

第4章 小規模攪乱力解析

風浪により吉野川河口部周辺に生じる攪乱力を数値解析により定量的に評価する事を目的とする。

4-1．対象区域

吉野川河口 0km 地点より、河川上流側 4km、海域側 3km の 7km を解析対象区間とする。
海域部分は 0km 地点中央断面より、北側 1km、南側 1.5km の計 2.5km を含める。

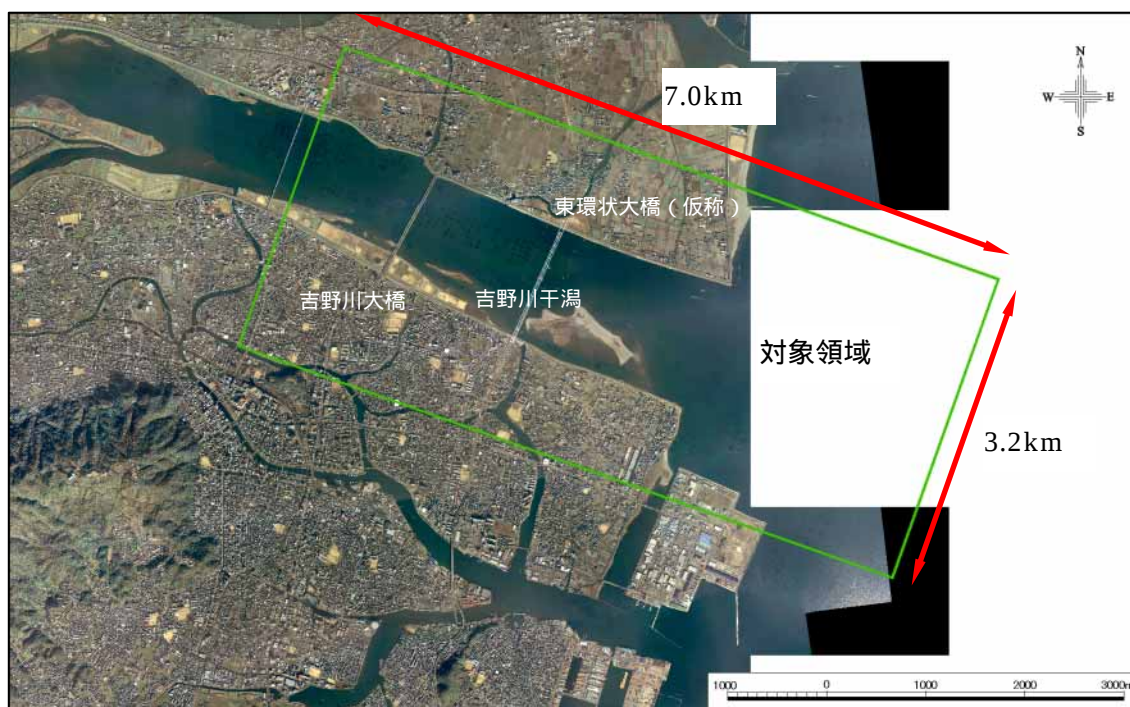


図 4-1 吉野川河口における波浪解析の対象領域 (7.0km × 3.2km)

4-2 . 地形条件

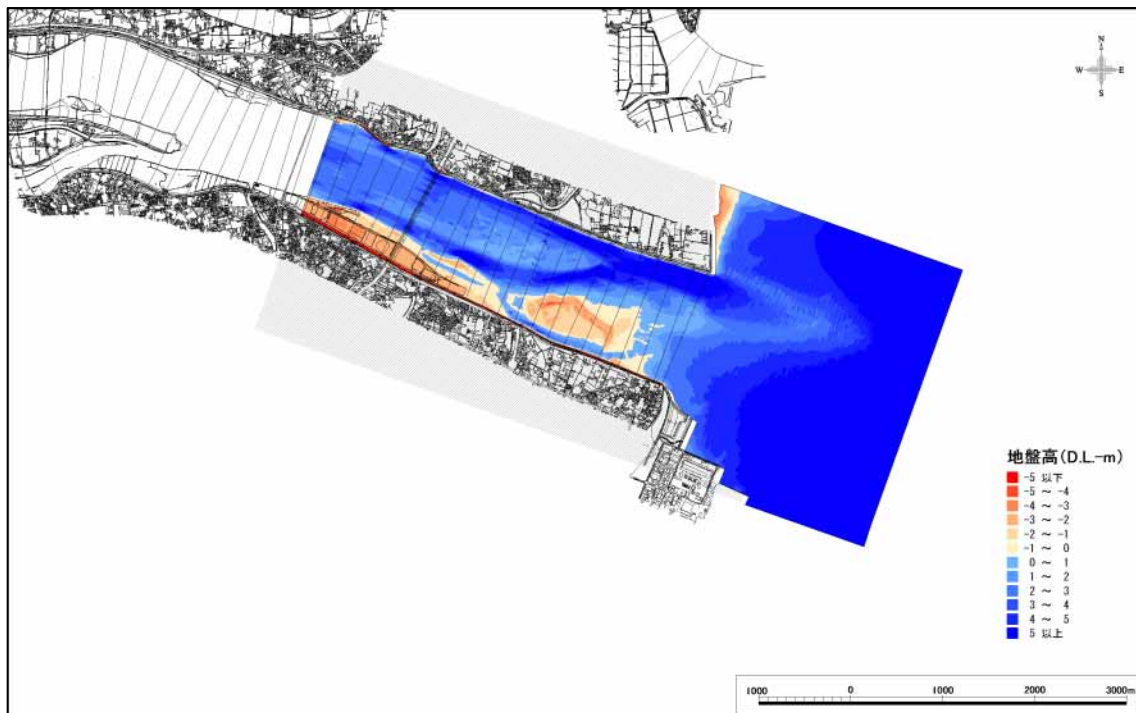


図 4-2 解析領域の水深分布図（平成 18 年 11 月 1 日時点）

4-3．解析手法

間瀬らによる、波の回折を考慮した多方向不規則波の変形解析モデルを使用する。

このモデルは従来のエネルギー平衡方程式に放物型波動方程式を基とした回折項を陽な形で含み、また砕波や反射波の効果を導入し、回折・反射においても安定した結果を得ることが可能である。

下表に様々な平面波浪場解析手法の理論的適用可能範囲を示す。エネルギー - 平衡方程式は他の手法と比べて汎用性が高い解析手法が、「回折」が基本理論に考慮されていないことが欠点であった。しかし、今回、適用を考えている間瀬らの手法は、欠点を補ったものである。

表 4-1 平面波浪場解析手法の理論的適用可能範囲¹⁾

計算手法	浅水変形	屈折	回折	反射	砕波モデル	任意水深	流れの影響	不規則性	有限振幅性	計算領域			備考
										広	中	狭	
波向線法	◎	◎	×			◎	○	○	△	○	○	○	は瘦躯に有限振幅性を含める
エネルギー平衡方程式	◎	◎	▽	△	○	◎	○	◎	×	○	○	○	
ヘルムホルツ方程式	○	○	◎	◎	×	◎	×	○	×			○	領域ごとに一様水深
高山の方法			◎	◎	×	◎	×	◎	×		○	○	一様水深のみ
緩勾配方程式	◎	◎	◎	◎	○	◎	○	○	△			○	
非定常緩勾配方程式	◎	◎	◎	◎	○	◎	○		×			○	砕波モデル・境界条件処理が容易
数値波動解析法	○	◎	◎	◎		◎			×			○	
非定常緩勾配不規則波動方程式	◎	◎	◎	◎	○	◎		◎	×			○	
放物型波動方程式	◎	◎	◎	△	○	◎	○	○	△		○	○	
非線型長波動方程式	◎	◎	◎	◎	○	×		◎	◎			○	鉛直加速度が無視される浅海域に限定される
ブシネスク方程式	◎	◎	◎	◎	○	○	○	◎	◎			○	原方程式は浅海息に限定される
ガラーキン法	◎	◎	◎	◎		◎		◎	◎			○	
非線型緩勾配波動方程式	◎	◎	◎	◎		◎		◎	◎			○	

◎：基本形で適用可能

○：応用形で一般的適用可能

▽：応用形で部分的適用可能

△：基本理論では考慮されないが実用上適用可能

空白：研究により適用できる可能性あり

×：適用不可能

以下に、間瀬らの波の回折を考慮した多方向不規則波の変形解析モデルについて述べる。

1) エネルギー平衡方程式

エネルギー平衡方程式は、多方向不規則波の屈折、浅水変形、さらには砕波変形を説くことができる。そのため、実用的にも領域の波浪変形解析モデルとして盛んに用いられている。しかし、波の回折については、問題があることが指摘されている。定常波浪場において、砕波等によるエネルギー減衰項を加えたエネルギー平衡方程式は、次のように表される。

$$\frac{\partial(v_x s)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y s)}{\partial y} + \frac{\partial(v_\theta s)}{\partial \theta} = -\varepsilon_b s \quad (1)$$

ここでは S 波の方向スペクトル、 (x, y) は水平座標、 θ は x 軸から反時計回りに測った波向角、 ε_b はエネルギー減衰係数であり、特性速度 (V_x, V_y, V_θ) は

$$(v_x, v_y) = \frac{\partial \omega}{\partial k} \vec{s} = (C_g \cos \theta, C_g \sin \theta) \quad (2)$$

$$v_\theta = -\frac{1}{k} \frac{\partial \omega}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial n} = \frac{C_g}{C} \left(\sin \theta \frac{\partial C}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad (3)$$

と表される。 (s, n) は図 4-3 に示す波向・波峰に沿った座標、 C は波速、 C_g は群速度である。

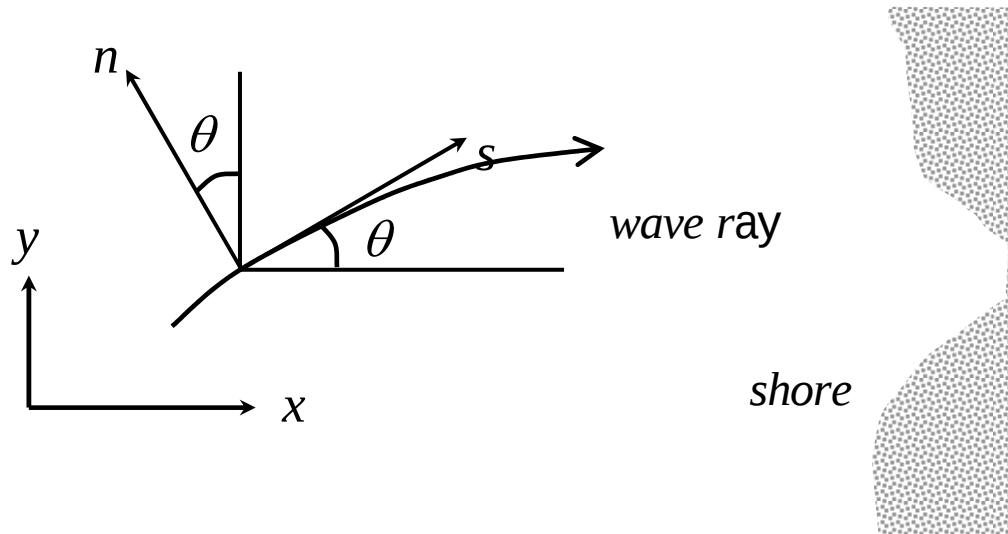


図 4-3 波向・波峰に沿った座標

2)エネルギー平衡方程式への回折項の導入

a)回折項の定式化

放物型波動方程式を基にして回折項を定式化し、エネルギー平衡方程式に導入することを考える。基本的な放物型波動方程式は、以下のように書くことができる。

$$2ikCC_g A_x + i(kCC_g)_x A = (CC_g A_y)_y = 0 \quad (4)$$

式(4)に A の共役複素素を乗じたものと、式(4)全体の共役複素素に $*$ を乗じたものを加えて、すなわち、 $\{式(4) \times A^*\} + \{式(4)^* \times A\}$ を求めると、

$$\left(C_g |A|^2\right)_x - \frac{i}{2\omega} \left\{ (CC_g |A|_y^2)_y - 2CC_g A_y A_y^* \right\} = 0 \quad (5)$$

が得られる。上式が成り立つためには

$$\left(C_g |A|^2\right)_x = 0 \quad (6)$$

$$(CC_g |A|_y^2)_y - 2CC_g A_y A_y^* = 0 \quad (7)$$

である。

式(6)はエネルギーの保存式を表し、式(7)は回折によるエネルギーの釣り合いを示している。波エネルギーは $E \propto |A|^2$ であり、式(6)及び式(6)の左辺第 1 項は E で表現できるが、第 2 項の

$A_y A_y^*$ は E で表現できない。そこで、 $A = ai + b$ として得られる $A_y A_y^*$ の表示式ができるだけ同じ

になるように $E_{yy}/4$ と近似する。したがって式(7)は

$$(CC_g E_y)_y - CC_g E_{yy}/2 \cong 0 \quad (8)$$

となる。

いま、式(6)の左辺が式(1)の左辺と比べ、エネルギー E を方向スペクトル S とみなす。そして、ほぼゼロである式(8)の E を S として式(1)の右辺に加えると、モデル方程式として次式を得る。

$$\frac{\partial(v_x s)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y s)}{\partial y} + \frac{\partial(v_\theta s)}{\partial \theta} =$$

$$\left(C_g |A|^2 \right)_x - \frac{k}{2\omega} \left\{ (CC_g \cos^2 \theta S_y)_y - \frac{1}{2} CC_g \cos^2 \theta S_{yy} \right\} - \varepsilon_b s \quad (9)$$

ここで、 k は回折項に関する影響係数である。すなわち、式(8)のようにこの項は完全にゼロにはならないのでこの影響係数によって回折項を調整する。この項は個別にはほぼゼロとなるが、差分化に当たって左辺の S へと達成するため、拡散項の役目を果たすことになる。放物型近似方程式は、波の伝播方向(ほぼ x 軸方向)に垂直な方向に回折効果を導入することができる。ここでは多方向不規則波の成分波のそれぞれに回折効果を導入しようとするものである。それぞれの成分波の伝播方向は元軸とは異なり、その分 $\cos \theta$ の重みがついている。

b) 数値計算法

成分波はすべて岸に向かって伝播するとする。図 4-4 のような要素中央部における方向スペクトルと矢印で示した特性速度の定義点の元で、風上差分を用いて式(9)を差分化すると、以下の式が得られる。

$$A_1 S_n^{ijk} + A_2 S_n^{i(j-1)k} + A_3 S_n^{i(j+1)k} + A_4 S_n^{ij(k-1)} A_5 S_n^{ij(k+1)} = -B S_n^{(i-1)jk} \quad (10)$$

ここで、 i および j はそれぞれ x 軸および y 軸方向の格子番号、 n は周波数番号、 k は波向番号を表し、 $A_1 \sim A_5$ および B は次のようである。

$$A_1 = v_{x_n}^{ijk} / \delta x + \varepsilon_{b_n}^{ij} + \frac{\kappa}{2\omega_n \delta y^2} \left\{ (CC_g)^{i(j+1)k} + (CC_g)^{ijk} - (CC_g)^{i(j+1/2)k} \right\} \cos^2 \theta_k$$

$$+ \begin{cases} v_{y_n}^{i(j+1)k} / \delta y & (v_y \geq 0) \\ -v_{y_n}^{ijk} / \delta y & (v_y < 0) \end{cases}$$

$$+ \begin{cases} v_{\theta_n}^{ij(k+1)} / \delta \theta & (v_{\theta_n}^{ijk} \geq 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ 0 & (v_{\theta_n}^{ijk} \geq 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} < 0) \\ (v_{\theta_n}^{ij(k+1)} - v_{\theta_n}^{ijk}) / \delta \theta & (v_{\theta_n}^{ijk} < 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ -v_{\theta_n}^{ijk} / \delta \theta & (v_{\theta_n}^{ijk} < 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} < 0) \end{cases} \quad (11)$$

$$A_2 = \frac{\kappa}{2\omega_n \delta y^2} \left\{ -(CC_g)^{ijk} + \frac{1}{2}(CC_g)^{i(j+1/2)k} \right\} \cos^2 \theta_k \quad (12)$$

$$+ \begin{cases} -v_{y_n}^{ijk} / \delta y & (v_y \geq 0) \\ 0 & (v_y < 0) \end{cases}$$

$$A_3 = \frac{\kappa}{2\omega_n \delta y^2} \left\{ -(CC_g)^{i(j+1)k} + \frac{1}{2}(CC_g)^{i(j+1/2)k} \right\} \cos^2 \theta_k \quad (13)$$

$$+ \begin{cases} 0 & (v_y \geq 0) \\ v_{y_n}^{i(j+1)k} / \delta y & (v_y < 0) \end{cases}$$

$$B = -v_{x_n}^{ijk} / \delta x \quad (14)$$

$$A_4 = \begin{cases} -v_{\theta_n}^{ijk} / \delta \theta & (v_{\theta_n}^{ijk} \geq 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ -v_{\theta_n}^{ijk} / \delta \theta & (v_{\theta_n}^{ijk} \geq 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} < 0) \\ 0 & (v_{\theta_n}^{ijk} < 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ 0 & (v_{\theta_n}^{ijk} < 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} < 0) \end{cases} \quad (15)$$

$$A_5 = \begin{cases} 0 & (v_{\theta_n}^{ijk} \geq 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ v_{\theta_n}^{ij(k+1)} / \delta \theta & (v_{\theta_n}^{ijk} \geq 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} < 0) \\ 0 & (v_{\theta_n}^{ijk} < 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ v_{\theta_n}^{ij(k+1)} / \delta \theta & (v_{\theta_n}^{ijk} < 0, v_{\theta_n}^{ij(k+1)} < 0) \end{cases} \quad (16)$$

ここで、 δ_x および δ_y は x 軸および y 軸方向の格子間隔である。

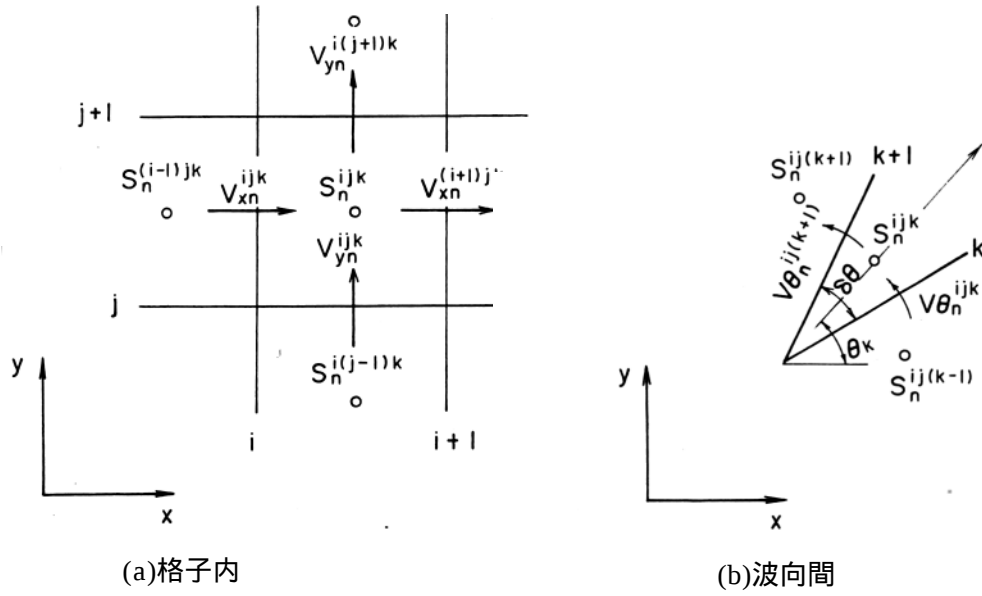


図 4-4 成分波のエネルギーの流出入

式(17)の右辺の $S_n^{(i-1)jk}$ は既知であり、周波数成分 n に対して、 $j=1 \sim J, k=1 \sim K$ の $J \times K$ 個の連立方程式を解くことによって S_n^{ijk} 求めることができる。すなわち、沖波条件として所定の方
 向スペクトルを与え、境界条件を考慮して前進的に S_n^{ijk} を求めていく。計算された S_n^{ijk} を用
 いて、有義波高 $H_{1/3}$ 、有義周期 $T_{1/3}$ 、平均波向き $\bar{\theta}$ を以下の式で求める。

$$H_{1/3} = 4.0 \sqrt{m_0} \quad (17)$$

$$T_{1/3} = T_0 \sqrt{m_0 / m_2} / \bar{T}_0 \quad (18)$$

$$\bar{\theta} = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \theta_k S_n^{ijk} / m_0 \quad (19)$$

ここで、

$$m_i = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K f_n^i S_n^{ijk} \quad (20)$$

である。 T_0 および $\bar{T}_0$ はそれぞれ沖波の有義周期と平均周期である。砕波減衰項は、高山らの
 定式化を用いている。

4-4 . 対象外力

波浪観測情報（ナウファス）より収集した 2001 年～2004 年の小松島港の波浪観測値を分析することにより、対象外力の主方向を決定する。図 4-5 より夏季における波浪の主方向は SE 方向とする。

表 4-2 夏季の波向き

夏 季（ 7 ～ 9 月 ） の 分 布					
年	2001	2002	2003	2004	4 年 分
N	0	0	0	0	0
NNE	0	0	0	0	0
NE	0	0	0	1	1
ENE	5	4	2	0	11
E	15	19	9	3	46
ESE	451	481	381	444	1757
SE	621	597	694	607	2519
SSE	2	1	1	0	4
S	0	0	0	0	0
SSW	0	0	0	0	0
SW	0	0	0	0	0
WSW	0	0	0	0	0
W	0	0	0	0	0
WNW	0	0	0	0	0
NW	0	0	0	0	0
NNW	0	0	0	0	0
合 計	1094	1102	1087	1055	4338

	夏季	年間
N	0%	0%
NNE	0%	0%
NE	0%	0%
ENE	0%	1%
E	1%	3%
ESE	41%	43%
SE	58%	52%
SSE	0%	0%
S	0%	0%
SSW	0%	0%
SW	0%	0%
WSW	0%	0%
W	0%	0%
WNW	0%	0%
NW	0%	0%
NNW	0%	0%
	100%	100%

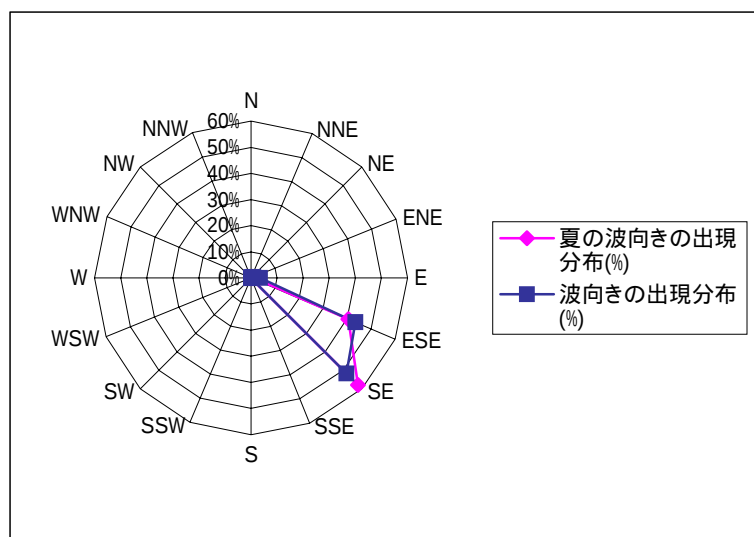


図 4-5 夏季と年間の波向の比較

4-5．解析条件

(1)解析方法

回折項を含んだエネルギー - 平衡方程式法

(2)空間分解能

図 4-1 に示す解析領域を $5\text{m} \times 5\text{m}$ のメッシュに分割した。

(3)波浪条件

小松島港観測所の波浪観測データより高波浪時と平常時の 2 種類とした。

(4)潮位条件

朔望平均満潮位(HWL) 朔望平均干潮位(LWL) 平均海面(MWL)の 3 ケースとした。

解析ケースについて下表に整理した。

表 4-3 解析ケース一覧

CASE	有義波高 $H_{1/3}$	周期 $T_{1/3}$	波長	潮位	備考
1	3.53m	7.7s	92.4m	L.W.L	小松島港観測所 2001～2004 年 年最高波高の平均値 p3-19 (2) 波浪条件参照
2	3.53m	7.7s	92.4m	M.W.L	
3	3.53m	7.7s	92.4m	H.W.L	
4	0.25m	3.0s	14.0m	L.W.L	小松島港観測所 2001～2004 年 出現頻度 30.2%，累積頻度 39.2% p3-19 (2) 波浪条件参照
5	0.25m	3.0s	14.0m	M.W.L	
6	0.25m	3.0s	14.0m	H.W.L	

4-6 . 解析結果

解析結果を以下に示す。

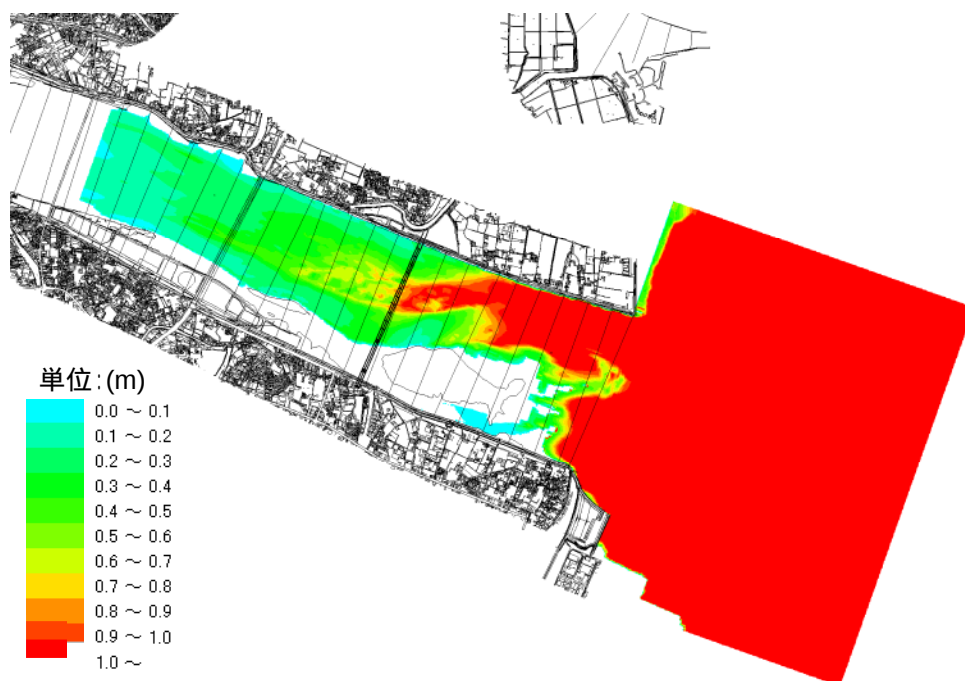


図 4-6 CASE1[高波浪時 ($H_{1/3}=3.53\text{m}$ $T_s=7.7\text{sec}$ L.W.L 時) の波高分布]

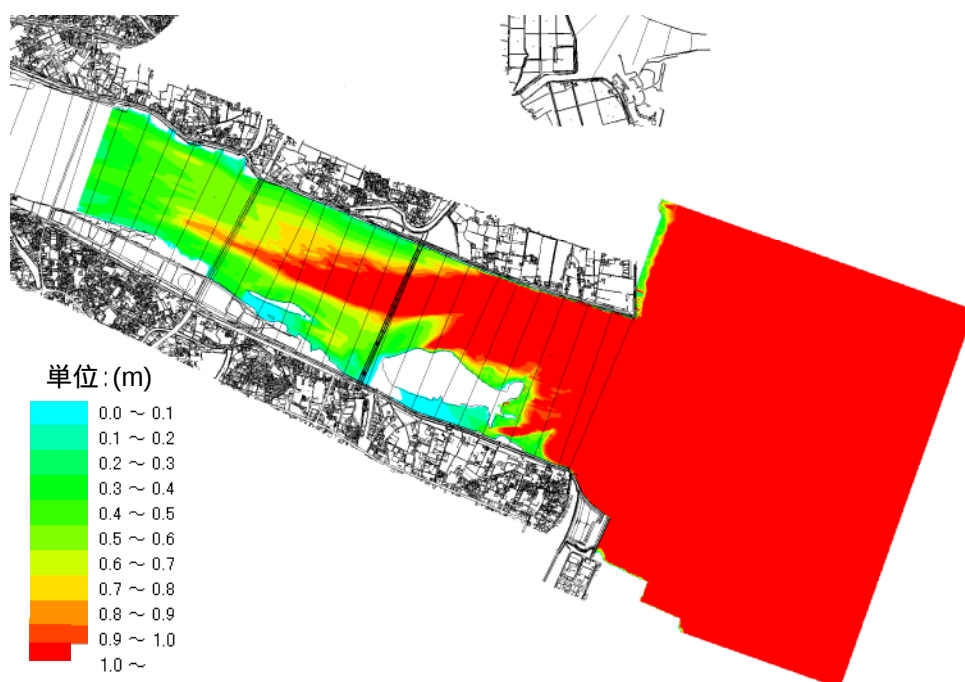


図 4-7 CASE2[高波浪時 ($H_{1/3}=3.53\text{m}$ $T_s=7.7\text{sec}$ M.W.L 時) の波高分布]

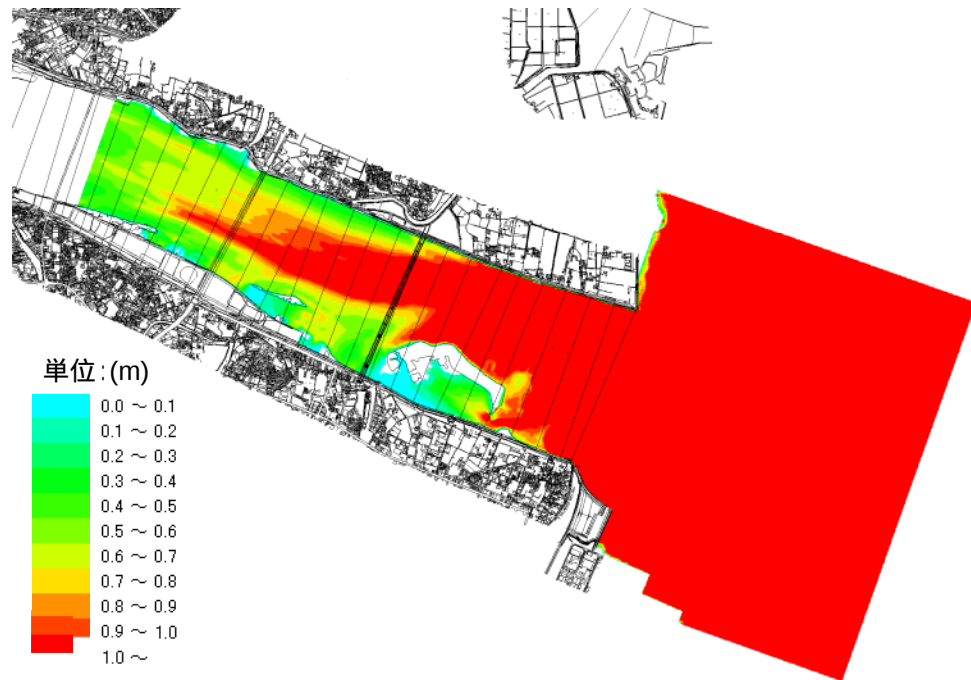


図 4-8 CASE3[高波浪時 ($H_{1/3}=3.53\text{m}$ $T_s=7.7\text{sec}$ H.W.L 時) の波高分布]

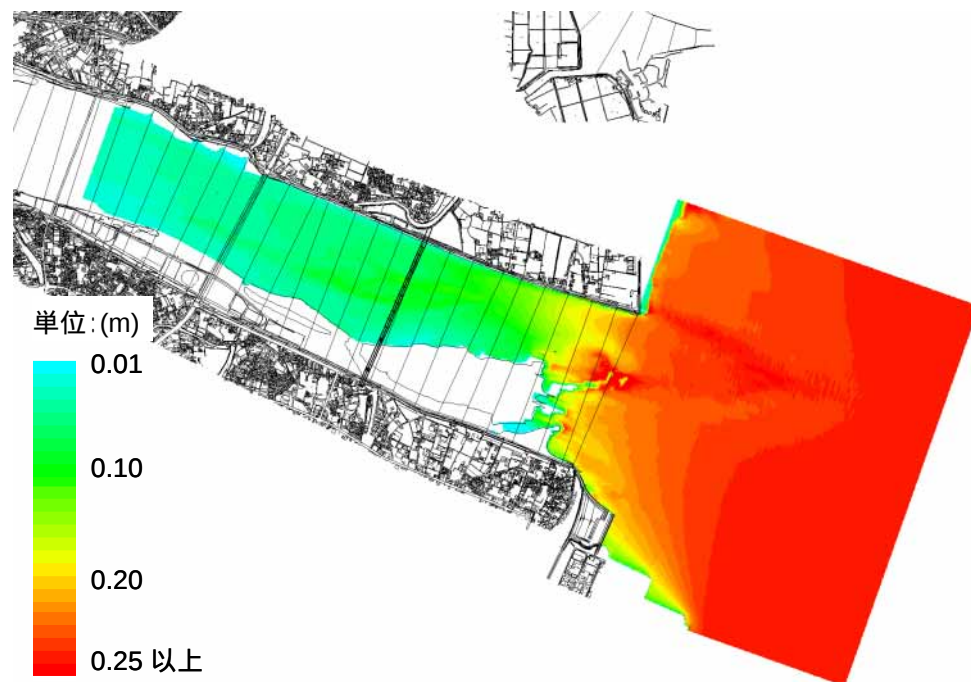


図 4-9 CASE4[平常時 ($H_{1/3}=0.25\text{m}$ $T_s=3.0\text{sec}$ L.W.L 時) の波高分布]

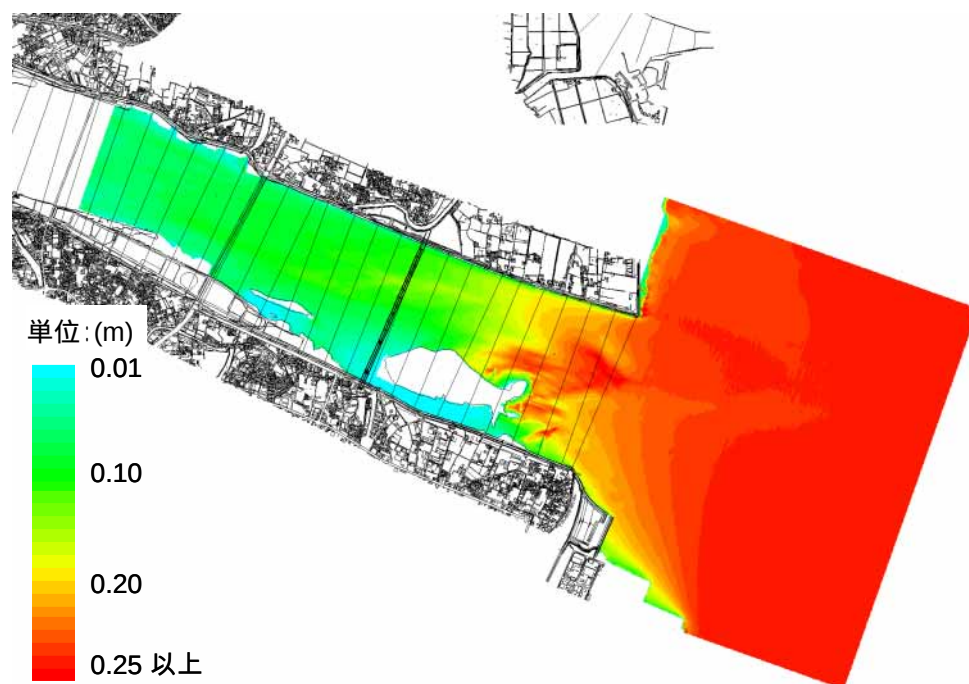


図 4-10 CASE5[平常時 ($H_{1/3}=0.25\text{m}$ $T_s=3.0\text{sec}$ M.W.L 時) の波高分布]

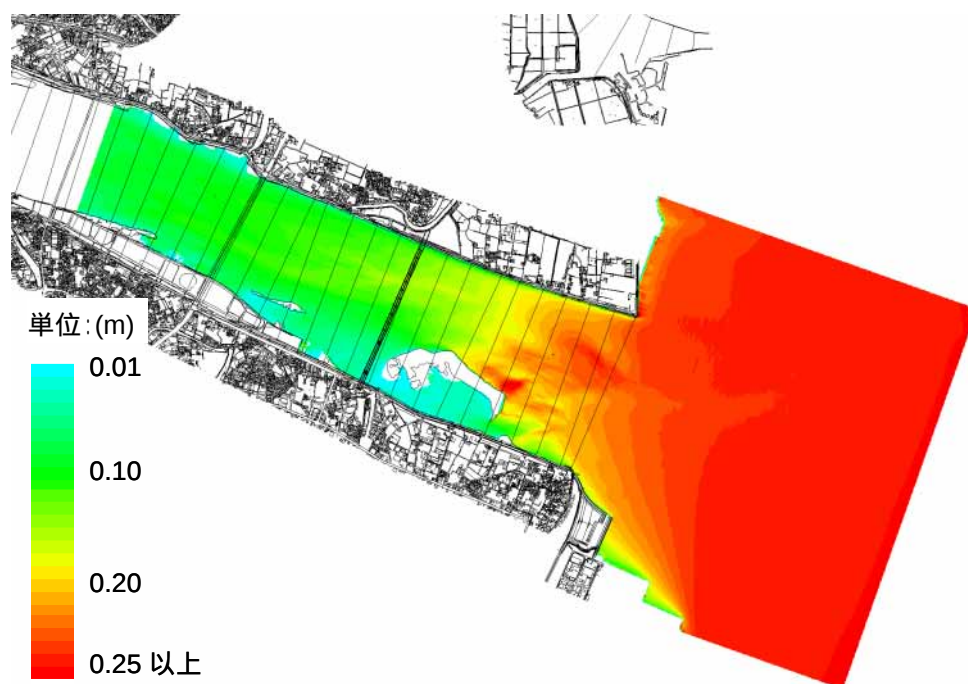


図 4-11 CASE6[平常時 ($H_{1/3}=0.25\text{m}$ $T_s=3.0\text{sec}$ H.W.L 時) の波高分布]

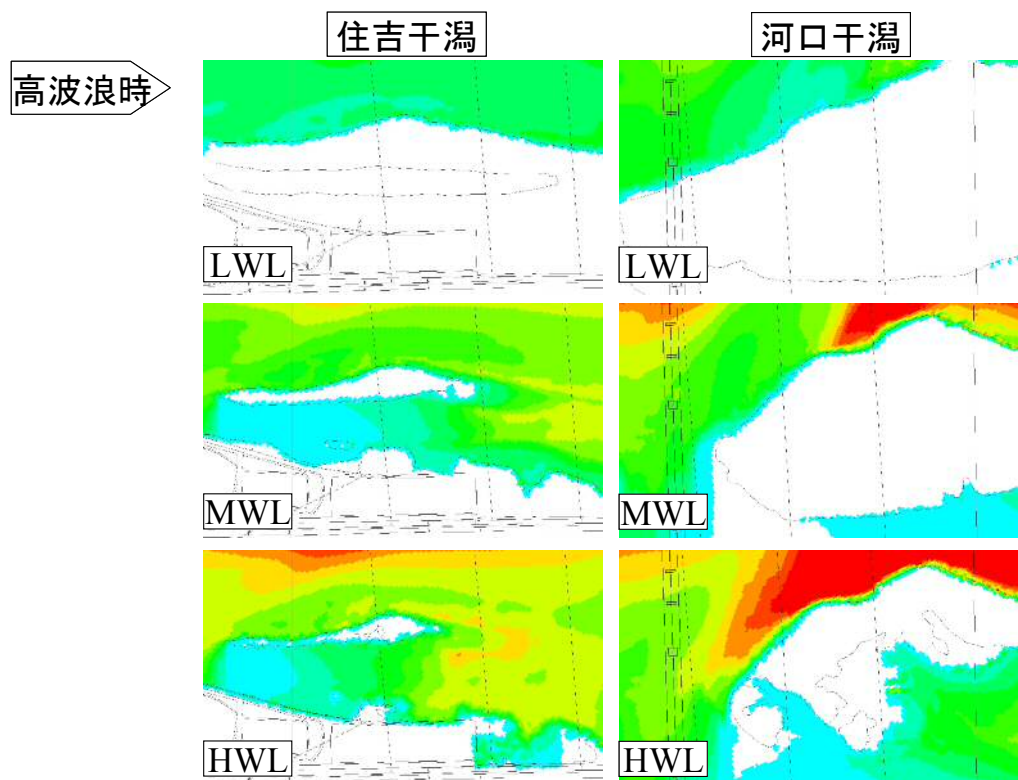


図 4-12 住吉干潟、河口干潟周辺の波高分布（高波浪時）

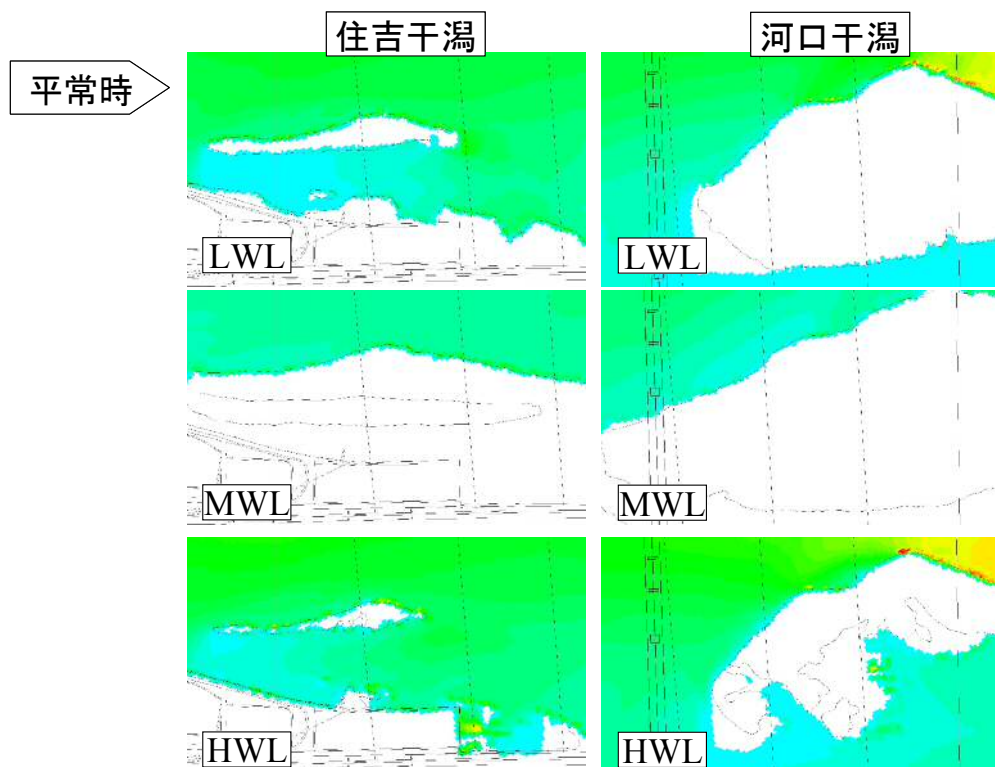


図 4-13 住吉干潟、河口干潟周辺の波高分布（平常時）

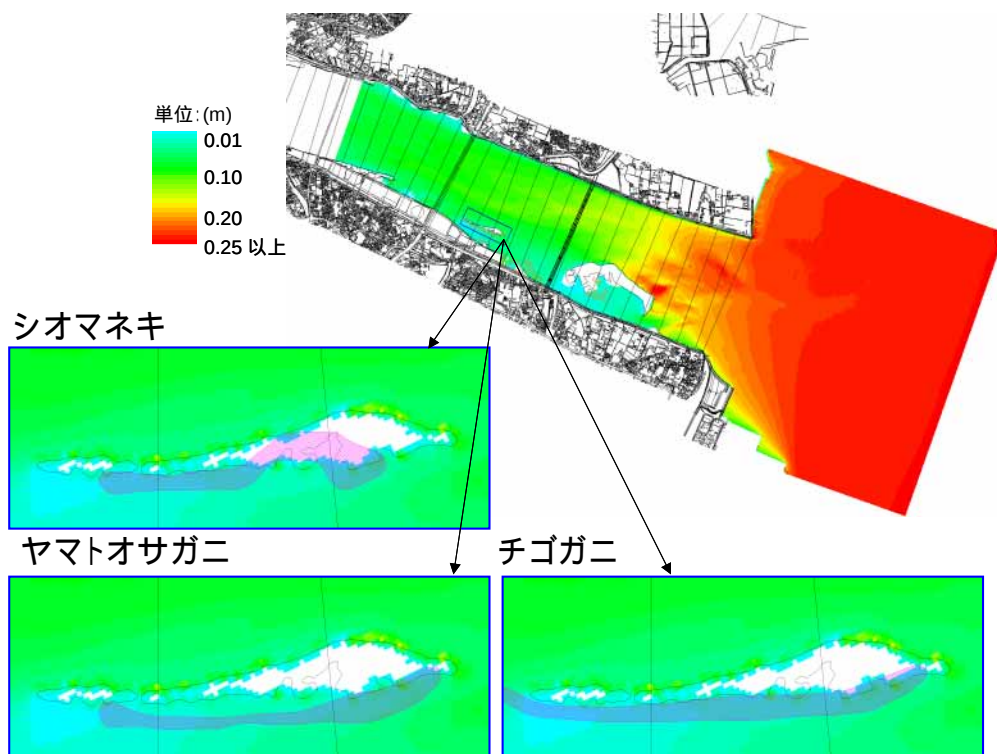


図 4-14 波高分布と底生動物の生息範囲(秋)の対比例

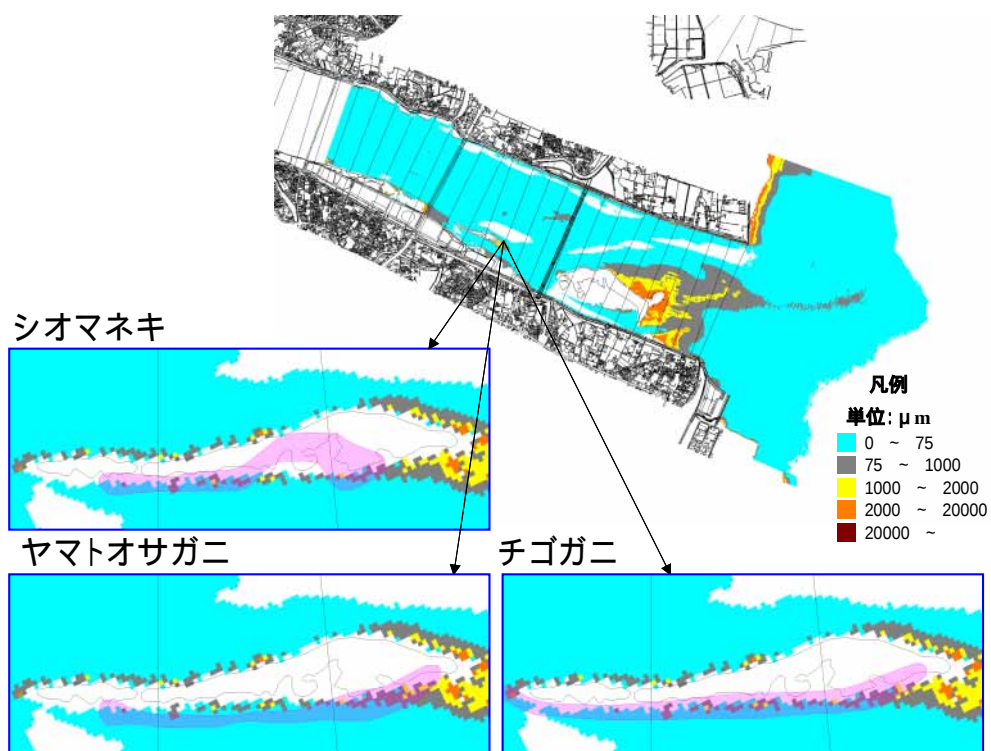


図 4-15 底質分布(中央粒径)と底生動物の生息範囲(秋)の対比例