

北アナトリア断層系・1944年 Bolu-Gerede 地震断層の分布形状と変位量

Fault geometry and slip-distribution along the 1944 Bolu-Gerede surface rupture, North Anatolian fault system, Turkey

近藤久雄¹・粟田泰夫²・Omer Emre³・Ahmet Dogan⁴
Selim Ozalp⁵・Fatma Tokay⁶・Cengiz Yildirim⁷・奥村晃史⁸・吉岡敏和⁹

Hisao Kondo¹, Yasuo Awata², Omer Emre³, Ahmet Dogan⁴,
Selim Ozalp⁵, Fatma Tokay⁶, Cengiz Yildirim⁷, Koji Okumura⁸ and Toshikazu Yoshioka⁹

^{1,8}広島大学大学院文学研究科 (Graduate School of Letters, Hiroshima Univ., kondoh@hiroshima-u.ac.jp,
kojiok@hiroshima-u.ac.jp)

^{2,9}活断層研究センター (Active Fault Research Center, GSJ/AIST, awata-y@aist.go.jp, yaoshioka-t@aist.go.jp)

^{3,4,5,6,7}トルコ鉱物資源調査開発総局 (General Directorate of Mineral Research and Explanation of Turkey, emre@mta.gov.tr,
dogan@mta.gov.tr, ozalps@mta.gov.tr, tokay@mta.gov.tr)

Abstract: A 180-km-long right-lateral surface rupture associated with the 1944 Bolu-Gerede earthquake (M_s 7.3) was re-examined by interpretation of aerial photographs taken in the 1970's, field observations of tectonic landforms and offset topographic features, and interviews to the villagers. The 1944 rupture is divided into five geometrical or behavioral segments ranging in length from 21 to 46 km with an average right-lateral displacement of 1.9-4.3 m. They are, from west to east, the Bolu, Yenicaga, Gerede, Ismetpasa and Bayramoren segments. The segment boundaries are characterized by 1- to 2-km-wide offset, gap, or bend of fault strand. Each segment is further divided into sections, several to 14 km long, based on slight discontinuity of fault line and slip distribution along the fault. Historical records show that the five segments of the 1944 rupture were probably split into two earthquake segments during a sequence of 967 and 1035 earthquakes, and they broke as a part of the several-hundred-kilometers-long rupture during the great 1668 earthquake. In spite of such differences in rupture length during historical earthquake cycles, measured offsets of topographic features along the Gerede segment are double to quadruple multiples of the 1944 slip.

キーワード: 北アナトリア断層系, 1944年 Bolu-Gerede 地震, 地震断層, セグメンテーション, 断層形状, 変位量分布, 単位変位量, 累積変位量

Key words: North Anatolian fault system, 1944 Bolu-Gerede earthquake, surface rupture, fault segmentation, fault geometry, slip distribution, slip per event, multiple offset

1. はじめに

北アナトリア断層系では, 歴史時代において複数回の地震サイクルが繰り返されてきており, 最近では 1939-1999 年の間に 8 つの M 7 以上の大地震を連鎖的に発生させてきたことが知られている (Ambraseys, 1970; Barka, 1992; Barka *et al.*, 2002 など). このことから同断層系は, 長大な断層系におけるセグメント区分, セグメントの連動性および断層活動の繰り返し様式の特徴を明らかにする上で, 最も重要な研究対象の 1 つとなっている. なかでも 1944 年に M_s 7.3 の地震を発生させた Bolu-Gerede 地震断層 (第 1 図) は, 1668 年には, 1939 年・1943 年および 1967 年地震断層などと連動して単独の巨大地震を発生させ, また 10-11 世紀の地震サイクルでは複数の地震に分かれて破壊したとされる (例えば Ambraseys, 1970). このことから, 1944 年地震断層は, 地震サイクル毎

に連動の組み合わせが変化する場合の断層活動様式の解明に, 最適の研究対象である.

1944 年地震断層についての既存の研究では, Ambraseys (1970), Barka and Kadinsky-Cade (1988), Barka (1996) などがその分布形態を小縮尺図に記載したにとどまり, 変位量については, わずかに 8 カ所での計測値が報告されているに過ぎない (Barka, 1996 など). これらのデータは, 1999 年 Izmit 地震断層のセグメント区分に関する研究 (例えば Lettis *et al.*, 2002; Awata *et al.*, 2003) に用いられているものと比較すると, 量的・質的に全く不足しているといえる. また, 1944 年地震断層に沿っては, 数回の地震サイクルによる累積的な変位地形が認められることが指摘されているが (池田ほか, 1994), その詳細は明らかにされていない.

以上のことから筆者らは, 1944 年地震断層の分布

形状および地震時の変位量分布と、最近数回分の活動における変位の累積量を解明することを目的として、地震地質学および古地震学的な研究を実施してきた。この報告においては、同地震断層の分布形状および変位量と、過去の活動による累積的な変位地形の概略について報告する。

2. 研究の方法

本研究では、まず、1970年代前半に撮影された縮尺約1/10,000の空中写真を使用して断層変位地形の判読を行い、縮尺1/25,000地形図を基図とする予察的な活断層分布図を作成した。この判読においては、断層変位地形とともに、1944年地震に伴うと考えられる数m以下の新鮮な横ずれ変位が各地で検出できた。次に、判読された断層線に沿って、実地踏査と住民への聞き取り調査を実施し、断層変位地形の有無と、1944年地震に伴う断層の出現状況を確認した。これらの結果をもとに、縮尺1/25,000地形図を基図とする地震断層分布図を作成した。

1944年地震断層の変位量は、断層線上に認められる土地境界、道路、石積みの壁、並木といった人工構築物や、小河川、段丘崖などの自然地形を横ずれ変位の基準として計測した。変位量の計測は、巻き尺とコンパスによる簡易測量によるとともに、変位基準の精度と信頼度に留意して、計測値の信頼度を高低(Good/Poor)に2分した。1944年地震断層に伴う断層変位は、地震直後の調査によって2地点で2.0-3.5mと報告されていることから(Ketin, 1948, 1969; Tasman, 1944; Barka, 1996)、今回の調査では、それらと同程度の変位量や、人為的な改変を受けやすい土地境界などの数m以下の変位量を、1944年地震による変位と推定した。

実地調査は、3人1組のチームで延べ約40チーム・日にわたって実施し、1944年地震によると推定される変位量は49地点で計測できた。

3. 1944年地震断層の調査結果

3.1 1944年地震断層のセグメント区分と変位量

1944年Bolu-Gerede地震に伴う地震断層は、Bolu西方のAbant湖付近からCankiri北西方のBayramoren付近まで約180kmにわたって出現した(第1図)。この地震断層の東側には1943年地震(M_s 7.3)に伴う長さ260kmの地震断層が、また西側には1957年地震(M_s 7.0)に伴う長さ40kmの地震断層などが連なっている(Barka, 1996)。

1944年地震断層は、断層線の幾何学的形態の特徴と変位量分布から、5つのセグメント(第1表)に区分できる。これらのセグメントは、McCalpin(1996)の幾何学セグメントおよび活動セグメントに相当すると考えられる。

断層の幾何学的形態の特徴、とくに断層線のステ

ップ、ギャップおよび屈曲によって示される断層の不連続構造がセグメント構造を規定する指標となり得ることは、Knuepfer(1989)、Lettis *et al.*(2002)、栗田ほか(2001)、Awata *et al.*(2003)などによって示されている。本研究では、主に、栗田ほか(2001)およびAwata *et al.*(2003)によって明らかにされた1999年Izmit地震断層のセグメント構造の特徴を参考に、長さ数km以上の断層線の幾何学的な不連続と変位量の不連続に着目して、セグメント区分を行った。さらに各セグメントは、断層線の小規模な不連続構造やわずかな屈曲によって、長さ数km程度のセクション(Awata *et al.*, 2003)に区分された。

以下では、各セグメントの分布形状と不連続構造の形態的特徴、および変位量について、西から順に記載する。なお、セグメント毎の詳細な分布形状と変位量の計測結果を第2-6図に示す。また、1944年地震時の変位量について計測地点ごとの一覧を第2表に、同地震断層の全域にわたる変位量分布を第7図に示す。

(1) Bolu セグメント

Boluセグメントは、1944年地震断層の西端に位置し、Abant湖付近からBolu市街地の南方を経てKindira付近に至る、長さ約37kmの断層区間である(第2図)。1944年地震による断層変位量は9地点で計測された。このうち主成分である右ずれ変位は7カ所で2.0-3.8mが計測され、信頼度の高い6地点の平均変位量は右ずれ2.6mであった。

1944年地震断層の西端はAbant湖の北東方と見られる。湖の北西方のSaryarでは1957年にのみ地震断層が出現し、また湖の東北東約8kmのDereceorenでは、1944年にのみ地震断層が出現したとの証言が得られた。したがって、1944年地震断層と1957年地震断層の境界は、Abant湖からDereceorenまでの約8km区間に位置することは確実である。しかし、この区間はAbant川沿いの幅広い直線谷にあたり、森林地帯でもあることから、断層地形の詳細はわからなかった。なお本報告では、Abant湖の北東方において断層地形の分布が不明瞭となる約4km区間の中央($40^{\circ} 37' N \cdot 31^{\circ} 18' E$)を1944年地震断層の西端と仮定した。

セグメント西半部のDereceoren付近からAsagikoy付近に至る約22km区間では、断層はわずかに屈曲を繰り返しながら、主に山間部の森林地帯を通過する。ここでは、山地を刻む直線状の谷が発達するものの、顕著な変位地形は見られず、確認できた断層地形は断続的である。しかし、 $N68-78^{\circ} E$ の範囲でわずかに変化する走向に着目すると、この21km区間は3つのセクション(BOL-1, 2および3)に分けられる可能性がある。この区間のうち、Asagikoyからその西南西6kmにかけての区間(BOL-3セクション)では、地震断層が現れたとの証言がいくつか得られたが、それよりも西側ではDereceorenの集落を除いて、地震

断層に関する情報は得られなかった。なお、Dereceoren では、地震断層が出現したと証言された地点 (Loc.10) において、宅地と畑の境界が不明瞭ながら $2.3 \pm 0.8\text{m}$ 右屈曲していた。

セグメント東半部の Asagikoy 付近から Kindira に至る約 14km の区間では、断層は $N80^\circ E$ の走向に転じて、Bolu 盆地南部の農村地帯を横切る。ここでは顕著な断層変位地形が連続的に分布し、逆向き低断層崖やプレッシャーリッジ・断層池などが多数認められた。この区間では、ほぼ全域において、1944 年地震断層が出現したとの証言が得られた。Bolu 南東方の Ilicakinik 付近では、断層線上に、長さ約 1.5km、幅 0.2km、比高 30m のプレッシャーリッジが形成されており、この 14km 区間は、プレッシャーリッジによってさらに 2 つのセクション (BOL-4 および BOL-5) に分けられる。なお証言によると、1944 年地震ではリッジ北側の断層線に沿って、断層が出現したとのことである。

BOL-4 セクションでは、Bolu 市街地の南西約 3km の Kopruculer 付近 (Loc.60) で、農地境界の横ずれ 3.8m が計測されたほか、農地境界や未舗装道路・水路のずれとして 2.0-3.2m が計測できた。なお、Bolu 市街地から真南に延びる主要道路では 1944 年地震で 3.5m の右ずれが生じたとされるが (Ketin, 1948, 1969), 現在では道路の屈曲を認めることはできない。

東端の BOL-5 セクションでは、Kindura 西方において、扇状地を変位させる比高 10m あまりの逆向き低断層崖が発達しており、この低断層崖の基部に沿って地震断層が現れたとの証言が得られた。東隣の Yenicaga セグメントとの間には、幅 0.6km で右ステップする断層線の不連続構造が発達している。

(2) Yenicaga セグメント

Yenicaga セグメントは、Bolu 盆地南東部の Kindira 付近から Kuzoren 川沿いの谷を経て、Yenicaga 湖東方の Siyamilar 付近に至る、長さ 34km の断層区間である (第 3 図)。1944 年地震による断層変位量は 6 地点で計測された。このうち主成分である右ずれ変位は 5 地点で 1.0-3.8m が計測され、信頼度の高い 4 地点での平均値は右ずれ 3.0m であった。

このセグメントを構成する活断層は、全体としては走向 $N75^\circ E$ で直線的に分布するものの、詳細にみると、右雁行あるいは屈曲からなる長さ数 100m 以下の小規模な不連続部によって 4 つのセクション (YNC-1, 2, 3 および 4) に区分される。各セクションの長さは 4-10km 程度である。YNC-3 と YNC-4 セクションの境界付近にあたる Yenicaga 湖の西方を除くほぼ全域で、1944 年地震に伴って地震断層が出現したとの証言が得られた。

西端の YNC-1 セクションは、 $N71^\circ E$ の走向をもつ長さ 7-8km の断層区間であり、とくに東北東部では、数百 m-1km 毎の断層崖が右雁行する断層帯となっている。

YNC-2 セクションは、 $N77^\circ E$ 走向で、Kuzoren 川の南の丘陵地帯に沿って延びている。Balitali 付近 (Loc.120, 130) では農地境界が 3.7-3.8m、Kuzoren Dagli 付近 (Loc. 140) では農地境界が 2.5m 右ずれに変位していた。

YNC-3 セクションは、Yenicaga 湖西南西方の丘陵を開析する浅い谷に沿って、 $N71^\circ E$ 方向に延びる、長さ 5-8km の断層区間である。東隣の YNC-4 セクションとの境界付近には、長さ約 3km、最大幅 1km のリッジが発達している。リッジは全体として南に傾動し、その北側には地すべり性の正断層群が発達している。

東端の YNC-4 セクションは、Yenicaga 湖付近の盆地を横切る長さ約 10km の断層区間である。西端は上述のリッジによって限られ、また東端は Yenicaga セグメントと東隣の Gerede セグメントとの境界をなす長さ 2-3km・幅 0.9km の二重屈曲を示す圧縮性の不連続構造によって限られる。Yenicaga 湖の西方では、1944 年地震断層についての情報は得られなかった。Yenicaga 湖の東側では、長さ 5km にわたって、 $N83^\circ E$ の方向に撓曲崖が直線状に延びている。この撓曲崖は、西部-中部では北側隆起最大 5m を示し、また東部では南側隆起となっている。隆起成分のヒンジ部にあたる Loc.150 では、1944 年地震によると推定される未舗装道路の右ずれ 2.0m が認められた。証言によれば、この Loc.150 から東に向かって地震断層は次第に不明瞭になっていった、とのことである。

(3) Gerede セグメント

Gerede セグメントは、Siyamlar 付近の圧縮性の不連続構造から Gerede 市街地を経て、Semerciler の圧縮性の不連続構造に至る、概ね $N80^\circ E$ の方向に延びる長さ 31km の断層区間である (第 4 図)。1944 年地震で断層が出現したことは、セグメントの各地で多くの証言が得られた。1944 年地震による断層変位量は 18 地点で計測できた。このうち主成分である右ずれ変位は 17 カ所で 1.5-6.3m が計測され、そのうち信頼度の高い 12 地点の平均変位量は右ずれ 4.3m であった。

このセグメントは、断層線のわずかな屈曲やギャップと変位量分布に基づいて、GRD-1, 2, 3 および 4 の 4 つのセクションに区分できる。

西端の GRD-1 セクションは、長さ約 5km で、Yenicaga 湖東方の Siyamlar 付近から Gerede 西方にかけての丘陵に分布し、連続性に乏しい断層線の連なりから構成されている。

GRD-2 および 3 セクションは、 $N80^\circ E$ 走向で、極めて良好な直線性を示す。両セクションは、上下成分の有無と 1944 年地震時の変位量によって区分されるが、断層線の平面形態からは顕著な不連続構造は認められない。

GRD-2 セクションは、Gerede 付近に分布する $N80^\circ E$ 走向で長さ約 7km の断層区間である。Gerede 市街

地の西方では、北側隆起の低断層崖に沿って断層池が見られ、また Gerede 市街地から Kocumlar までの 7 km 区間では、北落ちで最大比高 50m 程度の顕著な断層崖が形成されている。今回の調査では、Gerede 市街地の東部 (Loc.160) で沖積錐を切る比高 0.5m の低断層崖が認められ、また市街地の東方約 2km (Loc.170) では小扇状地を開析するガリーが 3.0m 右ずれに変位していた。これらは 1944 年地震による変位と推定される。

GRD-3 セクションは、Kocumlar 付近から Kapakli 付近に至る N80°E 走向で長さ 16km の断層区間である。この区間では、小河川が形成する扇状地上に低断層崖・プレッシャーリッジ・断層池・河川の屈曲などの変位地形が多数形成されており、4-6m 程度の右ずれ変位を示す極めて新鮮な断層変位地形が多数認められた (Loc.190-370)。このうち、Loc.190 と 200 ではケルンの列で限られた農地の境界が 4.5-5.6m 右ずれしており、また Loc.320 では 7カ所の農地境界の右ずれが平均 5.5m であった。これらの変位量は、既存の研究で知られていた他地域の 1944 年地震断層の変位量：最大 3.5m (Barka, 1996) よりも有意に大きい。1) 改変を受けやすい農地境界に系統的なずれが認められること、2) このセクションではより小さな変位を示す指標が見つからないことから、1944 年地震に伴うものと考えられる。

東端の GRD-4 セクションは、Kapakli から Semerciler に至る約 4km 区間であり、わずかに右雁行する断層線からなる幅 0.5km 程度の断層帯を構成している。セクション東端部の Semerciler (Loc.400, 410) では、農地境界や集落中の水路が右ずれ 1.0-1.5m の小さな変位を示し、これらは 1944 年地震によるものと推定される。

Semerciler の東側に推定される Ismetpasa セグメントとの境界では、断層線が幅 1.0km で左ステップするとともに、長さ 1.4km のギャップが発達している。

(4) Ismetpasa セグメント

Ismetpasa セグメントは、Semerciler 付近から Ismetpasa を経て、Gerede 川の南岸を東に延びて Afsar 付近に至る、46km の断層区間である (第 5 図)。断層線は緩やかに屈曲しながらも、概ね N80°E の方向に延びている。1944 年地震による断層変位量は、11 地点で右ずれ 2.4-5.0m が計測され、そのうち信頼度の高い 8 地点の平均変位量は右ずれ 3.7m であった。ただし、これらの変位量の一部には、後述のように余効変動による値が含まれている。

断層線は緩やかに屈曲し、数 km ごとに N75-85°E の範囲で走向を変えるが、その境界は明瞭ではない。ここでは、第 5 図に示すように、便宜的に 6 つのセクション (ISM-1, 2, 3, 4, 5 および 6) に区分する。

西端の ISM-1 セクションは、Semerciler 付近から Ismetpasa 西方までの 9km 区間であり、Gerede 高原から西に下る斜面において、断層線が断続的に認めら

れる。ここでは 3カ所において、1944 年地震に伴って地震断層が出現したとの証言が得られた。

Ismetpasa 付近から Hamamli を経て Seyhler に至る ISM-2 セクションでは、1944 年地震で断層が現れたとの証言が多く得られ、また農地境界や未舗装道路・並木列を指標として、3.6-5.0m の新鮮な右ずれ変位が計測できた (Loc.420-460)。ただし、Loc.440 と 450 の間に位置する、幹線道路 (E100) 沿いの道路維持作業所の付近では、1944 年地震の後に断層クリープが継続しており (Ambaraseys, 1970; Dogan *et al.*, 2003)、計測した変位量の少なからぬ部分が同地震の余効変動によるものと推定される (Dogan *et al.*, 2003)。また、1999 年 Izmit 地震 (Ms 7.4) の際にも、震央から東に 225km、同地震の地震断層の末端から東に 140km 離れたこのセクションで、数 cm の断層のすべりがトリガーされた (Dogan *et al.*, 2003)。

ISM-3, 4 および 5 セクションは、いずれも Gerede 川の南に沿う比高約 500m の断層崖の下方を横切って延びており、全体として N80°E の走向を示す。ここでは、北向きの大規模な断層崖斜面に逆向き断層崖が形成されており、河川の屈曲・シャッターリッジ・鞍部列・断層池などの断層地形がよく発達している。西部の Seyhler と Akbas の間の 12km 区間では集落が発達していないことから、1944 年地震断層についての情報は得られなかった。一方、東部の Akbas から Kabak の間では、地震断層が出現したとの証言が多く得られた。このうち Akbas 付近 (Loc.500, 510) では農地境界に 2.4-3.1m、Kabak 周辺 (Loc.520-530) でも農地境界や未舗装道路に 2.4-4.1m の極めて新鮮な横ずれ変位が認められた。これらは、いずれも 1944 年地震による変位と推定される。

東端の ISM-6 セクションでは、1944 年地震断層に関する証言は得られなかった。なお、Ismetpasa セグメントの東端は Afsar 付近に位置し、ここでは断層線が幅 1km の右ステップと長さ 1km ギャップからなる不連続構造を形成している。

ところで Ambaraseys (1988) は、1951 年 Ilgaz 地震 (Ms 6.9) に伴って、Ismetpasa セグメントのうち、Ismetpasa から Afsar までの区間において、地震断層が現れた可能性を指摘している。しかし、今回の実地調査では、同地震で断層が現れたとの証言は得られず、Ismetpasa 東方の Loc.460 付近で地割れが生じたとの証言が得られただけである。

(5) Bayramoren セグメント

1944 年地震断層の東端に位置する Bayramoren セグメントは、Afsar 付近から Bayramoren 付近に至る、長さ 19km の区間である (第 6 図)。断層線は、全体としては N78°E の走向を保ちながらも、2カ所で幅数百 m ないし 1km の顕著な左ステップの不連続構造を示し、3つの顕著なセクション (BYR-1, 2 および 3) に分けられる。1944 年地震による断層変位量は 5 地点で右ずれ 1.5-1.9m が計測され、そのうち信頼度の

高い3地点の平均変位量は右ずれ1.9mであった。

西端のBYR-1セクションは、AfsarからZevdesに至る4kmの断層区間で、東西両隣のセクションの延長線よりも約1km南に位置している。このセクションに沿って1944年地震断層が出現したことは、詳細な証言から確実であり、Kolavalaga (Loc.550)では農地境界の右ずれ1.9mが確認できた。

中央のBYR-2セクションは、ZevdesからN80°Eの方向に延びる長さ6-7kmの断層区間であり、その東端のLoc.560と570では、農地境界や道路脇の石垣の右ずれ1.8-1.9mが確認できた。

東端のBYR-3セクションは長さ8kmの断層区間で、全体として北に凸に湾曲している。ここでは、西隣のBYR-2セクションから延びる断層線の北側に、0.5-1km離れて、もう1条の断層線がほぼ平行に延びている。セクションの東半部では断層線は不明瞭となるが、Dalkoz付近では東西走向の1条の断層線に収斂すると推定される。南北それぞれの断層線において、1944年地震に伴って断層が現れたとの証言が得られた。また、同地震によると推定される変位は、Bayramoren西方のLoc.580で農地境界の右ずれ1.5m、Loc.590で水路の右ずれ1.5mが確認できた。

証言によれば、Bayramorenでは1943年Tosya地震(M_s 7.3)と1944年Bolu-Gerede地震の2度にわたって地震断層が現れ、その東方約3kmのDalkozでは1944年地震に伴って地震断層が生じたとのことである。一方、Dalkozからさらに3km東のBelenliでは、南落ちの低断層崖に沿って、1943年の地震に伴う地震断層のみが出現したとの証言が得られた。これらの証言から、1944年地震断層の東端は、DalkozとBelenliの間(40° 57' N・33° 13' E)に見られる幅0.9kmの左ステップと長さ1.9kmのギャップからなる不連続構造で限られると推定される。

なお、Ambraseys (1988)は、1951年Ilgaz地震(M_s 6.9)に伴って、ほぼBayramorenセグメントに一致するAfsarからDolaslarに至る区間においても、地震断層が断続的に現れたとしている。しかし今回の調査では、1951年地震に伴ってその区間に地震断層が出現したとの証言は得られなかった。

3.2 1944年地震断層における累積的な変位量

1944年地震断層の5つのセグメントのうち、GeredeセグメントとIsmetpasaセグメントでは、1944年地震によると推定される変位量よりも有意に大きな変位を示す地形や構築物が10カ所で発見された。

このうちGeredeセグメントでは、断層地形がよく発達するセグメント中央部のGRD-2および3セクションにおいて、1944年地震よりも有意に大きな変位量が8カ所で計測された(第4図)。GRD-2セクションでは、Geredeの東方約2kmのLoc.180において、小河川の横ずれ変位6.0mが認められた。同地点の約200m西方で計測された変位量3.0m(Loc.170)が1944年地震によるものと推定できることから、この小河

川のずれは複数回の累積変位による可能性がある。また、GRD-3セクションでは、小河川の右屈曲として、1944年地震によると推定される変位量4.5-6.0mの2-4倍に及ぶ変位量が計測された。それらは値の小さなものから順に、 8.6 ± 0.7 m (Loc.290), 10.5 ± 0.5 m (Loc.330), 11.7 ± 1.0 m (Loc.300), 14.7 ± 1.0 m (Loc.220), 16.9 ± 1.3 m (Loc.210), 21.0 ± 2.0 m (Loc.240) および 24 ± 2 m (Loc.360)であった。

IsmetpasaセグメントのISM-2セクションでは、Seyhler付近のLoc.470(第5図)において、Gerede川を横切る橋脚列の跡が大きく右ずれ変位していた。1970年代に撮影された空中写真では、川の北岸と中ほどにある2つの橋脚の列と、南岸の氾濫原にある3つの橋脚の列とが、20m程度、右ずれ方向に変位していることが判読できた。しかし今回の現地調査では、川の中ほどにある橋脚は洗掘によって下流(東)側に転倒していること、および南岸の2つの橋脚は採石場の稼働によって失われてしまったことから、正確な変位量は計測できなかった。この橋脚跡は、池田ほか(1994)が報告したものと同一と考えられ、彼らは、橋脚列の右ずれ量は 25.9 ± 2.1 mで、橋脚に使われた漆喰中の木炭片の放射性炭素同位体年代は、 1322 ± 163 , 1412 ± 172 , 1500 ± 192 および 2435 ± 179 yBPであったとしている。

このほかISM-4セクションでは、Akbas西方のLoc.490(第5図)において、扇状地を開析する河川に 13 ± 1 mの右ずれが認められた。

4. 考察

4.1 1944年地震断層のセグメント構造の特徴

1944年地震断層の長さは180kmであり、大局的にはN74-79°E走向で直線性を示す。しかし、幅1km程度のステップや長さ2km以下のギャップ、およびその前後に見られるわずかな断層線の雁行配列などに着目すると、断層線は大きく5つのセグメントに区分することができる(第1表)。これらのセグメントは、長さが21-46kmであり、セグメント毎の平均変位量は1.9-4.3mの範囲であった。

これらのセグメントの規模は、1999年Izmit地震断層(Awata *et al.*, 2003)で見られたセグメントの長さ(13-34km)や平均変位量(1.4-4.1m)と概ね一致している。しかし、Izmit地震断層の各セグメントの境界をなすジョグ(Awata *et al.*, 2003)では、幅と長さが数kmから十数kmに及ぶ不連続構造が発達し、セグメント間に最大約20°の顕著な屈曲が見られたことに比べると、1944年地震断層の内部の不連続構造は相対的に軽微であるといえる。一般にセグメント間の不連続構造の規模が大きいほどセグメント間の破壊伝播が起こりにくいと考えられていること(栗田ほか, 2001; Lettis *et al.*, 2003など)からすると、1944年地震は多重セグメント地震ではあったものの、各サブイベントが比較的に連続して発生した可能性

がある。

1944年地震断層と西隣の1957年地震断層との境界は、Abant湖とその東方約8kmのDereceorenの間と推定される。しかし、この境界付近では、Abant川の直線状の谷に沿って、4kmの区間で断層地形が不明瞭となるものの、その両側の断層線のトレースからは、顕著な屈曲やステップは存在しないと推定される。

一方、1944年地震断層の東端は、DalkozとBelenliの間と特定でき、ここでは東隣の断層線との間に幅2kmの右ステップと長さ2kmのギャップを伴う不連続構造が認められた。この不連続構造は、1944年地震断層の内部のどの不連続構造よりも顕著である。さらにこの不連続構造の西側約20kmを占めるBayramorenセグメントは、他の4つのセグメントと比べて直線性に乏しく、4-8km区間毎に断層線が屈曲やステップを示し、また2条の断層線が並走したりする。また、東隣の1943年地震断層も、今回調査してきた西端部の15km区間においては、やはり長さ数km毎にギャップやステップ・平行する2条の断層線などの、顕著な不連続構造を示す(第6図)。このように、1943年地震断層と1944年地震断層の境界部は、全体として長さ35km以上の顕著な不均質構造と一致し、その中でも最大規模の不連続部と1944年地震断層の東端が一致することが注目される。

なお、1944年地震断層と1943年地震断層は、Bayramoren付近において重複して現れたとされるが、このように隣接する地震断層の末端が互いに数kmあるいは十数kmにわたってオーバーラップする現象は、1957年と1967年の地震断層(Ambraseys and Zatopek, 1969)、1967年と1999年Izmit地震断層(Awata *et al.*, 2003)、1999年IzmitとDuzce地震断層(Emre *et al.*, 2000; Hartleb *et al.*, 2002; Awata *et al.*, 2003など)においても観察されている。

1944年地震断層の各セグメントは、さらに小さな断層線の不連続や数度程度の屈曲、あるいは地震時の変位量の違いから、長さ数kmごとのセクションに区分できる。とくに、Boluセグメントの東部、YenicagaセグメントおよびBayramorenセグメントで、このようなセクションの構造が明瞭に認められる。Awata *et al.* (2003)は、1999年Izmit地震断層の各セグメントでは末端部の数kmのセクションにおいて変位量が小さくなり、隣接するセグメントの末端部のセクションと合わさって、長さ数kmから十数kmのジョグを構成していることを発見している。しかし、今回調査した1944年地震断層では、ジョグの規模を正確に議論するのに必要な、精度の高い変位量分布のデータは得られなかった。

4.2 1944年地震断層のセグメントと歴史地震

Ambraseys (1970)によると、1944年地震断層に沿う地域の付近では、967年、1035年、1050年、および1668年にも大地震が発生している。

967年に発生した大地震では、BoluおよびGeredeで被害が生じ、両者の間に地震断層が現れたとされている(Ambraseys, 1970)。また、1035年の地震では、Geredeから東にかけて、少なくとも60kmの区間に地震断層が現れたとされている(Ambraseys, 1970)。ただし、1050年の地震では、1944年地震断層の東端から約30km東に位置するIlgazで被害が記録されていることから、1035年地震で破壊した断層区間は東隣の1943年地震断層の区間までは及ばなかった可能性が高い。

一方、1668年地震は、北アナトリア断層系で歴史時代に発生した最大の地震とされ、20世紀の地震サイクルにおいては1939年・1942年・1943年・1944年の大地震で破壊した約600kmの区間(Ambraseys, 1970)、あるいはさらに西方の1967年地震で破壊した区間までを含む(Ikeda *et al.*, 1991)、長大な断層が一度に破壊したと推定されている。

以上のことから、1944年地震断層で破壊した5つのセグメントは、10-11世紀の地震サイクルでは、Bolu-Yenicagaセグメントからなる区間とGerede-Ismetpasa-Bayramorenセグメントからなる区間の、2つの地震セグメントに分かれて活動した可能性がある。また、1668年地震では、1944年地震断層の3-4倍に及ぶ長大な区間が単一の地震で破壊したことになる。これらは、長大な活断層系において、地震サイクル毎に地震セグメントの範囲が大きく異なったことを歴史的に検証できる、世界でも数少ない事例である。

4.3 Geredeセグメントにおける変位の累積性

前述のように、GeredeセグメントのGRD-2および3セクションでは、1944年地震による変位量はそれぞれ右ずれ3mおよび5m程度と推定されるが、小河川の右ずれ量はこれよりも大きな値を示すものがある。そこで、1944年地震と同じ規模の断層変位が過去の活動においても繰り返されてきたものと仮定して、その整数倍に相当する変位量と、近傍で実測された累積変位量とを比較した(第8図)。

GRD-2セクションのLoc.180では右ずれ6.0mであるが、これは約200m西方のLoc.170で観察された1944年地震に伴うと推定される変位量の2倍である。

またGRD-3セクションでは、1944年地震に伴うと推定される変位量は右ずれ3.6-6.3mであったが、この値の2, 3および4倍に相当する累積変位量が計測されている。すなわち、セクション西部のKocumlar付近(Loc.190-210)では、1944年地震の変位量が4.5-5.6mであるのに対して、累積変位量として約3倍の16.9mが計測できた。また、セクション中央部のLoc.240からLoc.330までの約5km区間では、1944年地震での変位量が4.5-5.6mであったのに対して、累積変位量として約2倍の8.6-11.7m、約3倍の14.7m、および約4倍の21.0mが計測できた。さらに、1944年地震に伴う変位量が約6mと計測された東部の

Sariyardere 付近の Loc.360 では、累積変位量として小河川の横ずれ約 24m が計測できた。これは 1944 年地震時の変位量の 4 倍に相当する。

ところで 4.2 で考察したように、Gerede セグメントは 1944 年には長さ 180km の地震セグメントの一部として、また一つ前の活動にあたる 1668 年には長さ 600km あまりの地震セグメントの一部として活動し、さらに 10-11 世紀の地震サイクルでは 1944 年地震断層の東半部とのみ連動して破壊した可能性がある。また、Gerede セグメントの Loc.310 付近で実施されたトレンチ調査の結果によると、1668 年地震は 1 つ前、10-11 世紀の地震は 3 つ前の活動に相当する可能性が指摘されている (Okumura *et al.*, 1993)。したがって、Gerede セグメントにおける地震ごとの変位量は、最近 4 回の活動では、サイクル毎に地震セグメントの長さが数倍の範囲で大きく変化したにもかかわらず、ほぼ一定であった可能性がある。

5. まとめ

1944 年 Bolu-Gerede 地震では、Bolu の南西方約 30km から Bayramoren に至る 180km 区間において地震断層が出現した。この地震断層は、断層線のステップ・ギャップ・屈曲などの不連続部と、地震時の変位量に基づいて、5 つのセグメントに区分できる。各セグメントの長さは 21-46km で、平均変位量は 1.9-4.3m であった。このうち Gerede セグメントでは、1944 年地震に伴う変位量のほぼ 2, 3, 4 倍の整数倍を示す累積的な断層変位地形が認められた。1944 年地震断層に沿う地域では、1668 年には 600-700km に及ぶ長大な区間が単一の地震で破壊し、10-11 世紀には複数の地震が発生したと推定される。これらの累積変位量と歴史地震から、Gerede セグメントにおける変位量は、地震セグメントの長さが数倍の範囲で変化したにもかかわらず、ほぼ一定であった可能性がある。

今後、Gerede セグメントにおいて、変位量の精密測量、変位基準の年代の特定、活動時期の特定を行い、単位変位量の累積と地震断層長との関係について、より精度と信頼性の高い議論を行う必要がある。

謝辞 本研究は、「産業技術総合研究所地質調査総合研究センター及びトルコ鉱物資源調査開発総局間の協力協定」、および同協定の付属プロジェクト I 「北アナトリア断層帯西部域の断層の挙動に関する古地震学的研究」の一部として、2002 年および一部は 2003 年に実施された。実地調査にあたっては、トルコ鉱物資源調査開発総局の Tamer Y. Duman 氏および Volkan Ozaksoy 氏に協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

文 献

- Ambraseys, N. N. (1970) Some characteristic features of the Anatolian fault zone. *Tectonophysics*, **9**, 143-165.
- Ambraseys, N. N. (1988) Engineering Seismology. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **17**, 1-105.
- Ambraseys, N. N., and A. Zatopek (1969) The Mudurnu Valley, west Anatolia, Turkey, earthquake of 22 July 1967. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **59**, 521-589.
- Awata, Y., T. Yoshioka, E. Omer, T. Y. Duman, A. Dogan, E. Tsukuda, M. Okamura, H. Matsuoka and I. Kuscu (2003) Outline of the surface rupture of 1999 Izmit earthquake. *Special Publication Seriese*, **1**, General Directorate of Mineral Research and Exploration of Turkey, 41-50.
- 栗田泰夫・吉岡敏和・佃 栄吉・Omer Emre・Tamer Y. Duman・Ahmet Dogan (2001) 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. 活断層・古地震報告, No.1, 325-338.
- Barka, A. A., H. S. Akyuz, E. Altunel, G. Sunal, Z. Cakir, A. Dikbas, B. Yeyli, R. Armijio, B. Meyer, J. B. de Chabaliere, T. Rockwell, J. R. Dolan, R. Hartleb, T. Dawson, S. Christofferson, A. Tucker, T. Fumal, R. Langridge, H. Stenner, W. Lettis, J. Bachhuber and W. Page (2002) The surface rupture and slip distribution of the 17 August 1999 Izmit earthquake (*M* 7.4), North Anatolian Fault. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **92**, 43-60.
- 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. (1992) The North Anatolian fault zone. *Annales Tectonicae*, **IV**, 164-195.
- Barka, A. A. (1996) Slip distribution along the North Anatolian fault associated with the large earthquakes of the period 1939 to 1967. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **86**, 1238-1254.
- Dogan, A., H. Kondo, O. Emre, Y. Awata and S. Ozalp (2003) Triggered slip on the Ismetpasa segment of 1944 Bolu-Gerede surface rupture by the 1999 Izmit earthquake, North Anatolian Fault, Turkey. *Geophys. Res. Abstract*, **5**, EGS-AGU-EUG Joint Assembly, EAEm1-A-11520.
- Emre, O., T. Y. Duman, Y. Awata, Dogan, A. and S. Ozalp (2000) Surface ruptures of November 12, 1999 Duzce earthquake, NW Turkey. *Book of Abstracts and Papers*, XXVII General Assembly of European Seismological Commission, 247-252.
- Hartleb, R., J. F. Dolan, H. S. Akyuz, T. E. Dawson, A. Z. Tucker, B. Yerli, T. K. Rockwell, E. Toraman, A. Cakir and A. Dikbas (2002) Surface rupture and slip distribution along the Karadere segment of the 17 August 1999 Izmit and the western section of the 12 November 1999 Duzce, Turkey, earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **92**, 67-78.
- 池田安隆・E. Herece・隈元 崇 (1994) 北アナトリア断層西部の完新世後期の活動に関する調査. 地学雑誌, **103**, 404-408.
- Ikedo, Y., Y. Suzuki, E. Herece, Saroglu, A. M. Isikara and

- Y. Honkura (1991) Geological evidence for the last two faulting events on the North Anatolian fault zone in the Mudrunu Valley, western Turkey. *Tectonophysics*, **193**, 335-345.
- Ketin, I. (1948) Über die tectonisch-mechanischen Folgerungen aus den grossen anadoluischen Erdbeben des letzten Dezennumms. *Geol. Rudsch.*, **36**, 77-83.
- Ketin, I. (1969) Über die nordanadoluische horizontalverschiebung. *Bull. Mineral Res. Explor. Inst. Turkey*, **72**, 1-28.
- Knuepfer, P. L. (1989) Implications of the characteristics of end-points of historical surface fault ruptures for the nature of fault segmentation. U. S. Geol. Surv. Proc. of Workshop XLV: Fault Segmentation and Controls of Rupture Initiation and Termination, *USGS Open-File Report*, **89-315**, 193-228.
- Lettis, W., J. Bachhuber, R. Witter, C. Brankman, C.E. Randolph, A. Barka, W.D. Page and A. Kaya (2002) Influence of releasing step-overs on surface fault rupture and fault segmentation: examples from the 17 August 1999 Izmit earthquake on the North anatolian fault, Turkey. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **92**, 19-42.
- McCalpin, J. P. ed. (1996) *Paleoseismology*. Academic Press, 588p.
- Okumura, K., T. Yoshioka, I. Kusuc, H. Kayanne and Y. Suzuki (1990) Activity of the North Anatolian fault during these two millennia on the surface faults of 1944 earthquake based on trenching and microtopographic studies. *EOS*, **71** (43), AGU Fall Meeting, 1560.
- Tasman, C. E. (1944) Gerede-Bolu depremi. *Bull. Mineral Res. Explor. Inst. Turkey*, **1/31**, 134.

(受付：2003年10月20日，受理：2003年11月5日)

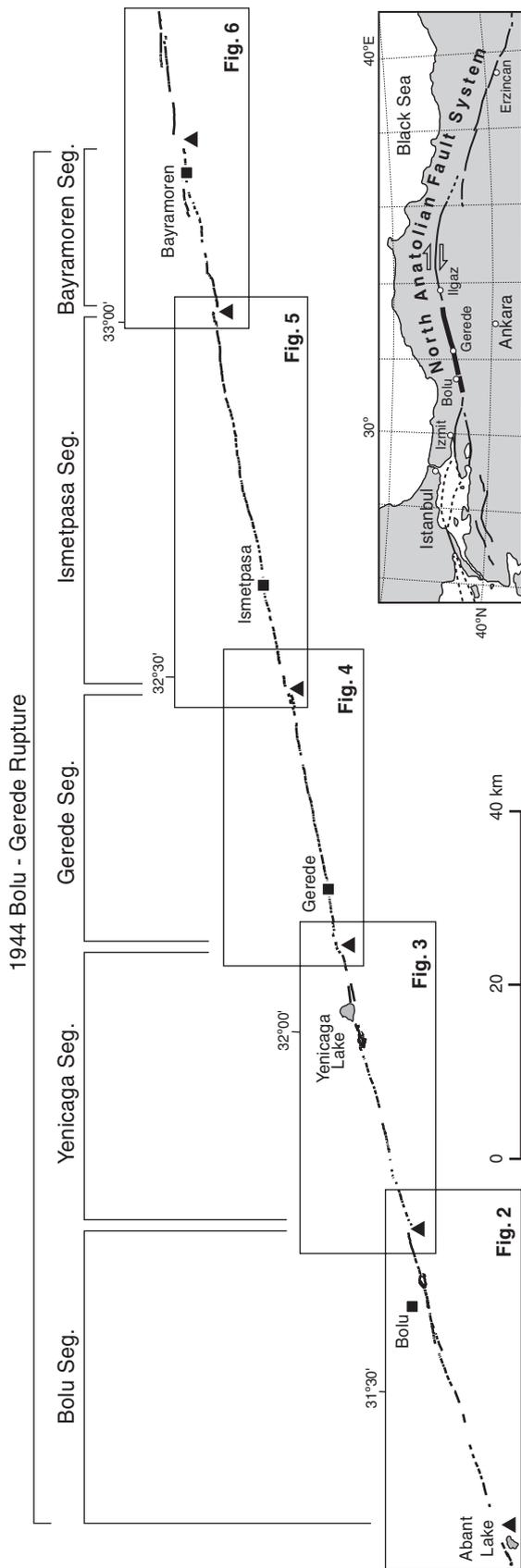
第1表. 1944年 Bolu-Gerede 地震断層の各セグメントの特徴.
Table 1. Parameters of each segment of the 1944 Bolu-Gerede surface rupture.

Segment	Length (km)	Strike	Displacement (m)		Number of section
			average	maximum	
Bolu	37	N74° E	2.6	3.8	5 ?
Yenicaga	34	N75° E	3.0	3.8	4
Gerede	31	N79° E	4.3	6.3	4
Ismetpasa	46	N79° E	3.7	5.0	6 ?
Bayramoren	21	N77° E	1.9	1.9	3

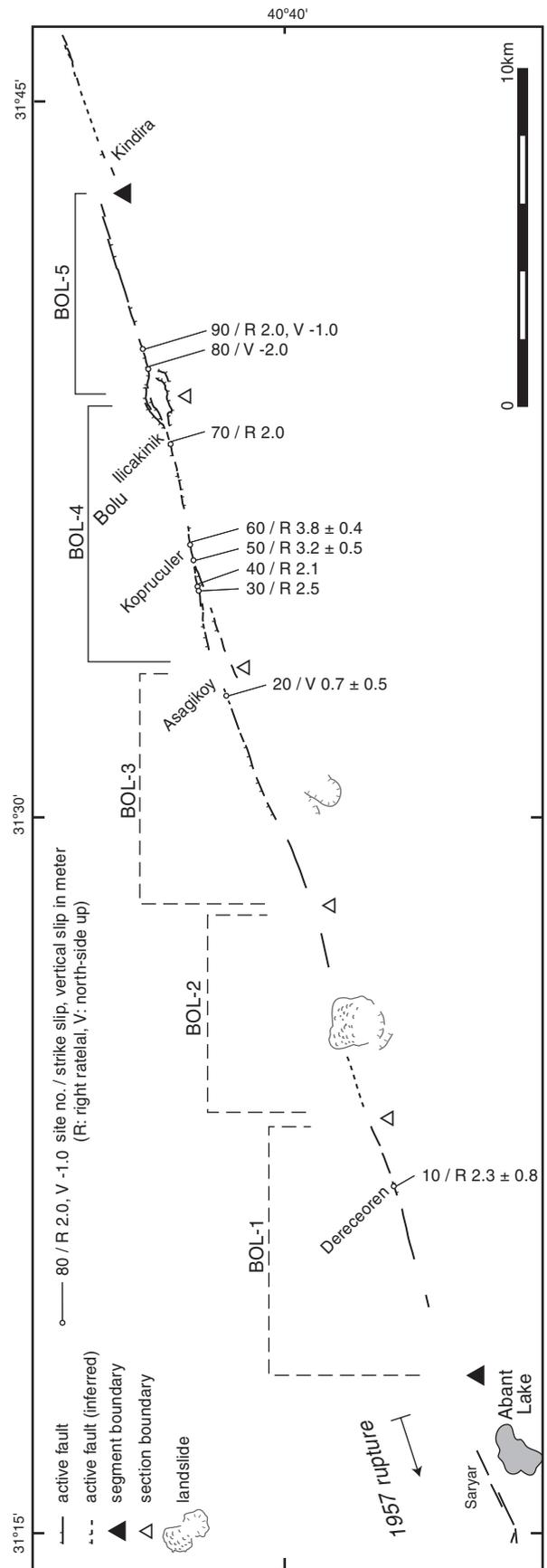
第2表. 1944年 Bolu-Gerede 地震断層の変位量.

Table 2. Displacement measurements of the surface ruptures associated with the 1944 Bolu-Gerede earthquake.

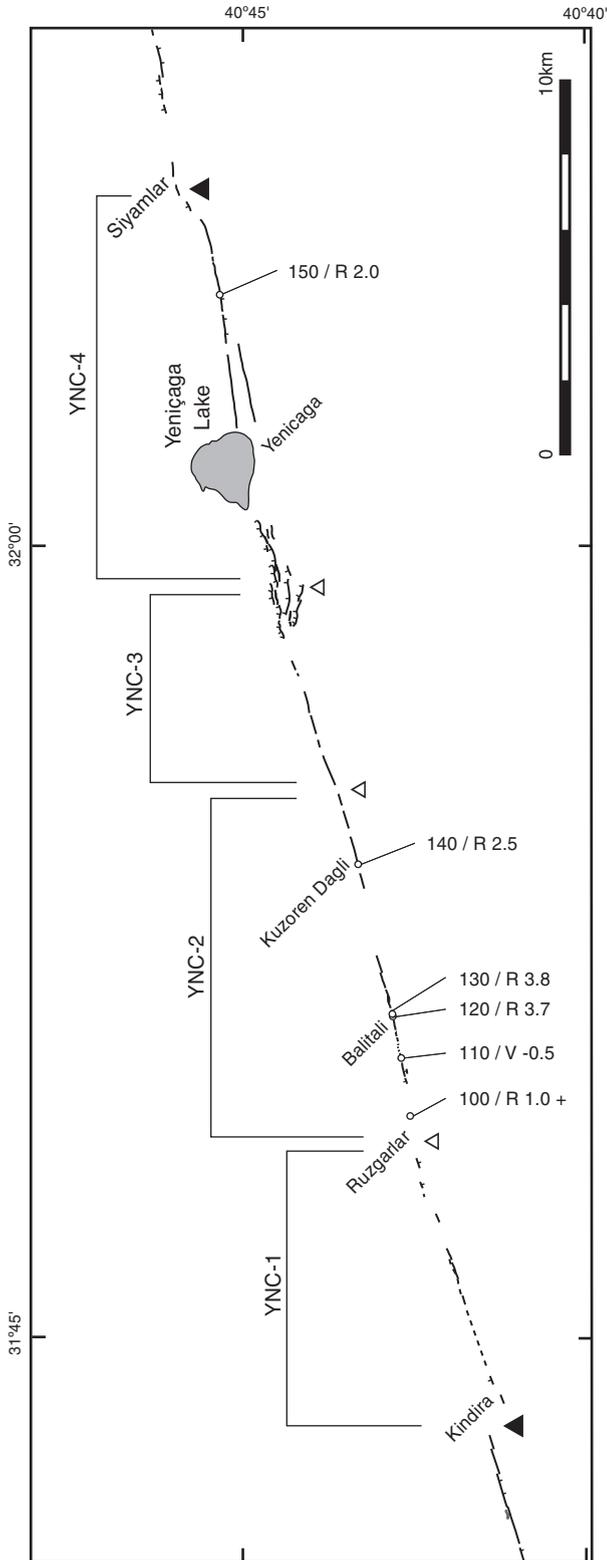
No.	Site		Displacement		Vertical N-side up (m)	Offset Feature and Remarks
	new	old	Good quality (m)	Poor quality (m)		
Bolu Segment						
10	00	Dereceoren		2.3 ± 0.8		field boundary
20	10	C-epni			0.7 ± 0.5	villager's evidence
30	20	Sultanbey	2.5			ditch with tree line in potato field
40	30	sultanbey	2.1			dirt in potato fields
50	40	Koprucular	3.2 ± 0.5			field boundary
60	50	Koprucular	3.8 ± 0.4			field boundary
70	60	Ilicakinik	2.0			dirt road and ditch
80	70	Nuhlar			-2.0	field boundary of wheat
90	80	Degimenozu	2.0		-1.0	field boundary of wheat
Yenicaga Segment						
100	90	Ruzgarlar		1.0 +		trunk of a tree
110	100	Kutukuculer			-0.5	old man's evidence
120	110	Baltali	3.7			field boundary
130	120	Baltali	3.8			field boundary with tree-line and fence
140	130	Kozoren Dagli	2.5			old man's evidence
150	140	Sahnalar	2.0			dirt road
Gerede Segment						
160	150	Gerede			-0.5	scarplet on the alluvial fan surface
170	160	Gerede	3.0 ± 0.5			gully incising fan surface
190	180	Cay Orenlar	4.5 ± 0.7			field boundary with line of bush
200	181	Cay Orenlar	5.6 ± 0.5			field boundary with line of bush
230	210	Afsartarakci		5.0 +		terrace riser
250	230	Afsartarakci		2.8 +		field boundary with fence
260	240	Afsartarakci	4.6			gully
270	250	Afsartarakci	4.5			line of trees
290	270	Afsartarakci		3.6 ± 0.3		line of trees
310	280	Ulaslar	5.6 ± 0.5			stream
320	290	Ulaslar	5.5			average of 7 field boundaries
340	301	Ulaslar	6.0			line of trees
350	311	Sariyardere		4.2 +		2 strands
370	312	Sariyardere	6.3 +			line of trees
380	320	Kapakli		2.9 +		dirt road
390	330	Kapakli	3.3			creek
400	340	Semerciler	1.0 ± 0.5			irrigation canal and wooden fence
410	350	Semerciler	1.5			wooden fence and line of trees
Ismetpasa Segment						
420	360	Ismetpasa	3.6			field boundary
430	370	Ismetpasa		5.0 ± 1.0		dirt road
440	380	Ismetpasa	5.0 ± 1.0			line of trees and irrigatoin canal
450	390	Ismetpasa	3.6			field boundary
460	400	Ismetpasa	3.8 ± 0.5			field boundary
480	420	Doganler		4.8 ± 1.0		gully on the land slide surface
500	440	Akbas	3.1			field boundary
510	450	Akbas		2.4 +		3 field boundaries in two strands
520	460	Guvem	2.4			average of 4 field boundaries
530	470	Guvem	4.1			old road with stone wall
540	480	Kabak	3.6			ave. of 6 field boundaries and 1 road
Bayramoren Segment						
550	490	Kolavlaga	1.9			field boundary
560	500	Erenler	1.8			field boundary
570	510	Erenler	1.9			dirt Road
580	520	Dolaslar		1.5		south strand, field boundary
590	530	Bayramoren		1.5 ± 0.5		south strand, channel



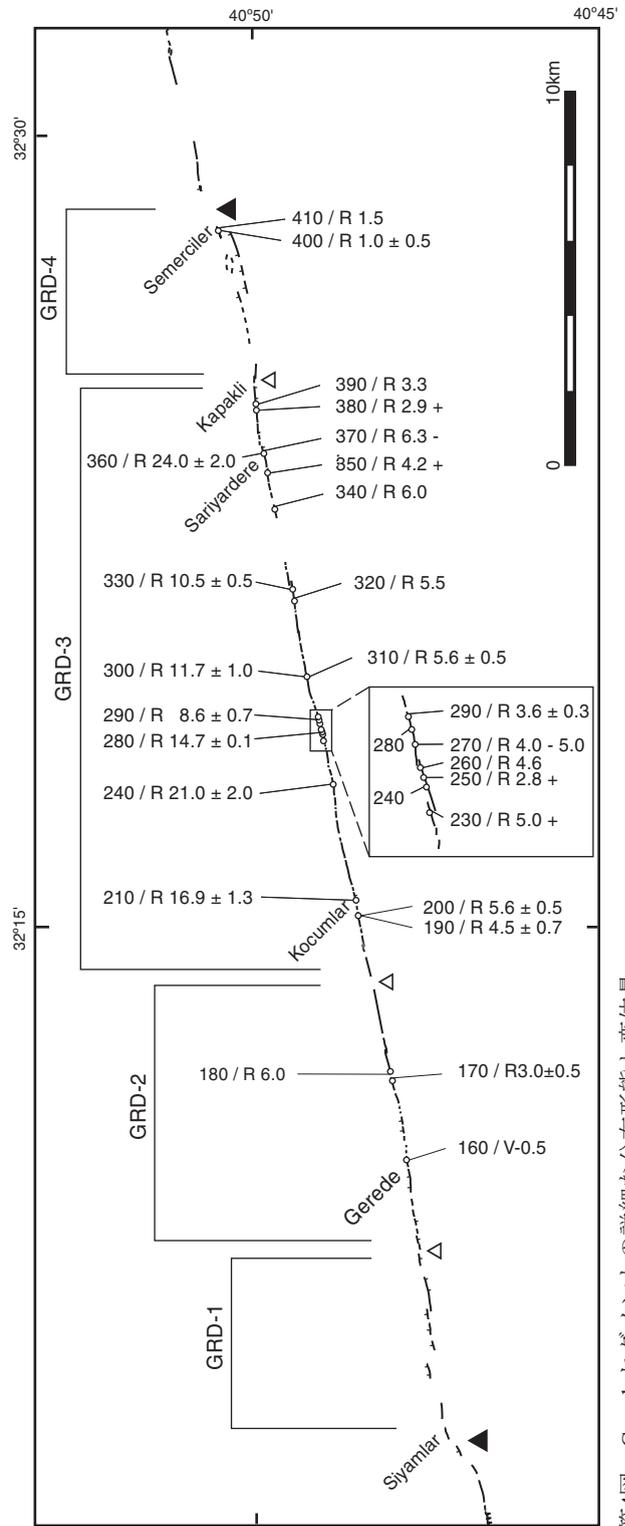
第1図. 1944年Bolu-Gerede地震断層の分布とセグメント区分.
Fig. 1. Geometry and segmentation of the 1944 Bolu-Gerede surface rupture.



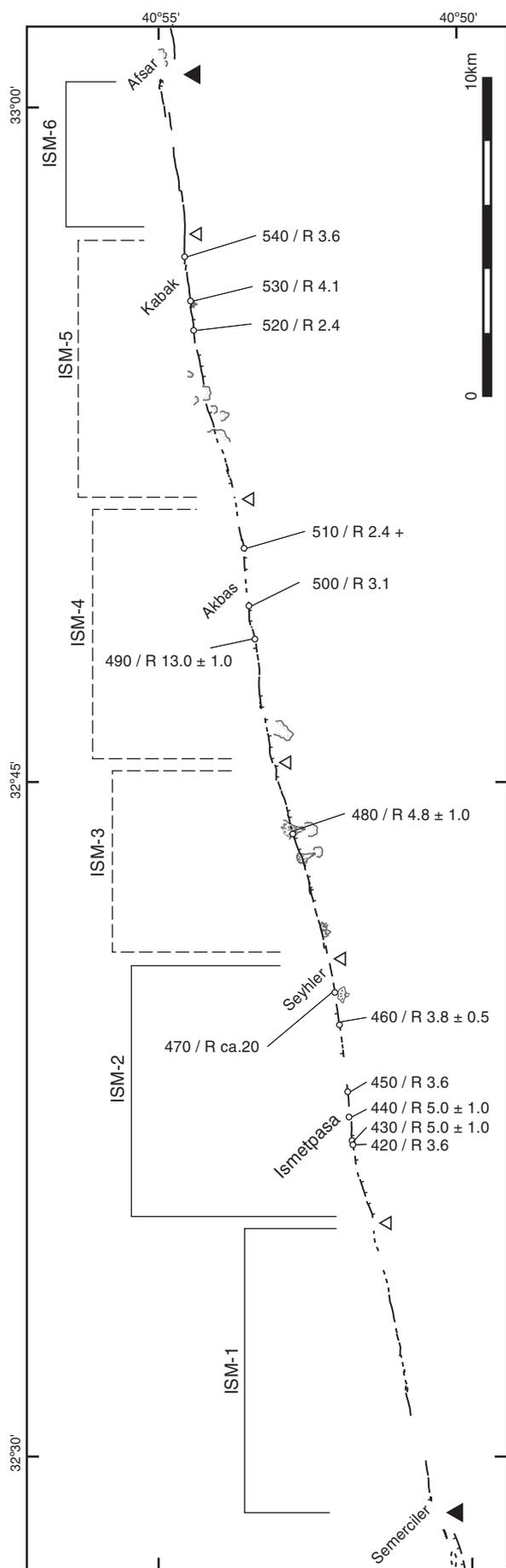
第2図. Boluセグメントの詳細な分布形態と変位量.
Fig. 2. Detailed geometry and displacement measurements of the Bolu segment.



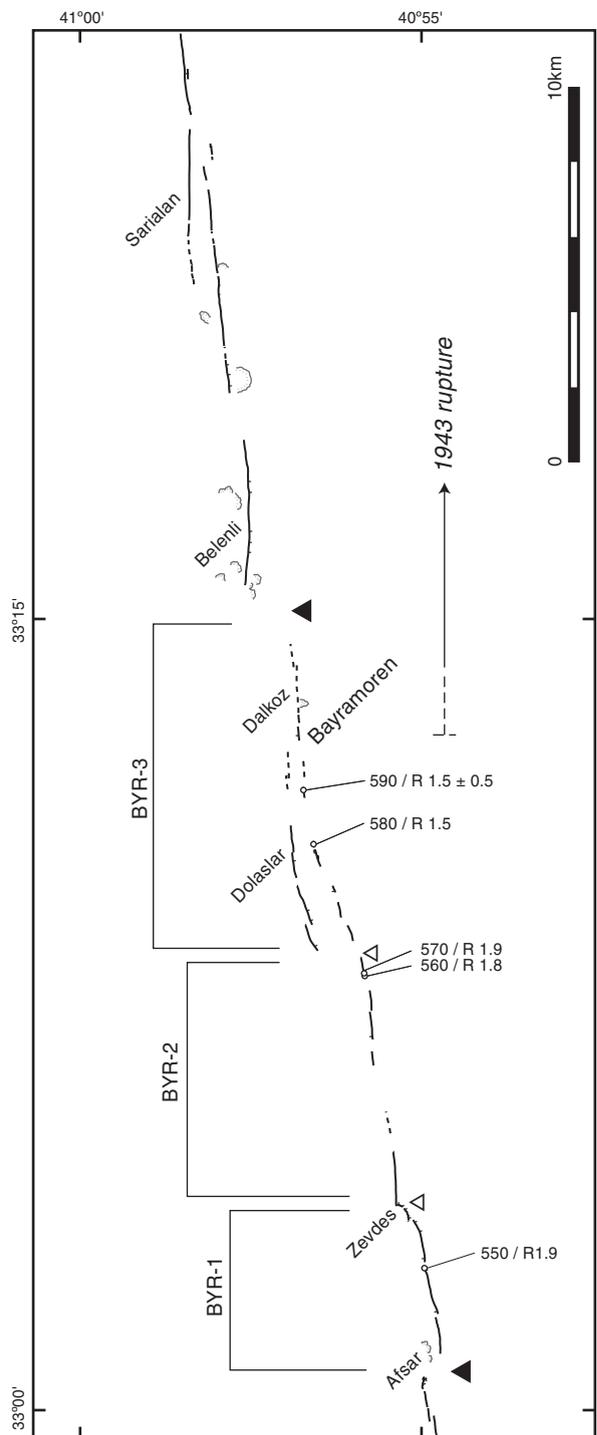
第3図. Yenicegagaセグメントの詳細な分布形態と変位量.
Fig. 3. Detailed geometry and displacement measurements of the Yenicegaga segment.



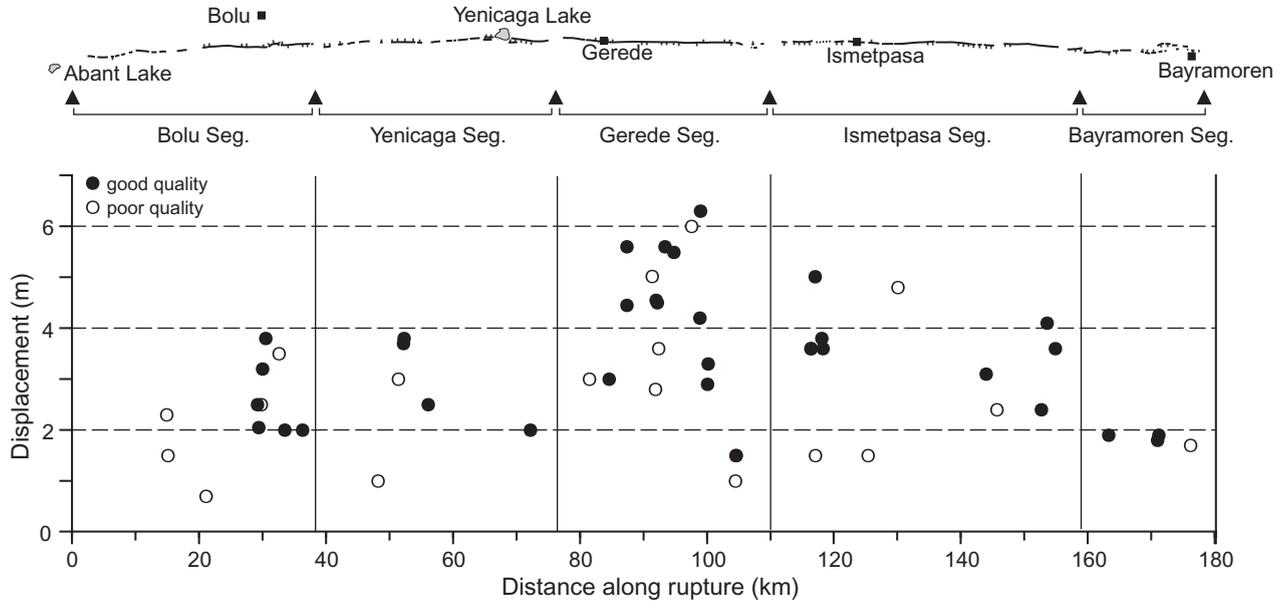
第4図. Geredeセグメントの詳細な分布形態と変位量.
Fig. 4. Detailed geometry and displacement measurements of the Gerede segment.



第5図. Ismetpasaセグメントの詳細な分布形態と変位量.
Fig. 5. Detailed geometry and displacement measurements of the Ismetpasa segment.

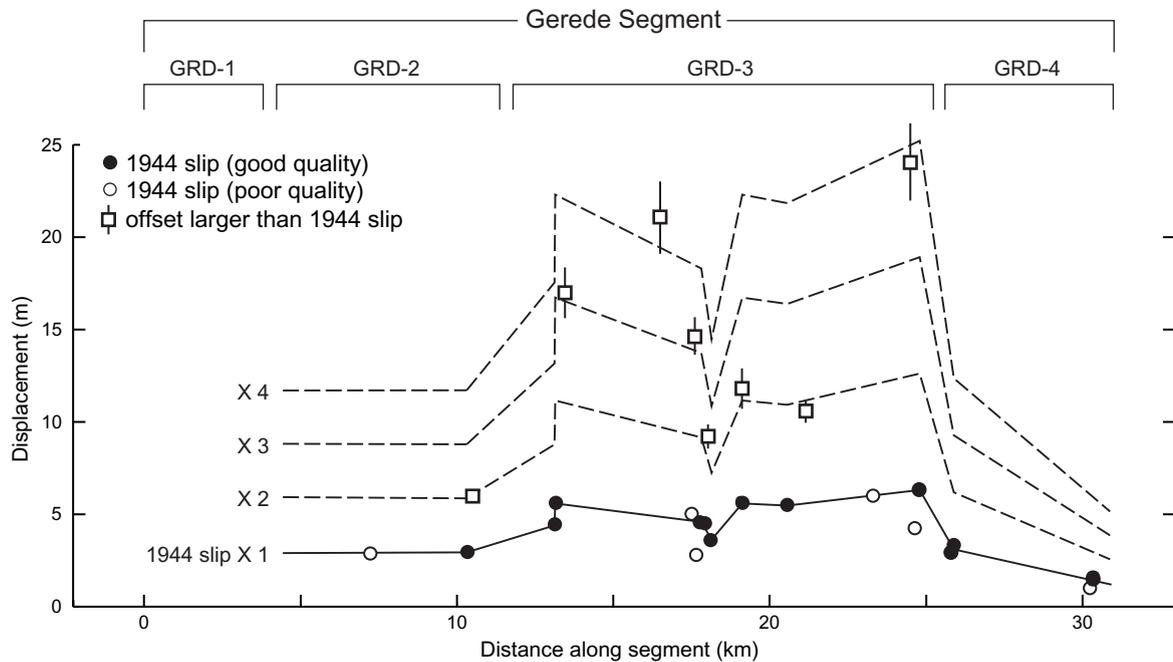


第6図. Bayramorenセグメントの詳細な分布形態と変位量.
Fig. 6. Detailed geometry and displacement measurements of the Bayramoren segment.



第7図. 1944年Bolu-Gerede地震断層に沿う右ずれ変位量の分布.

Fig. 7. Distribution of the right-lateral displacement along the 1944 Bolu-Gerede surface rupture.



第8図. Geredeセグメントにおける1944年地震による右ずれ変位量と小規模な変位地形の累積変位量との比較. 計測された累積変位量は、概ね1944年地震による変位量の整数倍に相当する.

Fig. 8. Comparison of right-lateral displacements during the 1944 earthquake with cumulative right-lateral offsets of small-scale displaced topographic features along the Gerede segment. The offset measurements of small-scale displaced topographic features fit the multiples of the 1944 slip.