1792 年 島 原 眉 山 崩 壊 に 伴 っ た 津 波 の 数 値 実 験

東京大学地震研究所 相 田 勇

(昭和 50 年 10 月 20 日受理)

Numerical Experiments of the Tsunami Associated with the Collapse of Mt. Mayuyama in 1792

Isamu AIDA

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

(Received October 20, 1975)

On May 21, 1792, a gigantic collapse of Mt. Mayuyama in Shimabara Peninsula, Kyushu, occurred. Following this event, a severe tsunami of about 10 meters in height was generated by the landslide and attacked the coast of Ariake-kai, killing more than 14,500 persons. Many historical documents tell us the phenomena of this tsunami in fair details, so that we attempted to reconstruct a numerical model of the tsunami consistent with the historical data. In the numerical computation, a finite difference method with a leap-frog system is adapted, and two kinds of source input are tried; one is the prescribed water mass transport normal to shore line and the other the vertical displacement of sea bottom. When the transport of $18,000 \text{ m}^3/\text{min}$ (current speed $\sim 20 \text{ m/sec}$) per unit length of shore on the center line of landslide area is assumed to be continued during 2 to 4 min, the computed waves agree fairly well with the real tsunami behaviors, the height of tsunami in various places along the coast and the order of the maximum crest in the sequence of a wave train. Therefore, it seems probable that the extraordinary flow of water normal to the shore occurred by some physical mechanisms of the mountain collapse.

The energy of this tsunami is estimated to be about 5×10^{10} erg, and this is about $1/100 \sim 1/1000$ of the available potential energy of the slid material due to the collapse of the mountain. It is significant that the tsunami energy is several times larger than that of the 1968 Hyuganada Earthquake ($M = 7.5$). The wave spreaded over a wide area and gave destructive damages to the coast more than 120 km on both side of Ariake-kai.

§ 1. は じ め に

1792 年 (寛政 4 年), 島原半島眉山に大崩壊が起り, 当時の島原城下の過半を埋めつくした崩壊物質は, 有明海にも突入して津波をひきおこし, 14,500 人以上の死者を出した. このいわゆる島原大変については, 日本地震史料などにもくわしく記録されており, 古くから多くの

人によつて研究されている。最近太田 (1970) は眉山崩壊の機構について詳細な検討を行つたが、またその中でこれまでなされて来た議論についても概括的に紹介している。片山 (1974) は豊富な古記録を自然現象の科学的記述として整理すると共に、崩壊の機構について検討を加えている。これらによつてこの災害の有様が非常に明確にされて来たが、対岸熊本側にまで溺死 5,000 人の被害を与えた津波について、量的に明確なイメージを与えることは重要なことと思われる。

山体の崩壊による津波 (あるいは巨大な水の波) については、1958 年 アラスカ・リツヤ湾におこつた水の波 [MILLER (1960)] について、実験的理論的な研究が行われている [WIEGEL, et al. (1970), NODA (1970)]. しかしこれらは大量の岩塊が比較的せまくて深い水域 (フィヨルド) に落ちこんで発生した孤立した波の一次元伝播として扱われており、現在の場合にそのまま適用出来ない。そこで二次元的な拡がりをもつて、広範囲に被害を与えたこの津波の数値実験を試みることにした。

§ 2. 津波の概要 [片山 (1974)]

1791 年 11 月から 12 月にかけて、島原半島西部小浜方面に地震が頻発した。翌 1792 年 2 月 10 日から 4 月 20 日頃にかけて、地震・鳴動などが半島中央部の普賢岳やその東方眉山付近におこり、普賢岳の火山活動も活発で熔岩の流出を見た (Fig. 1)。4 月 21 日に至り島原を中心に大きい地震が頻発し、25 日頃までの間に島原城にも被害が生じ、震度の最大は V~VI に達した。また湧水の増水・涸渇などの現象が各所に見られた。4 月 29 日には次の

Fig. 1. Map of Shimabara.

大崩壊の中心部付近に大きい地崩れが生じたものの、地震などは除々に小康状態となった。ところが 5 月 21 日（旧 4 月 1 日）20 時頃、2 度の強い地震と共に眉山の大崩壊が起つた。当時の幕府への報告文書に「前山（現在眉山）ト申高山、頂上ヨリ根方迄、一時ニ割崩、山水押出、城下海ヨリ高波打上、一ツニ相成、城下町家悉、并近在共、暫時ニ押流……」とあるような状況となった。これによつて当時の島原の港は全く土石に埋れ、海岸線は 870 m も沖に進み大小の島 59 が新たに出現したといわれている。これらの島々は其の後浸蝕されて現在はずつと少くなっているが、海図で見ると Fig. 1 の海底部分に多くの暗礁として残っているのが見られる。

この崩壊のエネルギーの一部は、有明海に津波をひきおこして島原半島の有明海沿岸ほぼ全域と、熊本側の玉名、^{あきた}飽託（当時飽田）、宇土、天草の 4 郡に被害を与えた。

a. 島原側の津波

島原側については津波の浸水距離（間）を、地図上に記録したものが残っている【片山（1974）】。これを北から南へ棒グラフに表わしたものが Fig. 2 の左側である。現在の地形図と当時はほぼ満潮であつた（後述）ことを考慮して海岸のスロープを求めて見ると図中央のようになり、津波の高さは右側のように求まる。浸水距離をはかつた地点は大略の地図上でしかわからないので、その点が現在の地図上で何処にあたるか不確かであり、また測定精度も定かではないので、この浸水高さは勿論誤差の大きいものであろう。しかしもう少し明確な高さとして、島原城南側で大手門前の並木の枝にちりあくたがかかつたとか、大手の石垣によじ登つ

Fig. 2. Inundation distances based on historical records, shore slopes inferred from the contour line of a topographic map and estimated height of tsunami inundation along the coast of Shimabara Peninsula.

Table 1. Damages in various districts

area	Shimabara	Kumamoto			
		Amakusa	Tamana	Hotaku	Udo
loss of lives	>9,644	343	2,221	1,166	1,266
houses washed away	3,347	373	2,252		
damaged fields (km ²)	3.7	0.65	21.3		
lost ships	>582	67	>1,000		

て水から脱したとか、田町門衛の灯火の高さに等しかつたとかの記録から 6~9 m の値が推定されており、また島原城北側数 km でも約 9 m という推定がある。島原半島北部守山付近では「往還に潮の深さ 3 尺ほどあふれ」とあるので当時の海面上 2 m 程度のものであろう。これらの数値を Fig. 2 の中に白いコラムにして記入して見るとさきほどの浸水距離からの推定と大きな矛盾がない。したがって津波の高さはほぼこの図のようなものであつたと考えられる。

この津波の特徴として「洪波は 3 度来たり、第 2 の波最も高し」という記述が残っているが、これは守山の庄屋の日記【片山 (1974)】にある島原半島北部の状況についての記録と符合している。

波源近傍での津波の時間的な記録として、地震におどろいてまつしぐらに逃げのびた人が、津波の汐先より 2, 3 間のところで助かつたということで、その間の距離約 600 m から津波の最初の波は島原城南側で 2 分あるいはそれ以上かかつたと推定されている【片山 (1974)】。島原城東側の猛鳥社では殆んど家を出る間もなく津波におそわれ 10 人の内 3 人のみ助命したとの事であるので、この 2 つの記録から島原付近ではかなり短時間（数分以内）で津波の高さが最高に達したことがわかる。

また海水温について島原城大手付近で「湯の如く熱く」。守山方面では「常よりよほどぬくい程度」と記録されている。

b. 熊本側の津波

熊本側では津波の高さについての記録はそれ程多くない。飽田（現飽託）郡舟津村弁天では 3 間四方の大石が流失し、蓮光寺の庫裡の 2 階に登っていた人々が溺死したといわれる。また同じ郡の二町村川口にいた 1600 石の船が数百間はなれた方丈村の陸地へうち上げられた。玉名郡清源寺村では城郭のように堅固な家の 2 階に登つた人々が溺死した。このようなことから、これらの場所ではいずれも津波の高さ 4~5 m 以上と推定される。玉名郡長須村では船が陸に上つたといわれるが、清原寺あたりよりはやや低かつたかに思われる。天草については幕府へ

の届出で記事に、丈五尺より拾五丈位とあるが、信憑性がうすく、死者の数も他郡より少ない (Table 1) ことから、津波の高さは前記 3 郡に比して少々低かつたものと思われる。

§ 3. 数値実験の方法

a. 計算格子

前節で述べたように津波は島原半島と対岸熊本側の有明海沿岸の広範囲を襲っているので、Fig. 3 に示すように有明海全域を計算海域とした。その中央部は格子間隔 500 m, 其の他を 1 km とし、水の運動の基本方程式を差分式で解く方法をとる [相田 (1974)]。有明海は図に見るように比較的浅く、島原付近では 10~20 m であり、津波発生域の水平ディメンションは

Fig. 3. Area of the numerical experiment with the grid intervals of 0.5 and 1 km. S1~18 and K1~10 show the points at which the computed results are printed. The inset at the lower right is the estimated tide curve at that day in Misumi.

3000 m はあると思われるので長波近似が有効である。しかし非線型効果が強くなると思われるが、ここでは簡単のため波の振幅による水深の変化を考慮するに留め、また浅い部分で海底が露出する場合は流量 0 を与えた。

図のようにほとんど閉じた海であるが、南西の口之津付近と大矢野島南方に長波進行波として外海に流出入する境界条件を与えてある。

有明海は潮差の大きい所であるが、この大変のあつた当日は新月の夜にあたり大潮であつた。三角における、5 月 21 日頃が新月にあたる年の潮位曲線を見ると、図右下に示すように潮差は 4 m で、潮位は 20 時頃はほぼ満潮に近い 3.38 m となつている。湾の奥では更に潮差が

大きくなるが、ここでは一様に基準面上 3.5 m の潮位にあつたものとして計算を行つた。なお図中 S1~S18, K1~K10 と示した点は、海面の昇降の計算結果を印刷出力させた位置を示す。

b. 入 力

上述の数値実験の場合、初期値入力としては、水位または流量を与える必要がある。

ここで眉山崩壊の状況を見るため、崩壊の機構について今まで行われている議論を見ると、1908 年から 1926 年にかけて火山爆裂説をとる佐藤伝蔵・駒田亥久雄や、地震崩壊説をとる大森房吉・小川琢治・本間不二男などの議論があつた【太田 (1970)】。最近太田 (1970) は地震動によりすべり面に流動化現象をおこして発生した円弧すべりであるとしている。すべり面上に載つた土塊のひきずり作用と崩壊時に突出した地下水の添加により、崩壊物の下層部は土石流の運動形態をとり、一挙に流下して数 km 隔つた海域にまで

Fig. 4. Upper: Plan of the slide area whose limit is shown by thick broken line. Old and present shore lines are shown by solid and broken lines, respectively. Broad arrows indicate the magnitudes of input transport Q , given at hypothetical shore lines drawn by thick grid lines in the first model. In the other model, the vertical bottom displacements are given within the area surrounded by broken grid lines. Lower: Supposed cross section of the collapsed mountain, O and K indicate old topographies after Ota (1970) and Katayama (1974) respectively. Broken line indicates the present topography. Double chain line K represents the cylindrical slide plane after Katayama (1974).

分散されたとしている。また片山 (1974) はその日の地震はその 1 月前の地震よりむしろ小さかったとして地震による引金説を否定し、広義の火山活動であり島原半島西部の地下から東方へ移動する熱水あるいはマグマによつて、普賢岳の活動、さらに眉山方面での地下水の温泉化が進み、地下水位の上昇が起る。その結果円弧すべりの要因となる上載地塊のモーメントが増大するとし、引金には有明海の干満の差である可能性を指摘した。また円弧すべりの際、その先端海底部のつき上げ作用が津波の原因であるとしている。

Fig. 4 下側に示した断面で O の鎖線は太田による旧山形、K の実線は片山による旧山形、点線は現在の山形である。又 K の円弧は片山が示した滑り面である。

また古谷 (1974) はこれらと異り、爆裂活動に伴つて破碎された山体の碎屑物質が粉体流のような形式でなだれ落ちたという説を発表している。

ここでは勿論これらの崩壊機構を論議するものではないが、一応数値実験の入力のイメージとして太田の議論に少々近似している流量入力と、片山の議論に近似した海底の鉛直変位を与える二通りを試みた。

流量の分布は、海岸に沿つて y をとり、流入の範囲を $\pm l$ 、その継続時間を τ として、 $q = Q_m \{(l-y)/l\} \sin(\pi t/\tau) = Q \sin(\pi t/\tau)$, $\tau \geq t \geq 0$, $l \geq y \geq -l$ で与える。 Q_m は流入中央部での最大流量であり、 q は中央から距離 y の格子に流入する流量である。ここで流量は海岸単位長さ当り m^3/min で表わしてある。Fig. 4 に示す格子は 500 m 間隔の計算格子であり、太い点線は太田 (1970) の論文などから引いた崩壊物質の堆積した範囲を示してある。太い矢印は上に述べた Q を示す。ここで実験を行つた Q_m と τ について数値を示すと Table 2 のようになる。因みに Ex. 4 の数値は、 $4.6 \times 10^7 \text{ m}^3$ の流体が流入したことを意味し、これは実線の旧海岸線と点線の現海岸線の間の堆積の厚さ平均 7 m、その沖合は直線的に減少するとした堆積量 $4 \times 10^7 \text{ m}^3$ とほぼ同等の量となる。また旧海岸線は現在 20 m 等高線に近い位置であり、崩壊の中心線付近で土石流の厚さ 15 m と仮定すれば流速の最大は 20 m/sec となる。

Table 2. Parameters of experiments

Transport input			Displacement input	
Run No.	$Q_m (\text{m}^3/\text{min})$	$\tau (\text{min})$	Run No.	Bottom displacement
Ex. 2	18,000	4	Ex. 8	10 m Max.; decrease offshore
3	"	3	Ex. 9	10 m uniform
4	"	2		
5	9,000	2		
6	"	4		
7	"	8		

一方円弧すべりで剛体として地塊が動いたとすれば海岸で突然の隆起が考えられる。Fig. 4 の K で示す円弧よりやや浅い円弧 (3 重鎖線) にしても、滑り面の滑り量 100 m に対して海岸での鉛直変位は 30 m となる。今の海底地形から見て大き過ぎると思われるので、ここでは Table 2 に示すように鉛直変位 10 m を、Fig. 4 の点線で示した格子域全域に一様に与えた場合と、周囲に減少させた場合の 2 例を行った。

§ 4. 実験結果と実際の津波との比較

a. 津波の高さ

第 2 節で述べた古記録によつて推定出来た津波の高さを Fig. 5 に、左に島原側、右に熊本側として太い実線の棒および白抜きのコラムで示してある。これに実験の結果から各地の最大の高さを 4 例について示してある。島原側については Ex. 9 が僅か小さいが、各実験結果は

Fig. 5. Maximum heights of computed tsunami in several experiments are compared with the inundation heights, which are indicated by the length of bar or column, inferred from historical documents.

Fig. 6. Relation between the duration of input transport and the maximum heights at various locations modified under the assumption that the maximum height is proportional to the transport.

Fig. 7. The order of the highest crest, and the arrival times of wave front as well as the highest crest in parenthesis, in various locations.

Fig. 8. Computed wave patterns on the east side of Ariake-kai.

大差はなく、古記録の津波の高さとかなりよく一致して見える。しかし熊本側では実験の条件によつて明らかな差がある。流量入力の場合2例は古記録の津波の高さを満たすが、変位入力の場合Ex. 8, Ex. 9は少々小さい。海底変位をこれ以上大きく与えることは、特に沖合側で不自然であり、また面積も円弧すべりで剛体として動いたとすると大きすぎる位に大きくとつてあるので、これ以上上げることは出来ない。このことから海底の突上げのみで津波のエネルギーを全部説明することはむづかしく、流量入力の方が津波発生により効果的であると思われる。このことは、眉山崩壊の際、何等かの物理的機構によつて、前述のような驚くべき大きな流量を海水に与えることに等価な現象があつたであろうことを意味しているが、その機構については今断定することは出来ない。

流量とその継続時間が津波の最高波にどのように寄与しているかを見るため、波の高さは流量に比例するとの仮定のもとに、流量 $10,000 \text{ m}^3/\text{min}$ に換算した最高波の高さを、 τ に関して比較したのが Fig. 6 である。右側の熊本側の各地はいずれも $18,000 \text{ m}^3/\text{min}$ と $9,000 \text{ m}^3/\text{min}$ の場合がほぼ一致し、 H_m が Q_m に比例するという仮定がほぼ成立っている。そして τ が2～4分では H_m が1.5倍程度変化するが、 $\tau = 8$ 分の値は4分の場合とあまり変らなくなる。これに反して左側島原半島の様子は複雑で、S3, S10, S12のように熊本側と似た振舞

Fig. 9. Computed wave patterns along the coast of Shimabara Peninsula. The insets show the distribution of water depth normal to shore at S4 and S6, as well as the phase, C, and group, U, velocities of edge waves expected from these depth distribution.

示すように北部で2波目に最高波が現れている。南部では3波目4波目に最高波が現れる場所もあり、地形的な共鳴によると思われる。北部各点の津波の様子は第2節に述べた守山庄屋の日記とよく合致していて、目立つた3つの波と、2波目の最高波の特徴が出ている。この最高波のあらわれる原因として対岸からの反射波も考えられるが、Fig. 7の最高波の山の到達時刻から見ると時間的に遅れ過ぎる。

Fig. 3で島原半島北部の海岸線を見ると、S5を境にS3~5, S5~7が折れた直線のように配列している。今S4, S6の地点で海岸に直角の方向に水深の断面図を作り、その断面から期待されるedge waveの位相速度C, 群速度Uを計算[AIDA (1967)]して見るとFig. 9右側に挿入した図のようになる。数値実験で得られた波から、波の先端の速度を求めて見るとS7~5に対して13.6 m/sec, S5~3に対して8.3 m/secとなり、これは海岸近くの水深から期待される長波速度よりかなり速いので、波の先端は速度の速い沖合いを廻つて来ていることを示している。さらに第2の山の速さを求めて見ると、S7~5に対して10.3 m/sec, S5~3に対して7.4 m/secとなる。前記のedge waveの位相速度は周期6 minに対してS6断面で

が見られる点もあるが、S8はほとんど逆の傾向を示しているし、またS5, S7, S16などでは H_m が Q_m に比例するという仮定が成立っていない。流量の変化が、これらの地点では波高だけでなく、周期など波の性質に変化を与えているものと思われる。

b. 最高波の性質

Fig. 7は最高波が第何山目に現れているかをEx. 4の場合について示してある。即ち熊本側では例外なく第1山が最高であり、このため前節Fig. 6のような揃った性質を示している。これを波形で見るとFig. 8に示すようであり、第1山が特に大きい場所が多く、津波の被害、特に死者を増大させる要因になったと思われる。

島原側ではFig. 7およびFig. 9に

9.8 m/sec, S4 断面で 7.8 m/sec であり, 計算波から求めたものとほぼ一致した値となる. 周期 6 分程度の波は S6 の波形には存在するが S4 については不明瞭である. しかしこの結果から, 第 2 波が高かったという現象は edge wave 的な効果による振幅の増大であつたとも考えられる.

c. エネルギー

今回行つた数値実験の中, Ex. 4 の場合が実際の状況をよく再現しているものとすれば, おおよその津波のエネルギーを推定することが出来る. 一つには入力として与えた流量から動エネルギーとして計算すると 5.3×10^{19} エルグとなる. もう一つは, 8 分後の海面の高さの分布から波の広がった部分全体を積算してポテンシャルエネルギーを求め, 波は進行波的と仮定して, その 2 倍を波の全エネルギーとすると 4×10^{19} エルグとなる.

したがつてこの津波のエネルギーは 5×10^{19} エルグ程度と推定される. 筆者が求めた数値モデルによる津波のエネルギーとして 1964 年新潟津波の場合は 6×10^{20} エルグ [AIDA (1969)], 1968 年日向灘津波の場合は $1 \sim 2 \times 10^{19}$ エルグ [相田 (1972), (1974)] であるので, 今回求められた数値はこの中間にある. なお崩壊直前に持つていたであろう崩壊物質のポテンシャルエネルギーは, 崩壊量の推定が困難であるが, $6 \times 10^{21} \sim 4 \times 10^{22}$ エルグ程度であると思われるので津波のエネルギーはその 1/100~1/1000 にしか過ぎなかつた.

§5. む す び

眉山の崩壊によつて起つた津波は, その波の諸性質を今回の数値モデルでほぼ説明出来るように思われる. ここに与えた入力のモデルは海岸線単位長さあたり最大 $18,000 \text{ m}^3/\text{min}$ の流量を 2~4 分間与えたものである. 崩壊機構は現在でも諸説あるが, それとこの入力モデルが物理的にどのように結びつき得るかは今後に残された問題である.

Table 3. Comparison among remarkable landslides in the world

	SHIMABARA	RITUYA BAY ALASKA	VAIONT ITALY
area of slide (km^2)	10	0.73×0.91	2.0×1.6
slide volume (m^3)	340×10^6	33×10^6	270×10^6
duration of sliding	2~4 min		30~45 sec
max. speed (m/sec)	20	34~109	25~30
area of reservoir (km^2)	1640	33	3
water depth (m)	10~20	120	200
max. height of water waves (m)	10	524	130
loss of lives	>14,640	2	3,000

この津波は、他の地震津波とは発生の機構において異なっているが、かなり広い海域を伝播し、広汎な地域に大きな被害を与えるなど、地震津波と全く変らない振舞を見せた。これに比し山体崩壊に伴った巨大な水波の例として知られるアラスカ・リッヤ湾の場合 [MILLER (1960)] や、イタリー・バイオントダムの場合 [KIERSCH (1964), MÜLLER (1964)] はかなり異った特徴がある。Table 3 に数字的な比較を試みたが、水波のおこった水域の面積が極端に違い、また水深もかなり異っている。リッヤ湾やバイオントダムの場合は非常に巨大な水の波があらわれたが、それは局限された地域に限られた。島原の場合は波の高さはそれらに比して低かつたけれども、はるかに広汎な地域に被害を与えた。

1640 年北海道内浦湾に発生した津波は、700 人あまりの死者を出しているが、これは駒ヶ岳の噴火による泥流の海への突入による津波である可能性が充分ある。泥流堆積物の量が $250 \times 10^6 \text{ m}^3$ [北海道防災会議 (1975)] であるといわれるので、規模からいっても島原眉山の崩壊に匹敵する量である。

謝 辞

この研究にあたり原稿に目を通して頂き、御教示を与えられた地震研究所梶浦欣二郎教授に厚く謝意を表します。またこの計算は東京大学大型計算機センターによったことを申添えます。

文 献

- AIDA, I., 1967, Water level oscillation on the continental shelf in the vicinity of Miyagi-Enoshima, Bull. Earthq. Res. Inst., **45**, 61-78.
 AIDA, I., 1969, Numerical experiments for the tsunami propagation—the 1964 Niigata Tsunami and the 1968 Tokachi-oki Tsunami, Bull. Earthq. Res. Inst., **47**, 673-700.
 相田 勇, 1972, 津波記録による波源数値モデルの推定, 地震 **2**, **25**, 343-352.
 相田 勇, 1974, 地震の断層モデルによる津波の数値実験, 地震 **2**, **27**, 141-154.
 古谷尊彦, 1974, 1792 年 (寛政 4 年) の眉山大崩壊の地形学的一考察, 京大防災研究所年報, 第 17 号 B, 259-264.
 北海道防災会議, 1975, 駒ヶ岳, 北海道における火山に関する研究報告書第 4 編, 1-194.
 片山信夫, 1974, 島原大変に関する自然現象の古記録, 島原火山観測所研究報告, 9 号, 1-45.
 KIERSCH, G., 1964, Vajont reservoir disaster, Civil Engineering, **34**, March, 32-39.
 MILLER, D., 1960, Giant waves in Lituya Bay Alaska, Geological Survey Professional Paper, 354-C, 51-83.
 MÜLLER, L., 1964, The rock slide in the Vajont valley, Jour. International Society Rock Mech., **2**, Nos. 3-4, 148-212.
 NODA, E., 1970, Water waves generated by landslides, Jour. Waterways, Harbors and Coastal Engineering Div. Proc. ASCE, **96**, ww4, 835-855.
 太田一也, 1970, 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 号, 6-35.
 WIEGEL, R., E. NODA, E. KUBA, D. GEE and G. TORNBORG, 1970, Water waves generated by landslides in reservoirs, Jour. Waterways and Harbors Div. Proc. ASCE, **96**, ww2, 307-333.