

# 1998 年パプアニューギニア地震津波の波源に関する考察

藤間 功司\* ・松富 英夫\*\* ・都司 嘉宣\*\*\*  
河田 恵昭\*\*\*\* ・高橋 智幸\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

1998 年 7 月 17 日にパプアニューギニア (PNG) で  $M=7.0$  ( $M_w=7.1$ ) の地震が発生した。我が国における経験によると、通常、 $M=7$  の地震では高々 2 m 程度の津波しか発生しない。しかし、PNG の地震は 10 m を越える大きな津波を発生させ、死者 2200 人以上に達する大被害を引き起こした。しかも、地震波の解析から、今回の地震は地震動の強さに比べて大きな津波を引き起こす「ぬるぬる型」の地震ではなく、通常タイプの地震だったことが示されている(谷岡, 1998; 河田ら, 1999)。そこで、今回の地震が  $M=7$  という規模に関らずなぜ大きな津波を発生させたのか、重大な関心が寄せられた。

そのため、著者らを含む国際津波調査団が 1998 年 8 月初旬に第 1 回調査、同年 10 月初旬に第 2 回調査を行い、被災状況、津波高分布、余震分布などを調べた。また、住民への聞き取り調査により津波来襲時間などを把握した(河田ら, 1999; 松富ら, 1999; Davies, 1998)。その後も、1999 年 1 月上旬に調査船「かいらい」による海底地形調査などが行われている(松本ら, 1999; 松山ら, 1999)。

ここでは、PNG 地震津波の発生・増幅機構を解明する第 1 歩として、線形理論解析を用いることにより、様々な初期水位分布から得られる津波高分布と水位経時変化を評価した。そして、現地観測で得られた結果との整合性を調べ、津波の発生原因について検討した。

## 2. 現地観測

現地観測で得られた結果のうち、津波の発生原因を探る上で重要と考えられる事柄は以下の通りである。

① 津波高は、Sissano Lagoon 付近でもっとも高く平均 10 m 程度であり、津波高が平均 5 m を超えたのはその周辺約 30 km の地域である。ただし、被災地の背後は低

湿地であり、津波は海岸付近のこぶ状の地形を越流している。すなわち、今回測定した津波痕跡高は「はい上がり高さ」ではない。過去の津波の高さと比較する際にはこの点に注意する必要がある。

② 余震は海岸線から Sissano Lagoon の沖合い 50 km までの海域で発生しており、地震運動はこの海域内に限られると考えられる。

③ 被災地のほぼ全域で引き初動だったと認められる。

④ 住民の体験談を総合すると、住民は地震を 3 回感じている。1 回目は小さな揺れで、2 回目が最も強い揺れ、3 回目は 2 回目に次いで強い揺れだったようである。津波は 3 回目の揺れとほぼ同時刻に来襲している。それに対し、地震計で観測された強い地震は 2 回ある。本震 ( $M=7$ ) と、その 20 分後に発生した  $M=6.1$  の地震である。本震の前に地震は記録されていない。また 2 回の強い地震の間に  $M=4\sim 5$  の小さな地震が記録されているが、強い揺れとは感じられなかったはずである。したがって、住民の感じた 2 回目の揺れが本震に対応し、3 回目の揺れが本震から 20 分後の  $M=6$  の地震、1 回目の揺れは地震計に記録が残らないような局所的な現象だったと考えるのがもっとも無理がないようである。すると、津波来襲時間は本震からほぼ 20 分後だと考えられる。

⑤ 地震前後で Sissano Lagoon の砂嘴の地盤高が変化したとは認められない。

⑥ 1 波目の周期に関する「最初の引きが 3~5 分続いた」「周期は 10 分以内だった」との証言から、被災地周辺での津波周期は大体 10 分程度と見られる。

## 3. 理論解析

ここでは、PNG 地震津波の被災地周辺を図-1 のように直線海岸と見なし、藤間ら (1999) の理論を使用することにより、波源の位置や波源の長軸・短軸の長さ、使用する関数形の組み合わせなどを変えて約 200 通りの初期水位分布を仮定し、理論解析を行った。そして、津波高分布と汀線水位経時変化を評価し、上記①~⑥の観測事実との整合性を調べ、PNG 津波の波源について考察する。線形理論では、非線形性・分散性などを無視している上、海底地形近似の上で制限があり、また汀線で流量

\* 正会員 工 博 防衛大学校助教授 土木工学教室  
\*\* 正会員 工 博 秋田大学助教授 鉱山学部土木工学科  
\*\*\* 工 博 東京大学助教授 地震研究所  
\*\*\*\* 正会員 工 博 京都大学助教授 防災研究所  
\*\*\*\*\* 正会員 博(工) 京都大学助手 防災研究所

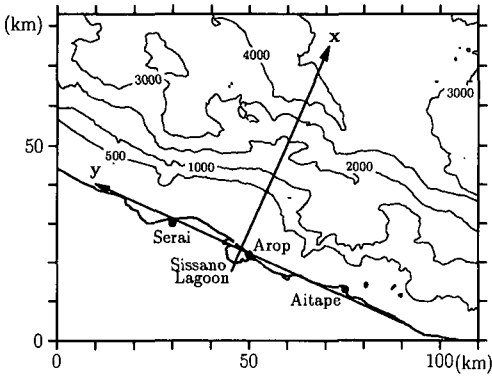


図-1 座標系の設定

がつねにゼロになるなどの問題点もあるが、数値解析に比べて格段に計算が容易なため、様々なパターンを検討し、波源と津波の大まかな関係を考察することが可能である。

藤間ら (1999) の理論は、地形を一様勾配の直線海岸であると仮定し、線形長波理論に基づき、任意形状の有限な初期水位分布からの津波伝播を次式のようにエッジ波解を基本解とした重ね合わせで表す。

$$\eta = \sum_{n=0}^{\infty} 2A_n(k)L_n(2|k|x)e^{-|k|x}e^{iky} \cos(\sigma_n t) dk \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_n = \sqrt{(2n+1)g\alpha|k|}, \quad (n=0, 1, 2, 3, \dots) \dots\dots (2)$$

ただし、 $L_n$  は  $n$  次のラゲール関数を表す。 $\alpha$  は勾配、 $k$  は  $y$  方向の波数である。

計算手順は以下の通りである。

- (1) 初期水位分布  $\eta_0(x, y)$  の数値データを与える。
- (2) 汀線 ( $y$ ) 方向に  $\eta_0(x, y)$  をフーリエ変換し、フーリエ係数  $c_k(x)$  を求める。
- (3) フーリエ変換の結果を使い  $x$  方向に以下の数値積分を施すことにより各成分の係数を求める。

$$A_n(k) = |k| \int_0^{\infty} e^{-|k|x} L_n(2|k|x) c_k(x) dx \dots\dots\dots (3)$$

- (4) 求めた係数を使い、式 (1) により任意地点、任意時刻における水位を計算する。

ただし、汀線から離れた場所で発生した津波の場合、津波のエネルギーの一部が沖側に伝播していくのが普通だが、理論では一様勾配を仮定しているため、一旦沖側に伝播した成分も屈折して汀線に到達してしまう。そのため、汀線から離れた場所で発生した津波に関しては、本理論解析は津波高を過大評価する傾向がある。今回の被災地付近では、沈み込み帯が汀線から 40~50 km の距離まで迫っているため、解析結果を考察する際に、このことを考慮に入れる必要がある。

#### 4. 波源に関する考察

##### (1) 本震で津波が発生した可能性

一山形、一谷形、一山一谷形など様々な初期水位分布を考え、長軸・短軸の長さを 10 km から 100 km 程度まで変化させて解析を行った。使用する関数形などによっても異なるが、波源の長軸が長く汀線までの距離が短いと top-hat 形に近い津波高分布が得られ、波源の長軸が短く汀線までの距離が長いと、ピークが鋭く裾野が広い津波高分布が得られた。

解析を行った中で、高い津波高が現れる地域の広さやピーク付近の尖り具合などが、もっとも実測の津波高分布に近い結果を与えた初期水位分布と、それによって得られる津波高分布、および汀線上  $y=0$  km、 $-20$  km 地点での水位経時変化を図-2 に示す。ただし、勾配 0.04、初期水位変動の最大値を 2.5 m とした。図中、負の初期水位は海面が下降したことを表している。また、津波高は汀線上での最高水位として算出した。

図-2 のモデルは津波高分布の全体形を良好に説明しているだけでなく、上記②③⑤の条件にも適合する。周期に関する情報⑥に対しても大きな矛盾はない。

さらに、図-2 の波源の位置や大きさは地震波解析の結果によく似ている。そこで、このモデルを本震が原因で津波が発生した場合のモデルと位置付け、地震の大きさととの整合性を検討しておく。波源の広さに関しては、図-2 のモデルは地震波解析結果に近いから、地震波解析から得られるすべり量と初期水位変動が釣り合う程度の大きさなら、地震の大きさととの整合性がよいと言える。

しかし、初期水位変動の大きさについて議論する前に、沖側に放出されるエネルギー量について大まかに把握しておく必要がある。図-2 の初期水位分布では、海岸線から沈み込み帯までの海域の中央付近に波源を設定しており、前述の通り、このような場合、本理論解析は津波高を過大評価する傾向があるからである。

さて、海底が水平だとしても沖側に伝わるエネルギーは全体の 50% だから、津波高を 2 倍以上過大評価するとは考えられない。一方、点波源からの波向線の伝播を考えると ( $x=x_0$  の地点から  $x$  軸となす角  $\theta_0$  で放射される波向線を考える)、 $x=L$  より遠くまで波向線が達するのは、放射方向が  $|\theta_0| < \sin^{-1}\sqrt{x_0/L}$  の範囲の波向線である。すなわち、 $x=L$  から沖側が水平床だとすると、全体の  $(1/\pi) \sin^{-1}\sqrt{x_0/L} \times 100(\%)$  のエネルギーが沖側に放出される。 $x_0/L=0.5$  なら、全体の 25% のエネルギーが沖側に放出されることになる。楕円形波源の場合、短軸方向に放出されるエネルギーの方が長軸方向に放出されるエネルギーより多いから、本理論解析の津波高過大評価量は、4/3 倍よりは大きいであろう。結局、津波高の過大評価量

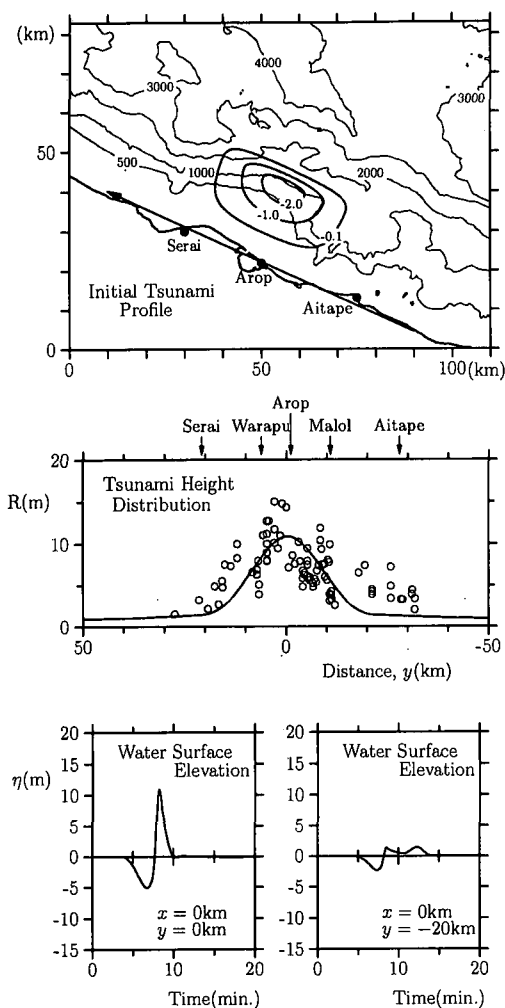


図-2 一谷形の初期水位分布を使用した場合の結果

は4/3倍から2倍の間であると評価できる。すなわち、本理論解析で考慮していない沖側地形の影響を考慮すると、図-2の波源形状で10mの津波高を出すために、3.3mから5mの初期最高水位変動が必要であると考えられる。

今回のPNG地震の地震波解析からは、すべり量約2mという結果が得られているから、上記の数値は、 $M=7$ の地震では考えられない大きさである。ただし、調査船「かいらい」による調査で、Sissano Lagoon 沖合の海底に半島のような地形が発見されており、この地形により津波がSissano Lagoon 付近に集中することが予想される。また、松山・田中(1996)の実験では、海底面に堆積物が存在すると地盤変動に対する水位の応答効率が高くなる結果が得られており、このようなメカニズムが地震の強さに比べて津波高を大きくしている可能性もある。したがって、今後の検討で、 $M=7$ の地震でも10m

の津波高が発生し得ることが示される可能性もある。

しかしながら、図-2の解析結果によると、 $y=0$  km地点(Sissano Lagoon 付近)に津波伝播開始後4分で津波が到達し、8分で最大水位に達する。 $y=-20$  km地点(Aitapeよりやや西側)でも5分で津波が到達している。これは、上記④の調査結果と大きく矛盾する。すなわち、本震で津波が発生したとすると津波来襲が約15分も早過ぎるのである。波源を観測された余震域より沖側(すなわち、沈み込み帯の外側)まで移動させなければ到達時間が20分にならないから、④の情報を重視すれば、本震が直接の原因となって津波が発生した可能性は低いと言える。なお、2回目の地震で図-2の初期水位が発生したとすると、逆に津波来襲が遅過ぎることになり、やはり④と矛盾する。

以上の結果をまとめると、以下のように言える。図-2のモデルは①②③⑤⑥の条件と整合性がよい。特に、全体的に言えば、図-2のモデルが調査したすべてのケースの中でもっとも津波高分布の傾向を再現している。また、波源の位置と広さに関しては、地震波解析の結果とも合致する。10mの津波高を出すために必要な初期水位変動の大きさが地震波解析の結果より大きい、その差は半島のような海底地形や堆積物の影響により説明できる可能性もある。ただし、図-2のモデルは津波到達時間に関する④の条件と大きく矛盾しており、④の情報が確かなら、図-2のモデルはPNG津波の波源として採用できない。

しかし、逆に、図-2のモデルを強く否定するのは④の条件だけであるから、仮に④の論理に何らかの誤りがあり、本震から5分から10分後に津波が来襲したと解釈できるならば、本震が直接の原因で津波が発生した可能性が高くなると言えるだろう。

## (2) 2回目の地震で津波が発生した可能性

図-2のモデルでは、津波到達時間に関する調査結果④を説明できない。また、波源を沖側に移動させて④との整合性を取ろうとすると、②と矛盾してしまう。したがって、波源を沖側に移動させても、すべての条件を満たすモデルが得られないことは明らかである。そこで、波源を汀線近くに設定し、2回目の地震で津波が発生したという可能性について調べてみる。

汀線付近に波源を設定した中で、実測の津波高分布によく適合したのは図-3の一山一谷形モデルである。ただし、勾配0.03、初期水位変動の最大値2.3mとした。

図-3では、 $|y| < 10$  kmの津波高分布が非常によく実測値に合致している。 $|y| > 10$  kmでの合致度が図-2に比べて若干劣るが、津波高分布に関してはほぼ全体像を説明していると言っていいだろう。また②③の条件も満たしている。地震発生と同時に水位が引き始め5分で最

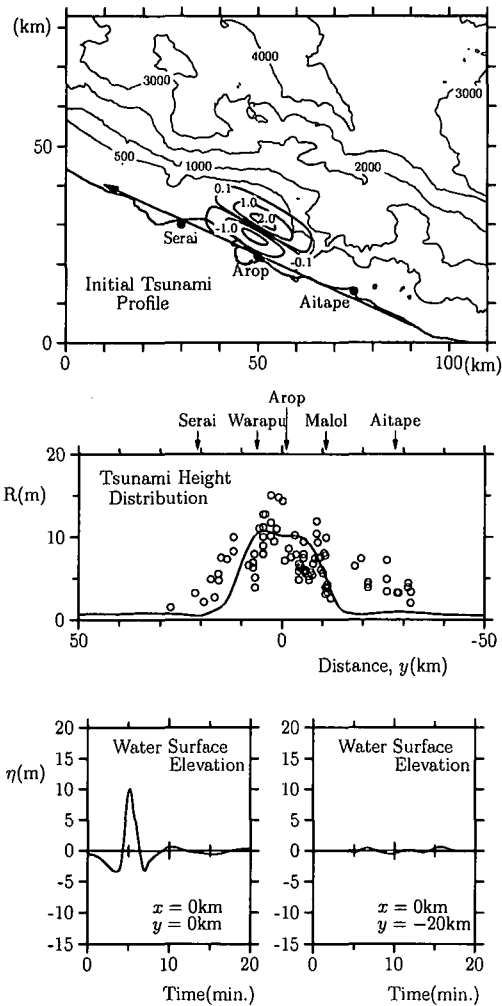


図-3 一山一谷形の初期水位分布を使用した場合の結果

高水位に達するから、2回目の地震によって津波が発生したとすれば、津波到達時間に関する調査結果④との整合性もよい。周期に関する情報⑥とも矛盾しない。

ただし、これだけの地盤変動が汀線付近で起きれば、陸上の地盤高に変化が現れるはずで、⑤との整合性に問題がある。また、 $M=6$ の地震に対しては初期水位変動が $-2.3\text{ m} \sim +2.3\text{ m}$ とかなり大きい。この場合、波源が汀線近くにあるから、理論解析で考慮していない沖側に放出されるエネルギーは図-2のモデルよりかなり小さいはずで、 $10\text{ m}$ の津波高を出すための初期水位変動は $-2.3\text{ m} \sim +2.3\text{ m}$ という値からそれほどずれていないと考えられる。一方、 $M=7$ の地震のすべり量が $2\text{ m}$ だから、他の条件を同一とすれば、 $M=6$ の地震のすべり量は、高々数十 $\text{ cm}$ のはずである。しかも、波源が汀線近くのため、半島状の海底地形によるエネルギー集中効果は期待できなくなる。堆積物による影響は考えられるが、 $M=6$ とい

う地震規模と $-2.3\text{ m} \sim +2.3\text{ m}$ という初期水位変動はあまりにも差が大きく、通常の地震で説明するには無理があるようである。

すなわち、以下のようにまとめることができる。図-3のモデルは①②③④⑥の条件と整合性がよい。しかし、⑤の条件と矛盾し、しかも、 $10\text{ m}$ の津波高を出すために、 $M=6$ の地震としては考えられない大きな初期水位変動を与える必要がある。したがって、図-3の波源が $M=6$ の地震運動のみによって形成されたと考えられることには無理がある。地震運動に加え、海底地滑りやガスの噴出などの要因が重なり、結果的に図-3の初期水位分布に相当する効果をもたらしたという可能性を考える必要があるだろう。

### (3) 海底地滑りで津波が発生した可能性

本震、または2回目の $M=6$ の地震で津波が発生したと仮定すると、それぞれ矛盾が生じることが分かった。そこで、地震運動以外に津波の原因を探る必要がある。

可能性のひとつとして、海底地滑りが挙げられる。ところで、海底地滑りでは地震運動より地盤高変化に時間がかかるため、津波の発生効率が低くなると考えられる。したがって、海底地滑りに対して、初期値問題として津波伝播を解析する本手法を使用することには無理があるが、地滑りに対応する空間スケールを持った波源によってどのような津波高分布が得られるかを調べてみる。

地滑りの場合、崩れた土塊が必ずどこかに堆積するから、地盤高変動量の積分値はほぼゼロになるはずである。しかし、崩れた土塊が幅広く、薄く堆積すると考えると、斜面が崩壊する時に比べ、堆積する時の方が津波発生効率がより一層低くなるものと思われる。そこで、一谷のみの初期水位分布を与え、長軸・短軸の長さを $10\text{ km}$ 以下として解析を行った。解析例を図-4に示す。ただし、勾配 $0.03$ 、初期最高水位変動 $2.7\text{ m}$ とした。

海底地滑りの場合、②③⑤との整合性はよい。また、地震の約 $15$ 分後に地滑りが生じたとすると、④との整合性もよくなる。周期が非常に短く⑥との整合性が悪いが、地滑りが数分間かけて起こったのであれば合理的な周期が得られる可能性もある。したがって、地滑りのプロセスを考慮していない本理論解析で得られる周期が短いからと言って、地滑りが津波の原因である可能性を否定することはできない。しかし、図から分かる通り、このモデルでは津波エネルギーが、あまりにも狭い範囲に集中してしまう。

すなわち、数 $\text{ km}$ オーダーの単一地滑りだけでは実測の津波高分布を説明できない。もちろん、図-2、図-3の規模の地滑りが発生すれば津波高分布を説明できる。その可能性は皆無ではないが、あまりに大きな地滑りを想定することにも無理があると思われる。

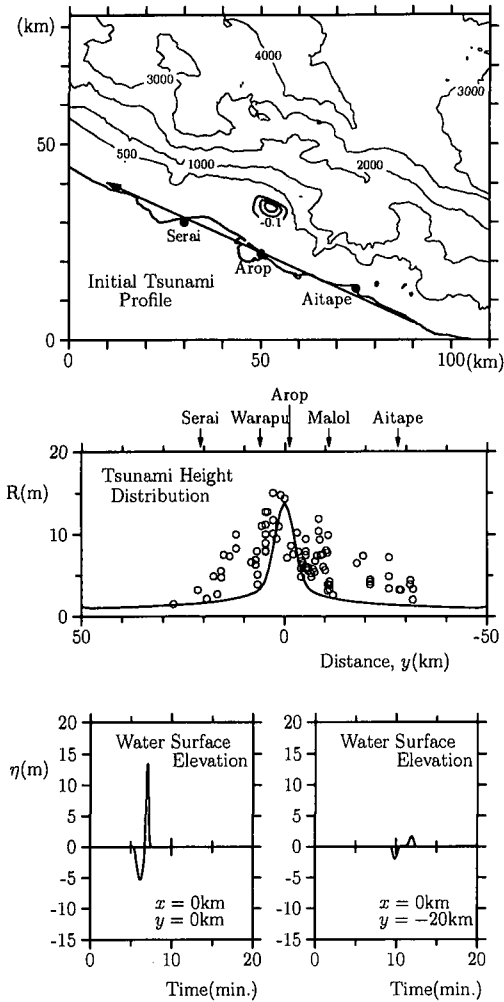


図-4 小規模な初期水位分布を使用した場合の結果

津波高を説明するために、 $M=6$ の地震としては考えられないような大きな初期水位変動を仮定しなければならない。また、海底地滑りを想定した図-4のモデルではエネルギーがあまりにも狭い範囲に集中してしまい、単一の地滑りだけでは実測の津波高分布を説明しきれない。

したがって、現段階では、どの波源モデルを使用した場合も最低ひとつの矛盾点が出てきてしまい、津波の発生原因を解明するに至っていない。

ただし、それぞれのモデルの弱点を補うように、いくつかの要因が重なったとすれば、すべての観測事実を説明し得るようなモデルも考えられる。例えば、以下のような可能性が考えられる。

- (1) 海底地滑りと、 $M=6$ の2回目の地震によってそれぞれ津波が発生し、それらが重なった。
- (2) 複数箇所で地滑りが発生し、それらによる津波が重なった。

その他に、以下の可能性も必ずしも否定しきれない。

- (3) 津波来襲時間に関する④の推論に間違いがあり、本震による図-2のモデルがすべての条件を満たす。
- (4) 図-3のモデルに相当する巨大な地滑りが発生した。

いずれにしても、PNG地震津波の発生原因については未だに確たることが言えないのが現状である。今後、PNG地震がなぜ大津波を引き起こしたか明らかにするためには、津波来襲時間に関する補充調査や、海域での地滑り痕調査などを実施するとともに、堆積層の地震応答や海底地滑りの発生機構などに関する基礎的研究も行っていく必要があるだろう。

参 考 文 献

河田恵昭ら (1999): 1998年パプアニューギニア地震津波の現地調査, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 391-395.  
 谷岡勇市郎 (1998): 1998年7月17日パプアニューギニア地震—日本で観測された津波の解析から—, 日本地震学会1998年度秋季大会予稿集, C61.  
 藤間功司・正村憲史・堂蘭良一・重村利幸・後藤智明 (1999): 陸棚で発生した津波に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 621/II-47, pp. 141-151.  
 松富英夫ら (1999): 1998年パプアニューギニア津波の陸上での流勢と被害, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 376-380.  
 松本 剛ら (1999): ニューギニア島北岸シッサノ沖地震津波域海底調査速報, 1999年地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, Sj-016.  
 松山昌史・田中寛好 (1996): 海底地盤の隆起と沈降にともなう水面応答とその特性について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 281-286.  
 松山昌史・今村文彦・橋 和正 (1999): 1998年パプアニューギニア・シッサノ津波の数値的解析, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 386-390.  
 Davies, H. (1998): The Sissano tsunami 1998, extracts from Earth Talk, The Printery, University of Papua New Guinea, 34 p.

したがって、地滑りが原因であるならば、複数の地滑りが発生し、それらによる津波が重なったか、または2回目の $M=6$ の地震運動と地滑りによる津波が重なったなどの可能性が高いと思われる。

5. 結 論

1998年PNG地震津波に、様々な初期水位分布を仮定し、理論解析により津波高分布や水位経時変化を算出し、現地観測から得られた観測事実との整合性を調べた。

津波高分布を説明し得る初期水位分布として図-2、図-3のモデルを得た。図-2の波源が本震で作られたとすると、ほとんどの情報と整合性がよいが、津波来襲時間に関する④の情報と合致しない。図-3の波源が2回目の地震で作られたとすると、到達時間に関しては整合性がよいが、Sissano Lagoonの砂嘴の地盤高が変化していないという⑤の情報との整合性が悪く、また10mの