土木学会論文集B2（海岸工学）
Vol. 66，No.1，2010，1366-1370

2009年サモア諸島沖地震津波の米領サモアにおける津波高さおよび被害の調査

A rapid-response field survey of the 2009 Samoa earthquake tsunami in American Samoa

行谷佑一[1]・越村俊一[2]・西村裕一[3]・中村有吾[4]
Gerard Fryer[5]・Akapo Akapo[6]・Laura S. L. Kong[7]

Yuichi NAMEGAYA, Shunichi KOSHIMURA, Yuichi NISHIMURA, Yugo NAKAMURA
Gerard FRYER, Akapo AKAPO and Laura S. L. KONG

A field survey of the 2009 Samoa earthquake tsunami was conducted on Tutuila Island, American Samoa, within a week of the event. At the western end of the island, the largest runup height was measured to be 16.3 m and almost all buildings were completely destroyed and/or washed away. In the east, runup or inundation heights were smaller (2-6 m), but buildings were severely damaged. At Pago Pago, main town of the island, inundation heights were around 4.5 m, and inundation limit is about 600 m from the coastline. The tsunami arrived 5-10 minutes after the mainshock. The death toll was low, because federal and territorial governments had together carried out an extensive public education program to explain tsunami hazard.

1. はじめに

2009年9月29日17時48分頃（UTC），南太平洋のサモア諸島沖のトンガ海溝付近で，Mw8.1（Global CMT）の地震が発生した（図-**1**（a））．USGS（オンラインa）によれば，この地震は正断層型で，トンガ海溝において沈み込む太平洋プレート内で発生した地震であった．震源の深さは18kmである．震源から約200km以内の範囲には，震源域を取り囲むように米領サモア，サモア独立国，およびトンガ国が存在し，それぞれで強い揺れを感じた．

この地震に伴い津波が発生し，Pago Pago（米領サモア）の検潮所で片振幅約2.4mの津波，およびApia（サモア独立国）で同0.8mの津波が観測された．トンガ国も含めたこれらの地域では，津波により死傷者や建物流失などの甚大な被害がもたらされた．

一般的に，陸域に遡上した津波の高さや被害についての情報は，壁に付いた浸水線およびデブリなどの痕跡と，人々の目撃証言などを頼りに得られる．これらの情報を沿岸各地で詳細に得ることは，津波の波源に関する知見や，伝播および遡上のメカニズム，被害の発生過程などを理解する上で重要である．しかしながら，これらの情報は時が経つにつれ急速に劣化が生じ，後になるほど判然としない証拠となってしまう．

このため，できるだけ速やかに現地調査を行うことで，沿岸各地の津波の高さや被害の状況などを把握する必要があった．そこで，本研究では，津波来襲直後に米領サモアのTutuila島で現地調査を行い，津波高さや被害状況の調査を行った．なお，この島ではJaffeら（2010）やUSGS（オンラインb）による調査結果もあるので，そちらも参照されたい．

2. 調査内容

（1）調査地および調査日程

米領サモア最大の島であるTutuila島は人口約5.5万人で，東西約30kmに延びる細長い島である．われわれは地震発生の6日後である2009年10月5日から8日にかけての4日間，この島を全島にわたり津波調査を行った．

調査日程が限られていることから，効率的な調査スケジュールを組む必要がある．このため，調査前に津波の伝播計算を行い，計算波高分布と人口分布とを比較することで，島の中での被害甚大地域を予測した（Koshimura，オンライン）．この他，DigitalGlobe社による津波来襲直後の衛星写真も入手し，被害を受けた地域を検討した．

このように事前に調査すべき地点を検討したことにより，効率的な調査スケジュールを組むことができた．この結果，調査を行った地点は50地点に及んだ．

1	正会員	博（工）	産業技術総合研究所研究員　活断層・地震研究センター
2	正会員	博（工）	東北大学准教授大学院工学研究科
3		博（理）	北海道大学助教大学院理学研究院
4		博（地）	北海道大学理学研究院研究員大学院理学研究院
5		Ph.D	Pacific Tsunami Warning Center, NOAA
6			National Weather Service, NOAA, American Samoa
7		Ph.D	International Tsunami Information Center, UNESCO/IOC-NOAA

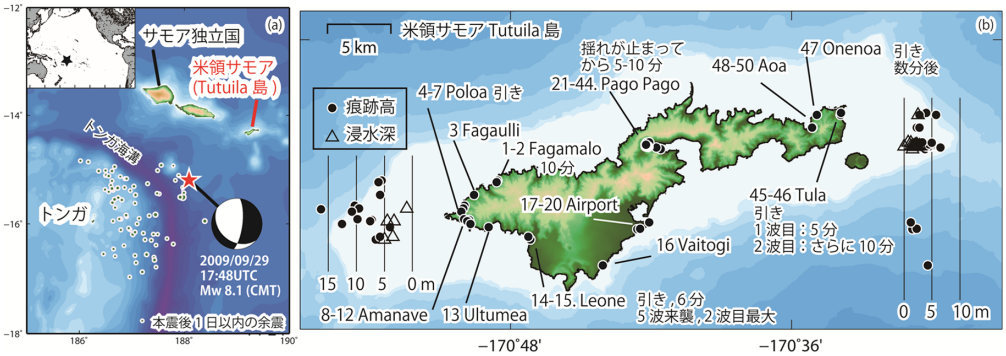

図-1　(a) 震源域の位置および地震のメカニズム解．(b) 本調査で行った津波痕跡高の調査結果．地形データはNOAA（オンライン）を用いた．「引き」とあるのは最初海面が引いた旨の証言が得られた地点を表し，時間は地震発生から1波目（押し波）が到達するまでの時間を表す．地点1～15は左側のグラフを，地点16～50は右側のグラフを参照されたい．

（2）調査項目

まず，壁に残された浸水線や地面に残されたデブリといった津波の痕跡を探した．この他，現地の復旧作業に支障をきたさない程度に住民から聞き取り調査を行い，津波の高さなどに関する情報を収集した．これらの情報を基に，海面を基準にしてトータルステーションにより痕跡高や浸水深（地面からの高さ）を測定した．ここで痕跡高とは，津波来襲時の海面からの高さである浸水高や遡上高を意味する．

痕跡高についてはPago Pagoにおける検潮記録を用いて，津波来襲時と測定時の潮位補正を行った．ただし，後述のUltumeaおよびAmanaveにおいては，測定時の潮位が欠測であったために，推算潮位を用いて補正した．

測定値の信頼性については，首藤・卯花（1984）を参考に，各測定値に対して4段階の信頼度を評価した．ただし，今回の測定はトータルステーションを用いていることから測定誤差は無視しうるものと考えられるため，痕跡などの信頼性を基に信頼度を評価した．すなわち，津波の痕跡が明瞭であるか，あるいは住民の証言が具体的である場合にはもっとも信頼できる意味の信頼度Aを与えた．痕跡がやや不明瞭ながら，住民の証言がそれを裏付けるものを信頼度Bとした．痕跡が比較的不明瞭でかつ住民の証言も具体性を欠く，あるいは得られなかった場合には信頼度Cとした．その他，台風や高潮などによる痕跡と区別がつかないような場合に信頼度Dとした（本調査では信頼度Dに該当するデータはなかった．）．

このほか，建物の被害状況についても調査を行った．住民からは，地震発生時，津波に対してどのような避難行動をしたかなどについても聞き取り調査を行った．

3. 調査結果

痕跡高や浸水深についてまとめたものを図-1 (b) および表-1に示す．ただし，表-1で浸水深が0.0mのものは遡上高を意味し，それ以外は浸水高を意味する．これによれば，震源域に面したTutuila島西部（FagamaloからLeoneにかけて）でおおよそ5m以上の痕跡高が測定された．とくに島西端部では10mを越える地点が存在し，最大の高さはPoloaで16.3mを測定した．一方，島の中部や東部（VaitogiからAoaにかけて）ではおおむね5m以下の浸水高および遡上高であり，島西部に比べ津波の高さは小さかった．聞き取り調査により，いずれの地点も地震による建物被害はほとんどないことから，被害のほとんどは津波より生じたと考えられる．以下に各地の調査結果を記す．なお，Poloa，Amanave，およびLeoneでは，U.S. Army Corps of Engineers（2006）による地形図を用いた（図-2，3，および4）．

（1）各地の痕跡高および被害

a）Fagamalo（地点1-2）

津波の浸水に伴うデブリが確認され，5.5-6.0mの遡上高が測定された．そのデブリの位置まで津波が浸水したことが証言からも得られた．ここでは全壊や流失した家屋は無かったが，いくつかの家屋では津波による破損が見られた．地震発生後10分程度で津波が来襲した．

b）Fagaulli（地点3）

石垣の途中にデブリが存在し，その石垣よりも海側に位置する木が，そのデブリの高さまで枝が枯れたり折れたりしていた．デブリの高さを測定したところ，遡上高は5.7mであった．この集落は石垣の上に立地するため，津波による被害はなかった．

c）Poloa（地点4-7）

この集落では，本調査で最も大きな痕跡高を記録した．すなわち，地点6では崖の上に生える植物が津波により枯死した様子が明瞭に観察され（図-2，写真-1 (a)），遡上高は16.3mと測定された．このほか，デブリによる痕跡（地点4および7）や教会の内壁に残された浸水線（地点5）などから9.5-10.9mの痕跡高が測定された．この周

表-1　津波痕跡高調査結果

No.	地点名	緯度,度	経度,度	浸水深,m	痕跡高,m	信頼度	主な証拠
1	Fagamalo	-14.297330	-170.809520	0.0	5.5	A	DB
2	Fagamalo	-14.298400	-170.809900	0.0	6.0	B	DB
3	Fagaulli	-14.307211	-170.826173	0.0	5.7	A	DB
4	Poloa	-14.314650	-170.832900	0.0	10.1	A	DB
5	Poloa	-14.316501	-170.833735	1.0	9.5	A	WM
6	Poloa	-14.317260	-170.834200	0.0	16.3	A	BB
7	Poloa	-14.318963	-170.835087	0.0	10.9	A	DB
8	Amanave W.	-14.324100	-170.833070	0.0	9.8	A	ER
9	Amanave C.	-14.324620	-170.829620	0.0	7.3	A	DB
10	Amanave C.	-14.325360	-170.830520	3.3	7.8	A	BB
11	Amanave C.	-14.325560	-170.830840	4.6	7.6	A	BB
12	Amanave E.	-14.327240	-170.828690	0.0	12.4	A	DB
13	Ultumea	-14.329490	-170.815600	0.0	4.0	A	DB
14	Leone	-14.336172	-170.787553	3.5	5.7	A	WA
15	Leone	-14.338093	-170.786106	4.9	6.4	A	WA
16	Vaitogi	-14.355940	-170.734450	0.0	4.2	A	DB
17	Airport	-14.331050	-170.709880	0.0	1.6	A	DB
18	Airport	-14.330990	-170.709430	0.0	1.7	A	DB
19	Airport	-14.330740	-170.707760	0.0	2.3	A	DB
20	Airport	-14.326390	-170.701310	0.0	1.4	A	DB
21	Pago Pago	-14.275600	-170.693131	1.5	3.6	A	WM
22	Pago Pago	-14.274529	-170.696233	0.0	6.6	A	DB
23	Pago Pago	-14.273844	-170.701940	0.0	4.8	A	DB
24	Pago Pago	-14.273899	-170.702780	1.9	4.4	A	WM
25	Pago Pago	-14.273306	-170.703188	2.3	4.5	A	WM
26	Pago Pago	-14.273380	-170.703226	2.5	4.6	A	WM
27	Pago Pago	-14.273559	-170.703285	1.7	4.6	A	WM
28	Pago Pago	-14.273584	-170.703840	1.2	4.6	A	WM
29	Pago Pago	-14.273810	-170.704043	0.1	4.1	B	WA
30	Pago Pago	-14.272425	-170.703792	2.4	4.5	A	WM
31	Pago Pago	-14.271290	-170.702990	1.4	5.1	A	WM
32	Pago Pago	-14.271010	-170.701460	0.8	3.2	B	WA
33	Pago Pago	-14.273700	-170.702090	2.4	-	A	WM
34	Pago Pago	-14.273800	-170.702850	2.1	-	A	WM
35	Pago Pago	-14.273530	-170.702900	2.4	-	A	WM
36	Pago Pago	-14.273470	-170.703020	2.3	-	A	WM
37	Pago Pago	-14.273350	-170.703140	2.4	-	A	WM
38	Pago Pago	-14.273300	-170.703380	1.7	-	A	WM
39	Pago Pago	-14.273740	-170.703280	2.1	-	A	WM
40	Pago Pago	-14.273750	-170.703700	1.2	-	A	WM
41	Pago Pago	-14.273620	-170.703830	1.5	-	A	WM
42	Pago Pago	-14.273310	-170.703990	1.8	-	A	WM
43	Pago Pago	-14.273130	-170.703220	2.8	-	A	WM
44	Pago Pago	-14.272660	-170.703720	2.0	-	A	WM
45	Tula	-14.251966	-170.564962	2.5	5.8	A	WM
46	Tula	-14.250678	-170.564680	0.0	4.0	C	BB
47	Onenoa	-14.252001	-170.581999	0.0	2.7	C	WA
48	Aoa	-14.260721	-170.585117	0.0	2.3	A	DB
49	Aoa	-	-	0.0	2.4	A	DB
50	Aoa	-14.260887	-170.585285	0.0	2.6	C	WA

証拠欄で，DB，WM，WA，BB，およびERはそれぞれデブリ，浸水線，目撃証言，植物の折れや枯死，および土壌浸食を意味する．またNo.49の位置はNo.48の位置から海岸方向に約4 m 程度離れた所である．

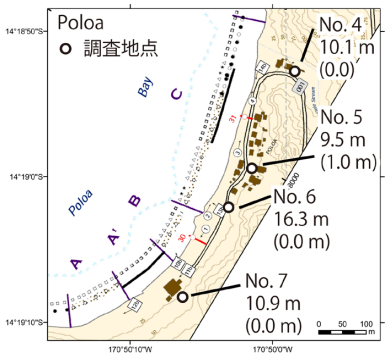

図-2　Poloaでの津波痕跡高測定位置．地点番号の下の数値は痕跡高を表し，括弧内の数値は浸水深を表す．以下，図-3，および4も同様である．

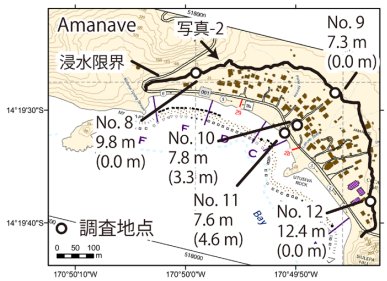

図-3　Amanaveでの津波痕跡高測定位置および浸水限界

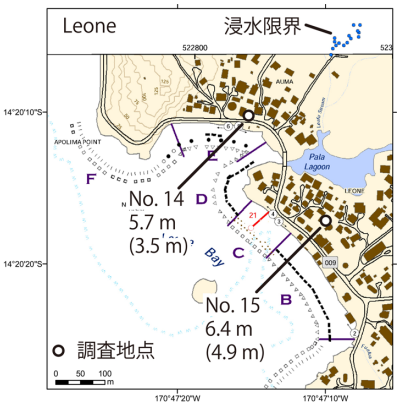

図-4　Leoneでの津波痕跡高測定位置および浸水限界

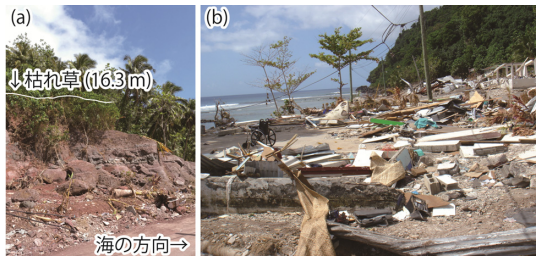

写真-1　（a）最大遡上高を記録したPoloaの状況（地点6）（b）Poloaでの被害の様子．

辺では**写真-1**（b）にあるようにほとんどの建物が破壊・流失され，壊滅的な被害を受けた．聞き取り調査によれば，最初海面が引いた後，津波が来襲した．

d）Amanave（地点8-12）

Poloaの南に位置するAmanaveでは，浸水限界の位置情報をGPSにより測量した（**図-3**）．浸水限界の認定は，急斜面上では**写真-2**で示されるように土壌浸食および植生ダメージなどに基づき，緩斜面および平坦地ではデブリや堆積物の分布に基づいた．その結果，最大で250m程度内陸に浸水し，遡上高は7.3-12.4mであることがわか

写真-2　図-3の矢印部から撮影したAmanaveの様子．矢印部は土壌浸食を表す（本文参照）．

った（地点8，9，および12）．浸水域中央部に位置する地点10および11では，木の枝の損傷状況（枝折れ，樹皮はげ）から7.6-7.8mの浸水高であることがわかった．

e）Ultumea（地点13）

この集落では，浸水限界付近にデブリが堆積しており，4.0mの遡上高が測定された．

f）Leone（地点14-15）

聞き取り調査によると，津波は全部で5回来襲し，このうち2番目の波が最大で，このとき家屋の1階と2階の間の庇まで海水が上昇した（写真-3，図-4，地点14）．ここでの浸水高は5.7mであった．このほか，津波が浸水したので木の上に昇り難を逃れた住民がおり，それによれば6.4mの浸水高であった（地点15）．

デブリの分布などから浸水限界を測量したところ（図-4），海岸線から250m程度奥まで浸水したことがわかった．この集落の中心には小さな河川（沼に近い）が存在するが，この沿岸での建物の全壊・流失が激しかった．しかし，浸水域内で破壊や流失を免れた建物も混在した．

聞き取り調査によれば，まず海面が引き，その後押し波が来襲した．地震発生から押し波来襲までは，6分程度の時間であった．

g）Vaitogi（地点16）

浸水限界付近にデブリが堆積しており，4.2mの遡上高が測定された．

h）Airport（地点17-20）

津波来襲の同日に撮影されたDigitalGlobe社による衛星写真に，津波が空港の滑走路に浸水し，デブリが残された様子が写されている．デブリの位置は浸水限界と考えられ，空港当局に許可を戴き滑走路内で遡上高の調査を行った．その結果が図-5であり，1.4-2.3mの遡上高であった．

写真-3　Leoneにおける家屋の浸水状況（地点14）

i）Pago Pago（地点21-44）

この集落は米領サモア最大の町であり，建物や人口の密度が高い地域である．海辺に近い所ほど，建物の全壊および流失が激しく，調査時は腐敗臭がひどかった．

ここでは，残された浸水線や目撃証言などによる痕跡高を高密度に測定した．また，デブリの位置を踏査することにより，浸水限界の位置を測定した．

その結果が図-6である．津波は最大で600m程度内陸にまで浸水した．痕跡高は3.2-6.6mに及び，浸水域の中央部ではおおむね4.5m程度の浸水高であった．浸水深は2m程度であった．ただし，図-6の中央に走る道路よりも海側では，建物の流失が激しく，浸水線等が確認しにくい状況であった．建物の被害については，越村ら（2010）に詳しい．なお，聞き取り調査によれば，地震の揺れが止まってから5-10分で津波が来襲した．

j）Tula（地点45-46）

島東部に位置するこの集落では，壁に残された浸水線から5.8mの浸水高および2.5mの浸水深を測定した．破壊を受けた建物が多数存在し，地面にはサンゴの破片や

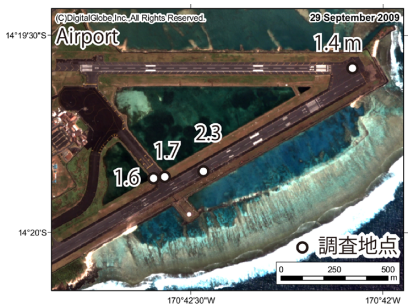

図-5　Airportでの津波遡上高測定位置．地点名は省略

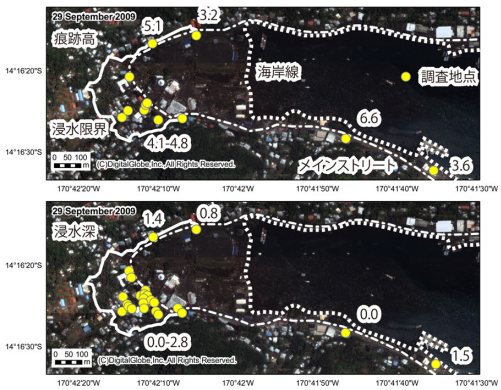

図-6　PagoPagoでの津波痕跡高測定位置および浸水限界．数字は痕跡高あるいは浸水深を表し，単位はmである．

礫，砂などが大量に残っていた．聞き取り調査によれば，最初海水は引き，地震の約5分後に第1波が来襲し，さらに10分後に第2波が来襲した．第1波はゆっくりとだんだん水が上がってくるように来襲した．

k）Onenoa（地点47）

聞き取り調査による浸水限界での高さを測量すると，2.7mの遡上高であった．ここでは，最初に海水が引き，地震の数分後に第1波が来襲した．

l）Aoa（地点48-50）

聞き取り調査や残されたデブリの位置などから，2.3-2.6mの遡上高であった．

（2）住民の避難行動

米領サモアのTutuila島では，大きな津波により建物などが甚大な被害を受けた．これに対し，死者の数は比較的少なかった．たとえば，同島でもっとも大きな津波が襲った島西端のPoloaでは，死者は1名にとどまった．このような傾向は他の集落でも見られ，同島の人口約5.5万人のうち，死者数は34名であった．

比較的死者数が少なかった理由として，この津波の来襲の直前に行われた啓蒙活動が挙げられる．現地当局（U.S. National Weather Service）は，津波来襲の数ヶ月前に，津波に関する教育活動を全島にわたって行っていた．その中で，津波の脅威に関する知識と，強い揺れを感じたら直ちに高台に逃げるという教訓を普及させた．

実際，われわれが聞き取り調査を行うと，「以前，地震を感じたら高台に逃げよ，と教えられたのですぐに高台に逃げた」と答える住民がほとんどであった．もちろん，ラジオ放送を通じての避難の呼びかけや，津波来襲が現地時間で深夜でなく朝方であったことも，死者数が抑えられた要因の1つではあるが，高台へ避難することが根付いたことが，もっとも大きな要因であったと考えられる．

ところで，2009年10月7日22:03（UTC）にVanuatu沖でMw7.6（USGS）の地震が発生し，PTWCは米領サモアに津波警報を発令した．当時われわれはLeoneで調査を行っている時であり，津波警報を受けて教会の鐘が鳴り続けた．津波来襲予定時刻まで数時間あることがNational Weather Serviceによるラジオ放送にて繰り返し伝えられていた．多くの住民はすぐに避難行動に移り，車で避難を行う住民が多く，道路が渋滞している所もあった．われわれを含め住民が地震を感じることはなかったが，それにも関わらず多くの住民が避難したことは，地震が無くとも津波が来襲する可能性がある，という知識を住民が正しく理解している結果であろう．

4. おわりに

本調査により次の知見が得られた．（1）震源域に直面するTutuila島西端では最大で16.3mの遡上高が測定された．一方，島東端でも最大で6m程度の浸水高が測定された．（2）ほとんどの集落で建物などの流失および全壊被害が甚大であり，特に島西部の集落はほぼ壊滅状態であった．（3）津波はまず引き波から始まり，地震発生から5-10分程度で第1波が来襲したことがわかった．（4）建物被害の割に死者数は少なかった．調査の結果，現地行政機関による啓蒙活動やラジオ放送を通じての避難の呼びかけのおかげで，地震直後に高台に避難する行動が根付いていたことがわかった．

謝辞：本研究の一部はJST・JICA及びRISTEK・LIPI間の地球規模課題対応国際科学技術協力事業，および平成20年度産業技術研究助成事業（プロジェクトID：08E52010a）によって実施されました．

参　考　文　献

越村俊一・郷右近英臣・行谷佑一・西村裕一・中村有吾・G. Fryer・A. Akapo・L. Kong（2010）：数値解析・GIS分析・衛星画像解析の統合による津波被災地探索技術　－2009年サモア諸島沖地震津波災害における実践と検証－，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 66，印刷中．

首藤伸夫・卯花政孝（1984）：1983年日本海中部地震津波の痕跡高，東北大学工学部津波防災実験所研究報告，1，pp. 88-267．

Koshimura, S.（オンライン）：Modeling the Tsunami of 30 September 2009 in Samoa islands, http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/samoa_090930/samoa0930.html, 参照5-19-2010.

Jaffe, E. B., G. Gelfenbaum, M. L. Buckley, S. Watt, A. Apotsos, A. W. Stevens and B. M. Richmond (2010): The limit of inundation of the September 29, 2009, tsunami on Tutuila, American Samoa, USGS open-file report 2010-1018, 27 p.

NOAA（オンライン）：Pago Pago, As 1/3 arc-second MHW Tsunami Inundation DEM, http://www.ngdc.noaa.gov/dem/showdem.jsp?dem=Pago%20Pago&state=AS&cell=1/3%20arc-second&vdat=MHW, 参照5-19-2010.

U.S. Army Corps of Engineers (2006): American Samoa shoreline inventory update III, U.S. Army Corps of Engineers Honolulu District, 74 p.

USGS（オンラインa）：Magnitude 8.1 - Samoa Islands region, 2009 September 29 17:48:10 UTC, http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/recenteqsww/Quakes/us2009mdbi.php, 参照5-19-2010.

USGS（オンラインb）：USGS Scientists in Samoa and American Samoa Studying Impacts of Recent Tsunami, October-November 2009, http://walrus.wr.usgs.gov/news/samoareports.html, 参照5-19-2010.