

津波発生数値計算手法に関する疑問

首藤 伸夫*

1. はじめに

現在、海底鉛直変位に起因する津波の数値計算においては、波源域では線形長波理論、浅くなってくると非線形長波理論である浅水波理論、河川内など必要に応じては非線形分散波理論を適用するのが、通常の手法となっている。

所で、海底変位によって津波が発生した瞬間を目撃した人が居る。1783年にイタリアで、1853年に日本で、目撃された。その目撃談には、線形長波とは異なるのではないかと思われる現象が報告されている。

この小文では、この2例を紹介し、発生理論や発生実験とも比べながら、問題点を明らかにする。

2. 海底変位による津波の発生

2.1 イタリアでの目撃記録

Soloviev et al. の *Tsunamis in the Mediterranean Sea, 2000B.C.-2000A.D.* の中に、1783年に起きた津波の目撃談がある(文献1)。記録に残るものとしては最も古いものといえよう。

1783年2月5日、破壊的なカラブリア地震が発生する。この地震は、イタリアの南西地方でその後数年間継続するものとなるが、中規模の津波を発生させた。この津波は、カラブリア地方のティレニア海沿岸では Scilla から Reggio まで、シシリー島では Messina から Torre Faro にまで影響した。またカラブリアのイオニア海沿岸にも影響が及んだ。

そもそもこの地震では、発生前からいくつかの異常が見られた。カラブリア地方全域とシシリー島では、地震15分前くらいから地下での震動が始まった。ローマニャやローマでも、地下震動のいくつかは感じられた。

地震直前には、海で異常現象が発生した。

まず第一は、深海魚 *cicirella* (イカナゴ) が、大量に海面近くに現れた事である。この魚は通常は海底から離れることなく、海底の泥に身を隠して居るのであるが、2月初めの数日間、メッシーナ島近く及びその他の場所で海面近くに現れた。

第二は、沖合の海の異常な荒れである。2月5日には、カラブリアの Monteleone 地域では海岸近くの海は静かであったのに、沖では風もないのに荒れており、海は沸き立っていた。そのため、漁師にはやむを得ず、岸に戻るものも居たとのことである。

第三は、地震前の引き潮である。Scilla や Cutro の住民は、地震の前に海が静かに 10m (Yards?) 位引き、そしてゆっくりと元に戻つ



図-1 ギョイア湾周辺図 (Google Earth による)

*東北大学名誉教授

たのを見た。Cutro の人々は家を離れたので、地震で家々はひどく壊されたが、住民に犠牲者は出なかった。

そして、1783 年 2 月 5 日正午頃、大規模地震がイタリアの南西部で発生し、これで生じた中規模津波がティレニア海沿岸、シシリー島との間のメッシーナ海峡、さらには東南部のイオニア海沿岸で目撃された。

ギオリア湾 (図-1) の北岸では、津波の発生過程が 2 カ所で目撃された。

一つは、北岸中央付近のヨッポロ (Joppolo) である。この辺りは写真-1 に見られるように崖が海に迫っているが、その高所で働いて居た二人の住民の目撃談によると、「地震の時、海は盛り上がり静止した。と見るや、二つに分かれ、海底の砂が見えた。」のである。海底の砂が見える位の浅い場所での発生である。

これを海上で体験した記録もある。同じ時、ニコータ (Nicotera) の西で、ヴァチカーノ岬 (Cape Vaticano) 沖辺りに、船に乗って居たシーラ (Scilla) の住民がいた。「地震の 8 分後くらいに大波を見た。」という。「船の一番大きなマストほどの大波が二つ、同じ場所に発生し、分かれて進行した。一つは泡立ち巻き波となって海の方へ、他はこれとは反対のニコータの岸へと進んでいった。ニコータでは、まず潮が引き、次いで満ち、3 回繰り返した。」



写真-1 Joppolo 近くの風景 (By Far lang. Google Earth による)

2.2 我が国での目撃記録

明治 25 年に設立された震災予防調査会が、同年に静岡県に古地震資料の収集を依頼した。その回答は「安政元年 11 月 4 日東海沖地震に関する静岡県調査報告 明治 26 年」となっている。昭和 46 年頃、東京大学理学部地球物理学教室の新館工事に際して発見され、昭和 52 年に東京大学地震研究所から印刷刊行された。

このなかに、1854 年 12 月 23 日安政東海地震で発生した津波を伊豆半島西岸で目撃した報告がある。(文献 2)。

「伝聞

伊豆加茂郡三浜村ニ伊浜ト称スル村落アリ
邑ノ北ニ高燈籠山アリ海角ノ高山ニシテ十数
州ヲ望ムヘシ邑人常ニ稔ヲ此山ニ取ル安政元
甲寅歳十一月四日邑人某同山ニ登ル俄ニシテ
地大ニ震フ已ニシテ西方ニ爆声ヲ聞ク百雷ノ
響ノ如シ之ヲ望メハ巨大ナル水柱ノ如キ者海
面ニ隆起シテ空際ニ登リ忽チ海暝暗黒トナリ
又忽チ変シテ巨大ナル水輪トナリ下田及伊豆
諸島ニ向テ進行シ一方ハ駿河湾ニ向テ進行ス
水柱ノ処ハ忽チ凹キ事雷盆ノ底ノ如ク暫時ニ
シテ水又凸ヲ為シ一凸一凹数回ノ後海上漸ク
収マル某氏何ノ故タルヲ知ラス唯奇異ノ感ヲ
ナス還テ而シテ之ヲ聞ケハ海嘯ナリト云々某
夜西風波濤ヲ起ス翌朝雲見嶽 (高燈籠山ト相



図-2 高燈籠山 (○印) 周辺図 (Google Map より作図)

連ナル海角) ヨリ・・・(中略) 前ノ水面隆起ハ火脈破裂ノ処ニシテ海嘯ノ源ナリ(後略)

この高燈籠山は、南伊豆町町勢要覧によると、松崎町との境界となっている高山層岩山(こうぞうりやま: 標高 518.9m)の事らしい。非常に見晴らしが良く、海が見渡せるという。一方、松崎町のウィキペディアによると、「高通山: 雲見の南側にある高い山。集落が一望できる場所に山桜とツツジが綺麗に咲く」とされて居り、隣り合う町で呼び名が異なる。いずれにしても両町の境にある山で、図-2の○印辺りのようである。上記報告中に続いて出てくる雲見嶽は、現在の地図には見当たらない。しかし、「富士おさんぽ見聞録」(文献3)の雲見浅間神社によると、図-2の地図に見られる雲見の烏帽子山の別名として御嶽山、雲見ヶ岳、浅間山があるとしているから、現在の烏帽子山(標高 163m)が雲見嶽であろう。

3. 津波発生の水理実験

高橋龍太郎は1933年昭和三陸大津波の後、水槽を使って津波発生の水理実験を行った。その結果は、地震研究所彙報別冊 第1号に掲載されて居る。(文献4)。

使用したのは、図-3に示すような水槽である。長さ2m、幅1.5m、側壁高さ0.3m、水槽の中央下部に径10cmのピストンが付けられており、これの上下運動により津波を発生させた。

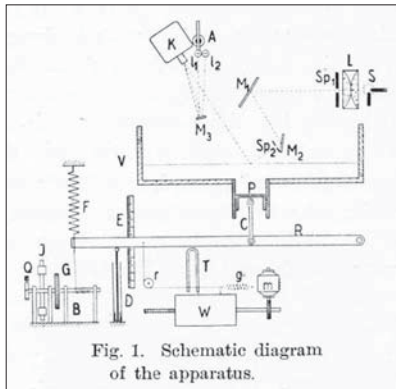


図-3 高橋の実験装置

生させた。水深は1.37cm, 1.96cm, 3.99cm, 6cmの4種類;ピストン上昇量は0.65cm ~ 3.25cm;ピストン上昇時間は0.095sec ~ 3.5secの間で変化させ、45種類の実験を行っている。

発生時点での半波長はピストン径であるから、発生時の水深波長比は $d/L=0.0685, 0.098, 0.1995, 0.3$ となり、浅水波 ($d/L < 0.05$) と呼べる領域からやや外れている。

では、そうした条件下に発生した波を、どのように観察したのであろうか。

図-4は、その1例で、ピストン上昇時間 $T=0.142$ 秒と早く、水深が $H=3.99$ cm と深い場合である。縦軸は鉛直位置、横軸は時間軸である。細線はピストンの動き、太い実線はピストン中心位置での水位変化、点線、一点鎖線、二点鎖線などはピストンか遠ざかる測点での水位変化である。

高橋は次のように記述している。

「図に依って知り得る如く、ピストンが上昇するとピストン真上の水面は高まって山に

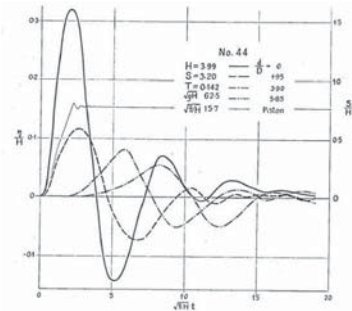


図-4 高橋の実験 No.44

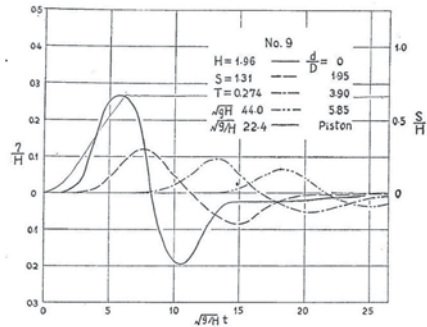


図-5 高橋の実験 No.9

なり、山の底面積はピストンの面積よりも大きくなる。次にピストン上の部分丈凹んで来る。即ちピストンの周囲には環状の水の堤が来る。ピストン直上の水面は更に凹んで平衡の位置よりも低くなるのが普通である。

ピストンの周囲に出来た水の堤は其の形を多少変化しながら、ピストンから外方へと進行する。平衡位置を越して凹んだピストン上の水面はやがて又上方に運動を始めて、又前と同じ事を繰返し、再び環状の水の堤が出来る。

かくしてピストン直上の水面は数回平衡位置の上下に振動し、其の振動が次第に小さくなって静止する。而して其の度毎に環状の水の堤を生じ、此が円形のピストンから外方へ進行する波となる。振動の回数は水深の大きい程多い様である。従って單なるピストンの上昇によって出来る波も数個の波より成る波群である事は注意を要する。」

図-5に、水深が $H=1.96\text{cm}$ と浅く、ピストン上昇時間 $T=0.275$ の遅い実験 No.9 の結果を示す。ここでは、一山一谷の振動で終わっている。

4. 線形長波理論での津波発生

現在では、津波発生域では線形長波理論を使うことが多い。非線形干渉がなく、水粒子の鉛直加速度は無視されている。

この理論では、安政東海津波で目撃された現象、「巨大ナル水柱ノ如キ者海面ニ隆起シテ空際ニ登リ忽チ海暝暗黒トナリ又忽チ変シテ巨大ナル水輪トナリ下田及伊豆諸島ニ向テ進行シー方ハ駿河湾ニ向テ進行ス水柱ノ処ハ忽チ凹キ事雷盆ノ底ノ如ク暫時ニシテ水又凸ヲ為シー凸一回數回ノ後海上漸ク収マル」を説明出来ないのではなからうか。

もし線形長波理論で扱おうと、最初隆起した海面は1度は平均水面より下に下がるが、それで終わり、目撃談のように凹凸を数回繰り返すことはない。

このことを理論的に示したのは、高橋龍太郎である。(文献5)

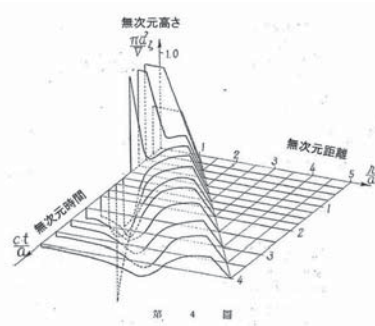


図-6 円形波源による波の時空間表現

円形の海底隆起から始まる水面変化をもとめ、図-6のように表して、説明する。

「同図から明らかに看取出来る通り、海底が隆起すると水面には最初截頭円錐形の山が成長して来るが、其の内、斜面の下部は外方へ c の速度で伝わって行くのに反し、斜面の上部は次第に崩れて後退してゆくので、其の中間に環状の凹所が出来て来る。此の凹みは次第に深くなると共に徐々に内方に後退してゆくので、 ct/a が 1.0 位の時には変動区域の外側に環状の水の土手が出来、其の山は大凡 c の速度で外方へ広がってゆく。其の間に中心の円錐は次第に痩せて尖塔になり遂に消失して、中心には洋鐘を逆にした様な形の凹みを生ずる。中心は更に陥没して喇叭状となる。次には中心は次第に持ち上がって来る。此の盛り上がった場所は段々に其の面積と高さとを増して、時間が経過すると中心付近は殆ど平水の状況にまで回復する。然し、其の周囲には環状の凹所が外へ外へと広がって居る。即ち相当の時間が経過した後は一山及び一谷より成る円形波が外方へと伝播してゆくのである。

此等の波の状態は筆者が曾て行った模型実験の結果に酷似している。」

波源の平面形状が長方形である線形長波を理論的に解いたのは梶浦欣二郎である。(文献6)。その座標系及び波源の形状を図-7に、波源短軸に沿ってとった x 軸上5地点での時間波形を図-8に示す。 τ^* は線形長波波速 c

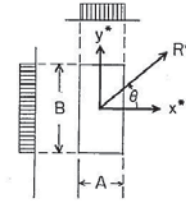


図-7 波源形状と座標軸

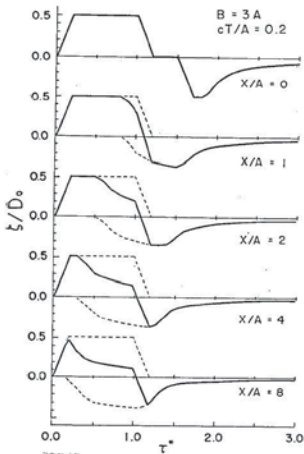


図-8 各地点での時間波形

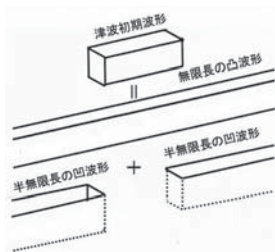


図-9 線形長波初期波形の形成

と短軸上の波源長さ A とで無次元化した時間、 T は立ち上がり時間である。

これでも判るとおり、線形長波の仮定の下では、一山一谷の津波となる。

このことを簡単に説明するには、無限長の凸波形に、2 個の半無限長の凹波形を図-9 のように重ね合わせると良い。凹波形の存在

しない所で隆起した海面形状となる。これを出発点とすると、凸波形、凹波形は相互に干渉することなく伝播し、それらを加えたものが実波形として認識される。二つの凹波形の末端からは初期波形の中央に向けて凹波形が伝播するから、そのうち初期に盛り上がった場所にも谷が出来る事となり、一山一谷の津波となるのである。

5. 線形長波理論では表せない現象

高燈籠山での目撃談では、「巨大ナル水柱ノ如キ者海面ニ隆起シテ空際ニ登リ忽チ海暝暗黒トナリヌ忽チ変シテ巨大ナル水輪トナリ下田及伊豆諸島ニ向テ進行シー方ハ駿河湾ニ向テ進行ス水柱ノ処ハ忽チ凹キ事雷盆ノ底ノ如ク暫時ニシテ水又凸ヲ為シー凸一凹数回ノ後海上漸ク収マル」となっているように、海面は数回上昇下降を繰り返して居る。

最初の上昇速度が速い高橋の実験 No.44 (図-4) の様な状況である。

水運動の鉛直加速度が無視できないことを意味している。一度高所に上がった水が下降して平水面に戻ったとき、下方方向の速度を持って居り、平水面下に突入する。その速度を失ったとき上昇を始め、平水面に戻ったとき今度は上向きを持って空中に上がる。こうして生ずる複数の波がコーシー・ポアソン波である。石を池に放り込んだときに発生し拡がっていく波紋がこれである。

線形長波理論に従う限り、一山一谷で終わるから、高燈籠山目撃談の様に波源で数回上下を繰り返す現象は再現できない。

イタリアでの目撃談によると、「地震の時、海は盛り上がって静止した。と見るや、二つに分かれ、海底の砂が見えた。」とある。

また、「船の一番大きなマストほどの大波が二つ、同じ場所に発生し、分かれて進行した。一つは泡立ち巻き波となって海の方へ、他はこれとは反対のニコテアの岸へと進んでいった。ニコテアでは、まず潮が引き、次いで満ち、3 回繰り返した。」

津波が分かれ、海底が見えたと云うから、かなり浅い場所での発生である。また、沖へ向かう波の先端は巻き波となった。こうした事を考えると、線形長波理論ではなく、少なくとも浅水理論、出来得れば分散項を含めて津波発生を扱わねばならない。

発生箇所が数回上下運動が繰り返されたと云う記述はなく、高燈籠山での目撃談とは異なっている。ただ、ニコータア海岸では3度の満ち引きが観測されている。これは、波源で3波続けて山谷が繰り返し発生したのか、あるいは近傍の海岸での反射波が襲来したのか、または発生直後から分散性が効いて波列が発生発達したのか、のいずれかであろう。

また、大きな水の山が発生し先行しニコータア海岸に向かったとするので、到達したニコータア海岸では押し波から始まりそうであるが、実際には引き波が先行している。これは不思議ではない。その山を作るには水が必要であり、それがすべて背後から来るとは限らず、前方からも来るから、岸边では引きから始まることになる。

6. おわりに

海底鉛直変位による津波発生の目撃談からは、線形長波の仮定では再現できない現象があることが判った。問題は、そうした現象が

線形長波として推定された津波をどのくらい変えるかである。一度、精査する必要がある。

参考文献

- 1) Soloviev, S.L., Solovieva, O.N., Go, C.N., Kim, K.S., Shchetnikov, N.A.: Tsunamis in the Mediterranean Sea 2000 B.C.-2000 A.D., Advances in Natural and Technological Hazards Research, Vol. 13, pp.65-66, 2000.
- 2) 東京大学地震研究所：安政元年 11 月 4 日 東海沖地震に関する静岡県調査報告 明治 26 年, p.4, 1977.
- 3) <http://iiduna.blog49.fc2.com/blog-entry-155.html>
- 4) Takahasi, Ryutarō: A model experiment on the mechanism of seismic sea wave generation, Part I, 地震研究所彙報別冊第 1 号, 「昭和八年三月三日 三陸地方津波に関する論文及報告」, pp.152-181, 1934.
- 5) 高橋龍太郎：海底の変動に因って生ずる津浪について, 地震研究所彙報, Vol.20, Part 2, pp.375 ~ 400, 1942.
- 6) Kajiura, K.: tsunami source, energy and the directivity of wave radiation, Bulletin of the Earthquake Institute, Vol.48, pp.835-869, 1970.

付録 その他の原因による津波発生の目撃談

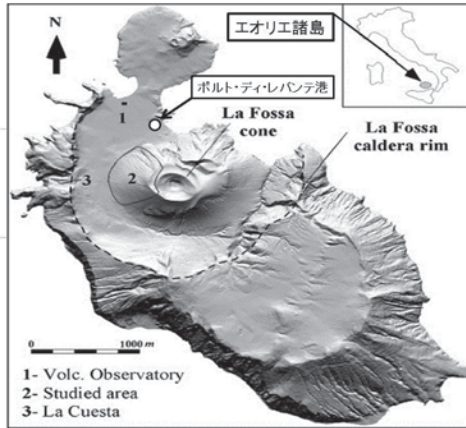
付録 1 地滑りによる津波発生

Maramai (2003) 他が、地滑りで発生したと思われる津波を報告している。場所はシリール島の北、エオリエ諸島中もっとも南のヴルカーノ島での出来事である。この津波は、彼らが始めて報告したもので、それ以前の津波カタログには掲載されていない。

「1988 年 4 月 20 日、大規模な地滑りが Vulcano 島 La Fossa 火山の北東縁で発生した。ちょうど火山活動・地震活動が増えつつあつた時期の事である。地滑りが海へ突入し、津波が発生した。この地域には潮位計がなかった

ので、計測記録は得られていない。

目撃者へのインタビューで得られた情報は次の通りである。波発生域内で船に乗って操業中の漁師が云うには、『現地時間午前 5 時半頃、大きな音を聞いたので岸の方を見ると、山が彼の方へと走ってくると感じた。高さ 1 ~ 2m の上昇する波が生じ、彼の船を持ち上げたが、船は傷つかなかった。次いで船が沈み、そして小さな振動が続いた。同じ湾内で、



付録図-1 ヴルカーノ島地図

波源よりもっと遠くに居た別の漁船は、津波の衝撃を受けたが、被害はなかった。

ポルト・ディ・レバンテ港では、沢山の人が急に波が港に入ってくるのを見た。嵐で発生したような波であったが、当時は晴れで風もなかった。波の振幅は0.5mほどであった。

0.5m くらいの波は北隣のリパリ島でも観察された。」

Maramai, A., L. Graziani and S. Tinti; Updating and revision of the European tsunami catalogue, in Submarine Landslides and Tsunamis edited by Yalciner, A. C. et al., 25 ~ 32, 2003.

付録2 崖崩落による津波発生

ITIC (International Tsunami Information Center) が運営している Tsunami Bulletin Board に、2015年11月18日2時40分付で、

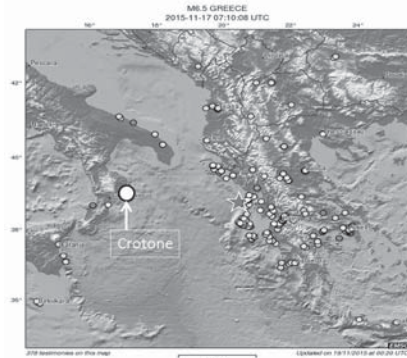
「M6.2 earthquake and tsunami (?) in Greece recorded by a tide gauge station in Italy」と題する投稿が現れた。投稿者は Dr. Aggeliki Barberopoulou であるが、それに添付されたのが、崖崩れで津波が発生したと思われる写真で meteonews からのものとされている。

投稿者が紹介する USGS (アメリカ地質調査所) 及び EMSC (ヨーロッパ地中海地震学センター) のホームページから、此の地震の

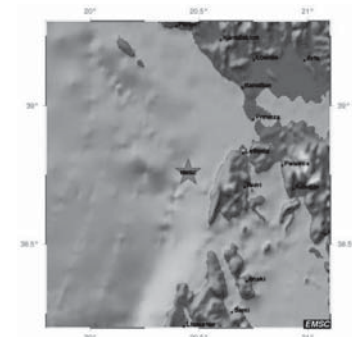
概略を探ると、2015年11月17日7時10分 (UTC 世界協定時) に、M6.5 (USGS) または M6.2 (EMSC) の地震がギリシャ西海岸で発生した。その震源は EMSC によれば図の星印の地点で、Lefkas 島の東側中央部に位置する Nidri の西北西 14km の海上であった。余震の分布状況から、SW-NE 方向の右ずれ



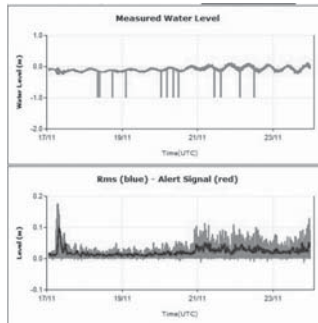
付録写真-1 崖崩れによる津波発生



付録図-2 周辺地図 (星印が震源) (google map より作成)



付録図-3 Lefkas 島と震源 (google map より作成)



付録図-4 Crotona の潮位記録

断層が生じたものと思われる。

このとき、Lefkas 島の西岸で生じた崖崩れが、写真で示されたものである。

ところで、投稿者の云うには、震源から 290km ほど西側のイタリア・Crotona で津波らしきものが記録されたという。その記録を投稿者の紹介するホームページで探したのが、付録図-4 である。

11 月 17 日の 8 時頃、20cm 弱の振動が見られる。しかし、崖崩れで発生する津波は、その極く周辺では 100m 近くにも立ち上がるが、崖から 10km も離れると、殆ど目立たなくなるのが通常である。崖崩れで発生した局地的な津波が 300km 以上離れたところに到達するとは考えられないし、地震は横ずれ断層だったと云うから、津波発生能力は殆ど期待できない。従って、この波の起源は不明と云わざるを得まい。だから、投稿者は、その題名で tsunami (?) と疑問符をつけたのであろう。

ただそれにしても、写真は崖崩れで津波が発生する瞬間を見事にとらえている。

付録 3 火砕流による津波発生

1994 年 9 月 19 日、ラバウル島の Vulcan 火山が噴火し、火砕流がその北岸に流入した。突入瞬間をラバウル火山観測所から捉えたのが写真 2 である。まだ海面には津波は発生していないとの但し書きが付けられている。

これで発生した後に西村等が堆積物調査か

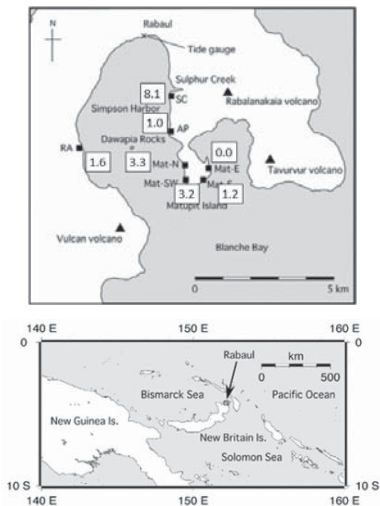
ら推定した津波遡上高を記入したのが、図 6 である。最高は約 10km 離れた地点での 8.1m となっている。

Nishimura Y, Nakagawa M, Kuduon J, Wukawa J.: Timing and scale of tsunamis caused by the 1994 Rabaul eruption, East New Britain, Papua New Guinea, in Tsunamis: case studies and recent developments edited by K. Satake, Springer, New York, pp. 43–56, 2005.

Paris, R., A.D. Switzer, M. Belousova, A. Belousov, B. Ontowirjo, P. L. Whelley and



付録写真-2 火砕流突入の瞬間 (ラバウル火山観測所撮影。Paris et al. より。)



付録図-5 ラバウル Vulcan 火山による津波堆積物発見位置と高さ。西村ほかの図に、Paris et al. を参考として作図。

M. Ulvrova :Volcanic tsunami: a review of source mechanisms, past events and hazards in Southeast Asia (Indonesia, Philippines, Papua New Guinea), *Natural Hazards*, 70, pp. 447-470, 2014.

付録4 原因不明の津波発生

「1832年2月8日 イタリア・カラブリア地方のイオニア海沿岸より15km内陸を震源として地震が発生。Cutro, Policastro, Roccabernarda, Rocca di Netroなどが部分的に破壊された。Crotona, Catanzaroが被災した。犠牲者数は235名である。

Tacina 川河口では海が上昇し, Magliacane 地域を半マイルにわたって浸水した。地震の際, 岸から約1マイルの所で, 海が約70ftの高さに錐状に立ち上がった。」

地震による海底変位が原因かもしれない。しかし, 河口近くであるから川からの堆積物が地滑りを起こして発生した可能性もある。いずれにしても, この短い記述からは特定できない。

Tinti, S. and A. Maramai :Catalogue of tsunamis generated in Italy and in Cote d'Azur, France: a step towards a unified catalogue of tsunamis in Europe, *Annali di Geofisica*, Vol.39, No.6, pp.1253 ~ 1299, 1996.