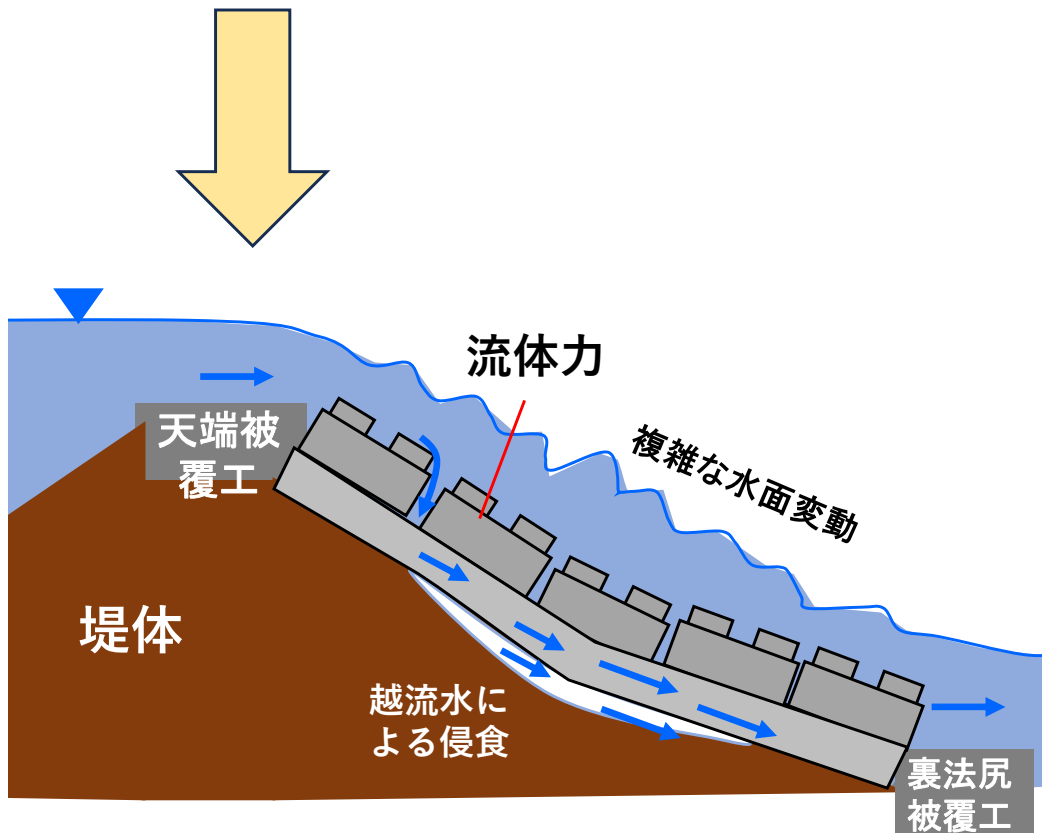
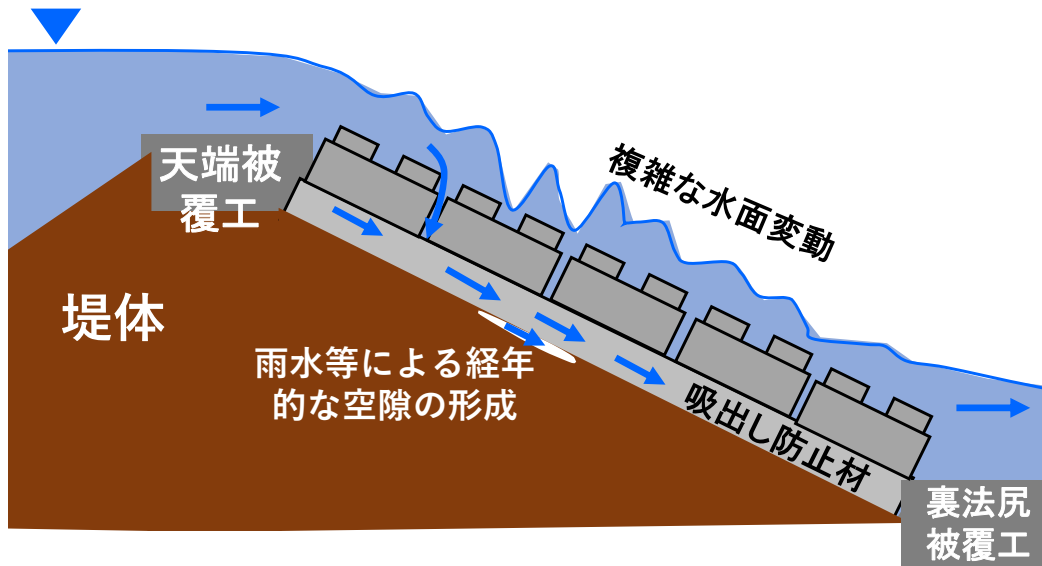


表面被覆型対策工が設置された堤防裏法部の流れと堤体侵食を評価する解析手法の開発と堤体表面に形成された初期侵食が及ぼす影響評価

中央大学研究開発機構 後藤岳久 中央大学研究開発機構 福岡捷二

1. 研究背景・目的

研究背景



- 令和元年東日本台風で発生した堤防決壊のうち、約86%は越水による堤防決壊であるため、越水した場合においても決壊しにくく、決壊するまでの時間を少しでも長くすることの出来る粘り強い堤防の技術開発が進められている。その技術として、裏法部に連節ブロックを設置して堤防裏法の侵食を抑制し、さらに、その下に吸出し防止材を設置する表面被覆型対策工が提案されている。
- 表面被覆型対策工では、雨水等の影響により吸出し防止シート下に空隙が形成される、又は、不等沈下等により堤体やブロックの不陸が形成される可能性があり、これらの存在は越流時の堤体侵食を助長する恐れがある。
- 表面被覆型対策工の具体の設計、施工上の留意点を明らかにするためには、接続ブロックに作用する流体力や、吸出し防止材と堤体との隙間の流速を解析し、堤体裏法部の侵食がどの程度生じるかを評価する必要がある。

本研究では、実河川の広域の流れと河床変動を計算可能な準三次元解析法(Q3D-FEBS(竹村・福岡, 2019))の枠組みで、空気混入を伴う複雑な接続ブロック上の流れと吸出し防止シート内とその下の流れ、それに伴う堤防裏法部の侵食の算定が可能な解析手法を構築する。さらに、表面被覆型対策工の堤体表面に形成された初期侵食が、その後の侵食に与える影響について検討する。

2. 空気混入を伴う接続ブロック上の流れの解析法(気液混相流に拡張したQ3D-FEBS法)と吸出し防止シート内及びその下の堤体との隙間の流れの解析法(浸透性材料を考慮した多層流モデルの組み込み)の一体的解析法

本解析法の枠組み

接続ブロック上の流れの準三次元解析(気液混相流のQ3D-FEBS)

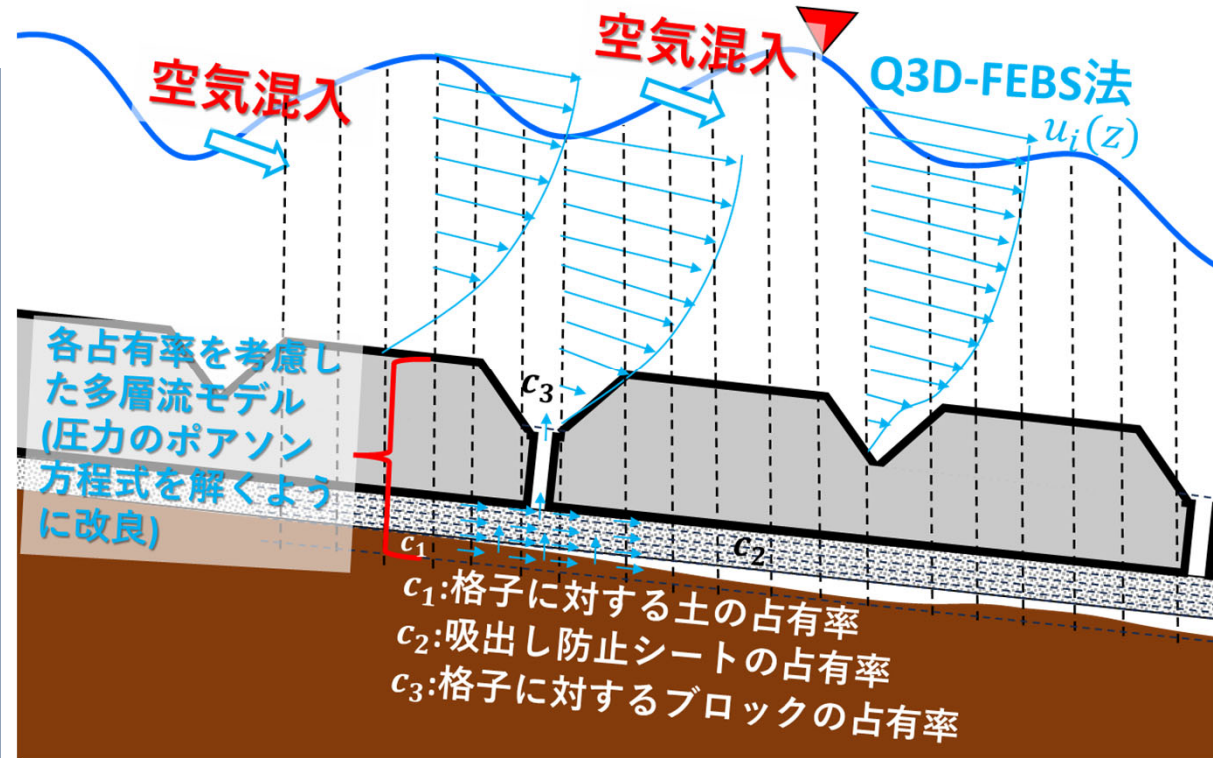
混相流の密度： $\rho = \rho_a C + \rho_w (1 - C)$

混相流の水深： $h = h_w / (1 - C)$

ρ_a ：空気の密度， ρ_w ：水の密度，
 h_w ：水の実質水深， C ：空気混入率

流速・圧力分布・乱れの計算

- ・水深積分連続式 $\bar{z}_s, \bar{h}_w$
- ・水深積分運動方程式 $\bar{U}_i, \bar{p}_b$
- ・水面、底面の運動方程式 $\bar{u}_{si}, \bar{u}_{bi}$
- ・水中の空気に関する連続式 C
- ・水深積分、水面、底面の乱れエネルギーの輸送方程式 $\bar{K}, \bar{k}_s, \bar{k}_b$



質量・運動量交換，せん断力

ブロック・シート内・シート下の隙間の流れの3次元解析

(各材料の占有率を考慮した多層流モデル)

- ・各材料の占有率を考慮した連続式
- ・各材料の占有率とシートによる抵抗を考慮した3次元の運動方程式 u_{ki}, p_k

c_1 : 格子に対する堤体土の占有率 c_3 : 格子に対するブロックの占有率
 c_2 : 吸出し防止シートの占有率

堤体の侵食の計算

- ・堤体侵食速度 E_p
 $E_p = \beta(|U_1| - u_c)$
 u_c : 侵食限界流速， β : 侵食速度係数
- ・堤体への堆積速度 E_d
 $E_d = C_s w_f$
 C_s : 移動土砂濃度， w_f : 沈降速度
- ・侵食された堤体土砂の輸送方程式

$$\frac{\partial C_s \delta_1}{\partial t} + \frac{\partial u_{1j} C_s \delta_1}{\partial x_j} = E_p - E_d$$

接続ブロック上の流れの準三次元解析(気液混相流のQ3D-FEBS)

混相流の密度 $\rho = \rho_a C + \rho_w(1 - C)$

混相流の運動量 $\rho u_i = \rho_a u_{ai} C + \rho_w u_{wi}(1 - C)$
 $\approx u_i(\rho_a C + \rho_w(1 - C))$

u_i : 混相流の流速,
 u_{ai} : 空気の流速,
 u_{wi} : 水の流速

水に関する連続式

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} + \frac{\partial u_j h_w}{\partial x_j} - w_3 = 0$$

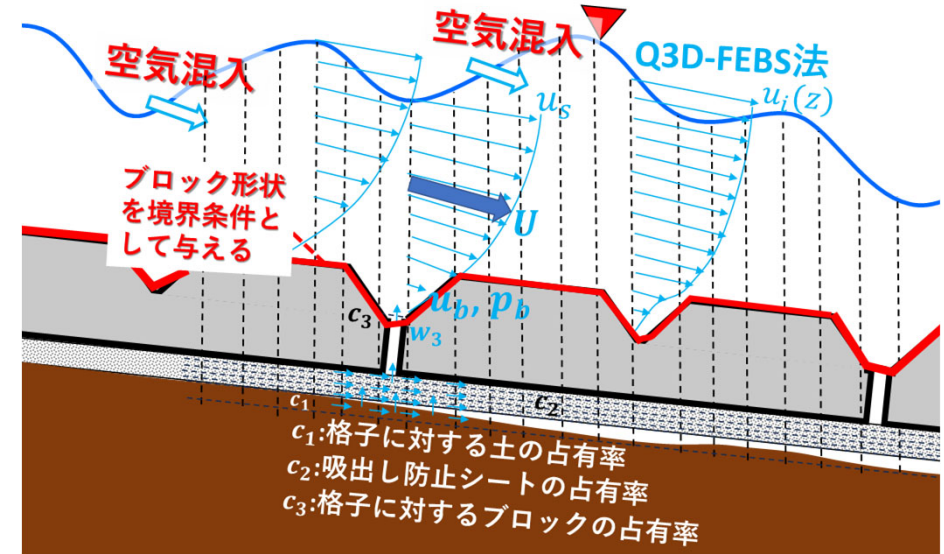
h_w : 水の実質水深,
 C : 空気混入率

混相流の水深: $h = h_w / (1 - C)$ w_3 : 吸出し防止シート・ブロックを通過する鉛直方向流速

流水中の空気に関する連続式

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C u_j}{\partial x_j} = 0$$

気体の非圧縮性を仮定した3次元連続式



水深平均の混相流の運動方程式

ρ_{ave} : 混相流の水深平均密度

$$\frac{\partial U_i h}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j h}{\partial x_j} - u_{bi} w_3 = - \frac{1}{\rho_{ave}} \int_{z_b}^{z_s} \left(\frac{\partial (\rho g (z_s - z) + dp)}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{\rho_{ave}} \frac{\partial \bar{p}' h}{\partial x_i} - \frac{p'_b}{\rho_{ave}} \frac{\partial z_b}{\partial x_i} - \frac{\tau_{bi}}{\rho_{ave}} + \frac{1}{\rho_{ave}} \frac{\partial h T_{ij}}{\partial x_j}$$

水面の混相流の運動方程式

$$\frac{\partial u_{si}}{\partial t} + u_{sj} \frac{\partial u_{si}}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial \rho_s g z_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho_s h} \frac{\partial z_s}{\partial x_i} \frac{\partial p'}{\partial \eta} \bigg|_s + \frac{\nu_{ts}}{\rho_s} \frac{\partial^2 u_{si}}{\partial z^2} \bigg|_s$$

ρ_s : 水面付近の混相流密度
 u_s : 水面の混相流の流速

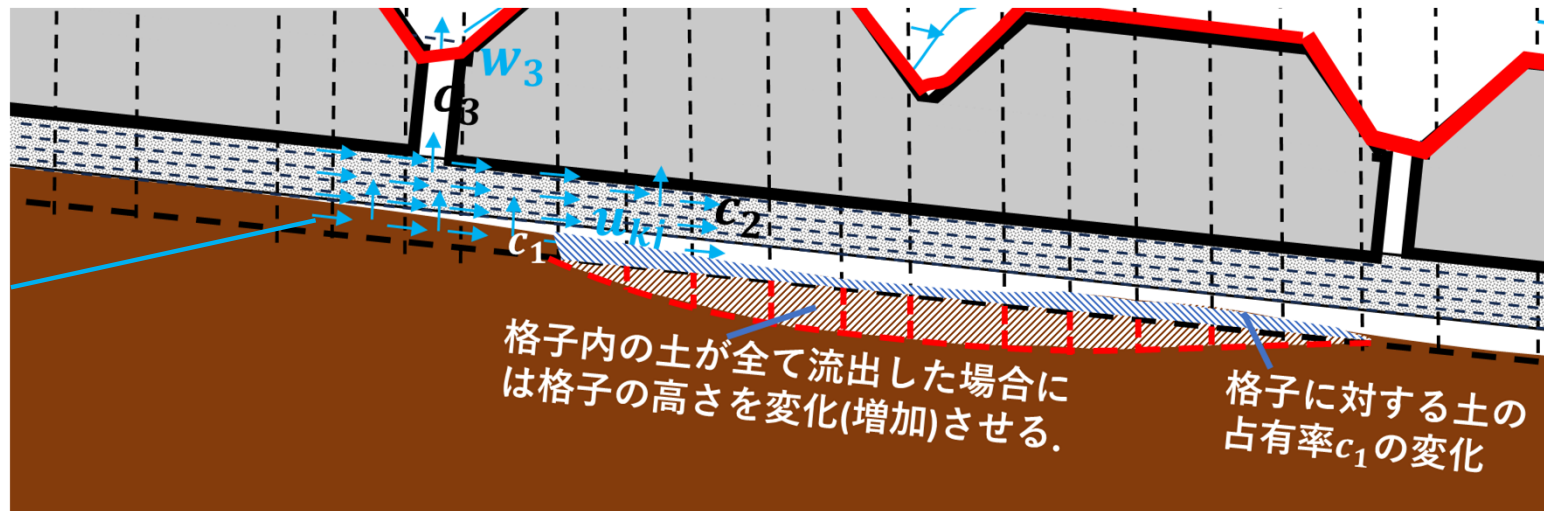
底面の混相流の運動方程式

ρ_b : 底面付近の混相流密度
 u_b : 底面の混相流の流速

$$\frac{\partial u_{bi}}{\partial t} + u_{bj} \frac{\partial u_{bi}}{\partial x_j} + w_3 \frac{\partial u_{bi}}{\partial z} = - \frac{1}{\rho_b} \frac{\partial \rho_b g z_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho_b} \frac{\partial p'_b}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho_b h} \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \frac{\partial p'}{\partial \eta} \bigg|_b + \frac{1}{\rho_b} \frac{\tau_{bi} - \tau_{shi}}{\delta z_b}$$

シート下の隙間の流れによる堤体侵食

土中の流れは
ダルシー則に
より評価



堤体侵食速度 E_p

昨年度までは、堤体材料を砂として扱ってきたが、堤体材料の粘性等を考慮するため、堤体侵食を侵食速度式を用いて評価する。

$$E_p = \beta(|U_1| - u_c)$$

シートと堤体の間隙の流速

u_c : 侵食限界流速, β : 侵食速度係数

侵食された堤体土砂の輸送方程式

侵食された堤体土砂の輸送は移流方程式で評価する。

$$\frac{\partial C_s \delta_1}{\partial t_b} + \frac{\partial u_{1j} C_s \delta_1}{\partial x_j} = E_p - E_d$$

流れの計算よりも大きいdtを使い計算を加速させた

堤体への堆積速度 E_d

堤体への土砂の堆積は干渉沈降速度を用いて評価する。

$$E_d = C_s w_f$$

C_s : 侵食された堤体土砂の濃度, w_f : 干渉沈降速度

堤体の侵食・堆積の評価

格子内に堤体土がある場合、格子内の土砂の占有率を変化させる。

格子内に堤体土が全て流出した場合、格子の高さを変化させる。

$C_1 > 0$ c_1 : 格子に対する堤体土の占有率

$$\delta_1 \frac{\partial C_1}{\partial t_b} = -E_p + E_d$$

$C_1 \leq 0$

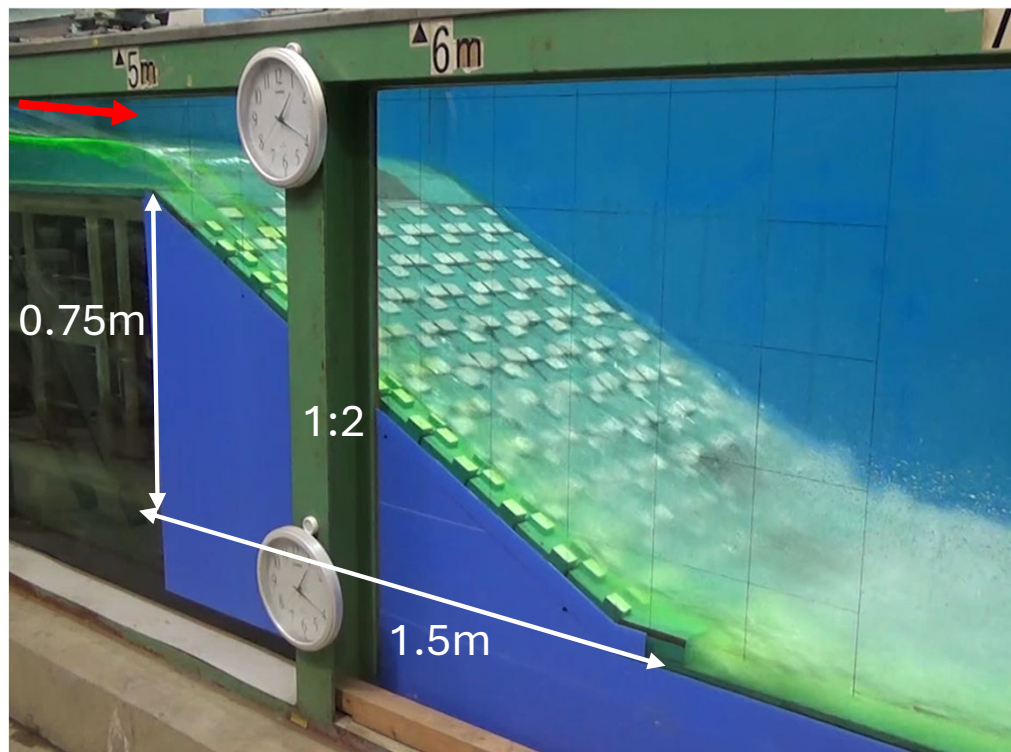
$$\frac{\partial \delta_1}{\partial t_b} = -E_p + E_d$$

3.構築した解析法の検証～接続ブロックと吸出し防止シートの両方が設置された小規模越水実験(R4国総研実施)への適用と流速の検証

接続ブロック＋吸出し防止シートが設置された小規模越水実験の条件

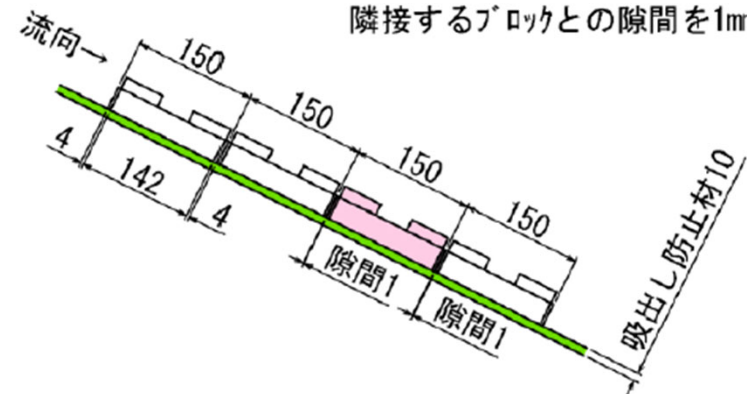
前回の意見交換会において、接続ブロック＋吸出し防止シートの両方が設置された場合について、本解析法の流れ場、圧力場（ブロックに作用する流体力）検証するようにと指摘を受けた。このため、ご指摘を踏まえ、国総研河川研究室より接続ブロック＋吸出し防止シートの両方が設置され、水面付近および吸出し防止シート下の流速が計測された小規模越水実験のデータをご提供頂き、これにより構築した解析法の検証を行った。この実験条件において、尚、ブロックに作用する流体力は計測されていなかったため、この実験条件下での圧力場（ブロックに作用する流体力）検証は出来ていない。

R4年度小規模越水実験 (国総研実施(越流水深20cm))

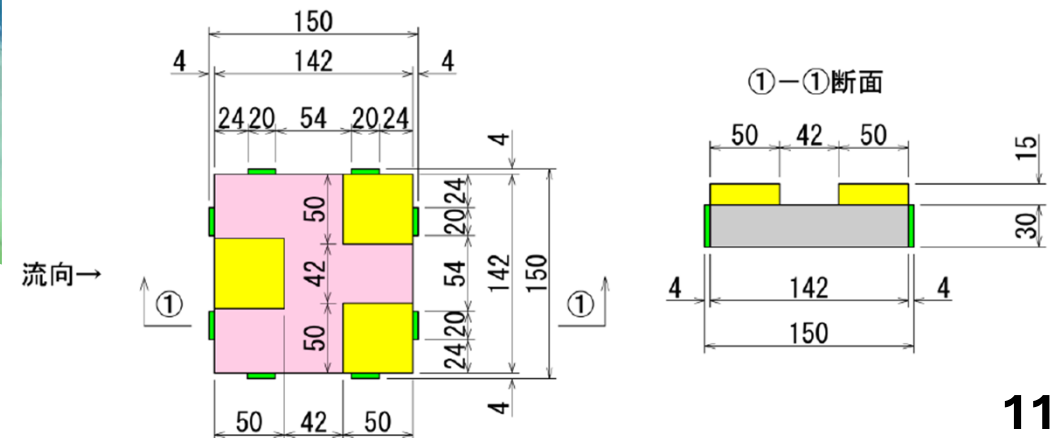


接続ブロックおよび吸出し防止シートの諸元

隣接するブロックとの隙間を1mm

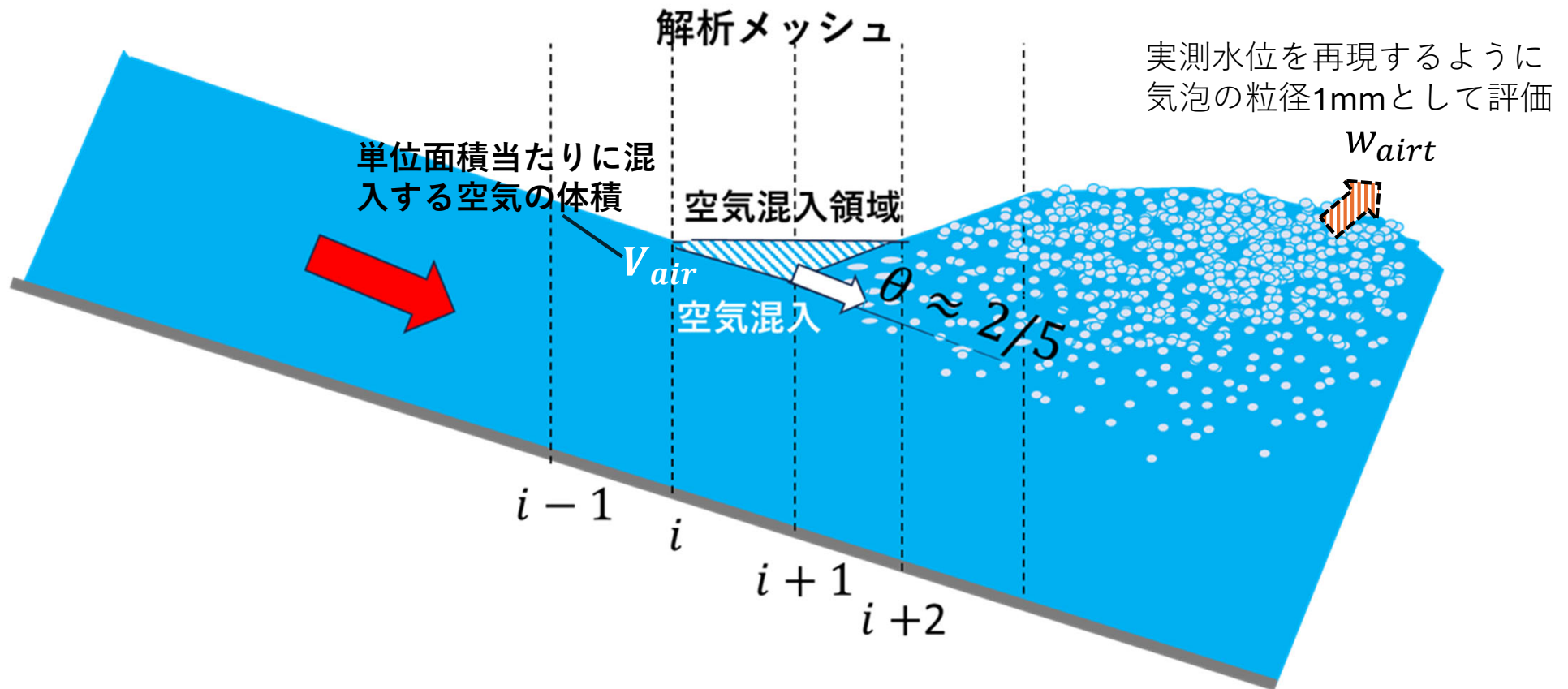


吸出し防止材（ニードフルマット）
空隙率：0.91



本解析における空気混入条件の変更

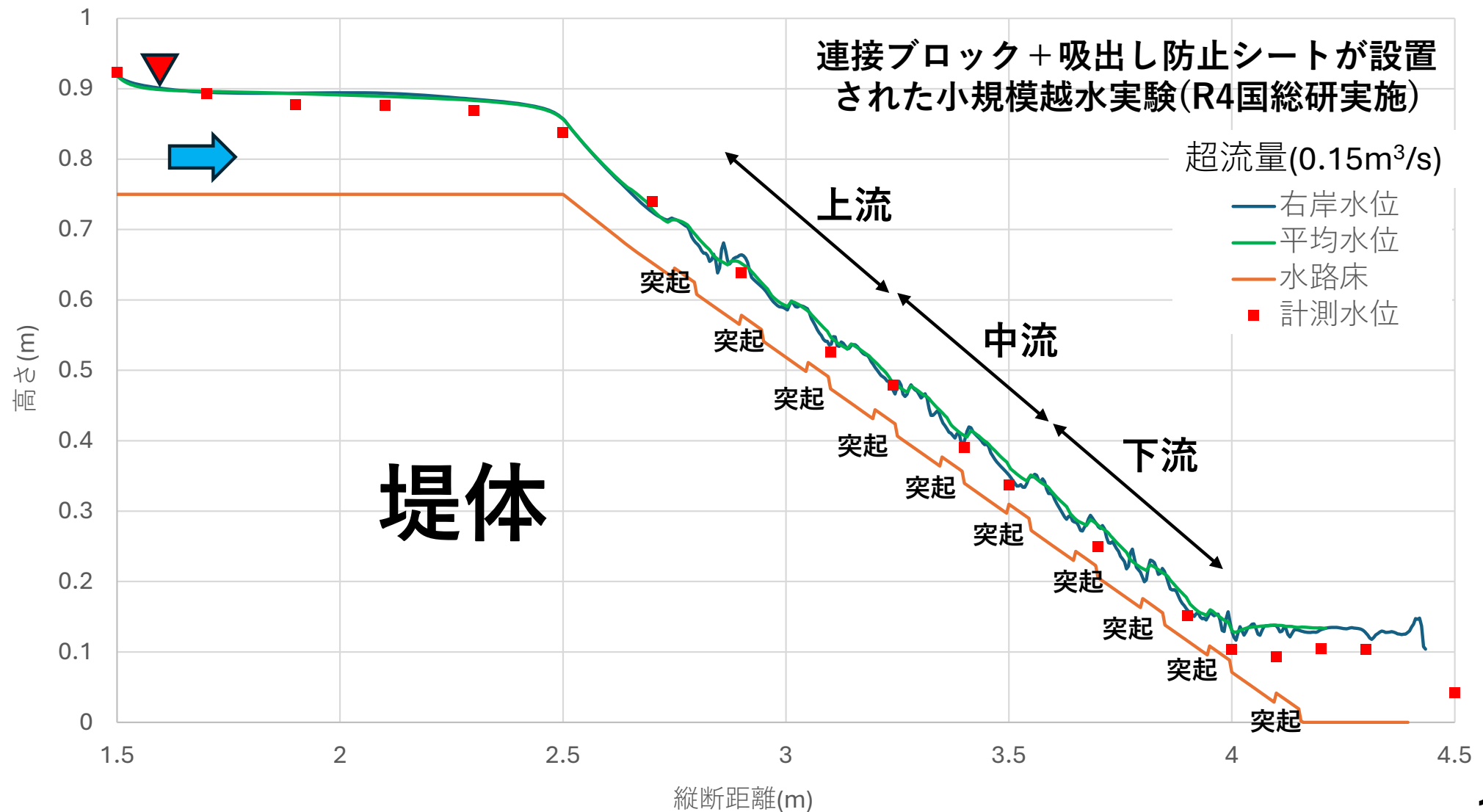
本研究では、水面勾配の最急勾配を計算し、R3小規模越流実験値を再現するように水面勾配2/5で、 $Fr > 2.5$ 以上の場合(N. Rajaratnam(1967)¹⁾²⁾)に空気混入するものとした。単位面積・単位時間当たりの空気混入量は、 V_{air} に水面流速 u_{si} を掛けた空気混入フラックスで評価することとした。水中の空気に関する移流方程式のプログラムのバグを修正した。



- 1) N. Rajaratnam : Hydraulic Jumps, Advances in Hydrosience, Vol.4, p.p.197-280, 1967.
- 2) H.Chanson : Air Bubble Entrainment in Free-Surface Turbulent Shear Flows, Academic Press, 2012.

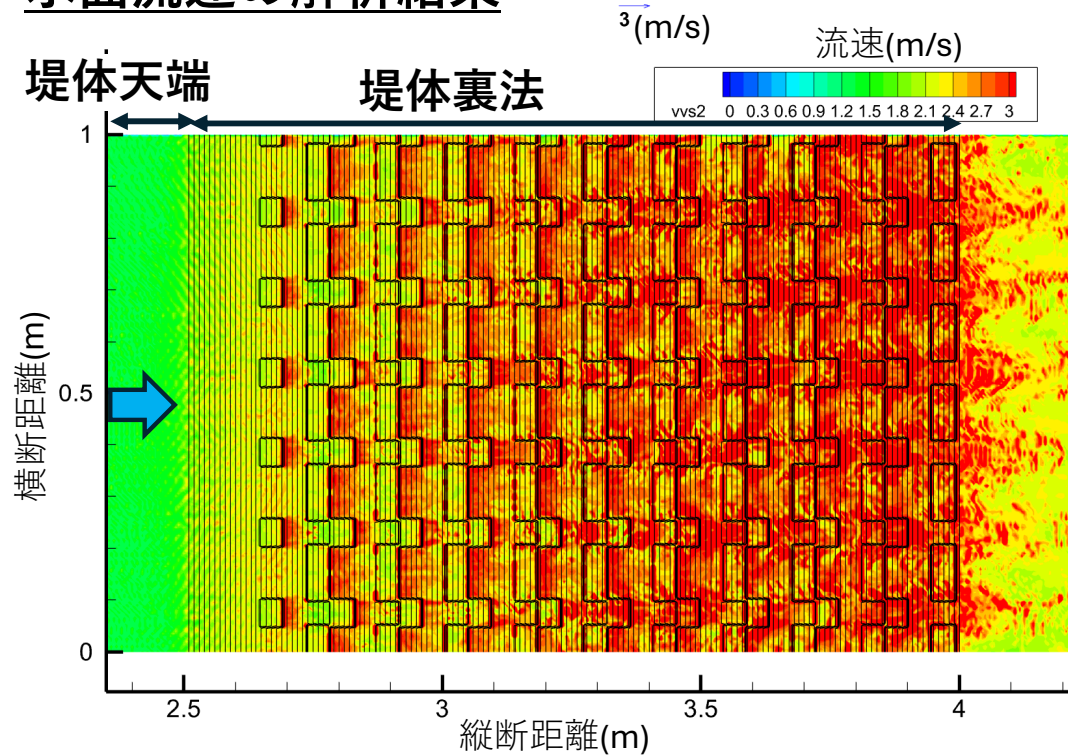
構築した解析法による水面形の解析結果と実験値の比較

- 水位は、右岸側の側面のアクリル越しに写真及び目視等によって計測されている。
(アクリル板には距離が分かる様に一定間隔でのメッシュが書かれている)
- 解析結果は裏法部において、概ね計測水位を再現している。

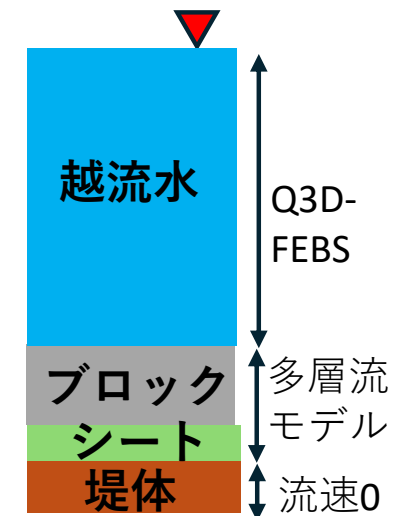
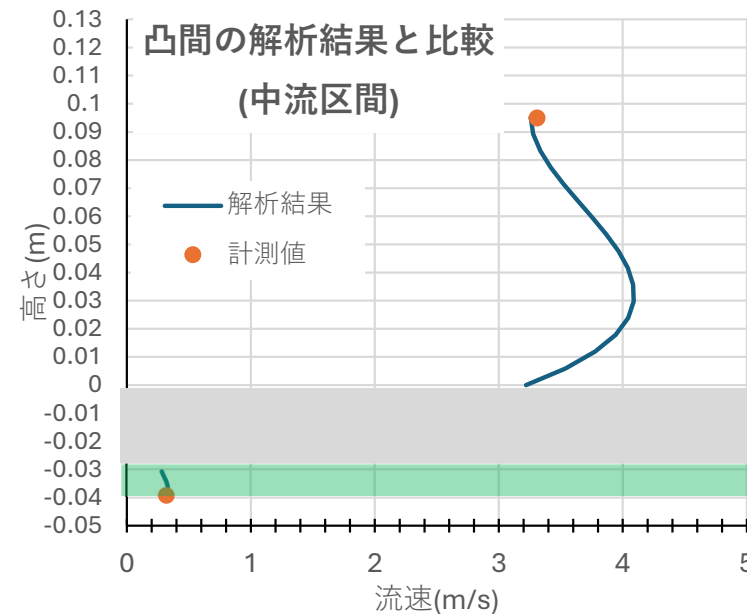
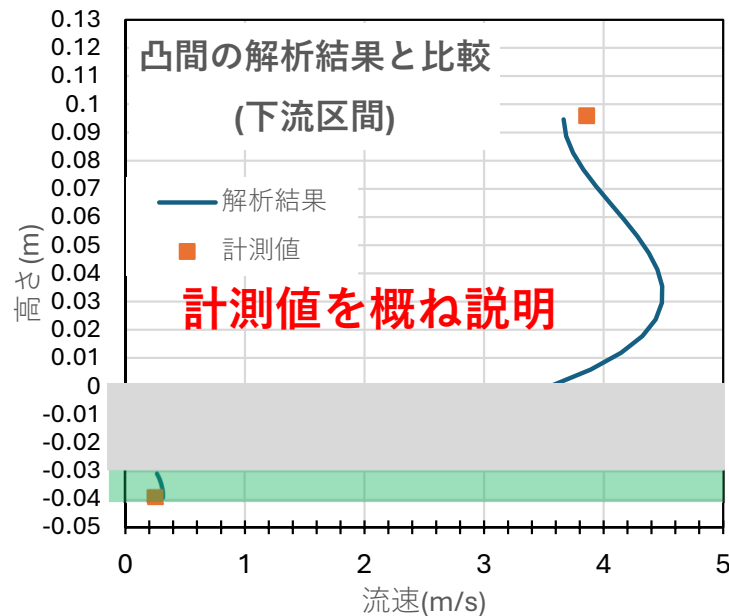
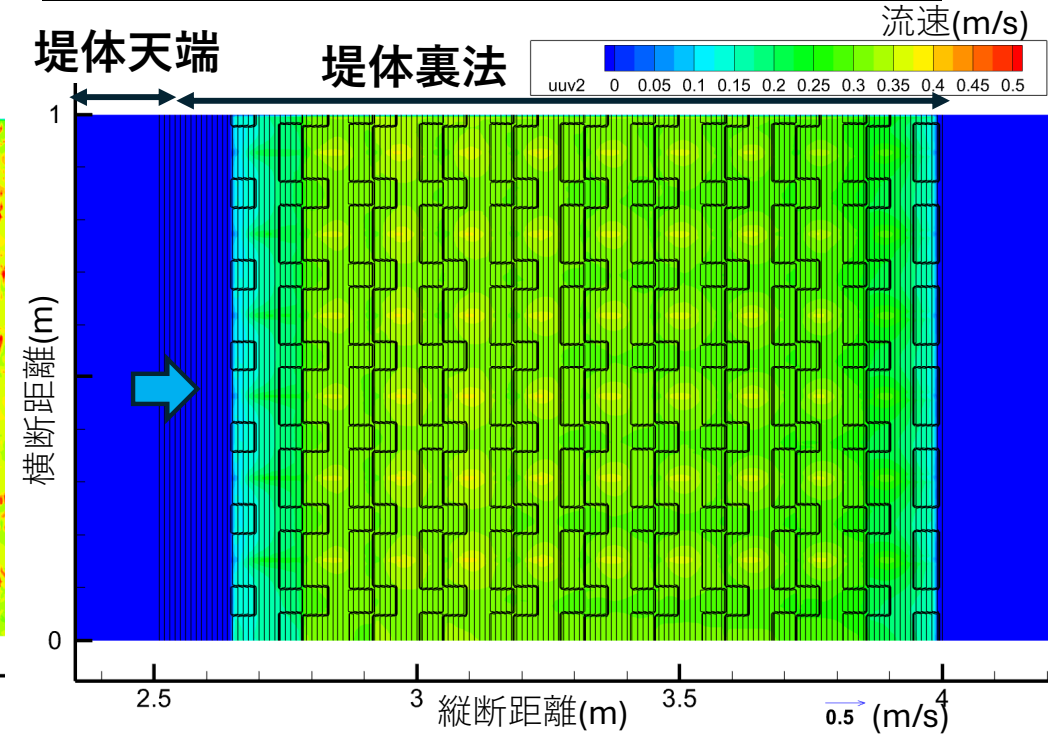


構築した解析法による流速鉛直分布の解析結果と実験値の比較

水面流速の解析結果



吸出し防止シート下の流速の解析結果

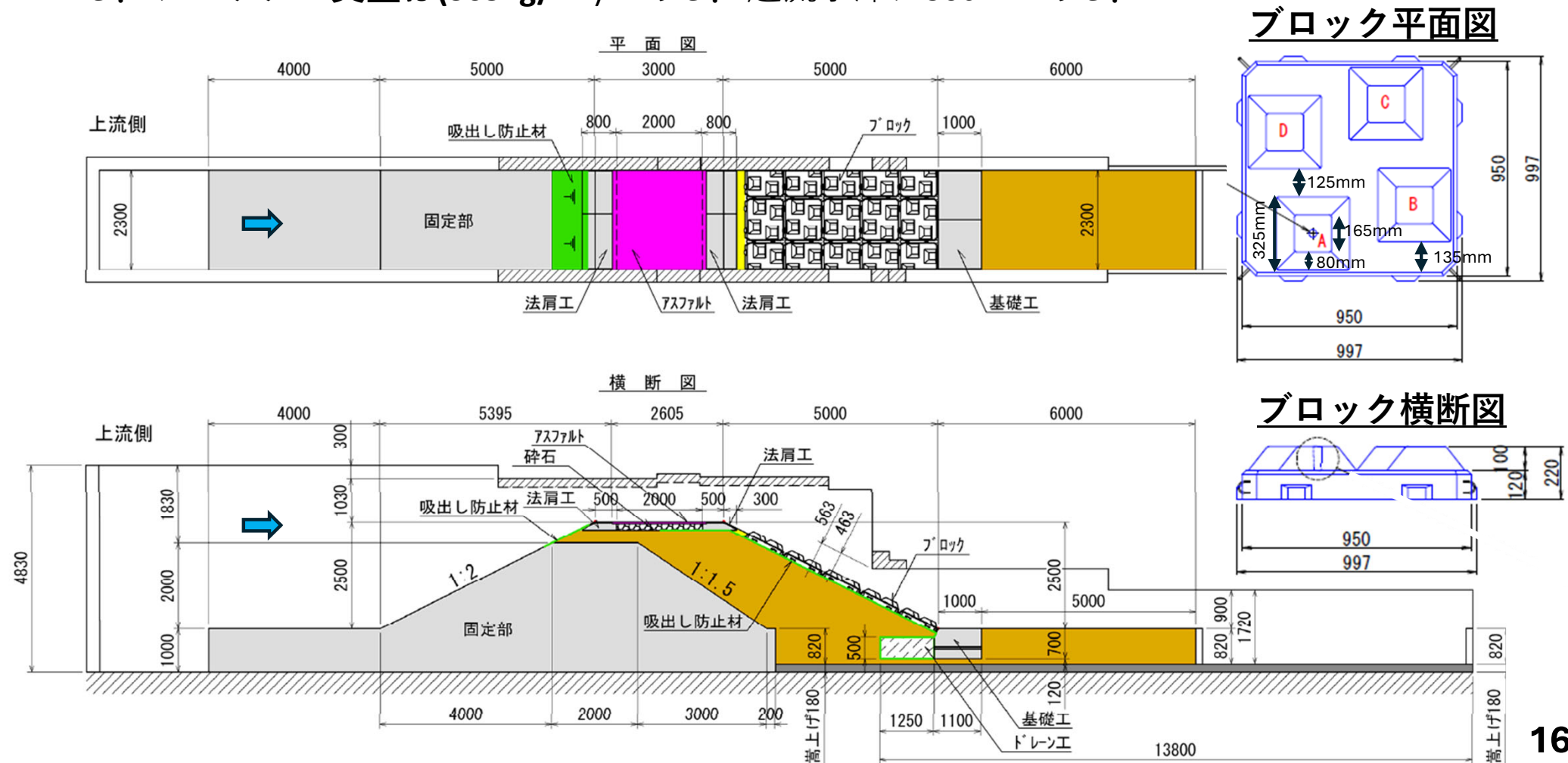


4. 接続ブロック及び吸出し防止シートが設置され、初期の堤体にガリ（溝）が設置された大規模模型実験(R5年度実施)とガリが無い場合の大規模模型実験(R5年度実施)への適用と比較検証

接続ブロック及び吸出し防止シートが設置され、初期の堤体にガリ（溝）が設置された場合とガリ（溝）が設置されていない場合の大規模模型実験(R5年度実施)の条件

構築した解析法を、接続ブロック及び吸出し防止シートの両方が設置され、初期の堤体にガリ（溝）が設置された場合とガリ（溝）が設置されていない場合の大規模模型実験に適用し、堤体侵食過程についてを検証する。

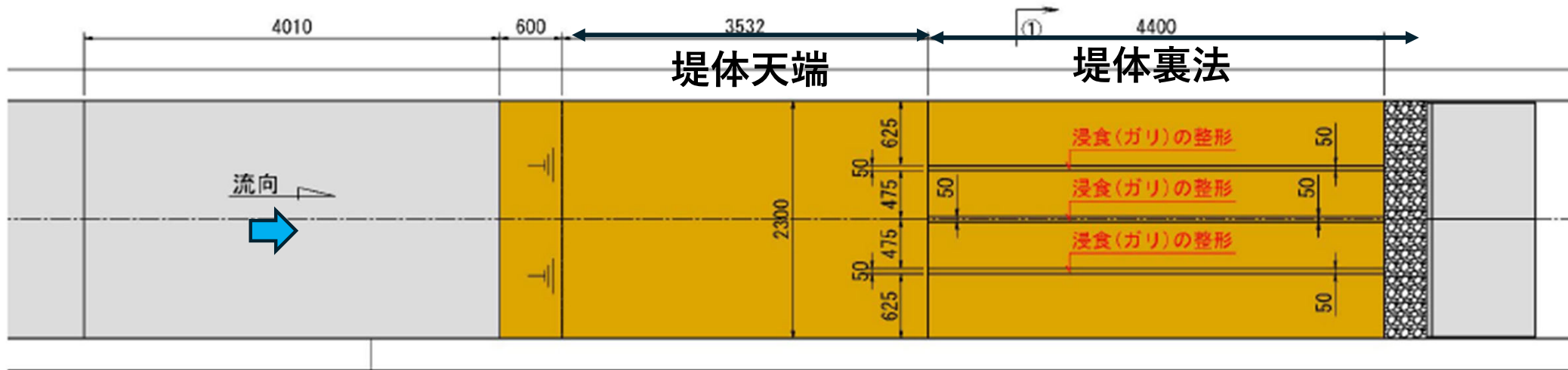
水路は高さ4.8m、幅2.3mであり、下図に示す**天端幅2m**、**堤防高2.5m**、**裏法面勾配2割**の堤防模型が設置されている。天端保護工にはアスファルト舗装、法肩保護工には法肩ブロック、裏法保護工には河川護岸用の**吸出し防止材（厚さ10mm）**、**粗度高さ100mmの接続ブロック**が設置されている。ブロックの**質量は(305kg/m²)**である。越流水深は30cmである。



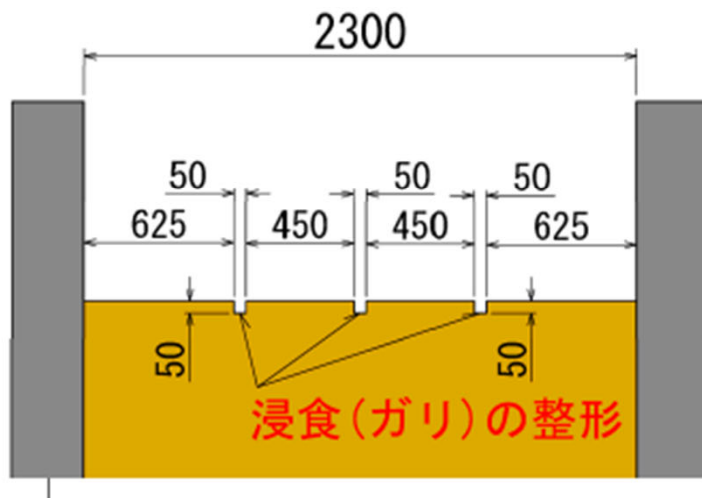
接続ブロック及び吸出し防止シートが設置され、初期の堤体にガリ（溝）が設置された大規模模型実験(R5年度実施)の条件

堤体のガリ（溝）形状

初期に堤体裏法部に幅50mm×深さ50mmのガリ（溝）を、下記のように、3本設置されている。



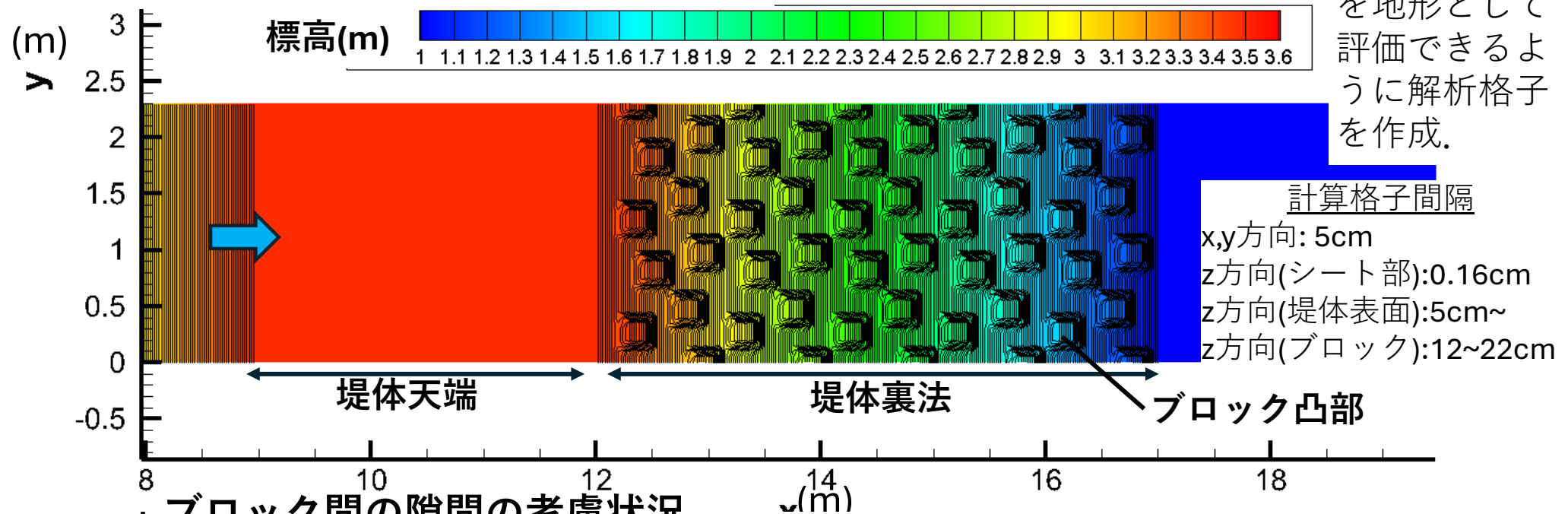
①－①断面図



ガリ（溝）設置後直後

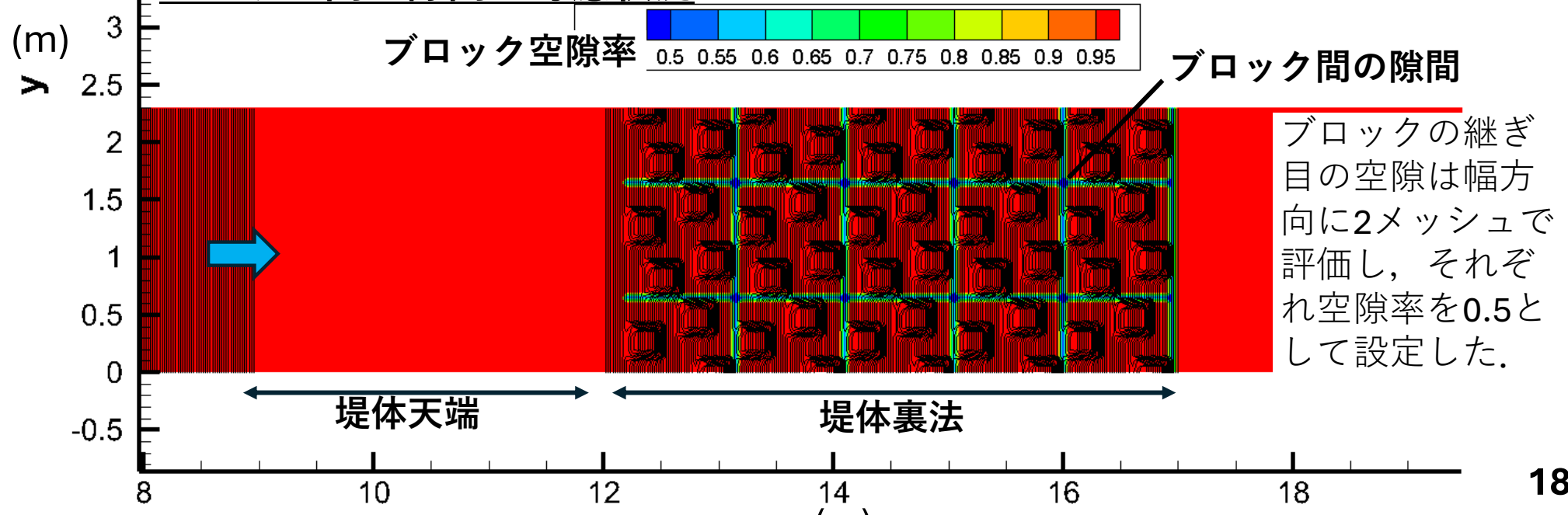
本解析における初期の堤体形状および接続ブロック設置状況 (R5年度大規模模型実験)

初期の堤体形状・接続ブロックの凹凸形状



ブロック形状を地形として評価できるように解析格子を作成。

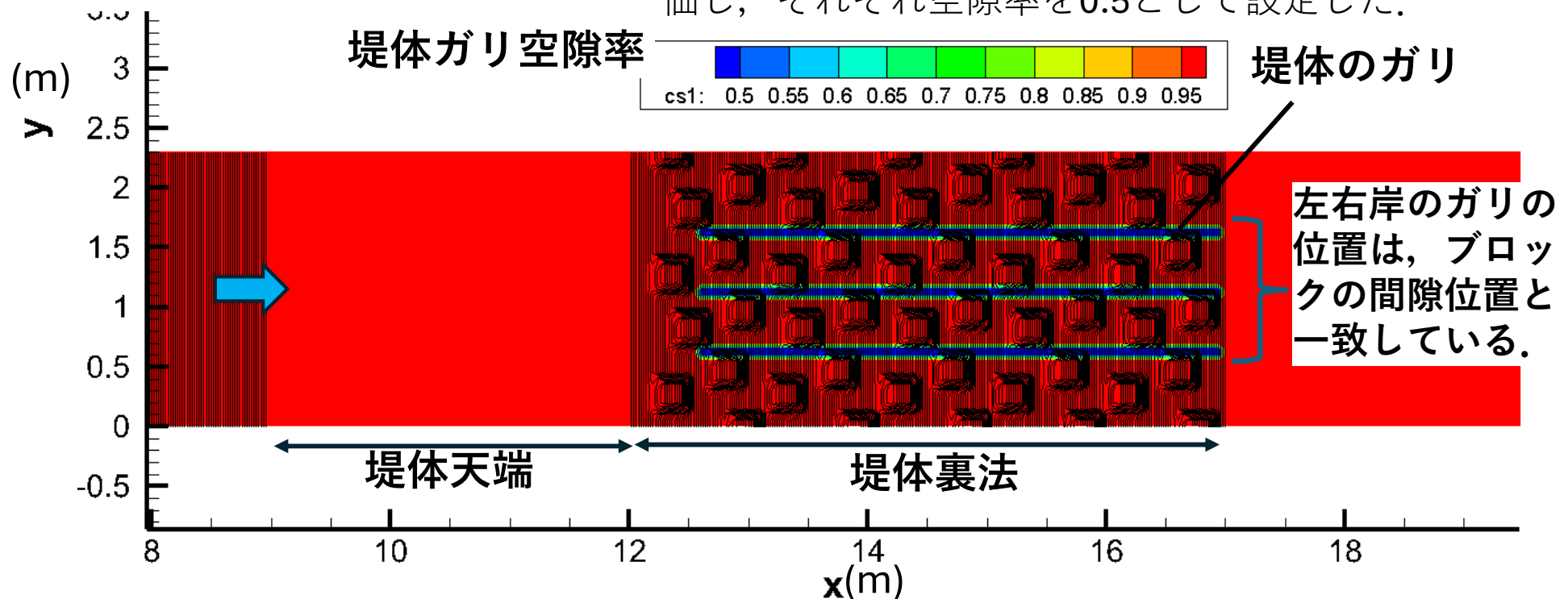
ブロック間の隙間の考慮状況



解析における初期の堤体形状およびガリ(溝)の設置状況 (R5年度大規模模型実験)

ブロック下のガリ(溝)の考慮状況

堤体のガリ(溝)については、幅方向に2メッシュで評価し、それぞれ空隙率を0.5として設定した。



その他解析条件

- 越流水深：30cm
 - 下流端水深：12cm
 - 堤体の材料の代表粒径：0.8mm
 - シートの空隙率：0.09
 - シートの抵抗(K :透過係数)：0.5(m/s)
 - 侵食限界流速 u_c ：0.3(m/s)
 - 侵食速度係数 β ：0.00006
- 実験計測値
- 実験の堤体・シート材料
- 昨年度の検討で決定
- 既往文献¹⁾を参考に設定、今後感度分析を行う。

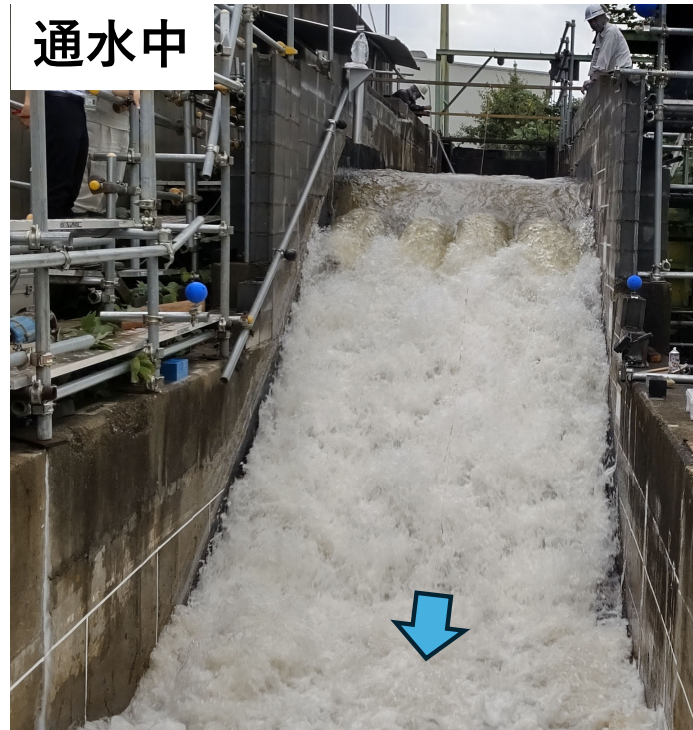
1) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，森北出版，2005

R5年度大規模模型実験の通水1回目の状況(実測値)

通水前



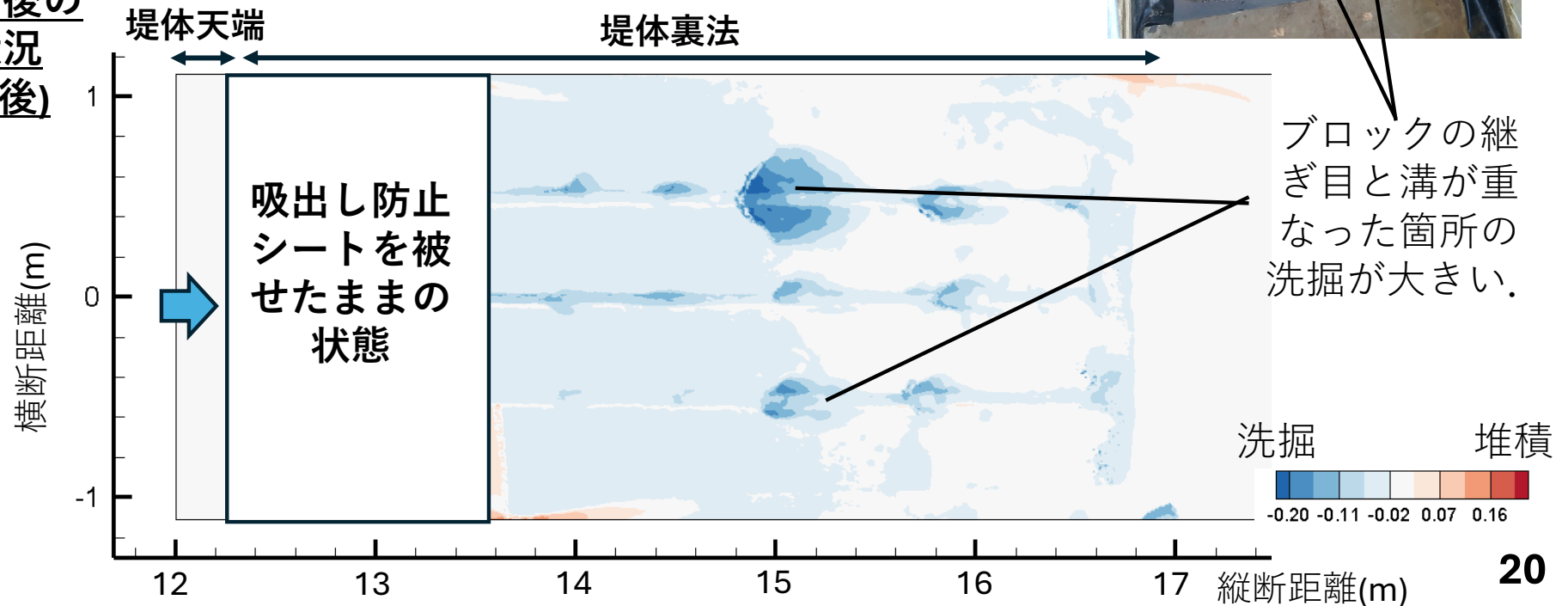
通水中



通水後の堤体洗掘状況
(通水30分後)



実測の通水前後の
堤体洗掘状況
(通水30分後)



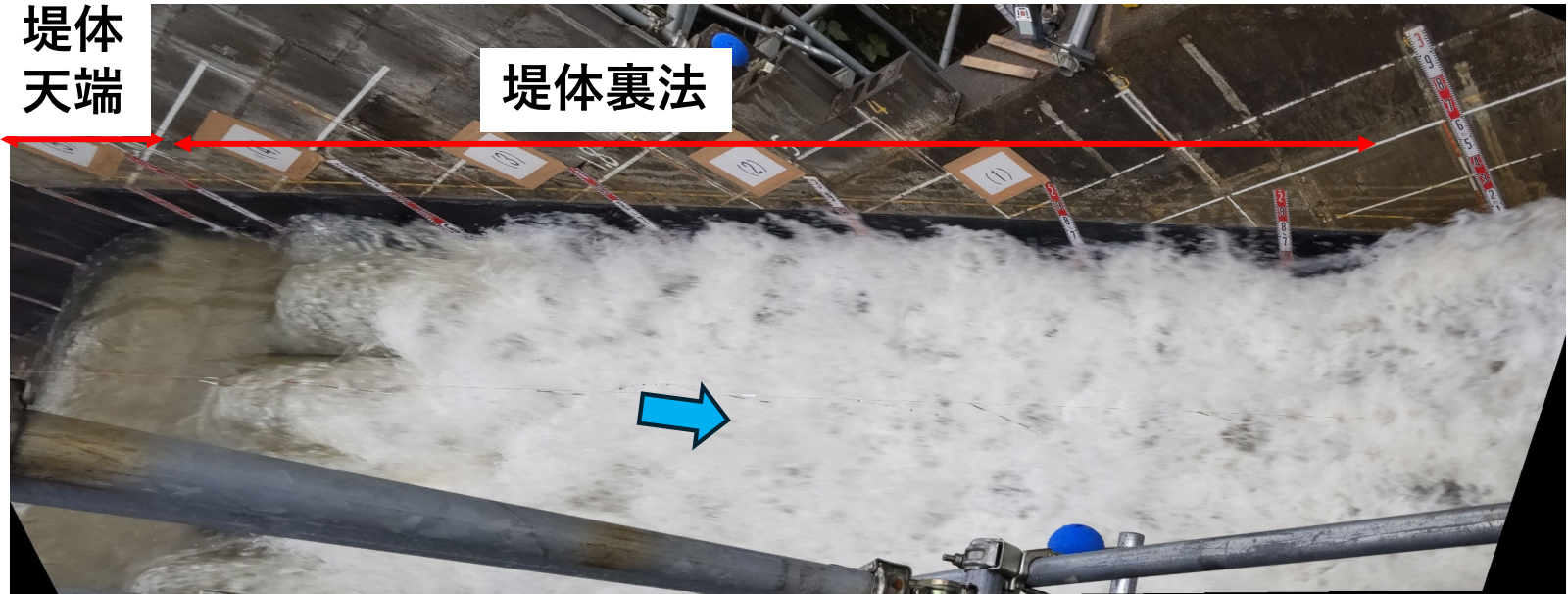
計測と解析の水位縦断分布の比較

水位計測地点の様子

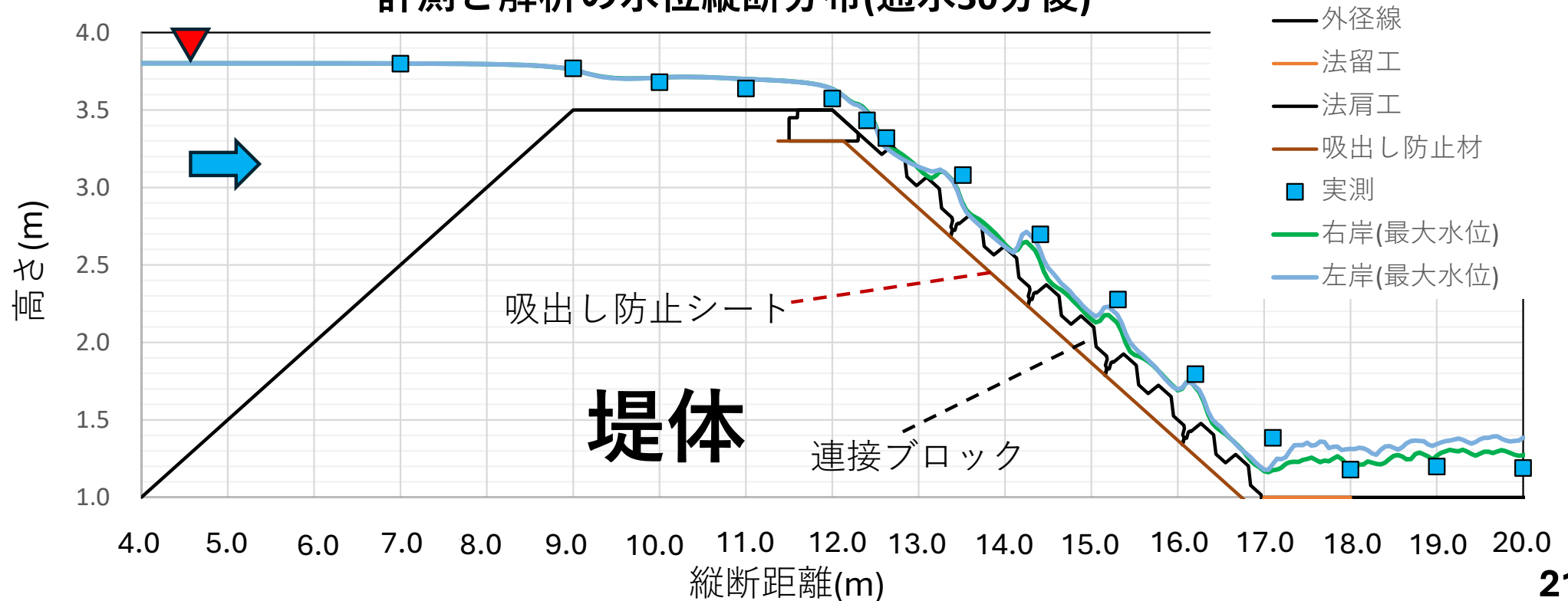
左岸側で計測されている

堤体天端

堤体裏法

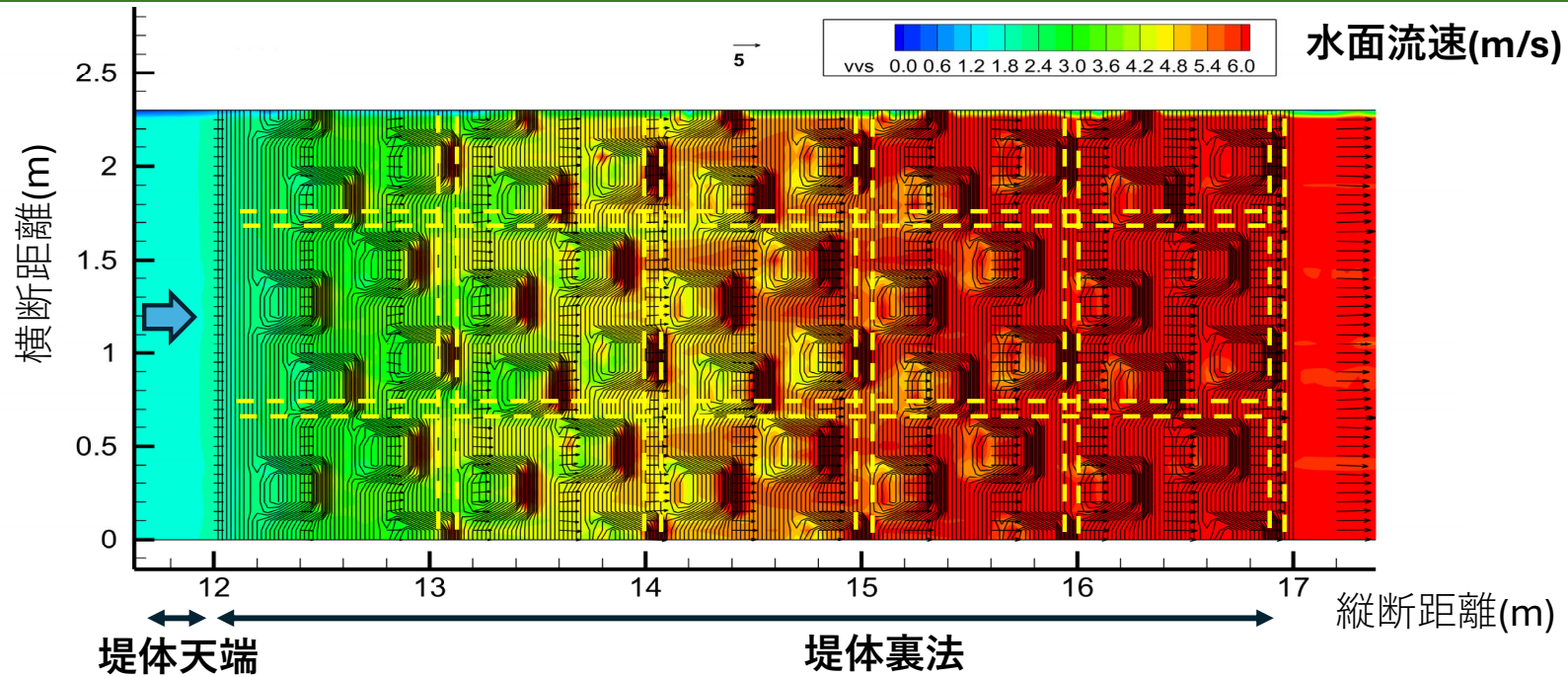


計測と解析の水位縦断分布(通水30分後)

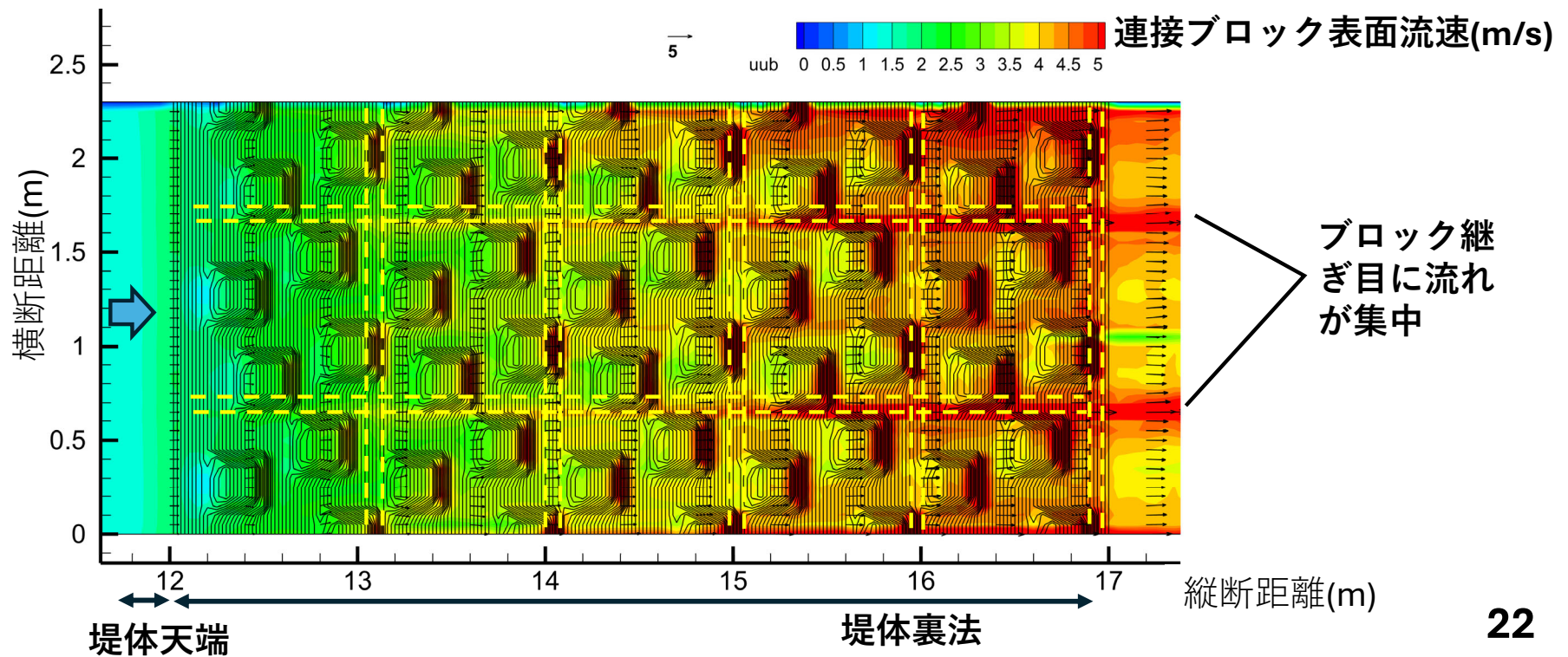


通水15分後における水面流速および接続ブロック表面流速分布

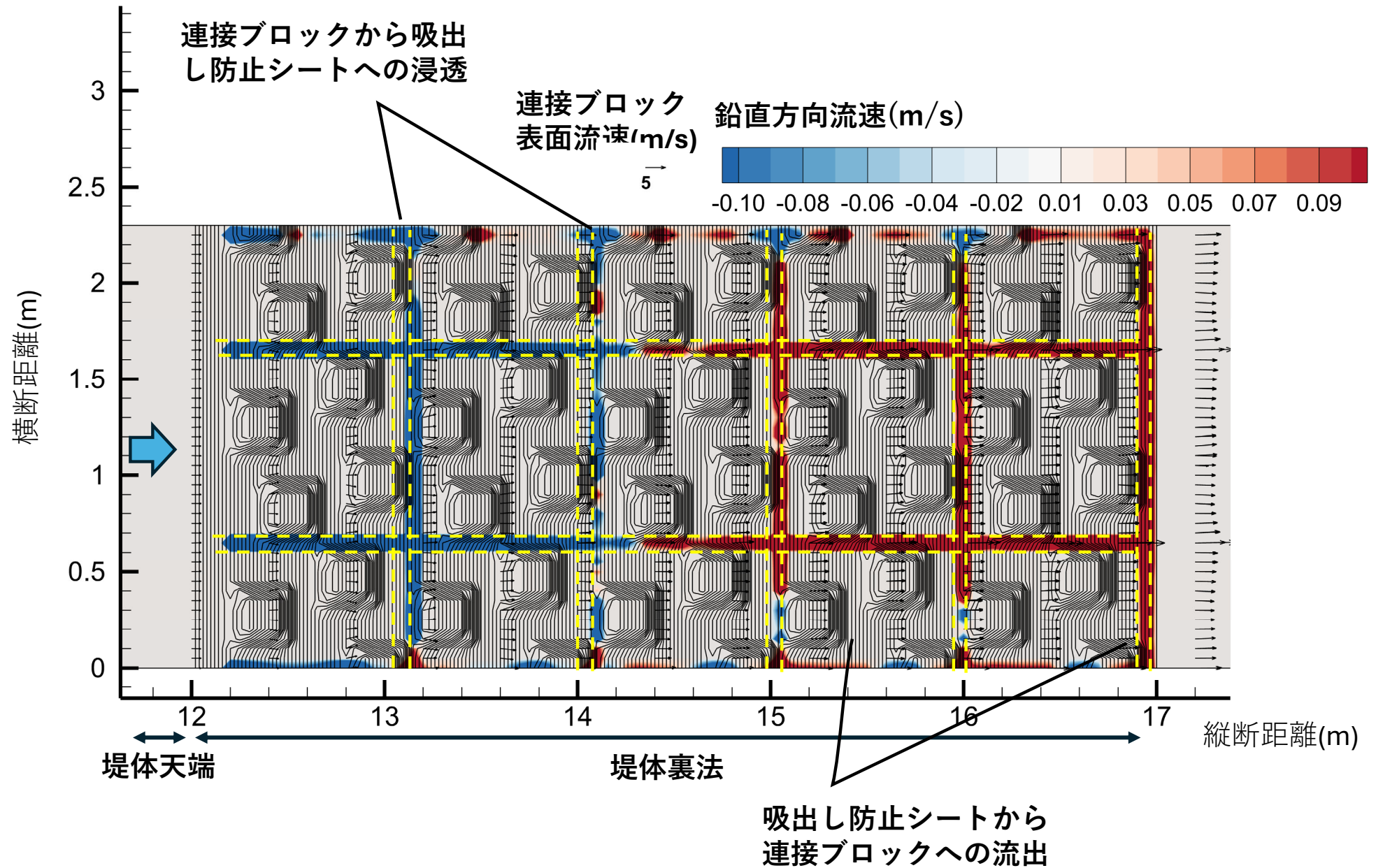
水面流速



接続ブロック
ク表面流速

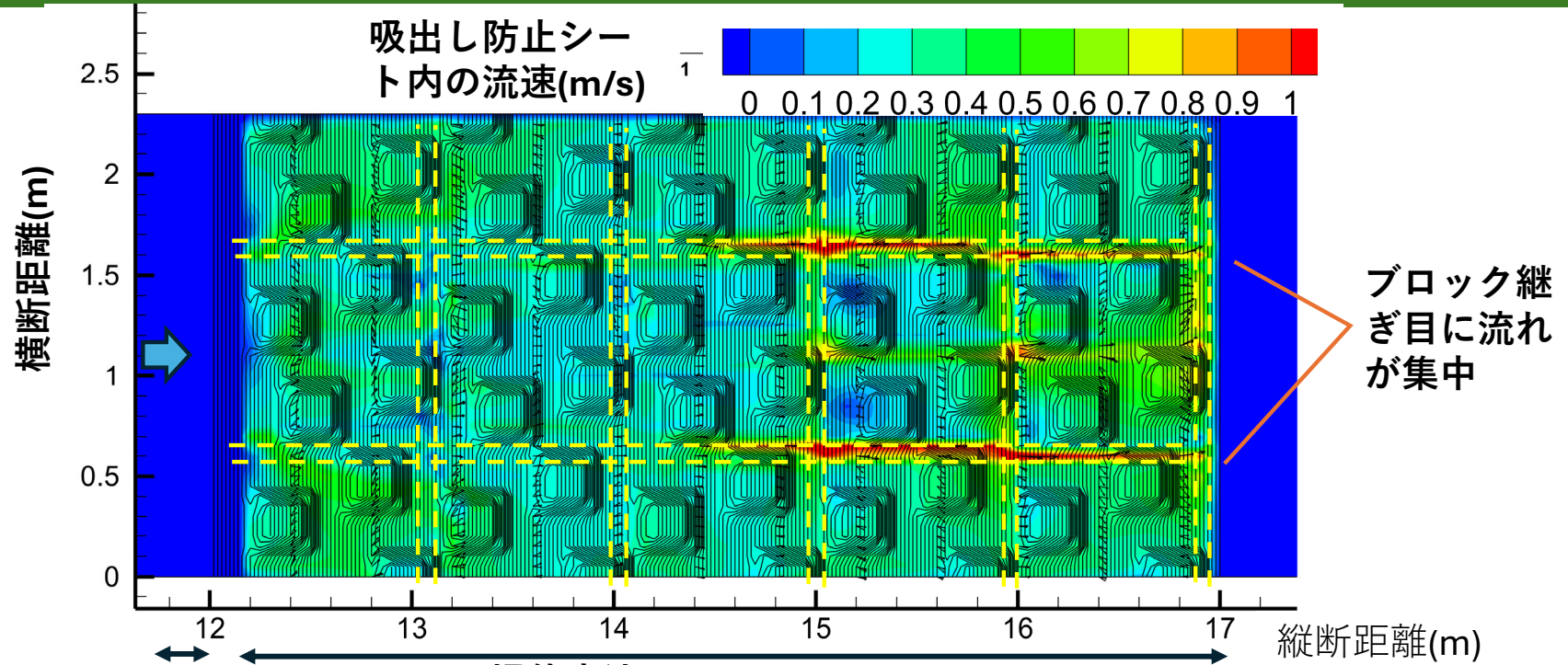


通水15分後における接続ブロック表面から吸出し防止シートに通過する鉛直方向流速分布

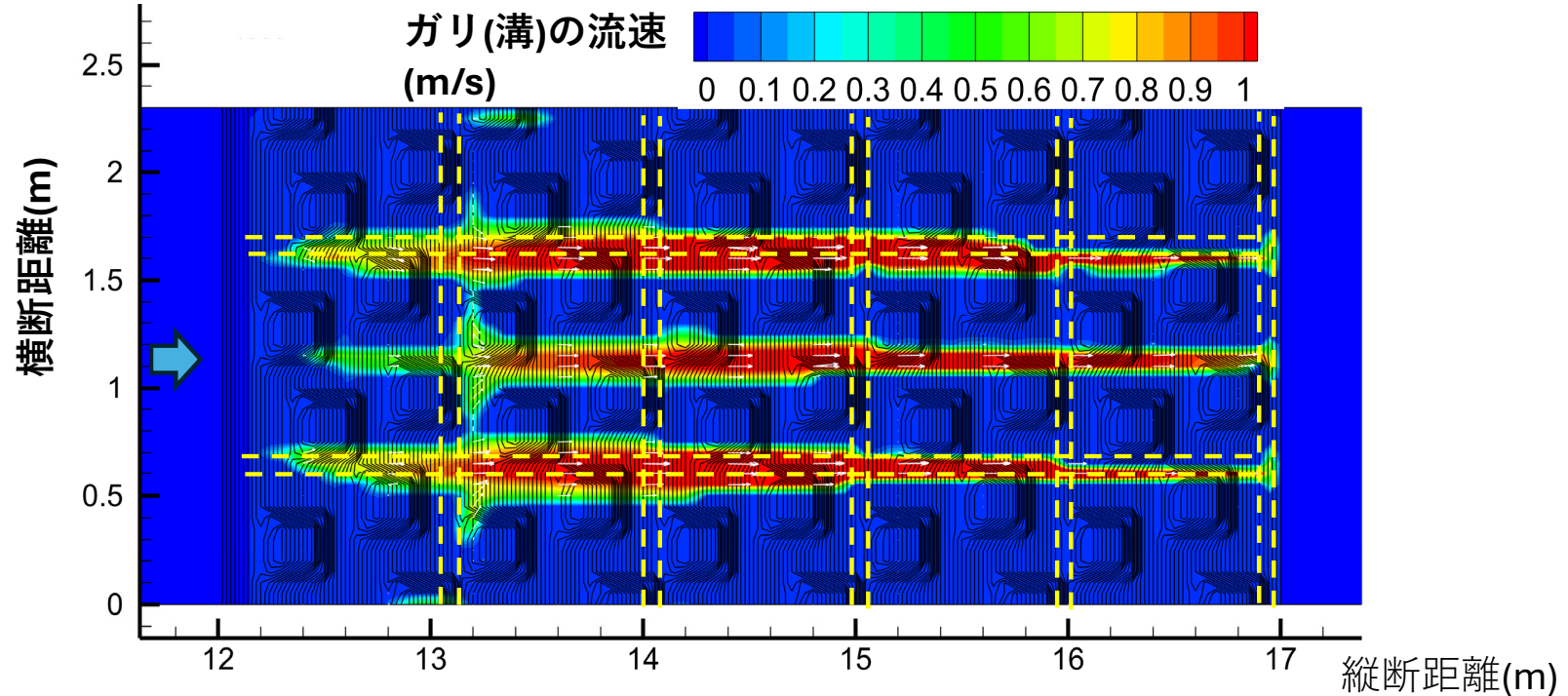


通水15分後における吸出し防止シート最下層とシート下のガリ(溝)の流速分布

吸出し防止
シート最下
層の流速

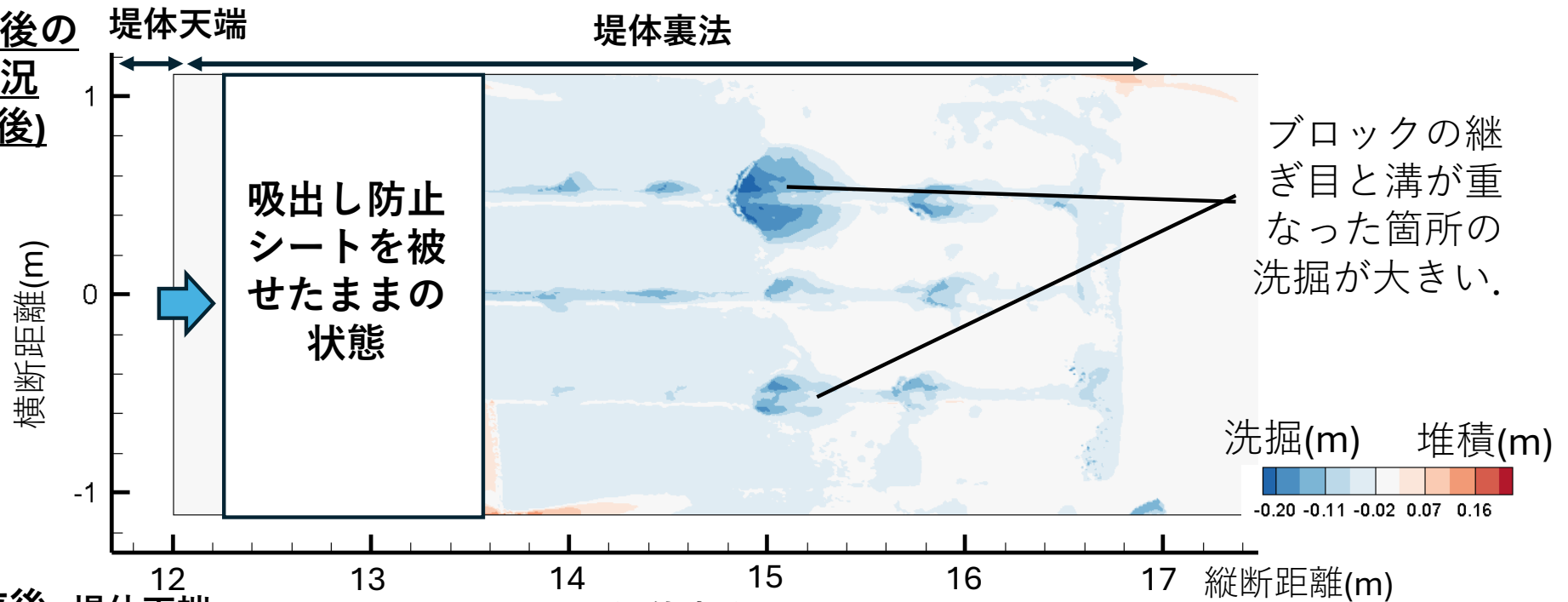


シート下の
ガリ(溝)の
流速分布

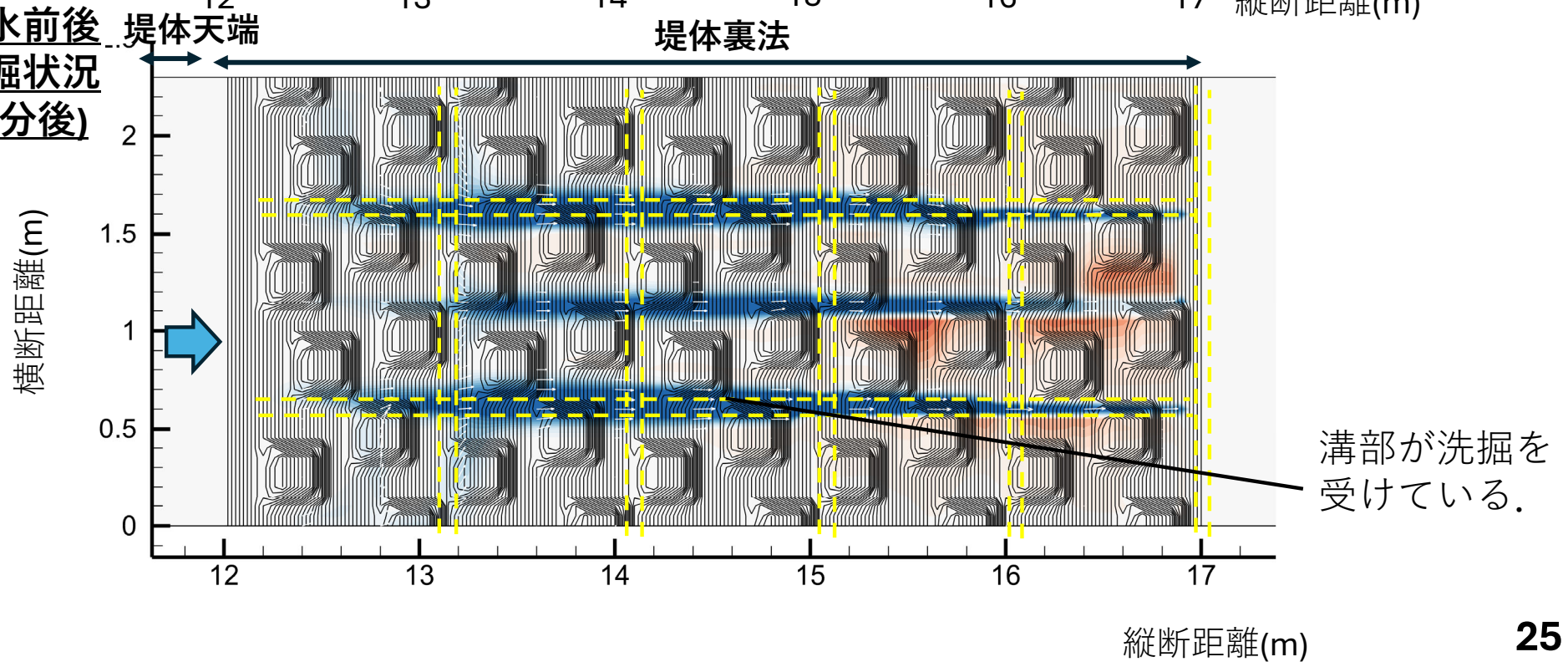


堤体裏法部の侵食の実測値と解析結果の比較（通水30分後）

実測の通水前後の
堤体洗掘状況
(通水30分後)

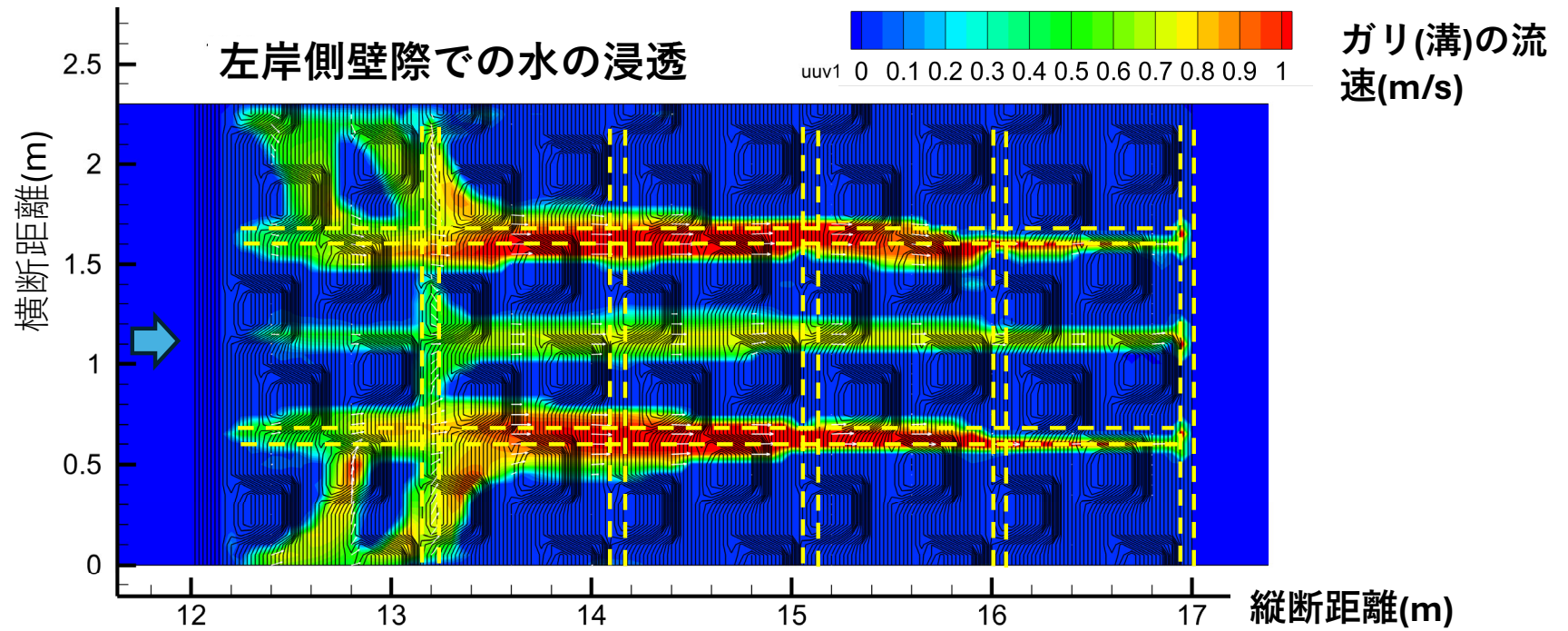


解析の通水前後
の堤体洗掘状況
(通水30分後)

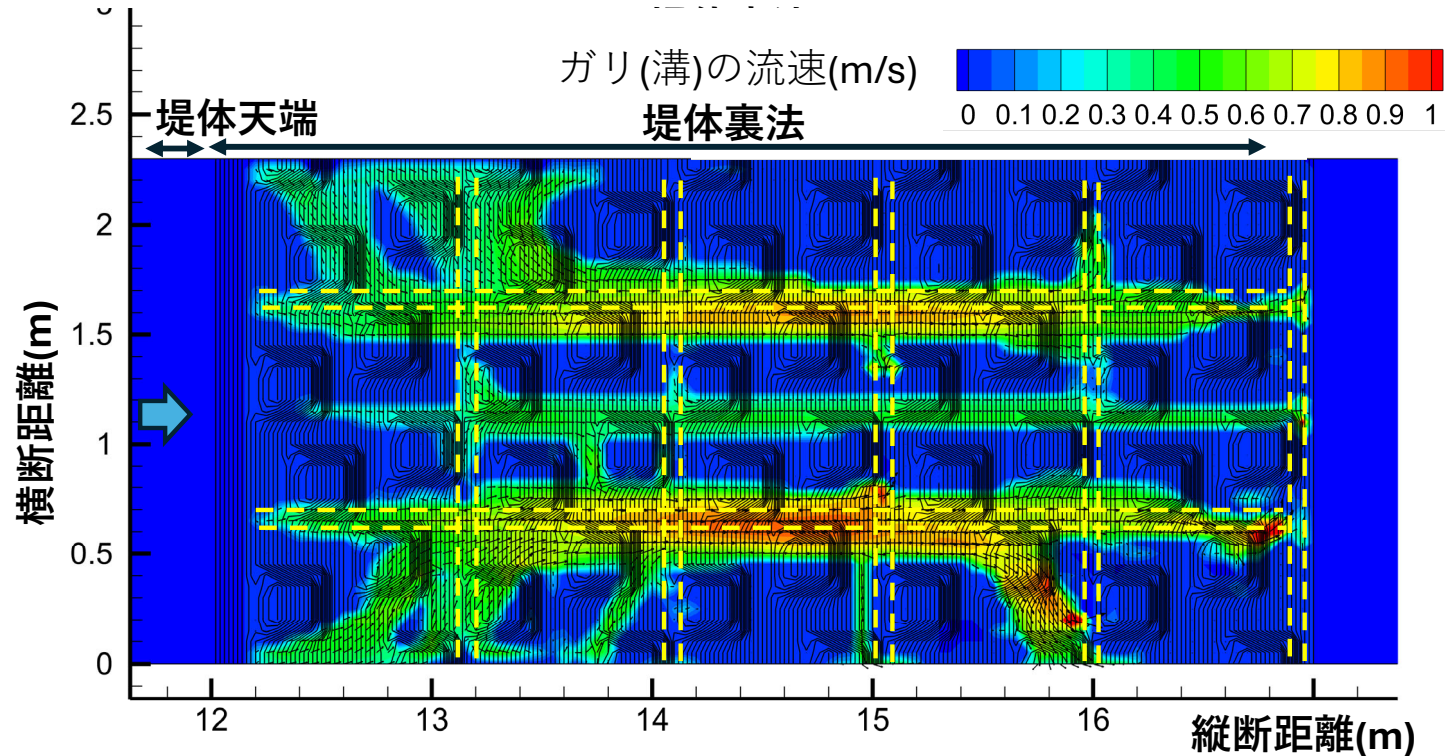


通水30分後、通水60分後における吸出し防止シート下のガリ(溝)の流速分布

通水30分後

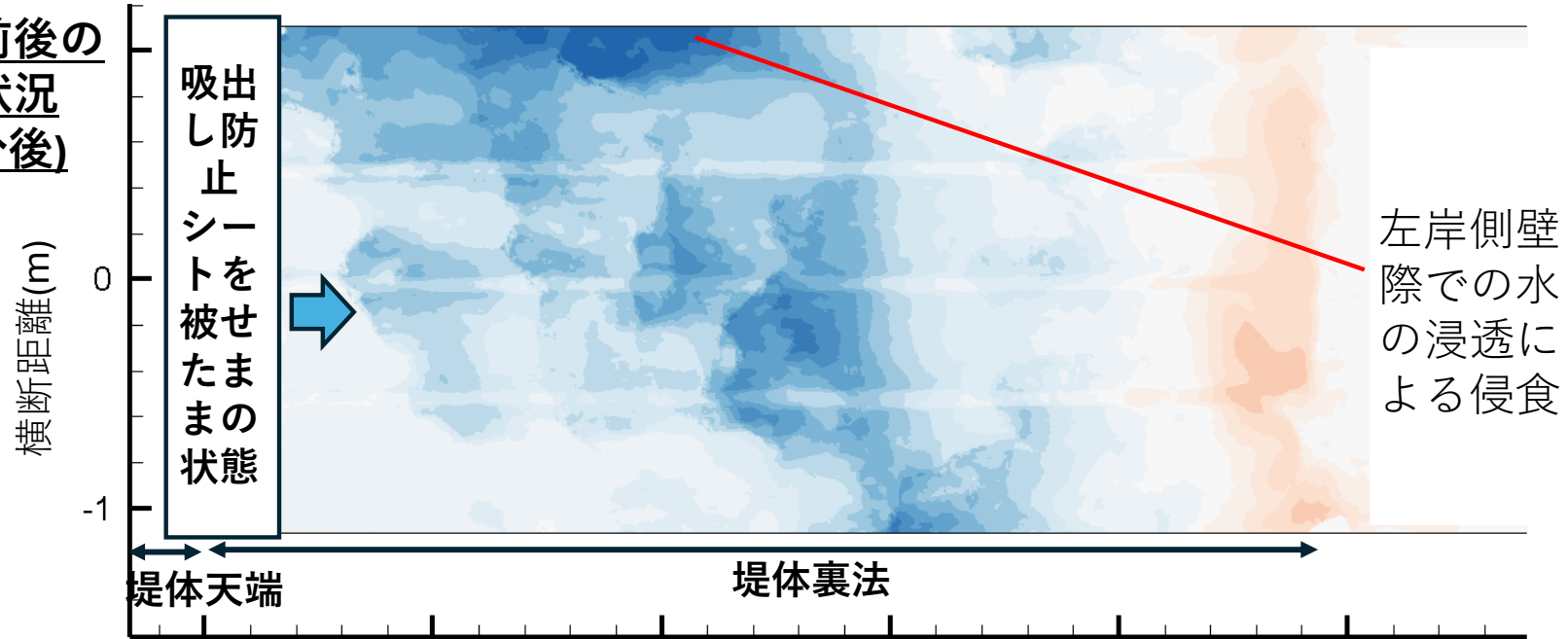


通水60分後

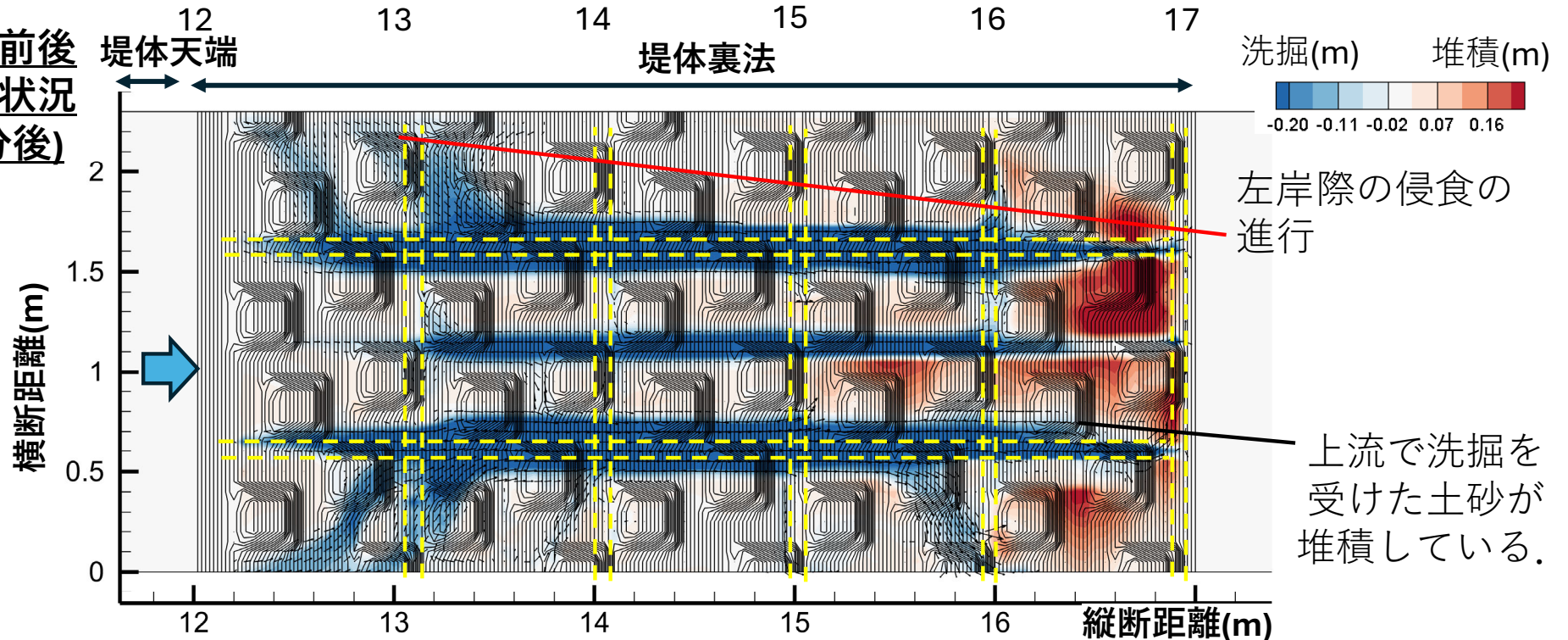


堤体裏法部の侵食の実測値と解析結果の比較（通水60分後）

実測の通水前後の
堤体洗掘状況
(通水60分後)



解析の通水前後の
堤体洗掘状況
(通水60分後)



連接ブロック下面に作用する圧力分布の解析結果(通水15分後)

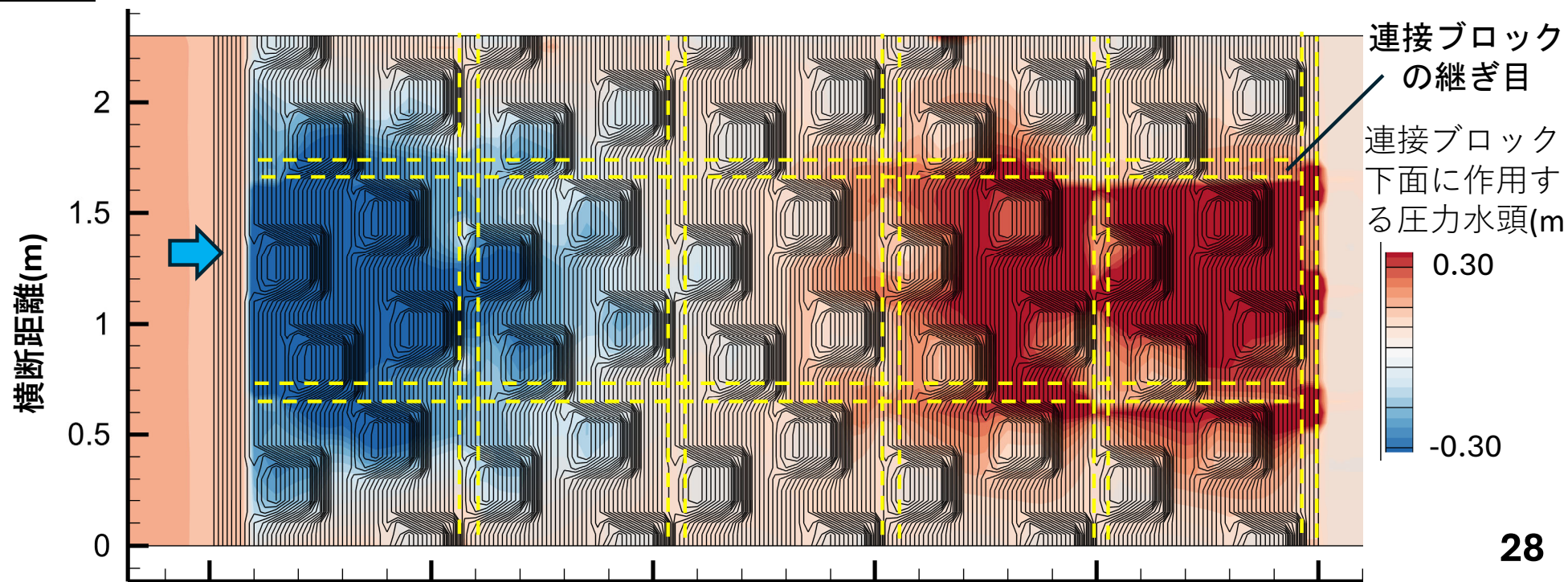
堤体裏法部：5m

連接ブロック
の配置状況

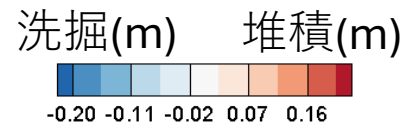


ブロック
の質量：
 305kg/m^2
 305kg/1個

連接ブロック
下面に作用す
る圧力分布

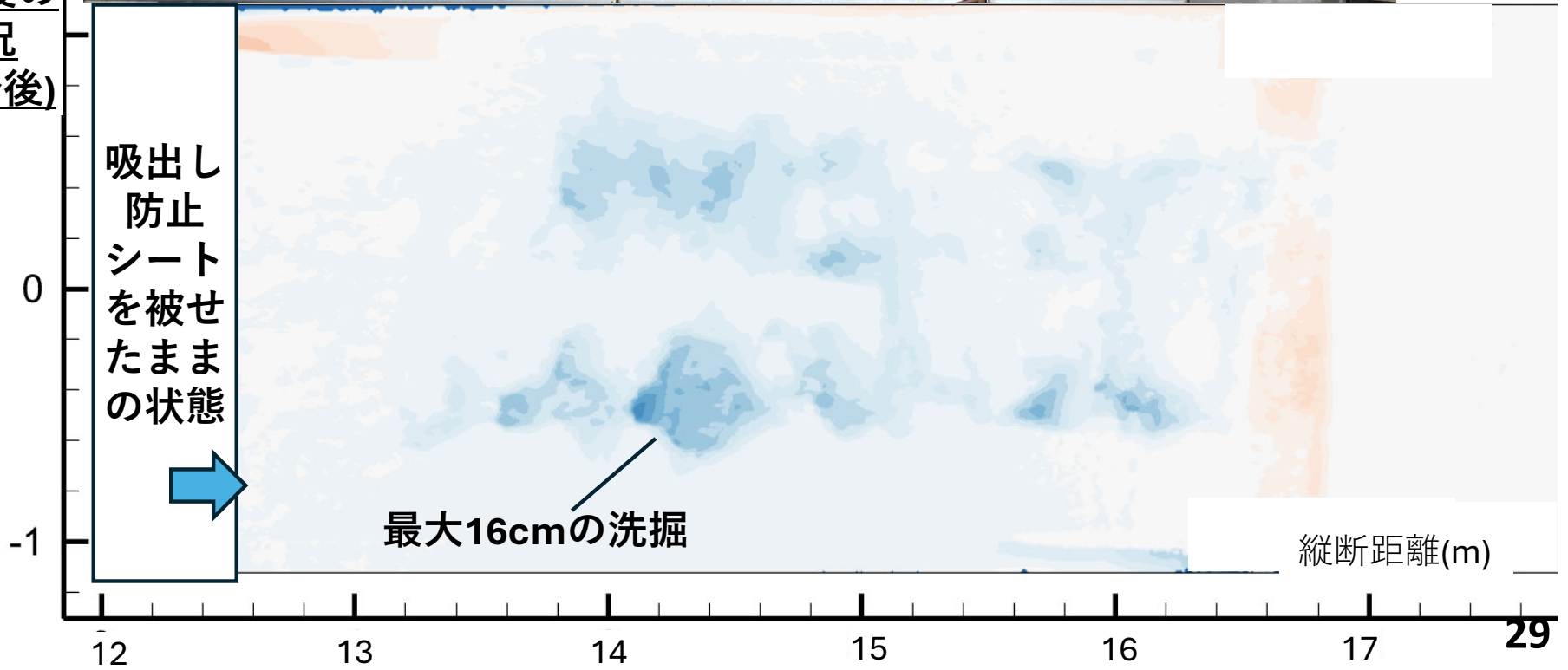


R5年度大規模模型実験(切り欠きなし)の通水後の状況(実測値, 180分後)



実測の通水前後の
堤体洗掘状況
(通水計180分後)

横断距離(m)



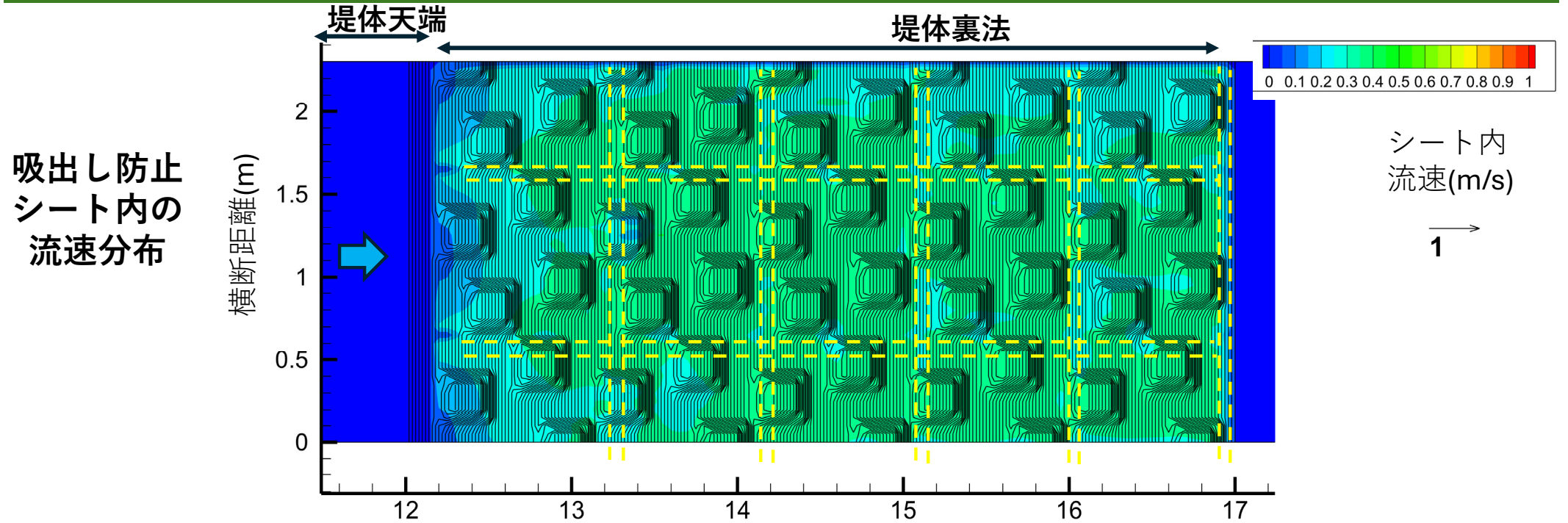
実測の通水前後の 堤体洗掘状況 (通水計180分後)

※出典：国総研提供資料

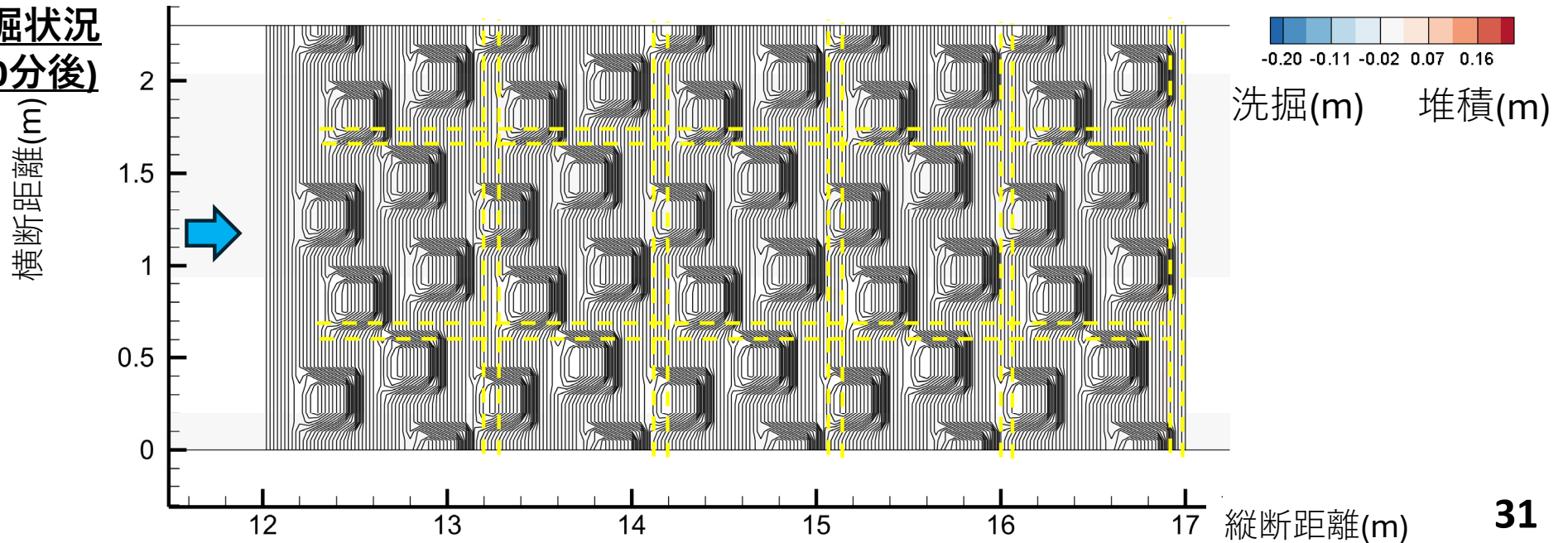


ブロック下の隙間計測状況

大規模模型実験(切り欠きなし)の通水60分後の吸出し防止シート内の流速分布と堤体侵食の解析結果

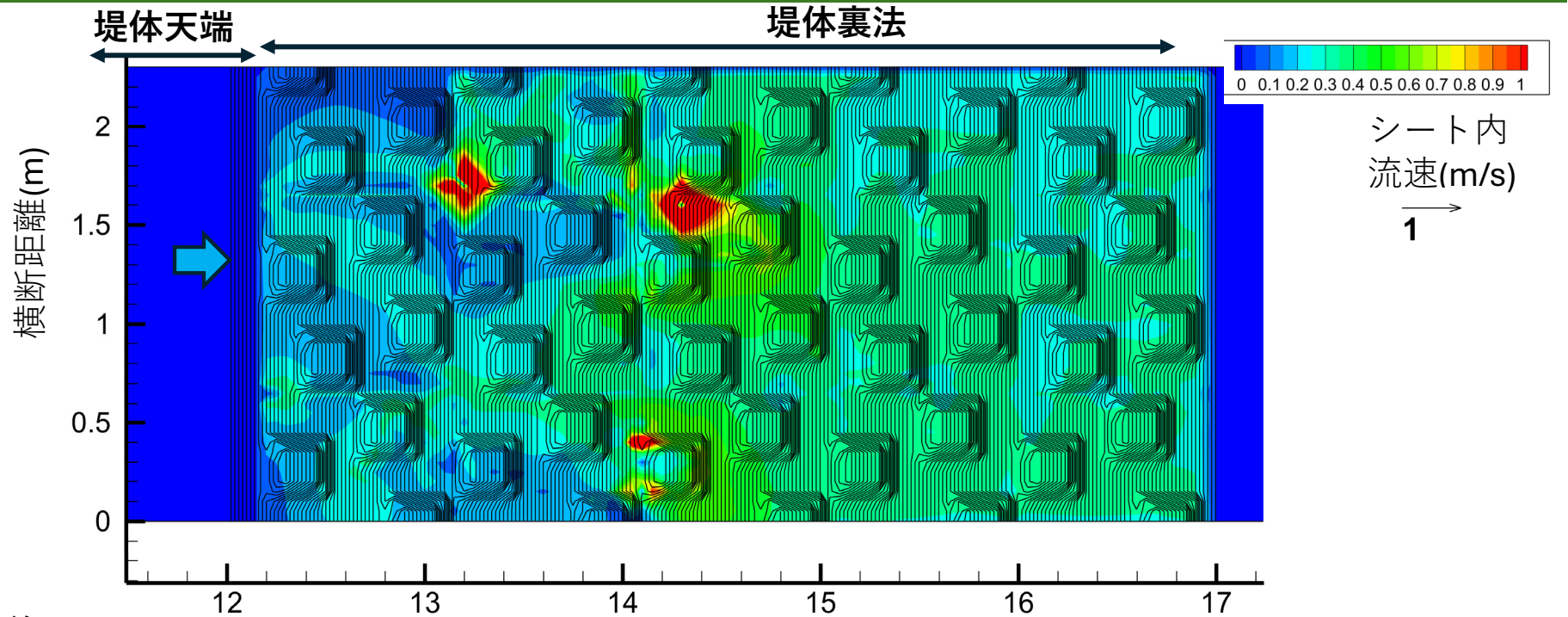


解析の通水前後
の堤体洗掘状況
(通水 60分後)

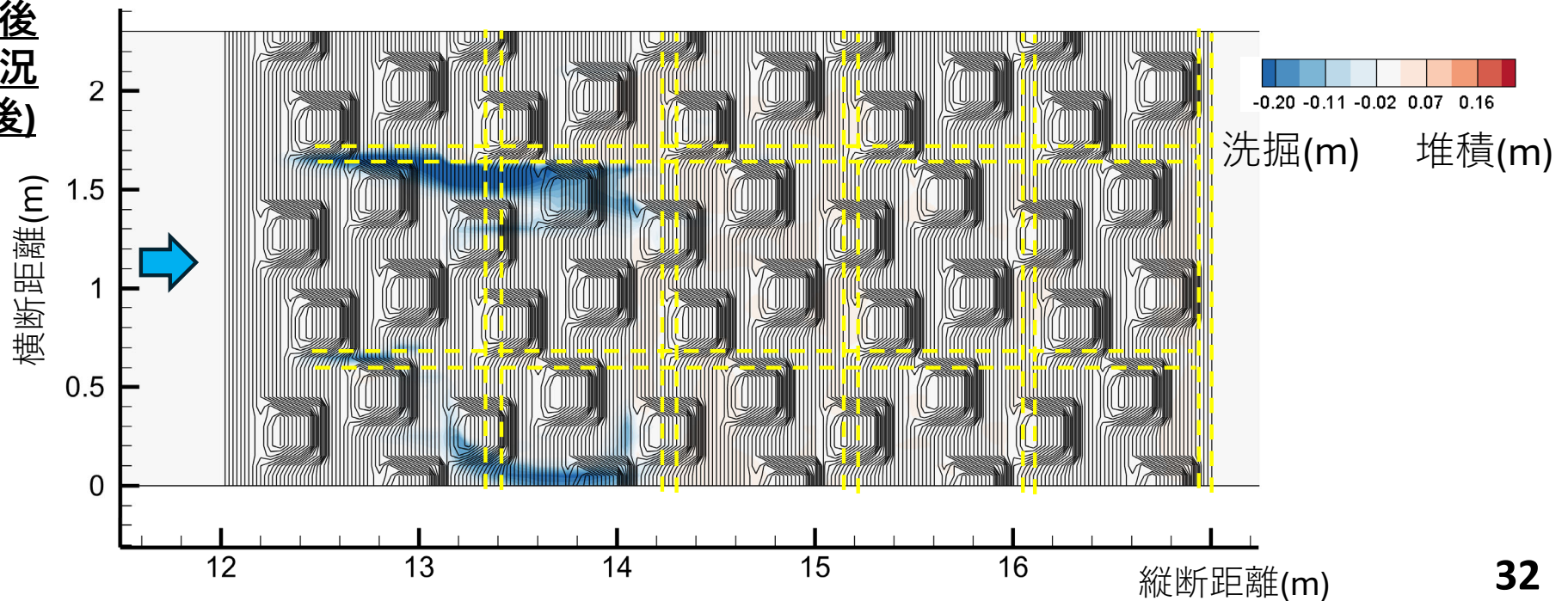


大規模模型実験(切り欠きなし)の通水180分後の吸出し防止シート内の流速分布と堤体侵食の解析結果

吸出し防止
シート内の
流速分布

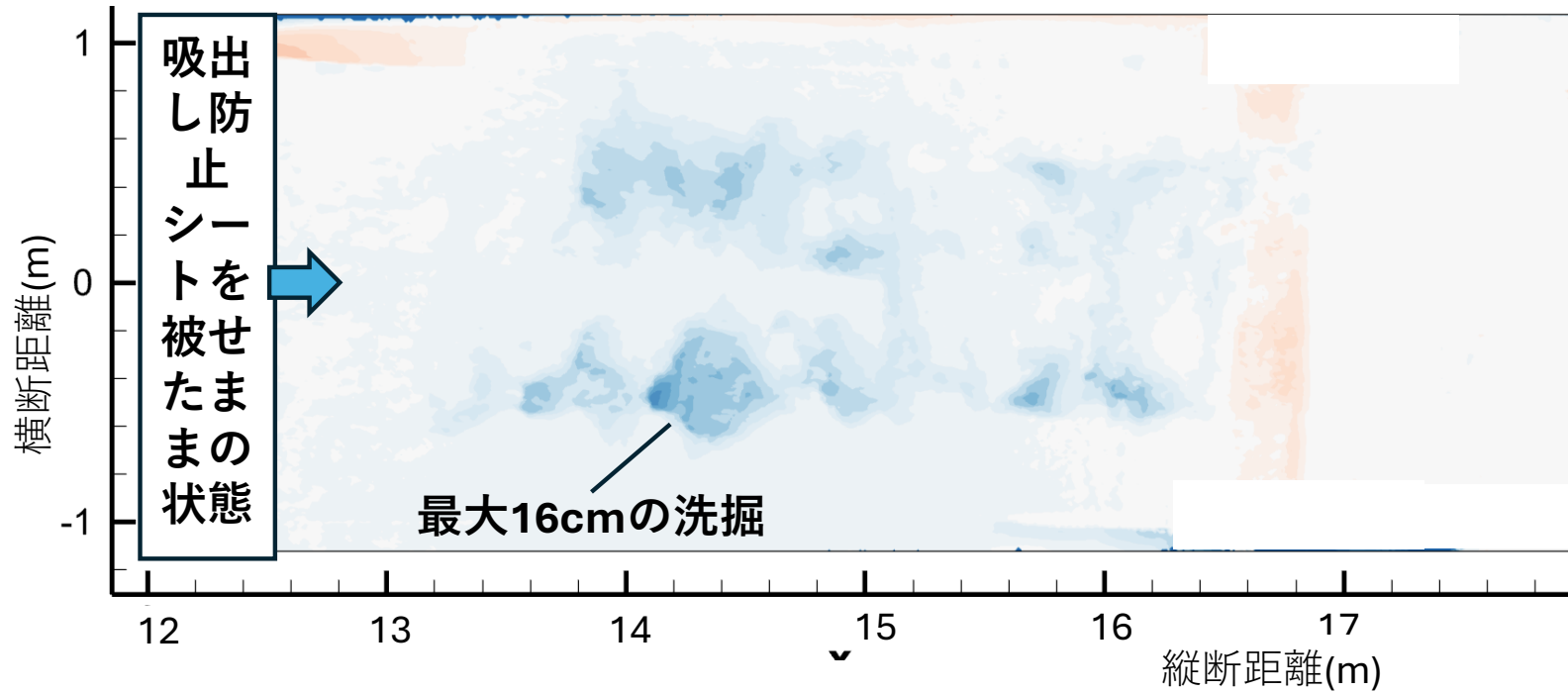
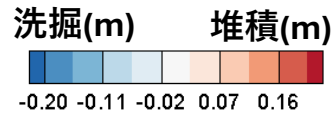


解析の通水前後
の堤体洗掘状況
(通水180分後)

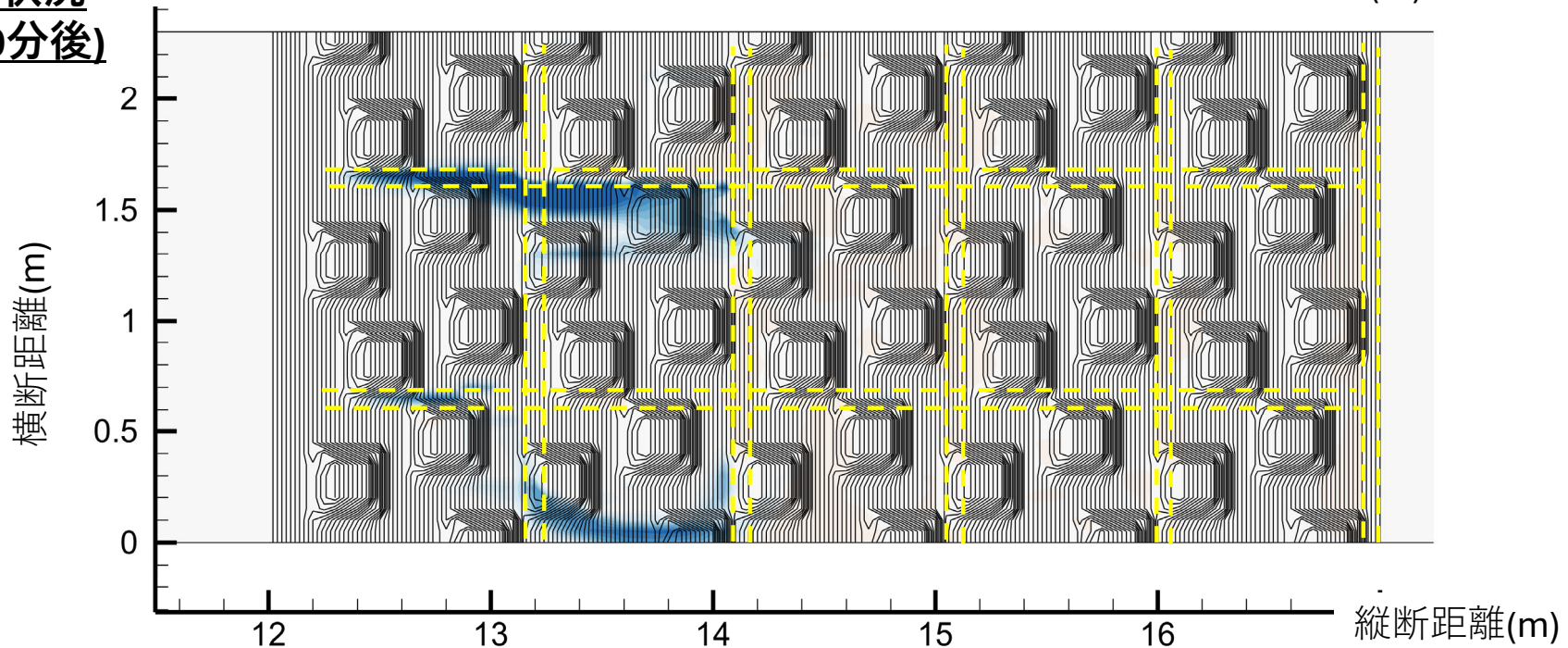


大規模模型実験(切り欠きなし)の通水180分後の吸出し防止シート内の流速分布と堤体侵食の解析結果

実測の通水前後の
堤体洗掘状況
(通水計180分後)



解析の通水前後の
堤体洗掘状況
(通水180分後)



5. 結論

- 本研究は、2つの主な結論から成る。第1は準三次元解析法の枠組みで空気混入を伴う接続ブロック上の流れと吸出し防止シート内部とその下の流れ、それに伴う堤防裏法部の侵食を算定可能な解析法を構築した。
- 第2は、本解析法を国総研で実施された接続ブロックと吸出し防止シートの両方が設置され、かつ、初期の堤体表面にガリ侵食がある場合と無い場合の実験に適用し、解析法を検証・検討した。その結果、初期の堤体表面にガリがある場合、ガリ付近に流れが集中し、その付近で洗掘を生じさせ、洗掘した土砂は法尻付近に堆積し、堤体変形を引き起した。また、法尻付近に土砂が堆積したことにより、初期のガリに比べて水みちが縮小したため、その付近のブロック下面の圧力が上昇した。これらが接続ブロックの変形を引き起こしたものと考えられる。一方、ガリが無い場合、本研究が対象とした条件で通水3時間までは、堤体表面の流速は概ね一様に0.3m/sで抑えられ、堤体変形は殆ど生じなかった。
- 今後、洪水流の3次元エネルギー分布に基づき、堤防裏法部の侵食対策が必要な箇所を選定する。そして、その場の流れやエネルギー条件や堤体調査に基づく空隙分布を与え、本解析法に基づく表面被覆型対策工の設計検討を行い、現地河川に適用することを考えている。
- 謝辞：本研究は、令和5年度採択 国土交通省河川砂防技術研究開発制度河川技術・流域管理分野の助成を受けた。また、国総研河川研究室より、実験データを提供頂いた。ここに記して謝意を表す。