

寛政 4 年 (1792) 有明海津波の再現性と災害特性に関する研究

梅 谷 英 孝*・富 樫 宏 由**

1. 序 論

近年, 九州沿岸域における統括的な沿岸災害に対するハザードマップの整備が進められており, 本研究もその一環として有明海津波災害のリスク評価を行なうものである。リスク評価に用いる想定津波の選択には, 対象海域で起こりうる最悪の事態に相当する規模の津波を選択し, 加えて, その再発の可能性も考慮する必要がある。そこで, 対象海域のリスク評価に用いる想定津波を寛政 4 年 (1792) 有明海津波とする。この津波は, 今から約 200 年前に起こった雲仙普賢岳の火山活動に伴う地震に誘発され, 普賢岳より東方に位置する眉山の東斜面 (天狗山) が大崩壊し, その土砂や岩屑が有明海に流入して発生した大津波である。そのため, 島原半島のみならず対岸の熊本・天草にも大きな被害をもたらした (島原大変肥後迷惑), 15000 人もの死者を出している。しかも, 比較的浅くて 2 次元的に広い遠浅の内湾で発生した大津波であるという意味では, 世界的に珍しい近代未経験の津波であるので, その実態は不明である。再発した場合を予測するためには, 先ずこの津波現象について詳細を再検討する必要があると思われる。本研究は, 数値解析によって有明海津波の発生・伝播・遡上の再現性を試行し, ハザードマップ作成に必要な災害特性を解明することを目的とする。この件については, 著者の一人富樫ら (1992) の水理模型実験による解析事例もあるが, 波源に崩壊滑落物体モデルによる造波運動を与えるために, 波源の地形とそれに対する陸上遡上現象の再現性が得られないこと, 縦横否模型であるために原型の急斜面地形が模型では断崖絶壁のようになって大津波痕跡高の再現性が局所的に良くない所があること等の水理模型実験特有の制約に起因する問題点が残されていた。

2. 津波解析法

2.1 数値解析理論

津波のように波長の長い波の運動は, 非線形長波理論 (浅水理論) によって表わすことが出来る。非線形長波理

論では, 圧力は静水圧分布となり, 水平流速は鉛直方向に一樣な分布となる。即ち, 海底から水面まで鉛直方向に積分することにより, 水表面及び水底の境界条件を基本式に取り込み, かつ未知数を減らすことが出来る。従って, 本数値解析では水深方向に積分した連続方程式と Navier-Stokes の運動方程式を基礎方程式とし, この基礎方程式を差分化して解く方法を用いた。空間差分には Staggard 格子を用い, 時間差分には Leap-frog 法を用いる。

2.2 計算条件

計算領域の沖側境界から流出する津波については, 進行波性長波の特性曲線法に基づく方法により, 流量を自由透過させるものとする。また, 陸上への遡上は, 岩崎・真野 (1979) の方法を用いる。これは, 波先端部における地形を階段状に考え, 陸側格子点の地盤高 h より海側格子点の水位 η が高い場合に, その差を実水深 D として, 流量計算を行う方法である。プログラム上は, $D > 10^{-5} \text{m}$ を計算最小水深として, この値以上の格子点につ

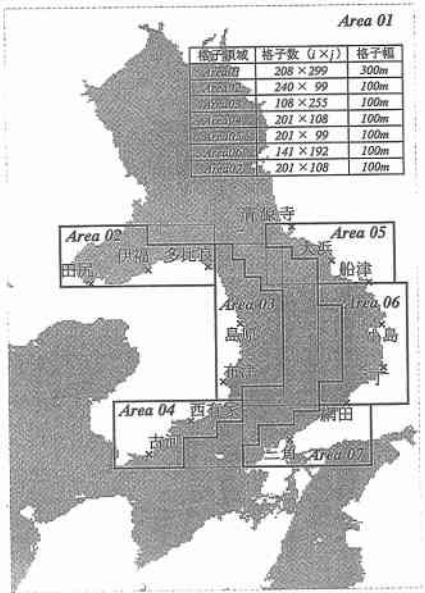


図-1 計算領域の格子分割

* 学生会員 修(工) 長崎大学研究生 工学部社会開発工学科
** フェロー 工 博 長崎大学教授 工学部社会開発工学科

いて計算することにする。

その他の計算条件として、全領域を一律な計算時間ステップ Δt で計算する。差分スキームの安定条件 (C.F.L 条件) を各領域で満たすように、 Δt を設定する。本数値解析では、 $\Delta t = 2 \text{ sec}$ とする。海底摩擦は、マンニングの粗度係数によって評価する。本数値解析では、海底を規則的な断面を持つ自然大流路と考えて、マンニングの粗度係数を $n = 0.025 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ とし、海底摩擦による運動量損失係数 f を、 $f = gn^2/D^{1/3}$ と置く。

2.3 計算領域

計算領域は、有明海津波が島原半島側と対岸熊本県側を主とする有明海沿岸の広範囲を襲っているの、有明海全域及び八代海と橘湾の一部とした。この領域を正方形格子に分割するが、陸上・海底地形の厳密な再現による計算精度の向上と、プログラムの軽量化を図るために、岩瀬ら (1996) の方法に倣って沿岸の細分化された格子間隔と沖合の粗い格子間隔の格子領域を結合して解析を行う。即ち、図-1 に示すように細分化した7領域を設定した。図中の地名はデータ抽出点の概要を示す。

3. 波源モデルの設定

有明海津波の発生原因としてこれまでに提唱されている説は、太田 (1970) による〈大崩壊によって生じた土砂の海中突入〉と、片山 (1974) による〈海中に達する山腹円弧すべりによる海水突き上げ〉がある。相田 (1975) は太田の説に近似している流量入力と、片山の説に近似した海底の鉛直変位を与える、2つの波源モデルで数値解析を行なっている。そこで本研究では、相田が提唱し

た波源モデルに従って数値解析を行う。

3.1 流量入力モデル

流量入力モデルでは、境界条件として汀線に沿って線流量 q を入力する。浜田ら (1991) による現地ボーリング調査から得られた眉山崩壊物の堆積地域の南北端を図-2 に示す $y1, y2$ とし、この汀線に沿った範囲を水塊の流入境界とする。その流量分布は I ~ III のように3種類の分布形状を設定する。また、線流量 q の時間変化は、流入継続時間 τ の半分の時点で最大流量 $Q_{\max}$ が発生するように増減させる。ここで、流量は単位長さ当たり m^3/s である。これらは以下の式で表わされる。

$$\text{I} : q = Q_{\max} \cdot \sin \left[\frac{\pi(y-y1)}{y2-y1} \right] \cdot \sin \left(\frac{\pi t}{\tau} \right) \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

$$\text{II} : q = Q_{\max} \cdot \sin^3 \left[\frac{\pi(y-y1)}{y2-y1} \right] \cdot \sin \left(\frac{\pi t}{\tau} \right) \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

$$\text{III} : q = Q_{\max} \cdot \sin \left(\frac{\pi t}{\tau} \right) \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

$$y1 < y < y2, 0 < t < \tau$$

3.2 水位入力モデル

一方、水位入力モデルでは、図-3 で指定した領域に、鉛直変位を与える。島原沖の海面下には、眉山崩壊時に発生した流れ山 (海底丘) がたくさん隠れており、円弧滑りによる眉山崩壊を仮定した場合、その先端海底部の突き上げ作用の中心は、この流れ山の周辺である可能性

表-1 解析ケース及びパラメータ

流量入力モデル				
解析ケース	流量 q の分布	$Q_{\max}[\text{m}^3/\text{s}]$	$\tau[\text{sce}]$	水塊流入量[億 m^3]
I-01	I	300	240	1.7
I-02	I	300	480	3.4
I-03	I	300	720	5.2
II-01	II	450	240	1.7
III-01	III	190	240	1.7

水位入力モデル						
解析ケース	U_p 上昇位置	$xd[\text{km}]$	$L_1[\text{km}]$	$L_2[\text{km}]$	$yd[\text{km}]$	$U_p[\text{m}]$
A-01	A	4	0	4	8	15
B-01	B	6	2	4	8	15
C-01	C	8	4	4	8	15
D-01	D	6	2	4	8	15
E-01	E	8	4	4	8	15
F-01	F	6	2	4	8	15
G-01	G	8	4	4	8	15
C-02	C	11	4	7	8	15
C-03	C	14	4	10	8	15
C-04	C	8	4	4	14	15
C-05	C	8	4	4	20	15
C-06	C	11	4	7	14	15
C-07	C	14	4	10	20	15
C-08	C	8	4	4	8	20
C-09	C	8	4	4	8	25
C-16	C	14	4	10	20	20
C-17	C	14	4	10	20	25

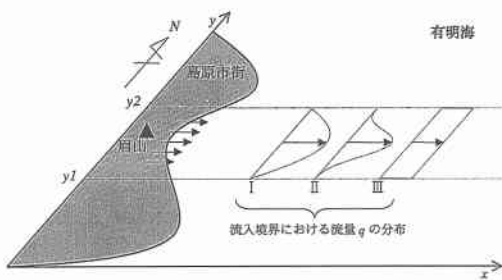


図-2 流量入力モデル

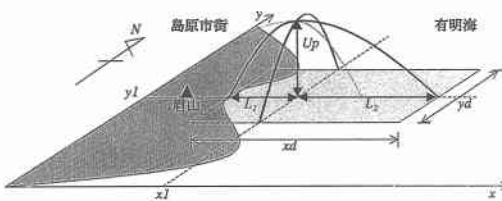


図-3 水位入力モデル

が高い。そこで、島原東方沖の海上7点に、津波の大きさと指向性を考慮しながら図-3に示す U_p の位置を想定し、各点において幾つかの水位上昇の立面形状を入力する。ここで、 U_p は指定領域 (xd , yd) の鉛直変位の最大値である。鉛直変位の立面分布形状 η_0 は以下の式によって与える。

$$\left. \begin{aligned} \eta_0(x, y) &= U_p \cdot A \cdot \sin \left[\pi \left(y - y_1 + \frac{yd}{2} \right) / yd \right] \\ &\cdot \left(y_1 - \frac{yd}{2} < y < y_1 + \frac{yd}{2} \right) \\ x_1 - L_1 < x < x_1 : A &= \sin [\pi (x - x_1 + L_1) / 2L_1] \\ x_1 < x < x_1 + L_2 : A &= \sin [\pi (x - x_1 + L_2) / 2L_2] \\ &\dots\dots\dots (4) \end{aligned} \right\}$$

3.3 解析ケース

解析ケースは、2つの波源モデルのパラメータを設定して表-1に示す32ケースを行なう。解析時間は津波の第1波が有明海全域に伝播するまでの時間として5400 secとする。更に、津波発生時の潮汐条件は、古記録から大潮の満潮時刻の1時間前の潮位として、対象領域の平均海面 (M.S.L) 上に1.93 mを与える。

4. 解析結果とその考察

4.1 陸上遡上高分布

本研究の目的の1つは寛政4年 (1792) 有明海津波の再現性を調べることであるが、そのための唯一の手法は古記録に基く陸上痕跡高の調査結果による検証である。

図-4~図-7は、各解析ケースにおける、陸上遡上高分布である。これは陸上遡上高を、Area 02~Area 04とArea 05~Area 07という100 mメッシュの海岸に沿って約500 m間隔で抽出したものを折れ線で表わしている (計286点)。図中2種類の点は、相田 (1975)、都司・日野 (1993) 及び都司・村上 (1997) による津波痕跡高であり、棒線は相田の数値解析による陸上遡上高である。これらと解析結果を比較・検討することによって、本数値解析法の信頼性・妥当性の検証を行なう。

図-4は、流量入力の場合の継続時間を240 sec、図-2に示す流量分布をIとした相田の解析ケースと同じ場合の解析結果と陸上痕跡高の比較を表わしている。磯鍋、大浜、二丁で、痕跡高に近い値を算出しているが、全体的に陸上遡上高が小さく、島原~安徳を除いて5 m前後となっている。また、流量分布をII・IIIと変化させたが、殆ど違いがなく、流量分布の形状は、陸上遡上高の増減にあまり関与しないと思われる。次に、流量分布I・II・IIIにおいて、流量入力の場合の継続時間を240 sec, 480 sec, 720 secと変化させてみた。継続時間の増加は水塊流入量の増加になるから、物理的には海中に突入した崩壊物質の増加を意味するので、陸上遡上高の増大が予想されたが、

陸上遡上高の分布形状は殆ど変化しなかった。従って、流量入力モデルでは再現性の良い結果は得られなかった。

図-5は、水位入力モデルによる場合で、 $U_p=15$ mと固定し、 $xd \times yd=8$ km $\times$ 8 km, 11 km $\times$ 14 km, 14 km $\times$ 20 kmと変化させた解析結果と陸上痕跡高の比較を表わしている。解析ケース:C-01は、全体的には平均して10 m以下の小さい方の痕跡高に近いようである。水位上昇の範囲を東西・南北方向に広げるに従って、全域で陸上遡上高が大きく増大している。特に、熊本県側で大きく増大していることが特徴であり、解析ケース:C-07は全体的に陸上遡上高分布の特徴を良く表しているという意味で再現性が良いと言えよう。

次に、 $xd \times yd=8$ km $\times$ 8 km, 14 km $\times$ 20 kmとしたそれぞれの水位上昇の範囲で、 $U_p=15$ m, 20 m, 25 mと変化させた解析結果と陸上痕跡高の比較を図-6, 図-7に示す。この2つの図を見ると、 U_p が大きくなるに連れて全域で陸上遡上高が相似形に増大していることが分かる。図-6の解析ケース:C-08では、神代~多比良、三ノ沢、大江~古河、清源寺~大浜、船津、塩屋~小島、二丁~長浜、三角ノ瀬戸~大手原と多くの箇所で痕跡高

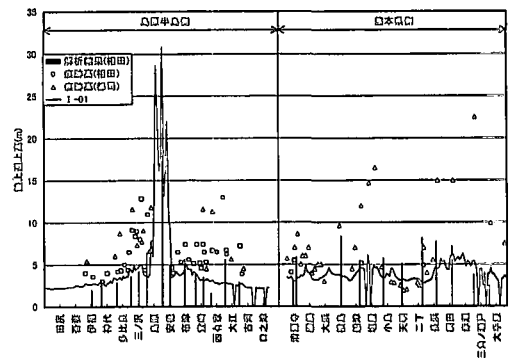


図-4 陸上遡上高分布 (1)

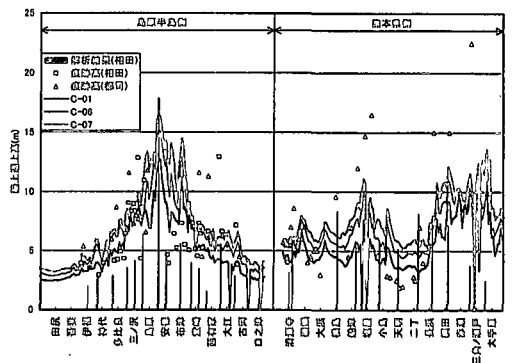


図-5 陸上遡上高分布 (2)

とほぼ一致する陸上遡上高を算出して比較再現性が良い。また、図-7の解析ケース:C-17を見ると、陸上遡上高が塩屋付近で約16m、長浜~大手原で15m~20mとなっている。一方、都司等の痕跡高では、塩屋付近で16.5m、三角ノ瀬戸付近で22.5mとなり、有明海沿岸に残る最も大きい津波痕跡高である。陸上遡上高と痕跡高の算出箇所・値に少々差はあるが、10m以上の大津波痕跡高がほぼ再現されており、数値解析的には初めて見出された注目すべき解析結果である。

水位入力モデルでは、上に述べたように解析ケース:C-07、C-08において、ほぼ寛政4年(1792)有明海津波の再現を想定できる結果が得られた。従って、この2つの解析ケースと、基本となる解析ケース:C-01、及び再現性良く陸上遡上高分布の特徴を良く表わしている解析ケース:C-17について、最短到達時間・最大流速・最大浸水深を求めた。

4.2 最短到達時間分布

図-8は、上の4ケースにおける最短到達時間分布を比較したものである。一般に、津波災害ハザードマップに必要な最短到達時間は、被災地域に到達した津波の第1波の水位が最大となる時間(河田・小池, 1997)と定

義されており、本研究もこの定義に基くことにする。

4ケースとも、最短到達時間の分布形状がほぼ相似形になっていることが認められるが、熊本県側における最短到達時間分布を見ると、若干ではあるが、解析ケースC-01よりC-17の最短到達時間が早くなっている。この2つの解析ケースの大きな違いは、与えた水位上昇の最大値の差であり、波源域の波速の差である。即ち、与えた水位上昇の最大値が大きい解析ケース:C-17における波源域の波速が、解析ケース:C-01より大きいため、波源域より離れた熊本県側の最短到達時間が早くなっていると考えられる。

また、相田(1975)は古記録を基に、島原付近では短時間(数分以内)で津波が到達したと推測しているが、図によれば、島原~安徳付近では5分以内で津波が到達していることが分かり、推測と良く合致している。

4.3 最大流速分布

図-9は、上の4ケースにおける最大流速分布を比較したものである。この図を見ると、熊本県側の塩屋付近と宇土半島の赤瀬~大手原を除く地域で、最大流速の分布形状が陸上遡上高の分布形状に類似していることが分かる。また、突出して目立った最大流速が約10箇所で見られるが、大凡の最大流速分布を把握することができる。

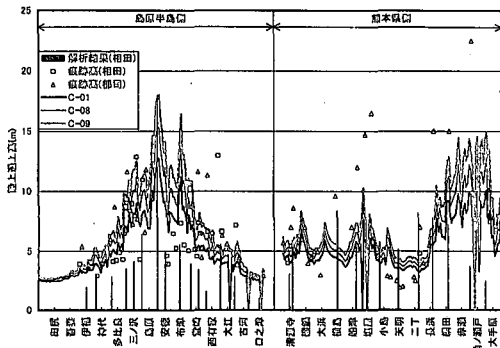


図-6 陸上遡上高分布(3)

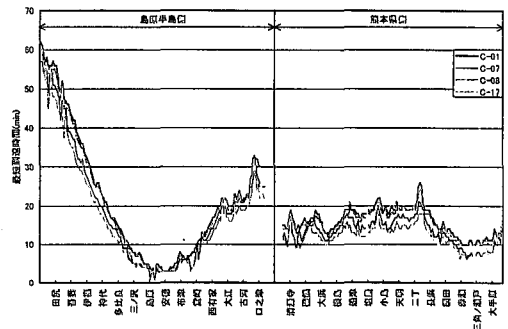


図-8 最短到達時間分布

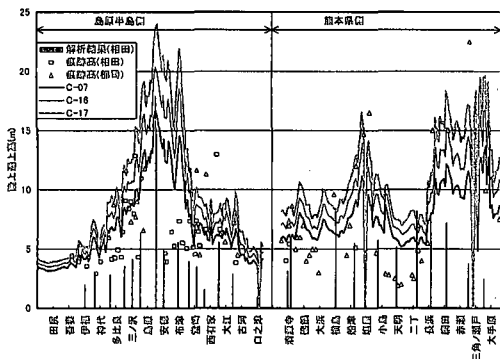


図-7 陸上遡上高分布(4)

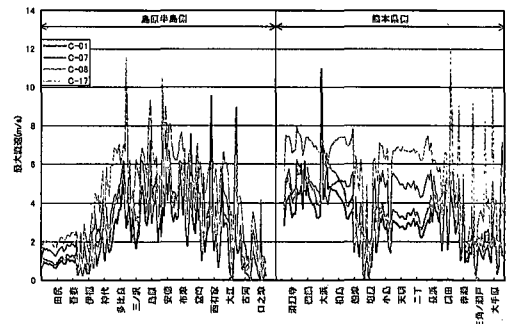
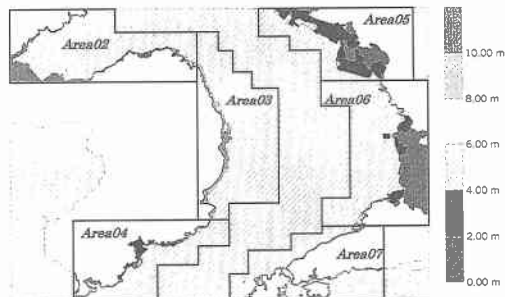


図-9 最大流速分布



図一〇 最大浸水深分布 (解析ケース：C-08)

4.4 最大浸水深分布

図一〇は、紙上余白の都合で1例として解析ケース：C-08における、Area 02～Area 07の最大浸水深分布を表わしている。殆どの海岸で浸水していることが分かる。また、諫早市、北有馬町付近、玉名市、熊本市では極端に浸水範囲が広く、宇土半島では狭くなっている。これらの場所の陸地高を調べると、干拓地のように地盤高が低い場所では浸水範囲が広く、高い場所では狭くなっていることが分かるので、地理的条件によって氾濫域に大小が生じたものと考えられる。

5. 結 論

得られた成果を纏めると、以下のようになる。

(1) 流量入力モデルによる数値解析では、全ての解析ケースにおいて類似した陸上遡上高分布となり、再現性の良い結果は得られなかった。

(2) 水位入力モデルによる数値解析では、解析ケース：C-07、C-08において、津波痕跡高と一致する陸上遡上高が多くの箇所で見出されており、全体的にはほぼ寛政4年(1792)有明海津波の再現を想定させる結果が得られた。特に、解析ケース：C-17によって熊本県沿岸における都司等による大津波痕跡高もほぼ再現することが出来た。

(3) 陸上遡上高分布、最短到達時間分布、最大流速分布、最大浸水深分布を求め、ハザードマップ形成に必要な災害特性を解明し、リスク評価を行う情報を得ることが出来た。

謝辞：本研究は、文部省科学研究費補助金、平成10～12年度基盤研究(B)(1)「九州沿岸域における環境ポテンシャル評価とハザードマップ形成に関する研究」(研究代表者 入江 功九州大学教授)による研究の一部であることを付記して謝意を表する。

また、東海大学工学部の後藤智明教授には、津波・高潮解析の具体的手法について種々御指導頂きました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 相田 勇 (1975): 1792年島原眉山崩壊に伴った津波の数値実験, 地震, 第2輯, 第28巻, pp. 449-460.
- 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回海岸工学講演会論文集, pp. 70-74.
- 岩瀬浩之・柴木秀之・見上敏文・後藤智明 (1996): 汎用津波数値解析システムの開発, 東海大学紀要工学部, Vol. 36, No. 2, pp. 139-145.
- 太田一也 (1987): 眉山大崩壊のメカニズムと津波, 月刊 地球/Vol. 9, No. 4, pp. 214-220.
- 河田恵昭・小池信昭 (1997): 津波災害のハザードマップについて, 京都大学防災研究所年報, 第40号, B-2, pp. 75-92.
- 都司嘉宣・日野賢之 (1993): 寛政4年(1792)島原半島眉山の崩壊に伴う有明海津波の熊本県側における被害, および沿岸遡上高, 東京大学地震研究所彙報, 第68号, pp. 91-176.
- 都司嘉宣・村上嘉謙 (1997): 寛政4年(1792)眉山崩壊による有明海津波の島原半島側の津波浸水高, 歴史地震, 第13号, pp. 135-173.
- 富樫宏由・平山康志・谷口祐治・松本慎市 (1992): 1792年有明海津波の再現性水理実験, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 221-225.
- 浜田政則・三沢良文・アイダゲン・オメール (1991): 島原市の地形・土質条件に関する考察—眉山崩壊のメカニズムと反復性—, 東海大学海洋学部, 40 p.