平成 30 年度　修士論文

カンボジア王国トンレサップ湖 Chhnok Tru 水上集落への ３次元数値流動解析モデルの適用

指導教員　　中村　恭志　准教授

東京工業大学大学院　環境社会理工学院
融合理工学系　地球環境共創コース

修士課程　17M51700

竹村　康平

目次

第 1 章　序論　3

1.1.　研究背景　3

1.2.　既往研究　3

1.3.　研究目的と本論文の構成　4

第 2 章　数値標高モデルの作成　5

2.1.　数値標高モデルの作成の背景　5

2.2.　データの整理　5

2.2.1.　ADCP 観測による水深データ　5

2.2.2.　MRC による Bathmetry Map による標高データ　6

2.2.3.　SRTM　6

2.2.4.　Landsat　6

2.2.5.　Sentinel　6

2.3.　水陸境界の判別　7

2.3.1.　使用するデータの決定　7

2.3.1.1.　SRTM　7

2.3.1.2.　Landsat　8

2.3.1.3.　Sentinel　8

2.3.2.　NDWI　8

2.4.　陸域の標高　9

2.5.　水域の標高　9

2.5.1.　データの準備　10

2.5.2.　Level Set 法　11

2.5.3.　正則化法　11

2.6.　数値標高モデルの完成　12

図表集　14

第 3 章　水理学的条件の作成　32

3.1.　水理学的条件作成の背景　32

3.2.　計算条件　32

3.2.1.　計算領域　32

3.2.2.　初期条件　33

3.2.3.　下流側境界条件　33

3.2.4　上流側境界条件　34

3.3. 計算結果 34
3.4. 再計算 35
3.5. 三次元計算の境界条件 36
図表集 37

第四章 水上集落内の三次元流動計算 49
4.1. 三次元計算の概要 49
4.2. 計算条件 49
4.2.1. 計算手法 49
4.2.2. 計算領域 49
4.2.3. 初期条件 49
4.2.2. 下流側境界条件 49
4.2.1. 上流側境界条件 49
4.2.2. 気象条件 49
4.2.1. 摩擦係数 49
4.3. 流速計算結果 51
4.4. 大腸菌の輸送計算条件 52
4.5. 大腸菌の輸送計算結果 53
図表集 55

第 5 章 結論 118

参考文献 119
謝辞 121

第一章　序論

1.1　研究背景

カンボジアの中央に位置するトンレサップ湖は東南アジア最大の湖である。トンレサップ湖は、国内におけるタンパク質も約 70%を水産物として供給している。また、湖水面に水上集落を形成し、推定で 100 万人が居住するなど、生活の場も提供している。さらに、雨季には大きく流量を増大させるメコン川からの逆流により、湖の大きさを約 15,000km² と乾季の大きさ約 2,500km² の 6 倍も変化させる。大きな水環境の変化により豊かな生態系を築いており、トンレサップ湖はカンボジアの重要な社会基盤となっている。

水上集落では上下水道の整備が行なわれておらず、糞便を含む汚水が処理されずに湖水に排出されている。一方で、水上集落の住民は湖水を飲用水または生活用水として利用しており、下痢等の疾病経験を住民が多く持つ事が明らかになるなど、水上集落での汚水や病原体の動態に関する知見が求められている[1]。

そこで本研究では、南部湖口付近に位置する水上集落 Chhnok Tru を研究対象とし、三次元数値流動解析により病原体輸送の把握を試みる。特に水上集落から排出される人糞由来の大腸菌に注目する。

1.2　既往研究

トンレサップ湖では、GPGPU を活用した数値流動解析モデル[2]があるが、このモデルは湖全域を対象にしており、計算格子が 250m 間隔と粗い。研究対象の水上集落は約 200m の水路に密集しており、水路の再現にはより細かい計算格子を使用したモデルが求められている。

また、今回注目する水上集落 Chhnok Tru では、複数の水路が入り組んでおり、複雑な地形の影響を受けると考えられる。現在存在する標高データはメコン委員会(MRC)による 1997 年から 1998 年にかけて行なわれた測深データがあるが、観測点の間隔が 400m と粗い。標高データは計算格子と同様に 200m の水路を表現するためには、より細かい標高モ

デルを作成する必要がある。さらに、対象集落内での数値流動解析には、初期条件・境界条件として流量や水位が必要となるが、人的・経済的制約から現地観測データが無いため、これらの水理学的条件も求められている。

そして、水路の上層と下層の温度の違いによって温度成層が形成される事があり、流れを大きく変化させる事がある。そこで三次元での計算で熱収支を考慮した水温計算が可能なTITech-WARM[3]を用いて汚水の輸送を計算する。

1.3 研究目的と本論文の構成

本研究では、南部湖口付近に位置する水上集落 Chhnok Tru における三次元数値流動解析 TITech-WARM による病原体輸送の把握を行なう。また、本モデルに必要となる数値標高モデルを、2018 年 3 月に行なわれた現地観測のデータや衛星データを使用して作成する。さらに、初期条件・境界条件として使用する水理学的条件を広範囲における二次元数値流動解析モデルにより推定する。以上の条件を用いて、三次元数値流動解析モデルを対象集落 Chhnok Tru に適用し、流速分布を求める。さらに、パッシブスカラー解析により大腸菌の輸送や分散を検討する。

本論文の構成を以下に示す。まず、第二章では、数値標高モデルの作成について示す。衛星データを用いて水域を特定する。新たな現地観測データとして ADCP 測深データを用いて水域の標高を補間し、数値標高モデルを作成する。

次に、第三章では、前章で作成した数値標高モデルを使用して広範囲における二次元数値流動解析モデルを適用し、流量や水位を推定する。

そして、第四章において、以上で準備した数値標高モデルと水理学的条件を用いて三次元数値流動解析モデルを対象集落に適用する。まず、水温計算も含めて計算を行ない、流速分布を求める。そしてパッシブスカラー解析により、大腸菌の輸送や分散を時間や深さによって変化する様子を示す。

最後に、第五章において、本論文をまとめる。

第二章　数値標高モデルの作成

2.1　数値標高モデル作成の背景

河川や湖沼において、水の流れを最も大きく変化させる要因の一つとして地形による影響が挙げられる。流動数値解析モデルにおいても地形による影響を再現するためには、数値標高モデル（Digital Elevation Model）が必要不可欠である。数値標高モデルとは、ある地点の座標とその地点における標高のデータの集合体の事である。

しかし、本研究の対象地域である Chhnoc Tru における数値標高モデルは整備されておらず、数値標高モデルの作成が求められている。そこで今回、衛星画像や現地観測のデータなどを使用して数値標高モデルを作成した。

手順は以下の通りである。まず、衛星データにより各地点が水域であるか陸域であるかの判別を行なう。そして水域と陸域の標高をそれぞれ観測結果や衛星データより算出する。そして最後に、それらのデータを組み合わせることで数値標高モデルを作成する。

2.2　データの整理

今回数値標高モデルの作成に使用するデータは、現地観測による 2 種のデータと衛星による 3 種のデータである。詳しい説明は以下の通りである。

2.2.1　ADCP 観測による水深データ

まず、ADCP 観測による水深データ（以降 ADCP 測深データと呼ぶ）である。まず、ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)は、ドップラー効果を利用する事で流速や水深などの水環境の状況を計測する図に示すような観測機器である。水中に超音波パルスを発信し、反射して返ってきた音の周波数の変化によって水中の状況を観測する。流速の鉛直分布や水深を計測することができ、流量も推定する事ができる。

2018 年 3 月 7 日～9 日の 3 日間にかけて観測が行なわれた。今回使用するデータは、水深である。

2.2.2　MRC による Bathmetry Map による標高データ

次に、MRC(Mekong River Commision)、メコン川委員会による Bathmetry Map による標高データ（以降 Bathmetry データと呼ぶ）である。本データは河床における標高のデータである。上で述べた ADCP 測深データは水深データであるため、ADCP 測深データと Bathmetry データの両者を扱うためには標高データに統一する必要がある。また観測日時は 1997 年～1998 年と 20 年程昔のデータであるため、一部地形が変化している所では現在の標高と大きく異なる可能性がある。

2.2.3　SRTM

次に、SRTM(Shuttle Rader Topography Mission)、スペースシャトル地形データである。SRTM はスペースシャトルからのレーダーを使用する事で立体地形データであり、無償で公開されている。ただし、水域における標高は河床などの水底ではなく水面の標高を示しており、空間解像度は 30m である。また観測日時が 2000 年であり、Bathmetry データと同様に一部地形が変化している所では現在の標高と異なる可能性がある。

2.2.4　Landsat

次に、Landsat である。Landsat は NASA が運用している衛星であり、地表面での反射率のデータ等を無償で公開している。空間解像度は SRTM と同じ 30m である。また、使用するのは 2017 年 2 月 5 日～21 日に観測されたデータであり、ADCP 測深データの観測日である 3 月 7 日～9 日と近い観測日のデータを選択した。

2.2.5　Sentinel

最後に、Sentinel である。Sentinel は ESA が運用している衛星であり、Landsat と同様に地表面での反射率のデータ等を無償で公開している。空間解像度は SRTM や Landsat よりも細かい 10m である。また、使用するデータは 3 月 10 日に観測されたデータであり、Landsat と同様に ADCP 測深データの観測日である 3 月 7 日～9 日と近い観測日のデータを選択した。

2.3　水陸境界の判別

水位が大きく変化するトンレサップ湖では水陸の境界が大きく変化する事、また網目状の入り組んだ水路が多く存在する事から、観測結果のみによる水陸境界の判別を行なう事は困難であると判断した。今回、データの取得時期を選択できる衛星データを使用した水陸境界の判別を試みた。

2.3.1　使用するデータの決定

まず多種の衛星データから、水陸境界の判別に使用する衛星データを選択する。ここで衛星データに求められる条件がいくつか存在する。衛星データの取得時期と現地観測時期が水位の時間変化に比べ近い事、水域特に細い水路を表現できるようなある程度細かい解像度を持っている事等である。これらの条件を満たす衛星データを選択する。

2.3.1.1　SRTM

まず、確認したのは SRTM(Shuttle Rader Topography Mission)である。SRTM は 2000 年にスペースシャトルからのレーダーにより観測された標高データである。

ADCP による現地観測の航路と重ねてみた結果は図 2.1 の通りである。ADCP 観測を行なった航路と SRTM による陸地が重なった。これは SRTM が観測された時期と ADCP 観測が行なわれた時期が異なったために水位の違いが生じ、水域である観測航路と SRTM による陸域が重なったと考えられる。

また、湖口における衛星画像と SRTM の標高データをそれぞれ図 2.2 に示す。衛星画像から分かるように、湖口付近では細かな水路が多く存在しており、今回の計算ではその細かい水路も再現した数値標高モデルの作成を行なう必要がある。そのため、この細かい水路も判別できる衛星画像が求められている。一方、SRTM では解像度不足のために水路が塗りつぶされてしまい、水路の判別が難しい。

以上のように、ADCP 観測の航路と陸域が重なってしまったため、また再現すべき細かい水路が判別できていないため、SRTM を水陸境界の判別に使用する事を断念する。

2.3.1.2 Landsat

次に確認を行なったのは Landsat である。Landsat は、2017 年 2 月 5 日～16 日に観測されたデータを使用した。

図 2.3 のように、ADCP 観測の航路が Landsat による衛星画像の水域に収まっている。

しかし、Landsat を水陸境界の判別として使用するには満たす条件が他にも存在する。湖口部における Landsat のトゥルーカラー画像を図 2.4 に示す。ここで水上集落が集中している水路の幅は約 200m となっており、解像度が 30m の Landsat では 6～7 個の格子しかない。水路の部分を拡大したこの図のように水路を鮮明に表す事ができてないため、Landsat も水陸境界の判別に使用することを断念する。

2.3.1.3 Sentinel

そして Sentinel について確認を行なった。Sentinel は、解像度が 10m と高解像度であり、細かい水路の再現が可能ではないかと考え、水陸境界の判別が可能か確認を行なった。

まず、観測航路と Sentinel による衛星画像の水域の比較は図のようになった。図 2.5 から分かるように観測航路は陸域に重なっておらず、不合理な水域は見つからなかった。

また、水上集落が密集している水路も図 2.6 のように解像度が 10m である Sentinel では 20 個程度の格子により十分鮮明に表現することができている。

以上のように、Sentinel によって水陸境界の判別を行なう事とした。

2.3.2 NDWI

次に Sentinel を利用して水域と陸域の判別を行うための指標と閾値の決定を行なう。今回は水域の特定によく利用される指標である NDWI(Normalized Difference Water Index)という地表面の水の存在と高い相関を持つ指標を使用する。NDWI は赤波長と中間赤外波長の反射率を使用し、赤波長と中間赤外波長の反射率をそれぞれ R、SWIR として以下の式のように表す事ができる。また、Sentinel では赤波長は Band3 により、中間赤外波長は Band8 により観測される。

$$NDWI = \frac{\mathrm{R} - \mathrm{SWIR}}{\mathrm{R} + \mathrm{SWIR}} \qquad \text{(3.2-1)}$$

NDWI は式から分かるように-1~1 の範囲の値となる。NDWI が高い値の時はその地点が水域であることを表しており、NDWI が低い値の時はその地点が陸域である事を表している。この NDWI をピクセル毎に求めると図 2.7 のようになる。濃い青色が水域、薄い青色

が陸域を表している。ここで、水域と陸域を判断するためには閾値を決定する必要がある。

まず、定量的に閾値の確認を行なう。トゥルーカラー画像により確実に陸域と水域であると考えられる地点を選択し、その地点における赤波長と中間赤外波長の反射率の関係を調べる。今回、陸域として緑に覆われた陸地の地点と田んぼ又は湿地と考えられる地点を、水域としてトゥルーカラーから浅いと考えられる水域と同様に深い水域を図 2.8 に示すように選択した。これらの地点で得られた赤波長と中間赤外波長の関係を NDWI の値とともに図 2.9 に示す。この図より陸域と水域の閾値として-0.2 が適切であると考えられる。

次に、任意の閾値による水域と陸域を推定し、比較することにした。今回、閾値として選択した値は、0、-0.2、-0.4 の三種類の値である。そして、三種の水域と Sentinel でのトゥルーカラー画像との比較を行なった結果はそれぞれ図 2.10~図 2.13 のようになった。水陸境界の判別において重要となる細かい網目状の水路の再現に注目すると、閾値を-0.2 とした時が最も再現できていることが分かる。

以上より閾値を-0.2 として、閾値より高い NDWI の地点を水域、閾値より低い NDWI の地点を陸域とすることにする。これにより水陸の判別を行なった結果を図 2.14 に示す。黒色の地点が陸域、白色が水域である。この結果を拡大した結果を図 2.15 に示す。この図 2.15 から分かるように、水上集落や水上の植生のある本来水域である地域を陸地と判断している部分や田んぼなどの陸地を水域と判断している部分がある。これらを手動で修正した結果を図 2.16 に示す。

以上により、水陸境界の判別が完了した。

2.4　陸域の標高

次に陸域での標高を求める。

今回使用するデータは前項で使用した SRTM である。前項の水陸境界の判別では細かい水路を再現できていなかったため使用しなかった。しかし陸域では、水路のある領域のような極端に標高が変化する部分が少ないと考えられる事、水の流れを計算する時には高精度の陸域標高が求められない事から、陸域の標高として SRTM を使用する事とした。

2.5　水域の標高

最後に水域での標高を求める。

今回使用するデータは ADCP による現地観測データ（以降 ADCP 測深データと呼ぶ）と MRC による Bathmetry データ（以降 Bathmetry データと呼ぶ）の２種類である。ADCP 測深データは水深データ、MRC データは河床の標高データであり、水深と標高の２種のデ

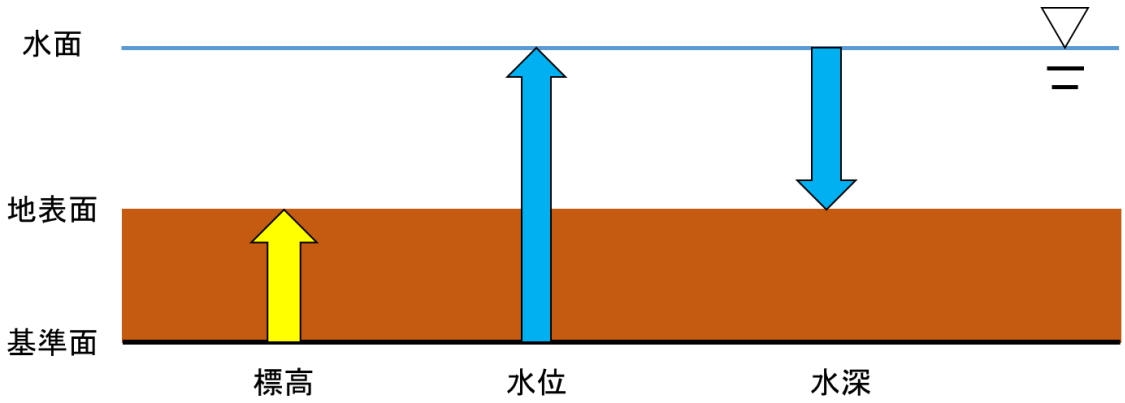


図-2.23　標高水位水深の関係

ータを同時に扱うためにはどちらかに統一する必要がある。今回水深データである ADCP 測深データを標高データに変換する。

2.5.1　データの準備

ADCP 測深データの水深を標高に変換するためには、水位のデータが必要である。ここで、Kampong Luong と Prek Kdam で水位の観測が行なわれている。図 2.17 に示すように、Kampong Luong は TSL 上に、Prek Kdam はトンレサップ川上に位置している。ADCP 観測が行なわれた月である 2017 年 3 月における日平均水位はそれぞれ図 2.18 と図 2.19 のようになる。基準点は HaTien であり、観測は 1 日 1 回行なわれている。観測が行なわれた 2018 年 3 月 7 日から 9 日にかけての平均水位は Kampong Luong では 2.33m、Prek Kdam では 1.39m となった。

まず、これらの水位を利用し、ADCP 測深データと Bathmetry データのうち距離が 10m 以下となるほぼ同じ位置で観測されていると考えられる点においてそれぞれの標高を比べることにした。10m という値は Sentinel の空間解像度と同じ値であり、作成する数値標高モデルの解像度も 10m にするため、10m の距離であれば二種の観測地点の距離が 10m 以下であれば、同じ地点とみなすことにした。使用した観測点の位置を図に、ADCP 測深データと Bathmetry データの標高の関係を図に示す。この図 2.20 より、Kampong Luong の水位の方が水上集落の水位に近い値である事が分かるが、湖口の水位としてより近い値が存在する可能性がある。実際に湖口は Kampong Luong の下流側に Prek Kdam の上流側に存在しているため、湖口の水位は Kampong Luong と Prek Kdam の水位の間の値であると考えられる。

そこで、ADCP 測深データの水深を標高に変換するための水位の値を変化させ、最も決定係数 R^2 が大きくなる値を湖口の水位として尤もらしい水位を求める。湖口の水位と決定係数 R^2 の関係を図 2.21 に示す。この図より、最も決定係数が大きくなる水位は 2.27m と

求められ、この値を湖口の水位とする。この値を用いて ADCP 測深データを水深データから標高データに変換し、水域の標高を推定する。

2.5.2 Level Set 法

次に、水陸境界からの距離を求める。この距離は標高を求める次のステップでの計算の入力条件として使用する。水域での境界からの距離を正、陸域での境界からの距離を負として、Level Set 法により境界からの距離を算出する。Level Set 法とは任意の点から水陸境界へ垂線を下ろし、その二点間の距離を求める。これを全ての格子で行なうことで境界からの距離を算出する。この Level Set 法により求めた水陸境界からの距離を図 2.22 に示す。この結果を用いて水域の標高を推定する。

2.5.3 正則化法

最後に、正則化法により準備したデータを用いて水域の標高を推定する。正則化法とは、隣接する格子間での標高変化と観測値からの差が小さくなるように補間を行なう手法である。この標高変化と差は、地点 s における推定する標高をf_s、同地点における観測された標高をf_s^{OBS}とすると以下の式で表す事ができる。

$$I = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2}\{(f_i - f_{i-1})^2 + (f_{i+1} + f_i)^2\} + \lambda(f_s - f_s^{OBS})^2$$

この I を最小化するようにf_iをそれぞれ決定する。また、λは観測値との差を格子間での標高変化と比べてどの程度重要視するかを表す変数である。今回、λを 0.02 とおいて推定を行なう。この式を微分し、以下の式を解く事に相当する。

$$\frac{\partial I}{\partial f_i} = (F_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}) + 2\lambda(f_s - f_s^{OBS})\delta_{Si} = 0$$

これは以下の式のように拡散方程式の定常状態を求める事と同義である。

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{2\lambda}{\Delta x \Delta y}\left(f_{lm} - f_{lm}^{OBS}\right)\delta_{lmij}$$

使用したデータは、Bathmetry データ、標高データに変換した ADCP 測深データ、そして Level Set 法により求めた水陸境界からの距離の 3 種である。作成する数値標高モデルの解像度を Sentinel の解像度と同じ 10m とする。

そして、正則化法により求めた推定標高は図 2.24 のようになった。ここで図 2.24 のうち、湖口西部を拡大した図を図 2.25 に、同じ地域の衛星画像と Bathmetry データ観測点を図 2.26 に示す。計算結果である推定標高からは、三日月型の島の北部では陸地が盛り上が

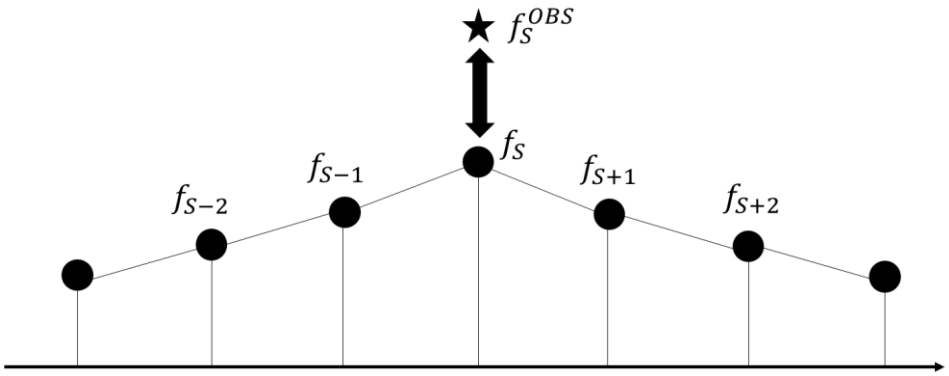


図-2.23　正則化法の考え方を用いて求めた水域における標高

り水の流れを阻害しているように見える。一方、衛星画像からこの地域には特に隆起しているようには見えず、前後の水路と同じような水の流れがあるように見える。この違いは水路の中心部分の標高データが無いことと水路の北部と南部にある隆起している部分の Bathmetry データの存在が原因である。正則化法は上記のように拡散方程式を解く事と同義であり、水路の標高を求める時に陸域に近く高い標高の Bathmetry データのみを使用してしまったために本来の水路の標高を再現することができなかったと考えられる。

そこで図 2.27 に示すように、陸域に近い標高データを入力せず、代わりに前後の水路の標高である 1.5m を与えたデータを新しい入力条件として使用し、再計算する。再計算を行なった結果を図 2.28 と図 2.29 に示す。隆起してしまっていた水路に注目すると、スムーズな水路を表現できているように見える。

2.6　数値標高モデルの完成

以上によって、水陸境界の判別、陸域の標高と水域の標高の推定が完了した。これらの結果を組みあわせて作成した数値標高モデルは図のようになる。

ここで、求められた推定標高の確からしさを検証する。標高の計算に使用した ADCP 測深データと Bathmetry データの標高と、観測地点と同じ地点における推定された標高の比較を図に示す。ここで観測標高と推定標高の間に一部大きな差がある地点がある。ここで、二種の標高差が 5m 以上となった地点を湖口における水陸判定した画像上にプロットすると図のようになった。これらの点がある地域を拡大すると、それぞれ図のようになる。これらは実際には水域における観測点であるが、川岸の形状や水路幅に比べて Sentinel の解像度が 10m と粗く、陸域として推定されてしまったために大きな誤差となってしまった。一方、これらの大きい誤差となった地点の付近の水域では誤差が少なく、水路の河床標高を表す事ができているため、この大きな誤差の地点は数値標高モデルの欠陥を示すものではない事が分かる。

また、数値標高モデルの信頼性を確かめるため、NSE(Nash-Sufficient Efficiency)を求めると 0.797 となった。NSE が 0.70 以上の時そのモデルは確からしいと言われており、0.70 を大きく上回る本数値標高モデルは十分に確からしいと言える。また、水域と判断した地点のみにおける NSE は 0.990 と高い値となった。

以上を持って、数値標高モデル作成の完成とする。

第二章　図表集

2.3　水陸境界の判別

2.3.1.1　SRTM

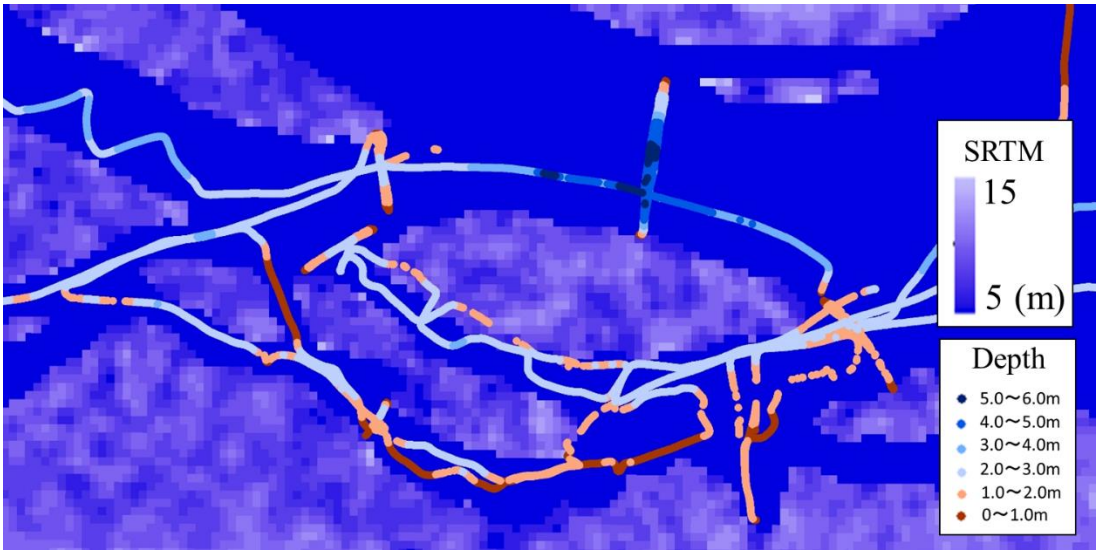


図-2. 1　SRTM と ADCP 観測航路の比較

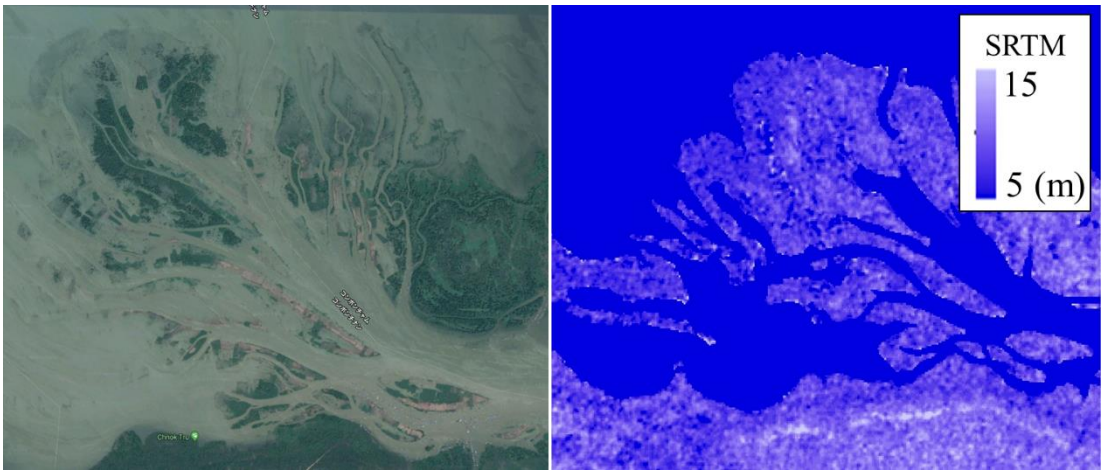


図-2. 2　湖口における衛星画像（左図）と SRTM の標高データ（右図）

2.3.1.2　Landsat



図-2. 3　Landsat によるトゥルーカラー画像と ADCP 観測航路の比較

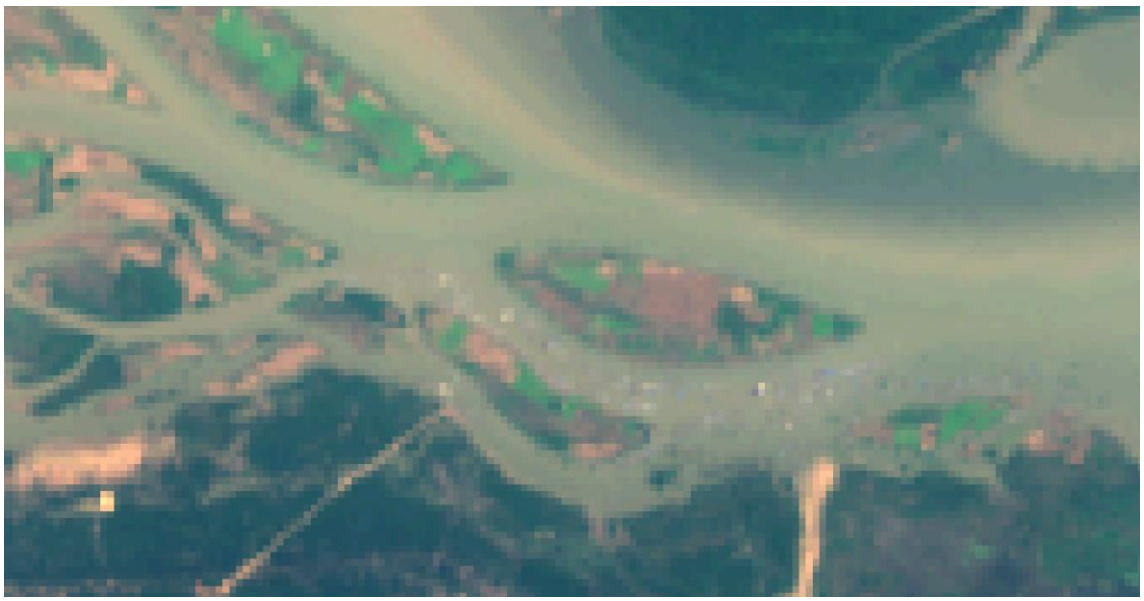


図-2. 4　水上集落のある地域での Landsat によるトゥルーカラー画像

2.3.1.3　Sentinel

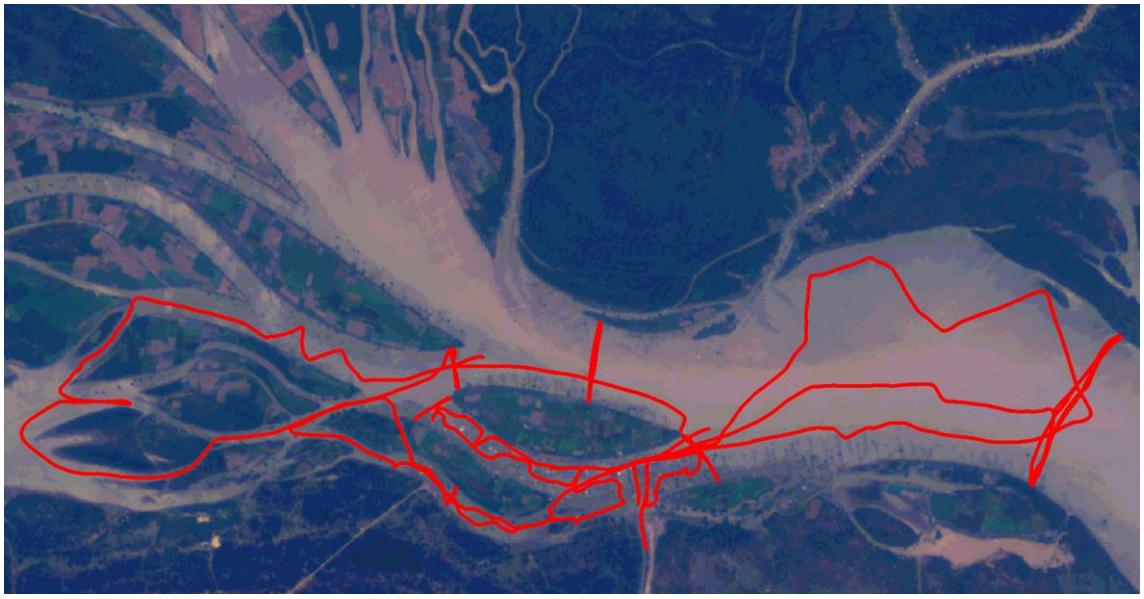


図-2. 5　Sentinel のトゥルーカラーと ADCP 観測航路の比較



図-2. 6　水上集落のある水路における Sentinel のトゥルーカラー画像

2.3.2　NDWI

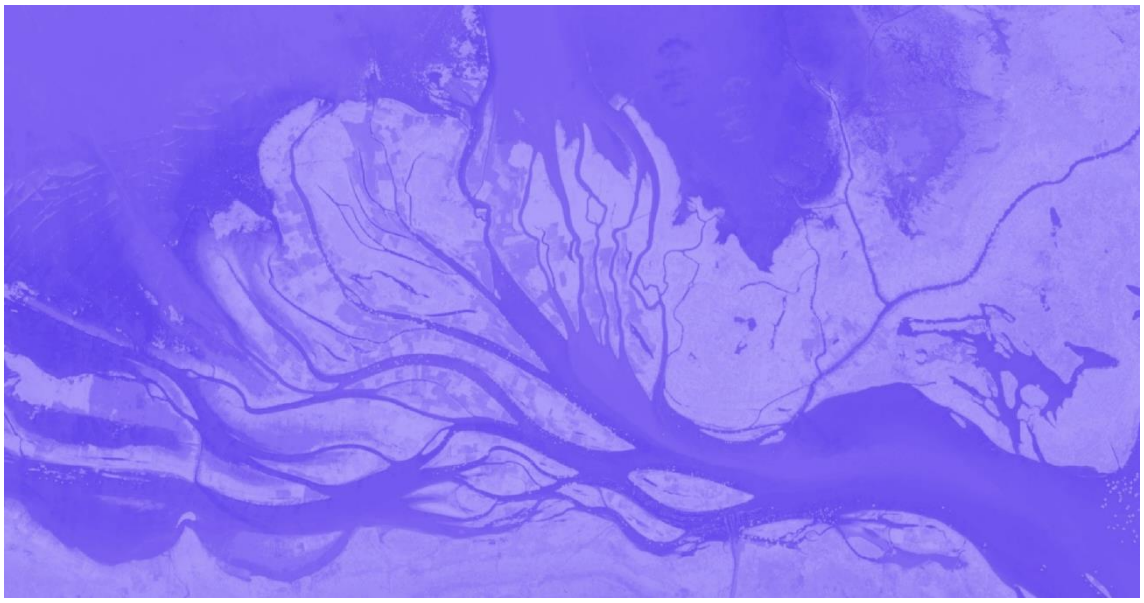


図-2. 7　Sentinel を使用した NDWI

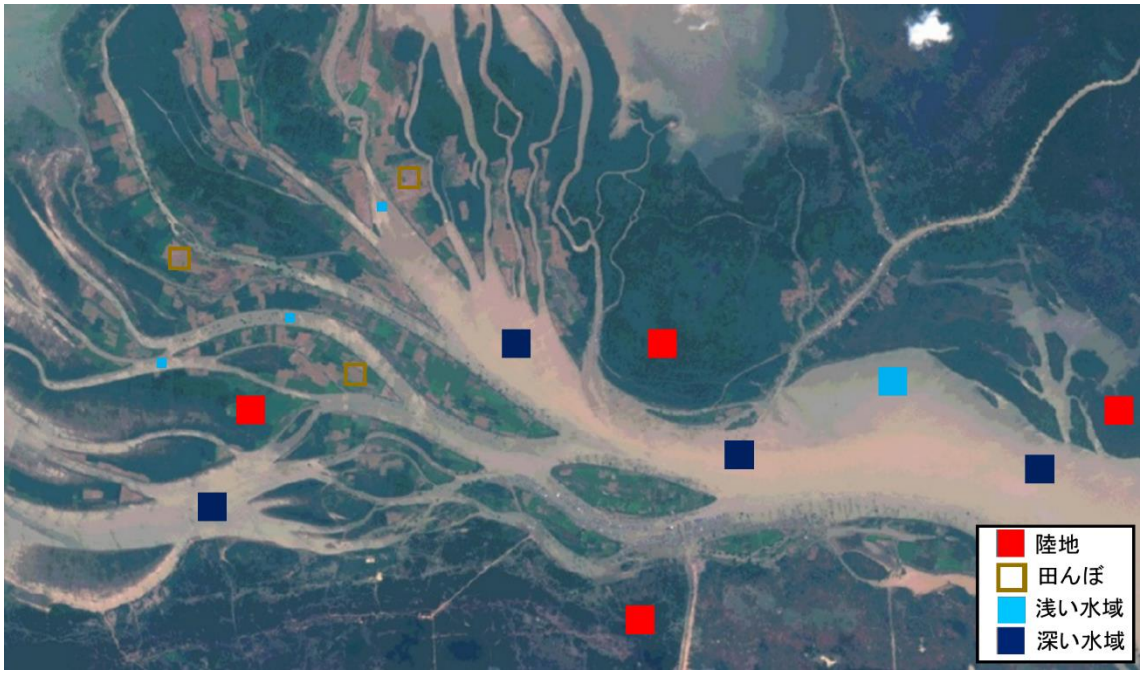


図-2. 8　反射率データの取得位置

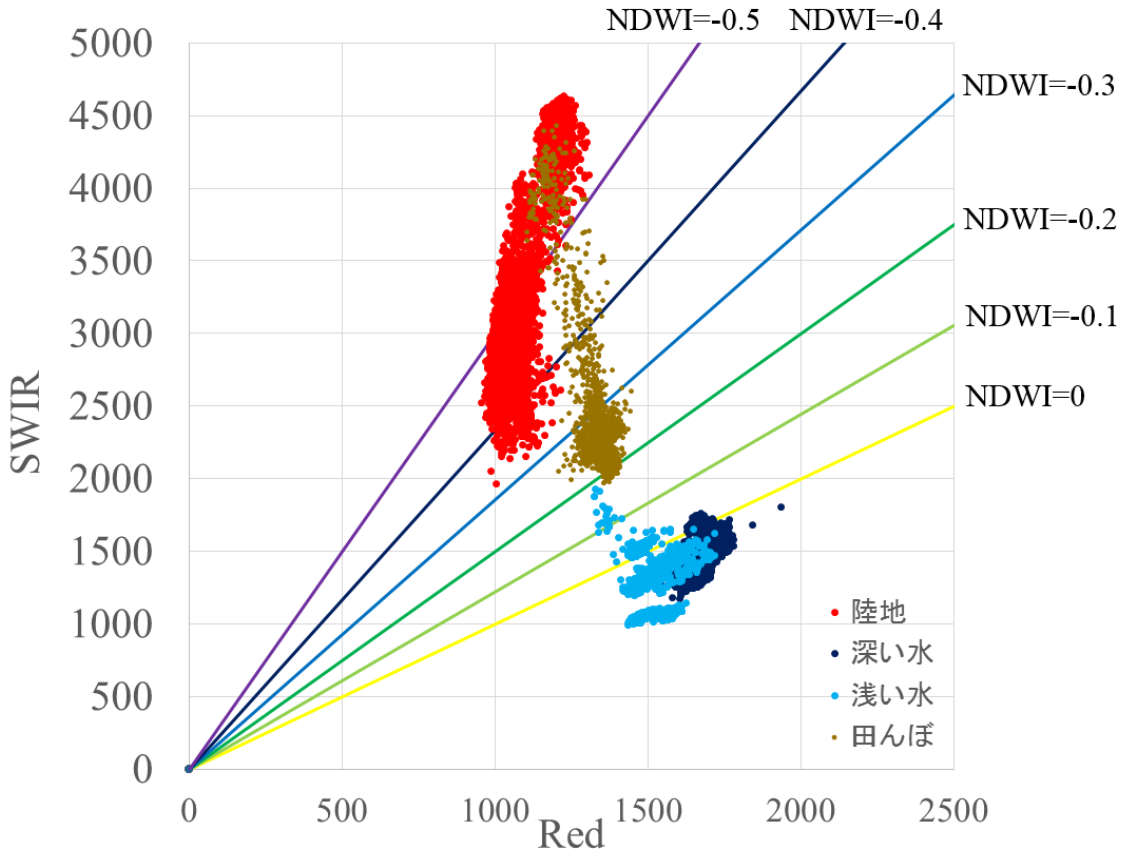


図-2. 9　陸地及び水域における各反射率の関係

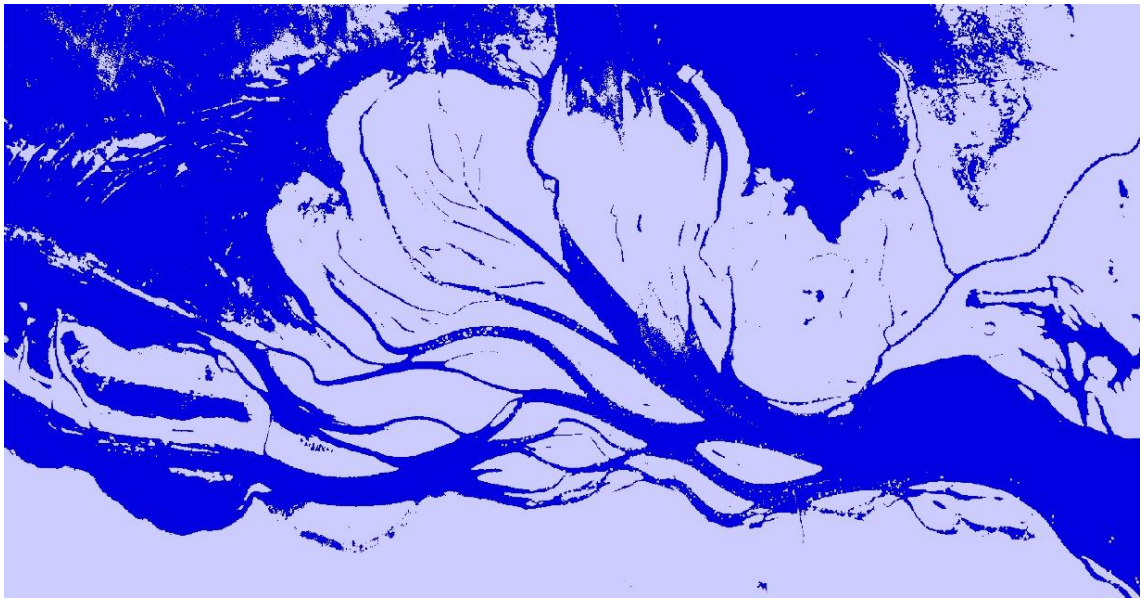


図-2. 10　閾値 0.0 による NDWI

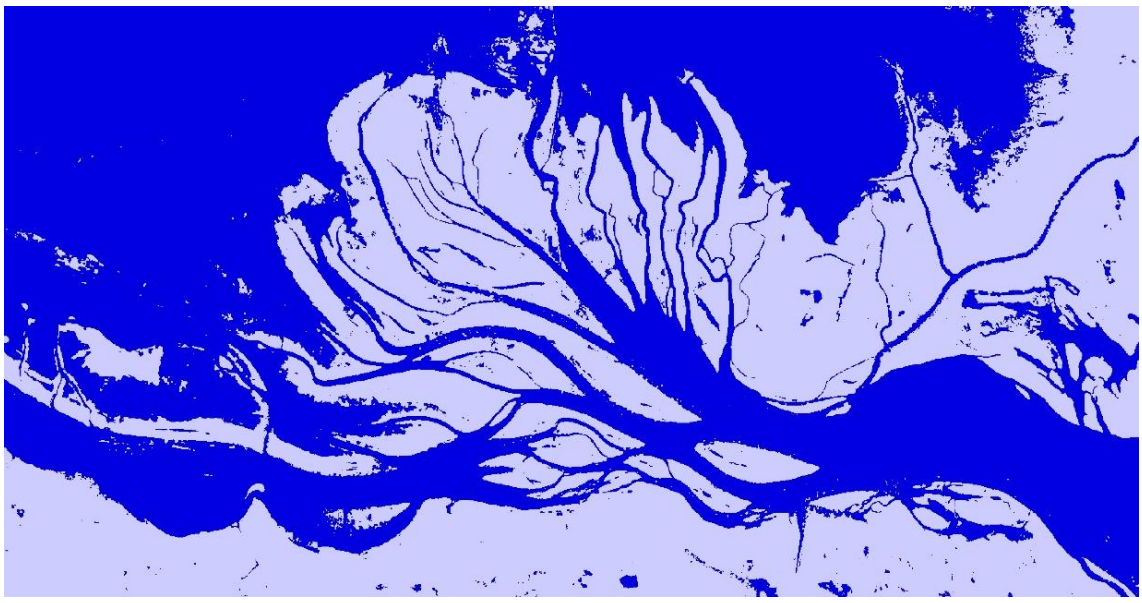


図-2. 11　閾値-0.2 による NDWI

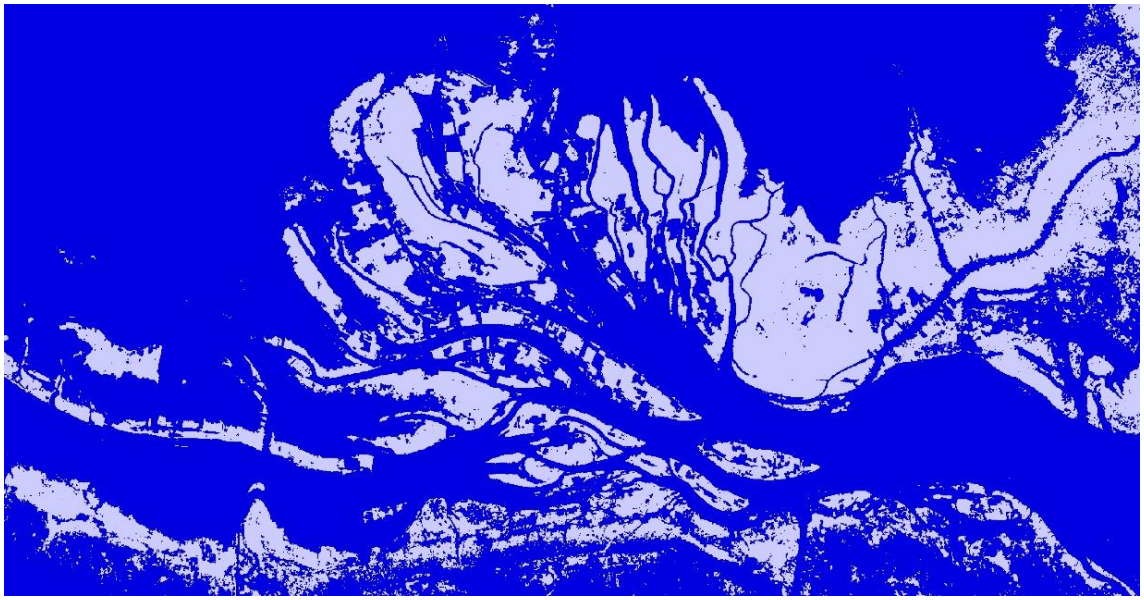


図-2. 12　閾値-0.4 による NDWI

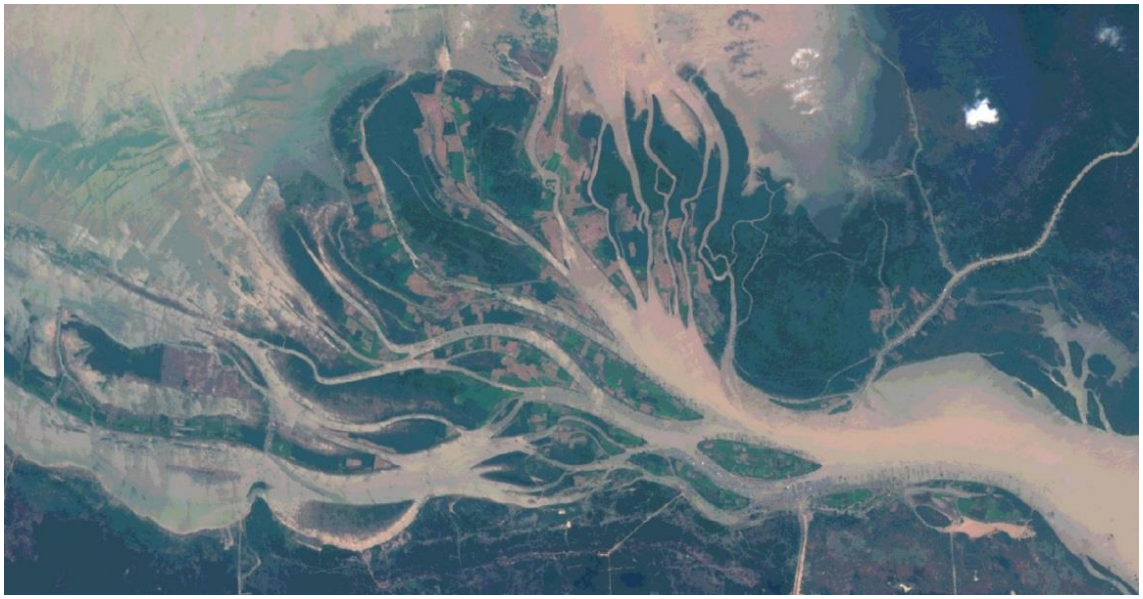


図-2. 13　Chhnok Tru における Sentinel のトゥルーカラー画像

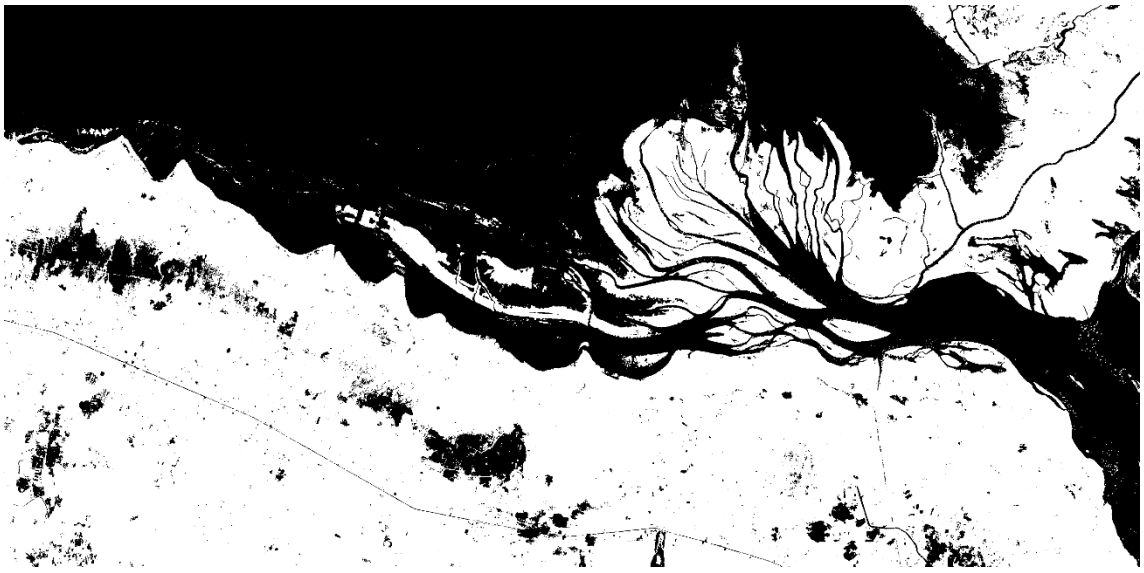


図-2. 14　NDWI による水域（黒色）と陸域（白色）



図-2. 15　　NDWI による水域（黒色）と陸域（白色）の拡大図

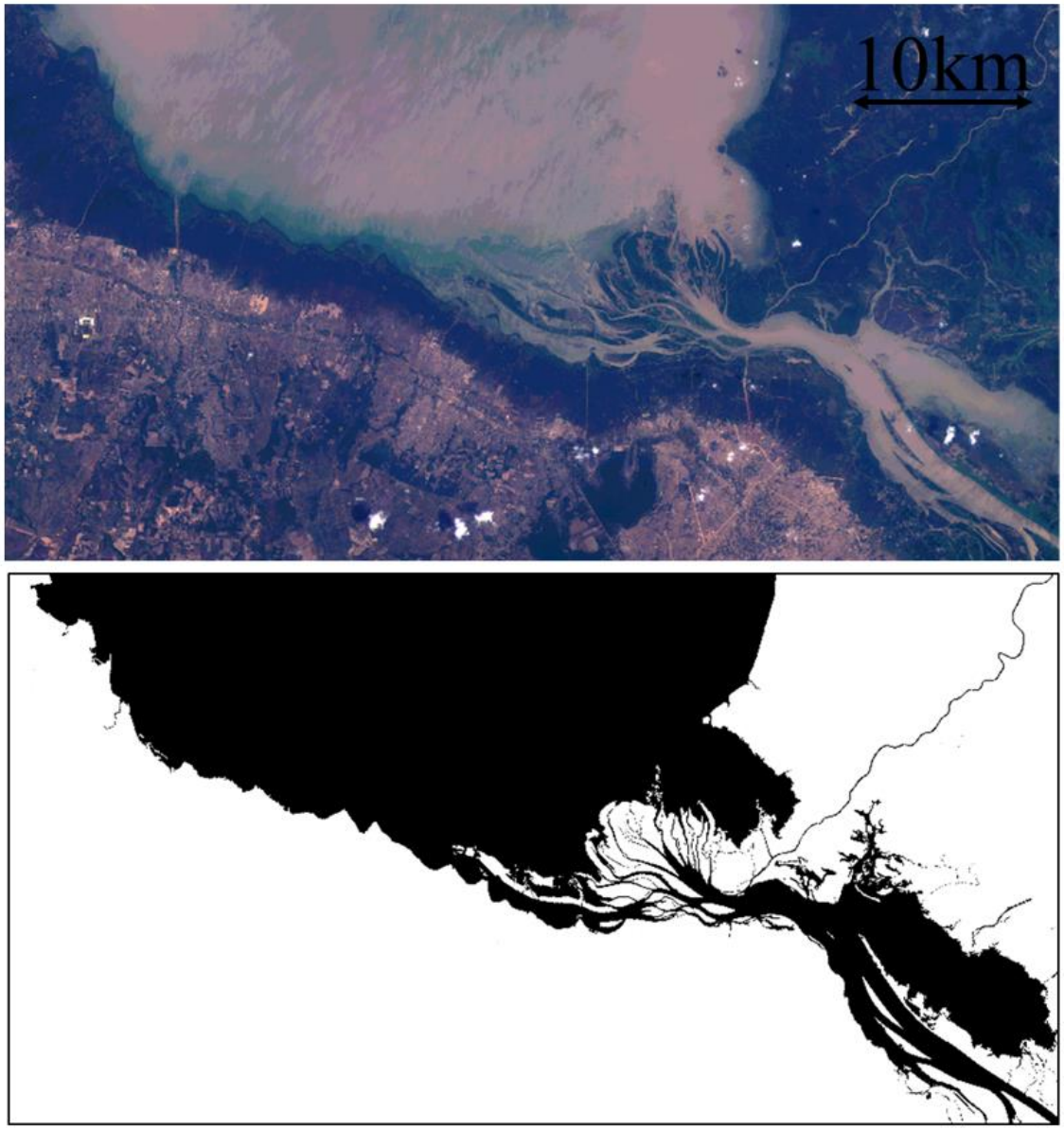


図-2. 16　修正後の NDWI による水域（黒色）と陸域（白色）

2.5　水域の標高

2.5.1　データの準備



図-2. 17　水位観測地 Kampong Luong と Prek Kdam

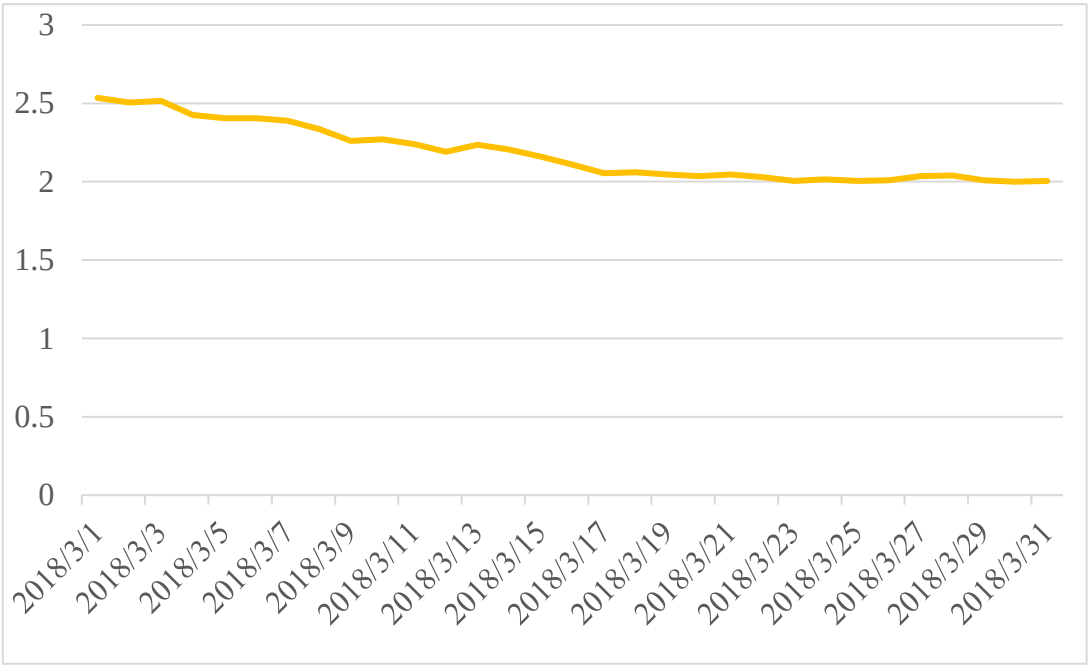


図-2. 18　Kampong Luong の水位

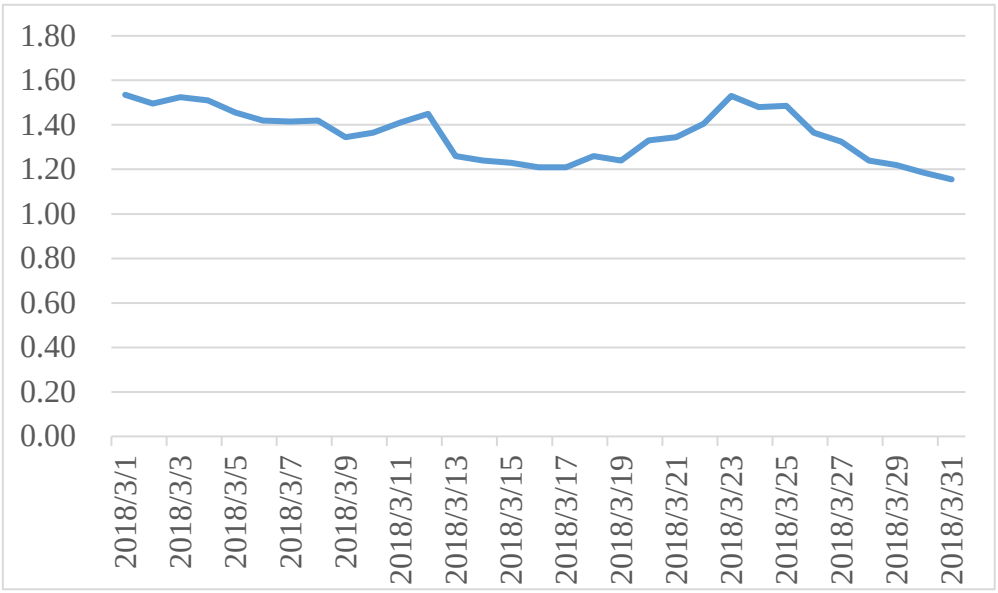


図-2. 19　Prek Kdam の水位

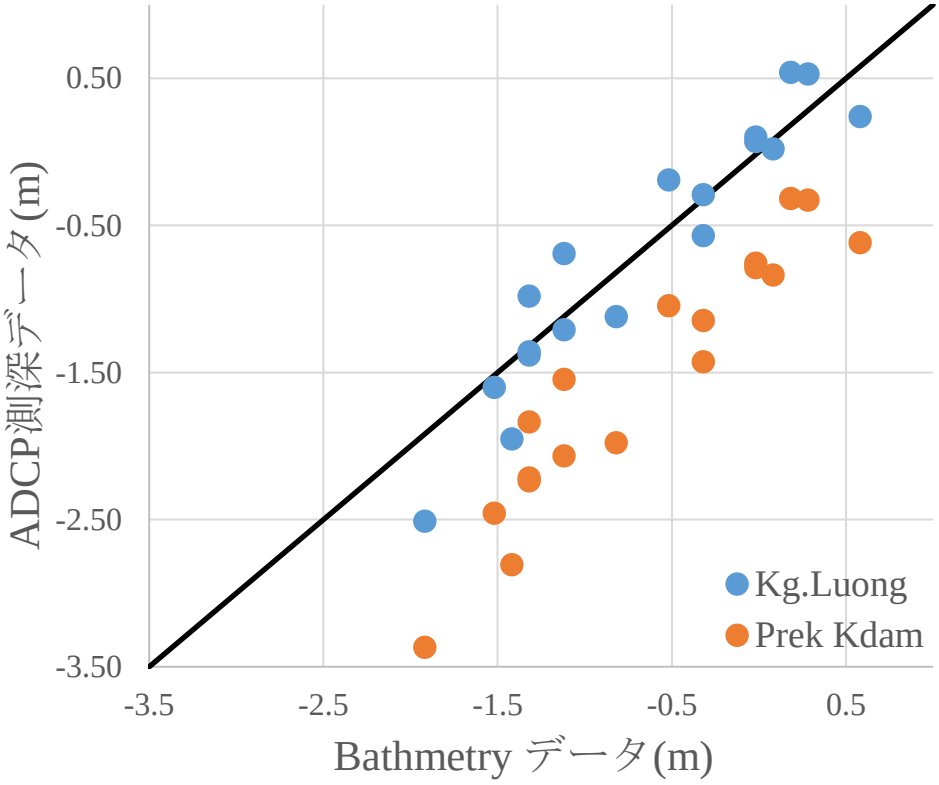


図-2. 20　二種の水位を用いた ADCP 測深データと Bathmetry データの水位の比較

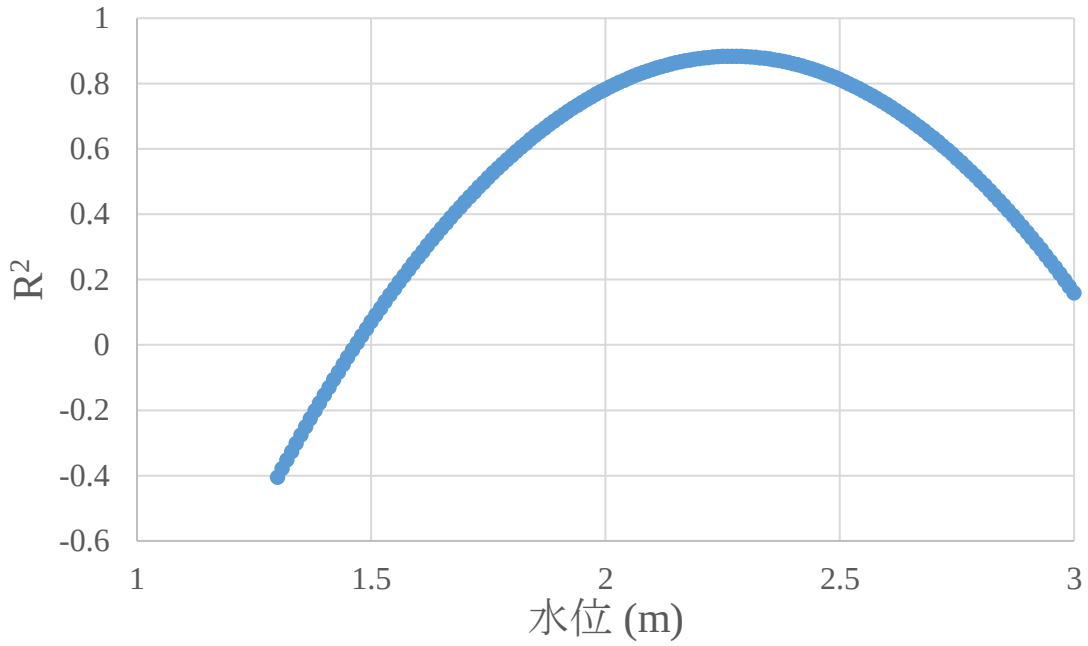


図-2. 21　ADCP 測深データと Bathmetry データの決定係数と ADCP 測深データに用いた水位の比較

2.5.2　Level Set 法

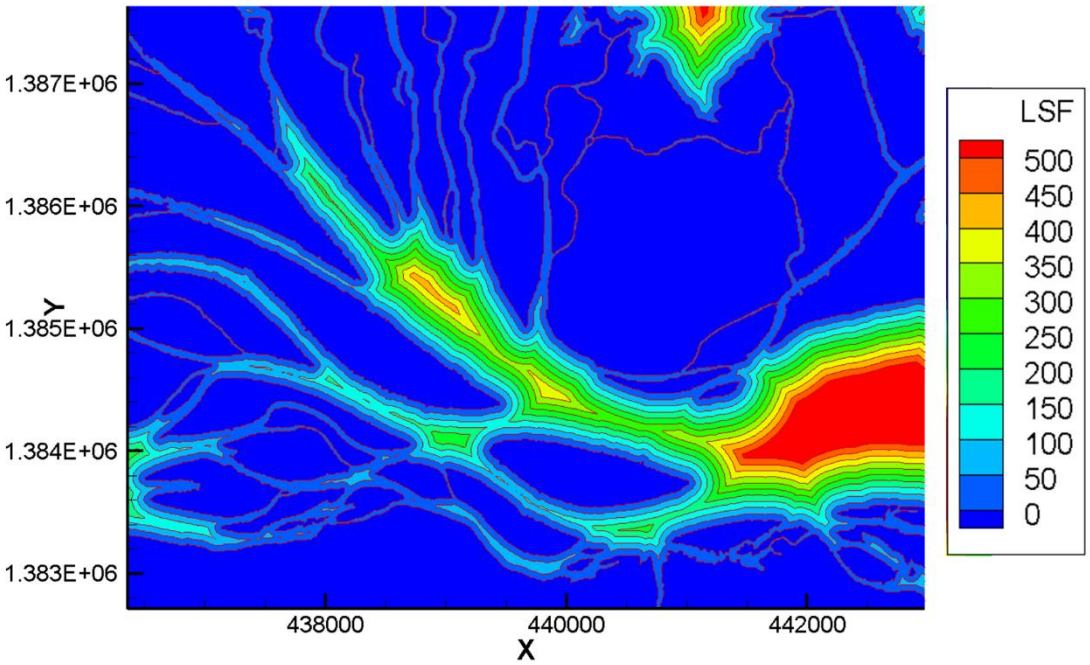


図-2. 22　Level Set 法により求めた水陸境界からの距離

2.5.3　正則化法

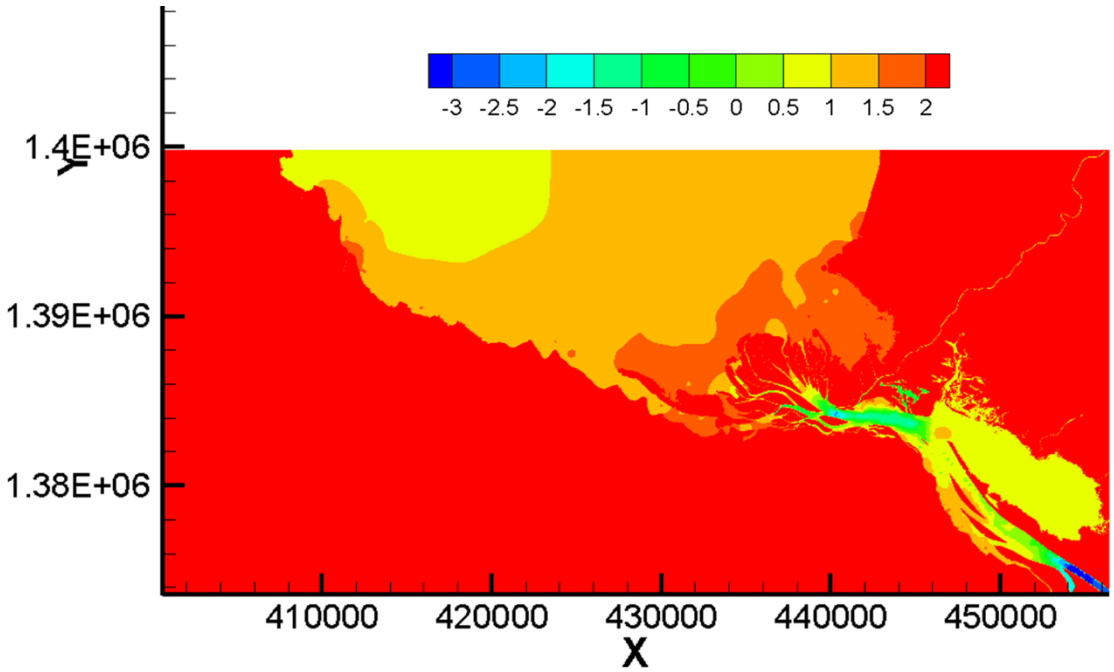


図-2. 24　正則化法の考え方を用いて求めた水域における標高

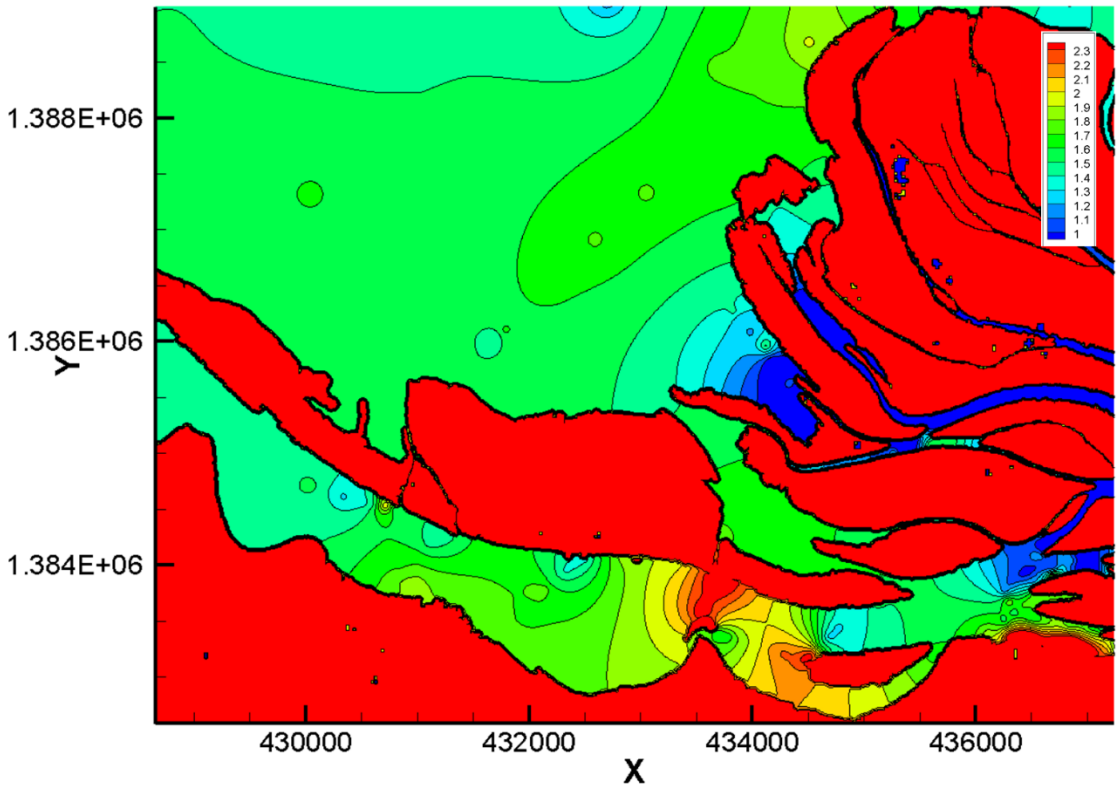


図-2. 25　正則化法の考え方を用いて求めた水域における標高の拡大図

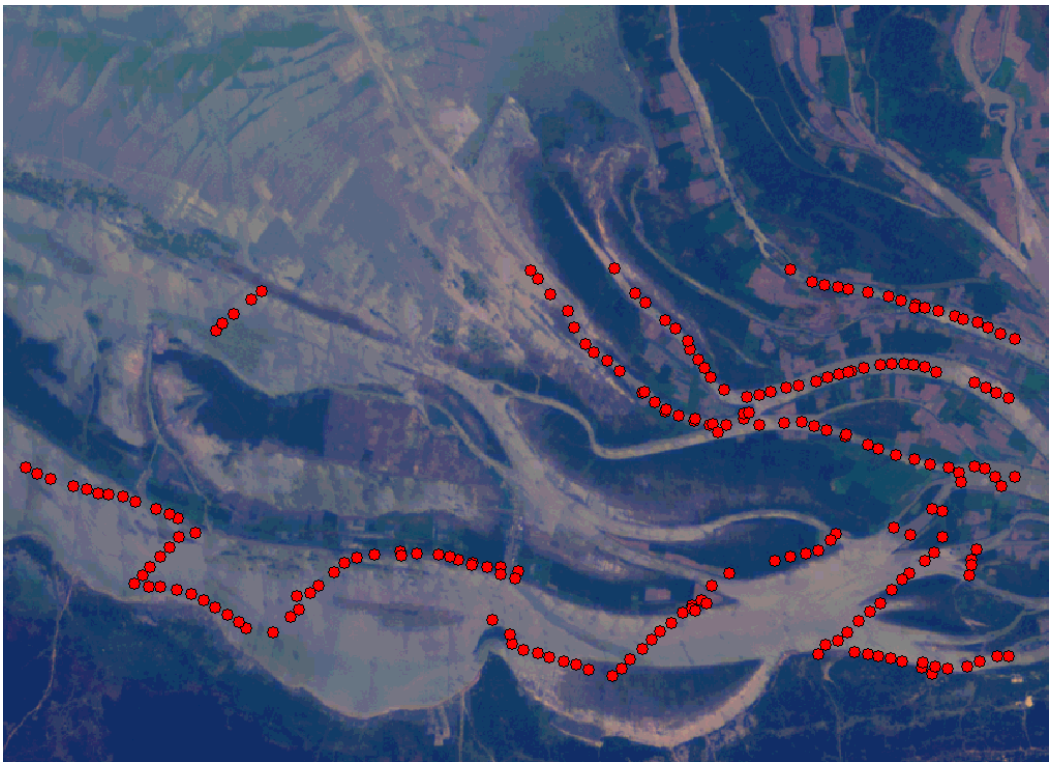


図-2. 26　Bathmetry データの観測位置

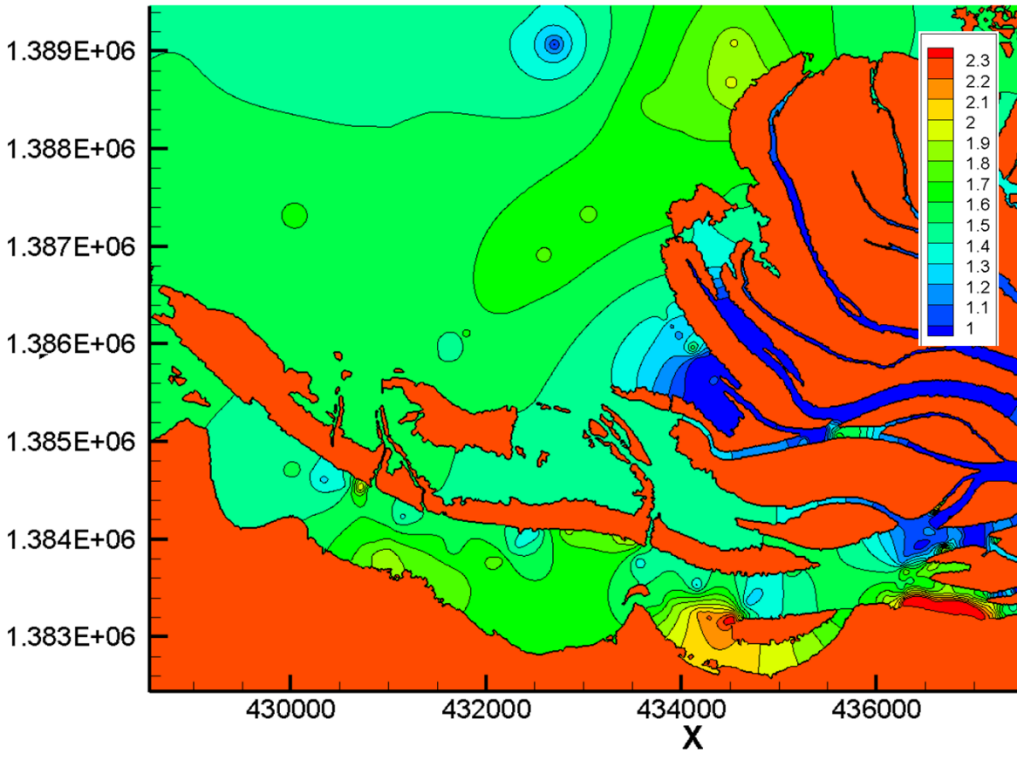


図-2. 27　修正後の水域における標高

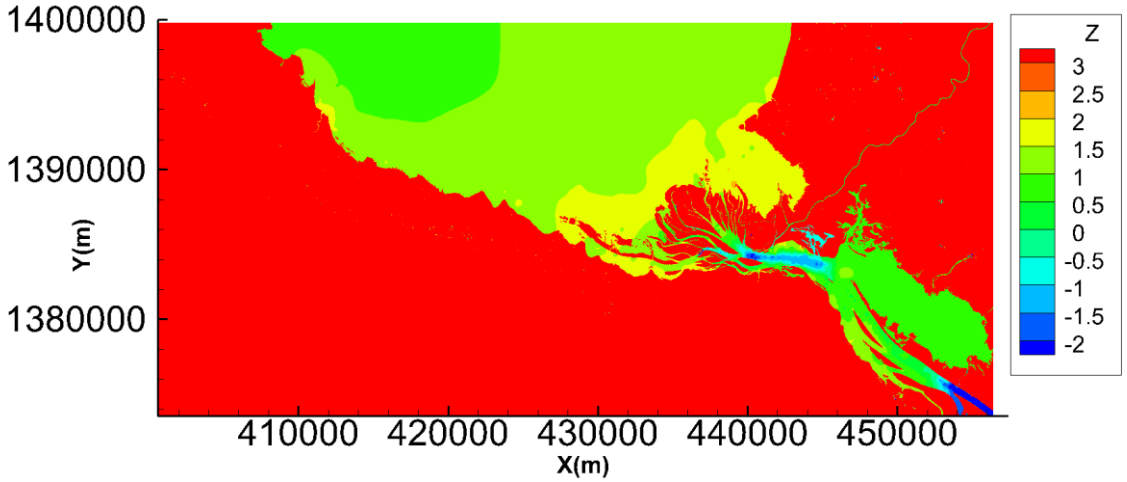


図-2. 28　数値標高モデル

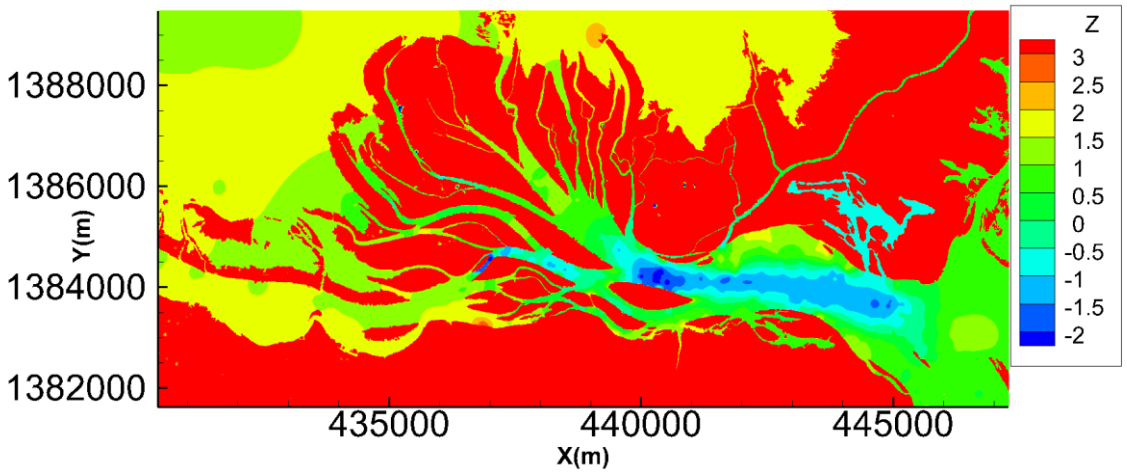


図-2. 29　数値標高モデルの拡大図

2.6　数値標高モデルの完成

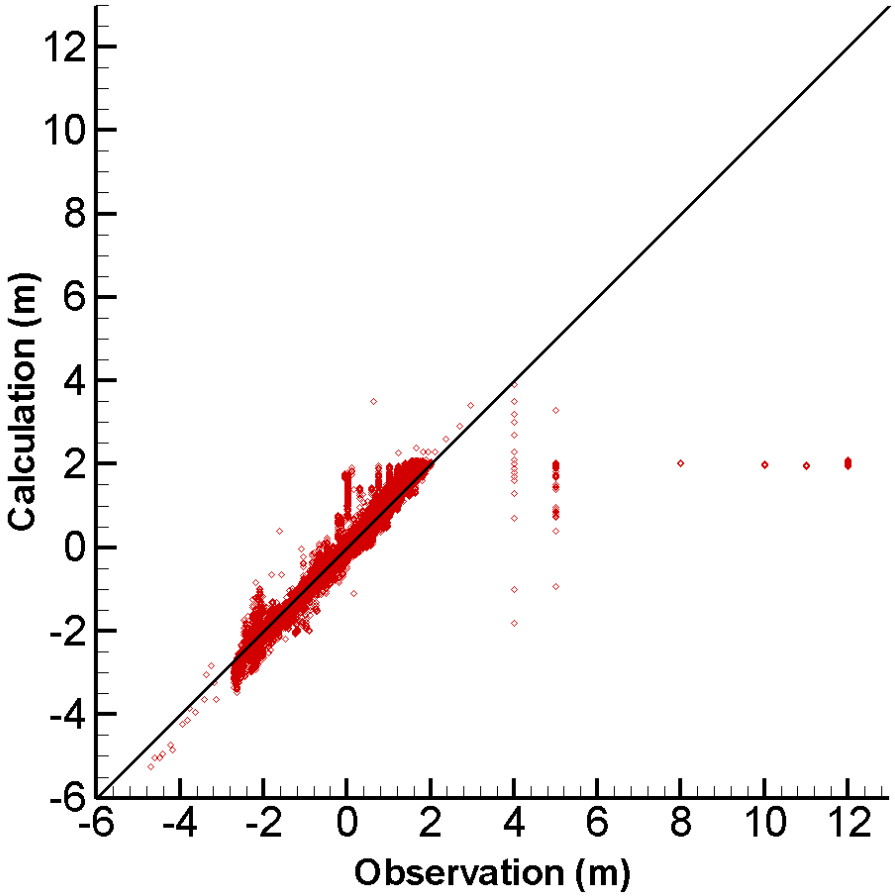


図-2. 30　数値標高モデルの標高と観測標高の比較

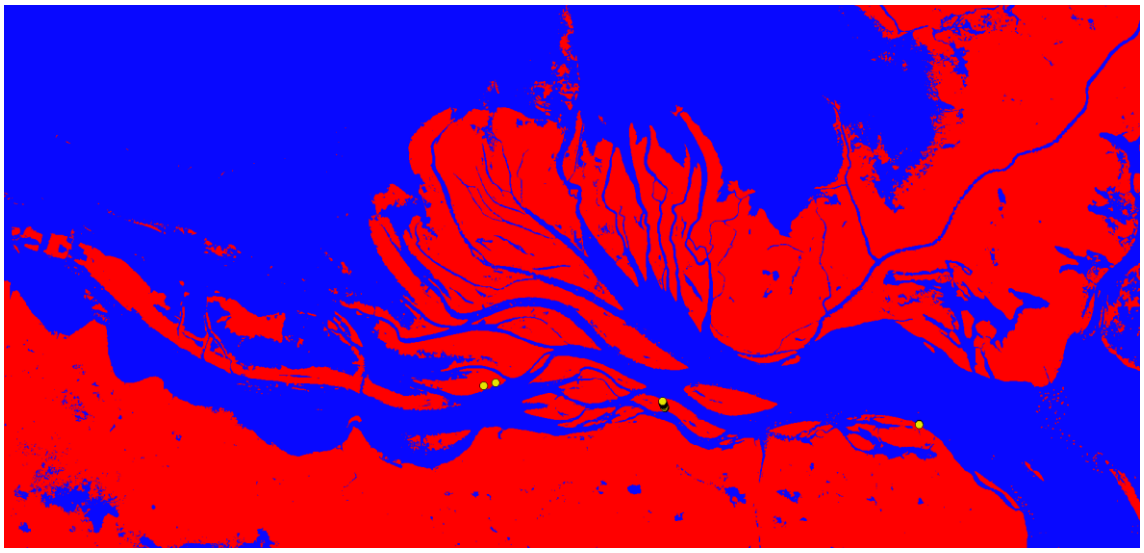


図-2. 31　数値標高モデルの標高と観測標高の大きい誤差が生じた地点

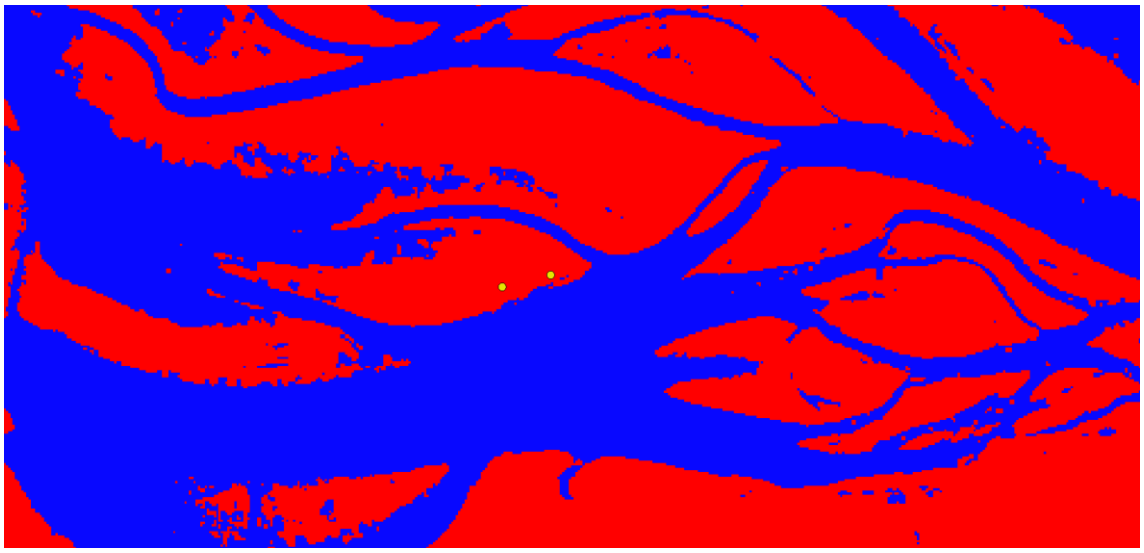


図-2. 32　数値標高モデルの標高と観測標高の大きい誤差が生じた地点の拡大図

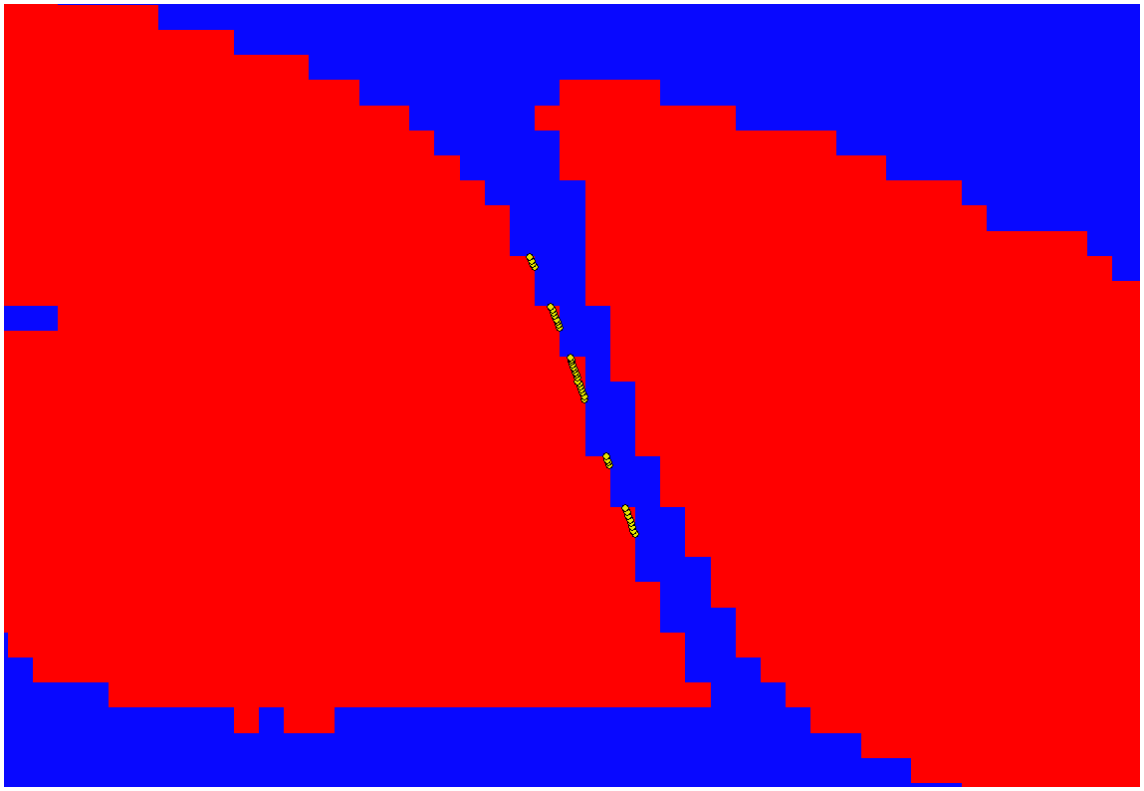


図-2. 33　数値標高モデルの標高と観測標高の大きい誤差が生じた地点の拡大図

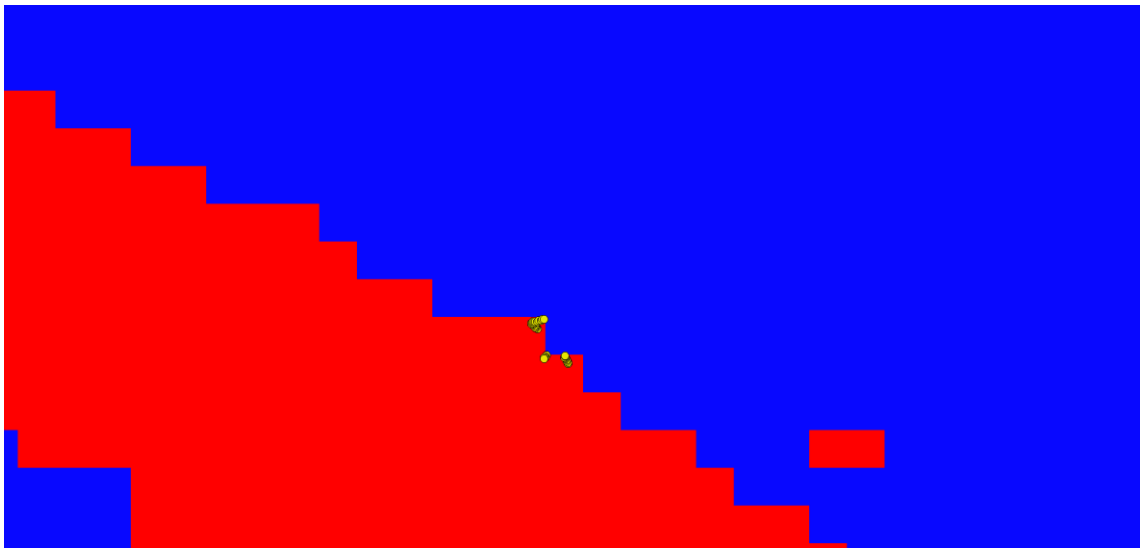


図-2. 34　数値標高モデルの標高と観測標高の大きい誤差が生じた地点の拡大図

第三章　水理学的条件の作成

3.1　水理学的条件作成の背景

汚水拡散の様子を数値解析流動モデルで計算するには、実際の拡散の現象と同様に三次元での計算を行なう必要があるが、広範囲における三次元計算には長時間の計算を要する。ここで、図-3.1 のように水上集落の密集している Chhnok Tru に限定して三次元計算を行ない、三次元計算で必要となる境界条件を、高速計算の可能な二次元計算を広域に対して行なう事により求める。

現在使用可能なデータとして、湖上の地点である Kampong Luong の水位データと Chhnok Tru の下流側における ADCP による流量データがある。そのため、この水位と流量を境界条件として計算を行なう必要があるが、計算領域を東西約 20km、南北約 10km と広範囲に設定する必要がある。この広範囲での三次元計算を行なうには長時間の計算を要し、計算を複数回行う事を考えると現実的ではない。そこで三次元計算と比べて計算時間が短い二次元計算により湖口上流部の水路からの流量を算出する事で、三次元計算の境界条件を求める必要がある。

3.2　計算条件

次に、二次元計算で必要となる条件を設定する。計算領域を設定し、初期条件として水位を、境界条件として水位と流量を設定する。ここで使用する水平方向の座標は UTM48 であり、直交座標を使用する。

また、計算期間は 2018 年 3 月 3 日 0 時から 10 日 0 時までの一週間とする。計算開始から数日間を助走期間として設け、流れが安定させた後に 3 月 7 日から 9 日にかけて行なわれた ADCP 観測による流量と比較を行なう。水平 2 次元浅水流モデルで計算を行なった。

3.2.1　計算領域

まず、計算領域を設定する。Chhnok tru の上流側にある網目状の水路を計算領域に含む

必要があるため、北西側上流側の境界を湖上にて設定する。また、下流側の境界として、現地観測にて流量観測を行なった地点を使用する。以上の条件を考えて設定した計算領域は以下のように設定した。

$$425000 \leqq X \leqq 445000$$

$$1382000 \leqq Y \leqq 1391000$$

この計算領域における数値標高モデルを図に示す。

3.2.2　初期条件

次に初期条件を設定する。今回の計算ではデータ不足のため精密な初期条件を設定できないため、計算の助走期間を設ける事にする。助走期間のおかげで、初期条件には高い精度は求められない。

まず、初期水位は 2 章にて ADCP 観測データと Bathmetry 観測データの比較にて求めた推定水位 2.27m を使用し、この水位を計算領域の全水域に適用する。実際には、上流側の湖内部の方が下流側の Chhnok tru よりも高い水位であることが推定されるが、以上で述べたように初期条件の精度は大きな要因となり得ないため、初期水位を一定の 2.27m として与える。

また、初期流速に関してはデータがほとんどないため、全水域にて水平方向鉛直方向ともに流速無しとして設定する。初期水位と同様に助走期間での計算によって修正されるため、流速無しとして初期流速を設定する。

3.2.3　下流側境界条件

そして、下流側における境界条件を設定する。下流側境界条件は、ADCP 観測結果を使用する。ここで、断面流量の観測が行なわれた地点を図-3.に、観測結果とそれぞれの平均値を表-3.1 に示す。5 回行なわれた観測地点をそれぞれ下流側から Line A 、Line B、Line C、Line D、Line E とする。Line A と Line B と Line D は片道 4 回往復 2 回の観測、Line C は片道 6 回往復 3 回の観測、Line E は片道 2 回往復 1 回の観測をそれぞれ行なっている。ここで、Line D と Line E を通った水が Line B に、Line B と Line C を通った水が Line A を通過しているため、この 2 区間での流量の収支が釣り合うはずである。複数回の観測の結果の平均値を使用してこの 2 区間の誤差と保存率を求める。まず Line D、Line E と Line B では誤差が 26.7m³/s、保存率が 54.5%となった。また Line B、Line C と Line A では誤差が 185.7m³/s、保存率が 71.5%となり、収支が取れてない事が分かる。この収支が合わない原因は、観測水路以外の水路からの流入や観測結果に誤差が含まれている事が考えられ

る。

まず観測水路以外の水路からの流入として、Sen 川からの流入が考えられる。Sen 川の位置を図-3.3 に流入量の観測データを図-3.4 に示す。Sen 川での観測は 1961 年から 2002 年までの 42 年間にかけて行なわれているが、途中 1971 年から 1981 年までの 11 年間にかけて流量データが欠損していたため、残りの 31 年間のデータを使用する。観測があった年における 3 月における平均流量を図-3.5 に示す。これらの平均を求めると 7.66m³/s となり、この値を Sen 川の流量とする。2000 年における 3 月の平均流量は 34.0m³/s と他の年の平均流量と比較して大きい値となったが、31 年間の観測における平均値には約 1m³/s 程度しか影響を与えない。ここで問題となっていた Line B、Line C と Line A における流量収支の誤差は 185.7m³/s であり、2000 年のみの流量の値による影響は十分に小さいため、31 年間の平均流量 7.66m³/s を使用する。

次に、観測結果の誤差についてである。Sen 川の流入を加味しても流量の保存率は 72.7%と低いままである。ここで観測結果自体に誤差が生じていると考え、各地点での流量を以下のように表し、観測値と推定値での最小二乗法によって流量の値を推定することにする。

$$\mathrm{LineA}: Q + \mathrm{Sen}$$

$$\mathrm{LineB}: \alpha Q$$

$$\mathrm{LineC}: (1-\alpha)Q$$

$$\mathrm{LineD}: \alpha\beta Q$$

$$\mathrm{LineE}: \alpha(1-\beta)Q$$

この手法により推定した各地点の流量を表-3.2 に、観測値との関係を図-3.6 に示す。決定係数 R^2 は 0.956 となり、高い値となった。これらの推定した値を観測結果とし、境界条件や計算結果の比較に使用する。

今回計算領域の下流側の境界を図 2 における Line A に設定する。そして、下流側境界条件は Line A の流量 586.45m³/s を使用する。

3.2.4　上流側境界条件

最後に、上流側の境界条件として水位を設定する。湖内は水位が一定と考え、Kampong Luong での水位の観測結果を使用する。計算期間 2018 年 3 月 3 日から 10 日にかけての表に示す水位を使用する。

3.3　計算結果

以上の条件を使用して 3 月 3 日から 3 月 10 日にかけて一週間、計算の終盤が比較対象と

なる ADCP 観測が行なわれた日時になるように再現計算を行なった。計算開始から一週間後 3 月 10 日における流速場を赤矢印で、水陸境界を黒実線にて図-3.7 に示す。また、初期状態の図-3.8 と比較すると Line C～Line A 間の水路が狭窄している事が分かる。この狭窄した部分は ADCP 観測を行なった地域であり本来は水域である。そこで、計算開始から一週間後の計算終了時における水位を図-3.9 に示す。図によると、狭窄している Line C～Line A 間の水路では、水位が 1m 以下となっており、Chhnok Tru の水位として考えられていた 2.27m を大きく下回る水位となっており、実際の水の流れを再現できていない。

この問題の原因の一つとして摩擦が挙げられる。摩擦により上流側の水路からの水の流入が下流側境界条件で流出する量より少なくなりすぎたために Chhnok Tru 内の水が枯渇した可能性がある。そこで、摩擦の度合いを決定する変数、マニングの粗度係数 n を変化させる。本計算では n=0.035 であったため、流量を増やすため n を小さくした条件で再計算を行なったが依然として少ない流量になった。また、n=0.005 の時の計算開始から一週間後の計算終了時でも、n=0.035 の時と同様に水路の狭窄が確認できた。本来、自然水路におけるマニングの粗度係数は、手入れの良い直線水路という摩擦が少ない状況では 0.030 が標準値と言われている。Chhnok Tru での水路では冠水林などの水流を阻害する物や曲線の形状の水路であったりするため、標準値よりも高い値である事が考えられる。現状以上に摩擦を排した状態であっても少ない流量しか流れない事から、最も大きな原因として摩擦以外の要因を考える必要がある。

他の原因として考えられるのは、境界条件の設定が不適切である可能性である。下流側の流量は 20 回の現地観測によって推定しているため、水位を 2m 以上変化させる程の大きな誤差を含んでいるとは考えにくい。一方、上流側の水位として使用している Kampong Luong の観測結果の水位を 1923 年から 2018 年にかけて図-3.10 に示す。1965 年から 1997 年にかけてはデータが得られなかった。ここで 1959 年から 1962 年の部分を拡大した図-3.11 から、数日で 2m 以上変化している区間が 6 個も存在している事が分かる。実際に水位が劇的に変化する事は考えにくいため、基準点がずれてしまった可能性が高い。この期間又はデータが取れていない 1965 年から 1997 年にかけて基準点がずれてしまい、正確な水位の観測ができていない可能性があると考えられる。そこで、上流側の境界条件で与える水位を変化させる事で、流量の過小評価や水路の狭窄の改善を試みる。

3.4 再計算

計算結果の流量の過小評価や水路の狭窄など実際の状況と大きく異なる問題を解決するため、上流側の水位を変化させ、Chhnok Tru の水位が 2.27m となる時の境界条件を探る。計算領域や下流側の流量は従来の計算と同じものを使用する。マニングの粗度係数 n は 0.035 を使用する。上流側の水位を増大させて再計算を行なった。ここで、水位の上昇量を

40cm から 80cm まで 10cm ずつ増やした時の Chhnok Tru 上の点の水位の時間変化を図-3.12 に示す。この図-3.12 より、60cm 上昇させた時の Chhnok Tru 上の点における定常状態の時の水位は 2.274m となり、誤差は 4mm と最も 2.27m に近い値となった。定常状態における水位は図-3.13 のようになり、水路の狭窄が起こっていない事が分かる。

また、水平方向の流速分布を図-3.14 に示す。ADCP 観測により流量を計測した断面 Line A、Line B、Line C、Line D、Line E において、観測結果と水位 60cm 上昇させた計算結果の流量をそれぞれ表-3.1 と図-3.13 に示す。両者の NSE は 0.956 となり、十分に高い値となった。

3.5　三次元計算の境界条件の準備

以上のように、上流側の水位を 60cm 上昇させた時、水域及び流量を実際の状態と同じように再現できている事が確認できた。そこで本計算を利用して三次元計算における境界条件として流量を、初期条件として水位を準備する。

まず、三次元計算における境界条件の準備を行なう。三次元計算の領域を図-3.16 のように設定し、上流側の水路をそれぞれ図-3.17 のように LineP、LineQ、LineR、Line S、Line T、Line U とすると流量を表-3.4 に示す。この値をそれぞれ上流側の境界条件として使用する。

次に、三次元計算の初期条件として使用する水位を、二次元計算の結果より準備する。図-3.18 に示す五点の水位を抽出した結果を表-3.5 に示す。三次元計算ではこの五点の水位から補間することで初期水位を設定する。

以上により、三次元計算の準備を行なう事ができた。これより三次元計算を行ない、汚染物質の拡散の様子を三次元計算により再現を行なう。

第三章　図表集

3.1　二次元計算の目的

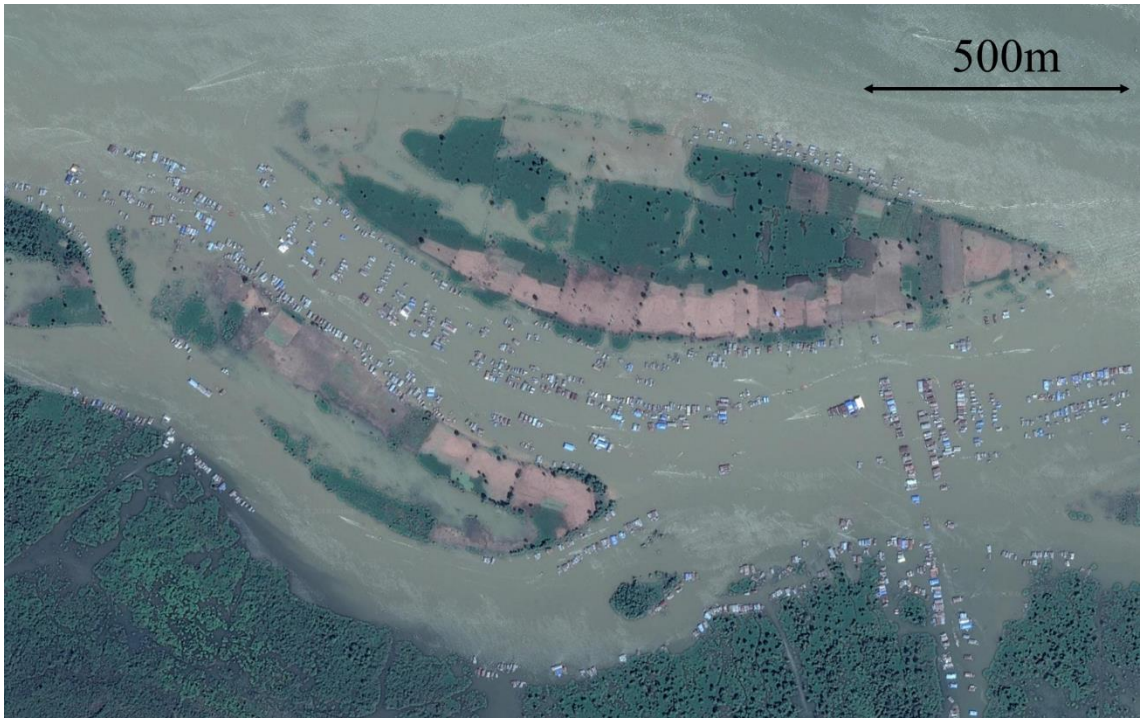


図-3. 1　Chhnok Tru における水上集落

3.2　計算条件

3.2.3　下流側境界条件

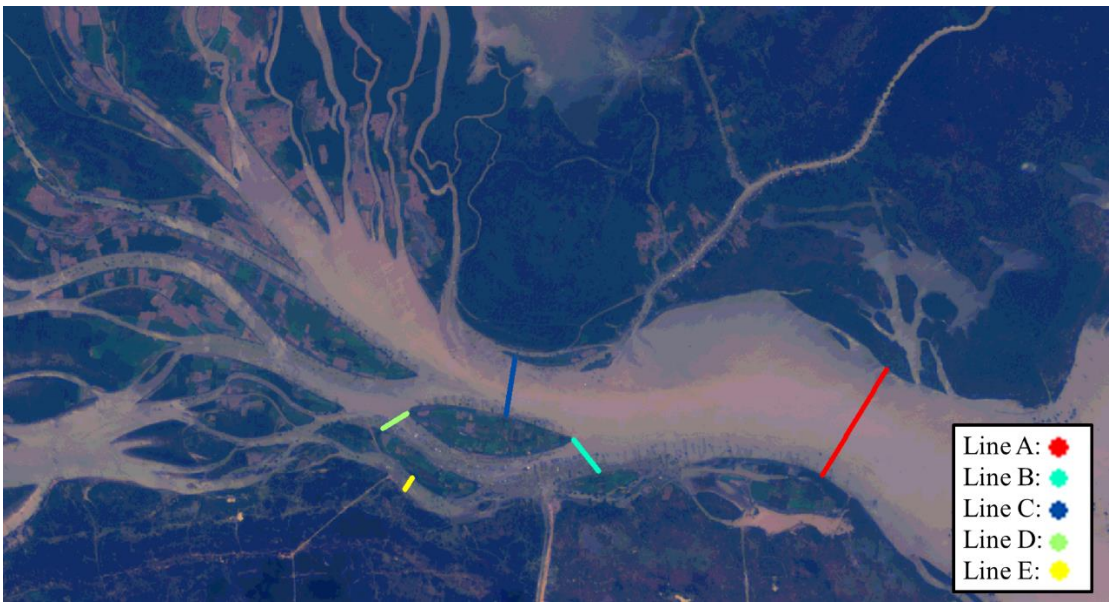


図-3. 2　ADCP による断面観測流量の取得位置

表-3. 1　　各断面における ADCP による断面観測流量

流量(m^3/s)	試行回数	往路	復路
Line A	1	710.313	611.354
	2	678.847	637.186
Line B	1	58.463	58.902
	2	53.849	63.642
Line C	1	441.039	432.597
	2	378.041	382.502
	3	402.726	407.152
Line D	1	23	31.731
	2	27.289	29.059
Line E	1	3.834	4.661

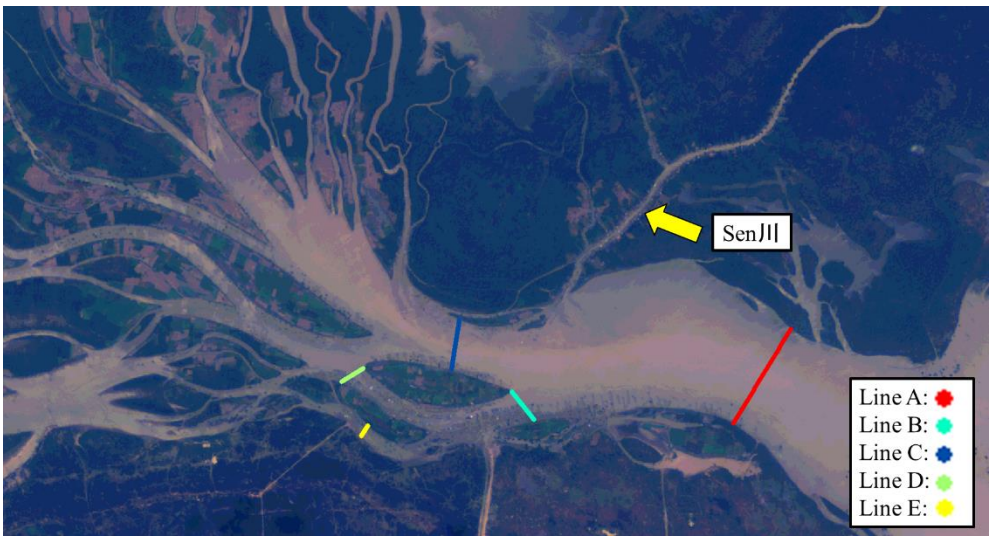


図-3. 3　Sen 川の位置

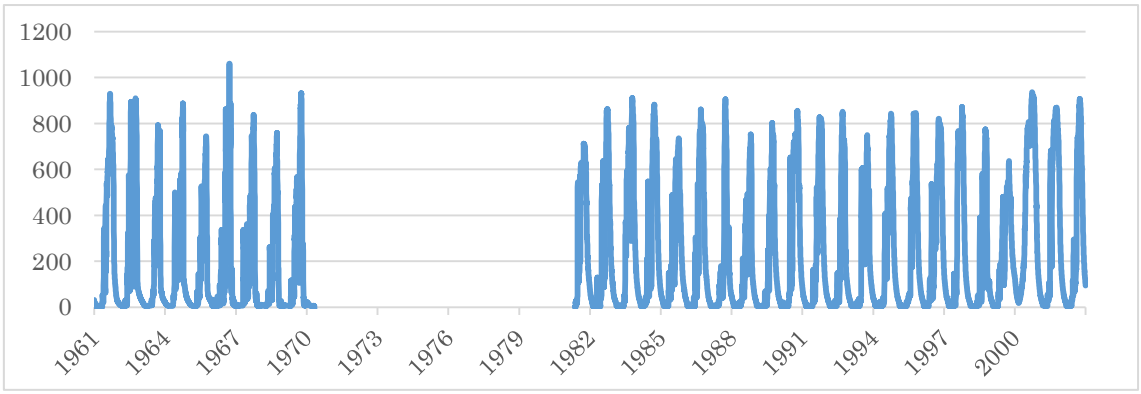


図-3. 4　Sen 川の流量

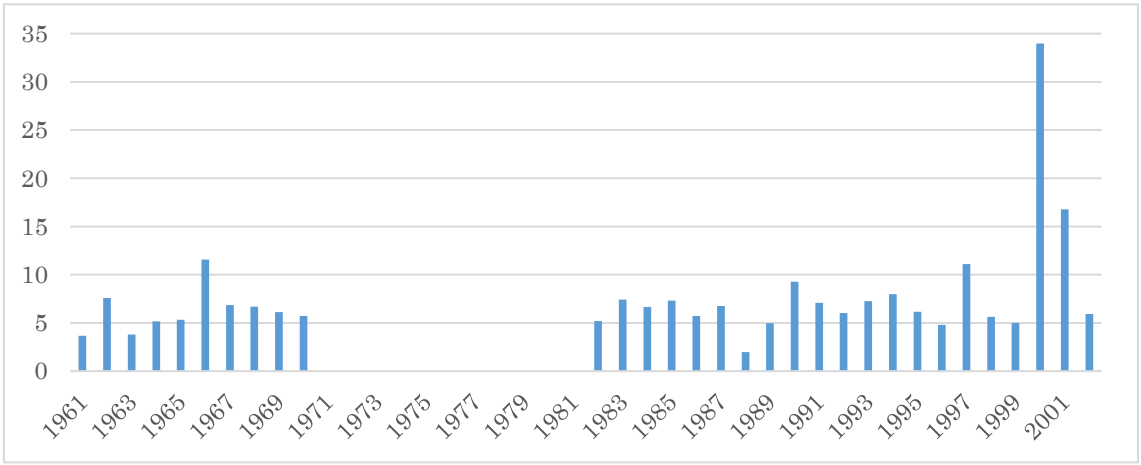


図-3. 5　3 月における日平均流量

表-3. 2　各断面における観測流量と推定された流量の比較

流量	観測値（m³/s）	推定値（m³/s）
Line A	586.45	582.89
Line B	98.47	102.43
Line C	480.32	436.95
Line D	60.99	81.99
Line E	37.47	29.91
Sen 川	7.66	7.66

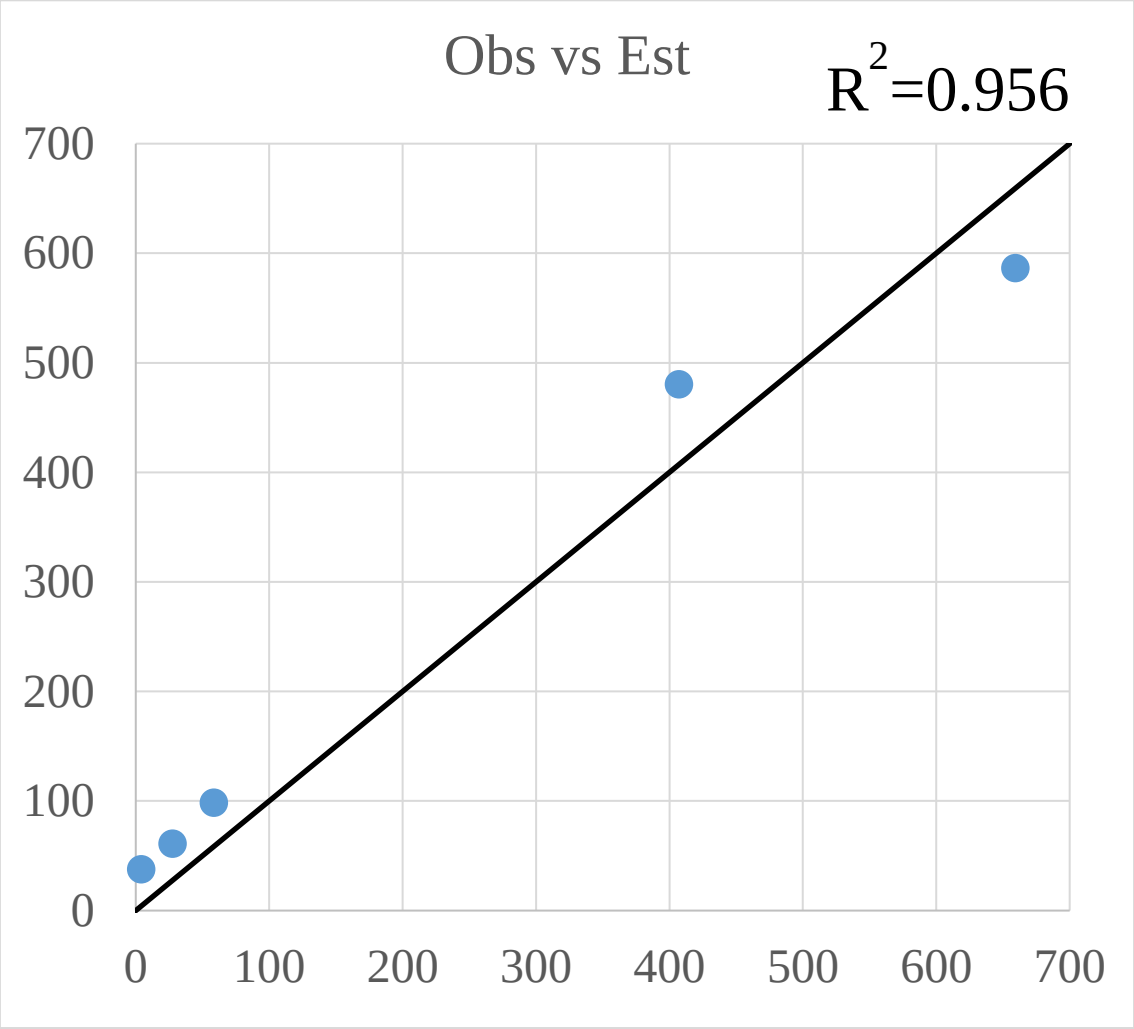


図-3. 6　各断面における観測流量と推定された流量の比較

3.3　計算結果

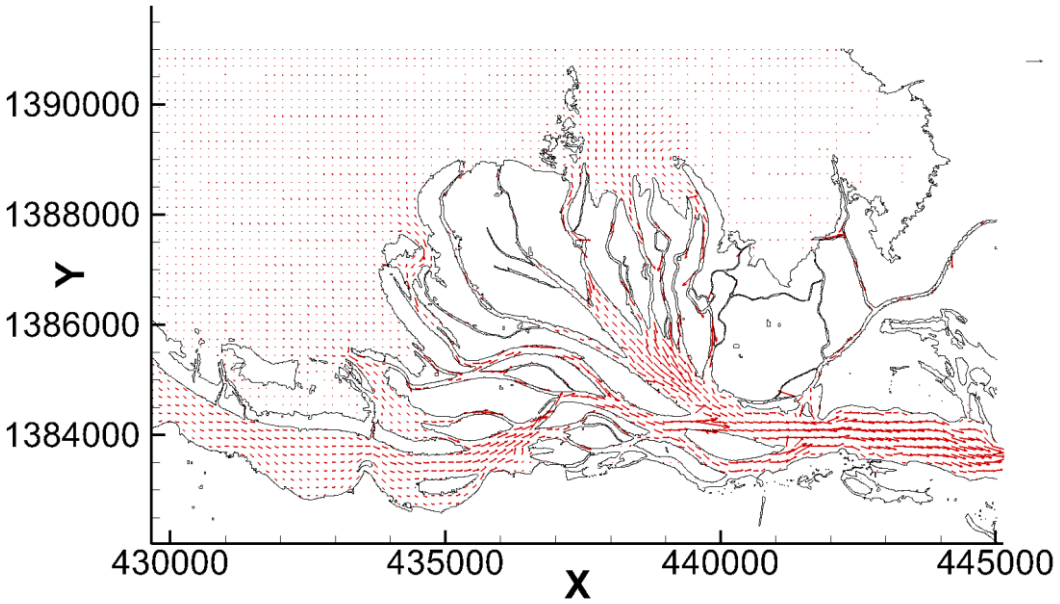


図-3.7　計算終了時の流速分布と水陸境界線

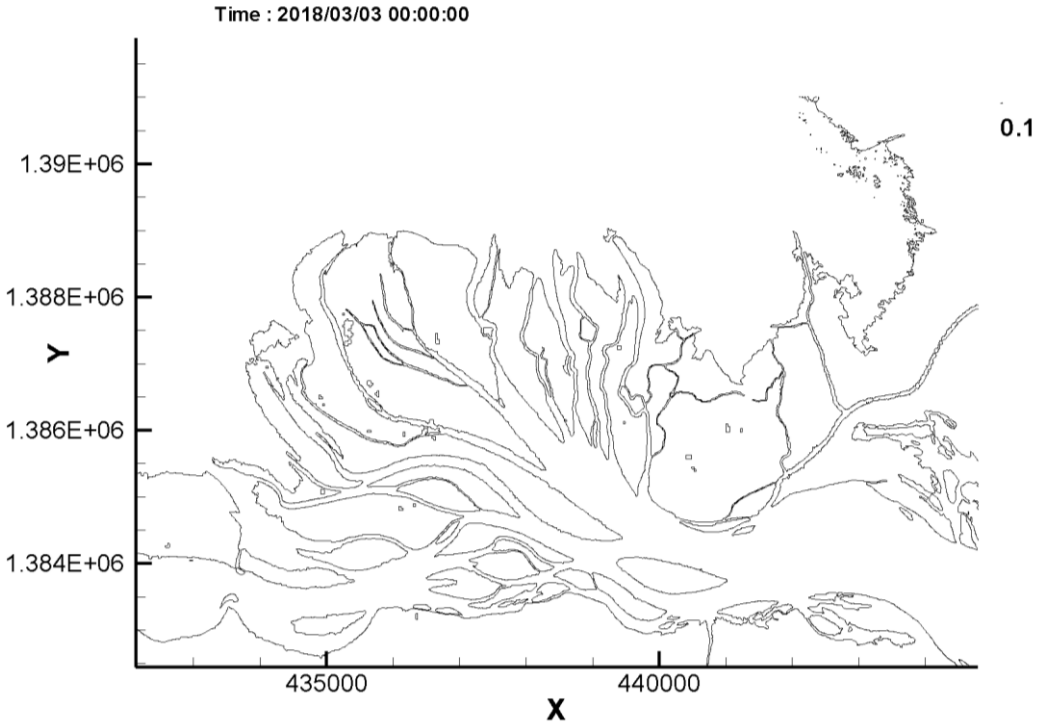


図-3.8　計算開始時の水陸境界線

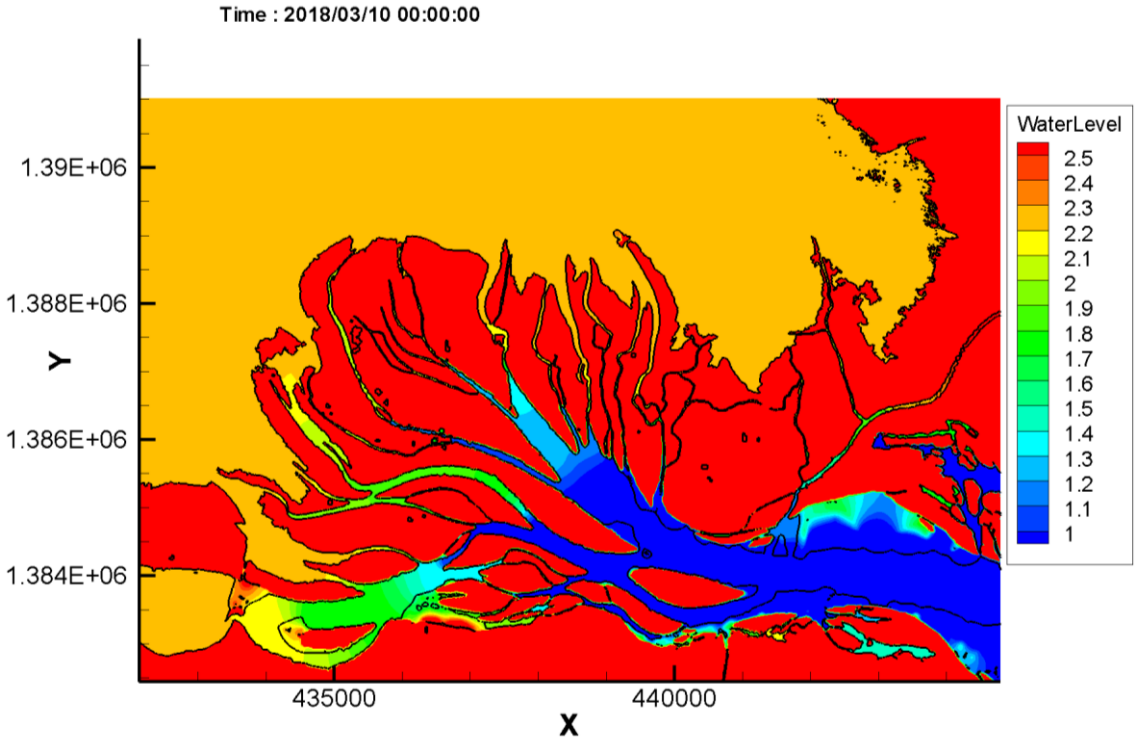


図-3. 9　計算終了時の水位

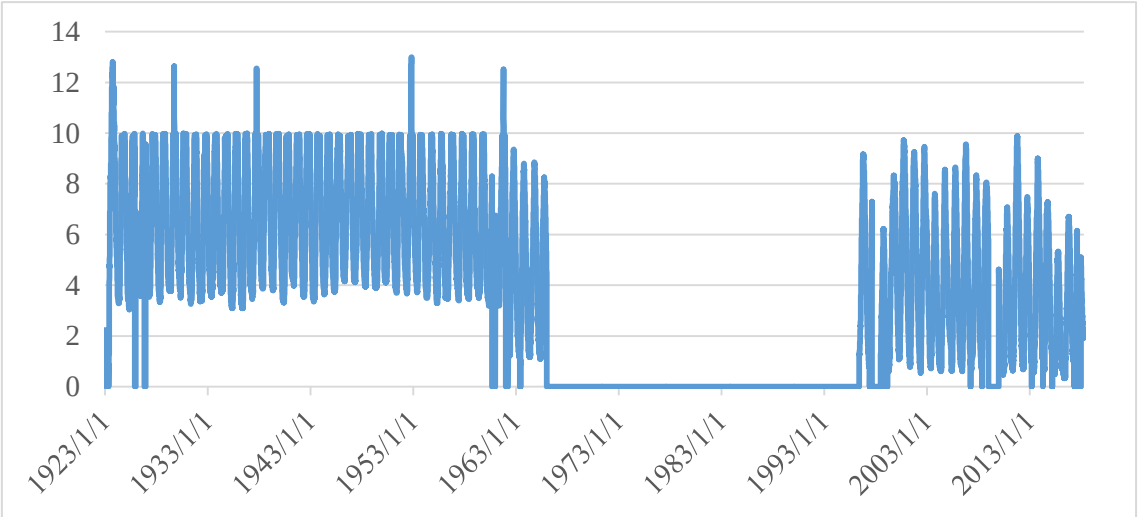


図-3. 10　Kampong Luong の水位

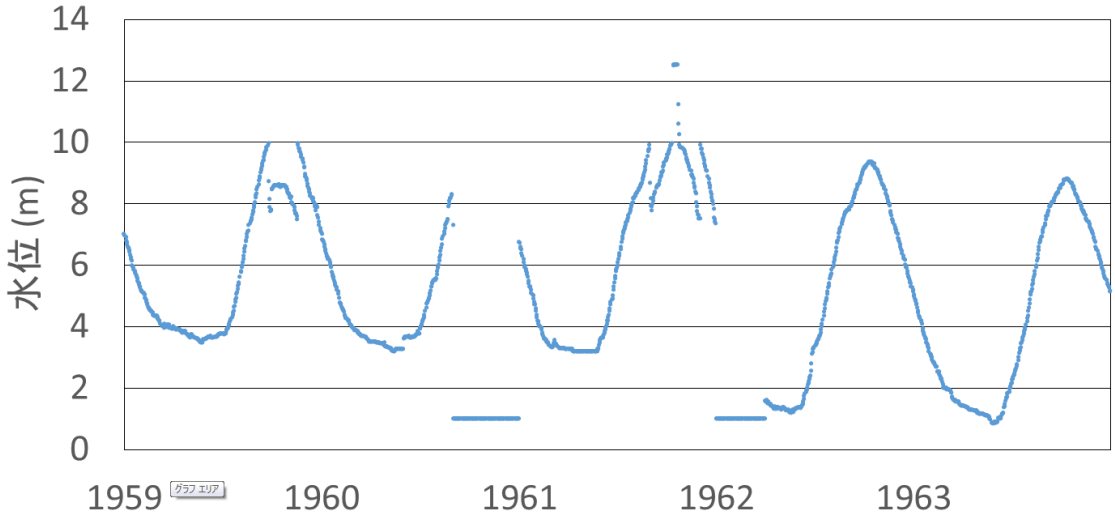


図-3. 11　Kampong Luong の水位（1959 年～1963 年）

3.4　再計算

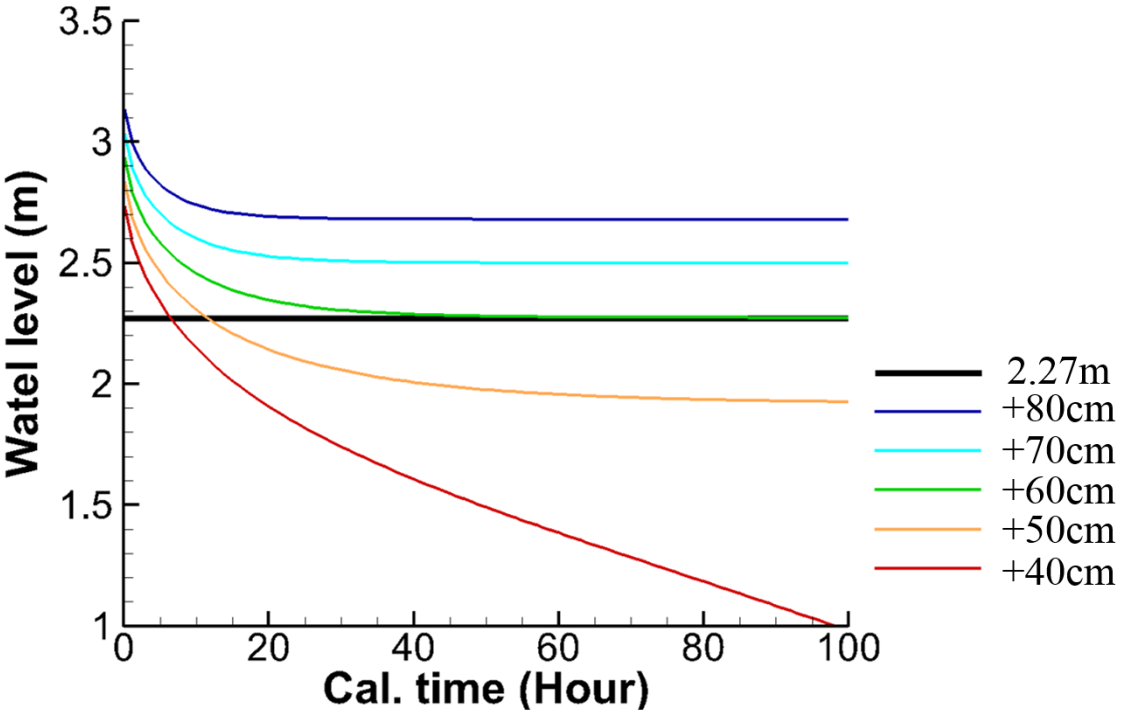


図-3. 12　上流側水位を変化させた時の Chhnok Tru の水位の時間変化

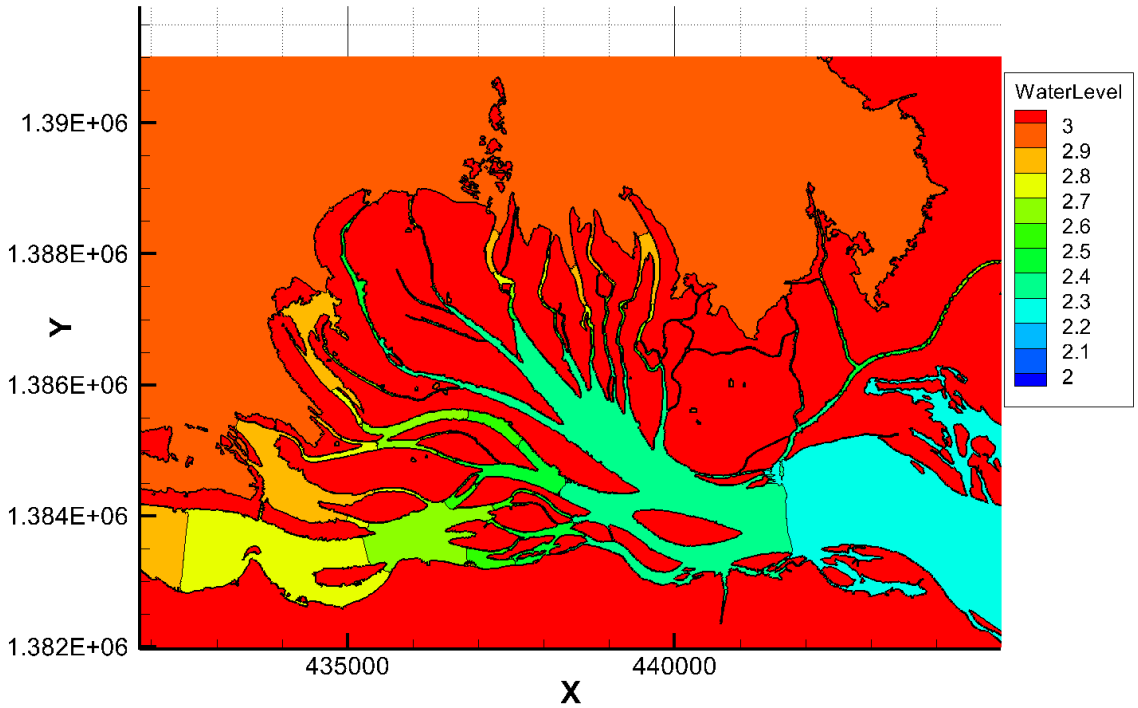


図-3. 13　上流側水位を 60cm 上昇させた時の水位

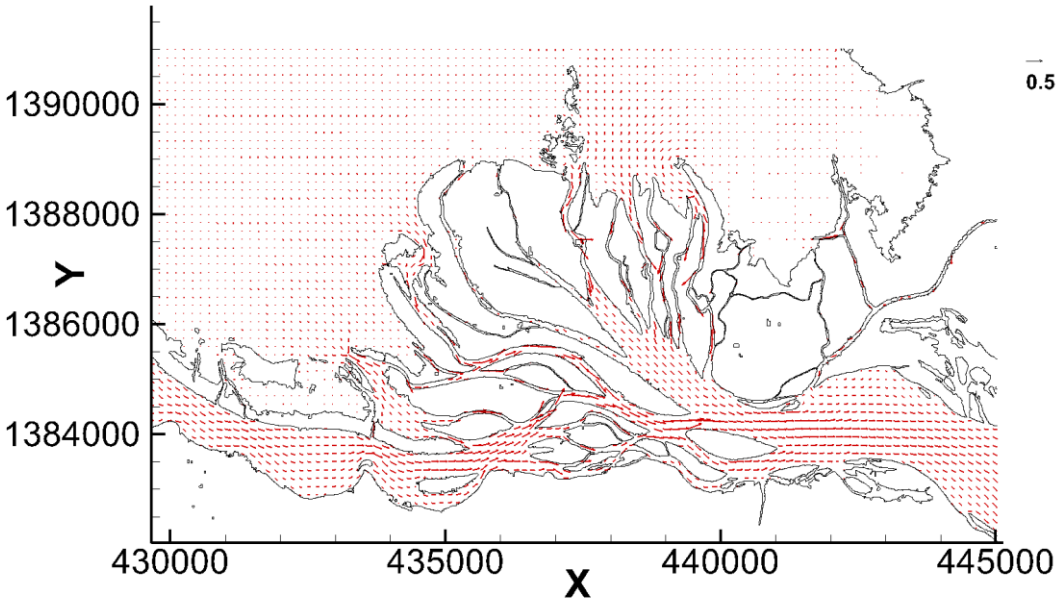


図-3. 14　上流側水位を 60cm 上昇させた時の流速分布

表-3. 3　観測流量と上流側水位を 60cm 上昇させた時の流量の比較

	観測値（m^3/s）	計算値（m^3/s）
Line A	586.45	582.89
Line B	98.47	102.43
Line C	480.32	436.95
Line D	60.99	81.99
Line E	37.47	29.91
Sen River	7.66	7.66

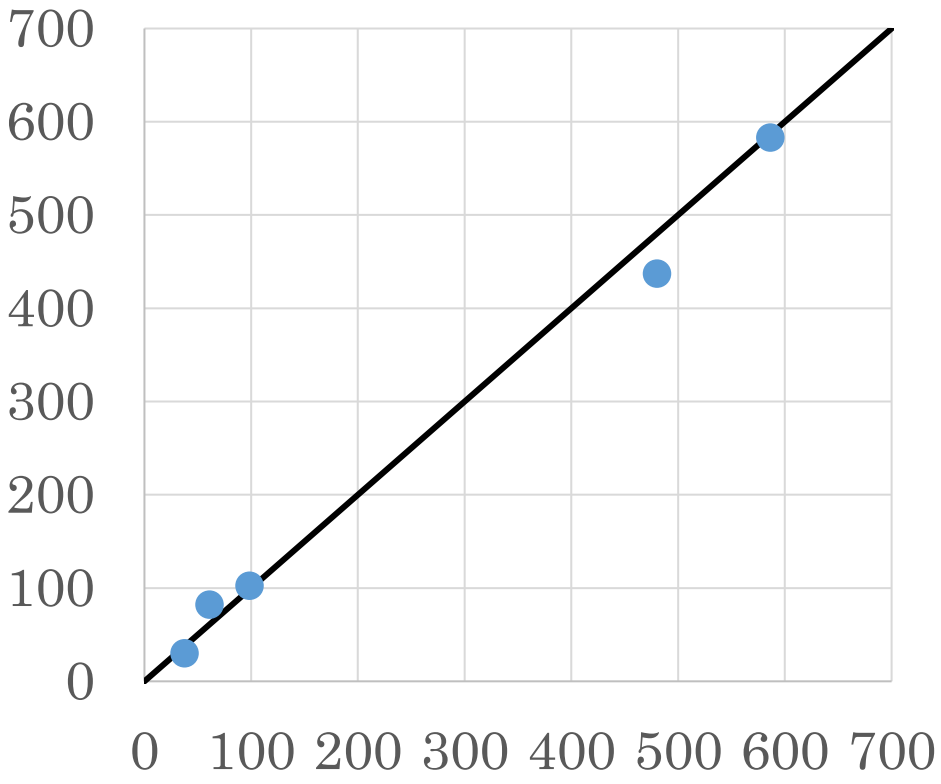


図-3. 15　観測流量と上流側水位を 60cm 上昇させた時の流量の比較

3.5　三次元計算の境界条件の準備

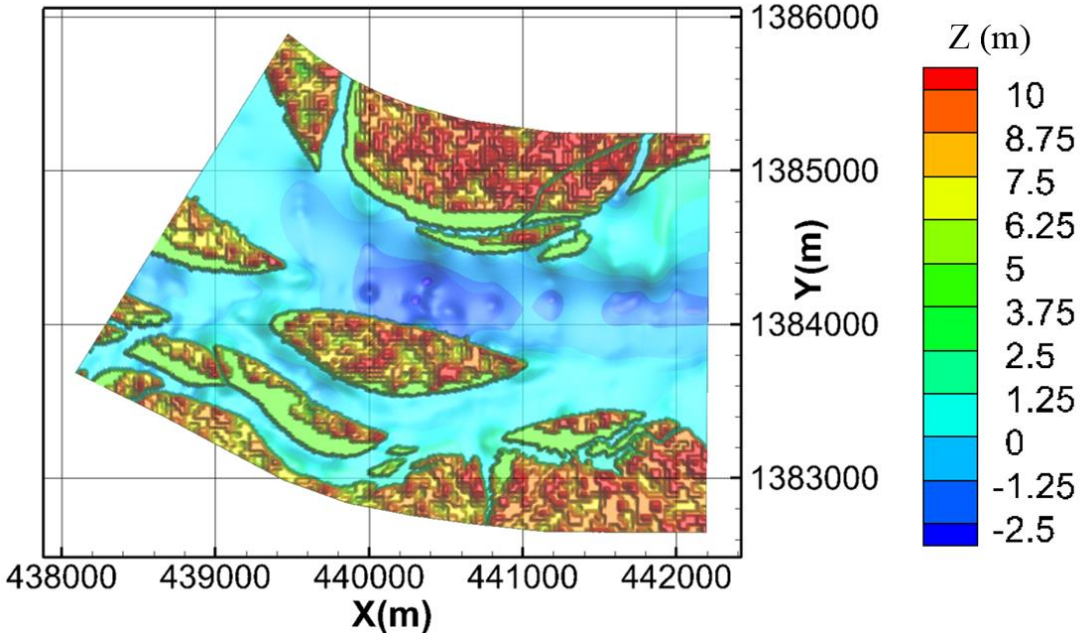


図-3. 16　三次元計算の計算領域

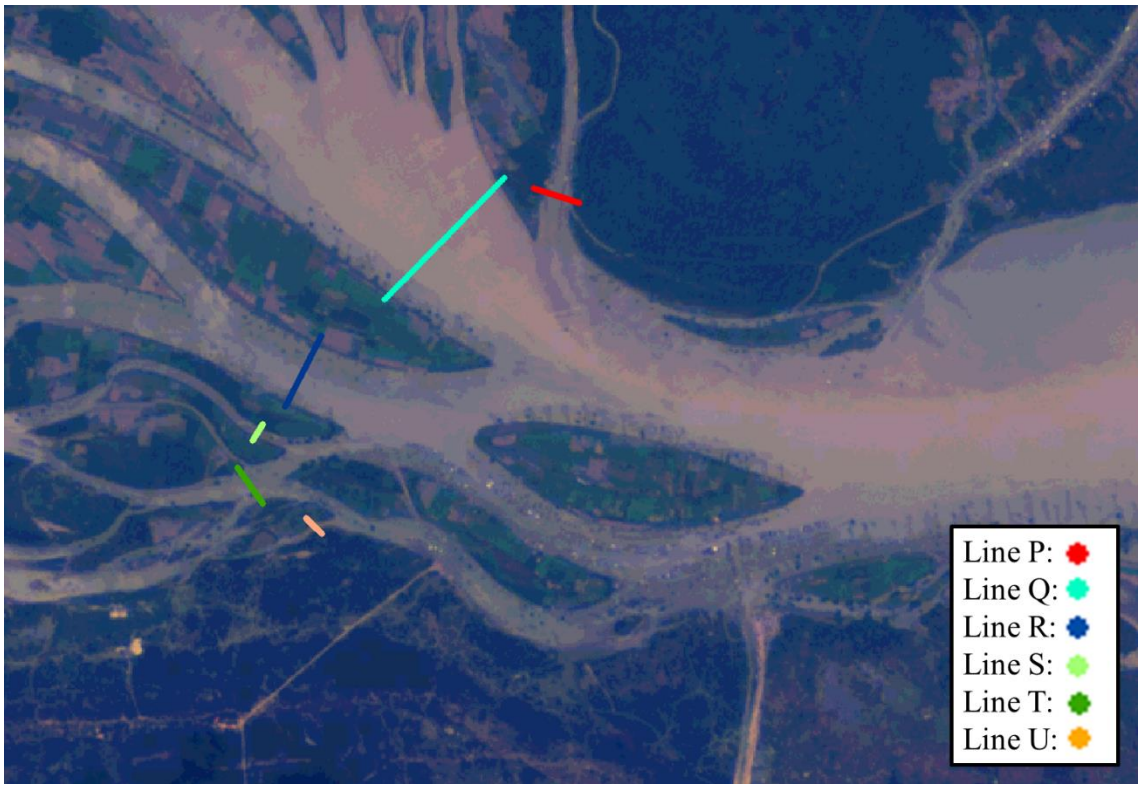


図-3. 17　三次元計算の境界条件取得位置

表-3. 4　三次元計算の境界条件

	Cal(m^3/s)	Rate
Line P	32.537	5.9%
Line Q	176.895	32.3%
Line R	260.789	47.6%
Line S	16.524	3.0%
Line T	57.376	10.5%
Line U	4.220	0.8%
SUM	548.340	100%

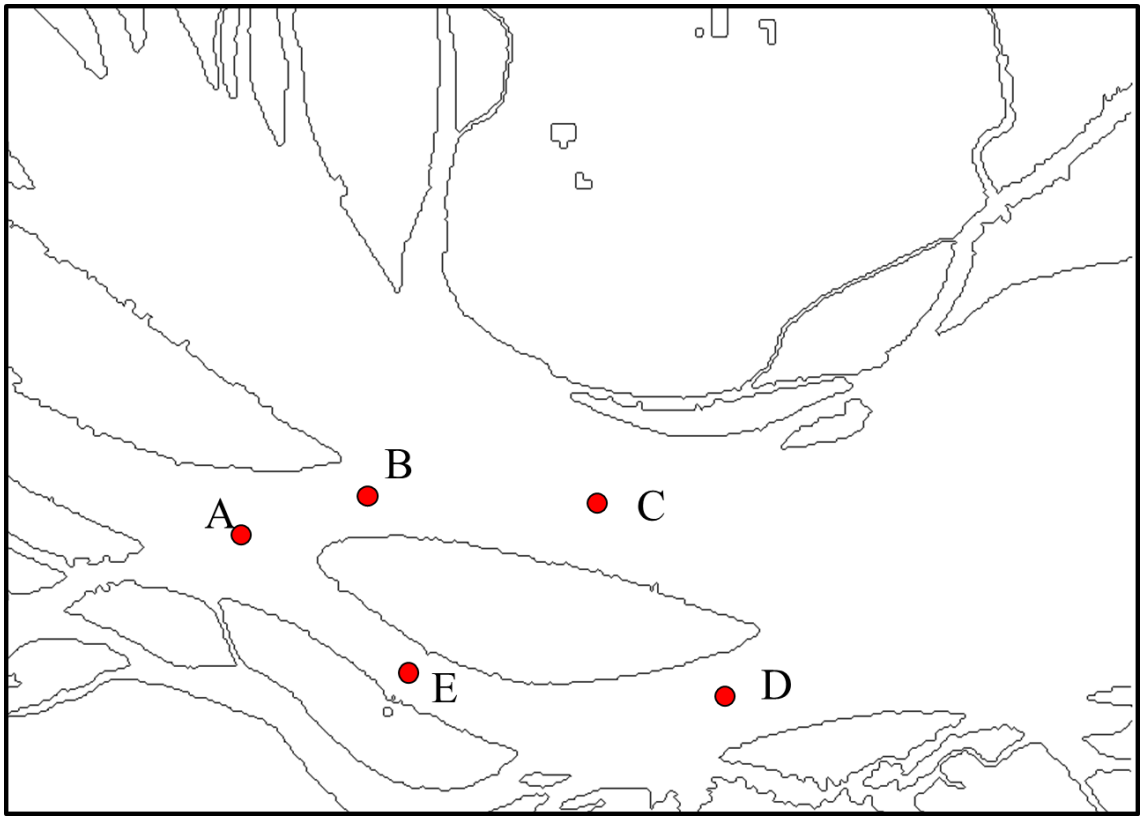


図-3. 18　三次元計算の初期水位取得位置

表-3. 5　三次元計算の初期水位

A	2.368
B	2.325
C	2.317
D	2.310
E	2.340

第四章　水上集落内の三次元流動計算

4.1　三次元計算の概要

汚水拡散の様子を数値解析流動モデルで計算するには、実際の拡散の現象と同様に三次元での計算を行なう必要がある。例えば温度成層が形成されていた場合、流れは上層と下層で異なり、これを表現するためには三次元による計算が必要となってくる。また、ここで取り扱う人糞がボートハウスから排出された際、大腸菌が水面付近で拡散するか、河床まで到達した後に拡散するか等の条件によって拡散の様子が大きく変化する可能性がある。

そこで、まず流動計算により流れ場を計算する。その後にパッシブスカラー解析より大腸菌の拡散の様子を調べる。

4.2　計算条件

次に、二次元計算と同様に三次元計算で必要となる条件を設定する。まず計算領域を設定し、次に初期条件として水位や水温を、境界条件として水位と流量と水温を設定する。また、水温に影響を与える気象条件として気温、日射、湿度、風も設定する。

ここで使用する水平方向の座標は二次元計算と同様に UTM48 である。また、計算期間は 2018 年 3 月における平均状態とする。

4.2.1　計算手法

三次元計算では非静水圧 k-ε 乱流モデルに基づく TITech-WARM(Tokyo Institute of Technology Water Reservoir Model)を使用する。同モデルは流動に加え、熱収支を考慮した水温計算を行なう事が可能である。流れに影響を与える水温成層なども反映させる事ができる。また、同モデルでは高い保存性を有する CIP 法を使用しているが、今回の計算対象である大腸菌は少量であっても大きな影響を与える可能性があり、高い保存性が求められる。三次元計算ではこの TITech-WARM を Chhnok Tru へ適用する。

4.2.2　計算領域

次に計算領域を設定する。水平方向は東西方向及び南北方向いずれも 20m 間隔の格子を使用している。また、鉛直方向に関しては 20 分割することで格子を設定している。図-4.1 に示すように、流線に沿って座標を設定したため、計算領域の形状が弧を描いている。およそ東西方向 3.6km 南北 3.0km の計算領域となっている。

4.2.3　初期条件

次に初期条件を設定する。今回、初期条件として設定するのは水位と水温である。

まず、水位は二次元計算の結果を使用する。図-4.2 に示す五点の水位を二次元計算結果より表-4.1 のように抽出し、それらを補間する事で初期水位を全体に与える。

次に、水温は 2018 年 3 月に行なわれた現地観測結果を使用する。観測点は図-4.3 に示す 9 点であり、初期水位と同様に表-4.2 で示された観測結果を補間する事で初期水温を全体に与える。

4.2.4　下流側境界条件

次に下流側境界条件を設定する。下流側の境界では流量と水位を二次元計算より求め、表のように与える。この境界では図-4.4 のように流出していくのみなので、水温は与える必要は無い。境界は Line A の一つのみであり、この流量と水位を表-4.3 に示す。これらの流量と水位を与えることで下流側境界条件とする。

4.2.5　上流側境界条件

次に上流側境界条件を設定する。上流側の境界では簡単のため図-4.5 に示すような 3 本の水路からの流入として、流量と水温を表-4.4 のように与える。流量は二次元計算結果より求めた。また、水温は図-4.6 に示す観測位置における水温より求めた。LineP の水温に関しては流入してくる 2 本の水路での観測水温をそれぞれの流量の比により推定した。

4.2.6　気象条件

次に気象条件を設定する。今回の計算で使用する項目は風、気温、湿度、日射である。こ

れらのデータは水位観測が行なわれていた Kampong Luong にて観測されたデータを使用する。風に関しては、風速と風向きのデータであったため、南北成分と東西成分に分割した。

まず、それぞれの項目における 2019 年 3 月 1 日から 31 日にかけてのデータを図-4.7、図-4.9、図-4.11、図-4.13、図-4.15 に示す。それぞれ 1 日の間隔で規則的に変化しているため、これらを毎時データに変換した結果をそれぞれ図-4.8、図-4.10、図-4.12、図-4.14、図-4.16 に示す。これらのエラーバーは各時間帯における標準偏差を表しており、標準偏差が示す誤差よりも時間帯による変化量が十分に大きい事が分かる。以上の通り、風、気温、湿度、日射の毎時データを使用する。

4.2.7 摩擦係数

最後に摩擦係数 fb を設定する。まず、摩擦係数 fb と二次元計算の際に摩擦の大きさを示すために使用したマニングの粗度係数 n の関係を代表深さ H と重力加速度 g を使用して以下の式により表す。

$$fb = n^2 H^{-4/3} g$$

摩擦は深い水路よりも浅い水路に大きく影響するため、代表深さはある程度の大きさの水路の中で浅い水路における深さを選択する。ここで、図-4.17 に示す水路が以上の条件に当てはまり、代表深さを 2.0m とする。

次に、深さ 2.0m における摩擦係数 fb とマニングの粗度係数の関係を表-4.5 に示す。ここで、自然水路においてマニングの粗度係数は 0.025~0.15 の範囲の値を取る事から、摩擦係数 fb を 0.004~0.100 の範囲で変化させる事にする。

4.3 流速計算結果

以上の条件を用いて流速計算を行なった。まず、摩擦係数 fb=0.004 の時の計算開始から 7 日後の朝 8 時における水平方向の流速分布を水面付近、水深 1m、水深 2m に分けて図-4.18、図-4.19、図-4.20 に示す。メインの流れは LineQ から北側の幅の広い水路に生じており、二次元計算による流れの状況と一致している。また、深さ方向の変化による流速の変化は小さい事が分かる。

ここで、表-4.6 のように ADCP 観測の行なわれた断面において観測値と、摩擦係数 fb=0.004 の時の計算による流量を比較する。Line B、Line D、Line E において計算値が観測値を上回っている一方、Line C では観測値が計算値を上回っている。これは、実際の流れの状況よりも摩擦の影響を小さく見積もってしまったために、摩擦の影響が大きく働くと考えられる幅が狭く浅い水路での流量を過大評価してしまったと考えられる。そこで、摩

擦係数 fb を現在の値より大きくさせる方向に変化させた場合、幅が狭く浅い Line B、Line D、Line E では流量が減る一方で、幅が広く深い Line C では摩擦の影響が比較的少ないので、Line B、Line D、Line E で減少した分 Line C では流量が増加する事が見込まれる。そこで、マニングの粗度係数から推定した範囲である 0.004~0.100 で変化させる。

表-4.6 に摩擦係数を変化させた時の流量観測が行なわれた各断面における流量と観測データとの相関係数を示す。これより、摩擦係数 fb=0.100 が最も実際の流れを再現している事が分かる。この表-4.6 より、摩擦係数 fb を 0.100 よりも大きくした時、相関係数が高くなることが予想されるが、実際の自然水路の状況を適切に表現していないことになる。また、摩擦係数 fb=0.100 の決定係数が 0.937 と十分に高い事から、摩擦係数 fb を 0.100 とする。この条件における水平方向の流速分布を水面付近、水深 1m、水深 2m に分けて図-4.21、図-4.22、図-4.23 に示す。摩擦係数 fb=0.004 の時と同じように、二次元計算による流れの状況と一致している。

摩擦係数 fb=0.100 における計算結果を元に大腸菌の拡散の計算を行なう。

4.4 大腸菌の輸送計算条件

集落内で大腸菌の輸送と分散を検討するため、上述の計算結果を使用したパッシブスカラー解析を行なった。

投入するスカラーに関する条件は以下の通りである。まず、大腸菌は沈まないと仮定し、水中では一定割合で死滅するとし、現地観測結果を基に大腸菌の半減期を 10 時間とする。また、朝 8 時に各住戸から投入されると仮定する。水中での人糞からの大腸菌の放出の過程は不明であるため、水面付近 20cm で全ての大腸菌が放出される場合と水中全層で一様濃度とする場合の二種類の条件で検討を行なう。前者は人糞が水中に投入されてすぐに大腸菌が放出される場合を、後者は人糞から徐々に大腸菌が放出される場合をそれぞれ想定して条件設定を行なった。住戸の位置は Google Map より特定を行なった。本計算領域には図-4.24 に示す 1362 戸が存在しており、各住戸よりスカラーを投入する。ここで、既往研究より、人糞 1g あたりの大腸菌数 $1.0*10^9$CFU/g、一日における一人あたりの人糞の平均重量 100g を使用する。また、一住戸あたりの人数を多くとも 7.1 人と、Chhnok Tru の 2009 年の人口 8979 人と住戸数 1265 戸（図-4.25）より推定した。本計算領域は Chhnok tru がある Kampong Chhnang 州 と Kampong Cham 州の両者に重なっている。計算領域に属す住戸のうち Kampong Chhnang 州にある住戸は 1099 戸、Kampong Cham 州にある住戸は 269 戸であり、計算領域外の上流側の Kampong Chhnang 州にある住戸は 166 戸であった。また、WHO の飲み水の安全基準として、大腸菌は「100ml 中に検出されない」と設けられており、大腸菌が 100ml 中 1CFU 以上の濃度で存在している時、飲み水として危険な状態であると言える。

以上の条件より大腸菌の輸送計算を行なった。

4.5　大腸菌の輸送計算結果

まず、一回のみ大腸菌を投入し大腸菌の輸送と分散を調べる。大腸菌の投入深さを 0.2m の時と 2.0m の時の各条件で、大腸菌の水平方向の一日毎の分布を水面付近と水深 1m と水深 2m に分けて図-4.26～図-4.67 に示す。各図は 100ml 中の大腸菌の大腸菌数を表しており、赤色の地域は基準値を上回る量の大腸菌の濃度である地域、黄色の地域は基準値の 0.1 倍～1 倍の大腸菌の濃度の地域、緑色の地域は 0.01～0.1 倍の大腸菌の濃度の地域、青色は基準値の 0.01 倍以下の大腸菌の濃度の地域である事を表している。一日経過後、上流側では多くの地域で基準値を下回る大腸菌数まで減っている一方で、北側の水路や南側の船着場付近で基準値を超える大腸菌が残されている。北側の水路では、実際には流れのある水路であり排出される事が考えられるが、境界条件を向かい合う二つの面のみにするために流れが無い状態となっているため、実際の大腸菌数より過大評価していると考えられる。一方、南側の船着場付近では水の流入がないため、大腸菌が長期間滞留する事が予想される。計算結果から、基準値を下回るまでに三日から四日経過する必要があり、大腸菌が長期間滞留する可能性が高い地域である事が分かった。また流れがある水路においては、鉛直方向の変化によっても大きく変化しない。大腸菌の投入深さが 0.2m の時であっても、流れのある地域では下層にも大腸菌が多く含まれた状態で排出される。以上より、大腸菌の投入深さは長期的な視点では大きな影響を与えない事が分かる。

次に、毎朝 8 時に大腸菌を投入し、定常状態における大腸菌の密度を調べる。前回の計算では大腸菌の輸送や排出の過程に注目していたが、今回は前日の大腸菌もある程度残った上での計算になり、実際の現象に近い状況で計算を行なう事で、基準値との比較に大きな意味を持たせる事ができる。大腸菌の投入深さを 0.2m の時と 2.0m の時の各条件で、定常状態と考えられる 7 日目の大腸菌の水平方向の分布を 4 時間毎に水面付近と水深 1m と水深 2m に分けて図-4.68～図-4.109 に示す。まず、大腸菌の投入深さによる違いは少ない事が分かる。これは水の流れにより鉛直方向にも拡散されるためだと考えられる。次に、計算終了時の大腸菌の分布を見ると、小島の凹凸に大腸菌が捕われているように見える。この凸凹は実際の水陸境界の変化に比べて計算格子の粗い事から生じてしまっており、この地点ではとても小さな流速しか発生していない。そして大腸菌投入直後に捕われた高濃度の大腸菌が少しずつ流れ出すため、大腸菌の影響が長期化してしまっている。実際には地形の凹凸がなくとも、何らかの影響で高濃度の大腸菌が滞留した場合、その地点の下流側では大腸菌に関して飲み水として使用できるレベルに要するまで長期化する可能性がある事が示唆された。

ここで、図-4.110 に定める点 I、点 J、点 K、点 L において、100ml あたりの大腸菌数の

時間変化をそれぞれ図-4.111～図-4.118 に示す。まず、鉛直方向の変化と大腸菌数の関係について考察を行なう。点 J、点 K では鉛直方向によって大腸菌の変化は少なかった。これは、両点が流れのある水路上の点であり、鉛直方向の流速変化は少ない事から上層下層ともに同じような速度で大腸菌が排出されていったと考えられる。一方で、点 I、点 L では上層下層とも水の流れが少ない部分であり、他地点よりも相対的に風の影響が大きくなり、上層の方が高濃度になる場合があった。次に、飲み水としての基準である、100ml 中に大腸菌が検出されない事との比較を行なう。点 J では大腸菌が投入されてから 4 時間から 5 時間で飲み水として使用可能なレベルまで大腸菌が排出された。一方点 K では大腸菌が投入されてから約 24 時間で飲み水として使用可能なレベルまで大腸菌が排出された。大腸菌は一日毎に投入されるため、常に基準値を上回る結果となった。これは点 K の上流側の小島に捕われた高濃度の大腸菌による影響と考えられる。点 I は 10^{1}~10^{3} 倍、点 L は 10^{4}～10^{5} 倍と常に基準値を大幅に超える大腸菌量となり、飲み水として使用するには危険な状態である可能性が高い事が示唆された。

第四章　図表集

4.2.2　計算領域

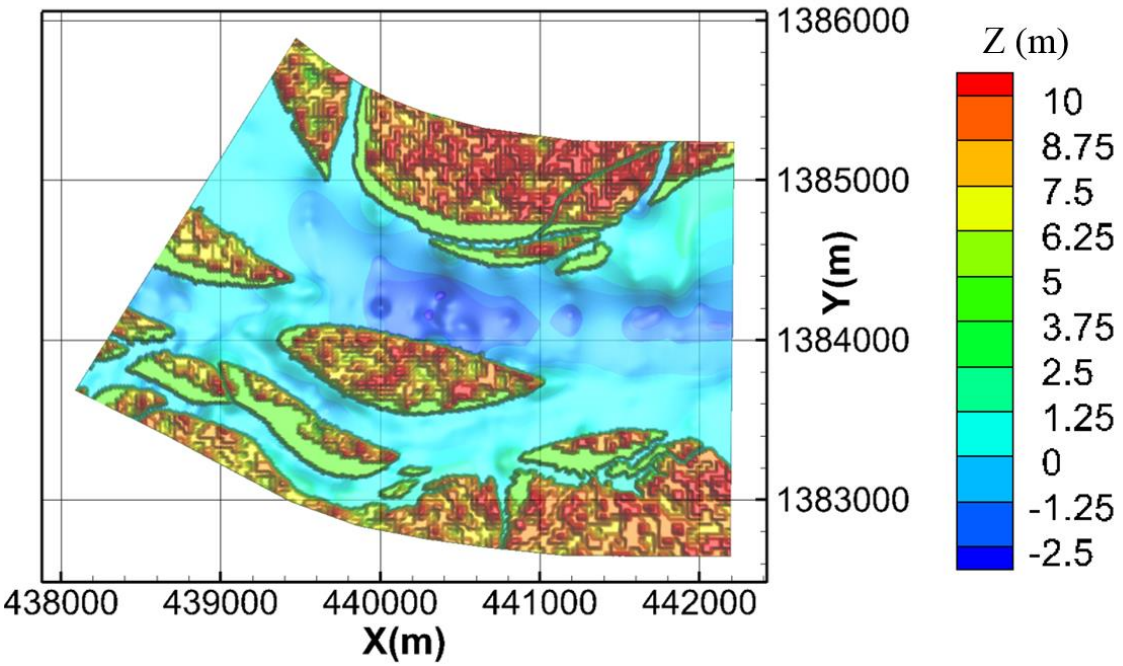


図-4.１　三次元計算における計算領域

4.2.3　初期条件

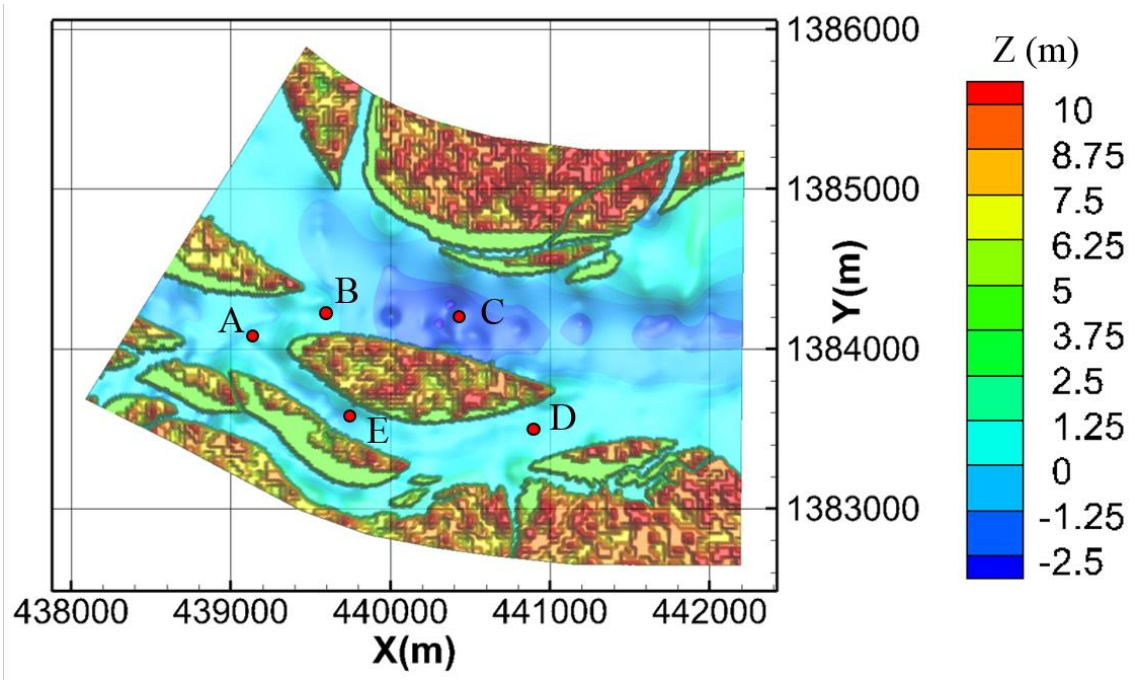


図-4. 2　初期水位取得位置

表-4. 1　初期水位

	水位(m)
A	2.368
B	2.325
C	2.317
D	2.310
E	2.340

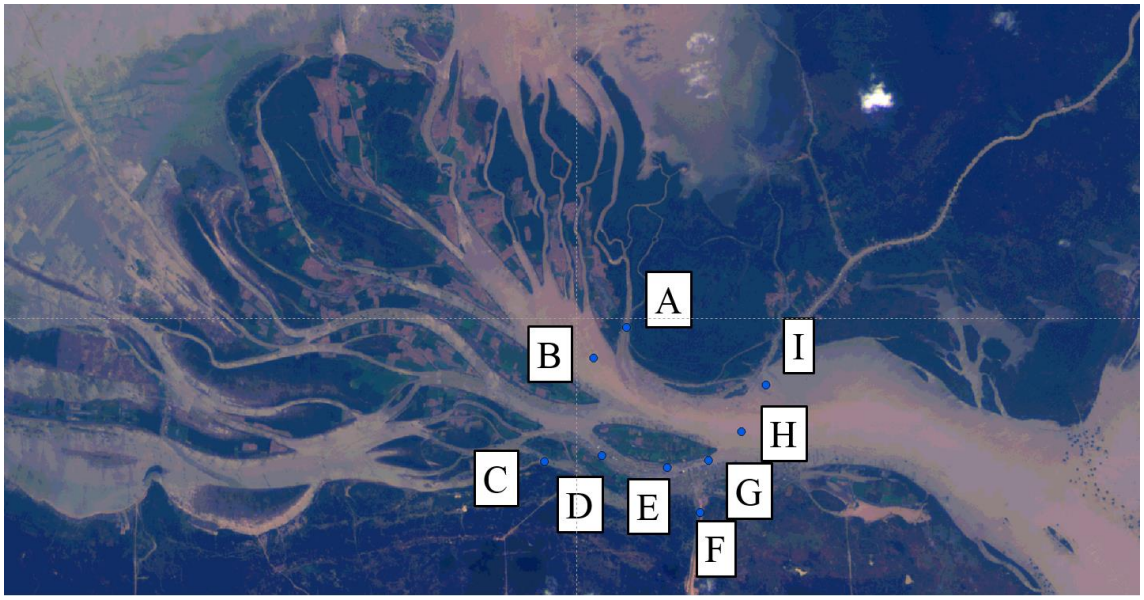


図-4. 3　初期水温取得位置

表-4. 2　初期水温

観測点	水温(℃)
A	31.4
B	33.1
C	31.5
D	31.5
E	32.3
F	33.7
G	31.3
H	31.2
I	31.2

4.2.4　下流側境界条件

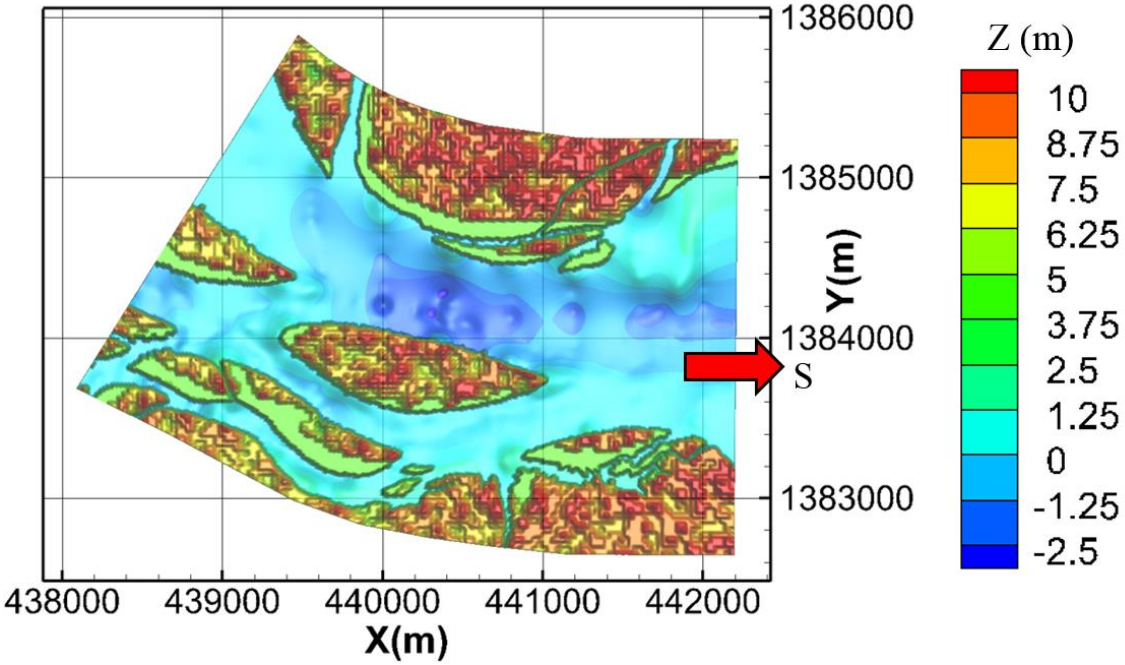


図-4. 4　下流側境界位置

表-4. 3　下流側境界条件

境界位置	流量(m^3/s)	水位(m)
S	575.23	2.295

4.2.5　上流側境界条件

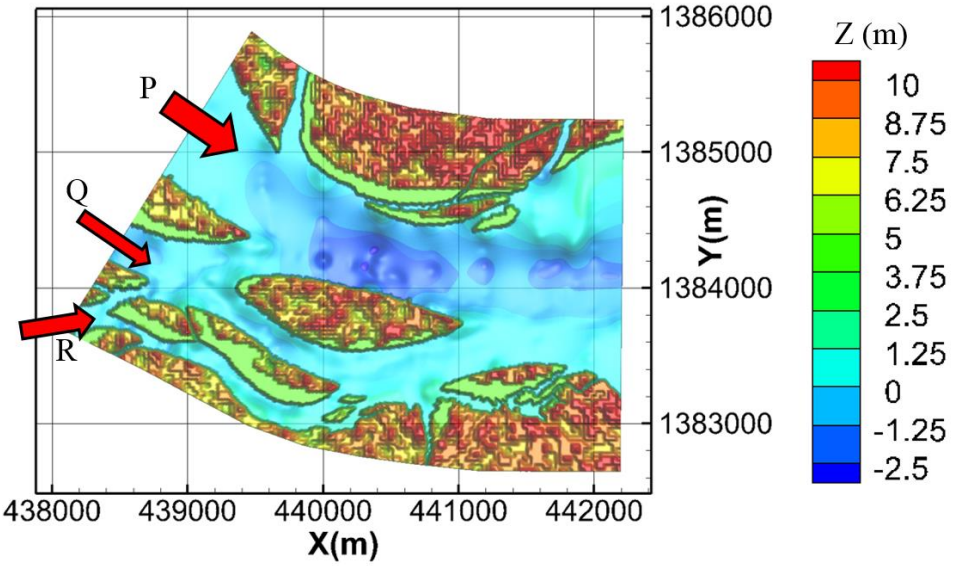


図-4. 5　上流側境界位置

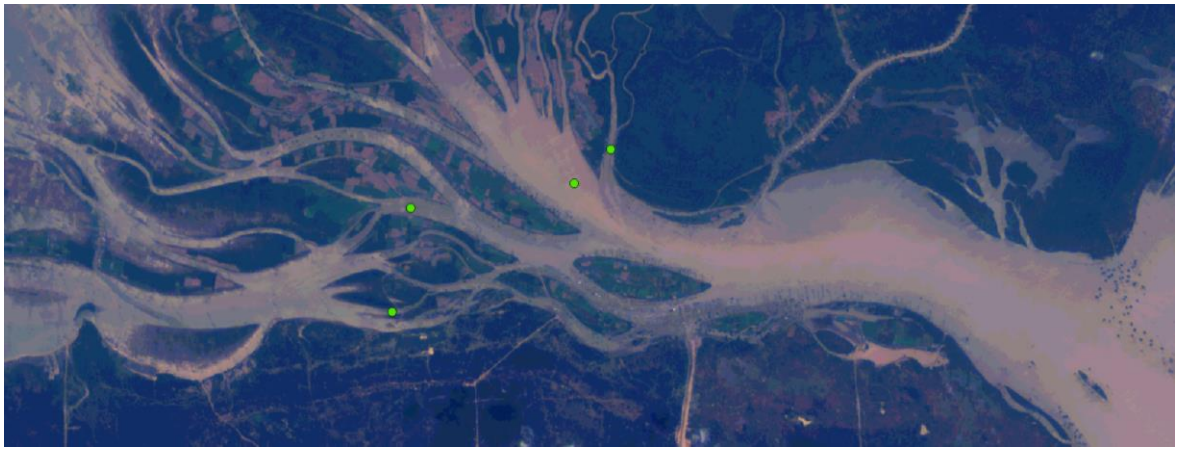


図-4. 6　上流側境界水温取得位置

表-4. 4　上流側境界条件

境界位置	流量(m^3/s)	温度(℃)
P	209.43	32.8
Q	260.79	30.9
R	78.12	30.8

4.2.6　気象条件

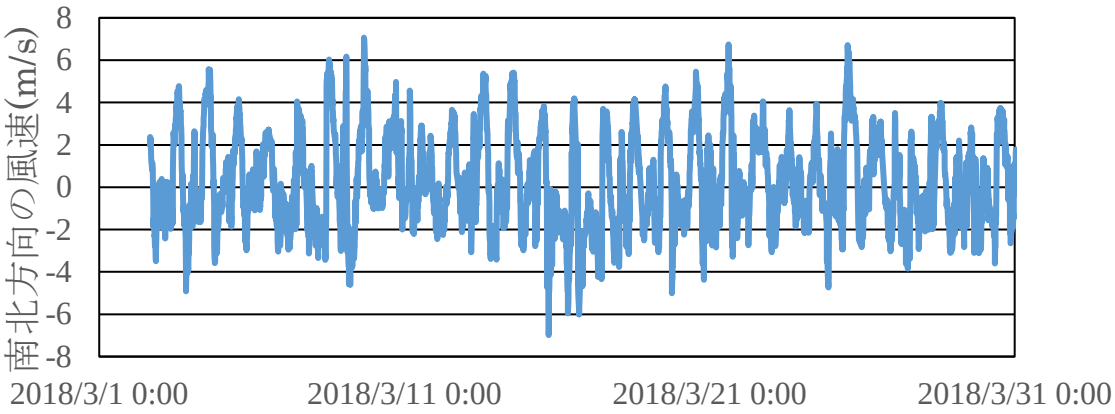


図-4. 7　2019 年 3 月の南北方向の風速（北向きを正）

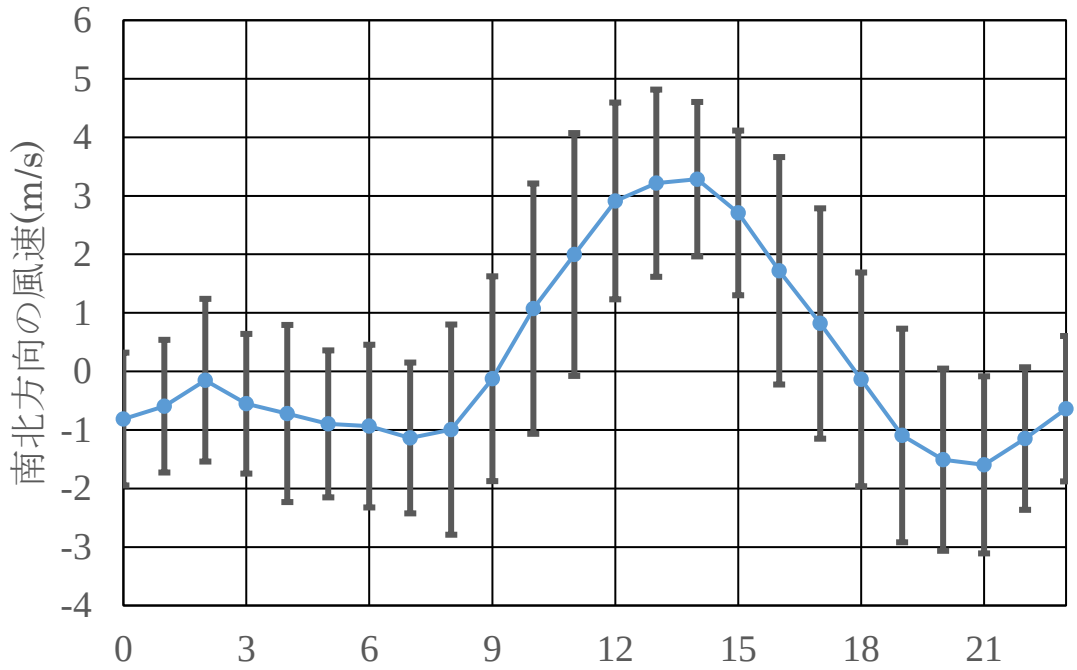


図-4. 8　南北方向における三月の毎時平均風速（北向きを正）

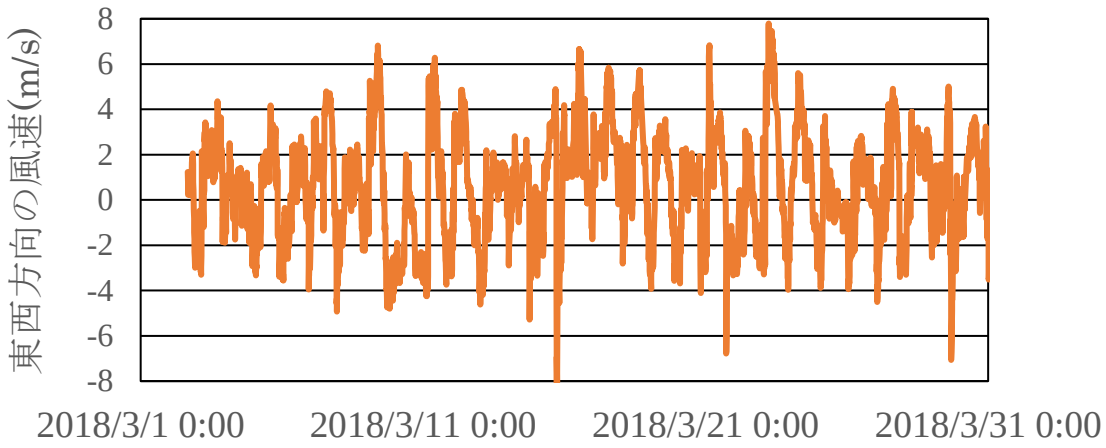


図-4. 9　2019 年 3 月の東西方向の風速（西向き向きを正）

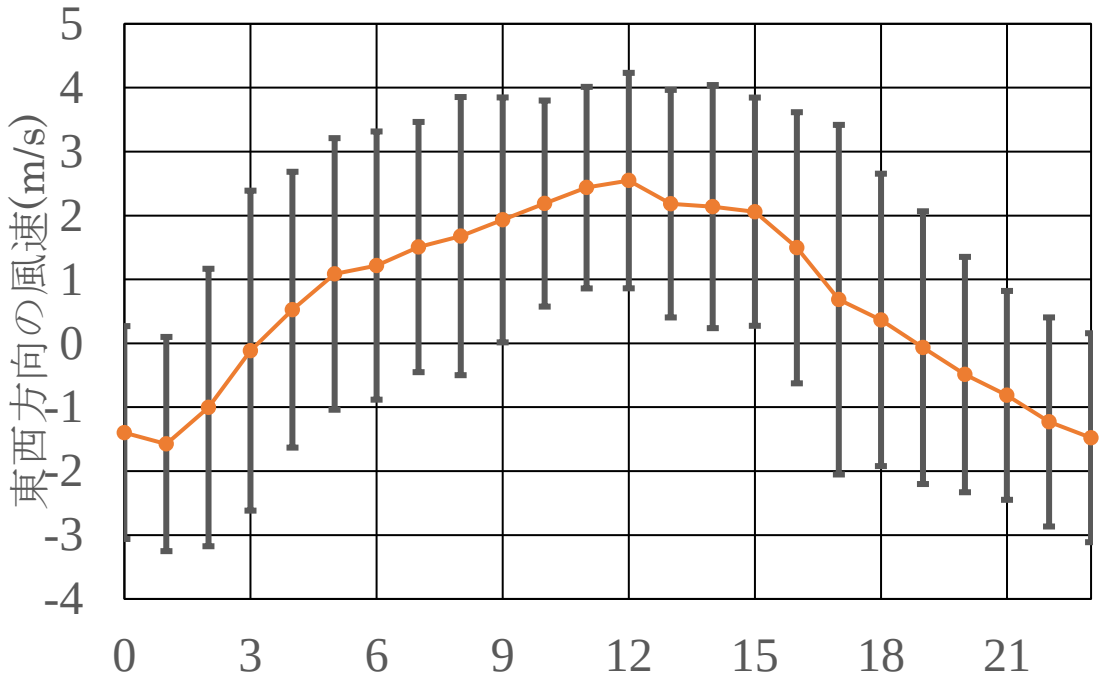


図-4. 10　東西方向における三月の毎時平均風速（西向きを正）

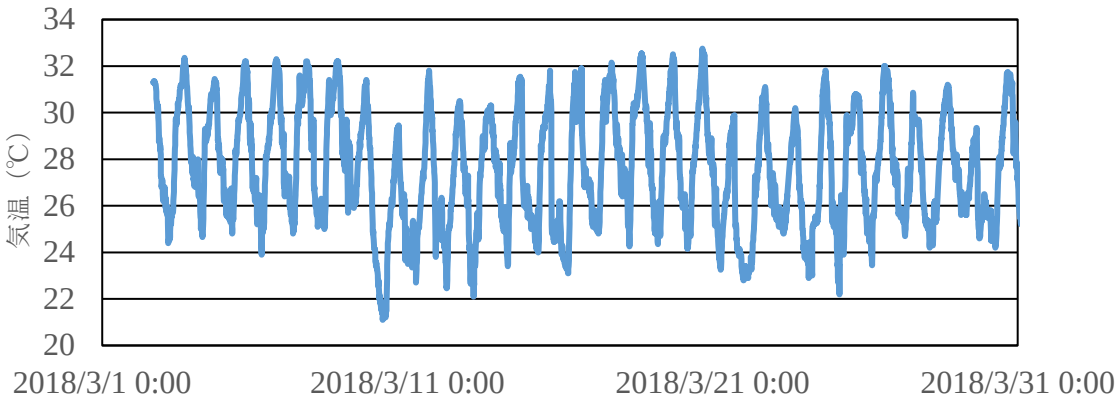


図-4. 11　2019 年 3 月の気温

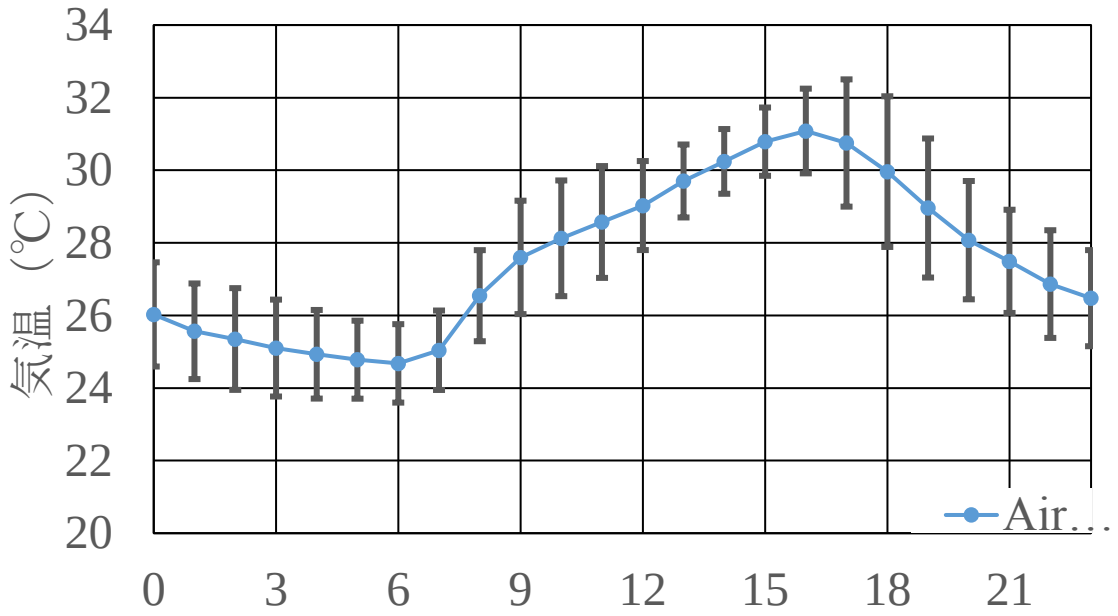


図-4. 12　三月の毎時平均気温

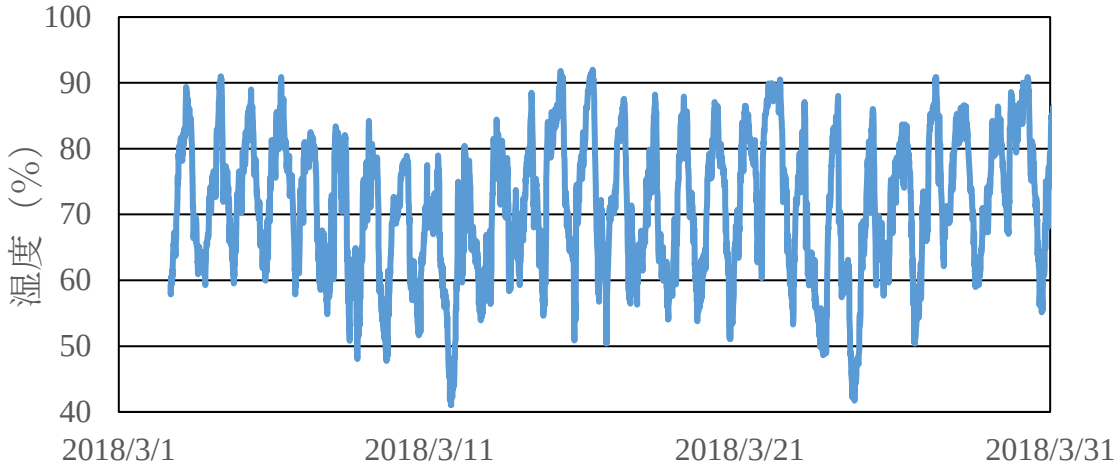


図-4. 13　2019 年 3 月の湿度

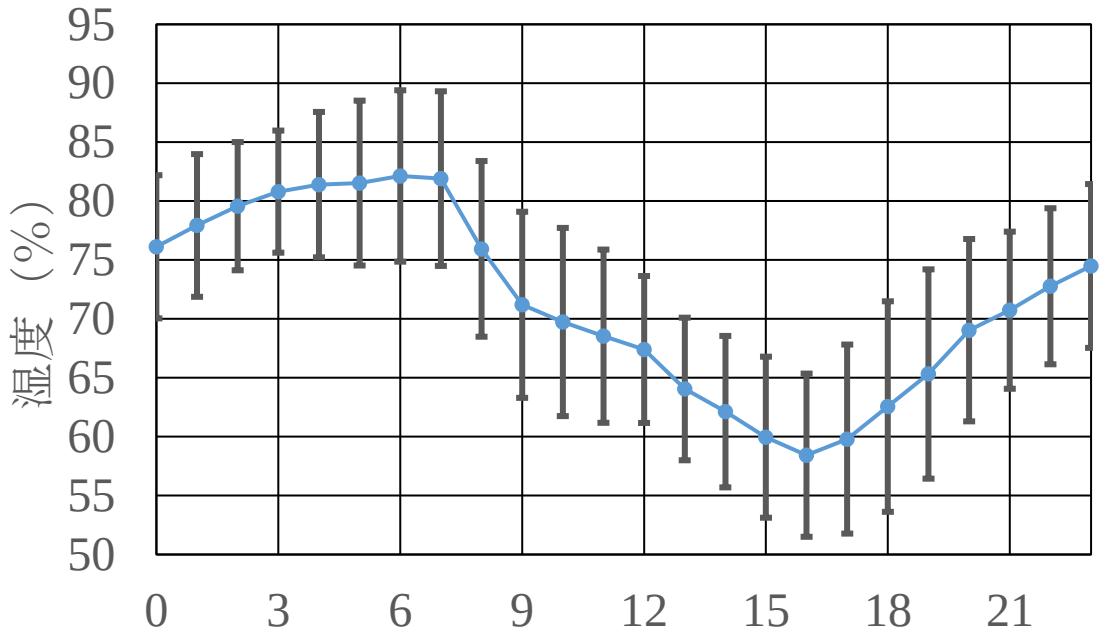


図-4. 14　三月の毎時平均湿度

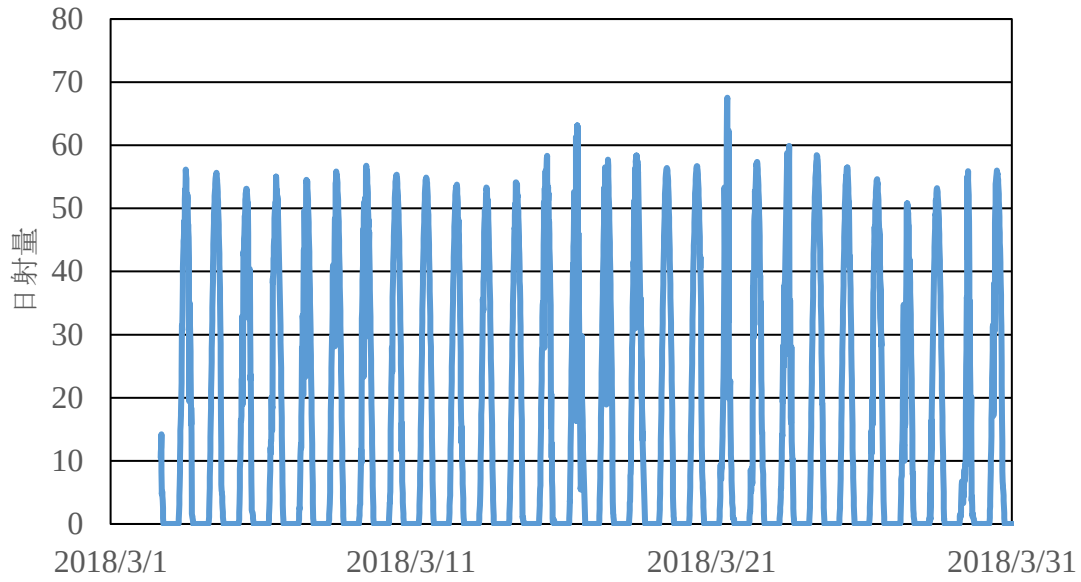


図-4. 15　2019 年 3 月の日射量

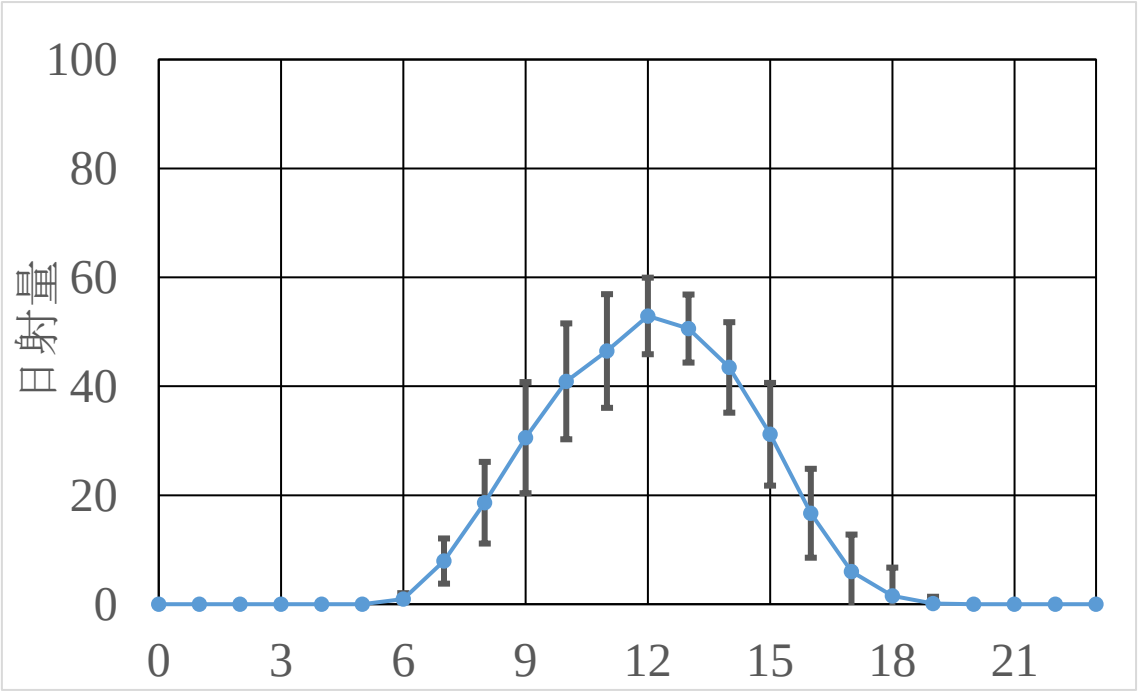


図-4. 16　三月の毎時平均日射量

4.2.7　摩擦係数 fb

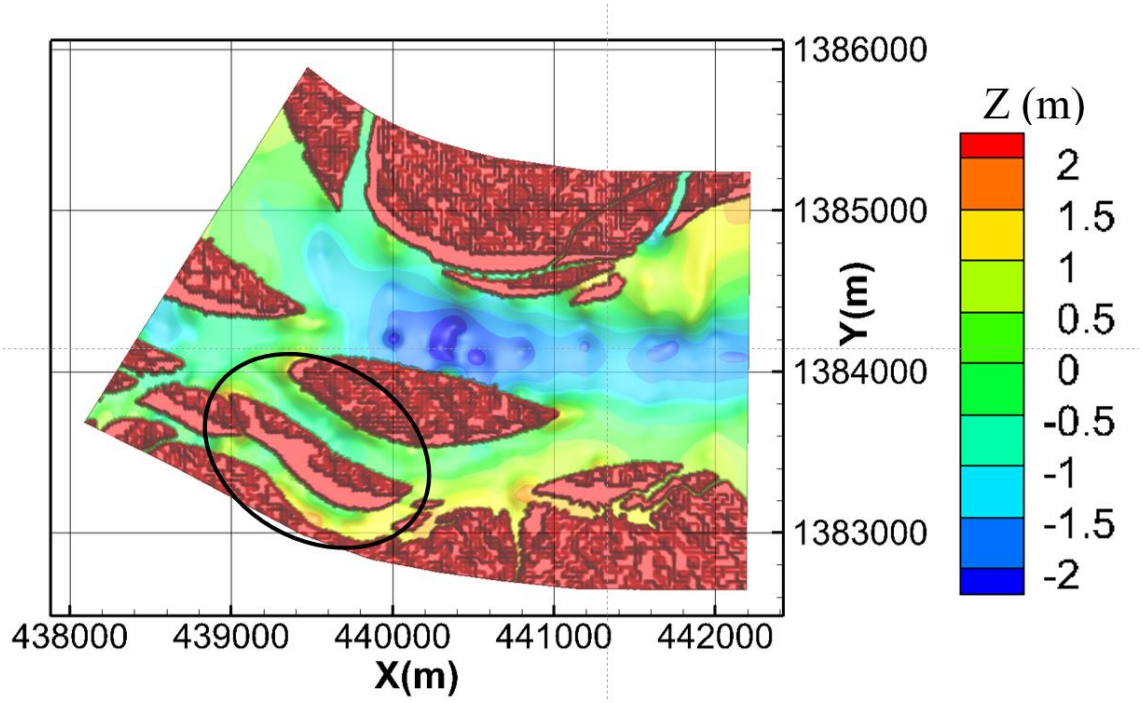


図-4. 17　摩擦の影響が大きいと予想される水路

表-4. 5　摩擦係数 fb とマニングの粗度係数の関係

摩擦係数 fb	マニングの粗度係数 n
0.004	0.0321
0.006	0.0393
0.008	0.0454
0.01	0.0507
0.02	0.0717
0.03	0.0878
0.05	0.1134
0.1	0.1604

4.3　流速計算結果

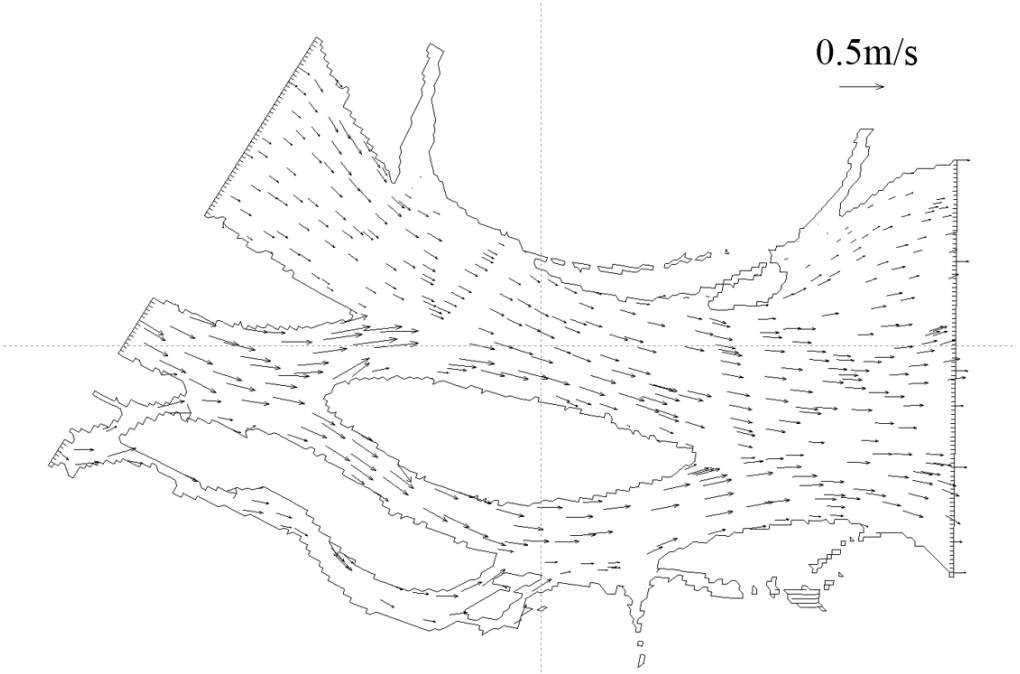


図-4. 18　摩擦係数 f_b=0.004 の時の水深 1m における流速分布

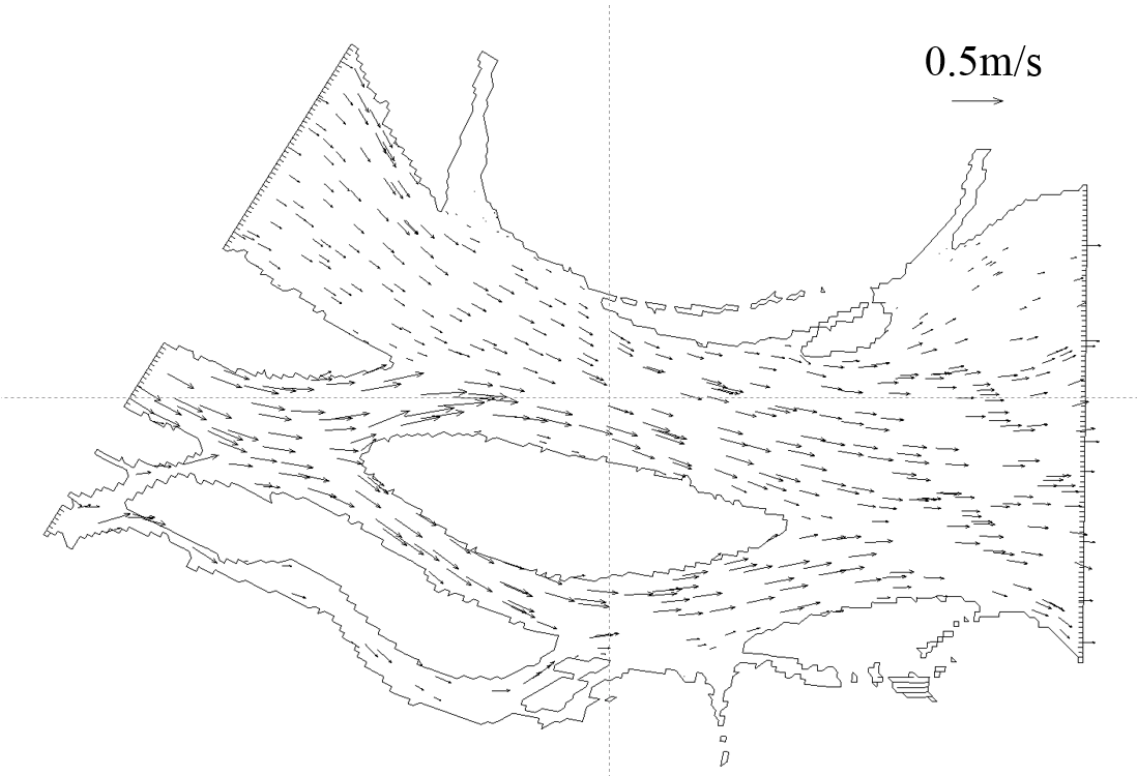


図-4. 19　摩擦係数 f_b=0.004 の時の水深 1m における流速分布

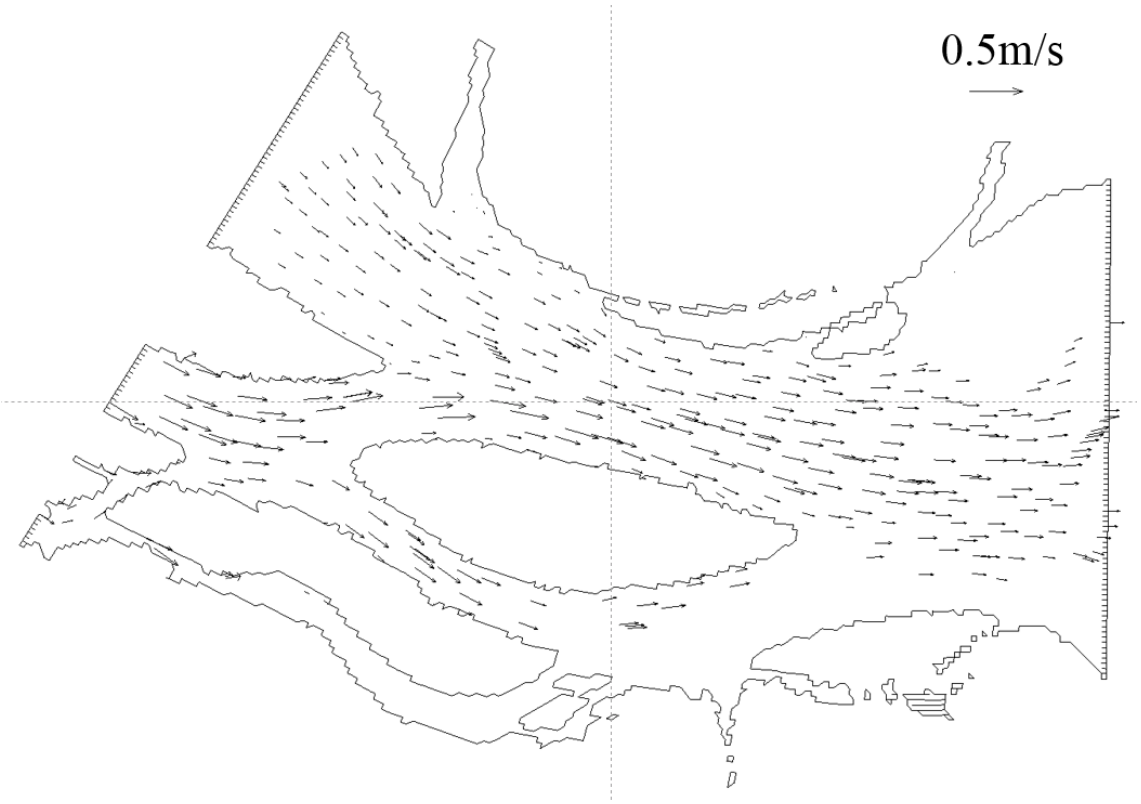


図-4. 20　摩擦係数 *fb*=0.004 の時の水深 2m における流速分布

表-4. 6　観測流量と摩擦係数 fb を変化させた時の流量の比較

流量(m^3/s)	観測結果	fb=0.004	fb=0.008	fb=0.010	fb=0.020	fb=0.030	fb=0.050	fb=0.10
Line B	98.47	137.33	136.02	134.08	127.86	125.93	124.75	124.47
Line C	480.32	400.52	402.68	405.26	412.66	415.25	416.66	421.02
Line D	60.99	109.52	107.88	106.90	100.94	99.09	98.60	98.27
Line E	37.47	31.71	31.35	31.09	30.25	29.89	29.56	29.24
R^2(vs Obs)	-	0.867	0.877	0.887	0.916	0.925	0.929	0.937

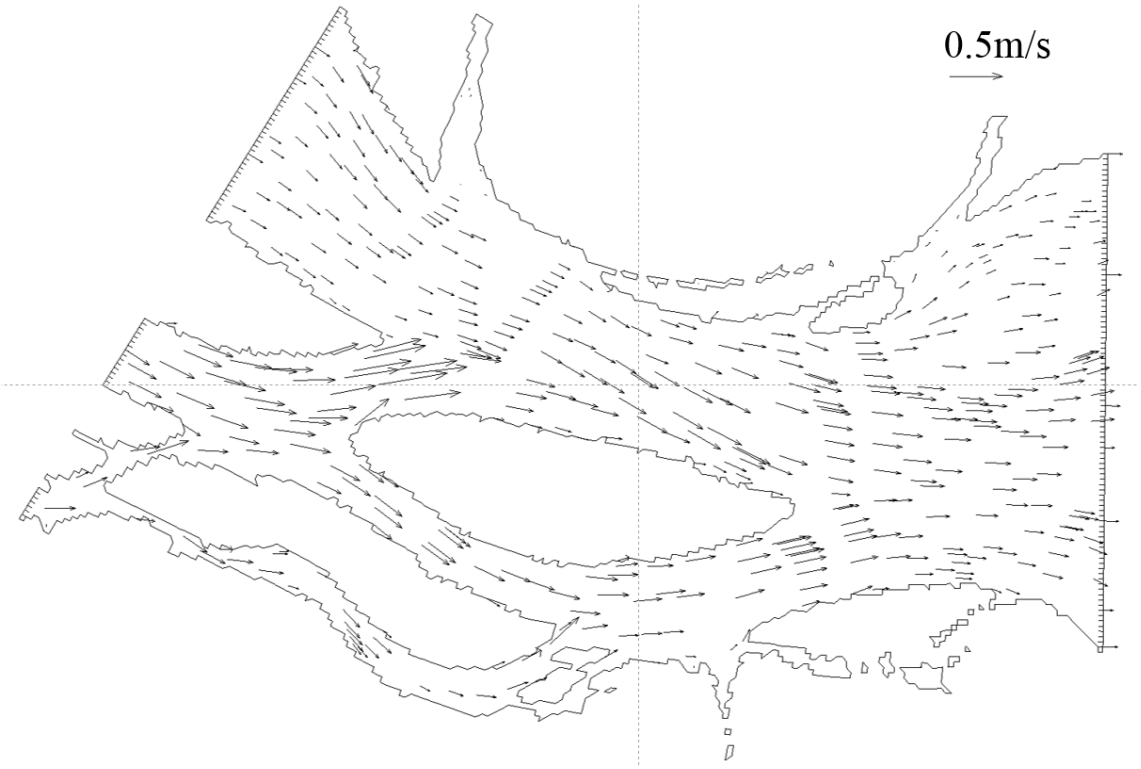


図-4. 21　摩擦係数 f_b=0.100 の時の水深 0m における流速分布

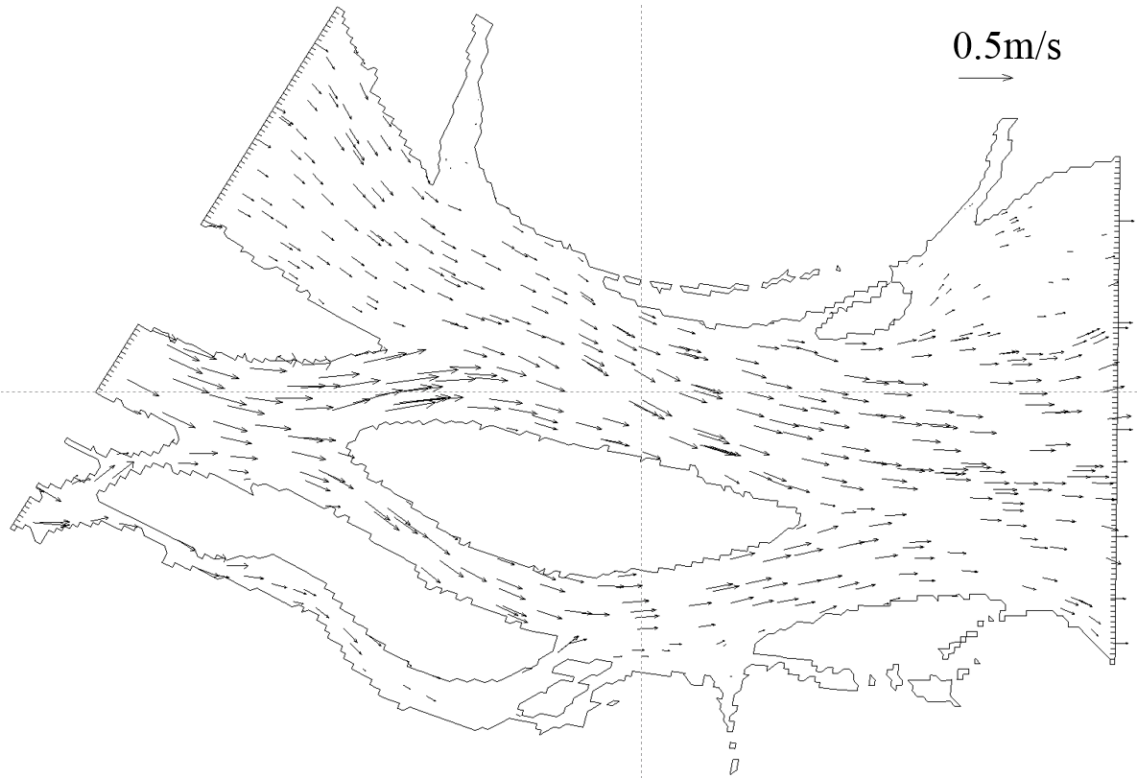


図-4. 22　摩擦係数 f_b=0.100 の時の水深 1m における流速分布

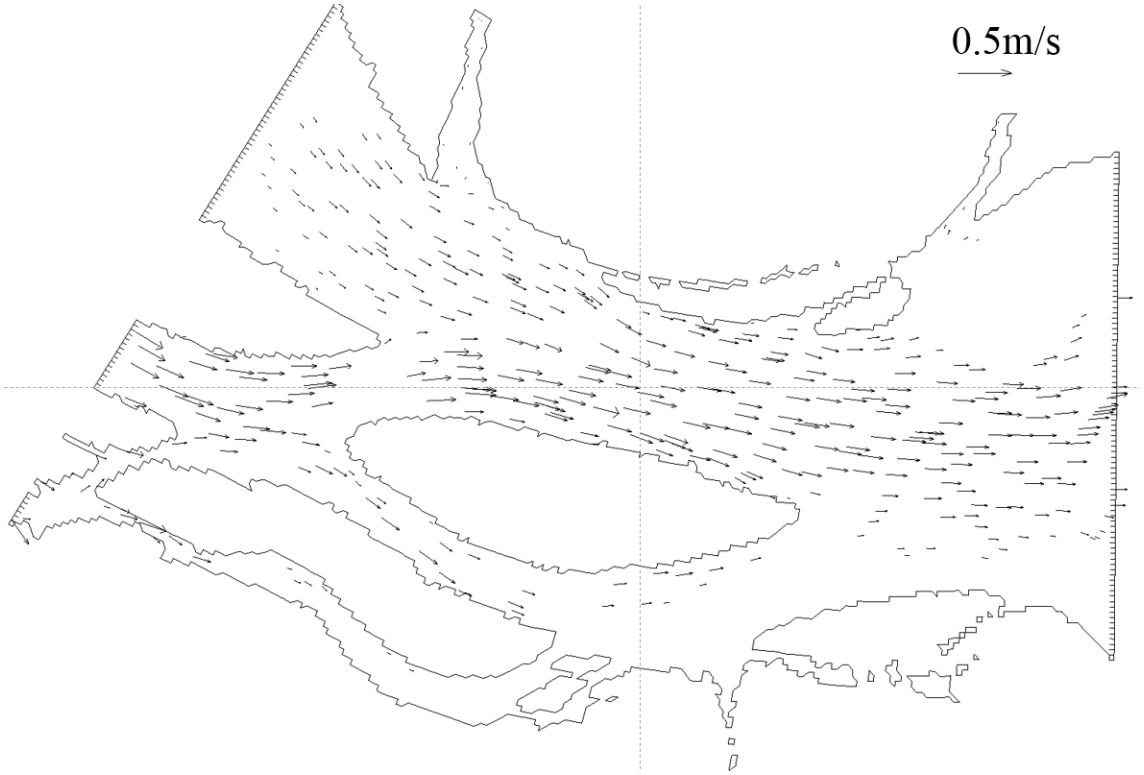


図-4. 23　摩擦係数 f_b=0.100 の時の水深 2m における流速分布

4.4　大腸菌の輸送計算条件

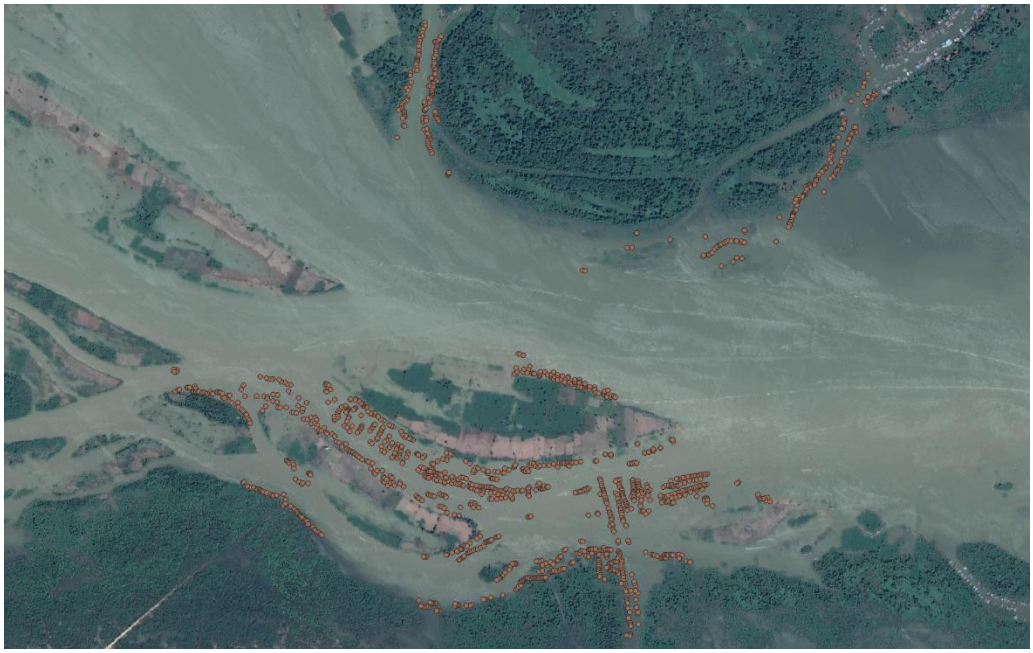


図-4. 24　計算領域内の住戸

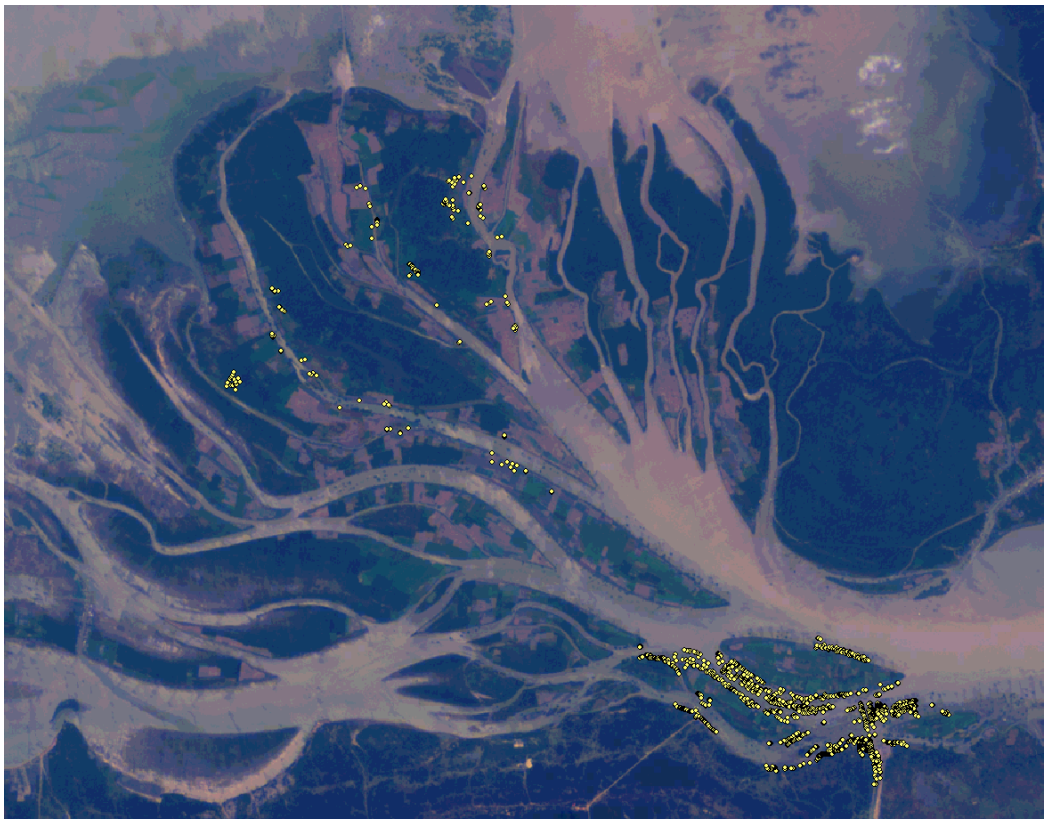


図-4. 25　Chhnok Tru 内の住戸

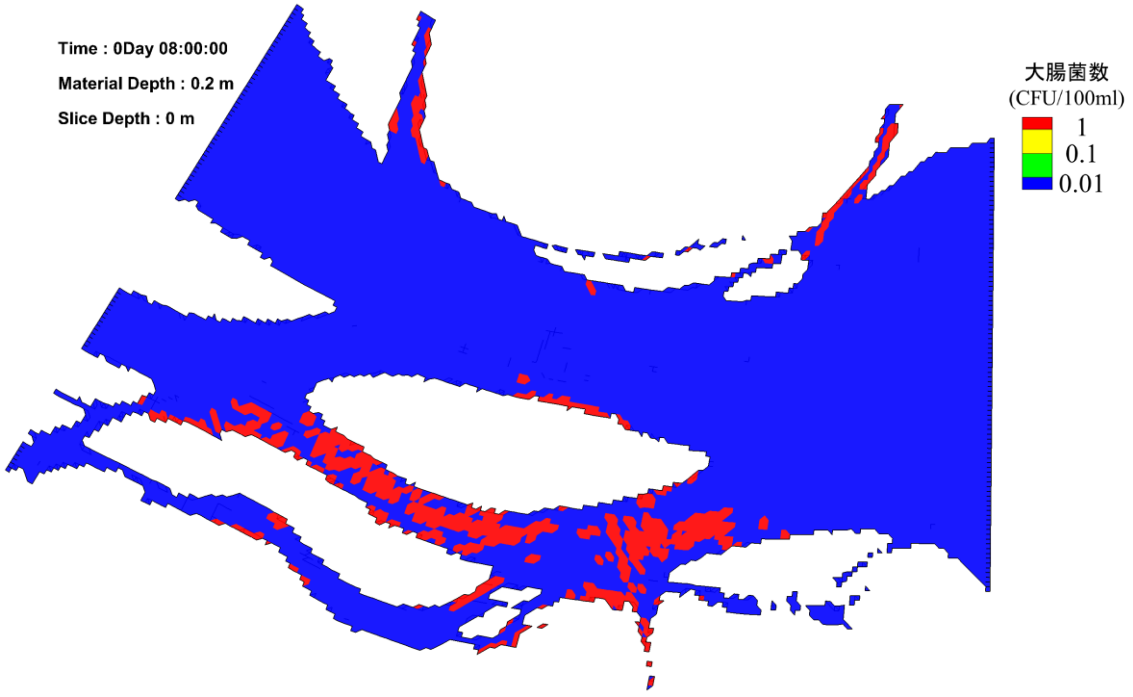


図-4. 26　大腸菌投入深さ 0.2m の時の計算開始時の水深 0m における大腸菌数

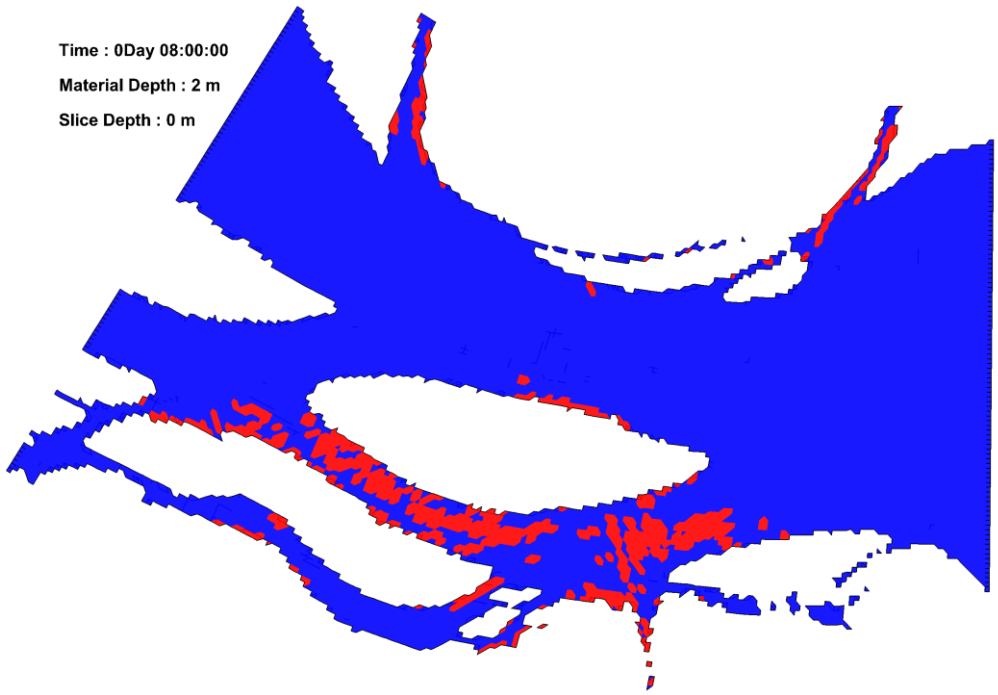


図-4. 27　大腸菌投入深さ 2.0m の時の計算開始時の水深 0m における大腸菌数

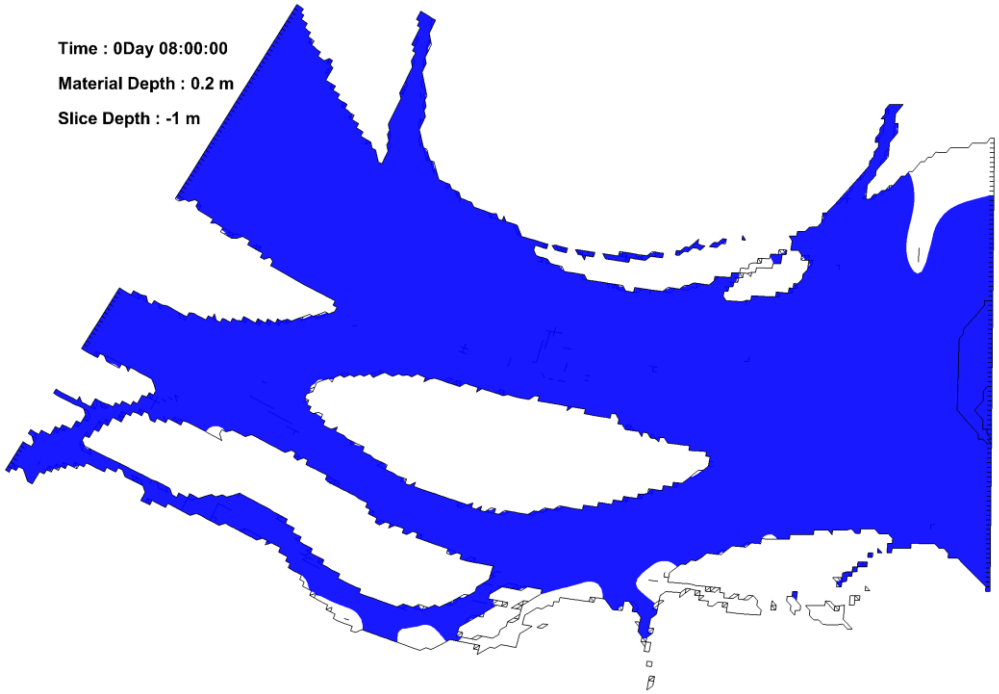


図-4. 28　大腸菌投入深さ 0.2m の時の計算開始時の水深 1m における大腸菌数

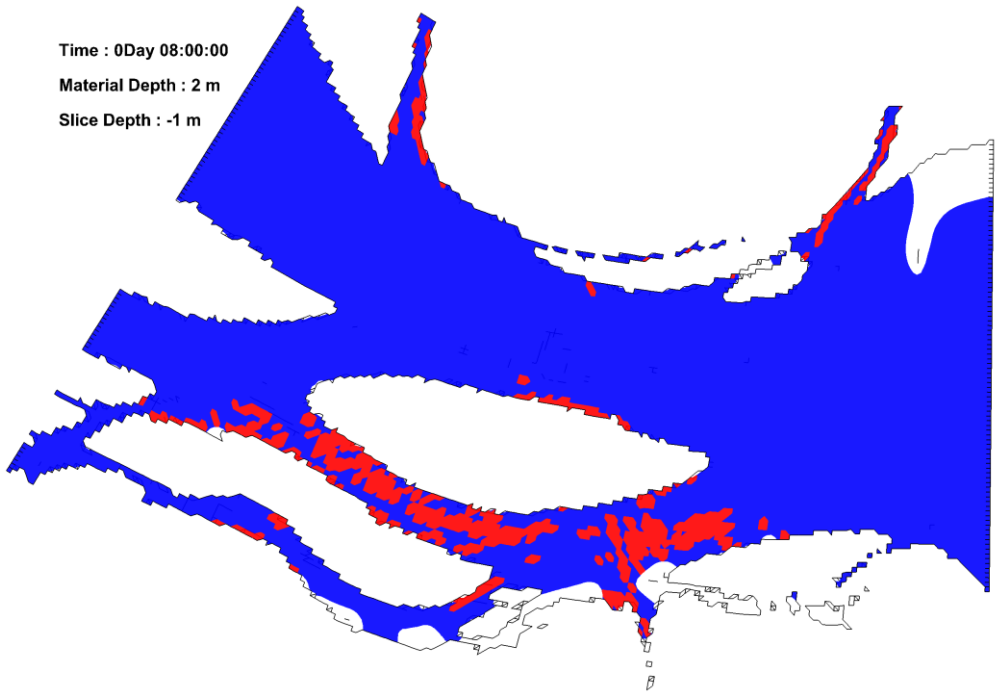


図-4. 29　大腸菌投入深さ 2.0m の時の計算開始時の水深 1m における大腸菌数

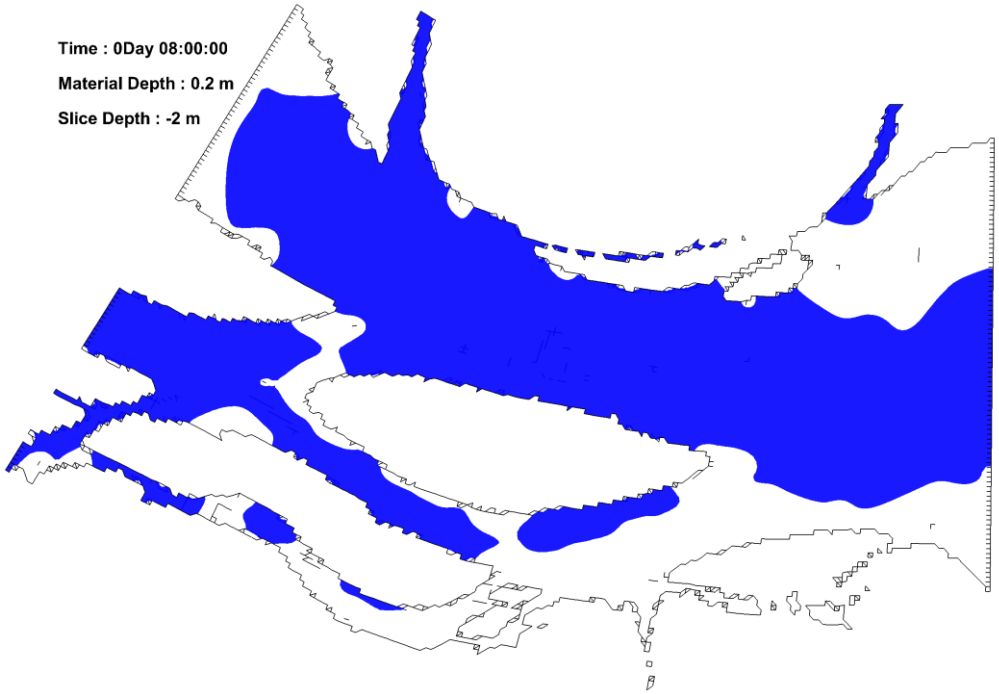


図-4. 30　大腸菌投入深さ 0.2m の時の計算開始時の水深 2m における大腸菌数

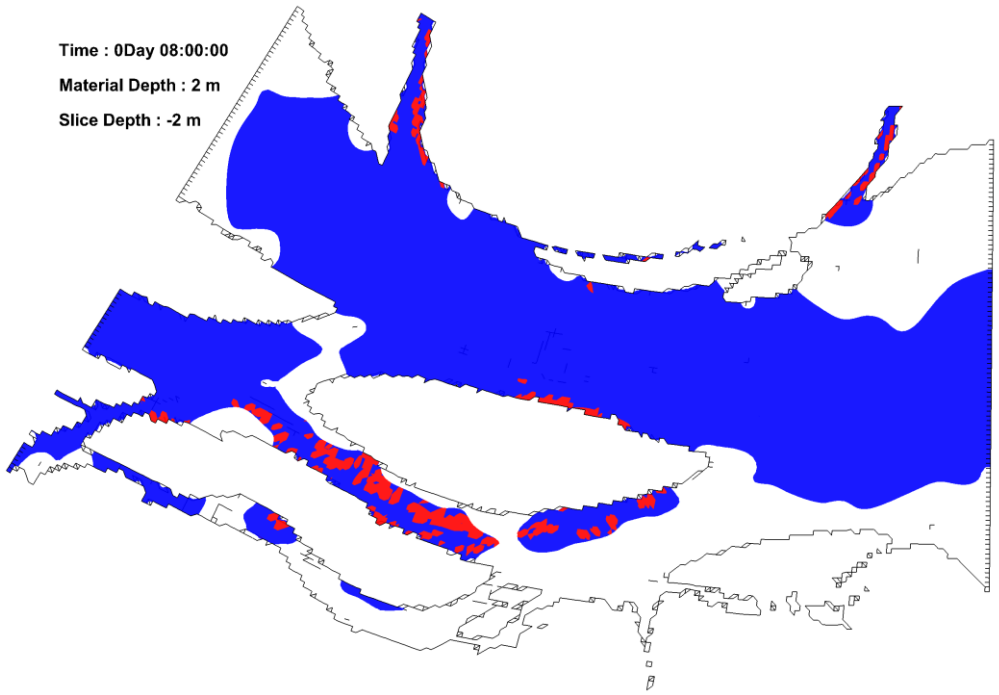


図-4. 31　大腸菌投入深さ 2.0m の時の計算開始時の水深 2m における大腸菌数

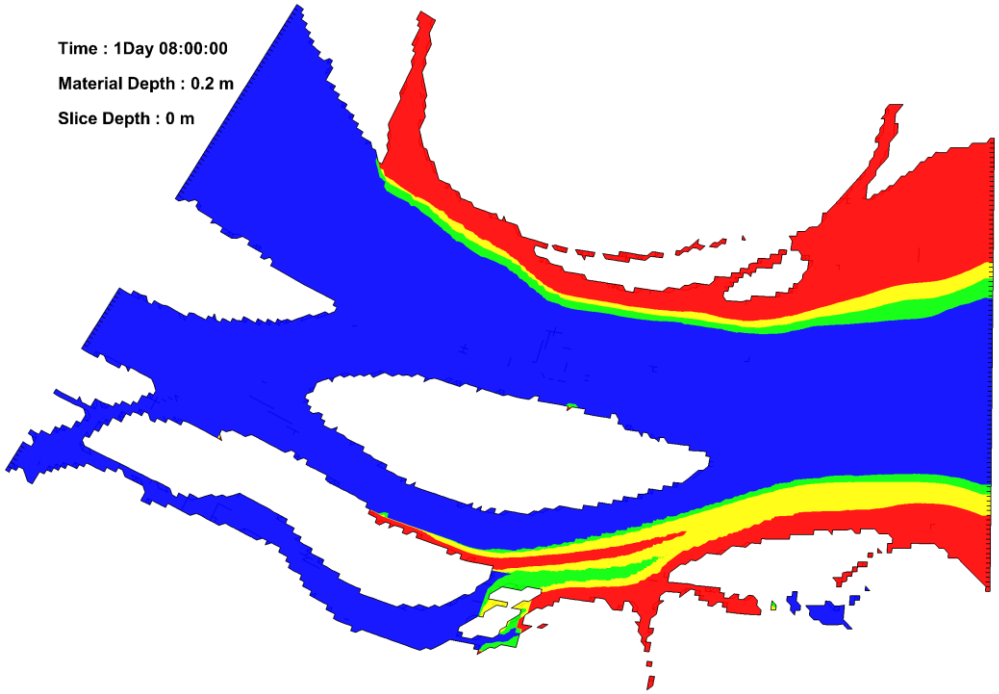


図-4. 32　大腸菌投入深さ 0.2m の時の計算開始から一日後の水深 0m における大腸菌数

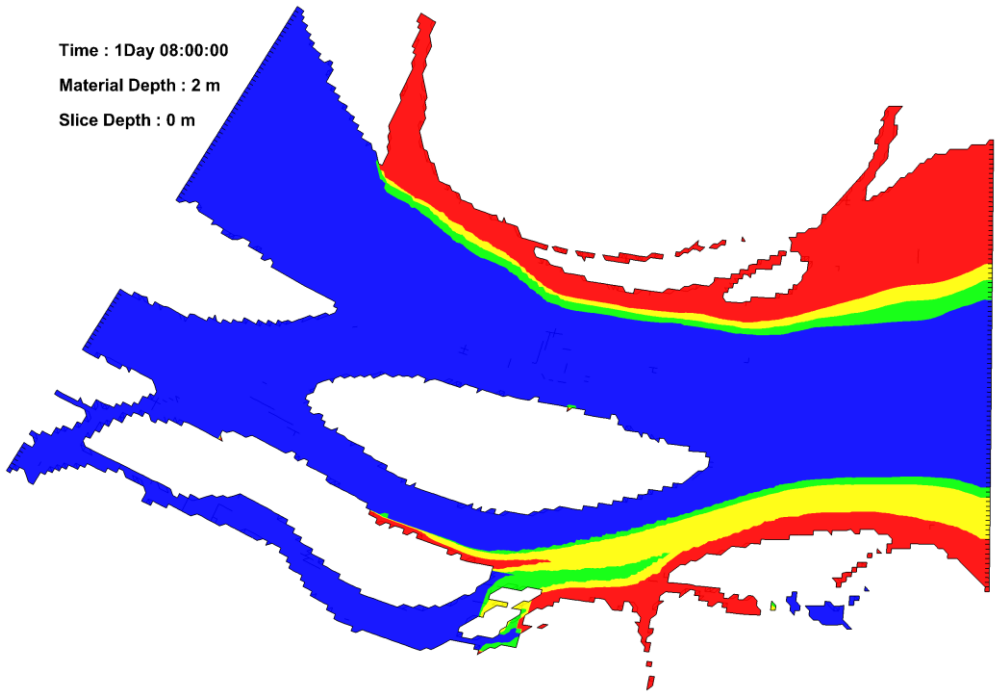


図-4. 33　大腸菌投入深さ 2.0m の時の計算開始から一日後の水深 0m における大腸菌数

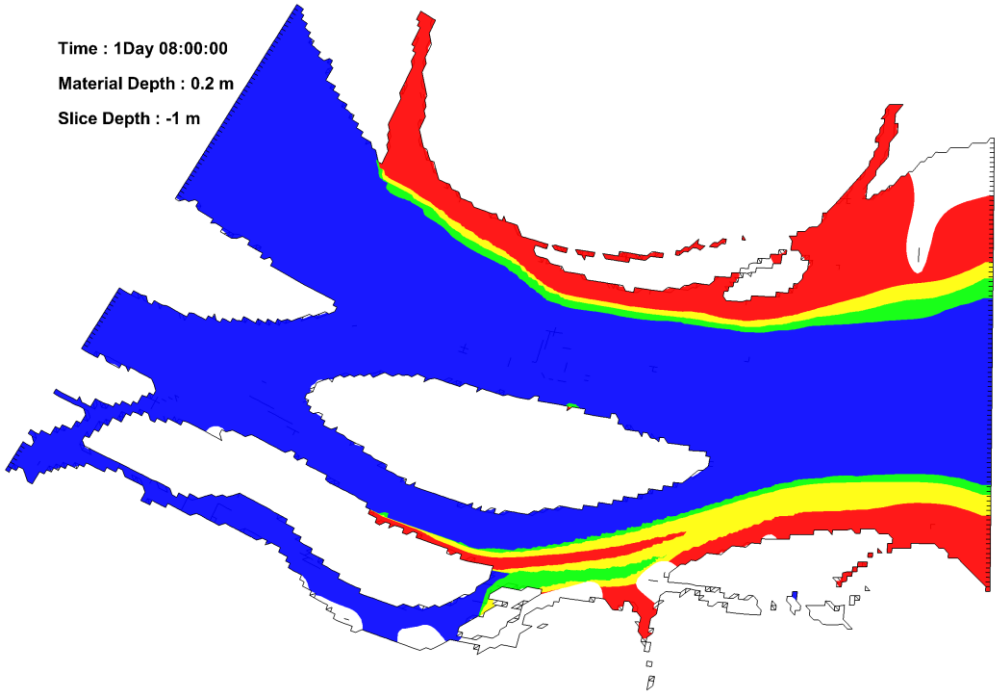


図-4. 34　大腸菌投入深さ 0.2m の時の計算開始から一日後の水深 1m における大腸菌数

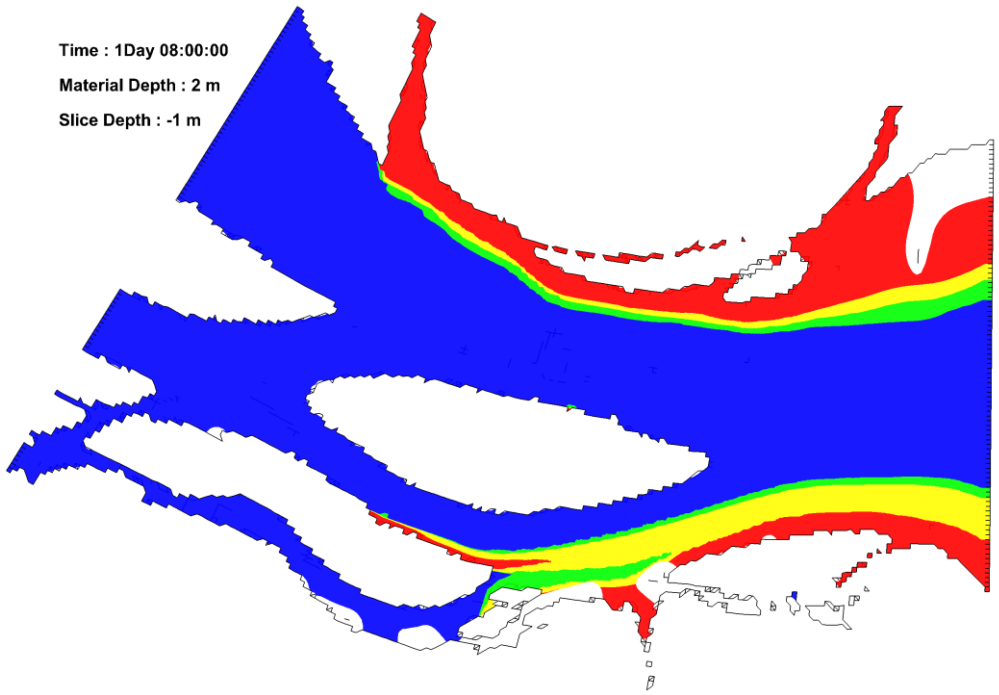


図-4. 35　大腸菌投入深さ 2.0m の時の計算開始から一日後の水深 1m における大腸菌数

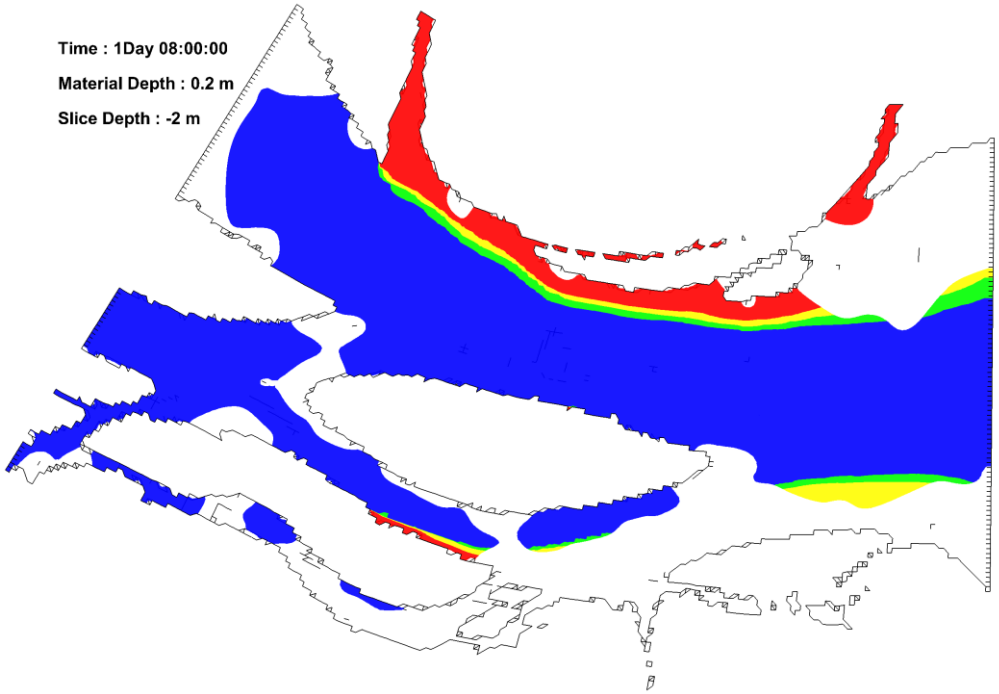


図-4. 36　大腸菌投入深さ 0.2m の時の計算開始から一日後の水深 2m における大腸菌数

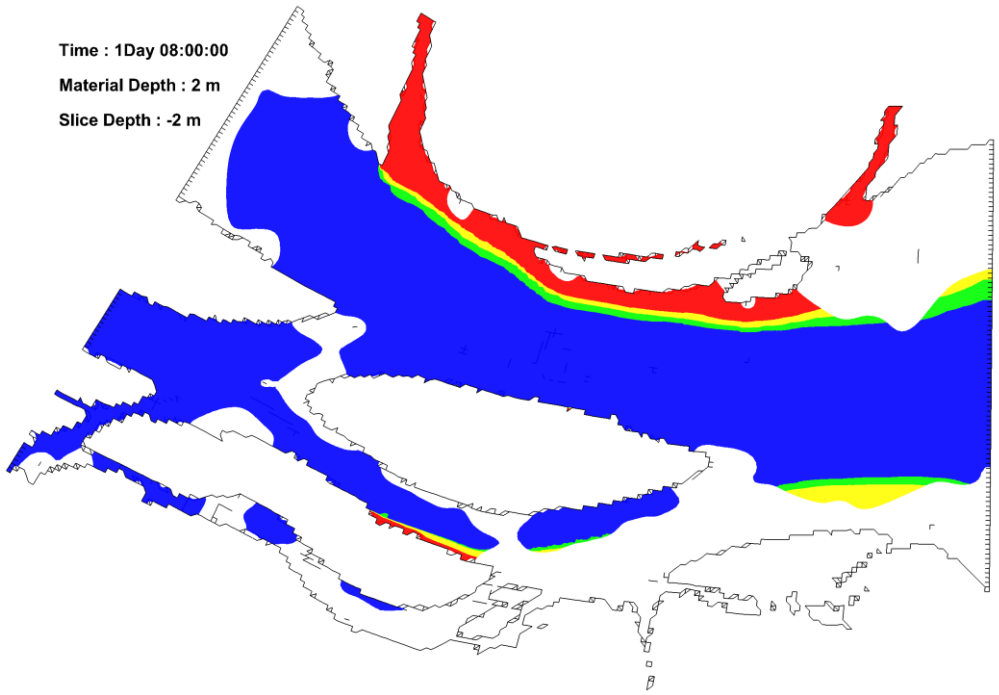


図-4. 37　大腸菌投入深さ 2.0m の時の計算開始から一日後の水深 2m における大腸菌数

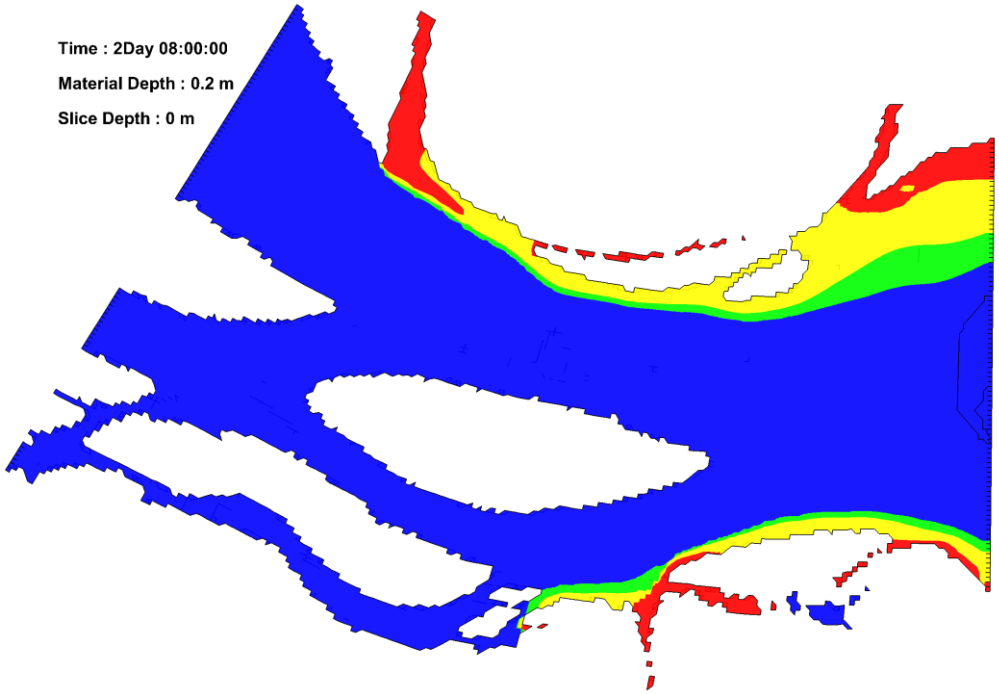


図-4. 38　大腸菌投入深さ 0.2m の時の計算開始から二日後の水深 0m における大腸菌数

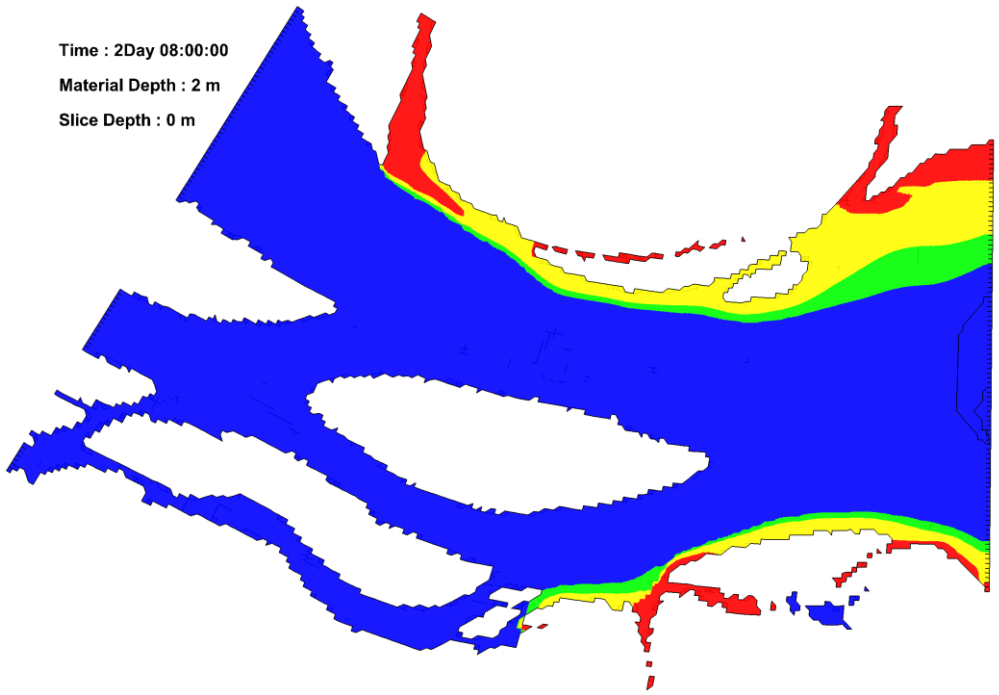


図-4. 39　大腸菌投入深さ 2.0m の時の計算開始から二日後の水深 0m における大腸菌数

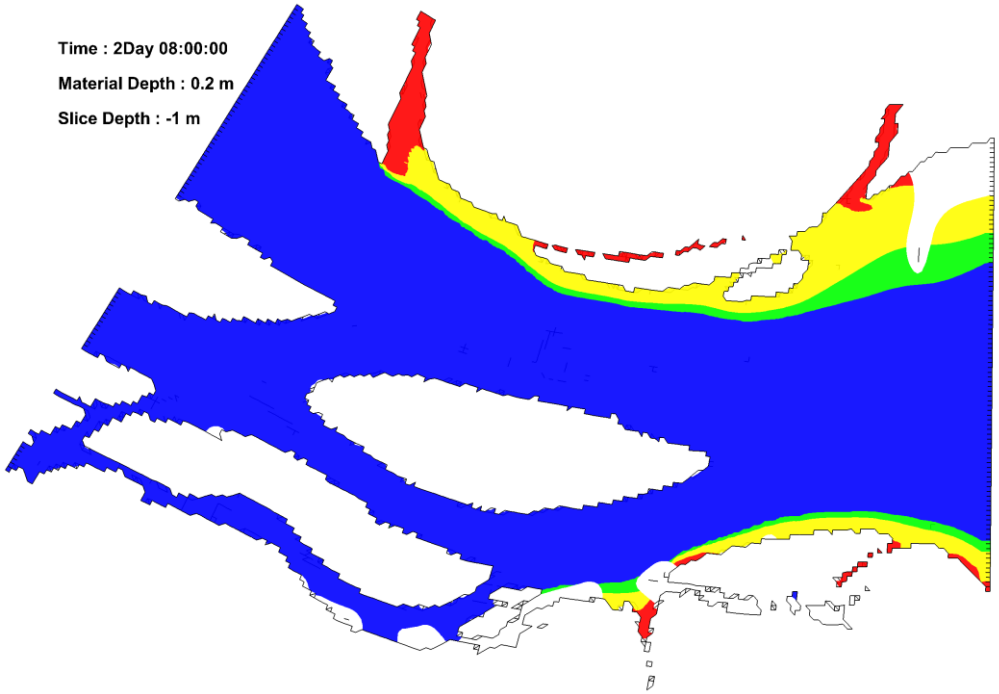


図-4. 40　大腸菌投入深さ 0.2m の時の計算開始から二日後の水深 1m における大腸菌数

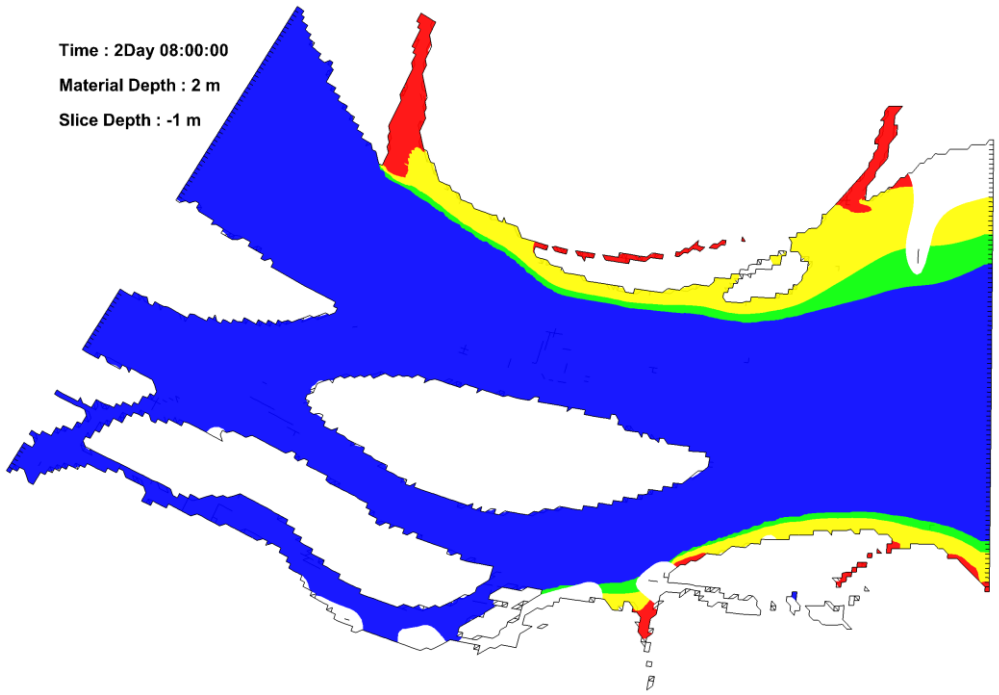


図-4. 41　大腸菌投入深さ 2.0m の時の計算開始から二日後の水深 1m における大腸菌数

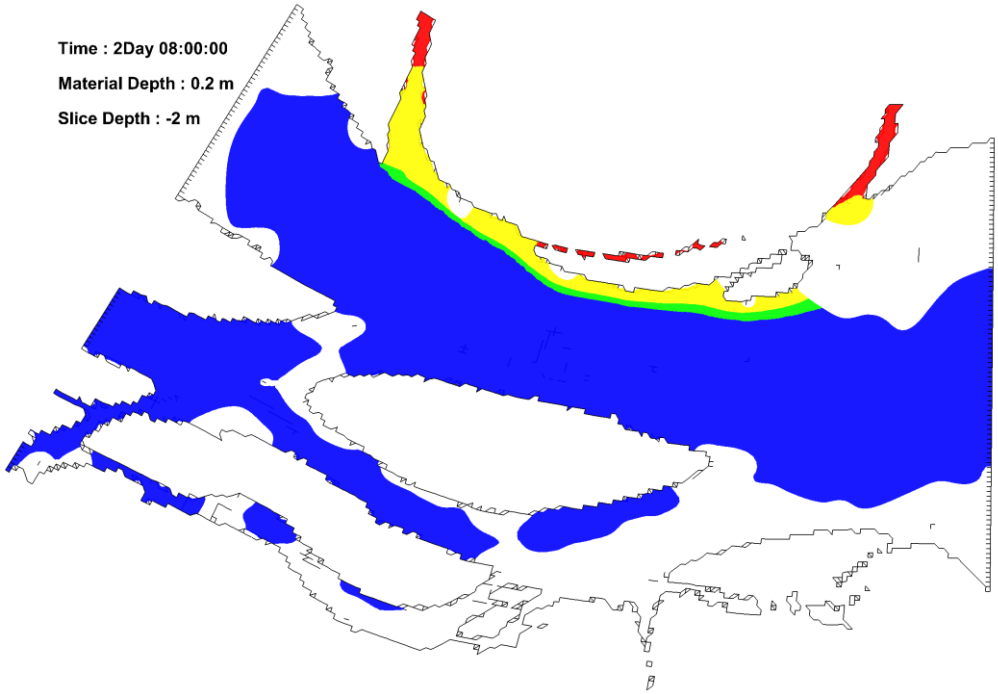


図-4. 42　大腸菌投入深さ 0.2m の時の計算開始から二日後の水深 2m における大腸菌数

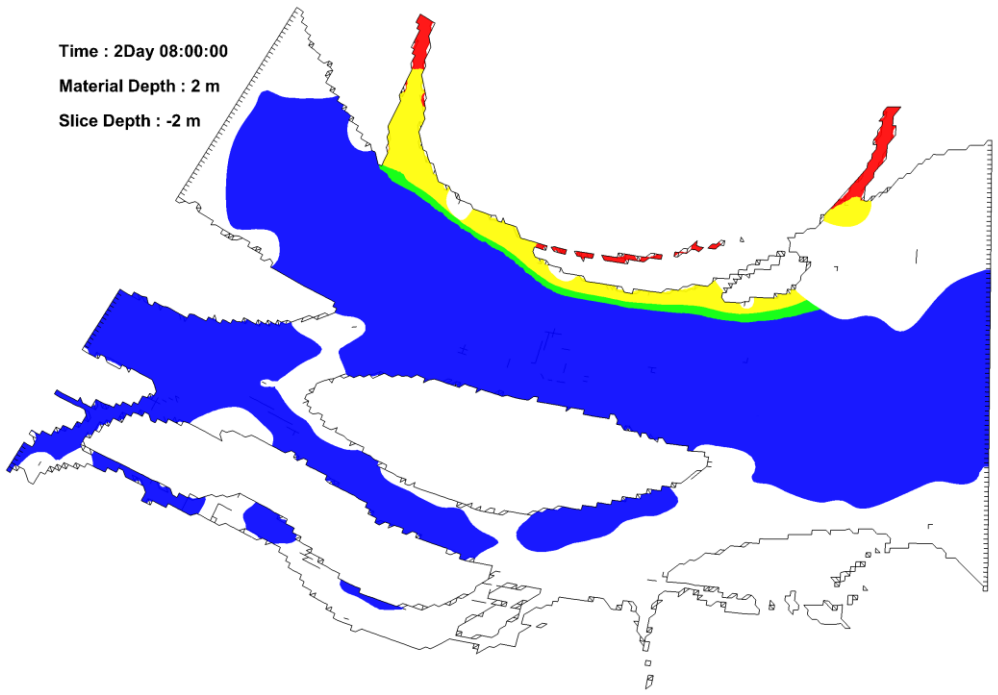


図-4. 43　大腸菌投入深さ 2.0m の時の計算開始から二日後の水深 2m における大腸菌数

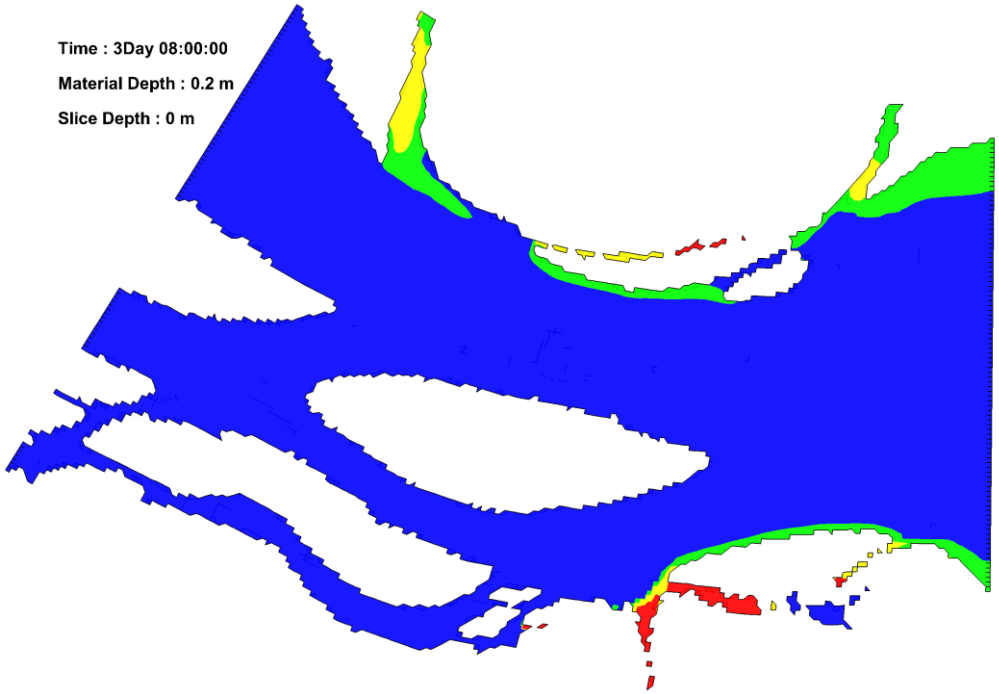


図-4. 44　大腸菌投入深さ 0.2m の時の計算開始から三日後の水深 0m における大腸菌数

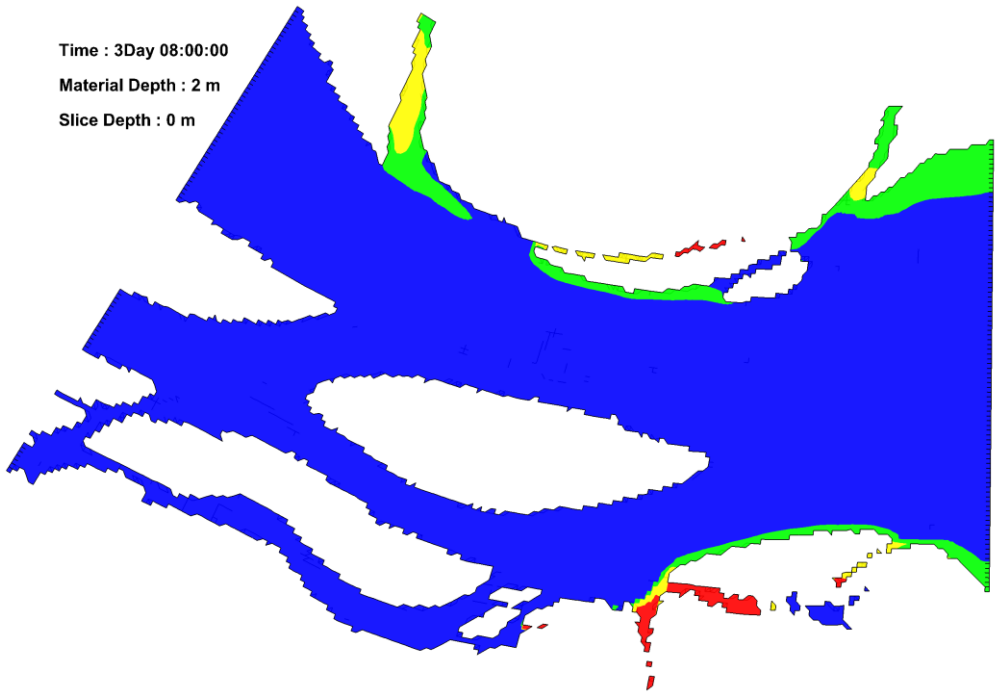


図-4. 45　大腸菌投入深さ 2.0m の時の計算開始から三日後の水深 0m における大腸菌数

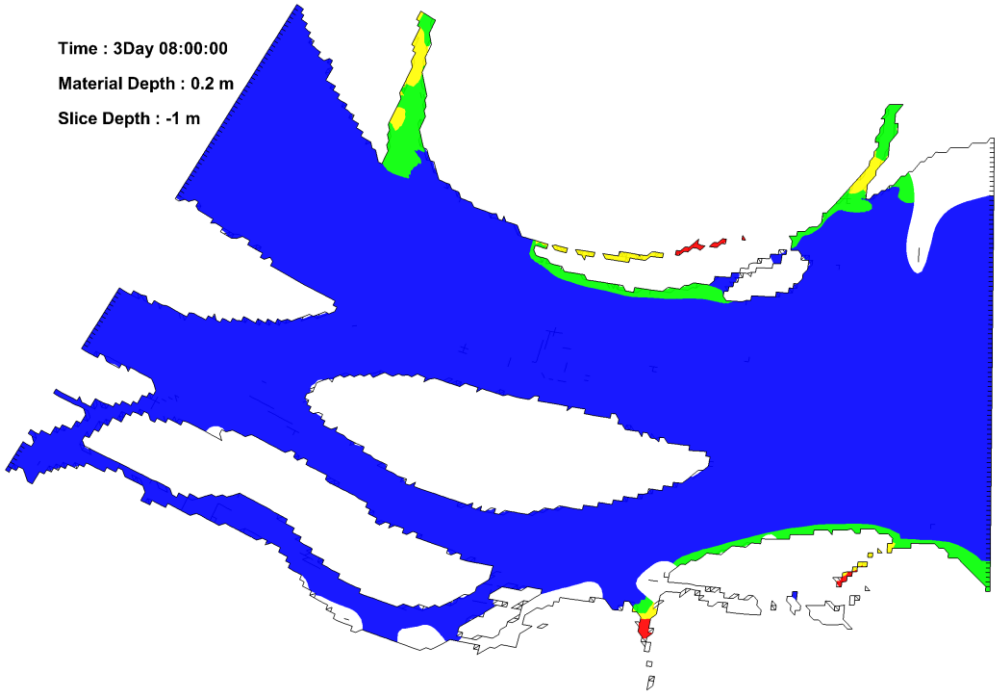


図-4. 46　大腸菌投入深さ 0.2m の時の計算開始から一日後の水深 1m における大腸菌数

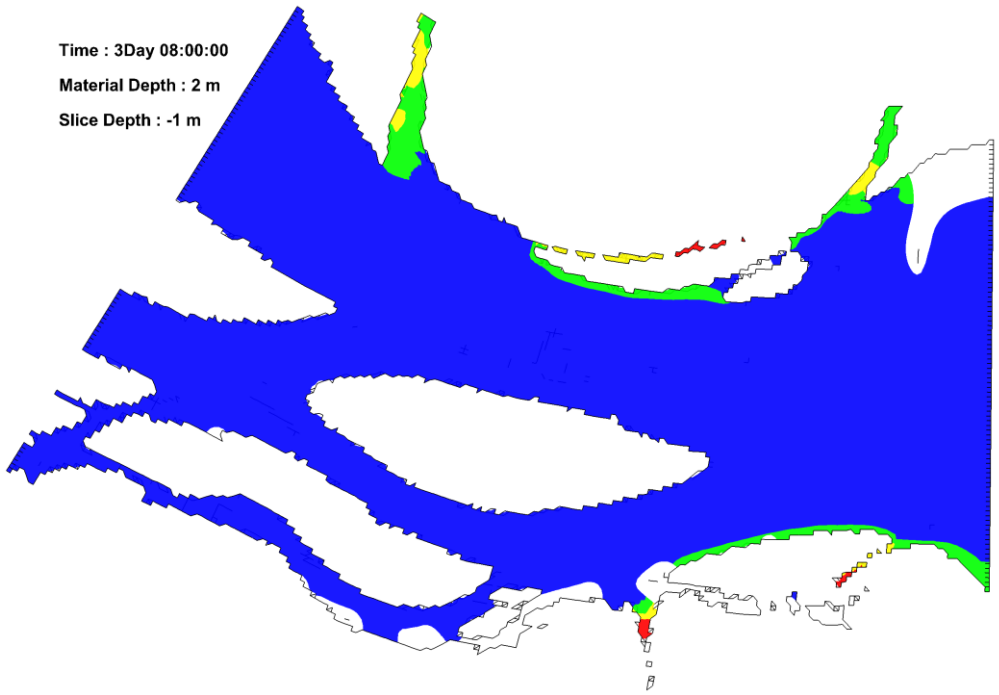


図-4. 47　大腸菌投入深さ 2.0m の時の計算開始から三日後の水深 1m における大腸菌数

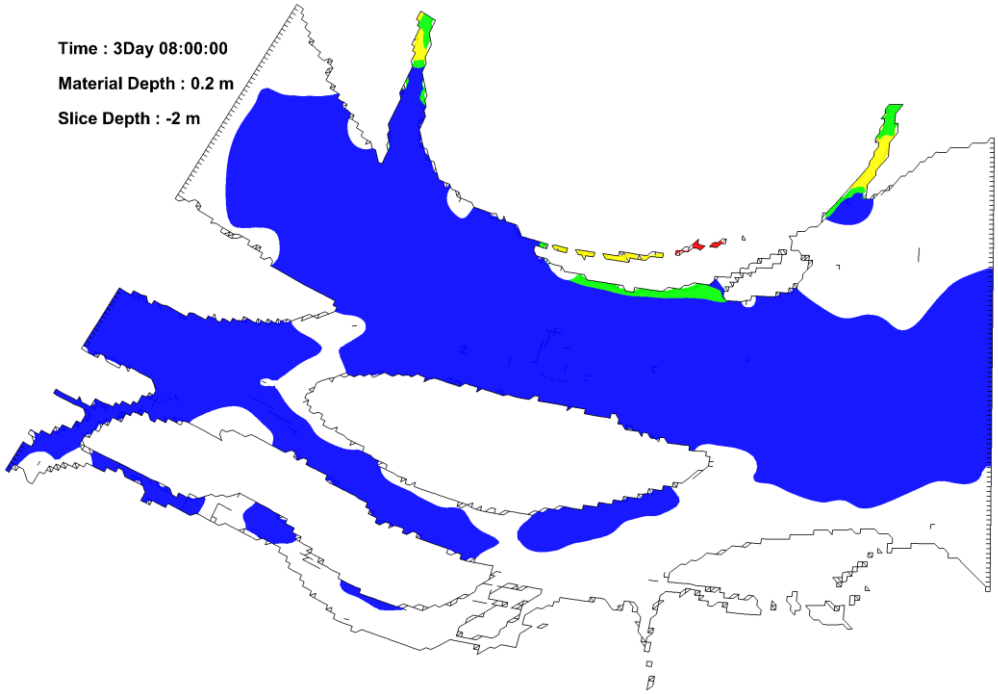


図-4. 48　大腸菌投入深さ 0.2m の時の計算開始から三日後の水深 2m における大腸菌数

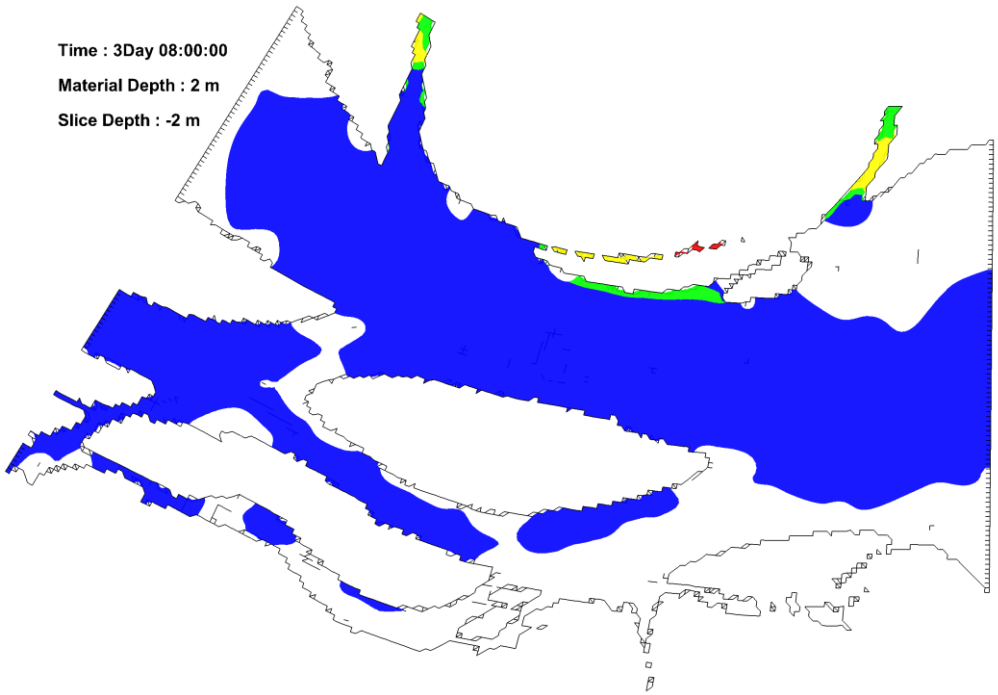


図-4. 49　大腸菌投入深さ 2.0m の時の計算開始から三日後の水深 2m における大腸菌数

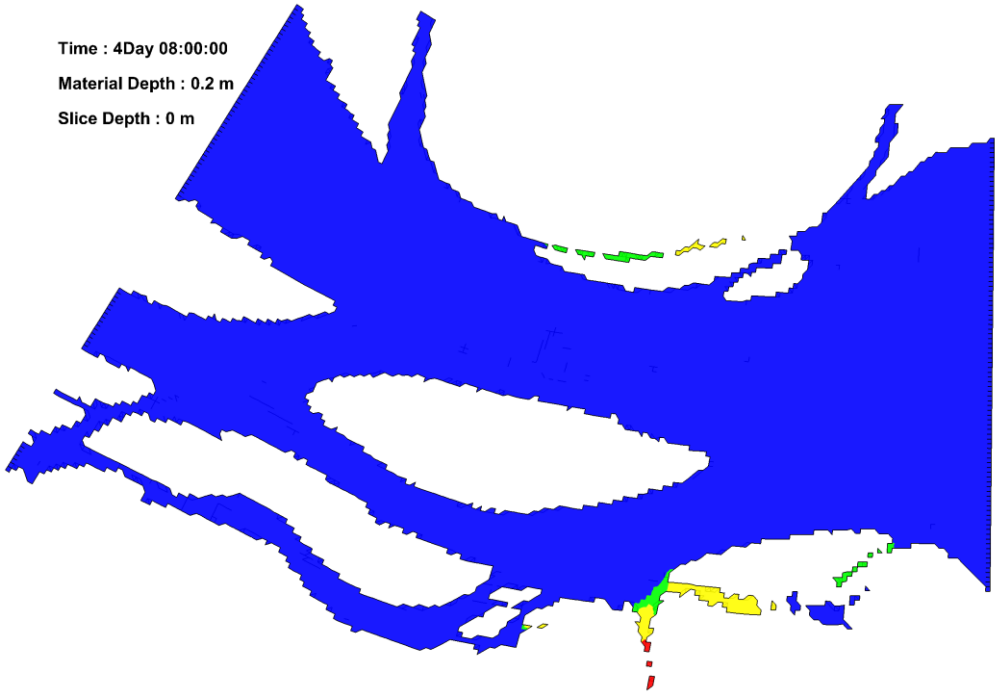


図-4. 50　大腸菌投入深さ 0.2m の時の計算開始から四日後の水深 0m における大腸菌数

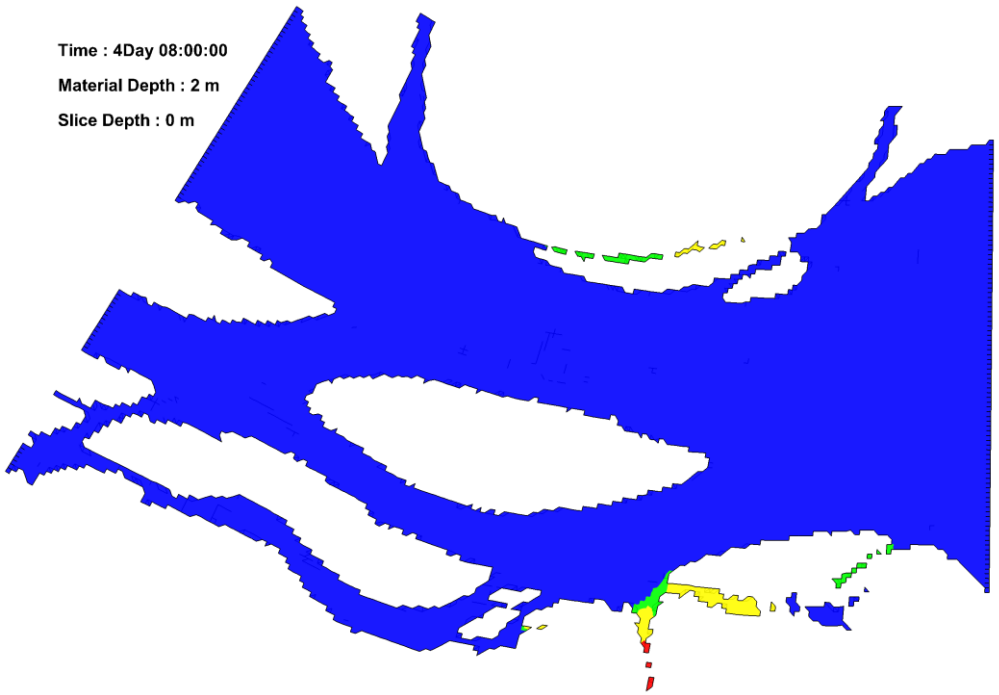


図-4. 51　大腸菌投入深さ 2.0m の時の計算開始から四日後の水深 0m における大腸菌数

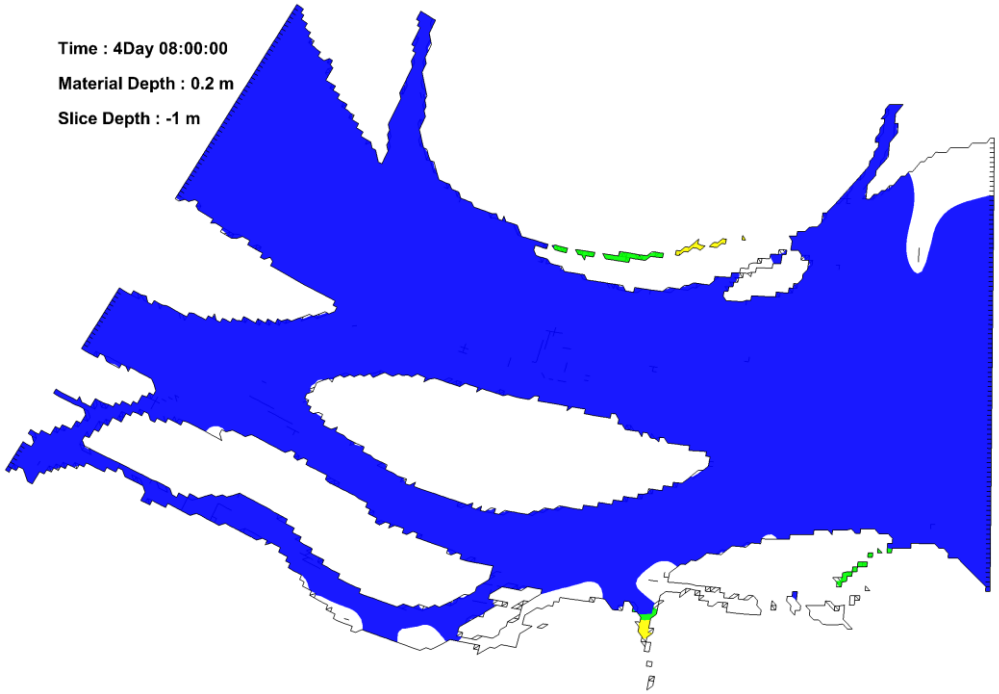


図-4. 52　大腸菌投入深さ 0.2m の時の計算開始から四日後の水深 1m における大腸菌数

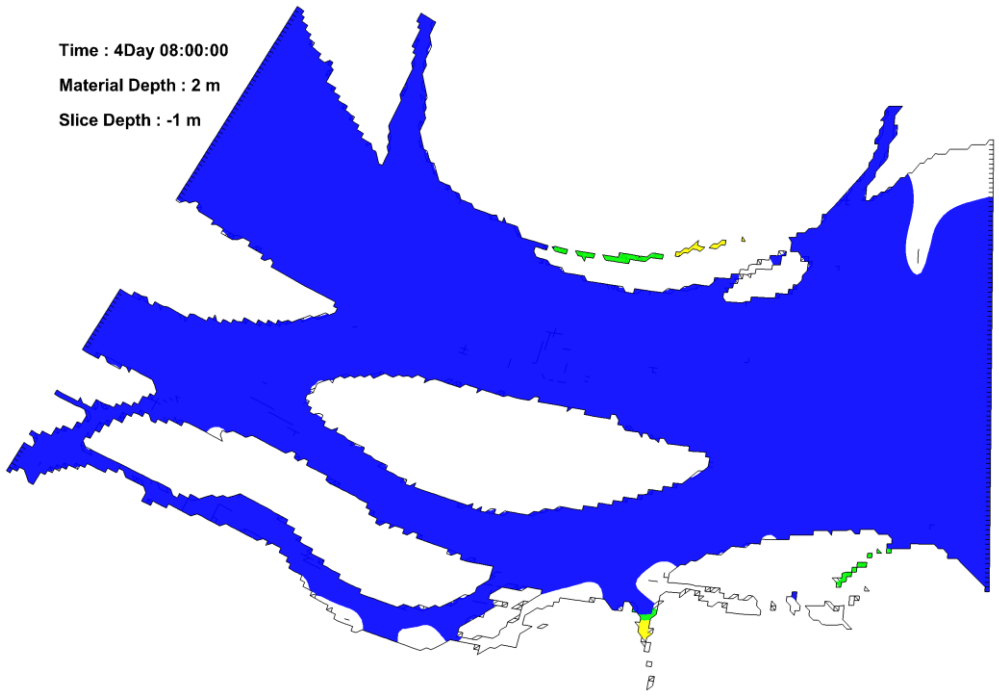


図-4. 53　大腸菌投入深さ 2.0m の時の計算開始から四日後の水深 1m における大腸菌数

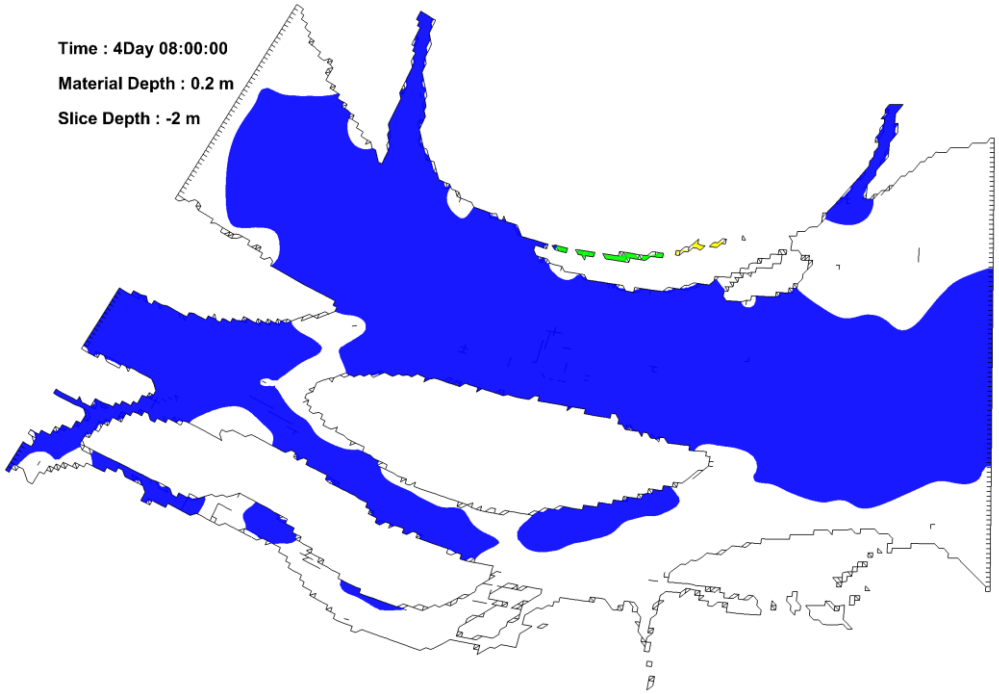


図-4. 54　大腸菌投入深さ 0.2m の時の計算開始から四日後の水深 2m における大腸菌数

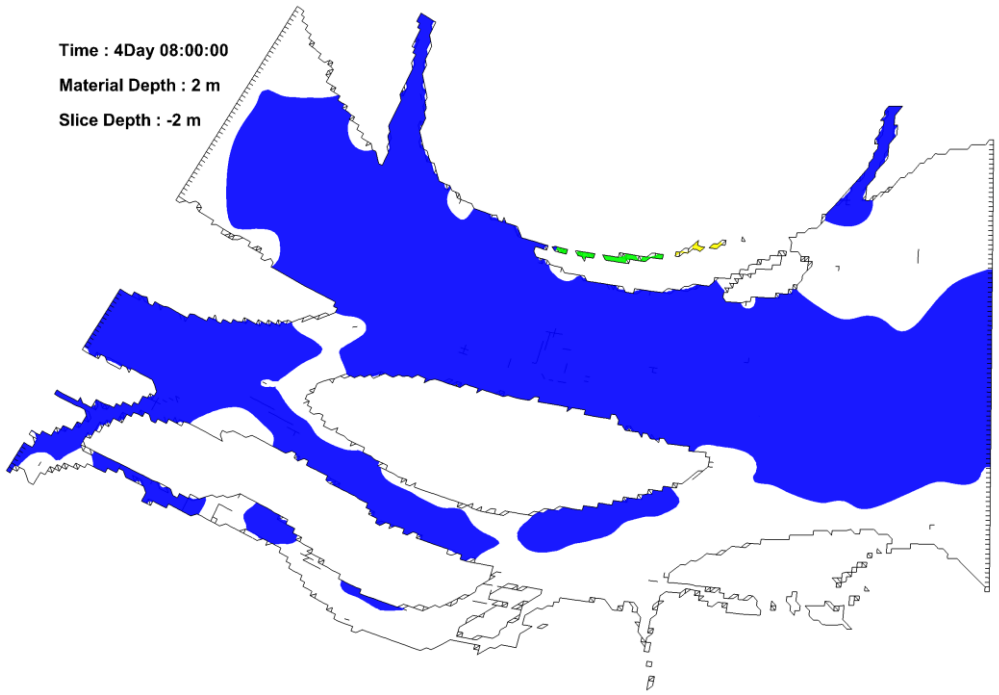


図-4. 55　大腸菌投入深さ 2.0m の時の計算開始から四日後の水深 2m における大腸菌数

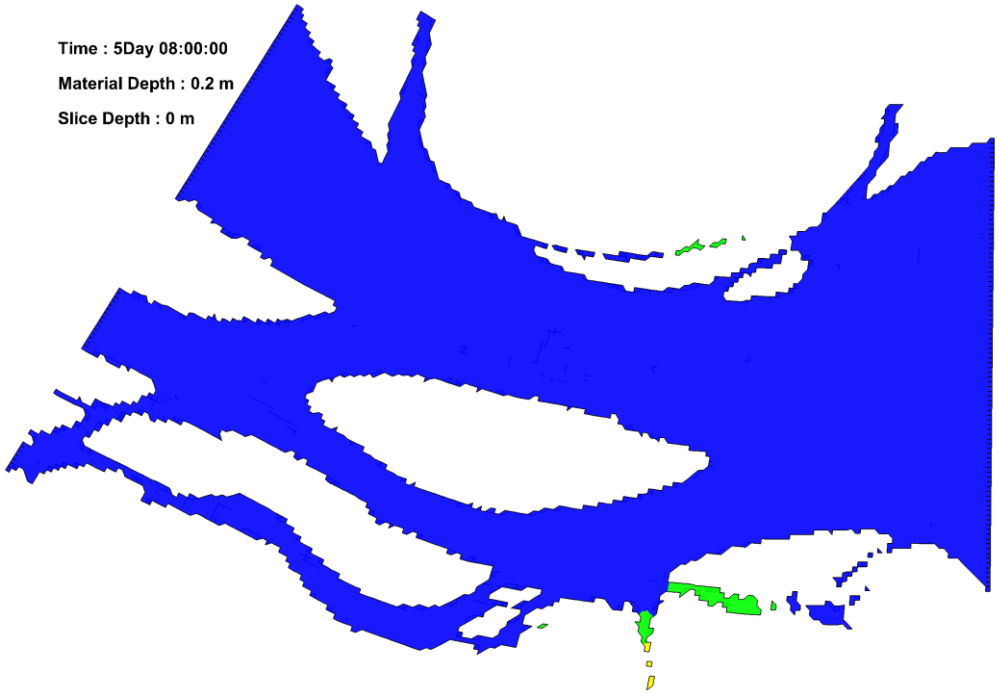


図-4. 56　大腸菌投入深さ 0.2m の時の計算開始から五日後の水深 0m における大腸菌数

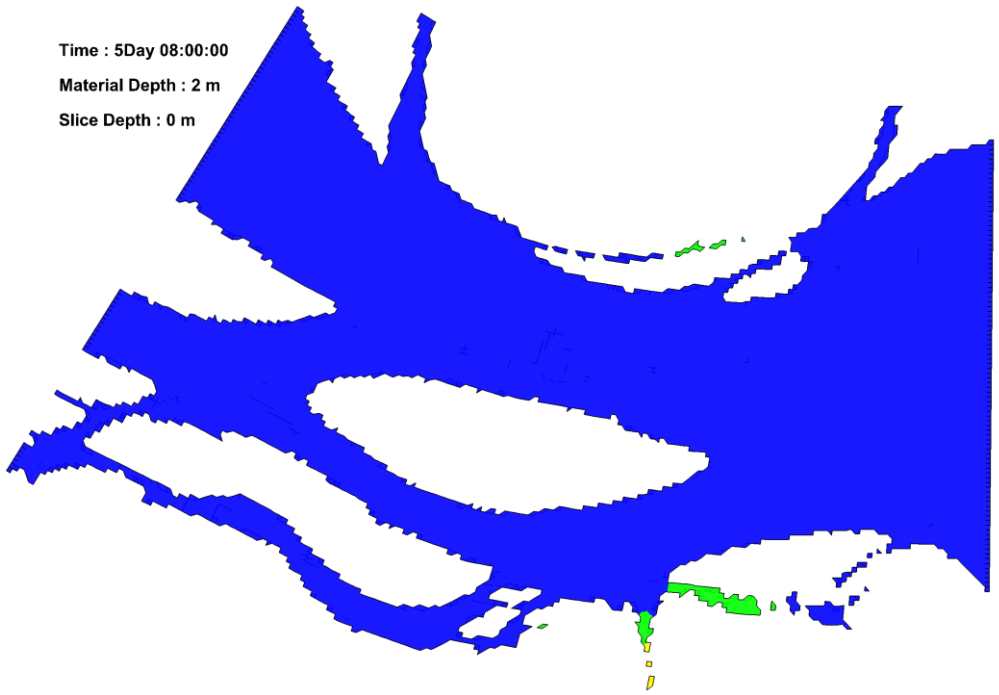


図-4. 57　大腸菌投入深さ 2.0m の時の計算開始から五日後の水深 0m における大腸菌数

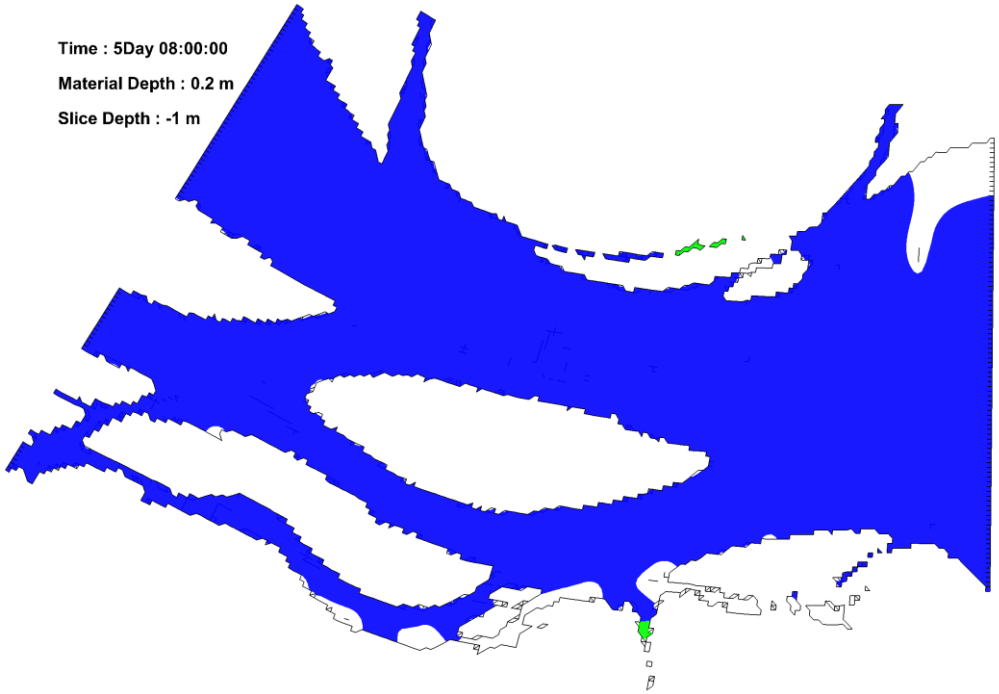


図-4. 58　大腸菌投入深さ 0.2m の時の計算開始から五日後の水深 1m における大腸菌数

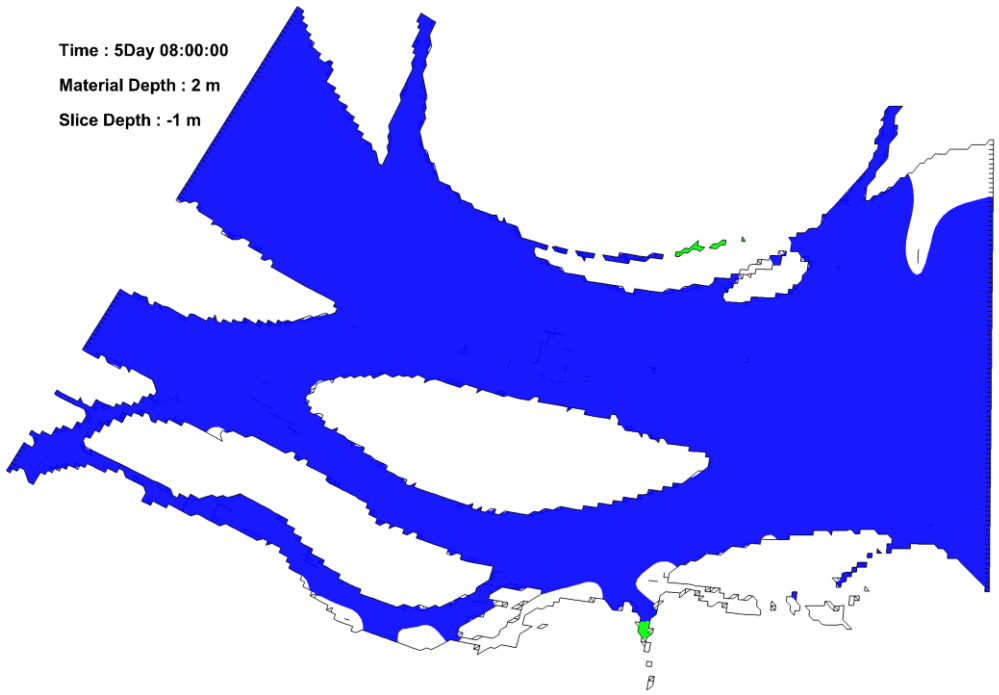


図-4. 59　大腸菌投入深さ 2.0m の時の計算開始から五日後の水深 1m における大腸菌数

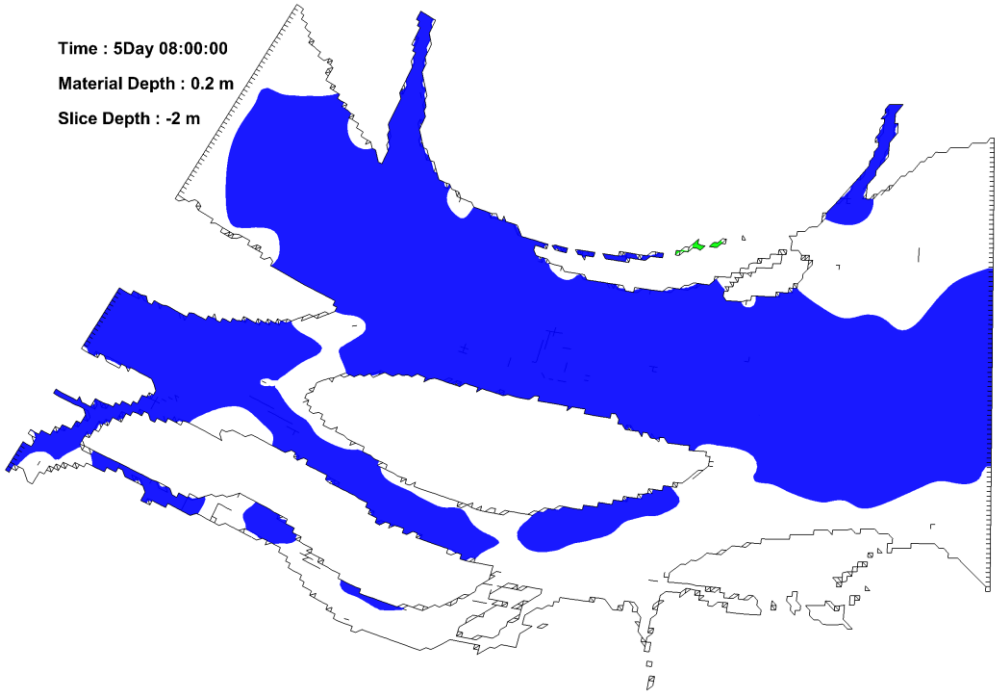


図-4. 60　大腸菌投入深さ 0.2m の時の計算開始から五日後の水深 2m における大腸菌数

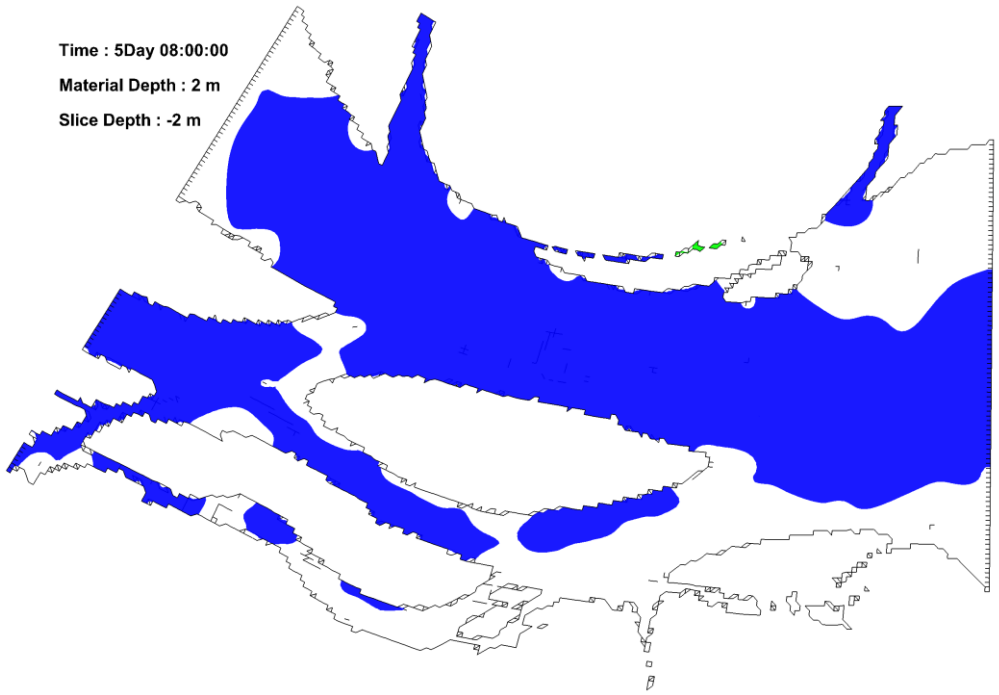


図-4. 61　大腸菌投入深さ 2.0m の時の計算開始から五日後の水深 2m における大腸菌数

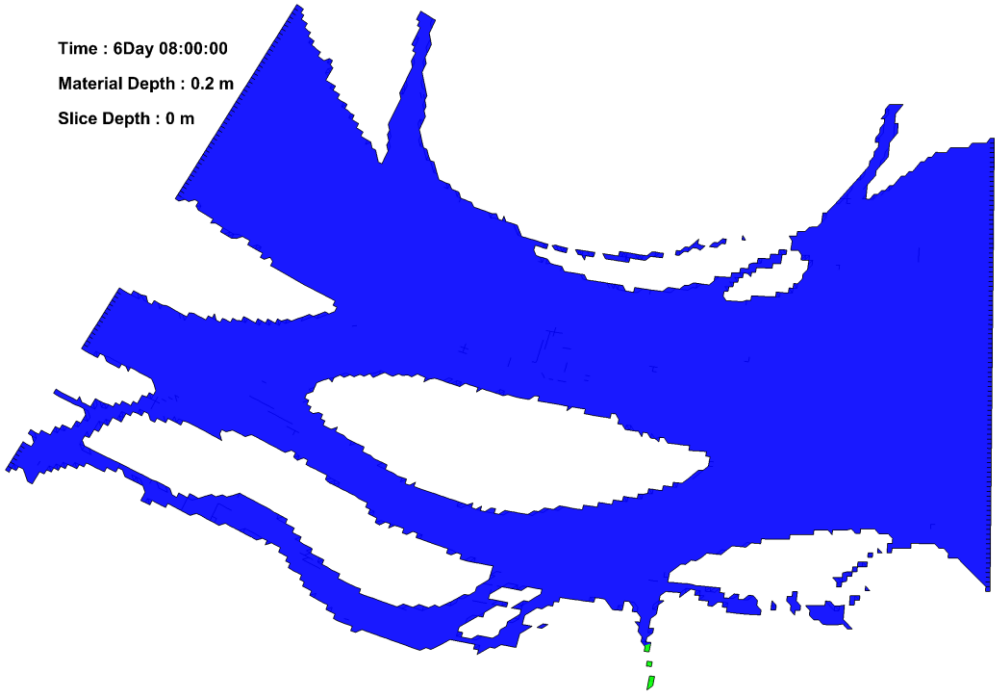


図-4. 62　大腸菌投入深さ 0.2m の時の計算開始から六日後の水深 0m における大腸菌数

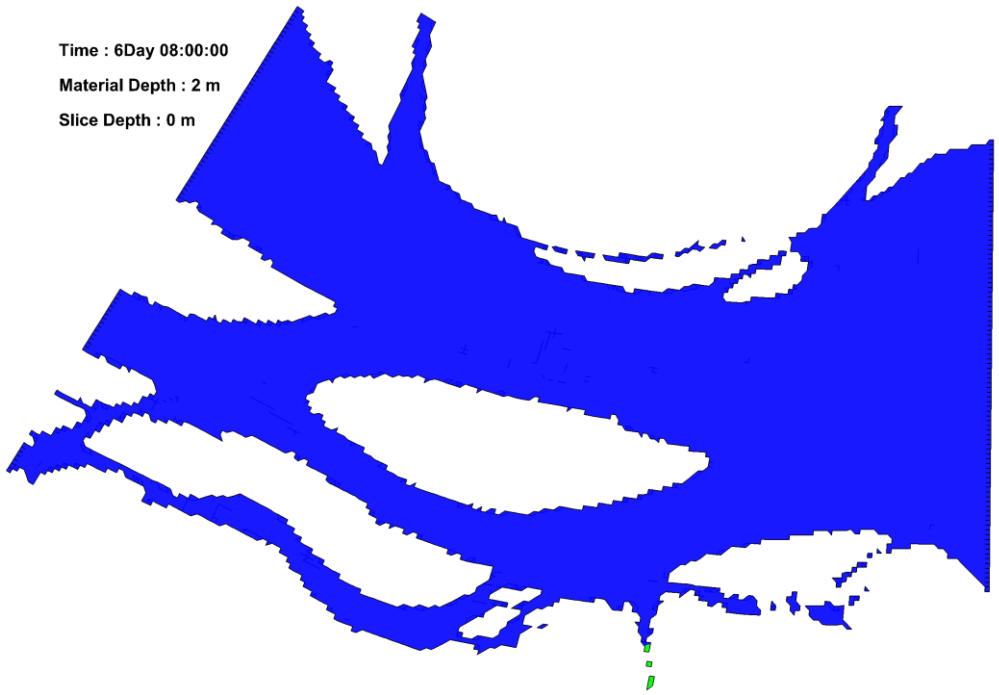


図-4. 63　大腸菌投入深さ 2.0m の時の計算開始から六日後の水深 0m における大腸菌数

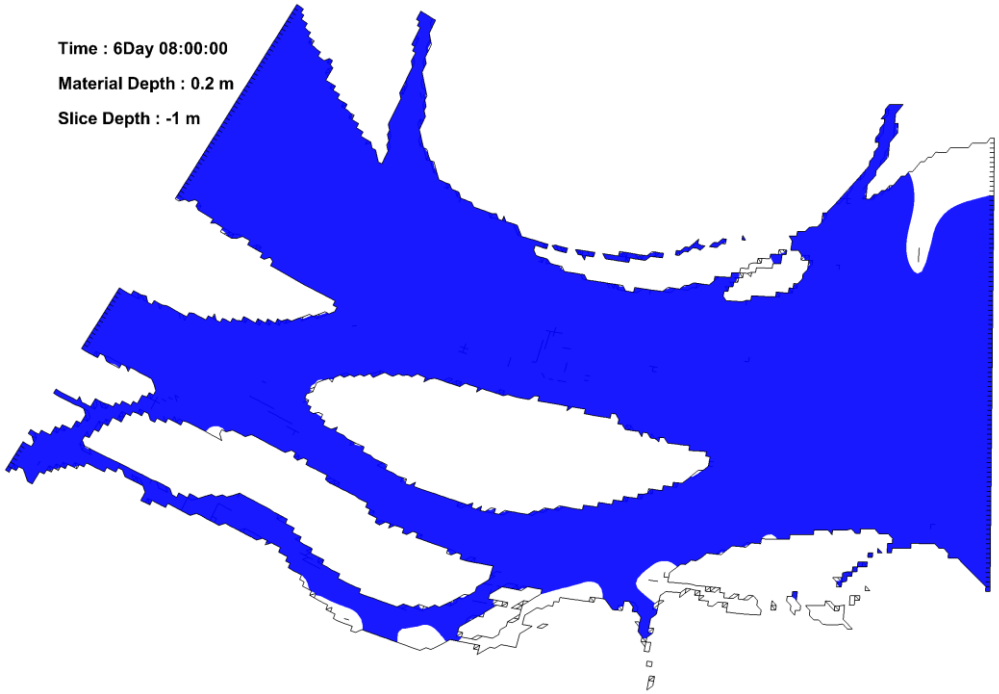


図-4. 64　大腸菌投入深さ 0.2m の時の計算開始から六日後の水深 1m における大腸菌数

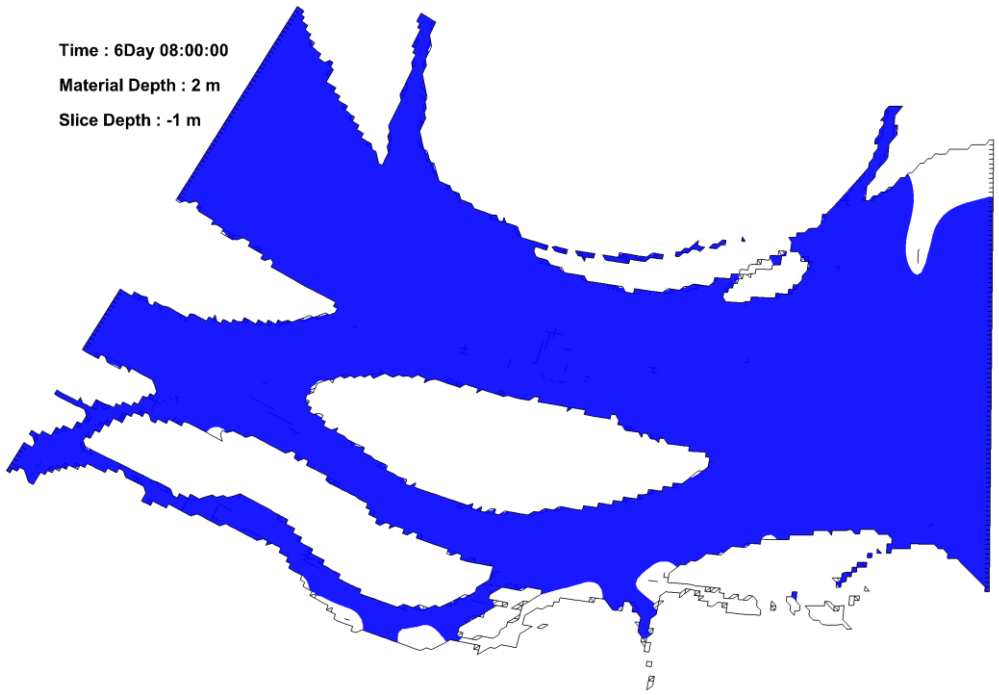


図-4. 65　大腸菌投入深さ 2.0m の時の計算開始から六日後の水深 1m における大腸菌数

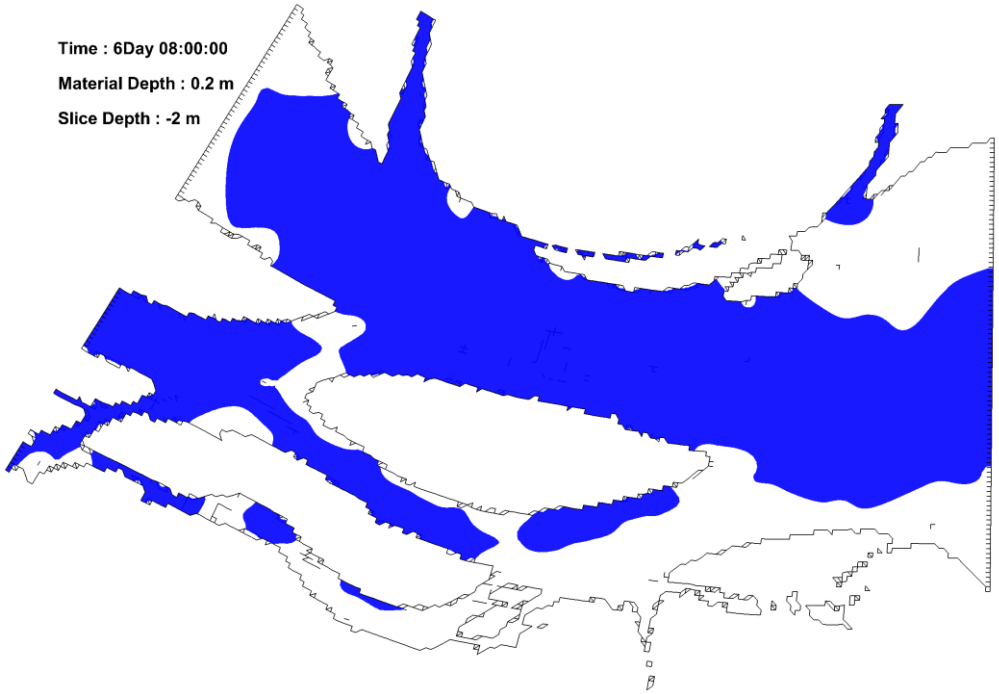


図-4. 66　大腸菌投入深さ 0.2m の時の計算開始から六日後の水深 2m における大腸菌数

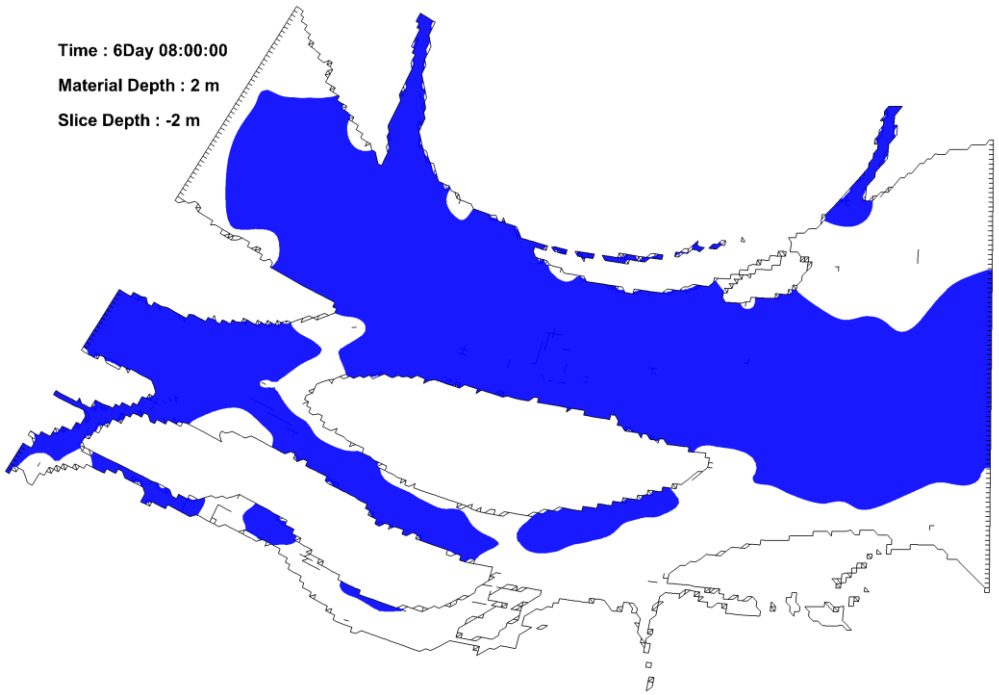


図-4. 67　大腸菌投入深さ 2.0m の時の計算開始から六日後の水深 2m における大腸菌数

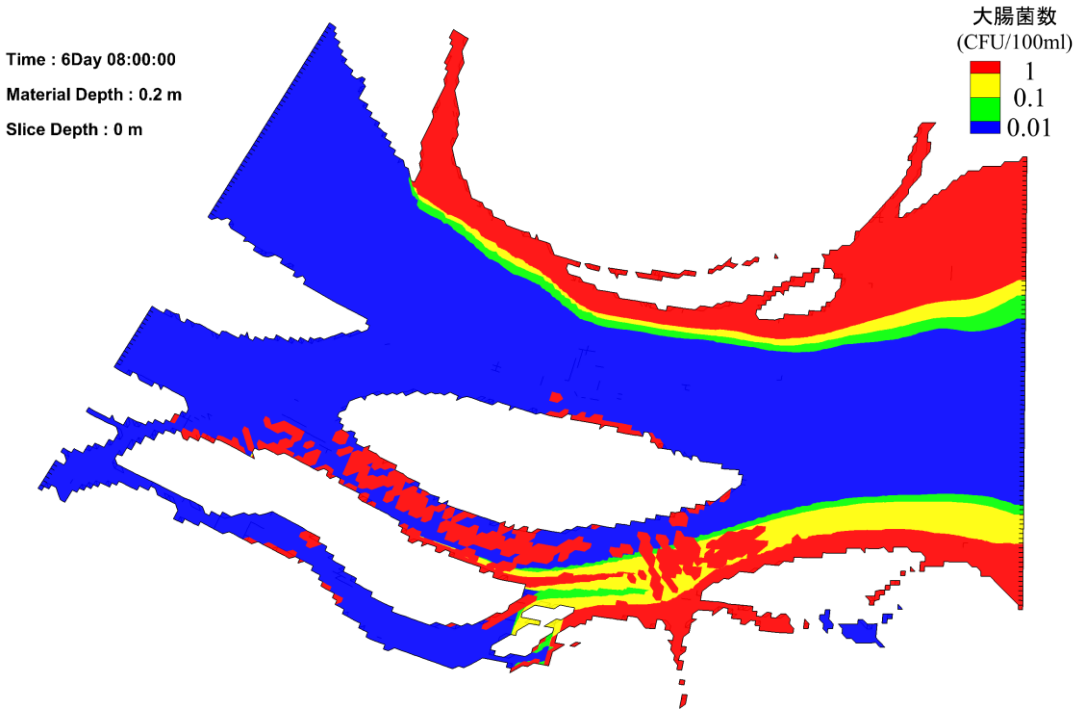


図-4. 68　深さ 0.2m で大腸菌投入時の水深 0m における大腸菌数

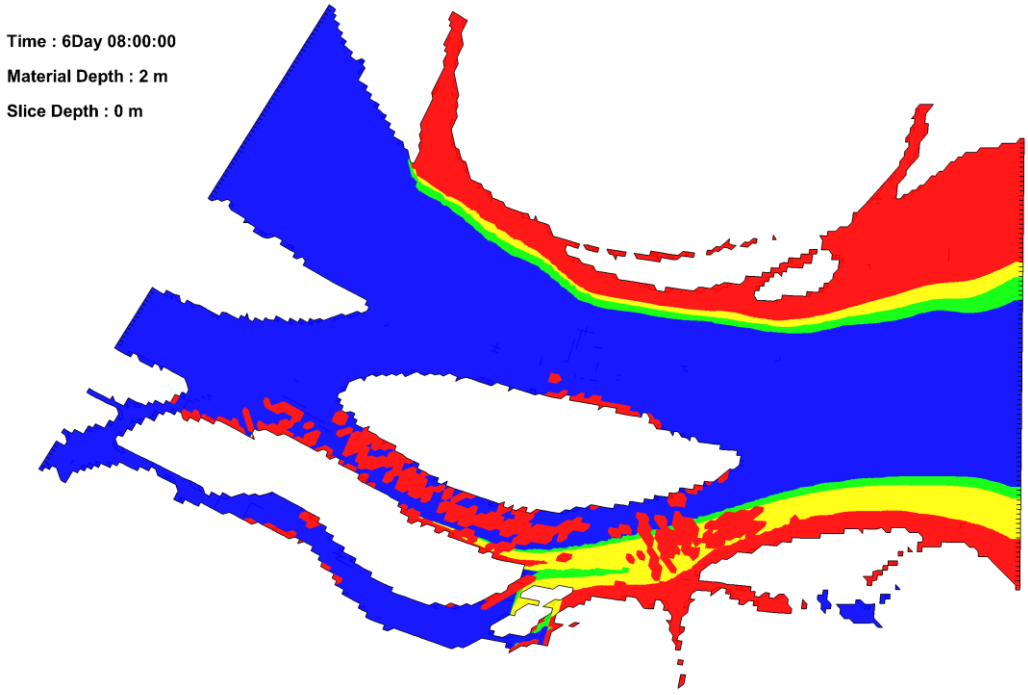


図-4. 69　深さ 2.0m で大腸菌投入時の水深 0m における大腸菌数

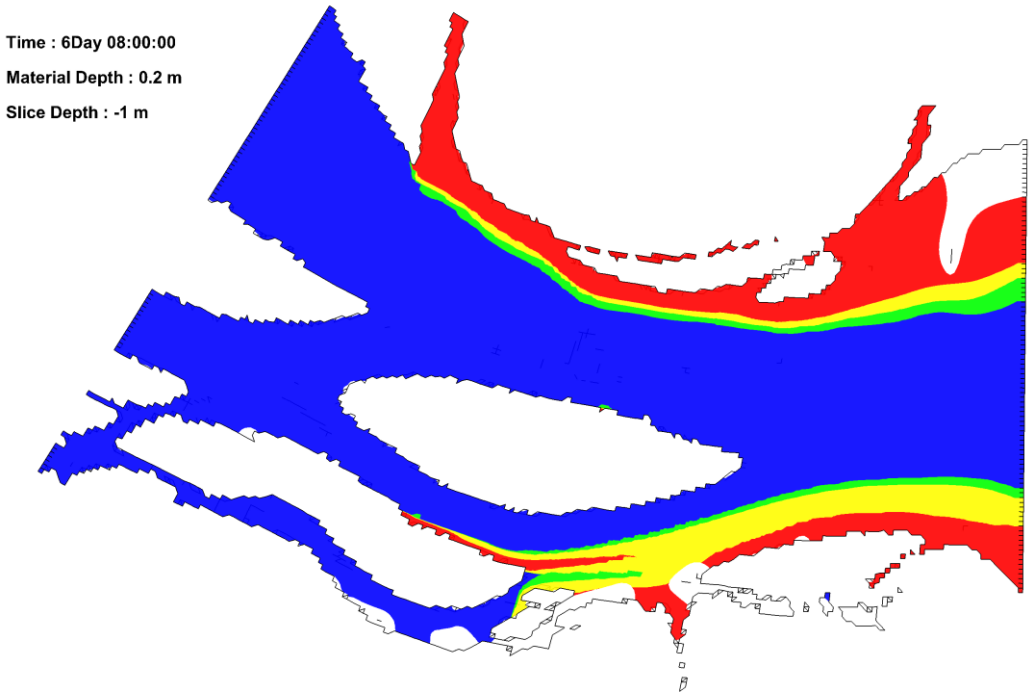


図-4. 70　深さ 0.2m で大腸菌投入時の水深 1m における大腸菌数

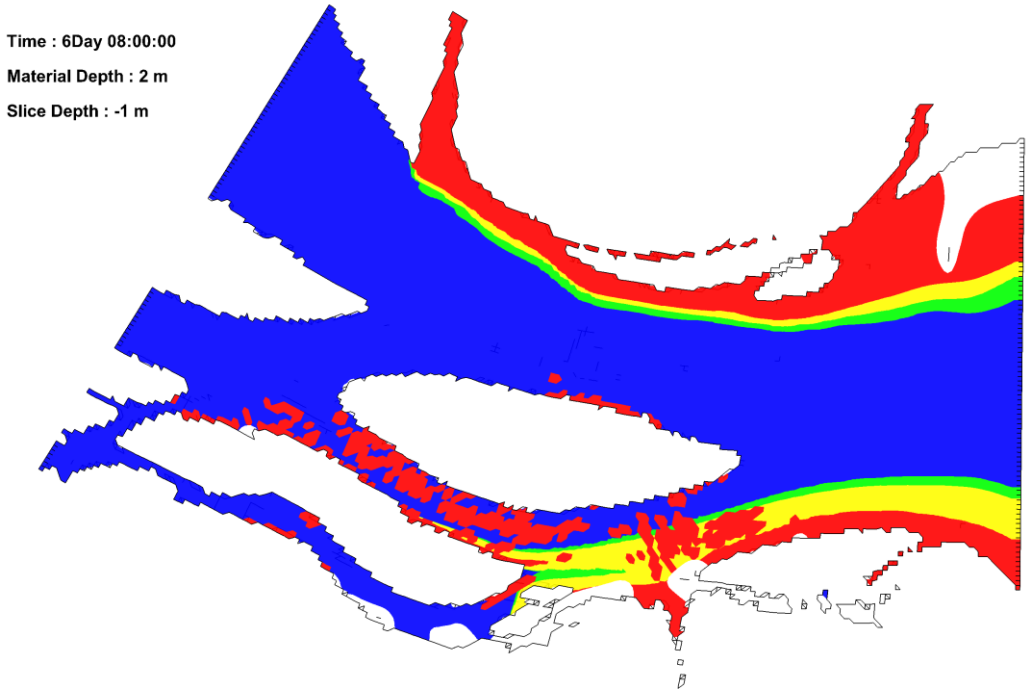


図-4. 71　深さ 2.0m で大腸菌投入時の水深 1m における大腸菌数

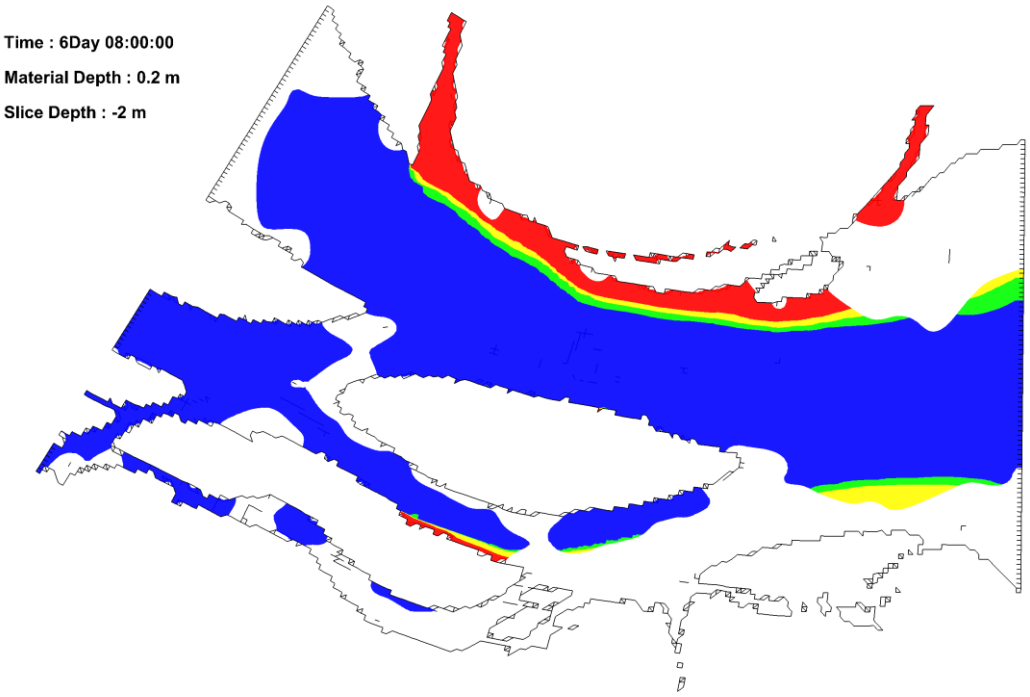


図-4. 72　深さ 0.2m で大腸菌投入時の水深 2m における大腸菌数

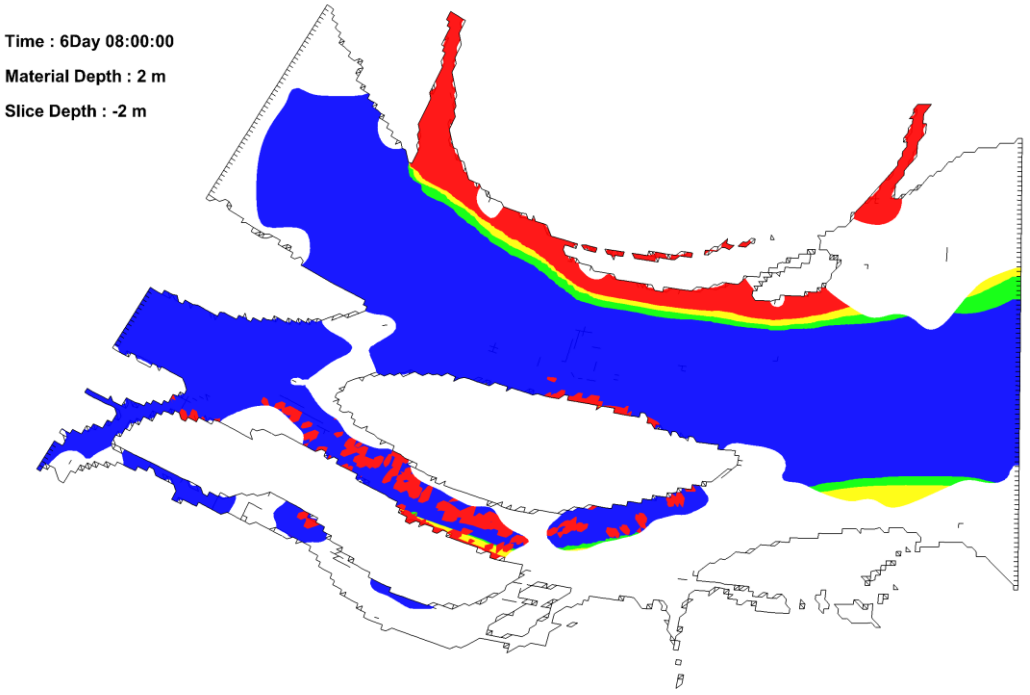


図-4. 73　深さ 2.0m で大腸菌投入時の水深 2m における大腸菌数

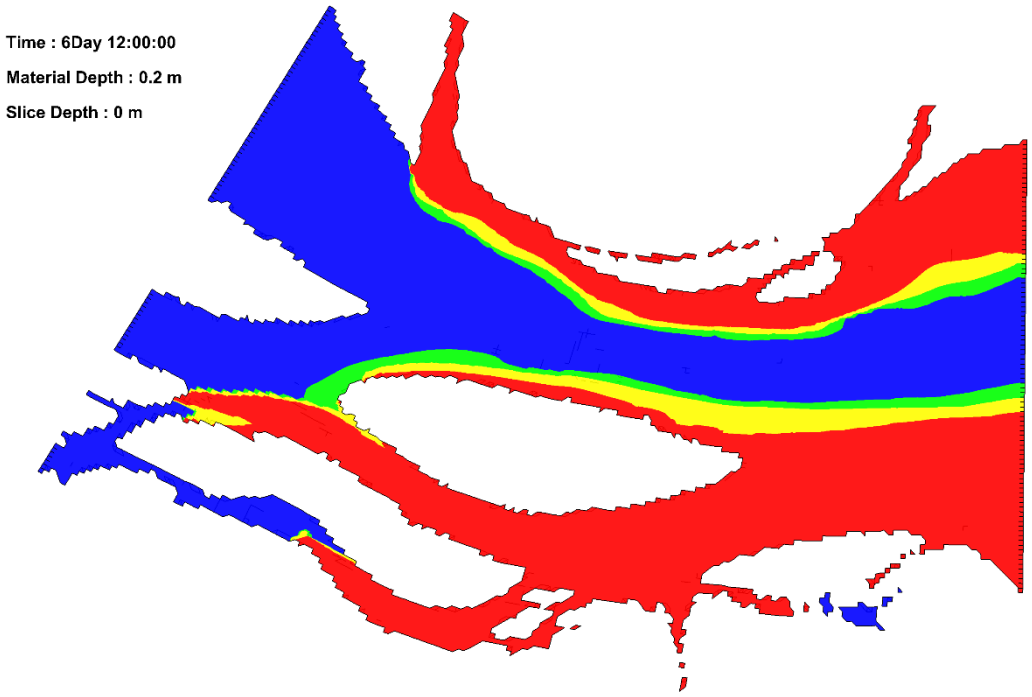


図-4. 74　深さ 0.2m で大腸菌投入から 4 時間後の水深 0m における大腸菌数

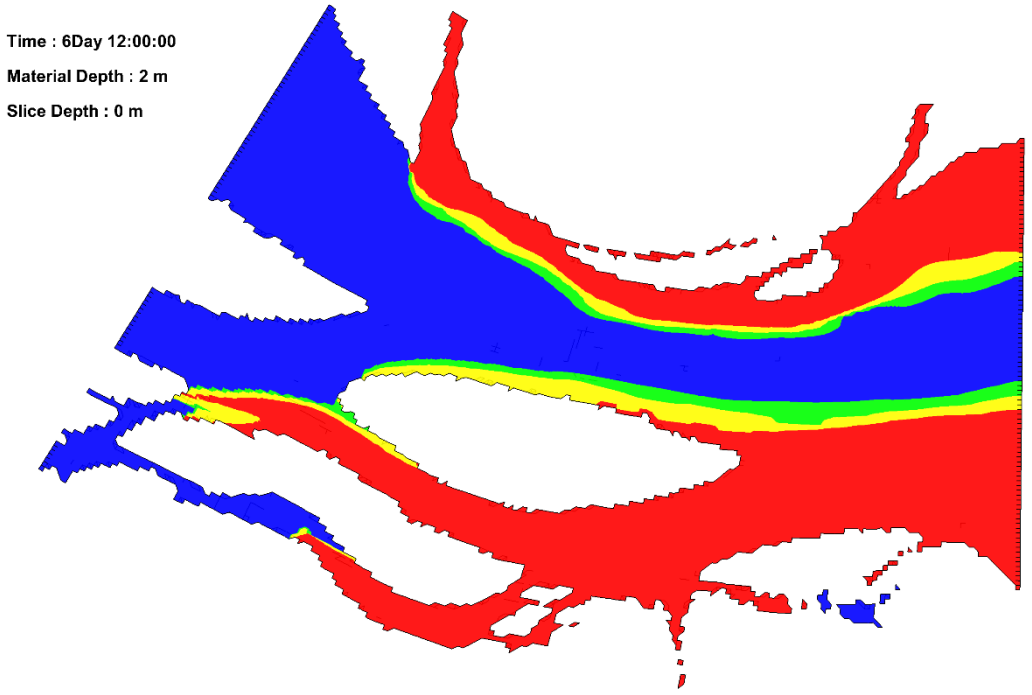


図-4. 75　深さ 2.0m で大腸菌投入から 4 時間後の水深 0m における大腸菌数

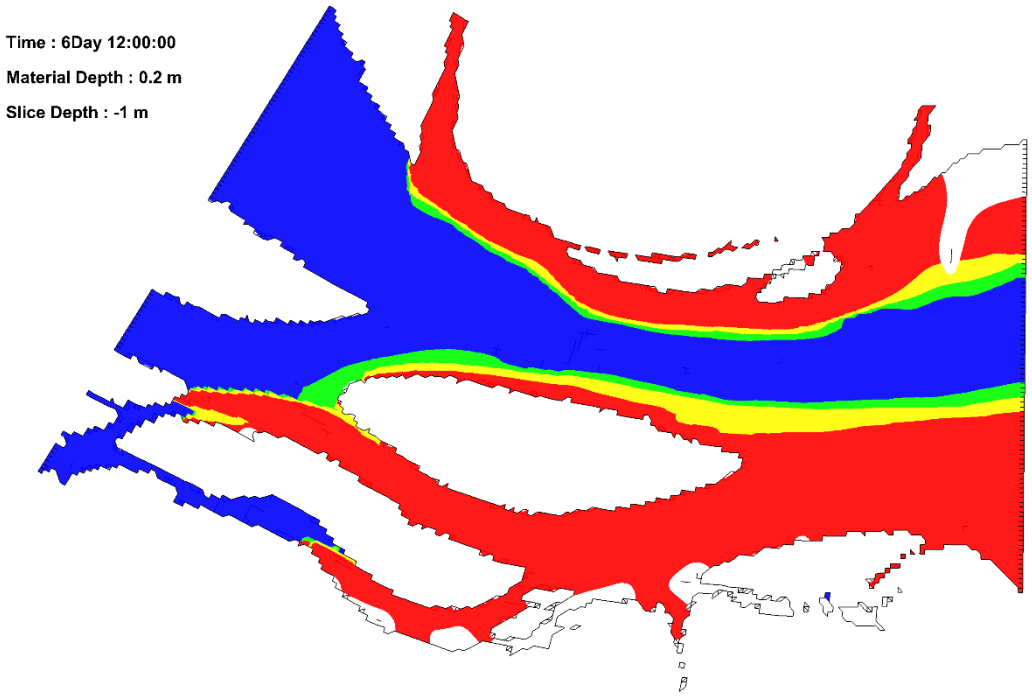


図-4. 76　深さ 0.2m で大腸菌投入から 4 時間後の水深 0m における大腸菌数

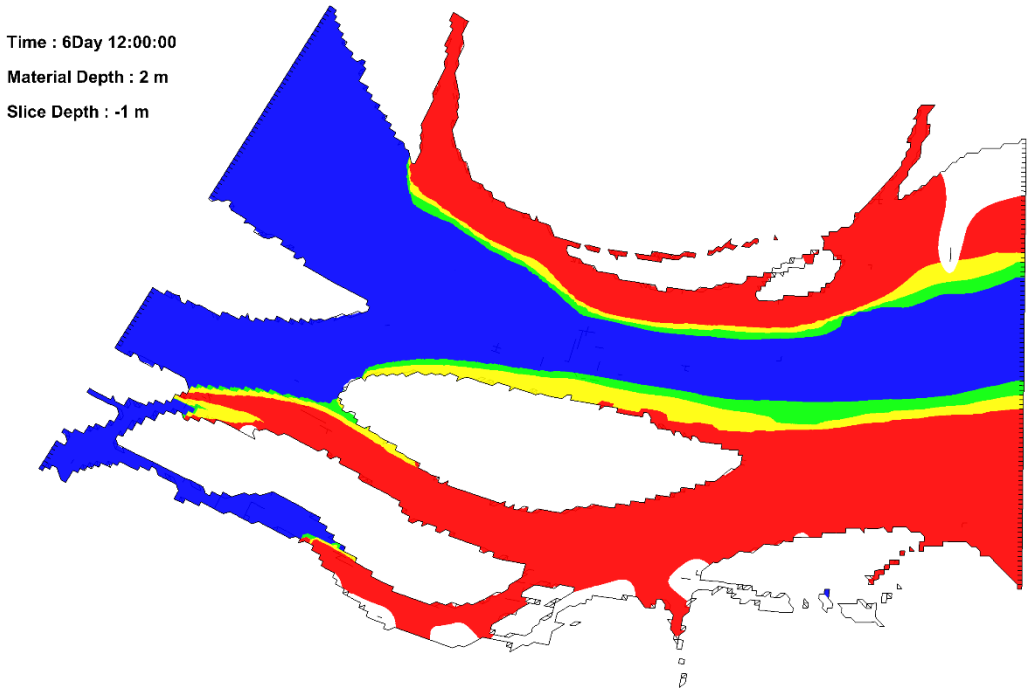


図-4. 77　深さ 2.0m で大腸菌投入から 4 時間後の水深 0m における大腸菌数

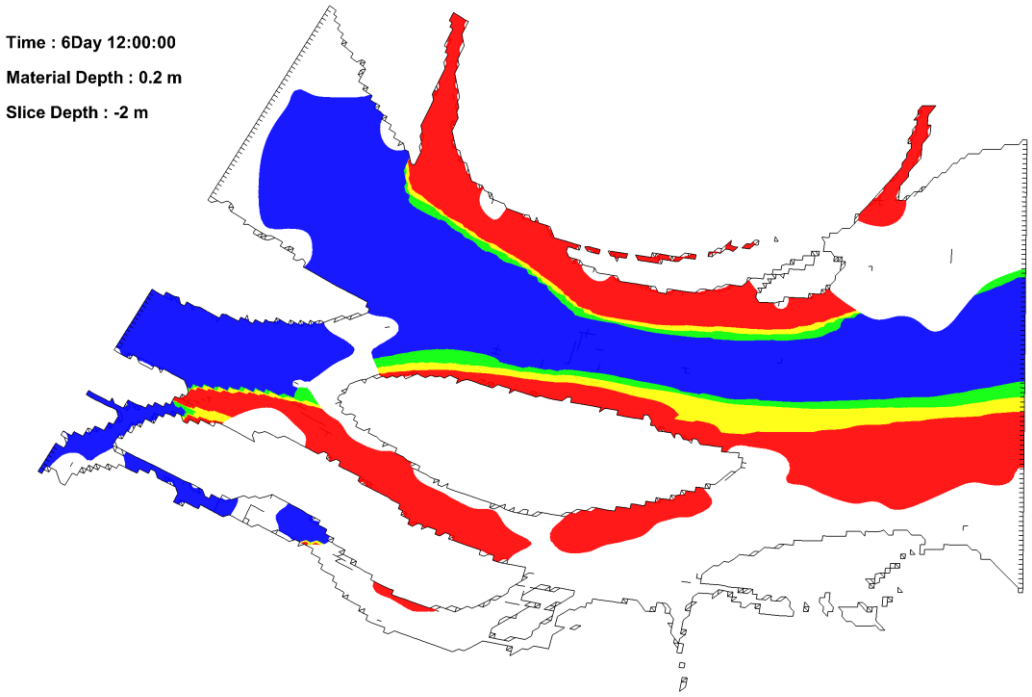


図-4. 78　深さ 0.2m で大腸菌投入から 4 時間後の水深 0m における大腸菌数

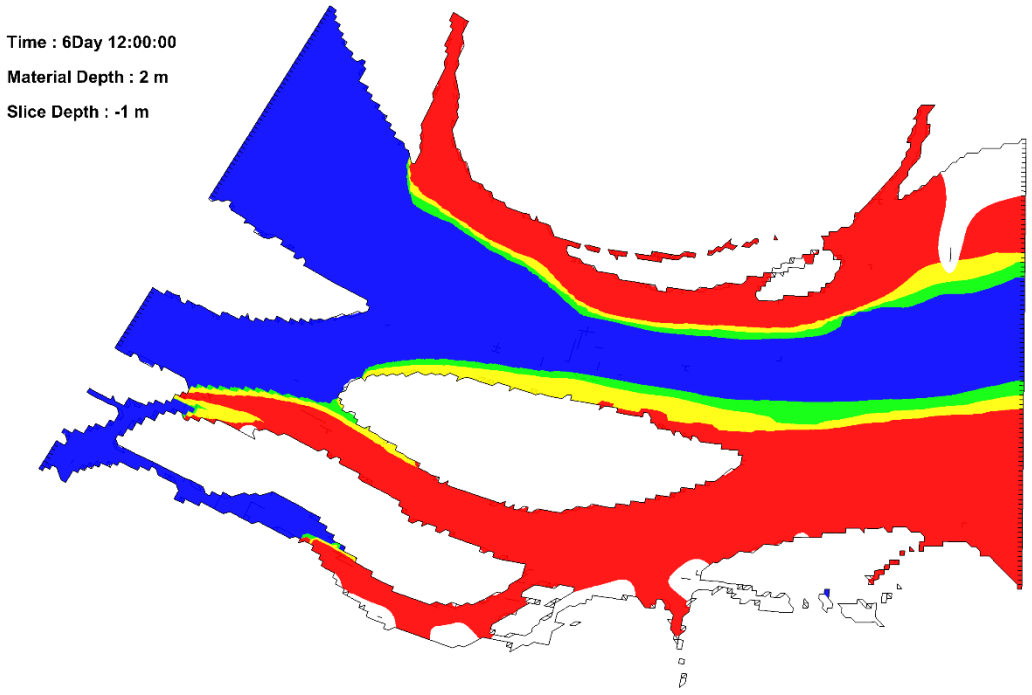


図-4. 79　深さ 2.0m で大腸菌投入から 4 時間後の水深 0m における大腸菌数

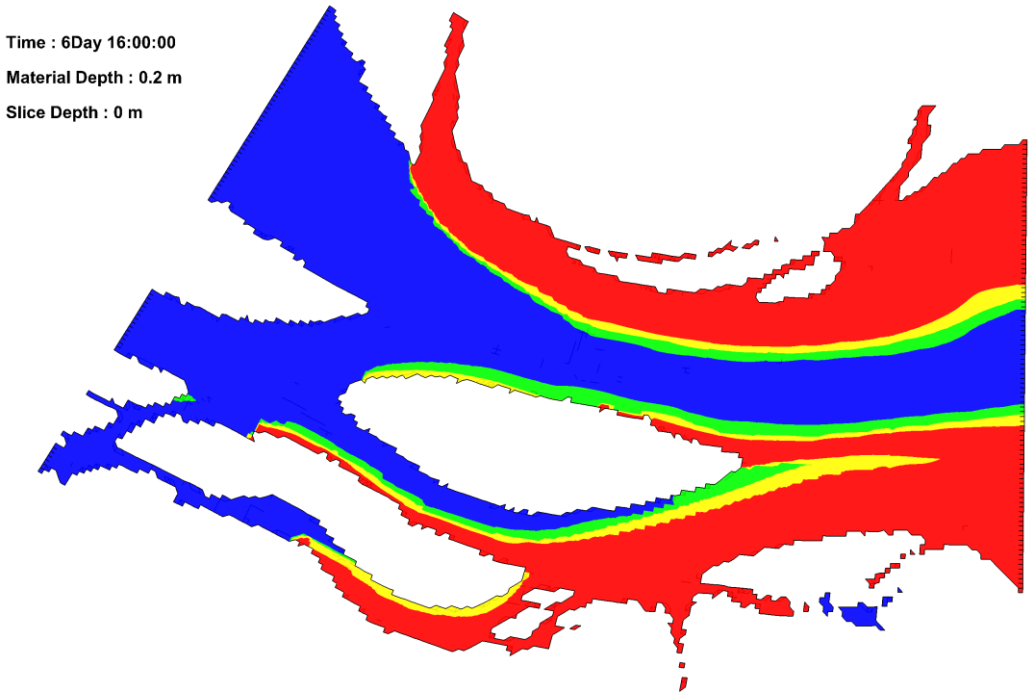


図-4. 80　深さ 0.2m で大腸菌投入から 8 時間後の水深 0m における大腸菌数

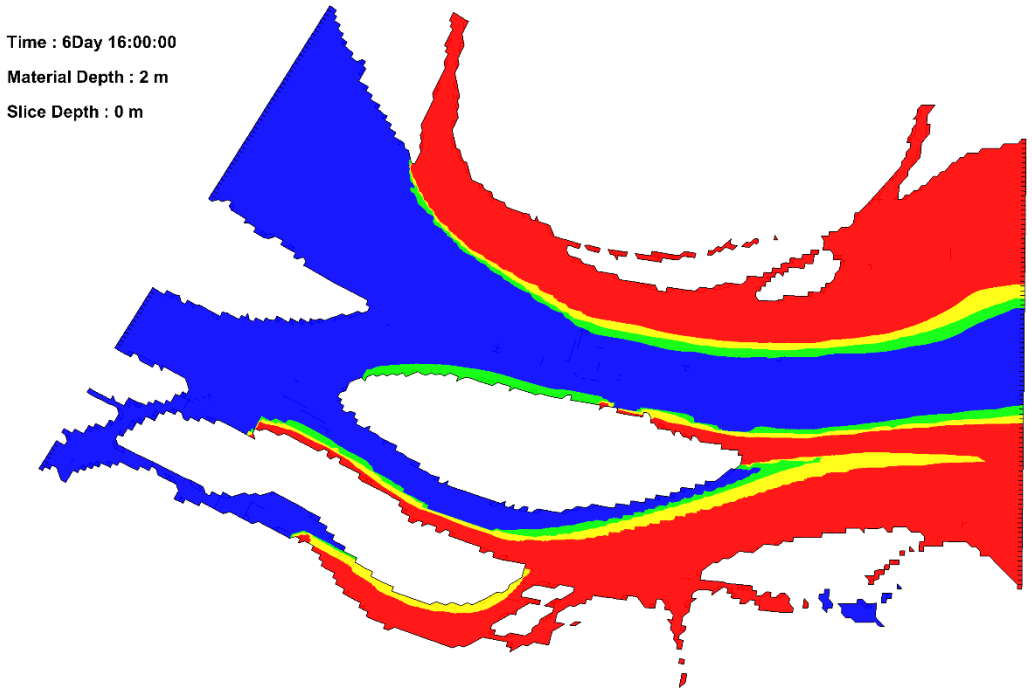


図-4. 81　深さ 2.0m で大腸菌投入から 8 時間後の水深 0m における大腸菌数

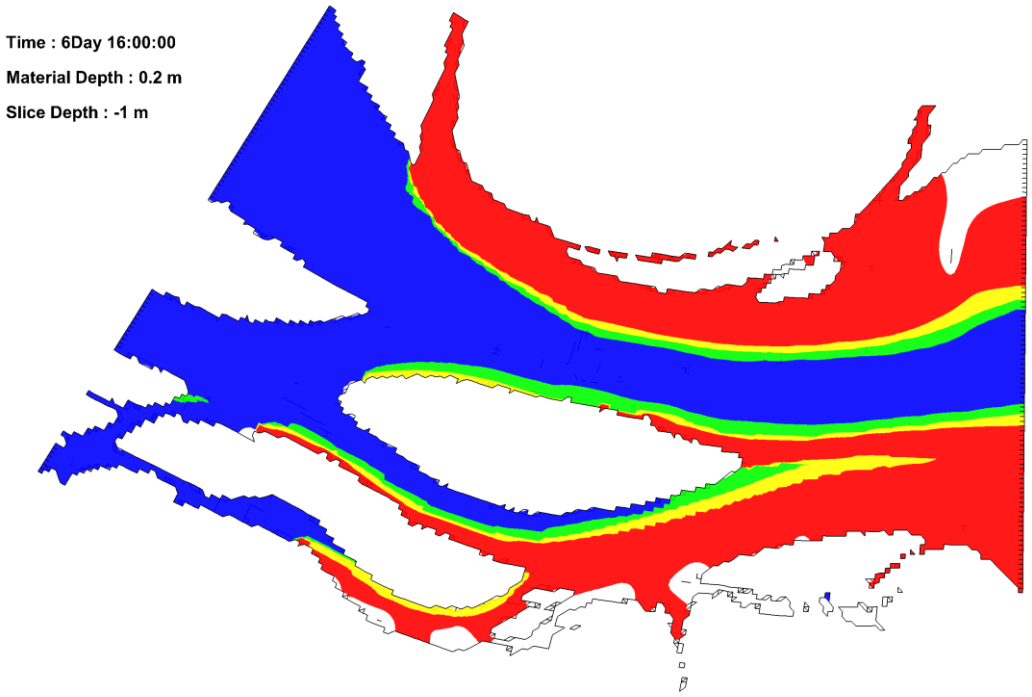


図-4. 82　深さ 0.2m で大腸菌投入から 8 時間後の水深 1m における大腸菌数

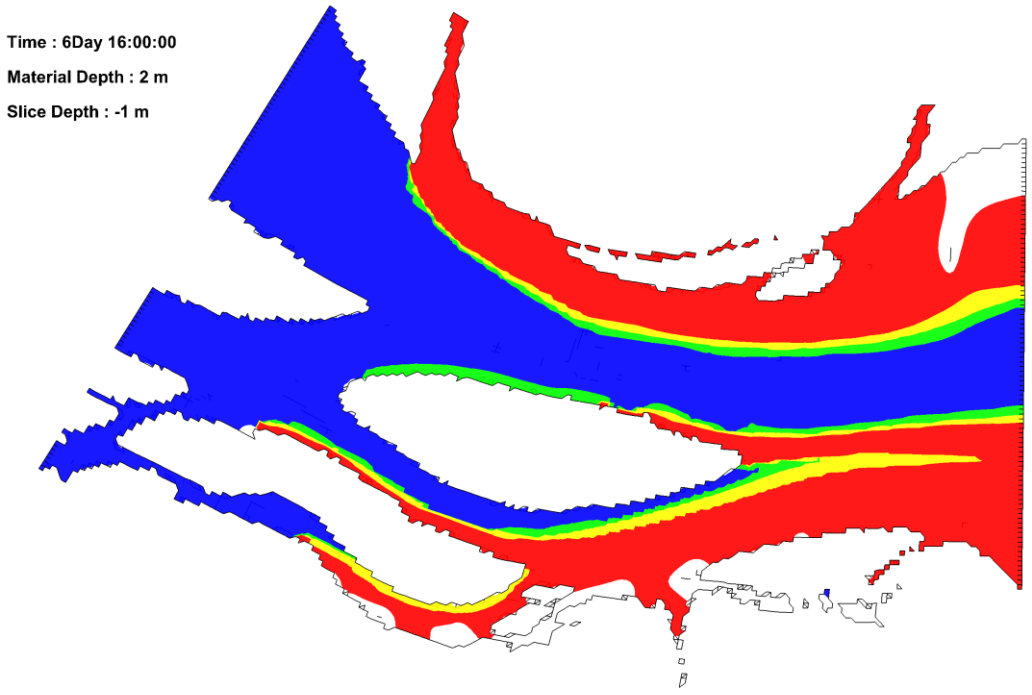


図-4. 83　深さ 2.0m で大腸菌投入から 8 時間後の水深 1m における大腸菌数

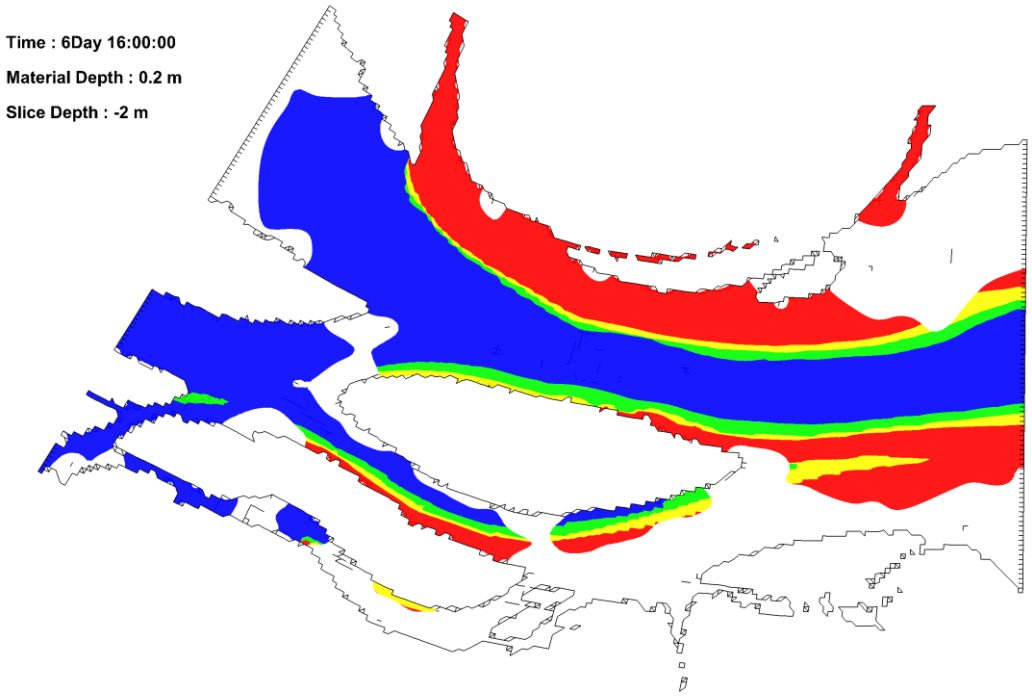


図-4. 84　深さ 0.2m で大腸菌投入から 8 時間後の水深 2m における大腸菌数

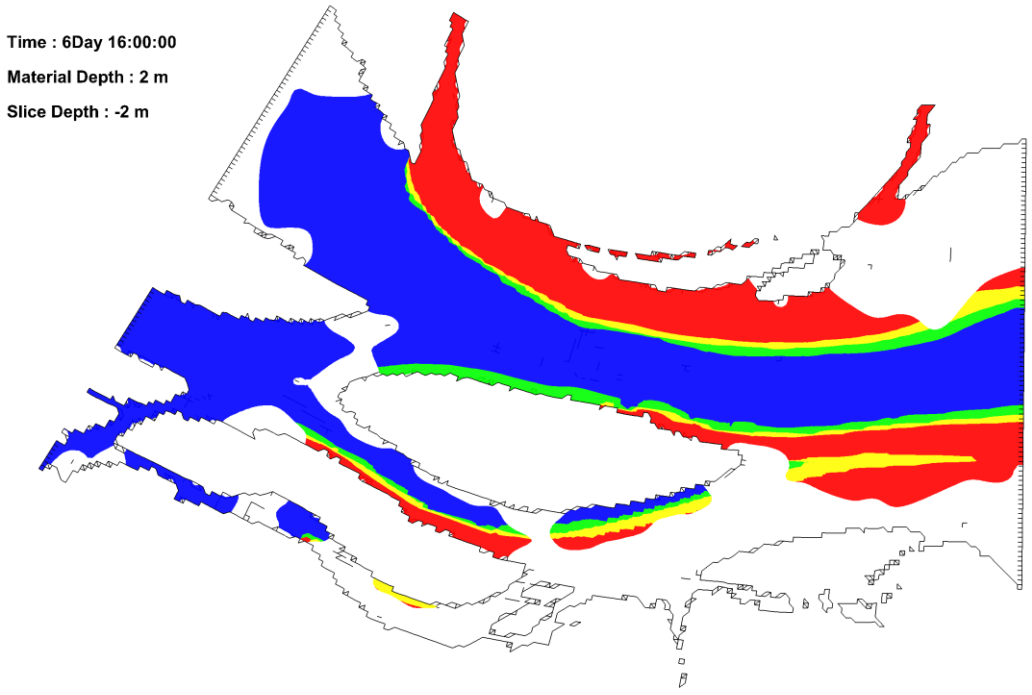


図-4. 85　深さ 2.0m で大腸菌投入から 8 時間後の水深 2m における大腸菌数

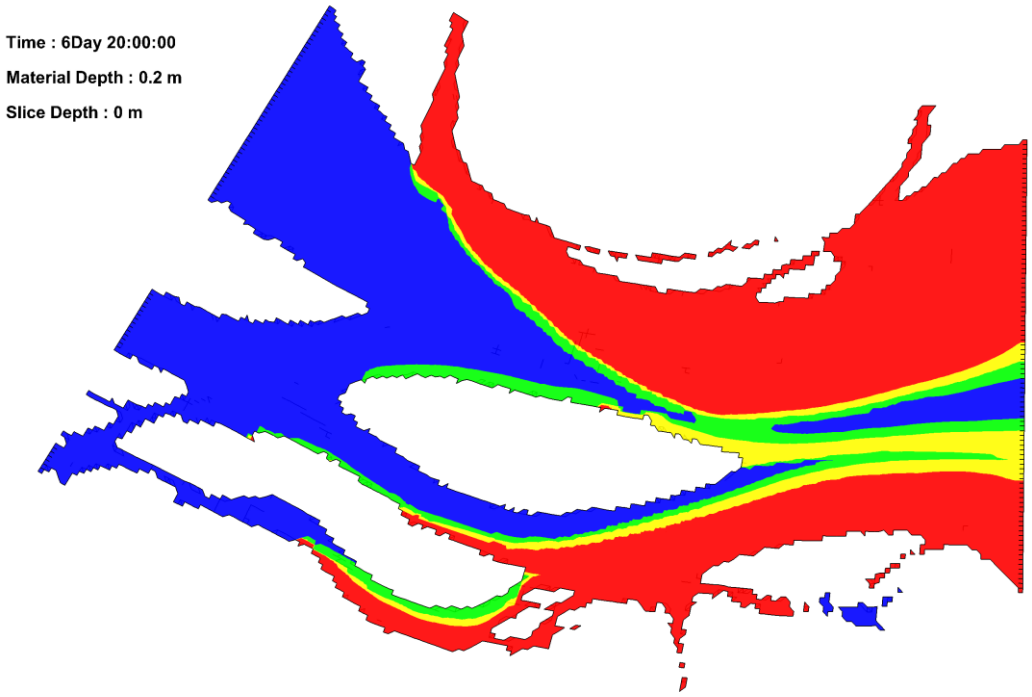


図-4. 86　深さ 0.2m で大腸菌投入から 12 時間後の水深 0m における大腸菌数

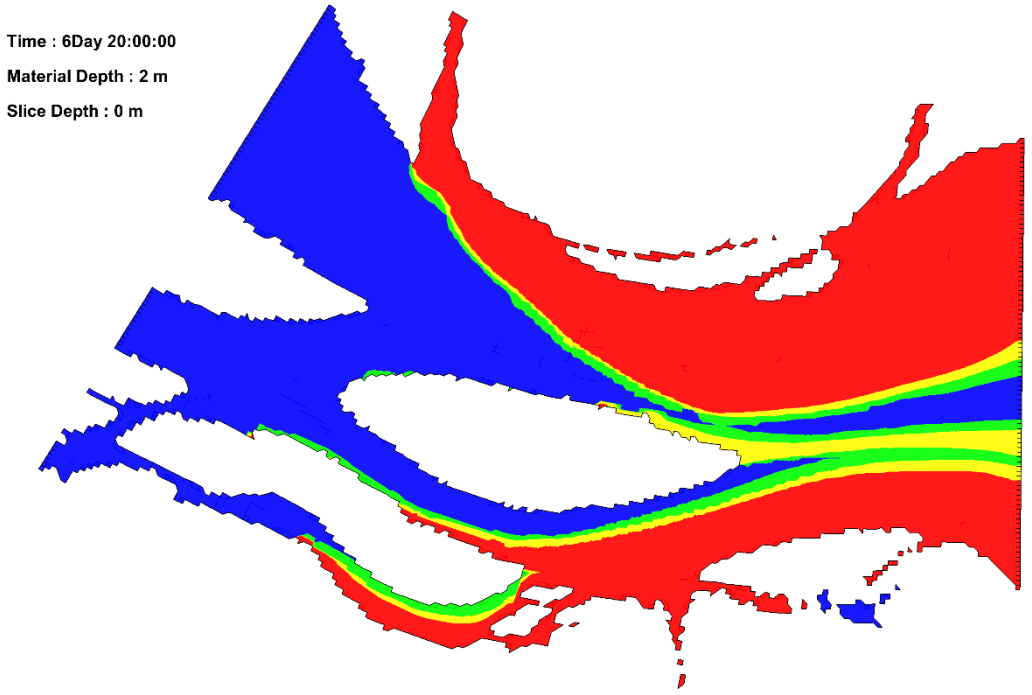


図-4. 87　深さ 2.0m で大腸菌投入から 12 時間後の水深 0m における大腸菌数

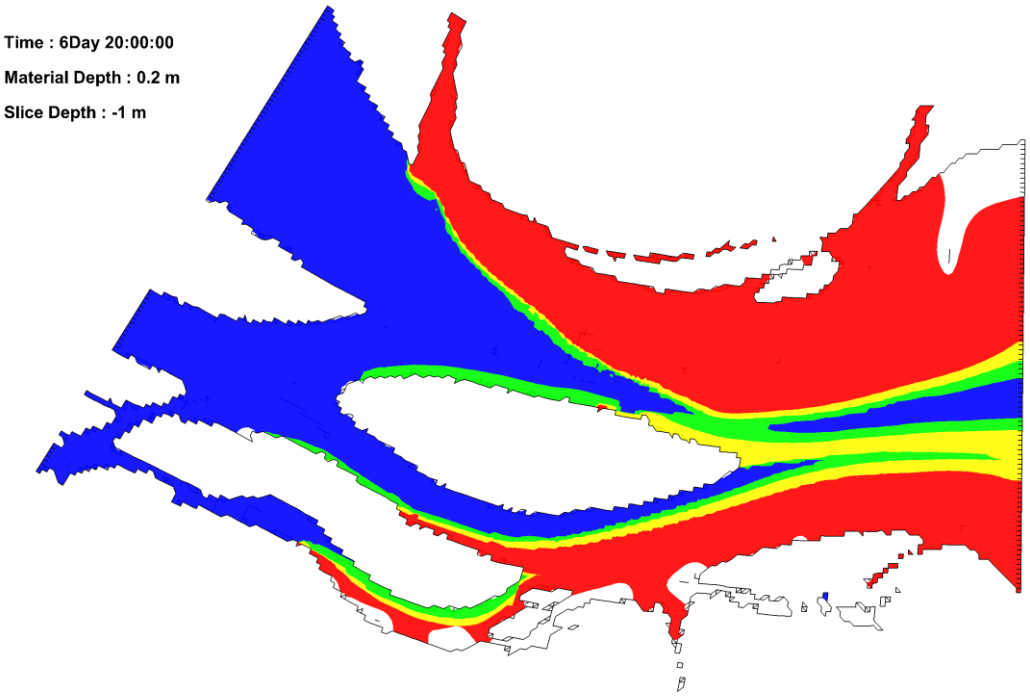


図-4. 88　深さ 0.2m で大腸菌投入から 12 時間後の水深 1m における大腸菌数

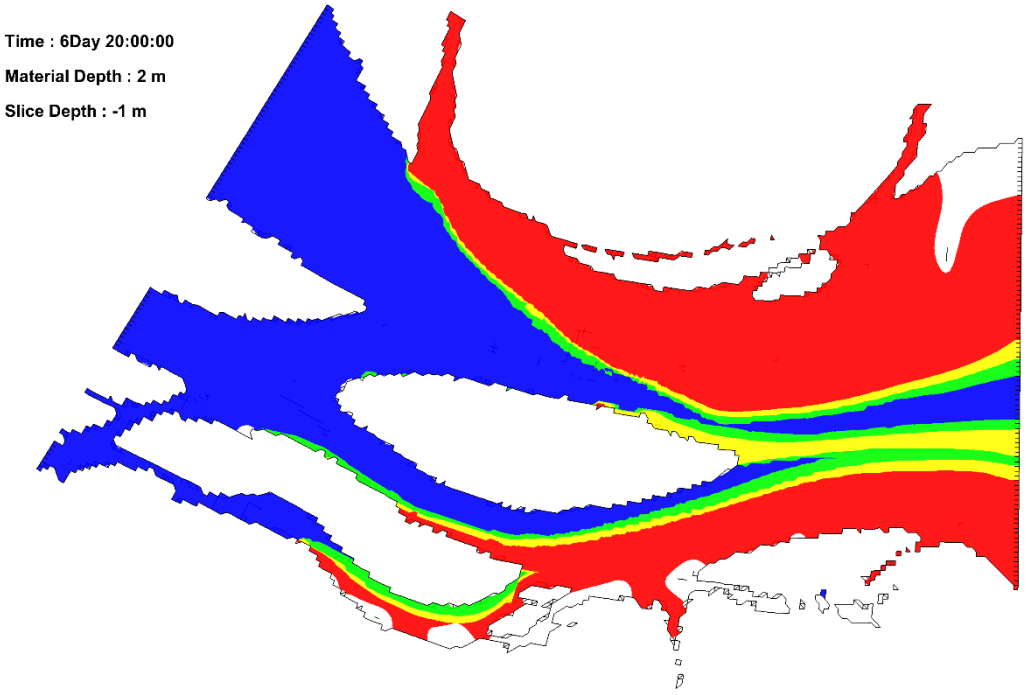


図-4. 89　深さ 2.0m で大腸菌投入から 12 時間後の水深 1m における大腸菌数

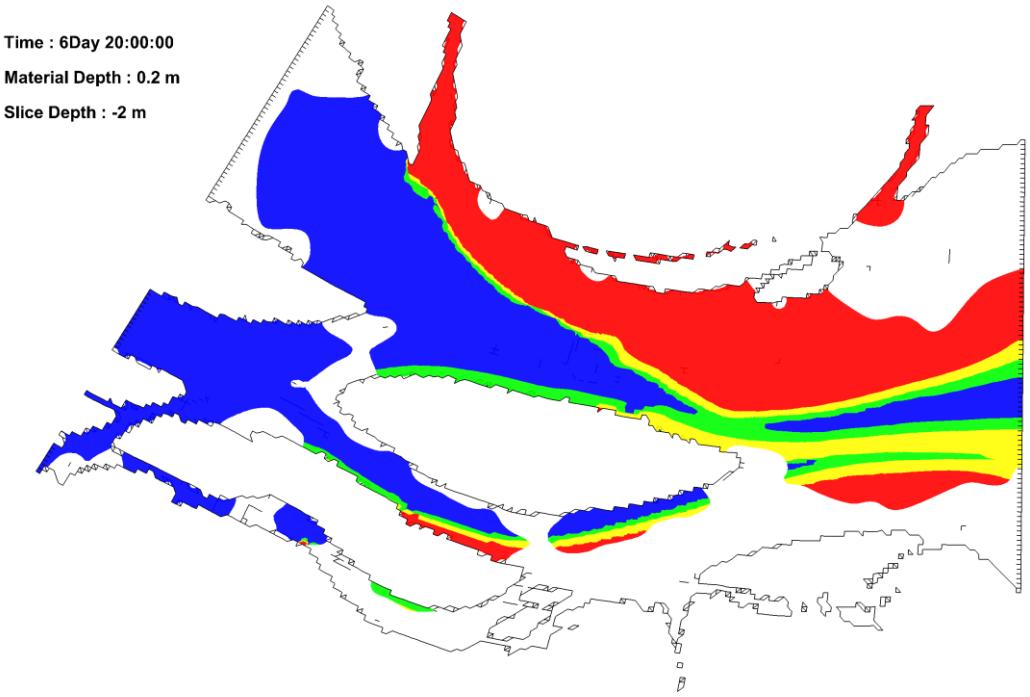


図-4. 90　深さ 0.2m で大腸菌投入から 12 時間後の水深 2m における大腸菌数

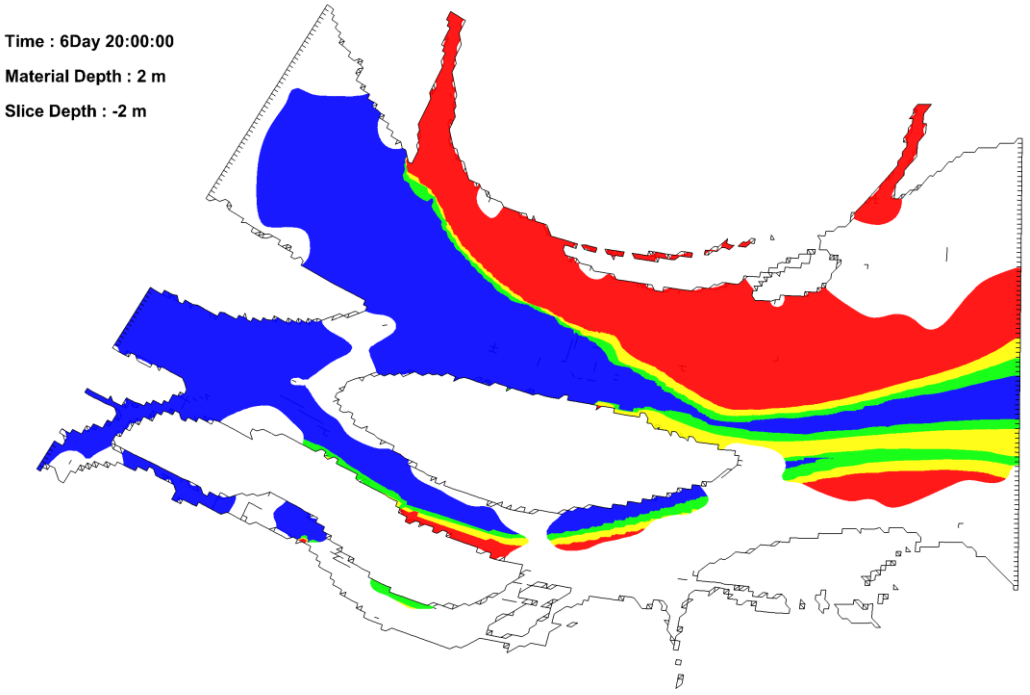


図-4. 91　深さ 2.0m で大腸菌投入から 12 時間後の水深 2m における大腸菌数

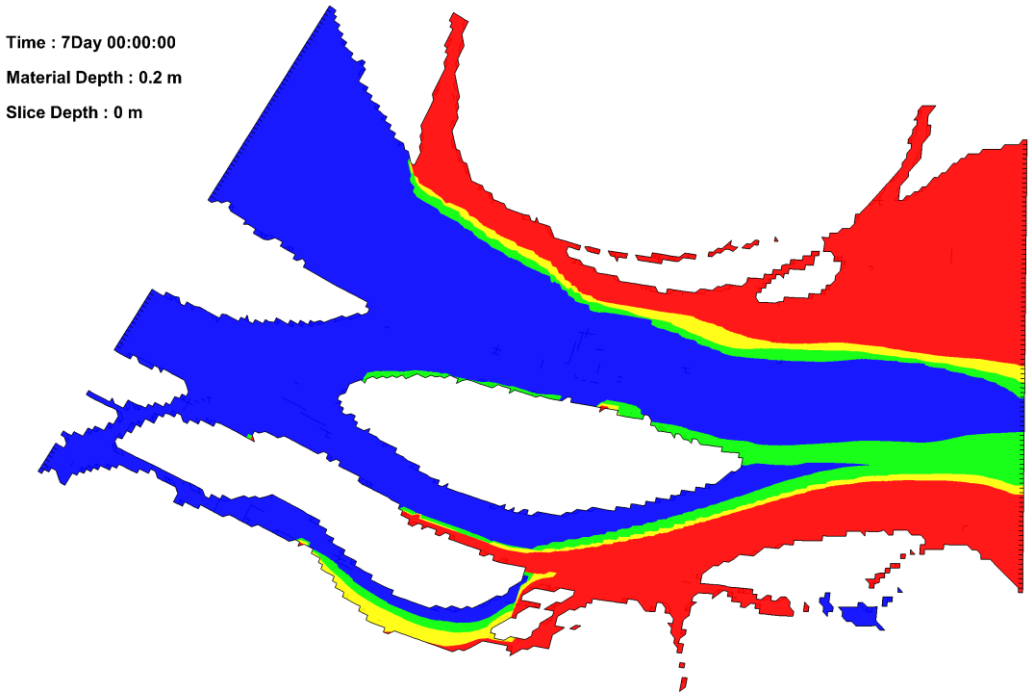


図-4. 92　深さ 0.2m で大腸菌投入から 16 時間後の水深 0m における大腸菌数

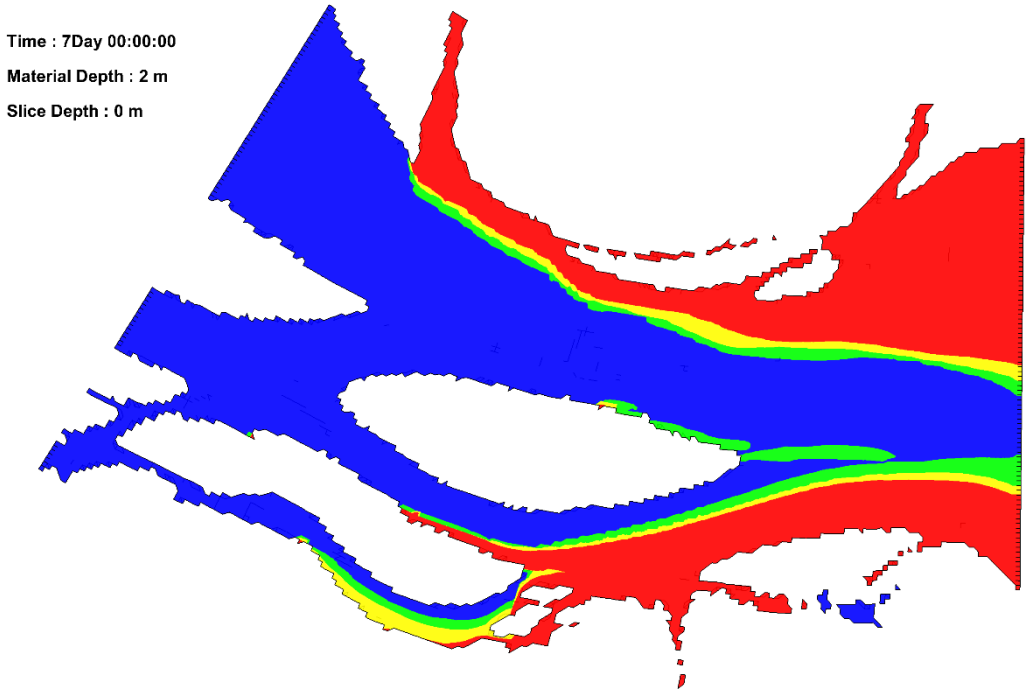


図-4. 93　深さ 2.0m で大腸菌投入から 16 時間後の水深 0m における大腸菌数

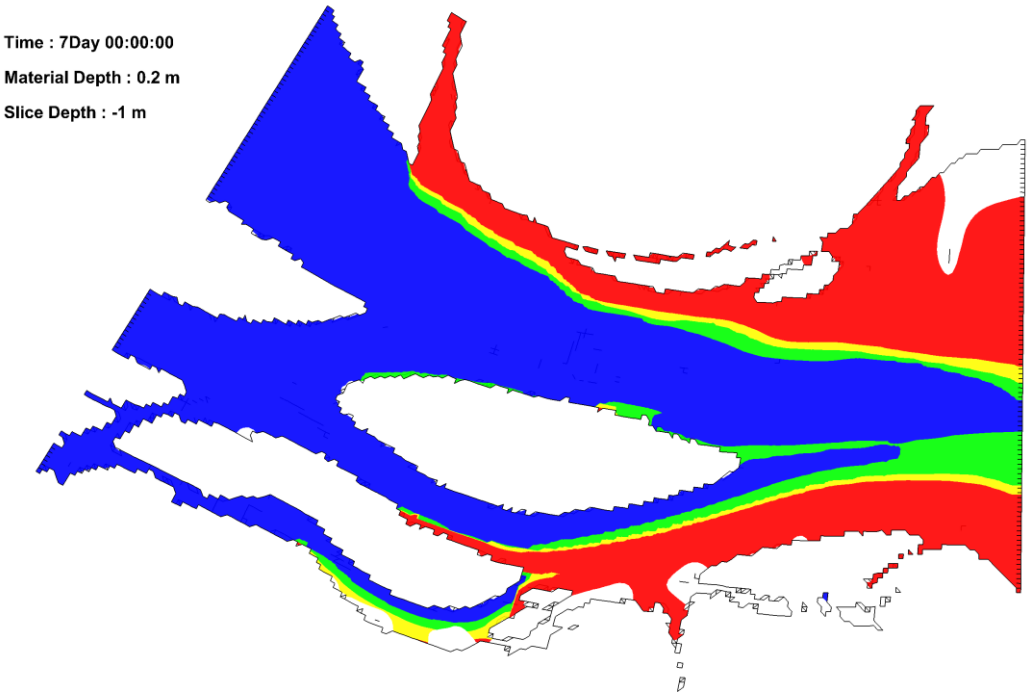


図-4. 94　深さ 0.2m で大腸菌投入から 16 時間後の水深 1m における大腸菌数

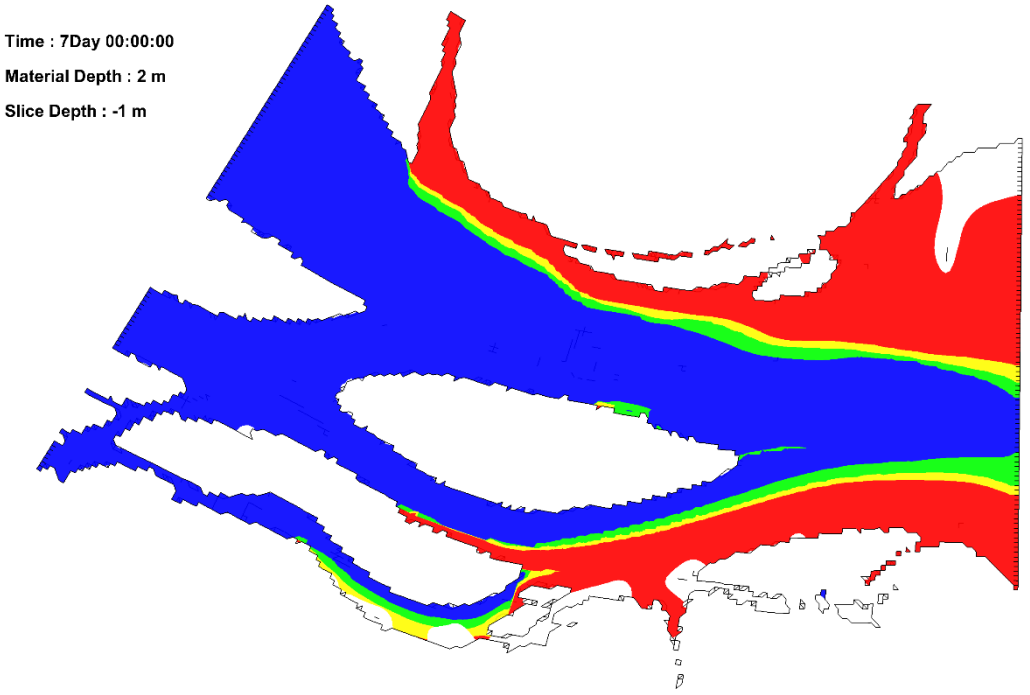


図-4. 95　深さ 2.0m で大腸菌投入から 16 時間後の水深 1m における大腸菌数

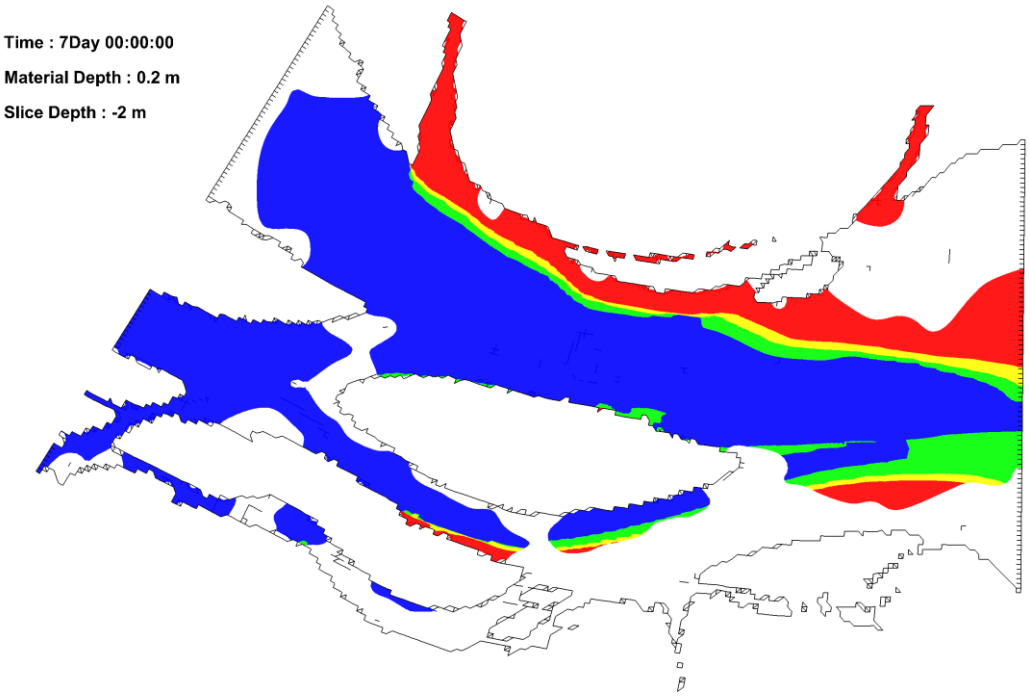


図-4. 96　深さ 0.2m で大腸菌投入から 16 時間後の水深 2m における大腸菌数

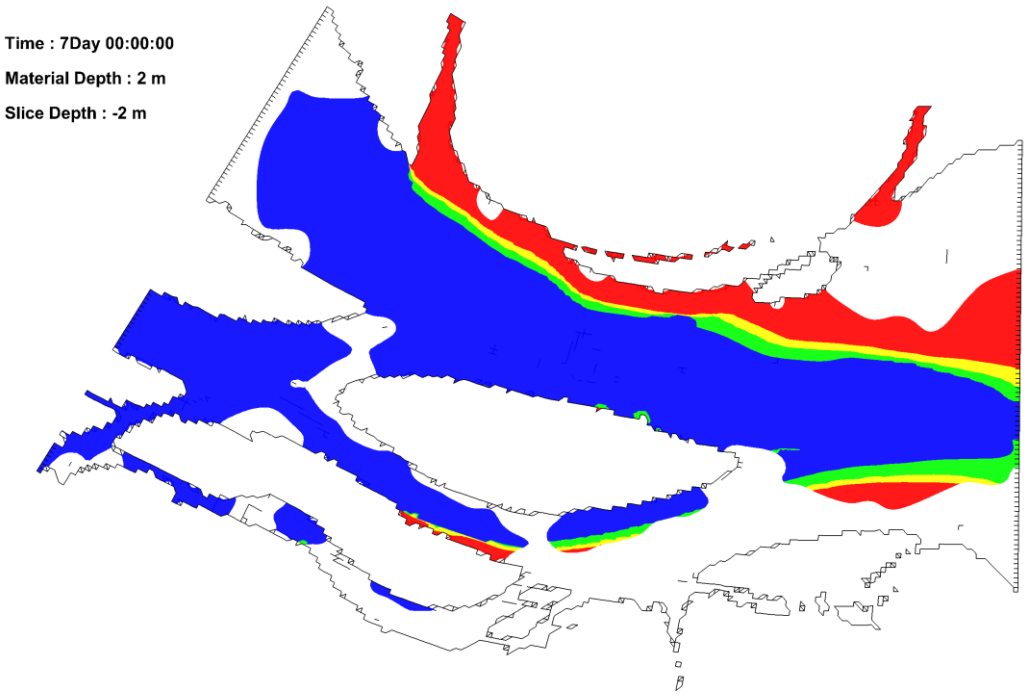


図-4. 97　深さ 2.0m で大腸菌投入から 16 時間後の水深 2m における大腸菌数

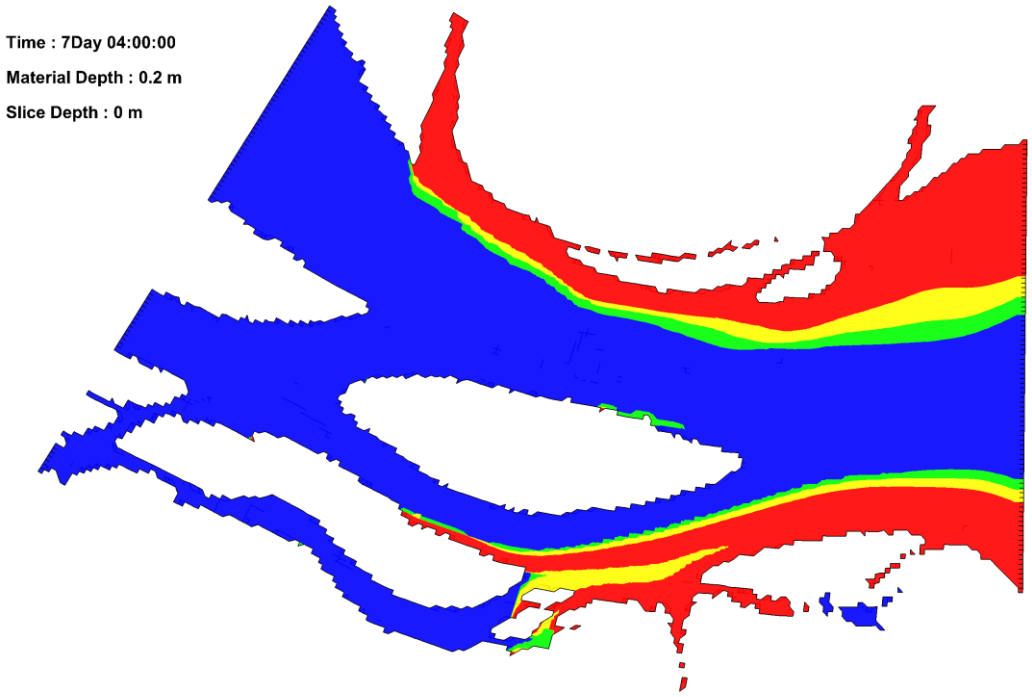


図-4. 98　深さ 0.2m で大腸菌投入から 20 時間後の水深 0m における大腸菌数

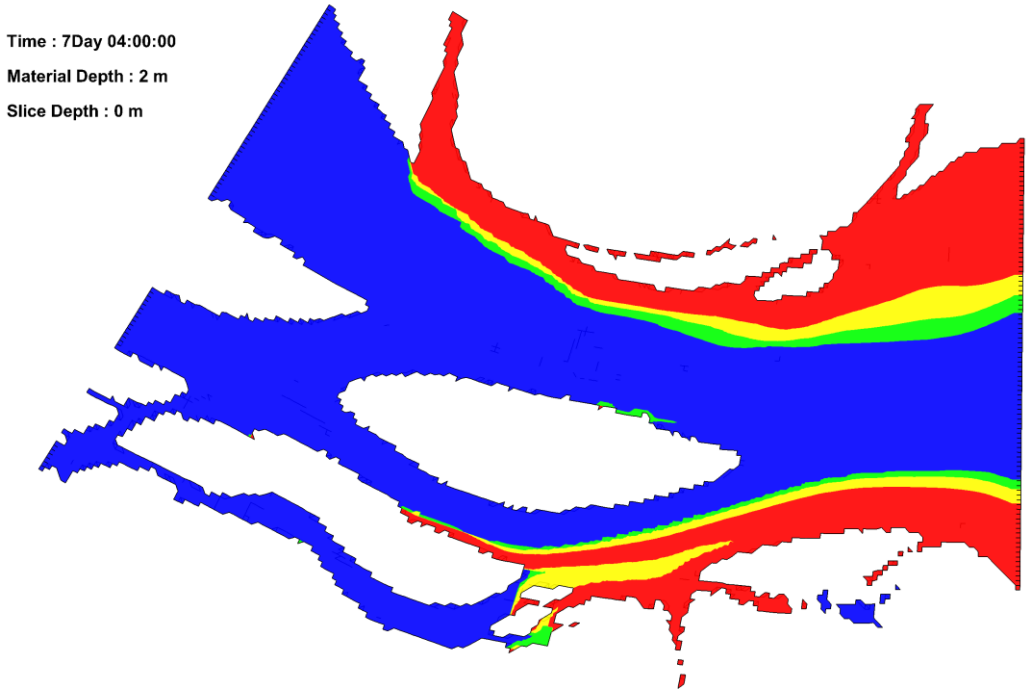


図-4. 99　深さ 2.0m で大腸菌投入から 20 時間後の水深 0m における大腸菌数

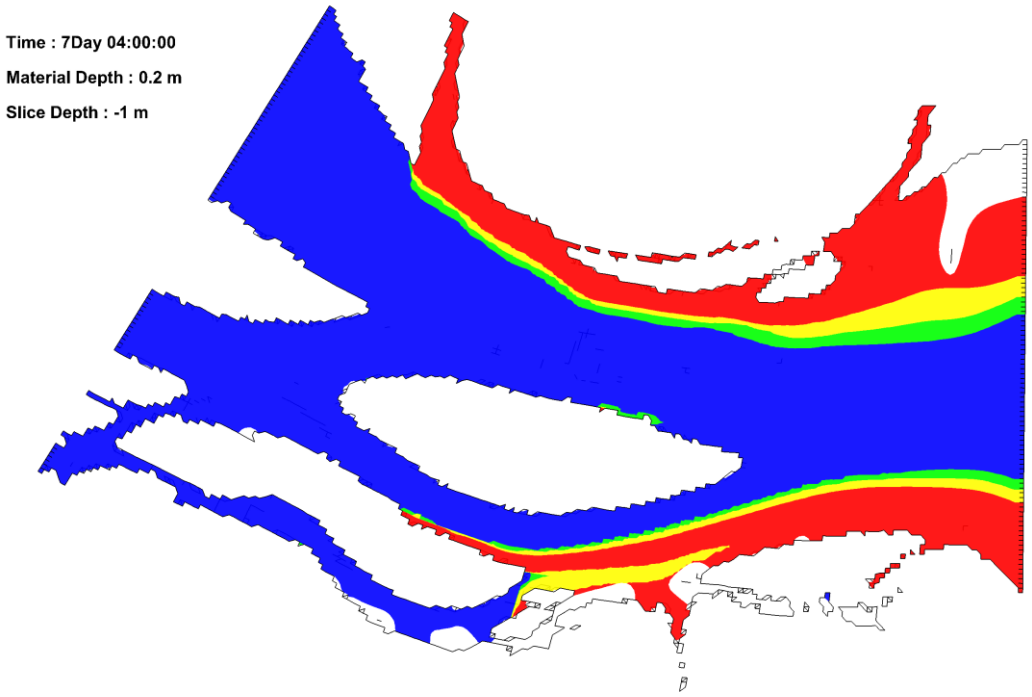


図-4. 100　深さ 0.2m で大腸菌投入から 20 時間後の水深 1m における大腸菌数

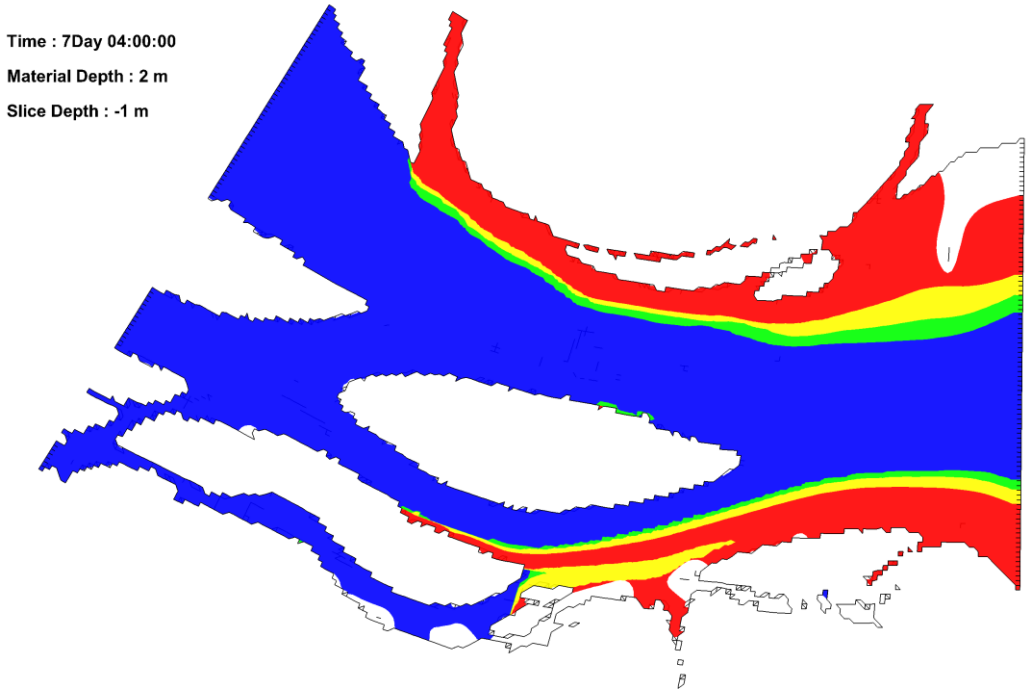


図-4. 101　深さ 2.0m で大腸菌投入から 20 時間後の水深 1m における大腸菌数

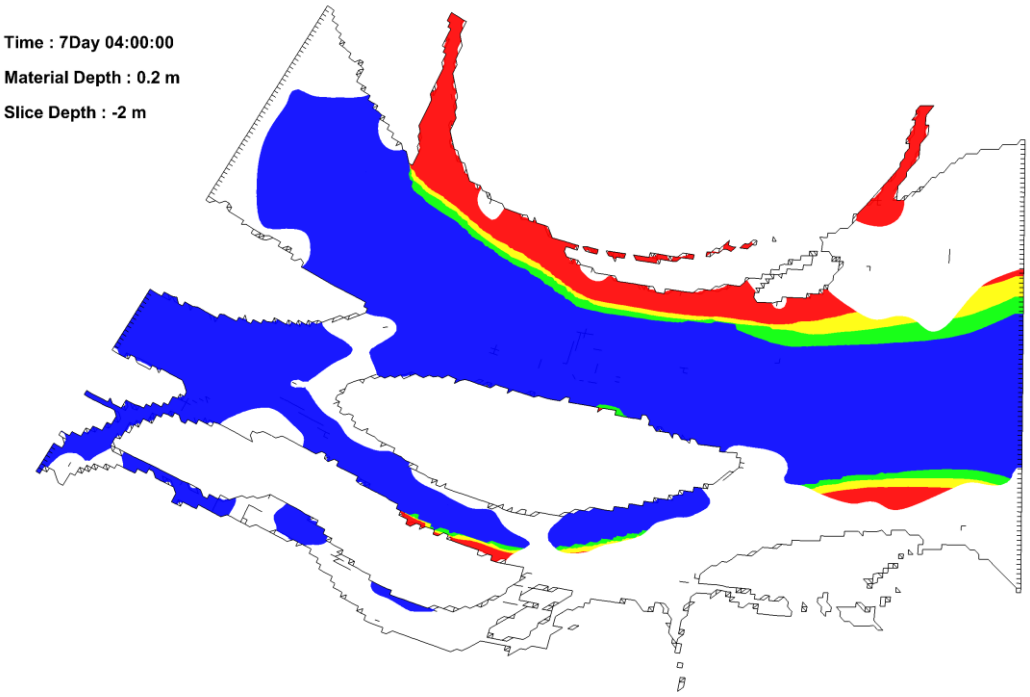


図-4. 102　深さ 0.2m で大腸菌投入から 20 時間後の水深 2m における大腸菌数

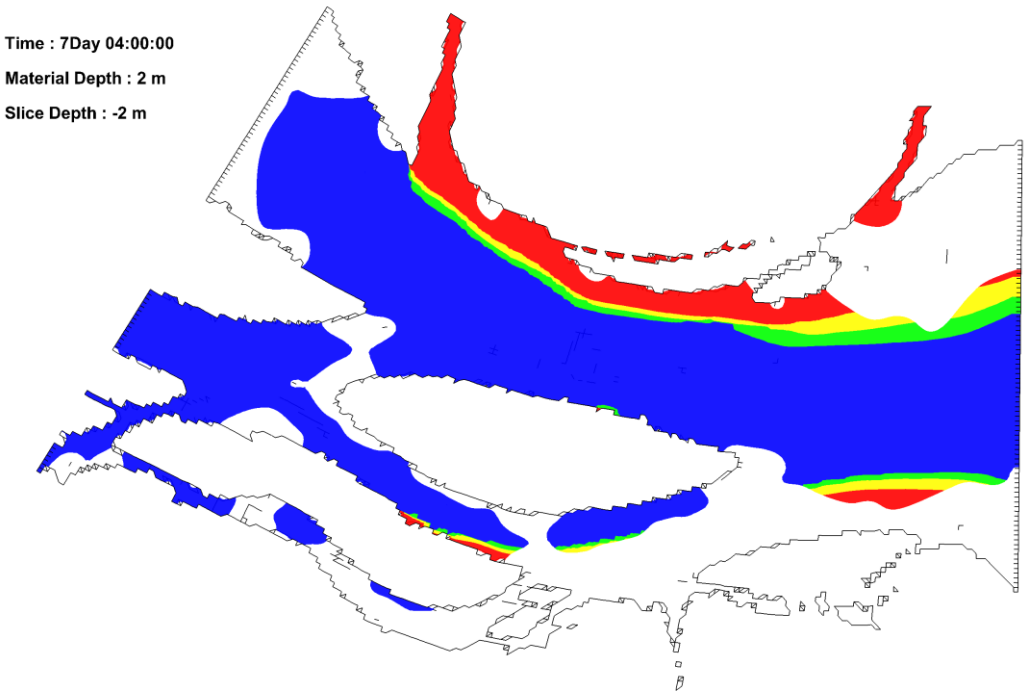


図-4. 103　深さ 2.0m で大腸菌投入から 20 時間後の水深 2m における大腸菌数

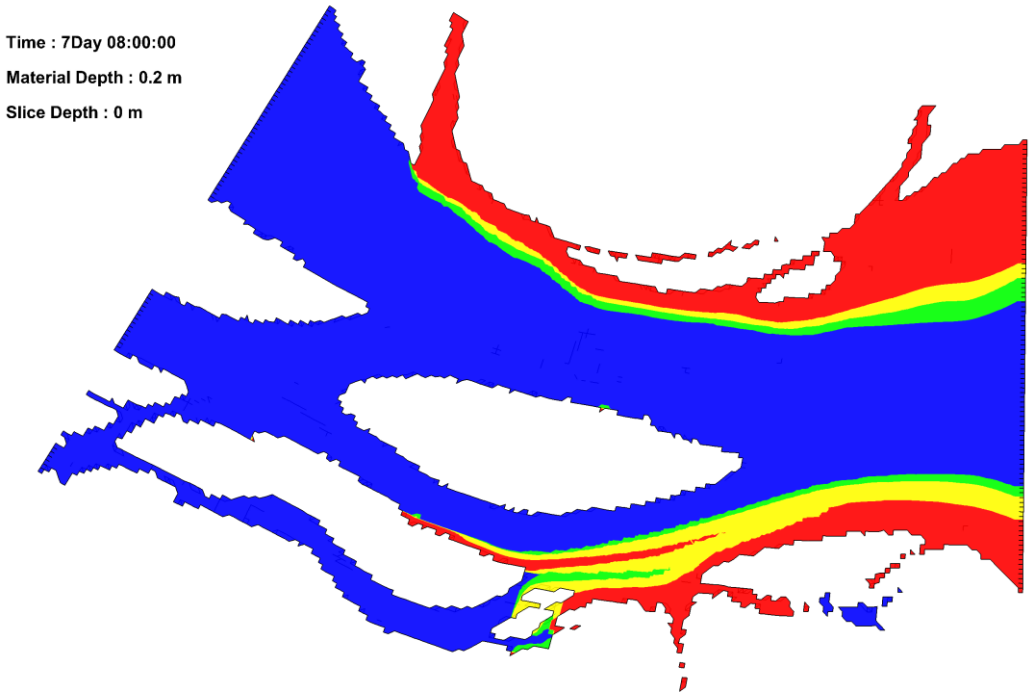


図-4. 104　深さ 0.2m で大腸菌投入から 24 時間後の水深 0m における大腸菌数

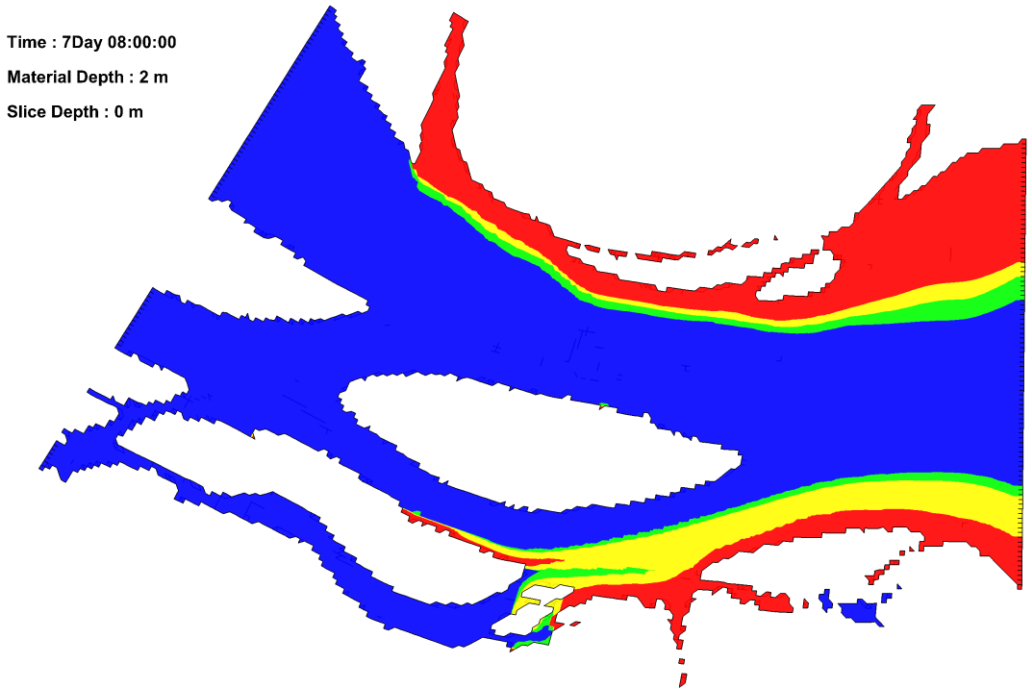


図-4. 105　深さ 2.0m で大腸菌投入から 24 時間後の水深 0m における大腸菌数

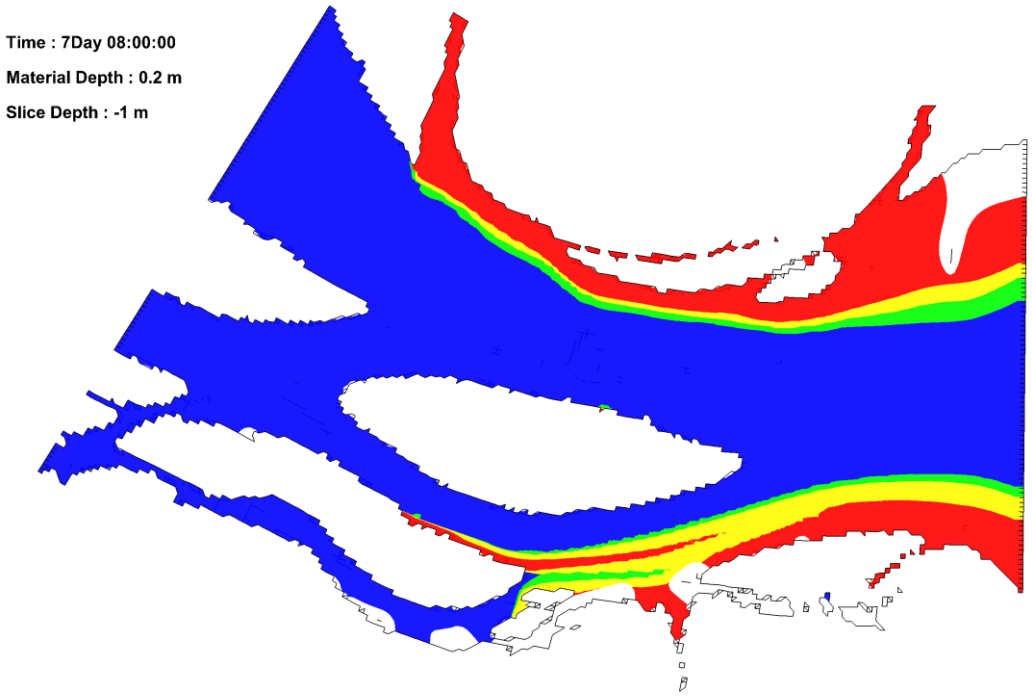


図-4. 106　深さ 0.2m で大腸菌投入から 24 時間後の水深 1m における大腸菌数

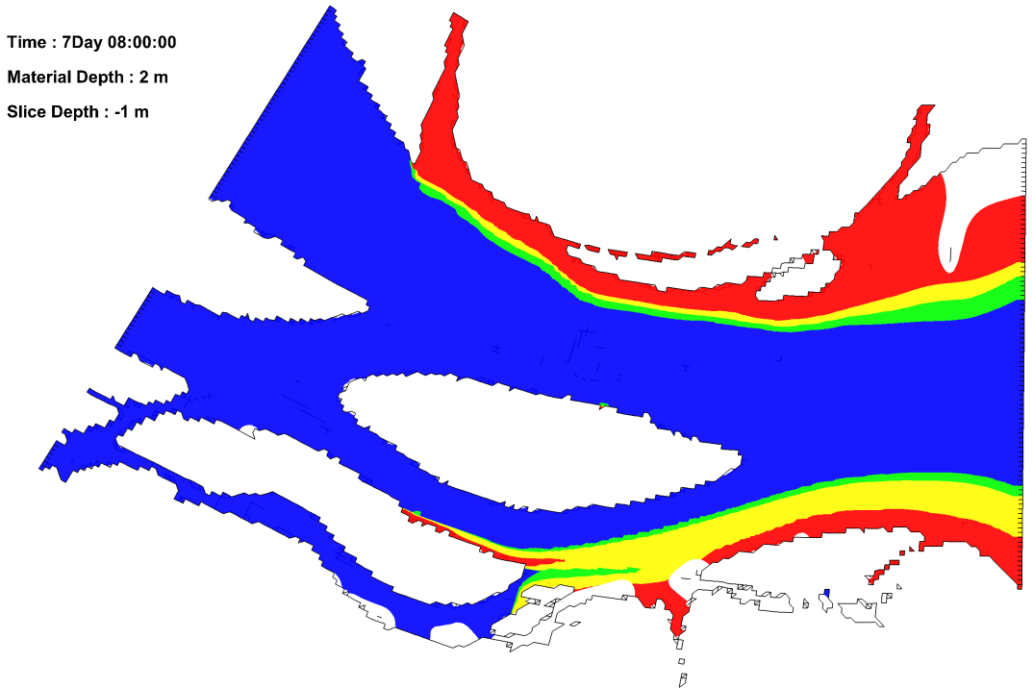


図-4. 107　深さ 2.0m で大腸菌投入から 24 時間後の水深 1m における大腸菌数

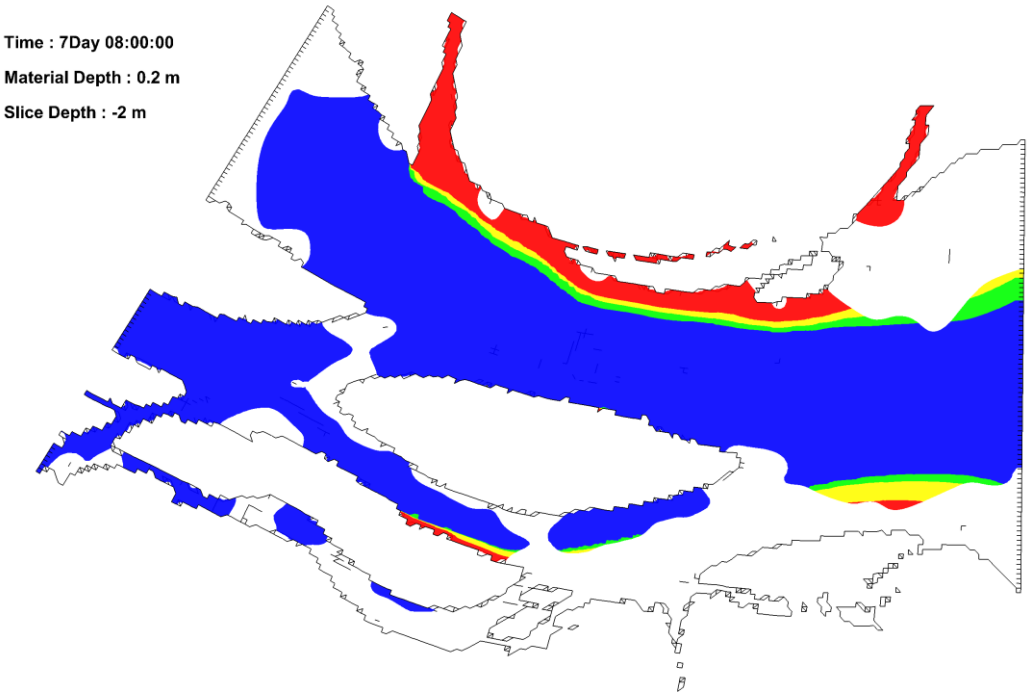


図-4. 108　深さ 0.2m で大腸菌投入から 24 時間後の水深 2m における大腸菌数

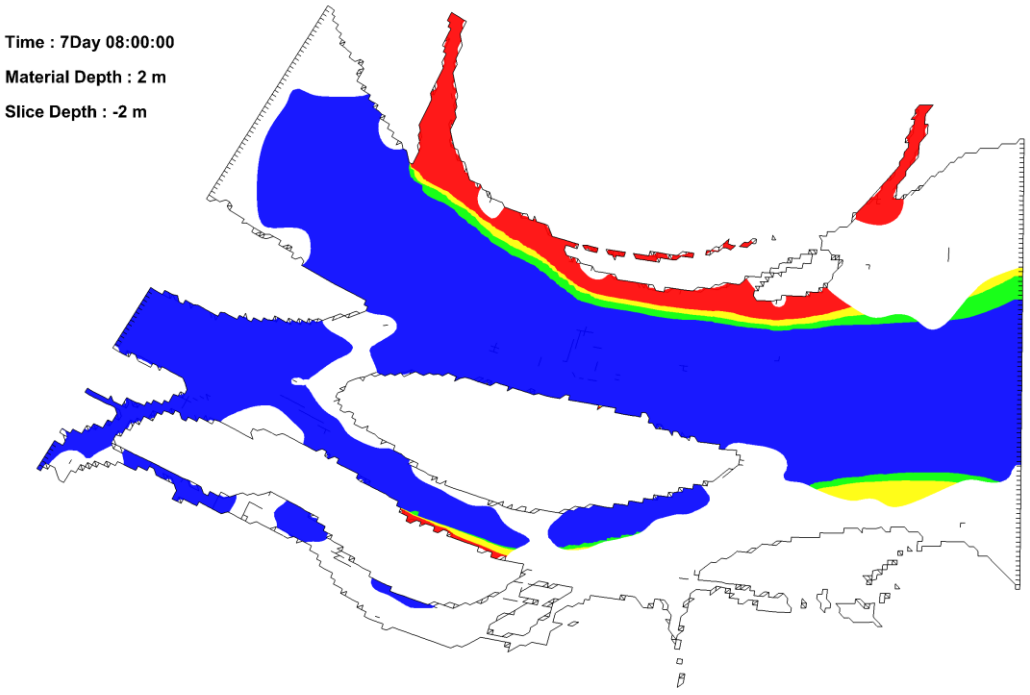


図-4. 109　深さ 2.0m で大腸菌投入から 24 時間後の水深 2m における大腸菌数

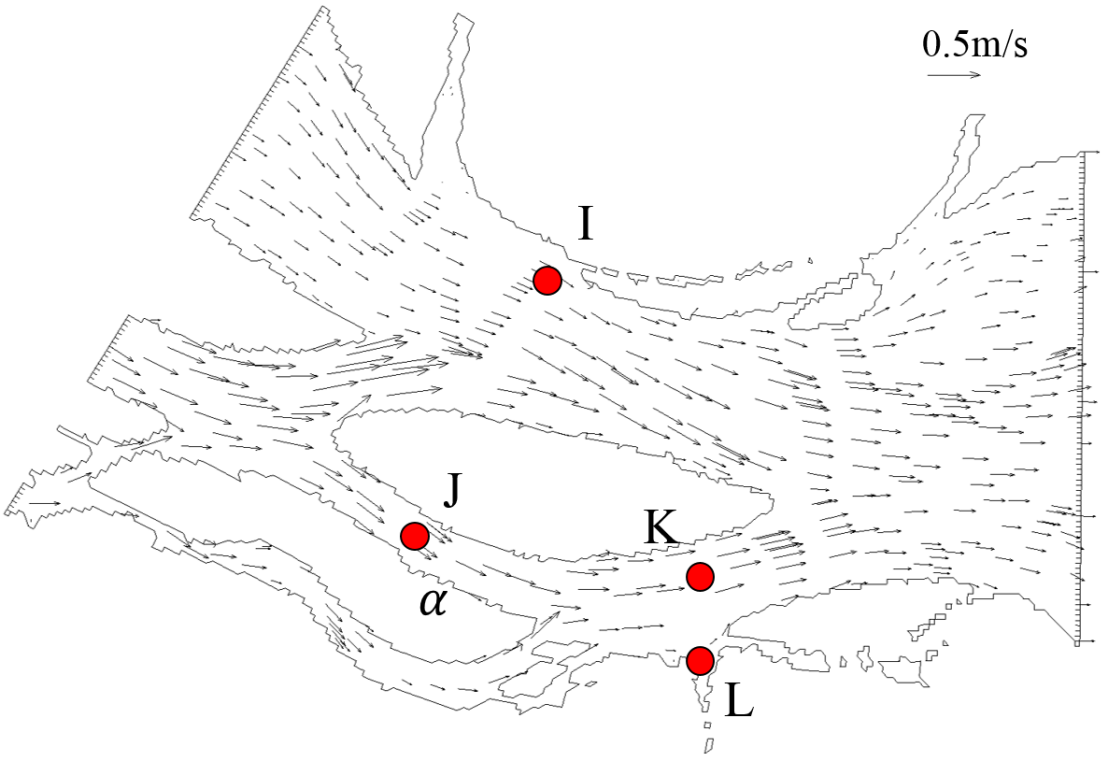


図-4. 110　定点における大腸菌数の時間変化を取得した 4 点の位置

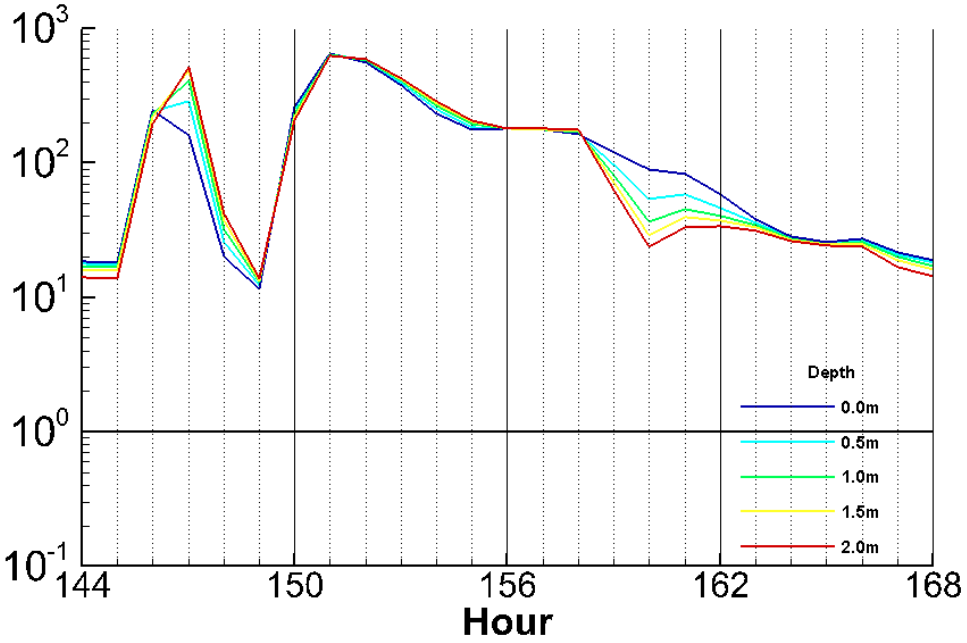


図-4. 111　深さ 0.2m で大腸菌投入時の点 I における大腸菌数の時間変化

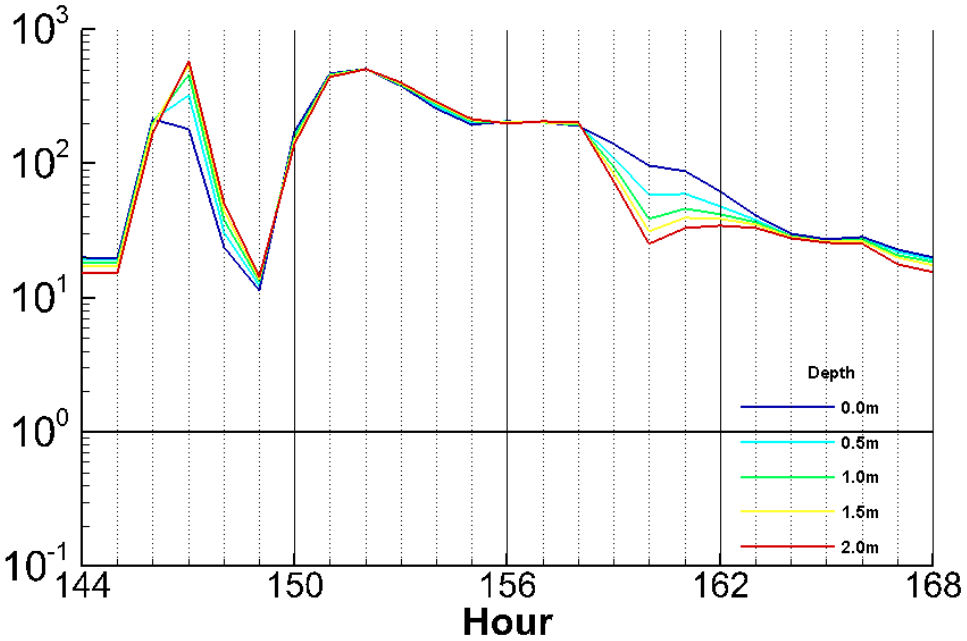


図-4. 112　深さ 2.0m で大腸菌投入時の点 I における大腸菌数の時間変化

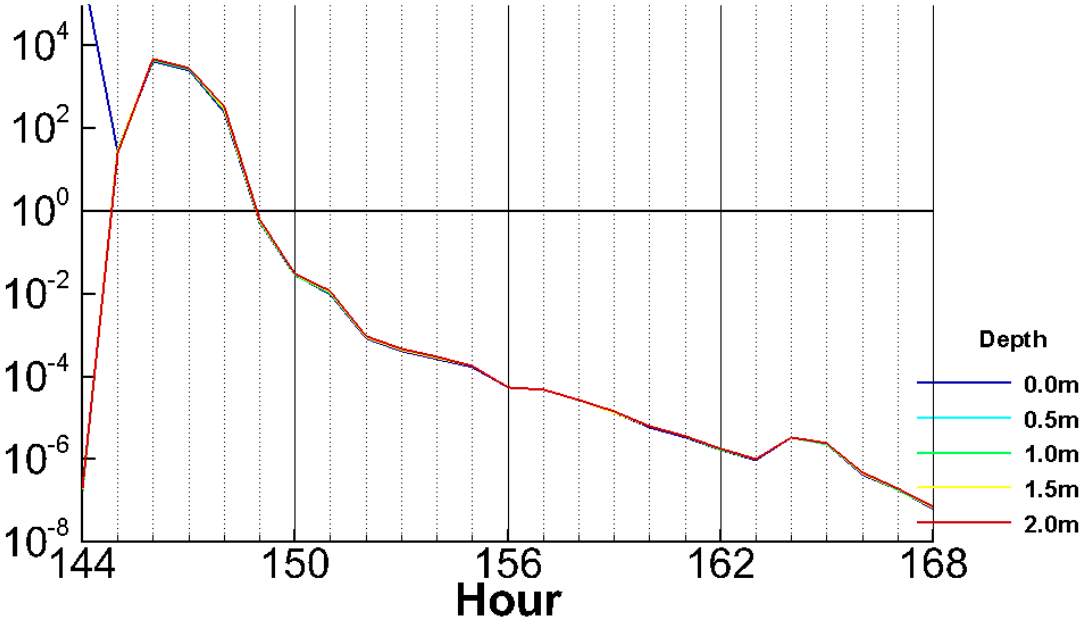


図-4. 113　深さ 0.2m で大腸菌投入時の点 J における大腸菌数の時間変化

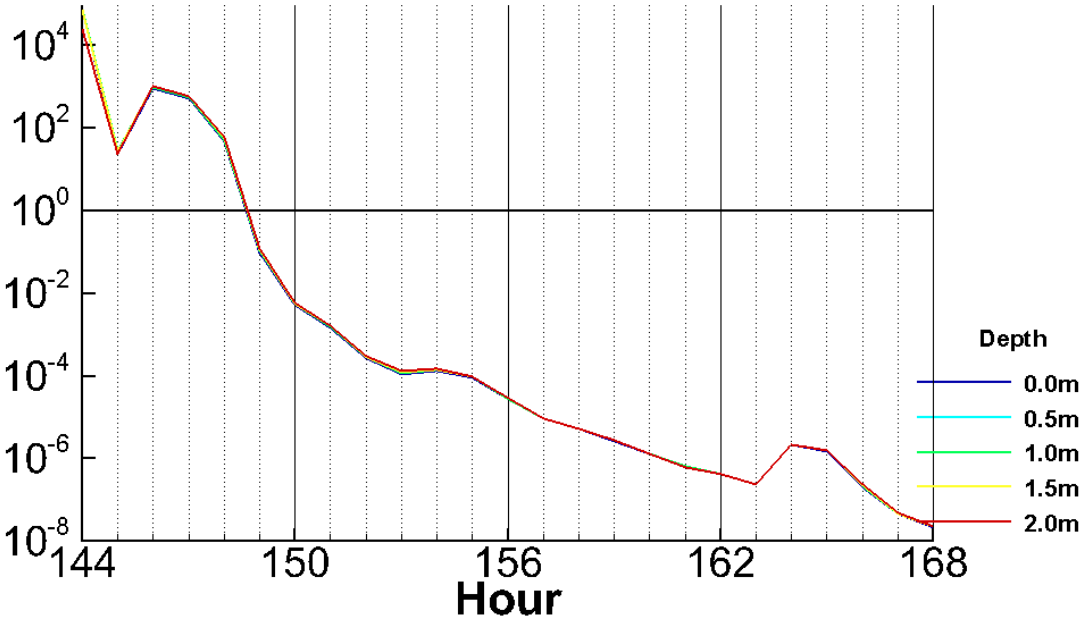


図-4. 114　深さ 2.0m で大腸菌投入時の点 J における大腸菌数の時間変化

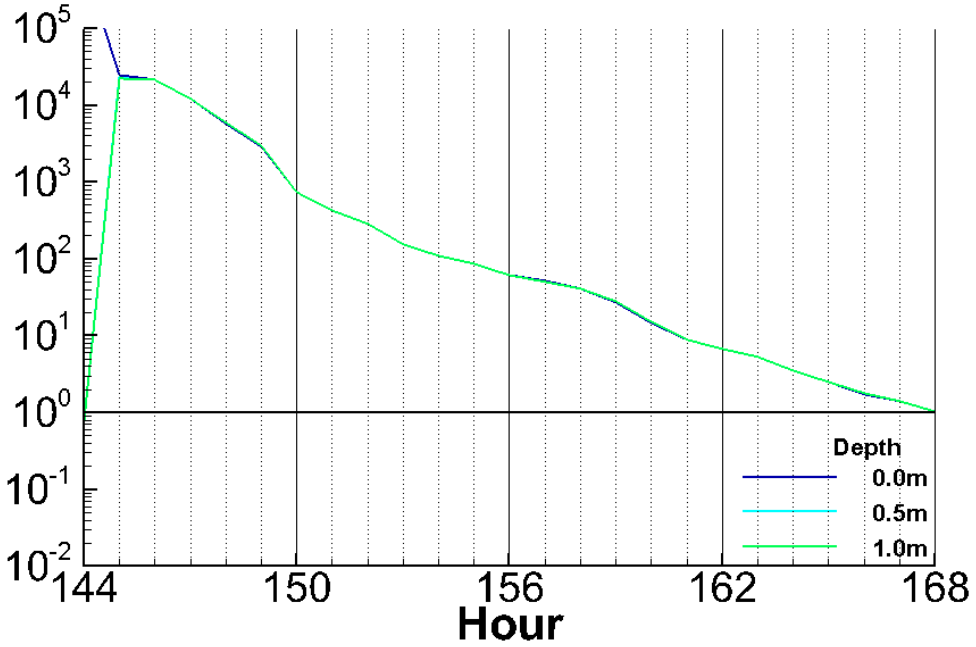


図-4. 115　深さ 0.2m で大腸菌投入時の点 K における大腸菌数の時間変化

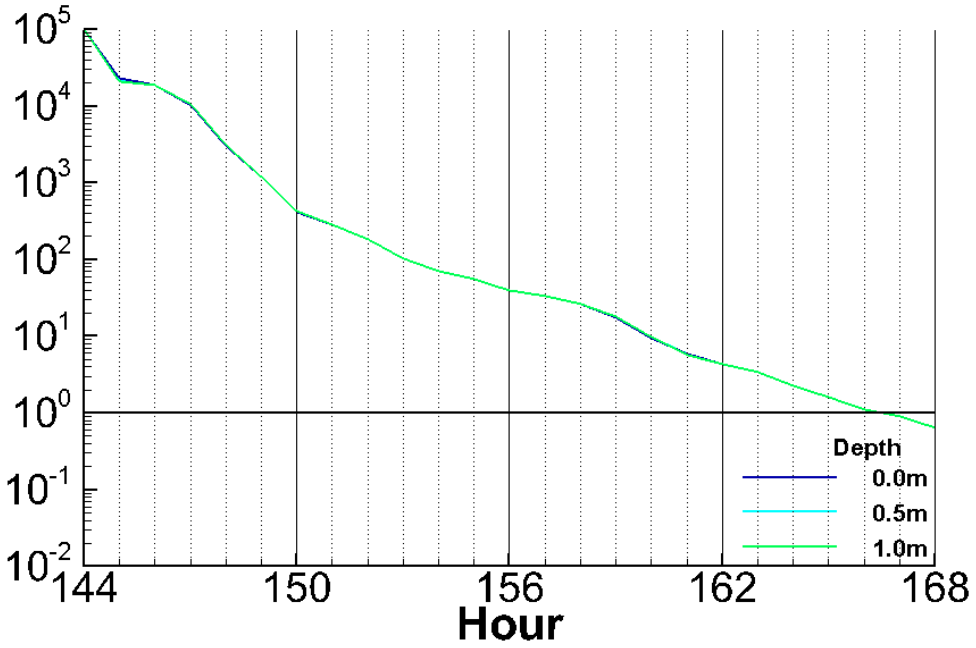


図-4. 116　深さ 2.0m で大腸菌投入時の点 K における大腸菌数の時間変化

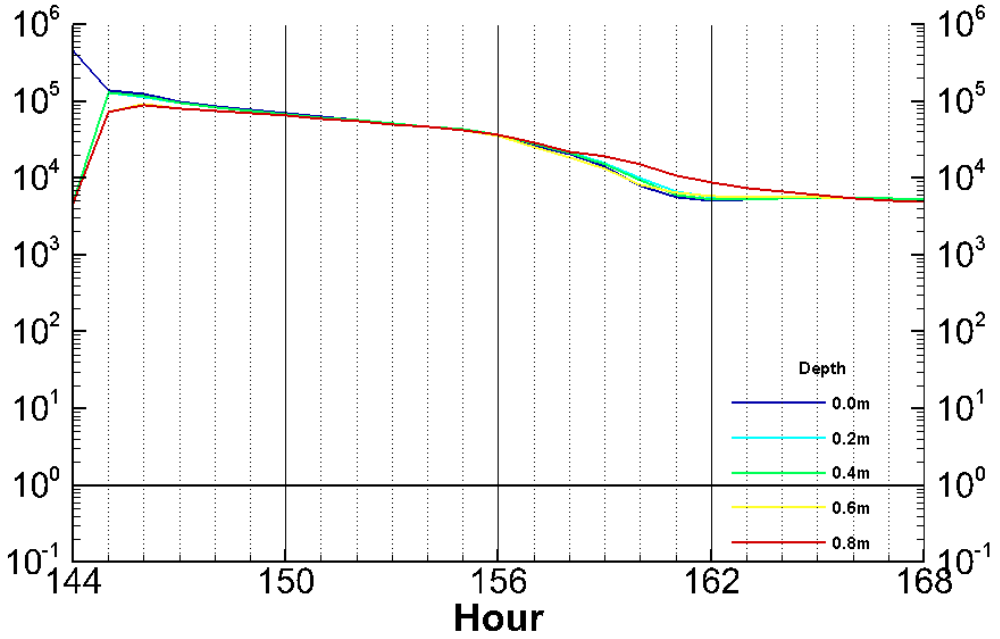


図-4. 117　深さ 0.2m で大腸菌投入時の点 L における大腸菌数の時間変化

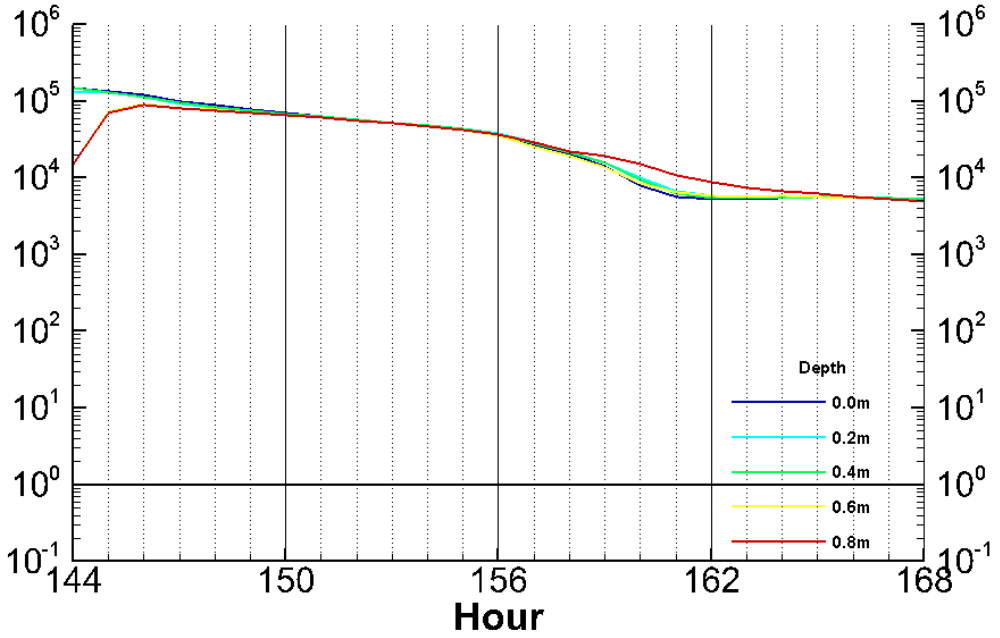


図-4. 118　深さ 2.0m で大腸菌投入時の点 L における大腸菌数の時間変化

第五章　結論

本論文では、水上集落 Chhnok Tru へ三次元数値流動解析モデルを適用し、汚水特に大腸菌の輸送や分散を検討した。

まず、数値標高モデルの作成を行なった。三種の衛星データより、データの取得時期や空間解像度より Sentinel を採用した。そして NDWI を用いて水域を推定し、水域の閾値が-0.2 である事が分かった。また、現地観測を行ない、Level-Set 法や正則化法の考えに従い、水域の標高を補間して推定する事で、数値標高モデルの整備を行なった。

次に、二次元数値流動解析モデルを適用する事で三次元数値流動解析モデルに必要な水理学的条件を準備した。上流側境界条件として使用した観測水位に誤りがある可能性から水位を 60cm 変更させた時、観測結果の流量と一致する事を確認し、三次元数値流動解析モデルの水理学的条件を準備した。

そして、三次元数値流動解析モデルの水上集落 Chhnok Tru への適用を行なった。水温計算に必要な気象条件の準備をした。計算結果の流量が観測流量とほぼ一致する事を確認した。計算結果を用いて、パッシブスカラー解析を行なった。今回の計算では三月の平均値を使用したため、本結果は一つの可能性を示すものである。計算結果では安全であると考えられた地点でも、風の影響等から危険な状態に陥る事も考えられる。大腸菌が拡散する深さは輸送や拡散に大きな影響を与えない事が確認された。流れのある水路では比較的早期に大腸菌が排出され、大腸菌に関しては飲み水として使用できるようになる一方で、南側の船着場などでは流れが少なく大腸菌が長時間滞留し、常に飲み水の基準を大きく上回る量の大腸菌数となり、危険な状態が続く事が示唆された。また、何らかの原因で大腸菌が水中で滞留した際、下流側では大腸菌数が基準値以下まで低下する時間が長期化される事が示唆された。

参考文献

[1] I. Sokneang, P. Hengism, H. Sivmey, S. Sengly, J. Pu, T. Watanabe: Hygiene and sanitation of people living on and around Tonle Sap Lake: Comparison of water based, water-land based and land based zones, Proceedings of 17th World Lake Conference, Siem Reap, Cambodia, 2017

[2] T. Nakamura, S. Murakami, L.Sambo, Hideto Fujii: Efficacy of a GPGPU-Acceleration to Inundation Flow Simulation in Tonle Sap Lake in Cambodia, Engineering Journal, 2019

[3] 中村恭志、戸田真仁、渡辺一人、石川忠晴：3 次元貯水池流動モデル"TITech-WARM"の開発と釜房貯水池への適用、土木学会論文集 B1（水工学)、第 69 巻 4 号, pp.I_775-I_780, 2013

[4] 中村恭志、石川忠晴、青森県高瀬川河口域の浅瀬が塩水遡上に与える影響に関する三次元数値流動解析による研究、土木学会論文集 B2（海岸工学）第 69 巻 2 号, pp.I_491-I_495, 2013

[5] 清水泉介、寺坂晴夫、LEVEL-SET 法を用いたプール内の気泡振動解析、第 14 回数値流体力学シンポジウム F09-1, 2000

[6] Jared S. Ervin, Todd L. Russell, Blythe A. Layton, Kevan M. Yamahara, Dan Wang, Lauren M. Sassoubre, Yiping Cao, Catherine A. Kelty, Mano Sivaganesan, Alexandria B. Boehm, Patricia A. Holden, Stephen B. Weisberg, Orin C. Shanks: Characterization of fecal concentrations in humanand other animal sources by physical, culturebased, and quantitative real-time PCR methods

[7] M. Nishiyama, H. Shimauchi, and Y. Suzuki:Temporal Variabilities in Genetic Patterns and Antibiotic Resistance Profiles of Enterococci Isolated from Human feces, Microbes Environment, Vol. 31, No. 2, 182-185, 2016

[8] Y. Tanaka, S. Hayashida and M. Hongo:The Relationship of the Feces Protein Particles to Rice Protein Bodiest, Agricultural and Biological Chemistry, 39:2, 515-518

[9] 日野幹夫、明解水理学、丸善出版株式会社、1983 年

[10] 梅干野晁, 中村恭志, 環境の可視化―地球環境から生活環境まで―, 放送大学教育振興会 2015 年

[11] 日本リモートセンシング学会、基礎から分かるリモートセンシング、理工図書株式会社、2011 年

[12] 矢部孝, 内海隆行, 尾形陽一共著, CIP 法：原子から宇宙までを解くマルチスケール解法, 森北出版株式会社 (2003)

[13] 中村恭志, 菊池喬, 石川忠晴, 東北地方太平洋沖地震に伴う河床地形変形が北上川塩水挙動に及ぼす影響の数値流動解析による検討, 河川技術論文集, 第 19 巻 (2013)

[14] 馬場銀河, 斉藤豪, 保存型 CIP 法を用いた二次元格子構造によるシミュレーション, 情報処理学会第 75 回全国大会 2015 年

[15] 中村恭志, 眞貝憲史, 石川忠晴, 小川原湖に侵入する塩水傾斜プルームの 3 次元数値流動解析, 河川技術論文集, 第 19 巻 2013 年

[16] 橋本雄一、GIS と地理空間情報増強版―ArcGIS10 とダウンロードデータの活用―、古今書院、2011 年

[17] City Population
http://www.citypopulation.de/php/cambodia-admin.php (Accecd at 2019/01/26)

謝辞

本論文を作成するにあたり、日頃より丁寧な御指導や適切な御指摘をいただきました中村恭志准教授に深く謝意を表します。中村先生には、研究の進め方や考え方、私に丁寧に教えて下さりました。この研究室生活の中で成長することができました。

合同研究室の木内豪教授にはゼミ発表の際、いつも鋭い指摘をしてくださり、研究の進め方を振り返りながら進む事ができました。ありがとうございました。

一昨年 8 月と昨年 9 月のカンボジアではご一緒に現地調査を行なわせていただいた山形大学・藤井秀人教授、富山県立大学・星川圭介教授、石川県立大学・藤原洋一教授と学生の米田さん、渡辺さん、本大学の Sokly さん、そしてカンボジア当局の関係者皆様方には、カンボジアでの過ごし方や研究についてのアドバイスや意見交換など貴重な時間を過ごさせていただきました。中村研究室の皆様と共同研究室の木内研究室の皆様には、合同ゼミなどで発表方法やアイデアなどを多くいただき、感謝しお礼申し上げます。

研究室の先輩方、同期、後輩の皆さんには同じ学生としてアドバイスや相談など研究を支えていただきました。特に先輩の安嶋さんには困った時に何度も頼り、いつも丁寧に教えてくださりありがとうございました。