

河口部における波高増幅率の簡易算定手法

SIMPLE ESTIMATION FOR WAVE SHOALING IN AN ESTUARY

平山克也¹・峯村浩治²

Katsuya HIRAYAMA, Koji MINEMURA

¹正会員 博(工) 独立行政法人 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

² 工修 独立行政法人 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

Wave shoaling often occurs in the estuary where incident wave penetrates to river flow. For boat navigation, that can make a severe condition even in a calm weather. To predict such an increase of wave height in a harbor area next to an estuary, a simple method is developed in this paper. In this method, the distribution of wave heights without considering effects of river flows are simulated using a Boussinesq-type wave transformation model, and then, wave amplification due to river flow are presumed using *Wave Action Conservation Theory* with expanded flows into the harbor area estimated by numerical simulation. Around a model harbor in front of river mouth, increased significant wave heights are calculated through the stream in opposite direction against wave propagating, and decreased significant wave heights are calculated behind the breakwater, where both stream and wave propagation direction are the same.

Key Words : river flow, wave amplification, simple method, boussinesq equation

1. はじめに

河口に隣接した港湾では、河川流による影響が少なくない。特に、港口部や河口部周辺では、流れによるせきあげ効果により波の峰が尖り、そこを航行する小型船舶の操船に支障を来す可能性がある。このような海域では、利用性の高い港湾づくりのために、河川流の影響による波浪の変形特性を把握することが重要であり、その定量評価を行うための数値解析モデルが必要となる。

波と流れ共存場に対する波浪解析のうち、Mohiuddinら¹⁾は、新たな波・流れ分散関係式をMadsen型の拡張型ブシネスク方程式に取り入れた位相解析モデルを提案した。そして、流速が小さい流れ場に設置された球面浅瀬上の2次元波浪変形計算を行い、流れの向きや強度に応じて異なる波高分布が算定されることを確認している。また、沖ら²⁾はブシネスク方程式の未知量である水位と流速をそれぞれ、波による成分と流れによる成分に分離して、流れ成分の水位と流速を既知として扱うことにより、定常流が存在する場でも適用可能な、波と流れの相互干渉を考慮できるブシネスク方程式を導いた。そして、

波の進行方向とは逆向きの強い流れによって発生するWave Blocking現象の再現計算を試みた。ただし、これらの研究で用いられた入射波はすべて規則波であった。

一方、間瀬ら³⁾は、波・流れ共存場では1つの周期に対して2種類の波が存在可能で、特に入射波の群速度が逆流と同程度の大きさになる領域で波浪場が複雑になることや、位相解析モデルによる数値解析では高波数の波を表現するために空間格子を細分化する必要があることなどを指摘した。そして、これらの問題を回避できる位相平均モデルの1つである波作用量平衡式に基づき、流れの影響を考慮した波浪変形予測モデル(WABED)を構築して、離岸流(あるいは、河口部の流れ)を模擬したモデル場に入射した不規則波の有義波高が、流れの強度に応じて増大する様子を再現した。

ところで、平山ら⁴⁾は、流れを考慮した分散関係式に関する理論的考察を行い、Madsen型の弱非線形ブシネスク方程式を基礎とする位相解析モデルを用いて波と流れの相互干渉を計算した場合には、特に流れを遡る波のせきあげ効果はごく浅い海域でのみ算定可能であり、 $k_0 h_0$ 値(k_0 , h_0 はそれぞれ流れを考慮しない場合の波数、

静水深) が少なくとも1.5より大きい場合には、波高増大の算定精度が急激に劣化する恐れがあることを指摘している。つまり、先述した間瀬らの指摘も合わせて考えると、現地における波・流れ共存場の波浪変形計算を行うための実用的な位相解析モデルの開発には、未だ多くの技術的課題が残されているように思われる。

そこで本研究では、流れが波に与える影響のみに着目して、流れによる波高増大の概略値を得ることを考える。まず、位相解析が可能なブシネスクモデルを用いて流れによる影響を考慮せずに波浪変形計算を行い、波形情報から算定される位相平均された有義波高、平均周期および波速ベクトルの平面分布を抽出する。つぎに、流れを考慮した分散関係式とエネルギー保存式あるいはWave Action (波作用量) 保存式から得られる関係式に、波浪変形計算で算定された波速の分布、および別途実施した流れ計算で得られた流速分布等を代入して、各地点における波高増大率を算定する。最後に、流れを考慮せずに算定された各地点の有義波高に波高増大率を乗じることにより、流れによる波高変化を考慮した有義波高分布を簡易に算定することができる。

2. 波・流れ共存場における分散関係

(1) 分散特性

微小振幅波理論において、規則波と定常流の共存する浅海波領域を仮定すると式(1)に示す分散関係式が成り立つ。このとき、流速 U は波の伝播方向と流れの方向が相反する場合には負の値をとるものとする。また、周期は変化しないものとする。

$$\omega = \sigma + kU = \sqrt{gk \tanh kh} + kU \quad (1)$$

ただし ω : 絶対角周波数

σ : 流れに対する相対角周波数

k : 絶対波数

U : 定常流速

g : 重力加速度

h : 水深

ここで、分散関係式(1)による k の解は、図-1に示す関係にあり、直線 $y = \omega - kU$ と曲線 $\omega = \sqrt{gk \tanh kh}$ との交点として求められる。すなわち、流れが無い($U = 0$)場合には(A)で示す1点のみで解を持つが、波向きに対して逆流となる流速の絶対値が徐々に大きくなると、直線の傾きが変化し、同時に2つの解を持つような流速の範囲が存在することがわかる。このとき、流れが無い場合の波数に近い成分(B)と、それよりも高波数の成分(D)が同時に存在するが、特に後者の成分をブシネスクモデルのような位相解析モデルで表現するためには、差分計算において相当細かな空間格子を用いる必要がある。

さらに流速の絶対値が大きくなると、もはや k の解は

存在しない。この状態は波エネルギーが逆流に逆らって伝播しないWave Blockingが生じていることを表し、このとき波の振幅はゼロとなる。また、直線が曲線と(C)点で接するときの流速は、Wave Blocking現象が生じるときの限界流速を表している。

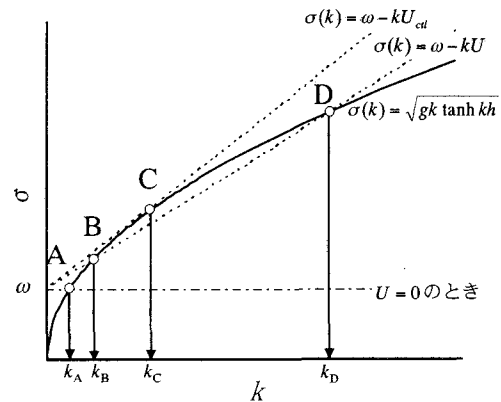


図-1 波・流れ共存場分散関係式の解 (逆流の場合)

(2) 限界流速

流れがある状態と無い状態での角周波数はそれぞれ、 $\sigma = kC$ 、 $\sigma_0 = k_0 C_0$ で表される。これらを式(1)に代入して整理すると式(2)となる。ここで、式中のサブスクリプト0は流れが無い状態を示す。また、 $\omega = \sigma_0$ である。

$$\frac{k_0}{k} = \frac{C}{C_0} + \frac{U}{C_0} \quad (2)$$

ここで、浅海波の波速を表す式(3)を式(2)に代入し、 C/C_0 について整理すると、流れの影響を考慮した波速 C を示す式(4)が導かれる。また、式(4)が成り立つための条件は式(5)であることが直ちに推測される。つまり、Wave Blocking現象が生じるときの限界流速 U_{crit} を示す判別式は式(5)で表される。

$$\begin{cases} C_0^2 = g/k_0 \tanh k_0 h_0 \\ C^2 = g/k \tanh k h \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[1 + \sqrt{1 + 4 \frac{U \tanh k_0 h_0}{C_0 \tanh kh}} \right] \frac{\tanh kh}{\tanh k_0 h_0} \quad (4)$$

$$\frac{U_{crit}}{C_0} < -\frac{1 \tanh kh}{4 \tanh k_0 h_0} \quad (5)$$

いま、波の進行方向を正とした流れ U を変化させ、さまざまな U/C_0 について相対水深 $k_0 h_0$ に対する波速 C を算定すると図-2が得られる。図中の破線は相対水深 $k_0 h_0$ に対する限界流速を示したものであり、これより下の領域は、流れに逆らって波エネルギーが伝播できないWave

Blocking領域を示す。式(5)からも明らかなように、深海波の場合、Wave Blocking現象を生じさせる限界流速は波速の1/4 ($U/C_0=0.25$)であるのに対し、浅海波ではそれより大きな流速の絶対値を有する逆流の中でも波エネルギーが遡上することがわかる。なお、図-2の作図にあたり、式(1)の解が2つ存在する場合には、流れによって波数 k が連続的に変化することを想定し、高波数の解は作図の対象外とした。

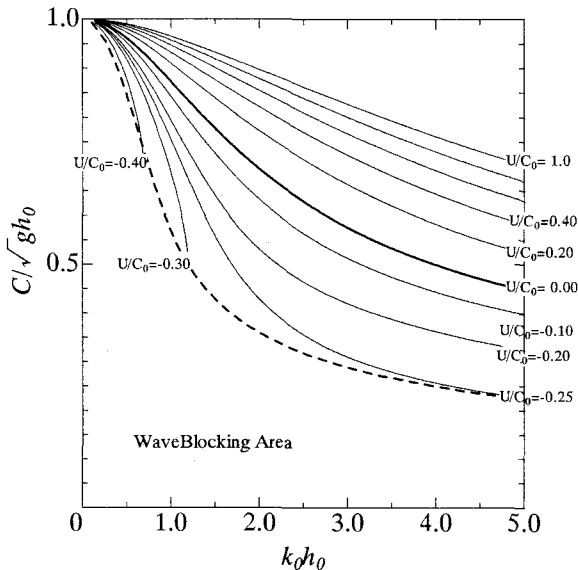


図-2 波・流れ共存場における波速の変化

3. 波高増幅率の算定

(1) 波高増幅率の算定式

流れによる波高増大率の算定式は、微小振幅波理論によるエネルギー保存式またはWave Action保存式により導出され、流れに速度勾配があると仮定した場合は式(6)、速度勾配がない場合は式(7)で表される⁹⁾。各式において、ある相対速度 U/C_0 に対する波高増幅率 a/a_0 を算定するとそれぞれ、図-3、図-4が得られる。流れによる波振幅の増幅率は、波と流れが同じ向きとなる U/C_0 が正の場合では減少し、負の場合には増幅する。両図を比較すると、速度勾配を有する流れ場のほうが増幅率は大きくなることからわかる。また各図ともに、同じ相対速度では深海波条件のほうが増幅率は大きくなっている。

$$\frac{a}{a_0} = \left[\frac{\{1 + (2k_0 h_0 / \sinh 2k_0 h_0)\} \{1 - (l_0/l)(U/C_0)\}}{(l/l_0 - U/C_0) \{1 + (2kh / \sinh 2kh)\} + 2U/C_0} \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$\frac{a}{a_0} = \left[\frac{\{1 + (2k_0 h_0 / \sinh 2k_0 h_0)\}}{(l/l_0 - U/C_0) \{1 + (2kh / \sinh 2kh)\} + 2U/C_0} \right]^{1/2} \quad (7)$$

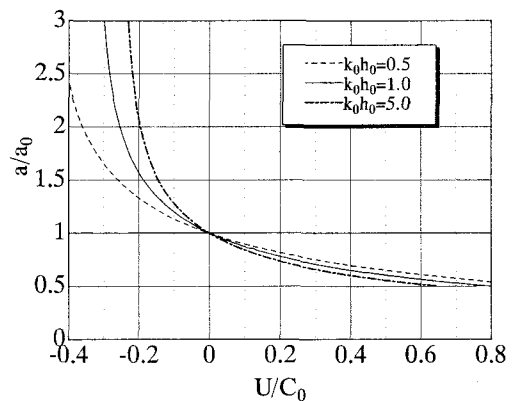


図-3 U/C_0 に対する波高増幅率 (速度勾配あり)

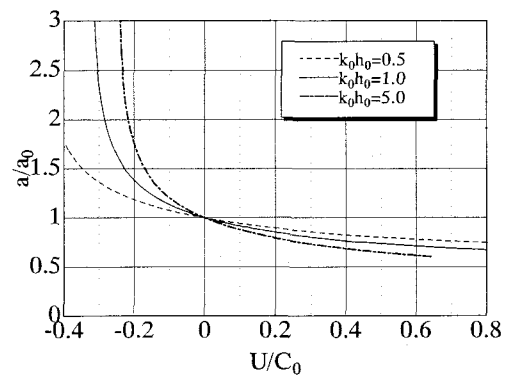


図-4 U/C_0 に対する波高増幅率 (速度勾配なし)

(2) 波高増幅率の簡易算定手法

流れにより増幅された波高の平面分布は図-5に示すフローに従って算定する。まず、河川流に代表されるような、波浪以外に起因する任意の流速ベクトルの分布が既知であるものとする。一方、河川流が無い状態の波浪場の算定には、回折系と屈折系の波浪変形が同時に考慮できるブシネスクモデルを用いる⁹⁾。そして、波形情報から算定される位相平均された有義波高、有義波周期、および波速ベクトルの平面分布を抽出する。つぎに、流れを考慮した分散関係式(1)に流速を代入して、波数 k と波長 l を算定する。そして、対象とした流れ場に速度勾配がある場合には式(6)により、各地点における波高増幅率を算定する。最後に、流れを考慮せずに算定された各地点の有義波高に波高増幅率を乗じることにより、流れによる波高変化を考慮した有義波高分布を算定することができる。ただし、式(6) (式(7))で示された波高増幅率の算定式は1次元の波・流れ共存場を対象として導出されたため、平面波浪場へ適用する際には波と流れの交差角に応じて波高増大に有効な流れ成分を抽出する必要がある。そこで、波速ベクトルの方向に射影された流れ成分のみが波高増大に作用するものとみなす (図-6)。

なお、河口部周辺の流れ場を算定する場合には、河口部に形成される密度流が問題とされることがある。しかし、流れによる波高増大が顕著に発生する状況は、河川の出水量が増加し、密度成層が崩れた状態であると考えられるため、本研究では密度流は特に考慮していない。

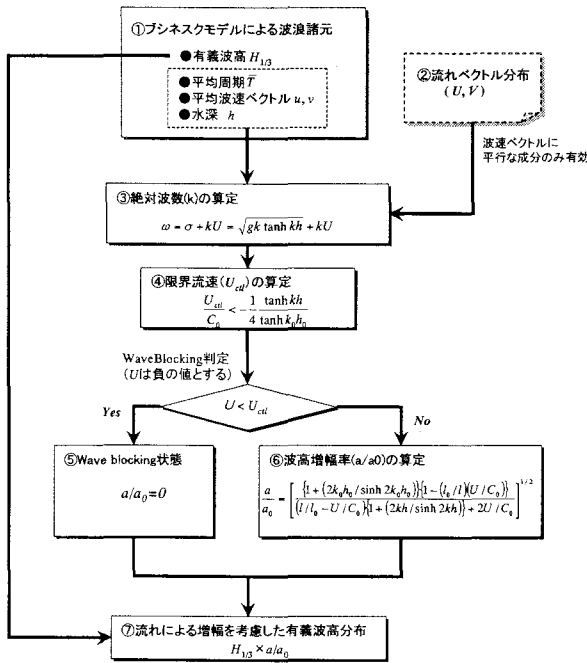


図-5 解析フロー

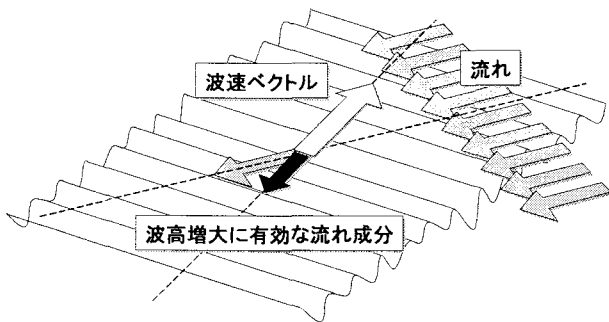


図-6 有効流れベクトルの概念図

4. 増幅波高の試算

(1) 計算条件

図-7に示すモデル地形を対象として、河川流による波高増大の算定を試みた。入射波と河川流の向きは相反するように設定し、領域の中央付近には防波堤を模した半無限堤（完全反射境界）が配置されている。図の左側境界からは、有義波周期12s、有義波高1m、方向集中度 $S_{max}=35$ とした多方向不規則波を入射させた。また、河川流は、図の右側境界から流速-3m/s（流量1,500m³/s）を入射させた。

(2) 河川流ベクトル

対象海域における河川流の移流・拡散計算には、非線形長波方程式を基礎とした単層の流れ解析モデルを使用した。流れ場がほぼ定常とみなせる時刻まで計算を行って得られた流速ベクトル分布を図-8に示す。

(3) 波高・周期分布の出力

ブシネスクモデルによる波浪変形計算で算定された有義波高、平均周期の平面分布をそれぞれ、図-9、図-10に示す。ここで、有義波高は各タイムステップで得られる水位変動の自乗和平均値から、レーリー分布を仮定して有義値に換算して求めた。図-9においては、構造物前面では入射波と反射波が重畳して波高が増大し、防波堤の背後域では回折波高の分布がみられる。また、平均周期は各タイムステップで得られる水位変動の時系列波形に対し、ゼロアップクロス解析により算出された個々波の周期を算術平均して求めたものであり、ややばらつきはあるものの、全体に入射波の有義波周期の約1.1倍程度になっている。ただし、沖側領域に比べ、回折領域で算定された平均周期はやや大きい。これは、不規則波中の成分波のうち、回折しやすい高周波数成分が回折域において卓越し、スペクトル形状が変形して低周波数側に偏ったエネルギー分布となっているためと考えられる。

(4) 平均波速ベクトル分布

ブシネスクモデルでは、回折系や屈折系の波浪変形が同時に考慮できることから、総じて増幅率算定に必要な各変数の平面分布を得やすい。しかし、非常に複雑な水面形状から平面的な波峰の移動速度（波速ベクトル）を求めることはそれほど容易ではない。そこで本研究では、位相解析によって得られる波形情報から位相平均された波速ベクトルの平面分布を算定する手法を提案した。すなわち、平面的な水位変動が微小振幅波理論の範疇で近似可能であると見なし、ブシネスクモデルの計算過程で順次得られる各地点での時間波形に対して、ゼロアップクロス解析を実施する。そして、得られた個々波の峰の時刻に算定された線流量フラックス(P, Q)を、それぞれそのときの水位変動 η で除することにより、個々波の波速ベクトルの各方向成分が式(8)のように算出できるものとした。さらに、解析時間内で得られたすべての個々波の波速ベクトルを算術平均したものを平均波速ベクトルとして定義した。

$$\begin{cases} Cx_{i,j} = P_{i,j} / \eta_{i,j} \\ Cy_{i,j} = Q_{i,j} / \eta_{i,j} \end{cases} \quad (8)$$

ただし、以下の条件に該当した場合には、微小振幅波理論の適用が困難であると判断し、算術平均の対象からその波速標本を取り除いた。①個々波の峰と谷の平均水面からの振幅が極端に異なる（非対称な）場合（峰振幅と谷振幅の比が7:3以上に偏っている場合）。②ベクトル合成された波速が、長波の波速よりも大きくなる場合。

このようにして算定した波速ベクトルの平面分布を図-11に示す。構造物前面では波向が相反する入射波と反射波が重畳するため、各個々波の波速は相殺され、平均波速は小さくなる。また、回折域にあたる波速ベクトルは、波が防波堤背後に回り込むような波速ベクトルが算定されており、一般的な回折波の伝播イメージに矛盾しない結果が得られている。

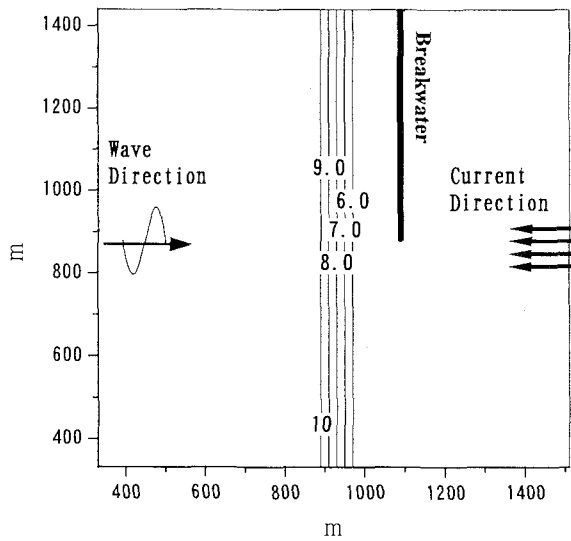


図-7 計算領域図

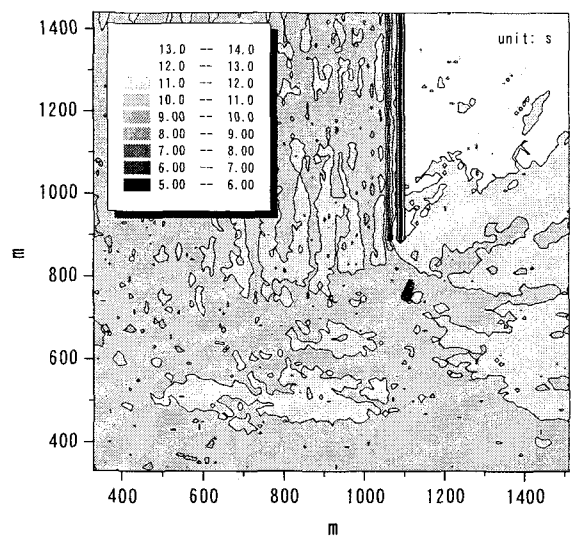


図-10 平均周期分布

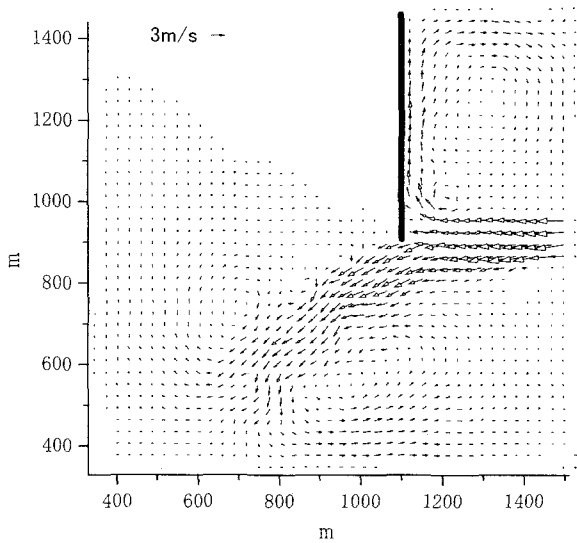


図-8 河川流ベクトルの平面分布

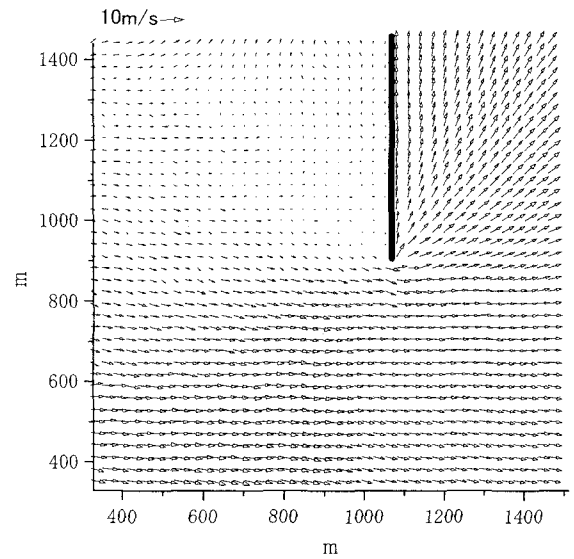


図-11 平均波速ベクトル分布

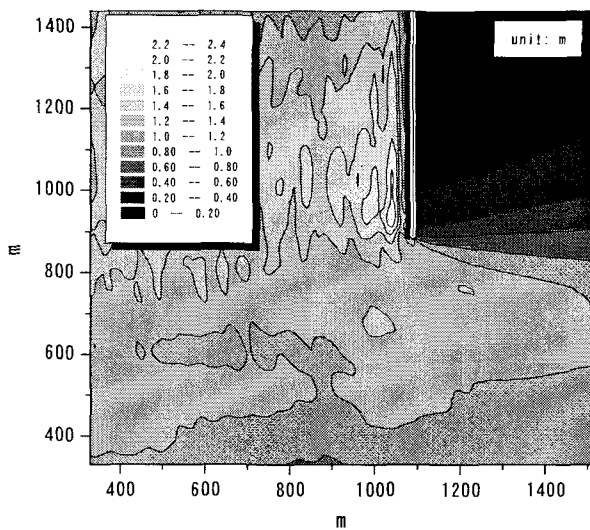


図-9 有義波高分布

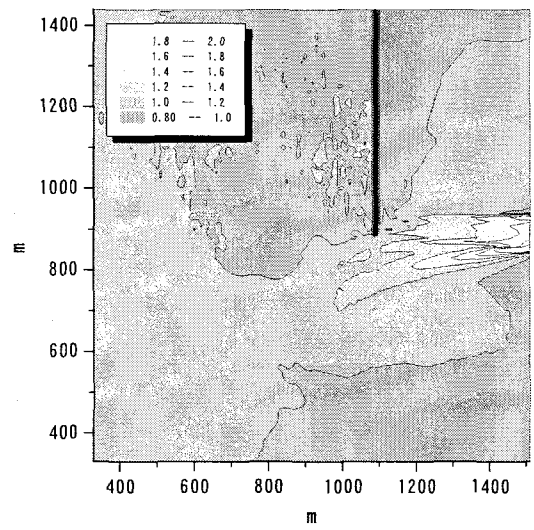


図-12 波高増幅率分布

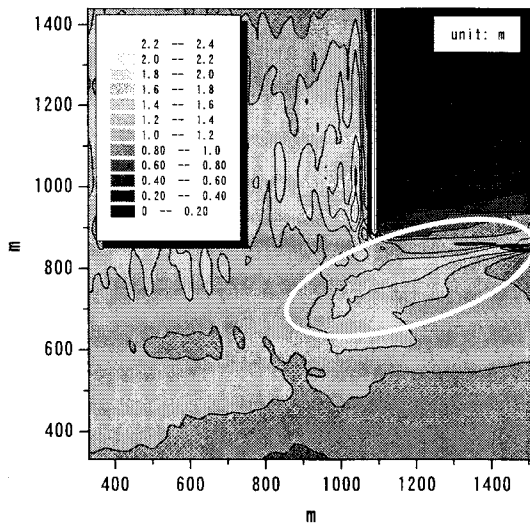


図-13 波高増幅率を考慮した有義波高分布

(5) 増幅波高分布

以上の解析結果を式(6)に代入して波高増幅率の平面分布を算出すると、図-12のようになる。構造物の遮蔽を受けない領域では、波と流れが相対する向きで重畳するため、増幅率は1.5倍以上の高い数値となる。また、構造物背後の回折域では波と流れの向きが等しいかそれに近くなるため、増幅せずに等倍以下の値となっている。つぎに、この波高増幅率を有義波高に乗じて得られた、流れによる波高増大を考慮した波高分布を図-13に示す。大きな流速が算定される河口周辺では波高増幅率が大きくなっているため、流れによる波高増大も大きく算定されていることが確認できる(図中白○枠内)。

図-14は、図-12に示した各地点における増幅率を、流れを考慮した分散関係図(図-1)上に重ねてプロットしたものである。計算領域内の大部分の地点は河川流の影響を受けないため、増幅率の算定には $U/C_0=0$ のときの分散関係式が適用されている。一方、黒枠で囲んだプロットは河川流による影響が大きな地点に対して得られたものであると考えられ、特に、河口付近の最も U/C_0 が大きくなる地点では、Wave Blocking現象が生じていたと考えられる。このときの波高増幅率は2.0にまで達していた。

5. おわりに

本研究では、流れによる波高増大を考慮した有義波高の平面分布を簡易に算定するために、既存のブシネスクモデルと微小振幅波理論に基づく波高増幅率の算定式からなる数値解析モデルを提案するとともに、試計算を実施して計算結果の妥当性を確認した。また、不規則波の波高増幅率の算定に用いる、ブシネスクモデルにおける平均波速ベクトルの算出方法を合わせて示した。なお、

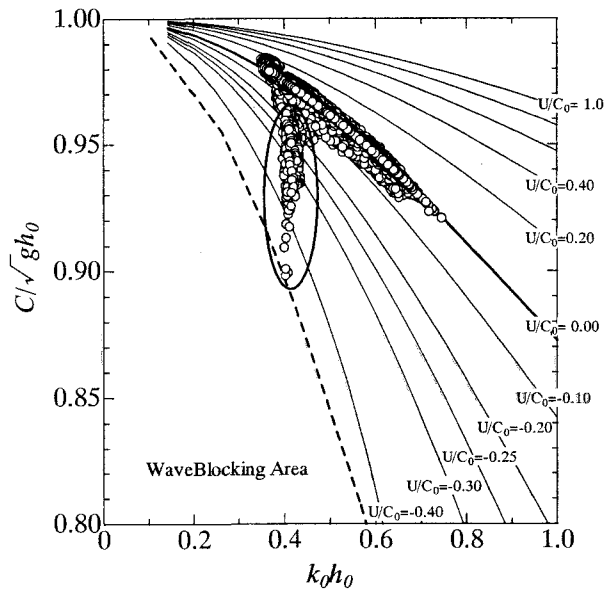


図-14 試計算における波速Cの分布

現地観測データを用いた本手法の検証事例については、梅沢ら⁷⁾を参照されたい。

参考文献

- 1) Mohiuddin, M., 富樫宏由, 平山康志: 波変形に対する流れの影響のモデル化, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.16-20, 2000.
- 2) 沖和哉, 酒井哲朗, 芦屋淳志: 波と流れの相互干渉を考慮したBoussinesq方程式による数値解析, 海洋開発論文集, 第19巻, pp.159-164, 2003.
- 3) 間瀬肇, 由比政年, 雨森洋司, 高山知司: 波・流れ共存場における砕波および回折効果を考慮した位相平均波浪変形予測モデルの構築, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.6-10, 2004.
- 4) 平山克也, 峯村浩治, 平石哲也: 流れによる波の変形計算に関する一考察, 第10回河口研究会, 2004.
- 5) Brevik, I. and Aas, B.: Flume Experiment on waves and currents. I Rippled bed, *Coastal Eng.*, Vol.3, pp.149-177, 1980.
- 6) 平山克也: 非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究, 港湾空港技術研究所資料, No.1036, 2002.
- 7) 梅沢信敏, 永井紀彦, 平山克也, 北村道夫, 鈴木智浩, 山田貴裕: 河川流による酒田港港口部の波浪場への影響について, 海洋開発論文集, 第21巻, 2005 (印刷中)。