

2001 年ペルー南部地震津波の災害調査

越村 俊一*・Emile A. Okal**・Lori Dengler***・Jose Borrero****
Vasily Titov*****・Modesto Ortiz*****・Sebastian Araya*****
Brandon Gomer*****・Matthew Swenson*****

2001 年 6 月 23 日にペルー南部海岸を震源として発生したマグニチュード 8.4 の巨大地震は、過去 25 年間の世界中の地震で最大のものであった。この地震により津波が発生し、震源付近の海岸で被害が報告された。この報告を受けて、米国では国立科学財団の助成により国際津波調査団が結成され、震源付近の海岸に沿って津波高さおよび被災状況の調査を行った。本稿では、津波調査から得られた本津波の特徴および沿岸部における被災状況を報告する。調査の結果、津波による被害は震源からおよそ 80 km 南東の街 Camana に集中しており、約 25 km の海岸に沿って平均 5 m の津波が来襲していたことが分かった。

1. はじめに

2001 年 6 月 23 日現地時間 15:33、ペルー南部海岸を震源 (16.26°S, 73.64°W, USGS 発表) とするモーメントマグニチュード (以下 Mw) 8.4 の巨大地震が発生した。この海域は、海洋プレートであるナスカプレートが南米プレートに沈み込むプレート境界型巨大地震の多発地帯であり、同領域では 1604 年、1868 年にそれぞれ Mw 8.7 と Mw 8.8 のイベントが発生している。Harvard 大学発表によると、本地震のモーメント解放量は過去 25 年間の世界中の地震で最大のものであった。この地震により津波が発生し、震源付近の海岸で被害が報告された。この報告を受けて、米国では国立科学財団 (National Science Foundation) の助成により国際津波調査団が結成され、震源付近の海岸に沿って津波高さおよび被災状況の調査を行った。本稿では、津波災害調査から得られた本津波の特徴および沿岸部における被災状況を報告する。また、震源付近海域を対象として津波の数値解析を行い、調査結果と併せて本津波の特徴を議論する。

2. 現地調査

2.1 調査概要

調査は、2001 年 7 月 5 日から 15 日の 11 日間にわたって行った。調査団のメンバーは、米国の地震・津波研究者が 7 名、メキシコから 1 名、ペルーから 3 名、日本から 1 名という構成であった。調査項目は、津波高さ、津波浸水域の測定、被災状況の把握、(人的・物的) 被害の調査、津波の目撃者に対する聞き取り調査である。調査

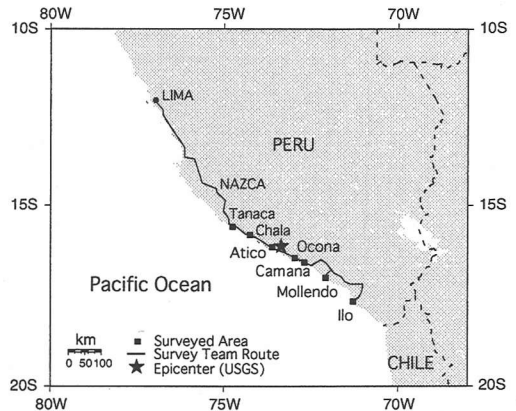


図-1 ペルー南部地震津波災害調査の行程

対象領域は、首都 Lima のおよそ 370 km 南東にある Tanaca から、チリとの国境近い Ilo までのおよそ 380 km の海岸線である。図-1 に、調査団の調査行程を示す。調査の実施地点は図中の■で示してある。

2.2 津波の来襲状況

津波はペルー海岸をはじめ、南米大陸の太平洋沿岸で観測された。図-2 に検潮所で観測された津波の来襲状況を示す。図中の () 内の値が観測された津波の全振幅 (cm) である。津波来襲時の潮位はペルー・チリ海岸において干潮であった (潮位差約 1.3 m) ため被害には結びつかなかったようである。津波波源域に最も近い検潮所は Matarani であった。図-3 に Matarani における地震発生前後約 1 か月間の水位変動を示す。これから地震前と地震後の平均海面を計算すると、地震後の平均海面は地震前に比べ 15 cm 上昇しており、ここでは地震により 15 cm の地盤沈降が発生したと解釈できる。

ペルーの太平洋岸において津波の痕跡が認められたのは Atico から Ilo に至る 300 km の海岸線であった。表-1 に各地の津波来襲状況を示す。目撃証言によると、各地の津波の来襲状況は最も被害の大きかった Camana を除き類似している。すなわち、地震後 10 から数 10 分の

* 正会員	博士(工)	人と防災未来センター
**	Ph.D.	ノースウェスタン大学教授
***	Ph.D.	フンボルト州立大学教授
****	Ph.D.	南カリフォルニア大学工学部
*****	Ph.D.	米国海洋大気局
*****	Ph.D.	メキシコ海洋局
*****		フンボルト州立大学
*****		ノースウェスタン大学地学部
*****		南カリフォルニア大学

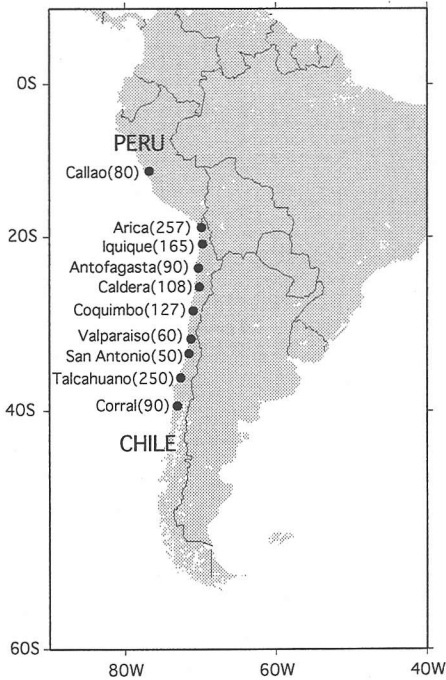


図-2 南米太平洋岸の津波来襲状況

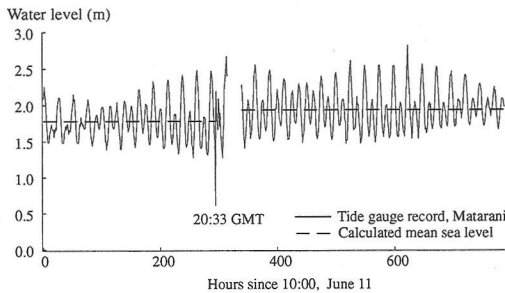


図-3 検潮記録から得られた Matarani の地盤変動量

表-1 ペルー南部太平洋岸における津波来襲状況

場所	測定津波高	備考
Tanaca/Chara	Not measured	地震後の引き波のみ被害なし
Atico	3 m	被害なし
Ocona	<7 m	地震後の引き波のみ被害なし
Camana	>5 m	引き波初動, 第2, 3波目最大津波による建物被害 2500 以上 2500 ヘクタール浸水 死者 24 名, 行方不明者 62 名
Quilca	4 m	引き波初動 漁港に浸水被害
Mollendp	Not measured	地震後の引き波のみ被害なし
llo	Not measured	地震後の引き波のみ被害なし

間海面が低下し、その後比較的小さな押し波の後通常の海面に戻ったという状況であった。

3. Camana での津波とその被害

3.1 津波の来襲状況

Camana 地区の人口は 53000 人で、主な産業は農業、漁業、観光業である。特に海岸部にはリゾートホテルやレストランが建ち並び、夏には 5000 人以上の観光客が訪れる。津波は、およそ 25 km にわたって続く平坦な海岸を襲った。図-4 に計測した津波高分布と陸上遡上距離を示す。図中の四角で囲った地域はそれぞれ (1) リゾート区域、(2) リゾート/農地混在、(3) 農地、という属性である。測定津波高は平均で約 5 m、最大は 8.8 m であった。また、津波の陸上遡上距離は、平均で 500 m、最長で 1400 m におよんだ。

目撃証言によると、地震発生後海面の低下が発生し、15 分以上継続した。その直後の押し波はさほど高くなく、水際から約 50 m 陸側にある道路(海面から約 3 m の高さ)を越えることは無かった。甚大な被害を及ぼしたのは続いて来襲した第 2, 3 波であった。



写真-1 La Punta における津波による建物被害例



写真-2 津波により流失した煉瓦造りの家屋

3.2 津波被害

Camana の海岸では、約 2500 ヘクタールの農地が浸水し、2500 棟の建物が被害を受けた。最も被害が大きかったのは、La Punta であった。ここでは、平坦な海岸にリゾートホテルやレストランが建ち並んでいる。写真-1 は津波による被害を受けた建物の例である。これは 3 階建ての鉄筋コンクリート造りのホテルで、海岸線からおよそ 70 m 陸側にある。写真中の点線は津波の痕跡高さを示しており、地震発生時の海面からの高さは 7.2 m であった。津波は建物の 2 階部分まで浸水していた。海岸地区の建物は、次の 2 つのタイプに分類される。

(1) 日干し煉瓦および竹製のバラック。農業地区の建物のほとんどがこれである。一部の煉瓦造りの家屋は地震動により倒壊し、津波氾濫流によっても流失した(写真-2)。

(2) 鉄筋コンクリート造り(ホテル・レストラン等)。リゾート地区では建物のほとんどが築 10 年以内の鉄筋コンクリート造りであった。鉄筋コンクリート造りの建物は地震による被害を免れ、基礎部に洗掘がみられたものの(写真-3)、津波の氾濫流にも耐えた。

この津波による人的被害は、死亡者 24 名、行方不明者 62 名、負傷者 41 名である。津波に被災したのは、主に海岸で暮らした経験の少ない農業従事者とホテル・レストランの管理人等であった。津波の規模に対する人的被害は比較的少ないといえるが、その一因として当地震津波の発生時期が冬であったことが挙げられる。また、地震後の津波の引き波初動を目撃した住民の多くは、地震の

表-2 Camana における津波による人的・物的被害

地区	死者	行方不明者	負傷者	家屋被害	
				損傷	倒壊
(1)	17	60	25	430	2500
(2)	4	0	16	30	115
(3)	3	2	0	300	300
計	24	62	41	760	2915

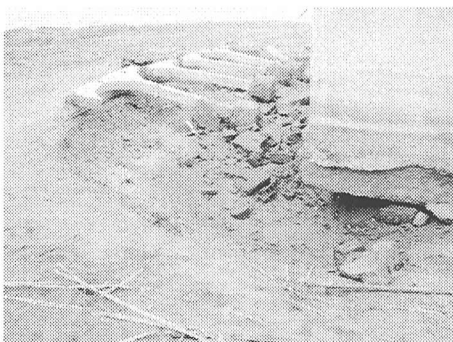


写真-3 津波の氾濫流による建物基礎部の洗掘

後に水が引いたら津波が来ることを知っており、自主避難を行っていたことが分かった。表-2 に、Camana 地区における津波による人的・物的被害の詳細を示す(各地区の位置は図-4 を参照)。

4. 津波の発生と伝播の数値解析

ここでは、震源付近海域を対象として実施した津波の数値解析結果と先述の調査結果に基づき、津波伝播の全体像を議論する。

4.1 地震断層モデル

菊池・山中(2001)は、24 点の広帯域実体波記録から、本地震の断層モデルとして北東南西圧縮の逆断層解を得た。彼らは、150 km×240 km の想定断層を 30 km×30 km の副断層に分割して、それぞれの副断層(セグメント)におけるモーメント解放量を求めた。ここでは、彼らの解析結果に基づき、Okada(1985)の理論式を用いて海底地盤変動を計算し、津波数値解析の初期条件とする。表-3 に菊池・山中(2001)による断層パラメータを示す。

表-3 2001 年ペルー南部地震断層パラメータ

Epicenter	16.14°S, 75.31°W
(Strike, Dip, Rake)	(309, 21, 61)
Depth	30 km
Seismic moment	2.2×10^{21} Nm

図-5 に、菊池・山中(2001)の解から求めた断層面上の滑り量分布を示す。図中の数字は各セグメント上の滑り量である。震源から 150 km 南にアスペリティの山がみられる。図-6 は図-5 の滑り量分布から求めた海底地盤変動量分布である。ただし、遠地実体波を用いた菊池・山中(2001)の解析手法では、断層の絶対的位置の推定精度に限界があるため、断層の位置に関しては、菊池・山中(2001)の解より 20 km 北西に平行移動して Matarani で観測された地盤沈降との矛盾が生じないように決定した。

4.2 計算結果

津波の伝播計算には、支配方程式として線形長波理論を採用し、陸側の境界条件は完全反射とした。海底地形データは、Smith・Sandwell(1997)の 2 分間隔のグリッドデータを 1 分間隔に補間したものを作成した。

図-7 に、水際で求めた最大津波高さと現地調査から得られた津波打ち上げ高との比較を示す。津波は Camana を中心とした 50 km 以下の海岸線に集中しており、両者は定性的によい一致を示している。著者が地震発生直後に均一滑りの断層モデルで行った計算結果[Koshimura, 2001]にはこの傾向は見られなかった。このことから、津波のエネルギーが Camana に集中した原

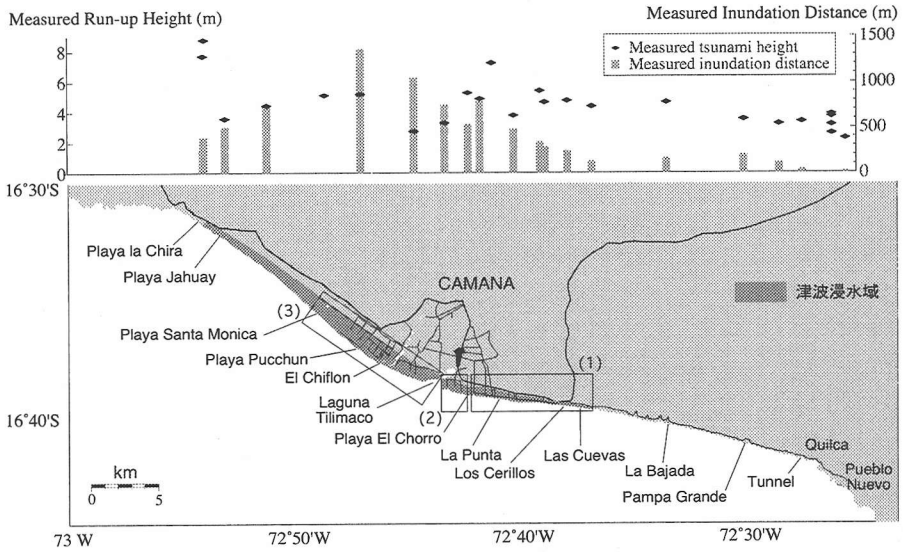


図-4 Camana における津波遡上高分布と陸上遡上距離

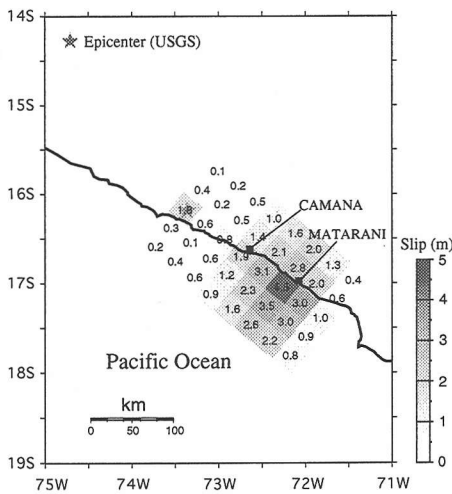


図-5 ペルー南部地震断層の滑り量分布

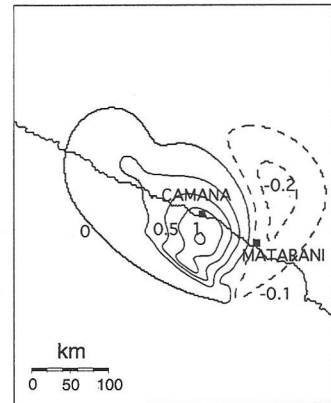


図-6 地震による海底地盤変動量分布

因が、断層面上の強いアスペリティ分布によるものであることが説明できる。

図-8 は、Camana, Arica における計算波形である。Arica の波形は、観測波形も示してある。Camana は断層運動により隆起するために、津波の初動は引きとなる。その後、押し波が続き第2波目が最大となる。この特性は現地で得られた証言と調和的である。一方、Arica における計算結果を見ると、津波の到達時刻に若干の差が認められ、観測波形にみられる高周波成分が再現されていない。本研究で使用している海底地形データの精度と解像度に起因した誤差であると考えられるが、この原因の解明は今後の課題である。

5. おわりに

調査で得られた本津波の特徴を以下に列挙する。

(1) 海岸において津波の痕跡が認められたのは、震源付近の街 Atico から Ilo に至る 300 km の海岸であった。地震の規模に対して津波の打ち上げ範囲が非常に狭いことが分かった。

(2) 津波の被害は震源からおよそ 80 km 南東にある Camana に集中しており、25 km にわたる海岸に沿って平均 5 m の津波が来襲し、浸水は海岸線から最長で 1.4 km に及んだ。最大遡上高さはおよそ 9 m であった。Camana の海岸は平坦な砂浜が 1 km 以上の幅で広がっており、土地利用はホテル、レストランを含めたリゾート地と農業用地に分かれている。津波浸水域は 2500 ヘクタールに及び、地震と津波による倒壊家屋は 2500 棟に及

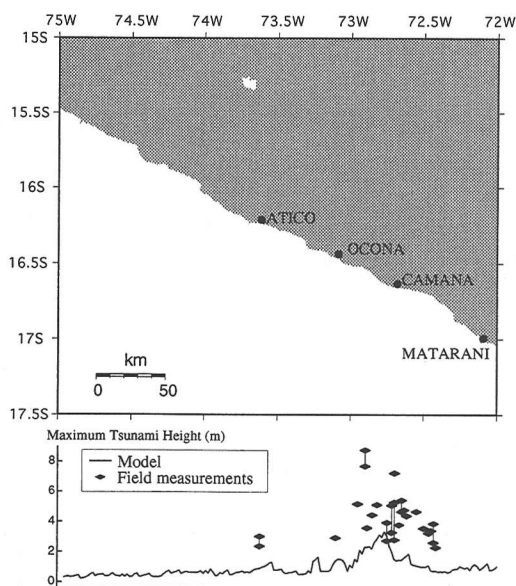


図-7 数値解析結果と実測値との比較

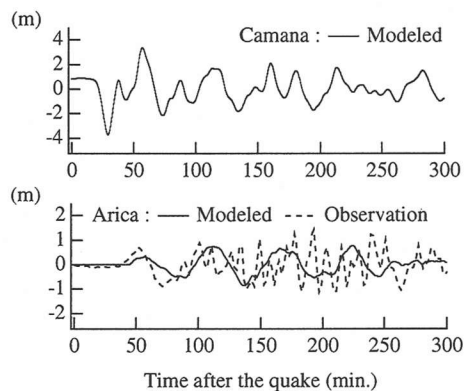


図-8 Camana と Arica における計算波形

んでいることが分かった。倒壊した家屋は、簡素な煉瓦造りの家がほとんどで、鉄筋コンクリート造のホテルは地震動と津波による倒壊を免れた。

(3) Camana における人的被害は津波によるものだけであった。報告された死者の数は 24 名、行方不明者は 62 名であった。イベント発生時においてペルーは冬であっ

たため、観光客はほとんどいなかった。被災したのは、ホテルやレストランの管理者と農業従事者であり、海岸で暮らした経験のない人々だった。この津波が夏の観光シーズンに発生していれば、被害はさらに甚大なものであったことが推測できる。

(4) 目撃証言から、Camana における津波の初動は引き波であったことが分かった。その後 4 度にわたり津波が来襲し、最大波は 2, 3 波目に来襲していた。初動が引き波であったことにより、住民は異変に気づき、自主的に避難を行う時間的余裕があったことが人的被害の軽減につながった。避難した住民は、地震後の大きな引き波が津波来襲の前兆であることを知っており、防災教育の重要性が確認できた。

(5) 菊池・山中 (2001) による断層モデルに基づいて得られた津波の数値計算結果は、現地調査で得られた津波高分布と調和的で、Camana における計算波形も目撃証言を裏付けるものであった。断層面上の滑り量は断層の南側に集中しており、断層滑りの強い不均一性がペルー南岸の津波高さ分布に大きく寄与していることが分かった。

謝辞：本研究の一部は米国 National Science Foundation (代表者：Emile A. Okal) の援助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 菊池正幸・山中佳子 (2001): EIC 地震学ノート, No. 105, 東京大学地震研究所ホームページ [http://www.eri.u-tokyo.ac.jp].
- Koshimura, S. (2001): Modeling a tsunami generated by an earthquake of Mw 8 in Peru, [http://www.pmel.noaa.gov/koshi/peru/].
- Okada, Y. (1985): Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 4, pp. 1135-1154.
- Okal, E. A., L. Dengler and International Tsunami Survey Team (2002): Field Survey of the Camana, Peru Tsunami of June 23, 2001, *Seismological Research Letters*, submitted.
- Smith, W. H. F., and D. T. Sandwell (1997): Global Sea Floor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings, *Science*, 277, pp. 1956-1962.