

山体崩壊による津波シミュレーション†
—1792 年眉山—

笹原 昇*

**Numerical Simulation of the Tsunami caused by the sector Collapse of Mt. Mayuyama,
Shimabara Peninsula, Kyushu in 1792**

Noboru SASAHARA*

Abstract

In 1792, a sector collapse occurred on the eastern slope of Mt. Mayuyama, a small eastern peak of the Unzen Volcano in the Shimabara Peninsula in the Kyushu Island. Debris avalanche rushed into the Shimabara Bay, a large-scale tsunami was generated in the region. In this study, I estimated the heights of the tsunami in the region, employing a numerical simulation of tsunami generation caused by the sector collapse with considering vertical displacement of the seafloor. The result of the calculation shows good agreement with the researched tsunami height on the east coast of the Shimabara Peninsula.

1. はじめに

海洋情報部においては、海上における安全の確保のため、海域火山に関する調査・観測を行い、長年にわたりデータを蓄積してきた。

これらデータは、2003 年末、海域火山データベースとして Web ページ (<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/>) から公開している。

当該データを活用し、海域火山活動による災害の規模推定の試みも行った。

寛政 4 年 4 月 1 日 (1792 年 5 月 21 日)、長崎県島原半島の雲仙岳東方にある眉山が火山活動に伴う地震により崩壊した。この山体崩壊物が前面海域に雪崩れ込み、対岸の熊本側をも巻き込む大規模な津波が発生した。

本稿では、この山体崩壊と津波に関するシミュレーションについて報告する。

従来は、相田 (1975) の数値実験のように、津波に関するシミュレーション自体の報告が多く、山体崩壊に関するシミュレーションと組み合わせたものは少ない。

2. 地形データ

山体崩壊に起因する津波シミュレーションを実施するには、山体崩壊シミュレーションを行う必要がある。これらシミュレーションには、地形データが必須である。

(1) 海域データ

J-BIRD (JODC 統合水深データセット: JODC Bathymetry Integrated Random Dataset 海上保安庁海洋情報部, 2002) 海図番号 169 「島原湾」、6348¹ 「橘湾」、6348² 「島原湾」の等深線・

† Received January 16, 2004; Accepted March 1, 2004.

* 技術・国際課海洋研究室 Ocean Research Laboratory, Technology Planning and International Affairs Division

水深点デジタルデータを用いた。

(2)陸域データ

国土地理院数値地図50mメッシュ(標高)(1998年11月1日発行)を用いた。

(3)水深・標高の基準

海域においては、最低低潮面 (Table.1 参照, 測量海域により平均水面との差 Z0 が違う), 陸域においては東京湾平均海面 (TP) である。

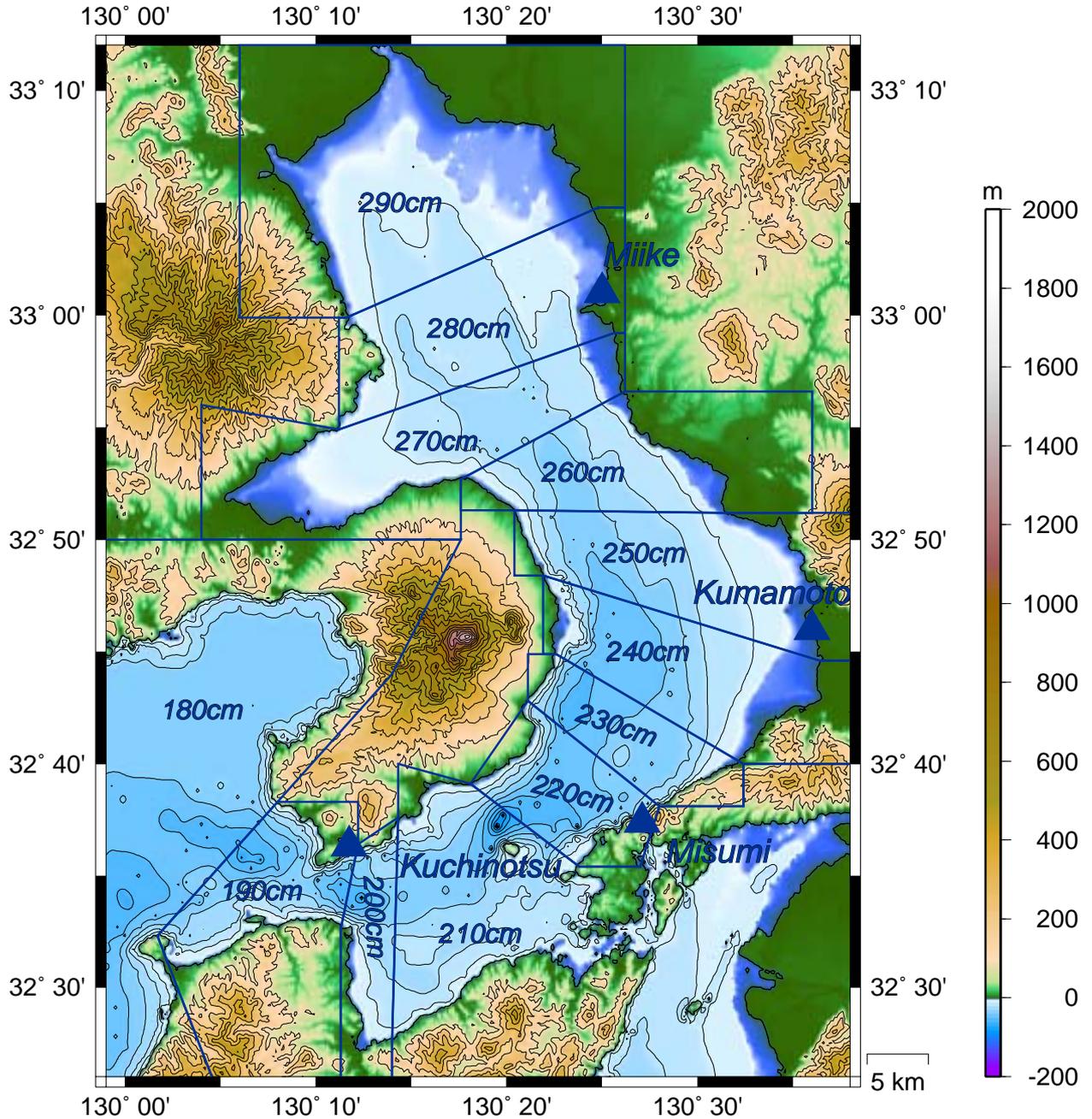
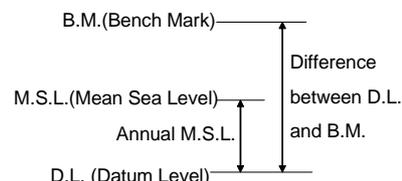


Fig.1 Topographical map of Shimabara Bay, Numerals in the sea show Z0 value (Hydrographic and Oceanographic Department, 2003a) in each sea region. Triangles show the locations of tidal station.

**Numerical Simulation of the Tsunami caused by the sector Collapse of Mt.Mayuyama,
Shimabara Peninsula, Kyushu in 1792**

Table.1 Normal Orthometric Height of M.S.L.

Tidal station Kuchinotsu	1993.8	1998.11	2000.1	2001.4	2002.4
Observation Date	1993.8	1998.11	2000.1	2001.4	2002.4
Normal Orthometric Height of Bench Mark	3.4305	3.4279	3.4255	3.4251	3.6501
Difference between Datum Level and B.M.	-7.0650	-7.0650	-7.0650	-7.0650	-7.0650
Normal Orthometric Height of Datum Level	-3.6345	-3.6371	-3.6395	-3.6399	-3.4149
Annual Mean Sea level	3.5340	3.5910	3.5810	3.5870	3.5840
Normal Orthometric Height of M.S.L	-0.1005	-0.0461	-0.0585	-0.0529	0.1691



これらを整合させるため、平均水面と TP との比較を試みた。

海図番号 6348¹「橘湾」、6348²「島原湾」のための測量が行われたのは、1992、1993 年であり、口之津験潮所（気象庁所管）の平均水面を用いて、潮高改正が行われている。また、陸域データは 1997 年以前の測量によると考えられる。Table.1（海岸昇降検知センター、2003a, 2003b）から同験潮所の 1993 年の平均水面の標高（TP からの高さ）は-10cm ほどであり、平均水面と TP はほぼ等しいものとして、陸域と海域を組み合わせ、地形データを作成した。

Fig.1 に、Z0 区分（海上保安庁海洋情報部、2003a）と、Z0 を補正し平均海面からの水深とした島原湾の地形を示す。

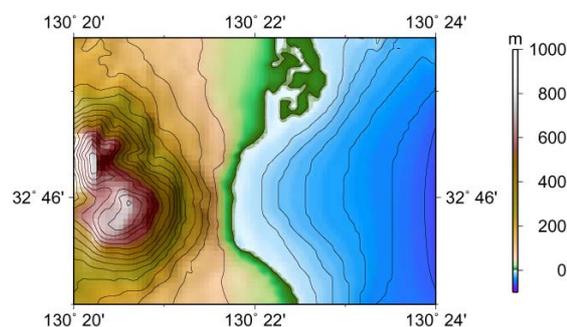


Fig.2 Assumed topography at Mayuyama and its adjacent sea before the collapse in 1792.

緯度を XY 座標に変換し、100m メッシュとした。この変換には、GMT (Wessel and Smith, 1998) の mapproject コマンドを使用した。

3. 山体復元

井上（1999）による 1792 年眉山山体崩壊前の復元図を参考にして、陸部は、現地形で馬蹄状にえぐられた眉山東側斜面を円錐形状へと地形データを復元した。海部は、崩壊堆積物が存在する海底地形と存在しない部分を比較し、滑らかな等深線となるよう復元した。これらの復元には、GMT (Wessel and Smith, 1998) の surface コマンドを使用した。

シミュレーション用データとするため、ランベルト正角円錐図法により、水深・標高データの経

4. 山体崩壊シミュレーション

山体崩壊シミュレーションには、建設省土木研究所地すべり研究室（1992）「準三次元地すべり運動解析プログラム LSFLOW」及び「土砂移動シミュレーション」（社団法人砂防学会地震砂防研究会、2000）を用いた。

ここで用いられる連続式は

$$\frac{\partial h}{\partial t} = - \left(\frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} \right)$$

$$M = \int_0^h u dz \quad M : X軸方向流速(m^2/s)$$

$$N = \int_0^h v dz \quad N : Y軸方向流速(m^2/s)$$

u : X軸方向速度(m/s)
 v : Y軸方向速度(m/s)
 h : 崩土の厚さ(m)

であり、運動方程式は、非圧縮粘性流体として、一般的な津波シミュレーションと同じナビエ・ストークス方程式を用い、鉛直方向に崩土は運動しないと仮定、準三次元的に計算する。

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

X 軸方向の式

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y}$$

$$= -g_z h \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \tan \Phi_m \right) + g_x h + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 M$$

$$- g_z \left(\frac{c}{\rho g_z} + h \tan \Phi_s \right) \frac{u}{(u^2 + v^2)^{1/2}}$$

Y 軸方向の式

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y}$$

$$= -g_z h \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \tan \Phi_m \right) + g_y h + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 N$$

$$- g_z \left(\frac{c}{\rho g_z} + h \tan \Phi_s \right) \frac{v}{(u^2 + v^2)^{1/2}}$$

- ρ : 単位体積質量(t/m³)
- g_z : 重力加速度(m/s²)
- g_x : X軸方向加速度(m/s²)
- g_y : Y軸方向加速度(m/s²)
- c : すべり面の粘着力(tf/m²)
- Φ_s : すべり面の摩擦角(deg)
- μ : 崩土の粘性係数(tfs/m²)
- Φ_m : 崩土の内部抵抗圧(deg)

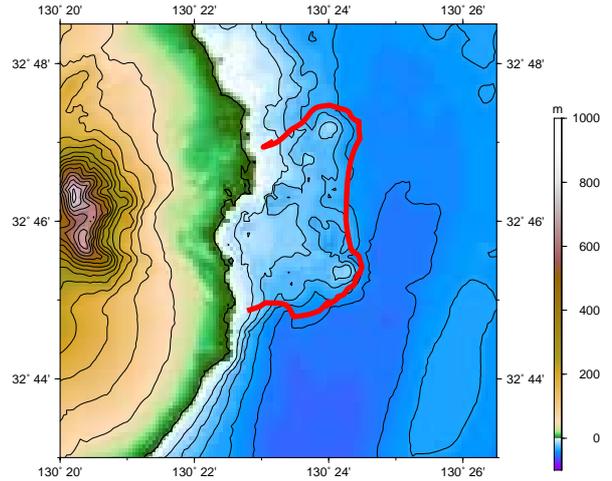


Fig.3 Contour map of the current topography.

A red line shows the region of extended debris.

初期加速度は、1989-1991年雲仙岳噴火時の震源分布をもとに、震央を眉山西方10km付近(馬越ほか, 1994), マグニチュードは6.4(太田, 1969)として、建設省土木研究所地すべり研究室(1992)から

水平最大加速度 264.1 gal

鉛直最大加速度 74.7 gal

と推定した。

また、地震波形特性も、同じく建設省土木研究所地すべり研究室(1992)より

主要動継続時間 1.47 秒

平均周期 0.17 秒

と推定した。

地盤物性値については、シミュレーションの簡略化のため、 $\rho = 2.0(t/m^3)$, $c = 0.0(tf/m^2)$, $\mu = 0.0(tfs/m^2)$, 流入係数を0.5とし、すべり面の摩擦角と崩土の内部抵抗角のみを変化させた。格子は、スタガード格子の100m間隔と、すべり面の抵抗則をクーロン則とした。

崩土の総量は、約4億m³である。

Numerical Simulation of the Tsunami caused by the sector Collapse of Mt. Mayuyama, Shimabara Peninsula, Kyushu in 1792

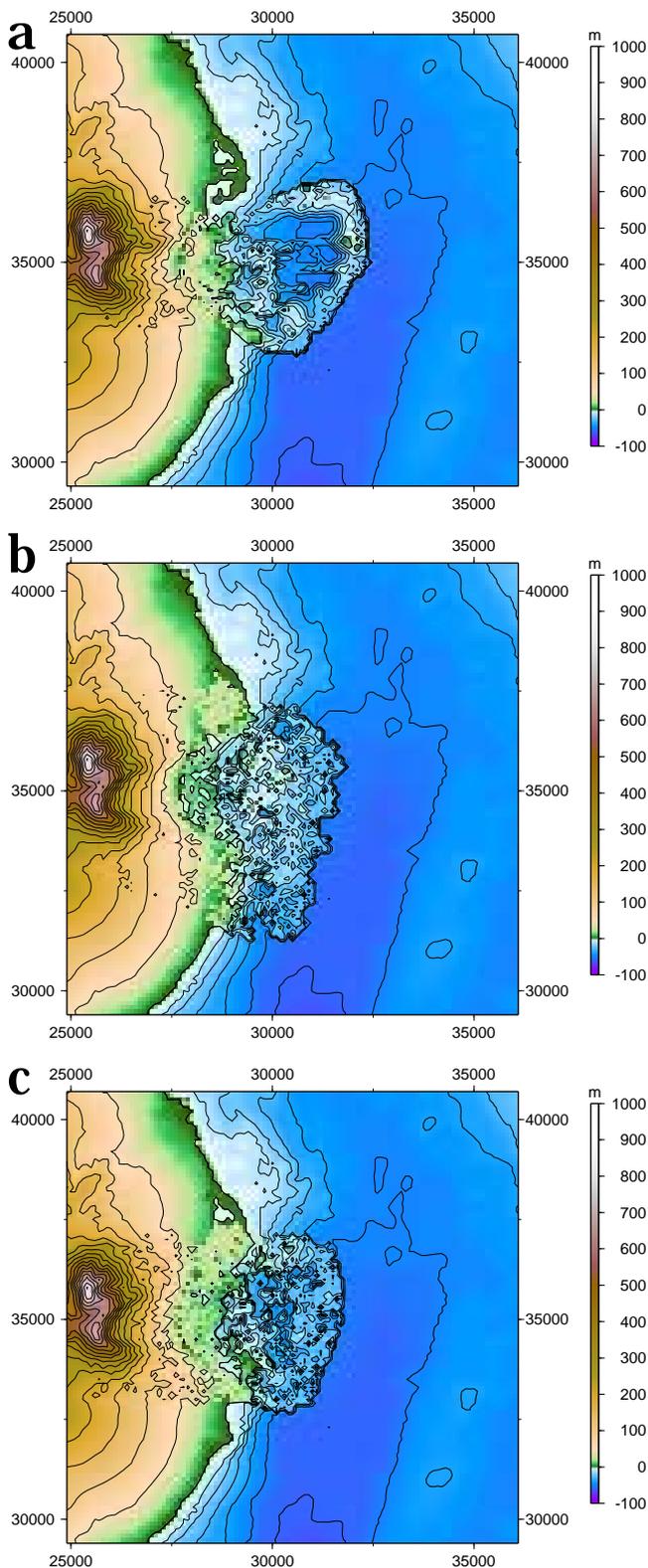


Fig.4 Distribution of debris calculated by the simulation of the present study. Case a; friction angle of sliding slope and internal friction angle of collapse rock are assumed to be 0.2° and 23.0° at the land, 0.8° and 8.0° at the sea. Case b; 0.2° and 9.5°. Convective term is neglected in calculation. Case c; 0.2° and 23.0° at the land, 0.7° and 9.0° at the sea. Convective term is neglected in calculation.

Case a

すべり面の摩擦角 **0.2(deg)**, 崩土の内部抵抗角 **23.0(deg)**と仮定し, 海中に突入してからの, 地盤物性値変化の影響を反映させるため, 水深値を持つ格子の地すべり面摩擦角 **0.8(deg)**, 崩土の内部抵抗角 **8.0(deg)**として, シミュレーションを行った. 崩土の海中突入量は, **2.3 億 m³**である.

Fig.4a にシミュレーション結果を示す. 現在の海底地形図で確認される崩壊堆積物の分布範囲 (**Fig.3**) とほぼ一致している.

Case b

すべり面の摩擦角 **0.2(deg)**, 崩土の内部抵抗角 **9.5(deg)**と仮定し, 計算した. また, 運動方程式にある対流項を無視した. 崩土の海中突入量は, **2.9 億 m³**である.

Fig.4b に結果を示す. 崩壊堆積物は, 南側の分布範囲が広がる.

Case c

陸部でのすべり面の摩擦角 **0.2(deg)**, 崩土の内部抵抗角 **23.0(deg)**, 海部での摩擦角 **0.7(deg)**, 内部抵抗角 **9.0(deg)**と仮定し, 対流項を無視して計算した. 崩土の海中突入量は, **2 億 m³**である.

Fig.4c に結果を示す. この崩壊堆積物の分布範囲は現在の海底地形図で確認される崩壊堆積物の分布範囲と最も整合している.

5. 津波シミュレーション

津波シミュレーションには, 財団法人日本水路協会 (1997, 1998, 1999) によるプログラム (非圧縮性流体, 非回転, 長波近似, 非粘性, ナヴィエ・ストークス方程式) を用いた.

本プログラムは通常, 海底の断層活動による地殻変動量を初期値とするが, ここでは, 山体崩壊シミュレーションにより計算された海中へ

の突入崩土の厚さを初期値とした。また、各計算間隔ごとに出力された崩土の3次元座標値を読み込むことにより、時間変化にも対応した。このため、プログラム中、連続式の計算部分を改修し、全高の鉛直変化に崩土の厚さを加えられるようにした。格子は、スタガード格子で100m間隔である。

(1) 潮汐

海上保安庁海洋情報部(2003b)により、1792年5月21日の三池、熊本、三角、口之津の潮汐を計算した。Fig.5に結果を示す。この結果により、島原湾の各海域の潮汐状態が確認できたが、ほとんど差がないため、島原の対岸である熊本の潮汐を用いることとした。

1792年5月21日(新暦)の20h00m~20h30m頃(都司・日野,1993)、山体崩壊とほぼ同時に眉山前面海域に津波が発生、対岸の熊本側に15分程度で到達したと考えられる。熊本側での津波到達時刻は、20h15m~20h45mなので、本シミュレーションでは、20h30mの潮高を採用した。

Fig.5の結果から、熊本における潮高は、20h30mの潮高は、392cmとなる。これから、Z0 245cmを差し引くと平均水面からの潮高は、147cmとなる。

全体の標高・水深データからこの潮高分を差し引いたものをシミュレーション用データとした。

(2) 解析

山体崩壊シミュレーションから求められた3ケースにおける崩土の厚さを初期値として、Fig.7に示す15箇所での津波高を求めた。

(3) 結果

津波発生から15分後の流束の速度分布をFig.6に示す。

Fig.8に15箇所の地点における計算された津波高を示す。比較のため、梅谷・富樫(2001)によって解析された津波高と、都司・日野(1993)、都司・村上(1997)によって現地調査された津波高も併せて表示してある。

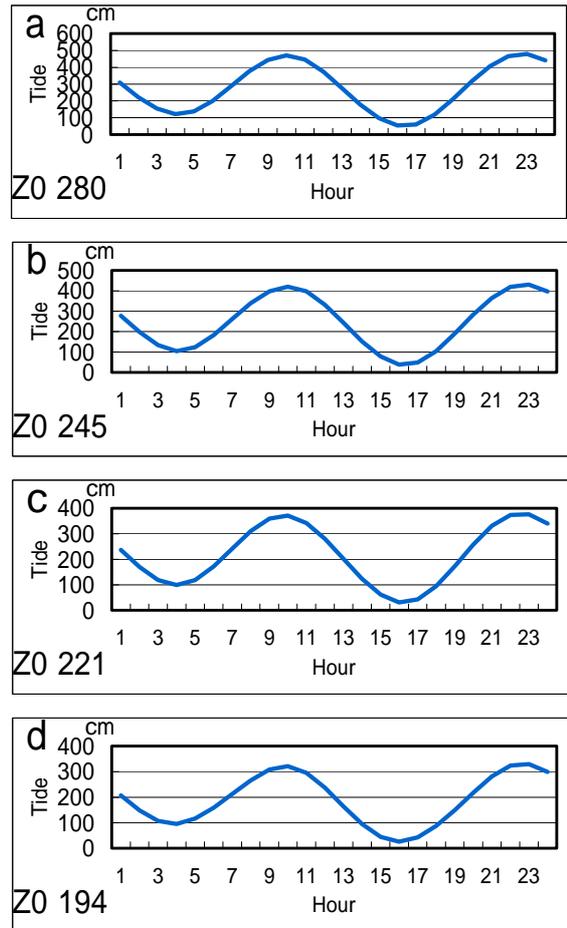


Fig.5 Astronomical tide on May 21,1792. Tsunami occurred at 20h30m a; Miike, b; Kumamoto, c; Misumi, d; Kuchinotsu

6. 考察

Fig.8から、解析結果を現地調査された津波高さと比較すると、島原側で津波の到来方向と正対するような布津・吉川の計算津波高が高く、熊本側(船津・近津・三角)が低い傾向にある。これは、本解析の津波の発生源・初期値では眉山前面海域から、南西方向により強く津波を発生させているためと考えられる。

熊本側でより高い津波高を得るには、海中の山体崩壊物の分布範囲をより熊本側に広げる必要があると思われる。

Numerical Simulation of the Tsunami caused by the sector Collapse of Mt.Mayuyama, Shimabara Peninsula, Kyushu in 1792

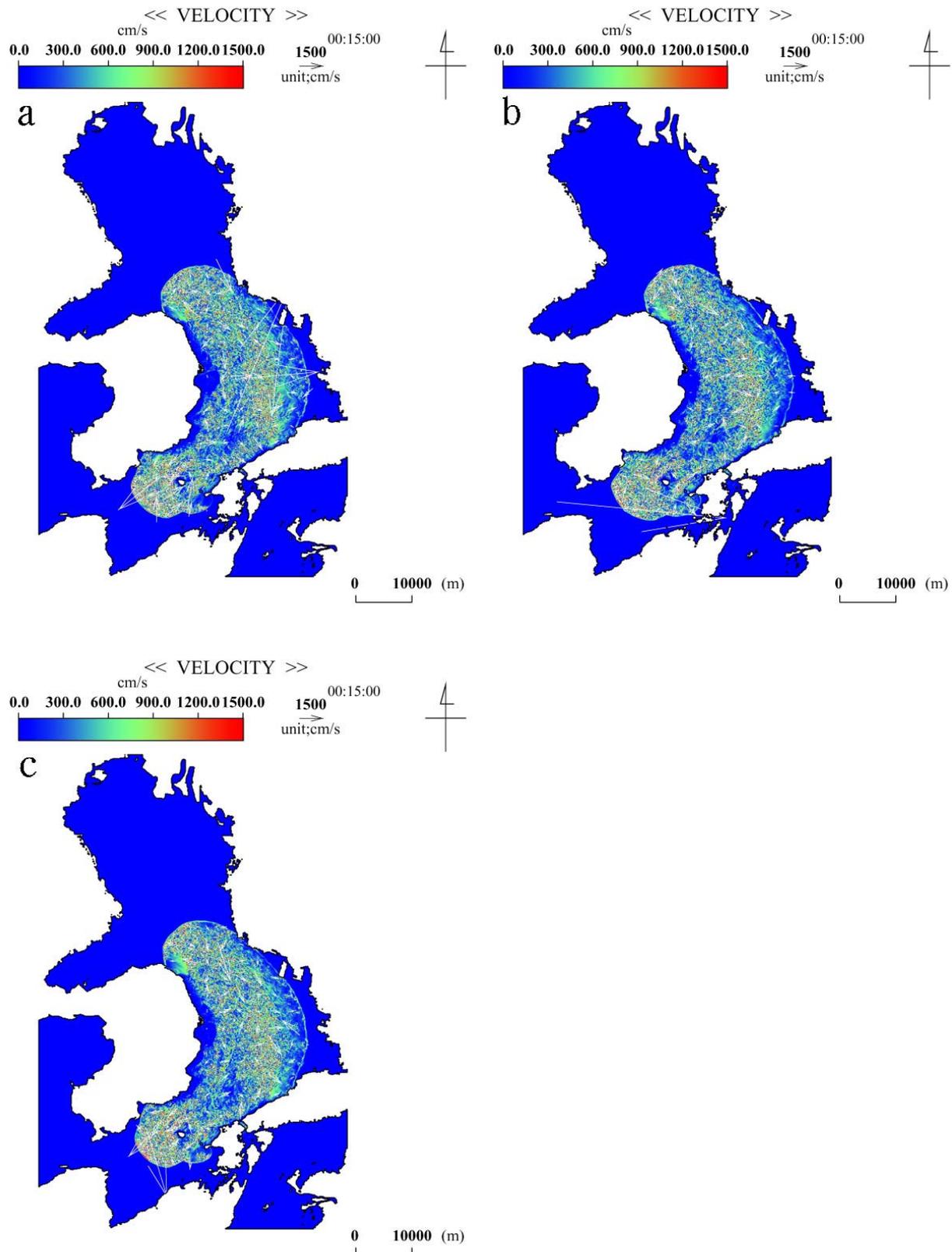


Fig.6 Vector and color map of tsunami current, 15min after the outbreaking of the collapse. Figs a, b, and c show the results for the Case a, Case b, and Case c, respectively.

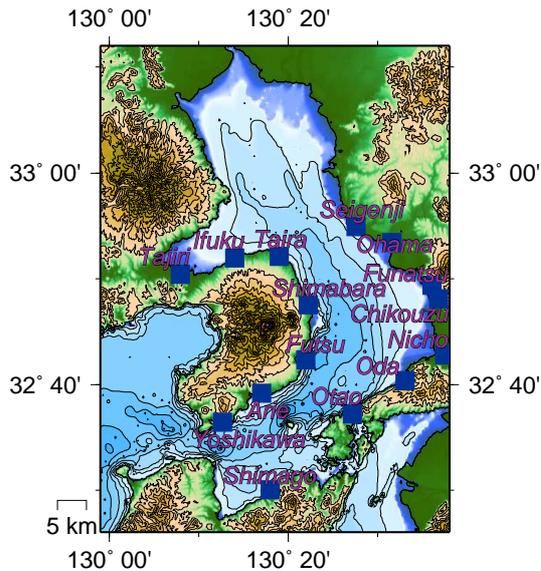


Fig.7 Locations of the points where sea level changes are calculated.

7. おわりに

調査された津波の痕跡高に整合するようなパラメータを検討するため、さらにシミュレーションを実施する必要がある。

シミュレーションの精度を高めるためには、眉山前面海域の精密海底地形や地質構造をより詳細に知る必要がある。

最後に、本稿を改善するため、有益な意見・資料をいただいた方々に感謝いたします。

要旨

寛政4年4月1日(1792年5月21日)、長崎県島原半島の雲仙岳東方にある眉山が火山活動に伴う地震により崩壊した。この山体崩壊物が前面海域に雪崩込み、対岸の熊本側をも巻き込む大規模な津波が発生した。

本稿では、山体崩壊と津波のシミュレーションを実施した。その計算値は島原半島側の遡上高とよい整合性を示した。

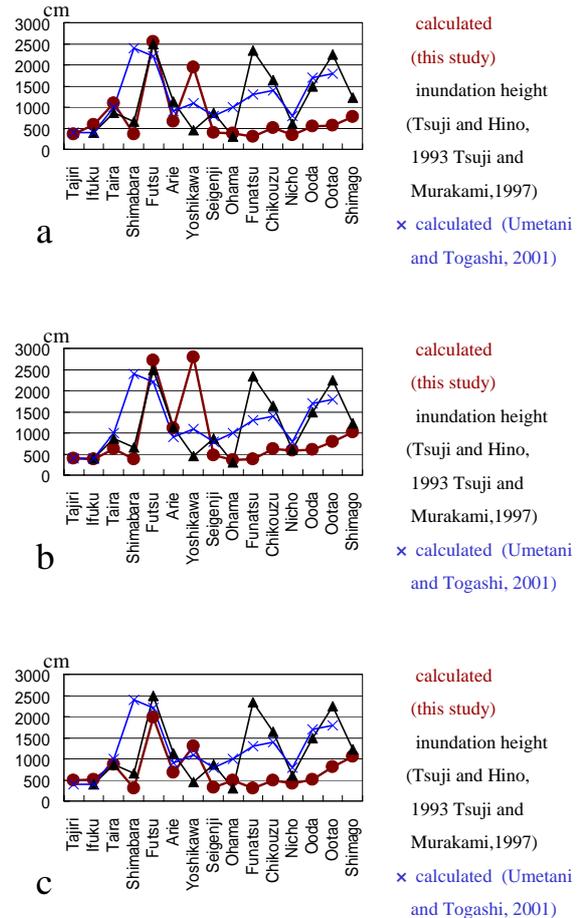


Fig.8 Heights of tsunamis from mean sea level. a; this study, b; after Tuji and Hino(1993), Tsuji and Murakami(1997), c; after Umetani and Togashi(2001).

参考文献

相田勇:1792年島原眉山崩壊に伴った津波の数値実験,地震第2輯,28,449-460,(1975).

井上公夫:1792年の島原四月朔地震と島原大変後の地形変化,砂防学会誌,52,4,45-54,(1999).

海岸昇降検知センター:験潮場取付水準成果集,(2003a).

海岸昇降検知センター:日本列島沿岸の年平均潮位とそのグラフ,(2003b).

海上保安庁海洋情報部:J-BIRD データフォーマット,(2002).

海上保安庁海洋情報部:平均水面,最高水面及び最低水面一覧表,(2003a).

***Numerical Simulation of the Tsunami caused by the sector Collapse of Mt. Mayuyama,
Shimabara Peninsula, Kyushu in 1792***

海上保安庁海洋情報部：統一プログラム沿岸海象
データ処理 (2003b).

建設省土木研究所地すべり研究室：準三次元地す
べり運動解析プログラムによる地すべり性
崩壊の被害範囲の予測，土木研究所資料，
3057, (1992).

太田一也：眉山崩壊の研究 1.崩壊機構について，
島原火山温泉研究所研究報告，**5, 6-35,**
(1969).

社団法人砂防学会地震砂防研究会 中村浩之・土
屋智・井上公夫・石川芳治 編：地震砂防，
(2000).

都司嘉宣・日野貴之：寛政四年(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，および沿岸遡上高さ，東京大学地
震研究所所彙報，**68, 91-176, (1993).**

都司嘉宣・村上嘉謙：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，**13, 135-173, (1997).**

馬越孝道・清水洋・松尾紉道：精度の良い震源分
布から推定した 1990-94 年普賢岳噴火活動の
マグマ上昇経路，火山，**39, 5, 223-235,**
(1994).

梅谷英孝・富樫宏由：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，土木学会
海岸工学論文集，**48, 356-360, (2001)**

**Wessel.P. and Smith, W.H.F.: New, improved
version of the Generic Mapping Tools
released, *EOS Trans. AGU*, **79, 579(1998).****

財団法人日本水路協会：港湾域における津波の挙
動の研究，調査研究資料，**77, (1997).**

財団法人日本水路協会：港湾域における津波の挙
動の研究，調査研究資料，**84, (1998).**

財団法人日本水路協会：港湾域における津波の挙
動の研究，調査研究資料，**90, (1999)**

Noboru SASAHARA