

# 北アナトリア断層系・1944年 Bolu-Gerede 地震断層のトレンチ掘削調査 — Demir Tepe 地点における 3D トレンチー

## 3D trenching survey at Demir Tepe site on the 1944 earthquake rupture, North Anatolian fault system, Turkey

近藤久雄<sup>1</sup>・Volkan Özaksoy<sup>2</sup>・Cengiz Yıldırım<sup>3</sup>・栗田泰夫<sup>4</sup>・Ömer Emre<sup>5</sup>・奥村晃史<sup>6</sup>

Hisao Kondo<sup>1</sup>, Volkan Özaksoy<sup>2</sup>, Cengiz Yıldırım<sup>3</sup>, Yasuo Awata<sup>4</sup>, Ömer Emre<sup>5</sup> and Koji Okumura<sup>6</sup>

<sup>1,4</sup> 活断層研究センター (Active Fault Research Center, GSJ/AIST, kondo-h@aist.go.jp, awata-y@aist.go.jp)

<sup>2,3,5</sup> トルコ鉱物資源調査開発総局 (General Directorate of Mineral Research and Explanation of Turkey, volkano@mta.gov.tr, cengizyildirim@mta.gov.tr, emre@mta.gov.tr)

<sup>6</sup> 広島大学大学院文学研究科 (Graduate School of Letters, Hiroshima University, kojiok@hiroshima-u.ac.jp)

**Abstract:** We excavated three-dimensional trenches to clarify both the timing and offset of paleo-earthquakes at Demir Tepe site, 12 km east of Gerede, on the 1944 Bolu-Gerede earthquake ruptures of the North Anatolian fault system. At this site, right-stepping fault traces form a linear depression and fault scarp on an alluvial fan surface. Fault-crossing trenches excavated into the depression and the fan surface show evidence of four faulting events. We obtained 25 radiocarbon ages and quantitatively calculated probability distribution of each event age. The most recent event identified in a soil horizon is correlated to the 1944 event. The penultimate event occurred after AD 1640 and corresponds to the great 1668 earthquake in historical records. The two events prior to the 1668 event occurred between AD 1210 and 1460 and between AD 840 and 960, respectively. Considering historic records and results from previous trenching studies, these events are possibly correlated to the 11<sup>th</sup> to 13<sup>th</sup> centuries event and the AD 1035 historical earthquake. According to our slip measurement, the 1944 event accompanied an offset of 4.0-5.0 m, reconstructed using the offset line of trees. Two shallow gullies incising the alluvial fan surface exhibit cumulative offsets of  $9.2 \pm 1.3$  m and  $9.7 \pm 1.2$  m. The 1668 event horizon lies above the channel deposits of these gullies. Furthermore, distinctively older buried channels exposed in the fault-parallel trenches provide cumulative offsets of  $14.5 \pm 0.8$  m and  $19.3 \pm 0.3$  m. Based on the offset measurements and relation to the event horizons, we can resolve three discrete slips per event; 4.0-5.0 m (AD 1944),  $4.8 \pm 1.5$  m (AD 1668),  $5.3 \pm 2.3$  m (the 11-13<sup>th</sup> century), and possibly another  $4.7 \pm 0.9$  m (AD 1035). These data suggest that the similar amount of slip was repeated at this site during the four earthquakes since AD 1035.

**キーワード:** 北アナトリア断層系, 1944年 Bolu-Gerede 地震断層, トレンチ調査, 地震時変位量, 累積変位量

**Keywords:** North Anatolian fault system, 1944 Bolu-Gerede earthquake rupture, trench excavation, slip per event, multiple offset

### 1. はじめに

トルコの北アナトリア断層系は, 20世紀に震源の系統的な西への移動を伴う大地震を発生させた活断層系として知られ, 長大な活断層のセグメンテーション, セグメントの連動, 複数の地震サイクルにわたる活動繰り返しの特徴を明らかにする上で, 最も重要な活断層系の1つである。

1944年にMs 7.3の大地震に伴って出現したBolu-Gerede地震断層では, 断層の平面分布と地震に伴う変位量, 複数の地震サイクルにわたる累積変位量に

関する再検討が行われている。その結果, 1944年地震で5~6 mを記録したGeredeセグメントでは, 最近4回の地震サイクルを通じてほぼ同程度の断層変位が繰り返されている可能性が示された(近藤ほか, 2003)。歴史記録, 従来の古地震学的調査によれば, それぞれの地震に伴って出現した地震断層長は数十~数百kmの範囲で変化したことが知られている(例えば, Ambraseys, 1970; Ambraseys and Finkel, 1995など)。したがって, 一回の地震に伴って連動したセグメントの組み合わせが変化したにも関わらず, Geredeセグメントでは固有変位量が繰り返されてき

た可能性がある(近藤ほか, 2003)。

しかし, この推定は, 地形計測に基づく累積変位量が 1944 年変位量の整数倍であることに依拠しており, 断層活動イベントの発生年代とその変位量が厳密に対応付けられたわけではない。

そこで, 過去複数回の断層活動時期と変位量を同時に復元することを目的として, Gerede 東方 12 km に位置する Demir Tepe サイトにおいて, 三次元的なトレンチ掘削調査を実施した。以下では, その予察的結果について述べる。

## 2. 調査地周辺の地形と掘削工程の概略

トレンチ調査地点周辺の断層は N80°E の走向で直線的に伸び, 調査地西部で右ステップを伴う(第 2 図)。断層の北側には高位の扇状地性段丘面が残丘状に分布し, これを侵食して低位の扇状地性段丘面が断層の両側に分布する(第 2 図)。低位段丘面には, 断層線の右ステップに伴う伸張により, 幅約 5 m, 長さ約 50 m の構造的な凹地が形成されており, この凹地を埋積する細粒堆積物がトラップされていることが予想された。細粒堆積物と断層との関係をもとに断層活動が発生した層準を特定し, 高い分解能で活動履歴を復元することができると期待された。

調査地西部の並木列は 4.0~5.0 m の右横ずれを示し, これは 1944 年地震に伴う変位とみられる(近藤ほか, 2003)。一方, 低位段丘面には 2 本のガリーが刻まれ, 断層を境に 9.2±1.3 m, 9.7±1.2 m の右横ずれ変位を示している(第 2 図)。この変位量は 1944 年変位量の約 2 倍であるため, 最近 2 回の地震に伴う変位量であることが予想された。

トレンチ掘削では, まずガリー埋積物の層序と, さらに下位の埋没チャンネル堆積物の有無を確認するため, ガリーに直交し断層にほぼ平行な 2 条のトレンチ(DTA3: 長さ 5 m, 深さ 1 m, 幅 0.7 m; DTC: 長さ 3 m, 深さ 1 m, 幅 0.7 m)を掘削した(第 2 図)。続いて, 凹地内部でのガリーの層位, 分布および断層との関係を認識するため, 断層に直交する方向に DTB トレンチ(長さ 3.5 m, 深さ 1 m, 幅 0.7 m), DTC トレンチに連結し断層に直交するトレンチを掘削した。DTA トレンチ壁面では, 断層にほぼ直交して流下する埋没チャンネル堆積物が認められ, ガリーよりも長い期間の累積変位を記録していることが期待された。そこで, その平面分布と横ずれ量を推定するため, 断層に平行するトレンチ(DTA1-4, DTD1-4: 長さ 7~12 m, 深さ 1 m, 幅 0.7 m)を掘削した。さらに, チャンネル堆積物と断層との関係を明らかにするため, 断層に直交する DTE トレンチ(長さ 8 m, 深さ 2.5 m, 幅 4 m)を掘削し, DTC トレンチを深さ 2.5 m まで拡張した。拡張した DTC トレンチを以下では DTC2 トレンチと呼ぶ。

## 3. トレンチ壁面の地質と地質構造

トレンチ壁面にはトレンチ底付近に露出した扇状地性堆積物とそれを切って堆積する河川性堆積物, 地表直下に発達する土壌 A 層が露出した。断層に直交するトレンチでは, 土壌より下位の地層が高角の断層により切断され, 凹地を埋積する細粒堆積物と扇状地性堆積物が接する様子が観察された。これらの地層を層相に基づき 1-12 層に区分した。第 3 図に模式的な地質柱状図を, 第 4~6 図にトレンチ壁面のスケッチを示す。以下では, 各層の特徴と分布を上位から順に記載する。

1 層: 地表直下に位置し, 全てのトレンチ壁面に露出する現成の土壌 A 層。層厚は扇状地表面上で 10 cm 程度, 断層凹地内部では 10~20 cm と凹地の外と比較して厚く堆積する。

2 層: 凹地を埋積する弱腐植質シルト質粘土層。層厚は 10~25 cm で南へ向かって増大し, 分布が南縁で断層に限られる。下位の 4 層との層相変化は明瞭であり, 堆積期に時間間隙があった可能性が示される。

3 層: ガリー底に分布する細礫混じりの砂層。DTA, DTB トレンチと DTC トレンチ南北壁面にのみ分布する。断面形状はトラフ状を示し, 層厚は最大で 5 cm である。

4 層: 全ての壁面に露出するフラッドローム層。本層は稀に細礫を含む均質なシルト~細砂からなり, 層厚は 40~50 cm とほぼ一定である。扇状地表面では 6a 層・砂礫層を不整合に覆う(DTD トレンチ北壁面: 第 7 図)。一方, 凹地内部では下位の 5a 層の細砂混じりシルト層との境界が不明瞭かつ漸移的であり, 顕著な不整合が認められない(DTC2 トレンチ: 第 4 図)。凹地で観察される 4 層の上部は, 細礫を含み土壌化している。

5 層: 凹地を埋積する細粒堆積物で, 黄色の細砂混じりシルト層からなる上位の 5a 層, 灰色の粘土層からなる下位の 5b 層により構成される。層相から判断して, 本層は湿地あるいは沼沢地で堆積したとみられる。層厚は南に向かって最大 50 cm まで増加する。6a 層の撓みを埋めるように堆積することから, 5 層の堆積は, 6 層の堆積・変形に引き続いて起きたとみられる。

6 層: 複数のチャンネル堆積物により構成される砂礫層。細砂混じりシルト質粘土層の 6a 層と複数のチャンネル堆積物からなる 6b 層により構成される。

6a 層は DTC2 トレンチでのみ観察され, 上部に腐植が混入し植物痕が認められる。これは, 6 層堆積終了期には水域を離れて土壌化が進行する環境にあったことを示す。一方, 上述したように, 上位の 5b 層・粘土層は湿地あるいは沼沢地で堆積したとみられるため, 6a 層堆積時と 5b 層堆積時の間で, 河川から静止した水域へと急激な環境変化が生じた可

能性が示唆される。

6b 層は淘汰の良い細～中砂と粗砂～細礫の互層から構成され、側方への粒径変化が著しい。また、一部で逆級化構造を伴う。ほぼ全てのトレンチで認められ、層厚 5～30 cm であることから、広範に堆積した網状流堆積物とみられる。

7 層：凹地にのみ分布する細礫混じり粘土層。分布の南縁は断層によって限られており、南へ向かって層厚が増加する。地層上面は 45°S の傾斜を示し、断層運動による顕著な変形を受けている。一方、下位では 9 層・砂礫層と接し、その境界は 60°S に傾斜している (第 4 図)。

8 層：断層に平行なトレンチ (DTA, DTD トレンチ) でのみ認められるチャンネル堆積物。10～20 cm 大の亜角礫の大礫により構成される特徴的な岩相をもち、断面形が浅いトラフ状の典型的なチャンネル堆積物である (第 6 図, 第 7 図)。凹地内部のトレンチ壁面では分布が認められないため、チャンネルは凹地に沿って流下していたのではなく、断層を横断して直線的に流下していたと判断できる。断面の形状から判断して、流路幅は 3～6 m 程度とみられる。ただし、8 層の東縁部は一部で上位の 6b 層により侵食されている。

9 層：DTC2 トレンチの底にのみ認められる砂礫層。最大径約 2 cm の小礫を中心に構成され、シルトを主体とした中～粗砂の基質に富む。

10 層：亜角礫混じりシルト層。全てのトレンチに分布する 10a 層と、粘土と中砂の互層を境に区分される 10b 層に細分される。10a 層は暗褐～暗紫色を呈し、やや土壌化したシルト中に径 0.5～10 cm の淘汰の悪い亜角～角礫が点在する。本層からは多数のレンガ片、土器片が出土する。

11 層：DTE トレンチで認められる土石流堆積物。層厚は約 90 cm で、最大径 30 cm の亜角礫を含む淘汰の悪い大～巨礫で構成される。シルトの基質中に円磨した陶器片やススなどが混在する。

12 層：断層帯の南側だけに認められる灰緑色の礫混じり粘土層。層厚は 1 m 以上であるが、下限はトレンチ中で確認されていない。粘土中に 1～3 cm 大の亜角礫が散在する。

#### 4. 断層活動イベント層準の認定と年代

##### 4.1 断層の変位構造と断層活動イベント層準の認定

トレンチ壁面に露出した断層変位と地層の関係、特に断層と地層の切断・被覆関係に基づき、4 つの断層活動イベント層準を認定した。以下では各イベントを新しいものから I-IV と呼び、イベントの認定根拠およびイベントに伴う変位・変形について述べる。

イベント I: 2 層以下の地層を切断する断層が 1 層・土壌中で消滅する (第 4 図・第 5 図)。したがって、

断層活動イベントが土壌形成中に生じたことが確実である。

イベント II: 4 層以下の地層を切断する断層が 2 層により覆われる (第 4 図・第 5 図)。2 層は凹地内部だけに分布するシルト質粘土層であることから、2 層はイベント II の発生後に生じた凹地を埋積するように堆積したと考えられる。以上から、イベント II は 4 層堆積以降、2 層堆積前に発生したことが確実である。なお、3 層とイベント II の関係を直接示す露頭は得られていない。

イベント III: 6b 層を切断する断層が 5b 層によって覆われる (第 4 図・第 5 図)。また、6 層が変形して生じた撓みを埋めて 5 層が堆積している。6 層は凹地の南縁を限る断層に向かって約 45° で撓み下がっている。5 層はシルト～粘土の細粒堆積物で構成され、6 層の作る向斜を埋積するように堆積している。さらに、地表での土壌化の痕跡を持つ 6a 層と、湿地・沼沢成の 5b 層との間には堆積環境の顕著な変化が推定でき、この変化は短い時間で起こったとみられる。ここで、地表面を構成する 6a 層を撓曲変形させるイベント III が発生し、断層運動で生じた凹地に湿地・沼沢成の 5 層が埋積したと考えると、堆積環境の急激な変化を合理的に説明することができる。以上から、イベント III の発生層準は 6a 層堆積後、5b 層堆積前である。

イベント IV: 7 層を切断する断層が 6b 層により覆われる (第 5 図)。断層は 10a 層、9 層および 7 層下部までを明瞭に切断する。断層の上端は 7 層の上部で不明瞭になるが、6b 層の基底および内部の層理面には変位が生じていないことが確実である。したがって、イベント IV は 7 層堆積以降、6b 層堆積前に発生した。

##### 4.2 断層活動イベントの発生年代

上記した 4 つのイベントの発生年代を検討するため、25 試料の AMS 法  $^{14}\text{C}$  年代測定をおこなった。測定結果を第 1 表に示す。

さらにイベントの暦年代を限定するため、OxCal 3.5 (Ramsey, 2000) を用いて、各ユニットとイベントに対する暦年の確率分布を再計算した。計算の際は、層序学的に矛盾する  $^{14}\text{C}$  年代を示す試料 8 点を対象から除いた。暦年の再計算では、Biasi and Weldon (1994) および Biasi *et al.* (2002) が提案したように、まず個々の試料を基にユニット毎に平均化した確率分布を求め、次に層序と歴史地震の年代を拘束条件として、ベイズ理論に基づく再計算をおこなった。結果を第 8 図に示す。以下では、再計算した各イベントの暦年代 ( $1\sigma$ ) を基に、歴史地震および約 2 km 東方の Ardicli 地点 (第 2 図: Okumura *et al.*, 1994; 2004) の結果との対応を検討する。

イベント I は、土壌中に発生したイベントであるため、1944 年地震に対応する可能性が高い。確率分

布の再計算では、イベント I を AD1944 年として拘束条件に加えた。

イベント II の発生年代は、AD1640 年以降に限定できる (第 1 表)。この年代に基づけば、イベント II は 1668 年の地震 (Ambraseys and Finkel, 1988) に対応する可能性が高い。以下では、イベント II が 1668 年の地震に対応すると考え、確率分布の再計算の拘束条件に加えた (第 8 図)。

イベント III の生じた年代は、AD1210 年以降、AD1460 年以前と限定される (第 1 表, 第 8 図)。イベント III の層準を覆う 5 層からは 2 点 (DTC2-W115 および DTC2-E100) の年代試料を得たが、いずれも層序的に明らかに矛盾するため、確率分布の再計算には加えていない。そのため、イベントの暦年代幅は 13~15 世紀と幅広い。一方、イベントの下限を示す 6a 層の上部には土壌化の痕跡が認められることから、イベントの発生時期は 6a 層の最も若い年代 11~13 世紀に近いと考えられる。このように、イベント III は、Ardicli 地点における 11~13 世紀の EV3 (Okumura *et al.*, 2004) に対応する可能性が高い。なお、この年代に対応する歴史地震は知られていない。

イベント IV の発生年代は、AD840 年以降、AD960 年以前と求められた (第 1 表, 第 8 図)。ただし、イベントの上下限を示す 6b 層および 7 層ともに、古い年代を示す試料が多産し、信頼性の高い年代値は各 1 試料のみ得られている。したがって、イベント IV の真の年代はより新しくなる可能性がある。このように、イベント IV は 1035 年の歴史地震 (Ambraseys, 1970) および Ardicli 地点の EV4 (10~13 世紀; Okumura *et al.*, 2004) に対応する可能性がある。

## 5. 断層活動イベントに伴う横ずれ変位量の検出

トレンチ調査地点では、地表の並木列やガリー、埋没チャネル堆積物を基準として、地形・地質学的に横ずれ変位量を推定することができた。これに加えて、変位基準とイベント層準との関係から、4 回のイベントのそれぞれに伴う横ずれ変位量が得られた。堆積物の分布と断層変位量を基に、堆積当時の古環境と断層活動の履歴を復元したものを第 9 図に示す。

### 5.1 1944 年地震 (イベント I) に伴う変位量

調査地西部の並木列が 4.0~5.0 m の右横ずれを示す (第 2 図)。断層と並木列が低角度で交差しているため、変位量の精度、信頼度は必ずしも高くない。しかし、調査地周辺の 10 km 以内で計測された 1944 年変位量とみられるオフセットはいずれも 4.5~5.5 m である (近藤ほか, 2003)。したがって、この並木列が示す変位量 4.0~5.0 m は 1944 年地震によるものとして妥当な値と考えられる。以下の変位量の算出にはこの値を用いた。

### 5.2 1668 年地震 (イベント II) に伴う変位量

段丘面上に発達する 2 本のガリーがそれぞれ  $9.2 \pm 1.3$  m,  $9.7 \pm 1.2$  m の右横ずれを示す (第 2 図)。前節で述べたように、ガリーは、断層変位を 2 回受けたことが確実である 4 層を侵食している。ガリーの変位量が 1944 年地震 1 回の変位量より有意に大きいことから、4 層が調査地周辺を広く覆って堆積した後、ガリーが形成され、その後 1668 年地震が発生したと考えられる (第 9 図)。

この際、地震以前にガリーが直線的に流下していたかどうかは変位量の見積もりにとって重要である。イベント III に伴って形成された凹地は、5 層の粘土・シルト層、さらに 4 層によって埋積されている (第 4 図, 第 9 図)。したがって、ガリー形成前には、凹地がほぼ完全に埋積されていた可能性が高く、ガリーの流路が凹地に影響されて形成当時から屈曲していたとは考えにくい。

したがって、 $9.2 \pm 1.3$  m,  $9.7 \pm 1.2$  m の変位量は、最近 2 回の断層活動による累積とみなすことができる。この変位量と 1944 年の変位量 4.0~5.0 m をもとに、1668 年地震に伴う右横ずれ変位量は  $4.8 \pm 1.5$  m と算出できる。

### 5.3 イベント III に伴う変位量

複数の埋没チャネル堆積物から構成される 6b 層が  $14.5 \pm 0.8$  m の右横ずれ変位量を示す。

6b 層は網状流の堆積物とみられ、トレンチ調査地点の地下に広範に分布する (第 9 図)。DTA2 トレンチの西部や DTA1 トレンチの西部と東端、DTC トレンチ、DTD1 トレンチでは 4 層が 10 層を直接覆っており、6b 層は分布していない。ここで、DTA1 および DTD1 トレンチの東端付近では、6b 層の左岸側 (東側) の分布縁は明瞭であり、DTC トレンチで 6b 層が認められない点を考慮すれば、両者がもともと一続きであったとみられる (第 9 図)。

また、断層に平行なトレンチ (DTD1-4 トレンチ) では、6b 層は下位のチャネル堆積物である 8 層の左岸側 (東側) を侵食しており、両者の接点はほぼ直線上に分布する (第 9 図)。6b 層を構成するチャネルを個々に識別し、トレンチ間で対比することは難しいが、一部のチャネルが直線的に流下して 8 層を侵食した可能性が考えられる。

そこで、DTA1 および DTD1 トレンチでみられる 6b 層の左岸側分布縁と 6b・8 層の接点の分布を基に直線的な補助線を設定し、これを基準に横ずれ量を計測した。分布縁の最大・最小から得られる変位量について平均と標準偏差を求めた結果、変位量は  $14.5 \pm 0.8$  m を求めることができる。この値からガリーを基準とした最近 2 回のイベントによる変位量を差し引くことにより、イベント III に伴う変位量は  $5.3 \pm 2.3$  m と見積もられる。

#### 5.4 イベント IV に伴う変位量

断層に平行するトレンチ (DTA1-4, DTE1-4 トレンチ) では、浅いトラフ状の断面形を持つチャンネル堆積物である 8 層が認められる。8 層は大礫サイズの亜角礫で構成され、他の堆積ユニットにはない特徴的な層相を持ち、各トレンチ間での対比が容易である。

トレンチ壁面に露出した 8 層の平面分布を復元すると、8 層を堆積させたチャンネルは断層にほぼ直交し、断層を境に右横ずれ変位を受けていることが明らかである (第 9 図)。さらに、凹地の内部では 8 層が見いだされない (例えば、DTC2 トレンチ) ことから、このチャンネルは凹地の影響を受けずに直線的に流下していたと推定される。

トレンチ壁面で観察される 8 層の水平方向の連続性に基づきチャンネルの外縁 (第 9 図) を認定し、これを基準に横ずれ量を計測した。ほぼ全ての左岸側 (東側) の外縁は、上位の 6b 層に侵食されているため、右岸側 (西側) の外縁を計測に用いた。計測では、断層北側のチャンネル外縁を連ねた線分と、これと同走向の線分を断層南側に推定して行った。その結果、8 層の右横ずれ変位量は  $19.3 \pm 0.3$  m と計測できる。この値は、3 回のイベントによる変位量よりも有意に大きく、4 回以上のイベントによる累積と考えられる。8 層の累積変位量が最小の断層活動回数で形成されたと考えれば、1944 年地震に 3 つ先行するイベント IV に伴う横ずれ変位量は  $4.7 \pm 0.9$  m と推定される。

#### 6. まとめ

1944 年 Bolu-Gerede 地震断層 Demir Tepe 地点において、断層の活動時期と過去の地震に伴う変位量を地形・地質学的に復元することを目的として、三次元的なトレンチ掘削調査を行った。

調査地には、扇状地性段丘面を切る逆向き低断層崖、断層の屈曲に伴う凹地が形成され、凹地の南北両縁を限る断層帯がトレンチ壁面に露出した。

断層と地質構造の関係に基づき、4 つの古断層活動イベントが認められる。最新のイベントは土壌層形成中に発生しており、1944 年 Bolu-Gerede 地震に対応するとみられる。最新イベントに先行するイベントは、年代測定結果から AD1640 以降に発生したと推定され、歴史記録に記載された 1668 年地震に対応する可能性が高い。さらに古い 2 つの断層活動イベントの発生時期は、それぞれ 13~15 世紀、9~10 世紀と求められた。この結果と従来の研究による活動履歴、歴史記録を総合すると、2 つのイベントは、紀元 11~13 世紀、1035 年地震 (Ambraseys, 1970) に対応する可能性が高い。

調査地西部の並木列が 4.0~5.0 m の右横ずれを示し、調査地周辺の 1944 年変位量分布とほぼ一致する

ことから、調査地における 1944 年地震に伴う右横ずれ変位量は 4.0~5.0 m とみられる。

断層凹地を南北に横断する 2 本のガリーに、 $9.2 \pm 1.3$  m、 $9.7 \pm 1.2$  m の右横ずれ変位量がみられる。この累積変位量は 1944 年変位量の約 2 倍で、ガリー形成後に 1668 年と 1944 年地震の 2 つの断層活動により形成されたとみられる。したがって、1668 年地震に伴う右横ずれ変位量は  $4.8 \pm 1.5$  m と算出できる。

断層活動 3 回分の変位を受け、複数のチャンネルで構成される網状流堆積物について平面分布を復元し、これをもとに横ずれ量を推定した。この分布縁を基準として、 $14.5 \pm 0.8$  m の累積変位量を計測した。1944 年地震に 2 つ先行するイベントに伴う変位量は  $5.3 \pm 2.3$  m と算出される。

浅いトラフ状の断面を持つ埋没チャンネル堆積物の平面分布を復元し、断層にほぼ直交する直線的な流路外縁を基準に横ずれ変位量を計測した。その結果、横ずれ変位量は  $19.3 \pm 0.3$  m と計測される。チャンネル堆積物は少なくともイベント 3 回の変位を受けることから、この変位量はイベント 4 回分の累積である可能性がある。したがって、1944 年に 3 つ先行するイベントに伴う横ずれ変位量は  $4.7 \pm 0.9$  m であった可能性がある。

このように、Demir Tepe 地点における最近 3 回の断層活動イベントに伴う変位量は、同程度 (約 5 m) であり、さらに 1 つ古いイベントにおいても同程度であった可能性がある。

**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、2003 年に実施された。サンディエゴ州立大学の Thomas Rockwell 氏には Lawrence Livermore National Laboratory における年代測定の便宜を図って頂くとともに、現地で示唆に富む議論をして頂いた。産業技術総合研究所・活断層研究センターの傳 碧宏氏にはランドサット画像についてご教示頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

#### 文 献

- Ambraseys, N. N. (1970) Some characteristic features of the Anatorian fault zone. *Tectonophysics*, **9**, 143-165.
- Ambraseys, N. N. and Finkel, C. F. (1988) The Anatolian earthquake of 17 August 1668. *Historical Seismograms and Earthquakes*, **17**, 1-105.
- Biasi, G. P. and Weldon II, R. J. (1994) Quantitative refinement of calibrated C-14 distributions. *Quaternary Research*, **41**, 1-18.

Biasi, G. P., Weldon II, R. J., Fumal, T. E. and Seitz, G. G. (2002) Paleoseismic event dating and the conditional probability of large earthquakes on the Southern San Andreas Fault, California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 2761-2781.

近藤久雄・栗田泰夫・Ömer Emre・Ahmet Doğan・Selim Ozalp・Fatma Tokay・Cengiz Yıldırım・奥村晃史・吉岡敏和 (2003) 北アナトリア断層系・1944年 Bolu-Gerede 地震断層の分布形状との変位量. 活断層・古地震研究報告, No. 3, 211-223.

Okumura, K., Yoshioka, T. and Kuşçu, İ. (1994) Surface faulting on the North Anatolian fault in these two millennia. *USGS Open-File Report*, 94-568, 143-144.

Okumura, K., Kondo, H., Rockwell, T., Awata, Y., Duman, T. E., Tokay, F., Yıldırım, C. and Özaksoy, V. (2004)

Slip History of the 1944 Segment of the North Anatolian Fault to Quantify Irregularity of the Recurrence. *SSA Annual Meeting*, 04-103.

Ramsey, C. B. (2000) OxCal Program Ver. 3.5, Radiocarbon Accelerator Unit, University of Oxford, U.K.([http://units.ox.ac.uk/departments/rlaha/orau/06\\_01.htm](http://units.ox.ac.uk/departments/rlaha/orau/06_01.htm)).

Stuiver, M., Reimer, P. J., Bard, E., Beck, J. W., Burr, G. S., Hughen, K. A., Kromer, B., McCormac, F. G., Plicht, J. van der. and Spurk, M. (1998) INTCAL98 Radiocarbon age calibration, 24,000-0 cal BP. *Radiocarbon*, **40**, 1041-1083.

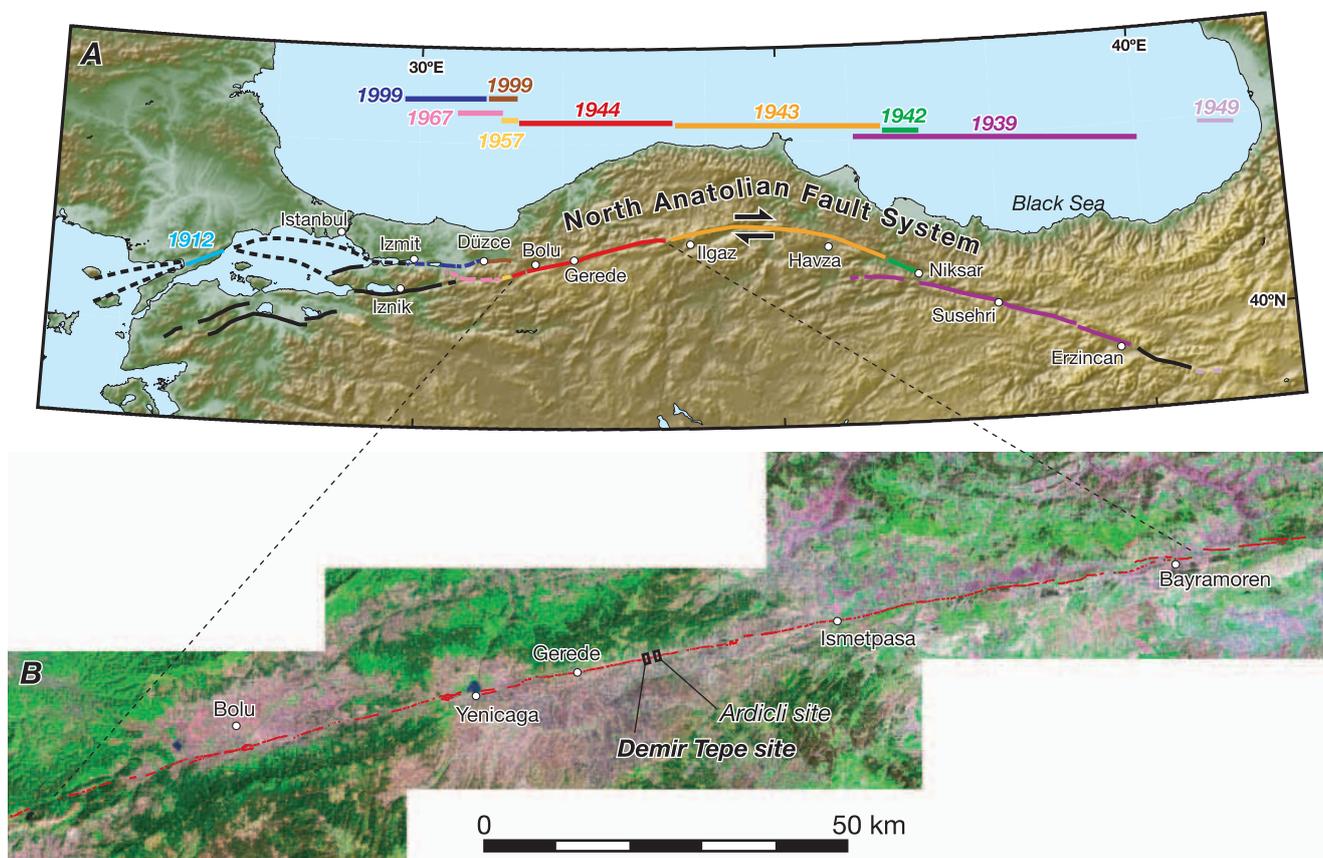
Wessel, P. and W. H. F. Smith (1991) Free software helps map and display data, *EOS* **72**, 441, 445-446.

(受付：2004年9月5日，受理：2004年9月16日)

第1表. 放射性炭素同位体年代の測定結果. 半減期はLibbyによる5568年. 測定は全て加速器質量分析計による. 暦年較正は, 較正プログラムOxCal 3.5 (Ramsey, 2000)およびStuiver *et al.* (1998)によるデータセットを使用. Labo. code; B- Beta Analytic社, L- Lawrence Livermore National Laboratory. 網掛けの年代値は, 層序学的に矛盾する年代を示し, OxCal 3.5の計算 (第8図) では除外した.

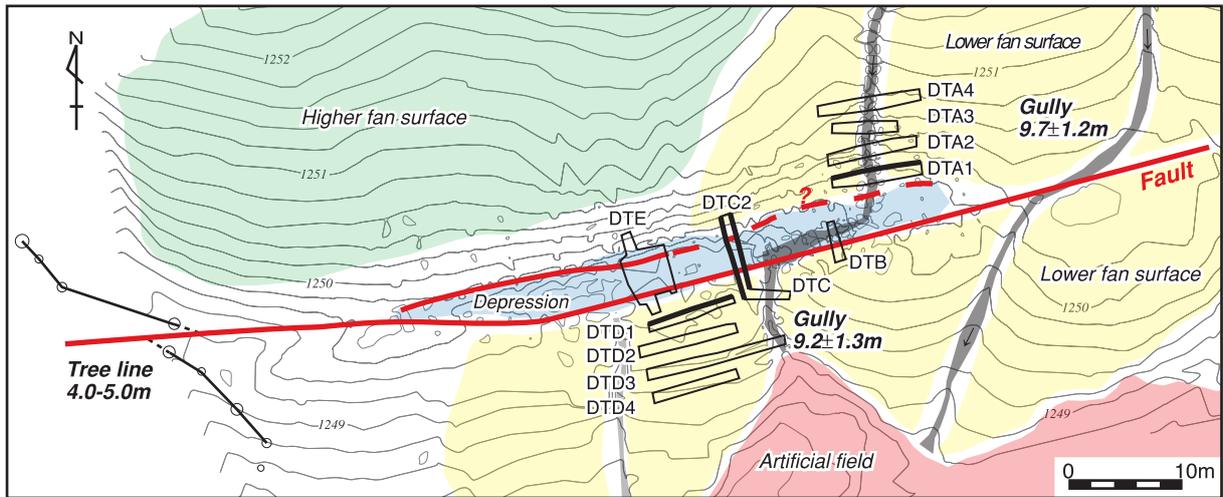
Table 1. Results of radiocarbon dating. Dating was carried out by accelerator mass spectrometry dating method. Calibrated ages are based on a calibration program of OxCal 3.5 (Ramsey, 2000) and data set of Stuiver *et al.* (1998). Labo. Code: B-; Beta Analytic Co. Ltd., L-; Lawrence Livermore National Laboratory. Shaded ages indicate apparent stratigraphic contradiction and they are excluded from re-calculation of probability distribution of calendar ages shown in Fig. 8.

Unit	Sample Name	Labo. Code	Material	<sup>13</sup> C (‰)	Conv. <sup>14</sup> C (yBP)	Calibrated Age (1sigma)	Event	Modeled Cal. Year (1sigma)	Historical Earthquake
							I		1994
02	DTC2 W113	B-188778	humic silt	-26.9	160 ± 40	AD 1675 - 1950			
02	DTC E 02	B-180990	charcoal	-27.6	200 ± 40	AD 1656 - 1947	II	1640<	1668
04 mid	DTE2 S 42	L-105565	charcoal	-25.0	80 ± 35	AD 1695 - 1953			
04 mid	DTC N 01	B-192589	charcoal	-25.5	170 ± 40	AD 1660 - 1950			
04 mid	DTE2 S 42	B-192588	charcoal	-24.4	200 ± 50	AD 1650 - 1950			
04 lower	DTC E 05	B-180991	charcoal	-23.5	370 ± 40	AD 1452 - 1627			
04 lower	DTA3 N 01	B-180987	charcoal	-25.4	410 ± 40	AD 1440 - 1487	III	1210-1460	unknown
05a	DTC2 W115	L-105559	charcoal	-25.0	120 ± 35	AD 1680 - 1951			
05b	DTC2 E 100	L-105560	charcoal	-25.0	1145 ± 35	AD 785 - 963			
06a	DTC2 W110	B-192590	wood	-26.6	880 ± 40	AD 1060 - 1210			
06a	DTC2 E 106	B-192591	wood	-28.1	920 ± 40	AD 1030 - 1180			
06a	DTC2 W109	B-188780	charcoal	-26.1	1070 ± 40	AD 980 - 1020			
06a	DTC2 W111	L-105561	charcoal	-25.0	1560 ± 35	AD 431 - 541			
06b upper	DTE2 S 41	L-105566	charcoal	-25.0	1055 ± 35	AD 978 - 1019			
06b lower	DTA3 N 04	B-180989	charcoal	-25.9	1320 ± 40	AD 661 - 765			
06b	DTC2 E 104	B-192592	plant	-27.1	1350 ± 40	AD 650 - 690			
06b bottom	DTC2 W119	L-105562	charcoal	-25.0	1360 ± 35	AD 653 - 683	IV	840-960	1035 ?
07	DTC2 W120	L-105563	charcoal	-25.0	1200 ± 35	AD 777 - 889			
07	DTC2 E 101	B-191844	charcoal	-24.7	1700 ± 40	AD 240 - 370			
07	DTC2 E 103	B-192593	humic silt	-25.3	1770 ± 40	AD 230 - 330			
08	DTA2 N 15	L-105558	charcoal	-25.0	1270 ± 35	AD 687 - 777			
09	DTC2 W121	L-105564	wood	-25.0	1290 ± 35	AD 675 - 774			
10a upper	DTA3 N 03	B-180988	charcoal	-23.5	1510 ± 40	AD 535 - 603			
10a upper	DTE2 S 39	L-105567	charcoal	-25.0	1530 ± 35	AD 443 - 598			
11 lower	DTF E 67	B-188781	charcoal	-25.7	2480 ± 40	BC 770 - 425			



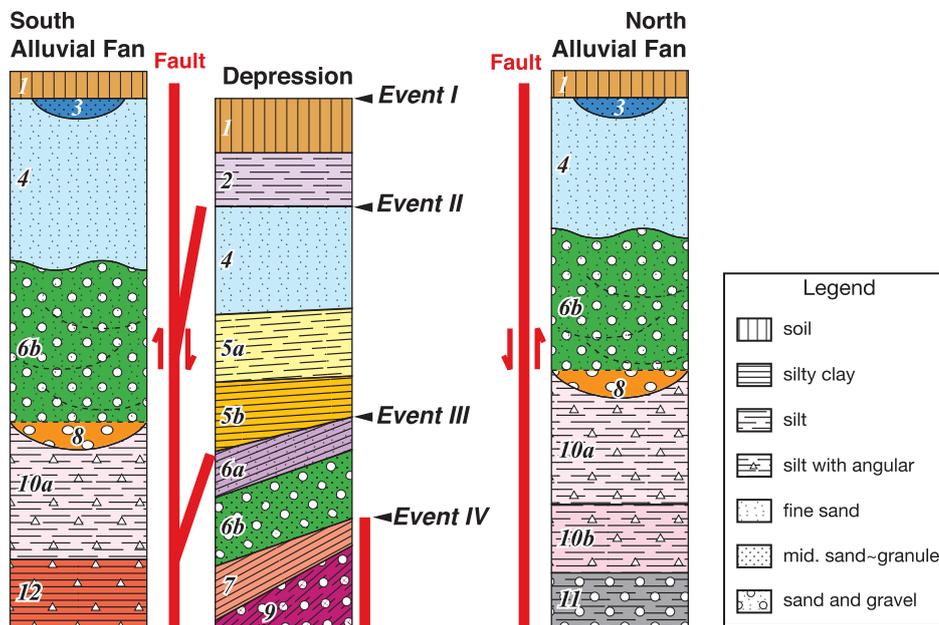
第1図. 調査地域の位置. (A) 北アナトリア断層の分布と20世紀の大地震に伴う地震断層. (B) 1944年Bolu-Gerede地震断層の分布とトレンチ調査地点. 基図はLandsat TM (Global Land Cover Facility, <http://www.landcover.org>) を使用.

Fig. 1. Locality maps of study area. (A) Geometry of the North Anatolian fault system and surface ruptures associated with large earthquakes in the 20th century. The base map is prepared using GMT4.3 (Wessel and Smith, 1991) (B) Geometry of the 1944 Bolu-Gerede earthquake rupture and location of the Demir Tepe trench site. The base map is Landsat TM mosaic image and the source for this dataset was the Global Land Cover Facility, <http://www.landcover.org>.



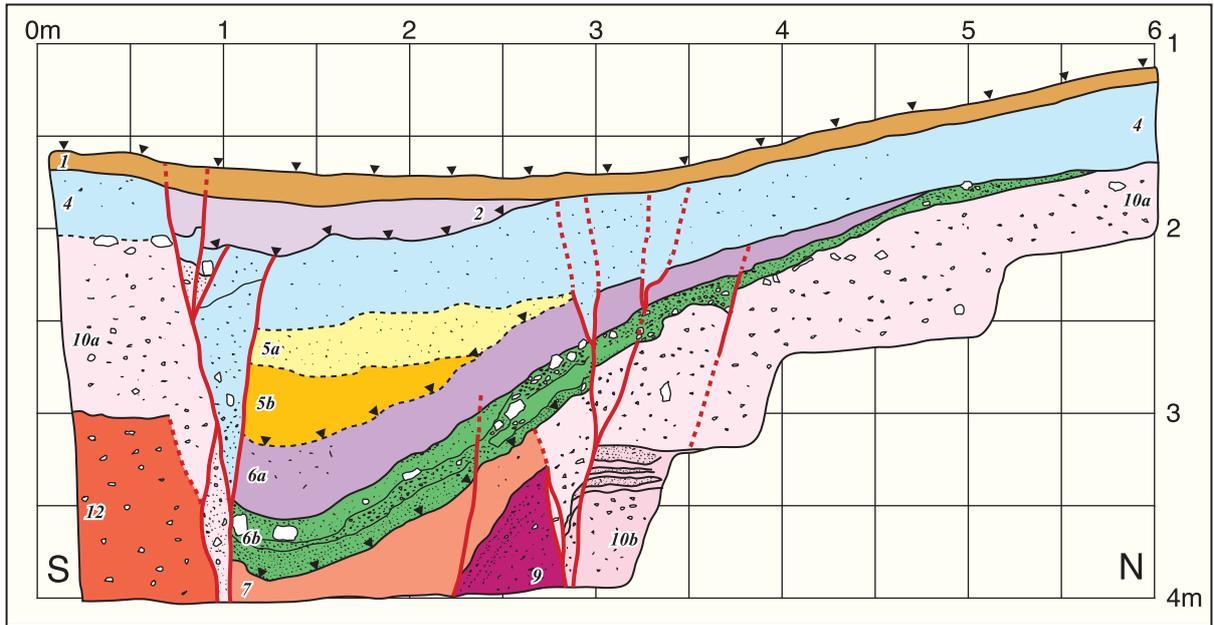
第2図. 調査地の変位地形とトレンチ掘削位置. 等高線間隔は0.2 m.

Fig. 2. Map showing tectonic geomorphic features and trenches of three-dimensional excavation. Contour interval is 0.2 m.



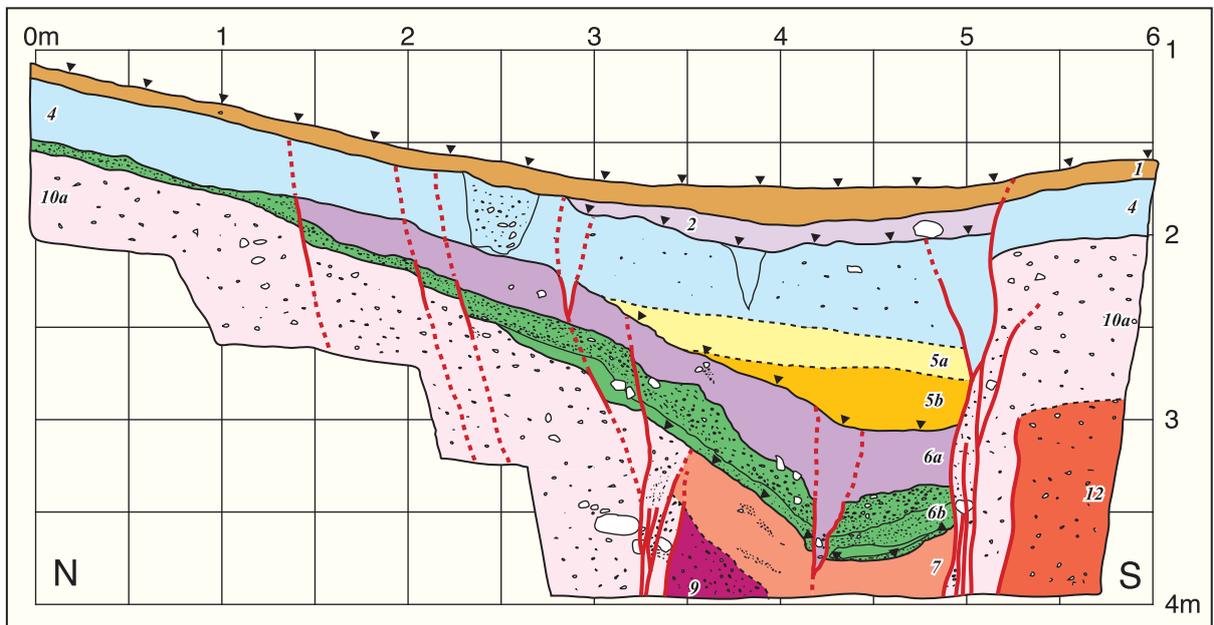
第3図. 調査地の模式的地質柱状図.

Fig. 3. Composite stratigraphic section at the Demir Tepe site.



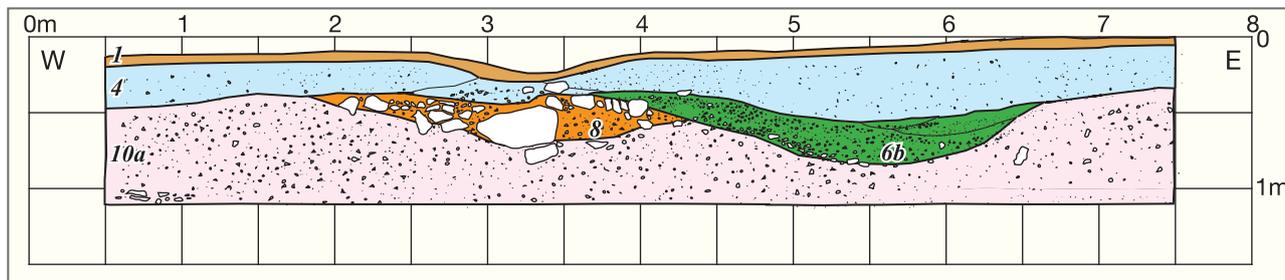
第4図. DTC2トレンチ西壁面のスケッチ. 黒三角はイベント層準を示す.

Fig. 4. Log of west wall of DTC2 trench. The number for units is the same as Fig. 3. Red line is fault and chain line means inferred. Black triangular marks indicate the faulting events.



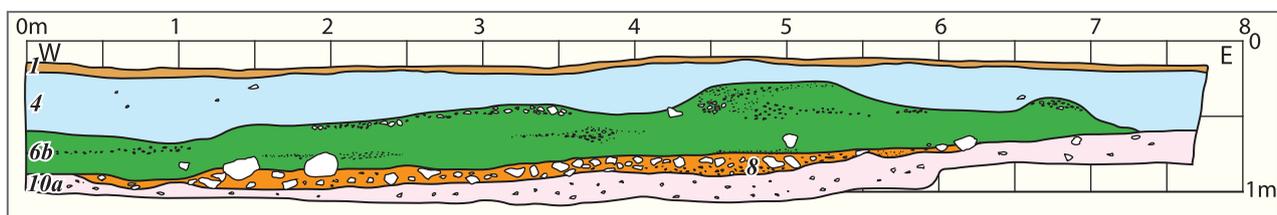
第5図. DTC2トレンチ東壁面のスケッチ. 黒三角はイベント層準を示す.

Fig. 5. Log of east wall of DTC2 trench. The number for units is the same as Fig. 3. Red line is fault and chain line means inferred. Black triangular marks indicate the faulting events.



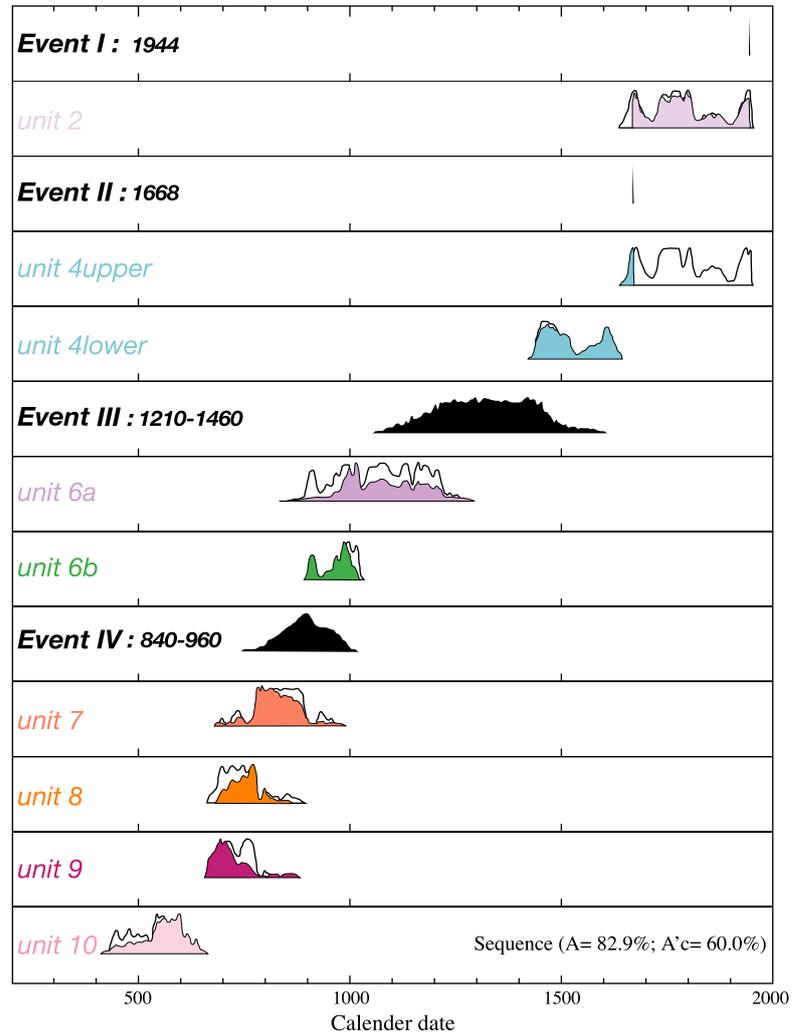
第6図. DTA1トレンチ北壁面のスケッチ.

Fig. 6. Log of north wall of DTA1 trench. The number of units is the same as Fig. 3. Note that a gully is incising into unit 4 and two distinct buried channels (units 6b and 8) are recognized.



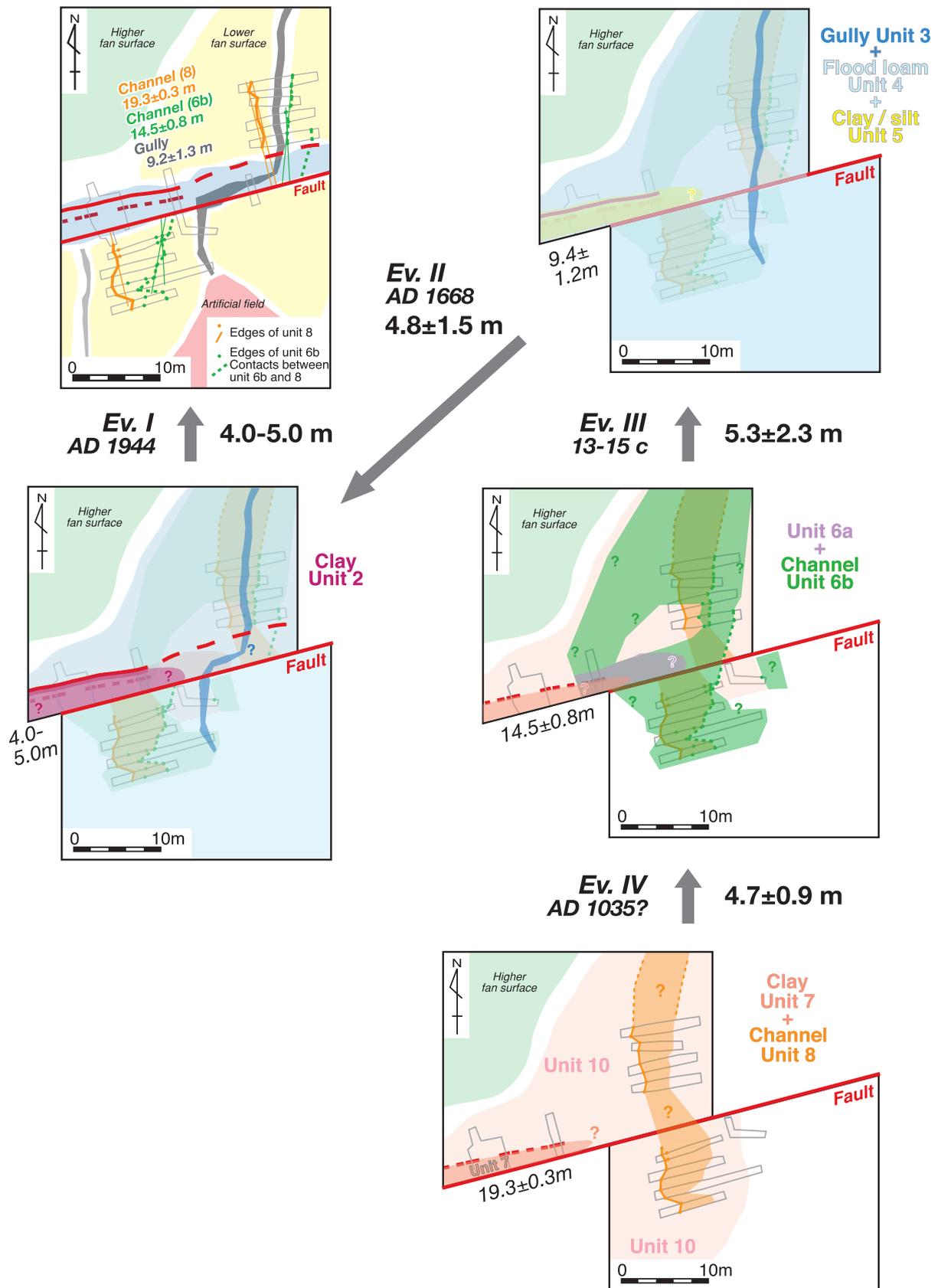
第7図. DTD1トレンチ北壁面のスケッチ.

Fig. 7. Log of north wall of DTD1 trench. The number for units is the same as Fig. 3.



第8図. OxCal 3.5 (Ramsey, 2000)を用いた暦年確率分布の再検討結果. 白い確率分布が再計算を行う前の確率分布, カラーの分布が各地層の再計算後の確率分布, 黒い分布がイベントの確率分布を示す. イベントIII, IVの数字は, 再計算後の暦年代(1 $\sigma$ )の範囲.

Fig. 8. Probability distribution of geological units and paleo-earthquake events constrained by Bayesian model and OxCal 3.5 (Ramsey, 2000). Outlines indicate probability distributions of calibrated radiocarbon ages prior to running the model. Colored areas represent posterior limits placed upon the distributions by the other age constraints including historical information of the 1944 and 1668 earthquakes. Black areas show probability distributions inferred for the paleo-earthquakes.



第9図. 変位地形および堆積物の分布から復元される断層変位の履歴.  
Fig. 9. Slip history through the recent four paleo-earthquake events.