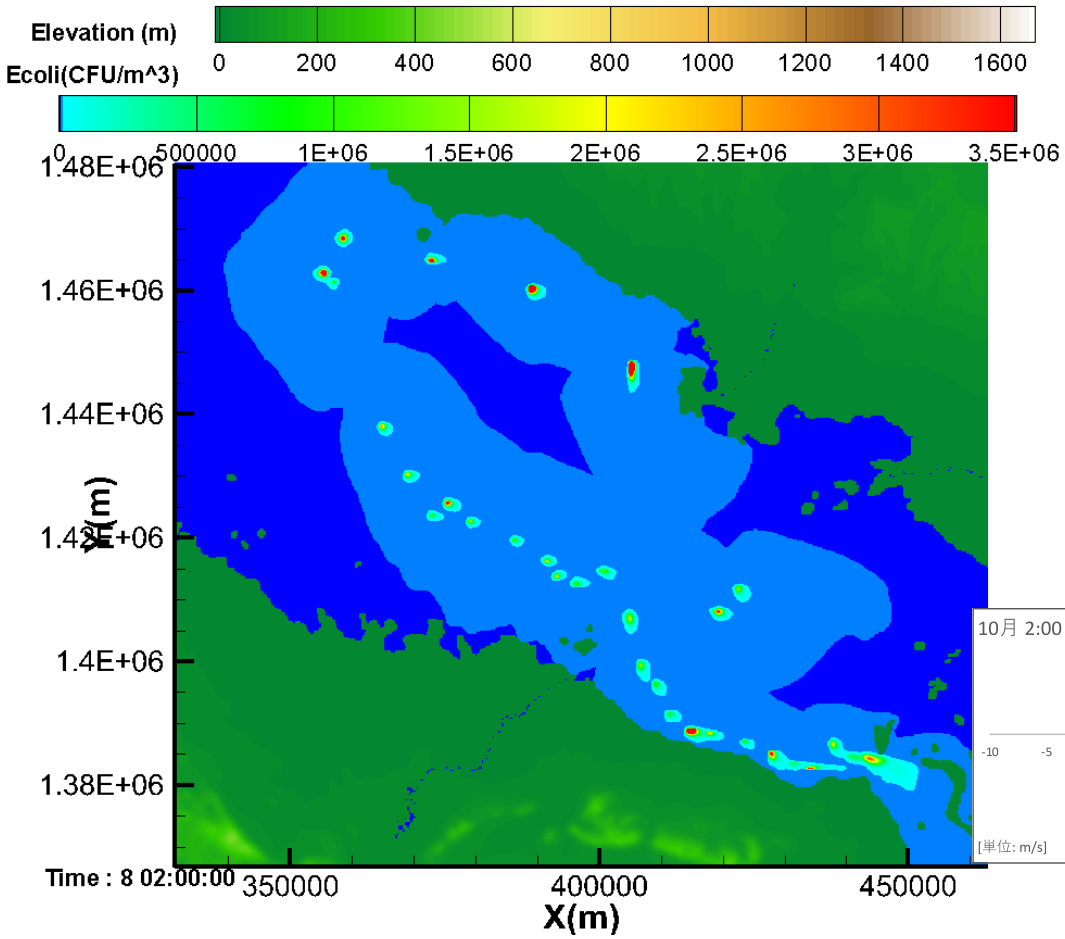


図4-183 10月 0:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



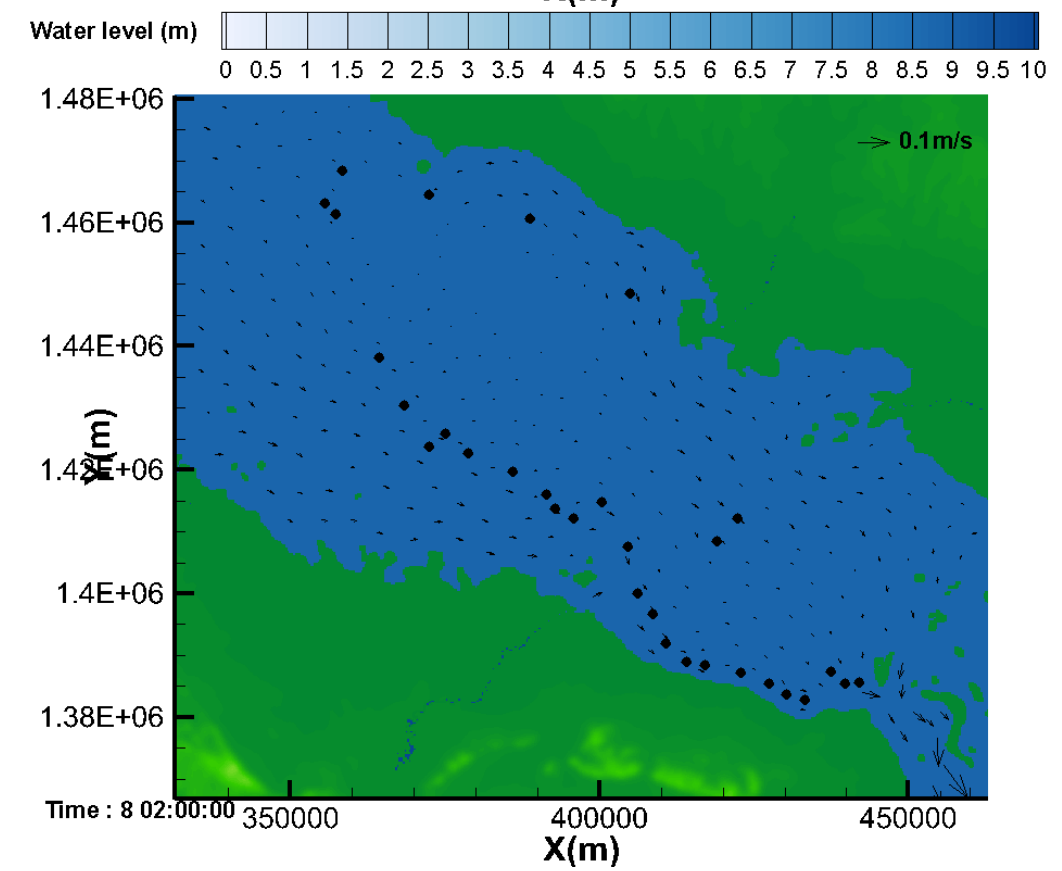
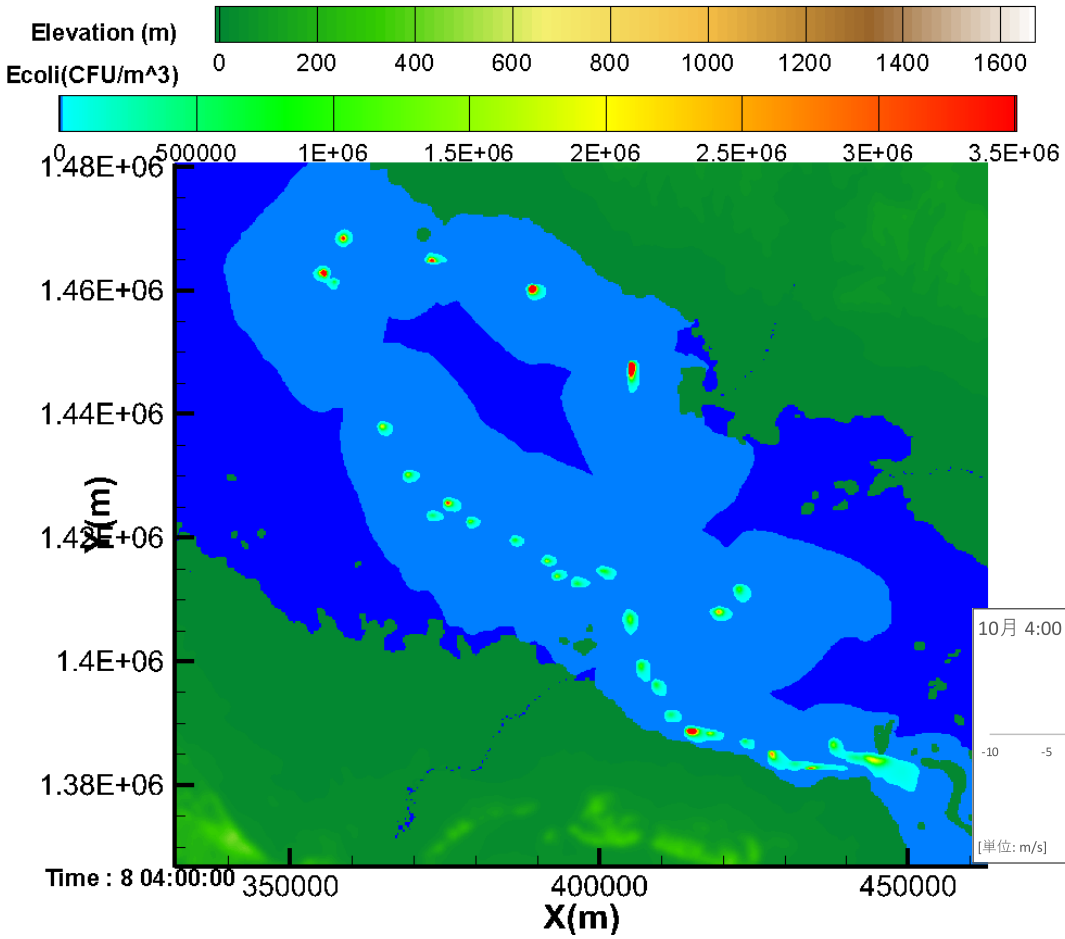


図4-184 10月 2:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



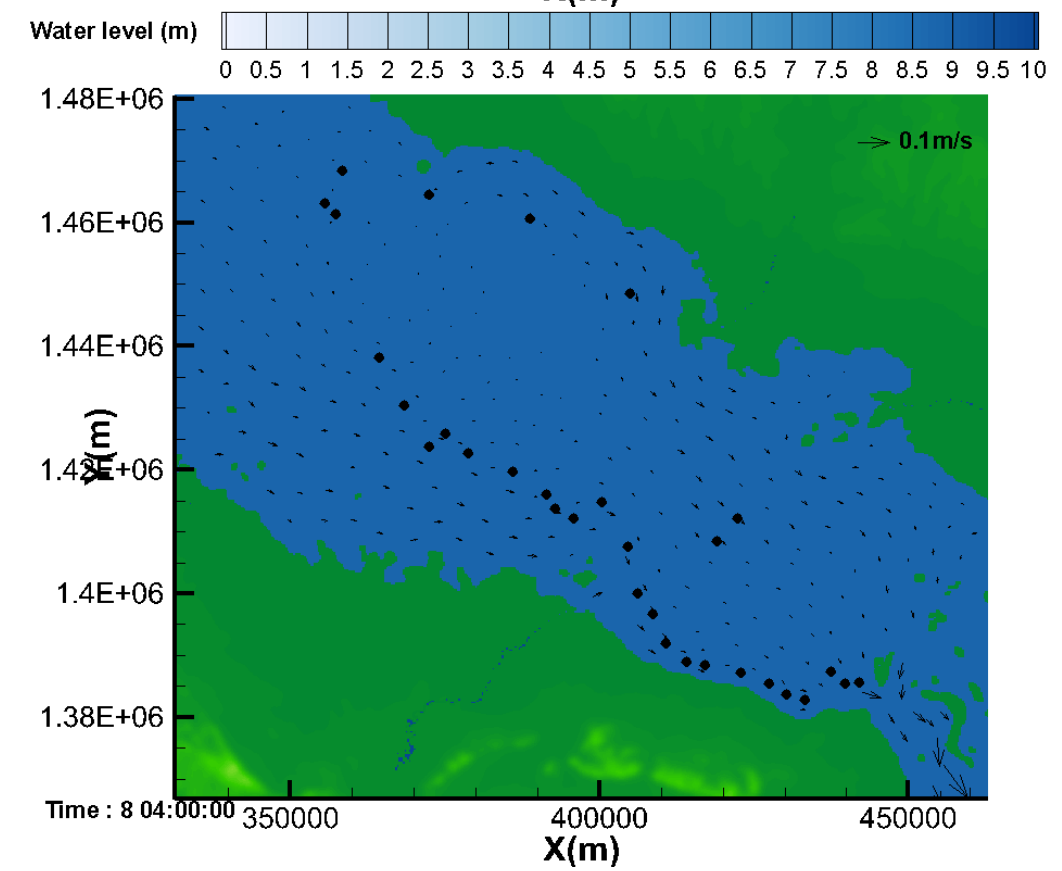
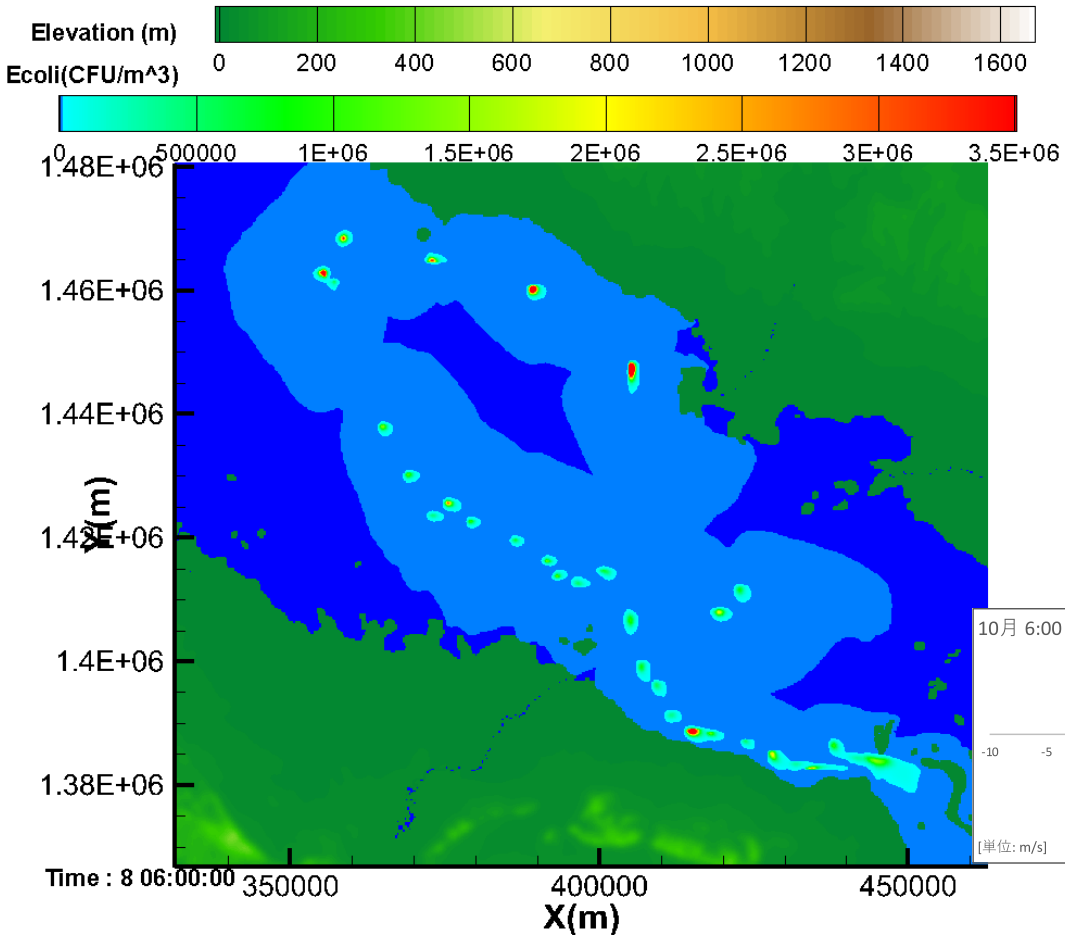


図4-185 10月 4:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



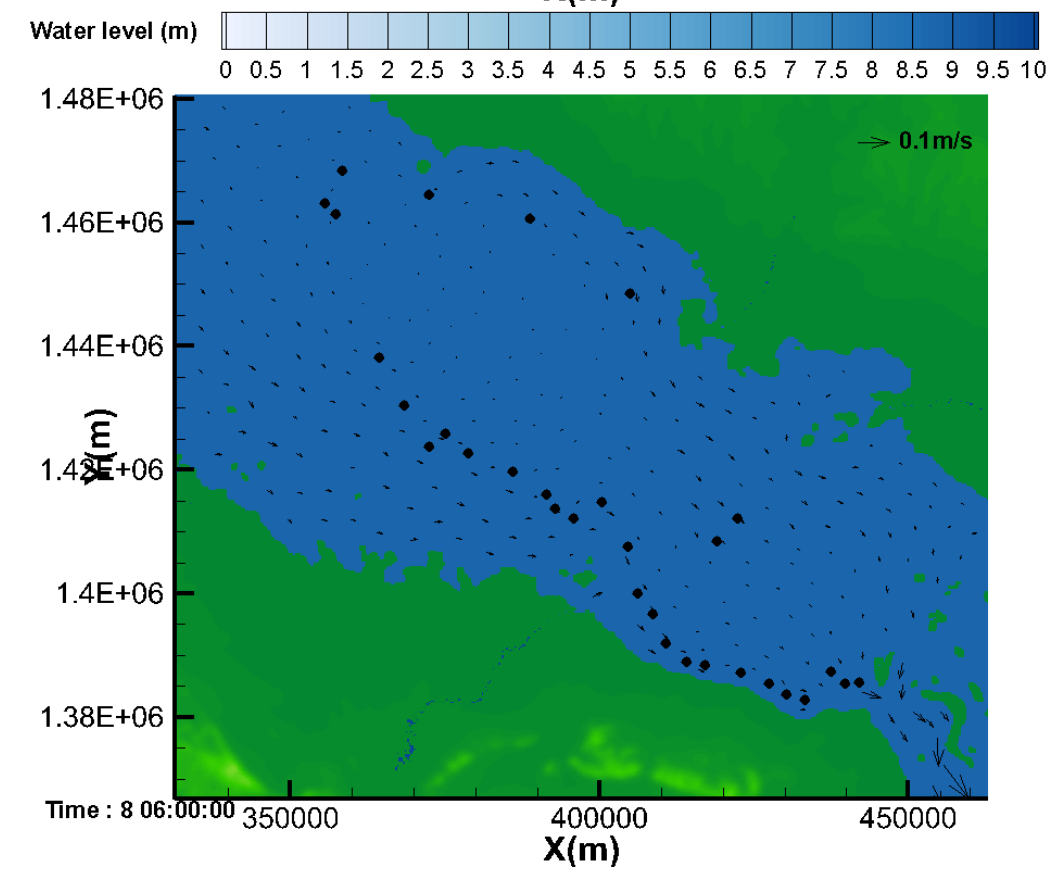
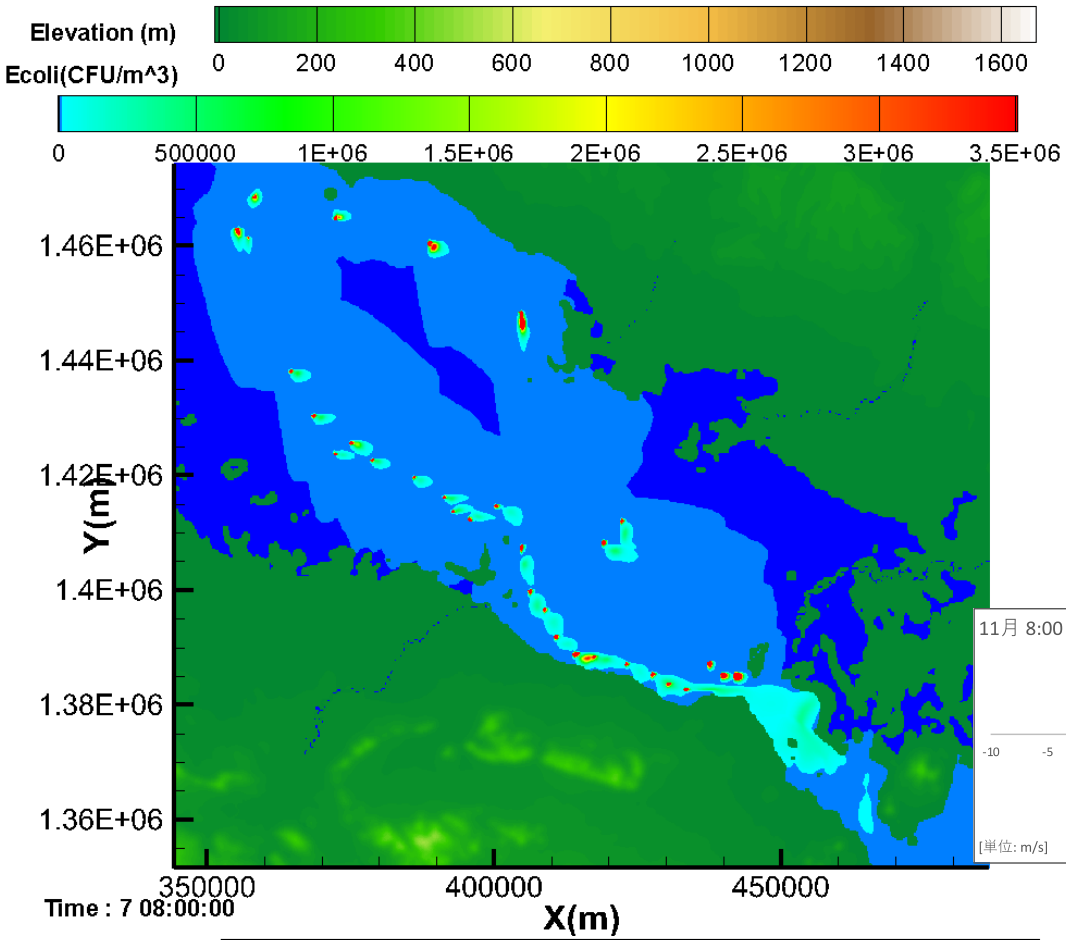


図4-186 10月 6:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



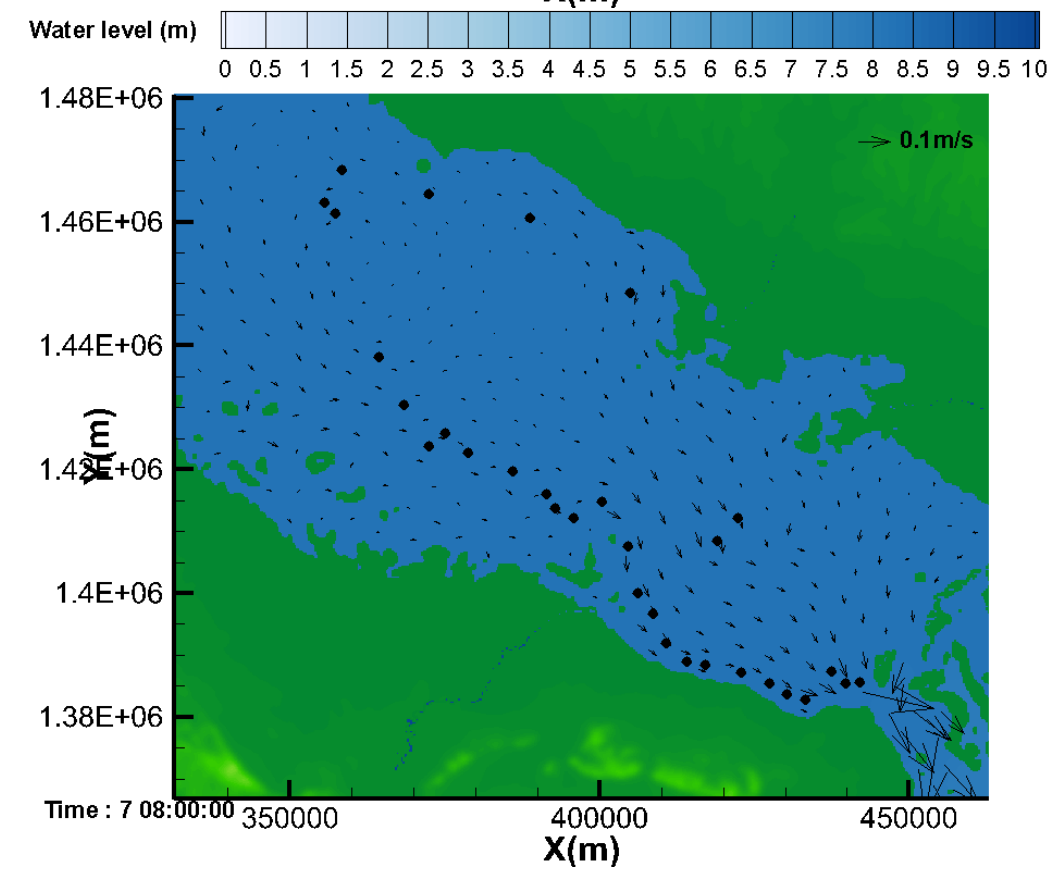


図4-187 11月 8:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

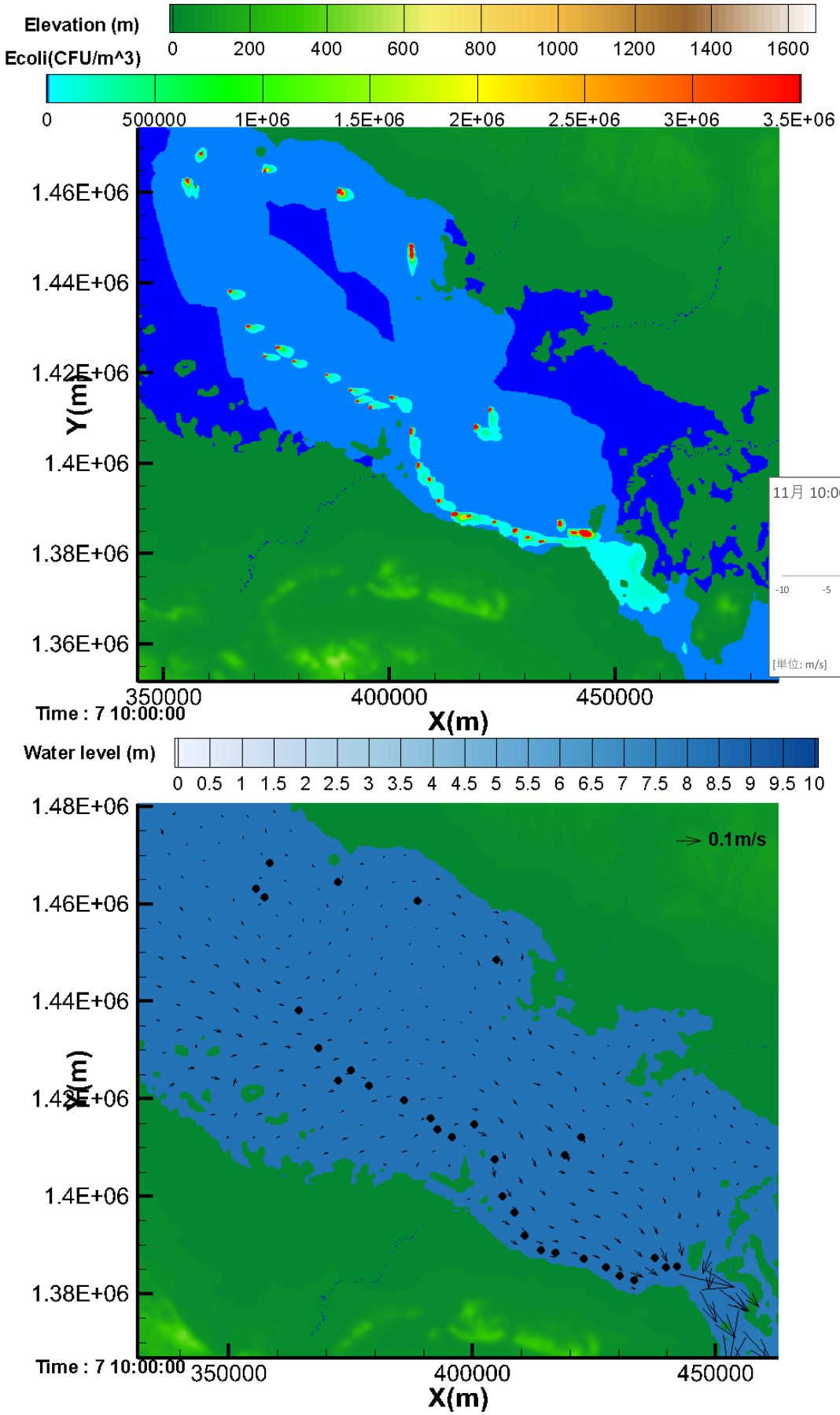
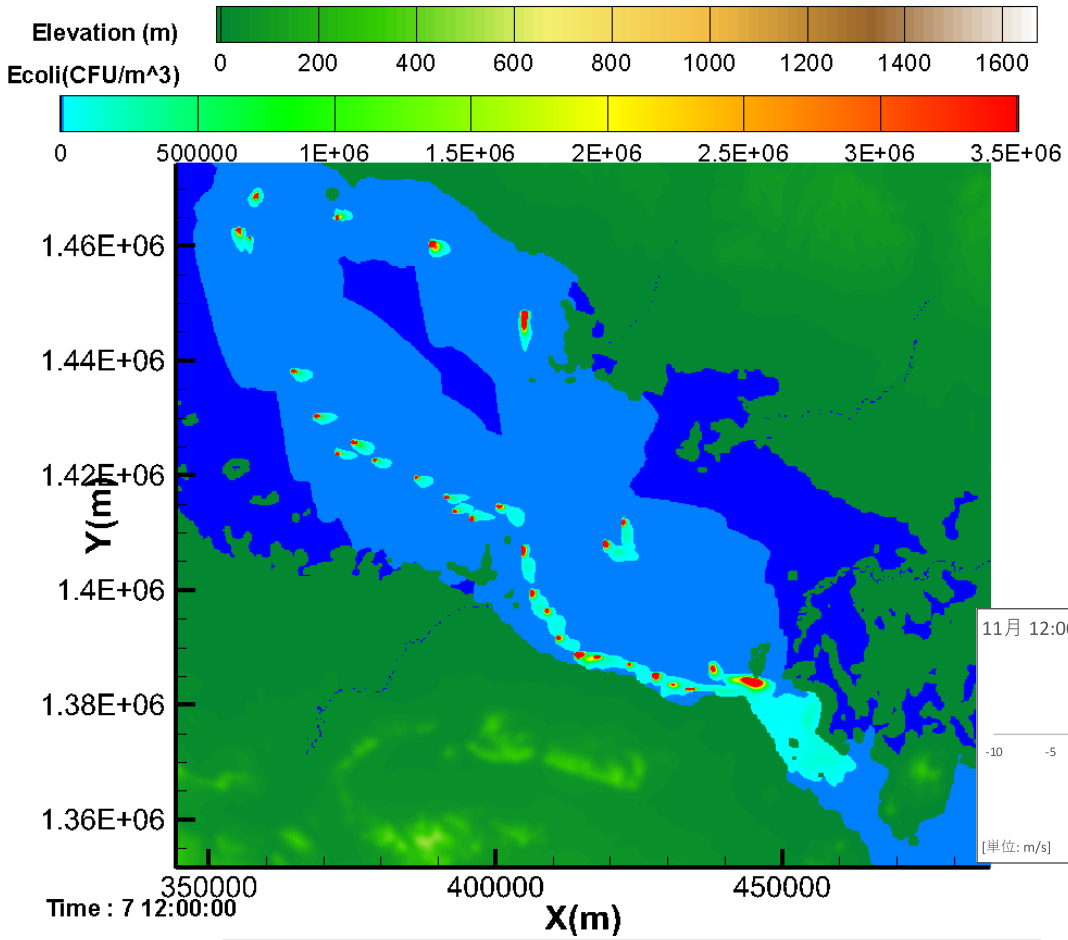


図4-188 11月 10:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



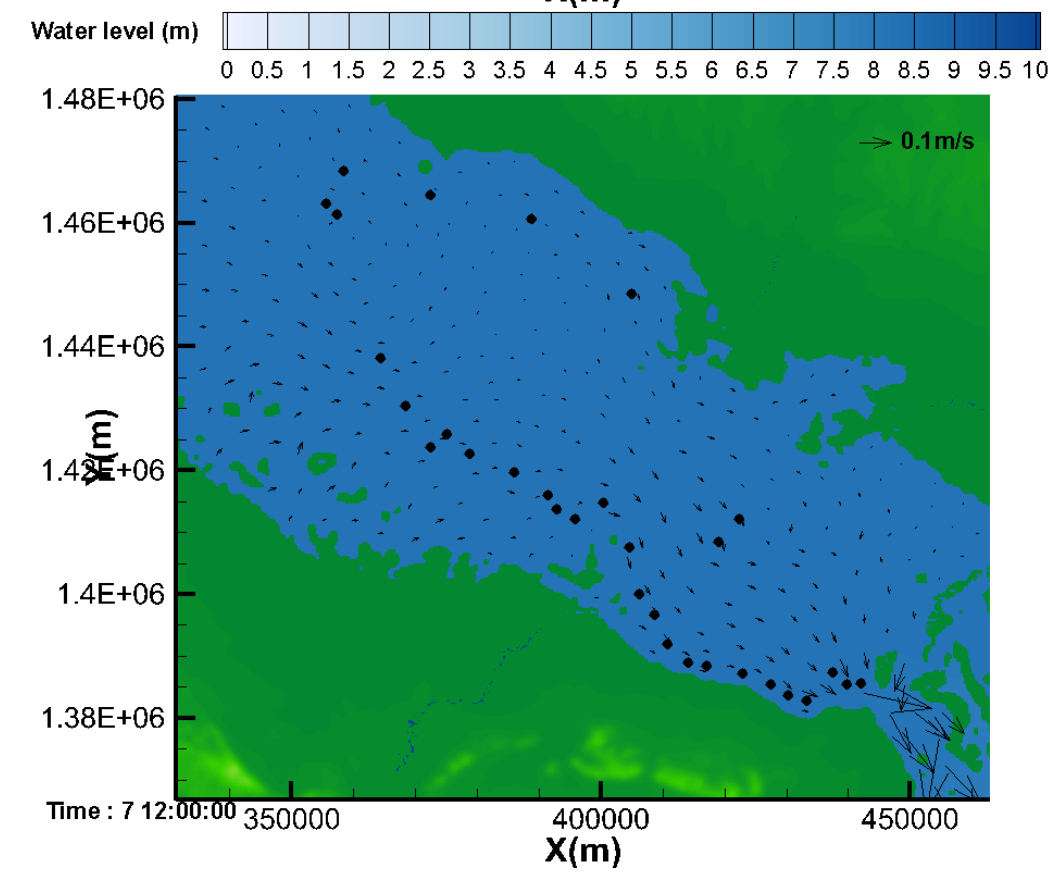
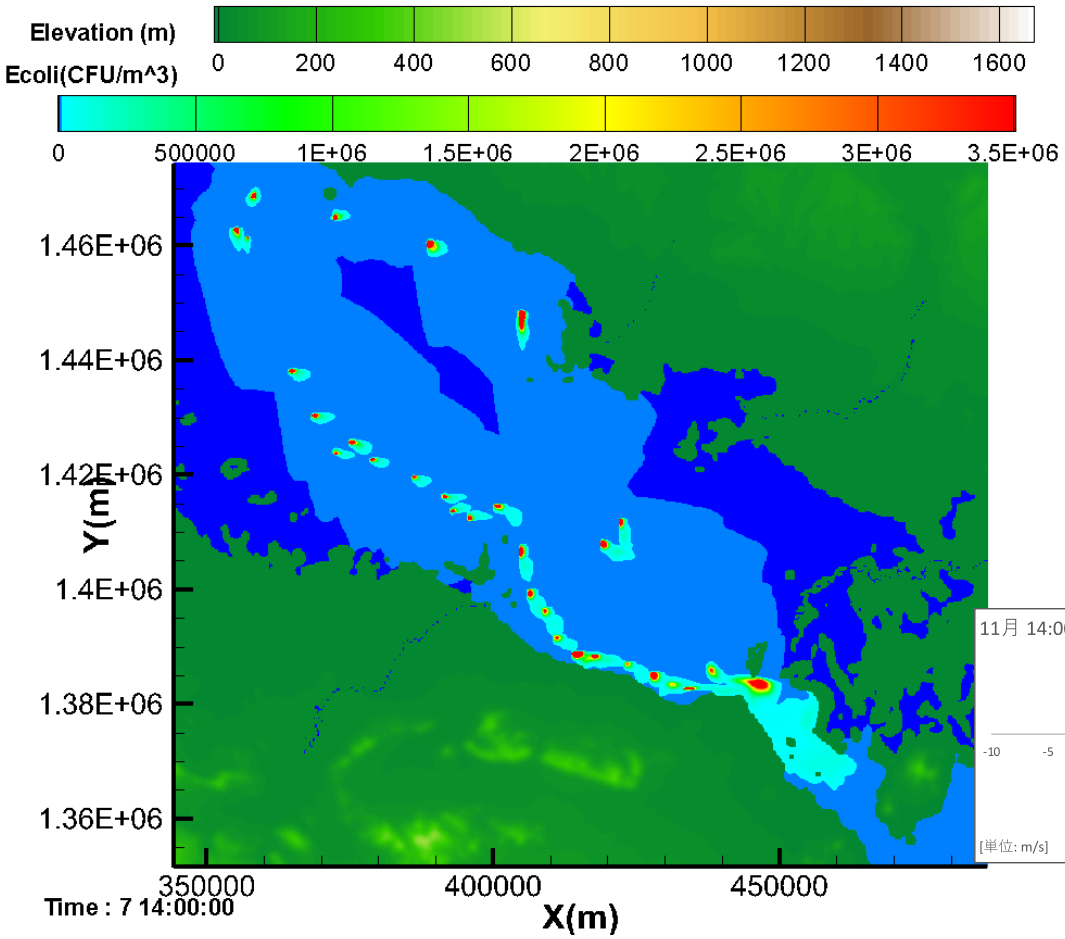


図4-189 11月 12:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



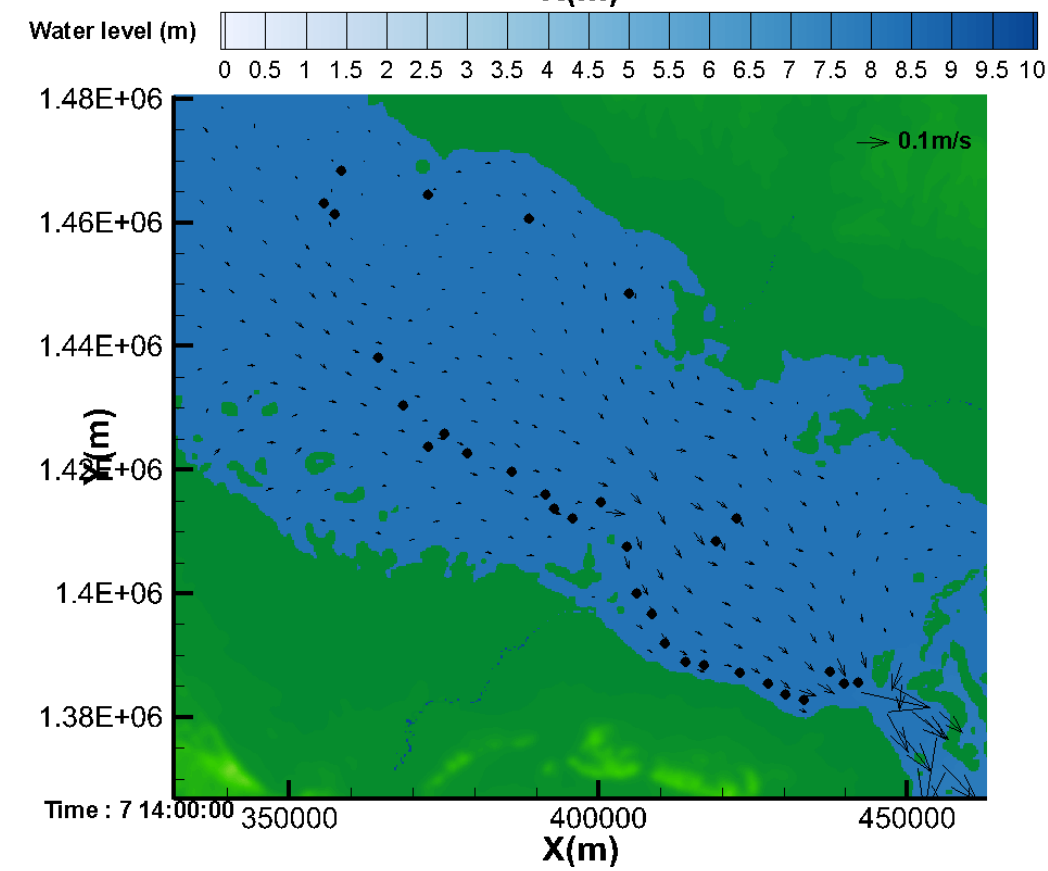


図4-190 11月 14:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

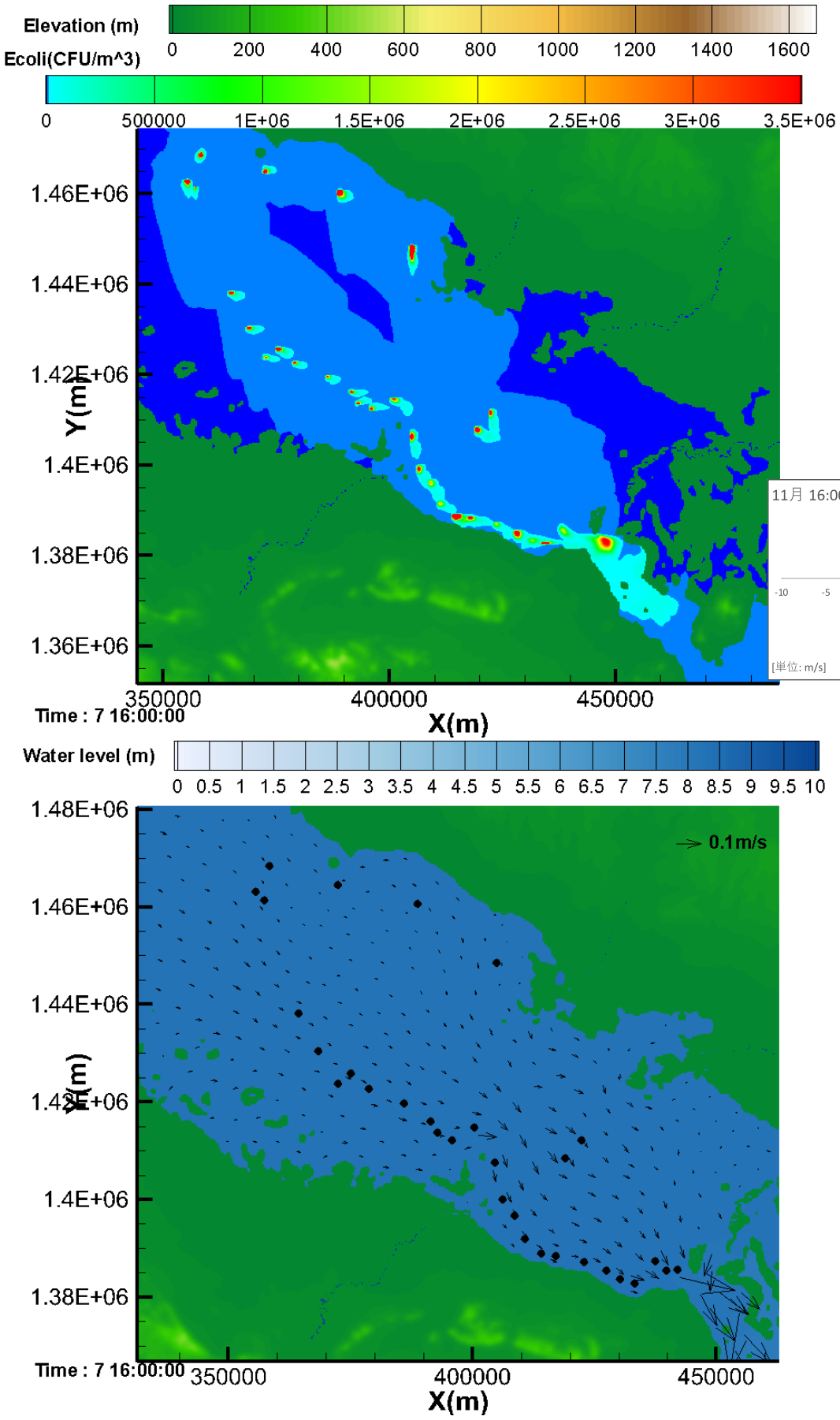


図4-191 11月 16:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

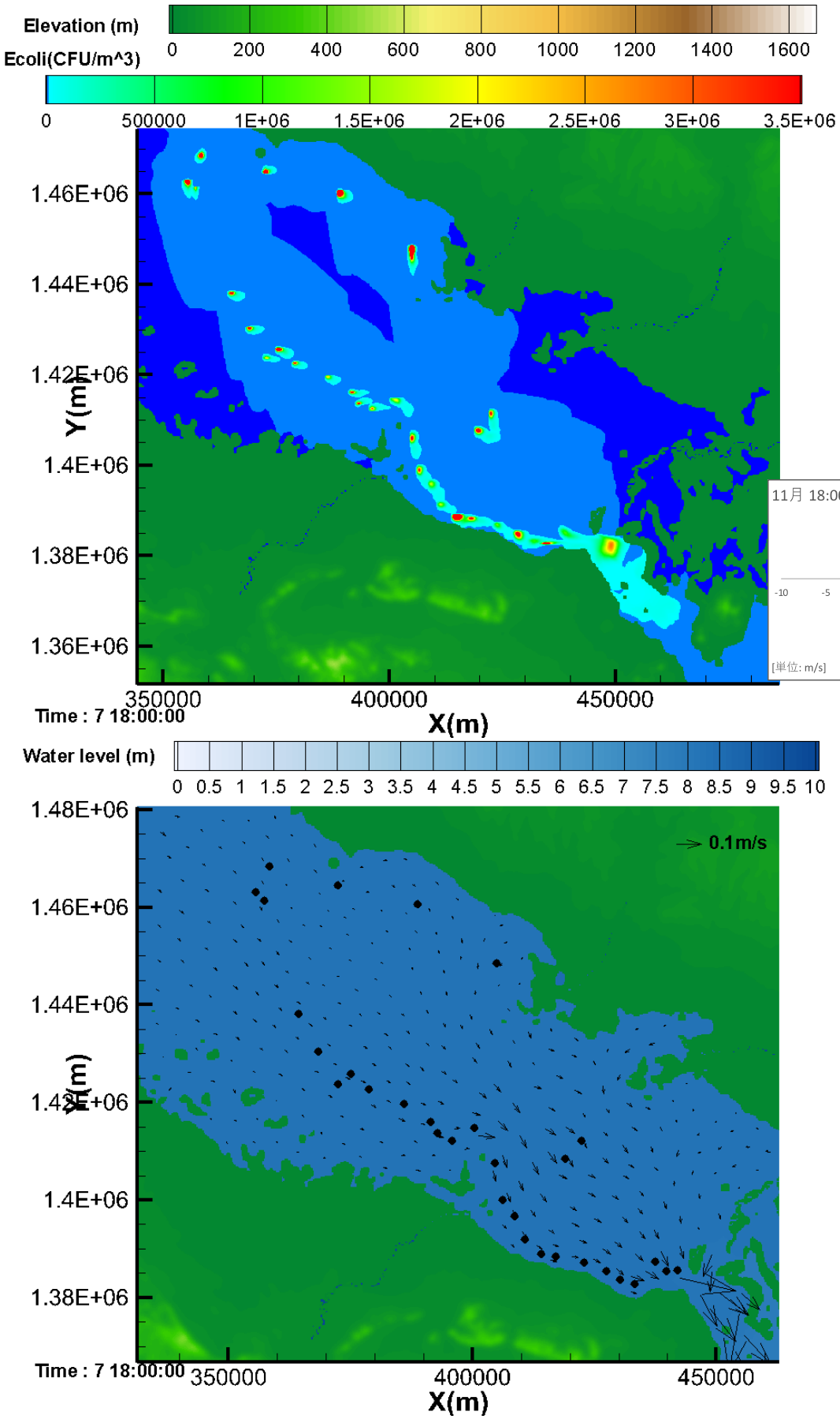


図4-192 11月 18:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

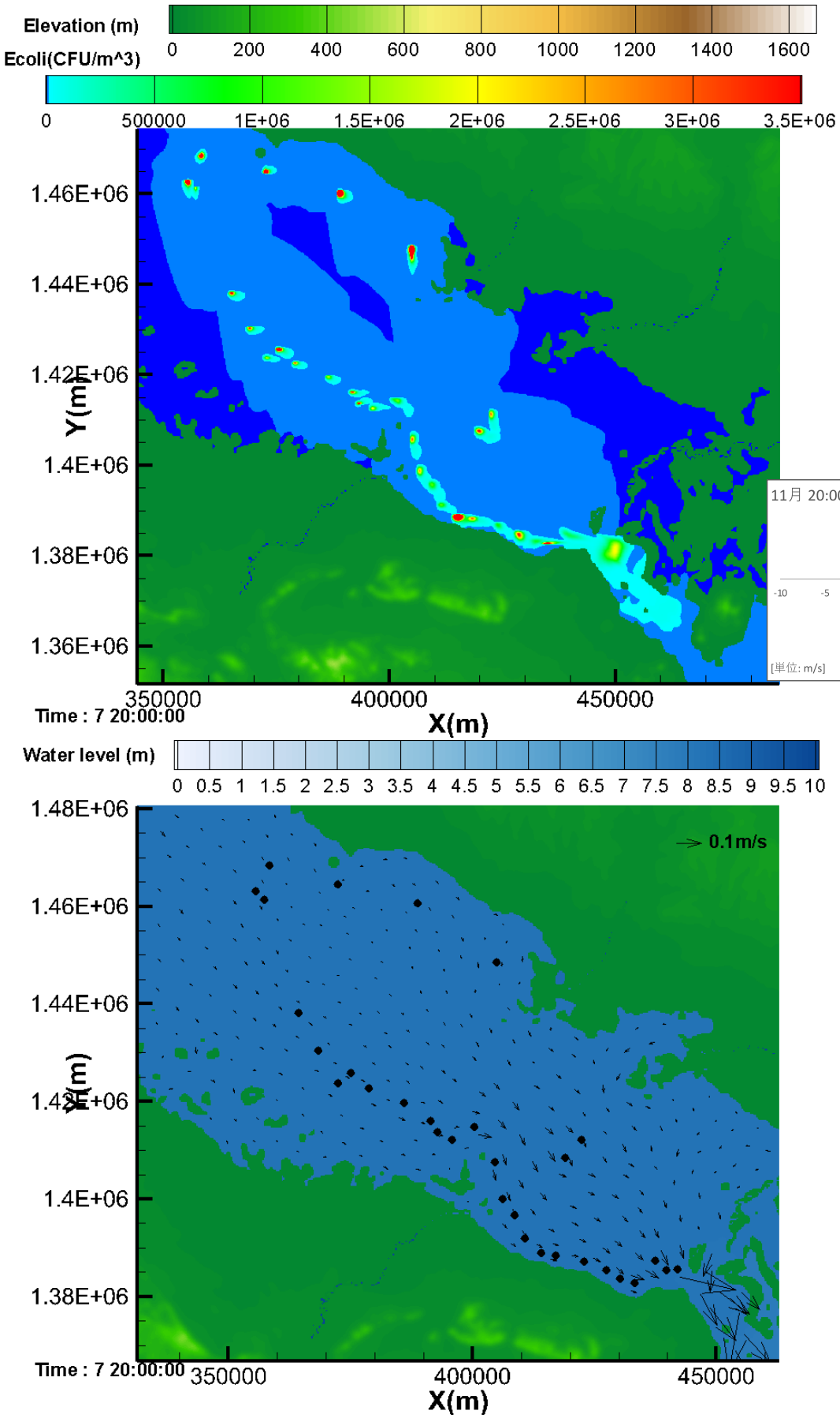


図4-193 11月 20:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

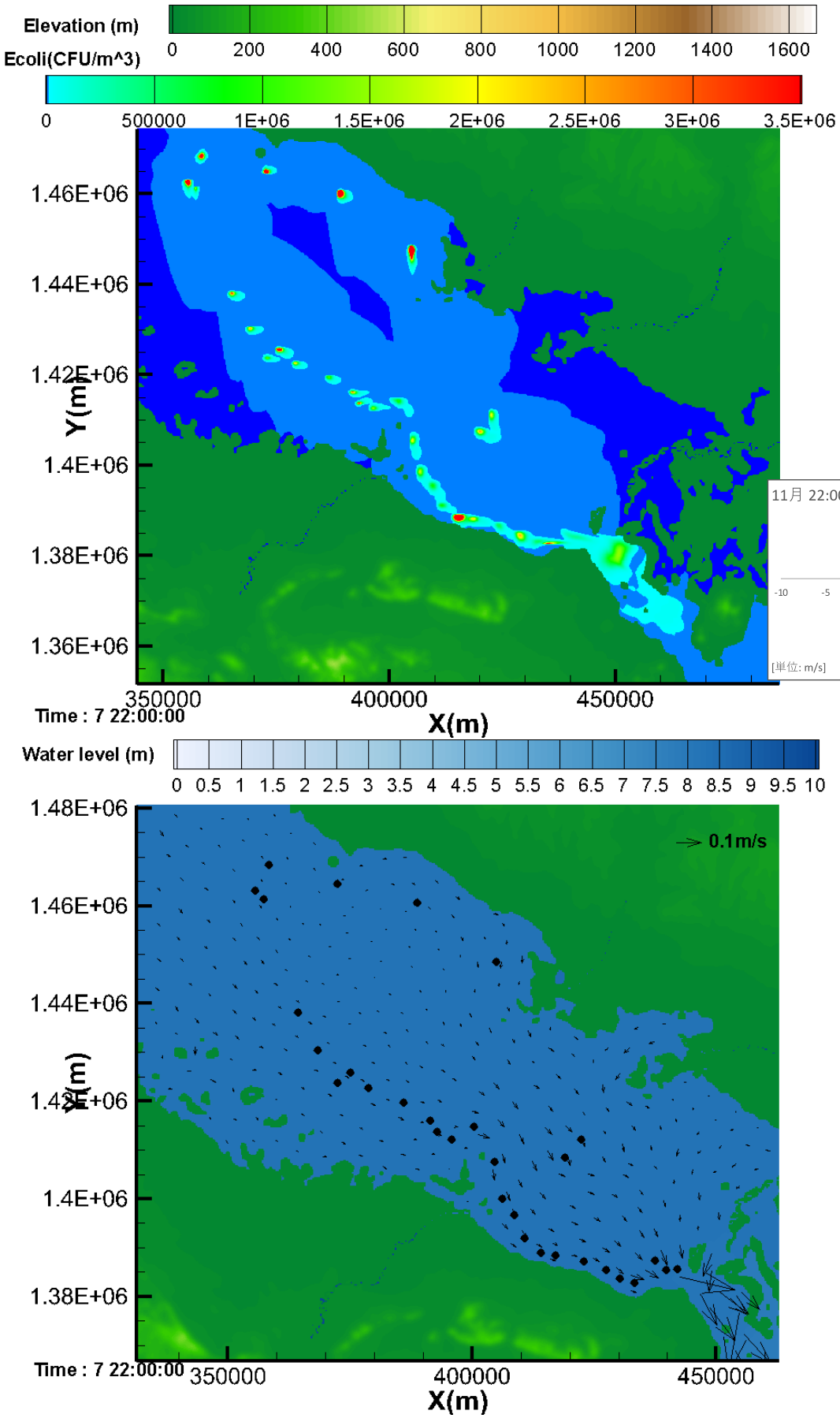
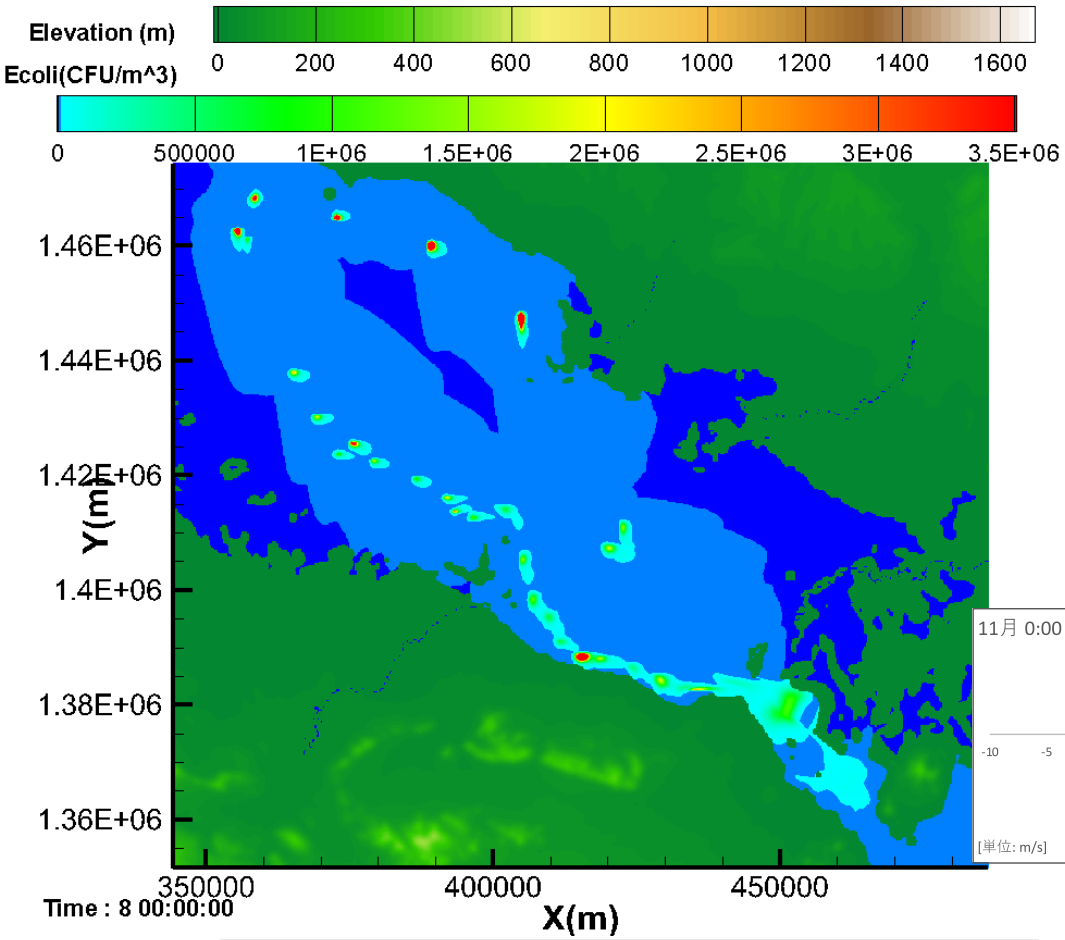


図4-194 11月 22:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



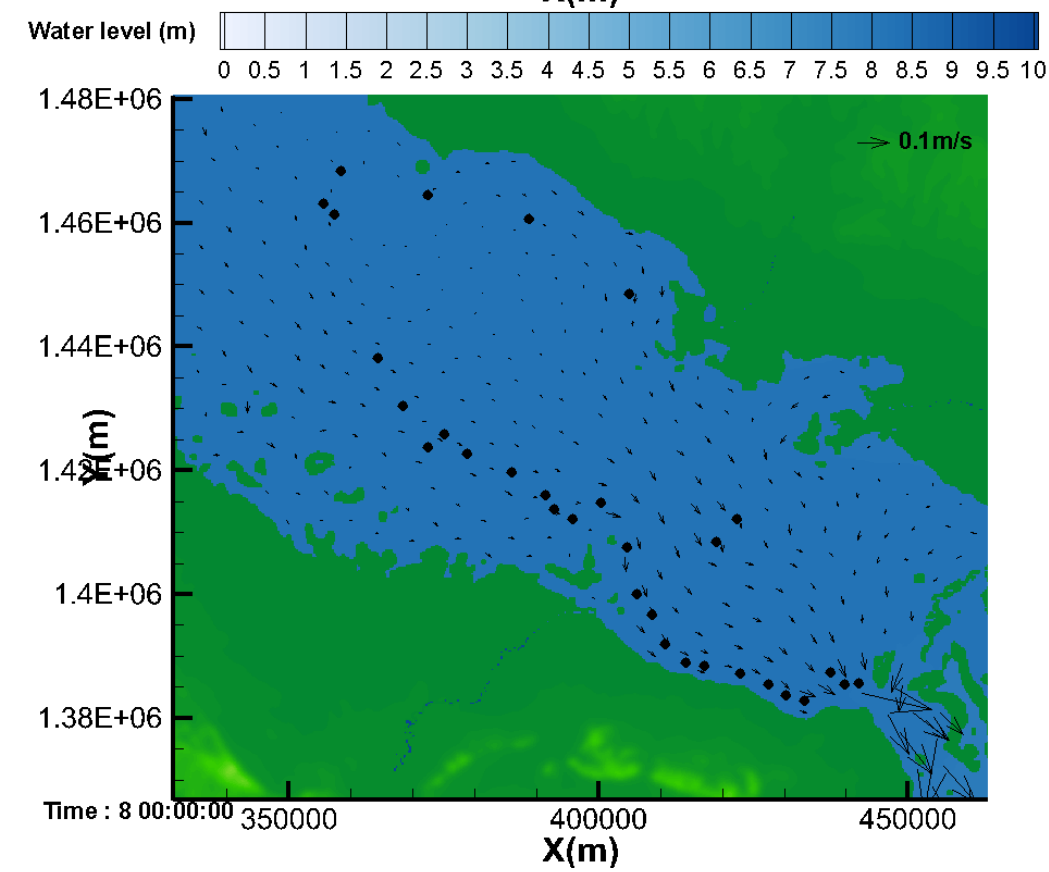


図4-195 11月 0:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

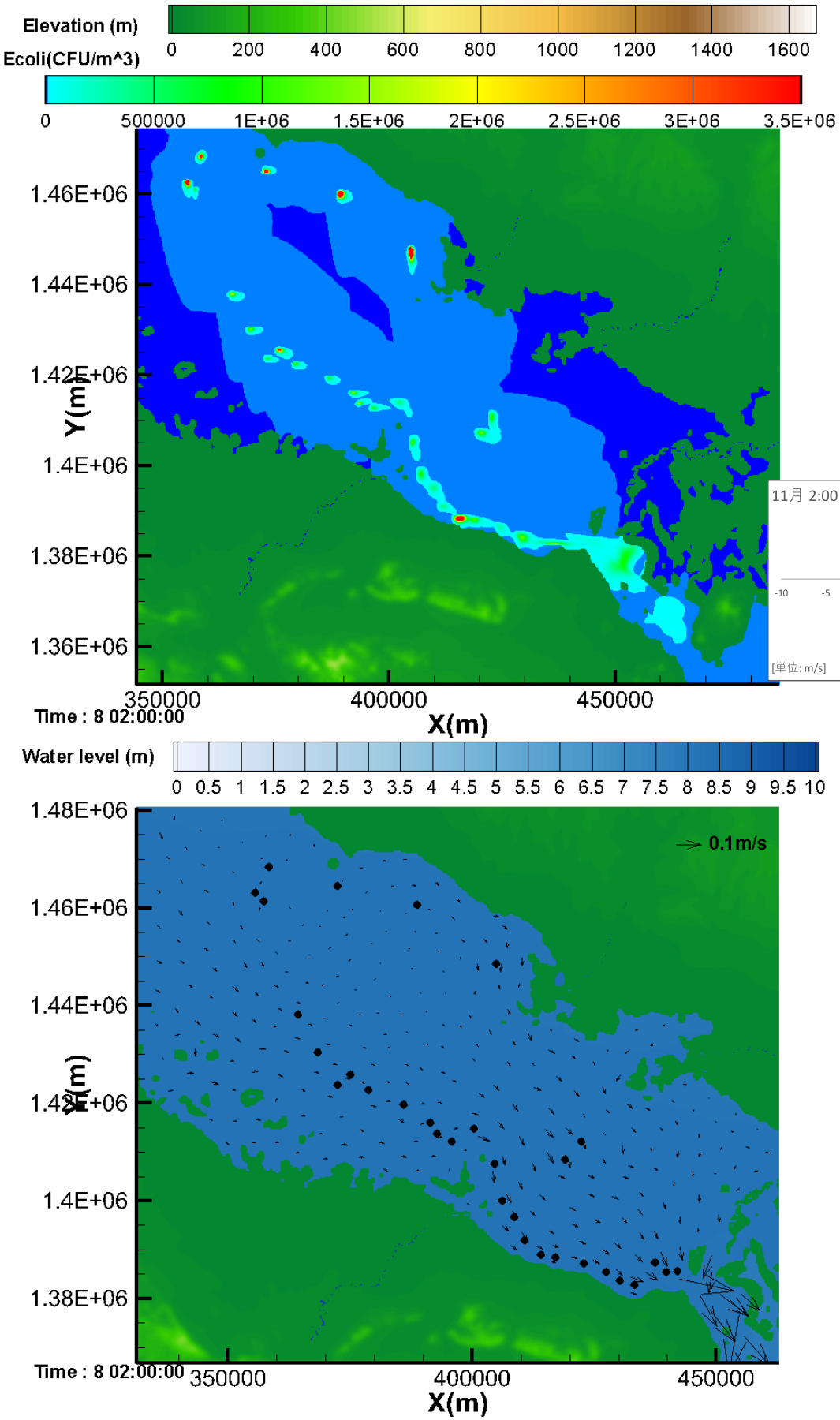


図4-196 11月 2:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル

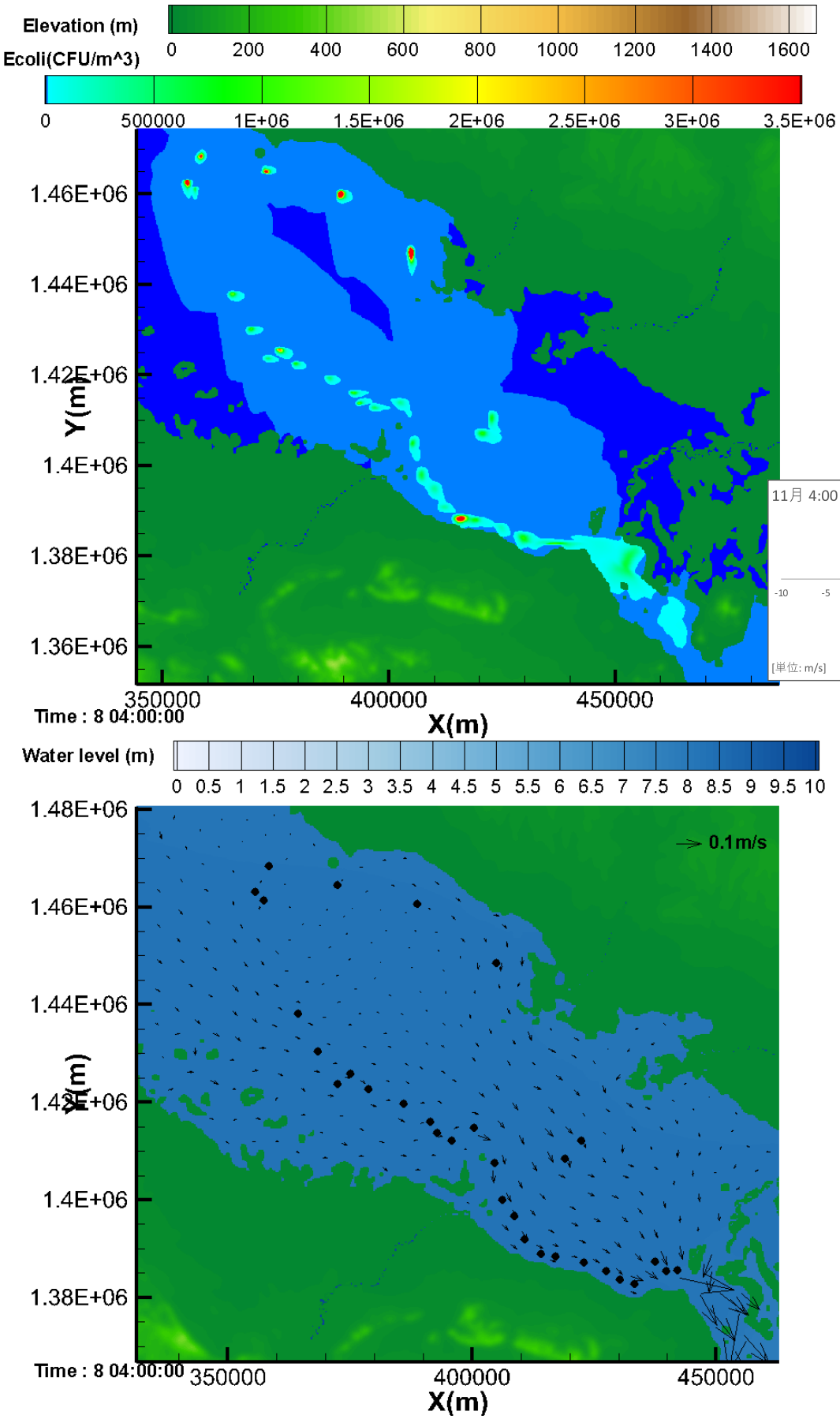
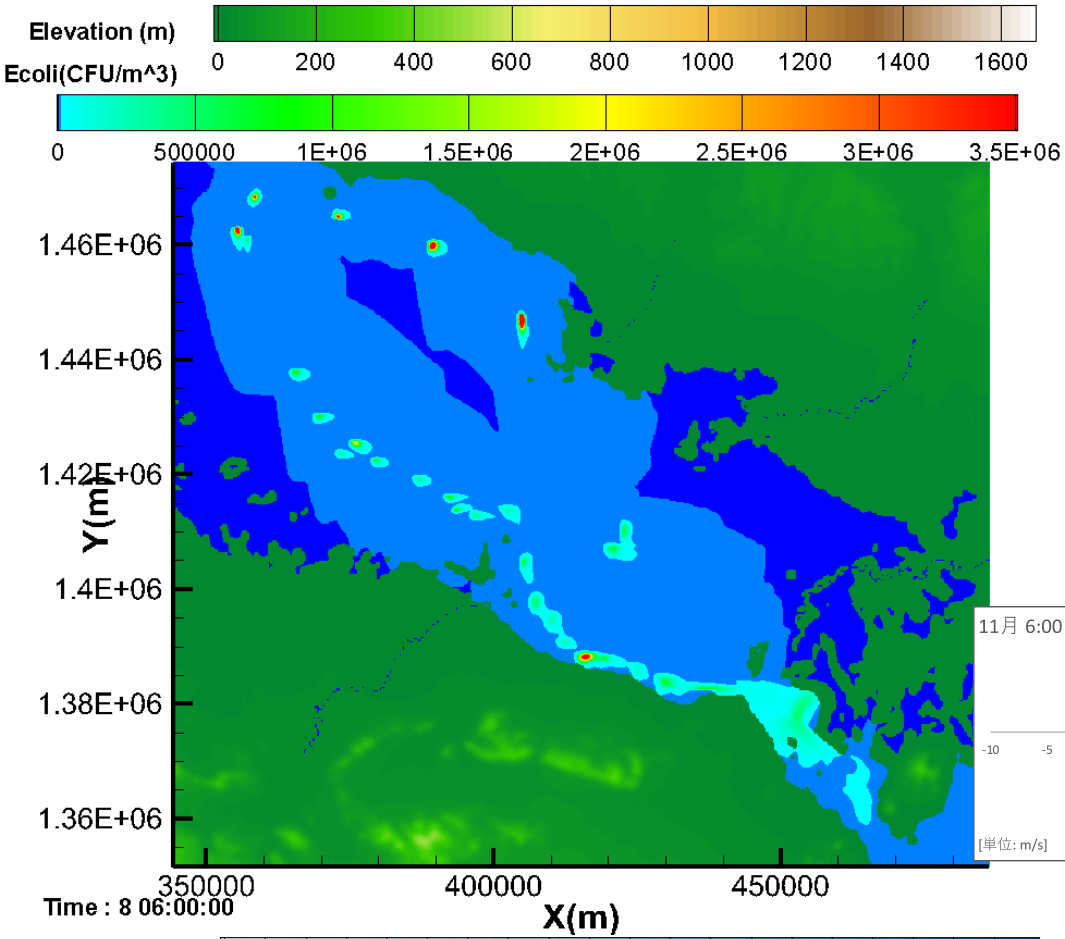


図4-197 11月 4:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル



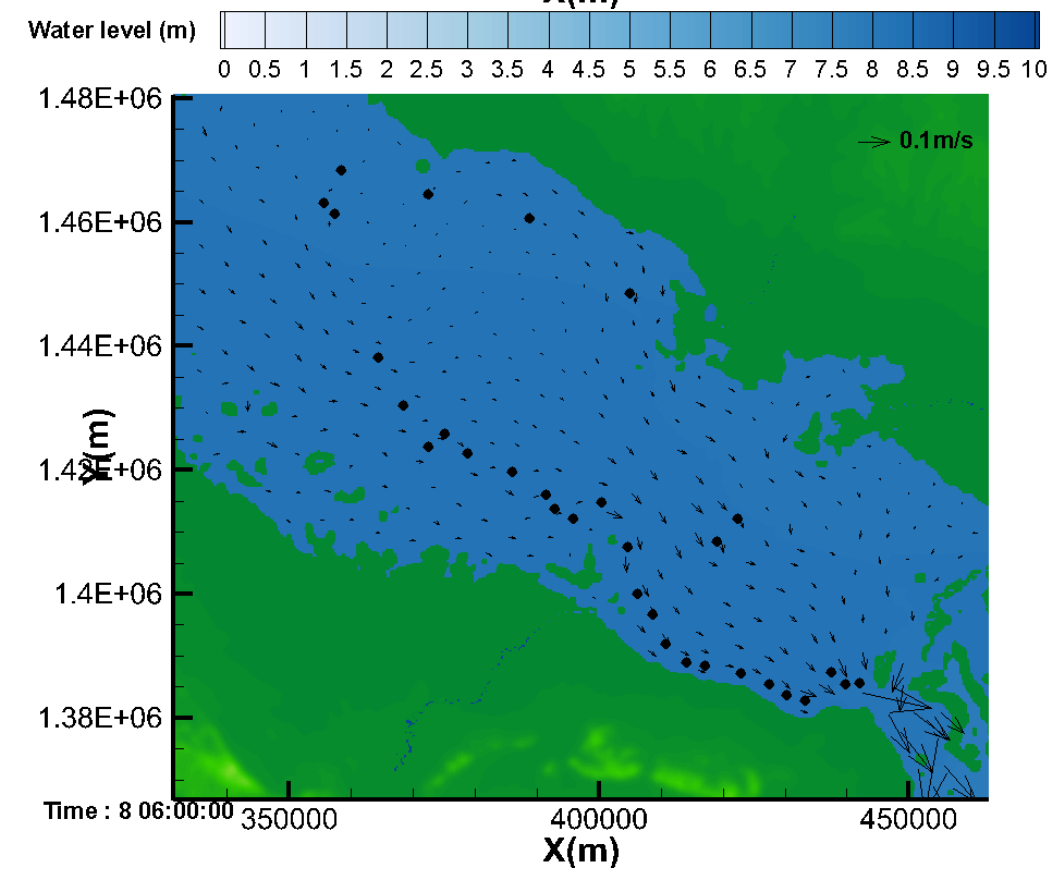


図4-198 11月 6:00の大腸菌濃度・流速分布・風ベクトル