

車籠埔断層の活動性及び集集地震時変位量と  
台湾西部のアクティブテクトニクスに関する研究

**Studies on activity of the Chelungpu fault, its coseismic displacement  
during the Chi-Chi earthquake, and active tectonics of western Taiwan**

杉山雄一<sup>1</sup>・李元希<sup>2</sup>・関口春子<sup>1</sup>・宍倉正展<sup>1</sup>・太田陽子<sup>3</sup>  
吾妻 崇<sup>4</sup>・荻谷愛彦<sup>5</sup>・渡辺満久<sup>6</sup>・斎藤英二<sup>7</sup>・渡辺和明<sup>7</sup>・佐々木俊法<sup>8</sup>

Yuichi Sugiyama<sup>1</sup>, Yuan-Hsi Lee<sup>2</sup>, Haruko Sekiguchi<sup>1</sup>, Masanobu Shishikura<sup>1</sup>,  
Yoko Ota<sup>3</sup>, Takashi Azuma<sup>4</sup>, Yoshihiko Kariya<sup>5</sup>, Mitsuhsa Watanabe<sup>6</sup>,  
Eiji Saito<sup>7</sup>, Kazuaki Watanabe<sup>7</sup> and Toshinori Sasaki<sup>8</sup>

**Abstract:** We conducted topographic surveys of several terraces in Tsaotun area, western Taiwan, to clarify the cumulative displacement of each terrace by the Chelungpu fault. The cumulative vertical displacement of the 3rd, 4th and 5th highest terraces has been estimated 25m+, 20m+ and 12-13m, respectively, but the age data were not obtained. We also excavated a trench at a 1.5-m-high fault scarp on the 6th (youngest) terrace to estimate the earthquake recurrence interval of the Chelungpu fault. The excavation survey made it clear that the exposed deposits of about 300 yBP underwent only one faulting event, the 1999 Chi-Chi earthquake. Therefore, the recurrence interval of the Chelungpu fault in Tsaotun area is inferred to be more than about 300 years. We also made a comparative study of the slip vectors measured at the ground surface ruptures and the dislocation vectors of the source fault inverted from strong ground motion records of the Chi-Chi earthquake. The two vectors show good agreement, implying that a detailed mapping of slip distribution of active faults can contribute to modeling source faults of future earthquakes. We have further conducted a comparative study on active tectonics of western Taiwan and Nankai trough region. The geologic structure of western Taiwan is a mirror image of the structure characterizing the source areas of great earthquakes along the Nankai trough: a left oblique subduction (western Taiwan) and a right oblique one (Nankai trough). Based on this correlation, western Taiwan is divided into five segments, 60 to 80 km long each, in terms of active tectonic (earthquake) structure.

**Key words:** Chelungpu fault, Chi-Chi earthquake, active tectonics, subduction, Taiwan

## 1. はじめに

約 2400 人の犠牲者を出した 1999 年 9 月 21 日の集集地震では,台湾中部に分布する車籠埔断層に沿って,長さ約 100km に達する地震断層が出現した.車籠埔断層の活動性や活動履歴

---

<sup>1</sup> 活断層研究センター (Active Fault Research Center)

<sup>2</sup> 台湾經濟部中央地質調査所 (Central Geological Survey, MOEA, Taiwan)

<sup>3</sup> 横浜国立大学名誉教授 (Emeritus professor of Yokohama National University)

<sup>4</sup> 内閣府 (Cabinet Office)

<sup>5</sup> 千葉大学 (Chiba University)

<sup>6</sup> 東洋大学 (Toyo University)

<sup>7</sup> 地質調査情報部 (Geoinformation Division)

<sup>8</sup> 株式会社アイ・エヌ・エー (INA Corporation)

9月12日受付, 9月25日受理

については、これまでのところ詳しいデータが得られていない。このため、旧地質調査所地震地質部活断層研究室では、南投県草屯（第1図）近傍において、車籠埔断層による変位を被った複数の河成段丘の累積上下変位量を計測すると共に、同断層のトレンチ調査を実施した。本稿ではまず、これらの調査結果を報告する。また旧活断層研究室では、集集地震直後から、台湾經濟部中央地質調査所と共同で、地震断層の変位ベクトルに関する調査を開始し、その成果の一部は既に公表した（例えば、吾妻ほか、2000）。ここでは、その後得られたデータを加えて、地震断層による地表面の変位ベクトルと強震記録から求められた震源断層の変位ベクトルを比較することにより、活断層の変位データから震源断層のすべり分布やすべりの不均質性を推定する可能性を検討する。さらに、南海トラフ沿い地域の地質構造との比較を通じて、集集地震の震源域を含む、プレート境界としての台湾西部のアクティブテクトニクスの特徴について考察する。

なお、以上の調査・研究は、平成12年度の工業技術院特別研究「活断層及び古地震による地震発生予測の研究」、科学技術振興調整費「地震災害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究」、及び同振興調整費多国間型国際共同研究「フィリピン海プレート周辺地域における地震断層に関する調査研究」の一環として行った。

## 2. 調査・研究の方法

### (1) 車籠埔断層の活動性調査

#### 1) 河成段丘の累積上下変位量の計測

南投県草屯付近には、6段ほどの河成段丘が発達し、車籠埔断層はこれらの段丘を切っている（第2図）。各段丘の形成年代は不明であるが、将来それらの年代が明らかになれば、段丘面の累積上下変位量から、車籠埔断層の平均上下変位速度を見積もることが可能となる。さらに、この平均上下変位速度と集集地震時の上下変位量を用いて、車籠埔断層のおよその活動間隔を見積もることが可能となる。そこで、車籠埔断層を横断する5測線と約2km東側を並走する副断層を横断する8測線（うち5測線は、集集地震による1回だけの変位を記録する沖積面上）の精密測量を行い、上下変位量と断層崖の断面形を計測した。

#### 2) トレンチ調査

車籠埔断層の1つ前の活動時期の特定を主目的として、草屯市街地南東約1kmに分布する現河床からの比高約2mの沖積段丘に形成された地震断層崖を掘削した（第2図）。なお、集集地震前には、この段丘上には明瞭な崖の存在は知られておらず、段丘の離水後はただ1回だけの断層活動（1999年集集地震）があったと推定される。トレンチは、北西-南東方向の地震断層崖を斜めに横切るように東西方向に掘削し、長さ約20m、幅約7m、深さ約2.5m、壁面の傾斜60度とした。壁面の成形後、詳細なスケッチを行うと共に、 $^{14}\text{C}$ 年代測定用試料を採取し、測定を株式会社地球科学研究所に依頼した。

### (2) 地震断層による地表面の3次元変位ベクトルの計測

逆断層型の地震断層は大きな水平短縮を伴うため、その実変位の計測は横ずれタイプの地震断層に比べて困難である。本研究では、台湾經濟部中央地質調査所と共同で、断層に切られた異なる方向の複数の直線状構造（道路、フェンス等）、並びに等間隔の繰り返し構造を持ち、断層による特定地点の変位が復元可能な直線状構造の精密測量を行った。そして、吾妻ほか（2000）の方法を用いて、約60地点の3次元変位ベクトル（地震断層上盤側の下盤側に対する相対変位量と変位の向き）を求めた（Lee *et al.*, 2000）。

### (3) 台湾西部の地質構造、大地形等の特徴の抽出

經濟部中央地質調査所から最近刊行された50万分の1台湾地質図（陳ほか、2000）及び50万分の1台湾活動断層分布図（林ほか、2000）等の既往資料に基づいて、台湾西部の地質構造、大地形、活断層及び地震断層の特徴を抽出した。

### 3. 調査・研究結果

#### (1) 車籠埔断層の活動性調査の結果

##### 1) 河成段丘の上下変位量

精密測量の結果得られた各河成段丘の断面形を第3図に示す。車籠埔断層の主断層による上下変位量は、各段丘の原勾配を考慮すると、面では25m+、面では20m+、面では12~13m程度と見積もられる。形成年代の古い高位面ほど上下変位量が大きく、変位の累積が明瞭に認められる。

車籠埔断層の約2km東側を並走する副断層(バックスラスト)による上下変位量は、面では25m+、面では6~8m程度と見積もられ、やはり変位の累積が明瞭である。

##### 2) トレンチ調査結果

トレンチ掘削地点の見取り図を第4図に、トレンチ壁面のスケッチを第5図にそれぞれ示す。また、<sup>14</sup>C年代測定結果を第1表に示す。

トレンチ壁面には、下位より礫層、細砂~砂質シルト層及び表土が露出した。層相から、下位の礫層は段丘をかたち作る段丘礫層、その上位の細砂~砂質シルト層は氾濫堆積物と判断される。

またトレンチ壁面には、地表の地震断層崖に連続する北東傾斜の逆断層が出現した。断層の傾斜はトレンチ壁面下部(礫層中)では60度に達するが、地表付近では低角化しており、断層上盤側(東側)の表土とその下位の細砂~砂質シルト層が下盤側の表土に覆い被さっているのが確認された。

礫層とその上位の細砂~砂質シルト層との境界の上下変位量は約1.3mであり、地表面及び表土基底の上下変位量(1.3~1.4m)とほぼ同じであることが確かめられた。即ち、細砂~砂質シルト層の基底よりも上位の層準には、変位の累積は認められなかった。

#### (2) 地震断層による地表面の変位ベクトル

精密測量によって得られた地震断層上盤側の水平変位ベクトル(変位量及び向き)と上下変位量を第6図に示す。水平変位量は、震央のすぐ北側の南投(Nantou)付近から草屯(Tsaotun)にかけての地域で1m程度と最も小さく、地震断層北部で大きいことが判明した。北部の豊原(Fengyuan)付近では最大8m以上に達する。震央の南側では、南投県名間(Mingchien)付近で水平変位量が4~5mに達し、水平変位量が南に向かって単純に漸減する訳ではないことが明らかになった。

上下変位量についても、水平変位量と同じく、南投~草屯付近で最も小さな値(概ね2m以下)が計測され、北部で大きな値(最大約10m)が得られた。

水平変位ベクトルの向きは、断層南部では南西~西南西であり、北に行くにつれて時計回りに回転し、断層北部では北北西~南北方向となることが判明した。

#### (3) 台湾西部の地質構造、大地形等の特徴

台中から嘉義にかけての地質構造及び大地形の特徴を第7図に示す。車籠埔断層の東側には、鮮新統と更新統からなる南北に延びる堆積盆地が存在する。車籠埔断層の北端は東へ大きく屈曲し、この堆積盆地の南北性のより古い構造を切っている。

南北に延びる堆積盆地とその西縁を限る逆断層のペアは、車籠埔断層の西側にも存在する。更新~完新統からなる台中盆地と大甲断層~彰化断層である。大甲河流域の後里郷付近には、大甲断層~彰化断層から分岐するかたちで、1935年の新竹台中地震で活動した屯子脚断層(第7図のa)が分布し、台中盆地の南北性の構造を斜断して東北東に延びる。この断層は、堆積盆地との関係から見ると、車籠埔断層北端部の東への屈曲部と類似する。

### 4. 議論

#### (1) 車籠埔断層の活動性

### 1) 地震時変位量と累積変位量からの検討

草屯付近における集集地震に伴う車籠埔主断層の上下変位量は 1.5~2.0m 程度, 副断層(バックスラスト)の上下変位量は 1.0~1.5m 程度であった。今回の地震に伴う変位量が 1 回の断層活動による平均的な変位量であると仮定すると, 面はその形成後, 10 回以上の断層変位を被り, 低位の面でも概ね 5 回程度の断層変位を被っていると推定される。今後,  $^{14}\text{C}$  年代測定等により, 各段丘面の形成年代を明らかにすることにより, 車籠埔断層の活動間隔と平均変位速度の見積もりに道を拓くことが期待される。

### 2) トレンチ調査結果に基づく最新 2 回の活動の間隔

トレンチ調査の結果から, 草屯付近の車籠埔断層では, 氾濫堆積物と考えられる細砂~砂質シルト層の堆積開始以降, 集集地震時と同程度の変位量を持つ活動(固有規模の活動)は, 集集地震以外には生じなかったと判断される。細砂~砂質シルト層とその下位の礫層から得られた  $^{14}\text{C}$  年代データ(第 1 表, 第 5 図)に基づく, 細砂~砂質シルト層の堆積は, 補正済み  $^{14}\text{C}$  年代で 300~200 yBP 頃(較正暦年代では 17 世紀の中頃に当たる)に始まったと考えられる。したがって, 草屯付近の車籠埔断層では, 最新 2 回の活動(固有規模の活動)は, おおよそ 300 年以上の間隔をおいて生じたものと推定される。

今後, より古い段丘面のトレンチ調査等を行って, 1 つ前の活動時期を限定すると共に, より古い活動の時期を明らかにして, 車籠埔断層の活動間隔を解明することが望まれる。

### (2) 活断層の変位量分布による震源断層のすべり量分布の推定・可能性と課題

集集地震に伴う地震断層による地表変位の分布は, GPS データによる地表の水平変位場(例えば Yang *et al.*, 2000)と概ね一致する。また, 強震記録から求められた震源断層浅部での最終すべり分布とも良い一致を示す(第 6 図)。

この事実は, 活断層の累積変位量や単位変位量の分布データが, その活断層から将来発生する地震の震源モデルの想定, 特にすべり量分布の推定に大きく貢献し得ることを示唆している。

しかし, 変位量データが全区間にわたって高い密度で取得されている断層は, 最近活動した活断層や変位基準となる地形面が広く分布する台地・丘陵地の活断層等, ごく一部に限られている。今後, 大規模な活断層や人工稠密地域に分布する活断層について, 変位量データをその全区間にわたって取得し, 変位量の分布パターンを明らかにして行く必要がある。

### (3) 南海トラフ沿い地域との比較から見た台湾西部のアクティブテクトニクス

台中付近の堆積盆地, その前縁の逆断層, 断層北部の東方への屈曲・分岐からなる構造は, 南海トラフ沿いの前弧域に見られる前弧盆地, その前縁の逆断層, 同断層東端から堆積盆地を分断して北へ延びる断層・褶曲からなる構造と類似し, 両者は鏡像関係にある。このことは, 台湾中部と南海トラフ沿いの地域が共通のテクトニクス(低角度の斜め沈み込み)に支配されていることを示唆する。鏡像関係は左斜め沈み込み(台湾西部)と右斜め沈み込み(南海トラフ)の違いを反映していると考えられる(第 8 図)。

このような考え方に基づく, 台湾西部は, 北部の新竹付近, 台中北方, 嘉義付近及び南部の台南付近を境界として, 長さ 60~80km の 5 つの単位破壊域(セグメント)に区分されると推定される。今後, トレンチ調査等により, 各セグメントの活動履歴を解明し, 南海トラフ沿いで見られるような複数のセグメントのほぼ同時ないし連鎖的な破壊が台湾西部でも起きているのか明らかにすることが望まれる。

### 謝 辞

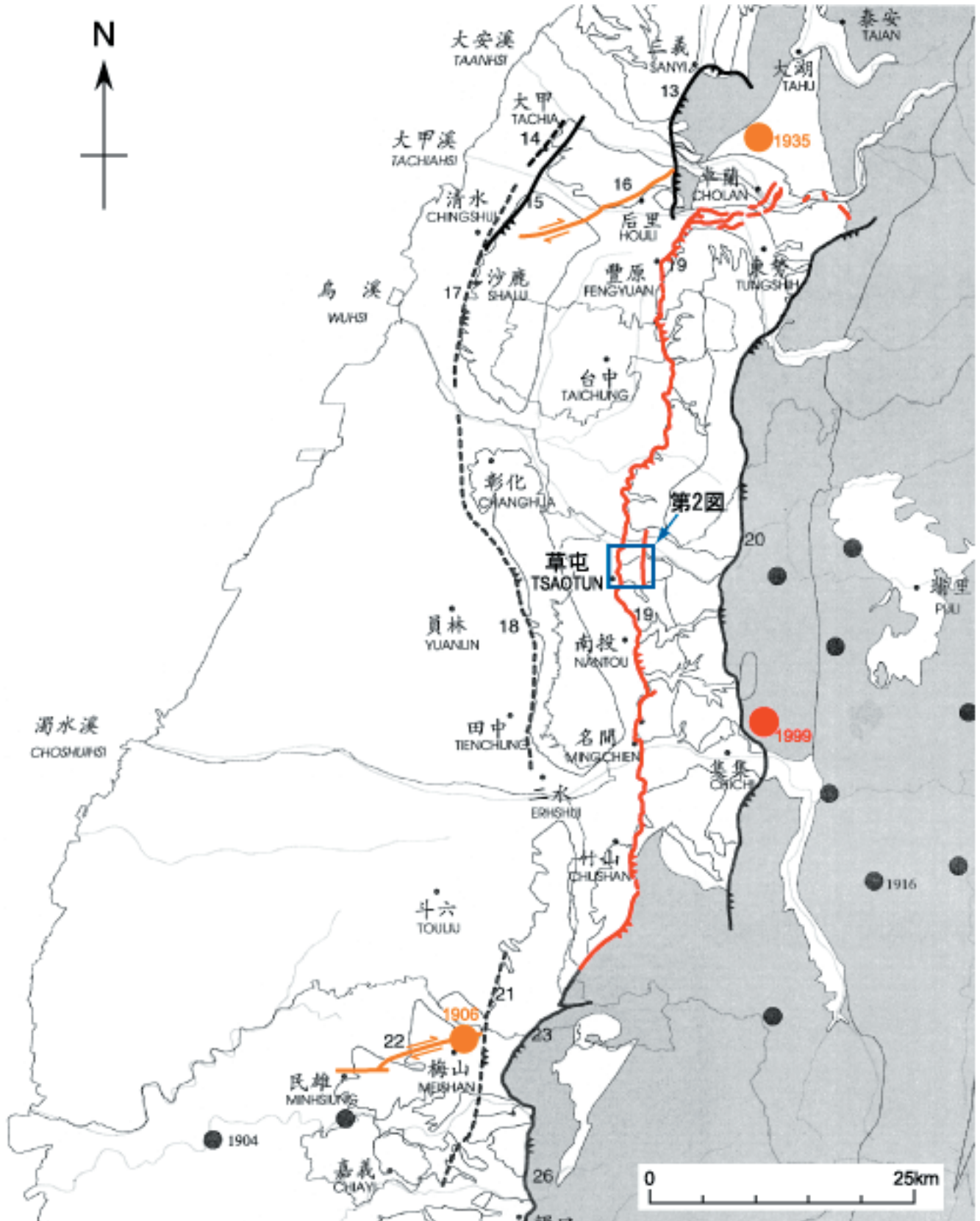
本研究を行うに当たり, 石 同生氏及び盧 詩丁氏をはじめとする台湾經濟部中央地質調査所の皆様には, 多大なご協力とご支援を賜った。また, トレンチ調査に際しては, 掘削地点の選定並びに土地所有者との交渉等で, 黄 奇瑜国立台湾大学教授にご尽力いただいた。ここに記して篤く御礼申し上げます。

## 文 献

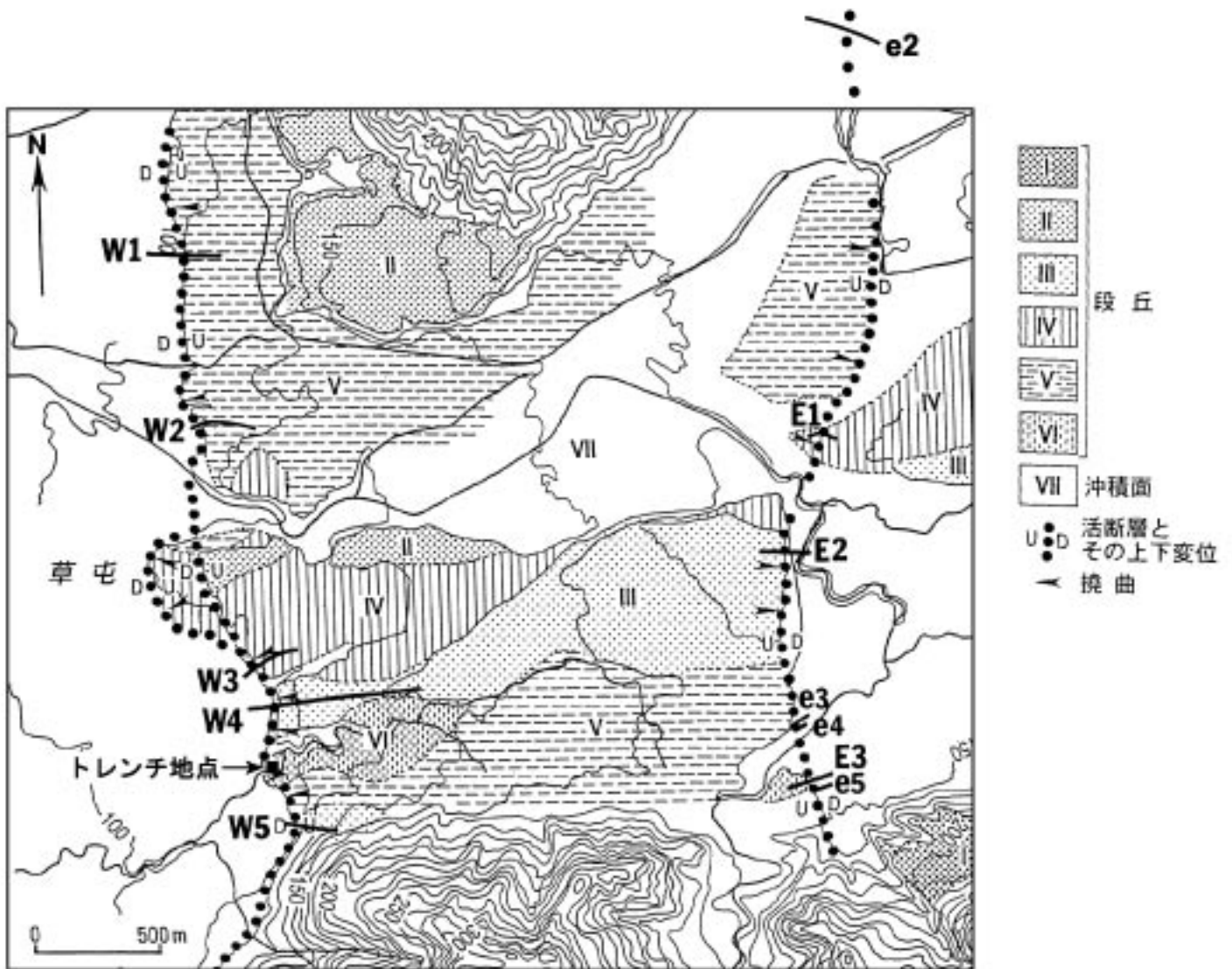
- 吾妻 崇・杉山雄一・苅谷愛彦・粟田泰夫・李 元希・石 同生・盧 詩丁・吳 維毓(2000) 1999年台湾集集地震に伴う地震断層の変位とセグメンテーション. 地質調査所速報, no. EQ/00/2 (平成11年度活断層・古地震研究調査概要報告書), 221-235.
- 陳 肇夏・何 信昌・謝 凱旋・羅 偉・林 偉雄・張 徽正・黄 鑑水・林 啓文・陳 政恒・楊 昭男・李 元希(2000) 50万分の1台湾地質図. 經濟部中央地質調査所.
- Iwata, T., Sekiguchi, H. and Pitarka, A. (2000) Source and site effects on strong ground motions in near-source area during the 1999 Chi-chi, Taiwan, earthquake. *EOS*, **81**, no. 48, F882, S72B-07.
- Lee, Y.-H., Wu, W.-Y., Sugiyama, Y., Azuma, T. and Kariya, Y. (2000) Displacements and segmentation of the surface fault, 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake. *EOS*, **81**, no. 48, F882, S72B-08.
- 太田陽子(2000) 1999年921集集地震による地震断層は何を語るか. 地学雑誌, **109**, 799-804.
- 林 啓文・張 徽正・盧 詩丁・石 同生・黄 文正(2000) 50万分の1台湾活動断層分布図(第2版)及び台湾活動断層概論. 經濟部中央地質調査所, 122p.
- Yang, M., Rau, R.-J., Yu, J.-Y. and Yu, T.-T. (2000) Geodetically observed surface displacements of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake. *Earth Planets Space*, **52**, 403-413.

## 成果の公表

- 太田陽子・草屯断層トレンチ調査グループ(2001) 車籠埔断層中部, 草屯地区におけるトレンチ調査. 地球惑星関連学会2001年合同大会予稿集, Jm-009.
- 太田陽子・黄 奇瑜・袁 彼得・杉山雄一・李 元希・渡辺満久・澤 祥・柳田 誠・佐々木俊法・鈴木康弘・唐 厚樞・楊 盛淵・曹 育田・廣内大助・谷口 薫(2001) 台湾中部, 車籠埔断層上のトレンチ調査. 草屯地区, 草屯西断層の例. 地学雑誌, **110**, 698-707.
- 杉山雄一(2001) 台湾西部と南海トラフ域との比較. 類似点(鏡像性)と相違点(セグメント化の成熟度). 地球惑星関連学会2001年合同大会予稿集, Jm-010.



第1図. 1999年集集地震の震源域付近の概略図. 林ほか (2000) を簡略化.  
 Fig. 1. Index map of the 1999 Chi-Chi earthquake area. Simplified after Lin et al. (2000).

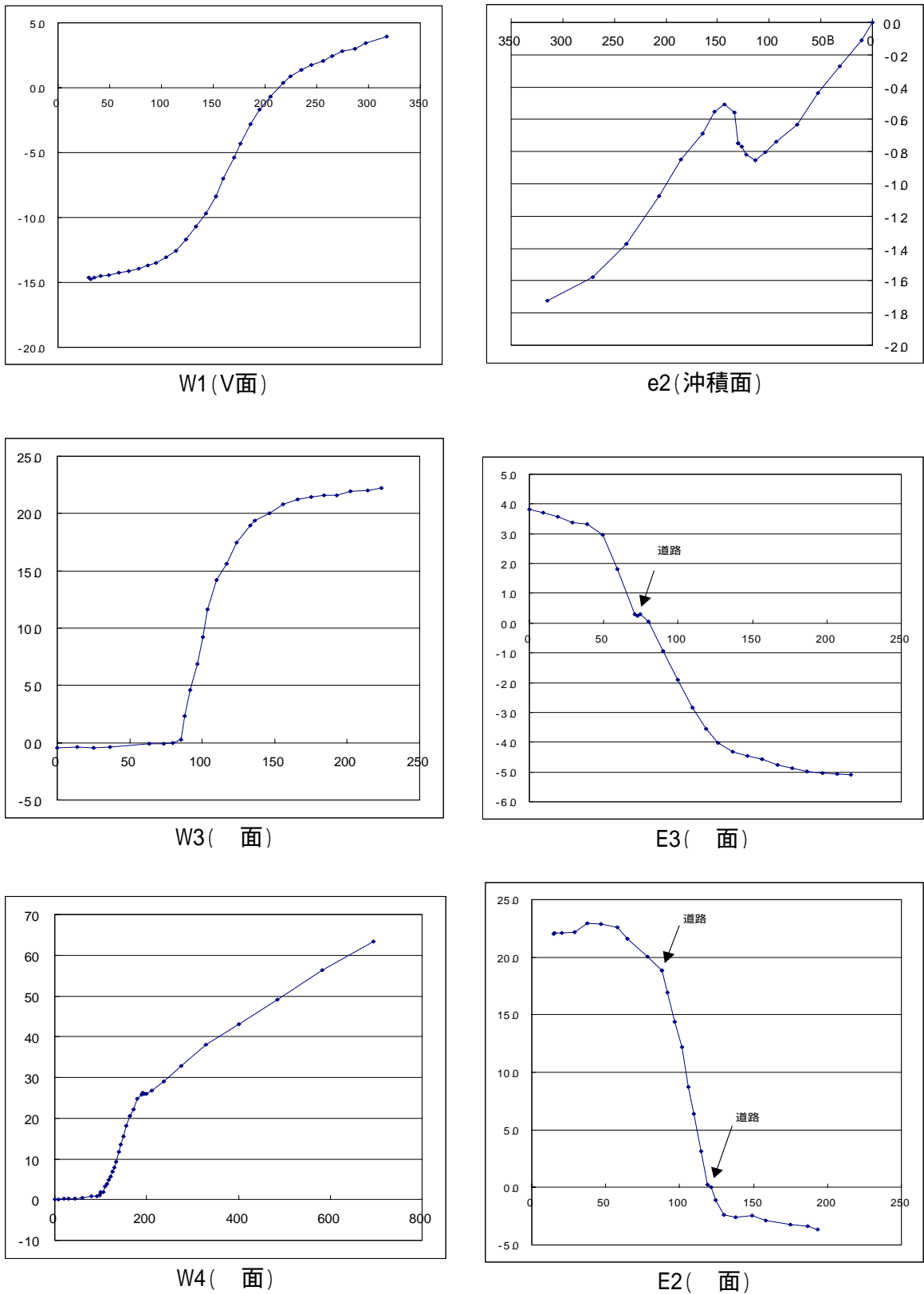


第2図. 草屯付近の段丘分布と地形測量測線及びトレンチ調査地点. 太田 (2000) に加筆.

Fig. 2. Map showing terrace distribution, topographic survey lines and a trench site in Tsaotun area.

Modified after Ota (2000).

西側の断層が車籠埔断層, 東側の断層が副断層 (バックスラスト). e2~e5は集集地震による上下変位量を計測した沖積面上の測線 (e1は本図の枠外, e2の北方約1kmの烏溪南岸).



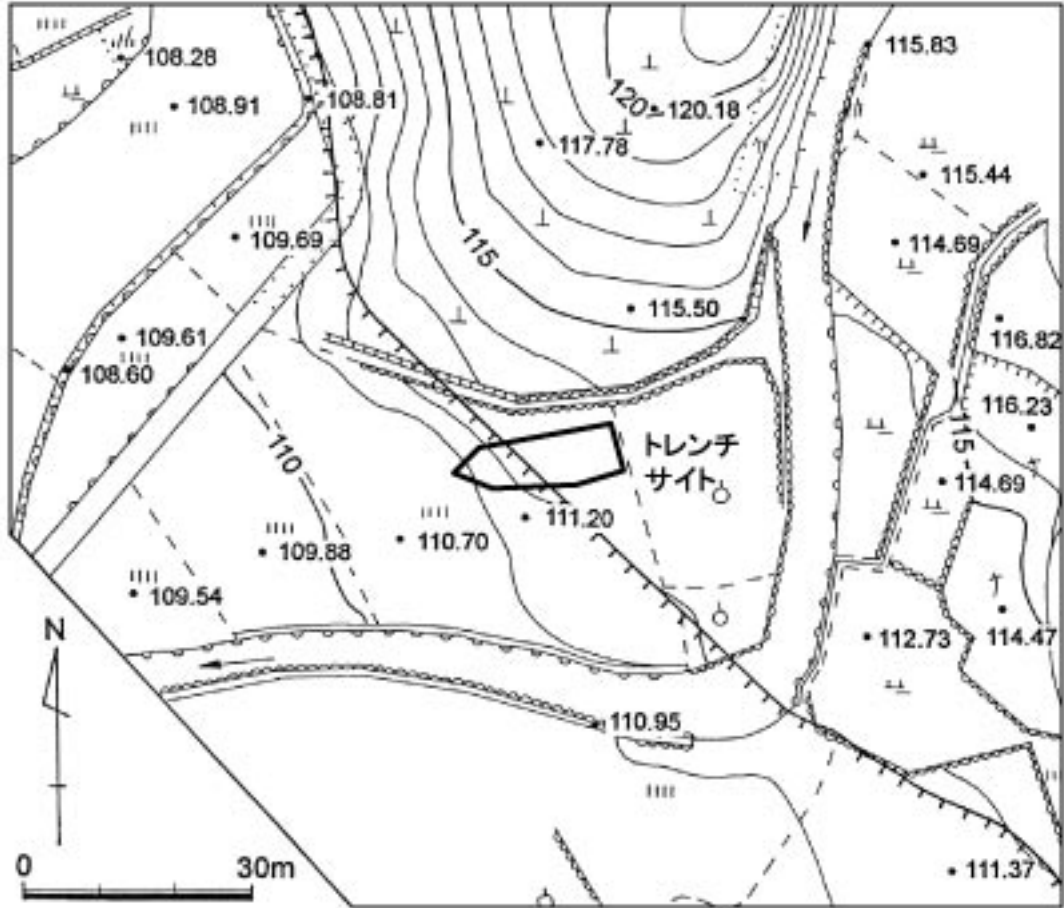
第3図．車籠埔断層及びその副断層による変位を被った段丘面及び沖積面の地形断面．

Fig. 3. Topographic profiles of the terraces and alluvial plain displaced by the Chelungpu fault.

W1, W3, W4測線は車籠埔断層を横断し, e2, E2, E3測線は副断層を横断する．

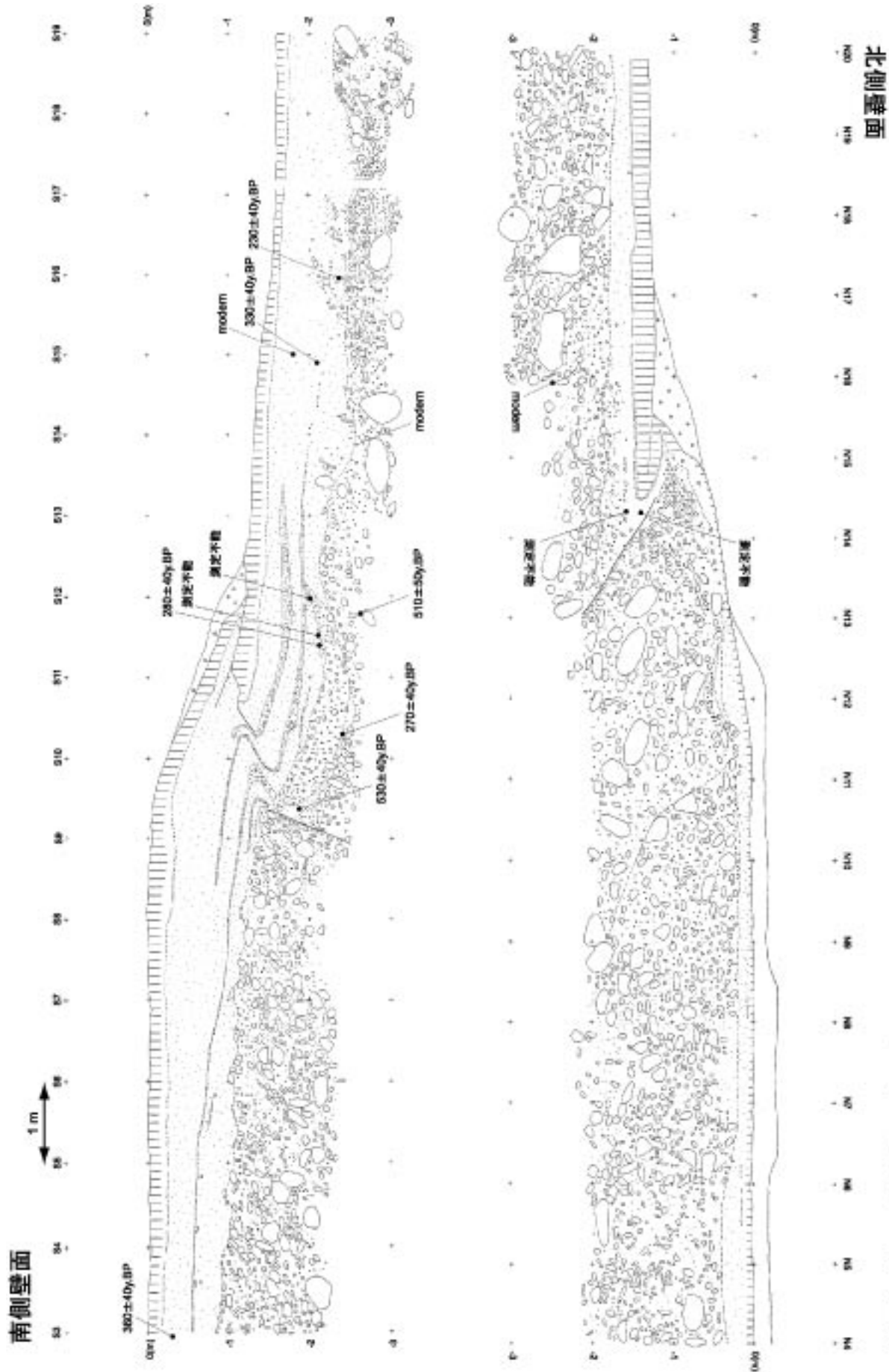
各測線の位置は第2図参照．各断面の縦軸・横軸の単位はメートル．





第4図. トレンチ調査地点の平面図.

Fig. 4. Plan of the trench site in the suburbs of Tsaotun.



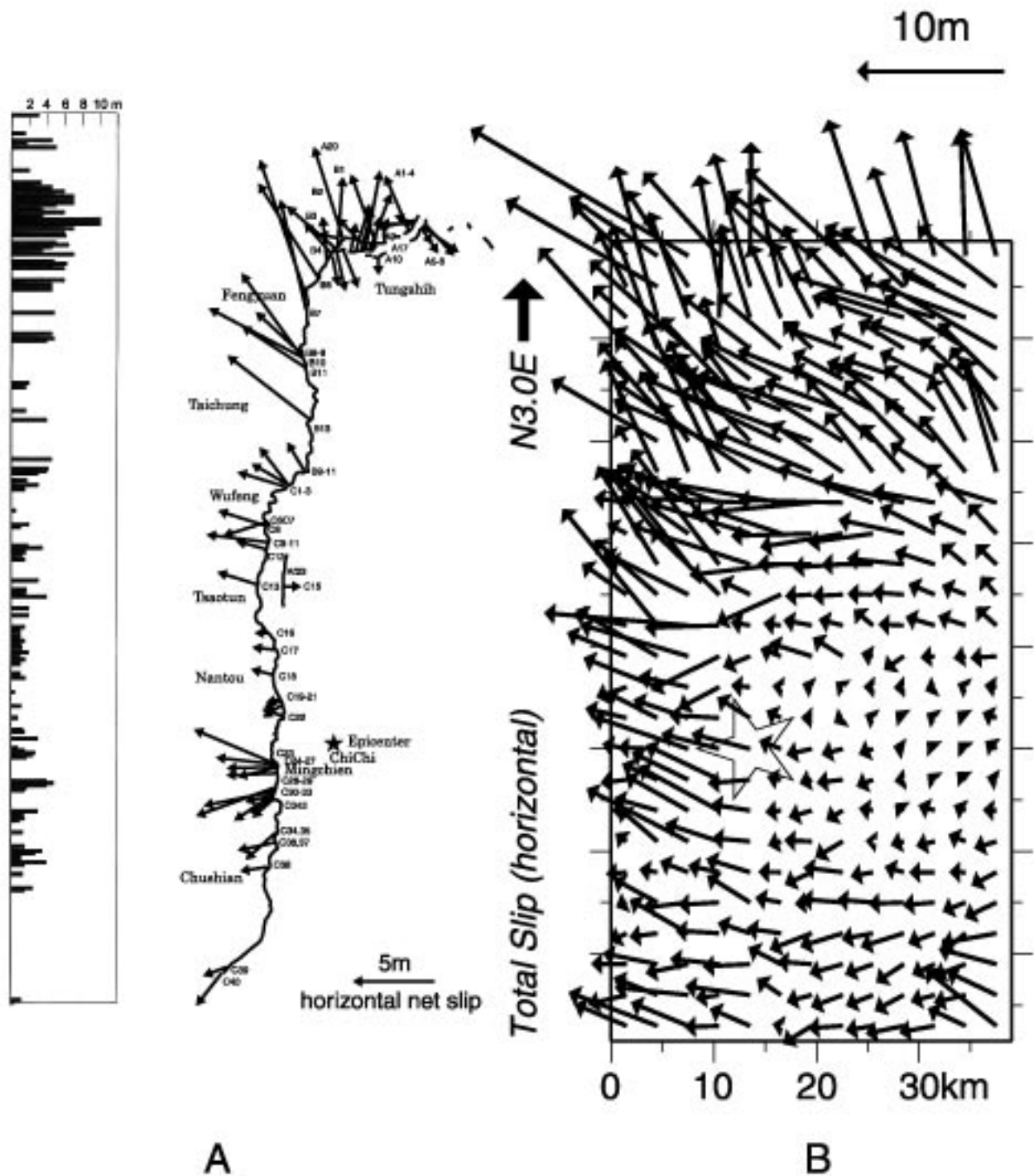
第5図. トレンチ壁面のスケッチ.  
Fig. 5. Sketches of the trench walls.

第1表. トレンチ壁面試料の<sup>14</sup>C年代測定結果.

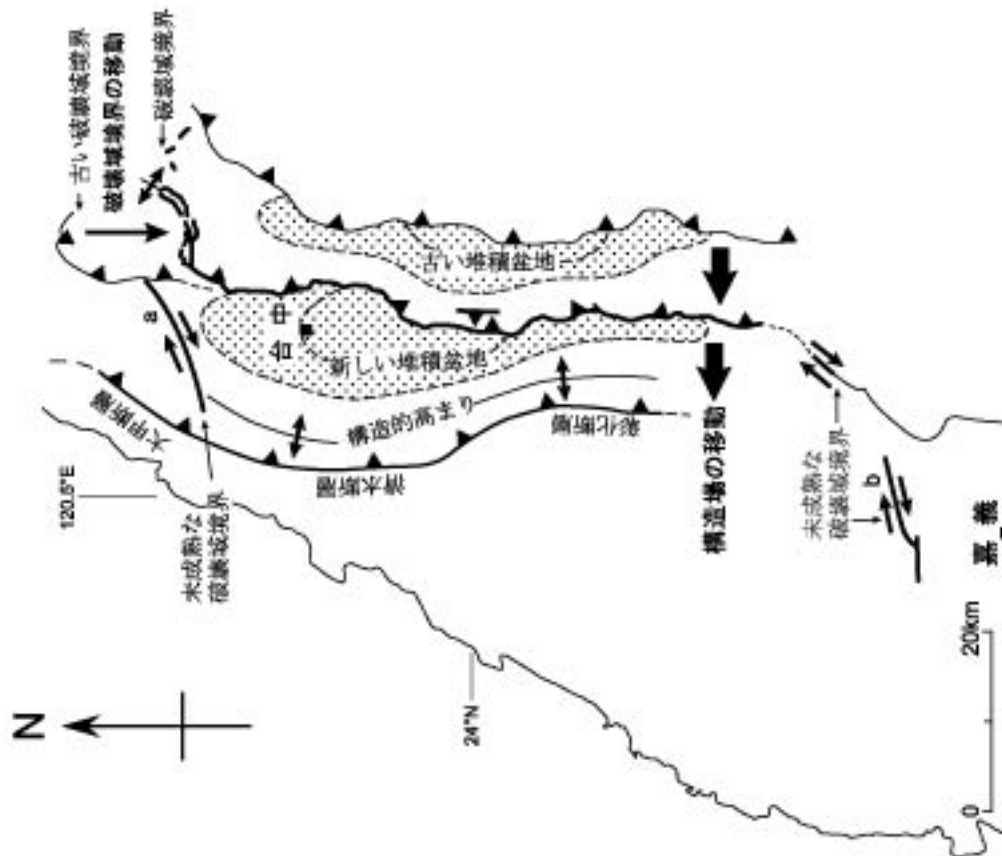
Table 1. <sup>14</sup>C dating results of the samples from the trench walls.

Sample number	Lab. no. (Beta-)	Location	Horizon	Material	Method	Measured <sup>14</sup> C age (y BP)	δ <sup>13</sup> C (‰)	Conventional <sup>14</sup> C age (y BP)	Calibrated age (Cal AD/BC; 1σ)
11	145627	S15	2 (up.)	char.	AMS	108.0±0.5%	-25.3	modern	
26	145625	S15	2 (up.)	char.	AMS	370±40	-28.0	330±40	AD 1490-1640
31	145626	S3	2 (up.)	char.	AMS	390±40	-26.8	360±40	AD 1460-1530/ AD 1560-1630
21	146760	S11-S12	2(low.)	char.	AMS	330±40	-28.0	280±40	AD 1525-1560/ AD 1630-1655
43	145621	S16	2(low.)	char.	AMS	260±40	-26.9	230±40	AD 1650-1670/ AD 1780-1800
6	145623	S9-S10	2(low.)	char.	AMS	560±40	-26.8	530±40	AD 1400-1430 AD 1530-1550/
1	145619	S10-S11	2(low.)	char.	AMS	270±40	-25.3	270±40	AD 1630-1660
3	145622	S12	1	char.	AMS	520±50	-25.6	510±50	AD 1410-1440
20	145618	S14	1	char.	AMS	106.6±0.5%	-31.4	modern	
18	145617	N16	1	char.	AMS	109.2±0.5%	-26.1	modern	

年代測定及び暦年較正はBeta Analytic社による。層準 (horizon) の1は礫層, 2は細砂～砂質シルト。試料物質 (material) のchar.は炭化物。



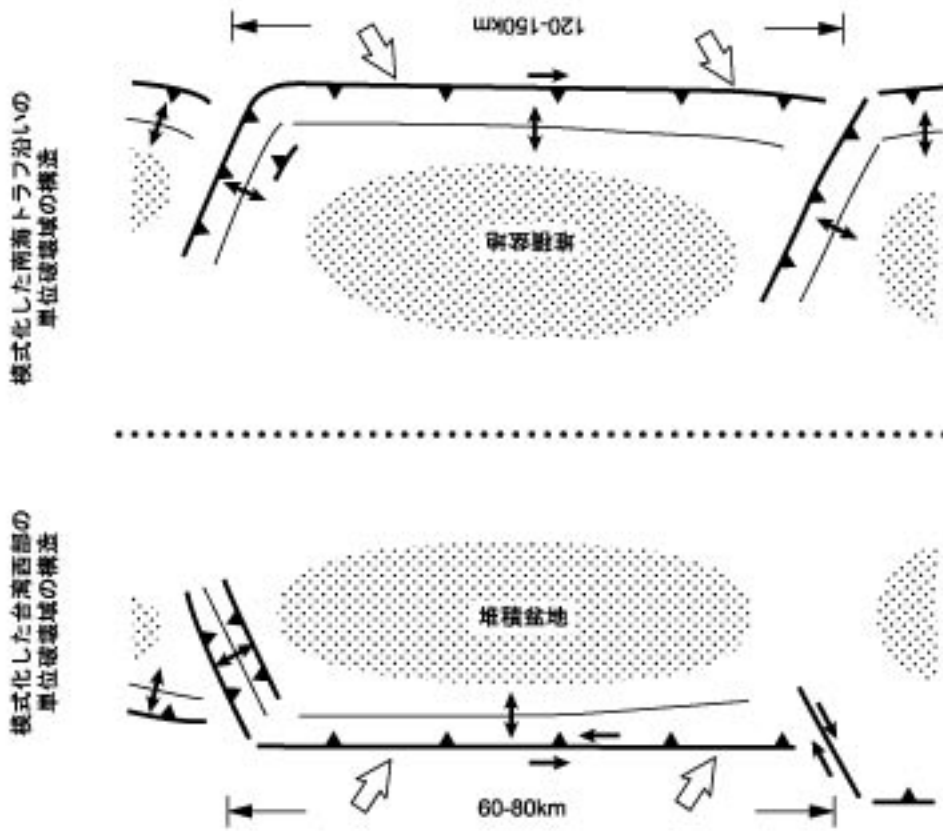
第6図. A : 集集地震の地表地震断層の水平変位ベクトル及び上下変位量 (Lee et al., 2000) ,  
 B : 強震記録から求められた震源断層の最終すべり量分布 (Iwata et al., 2000) .  
 Fig. 6. A: horizontal displacement vectors and vertical displacement of the ground surface ruptures associated with the Chi-Chi earthquake (Lee et al., 2000), B: final slip distribution on the source fault inverted from strong ground motion records of the Chi-Chi earthquake (Iwata et al., 2000).



第7図. 台湾西部, 台中～嘉義付近の大構造.  
主に林ほか (2000) から抽出.

Fig. 7. Macroscopic geologic structure of western Taiwan from north of Taichung to Chiayi.

aは1935年の地震の際に活動した屯子脚断層,  
bは1906年の地震の際に活動した梅山断層.



第8図. 台湾西部と南海トラフ沿い地域との比較. 両者は鏡像関係にある.  
Fig. 8. Tectonic comparison of western Taiwan with the Nankai trough region.