

7. 津波に伴う土砂移動に係る安全性評価

津波に伴う海底の土砂移動による取水口の閉塞によって、当該施設の安全機能が損なわれることがないか、検討を行なう。

7.1 評価対象の津波波源

前章の津波水位に係る解析結果で、敷地沿岸における遡上高が最大となるケース (JSCE01_High)、1～3号機取水口における水位下降量が最大となるケース (JSCE08_Low) を対象とする。図 7.1 に土砂移動解析の評価対象の津波波源を示す。

7.2 土砂移動解析手法及び条件

表 7.1 に土砂移動解析の計算条件、表 7.2 に土砂移動解析に関する主な解析パラメータを示す。土砂移動解析手法には、掃流砂層と浮遊砂層の交換砂量を考慮した高橋他 (1999) の土砂移動モデルを採用する。また、土砂移動解析では、表 7.1 の A 領域～F 領域までの地形モデルによる津波の流水計算と同時に、F 領域において流砂計算を行なう。図 7.2 に地形モデル及び土砂移動解析を考慮する解析領域、図 7.3 に 初期砂層厚の設定状況を示す。

ただし、高橋他 (1999) の土砂移動モデルは、海域を対象としたものであるため、このモデルを用いて陸上遡上域への流砂計算を行なうことは、このモデルの適用範囲外と考える。そこで、本クロスチェック解析では、流砂計算の範囲を海域のみとする。

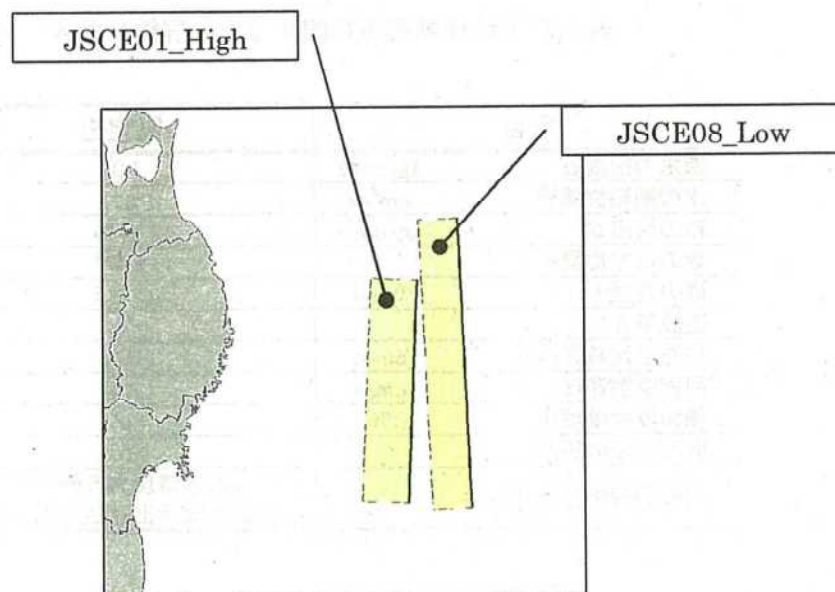


図 7.1 土砂移動解析の評価対象の津波波源

表 7.1 土砂移動解析の計算条件

基礎方程式	流水	非線形長波式					
	流砂	高橋他(1999)の掃流砂層と浮遊砂層間の交換砂量を考慮した分離モデル					
各領域の解析条件	津波水位解析領域					土砂移動解析領域	
		A領域	B領域	C領域	D領域	E領域	F領域
	空間格子間隔(m)	1350	450	150	50	17	5.6
	時間格子間隔(s)	2.43	0.81	0.27	0.09	0.03	0.01
	地形モデル	海域のみ			海域および陸上		
	境界条件	陸側	完全反射			小谷ら(1998)の遡上境界	
沖側		自由透過	外側の格子領域と、水位・流量を接続				
初期条件	津波初期水位は、Mansinha and Smylie(1971)の方法を用いて設定。						
海底摩擦係数	Manningの粗度係数 $n=0.025m^{-1/3}s$ (後藤・佐藤(1993)、土木学会(2002))						
水平渦動粘性係数	考慮しない						
流水計算の打ち切り水深	$10^{-5}m$						
現象再現時間	地震発生後4時間						

表 7.2 土砂移動解析に関する主な解析パラメータ

項目	設定値
海水の密度 ρ (g/cm ³)	1.03
水の動粘性係数 (cm ² /s)	0.01
砂の密度 σ (g/cm ³)	2.716
砂の水中比重 s	1.637
砂の粒径 d (mm)	0.215
空隙率 λ	0.4
砂粒子沈降速度 w (cm/s)	2.76
限界摩擦速度 u_c (cm/s)	1.49
飽和浮遊砂濃度 (%)	1.0
底面勾配の係数	2.0
砂移動解析の境界条件	浮遊砂濃度の勾配をゼロ 掃流砂は流出及び流入を考慮

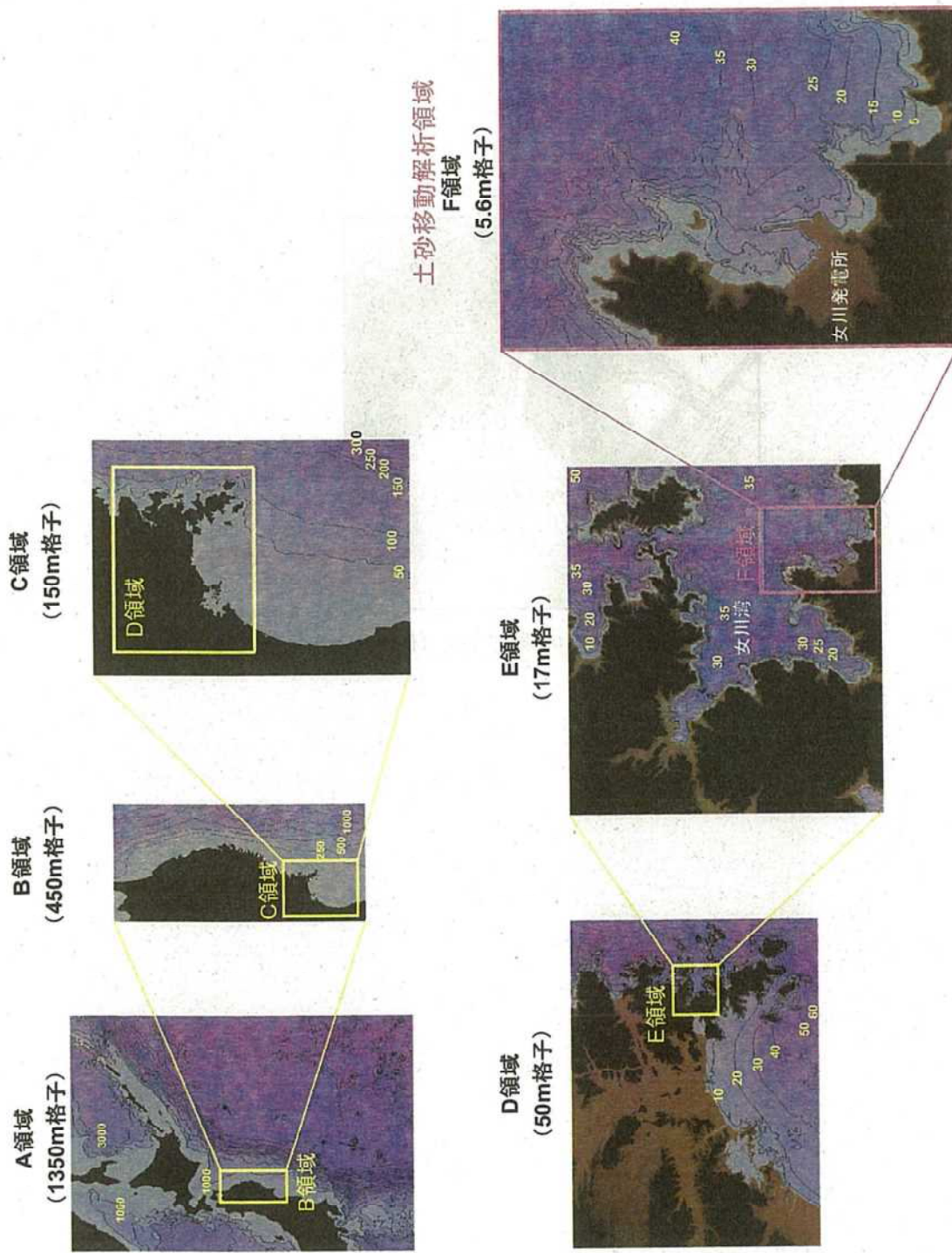


図 7.2 地形モデル及び土砂移動解析を考慮する解析領域

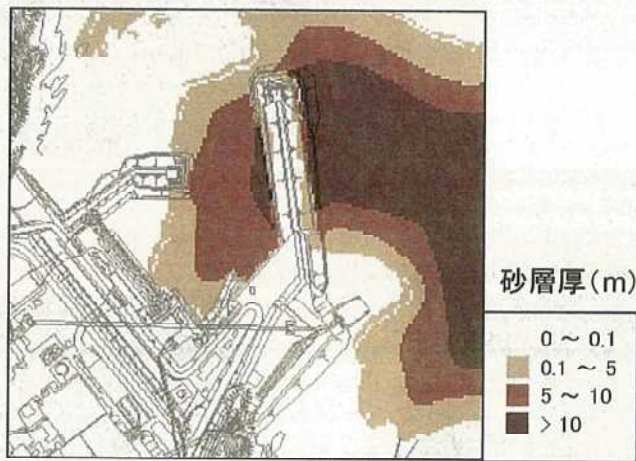


図 7.3 初期砂層厚の設定状況 (保安院提供データ)

7.3 解析結果及び安全性評価結果

図 7.4 に取水口断面図、表 7.3 に取水口前面の堆砂高及び安全性判断基準値を示す。JNES の評価では、取水口前面の堆積高は、第 1 号機で約 23cm、第 2 号機で約 8cm、第 3 号機で約 1cm であり、取水口の開口部高さ（第 1 号機：270cm、第 2 号機：300cm、第 3 号機：300cm）に対して十分な余裕があることから、安全性判断基準を満足する結果となった。なお、表 7.3 で示した解析結果は、代表地点 1 地点だけでなく、隣接地点（1 メッシュ隣のメッシュ）も含めて解析値を抽出した。これは、土砂移動解析では隣接メッシュで解析値が倍程度異なる場合があるためである。

図 7.5 及び図 7.6 に、最大水位上昇ケース（JSCE01_High）の最大堆積量分布図及び 4 時間後の地形変化量分布を、図 7.7 (1) ～ (3) に各取水口前面の代表地点での各種時系列の結果を示す。図 7.8、図 7.9、図 7.10 (1) ～ (3) に最大水位下降ケース（JSCE08_Low）の結果を示す。

最大水位上昇ケースでは、取水口前面での最大堆砂高が、第 1 号機で約 23cm、第 2 号機で約 1cm、第 3 号機で 1cm 未満であり、地形変化は地震発生後 120 分程度で収束する結果となった。最大水位下降ケースでは、第 1 号機で約 12cm、第 2 号機で約 8cm、第 3 号機で約 1cm であり、地形変化は地震発生後 120 分程度で収束する結果となった。

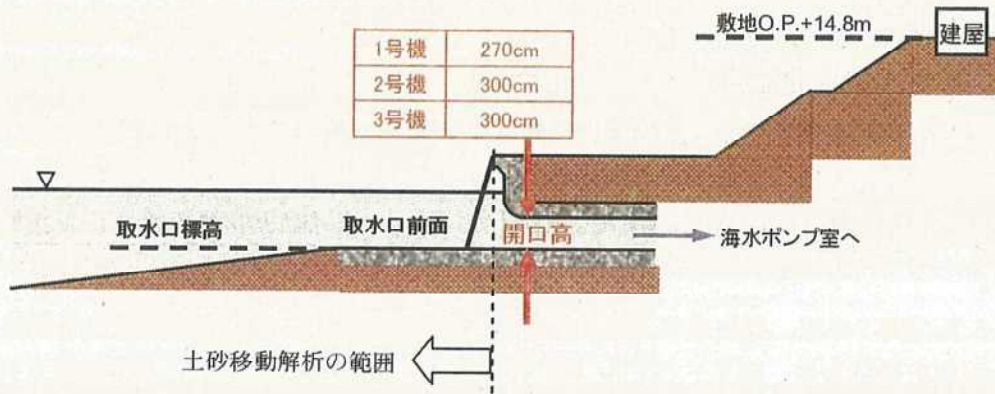
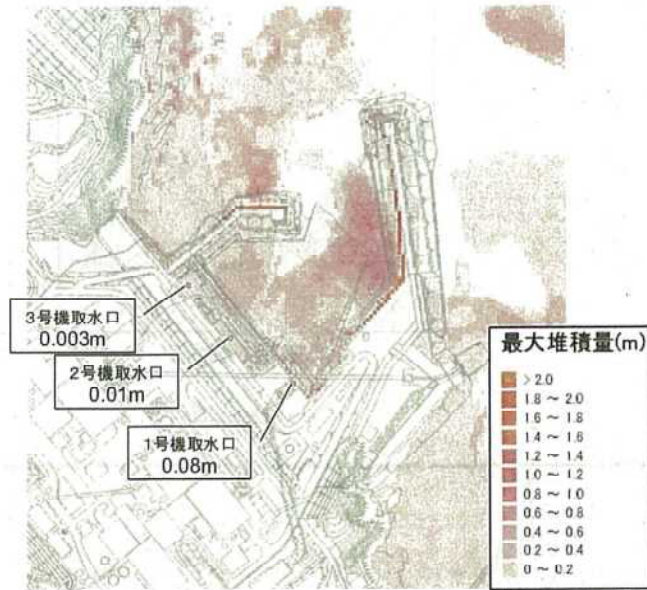


図 7.4 取水口断面図

表 7.3 取水口前面の堆砂高及び安全性判断基準値

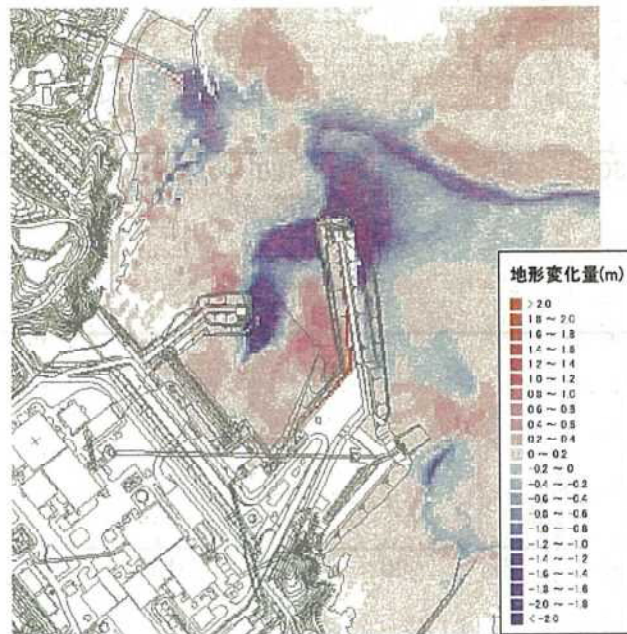
波源モデル	第1号機	第2号機	第3号機
JSCE01_High	3~23cm	1cm	0cm
JSCE08_Low	3~12cm	2~8cm	1cm
安全性判断基準値 (取水口の開口高)	270cm	300cm	300cm

※解析結果は、代表地点の隣接地点（1メッシュ隣のメッシュ）も含めて解析値を抽出



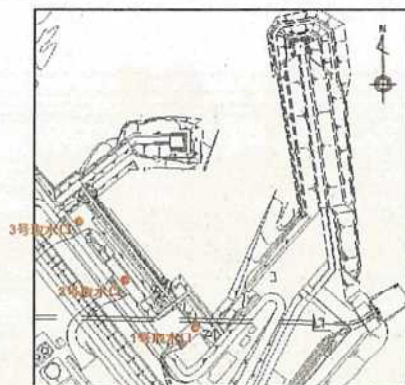
JNES

図 7.5 最大堆積分布 (最大水位上昇ケース : JSCE01_High)



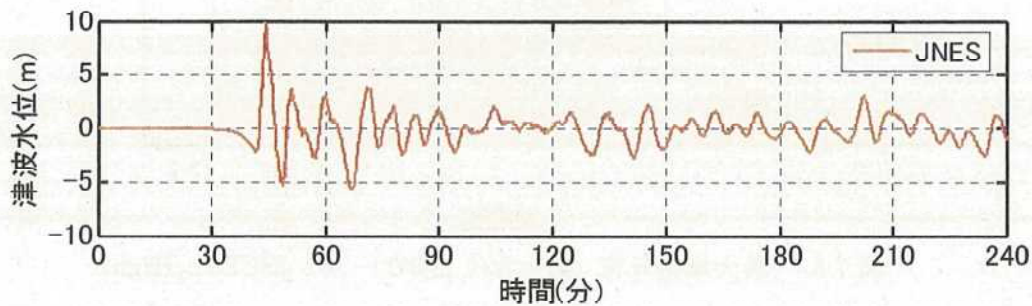
JNES

図 7.6 4 時間後の地形変化量分布による比較 (最大水位上昇ケース : JSCE01_High)

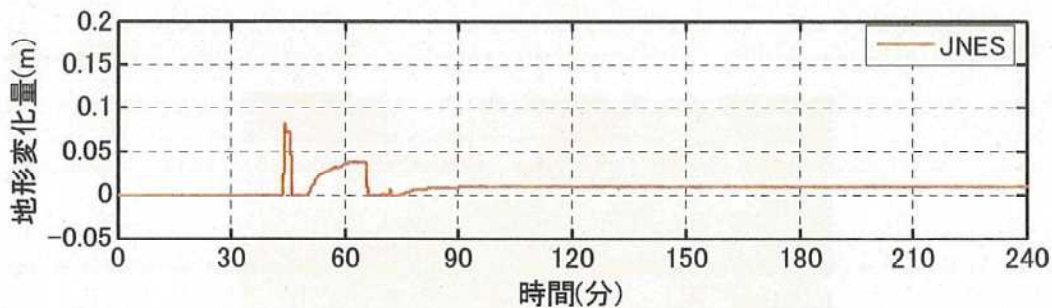


代表地点位置図

1号機取水口



1号機取水口



1号機取水口

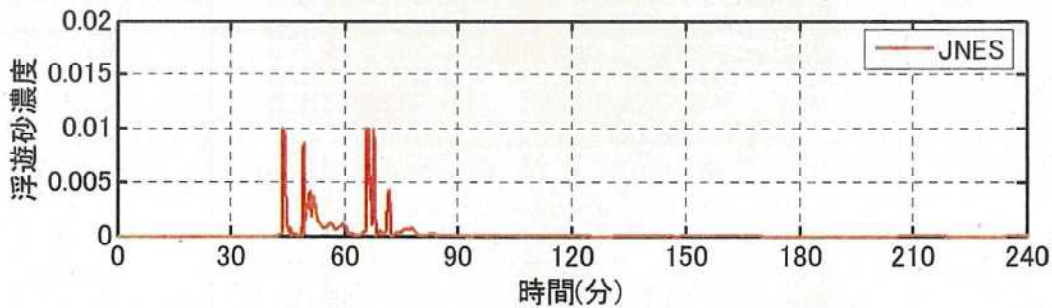
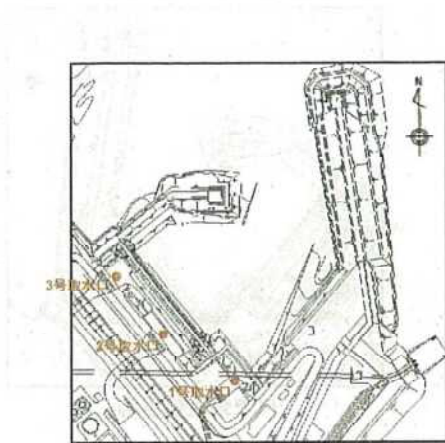


図 7.7 (1) 取水口前面の各種時系列による比較
(最大水位上昇ケース：JSCE01_High)、第1号機取水口



代表地点位置図

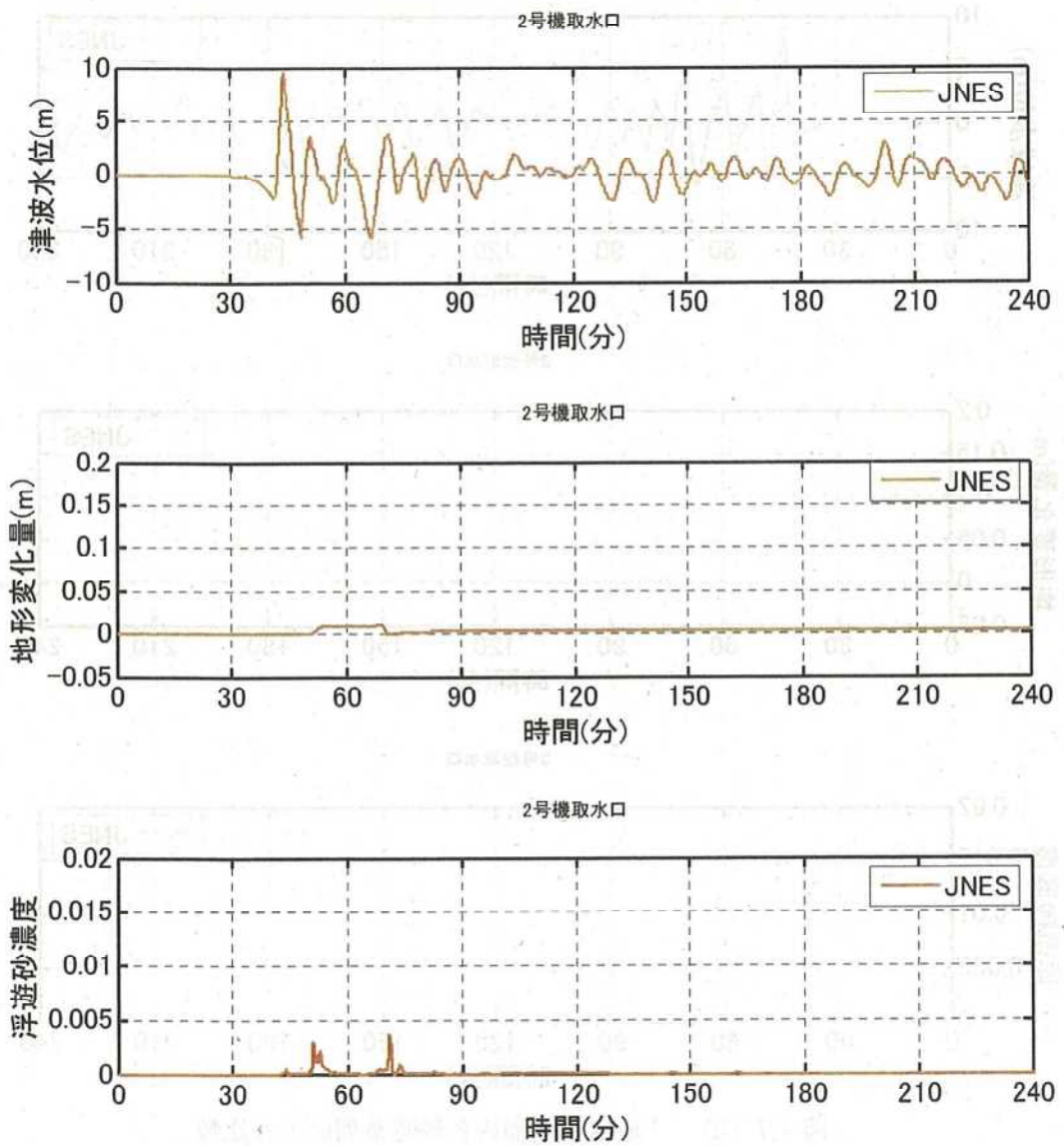
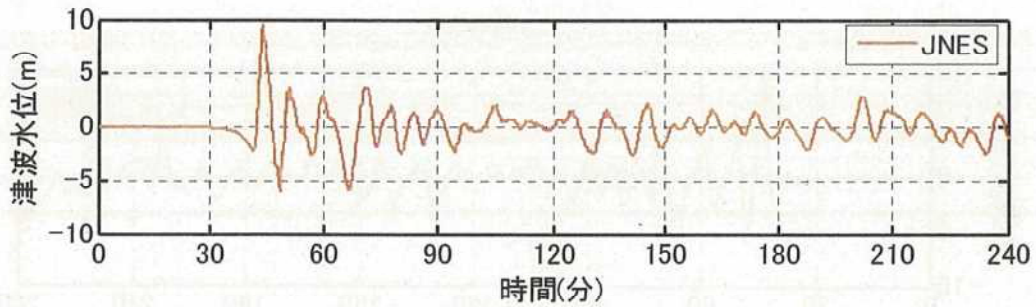


図 7.7 (2) 取水口前面の各種時系列による比較
(最大水位上昇ケース：JSCE01_High)、第2号機取水口

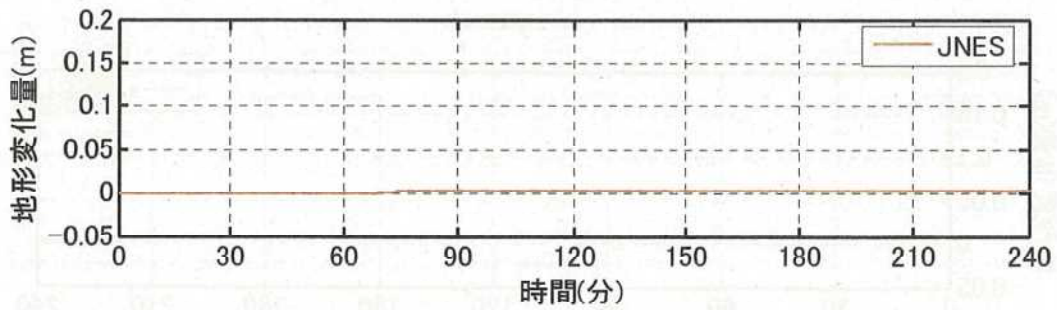


代表地点位置図

3号機取水口



3号機取水口



3号機取水口

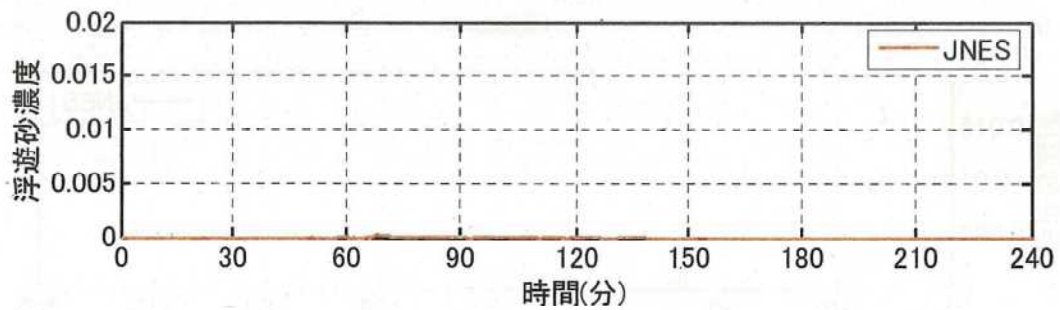
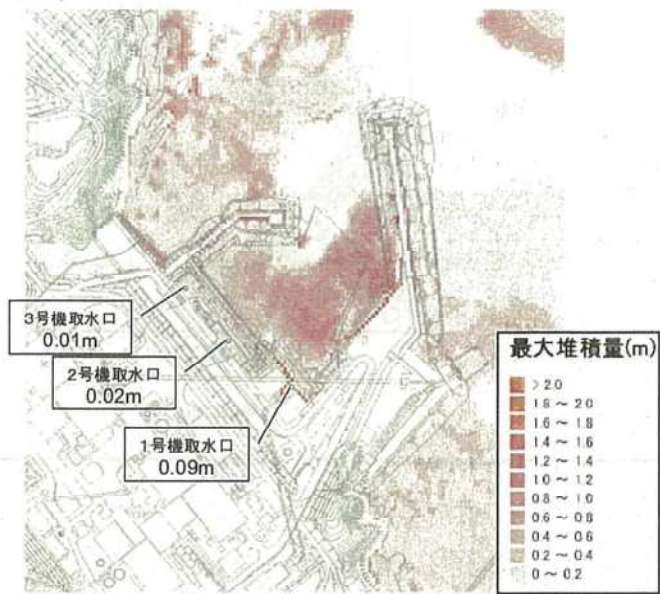
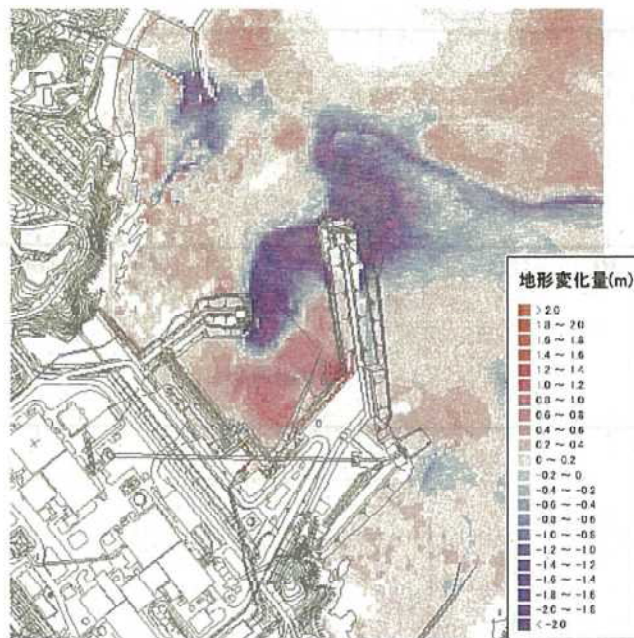


図 7.7 (3) 取水口前面の各種時系列による比較
(最大水位上昇ケース : JSCE01_High)、第 3 号機取水口



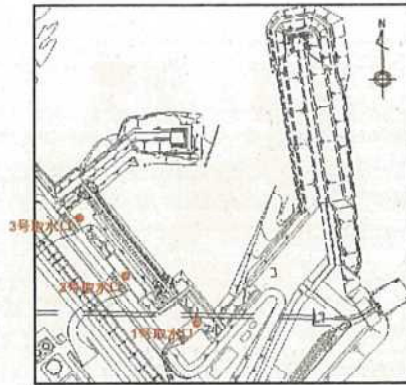
JNES

図 7.8 最大堆積分布 (最大水位下降ケース : JSCE08_Low)



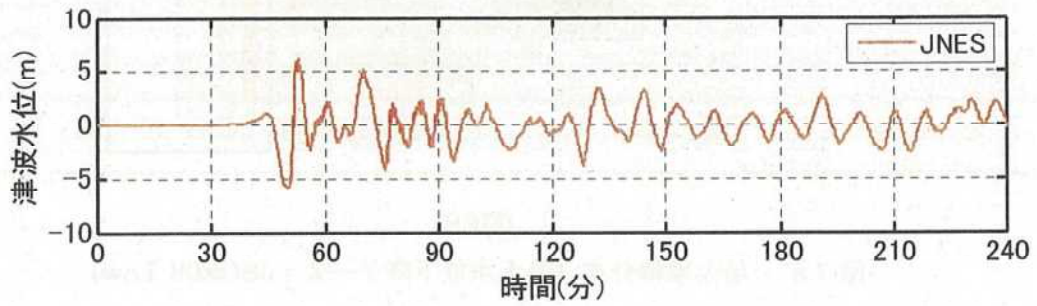
JNES

図 7.9 4時間後の地形変化量分布による比較 (最大水位下降ケース : JSCE08_Low)

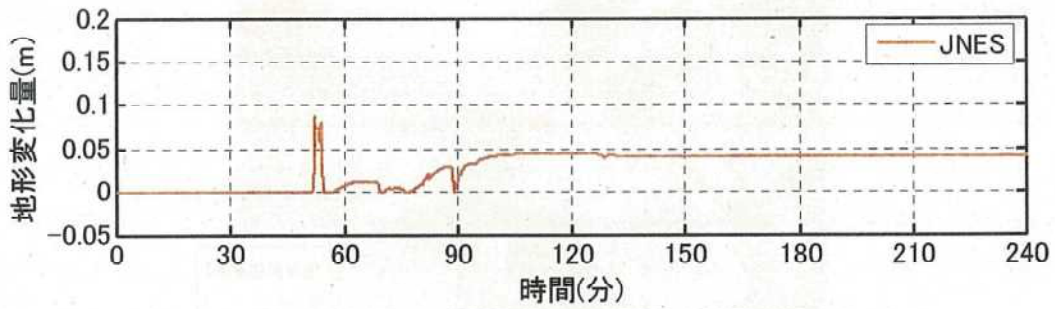


代表地点位置図

1号機取水口



1号機取水口



1号機取水口

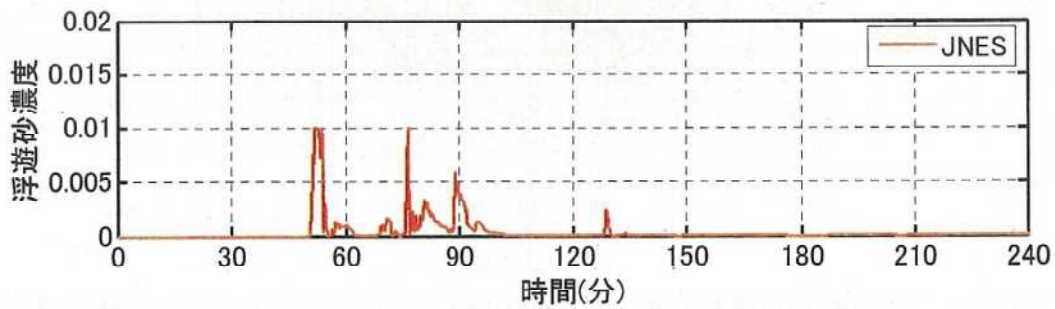
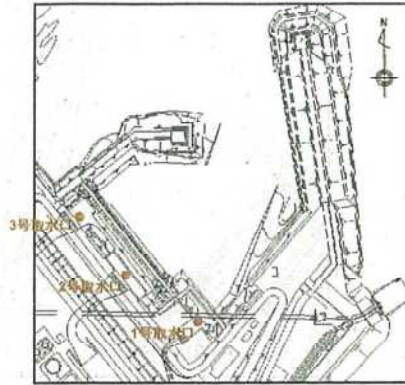
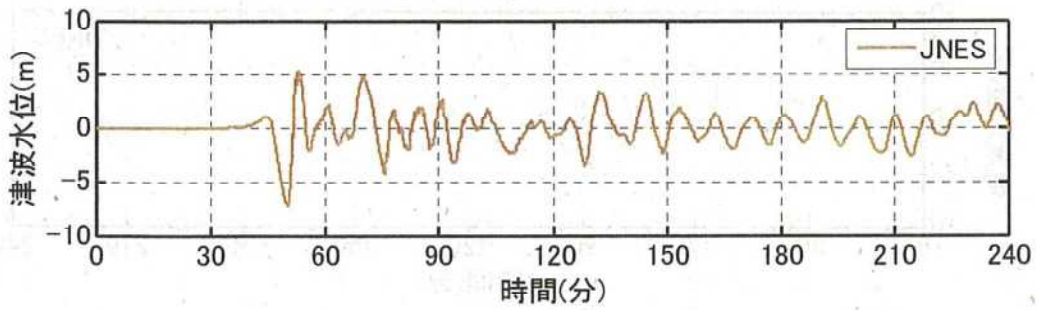


図 7.10 (1) 取水口前面の各種時系列による比較
(最大水位下降ケース: JSCE08_Low)、第 1 号機取水口

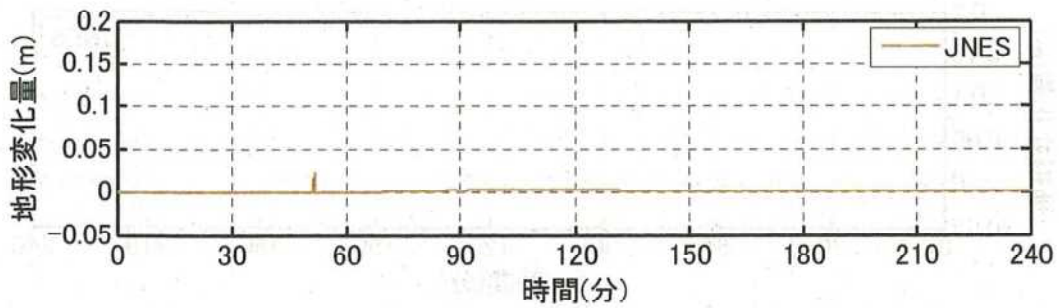


代表地点位置図

2号機取水口



2号機取水口



2号機取水口

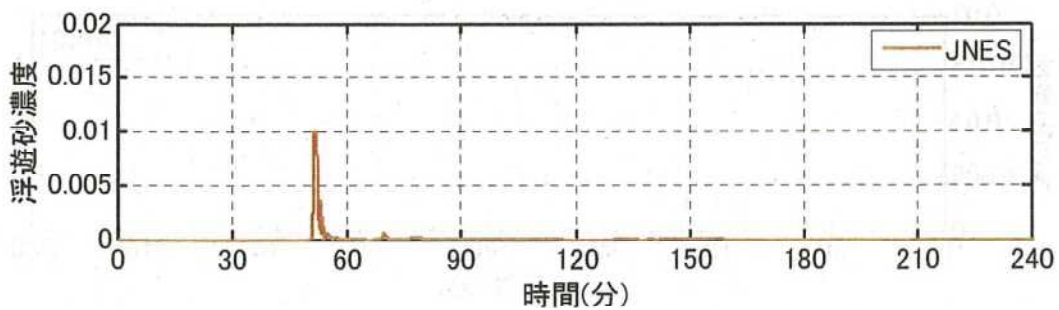
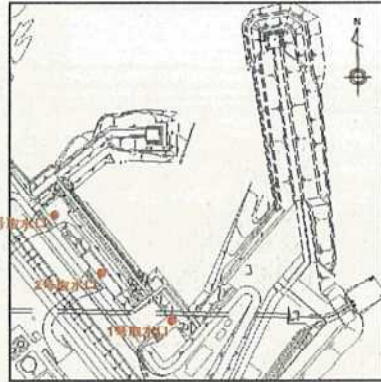
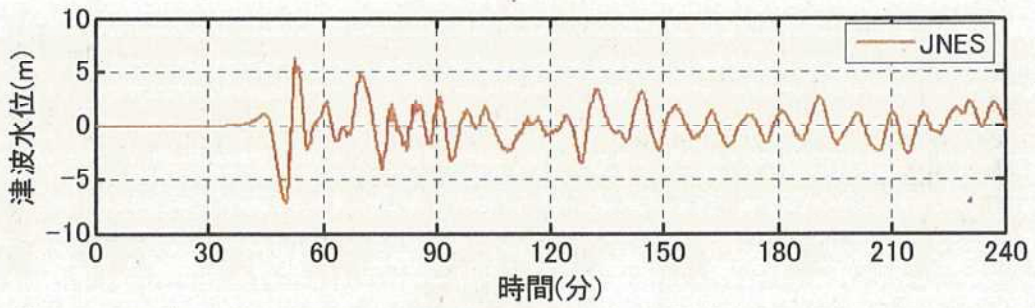


図 7.10 (2) 取水口前面の各種時系列による比較
(最大水位下降ケース：JSCE08_Low)、第2号機取水口

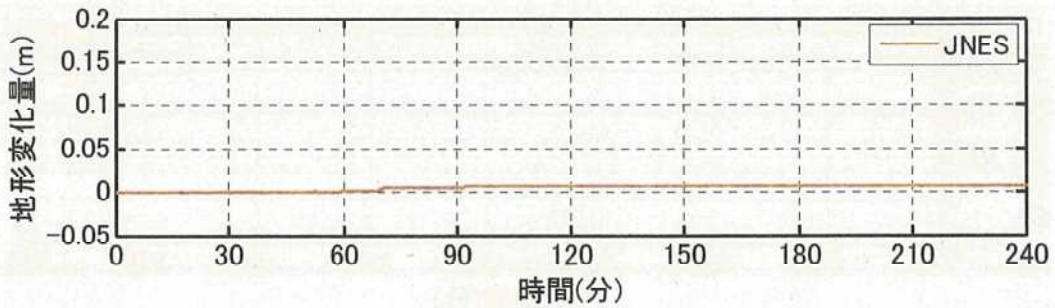


代表地点位置図

3号機取水口



3号機取水口



3号機取水口

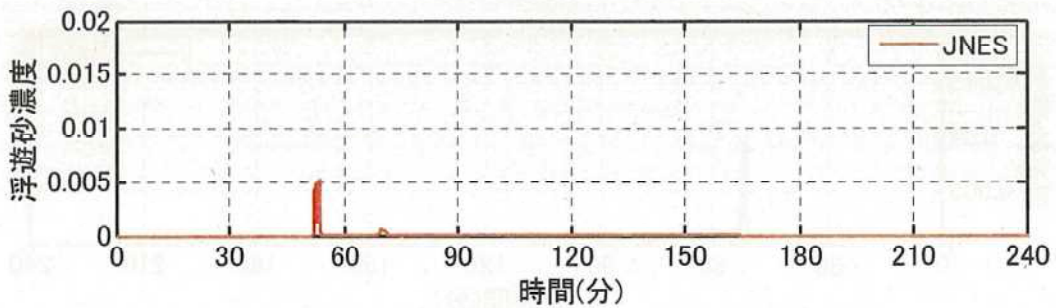


図 7.10 (3) 取水口前面の各種時系列による比較
(最大水位下降ケース：JSCE08_Low)、第3号機取水口

7.4 JNES の解析結果及び事業者の解析結果との比較

表 7.4 に JNES と事業者の計算条件、表 7.5 に主な解析パラメータを示す。図 7.11 に JNES と事業者の地形モデル及び土砂移動解析を考慮する解析領域を示す。

図 7.12～図 7.15 に JNES と事業者の結果を合わせて示す。図 7.12 に最大水位上昇ケース (JSCE01_High) の最大堆積量分布図及び 4 時間後の地形変化量分布、図 7.13 に最大水位下降ケース (JSCE08_Low) の結果を示す。港内における最大堆積量分布及び 4 時間後の地形変化量分布は、全体的にはほぼ同様の堆積/侵食傾向を示した。局所的には、防波堤に沿う箇所の堆積量において、JNES の結果が事業者の結果より大きくなっている。

図 7.14 及び図 7.15 に、各取水口前面の代表地点での各種時系列の結果を示し、同図中には事業者の結果を合わせて示す。表 7.6 に、各取水口前面での最大堆砂高について、JNES の結果と事業者の結果を示す。なお、表 7.6 の JNES の解析結果は、図 7.14 及び 7.15 に示した代表地点だけでなく、隣接地点 (1 メッシュ隣のメッシュ) も含めて解析値を抽出した。これは、JNES と事業者の地形モデルは、メッシュの中心位置が半メッシュ程度異なる場合があること、また、土砂移動解析では隣接メッシュで解析値が倍程度異なる場合があるためである。

事業者の評価結果では、堆積高が第 1 号機で約 5cm、第 2 号機で約 14cm、第 3 号機で約 11cm である。JNES の評価結果 (隣接地点も考慮した評価結果) と比較すると、第 1 号機では、事業者結果は JNES 解析結果と同程度であるが、第 2 号機及び第 3 号機では、事業者の結果が JNES の倍程度みられる。以下に各号機の比較結果を示す。

第 1 号機では、事業者の解析値は、JNES の解析結果とほぼ同程度となった。ただし、地形変化量の時系列で比較すると、図 7.14 (1) 及び図 7.15 (1) に示すように、JNES の解析結果では 45 分付近で瞬間的に堆積が見られ、事業者の結果ではそのような現象は見られない。これについては、7.5 節で考察する。

第 2 号機の最大水位下降ケース (JSCE08_Low) では、JNES の最大堆砂高が約 8cm に対し、事業者結果は約 10cm であり、差は約 2cm である。最大水位上昇ケース (JSCE01_High) では、JNES の結果が約 1cm に対し、事業者結果は約 14cm であり、10cm 以上の差が見られる。

第 3 号機の最大水位下降ケース (JSCE08_Low) では、JNES の結果が約 1cm に対し、事業者結果は約 11cm であり、10cm の差が見られる。

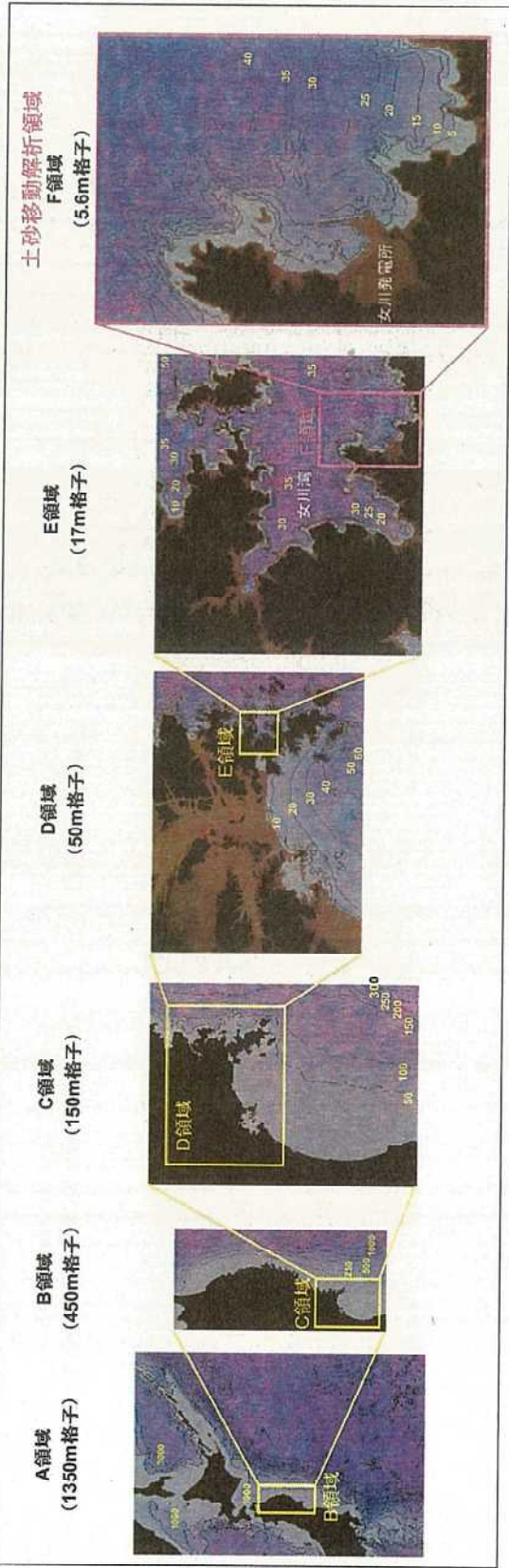
表 7.4 JNES と事業者の計算条件の比較

項目		JNES		事業者		
基礎方程式	流水	非線形長波式				非線形長波式
	流砂	高橋他(1999)の掃流砂層と浮遊砂層間の交換砂量を考慮した分離モデル				高橋他(1999)の掃流砂層と浮遊砂層間の交換砂量を考慮した分離モデル
各領域の解析条件	空間格子間隔(m)	津波水位解析領域			土砂移動解析領域	
	時間格子間隔(s)	A領域 1350	B領域 450	C領域 150	D領域 50	E領域 17
境界条件	地形モデル	海域のみ			海域および陸上	
	境界条件	陸側	完全反射	小谷ら(1998)の遡上境界		
初期条件		自由透過	外側の大格子領域と、水位・流量を接続			岩崎ら(1979)の遡上境界
初期条件		津波初期水位は、Mansinha and Smylie(1971)の方法を用いて設定。				津波初期水位は、Mansinha and Smylie(1971)の方法を用いて設定。
海底摩擦係数		Manningの粗度係数 $n=0.025m^{-1/3}$ (後藤・佐藤(1993)、土木学会(2002))				Manningの粗度係数 $n=0.03m^{-1/3}$ (岩崎・真野(1979)、土木学会(2002))
水平渦動粘性係数		考慮しない				考慮しない
流水計算の打ち切り水深		$10^{-5}m$				$10^{-3}m$
現象再現時間		地震発生後4時間				地震発生後4時間

表 7.5 土砂移動解析に関する主な解析パラメータ (JNES 及び事業者の設定値)

項目	JNES	事業者
海水の密度 ρ (g/cm ³)	1.03	1.03
水の動粘性係数 (cm ² /s)	0.01	0.01
砂の密度 σ (g/cm ³)	2.716	2.716
砂の水中比重 s	1.637	1.637
砂の粒径 d (mm)	0.215	0.215
空隙率 λ	0.4	0.4
砂粒子沈降速度 w (cm/s)	2.76	2.76
限界摩擦速度 u_c (cm/s)	1.49	1.49
飽和浮遊砂濃度 (%)	1.0	1.0
底面勾配の係数	2.0	0.0
砂移動解析の境界条件	浮遊砂濃度の勾配をゼロ 掃流砂は流出及び流入を考慮	浮遊砂濃度の勾配をゼロ 掃流砂は流出のみ考慮

■ JNESの地形モデル



■ 事業者の地形モデル

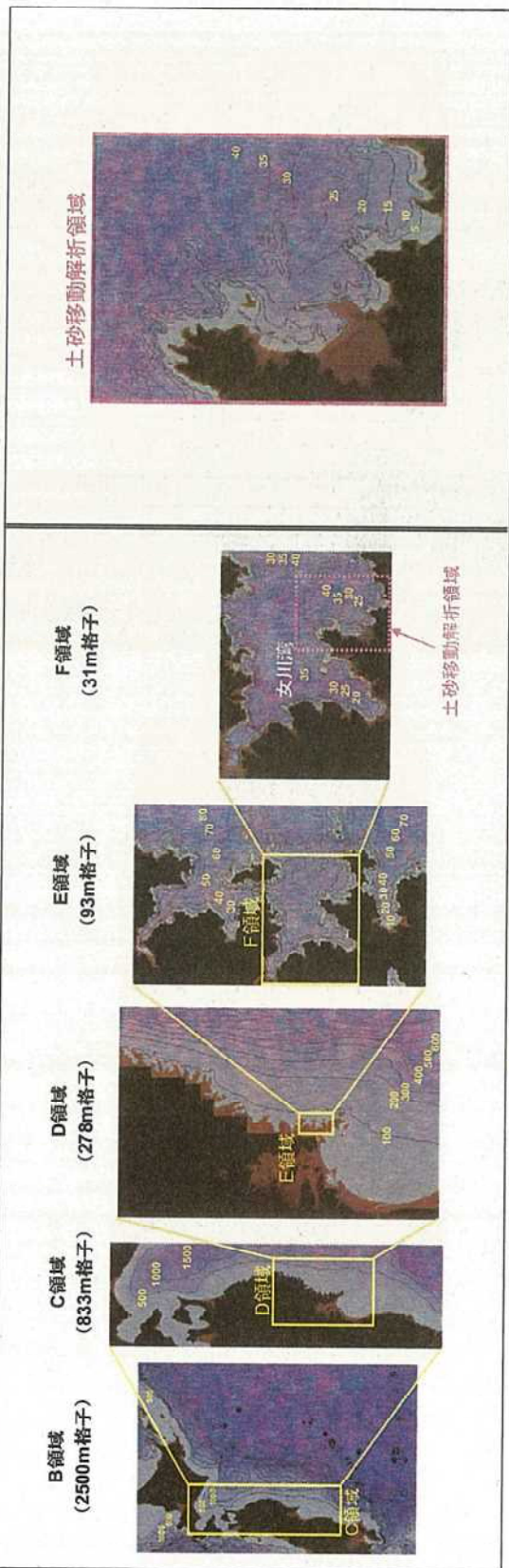


図 7.11 地形モデル及び土砂移動解析を考慮する解析領域 (JNES 及び事業者)

表 7.6 取水口前面における最大堆砂高の解析結果

	波源モデル	JNES	事業者
	第1号機	JSCE01_High	3~23cm
JSCE08_Low		3~12cm	5cm
第2号機	JSCE01_High	1cm	14cm
	JSCE08_Low	2~8cm	10cm
第3号機	JSCE01_High	0cm	2cm
	JSCE08_Low	1cm	11cm

※JNESの結果は、代表地点の隣接地点（1メッシュ隣のメッシュ）も含めて解析値を抽出

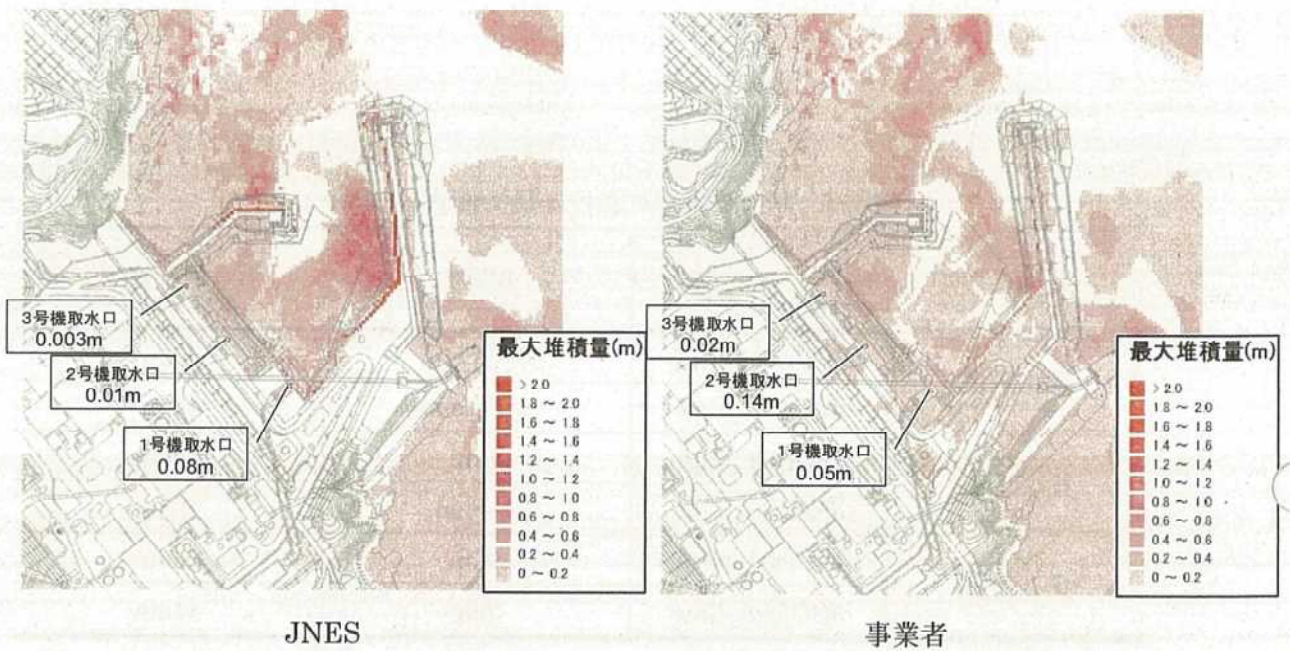


図 7.12 (1) 最大堆積分布 (最大水位上昇ケース : JSCE01_High)

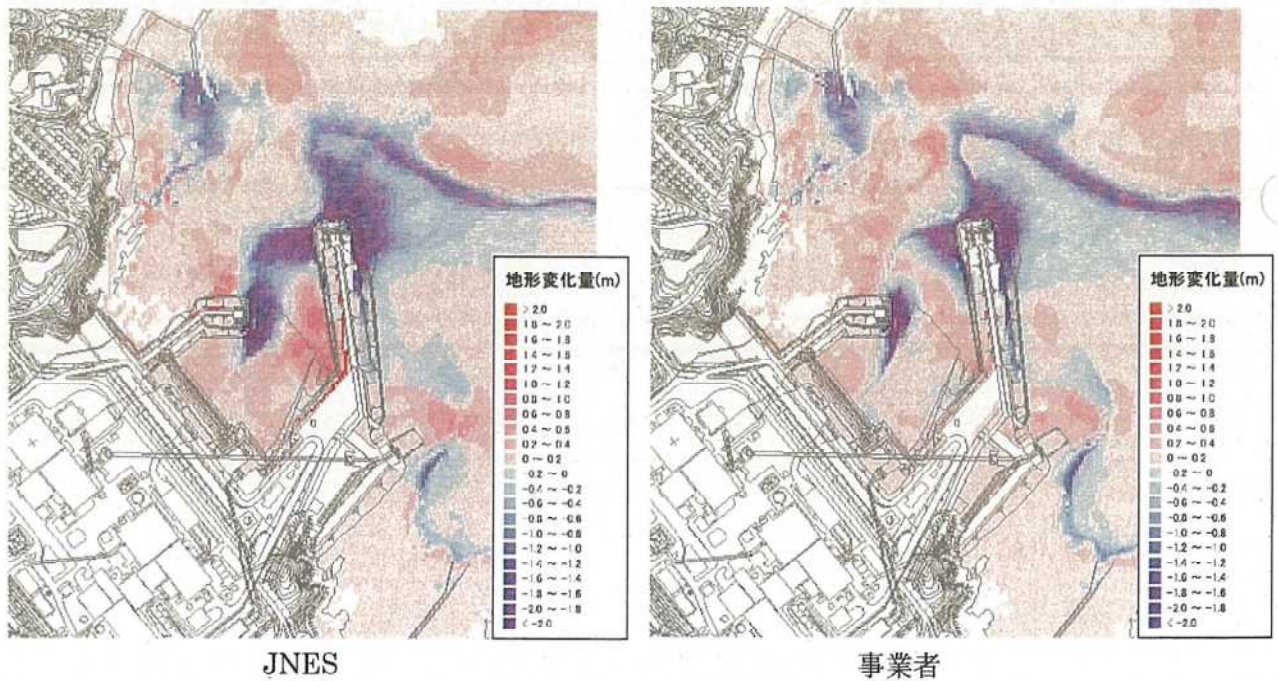
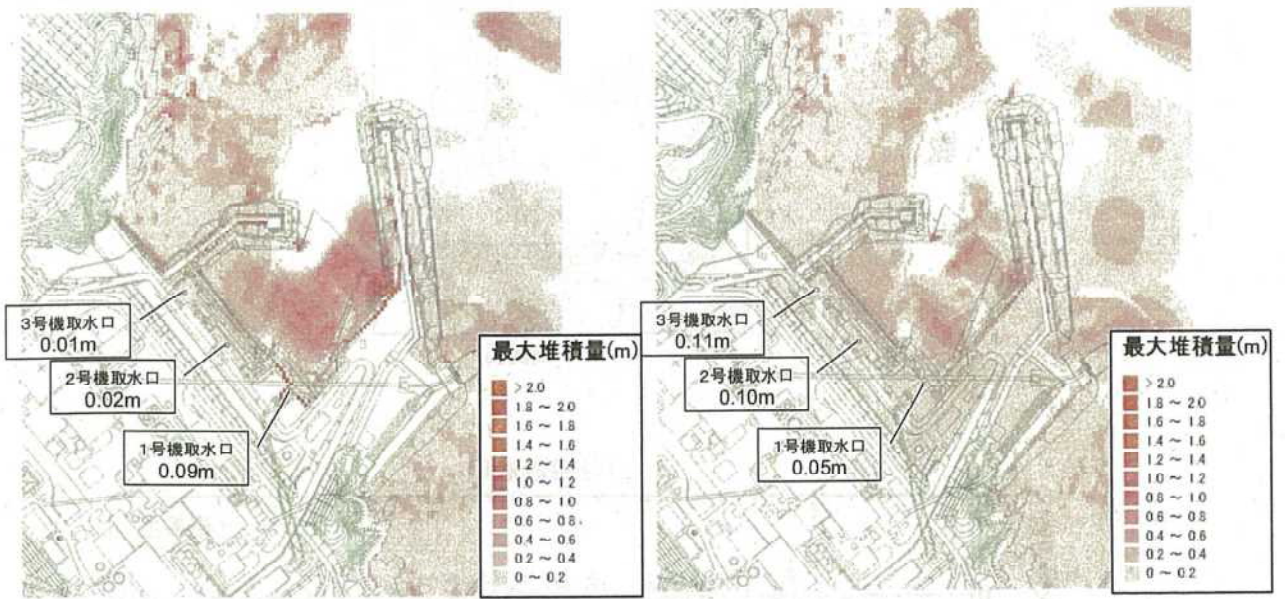
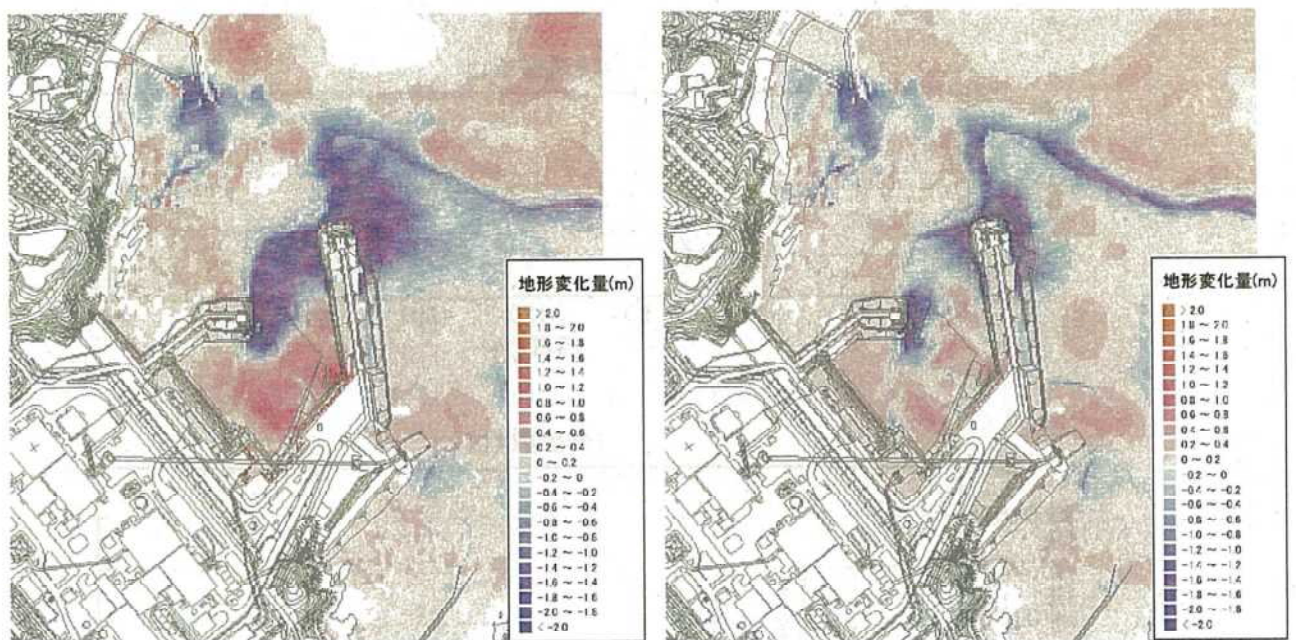


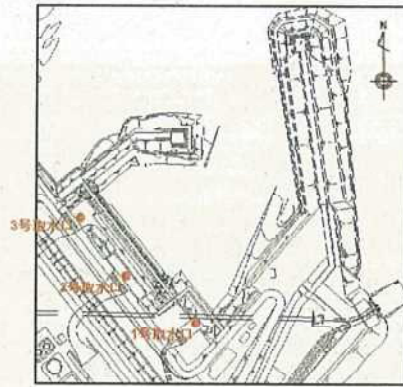
図 7.12 (2) 4時間後の地形変化量分布による比較 (最大水位上昇ケース : JSCE01_High)



JNES 事業者
 図 7.13 (1) 最大堆積分布 (最大水位下降ケース : JSCE08_Low)



JNES 事業者
 図 7.13 (2) 4 時間後の地形変化量分布による比較 (最大水位下降ケース : JSCE08_Low)



代表地点位置図

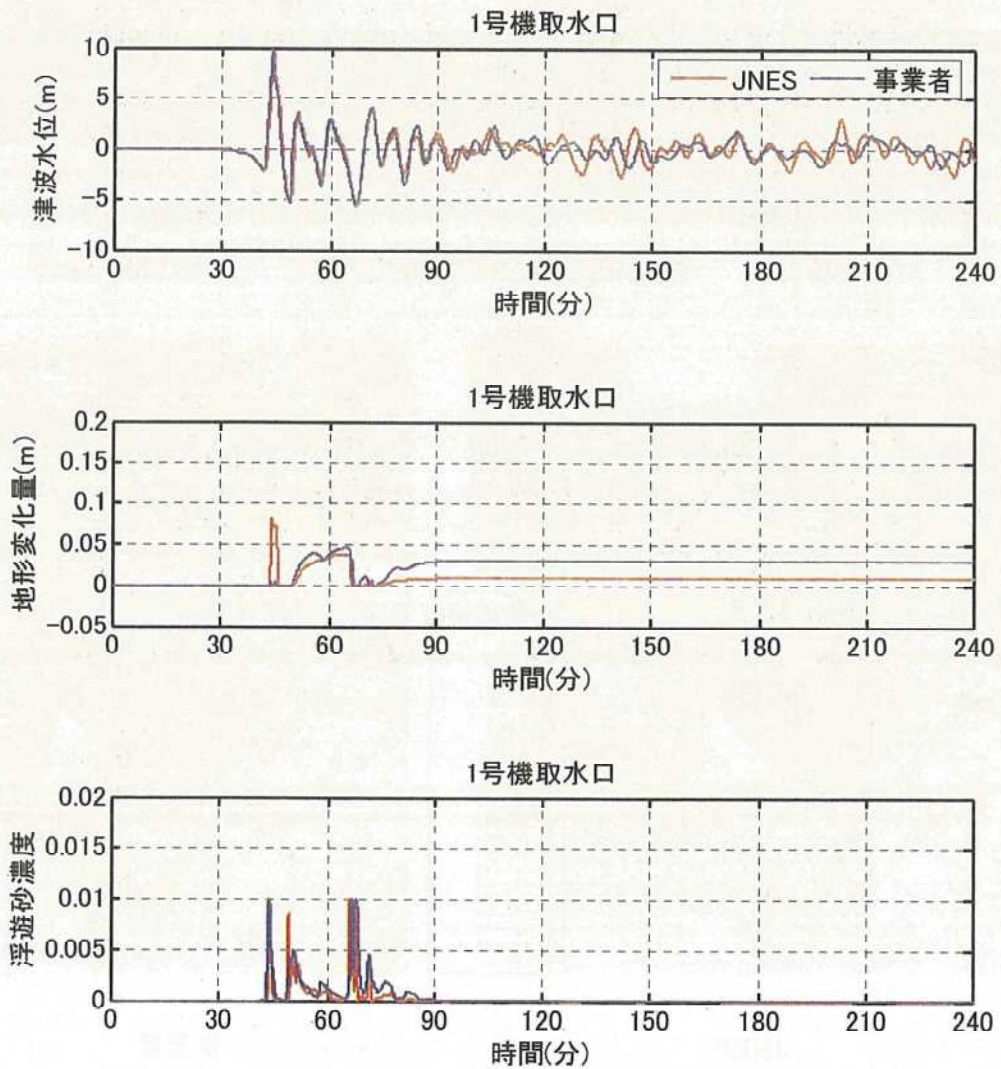
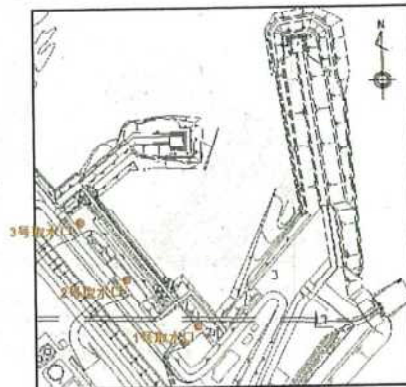


図 7.14 (1) 取水口前面の各種時系列による比較
(最大水位上昇ケース：JSCE01_High)、第1号機取水口



代表地点位置図

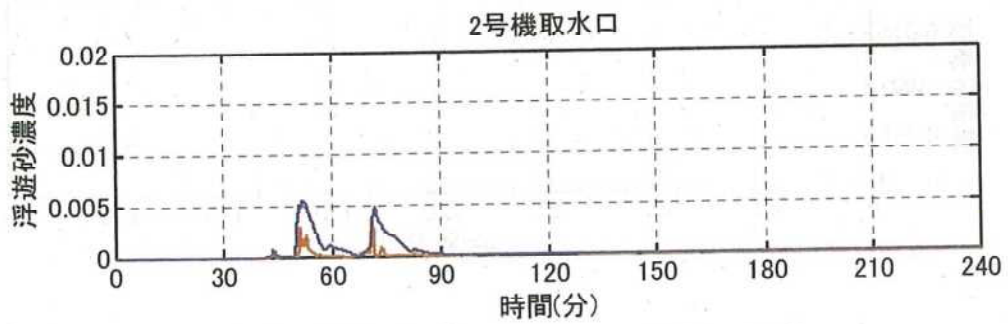
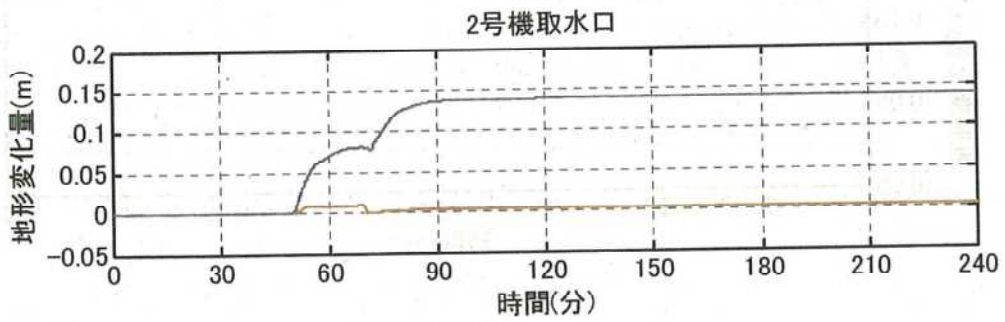
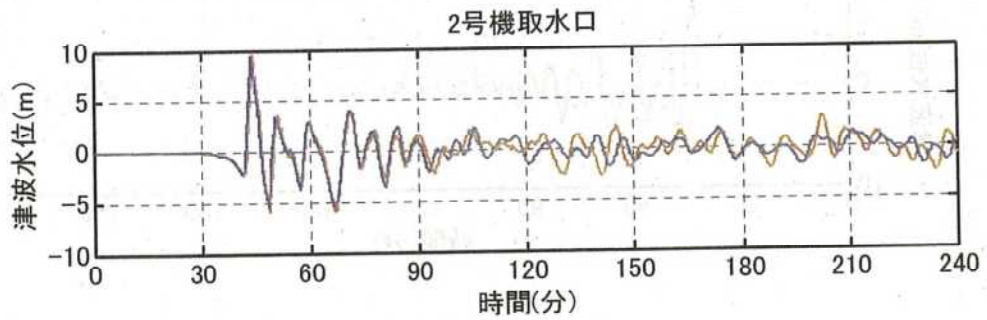
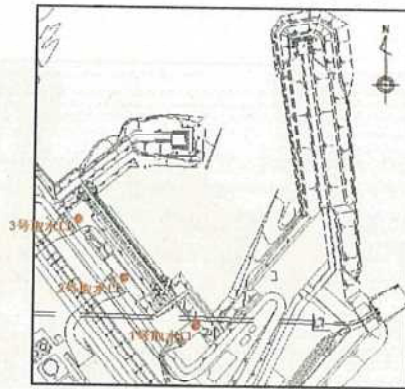


図 7.14 (2) 取水口前面の各種時系列による比較
(最大水位上昇ケース: JSCE01_High)、第2号機取水口



代表地点位置図

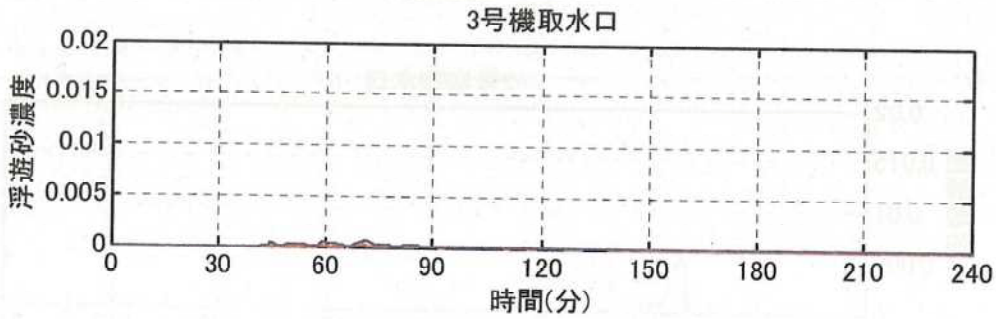
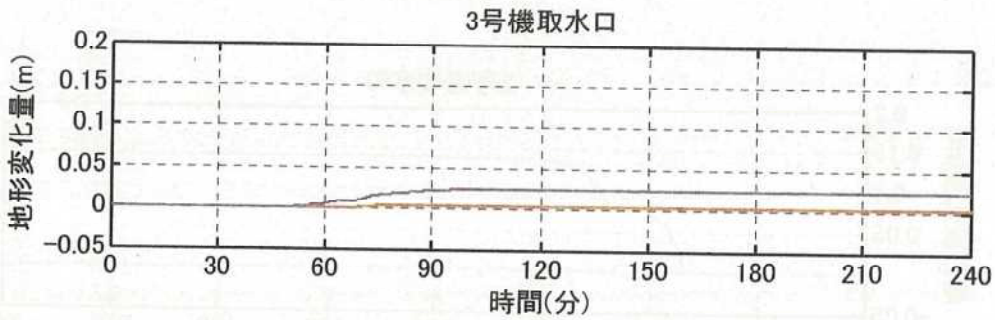
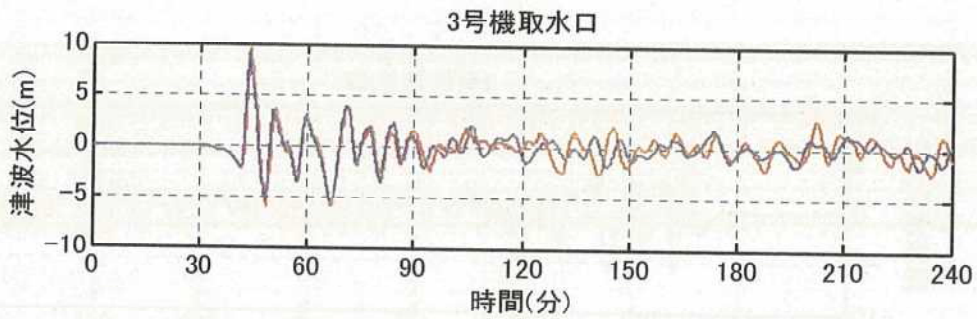
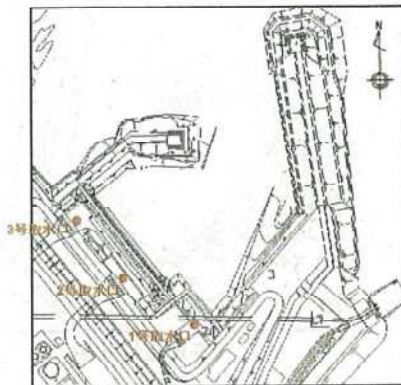


図 7.14 (3) 取水口前面の各種時系列による比較
(最大水位上昇ケース：JSCE01_High)、第3号機取水口



代表地点位置図

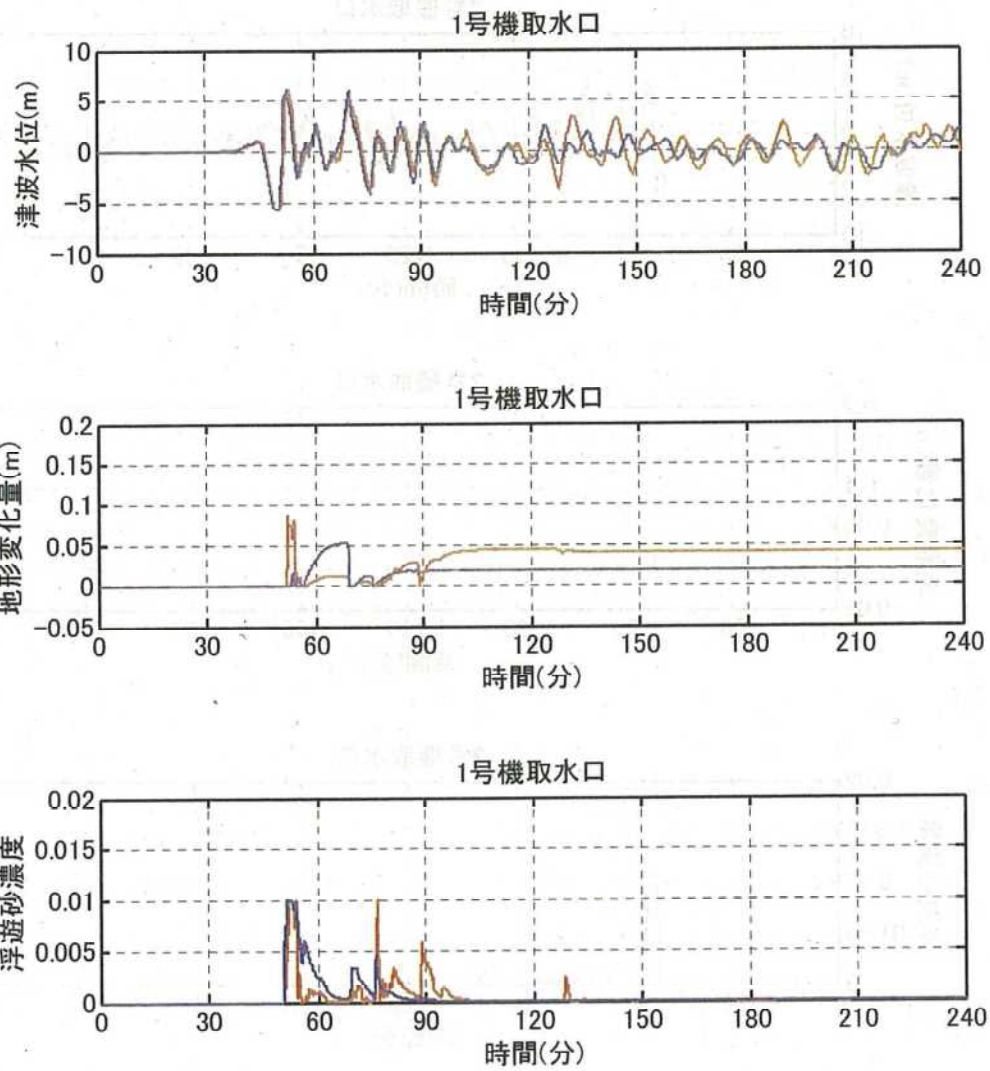
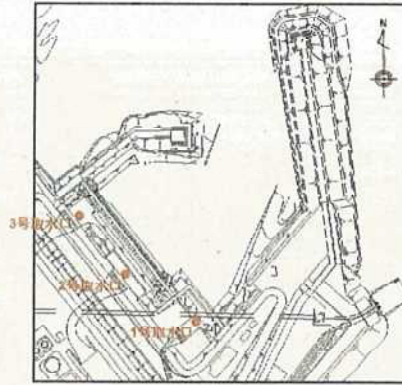


図 7.15 (1) 取水口前面の各種時系列による比較
(最大水位下降ケース：JSCE08_Low)、第1号機取水口



代表地点位置図

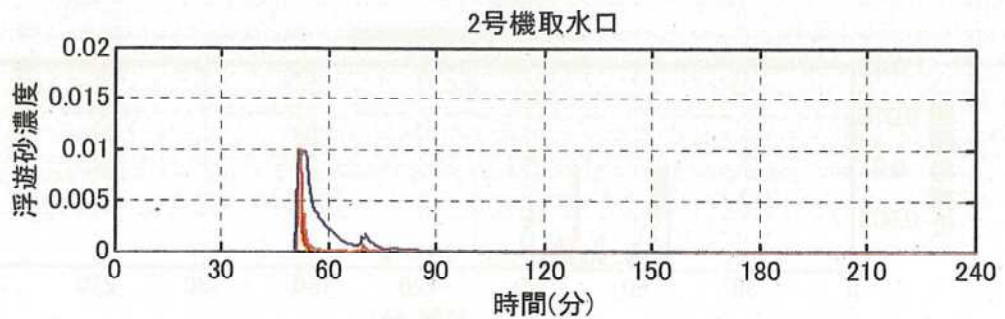
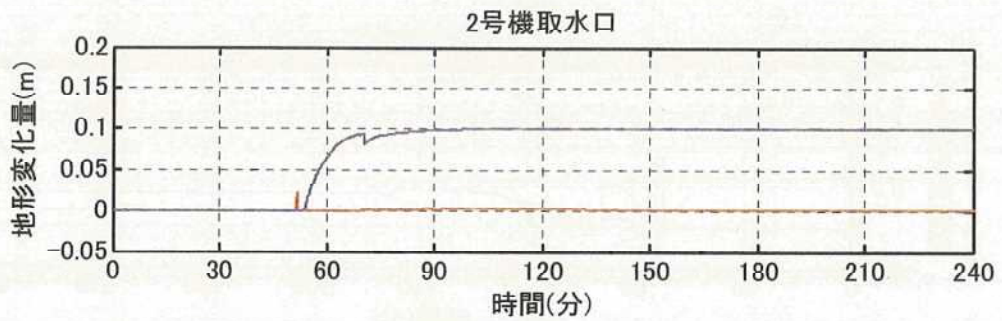
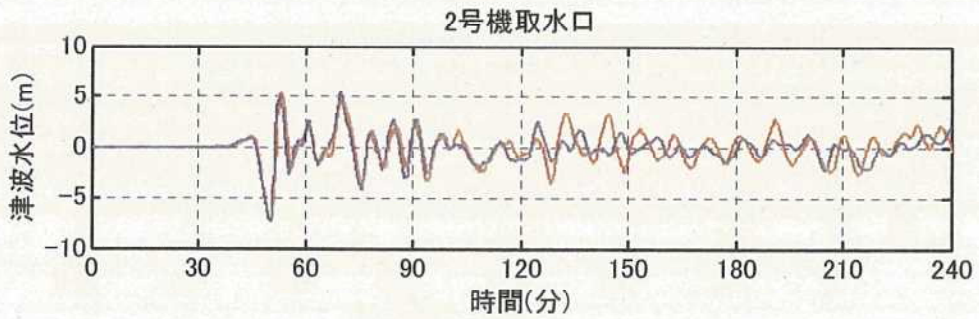
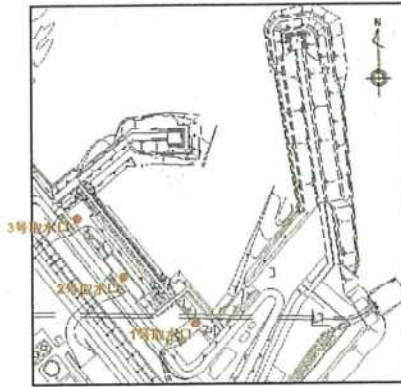


図 7.15 (2) 取水口前面の各種時系列による比較
(最大水位下降ケース: JSCE08_Low)、第2号機取水口



代表地点位置図

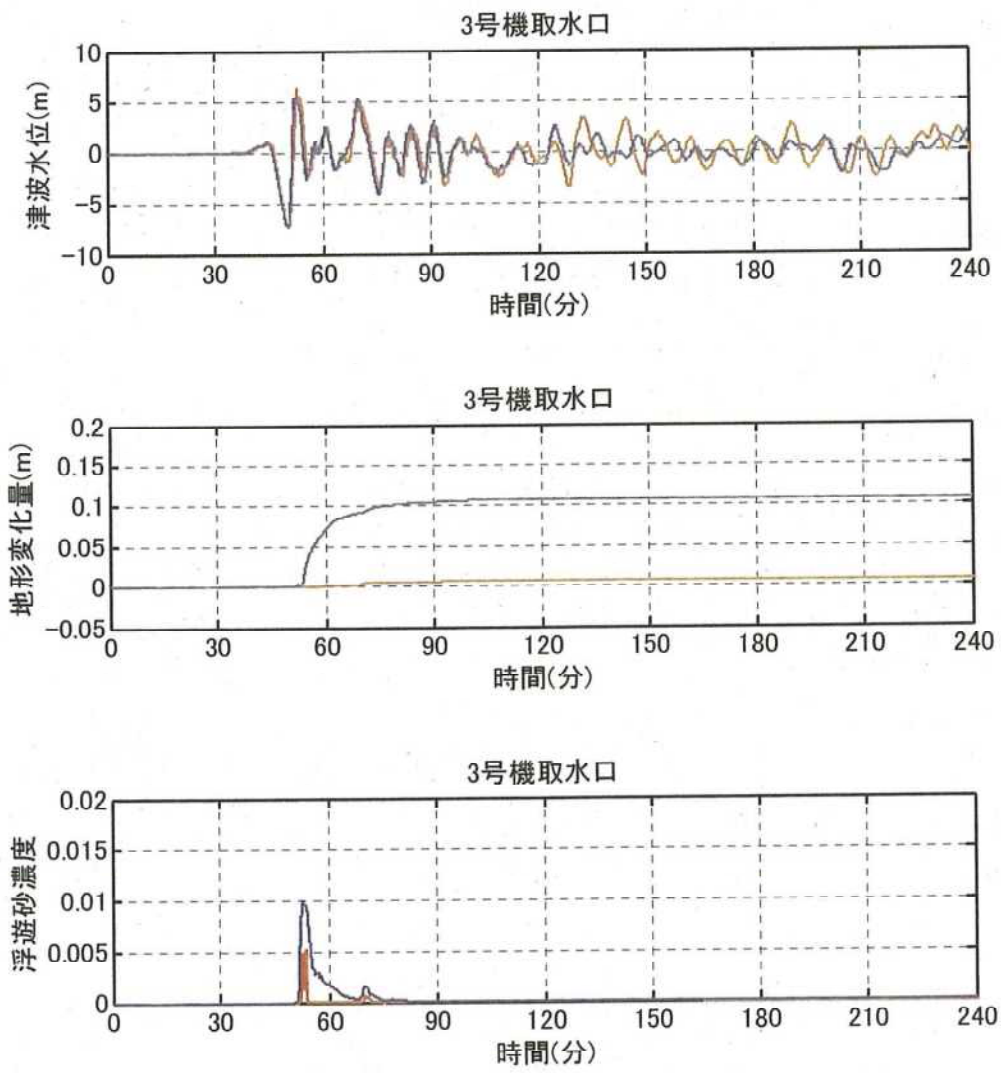


図 7.15 (3) 取水口前面の各種時系列による比較
(最大水位下降ケース: JSCE08_Low)、第3号機取水口

7.5 事業者結果との差の要因分析

取水口前面での堆砂高を評価するための海底の土砂移動解析において、7.4節で述べたように、JNES と事業者の解析結果に差が生じた。これらの差の原因を究明するために、事業者の設定した解析条件及び解析パラメータを用いて解析し、7.4 節までの結果と比較し、その影響を分析する。

表 7.7 に差の要因として考えられる設定条件及びパラメータを列挙し、JNES と事業者の設定値及び要因分析用の設定値を示す。まず、要因分析解析の Case 1 として、表 7.7 に挙げた解析条件及び解析パラメータ全てについて、事業者の設定値に合わせた解析条件を用いた解析を行なう。次に、個々の解析条件及び解析パラメータの影響を把握するための要因分析解析 Case 2 から Case 6 を行なう。

要因分析解析 Case 1 での波源条件は、最大水位上昇 (JSCE01_High) / 下降ケース (JSCE08_Low) とし、各評価地点における堆砂高の解析結果を表 7.8 に示す。7.4 節では、第 2 号機、第 3 号機で事業者結果との差が見られていたが、表 7.7 に挙げた解析条件及びパラメータを合わせることによって、最大水位下降ケースでは、事業者の結果が JNES の解析結果とほぼ同程度となった。最大水位上昇ケースでは、JNES の解析結果と同程度にならなかったが、第 2 号機では 7.4 節では約 12cm の差が、今回検討によりその差が約 9cm となった。

図 7.16 及び図 7.17 に、最大水位上昇/下降ケースの各取水口前面位置における要因分析解析 Case 1 の解析結果 (水位変動、地形変化量、浮遊砂濃度) を取水設備毎に (1) ~ (3) に示す。第 1 号機の最大水位上昇ケースでは、図 7.16 (1) に示すとおり、約 45 分付近に見られていた急激な堆積がなくなり、隣接地点を含めて整理した堆積値は最大 5cm となり、事業者結果をほぼ説明可能となった。第 2 号機、第 3 号機の最大水位下降ケースでは、図 7.17 (2)、(3) の地形変化の時系列に示すとおり、約 55 分以降の地形変化をほぼ説明可能となった。第 2 号機、第 3 号機の最大水位上昇ケースでは、事業者の結果を完全には説明できないものの、7.4 節の比較結果に比べて、差が小さくなった。

次に、個々の解析条件の影響を分析するための要因分析解析 Case 2 ~ 6 では、波源条件を最大水位上昇ケース (JSCE01_High) のみと対象とした。解析時間は地形変化がほぼ収束する 120 分後までとした。評価地点は、第 1 号機及び第 2 号機とし、地形変化量が微小な第 3 号機は対象外とした。表 7.9 に個々の解析条件及び解析パラメータの影響の分析結果を、図 7.18 (1) に要因分析解析 Case 2 ~ 6 における地形変化量の時系列を示す。第 1 号機において見られた約 45 分付近での急激な堆積は、陸域の流砂計算をしない場合に生じることが分かった。第 1 号機の JNES と事業者の結果の差の主な要因は、陸域の土砂移動計算、及び Manning 粗度係数、計算時間間隔であることを確認した。第 2 号機では、図 7.18 (2) に示すように Manning 粗度係数、流水計算の打ち切り水深が主な要因であることを確認した。

以上の検討結果から、取水口前面における JNES と事業者の結果の差の主要因は、陸域の流砂計算の有無及び Manning 粗度係数、流水計算の打ち切り水深、計算時間間隔であることが確認

できた。なお、Manning 粗度係数、流水計算の打ち切り水深については、JNES と事業者の設定値に幅があるが、いずれも許容されている。底面勾配係数については、評価地点の取水口前面においては海底の勾配がないため、影響が小さいと言える。

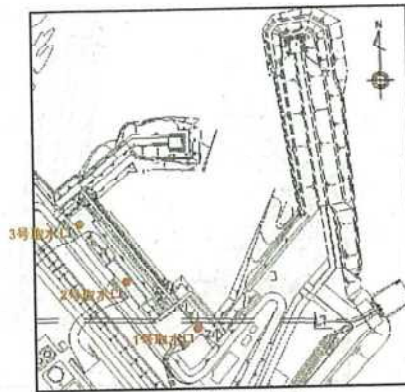
表 7.7 差の要因分析に係る解析条件一覧

	JNES	事業者	要因分析用の設定条件						
			Case1 (事業者と同じ)	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	
陸域の流砂計算	無	有	有	有	無	無	無	無	無
海底摩擦係数 Manningの粗度係数 $n(m^{-1/3}s)$	0.025	0.030	0.030	0.025	0.030	0.025	0.025	0.025	0.025
底面勾配係数	2.0	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0	2.0	2.0	2.0
流水計算の打ち切り水深 (m)	10^{-5}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-3}	10^{-5}
時間格子間隔 Δt (秒)	0.01	0.05	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05
現象再現時間	4 時間	4 時間	4 時間	2 時間	2 時間	2 時間	2 時間	2 時間	2 時間

表 7.8 要因分析解析 Case1 の解析結果

	波源モデル	取水口前面における最大堆砂高		
		JNES	要因分析 Case1	事業者
第1号機	JSCE01_High	3~23cm	2~5cm	5cm
	JSCE08_Low	3~12cm	8~15cm	5cm
第2号機	JSCE01_High	1~2cm	4~5cm	14cm
	JSCE08_Low	2~8cm	10~14cm	10cm
第3号機	JSCE01_High	0~1cm	0~1cm	2cm
	JSCE08_Low	1~2cm	11~13cm	11cm

※JNESの結果は、代表地点の隣接地点（1メッシュ隣のメッシュ）も含めて解析値を抽出



代表地点位置図

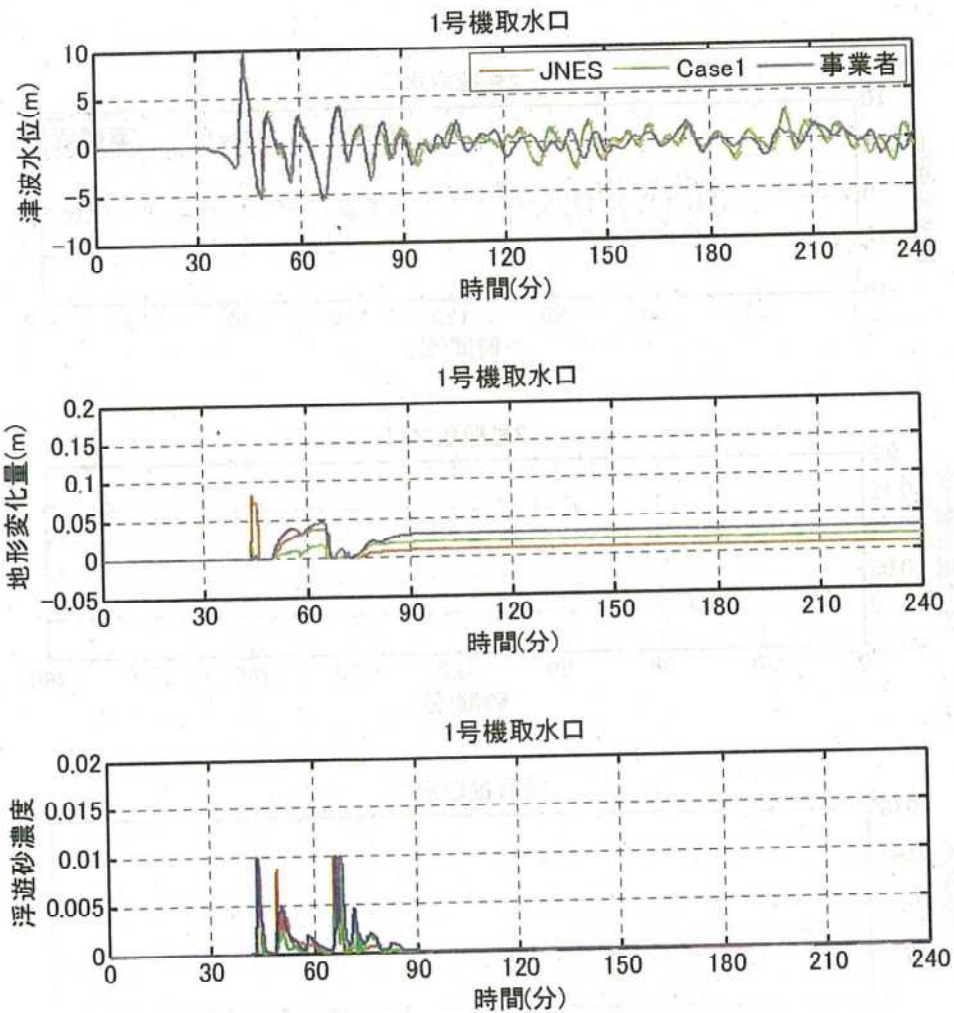
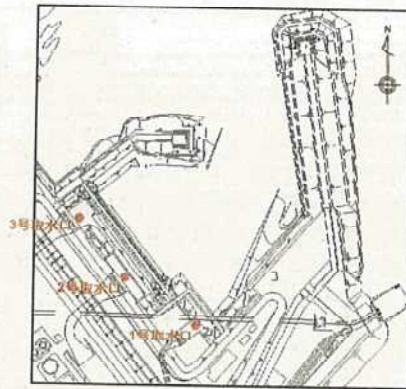


図 7.16 (1) 要因分析解析 Case1 の解析結果
(最大水位上昇ケース：JSCE01_High)、第1号機取水口



代表地点位置図

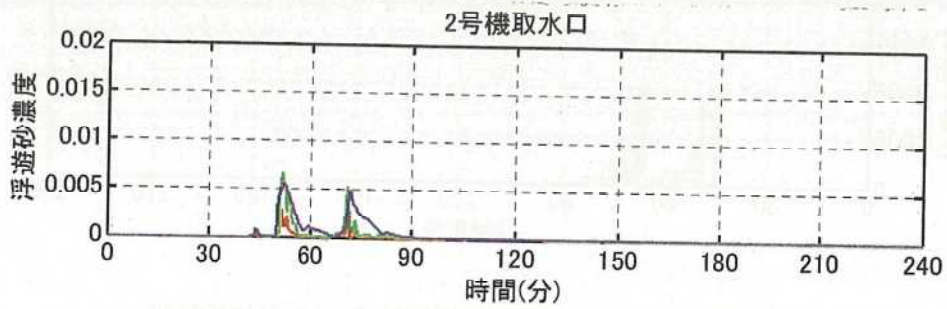
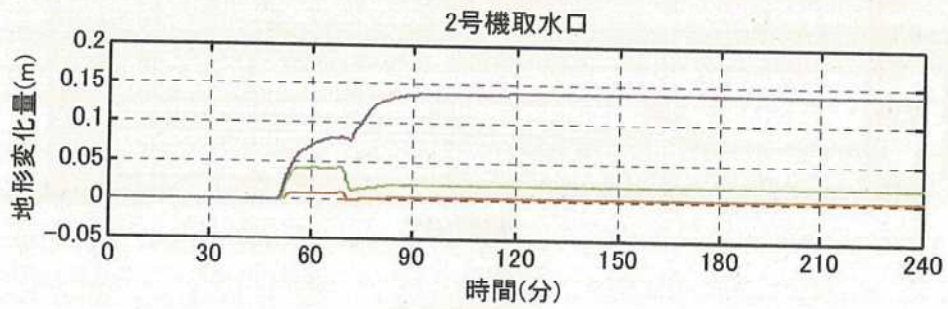
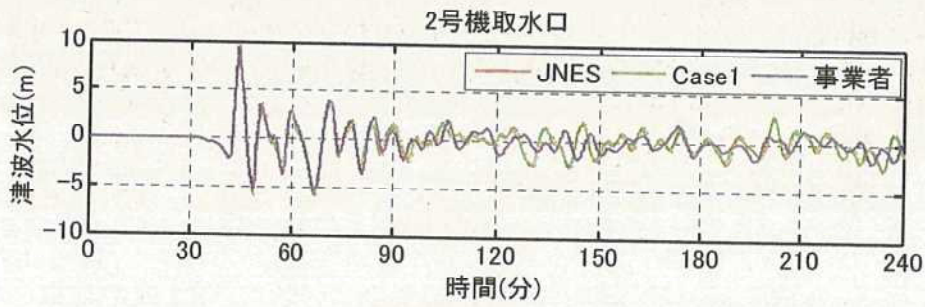


図 7.16 (2) 要因分析解析 Case1 の解析結果
 (最大水位上昇ケース：JSCE01_High)、第2号機取水口

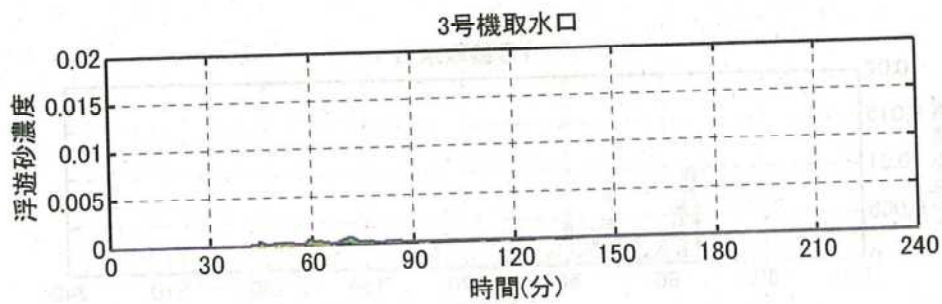
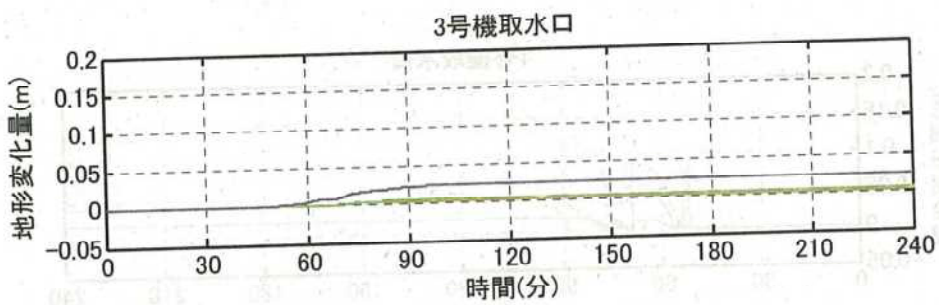
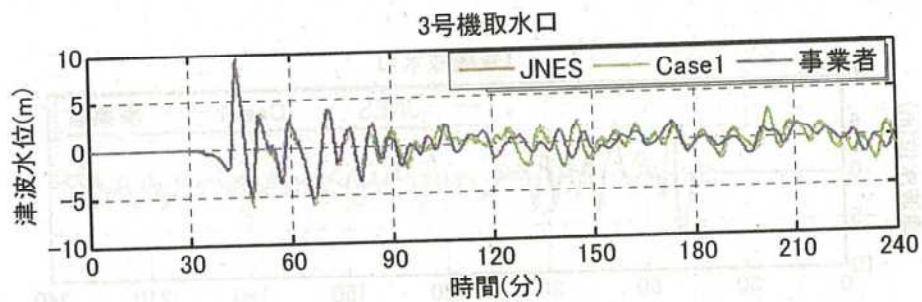
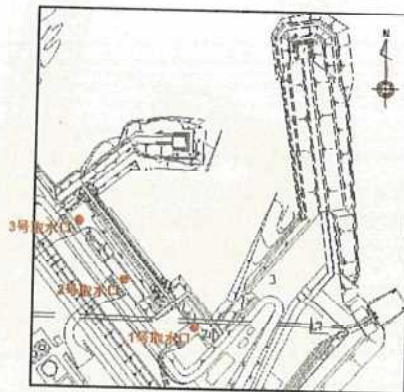


図 7.16 (3) 要因分析解析 Case1 の解析結果
(最大水位上昇ケース：JSCE01_High)、第3号機取水口



代表地点位置図

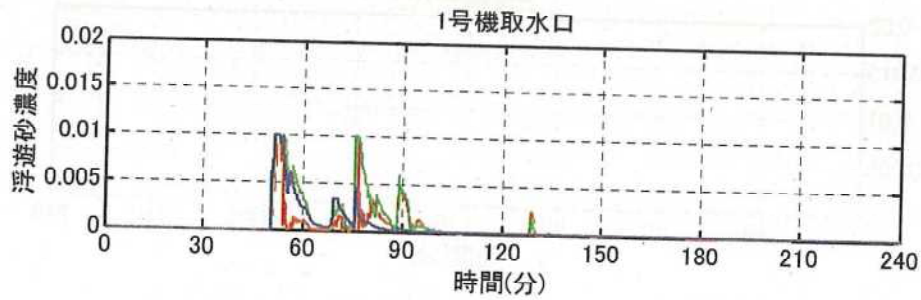
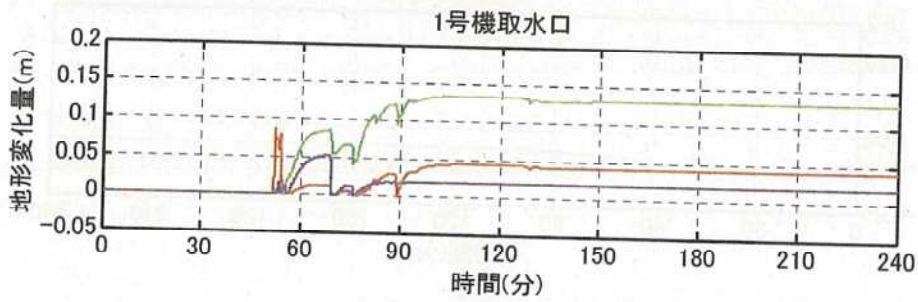
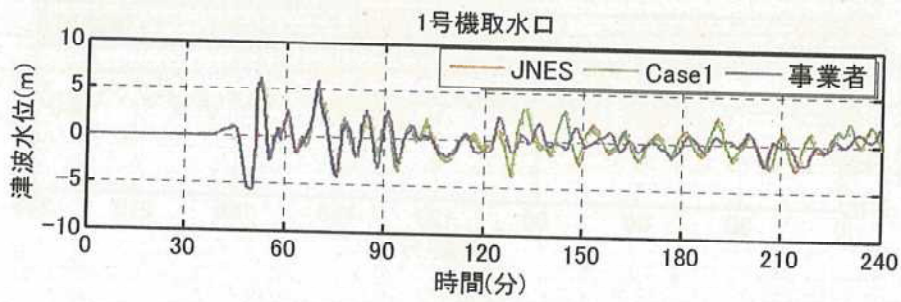


図 7.17 (1) 要因分析解析 Case1 の解析結果
(最大水位下降ケース：JSCE08_Low)、第1号機取水口



代表地点位置図

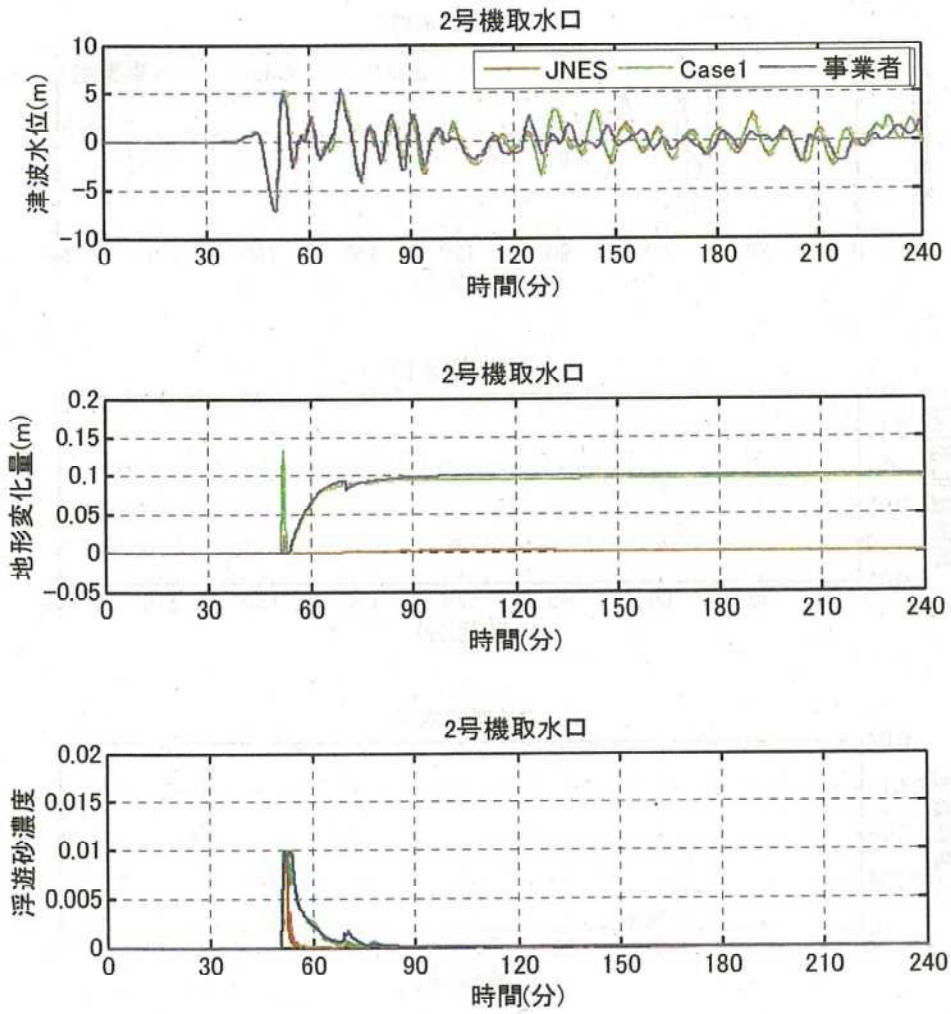
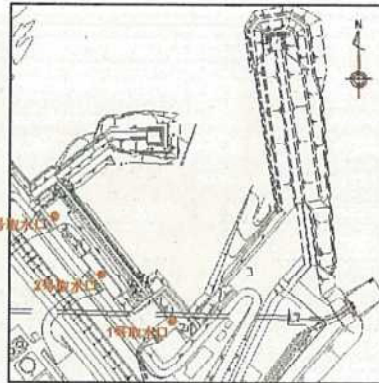


図 7.17 (2) 要因分析解析 Case1 の解析結果
(最大水位下降ケース：JSCE08_Low)、第2号機取水口



代表地点位置図

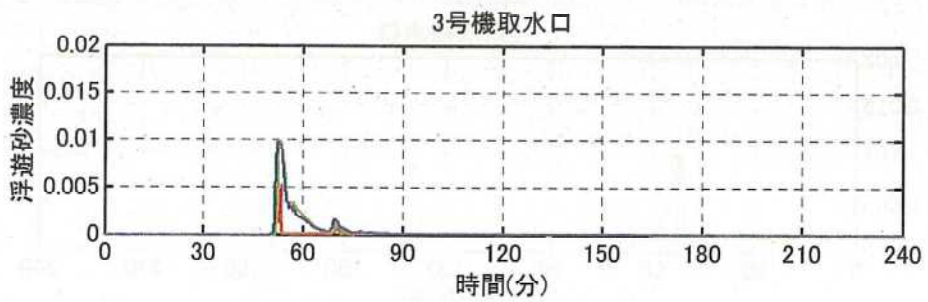
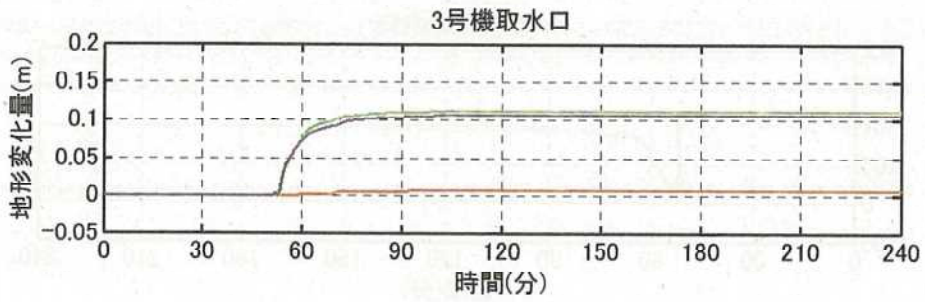
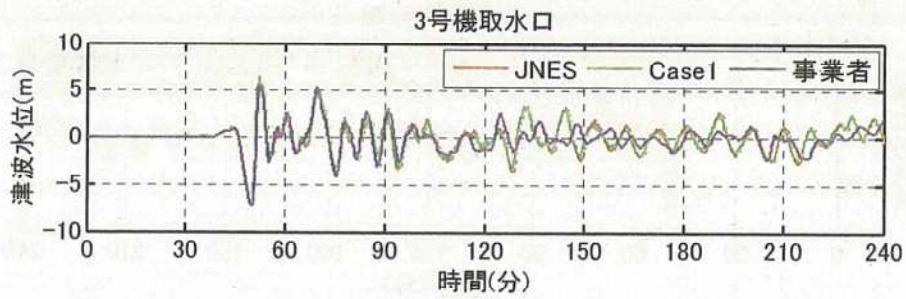
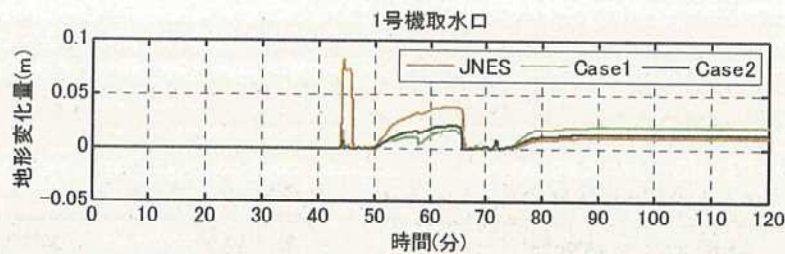


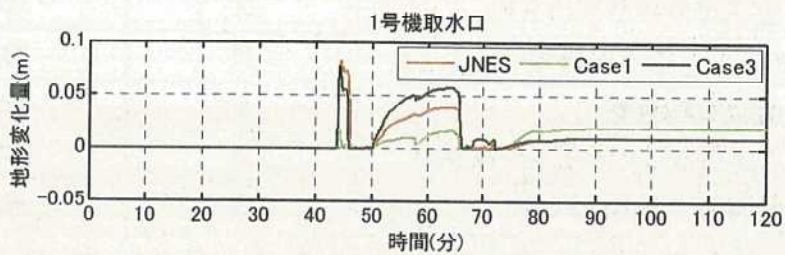
図 7.17 (3) 要因分析解析 Case1 の解析結果
(最大水位下降ケース：JSCE08_Low)、第3号機取水口

表 7.9 個々の解析条件及び解析パラメータの影響の分析結果

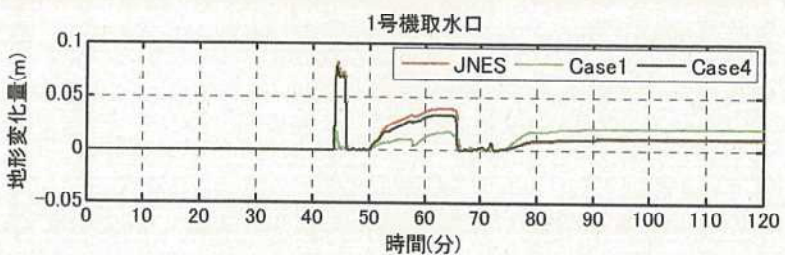
要因分析解析ケース	解析条件及び解析パラメータ	第1号機	第2号機
Case2	陸域の流砂計算の有無	大	小
Case3	Manning の粗度係数 $n(m^{-1/3}s)$	大	大
Case4	底面勾配係数	小	小
Case5	流水計算の打ち切り水深(m)	小	大
Case6	時間格子間隔 Δt (秒)	大	小



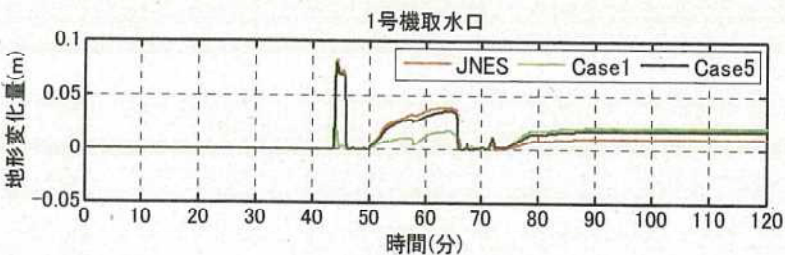
Case2
陸域の流砂計算



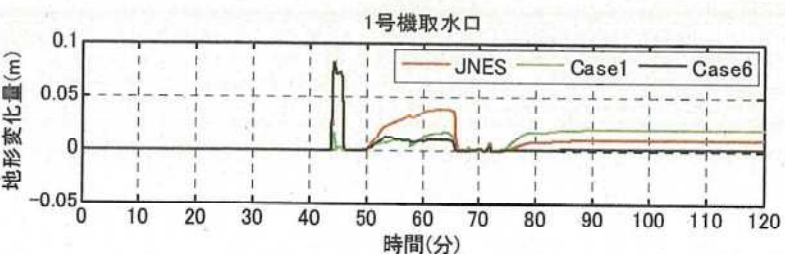
Case3
Manning 粗度係数



Case4
底面勾配係数

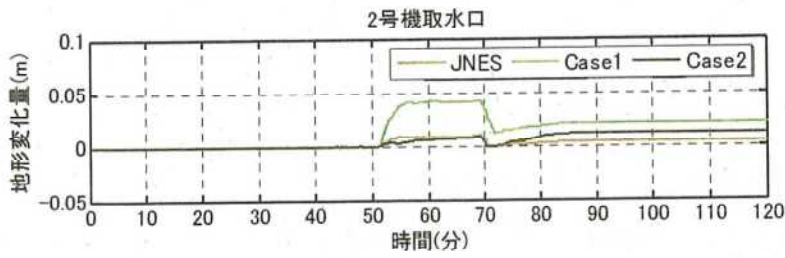


Case5
流水計算の打ち切り水深

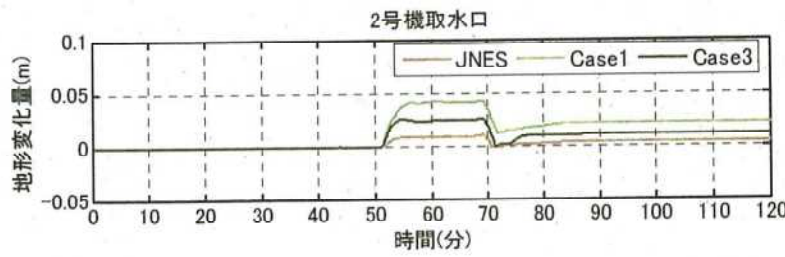


Case6
時間格子間隔

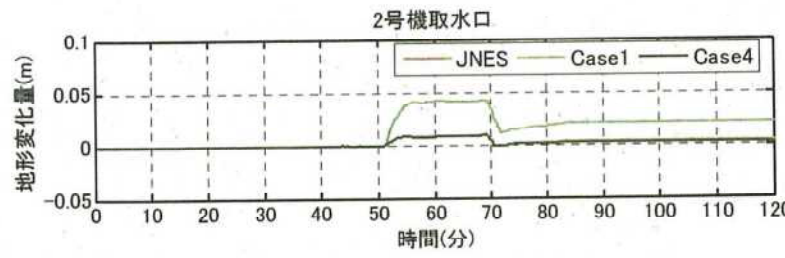
図 7.18 (1) 要因分析解析 Case 2～6 の解析結果 (第 1 号機取水口)



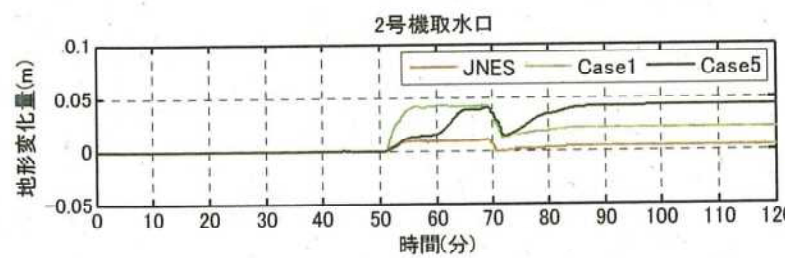
Case2
陸域の流砂計算



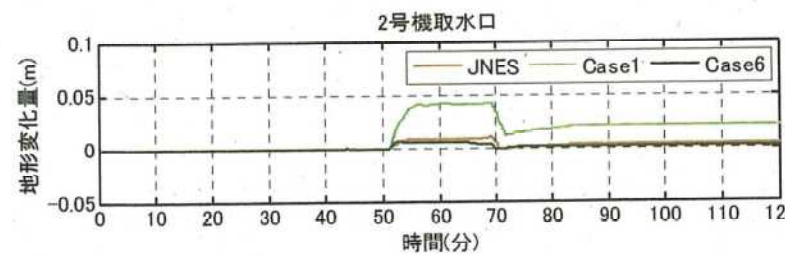
Case3
Manning 粗度係数



Case4
底面勾配係数



Case5
流水計算の打ち切り水深



Case6
時間格子間隔

図 7.18 (2) 要因分析解析 Case 2 ~ 6 の解析結果 (第 2 号機取水口)