

衛星画像、空中写真の判読等による 1999年台湾集集地震に伴う地形変化の抽出 Geomorphological Phenomena with Chichi (Taiwan) Earthquake in 1999 based on Satellite Image and Airphoto Interpretation

地理調査部 坂井尚登・小田切聡子・関崎賢一・安藤暁史

Geographic Department Hisato SAKAI, Satoko ODAGIRI, Kenichi SEKIZAKI, Akifumi ANDO

企画部 根本正美

Planning Department Masami NEMOTO

横浜国立大学名誉教授 太田陽子

Yokohama National University, Professor Emeritus Yoko OTA

要 旨

1999年台湾集集（チーチー）地震において地形学的影響が及んだ台湾中部地域を対象に、衛星画像（SPOT等）、数値標高モデル及び空中写真を活用してリニアメント抽出や崩壊地判読などを試みた。また、鳥瞰図、陰影図、傾斜量図など各種画像を作成し、判読の支援資料としてその効果を検討した。地震後の衛星画像を用いた立体視判読により、車籠埔（シャロンポー）断層などの活断層と思われるリニアメント、大規模崩壊、表層崩壊を明瞭に抽出・把握できたが、地震断層の抽出は困難であった。地震断層については、地震以前の空中写真判読等により、草屯地区において、1/2.5万の縮尺の詳細活断層分布図を作成して検討した結果、今回の地震断層は、既存の活断層上に生じ、変位の累積も見られることが明らかになった。また、草嶺の大規模崩壊地における崩壊前後の精密な地形分類図（1/2.5万）をそれぞれ作成し、崩壊発生時の時系列な段階に対応した地形変化の詳細を明らかにした。

以上のことから、台湾集集地震クラスの地震に関する地形解析に対して、SPOTクラスの地上分解能を持つ衛星画像が効果的であり、さらに、数値標高モデル（＝DEM：Digital Elevation Model、以下、「DEM」という。）を併用することでその効果が向上することもわかった。

これらの衛星データは、踏査が困難な人口が少ない地域や、政治経済的な理由により空中写真等の情報の入手が期待できない地域での地震発生予測及び大地震発生に際して、活断層分布の把握、地震による地形変化の把握等を行うための有効な手段になると考えられる。今後は、より解像度の高い衛星データの利用が可能となることから、地震断層の抽出を含め、いっそう有効性が高まることが期待できる。

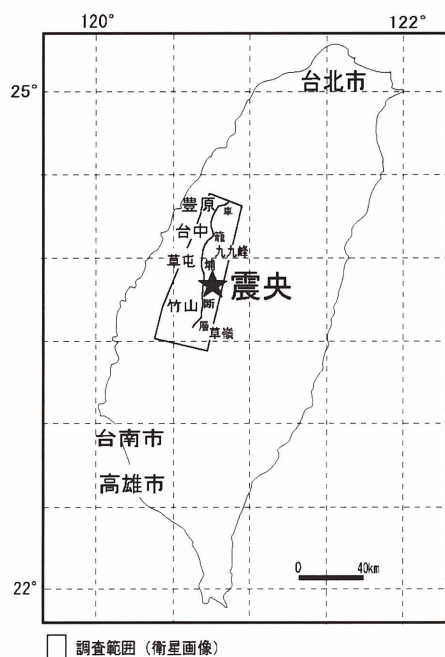
1. はじめに

1999年9月21日午前1時47分頃（現地時間）、台湾中部でM7.6の大地震が起こった。震源地は台北市の南西約150kmの南投県集集鎮付近で、被害は震源に近い南投県や付近の台中市などの台湾中部を中心に、死者・行方不明者約2400人、建物の倒壊8万棟といわれている。台湾では、震央付近の地名から今回の地震を「集集大地震」と呼んでいる。

今回の地震では、南投県竹山から台中県豊原にかけて、長さ80kmに及ぶ地表地震断層が出現した。断層の走向はほぼ南北で、東側が西側に対して2～6m、最大では9m以上隆起した。台中盆地の東側では、ほぼ南北の走向を持つ並行する2本の活断層が従来から知られていたが、今回の地表地震断層は、その中の一つである「車籠埔断層」上に出現した。本研究は、人工衛星画像、空中写真、地震前のDEM等を用いた地形学的調査により、地震断層周辺地域の活断層の詳細な位置を把握するとともに、被害と断層活動、地形条件の関係を明らかにし、我が国をはじめとする地震多発地域における防災対策立案に資することを目的とした。また、活断層の平面位置を地形学的に明らかにする手法の技術移転を図ることを目的のひとつとした。

本研究は、平成12年度科学技術振興調整費国際共同研究総合推進制度多国間型国際共同研究「フィリピン海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、国立台湾大学・国立台湾師範大学・内政部土地測量局の研究者等のご協力を得て実施した。

なお、台湾の地名、機関名等の固有名称は、本来旧字体を使用すべきであるが、本稿では新字体を使用した。



図－1 調査位置図

2 調査研究の概要

2. 1 衛星画像判読による活断層・リニアメント及び崩壊地形の抽出

- (1) 地震前後のIRS画像（単画像，解像度約5m）を入手し，地形変化に関する予察的判読を行った。
- (2) 地震前後のSPOT画像（解像度約10m）を処理，ステレオ画像を作成し，目視判読により活断層・リニアメント及び崩壊地形を抽出した。

2. 2 空中写真判読等による活断層分布及び大規模崩壊地形の把握

- (1) 地震前の空中写真の判読等による，車籠埔断層沿い草屯付近の詳細な活断層分布の把握。
- (2) 地震前後の空中写真の判読等による，草嶺の大規模崩壊地形の把握。

なお，調査範囲を図－1に示した。

3 衛星画像判読による活断層・リニアメント及び崩壊地形の抽出

3. 1 衛星画像を用いた調査の意義

台湾は，我が国同様の地震国であることから，地震の研究は非常に高い水準にある。今回の地震後，すみやかに地表地震断層に関する精力的な調査が行われ，その位置に関する詳細な地図が作成された（[6]）。また，比較的早い段階で現地写真（解像度の低い空中写真を含む）の画像がインターネット等に公開され，地震による地変が画像により世界中に伝えられた。それでもなお，今回の地震に関して，衛星画像を用いた調査を行うことには，次のような意義がある。

- (1) 今後，人口の希薄な地域や政治経済的な理由により

大縮尺地形図や空中写真等の詳細な地形情報が期待できない地域で大地震が発生した際に，衛星画像を用いて地表地震断層や地すべり等の地形変化を把握できるかどうかの検証を行うことができる。

(2) 今回活動した車籠埔断層と活動しなかった周辺の断層を衛星画像上で比較することにより，衛星画像を用いて活断層分布図を作成することを検討することができる（台湾では空中写真に関してはことのほか持ち出し等に関する統制が厳しい）。

このような観点から，今回は次のような観点に絞って，主に目視により衛星画像を判読した。

- 1) 地表地震断層が衛星画像により判読できるか
- 2) 地すべり等の地変が衛星画像により判読できるか
- 3) 活断層が衛星画像により判読できるか

3. 2 衛星画像判読による活断層・リニアメント及び崩壊地形の抽出

台湾集集地震では，地形学的見地から，長さ80kmに及ぶ地震断層，草嶺，九分二山などの大規模崩壊，九分二山などの広域表層崩壊など様々な地形変化が見られた。この地震において地形学的影響が及んだ台湾中部地域を対象に，衛星画像及びDEMを活用してリニアメント抽出や崩壊地判読などを試みた。また，鳥瞰図，陰影図，傾斜量図など各種画像を作成し，判読の支援資料として，その効果を検討した。

3. 2. 1 予備的検討

予備的検討を行うための衛星画像として，地震前後の撮像が行われている画像のうち，最も地上分解能の高いIRS（インドリモートセンシング衛星）のデータ（単画像，解像度約5m）をNASDAより提供を受け，単画像による判読を実施した。使用した衛星画像を以下に示す。

IRS-1D/LISS3

- 1999年 2月 4日 パス140，ロウ54～56
- 1999年 9月17日 同上
- 1999年10月12日 同上
- 1999年11月 6日 同上
- 1999年 7月 1日 パス141，ロウ54～56

IRS-1D/パンクロ

- 1999年11月 6日 パス140，ロウ55B，D

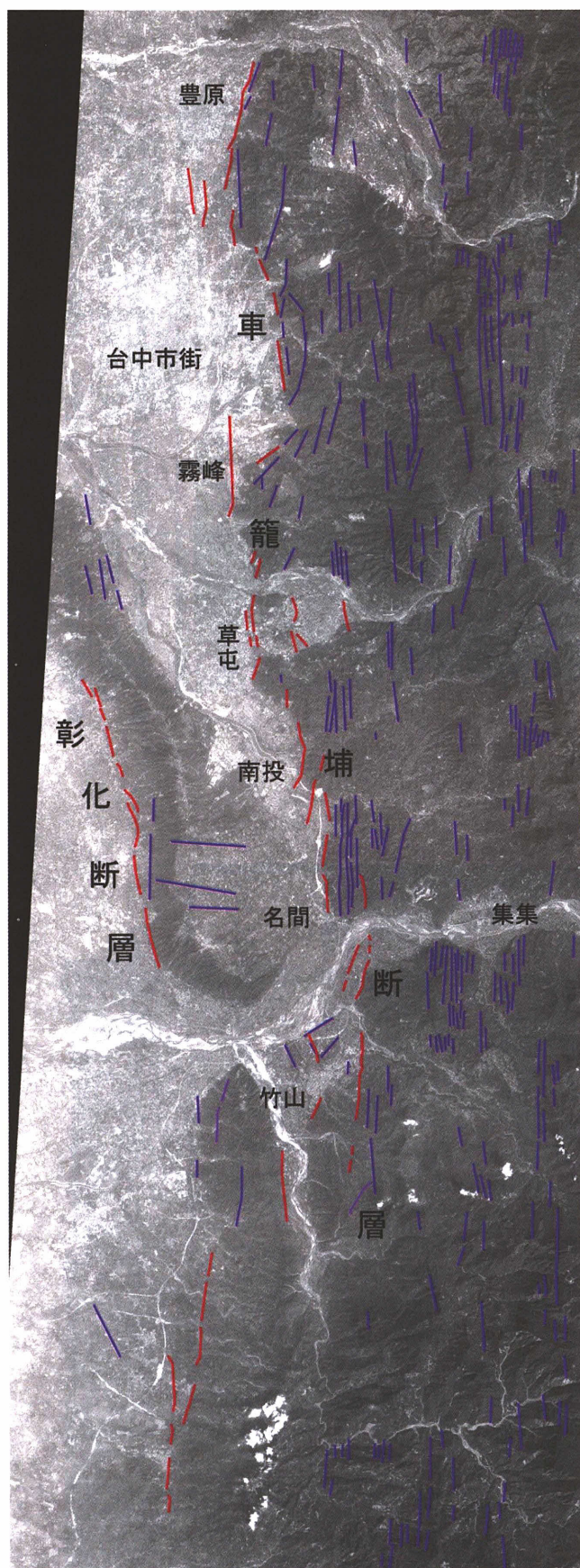


図-2 SPOT画像から判読したリニアメント

3. 2. 2 SPOT画像とDEMによる検討

(1) 使用した衛星画像の諸元

衛星画像として、仏国のSPOT画像を使用した。SPOT画像の大きな利点として、立体視判読が可能であることがある。表-1に、今回使用したSPOT画像の諸元を示す。なお、地上分解能はすべて約10mであり、現在運用中の衛星の中では最も高分解能の部類に入る。

(2) DEMの諸元

国立中央大学太空及遙測研究中心が所有する地震前に作成したDEMを使用した。なお、今回の解析では地震後のDEMは入手することができなかった。

このDEMのメッシュの大きさは40mである。国立中央大学太空及遙測研究中心では台湾全土のDEMを所有しているとのことであるが、今回の解析では、

北緯 23° 30' ~ 24° 22' 30"

東経 120° 30' ~ 120° 52' 30"

の範囲を中心とする台湾中部地域のDEMを準備した。

(3) 衛星画像判読による活断層・リニアメント及び崩壊地形の抽出

地震前及び地震後のSPOT画像やDEMを処理・組み合わせるステレオ画像や鳥瞰図等を作成し、活断層・リニアメント及び崩壊地形を判読、抽出した(図-2~5参照)。

4. 空中写真判読等による活断層分布及び大規模崩壊地形の把握

集集地震は、長さ80kmに及ぶ地震断層を出現させるとともに、草嶺、九分二山などの大規模崩壊、九九峯などの広域表層崩壊などさまざまな地形変化を引き起こした。

黄奇瑜台湾大学教授、張瑞津台湾師範大学教授らの協力を得て、活断層分布については草屯地区、大規模崩壊地形については草嶺地区をモデル地域に選び、以下のような調査を実施した。

(1) 地震前の1/2万空中写真の判読による、草屯地区の地形及び車籠埔断層等の活断層分布(図-6参照)の把握。

(2) 地震前後の1/2万空中写真の判読による、草嶺・九分二山地区の大規模崩壊地形の把握(図-7参照)。

(3) 現地踏査

凡 例 (図-2)

- 資料[2]を検討して活断層としたリニアメント
- その他の主なリニアメント

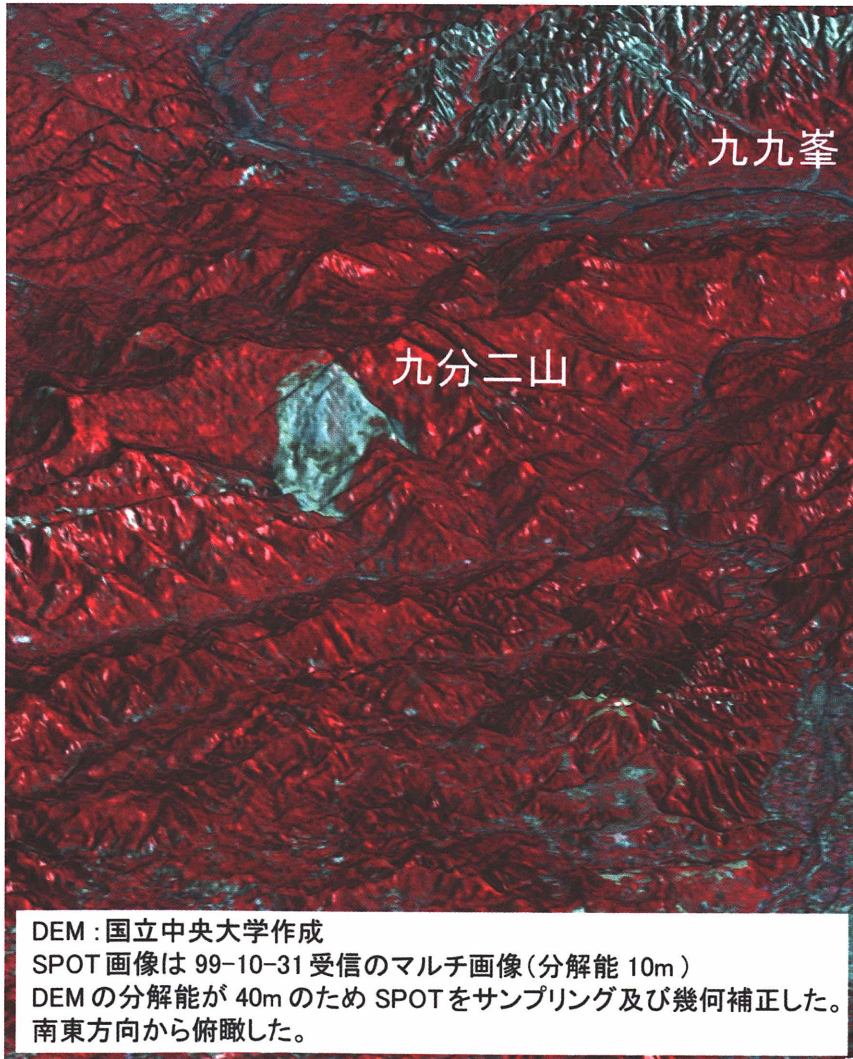


図-3 DEM+SPOTデータより作成した九分二山及び九九峯周辺の鳥瞰図

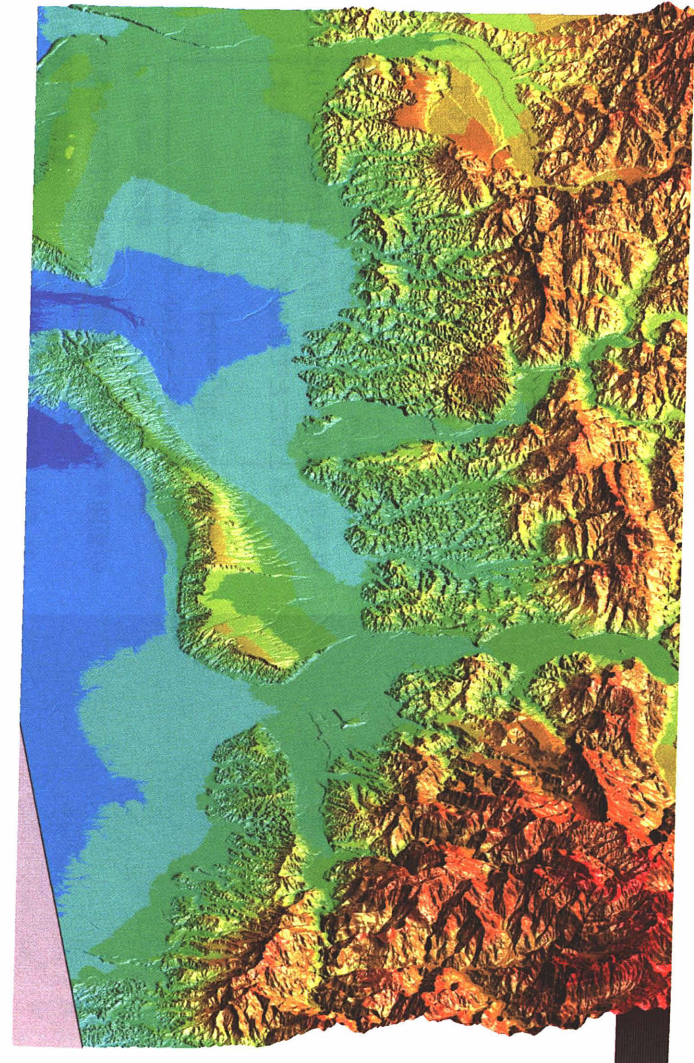
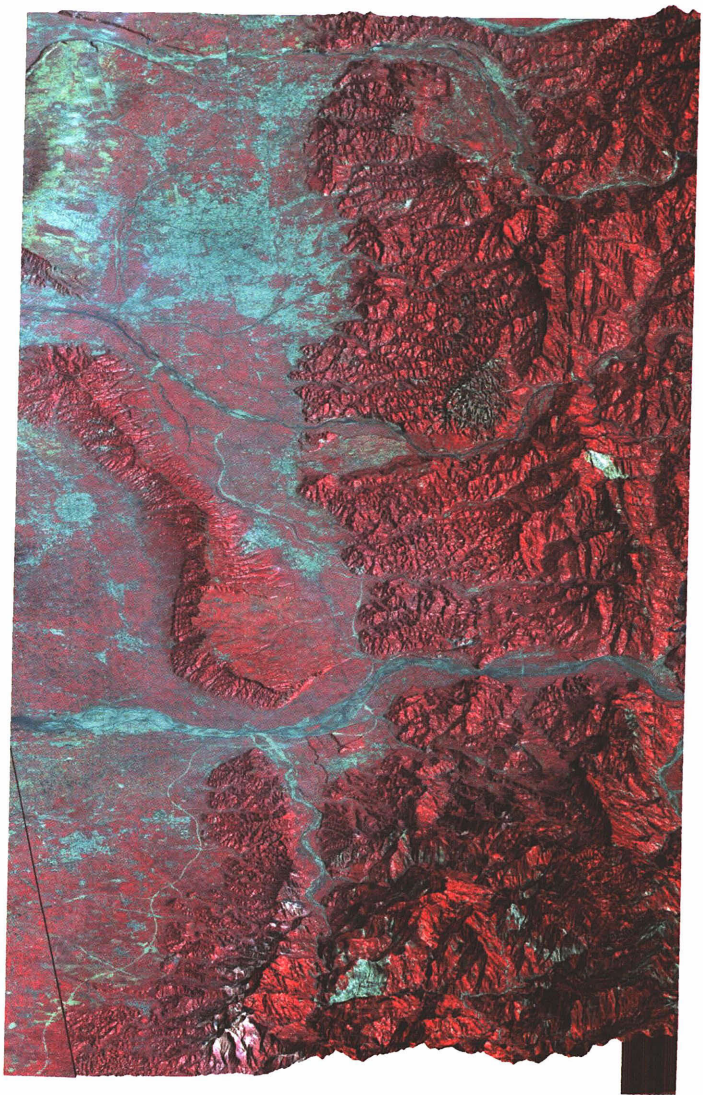


図-4 DEMによる鳥瞰図(調査対象地域を南方から俯瞰)

鳥瞰表現 (+ 段彩) により, 中央山脈西部山麓帯の西縁における地質構造等を示すリニアメント, 段丘等や, 沖積低地の分布状況及びリニアメントが理解し易く表現されている



図－5 SPOT画像とDEMによる鳥瞰図（調査対象地域を南方から俯瞰）

衛星画像にDEMによる鳥瞰表現を重ね合わせ処理した。崩壊地位置（山地内の青色部）や山麓部の沖積低地に分布する各種地形の相互関係が理解しやすく表現されているとともに、山地西縁の山麓に沿って分布する沖積地を切るリニアメントが認められる

凡例(Legend)

名称	原稿記入例	説明文
活断層 Active Fault Trace		最近数十万年間に、概ね千年から数万年の周期で繰り返し動いてきた痕跡が地形に現れ、今後も活動を繰り返すと考えられる断層。明確な地形的証拠から位置が特定できるもの。
活断層(位置やや不明確) Active Fault Trace (site indistinct)		活断層のうち、活動の痕跡が侵食や人工的な要因等によって改変されているために、その位置が明確には特定できないもの。
活断層(活拗曲) Active Flexure		活断層のうち、変位が数らかい地層内で拡散し、地表には段差ではなく、たわみとして現れたもの。たわみの範囲及び傾斜方向を示す。
活断層(伏在部) Active Fault Trace (concealed)		活断層のうち、最新の活動時以後の地層で覆われ、変位を示す地形が直接地表に現れていない部分。
地形面の傾動方向 Tilting Surface Direction		地形面が、現在も続いている地殻変動によって傾いている場所。最大傾斜方向で図示。
段丘面Ⅰ TerraceⅠ		河川的作用で形成された平地が陸化した台地面。ギリシャ数字で陸化年代の相対的新旧を示す。数字が小さい程陸化年代が古い。
段丘面Ⅱ TerraceⅡ		
段丘面Ⅲ TerraceⅢ		
段丘面Ⅳ TerraceⅣ		
段丘面Ⅴ TerraceⅤ		
段丘面Ⅵ TerraceⅥ		
段丘面Ⅶ TerraceⅦ		
段丘面Ⅷ TerraceⅧ		
段丘面Ⅸ TerraceⅨ		
段丘面Ⅹ TerraceⅩ		
段丘面ⅩⅠ TerraceⅩⅠ		
段丘面ⅩⅡ TerraceⅩⅡ		
扇状地 Fan		河川によって形成された、谷口を頂点とし平地に向かって扇状に開く半円錐の地形。地下に未発見の断層が存在する可能性もある。
地すべり Landslide		斜面を構成する岩石・土壌などの一部が斜面下方に移動している場所。滑落崖と移動土塊の範囲を図示。
人工改変地 Artificial Modified Area		

図－6（その2） 凡例: (図－6（その1） 草屯付近における活断層分布及び地形分類図)

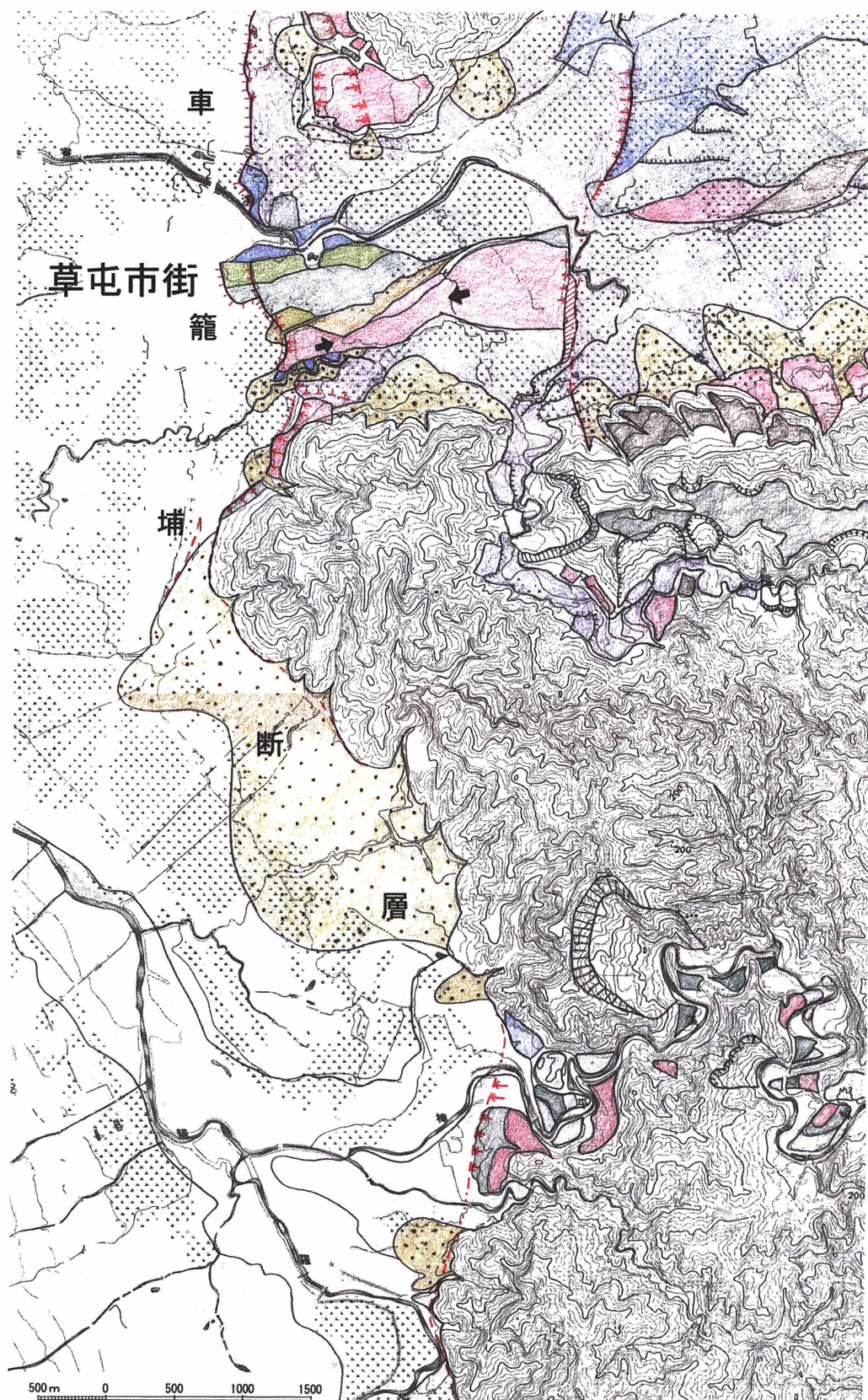
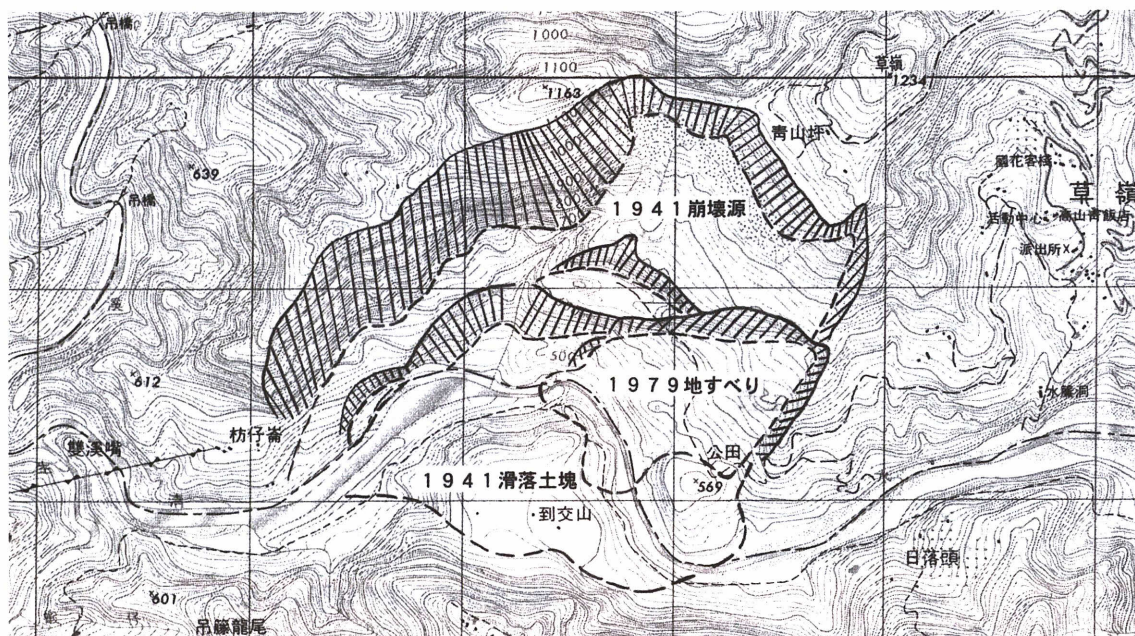
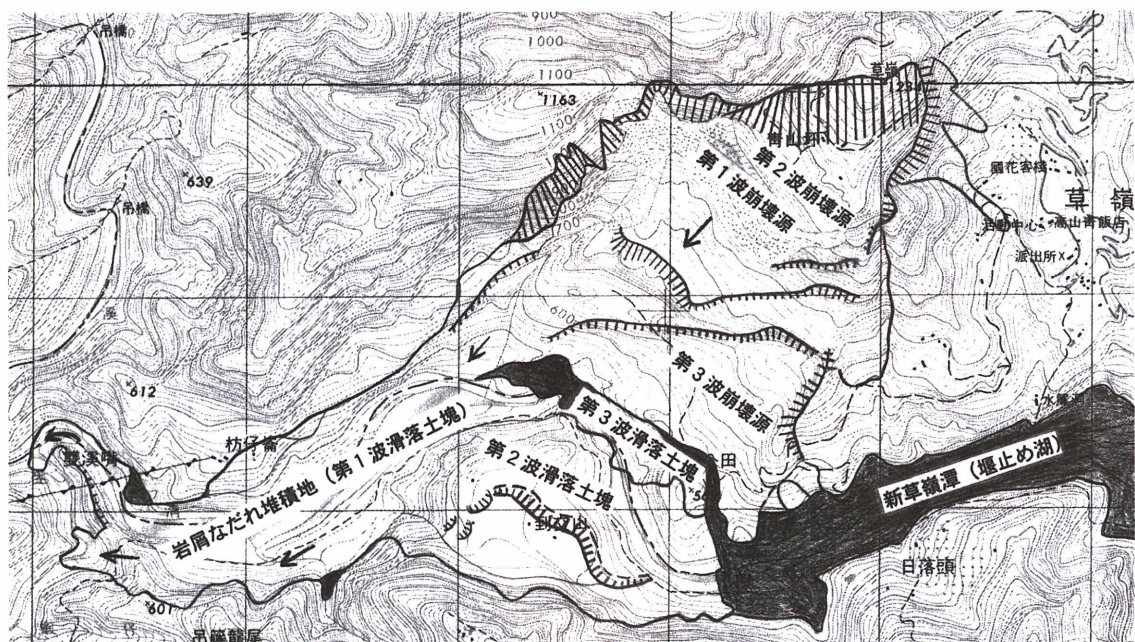


図-6 (その1) 草屯付近における活断層分布及び地形分類図：

(1976年撮影の1/2万空中写真による。[3], [8]に加筆して作成。草屯地区の一部は[3]による図と異なっている。原図縮尺1/2.5万, 縮小率53%)



(地震前)



(地震後)

図－7 1:25,000草嶺地形分布図 (縮尺率70%)

表－1 SPOT衛星画像の諸元

(地震前)

	受信年月日	センサ	パス	ロー	備考
(1)	1998年11月13日	HRV、パנקロ	299	302～303	
(2)	1998年12月31日	HRV、パנקロ	299	303	(1)と立体視可能
(3)	1999年1月5日	HRV、パנקロ	299	302	(1)と立体視可能

(地震後)

	受信年月日	センサ	パス	ロー	備考
(4)	1999年10月31日	HRV、マルチ	299	302～303	パנקロとしても使用
(5)	1999年11月23日	HRV、パנקロ	299	302～303	(4)と立体視可能

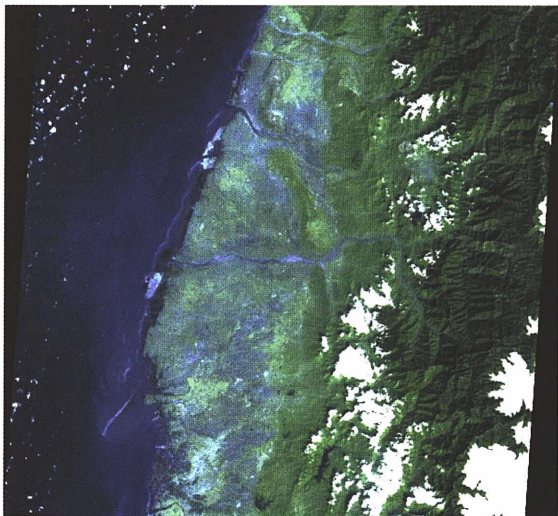


図-8 (その1) 地震前のIRS-1D/LISS3画像
(1999年2月4日):

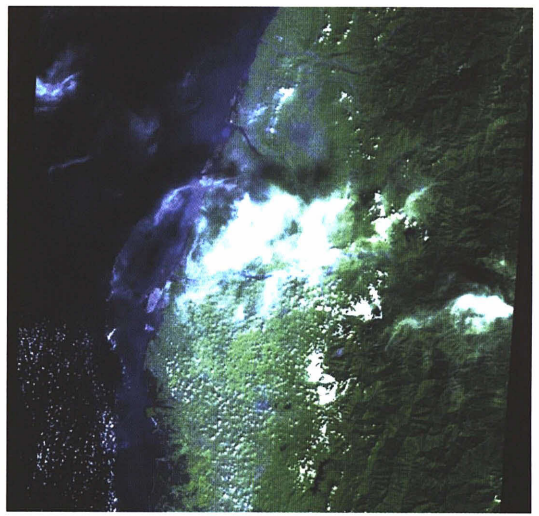


図-8 (その2) 地震後のIRS-1D/LISS3画像
(1999年11月6日):
地震前後の画像を比較し、地表地震断層の抽出を試みた。

5. 調査研究結果

5. 1 衛星画像判読による活断層・リニアメント及び崩壊地形の抽出

5. 1. 1 予備的検討における判読結果

(1) LISS3画像の判読

比較的雲が少なく鮮明な次の2つのLISS3画像について、フォルスカラー画像を作成し、判読を行った。

地震前(図-8.1参照):1999年2月4日,地震後(図-8.2参照):1999年11月6日を使用した。その結果,次のような結論を得た([1])。

1)地表地震断層:地表地震断層について,公表されている地表踏査の結果([5],[6])等を参考にしながら該当部分について目視で精査したが,LISS3画像では地表地震断層は確認できなかった。

2)地すべり等の地変:大規模な地すべりが発生し堰止め湖ができた状況や,表層崩壊が局所的に多発した状況がLISS3画像から確認できた(図-9,10参照)。

3)活断層:今回活動した断層の西側に並行して,明瞭なリニアメントが判読できる。地形的特徴から,このリニアメントも活断層であると判断できる(図-11参照)。これは「彰化断層」と呼ばれる活断層の位置に一致する。

4)建物の倒壊等:判読は困難であった。

(2) パンクロ画像の判読

地表地震断層について,台湾中央地質調査所が作成した2万5千分の1の位置図([6],図-12参照)を参考に,地震後の11月6日に撮影されたパンクロ画像で判読できるかどうかを検討した。その結果,連続する断層線として判読することはできなかったが,画像(図-13参照)で矢印で示した場所に白く写っている位置が,地表地震断層で河床に段差が生じた場所(図-14参照)に一致する。また,このほかにも,地表地震断層が生じたとされる位置で白い線状の画像が判読される場所があった。今回の

地表地震断層は,縦ずれ成分の大きさに比べて横ずれ成分が小さいことから,衛星写真の単画像では画像パターンの乱れ等の識別ができず,判読はかなり困難であった。

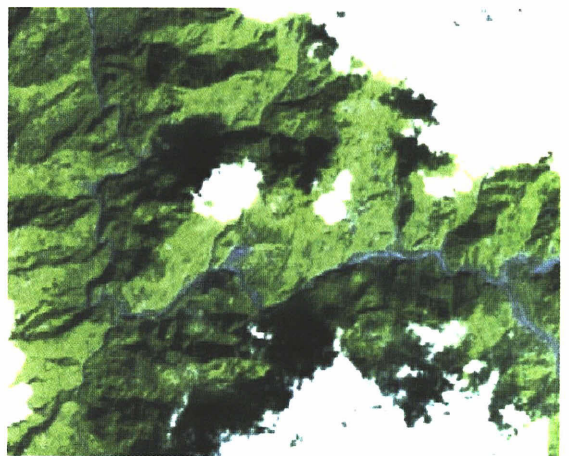


図-9 (その1) 地震前:(草嶺)

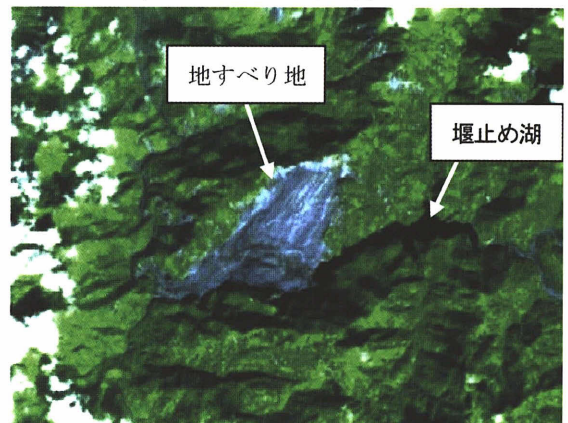


図-9 (その2) 地震後:(草嶺)大規模な地すべりと堰止め湖ができた状況等が確認できる



図-10 (その1) 地震前(九九峯)：植生に被覆されている様子がわかる

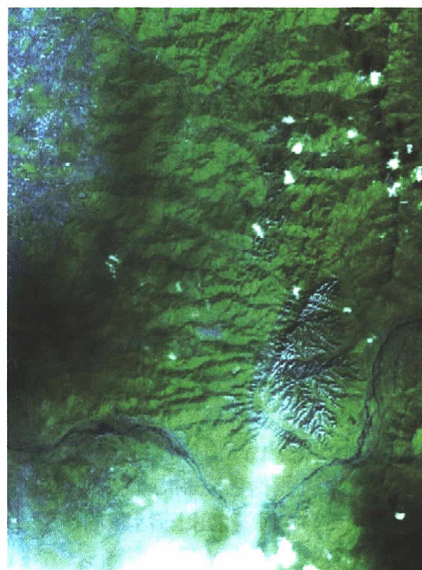


図-10 (その2) 地震後(九九峯)：表層崩壊が多発した状況が明瞭に把握できる

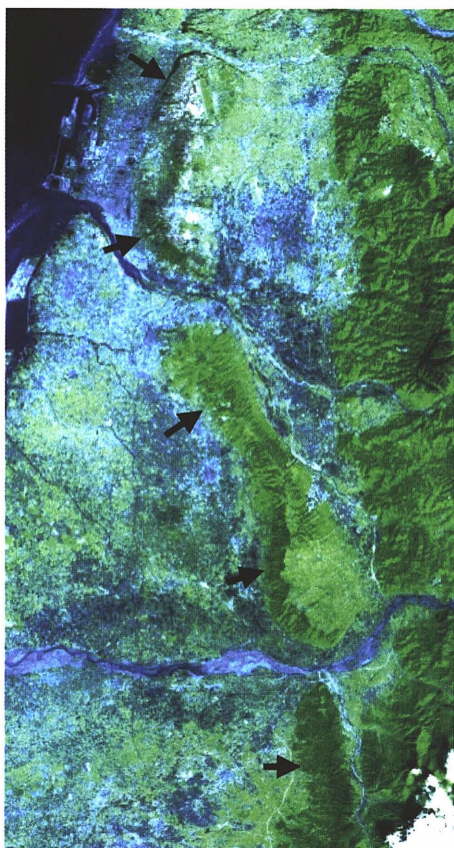


図-11 リニアメント(彰化断層)図：→を付した付近などに明瞭なリニアメントが把握でき、地形的特徴、資料から活断層であると判断できる。(画像が被覆されて見えなくなることを避けるため矢印を利用)

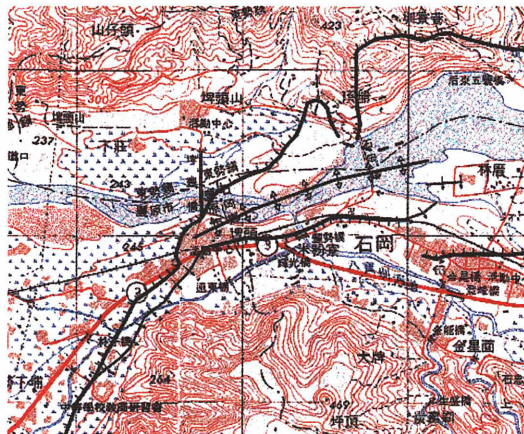


図-12 2万5千分の1地表地震断層位置図(九二一地震車籠埔断層沿線地表破裂位置図：台湾中央地質調査所)



図-13 大甲溪を横断する地表地震断層：矢印が地表地震断層により滝が生じた位置

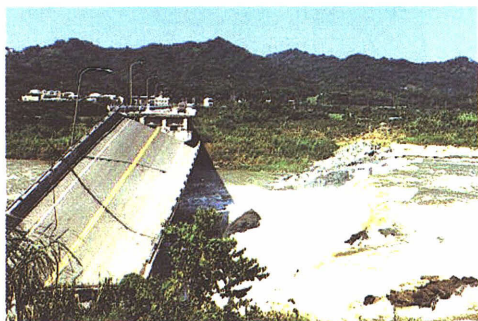


図-14 写真は図-13の矢印で示した滝および橋：
(台湾中央地質調査所のHPより)

5. 1. 2 SPOT画像とDEMによる判読結果

(1) 地震前のSPOT画像による活断層・リニアメントの抽出

地震前のSPOT画像を立体視し、リニアメントの目視判読を試みた(図-2参照)。画像上の直線模様などをリニアメントとして抽出し、台湾地質調査所などの既存の関係資料〔5〕,〔6〕と照合した。

中央山脈西部山麓帯の西縁に沿う、名間、南投、草屯、霧峯などにおいて山麓部および谷口部の沖積地を切る直線状、雁行状のリニアメントが認められた。これらのリニアメント群は活断層である車籠埔断層にほぼ沿ってみられ、今回出現した地震断層の活動状況と調和的な分布状況を示している。このことから、今回抽出できたリニアメントには車籠埔断層をはじめとする活断層が的確に含まれていることが分かった。もちろん、これ以外にも地形学的意味を持たない単なる直線模様もリニアメントとして含まれていたが、地震前のSPOT画像を使用して広域的かつ均質的に活断層の分布を把握できることが分かった。

(2) 地震後のSPOT画像による地震断層の判読抽出の可能性

地震後のSPOT画像を立体視して、車籠埔断層沿いに今回の地震で出現した地震断層の判読抽出を試みた。部分的にごく短い直線状の色調の違いが認められる箇所がみられたが、今回の変位を明瞭に捉えることはできなかった。この理由としては、SPOTの地上分解能が不十分であったためと考えられる。

(3) 地震後のSPOT画像による大規模崩壊や広域表層崩壊の判読抽出

地震後のSPOTバンクロー画像を目視したところ、崩壊地は白く表現されるため、草嶺、九分二山などの大規模崩壊、九九峯などの広域表層崩壊とも、崩壊の形状や崩壊箇所の個数を明瞭に判読できた。SPOT画像では立体視が可能のため、特に草嶺や九分二山の大規模崩壊にお

いては、崩壊部や堆積部を立体的かつ定量的に把握できた。

5. 2 空中写真判読等による活断層分布及び大規模崩壊地形の把握

5. 2. 1 活断層

空中写真判読等により、草屯地区の1/2.5万詳細活断層分布図を作成した(図-6参照)。当該地区では、草屯市街地西側を通過する車籠埔断層の主断層(東上がり)の撓曲崖とその2km東方の逆向き低断層崖(西上がり)という、逆断層が形成する地形の典型を見ることができ。今回出現した地震断層と既存の活断層(車籠埔断層)の位置はよく一致しており〔4〕,〔8〕上位の段丘ほど大きな変位を受けていることから、変位の累積性が指摘されている〔2〕,〔3〕。

5. 2. 2 大規模崩壊

大規模崩壊が発生した草嶺(図-16参照)、九分二山周辺は、新第三紀～中新世の砂岩・泥岩・頁岩などの互層〔5〕からなるケスタ地形を呈し、流れ盤斜面、受け盤斜面(ケスタ崖)などが広く見られる。相対的に緩傾斜の流れ盤斜面では、数は少ないが大規模崩壊が発生し、急傾斜の受け盤斜面では小規模な崩壊が多発している。いずれも直線型斜面で発生しているのが特徴である。また、大規模崩壊地では、崩壊面の傾斜が崩壊前の斜面傾斜とほとんど変わらない。これは崩壊が単斜構造の流れ盤斜面で起こり、その層理面がそのまますべり面となっていることによる。

大規模崩壊のモデル地域として取り上げた草嶺南西の流れ盤斜面は、斜面下部が清水溪の侵食により不安定になっていることから崩壊の常襲地帯である。集集地震前の空中写真(1980年撮影)を判読すると、草嶺周辺には過去に発生した大規模崩壊の痕跡が至る所に見られる。草嶺南西斜面の大小複数の滑落崖及び崩落土塊が河川侵



図-15 九九峯(バッドランド地形)：地震に誘発され、表層地すべりが発生。地震前はすべて植生に覆われていたが、地震後は地肌が露出している。

食により段化した河成段丘（到交山），これによりダムアップされた清水溪上流部から阿里山溪に見られる広い河床などである。これらの地形を形成した崩壊が発生したのは、1862年（地震），1941年（地震，嘉義大地震），1942年（降雨），1979年（降雨）である（カッコ内の「地震」，「降雨」は崩壊発生の原因となった現象）。このうち、1941年の崩壊も大規模なものであり，今回形成された新草嶺潭と同様の大きな堰止め湖を形成した（図-7参照，[7]）。

6 考察等

6. 1 衛星画像判読における鳥瞰図等の支援資料の活用効果

今回の対象地域におけるリニアメントはおおむね南北方向を示していることから，DEMを使って南方向から対象地域を俯瞰したところ，地震前のSPOT画像上で抽出したリニアメントが，鳥瞰図（図-4参照）上でも明瞭に表現されていることが分かった。このことから，SPOT画像上でリニアメント抽出を行う際，鳥瞰図を使って立体的観察を加えることで，地形学的意味のあるリニアメントの抽出が効果的に行えることが示されたと言える。

DEMとSPOT画像を組み合わせた鳥瞰図（図-5参照）の場合も同様の効果があるとともに，リニアメント位置の同定などの支援資料としても，その効果は高いものであった。なお，DEMとSPOT画像は，座標系も分解能も異なるため，幾何補正を行って分解能を40mに統一するとともに，サンプリングポイントも一致させた。

DEMと地震後のSPOT画像との組み合わせによる鳥瞰図（図-3参照）では，草嶺や九分二山の大規模崩壊，九九峯（図-15参照）の広域表層崩壊などが立体的に表現され，SPOT画像イメージは大規模な崩壊地や地すべり地の範囲の抽出に有効であった。

以上のように，DEMと衛星画像による鳥瞰表現は，視覚的かつ立体的な地形把握の手段として，極めて有力な手法と思われる。特に，緊急的・概略的な地形変化に関する調査・考察にあたって高い効果を期待することができる。また，地震前のDEMと併せて地震後のDEMを利用することができれば崩壊土砂量（差分）などの量的な検討が行えるが，SPOT画像は，その際の地すべり範囲の検討・抽出などに有効な資料になると思われる。陰影図，傾斜量図などに関しても，リニアメントや遷急点（線）の抽出など，地形解析を行う上で有意義な情報を読み取れることが分かった。

台湾集集地震クラスの地震に関する地形解析に対して，SPOTクラスの地上分解能を持つ人工衛星画像が大いに効果的であることを確認することができた。さらに，DEMを併用することでその効果が向上することも分かった。

6. 2 空中写真判読による活断層分布及び大規模崩壊地形の把握

6. 2. 1 活断層

草屯付近には，草屯市街地東側を通過する車籠埔断層延長部の東上がりの主断層とその2 km東方の西上がりの逆向き低断層の2列の活断層が明瞭に見られる（図-6参照）。今回出現した地震断層と既存の活断層の位置がよく一致しており，主断層では比高約2 m，逆向き低断層では比高1 m弱の変位が既存の断層崖上に現れた（[3]，[4]）。このように主断層は1回の地震で逆向き低断層の2倍強の変位を示すことは周辺に分布する段丘の変位によっても明らかである。たとえば段丘8面は主断層の段丘崖（撓曲崖）の比高が約30 m以上，逆向き低断層崖の比高は12～3 mであり，今回程度の地震による変位を想定すればおよそ15回分に相当する。これらの段丘は上位のものほど変位量が大きく，変位の累積性を示している（[2]）。また，主断層の断層崖の比高と逆向き低断層崖の比高の比率はどの段丘をとっても1:0.4程度であることから逆向き低断層は常に主断層の活動に連動して変位しているものと思われる。

6. 2. 2 大規模崩壊

草嶺大崩壊について，地震後（1999年撮影）空中写真を判読した結果，以下のことが分かった（図-7参照）。

(1) 崩壊は，崩落土砂による堆積地形の解析結果や現地調査時の聞き取りによる生存者の証言などから，時間的に3段階に分かれて発生した。

(2) 最初に草嶺南西の流れ盤斜面のかなりの部分が崩落し，岩屑なだれが発生した。高速で流れ下った岩屑なだれ堆積物は，清水溪対岸の到交山段丘に激突した。堆積物の一部は段丘面上や段丘南側の山地斜面にジャンプして残ったが，大部分は清水溪下流方向に流下していった。なおも高速で流下する岩屑なだれ堆積物は，清水溪南側の山地斜面を這い上がったたり，清水溪北側の古い地すべりの滑落ブロック上を流下した。その一部は，清水溪河床からの比高100～150 mにおよぶ双溪嘴の尾根を乗り越えて生毛樹溪に達した。また，清水溪本流を流下した岩屑なだれ堆積物の末端は，清水溪と生毛樹溪の合流点に達した。なお，岩屑なだれ堆積物が形成したと思われる堤防状の高まりが複数存在することから，岩屑なだれは複数回発生したか，もしくは複数の流れが存在していた可能性がある。

(3) 第2段階では，草嶺南西の流れ盤斜面の残部が崩落した。このブロック上には，住民36名が居住する青山坪集落が載っていたが，水平距離2 km弱，比高600 m弱の距離を滑り落ち，一度清水溪の河床を乗り越えて到交山段丘に乗り上げかけてから清水溪の河床方向に小さくすべって戻った。これだけの距離と高さを滑落しながら7名の生存者がいたことから，本ブロックは第1段階の滑落ブロックとは異なり，地すべり的に比較的低速で移動

したものと思われる。

(4) 第3段階では、なおも低所として残っていた清水溪の谷を、地すべりによる滑落ブロックが閉塞した。この地すべりは、主滑落崖下のすべり面上に2～3段の階段状に見られる比高5～10mの小さな崖を滑落崖として発生した。

(5) 以上のイベントはごく短時間のうちに連続して発生した。

6. 3 結果

(1) 衛星画像判読により、車籠埔断層など、活断層と思われるリニアメントを抽出できた。地震断層の抽出はかなり困難であった。

(2) 衛星画像判読により、大規模崩壊、表層崩壊を明瞭に把握できた。

(3) 空中写真判読等により、草屯地区において、1/2.5万の縮尺の詳細活断層分布図を作成した。今回の地震断層は、既存の活断層上に生じ、変位の累積も見られる。

(4) 空中写真判読等により、草嶺の大規模崩壊地における崩壊前後の精密な地形分類図をそれぞれ作成し、崩壊発生時の時系列な段階に対応した地形変化の詳細を明らかにした。

7 まとめ

SPOT衛星の画像判読は、活断層分布や崩壊地形の把握には相当程度有効であるが、地震断層の抽出には、解像度が十分ではない。これは、IKONOS等の高解像度画像の利用により可能になると考えられる。今後、踏査が困難な人口が少ない地域や、政治経済的な理由により空中写真等の情報の入手が期待できない地域で、地震発生予測及び大地震発生に際して、これらの衛星データは、活断層分布の把握、地震による地形変化の把握等を行うための有効な手段になると考えられる。

台湾における空中写真の判読による詳細な活断層分布状況の把握は、日本同様長期的な地震発生予測に有効と考えられる。台湾では、活断層の平面位置を地形学的に明らかにする手法について、必ずしも十分に理解されていないとともに、活断層分布の詳細調査はほとんど行われていない。今回、空中写真判読による崩壊地形の判読と併せ、台湾の研究者の協力により研究を進めることで、ある程度の技術移転ができたと考えている。



図-16 草嶺南西の大規模崩壊（崩壊源頭部、左側稜線の右側延長部が失われたブロック）

引用文献

- [1] 宇根寛(2000)：衛星画像による台湾集集地震に伴う地形変化判読の検討，衛星リモートセンシング推進委員会，防災ワーキンググループ報告書，p6
- [2] 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Vol. 109, No. 5, 799-804
- [3] Ota, Y., Watanabe, M., Suzuki, Y., Sawa, H., Yanagida, M., Miyawaki, A. and Kim, H. Y. (2000) : Characteristics of earthquake fault associated with 9. 21 Chi-Chi earthquake, central Taiwan, especially on the relationship between earthquake fault and pre-existing Quaternary active fault. Proceedings of the HOKUDAN International Symposium and School on Active Faulting, 353-358.
- [4] 太田陽子・Hung, C. Y・渡辺満久・鈴木康弘・澤祥(2000)：台湾中部，921集集地震による地震断層の特性と変化の累積性，日本第4紀学会予稿集，30, 46-47
- [5] 台湾經濟部中央地質調査所：九二一地震地質調査報告，(1999. 11. 20)
- [6] 台湾經濟部中央地質調査所：九二一地震車籠埔断層沿線地表破裂位置図，(1999. 11. 20)
- [7] 台湾經濟部水利処：九二一震災草嶺崩壊地処理情形總報告，(1999)
- [8] 太田陽子・渡辺満久・鈴木康弘・澤祥（準備中）：1999年集集地震による地震断層と既存の活断層との関係（地学雑誌に投稿予定）