

◆ 土砂災害特集 ◆

衛星画像から見た 2001 年桃芝台風による台湾中部山岳地帯の
土砂移動現象発生状況

山越隆雄* 渡 正昭**

1. はじめに

2001 年 7 月 29～31 日にかけて台湾を通過した台風 0108 号 (台湾名：桃芝台風、以下、桃芝台風と呼ぶ) により、台湾中部山岳地帯では、土砂災害および水害が数多く発生した。同地域は、この 2 年前の 1999 年 9 月 21 日に、台湾南投縣集集を震源として発生した地震 (M7.3 (台湾中央気象局発表)、以下、集集地震と呼ぶ) によって斜面崩壊が多発した地域でもある。我が国は、台湾と同様に地震国であり、かつ、多雨地域に属している。したがって、今回の桃芝台風による災害の実態を調査することは、我が国における防災技術向上に資する知見を積み上げるためにも重要である。

日本国内で災害が発生した場合、通常は空中写真を用いた調査が行われる。しかし、海外で災害が発生した場合には、空中写真を利用することは難しい。国によっては、社会的、経済的な事情から空中写真どころか地図さえ入手できないこともある。このような場合、世界のどこの画像であっても入手が可能な衛星リモートセンシングデータを活用するのが有効であると考えられる。

そこで本報では、桃芝台風に伴う豪雨によって発生した斜面崩壊等土砂移動現象の概況を、衛星画像を用いて調査した結果について報告する。また、1996 年に台湾を襲い、中部山岳地帯に土砂災害をもたらした台風 9608 号 (台湾名：賀伯台風、以下、賀伯台風と呼ぶ) の際の土砂移動現象の概況についてもあわせて調査し、桃芝台風と比較した。

2. 桃芝台風とそれによる被害の概要

2001 年 7 月 29 日～31 日にかけて、台湾中部を

表-1 使用した衛星画像

衛星名	センサー名	撮像日	軌道番号/ シーン番号	観測角*	解像度	備考
TERRA	ASTER	2000/10/20	—	R 8.6°	15m	桃芝台風前
SPOT1	HRV	2001/9/14	298/303	R25.5°	20m	桃芝台風後
SPOT2	HRV	1996/6/5	299/302	R27.6°	20m	賀伯台風前
SPOT2	HRV	1996/8/18	299/302	L15.5°	20m	賀伯台風後

*：鉛直下方向とセンサーの向きの成す角度 (R：衛星の進行方向に対して右方向、衛星の進行方向は北から南へ)

通過した桃芝台風は、台風の進路に当たる台湾中部を中心に豪雨をもたらした。中川ほか (2001) によると、桃芝台風に伴う豪雨は、阿里山 (2,406m) 付近で最も多く、29 日～31 日の積算降水量は 758mm、特に 30 日の日雨量は 714.5mm であった¹⁾。

この降雨により、台湾中部を中心に土砂災害、水害が多発し、台湾全域の死者・行方不明者は 214 人に上った。そのうち、最も被害が集中したのは、台湾島のほぼ中心部に位置し、台湾最大の河川である濁水溪の流域を含む南投縣であり、死者・行方不明者は 119 人に上った。

3. 調査対象範囲の概要

桃芝台風に伴う土砂災害の多くが濁水溪の流域で発生した。濁水溪の支川のうち取分け被害が大きかったのが陳有蘭溪である (図-1)。陳有蘭溪は、流域面積約 440km²、流路延長 35km を有する河川である。流域内の地形は急峻で周囲には標高 3,000m 以上の山稜が連なり、平均河床勾配は 1/10 と急流である。遡ると、1996 年の賀伯台風で

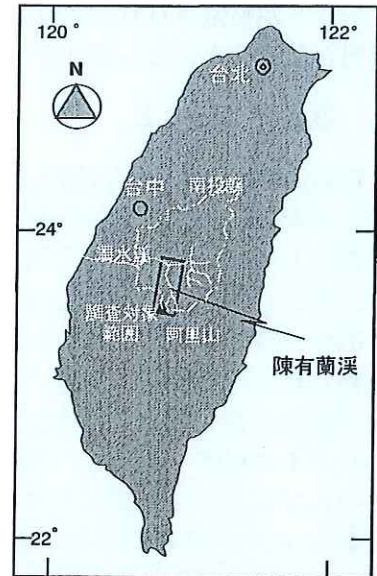


図-1 調査対象範囲位置図

も甚大な土砂災害に見舞われ²⁾、集集地震でも多数の山腹斜面の崩壊が発生した経緯がある^{3),4)}。

4. 調査方法

桃芝台風および賀伯台風による土砂移動現象の発生状況を調べるため、一般に入手可能な商用の地球観測衛星の画像を購入した。画像は、各台風について、その来襲前後のものを1式ずつ購入した。それらの諸元を表-1に示す。本来であれば、台風による地表面状態の変化のみを抽出するために、衛星画像を選ぶにあたって撮像時期がなるべく台風来襲日に近くなるように留意すべきである。また、比較を容易にするために、なるべく同一のセンサー、同様の観測角(センサーの撮像方向と鉛直下方向の成す角度)で撮像されたものを入手すべきである。しかし、台湾が亜熱帯性気候に属し、雲で覆われていることが多いため、表-1に示した画像以外に好適な画像を見つけることはできなかった。実際に入手した衛星画像を撮像した衛星センサーは、TERRA/ASTER センサーとSPOT/HRV センサーである。これらは、観測角が可変であるという特徴を有する。観測角が可変であると観測機会が増えるため、被雲率の少ない画像を得やすくなるが、その反面、得られる画像が、地形と衛星が観測する方向の幾何学的関係に応じて歪むことになる。標高が高い地点ほど、画像の外側に向かって倒れこんだように見える。この傾向は、観測方向が鉛直下方から離れるにしたがって顕著になる。

このような歪みは、観測対象範囲の地形情報が既知であれば取り除くことができるが、台湾では他国の人間は詳細な地形情報を入手することができない。そのため、表-1に示した画像について、衛星画像供給元で標準的に行われる補正(システム補正⁵⁾)以外に補正を行うことをせず、歪みの残ったままの画像を目視判読することによって調査を行った。したがって、以下では定量的な検討は行わず、相互の比較を通して、相対的な検討によって土砂移動現象発生状況を調査することとする。

5. 調査結果

5.1 桃芝台風による土砂移動現象発生状況

本報の調査対象である陳有蘭溪流域の桃芝台風前後の衛星画像(フォールスカラー画像)を写真-1に示す。この形式の画像では、植生によって強く反射される近赤外波長の輝度値をカラーの赤に割

り当てているため、植生の繁茂した範囲は赤く見える。一方、崩壊地や、土石流の流下および堆積域などの裸地は、植生が無くなっているため近赤外波長の反射が弱いため青白く見える。

台風前の2000年10月20日の画像と台風後の2001年9月14日の画像を比較すると、写真-1中に点線で示す範囲において、河床幅の拡大や新規斜面崩壊など大規模な土砂移動現象によるものと思われる痕跡が多数確認できた。すなわち、陳有蘭溪上流域西側周辺(写真-1の①で示す範囲)と、陳有蘭溪下流域や草棍溪流域周辺(写真-1の②、③で示す範囲)の大きく分けて二つの範囲に痕跡が集中しているように見える。

桃芝台風前後の画像を比較して土砂移動現象の発生が顕著な部分の拡大画像(写真-2: 陳有蘭溪左支川源頭部、写真-4: 陳有蘭溪下流部、写真-5: 草棍溪)を拡大して示し、それぞれの画像から読み取れる土砂移動現象発生状況を以下①~③の通りにまとめた。

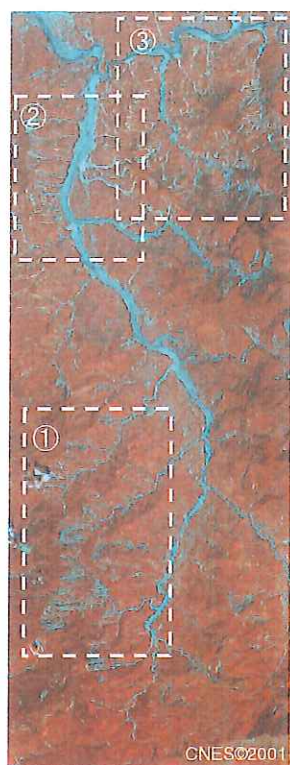
①陳有蘭溪上流域

もともとこのエリアでは、集集地震によって、ほとんどの溪流の源頭部に斜面崩壊が発生していた⁶⁾。したがって、台風前の画像にもほとんどの谷の源頭部に崩壊地と思われる裸地があることがわかる(写真-2)。衛星画像によって把握できる新規斜面崩壊は、植生で覆われていた斜面が崩壊によって裸地化する場合にほぼ限られるため、既存の崩壊地内でさらに斜面崩壊が起きる場合はその把握は難しい。

しかし、溪流筋の裸地が大きく拡幅しているように見える箇所が数多くある。たとえば、写真-2に示す陳有蘭溪左支川は、台風来襲前、溪流筋の裸地の幅、すなわち河道と思われる部分の幅が数ピクセル(1ピクセル=15m: TERRA/ASTER)程度であったのに対して、台風後の画像では、10ピクセル(1ピクセル=20m: SPOT/HRV)以上が裸地化していた箇所もあった。写真-3に、写真-2中で拡幅が著しい見られる部分の一例を拡大して示す。前述の通り、台風前後の画像として示す衛星画像は異なる観測角で撮像されたものであるため、両者を比較して大小を論ずる場合に注意を要する。ここでは、溪流をまたぐように2箇所線分a, bを引いた。これらは、それぞれの画像で、同じ地物であると思われるもの同士を結んだものであり、それぞれの線分の長さは両方の画像中で同じ距離を示していると見ることができる。これらの線分をスケールとして溪流筋の裸地部分の幅を

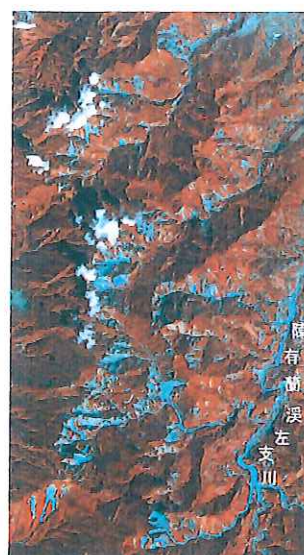


(a) 台 風 前 (TERRA/
ASTER, 2000/10/20)



(b) 台 風 後 (SPOT/HRV,
2001/9/14)

写真-1 桃芝台風前後の調査対象範囲 (陳有蘭河流域) の衛星画像



(a) 台 風 前 (2000/10/20)



(b) 台 風 後 (2001/9/14)

写真-2 陳有蘭溪上流域における土砂移動現象発生状況
(図示範囲は、写真-1 中に“①”として示す)



(a) 台 風 前 (2000/10/20)



(b) 台 風 後 (2001/9/14)

写真-4 陳有蘭溪下流域における土砂移動現象発生状況
(図示範囲は、写真-1 中に“②”として示す)

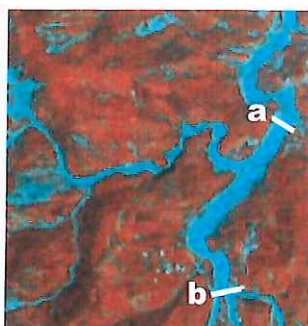
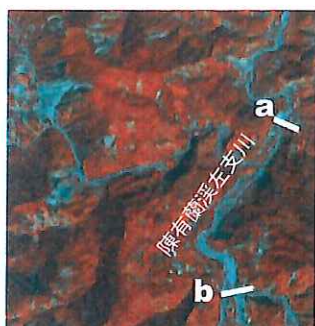


写真-3 陳有蘭溪上流域における土砂移動現象発生状況の
拡大図 (左：台風前、右：台風後)



(a) 台 風 前 (2000/10/20)



(b) 台 風 後 (2001/9/14)

写真-5 草棍溪における土砂移動現象発生状況 (図示範囲は、写真-1 中に“③”として示す)

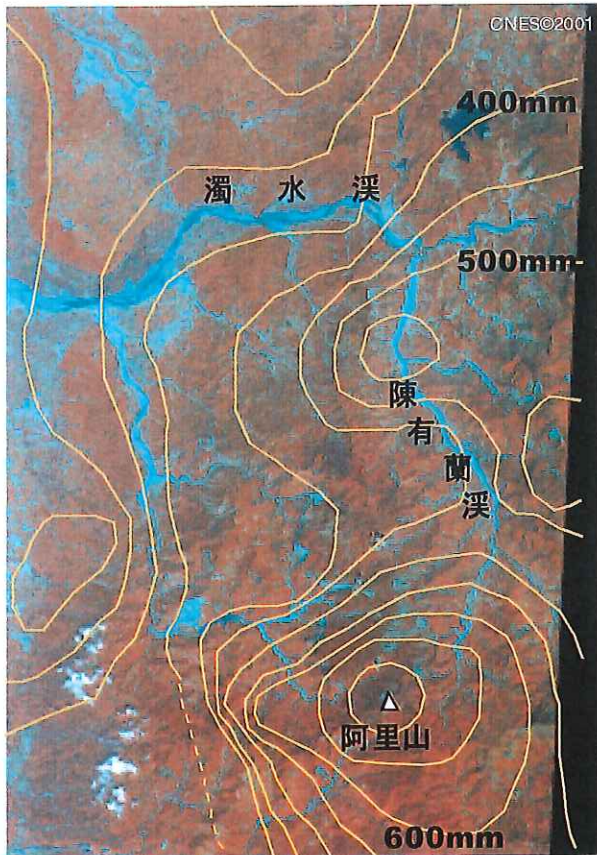


写真-6 桃芝台風後の SPOT 画像と中川ほか (2001) による 2001 年 7 月 29 日～31 日の間の総雨量

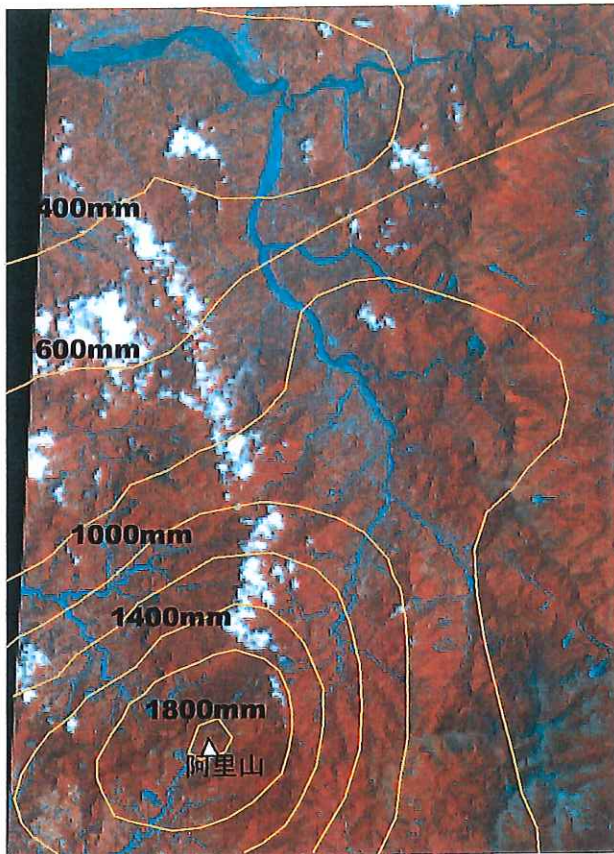
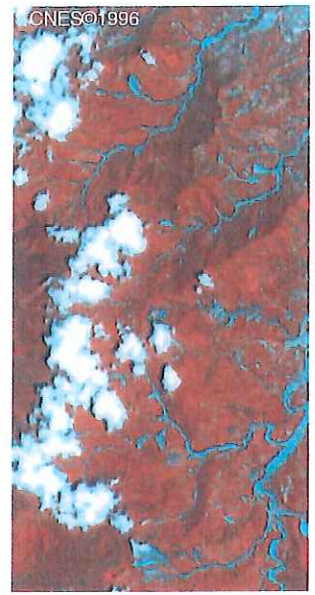
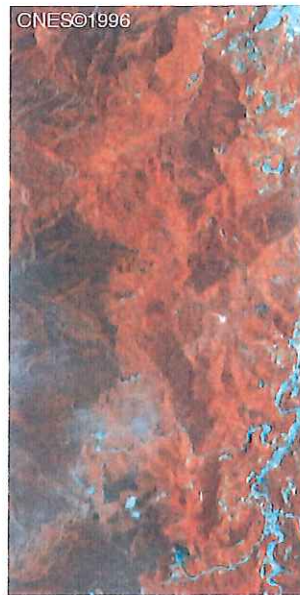


写真-7 賀伯台風後の SPOT 画像と 1996 年 7 月 30 日～8 月 2 日の間の総雨量⁸⁾



(a) 賀伯台風前 (1996/6/5) (b) 賀伯台風後 (1996/8/18)

写真-8 陳有蘭溪上流域における賀伯台風による土砂移動現象発生状況



(a) 賀伯台風前 (1996/6/5) (b) 賀伯台風後 (1996/8/18)

写真-9 陳有蘭溪下流域における賀伯台風による土砂移動現象発生状況

比較すると、明らかに台風後の方が拡幅していることがわかる。これは、土石流等が流下して元の河道よりも幅広く侵食したか、または、堆積して埋めてしまったかのどちらかであると推察される。

②陳有蘭溪下流部

桃芝台風前の画像を見ると、画像左端に上下に連なる山地の尾根部に崩壊地と思われる裸地部がすでに分布していた。Wang ほか (2000) によると、写真-4 に示す陳有蘭溪下流域の左岸側には、1999 年の集集地震によって数多くの斜面崩壊が発生したことが示されている⁷⁾。しかし、谷筋を大規模に土砂が流下したような痕跡は見当たらない。

しかし、台風後の画像によると、ほとんど全ての主たる谷筋が陳有蘭溪本川まで連なって明瞭に裸地化しており、台風に伴う豪雨によって土石流が発生し、流下したものと推察される。

③草棍溪

写真-5 (a) に示す桃芝台風前の衛星画像を見ると、この流域では、画像の右下部に見られるように最上流部に大きな崩壊地があるほかは、顕著な崩壊地は分布していなかった。しかし、桃芝台風後の画像では、新規崩壊地または土石流の流下・堆積域を示すと思われる青白い裸地部分が際立って増えていることがわかる。陳有蘭溪上流域および下流域では、集集地震によってすでに斜面崩壊が多く分布しており、桃芝台風に伴う豪雨時にはさらに土石流が発生したものと考えられた。しかし、草棍溪の流域では、桃芝台風によって、初めて崩壊した斜面が多く確認される点が前述の2つのエリアと異なる点である。今回、衛星画像判読によって調査した範囲の中では、最も地被状態の変貌が著しい溪流であった。

写真-6 として、桃芝台風による 2001 年 7 月 29 日～31 日の総雨量の等雨量線図¹⁾を衛星画像に重ね合わせたものを示す。この写真によると、阿里山を中心に降雨量が多かったことがわかる。また、阿里山周辺ほどではないが、陳有蘭溪の下流域にも総雨量 550mm 程度の降雨集中域がある。台風来襲前後の二枚の画像を目視で比較することにより抽出した土砂移動現象が顕著と思われる範囲(陳有蘭溪上流部、下流部および草棍溪流域)が、降雨集中域と概ね符合していることがわかる。このことより、衛星画像の目視判読結果がほぼ妥当であったことがわかる。すなわち、第一義的には、雨量の多いところで土砂移動現象がより発生しやすいと考えられるので、降雨の集中域と衛星画像から土砂移動現象が顕著と見られる範囲の一致は衛星画像判読結果の妥当性を支持していると言える。

5.2 賀伯台風による土砂移動現象発生状況との比較

検討の対象とした陳有蘭溪流域では、1996 年 7 月 30 日～8 月 2 日にかけて、台風 9608 号(台湾名、賀伯台風)によって記録的な豪雨があり、多くの土砂災害が発生した経緯がある。その際の降雨量は、連続雨量が 1,800mm を超え、世界的にも極めてまれな豪雨であった¹⁾。以下では、賀伯台風によって発生した土砂災害の状況を衛星画像によって把握し、桃芝・賀伯両台風による土砂移動現象発生状況を比較することによって、桃芝台風の二年前に発生した集集地震の影響の有無について検討する。

賀伯台風の際の等雨量線図を、賀伯台風後に

撮像された衛星画像と重ね合わせ、写真-7 に示す。桃芝台風と同様に、降雨の中心は阿里山にある。しかし、総雨量は桃芝台風の場合の 2 倍以上(1,800mm)である。一方、桃芝台風時には、550mm 程度の降雨を記録した陳有蘭溪下流域および草棍溪流域では、賀伯台風による降雨量は 400～600mm であった。そこで、賀伯台風前後の衛星画像から、写真-1 の①、②と同じ範囲について抜粋し、写真-8 および 9 として示す。

写真-8 は、写真-1 の①の範囲における賀伯台風前後の衛星画像である。この図によると、陳有蘭溪上流域では、陳有蘭溪の支川沿いに裸地を表す青白い領域が連なっており、土石流が発生、流下した跡であることが推察される。写真-2 と比較すると、発生した土砂移動現象は、桃芝台風の際のものとは比べて軽微であるようにも見える。しかし、桃芝台風後の画像(写真-2(b))に数多く見える崩壊地等は、ほとんどが集集地震によって発生したもので⁵⁾、台風前から存在したものである。そのため、崩壊面積という点から両者を比較することはできない。一方、河道の拡幅状況を比較することによって、陳有蘭溪上流域において発生した土砂移動現象の規模の大小を比べることは可能であると考え、河道幅の計測を行った。しかし、両者の間に有意な違いを見出すことはできなかった。

次に、写真-1 で②と示した範囲における賀伯台風前後の衛星画像を示す(写真-9)。この範囲では、陳有蘭溪の右岸側に土石流の流下したと思われる筋が見える(写真-9 中に矢印で示す)。左岸側には土砂移動現象の生じた様子は見当たらない。なお、写真-1 で③と示した草棍溪においても、賀伯台風前後の画像を比較したが、ほとんど土砂移動現象は発生していなかった。これらの地域では、総降雨量はそれほど違わないに関わらず、賀伯台風時と桃芝台風時で土砂移動現象の発生状況が著しく異なっているといえる。

この範囲も含めて、陳有蘭溪の流域では、1999 年の集集地震の際に斜面崩壊が数多く発生した⁶⁾。そのため、溪床に不安定土砂が堆積し、その後の降雨で土石流が発生し易くなるのではないかと懸念されていた³⁾。写真-4 および 9 を通じて確認された土砂移動現象の発生状況の違いは、この懸念を裏付けるものであると見ることもできる。すなわち、集集地震の影響を受け、その後の降雨によって土石流等の土砂移動現象が発生しやすくなっていたものと考えられる。この点については、

今後さらに多くの資料を収集して検討する必要がある。

6. まとめ

本報では、2001年7月30日から8月1日かけて、台湾中部山岳地帯に豪雨をもたらした桃芝台風による土砂移動現象発生状況を、衛星画像のみを利用して調査した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 衛星画像の目視判読の結果桃芝台風に伴う土砂移動現象が顕著と推定された範囲は、総雨量 550mm 以上の範囲と符合していた。
- (2) 桃芝台風時および賀伯台風時における土砂移動現象の発生状況を比較すると、陳有蘭溪下流域では、総雨量の点では同程度であったにも関わらず、桃芝台風時の方が土砂移動現象の発生が顕著であった。1999年の集集地震の影響により、土砂移動現象が発生しやすくなっていた可能性が示唆される。

本報で、衛星画像の目視判読のみから検討を加えた結果、桃芝台風によって台湾中部山岳地帯で発生した土砂移動現象の特徴がある程度明らかになった。今後は、ここで得た知見を基に、調査テーマおよび調査対象範囲を絞り、詳細な現地調査、または、台湾国内の研究者と共同研究を推進していきたい。また、今後、世界のどこかで大災害が発生した場合であっても、衛星画像の利用により、調査を有効に行うことができるようになるものと思われる。すなわち、本報で行ったような簡易な衛星画像の目視判読によって、現地調査を行うにあたっての調査地域・項目をある程度絞りこむことが可能になるものと思われる。

参考文献

- 1) 中川一、戸田圭一、牛山素行：2001年台風0108号「桃芝」による台湾での土砂災害，自然災害科学，Vol.20，No.3，p.353-360，2001.
- 2) 石川芳治、山田孝、黒川興及：台湾における1996年8月のハーブ台風による土石流災害，砂防学会誌，Vol.50，No.3，pp.70-73，1997.
- 3) 水山高久、土屋智、山田孝：台湾921集集大地震と斜面災害の概要（速報），砂防学会誌，Vol.52，No.5，pp.41-45，2000.
- 4) 山越隆雄、清水孝一、南哲行：衛星リモートセンシングを用いた1999年9月台湾中部地震による大規模斜面崩壊状況の調査，砂防学会誌，Vol.52，No.4，pp.73-74，1999.
- 5) 日本リモートセンシング研究会：リモートセンシングハンドブック，宇宙開発事業団，pp.101-102，1997.
- 6) 山越隆雄、南哲行、清水孝一：衛星リモートセンシングを利用した台湾中部地震による斜面崩壊状況調査，土木技術資料，Vol.41，No.11，pp.4-5，1999.
- 7) Wang, W. N., Nakamura, H., Kamai, T., and Lee, M. C.(2000) A Photogeologic Study on the Earthquake-induced Slope Failure in Central Taiwan on September 21.1999, Proc. Annual Meeting Landslide Soc. Japan, 2000.
- 8) 台湾省政府農林庁水土保持局・同林務局：85年賀伯台風傾斜地土砂災害の記録，1997.

山越隆雄*



独立行政法人土木研究所
土砂管理研究グループ
火山・土石流チーム研究員，農博
Dr.Takao YAMAGOSHI

渡 正昭**



同 火山・土石流チーム
上席研究員
Masaaki WATARI