

合成等価粗度モデルを用いた津波氾濫シミュレーションの提案

油 屋 貴 子*・今 村 文 彦**

本研究では、非定常性を有する津波を対象に家屋の抵抗を合成等価粗度を用いてモデル化した。モデルに含まれる抵抗係数は水理模型実験より算定した。このモデルを津波遡上計算に取り入れ、浸水深や遡上域がどの程度変化するかを空間格子幅に着目して従来の方法と比較したところ、格子幅が 50 m (家屋スケールの 5 倍程度) よりも小さい場合に最大浸水深と最大遡上距離の精度が向上し、それよりも大きな格子幅では従来モデルを用いたほうが良好な結果が得られた。仙台湾沿岸における津波遡上計算では、家屋と樹木の抵抗を合成等価粗度により評価した。従来の一定粗度を用いた計算結果と比較すると遡上域が大きく減少することがわかった。

1. はじめに

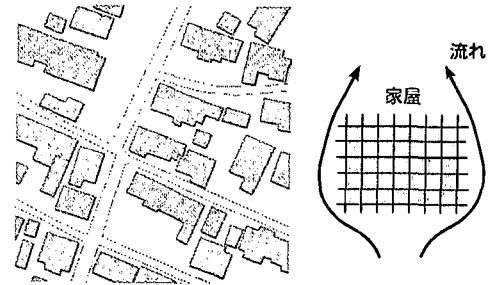
「津波災害につよい街づくり」のためには、津波の挙動などの外力を事前に予測し、これに対する地域の避難計画や情報伝達システムを検討することが不可欠である。この時、信頼性の高い津波遡上計算により、津波の遡上高さ・流速・遡上域・流体力等を的確に把握しなければならない。沿岸に様々な土地利用がある我が国においては、推算結果の良否は遡上域の建物などによるエネルギー損失量の推定精度に大きく依存する。

従来の津波遡上計算では、Manning 粗度を一様に与える方法 (相田, 1977), または土地利用毎に数段階に粗度を与える方法 (小谷ら, 1998) が一般的であった。最近、家屋群を不透過性の地形の一部として扱う方法 (劉ら, 2002), さらに、MARS 法など 3 次元数値モデルによる解析 (平石ら, 2001) が行われている。しかし、広域の対象領域を 3 次元的に扱うには解析能力の限界があり、さらには、構造物に対するモデル化や経験的な係数が存在しているという課題が残されている。

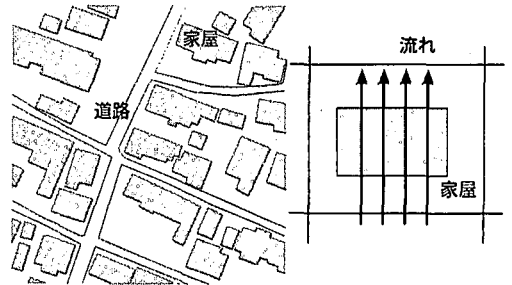
そこで本研究では、水平 2 次元モデルを基本とし、非定常性を考慮した津波に対する家屋の抵抗をモデル化し津波遡上計算に取り入れることによって、浸水深や遡上域がどの程度変化するかを空間格子幅に着目して従来の方法と比較し、実用的な遡上計算手法を提案する。また、合理的な粗度係数などの設定方法についても検討する。

2. 家屋を考慮した津波遡上計算手法

家屋の影響を考慮した数値計算手法として、本研究では、家屋幅と計算格子幅との関係に着目した以下の 2 つの数値モデルについて検討する。それぞれの数値モデルの概念図を図-1(a), (b) に示す。



(a) 地形モデル



(b) 抵抗モデル

図-1 数値モデルの概念図

i) 家屋を高い地盤と考える場合—地形モデル

家屋幅に対して格子幅が小さい場合は、家屋間を流下する際の縮流による流速の増大や家屋の上流側での水位の堰上げなど、局所的な流況が再現可能であるが、正方形格子で複雑な土地利用状況を近似することは難しく、数 m 程度の細かい格子幅が必要である。

ii) 家屋を抵抗要素と考える場合—抵抗モデル

家屋スケールより大きな格子幅で解く場合は、家屋による流体抵抗やエネルギー損失をなんらかの形で取り入れなければならない。各格子に粗度を与える方法も抵抗モデルの一つであるが、各係数の設定方法や非定常性の導入についての課題がある。

* 修(工) 仙台市

** 正会員 工 博 東北大学教授 大学院工学研究科附属災害制御研究センター

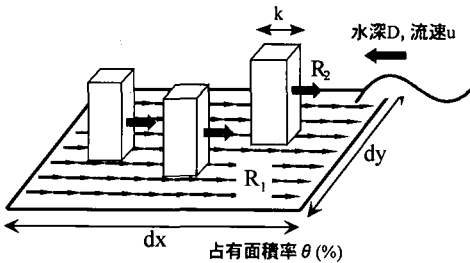


図-2 合成等価粗度の概念図

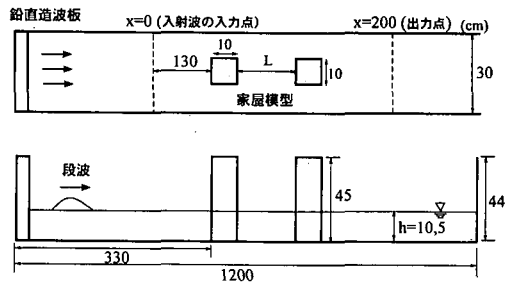


図-3 水理模型実験の概要

3. 家屋の抵抗モデル

3.1 合成等価粗度の導出

地形モデルや Morison 式を用いた抵抗モデルの再現性は高いと考えられるが(原田ら, 2000), 実際に現地へ適用するには複雑である。そこで, 精度が高く簡便な方法として合成等価粗度を考える。流水に作用する力は, 図-2 のように底面摩擦力 R_1 と家屋の抵抗力 R_2 の合力であり, それぞれ式 (1), (2) のように表すこととする。これを再び等価な粗度として置き換えることにより, 合成等価粗度 n は式 (3) のように導かれる。

$$R_1 = \rho g D \frac{n_0^2 u^2}{D^{4/3}} dx dy \left(1 - \frac{\theta}{100}\right) \dots \dots \dots (1)$$

$$R_2 = \frac{1}{2} C_D \rho u^2 (kD) \frac{\theta}{100} dx dy / k^2 \dots \dots \dots (2)$$

$$n = \sqrt{n_0^2 + \frac{C_D}{2gk} \times \frac{\theta}{100 - \theta} \times D^{4/3}} \dots \dots \dots (3)$$

ここで, n は合成等価粗度, n_0 は底面粗度, D は水深, k は家屋の幅, u は流速, θ は家屋占有率, C_D は抵抗係数, dx, dy はそれぞれ x, y 方向の格子幅である。従来の Manning 粗度は一定値または経験的に与えられるのに対して, 合成等価粗度 n は抵抗係数 C_D , 家屋の占有面積率 θ , 水深 D , 家屋幅 k によって合理的に求めることが可能である。

3.2 抵抗係数 C_D の算定

津波は非定常性が強く, 波力や衝撃力などが作用する等の影響があるため, 定常流における C_D 値を用いた場合, 抵抗力を過小評価してしまうと考えられる。そこで, 非定常下における C_D を算定するために図-3 に示す全長 12 m の水路で水理模型実験を行った。水路には家屋を想定した角柱の模型を 2 つ設置し, 水路端の鉛直造波板から段波を発生させた。家屋模型間の距離 L は 10 cm から 100 cm まで変化させ, 段波発生のための静水深は 5 cm および 10 cm とした。 C_D は上流および下流, それぞれの模型において次式 (4) を用いて算定し, 平均値をとった。 $F_{\max}$ は抵抗力の最大値である。

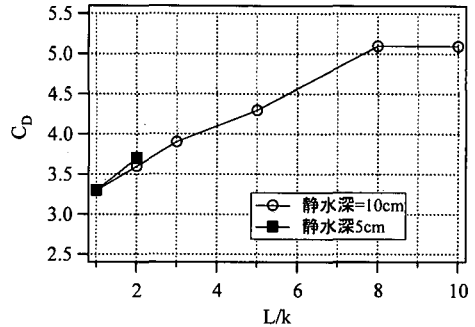


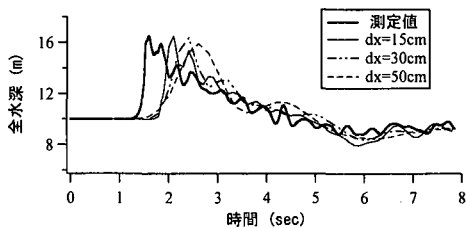
図-4 抵抗係数 C_D の算定結果

$$C_D = F_{\max} / \left(\frac{1}{2} \rho u_{\max}^2 k D \right) \dots \dots \dots (4)$$

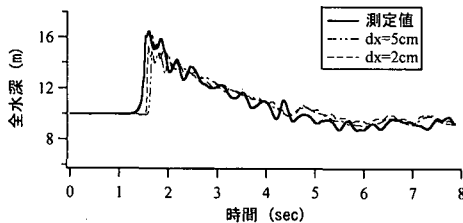
算出された C_D は, 家屋形状・配置や津波の非定常性によって変化する。ここでは, 非定常性の異なる津波に関しても検討した。図-4 は家屋幅および密度に対する C_D 値であり, 強い相関があることがわかる。非定常下の付加質量力も考慮してモデル化しているため, その値は通常より大きい。本実験で想定した津波を現時スケールに換算すると, 住宅地域で 6 m および 3 m 程度の波である。浸水深と家屋被害の関係(首藤, 1994)を考慮すると, 最大規模と中規模の津波を想定していることになる。図-4 より, C_D は津波の規模には依存しないということがわかった。

3.3 水理実験の再現計算

算定された抵抗係数 C_D を用いて実験の再現計算を行い, 合成等価粗度を用いた計算の再現性について検討した。格子幅 dx は 15 cm, 30 cm, 50 cm とした。家屋模型 (10 cm) よりも大きなサイズの格子を選定できる。結果の一例として, 静水深 10 cm, $L/k=1$ の模型通過後(図-3 の $x=200$ cm の地点)の全水深を図-5(a) に示す。最も大きな $dx=50$ cm ではややピークが低下し前面波形勾配が緩やかになっているが, 格子幅が小さいほど実験値と良好に一致することがわかった。共通する問題として, 第一波の立ち上がり時間が実験値に対して遅れている。格子幅の粗さが原因である。



(a) 合成等価粗度モデル



(b) 地形モデル

図-5 全水深についての再現結果の比較

また、地形モデルの再現性についても検討した。格子幅 dx は 2 cm, 5 cm とした。地形モデルでは、少なくとも家屋模型よりも小さなサイズの格子を選定しなければならない。図-5(b)より、ピーク及び波形勾配ともに実験値とほぼ一致しているが、格子が粗くなると波高の減衰が大きくなり、格子の選定にはさらに注意が必要である。第一波の立ち上がり時間が、実験値に対して遅れていることは合成等価粗度モデルと同様であるが、格子が小さい分、その差は小さい。

4. 沿岸集落モデル地形での津波遡上計算

4.1 計算条件

ここでは、従来モデルと本モデルの比較検討をするために、家屋のみの影響に対して、仙台湾沿岸の荒浜住宅地域を想定した沿岸集落モデル地形を設定して、単純条件下での効果を調べた。モデル地形は沿岸方向の地域の幅を考慮して、図-6 のように Case-1 と Case-2 を設定した。計算方法は、表-1 に示すような 3 種類である。荒浜は住宅が密集した地区であるため、合成等価粗度の C_D は、 $L/k=1$ の場合に相当する 3.3 を用いた。また、家屋幅 k は 10 m とした。格子幅 dx は 5, 10, 20, 50, 100, 200 m とし、周期 10 分、振幅 4 m, 7 m の正弦波を沖側の境界に強制入力した。ここでは地形モデル ($dx=2$ m) による結果を真値とみなし、それぞれの計算方法による結果の比較を行った。

4.2 浸水深の計算結果

まず、最大浸水深について各粗度モデルの比較を行った。結果の一例として Case-2、入射波振幅は 7 m の結果

を図-7 に示す。図中の太実線が地形モデル ($dx=2$ m) の結果であり、ここでの真値としている。3つの粗度モデルを比較すると、1) 格子サイズの小さい合成等価粗度モデルが最も高い精度の結果を示し、格子が粗くなると精度が大きく低下すること、2) 一定粗度、一様粗度モデルでは、浸水距離が長くなると誤差が大きくなること、3) 一定粗度、一様粗度モデルでは格子サイズに依存しない結果が得られていること、が特徴として見られた。まず、1) に関して、50 m よりも大きな格子幅では浸水深が低下する原因としては、浸水深や流速の算定に課題があると思われる。格子幅が大きい場合には、格子の上流境界と下流境界における流量や水深の差も大きくなるはずである。しかし抵抗力の算定に用いる水深や流速は上流境界の値であるため、格子内の抵抗力が過大評価されてしまうことになる。2), 3) に関して、一様・一定粗度モデルでは、全体的な傾向を押さえることが出来るものの、実際の多様な家屋配置に対応できずに、誤差が累積していることが原因であると言える。これは、遡上域を推定する際には、大きな影響を及ぼし精度の低下につながる。両モデルによる浸水深が大きいことから、居住区内にお

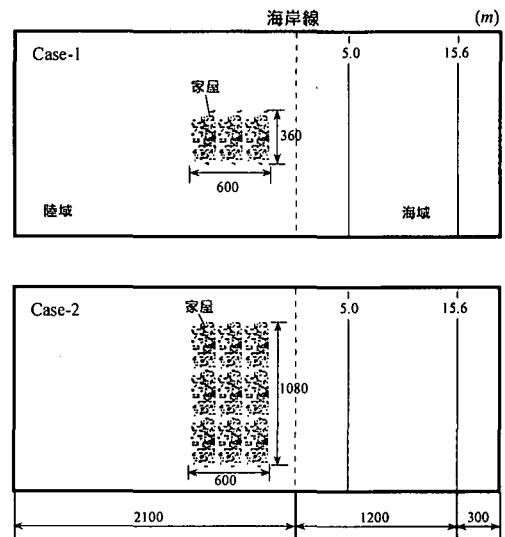


図-6 モデル居住区の概略 (平面図)

表-1 計算条件

計算方法	粗度係数 n	
	居住区域	その他
(a) 合成等価粗度モデル	$n = \sqrt{n_0^2 + \frac{C_D}{2gk} \times \frac{\theta}{100 - \theta} \times D^{4/3}}$	0.025
(b) 一定粗度モデル (小谷ら, 1998)	0.06	0.025
(c) 一様粗度モデル	0.025	

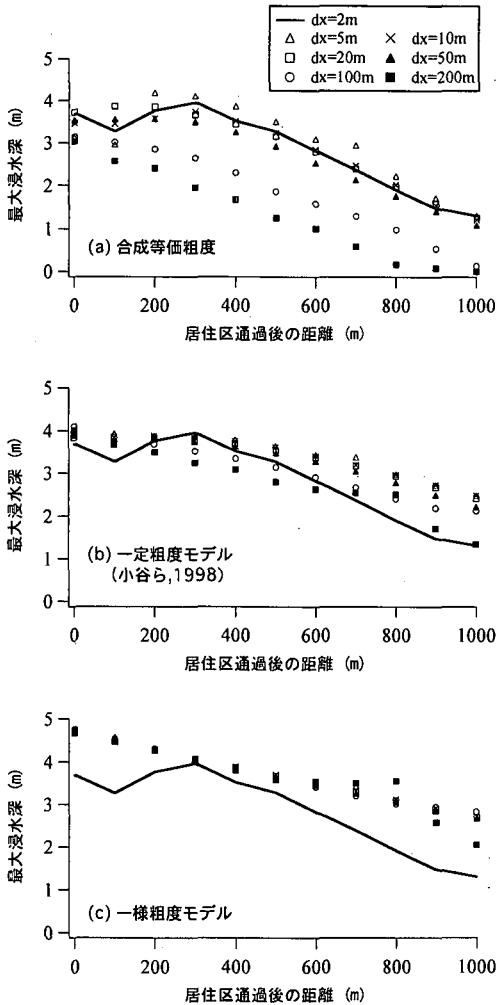


図-7 最大浸水深の誤差

けるエネルギー損失が過小に見積もられていると考える。

4.3 遡上距離の計算結果

津波がどれだけ遡上するのかについて具体的な値を得るために、岸沖方向の最大遡上距離を算定した。(b) 一定粗度、(c) 一様粗度の方法による結果は、いずれも地形モデルより過大な値を示しており、格子幅による影響はほとんどない。Case-1 および Case-2 を比較すると、どのモデルでも Case-1 の方が良好な結果を示している。津波の浸水には、住宅域の陸岸方向の距離（長さ）だけでなく、幅も影響していることがわかる。

(a) の合成等価粗度では、浸水深と同様に、格子幅が大きい場合には遡上域を過小評価していたが、どのような津波規模および居住区規模であっても、格子幅をおおよそ 50 m より小さくとれば誤差を 100 m 以内に抑えることができ、従来の遡上計算法よりも精度良く遡上域を

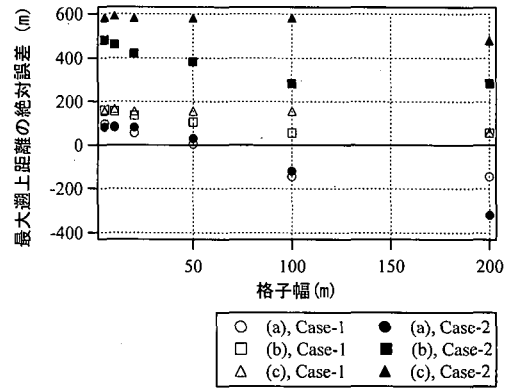


図-8 最大遡上距離の絶対誤差

算定できることが示された。ここで、50 m は、平均的な家屋サイズ（約 10 m）の 5 倍程度のスケールである。

4.4 遡上計算法の評価

最終的に、最大浸水深と最大遡上距離の結果をもとに、それぞれの遡上計算方法を評価した。Case-1 を「居住区規模・小」、Case-2 を「居住区規模・大」、また、入射波振幅 4 m の場合を「津波規模・中」、振幅 7 m の場合を「津波規模・大」としてそれぞれの組み合わせにより 4 通りの評価を行った。そのうち「津波規模・大、居住区規模・小」の結果を表-2(a) に、「津波規模・大、居住区規模・

表-2 遡上計算法の評価

(a) Case-1 (津波規模・大、居住区規模・小)

格子幅 (m)	合成等価粗度		一定粗度(小谷ら)		一様粗度	
	最大 浸水深	最大 遡上距離	最大 浸水深	最大 遡上距離	最大 浸水深	最大 遡上距離
5	○	○	○	△	○	△
10	○	○	○	△	○	△
20	○	○	○	△	○	△
50	○	○	○	△	○	△
100	○	×	○	○	○	△
200	×	×	○	○	○	○

(b) Case-2 (津波規模・大、居住区規模・大)

格子幅 (m)	合成等価粗度		一定粗度(小谷ら)		一様粗度	
	最大 浸水深	最大 遡上距離	最大 浸水深	最大 遡上距離	最大 浸水深	最大 遡上距離
5	○	○	△	×	△	×
10	○	○	△	×	△	×
20	○	○	△	×	△	×
50	○	○	○	×	△	×
100	×	×	○	△	△	×
200	×	×	○	△	△	×

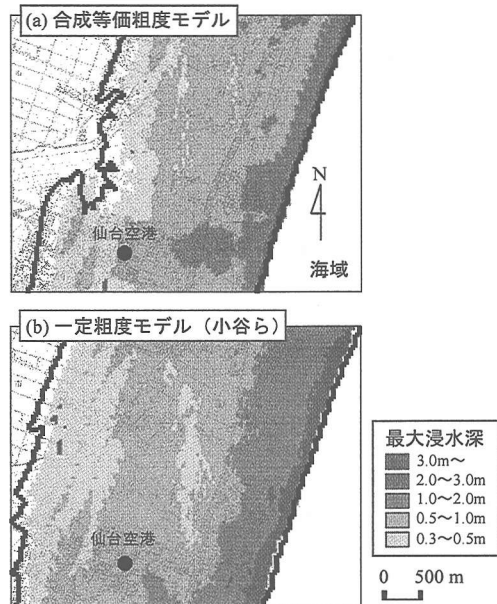


図-9 最大浸水深分布

大」の結果を表-2(b)に示す。ここでは、精度の傾向を議論するために、誤差は、最大浸水深の絶対誤差が50 cm (誤差10%程度)以下を○, 50 cm~100 cm (誤差10~20%程度)を△, 100 cm以上を×で表した。最大遡上距離の絶対誤差については、津波の規模によらず、絶対誤差が100 m (誤差5%程度)以下を○, 100 m~300 m (誤差5~10%程度)を△, 300 m以上を×で表した。

表-2の結果より、計算方法を選択する際の基準として、格子幅が50 m以下では合成等価粗度を、それ以上の場合は一定粗度を用いた方法がよいと判断できる。

5. 実地形での津波遡上計算例

5.1 計算条件

最後の検討として、仙台湾沿岸の実際の地形データを用いて遡上計算を行い、従来の遡上計算法と比較した。格子幅は25 m, 沖側の入射波振幅は4 mである。土地利用は居住区, 森林, その他の3区分とした。森林については、幹のみで抵抗すると仮定し、円柱の C_D 値を与えた。占有面積率 θ と樹木の直径に関しては、仙台湾沿岸防潮林の現地調査結果(原田ら, 2000)によって得られた平均値とした。また、居住区域の C_D, k および θ についても各区域の平均値を与えた。

5.2 計算結果

結果の一例として、計算対象領域のうち仙台空港付近の最大浸水深分布を示す。図-9の(a)は合成等価粗度モデル, (b)は一定粗度モデルを用いて得られた最大浸

水深分布である。合成等価粗度による結果をみると、住宅地域および仙台空港付近で浸水深の大きな領域が生じており、通過後は浸水深が小さくなっている。それに対して一定粗度を用いた場合は浸水深の大きな領域が広く分布していることがわかる。なお、小谷ら(1998)の一定粗度の結果と土地利用を考慮しない結果(一樣粗度モデル)とを比較すると、大きな違いはみられなかった。今回、合成等価粗度モデルに対して、一定粗度および一樣粗度モデルの結果は600 m~800 m程度内陸まで遡上するという結果が得られた。このことから、樹木と家屋の抵抗力を取り入れることによって津波の減衰効果に大きな違いが生じることがわかった。正確な浸水域の推定には、合成等価粗度モデルが必要であることが示されたとえる。

6. 結 論

家屋を考慮した津波遡上計算法としては、家屋を高い地盤として扱う地形モデルと抵抗要素として扱う抵抗モデルが考えられる。本研究では、実用的な抵抗モデルとして、家屋の影響が水深と占有面積率で評価される合成等価粗度を提案した。これにより合理的に粗度係数を設定することが出来る。非正常性に対しては、水理実験により抵抗係数を算定する方法を提案した。仙台湾沿岸のモデル居住区における遡上計算では、合成等価粗度モデルでは、格子幅が50 m(家屋スケールの5倍程度)よりも小さい場合に最大浸水深と最大遡上距離の精度が向上し、それよりも大きな格子幅では従来モデルを用いたほうが良いことが示された。仙台湾沿岸における津波遡上計算では、家屋と樹木の抵抗を合成等価粗度により評価し計算を行った。従来の一定粗度を用いた計算結果と比較すると遡上域が大きく減少することがわかった。

参 考 文 献

- 相田 勇 (1977): 陸上に溢れる津波の数値実験—高知県須崎および宇佐の場合—地震研究所彙報, 第52号, pp. 441-460.
- 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫 (1998): GISを利用した津波遡上計算と被害推定法, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 356-360.
- 首藤伸夫 (1994): 北海道南西沖地震津波による家屋の被害, 津波工学研究報告, 第11号, pp. 11-28.
- 原田賢治・油屋貴子・Latief Hamzah・今村文彦 (2000): 防潮林の津波に対する減衰効果の検討, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 366-370.
- 平石哲也・竹村慎治・永瀬恭一 (2001): 南太平洋地域における植林による津波対策法の適用性, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1411-1415.
- 劉 曉東・堺 茂樹・小原忠和・三上 勉・岩間俊二・今村文彦・首藤伸夫 (2001): 市街地への津波遡上・氾濫に関する数値解析, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 341-345.