

GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法

小 谷 美 佐*・今 村 文 彦**・首 藤 伸 夫***

1. はじめに

津波の頻度は小さいものの一旦発生すれば大災害となる可能性が高く、しかも被害の規模や形態は人間活動と密接に結びついているために、生活様式や土地利用の違いによりそれらの推定値が大きく異なることが指摘されている。過去、推定津波高さや到達時間を用いた危険度の評価やハザードマップについての研究はなされているが(河田・小池, 1996; 村上ら, 1996), 津波による被害推定については具体的になされていない。そこで本研究は、GIS による土地利用・地形・地理情報を利用して、市街地などの複雑な地域における高精度な遡上計算を行い、その結果に基づいた定量的な被害規模の推定方法を提案することを目的とする。

津波遡上計算に関しては、相田(1977)が高知県須崎において遡上計算を実施し、その際に地域毎に異なった粗度変化(等価摩擦係数の違い)を取り入れているが、その係数の設定方法は経験的に与えているに過ぎない。また、遡上計算での波先端においては岩崎・真野(1979)の境界条件が広く用いられているが、波先端が不連続的な挙動を示すことがあり、その方法の改良が必要とされている。

また一方、津波による人的・家屋被害に関しては、過去の事例を対象とした羽鳥(1984)や松富・首藤(1994)などの調査結果があるが、まだ定量的評価に利用されていない。河田(1997)は、津波による人的被害を統計的にまとめ、津波浸水高さによる簡易推定を提案しているが、この方法は広域での推定に適している一方、詳細な被害推定には難しい。

2. 津波遡上計算法の改良

数値計算の支配方程式は、(1)式に示す非線形長波理論(運動量方程式)である。これを数値計算する際には、陸上遡上における波先端条件が必要であり、岩崎・真野(1979)の条件がその代表例として利用されている。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2 M \sqrt{M+N}}{D^{7/3}} = 0 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 M, N は x, y 方向の流量、 D は全水深、 g は重力加速度、 n はマンニングの粗度係数、 η は水位である。波先端条件として、従来用いられた岩崎・真野(1979)の条件をまとめると以下ようになる。

1. 津波の先端は全水深 D がゼロとそれ以外の格子の境界にある。

2. 流量を計算するための全水深は、両側の水位の高い方の値を使って求める。具体的には 1 次元伝播(x 方向とし、位置を i と定義する)の場合に、

$$D(i) = \eta(i) + \max(h(i), h(i-1)) \dots \dots \dots (2)$$

となる。ここで h は静水深(地盤の高さに相当)、 $D(i)$ がゼロまたは負の場合には、流量をゼロとする。

3. M^2/D などの項で、 D がゼロに近づいた場合には、この項は D^2 に比例してゼロに近づくのでこれをゼロとして省略する。

以上の方法において 2, 3 が問題となる。まず、2 の方法では図-1(a) に示すように、右側の全水深がない(dry) 場合において、流体側(wet) の水位が次の陸上側の地盤高(水位と同じ)よりも低い場合には、遡上することが出来ないにもかかわらず、計算してしまう場合がある。さらに、図-1(b) の場合には、(1) 式の第 4 項である圧力項中の全水深の扱いにも注意が必要であり、越流公式やその研究に従い、流量計算での全水深は、手前の全水深 $D(i-1)$ よりも、以下の式に示すように水位

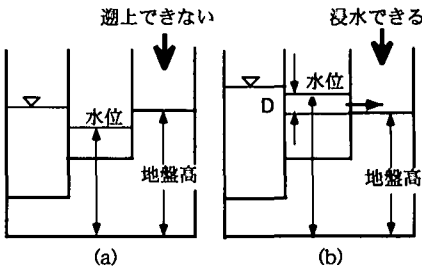


図-1 波先端条件

* 学生会員 東北大学大学院工学研究科
** 正 会 員 工 博 東北大学助教授 大学院工学研究科附属災害制御
研究センター
*** 正 会 員 工 博 岩手県立大学教授 総合政策学部

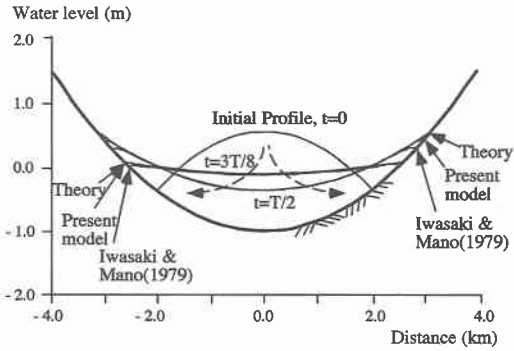


図-2 水面形

$\eta(i-1)$ と次の地盤高 $h(i)$ と差を用いるべきである。

$$D(i) = \eta(i-1) + h(i) \dots \dots \dots (3)$$

さらに、2において、 D がゼロに近づいた場合には、発散してしまうのでこれをゼロとして省略するべきであるが、移流項自体を省略する事は出来ない。波先端での移流項は大きく無視できないために、これを省略すると流量の計算精度が大きく低下する。ここでは、差分化した各項の全水深を調べ、それがゼロに近い場合には、その項のみを省略しそれ例外は残して、移流項の計算をしなければならない。

以上より、提案する波先端条件は、以下ようになる。

1. 流量を計算するための全水深は、dry 計算点の地盤高と先端部での水位の差とする。その差が負の場合には、流量をゼロとする。(遡上しない。)
2. 移流項の計算の際に、全水深がゼロまたはある下限値より小さくなった場合には、その全水深を分母として持つ項のみを省略し、移流項の計算を行う。

図-2には、球状のお盆の中に水塊を入れて、その水面形を求める問題に対し、理論解、岩崎・真野 (1979)、本計算結果とを比較している。ここでは、波先端で岩崎・真野 (1979) の結果が丸められ、先端位置が低くなっていることが分かる。

3. GIS データの利用

3.1 GIS データの作成

地方都市周辺の土地利用分布図を TNTmips (地理及び画像処理システム) と、各格子に情報を持たせた GIS 地形データを作成した (図-3)。具体的には、地方都市周辺の 1:50,000 の土地利用分布図及び標高図をスキャンし、TNTmips の機能に従い、カラー情報を取り入れて対話的にベクトル化を行った。さらに、それぞれに属性をつけることで、土地利用分布図からは土地利用の区別、標高図からは 3 次元の標高データを適当な大きさのメッシュデータに置き換えた。

3.2 粗度係数の設定

津波・洪水の数値計算における粗度係数は経験的に与えられており、その妥当性とそれを与える基準に課題が残されていた。まず、河川洪水氾濫において、水理模型実験から密集市街地における粗度係数を直接推定した福岡ら (1994) の結果があり、さらに津波氾濫計算においては、経験的に用いられている相田 (1977) 係数がある。表-1 にその結果をまとめる。ここで、相田 (1977) の用



図-3 GIS 地形データ

表-1 Manning 粗度係数の比較と本研究による設定した係数

福岡ら (1994)		相田 (1977)		後藤&首藤(1983)		本 研 究	
区 分	推定粗度	区 分	等価係数	区 分	推定係数	区 分	設定粗度
80%≧	0.1			高密度	0.11		
50～80 %	0.096	密集地域	0.07			高密度居住区	0.080
20～50 %	0.084	やや密度の高い地域	0.05	中密度	0.05	中密度居住区	0.060
0 ～20 %	0.056			低密度	0.03	低密度居住区	0.040
道 路	0.043	その他陸地	0.02			森林域 (果樹園・防潮林含ず)	0.030
						田畑域 (荒地含)	0.020
		汀線付近 (防潮林含)	0.04			海域・河川域 (防潮林含ず)	0.025

いた摩擦損失係数は、等流仮定の下に等価粗度係数に置き換えてある。土地状態の分類の定義に若干の違いがあるが、全体的に相田 (1977) の値の方が小さいことが分かる。

一方、基礎的な水理実験の研究例として Goto & Shuto (1983) の結果がある。彼らは、大障害群の抵抗則を求め家屋の等価粗度を提案している。特に、流れを前面、障害物内、後方の3つの領域に分類しているが、流れが早い場合には、後方で損失が大きくなるようである。この場合、家屋どおし間が狭い場合 (高密度の状態、無次元家屋間隔 $b=0.3$) に、抵抗係数は3.4となり、前後の水深差を1mとすると n 値が0.11となる。ここで、家屋間隔を若干大きくすると (中密度の状態、 $b=0.5$)、 n 値は0.05になる。さらに、低密度の状態 ($b=0.7$)、 n 値は0.03になる。この結果も表-1に加える。

以上の3つの結果を下に、妥当な粗度係数を設定する。本研究でのGIS土地利用データは、森林、農地、工場、市街地などの土地利用に応じて6種類の分類を行っているので、それぞれに対応する粗度の設定を行った。その結果を表-1に示す。ここでは、有効数字を大きくとらず、代表的な値として与えている。

4. 津波計算例とその結果

4.1 対象領域と計算条件

対象領域は図-3の地域を含む図-4の領域、計算条件は、表-2に示す。仮想津波(押し波で始まる単純正弦

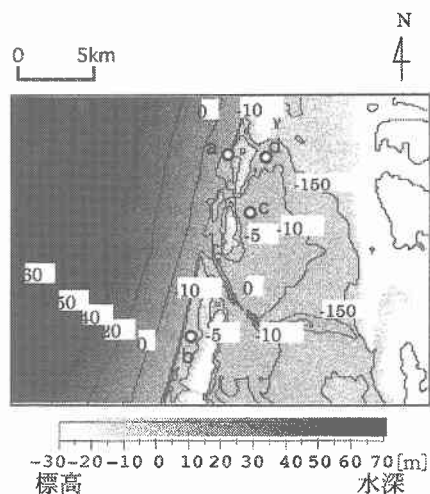


図-4 計算対象領域

表-2 計算条件

	原点 (左下)	実距離(km)	格子数	空間格子	時間格子	再現時間
縦	N 38° 48'	20.0	400	50 m	0.1 秒	1 hr
横	E 139° 40'	27.1	542	50 m		

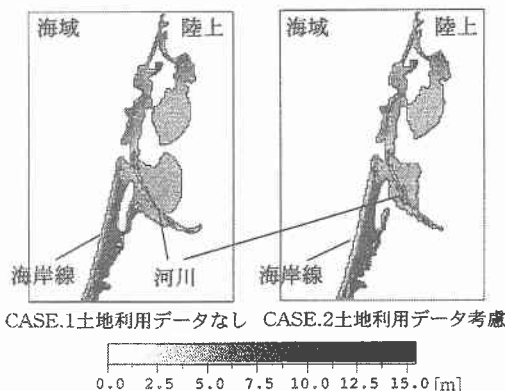


図-5 遡上領域

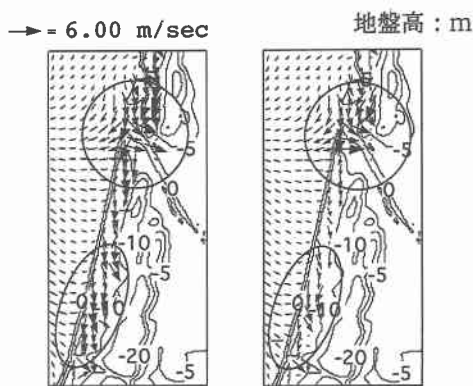


図-6 流速分布

波)を想定し、対象領域左側から強制入力させ、従来の土地利用データなし場合と土地利用データ考慮の場合の粗度分布の場合において遡上計算を行った。

4.2 遡上結果

図-5に土地利用を考慮した場合としない場合の遡上領域の比較を示す。本対象領域は比較的単純な地形であるので土地利用を考慮しない場合、同心円上に遡上している。これに対して、土地利用考慮の場合は、対象領域南部沿岸に分布する防潮林や河口付近の構造物などの影響で、遡上が妨げられていることがわかる。これらから、土地利用に応じた抵抗粗度分布を考慮することが非常に重要性であると言える。特に市街地の水理量は被害推定に大きく影響するので、その高い推定精度が必要である。

4.3 流速分布

家屋倒壊などの被害基準ともなる各地点の流速を出力した。例として、沿岸地域の流速結果を図-6に示す。円形で囲った部分は土地利用考慮あるなしの結果の違いを顕著に示している。いずれも、粗度に変化を与えた方が、

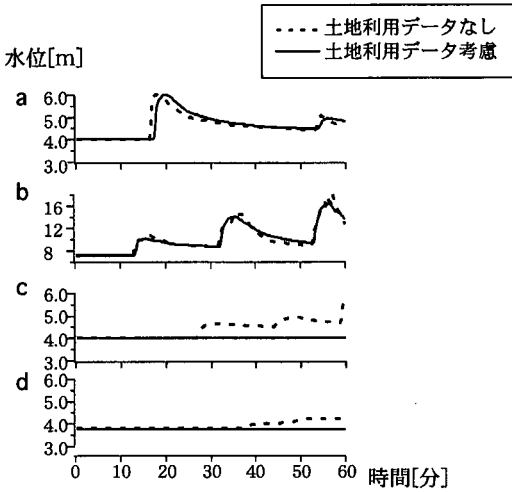


図-7 時間波形

陸上への遡上は小さくなることが分かる。

4.4 各出力地点の時系列

次に図-4 に示された出力点での時間波形を図-7 に示す。出力地点は、河口付近とその沖水深 40 m の地点などの 4 地点とした。海域では土地利用による効果を受けないので、地形データのみと土地利用考慮の時間波形に違いはない。しかし、a 地点に関しては第一波の到達時間に遅れが生じている。また、c、d 地点では土地利用を考慮することにより遡上しない地域があることを示している。

5. 津波被害の推定

5.1 被害推定の対象

これらの津波遡上の結果から実際に予想される津波被害の推定を土地利用を考慮した場合において行う。本研究では、沿岸域の変貌の 1 つの側面として住民の生活活動や土地利用を考慮した被害推定の方法を検討する。これらは GIS を用いて詳細に把握可能であるので、被害規模を量的に推定できる反面、推定に用いられる様々な基準を整理する必要がある。津波被害には様々な種類があるが、本研究では人的・家屋被害に限定して推定する(首藤, 1987)。人的被害については、到達時間と避難時間との関係が最も重要であるが、ここでは、避難が遅れたものとして最大の被害を推定する。本ケースにおいて河田(1997)による簡易推定法と遡上計算結果に基づく推定法

表-4 総人口と被害率

総人口 (数)	被害人口 (数)	被害率 (%)
151129	27325	18.1
総家屋数 (件)	倒壊家屋数 (件)	倒壊率 (%)
57344	469	0.8

の 2 種類を行う。家屋に関しては、3 種類の家屋に対する破壊基準をそれぞれ設定し、それを超えた場合に被害あり(全壊)とする。

5.2 人的被害

人的被害は遡上高さに関係するが、まず第一の方法として河田(1997)による簡易法による被害率を出した。ここでは領域内の平均遡上高さ 9.4 m を用いた。その結果、死亡率は最大(危険側)で 95%、最低(安全側)で 1.6% となり、推定値に幅がありすぎて被害率を特定することができない。津波の形態や避難行動により、このように実際の被害率は大きく変化することを示している。そこで、第二の方法として、ある程度以上の浸水があった場合に、生命の危険があるとして、その浸水域での人口を求め、それを最大の人的被害を考える。なお、人口に関する資料・データが現在入手できないので、GIS データ(占有面積率などの家屋の情報)を代用して、この地域での家屋数から人口を算出する。ここでは、表-3 に示すように、対象領域で 1 メッシュでの家屋占有率を元に人口、家屋を推定した。

本研究では、浸水域が 50 cm 以上のところで床上浸水の被害を受けるという規定に基づいて人的被害を求め

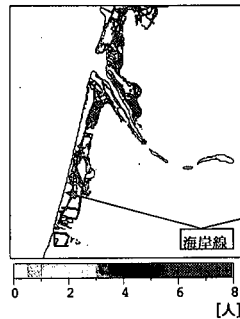


図-8a 被害人口分布

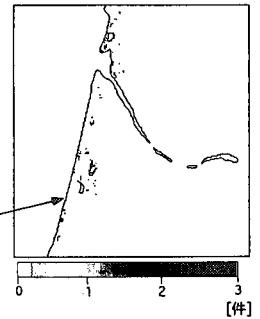


図-8b 被害家屋分布

表-3 メッシュ当たりの家屋数と人口

居住状態	家屋占有率	推定家屋数	推定人口
高密度	100 %	3 件	8 名
中密度	50~80 %	2 件	5 名
低密度	10~30 %	1 件	2 名

表-5 家屋破壊基準 (松富・首藤, 1994)

家屋の種類	本研究での対応分類	流速 (m/sec)	抗力 (tf/m)
鉄筋コンクリート造	高層建築物地区	10.2 以上	16.9 以上
コンクリート・ブロック造	密集居住地区	10.2	16.9
木造	閑散居住地区	4.2	1.06

た。結果を表-4に被害人口の分布を図-8aに示す。人的被害は18.1%となった。これは、簡易法よりかなり特定した形で被害率を求めることができることを示している。

5.3 家屋被害

過去の研究により(羽鳥, 1984), 浸水高さや流体力と破壊率との関係が求められているが, 現在の家屋の形態が当時と大きく異なっていること, また, 数値計算を利用すれば局所的な水理量が詳細に求められることから, 家屋被害に関しても, 人的被害と同様に1メッシュあたりの被害家屋数を概算することができる。なお, 家屋数については上述の表-3を参照されたい。

3種類の家屋に対する破壊基準に関しては, 松富・首藤(1994)及び松富ら(1996)の結果を下に, 流速の大きさによって表-5のように決めた。これらから求める家屋被害件数, 被害率は表-4, 空間分布は図-8bになる。これは, 浸水域の大きさに比べて, 流速(流体力)が比較的小さなケースであったことを示す。家屋被害率は0.8%となり, 人的被害率と比べて非常に小さくなっている。

6. 終わりに

本研究では, GISを利用した高精度の津波遡上計算方法を提案し, そこで用いられる粗度係数を過去の研究より設定した。さらに, 遡上計算結果をもとに, 人的・家屋被害を推定する方法を提案した。これらの結果は想定津波を対象としており, その精度を確かめることは現在出来ない。

本手法では, 現況における被害推定も可能であるが,

GISデータに戻ることにより, 防災施設や構造物を新たに設置が出来, それによる被害率の予測も出来る。これにより, 防災施設の効果などが定量的に評価が可能である。

謝辞: 本研究の一部は, 科学技術振興調整費「日本海東縁部の地震発生ポテンシャル評価に関する総合研究」より補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 相田 勇 (1977): 陸上に溢れる津波の数値実験, 一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.
- 岩崎敏夫・真野 明 (1979): オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算, 第26回海岸工学講演論文集, pp. 70-74.
- 河田恵昭・小池信昭 (1995): 機器管理と津波避難マニュアル, 京大防災研年報, 第38号, B-2, pp. 157-711.
- 河田恵昭 (1997): 大規模地震災害による人的被害の予測, 自然災害科学, 第16号, pp. 3-13.
- 羽鳥徳太郎(1984): 津波による家屋の破壊率, 地震研究所彙報, 第59号, pp. 433-439.
- 福岡捷二・川島幹雄・松永宜夫・前内永敏 (1994): 密集市街地の氾濫流に関する研究, 土木学会論文集, No. 491/II-27, pp. 51-60.
- 松富英夫・首藤伸夫 (1994): 津波の浸水深, 流速と家屋被害, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 246-250.
- 松富英夫ほか (1996): 1996年イリアンジャヤ地震津波とその被害, 海岸工学論文集, 第43号, pp. 311-315.
- 村上仁士・伊藤禎彦・山本尚明・佐藤広章 (1996): 紀伊半島・四国沿岸における津波の危険度に関する考察, 海岸工学論文集, 第43号, pp. 318-320.
- 首藤伸夫 (1987): 津波災害の変遷, 東北大学工学部津波防災実験所研究報告, 第4号, pp. 1-41.
- Goto, C. and N. Shuto (1983): Effects of Large Obstacles on Tsunami Inundations, Tsunamis—Their Science and Engineering, Terra Scientific Publishing Company, pp. 511-525.