1999 集集地震による地震断層の位置と既存の活断層との関係

太田陽子*渡辺満久**鈴木康弘*** 澤祥****

Active Fault along the Chelungpu Fault, Central Taiwan, Especially its Close Coincidence with the Location of the 1999 Chichi Earthquake Fault

Yoko OTA * , Mitsuhisa WATANABE ** , Yasuhiro SUZUKI *** and Hiroshi SAWA ****

Abstract

A remarkable surface rupture appeared in the 1999 Chichi earthquake, in central Taiwan. The nature and location of the earthquake fault was studied in detail immediately after the earthquake (*e.g.*, Central Geological Survey, Taiwan, 2000) Its location to the pre-existing active fault trace, however, was unknown. We wish to establish a location relationship between the earthquake fault and the pre-existing active faults which are mapped from photo interpretation at a scale of 1:20,000, taken in 1970's, supplemented by field observation. The identified active faults are divided into four types from I to IV, depending on their certainty as active faults as well as their location accuracy. A Type I fault is where the active fault is definite and location is certain, II is also an active fault, but with a little uncertainty as to exact location due to subsequent erosion of the fault sacrp, and also because of sedimentation on the foot-wall, and III is a concealed fault beneath the younger sediment. Type IV appeared as a lineament without any clear evidence of deformed morphology. After mapping these active faults, we added the location of our observation to the 1999 surface rupture and GPS sites for measuring the earthquake fault using CGS map (2000).

We present eight areas to show the exact relationship between active fault trace and earthquake fault trace and summarized them into Fig. 10. We concluded that most (*ca.* more than 80%) of the earthquake fault trace occurred exactly on the active fault of Type I and II. The earthquake fault often appeard even on lineament of Type IV, implying that this lineament should be mapped for the acive fault map. On the young alluvial lowland where it is too young to record past faulting, the earthquake fault still appears on the probable extension of known active fault trace. The earthquake fault sometimes jumps from one fault to another where two or three active fault traces are recognized. Although we can not explain the reason

^{*} 横浜国立大学(名誉教授)

^{**} 東洋大学社会学部

^{***} 愛知県立大学情報科学部

^{****} 国立鶴岡工業高等専門学校

^{*} Yokohama National University

^{**} Toyo University

^{***} Aichi Prefectural University

^{****} Tsuruoka National Colleage of Technology

for such a jumping, the earthquake fault still appears on one of the known faults. Therefore, repeated faulting activity during the late Quaternary on the same trace was confirmed for the Chelugmu Fault. This implies the detailed mapping of many other active faults in Taiwan, including Type III and IV, is essential for the understanding of future rupture locations.

Key words : Chelungpu Fault , 1999 Chichi earthquake , earthquake fault , active fault , category of active fault , flexural sacrp , fault scarp , progressive faulting

キーワード:車籠埔断層,1999年集集地震,地震断層,活断層,撓曲崖,断層崖,活断層認定の確か さ,変位の累積性

I. まえがき

1999年9月21日の集集地震(マグニチュード 7.3)時には,長さ約90kmにもわたる大規模な 地震断層が地表に出現し(図1),世界の注目を浴 びた。この地震断層は,ほぼ南北方向に走る「第 2類の活断層」(第四紀に活動した断層)である車 籠埔断層(張ほか,1998)が活動したものであり, 東西圧縮の場を反映して,おもに東上がりの逆断 層という変位形態として現れた。いたるところで, 河川,道路,田畑,人家を切り,大きな災害をも たらした。地震断層の位置,変位様式,変位量な どはまず台湾の研究者により詳しく調査され,そ の結果が地震後まもなく公表された(中央地質調 査所,1999)。筆者らも地震直後から地震断層の 調査を始め,その大要を報告した(太田・山口, 1999;太田, 1999aなど)。とくに既存の活断層と 地震断層との位置関係および変位の累積性に注目 して調査を進めた(たとえば, Ota, 1999; Ota et al., 2000, 2001; 渡辺ほか, 2000)。それは, 台湾 での活断層の図化はまだ小縮尺でなされ,地震断 層の分布図に対応する精度(1/25,000)の活断層 図は描かれておらず,今回の地震断層が既存の活 断層との関連でどのような位置に生じたかの分析 が行われていなかったからである。

地震断層と活断層との位置関係を明らかにし, かつ活断層の累積性の有無を検討することは,車 籠埔断層の活動史に関する情報を得るためだけで はなく,ほかの活断層の今後の地表変形の現れる 位置(地震断層の位置),さらに地震断層と関係す る災害発生個所の予測のためにも重要である。本 稿の目的は,上記の問題の解決のために,活断層 としての車籠埔断層の位置と変位の累積性を明ら かにすること,そして活断層と1999年の地震断 層との位置関係を明らかにすることである。本稿 では,地震断層の位置は筆者らが確認したほかは すべて中央地質調査所(2000)によるもので,以 下の記載では特別の場合を除いてこの引用を省い てある。なお筆者らが新たに見いだした特定の場 所を除いては地震断層の詳細の記載を本稿では行 わない。

Ⅱ.調査方法

筆者らは1999年10,11月および2000年4月 に短期間ではあるが写真判読を行い,活断層の位 置を図化した。さらに,太田が2000年10月から 3カ月国立台湾大学に滞在した機会に車籠埔断層 全域についての写真判読結果の再検討と部分的な 修正を行い,2000年11月,12月および2001年 2月に共著者との間でのクロスチェックおよび現 地での検討を行った。台湾では空中写真の複製お よび持ち出しは禁止されているので,これらの作 業はすべて国立師範大学および国立台湾大学で実 施された。用いた空中写真は,縮尺約20,000分の 1の1970年代に撮影したものである。現地調査は 1999年9月以降2001年3月までの期間に数回に わたって実施した。

判読した活断層は,次のタイプI~IVの4種に

わけて 25,000 分の1 地形図上に図化した。

タイプ I 段丘面の変形が明瞭(同一面におけ る急崖,凸形の断面,逆傾斜,勾配の不連続,逆向き 低断層崖,背斜状変形など)で,活断層の位置と変 位のセンスがともに確かなもの,具体的には誤差 20m 程度でトレンチ地点が決められる程度の正 確さをもつものと考えられる。Iの場合には段丘 面の傾動の方向,それから推定される背斜軸の位 置なども図示してある。

タイプ II 断層崖と思われる崖地形は存在し, 活断層の存在と変位のセンスは確かであるが位置 がやや不確かなもの(おそらく形成後の侵食によ る後退のため,または低下側での堆積によるため。 多くの場合に断層は時代を異にする地形面の境界 にあたる)。したがってIのような精度でトレンチ 地点は決められない。なお,Iの活断層の延長で, 山地と平野の地形境界ではあるが,段丘のような 変位基準になる地形面がないものもこの範疇に含 める。

タイプ III 上記 I または II に挟まれた部分に ある沖積低地で,両側での活断層の延長から活断 層の存在は確かと思われるが,地表にはまったく 変位が現れていないもの。幅広い谷を横切る場合 には位置がきわめて不確かであるので,線として 表現するには問題がある場合もある。これはいわ ば伏在活断層といえる。沖積低地上で最新の変位 を経験するには若すぎる地形面の地域にこの記号 を用いている。

タイプ IV 山地や丘陵内の直線的な谷, 鞍部 の線状連続など線状構造は明瞭なリニアメントで あるがずれの向きが不確かで,活断層としての確 証はないもの。組織地形であることが明確な場合 は省く。

活断層を上記の4種類にわけて図化した後に, 地震断層の位置との関係を検討した。そのために, 筆者らの現地調査による資料(とくに必要な場合 は各図に地点番号を付して説明)に加えて,中央 地質調査所(2000)による地震断層の観察地点 (GPSにより位置を確定した測定地点)を上記の 活断層図に写し,両者の位置関係を検討した。中 央地質調査所は1999年に地震断層の報告書を出 しているが,上記の2000年版では地点の名称を 変え,かつ地点の位置も変わっている場合がある。 したがって以下では2000年版を引用する。

なお,活断層図には変位基準としての河成段丘, 扇状地などを記入してある。河成段丘は高位から 順に,高位,中位,低位の3群に分類した。それ ぞれはさらに細分されることがある。ただし,そ れぞれの地域内での新旧の関係は確かであるが, 段丘の年代を知る資料はなく,また離れた地域相 互での対比については試案にすぎない。とくに詳 しく調査した草屯地区では段丘をさらに細分して 表現し,等高線入りの図に示してあるが,そのほ かの地域では煩雑さを避けるためおもな地形区分 と断層のみを示した。断層の名称(英字で表現) および観察地点の番号は各図ごとに独立して付し てある。

III.活断層の分布と地震断層との関係

以下には活断層の分布や変位様式・量において 様相を異にする8地域(図1)を南部から順にと りあげて両者の関係を述べる。

1) 瑞竹 (Juichu) 図幅北・中部 (図2)

活断層:車籠埔断層の南端部にあたる本図幅内 では一般に活断層の地表での表現は明瞭でない。 その中で北部の大坑 (Takeng) 東部の谷底平野に は明瞭な活断層による変位の累積性が認められる (loc.1)。ここでは西北流する小流に沿う谷底の上 流部の低地にほぼ南北方向の東上がりの崖がある。 この崖は小流の方向とほぼ直交しており,崖の北 部では河成段丘 L1 面を,南部ではより若い L2 面 を切っている。崖の比高はL1面で約25m,L2面 で数m程度である。このような地形から,この南 北方向の崖は変位を繰り返した断層崖(I)と認 定する。これと同様の,ただしより小規模の崖は 瑞竹図幅北端部にある谷の合作橋の上流にみられ る(loc.2)。ここでは小流はメアンダーを繰り返し, 小規模な崖があるが,もっとも東側の谷底平地を 切る南北方向の直線上の崖は, loc.1 と同様な東上 がりの断層崖と思われる。loc.1の延長上には A1, loc.2 の延長上には A2 のリニアメント (IV) がみ られる。両者ははやや断続しながらさらに南に続



図 1 1999 集集地震による地震断層の位置および 索引図.

区画とその中の地名は 1/25,000 地形図の範 囲と図幅名を示す.地震断層のトレースは中 央地質調査所(2000)による.

Fig. 1 Index map of the study area.

The 1999 earthquake fault trace is after the Central Geological Survey (2000). Rectangles are the boundaries of the 1:25,000 topographic map and the shaded areas indicate the location of the following figures.



図 2 瑞竹図幅北部の活断層と地震断層.

Fig. 2 Active faults and the location of GPS points on the earthquake fault in the northerrn area of Sheet 9520-IIINE (瑞竹).

GPS points are after the Central Geological Survey (2000). The thick solid line with the sense of offset is for Type I active fault, the dashed line with sense of offset for Type II fault, and the dotted line idicates a possible location of concealed fault active (Type III), which is estimated by extending the active faults of Type I and II, and has no surface displacement. Dashed line for Type IV. These keys are commonly used for the following maps. くが,山坪頂(Shangpingting)付近までの間の 山地内では変位地形は認められない。

loc.3 では中位段丘面(M)上に北東~南西方向 の直線的な崖があり,南東上がりを示す。この崖 は河川の侵食によるとは考えられない方向をもち, かつその直線性からタイプIの活断層であると判 断する。これをBと呼ぶ。なおここでは段丘外縁 の食い違いから右横ずれの可能性がある。この崖 の東方の河床には断層破砕帯が露出している。 loc.3 の断層は北東方向にはリニアメント(直線状 の谷)につながる。そこでこの部分をIVと判定す る。loc.3 から南では活断層を認定することはで きなかった。本地域では,段丘面を変位させる地 点を除くと,活断層は山地を通るため地形への表 現はわるい。

地震断層との関係: loc.1, およびその延長の A1 では3 地点で, loc.2 およびその延長の A2 で は2地点でそれぞれ地震断層が見いだされている。 Loc.1 および Loc.2 の断層崖の基部でも地震断層 による地表の破断が確認できた。すなわち,地震 断層は活断層 A1 および A2 上に現れ,両者の位置 は一致している。しかし, A1, A2 は一線状に連 なるのではなく,両者は乗り変わっていることが 注目される。loc.3の中位段丘上では筆者らは新 たに地震断層による地表の破断を見いだした。し たがって活断層 B でも活断層と地震断層は一致し ているといえる。なお,図2の南西端,桶頭橋 (Tungtou Bridge)付近では,中位,低位の2段 の河成段丘上に右横ずれを主とし,南東上がりを 伴う明瞭な地震断層が出現しているが、この付近 では既存の活断層を見いだすことはできなかった。 活断層としての車籠埔断層は図2の南端付近で消 滅するものと考えられる。

2) 竹山 (Chushan) 図幅中・南部 (図3)

活断層:濁水渓(Choushui River)以南の地域 では,濁水渓左岸,東埔渓(Tungpuna River) 沿岸および山麓に沿って扇状地性の河成段丘の発 達がよい。濁水渓左岸では,低位段丘(L2)西縁 が沖積低地と接するところ(loc.1)で西に張り出 した凸形の断面を呈する撓曲崖が認められ,その 背後に逆傾斜を伴う背斜状の変形がある。しかし, 撓曲崖基部の傾斜の変換が不明瞭で多少の侵食の 影響が想定され,これを II と認定した(断層 A)。 その南東部では西への撓曲が欠如しているので, 河食を受けて断層崖がかなり後退した可能性があ る。活断層の位置を正確に求めることができな かったので,これを III と表現した。濁水渓沿い の氾濫原ないし最低位の沖積低地では活断層を示 す変位地形は認められない。loc.2 では複数の断 層活動を示すと思われる露頭がある(この付近で 2002 年 11 月以降のトレンチ調査により, 少なく とも3回の活動が認められた:李ほか,未発表)。 活断層 A は東埔渓左岸の延平 (Yenping) 付近で 新旧の段丘群を累積的に撓曲させる崖(I)をなし, そこから南では高位面を切る撓曲崖(I)として 北東~南西方向に追跡できる。撓曲崖背後には背 斜状の変形がみられる。なお loc.3 付近では活断 層 A は二つに分岐し,東側の断層は A の背後で明 瞭な西への撓曲を示す。

東埔渓左岸の広い高位段丘には東上がり,比高数10mの明瞭な撓曲崖(I)がみられ(loc.4)これを断層 B とする。これは右岸のより高位の高位段丘に II として続き,さらにその延長では北東~ 南西方向の谷に沿うリニアメント(IV)をなす。なお,活断層 B は初郷断層(中央地質調査所の李元



写真 1 道路上に現れた断層 B 上での地震断層(図 3, loc. 4).

Photo 1 Earthquake fault disrupting a road on Fault B (Fig. 3, loc. 4).



図 3 竹山図幅中・南部の活断層と地震断層.

Fig. 3 Active faults and the location of GPS points on the earthquake fault in the middle and in the southern area of Sheet 9520-IVSE (竹山).

希博士による,林ほか,2000の活断層図には図示 されていない)の延長にあたる。したがってここ に述べたことは初郷断層が確実に活断層であるこ とを示す資料となる。この延長では低角逆断層の 露頭が発見されたという(李錫堤博士による私信)。

地震断層との関係:地震断層は,上記に認定した車籠埔断層(断層A)の位置とおおむね一致する。すなわち,タイプIでは両者は完全に一致する。IIと認定した loc.1 付近では地震断層は一部活断層とほぼ一致し,侵食による後退の量がさほど大きくないことを示す。しかし,II,IIIの部分では地震断層は一般に推定した位置よりやや平野

側に現れた。なお, loc.2 では, 集集地震による地 震断層も出現した。濁水渓両岸の沖積低地では新 たに地震断層が出現した。loc.3 では新たに地震 断層を確認した。なお, B上のloc.4 では撓曲崖の 基部で, 比高数十 cm の地震断層が確認された(写 真1)。このことは, 集集地震の際に車籠埔断層に 加えて, その東の初郷断層の一部も地表に変形を 生じたことを示すものとして重要である。

3) 南投図幅中・南部(図4)

活断層:図4の範囲では,活断層は一般に山地 と低地との地形境界に現れている(A)。しかし, 猫羅渓(Mauluo River)とその二つの大きな支流



図 4 南投市図幅中・南部の活断層と地震断層.

Fig. 4 Active faults and the location of GPS points on the earthquake fault in the middle and in the southern area of Sheet 9520-IVNE (南投市).

に沿っては上記の地形境界付近に河成段丘群が発達し,活断層はそれらの西縁を画している。南の支流に沿う千秋斗(Chienechiotou)付近では明瞭な撓曲崖が新旧の段丘(M1,L1)を累積的に変位させ(loc.1),Iと認定できる。北側の支流に沿うloc.2では撓曲崖が低位段丘にみられるが,基部が河食を受けてている可能性があるのでIIとする。しかし,河床に近い最低位の面では変形はみられない。そのほかの場所では変位基準面の欠如および部分的に侵食の影響がみられることから,

II と判定した。なお,南部では山地の末端に高位 の面の遺物と思われる地形があり(loc.3),それが 撓曲変形をしている。河川沿いのもっとも若い沖 積低地では変位は認められない。

地震断層との関係:地震断層は図示した断層 A 上およびその延長上の沖積低地で現れた。II とし たところでもそのほとんど直上に地震断層が現れ たことは,侵食による後退がきわめてわずかで あったことを示している。

4) 南投図幅北部(図5)

活断層:草屯東方地域(図5)には多数の河成 段丘群が発達し, それらを切る二つの活断層が従 来から地形学的手法によって認定されていた(石 ほか、1985;太田、1999b)。西側の活断層A(草 屯西断層)は車籠埔断層の一部にあたる東上がり の撓曲崖で,その約2km東の草屯東断層(これ らの名称は太田ほか、2001による)は西上がりの 撓曲岸(B)である。草屯西断層では撓曲岸が明瞭 で(写真2),一部(loc.1,清明宮背後の露頭:写 真3)では段丘礫層の西への撓曲もみられ,Iと認 定できる。なお局地的には A から西に張り出す短 い撓曲崖で示される活断層 A2 がある。断層 Bは, 河川の流下の方向とは逆に東への逆傾斜を示す明 らかに異常な地形で, 撓曲崖であるが, 基部はや や急で河川による侵食が示唆されるから,大部分 を II (少なくとも loc.2 より南) と認定した。こ の地域では溢寮渓とその支流, 猫羅渓の支流にそ う若い沖積低地では活断層による変位は認められ ない。

なお,Cは短い東上がりのリニアメントで,A とほぼ平行し,一部では撓みと思われる地形もあ り,活断層の可能性がある。しかし,確定的な資 料に欠けるのでIVと判定した。なお仮に活断層 であるとしてもII面より若い地形にはまったく変 位はなく,その点ではA,Bと異なり,最近は活 動していない。

なお,本地域の段丘群の形成年代についてはほ とんど資料がない。最南部の高度約330mの最高 位の段丘(図5の範囲外)は赤色のラテライト化 した土壌を伴う。赤色土の形成期はほかの地域の ¹⁴C年代から約30,000年前と推定されている



図 5 南投市図幅北部,草屯地域の活断層と地震断層. 段丘はほかの地域よりも細分されている.

Fig. 5 Active faults and the location of GPS points on the earthquake fault in the northern area of Sheet 9520-IVNE (南投市). Terraces are divided into several steps.



写真 2 草屯西断層にみられる変位の累積性によ る撓曲崖.

Photo 2 Flexural scarp at the Tsautun West Fault, as a repeated fault activity.



- 写真 3 草屯西断層による段丘礫層の撓み(図5, loc.1).
- Photo 3 Warped terrace gravel on the Tsautun West Fault (Fig. 5, loc.1).



写真 4 草屯西断層における既存の活断層と地震断層との一致を示す実体写真.

Photo 4 Stereo-view of the Tsautun West Fault showing the coincidence of the pre-existing fault scarp and the earthquake fault.

(Ota *et al.*, 2003)から,図5に示した段丘群は それより若い。段丘礫層も新鮮であるので,図示 したすべての段丘は完新世のものである可能性が ある。

本地域では時代を異にする複数の段丘が存在し, 古い段丘ほど変位量が大きく,断層活動の累積性 を示している(Ota, 1999; Ota et al., 2000)。な お,活断層A,Bともに下盤側は若い堆積物に覆わ れているため,以下に示す崖の比高は実際の変位 量よりは小さい。たとえば,段丘 III では崖の比 高は 30 m (loc.3) であるが段丘 V では 15 m (loc.4)である。副次的な西上がりの草屯東断層 (B) でも同様な累積性が明瞭で, 段丘 III では 12 m(loc.5), V では6~8 m(loc.6,7)となる。 このように更新世後期または完新世における変位 の累積性は,主断層と副断層の双方に認められ, しかも後者の前者に対する比率はどの段丘におい てもほぼ一様で約40%で,地震断層による変位 量もこれとほぼ同様な傾向を示している。このこ とは,副断層が主断層の活動とつねに連動し,か つその量が小さかったことを示唆している。

地震断層との関係:地震断層は断層 A および A2上ではつねに既存の活断層による崖の基部に 現れ,両者の位置は完全に一致している(写真4)。



写真 5 草屯東断層上での地震断層(図5,loc.4). 養魚場の底の変位が明瞭.

Photo 5 Displaced fish pond (Fig. 5, loc. 4) caused by the Chichi earthquake.

本図の北部の一部には断層 A の背後に地震断層が みられるが(中央地質調査所,2000),ここには変 位地形はまったくみられないので,これは主断層 に伴う二次的なものと推定する。断層 B でも地震 断層は明瞭で,地震断層は活断層の位置とほぼ一 致するが,一部では既存の崖の基部よりも約 100m 東側に現れた。これは,活断層 B の基部が 河食により後退し,IIと判断したことと対応して いる。なお,中央地質調査所(2000)はBに対応 する地震断層の位置を線として示しているのみで, GPSで位置を確定した実測地点はみられない。 また図示された地震断層の位置は筆者らが確認し た地点(loc.5,6,7)より約300m西にずれてい る。上記のように,本地域ではA,Bの両断層とも に地震断層が現れ,地表変位がなかった若い沖積 低地でもIまたはIIの活断層の延長上に地震断層 が出現した(例,写真5, loc.8)。

活断層 A 上の loc.9 ではトレンチ調査が行われ, 1999 年地震による堆積物の変形が明瞭になった が,それより前の断層活動を見いだすことはでき なかった。ただし,変位している堆積物の下部の "C年代から,一つ前の地震は300~500年前より 古いと推定される(太田ほか,2001;Ota *et al.*, 2001)。活断層 B でも loc.10 でトレンチ調査およ びボーリング調査が実施された。ここでは段丘礫 層は下盤側には見いだされず,また下盤側に厚さ 約 20 m の細粒堆積物が認められた。その中に複 数の古土壌層があり,断層活動が繰り返されたこ とを示唆している(Huang *et al.*,準備中)が,詳 細は分析中である。リニアメントC上では,地震 断層は生じなかった。

5) 霧峰図幅中·南部(図6)

活断層:本地域では車籠埔断層の方向は変化に 富む。南投図幅北部から連続する南北方向の活断 層(A)は湾曲を繰り返し,図6の北端,loc.1の 西方から東に向きを変え,草湖渓右岸(本図の範 囲外)で再び南北方向となる。本地域の活断層は おおむね山地と平野との地形境界をなし,明瞭な 変位基準地形に欠けるので,II(山地斜面が凸形 の断面を示す場合)としたところが多い。しかし, 局地的には山麓の狭い低位段丘の外縁または沖積 低地上に西へ撓む撓曲崖がみられ(たとえばloc.1 ~4),そこではIと認定できる。

草湖渓およびその南方の支流の乾渓(Kan River)の沖積低地には活断層を示す変位地形は認 められない。明瞭な撓曲崖の出現で有名な光復国 民中学背後のグラウンド(loc.5)にも地震以前の 活断層は地表には見いだされない。ただし,国立



図 6 霧峰図幅南部の活断層と地震断層.

Fig. 6 Active faults and the location of GPS points on the earthquake fault in the southern area of Sheet 9521-IIISE (霧峰)

成功大学黄奇瑜教授によると, 撓曲崖南方の河食 崖では断層両側での基盤の高度差は4m以上あっ たという(地表での変位量は2~2.5m)から, この地点で繰り返し断層活動があったことは確実 である。

地震断層との関係:地震断層は活断層 A 上に現 れ,両者の位置はよく一致している。loc.5 では断 層変位のみられなかった低位段丘面および沖積低 地,さらに現在の氾濫原にも地震断層が現れた。 このような沖積低地上での予想された位置での地 震断層の出現はほかの地域でも同様である。な お、loc.1 ではトレンチ調査が行われ(Chen et al., 2001),今回の地震断層を含めて少なくとも3 回の東上がりの逆断層活動が沖積層および基盤岩 石を切っていることが見いだされた。このことは, この地点に沖積低地を切る変位を認定した筆者ら の既述の見解と一致する。

6) 霧峰図幅北部および台中図幅南部(図7)

活断層: 図7の範囲ではA, B二つの活断層が みられる。活断層 A は南部の霧峰図幅では段丘と 沖積低地との境界に現れ,低位段丘の西への撓曲 が顕著で(たとえば, loc.1, 2), Iと判断できる。 この活断層は頭坑渓 (Toupienkeng) より北では 山地と低地との境界をなし,変位基準となる面を 欠く。しかし虎頭山脚 (Hutou Mt.) 西斜面は平 坦で高位の段丘の遺物と思われ,そこでの傾動の 可能性がある(loc.4)ので,本地点およびその延 長をIIと判断した。活断層BはAの東にほぼ並行 して走り,これは頭坑渓の南方では中位段丘の西 縁を限る撓曲崖,または低位段丘を明瞭に切断す る断層崖をなす(loc.3)。これらの場所ではIと認 定できる。それより南方では B は低位または中位 段丘東縁に位置し, Iとする確証に欠け, IIと認 定する。さらに南の山地内ではリニアメントも追 跡できない。Bはloc.3付近から北方では走向を やや西に変え,活断層Aに収斂するようにみえる。 沖積低地上では変位地形は認められない。

地震断層との関係:図7の中央部では,地震断 層は活断層 B 上に出現した。地震断層は図7の北 端では活断層 A の II と認定した部分にも現れた。 A の延長上で地震断層が現れたのはこの図内では この1点のみである。本地域では,地震断層が地 形的にもっとも明瞭で I と認定できた活断層 A で 現れず,むしろそれより東の B に出現したこと, ただし B は A に収斂していることなどが特色であ る。なお,loc.5 付近では 3 点で中央地質調査所 (2000)による GPS で位置を確定した地点がある が,この付近ではどの種類の活断層も認定できな い。空中写真判読によると loc.5 には湾曲した滑 落崖がある。したがってこれらの 3 点は滑落崖が



図 7 霧峰図復北部および台中市図幅南部の活断 層と地震断層.

Fig. 7 Active faults and the location of GPS points on the earthquake fault in the northern area of Sheet 9521-IIISE(霧峰) and southern area of Sheet 9521-IIINE (台中市).

再活動した可能性がある。

7)台中図幅中・北部(図8)

図8に示した範囲では山麓にかなり広い扇状地 性の中位段丘群があり,時に低位段丘群も発達す る。顕著な活断層Aはこれらの段丘西縁の明瞭な 撓曲崖として現れており,多くの地点でIと判断 できる。たとえば,明瞭な西に傾き下がる撓曲崖 (loc.1,2など),その背後で逆傾斜する背斜状の変 形(loc.3),さらに段丘内にみられる短い副次的な 背斜状変形変形もある(loc.4)。

本地域内ではほかに,中位または低位段丘内縁 を連ねたリニアメント(IV)があり,これをBと



図 8 台中市図幅北部の活断層と地震断層

Fig. 8 Active faults and the location of GPS points on the earthquake fault in the northern area of Sheet 9521-IIINE (台中市).

呼ぶ。B は単に段丘の内縁にすぎないとも思われ るが,図8の北端では低位段丘をきる断層崖を示 し(loc.5),I と認定できる。本地域北部では,A とB は一旦収斂するが,最北部では再び別のト レースを示す。図8の南端部でもBはAに収斂している。大里渓に沿う沖積低地および中位段丘を 開析する谷沿いの沖積低地には断層変位はみられない。

地震断層との関係:地震断層は,図の南半では 活断層の確実性の低いB上におもに現れ,明瞭な 撓曲崖ないし断層崖をなすAに現れなかったこと が本図内での特色である。このことは,確実度の 低い活断層も無視できないことを示すものとして 重要である。地震断層は図8の北端ではAに乗り 変わっていることが注目される。なお,地震断層 はBの一部では推定した断層の位置よりやや東に ずれるが,その理由はわからない。

8) 后里図幅南部および東勢図幅南西部(図9)

活断層:本地域では車籠埔断層は北北東に方向 を変え,大甲渓 (Tachia River)に沿ってほぼ東 西に走り,その後再び北東方向に向きを変え,大 甲渓を横切る。后里図幅(図9の西半)の山麓に は山地と低地の北東方向の境界をなすリニアメン トがあるが,明瞭な変位基準になる地形がないの でこれを IV とし, A1 と呼ぶ。それと平行して, 幅狭い扇状地性の低位段丘があり,その末端は西 に撓みこむ撓曲崖をなす (loc.1 およびその付近)。 これを I と認定し, A2 と呼ぶ。A2 はさらに北東 に続き、大甲渓左岸の段丘を撓ませている(loc.2)。 大甲渓左岸では河成段丘を切る東西方向の北上が りの崖がある。この崖は,その直線性と,山側に 向かって低下することから河川の侵食によるもの とは考えられず,活断層 Iとし,これを Bと呼ぶ。 そのうちの loc.3 では Hsieh et al.(2001)も短い 活断層を認定している。なお、この付近の低位段 丘より南には東西方向の支流のつくる沖積低地が あり,そこでは変位地形は認められない。さらに 上流の右岸(loc.4)には北東から南西に走る崖が あり,変位の累積性が認められる。この地点と,B とは連続性が絶たれているので, loc.4 付近の断層 をCと呼ぶ。これは北東に向かっては山地を横切 るリニアメント(IV)となる。さらに図の東端付 近にはCとほぼ平行する活断層Dが低位段丘を西 上がりに変形させている。大甲渓左岸の高位段丘 には西上がりの顕著な撓曲崖があり(loc.5),段丘



図 9 后里図幅南端部および東勢図幅南部の活断層と地震断層.

Fig. 9 Active faults and the location of GPS points on the earthquake fault in the southern area of Sheet 9521-SE (后里) and Sheet 9521-ISW (東勢).

面の東端では東(上流)に向かって傾き,全体と しては背斜状の変形を示す。これを活断層 E と呼 ぶが,この延長では若い段丘の変位はみられない。

本地域では活断層の走向が大きく変わり,また それらの連続性がわるく,活断層の認定には困難 を感じた場所である。ここに図示した以外にも活 断層が存在する可能性もある。これら一連の活断 層に加えて,大甲渓北にはほぼ南北に続く東上が りの撓曲崖が中位または低位段丘を変位させてい る(F)。これは車籠埔断層とは雁行しており,張 ほか(1998)および林ほか(2000)の活断層図で は三義断層とされている。

地震断層:地震断層は活断層 A2, B, C, D上 に現れ,地震断層とこれらの活断層の位置は完全 に一致する。たとえば A2上の loc.6 では大甲渓河 床をきる有名な滝が出現し,その延長上の河川敷 やそこにつくられた養魚場を切って鉛直変位約 9mにも及び,車籠埔断層上最大の変位を示す断 層崖(loc.7)が出現した(太田・山口,1999)。こ の崖では,河成の礫層下に露出する基盤は著しく 破砕されていて,今回の地震だけの活動によると は思われない。また大甲渓右岸の崖では loc.7 の 延長上の道路沿いに段丘礫層を切る逆断層の露頭 もある(井上ほか,2000)。さらに東上りの断層崖 の東には,地震時に逆向き断層崖も形成された。 loc.4 でも地震断層の位置は既存の活断層に一致 し,しかも変位が累積していた。これらから,車 籠埔断層北端部でも活断層の走向は大きく変わる が活断層の変位が繰り返されたことは確実である。 活断層 D でも地震断層は現れた。中正公園(loc.8 付近)の沖積低地ではA2の延長から予想される位 置に地震断層が出現した。ここでは東上がりの主 断層の背後に逆向き低断層崖を伴う。このように, 大甲渓の両岸では活断層の連続性はよくないが、 地震断層の出現したところは筆者らの確認した活 断層と一致していた。活断層 F ではまったく地震

断層は現れていないことを確認したが, E では地 震断層の有無を確認していない。

IV.地震断層と活断層の位置に関する総括・ 考察と今後の問題

1)調査結果の総括と考察

全域について地震断層と活断層との位置をまと めて示すと図 10 のようになる。この図と以上の 諸例により活断層と地震断層の位置の対応および 活断層の累積性についてわかってきたことを以下 にまとめ,多少の考察を加える。

1.大局的に言えば地震断層のほとんどすべて が既存の活断層の直上に現れた。その位置はIの 範疇の活断層に関しては両者は完全に一致してい る。II, III, IV の場合でも地震断層の大部分はこ れらの断層上に現れた。地震断層が既知の活断層 上に現れたことは日本の地震断層の場合にはすで に十分に知られていたことである(たとえば, 1891 年濃尾地震と根尾谷断層系:松田, 1974 な ど。1930年北伊豆地震と丹那断層: 久野, 1933 など。1995年兵庫県南部地震と野島断層:中田 ほか, 1995; 太田ほか, 1995など)。また, ルソン 島のフィリピン断層の地震断層もまさに活断層上 に現れた(中田ほか, 1990)。しかし, 台湾におい てはかつての地震断層と既存の活断層との関係は ほとんど論じられていなかった。集集地震の場合 でも台湾の研究者による調査では,当初地震断層 の調査に追われていたせいか,既存の活断層との 正確な位置関係は考察対象とされていなかった。 筆者らは,地震直後から両者がきわめて一致して いることに注目し(たとえば、太田・山口、1999; 太田, 1999a; Ota, 1999; Ota et al., 2000, 2001; 渡辺ほか,2000),本文で述べたように,両者の密 接な対応を明らかした。最近になって台湾でもこ の点が注目され,既存の活断層研究の機運が高 まってきた (たとえば Hsieh et al., 2001; Chen et al., 2001; Chang and Yang, in press).

さらに,複数の段丘が同一個所にみられる場合 には,つねに古い時代の段丘を切る撓曲(断層) 崖の比高が若い段丘のそれよりも大きく変位の累 積性が認められる。あるいは複数の活動を示す断



- 図 10 車籠埔断層全域における活断層と地震断層との 位置の比較.
- 1.認定された活断層の位置と地震断層とがほぼ一致す るもの.
- 2. 認定された活断層上に地震断層が生じなかったもの.
- 3.活断層が認定されない場所に現れた地震断層.
- Fig. 10 Comparison of the location of the earthquke fault and the pre-existing active Chelungpu Fault.
- 1. Pre-existing active faults which were reactivated by the 1999 earthquake.
- 2. Pre-existing active faults on which the 1999 earthquake was not recognized.
- 3. Earthquake faults appeared where no pre-existing active faults were not identified.

層露頭がある。より長期にみれば車籠埔断層は本 来の地質境界よりも西に移動したようであるが, このように少なくとも第四紀後期という時間内で は同一個所で繰り返し断層が活動したことは確実 である。また,上記の記載ではふれなかったが, 活断層に直接関連する建物の破壊は,断層直上お よび,上盤側の狭い範囲(30m程度)に限られ, 断層に近接していても下盤側ではほとんど被害は なかった(たとえば,太田・山口,1999;太田, 1999a)。このことは活断層の正確な図化が,将来 の地震断層の位置の予測,そして断層と関連する 災害の位置の予測にとってきわめて重要であるこ とを示している。

2.したがって,活断層の痕跡がなにもないと ころに地震断層が生じた例はほとんどない。しか し,一部の中央地質調査所(2000)による観察地 点(おもに山地内の地点)は活断層からはずれて いるものがあり,一部の地点は滑落崖の可能性も ある。なお,既述のように,大河川沿いの沖積低 地,小規模な谷の谷底平野などの若い地形面では, 従来変位がなかったところにも地震断層は現れた。 しかし,それらの両端では必ず活断層があり,地 下には III の断層が潜在していると予想された場 所である。上記の場所で活断層がみられないのは, 地形面が最新の活動を記録するに若すぎるためで ある。

3.車籠埔断層の大部分は低角逆断層のために 湾曲した平面形を示しつつも,東上がりの撓曲崖 をなし,東の山地と西の低地との地形境界,ない しは段丘西端部を限っていた。しかし,南端およ び北東端では様相を異にする。すなわち,南端部 では車籠埔断層は山地内を走り,かつ南に向かっ て活断層としての地形表現が次第に不明瞭になる。 さらに走向が北東から南西に転じるため,右横ず れの可能性もある。また北東端では,北方の南北 方向の活断層につながらず,著しく走向を変える。 このように断層の走向が変化する場所でも活断層 が明瞭な部分では地震断層との一致がみられた。

2) 地震断層に関する今後の問題

1. 地震断層のほとんどは筆者らの調査で明ら かにした活断層上に現れているが,活断層のすべ てが今回地震断層として地表変形を起こしたわけ ではない。1891年の濃尾地震の際によく知られ ているように(松田,1974),複数の活断層がある 場合,途中で乗り換え現象を起こしている場合が ある。車籠埔断層についてもその中での細分され るトレースでの乗り換えがみられるが,その場合 でも必ず既存の活断層上に地震断層が生じている。 なぜある特定の場所で乗り換え現象が起こるかに ついては不明である。

2. 複数の断層がある場合, つねに活動が活発 で確実に認定できる活断層 I に地震断層が生じた とは限らず,むしろ IV と認定したリニアメント直 上で地震断層が起こっている場合がある。このこ とは,活動の確かさが劣るリニアメントでも図化 しておくことが将来の活動予測に重要であること を示している。

3.また,今回の地震断層ではかなり走向を異 にする車籠埔断層のほぼ全長が活動したが,つね にそうであるかどうかが問題となる。断層の活動 史の解明,異なる地点での活動の同時性などの検 討のためには多くの地点でのトレンチ調査が必要 である。集集地震以後にトレンチ調査が始まった が,その地点は現段階では車籠埔断層中央部に集 中している。今後より北部,南部での調査が必要 である*。

4.既述したように活断層が地表にはみえな かった沖積低地でも今回の地震断層が現れた。し たがって,そのような沖積低地の年代がわかれば 集集地震より一つ前の断層活動期を推定する手が かりになる。断層を横切るトレンチ調査に加えて, 沖積低地での浅層ボーリングによって年代測定試 料を得ることも古地震の時期を考察するための大 切なテーマである。

5.本稿はかなり記載および関連する図が多い が,これは活断層と地震断層の位置が如何に一致 するかを具体的に示すことが必要であると考える からである。このことは,車籠埔断層以外の活断 層の正確な図化が,今後起こりうる地震断層の位 置の予測,ひいては地震断層に伴う被害予測のた めの基礎的資料となることを意味する。本稿では 台湾ではとくに大縮尺の活断層図がないことを鑑 みて, できるだけ正確な図を示すことを試みた。 IV 章の議論はこのような記載と図化に基づいて 初めてなしうるからである。

V.結 論

車籠埔断層に沿う地域の空中写真判読と現地調査に基づいて,第四紀後期の活断層を,とくに位置の確からしさに基づくI~IVのタイプに分類し,段丘の分布とともに1/25,000地形図に図化した。これは低角逆断層としての活断層の変位様式を明らかにするとともに,本断層に関する初めての活断層分布図である。さらに多くの地点で時代を異にする段丘での変位量を計測し,第四紀後期における変位の累積性を確認した。これらの活断層と1999年集集地震による地震断層との位置を比較し,両者がほとんど完全に一致することを確かめた。この情報は,今後ほかの活断層の正確な図化が,将来の地震断層の起こりうる位置の予測に重要な基礎資料となることを示すものである。

謝辞

本研究に用いた経費の一部は日本の地質調査所および 国土地理院による。また太田への中華民国国家科学委員 会による国立台湾大学への招聘は,長期にわたる調査を 可能としてくれた。空中写真判読に当たっては,国立台 湾大学黄奇瑜教授(現在国立成功大学),同劉平妹教授, 国立台湾師範大学張瑞津教授により格別の便宜を図って いただき,さらに活断層に関してしばしば討論していた だいた。写真判読の一部については株式会社 INA 地質部 (現阪神コンサルタンツ)の柳田 誠,宮脇明子両氏の ご協力を得た。以上の諸機関および各位に深い感謝を捧 げる。

文 献

張微正・林啓文・陳勉銘・廬詩丁(1998)台湾活動断層 分布図(1/500,000)および説明書.中央地質調査所. 中央地質調査所編(1999)921地震地質調査報告.

中央地質調査所編(2000)921 地震地質調査報告.

- Chang, J.C. and Yang, G.S. (in press) Ground deformation of Che-lung-pu Fault, central Taiwan. *Quaternary International.*
- Chen, W-S., Chen,Y-G. and Chang, H-C. (2001). Paleoseismic study of the Chelungpu Fault in the Minjian area. *Western Pacific Earth Sciences*, 1, 351 358.

- Hsieh, M-L., Lee, Y-H., Shih, T-S., Lu, S-T. and Wu, W-Y. (2001). Could we have pre-located the northeastern portion of the 1999 Chi-Chi Earthquake rupture using geologic and geomorphic data? *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **12**, 461 484.
- 井上大栄・Lee, T.C.・電力台湾地震調査グループ (2000) Chelungpu 断層 Fengyuan-Shikang の応用 地質学的課題.平成12年度シンポジウム予稿集, 1999Chichi 地震の応用地質学的側面,114.
- 久野 久(1936)最近の地質時代に於ける丹那断層の 運動に就いて.地理学評論,12,18 32.
- 松田時彦(1974)1891年濃尾地震の地震断層.東京大 学地震研究所研究速報,13,85125.
- 中田 高・堤 浩之・Punongbayan, S.P.・Rimando, R.E.・Darigdig, J. and Daag, A. (1990) 1990 年 フィリピン地震の地震断層.地学雑誌, **99**, 515 532.
- 中田 高・蓬田 清・尾高潤一郎・坂本晃章・朝日克 彦・千田 昇(1995)1995年兵庫県南部地震の地震 断層.地学雑誌,104,127142.
- 太田陽子(1999a):台湾中部,9.21集集大地震による地 震断層第1報.地質ニュース,543,714.
- 太田陽子(1999b):変動地形を探る II.古今書院.
- Ota, Y. (1999) Characteristics of earthquake fault associated with 921 earthquake, central Tiwan, especially on the relationship between earthquake fault and pre-existing Quaternary active fault. *Proc. Intern. Workshop on Chi-chi Taiwan Earthquake of September 21, 1999, 4.1 4.12.*
- 太田陽子・山口 勝(1999)台湾中部,9.21 集集大地 震による地震断層の地表形態.地理,44(12),815.
- 太田陽子・堀野正勝・国土地理院災害調査グループ (1995)兵庫県南部地震の際に出現した野島地震断層 と被害状況.地学雑誌,104,143155.
- Ota, Y., Watanabe, M., Suzuki, Y., Sawa, H., Yanagida, M., Miyawaki, A. and Kim, H. (2000) Characteristics of earthquake fault associated with 921 earthquake, central Tiwan, especially on the relationship between earthquake fault and pre-existing Quaternary active fault. *Proc. Hokudan Internatl. Symp. on Active Faulting*, 353 358.
- 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・蘇育田・楊盛淵・廣内大助・谷口 薫(2001)台 湾中部,車籠埔断層のトレンチ調査 草屯西断層の 例.地学雑誌,110,698707.
- Ota, Y., Huang, C.Y., Yuan, P.B., Sugiyama, Y., Lee, Y., Watanabe, M., Sawa, H., Yanagida, M., Sasaki, S., Suzuki, Y., Hirouchi, D. and Taniguchi, K. (2001) Trenching study at the Tsautun site in the central part of the Chelungpu Fault, Taiwan. Weastern Pacific Erath Sciences, 1, 487 498.
- Ota, Y., Shyu, B.H., Chen, Y.G. and Hsieh, M.L. (2003) Deformation and age of fluvial terraces south of the Choushui River, central Taiwan, and

their tectonic implications. *Western Pacific Earth Sciences*, **3**, 43 72.

- Ota, Y., Chen, Y.G. and Chen, B.S. (in press) Review on the paleoseismological study in Taiwan. *Tectonophysics.*
- 林啓文・張微正・廬詩丁・石同生・黄文正(2000)台湾 活動断層分布図第2版(1/500,000)および説明書. 中央地質調査所.

補遺

*本稿執筆後に,北部と南部でそれぞれ一つのトレンチ が掘削され,複数の断層活動が見いだされた.

- 石再添·張瑞津·楊貴三·許民陽 (1985) 草屯與車籠埔 河階群的活 断層與地形面. Bull. Geogr. Soc. China, 13, 1 12.
- 渡辺満久・太田陽子・鈴木康弘・澤祥(2000):台湾中部,921地震時の地表地震断層と既存の活断層との関係.地球惑星学会2000年合同大会予稿集,CD-ROM.

(2002年6月17日受付,2002年9月3日受理)