

長崎湾のアビキの有限要素法による解析と 河川遡上の現地観測

富樫 宏由*・中村 武弘**・新田 喜浩***

1. はじめに

従来、有限要素法による波動解析の中では、長波特に潮流・河口流とそれによる拡散問題、津波の発生と伝播等の解析事例が比較的多いが、湾水振動については、解法を検証するための長方形湾等に対する適用計算例のみで、実際の事例解析の研究は見られないようである。

一方、長崎湾のアビキ（湾水振動）に関する研究としては、寺田等の最初の本格的な研究に始まり¹⁾、長崎海洋気象台他気象庁関係でいろいろ取組まれてきたようであるが、著者等も深堀の埋立て締切り後のアビキの変化の有無について検討を行ってきた²⁾。最近では、外洋におけるアビキの発生源を含めた発生機構について、昭和54年3月に発生した観測史上最大のアビキを事例とした日比谷・梶浦の研究によって既にその概要が把握されている³⁾。しかし海事関係者にとっては、例えばアビキ発生時の大型船の曳船による操船・入出渠・係離岸作業のためには、湾内におけるアビキの局所的な流向・流速等の資料が必要であり、また将来の湾内の一部埋立て法線計画によるアビキの流況の局所的な変化を予測する必要もあり、そのためにはかなり細かいメッシュ分割による解析が要求される。

本研究は、このアビキの局所的な流況解析ができることを狙いとして、有限振幅長波理論を用いた有限要素法によるアビキの解析を行うことが第1の目的である。

また、湾奥には浦上川が注いでおり、過去に大きなアビキが発生した時には、係留索を切られて漂流した漁船が、この河川内に入って他船や河岸に衝突したり、上流の稲佐橋の橋脚や橋桁に衝突して大破浸水又は沈没する事故がよく起こったが、このアビキの河川遡上の実態はまだよくわかっていないので、これを先ず波高の現地観測によって調査解析することが第2の目的である。

従来の有限要素法による長波の解析は殆ど微小振幅波理論を用いたものが多いが、水深が浅く細長い河川内のアビキの解析を含めて、局所的な流況解析を精度よく行

うためには移流項が必要であり、そのため有限振幅波理論を用いていることが本解析の一つの特徴でもある。

2. 基本方程式

静水面上に x, y 座標をとり、水底から水面まで積分して平面2次元化した、有限振幅長波の運動方程式と連続方程式は、総和規約を適用して、次式で与えられる。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + g \frac{\partial \eta}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \{ (h + \eta) u_i \} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 u_i は平均流速、 η は水位、 h は水深、 g は重力加速度、 x_i は直交座標、 t は時間である。

初期条件は静水状態、境界条件は沿岸では汀線の法線流速を零、外湾の洋上における入力点では仮想入力境界とし⁴⁾、水位とそれに対応した流速を与えた。

仮想入力境界とは、長波の主要な伝播方向が1次元であるとみなされる場合、図-1に示すようにこれを x 軸方向にとって、入射波 z_B^+ と反射波 z_C^- が重複して入力点 A での水位と流速を特性曲線法で与えるものであり、進行波入力と重複波入力の2通りの入力ができる。 y 軸方向の流速は特に規定しないので、常に1 step 前の値が入力される。

式(1)、(2)に対して適用した有限要素法は、川原の重みつき残差法による2段階陽的解析法である⁵⁾。

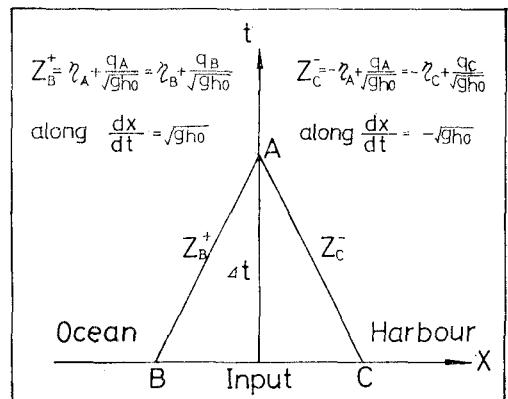


図-1 仮想入力境界での計算方法

* 正会員 工博 長崎大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 長崎大学助手 工学部土木工学科

*** 学生会員 長崎大学大学院 工学研究科

3. 解法の検証

川原の方法では、メッシュ分割の長さ Δx に対して、集中質量行列に関する選択係数 e と時間きざみ Δt を、常に C.F.L. 条件との絡みで、計算が安定する範囲内で最大にとらなければならない。そのために、先ず図-2 に示すような計算水路を長崎湾の大きさに半幅 500 m、長さ 7 km、平均水深を 18 m として出口を開いた長方形水路とし、アビキを進行波入力として模擬してこれを決定した。次いで、この水路に様勾配斜面をつけて、水路長 7.4 km ($S=1/250$)、8.8 km ($S=1/300$) としてそれぞれ適用範囲内で浅水変形計算を行い、微小振幅波理論の Green の式と有限振幅波理論の梶浦の式と比較したのが図-3 であるが⁶⁾、両者はかなりよく一致しており、有限振幅長波理論を用いた本解法の妥当性が検証されている。

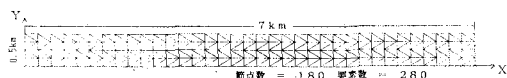


図-2 長方形湾又は水路モデルのメッシュ分割図

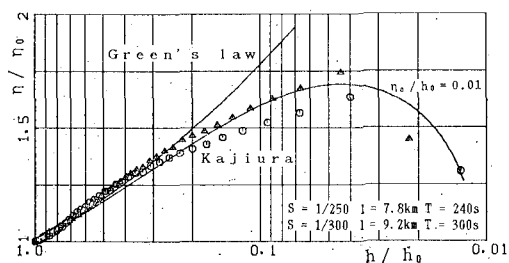


図-3 浅水変形の理論値と計算値の比較

次に、図-2 に示す水路の出口を閉じて長方形湾モデルとし、更に長さ 1.5 km の外湾も長方形モデルとして接続した場合も加え、アビキを重複波入力として外湾の有無による両者の比較計算を行った。外湾の幅は内湾の 6 倍近くも広がるが、この場合の内湾の波高増幅率はやや大きくなる程度で、全体的にはあまり変わらないが、湾奥よりは中央付近から湾口にかけて外湾に近い方が相対的に波高も流速も大きくなる傾向が見られる。

4. 観測史上最大のアビキの再現

図-4 は長崎湾のメッシュ分割図である。要素の一边長 Δx の最大は約 280 m、最小は 20 m 程度である。原型にできるだけ忠実に型取り、小さな地形の変化による局所的な流況が把握できるように細分化した。従って、汀線の最小水深は 1 m までとった。

昭和 54 年 3 月に発生した観測史上最大のアビキの松ヶ枝における波高は 2.78 m であった、これに対して、日比谷・梶浦のシミュレーション解析の結果によれば、

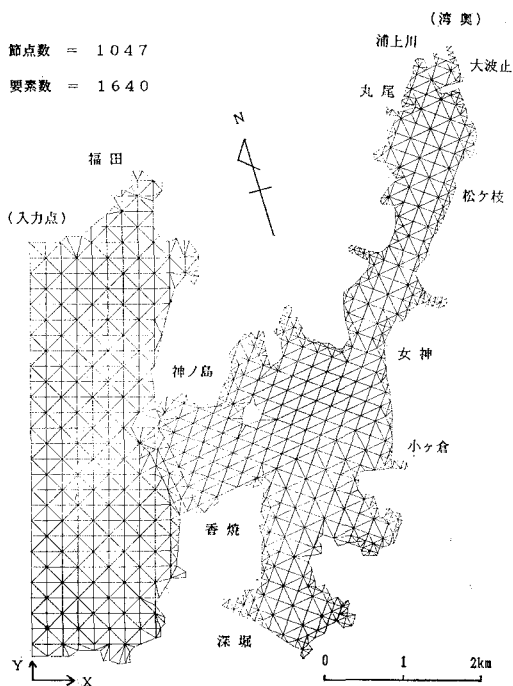


図-4 長崎湾のメッシュ分割図

図-4 の入力点付近の第 1 波の振幅は約 30 cm、湾口では 33 cm 程度となっている。これを参考にして、松ヶ枝で波高約 2.8 m となるような波の入力点の振幅を逆算すると約 35 cm、この場合の進行波としての振幅は約 29 cm となった。この時の時間波形を、ほぼ湾軸に沿った代表点（入力点、湾口、高鉾島付近、女神、松ヶ枝、湾奥の魚市場付近）で示したのが図-5 である。水位と流速の位相関係から見ると、外湾部は部分重複、内湾部は完全重複の状態であるのに対して、湾口部はほぼ進行

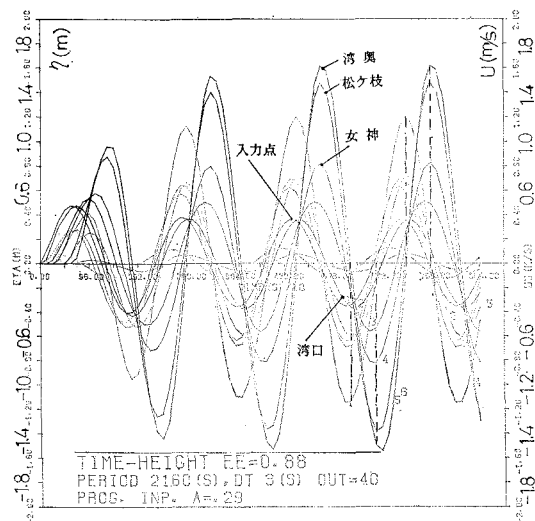


図-5 代表地点の水位と流速の時間波形

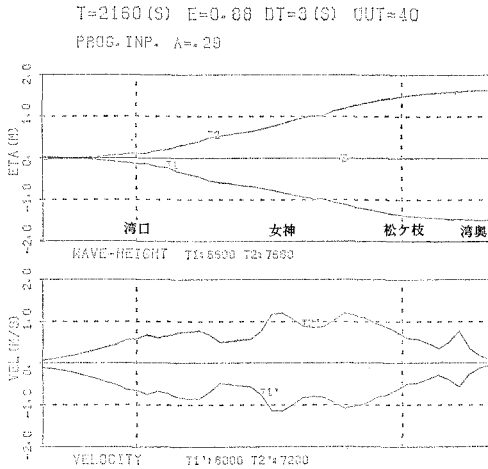


図-6 最大波高・流速時の空間波形

波的な挙動を呈している。また、湾口の波高は外湾の入力点と殆ど同じ大きさであるが、ここから松ヶ枝までの波高増幅率は $2.8/0.7 = 4$ 倍である。

図-6 は前図で破線で示す位相でとった最大波高・流速時の空間波形で、振動の節は入力点の間近にあり、湾内2ヶ所の最大流速は $1.1 \sim 1.2$ mである。

図-7 は上げ潮時、図-8 は下げ潮時の各最大流速時の流況図である。女神対岸の神崎鼻、高鉾島、港口防波堤先端の付近は局所的な流速が大きい所で、Mosfield 号入港時にアビキによって海面が汚濁していたと報告された箇所と合致する⁷⁾。三菱重工香焼工場東岸の係船岸に沿った流速も局所的に大きいようである。以上により、

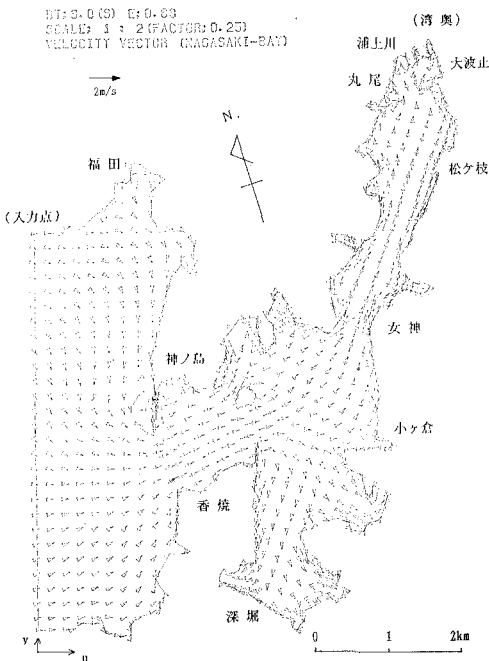


図-7 上げ潮・最大流速時の流況

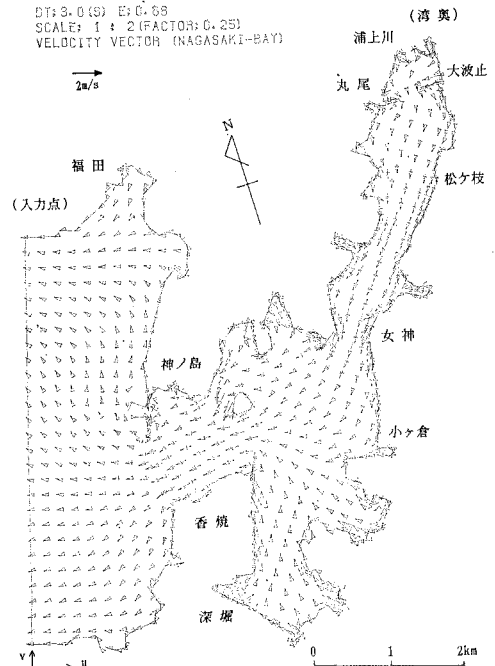


図-8 下げ潮・最大流速時の流況

観測史上最大のアビキの湾内の挙動が詳細に把握された。

5. アビキの河川遡上の現地観測と解析

浦上川を遡上するアビキの現地観測は、潮位計として石田式変倍自記水位計を用い、図-9 に◎印を付けた湾

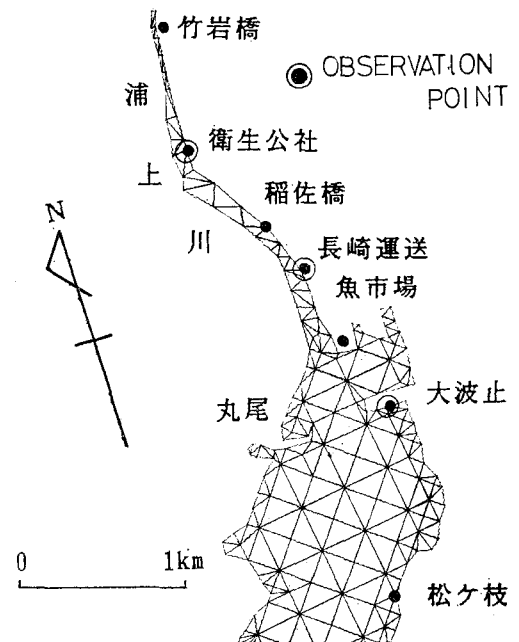


図-9 浦上川のメッシュ分割と観測地点図

奥の大波止と河川内の長崎運送、衛生公社の3地点に設置して同時観測を行った。3地点を含んだ河口付近の縦断地形を図-10に示すが、3測点A、C、Eは追加距離でわかるように約1kmずつ離れている。河口付近に観測波高基準点を設けることはいろいろな理由から非常に難しいので、潮位計を設置し易い大波止の元船突堤の付け根を選んで、ここの波高を魚市場（浦上川河口）の波高と略々同じものとみなすことにした。

観測結果によれば、大波止と長崎運送では1～2分、また大波止と衛生公社では3～5分位の位相差があるが、アビキの数値解析結果と地形を考え合わせても両地点の波高は略々同位相と見て差支えないようである。図-10でわかるように、3測点の水深は潮位によって変化するので、観測点の水深を最上流の衛生公社での満潮時の平均水深2.25mから観測可能な2m下までの断

面を考え、

イ (2.25～1.75 m), ロ (1.75～1.25 m)

ハ (1.25～0.75 m), ニ (0.75～0.25 m)

というように50cm毎に4つに区分した水深を基準として、その各区分に入る水深での3測点の波高増幅率を読み取った。図-11には、このように4区分した各水深での波高増幅率の平均値がプロットしてある。図-12には、更にこの4区分の波高増幅率を平均した観測値全平均の波高増幅率をプロットしてある。尚、全観測値平均の波高増幅率として、上げ潮時はC点で1.31、E点で2.09、下げ潮時はC点で1.34、E点で2.23となっているが、ここではその差を無視して取扱っている。

ところで、ここで用いた観測値は測点の波高が数10

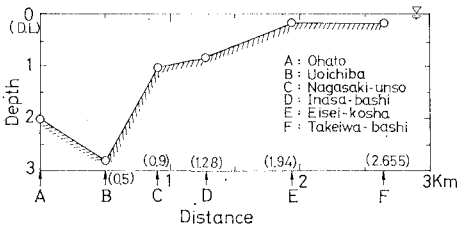


図-10 河口付近と浦上川の河床縦断地形図

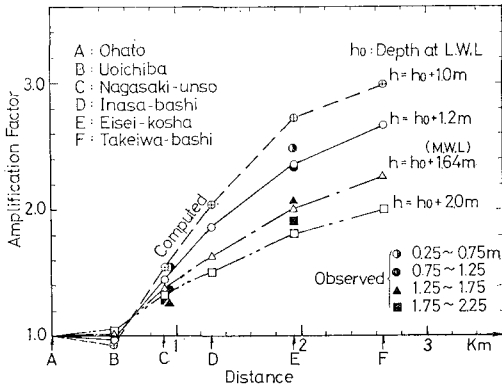


図-11 大波止を基点とした波高増幅率と観測値の比較

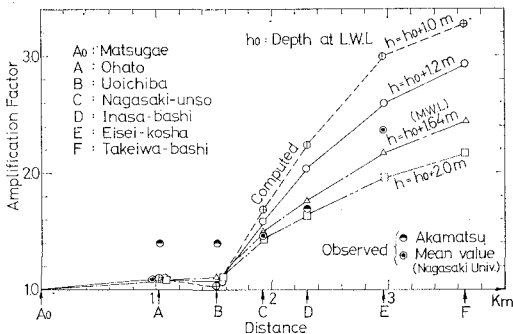


図-12 松ヶ枝を基点とした波高増幅率と観測値の比較

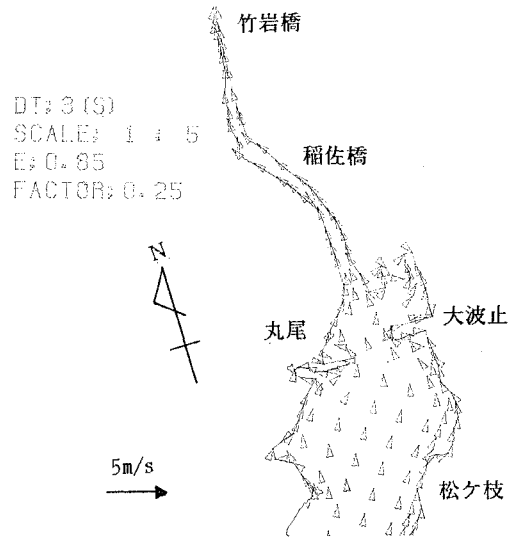


図-13 上げ潮・最大流速時の流況

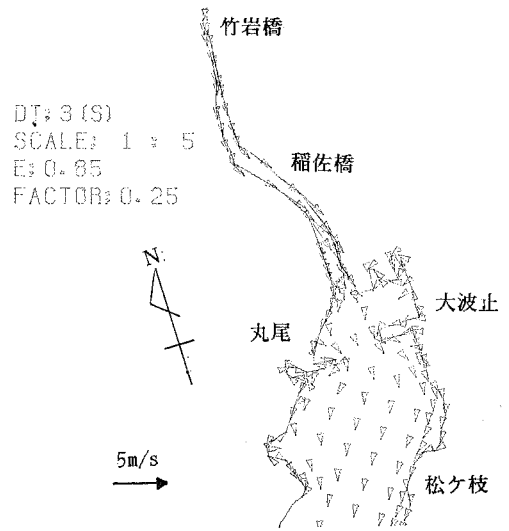


図-14 下げ潮・最大流速時の流況

cm, 周期は固有周期の前後を考慮して30~40分程度のものを主として抽出して整理したものである。従って、数値解析の方もそれに合わせて、入射波の振幅3cm, 周期36minで入力し、計算した結果が図-11, 12折れ線である。最上流の竹岩橋は壁で閉じてあるので、普通の湾奥の取扱いと同じであり、従ってこれは完全重複波型の解として得られた波高増幅率である。水深が浅い場合の他は、計算値は割合良く観測値を説明しているようである。図-12は赤松⁷⁾に就いて潮位の変化を無視して全観測値を平均して計算値と比較してみたものであるが、当然予想されるように略々平均潮位時の波高増幅率に近いものとなった。

図-13, 14は上げ潮・下げ潮時の各最大流速時の湾奥部と河口付近の流況を調べたものであるが、波高が小さいためか余り目立った特徴は見られないようである。

6. 結 論

(1) 有限振幅長波理論式に基づく有限要素法による本解析法の妥当性を梶浦の浅水変形理論式によって比較検証した。

(2) 長崎湾の地形に合わせて細分割したメッシュ分割図により、昭和54年3月の観測史上最大のアビキについて事例解析した結果、松ヶ枝での最大波高2.78mとはほぼ一致する解を得た。従って、この場合の湾内の流況を詳細に把握できたので、この結果は今後のアビキ対策の資料として防災の見地から極めて有用である。

(3) 現地観測により、浦上川を遡上するビキの波高増幅率を求めた。その結果を平均して見ると、上げ潮時よりも下げ潮時の方が増幅率がやや大きい、数%以内の小差である。従って、これを無視して全体を平均して見ると、満潮時よりも干潮時の方が増幅率は大きく、水深による相違は明らかである。そしてこれを数値解析により比較検討した結果、両者は割合良く一致することが確かめられ、本解析法の妥当性が再び検証された。

最後に、本研究を遂行するに当たり、中央大学の川原睦人教授、大学院生樫山和男氏の御両名には懇切なる御教示を頂いた。ここに付記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 寺田一彦 他: 長崎港の副振動について, 長崎海洋気象台報告, 第4号, 長崎海洋気象台, pp. 1~73, 1953.
- 2) 中村武弘・富樫宏由・平山康志: 長崎湾のアビキ観測, 第30回年講概要集, 第2部, pp. 29~30, 1975.
- 3) Hibiya, T. and K. Kajiura: Origin of the Abiki phenomenon (a kind of seiche) in Nagasaki Bay, Jour. of Oceanographical Soc. of Japan, Vol. 38, No. 3, pp. 172~182, 1982.
- 4) 岩崎敏夫: 昭和51年度津波遡上高調査報告書, 東北大学工学部土木工学科, pp. 1~55, 1977.
- 5) Kawahara, M. et al.: Selective lumping finite element method for shallow water flow, Int. Jour. for Num. Method in Fluids, Vol. 2, pp. 89~112, 1982.
- 6) Kajiura, K.: Local behaviour of tsunamis, Lec. Notes in Phy., 64, Waves on Water of Variable Depth, pp. 72~79, 1976.
- 7) 津波(長崎港アビキ)対策調査委員会報告書, 西部海難防止協会, 1982.