



|                  |   |
|------------------|---|
| Title            | 地すべりの変動地形解析による地塊運動特性に関する基礎的研究   |
| Author(s)        | 佐々木, 一郎   |
| Citation         | 北海道大学 演習林研究報告, 59(1), 1-44  |
| Issue Date       | 2002-03   |
| Doc URL          | <a href="http://hdl.handle.net/2115/21475">http://hdl.handle.net/2115/21475</a> |
| Type             | bulletin (article)  |
| File Information | 59(1)_P1-44.pdf   |



[Instructions for use](#)

# 地すべりの変動地形解析による地塊運動特性に関する 基礎的研究

佐々木一郎<sup>1</sup>

Kinematic Study of Block Mass by Analysis on Landslide Relief  
by  
Ichiro SASAKI<sup>1</sup>

## 要 旨

近畿地方中山間地域の地塊型平面すべり地を研究対象とし、59ヶ所の地すべり事例から地塊運動特性を研究した。それらの地すべり変動地形解析では、各部位の変動地形を形成した運動要素によって類型化し、平面形態は側部の変形の組合せが引張・引張の平面形態Ⅰと、引張・剪断の平面形態Ⅱに分類し、平面形態Ⅰでは並進・平面的回転運動、平面形態Ⅱでは並進運動をとり、その地塊運動によって各部位にその変形に応じた変動地形が現れることを明らかにした。また、地質調査結果によるすべり面構造解析では、地すべりの運動主体である主地すべり地塊とこれを規定する主すべり面を抽出し、平面形態Ⅰでは底部すべり面が主となるすべり面構造Ⅰ、平面形態Ⅱでは底部すべり面と側部すべり面がクサビ構造をなすすべり面構造Ⅱをとることを明らかにした。さらに、現場観測データによる地塊運動の解析、すべり面構造モデルを用いた地塊運動の再現実験によって、地塊型地すべりの三次元運動機構とすべり面構造・地塊運動・変動地形の相互関係を明らかにした。

以上の結果をもとに、地塊型地すべりの対策手法を提言した。

キーワード：地すべり変動地形，地すべり平面形態，地塊地すべり，平面的回転運動，三次元運動機構

---

2001年8月31日受理, Received August 31, 2001.

1：北海道大学大学院農学研究科環境資源学専攻森林管理保全学講座，札幌市北区北9西9，060-8589

Research Group of Forest Management and Conservation, Division of Environmental Resources, Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Kita 9 Nishi 9 Kita-ku, Sapporo, 060-8589

## 目 次

## 緒 言

## I. 研究方法

1. 地すべり地形と運動に関する研究史と課題設定
2. 研究方法

## II. 地すべり地の平面形態

1. 地塊型地すべり地の変動地形の実態
2. 地すべり変動地形の分類
3. 平面形態からみた地すべり地塊の運動様式

## III. すべり面三次元構造

1. 地すべり地塊構造
2. すべり面三次元構造モデル

## IV. 現場観測データによる運動様式の検証

1. 移動杭と孔内傾斜計観測結果による運動実態
2. 各種計測結果による運動実態

## V. 平面形態・すべり面構造の分布実態からみたそれらの分類と相互関係の検証

1. 平面形態分類の妥当性の検証
2. すべり面構造と平面形態の対応関係の検証
3. 平面形態分類と様々な地すべり変動実態

## VI. 地すべり三次元運動機構

1. すべり面構造による地塊運動の規定
2. モデルを用いた地塊運動様式の再現
3. 三次元運動機構

## VII. 地すべり対策への提言

1. 地すべり調査方法についての提言
2. 地すべり対策方法についての提言

## 摘 要

## 引 用 文 献

## 緒 言

日本の総農地面積の約四割にあたる中山間地域には、地すべり地帯が多く存在している。これらの地域は農林業生産の場であり、近年生産性の向上を図るための水田区画整理や農道・林道建設等の基盤整備が進められるようになった。これらは大規模な地形改変を伴うものであり、地すべり運動特性を考慮に入れた土地利用・地形改変手法の開発が求められている。地すべり現象は一般に地質的素因の有する個所に発生しその移動痕跡が地形として残り、局所的な徴候として現れる初期段階から序々に進行する運動形態をとるものである。地形から運動を抽出することや、地すべり動態観測等による徴候段階での運動把握が、今後の運動予想の重要な情報であり検討要素となる。

しかし、変動地形がどのような地すべり運動によって形成されたかについての研究は、左右側部を含む平面的形態およびその三次元的運動に関して確立した理論はなく、地すべりの地形・運動情報が的確に収集・整理されてこなかった。例えば、地すべり地のある地点間で移動期間・移動方向・移動量が異なる場合、それらが一つのブロックの運動徴候を示すものなのか、異なるブロックの運動を示すものなのかという問題にしばしば現場で遭遇し、地すべり機構把握と予知・対策において重要な実践的問題を提起することがあった

が、これを判定する明確な理論がなかった。

地すべり現象は三次元空間において時間的経過を経て現れるものである。重要なのはその運動特性の時間・空間的把握である。本研究は、多様な運動物質や運動様式をもつ地すべり現象のなかでも、その典型と考えられる地塊型平面地すべりについて、近畿地方中山間地域の災害に直結した地すべり現象を研究対象とし、どのようなすべり面の場合にどのように運動して地すべり変動地形を形成したかという地すべり三次元運動特性を解明することを目的としたものである。

本研究に際して、御指導を賜った北海道大学大学院新谷融氏、同中村太士氏、山田孝氏、笹賀一郎氏、清水収氏、菊池俊一氏、並びに同農学研究科環境資源学ゼミにおいて有益な意見を頂いた大学院生・学生諸氏、貴重な御意見を頂いた森林空間研究所東三郎氏、現地資料提供に協力頂いた元兵庫県農林水産部安部優吉氏、同社土地改良事務所越智実鶴氏、島根県隠岐支庁農林部、(株)日本海開発コンサルタント浜崎晃氏、日本基礎技術(株)木村耕治氏、永美章氏、藤井誠人氏、現地調査ならびに資料提供について御協力を頂いた農林水産省近畿農政局、京都府農林水産部、兵庫県農林水産部、和歌山県農林水産部・土木部の関係各位に深く感謝する。

なお、本論文は北海道大学大学院学位審査論文である。

## I. 研究方法

### 1. 地すべり地形と運動に関する研究史と課題設定

#### 1.1 地すべりの地形分類と運動機構

斜面変動の一つの運動様式である地すべりは、頭部の滑落崖や末端部の隆起等に特徴付けられる特有の地すべり地形として現れる。地すべり研究においても、地すべり地形が、初期段階に取り上げられた(中村 1934)。

地すべり地形やそれを形成した運動は様々であり、地すべりの分類としては、地すべりが現れる特有の地質に注目した分類(中村 1955, 小出 1955)、運動形態による分類(高野 1960, 谷口 1963)、運動形式と物質のタイプを組み合わせた分類(Varnes 1958, 1978)、地すべりの発達段階を考慮した分類(山田ほか 1971)等がある。本論では、運動形態による分類である高野(高野 1960)の区分をもとに、地すべり運動の典型として、すべり面に沿って地すべり地塊があまり乱されことなく移動するものを「地塊型地すべり」と呼んだ。

地すべり運動様式の共通した特徴は、移動した土塊が斜面にそのまま残っており、それが再び移動すると云う点である。これによって、地すべりでは地すべり地形と地すべり運動との相互関係が認められ、地すべり地形が斜面上の土塊のどのような運動によって生じるかについて、例えば回転すべり・平面すべり等のいわゆる古典的地すべりモデルが示された(Varnes 1958/1978, 谷口 1963, 藤原 1979)。

地すべり地形という場合、一般には地すべり地形モデル等に示される地すべり運動を現す地形をいう場合と、二万五千分の一程度の地形図からも読み取れるもう少し大きな地形規模の等高線の不規則等(高野 1960等)の特徴をいう場合がある。これらは、前者が地すべり運動直後であって、後者は一定程度の経過を経た後といった、時間スケールの差に対応する違いでもある。したがって、前者は特に後者と区別するために、地形変化(高野 1960)、地すべり微地形(木全・宮城 1985等)、徴候(渡・酒井 1975等)、地すべり構造(大八木 1992)と呼ばれた。本論では、地すべり変動(藤田 1990)を示す地形であるので、「地すべり変動地形」と呼ぶことにした。変動地形は、一般には地殻変動によってできた地形をいう(貝塚 1977)が、地表変動(東 1979)を明確にするために地すべり変動にも適用したい。

地すべりの運動の典型は、移動土塊が原形を比較的良好に保ったまま移動することである。これは特別な面をすべり面として剪断破壊をする特性のためであり(山田ほか 1971)、したがって、すべり面を生成しやすい特定の地質または地質構造のところが地すべり地となりやすい。

地すべり運動の主体である地すべり地塊は、岩盤地すべりのような典型的なものは、すべり面上の剛体に近いもの考えることができ、その運動は一般に平面状すべり面では並進運動、曲面状すべり面では回転運動と考えられている(Varnes 1958/1978, 谷口 1963, 藤原 1979)。

その他、東(1979等)は、植生が地表変動に反映されることを明らかにし、これから山腹における単純なすべり面との関係で論じることができないクリープ的現象の実態を明らかにした。

地すべり運動を検討するには色々な運動様式を考慮しなければならないが、地すべり機構の典型としては、すべり面で剪断破壊し地塊がほぼ原形をたもって移動する地塊型地すべりがあげられる。

#### 1.2 地すべり地形と運動に関する課題

地すべり災害直後のやや発達した段階の典型的な地すべりを特にその側部に注目して観察すると、以上のこれまでの地すべり地形と地すべり運動の相互関係に関する研究では説明できない、つぎのような地すべり地塊の非対称形態とされる現象(佐々木 1987)が多く認められる。

- ・側部の一方が滑落崖となり、他方が陥没帯となる。
- ・頭部滑落崖が両側部に連続するが、末端部で一方が開口状の陥没帯で、他方が閉塞状となる。
- ・側部の一方が押し出し傾向の雁行状亀裂で、他方が沈下だけの陥没帯となる。
- ・末端部で側部の一方のみに押し出しが現れる。

これらの左右非対称的な形状に関しては、地すべりの側面キレツにクローズドクラックとオープンクラックがあることを、渡・酒井(1975)や藤原(1979)が取り上げた。クローズドクラックは圧縮されつつ横に剪断されたもの、オープンクラックは引張られつつ剪断されたものと考えられ、渡・酒井はこれら二つの組合せを取り上げ、クローズドクラック側のすべり面の位置がオープンクラック側より深いことを示唆した。また藤原は、平面形状との関連や側部と頭部とのつながりについて言及したが、これらが左右で異なる組合

せには言及しなかった。

藤田 (1984) は、崖崩れや盛土斜面のすべり面形状がスプーン状を呈するのに対して、地すべりのすべり面は平面状を呈してその面がどちらかに偏している場合が多く、運動方向は多くの場合いずれか一方の側面部とほぼ並行であること、そしてこれは土塊内の応力がいずれか一方に偏している証拠であると指摘した。

これらは、Varnes (1958/1978) の地すべりモデルに対して、地すべりの具体的な実態を捉え、それを説明しようとしたものである。しかし、クローズドクラック側が必ずしも横断的にすべり面の深くなった部分ではないこと、両側部がオープンクラックの場合もあること、また、この場合末端での閉塞をクローズドクラックと考えるかどうか等のように、これまでの考えでは説明できない現象が多くみられる。これは、地形とすべり面構造と運動との関係が明らかにされていないためであり、その解釈によっては地すべり機構および対策工の考え方が異なったものとなる。

地すべり運動と地すべり地形の関係を明らかにするには、地すべり地形を総合的・包括的にそれを形成した地すべり運動との関係で分析し、その運動を地すべり地塊及び基盤地質の三次元構造 (藤田 1984, 大八木 1992, 佐々木・新谷 1998, 日本地質学会地質基準委員会 2000) をもとに検討しなければならない。

地すべり現象を地下構造との関係で論じたものには、地すべり地形の特徴を岩盤形態や土層形態との関係で論じたもの (佐々木 1974, 猿田 1976), 側部の断層沿いに側面が形成され、運動方向はこれに平行し、すべり面の等高線に直角方向ではないことを指摘したもの (大八木ほか 1970, 藤田 1984) がある。また申 (1995) は、移動方向とすべり面の最大傾斜方向が一致するとは限らないとしたが、その機構には言及しなかった。高野 (1983) は、ジグザグ的な移動を示す場合、すべり面が何枚かあってそれぞれ傾斜が異なることに原因すること、また一つの平面すべり面上の地塊でも、その移動方向が異なることがあることを指摘した。平面すべり面上の土塊は、重力作用だけでは、すべり方向はすべり面最大傾斜方向となる (Goodman 1992) が、そうでないときは、藤田や高野のような機構や地下水の作用あるいは他の運動様式等を考える必要がある。

本論は、この地すべり変動地形と地すべり運動との関係を検討することを研究課題とした。

## 2. 研究方法

### 2.1 研究目的

地すべり予知・対策の基礎となるのは地すべりの運動の解明であるが、前節 1.2 で述べたような、これまでの地すべりモデルでは解釈につかない地すべり地形の左右非対称性の問題がある。また、その他進捗しつつある地すべり徴候から地すべり運動をとらえようとするとき、つぎのような問題があげられる。

- 地すべり初期段階の徴候として現れる地すべり変動地形と地すべり地塊運動全体との関係
- 地すべり地塊全体の運動とその一部の局所運動の判別
- すべり面最大傾斜方向と移動方向の偏差
- 移動方向・移動量がことなる同一平面すべり面上の地塊の運動像

これらの問題に関してはこれまで明確に捉えられていなかったもので、例えば初期徴候から地すべり運動をとらえ緊急的な地すべり対策を計画・実施するにあたって、その対象を過小評価してしまう危険性が考えられる。

これらの問題が想起されるのは、これまでのモデルが地すべり運動を運動方向に並行な縦断面上で考えられている二次元的なモデルであるためである。すなわち、三次元的な地すべり運動モデルは確立途上であり、この三次元運動機構解明の遅れは、調査技術による地すべり地塊・基盤地質の三次元構造把握や計測技術による三次元的地すべり運動把握が困難であるとともに、解析技術における三次元的運動実態の二次元解析への投影手法の遅れ等をもたらししている。

これらの問題点は多くが地塊型平面すべりであり、その解明のためには、移動の単元としての地すべり地塊とその移動状況を明らかにし、地すべり変動地形を地すべり運動の結果として組み立て、地すべりの運動実態とその発生機構を反映した地すべり三次元運動モデルの構築が求められる。平面すべりの地すべり地塊運動様式は、これまで並進的な運動であることが前提とされていたが、それには平面的な回転運動を伴うこと、そして、並進運動が主体であるものと、並進とともに平面的回転運動をとるものがあること、そして、これらの違いはすべり面の構造によるものであること等を把握する必要がある。本研究は、斜面の動的実態に即した対策工法・土地利用方法のために、地すべり地塊の三次元運動機構を解明し、地すべり変動地形・すべり面構造・地すべり地塊運動の相互関係を明らか

にしたすべり三次元運動モデルを構築することを目的とする。

## 2.2 地塊型地すべり地の特徴

地すべり現象は様々な移動物質や運動様式をもつが、地すべり運動形態の研究に当たっては、地すべり地で起きている普遍的と考えられる地塊移動現象を取り上げ、これを質的に同一とみなせるものに分類し、その中で普遍的運動形態を示す運動様式を対象としなければならない。そのためまず、本研究では、地塊型地すべりを主研究対象とした。地塊型地すべりとは、地すべり地塊がほぼ原形を保ちながらすべり面上を移動するもので、すべり面の規定を受けないクリープ運動と比べて大規模な災害をもたらすものである。その主な意義はつぎのとおりである。

- 地すべり運動様式には地塊・崩壊・粘稠・流動型等があるが、その「典型」は地すべり地塊が下部の

すべり面によって移動する地塊型である。

- 地すべり「運動の初期段階」においては、地すべり地塊はほぼ原型を保って移動するが、他の様式は地塊部分がさらに破壊・崩壊し、流動化したものと考えられる。
- 地すべりの進行に伴って、地すべり地塊の頭部で陥没し末端で隆起する等の変形が著しくなり、これらが崩壊・流動に転化していくが、その「運動主体」はすべり面上をほぼ原型を保って移動する主地すべり地塊であり、頭部や末端の変形・破壊を経た地塊は、主地すべり地塊の運動によって形成された派生地塊である。
- 主地すべり地塊は、まとまった地塊として移動するもので、地すべり運動の一つの「単位」となっている。
- 地すべりは、初生的なすべりに多い岩盤すべりに近いものから、初生すべりがさらに再発するもの、

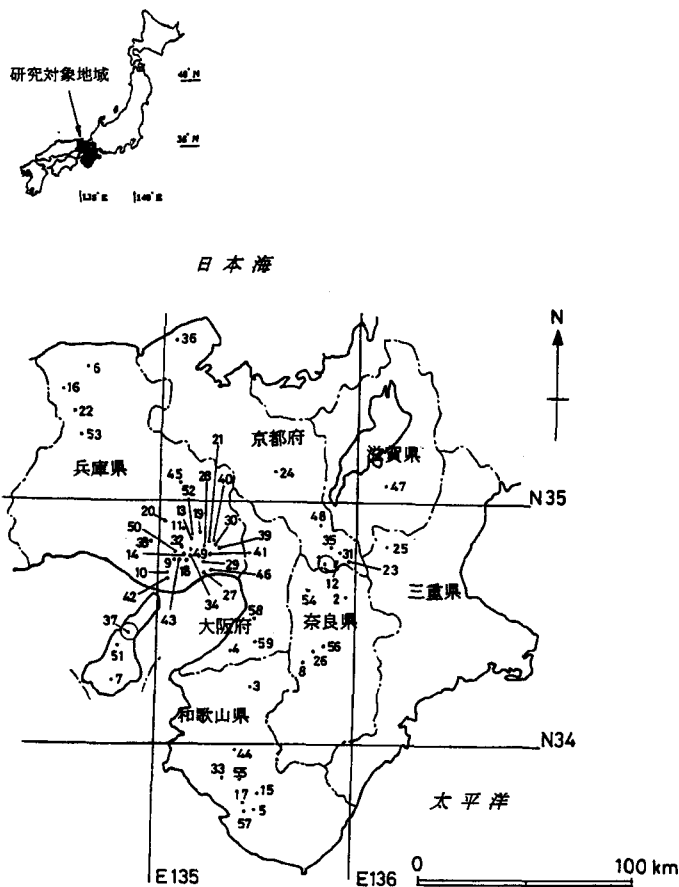


図-1-1 研究対象地域と調査地すべり地(○は典型地すべり地)

および、その一部が二次的にすべる崩積土地すべり等の各発達段階にわかれ、その地すべり地塊を構成するものも発達段階に応じて岩盤から崩積土に地質構成が変化していくが、各段階の地質構成で地塊型が現れる。

これまで一般に粘稠型地すべりが普通の地すべり（高野 1960等）と捉えられる傾向にあったが、地すべり発生後大規模な崩壊や流動化に至るまでの段階においては、平面すべり面に沿う運動様式をとる地塊型地すべりが一般的であると考え、地塊型平面すべりを地すべり予知・対策の基本となる研究対象であると位置づけた。

### 2.3 研究対象地域

地すべり地塊の運動と地すべり変動地形との関係をみるために、一つの原形を保った地すべり地塊がある一つの平面すべり面上を移動するような地塊型平面すべりを研究対象とするが、研究地域としては、地塊型地すべり分布が多く、その災害直後の野外情報が得やすい近畿地方を主な対象地域とし、災害に直結した地すべり地59箇所を調査地として抽出した。これらは少なくとも災害として認識されたものであって、災害時調査によってその地すべり直後の変動地形が残存していた地塊型地すべり地と考えられる個所である。その中には、短期間に運動し、変動地形が地表に明確にほぼ連続して現れた発達した段階に達しており、運動履歴が地表形状から推定しやすい地すべり地があった。これらの中から、本研究で地塊型平面すべりの二つの類型を示すと考えた黒谷地すべり地・狸谷地すべり地の2ヶ所を典型地すべり地とし、変動地形とすべり面構造分析の対象とした（図-I-1、

表-I-1 研究対象地すべり地一覧  
(佐々木・新谷 2000aより)

| No. | 地名   | 府県  | 地質系統 | 幅*長さ<br>m*m | 災害年  | 備考       |
|-----|------|-----|------|-------------|------|----------|
| 1   | 狸谷   | 京都  | 更新統  | 30*70       | 1983 |          |
| 2   | 吐山   | 奈良  | 新第三系 | 30*35       | 91   |          |
| 3   | 馬場   | 和歌山 | 中生界  | 10*13       | 82   |          |
| 4   | 櫻井川  | 大阪  | 更新統  | 130*190     | 84   |          |
| 5   | 舟ン谷  | 和歌山 | 新第三系 | 180*180     | 74   |          |
| 6   | 香住   | 兵庫  | 新第三系 | 85*100      | 73   | 初期発生は'71 |
| 7   | 成相   | 兵庫  | 白亜系  | 50*50       | 93   |          |
| 8   | 西吉野  | 奈良  | 中生界  | 70*50       | 90   |          |
| 9   | 瑞穂   | 兵庫  | 新第三系 | 30*40       | 89   |          |
| 10  | 戸田朽  | 兵庫  | 新第三系 | 20*50       | 83   |          |
| 11  | 東条   | 兵庫  | 新第三系 | 65*60       | 86   |          |
| 12  | 小谷   | 京都  | 更新統  | 35*8        | 86   |          |
| 13  | 毘沙門  | 兵庫  | 新第三系 | 50*65       | 89   |          |
| 14  | 米田   | 兵庫  | 新第三系 | 25*25       | 91   |          |
| 15  | 上野   | 和歌山 | 新第三系 | 130*250     | 82   |          |
| 16  | 中辻   | 兵庫  | 新第三系 | 55*110      | 89   |          |
| 17  | 岡    | 和歌山 | 新第三系 | 20*20       | 86   |          |
| 18  | 北僧尾  | 兵庫  | 新第三系 | 70*60       | 74   |          |
| 19  | 長尾   | 兵庫  | 新第三系 | 25*25       | 76   |          |
| 20  | 社    | 兵庫  | 新第三系 | 25*25       | 84   |          |
| 21  | 東田   | 兵庫  | 新第三系 | 45*25       | 89   |          |
| 22  | 口大谷  | 兵庫  | 新第三系 | 60*60       | 93   |          |
| 23  | 加茂   | 京都  | 中生界  | 60*100      | 86   |          |
| 24  | 京北   | 京都  | 中生界  | 100*100     | 85   | 初期発生は'39 |
| 25  | 上野   | 三重  | 更新統  | 70*25       | 93   |          |
| 26  | 滝    | 奈良  | 中生界  | 90*35       | 90   |          |
| 27  | 住吉   | 兵庫  | 白亜系  | 130*30      | 95   |          |
| 28  | 東田   | 兵庫  | 新第三系 | 85*90       | 85   |          |
| 29  | 北畑   | 兵庫  | 新第三系 | 60*300      | 87   |          |
| 30  | 東田   | 兵庫  | 新第三系 | 170*80      | 82   | 初期発生は'60 |
| 31  | 園    | 京都  | 更新統  | 150*50      | 80   |          |
| 32  | 東    | 兵庫  | 新第三系 | 90*50       | 91   |          |
| 33  | 東本庄  | 和歌山 | 古第三系 | 35*25       | 89   |          |
| 34  | 吉川   | 兵庫  | 新第三系 | 25*16       | 89   |          |
| 35  | 里西   | 京都  | 更新統  | 45*80       | 84   |          |
| 36  | 徳光   | 京都  | 新第三系 | 90*150      | 81   |          |
| 37  | 黒谷   | 兵庫  | 更新統  | 95*70       | 74   |          |
| 38  | 船木   | 兵庫  | 新第三系 | 200*140     | 94   | 調査は'99   |
| 39  | 大沢   | 兵庫  | 新第三系 | 80*70       | 75   |          |
| 40  | 東田   | 兵庫  | 新第三系 | 60*25       | 91   |          |
| 41  | 豊岡   | 兵庫  | 新第三系 | 110*180     | 73   |          |
| 42  | 戸田峠  | 兵庫  | 新第三系 | 20*70       | 83   |          |
| 43  | 奥谷   | 兵庫  | 新第三系 | 25*30       | 91   |          |
| 44  | 初湯川  | 和歌山 | 中生界  | 70*100      | 85   |          |
| 45  | 川代   | 兵庫  | 中生界  | 5*10        | 85   |          |
| 46  | 鴨子ヶ原 | 兵庫  | 更新統  | 140*200     | 95   |          |
| 47  | 日野   | 滋賀  | 中生界  | 110*40      | 91   |          |
| 48  | 宇治田原 | 京都  | 中生界  | 40*40       | 90   |          |
| 49  | 金会   | 兵庫  | 新第三系 | 30*45       | 79   |          |
| 50  | 大島   | 兵庫  | 新第三系 | 50*35       | 88   |          |
| 51  | 中邑   | 兵庫  | 更新統  | 60*15       | 74   |          |
| 52  | 毘沙門  | 兵庫  | 新第三系 | 45*35       | 82   |          |
| 53  | 明延   | 兵庫  | 中生界  | 40*25       | 92   |          |
| 54  | 生駒   | 奈良  | 中生界  | 25*25       | 91   |          |
| 55  | 洞    | 和歌山 | 古第三系 | 65*70       | 85   |          |
| 56  | 平沼田  | 奈良  | 中生界  | 65*30       | 83   |          |
| 57  | 櫻の木  | 和歌山 | 新第三系 | 30*5        | 86   |          |
| 58  | 堺    | 大阪  | 更新統  | 30*15       | 91   |          |
| 59  | 滝畑   | 大阪  | 中生界  | 30*10       | 83   |          |

\*これらのうちNo.1, 37が典型地すべり事例

表-I-1)。

地質構成を古第三紀までの基盤岩と新第三紀以降の被覆層に分けると、近畿地方を含む西南日本は、基盤岩が広く地表に露出しており、東北日本と好対照をなす。これは、東北日本では新第三紀以降活発な火山活動があったのに対し、西南日本ではこれが少ないことによる。また、近畿地方は、その地形は緩やかなうねり構造をしており、活断層沿いの断層崖を除くと比較的起伏量が少ない(藤田1985)。このため、今回の研究対象とする地塊型の地すべりが現れやすいといえる。

各地すべり地の主な災害発生年は1973年から1995年、地すべり地の地質は中生代から第四紀に及び、その規模は10m×100mから200m×200mまでであった。

### 2.4 研究方法

研究は、まず典型地すべり地を対象として、変動地形をモデル化し、平面形態分類を行い、変動地形を形成した運動様式について仮説を提示し、形態分類の妥当性を検証する地すべり地形研究を行った。つぎに、同じ典型地すべり地において、運動主体である地すべり地塊構造および運動を規定するすべり面構造を考察し、平面形態とすべり面構造の関係について仮説を提示し、これを検証するすべり面構造研究を行った。これらの典型地すべり地においては、現場計測データは得られていないので、同様な平面形態・すべり面構造を有する現場計測データをもとに運動実態を取り出し、変動地形から類推した運動様式の仮説を検証する運動実態研究を行った。

以上の研究結果を総括し、どのようなすべり面構造のときに・どのように地塊が運動し・どのような変動地形が形成されるかという地すべり三次元運動機構解明と、地すべり変動地形・すべり面構造・地すべり運動の相互関係モデル構築を試み、今後の地すべり対策への適用について提言した。

## II. 地すべり地の平面形態

### 1. 地塊型地すべり地の変動地形の実態

#### 1.1 典型地すべり地の変動地形調査結果

平面すべりの地塊型地すべりの典型事例として、一日で6~7m移動して終息した黒谷地すべり地・狸谷地すべり地2ヶ所をまず取り上げ、その地すべり変動地形の特徴を調査した。その結果を表-II-1と図-II-1, II-2に示した。

なお、変動地形を示す用語はつぎのように定義した。

- 滑落崖：移動地塊が末端部方向へ移動し、落差を伴う亀裂となり、地表に滑落面が露出したもの。
- 陥没帯：滑落崖と平行に移動地塊が陥没し、向き合った一対の滑落面が帯状につづくもの。
- 亀裂：滑落崖のように落差を伴わないもの。
- 滑落崖(閉塞)：滑落崖の下の滑落面に移動地塊が接しているもの(クローズドクラック)。開口幅は、1mm未満とした。
- 滑落崖(開口)：滑落崖の下の滑落面と移動地塊の間が開いているもの(オープンドクラック)。開口幅は、1mm以上とした。
- 側部：変動地形形成方向が、移動方向に対して平行から45°の開きのものまでとした(瀬野 1995の横ずれ断層の定義を参照)。
- 横ズレ：側部滑落崖に向かって横方向(すなわち移動方向)にズレが大きく認められるものは大。その大きさは、移動量とほぼ同程度である(ズレがほとんど認められないものは小)。単一の面でのズレではなくあるゾーンで横ズレが認められる場合や、左右側部の移動量の差として確認される場合がある。

表-II-1 地すべり変動地形典型事例調査結果(佐々木・新谷 2000cより)

| No. | 地 府 名 県 | 地質系統 | 幅*長さ<br>m*m | 年 区<br>代 分 | 変動地形      |          |        | 移動量(m) |    |     |     | 移動期間<br>(day) | 移動速度<br>(m/day) | 運動様式  | 分類 |
|-----|---------|------|-------------|------------|-----------|----------|--------|--------|----|-----|-----|---------------|-----------------|-------|----|
|     |         |      |             |            | 頭部        | 右側部      | 左側部    | 末端部    | 頭部 | 右側部 | 左側部 |               |                 |       |    |
| 37  | 黒 兵 谷 庫 | 更新統  | 95*70       | 74 初 生     | 陥没帯陥没帯    | α 横ズレ陥没帯 | at 隆起  | 7      | 3  | 7   | 7   | 1             | 7.0             | 並進・回転 | I  |
| 1   | 狸 京 谷 都 | 更新統  | 30*70       | 83 二 次     | 滑落崖横ズレ滑落崖 | β 横ズレ滑落崖 | at 押し出 | 6      | 6  | 6   | 10  | 1             | 6.0             | 並進    | II |

\* α : 引張変形、at : 引張変形(横ズレ大)、β : 剪断変形、γ : 圧縮変形

\* 移動速度 = 側部最大移動量 ÷ 移動期間



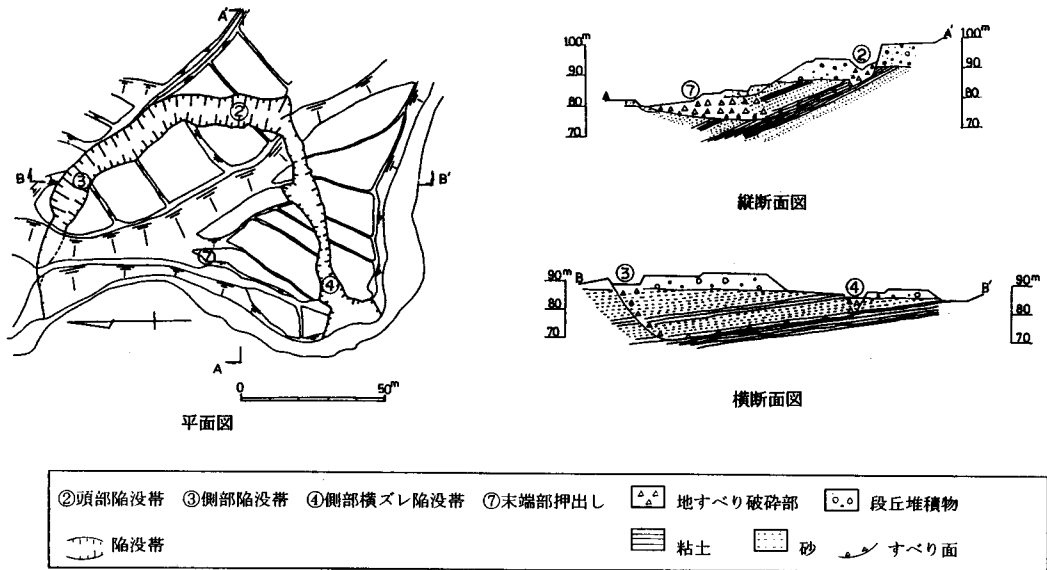


図- II - 1 黒谷地すべり地質調査結果

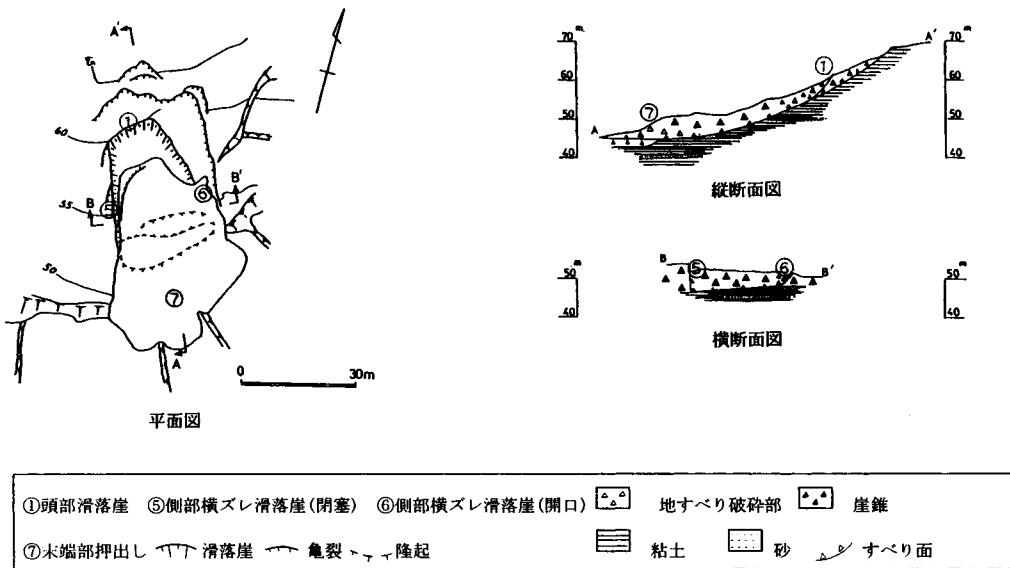


図- II - 2 狸谷地すべり地質調査結果

(1) 黒谷地すべり地

[変動地形]

頭部は陥没帯を伴う滑落崖である。右側部は頭部と連続する陥没帯であるが、末端付近では閉塞している。左側部も頭部と連続する陥没帯であるが、横ズレ

大の陥没帯となり、末端部まで開口している。末端部は、左側で隆起を伴う山側への回転と押し出しが顕著で、右側で押し出し兆候と斜面崩壊が認められた。

[移動状況]

頭部が7 m、右側部が3 m、左側部が7 m、末端

部は左側で7mである。左右側部では左側部の移動量が大きい。豪雨を契機に移動を開始し、約1日でこのような形状となった。

## (2) 狸谷地すべり地

### [変動地形]

頭部は滑落崖でその下部が陥没帯状になっている。右側部は移動方向に並行な横ズレ滑落崖、左側部は末広りの横ズレ滑落崖、末端部が流動を伴う押出しである。

### [移動状況]

頭部・左右側部の移動量はほぼ同程度の約6mである。末端部は流動的な移動を示し、移動量がより大きくなっている。長雨の後に移動を開始し、約1日でこのような形状となった。

## 2. 地すべり変動地形の分類

### 2.1 地すべり変動地形を形成する地塊変形

地すべり変動地形は地すべり地塊運動によって形成される。地すべり地塊およびその周辺地盤は、地すべり運動によって変形をうける。変形は一般に、応力・歪の変形の程度によって弾性もしくは弾塑性変形から降伏、破壊にいたる(太田 1989)が、地すべり変動地形は、変形の種類と程度によって、様々な形態をとると考えられる。変動地形と地塊運動の関係を検討するときは、様々な地すべり変動地形を類型化してとらえることでその単純な関係に還元できる。

平面上の地すべり地塊の運動によって、その周囲にどのような変形が生じるかを考察する。物体は外力によってその内部に応力を誘起すると同時に、変形し歪を生じる。応力とこれに対応した歪の種類には、引張・圧縮・剪断がある(秋田大学鉱山学部編 1979)が、地すべり地塊の運動に対しては、模式的につきのような変形を考えることができる。

- ・運動方向の反対側方向に直行する面：引張変形
- ・運動方向と平行方向の面：剪断変形
- ・運動方向に直行する面：圧縮変形

また、地すべり地塊各部位において、これらの変形によってどのような変動地形が現れるかを模式的に示した(図-II-3)。

### [頭部]

運動方向の反対側方向に直行する面であるので、引張変形を受ける。引張変形に伴う破壊性状は、引張方向と直行方向の分離破壊あるいは引張方向に対して

$45 + \phi/2$ の角度の剪断破壊(主動破壊)となる。初期徴候は開口状の亀裂となるが、岩盤のように分離破壊面が自立する場合は裂かが形成され、自立しない場合は剪断破壊(主動破壊)し、陥没帯(写真-II-1)もしくは滑落崖が形成される。

### [側部]

運動方向と平行方向の面では剪断変形をうける。この部分では、剪断破壊による横ズレ亀裂となる。地すべり地塊はすべる傾斜角と地形勾配との関係で、亀裂に沿って沈下もしくは隆起する。沈下の場合には滑落崖(写真-II-2)を形成する。

運動方向とある角度をもつ面では、頭部と同じように引張変形を受け、分離破壊・裂かが形成されるが、分離面が自立しない場合は、滑落崖もしくは陥没帯が形成される。この場合、横ズレが大きく現れるもの(写真-II-3、ただしこれは引張変形部分が横ズレを伴う亀裂帯である)と、小さいものがある。

これまで側部に関しては、古典モデルでは側面キレットあるいはその初期形状の雁行状キレットのみが取り上げられており、渡・酒井(1975)がクローズドクラックとオープンクラックの指摘にとどまっているが、実態としてはこの他さまざまなものが現れている。これらは、地すべりの移動量の差によっても異なるものであるが、これらを形成した変形を検討すると、剪断変形と引張変形に分類されることがわかる(図-II-4)。

### [末端部]

すべり面が直接地表に現れる末端開放の場合は、剪断破壊による地すべり地塊の押出しとなる(写真-II-4)。

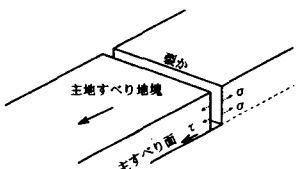
すべり面が直接地表に現れない場合は、運動方向に直行する面において圧縮変形を受ける。圧縮変形に伴う破壊性状は、圧縮方向に対して $45 - \phi/2$ の角度で剪断破壊(受働破壊)し隆起する。圧縮方向に平行な垂直面では、分離破壊し地表に縦亀裂が生じる場合がある。

### 2.2 典型地すべり地における変動地形を形成する地塊変形

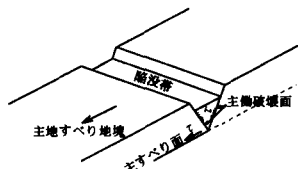
典型地すべり地における変動地形の特徴から、各部位の変形を考える。

#### (1) 黒谷地すべり地

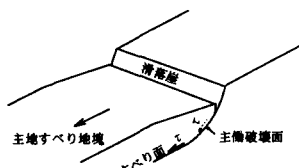
- ・頭部は陥没帯で引張変形である。
- ・右側部は斜交方向に形成された陥没帯を伴う滑落崖で、滑落崖から引き離される方向に移動した引



引張変形に伴う分離破壊による裂か

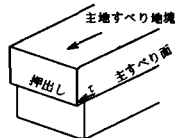


引張変形に伴うせん断破壊による陥没帯

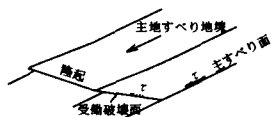


引張変形に伴うせん断破壊による滑落崖

(頭部)



主すべり面のせん断破壊による押し出し

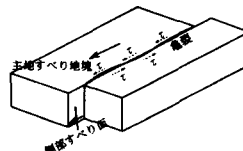


圧縮変形に伴うせん断破壊による隆起

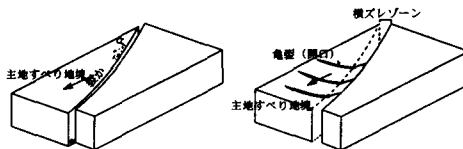


圧縮変形に伴う分離破壊による縦亀裂 (せん断破壊による隆起を伴う)

(末端部)

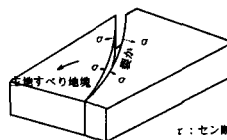


せん断変形に伴うせん断破壊による亀裂



引張変形に伴う分離破壊による裂か (横ズレ大)

引張変形に伴う亀裂 横ズレゾーンを形成



$\tau$ : せん断応力  $\sigma$ : 垂直応力

引張変形に伴う分離破壊による裂か (横ズレ小)

(側部)

| 側部形状     | 横ズレ性 | 側部滑落崖の形成方向    |                     | 変形性     |         |      |     |
|----------|------|---------------|---------------------|---------|---------|------|-----|
|          |      | 移動方向と平行       | 移動方向と斜行 (傾きは4.5°まで) |         |         |      |     |
| 滑落崖 (閉塞) | 大    | (a) (沈下) (a') | (b)                 | 剪断変形    |         |      |     |
|          | 小    | (c)           | (d) (亀裂 (開口)) (d')  |         |         |      |     |
| 滑落崖 (開口) | 大    | (e)           | (f)                 | 引張変形    |         |      |     |
|          | 小    | (g)           | (h)                 |         |         |      |     |
| 陥没帯      | 大    | (i)           | (j)                 | 引張変形    |         |      |     |
|          | 小    | (k)           | (k')                |         |         |      |     |
| 凡例       |      | 開口幅1mm未満      | 開口幅1mm以上            | ズレ1cm以上 | ズレ1cm未満 | 移動量  |     |
|          |      | 滑落崖 (閉塞)      | 滑落崖 (開口)            | 陥没帯     | 横ズレ大    | 横ズレ小 | 移動量 |

図- II - 3 地すべり地塊各部位の変形・破壊形式と変動地形

図- II - 4 側部変動地形の種類 (佐々木・新谷 2000a より)

写真-Ⅱ-1  
頭部陥没帯



写真-Ⅱ-2  
側部滑落崖  
(横ズレ大・閉塞)



写真-Ⅱ-3  
側部亀裂  
(横ズレ大・開口)

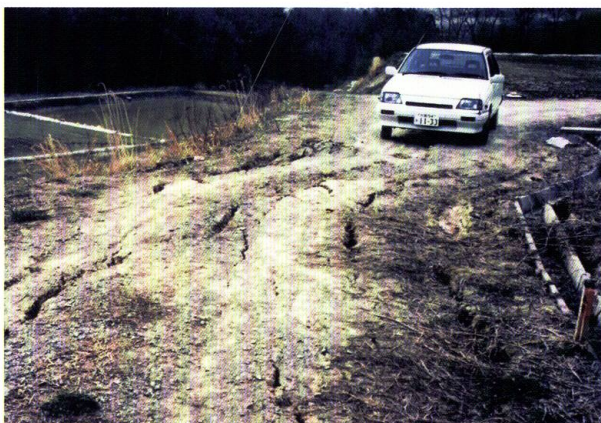


写真-Ⅱ-4  
末端部押し出し  
(すべり面沿い)



表- II - 2 地すべり変動地形の形態分類 (佐々木・新谷 2000a より)

| 平面形態分類 | 模式平面形態 | 各部位の変動地形の変形            |                             |                             |                       | すべり面形態 |
|--------|--------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|--------|
|        |        | 頭部                     | 側部                          | 側部                          | 末端部                   |        |
| I      |        | 引張変形 $\alpha$<br>(陥没帯) | 引張変形 $\alpha$<br>t<br>(陥没帯) | 引張変形 $\alpha$<br>(陥没帯)      | 圧縮変形 $\gamma$<br>(隆起) | 平面P    |
| II     |        | 引張変形 $\alpha$<br>(滑落崖) | 剪断変形 $\beta$<br>(滑落崖)       | 引張変形 $\alpha$<br>t<br>(滑落崖) | 圧縮変形 $\gamma$<br>(隆起) | 平面P    |

\*  $\alpha t$ : 横ズレが大きな引張変形

\* ( ): 変動地形の例

張変形である。陥没帯が末端付近で閉塞する。

- ・ 左側部は斜交方向に形成され横ズレ大の陥没帯を伴う滑落崖で、滑落崖から引き離される方向に移動した引張変形である。
- ・ 末端は隆起を伴う押出しの圧縮変形である。
- ・ 左側部のみが横ズレ大となる。

(2) 狸谷地すべり地

- ・ 頭部は滑落崖で引張変形である。
- ・ 右側部は移動方向に並行に形成され横ズレ大・閉塞性の滑落崖であり、その延長線上で、地すべり地塊が隆起する側部すべり面沿いのすべりである剪断変形である。
- ・ 左側部は斜交方向に形成され開口性の滑落崖で2~3mの幅を経て横ズレ大であることが認められる。これは、右側部のように側部滑落崖沿いのすべりではなく滑落崖から引き離される方向に移動した引張変形である。
- ・ 末端は隆起を伴う押出しの圧縮変形である。
- ・ 両側部で横ズレ大となる。

2.3 変動地形の分類

地すべり変動地形の形態分類には、側部変動地形の特徴を考慮しなければならない。側部変動地形の特徴を捉える方法としては、クローズドクラックとオー

ブンクラックに、あるいは滑落崖と陥没帯に区分する等があるが、これらは多様な形態を包括しにくい。地すべり変動地形は地すべり運動の反映と考えられるので、ここではその多様性を出現させた地すべり地塊運動に関する変形要素に還元し、地すべり変動地形を分類することを試みた。

典型的地すべり地の変動地形は、一般に頭部に形成された滑落崖や陥没帯が、一方の側部にのみ連続する共通した形態が見られる (佐々木 1991) が、他方の側部の変動地形形成要因は同一と見るべきではない。今回上記の運動に関する各部位の変形要素の検討から、頭部と末端部はいずれもそれぞれ引張変形と圧縮変形であるが、側部を形成した変形は、引張変形・引張変形の組合せと引張変形・剪断変形の組合せに区分された。先の2.1で検討したように、一般的に側部は剪断変形と引張変形に分かれるが、両側部の組合せとしては、これらの二つが地塊型地すべりの二つの類型を示すものである。ここでは、表-II-2のように前者を平面形態I、後者を平面形態IIと整理した。横ズレ性を考慮すると、平面形態Iは、側部の一方のみが横ズレ大となり、平面形態IIは、両側部で横ズレ大となる。黒谷地すべり地は平面形態I、狸谷地すべり地は平面形態IIに分類される。

3. 平面形態からみた地すべり地塊の運動様式

### 3.1 地すべり地塊の運動

各分類における各部位の変形が、どのような地塊運動によって現れたかについて以下検討する。ここに取り上げた典型地すべりの事例は、地すべり地塊がほぼ原形を保ったまま大きく移動したものであることから、つぎのような条件を考えることとした。

- ・地すべりは、特定のすべり面沿いに剪断破壊するものであり、この運動によって地すべり地塊の周辺は変形を受けるが、地すべり地塊そのものは、剛体にちかい有限の物体とすることができる。
- ・一般に、有限の大きさで一定の形をもっている物体に外力を加えると、その物体は座標の位置を変えたとともに大きさと形を変えながら運動する。その変位・変形は、並進（平行移動）・回転・膨張・ゆがみの4つの要素に分解して考えることができる。このうち、並進と回転が、剛体の重心の直線運動とそのままの回転運動として表すことができる要素である（垣見，1978）。本研究で取り上げた地塊型地すべりの移動地塊が剛体的であると考えると、その運動は並進と回転となる。
- ・地すべり地塊の運動をもたらす外力の種類・程度についての議論は、ここにいない。

本研究対象とする典型的地すべり地の地塊運動は、以上のような条件のもとでは、運動学 (kinematics) モデルで物体の運動を取り扱う (Goodman 1976) ことができ、地すべり変動地形は、地すべり地塊の剛体的な並進もしくは回転運動による地塊周辺の変形であると考えられる。

### 3.2 平面形態分類と地すべり地塊運動

地すべり地塊を剛体的なものとした場合、各平面形態を形成した平面すべり面上の地塊運動について、つぎのような仮説を提示した。

- ・平面形態Ⅰは、一つの側部は横ズレ大の引張変形であり、もう一方の側部が横ズレ小の引張変形となっている。これは並進運動だけではなく、移動量が大きく横ズレ大の引張変形側を円周側とし、末端付近で滑落崖と地すべり地塊が閉塞している横ズレ小の引張変形側が中心側とする平面的回転運動を示すものと考えられる。
- ・平面形態Ⅱは、一つの側部は移動方向に並行な横ズレ大の剪断変形であり、もう一つの側部も横ズレ大の引張変形であるので、一つの側部で剪断変形を受けながらの並進運動と考えられる。

## Ⅲ. すべり面三次元構造

### 1. 地すべり地塊構造

各平面形態の典型地すべり事例の地すべり地塊構造は、地表地質調査・ボーリング調査（兵庫県北淡町 1975, 兵庫県洲本土地改良事務所 1993, 京都府木津町 1983）および先のⅡ. 1, Ⅱ. 2で考察した変動地形の変形性の特徴から、地すべり地塊はつぎのような構造であることがわかる。

#### (1) 地すべり地塊を規定する境界面

地すべり地塊は、地すべり変動を起こした地塊であり、つぎのような境界面に囲まれていることになる。  
[地すべり地塊下部の剪断変形を示す底部すべり面]

底部すべり面は、地すべり地塊がほぼ原型を保って移動した地すべり地塊下部において、基盤と地すべり崩土の境界面（狸谷）や基盤の砂層と粘土層の境界面（黒谷）等の地質的境界面等に形成されるすべり層である。

[地すべり地塊側部の剪断変形を示す側部すべり面]

側部で剪断変形する部分（狸谷）は、すべり面の一種で側部すべり面となる。狸谷では地質的境界面ではなく、底部すべり面上の地すべり地塊の剪断的な変形で、地すべり崩土中に二次的に形成された剪断破壊による地すべり層である。

[地すべり地塊頭部～側部の引張変形に伴う剪断破壊による主働破壊面]

主働破壊面沿いは、地表部で滑落崖下部の沈降部がゾーンを形成し、断面的に円弧状（狸谷）～急角度の直線状（黒谷）になる。

[地すべり地塊末端部の圧縮変形に伴う剪断破壊による受働破壊面]

受働破壊面沿いは、地表部で隆起・押し出し部がゾーンを形成し、断面的にすべり面が円弧状～直線状をなす。

これまでの地すべり地形モデル（たとえば Varnes 1958/1978等）では、すべり面はこのような区別がされていない。一方、山田ほか（1971）は、折線状すべり面として、主すべり面と主働崩壊面・受働崩壊面との組合せを考えた。本論はこの考えと基本的に一致するが、ここではとくに底部すべり面とともに側部すべり面を合わせて主すべり面とした。

主働破壊面・受働破壊面は、地すべり地塊運動によってその周囲に形成される引張変形・圧縮変形にともなう剪断破壊面であって、地すべり地塊が直接すべ

り層に接し、すべり層が剪断変形し剪断破壊面を形成する主すべり面とは異なるものである。

なお、Terzaghi & Peck (1969) は、主働崩壊面上の土塊が推力となり、水平部分の土塊を押し出し、受働破壊に至る機構を考えた。この考え方は、申 (1989) や玉田・福田 (1987) のくさび (Wedge) として沈下し潜在すべり面からすべらせる要因となる考え方と一致するものである。本論では、くさび (Wedge) に当たるものを運動の結果と位置づけ、この形成に伴い推力を構成するものであると考えることにした。

(2) 地すべり地塊の構成要素

以上の境界面に囲まれた地塊が、地すべり運動によって生じた地すべり地塊であるが、地すべり地塊はつぎの部分に区分した (図-III-1)。

[底部すべり面上の主地すべり地塊]

主地すべり地塊は、底部すべり面に沿ってほぼ原

型を保って移動する地すべり運動の主体をなすもの。平面形態IIでは、一つの側部は側部すべり面となる。[頭部の主働破壊面沿いの地すべり破碎部である派生地塊・引張変形地塊]

主地すべり地塊運動によってその頭部や側部に形成される引張変形にともない、剛体的な地塊では裂かとなるが、弾性～塑性的な地塊では主働破壊し、主働破壊面上の破壊・攪乱部が、派生地塊である引張変形地塊となる。

[末端部の受働破壊面沿いの地すべり破碎部である派生地塊・圧縮変形地塊]

地すべり地塊運動によって、剛体的な地塊等における末端開放状態では、その末端部においては主すべり面沿いの押し出しとなるが、弾性～塑性的な地塊等における末端閉塞状態では圧縮変形にとまって受働破壊し、受働破壊面上の破壊・攪乱部が、派生地塊である圧縮変形地塊となる。

主地すべり地塊が弾性～塑性的な場合は、頭部に引張変形地塊、末端部に圧縮変形地塊が現出するが、主地すべり地塊が岩盤等のように剛体的な場合は、頭部引張変形部は裂かとして現出する。また、地すべり地塊が崩土化し平面状の主すべり面が短くなると、主働破壊面と受働破壊面が連続し、回転すべり面を形成し、地すべり地塊は引張変形地塊と圧縮変形地塊から構成されることになる。

これまでの地形モデルでは、地形単位として地すべり変動地形の区別がされてはいる (木全・宮城 1985等) が、地すべり地塊に関してはこのような区別はされてこなかった。藤田 (1984) は、地すべり地塊を地すべりの主体をなすところの滑らせようとする力の働く主力部分を主すべりブロックとし、その下方への移動により、上部ではテンションゾーンが、下部ではコンプレッションゾーンが形成されるとした。本論はこの考えと一致するもので、主地すべり地塊が主すべりブロック、引張変形地塊がテンションゾーン、圧縮変形地塊がコンプレッションゾーンに当たるものである。

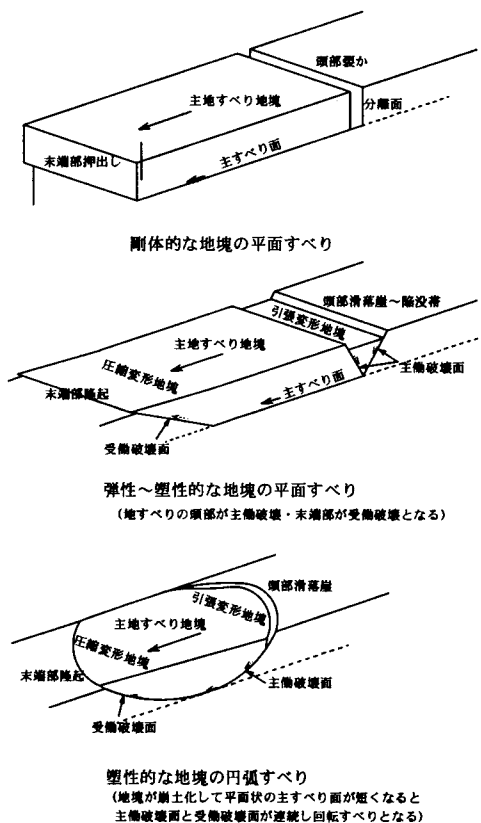


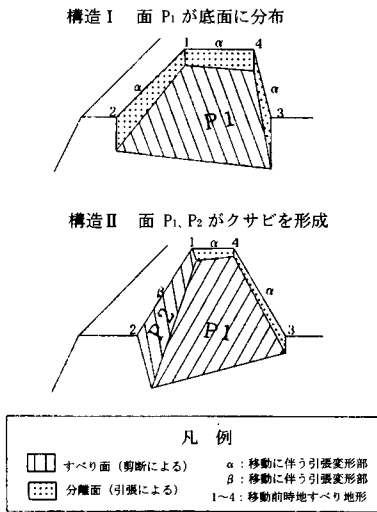
図-III-1 地すべり地塊の構成要素 (佐々木・新谷 2000c)

2. すべり面三次元構造モデル

2.1 モデル化の条件

以上の各形態の地すべり地塊構造から、つぎのように地すべり地塊運動を規定する主すべり面の三次元構造をモデル化した (図-III-2)。

モデル化に当たっては、つぎのような条件を与え



図一三ー二 すべり面三次元構造モデル (佐々木・新谷 2000c より)

た。

- ・ 剪断変形部の底部すべり面・側部すべり面は、近似平面形とし一面とする。
- ・ 頭部及び側部引張変形による主動破壊面は、近似平面形分離面とし一面とする。
- ・ 末端部は、すべり面が直接末端斜面に現れる末端開放状態とする。
- ・ 地すべり地塊は、すべり面・分離面と地表面に囲まれた一つの剛体に近いものとする。
- ・ すべり地塊は、引張変形地塊と圧縮変形地塊である派生地塊は捨象し、主部すべり面の剪断変形で移動する主地すべり地塊とする。

## 2.2 すべり面構造

### (1) 構造 I

平面形態 I の基本すべり面構造は、底部の剪断変形のすべり面がすべり方向に並行もしくは斜交し、地表には現れないものである。地すべり地塊の頭部および側部は、地すべりの進行に伴う分離面である。末端部は、底部すべり面が傾斜して現れる。これを構造 I とする。

### (2) 構造 II

平面形態 II の基本すべり面構造は、底部と側部との二面の剪断変形のすべり面によって、クサビが形成されたものである。地すべり地塊の頭部および反対側

側部は、地すべりの進行に伴う分離面である。末端部は、側部及び底部すべり面が現れる。これを構造 II とする。

これらは、ともに各平面形態における変動地形の変形の組合せと対応するものであるので、平面形態 I・II のすべり面構造モデルとする。

## IV. 現場観測データによる運動様式の検証

### 1. 移動杭と孔内傾斜計観測結果による運動実態

#### 1.1 調査方法

##### (1) 調査方法

前章までで、典型地すべり地における変動地形解析およびすべり面構造解析によって、平面形態 I・II とほぼこれに対応するすべり面構造 I・II を抽出した。また平面形態の特徴をもとに、地すべり地塊を剛体と仮定した場合の運動が、平面形態 I では並進・平面的回転運動、平面形態 II では並進運動となる仮説を提示した。

本章では、その運動が実際どのようなものであるかを、各平面形態・すべり面構造を有する二か所の地すべり地現場観測データから検証を試みることにする。典型すべり地では現場観測データが得られていなかったため、表面移動量を移動杭、地中移動量を孔内傾斜計によって観測された平面形態 I・すべり面構造 I の船木地すべり地 (兵庫県 1995, 佐々木・新谷 2000b)、平面形態 II・すべり面構造 II の山田地すべり地 (島根県 1989, 子川ほか 1991, 来海ほか 1991) を選定した。

##### (2) 運動パラメータ

観測された運動データからその運動パラメータをつぎのように求めた。

並進量 (m) : 左右側部移動量の小さい方とする

回転量 (m) : 左右側部間移動量差とする

換算回転量 (m) : 両側部での移動量が得られていない場合は、ブロック幅から、つぎのように換算回転量を求めた

$$\text{回転量} \times (\text{ブロック幅} \div \text{左右間距離})$$

回転角 (rad) : 左右側部の移動量の小さい側を回転軸、左右側部間距離を回転半径とし、次式で表す

$$\text{回転角} = \text{円周} \div \text{半径} = \text{回転量} \div \text{左右側部間距離}$$

並進速度 : 並進量の移動速度とし、次式で表す

$$\text{並進速度} = \text{左右平均移動量} \div \text{移動期間}$$



回転速度 (mm/day) : 回転量 ÷ 移動期間  
 角速度 (rad/day) : 平面的回転量の移動速度とし、  
 次式で表す

$$\text{角速度} = \text{回転角} \div \text{移動期間}$$

回転度 : 回転量 ÷ 並進量とする

## 1.2 平面形態 I の並進・平面的回転運動 (船木地すべり地)

### (1) 変動地形

頭部には落差30~110cmの滑落崖が幅140mにわたりほぼ連続して形成されている。側部には、地すべり発生時には、左側部は頭部滑落崖形成方向の延長上に断続する亀裂が認められ、右側部は雁行状に亀裂が形成され下半部は隆起に転じていた。末端部は、目視では明瞭な変状は認められていなかった。

このように各部位の変動地形がほぼ連続して現出する発達段階のものではないが、左側部が頭部滑落崖の延長で横ズレ成分の少ない引張変形、右側部が頭部滑落崖と直行する方向で横ズレ成分が現れやすい引張変形の特徴は、右側部付近を中心とする平面的回転運動の反映であると考えられ、平面形態 I に分類された。

### (2) すべり面構造

基盤の神戸層群泥岩層の上面を岩盤等高線として表した。岩盤面がほぼすべり面となっており、移動の主体である地すべり地塊 (主地すべり地塊) の主要なすべり部分 (主すべり面) の構造は、ややゆがんだ一

つの平面となりその傾斜方向は概ね S60W である。これはすべり面構造 I を示す。

地すべり地塊の層厚は、主すべり面に分布する地塊部分でおおよそ13~16mである。

### (3) 地すべりブロックの領域区分

移動杭観測結果によって、垂直移動量が水平移動量の2倍以上を示す沈下の著しい引張変形地塊、主すべり面の傾斜角は約6° (地表面勾配10°) とほぼ平行な移動を示す主地すべり地塊、隆起部分である圧縮変形地塊に区分された。

### (4) 地すべり地塊運動 (表-IV-1, 図-IV-1)

当地区は、平面形態 I・すべり面構造 I であり、変動地形の特徴は右側部付近を中心とする平面的回転運動を反映するものと考えられたが、現地観測データによっても、主地すべり地塊の地表部で、並進速度 6.2mm/day, 角速度  $4.8 \times 10^{-5}$  rad/day の平面的回転運動、すべり面沿いに並進速度 5.0mm/day, 角速度  $8.6 \times 10^{-5}$  rad/day の平面的回転運動が認められた。

これによって、平面形態 I・すべり面構造 I の地すべりブロックにおける、地すべり地塊の平面すべり面沿いの並進・平面回転運動の一つの例証が得られた。なお、回転量/並進量で示される並進成分と回転成分の割合は、地表部で1.1, 地中部で1.6であった。

表-IV-1 船木地すべり地運動パラメータ

|    |        | 右側<br>移動量 | 水平<br>(mm) | 垂直<br>(mm) | 左側<br>移動量 | 水平<br>(mm) | 垂直<br>(mm) | 左右間<br>距離<br>(mm) |        |
|----|--------|-----------|------------|------------|-----------|------------|------------|-------------------|--------|
| 船木 | 引張変形地塊 | I-7       | 101        | -255       | I-9       | 58         | -88        | 40,000            |        |
|    | 移動杭    | 主地すべり地塊   | II-7       | 141        | -16       | II-11      | 87         | -36               | 80,000 |
|    | 圧縮変形地塊 | II-5      | 141        | 41         | III-12    | 55         | 2          | 140,000           |        |
|    | 孔内傾斜計  | 主地すべり地塊   | No.4       | 11         | No.5      | 5          |            | 70,000            |        |

\* 並進量 : 側部移動量の小さい方  
 \* 回転量 : 左右側部移動量の差  
 \* 換算回転量 = 回転量 × (ブロック幅140m ÷ 左右間距離)  
 \* 回転速度 = 換算回転量 ÷ 移動時間  
 \* 回転角 = 回転量 ÷ 左右間距離  
 \* 角速度 = 回転角 ÷ 移動距離  
 \* 回転度 = 換算回転量 ÷ 並進量

1.3 平面形態Ⅱの並進運動 (山田地すべり地)

(1) 変動地形 (付図-Ⅳ-1)

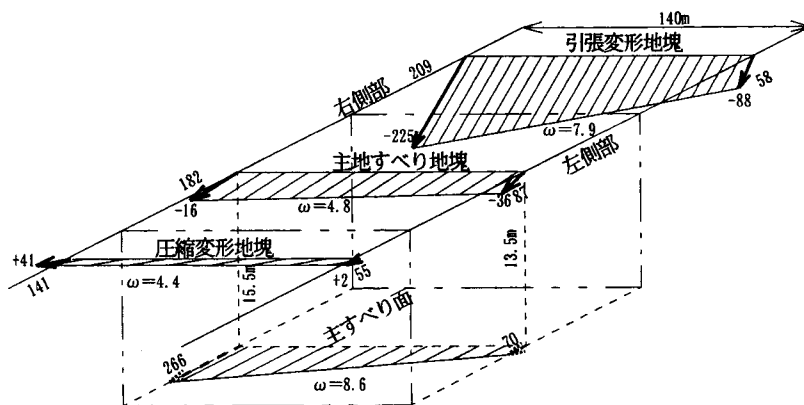
頭部には、開口亀裂が発生した。右側部には、隆起を伴う圧縮されつつ横ズレる閉塞性亀裂、左側部には横ズレを伴う開口性亀裂が発生した。これより下のNo.4孔から下部は、やや方向をかえ、これらの亀裂は不明瞭となり、末端部焼野川に面して、側方侵食が活発であった。

このように、上半部では、一方の側部が剪断変形、

他方の側部が引張変形の特徴を示し、平面形態Ⅱに分類された。

(2) すべり面構造 (付図-Ⅳ-1, 付図-Ⅳ-2)

底部すべり面を形成するのは、厚さ1~3mの粘土層でほぼ平面状に分布する。末端方向と右側部側に緩やかに傾斜し、底部すべり面が深くなる右側部に沿って、急傾斜の側部すべり面が形成され、これら底部すべり面と右側部の側部すべり面の2面がクサビ状構造



- \* ベクトルは各側部での移動量と方向を表示
- \* 右側部移動量は並進量、左側部移動量は並進量+換算回転量(mm/14day)
- \* 矢印の横の数字は垂直移動量(mm/14day)
- \* 角速度ω(×10<sup>-5</sup>rad/day)

図-Ⅳ-1 船木地すべり地運動模式図

| 並進量<br>(mm) | 並進<br>速度<br>(mm) | 回転量<br>(mm) | 換 算<br>回転量<br>(mm) | 回転速度<br>(mm/day) | 回転角<br>(rad)         | 移動<br>期間<br>(day) | 角速度<br>(rad/day)     | 回転度 | 運動<br>様式          |
|-------------|------------------|-------------|--------------------|------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-----|-------------------|
| 58          | 4.1              | 43          | 151                | 10.8             | 1.1×10 <sup>-3</sup> | 14                | 7.9×10 <sup>-5</sup> | 2.6 | 並進・<br>平面的<br>回 転 |
| 87          | 6.2              | 54          | 95                 | 6.7              | 6.7×10 <sup>-4</sup> | 14                | 4.8×10 <sup>-5</sup> | 1.1 |                   |
| 55          | 3.9              | 86          | 86                 | 6.1              | 6.1×10 <sup>-4</sup> | 14                | 4.4×10 <sup>-5</sup> | 3.3 |                   |
| 5           | 5.0              | 6           | 12                 | 12.0             | 8.6×10 <sup>-5</sup> | 1                 | 8.6×10 <sup>-5</sup> | 1.6 |                   |

をなす。これはすべり面構造Ⅱを示す。

地すべり地塊の層厚は、主すべり面に分布する地塊部分でおおよそ5～14.5mである。

(3) 地すべり地塊の並進運動 (表-Ⅳ-2, 図-Ⅳ-2, 付表-Ⅳ-1, 付表-Ⅳ-2, 付図-Ⅳ-3, 付図-Ⅳ-4)

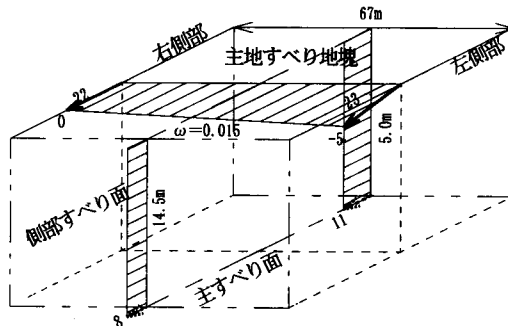
当地区上半部は、平面形態Ⅱ・すべり面構造Ⅱであるが、現地観測データによって、地表部ではほぼ同一方向S14Wに並進速度0.24mm/day, すべり面沿いS方向に並進速度0.11mm/dayの並進運動が認められた。

孔内傾斜計でのすべり面付近の地中移動量と移動杭での地表面移動量を比較すると、地表部移動量の方

が約2倍となり、移動方向も少し差異がある。これは、地すべり地塊の塑性的変形の反映と考えられた。

このすべり面構造Ⅱに規定された地塊の並進運動によって、頭部には引張変形による亀裂、側部すべり面のある右側部には剪断変形の横ズレを伴う亀裂、左側部には引張変形の横ズレを伴う亀裂が発生したと考えられる。

底部すべり面傾斜方向はS32Wであるが、地塊移動方向はS14Wであった。これは、すべり面構造Ⅱの二つのすべり面交線方向がS14Wであり、これに規定されるものと考えられる。



- \* 右側部移動量は並進量、左側部移動量は並進量+換算回転量(mm/97day)
- \* 矢印の横の数字は垂直移動量(mm/97day)
- \* 角速度 $\omega$ ( $\times 10^{-5}$ rad/day)

図-Ⅳ-2 山田地すべり地運動模式図

表-Ⅳ-2 山田地すべり地運動パラメータ

|    |       | 右側<br>移動量 | 水平<br>(mm) | 垂直<br>(mm) | 左側<br>移動量 | 水平<br>(mm) | 垂直<br>(mm) | 左右間<br>距離<br>(mm) |        |
|----|-------|-----------|------------|------------|-----------|------------|------------|-------------------|--------|
| 山田 | 移動杭   | 主地すべり地塊   | I-2        | 22         | 0         | I-6        | 23         | -5                | 67,000 |
|    | 孔内傾斜計 | 主地すべり地塊   | No.1       |            |           | 9          |            |                   |        |
|    |       |           | No.2       |            |           | 7          |            |                   |        |

- \* 並進量: 側部移動量の小さい方
- \* 回転量: 左右側部移動量の差
- \* 換算回転量=回転量 $\times$ (ブロック幅 $\div$ 左右間距離)
- \* 回転速度=換算回転量 $\div$ 移動時間
- \* 回転角=回転量 $\div$ 左右間距離
- \* 角速度=回転角 $\div$ 移動距離
- \* 回転度=換算回転量 $\div$ 並進量

1.4 平面的回転運動と並進運動のパラメータ比較

以上の結果によると、船木地すべりでは主地すべり地塊において、すべり面で角速度 $8.6 \times 10^{-5}$ rad/day、地表部で角速度 $4.8 \times 10^{-5}$ rad/dayの平面的回転運動が確認された。これにはすべり面で5.0mm/day、地表部で6.2mm/dayの並進運動を伴うことが確認された。また、この主地すべり地塊の運動によって、上部(頭部)には沈下を伴う4.1mm/dayの並進運動と角速度 $7.9 \times 10^{-5}$ rad/dayの平面的回転運動、下部(末端部)には隆起を伴う3.9mm/dayの並進運動と角速度 $4.4 \times 10^{-5}$ rad/dayの平面的回転運動が認められた。これに対し、山田では平面的回転運動を想定した角速度は $1.5 \times 10^{-7}$ rad/dayであって、ほぼ並進にちかひことが確認された。並進運動はすべり面で0.11mm/day、地表部で0.24mm/dayであった。

このように、現場観測データによって平面形態Ⅰ・すべり面構造Ⅰを呈する船木地すべり地で並進・平面的回転運動、平面形態Ⅱ・すべり面構造Ⅱを呈する山田地すべり地で並進運動を認めることができた。

回転量/並進量で示される並進成分と回転成分の割合は、船木地すべり地では地中部で1.6であるが、山田地すべり地では0.04であった。並進運動と平面的回転運動様式は、ある程度相対的なものともいえるが、角速度もしくは回転度を比較すると、量的に明らかに異なるものであることがわかる。

2. 各種計測結果による運動実態

2.1 移動量調査による運動実態

地すべり変動地形調査結果(次章の表-V-1)の中から、変動地形等によって頭部・側部・末端部の

移動量を測定できたものを表-IV-3にまとめ、運動量をつぎのように取り出した。

(1) 運動パラメータ

先の1.3(1)の運動パラメータと同じとする。

ここでは、左右側部の移動量を、地すべり地塊の側部方向両端での移動量とみなしてもとめたものである。

(2) 運動実態

表-IV-3に取り上げた各地すべり地は、変動地形の形状や左右移動量の差が比較的明瞭に現れたものであるが、つぎのような特徴が考えられる。

平面形態Ⅰでは、角速度 $2.2 \times 10^{-4} \sim 5.9 \times 10^{-2}$ rad/dayの平面的回転運動を示す。

平面形態Ⅱでは、角速度が $0 \sim 3.5 \times 10^{-3}$ rad/dayである。このうち、すべり面構造Ⅱでは回転角は0radで、構造Ⅰでは $1.4 \times 10^{-3} \sim 3.5 \times 10^{-3}$ rad/dayである。すなわち、平面形態Ⅱにおいて、構造Ⅱは並進であるが、構造Ⅰである特殊ケースでは平面形態Ⅰと同様な平面的回転運動様式を示す。

(3) 平面的回転運動の特徴

最大移動量と回転角・角速度は正の関係にあるが、回転度とは負の関係にある(図-IV-3, IV-4, IV-5)。これは、移動量が大きいくほど平面的回転角が大きくなり速度も大きくなるが、並進成分も大きくなり回転度は小さくなることを示す。

角速度は回転角と正の関係にある(図-IV-6)。これは、回転角が大きくなるほどその速度が大きくなることを示す。

これらは、移動が進むに従い平面的回転成分が大きくなり速度も大きくなる加速的な平面的回転運動と、

| 並進量<br>(mm) | 並進速度<br>(mm) | 回転量<br>(mm) | 換算<br>回転量<br>(mm) | 回転速度<br>(mm/day) | 回転角<br>(rad)         | 移動<br>期間<br>(day) | 角速度<br>(rad/day)      | 回転度  | 運動<br>様式 |
|-------------|--------------|-------------|-------------------|------------------|----------------------|-------------------|-----------------------|------|----------|
| 23          | 0.24         | 1           | 1                 | 0.01             | $1.5 \times 10^{-5}$ | 97                | $1.5 \times 10^{-75}$ | 0.04 |          |
| 9           | 0.11         | -           |                   |                  | -                    | 81                | -                     | -    | 並進       |
| 7           | 0.09         | -           |                   |                  | -                    | 81                | -                     | -    |          |

表-IV-3 地すべり移動量調査表

| No. | 地名  | 幅*長さ<br>m*m | 変動地形 |        |            |        | 側部         |     | 移動量(m)            |     |     |      |      |
|-----|-----|-------------|------|--------|------------|--------|------------|-----|-------------------|-----|-----|------|------|
|     |     |             | 頭部   | 右側部    | 左側部        | 末端部    | 組合         | 頭部  | 右側部               | 左側部 | 末端部 |      |      |
| 11  | 東条  | 65*60       | 滑落崖  | 横ズレ亀裂  | $\alpha t$ | 亀裂     | $\alpha$   | 隆起  | $\alpha \alpha t$ | 1.5 | 1.5 | 0.01 | 0.02 |
| 29  | 北畑  | 60*300      | 滑落崖  | 横ズレ陥没帯 | $\alpha t$ | 滑落崖    | $\alpha$   | 流動  | $\alpha \alpha t$ | -   | 50  | 10   | 50   |
| 32  | 東   | 90*50       | 陥没帯  | 横ズレ亀裂  | $\alpha t$ | 亀裂     | $\alpha$   | 押し出 | $\alpha \alpha t$ | 3   | 2   | 0.2  | 2    |
| 37  | 黒谷  | 95*70       | 陥没帯  | 陥没帯    | $\alpha$   | 横ズレ陥没帯 | $\alpha t$ | 隆起  | $\alpha \alpha t$ | 7   | 3   | 7    | 7    |
| 1   | 狸谷  | 30*70       | 滑落崖  | 横ズレ滑落帯 | $\beta$    | 横ズレ滑落帯 | $\alpha t$ | 押し出 | $\alpha t \beta$  | 6   | 6   | 6    | 10   |
| 6   | 香住  | 85*100      | 滑落崖  | 横ズレ滑落崖 | $\beta$    | 陥没帯    | $\alpha$   | 押し出 | $\alpha \beta$    | 5   | 10  | 1    | 15   |
| 8   | 西吉野 | 70*50       | 滑落崖  | 不明瞭    | *          | 滑落崖    | $\beta$    | 押し出 | $\beta *$         | 0.5 | *   | 0.3  | 0.2  |

\*横ズレ性は特に明瞭なもののみを記載。  
 \* $\alpha$ : 引張変形、 $\alpha t$ : 引張変形(横ズレ大)、 $\beta$ : 剪断変形、 $\gamma$ : 圧縮変形  
 \*並進量: 側部移動量の小さい方  
 \*回転量: 左右側部移動量の差  
 \*回転角 = 回転量 + 幅  
 \*角速度 = 回転角 + 移動期間  
 \*回転度 = 回転量 + 並進量

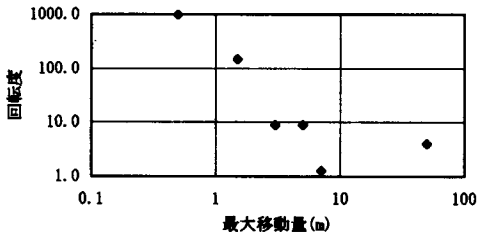


図-IV-3 最大移動量と回転度

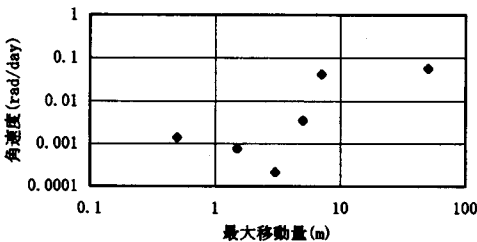


図-IV-5 最大移動量と角速度

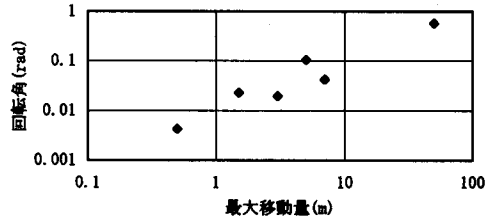


図-IV-4 最大移動量と回転角

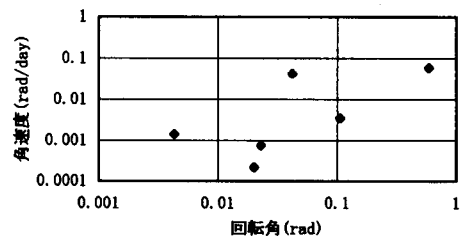


図-IV-6 回転角と角速度

同時に並進運動も進んでいく動的な運動実態を示すものである。

特に移動量の小さな初期段階において、左右側部移動量の差の割合である回転度が大きいことは、初期徴候の把握に重要な示唆を与えるものである。

2.2 その他の観測結果による運動実態

以上のほか、丁張り移動量等についても、観測結果に現れた運動実態をみた(表-IV-4)。

(1) 丁張りによる地表移動量 (No.16中辻地すべり地)  
 移動開始から25日間は右側部A地点移動量が大きく現れ、左回り平面的回転角 $3.0 \times 10^{-5}$ rad/dayとなったが、その後11間で左側部B地点移動量が急激に大きくなり、A地点移動量を凌駕し、右廻り平面的回転角 $1.6 \times 10^{-4}$ rad/dayとなった(図-IV-7(1))。

平面的回転運動は、このように回転方向を逆転させて進行させることがある。

(2) 孔内傾斜計による地中移動量 (No.47日野地すべり

| 移動期間<br>(day) | 平面<br>形態 | すべり面<br>構造 | 並進量<br>(m) | 並進速度<br>(mm/day) | 回転量<br>(m) | 回転角<br>(red)      | 角速度<br>(red/day)  | 回転度      | 運動様式  |
|---------------|----------|------------|------------|------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|-------|
| 30            | I        | I          | 0.01       | 0.3              | 1.49       | $2.3 \times 10^2$ | $7.6 \times 10^4$ | 149.0    | 並進・回転 |
| 10            | I        | I          | 10         | 1,000.0          | 40         | $6.7 \times 10^1$ | $6.7 \times 10^1$ | 4.0      | 並進・回転 |
| 90            | I        | I          | 0.2        | 2.2              | 1.8        | $2.0 \times 10^2$ | $2.2 \times 10^4$ | 9.0      | 並進・回転 |
| 1             | I        | I          | 3          | 3,000.0          | 4          | $4.2 \times 10^2$ | $4.2 \times 10^2$ | 1.3      | 並進・回転 |
| 1             | II       | II         | 6          | 6,000.0          | 0          | 0.0               | 0.0               | 0.0      | 並進    |
| 30            | II       | I          | 1          | 33.3             | 9          | $1.1 \times 10^1$ | $3.5 \times 10^3$ | 9.0      | 並進・回転 |
| 3             | II       | I          | 0          | 0.0              | 0.3        | $4.3 \times 10^3$ | $1.4 \times 10^3$ | $\infty$ | 並進・回転 |

表-IV-4 その他の地すべり移動観測結果

(1) 中辻北地すべり地丁張り移動量

| 測定期間        | 右側部A  |       | 左側部B  |       | A-B    |         | 回転角<br>(rad)             | 角速度<br>(rad/day)         | 回転度      |
|-------------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|--------------------------|--------------------------|----------|
|             | 水平移動量 | 垂直移動量 | 水平移動量 | 垂直移動量 | 水平移動量  | 垂直移動量   |                          |                          |          |
| 89.10.17    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0       |                          |                          |          |
| 10.17~11.11 | 38    | 13    | 0     | 0     | 38     | 13      | $7.6 \times 10^{-4}$     | $3.0 \times 10^{-5}$     | $\infty$ |
| 11.11~11.22 | 142   | 77    | 230   | 257   | (-) 88 | (-) 180 | $(-) 1.8 \times 10^{-3}$ | $(-) 1.6 \times 10^{-4}$ | 0.6      |
| 合計          | 180   | 90    | 230   | 257   | (-) 50 | (-) 167 |                          |                          |          |

\*A, Bは地すべりブロック頭部付近の側部で、A~B間は50m

\*移動量の単位はmm

\*回転角=回転量÷幅 回転量は水平移動量のA-B

(2) 日野地すべり地地中移動量 (孔内傾斜計)

| 孔番    | 深度(m) | 91.9.13~91.10.10 |       |      | 方向 |
|-------|-------|------------------|-------|------|----|
|       |       | A                | B     | L    |    |
| No. A | 13.5  | -4.00            | -0.30 | 4.01 | -4 |
| No. B | 12.0  | -8.00            | 3.00  | 8.54 | 21 |

\*Aは末端方向が(-)、Bは右向きが(-)

\*方向はA~BのA(-)方向に対して左廻りが+(°)

\*A~B間は、13m

\*移動量の単位はmm

地)

同一測線方向のA, B上下二点の孔内傾斜計で平面的に移動方向が25°変化していることが確認できる。上部A移動量4mmに対して下部B移動量9mmであり、下部で移動量が大きくなっている(図-IV-7(2))。

この同一測線方向の上下で方向が異なり平面的回転が認められることは、船木地すべり地でも同じであるが、船木では上部No.4移動量42mmに対して下部No.1移動量28mmであり、上部で移動量が大きくなっていた(佐々木・新谷 2000b)。

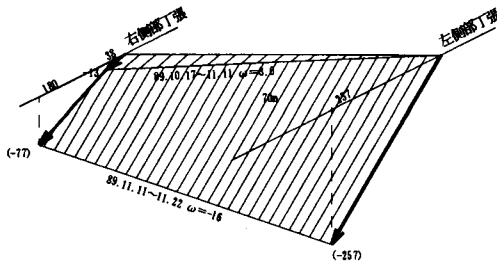
船木が一般の地すべり地での傾向であるのに対し、日野は切土が要因となった地すべりの傾向を示すものと考えられる。

2.3 地すべり地塊運動に伴う塑性的変形

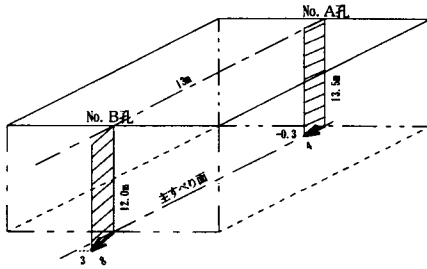
現場観測データでは、地塊の運動とともに、つぎのような地すべり地塊の塑性的変形が認められた。

(1) すべり面移動量と地表面移動量の差

地塊型地すべり地における典型的なすべり運動では、すべり面移動量と地表面移動量はほぼ同一となる



(1) 中辻北地すべり地丁張観測結果にみる平面的回転の反転



(2) 日野地すべり地孔内傾斜計観測結果にみる  
上下(山谷)方向の移動量(mm/91.9.13~10.10)・方向変化

- \*ベクトルは各側部での移動量と方向を表示
- \*移動量はmm/days, 矢印の横( )は垂直移動量
- \*角速度 $\omega$ ( $\times 10^{-5}$ rad/day)

図-IV-7 移動観測にみる平面的回転事例

が、一般的傾向としては地表面移動量の方が大きくなる。たとえば船木地すべり地の主地すべり地塊では、すべり面が42mmに対して、地表面移動量は74mmで、移動方向にも差異があった。これは地すべり地塊の塑性的～流動的変形の反映と考えられた。

(2) 上下(山谷)方向の移動量変化

また、地塊型地すべり地における典型的なすべり運動では、主地すべり地塊での上下(山谷)方向での移動量は同一となるが、その上部と下部では移動量が異なる場合がある。その傾向については大きく二つのケースが認められる。

[上部の方が大きい場合]

たとえば船木地すべり地では、ほぼ同一平面的回転方向沿いのすべり面移動量が上部で42mm、下部で28mmであった。

[下部の方が大きい場合]

たとえば日野地すべり地では、ほぼ同一平面的回転方向沿いのすべり面移動量が上部で4mm、下部で9mmであった。

前者が末端部に圧縮変形地塊が分布する一般的

すべり地で、後者は末端開放型の地すべり地で認められるケースと考えられる。

(3) 平面的回転方向の反転

すべり面構造Iでは、平面的回転運動様式となるが、中辻地すべり地のように平面的回転方向が地すべりの進行に伴い、角速度 $3.0 \times 10^{-5}$ rad/dayの左回り平面的回転が反転し、11日間で角速度 $1.6 \times 10^{-4}$ rad/dayの右回り平面的回転になったケースがある。

また、北畑地すべり地では、上下(山谷)方向で回転方向が反転したケースがあった。

このように、現場観測データ等では、すべり面に沿った主地すべり地塊の原形を保つような地塊運動とともに地すべり地塊の塑性的変形が認められた。しかし、平面形態の特徴は主地すべり地塊のすべり面に沿った原形を保つような運動と対応関係が強く現れており、このような塑性的変形を伴いながら、平面すべり面に沿った地塊的な並進・平面的回転運動様式をとったものと考えられる。

V. 平面形態・すべり面構造の分布実態からみたそれらの分類と相互関係の検証

1. 平面形態分類の妥当性の検証

1.1 調査方法

研究対象地周辺の地すべり地59箇所(図-1-1)において、つぎの項目について地すべり変動地形調査をおこない(表-V-1)、平面形態I・IIの分類とこれに対応したすべり面構造I・IIがどの程度の妥当性をもつかを検証した。

- 区分：地すべりの発生区分 初生(地すべり変動地形が初めて現れた地すべり)か再発(過去に初生的にすべった地すべり移動地塊が、ほぼ同じ規模で移動したもの)か二次(地すべり地塊あるいは地すべり崩土・崖錐堆積物の一部が移動したもの)
- 頭部：頭部の変動地形
- 右側部・左側部：各側部の変動地形とその変形の区分 変形性の区分は図-II-4にもとづく。ただし、ここでは横ズレとしたのは、特に明瞭なものだけである。
- 深度：頭部付近のすべり面深度(m)
- 勾配：頭部付近のすべり面の勾配(°)
- 移動量：末端での平均移動量(m)
- 移動期間：移動したおおよその時間(日)

表-V-1 地すべり変動地形調査結果一覧 (佐々木・新谷 2000aより)

| No. | 地名   | 幅*長さ<br>m*m | 災害<br>年代 | 発生区分 | 各部位の変動地形 |          |            |         | 平面形<br>態分類 | すべり面 |    | 移動量<br>帯幅 | 頭部陥<br>面傾度 | すべり<br>面傾度 |     |
|-----|------|-------------|----------|------|----------|----------|------------|---------|------------|------|----|-----------|------------|------------|-----|
|     |      |             |          |      | 頭部       | 右側部      | 左側部        | 末端部     |            | 傾斜組合 | 傾度 |           |            |            | 勾配  |
| 1   | 狸谷   | 30*70       | 83       | 二次   | 清落崖      | 横ズレ清落崖   | β 横ズレ清落崖   | α 押し出し  | α t β      | II   | 4  | 30        | 6          | II         |     |
| 2   | 吐山   | 30*35       | 91       | 二次   | 清落崖      | 横ズレ清落崖   | α 横ズレ清落崖   | β 押し出し  | α t β      | II   | 5  | 19        | 1          | II         |     |
| 3   | 馬場   | 10*13       | 82       | 初生   | 清落崖      | 不明瞭      | * 不明瞭      | * 亀裂    | **         | II   | 3  | 40        |            | II         |     |
| 4   | 榎井川  | 130*190     | 84       | 再発   | 清落崖      | 不明瞭      | * 横ズレ清落崖   | β 押し出し  | β *        | II   | 5  | 6         |            | II         |     |
| 5   | 舟ノ谷  | 180*180     | 74       | 再発   | 陥没帯      | 横ズレ清落崖   | β 陥没帯      | α 不明瞭   | α β        | II   | 12 | 14        | 1          | 10         | II  |
| 6   | 香住   | 85*100      | 71       | 初生   | 陥没帯      | 横ズレ清落崖   | β 陥没帯      | α 押し出し  | α β        | II   | 15 | 20        | 15         | 6          | I   |
| 7   | 成相   | 50*50       | 93       | 初生   | 清落崖      | 横ズレ亀裂    | β 亀裂       | α 押し出し  | α β        | II   |    |           |            |            | I   |
| 8   | 西吉野  | 70*50       | 90       | 再発   | 清落崖      | 不明瞭      | * 清落崖      | β 押し出し  | β *        | II   | 15 | 20        | 0.5        |            | I   |
| 9   | 瑞穂   | 30*40       | 89       | 二次   | 清落崖      | 押し出し     | γ 不明瞭      | * 右押し出し | γ *        | I    | 3  | 6         |            |            | I   |
| 10  | 戸田朽  | 20*50       | 83       | 二次   | 清落崖      | 押し出し     | γ 亀裂       | α 押し出し  | α γ        | I    | 4  | 5         |            |            | I   |
| 11  | 東条   | 65*60       | 86       | 二次   | 清落崖      | 横ズレ亀裂    | α 亀裂       | α 隆起    | α α t      | I    | 6  | 10        | 1.5        |            | I   |
| 12  | 小谷   | 35*8        | 86       | 二次   | 清落崖      | 清落崖      | α 亀裂       | α 押し出し  | α α        | I    | 2  | 27        |            |            | I   |
| 13  | 毘沙門  | 50*65       | 89       | 二次   | 清落崖      | 陥没帯      | α 不明瞭      | * 押し出し  | α *        | I    | 5  | 5         | 0.3        |            | I   |
| 14  | 米田   | 25*25       | 91       | 二次   | 清落崖      | 雁行亀裂     | α 亀裂       | α 押し出し  | α α        | I    | 5  | 10        |            |            | I   |
| 15  | 上野   | 130*250     | 82       | 二次   | 清落崖      | 横ズレ雁行亀裂  | α 陥没帯      | α 不明瞭   | α α        | I    | 12 | 26        | 1          |            | I   |
| 16  | 中辻   | 55*110      | 89       | 二次   | 清落崖      | 亀裂       | α 不明瞭      | * 右押し出し | α *        | I    | 8  | 10        | 0.4        |            | I   |
| 17  | 岡    | 20*20       | 86       | 二次   | 清落崖      | 亀裂       | α 不明瞭      | * 不明瞭   | α *        | I    | 6  | 27        |            |            | I   |
| 18  | 北僧尾  | 70*60       | 74       | 二次   | 清落崖      | 不明瞭      | * 雁行亀裂     | α 押し出し  | α *        | I    | 3  | 10        |            |            | I   |
| 19  | 長尾   | 25*25       | 76       | 二次   | 清落崖      | 不明瞭      | * 陥没帯      | α 不明瞭   | α *        | I    | 4  | 10        |            |            | I   |
| 20  | 社    | 25*25       | 84       | 二次   | 清落崖      | 不明瞭      | * 不明瞭      | * 左亀裂   | **         | I    | 3  | 16        |            |            | I   |
| 21  | 東田   | 45*25       | 89       | 二次   | 清落崖      | 不明瞭      | * 清落崖      | α 押し出し  | α *        | I    | 5  | 10        | 0.5        |            | I   |
| 22  | 口大谷  | 60*60       | 93       | 二次   | 清落崖      | 不明瞭      | * 清落崖      | α 押し出し  | α *        | I    |    |           |            |            | I   |
| 23  | 加茂   | 60*100      | 86       | 二次   | 清落崖      | 清落崖      | α 清落崖      | α 流動    | α α        | I    | 6  | 11        |            |            | I   |
| 24  | 京北   | 100*100     | 39       | 初生   | 清落崖      | 清落崖      | α 清落崖      | α 押し出し  | α α        | I    | 5  | 36        |            |            | I   |
| 25  | 上野   | 70*25       | 93       | 初生   | 清落崖      | 清落崖      | α 不明瞭      | * 隆起    | α *        | I    | 9  | 10        |            |            | I   |
| 26  | 滝    | 90*35       | 90       | 初生   | 清落崖      | 清落崖      | α 横ズレ清落崖   | α 押し出し  | α α t      | I    | 10 | 27        | 0.2        |            | I   |
| 27  | 住吉   | 130*30      | 95       | 初生   | 清落崖      | 亀裂       | α 不明瞭      | * 隆起    | α *        | I    | 5  | 14        | 0.3        |            | I   |
| 28  | 東田   | 85*90       | 85       | 初生   | 清落崖      | 不明瞭      | * 清落崖      | α 押し出し  | α *        | I    | 10 | 13        |            |            | I   |
| 29  | 北畑   | 60*300      | 87       | 再発   | 清落崖      | 横ズレ陥没帯   | α 清落崖      | α 流動    | α α t      | I    |    |           | 50         |            | I   |
| 30  | 東田   | 170*80      | 60       | 再発   | 清落崖      | 不明瞭      | * 亀裂       | α 押し出し  | α *        | I    | 8  | 12        |            |            | I   |
| 31  | 園    | 150*50      | 80       | 再発   | 清落崖      | 不明瞭      | * 清落崖      | α 押し出し  | α *        | I    | 6  | 18        |            |            | I   |
| 32  | 東    | 90*50       | 91       | 二次   | 陥没帯      | 横ズレ亀裂    | α 亀裂       | α 押し出し  | α α t      | I    | 6  | 13        | 3          | 6          | I   |
| 33  | 東本庄  | 35*25       | 89       | 二次   | 陥没帯      | 陥没帯      | α 不明瞭      | * 押し出し  | α *        | I    | 4  | 27        | 0.4        | 3          | I   |
| 34  | 吉川   | 25*16       | 89       | 二次   | 陥没帯      | 不明瞭      | * 不明瞭      | * 押し出し  | **         | I    | 3  | 23        | 1          | 2          | I   |
| 35  | 里西   | 45*80       | 84       | 初生   | 陥没帯      | 横ズレ陥没帯   | α 崩壊       | * 隆起    | α α t      | I    | 12 | 8         | 5          | 10         | I   |
| 36  | 徳光   | 90*150      | 81       | 初生   | 陥没帯      | 横ズレ陥没帯   | α 陥没帯      | α 隆起    | α α t      | I    | 25 | 15        | 35         | 40         | I   |
| 37  | 黒谷   | 95*70       | 74       | 初生   | 陥没帯      | 陥没帯      | α 横ズレ陥没帯   | α 隆起    | α α t      | I    | 11 | 18        | 7          | 10         | I   |
| 38  | 船木   | 200*140     | 94       | 二次   | 清落崖      | 清落崖      | α 亀裂       | α 不明瞭   | α α        | I    | 12 | 7         |            | 13         | I   |
| 39  | 大沢   | 80*70       | 75       | 再発   | 陥没帯      | 亀裂       | α 清落崖      | α 崩壊    | α α        | I    | 10 | 4         |            | 8          | I   |
| 40  | 東田   | 60*25       | 91       | 再発   | 陥没帯      | 亀裂       | α 不明瞭      | * 押し出し  | α *        | I    | 5  | 8         | 0.6        | 5          | I   |
| 41  | 豊岡   | 110*180     | 73       | 再発   | 陥没帯      | 不明瞭      | * 横ズレ亀裂    | α 押し出し  | α *        | I    | 6  | 4         |            | 10         | I   |
| 42  | 戸田峠  | 20*70       | 83       | 二次   | 亀裂       | 亀裂       | α 不明瞭      | * 押し出し  | α *        | I    | 5  | 5         |            |            | I   |
| 43  | 奥谷   | 25*30       | 91       | 二次   | 亀裂       | 亀裂       | α 不明瞭      | * 押し出し  | α *        | I    |    |           |            |            | I   |
| 44  | 初湯川  | 70*100      | 85       | 二次   | 亀裂       | 不明瞭      | * 不明瞭      | * 不明瞭   | **         | I    | 20 | 40        |            |            | I   |
| 45  | 川代   | 5*10        | 85       | 初生   | 亀裂       | 開口性亀裂    | α 圧縮性亀裂    | γ 押し出し  | α γ        | I    | 3  | 40        |            |            | I   |
| 46  | 鴨子ヶ原 | 140*200     | 95       | 初生   | 亀裂       | 亀裂       | α 亀裂       | α 亀裂    | α α        | I    |    |           |            |            | I   |
| 47  | 日野   | 110*40      | 91       | 初生   | 亀裂       | 不明瞭      | * 不明瞭      | * 左押し出し | **         | I    | 15 | 31        | 0.02       |            | I   |
| 48  | 宇治田原 | 40*40       | 90       | 二次   | 清落崖      | 横ズレ清落崖   | α 不明瞭      | * 押し出し  | α *        | その他  | 10 | 40        |            |            | その他 |
| 49  | 金会   | 30*45       | 79       | 二次   | 清落崖      | 横ズレ清落崖   | α 清落崖      | α 押し出し  | α α        | その他  | 5  | 20        |            |            | その他 |
| 50  | 大島   | 50*35       | 88       | 二次   | 清落崖      | 清落崖      | α 横ズレ清落崖   | α 押し出し  | α α        | その他  | 7  | 20        | 5          |            | その他 |
| 51  | 中邑   | 60*15       | 74       | 二次   | 清落崖      | 清落崖      | α 不明瞭      | * 押し出し  | α *        | その他  | 7  | 12        |            |            | その他 |
| 52  | 毘沙門  | 45*35       | 82       | 二次   | 清落崖      | 陥没帯      | α 不明瞭      | * 押し出し  | α *        | その他  | 6  | 12        |            |            | その他 |
| 53  | 明延   | 40*25       | 62       | 二次   | 清落崖      | 不明瞭      | * 亀裂       | α 押し出し  | α *        | その他  | 9  | 22        |            |            | その他 |
| 54  | 生駒   | 25*25       | 91       | 初生   | 清落崖      | 押し出し 3 m | α 押し出し 1 m | α 押し出し  | α α        | その他  | 12 | 40        | 3          |            | その他 |
| 55  | 洞    | 65*70       | 85       | 初生   | 清落崖      | 清落崖      | α 横ズレ清落崖   | α 右押し出し | α α t      | その他  | 10 | 23        | 0.5        |            | その他 |
| 56  | 平沼田  | 65*30       | 83       | 二次   | 亀裂       | 亀裂       | α 不明瞭      | * 亀裂    | α *        | その他  | 10 | 25        |            |            | その他 |
| 57  | 榎の木  | 30*5        | 86       | 二次   | 亀裂       | 不明瞭      | * 不明瞭      | * 右亀裂   | **         | その他  | 6  | 55        |            |            | その他 |
| 58  | 堺    | 30*15       | 91       | 二次   | 亀裂       | 不明瞭      | * 不明瞭      | * 右押し出し | **         | その他  | 3  | 23        |            |            | その他 |
| 59  | 滝畑   | 30*10       | 83       | 二次   | 亀裂       | 不明瞭      | * 亀裂       | α 押し出し  | α *        | その他  | 7  | 50        |            |            | その他 |

・横ズレ性は特に明瞭なもののみを記載

・α:引張変形、α t:引張変形(横ズレ大)、β:剪断変形、γ:圧縮変形

・\*は不明瞭なもの



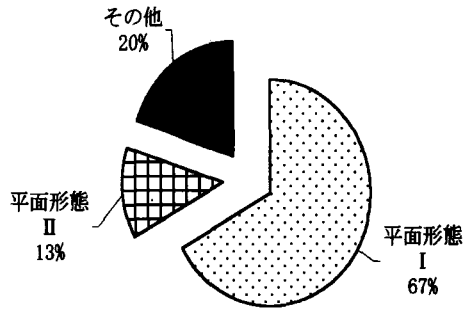


図-V-1 地すべり平面形態分布頻度

- ・ 陥没幅：頭部滑落崖下の陥没帯の幅 (m)
- ・ すべり面構造：地質調査結果から推定し構造 I・II に分類

## 1.2 分類・分布の実態

### (1) 平面形態

表-V-1 にもとづき各地すべり地の平面形態を分類し、この分類がどの程度妥当性をもつかを検証する。

今回取り上げた地塊型地すべりには、平面形態 I・II に分類された平面すべりのほかに、曲面すべり（いわゆる円弧すべり・回転すべり）が含まれているのでこれをその他とした。

各地すべり地においていずれも頭部は引張変形、末端部は圧縮変形であった。末端部の一部では剪断面が直接現れるものがあつたが、圧縮変形の特殊ケースと考えた。平面形態分類の要点である両側部は、側部変動地形を変形の組合せとすると、平面形態 I にあたる引張変形・引張変形と平面形態 II にあたる剪断変形・引張変形の二つの組合せに整理された。その一部が不明瞭なものが多く現れたが、これは地すべりの進行の程度によるものと考え、一方の側部における変形性の特徴等から平面形態 I と平面形態 II に分類した。

これら平面形態 I・II の分布は図-V-1 に示した。これによると、今回区分した平面形態 I・II は、調査対象地の地すべり地の80%を占め、そのうち平面形態 I が約84%、平面形態 II が約16%であった。その他20%は、地塊型円弧すべりであった。

すなわち、地塊型平面すべりにおいては、現実に見られる変動地形やその平面形態は、それぞれの地すべり地の地形・地質条件・地すべり運動進行程度等を反映して様々に現出するが、各部位の変形とその組合せ

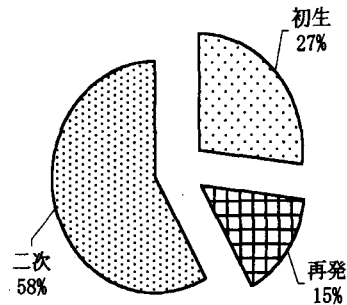


図-V-2 地塊型地すべり発生区分

をとると、平面形態 I・II に分類されるのであり、この平面形態分類が地塊型平面すべりにほぼ妥当性のあることが実証された。

### (2) 地すべり発生区分

表-V-1 にもとづき、初生すべり・再発すべり・二次すべりの地すべり発生区分頻度（図-V-2）をみると、地塊型はほぼ原形を保った移動であるが、初生すべりとは限らず二次すべりが58%あることがわかる。地すべりは、一般に初生～再発～二次に移行するが、いずれの段階でも地塊型が現れることがわかる。

平面形態ごとの発生区分頻度（図-V-3、V-4）では、平面形態 I では二次すべりが多く、平面形態 II では初生と再発が多くなっている。これについては、今後地質的に明らかにしなければならないが、平面形態 II がより地質的な規定を受けている反映と思われる。

## 1.3 変動地形の現れ方

### (1) 頭部変動地形区分

頭部変動地形は、初期段階の亀裂とそれが進行した滑落崖・陥没帯に区分された。その出現頻度は、平面形態区分ごとの関係（図-V-5）および発生区分ごとの関係（図-V-6）では、滑落崖が60～75%程度、陥没帯が20～30%程度、亀裂が0～20%程度であった。

### (2) 陥没帯幅とすべり面深度・移動量との関係

陥没帯幅が何に依存するかについて、すべり面深度・移動量との関係から検討してみた。

いま、陥没帯幅  $w$  (m) とすべり面深度  $h$  (m) の関係をプロットすると図-V-7 となり、つぎの回

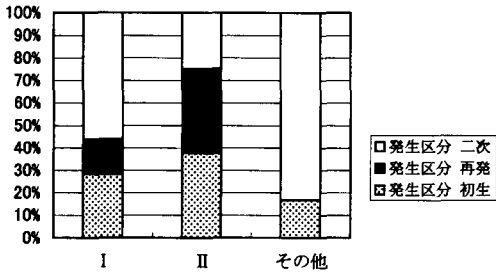


図-V-3 平面形態ごとの地すべり発生区分

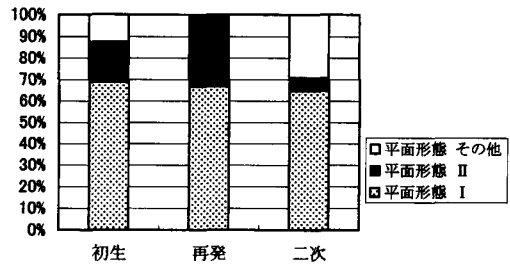


図-V-4 地すべり発生区分ごとの平面形態

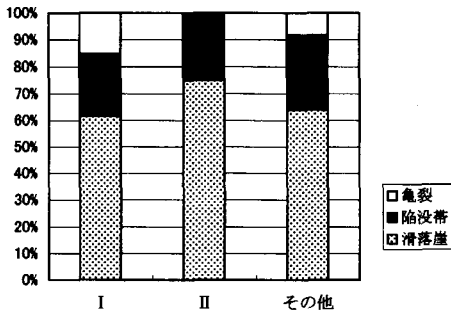


図-V-5 平面形態ごとの頭部変動地形

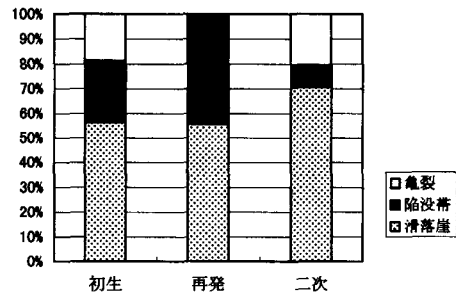


図-V-6 発生区分ごとの頭部変動地形

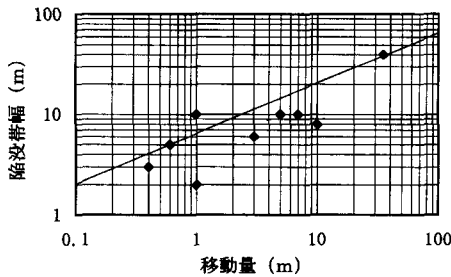


図-V-7 すべり面深度と陥没帯幅との関係

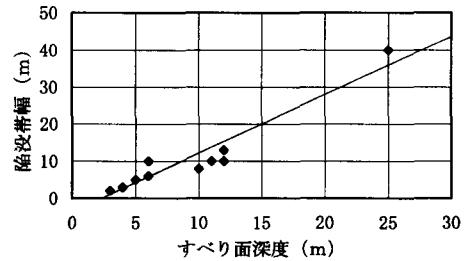


図-V-8 移動量と陥没帯幅との関係

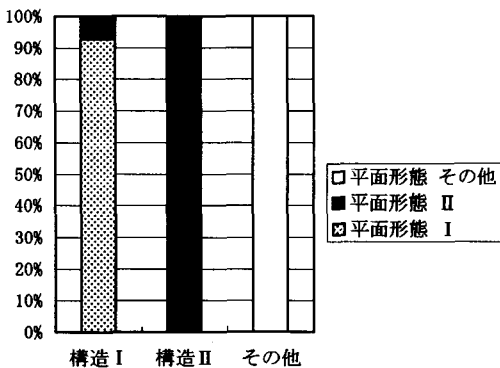


図-V-9 平面形態ごとの地すべり発生区分

帰式が得られた。

$$w = -4.6 + 1.6h \quad (\text{相関係数 } r=0.91) \quad \dots\dots\dots V-(1)\text{式}$$

陥没帯は、主動崩壊線が頭部と谷側に対になることによって形成されるが、主動崩壊線は勾配が60°程度であることから、すべり面深度と陥没帯深度がほぼ等しくなり、V-(1)式となることを示すものである。この関係は既に高野(1960)が実験的に明らかにしている。

さらに、陥没帯幅  $w$  (m) と移動量  $d$  (m) の関係(図-V-8)から、つぎの回帰式が得られた。

$$w = 4.1 d^{0.5} \quad (\text{相関係数 } r=0.87)$$

…………… V-(2)式

これは、移動量の大きさが陥没帯幅に影響されることを示すものと思われる。

## 2. すべり面構造と平面形態との対応関係の検証

### 2.1 各地すべり地のすべり面構造と平面形態の対応関係

#### (1) 一般的傾向

一般的傾向として、すべり面構造 I・II に応じてそれぞれ平面形態 I・II であることが帰納的に検証された(図-V-9)。

#### (2) 特殊ケース

すべり面構造 I ではその 7% が平面形態 II となっている。これに該当するのは、No. 6~8 の地すべり地である。平面形態 II に当たる形態は、剪断変形側の側部ですべり面が深くなっているすべり面構造 II に当たるすべり面構造が想定されており(渡・酒井 1975)、本研究でも確認された。しかし、No. 6~8 の地すべり地は、すべり面構造 I であり、剪断変形側の側部で浅くなっている。地すべり運動はすべり面構造に規定され変動地形が形成されるという推察からは、この現象は一見矛盾する関係にある。

しかし No. 6~8 の地すべり地は、構造 I の底部すべり面が地表に現れ、この部分で横ズレ大の滑落崖(閉塞性)となり剪断変形を、他方の側部は横ズレ小の滑落崖・陥没帯となり引張変形(ただし No. 8 は不明瞭)を形成し、側部変動地形の組合せが平面形態 II の剪断変形・引張変形となったと考えられる。

平面形態では平面形態 II、すべり面構造では構造 I となるので、佐々木・新谷(2000等)はこれを本論の平面形態 I・II とは別なものとして分類した。本論では、すべり面構造と地形面との関係で現れる構造 I の特殊ケースと考えることとした。

### 2.2 既往文献によるすべり面構造の検討

#### (1) 平面形態 I

平面形態 I に当たる地すべり地は、一般に流れ盤地すべりと呼ばれるものである。すべり面構造としては底部の平面すべり面が主すべり面となるすべり面構造 I となる。

その主すべり面の成因は、地層面に並行に形成された粘土化帯等の弱層であると考えられる。

#### (2) 平面形態 II

平面形態 II に当たる地すべり地は、頭部滑落崖と移動方向にほぼ平行な剪断変形の横ズレ滑落崖を形成する変動地形を呈する平面形態である。これは、各地の地すべり地で認められ、本研究対象地での地質データよりも詳細に研究されている(長崎県鷲尾岳(大八木ほか 1970)、島根県山田(子川ほか 1991)、富山県国見(平田ほか 1991)、福島県抜戸(申ほか 1992)、大阪府亀瀬(山田ほか 1971)等)。これらの地すべり地は、平面形態 I の地すべり地と同様に、一般に流れ盤地すべりと呼ばれるもので、地すべり地塊底部に主すべり面があるが、さらに側部の剪断変形を呈する横ズレ滑落崖にそって側部すべり面が存在するもので、本研究で明らかにした同一のすべり面構造 II をなす。

これらの既往文献では、そのすべり面の成因はつぎのように明らかにされている。

- ・底部すべり面は、地層面に並行に形成された粘土化帯等の弱層である(長崎県鷲尾岳(大八木ほか 1970)、島根県山田(子川ほか 1991)、富山県国見(平田ほか 1991)等)。
- ・側部すべり面は、断層面(長崎県鷲尾岳(大八木他 1970)、福島県抜戸(申 1992)等)や不整合面(富山県国見(平田ほか 1991)等)あるいは地層の凹状側部(大阪府亀瀬(山田ほか 1971))等の形状の弱層である。

これらによると、平面形態 II のすべり面構造は、底部と側部の弱層による地質構造の規制を受けるためクサビ状の構造 II をなすものである。

ただし、鷲尾岳地すべり地では、平面形態 II では引張変形となる側部で剪断変形が現れている。これは、構造 II の底部すべり面が地表に現れ、この部分で横ズレ大の剪断変形の滑落崖(閉塞性)が形成されたものである。また、側部すべり面が形成されている側部でも、これを地すべり層の層準に不整合に被う火山岩が分布する頭部付近では剪断変形ではなく、引張変形の横ズレ滑落崖が形成されている。これは、側部すべり面を形成した断層が、上位の火山岩に及んでいないために、このような引張変形が形成されたものと考えられた(大八木他 1970)。すなわち、ここでは側部変動地形の組合せが平面形態 II の剪断変形・引張変形ではなく剪断変形(一部引張変形)・剪断変形であるが、これはすべり面構造と地形面との関係で現れる構造 II の特殊ケースと考えることとした。

構造 I は、平面すべりのすべり面構造としては、

ごく一般的・普遍的に認められるものである。しかし、これまでの研究では、本研究で示したような変動地形の特徴が捉えられていないものが多く、また、構造Ⅱとの区別、および変動地形の平面形態Ⅰ・Ⅱとの関係も明確ではなかった。

以上から、これらのすべり面構造Ⅰ・Ⅱは、平面形態Ⅰ・Ⅱの一般的すべり面構造モデルとして位置づけることとした。

3. 平面形態分類と様々な地すべり変動実態

本研究対象の地塊型平面地すべり地において現れた斜面変動を総括すると図-V-10ようになる。これからつぎのことがいえる。

- 平面形態は、すべり面構造Ⅰ・Ⅱに規定されて、平面形態Ⅰ・Ⅱとなる。ただし、すべり面と地形の関係で、構造Ⅰの底部すべり面が地表に現れるような場合は、平面形態Ⅱとなる。
- 地すべり移動量が1m以下の段階では、各部位の変動地形は連続的に現れず、平面形態Ⅰでは(頭部)～(平面的回転外側の横ズレ引張変形部にあたる側部)～(末端部)に、平面形態Ⅱでは(頭部)～(剪断変形にあたる側部)～(末端部)に

まず変動地形が現れる。この場合、平面形態Ⅰでの(平面的回転外側の横ズレ引張変形部にあたる側部)では、横ズレ陥没帯、横ズレ雁行状滑落崖等となる。

- 地すべり移動量が5～6m以上となると、末端部では圧縮変形の押し出し・隆起とともに側部の一方で崩壊が現れ、末端部全般が崩壊・流動性を示すようになる。さらに進行すると移動地塊そのものが崩壊～流動化する場合があると考えられる。
- 地すべり運動は、すべり面沿いの移動とともに、深度方向の移動量変化(一般には地表部で移動量が大きくなる)、移動方向での移動量変化(移動量が大きくなる場合と小さくなる場合がある)等の移動土塊内の塑性的変形をともなう。また、平面的回転の進行にともなう反転もしくは移動方向での反転が現れる場合がある。

このように、本研究は地すべり運動を中心とした多様な斜面変動から出発し、それを現出させた基本的ものとして、すべり面構造・地すべり地塊運動・変動地形の三次元的相互関係を明らかにしたが、現実の地塊型平面すべりの形面形態は様々であって、さらに塑性的変形・地塊のブロック化・崩壊・流動等の他の斜

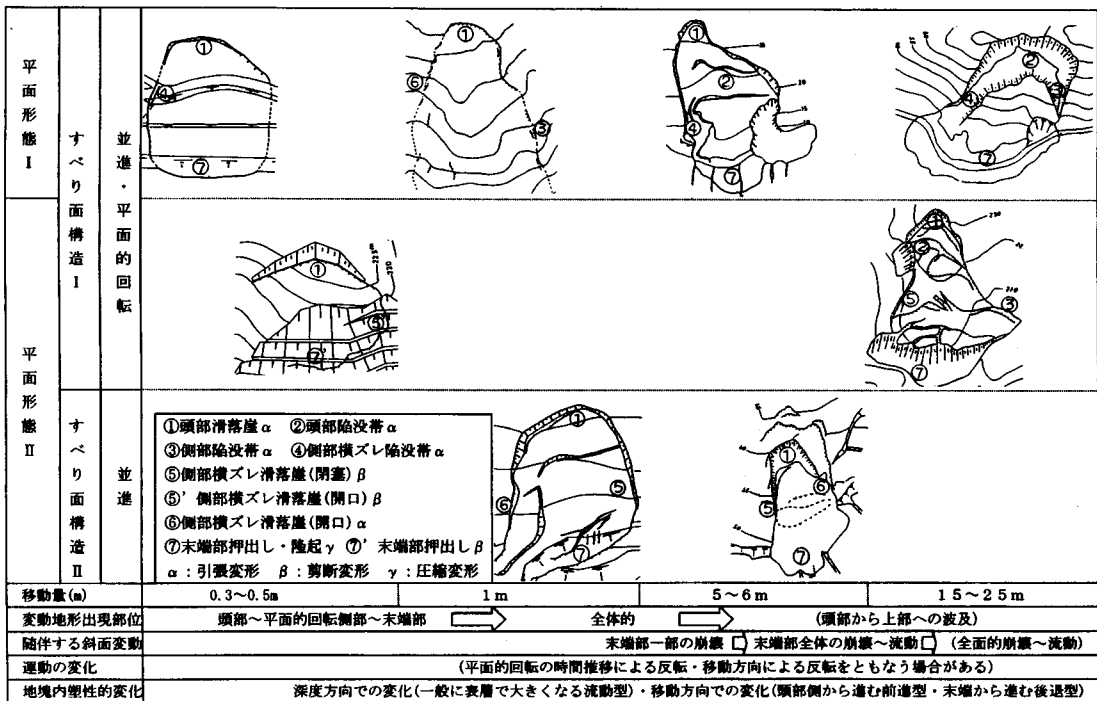


図-V-10 平面形態分類と様々な地すべり変動実態

面変動様態を取るものであることが示された。そしてこれらは、すべり面構造に規定される運動の他に、地すべり進行程度・すべり面の凹凸・地すべり地塊の性状等の規定を受けて、地塊物質構成や様々な発達段階等に規定されたものとして整理されたが、すべり面構造に規定される運動が基本的であると考えられた。

すなわち、本研究で対象とした地塊型平面すべりは、①典型的な地すべり運動様式、②移動単位となる主要な運動主体、③繰り返し現れる運動形態であり、特に崩壊・流動に至る前の④地すべり発生の初期に現れる運動であるので、地すべり予知・対策の対象となる基本的運動形態であるといえる。

## VI. 地すべり三次元運動機構

### 1. すべり面構造による地塊運動の規定

すべり面構造Ⅰ・Ⅱにおいては、地すべり地塊はつぎのような規定をうけると考えられる。

#### (1) 構造Ⅰ

底部に一面のすべり面構造となるので、地すべり地塊の自重作用だけのときは、この一面に沿ったその傾斜方向の移動となる (Goodman 1976)。しかし、すべり面と地形との関係で、地形面にすべり面が斜交するように、一方の側部で抵抗が大きくなる場合は、並進運動とともにこの側部側が軸となり回転する平面的回転運動となる。

#### (2) 構造Ⅱ

底部と側部の二面にすべり面が形成され、クサビ状構造となるので、地すべり地塊の自重作用だけのときは、二面の交差線に沿って移動する並進運動となる (Goodman 1976)。

二面の交差線方向が移動方向となるが、これは底部すべり面の傾斜方向と異なる。

以上のように、地すべり地塊がすべり面構造の規定を受けてどのように運動するかという考察によっても、構造Ⅰでは並進をとまなう平面的回転運動、構造Ⅱでは並進運動となることが考えられた。

すべり面上の地すべり地塊は、上に述べたように、自重作用だけを考えるとすべり面の傾斜方向が移動方向となるが、一般にはすべり面傾斜方向と移動方向は一致しない。これは、一つには自重作用以外の水圧等の作用によるものと考えられるが、自重作用だけでも、構造Ⅰにみる左右の不均質による平面的回転運動、あ

るいは、構造Ⅱにみる側部すべり面によるクサビ状構造による並進運動によって現れると考えられる。

### 2. 模型を用いた地塊運動様式の再現

すべり面構造Ⅰ・Ⅱに規定される地すべり地塊が、どのような運動様式をとり、この運動によって周辺部にどのような変形が生じさせるかを、すべり面構造モデル模型を用いて地塊運動を再現し検討した。

#### (1) 検討要領

##### ①模型化の基礎データ

前節で検討した、平面形態Ⅰ・Ⅱに応じた、すべり面三次元構造モデル構造Ⅰ・Ⅱを模型化した。ここでは、形態的に地すべり地塊の運動を検証するのが目的であるので、地すべり地塊形態およびすべり面でのみすべるというすべり面性状とすべり面構造のみを模型化した。

##### ②模型の作成

模型はすべり面構造のみのモデル化であるので、強度・長さ・密度・力・時間の各寸法比は無視し、材料は発砲スチロールを用いた。地すべり地塊を取り囲む面は、剪断変形のすべり面と引張り変形の分離面の二種類とし、すべり面のみをすべりやすい性状になるように、セロハンを張った。末端部については、開放状態としたが、構造Ⅰについては、末端部の抵抗が地すべり地塊の運動に影響を与える要素となることから、人為的にセロテープで抵抗を設けた。

##### ③運動の再現

地すべり地塊の運動は、原地形状態から手を離し自重作用を再現した。

#### (2) 検討結果

##### ①構造Ⅰ (写真-VI-1)

底部の1つのすべり面に沿う並進を伴う平面的回転すべりが発生し、頭部から右側部および左側部にかけて分離面が現れた。このうち、左側部は横ズレ性を示し、右側部は末端が閉塞状態を示した。

##### ②構造Ⅱ (写真-VI-2)

2つのすべり面に沿う並進すべりが発生し、右側部で側部すべり面、頭部から左側部に分離面が現れた。両側部は共に横ズレ性を示した。

#### (3) まとめ

この模型による検討では、地すべり地塊がすべり面三次元構造に規定されて、構造Ⅰでは並進・平面的

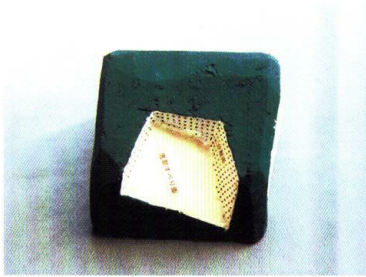


写真-VI-1(1)  
すべり面構造 I

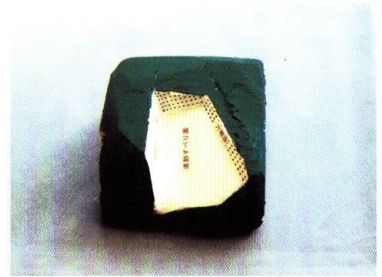


写真-VI-2(1)  
すべり面構造 II

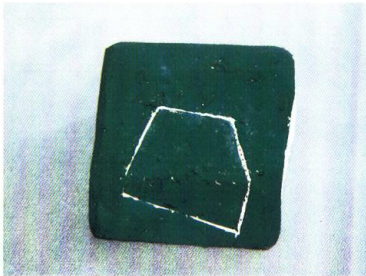


写真-VI-1(2)  
地すべり前

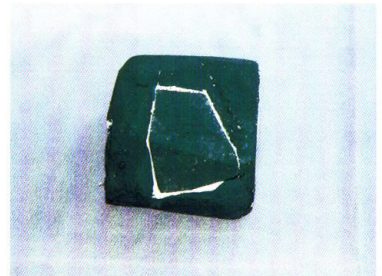


写真-VI-2(2)  
地すべり前

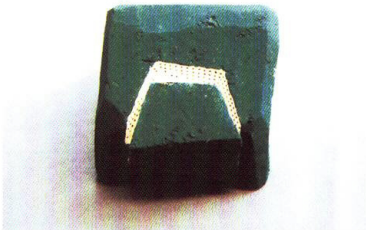


写真-VI-1(3)  
地すべり発生後



写真-VI-2(3)  
地すべり発生後

回転, 構造 II では並進運動となることが確認された。またこの運動によって, 側部において構造 I には平面形態 I, 構造 II には平面形態 II を示す変形であるすべり面 (剪断変形部分) や分離面 (引張変形部分), 及び横ズレ性が現れることが確認された。現実の地すべりにおいては, 分離面は頭部や側部の引張変形の滑落崖・陥没帯に, すべり面は側部滑落崖等になるものと考えた。

### 3. 三次元運動機構

以上を総括すると, すべり面構造によって地塊運動様式が決まり, すべり面構造と地形との関係で, 地塊運動による各部位の特有の変形が現れる平面形態とこれに対応した地塊構造の関係を認めることができ, 図-VI-1 のすべり面構造・地塊運動・変動地形三次元モデルにまとめることができる。平面形態分類毎に,

変形によって現れる変動地形までを整理しるとつぎのようになる。

#### (1) 平面形態 I

##### 1) すべり面構造

底部に一面のすべり面構造 I となる。

##### 2) 運動様式

地すべり地塊の自重による運動は, すべり面傾斜方向への並進運動となる。しかし, 斜面傾斜方向とすべり面傾斜方向が異なる場合が多く, すべり面の傾斜方向側で一般に抵抗が大きくなる。この場合は, 抵抗が大きい部分が回転軸側で抵抗の少ない側部から移動する平面的回転運動が実現し, 並進・平面的回転運動となる。この平面的回転運動によって, すべり面の傾斜方向と異なる方向の地すべり運動が実現する。

ただし, 地すべり進行の過程でこの回転方向が変わることがある。

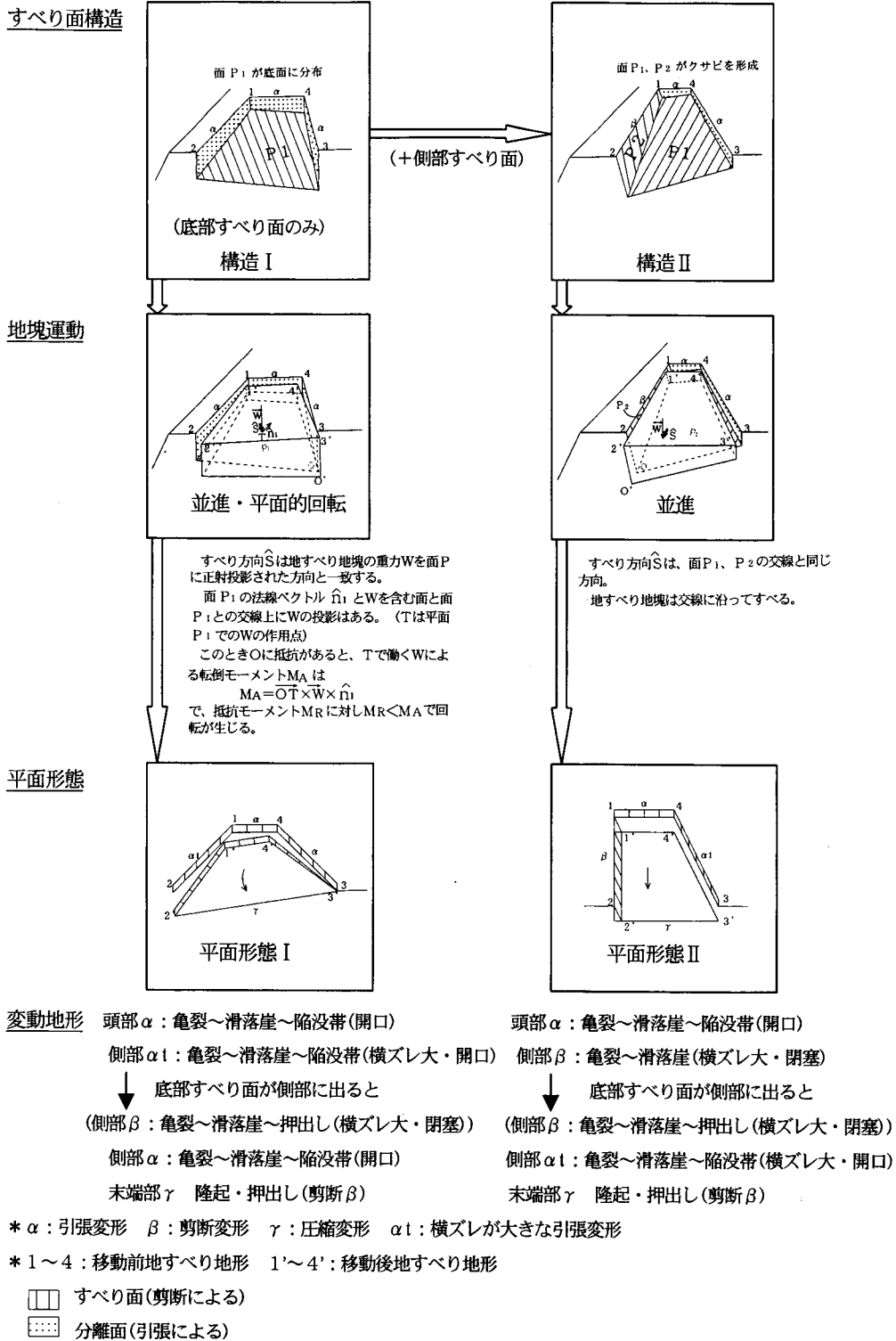


図-VI-1 すべり面構造・地塊運動・変動地形の三次元モデル

これらの側部は、地すべり地塊で引張変形を受ける形状に形成される。地すべり地塊は、一般に引張強度は小さいので、この運動は最小エネルギーで運動する様式をとる。

### 3) 地すべり地塊の変形

底部の1つのすべり面に沿う並進・平面的回転すべりが発生し、頭部から両側部にかけて引張変形が現れる。このうち、平面的回転の円周側側部は横ズレを示し、中心側側部は末端が閉塞状となる。

ただし、底部すべり面が地表に出た部分では、円周側側部の剪断変形が現れこの部分は横ズレを示す。

### 4) 変動地形

#### [頭部]

亀裂（開口・落差を伴う）・裂かから主働破壊によって滑落崖、陥没体等が形成される。これら滑落崖等の変動地形下部に沿って、沈下が著しい引張変形地塊を形成する。

#### [円周側側部]

亀裂（開口・落差を伴う）・裂かから主働破壊によって滑落崖、陥没体等が形成される。亀裂段階では、横ズレは明瞭ではないが、滑落崖、陥没帯、裂か等では横ズレが明瞭となり、これらの開口部は末端に及ぶ。ただし、亀裂段階においても、すべり方向に雁行状に並ぶ形状を示す場合がある。ここでも頭部と同様に、滑落崖に沿って引張変形地塊を形成する。

また、底部すべり面が地表に現れる場合は、剪断変形で横ズレのある閉塞した滑落崖が形成される。

#### [中心側側部]

亀裂（開口・落差を伴う）・裂かから主働破壊によって滑落崖、陥没体等が形成される。形状的に頭部と連続的になり、横ズレは少ない。開口部は末端で閉塞状となる。ここでも滑落崖に沿って引張変形地塊を形成する。円周側側部が亀裂段階では、中心側側部には変動地形が現れない場合がある。

#### [末端部]

末端開放の場合は、末端部はすべり面沿いの剪断変形の押出しが現れる。

末端閉塞の場合は、円周側側部末端は、地塊表面が山側へ傾斜する回転運動を伴う受働破壊で隆起等が現れ、圧縮変形地塊を形成する。

## (2) 平面形態Ⅱ

### 1) すべり面構造

底部と側部の二面にすべり面が形成され、クサビ

状の構造Ⅱとなる。

### 2) 運動様式

地すべり地塊の自重による運動は、二面の交差線に沿って移動する交差線方向の並進運動となる。底部すべり面の傾斜方向は、側部すべり面側へ傾いており、クサビ状構造によって、底部すべり面の傾斜方向と異なるすべり方向が実現する。

一つの側部は、底部すべり面と同じ剪断抵抗の小さな側部すべり面が形成され剪断変形となり、他方の側部は地すべり地塊で引張変形を受ける形状に形成される。地すべり地塊は、一般に引張強度は小さいので、この運動は最小エネルギーで運動する様式をとる。

### 3) 地すべり地塊の変形

2つのすべり面に沿う並進すべりが発生し、頭部から一つの側部にかけて引張変形、他方の側部すべり面側で剪断変形が現れ、両側部は共に横ズレを示す。

ただし、底部すべり面が地表に出た部分では側部の剪断変形が現れる。また、剪断変形部でもこれが被覆層に覆われると、横ズレ引張変形となる。

### 4) 変動地形

#### [頭部]

亀裂（開口・落差を伴う）・裂かから主働破壊によって滑落崖、陥没体等が形成される。これら滑落崖等の変動地形下部に沿って、沈下が著しい引張変形地塊を形成する。

#### [引張変形側部]

亀裂（開口・落差を伴う）・裂かから主働破壊によって滑落崖、陥没体等が形成される。地すべり地塊本体との関係では横ズレが示されるが、引張変形地塊を形成するので、外側の滑落崖等で明瞭な横ズレを示さない場合がある。これらの変動地形は、形状的に頭部と連続的になる。

また、すべり面構造と地形面との関係で底部すべり面が一方の側部に出る場合は、底部すべり面が地表に現れ剪断変形で横ズレのある閉塞状の滑落崖が形成される。

#### [剪断変形側部]

亀裂、滑落崖が形成される。これらは閉塞状で、横ズレが明瞭となる。ただし、側部すべり面が地表にまで及ばないときは、閉塞状は地表付近で緩み開口状となり、雁行状に並ぶ場合がある。この場合でも、その側部の形成方向は、移動方向と平行であり、横ズレが現れる。



## [末端部]

末端開放の場合は、末端部はすべり面沿いの剪断変形の押出しが現れる。

末端閉塞の場合は、圧縮変形に伴う受働破壊で押し・隆起等が現れ、圧縮変形地塊を形成する。

## (3) 平面すべりと回転すべりとの関係

平面形態Ⅰ・Ⅱは平面すべり面からなる構造Ⅰ・Ⅱのすべり面構造に規定された地すべり運動によって現れた変動地形であるが、地塊型地すべりにはそのほか、曲面すべりと呼ばれる円弧状すべり面沿いの縦断方向の山側へ地盤が傾斜する回転運動がある。この回転すべりと直線すべりがどのような関係にあるかは図Ⅲ-1に示したように、つぎのように整理できる。

平面すべりの運動の主体である主地すべり地塊は、頭部から側部にかけて引張変形地塊を、末端部には圧縮変形地塊を形成する。引張変形地塊では主働破壊が現れ、滑落崖～陥没帯が形成される。圧縮地塊では受働破壊が現れ、隆起・押し等が現れる。

これらは、主地すべり地塊の移動によって現れた派生地塊であるが、引張地塊はそれ自身も地すべりの推力として作用していく。

地すべりの初生～再発～二次へと進行するに伴い、地すべり地塊は原岩の組織をもったものから細分化し風化し崩土化していくが、平面すべり面に規定される主地すべり地塊部分がほとんどなく、引張変形地塊が推力となり直接圧縮変形地塊に接する形をとると、主働破壊面と受働破壊面が連続する円弧すべり面沿いの回転すべりとなり、頭部沈下、末端隆起の変動地形が現れる。

ただし、初生すべりでも、引張変形地塊が直接推力となり回転すべりの形態をとるものがある。

## VII. 地すべり対策への提言

地すべり地は中山間地の緩斜面で多くは棚田地帯を形成し、農業生産の場であるとともに生活の場となっている。地すべり地では、長年の生活の知恵からなるべく地すべりに逆らわないような土地利用形態がなされおり、そのため小面積の田が多く耕運機がようやく通れる小道しかないという状況である。このような中山間地域にこそ生産・生活基盤の整備が必要であるが、地形改変が行われる場合には、それが斜面の安定を損なわないように、そしてできれば現状より安定化させ

るような地すべり対策が必要である。さらに、環境を守る立場からは、水田および地すべり地の生態学的意義が考えられており(岡村 1992, 守山 1997等)、今後は地すべり対策にこの要素も考慮されなければならないであろう。地すべり対策にあたっては、地すべり予知のための地すべりの地形・地質・運動の把握、特にその三次元的特性把握が重要と考えられるが、これに関する以上のような本研究結果から、つぎのような地すべり対策への提言を行う(図Ⅶ-1)。

## 1. 地すべり調査方法についての提言

## 1.1 地形変動情報について

地すべり対策の基本は、地すべりの実態把握・機構解析であるが、そのための重要な手法の一つは、地形に現れた変動情報の解析である。

## (1) 地すべり地形判読

地すべり対策において重要な調査に、地すべり地形判読がある。これは、対象とする個所が地すべり履歴を有するか否か、およびその変動の程度の判定であり、以後の地すべり対策のための解析が大きく異なることになる。

この地形判読においてしばしば判断に困るのが、頭部から側部にカギ型に形成されている谷地形にその囲まれた地塊の判定である。このカギ型の谷地形が侵食作用のみによるものとすれば地すべり移動地塊と判定されないが、頭部から一つの側部に形成された地すべり陥没帯が発達したものとすると地すべり地塊と判定される。

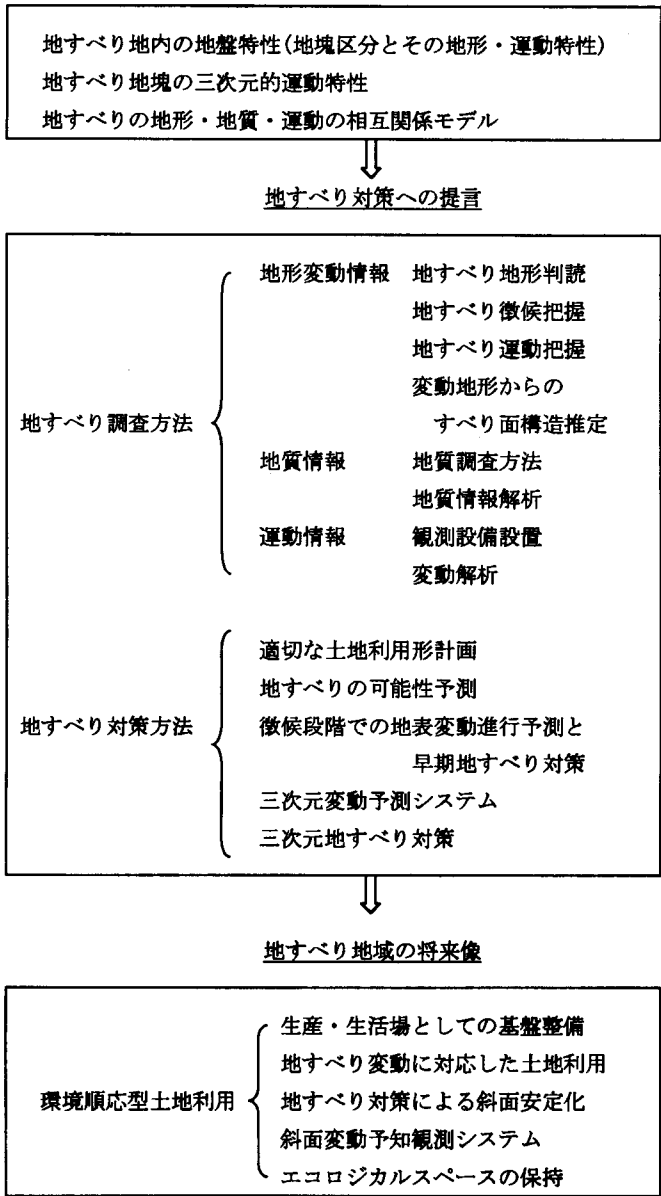
平面形態Ⅰでは陥没帯が左右非対称的に形成される場合があるので、上記のような地形は地すべり地塊の可能性のある地塊であるとマークしておく必要がある。

## (2) 地すべり徴候把握

地すべり初期段階の亀裂等の徴候は、その運動が地すべり地塊の全体的な移動であっても、地表においては頭部・側部・末端部と連続して現れない場合がある。この場合、各部分毎の現象と見誤ることがある。たとえば、側部の現象をその亀裂等が発生した部分だけの現象と判断すると、全体の運動が把握されないことになる。

側部において一方が横ズレ、他方がそうでないときは、これらをそれぞれ別個の現象と考えるのではなく、平面形態Ⅰのような一つの地すべり地塊の平面的

地すべり予知のための地形・地質・運動三次元的特性把握



図一七ー一 本研究成果と地すべり対策への提言

回転運動の徴候ではないかを検討する必要がある。

(3) 地すべり運動把握

さらにもう少し地すべり変動が進行すると、地すべり地塊の各部分で移動方向や移動量が明瞭になってくる。この段階でも、各部分で移動方向や移動量が異

なって現れる場合がある。上下方向で移動量が異なるのはよく見られる現象である(たとえば、伊藤ほか 1991, 菅原 1993)が、移動方向が異なるものについては、これまで全体としての流動するような運動(たとえば、亀の瀬地すべり地(山田ほか 1971), 猿供養地すべり地(白石 1992)), または、別個のすべり面

である別の地すべり地塊の運動（高野 1983）と考えられてきた。また、早川ほか（1993）は地表面変位の二次元的解析から、地すべり全体のクリープ的変形挙動とした。

平面形態Ⅰでは同一地すべり地塊であっても、その部位によって移動方向・移動量が異なる平面的回転運動をとるので、一つの地すべり地塊の平面的回転運動とならないかを検討する必要がある。

また、すべり面最大傾斜方向と移動方向が異なる問題（申 1995等）がある。平面すべり面上の土塊は、重力による作用だけを考えると、すべり方向は理論的にはすべり面の最大傾斜方向となる（Goodman 1992）ので、そうでないときは、次のケースが考えられる。

- ・重力以外の地下水の作用
- ・すべり面が多重構造になっている（高野 1983）
- ・その他の運動機構

その他は本研究で明らかにしたような、側部にすべり面がありこれに沿っている場合（藤田 1984、本研究の構造Ⅱ）と、平面的回転運動による（本研究の構造Ⅰ）場合があるので、これらを合わせて検討する必要がある。

#### (4) 変動地形からのすべり面構造の推定

本研究で、平面形態Ⅰ・Ⅱとすべり面構造Ⅰ・Ⅱとの対応関係が得られたので、変動地形を観察し、これをもとに形態分類することで、すべり面構造の予察が可能になる。

同一平面形態でもすべり面構造が異なる問題については、すべり面構造と運動様式との対応は変わらないが、底部すべり面と地形・あるいは被覆層との関係でその特殊ケースが現れるということが明らかになった。

変動地形の観察における留意点をあげる。

- ・亀裂・滑落崖等は、従来、開口幅・落差が調べられているが、その移動方向も確認する。
- ・その変位は、一つの亀裂・滑落崖についてであるとともに、あるゾーンを介して認められる場合があるので注意する。
- ・亀裂・滑落崖等の平面的分布を押さえ、左右側部の違いを観察する。

### 1.2 地質情報について

以上の地形変動は、地すべり運動の主体である地

すべり地塊の性状と運動を規定するすべり面構造等の地質的実体にその根拠を求めるなければならない。

#### (1) 地質調査方法

地表地質踏査やボーリング調査等は、基盤岩と地すべり地塊の地質およびその構造と、すべり面もしくはすべり面となりうる地質的弱層およびその構造等を確認しうるものでなければならない。

##### [地表地質踏査]

地表地質踏査にあたっては、露頭観察から地すべり崩土の分布を面的に明らかにする必要がある。藤田（1975）は、自然に露出しているすべての崖の地層を余さず、ベター面に調べ上げる方法を強調しているが、地すべり調査には特にこのことが必要である。基盤だけでなく崖錐・地すべり崩土の観察が重要で、つぎのような留意点をあげる。

- ・地すべり崩土を堆積物として調査し、各露頭の土質・粒度・淘汰度・構造等（三梨・山内 1987等）を記載する。この場合、地すべり崩土の起源となる地質を想定することや、原岩の組織を残存しているか・地すべり運動によって破碎状になっているか、あるいは主地すべり地塊・派生地塊に区分されるかを判定することが重要である。
- ・空中写真判読や地形調査で認められた地すべり地形は、当該箇所特に境界付近での、地表の露頭観察による地すべり崩土分布によって確認する。
- ・地すべり地となった地形・地質特性を見出す。

##### [ボーリング調査]

すべり面・基盤等の確認、および、孔内傾斜計観測孔設置のためにボーリング調査が必要となるが、つぎのような留意点をあげる。

- ・ボーリング孔は、地質やすべり面の三次元構造を捉えるように、従来のすべり方向の測線上の縦断面的配置とともに、少なくとも一つの横断面的配置が必要である。
- ・ボーリング孔位置は、頭部に近づけすぎると、主すべり面が確認できない。Ⅱ.4.5(1)式によると頭部引張変形部は、頭部亀裂等からすべり面深度程度の幅に形成されるので、これより下方に設けるのがよい。

#### (2) 地質情報解析

地質情報解析は、つぎのような作業によって、地形変動情報や地すべり運動情報を地質的に根拠づけるものにする。

- ・地形変動情報と地質情報を総合し、地すべり地塊を主地すべり地塊・引張変形地塊・圧縮変形地塊に分けゾーニングする。
- ・平面形態を分類する。
- ・すべり面構造を組み立てる。
- ・すべり面構造・地すべり運動・変動地形の相互関係を検討する。

### 1.3 地すべり運動情報について

地すべり対策においては、以上の地形・地質情報とともに、地すべり動態観測を適切に行い運動情報を把握し解析する機構解析が重要である。また、動態観測によりできるだけ早く初期徴候を捉え、今後の変動予測をすることが対策上重要である。

#### (1) 観測設備設置

本研究では、地すべり地塊は主地すべり地塊と派生地塊である引張変形地塊・圧縮変形地塊から構成されるとし、地塊運動においては派生地塊を捨象し主地すべり地塊の運動を明らかにした。派生地塊の運動は、主地すべり地塊の運動を反映したものであるが、その移動量は主地すべり地塊のそれと直接一致するものではない。特に、引張変形地塊では、移動量と比例せずに沈降量が現れる場合があるので、地すべり地塊の運動量を捉えるには、主地すべり地塊部に観測設備を設ける必要性が考えられる。このように各観測設備はどの地塊の変動を捉えるものかを明確にして設置する必要がある。

#### (2) 変動解析

地すべり地塊全体の動きでも地すべり運動が未発達の段階においては、地表の地すべり徴候も部分的な微小なもので、観測計器で捉えられる変動も局所的なものである。本研究で明らかにしたすべり面構造・運動様式・変動地形の関係（図－VI－1）によれば、地すべり地塊の範囲・地塊運動様式・各部位での変形等が検討でき、微小変動段階でもその運動実態が的確に把握される指針が得られる。例えば、地中移動量観測において、左右の移動に方向や量的な差が見られる場合、従来は単にデータのゆらぎと考え、あまり重要視されなかったが、これが平面的回転運動を示すものであると判断されるであろう。

#### (3) 三次元変動予測システム

現況の自動観測システムでは、各種の測定設備を三次元に配置されるようになってきている（綱木 1996等）が、平面的回転運動が認識されておらず、左右の変動量の差等を運動情報として利用されていない。三次元的に各データを総合し、本研究で明らかにしたすべり面構造に規定された運動様式を解析するシステムを組み込めば、測定機器からの運動情報から時間・空間的に動的な運動実態を捉えられ、今後の運動を予測する三次元変動予測システムが可能になると考える。

## 2. 地すべり対策方法についての提言

以上のような本研究結果から得られた地形情報解析・動態観測手法に関する新たな知見から、地すべり対策における新たな方法が考えられる（図－VII－2）。

### 2.1 適切な土地利用計画

本研究では、地すべり地塊は主地すべり地塊と派生地塊である引張変形地塊・圧縮変形地塊から構成されるとした。その中で、主地すべり地塊はほぼ原形を保った移動で地表部での攪乱は少ないが、引張変形地塊は沈降が顕著に現れ変動が著しいこと、各平面形態に応じて引張変形地塊の分布形状が異なること等が明らかになった。

地すべり地において、斜面環境に適応した長年にわたる生活の知恵としてこれらの地盤特性に応じた土地利用が行われてきたが、今後の土地利用計画においては、変動地形やすべり面構造等をもとに地塊構成を見出し、その地塊構成部分の変動状況に応じた土地利用計画をおこなう必要がある。

斜面の土地利用においては、地形変化が斜面の安定を損なわれず、斜面安定が維持・向上されなければならない。この場合、上記の地形・地質・運動情報により、地すべり地塊の範囲・地塊運動様式・各部位での変形等の可能性予測と、地形改変計画、土地利用計画、防災計画の検討を行うことができる。

地すべり初期に現れる部分的な地すべり徴候については、上記の地形・地質情報および運動情報解析により、その徴候を的確に評価し地すべり進行変動予測ができる。したがって、この段階で地すべり地塊全体に対して早期に適切な対策をとることができる。

2.2 三次元地すべり対策

地すべり対策は、地すべり地塊の運動方向に対して行うのが、効率的であり適切であると考えられる。しかし、現場においてはこれまですべり面構造Ⅰ・Ⅱとその規定を受けた運動様式が明確になっていなかったため、すべり方向・すべり面最大傾斜方向・地形傾斜方向のどれを基準にするかについて混乱があったと思われる。本研究結果からは、つぎのように整理できる(表-Ⅶ-1)。

杭工・アンカー工等の地すべり抑止工を設ける場

合は、構造Ⅰと構造Ⅱでは地塊移動方向とすべり面最大傾斜方向とが異なるので、これらを三次元的に考察し、その抑止方向を地塊移動方向に対して向けなければならない。

また、その施工範囲は、従来、地表形状から判断される地すべりブロック範囲としているのが一般的であるが、地すべりブロックは主地すべり地塊・引張変形地塊・圧縮変形地塊にゾーニングされるので、主すべり面上の主地すべり地塊の範囲を対象に施工すればよいことになる。

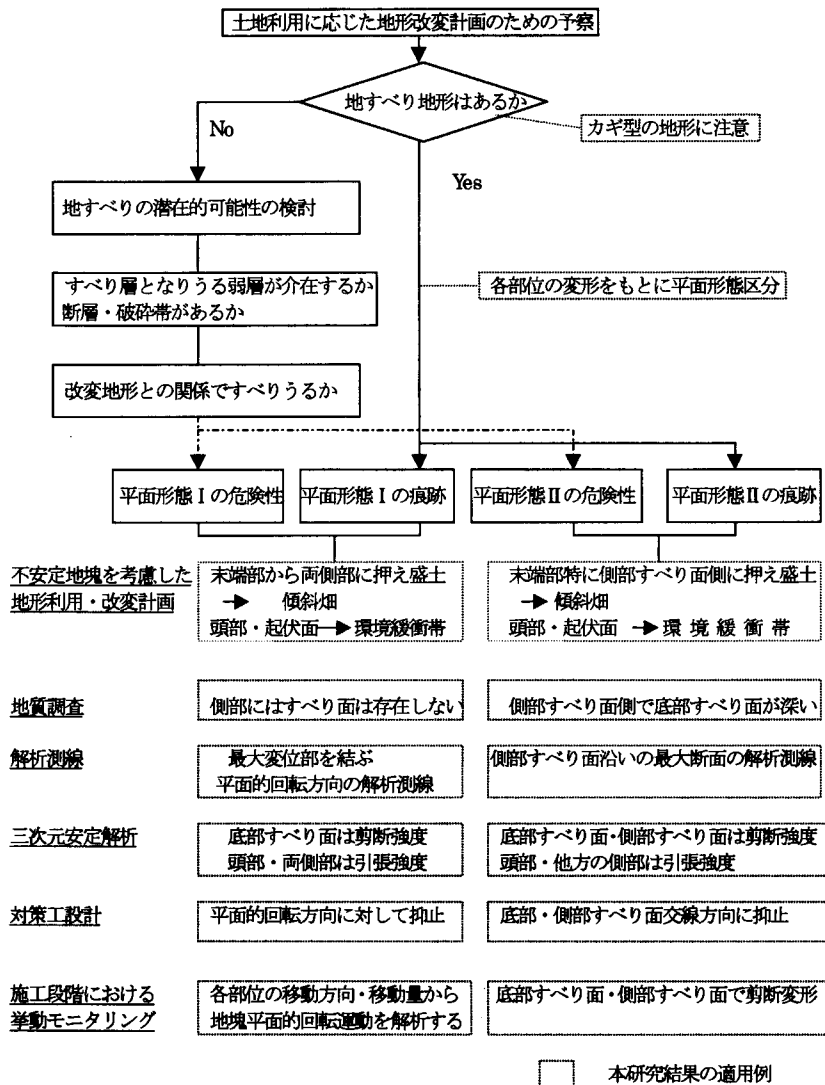


図-Ⅶ-2 本研究結果を適用した土地利用計画検討シート(例)

表-Ⅶ-1 すべり面構造と地すべり対策の要点

| すべり面構造                    | 構造Ⅰ                | 構造Ⅱ               |
|---------------------------|--------------------|-------------------|
| 運動様式                      | 並進・平面的回転           | 並進                |
| 抑止杭抑止方向<br>=地塊運動方向        | 側部を軸とする<br>平面的回転方向 | 底部・側部すべり面<br>交線方向 |
| すべり面最大傾斜方向<br>と地塊運動方向との関係 | 主地すべり地塊の<br>下端では一致 | 偏差あり              |

地すべり斜面安定度の検討は、今後三次元的解析とならなければならないが、解析モデルは従来のような底部すべり面と側部すべり面との連続的形態（たとえば、申 1989）ではなく、剪断変形部であるすべり面構造を基礎にした、頭部・側部・末端部における引張変形部・剪断変形部・圧縮変形を考慮した解析モデルが必要となる。本研究で明らかにされた三次元運動モデルは、具体的な解析モデルを構築する際の、一般的モデルを提供するであろう。

摘 要

- (1) 本研究は、地塊型平面すべりの典型的な地すべり地において、すべり面構造・運動様式・変動地形の関係を三次元的に考察したものである。研究対象地域は、地塊型地すべりが多く、その災害直後の野外情報得やすい近畿地方が選ばれた。
- (2) 典型的な地すべり地の変動地形は、それを形成した地塊運動による変形（引張・剪断・圧縮）として捉えられ、引張変形では横ズレ性の大小に分けられた。これによって各部位の変動地形を整理し、側部の変形の組合せが異なる平面形態Ⅰ、平面形態Ⅱに分類された。
- (3) これによって、平面形態を地すべり地塊構造と地塊運動様式を反映したものとして捉えることができた。平面形態Ⅰは両側部の変形が引張・引張の組合せであり、横ズレ大を呈す側部が円周側、横ズレ小を呈す側部が中心側となる平面的回転運動が、平面形態Ⅱは両側部の変形が剪断・引張の組合せであり、両側部が横ズレ大で並進運動が仮設的に提示された。
- (4) 研究対象地の59箇所の地すべり地で、平面形態分類とその分布頻度が調べられた。今回区分した平面形態Ⅰ・Ⅱは、調査対象地の地すべり地の80%を占

め、そのうち平面形態Ⅰが約84%、平面形態Ⅱが約16%であった。その他20%は、地塊型円弧すべりであった。すなわち、この平面形態分類が地塊型平面すべりにほぼ妥当性のあることが実証された。

- (5) すべり面構造は、平面形態Ⅰ・Ⅱの典型的な地すべり地の調査データから三次元的にモデル化された。平面形態Ⅰでは、底部すべり面で規定され頭部・側部が分離面となる構造Ⅰ、平面形態Ⅱでは、底部と側部の二面のすべり面で規定され、頭部と他の側部が分離面となる構造Ⅱと考えられた。この平面形態とすべり面構造との対応関係は、各地すべり地調査結果からも帰納的に検証され、構造Ⅰ・Ⅱは平面形態Ⅰ・Ⅱの一般的すべり面構造と考えることができた。
- (6) 移動杭による表面移動量、孔内傾斜計による地中移動量観測データによって、平面形態Ⅰ・すべり面構造Ⅰの並進・平面的回転運動、平面形態Ⅱ・すべり面構造Ⅱの並進運動の例証が得られた。前者は船木地すべり地において、主すべり面沿いに角速度  $8.6 \times 10^{-5}$  rad/day、地表部で角速度  $4.8 \times 10^{-5}$  rad/day の平面的回転運動と、主すべり面沿いに5.0mm/day、地表部で6.2mm/dayの並進運動が確認された。後者は山田地すべり地において、平面的回転運動を想定した角速度は  $1.5 \times 10^{-7}$  rad/day でほぼ並進であることが確認され、その運動はすべり面で0.11mm/day、地表部で0.24mm/dayであった。回転量/並進量で示される並進成分と回転成分の割合は、船木地すべり地では地中部で1.6であるが、山田地すべり地では0.04であった。
- (7) これらは、すべり面構造の規定をうけた地すべり地塊運動の運動の考察によって演繹的に推論され、また、すべり面構造モデルの模型によって地すべり地塊運動が視覚的に再現され確認された。

- (8) 以上によって、平面形態Ⅰ・Ⅱに応じてそれぞれ独自のすべり面構造Ⅰ・Ⅱをもち、地すべり地塊はその構造に規定された運動様式をとり、この運動によって平面形態Ⅰ・Ⅱの地すべり変動地形が現れる関係を認めることができこれをモデル化された。
- (9) 地すべり運動はすべり面構造に規定される運動の他に、地すべり進行程度・すべり面の凹凸・地すべり地塊の性状等の規定を受けて、多様な斜面変動として現れるが、それを現出させている基本的ものとしては、本研究結果のモデルに示されるすべり面構造・地すべり地塊運動・変動地形の三次元的相互関係があることが明らかにされた。
- (10) 従来、非対称的に現れる変動地形の原因、局所的な運動と地塊としての運動の区別、移動方向の異なる地塊の運動の捉え方、すべり面傾斜方向と移動方向の偏差の意味等は明確になっておらず、地すべり機構解析および地すべり対策上の問題があったが、本研究はこれらの解決方法を提言し、地すべり地塊の変動特性に対応した土地利用・地形改変計画・三次元変動解析システム・三次元解析モデル・三次元地すべり対策等を展望した。

## 引用文献

- 秋田大学鉱山学部通信過程教育講座採鉱課程編集委員会 (1979) : 材料力学, 225, 秋田大学
- 藤田和夫 (1985) : 変動する日本列島, 75-90, 121-138, 岩波書店
- 藤田 崇 (1990) : 地すべり—山地災害の地質学, 126, 共立出版
- 藤田寿雄 (1984) : 機構解析, 地すべり防止技術研修テキスト, 154-177, 地すべり対策技術協会
- 藤田至則 (1975) : 地質への招待, 228, 玉川大学出版部
- 藤原明敏 (1979) : 地すべりの解析と防止工法, 48-57, 理工図書
- Goodman R. E. (1976) : 不連続性岩盤の地質工学 (赤井浩一他訳), 166-173, 北森出版
- Goodman R. E. (1992) : ブロック理論と岩盤工学への応用 (吉中龍之介・大西有三訳), 359, 土木工学社
- 東 三郎 (1979) : 地表変動論, 286, 北大図書刊行会
- 兵庫県土地改良事務所 (1995) : 地第6-507号 船木地区地すべり調査業務報告書, 日本基礎技術㈱
- 兵庫県北淡町 (1975) : 山本農地保全復旧工事報告書, 日本グラウト工業㈱
- 兵庫県洲本土地改良事務所 (1993) : 地すべり災害黒谷地区地質調査報告書, 日本基礎技術㈱
- 兵庫県豊岡土地改良事務所 (1980) : 香住地区地すべり調査業務報告書, 日本グラウト工業㈱
- 兵庫県豊岡土地改良事務所 (1989) : 中辻北地区調査設計業務報告書, 日本基礎技術㈱
- 平田益美・藤田寿雄・片山慎一郎 (1991) : 国見地すべりの発生機構について, 第30回地すべり学会研究発表講演集, 207-210
- 垣見俊弘 (1978) : 地質構造の解析, 98-99, 地学団体研究会
- 貝塚爽平 (1997) : 日本の地形, 234, 岩波書店
- 木全令子・宮城豊彦 (1985) : 地すべり地を構成する基本単位地形, 地すべり, Vol.21, No.4, 1-9
- 来海昭雄・子川桂二 (1991) : 山地地すべり (その2)—対策工法と効果について—, 第30回地すべり学会研究発表講演集, 219-222
- 小出 博 (1955) : 日本の地すべり, 257, 東洋経済新報社
- 子川桂二・来海昭雄 (1991) : 山地地すべり (その1)—地質構造と地すべり機構—, 第30回地すべり学会研究発表講演1集, 215-218
- 京都府木津町 (1983) : 狸谷農地保全災害復旧事業地質調査報告書, 日本グラウト工業㈱
- 三梨 昂・山内靖喜 (1987) : 地質調査法, 303, 地学団体研究会
- 守山 弘 (1997) : 水田を守るとはどういうことか, 205, 農林漁村文化協会
- 中村慶三郎 (1934) : 山崩, 245, 岩波書店
- 中村慶三郎 (1955) : 崩災と国土—地すべり・山崩れの研究—, 300, 古今書院
- 日本地質学会地質基準委員会 (2000) : 第一次地質基準, 日本地質News, Vol.3, No.2, 31-38
- 岡村俊邦 (1992) : 地すべり地のエコロジカルな土地利用に関する提言, シンポジウム地すべり地形に関する諸問題論文集, 地すべり学会, 51-61
- 大田秀樹 (1989) : 農業土木技術者のための最新土質力学 (その3)—土に構成則—, 農業土木学会誌, Vol.57, No.9, 67-74
- 大八木則夫 (1992) : 地すべり地形の定義と判定, シンポジウム地すべり地形に関する諸問題論文集, 地すべり学会, 1-8

- 大八木則夫・大石道夫・内田哲雄 (1970): 北松鷲尾岳地すべりの構造要素, 防災科学技術総合研究報告 第22号, 115-140
- 佐々木一郎 (1974): 地すべり地塊岩盤面の形態について, 地すべり, Vol.11, No.1, 7-20
- 佐々木一郎 (1987): 地すべり地塊の左右非対称形態, 第26回地すべり学会研究発表講演集, 178-181
- 佐々木一郎 (1991): 地すべり地塊の移動形態, Proceeding of the 1st Symposium on Geo-Environments, 日本地質学会, 113-118
- 佐々木一郎・新谷 融 (1998): 岩盤地すべりの三次元破壊過程, 日本地質学会第105回学術大会講演要旨, 306
- 佐々木一郎・新谷 融 (2000a): 地すべり地の平面形態の運動学的考察, 地すべり Vol.37, No.1, 11-17
- 佐々木一郎・新谷 融 (2000b): 兵庫県船木地区地すべり移動観測結果からみた地塊の平面的回転運動, 地すべり Vol.37, No.2, 55-61
- 佐々木一郎・新谷 融 (2000c): すべり面三次元構造と地すべり地塊運動特性, 地すべり Vol.37, No.3, 32-41
- 猿田拓己 (1976): 地すべり運動の形態的研究, 北大卒論
- 瀬野徹三 (1995): プレートテクトニクスの基礎, 190, 朝倉書店
- 島根県隠岐支庁農林部 (1989): 山田第二期地区災害関連緊急地すべり対策事業地質調査設計業務報告書, (株)日本海技術コンサルタンツ
- 白石一夫 (1992): 積雪期に発生した地すべりの運動形態とその対策, シンポジウム地すべり地形に関する諸問題論文集, 146-151
- 申 潤植 (1995): 地すべり工学-最新のトピクス-, 111-184, 山海堂
- 申 潤植・山崎孝成 (1992): 岩盤すべりの地形・地質的規制条件, シンポジウム地すべり地形に関する諸問題論文集, 88
- 高野秀夫 (1960): 地すべりと防止工法, 6-7, 42-53, 地球出版
- 高野秀夫 (1983): 斜面と防災, 175, 築地書館
- 玉田文吾・福田順二 (1987): 陥没帯を伴う地すべりの発生機構, 第26回地すべり学会研究発表講演集, 61-63
- 谷口敏雄 (1963): 地すべり調査と対策, 16-21, 山海堂
- Terzaghi K. & Peck R. B. (1969): テルツァギ ベック 土質力学 (星埜ほか共訳), 248, 丸善
- 綱木亮介 (1996): 最新の地すべり観測システムについて, 基礎工, Vol.26, No.6, 21-26
- Varnes, D. J. (1958): Landslide Types and Processes, Landslide and Engineering practice, HRB., Spec. Rep., No.29, 20-47
- Varnes, D. J. (1978): Slopes Movement Types and Processes, Landslide Analysis and Control, HRB, Spec. Rep., No.176, 11-33
- 渡 正亮・酒井淳行 (1975): 地すべり地の概査と調査計画の考え方, 全国地すべりがけ崩れ対策協議会, 12-13, 32-37
- 山田 剛・渡 正亮・小橋澄治 (1971): 地すべり・斜面崩壊の実態と対策, 580, 山海堂



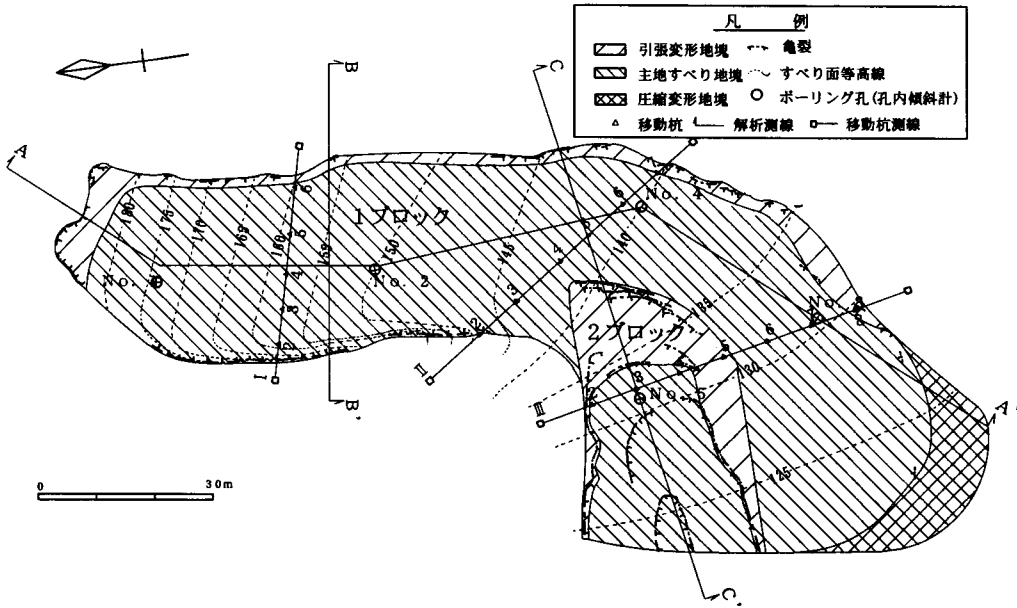
### Summary

The purpose of this study is to reveal the three-dimensional mechanism of block slide, and the areas of landslide disaster in the Kinki district were surveyed. The plane forms of landslides were classified into two, by analysis of landslide relief; the deformation type on both frank-sides of Form I was tension and tension, and that of Form II was tension and shear. And the following hypothesis was proposed; the translation or plain rotation movement formed these features.

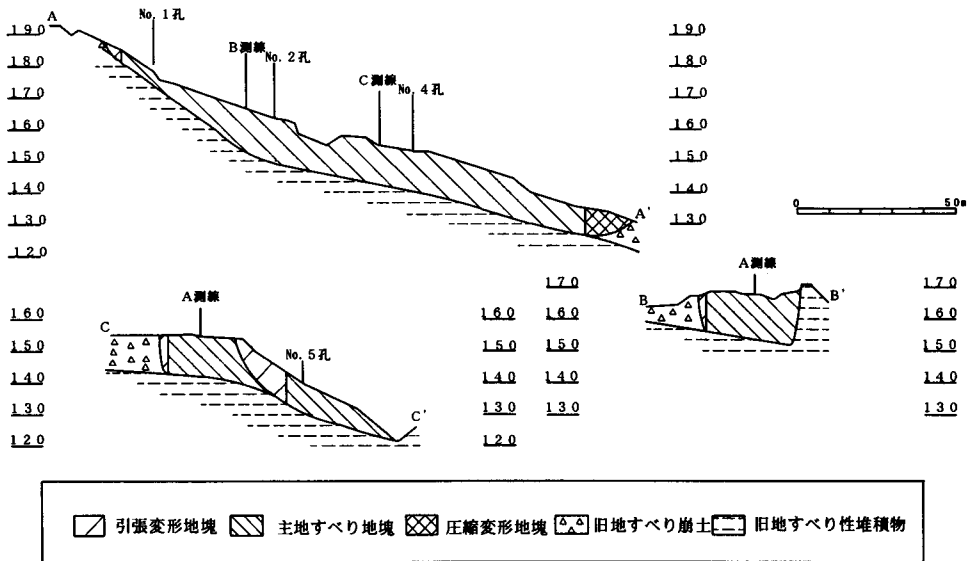
Then, the hypothesis about correlation between the plane forms and the structure of sliding surface was proposed, by analysis of the geology of the landslides; Form I has Structure I composed of only the bottom slip surface and Form II has Structure II composed of the bottom and the side one. And the 59 points of landslide disaster places verified the hypothesis. Moreover, based on the in-situ observation datum, the illustrations of the movement of the two types were obtained.

Consequently the relation between the structure of slip surface, the mode of movement and the plane form was generalized, which was verified by the reappearing experiment of mass movement controlled by each shape of sliding surface model respectively. Finally the future application methods were proposed.

**Key words** : landslide relief, landslide plane form, block slide, plane rotation, three-dimensional mechanism



付図-IV-1 山田地すべり地平面図 (子川・来海 1991より)



付図-IV-2 山田地すべり地断面図 (子川・来海 1991より)

付表-IV-1 地表面移動量(移動杭)観測結果(山田地すべり地1989年)  
(島根県1989より)

| 測<br>線 | 杭<br>番 | 4/26~6/1移動量(mm) |     |    |    |     | 6/1~7/1移動量(mm) |     |    |    |     | 7/1~8/1移動量(mm) |     |     |     |     | 4/26~8/1累<br>計移動量(mm) |     |     |
|--------|--------|-----------------|-----|----|----|-----|----------------|-----|----|----|-----|----------------|-----|-----|-----|-----|-----------------------|-----|-----|
|        |        | X               | Y   | Z  | L  | D   | X              | Y   | Z  | L  | D   | X              | Y   | Z   | L   | D   | Z                     | L   | D   |
| I      | 2      | -8              | -7  | 4  | 11 | 11  | -11            | -5  | 2  | 12 | 12  | -19            | -5  | 0   | 20  | 20  | 0                     | 20  | 20  |
|        |        | -8              | -7  | 4  | 11 | 11  | -3             | 2   | -2 | 4  | 4   | -8             | 0   | -2  | 8   | 8   | 0                     | 22  | 24  |
|        | 3      | -10             | -7  | 0  | 12 | 12  | -12            | -3  | -2 | 12 | 13  | -18            | 0   | -5  | 18  | 19  | -5                    | 18  | 19  |
|        |        | -10             | -7  | 0  | 12 | 12  | -2             | 4   | -2 | 4  | 5   | -6             | 3   | -3  | 7   | 7   | -5                    | 23  | 24  |
|        | 4      | -14             | -4  | -1 | 15 | 15  | -17            | -3  | -3 | 17 | 18  | -20            | 0   | -6  | 20  | 21  | -6                    | 20  | 21  |
|        |        | -14             | -4  | -1 | 15 | 15  | -3             | 1   | -2 | 3  | 4   | -3             | 3   | -3  | 4   | 5   | -6                    | 22  | 24  |
| 5      | -15    | -3              | 0   | 15 | 15 | -15 | 0              | 1   | 15 | 15 | -23 | 0              | 0   | 23  | 23  | 0   | 23                    | 23  |     |
|        | -15    | -3              | 0   | 15 | 15 | 0   | 3              | 1   | 3  | 3  | -8  | 0              | -1  | 8   | 8   | 0   | 26                    | 27  |     |
| 6      | -14    | 1               | -4  | 14 | 15 | -14 | 3              | -3  | 14 | 15 | -20 | 7              | -5  | 21  | 22  | -5  | 21                    | 22  |     |
|        | -14    | 1               | -4  | 14 | 15 | 0   | 2              | 1   | 2  | 2  | -6  | 4              | -2  | 7   | 7   | -5  | 23                    | 24  |     |
| II     | 2      | -6              | -23 | 3  | 24 | 24  | -8             | -25 | 2  | 26 | 26  | -18            | -20 | 0   | 27  | 27  | 0                     | 27  | 27  |
|        |        | -6              | -23 | 3  | 24 | 24  | -2             | -2  | -1 | 3  | 3   | -10            | 5   | -2  | 11  | 11  | 0                     | 38  | 38  |
|        | 3      | -6              | -13 | -1 | 14 | 14  | -11            | -13 | -2 | 17 | 17  | -15            | -8  | -3  | 17  | 17  | -3                    | 17  | 17  |
|        |        | -6              | -13 | -1 | 14 | 14  | -5             | 0   | -1 | 5  | 5   | -4             | 5   | -1  | 6   | 6   | -3                    | 26  | 26  |
|        | 4      | -4              | -8  | 1  | 9  | 9   | -5             | -8  | -1 | 9  | 9   | -13            | -10 | 3   | 16  | 17  | 3                     | 16  | 17  |
|        |        | -4              | -8  | 1  | 9  | 9   | -1             | 0   | -2 | 1  | 2   | -8             | -2  | 4   | 8   | 9   | 3                     | 18  | 20  |
|        | 5      | -1              | -3  | -1 | 3  | 3   | -5             | -3  | -2 | 6  | 6   | -13            | 6   | 0   | 14  | 14  | 0                     | 14  | 14  |
| -1     |        | -3              | -1  | 3  | 3  | -4  | 0              | -1  | 4  | 4  | -8  | 9              | 2   | 12  | 12  | 0   | 19                    | 20  |     |
| 6      | -6     | -7              | -7  | 9  | 12 | -2  | -6             | -9  | 6  | 11 | -8  | 1              | -8  | 8   | 11  | -8  | 8                     | 11  |     |
|        | -6     | -7              | -7  | 9  | 12 | 4   | 1              | -2  | 4  | 5  | -6  | 7              | 1   | 9   | 9   | -8  | 23                    | 25  |     |
| 7      | -3     | -4              | -6  | 5  | 8  | 0   | -2             | -6  | 2  | 6  | -1  | 1              | -6  | 1   | 6   | -6  | 1                     | 6   |     |
|        | -3     | -4              | -6  | 5  | 8  | 3   | 2              | 0   | 4  | 4  | -1  | 3              | 0   | 3   | 3   | -6  | 12                    | 15  |     |
| III    | 2      | -11             | 2   | 1  | 11 | 11  | -22            | 4   | 0  | 22 | 22  | -73            | 16  | -8  | 75  | 75  | -8                    | 75  | 75  |
|        |        | -11             | 2   | 1  | 11 | 11  | -11            | 2   | -1 | 11 | 11  | -51            | 12  | -8  | 52  | 53  | -8                    | 75  | 75  |
|        | 3      | -19             | -1  | -4 | 19 | 19  | -40            | -1  | -6 | 40 | 40  | -99            | -11 | -34 | 100 | 105 | -34                   | 100 | 105 |
|        |        | -19             | -1  | -4 | 19 | 19  | -21            | 0   | -2 | 21 | 21  | -59            | -10 | -28 | 60  | 66  | -34                   | 100 | 107 |
|        | 4      | -20             | -3  | -4 | 20 | 21  | -50            | -4  | -7 | 50 | 51  | -111           | -21 | -38 | 113 | 119 | -38                   | 113 | 119 |
|        |        | -20             | -3  | -4 | 20 | 21  | -30            | -1  | -3 | 30 | 30  | -61            | -17 | -31 | 63  | 71  | -38                   | 114 | 121 |
|        | 5      | -3              | 2   | -2 | 4  | 4   | -28            | -2  | -7 | 28 | 29  | -38            | -3  | -17 | 38  | 42  | -17                   | 38  | 42  |
|        |        | -3              | 2   | -2 | 4  | 4   | -25            | -4  | -5 | 25 | 26  | -10            | -1  | -10 | 10  | 14  | -17                   | 39  | 44  |
| 6      | -3     | -2              | 1   | 4  | 4  | -5  | -1             | 0   | 5  | 5  | -3  | 1              | -9  | 3   | 10  | -9  | 3                     | 10  |     |
|        | -3     | -2              | 1   | 4  | 4  | -2  | 1              | -1  | 2  | 2  | 2   | 2              | -9  | 3   | 9   | -9  | 9                     | 16  |     |
| 7      | -5     | 2               | 2   | 5  | 6  | -4  | -1             | 0   | 4  | 4  | -1  | -3             | -8  | 3   | 9   | -8  | 3                     | 9   |     |
|        | -5     | 2               | 2   | 5  | 6  | 1   | -3             | -2  | 3  | 4  | 3   | -2             | -8  | 4   | 9   | -8  | 12                    | 18  |     |
| 8      | -5     | 1               | 3   | 5  | 6  | -5  | 0              | 2   | 5  | 5  | -2  | -4             | -5  | 4   | 7   | -5  | 4                     | 7   |     |
|        | -5     | 1               | 3   | 5  | 6  | 0   | -1             | -1  | 1  | 1  | 3   | -4             | -7  | 5   | 9   | -5  | 11                    | 16  |     |

※ 上段は期間最終観測日の測定移動量で、下段はその期間の移動量

※ Xは末端方向が(-)、Yは右向きが(-)、Zは鉛直方向が(-) X(-)はAがS14W、BがS57W、CがS78W

※  $L=(X^2+Y^2)^{1/2}$   $D=(X^2+Y^2+Z^2)^{1/2}$

付表-IV-2 地中移動量 (孔内傾斜計) 観測結果 (山田地すべり地1989年)  
(島根県1989より)

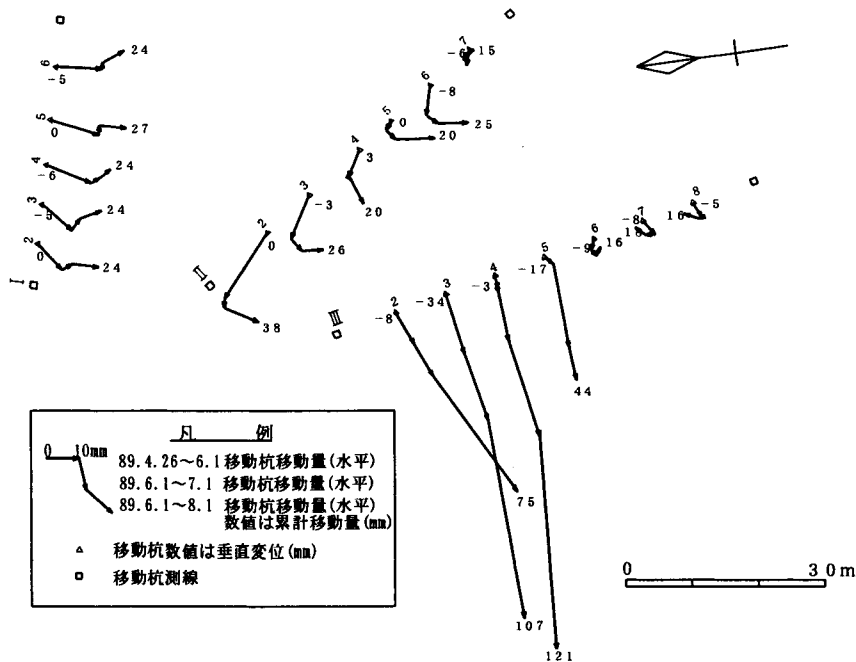
| 孔番 | 深度<br>(m) | 5/12~6/1 移動量(mm) |       |      |      | 6/1~7/1 移動量(mm) |       |      |      | 7/1~8/1 移動量(mm) |       |       |      | 累計移動量<br>(mm) |
|----|-----------|------------------|-------|------|------|-----------------|-------|------|------|-----------------|-------|-------|------|---------------|
|    |           | A                | B     | L    | 方向   | A               | B     | L    | 方向   | A               | B     | L     | 方向   |               |
|    |           |                  |       |      |      |                 |       |      |      |                 |       |       |      |               |
| 1  | 4.0~      | -0.48            | 0.80  | 0.93 |      | -3.16           | 0.70  | 3.24 |      | -8.85           | 1.16  | 8.93  |      |               |
|    | 5.0       | -0.48            | 0.80  | 0.93 | S51E | -2.68           | -0.10 | 2.68 | S10W | -5.69           | 0.46  | 5.71  | S3W  | 9.32          |
| 2  | 13.5~     | -0.54            | 0.58  | 0.79 |      | -2.30           | -0.22 | 2.31 |      | -6.12           | -0.38 | 6.13  |      |               |
|    | 14.5      | -0.54            | 0.58  | 0.79 | S51E | -1.76           | -0.80 | 1.93 | S44W | -3.82           | -0.16 | 3.82  | S2E  | 6.55          |
| 4  | 11.5~     | 1.24             | -1.32 | 1.81 |      | -0.18           | -0.88 | 0.90 |      | -3.89           | -2.20 | 4.47  |      |               |
|    | 12.5      | 1.24             | -1.32 | 1.81 | N7W  | -1.42           | 0.44  | 1.49 | S23W | -3.71           | -1.32 | 3.94  | S60W | 7.24          |
| 5  | 8.0~      | -4.82            | 0.44  | 4.84 |      | -7.44           | 0.00  | 7.44 |      | -10.58          | -0.10 | 10.58 |      |               |
|    | 9.5       | -4.82            | 0.44  | 4.84 | S75W | -2.62           | -0.44 | 2.66 | W    | -3.14           | -0.10 | 3.14  | S82W | 10.64         |

\* 上段は期間最終観測日の移動量で、下段はその期間の移動量

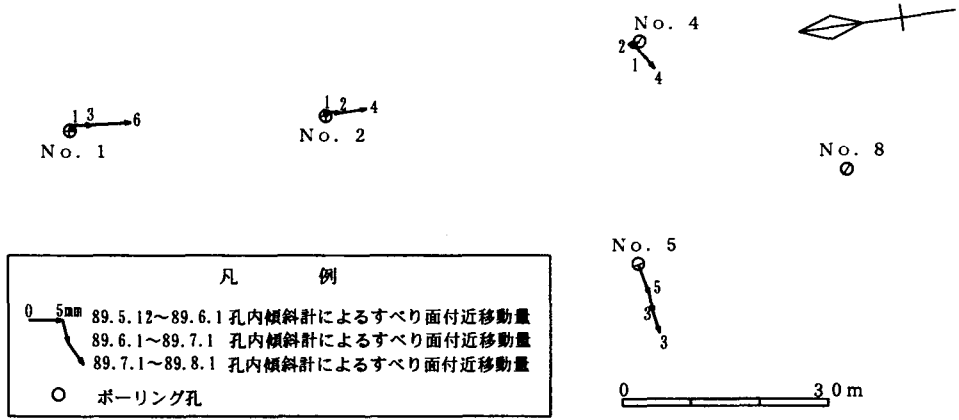
\* 各孔の深度は、すべり面深度を示す。

\* Aは末端方向が(-)、Bは右向きが(-) A(-)は1孔がS8W、2孔がS4W、4孔がS40W、5孔がS80W

\*  $L = (A^2 + B^2)^{1/2}$



付図-IV-3 山田地すべり地平面図  
(移動杭観測結果)



付図-IV-4 山田地すべり地平面図  
(孔内傾斜計観測結果)