

女川原子力発電所 地震随件事象に対する考慮について（津波に対する安全性）要旨

1. 評価概要

津波に対する安全性の評価は、「原子力発電所の津波評価技術（土木学会）」（以下「土木学会手法」という）による水位評価を基本とし、女川地点において考慮する地震動（S_s-F）の断層モデルを用いた水位評価等を実施している。また、津波に伴う二次的な影響の評価についても実施している。

2. 津波安全性評価結果

女川原子力発電所に最も影響を及ぼす津波は土木学会手法による設計想定津波（以下、「想定津波」という）であることから、想定津波に対する安全性評価を実施した。

	津波名称	敷地前面 最大水位上昇量	取水口前面最大水位下降量		
			1号機	2号機	3号機
既往津波	1896年明治三陸地震津波	6.24m	3.80m	3.85m	3.84m
	1933年昭和三陸地震津波	5.69m	5.05m	4.99m	4.97m
	1611年〔慶長16年〕の津波（津波地震）	7.11m	4.26m	4.37m	4.33m
	1611年〔慶長16年〕の津波（正断層地震）	7.78m	8.01m	7.90m	7.91m
	【参考】869年〔貞観11年〕の津波	5.5m	5.3m	5.2m	5.2m
想定津波	設計想定津波（水位上昇側）	12.96m	5.68m	5.49m	5.49m
	設計想定津波（水位下降側）	7.74m	8.02m	7.96m	7.95m
	【参考】連動型想定宮城県沖地震津波（S _s -F）	4.1m	3.6m	3.6m	3.6m

その結果、以下（1）～（3）に示すとおり、女川原子力発電所の津波に対する安全性は確保されていることを確認した。

(1). 水位上昇側の評価結果

女川原子力発電所の想定津波による水位上昇量は12.96mであり、評価用の最高水位は朔望平均満潮位（O.P.+1.43m）を考慮するとO.P.+14.4m程度である。原子炉施設等の主要施設がO.P.+14.8mの敷地に設置されていることから、原子炉施設の安全性に問題とならないことを確認した。

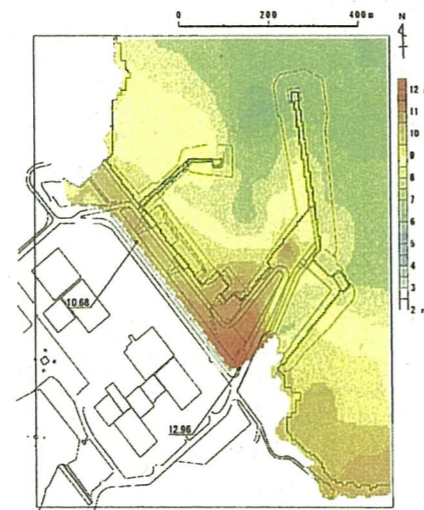


図 2-1 最大水位上昇量分布

(2). 水位下降側の評価結果

女川原子力発電所の想定津波による水位低下に関する評価を実施した。

その結果、津波時の水位は各号機の取水口敷高を数分間程度下回るが、その間、非常用補機冷却海水ポンプに必要な海水が取水路内に確保されていること、取水路内の水位変動が生じてこの設計最低水位（取水不能水位）を下回らないことから、原子炉施設の安全性に問題とならないことを確認した。

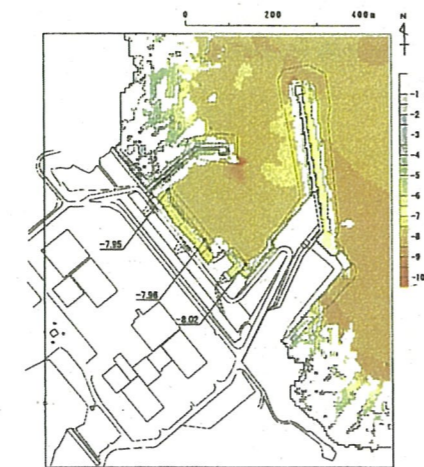
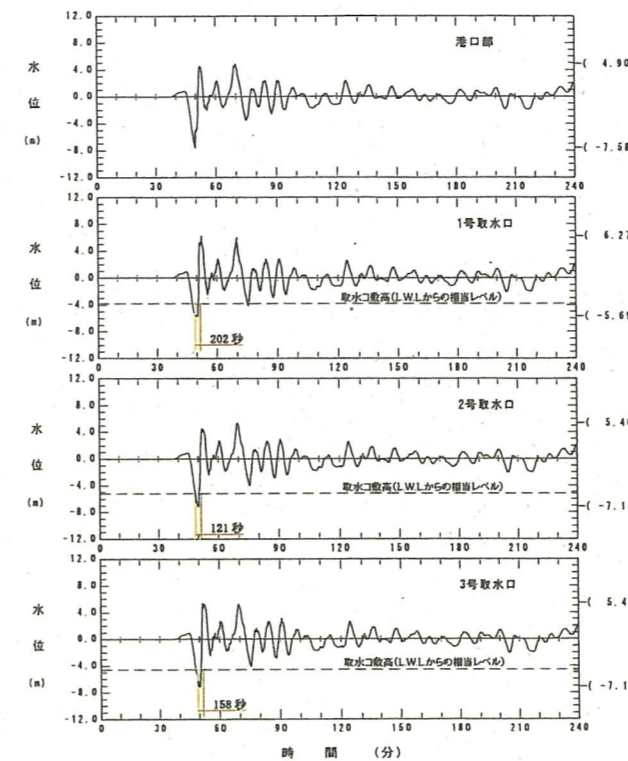


図 2-2-1 最大水位下降量分布



ユニット	取水可能水量	非常用海水ポンプ取水量	取水可能時間	取水不能時間
1号機	約 2,600m ³	3,740m ³ /h	約 41分	約 4分
2号機	約 5,100m ³	7,850m ³ /h	約 88分	約 2分
3号機	約 5,000m ³	7,850m ³ /h	約 88分	約 3分

図 2-2-2 取水口前面の水位の時系列変化

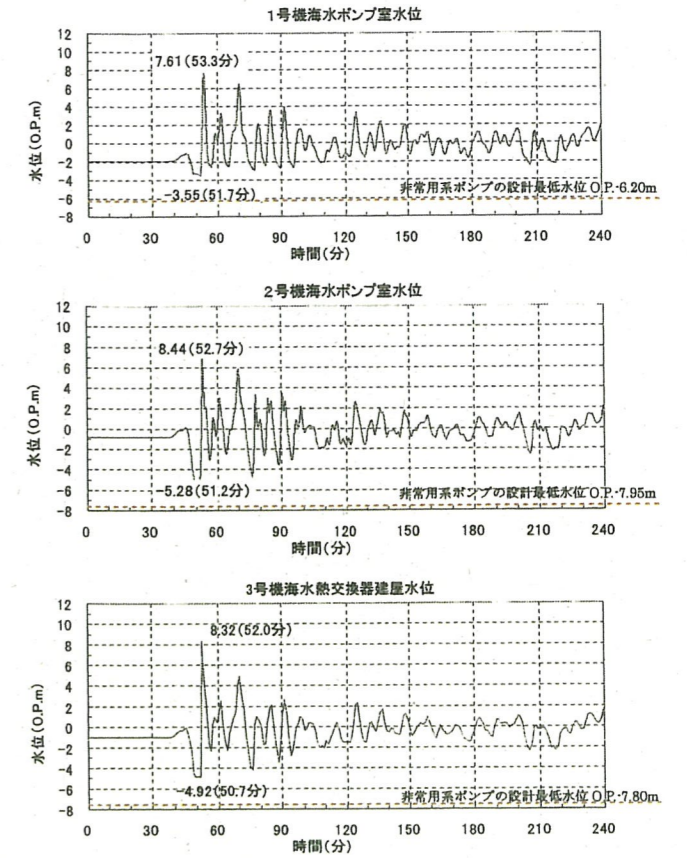


図 2-2-3 取水設備の水利特性による水位の時系列変化

(3). 二次的な影響（砂移動）に対する評価結果

女川原子力発電所の想定津波に伴う二次的な影響として砂移動に関する評価を実施した。その結果、各号機の取水口前面に多少の砂が堆積することが確認されたが、取水口を閉塞するほどではないことから、非常用補機冷却系の取水に支障が生じることはないことを確認した。また、想定津波によって浮遊した砂が海水ポンプ室に堆積する量は、海水ポンプ室の底版から非常用補機冷却系ポンプ呑み口レベルまでの容量よりも小さいことから、非常用補機冷却系の取水に支障が生じることはないことを確認した。

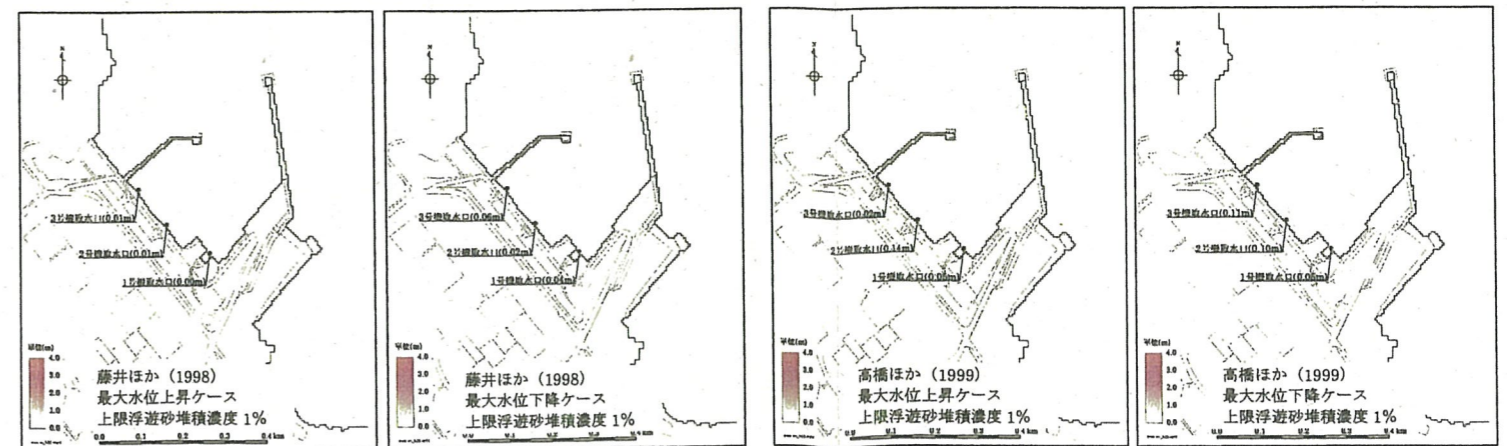


図 2-3 砂移動に伴う地形変化量の最大堆積量分布

津波名称	敷地前面 最大水位上昇量	取水口前面最大水位下降量		
		1号機	2号機	3号機
1896年明治三陸地震津波	6.24m	3.80m	3.85m	3.84m
1933年昭和三陸地震津波	5.69m	5.05m	4.99m	4.97m
1611年〔慶長16年〕の津波(津波地震)	7.11m	4.26m	4.37m	4.33m
1611年〔慶長16年〕の津波(正断層地震)	7.78m	8.01m	7.90m	7.91m
【参考】869年〔貞観11年〕の津波	5.5m	5.3m	5.2m	5.2m

(4) 海域活断層による津波

海域活断層による津波の推定波高は、阿部(1989)⁽²⁹⁾の簡易予測式により検討した。算定結果によると、第10.3.3-1表に示すとおり、海域活断層による津波の推定津波高は最大でも約1.2mである。

既往津波の予測計算結果から、1611年の津波を正断層地震と考えたケースでは、敷地前面における最大水位上昇量が7.78mであることから、海域の活断層による津波の推定津波高は、既往津波の高さを上回るものではないものと評価できる。

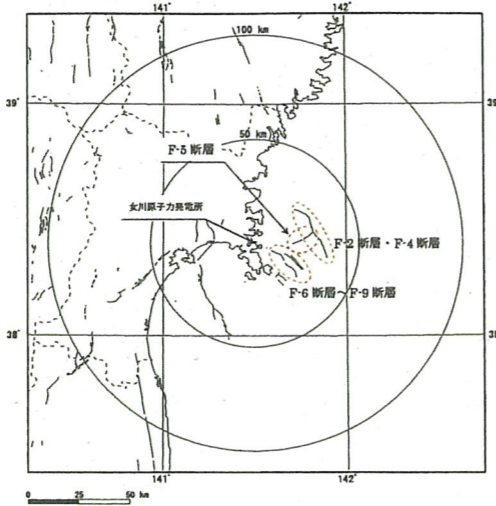


図1.5: 海域活断層位置図

海域断層	断層長 L (km)	断層幅 W (km)	すべり量 D (km)	地震モーメント Mo (km)	モーメント マグニチュード Mw	津波の伝播距離 Δ (km)	推定津波高 Ht (m)
F-2・F-4	27.9	15.0	2.32	3.40×10^{19}	7.0	21.7	1.2
F-5	11.2	7.5	0.93	2.73×10^{18}	6.2	20.7	0.3
F-6~F-9	22.0	14.7	1.83	2.07×10^{19}	6.8	15.2	1.2

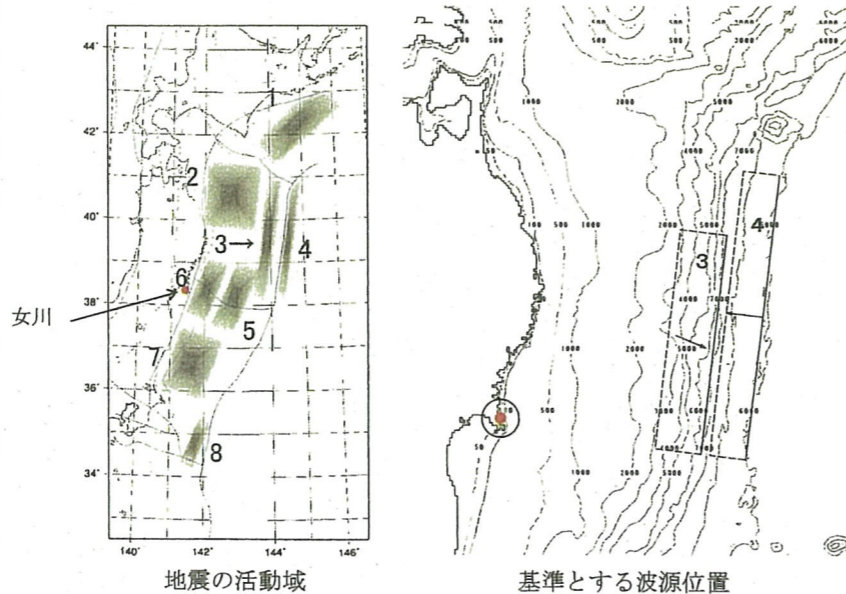
(5) 設計想定津波の検討

(3) 既往津波の検討のとおり、既往津波の再現性が確認されたことから、土木学会(2002)⁽¹⁾を参考に、日本海溝沿いで想定される地震規模に応じた波源の基準断層モデルを設定し、この断層モデルの諸条件について位置を含め合理的と考えられる範囲内で変化させた数値シミュレーションを多数実施するパラメータスタディを行った。

ここでは、土木学会(2002)⁽¹⁾において既往最大とされているMwとして、領域3、4にそれぞれMw=8.3, 8.6の基準断層モデルを設定した。

※女川原子力発電所に影響を及ぼす津波の設定領域としては、領域3~6が考えられるが、領域5、6では領域3、4より最高水位が低くなるため領域5、6はスクリーニングアウトした。

- * : 領域5 : 1793(寛政5年)の津波 約4m
- ** : 領域6 : 1978(昭和53年)の津波 約1m



断層パラメータを以下に示す。

断層パラメータ	領域3	領域4	備考
モーメント マグニチュード Mw	8.3	8.6	既往最大津波のMw
断層長さ L	218km	283km	既往津波を再現できる断層モデルにスケールング則を適用して設定。スケールング則は断層幅に限界がある場合。
断層幅 W	50km	50km	
すべり量 D	9.32m	10.1m	
断層上縁深さ d	1km	1km	既往津波を再現できる断層モデルの値。
走向 θ	190°	190°	等深線(海溝軸)に合わせて設定。
傾斜角 δ	20°	45°	既往津波を再現できる断層モデルの値。
すべり角 λ	75°	270°	領域3: 走向とすべり方向に基づき設定。 領域4: 既往津波を再現できる断層モデルの値。

a. 概略パラメータスタディ

概略パラメータスタディ: 位置(南北, 東西方向)と走向を組合せた18ケースの数値シミュレーションを行い、最高水位ならびに最低水位に関して各々の最大ケースを抽出した。

概略パラメータスタディ結果

領域	パラメータ項目	パラメータ変動範囲	ケース数	計算水位(m)		
				最大水位上昇	最大水位下降	
3	a) 位置	基準, 北へ20km, 40km移動	3	計9	+11.8	-5.1
	b) 走向 θ	基準, 基準±5°				
4	a) 位置	基準, 北へ20km, 40km移動	3	計9	+9.0	-8.0
	b) 走向 θ	基準, 基準±10°				

b. 詳細パラメータスタディ

詳細パラメータスタディ: 概略パラメータスタディで得られた最大ケースについて、傾斜角, すべり角, および断層面上縁深さを組合せた18ケースの数値シミュレーションを実施した。

詳細パラメータスタディ結果

区分	パラメータ項目	パラメータ変動範囲	ケース数	計算水位(m)		
				最大水位上昇	最大水位下降	
概略最大水位 上昇ケース(領域3)	a) 傾斜角 δ	基準±5°	3	計9	+13.0	-5.7
	b) すべり角 λ	基準±10°				
概略最大水位 下降ケース(領域4)	a) 傾斜角 δ	基準±5°	3	計9	+8.6	-8.1
	b) 断層面上縁深さ d	0, 1, 2km				

c. 評価結果

概略パラメータスタディのうち、領域3を波源とする最大水位上昇のケースについては、プレート間地震の不確定さとして、さらに傾斜角とすべり角を組み合わせることで変化させた場合の数値シミュレーションを実施した。また、領域4を波源とする最大水位下降のケースについては、プレート内正断層の不確定さとして、傾斜角と断層上縁深さを組み合わせることで変化させた場合の数値シミュレーションを実施した。これらの結果によれば、敷地における最大水位上昇量は領域3を波源として約13.0m、取水口付近における最大水位下降量は領域4を波源として約8.1mである。

なお、最大水位上昇ケースの敷地前面における最大水位上昇量は、既往最大の1611年の津波の最大水位上昇量を上回っている。また、パラメータスタディをした想定津波群の敷地周辺における計算水位は、既往津波高を全ての地点で上回っていることを確認した。

詳細パラメータスタディ後の最高水位および最低水位

区分	断層パラメータの概要	計算水位(m)
最大水位上昇 (領域3)	基準(最南端), 走向θ=-5°としたケース (傾斜角δ=25°, すべり角λ=80°)	+13.0
最大水位下降 (領域4)	基準(最南端), 走向θ=-10°としたケース (傾斜角δ=40°, 断層面上縁深さd=2km)	-8.1

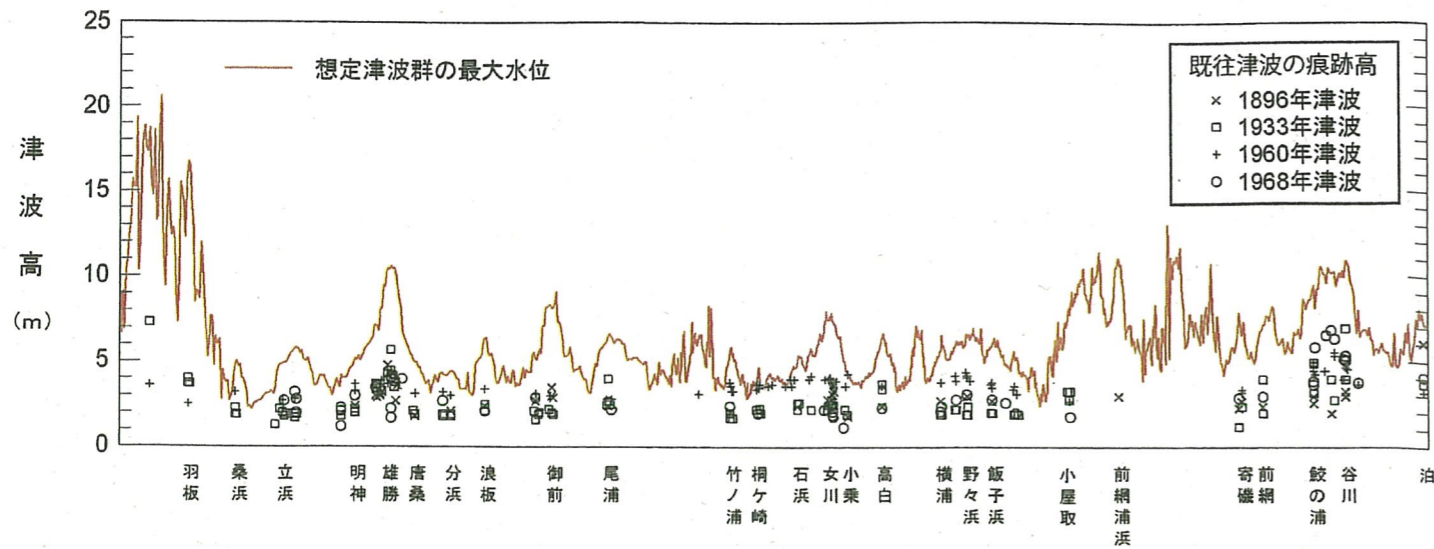


図-1-6 想定津波群と既往津波高の関係図

d. 連動型想定宮城県沖地震津波

基準地震動 Ss-F で用いた断層モデルによる地震に伴う津波（連動型想定宮城県沖地震津波）に対する検討を行った。

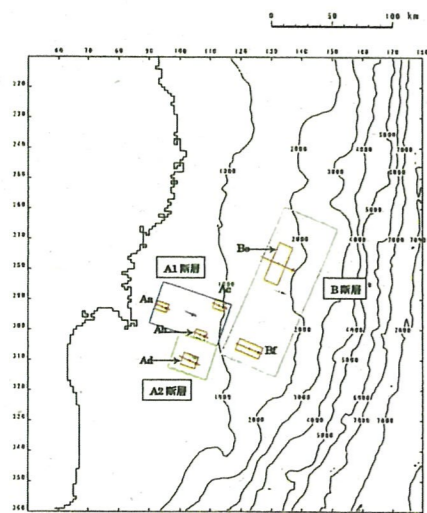


図-1-6：断層位置，アスペリティ位置

項目	断層全体			アスペリティ					
	A1	A2	B	Aa	Ab	Ac	Ad	Be	Bf
面積 (km ²)	2,266	1,071	6,483	72	72	72	137	410	205
平均すべり量 (m)	4.35 (背景領域)			5.45	5.45	5.45	7.55	13.03	9.21
断層上縁深さ (km)	26	26	14	44.5	30.3	27.4	30.3	19.8	17.6
走向 (°)	200	200	205	200	200	200	200	205	205
傾斜角 (°)	21	21	12	21	21	21	21	12	12
すべり角 (°)	85	85	90	85	85	85	85	90	90

上記の断層モデルを用いて、数値シミュレーションを実施した結果、敷地における最大水位上昇量は約 4.2m、最大水位下降量は約 3.6m である。

前述の設計想定津波の検討結果から、水位上昇側の設計想定津波では、敷地前面における最大水位上昇量が 13.0m、最大水位下降量が 8.1m であることから、連動型想定宮城県沖地震に伴う津波の高さは、設計想定津波を上回るものではないことを確認した。

2. 取水設備の水理特性による水位変動への影響

(1) 設計条件

数値シミュレーションは、取水口から取水路、海水ポンプ室まで（3号機は海水熱交換器建屋）について検討した。

数値シミュレーションの計算条件を以下に示す。

項目	設定内容
計算範囲	1・2号機：取水口～海水ポンプ室 3号機：取水口～海水ポンプ室～海水熱交換器建屋
計算時間間隔 Δt	0.0001 秒
基礎方程式	非定常管路流・開水路の連続式および運動方程式
海水ポンプ室側境界条件	水位上昇側評価 1号機：循環水ポンプ停止時 3,860m ³ /hr 2号機：循環水ポンプ停止時 7,850m ³ /hr 3号機：循環水ポンプ停止時 7,850m ³ /hr 水位下降側評価 ※ 1号機：通常運転時 137,400m ³ /hr 1号機：循環水ポンプ停止時 3,860m ³ /hr 2号機：通常運転時 199,440m ³ /hr 2号機：循環水ポンプ停止時 7,850m ³ /hr 3号機：通常運転時 202,600m ³ /hr 3号機：循環水ポンプ停止時 7,850m ³ /hr
取水路の摩擦損失係数	マンニングの粗度係数 n=0.018m ^{-1/3} s 1号機（経年時）：取水路の 0.10m の貝代を考慮 2号機（経年時）：取水路の 0.15m の貝代を考慮 3号機（経年時）：取水路の 0.15m の貝代を考慮
潮位条件	水位上昇側：朔望平均満潮位 O.P. +1.43m ⁽³⁹⁾ 水位下降側：朔望平均干潮位 O.P. -0.14m ⁽³⁹⁾
局所損失係数	土木学会(1999)等 ⁽³²⁾⁻⁽³³⁾ による
計算時間	地震発生後 4 時間

※ 循環水ポンプ停止水位（1号機：O.P. -3.30m，2号機：O.P. -4.95m，3号機：O.P. -4.50m）以下で循環水ポンプ停止時に切り替え

管路の基礎方程式（取水路の圧力水路時）

・連続式

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

・運動方程式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gA \left(\frac{n^2 |v| v}{R^{4/3}} + \frac{1}{\Delta x} f \frac{|v| v}{2g} \right) = 0$$

開水路の基礎方程式（取水口，取水路，海水ポンプ室の開水路時）

一次元非定常管路流の連続式

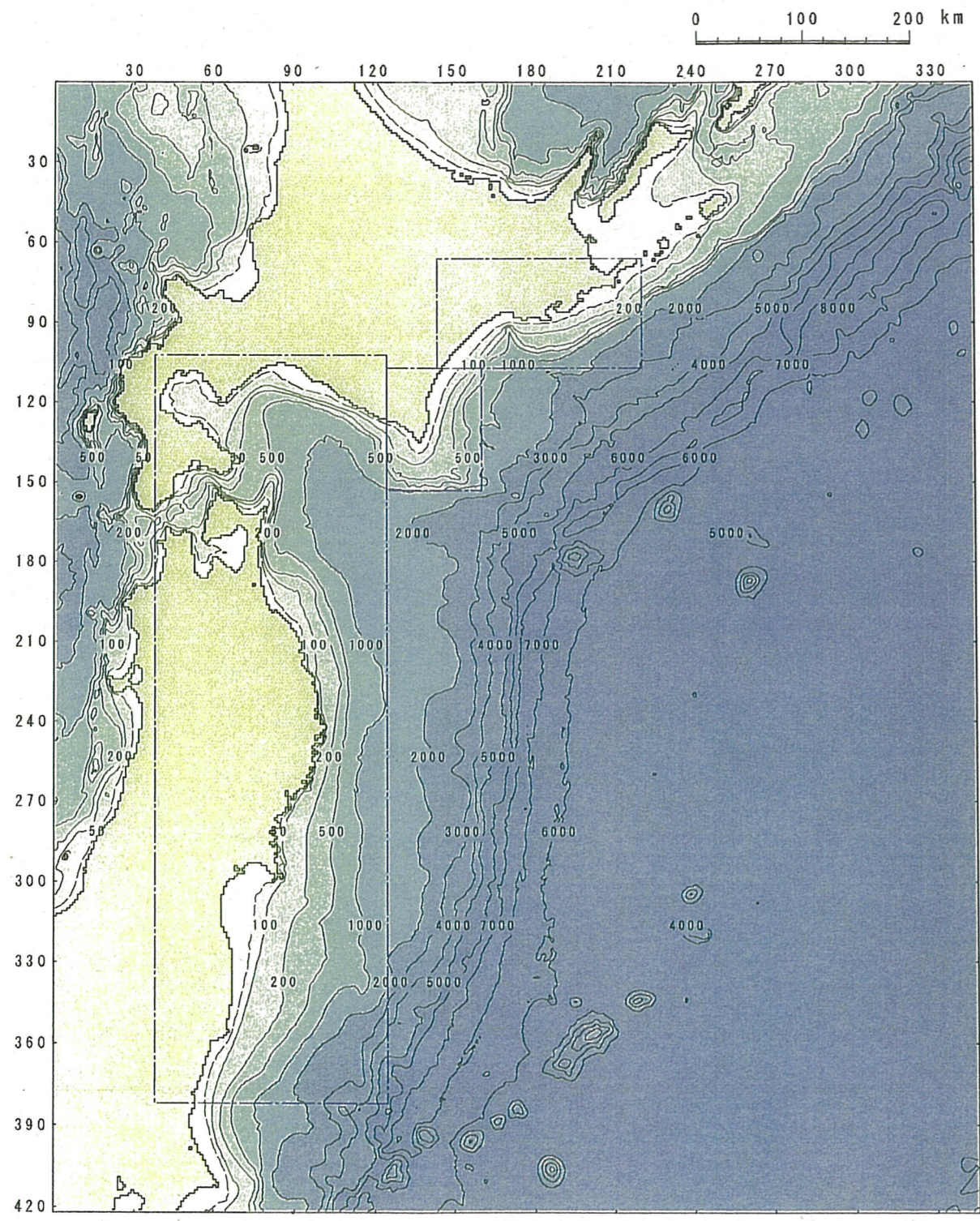
・連続式

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

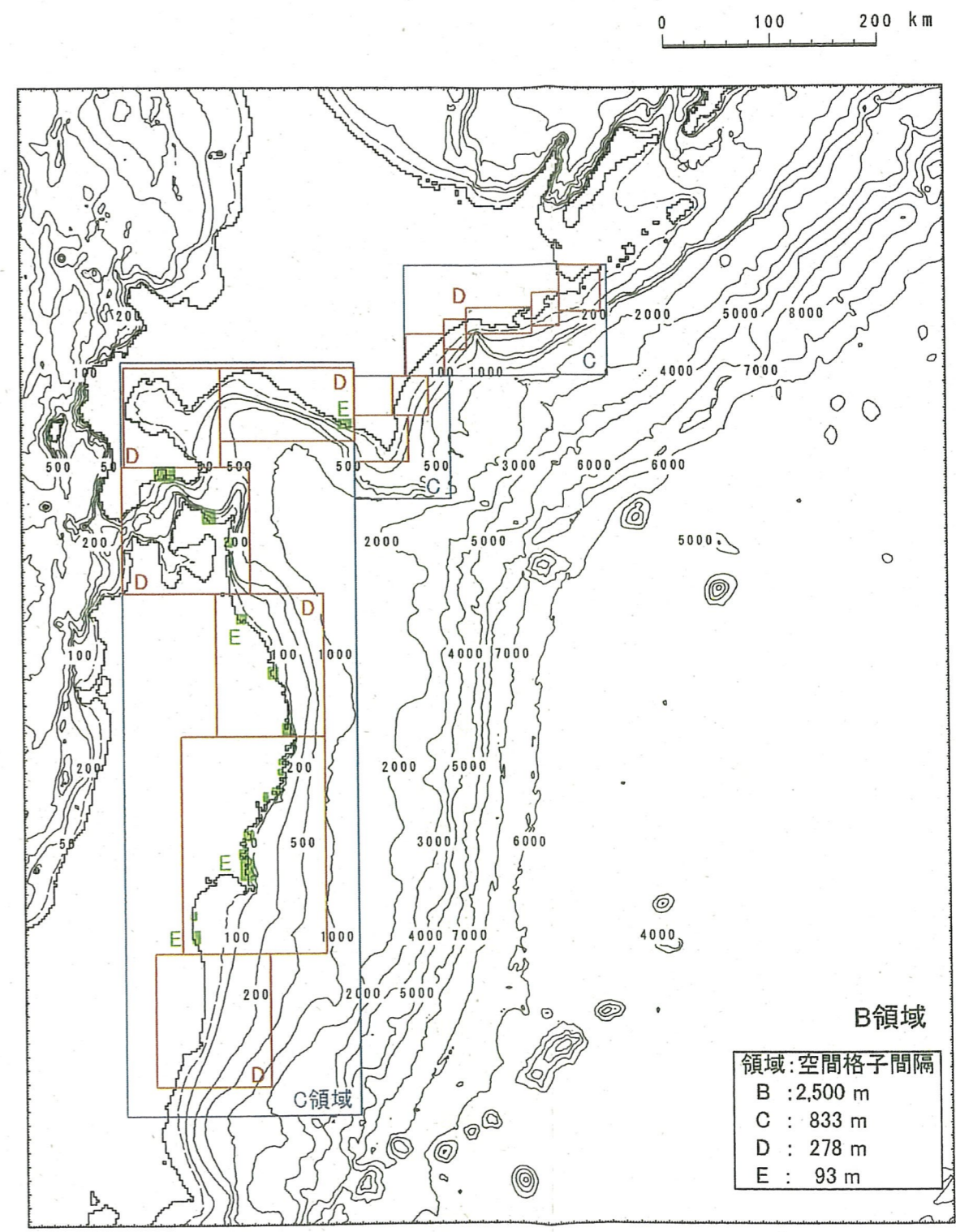
・運動方程式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gA \left(\frac{n^2 |v| v}{R^{4/3}} + \frac{1}{\Delta x} f \frac{|v| v}{2g} \right) = 0$$

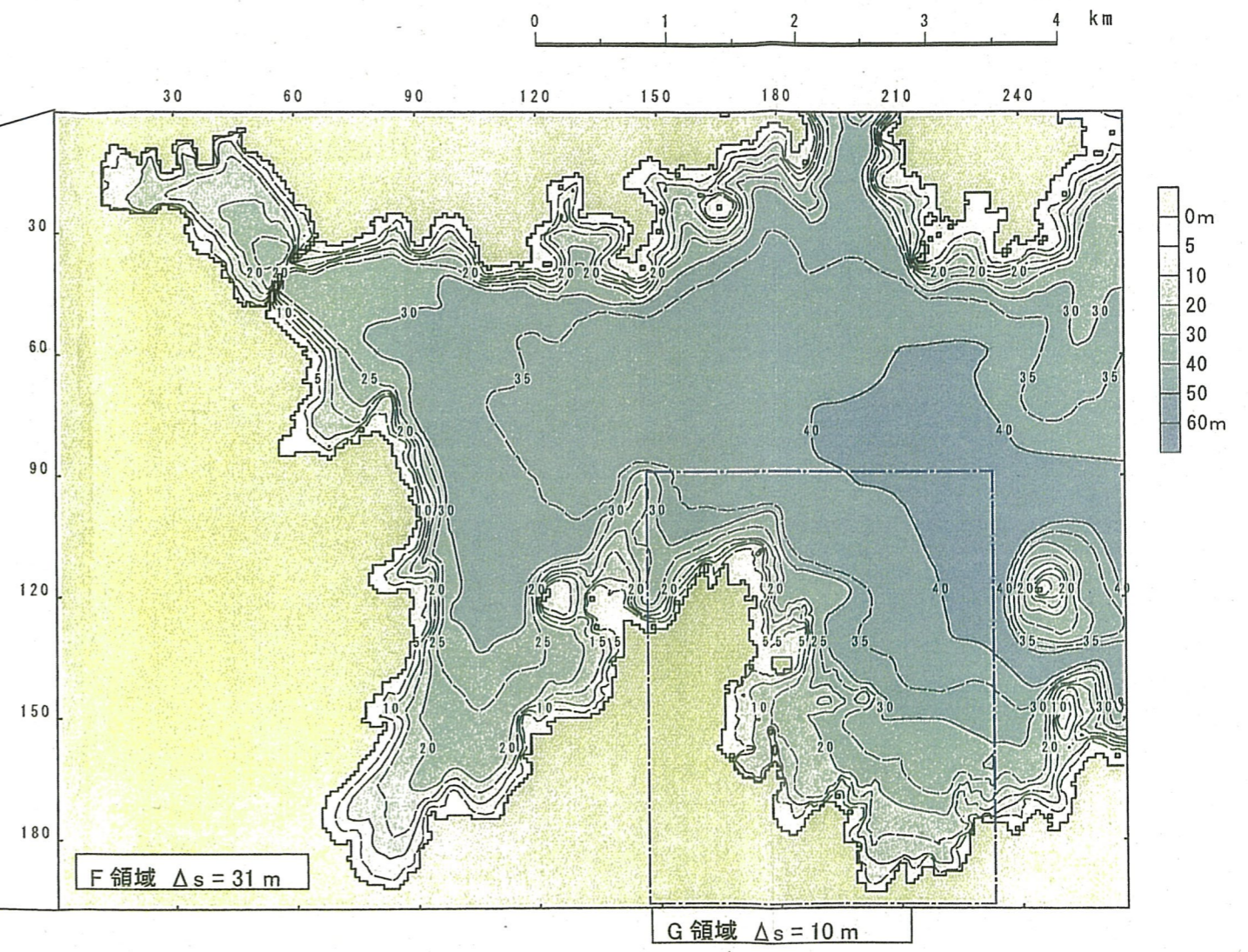
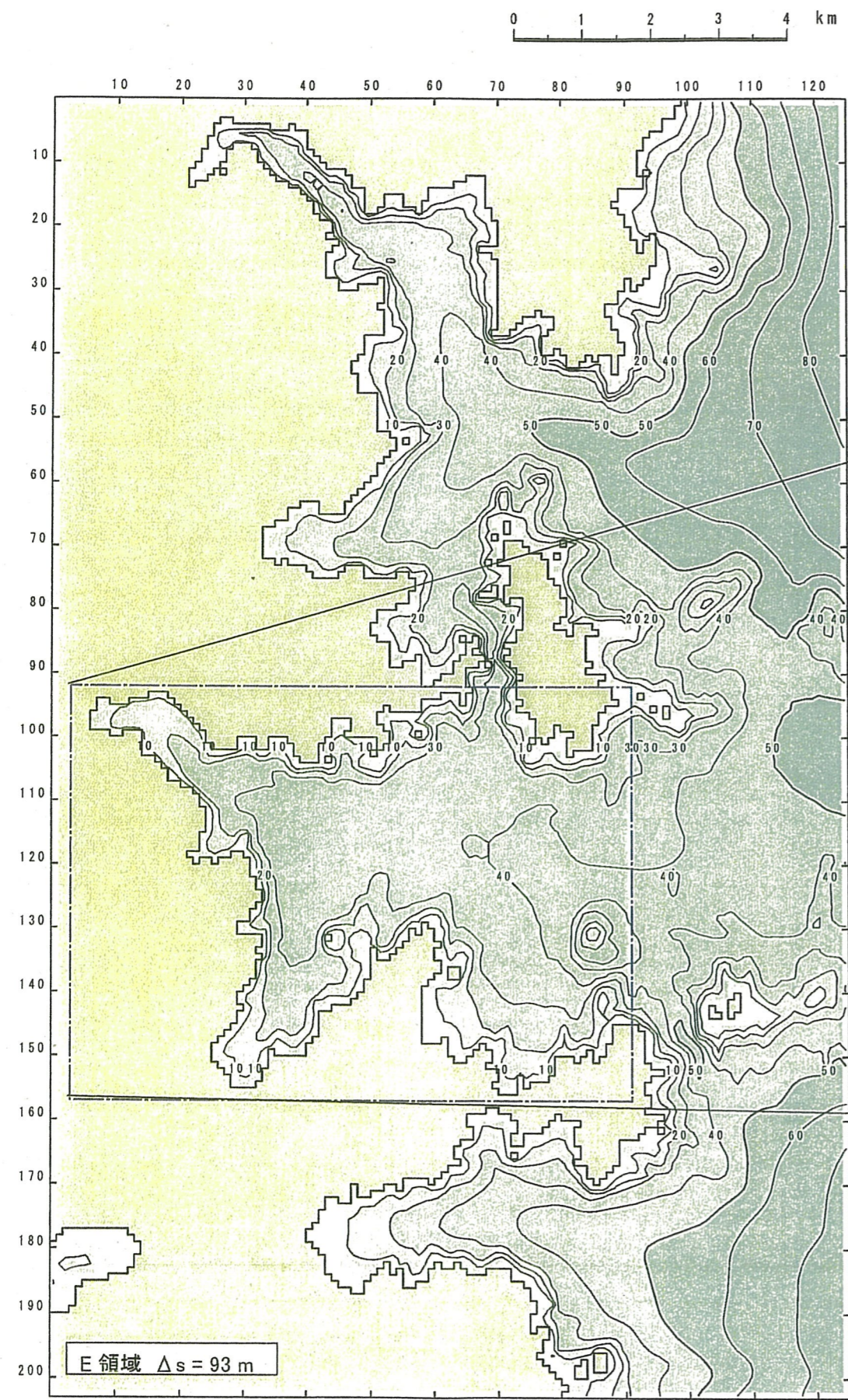
- | | | | | | |
|----|-----------------------------|---|---------------------------------------|---|-----------------|
| t | : 時間 (s) | Q | : 流量 (s) | v | : 管路の流速 (m/s) |
| x | : 流下方向の座標 | A | : 流水断面積 (m ²) | H | : 圧力水頭+位置水頭 (m) |
| g | : 重力加速度 (m/s ²) | f | : 局所損失係数 | R | : 管路の流速 (m/s) |
| Δx | : 管路の流れ方向長さ | n | : Manning の粗度係数 (m ^{-1/3} s) | | |



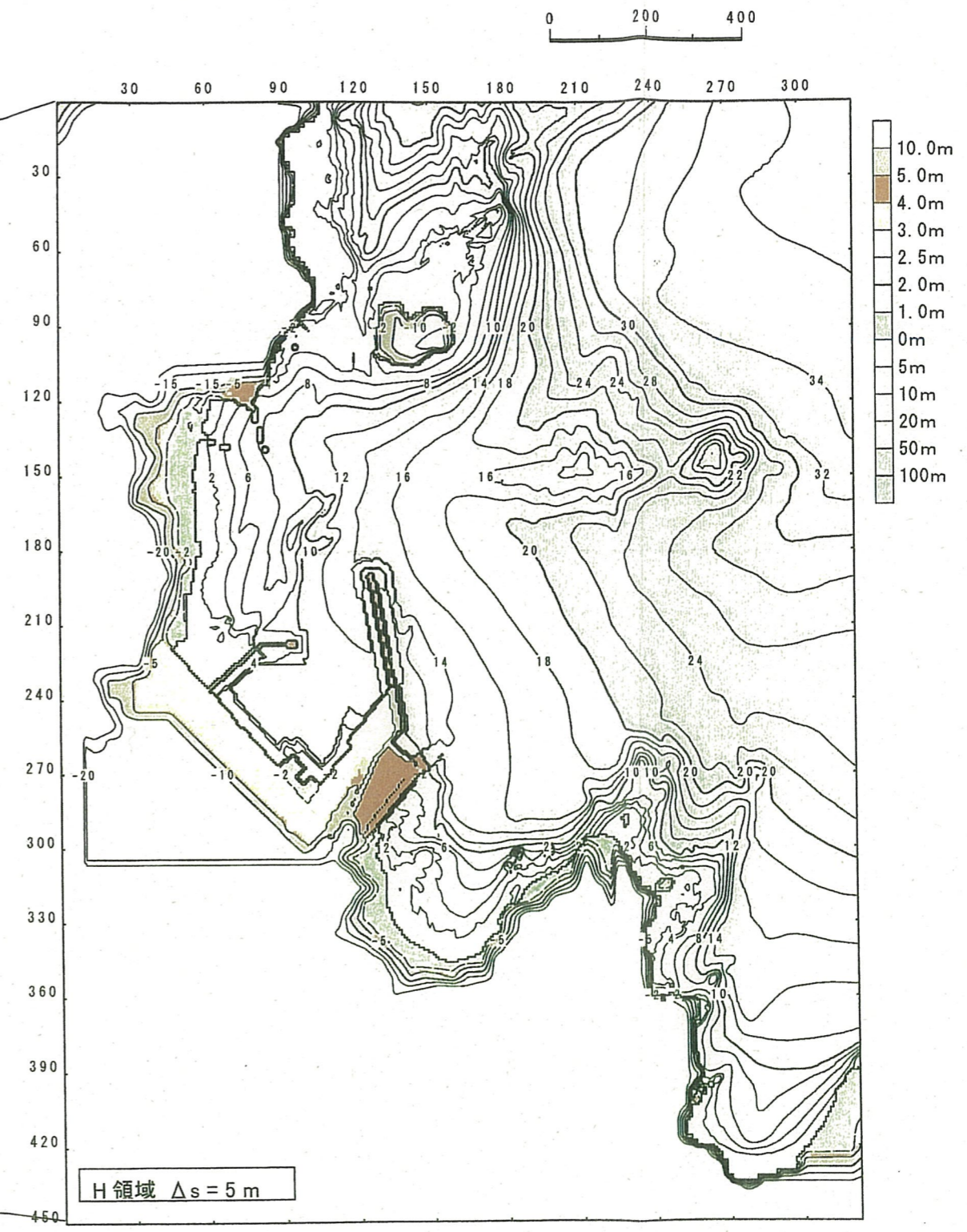
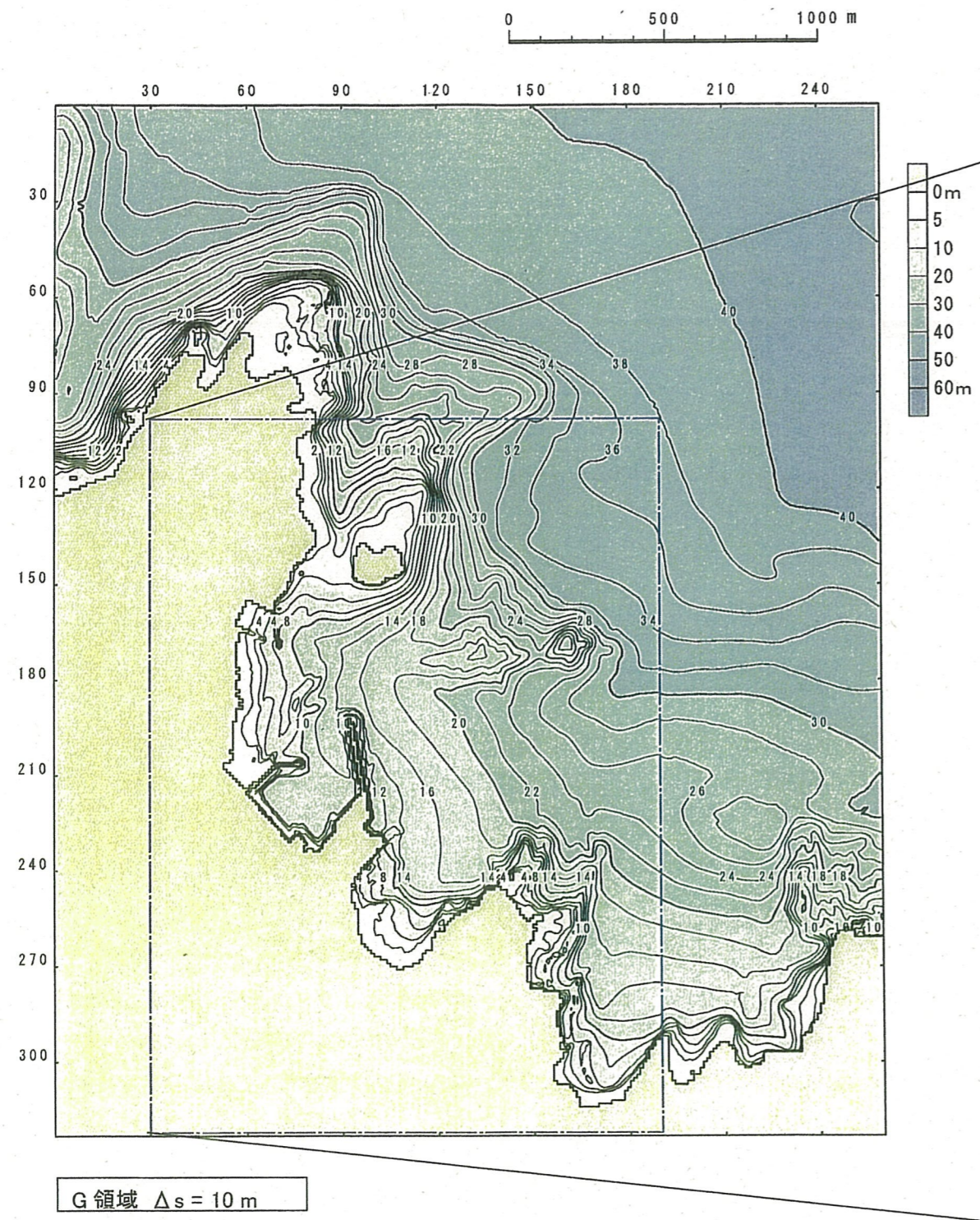
添付図-1：計算領域と水深



添付図-2：計算領域の格子分割



添付図-3：計算領域と地形（E～G領域）



添付図-4：計算領域と地形（G～H領域）

(2) 検討結果

想定津波を対象とした取水設備の水理特性による水位変動について数値シミュレーションを実施した結果、水位上昇に対して各設備から溢水することはない、また、水位低下に対して取水できなくなることはないことから、原子炉施設の安全性に問題とならないことを確認した。

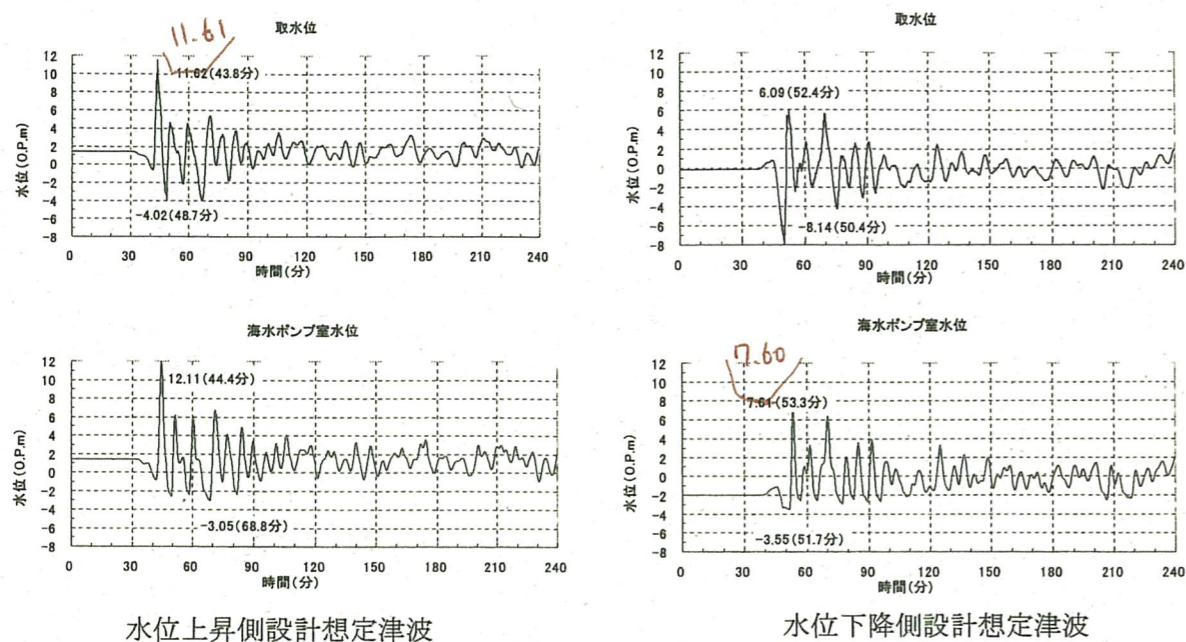


図-2-1：取水設備の水理特性による水位時系列変化（1号機）

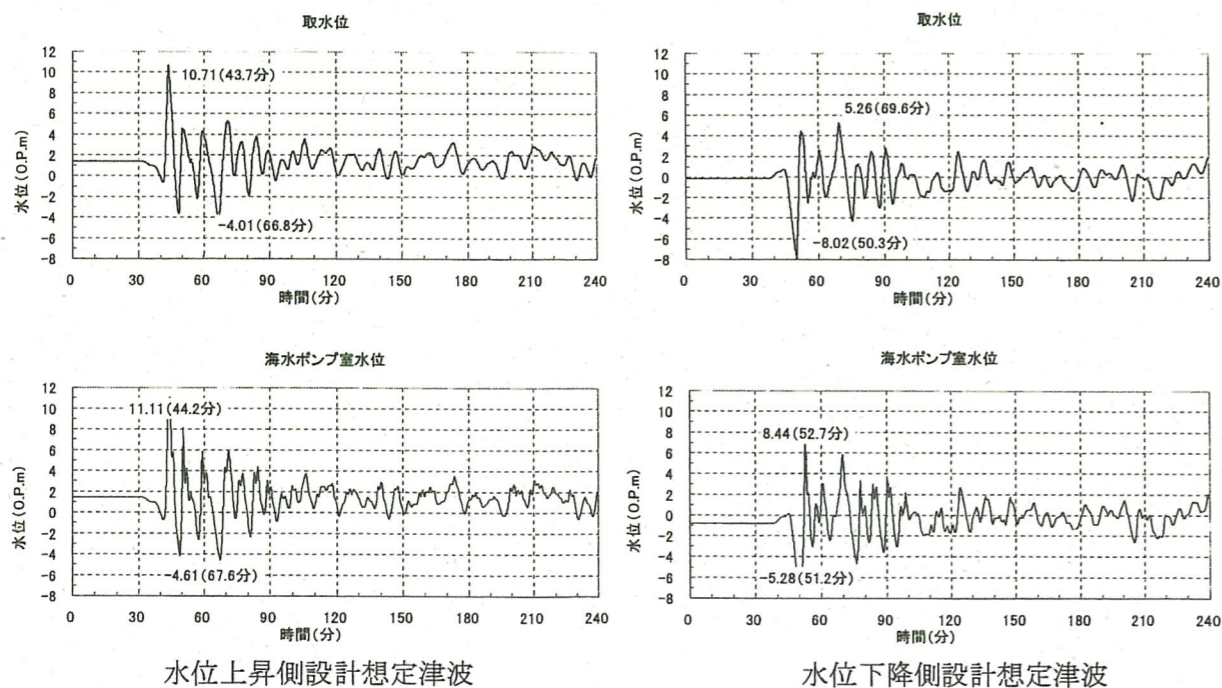


図-2-2：取水設備の水理特性による水位時系列変化（2号機）

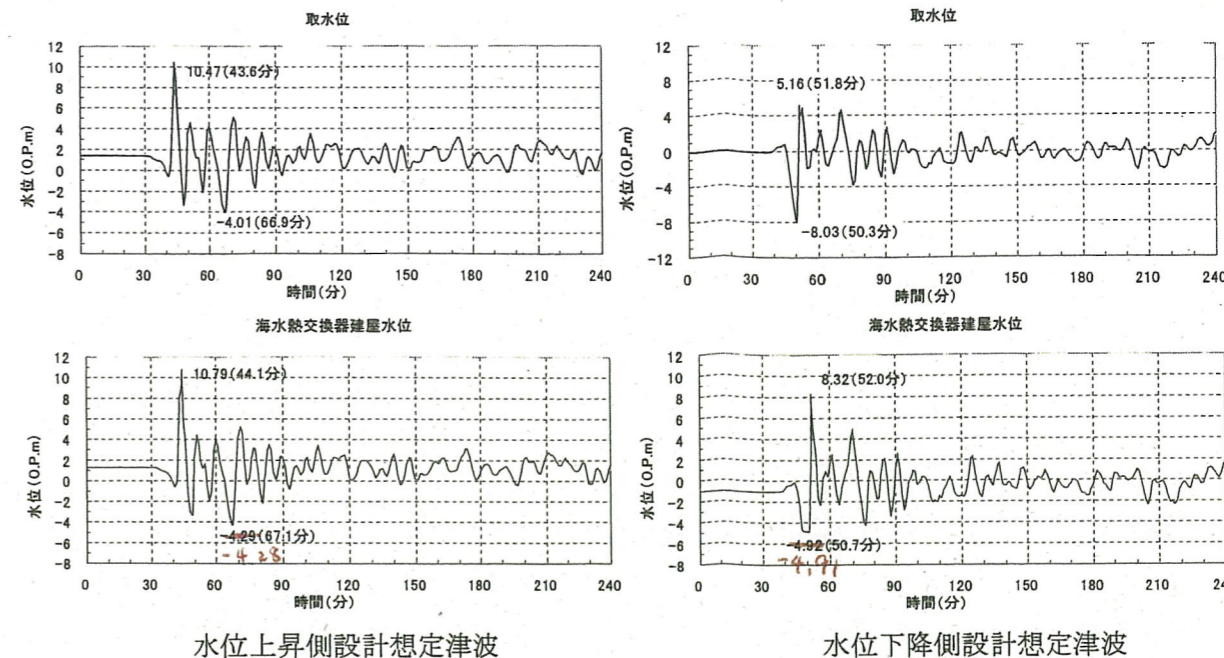


図-2-3：取水設備の水理特性による水位時系列変化（3号機）

3. 砂移動に対する評価

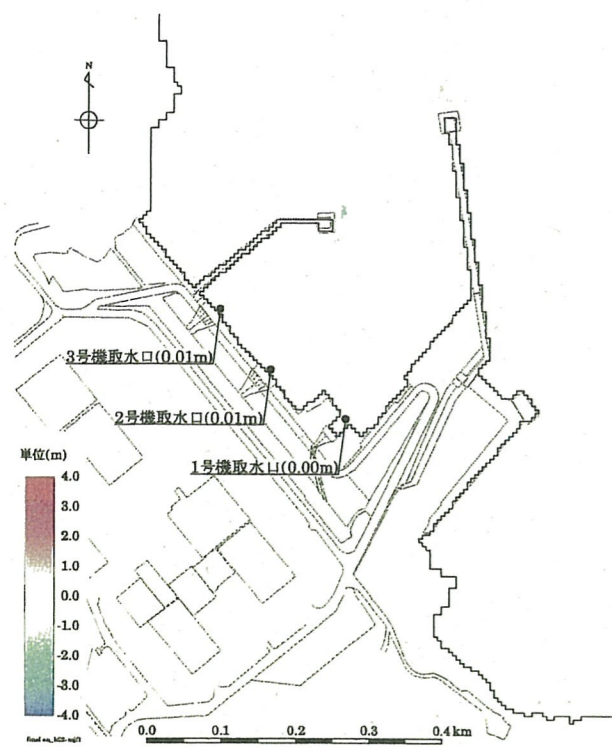
想定津波により砂が移動した場合の影響について数値シミュレーションにより検討し、非常用系の冷却海水ポンプの取水に支障が生じることはなく、原子炉施設の安全性に問題とならないことを確認する。

数値シミュレーションは、藤井ほか（1998）⁽³⁴⁾、高橋ほか（1999）⁽³⁵⁾の手法に基づき、津波の挙動とそれに伴う砂移動を同時に計算し、その結果変化した地形を用いて次のステップの流れと水位を計算した。

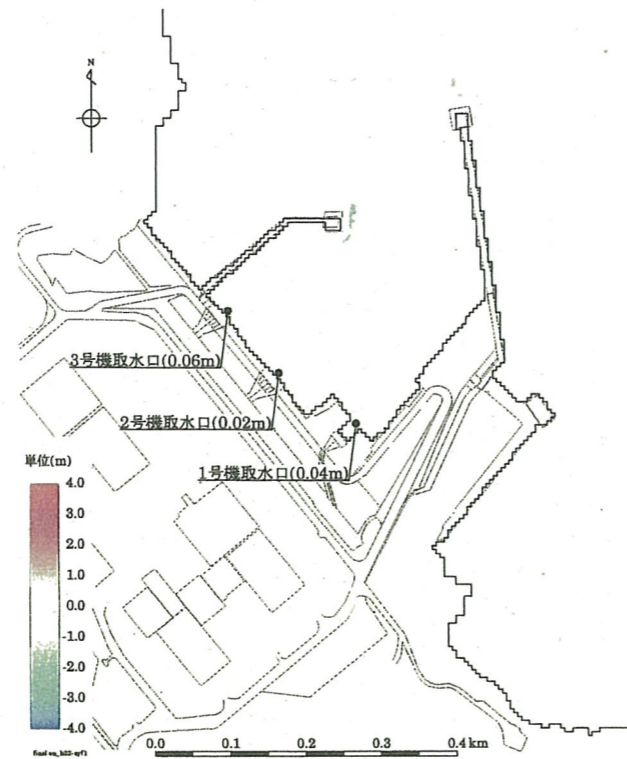
	藤井ほか(1998) ⁽³⁴⁾ の手法	高橋ほか(1999) ⁽³⁵⁾ の手法
地盤高の連続式	$\frac{\partial Z}{\partial t} + \alpha \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \frac{E-S}{\sigma(1-\lambda)} = 0$	$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{E-S}{\sigma} \right) = 0$
浮遊砂濃度連続式	$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(UC)}{\partial x} - \frac{E-S}{D} = 0$	$\frac{\partial(C_s D)}{\partial t} + \frac{\partial(MC_s)}{\partial x} - (E-S) = 0$
流砂量式	小林ほか(1996) ⁽³⁶⁾ の実験式 $Q = 80\tau_*^{1.5} \sqrt{sgd^3}$	高橋ほか(1999) ⁽³⁵⁾ の実験式 $Q = 21\tau_*^{1.5} \sqrt{sgd^3}$
巻き上げ量の算定式	$E = \frac{(1-\alpha)Qw^2\sigma(1-\lambda)}{Uk_z \left[1 - \exp\left\{ \frac{-wD}{k_z} \right\} \right]}$	$E = 0.012\tau_*^2 \sqrt{sgd} \cdot \sigma$
沈降量の算定式	$S = wC_b$	$S = wC_{sb} \cdot \sigma$
摩擦速度の計算式	log-wake 則 $u_* / U = \kappa / \{ \ln(h/Z_0) - 1 \}$ を積分した式より算出	マニング則より算出 $u_* = \sqrt{gn^2 U U / D^{1/3}}$

- Z : 水深変化量 (m) t : 時間 (s) x : 平面座標
- Q : 単位幅、単位時間当たりの掃流砂量 (m³/s/m) τ_{*} : シールズ数
- σ : 砂の密度 (kg/m³) ρ : 海水の密度 (kg/m³) S : σ/ρ - 1
- g : 重力加速度 (m/s²) d : 砂の粒径 (m) U : 流速 (m/s)
- D : 全水深 (m) M : U × D (m²/s) λ : 空隙率
- n : Manningの粗度係数 (m^{-1/2}/s)
- α : 局所的な外力のみに移動を支配される成分が全流砂量に占める比率 (=0.1)
- w : 土粒子の沈降速度 (m/s) C : 浮遊砂濃度 (kg/m³) C_s : 浮遊砂体積濃度
- C_b : 底面浮遊砂濃度 (kg/m³) C_{sb} : 底面浮遊砂体積濃度 k_z : 鉛直拡散係数 (m²/s)
- κ : カルマン定数 (=0.4) h : 水深 (m) Z₀ : 粗度高さ (=κs/30) (m)
- κ_s : 相当粗度 (=d) (m)

その結果、想定津波を対象とした砂移動の数値シミュレーションを実施した結果、各号機の取水口付近における砂の堆積は最大でも 0.2m程度であることから、砂移動により非常用系の冷却海水ポンプの取水に支障が生じることはないことを確認した。

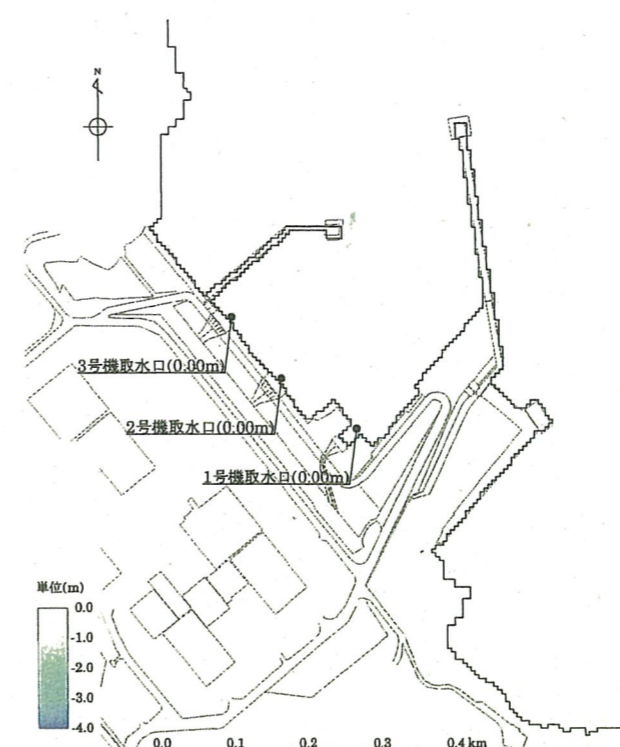


(a) 最大水位上昇ケース

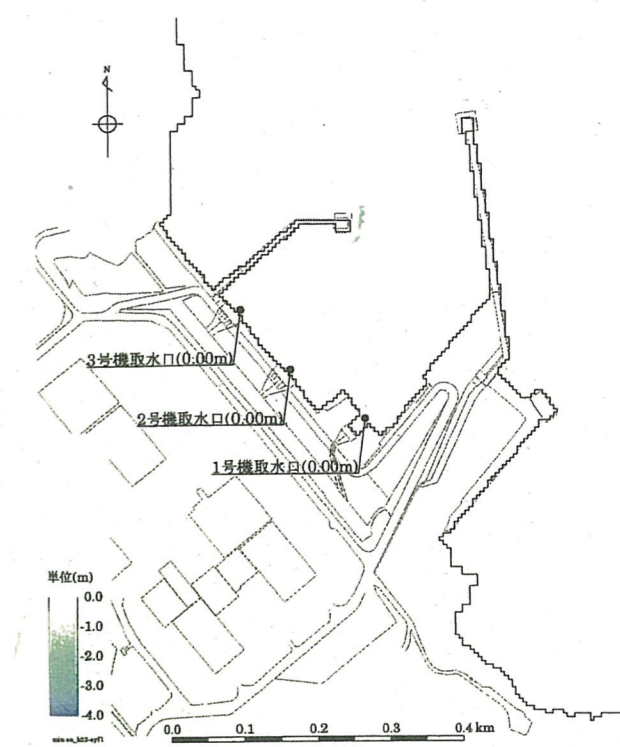


(b) 最大水位下降ケース

砂移動に伴う地形変化量の分布 (藤井ほか(1998)⁽³⁴⁾, 地震発生後 240 分)

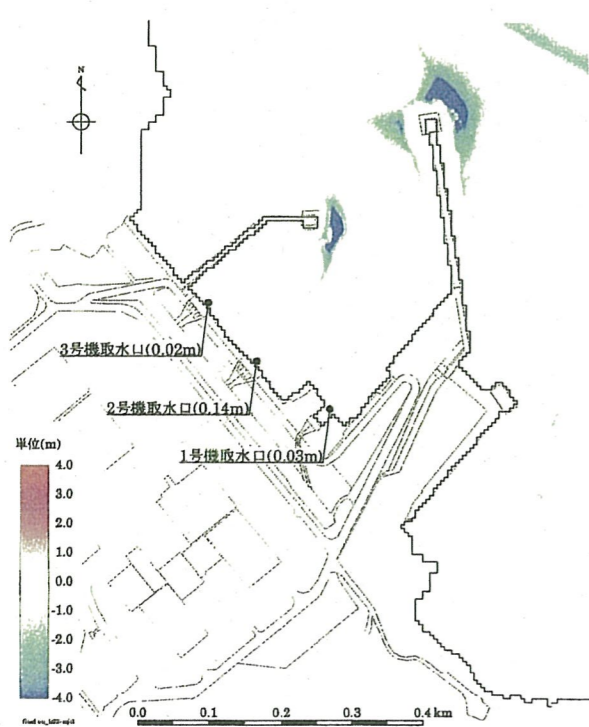


(a) 最大水位上昇ケース

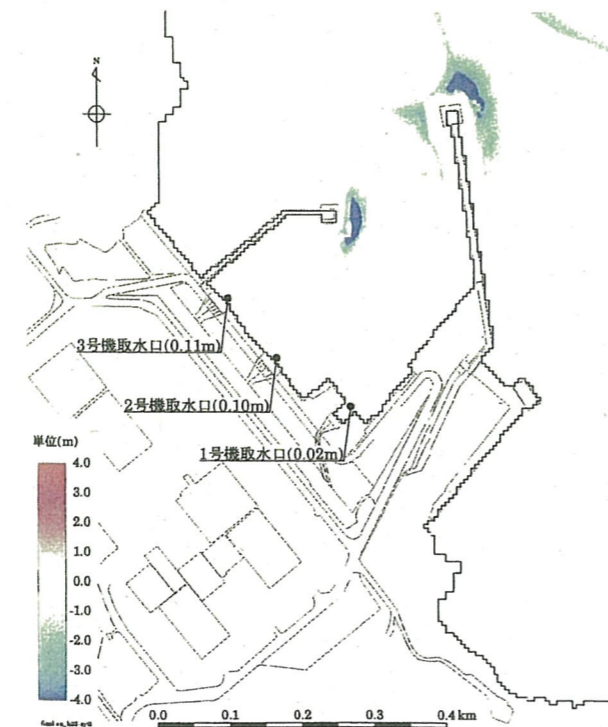


(b) 最大水位下降ケース

砂移動に伴う地形変化の最大侵食量分布 (藤井ほか(1998)⁽³⁴⁾)

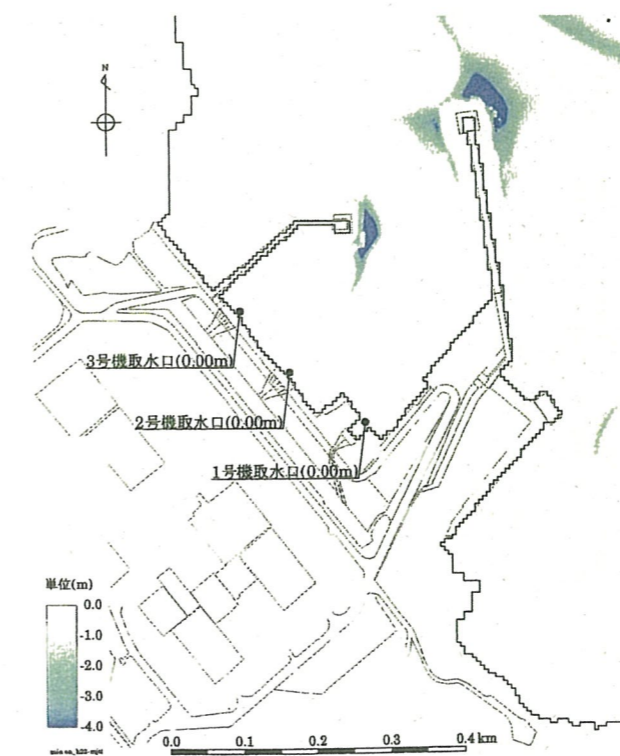


(a) 最大水位上昇ケース

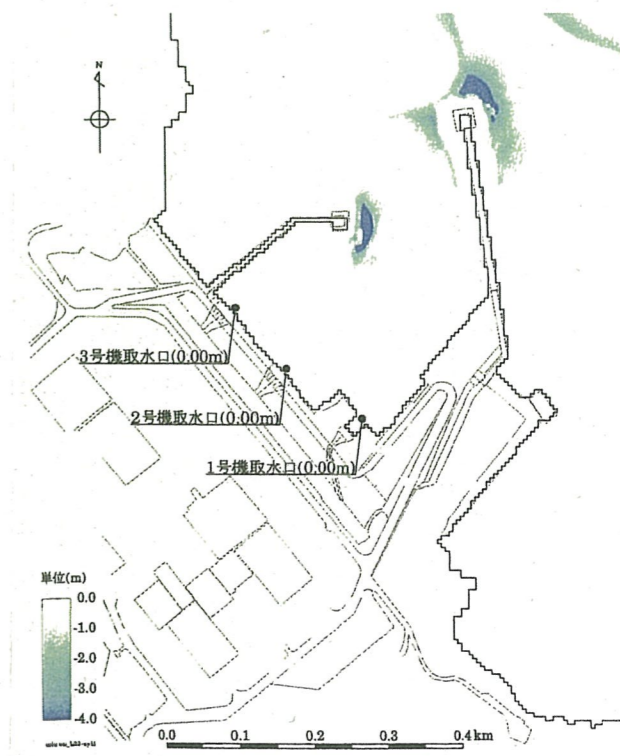


(b) 最大水位下降ケース

砂移動に伴う地形変化量の分布 (高橋ほか(1999)⁽³⁵⁾, 地震発生後 240 分)



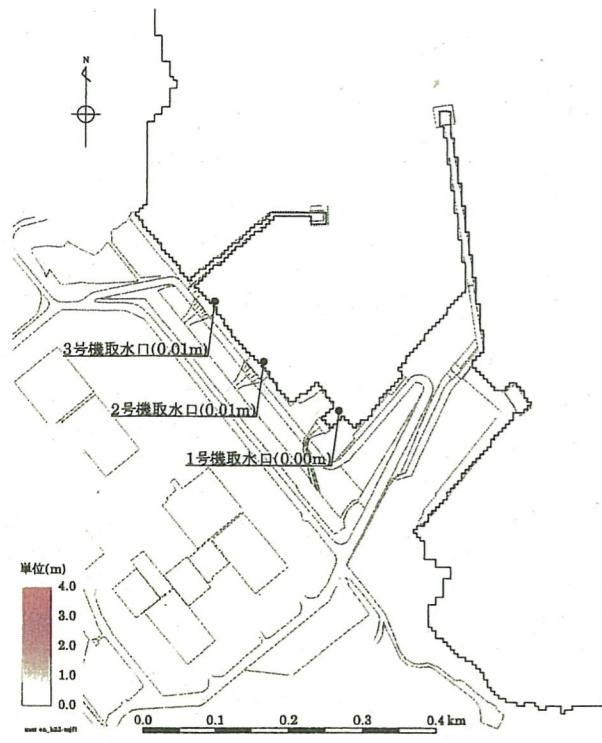
(a) 最大水位上昇ケース



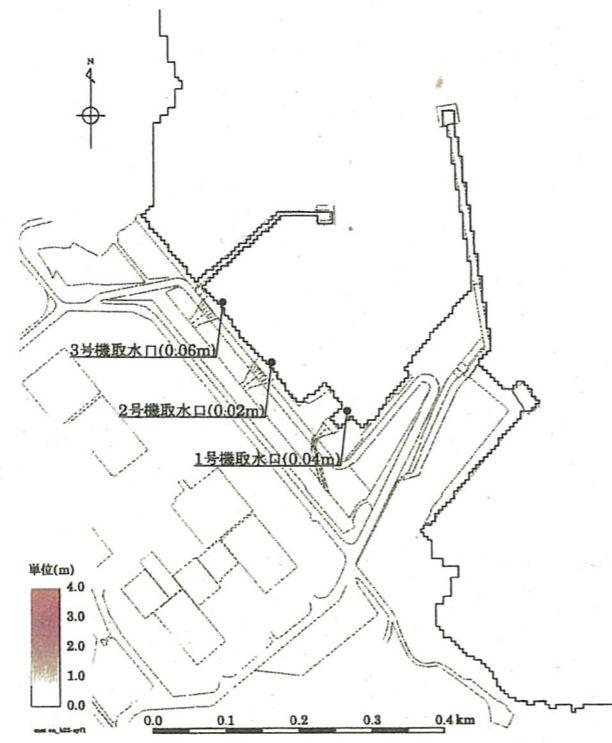
(b) 最大水位下降ケース

砂移動に伴う地形変化の最大侵食量分布 (高橋ほか(1999)⁽³⁵⁾)

岩礁域でも砂が溜り

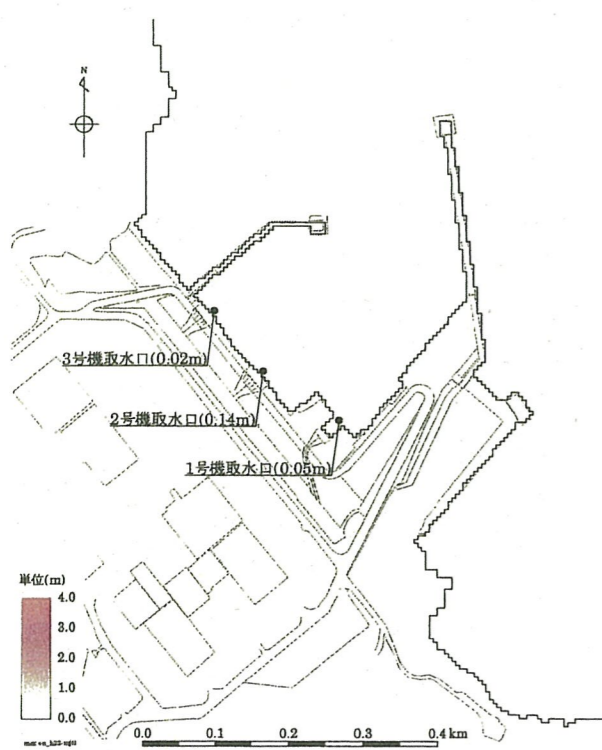


(a) 最大水位上昇ケース

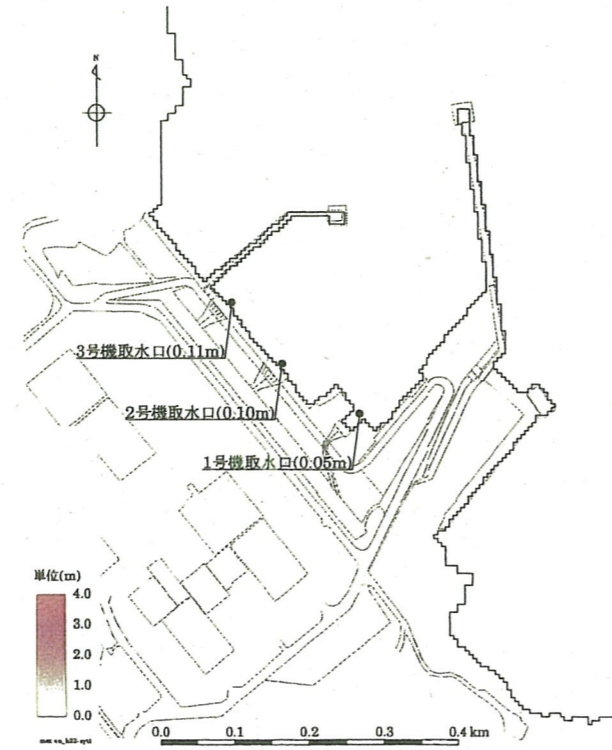


(b) 最大水位下降ケース

砂移動に伴う地形変化の最大堆積量分布 (藤井ほか(1998)⁽³⁴⁾)



(a) 最大水位上昇ケース



(b) 最大水位下降ケース

砂移動に伴う地形変化の最大堆積量分布 (高橋ほか(1999)⁽³⁵⁾)