

台湾における活断層研究の現状と問題点

太田陽子¹⁾

1999年の大災害を伴った集集地震から1年半に近く、集集地震による地震断層の研究が著しく進展し、トレンチ調査も数カ所で行われ、新たな計画もある。それとともに活断層に関する研究にも新しい展開が見られる。本稿では、おもに集集地震による地震断層のトレンチ調査、および活断層に関する最近の研究についてまとめてみたい。

1. 活断層の認定に関する問題

迅速に行われた地震断層調査

地震断層の観点からみると、集集地震後ほぼ3ヵ月の間に、中央地質調査所のメンバーを始め各種研究機関、大学などの研究者約80名の協力によって集集地震による地表地震断層の位置、変位量、変位様式などに関する詳しい資料がまとめられた。これらの資料はホームページで公表されるとともに、25,000分の1の地形図に地震断層の位置と観察地点が記入され、各地点の情報が詳しく記載されて(中央地質調査所, 1999)、その後の研究の基礎資料として活用された。さらに地震断層をはさむ地帯での精密測量がなされ、1,000分の1の地図としてまとめられた(Huang *et al.*, 1999)。このように短期間の間に延長100kmにも及ぶ地震断層の詳細図が公けにされたことは特筆に値する。

従来の活断層研究と問題点

しかし、活断層自体についての研究はそれとくらべておこなわれていた。地震直前の1998年には50万分の1台湾活動断層分布図、およびそれぞれについての説明、文献がまとめられている(張ほか, 1998)。活断層は第1類活動断層(完新世に活動したもの)、

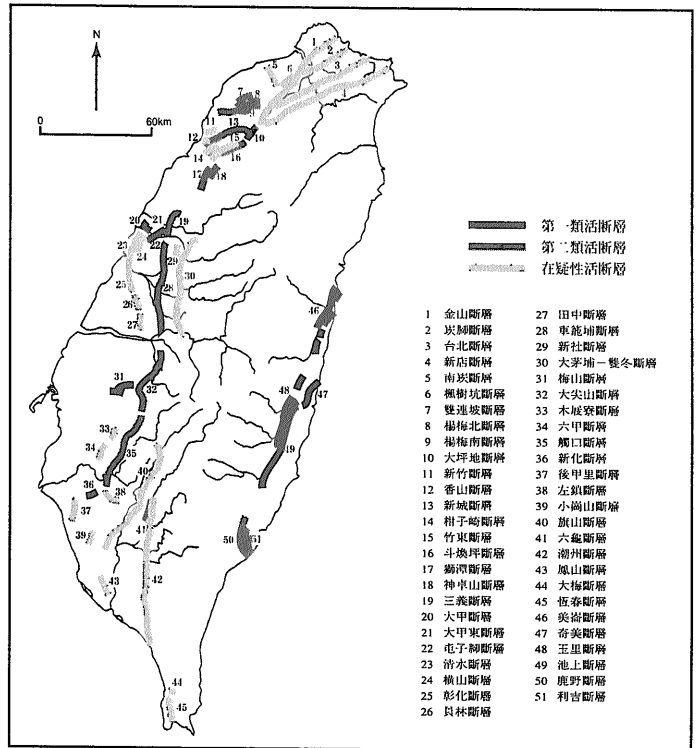
第2類活動断層(更新世後期に活動したもの)、存疑性活動断層(活断層の疑いがあるもの、suspect active fault)に分けられている(第1図)。第1類に入るものは地震断層である。集集地震の起震断層である車籠埔断層は第2類とされ、1999年の地震断層とくらべてはるかに単純な線として表現されていた。この図に付されている説明書、「台湾活動断層概要」には、日本をはじめ各国の活断層の分類、判定基準などが紹介され、断層変位地形も説明されており、さらに文献には台湾でのいわゆる地形学的方法による活断層研究(おもに活断層研究会, 1980による手法に基づく;たとえば石ほか, 1984, 1985, 1986, 1993)ものせられているが、断層図にはそれが反映されていない。たとえば台湾南部で中央山脈西縁を限る扇状地の撓みと逆向き低断層崖をもつ潮州断層(第1図の42)はすでに石ほか(1984)などにより研究され、筆者も紹介したことがある明瞭な活断層(太田, 1999)で、日本で言えば確実度Iの活断層であるが、ここでは存疑性活動断層として扱われている。完新世の活動が確かである鳳山断層、清水断層、彰化断層(太田, 1999)も同様である。

私は、何回か、台湾の研究者から、「活断層をひくのにいくつくらいのcontrol point」があるかと聞かれ、驚いたことがある。これは、地質学者にとっては露頭でみられたものをつなぐという形で活断層を図示していたことによる。台湾の地形学者による諸研究は、地質学者たちからstructural geologyの背景がないという批判を受け、かつ論文が大学の研究報告などに発表され、全国誌ないしは国際誌に発表されていないことなどから、結局活断層図の編集に当たっては成果が取り入れられてい

1) 横浜国立大学 名誉教授:

〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-1

キーワード: 台湾, 活断層, 1999年地震断層, トレンチ調査



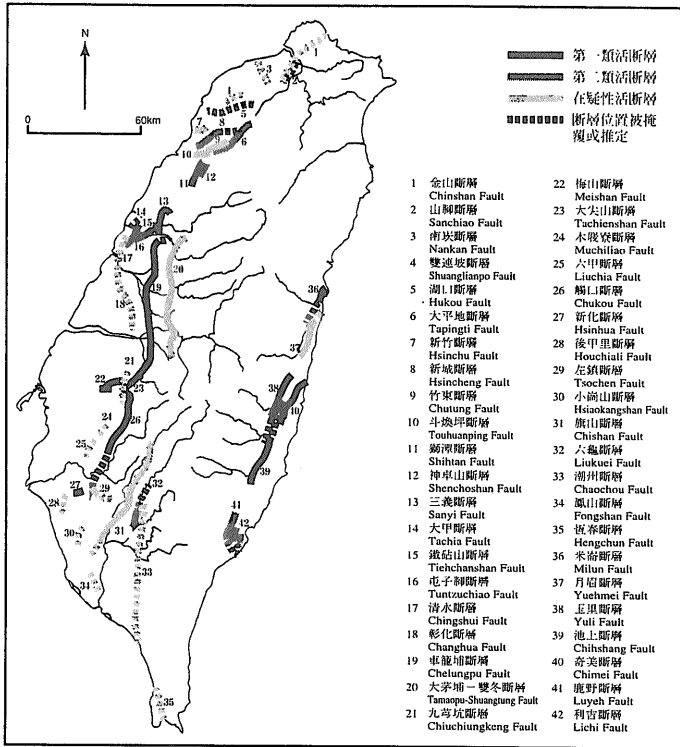
第1図 台湾の活断層図の要約1 (張ほか, 1998の要約).

なかったのが現状である。私は、地形学者の側でも全国誌に論文をのせ、かつ活断層の背景としてのテクトニクスの理解を深めると同時に、地質学者も、繰り返された断層の表現としての地形の変位を評価する努力を求めたい。台湾大学、地質調査所などの講義においても、私は、地形面の変形が活断層を語る露頭であるということ、活断層の認定には変位地形を空中写真判読から見出すのが基礎であることを強調した。そして日本でこうして認定された活断層が実際にトレンチ調査などで断層の存在が明らかになった例を多く説明した。地表変形を活断層認定の手がかりとすることが地質学者の側からも少しずつ理解されてきた。たとえば筆者を招聘してくれた台湾大学の黄教授も最近では1日に1~2例ずつ実体視を試み、変位地形とその意味をよむ努力を始めた。本来有孔虫の分析による気候変化、古海洋学の研究者であるとともに、プレート境界でのテクトニクスについても多くの発表をしている同教授が、まったくあつがっていなかった地形判読を試み、かつ筆者による講義に毎回出席し、多くの質問を浴びせた。こうして、一流の研究者がさらに別の分野にも積極的な関心をよせているこ

とに私は感銘を覚えたのである。中央地質調査所でも、活断層調査を担当する(といっても活断層研究室があるのではなく、地域地質の部門に属する人々が活断層調査を担当している)数名の研究者と地域地質部門の長である張敬正博士とが、写真判読の仕方を学びたいとまる3日間空中写真判読の実習をすることを依頼された。私が、後に述べるように同所での活断層図の作り方にかかなり批判的な発言をしたにもかかわらず、張博士みずから長時間空中写真判読に取り組んでいる姿勢にも感動した。このような努力が今後活断層研究にぜひとりいれられることを期待している。

新しい活断層図

1998年に出版された活断層図は、集集地震を契機に改訂されることになった。2000年の12月中旬にその印刷図を見せてもらった。図を見ると、上記の潮州断層は今度の図では「断層位置被掩覆或推定被覆」(後述)とされた。編集者の一人に、なぜ潮州断層のような明瞭な変位地形を認めないのかを訪ねると、結局は露頭がないという答えが返ってくる。地形の変形がいかに明瞭かをいってもどうして



第2図 台湾の活断層図の要約2
(林ほか, 2000の要約).

も意見がかみ合わず、激論をかわしたままに終わってしまった。しかし、この議論の結果として、地質調査所内でも空中写真判読の必要性を認める人もでてきて、前項で述べたような写真判読実習を担当する機会を得たのである。

新版をみせてもらったとき、私は1998年の初版と異なる主な点が何であるかを訪ねた。答えは、まず車籠埔断層の分類とトレースが変わったこと、51の断層が42に減ったこと、などであった。最初の点については、かつてなめらかな直線に近い形でえがかれていた車籠埔断層が屈曲に富んだ形になっているので問題はない。断層の数についてみると、面白いことに台北地域または台北周辺地域の活断層群(2, 3, 4, 6, 8, 12, 14; 番号はいずれも1998年版)が消えている。首都ないしその付近で活断層の数が減ったことの原因をぜひつぎの機会に訪ねてみたい。活断層の分類については、既述の第1類, 第2類, 存疑性活動断層に加えて、断層位置被掩覆或推定(fault concealed or inferred)という区分が設けられた。またこの図では走向滑移断層(横ずれ断層)に加えて、逆断層と正断層の別も設けられた。一方、凡例にはない第

2類の破線(新番号の5, 8の一部, 2の一部)がある。さらに従来存疑性活動断層とされていたものかなりが断層位置被掩覆或推定とされている(たとえば1, 5, 7, 9, 13, 39, 42, 43)。このように活断層の区分, 認定が統一の見解に達しているとはいえない。

車籠埔断層については地震断層としての詳細図は公にされているが、それが既存の活断層とどのような関係にあるかはほとんど取り上げられていない。それだからこそ私達がこの国で活断層研究をする必要がある(Ota, 1999, Ota et al., 2000, 渡辺ほか, 2000, 太田ほか, 準備中)わけである。同様にほかの活断層の判定基準にも多くの問題がある。次の改訂の際には地形学的手法やトレンチ調査なども加えた新しい活断層図が作製されることを切に期待している。

さらに、今回の地震では断層と直接関係した建物の倒壊は、断層直上および上盤側のきわめて狭い帯に集中しており、断層に近接していても下盤側にはほとんど被害がなかった。正確な、かつ小縮尺の活断層図は、将来の地震断層発生の場所およびそれと関連する被害域の推定にもきわめて有効

であることを付け加えておきたい(太田, 2000)。

活断層の変位速度

活断層の変位速度の推定に当たっては変位基準となる地形面の年代測定が重要である。台湾では段丘地形の発達が顕著であるが、現段階ではその編年が確立しているとはいえない。しかし、後述するように、トレンチ調査の数が増えるにつれて少しずつ年代測定用試料も見出されるようになった。しかし、活断層の変位速度を論じるにはあまりにも資料が限られており、今後の年代開発法の進展とそれに基づく編年の確立をまつほかはない。

2. トレンチ調査の現状

1999年の集集地震による地震断層の発生後、台湾でも活断層のトレンチ調査が始まった。台湾では従来はトレンチ調査はほとんど行われていなかった。その理由として、1935年地震の地震断層のところでトレンチ調査をしたことがあったが、結果が思わしくなかったこと、経費がかかること、などがあげられていた。しかし、トレンチ調査の経費はほかのGPS、地震などの大規模観測とくらべてとくに巨大な経費を必要とするわけではない。私の台湾滞在中にも、現地研究者とともに国家科学委員会を訪れてその必要性を力説したが、限られた経費を地震関係者と活断層、とくにトレンチ調査との間にどう振りわけるか、苦慮している点も認められた。このような状況の中でも現在いくつかの地点で調査が行われ、または進行しつつある。以下にそのあらましを要約しよう。

(1) 草屯地域

ここには東上り主断層による撓曲崖とその背後の逆向き低断層崖との2本の断層がほぼ平行して走り、ともに変位の累積性をもっとも明瞭な地域である(石ほか, 1985; 太田ほか, 2000など)ので、筆者らはまずこれら両断層上でトレンチ調査を行った(写真1)。西の草屯西断層(車籠埔断層)で実施した2000年7月の調査では、1999年集集地震による変位の様子、地表での短縮量などがわかり、さらに堆積物の層相によって南北両壁面で変形の様子が大きく異なることなどを見出した。1999年より以前の断層活動は見出せなかったが、変位した堆

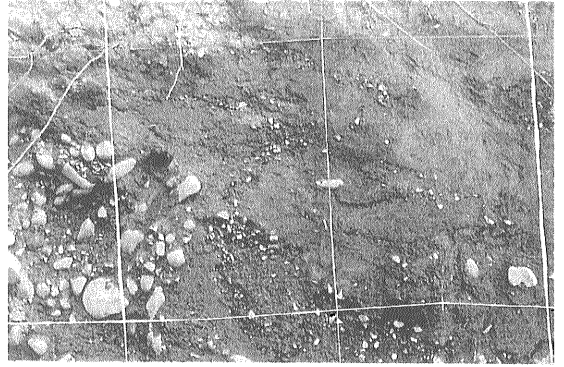


写真1 草屯地区のトレンチ調査から見出された1999年地震による堆積物の変形。

積物から得られた最古の年代から、少なくとも300～500年前以前であると推定された(太田ほか, 印刷中)。一方東の草屯東断層(副断層)のトレンチ調査(2000年4月)では下盤のみに細粒堆積物があり、明瞭なピート層が見られる。約780年前という年代を示すこの層の傾きは1999年の地震で説明される。したがって1999年以前の断層活動はそれ以前と推定される。またトレンチ地点より20m東で行ったボーリングでは、深度20mで礫層に到達した。その上の厚いシルト層およびその中に含まれる数層の腐植質堆積物の存在は複数の断層活動を示すと思われ、分析中である(黄ほか, 準備中)。

なお、草屯地域では最近地下レーダー(Ground penetrating rader)による浅層部の地下構造探査を行った(Jiu and Ota, in prep.)。この結果、草屯西断層のトレンチ調査で求められた地下構造ときわめて似た構造が見出された。その分析結果を応用すると、地質的に活断層を認定できなかった草屯東断層でも逆断層を伴う構造が確認でき、この方法の有用性が確かめられた。

(2) 霧峰地域

①李ほか(2000)は中興新村付近の4地点でのトレンチ調査を行った。そのうちの1地点では約200年前の断層活動を見出し、これは歴史記録による1845年の地震に当たる可能性が大きいという。またほかの1地点では複数のcolluvial wedgeの存在から6回の古地震を読み取っている。ただし年代については示されていない。また詳細なスケッチがでていないためにこれらの古地震の存在、年代については確定的にはわからないが、上に述べた地

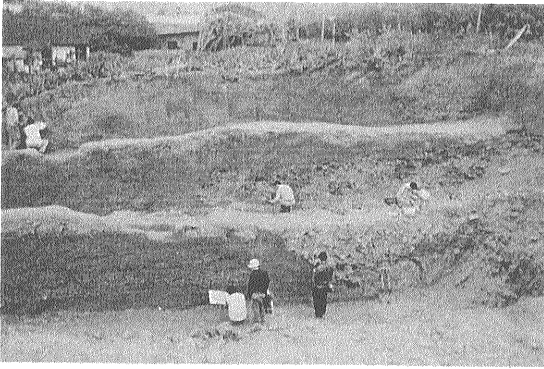


写真2 霧峰地区の撓曲崖とトレンチ調査地点。この撓曲崖は、山地と低地との地形境界よりもやや平野側に位置し、空中写真判読でも認定されたもの。集集地震による地震断層はこの撓曲崖の先端に現れた。陳文山、陳宇高などの調査による。



写真3 光復国民中学背後のグラウンドでのトレンチ調査に現れた1999年地震断層。

点のことを含めてかなり短い活動間隔を考えているようである。

②朱ほか(2000)の光復国民中学付近のトレンチ調査では1999年の断層と、上盤側での背斜状変形、その中での副断層などが知られていて、変位様式に関する情報を提供しているが、より古い断層活動は見出されていない。

③陳文山ほか(調査中)は霧峰地区の3地点でトレンチ調査を実施中(2001年3月現在)。1地点では下盤側のみ掘削で、これは堆積の場である下盤で年代試料をとるためと説明されたが、ここでの下盤の資料と他地点での上盤の資料をどう結びつけるかが問題である。地震断層を横切る1地点では明瞭な低角逆断層が現れたが、トレンチ壁では1999年より前の出来事は見出されていない。このトレンチ調査はまだ調査中の段階(2000年12月26日)で公開され、数十人がバスで現地を訪れ、見学をする機会が得られた。その後(2001年3月)、陳文山ほかはさらに複数の地点でのトレンチ調査を行い、同一地点での少なくとも3回の断層活動を見出した。ここでは段丘礫層を切る低角逆断層が確認でき(写真2)、その上限高度に約6mの高度差が認められた。堆積物の年代測定試料も数多く採取され、断層活動の間隔が求められることが期待されている。この調査の際(2001年2月下旬)にも140人も達する見学者が訪れるなど、トレンチ調査に関する台湾の研究者の関心の深さを示している。

④光復国民中学グラウンド(袁彼得ほか)では12

月中旬からトレンチ調査が行われている。地震断層が明瞭であることから注目されたこのグラウンドには将来博物館が建設され、このトレンチも保存される予定である。筆者は2001年1月2日に現地を訪れた(写真3)。まだ調査中で、当日は調査担当者が不在であったが、筆者の観察した限りでは1999年地震による低角逆断層が明瞭であり、その変位量は約2mで、地震断層の変位量(約2m)と等しく、1回の活動で説明できる。空中写真判読ではこの地点では地震以前の断層は見出されなかった。その際には埋め立てによって既存の崖が隠されている可能性を考えたが、トレンチ壁の観察で埋め立ての量は上盤、下盤で同一(1.8m)であったから、やはりこの地点では地表には断層変位は記録されていなかったと見られる。しかし、この地点では上盤側に基盤の第三紀層が現れていたが下盤にはみられない。下盤でもう少し深く掘ると基盤高度の差から一つ前の断層活動が読み取れる可能性がある。実際、この南を流れる河川右岸の地震後の護岸工事の際には、少なくとも約4mの基盤高度のずれがあったという(黄奇瑜による)から、確実に一つ前の断層活動はありそうである。ただしその年代がわかるかどうかは問題である。なおここではさらに複数のトレンチ調査が予定されている。なお、本地点での地表での短縮量は約1.1mであった。

(3) 北部地域

直接の掘削ではないが、露頭をはぎ取ることによって若い堆積物の変形史から断層の活動歴を求める研究も行われている。井上ほか(2000)は大甲溪右岸で、複数の断層活動を認め、再来間隔が約

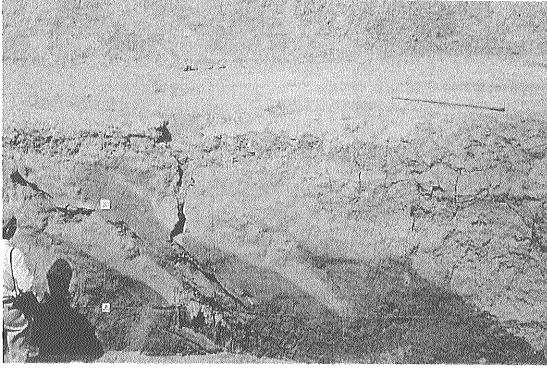


写真4 台南断層トレンチ壁。台南層(完新世中期)の急な傾きが明瞭。李のトレンチ調査による。

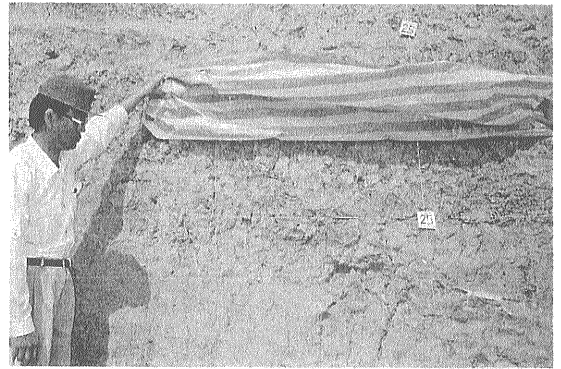


写真5 台南断層トレンチ壁に現れた人骨。やや東に傾斜している。左側にいるのが調査にあたった李錫堤氏。

1,400年である可能性を述べた。林愛明ほか(2000)は2箇所での露頭断面から得られた炭化木片の年代、~450yrBPから、集集地震よりまえの歴史地震が清時代に起こったと推定した。しかし、これが集集地震による可能性もあるという議論もあり(大会当日の討議)、問題を残している。

(4) 台南地域

上記のトレンチ調査はいずれも車籠埔断層上で行われたが、最近になってそれ以外の活断層でもトレンチ調査が始まった。李錫堤は、台南市東方の台南断層上で2001年2月にトレンチ調査を行った。台南断層は、完新世中期の海成層である台南層を変位させる活断層であり、市街地にも近いことから注目されている活断層である。ここでは台南層の顕著な撓曲変形(写真4)、それを不整合に被う若い堆積物の変形などから、複数の断層活動がありそうである。さらにトレンチ上部では埋葬された人骨が見出され、それ自体も変位を受けている可能性が大きい(写真5)。この人骨は約400年前以降と推定され、清時代の歴史地震を記録している可能性もあるという。

4. 活断層研究に関する課題と提言

1) 台湾の活断層研究には、変動地形学的手法に関する認識の乏しさと、空中写真使用上の制約などから、空中写真判読による地形学的手法が十分取り入れられていない。今後空中写真判読に基づく変位地形の認定と、大縮尺上での正確な図化が必要である。空中写真利用の自由化が切に望ま

れる。

2) トレンチ調査地点はおもに車籠埔断層の中部地域で行われている。北部では変位量が5~10mと著しく大きく、かつ横ずれを伴っていること、南部では変位量は小さいが横ずれ成分が大きいこと、などから変位量が2~3m程度で、純粋に逆断層であった中部地域をとりあえず対象としようということのようである。車籠埔断層が集集地震の場合のように100kmに達する範囲が常に同時に活動するかどうか、活動期を異にするにする複数のセグメントの有無の検討、などのためには、中部以外の地域でも調査することが必要である。

3) 現段階では地震断層をトレンチ調査の対象としているので、トレンチ調査地点を選ぶのには問題はない。しかし、今後活断層のトレンチ調査をする際には、逆断層特有の変形様式を理解しないと、幅広い変形帯の中でのトレンチ地点の選定が難しい。

4) 集集地震に伴う変位様式、たとえば低角逆断層で、上盤側に背斜状の変形を伴うこと、それに伴う小規模な逆断層がみられること、上盤が下盤上に覆いかぶさり、地表での短縮を示すこと、などが明らかになってきた。しかし、複数の活動が得られた場所はまだまだ限られている。複数の古地震の認定と活動間隔についてはさらに検討が必要である。

5) 1999年地震以前の断層活動が多く地点で見られなかった理由は、掘削深度が十分に深くないこと、または掘削した段丘が前の断層活動を見出すには新しすぎたことによるであろう。筆者らが草屯地域でトレンチ地点を選定した折も、一つ前の活動を見出すためにはできるだけ若い面を掘削しよ

うと考えたが、実際には若すぎたようである。今後の掘削では、既存の活断層による変位が見られる最新の段丘を選んで調査する必要がある。たとえば竹山図幅の水底寮、延竹橋の北および南、南投図幅、草屯地区の下位から2番目の段丘面、猫羅溪右岸の千科斗、霧峰図幅の烏溪北方、台中図幅の白雲山荘付近の低位の段丘面などが候補地点としてあげられる。なお台湾では隆起の大きいことや、降水量の多いことを反映して侵食・堆積が著しく大きいことをトレンチ調査に当たって考慮する必要がある。

6) 古地震の解明、将来の断層活動期の推定のためには今後は車籠埔断層以外の活断層でのトレンチ調査が必要である。3) でも述べたように、逆断層では断層の位置の認定が難しい場合が多く、掘削地点の選定のためには大縮尺の地図上で高い精度で活断層の位置を決める必要がある。このことは今後の研究に待つところが多い。実際、活断層研究については多くのプロジェクトが計画されている。

ここに述べた内容の多くは、筆者が2000年10月から3ヵ月間、中華民国国家科学委員会の経費により国立台湾大学地質系の訪問教授として招聘されていた期間に得られた資料による。この訪問の実現を図ってくださり、活断層研究について多く討論していただいた台湾大学黄奇瑜教授をはじめ、中央地質調査所の張徽正博士、ほか現地地で研究についての討論をいただき、お世話になった多くの方に厚く感謝する。そのほか、現地調査に当たっては日本の地質調査所、国土地理院などから研究費の補助をいただいた。今後の台湾の活断層研究に少しでも協力できることを願っている。

(2001.5.1記)

なお、本稿提出後にアメリカ合衆国カリフォルニア工科大学において、Sich教授とともにDEMによる図で活断層を認定する機会を得た。さらに、国土地理院からspot資料を提供していただいた。これらは活断層分布の大勢を知るのに極めて有益で、今後活用してゆきたい。また、活断層研究についても新たな進展がみられるが、それらについては別の機会にまとめたい。

引用文献

- 中央地質調査所編(1999): 921地震地質調査報告. 314p.
- 張 徽正・林 啓文・陳 勉銘・盧 詩丁(1998): 50万分の1台湾活動断層分布図および説明書. 中央地質調査所.
- Huang, C.Y., Lee, C.W. and Yuan, P.B. (1999): Detailed mapping of the Chelungpu fault (1:1000). NSC report.
- 井上大栄・Lee, C.T.・電力台湾地震調査グループ(2000): Chelungpu断層Fengyuen-Shikang 間の応用地質的課題. 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, 1-14.
- 活断層研究会編(1980): 日本の活断層-分布図と資料-. 東京大学出版会.
- 太田陽子(1999): 変動地形を探るⅡ, -環太平洋地域海成段丘と活断層の調査から-. 古今書院, 204p.
- Ota, Y. (1999): Characteristics of earthquake fault associated with 921 earthquake, central Taiwan, especially on the relationship between earthquake fault and pre-existing Quaternary active fault. Proceedings of the International Workshop on Chi-chi Earthquake of September, 21, 1999. 4-1~4-12.
- 太田陽子(2000): 1999年集集地震による地震断層は何を語るか. 地学雑誌. 109, 799-804.
- Ota, Y., Watanabe, M., Suzuki, Y., Hunag, C.Y. and Sawa, H. (2000): Earthquake fault associated with the 921 Chichi earthquake, with special reference to its coincidence with pre-existing fault and progressive deformation. Abstract read at Western Pacific Geophysical International Conference.
- 太田陽子・黄 奇瑜・袁 彼得・杉山雄一・李 元希・柳田 誠・佐々木俊法・渡辺満久・澤 祥・鈴木康弘・唐 厚樞・蘇 育田・楊 盛淵(印刷中): 台湾中部, 車籠埔断層のとトレンチ調査-草屯西断層の例. 地学雑誌. (印刷中).
- 李 錫堤・鄭 錦桐・廖 啓雯・廖 卿妃(2000): 車籠埔断層開の初歩成果. 第8回台湾地区地球物理研討会論文集, 642-648.
- 林 愛明・大内 徹・Chen, A.・丸山 正(2000): 1999台湾集集地震の車籠埔断層で起きた歴史地震断層イベント. 地球惑星科学合同学会2000年合同大会予稿集.
- 林 啓文・張 徽正・盧 詩丁・石 同生・黄 文正(2000): 台湾活動断層分布図第2版(50万分の1). 中央地質調査所.
- 石 再添・張 瑞津・楊 貴三・許 民陽(1985): 草屯車籠埔河階群の活断層與地形面. Bull. Geogr. Soc. China, 13, 1-12.
- 石 再添・登 国雄・張 瑞津・石 慶得・楊 貴三・許 民陽(1984): 台湾西部與南部活断層的地形学研究. 国立台湾師範大学地理研究所地理研究報告, 10, 49-94.
- 石 再添・登 国雄・張 瑞津・石 慶得・楊 貴三(1986): 台湾活断層的地形学研究. 国立台湾師範大学地理研究所地理研究報告, 12, 1-44.
- 石 再添・楊 貴三・張 瑞津(1993): 台湾活断層的地形学研究概要. 地工技術雑誌, 44, 26-51.
- 朱 劭祖・李 建成・胡 楠慶・Angelier, J.・詹 瑜璋(2000): 集集地震地表変形之構造特徴. 中華民國地質学会2000年大会, 9-11.
- 渡辺満久・太田陽子・鈴木康弘・澤 祥(2000): 台湾中部, 921集集地震時の地表地震既存の活断層との関係. 地球惑星科学合同学会2000年合同大会予稿集.

OHTA Yoko (2001): Recent studies on Active Fault and Trending in Taiwan.

<受付: 2001年7月12日>