

8. 漂流物衝突シミュレーション

8.1. シミュレーション手法と解析条件

(1)解析モデル

解析コードは、類似事業で採用された京都大学開発の解析コードを使用した。本コードは、漂流物を質点ではなくその形状を正確に反映させることができ、並進 3 自由度および回転 3 自由度を考慮した漂流物の挙動解析が可能なモデルである。ただし計算時間短縮のため、沖合については平面二次元解析モデルで計算し、水路斜面部から直立護岸を含む岸側の領域は三次元解析モデルで計算を行うこととした。

(2)解析領域

対象地形を図-8.1.1 に示す、(a)直立護岸および(b)単純勾配の海底地形とし、陸上部には堤体を設置した。堤体高は 0.6 m とし、設置位置は護岸汀線と護岸から 0.625m 陸側の 2 種類とした。造波境界、直線部、単純勾配斜面、直線部、直立護岸、遡上区間の一連の水路をモデル化し、横断方向については計算時間節約のために幅 20cm とした。

また、二次元モデルと三次元モデルとの境界においては、後述する海底地形のうち、直立護岸では、入力波 We10 が汀線より 8.5m 沖側の地点、We20～We40 が汀線より 7.0m 沖側の地点を境界とし、単純勾配では、入力波 We10 が汀線より 5.0m 沖側の地点、We20～We40 が汀線より 4.0m 沖側の地点を境界とした。当該地点より岸側を三次元モデルとし、当該地点よりも沖側を二次元モデルとしてそれぞれ計算した（図-8.1.1、表-8.1.1 参照）。

(3)計算メッシュ

計算メッシュは、試験水路の形状を適切に表現できるように作成した。具体的に、三次元モデルに関しては、水路縦断方向および鉛直方向の分割について計算メッシュサイズを 2.0cm に設定し、横断方向の分割については 4.0 cm とした（表-8.1.1 参照）。

(4)初期条件

初期条件は静水状態（沖合直線部水深 60cm）とした。

(5)入力津波条件

津波の入力は、図-8.1.1 の A 点において計測された水位時系列の計測結果を用いた。ただし、水理試験では直立護岸のみを対象としたため、単純勾配地形については地形形状が同一の類似事業（平成 29 年度実施）で得られた計測地点 A における計測結果を適用した。入力波は、図-8.1.2 に示す、We10～We40 の 4 種類の波形とした。

(6)漂流物条件

漂流物の形状については、水理試験で用いた 4 ケースを設定した（漂流物試験方法を参照）。船舶型漂流物 A, B, C, D の体積はそれぞれ $2.3775 \times 10^{-4} \text{m}^3$, $2.3775 \times 10^{-4} \text{m}^3$, $2.8463 \times 10^{-4} \text{m}^3$, $0.4443 \times 10^{-4} \text{m}^3$ であるため、密度は 626.7kg/m^3 , 626.7kg/m^3 , 534.0kg/m^3 , 652.7kg/m^3 としている。

上述した解析条件をもとに、水理試験を対象に、数値シミュレーション解析を実施し、解析手法の適用性を確認した。

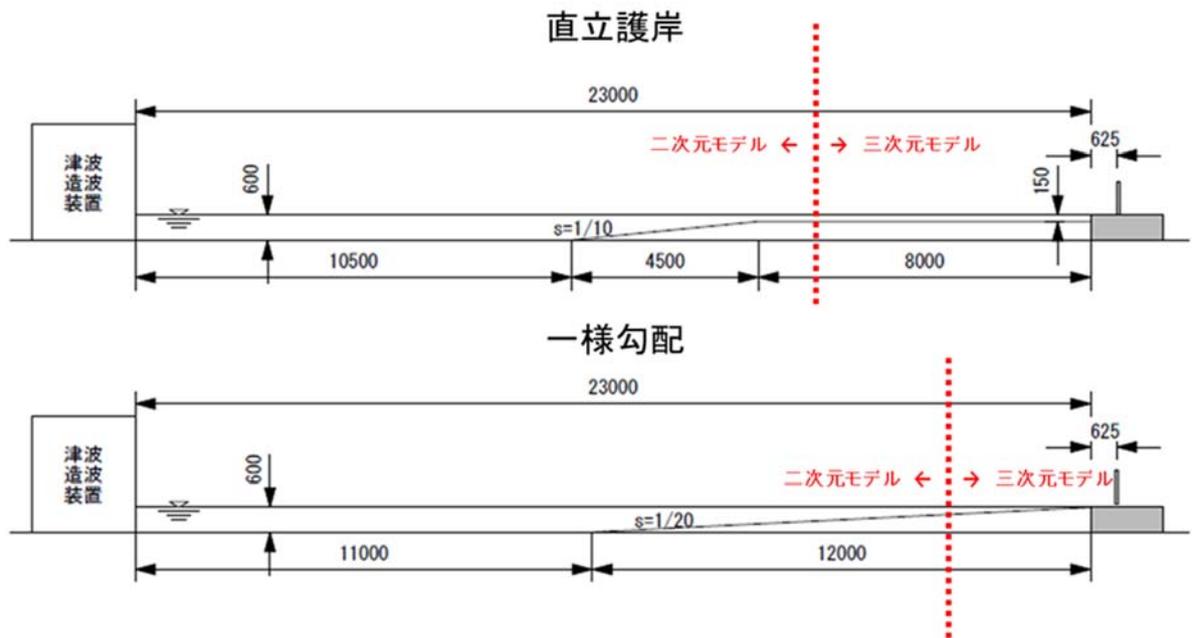


図- 8.1.1 地形および堤体条件（断面図，単位：mm）入力津波条件

表- 8.1.1 解析条件

地形	2次元モデルと3次元モデルとの境界位置		3次元領域メッシュサイズ
直立護岸	We10	汀線より 8.5m 沖側	x, z 方向：2.0cm y 方向：4.0cm
	We20		
	We30	汀線より 7.0m 沖側	
	We40		
単純勾配	We10	汀線より 6.0m 沖側	
	We20		
	We30	汀線より 4.0m 沖側	
	We40		

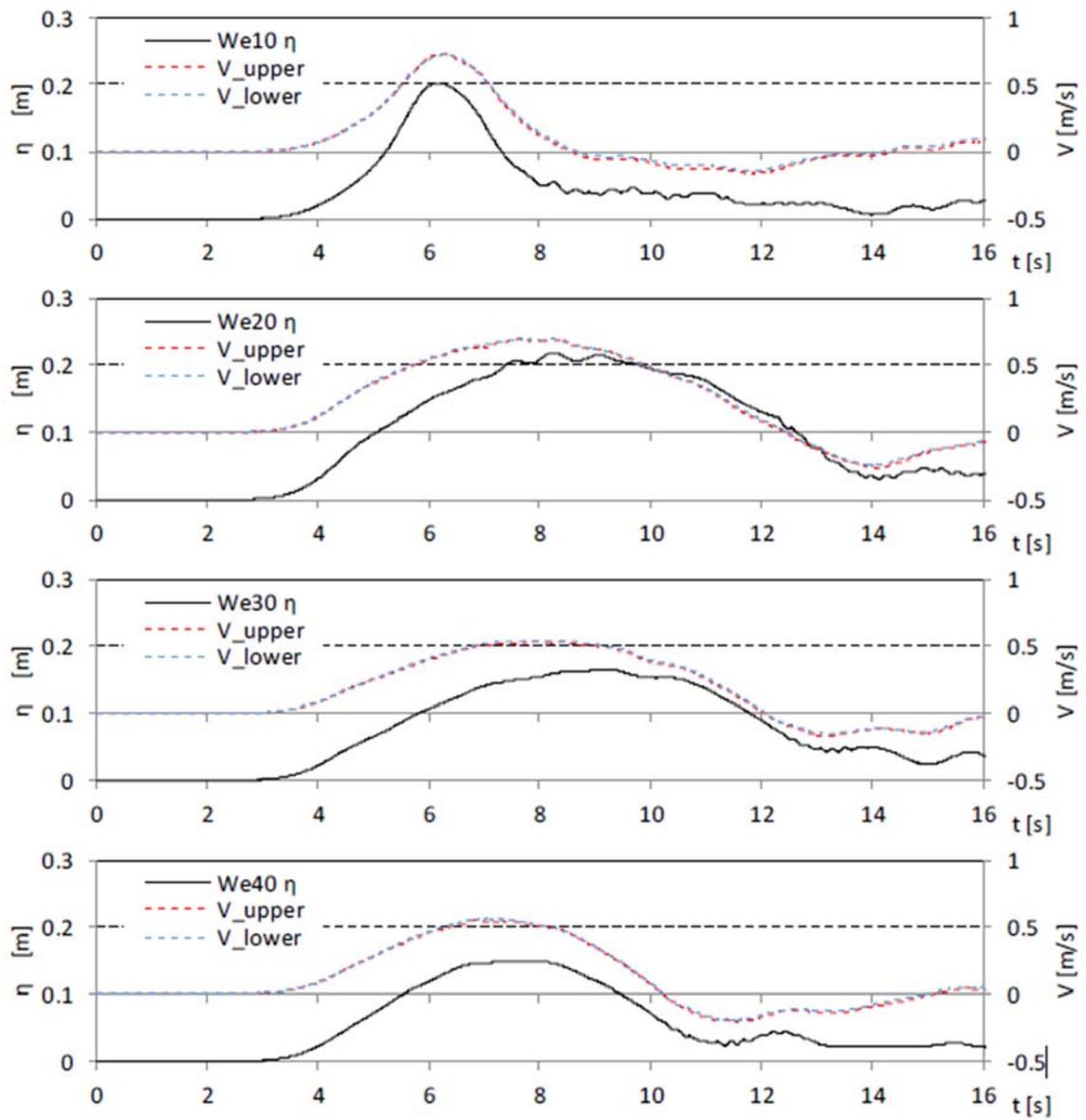


図- 8.1.2 入力津波条件 (計測位置: 点 A)

8.2. 解析ケース

直立護岸，単純勾配地形を対象に，計 80 ケースの解析を実施した．直立護岸，単純勾配における解析条件のケース一覧を表- 8.2.1 及び表- 8.2.1 に示す．なお，No.44~No.48 のケースにおいては実機スケールでの解析を実施し，その他のケースにおいては模型スケールでの解析を実施した．

表- 8.2.1 シミュレーション解析ケース一覧

No.	海底勾配	ケース名	波形	堤体位置	漂流物	漂流物位置
1	直立護岸	F-We10-A-05	We10	0.625m	A	0.5m
2		F-We10-A-20				2.0m
3		F-We10-A-30				3.0m
4		F-We10-A-35				3.5m
5		F-We20-A-05	We20			0.5m
6		F-We20-A-10				1.0m
7		F-We20-A-20				2.0m
8		F-We20-A-30				3.0m
9		F-We20-A-35				3.5m
10		F-We20-A-40	4.0m			
11		F-We30-A-05	We30			0.5m
12		F-We30-A-10				1.0m
13		F-We30-A-15				1.5m
14		F-We30-A-20	2.0m			
15		F-We40-A-05	We40			0.5m
16		F-We40-A-10				1.0m
17		F-We40-A-20				2.0m
18		F-We40-A-25				2.5m
19		F-We10-B-05	We10		B	0.5m
20		F-We20-B-05	We20		0.5m	
21		F-We10-C-05	We10		C	0.5m
22		F-We10-C-20	2.0m			
23		F-We20-C-05	We20			0.5m
24		F-We20-C-10				1.0m
25		F-We20-C-20				2.0m
26		F-We20-C-30				3.0m
27		F-We20-C-40				4.0m
28		F-We20-C-50	5.0m			
29		F-We30-C-05	We30			0.5m
30		F-We30-C-20	2.0m			
31		F-We40-C-05	We40			0.5m
32		F-We40-C-20				2.0m
33		F-We40-C-30				3.0m
34		F-We40-C-35				3.5m
35		F-We40-C-40				4.0m
36		F-We20-D-05	We20		D	0.5m
37		F-We20-D-10				1.0m
38		F-We20-D-15				1.5m
39		F-We20-D-20	2.0m			
40		F-We40-D-05	We30			0.5m
41		F-We40-D-10	1.0m			
42		F-We40-D-20	We40		2.0m	
43		F-We40-D-25	2.5m			

表- 8.2.2 シミュレーション解析ケース一覧 (つづき)

No.	海底勾配	ケース名	波形	堤体位置	漂流物	漂流物位置
44	直立護岸 (実機 スケール)	R-We20-A-01	We20	0.625m (50m)	A	0.1m
45		R-We20-A-05				0.5m
46		R-We20-A-10				1.0m
47		R-We20-A-20				2.0m
48		R-We20-A-40				4.0m
49	直立護岸	O-We10-A-05	We10	0m	A	0.5m
50		O-We10-A-20				2.0m
51		O-We20-A-05	We20			0.5m
52		O-We20-A-20				2.0m
53		O-We30-A-05	We30			0.5m
54		O-We30-A-20				2.0m
55		O-We40-A-05	We40		0.5m	
56		O-We40-A-20			2.0m	
57		O-We10-C-05	We10		C	0.5m
58		O-We10-C-20				2.0m
59		O-We20-C-05	We20			0.5m
60		O-We20-C-20				2.0m
61		O-We30-C-05	We30			0.5m
62		O-We30-C-20				2.0m
63		O-We40-C-05	We40		0.5m	
64		O-We40-C-20			2.0m	
65	単純勾配	S-We10-A-05	We10	0.625m	A	0.5m
66		S-We10-A-20				2.0m
67		S-We20-A-05	We20			0.5m
68		S-We20-A-20				2.0m
69		S-We30-A-05	We30			0.5m
70		S-We30-A-20				2.0m
71		S-We40-A-05	We40		0.5m	
72		S-We40-A-20			2.0m	
73		S-We10-C-05	We10		C	0.5m
74		S-We10-C-20				2.0m
75		S-We20-C-05	We20			0.5m
76		S-We20-C-20				2.0m
77		S-We30-C-05	We30			0.5m
78		S-We30-C-20				2.0m
79		S-We40-C-05	We40		0.5m	
80		S-We40-C-20			2.0m	

8.3. 水位時系列

図- 8.3.1～図- 8.3.9 に、直立護岸のケースについて、A, B5, B10, B15, C, D 地点での水位時系列波形図をそれぞれ示す。漂流物なしの解析結果を緑線とし、試験結果を青線で示した。なお、図- 8.3.5 は直立護岸の実機スケールのケースであり、模型スケールの解析結果を実機スケールに換算した結果と比較して示した。また、単純勾配のケースについて図- 8.3.10～図- 8.3.13 に示す。なお単純勾配のケースは、漂流物なしの解析結果のみ示した。

シミュレーション解析結果は、試験結果と比較して若干の差異があるものの、その波形は水理試験の結果を精度良く再現していると言える。

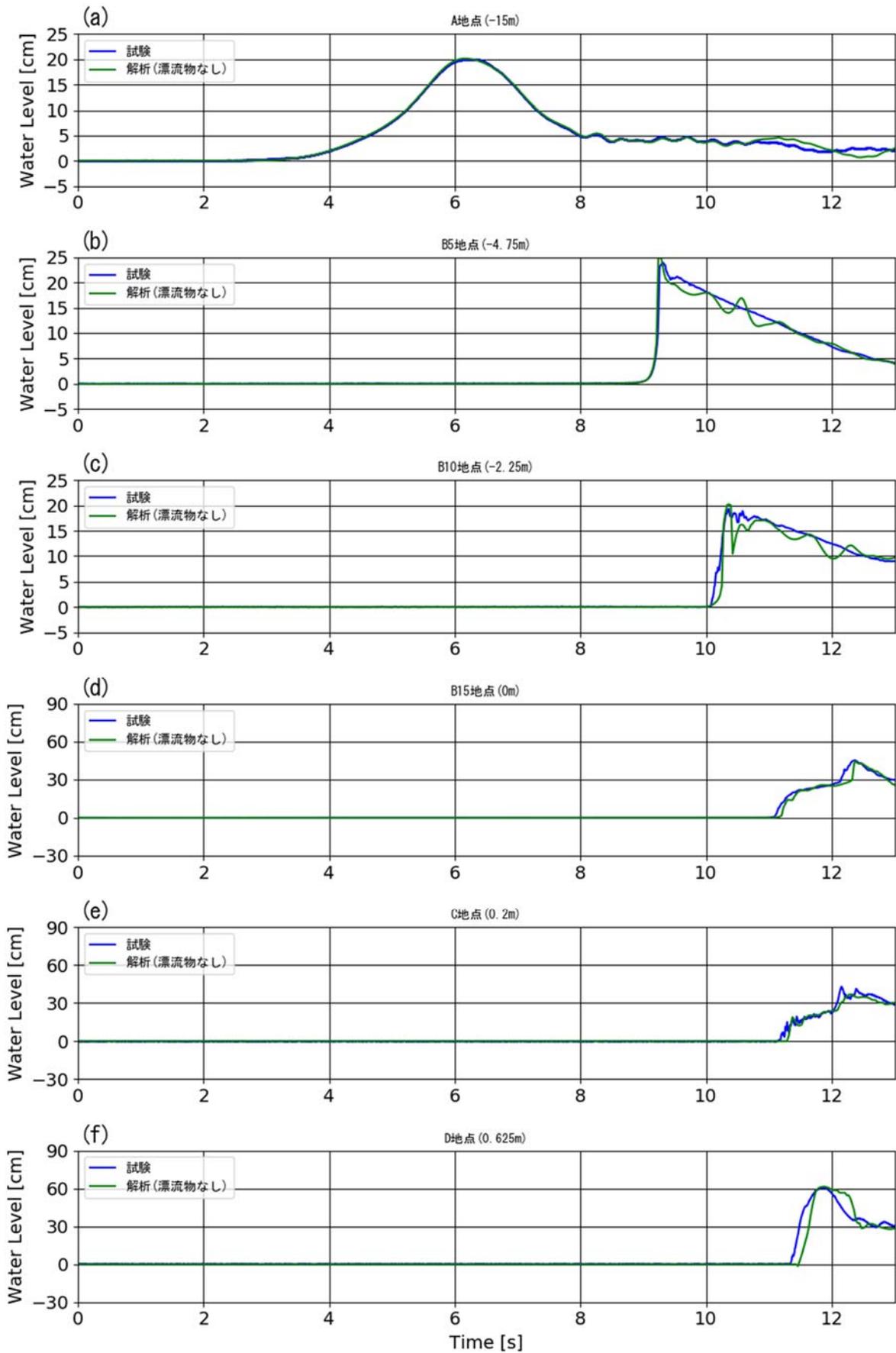


図- 8.3.1 水位時系列波形 (直立護岸, 堤体位置 0.625m, We10)

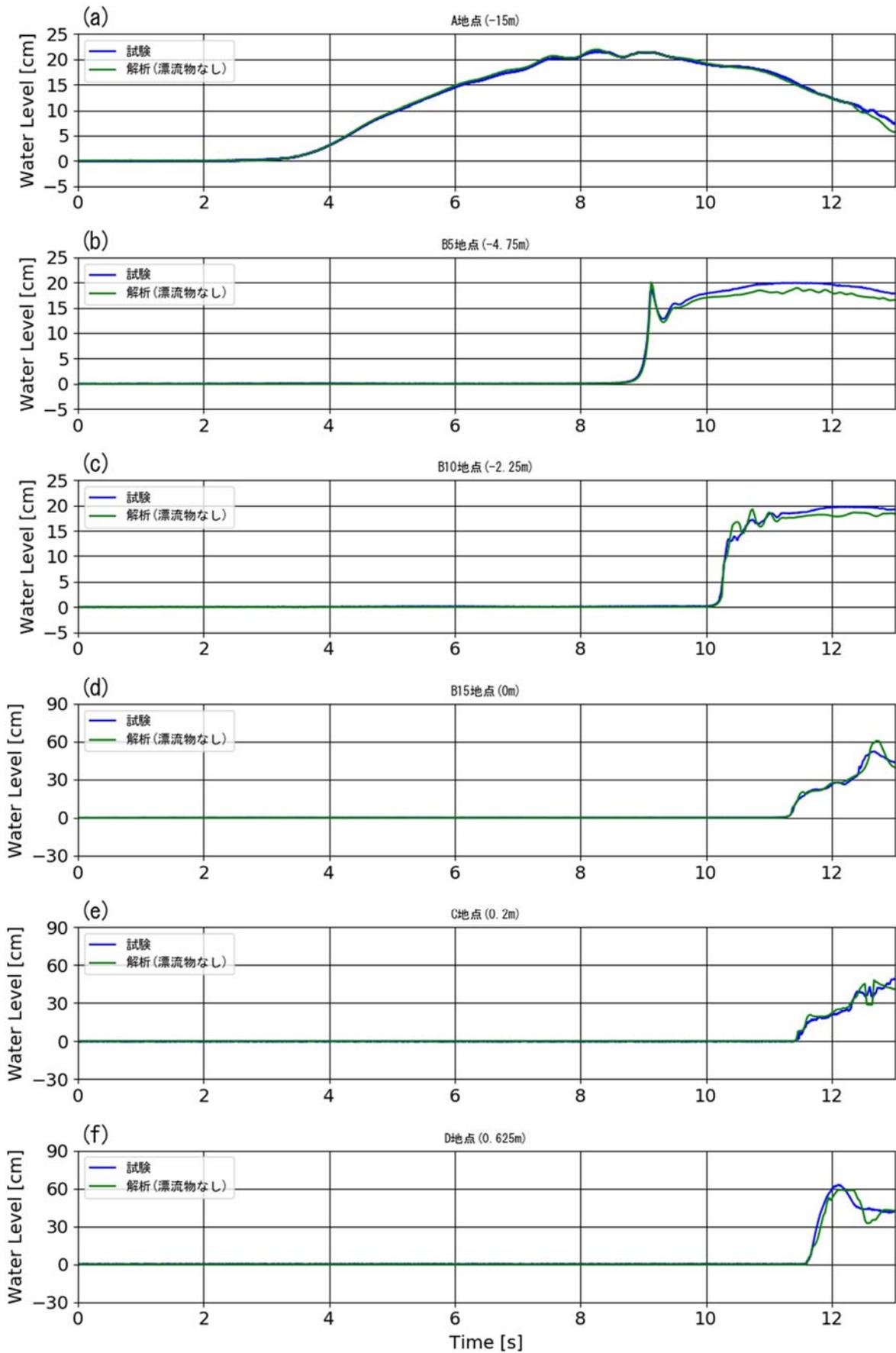


図- 8.3.2 水位時系列波形 (直立護岸, 堤体位置 0.625m, We20)

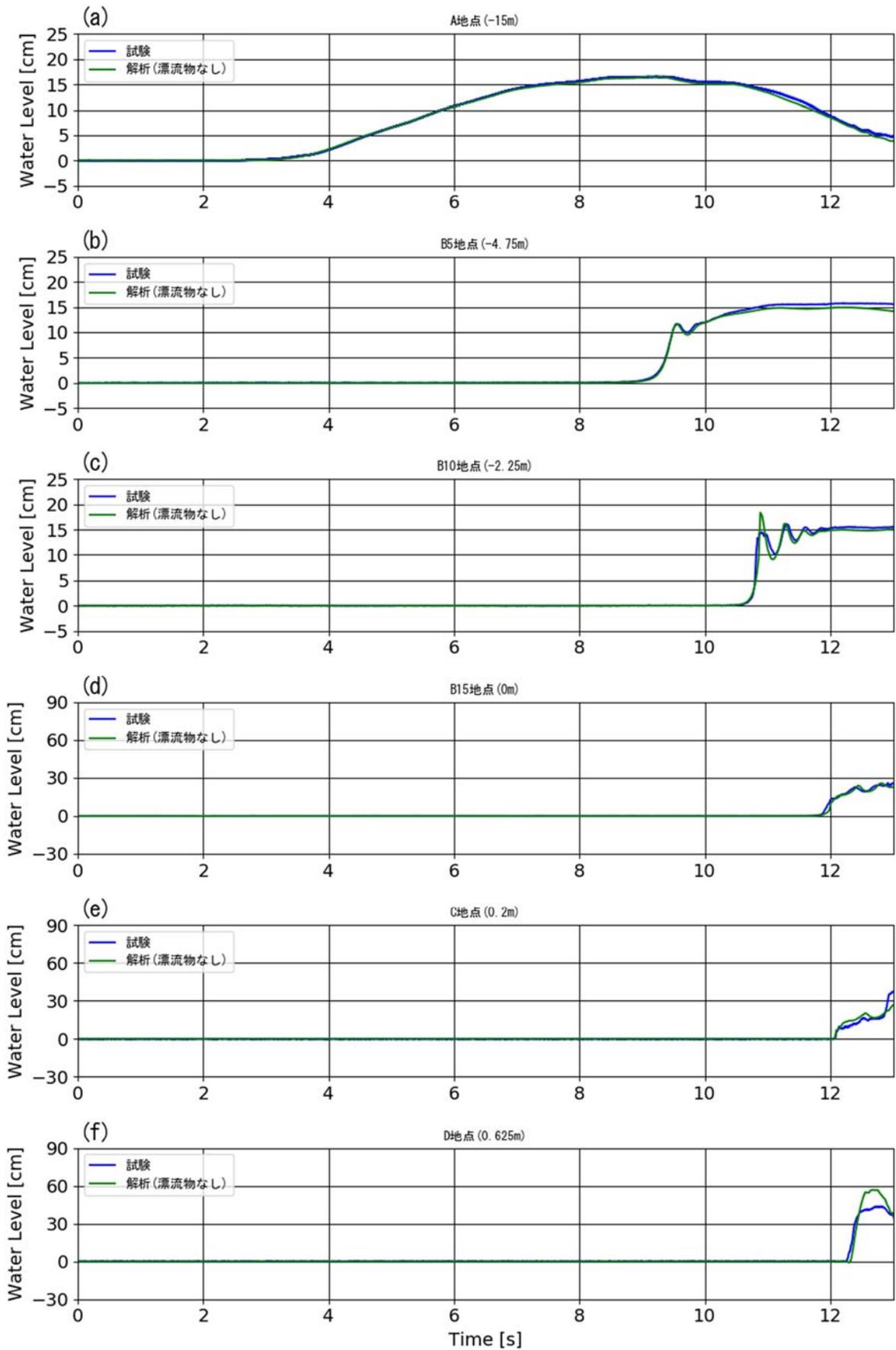


図- 8.3.3 水位時系列波形 (直立護岸, 堤体位置 0.625m, We30)

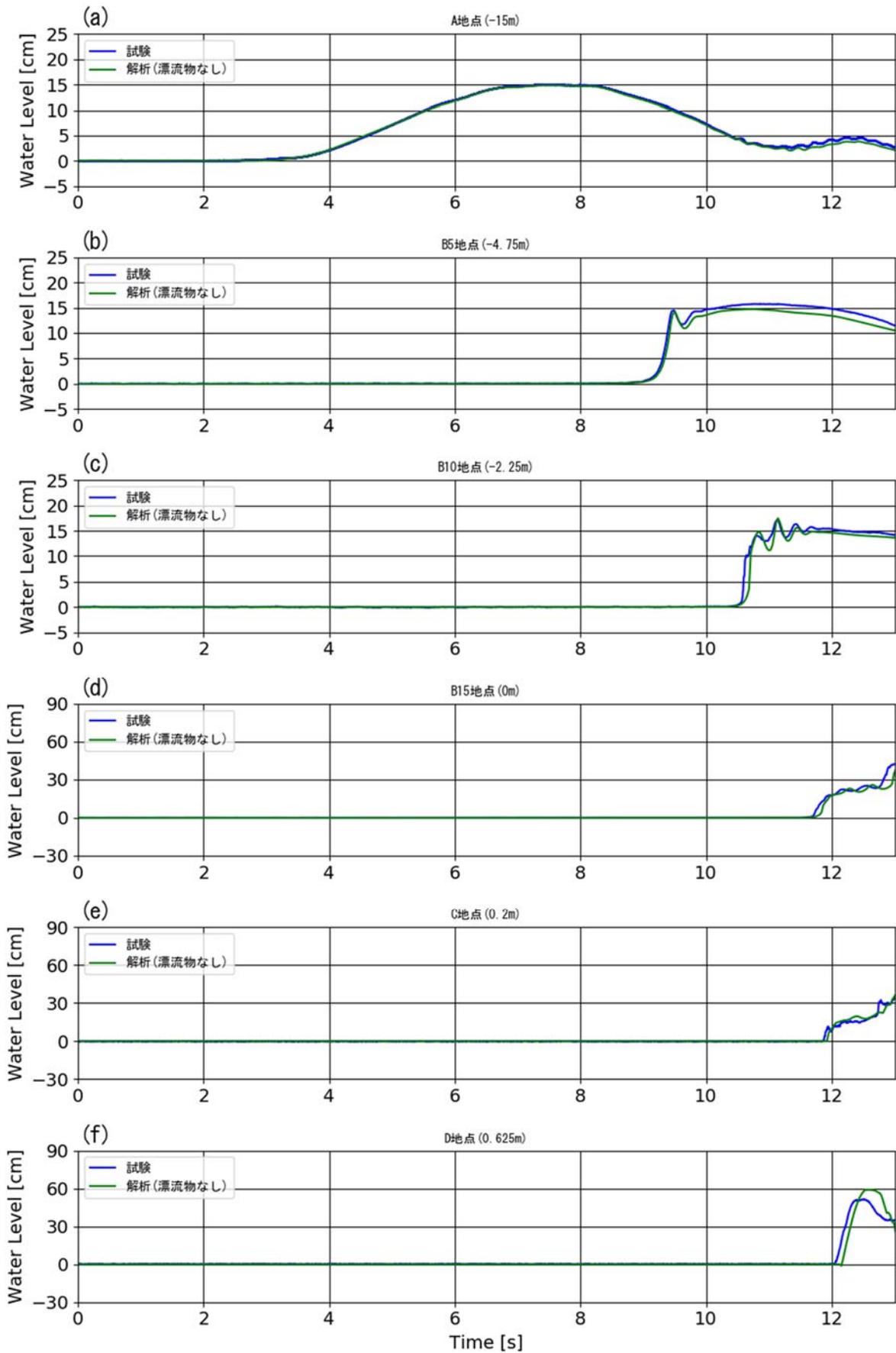


図- 8.3.4 水位時系列波形 (直立護岸, 堤体位置 0.625m, We40)

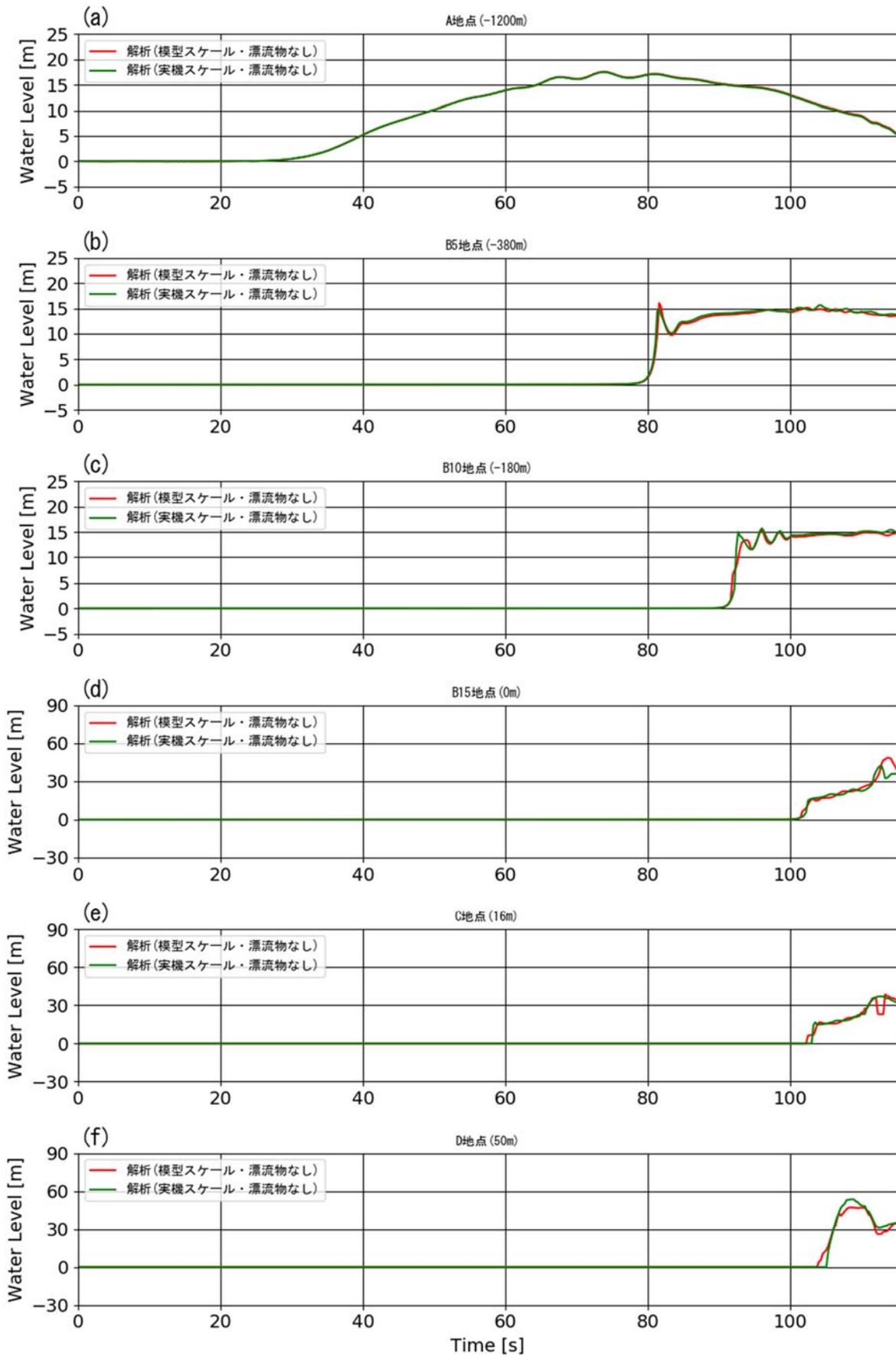


図- 8.3.5 水位時系列波形 (直立護岸, 実機スケール, 堤体位置 50m, We20)

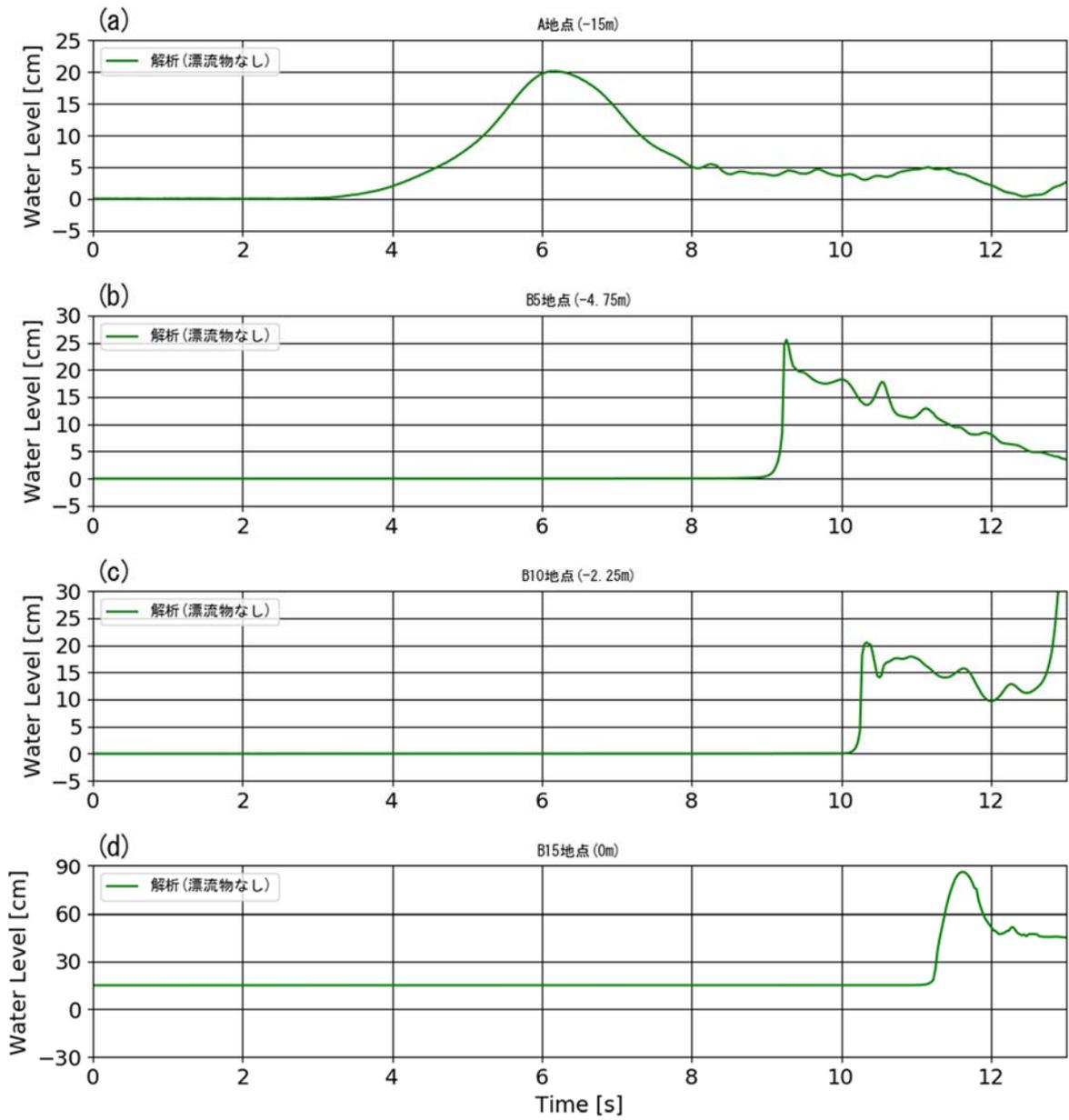


図- 8.3.6 水位時系列波形 (直立護岸, 堤体位置 0m, We10)

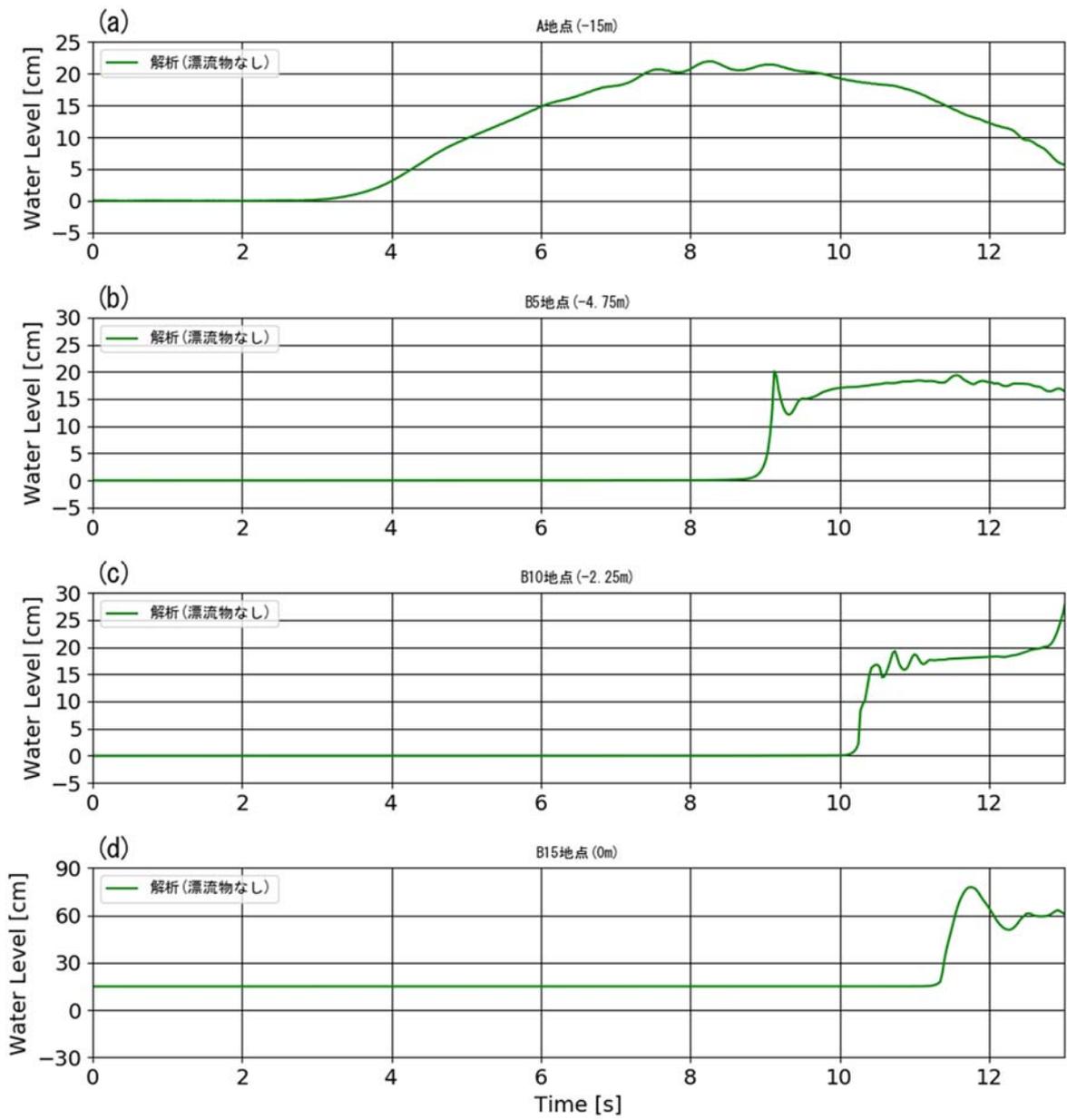


図- 8.3.7 水位時系列波形 (直立護岸, 堤体位置 0m, We20)

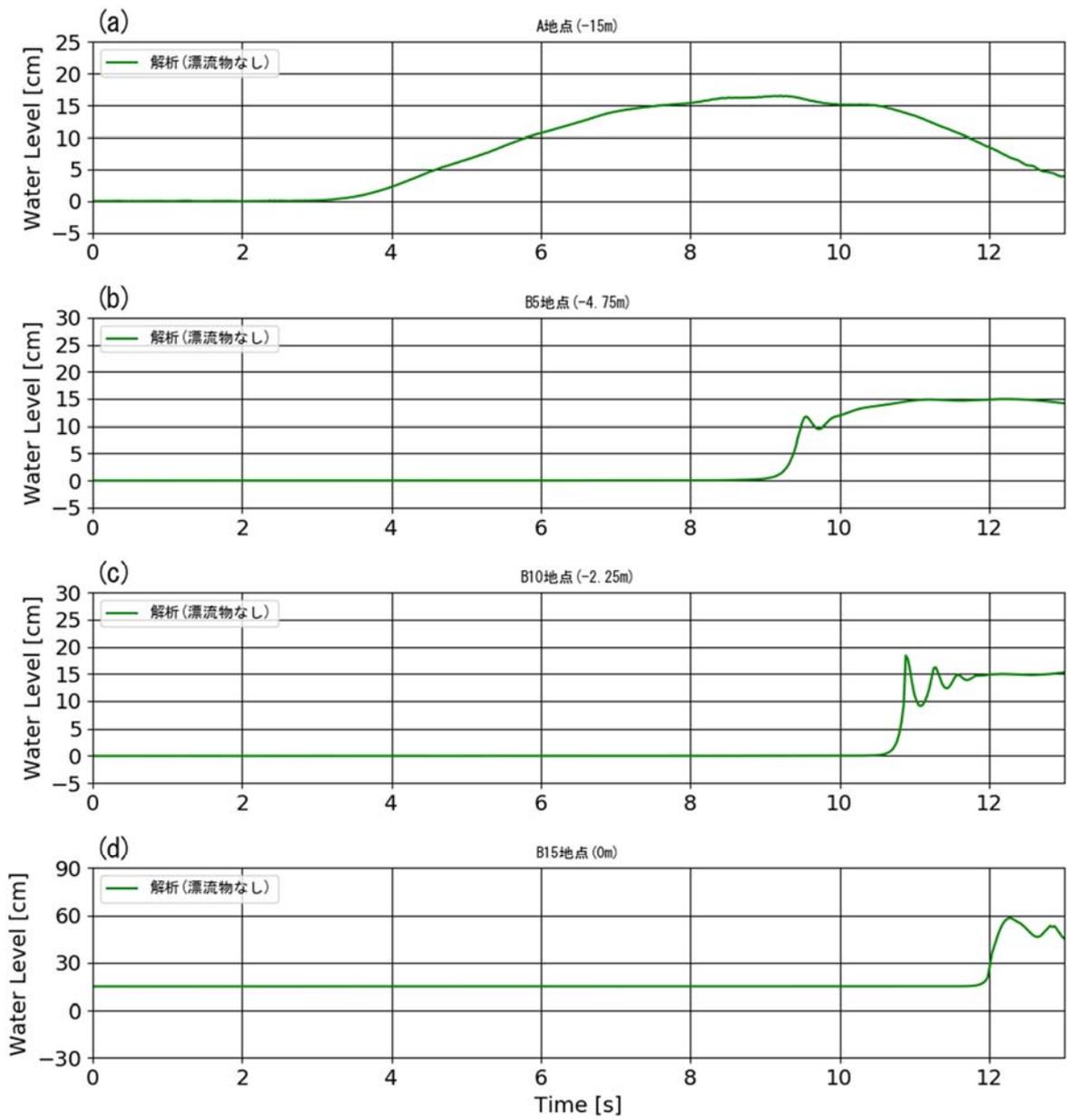


図- 8.3.8 水位時系列波形 (直立護岸, 堤体位置 0m, We30)

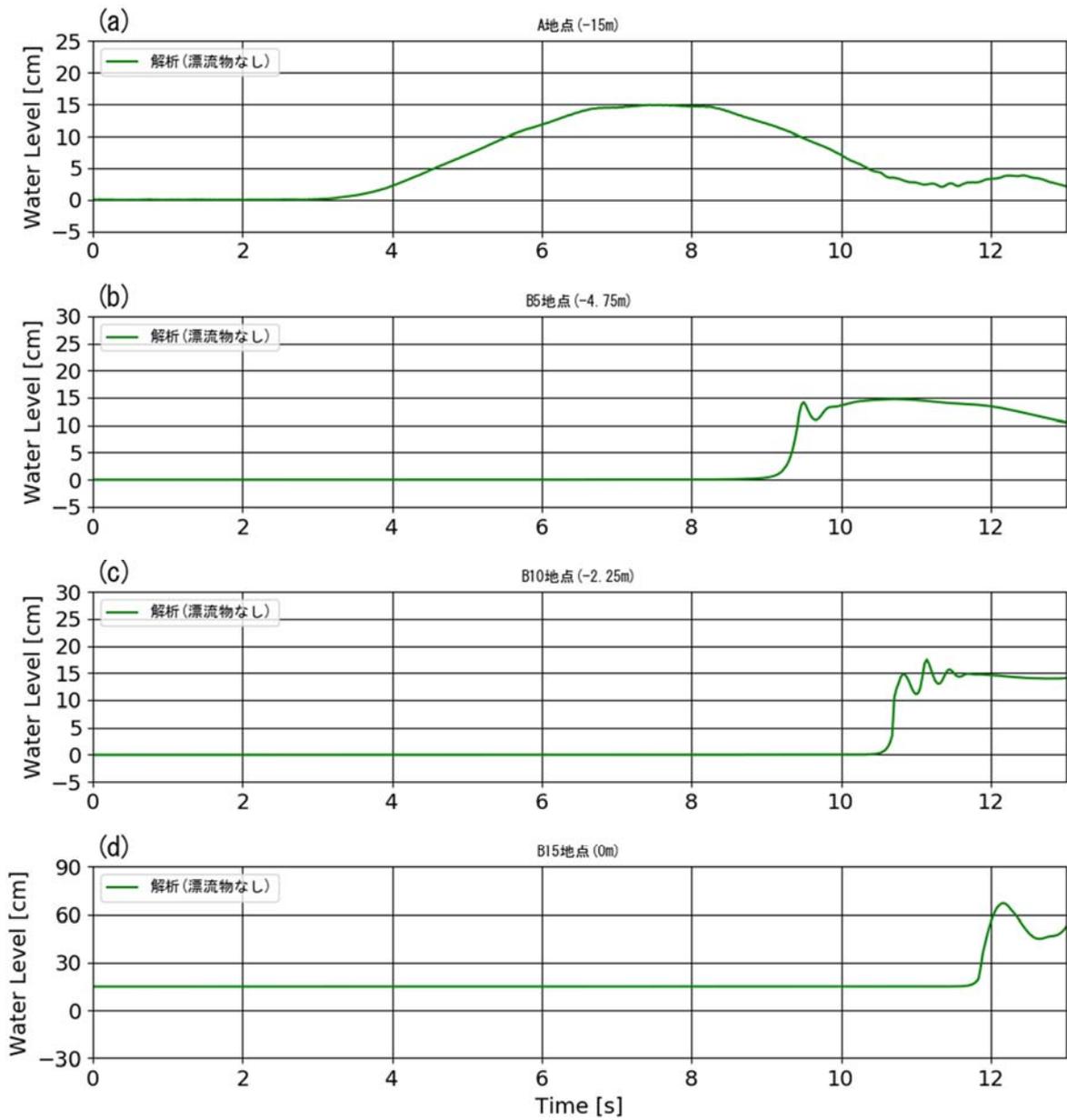


図- 8.3.9 水位時系列波形 (直立護岸, 堤体位置 0m, $We40$)

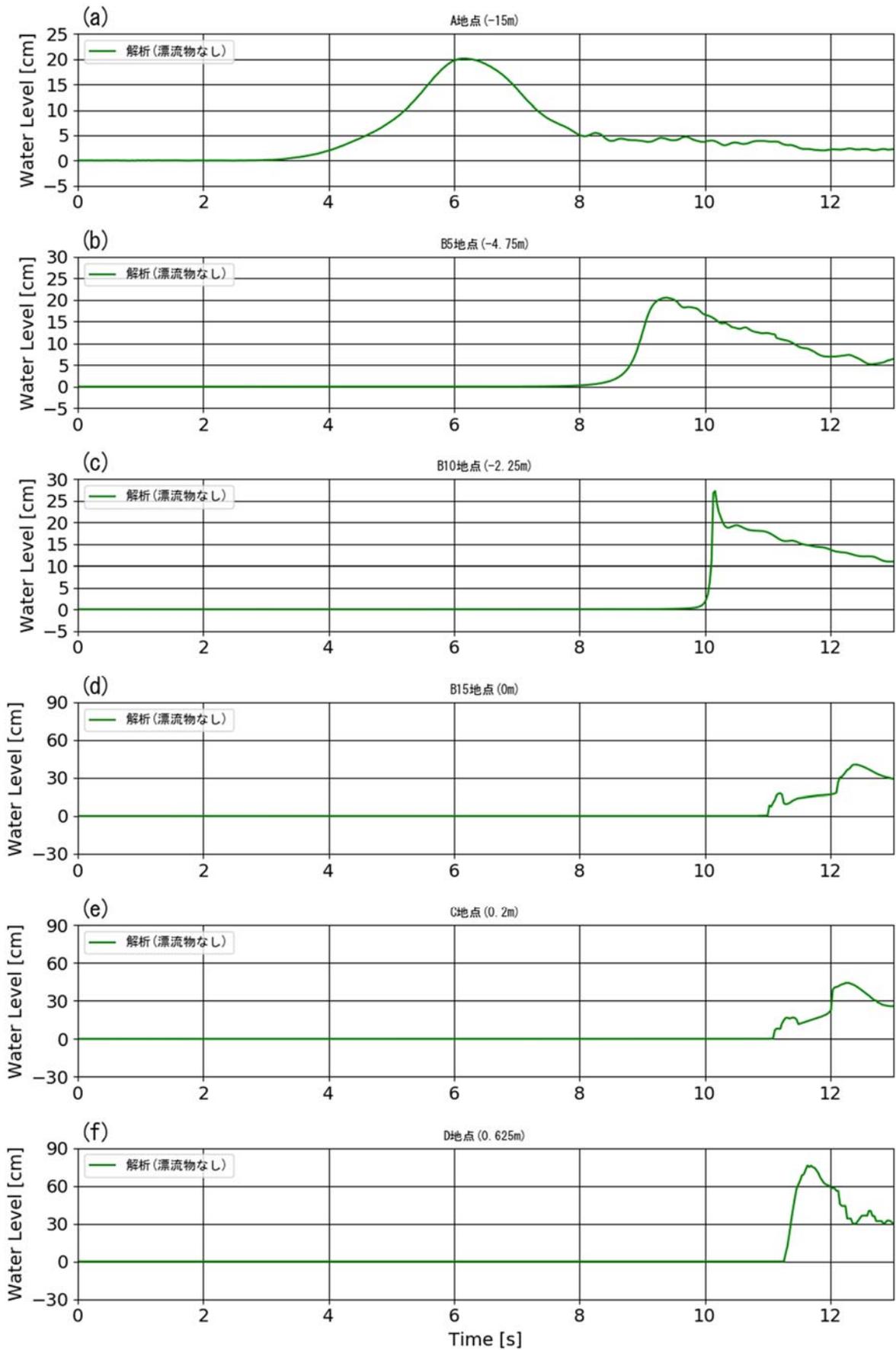


図- 8.3.10 水位時系列波形 (単純勾配, 堤体位置 0.625m, We10)

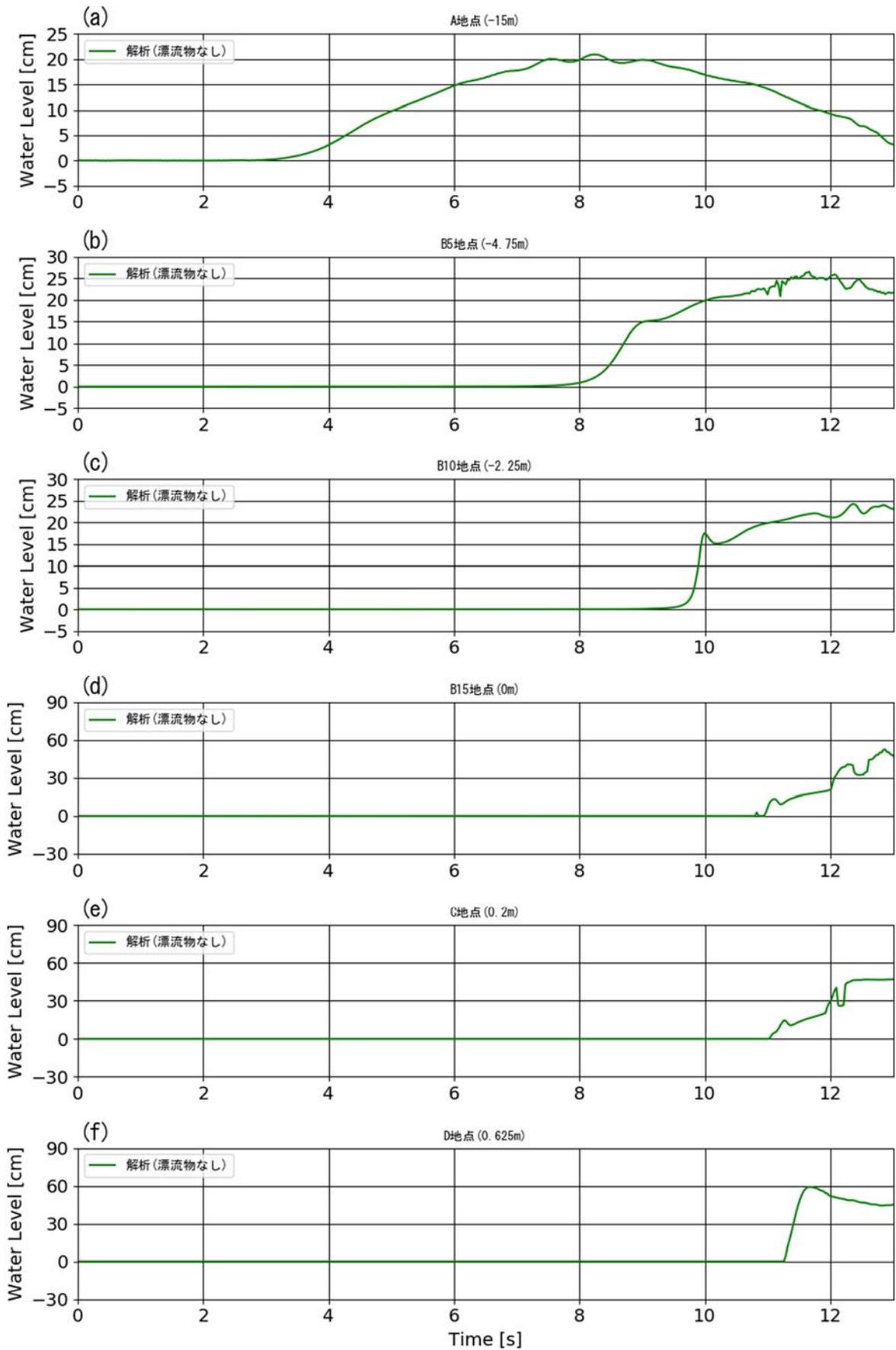


図- 8.3.11 水位時系列波形 (単純勾配, 堤体位置 0.625m, We_{20})

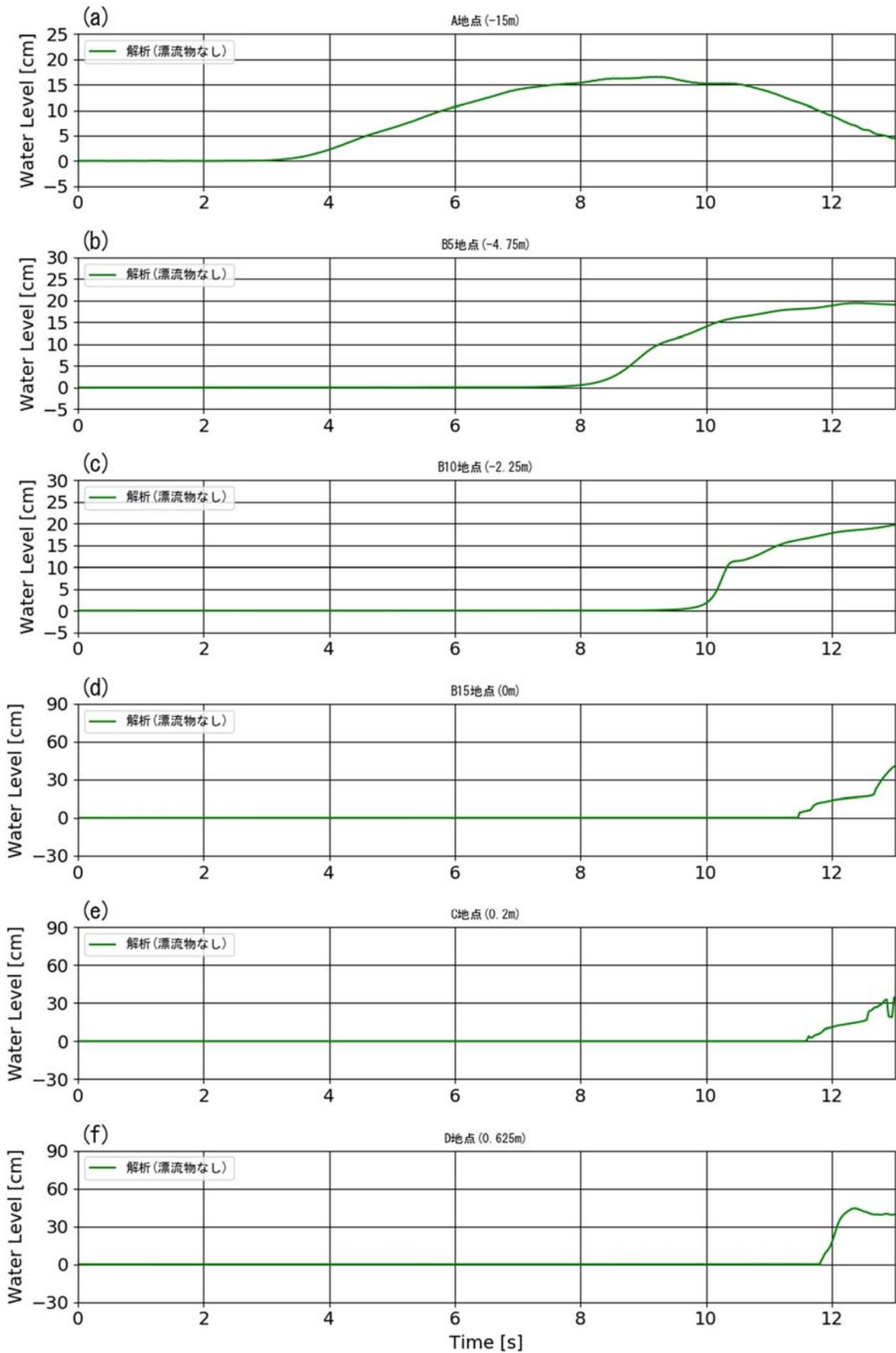


図- 8.3.12 水位時系列波形 (単純勾配, 堤体位置 0.625m, We30)

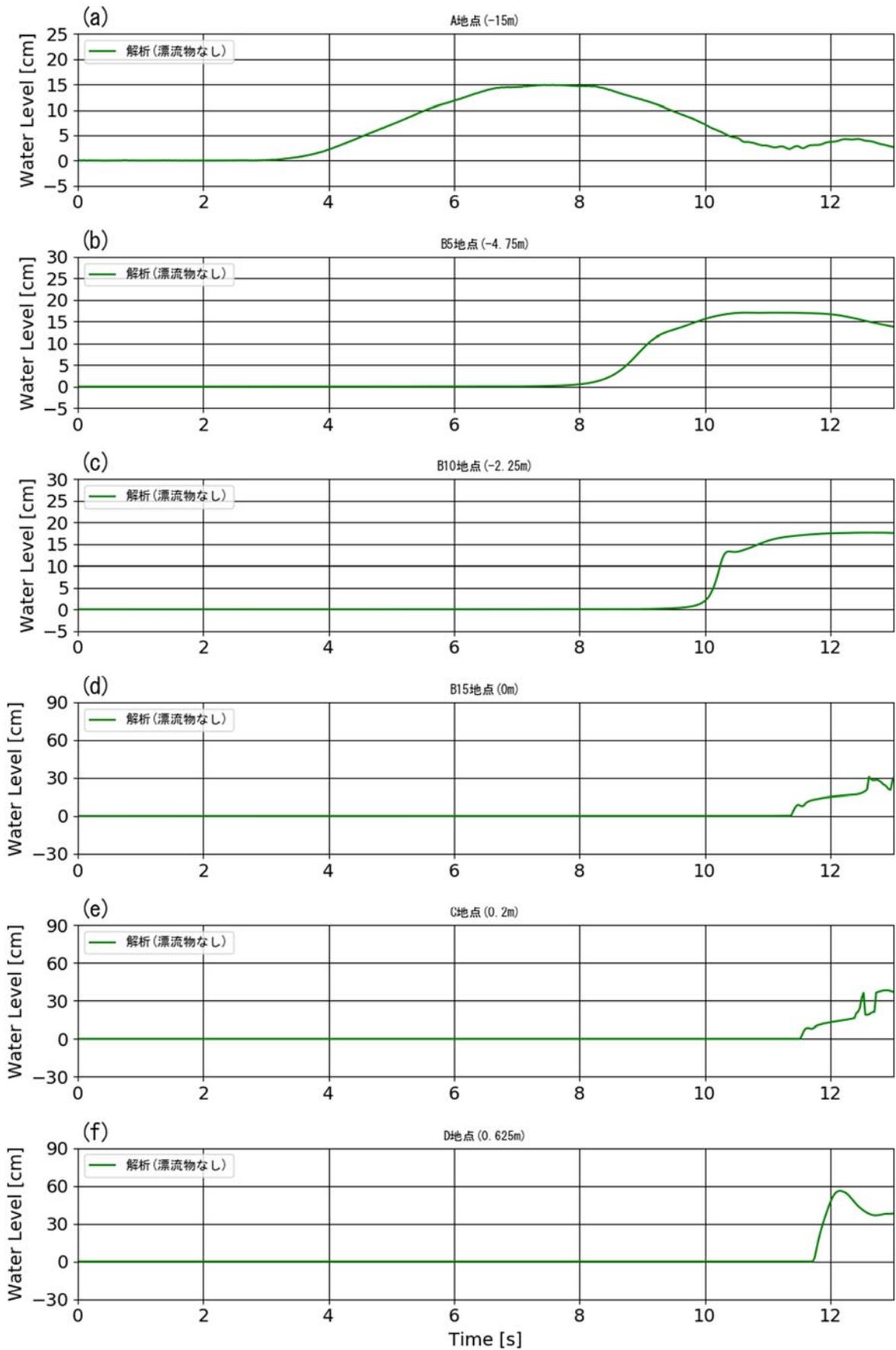


図- 8.3.13 水位時系列波形 (単純勾配, 堤体位置 0.625m, We40)

8.4. 流速時系列

図- 8.4.1～図- 8.4.4 に、直立護岸の試験ケースについて、A, B6-7, B13-14, C 地点での流速時系列図をそれぞれ示す。なお、シミュレーション結果の流速は鉛直方向に平均した断面平均流速である。漂流物なしの解析結果を緑線とし、試験結果を青線で示した。また同様に、直立護岸の実機スケールのケースについては図- 8.3.10～図- 8.3.13 に、単純勾配のケースについて図- 8.3.1～図- 8.3.13 に示す。なお、実機スケールのケースについては、模型スケールの解析結果を実機スケールに換算した結果と比較して示す。また、単純勾配のケースは漂流物なしの解析結果のみ示す。

シミュレーション解析結果は、水位の解析結果と同様、水理試験の結果を精度良く再現していると言える。ただし、直立護岸の汀線位置での解析結果と試験結果に比較的大きな差異が表れている。これは地形の隅角部のため流向の変化点となり、鉛直方向のわずかな位置の違いで流速が異なることから、水理試験におけるプロペラ流速計の計測結果と厳密には解析結果の算出点が一致しないことが要因と考えられる。

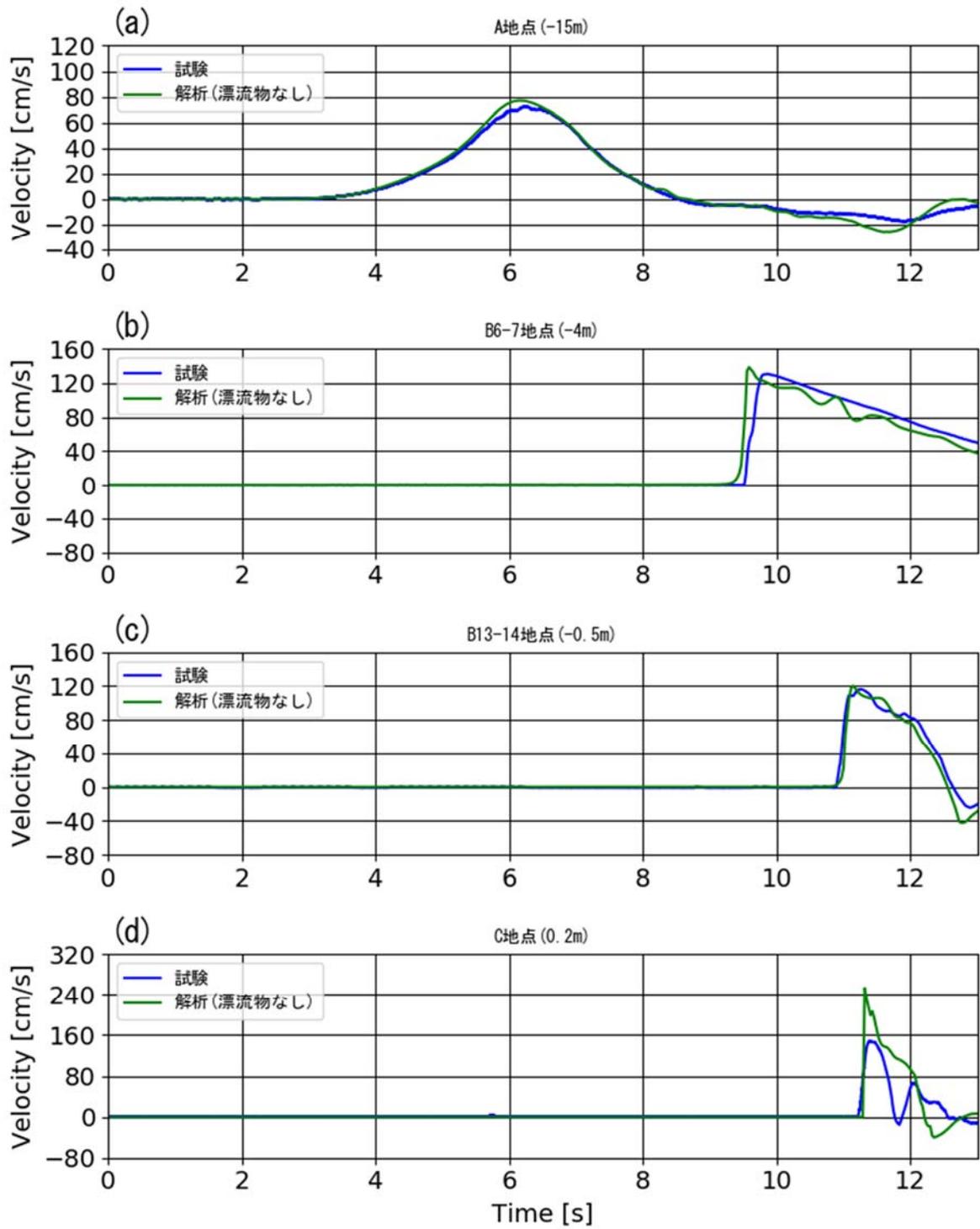


図- 8.4.1 流速時系列波形 (直立護岸, 堤体位置 0.625m, We_{10})

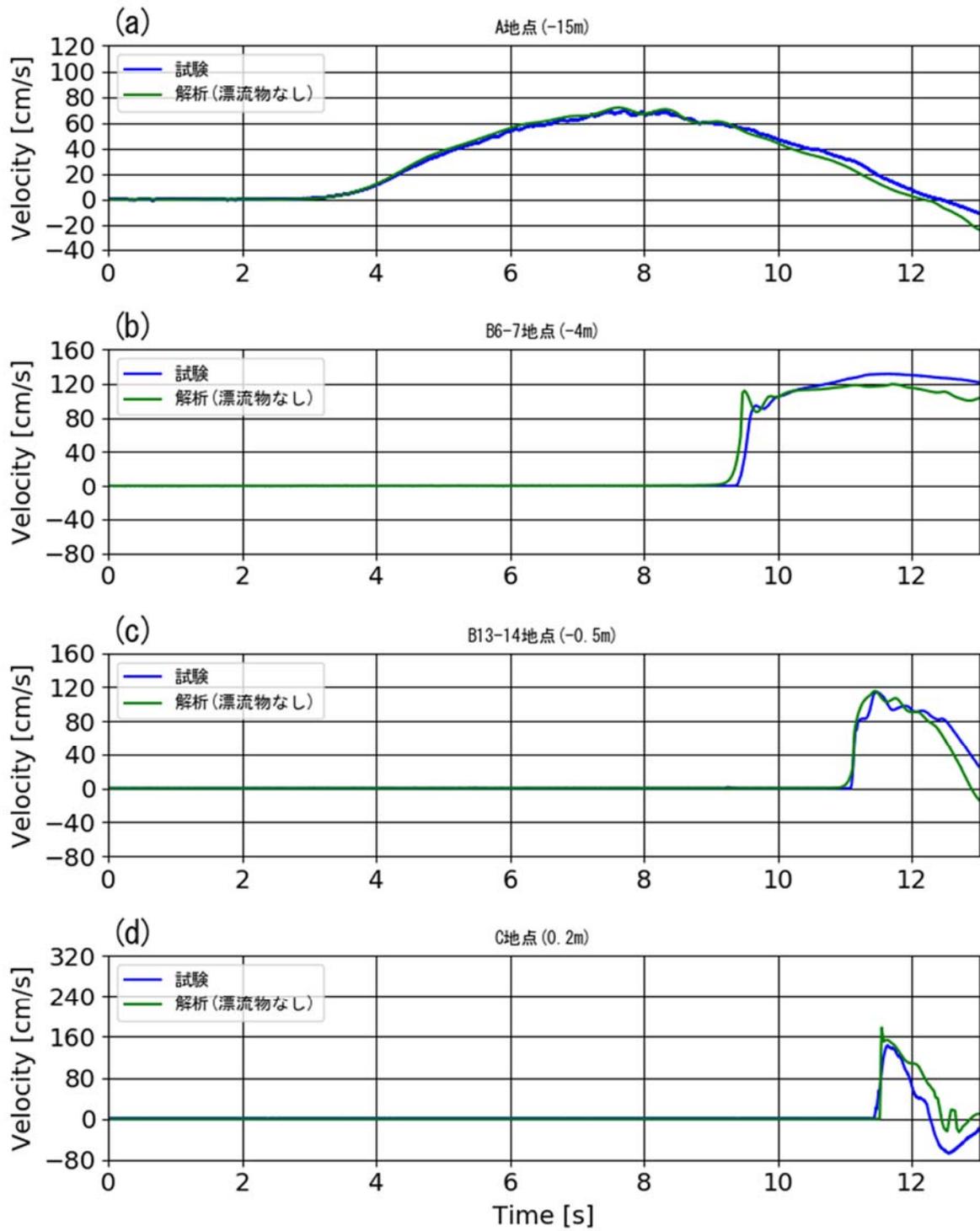


図- 8.4.2 流速時系列波形 (直立護岸, 堤体位置 0.625m, We_{20})

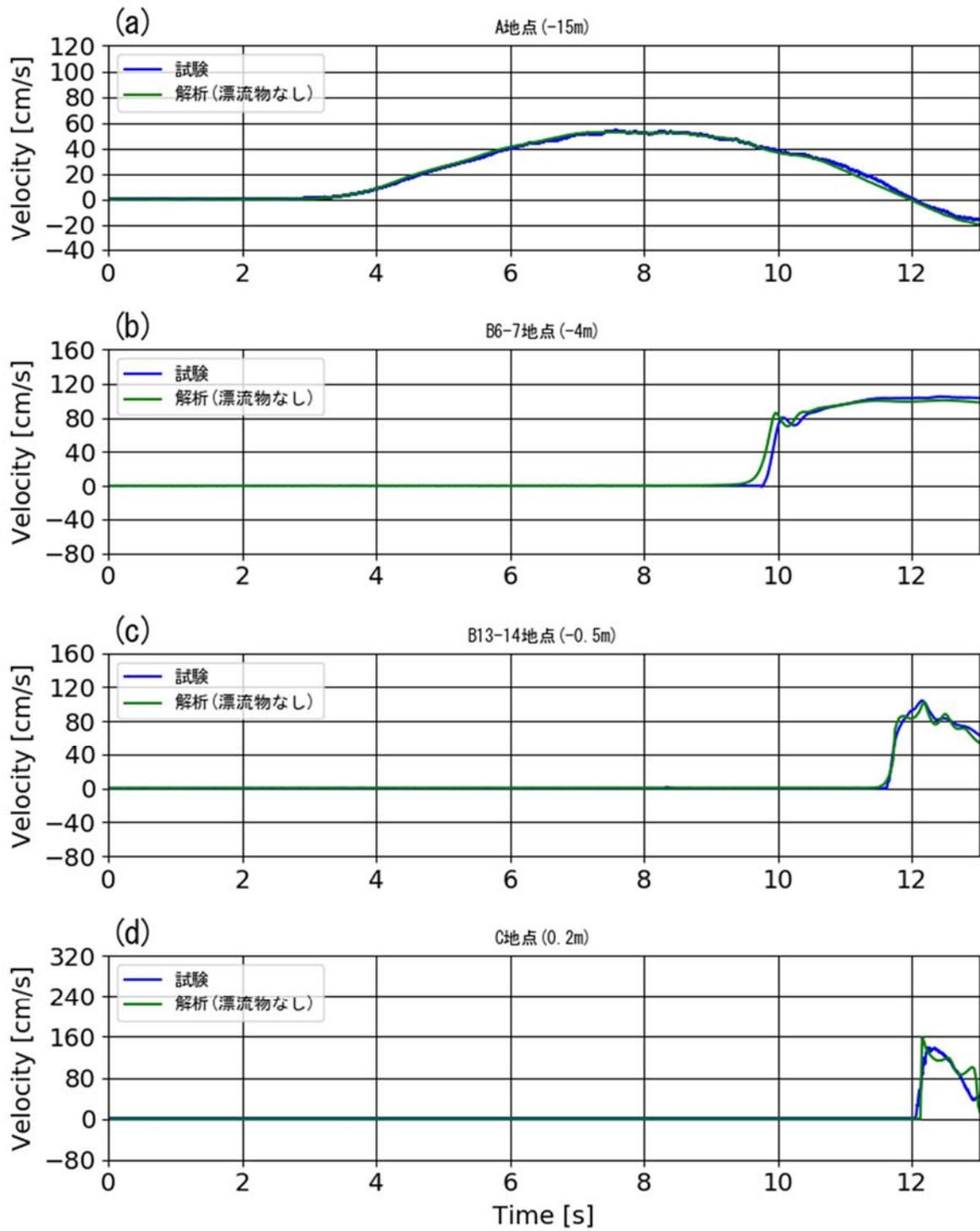


図- 8.4.3 流速時系列波形 (直立護岸, 堤体位置 0.625m, We30)

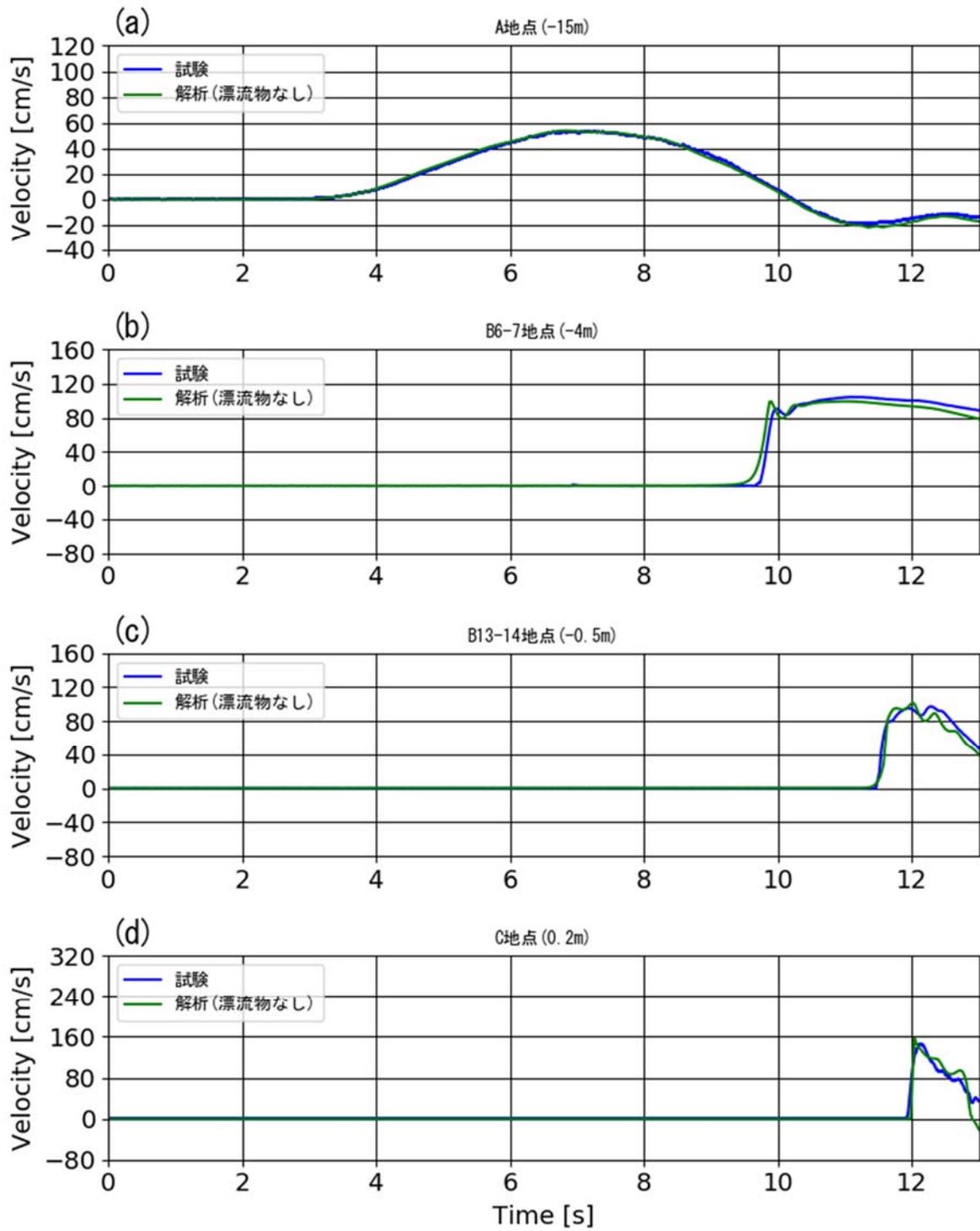


図- 8.4.4 流速時系列波形 (直立護岸, 堤体位置 0.625m, We_{40})

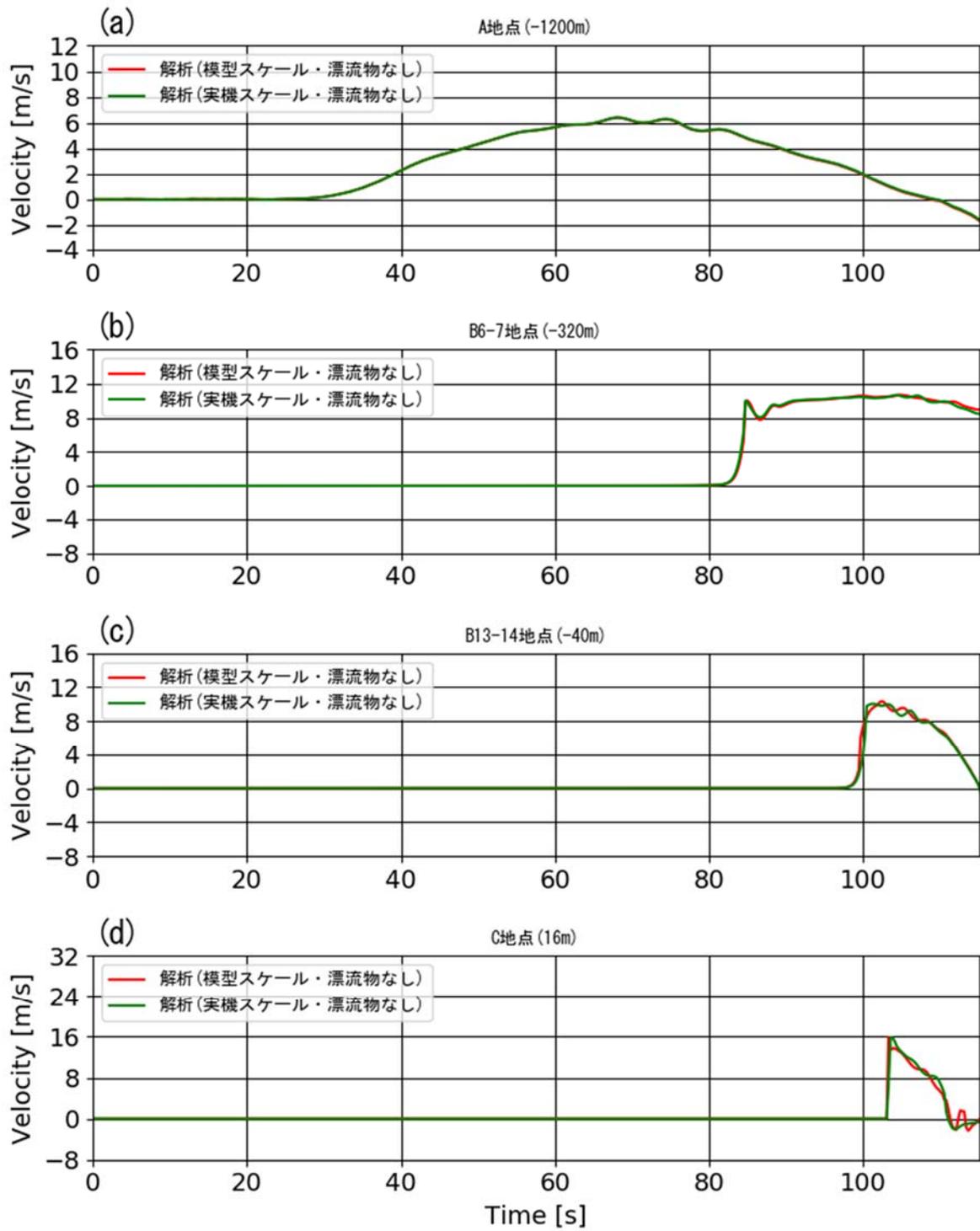


図- 8.4.5 流速時系列波形 (直立護岸, 実機スケール, 堤体位置 50m, We_{20})

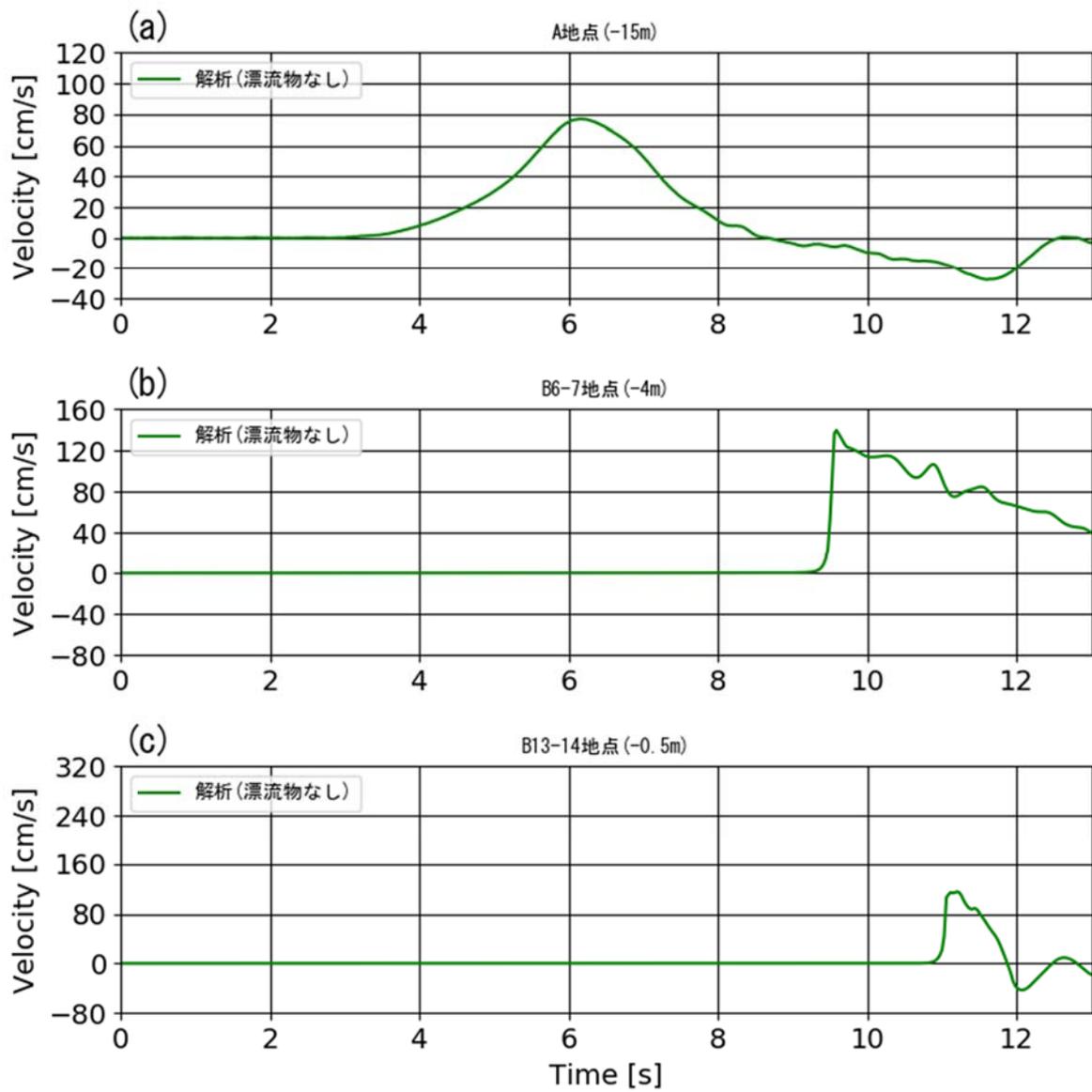


図- 8.4.6 流速時系列波形 (直立護岸, 堤体位置 0m, We_{10})

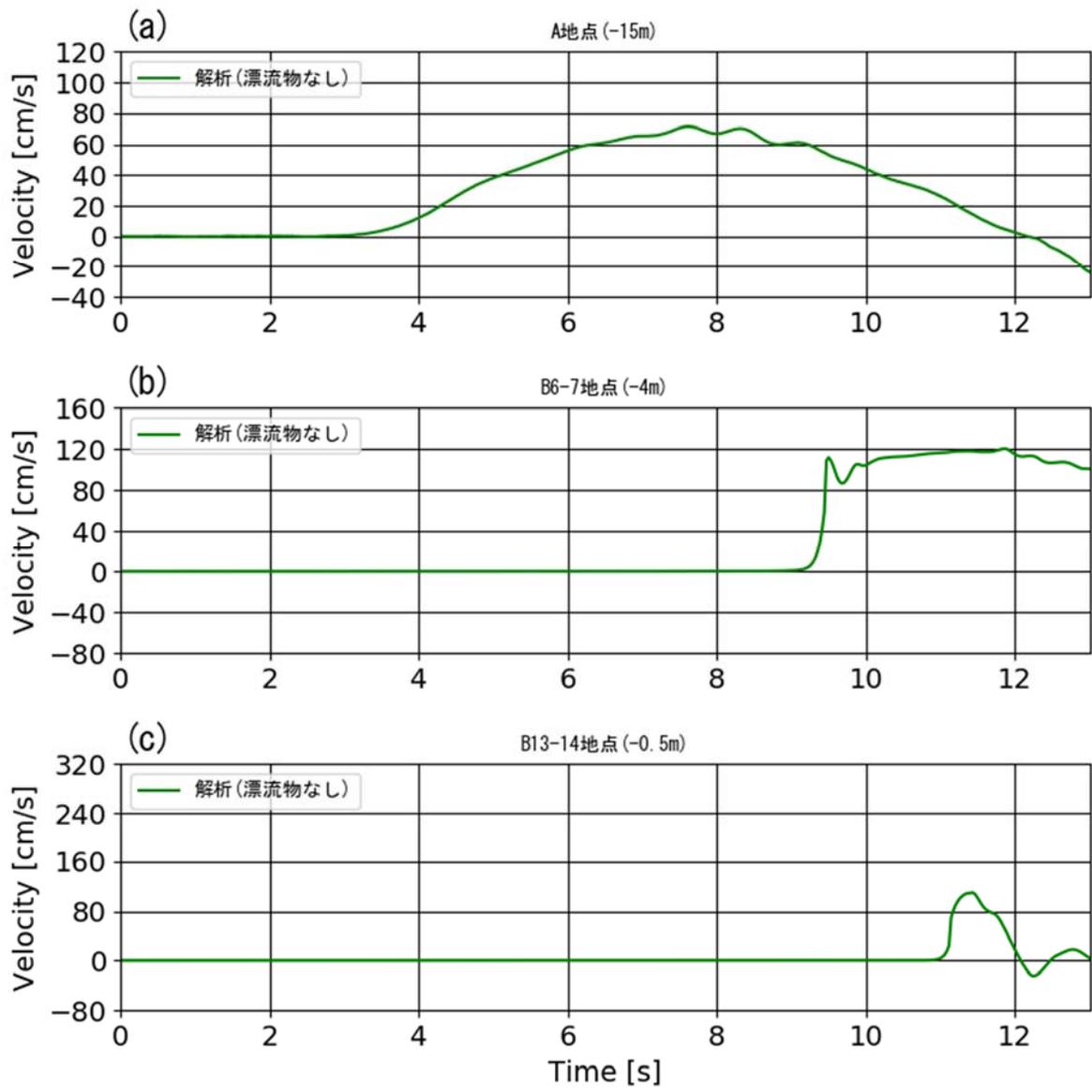


図- 8.4.7 流速時系列波形 (直立護岸, 堤体位置 0m, We20)

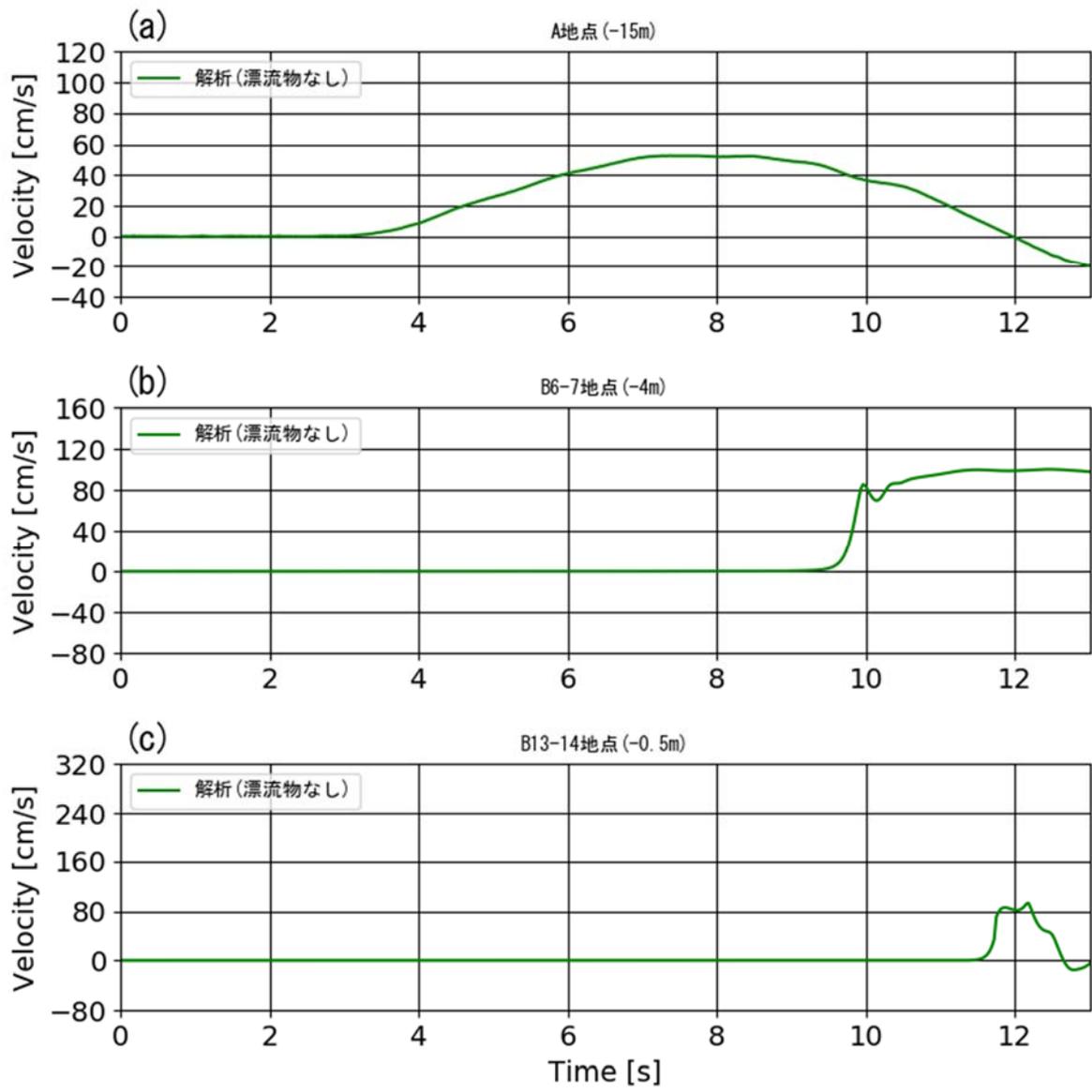


図- 8.4.8 流速時系列波形 (直立護岸, 堤体位置 0m, We30)

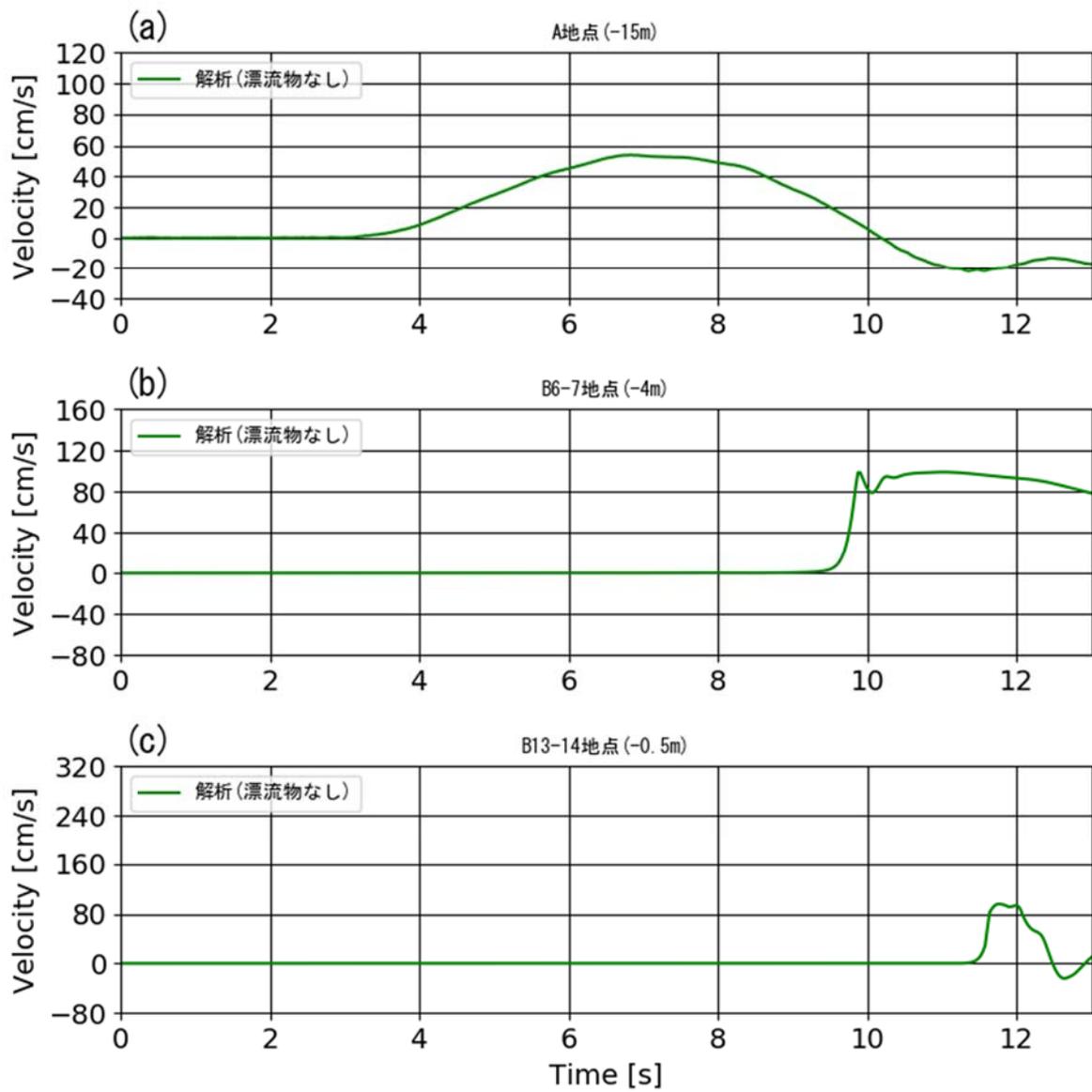


図- 8.4.9 流速時系列波形 (直立護岸, 堤体位置 0m, $We40$)

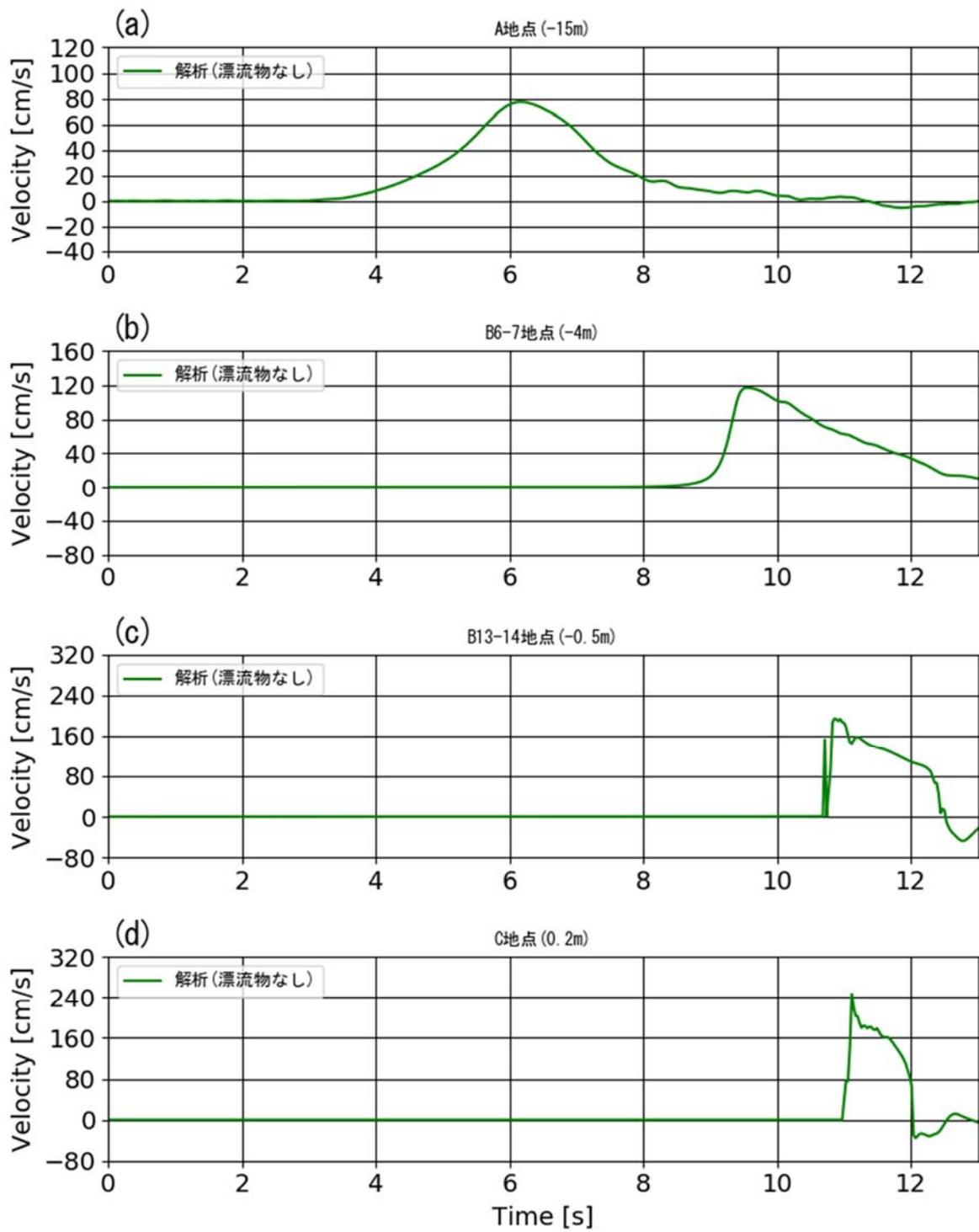


図- 8.4.10 流速時系列波形 (単純勾配, 堤体位置 0.625m, We_{10})

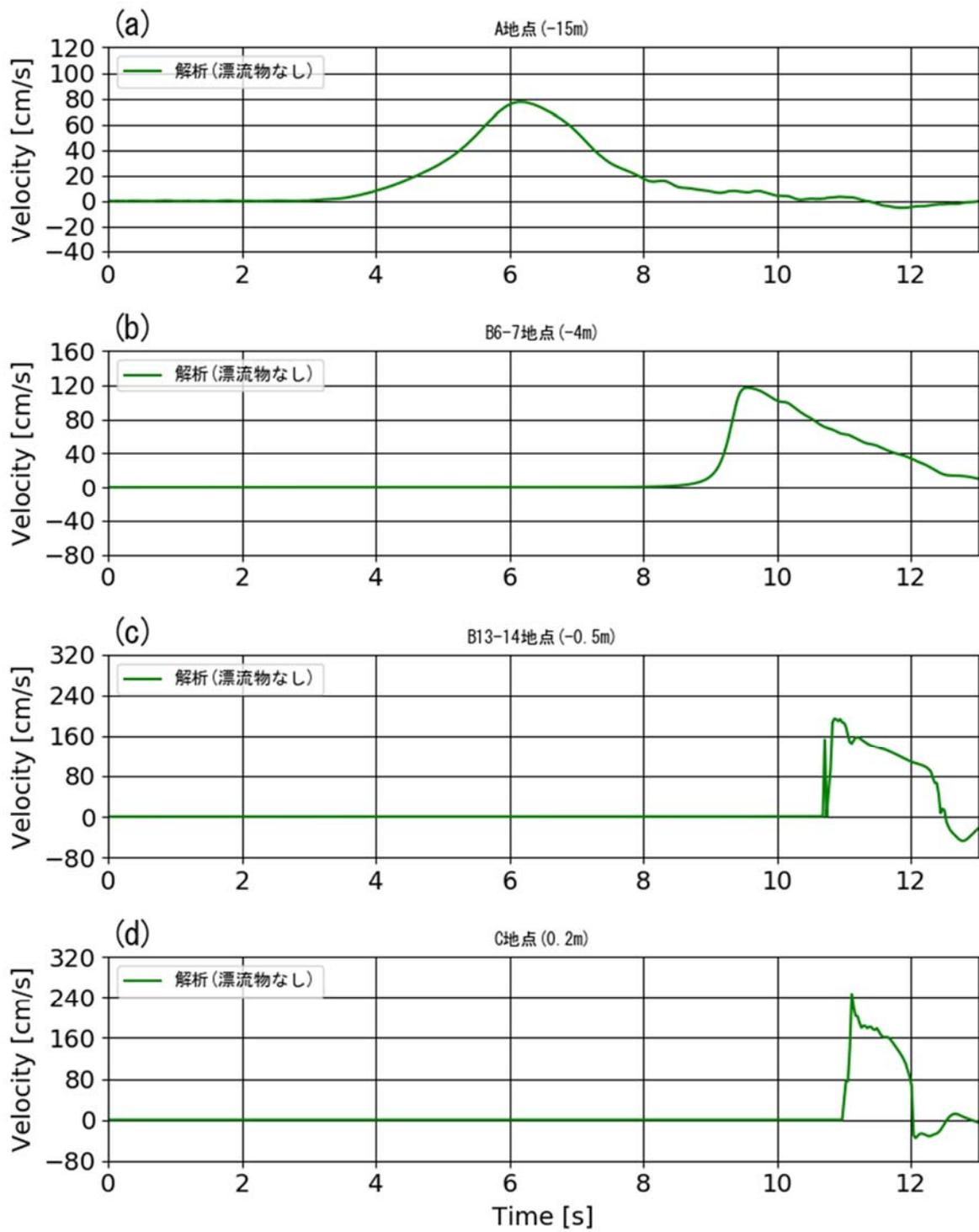


図- 8.4.11 流速時系列波形 (単純勾配, 堤体位置 0.625m, We_{20})

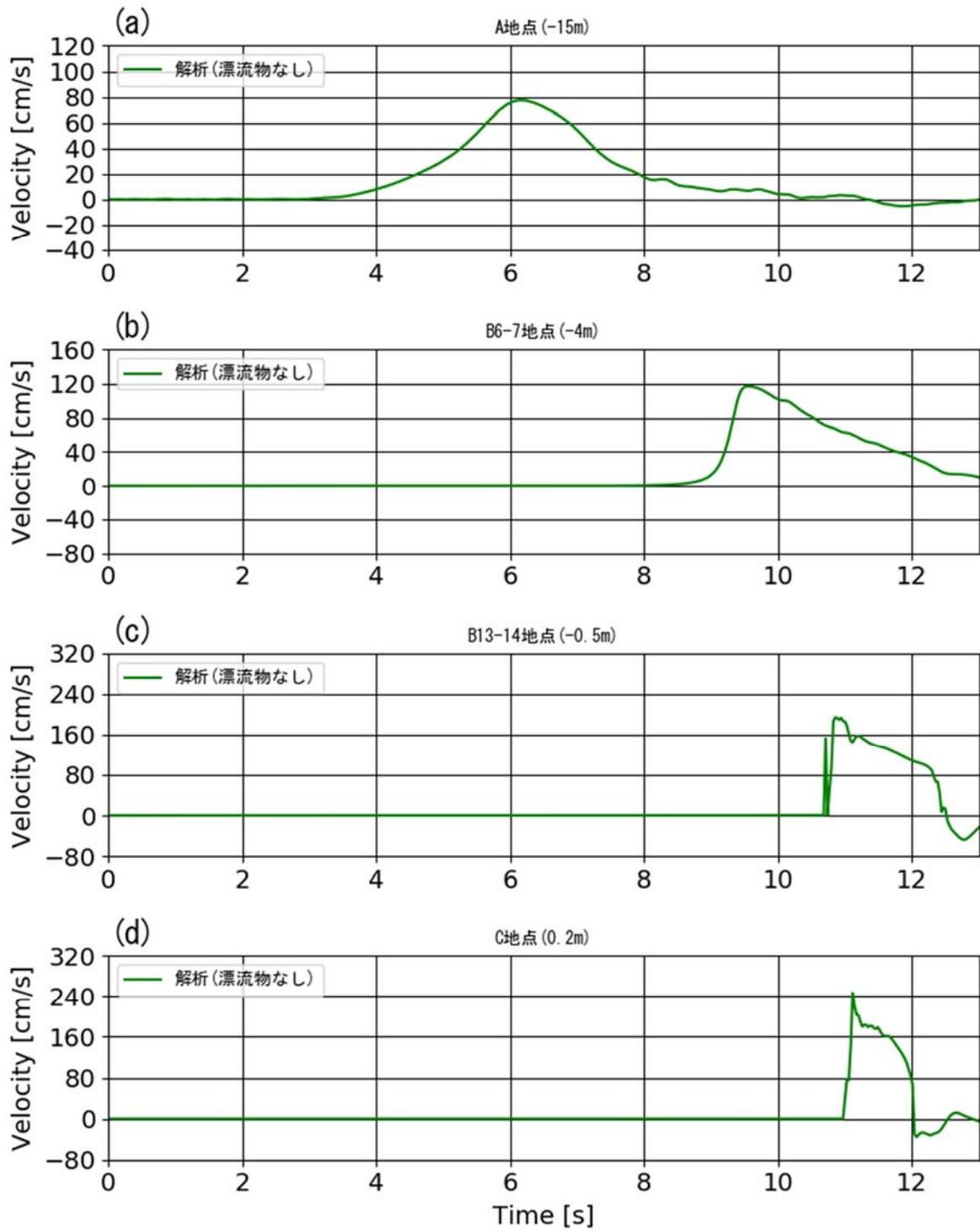


図- 8.4.12 流速時系列波形 (単純勾配, 堤体位置 0.625m, We30)

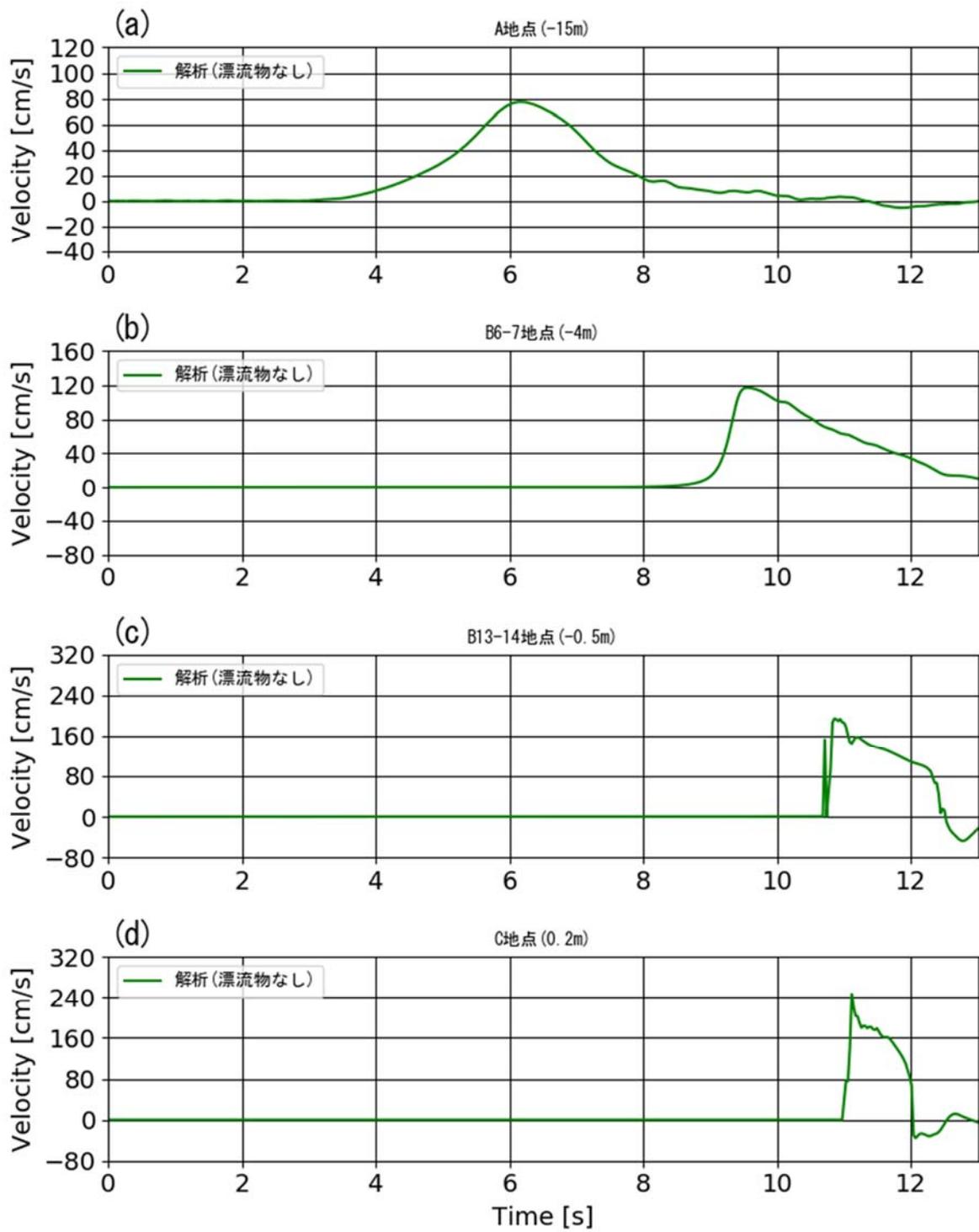


図- 8.4.13 流速時系列波形 (単純勾配, 堤体位置 0.625m, We_{40})

8.5. 波圧時系列

図- 8.5.1～図- 8.5.27 は、堤体前面で計測された圧力の時系列波形図をそれぞれ示した図であり、漂流物ありの解析結果を赤線、漂流物なしの解析結果を緑線とし、試験結果を青線で示す。ただし、後述する衝突判定において衝突が確認されたケースについてはすべてを示しているが、すべての初期位置において衝突が確認されなかった、波種類、堤体位置、地形の組合せにおいては、代表 1 ケースのみを示した。

p1～p7 は、堤体下部から p1:2.5cm, p2:7.5cm, p3:12.5cm, p4:17.5cm, p5:22.5cm, p7:32.5cm, の各地点の圧力を示している。なお、試験データとの比較は、直立護岸のケースのみとなり、水理試験では漂流物の衝突しない位置で圧力を計測しているため、比較の対象は漂流物なしの解析となる。

例えば、図- 8.5.2 の F-We20-A-05 では、12.0s 付近において、漂流物ありとなしで 15kPa 程度の明らかな違いが表れている。図中には、差異が明らかに現れているケースに破線で丸印を付けた。この差異が、漂流物の衝突によるものと考えられる。ただし、水理試験の結果で示したひずみゲージの時系列変動と比較すると、衝突の影響の継続時間が長く、短周期の変動が表れない。これは、数値シミュレーションでは、堤体や漂流物を剛体として考えているためであり、構造物同士の衝突による反発の影響が考慮出来ないためである。

構造物を剛体と考える場合、ひずみは生じないことになる。流体と構造物の衝突を考えた場合、流体の動きに対してひずみの速度は非常に速く、変位量は非常に小さいため、流体の動きや、流体と構造物の間に働く圧力への影響はほとんどないと考えられる。一方で、構造物同士の衝突によって働く力を考える場合、剛性等により固有周期などの動的現象が大きく影響される。本手法によれば、後述するように漂流物の衝突可能性等の定性的な特徴は再現することは可能と考えられるが、漂流物の衝突力を定量的に評価するには、動的な構造解析が可能な解析モデルを取り込む必要がある。

漂流物が堤体に近接していない状態では、漂流物の有無による違いはほとんどないと考えられるが、漂流物のありとなしの結果を比較すると、上述の衝突の影響以外にも多少の相違が生じている。要因としては、漂流物に対する解析領域の水路幅の影響が考えられ、水路幅が十分に大きくないために、津波の挙動に対して漂流物の存在の影響が表れていると考えられる。ただし、その差は作用圧力の大きさに比較するとわずかである。実際の津波評価への適用の際には、解析領域を広げることにより増大する計算時間の増加と要求される解析精度を比較して領域を設定する必要がある。

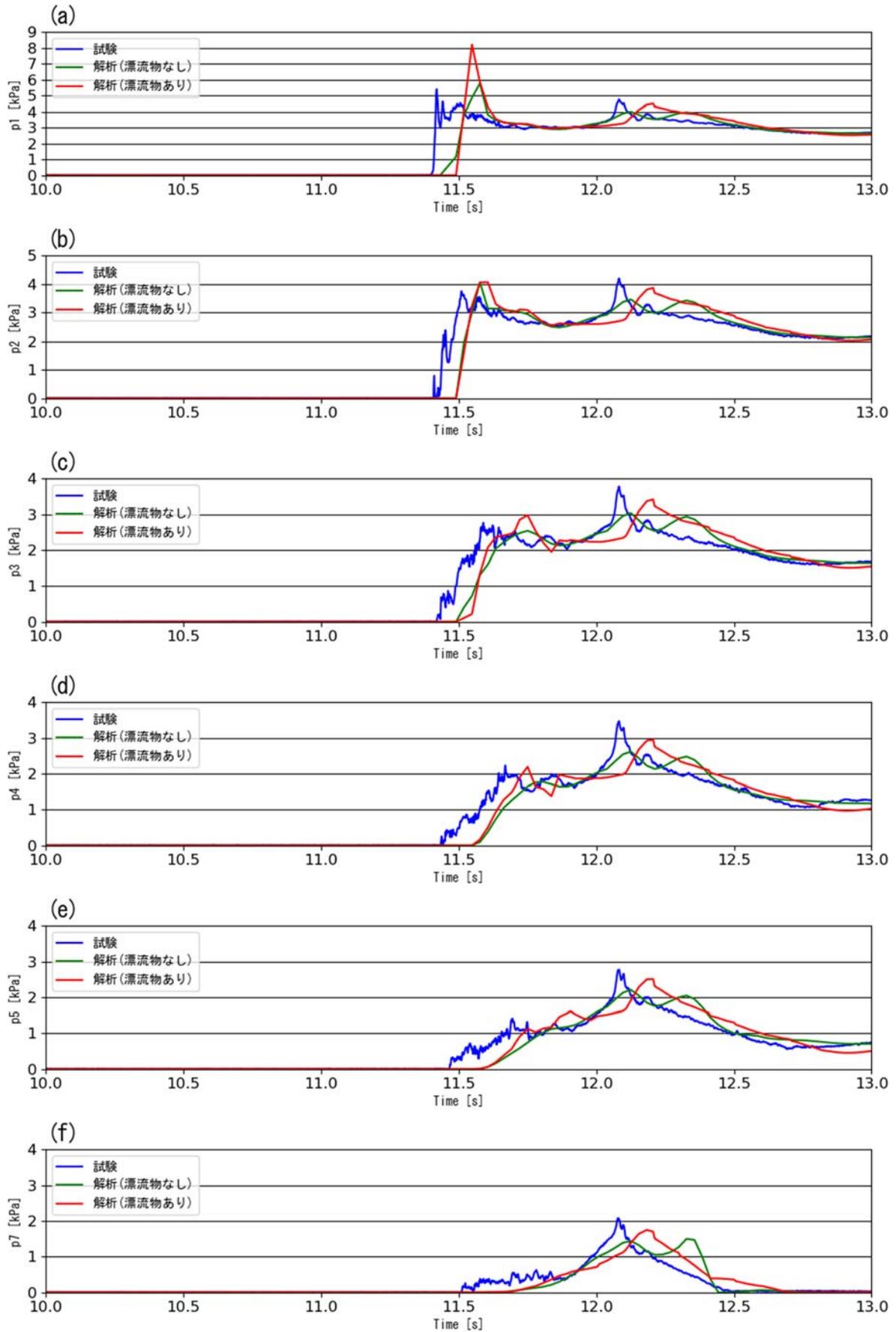


図- 8.5.1 波圧時系列 (直立護岸,堤体位置 0.625m,We10,TypeA,初期位置 0.5m,F-We10-A-05)

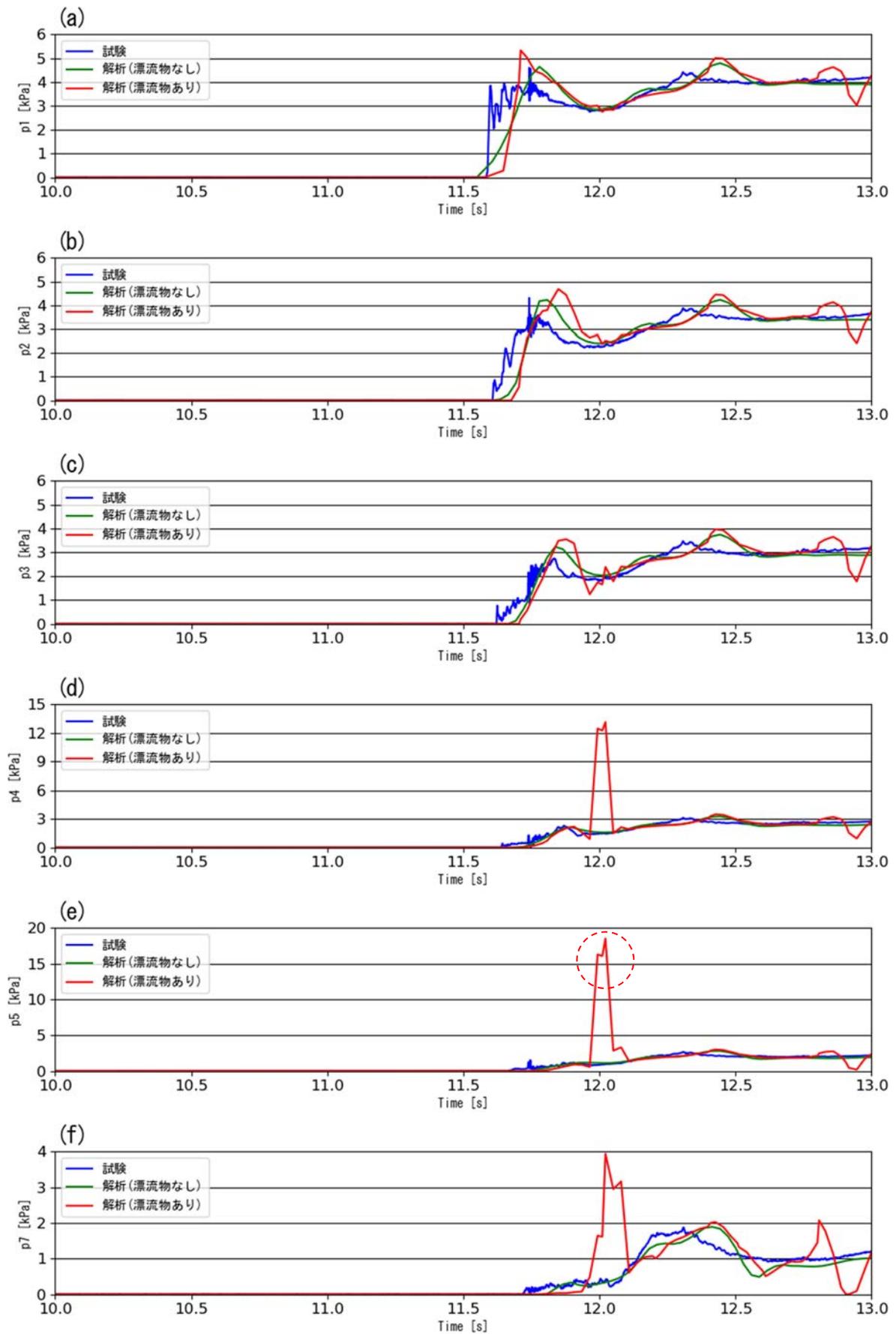


図- 8.5.2 波圧時系列 (直立護岸,堤体位置 0.625m,We20,TypeA,初期位置 0.5m,F-We20-A-05)

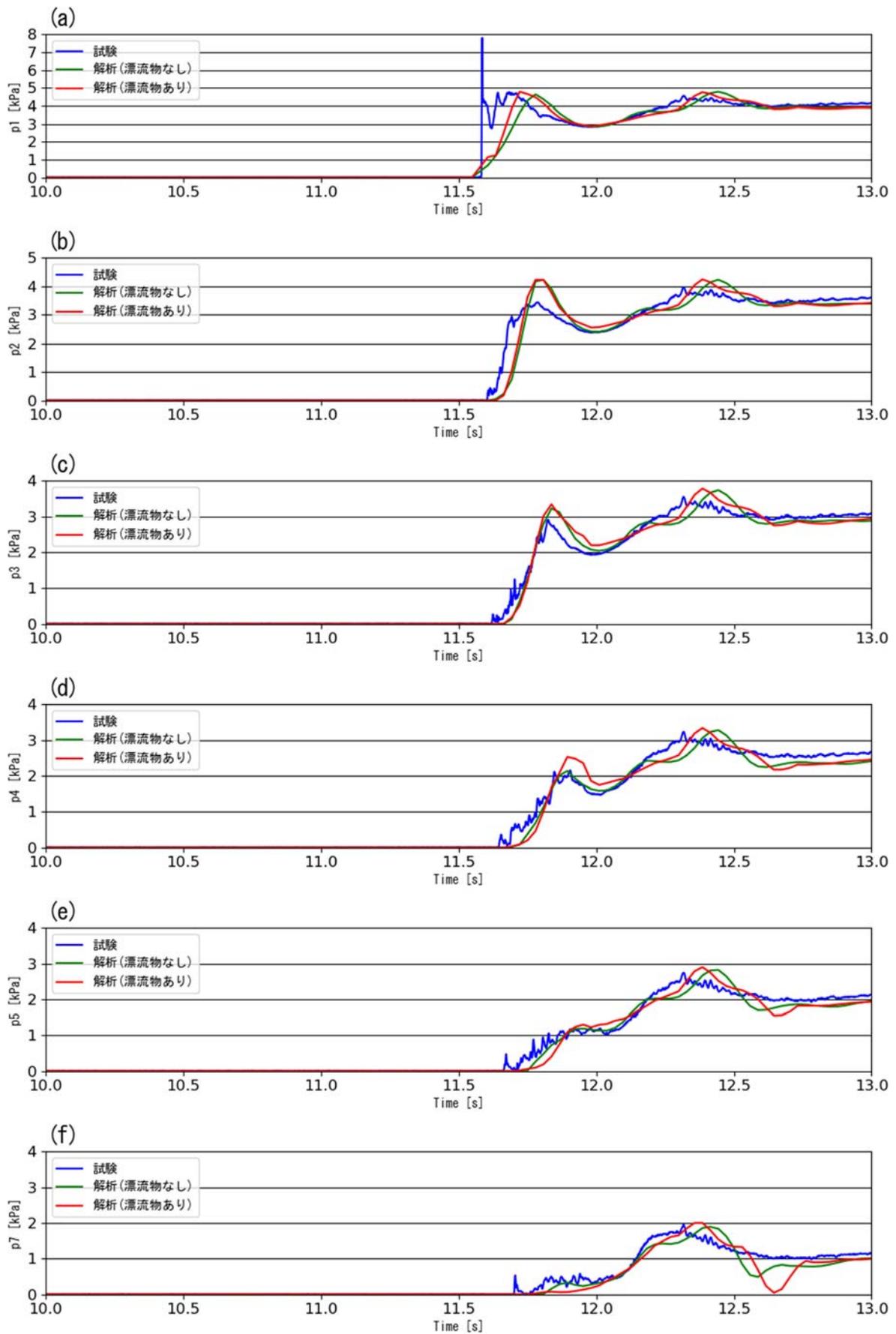


図- 8.5.3 波圧時系列 (直立護岸,堤体位置 0.625m,We20,TypeA,初期位置 1.0m,F-We20-A-10)

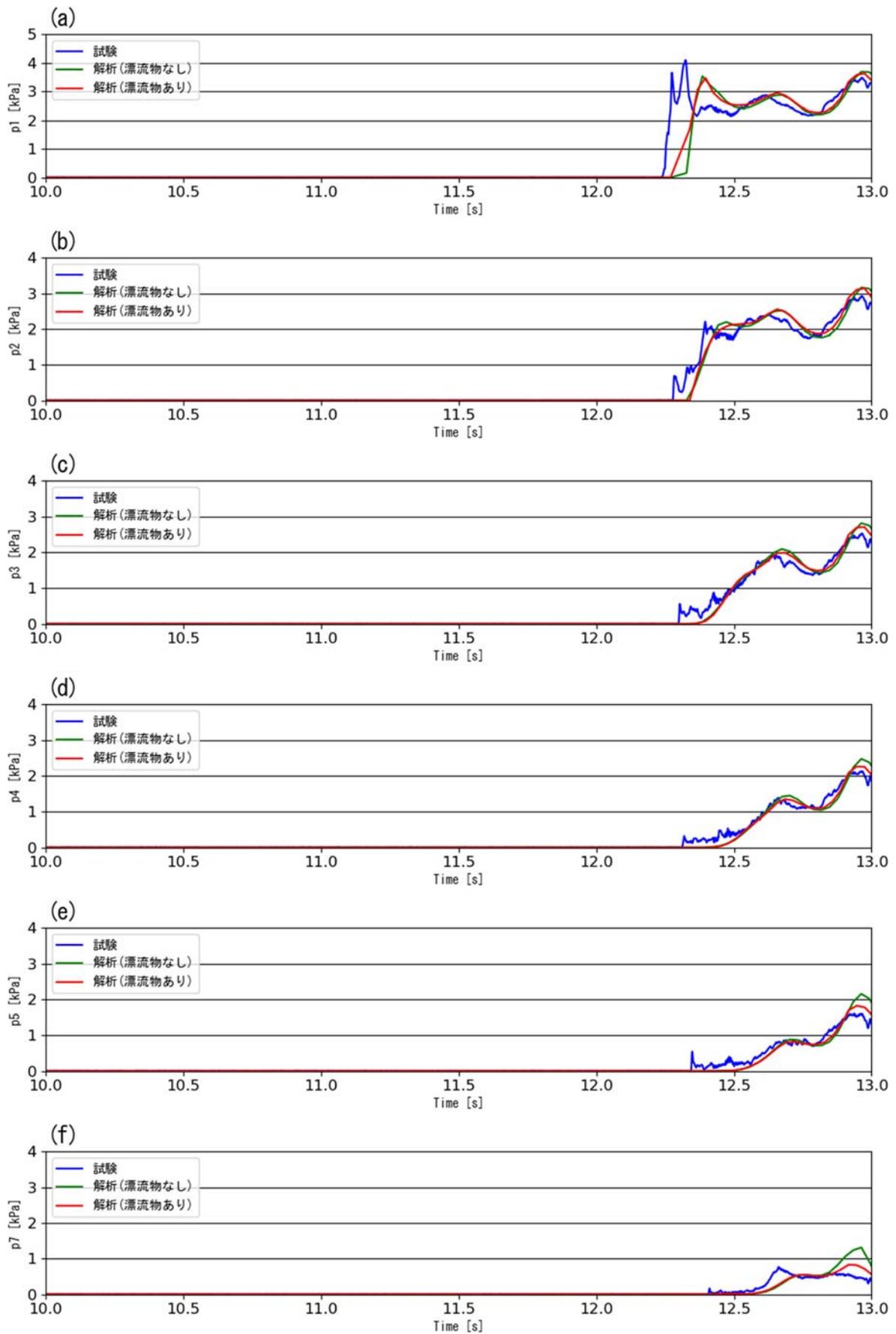


図- 8.5.4 波圧時系列 (直立護岸,堤体位置 0.625m,We30,TypeA,初期位置 0.5m,F-We30-A-05)

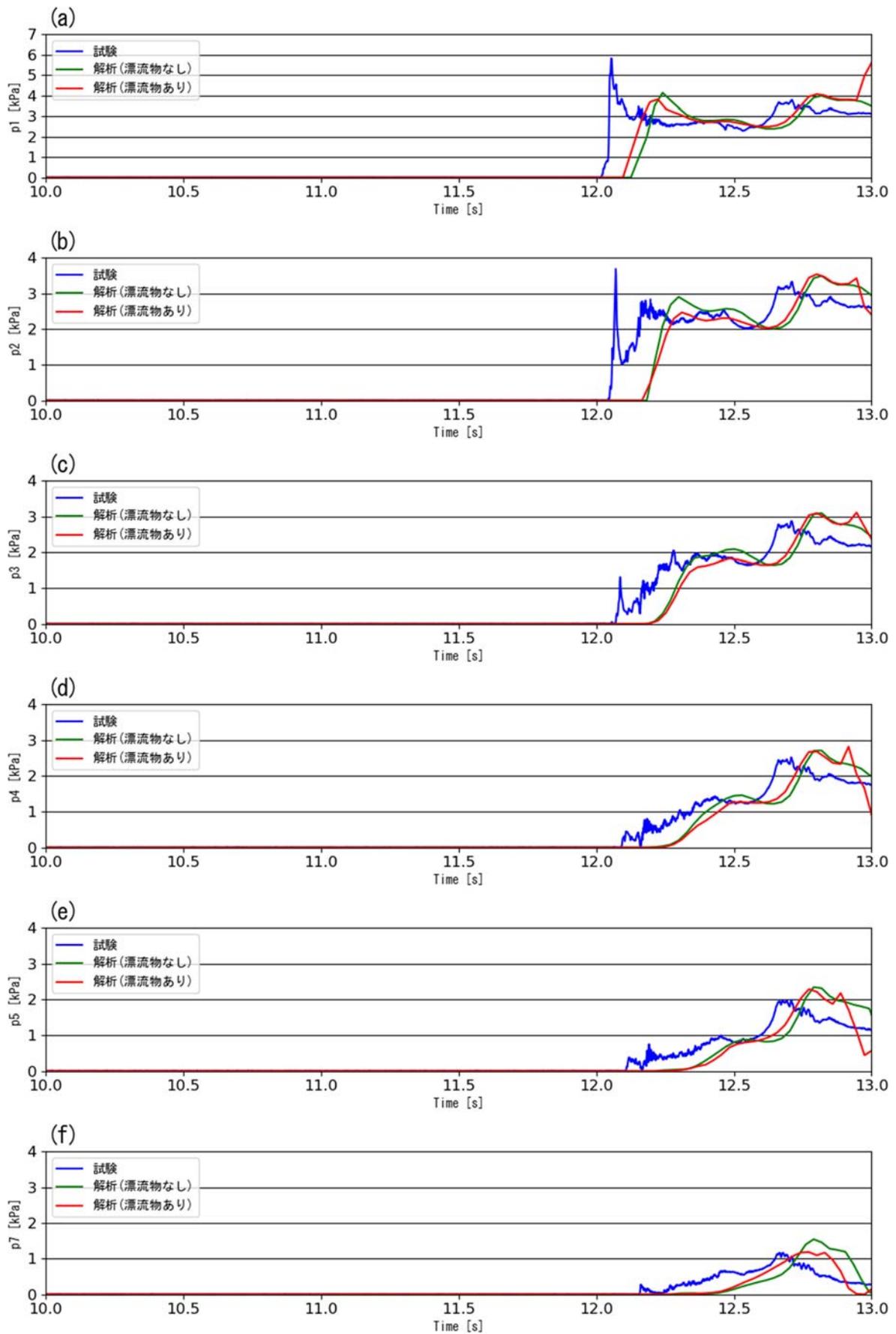


図- 8.5.5 波圧時系列 (直立護岸,堤体位置 0.625m,We40,TypeA,初期位置 0.5m,F-We40-A-05)

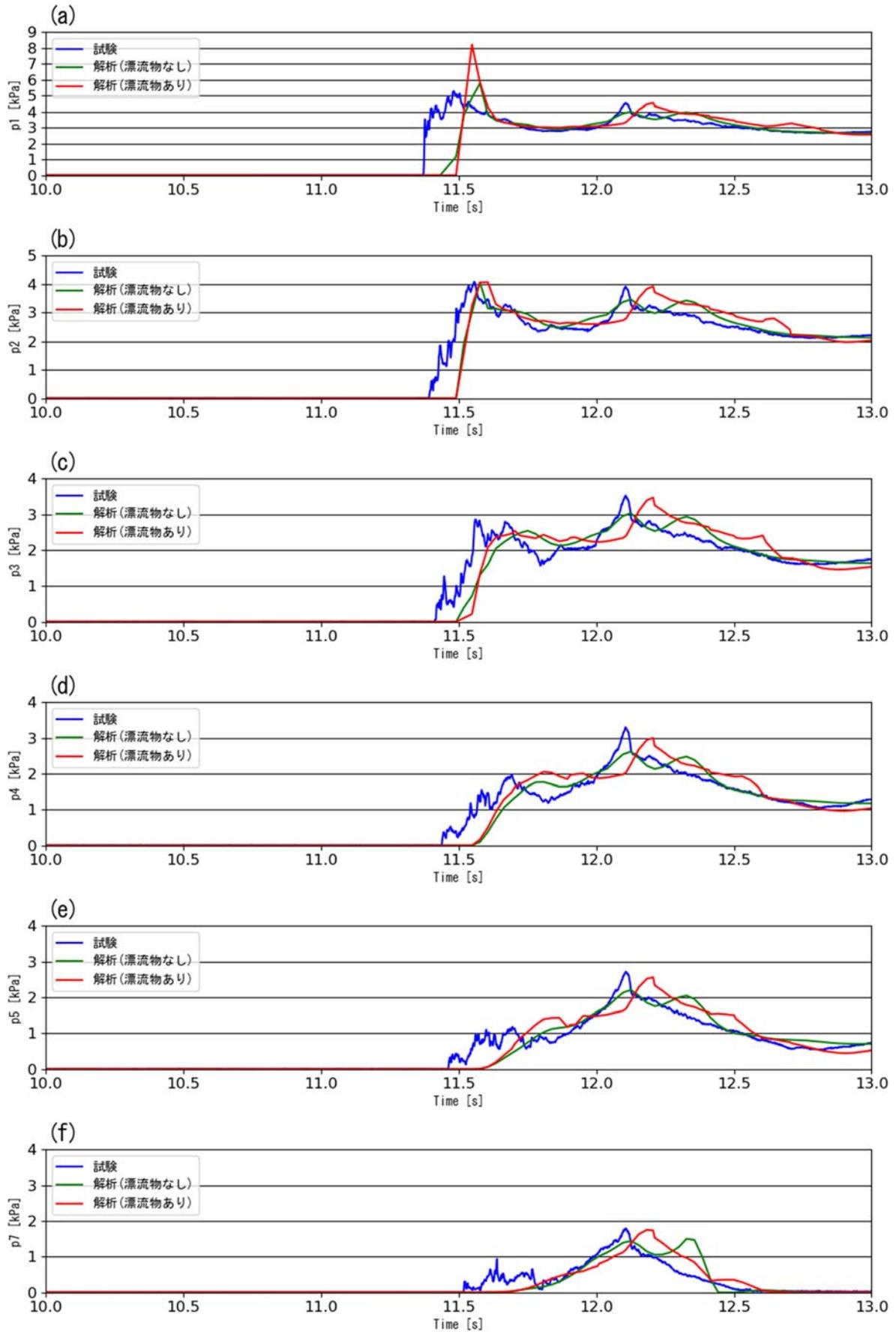


図- 8.5.6 波圧時系列 (直立護岸,堤体位置 0.625m,We10,TypeB,初期位置 0.5m,F-We10-B-05)

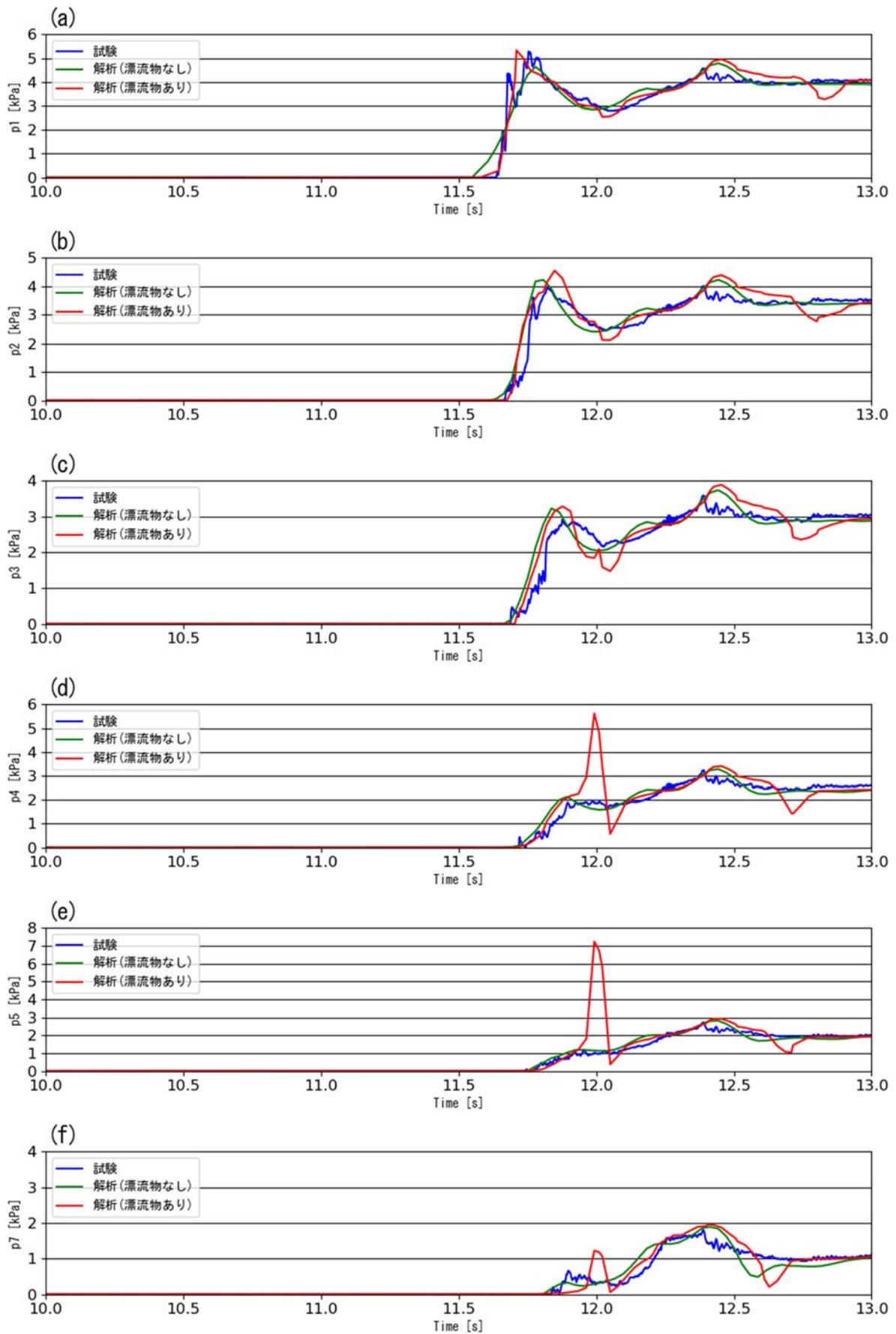


図- 8.5.7 波圧時系列 (直立護岸,堤体位置 0.625m,We20,TypeB,初期位置 0.5m,F-We20-B-05)

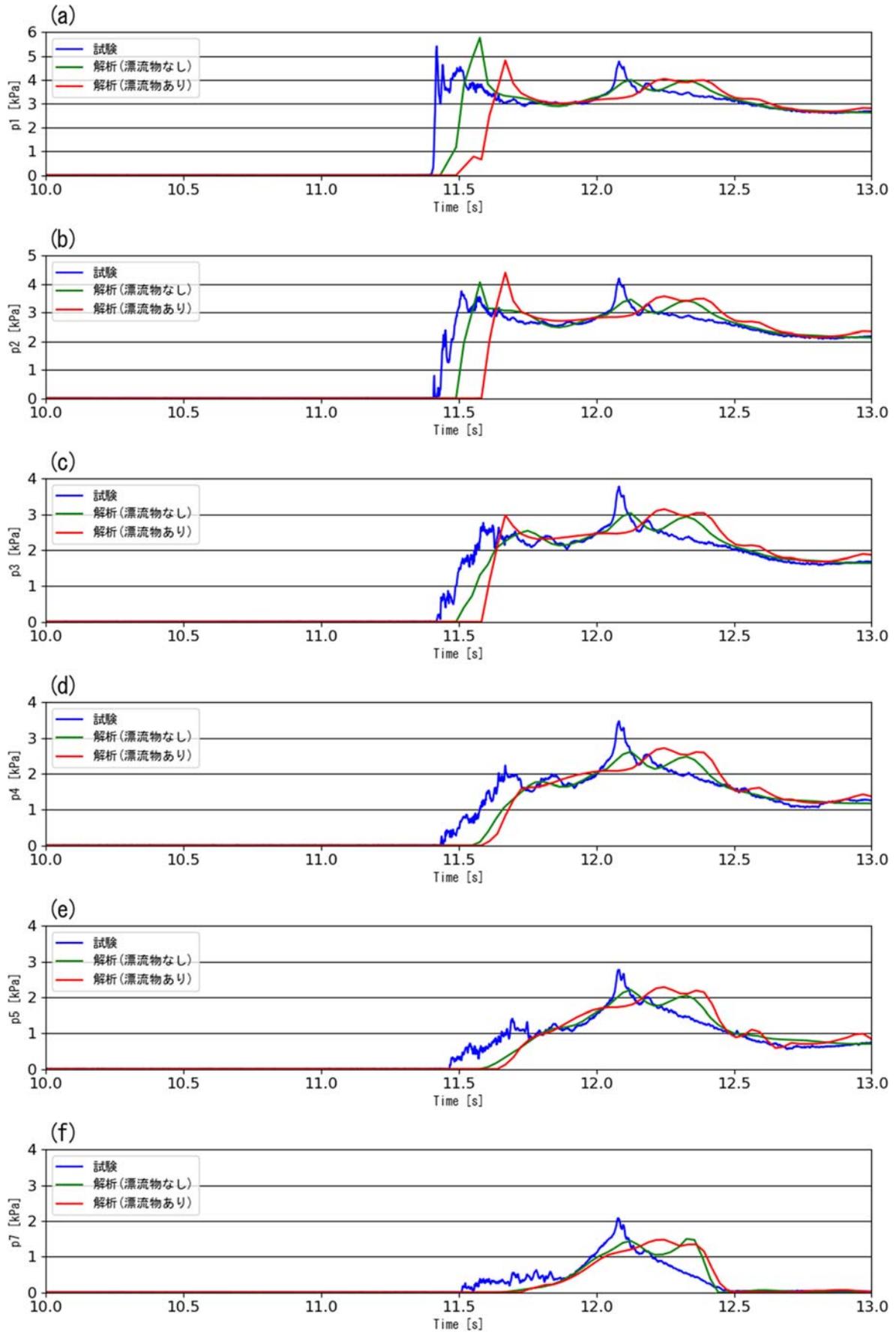


図- 8.5.8 波圧時系列 (直立護岸,堤体位置 0.625m,We10,TypeC,初期位置 0.5m,F-We10-C-05)

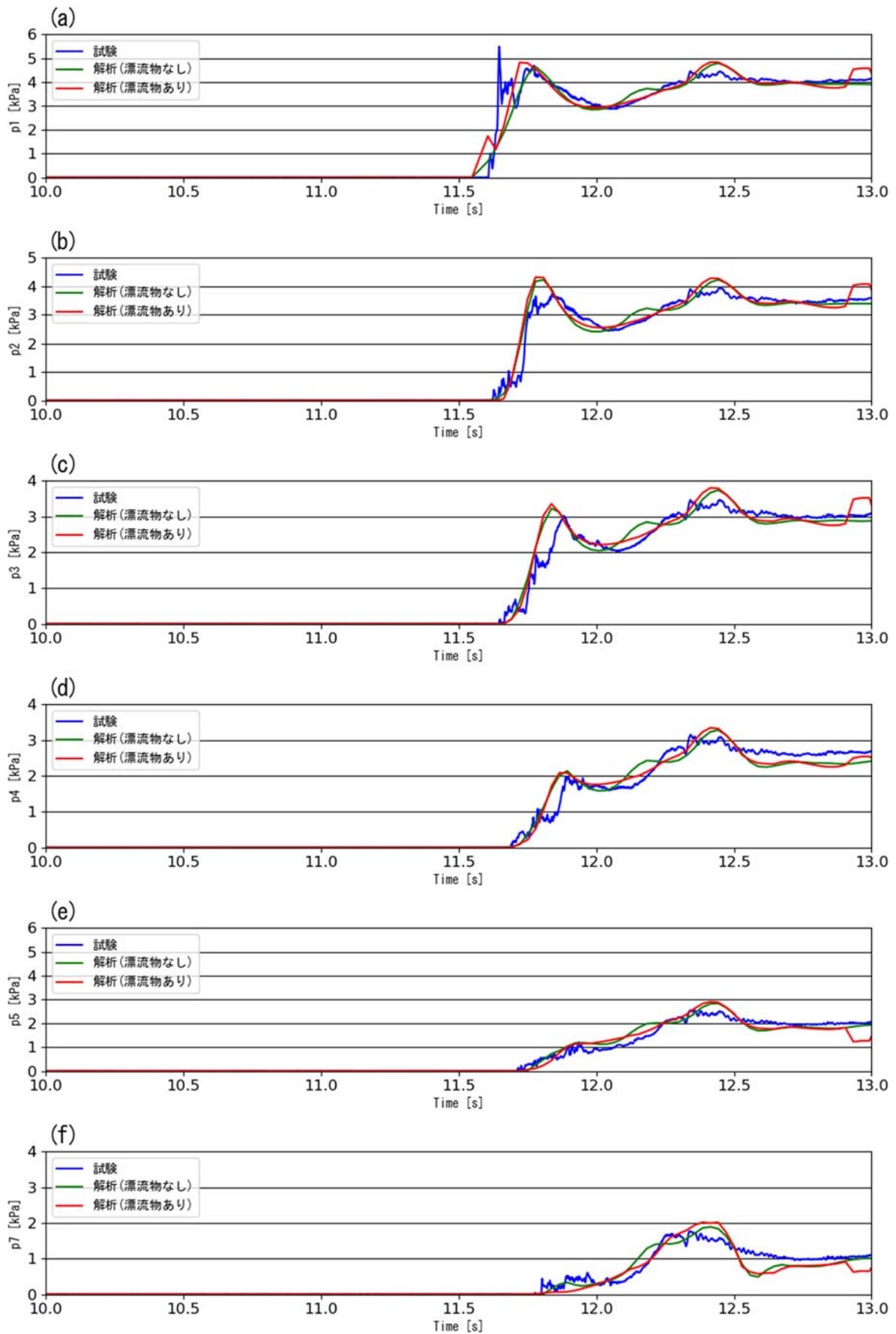


図- 8.5.9 波圧時系列 (直立護岸,堤体位置 0.625m,We20,TypeC,初期位置 1.0m,F-We20-C-10)

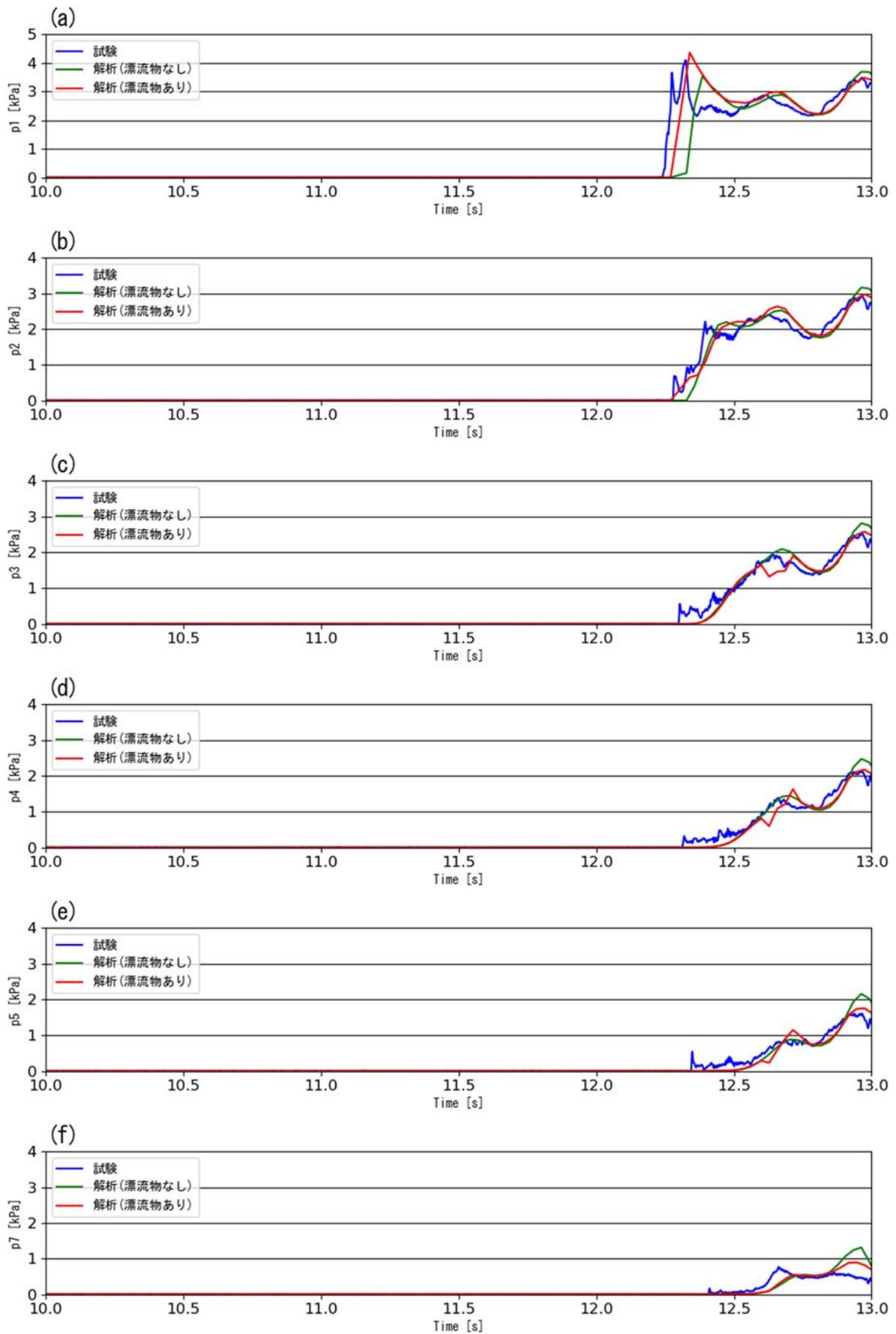


図- 8.5.10 波圧時系列 (直立護岸,堤体位置 0.625m,We30,TypeC,初期位置 0.5m,F-We30-C-05)

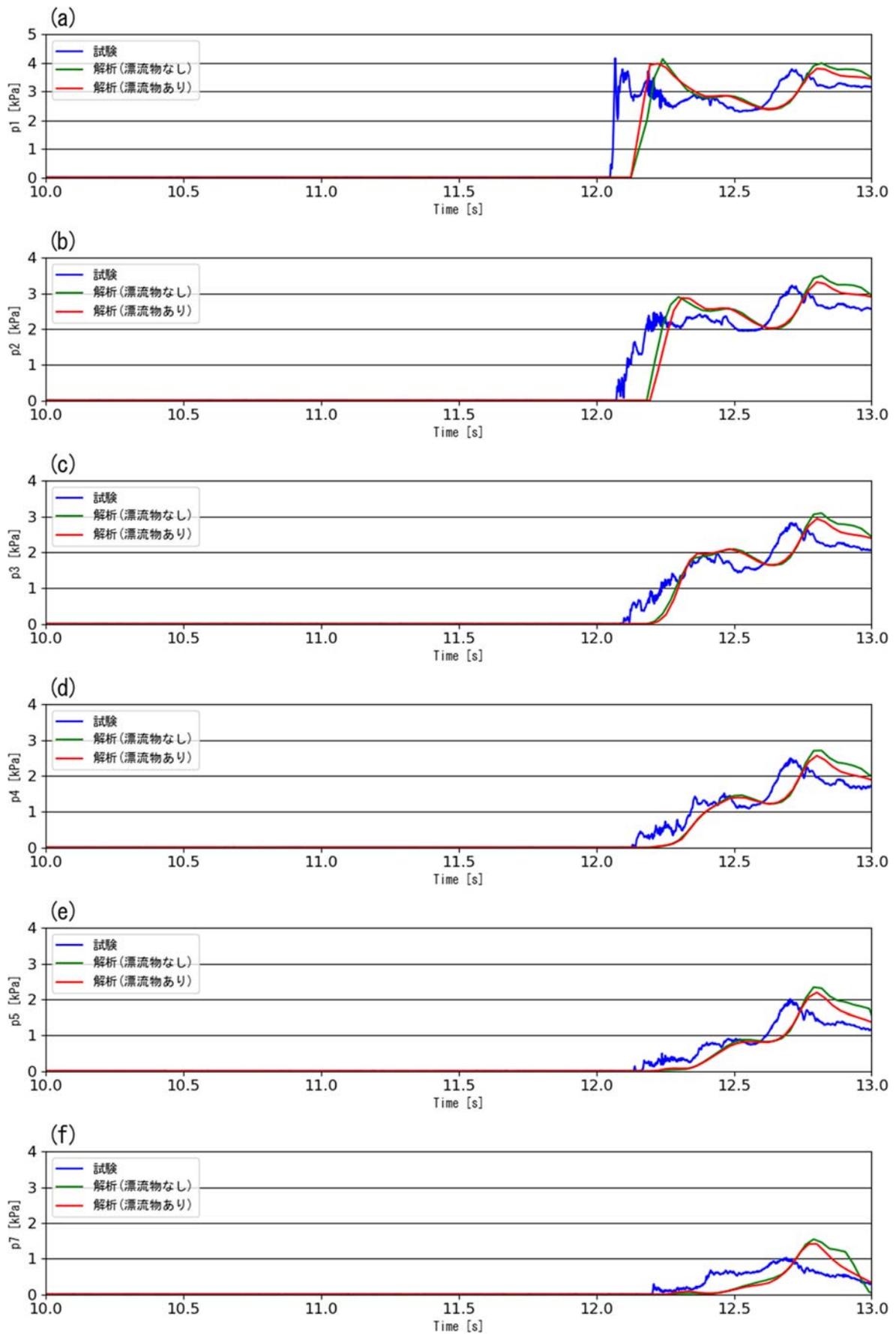


図- 8.5.11 波圧時系列 (直立護岸,堤体位置 0.625m,We40,TypeC,初期位置 0.5m,F-We40-C-05)

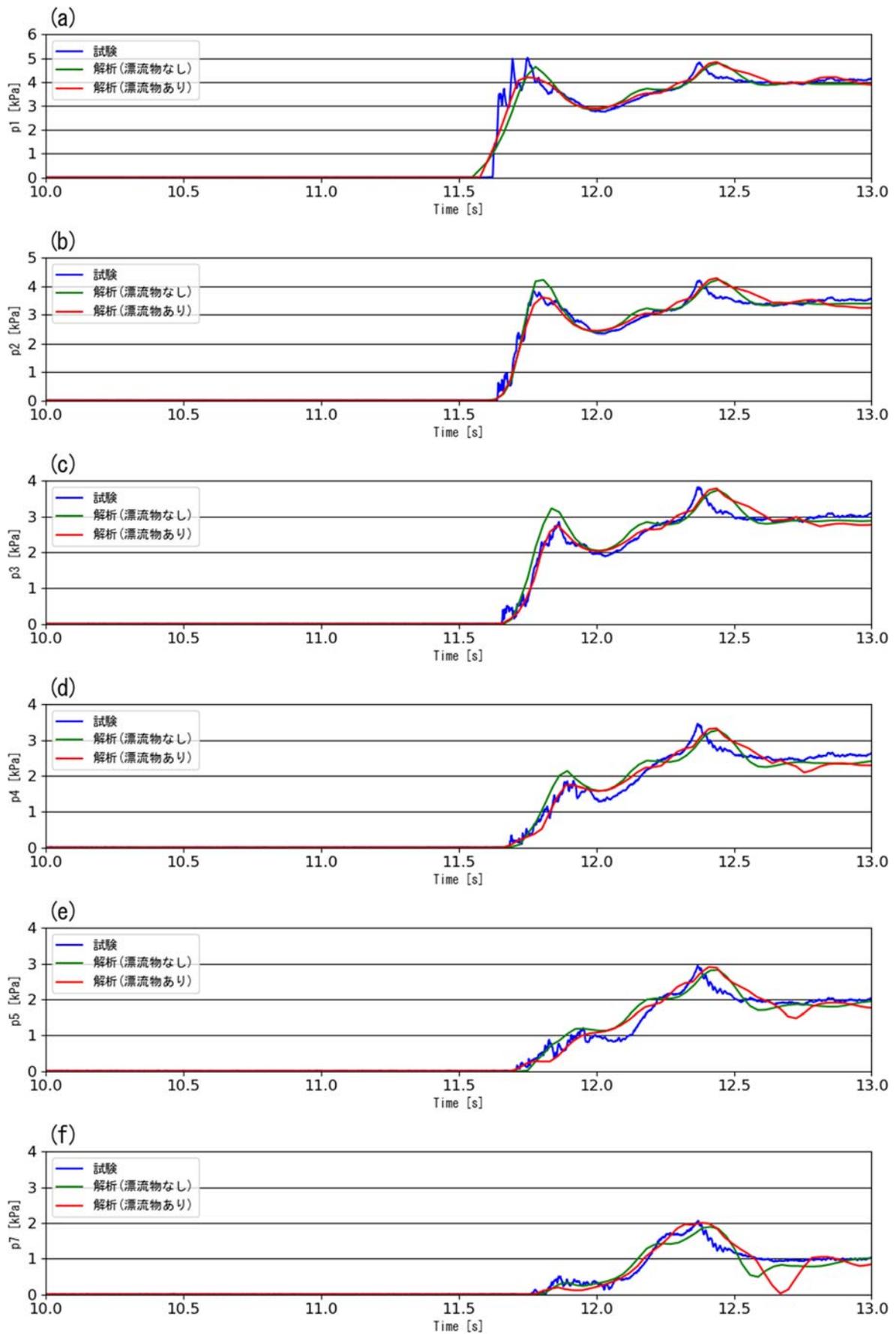


図- 8.5.12 波圧時系列 (直立護岸,堤体位置 0.625m,We20,TypeD,初期位置 0.5m,F-We20-D-05)

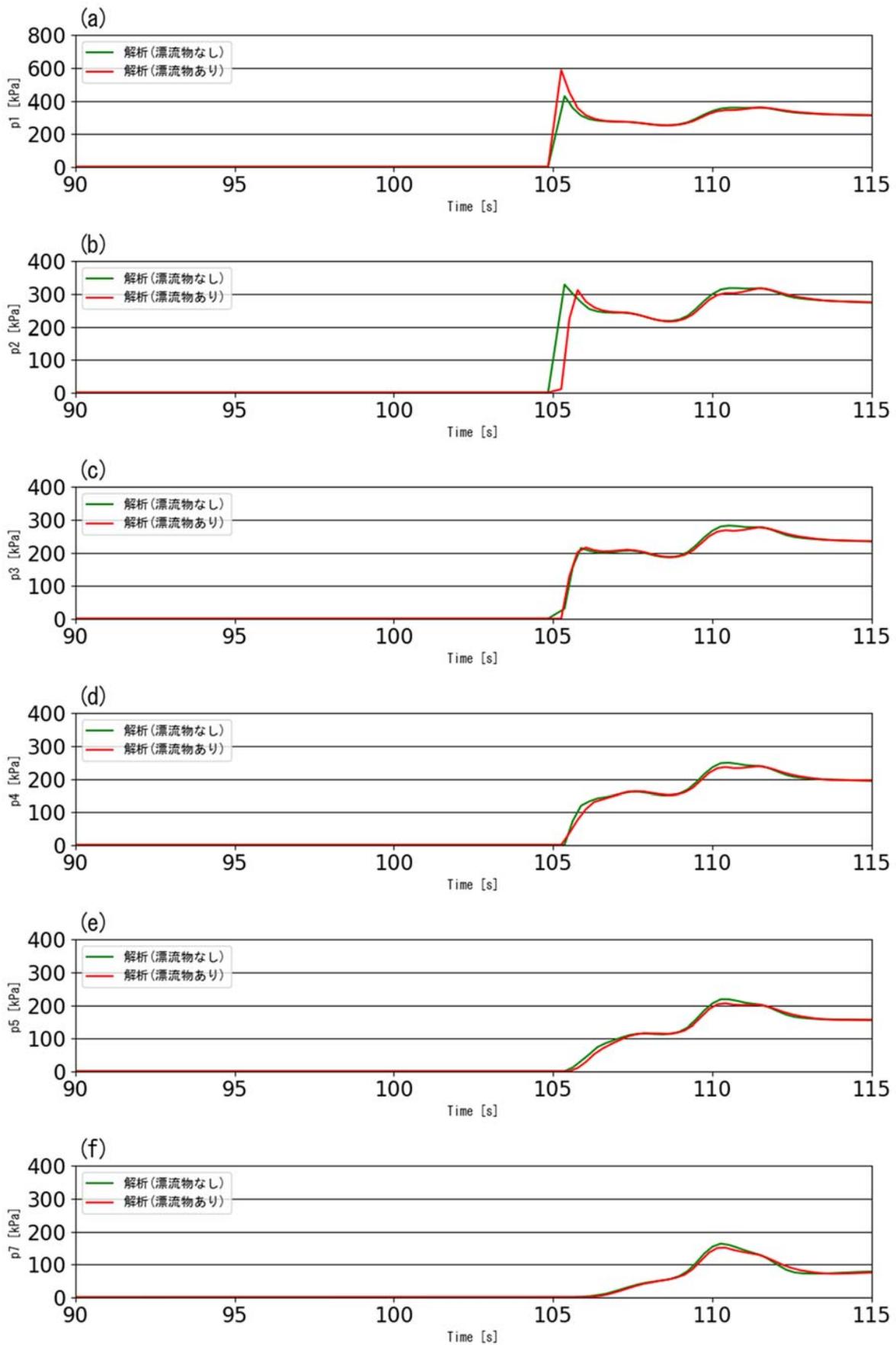


図- 8.5.13 波圧時系列 (直立護岸,堤体位置 50m,We20,TypeA,初期位置 8m,R-We20-A-01)

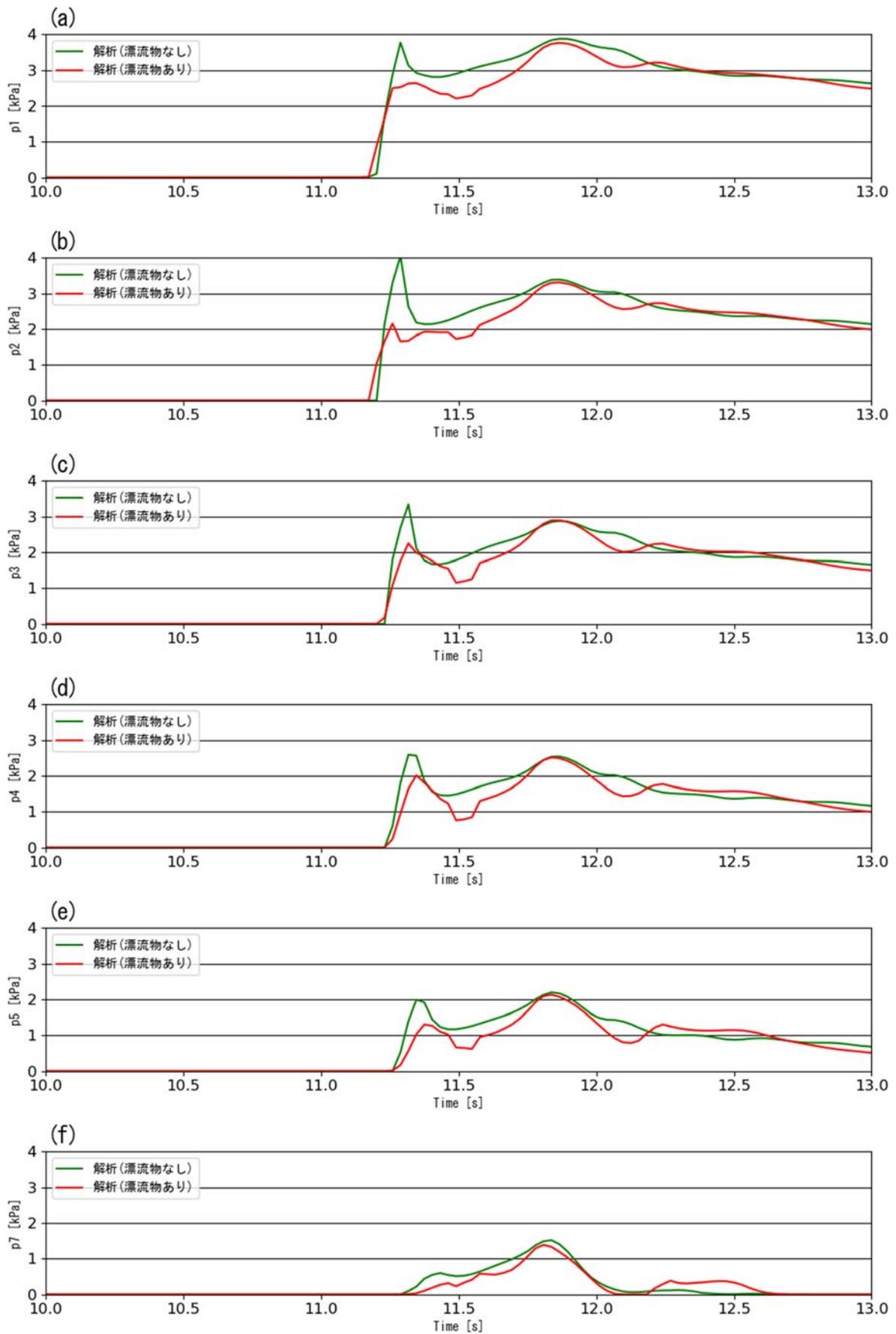


図- 8.5.14 波圧時系列 (直立護岸,堤体位置 0m,We10,TypeA,初期位置 0.5m,O-We10-A-05)

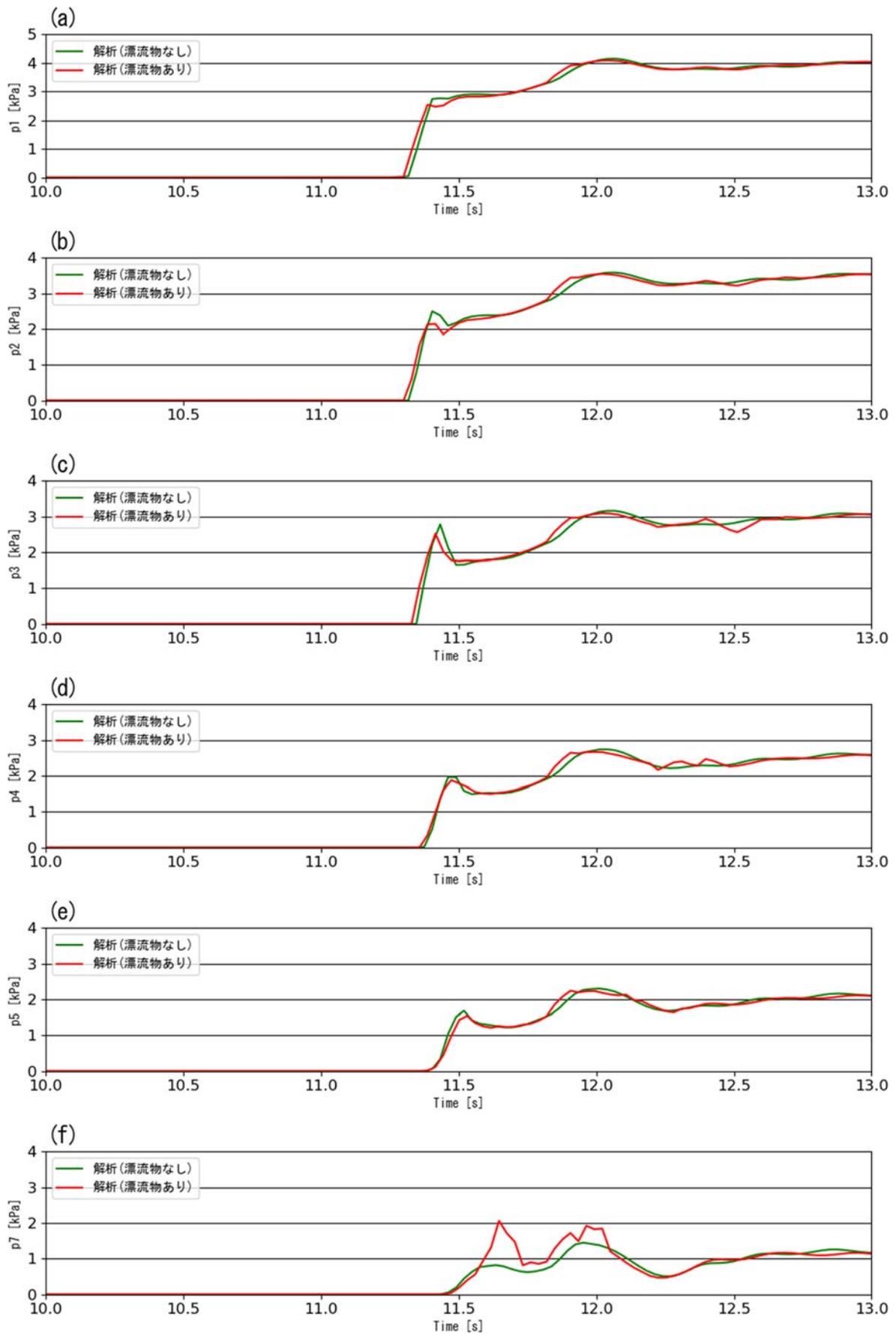


図- 8.5.15 波圧時系列 (直立護岸,堤体位置 0m,We20,TypeA,初期位置 0.5m,O-We20-A-05)

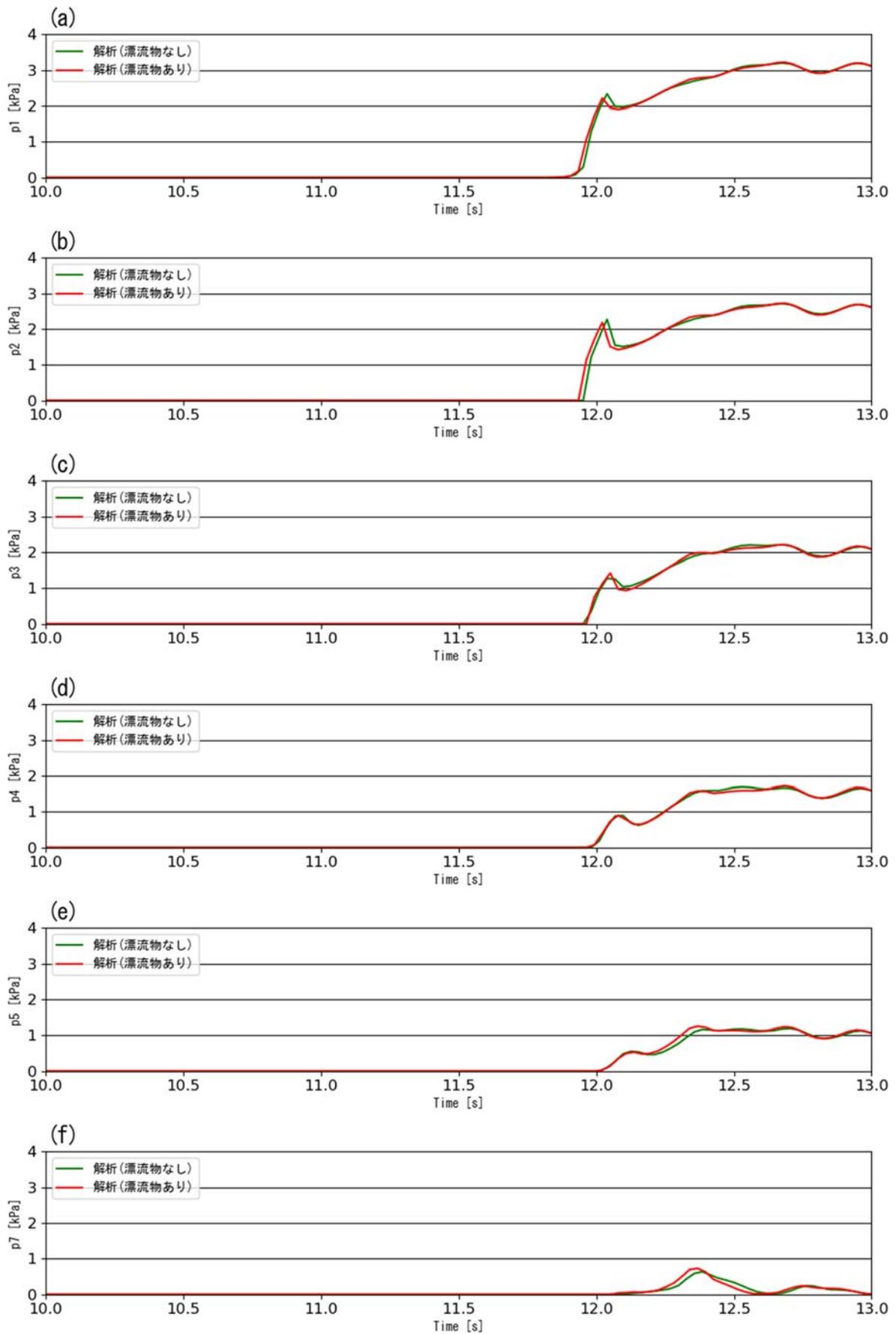


図- 8.5.16 波圧時系列 (直立護岸,堤体位置 0m,We30,TypeA,初期位置 0.5m,O-We30-A-05)

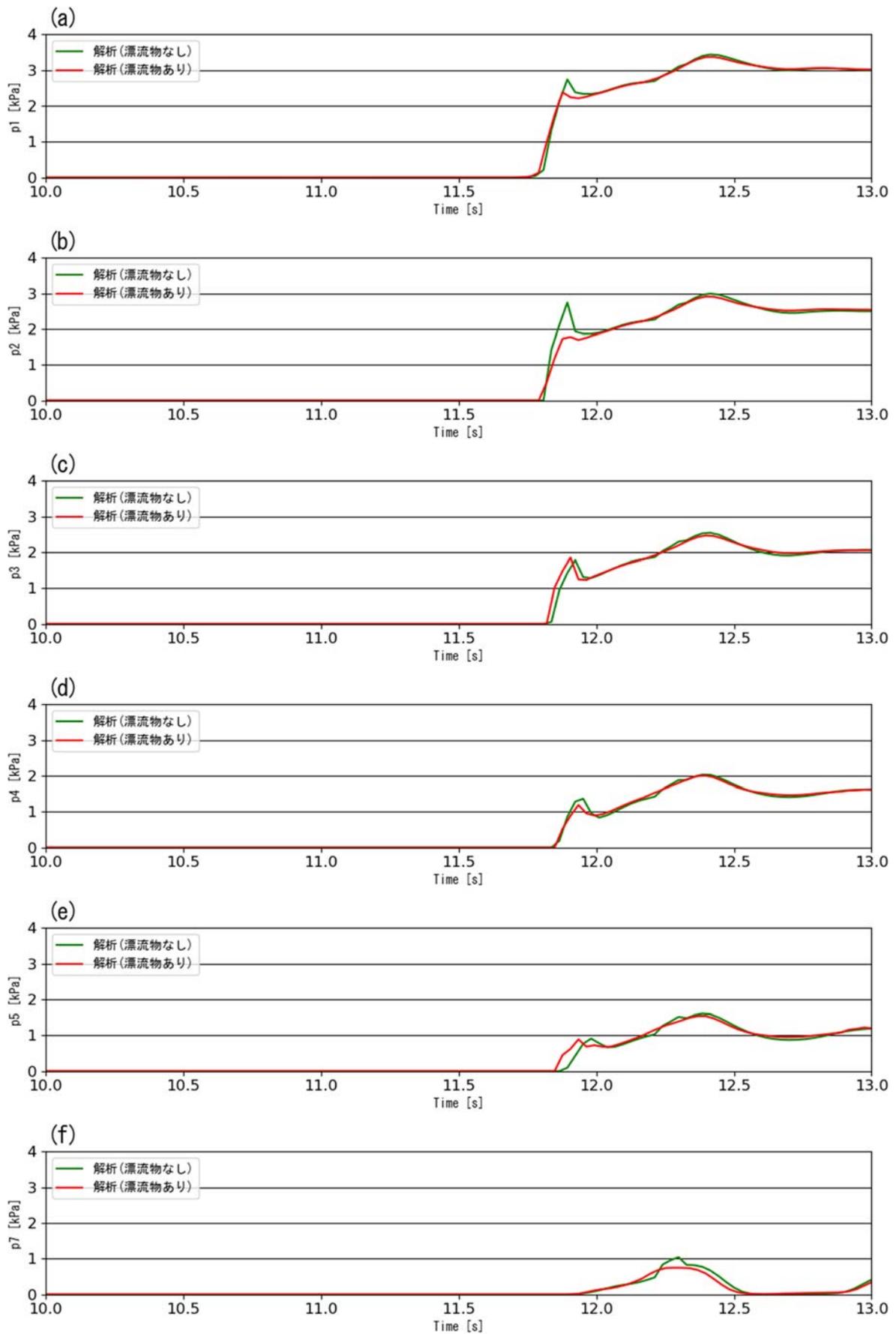


図- 8.5.17 波圧時系列 (直立護岸,堤体位置 0m,We40,TypeA,初期位置 0.5m,O-We40-A-05)

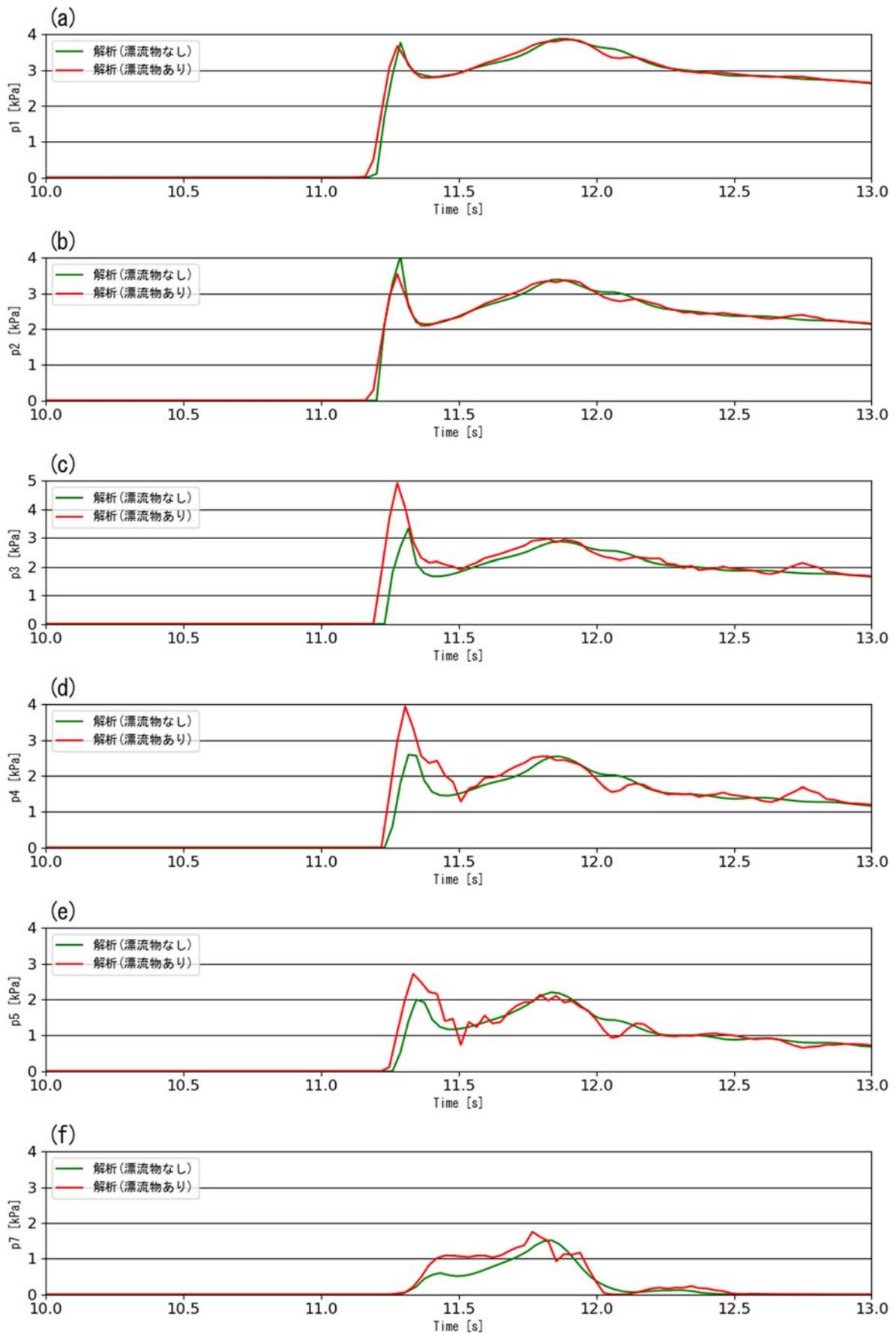


図- 8.5.18 波圧時系列 (直立護岸,堤体位置 0m,We10,TypeC,初期位置 0.5m,O-We10-C-05)

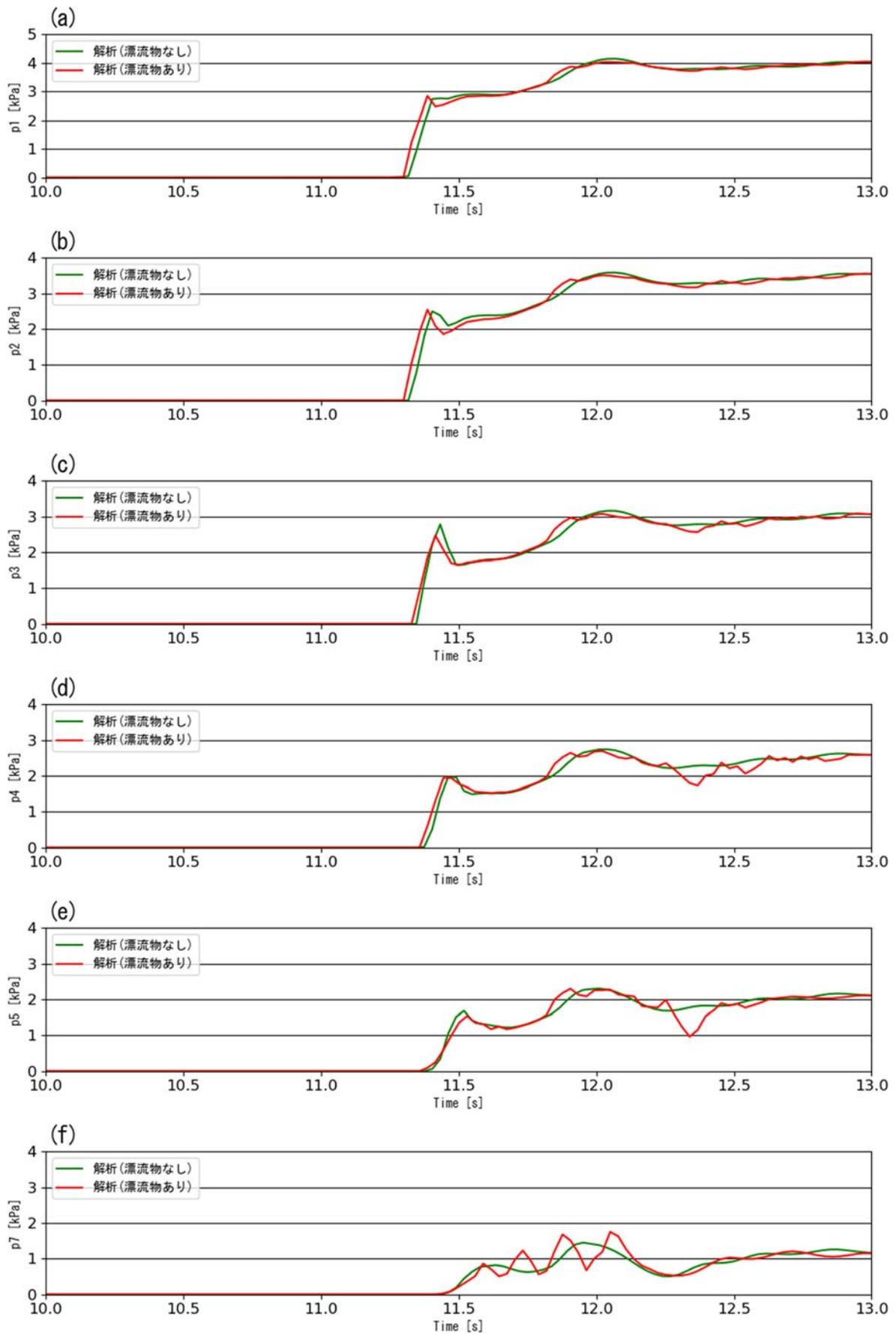


図- 8.5.19 波圧時系列 (直立護岸,堤体位置 0m,We20,TypeC,初期位置 0.5m,O-We20-C-05)

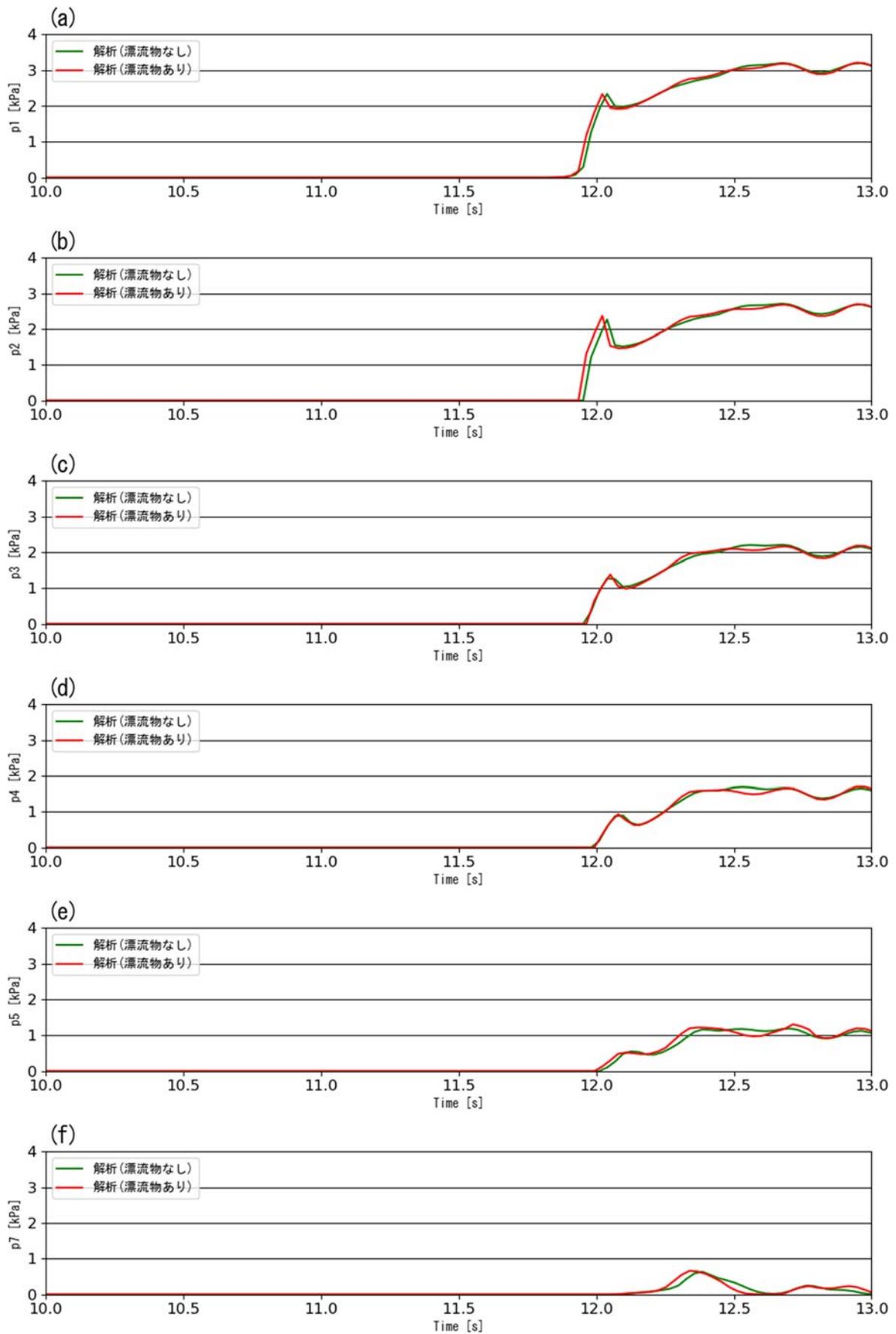


図- 8.5.20 波圧時系列 (直立護岸,堤体位置 0m,We30,TypeC,初期位置 0.5m,O-We30-C-05)

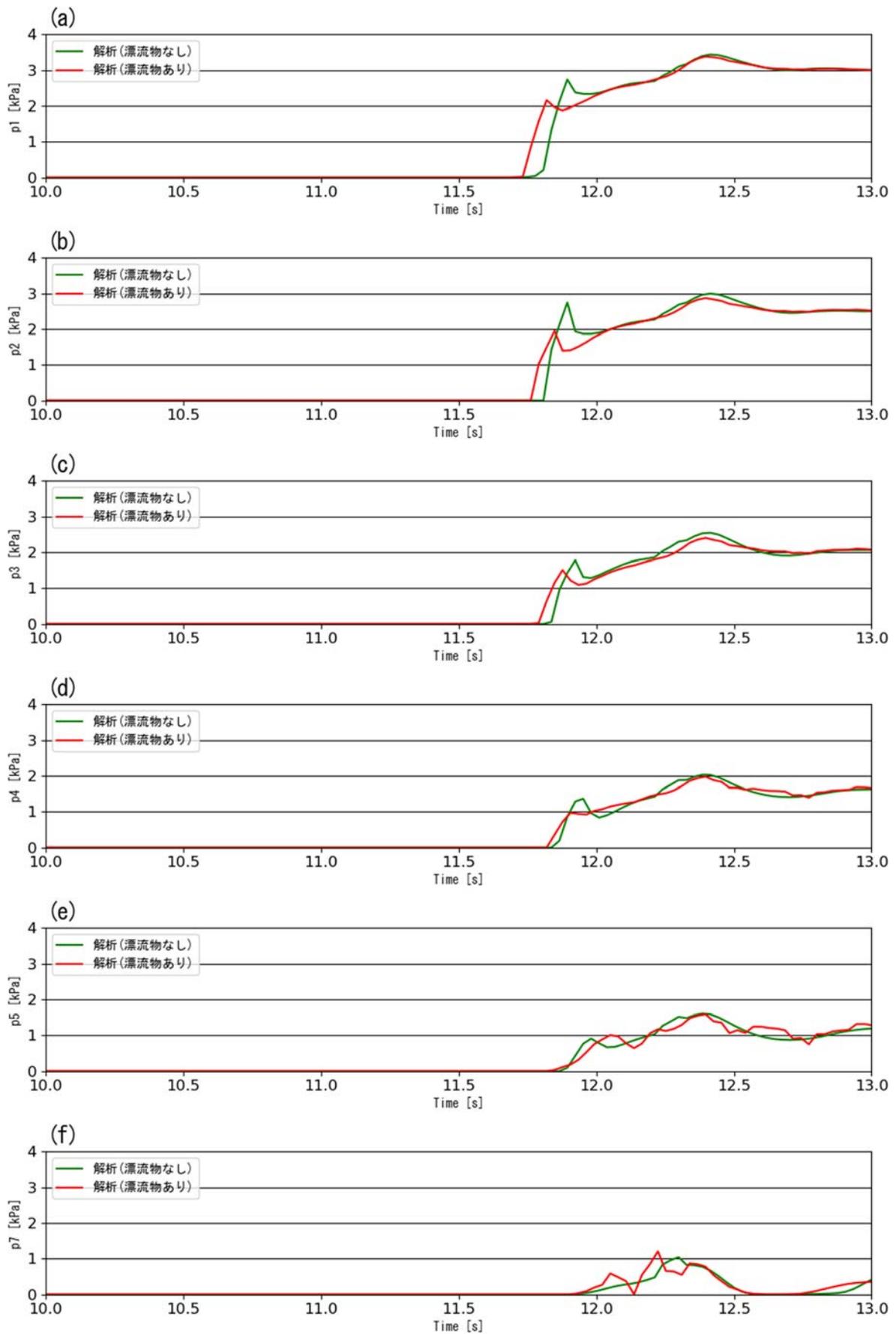


図- 8.5.21 波圧時系列 (直立護岸,堤体位置 0m,We40,TypeC,初期位置 0.5m,O-We40-C-05)

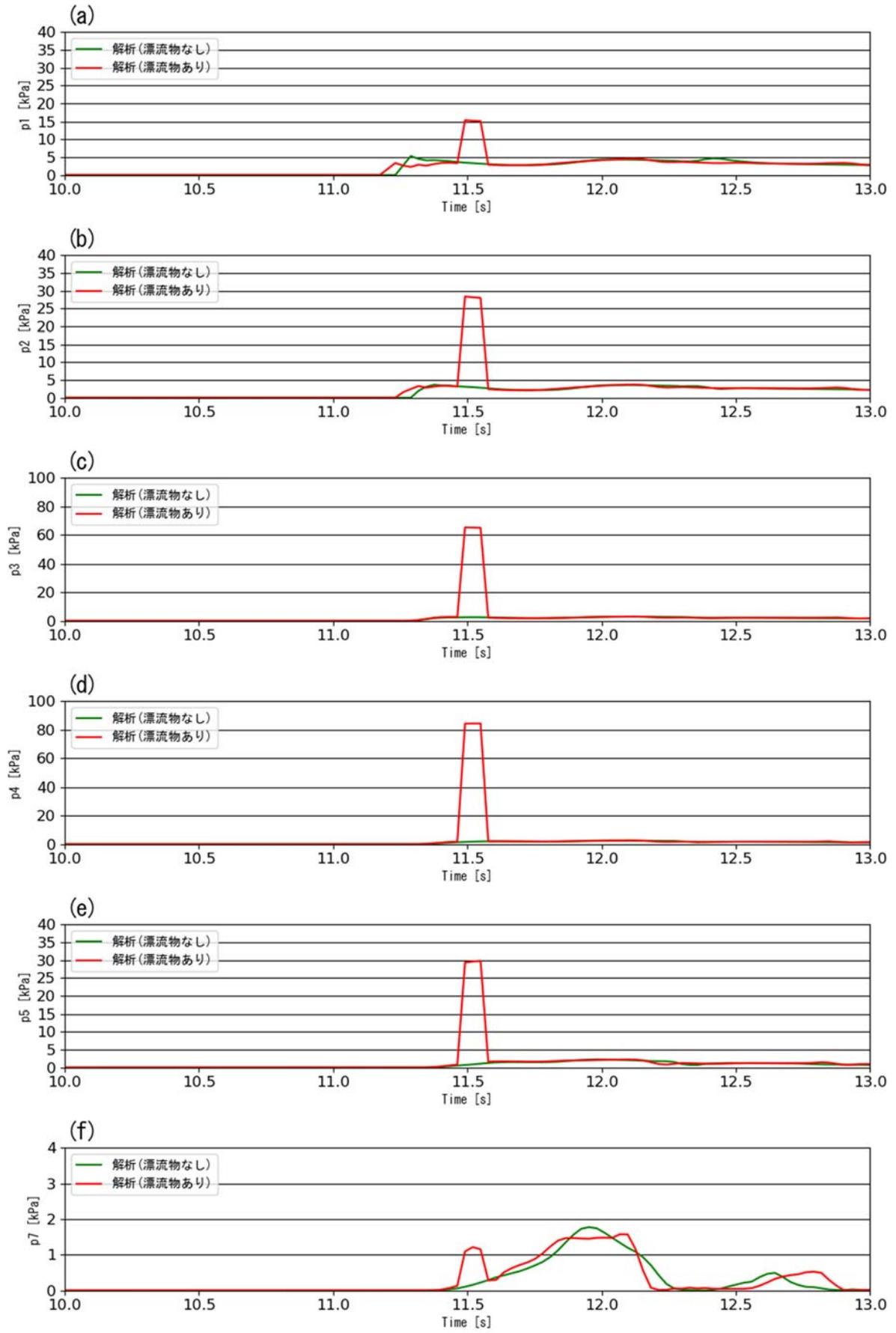


図- 8.5.22 波圧時系列 (単純勾配,堤体位置 0.625m,We10,TypeA,初期位置 0.5m,S-We10-A-05)

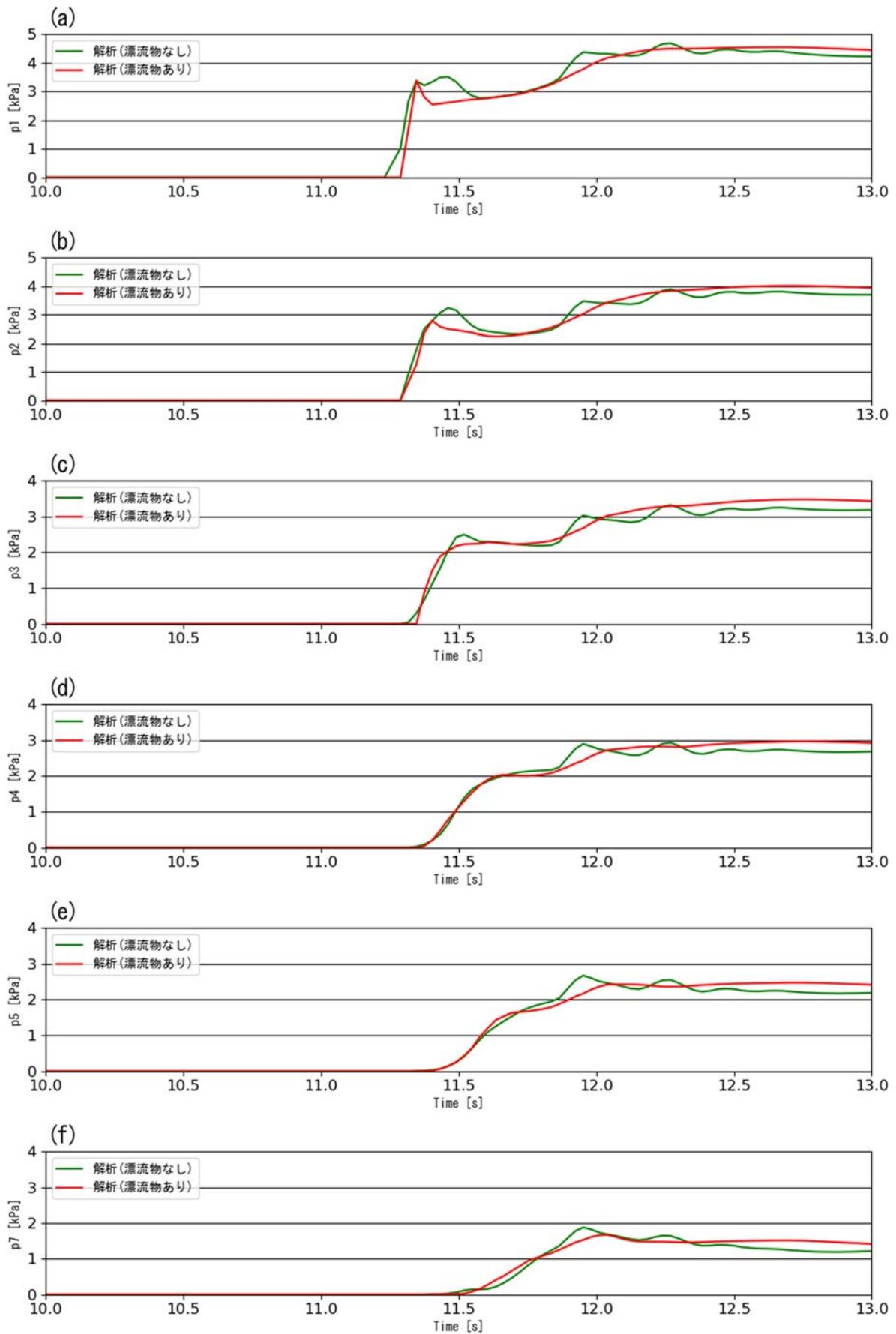


図- 8.5.23 波圧時系列 (単純勾配,堤体位置 0.625m,We20,TypeA,初期位置 0.5m,S-We20-A-05)

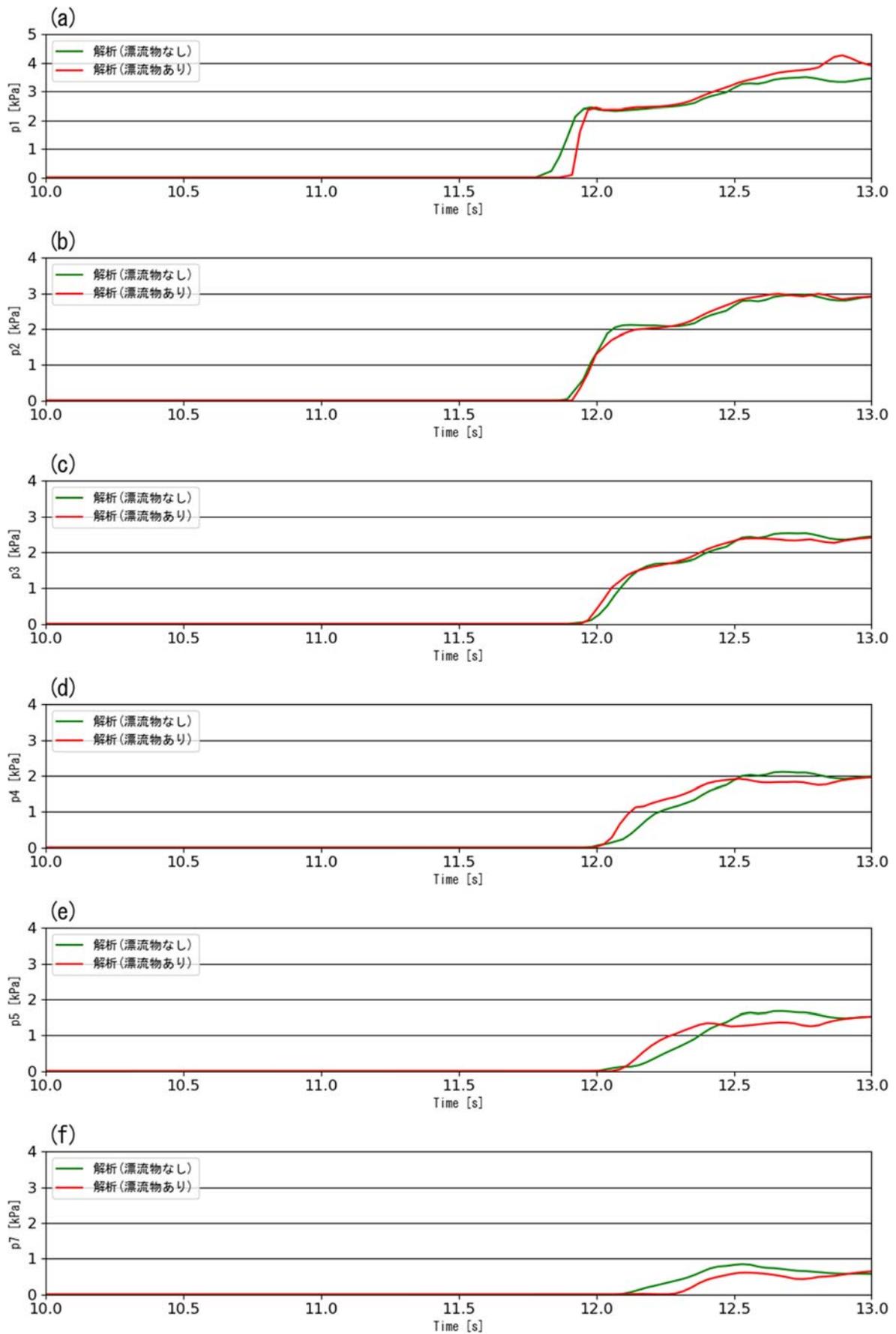


図- 8.5.24 波圧時系列 (単純勾配,堤体位置 0.625m,We30,TypeA,初期位置 0.5m,S-We30-A-05)

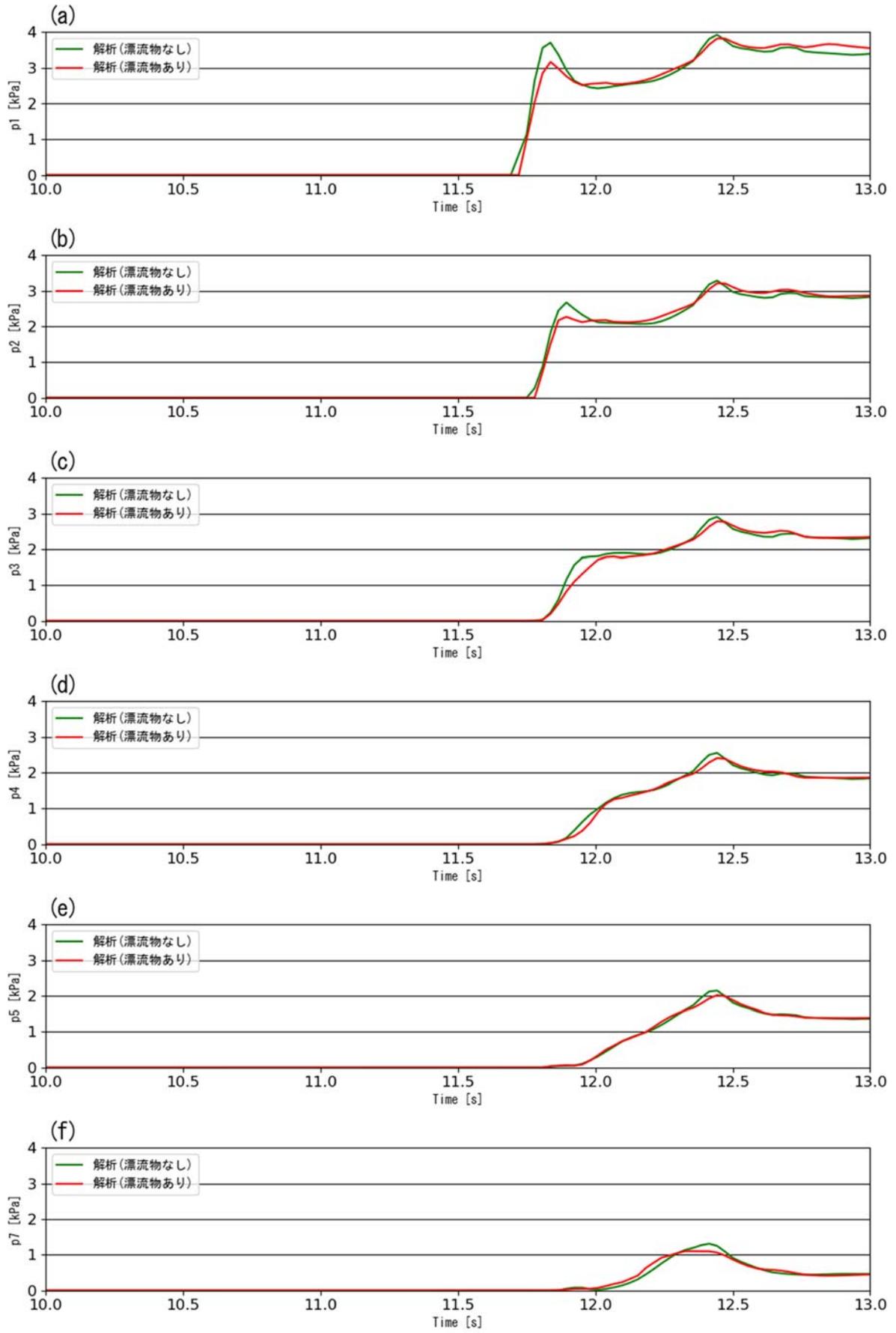


図- 8.5.25 波圧時系列 (単純勾配,堤体位置 0.625m,We40,TypeA,初期位置 0.5m,S-We40-A-05)

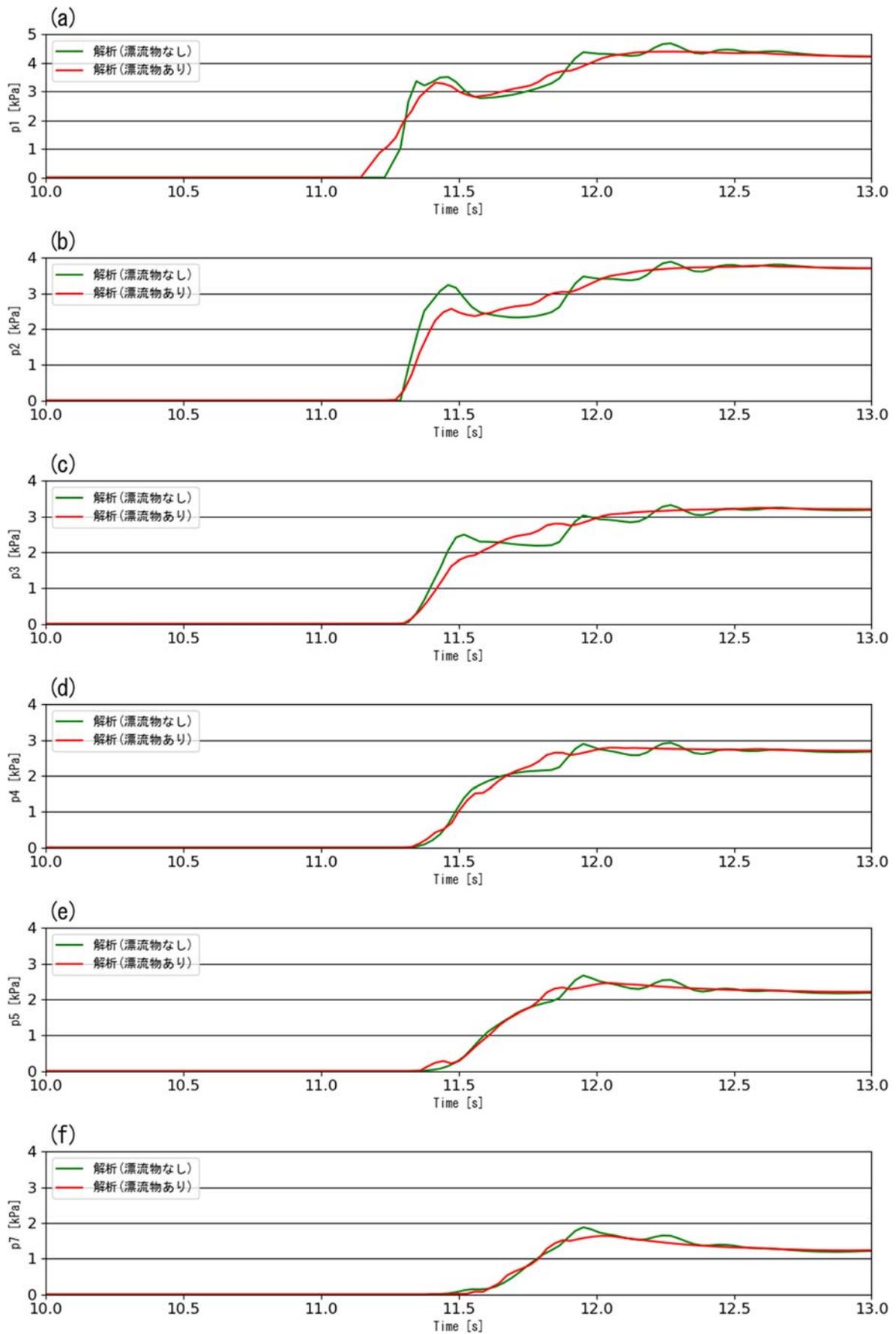


図- 8.5.26 波圧時系列 (単純勾配,堤体位置 0.625m,We20,TypeC,初期位置 0.5m,S-We20-C-05)

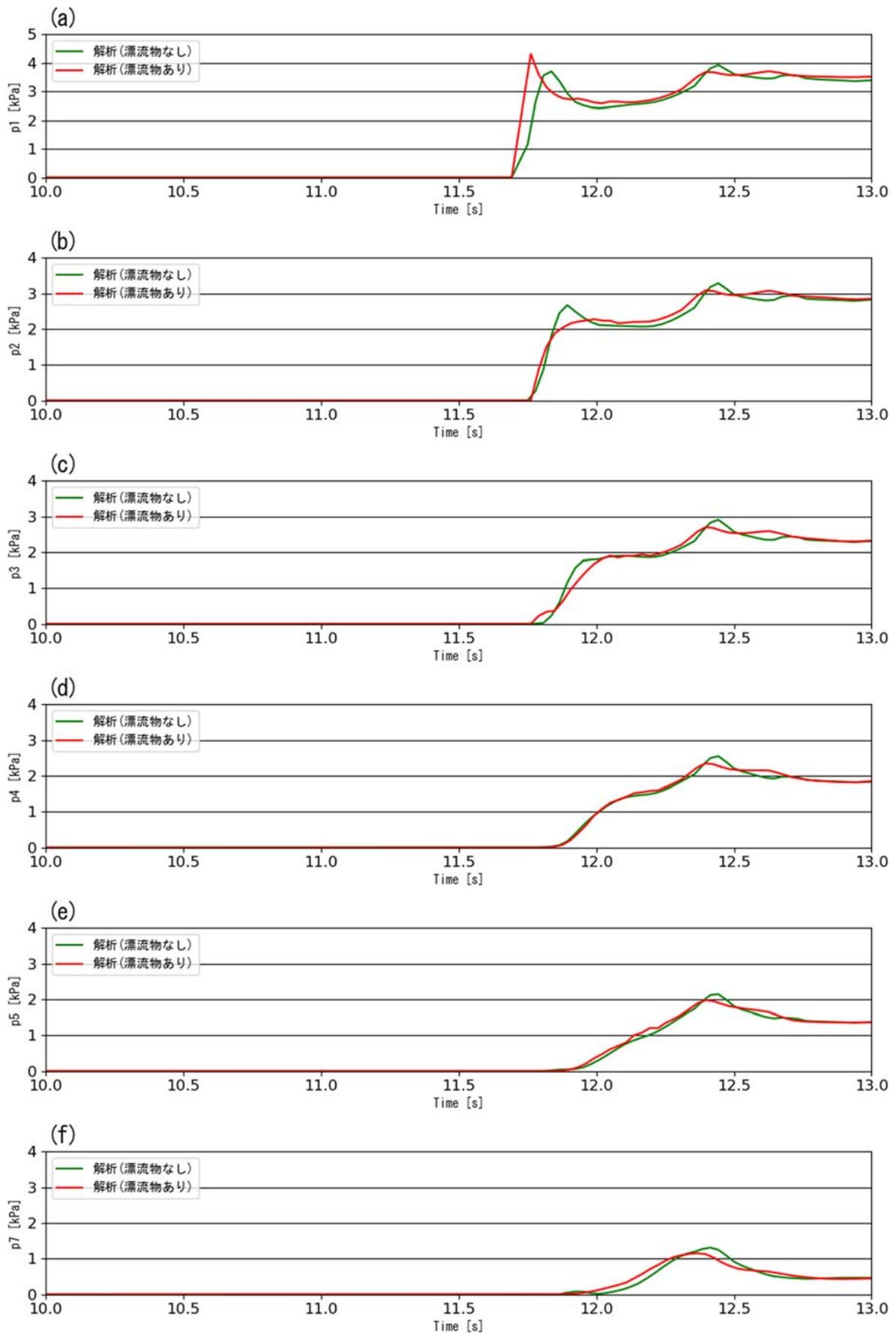


図- 8.5.27 波圧時系列 (単純勾配,堤体位置 0.625m,We40,TypeC,初期位置 2.0m,S-We40-C-05)

8.6. 圧力の鉛直分布

図- 8.6.1～図- 8.6.27 に、図- 8.5.1～図- 8.5.27 に示したケースの漂流物最接近時刻における、漂流物がある場合とない場合の鉛直圧力分布を示す。なお、漂流物最接近時刻の詳細については、表- 8.7.1 及び表- 8.7.2 に後述する。

数値シミュレーションでは、堤体を剛体として解析しているため、ひずみの算出は困難であり、水理試験の結果と直接比較することは出来ない。図- 8.6.1～図- 8.6.27 において、漂流物の有無により圧力分布が異なるケースは、顕著な漂流物の衝突があるケースと考えられる。すなわち、漂流物が堤体に衝突することで、堤体前面で計測される圧力は大きな値となる。類似事業においては、この圧力から衝突の有無を判定している。しかしながら、図- 8.6.1～図- 8.6.27 から明らかのように、漂流物の衝突があっても顕著な衝突でない場合は大きな波圧として検出されないケースがある。そこでここでは、後述するように、漂流物先端から防潮堤までの距離を簡易的に算出することで、漂流物衝突の有無判定として用いる。

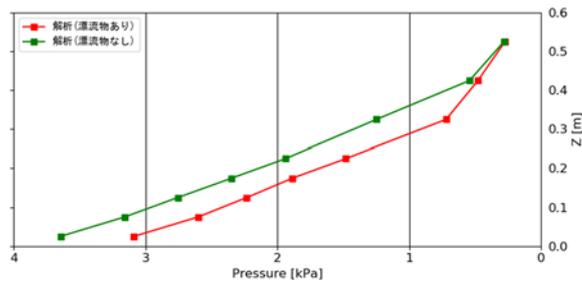


図- 8.6.1 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(直立護岸, We10, 堤体位置 0.625m, 漂流物 TypeA, 初期位置 0.5m, F-We10-A-05)

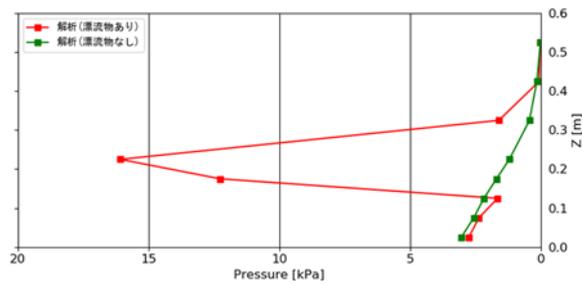


図- 8.6.2 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(直立護岸, We20, 堤体位置 0.625m, 漂流物 TypeA, 初期位置 0.5m, F-We20-A-05)

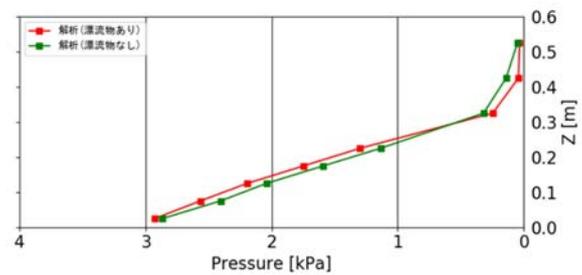


図- 8.6.3 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(直立護岸, We20, 堤体位置 0.625m, 漂流物 TypeA, 初期位置 1.0m, F-We20-A-10)

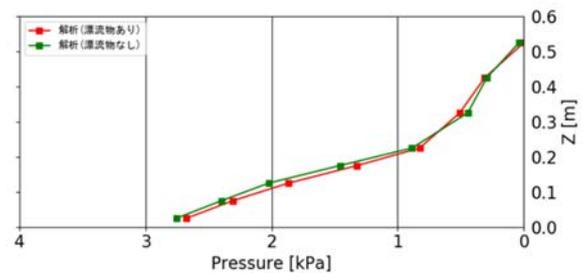


図- 8.6.4 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(直立護岸, We30, 堤体位置 0.625m, 漂流物 TypeA, 初期位置 0.5m, F-We30-A-05)

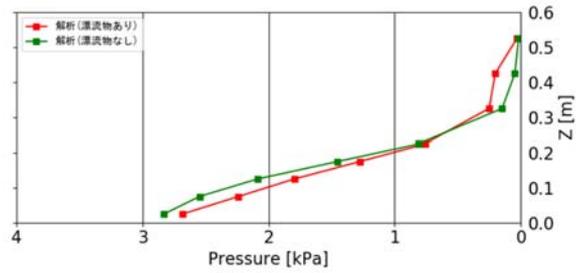


図- 8.6.5 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(直立護岸, We40, 堤体位置 0.625m, 漂流物 TypeA, 初期位置 0.5m, F-We40-A-05)

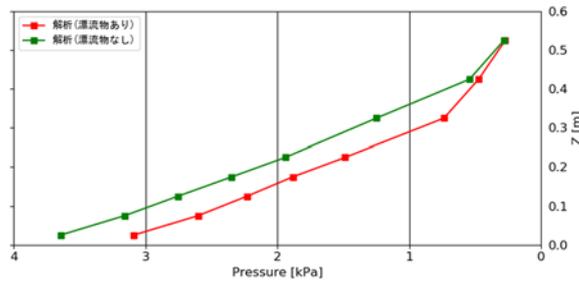


図- 8.6.6 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(直立護岸, We10, 堤体位置 0.625m, 漂流物 TypeB, 初期位置 0.5m, F-We10-B-05)

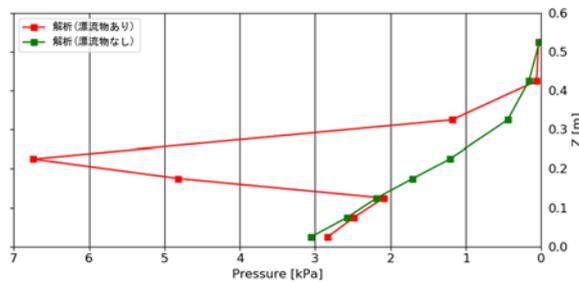


図- 8.6.7 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(直立護岸, We20, 堤体位置 0.625m, 漂流物 TypeB, 初期位置 0.5m, F-We20-B-05)

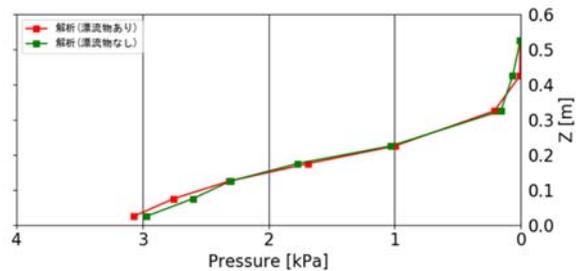


図- 8.6.8 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(直立護岸, We10, 堤体位置 0.625m, 漂流物 TypeC, 初期位置 0.5m, F-We10-C-05)

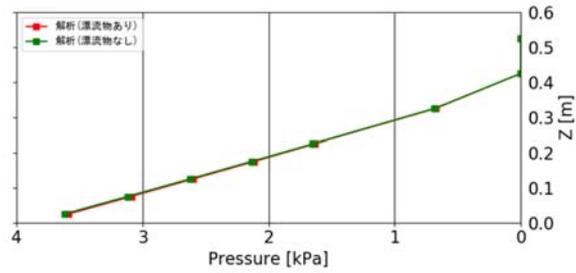


図- 8.6.9 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(直立護岸, We20, 堤体位置 0.625m, 漂流物 TypeC, 初期位置 1.0m, F-We20-C-10)

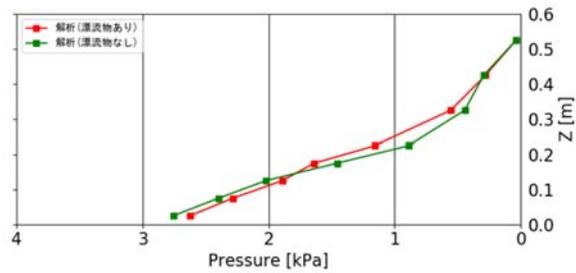


図- 8.6.10 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(直立護岸, We30, 堤体位置 0.625m, 漂流物 TypeC, 初期位置) 0.5m, F-We30-C-05)

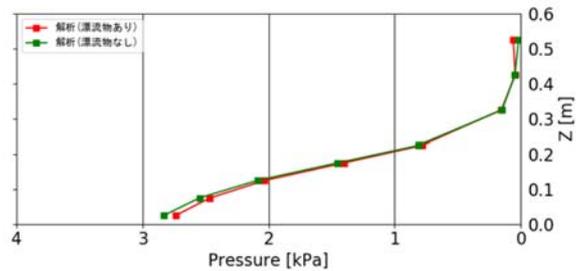


図- 8.6.11 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(直立護岸, We40, 堤体位置 0.625m, 漂流物 TypeC, 初期位置 0.5m, F-We40-C-05)

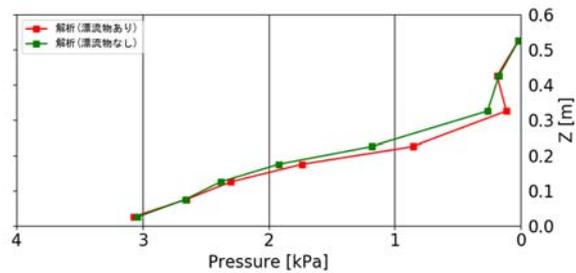


図- 8.6.12 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(直立護岸, We20, 堤体位置 0.625m, 漂流物 TypeD, 初期位置 0.5m, F-We20-D-05)

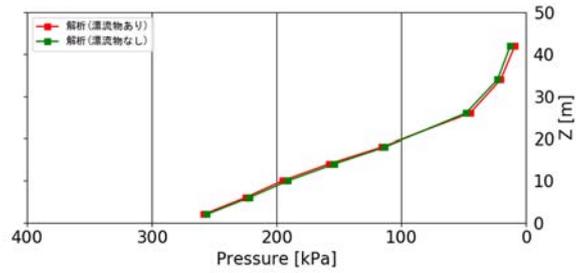


図- 8.6.13 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(直立護岸, We20, 実機, 堤体位置 50m, 漂流物 TypeA, 初期位置 8.0m, R-We20-A-01)

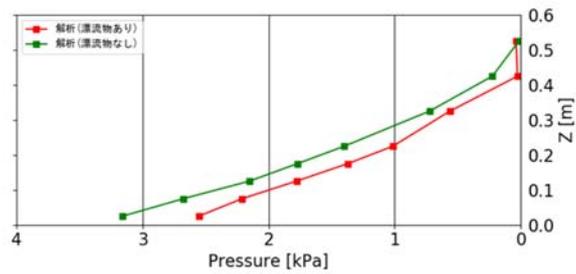


図- 8.6.14 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(直立護岸, We10, 堤体位置 0m, 漂流物 TypeA, 初期位置 0.5m, O-We10-A-05)

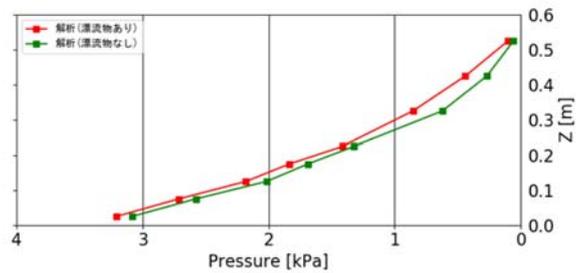


図- 8.6.15 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(直立護岸, We20, 堤体位置 0m, 漂流物 TypeA, 初期位置 0.5m, O-We20-A-05)

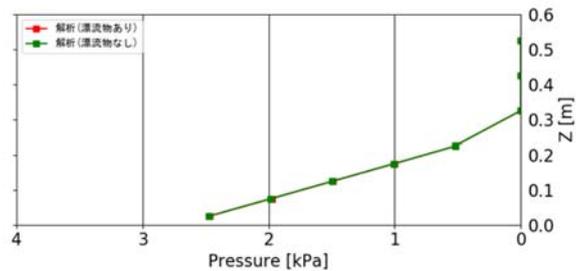


図- 8.6.16 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(直立護岸, We30, 堤体位置 0m, 漂流物 TypeA, 初期位置 0.5m, O-We30-A-05)

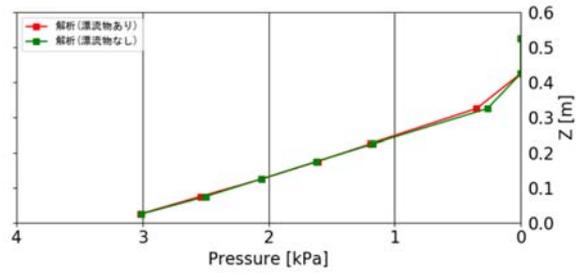


図- 8.6.17 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(直立護岸, We40, 堤体位置 0m, 漂流物 TypeA, 初期位置 0.5m, O-We40-A-05)

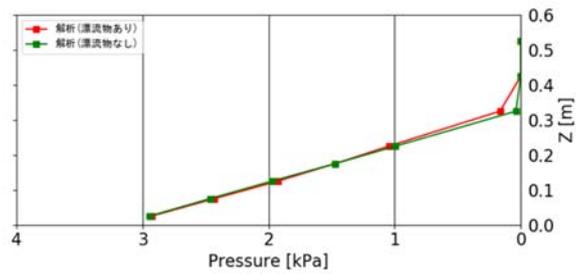


図- 8.6.18 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(直立護岸, We10, 堤体位置 0m, 漂流物 TypeC, 初期位置 0.5m, O-We10-C-05)

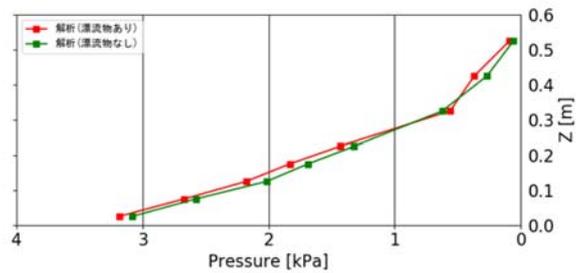


図- 8.6.19 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(直立護岸, We20, 堤体位置 0m, 漂流物 TypeC, 初期位置 0.5m, O-We20-C-05)

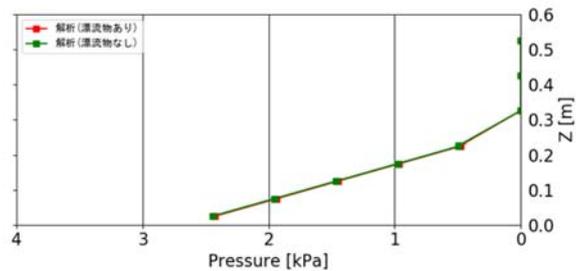


図- 8.6.20 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(直立護岸, We30, 堤体位置 0m, 漂流物 TypeC, 初期位置 0.5m, O-We30-C-05)

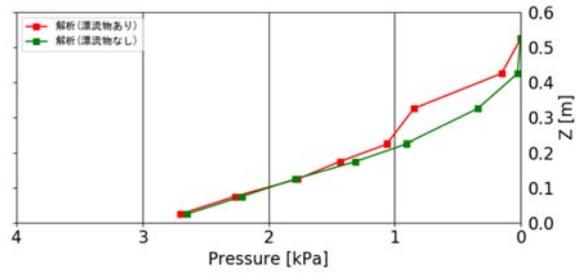


図- 8.6.21 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(直立護岸, We40, 堤体位置 0m, 漂流物 TypeC, 初期位置 0.5m, O-We40-C-05)

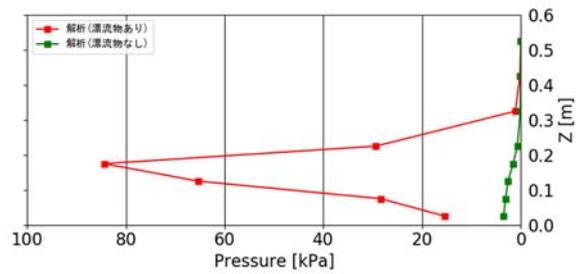


図- 8.6.22 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(単純勾配, We10, 堤体位置 0.625m, 漂流物 TypeA, 初期位置 0.5m, S-We10-A-05)

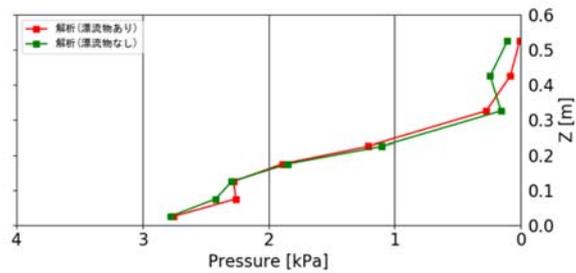


図- 8.6.23 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(単純勾配, We20, 堤体位置 0.625m, 漂流物 TypeA, 初期位置 0.5m, S-We20-A-05)

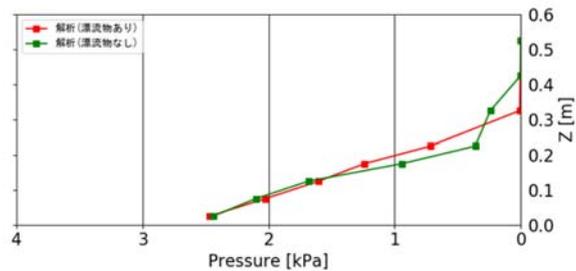


図- 8.6.24 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(単純勾配, We30, 堤体位置 0.625m, 漂流物 TypeA, 初期位置 0.5m, S-We30-A-05)

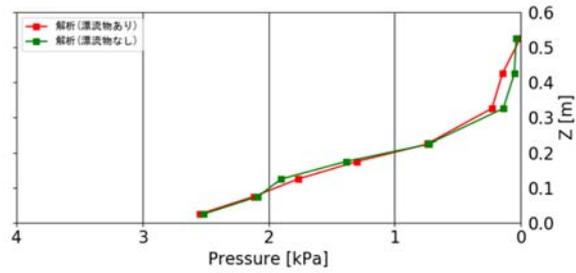


図- 8.6.25 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(単純勾配, We40, 堤体位置 0.625m, 漂流物 TypeA, 初期位置 0.5m, S-We40-A-05)

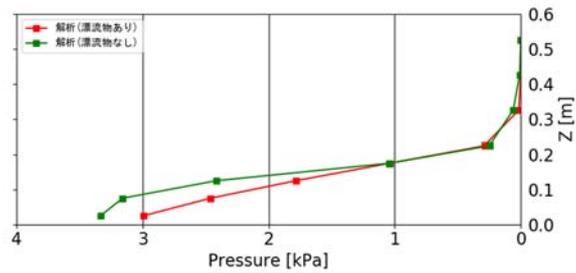


図- 8.6.26 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(単純勾配, We20, 堤体位置 0.625m, 漂流物 TypeC, 初期位置 0.5m, S-We20-C-05)

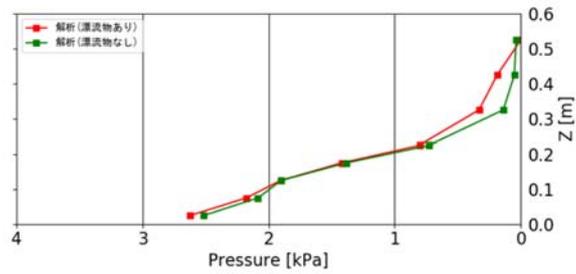


図- 8.6.27 漂流物最接近時の鉛直波圧分布(単純勾配, We40, 堤体位置 0.625m, 漂流物 TypeC, 初期位置 0.5m, S-We40-C-05)

8.7. 漂流物の移動軌跡と衝突の有無

漂流物が堤体に衝突した可能性を更に検討するため、図-8.7.2～図-8.7.11に、漂流物の移動軌跡（重心点）および比較結果を示す。また、表-8.7.1及び表-8.7.2に、堤体へ津波が到達した時刻、漂流物の重心位置がもっとも堤体に近づいた時刻、漂流物先端から堤体までの距離、及び、漂流物の衝突有無判定を示す。

ここで、漂流物衝突の有無は、漂流物先端から防潮堤までの距離を簡易的に算出することで、判定した。図-8.7.1に、漂流物先端から防潮堤までの距離を簡易的に算出する方法を説明する概略図を示す。図-8.7.1に示すように、漂流物の重心位置を点G、漂流物の先端位置を点A、重心点Gを堤体面上に投影した投影点を点B、重心点Gから点Aまでの距離を「距離GA」、重心点Gから点Bまでの距離を「距離GB」、y軸を中心軸とした回転角を θ とすると、回転角 θ 、距離GA及び距離GBは解析結果より既知のため、漂流物先端から堤体までの距離は、距離BC（点Bと点Cとの距離）と等価となり、以下のように求まる。

$$\begin{aligned}\text{漂流物先端から堤体までの距離(距離BC)} &= \text{距離GB} - \text{距離GC} \\ &= \text{距離GB} - \text{距離GA} \times \sin \theta\end{aligned}$$

表-8.7.1及び表-8.7.2には、当該手法を用いて衝突の可能性について検討した結果を、示した。なお、漂流物先端から堤体までの距離が2.0cm以下のケースを衝突の可能性が高い「○」とし、2.5cm未満のケースを「△」、2.5cm以上のケースを衝突の可能性が低い「×」とした。なお、衝突判定に用いた本手法は、簡易的に距離を算出しているため、多少の誤差が生じる。このため、マイナスと算出されるケースもあり、そのようなケースは0cmとしている。また、計算の出力時間間隔により距離が変わる可能性もあり得るため、これらを勘案して、衝突判定を行っている。

図-8.7.2～図-8.7.11によれば、堤体近傍の動きを除けば、多くのケースで漂流物は堤体に接近しており、衝突の可能性を再現していると見ることが出来る。実際の現象の不規則性を考慮すれば、ある閾値を設定して、閾値以上に堤体に近接した場合には衝突の可能性があると判断してやれば、衝突確率的な評価は可能であると考えられる。ここでは、上述の閾値により衝突の有無を判定したが、堤体近傍での漂流物の挙動を正確に算定するには、漂流物周りや漂流物と堤体の間の、局所的な圧力変動やの流速場を再現する必要がある。衝突力の定量評価のためには、詳細な解析格子や構造物の動的解析モデルの導入や、あるいは、接近判断や接近速度などによる衝突力の評価モデルの適用が考えられる。

水理試験では、顕著な衝突が生じる際には、津波到達から0.1～0.2s後に衝突しているが、数値シミュレーションでは0.5s程度後に衝突あるいは最接近している。ただし、水理試験では、同じ条件であっても顕著な衝突が確認できない場合があり、この場合は漂流物が堤体に最接近する時間は、0.2s後よりも遅い。シミュレーションでは、この漂流物衝突の不確実性が考慮できないため、漂流物の衝突の有無を数値シミュレーションで判断するには、解析モデルにこの不確実性を取り込む必要があり、今後の課題である。漂流物の衝突が遅れた場合、津波の先端部分が漂流物の衝突に先行して到達するため、堤体と漂流物の間に水塊が挟まれることになり、衝突力が低減すると考えられる。漂流物の衝突時間が水理試験に比べて遅れていることから、数値シミュレーションにおいて漂流物の動き出しの加速度が小さく評価されていることが考えられる。漂流開始時に漂流物を加速させる抗力等の力の評価手法について、今後検討する必要がある。

表- 8.7.1 には、水理試験による衝突頻度の試験結果を同時に示した。数値シミュレーションと水理試験の結果を比較すると、We10, We20 については、水理試験において 60~70%以上の衝突頻度の場合に、数値シミュレーションにおいても漂流物の衝突が再現されていることが分かる。We30, We40 では、水理試験において衝突が確認されたケースにおいても、数値シミュレーションでは衝突していない。後述する漂流物の軌跡においても、We30, We40 では、漂流物が汀線まで接近していないことが分かる。We30, We40 は津波高が相対的に小さく、砕波により生じる段波形状の波高が小さい。数値シミュレーションにおいては、段波形状における乱れ等の再現性等が、漂流開始時に漂流物を押す流体力に大きく影響していることが想定される。解析格子等の調整により再現精度が向上することも考えられるが、より詳細な検討が必要である。

TypeD では 1 ケースも衝突が確認されていない。これについては、水理試験において結果のばらつきが大きく、また、数値シミュレーションにおいては漂流物が小さく十分な解析格子の解像度を確保すること出来ていないことが要因として考えられる。

実機スケールの解析 (R シリーズ) について模型スケールの解析結果と比較すると、模型スケールでは衝突するケースでも実機スケールでは衝突していない。この違いは、数値誤差や数値粘性等の計算アルゴリズムも要因の 1 つに考えられるものの、主には水の物性に由来すると考えられる。実機スケールの解析では、長さや重さに関する諸量についてはフルード則に基づいてスケールアップしているが、動粘性係数等の水の物性については同じ値としている。そのため実機では、抗力や摩擦に相当する流体力が相対的に低減して、衝突し難い結果になったと推察される。したがってこの結果に基づくと、水理試験は安全側の結果を与えると考えられる。

堤体模型を汀線位置に設置したケース (O シリーズ) では、衝突の有無については堤体位置 0.625m の場合と概略一致する。ただし、TypeA の We30, We40 については、堤体位置 0.625m では衝突していないケースでも、堤体位置 0m では衝突している。堤体位置 0.625m の場合、漂流物の初期位置が汀線に近いと、汀線を越えて浸水する際の複雑な流況の影響を受けるために、この部分の流況および漂流特性の再現精度の影響を受けていると考えられる。

護岸形状を単純勾配としたケース (S シリーズ) では、全体的に直立護岸よりも衝突し難い結果となった。水理試験の結果から明らかなように、漂流物の衝突は漂流開始時の初期位置が砕波帯よりも岸側の場合に顕著である。単純勾配の場合、直立護岸よりも水深の浅くなる領域が岸に近い場合砕波点が岸に近づく傾向にある。そのため、顕著な衝突の生じる初期位置の領域が岸側に狭くなっていると考えられる。

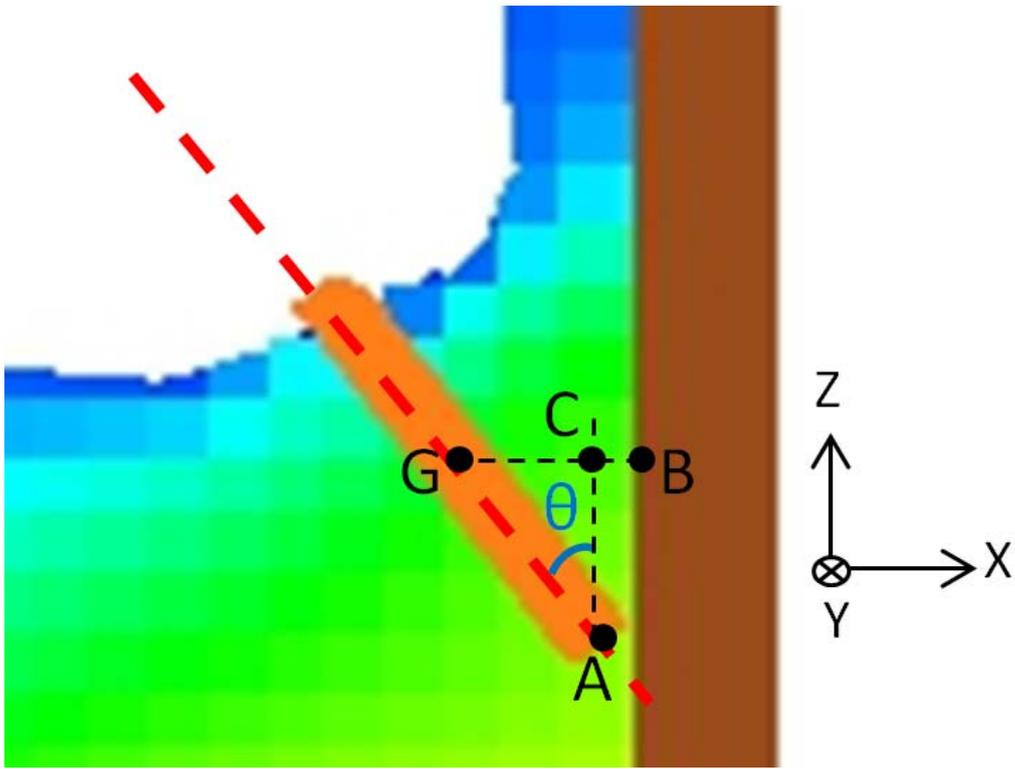


図- 8.7.1 漂流物先端から堤体までの距離を簡易的に算出する概略図

表- 8.7.1 津波到達時刻，漂流物最接近時刻，堤体までの距離，及び衝突判定

ケース名	津波到達時刻	漂流物最接近時刻	漂流物先端から堤体までの距離	衝突判定	衝突頻度 (試験結果)
F-We10-A-05	11.5s	12.0s	0.0cm	○	87%
F-We10-A-20	11.5s	11.9s	15.3cm	×	67%
F-We10-A-30	11.5s	12.4s	103.7cm	×	13%
F-We10-A-35	11.5s	12.5s	88.4cm	×	0%
F-We20-A-05	11.6s	12.0s	1.3cm	○	100%
F-We20-A-10	11.6s	12.0s	0.0cm	○	67%
F-We20-A-20	11.6s	12.5s	33.9cm	×	27%
F-We20-A-30	11.6s	12.6s	68.5cm	×	47%
F-We20-A-35	11.7s	12.7s	101.5cm	×	0%
F-We20-A-40	11.7s	12.8s	129.3cm	×	0%
F-We30-A-05	12.3s	12.7s	4.5cm	×	80%
F-We30-A-10	12.3s	13.0s	19.3cm	×	67%
F-We30-A-15	12.3s	13.2s	58.1cm	×	13%
F-We30-A-20	12.3s	13.3s	68.3cm	×	0%
F-We40-A-05	12.2s	12.5s	7.1cm	×	93%
F-We40-A-10	12.2s	12.7s	12.7cm	×	60%
F-We40-A-20	12.2s	13.2s	32.0cm	×	13%
F-We40-A-25	12.1s	13.2s	13.2cm	×	0%
F-We10-B-05	11.5s	12.0s	0.0cm	○	67%
F-We20-B-05	11.6s	12.0s	1.4cm	○	67%
F-We10-C-05	11.6s	11.8s	1.6cm	○	-
F-We10-C-20	11.5s	12.4s	30.7cm	×	-
F-We20-C-05	11.6s	12.0s	3.0cm	×	87%
F-We20-C-10	11.6s	15.1s	0cm	○	80%
F-We20-C-20	11.6s	12.5s	27.7cm	×	13%
F-We20-C-30	11.6s	12.2s	82.6cm	×	27%
F-We20-C-40	11.6s	12.8s	132.2cm	×	20%
F-We20-C-50	11.6s	12.1s	177.3cm	×	7%
F-We30-C-05	12.3s	12.7s	0.3cm	○	-
F-We30-C-20	12.3s	13.3s	80.1cm	×	-
F-We40-C-05	12.2s	12.5s	2.0cm	○	87%
F-We40-C-20	12.2s	13.0s	64.2cm	×	60%
F-We40-C-30	12.1s	12.6s	124.3cm	×	0%
F-We40-C-35	11.7s	12.1s	153.4cm	×	7%
F-We40-C-40	12.2s	12.5s	132.2cm	×	13%
F-We20-D-05	11.6s	11.9s	0cm	○	40%
F-We20-D-10	11.6s	12.0s	4.5cm	×	60%
F-We20-D-15	11.6s	12.3s	18.4cm	×	47%
F-We20-D-20	11.6s	12.3s	11.7cm	×	0%
F-We40-D-05	12.2s	12.6s	6.6cm	×	80%
F-We40-D-10	12.2s	12.8s	7.5cm	×	40%
F-We40-D-20	12.1s	12.9s	99.3cm	×	13%
F-We40-D-25	12.1s	15.1s	60.8cm	×	20%

表- 8.7.2 津波到達時刻，漂流物最接近時刻，堤体までの距離，及び衝突判定

ケース名	津波到達時刻	漂流物最接近時刻	漂流物先端から堤体までの距離	衝突判定
R-We20-A-01	105.3s	108.0s	702.4cm	×
R-We20-A-05	105.5s	109.5s	874.5cm	×
R-We20-A-10	105.3s	112.0s	1924.0cm	×
R-We20-A-20	105.4s	122.6s	5417.0cm	×
R-We20-A-40	105.5s	116.6s	14516.5cm	×
O-We10-A-05	11.2s	11.6s	0cm	○
O-We10-A-20	11.2s	11.8s	42.7cm	×
O-We20-A-05	11.3s	11.8s	0.9cm	○
O-We20-A-20	11.3s	16.5s	51.1cm	×
O-We30-A-05	11.9s	16.4s	0cm	○
O-We30-A-20	11.9s	12.6s	49.5cm	×
O-We40-A-05	11.8s	13.0s	0.1cm	○
O-We40-A-20	11.8s	18.3s	17.4cm	×
O-We10-C-05	11.2s	12.4s	0.6cm	○
O-We10-C-20	11.2s	14.6s	3.0cm	×
O-We20-C-05	11.3s	11.8s	0.8cm	○
O-We20-C-20	11.3s	14.7s	9.3cm	×
O-We30-C-05	11.9s	16.5s	1.2cm	○
O-We30-C-20	11.9s	12.6s	45.7cm	×
O-We40-C-05	11.7s	12.2s	0.5cm	○
O-We40-C-20	11.8s	12.4s	44.1cm	×
S-We10-A-05	11.2s	11.5s	0cm	○
S-We10-A-20	11.2s	11.8s	3.8cm	×
S-We20-A-05	11.3s	11.6s	0.4cm	○
S-We20-A-20	11.3s	11.9s	18.2cm	×
S-We30-A-05	11.9s	12.2s	4.5cm	×
S-We30-A-20	11.9s	13.0s	35.7cm	×
S-We40-A-05	11.8s	12.1s	2.7cm	×
S-We40-A-20	11.7s	12.5s	27.4cm	×
S-We10-C-05	11.1s	11.6s	4.2cm	×
S-We10-C-20	11.2s	11.6s	9.3cm	×
S-We20-C-05	11.2s	11.5s	0.7cm	○
S-We20-C-20	11.2s	11.9s	17.3cm	×
S-We30-C-05	11.9s	12.2s	3.1cm	×
S-We30-C-20	11.9s	12.7s	45.5cm	×
S-We40-C-05	11.8s	12.1s	2.3cm	△
S-We40-C-20	11.7s	12.4s	37.8cm	×

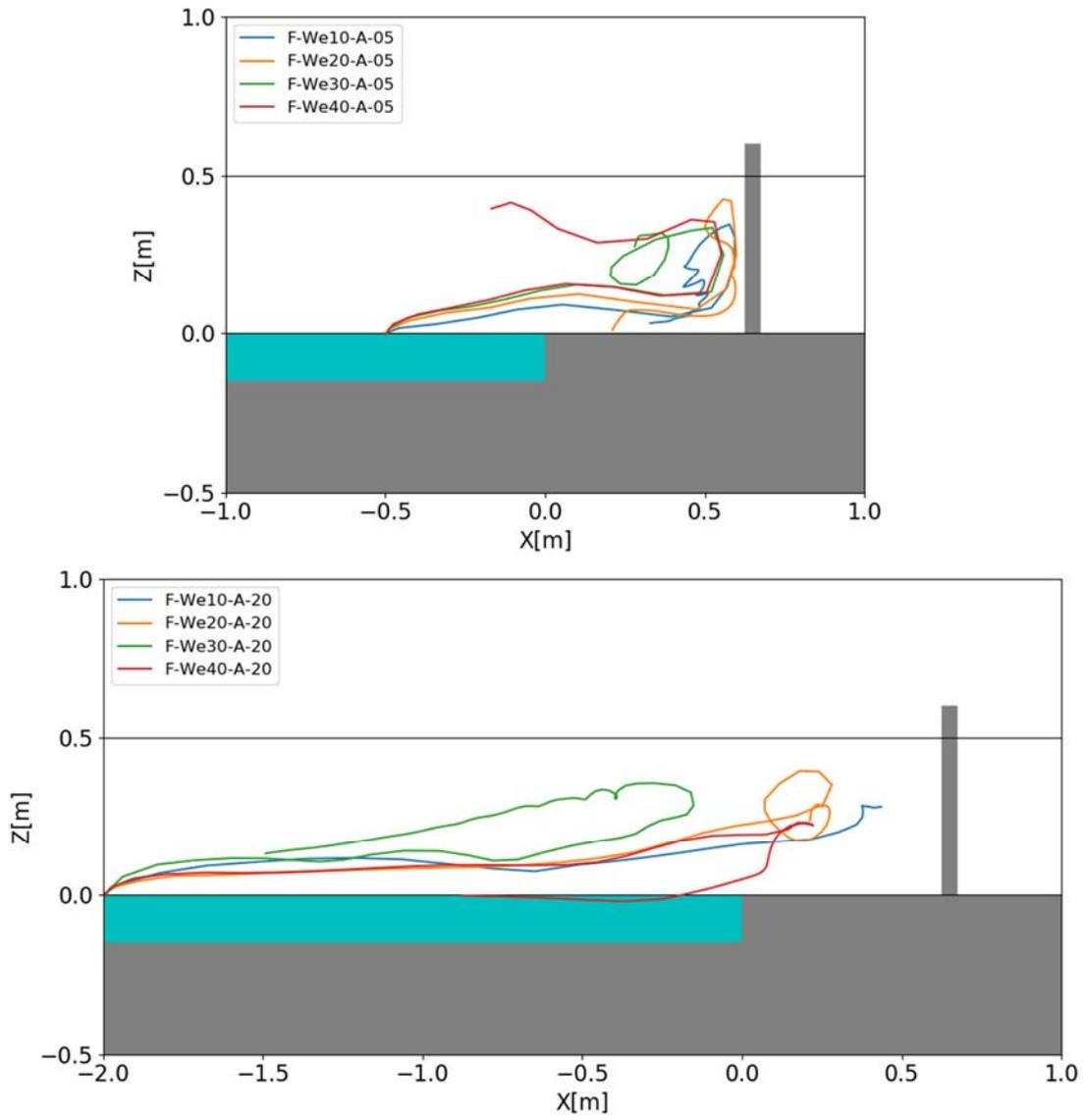


図- 8.7.2 漂流物の移動軌跡 (直立護岸, TypeA, 堤体位置 0.625m)

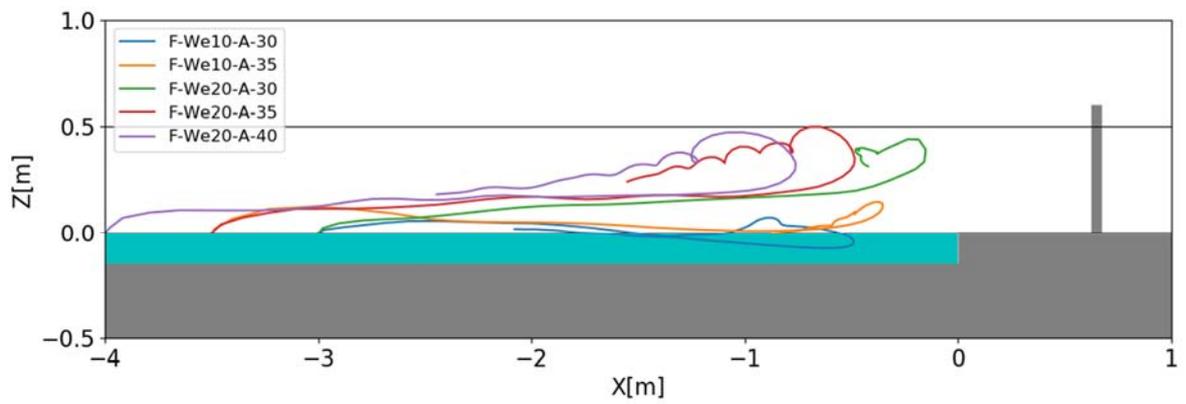
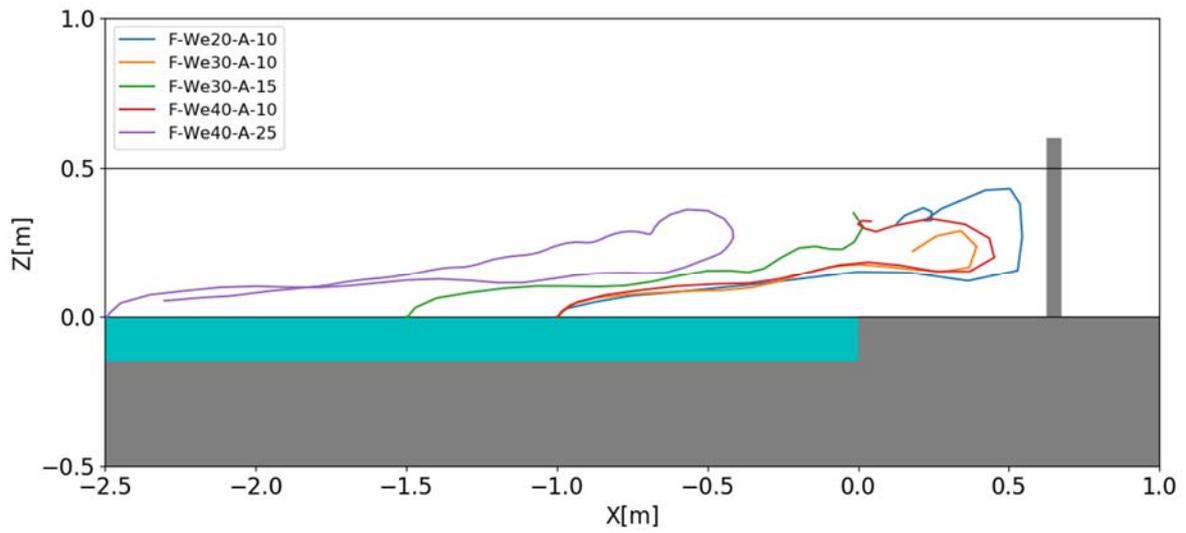


図- 8.7.3 漂流物の移動軌跡 (直立護岸, TypeA, 堤体位置 0.625m)

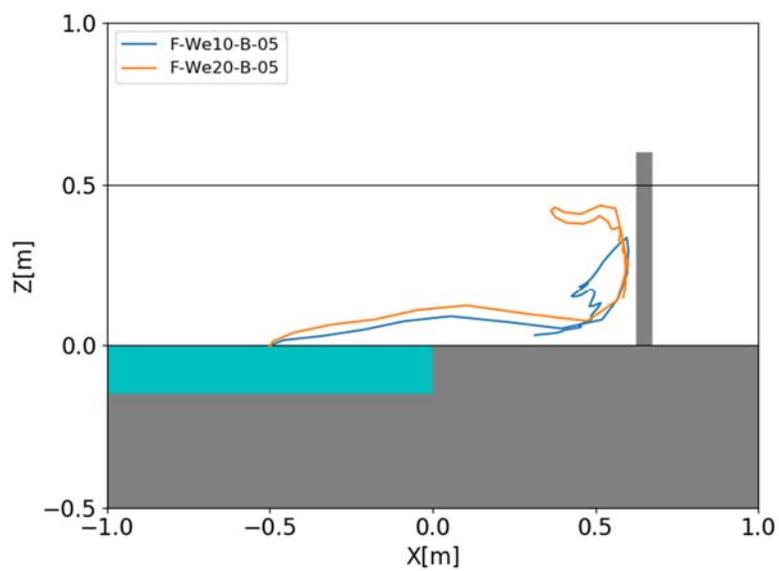


図- 8.7.4 漂流物の移動軌跡 (直立護岸, TypeB, 堤体位置 0.625m)

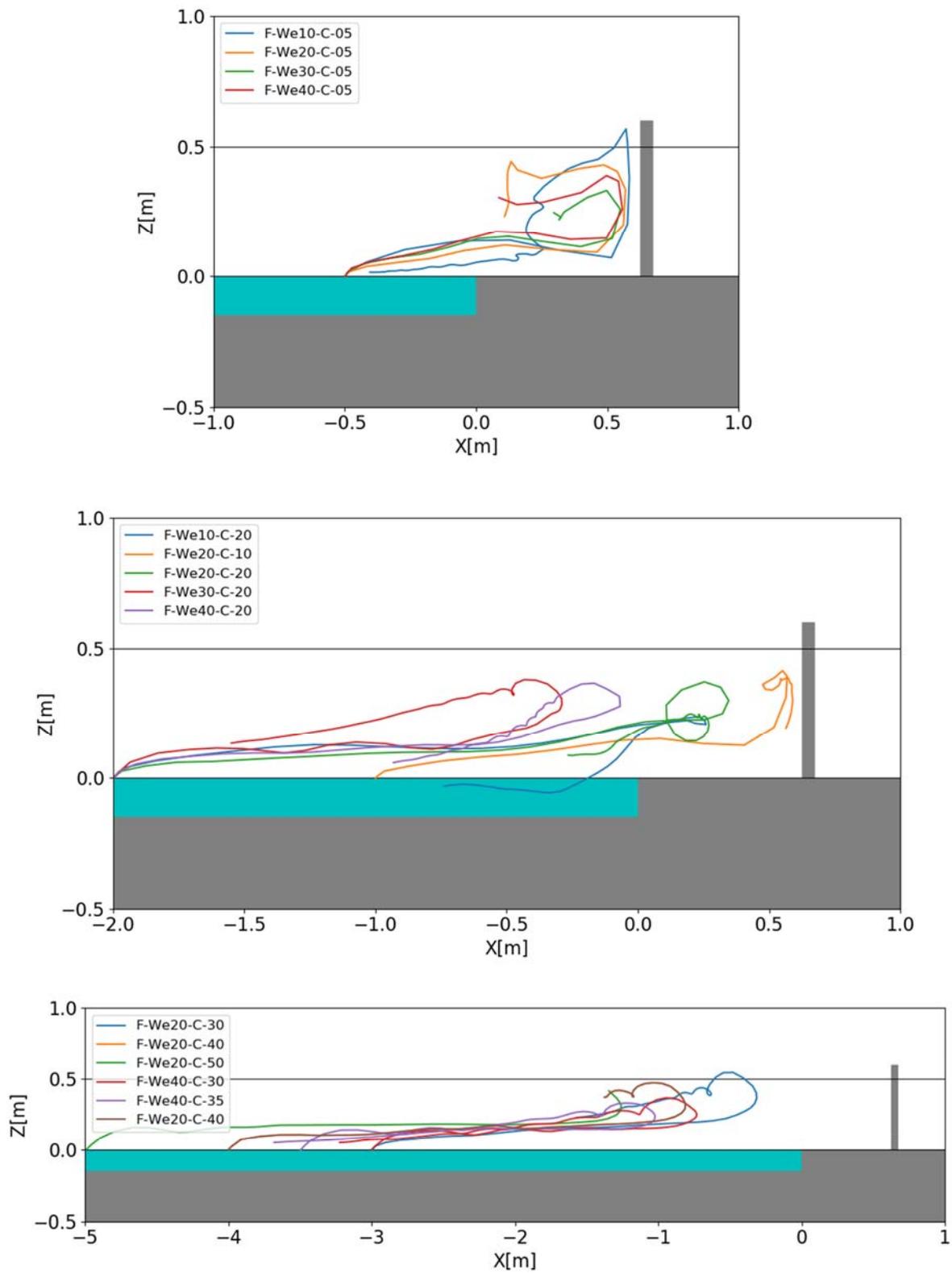


図- 8.7.5 漂流物の移動軌跡 (直立護岸, TypeC, 堤体位置 0.625m)

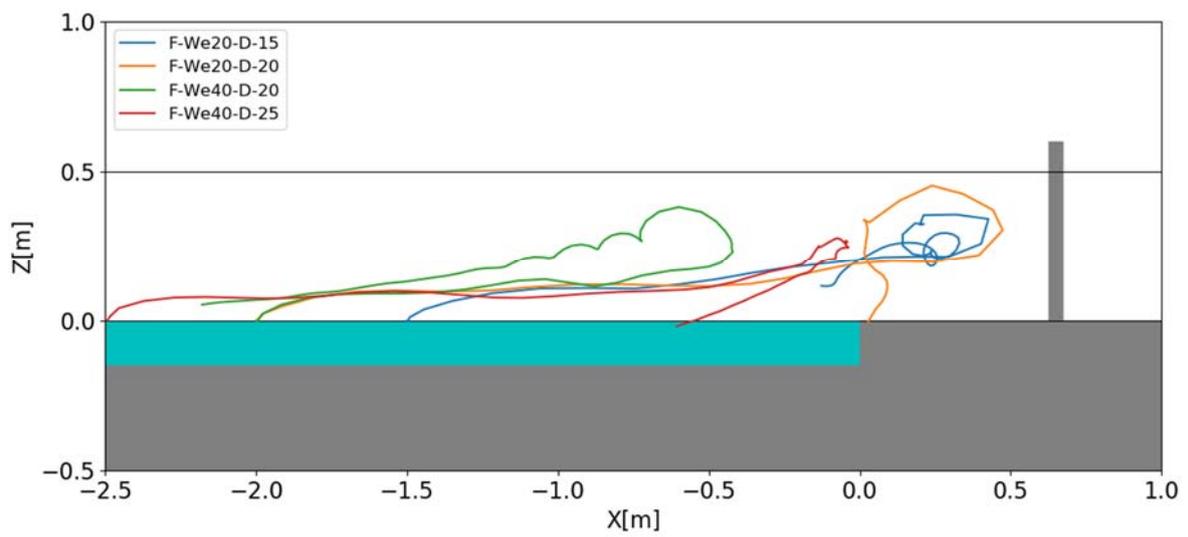
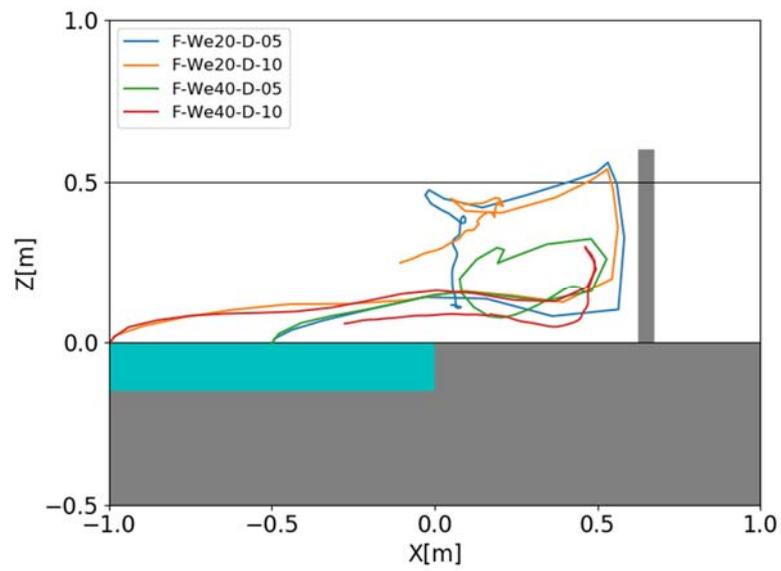


図- 8.7.6 漂流物の移動軌跡 (直立護岸, TypeD, 堤体位置 0.625m)

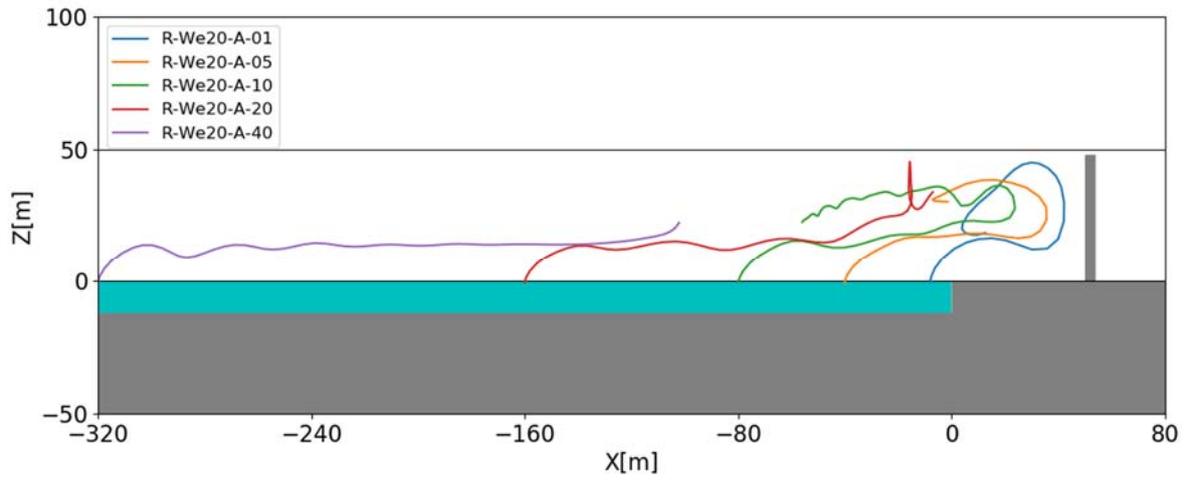


図- 8.7.7 漂流物の移動軌跡 (直立護岸・実機スケール, TypeA, 堤体位置 0.625m)

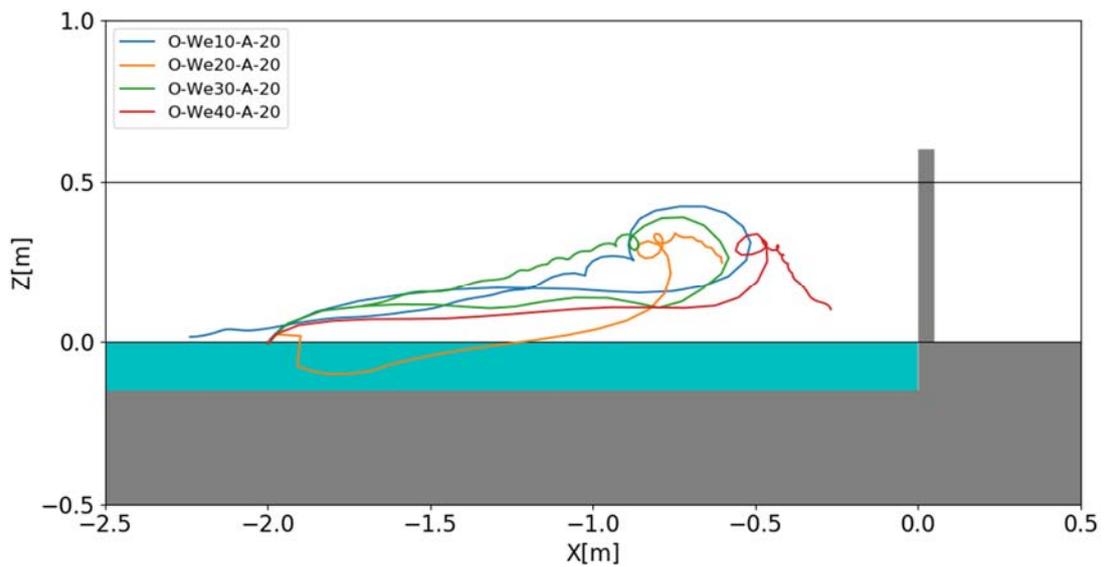
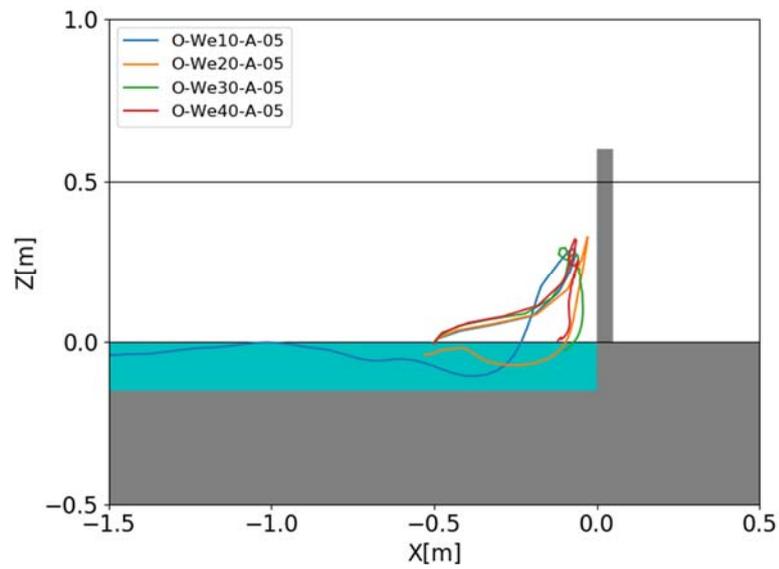


図- 8.7.8 漂流物の移動軌跡 (直立護岸, TypeA, 堤体位置 0m)

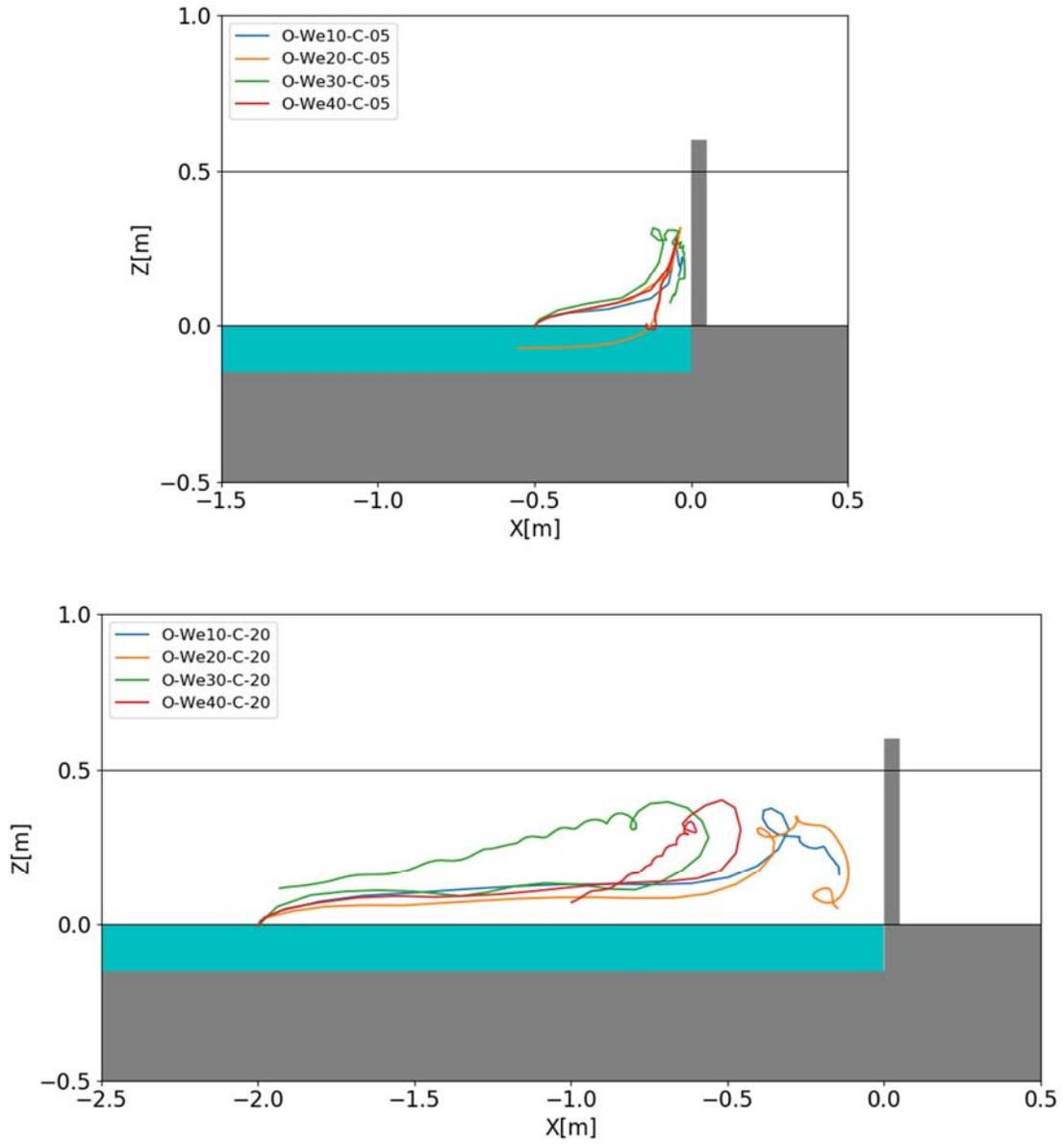


図- 8.7.9 漂流物の移動軌跡 (直立護岸, TypeC, 堤体位置 0m)

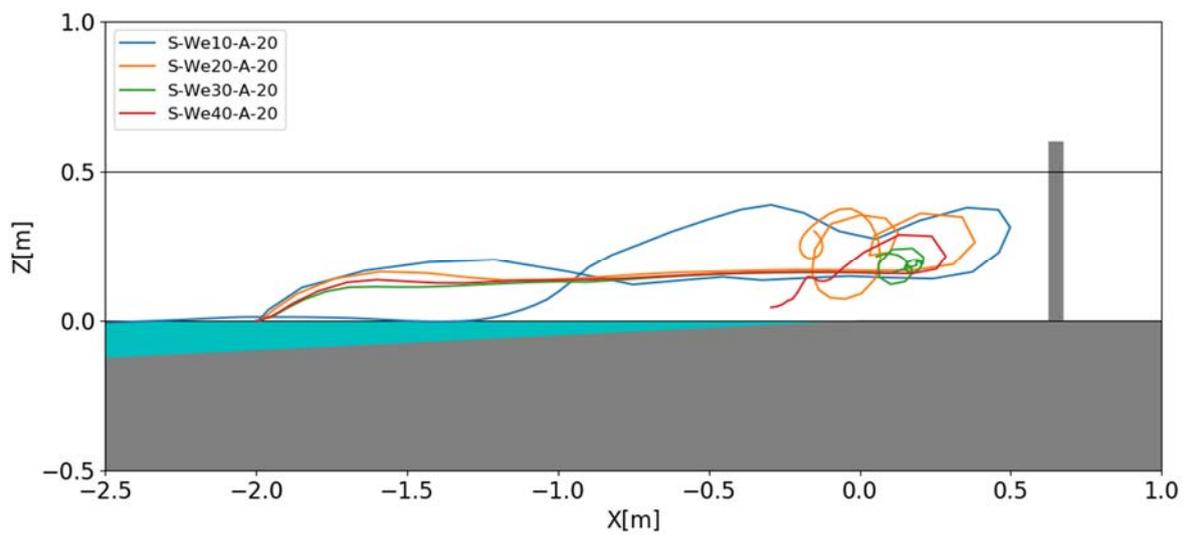
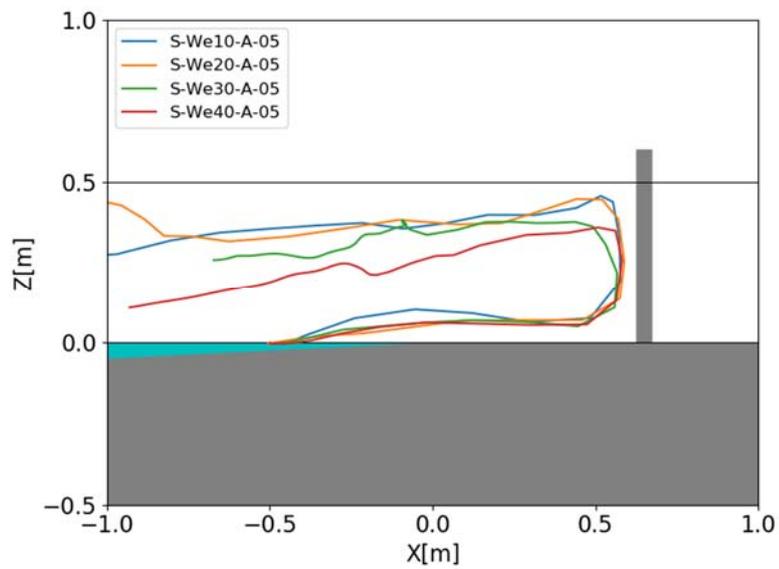


図- 8.7.10 漂流物の移動軌跡 (単純勾配, TypeA, 堤体位置 0.625m)

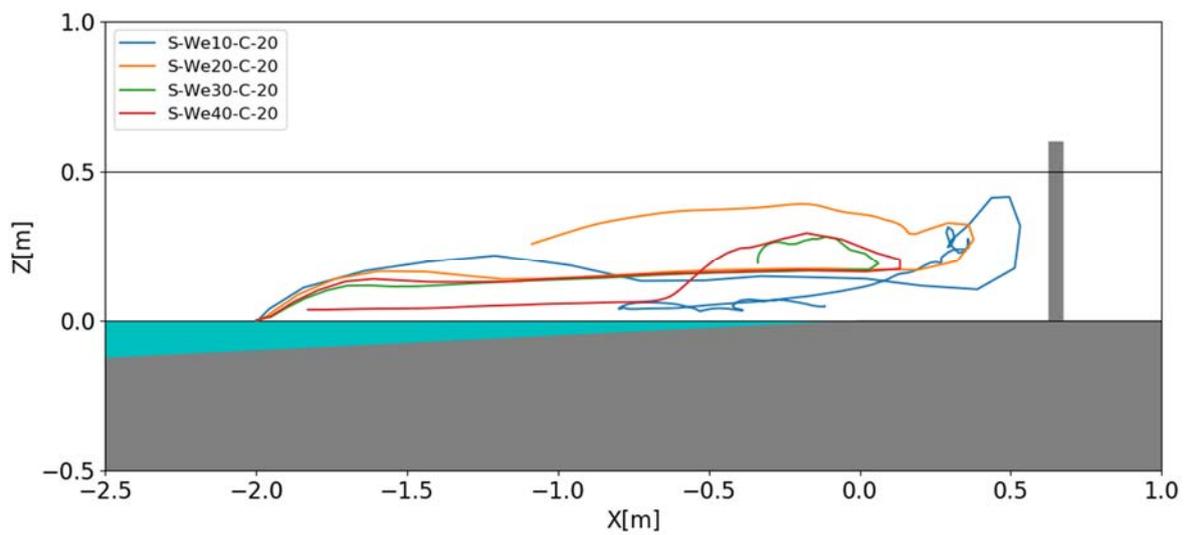
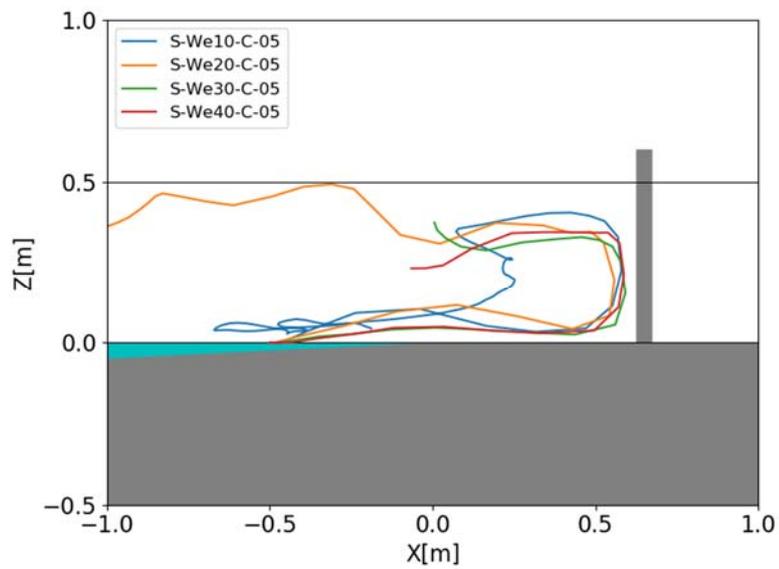
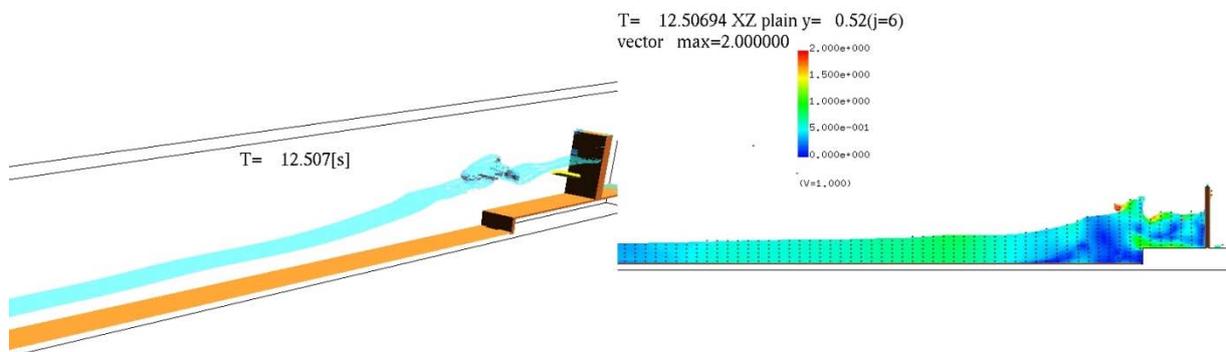
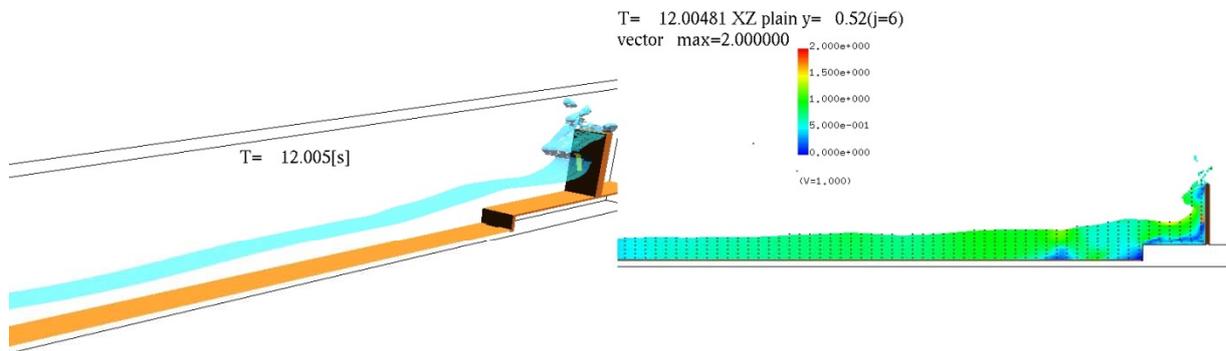
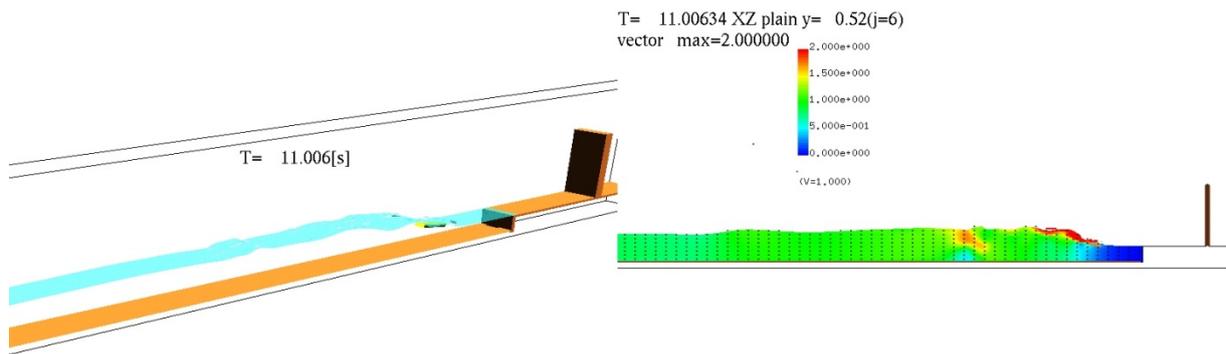
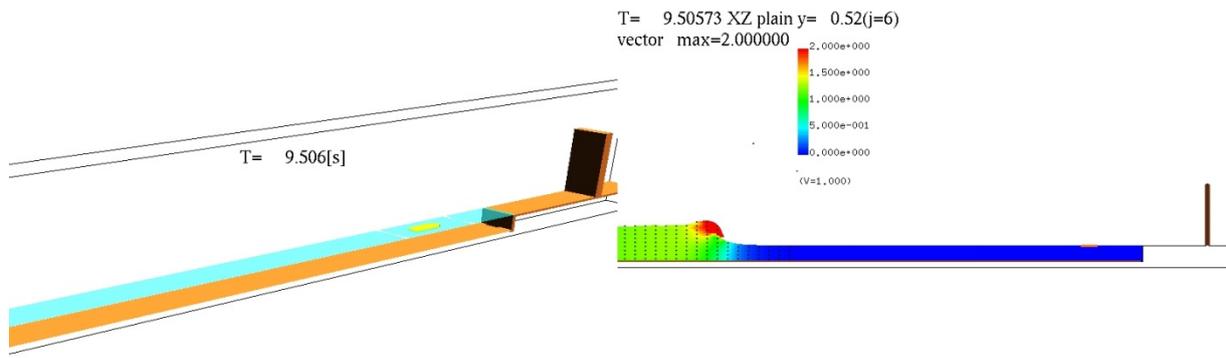


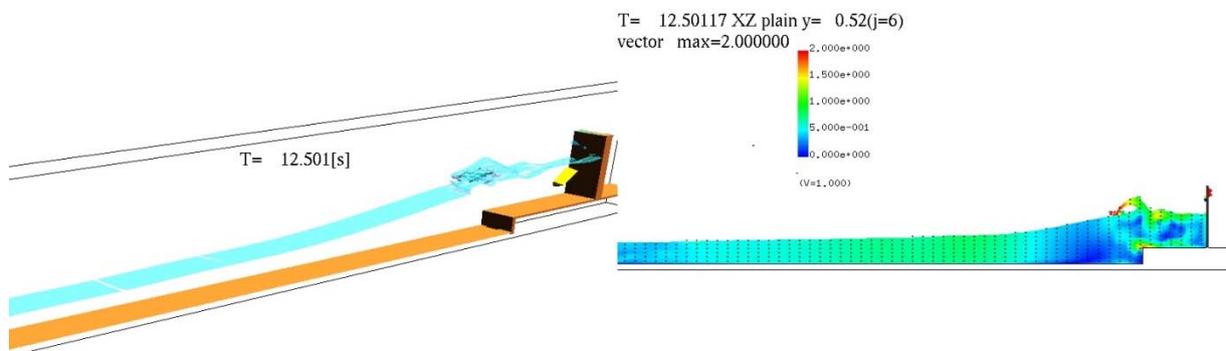
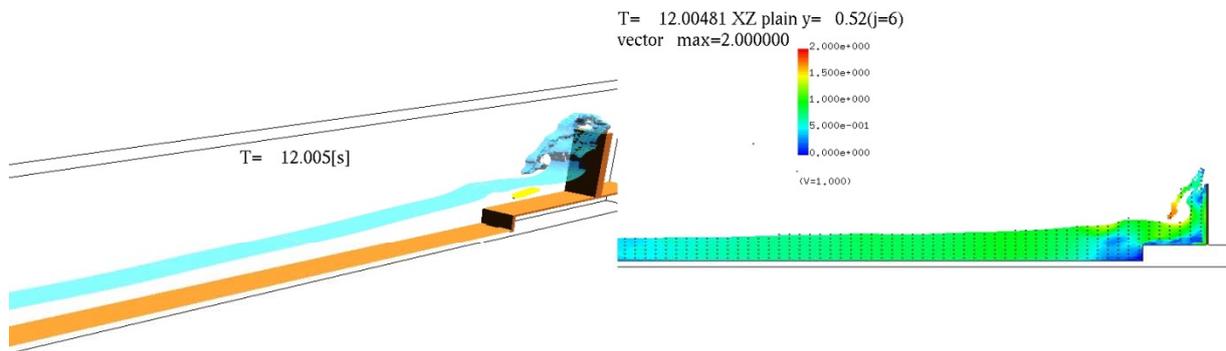
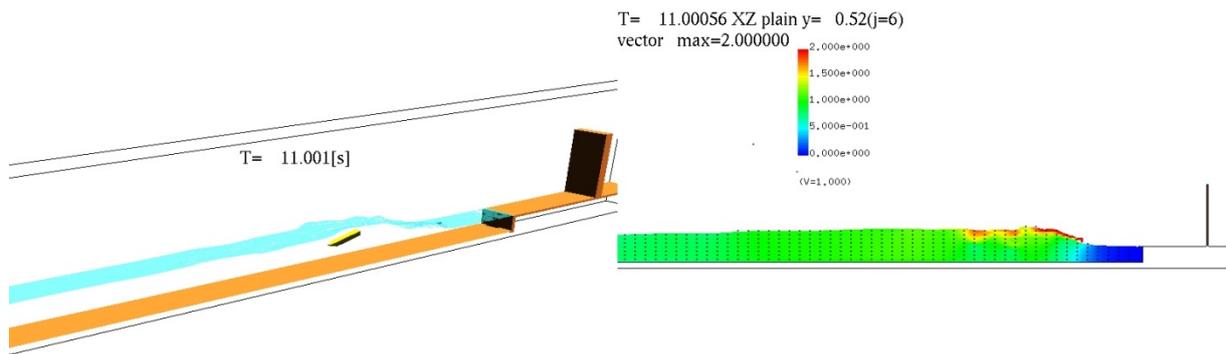
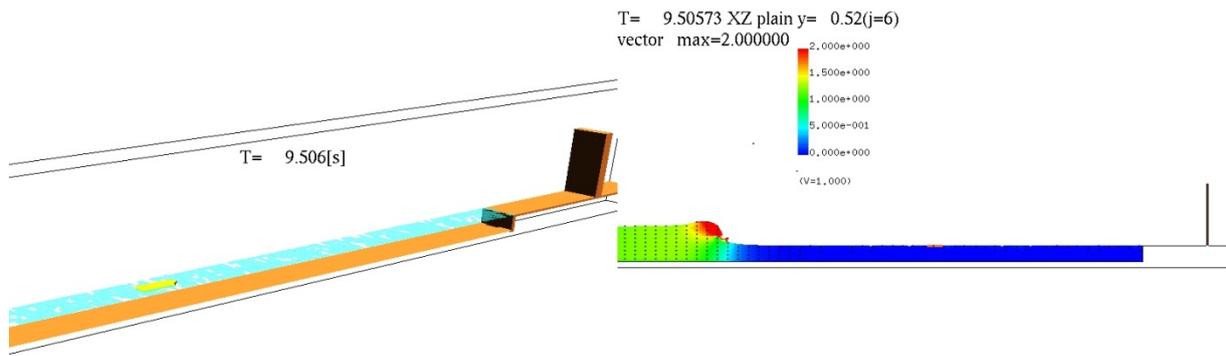
図- 8.7.11 漂流物の移動軌跡 (単純勾配, TypeC, 堤体位置 0.625m)

8.8. 漂流物の衝突状況

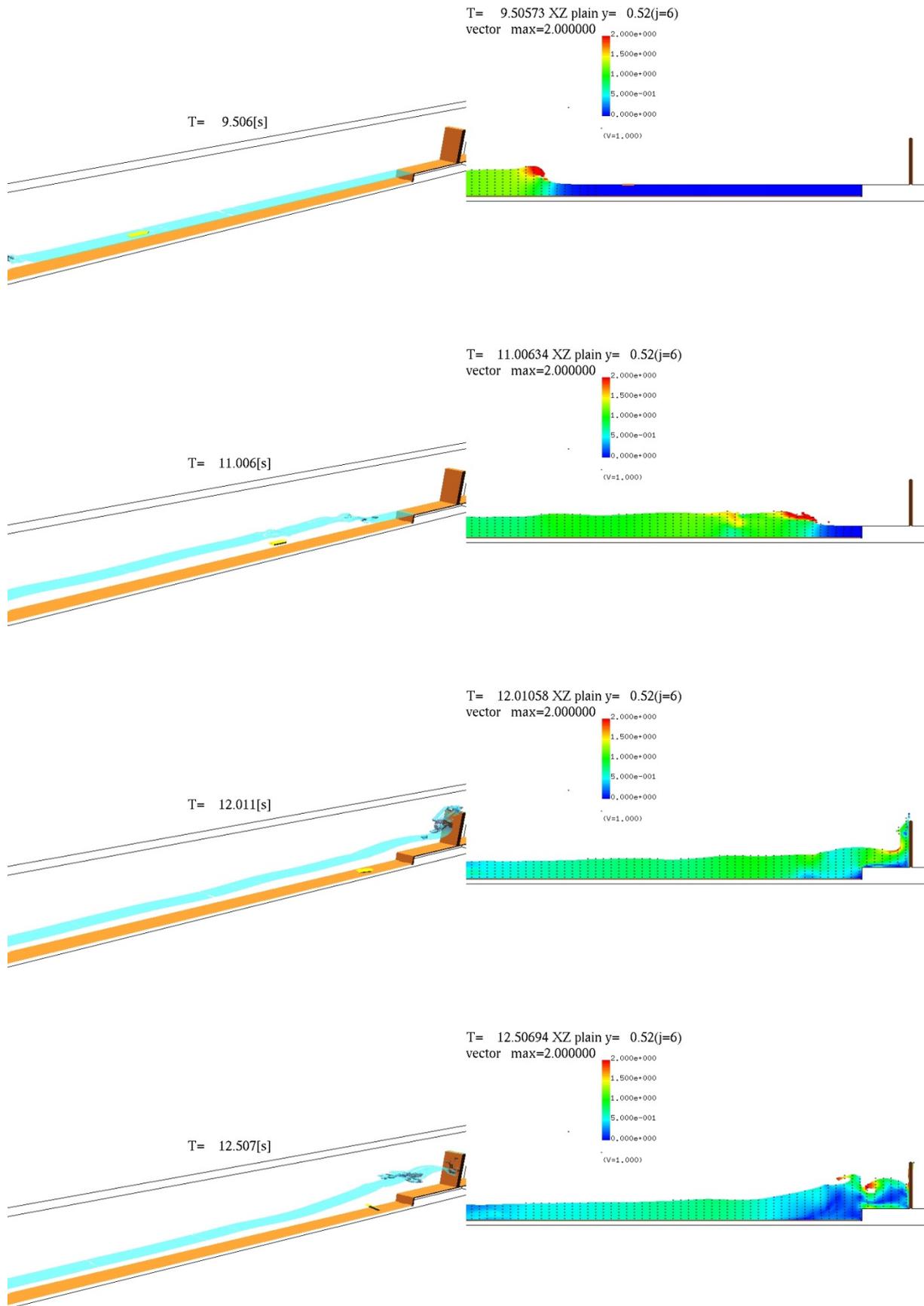
解析結果については可視化のため動画を作成した。図-8.8.1～図-8.8.80に、全解析ケースのこれらのスナップショットを示す。漂流物および水面を示した3次元鳥瞰図，鉛直断面流速分布をケースごとに順に示した。



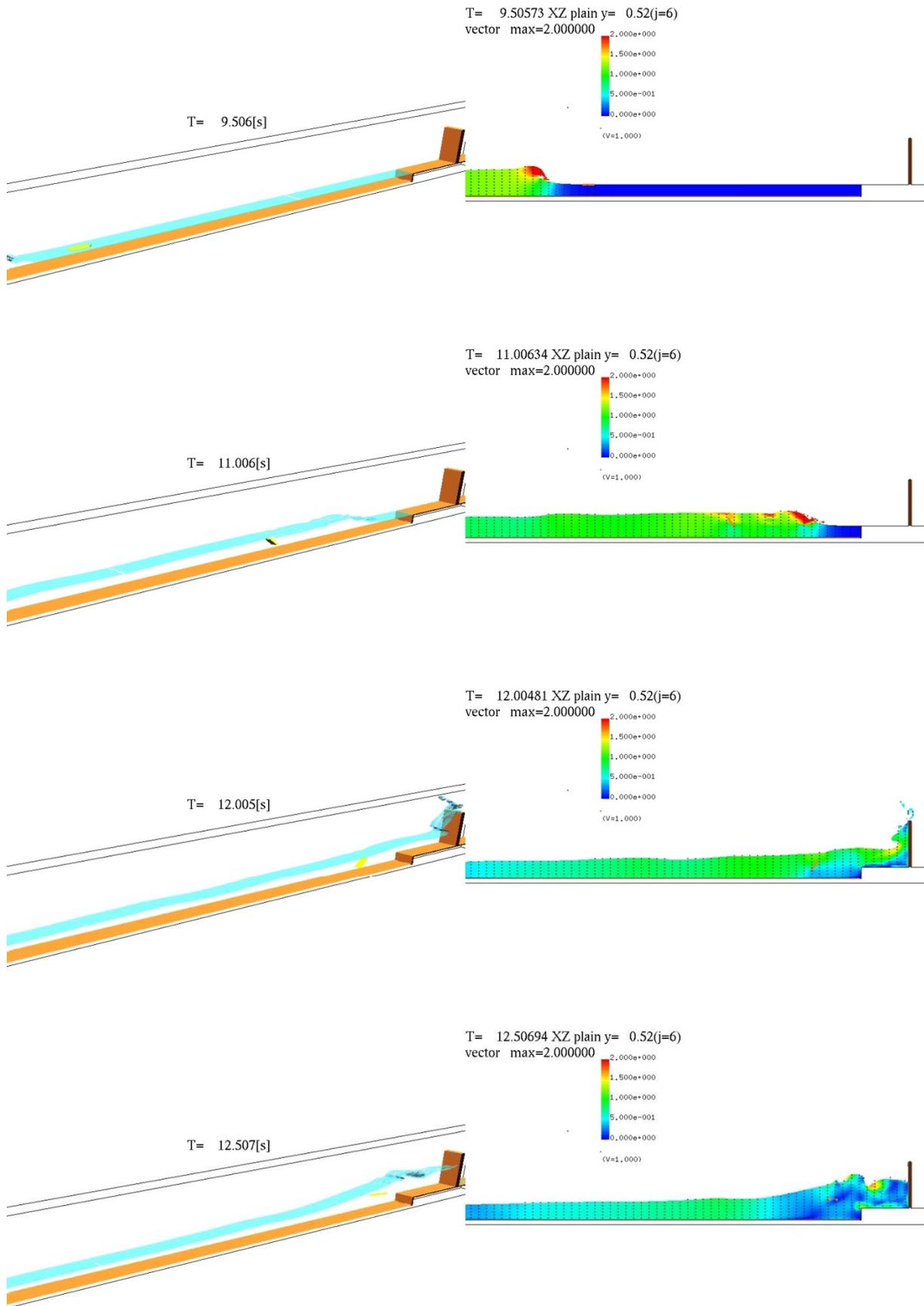
(a) 3次元鳥瞰図 (b) 鉛直断面流速分布
図- 8.8.1 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We10-A-05)



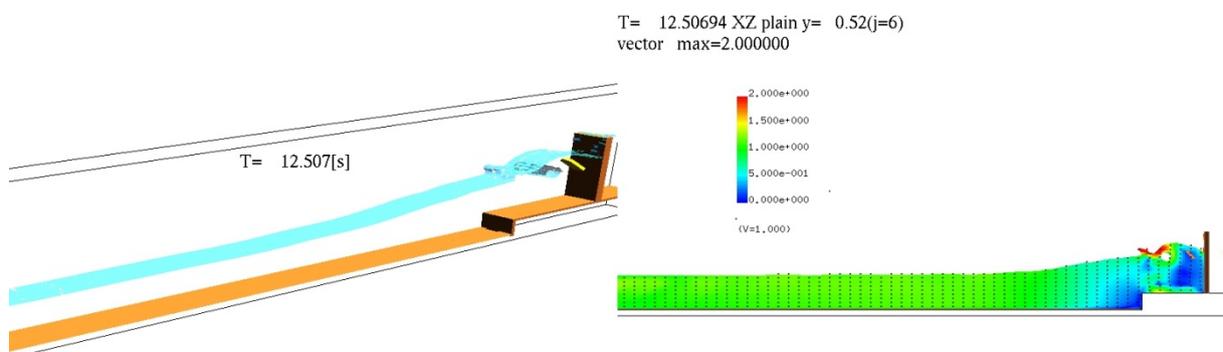
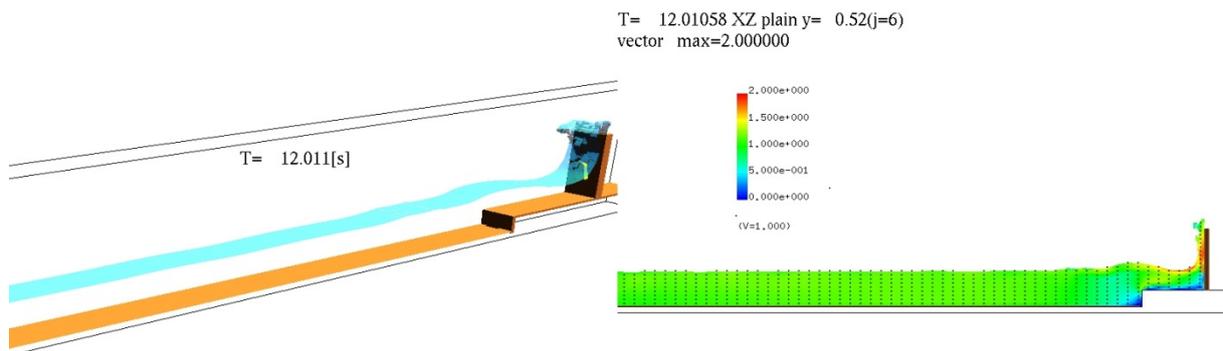
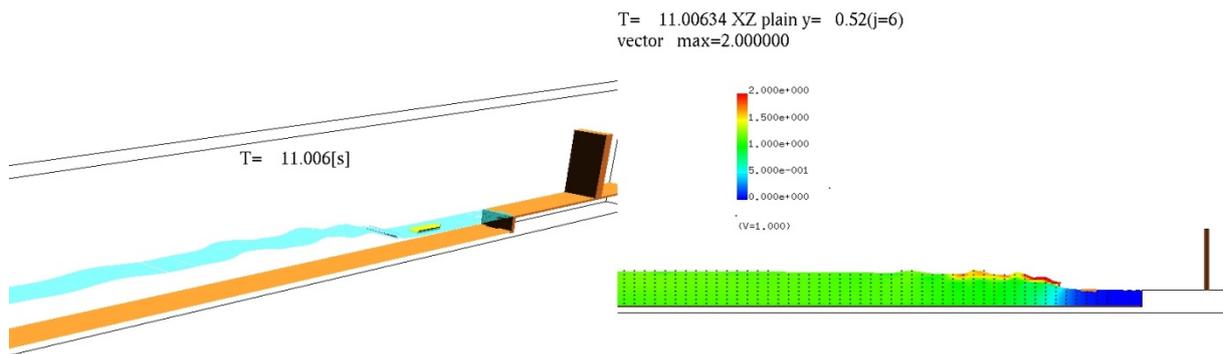
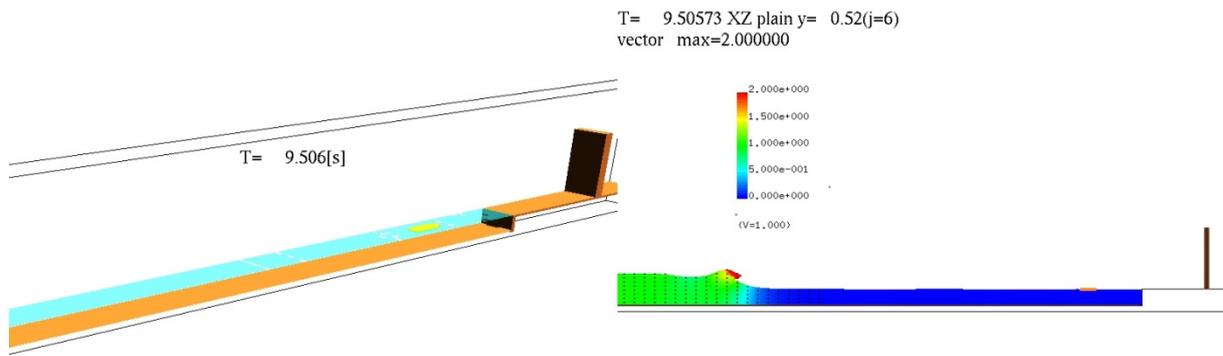
(a) 3次元鳥瞰図 (b) 鉛直断面流速分布
図- 8.8.2 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We10-A-20)



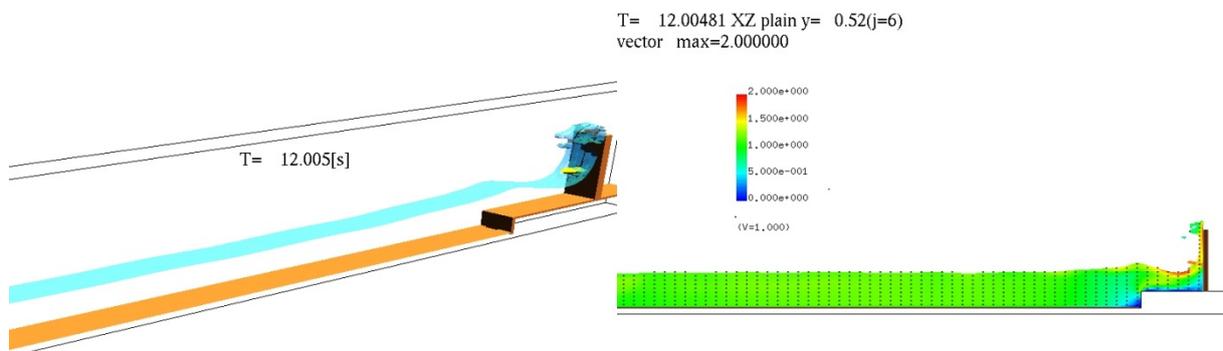
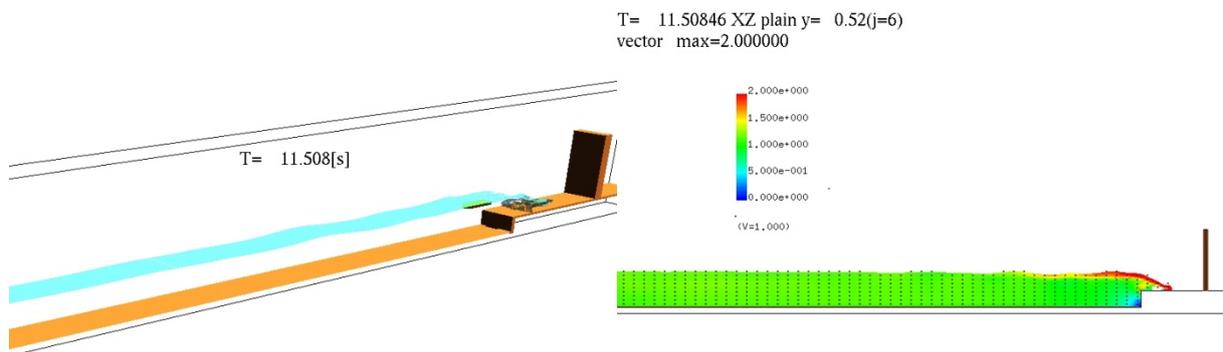
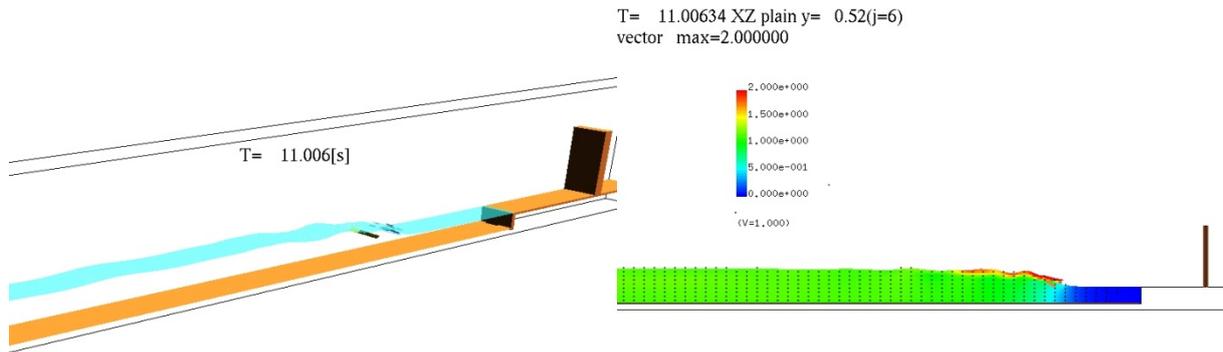
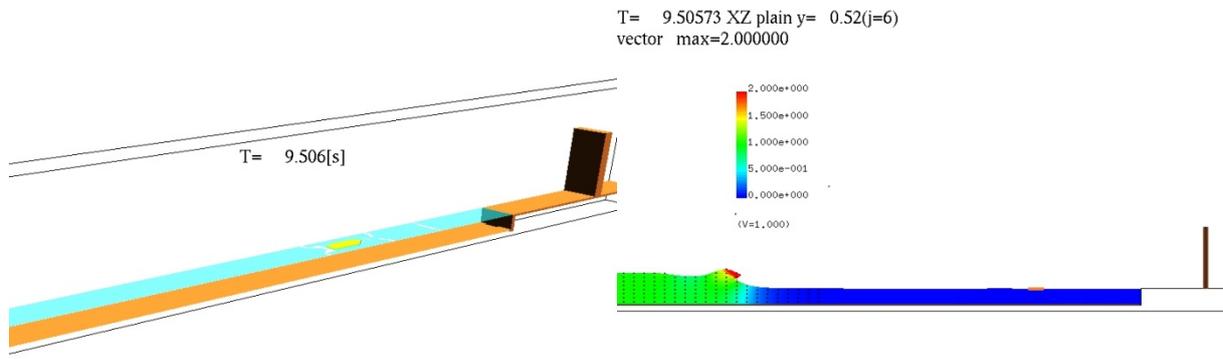
(a) 3次元鳥瞰図 (b) 鉛直断面流速分布
 図- 8.8.3 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We10-A-30)



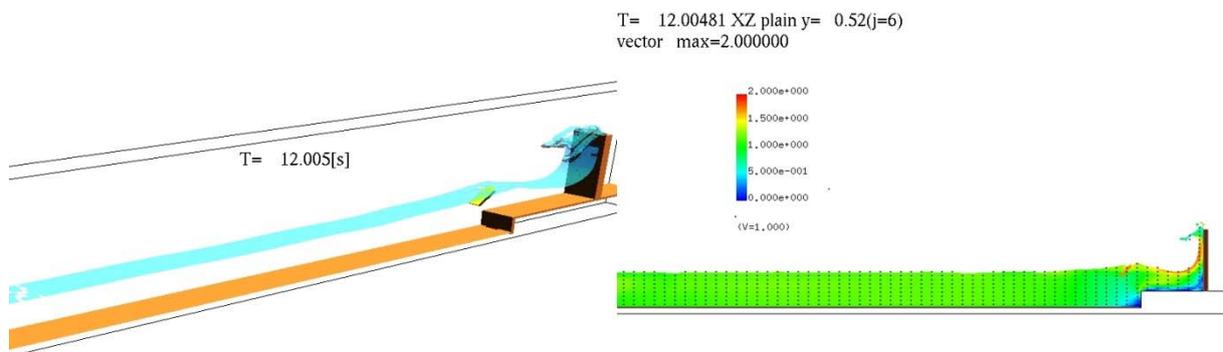
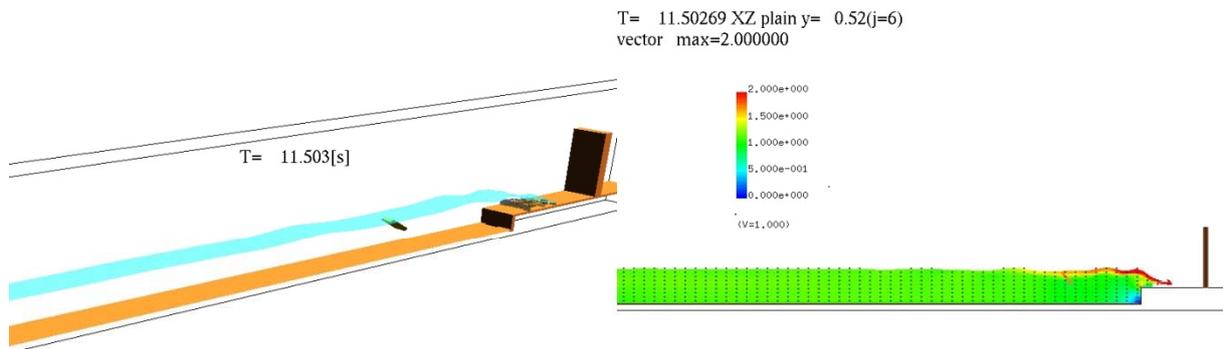
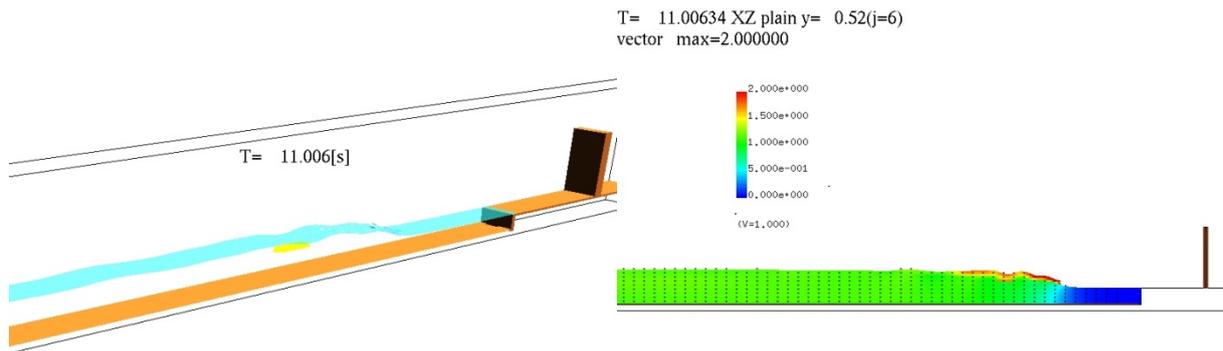
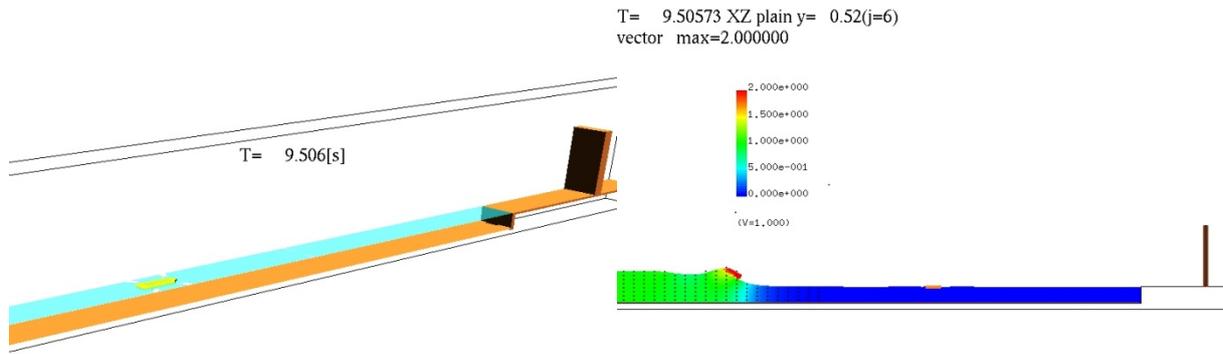
(a) 3次元鳥瞰図 (b) 鉛直断面流速分布
 図- 8.8.4 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We10-A-35)



(a) 3次元鳥瞰図 (b) 鉛直断面流速分布
図- 8.8.5 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We20-A-05)

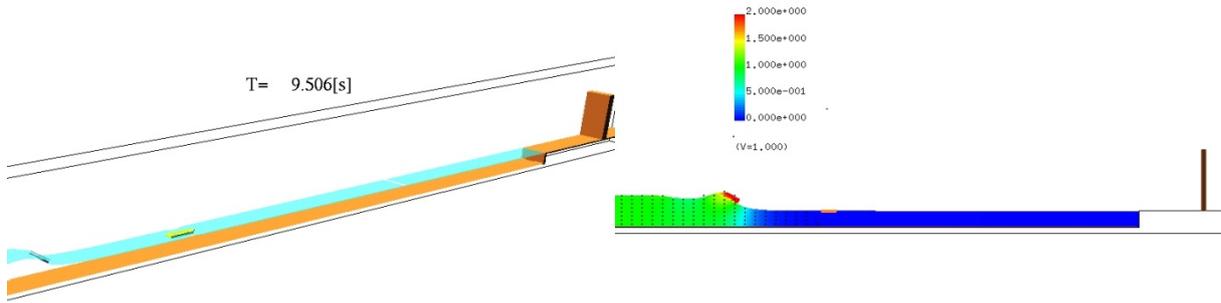


(a) 3次元鳥瞰図 (b) 鉛直断面流速分布
 図- 8.8.6 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We20-A-10)

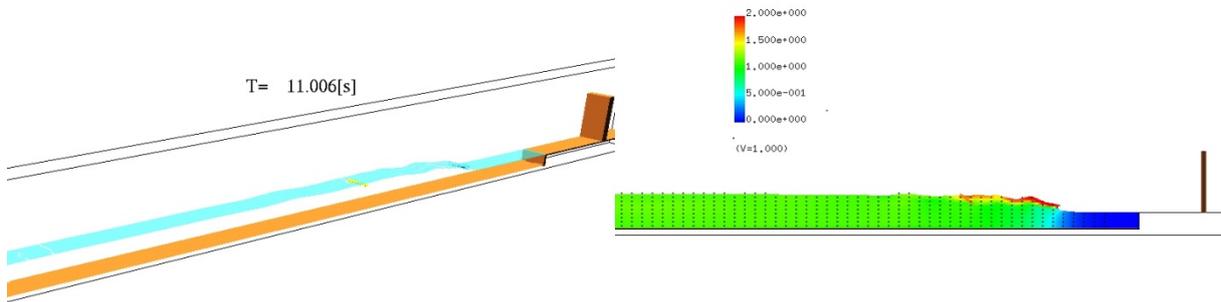


(a) 3次元鳥瞰図 (b) 鉛直断面流速分布
図- 8.8.7 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We20-A-20)

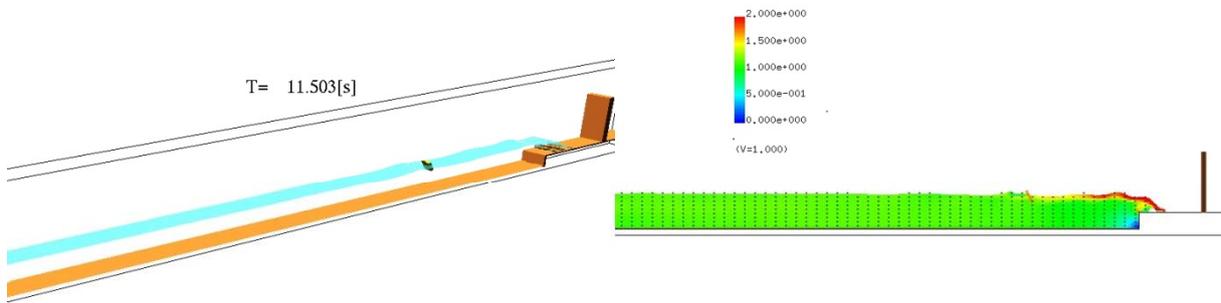
T= 9.50573 XZ plain y= 0.52(j=6)
vector max=2.000000



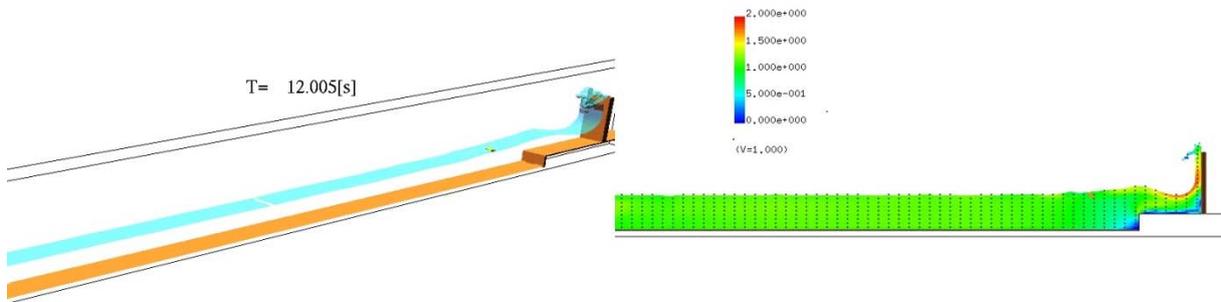
T= 11.00634 XZ plain y= 0.52(j=6)
vector max=2.000000



T= 11.50269 XZ plain y= 0.52(j=6)
vector max=2.000000

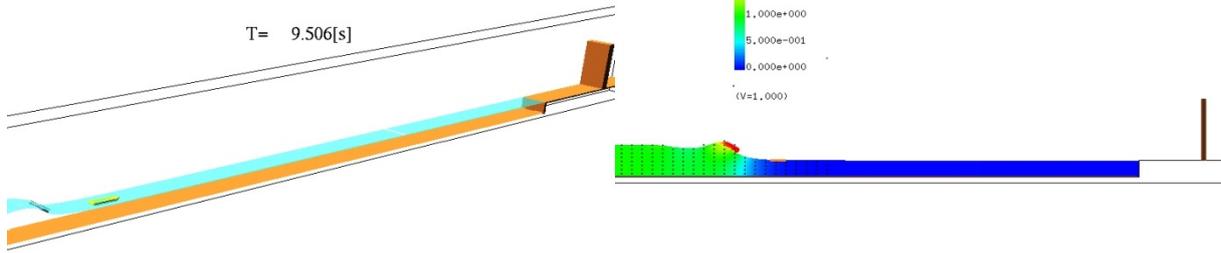


T= 12.00481 XZ plain y= 0.52(j=6)
vector max=2.000000

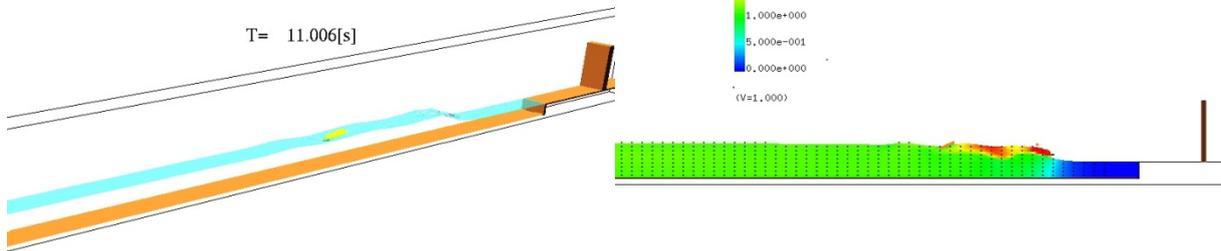


(a) 3次元鳥瞰図 (b) 鉛直断面流速分布
図- 8.8.8 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We20-A-30)

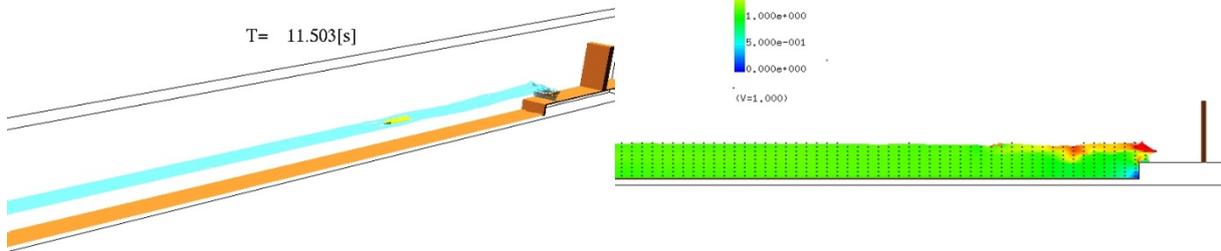
T= 9.50573 XZ plain y= 0.52(j=6)
vector max=2.000000



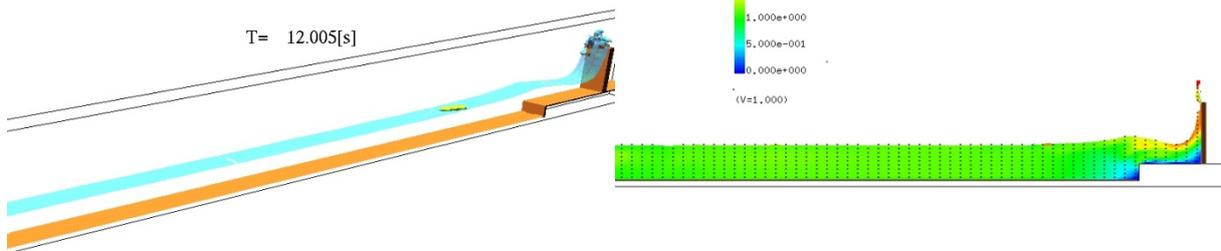
T= 11.00634 XZ plain y= 0.52(j=6)
vector max=2.000000



T= 11.50269 XZ plain y= 0.52(j=6)
vector max=2.000000



T= 12.00481 XZ plain y= 0.52(j=6)
vector max=2.000000



(a) 3次元鳥瞰図 (b) 鉛直断面流速分布
図- 8.8.9 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We20-A-35)