

## 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\*\*

### 1. はじめに

1999年8月17日現地時間3:02a.m.に、トルコ共和国北西部イスタンブールから65マイル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 (図-1参照), 多大な被害を出した。1ヶ月後の9月での調べでは, 人的被害15,800死者, 50,000負傷者, 家屋被害65,385全壊家屋を出している。このように地震による被害は大きく注目されていたが, 断層の動きに伴って津波も発生していたと報告された。今回の地震は横ずれ断層であるので, 通常津波は発生しにくいと言われている。発生の直後, Dr.Ahmet Yalciner氏が中心となった南カリフォルニア大学のチームが現地調査を実施して, 地域は限られるが2mを超える津波が来襲していることを報告している (USC, 1999)。さらに, ギョルジュク市 (Golcuk) 付近の沿岸部での地盤沈下と地滑りと津波発生との関連も指摘していた。

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のメカニズムについて考察・検討を行う。さらに, 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を数値的に解析する。

### 2. 現地調査

#### 2.1 調査概要

期間は平成11年10月25日から29日であ

り, 参加メンバーは, 著者の1名を含み, Dr.Ahmet Yalciner (中東工科大学, 南カリフォルニア大学客員), Dr.U.Kuran (土木研究所), Dr.Altinok (イスタンブール大学), 樹神祐也 (東北大4年) である。主な対象地域は, 図-2に示すイズミット湾内沿岸, ギョルジュク市内, デーレメンデレである。調査内容は, 地震による地盤変位断層, 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, Altinokら (1999) により, とりまとめられた津波の高さの痕跡値を表す。

#### 2.2 地震の情報

まず, 現在まで確認されている地震および地盤変位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 ( $M_w$ ) で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, 以下のように3つの断層がずれた可能性が高い。

1) 西側 (カラマーセル市沖付近) からギョルジュク市西部に上陸 (最大変位4m)

2) イズミット湾奥南部から始まり, サバンジャ湖を通過してアダバザルに至る (最大変位2m程度)

3) アドバザル南部からチュジュ断層へ (最大変位4m)

さらに, 1) と2) の断層の間に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2m程度, その範囲は, 15km×10kmと拡大していた (写真-1, 2参照)。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と矛盾している。これは Pull-apart または step-over

\* 東北大学大学院工学研究科災害制御研究センター

\*\* 東京大学地震研究所

### Location of August 17, 1999 Turkish Earthquake

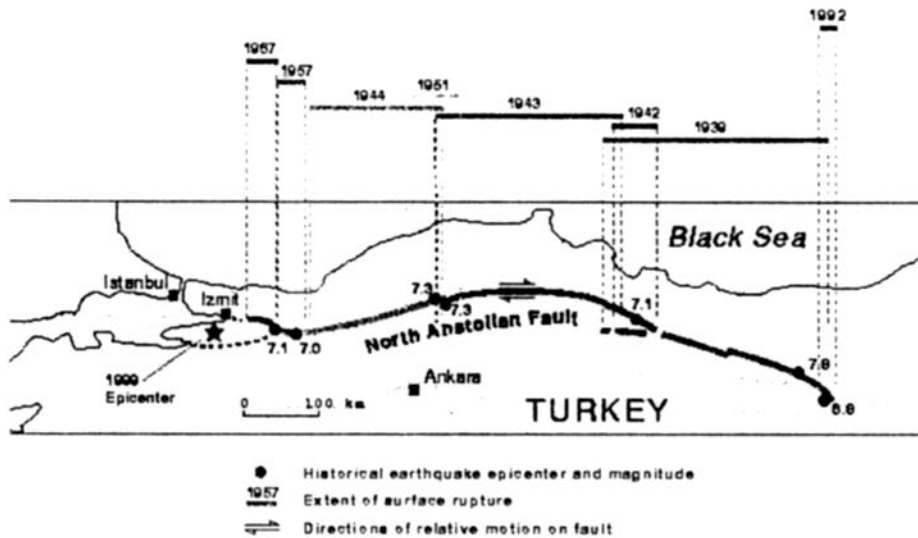


図-1 アナトリア地震帯と今回の震源位置

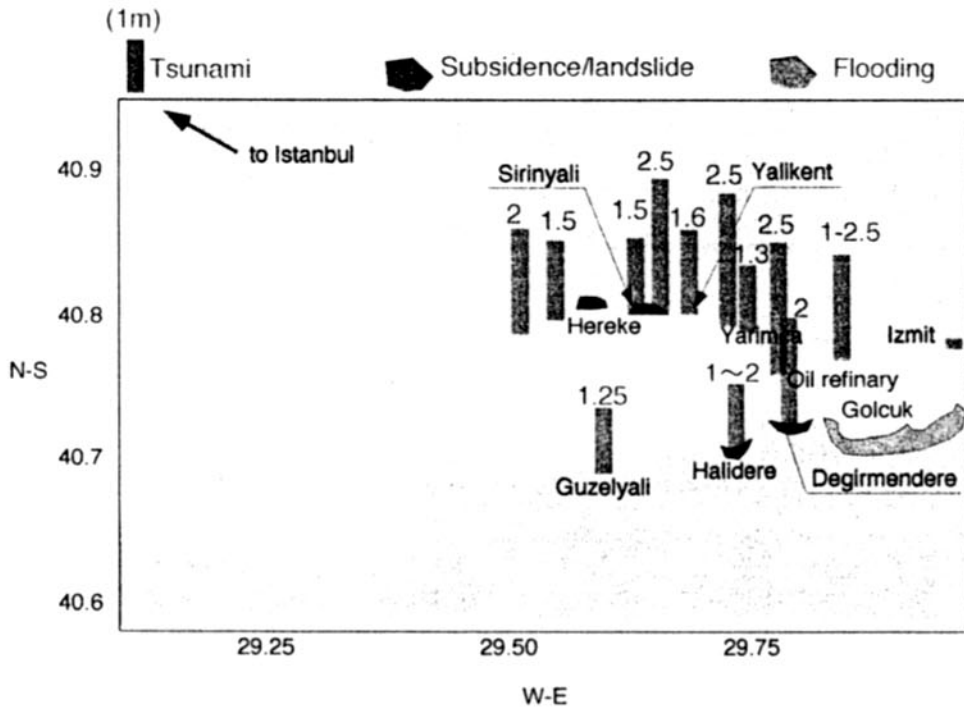


図-2 調査で得られた津波の痕跡高さ

西側（内陸側）

東側（海側）

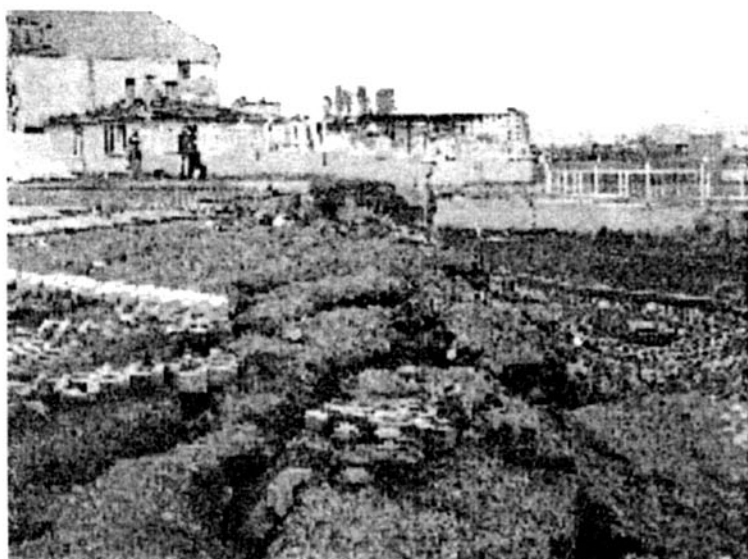


写真-1 ギョルジュク市内で見られた正断型の地盤変位



写真-2 ギョルジュク市内での沿岸（激しい地盤沈下が見られている）

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 (Degirmendere) での沿岸海岸地滑り現象

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。図-3 は、地滑りが起こる前の都市計画図であり、図中実線で示されたいる地域が、現在は海岸になっている。沈下した地域には、ホテル、

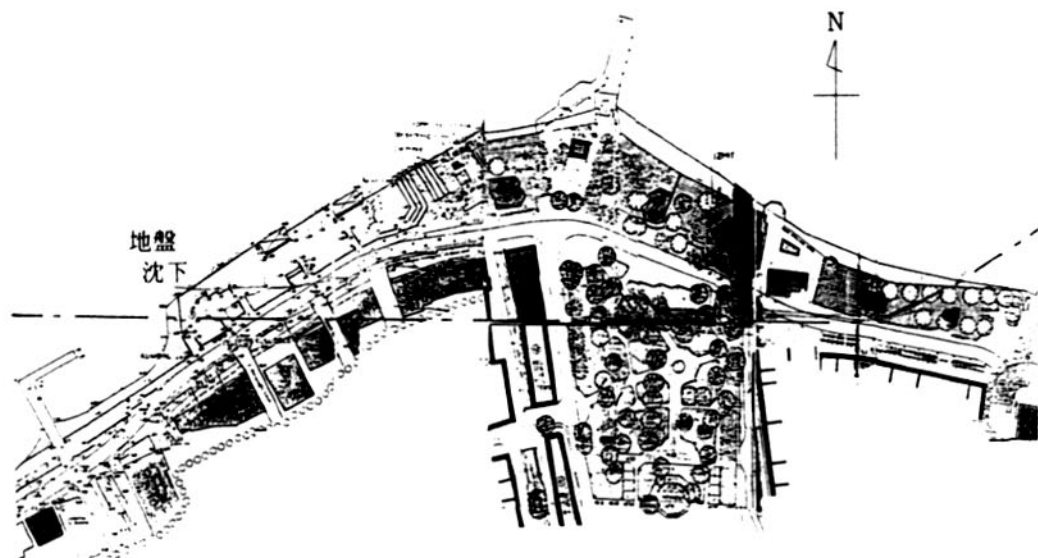


図-3 デーレメンデレにおける地震前の地形(都市計画図)

コーヒーショップ、レストランがあり、地震の発生時に、海底に沈んだと考えられる。当時、その場所には、多くの人々がいたと報告されている。他の地域でも沿岸沈下は確認されたが、ここでの規模は最大である。

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10m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。そこで、レーザー距離計で3次元の位置決めを行った。陸上部でこの地滑りを見ると、1m強の段差があり(写真-3を参考)、鉛直規模は大したことはないと思われるが、我々の行った海面下の地形測量を行った結果、最大15mもの低下が見られた(図-4)。元々、沿岸付近では海底勾配がきつい地形であり、地震動や他の原因により、幅250m程の海岸部が一気にすべり落ちた可能性高い。ただし、不思議なことに、沿岸部で滑った土砂の堆積は見られなかった。この地域は河口にあたり、沖積層が発達しており、不安定な柔らかい地盤であったことは予想できる。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。

関連事項として、地盤沈下が発生した沿岸では、2ヶ月前にパイプの埋設工事が道路沿いに行われたという。この道路に沿って、今回の地盤沈下が起こっているが、関連は不明である。埋設の深さは2~3mとされている。

なお、我が国では、万寿3年(1026年)に、島根県沖(現在の益田市高津河口の沖)にあった鴨島、鍋島など鳴動とともに陥没したという口述や史料(信憑性は低い)がある(首藤, 1998)。それにより津波が発生し、川沿いに約10km上流したと言われている(渡辺, 1998)。しかし、最近の堆積物調査により、津波の痕跡が残されており、そのイベントの信憑性が高まった。

#### 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、沿岸での商店の床に浸水した事例がある。現在は、はっきりとしていないが、白壁に浸水痕が残されており、津波がここまで来たことは確実である。現在の海面からの高さは2m程度である。その一方、証言だけのものとして、以下がある。陥没した場所にい



写真-3 デーレメンテレ沿岸における地盤沈下

た少年がボートと共に流され、沿岸の建物の2階に打ち上げられたという。しかし、その付近のガラスや看板などは破壊されておらず、浸水痕も残されていない。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のであると考えられる。

次に、津波の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、記憶に残っているという。

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

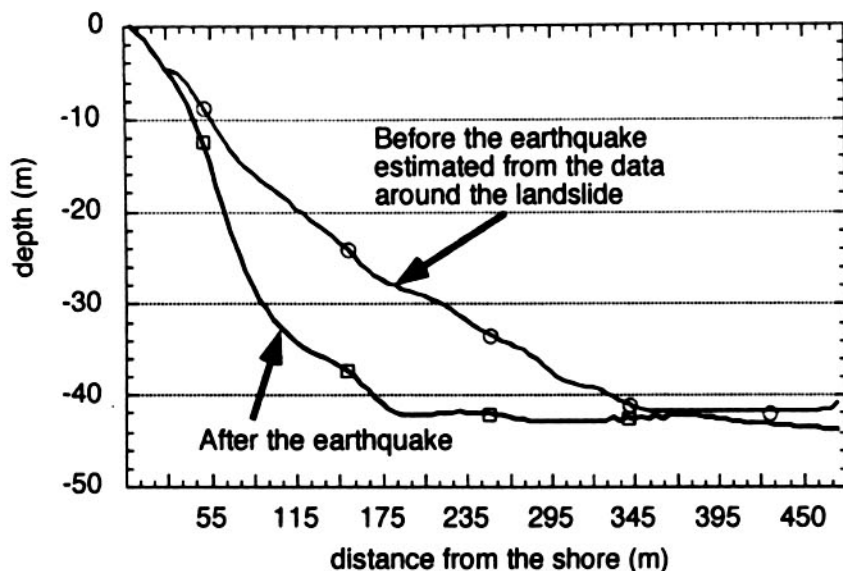


図-4 デーレメンデレにおける海底地形変化

ることは出来なかったが、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判断すると、沿岸での津波の特徴は以下のよう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る。
- ・その発生時間は、地震動の最中または直後である。
- ・引き波の次に、押し波が来た。
- ・津波は1波のみ、または、それ以降は大変小さい。
- ・津波の周期は1分程度である。
- ・地震後で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。

津波の高さは、デーレメンデレ付近やその対岸より少し西側(Yarimca)が高い。その値は2.7 m程度。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、Yarimca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、ほぼイズミット湾全域であった。

ゴルジュクのpull apartによる地盤沈下は広範囲で大きかった(写真-2参照)。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. 数値解析

今回の調査で沿岸地滑りの規模が分かった。この周辺で津波痕跡値が大きく、1つの原因である可能性が高い。今村・李(1998)や松本ら(1998)による海底地滑りによる津波数値モデルを適用すれば、今回の地滑りで生じた津波の規模を定量的に評価できる。今回、その周辺の海底部(ちょうど海底水深が200 mに急激に落ち込んでいる部分)で、横滑り断層が発生した。これは、西側(カラムーセル市沖付近)からギョルジュク市西部に上陸(最大変位4 m)している断層である。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ので、逆に、津波痕跡分布より、西端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。

#### 3.1 横滑り断層による津波の発生

通常、津波の発生は海底の鉛直変位で生じ

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、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（ $\zeta$ ）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（ $\xi_h$ ）を以下の式により算出する事が出来る。

$$\xi_h = \frac{\partial h}{\partial x} \zeta_x + \frac{\partial h}{\partial y} \zeta_y \quad (1)$$

ここで、 $h$ は海底水深、 $\zeta_x$ 、 $\zeta_y$ 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、双方の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（Imamuraら、1995）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。

現在、考えら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）が代表であり、今回、断層幅を20kmで固定し、長さや変位量を変化させることとした。

図-5には、断層長さ10km、すべり量 $D=8.5$ mの場合で、算出された海底鉛直変位を

表-1 推定されたメカニズム解

走向	傾き	滑り角	震源深さ
268度	84度	180度	10km

表す。ここでは、(1)式で表した水平運動による鉛直変位も含まれている。横滑り断層運動による鉛直運動による鉛直変位は最大0.93m程度であり、その内、海底斜面での水平運動による鉛直変位は1割程度である。今

回は、右ずれ断層であるので、北方向では東部で隆起西部で沈降、逆に南方向で東部で沈降西部で隆起が起こっている。

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、2kmから深くなると、急激に変位量を小さくさせる。通常、地震波解析による推定では、精々10km程度（極浅い）しか分からない。今回も極浅い断層であったが、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1000mと仮定して、解析を進める。

### 3.2 地滑りによる津波の発生

従来より、土石流のみの研究はなされ数値モデルも提案されている。しかし、海水中の地滑りの挙動は複雑であり、未だに数値モデルは確立されていない。特に、土石流と海水との相互作用と土石流先端部の不安定問題が課題となっている。松本ら（1997）は、密度の違う流体として扱い、質量と運動量の交換（相互作用）を考慮し、かつ、先端での形状抵抗を取り入れることにより、不安定問題を解決した。さらに、暫定的であるが、海水との混合の影響を考慮し、より精度の高いモデルを開発した。ここでも、そのモデルを用い、地滑り前の海底地形図（図-4参照）に、デーレメンデレでの沿岸地滑り（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-5に示すように場所である。ここでは、地滑りによる津波のみのケースを始めに行った。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（図-6）とデーレメンデレ付近の水位時間波形

表-2 震源深さの違いによる海底変位の違い

深さ	最大水平変位	最大鉛直変位	合成鉛直変位
10.0m	3.89m	1.06m	1.05m
100.0m	3.21m	1.01m	0.97m
1000.0m	2.69m	0.88m	0.93m
2000.0m	0.75m	0.65m	0.68m
5000.0m	0.37m	0.39m	0.41m

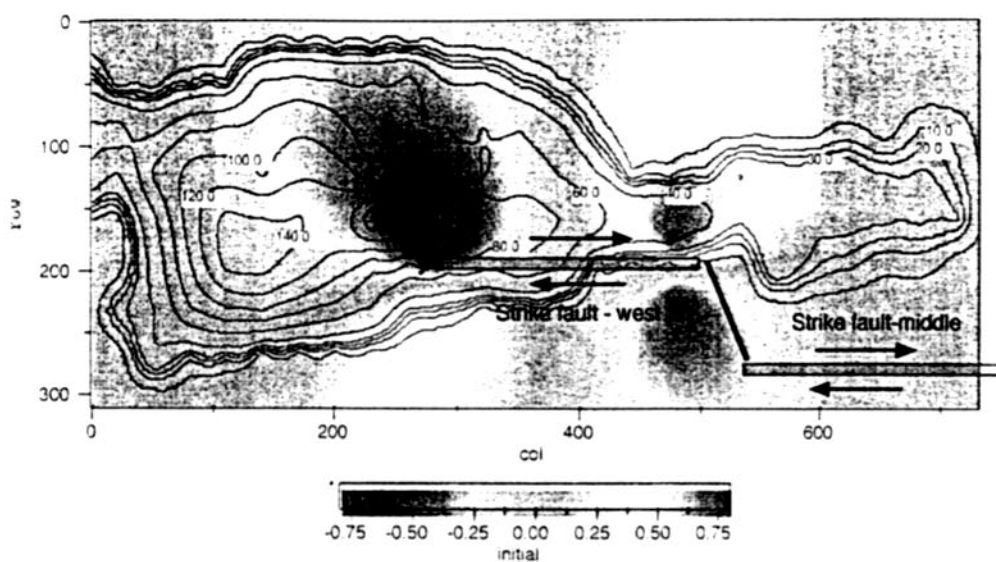


図-5 計算領域と仮定された断層位置

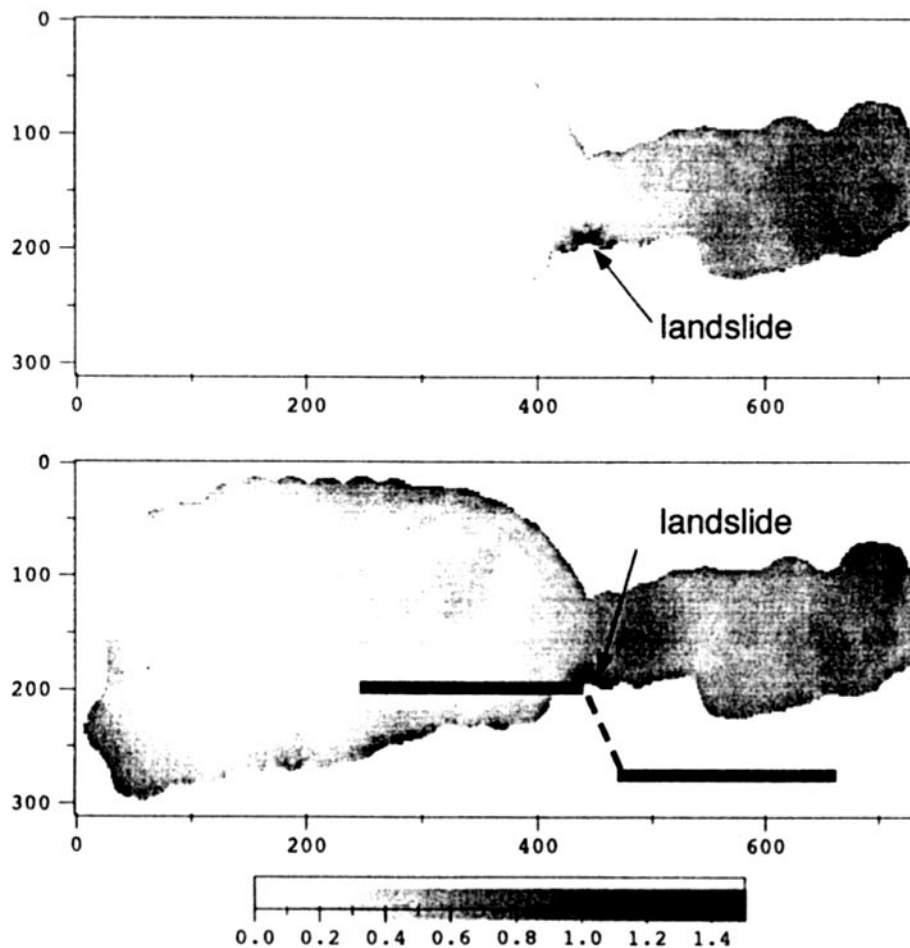


図-6 計算された最高水位分布(地滑りのみケースと断層と地滑りのケース)



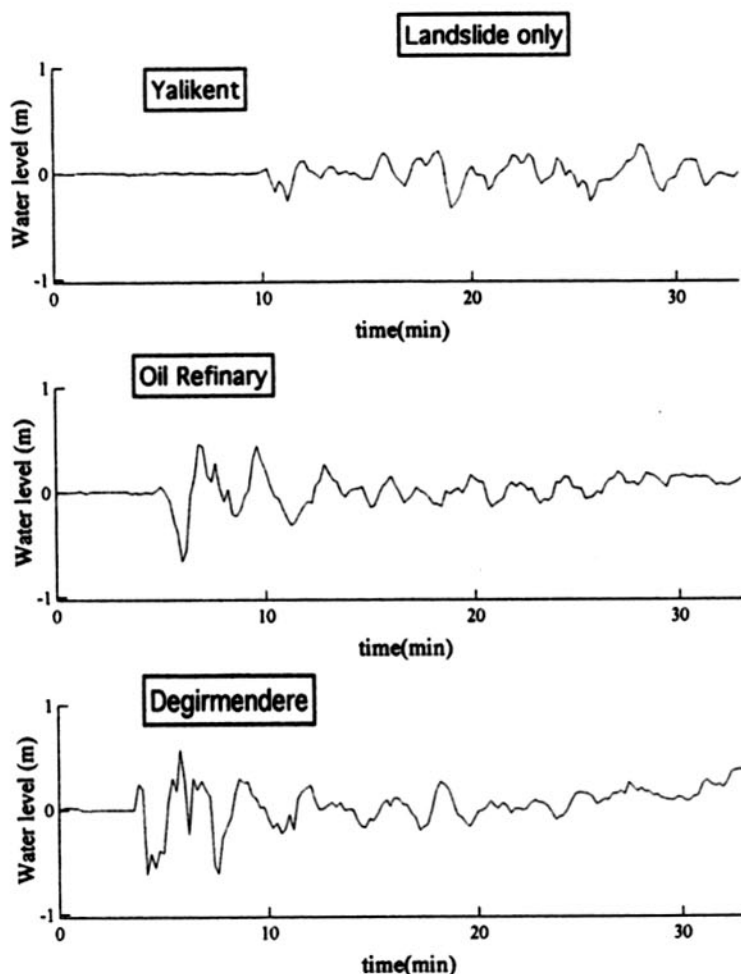


図-7 (a) 3地点での水位時間波形 (地滑りのみケース)

(図-7) を示す。地滑りと断層との複合モデル及びその結果について、次の章に説明する。図-6, 7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の広域に影響しないことなどが分かる。地滑りだけでは、図-2に示された沿岸の観測値を説明できないと考えられる。以下に、断層モデルの複合モデルも含めて実測値との検討を行う。

### 3.3 数値計算条件と主な結果

今回の地震では、図-5に示された付近に断層が存在したと想定されている。ギョルジュク市内での横ずれ断層 (西側断層の東端) 及び正断層は実際に地上で観測されている。一

方、西側断層の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、断層の長さを3つ (5, 10, 15 km) に仮定したモデルを対象に地滑りとの複合発生モデルを計算することとする。ここで、仮定したモデルの妥当性を検証するには、図-2で示された実測値 (痕跡値) と比較する必要がある。図-8と9には、湾内での南側と北側での、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を示しており、50 m を乗ずれば実際の距離となる。まず、南側沿岸での計算値と痕跡値との比較を見ると、地滑りにより Degirmendere 付近の津波遡上高さはほぼ説明できる。痕跡調査では、この西側にある Hakidere や Guzelyali

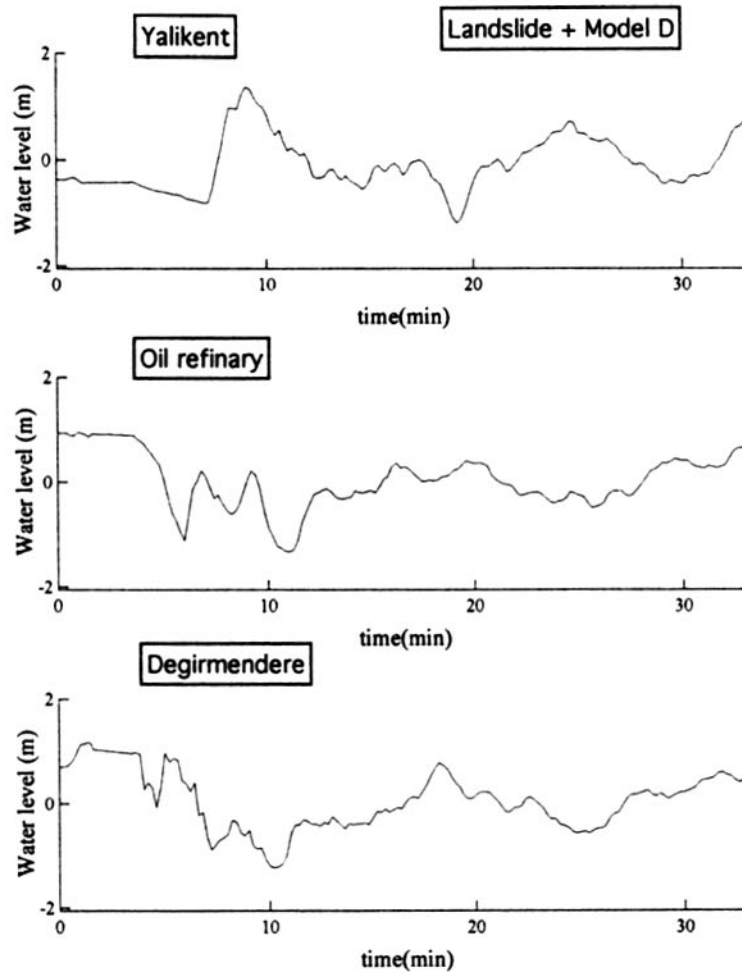


図-7 (b) 3地点での水位時間波形 (断層と地滑りのケース)

でも1 m以上の津波が報告されており、これを説明するには、地滑りだけでは不十分で西側断層が必要である。断層長さが長いほど、沿岸で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い、津波痕跡値の場所よりもさらに西側で津波が増加してしまう。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が最も妥当なものとなる。同様な比較を北側沿岸で行った結果を図-9に示す。北側では、Hereke付近を除いて全体的に計算値は過小評価であり、モデルDでも同様であった。本計算モデルでは、週上計算まで行っているが、陸上構造物などの効果は含まれていない。これは南側でも同様な条

件であり、北側での過小評価の原因であると思われる。Sirinyali及びYalikentでは他以上の津波の被害や大きな津波の痕跡を残しているが、数値計算結果は特に過小である。Yalikentでは、局所的な地盤沈下も生じていたが、Degirmendereでのような規模ではなかった。北側での不一致は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。Degirmendereを中心に沿岸地滑りや沈下が発生しており、それが原因で津波が発生した。ただし、痕跡記録を説明するためには、

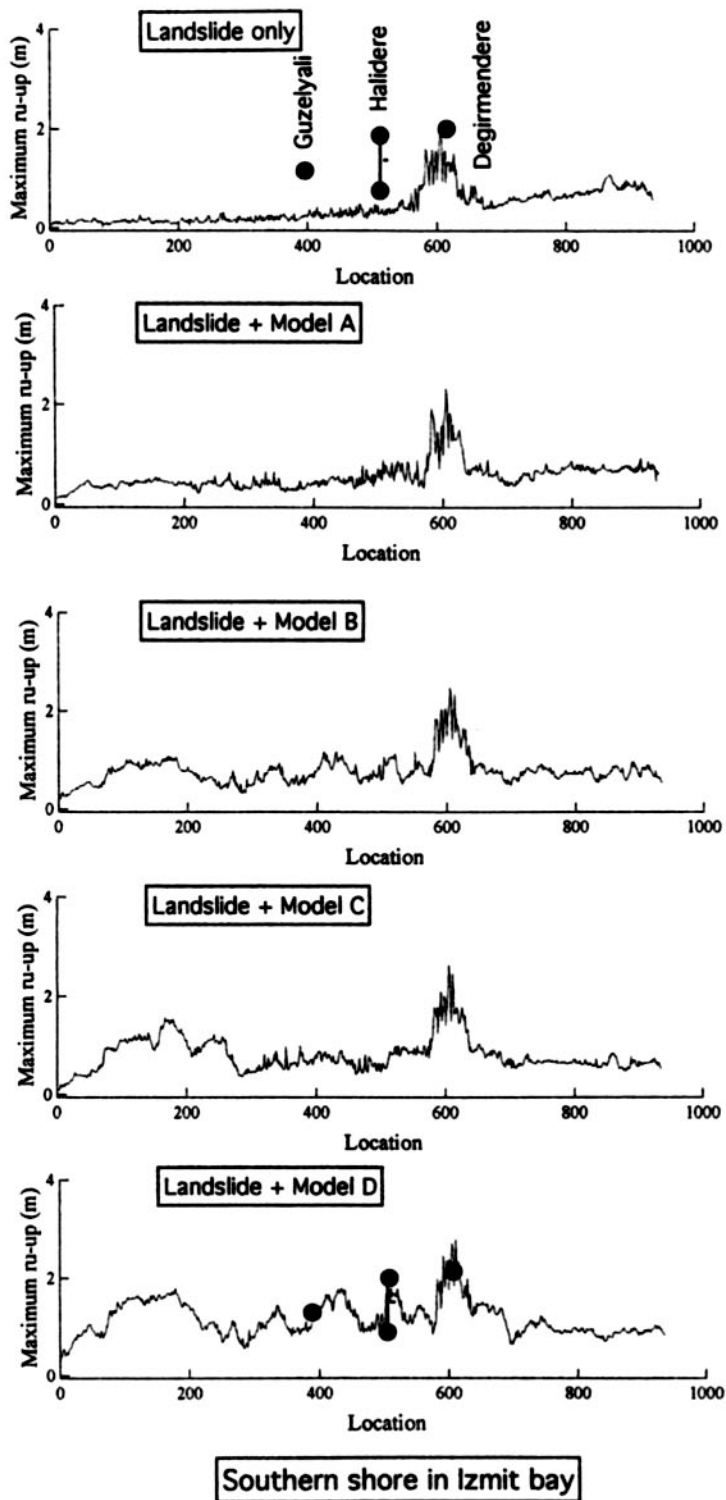


図-8 南沿岸での遡上高さ分布と痕跡記録の比較

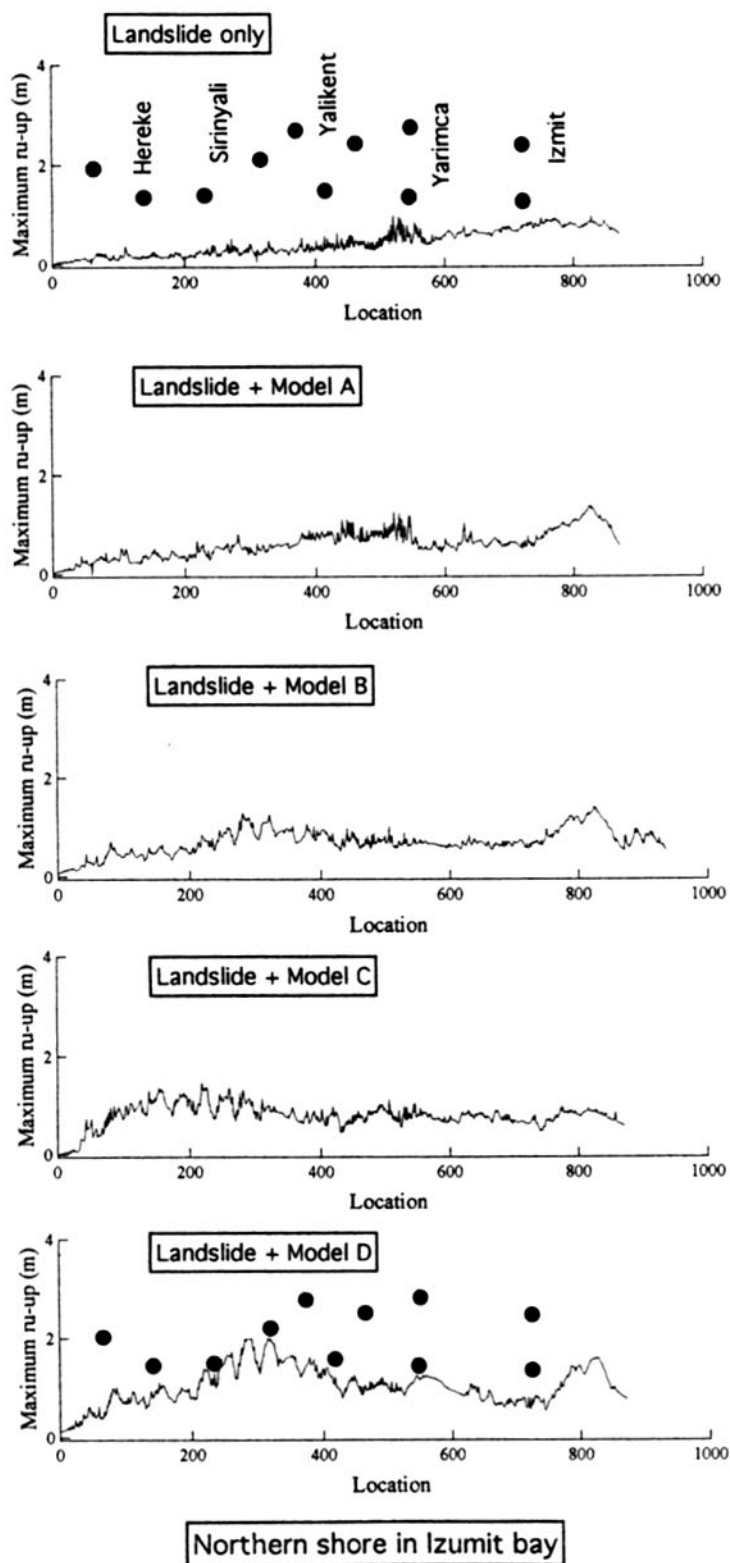


図-9 北沿岸での遡上高さ分布と痕跡記録の比較

表-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
断層長さ	5 km	10 km	15 km	10 km
西端の位置	Halidere 沖	Halidere と Guzelyali 沖 の中間	Guzelyali 沖	Halidere と Guzelyali 沖 の中間
すべり量	8.5m	8.5m	8.5m	15.0m
最大鉛直変位	0.85m	0.93m	0.98m	1.64m

沿岸地滑りだけでは不十分であり、ギョルジユ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10km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高い。

#### 参考文献

- 首藤伸夫 (1998) : 津波来時の土砂移動に関する過去の記録, 東北大学津波工学報告 pp.1-36.
- 渡辺偉夫 (1998) : 日本被害津波総覧, 東大出版会.
- 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.
- Yalciner A.C., C.E. Synolalis, J. Borrero, Y. Altinok, P. Watts, F. Imamura, U. Kuran, S. Ersoy, U. Kanolu 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.
- 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 : 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.
- Imamura, F., C. E. Synolakis, E. Gica, V. Titov, E. Liscianco 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) : ホームページ, <http://cwis.usc.edu/dept/tsunami/turkey>