

1999 年 8 月トルコ・コジャエリ地震に伴って発生した 津波の現地調査と数値解析

今村 文彦*・越村 俊一**・Ahmet C. Yalciner***

1. はじめに

1999 年 8 月 17 日現地時間午前 3 時 2 分に、トルコ共和国北西部イスタンブールから 120 km 離れたイズミット市付近を震源とした地震($M_w=7.4$)が発生した(図-1 参照)。1 ヶ月後の調べでは、死者 15,800 名、負傷者 50,000 名、全壊家屋 65,385 軒にも及んだ。

地震による被害は大きく注目されたが、断層運動に伴い津波も発生したと報告された。しかし、今回の地震は横ずれ断層によるものであり、一般的に津波は発生しにくいと言われていたにもかかわらず、15 m 以上の津波高さを報道するものもあった。発生直後、南カリフォルニア大学チームが現地調査を実施し、地域は限られるが 2 m を超える津波が来襲していることを報告した(USC, 1999)。彼らは、この津波がギョルジュク市(Golcuk)付近沿岸部の地盤沈下と地滑りとに関連していることも指摘している。

本研究では、1999 年 10 月下旬に現地調査を再度実施し、その結果を基に津波の実態と発生メカニズムについて考察・検討を行う。さらに、本津波の数値解析を実施し、横ずれ断層モデルと地滑りモデルを併用して、現地で得られた津波の痕跡値を説明できる波源モデルの検討を行う。

2. 現地調査

2.1 調査概要

調査期間は平成 11 年 10 月 25 日から 29 日であり、主な対象地域は、図-2 に示すイズミット(Izmit)湾沿岸、ギョルジュク(Golcuk)市内、デーレメンデレ(Degirmendere)である。調査内容は、地震による地盤変位、沿岸地盤沈下状況、津波の痕跡調査、津波に関する聞き取り調査である。図-2 の縦棒は、本調査結果に Altinok ら(1999)の結果を加えた津波の高さの痕跡値を表す。特徴としては、イズミット湾奥に津波が限られていたこと、その高さが 1~2.5 m 程度であったことが挙げられる。

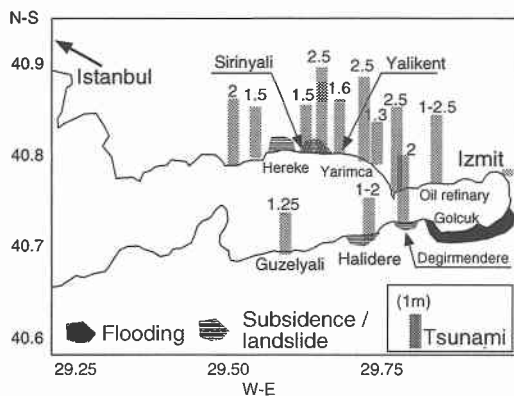


図-2 調査で得られた津波の痕跡高

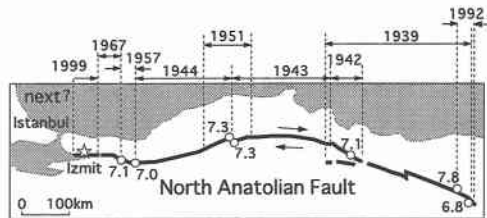


図-1 アナトリア地震帯と今回の震源位置 (USGS のホームページ情報より作成)

2.2 地震の情報

現在まで確認されている地震、地盤変位及び断層についてまとめる。地震規模は、モーメントマグニチュード(M_w) 7.4 で、東西方向の右横ずれ断層であった。北アナトリア断層に沿って、以下に示す 3 つの断層がずれた可能性が高い。

- 1) 西断層：カラマーセル (Karamusel) 市沖付近からギョルジュク市西部にかけて (最大変位 4 m)
- 2) 中央断層：イズミット湾奥南部から始まり、サパンジャ (Sapanca) 湖を通過してアダバザリ (Adapazari) に至る (最大変位 2 m 程度)
- 3) 東断層：アダバザリ南部からデュジュ (Duzce) 断層

* 正会員 工 博 東北大学助教授 大学院工学研究科附属災害制御研究センター

** 正会員 博(工) 学振特別研究員 東京大学地震研究所

*** Ph.D 中東工科大学助教授 土木工学科



写真-1 ギョルジュク市内での正断層型の地盤変位

へ（最大変位 4 m）

さらに、1) と 2) の断層の間には斜行する正断層が発生、ギョルジュク市内での海岸側（北東方向）が沈下、最大変位 2 m 程度となった。その範囲は、15 km×10 km と広い（写真-1 参照）。この地盤の沈下に伴い、海水の流入があった。写真-1 に見られる断層は正断層であり、今回の地震メカニズム（右横ずれ）と矛盾している。これは pull-apart または step-over と呼ばれる現象で、横ずれ断層間に張力場が生じて、地盤が沈下する現象であると考えられる。

2.3 デーレメンデレでの沿岸海岸地滑り

デーレメンデレの中心部で大規模な地盤地滑りが生じていた。その範囲は、幅 250 m、長さ（岸沖方向で）80 m 程度である。沈下した地域には、ホテル、コーヒーショップ、レストランがあり、地震発生時に海底に沈んだ。当時、この場所には、多くの人々がいたと報告されている。

本調査では、測深器で現在の水深を測定し、レーザー距離計で水平距離と方位を測定し測定位置を確定していった。位置の推定には、通常 GPS が用いられるが、数 10 m 程度の誤差があるので、今回のような狭い範囲では利用できない。陸上部でこの地滑りを見ると、1 m 強の段差があり（写真-2 を参考）、鉛直規模は大きくないと思われるが、海面下の地形測量を行った結果、最大 15 m もの低下が見られた（図-3）。

元々、沿岸付近では海底勾配が大きく、地震動や他の原因により幅 250 m 程の海岸部が一気にすべり落ちた可能性が高い。ただし、不思議なことに、沿岸部で滑った土砂の堆積は海底で発見できなかった。この地域は河口部に位置し、沖積層が発達しており、不安定な柔らかい地盤であったと予想できる。なお、「デレ」はトルコ語で河川の意味であり、「デーレメンデレ」は、石臼の河川という意味になる。

2.4 デーレメンデレでの聞き取り調査

地震発生直後の津波の様子を住民にインタビューした。証言と痕跡が一致するものとして、沿岸での商店床

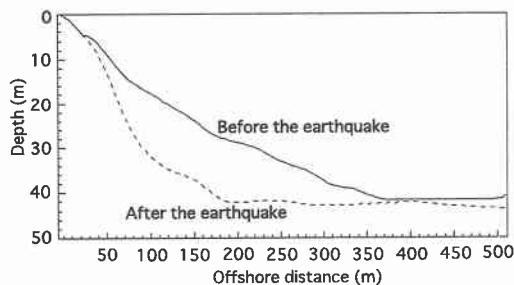


図-3 デーレメンデレにおける海底地形変化



写真-2 デーレメンデレでの沿岸地滑り

に浸水した事例がある。白壁に浸水痕が残されており、津波がその高さまで（海面から 2 m 程度の高さ）来たことは確実であった。その一方で、証言と痕跡が一致しない、信頼性の低いものもあった。地震直後に新聞などで報道された津波の高さはこれらの証言によるものであろう。

津波発生時についての証言は以下の通りである。強い地震の揺れの最中または直後に、海面の低下が多くの住民により確認されている。海底を見たという証言もある。その後、押し波が打ち寄せてきている。波の数は 1 波であるのがほとんどであるが、3 波という報告もある。これは、イズミット湾ほぼ全域で一致している。

前兆現象に関連して、1 週間前に、波を見たという証言が異なる 3 カ所で得られた。いずれも、引き波で始まり、1 波のみである。当時、風もなく穏やかであるのに、若干浸水した程度の波が来たので、不思議に思い、記憶に残っていた。

2.5 他の調査結果を含めた総合的判断

今回、時間の制約もあり沿岸全域で調査することは出来なかったが、我々の調査結果と、Altinok ら (1999)、Yalciner ら (1999) が地震発生 5 日後に行った現地調査などの結果を加えて推定すると、沿岸での津波の特徴は以下のものであったと推定できる（図-2 参照）。

- ・津波の初動は全域で引き波であった。

- ・その発生時間は地震動の最中または直後であった。
- ・引き波の次に、押し波が来た。
- ・津波は1波のみ、それ以降は大変小さかった。
- ・津波の周期は1分程度である。
- ・地震後の津波の到達時間は北沿岸で数分、南沿岸で1分程度であった。

津波高さは、デーレメンデレ付近やその対岸（北方沿岸）より少し西側ヤリンカ（Yarimca）で高く、その値は2.7 m程度であった。一方、デーレメンデレでは、2 m程度である。津波の痕跡がはっきり残されていたのは、ヤリンカやデーレメンデレを中心として、左右5 km程度の範囲。ただし、目撃された津波の範囲はイズミット湾のほぼ全域であった。

ギョルジュクの pull apart による地盤沈下は広範囲で大きかった（写真-1）。ただし、この地盤沈下により流れは生じたが、大きな水位の上昇や低下はなかったようである。少なくとも、その周辺での津波痕跡は残されていない。

3. 津波発生と伝播の数値解析

3.1 津波の発生要因

今回の調査でデーレメンデレ付近の沿岸地滑りの規模が分かった。この周辺では津波痕跡値が大きく、地滑りが津波発生の原因である事は間違いないであろう。

断層運動に関しては、西断層（図-4）が津波の発生に関与した可能性がある。これは、西側（カラマーセル市沖付近）からギョルジュク市西部まで伸びる断層（最大変位4 m）である。東端は、ギョルジュク市西部で確認されているが、西端は不明である。この付近の断層運動が津波分布に大きく影響を与えているはずであるから、逆に、津波痕跡分布より西端位置を推定することも可能である。この断層の西端が、次に発生する地震（イスタンブール沖）の開始地点であり、この位置推定は重要である。

3.2 横滑り断層による津波の発生

通常、津波の発生は海底地盤の鉛直変位により生じるので、横滑り断層（水平運動）では発生しないと思われる。しかし、横滑り断層の場合にも鉛直変位があり、それは断層の両端付近でわずかながら見られる。さらに、海底地形に勾配がある場合には、水平運動（ ξ ）により鉛直成分も生じる。具体的には、海底勾配のため、鉛直変位成分（ ξ_z ）を以下の式により算出する事が出来る。

$$\xi_z = \frac{\partial h}{\partial x} \xi_x + \frac{\partial h}{\partial y} \xi_y \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 h は海底水深、 ξ_x 、 ξ_y はそれぞれ、断層の水平変位の x 、 y 方向成分である。

従って、津波発生時初期水位分布の算定には、双方の

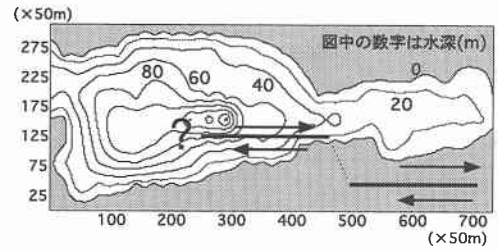


図-4 計算領域と仮定された断層位置

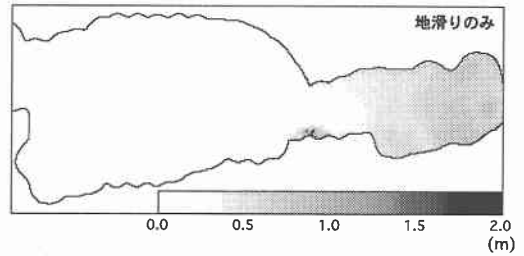


図-5 地滑りモデルによって計算した最高水位分布

原因による鉛直変位を加えなければならない。過去においても、1994年フィリピン・ミンドロ島で発生した津波は横滑り断層で生じており、(1)式で与えられる成分を取り入れて数値計算が行われている（Imamura ら、1995）。

現在発表されている地震メカニズム解は表-1で示された解（Harvard Univ. CMT 解）がその代表である。

ここで、震源深さについて注意が必要である。特に、断層長さが短い横ずれ断層の場合には、その深さにより海底の変位量に変化が生じる。その例を表-2に示す。特に、2 km から深くなると、急激に変位量が小さくなる。通常、地震波解析による深さ推定では、精々10 km 程度しか分からない。今回は極浅い断層であったということは推定されたが、表-2で示した範囲の情報は得られていない。ここでは、深さ1000 mと仮定して、解析を進める。

3.3 地滑りによる津波の発生

ここでは、2層流津波発生モデル（今村・李、1998：松本ら、1998）を用い、地滑り前の海底地形図に、デーレメンデレにおける沿岸地滑り（図-3）地形を考慮して数値計算を実施した。

計算対象領域は、図-4に示す場所である。ここではまず、地滑りのみによる津波発生の場合を行った。再現時間35分程度で計算を実施し、得られた最高水位分布

表-1 推定されたメカニズム解

走向	傾き	すべり角	震源深さ
268 度	81 度	180 度	10 km

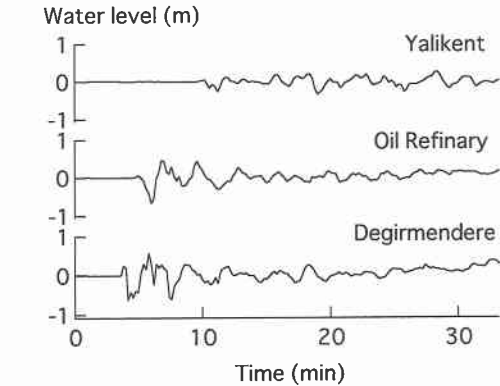
表一2 震源深さの違いによる海底変位変化(D=8.5 m)

深さ	最大水平変位	最大鉛直変位	合成鉛直変位
10.0 m	3.89 m	1.06 m	1.05 m
100.0 m	3.21 m	1.01 m	0.97 m
1000.0 m	2.69 m	0.88 m	0.93 m
200.0 m	0.75 m	0.65 m	0.68 m
5000.0 m	0.37 m	0.39 m	0.41 m

(図一5) とデーレメンデレ付近の水位時間波形 (図一6) を示す。これらの図より、今回の地滑り津波は2分程度の短周期であること、局所的な地滑りによる津波は湾全体には影響しないことなどが分かる。地滑りだけでは、沿岸の観測値を説明できないと考えられる。

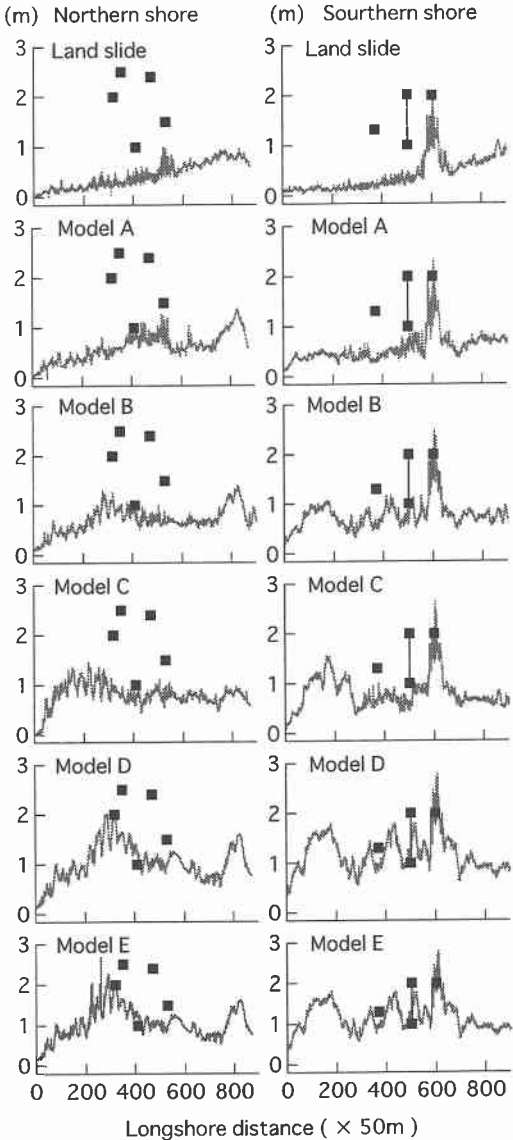
3.4 複合原因による津波の発生

地滑りと西断層により複合的に発生する津波を検討する。ここでの課題は、西断層の長ささとデーレメンデレ以外での地滑りの規模の特定である。西側断層西端は水面下であり、どこまで続いていたかは判明していない。そこでまず、断層の長さを3つ (5, 10, 15 km) に仮定したモデル A から C (表一3) を対象に検討した。その結果として、図一7 にイズミット湾南岸と北岸での痕跡値と計算値の比較を示す。横軸は計算領域の西側からの計算格子数 (格子間隔 $dx=50\text{ m}$) を示しており、 dx を乗ずれば実際の距離となる。縦軸は津波の打ち上げ高 (実線: 計算値, ■: 痕跡値) である。南岸での計算値と痕跡値との比較を見ると、地滑りによりデーレメンデレ付近の津波打ち上げ高はほぼ説明できるが、ハキデレ (Hakidere) など 1 m 以上の津波を説明するには、地滑りだけでは不十分で西側断層が必要である。断層長が長いほど、沿岸の津波は大きくなるが、長さ 15 km になると高さの増加する地点が異なってしまう。これで、南沿岸の痕跡値は説明可能であるが、北側では不十分である。



図一6 計算水位の時系列変化 (地滑りモデル)

そのために、モデル D のように長さは 10 km で止めて、すべり量を大きくしたモデルを仮定した。それでも



図一7 南北岸での計算週上高さと痕跡記録の比較

表一3 仮定した断層モデル

	モデルA	モデルB	モデルC	モデルD	モデルE
断層長さ	5 km	10 km	15 km	10 km	10 km
すべり量	8.5 m	8.5 m	8.5 m	15.0 m	15.0 m
最大鉛直変位	0.85 m	0.93 m	0.98 m	1.64 m	1.64 m
沿岸地滑り	D	D	D	D	DN

D: デーレメンデンのみ、

DN: デーレメンデンおよび北部沿岸

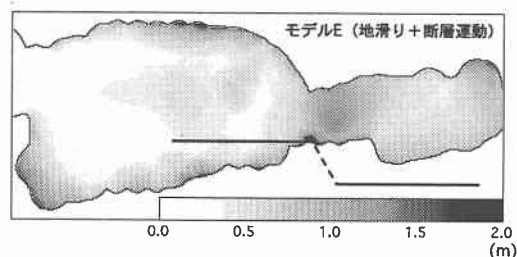


図-8 複合型モデルEによって計算した津波の最高水位分布

北側では、ヘレケ (Hereke) 付近を除いて全体的に計算値は過小評価であった。断層のすべり量をこれ以上増加させると、南沿岸での計算値は過大になる。そこで、シリニヤリ (Sirinyali) やヤリケント (Yalikent) で報告されている沿岸地滑りを考慮する必要がある。ただし、ここでの規模は測定されていない。USC (1999) によれば、デーレメンデレほど大規模でないで、ここでは、半分の規模 (鉛直沈下量) を仮定した。これをモデルEとする。このモデルによる計算結果と痕跡値の比較を図-7に併せて示す。また、湾内の最大水位分布 (計算値) を図-8に示す。図-5との比較から明らかなように、横ずれ断層運動により発生した津波は湾全体の津波高さに影響を及ぼしていることが分かる。モデルEによる計算結果は、他の結果に比べ、部分的には改善されているが、図中の西側での不一致は解消されていない、さらに今後の検討課題である。

4. おわりに

本研究により、トルコ・コジャエリ地震に伴って発生した津波の実態を明らかにした。デーレメンデレを中心に沿岸地滑りや地盤沈下が発生しており、それが原因と

なって津波が発生したことが分かった。ただし、痕跡記録を説明するためには、沿岸地滑りだけでは不十分であり、ギョルジュクから西側へ伸びる横ずれ断層が必要である。その長さは10 km程度であり、断層の西側端は、アナトリア地震地帯での次の地震の発生箇所となる可能性が高い。

謝辞: 本研究の一部は、科技厅振興調整費、科研費基盤 (B) (2) 海外 (12574016) (研究代表 今村文彦) 及び (B) (1) (11480099) (研究代表 大町達夫) の援助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 今村文彦・李 昊俊 (1998): 津波発生・伝播の数値モデルの現状と課題, 沿岸海洋研究, 第36巻, pp. 91-101.
- 松本智裕・橋和 正・今村文彦・首藤伸夫 (1998): 土石流による津波発生・伝播モデルの開発, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 346-350.
- Altinok, Y., B. Alpar, S. Ersoy, and A. C. Yalciner (1999): Tsunami generation of the Kocaeli earthquake (August 17th 1999 (in the Izmit bay; coastal observations, bathymetry and seismic data, Turkish J. Marine Science, Vol. 5, No. 3, pp. 131-148.
- Imamura, F., C. E. Synolakis, E. Gica, V. Titov, E. Listanco and H.J. Lee (1995): Field survey of the 1994 Mindoro Island, Philippines tsunami, Topical issue of Tsunami 1992-94, Pure and Applied Geophysics, Vol. 144, No. 3/4, pp. 875-890.
- USC (1999): 南カリフォルニア大学ホームページ (<http://www.usc.edu/dept/tsunamis/turkey/>).
- USGS (1999): 米国地質調査所ホームページ (<http://gldpsp.cr.usgs.gov/turkey/turkey.html>).
- Yalciner A. C., C. E. Synolakis, J. Borrero, Y. Altinok, P. Watts, F. Imamura, U. Kuran, S. Ersoy, U. Kanoglu and S. Tinti (1999): Tsunami generation in Izmit bay by 1999 Izmit earthquake, Proc. Int. Conf. on Kocaeli earthquake, ITU, Dec. 2-5, Istanbul, pp. 217-221.