

北アナトリア断層系 1999 年 Izmit 地震に伴う地震断層のセグメント構造

Segment structure of the surface ruptures associated with the 1999 Izmit earthquake, North Anatolian fault system, Turkey

栗田泰夫¹・吉岡敏和¹・佃 栄吉¹・Omer Emre²・Tamer Y. Duman²・Ahmet Dogan²

Yasuo Awata¹, Toshikazu Yoshioka¹, Eikichi Tsukuda¹,
Omer Emre², Tamer Y. Duman² and Ahmet Dogan²

Abstract: The Mw 7.4 Izmit earthquake of August 17, 1999, Turkey ruptured a 140-km-long right-lateral-slip surface faults along the North Anatolian fault system. We mapped the surface ruptures on a set of 1:25,000 topographic maps and measured the displacements at approximately 300 points to reveal the segment structures and evaluate the occurrence of multi-segments earthquake. The ground surface ruptures extended for 90 km eastward from Izmit to the Eften Lake. To the west of Izmit, the rupture might run under the Izmit Bay for over 50 km. These ruptures are subdivided into five main segments based on geometry and slip characteristics: the Golcuk, Tepetarla, Arifiye, Karadere and Aksu segments from west to east. Each segment is 15 to 35 km long with maximum displacement of 1.7 to 4.9 m, and separated by jogs longer than a few kilometers. Along the central (body) section of a segment, the displacement is relatively uniform or shows gradual change. On the other hand, the displacement changed suddenly at the both ends of body section, and only a small amount of displacement was measured along the marginal (tail) sections. Segment boundaries composed of tail sections are mostly releasing jogs 3 to 10 km long, except for the 15-km-long restraining jog between the Arifiye and Karadere segments. The dimensions and scaling laws of the segments in the 1999 Izmit ruptures are comparable with those of other tectonic settings, such as behavioral segments of the Japanese surface ruptures and structural segments of the western United States in the extensional field. Size and type of jogs seem to be a key to understanding the rupture propagation during a multi-segment earthquake.

Key words: 1999 Izmit earthquake, North Anatolian fault system, segment, multi-segment earthquake

1. はじめに

活断層では、個々の活動セグメントが固有規模（長さ・変位量）の活動を繰り返すとともに、複数のセグメントが連動して破壊することがある（W.G.C.E.P., 1995）。したがって、活断層から発生する地震の予測では、個々のセグメントの特徴とともに、セグメント間の破壊の連動様式を解明することが不可欠である。また、断層活動モデルの研究にあたっては、長大な活断層系において複数の多重セグメント地震が起こっていることから、個々のセグメントの活動履歴を詳細に復元することが可能な事例を取り上げる必要がある。

このような研究事例として、北アナトリア断層系が挙げられる。北アナトリア断層系は総延長約 1500km にも及ぶ長大かつ活動的な活断層であり、歴史時代において、断層帯の大部分の区間が連鎖的に破壊する大地震のサイクルを複数回繰り返してきている。とくに 1939～1967 年の間に、断層系の東から西に向かって 6 つの大地震が連鎖的に発生してきたことが知

¹ 活断層研究センター（Active Fault Research Center）

² トルコ鉱物資源調査庁（Mineral Research and Exploration of Turkey）

9月10日受付, 9月27日受理

られている（例えば Barka, 1996）. そして 1999 年には, 大地震の発生が懸念されていた同断層系北西部の空白域の一部において, 8 月 17 日に Izmit 地震 (M7.4) が, また 11 月 12 日には Duzce 地震 (M7.1) が相次いで発生した. これら 2 つの大地震は, 近代的な地震観測網の中で発生しており, 多重セグメント地震の実体を解明する上で極めて重要な研究対象でといえる.

以上の観点から, 活断層研究センターでは, トルコ鉱物資源調査庁地質研究部と共同して, 1999 年 Izmit 地震および Duzce 地震の地震断層を中心とした地震地質学的・古地震学的な調査研究を行っている (Awata *et al.*, 2000; Emre *et al.*, 2000; 栗田ほか, 印刷中; 須貝ほか, 2001). 本報告では, 共同研究の端緒として実施された 1999 年 Izmit 地震に伴う地震断層の調査研究成果のうち, 地震断層の分布形態と変位量分布からみたセグメント構造の特徴について述べる.

2. 調査手法

Izmit 地震で出現した地震断層について, 現地調査および空中写真の解析により断層の分布を詳細に追跡するとともに, 断層変位量を一定間隔毎に正確かつ精密に計測して, その分布を明らかにした.

トルコ鉱物資源調査庁や米国地質調査所・南カリフォルニア地震センター (U.S.G.S., 1999) などの調査機関・グループによる概査結果の速報を参考にして, 地震断層が現れたとされる陸域の 90km 区間を中心に, 周辺に現れた副断層を含む東西 140km の区間を踏査し, 縮尺 2.5 万分の 1 地震断層詳細図を作成した. 現地調査および詳細図の作成においては, 地震直後に撮影された縮尺約 1.5 万分の 1 の空中写真を参考にした. また変位量分布については, 概査結果から平均的な変位量は 3m 程度とされていたことから, その 100 倍の長さの区間ごとに計測を行うこととした. これは, 栗田 (1999) の検討結果から, 変位量の 1 万倍程度の長さで予測される個々のセグメント毎に, 詳細な変位量分布の解明を目指したことによる.

調査の結果, 約 300 点において比較的信頼度が高い断層変位量を計測できた. このうち, 主要箇所については簡易測量によって変位の状況を記録したほか, トータルステーションによる実測図を用いて断層変形帯の広がりを正確に捕捉した. さらに, 地震断層とその周辺地域において, 軟弱地盤の液状化・側方流動などに着目した調査を併せて行い, 地震断層とそれ以外のマスマーブメントによる断裂や地盤変形を明確に区別した.

3. 地震断層の分布形状と変位量分布

Izmit 地震に伴う地震断層は, 北アナトリア断層の北西部の地震空白域と目されていた断層区間の一部 (Barka, 1996) に沿って, 東西約 140km の区間に出現した (第 1 図). 変位量が大い地震断層は, 震央の西方約 20km にあたる Golcuk 市付近の海岸に沿って現れたほか, 震央の東方の Izmit 市南方から, その約 90km 東方の Eften 湖にかけてほぼ連続的に現れた. 一般的な走向は東西であり, 右ずれ約 1~5m の変位を伴った. 断層線は, 一般に幅 30m 以下の撓みを伴う変形帯として認められ, 一部では変形帯の幅が 100m 以上にも広がっていた. また断層線の不連続に伴って, 長さ・幅ともに km オーダーのプルアパート構造が形成され, そこでは最大 2.5m の上下成分を伴う右横ずれ正断層が現れた.

3.1 主な地震断層のセグメント

陸域における地震断層は, 断層線の分布形態と変位量分布の連続性に基づいて, 5 つの主要なセグメントに区分できる (第 2, 3 図). それらは東から, Golcuk・Tepetalra・Arifye・Karadere および Aksu セグメントである. 各セグメントは, 変位量が約 1m 以上と大きい主部と, 変位量が 0.5m 以下の末端部とに分けられ, 両者の境界付近では 1km 以下の短い区間において変位量が急変していることが多い.

1) Golcuk セグメント

Golcuk セグメントは Golcuk 市付近の陸域において長さ約 8.5km にわたって確認できた(第 3 図 A)。その西方延長は大きな変位量を保ったまま, Izmit 湾に没している。Golcuk 市西方では, 東西走向で, 変位量は右ずれ 4.0~4.2m であった。同市東方では, 走向を北西-南東に転じて北東落ちの正断層成分を伴うようになり, 南東に向かって次第に変位量を減じた。この正断層成分を伴う区間では, 最大 2.5m 北東落ちの上下成分が計測された。正断層成分のために, Kazikli 川の扇状地性三角州では最大 3~4m 程度の沈降が生じ, 海岸線の一部が水没した。

このセグメントのうち東部の正断層成分を伴う区間では, 地震断層に沿って累積性のある低断層崖が認められ, その比高は, 今回の変位を含めて 5~10m であった。

Izmit 湾での高分解能音波探査によれば, Golcuk セグメントの西方延長域では, 約 20km にわたって海底に地震断層が現れた(岡村ほか, 印刷中)。しかし, さらに西方の Hersek セグメントに沿っては, 海底(岡村ほか, 印刷中)および陸域の双方において, 顕著な地震断層が現れなかったことが確認されている。Golcuk の約 30km 西方には, 北端に陸繋島を従えた Helsek 三角州が大きく Izmit 湾に突出している。地質構造(Emre *et al.*, 1998)からは, Hersek セグメントは陸繋島の南縁を通過することが予想されたが, そこでは地震断層や顕著な地殻変動は観察できなかった。ただし, 地震観測・測地データによれば, 地震の破壊領域の西端は Izmit 湾の中央に沿って, Golcuk の西方約 50~60km にまで及んだとされている(Ito *et al.*, 2000)。

2) Tepetarla セグメント

Tepetarla セグメントは, Izmit 湾東岸から Sapanca 湖西岸までの 19km 区間で明瞭に認められた。ほぼ東西走向で, 変位量は右ずれ $2.8 \pm 0.2\text{m}$ (信頼度の高い 27 地点の平均と標準偏差)とほぼ一様であり, 最大値は 3.4m であった(第 3 図 A, B)。このセグメントに沿っては, 約 1.5~7km 間隔毎に, 長さ 300m 以下の小規模なプリアパート構造が 5 カ所に現れた。

このセグメントは, 第四系から構成される背斜状地形の斜面(Emre *et al.*, 1998; Ikeda, 1998)に沿っている。

3) Arifiye セグメント

Arifiye セグメントは, Sapanca 湖の西岸から Sakarya 盆地の中央部を通過して, Mudurnu 川東岸までの 27km 区間に現れた(第 4 図 C, D)。走行は西北西-東南東である。セグメントの西部では変位量が右ずれ約 4m 以上と大きく, 最大変位量として, Arifiye の南のポプラ林において 4.9m が計測された。Sakarya 川以東のセグメント中・西部では, 断層変位量は東に向かって徐々に, あるいは階段状に減少し, Mudurnu 川西岸では約 2m となった。断層は Mudurnu 川付近で急に変位量を減じ, 末端部の 6.5km 区間の変位量は約 0.5m であった。

このセグメント中部の約 10km 区間では, 0.3~0.5m の南落ちの上下成分が伴われ, 今回の変位を含めて比高 1m 弱程度の累積性のある低断層崖が認められた。付近の住民の証言によれば, この区間では 1967 年 Mudurnu 地震の際にも小規模な地震断層が現れたとのことである。また, この区間の南側では, 数カ所において北西-南東走向で北東落ちの, 小規模な正断層が現れた。

4) Karadere セグメント

Karadere セグメントは, Sakarya 盆地の西部から Almacik 山地北縁部にかけて, 西南西-東北東に延びる, 長さ 15km の地震断層である(第 4 図 D, 第 5 図)。主部の約 10km 区間のうち, 東部では右ずれ 1.5~2.0m, 西部では同 1m 弱であり, いずれにおいても南落ち 0.5m 以下の上下変位を伴った。セグメント両側の末端部においては, 変位量は 0.5m 以下となり, 西

端部と主部との間では断層線がクランク状に右屈曲している．このセグメントの大部分は線状の谷地形に沿っており，さらにセグメント西部においては段丘面群を変位させる顕著な変位地形に沿って現れた．

5) Aksu セグメント

Aksu セグメントは，Almacik 山地の北縁部から Duzce 盆地の南東部にかけて，全体として西南西-東北東に延びる長さ 15km の地震断層である(第 5 図)．セグメント西部の山地内においては，Aksu 川沿いの直線状の谷に沿って長さ 6km の主部が現れ，最大変位量は 1.7m で，0.6m 以下の南東落ちの上下成分を伴った．また東部の末端部 6km は，Duzce 盆地の南東縁部の山地と盆地の境界において，三角末端面を伴う顕著な断層崖下に沿って現れた．主部と東側末端部の間では，断層線がクランク状に右屈曲している．セグメント東側の末端部は，おおむね東西走向で小刻みに湾曲した形状を示し，北落ち 0.3m 以下の正断層成分と，0.3m 以下の右横ずれを伴った．

なお，Aksu セグメントの東部の 6km 区間は，Izmit 地震の 3 ヶ月後に発生した 11 月 12 日の Duzce 地震の地震断層(長さ 43km；Emre *et al.*, 2000)と一部オーバーラップしている．ただし，Duzce 地震に伴う変位量は，このオーバーラップ区間の東部では最大北落ち約 3m，右ずれ約 2m と大きかった(Emre *et al.*, 2000)．

3.2 副次的な地震断層

上記の主要なセグメントの周辺にも，長さ数 km 以下で，変位量数 10cm 以下の小規模な地震断層が孤立して現れた(第 1 図)．

Duzce 盆地の西部では，Aksu セグメントの北北東約 10km に，北東-南西走向，長さ 1.5km，右ずれおよび南東落ちの変位量がいずれも 0.2m 以下の地震断層が現れた．この東方約 2km の地点でも，高速道路の路面上に北東-南西走向の断層群が現れた．

Sakarya 盆地北東縁の丘陵地帯では，地震断層の主断層線の約 10km 北方にあたる Hendek 市付近において，既知の Hendek 断層(Emre *et al.*, 1998)に沿う，長さ約 4km の地震断層が確認できた．地震断層は西南西-東北東走向で変位量は最大で右ずれ 0.3m であった．

Sapanca 湖南岸の Sapanca 付近では，北西-南東走向で右ずれを伴う正断層が 2 条現れた．変位量は右ずれ数 cm 以下，北東落ち最大 0.6m であった．Sapanca 湖岸の三角州の先端付近では，断層の沈下側の地域が最大 1m 程度水没した．ここでは地盤の液状化に伴う噴砂現象が認められたが，断層に直交する方向の地盤の水平移動成分は断層近傍のみで大きく，液状化に伴う地盤の側方流動は顕著ではなかった．なお，この地震断層の一部では，1967 年 Mudurnu 地震の際にも小規模な地震断層が現れた(Ambraseys and Zatopec, 1969)．

海底では顕著な地震断層が確認できなかった Hersek セグメントの南方にあたり，震央の西方約 50km に位置する Catal 岬付近では，東西走向の右ずれ成分を伴う正断層が現れた．変位量は右ずれ数 cm，北落ち最大 20cm であった．この地震断層に沿っては，堆積原面が良好に保存された段丘面上に数 m 程度の北落ちの撓曲崖が発達している．

これらの副断層を含めると，地震断層が現れた範囲は東西約 140km となる．

4. 地震に伴う沿岸域の水没

Izmit 地震では，Izmit 湾南岸の Golcuk 付近から Karamursel 付近にかけての海岸と Sapanca 湖の南岸において，数カ所で沿岸域が水没した．このうち Golcuk 付近と Sapanca 湖岸の水没は，上述のように正断層の活動に起因したものである．しかし，Golcuk 東方の Degirmendere・Urasru・Karamursel 付近の扇状地性三角州の末端で生じた水没は，1) 中～低層の建物が完全に水中に没するほど地盤の移動量が大きいこと，2) 失われた地盤の周辺に側方流動を示す幅広い断層帯が認められることから，主として，地震に伴ってランドスライドが起こったこ

とに起因すると判断した。

5. セグメントとジョグの特徴

5.1 セグメントの変位量と長さの特徴

Izmit 地震断層の個々のセグメントでは、その主部において比較的一様な変位量が現れた。最も典型的な例は Tepatarla セグメントであり、観察された 19km 区間において平均変位量 2.8m、標準偏差 0.2m であった。計測誤差が手法的に $\pm 0.1\text{m}$ 程度は見込まれることを考慮すると、その一様性は極めて高いといえる。Arifiye セグメントにおいては、変位量が一様ではなく、東に向かって漸減していくように見える。しかしここでも、北西-南東方向の副断層群によって変位量が次第に分散していくメカニズムを考慮すれば、馬尾状をなす断層帯全体での変位量の変化は比較的小さい可能性がある。

Izmit 地震断層の変位量分布は、他の研究グループ (Barka *et al.*, 2000; U.S.G.S., 1999) によっても調査されている。著者らの計測結果と比較すると、他の研究グループが報告した変位量は、ほぼ一致する地点もあるが半分以下と小さい地点も多い。この計測値の違いは、主に、断層が幅広い範囲において撓み成分を伴っている地点において、撓み成分を十分に補足できなかったかどうかに起因するものと考えられる。

セグメント毎にその長さを変位量を比較すると、長さが長いセグメントほど最大変位量が大きい傾向が認められる (第 1 表)。さらに、セグメント毎の長さ (L) は 15~35km、最大変位量 (D_{\max}) は 1.7~4.9m の範囲にあって、そのスケーリング則は、

$$L \text{ (km)} = \text{ca. } 8 \times D_{\max} \text{ (m)}$$

と表される。このような Izmit 地震の地震断層に認められるセグメントの規模とスケーリング則は、日本の陸域における地震断層の活動セグメント (粟田, 1999) や、北米大陸西部のベーズン・アンド・レンジ地域における地震断層の構造セグメント (dePolo *et al.*, 1991) の規模およびスケーリング則とおおむね等しい (第 3 表)。北アナトリア断層系の地震断層では、日本の陸域や北米大陸の地震断層と比べて、最大変位量の分布範囲はおおむね同じであるが、前者は後 2 者に比べて地震断層長が長いことが注目される。この点については、個々のセグメントの規模は地域によらず同じであるが、断層の形状が直線的である北アナトリア断層系では、同時に多くのセグメントが連動して破壊する傾向があるものと考えられる。

5.2 セグメント境界をなすジョグの特徴

Izmit 地震断層では、直線的に延びるセグメントの主部の間には、形態的にも変位量分布の点でも不連続をなす、末端部がつくるジョグが認められる (第 6 図)。ジョグの規模は、長さ 3~16km、幅 0.6~9km で、形態的にはステップ・オーバー、隔離、屈曲のいずれか (第 7 図)、あるいはその組み合わせからなる (第 2 表)。個々のセグメント内に認められる小規模な不連続構造は長さ 300m 以下であり、規模の点において、これらのセグメント間の不連続構造とは明確に区別できる。

セグメント境界をなすジョグは、その規模、屈曲の程度、応力タイプ (伸張・圧縮) の組み合わせ (Barka and Kadinsky-Cade, 1988) によって分類することができる (第 2 表)。規模の点では、Arifiye-Karadere ジョグと、11 月に発生した Duzce 地震断層との境界にあたる Aksu-Eften ジョグが大きい。さらに、これら 2 つの大きなジョグは、ともに約 30° と顕著な屈曲を伴っている。このうち、Izmit 地震断層の中間部に位置する Arifiye-Karadere ジョグは圧縮性であるのに対して、東端に位置する Aksu-Eften ジョグは伸張性となっている。

一般に、地震断層の内部において不連続構造をなすジョグの規模は、長さ数 km 以下であることが知られている (Barka and Kadinsky-Cade, 1988; 松田, 1990; dePolo *et al.*, 1991)。また、地震断層の末端は、長さが 10km 以上で、 30° 以上の屈曲を伴う伸張性のジョグであること

が経験的に知られている (Barka and Kadinsky-Cade, 1988). 一つの地震において連動的に破壊を伝播するジョグと, 破壊を停止させるジョグの規模・形状・タイプの特徴は, 今回の Izmit 地震においても再現された .

5.3 セグメント構造と震源過程の比較

地表の地震断層のセグメント構造は, 地下の震源断層の破壊過程にも影響を与えていると考えられる . Izmit 地震の遠地実体波の波形解析から推定された震源過程と, 地震断層の変位量分布との比較によれば, 両者が量的・空間的に整合的であるとされている (Pinar *et al.*, 2000). さらに, 推定された震源過程 (Pinar *et al.*, 2000) と地表の地震断層を比較すると, 震源断層の破壊は Tepeparla セグメントの西端から東西両方向に伝播し, このうち東側では, Arifiye-Karadere ジョグで数 10 秒間破壊が一時停止し, その後さらに東に伝播して Aksu-Eften ジョグで完全に停止したことになる . また, 8 月 17 日の Izmit 地震の後にはその東隣で 11 月 12 日に Duzce 地震が発生したことから, Aksu-Eften ジョグにおいては約 3 ヶ月の間, 破壊の伝播が停止していたことになる . すなわち, 規模が大きく, 顕著な屈曲を伴うジョグで破壊の伝播が長期間停止する傾向があり, さらに圧縮性のジョグよりも伸張性のジョグにおいて停止期間が長かったことになる .

このように, ジョグの規模・形状がセグメント間の破壊伝播時間に影響を与えたことは, 長大な活断層系における多重セグメント地震の震源過程を予測する上で重要である . 今後, 他の地震における事例を詳しく再検証するとともに, クーロン破壊応力モデルなどによって破壊伝播の力学的なメカニズムを検討する必要がある .

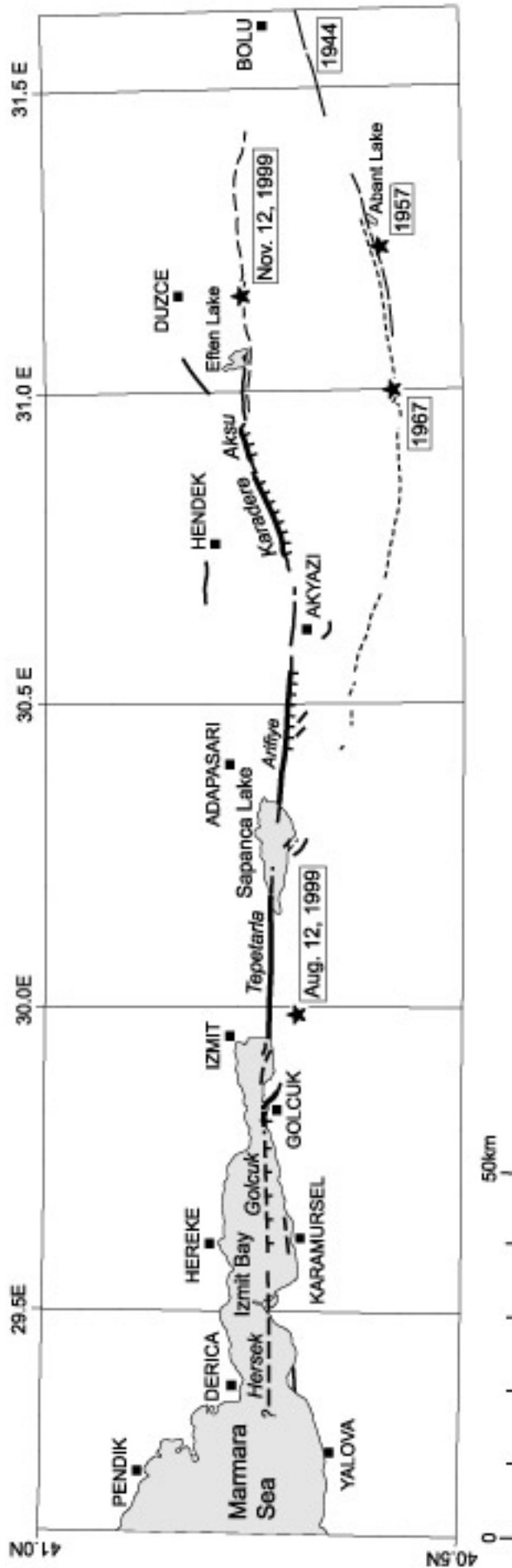
謝 辞

現地調査にあたっては, 地球科学情報研究部門の加藤碩一氏, トルコ鉱物資源調査庁の Ismail Kuscu および Terfik Erkar 氏らに協力いただいた . ここに記して感謝申し上げます .

文 献

- Ambraseys, N.N. (1970) Some characteristics of the Anatolian fault zone . *Tectonophysics*, **9**, 143-165 .
- Ambraseys, N.N. and Zatopec, A. (1969) The Mudurnu Valley, western Anatolia, Turkey earthquake of 22 July 1967 . *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **59**, 521-589 .
- 栗田泰夫 (1999) 日本の地震断層におけるセグメント構造とカスケード地震モデル (試案). 地質調査所研究速報 , no. EQ/99/3 , 275-284 .
- 栗田泰夫・吉岡敏和・佃 栄吉・Emre, O., Duman, T. Y. and Dogan, A. (印刷中) 陸域の地震断層調査 . 科学技術振興調整費 トルコ北西部の大地震に関する緊急調査成果報告書 .
- Awata, Y., Yoshioka, T., Emre, O., Duman, T.Y., Dogan, A. and Tsukuda, E. (2000) Segment structures of the surface ruptures associated with the August 17, 1999 Izmit earthquake, Turkey. *Book of Abst. Papers, XXVII General Assem. Euro. Seismol. Commis.*, 149-153.
- Barka, A. A. (1996) Slip distribution along the North Anatolian fault associated with the large earthquakes of the period 1939 to 1967. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **86**, 1238-1254.
- Barka, A. A. and K. Kadinsky-Cade (1988) Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonics*, **7**, 663-684.
- Barka, A. A., Akyuz, S., Altunel, E., Sunal, G., Cakir, Z., Dikbas, A., Yerli, B., Rockwell, T., Dolan, J., Hartleb, R., Dawson, T., Fumal, T., Langridge, R., Stenner, H., Christofferson, S., Tucher, A., Armijo, A., Meyer, B., Chabalier, J.B., Lettis, W., Page, W. and Bachhuber J. (2000) The August 17, 1999 Izmit earthquake, M=7.4 Eastern Marmara, Turkey, study of surface rupture and slip distribution. *The Izmit and Duzce earthquakes: preliminary results*, Istanbul Tech. Univ., 15-30 .
- dePolo, C.M., D.G. Clark, D.B. Slemmons and A.R. Ramelli (1991) Historical surface faulting in the Basin and Range province, western North America: implication for fault segmentation. *Jour. Struc. Geology*, **13**, 123-136.

- Emre, O., Duman, T.Y., Awata, Y., Dogan, A. and Ozalp, S. (2000) Surface ruptures of November 12 1999 Duzce earthquake, NW Turkey. *Book of Abst. Papers, XXVII General Assem. Euro. Seismol. Commis.*, 247-252
- Emre, O., T. Erkal, A. Tchepalyga, N. Kazanci, M. Kecer, M. and E. Unay (1998) Neogene-Quaternary evolution of the eastern Marmara region, northwest Turkey. *Mineral Res. Expl. Bull.*, **120**, 119-145.
- Ikeda, Y. (1988) Geomorphological observation of the North Anatorian fault zone west of Mudurnu. *Multidisciplinary Research on Fault Activity in the Western Part of the North Anatolian Fault Zone, Tokyo Inst. Tech. And Kandilli Obser. Bogazici Univ.*, 6-14.
- Ito, A., Ucer, B., Baris, S., Honkura, Y., Nakamura, A., Kono, T., Pektas, R., Komut, T., Hasegawa, A. and Isikara, A. (2000) Preliminary report on the aftershocks of 1999 Izmit earthquake, Turkey, revealed from microearthquake observations. *The Izmit and Duzce earthquakes: preliminary results*, Istanbul Tech. Univ., 225-232 .
- 松田時彦 (1990) 最大地震規模による日本列島の地震分帯図 . 地震研究所彙報 , **65**, 289-319.
- 岡村 眞・松岡裕美・須貝俊彦・遠田晋次・奥村晃史・栗田泰夫・Kuscu, I.・Emre, O.・Duman, T. Y.・Dogan, A.・Karagoz, S. (印刷中) 海域の地震断層調査 . 科学技術振興調整費 トルコ北西部の大地震に関する緊急調査成果報告書 .
- Pinar, A., D. Kalafat, G. Horasan, N. Ozel, M. Yilmazer, A.M. Isikara and L. Gulen (2000) Rupture process of the August 17, 1999 Izmit (Kocaeli) earthquake. *The Izmit and Duzce earthquakes: preliminary results*, Istanbul Tech. Univ., 71-78 .
- 須貝俊彦・栗田泰夫・遠田晋次・Omer Emre・Ahamet Dogan・Selim Ozalp・原口 強・木下博久・高田圭太・山口正秋 (2001) 北アナトリア断層系 1999 年デュズジェ地震断層の古地震調査 . 活断層・古地震研究報告 , no. 1, 339-351 .
- U. S. Geological Survey (1999) Implication for earthquake risk reduction In the United States from the Kocaeli, Turkey, Earthquake of August 17, 1999. *U. S. Geological Survey Circular* 1193, 64p .
- Working Group on California Earthquake Probabilities (1995) Seismic hazards in southern California: probable earthquakes, 1994 to 2024. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **85**, 379-439.

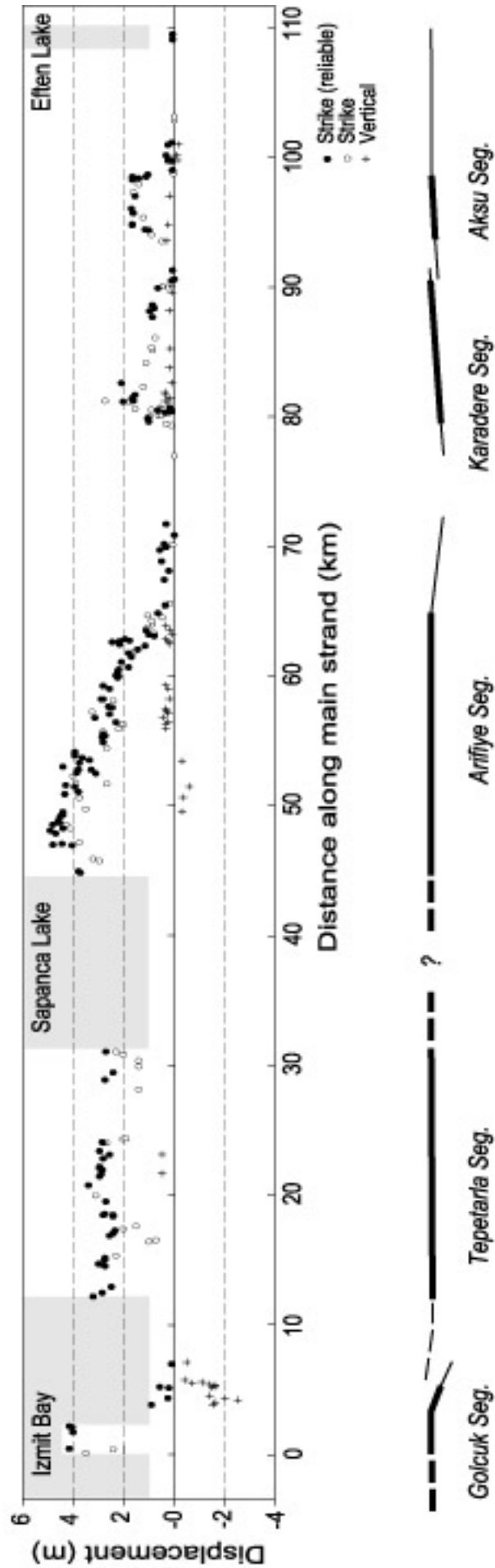


第1図. 北アナトリア断層帯北西部における1999年Izmit地震断層と1944年以降の地震断層.

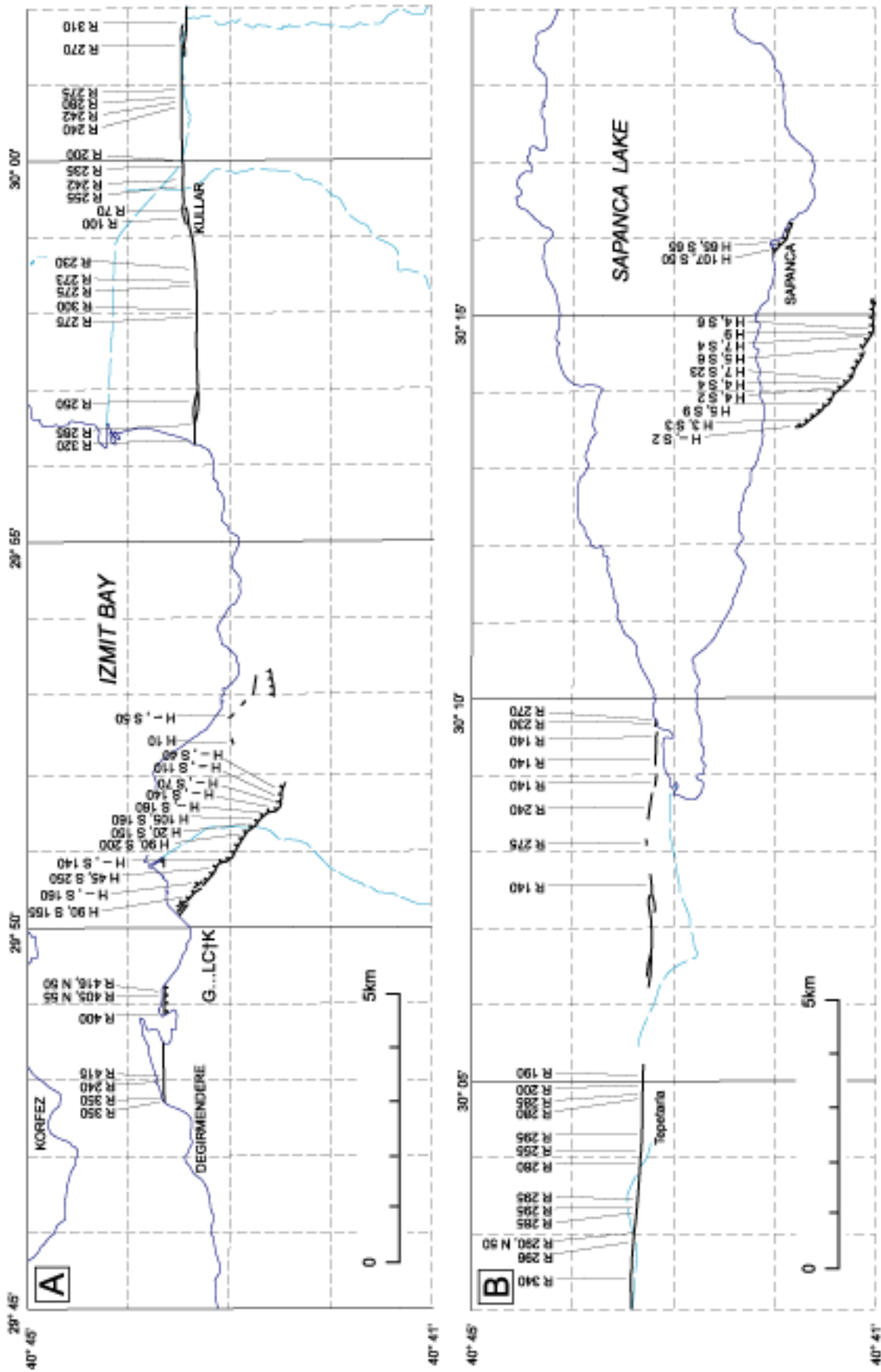
1999年Izmit地震断層：太線は主断層線；ケバは上下変位の低下側；細線は末端部および副次的断層；主断層線は、Golcuk, Tepetarla, Arifiye, KaradereおよびAksuセグメントから構成される。1999年Duzce (Emre et al., 2000) , 1967年Mudrunu (Ambraseys and Zatopec, 1969) , 1957年Abantおよび1944年Bolu-Gerede地震断層(一部) (Ambraseys, 1970) を併せて示す。

Fig. 1. Surface fault ruptures on the northwestern North Anatolian fault system, 1944 to 1999.

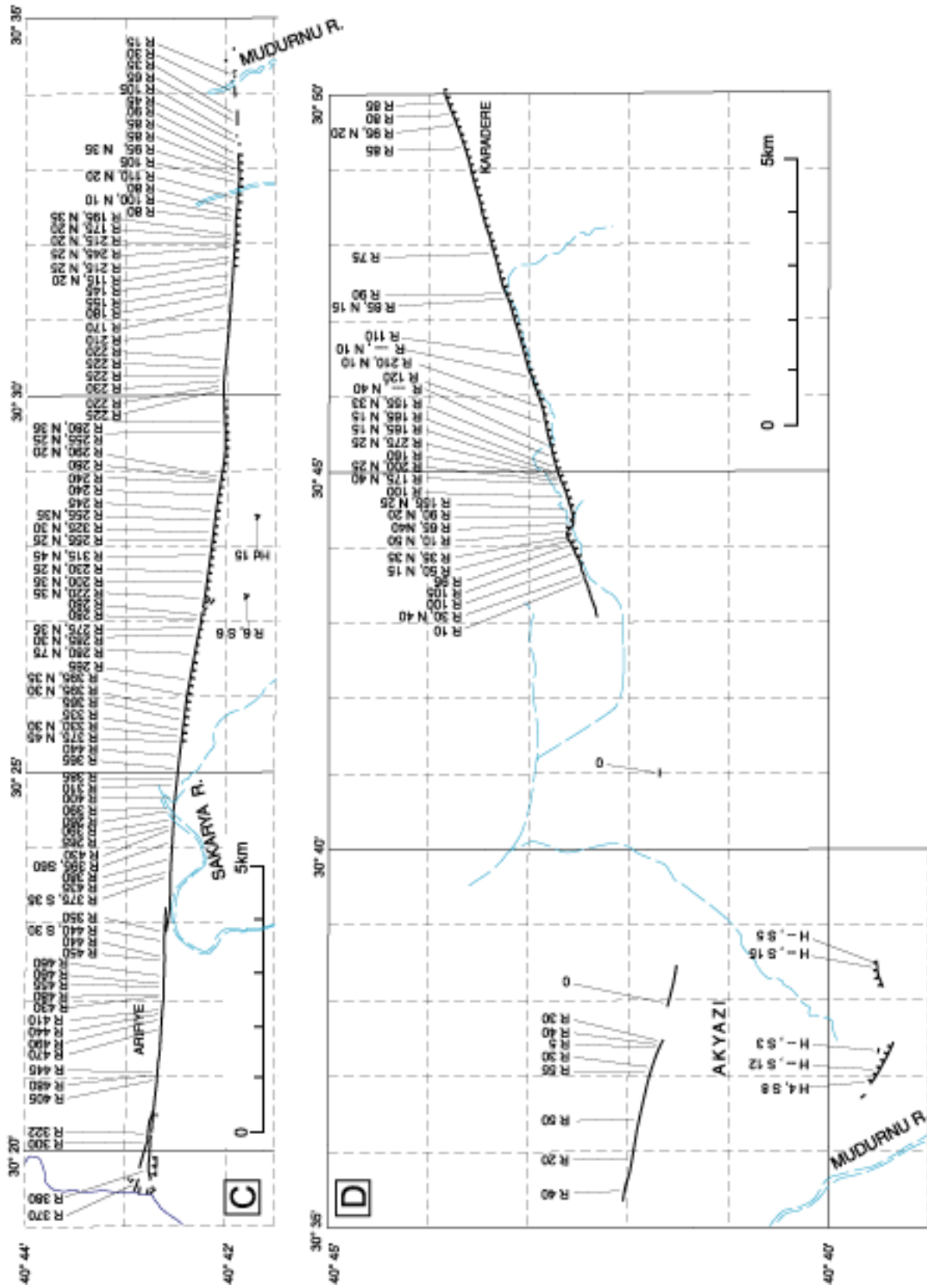
1999 Izmit Surface fault: thick line shows the body-section of main strand; sticks show downthrown side; thin line shows the tail-section of main strand and subordinate strand; the main strand of 1999 rupture consists of the Golcuk, Tepetarla, Arifiye, Karadere and Aksu segments. 1999 Duzce (Emre et al., 2000), 1967 Mudrunu (Ambraseys and Zatopec, 1969), 1957 Abant and 1944 Bolu-Gerede (Ambraseys, 1970) surface ruptures are also shown.



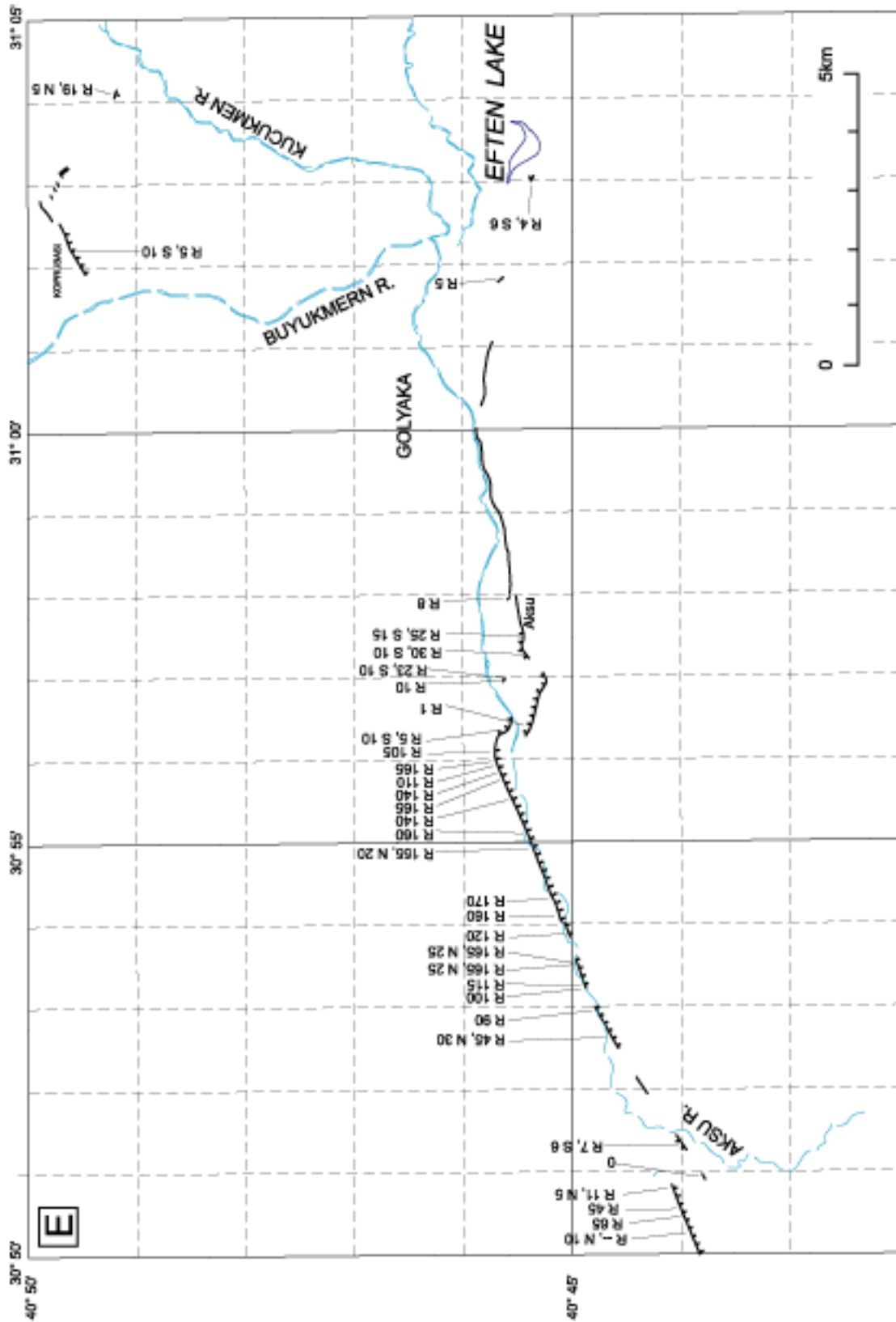
第2図. 1999年Izmit地震に伴う地震断層の変位量分布.
 Fig. 2. Distribution of fault displacement along the surface rupture of the 1999 Izmit earthquake.



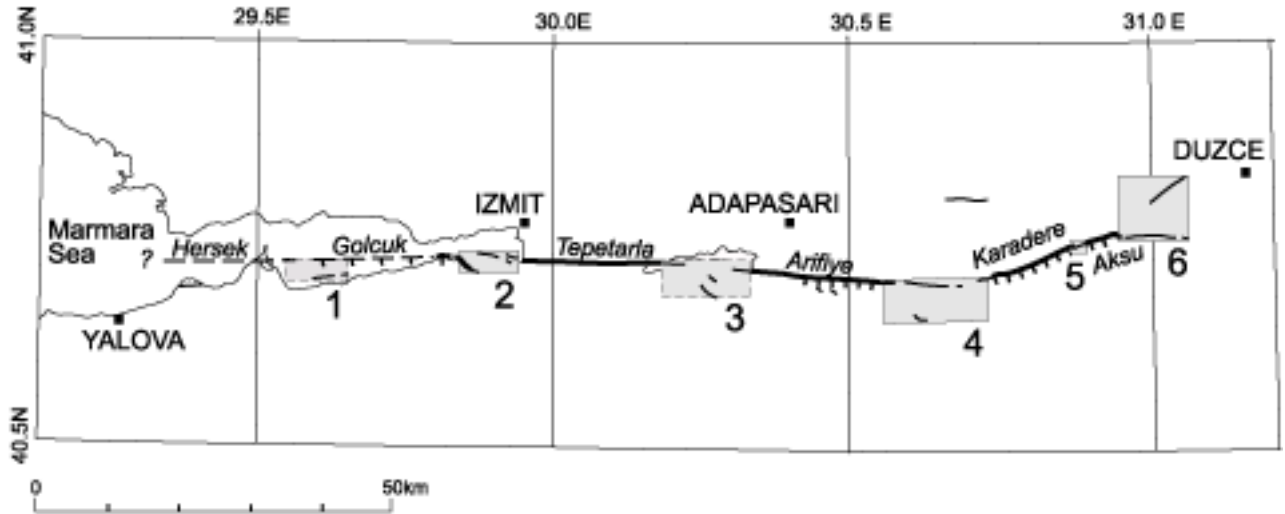
第3図. 地震断層の詳細図 (その1).
 数字は断層の変位量 (cm). R : 右ずれ, H : 水平傾斜, N : 北側隆起, S : 南側隆起.
 Fig. 3. Strip map of the surface rupture of the 1999 Izmit earthquake (part 1).
 Numerals show the displacement in centimeter. R: right-lateral, H: horizontal-dip, N: north-side-up and S: south-side-up.



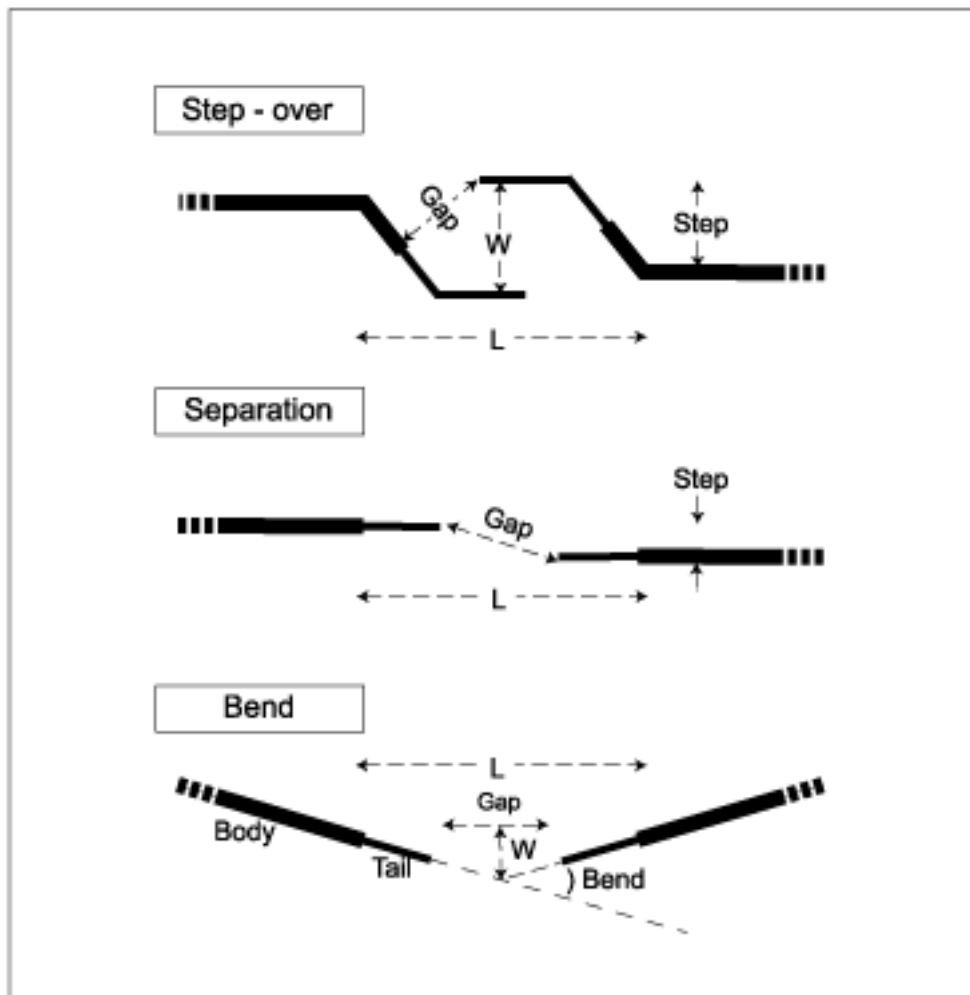
第4図. 地震断層の詳細図 (その2)
Fig. 4. Strip map of the surface rupture of the 1999 Izmit earthquake (part 2).



第5図. 地震断層の詳細図 (その3).
 Fig. 5. Strip map of the surface rupture of the 1999 Izmit earthquake (part 3).



第6図. 1999年Izmit地震に伴う地震断層のセグメント構造とジョグの分布.
Fig. 6. Segment structures and jogs of the 1999 Izmit surface rupture.



第7図. 横ずれ地震断層に伴うジョグの分類.
Fig. 7. Type of jogs in strike-slip fault.

Name	Length (km)			Displacement (m)		Length of Section (km)
	Total	Body	Tail	Max.	Mode	
Hersek						
Golcuk	ca. 25	>= 7		4.2 ?	4.0 ?	
Tepetarla	ca. 30	>=19	<=11	3.4	2.8	1.5 - 7
Arifiye	ca. 35	>=21	<=14	4.9	2 - 4.5	3 - 6
Karadere	12	10	2	2.1	1 - 2	3 - 7
Aksu	21	5	16	1.8	1.6	

第1表. 1999年イズミット地震に伴う地震断層のセグメントの特徴.
Table 1. Characteristics of the segments in the 1999 Izmit surface rupture.

Name	Size (km)					Bend (deg.)	Type
	Length	Width	L * W	Step	Gap		
1 Hersek - Golcuk	?	<=4	?	0	?	<5	?
2 Golcuk - Tepetarla	8	3	24	1	2 - 3	<5	Releasing
3 Tepetarla - Arifiye	<<16	<4	<<64	0	<<14	<5	Releasing
4 Arifiye - Karadere	14	5	70		6	30	Restraining
5 Karadere - Aksu	3	0.6	1.8	0	0.6	<5	Releasing
6 Aksu - Eften	8	9	72		0	30	Releasing

第2表. 1999年イズミット地震に伴う地震断層のジョグの特徴.
Table 2. Characteristics of the jogs in the 1999 Izmit surface rupture.

Region	Earthquake Segment			Fault Segment		
	M	Length (km)	Displace. Max. (m)	Number >=5km	Length (km)	Displace. Max. (m)
Japan (in land)	6.8 - 8.0	12 - 80	1.7 - 7.4	1 - 3	9 - 36	1.2 - 7.4
N. America (Basin & Range)	6.8 - 7.7+	34 - 110	3.5 - 11.0	2 - 4	6 - 50	1.5 - 11.0
N. Anatolian Fault (1999)	7.1 - 7.4	43 - 145	4.9 - 5.3	2 - 6	10 - 35	1.8 - 5.3
N. Anatolian Fault (1939-99)	7.0 - 7.8	30 - 360	1.6 - 7.5			

第3表. 北アナトリア断層系・日本内陸・北米西部における地震断層の規模の比較.
Table 3. Comparison of length and displacement among the surface ruptures in North Anatolia fault system, inland Japan and western North America.