

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

Paleoseismic investigation of the 1999 Duzce earthquake fault at Lake Efteni, North Anatolian fault system, Turkey

須貝俊彦¹・栗田泰夫²・遠田晋次²・Omer Emre³・Ahmet Dogan³
Selim Ozalp³・原口 強⁴・木下博久⁴・高田圭太⁴・山口正秋¹

Toshihiko Sugai¹, Yasuo Awata², Shinji Toda², Omer Emre³, Ahmet Dogan³, Selim Ozalp³
Tsuyoshi Haraguchi⁴, Hirohisa Kinoshita⁴, Keita Takada⁴ and Masaaki Yamaguchi¹

Abstract: In order to reveal the recurrence and displacement of past faultings on the 1999 Duzce earthquake (M7.1) segment, we investigated subsurface geology across the 1999 earthquake rupture which appeared along the southern side of the Lake Efteni. We used a 6-m-long, 50-cm-wide, and 10-cm-thick geoslicer to sample sediments in tectonically subsided area at intervals of 5-10 m. The sediments are divided into 6 units based on angular unconformities. The second oldest unit 2, mainly composed of mudflow deposits, drops toward the north more than 15 m. The unit 2 is covered by younger fine sediments with several angular unconformities probably associated with surface faultings. Two probable and two possible faulting events are identified after the deposition of unit 2. From the radiocarbon dates (about 2 ka) of the peat layer just above unit 2, the average recurrence interval of faultings is calculated around 400 to 500 years and the vertical displacement of each individual faulting is estimated at 2.5 to 3 m. Moreover, we can point out the possibility that the penultimate faulting event occurred later than A.D. 1650. The Duzce fault shows very high activity during the past 2000 years.

Key words: North Anatolian fault, 1999 Duzce earthquake fault, Lake Efteni, geoslicer

1. はじめに

トルコの北アナトリア断層 (NAF) は, 1939~67 年に M7 超の大地震 6 つを次々と生起させ, しかも断層破壊域が西進してきたことで, 世界的に注目を集めてきた (第 1 図: Ambraseys, 1970; Stein *et al.*, 1997). この一連の破壊域の西方延長において, 1999 年 8 月 17 日にイズミット (Izmit) 地震 (M7.4) が発生し, 長さ約 120 km の地表地震断層が出現した (第 1 図: Awata *et al.*, 2000). 同年 11 月 12 日には デュズジェ (Duzce) 地震 (M7.1) が発生し, 8 月の地震断層の東方延長に長さ約 40 km の地表地震断層が出現した (Emre *et al.*, 2000). 1999 年 11 月の地震断層は, NAF の破壊域がスイッチバック (東進) した点でユニークである. また 11 月地震断層は, ボル (Bolu)・サパンジャ (Sapanca) 湖間で南北に分岐する NAF の北岐 (デュズジェ断層) である点も注目される. 1999 年 11 月地震断層の活動履歴の解明は, NAF の地震サイクルの理解に不可欠であるとともに, 長大な活断層系の断層破壊モデルを構築する上での鍵となる. そこで我々は 2000 年夏に, 1999 年 11 月地震断層の古地震学的調査を実施した (Sugai *et al.*, 2000). 本稿では, 速報 (須貝ほか, 2001a, b) に, その後新たに得た ¹⁴C 年代測定値等のデータを加味し, 再検討した結果を報告する.

¹ 東京大学 (University of Tokyo)

² 活断層研究センター (Active Fault Research Center)

³ トルコ鉱物資源調査庁 (Mineral Research and Exploration of Turkey)

⁴ 復建調査設計株式会社 (Fukken Co., Ltd.)

9月7日受付, 9月25日受理

2．1999年11月地震断層と調査地周辺の地形

1999年11月地震に伴い破壊したデュズジェ断層は、デュズジェ盆地とエルマチック(Elmacik)山地の地形境界をなしている(第2図,写真1)。11月地震時の断層変位は右横ずれが卓越し,最大右横ずれ変位量は約5.3mに達したが,エフテニ湖の南岸では垂直ずれ2~3m,右横ずれ3mの正断層が出現した(写真2; Emre *et al.*, 2000)。エフテニ湖は,水深の浅い湖であり,地震性沈降による堆積空間形成速度と堆積速度とが均衡してきたと推定されることから,古地震調査に適した地域と考えられる。そこで,調査地点をエフテニ湖南岸に選び,トータルステーションを用いた測量を実施し,詳細地形図を作成した(第3図)。11月地震の地表地震断層は,地形断面(第4図)の水平距離55m付近に出現し,その上下変位量は約2.5mに達した。

3．地表地震断層近傍の浅部地下構造

1999年11月地震断層と概ね直交する方向に,深度6m,幅50cm,厚さ10cmのジオスライサー10本と,深度5~15m,径約6cmのボーリング5本を密に配列し(第3図),堆積物を採取した(第5図,写真3)。これらの全堆積物を対象として,岩相層序区分を行い,帯磁率・湿潤密度・¹⁴C年代値を測定した(第6,7図,第1表)。ジオスライサーによる採取試料は,採取時の変形や欠落がほとんどなく,堆積構造や断層面などの3次元構造の観察にたえる大きさである(第5図)。そこで,ジオスライサー試料の観察を基本とし,それとボーリングコアを対応させて,堆積物全体を対比した。断層を横切る地質断面を第8図に示す。

地層は傾斜不整合(の可能性のある層理面)を境界として,下位よりunit 1~6に区分される。以下に,各unitの特徴を断層活動と関連づけて記載する。

unit 1は,断層下盤側に属する中粒砂~粘土層である。GS-7とGS-10の最下部で確認されたunit 1から採取された材の¹⁴C年代は29,090年前と36,960年前以前と古い(第1表)。unit 2は,粘土質マトリックス支持の角礫層~粘土層であり,泥流堆積物と推定される。帯磁率や湿潤密度が高いこと(第6,7図)が特徴である。

unit 3~6は,湖成または氾濫原堆積物からなり,泥炭層を多数挟む。unit 3はBr.1とBr.2で厚く,泥炭~有機質シルトが卓越する。unit 3の最下部は「材混じりの有機質シルト~泥炭層」とその直上の「淘汰の良い貝殻混じり砂層」というセットからなる。このセットは,地質断面にそって13m以上連続し(第8図; Br.1, 2, 3, 4, GS-5),材の¹⁴C年代値は約2千年前を示す(第1表の2BR10.07と5GS5.40)。

unit 3/4境界はやや不明瞭であるが,Br.1とBr.2では泥炭質堆積物から無機質な粘土層へ変化しており,unit 3堆積後の水深の急増を示唆する。GS-5の深度4m付近には, colluvial wedgeとみなしうるunit 2の再移動堆積物が挟在する。この再移動堆積物を境に地層の傾斜が若干緩くなる。以上はunit 3/4境界が北落ちの傾動により形成されたことを示唆する。

GS-5の深度2.5m付近(第9図のGS-5柱状図の上から三つ目の矢印)にも,傾斜不整合を認めうる。しかし,GS-5より南のGS-6からGS-10ではこの層準は削剥されており,GS-5の北側のGS-1からGS-4はこの層準に達していない。ボーリングコア(Br.1~3)の観察では,不整合面の認定は困難であった。このため本稿では,この層準はunit 4に含めたが,後述のようにイベント層準の可能性もある。

unit 5は砂層とシルト層の互層からなり,砂層は保存の良い巻貝化石を多量に含む。unit 4/5境界は明瞭な傾斜不整合関係にある(第9図; Br.1, GS-3, 4, 5, 6)。unit 5はunit 4にアバットし,その範囲はGS-7付近にまで及ぶ。GS-7の南側では,unit 5は土石流堆積物に連続する。

unit 6は,基底の材が250年前の¹⁴C年代を示すことから(第1表, 3GS1.30),17世紀以降の堆積物と考えられる。GS-4とGS-5においては,unit 5/6境界の傾斜不整合が明瞭である。またGS-5の堆積物の傾斜はきつく,引きずり構造が認められることから,GS-5の北方近傍に断層が伏在していると判断される。

4. 断層イベント層準の認定

上述のように unit 2 堆積後 明瞭な傾斜不整合が 2 層準 (unit 5/6 境界および unit 4/5 境界), やや不明瞭な傾斜不整合が 2 層準 (unit 4 内部および unit 3/4 境界) 認められる (第 8 図). 各不整合面は, 南側での削剥と北側での埋積の組み合わせで形成されており, 北落ちの傾動の繰り返しが推定される. Unit 5/6 境界と unit 4/5 境界は, 断層イベント層準の可能性が高い.

unit 4 内部および unit 3/4 境界の不整合もまた, 確実度は劣るが, イベント層準に対比しうる. その理由は以下の通りである. 上述のように, unit 3 下部は, 「有機質シルト~泥炭層」とその直上の「貝殻混じりの砂層」のセットからなり, 堆積時の勾配はほぼ水平であったと推定される. ところが, unit 3 下部は, 近接する Br.3 と Br.4 の間で, 現在約 6 m 上下に変位している (第 8, 9 図) のに対して, unit 4/5 境界は Br.3 と Br.4 の間で, 1.5~2 m しか上下に変位していない. 両者間の 4~4.5 m の上下変位量の違いは, unit 3・unit 4 の堆積中の断層活動がもたらしたと判断される. その時のイベント層準としては, 上述した 2 つのやや不明瞭な傾斜不整合が想定される. 断層北側 (沈降側) の Br.1 と Br.2 において認められる, unit 3/4 境界での水深急増の可能性は, コサイスミックな沈降によって説明される.

GS-6 の深度 2 m 前後には unit 2 と unit 5 を変位させる断層面が捉えられている. しかし, この断層の上方延長の地表付近には, 1999 年 11 月地震では明瞭な変位は生じていない. したがって, この断層は unit 5/6 境界形成時, すなわち, 最新の一つ前のイベントで変位した可能性がある. また, unit 6 の最下部 (細礫層~砂層) は北へ向かって細粒化・薄層化しており, unit 5/6 境界付近の ^{14}C 年代値 (第 1 表の 3GS1.3, 5GS0.95, 5GS1.15, 6GS1.00) も, 測定試料が材であることを考慮すればよく揃っており, unit 5/6 境界の傾斜不整合がごく短期間に形成されたことを示している.

5. 断層の活動時期および断層活動の間隔

上述した 4 つの傾斜不整合は GS-5 において認められることから, GS-5 試料の ^{14}C 年代・深度関係に基づいて, 断層の活動時期を整理すると第 10 図のようになる. 1999 年 11 月の断層活動の一つ前の活動は, 1650 年以降と考えられる. また, 過去 2 千年間における断層活動の平均的な間隔は, 400~500 年程度と推定される.

6. 過去 2 千年間の変位速度と 1 回の断層運動による変位量の推定

unit 3 の基底は, みかけ上, 約 15 m 上下に食い違っている (第 5 図). GS-7 以南では, unit 2 より若い堆積物はほとんど存在しないことから, unit 2 の上部は削剥されている可能性が高い. GS-5 以北では, 既に述べた通り, unit 3 の基底面は概ね水平であったと推定される. unit 3 の年代はほぼ 2 千年前であることから 過去約 2 千年間の上下変位量は約 15 m と推定され, この間の平均上下変位速度は 7.5 mm/年となる.

1999 年 11 月地震断層の上下変位量と水平変位量はほぼ等しい. 両者の比率は過去においても同様と仮定すると, 断層の総変位速度は約 10 mm/年と算出される. 過去 2 千年間の断層変位回数が 5~6 回とすると, 1 回の断層運動による総変位量は 3.3~4 m, 上下変位量は 2.5~3 m と推定される. この値は, 1999 年 11 月地震の地表地震断層の上下変位量と一致している. さらに, 3.3~4 m という総変位量は, 20 世紀に NAF 沿いに出現した幾つもの地表地震断層の総変位量の平均的な値でもあり (Stein *et al.*, 1997), 妥当な値と言えよう.

7. まとめ

北アナトリア断層西部, 1999 年 11 月デュズジェ地震断層西部を対象として, エフテニ湖南岸において, ジオスライサーを用いた古地震学的調査を実施した. その結果, 以下の点が明らかにされた. 地層は傾斜不整合を境として, 下位から unit 1~6 に区分される. 各不整合面は断層の南側の削剥と北側の埋積によって形成され, 北落ちのコサイスミックな傾動が 4

回以上繰り返されたと推定される。¹⁴C年代データから、過去2千年間の平均的な断層活動の間隔は400~500年と算定され、1999年の活動の一つ前の断層活動は、1650年以降に起きた可能性が高い。さらに1回の断層運動による上下変位量は2.5~3m、総変位量は3.3~4mと推定される。北アナトリア断層はボル・サパンジャ湖間で南北2条に分岐するが、このような調査結果は、1999年11月地震を生起させた北の分岐断層が南の分岐断層と同等ないしそれ以上に活動的であることを示している。

本稿では、傾斜不整合を根拠として、断層イベントを認定したため、断層活動の証拠としては“プロバブル”な域にとどまる。しかし、高密度でジオスライサーと群列ボーリングの複合調査を行い、通常のトレンチ調査では届かない深度や広い幅にわたって、堆積物の変形構造を捉えることに成功した。今後は、周辺地域でのトレンチ調査の結果と組み合わせ、傾斜不整合によるイベント解釈の精度をクロスチェックすることが望まれる。また、北アナトリア断層西部の断層活動履歴の解明が進むことで、断層のセグメンテーションに関する理解が深まることが期待される。

謝 辞

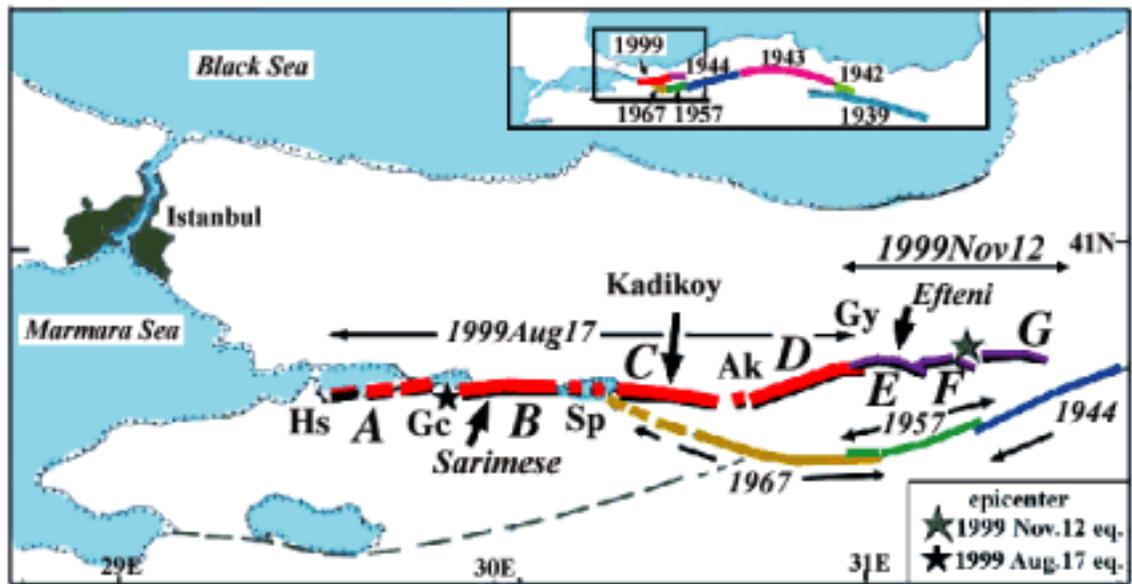
Ahrmet Dogan氏をはじめとするトルコ鉱物資源調査庁の諸氏には、現地調査にご協力いただいた。また調査中は、同庁の宿泊施設を利用させていただいた。記して感謝申し上げます。

文 献

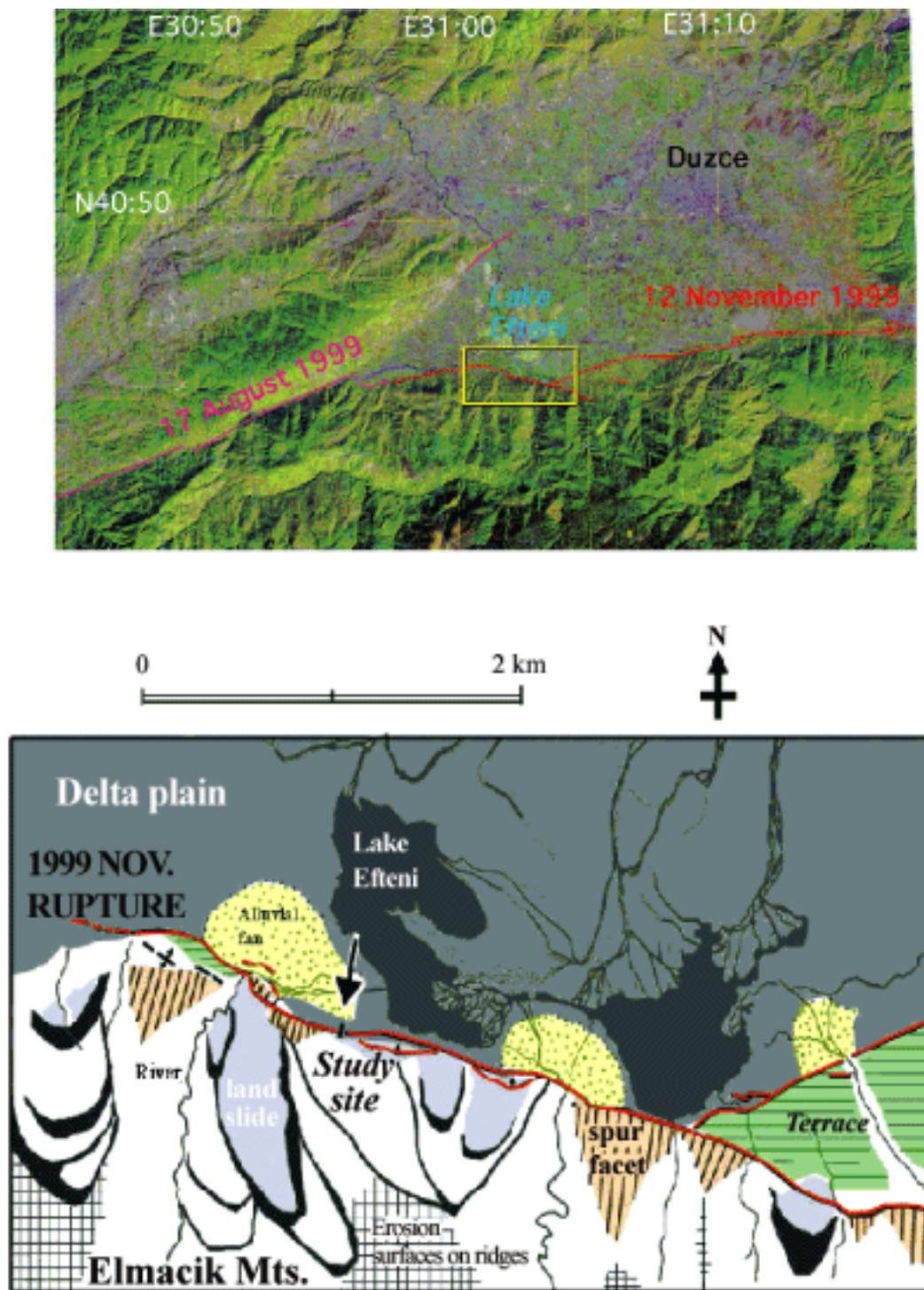
- Ambraseys, N.N. (1970) Some characteristic features of the North Anatolian fault zone. *Tectonophysics*, **9**, 143-165.
- Awata, Y., Yoshioka, T., Emre, O., Duman, T.Y., Dogan, A. and Tsukuda, E. (2000) Segment structures of the surface ruptures associated with the August 17, 1999 Izmit earthquake, Turkey. *Book of Abst. Papers, XXVII General Assem. Euro. Seismol. Commis.*, 149-153.
- 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.
- Stein, R. S., Barka, A.A and Dietrich, H.J. (1997) Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophys. J. Int.*, **128**, 594-604.
- Sugai, T., Toda, S., Takada, K., Emre, O., Awata, Y., Dogan, A., Haraguchi, T., Kinoshita, H. Tokay, F. and Duman, T.Y. (2000) Evidence for the repetitive coseismic subsidence of the Lake Eften along the Duzce segment, North Anatolian fault, Turkey. *EOS*, F816 (Abstracts for the AGU 2000 Fall meeting).

成果の公表

- 須貝俊彦・遠田晋次・粟田泰夫・原口 強・オメール エムレ・木下博久・高田圭太・アーメット ドガン・タメール ドマン・セリム オザルプ (2000) トルコ北アナトリア断層系 1999年11月地震断層, エフテニ湖セグメントにおけるジオスライサー 調査速報. 日本地震学会 2000年度秋季大会講演予稿集, P087.
- 須貝俊彦・粟田泰夫・遠田晋次・オメール エムレ・原口 強・木下博久・高田圭太 (2001a) トルコ, 北アナトリア断層系, 1999年11月デュズジェ地震断層, エフテニ湖セグメントの活動履歴. 日本地理学会発表要旨集, no. 60 (印刷中).
- 須貝俊彦・粟田泰夫・遠田晋次・原口 強・Omer Emre・木下博久・高田圭太 (2001b) ジオスライサーによる北アナトリア断層系 1999年11月地震断層の活動履歴調査—速報—. 活断層研究, no. 20, 104-111.

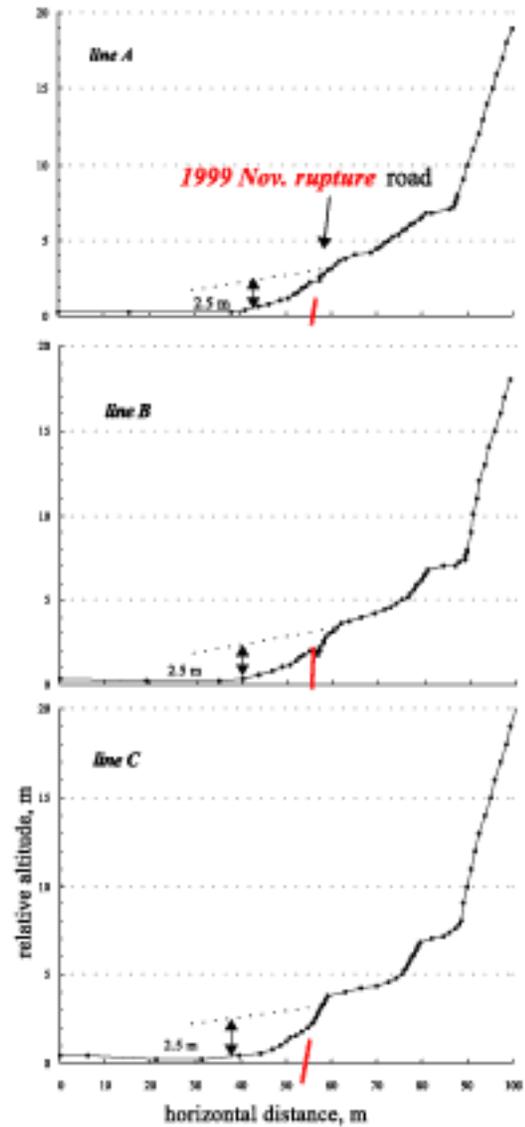
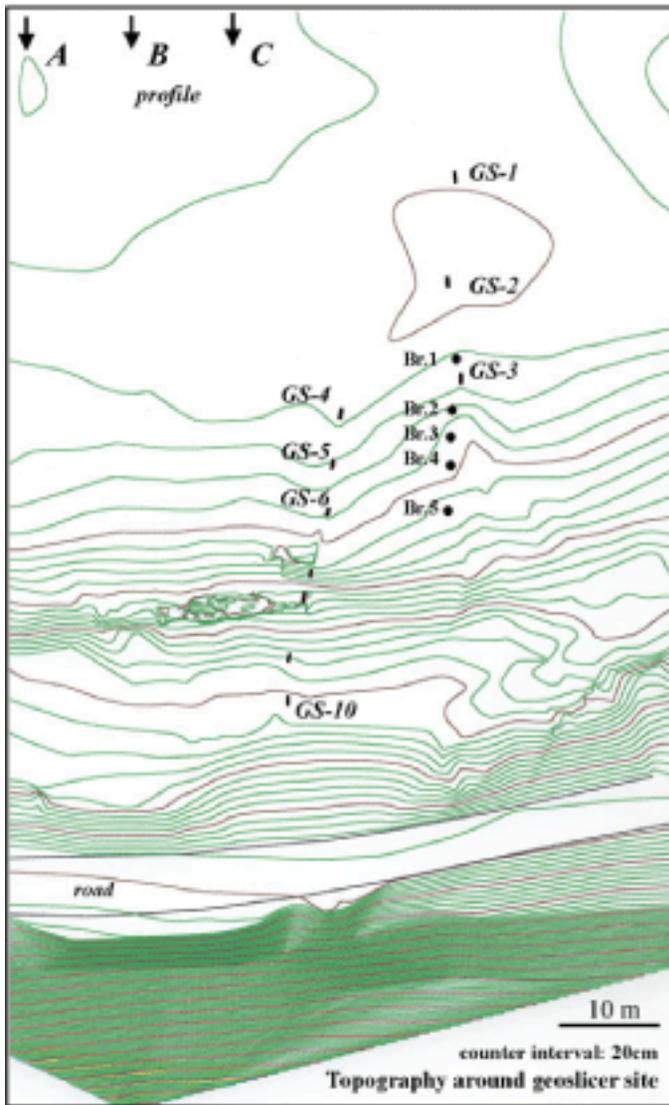


第1図. 北アナトリア断層と1999年8月および11月地震断層の位置.
 Fig. 1. The North Anatolian fault and the 1999 Aug. and Nov. earthquake segments.



第2図. デュズジェ盆地周辺の衛星画像 (ERSDACによる) (上) と調査地点周辺の地形学図 (下).
1999年11月地震断層はEmre et al. (2000) に基づく.

Fig. 2. Landsat image around the Duzce tectonic basin (top) and Geomorphic map around the geoslicer site (bottom).
1999 Nov. surface rupture is after Emre et al. (2000). Landsat image is after Earth Remote Sensing Data Analysis Center.



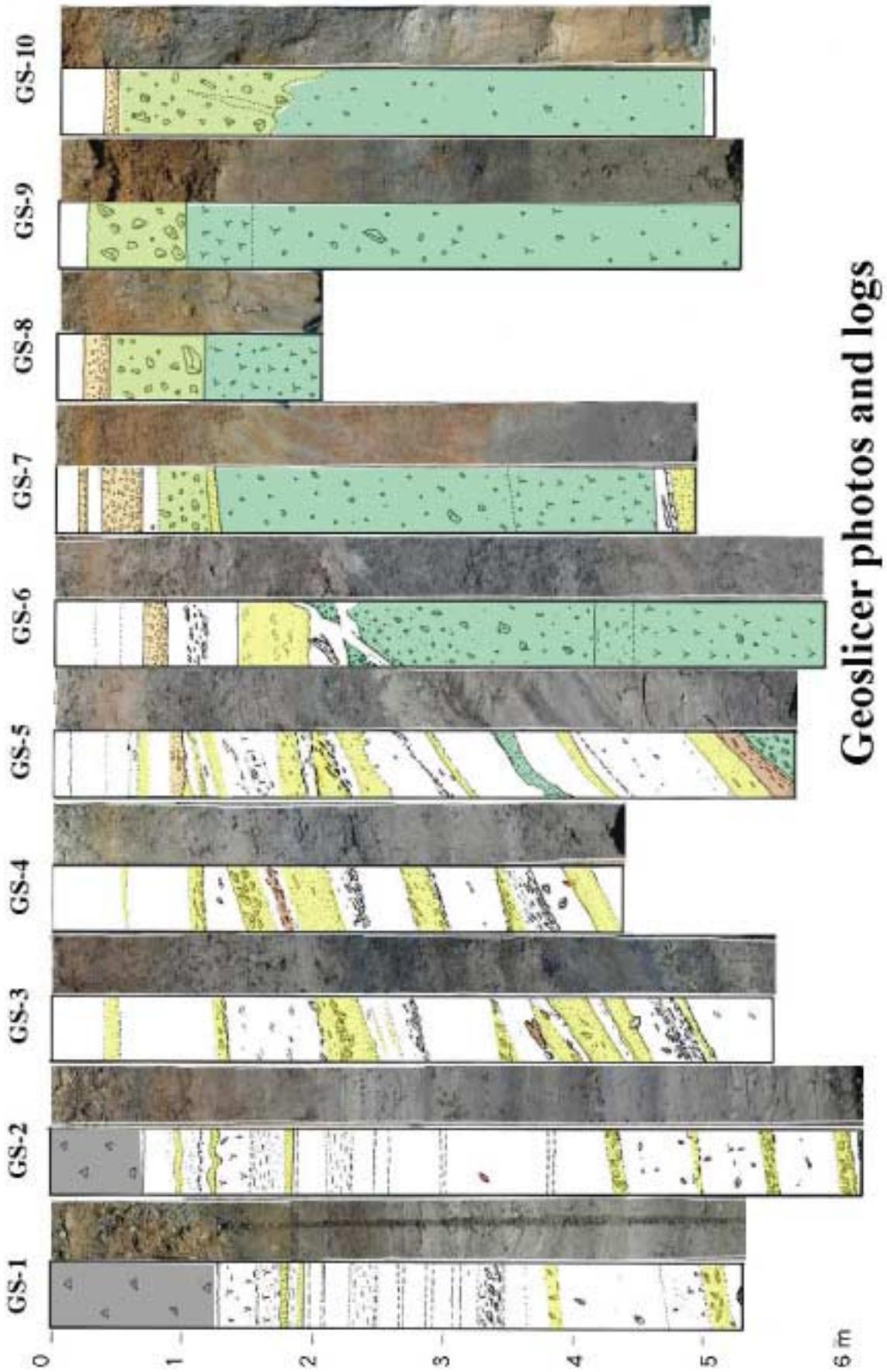
第3図（左図）. 調査地点の地形図.

Fig. 3 (left). Topographic map of the survey site made by total station measurements.

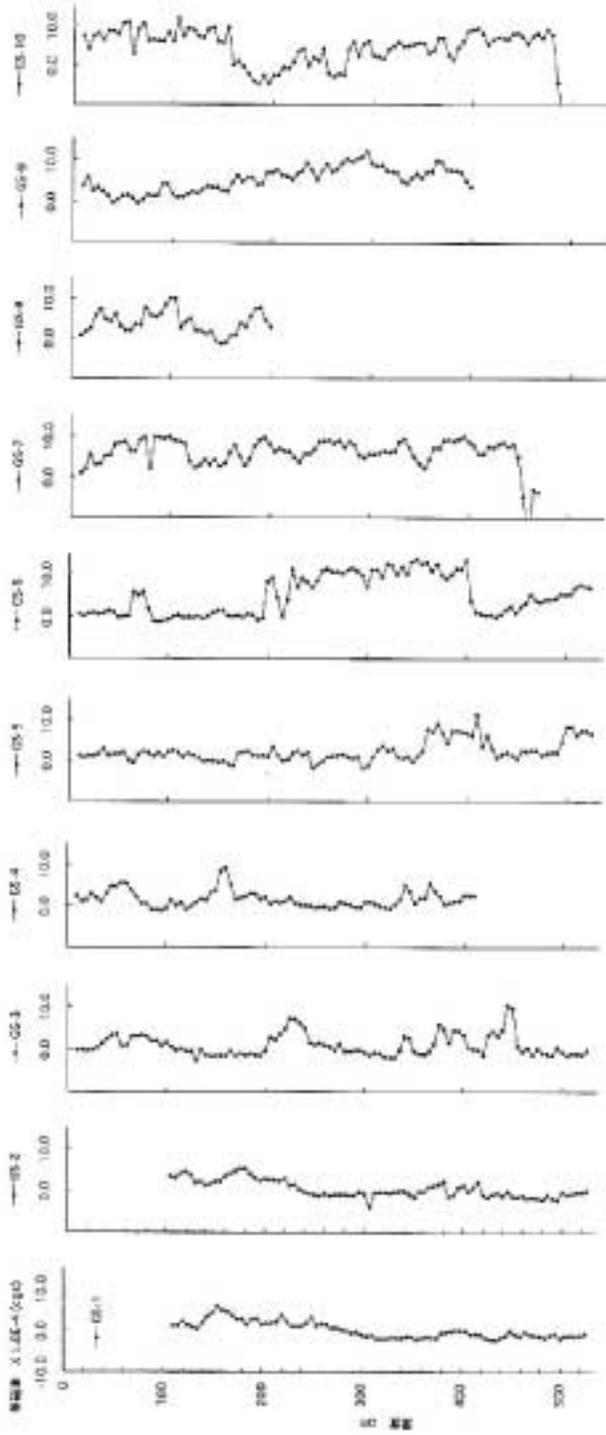
第4図（右図）. 1999年11月地震に伴う地表地震断層崖の地形断面図.

断面の位置は第3図に示す.

Fig. 4 (right). Profiles of the 1999 Nov. surface fault scarps. Locations are shown in Fig. 3.

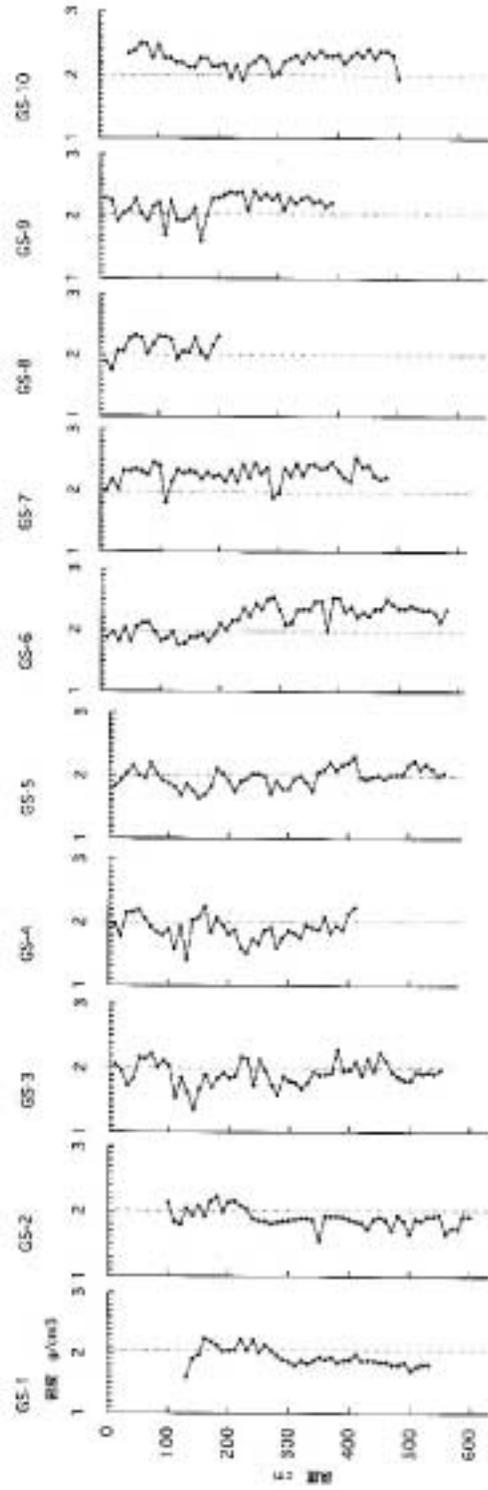


第5図. ジオスライサー試料の写真とスケッチ。
Fig. 5. Logs and photos of geoslicer samples, GS-1 to GS-10.



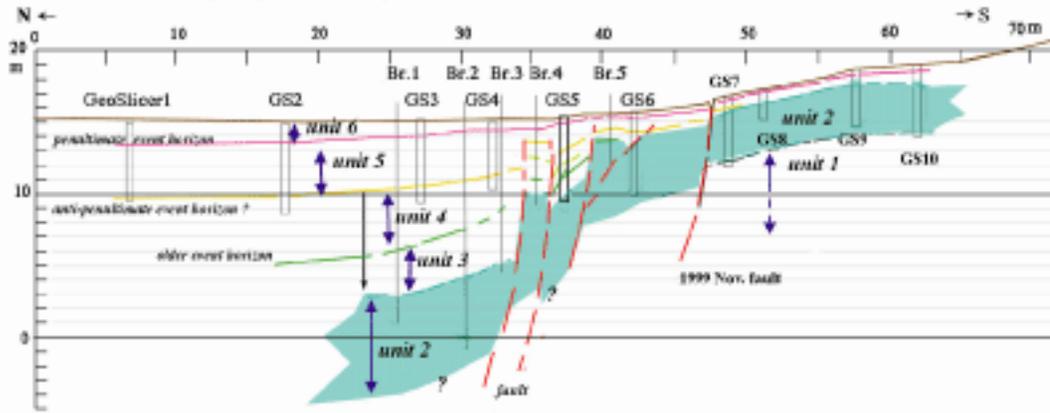
第6図. ジオスライサー試料の帯磁率.

Fig. 6. Magnetic susceptibility of geolicer samples, GS-1 to GS-10.

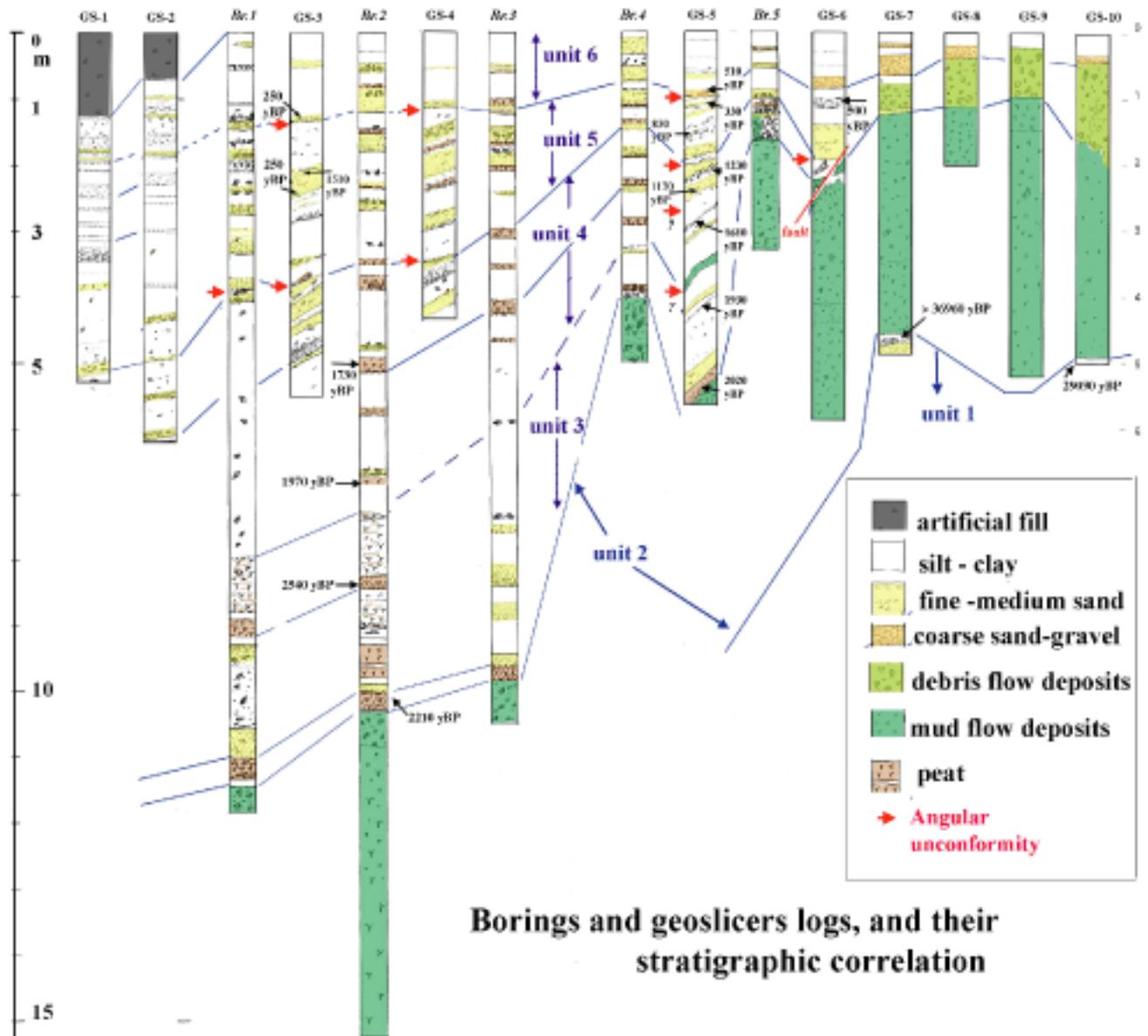


第7図. ジオスライサー試料の湿潤密度.

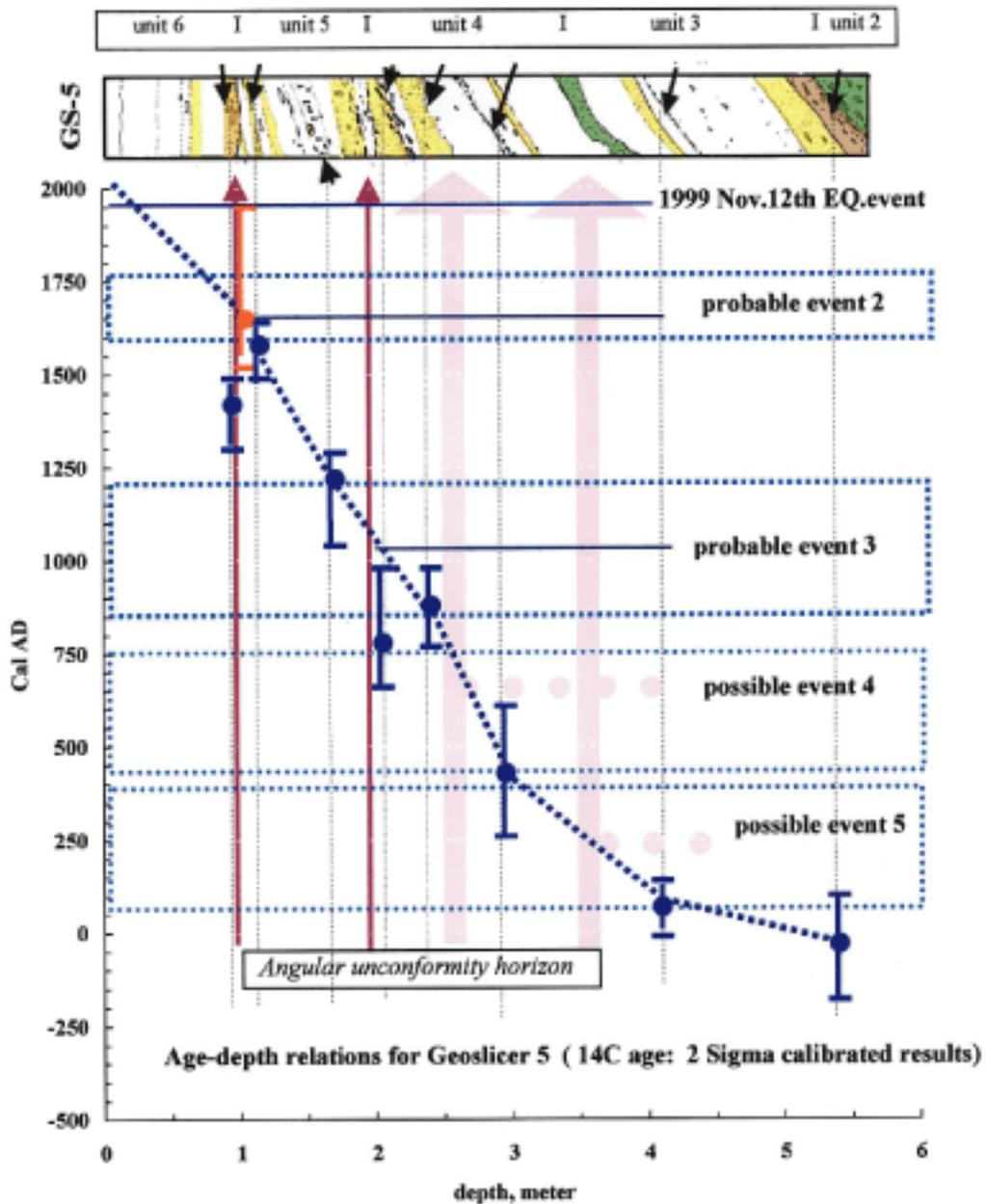
Fig. 7. Wet bulk density of geolicer samples, GS-1 to GS-10.



第8図. エフテニ湖南岸における1999年11月地震断層を横切る地質断面図.
 Fig. 8. Geological profile across the 1999 Nov. earthquake fault on the south side of the Lake Efteni showing longitudinal step faults.



第9図. ジオスライサーおよびボーリングコアの柱状図と地層の対比.
 Fig. 9. Boring and geoslicer logs and their stratigraphic correlation.



第10図. ジオスライサーNo. 5の時間-深度ダイアグラムと傾斜不整合から推定される断層イベントの時期.

Fig. 10. Age-depth diagram for geoslicer 5 and timing of the individual faulting events estimated from the angular unconformities observed on the geoslicer logs.

Sample name	Laboratory number	material	method	depth m	Calibrated radiocarbon age			Conventional age, yBP $\pm 1\sigma$	
					2 σ	2 σ	Intercept		
2GS6.00	Beta-148221	shell	AMS	6	BC 830	BC 780	Cal BC 800	2620	40
3GS1.30	Beta-148173	organic s.	Rd+ext.c.	1.3	AD 1520 AD 1625 AD 1765 AD 1940	AD 1575 AD 1675 AD 1800 AD 1945	Cal AD 1650	250	40
3GS2.20	Beta-148174	shell	AMS	2.2	AD 440	AD 660	Cal AD 560	1510	40
3GS2.50	Beta-155056	wood	AMS	2.5	AD 1520 AD 1625 AD 1765 AD 1940	AD 1575 AD 1675 AD 1800 AD 1945	Cal AD 1650	250	40
3GS3.40	Beta-148175	shell	AMS	3.4	BC 760 BC 550	BC 680 BC 390	Cal BC 410	2400	40
3GS3.80	Beta-148176	shell	AMS	3.8	BC 840	BC 790	Cal BC 810	2640	40
5GS0.95	Beta-148160	wood	Rd+ext.c.	0.95	AD 1300	AD1490	Cal AD 1420	510	70
5GS1.15	Beta-148161	wood	AMS	1.15	AD 1490	AD1640	Cal AD 1520/ 1580/1630	330	40
5GS1.70	Beta-155055	wood	Radiometric	1.7	AD 1040	AD1290	Cal AD 1220	830	60
5GS2.05	Beta-148162	wood	Radiometric	2.05	AD 660	AD 980	Cal AD 780	1230	70
5GS2.40	Beta-155057	wood	AMS	2.4	AD 770	AD 980	Cal AD 880	1170	40
5GS2.95	Beta-148163	wood	Radiometric	2.95	AD 260	AD 610	Cal AD 430	1610	70
5GS4.10	Beta-148164	wood	AMS	4.1	BC 10	AD 140	Cal AD 70	1930	40
5GS5.40	Beta-148165	wood	Rd+ext.c.	5.4	BC 180	AD 100	Cal BC 30	2020	60
6GS1.00	Beta-148219	wood	Rd+ext.c.	1	AD 1310 AD 1385	AD 1360 AD 1480	Cal AD 1425	500	60
7GS4.60	Beta-148220	wood	Rd	4.6	-	-	-	>36960	
10GS4.90	Beta-148172	organic s.	AMS	4.9	-	-	-	29090	180
2BR5.00	Beta-148171	wood	AMS	5	AD 410	AD 230	Cal AD 330	1730	40
2BR6.80	Beta-148170	organic s.	AMS	6.8	BC 50	AD 110	Cal AD 40	1970	40
2BR8.40	Beta-148169	wood	AMS	8.4	BC 790 BC 620	BC 760 BC 590	Cal BC 780	2540	40
2BR10.07	Beta-148166	wood	AMS	10.07	BC 380	AD 170	Cal BC 350/ 300/220	2210	40

第1表. 14C年代測定結果一覧. 各年代測定試料の採取位置は第9図に示す.

Table 1. Results of the radiocarbon dating. Location of each sample is shown in Fig. 9.



写真 1 (上). 調査地点の遠景 .

Photo 1 (top). Distant view of the survey site on the south of Lake Efteni.

写真 2 (中). 調査地点近傍の 1999 年デュズジェ地震断層 .

Photo 2 (middle). The 1999 Nov. 16th earthquake rupture near the survey site.

写真 3 (下). 観察のため、調査地点に並べられたジオスライサー試料 GS-1 ~ GS-10 .

Photo 3 (bottom). Geoslicer samples, GS-1 to GS-10, laid on the survey site for observation.