

2. 堰群数理解析モデル解析

2-1 解析対象と解析手法

(1) 解析目的

新ダイルート堰群には5つの堰により7つの幹線水路へ異なった水量を安定的かつ高精度に分水することが求められていることから、新ダイルート堰群が所要機能を発揮できるか検証するため、数理解析モデルを用いて数理解析を行う。

また、オーバーフローやアンダーフローなどのゲート操作に伴う新堰群周辺の数理解析結果などを踏まえ、堰周辺の土砂移動形態の傾向を分析、堰上下流の洗掘・堆砂現象の評価も行う。

新ダイルート堰群周辺の数理解析は以上の様に2つの目的を有しており、ここでは、前者を流況解析、後者を河床変動解析と分類する。

流況解析では、既存堰と新堰周辺の流況の影響、多方向への分流による流況の変化などを正確に再現し、河床変動解析では、浮遊砂の濃度およびその水深変化の非平衡性を考慮する。そのため、これら数理解析には準三次元モデルを適用する。

なお、流況解析は、別途、水理研究所（HRI）が実施する水理模型実験結果との検証を行い、設計へ反映することを予定していることから、地形、流量等の解析のための基礎条件は、出来るだけ水理模型実験と同等の値を適用する。

また、河床変動解析では、今あるデータを用いて実施した。しかし、年間堆砂量を把握するために十分な精度が得られていないため、対策工の検討において必要とされる精度の結果が得られていない。ここでは、今あるデータを用いて解析を行った結果を示す。

(2) 解析対象

解析対象はダイルート堰群及び新ダイルート堰群を含む、図 2-1.1 に示す平面測量と同じ領域とする。

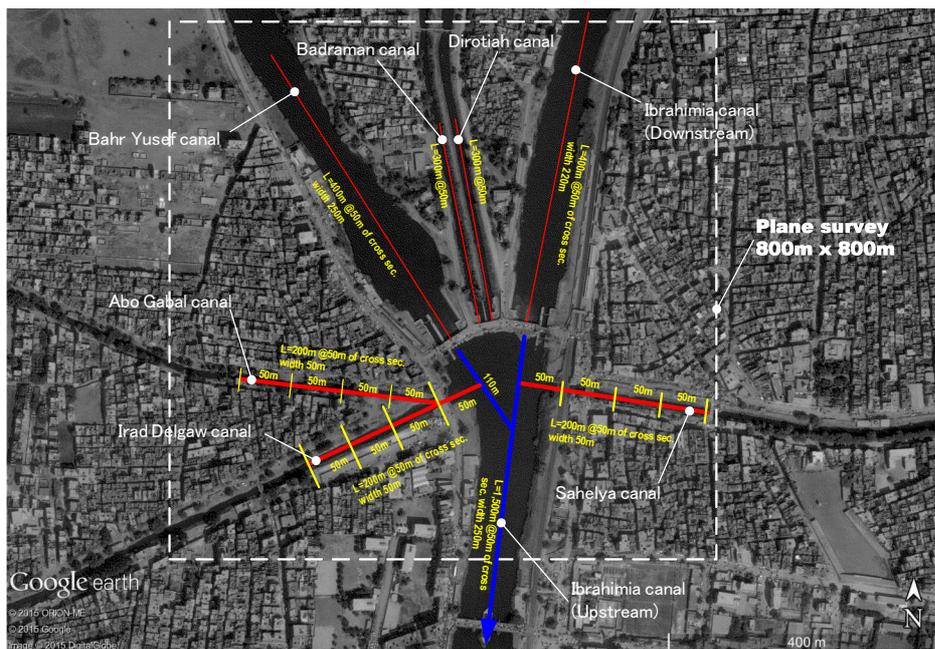


図 2-1.1 解析対象範囲

(3) 解析手法

a) 流況解析

1) 適用数理モデルの選定

新ダイルート堰群の流況解析は、水路流下方向、横断方向の流れだけでなく、水深方向の流れも評価することが求められる。そのため、水深方向の流れを評価できる準三次元（平面二次元多層）計算モデルまたは三次元計算モデルのどちらかを採用する必要がある。

数理モデルの特徴を比較検討した結果、水深方向の流れも三次元計算モデルと同等の精度で評価でき、三次元計算モデルよりも入力データが少なく、演算時間も早い、準三次元計算モデルを採用する。

表 2-1.1 数理モデルの比較表

比較項目	準三次元計算モデル	三次元計算モデル	備考
1. 計算できる項目			
流下方向流速 u	○		
横断方向流速 v	○		
水深方向流速 w	○		
2. 入力データ数	少ない○	多い△	
3. 計算結果の精度	ほとんど同じ		
4. 演算時間*	1 ○	10 ×	準三次元計算モデルの演算時間を 1 とした時の相対比率
5. 結果の表現	ほとんど同じ		
総合評価	◎	△	

注) *) W. Ottevanger & W.S.J. Uijtewaal, K. Blanckaert (2012), “Quasi-3D modelling of bed shear stresses at high curvature”, River Flow 2012–Murillo (Ed.)

2) 解析モデルの基礎方程式

準三次元計算モデルは、三次元計算モデルの計算負荷を解消するために、近似解法を適用することで三次元計算モデルと同等の結果を得るために開発された手法である。

以下に適用する基礎方程式を述べる。

ア) 解析モデルの特徴

解析モデルの特徴を表 2-1.2 に示す。

表 2-1.2 解析モデルの特徴

項 目	特 徴
算定項目	流速・水位を算定
算定次元	水域内を三次元的に算定
静水圧近似	平面的に広い水域であり，鉛直流速が水平流速に比較して非常に小さいため，水圧は静水圧のみ考慮
粘性および拡散項	水平方向：SGS モデルを適用 鉛直方向：Mellor & Yamada 2.5 次乱流モデルを適用
座標系	複雑で不規則的な地形条件を十分反映するために，平面的には直交曲線座標系 (Orthogonal curvilinear coordinate) を採用し，鉛直方向には自由水面の変動を適切に評価するために σ - 座標 (σ -transformation) を用いる。

イ) 基礎方程式

基礎方程式を以下に示す

連続式、

Navier-Stokes 方程式 (N-S 式)、

の 2 種類の 4 式である。

(連続式)

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

(Navier-Stokes 方程式)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_z \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} - fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_z \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) - g$$

ここで、

u 、 v 、 w はそれぞれ x 、 y 、 z 方向の流速 (m/s)、 T は水温 (°C)、 ρ は水の密度 (kg/m³)、 P は圧力 (Pa)、 g は重力加速度 (m/s²)、 f はコリオリパラメータ (rad/s)、 ν_x 、 ν_y 、 ν_z は渦動粘性係数 (m²/s)、である。

渦動粘性係数は、後述する乱流モデルによって与える。

ウ) 座標系

水平方向の座標系には境界適合型の直交曲線座標系 (図 2-1.2)、鉛直方向の座標系には σ 座標系 (図 2-1.3) を用いる。

直交曲線座標により、湾曲した河道や海岸線の地形を表現することが可能である。

σ 座標は、鉛直座標を地形に合わせて伸縮させて水面で $\sigma=1$ 、底で $\sigma=0$ になるような座標系であり、複雑な地形をより自然に表現し得る座標系である。

デカルト座標から σ 座標への変換は次式を用いる。

$$\sigma = \frac{z - \eta}{h + \eta}$$

ここで、 x, y, z は直交座標系での座標で、 $H \equiv h + \eta$ 、 $h(x, y)$ は底面の座標で、 $\eta(x, y, z)$ は水面変動である。

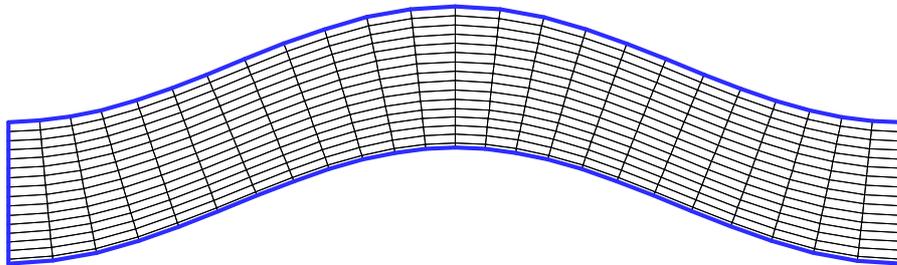
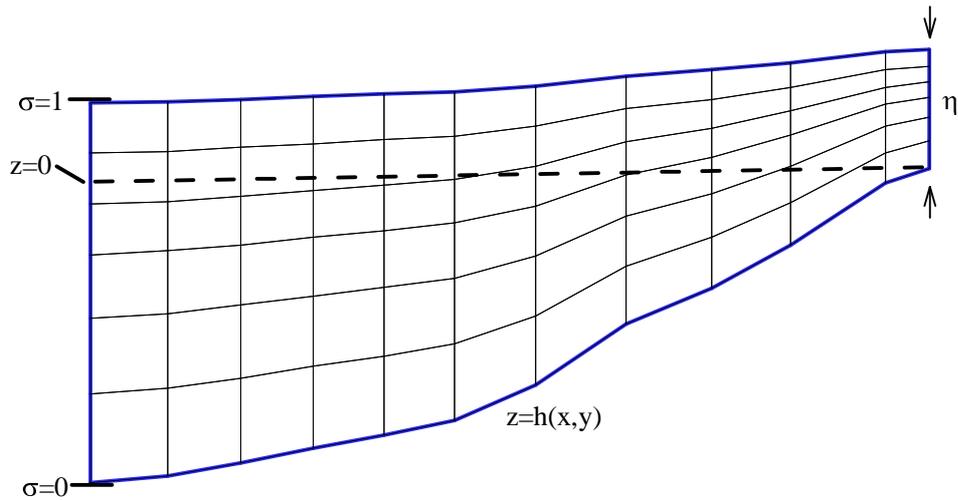


図 2-1.2 直交曲線座標

図 2-1.3 σ 座標

エ) 乱流モデル

鉛直渦動粘性係数および鉛直拡散係数は、レベル 2.5 の非等方型 2 方程式乱流クロージャーマodelにより求められる。鉛直渦動粘性係数および鉛直拡散係数のモデル化により、鉛直方向の成層構造や、その成層が拡散に与える影響を詳細に表現することができる。

3) 解析条件

ア) 計算メッシュ

計算メッシュは、分流部および堰群の形状を適切に表現できるように作成した。

縦横断方向の計算メッシュサイズは、特に新設堰周辺は詳細な流動場を検討できるように、0.5 m から 2.5 m に設定した。

また、計算負荷を少なくする為、上下流の河道部分については縦断方向の計算メッシュサイズを 2.5m~10m まで連続的に変化させた。

鉛直方向のメッシュ分割は、水路最深部から水面までを 5 分割した。

バハルヨセフ、イブラヒミア、アボギャバル、イラッドデルガウ、サヘリアの各水路流路を再現できるように水路形状に沿ってメッシュを配置した。

総メッシュ数は縦断方向 218×横断方向 182×鉛直方向 5=198,380、領域全体の計算メッシュサイズは概ね縦断方向 4m×横断方向 2.5m である。

作成した水路メッシュ図を図 2-1.4 に示す。

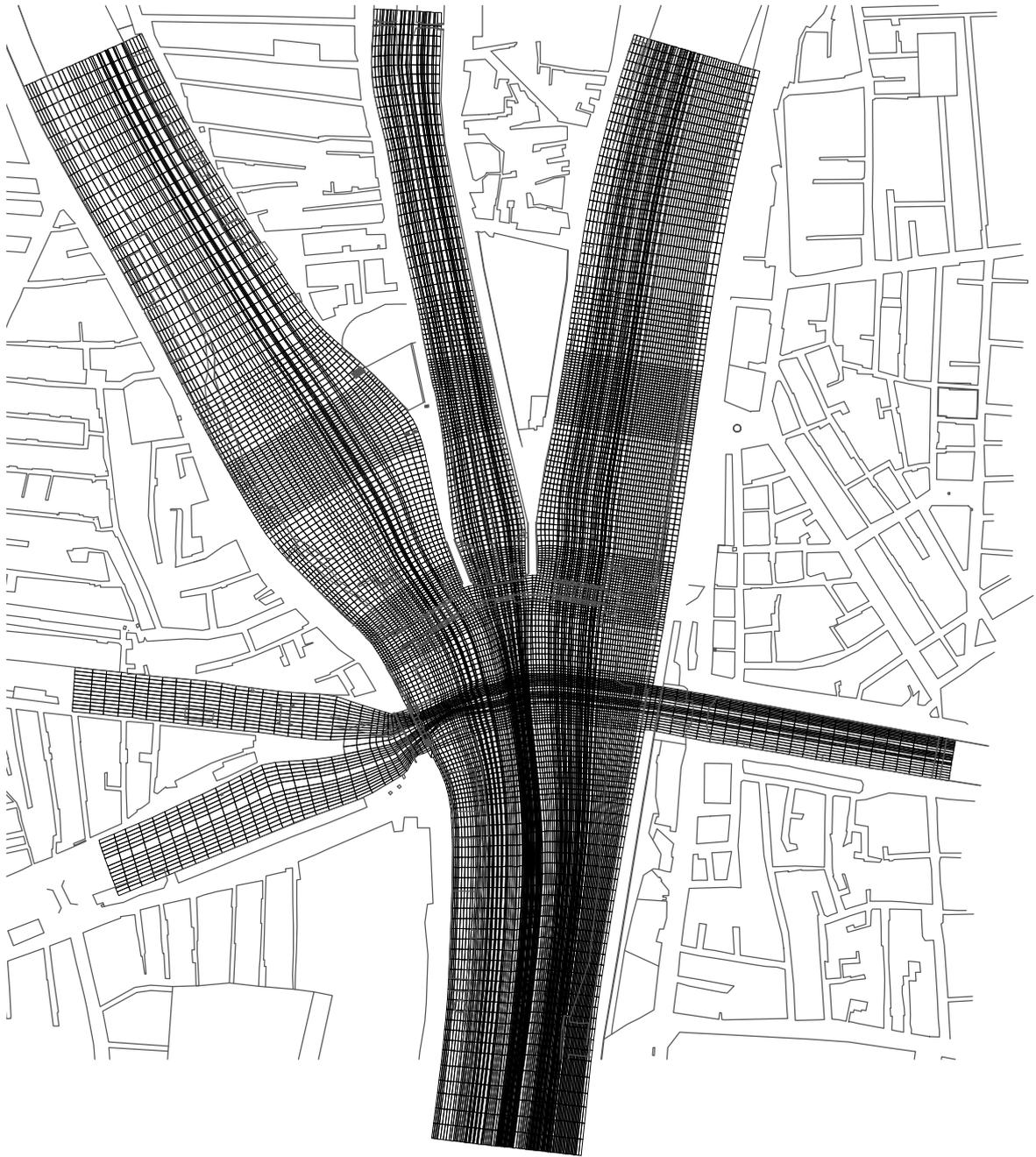


図 2-1.4 水路メッシュ図

イ) 地形

下記の 2 通りの地形を用いた。

- ・ 2015 年 8 月測量地形 流況解析の検証を行うために、HRI が実施する水理模型実験と同じ検証データを用いる。
- ・ 2016 年 1 月測量地形 堆砂除去後であることから、新ダイルート堰群の設計に用いる地形図であり、堰設置後の影響を評価するために活用する。

作成した地形の平面図を図 2-1.5、図 2-1.6 に示す。

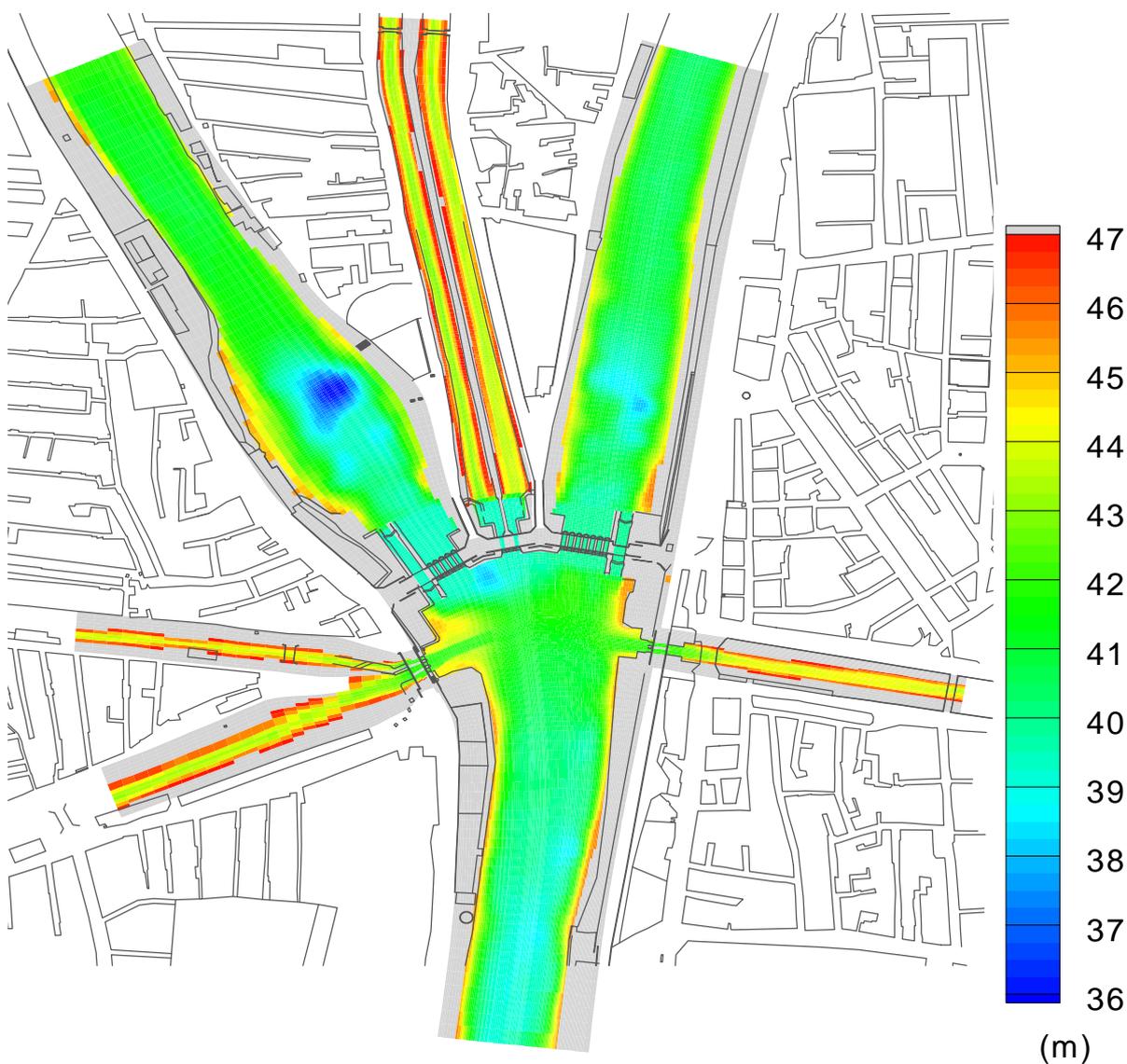


図 2-1.5 地形 (2015 年 8 月測量)

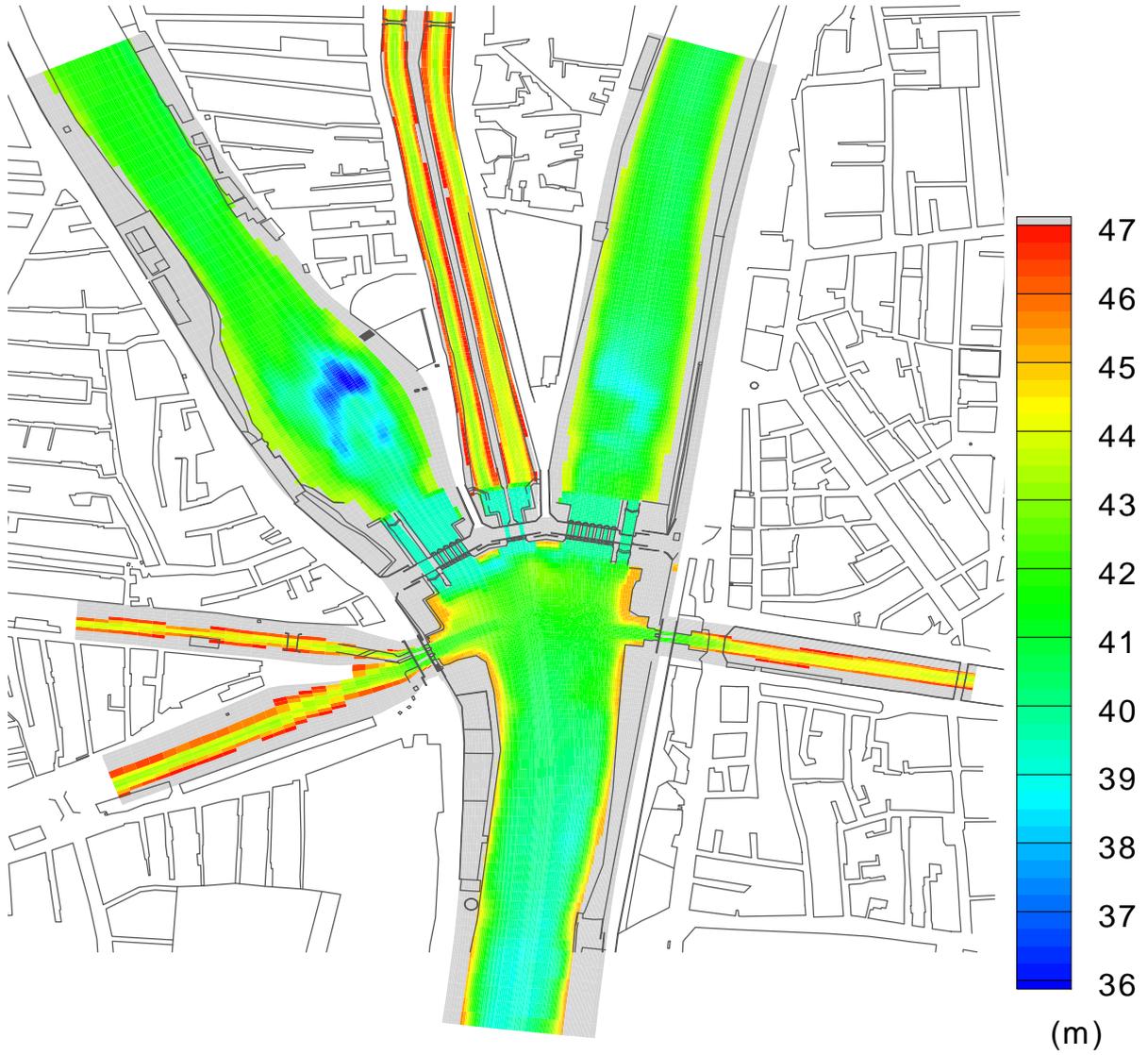


図 2-1.6 地形 (2016 年 1 月測量)

既存ダイルート堰群の現在の寸法を表 2-1.3 に示す。

表 2-1.3 既設ダイルート堰群の現在の寸法

堰の名称		構造諸元		ゲート諸元
堰群上流側	Bahr Yusef	門数 堰柱 中間エプロン 基礎 舟通し	5 門 4 本 & 幅 1.80~2.25m L=43.25m, 厚さ 3m 石灰ストーン(一部コンクリート) 幅 8.5m	3m 幅 5 門 全高 7.5m 3 段ゲート 敷高 39.50m 最大管理水位 46.00m
	Ibrahimia	門数 堰柱 中間エプロン 基礎 舟通し	7 門 6 本 & 幅 1.80~2.25m L=39.70m, 厚さ 3m 石灰ストーン(一部コンクリート) 幅 8.5m	3m 幅 7 門 全高 7.5m 3 段ゲート 敷高 39.81m 最大管理水位 46.00m
	Badraman & Dirotiah	門数 堰柱 中間エプロン 基礎	2 門 2 本 & 幅 1.80~2.25m L=38.65m, 石灰ストーン, 厚さ不明	3m 幅 2 門 全高 7.5m 3 段ゲート 敷高 39.30 m 最大管理水位 46.00m
堰群下流側	Abo-Gabal & Irad Delgaw (left bank)	門数 堰柱 中間エプロン 基礎	3 門 2 本 & 幅 1.80~2.25m L 28.60m 石灰ストーン, 厚さ不明	3m 幅 3 門 全高 5.5m 1 枚ゲート 敷高 42.00 m 最大管理水位 46.00m
	Sahelyia (right bank)	門数 堰柱 中間エプロン 基礎	2 門 1 本 & 幅 1.80~2.25m L=18.90m, 石灰ストーン, 厚さ不明	3m 幅 2 門 全高 5.5m 1 枚ゲート 敷高 41.80 m 最大管理水位 46.00m

ウ) 堰の放流量

既存ダイルート堰の放流量は、HRI が実施する水理模型実験に適用する下記のオリフィス式により算出した値を基本として、水路毎に実測水位および分流量と解析モデルでの水位および分流量が一致するように調整を行った。

$$Q = \frac{2}{3} C_v \sqrt{2g} B (H_1^{3/2} - H_2^{3/2})$$

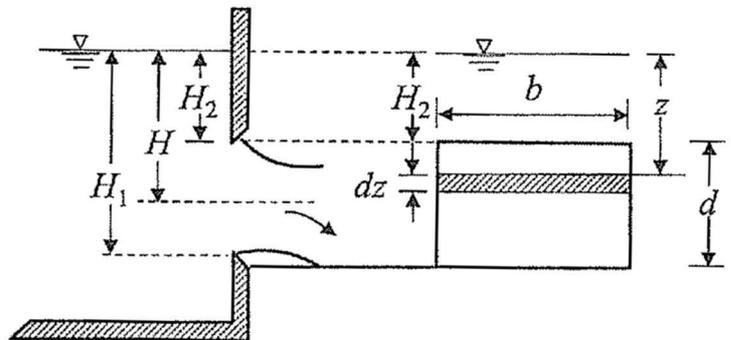
ここに、 Q = 放流量(m³/s)

C = 流量係数 = 0.64

B = 堰幅 (m)

g = 重力の加速度 9.8(m²/s)

H_1, H_2 = オリフィスの上下端水深(m)



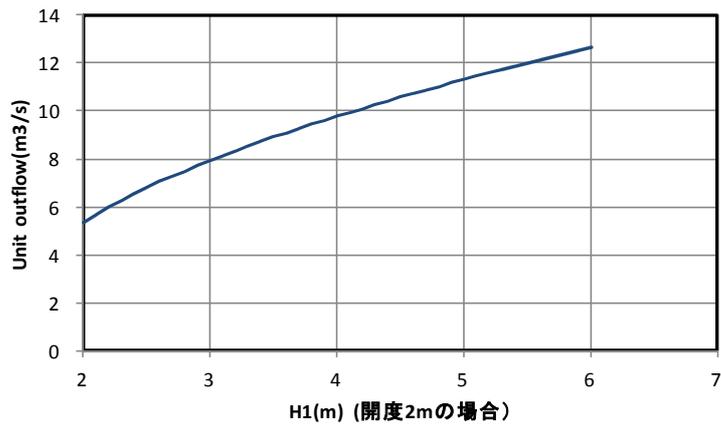


図 2-1.7 既設ダイルート堰の水位－流量曲線

一方、新ダイルート堰の放流量は、オーバーフローは越流公式により算出した値を、アンダーフローはオリフィスの放流公式より算出した値を基本として、水路毎に所定の水位および分流量と解析モデルでの水位および分流量が一致するように調整を行った。

オーバーフロー流量公式

$$Q=C*B*H^{3/2}$$

ここに、

Q = 放流量 (m³/s)

C = 流量係数

B = 堰幅 (m)

H = 越流水深 (m)

オリフィス流量公式 (アンダーフロー流量公式)

$$Q = \frac{2}{3} C_1 \sqrt{2g} B (H_1^{3/2} - H_2^{3/2})$$

ここに、

Q = 放流量 (m³/s)

C = 流量係数

B = 堰幅 (m)

g = 重力の加速度 9.8 (m²/s)

H_1 H_2 = オリフィスの上下端水深 (m)

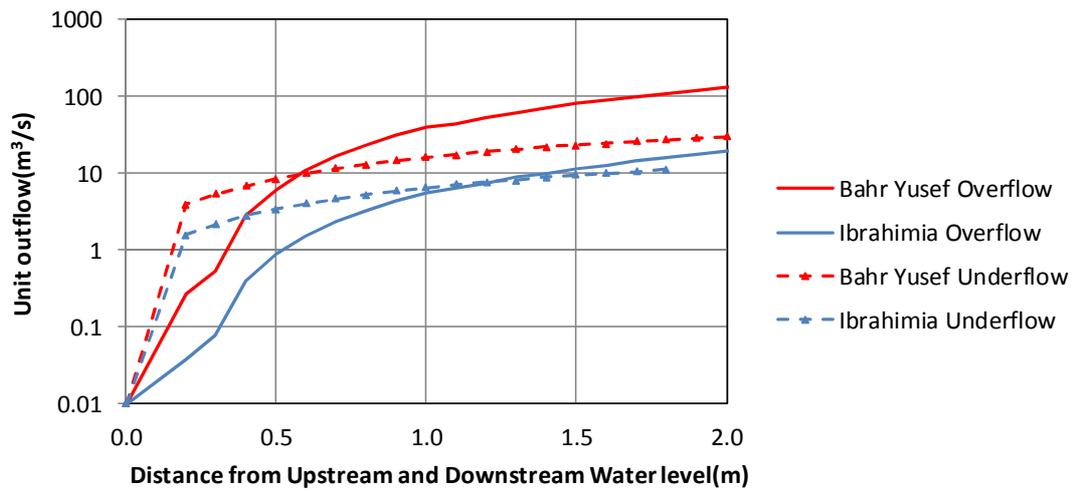


図 2-1.8 新ダイルート堰の水位－流量曲線（大規模堰）

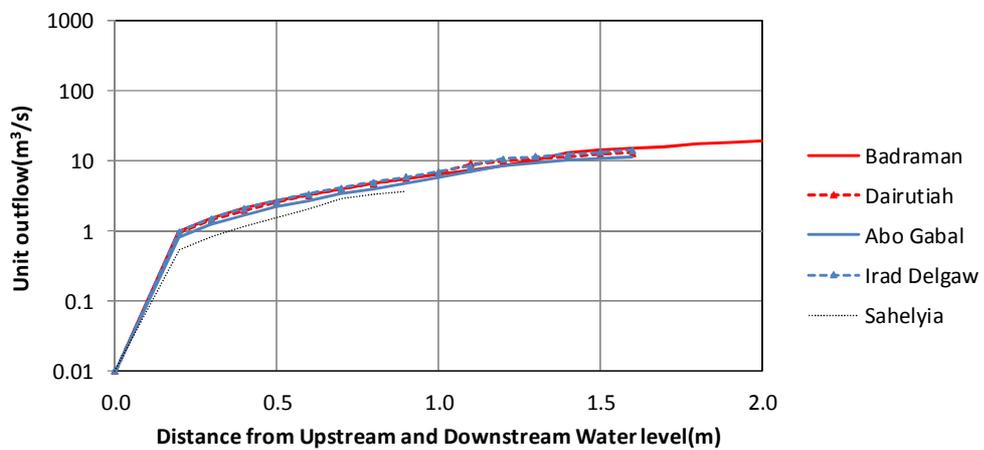


図 2-1.9 新ダイルート堰の水位－流量曲線（小規模堰）

4) 境界条件

境界条件は、イブラヒミア水路上流端を流量境界、各水路下流端を水位境界とした。

5) 解析ケース

解析ケースは、表 2-1.4 に示す様に、検証、現況、計画の 3 段階とする。

検証段階では、HRI が実施している水理模型実験との比較を行うために同じ地形及び水位流量を適用する。

一方、現況及び計画段階では、堰の設計に最新の地形データを適用していることから、流況解析にも最新の地形データを適用する。

また、計画段階においては、ゲート放流方式がオーバーフローとアンダーフローでの流況の違いについて比較するための解析を行う。

検証時の水位流量は HRI が水理模型実験の検証に適用するため 2015 年 6 月 30 日に実施した実測値を使用する。また、現況時及び計画時は、設計流量を使用する。

なお、既設のバハルヨセフ堰及びイブラヒミア堰には船通しが各 1 門併設されているが、検証時は両堰とも閉められている。現況及び計画段階では、バハルヨセフ堰の船通しは撤去する予定であることから解放する。一方、イブラヒミア堰では、周辺部でのアクセス道路の計画もあるため、この通水量を期待しない（閉めた）状態とする。

表 2-1.4 解析ケース

解析ケース	解析段階	河床状況	施設	流量 (m ³ /s)		備考
				実測 355m ³ /s	設計 455m ³ /s	
検証	検証段階	①	既設 (DGRs)	○		水位、流量は水理研究所 (HRI) と同じ値を用いる。
現況	現況段階	②	既設 (DGRs)		○	
計画 1	計画段階	②	新堰 (NDGRs) ゲート: UnderFlow		○	
計画 2			新堰 (NDGRs) ゲート: OverFlow		○	
備考	河床状況 (測量データ) ① : Aug, 2015 (HRI), ② : Jan, 2016 (D/D, HRI) (After Dredging)					

6) 解析ケース別水位流量とゲート開度

解析ケース別水位流量を、表 2-1.5 に示す。検証時のゲート開度を表 2-1.6 及び図 2-1.10 に示す。

表 2-1.5 解析ケース別水位流量

ケース	流量条件	堰上流		堰下流						
		イブラヒミア		バハルヨセフ	イブラヒミア	バドラン	ダイルーチア	アボガバル	イラドデルガウ	サヘリア
		流量 (m ³ /s)	水位 (m)	水位 (m)						
検証段階	検証流量	355	46.02	45.82	45.05	45.68	45.88	45.73	44.79	45.72
現況段階	設計流量	455	46.30	45.82	45.13	45.90	45.90	45.90	45.90	45.90
計画段階	設計流量	455	46.30	45.82	45.13	45.90	45.90	45.90	45.90	45.90

表 2-1.6 検証時のゲート開度

Regulator		Gate Opening (m)							
		Gate Position	1	2	3	4	5	6	7
Bahr Yusef		Upper	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A		
		Middle	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25		
		Lower	0	0	0	0	0		
Ibrahimia		Upper	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
		Middle	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
		Lower	0	0	0	0	0	0	0
Badraman	Badraman	Upper	N/A						
		Middle	1.30						
		Lower	0						
	Dairutiah	Upper	N/A						
		Middle	0.875						
		Lower	0						
Abo Gabal	Abo Gabal		0.625						
	Irad Delgaw		0.15	0.15					
Sahelyia			0.10	0.10					

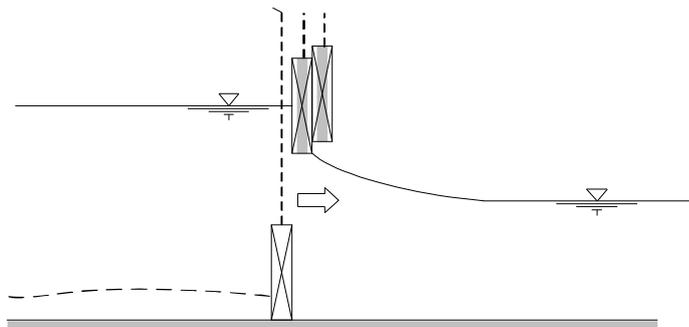


図 2-1.10 検証時のバハルヨセフ堰とイブラヒミア堰のゲート操作

b) 河床変動解析

1) 河床変動解析の概要

新ダイルート堰群の河床変動解析は、図 2-1. 11 に示す様に、大きく①流れの計算、②河床変動及び粒度分布の計算に分けられる。この内、流れの計算には流況解析のモデルを適用する。

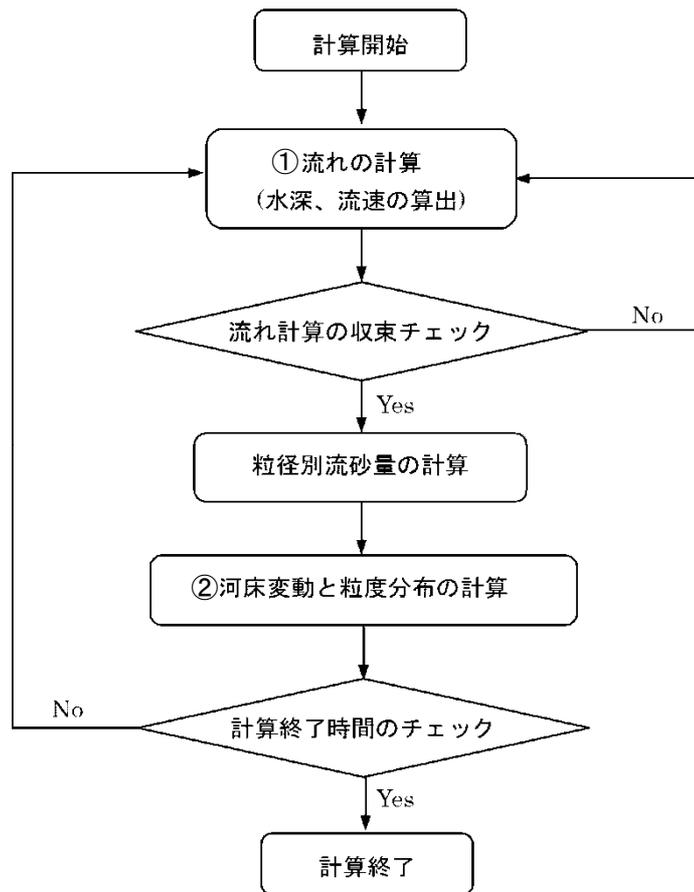


図 2-1. 11 河床変動解析の計算フロー

2) 河床変動解析の基礎方程式

河床変動解析の基礎方程式の内、河床変動及び粒度分布の計算における基礎方程式を述べる。

ア) 河床変動の計算

河床変動の計算は、次式により、底面の流れより求められる掃流砂量の場所的な変化および浮遊砂の浮上量と沈降量の差から計算される。なお、浮遊砂については、後に示すように移流拡散方程式を解くことにより評価される。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{-1}{(1-\lambda)} \sum_k \left\{ \frac{\partial q_{bxk}}{\partial x} + \frac{\partial q_{byk}}{\partial y} + (E_{sk} - D_{sk}) \right\} \quad (2-1)$$

ここに、 z_b : 河床高、 q_{bxk} : x 方向の粒径階 k の単位幅掃流砂量、 q_{byk} : y 方向の粒径階 k の単位幅掃流砂量、 E_{sk}, D_{sk} : 粒径階 k の浮遊砂の浮上量と沈降量である。

イ) 粒度分布の計算

河床変動に伴い、河床表層（交換層）における河床材料の各粒径階の含有率が変化する。その評価式は次のとおりである。

$$\frac{\partial P_{bk}}{\partial t} - \frac{1}{E_m} \frac{\partial z_{bk}}{\partial t} + \frac{1}{E_m} \frac{\partial z_b}{\partial t} (\eta P_{bk} + (1-\eta)P_{bko}) = 0 \quad (2-2)$$

ここに、 λ は河床材料の空隙率、 P_{bk} は交換層（混合層とも呼ばれている）の粒径階 D_k の含有率、 P_{bko} は交換層の下層における粒径階 D_k の含有率、 E_m は交換層の厚さである。また、 η は係数で、次に示すように侵食のとき $\eta = 0$ 、堆積のとき $\eta = 1$ である。

$$\eta = \begin{cases} 1 & \partial z_b / \partial t > 0 \\ 0 & \partial z_b / \partial t < 0 \end{cases} \quad (2-3)$$

河床モデルの概要は以下のとおりである。図 2-1. 12 に示すように、河床をある基準面 z_o から河床面 z_b まで鉛直に多数の層に分ける。最上層は交換層(mixed layer)で、その厚さは E_m 、そのすぐ下の層は遷移層 (transition layer) で厚さは E_t である。その他は堆積層 (deposited layer) と呼ばれ、厚さはすべて同じ E_d である。

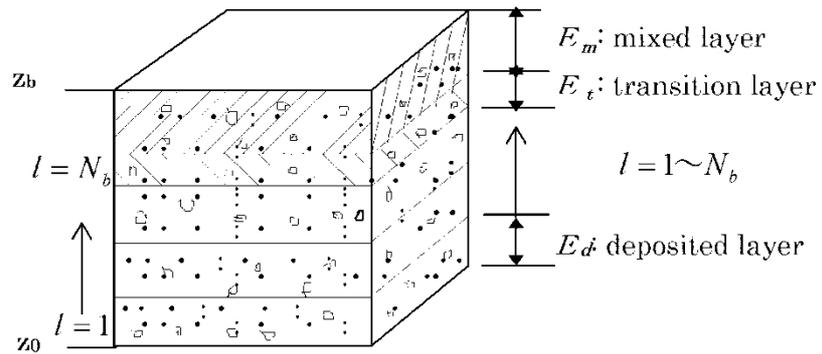


図 2-1.12 河床の構成

ウ) 移流拡散方程式

移流拡散方程式は以下のとおりである。

【移流・拡散方程式：浮遊砂濃度】

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (D_{Ch} \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_{Ch} \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_{Cz} \frac{\partial C}{\partial z})$$

C：浮遊砂濃度（各粒径別）、

u、v、w：x、y、z方向における流速成分

D_{Ch}、D_{Cz}：水平および鉛直方向における水質の有効（分子+渦動）拡散係数

3) 解析条件

ア) メッシュサイズ

メッシュサイズは流況解析と同様である。

イ) 計算期間と水位流量

検証計算では2016年1月河床を初期として、堆砂後の2016年11月までの11か月の計算を実施する。2016年11月の堆砂後に相当する河床として2015年11月測量河床を想定し、2015年11月測量河床－2016年11月測量河床の堆積・侵食傾向と計算結果の検証を行う。水位と流量は、実績値より算出した月毎の平均値を用いる。

バハルヨセフ水路およびイブラヒミア水路については同期間の実績流量・水位を与えた。バドラマン、ダイルーティア、アボギャバル、イラッドデルガウイ、サヘリア水路については観測されていない為、上述のバハルヨセフ水路とイブラヒミア水路の流量と計画流量に対する流量割合を用いて各水路の流量を算出し、各水路のH-Q関係より下流水位を与えた。表2-1.7および図2-1.13に流量、表2-1.8および図2-1.14に水位を示す。

予測計算では2016年1月河床を初期として、1年間の解析を行った。流入量については1999年～2014年の16年間の月平均流量を算出し、1年間の流況を与えた。流入量を計画流量に対する流量割合で配分し、各水路下流における放流量を算出し、各水路のH-Q関係より下流水位を与えた。表2-1.9および図2-1.15に流量、表2-1.10および図2-1.16に水位を示す。

表 2-1.7 検証計算流量：2015 年 1 月～2015 年 11 月

Discharge (m ³ /s)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sep	Oct	Nov
Ibrahimia canal U/S	150.8	277.4	314.4	320.4	358.6	396.0	399.7	395.2	317.3	308.3	275.4
Bahr-Yusef canal	81.9	148.4	171.5	164.5	188.3	200.3	201.2	202.3	164.8	165.4	140.4
Ibrahimia canal D/S	52.6	99.1	109.0	121.4	131.6	153.0	155.4	150.3	118.3	109.7	105.3
Badraman canal	3.4	6.3	7.2	7.3	8.2	9.0	9.1	9.0	7.2	7.0	6.3
Diroutiah canal	4.6	8.4	9.6	9.8	10.9	12.1	12.2	12.0	9.7	9.4	8.4
Abo Gabal canal	2.7	4.9	5.6	5.7	6.4	7.1	7.1	7.1	5.7	5.5	4.9
Irada Delgaw canal	3.5	6.5	7.4	7.5	8.4	9.3	9.4	9.3	7.4	7.2	6.5
Saheleya canal	2.0	3.7	4.2	4.3	4.8	5.3	5.3	5.3	4.2	4.1	3.7

表 2-1.8 検証計算水位：2015 年 1 月～2015 年 11 月

D/S Water level (m)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sep	Oct	Nov
Ibrahimia canal U/S	44.2	45.5	45.7	45.7	45.8	46.0	46.0	46.0	45.7	45.6	45.6
Bahr-Yusef canal	42.2	44.9	45.3	45.2	45.6	45.8	45.8	45.8	45.2	45.2	44.7
Ibrahimia canal D/S	43.0	44.1	44.2	44.4	44.6	45.0	45.0	44.9	44.4	44.2	44.2
Badraman canal	44.1	45.5	45.5	45.5	45.6	45.6	45.7	45.7	45.5	45.4	45.5
Diroutiah canal	44.1	45.2	45.5	45.5	45.6	45.8	45.7	45.8	45.5	45.4	45.5
Abo Gabal canal	44.1	45.3	45.4	45.5	45.6	45.7	45.7	45.7	45.5	45.5	45.6
Irada Delgaw canal	44.1	44.6	44.6	44.7	44.7	44.8	44.8	44.7	44.6	44.5	44.6
Saheleya canal	44.1	45.4	45.6	45.5	45.6	45.8	45.7	45.8	45.5	45.5	45.6

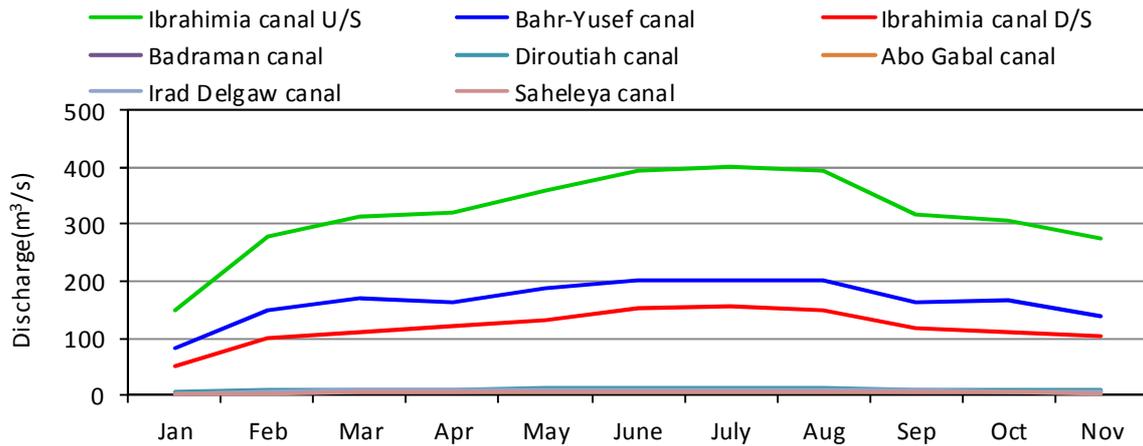


図 2-1.13 検証計算流量：2015 年 1 月～2015 年 11 月

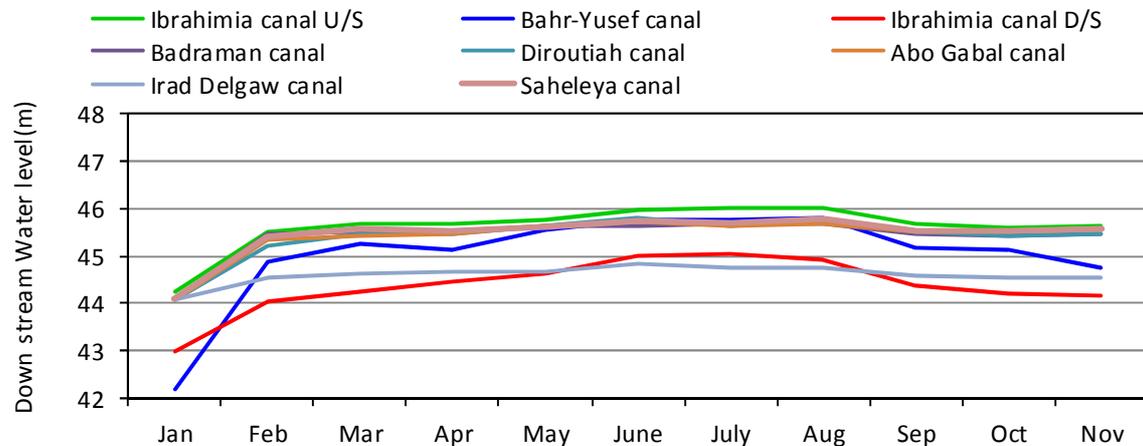


図 2-1.14 検証計算水位：2015 年 1 月～2015 年 11 月

表 2-1.9 予測計算流量：1月～12月（1999年～2014年の16年間の平均）

Discharge (m ³ /s)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Ibrahimia canal U/S	111.0	286.9	323.9	339.6	345.2	411.3	418.1	414.7	340.7	316.1	285.8	226.4
Bahr-Yusef canal	51.0	141.0	164.0	167.0	171.0	203.0	206.0	206.0	166.0	150.0	139.0	103.0
Ibrahimia canal D/S	48.0	115.0	125.0	136.0	137.0	164.0	167.0	164.0	138.0	132.0	116.0	99.0
Badraman canal	2.5	6.5	7.4	7.7	7.9	9.4	9.5	9.4	7.7	7.2	6.5	5.1
Diroutiah canal	3.4	8.7	9.9	10.3	10.5	12.5	12.7	12.6	10.4	9.6	8.7	6.9
Abo Gabal canal	2.0	5.1	5.8	6.1	6.2	7.3	7.5	7.4	6.1	5.6	5.1	4.0
Irada Delgaw canal	2.6	6.7	7.6	8.0	8.1	9.6	9.8	9.7	8.0	7.4	6.7	5.3
Saheleya canal	1.5	3.8	4.3	4.5	4.6	5.5	5.6	5.5	4.5	4.2	3.8	3.0

表 2-1.10 予測計算水位：1月～12月（1999年～2014年の16年間の平均）

D/S Water level (m)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Ibrahimia canal U/S	44.5	45.8	45.8	45.8	45.9	45.9	45.9	45.9	45.9	46.0	45.8	45.7
Bahr-Yusef canal	43.0	44.7	45.0	45.1	45.1	45.6	45.6	45.6	45.1	44.8	44.7	44.1
Ibrahimia canal D/S	42.7	44.2	44.4	44.5	44.6	44.9	45.0	44.9	44.6	44.6	44.2	44.0
Badraman canal	44.4	45.4	45.5	45.6	45.6	45.7	45.7	45.7	45.6	45.5	45.4	45.2
Diroutiah canal	44.3	45.4	45.6	45.6	45.6	45.7	45.7	45.7	45.6	45.5	45.4	45.1
Abo Gabal canal	43.9	44.8	44.9	45.0	45.0	45.2	45.2	45.2	45.0	44.9	44.8	44.5
Irada Delgaw canal	43.9	44.6	44.7	44.7	44.7	44.8	44.8	44.8	44.7	44.6	44.6	44.4
Saheleya canal	44.2	45.4	45.5	45.6	45.6	45.8	45.9	45.9	45.6	45.5	45.4	45.0

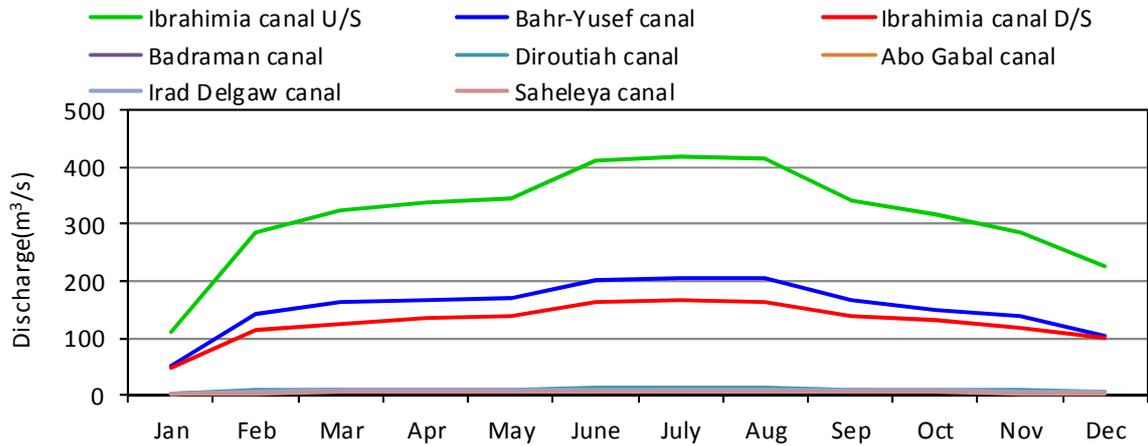


図 2-1.15 予測計算流量：1月～12月（1999年～2014年の16年間の平均）

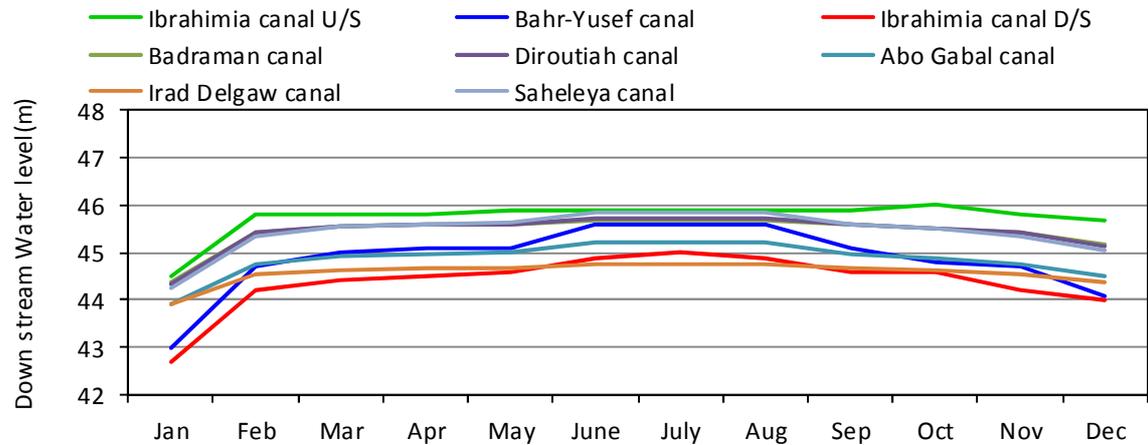


図 2-1.16 予測計算水位：1月～12月（1999年～2014年の16年間の平均流量より算出）

ウ)河床材料の粒度分布

表 2-1.11 および図 2-1.17 に示す HRI の水理模型実験中間報告書中の河床材料調査結果の内、イブラヒミア水路上流の河床材料データを用いた。計算では、HRI の河床材料調査結果を反映させ、表 2-1.12 に示す 2 区分の代表粒径を設定した。本解析では、計算領域全体に同一の材料を設定した。

表 2-1.11 河床材料調査結果

Ibrahimia U/S		Ibrahimia D/S		Bahr-Yusef	
Diameter (mm)	Finer Weight (%)	Diameter (mm)	Finer Weight (%)	Diameter (mm)	Finer Weight (%)
1.4	97.6	1.4	41.1	1.4	97.9
1	97.3	1	41.0	1	97.5
0.85	97.0	0.85	40.9	0.85	97.0
0.5	92.1	0.5	40.6	0.5	89.6
0.355	64.8	0.355	39.3	0.355	70.9
0.212	0.4	0.212	5.4	0.212	1.7
0.15	0.2	0.15	1.8	0.15	0.3
0.075	0.1	0.075	0.2	0.075	0.1
0.063	0.1	0.063	0.1	0.063	0.1
0.01	0.0	0.001	0.0	0.001	0.0

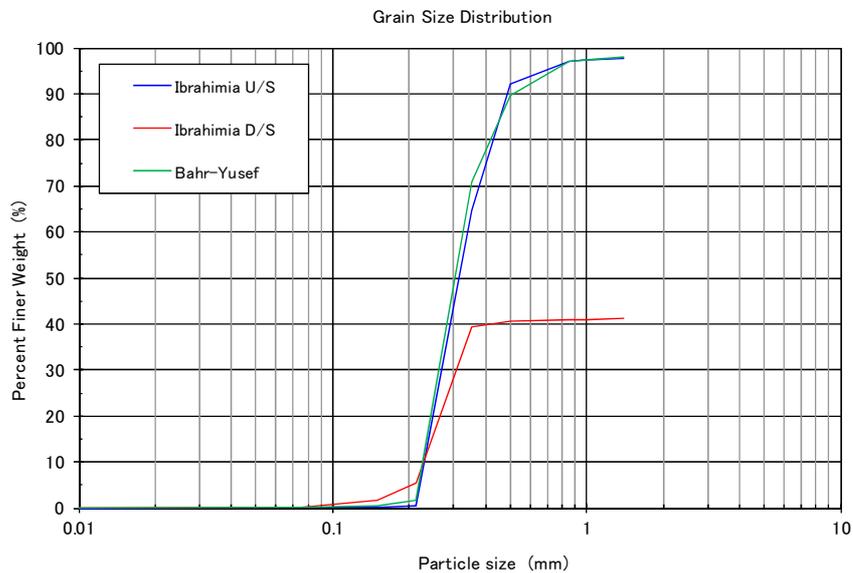


図 2-1.17 河床材料の粒度分布

表 2-1.12 計算での代表粒径と含有率

Representative particle diameter (mm)	Content rate (%)
0.6	34.1
0.25	65.6

エ) 掃流砂量式

掃流砂式は以下に示す芦田・道上式を用いる。

x 方向の単位幅流砂量 q_{bxk} と y 方向の単位幅流砂量 q_{byk} の計算について、まず、単位幅掃砂量 q_{bk} を式(2-4)の芦田・道上式により算出する。次に、底面の流速分布より、流砂量を x 方向・ y 方向に分配し、 q_{bxk} および q_{byk} を求める。

(芦田・道上式)

$$\frac{q_{bk}}{\sqrt{sgd_k^3}} = 17P_{bk}\tau_{*ek}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}}\right) \quad (2-4)$$

オ) 浮遊砂式

浮遊砂量式については、浮遊砂成分を浮上量と沈降量に分け、それぞれ以下のように算出する。

◆ 浮上量 E_{sk}

粒径階 D_k の浮遊砂の浮上量 E_{sk} は次式のように算出される。

$$E_{sk} = W_{sk}C_{ek} \quad (2-5)$$

ここに、 W_{sk} ：粒径階 d_k の沈降速度、 C_{ek} ：粒径階 D_k の平衡基準面濃度である。 C_{ek} は、次に示す芦田・道上の平衡基準面濃度式より求められる。

$$C_{ek} = 0.025P_{bk} \left[\frac{g(\xi_0)}{\xi_0} - G(\xi_0) \right] \quad (2-6)$$

$$g(\xi_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\xi_0^2\right) \quad (2-7)$$

$$G(\xi_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\xi_0}^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2}\xi^2\right) d\xi \quad (2-8)$$

$$\xi_0 = \frac{W_{sk}}{0.75u_*} \quad (2-9)$$

ここに、 P_{bk} ：交換層における粒径階 D_k の含有率、 u_* ：摩擦速度である。

◆ 沈降量 D_{sk}

粒径階 D_k の浮遊砂の沈降量 D_{sk} は次のように算出される。

$$D_{sk} = W_{sk}C_{ak} \quad (2-10)$$

ここに、 C_{ak} ：粒径階 D_k の底面の土砂濃度、粒径毎の土砂濃度 C_k は、移流拡散方程式から求められる。

カ)境界条件

イブラヒミア水路の上流端より流入流量とともに、掃流砂・浮遊砂量を与える。

掃流砂量については、上流端の河床勾配に応じた平衡給砂とする。

浮遊砂量については、下記に示す C-Q 式の形式で流量に応じた浮遊砂量を与えた。係数 α および係数 β については、水理公式集平成 11 年版（土木学会編集）の一般値を基本にしつつ、検証計算により河床変動の再現性の高い値を設定した。

本解析での設定は $\alpha = 1.5 \times 10^{-7}$ 、 $\beta = 2$ とした。

$$Q_{\text{sin}} = \alpha Q^\beta \tag{2-11}$$

ここに、 Q_{sin} : 流入する流砂量 (m³/s)

Q : 流量 (m³/s)

α : 係数 ($4 \times 10^{-8} \sim 6 \times 10^{-6}$)

β : 係数

4) 解析ケース

解析ケースを表 2-1.13 に示す。河床変動の検証として、堆砂除去後である 2016 年 1 月測量河床を初期河床として、堆砂除去前の 2015 年 11 月測量河床の再現を行うことにより、現況河道の河床変動の傾向を再現・評価可能であることを示す。図 2-1.18 に堆砂除去前後の河床変動高のコンター図を示す。

構築したモデルに対し、1 年間の代表的な流量を適用し、現況（既設堰）および計画（新設堰築堤後）の河床変動予測計算を実施する。結果より、堰周辺の堆積・侵食が顕著な個所を確認し、新設堰を含めた水路の護床工範囲検討の参考とする。

表 2-1.13 計算ケース（河床変動解析）

ケース	解析内容	河床	施設	流量
河床変動検証	検証	初期：② 検証対象：①	現況	11 ヶ月
河床変動現況	現況	初期：②	現況	1 年間
河床変動計画	計画	初期：②	計画 オーバーフロー	1 年間
備考	河床条件 ①：2015 年 11 月測量（堆砂除去前） ②：2016 年 1 月測量（堆砂除去後）			

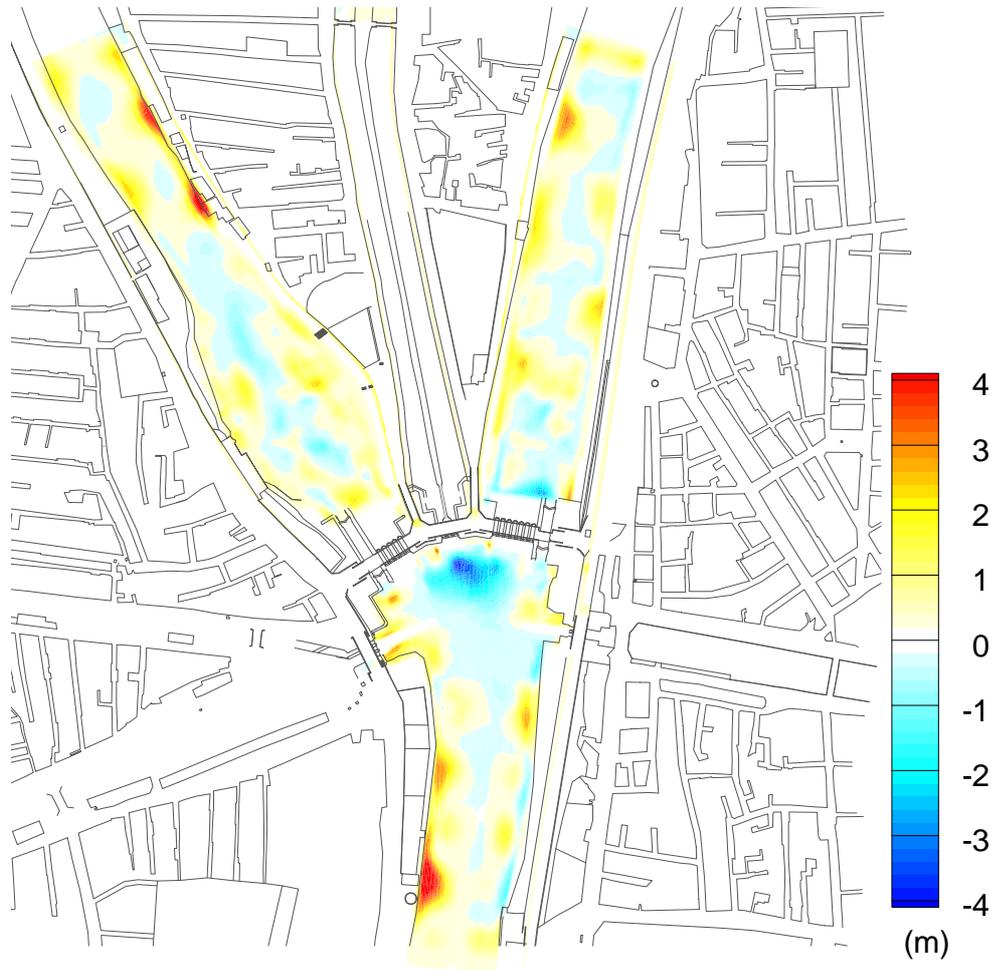


図 2-1.18 河床変動高コンター図
2015年11月測量河床-2016年1月測量河床

2-2 解析結果と評価

(1) 流況解析

a) 解析結果

1) 検証

i) 流量

図 2-2.1 に流速観測地点を、表 2-2.1 及び図 2-2.2 に流速観測地点における流量及び断面平均水位の比較を示す。堰下流 7 水路の計算流量は実測流量を良く再現できている。

ii) 平均流速

流速観測地点における平均流速を表 2-2.2 及び図 2-2.3 に示す。堰下流 7 水路の計算平均流速は実測平均流速を良く再現できている。

iii) 断面流速

断面流速の結果を図 2-2.4 から図 2-2.10 に示す。
これらによると、計算断面流速は実測の断面流速を良く再現できている。

iv) 流速コンター図

図 2-2.11 から図 2-2.12 は流速の速さを色で表したコンター図である。図 2-2.13 はバハルヨセフ堰下流を水力模型実験と比較した図で、左岸の渦が流況解析で表現されている。

v) 評価

したがって、計算された流速と流量の一致程度から判断して、計算された値は、実測値を再現させることができると判断される。

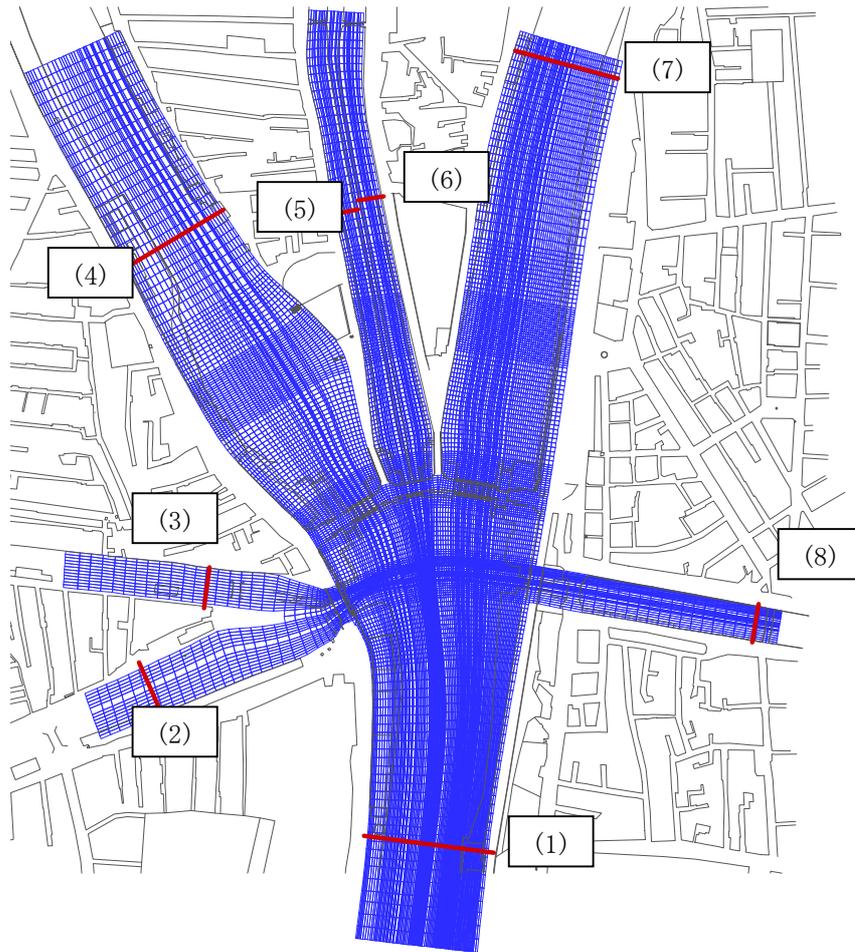


図 2-2.1 流速観測地点位置図

表 2-2.1 流速観測地点における流量と断面平均水位（検証）

水路名称	流量 (m ³ /s)			水位 (EL. m)		
	計算値	目標値	差 (計算-目標) (%)	計算値	目標値	差 (計算-目標) (%)
Ibrahimia canal U/S	355.0	355.0	0.0%	46.1	46.1	0.0%
Irad Delgaw canal	2.1	2.2	-0.4%	44.8	44.8	0.0%
Abo Gabal canal	6.2	6.1	0.6%	45.8	45.7	0.3%
Bahr Yusef canal (1)	171.5	170.6	0.5%	45.8	45.8	0.0%
Badraman canal	6.1	6.1	0.1%	45.7	45.7	0.0%
Dairutih canal	9.2	9.2	-0.2%	45.9	45.9	0.0%
Ibrahimia canal D/S (1)	156.8	157.3	-0.3%	45.0	45.0	0.0%
Sahelyia canal	3.1	3.1	0.6%	45.7	45.7	0.0%

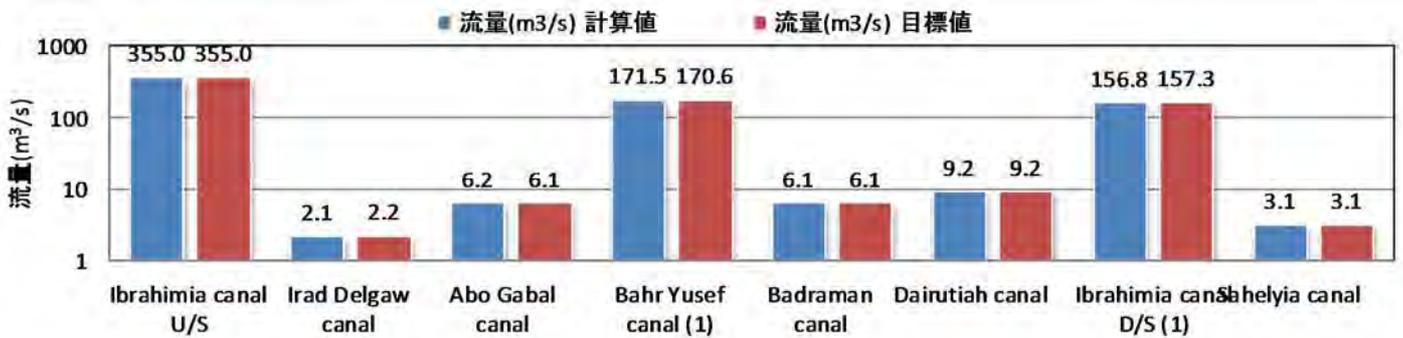


図 2-2.2 流量比較図

表 2-2.2 断面平均流速

水路名称	平均流速 (m/s)	
	計算値	目標値
Irad Delgaw canal	0.12	0.12
Abo Gabal canal	0.47	0.47
Badraman canal	0.32	0.32
Dairutih canal	0.33	0.33
Sahelyia canal	0.25	0.25

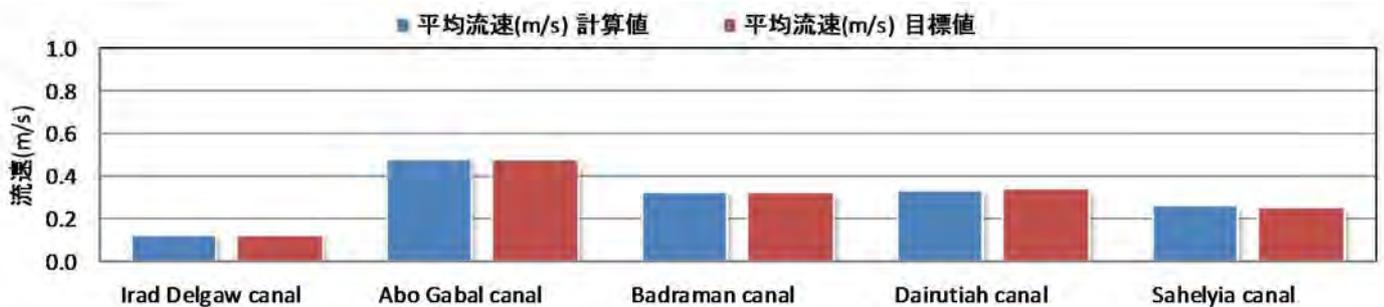


図 2-2.3 平均流速比較図

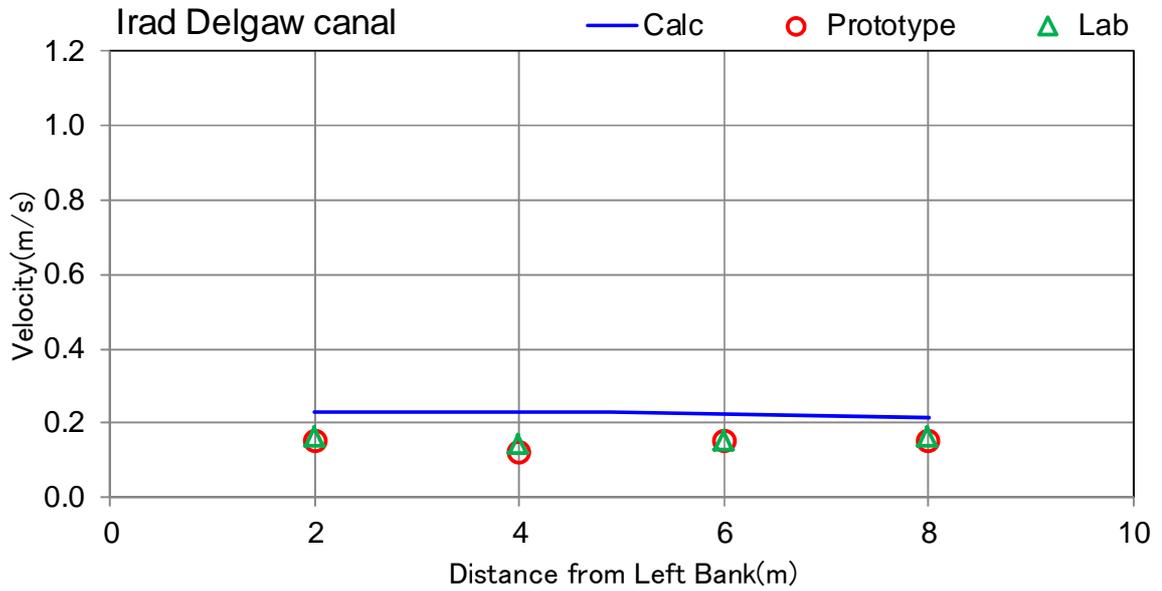


図 2-2.4 イラドデルガウイ水路における断面平均流速の比較

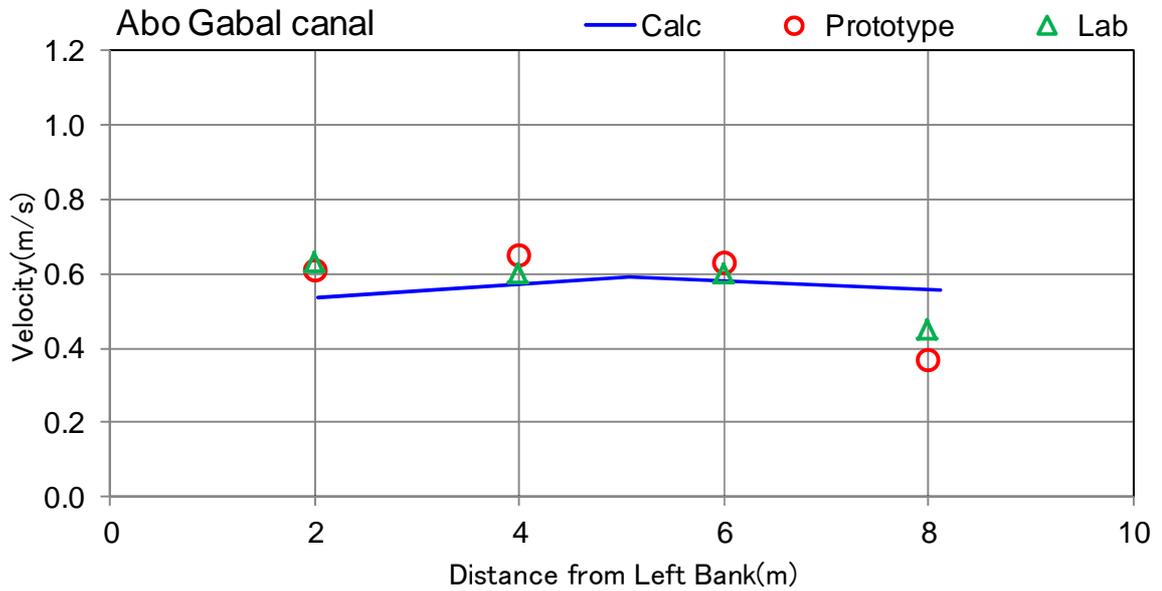


図 2-2.5 アボギャバル水路における断面平均流速の比較

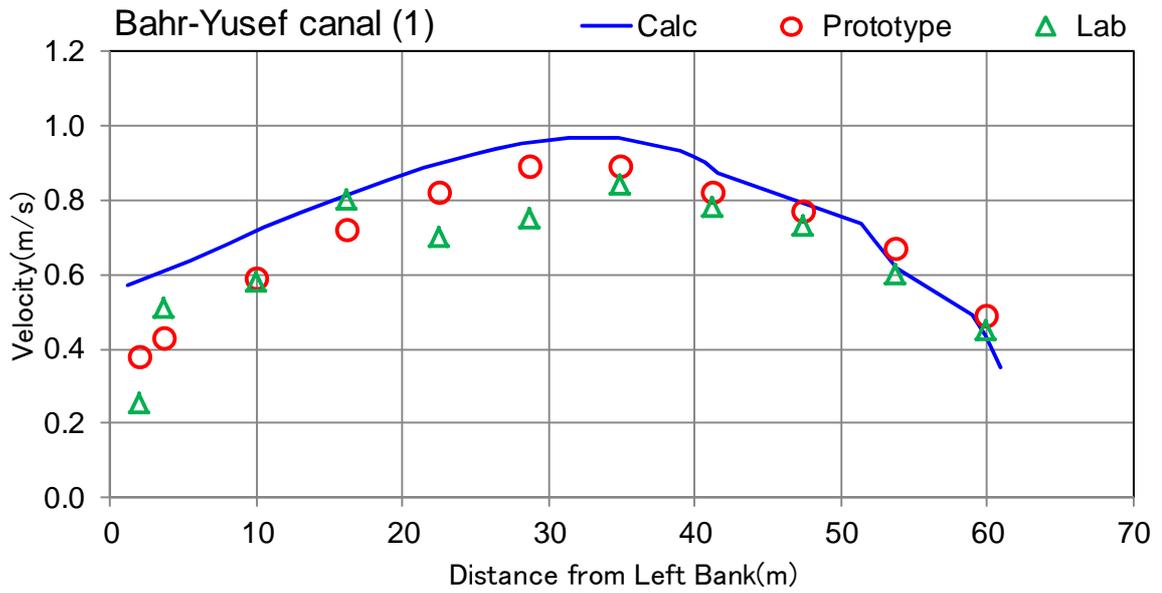


図 2-2.6 バハルヨセフ水路における断面平均流速の比較

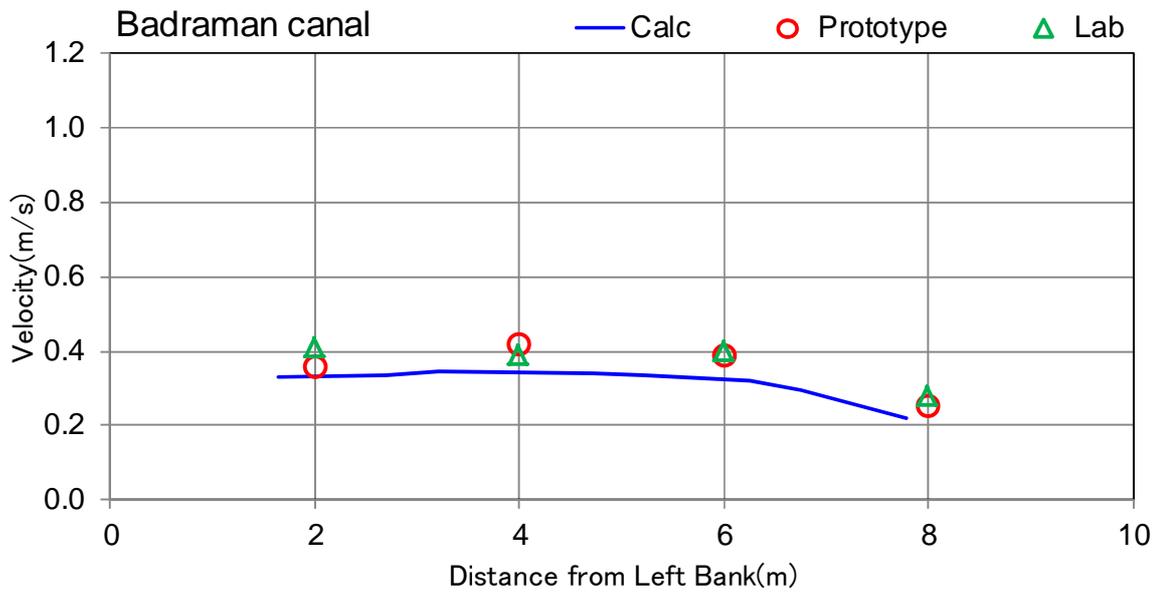
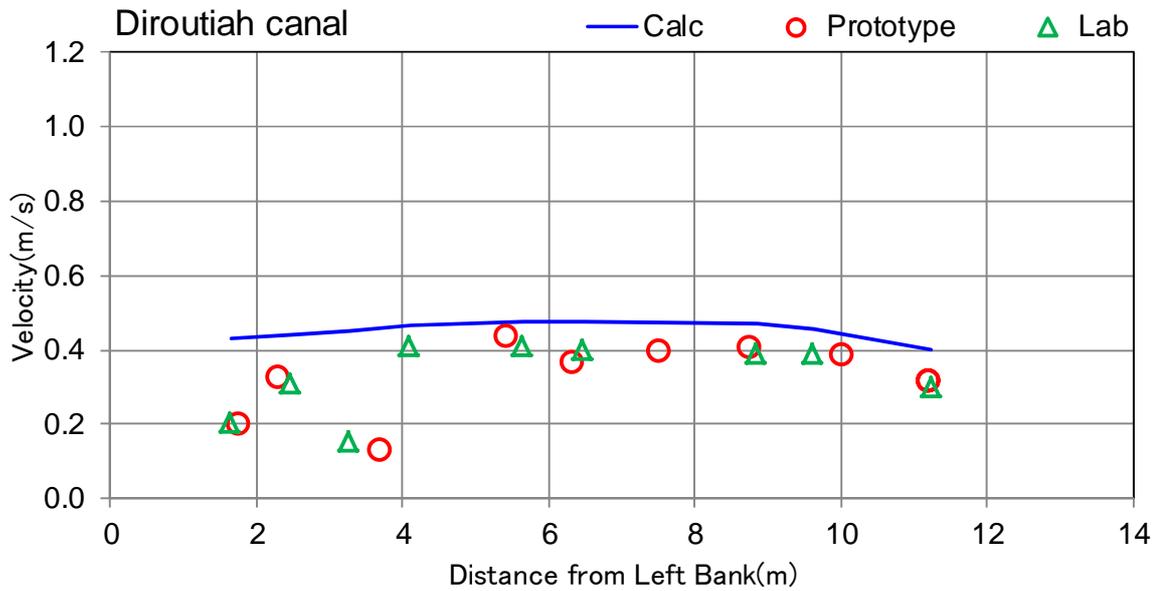


図 2-2.7 バドラマン水路における断面平均流速の比較



注) 左岸から約 3.8m 地点の実測流速は水路形状から想定できない流速であることから、評価の対象外とした。

図 2-2.8 ダイルーティア水路における断面平均流速の比較

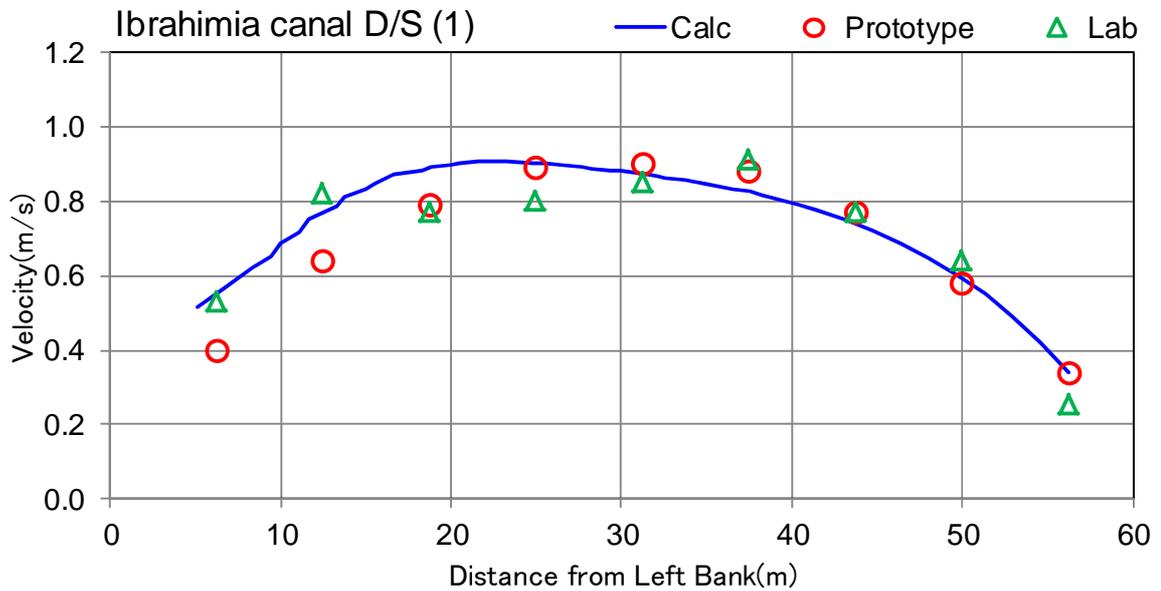


図 2-2.9 イブラヒミア水路における断面平均流速の比較

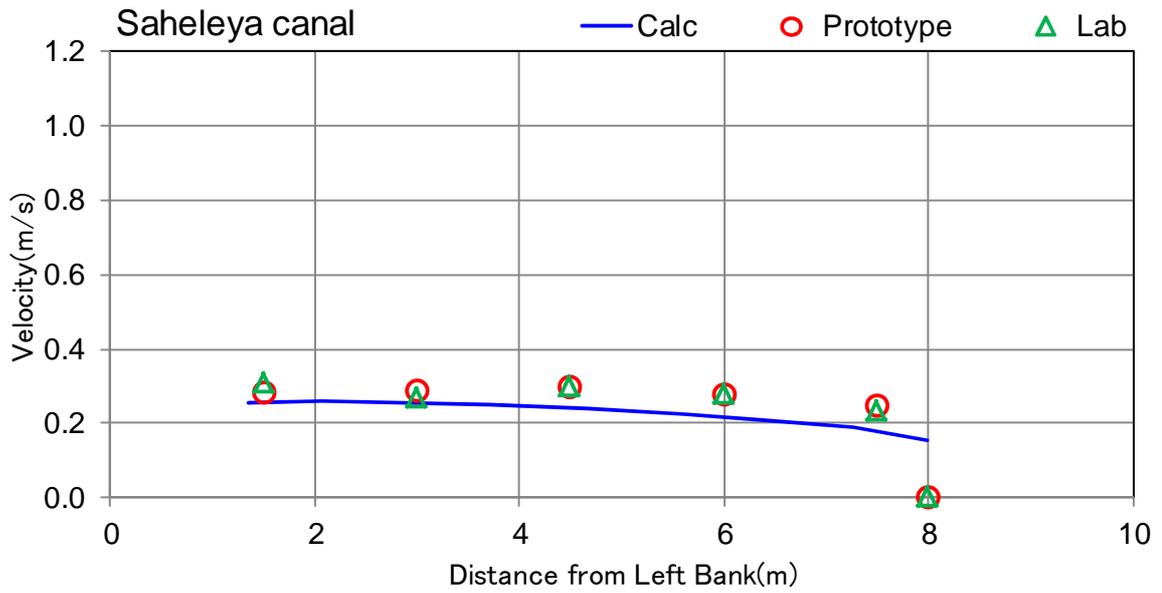


図 2-2.10 サヘリア水路における断面平均流速の比較

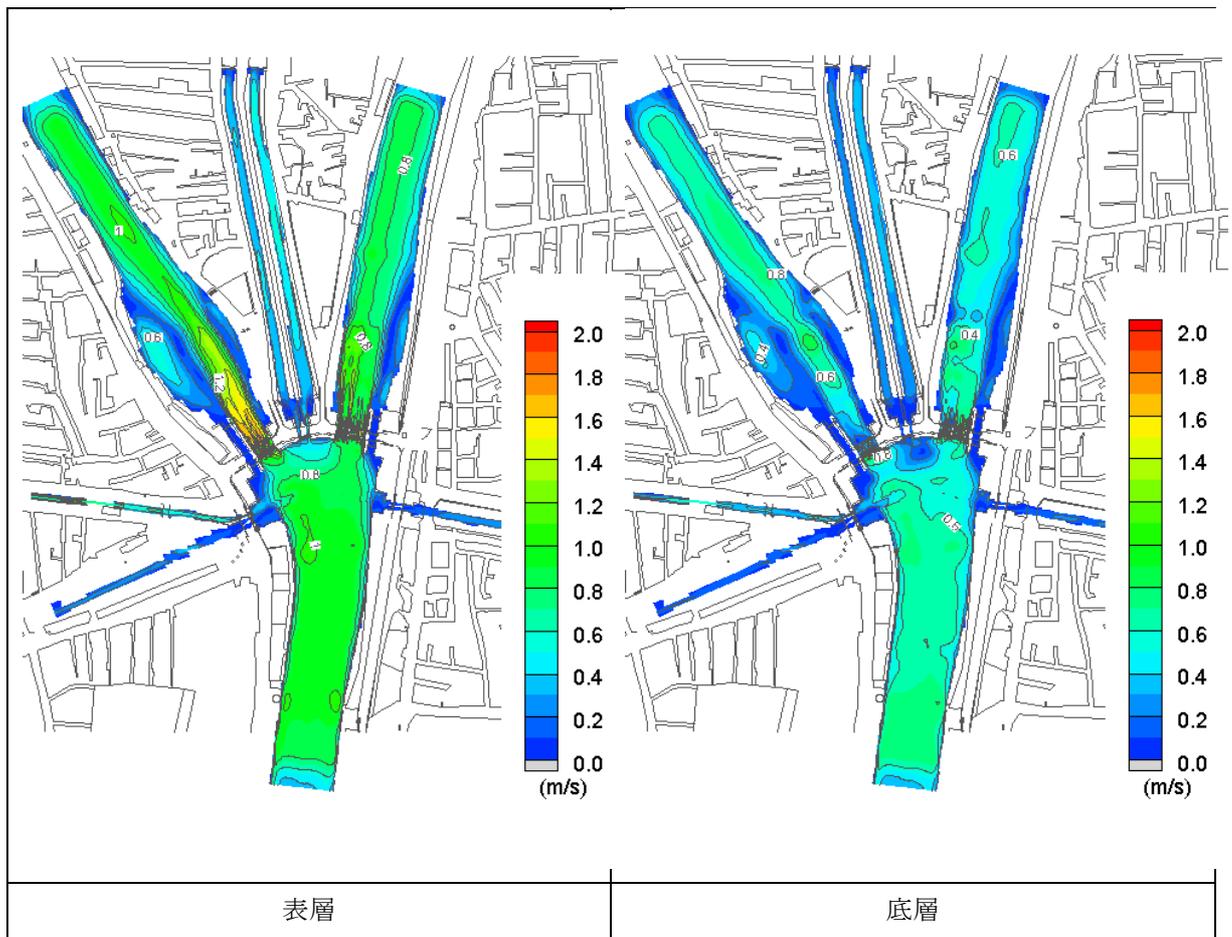


図 2-2.11 流速コンター図 (検証)

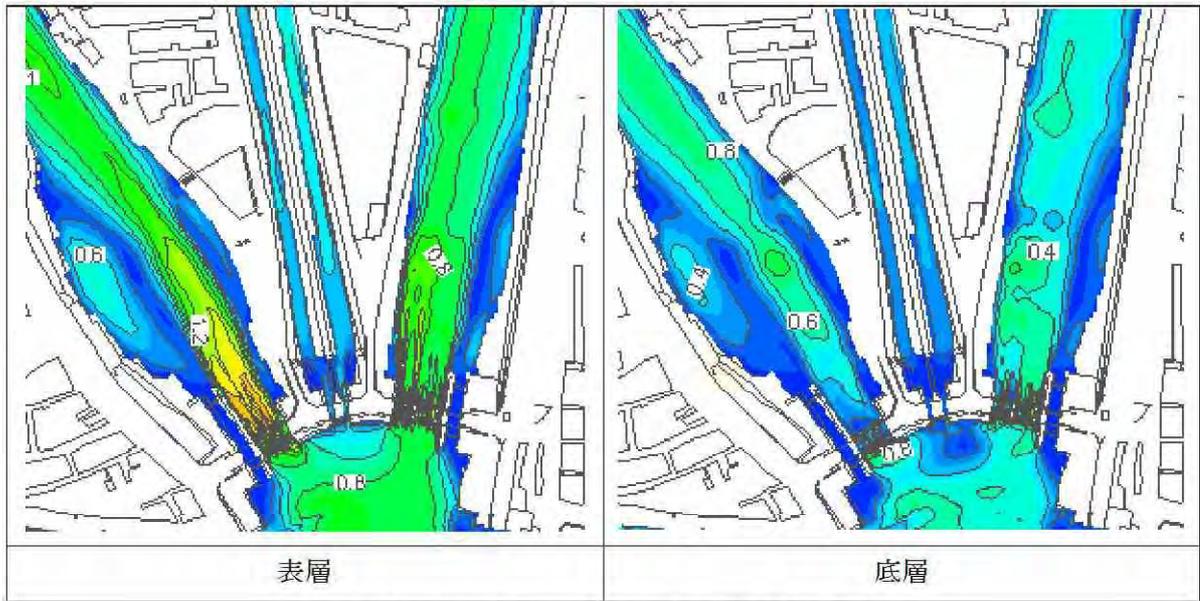


図 2-2.12 流速コンター図 (検証、堰周辺拡大図)

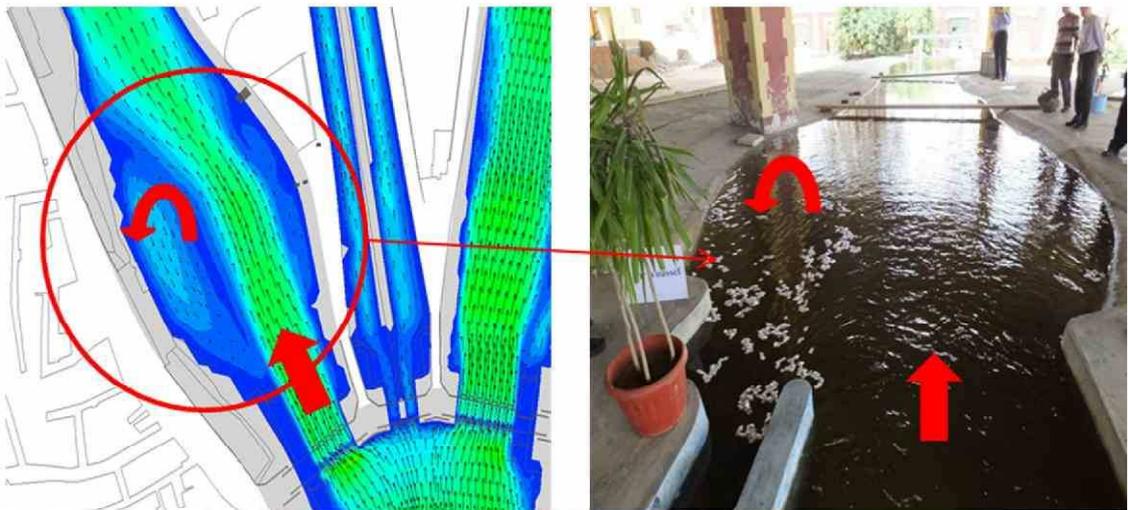


図 2-2.13 バハルヨセフ堰下流における流況解析と水理模型実験の比較

2) 現況

現況では、設計流量配水時の流況を解析した。

表 2-2.3 に流速観測地点における流量及び断面平均水位の比較を示す。また、図 2-2.14 に流量比較図、図 2-2.15、2-2.16 に流速コンター図を示す。

この結果、バハルヨセフ堰下流両岸、イブラヒミア堰下流右岸に流速の遅い領域が発生し、特にバハルヨセフ堰下流左岸部では渦を巻いていることが判明した。

表層の流速はバハルヨセフ堰下流が速いが、流速 2m/s 以上の領域はいずれも発生していないことが流速分布図から判る。

表 2-2.3 流速観測地点における流量と断面平均水位（現況）

水路名称	流量 (m ³ /s)		水位 (m)	
	計算値	目標値	計算値	目標値
Ibrahimia canal U/S	447.5	455.0	46.2	46.3
Irada Delgaw canal	8.2	9.0	45.9	45.9
Abo Gabal canal	6.7	7.0	46.0	45.9
Bahr-Yusef canal (1)	232.9	227.0	45.8	45.8
Badraman canal	11.0	9.0	45.9	45.9
Diroutiah canal	12.2	12.0	45.9	45.9
Ibrahimia canal D/S (1)	186.3	186.0	45.1	45.1
Saheleya canal	5.0	5.0	45.9	45.9

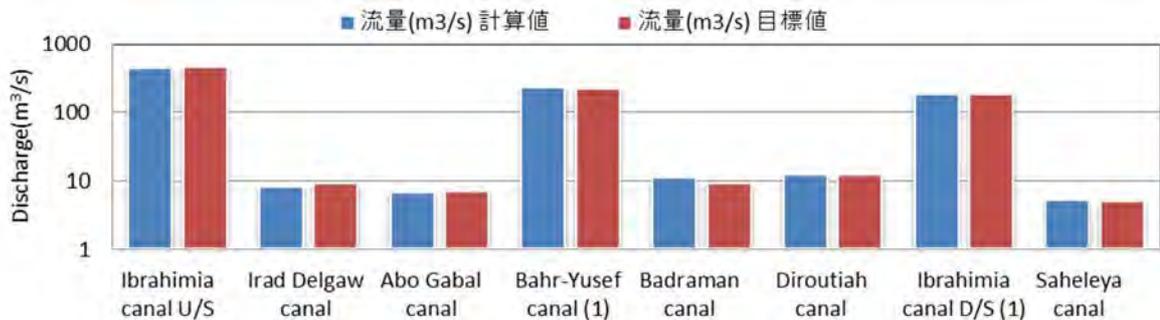


図 2-2.14 流量比較図 (現況)

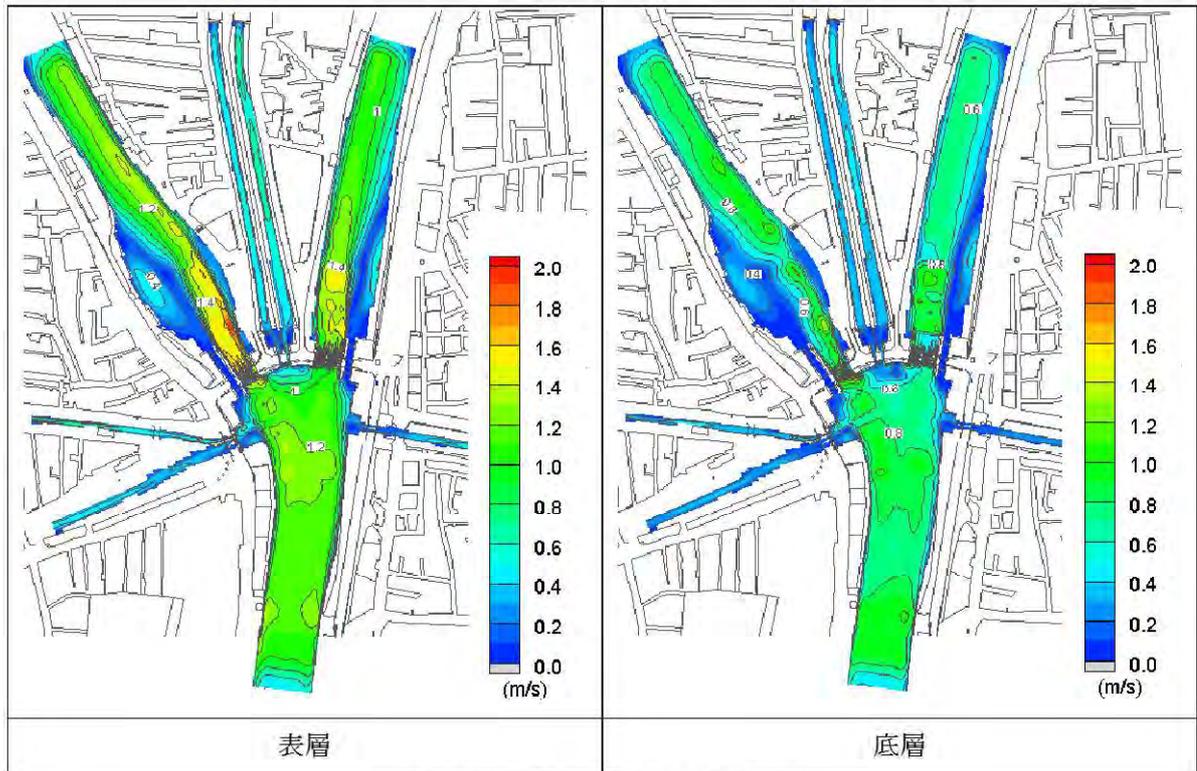


図 2-2.15 流速コンター図 (現況)

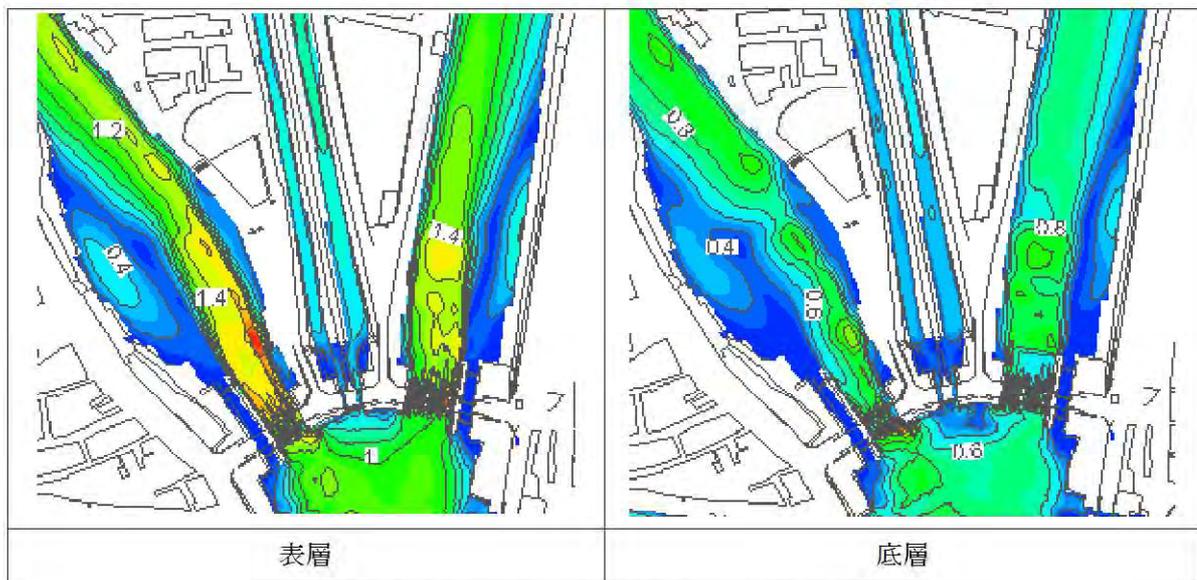


図 2-2.16 流速コンター図 (現況、堰周辺拡大図)

3) 計画

計画では、設計流量において、堰放流方式がアンダーフローとオーバーフローの場合の流況を解析した。

表 2-2.4 に流速観測地点における流量及び断面平均水位の比較を示す。また、図 2-2.17 に流量の比較図、図 2-2.18~2-2.21 に流速コンター図を示す。

この結果、バハルヨセフ堰下流左岸、イブラヒミア堰右岸上下流に流速の遅い領域が発生していることが判明した。

オーバーフロー及びアンダーフローとも堰下流の流速に差がほとんど無い。これは、堰下流の水深が 5m 以上もあることが原因と考えられる。また、イブラヒミア堰の底層部の流速のうち、右岸側のゲートの値が大きくなっていることが判明した。これは、上流既設堰のから直進流下するゲート数が右岸側に集中している事、新設堰通過後の下流右岸部が拡大していることから右岸方向へのモーメントが発生していることなどが原因と考えられる。

いずれの堰も流速 2m/s 以上の領域は発生していないことが判る。

表 2-2.4 流速観測地点における流量と断面平均水位（計画）

水路名称	流量 (m ³ /s)			水位 (m)		
	計算値		目標値	計算値		目標値
	アンダー	オーバー		アンダー	オーバー	
(1) Ibrahimia canal U/S	455.0	455.0	455.0	46.3	46.3	46.3
(2) Irad Delgaw canal	6.6	5.0	9.0	45.9	45.9	45.9
(3) Abo Gabal canal	8.7	8.2	7.0	46.1	46.0	45.9
(4) Bahr-Yusef canal	230.3	231.5	227.0	45.8	45.8	45.8
(5) Badraman canal	8.9	9.0	9.0	45.9	45.9	45.9
(6) Diroutiah canal	11.8	11.9	12.0	45.9	45.9	45.9
(7) Ibrahimia canal D/S	183.7	184.6	186.0	45.1	45.1	45.1
(8) Saheleya canal	5.0	5.0	5.0	45.9	45.9	45.9

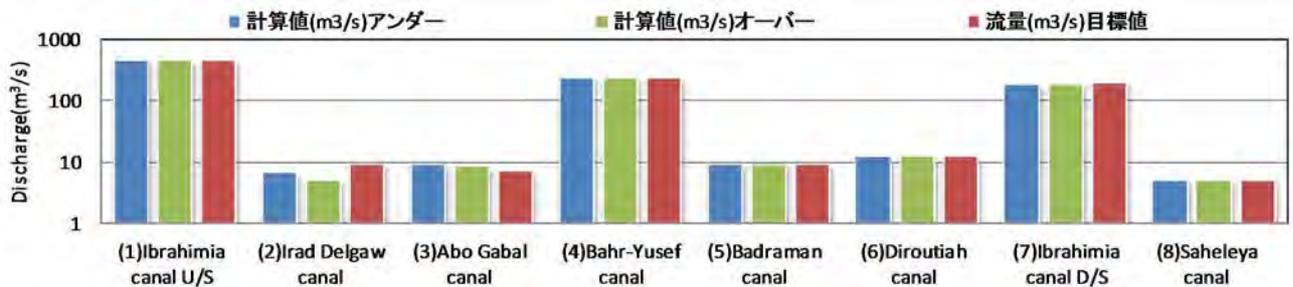


図 2-2.17 流量比較図（計画）

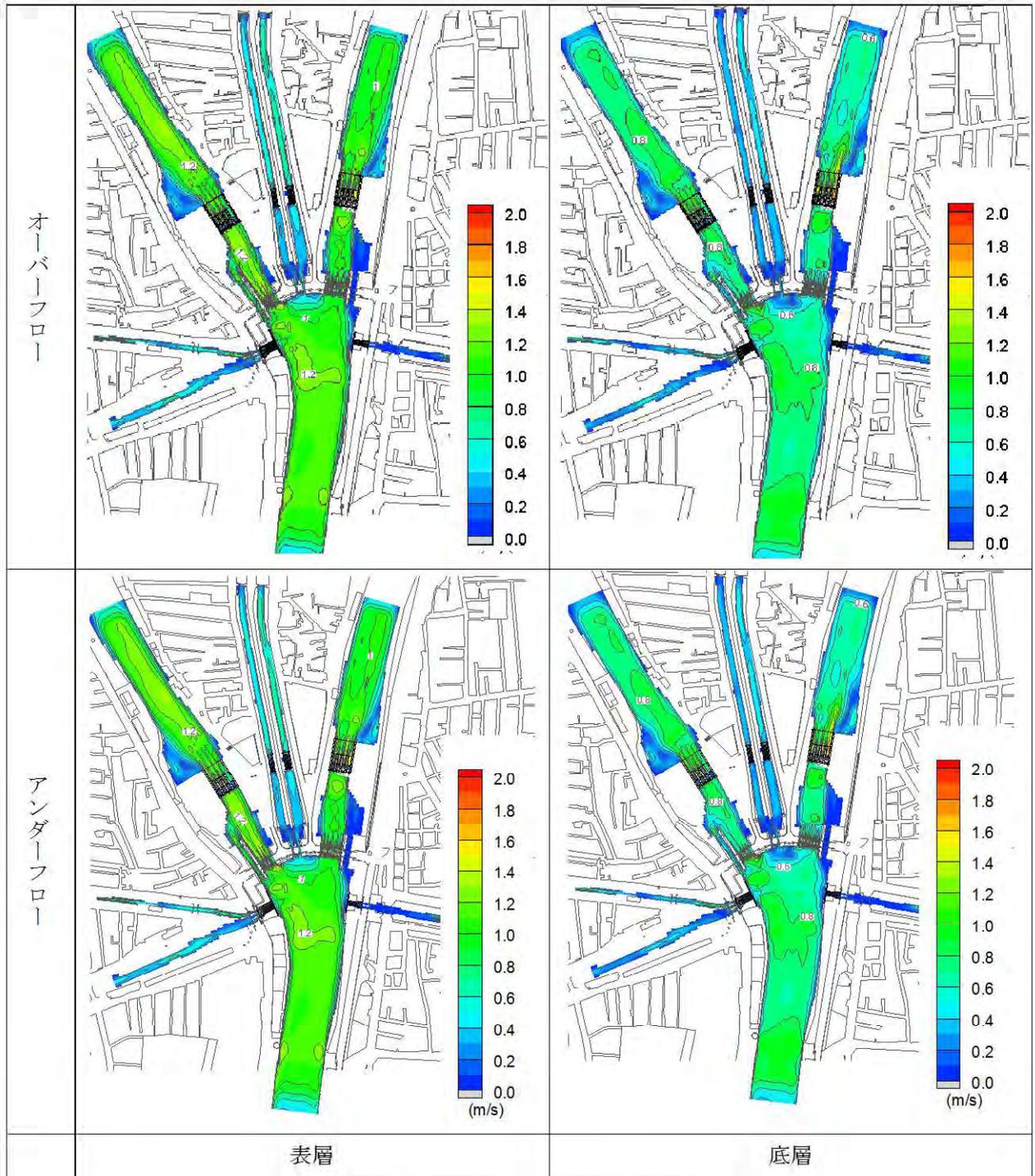


図 2-2.18 流速コンター図 (計画)

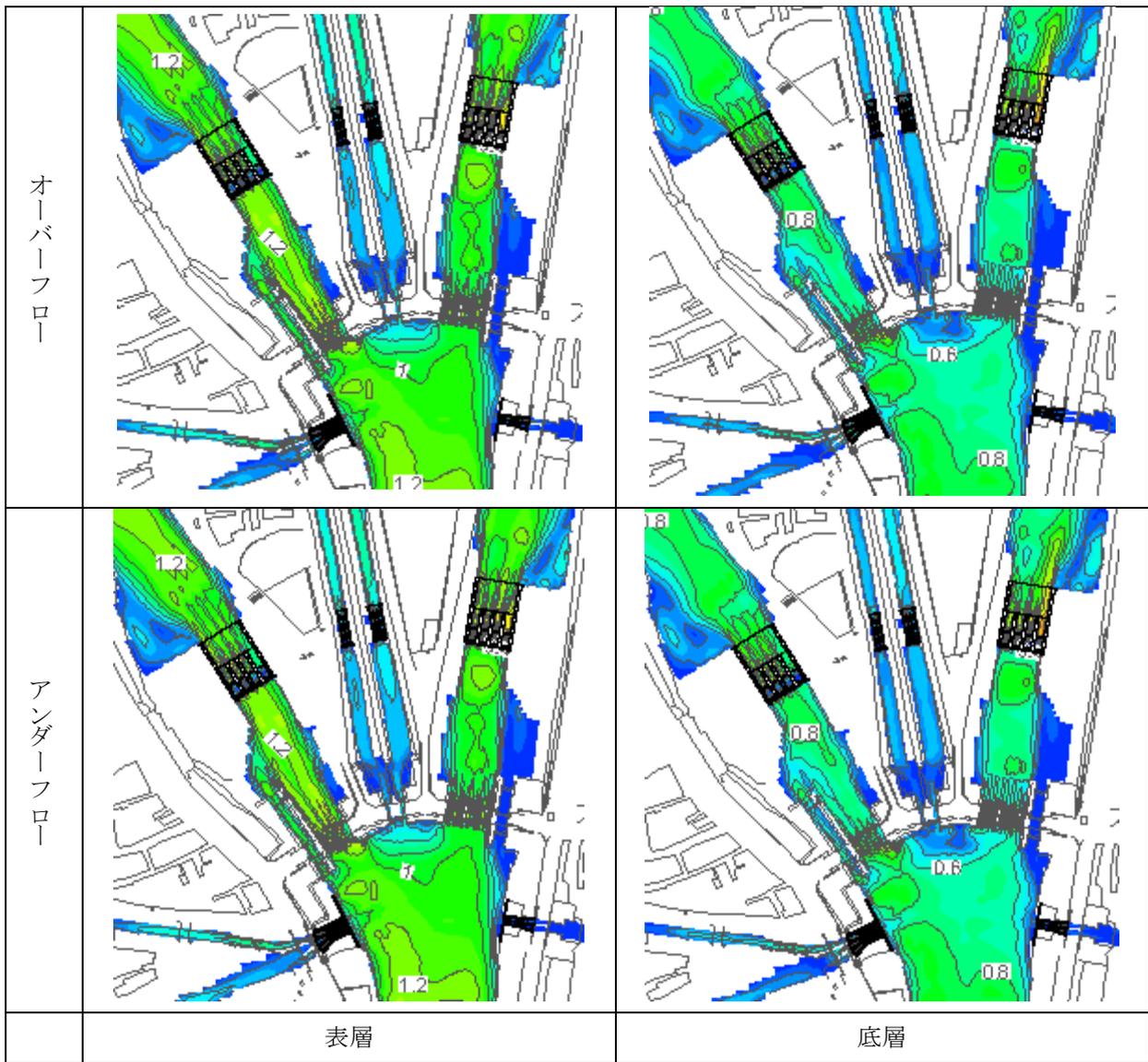


図 2-2.19 流速コンター図 (計画、堰周辺拡大図)

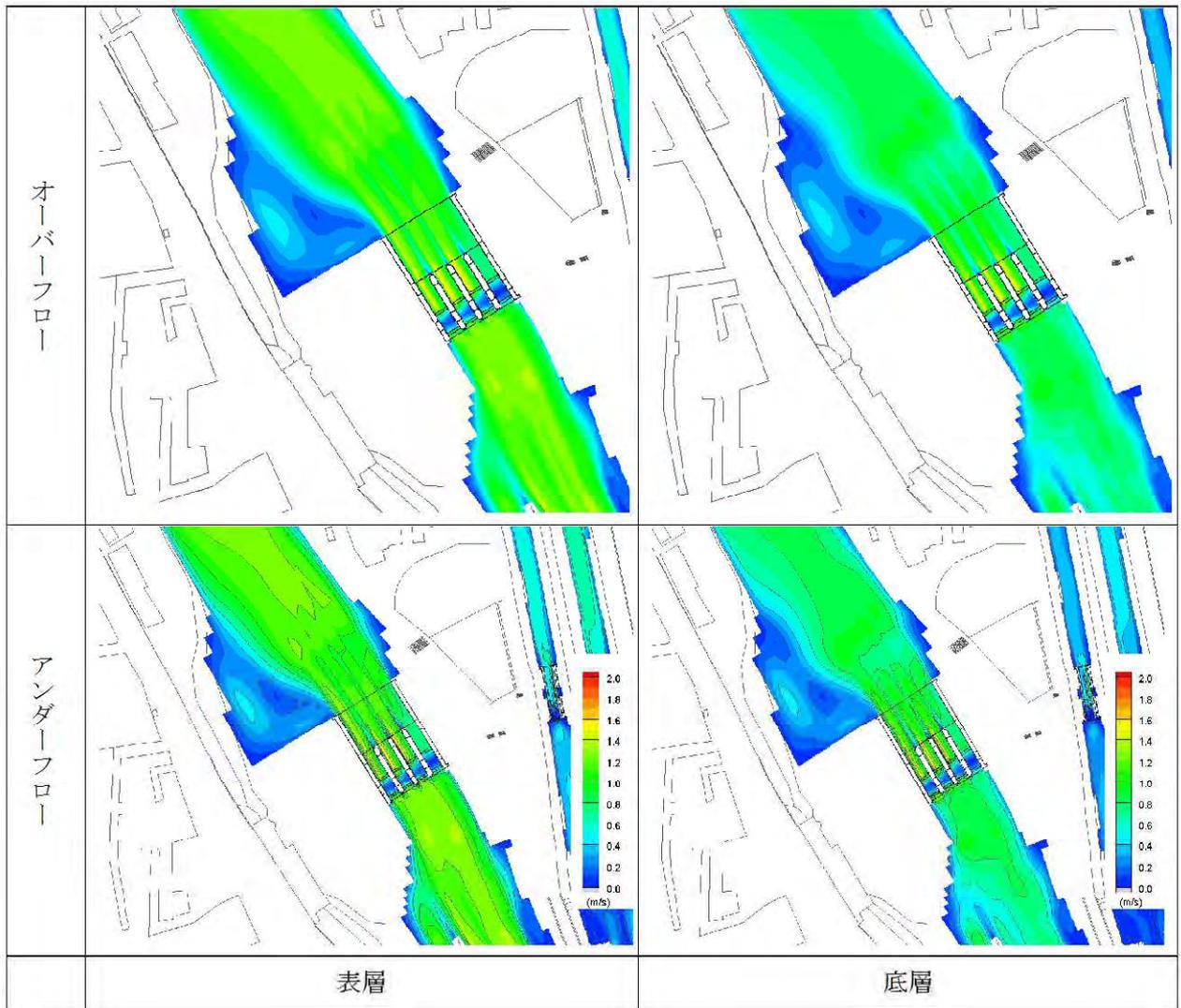


図 2-2. 20 流速コンター図 (計画、パハルヨセフ堰拡大図)

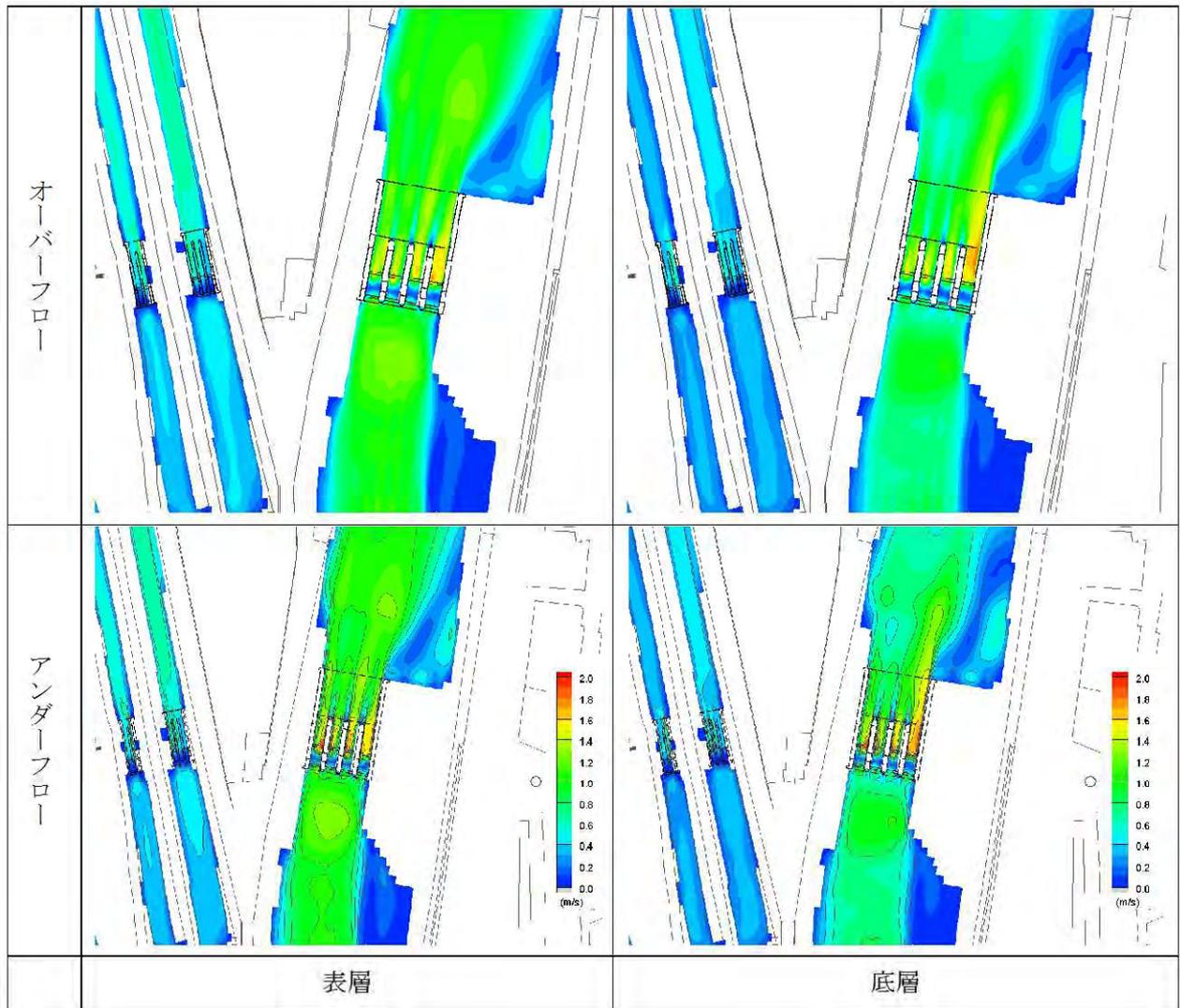


図 2-2.21 流速コンター図 (計画、イブラヒミア堰拡大図)

4) 評価

新設 5 堰は計画流量を適正に 7 水路に配分できることを確認した。

また、洗掘等の可能性については、設計流量時の解析結果により高速流となる危険箇所や現況の流速よりも計画の流速が上回っている範囲を対象として評価する。

図 2-2.22～25 に計画流速から現況流速を差し引いた流速差分図を示す。これらによると、現況よりも計画の流速が上回っている黄色や赤色の領域が発生していることが判る。また、新バハルヨセフ堰及びイブラヒミア堰の既設堰の下流から新設堰の上流までの区間は、湛水区間となる為、新設堰の影響により流速が減少していることがわかる。この区間で流速が減少することにより堆砂が進行する可能性があるため当該区間の維持管理に留意が必要である。

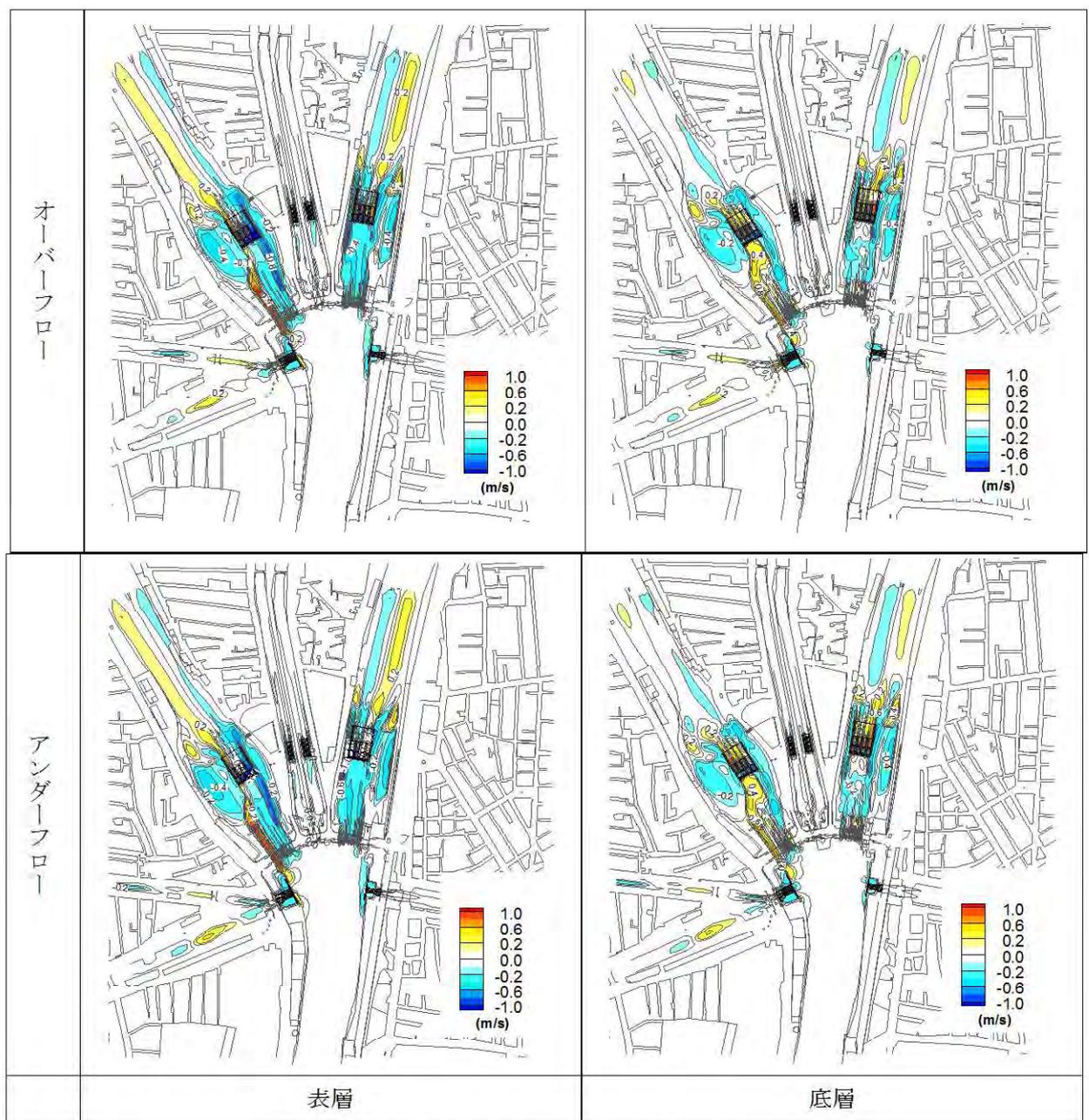


図 2-2.22 流速差分図 (計画－現況)

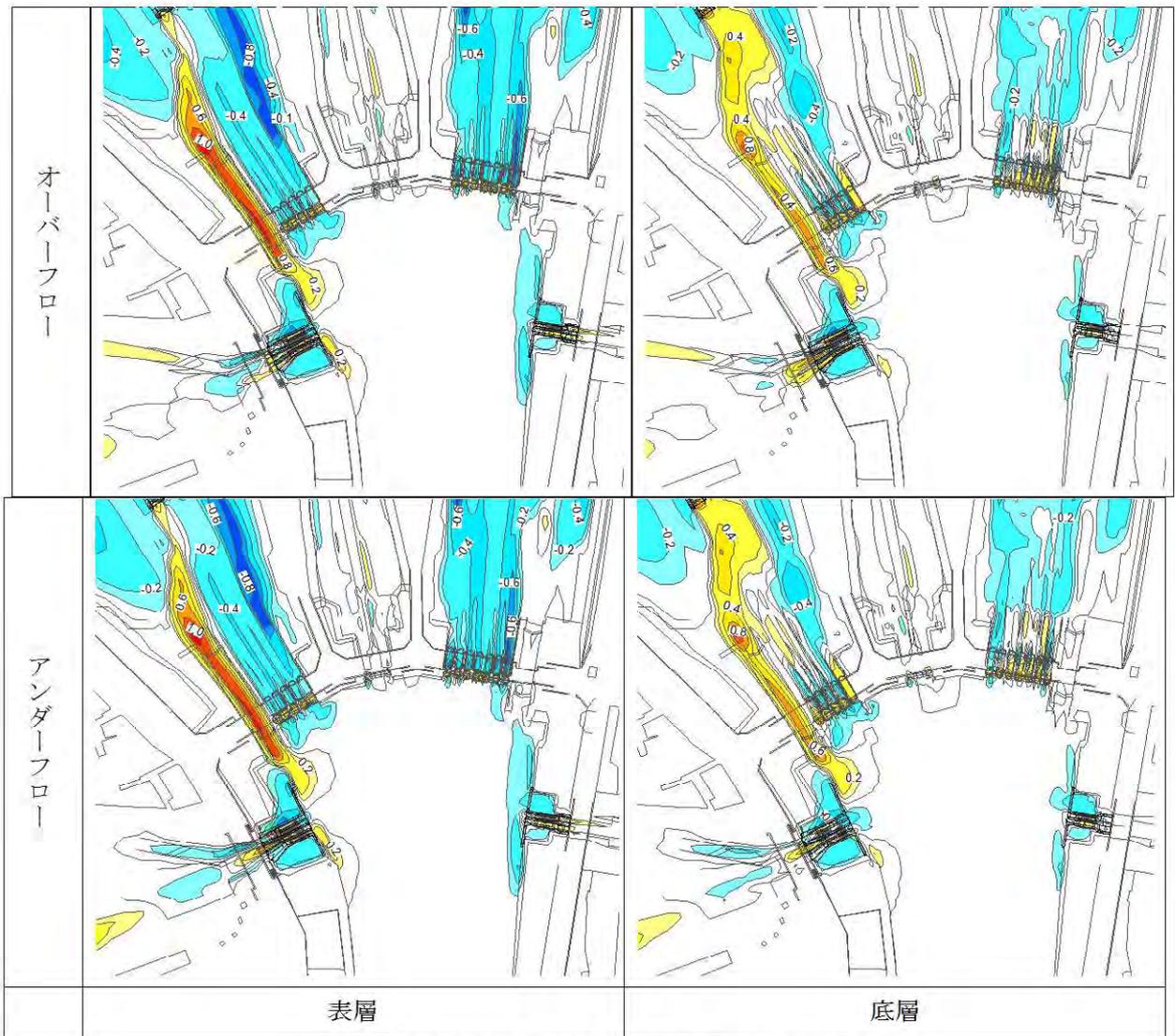


図 2-2. 23 流速差分図 既設堰拡大図 (計画-現況)

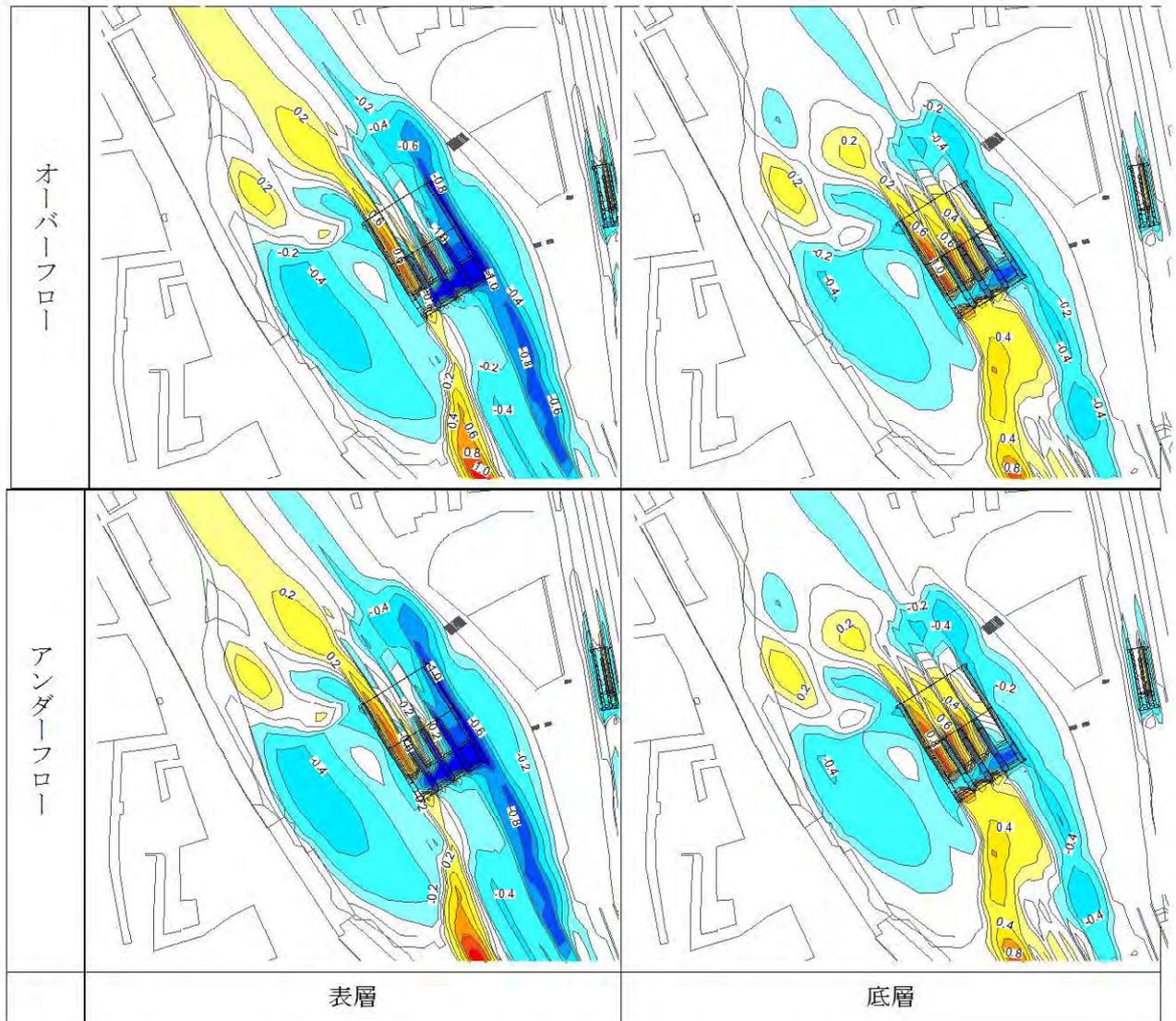


図 2-2.24 流速差分図 (バハルヨセフ堰拡大図) (計画一現況)

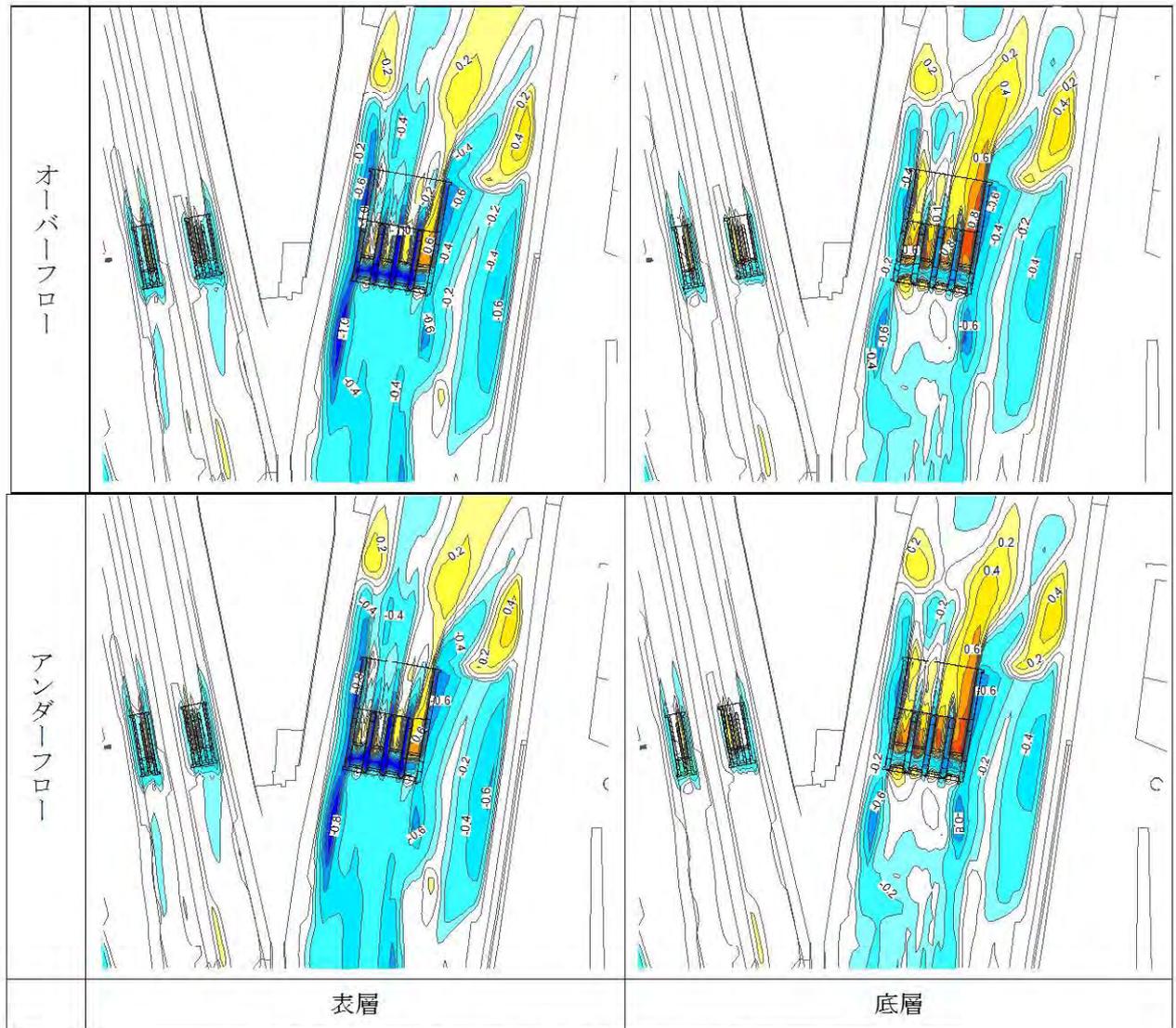


図 2-2.25 流速差分図 イブラヒミア堰拡大図 (計画-現況)

現況と計画流速分布の結果を以下に示す。

護床工の範囲を確認するために、評価は河床の流速分布によって行う。

新設堰下流付近の現況段階の最大河床流速はバハルヨセフ水路で 0.8～1.0m/s、イブラヒミア水路で 0.8m/s である。

また計画段階ではバハルヨセフ水路で 1.0m/s、イブラヒミア水路で 0.8～1.4m/s である。

特に、イブラヒミア堰では堰 4 門のうち、最右岸に流速が集中しており、流速の速い領域がエプロンの下流にまで及んでいる。また、残り 3 門の流速はエプロンの範囲内に収まっている。

イブラヒミアの局所的な流速の集中を除き、バハルヨセフ、イブラヒミア共に、堰通過後の流況はエプロン内で安定していることが判る。

表 2-2.5 新堰下流河床部の流速の差

項目		バハルヨセフ堰	イブラヒミア堰
最大流速 (m/s)	現況	0.8～1.0	0.8
	計画	1.0	0.8～1.4
	差 (現況 - 計画)	0～0.2	0～0.6
流れの状況		エプロンの下流端から 30m より下流では安定した流れになっている。	右岸端のゲートを除き、エプロンの下流端から 30m より下流では安定した流れになっている。
護床工の範囲		エプロンの下流端から約 30m 下流	エプロンの下流端から約 30m 下流

なお、新イブラヒミア堰の右岸側 1 門の流速集中に伴うエプロント流の護床対策については、将来的には、ゲート操作による 4 門均等放流の実施が望ましい。

また、短期的には捨て石の設置等による対処方法もある。ただし、当該範囲は仮締切の外にあたるため、ウインタークロージャの時期での捨て石設置工事实施が想定される。

これらについては、護床工の配置、施工計画及びゲート操作計画との関連に注意が必要である。

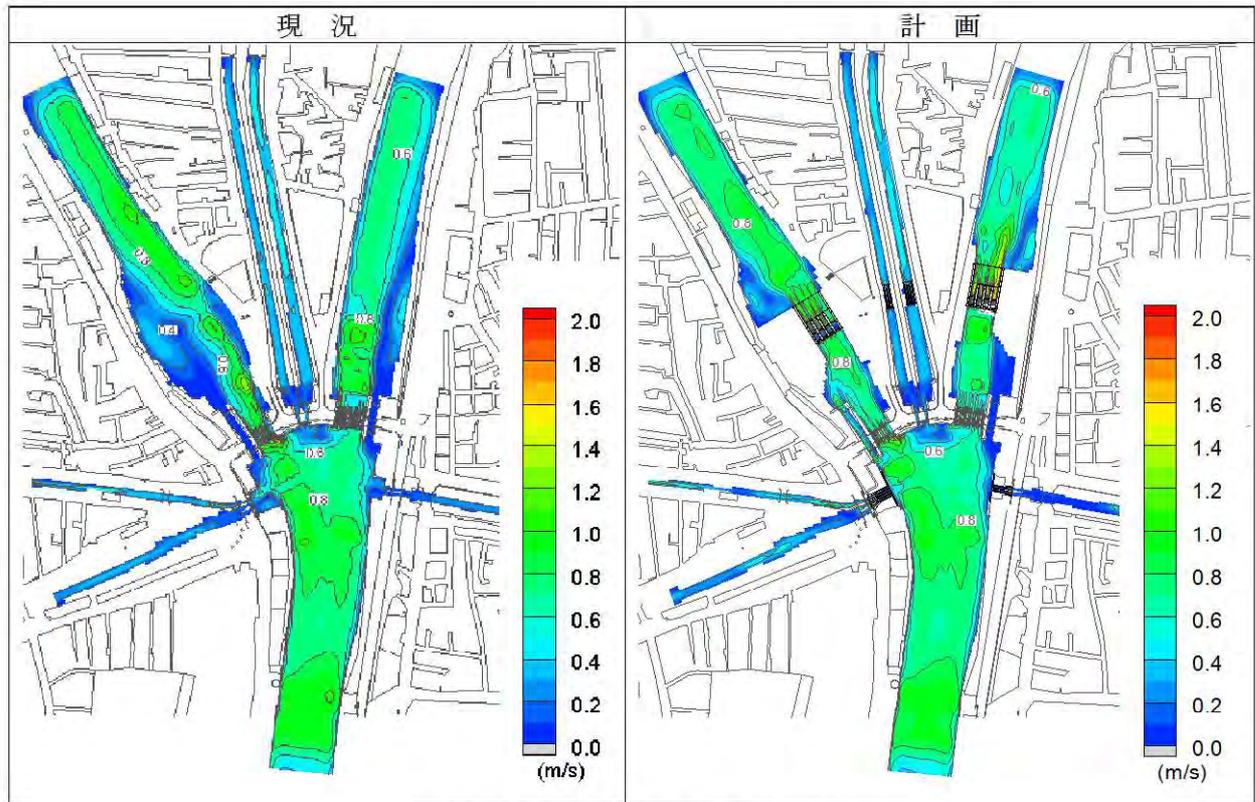
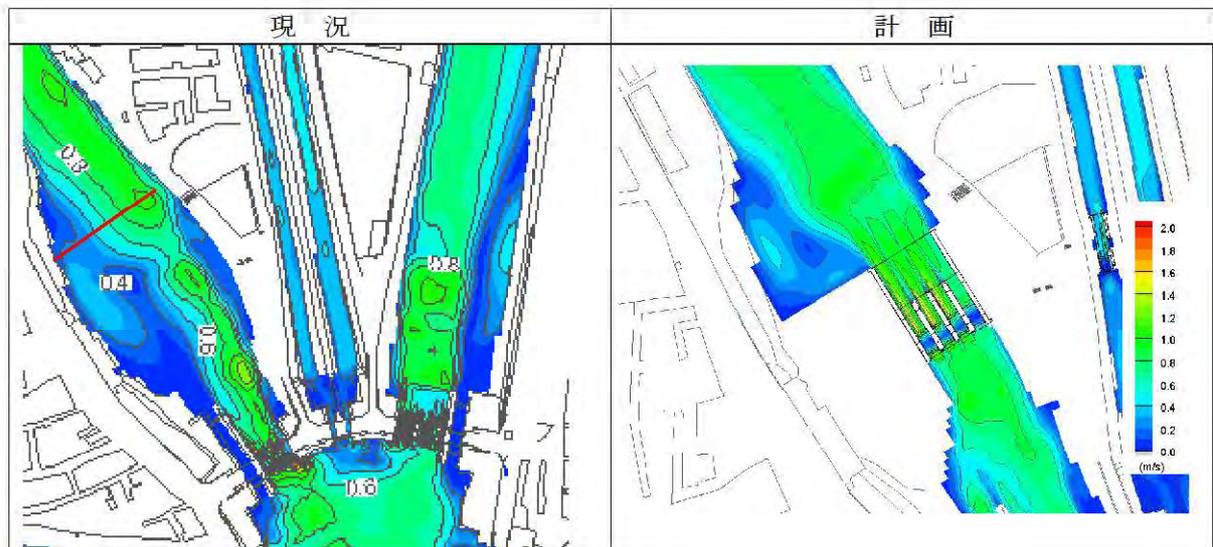
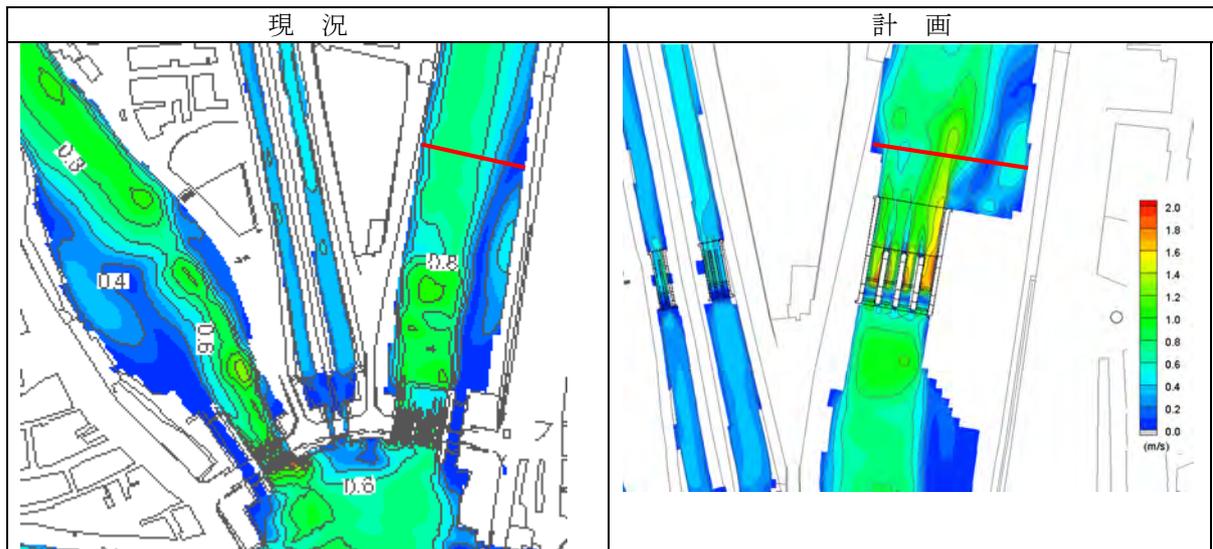


図 2-2.26 河床部の流速コンター図



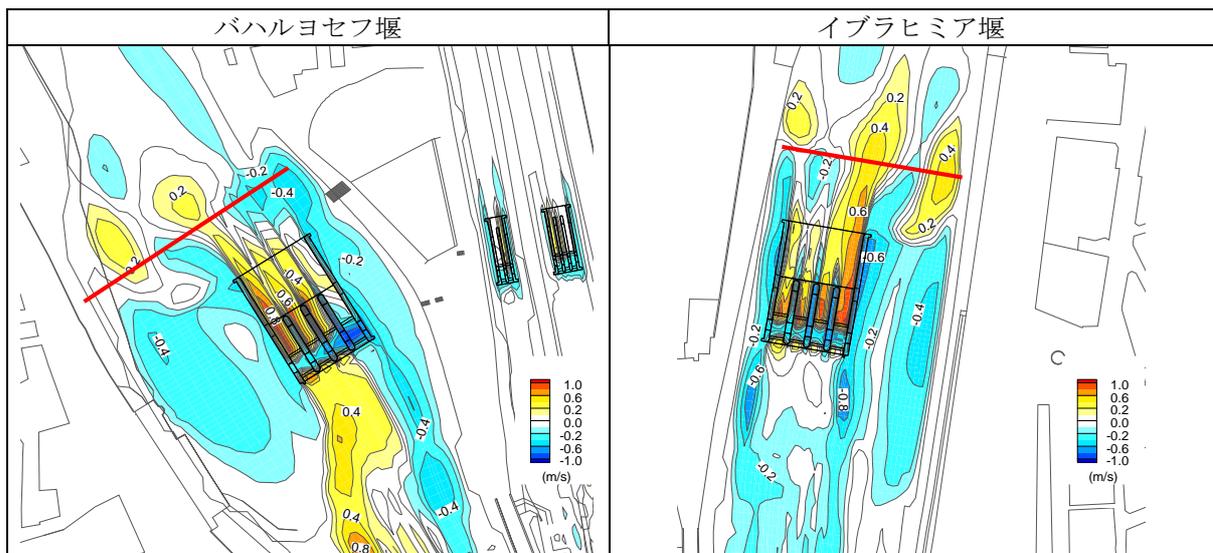
注) 赤線はエブロン下流端から 30m の地点を示す。

図 2-2.27 河床部の流速コンター図(バハルヨセフ堰)



注) 赤線はエプロン下流端から 30m の地点を示す。

図 2-2. 28 河床部の流速コンター図(イブラヒミア堰)



注) 赤線はエプロン下流端から 30m の地点を示す。

図 2-2. 29 河床部の流速差 (バハルヨセフ堰及びイブラヒミア堰、現況 - 計画)

5) 水理模型実験との比較のための計画流況解析の実施

現況及び計画の流況解析は、堰設計への影響を確認することを目的として、堰設計が適用する地形図と同一の2016年1月測定の値を適用した。一方、水路模型実験との比較においては、水理模型実験が2015年8月時点の地形を適用していることから、同一の条件となっていないが、流況解析の現況、計画の傾向との比較を行うことを確認していた。

しかし、その後、ある程度の条件は同一としておくことが決定され、流況解析の計画段階については、水理模型実験と同一の2015年8月時点の地形を適用して解析を行うこととした。以下に、その結果を示す。

ア) 解析条件

両方のモデルによる結果を比較するために、以下の条件をこの流況解析に適用する。比較対象の解析は、新ダイルート堰群（計画段階）である。

表 2-2.6 解析条件

解析条件	基本設計報告書 (BDR)	比較のための解析
1.地形データ	2016年1月	2015年8月
2.メッシュ数	総メッシュ数: 198,380	BDRと同じ
3.境界条件	既設堰上流: 流量 各水路末端: 水位	BDRと同じ
4.水位流量	計画段階 (新堰)	BDRと同じ

i) 地形条件

2015年8月の地形データを適用して、水理模型実験に適合させる。(図 2-2. 31, 2-2. 32)

ii) メッシュ数

総メッシュ数は基本設計報告書と同じである。(図 2-2. 30).

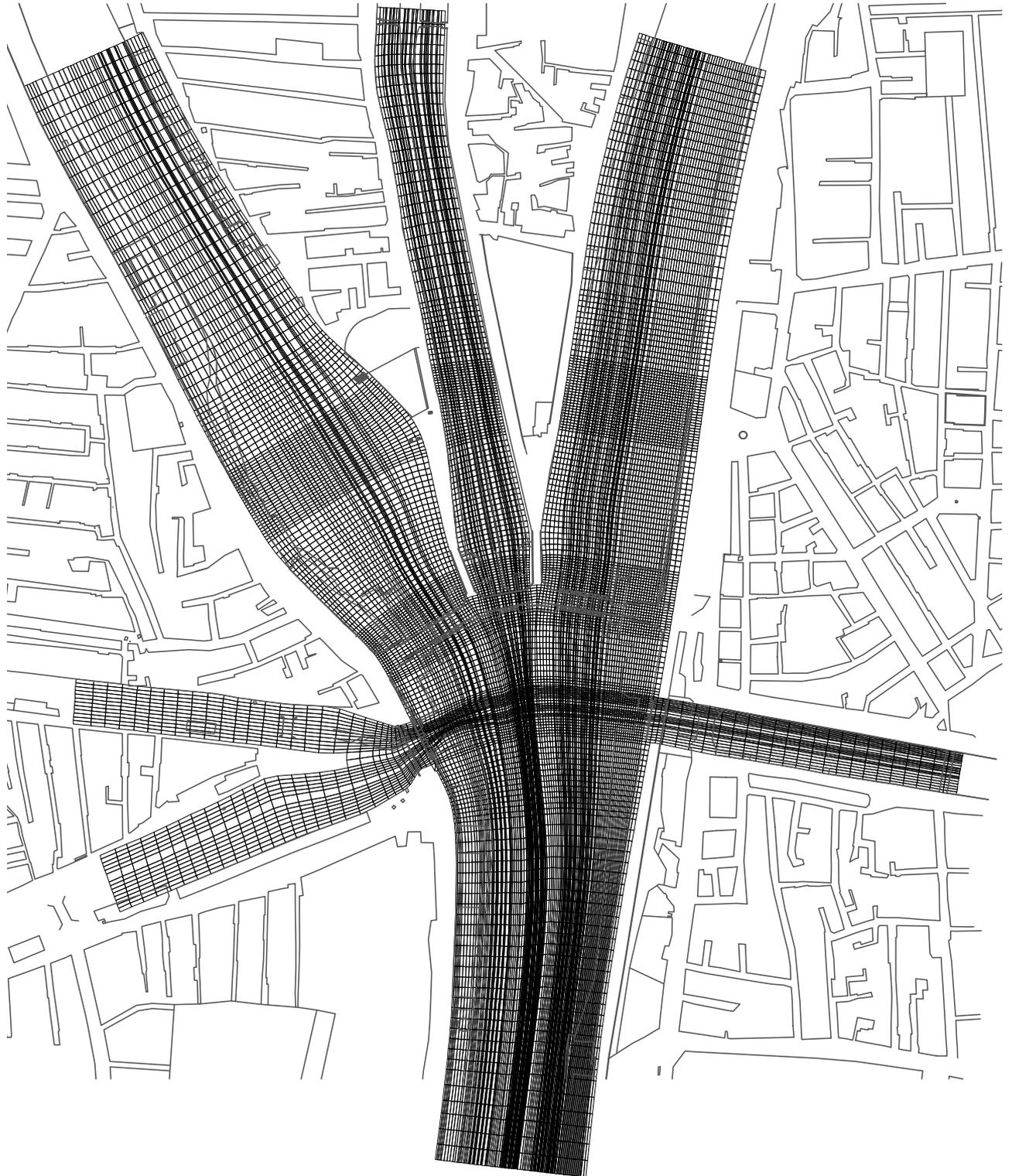


図 2-2. 30 水路メッシュ図

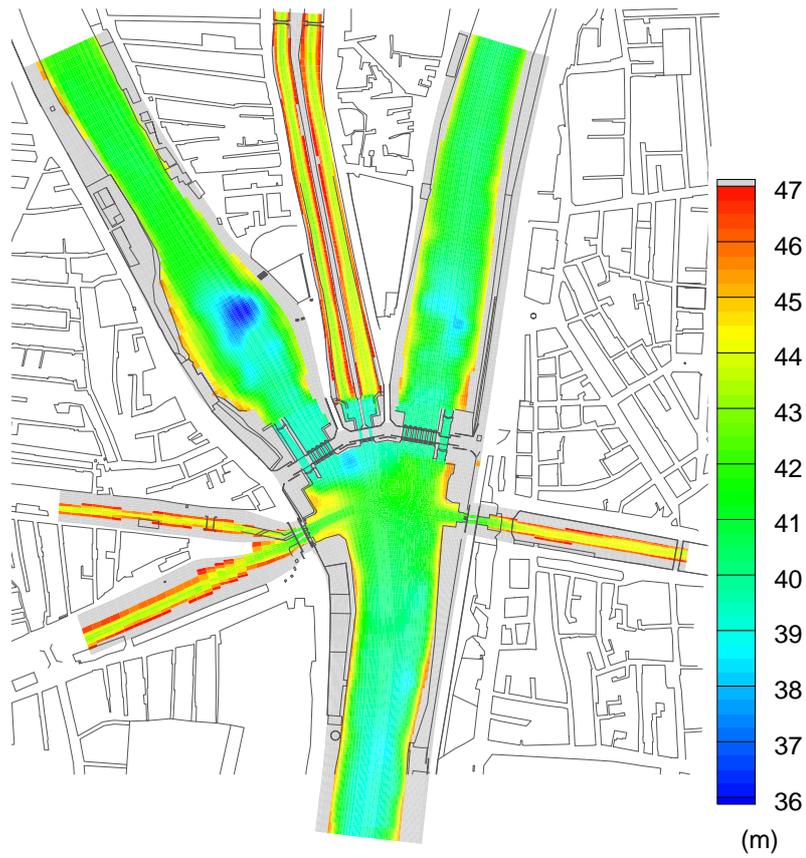


図 2-2.31 地形 (2015 年 8 月、検証 - 現況)

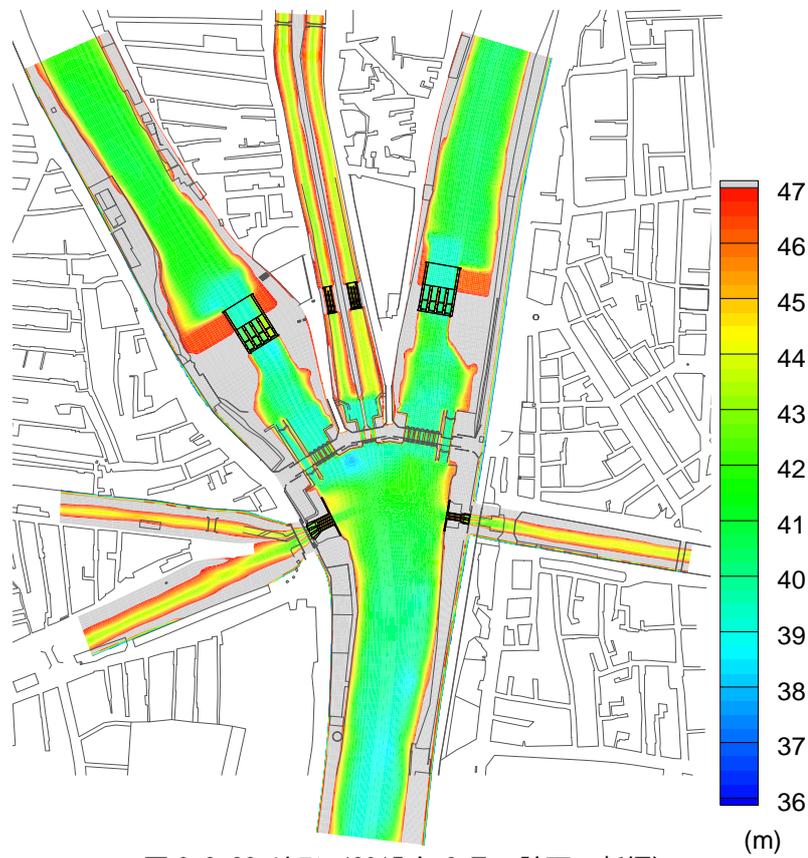


図 2-2.32 地形 (2015 年 8 月、計画 - 新堰)

iii) 境界条件

境界条件は以下の通りである。

- ・ 流況境界：既存堰の上流
- 水位境界：各水路の末端

iv) 水位、堰流入量、新堰からの放流量

水位境界としての適用水位は、表 2-2.7 に示す水配分局のデータに基づいて適用される(これは新堰の設計にも適用されている)。流量境界は上流端で 455m³/s である。

表 2-2.7 水位、堰流入量及び新堰からの放流量

Item	US. of Regulators	DS. of regulators							Remarks
	existing DGRs	Bahr Yusef	Ibrahimia	Badraman	Dairutiah	Abo Gabal	Irada Delgaw	Sahelyia	
Water Level (m)	46.30	45.82	45.13	45.90	45.90	45.90	45.90	45.90	Target Value
Inflow (m ³ /s)	455	—	—	—	—	—	—	—	Up stream
Outflow of regulator (m ³ /s)	—	27	186	9	12	7	9	5	Target Value

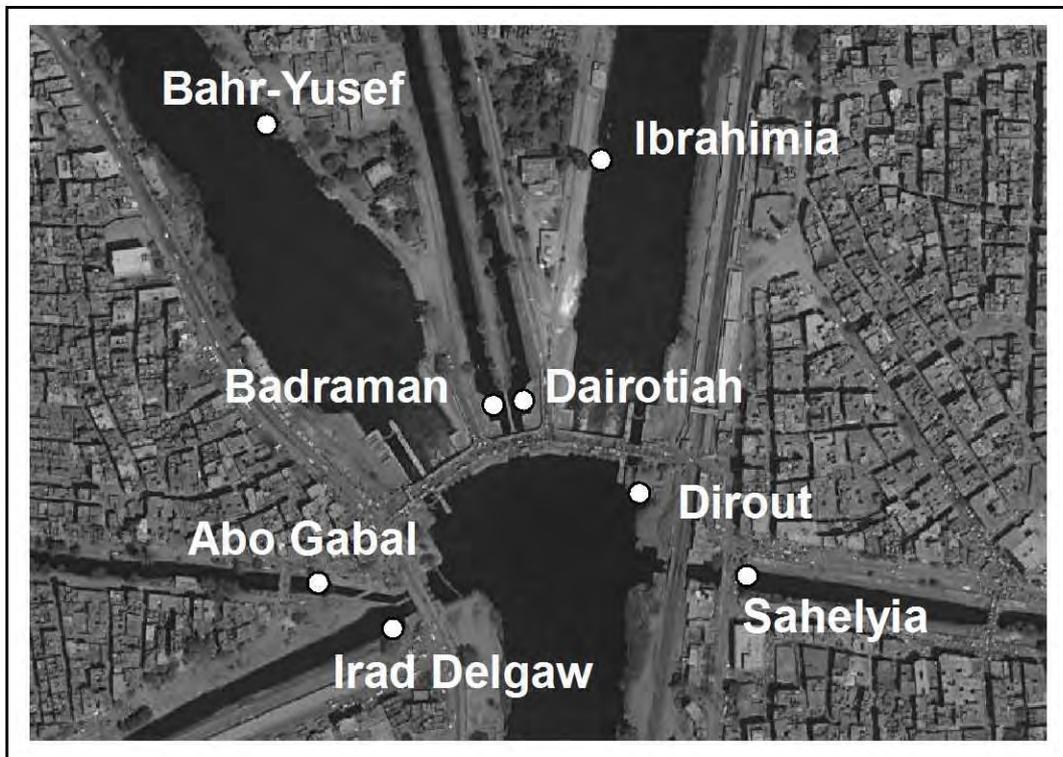


図 2-2.33 水位観測地点

イ) 解析結果及び評価

図 2-2.34 に観測区間の位置を、表 2-2.8 と図 2-2.35 に各区間の観測データと計算データの水位と流量の比較を示す。

まず、数値と表の結果は、平均流量と水位の両方に近い値を示しており、上記の条件での計算が計画段階での流況状態を示すのに十分に機能することを示している。

図 2-2.36、2-2.37 に、計画段階における表層と底層の速度分布図を示す（図 2-2.38、2-2.39 は、図 2-2.36 の拡大図。）

第 2 に、上記の結果は、新堰（バハルヨセフ水路の左岸、イブラヒミア水路の右岸）の下流における止水域を示しており、これは水理模型実験の結果と同じ現象である。

さらに、図 2-2.37 によれば、右側からの第 1 ゲートの底層の流速は、他の新イブラヒミア堰のゲートよりも速く、これも水路模型実験と同じ結果である。

図 2-2.42 は、計画段階における水位分布図を、また、各断面（図 2-2.43 に示す新堰から 30m、50m、100m 下流）での断面速度分布を図 2-2.40、その位置図を図 2-2.41 に示す。

これらの結果から以下のことが言える。

- ・ 堰の 30m、50m 下流の流速分布は、ピアの影響をよく再現している（図 2-2.42、2-2.43）。
- ・ 堰の 30m 下流の速度は平均で 1.2m/s 以下であり、それより下流の速度は遅くなる。

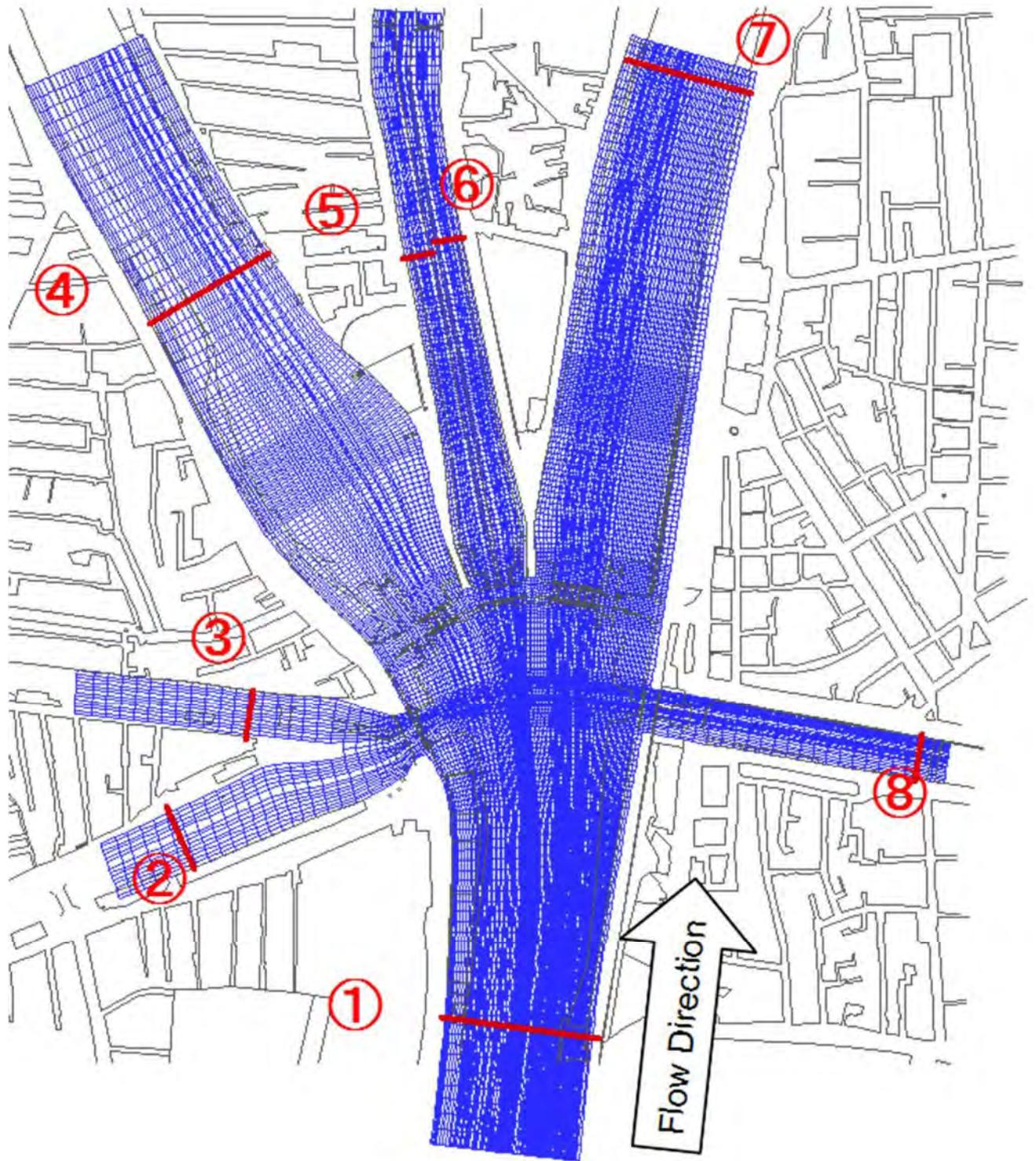


図 2-2.34 観測断面

表 2-2.8 計算結果 (Calc) と観測結果 (Target) の観測断面における流量と平均水位の比較

Canal name	Discharge			Water level		
	Calc	Target	Difference	Calc	Target	Difference
Ibrahimia canal U/S	455.0	455.0	0.0%	46.3	46.3	-0.1%
Irada Delgaw canal	9.0	9.0	-0.3%	45.8	45.9	-0.2%
Abo Gabal canal	7.1	7.0	1.5%	46.0	45.9	0.2%
Bahr Yusef canal (1)	228.7	227.0	0.7%	45.8	45.8	0.0%
Badraman canal	8.9	9.0	-0.7%	45.9	45.9	0.0%
Dairutiah canal	11.9	12.0	-0.7%	45.9	45.9	0.0%
Ibrahimia canal D/S (1)	184.4	186.0	-0.8%	45.1	45.1	0.0%
Sahelyia canal	5.0	5.0	-0.7%	45.9	45.9	0.0%
	(m ³ /s)		(%)	(m)		(%)

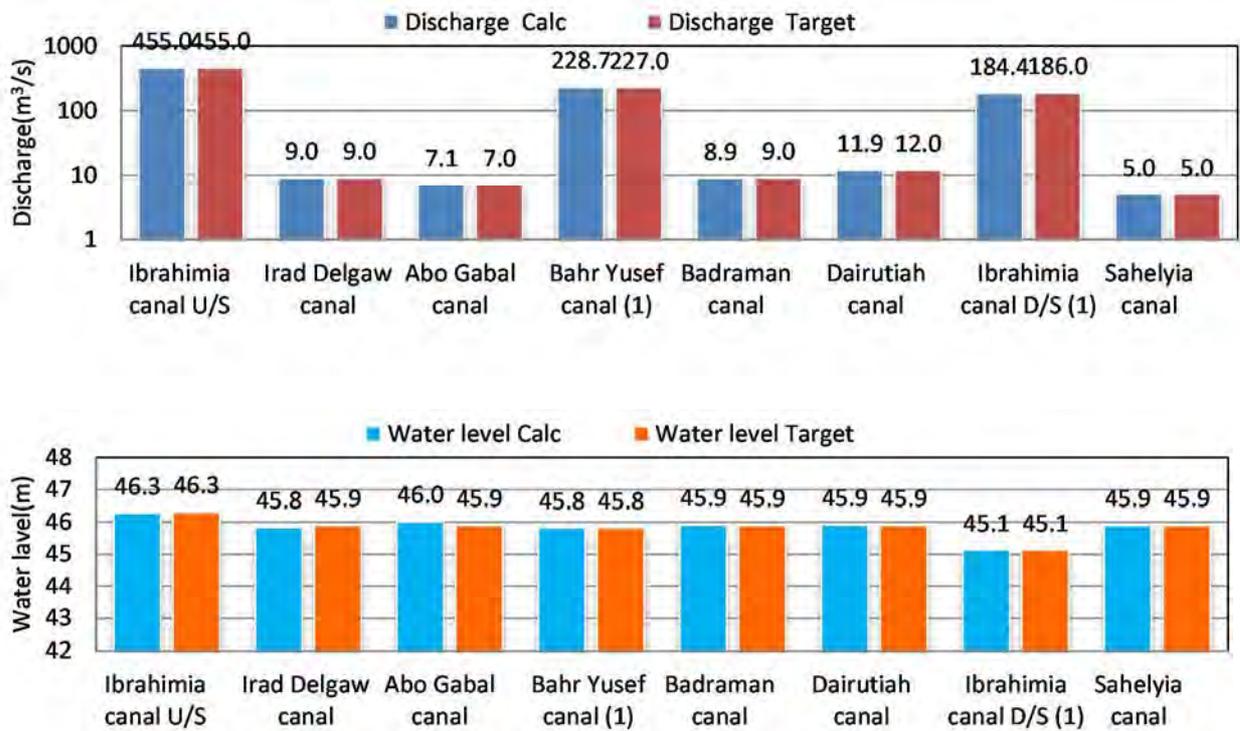
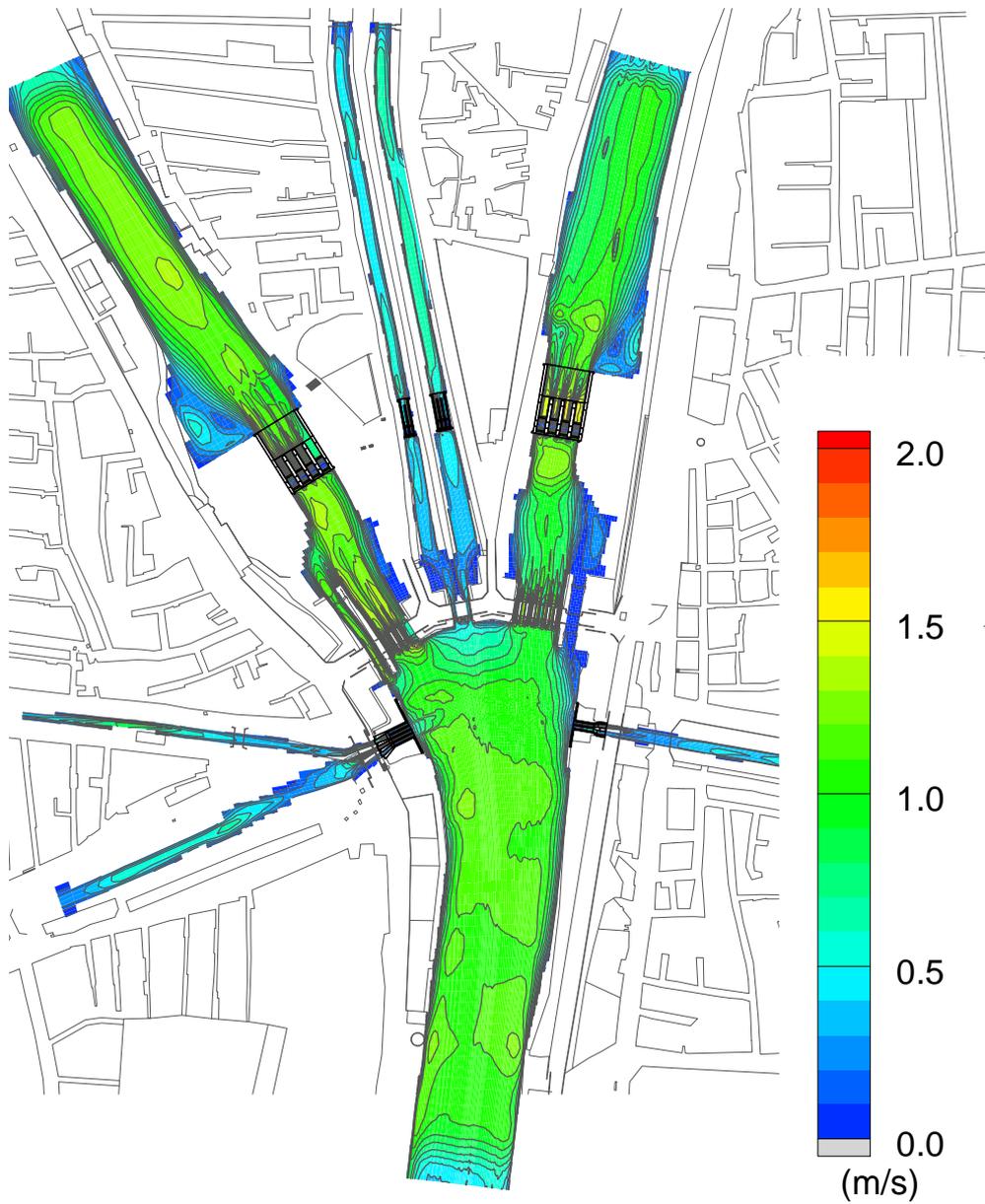
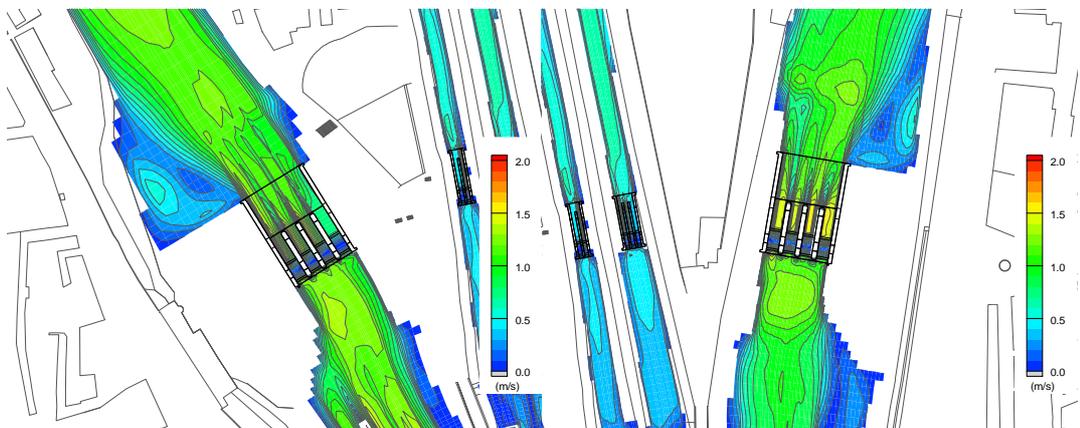


図 2-2.35 計算結果 (Calc) と観測結果 (Target) の観測断面における流量と平均水位の比較



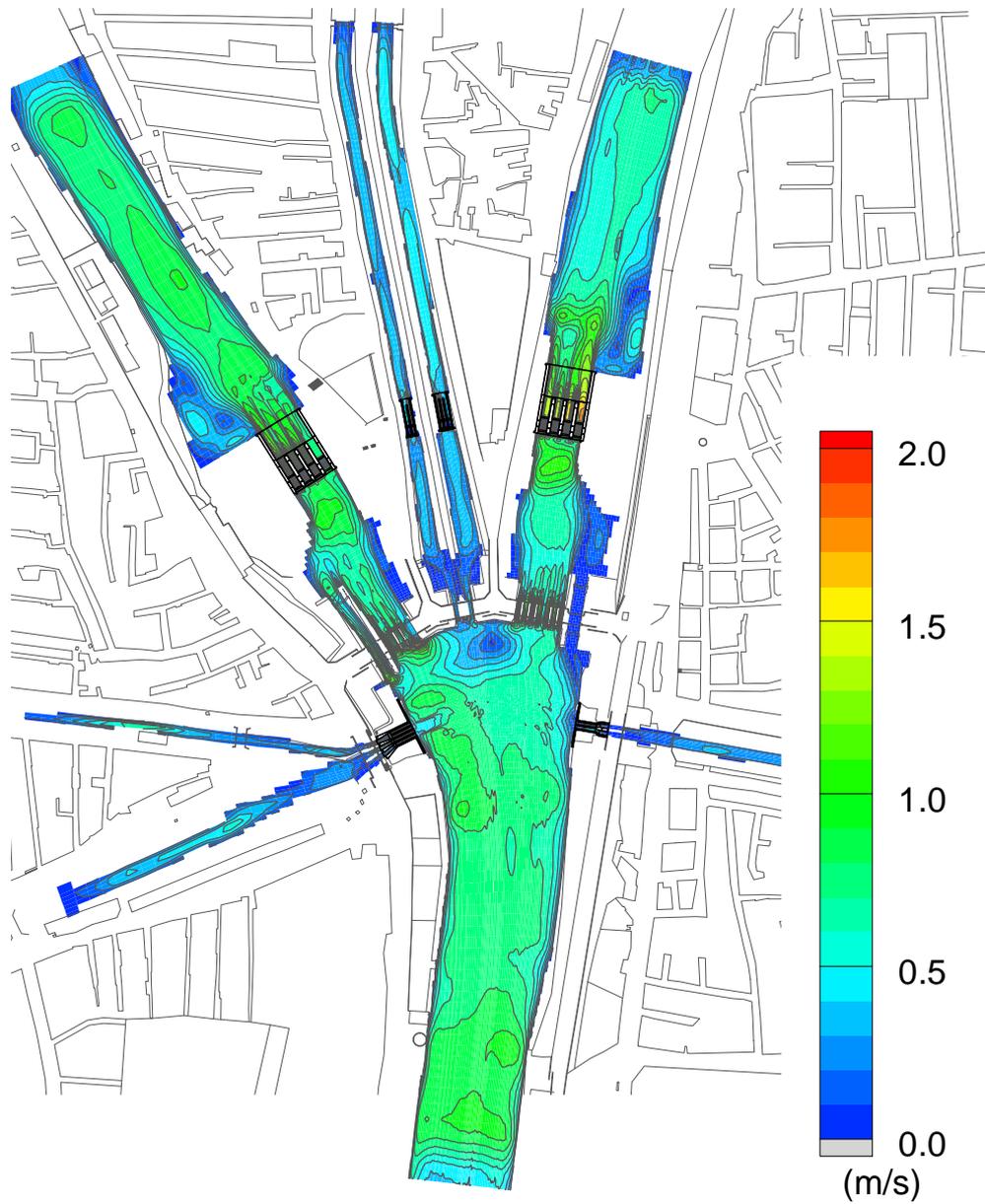
(a) 全域



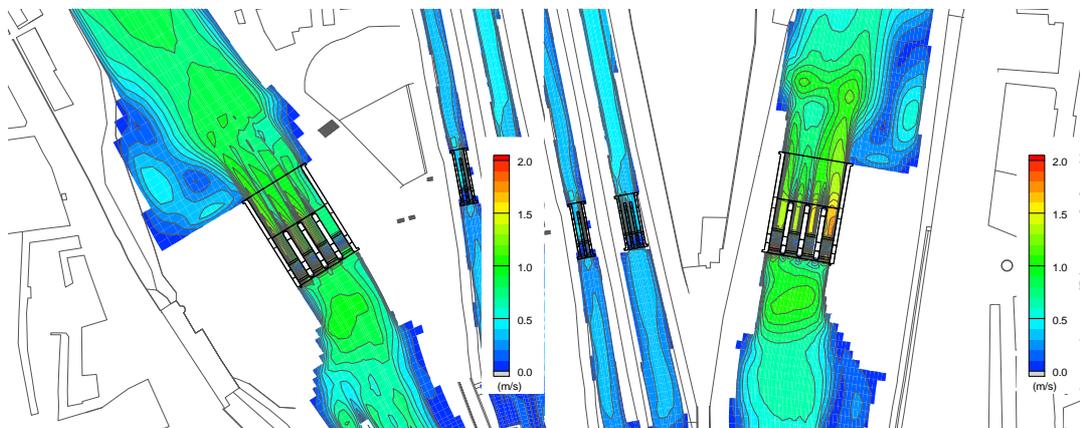
(b) バハルヨセフ新堰

(c) イブラヒミア新堰

図 2-2. 36 計画段階における表層の速度分布図



(b) 全域



(b) バハルヨセフ新堰

(c) イブラヒミア新堰

図 2-2.37 計画段階における底層の速度分布図

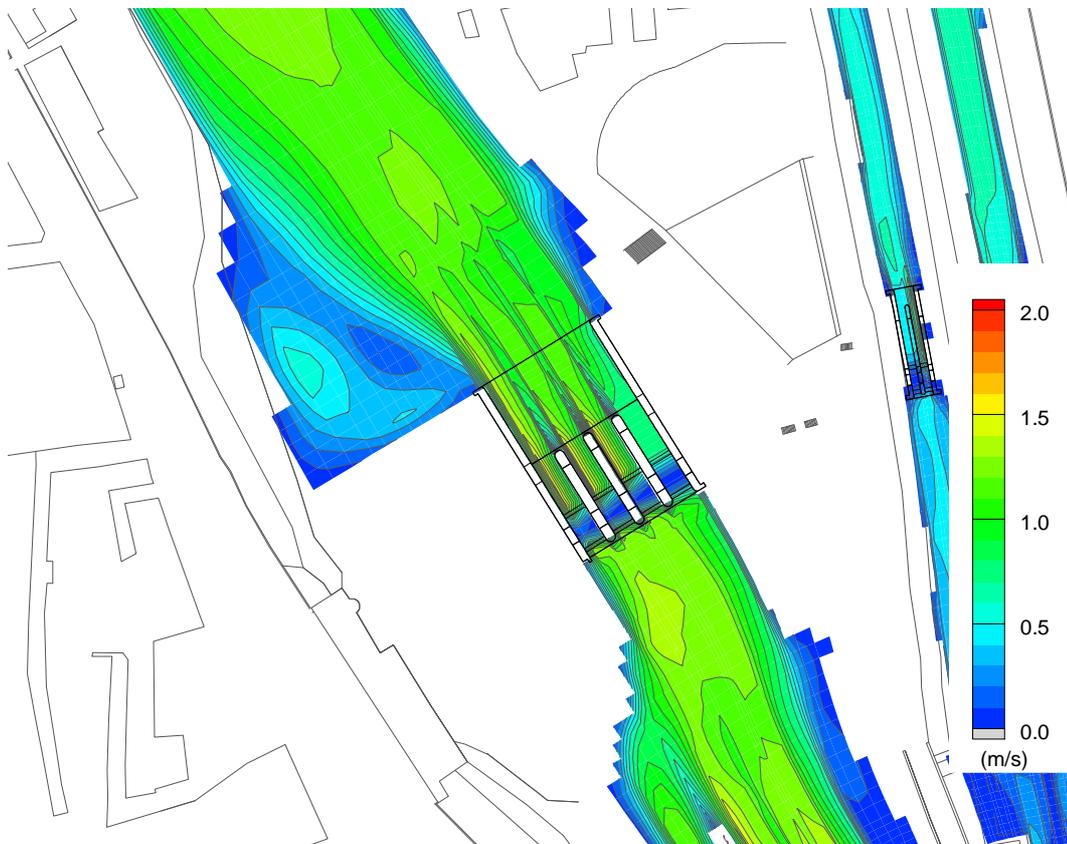


図 2-2.38 計画段階における表層の速度分布図（新ノハルヨセフ堰周辺拡大図）

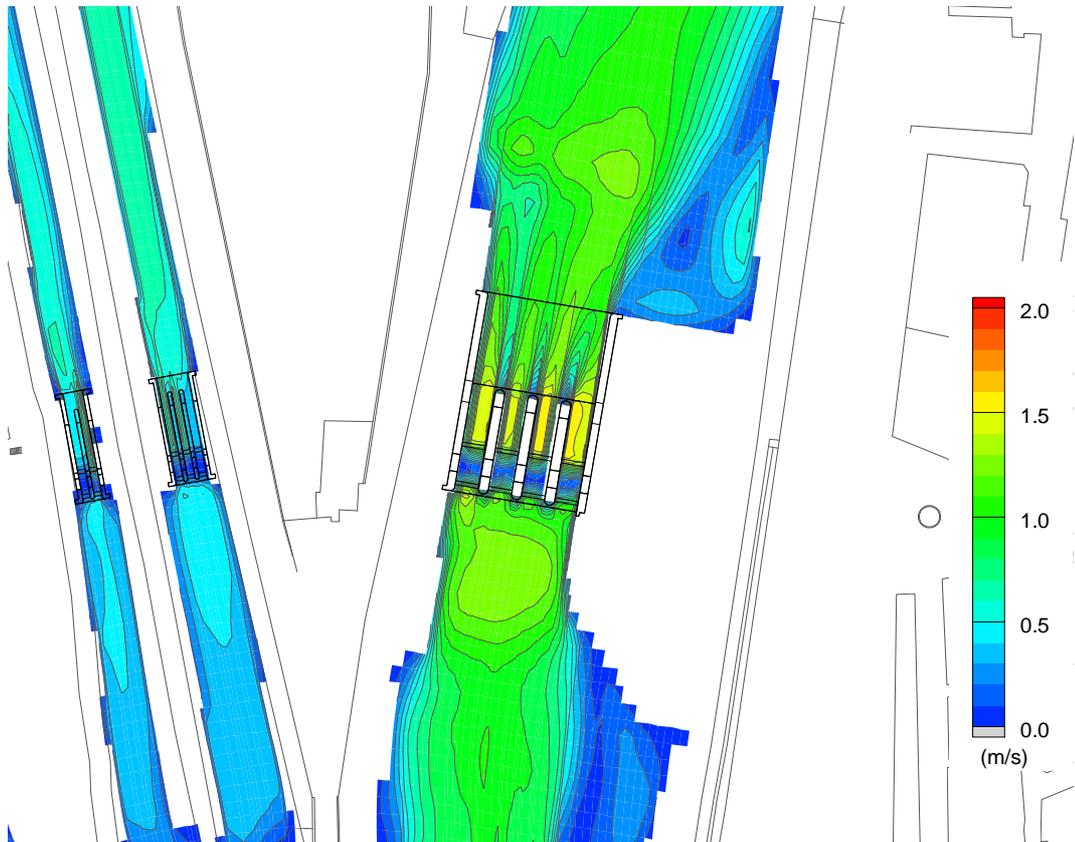


図 2-2. 39 計画段階における表層の速度分布図（新イブラヒミア堰周辺拡大図）

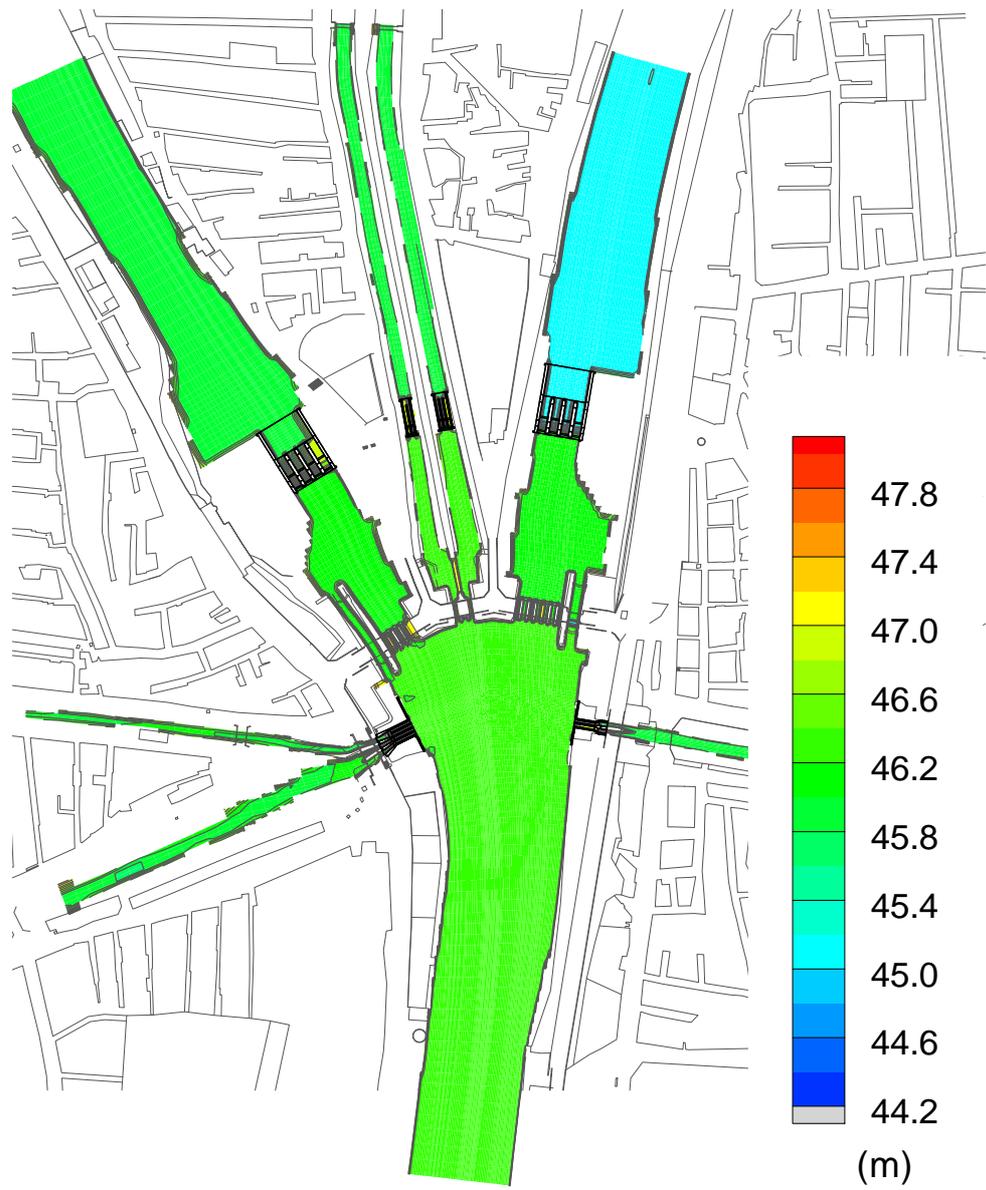


図 2-2. 40 計画段階における水位分布図

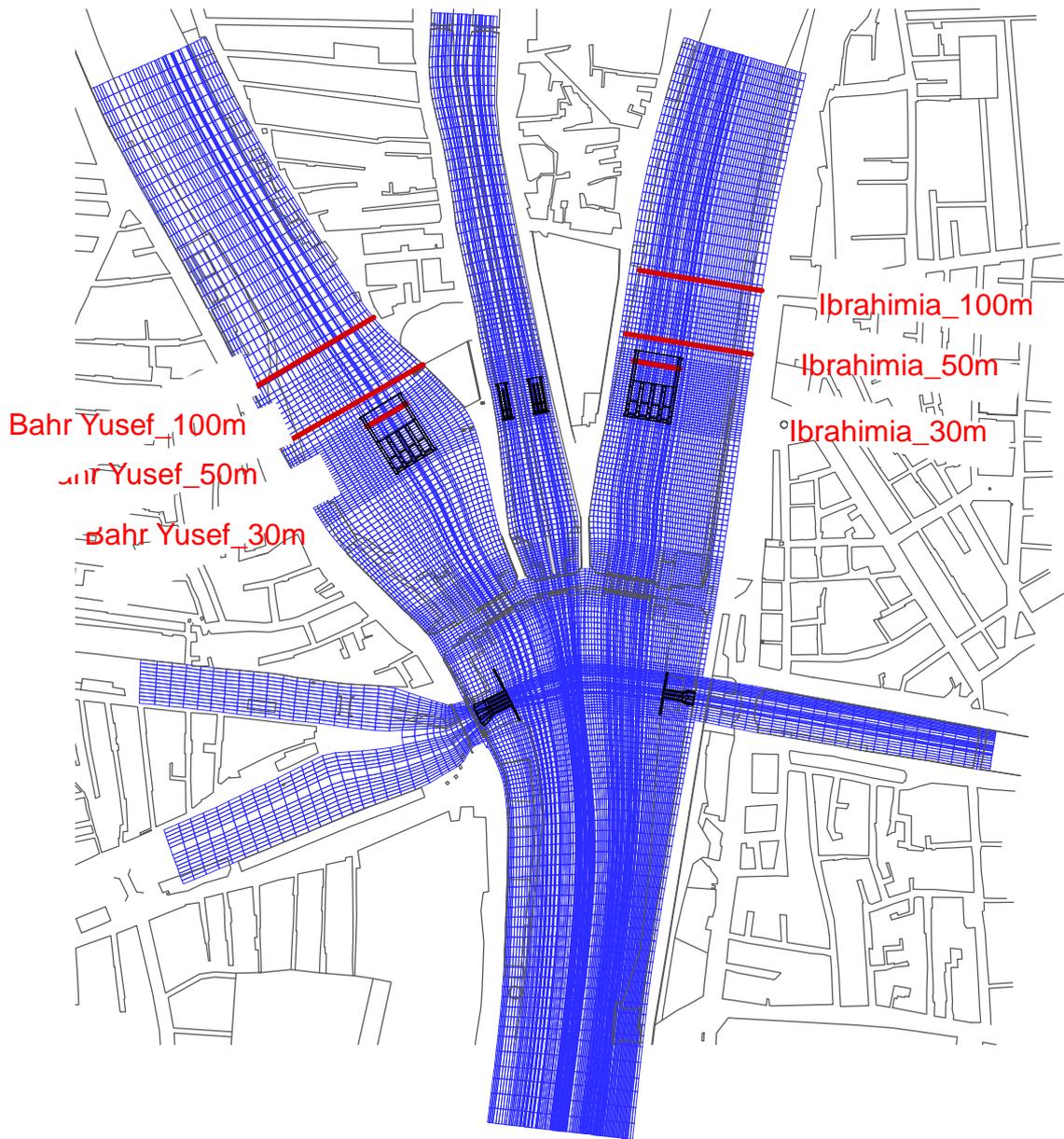


図 2-2.41 断面測線の位置図

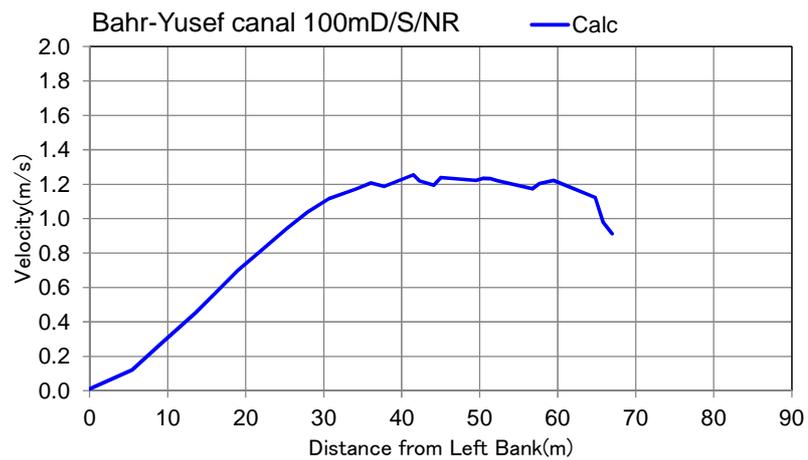
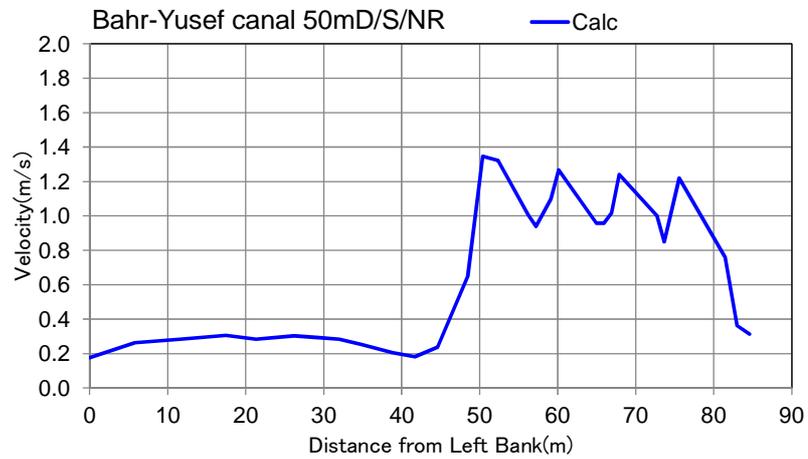
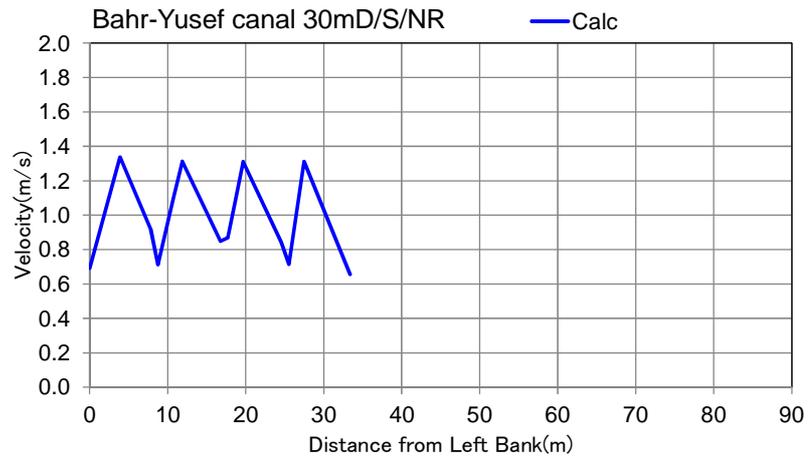


図 2-2. 42 断面流速ノバハルヨセフ水路 (新堰下流 30m, 50m, 100m)

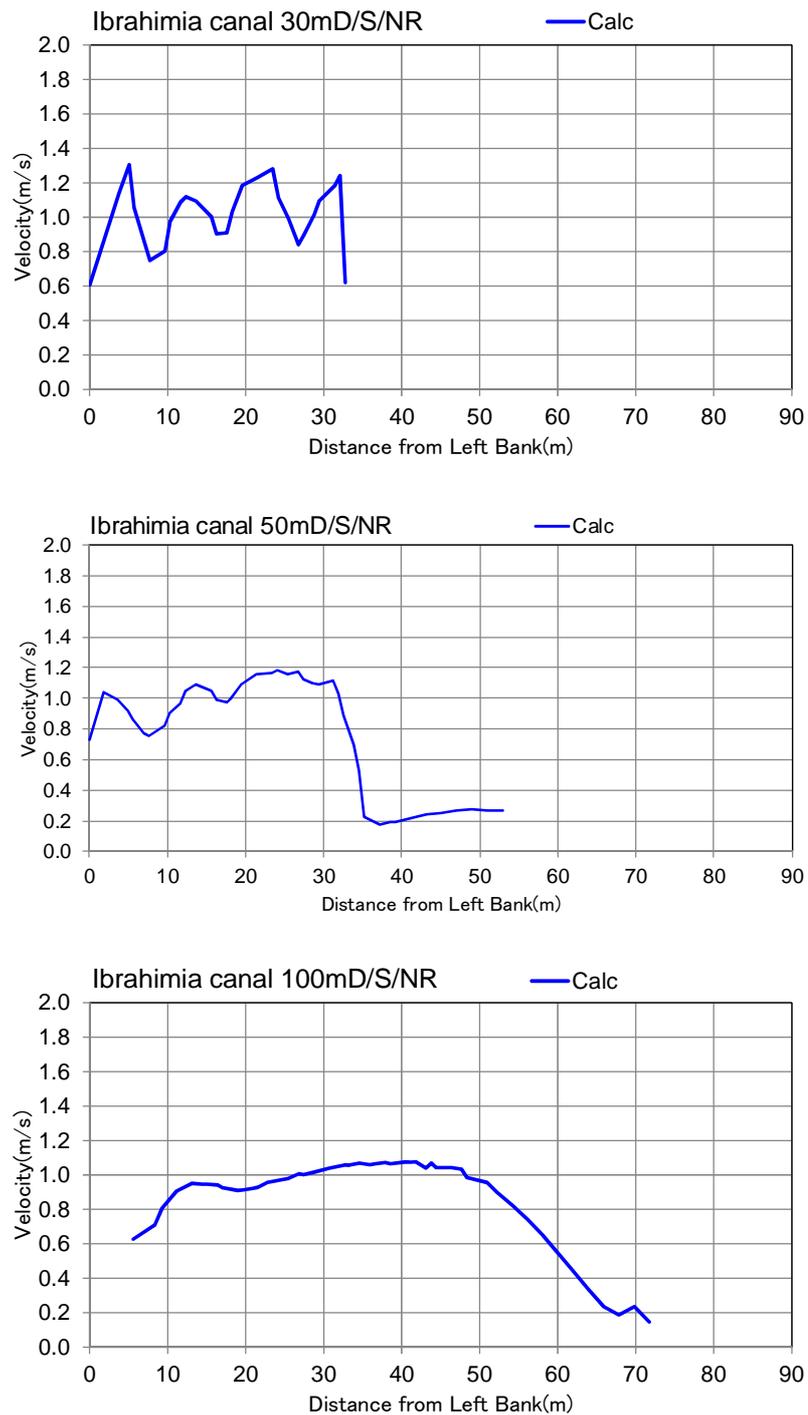


図 2-2. 43 断面流速 (イブラヒミア水路、新堰下流 30m, 50m, 100m)

6) 上流小規模 2 堰の敷高を変更した計画流況解析の実施

基本設計が確定した後に上流小規模 2 堰の敷高を低く変更する様に RGBS から要求され、検討を行った結果、実施設計として以下のとおり敷高を低くすることが決定された。この解析は上流小規模 2 堰の敷高変更の影響を確認するために計画段階の流況解析を実施したものである。

水路条件等の測量データは、堰設計が適用している地形図と同一の 2016 年 1 月測量の値を適用した。

ア) 解析条件

両方のモデルによる結果を比較するために、以下の条件をこの流況解析に適用する。比較対象の解析は、新ダイルート堰群（計画段階）である。

表 2-2.9 解析条件

解析条件	基本設計報告書 (BDR)	比較のための解析
1.地形データ	2016 年 1 月	BDR と同じ
2.メッシュ数	総メッシュ数: 198,380	BDR と同じ
3.境界条件	既設堰上流: 流量 各水路末端: 水位	BDR と同じ
4.水位流量	計画段階 (新堰)	BDR と同じ
5 上流小規模 2 堰敷高	新アボギヤバル堰 EL. 44.15m 新サヘリア堰 EL. 44.65m	新アボギヤバル堰 EL. 43.6m 新サヘリア堰 EL. 43.0m

i) 地形条件

2016 年 1 月の地形データを適用した。(図 2-2.44)

ii) メッシュ数

総メッシュ数は基本設計報告書と同じである。(図 2-2.45).

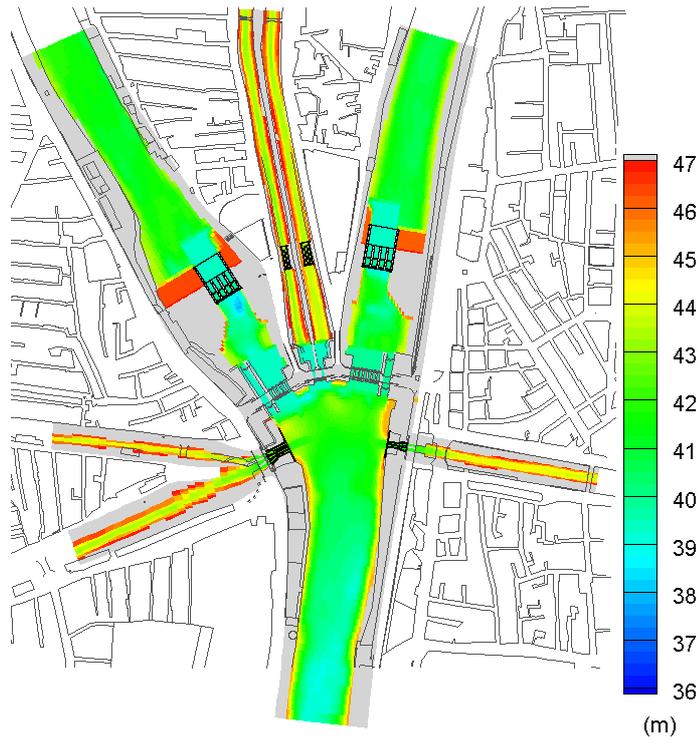


図 2-2.44 地形 (2016 年 1 月、計画 - 新堰)

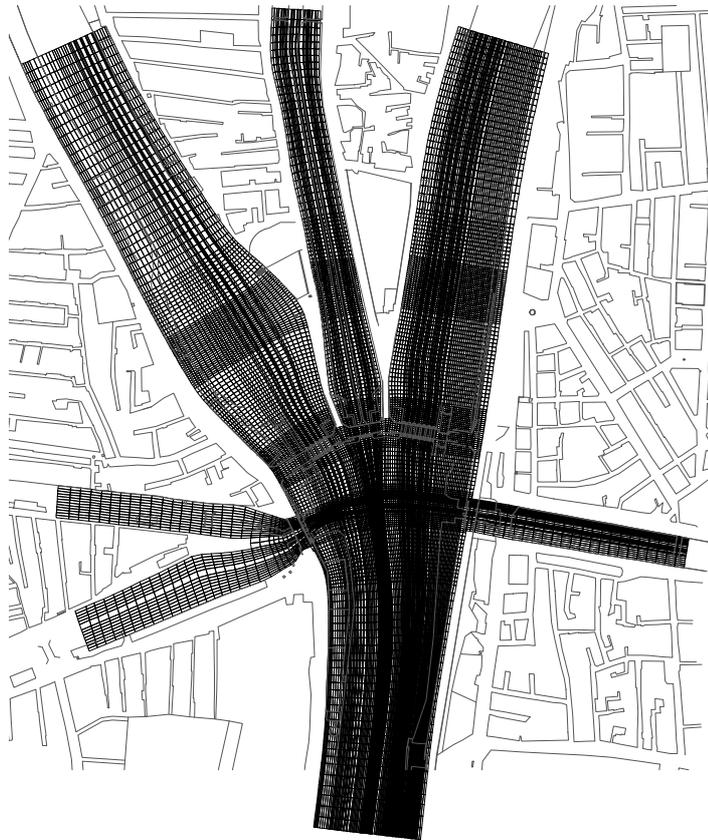


図 2-2.45 水路メッシュ図

iii) 境界条件

境界条件は以下の通りである。

- ・ 流況境界：既存堰の上流
- 水位境界：各水路の末端

iv) 水位、堰流入量、新堰からの放流量

水位境界としての適用水位は、表 2-2.10 に示す水配分局のデータに基づいて適用される（これは新堰の設計にも適用されている）。流量境界は上流端で 455m³/s である。

表 2-2.10 水位、堰流入量及び新堰からの放流量

Item	US. of Regulators	DS. of regulators							Remarks
	existing DGRs	Bahr Yusef	Ibrahimia	Badraman	Dairutiah	Abo Gabal	Irad Delgaw	Sahelyia	
Water Level (m)	46.30	45.82	45.13	45.90	45.90	45.90	45.90	45.90	Target Value
Inflow (m ³ /s)	455	—	—	—	—	—	—	—	Up stream
Outflow of regulator (m ³ /s)	—	27	186	9	12	7	9	5	Target Value

イ) 解析結果及び評価

上流小規模 2 堰敷高を変更しても、各堰のゲート操作により小規模水路への流入量が敷高変更前と同じ水量に制御されることに伴い、敷高変更前後で上流小規模 2 堰周辺の流況に変化が無いことが判明した。このことより、設計流量時においては上流小規模 2 堰の敷高の変更は影響を与えないと言える。

図 2-2.46 にダイルート堰群全体の流況比較図、図 2-2.47 に新アボギャバル堰周辺の流況比較図、図 2-2.48 に新サヘリア堰周辺の流況比較図を示す。いずれも敷高変更前後での流況に変化は無いことが判る。

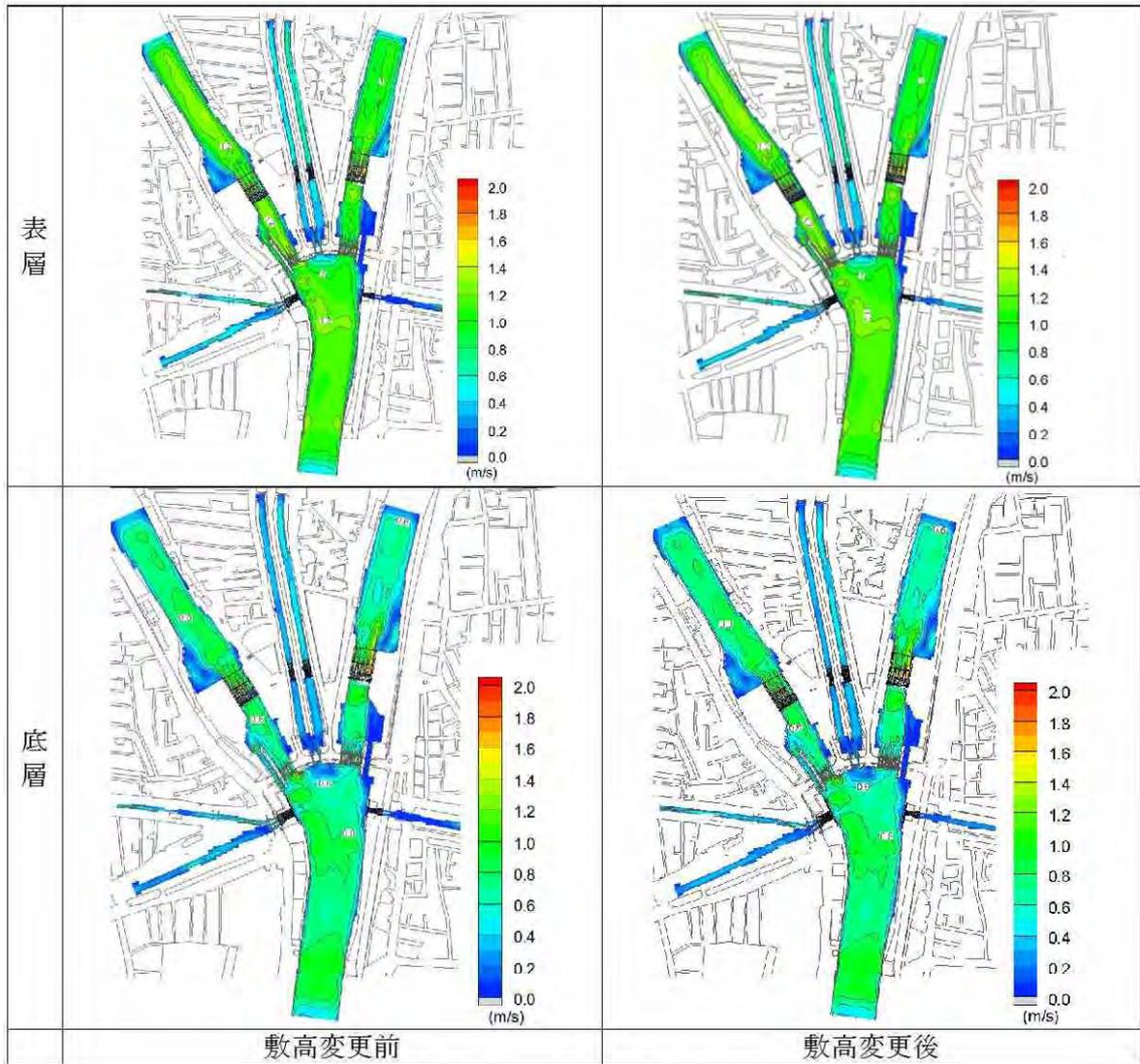


図 2-2.46 ダイルート堰群全体の流況比較図

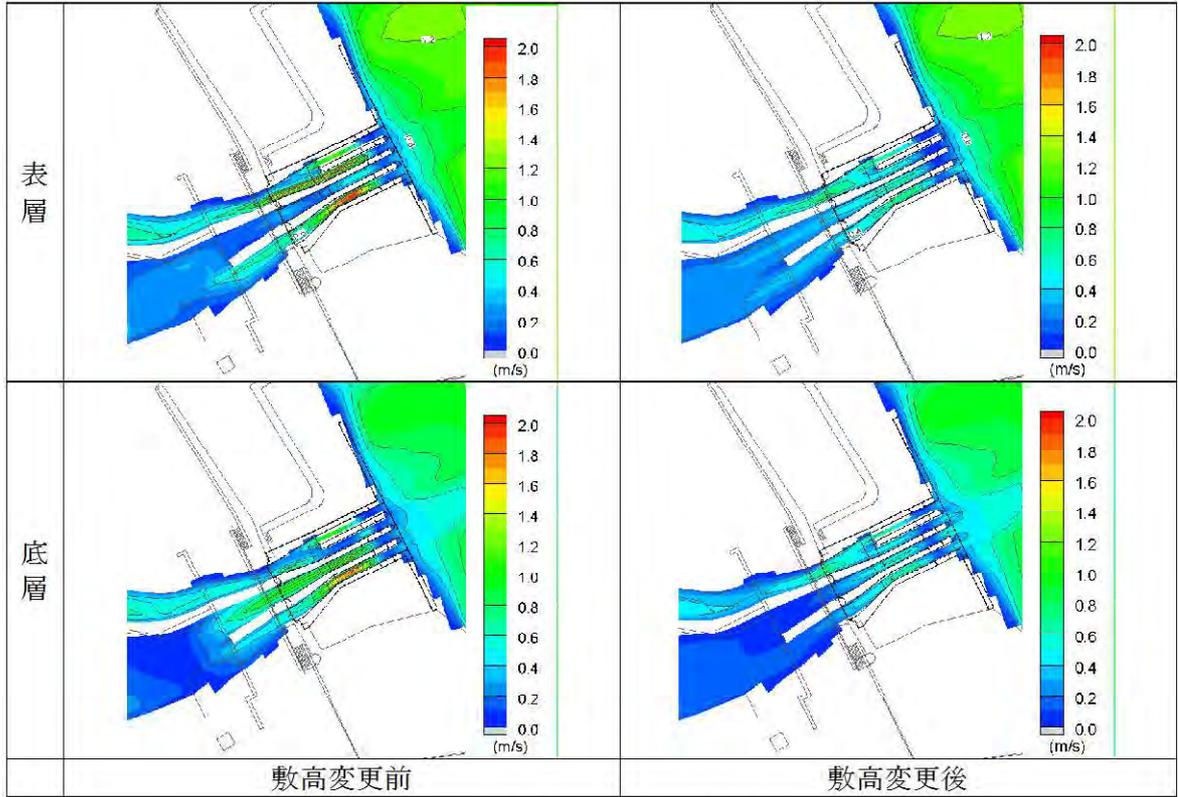


図 2-2.47 新アボギャバル堰周辺の流況比較図

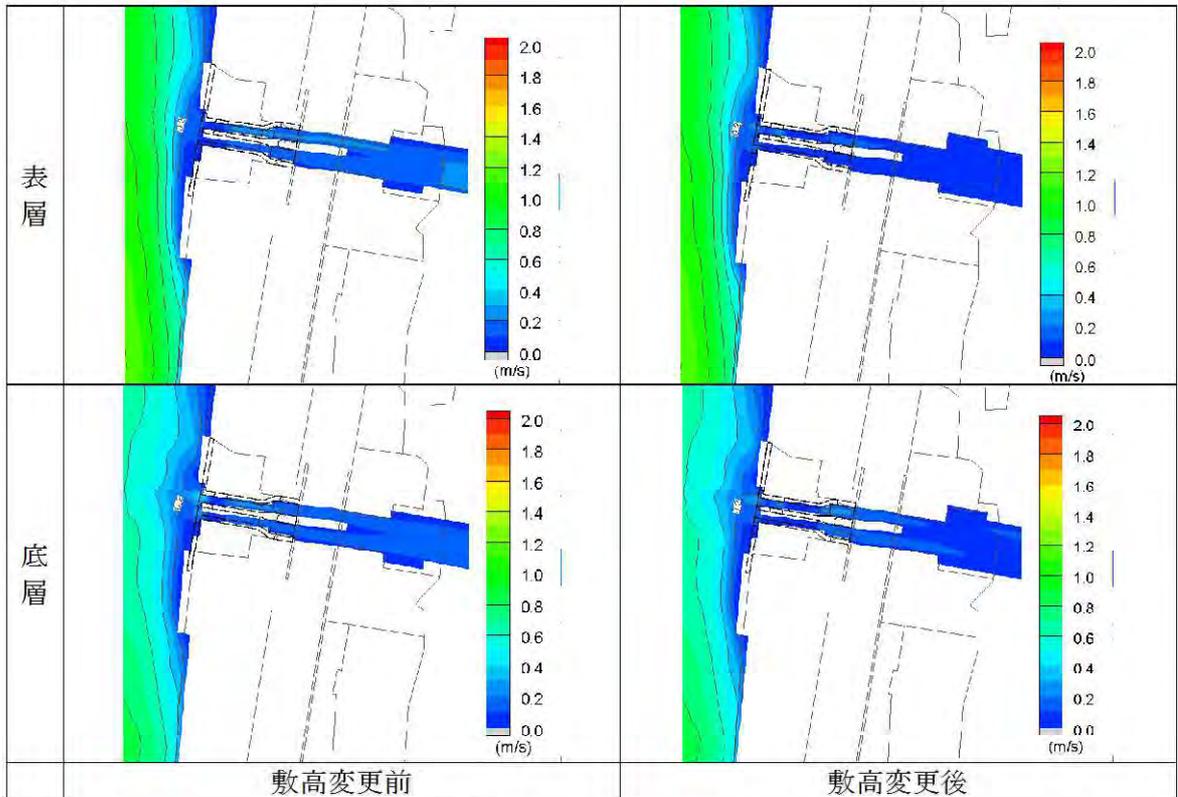


図 2-2.48 新サヘリア堰周辺の流況比較図

7) 上流小規模 2 堰への導流壁の設置について

既設ダイルート堰の上流小規模 2 堰では、堰前面に堆砂が発生し、取水機能が低下すると懸念されている。計画施設は取水を確実にするために堆砂の影響の少ない既設堰の前面に設置することとしている。水理解析においては、計画取水が確実に実行されることを確認しており、更に新堰前面の堆砂も減少傾向にあることを確認している。

一方、取水機能を更に安定化させるために取水堰前面に導流壁を設置する案が提案された。ここでは、その案について得失を整理する。

最大取水量 $5\text{m}^3/\text{s}$ のサヘリア堰を対象として新堰前面に約 20m の導流壁を設置した場合の流況解析を設計流量時の条件で実施した。

本条件での流速コンター図を以下に示す。

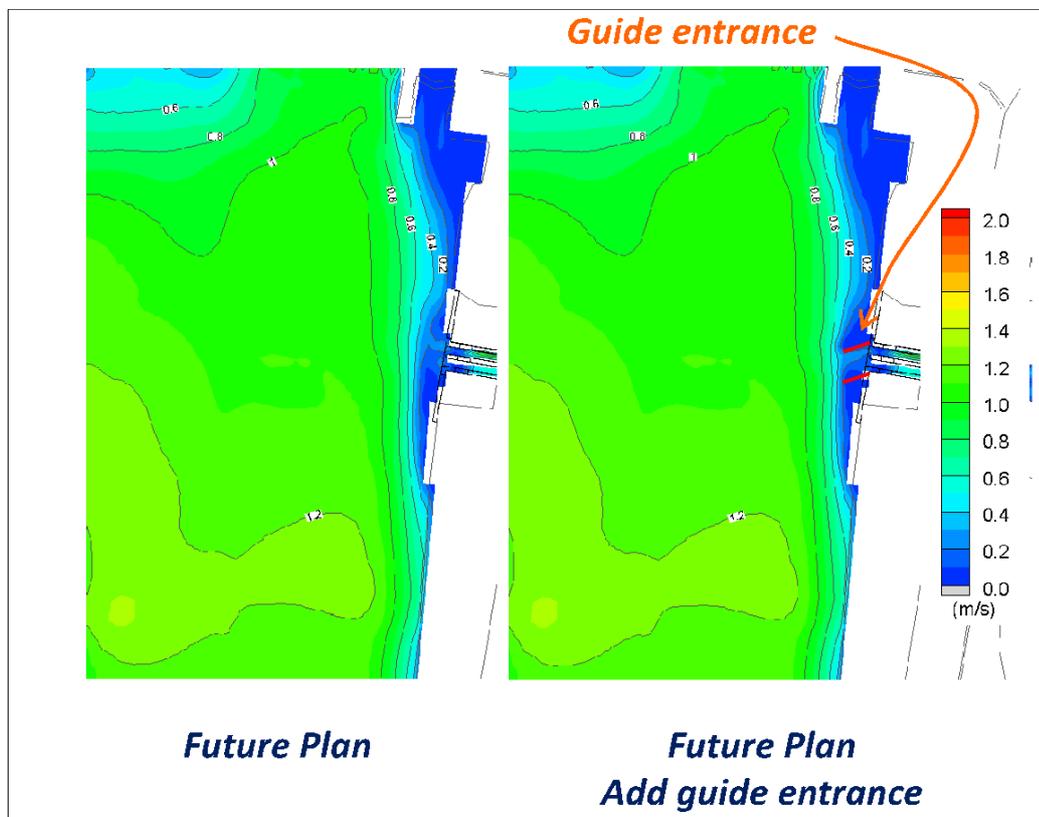


図 2-2.49 新サヘリア堰前面に 20m の導流壁を設置した場合の流況

ア) 取水

導流壁設置前の堰前面は流速 0.2m/s 以下の湛水域が広がり、取水は接近流速の無い状態で行われている。

導流壁を導入した解析の結果、20m の導流壁は流速 0.2m/s 以下の湛水域の流水をとらえているだけで、導流壁設置に伴う取水量増の効果はほとんど見受けられない。以上より、上流小規模 2 堰への導流壁の設置は効果が無いと判断される。

イ) 堆砂

導流壁の設置は、①堆砂が水路内に積極的に導入されることに伴う堆砂捕獲範囲の拡大、②堰前面の堆砂除去作業効率の低下などの弊害が発生する可能性がある。

ウ) その他

導流壁を導入することは、建設費用が増大することになる。

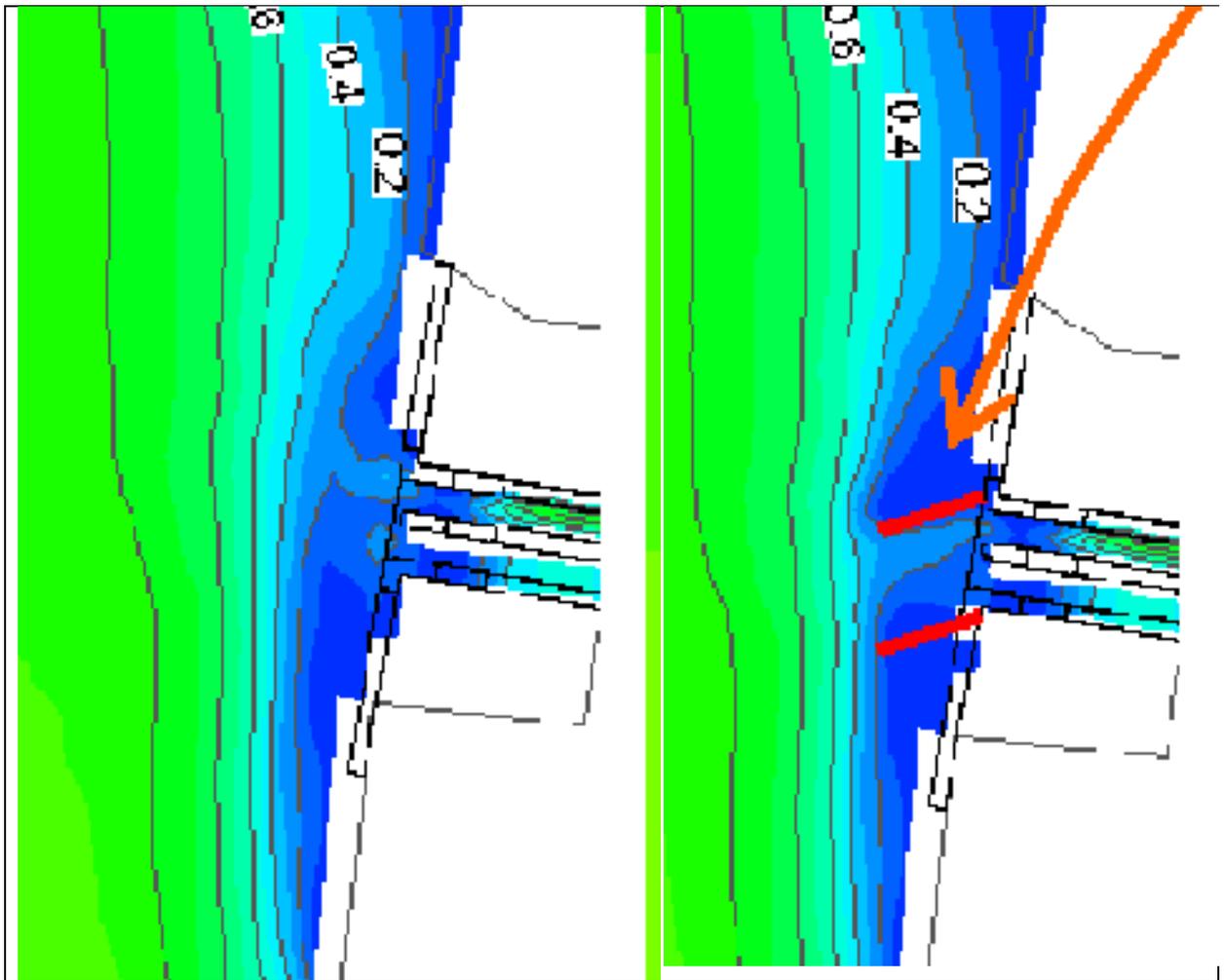


図 2-2.50 新サヘリア堰前面に 20m の導流壁を設置した場合の流況（拡大図）

8) 既設イブラヒミア堰の船通し開放によるサヘリア堰及び新イブラヒミア堰への影響について

既設バハルヨセフ堰及び既設イブラヒミア堰にはそれぞれ船通しが設置されており、現況では閉じられている。新ダイルート堰建設後は既設バハルヨセフ堰の船通しは開放されるが、既設イブラヒミア堰の船通しは新ダイルート堰群の周辺整備によりこの船通し周辺が別用途に活用されることが想定されたため、現況と同じく閉じられた状態を想定した。水理解析においても、この船通しの通水は無いものとして解析を実施している。

その結果、既設イブラヒミア堰上流の新サヘリア堰前面の流速が若干緩やかになる傾向、更に新イブラヒミア堰右岸ゲートへの河床流速の集中する可能性が判明した。

この検討は、既設イブラヒミア堰の船通しを開状態にした場合の水理解析を実施し、新サヘリア堰前面及び新イブラヒミア堰周辺の流況を確認するものである。

ア) 解析条件

解析条件は、基本設計時と同じ、2016年1月測量データ、計画段階の最大流量、上流小規模2堰敷高は変更前の基本設計の標高である。

イ) 解析結果及び評価

既設イブラヒミア堰の船通しを開放した場合、新サヘリア堰前面の流れが若干、新サヘリア堰側へ向かうこと、新イブラヒミア堰右岸側ゲートへの河床部流速の集中が緩和されることが明らかになった。

図 2-2.51 に既設イブラヒミア堰上下流の流況比較図、図 2-2.52 に新サヘリア堰の流況比較図、図 2-2.53 に新イブラヒミア堰の流況比較図を示す。

これらの結果より、既設イブラヒミア堰の船通しは開放した方が良いことが言える。

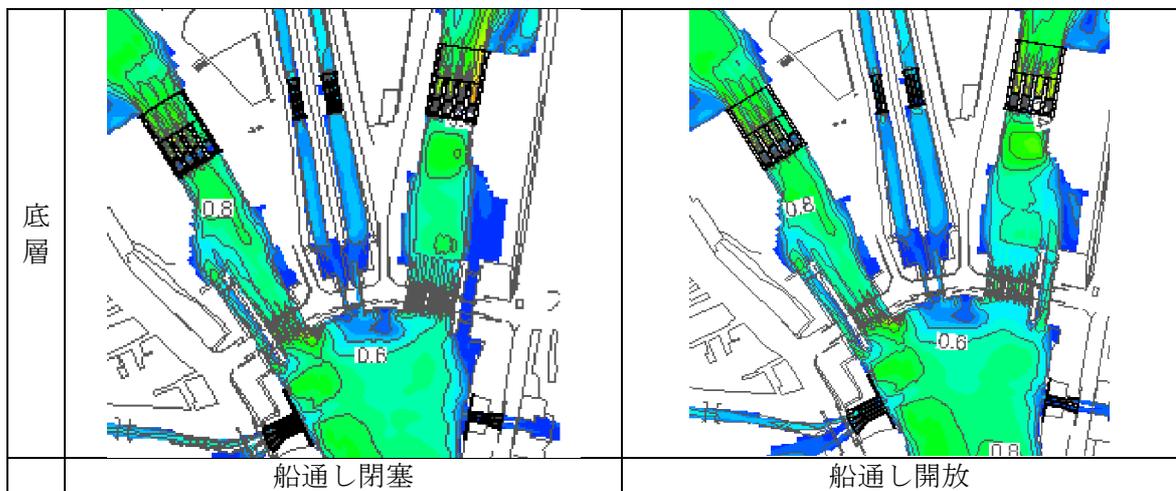


図 2-2.51 既設イブラヒミア堰上下流の流況比較図

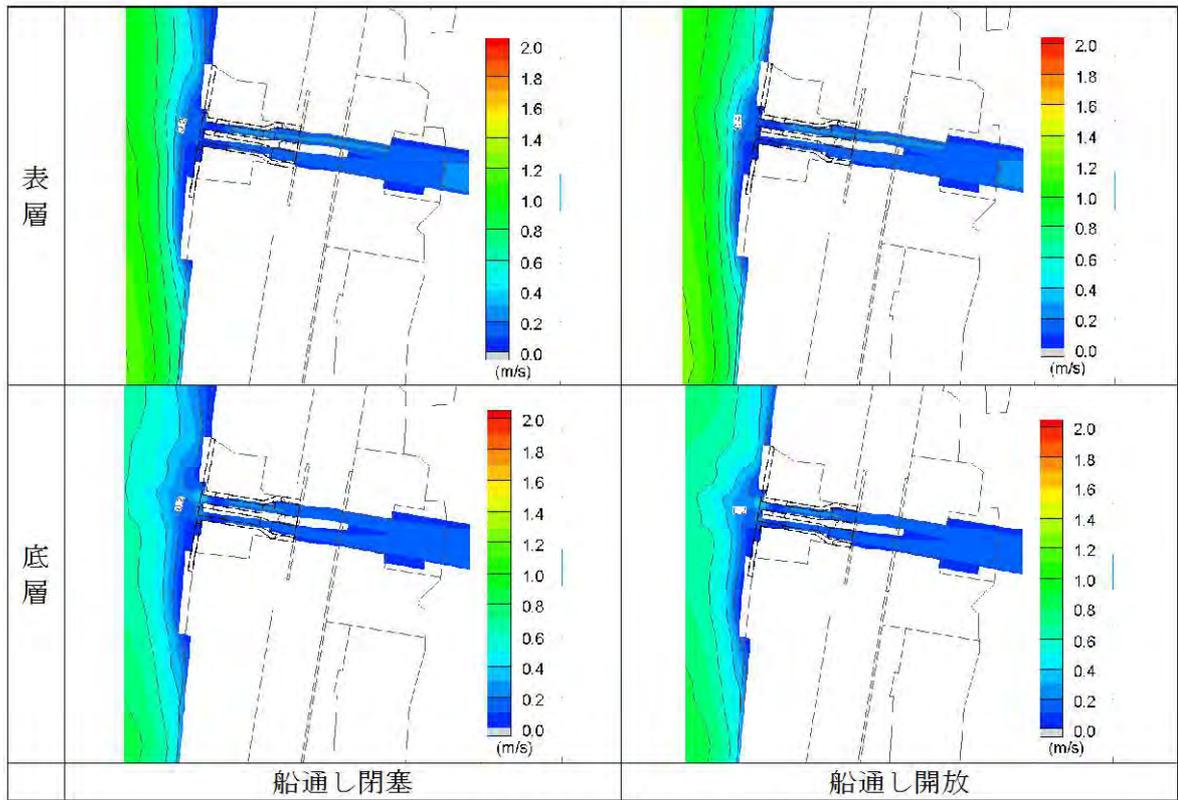


図 2-2. 52 新サヘリア堰の流況比較図

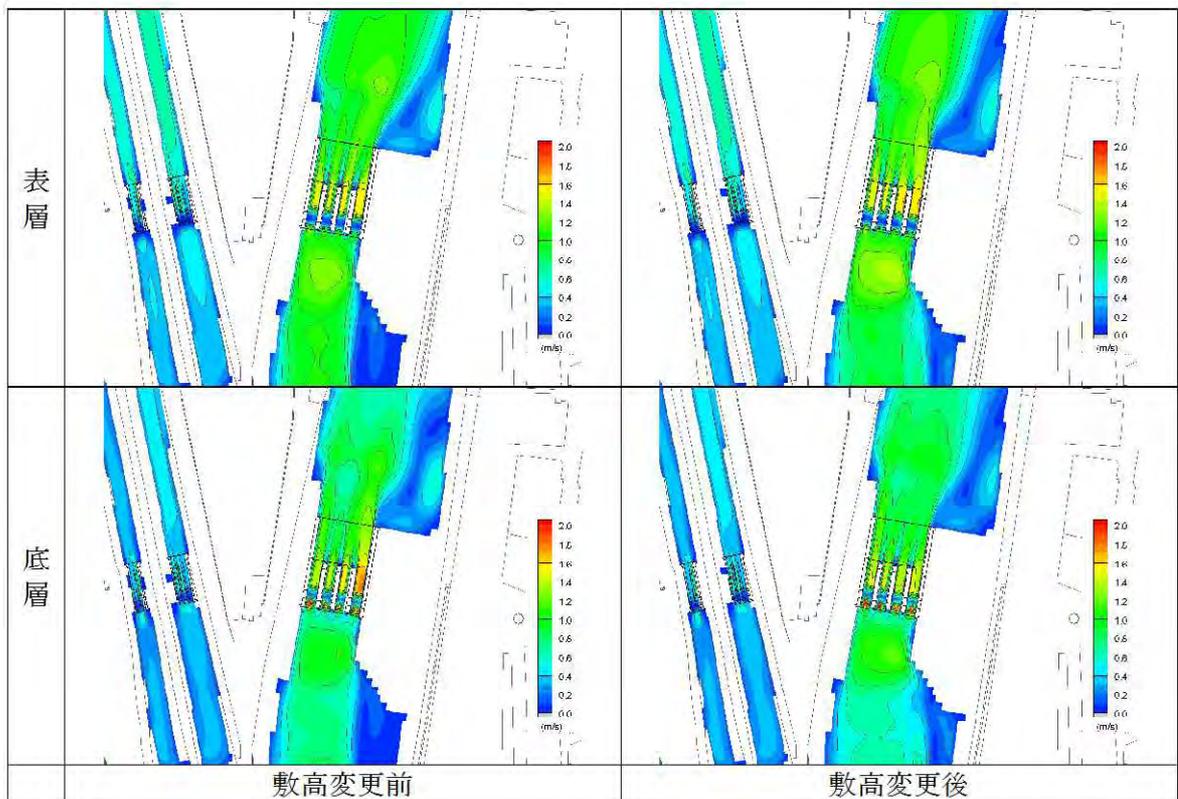


図 2-2. 53 新イブラヒミア堰の流況比較図

(2) 河床変動解析

a) 解析結果

1) 検証

堆砂処理前である 2015 年 11 月測量河床と堆砂処理後の 2016 年 1 月測量河床を検証材料として、河床変動の検証計算を行った。2015 年 11 月測量河床と 2016 年 1 月測量河床の差を取ることにより、堆砂処理が行われるまでの約 1 年間の堆砂量を把握することができる。

本検討では、上記の約 1 年間の堆砂量と堆積箇所の傾向を再現することにより河床変動の検証を行い、解析モデルの妥当性を確認する。

本来であれば、2015 年 1 月測量河床を初期河床として、2015 年 11 月までの計算を行い、実績と計算結果を比較することが望ましいが、2015 年 1 月の測量河床が存在しない為、本検討では、2016 年 1 月河床を初期として、11 か月の計算を行い、実績と計算結果を比較した。1 年間の堆砂傾向を再現できるモデルの構築を目標に、堆砂量の傾向および容量が実績に近くなるように調整を行った。

図 2-2.55 に示す代表的な以下の 3 つのエリアについて、計算初期から計算終了時までの堆砂量を算出し、堆砂処理前である 2015 年 11 月測量河床と堆砂処理後の 2016 年 1 月測量河床の差を取り算出した堆砂量と比較した。

- ①ダイルート既設堰～上流 150m の範囲
- ②バハルヨセフ下流水路の範囲
- ③イブラヒミア下流水路の範囲

表 2-2.11 および図 2-2.56 に堆砂量の比較を示す。図表より、堆砂量のオーダーについては、計算値は実測値に概ね近い値となっており、バハルヨセフ水路の方がイブラヒミア水路より堆積が多くなる傾向についても再現できている。

図 2-2.55 に計算終了時の河床変動高の比較を示す。ダイルート既設堰群上流の①のエリアについて、アボギャバル堰前面・側面での堆砂傾向については再現されている。ダイルート既設堰群下流の②のバハルヨセフ下流水路の範囲について、バハルヨセフ堰下流左岸側の堆積部や 330m 下流右岸側の堆積傾向が再現されている。また、計算値のみに着目すると、ダイルート既設堰群下流の③のイブラヒミア下流水路の範囲では侵食傾向となっていることが確認できる。

以上より、本解析はダイルート堰群周辺の河床変動の傾向を概ね再現できているものと考えられる。

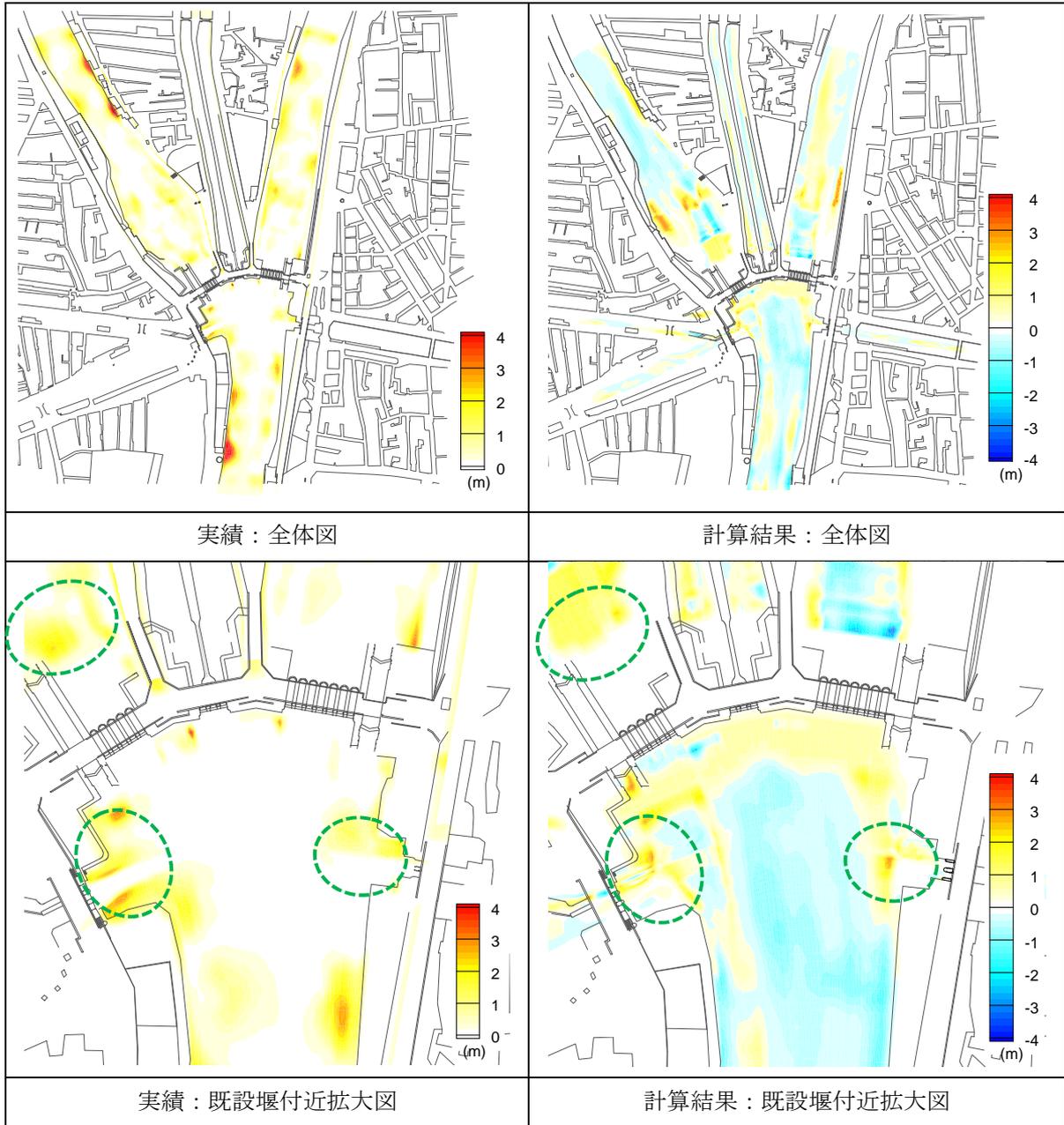


図 2-2.54 河床変動高コンター図（検証）

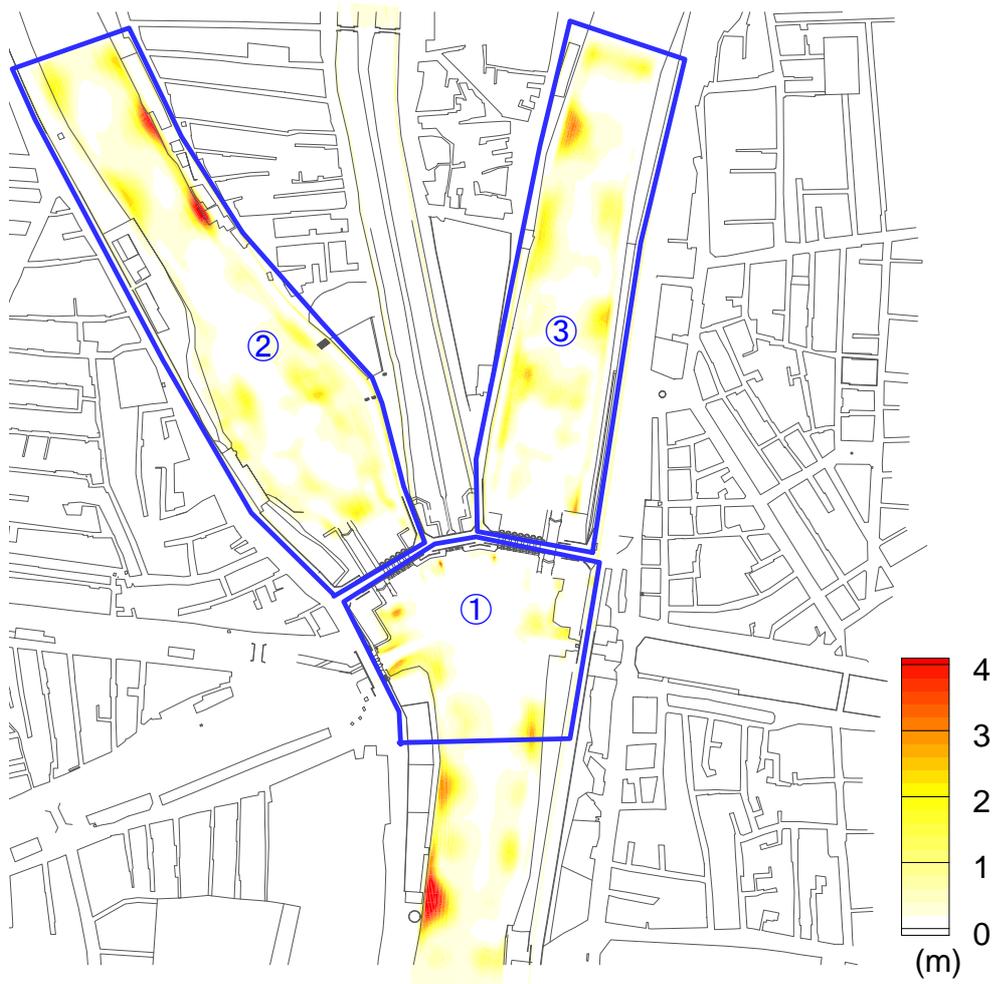


図 2-2. 55 堆砂量集計範囲

表 2-2. 11 堆砂量比較

	Area	Sedimentation (m ³)	
		Calc	Obs
①	Existing Regulator-Upstream150m	5,500	5,400
②	Bahr Yusef canal	14,600	17,300
③	D/S Ibrahimia canal	10,100	12,400

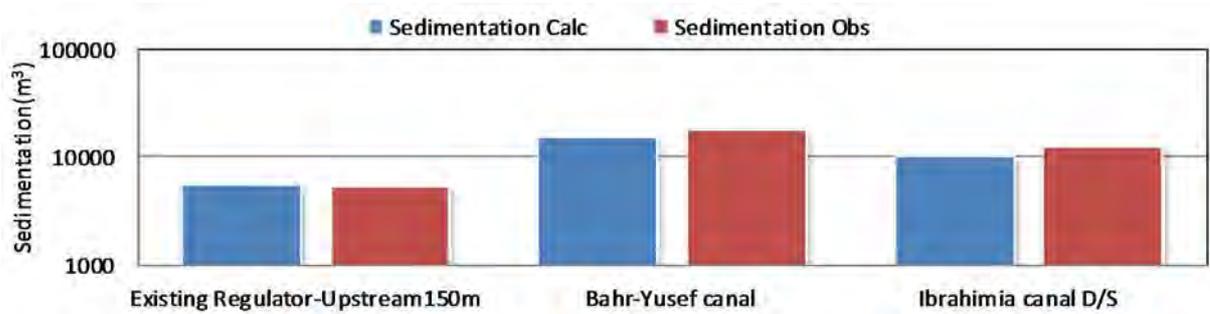


図 2-2. 56 堆砂量比較

2) 現況

現況では、1年間の平均的な流量を与えて河床変動計算を行った。図 2-2.57 に計算終了時の河床変動高を示す。イブラヒミア水路では、水深が深くなり、流れが緩やかになる下流 120m 付近に比較的大きな堆積ができる。また、バハルヨセフ水路では、堰下流で左回りの循環流が発生する為、左岸付近でも堆積が発生している。水路が徐々に狭まり縮流していく堰下流 200m 付近で侵食が発生している。

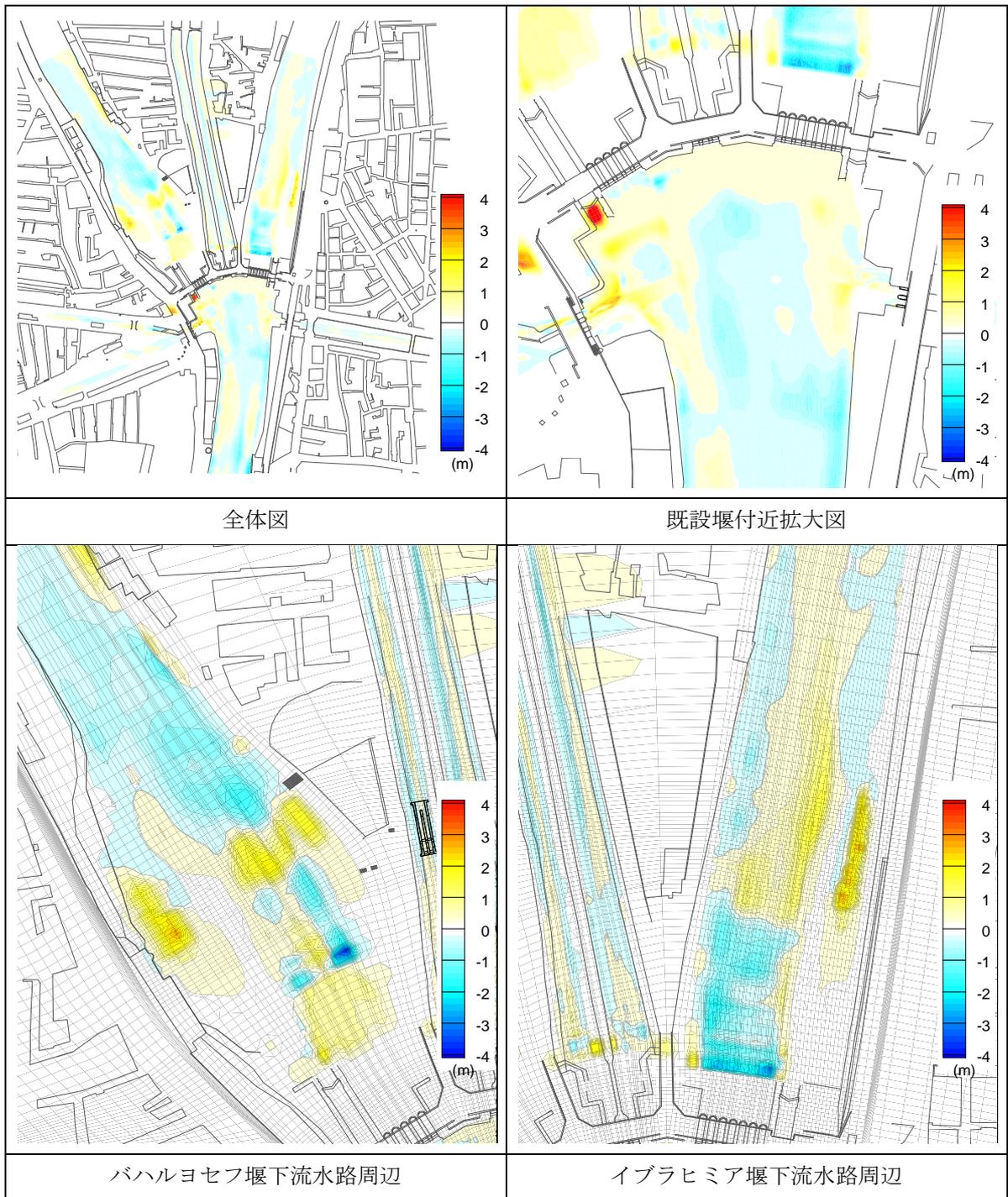


図 2-2.57 河床変動高コンター図（現況）

3) 計画

計画では、現況と同様に、1年間の平均的な流量を与えて河床変動計算を行った。図 2-2.58 に計算終了時の河床変動高を示す。既設堰の分水路周辺について、アボギャバル堰の前面・側面およびイブラヒミア水路側で堆積が大きくなっている。

イブラヒミア新設堰周辺については、新設堰の前面で若干堆積が発生し、新設堰下流側で比較的大きな侵食が発生する。

バハルヨセフ新設堰周辺は堰の下流で比較的大きな侵食が確認できる。

アボギャバル堰およびサヘリア堰は水路側岸部に沿って前面に張り出す形になっており、現況水路の予測結果に比べてアボギャバル堰の前面・側面の堆砂が減少している。

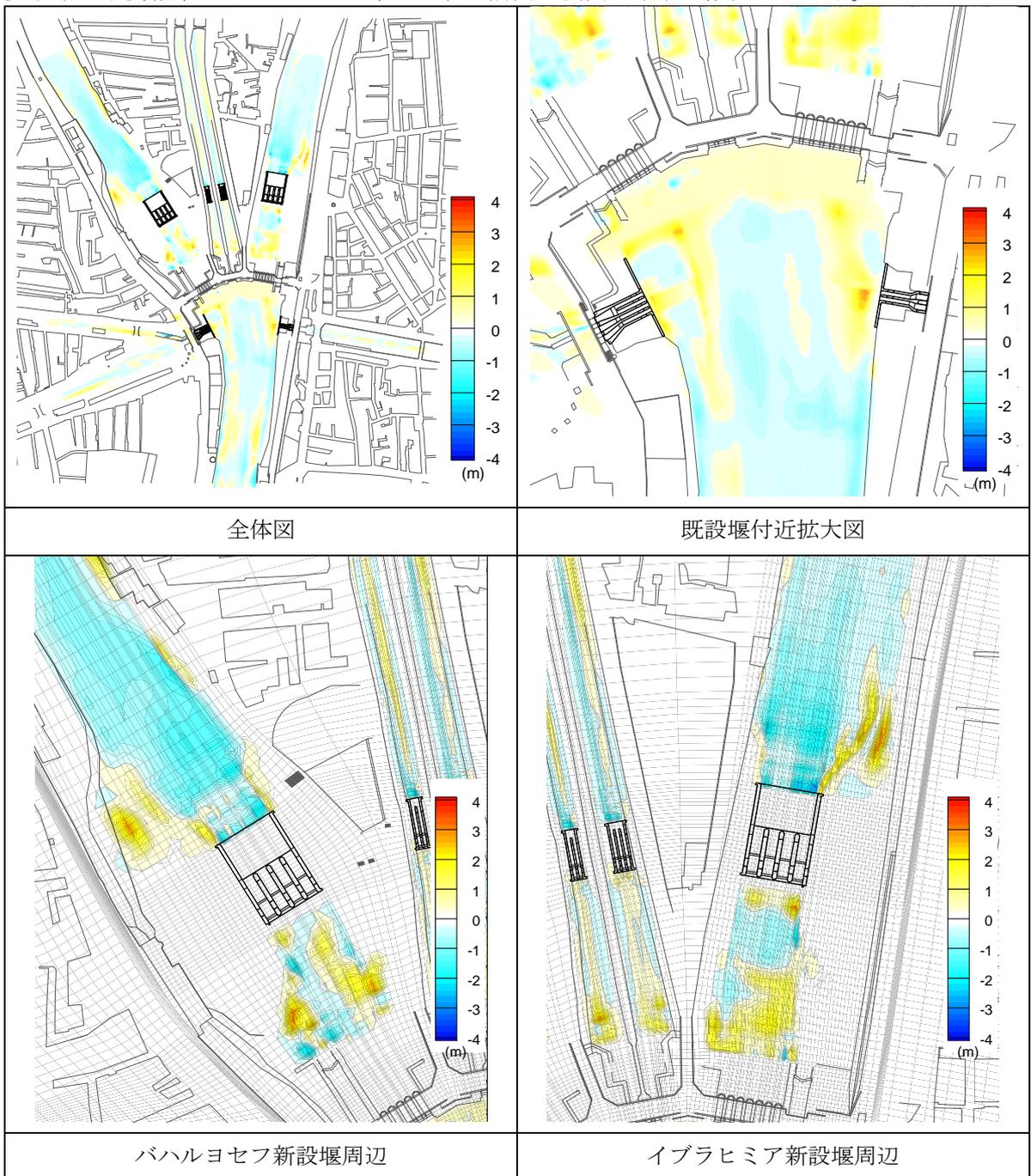


図 2-2.58 河床変動高コンター図 (計画)

4) 評価

現況及び計画の河床変動解析の結果、以下の事が言える。

- ・新バハルヨセフ堰

バハルヨセフ新設堰下流では局所洗掘が発生する可能性がある。

- ・新イブラヒミア堰

イブラヒミア新設堰下流では局所洗掘が発生する可能性がある。また、堰直上流では若干の堆積が発生する可能性がある。

- ・新アボギャバル堰及び新サヘリア堰

新設堰の有無にかかわらず、既設堰上流の左岸側（アボギャバル堰前面部）およびイブラヒミア水路上流部（サヘリア堰前面部）には堆砂が発生する可能性がある。

但し、新堰では、アボギャバル堰及びサヘリア堰を水路側岸部に沿って前面に張り出した結果、現況に比べてアボギャバル堰前面の堆砂が減少する。

このことから、取水への影響は軽減されるものと推定される。

検証における既設堰中央部の取扱いと今後の対応について

検証の材料となる差分図は堆砂処理前（2015.11）の測量データー堆砂処理後（2016.01）測量データにより算出し、図化している。そのため、既設堰中央部分は侵食の様子を示しているが、実際には侵食ではなく、堆積である可能性が高い。

堆砂処理（掘削）が行われていない地点については実際の堆積・侵食が逆転していることに注意が必要である。既設堰中央前面では2015.11から2016.01の間に河床変動が起こって堆積したと考えられる。検証計算結果では、堆砂の程度は異なるものの、既設堰中央前面で堆積傾向となっている為、実績と計算の傾向は一致していると考えられる。

今回の検証で重要なポイントは、堆砂除去範囲が不明である点である。残念ながら堆砂除去範囲が不明である為、堆砂処理後の2016.01河床で2015.11河床より堆積している地点については、人為的な土砂輸送があったのか実際の河床変動により堆積が生じたのか不明瞭であり、検証データとして不確実性が高い。このことからこの範囲は評価対象としないという方針で解析を行っている。

今回の河床変動解析については、解析に必要となる検討期間内の流入土砂や検討対象範囲の河床材料の粒度分布等の情報が十分に入手できない為、不確実性は残るものの、本業務での調査結果を活用し、現在の堆積・侵食をある程度再現・予測できる解析モデルを構築している。

今後、現在の構築モデルの計算精度を向上させる為には、より詳細な地形データや各水路の流量・水位・堰の運用状態の時系列データが必要となる。