

V 字状湾および港湾内の空間格子間隔が津波数値 計算結果に及ぼす影響に関する検討

稲垣 和男*・木場 正信**・田中 寛好***・高尾 誠****

1. はじめに

浅水理論を用いた津波の数値計算では、信頼度の高い海底地形データを用いることと適切な空間格子間隔でモデル化することが、良好な精度の津波計算水位を予測する上で重要である。前者については、マルチナロービーム技術の普及による測深精度の向上や DGPS の利用による洋上の位置測定の精度向上により、近年飛躍的に信頼度の高い海底地形データを利用することが実現されつつある。空間格子間隔については深海域を対象として、「波長間に含まれる格子点数を 20 以上とすることが望ましい(長谷川ら, 1987)」, や遡上先端域として, 「 $\Delta x/\alpha g T^2 < 4.0 \times 10^4$ (Δx : 格子間隔, α : 海底勾配, g : 重力加速度, T : 周期) を満足するように格子分割を設定する必要がある (Goto ら, 1983)」等の目安が活用されているが, 著しい津波の増幅が生じることがある V 字状湾や防災対策上重要な拠点となる港湾内の格子間隔については, これまで具体的な設定方法は提示されていない。本研究では, V 字状湾および港湾内を対象に数値実験を行い, 津波水位の計算誤差を 5% 程度とするための格子間隔について提案する。

2. V 字状湾

(1) 解析モデルと検討条件

V 字状湾の解析モデルの形状および諸元を図-1, 表-1 に示す。V 字状湾の奥行き ℓ を 1000 m, 2000 m, 4000 m とした 3 ケースの形状に対し, 解析領域の格子間隔 Δx を 25 m, 50 m, 100 m, 200 m, 400 m の 5 通り, 計 15 種類の格子モデルを用意した。この格子モデルに対し周期 (T) 5 分~20 分, 振幅 1 m の正弦波を 1 波のみ入力した。基礎方程式は慣性項および海底摩擦項 (マニングの粗度係数 $n=0.03$) を含む浅海長波方程式であり, 陸岸は完全反射条件とした。なお, 梶浦 (1963) によれば, 湾水震動の特性について検討する場合, 湾口部面積が外海的全断面積の 0.1~0.2 のところで議論する必要がある

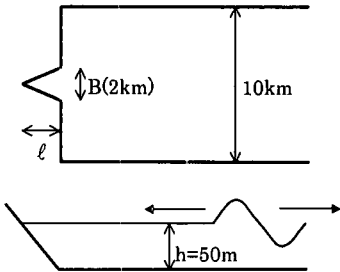


図-1 V 字状湾の解析モデル

表-1 解析モデルの諸元

項 目	内 容		
湾奥行き ℓ	1000 m	2000 m	4000 m
湾口幅 B	2000 m		
B/ℓ	2	1	0.5
湾の海底勾配	1/20	1/40	1/80
入射波周期 (分)	5, 7.5, 10, 20	5, 10, 15, 20	5, 10, 20
格子間隔 (m)	25, 50, 100, 200, 400		

としている。ここでは、事前に外海の幅を変えて湾口部および湾奥部の計算水位について比較した結果、面積比を 0.2 としても、外海の影響を受けないことを確認した。この計算では、沖波を初期波形として一波だけ想定しているため、梶浦が示した値よりやや大きくても影響が見られなかったものと思われる。

(2) 感度解析結果

感度解析結果を検討する際の波長として、 L_v (湾内平均水深による波長)、 L_o (湾中央から湾奥部の平均水深による波長) の 2 種類を用いた。

V 字状湾内センターライン沿いの最高水位分布を図-2 に示す。湾内の最高水位は、ほとんどの場合、湾の形状及び入射波長の如何に関わらず湾中央部よりも奥で大きく増幅する傾向にある。ただし、 L_v/ℓ が 20 程度の場合は湾全体としてほとんど増幅しない。入射波の波長や湾奥長さが異なっても、 L_v/ℓ が同一となるケース (例えば $\ell=1000\text{ m}$: $T=5\text{ 分}$, $\ell=2000\text{ m}$: $T=10\text{ 分}$, $\ell=4000\text{ m}$: $T=20\text{ 分}$) では、最高水位分布は水平距離を無次元

* (株)ユニック 環境水理解析研究室
** 工修 (株)三菱総合研究所 フロンティア科学研究所
*** 正会員 工修 (財)電力中央研究所 水理部
**** 正会員 工修 東京電力(株) 原子力技術部

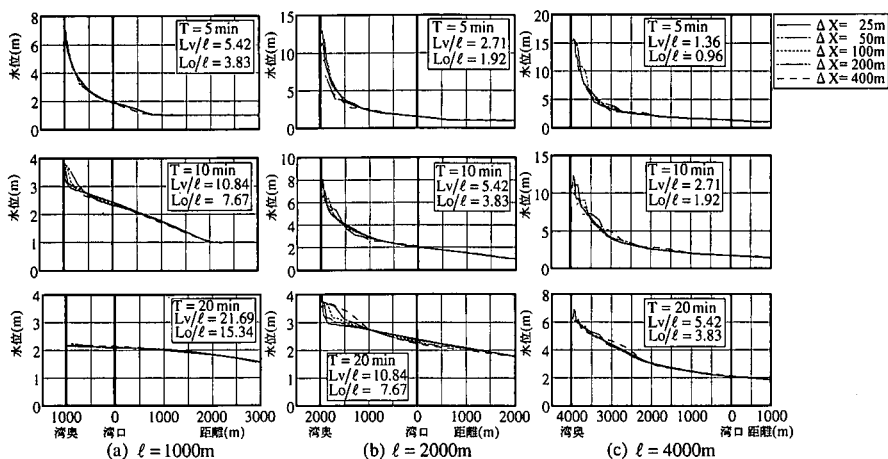


図-2 湾口～湾奥縦断沿いの計算最高水位分布の比較

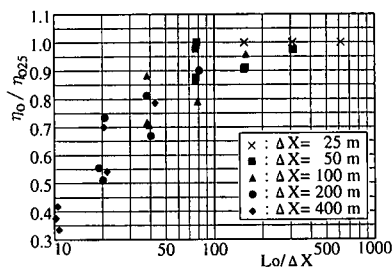
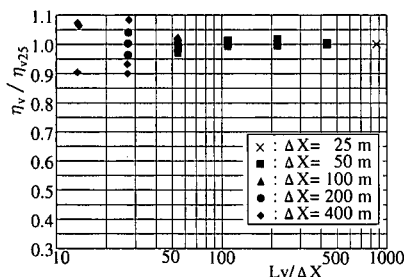


図-3 湾中央部における最高水位の誤差と格子間隔の関係

化して見ればほぼ同一となる。

湾中央部における各ケースの最高水位 (η_v) と 25 m 格子のケースの最高水位 (η_{v25}) との比をとり図-3に示す。湾口～中央部の最高水位分布は、ここに設定したような格子間隔の範囲では大きく変化せず、格子間隔を L_v の 1/40 程度とすれば L_v/l の値に係わらず 5 % 程度の誤差で計算することが出来る。

湾奥における各ケースの最高水位 (η_o) と 25 m 格子のケースの最高水位 (η_{o25}) との比をとり図-4に示す。湾奥近傍では l と L_o との関係に大きく依存するため、3 通りに分類している。 $L_v/l < 6$ の場合、入射波は湾奥で急激に増幅し、格子間隔によって計算結果は大幅に変化する。湾中央部から徐々に格子を密にし、湾奥部では L_o の 1/100 以下の格子間隔が必要になることがある (図-4(a))。 $6 \leq L_v/l \leq 10$ の場合、湾奥部の最小格子は L_o の 1/50 程度とする必要がある (図-4(b))。 $10 < L_v/l$ の場合、入射波の増幅は緩やかで、湾奥部では L_o の 1/40 程度の格子間隔とすれば 5 % 以内の誤差で計算することが出来る (図-4(c))。

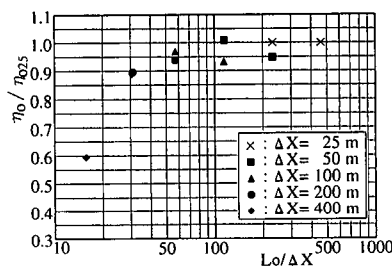
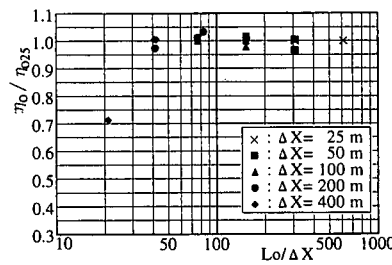
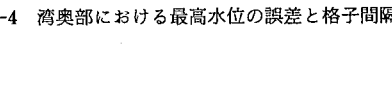
(a) $L_v/l < 6$ の場合(b) $6 \leq L_v/l \leq 10$ の場合(c) $10 < L_v/l$ の場合

図-4 湾奥部における最高水位の誤差と格子間隔の関係

3. 港 湾 部

格子間隔が港内の岸壁等における計算水位に与える影

響について感度解析を行い、格子分割に関する知見を得る。

(1) 検討条件

解析モデルの諸元を表-2に、形状を図-5に示す。防波堤の形状は、いずれの格子間隔についても最大格子(150 m)による近似に合わせることで、全格子モデルで共通な港湾地形となる場合と、それぞれの格子間隔で地形近似が最善となるようモデル化した場合の両者を検討した。沖合より汀線に直交方向に、振幅1 m, 周期5分, 10分, 20分の正弦波を1波のみ入力した。基礎方程式はV字状湾の検討と同様である。

(2) 感度解析結果

a) 港湾形状を最大格子間隔に一致させた場合

格子間隔 Δx は25 mを基準に計算結果を比較しているが、25 mで計算結果が収束解に達しているか否かを確認するために、 $\Delta x = 12.5$ mとした場合と25 mとした場合を入射波周期5分について比較して図-6および図-7に示す。微細な相違はあるが、計算水位分布および流動

パターンは両者でほぼ一致している。

格子間隔25 mの場合の計算最高水位 (η_{R25}) を基準とした各格子間隔における最高水位 (η_R) を比較して図-8に示す。また、図-9に各ケースの最高水位の分布を、図-10に2つの時間断面における流速ベクトルと水位分布の比較を示す。格子間隔を150 m, 入射波周期を5分とした場合でも、一波長当たりの格子数は20であり、いずれの条件でも、格子間隔は長谷川ら(1987)の示した

表-2 港湾解析モデルの諸元

項目	内容
対象地形	下図の港湾を想定する。
計算領域	岸沖方向: 3000 m, 汀線平行方向: 6000 m
水深	10 m (一様)
格子間隔	12.5, 25, 50, 75, 150 m

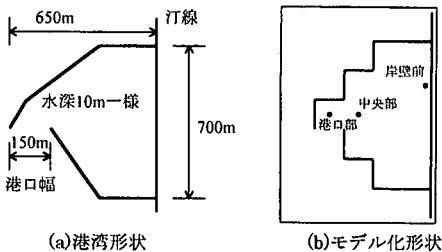


図-5 港湾モデル形状

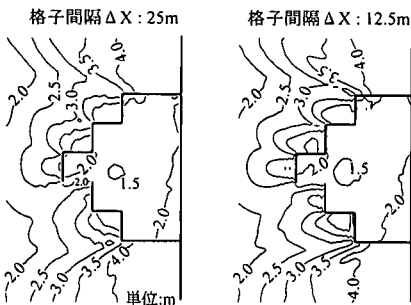


図-6 格子間隔が25 mと12.5 mの場合の最高水位分布の比較

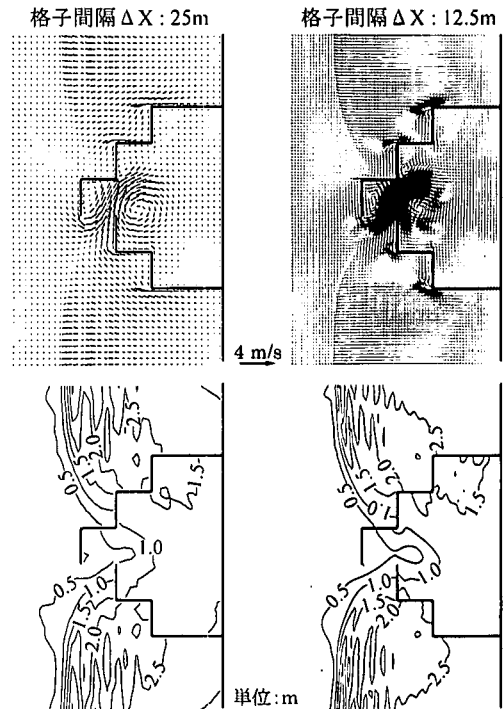


図-7 格子間隔が25 mと12.5 mの場合の流速ベクトルと水位分布 (計算開始6分後)

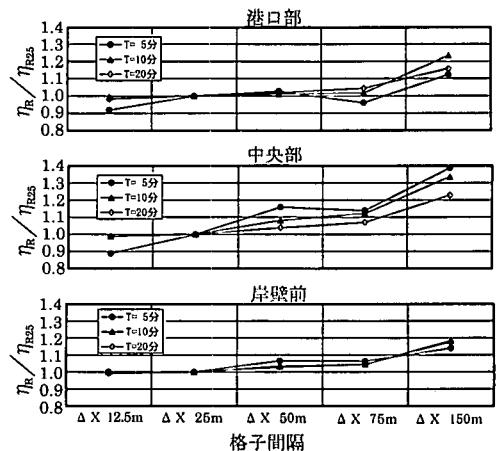


図-8 格子間隔25 mの場合を基準とした最高計算水位の比較

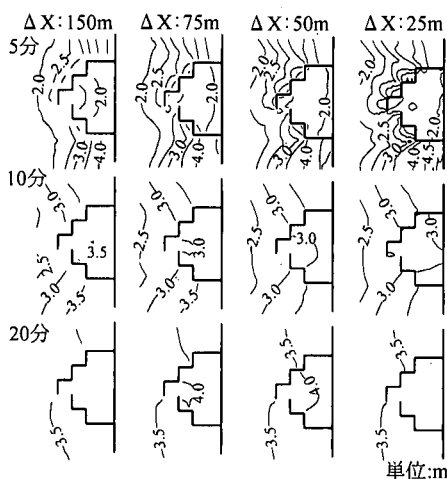


図-9 最高水位分布の比較 (入射波周期 上段: 5分, 中段: 10分, 下段: 20分)

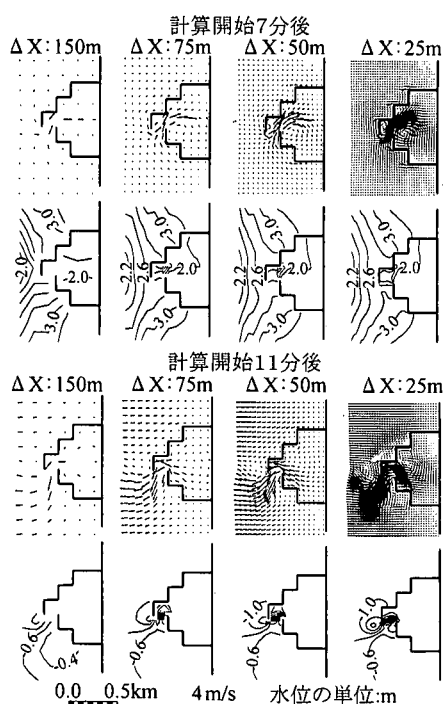


図-10 流速ベクトルと水位分布の比較 (入射波周期: 10分)

基本的な条件を満足している。港内の水位は格子間隔が大きいほど高く、特に港口部を一格子でモデル化した場合 ($\Delta x=150\text{ m}$) は、その傾向が顕著である (図-8, 図-9)。流速ベクトルと水位分布に着目すると (図-10)、港口部周辺では格子間隔が小さいほど複雑な流動パターンとなっている。格子間隔が小さい方が港内の水位が低くなるのは、港口部の渦とそれに伴う死水域が顕著となり、主流部の流入幅が狭くなって津波に伴う流れの進入

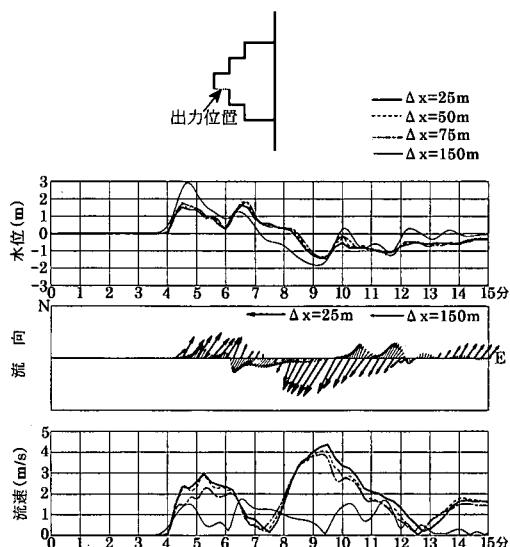


図-11 港口中央部の水位・流向・流速の時系列 (入射波周期 5分の場合)

が阻害されるためと思われる。港口中央部の水位・流速の時系列 (図-11) によれば、格子間隔を 75 m 以下とした場合の相違はそれ程顕著ではないが、図-10 に示す流速分布パターンには明らかに相違があることに留意する必要がある。流向については図-11 に表示上の制約から格子間隔が 25 m および 150 m の場合について比較したが、両者の位相は大きく異なっている。

これらの計算結果から、一波長当たりの格子間隔が基本的な条件を満足する場合でも、港口幅に比べて相対的に大きい格子幅とした場合は流動パターンに大きな制約を受けるため、港口幅の 1/5 程度の格子間隔で港湾部周辺をモデル化することが望ましい。

b) 港湾形状をそれぞれの格子間隔で最善にモデル化した場合

この場合は格子間隔毎に異なる問題を計算していることになるが、現実にはある判断のもとに最善と思われる格子モデルを作成し用いているわけであり、実用上の格子間隔の影響としてはこの方が現実的である。

計算結果から、格子モデル毎の計算最高水位を最善モデルと同一形状モデルで比較して表-3 に示す。また、格子間隔 25 m の場合 (η_{F25}) を基準とした最高計算水位 (η_F) を比較して図-12 に、最高水位分布を図-13 に、入射波周期 5 分の場合の流速ベクトルと水位分布を図-14 にそれぞれ示す。それぞれの格子間隔モデルにおいて、計算最高水位は同一形状モデルと比べて「最善モデル」の方が大きい (表-3)。全体的に 25 m 格子による「最善モデル」の方が粗い格子による「最善モデル」の計算最高水位より低い傾向にあるが、入射波周期 5 分では逆の

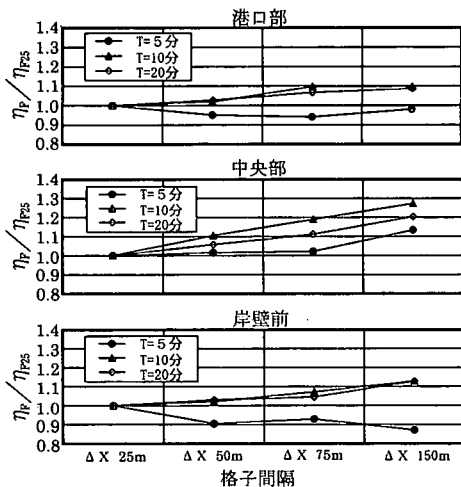


図-12 最善の格子分割による格子間隔 25 m の場合を基準とした最高計算水位の比較

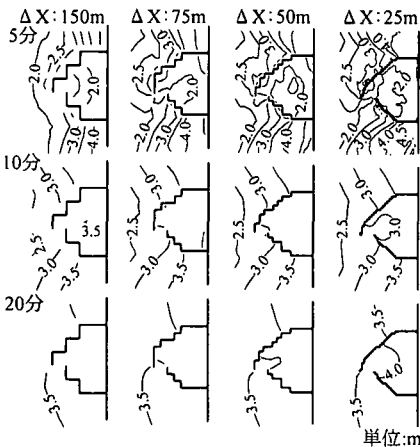


図-13 最高水位分布の比較 (入射波周期 上段: 5分, 中段: 10分, 下段: 20分)

傾向がみえる (図-12: 港口部, 岸壁前)。周期が短い場合は最高水位の空間分布の変化が著しいため、定点ではそのような傾向が見られる事があるが、全体としての分布は必ずしも矛盾するとは言えない (図-13, 図-14)。

4. 結 論

V 字状湾および港湾部における格子分割に関する検討を行った結果、以下の結論が得られた。

- ① 湾口から湾中央部では湾内平均波長 L_v の 1/40 程度の格子間隔を選べば 5 % 程度の誤差で計算できる。
- ② $L_v/\ell < 6$ の場合、湾奥の狭い範囲で急激に増幅し、 L_o の 1/100 程度の格子間隔が必要な場合もある。
- ③ $6 \leq L_v/\ell \leq 10$ の場合、 L_o の 1/50 程度の格子間隔を湾奥部で用いれば 5 % 程度の計算誤差に納めることが

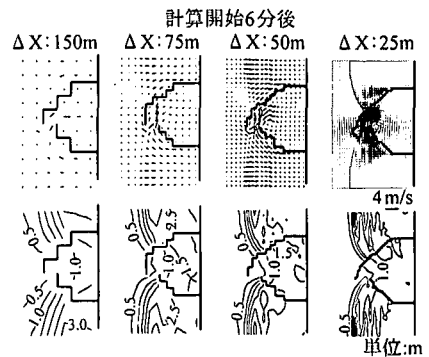


図-14 最善の格子分割による流速ベクトルと水位分布 (入射波周期 5 分の場合)

表-3 格子モデル毎の計算最高水位の変化率 (最善モデル/同一形状モデル)

地点	T=5分			T=10分			T=20分		
	格子間隔 (m)								
	25	50	75	25	50	75	25	50	75
港口部	1.14	1.06	1.12	1.12	1.13	1.21	1.06	1.07	1.09
中央部	1.22	1.07	1.10	1.05	1.07	1.11	1.02	1.04	1.06
岸壁部	1.31	1.11	1.14	1.05	1.04	1.08	1.04	1.04	1.04

可能である。

④ $10 < L_v/\ell$ の場合、入射波の増幅は湾奥でも緩やかで、 L_o の 1/40 程度の格子間隔で良好な精度が得られる。

⑤ 港湾に対して粗い格子分割を用いると、港口部に発生する渦とそれに伴う死水域が表現されず、主流部の流入幅を広く評価する事によって港内の水位に対して過大評価となる場合がある。

⑥ 港口部周辺では複雑な流動パターンとなることが予想されるが、港内の水位を精度良く計算するためにはこの流況を表現することが重要となる。少なくとも港口幅の 1/5 程度の格子間隔が望ましい。

謝辞: 本研究は、電力 9 社と日本原子力発電 (株) による電力共通研究の一部として実施した。研究を進めるにあたり、土木学会原子力土木委員会津波評価部会 (主査: 首藤伸夫岩手県立大学教授) の委員の方々から貴重なご指導をいただきました。ここに厚く謝意を表します。

参 考 文 献

- 梶浦欣二郎 (1963): 湾水振動におよぼす防波堤の効果, 東京大学地震研究所彙報, 第 41 号, pp. 403-418.
- 長谷川賢一, 鈴木孝夫, 稲垣和男, 首藤伸夫 (1987): 津波の数値実験における格子間隔と時間積分間隔に関する研究, 土木学会論文集, No. 381/II-7, pp. 111-120.
- Goto, C., Shuto, N. (1983): Numerical simulation of tsunami propagations and run-up, *Tunamis, Their Science and Engineering*, pp. 439-451.