

地すべりダイナミクスの発展

佐々 恭二

要 旨

防災研究所の地すべり研究ユニットは、地すべり等防止法の施行の翌年の昭和 34 年に日本の大学で専門的に地すべり災害軽減のための研究する唯一の組織として設立された。防災研究所は、種々の災害を軽減するための技術的研究を行うと共に、その基礎となる学理の研究を行う機関です。地すべり研究は、それに関連する多くの基礎学問分野においてその応用としての研究は行われてきましたが、地すべり研究自体を科学の一分野、すなわち地すべり学 (Landslide Science) として位置付けるにはいたっていません。地すべり研究が学問として発展するには、地すべり学独自の中核的研究と地すべりに関する関連学問分野の研究を総合する国際ジャーナルとそれを支える幅広い国際コミュニティーが必要です。ここでは、まず地すべり研究の重要性と学際性、並びに地すべり研究で対象とする各種の斜面運動を紹介した後に、地すべり学独自の中核的研究の一つとしての地すべりダイナミクス (Landslide Dynamics) の内容とその発展について述べ、最後に地すべり学の発展の基礎となる国際的協力の枠組みの発展について述べます。

キーワード：斜面災害、地すべり、地すべりダイナミクス、地すべり運動予測、地すべり再現試験、地震・降雨複合斜面災害、すべり面液状化

1. はじめに

大学、大学院、ポスドクから現在まで 44 年間、ほぼ半世紀にわたって京都大学において勉学と研究に没頭して参りました。また、後半の 26 年間は防災研究所において研究と教育に従事し、この間、防災研究所の先輩、同僚、事務室、技術室の多くの方々にお世話になりましたこと、まずもって厚くお礼申し上げます。退職にあたり特別講演と防災研究所年報 A に掲載させて頂く機会を与えて頂きました。これまで研究してきた研究の内容の詳細は、研究業績にあげた論文を参照して頂くこととし、この貴重な機会を、地すべり研究の対象となる各種の地すべり現象と地すべり (Landslides) の学術的定義と防災研究の 1 分野としての地すべり学「Landslide Science」の中核的分野としての地すべりダイナミクスの内容について紹介し、最後に地すべり学発展の社会的基盤として不可欠な斜面災害危険度軽減のための国際的コミュニティーと国際的協力の枠組みについて皆様のご理解とご協力を得るための場とさせて頂きたいと思ひます。

1.1 防災研究所の地すべり研究ユニット

(地すべり研究部門-地盤災害研究部門地すべりダイナミクス研究分野-斜面災害研究センター) の使命

日本では、第二次大戦後の荒廃期に日本全国で台風の度に大規模な地すべり災害が多発しました。この被害を軽減させるために地すべり等防止法が昭和 33 年に制定されました。この法律を受けて、文部省、科学技術庁、建設省、農林省では各々地すべり研究を推進する研究組織を立ち上げました。大学では、法律施行の翌年の昭和 34 年に大学で唯一の地すべりを専門に研究する部門、地すべり部門が防災研究所内に設置されました。昭和 44 年には急傾斜地の崩壊による災害を防止するための法律「急傾斜地法」が施行され、同年防災研究所に四国に多発する結晶片岩地すべりとよぶ急傾斜の地すべりの観測研究を実施するために徳島地すべり観測所が設立されました。防災研究所は国家レベルで防災研究をする機関です。地すべり部門・徳島地すべり観測所は、その中で地すべり研究を推進する全国の大学で唯一の研究単位であります。

大学、大学院、ポスドク、助手の間、京都大学農学部林学科砂防学研究室で過ごしました。砂防研究

室から防災研究所の地すべり部門に移籍するにあたって、防災研究所の地すべり部門のもつ、大げさですが国家的使命を理解していたつもりです。2003年4月から旧地すべり部門と旧徳島地すべり観測所が合体し、斜面災害研究センターが設立され、定年退職まで4年間センター長を務めさせて頂きました。このような背景のもとで地すべりダイナミクスの発展についてお話しさせていただきたいと存じます。

1.2 地すべり研究の重要性と地すべり研究の学際性

地震、台風、しばしば高速流動する火山堆積物の広範な分布、国土のほとんどが山地・傾斜地で占められることなど斜面災害の誘因・素因を数多く有する日本における斜面災害研究の重要性は、国土が平坦な英国・フランス、広大な国土を持つ米国などとは比較にならない重要性があり、日本では斜面災害研究が活発に行われてきました。しかし、斜面災害研究は、国毎、学問分野毎にばらばらに実施されて来たため、その学術定義すら国際的に統一されていませんでした。学問として発達するには用語の統一が不可欠です。20世紀の最後の10年間に実施された国際防災の十年(IDNDR)の一環として、斜面災害に関連する国際学会によって世界地すべり目録作成委員会が組織され、ユネスコと国際地質学連合(IUGS)の協力を得て、用語の統一を検討しました。その結果、Landslidesを“the movement of a mass of rock, debris or earth down a slope”「岩、土あるいはその混合物の斜面下降運動」と定義することが国際的に合意され、その学術対象範囲が確定しました。この定義は、地すべり、斜面崩壊、土石流、岩盤崩落などを含む重力による斜面変動現象の総称であり、

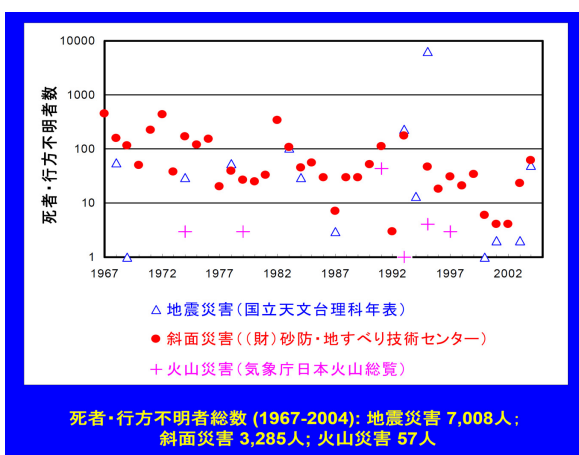


図1 1967-2004年における日本での斜面災害、地震災害（地震時地すべりによる死者も含む）、火山災害（火山ガスによる死者も含む）による死者数の比較

「Landslides」の直訳である広い意味での「地すべり」に相当します。用語の国際的統一は科学の前提ですので、(社)日本地すべり学会では「地すべり」を学術的用語として用いる場合は、上記の国際的に統一された Landslides の意味で用いることにしました。国際的に統一された「地すべり」によって生じる災害が、日本語での「斜面災害」にほぼ対応します。雪崩は、重力による斜面下降運動なので、斜面災害の一部ですが、材料が異なるため一般には地すべりには含まれません。しかし、ヨーロッパアルプスのように雪崩災害が激しい地域では、現象的にもメカニズム的にも極めて近い現象ですので、地すべりと雪崩 (Landslides and Avalanches) 災害を一括して取り組んでいます。

「地すべり」は世界各地で異なる規模、頻度でほぼ毎年発生していますが、地震、火山噴火、台風、津波等と異なり、「地すべり」の数を数えることは困難です。また、地すべりによる死者数を正確に把握することも必ずしも容易ではありません。世界的に用いられている統計では、斜面災害による死者の多くが、豪雨災害、地震災害、火山災害のなかに分類され、著しく小さく見積もられています。図1に日本での1967-2004年の地震災害、斜面災害、火山災害の統計を示します。この図では豪雨による斜面災害も地震による斜面災害も斜面災害に数えられています。地震による斜面災害は地震災害の死者数にも数えられていますので、二重に数えられていることになります。このような統計は、他の国ではないと思います。この表によると斜面災害は毎年発生しており、期間中の斜面災害による全死者数は（1995年の兵庫県南部地震を含む）地震による全死者数のおよそ半分に達しています。この数字は、斜面災害軽減の重要性を地震災害との対比で客観的に示したものだといえます。

斜面災害は、図2(a)に示す如く、複合的な災害現象であり、地震、火山噴火、豪雨（台風、ハリケーン）、長期降雨、集中融雪、不適切な開発行為、採鉱などによって引き起されます。また、大規模な沿岸、海底地すべりにより津波が発生することも知られており、1792年の雲仙・眉山地すべりは、大津波を引き起こし、地すべりと津波により合計16,000の人命が失われました。1980年アメリカのセント・ヘレン火山、1888年の日本の磐梯山では、火山の山頂付近での大規模な地すべりが山頂部を崩壊させ、火山噴火を誘発しました。斜面災害は地震、豪雨、火山噴火、人間活動などによる誘因がなくとも自然風化の進行により発生するため、世界のどの地域で

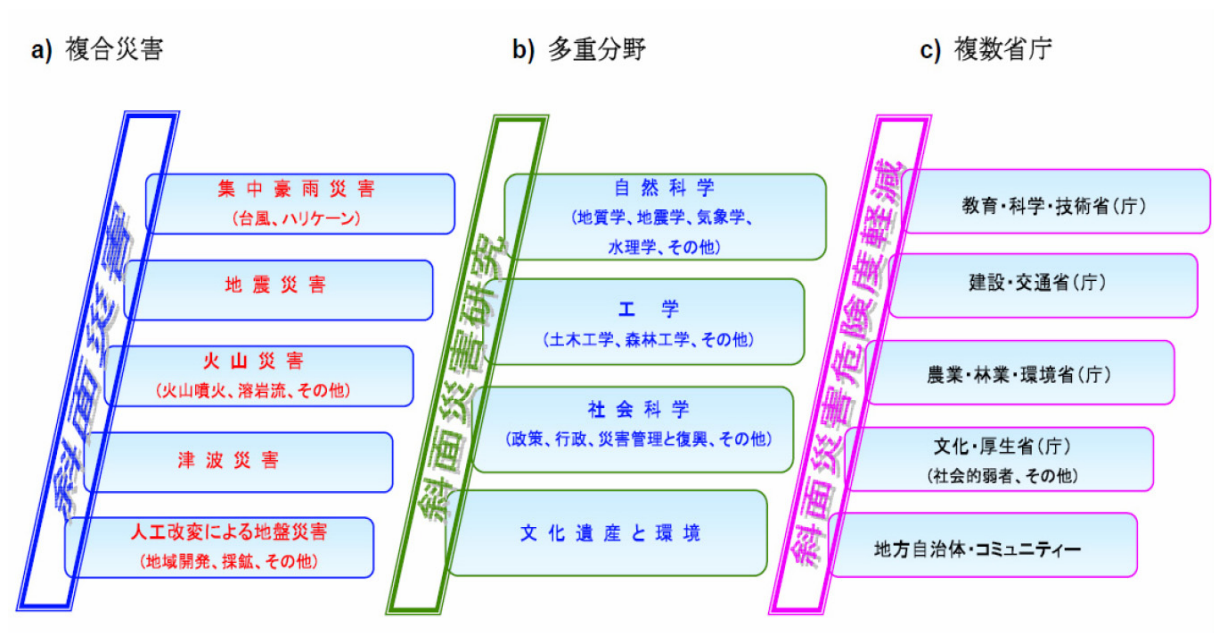


図2 斜面災害の特徴

どの分野でも「隅」のテーマである。しかし多くの分野が関係している。

も発生し、地すべりは、斜面上及びその周辺に居住する住民にとって最も身近な脅威となる災害です。

斜面災害は、図2 (b) に示す如く、様々な自然科学、工学、社会科学、および関連する文化遺産、環境などにまたがる多重的な分野です。また、斜面災害は教育・科学・技術、建設・運輸、農業・森林・環境、文化、また脆弱な人々（貧民、老人、障害者、あるいは子供）を対象とする省庁、地方公共団体・コミュニティなどいくつかの省庁・組織にまたがって管理されることが必要な現象です（図2 (c)）。

1.3 種々の地すべり現象の統合（バーンズの地すべり分類）

地すべり研究は、図2 に示した如く多くの分野に関連します。図3 は、地すべり研究の学際性を示した図です。この図は、言い換えると地すべり研究は、種々の学問分野においてその応用の対象として研究されていたため、「地すべり」とは何かが分野により、国により異なっていました。先述の如く、これを国際的に統一したのが、ユネスコと国際地質学連合(IUGS)の協力を得て設立された世界地すべり目録作成委員会の仕事です(Cruden & Varnes 1996)。そしてその基礎となったのが、Varnes (1978)による地すべり現象の分類です。バーンズの研究により世界各地で発生し、関連する種々の学問分野で取り上げられてきた各種の地すべり現象を統合的に捉え、今日の地すべり研究、あるいは初期段階の学問としての基礎となったと言えると思います。

図4 は、Varnes (1978) が、斜面運動のタイプ (Types of slope movement) として発表したものです。これは Varnes (1958)が、地すべりの分類 (Classification of landslides) として発表したものに特殊な運動である前方回転 (Topples) と水平伸張 (Lateral Spread) を加えたものですが、基本的には同じものです。しかし、地すべり (landslide) は、地面のすべり (land の slide) のみを指す言葉であり、岩盤崩落 (Rock の fall), 土石流 (debris の flow) や山体の極めて緩慢な変形などを含めないとの意見から、斜面運動と呼び変えたものです。これに対して、世界の Landslides 関連学会の研究者で構成された世界地すべり目録委員会(Cruden & Varnes

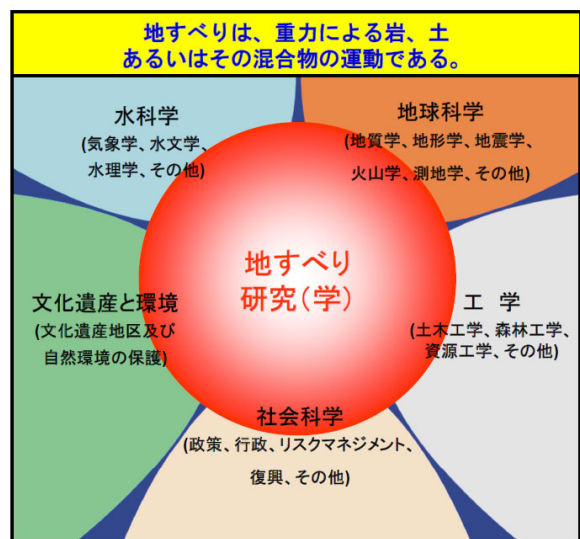


図3 地すべり研究（学）の学際性

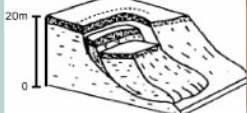
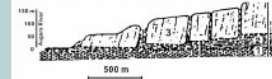
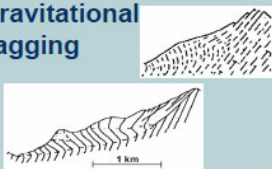
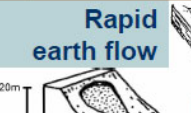
マスマーブメント（地すべり運動）のタイプ（Varnes, 1978）			
運動のタイプ	材料のタイプ		
	岩 (Rock)	砂礫 (Debris)	土 (Earth)
I. 落下 (Falls)	Rock fall 	Debris fall	Earth fall
II. 前方回転 (Topples)	Rock topple 	Debris topple 	Earth topple
III. すべり (Slides)	Rock slump 	Debris slump	Earth slump 
A. 回転			
B. 並進	Rock block slide  Rock slide	Debris slide 	Earth block slide  Earth slide
IV. 水平伸張 (Spreads)	Rock lateral spread 		Earth lateral spread 
V. 流動 (Flows)	Gravitational sagging  	Debris avalanche   Soil creep	Rapid earth flow   Earth flow

図4 種々の地すべり現象の統合 (バーンズの斜面運動のタイプ 1978 を書き換え)

1996)は、landslidesを、rock fall, earth slide, debris flowのように材料 (rock, debris, earth) と運動のタイプ (fall, slide, flow など) を組み合わせて表現される各種の斜面運動の総称、すなわち「岩、土あるいはその混合物の斜面下降運動」として定義しました。したがって図4 (英語・日本語で書き換え) にしめされるものが、地すべり研究が対象とする種々の斜面運動を表しています。地すべり研究の学際性を尊重し、地すべりの定義もこの図も力学的な基礎知識や地質的な基礎知識がなくてもその意味するところが理解できる形で提案されています。

David Varnes は、地すべり学の基礎を造った研究者と言えると思います。2002年に設立された国際斜面災害研究機構 (ICL)では、その設立と同時に地すべり学の研究・教育に発展に貢献した人に贈るメダル (純銀製) をつくり、そのメダルの名前をバーンズメダルと名付けました。これまで地すべり研究・教育分野で功績のあった研究者として、Robert Schuster (米国, 2003), John Hutchinson (英国, 2004), 福岡正己 (日本, 2005) Masami Fukuoka, Norbert Morgenstern (カナダ, 2006) にバーンズメダルが授与されています。

2. 地すべりダイナミクスとその応用

2.1 地すべりダイナミクスの研究対象

図4は、地すべりの研究範囲を示したものとして、地すべり学の基礎となるものであるが、力学的な観点から見ると必ずしも適切ではない。その第一は、流動として土石流のような極めて早い現象 (毎秒数 m から時には数十 m) と年間数 mm から数十 mm 程度の山体変形までが同じ流動として扱われている。せん断速度が空間的に分布している点で同じカテゴリーに含まれているが、メカニズムは異なるはずであり、また防災上の対応も異なる。また、水平伸張も勾配が水平に近いが、いずれも土の摩擦角が極めて小さければ、すべりとして説明できるものである。同じすべりで回転 (円弧すべり) と並進 (平面的すべり) を分けているが、すべり面の形は力学的にはそれほど重要ではない。Sassa (1985, 1999) は、地すべりを力学的観点から分類する研究を行った。図5がその分類である。すなわち地すべりの発生機構とその後の運動速度に着目してのものであり、せん断のタイプとせん断特性から材料を分けたものである。せん断のタイプとして次の3つに分けている。I. すべり：これをさらに、I-1:破壊後に急速な運動が生じ

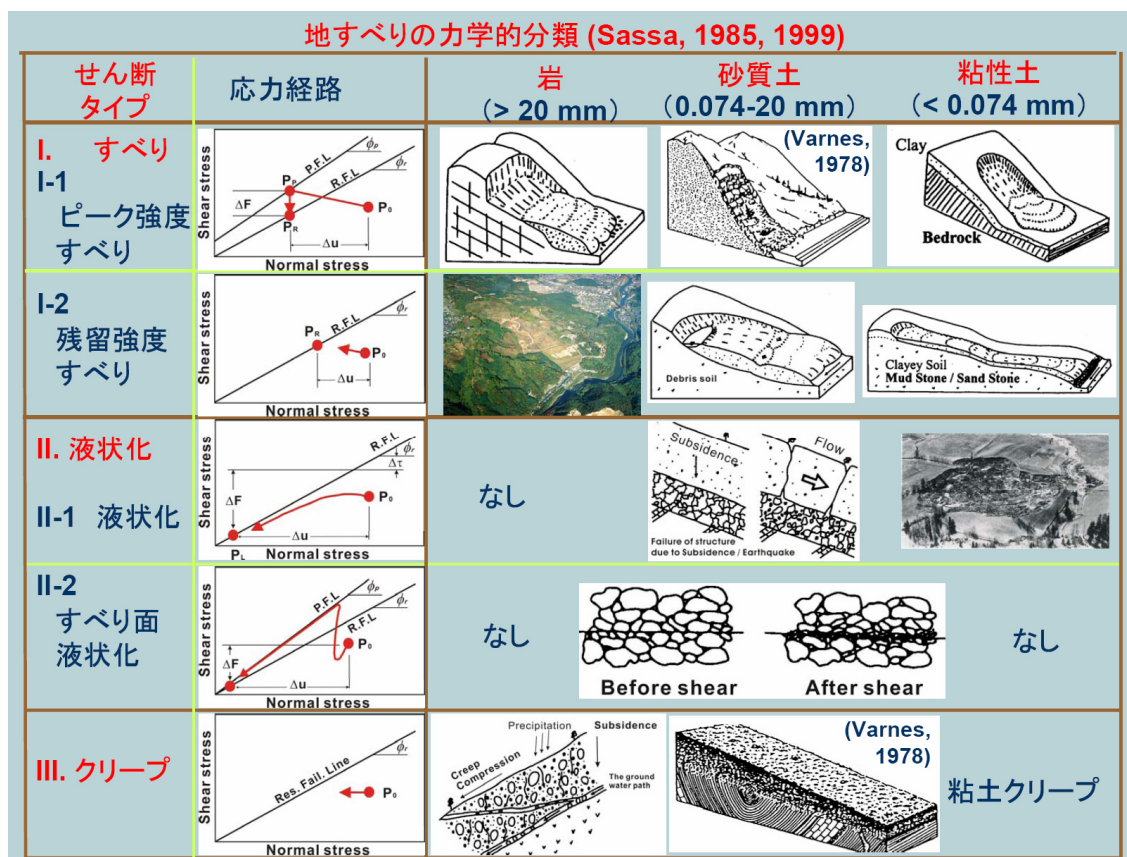


図5 地すべりの力学的分類 (Sassa 1985, 1999)

る「崩壊」に相当する**ピーク強度すべり**と I-2 すでに過去に何度かすべっているところが再び移動する「再活動地すべり」に相当する**残留強度すべり**に分けた。

II. 液状化：斜面土層の内部で液状化が発生し、破壊後に極めて高速の地すべり運動が生じるタイプである。これをさらに、**II-1：液状化**と **II-2：すべり面液状化**に分けた。液状化は、斜面土層の一部が極めて粗な構造になっているところでは、土層が飽和時に何らかの原因で急激な応力変化が生じると粗な構造が壊れて、間隙水のなかに土粒子が浮かぶ構造になるものであり、発生はかなり特殊な場所に限られる。これに対してすべり面液状化は、土層構造が粗でなくても土中でせん断が生じるとすべり面で土粒子が壊れ、せん断ゾーンの体積収縮が生じ、高い過剰間隙水圧が発生してすべり面が液状化する現象であり、飽和状態でせん断により土粒子が破砕される条件が満たされればどこでも生じるかなり一般性の高い現象である。

III: クリープは、土層の全体としては破壊していないが、土層内部での局所的な不安定部分(粒子)が、地下水位の上下等により僅かずつ変形することによって生じる斜面の運動である。II と III がバーズ

の分類で流動(Flow)の中に極めて早い現象と極めて緩慢な現象が混在していたものをメカニズムの観点から切り離したものである。

地すべりの動力学、すなわち地すべりダイナミクスで研究する対象は、これら3つのタイプのせん断現象であるが、防災上、特に重要性の高いものは人命に危害を加える高速の地すべり現象を引き起こす液状化とすべり面液状化である。

2.2 地すべりダイナミクス研究のための試験機の開発

地すべりダイナミクスの主たる研究対象である高速地すべりは、豪雨の時のみならず、1995年の阪神震災の際の仁川地すべりのように降雨がほとんど無い時期における地震時にも発生し、また、2004年の台風23号の後で生じた中越地震時に誘発された東竹沢地すべり、寺野地すべりのように地震・降雨複合作用で発生する場合があります。

高速地すべりの発生メカニズムを調べるためには、地震、降雨あるいは地震・降雨複合作用による地すべり発生とその後の運動を再現する試験機が必要です。その認識の元で最初に科学研究費により地震時地すべり再現試験機を開発し(佐々恭二、1994)、

ついで阪神震災の後の補正予算でこれを改良した試験機 (DPRI-5, DPRI-6) を開発し、ついで科学技術振興調整費「地震豪時の高速長距離土砂流動現象の解明」プロジェクトで可視型試験機 (DPRI-7) を開発しました。一連の試験機の概要とその地すべり再現試験への適用は、2004 年から出版が開始されたフルカラーの国際地すべりジャーナル「Landslides」の創刊号の最初の論文 (Sassa et al., 2004) に詳しく紹介していますが、その要点を図 6 に示しました。

地すべりのすべり面が形成される土層 (あるいはそれと同じと判断される土層) からサンプルを採取し、これをリングせん断試験機の中に入れます。そしてこの試料に斜面土層内で作用しているものと同じ力を垂直応力とせん断応力に分けて載荷し、斜面土層内の初期応力を再現します。そしてさらに降雨に対応する間隙水圧の上昇、地震力に対応する垂直応力、せん断応力を載荷します。そしてその結果としての破壊 (すべり面の形成) の有無と破壊後の運動、さらにその過程で発生する過剰間隙水圧とすべり面で発揮されるせん断抵抗変化を計測します。すべり面に作用する過剰間隙水圧の計測は、せん断箱の上箱の外壁のすべり面から 2mm 上に設置された溝 (フィルター付き) に間隙水圧計を接続して計測

します。また、せん断中にせん断箱の上下の隙間から一滴の水も漏れないように、下箱に取り付けた防水ゴムエッジが、せん断箱内部で発生する過剰間隙水圧以上の接触圧で常に上箱に接しているように高速サーボシステムで自動調整します。

この試験機が通常のリング試験機が基本的に異なる点は、通常のリングせん断試験機が一定の速度で回転させた時のせん断抵抗を計測する試験機であるのに対し、自然の応力 (垂直応力とせん断応力: 回転力) を再現して与え、何が起こるか観察しようという現象の再現試験である点です。土層実験などモデル試験と異なる点は、斜面土層内の応力を試験機内でそのまま再現し、その場所でのすべり面の形成を再現していることです。

2.3 地すべり再現試験機を用いた研究

1) 1995 年兵庫県南部地震で発生した仁川地すべりの研究

1997 年 1 月 17 日に兵庫県で発生したマグニチュード 7.2 の地震では、兵庫県内の各所で大災害を引き起こしたが、11 月、12 月、1 月とほとんど無降雨に近い渇水期であったために大きな地すべりは発

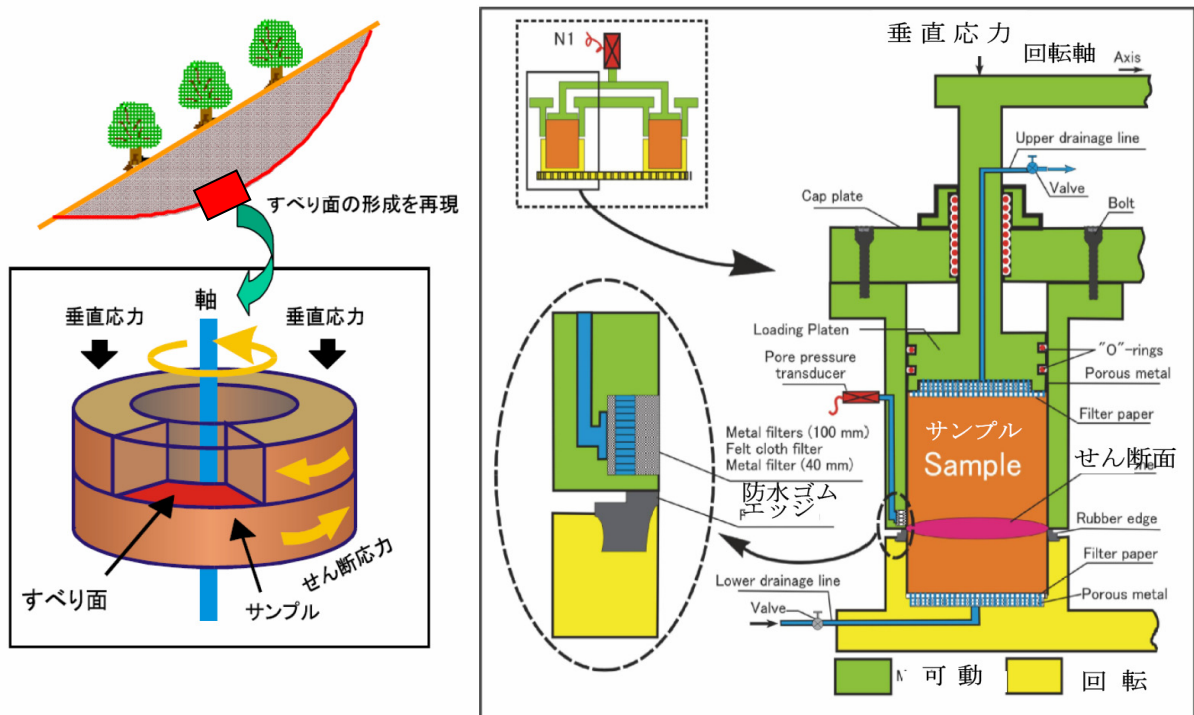


図 6 地震時地すべり再現試験機概念とせん断箱の構造模式図

- 斜面土層内の潜在すべり面にかかる応力の試験機内での再現
- せん断破壊の発生 (すべり面の形成) とその後の運動の試験機内での再現
- すべり面で発生する過剰間隙水圧と運動時に発揮される摩擦抵抗の計測



兵庫県南部地震で発生した 高速長距離土砂流動現象

- 降雨のほとんど無い時期に、川も無いところで、なぜ土石流的な土砂流動現象が発生したのか？
- 表層は乾いていたが、地下に帯水層があり、すべり面は飽和していた
- 現地からサンプル（大阪層群-花崗岩質の砂）を採取し、飽和状態で地震時地すべり再現試験を実施
- すべり面のみの流動化“すべり面液状化現象”が発生することが分った。

図7 1996年兵庫県南部地震で発生した仁川地すべり

生しなかった。その中で唯一大きな災害となったものは、図7に示す西宮市仁川地区で発生した地すべりである。規模は11万 m^3 とそれほど大きなものではないが、都市域の住宅密集地で発生し、その運動が高速であったため避難できず34人が地すべりの下敷きとなり死亡した。写真はセスナから筆者が災害直後に撮影したものである。斜面で地すべりが発生し、末端の小さな川を埋め、下流へ方向を転換して流動した。手前の壊れていない住宅地は川の対岸であり、斜面内にあった住宅はすべて破壊された。中央に小さく見えるのは埋まった人を探して掘削しているところである。地すべり、特に流動性の高い

地すべりや斜面崩壊は降雨時に発生することが多く、流動性の高い地すべりが発生すると「水と土砂が一体となり土石流として流動した」と解釈されるか、「地すべり土塊が川を堰き止めダムを形成し、その背後に溜まった水がオーバーフローする時、ダムが決壊し、多量の水と土砂が一体となって流下した」と解釈され、いずれも多量の水が流動化に不可欠との認識が一般的であった。しかし、仁川地すべりは、ほとんど無降雨の時に発生し、かつ斜面末端の川をせき止めるまもなく、一気に流下したことは明らかであり、土塊の流動化の原因が、土塊を飽和させるほどの多量の水の存在でなかったことは明確であった。

図7の写真の矢印のところに水溜まりが認められ、この深さから地下水がしみ出していた。このことは、地上踏査で斜面の右端の方でも地下水が噴き出しており、またボーリング調査とその後の水位観測でもある深さ以下では常時地下水があることが確認された。したがって表層は乾燥していたが、すべり面は飽和した土層のなかに掲載されたと推定される。そこですべり面を形成した大阪層群の土砂サンプルを採取し、それを地すべり再現試験機に入れ、飽和させた後、地震前の土層にかかる応力で圧密し、さらに現地に最も近い地震観測点であるJR宝塚駅で観

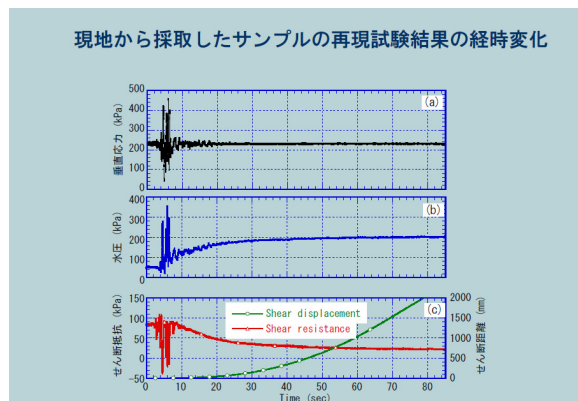


図8 兵庫県南部地震で観測された実波形を用いた地すべり再現試験の結果

測された地震波形をもとに斜面土層のすべり面にかかる垂直応力とせん断応力を再現して与え、1) 地すべりの発生の有無、2) 発生時および発生後に土層内に生じる間隙水圧、3) 破壊時および破壊後に発揮されるせん断抵抗の計測を行った結果を整理したものが図8である。地震の主要動を受けると高い過剰間隙水圧が発生し、かすかながら変形が進み始めている。主要動終了後も、過剰間隙水圧の上昇とそれに伴うせん断抵抗力の減少、その結果としてのせん断変位の加速度的増大が続いており、高速地すべりが発生することを実験的に示した。(Sassa 1996, Sassa et al.,2004)。

2) すべり面液状化現象

図8の実験結果から、必ずしも地震時に液状化が生じているわけではなく、変形(すべり)が進めば進むほど液状化、すなわち過剰間隙水圧の増大が生じていることがわかる。この現象のメカニズムとして、佐々は、「すべり面液状化」の概念を提案した(Sassa 1996)。この概念は、図9に模式的に示すように砂質土など粒状体からなる土砂が、ある一定以上の荷重のもとでせん断されれば、石臼で米がつぶされるように、せん断ゾーン内にある砂粒子が破碎され(粒子自体が壊れることも、角張った粒子では角がとれることもあり得る)、せん断ゾーンの体積が収縮する。そしてせん断ゾーンが水で飽和されていれば、水は非圧縮なのでそれまで土粒子にかかっていた応力が間隙水にかかる、すなわち間隙水圧が上昇するはずである。この現象は、せん断前後の土粒子の粒度の変化でも間接的に説明できるが、直接この粒子破碎を観察するために、科学技術振興調整費「地震豪雨時の高速長距離土砂流動現象の解明」を得て、透明のせん断箱を持つ可視型の地震時地すべり再現試験機を開発した。図10は垂直応力200kPaの下で毎秒2mで、珪砂をせん断した時のせん断箱の様子を連続撮影したものである。せん断箱の上半分は、固定され、下半分を回転させている。下箱の

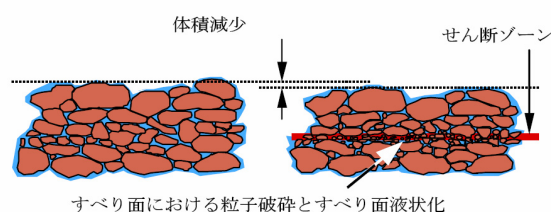


図9 すべり面での粒子破碎による体積収縮によるすべり面液状化模式図



図10 可視型試験機におけるせん断中のせん断ゾーンにおける粒子破碎の進行

上面には特殊な合成ゴム製のエッジが取り付けられ、上箱の下面の接着されたステンレス板に常に内部で発生する過剰間隙水圧以上の圧力で押しつけられるようにサーボ制御されており、2 m/秒の高速回転中も一滴の水も漏れない構造になっている(図6)。(a)はせん断前、(b)、(c)、(d)はせん断中である。せん断ゾーンで砂粒子が破碎されて生成された細かな破碎した砂を含む泥水が、せん断ゾーンで発生する高い間隙水圧のために上下に拡散している様子が観察され、すべり面液状化の発生が肉眼でも観察された (Sassa, et al.,2004)

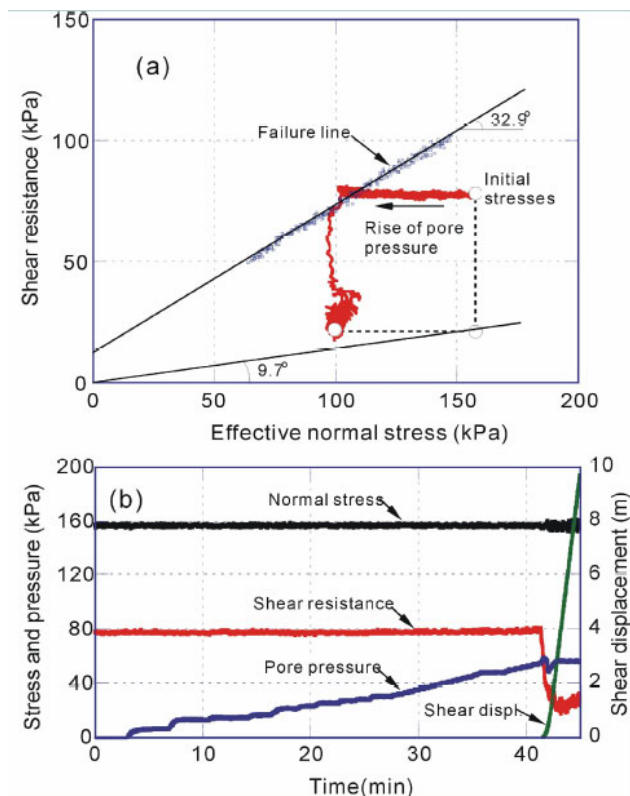
3) 2003 年熊本県水俣市の豪雨で発生した深層崩壊-土石流の研究

2003年7月20日に熊本県をおそった集中豪雨(累積雨量 314mm, 最大時間雨量 91mm)により水俣市の山腹で深層崩壊が発生し、崩壊土塊が溪床堆積物を巻き込んで、土石流となって流下した。そして土石流扇状地に立てられていた住宅の住民 15 名が死亡した。この源頭部を構成していた風化溶岩起源の土砂からサンプルを採取し、豪雨による崩壊再現試験と崩壊土塊により溪床堆積物の急速載荷により溪床堆積物が巻き込まれるプロセスの再現試験を実施した (Sassa, et al., 2004)。図 11 に深層崩壊-土石流の全景を示す。また、その源頭部の崩壊の再現試験の結果を図 12 に示す。図 12((a)の Initial stress



図 11 2003 年熊本県水俣市の深層崩壊-土石流

は、豪雨前の斜面土層内の応力を示す。そして豪雨による斜面土層内での水位上昇を再現しているプロセスが、垂直応力が次第に減少しているほぼ水平な応力経路である。やがて有効応力が、この土の持つ破壊線にあたると破壊が生じ、運動が始まる。図 12(b)にその経時変化が示されている。地下水位上昇により次第に水圧が増大し、ある時点で破壊が生じて、急激にせん断変位が増大している。この破壊に



水俣市の崩壊の再現試験の結果

- 1) 崩壊現場から採取した風化溶岩からなる砂礫層から採取したサンプルを用いて、試験機内で斜面土層の初期応力を再現
- 2) 豪雨による地下水位上昇による間隙水圧増大を再現
- 3) 種面土層内の応力が破壊線に到達した時、すべりが発生。
- 4) 破壊後、せん断強度は急低下し、高速の運動が開始された。運動時に発揮された摩擦角は9.7°

図 1 2 豪雨による市の深層崩壊の再現試験の結果

伴うせん断の進行とともに粒子破碎とすべり面液状化が発生し、せん断抵抗が急激に低下している。破壊時に発揮された摩擦角は、 32.9 度であるが、運動時に発揮された摩擦角は、 $\tan^{-1}$ (運動時に発揮される摩擦抵抗) / (初期垂直応力) で表現されるが、 9.7 度である。ちなみにこの試験では、図 6 に示すせん断箱内の水圧を徐々に上昇させるため、せん断箱からの水の出入りは自由である。したがって、せん断面の $2 \sim 6 \text{ mm}$ 上で計測されている間隙水圧計の値は、すべりゾーン内部で発生している過剰間隙水圧を正確に測定できていない。正確に測れていたとすると(a)のグラフでは、破壊後の応力経路は破壊線に沿って低下する。また、(b)のグラフでは破壊後間隙水圧の値は垂直応力の値にかなり近づくはずであることが、せん断抵抗の急激な低下から推定される。

4) 2006 年フィリピンレイテ島で降雨後の小地震で発生した大規模地すべりの研究

2006 年 2 月 17 日にフィリピン・レイテ島で死者・行方不明 1,144 名の大規模地すべりが発生しました。京都大学防災研究所、国際斜面災害研究機構 ((特) アイシーエル)、フィリピン火山地震研究所などによる共同調査が実施されました(Sassa et al. 2007)。この地すべりは、豪雨の 5 日間後に近接した場所で発生した小規模な地震 ($M=2.6$) を誘因として、斜面を構成している火山性碎屑物内に地すべりが誘

発され、それが極めて流動性の高い高速地すべりとなって、斜面脚部に形成されていた教会等を含む住宅地を破壊しました。

図 13 左は、佐々がチャーターヘリから撮影した地すべり源頭部の全景です。斜面を横断する形でフィリピン断層とその副断層が走っており、断層に関連した地殻応力・変形を受けた地域です。そのためか地すべりの中心線は二つに分かれています。中心線の屈曲部の B 点の上で地下水流の流れが阻害されることにより、降雨に伴う地下水圧の上昇が最も大きくなり、B 点から上の部分でまず地すべりが始まり、これと同時に山頂部が引かれて追従し、C 点以下の部分に圧力がかかり、斜面下部ブロックも移動したと推定しました。図 13 の右上の図がその縦断面です。運動中に発揮された平均的な見かけの摩擦角は、地すべり上端と堆積域末端を結ぶ線 (速度ゼロとする斜面勾配に相当し、エネルギー線と呼びます) で表されますが、約 10 度でした。我々は、B 点の近くまで登り、残っていた土層からもサンプルを採取しましたが、S 点に運動してきた土塊が堆積していたので (図 13 右下)、その底部から約 100 kg のサンプルを採取し、日本に持ち帰り再現試験を実施しました(Sassa, et al. 2007)。

レイテ地すべりの最大深度は、 100 m を越えており、現有の再現試験機の容量では再現試験が無理なので、実験可能な 35 m の深さに対応する応力下で実験を行いました。最初に斜面勾配と 35 m の深さから

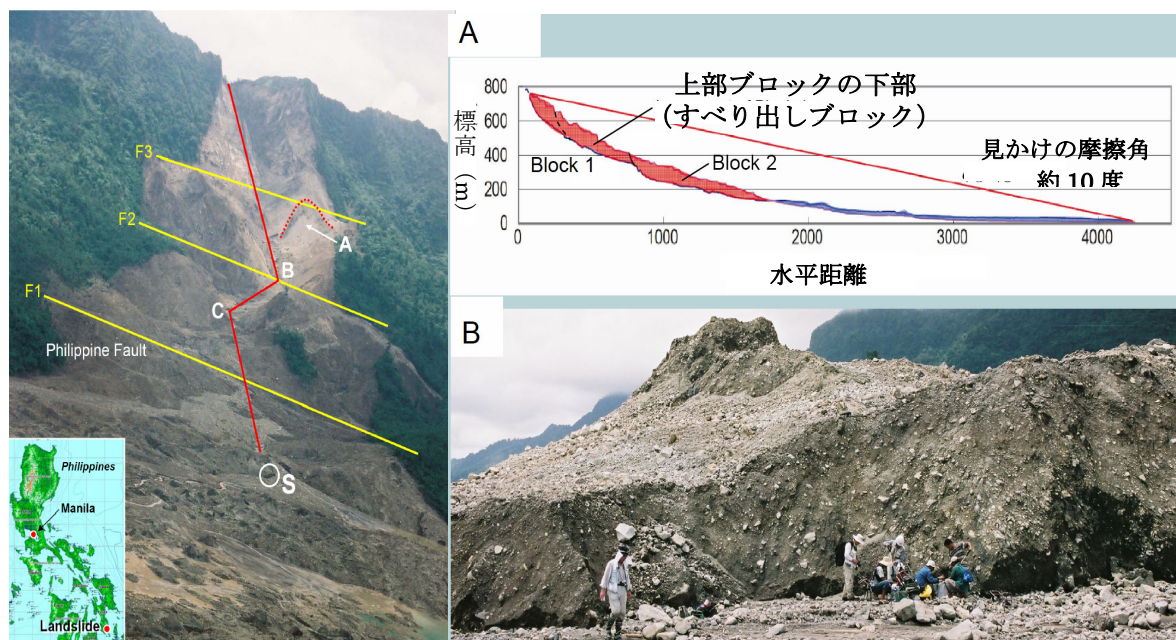


図 13 フィリピン・レイテ島で発生した大規模高速地すべり

左：地すべり発生域 (チャーターヘリより佐々撮影)

右上：レイテ島地すべりの縦断面 (福岡、新井場の現地計測結果をもとに作成)

右下：流山 (左写真の S 点) 底部からのサンプルの採取 (左の人物は丸井英明会長)

算定される垂直応力とせん断応力を与え、ついで地下水上昇を再現し、地下水上昇のみで地すべりが発生する破壊線の位置を正確に求めました。レイテ地すべりは降雨が、ほぼ止んでから 5 日後の小さな地震で発生しましたので、地すべり発生時には、ピークの水位は超えていたと推定されます。

この再現試験では、サンプルを現地の斜面土層（35m相当）内に作用する応力を載荷後、間隙水压を上昇させ、あと 5m 水位が上昇すれば破壊する状態を再現し、最後に地すべり現場に近いところで発生したマグニチュード ($M_s=2.6$) の地震によって地すべり土塊に載荷されると推定される地震力を与えました。地震波形は、最も近い地震観測点である Maasin 観測点での記録波形を用いました。最大地震加速度は、震央と地すべりとの距離による減衰から算出すると約 10gal ですが、基岩-堆積層間の増幅（約 3 倍と推定。増幅度は、土層間の弾性波速度のコントラストに比例）と傾斜地での増幅効果（約 2 倍と推定）をあわせて 60gal と仮定して与えました。その結果を図 14 に示しました。図から分かるように運動開始後は、せん断抵抗が極めて小さくなる典型的な「すべり面液状化現象」が発生しており、レイテ島地すべりにおける極めて速度が大きい流動性の高い現象を再現しました。また、高速運動中に発揮された見かけの摩擦角は 0.9 度という極めて小さなものになることが分りました。試験は、完全な平面的なすべりですが、実際は運動経路が上下、水平に曲折していることから、かなりのエネルギー損失があること、試験は完全な非排水条件で行いましたが、自然状態ではすべりゾーンからの排水もある程度生じること（試験機のせん断箱の上部の排水弁を解放した状態で再現試験を実施した結果、得られた見かけの摩擦角はやや大きく 2 度でした）、堆積域において土層深度が薄くなると粒子破碎が少なくなり、すべり面液状化が生じにくくなることなどにより、約 10 度の見かけの摩擦角になったと想定されます。

これまでの調査では、すべり面液状化を伴う典型的な高速地すべりの運動中に発揮される摩擦角は、レイテ島地すべりと同様に、10 度前後、あるいはそれ以下になります。すべり面液状化の発生の有無は下記の要因によります。

- 1) 粒子の壊れやすさ：火山性堆積物などは角張っており、粒子破碎をし易い材料です。一方、海岸の砂のように川を流下してくる間に壊れやすい部分はすべて壊れてしまった材料は強くなります。また、粘土のように粒子がそれ以上壊れないような土は、すべり面液状化を起こし

にくい材料です。

- 2) 粒子が壊れるか否かは、せん断中にかかっている応力によって異なります。強い材料でも高压下でせん断を受ければ壊れます。
- 3) 粒子破碎による体積収縮が生じて土層が水で飽和していなければ、過剰間隙水压が発生しないので、すべり面液状化は発生しません。いつも水で飽和しているような場所は、無降雨の時期に地震が発生しても、阪神震災での仁川地区の地すべりのようにすべり面液状化が発生するので危険度が高いと言えます。

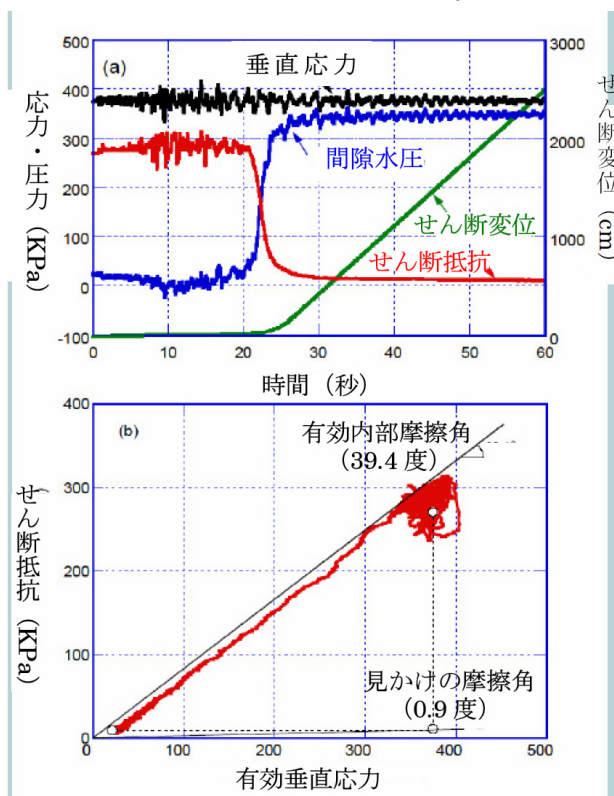


図 14 レイテ島地すべりの再現試験の結果

斜面土層に作用する垂直応力とせん断応力を載荷後、降雨による地下水上昇に相当する間隙水压を上昇させ、その後、近くで発生した小さな地震による地震力（観測波形を使用）を載荷

上：破壊発生前後の応力変化と発生した過剰間隙水压及び発揮されたせん断抵抗変化とせん断変位。

破壊発生後に過剰間隙水压が急上昇し、せん断抵抗が急低下する「すべり面液状化」現象の発生が確認される。

下：応力経路で示したもの。破壊は応力が 39.4 度の破壊線に達したことにより起こり、破壊後に過剰間隙水压の上昇により応力は破壊線に沿って低下。見かけの摩擦角にして僅か 0.9 度で定常状態に達している。

2.4 地すべり危険度予測の研究

これまで、地震によって誘発される高速地すべり（1995年の兵庫県西宮市の仁川地すべり）、豪雨によって誘発される高速地すべり（2003年の熊本県水俣市の斜面で発生した深層崩壊が土石流へと発達）、また、降雨と地震の複合作用によって発生した大規模高速地すべり（2006年2月17日にフィリピンのレイテ島で発生）について、各々現地からサンプルを採取して、地すべり再現試験機を用いて実験を行い、これらの高速地すべりの運動が実験的に説明できることを確かめた。

そこで、まだ地震や豪雨の発生していない場所でサンプルを採取し、実験を行うことにより、高速地すべりの発生とその運動範囲の予測が可能かどうか検討してみた（これは、科学技術振興調整費）地



図 15 東京都八王子市-日野市の住宅開発地域の試験地

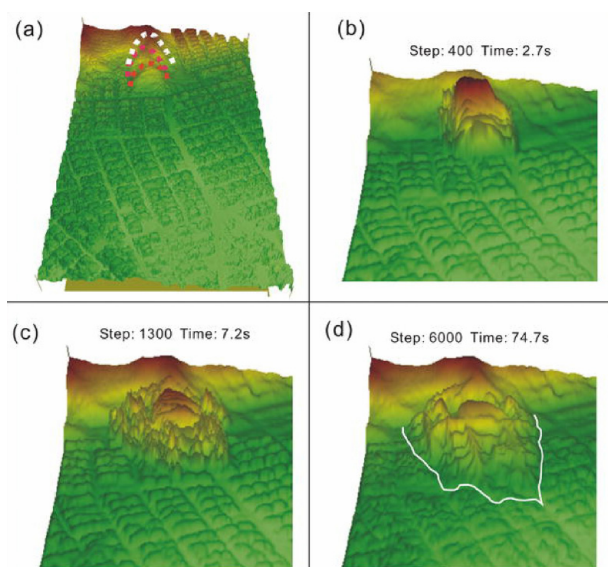


図 16 東京都八王子市住宅街での地震時地すべり災害予測の結果

震豪雨時の高速長距離土砂流動現象の解明の一環として始められ、防災研究所の21世紀COEプログラムの一環として研究が継続された)。図15は、東京都のベッドタウンである八王子市、日野市の境界に広がる住宅開発地域の空中写真である。丘陵地が開発され住宅があるいは斜面を削り、あるいは谷を埋めて平坦化した所に多数の住宅が建設されている。研究ではこの住宅地域から、谷を埋めた場所(A)と山を切った斜面に近接しているところ(B)を選んだ。B点の両側は過去に降雨により地すべりが発生した場所であり、特に向かって左側の斜面脚部からは今も地下水が出ている。Bの矢印は尾根状であり、降雨による地下水の集中はなく、降雨による地すべりの可能性はほとんどない。しかしながらその基礎となる底部砂層は、斜面脚部からの地下水の流出からも推定されているように常に飽和している。この砂層からサンプルを採取し、地震が発生した場合に過剰間隙水圧が発生するかどうか、すべり面液状化が発生するかどうかを確かめる地震時地すべり再現試験を実施した。その試験結果を地すべり運動シミュレーション(Sassa 1988に基づいて科学技術振興調整費により改良 Sassa etc 2004)を実施した結果である。地震力を受けると尾根部が崩壊し、すべり面では粒子破碎によってすべり面液状化が発生して、斜面脚部に広がる住宅が被災することが推定された。この住宅地と斜面は航空レーザ測量により詳細な地形データを得たことから、極めて鮮明な地形を立体表示できている。なお、このシミュレーションの出力図では地すべり土塊の深さを5倍に拡大して表示している。

この予測結果が本当に正しいかどうかを検証することは困難であるが、尾根部といえども地震時には崩壊しうること、この斜面の底部を構成する砂質土は、すべり始めれば(20mの深さを想定)、すべり面液状化が生じることにより、大きな被害をもたらす高速長距離運動地すべりになる条件を備えているとの推定は可能である。

3. 地すべり学の発展の基礎となる国際的協力の枠組み

3.1 国際斜面災害研究機構、京都大学防災研究所・斜面災害研究センターの設立、およびユネスコ・京大・ICLによるUNITWIN共同計画の開始

2002年1月21-25日にユネスコと京都大学は共同で「地すべり危険度軽減と文化自然遺産の保護」に関する国際シンポジウムを京都で開催しました。



図 17 国連大学において開催された東京円卓会議の参加者記念写真（2006 年 1 月 18 日）

このシンポジウムは日本外務省、ユネスコ国内委員会等の後援を得て実施され、ユネスコから水科学部、地球科学部、文化遺産部、基礎・工学科学部（防災課）から 6 人、文部省、外務省、世界気象機関（WMO）、国際防災戦略事務局（UN/ISDR）ほか世界の主要な地すべり研究機関からの代表者が参加しました。斜面災害研究の重要性とこれまで斜面災害に関する国際研究計画も国際学会もなかったとの共通認識に基づき、この会議の参加者は、国際斜面災害機構（ICL）の定款の採択と初代会長（佐々恭二）の選出を行い、国際斜面災害機構（ICL）の設立を宣言する「京都宣言」を発表し、国際斜面災害研究機構（ICL）が発足しました。

国際斜面災害研究機構の設立は、人口増大、経済成長、国土開発、地域開発の進展により、斜面災害危険度軽減のための研究の必要性が世界的に認識されてきたことを反映しています。このような内外の要請に応えるために、2003 年 4 月に防災研究所に斜面災害危険度軽減の研究を実施するために斜面災害研究センターが設立されました。このセンターは、地すべり学の核としての地すべりダイナミクス研究領域と徳島地すべり観測所を含む地すべり計測研究領域の 2 分野（1 教授、2 助教授、2 助手）からなるセンターです。また、この設立と同時期の 2003 年 3 月にユネスコ、京都大学、国際斜面災害研究機構の三者は、ユネスコのプログラムである UNITWIN 計画の一つとして「社会と環境に資する

ための斜面災害危険度軽減共同計画」に調印しました。UNITWIN 計画は、1992 年から開始されたユネスコのプログラムであり、名称は、大学が密接に連携し（絡み合い）、ネットワークを構築して協力を発展させる意味の **University twining and networking** の略です。その主たる目的は、ユネスコの守備範囲である教育、科学、文化、人権などのすべての分野における知識の交流を通じた人材育成と研究活動及び地球規模での学術的連帯の推進です。日本では、Asia-Pacific Distance and Multimedia Education Network（アジア太平洋遠隔・マルチメディア教育（早稲田大学、1999 年設立）、UNITWIN Network on Emergency preparedness and response（防災教育共同研究プロジェクト、早稲田大学、2005 年設立）が実施されています。単一の機関で実施する UNESCO Chairs プログラムとしては、昨年認可された UNESCO Chair on Cultural Heritage and Risk Management（文化遺産とリスクマネジメント、立命館大学）などがあります。

ユネスコ・京都大学-ICL による斜面災害危険度軽減のための UNITWIN 計画を推進する拠点として、京都大学の総長裁量経費と国際斜面災害研究機構の経費により、京都大学宇治構内に UNITWIN 本部棟が建設されました。2004 年 9 月に UNITWIN 本部棟内で開催されました開所式典には、京都大学から尾池和夫総長・副学長、防災研究所から井上和也所長ほか、ユネスコから関連部局（高等教育、防災、

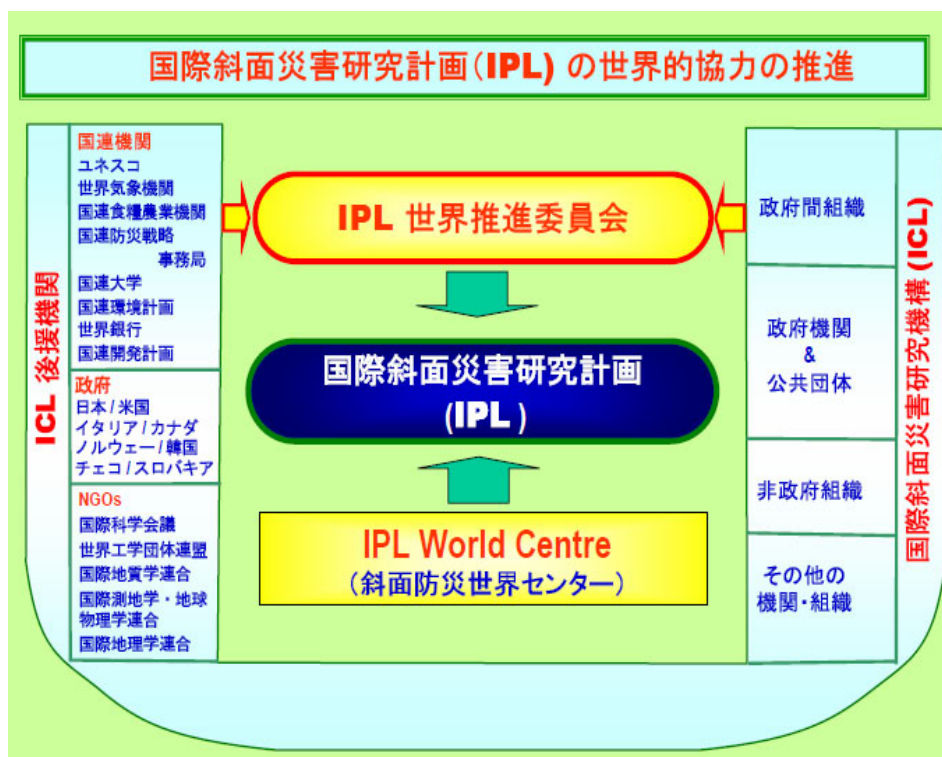


図 18 東京行動計画で採択された国際斜面災害研究計画の推進体制

地球科学) の 3 名、内閣府、文部科学省防災科学技術推進室長、ユネスコ国内委員会、国連大学長等にご出席いただきました。現在、この本部棟が、国際斜面災害研究計画の推進および世界的な斜面災害研究の情報交換・共同研究等の活動のベースとなっています。

3.2 2006 年東京行動計画と 2008 年第一回斜面防災世界フォーラム

2005 年に神戸で開催された国連防災世界会議において、テーマセッション「洪水及び斜面災害に関する研究と災害軽減のための新たな国際イニシアティブ (IFI & IPL)」が ICL、ユネスコ、世界気象機関、国連大学、京都大学他によって共催され、そのセッションにおいて ICL から「地球システム危険度評価と持続できる災害管理に関する研究と学習の強化」に関する協力の推進を目指す同意書が提案され、国連 5 機関 (UNESCO, WMO, FAO, UN/ISDR, UNU) と国際科学会議 (ICSU) と世界工学団体連盟 (WFEO) によって承認されました。そしてこの同意書に基づいて、地球システム災害の一つとして斜面災害危険度軽減に関する地球規模での協力を検討するために、2006 年に国連大学において円卓会議「国連国際防災戦略における斜面災害に関する地球システム危険度解析と持続可能な災害管理についての研究と学習の強化—ダイナミックかつ地球

規模でのネットワークをもつ国際斜面災害研究計画の構築を目指して」が開催されました (図 17)。本会議は日本政府 (内閣府ほか 4 省)、日本学術会議等の後援を得て、ICL とユネスコ、国際防災戦略事務局など国連 6 機関、京都大学が共催し、その会議の成果として 2006 年東京行動計画「地すべりと関連地球システム災害の地球規模での危険度軽減のための研究と学習の強化」 が採択されました。この計画は、2005 年の国連防災世界会議で採択された兵庫行動枠組み 2005-2015「災害に強い国・コミュニティの構築」の一部として実施されるものです。

東京行動計画の中核は、国際斜面災害研究計画 (IPL) を ICL の計画から、ICL と国連機関など世界的 Stakeholders との共同計画に発展させたことです。新たな IPL の推進枠組みが、図 18 に示されています。すなわち、IPL 世界推進委員会 (IPL Global Promotion Committee) が、IPL を運営する主体として設立されることになりました。そしてこの IPL 世界推進委員会の構成メンバーは、ICL の会員機関の代表と、ICL の後援機関の代表です。投票権のある代表は、IPL を推進するために会費や後援金など財政的支援を行っている機関の代表、ならびに東京行動計画の推進に関して協力覚え書き (MOU) を ICL と交わした機関です。東京行動計画を推進するために覚え書きを交わした機関は、2007 年 1 月の時点で国連防災戦略事務局 (UN/ISDR)、国連大学 (UNU)、世

第一回斜面防災世界フォーラム

国際斜面災害研究計画(IPL)に関する2006年東京行動計画の実行に向けて
-地すべりと関連地球システム災害の地球規模での危険度軽減のための研究と学習の強化-
日時: 2008年11月18-21日
場所: 国連大学、東京都渋谷区神宮前5丁目53-70

主催
国際斜面災害研究機構(ICL)、国連教育科学文化機関(ユネスコ)、世界気象機関(WMO)、国連食糧農業機関(FAO)、国連国際防災戦略事務局(UN/ISDR)、国連大学(UNU)、国連環境計画(UNEP)、国連開発計画(UNDP)、世界銀行(IBRD)、国際科学会議(ICSU)、世界工学団体連盟(WFEO)、
京都大学(KU)、日本地すべり学会(JLS)

後援(予定)
内閣府、外務省、文部科学省、農林水産省、国土交通省、気象庁、国際協力機構、日本学術会議、イタリア外務省、イタリア文部科学省、イタリア内閣府市民防衛部、韓国非常事態管理庁他

名誉議長
松浦晃一郎(UNESCO事務局長)
Jacques DIOUF(国連食糧農業機関事務局長)
Salvano BRICENO(国連防災戦略事務局事務局長)
Gopverdhan METHA(国際科学会議会長)
Michel JARRAUD(WMO事務局長)
Hans van GINKEL(国連大学長)
西村周三(京都大学副学長)

共同議長
Edward BROMHEAD(英国ロンドン大学教授)
Srikantha HERATH(国連大学上級学術計画官)
Howard MOORE(国際科学会議顧問)
佐々恭二(ICL会長、京都大学名誉教授)
Paolo CANUTI(ICLヨーロッパセンター)
石原和弘(京都大学防災研究所教授)
Badaoui ROUHBAN(ユネスコ防災課長)
Robert SCHUSTER(米国地質調査所)

国内組織委員会
委員長: 實 馨(京都大学防災研究所教授)、副委員長: 落合博貴(日本地すべり学会副会長)
幹事: 福岡 浩(京都大学防災研究所・准教授)

図 19 第一回斜面防災世界フォーラムの概要

界気象機関(WMO)、世界工学団体連(WFEO)、ユネスコ(UNESCO)、国際科学会議(ICSU)であり、国連食糧農業機関(FAO)は現在、調印手続き中です。上記の新たなIPLを運営するためにIPL世界推進委員会が設立され、2007年1月に国連大学において開催された最初の会議において議長に国連国際防災戦略事務局長のサルバノ・ブリセーノ氏、副議長にユネスコ防災課長のバダウイ・ルーバン氏、ICLの佐々恭二、ICL-Europeのパオロ・カヌーティさんが選ばれました。

また、ICLならびにICL後援機関のメンバーと日本政府各省や京都大学副学長等を顧問として、IPL世界推進委員会の事務局としてIPL World Centre(斜面防災世界センター)が設立されました。IPLとして推進すべき分野として、(1)技術開発(A:監視と早期警戒、B:ハザードマップ、脆弱性、および危険度評価)、(2)重点地すべり(A:巨大災害を引き起こす地すべり、B:遺産を脅かす地すべり)、(3)能力開発(A:人間・組織能力の強化、B:情報・知識の収集・発信)、(4)軽減、予防、復興(A:予防、B:軽減、C:復興)があげられています。また、IPLを推進する活動として、3年ごとに斜面防災世界フォーラムを開催すること、その際に斜面災害軽減に貢献する大学、研究所、NGO、政府、地方公共団体等を対象として、世界的COE(WCoE)を選定すること、及び世界的コミュニティが高い関心を持つ世界的斜面災害問題への貢献がうたわれました。

第一回斜面防災世界フォーラム

2006年東京行動計画での決議を受けて、2008年11月に18-21日に東京の国連大学で第一回斜面防災世界フォーラムが開催されることになりました。このフォーラムの共催機関は、ICL、国連8機関(国連教育科学文化機関(ユネスコ)、世界気象機関(WMO)、国連食糧農業機関(FAO)、国連国際防災戦略事務局(UN/ISDR)、国連大学(UNU)、国連環境計画(UNEP)、国連開発計画(UNDP)、世界銀行(IBRD)、国際科学会議(ICSU)、世界工学団体連盟(WFEO)、京都大学(KU)、日本地すべり学会(JLS))です。組織委員会の名誉議長は松浦晃一郎ユネスコ事務局長、ジャロウ世界気象機関事務総長、ディエフ国連食糧農業機関事務局長、ブリセーノ国連防災戦略事務局長、ギンケル国連大学長、メタ国際科学会議会長、西村周三京都大学副学長です。共同議長は、ユネスコ防災課長や国際科学会議(ICSU)顧問など世界の関連機関から代表、石原和弘防災研究所長と地すべり分野でのエキスパートの8名が務め、国際組織委員会は實馨防災研究所教授を委員長として、国内の関連した研究機関、内閣府・関連省庁等を網羅する形で組織されています。会議中には分科会を20-25セッション開催する計画です。本会議は3年に一度開催予定ですが、今回が最初の会議であり、分野が限られているだけにそれほど大きな会議ではありませんが、この試みが成功すれば斜面災害に関する研究教育分野の発展に大きな影響があると思わ

れます。関係する皆様のご協力をお願いする次第です。

4. おわりに

京都大学防災研究所には、地震・火山・洪水・高潮・異常気象など種々の災害現象を扱う研究者が、土工学、地球物理学、建築学等を基礎として切磋琢磨して研究を行っています。

私が育った林学の砂防学としての現場での調査・観察・自然現象の見方を学んだこと、僅か1年間ですが英国王立協会と日本学術振興会の交換科学者として、当時地すべり研究の中心であったロンドン大学において土質力学からの見方を学んだこと、京都大学防災研究所に来てからは、理学部地球物理学専攻の一員として地球物理学研究者の思考を学んだこと、防災研究所において土石流の研究をされていた高橋 保先生、国際共同研究と一緒にさせていただいた土岐憲三先生からは、研究および国際共同研究の進め方について学びました。そして私の研究とくに地すべり計測の研究を高く評価していただき、防災研究所に招聘していただいた島通保先生のおかげで今日、無事退職まで迎えられたものと感謝しております。

図2、図3に示したごとく地すべりは多くの分野に関連していますし、何らかで研究を行っておられる研究者も数多くおられますが、地すべり研究を研究の中心とされている研究者や、地すべりを主な対象として教育・研究を行われている学部の研究室は皆無と思います。日本および日本の支援で近年、極めて小規模なグループがネパール地すべり学会（実態は研究グループ）を例外として、海外に全国レベルの「地すべり学会」はなく、したがって国際地すべり学会もありませんでした。すなわちどの学問分野でも片隅の応用分野ではあっても、一つの独立した学問分野としては存在していないといえるかと思えます。

しかしながら他分野を総合した地すべり学の確立は、効果的な地すべり危険度軽減のために不可欠な要素です。学問の基礎はそれを世界共通の言葉とするジャーナルですが、2002年に京都に設立された国際斜面災害研究機構（ICL）の機関事業として、2004年から季刊の国際ジャーナル「*Landslides*」が創刊され、過去4年間、順調に発展してきました。*Landslides*の分野は、関連する各々の分野、各々の国では、それほど大きな課題ではありませんが、これらすべてをまとめると大きな社会的ニーズがあることが理解され、世界に散らばる個人、団体、国連組織の支援を得られたことがこれまでに発展を支えてきたと思います。

これまでの防災研究所における26年間、またそれ以前の砂防研究室における大学院・助手時代を含めて多くの方々にお世話になり、励まされ、また、無理難題をお願いして、多くの方々にご迷惑をおかけしたことと思います。最後に京都大学において受けたご恩に感謝するとともに、京都大学と防災研究所の皆様のご健康とますますの発展を祈念いたします。

参考文献

- Cruden, D. and Varnes, D. (1996): Landslide types and processes. In: *Landslides -Investigation and Mitigation* (editors: K. Turner and R. Schuster), TRB, National Research Council, Washington, pp.36-75.
- Sassa, K. (1985): Geotechnical classification of landslides. *Proc. 4th International Conference and Field Workshop on Landslides*, pp.31-45.
- Sassa, K. (1999): Introduction. In: *Landslide of the World* (Editor: K. Sassa), Kyoto University Press, pp.3-18.
- 佐々恭二 (1994): 地震時地すべり再現試験機の試作研究. 科学研究費補助金（試験研究B）研究成果報告書, 106 頁
- Sassa, K. (1996): Prediction of Earthquake Induced Landslides. Special Lecture for 7th International Symposium on Landslides. "*Landslides*", Balkema Co. Ltd. Vol.1, pp.115-132.
- Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, G., and Ishikawa, N. (2004): Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics. *Landslides: Journal of the International Consortium on Landslides*, Vol. 1 (1), pp. 9-17.
- Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, F., Wang G. (2007): Landslides induced by a combined effect of earthquake and rainfall. In: *Progress in Landslide Science* (Editors: K. Sassa, H.Fukuoka, F. Wang, G.Wang), Springer, pp.193-207.
- Varnes, D. (1978): Slope movement -Types and Processes. In: *Landslides -Analysis and Control* (Editors: R. Schuster and R. Krizek), TRB, National Research Council, Washington, pp.11-33.

参考資料

International Consortium on Landslides (国際斜面災害研究機構): <http://iclhq.org/>

Progress of Landslide Dynamics

Kyoji SASSA

Synopsis

The Landslide Research Unit in the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University was established as unique landslide research unit specializing landslide disaster mitigation research within all Japanese universities in 1959, one year after the enforcement of the Japanese landslide prevention law. The Disaster Prevention Research Institute aims to develop technology to reduce various natural disasters, and also to study sciences as the basis of disaster prevention research.

Studies of landslides have been conducted in many related basic scientific fields. However, those studies have not yet combined as one of integrated scientific fields of “Landslide Science”. To develop landslide studies as an independent Scientific field, an international journal “Landslides” for integrating related scientific studies from various existing fields and an enough wide and strong international community to support it are required. This paper firstly describes the significance of landslide studies, its multi-disciplinary characteristics, and various slope movements as the target of landslide studies, secondly presents the concept and progress of “Landslide Dynamics” as the core research of “Landslide Science”, finally introduce a new international cooperation framework as the infrastructure of “Progress of Landslide Science”.

Keywords: Landslides, Landslide Dynamics, Prediction of landslide motion, Landslide ring-shear simulation test, Sliding surface liquefaction, Earthquake and rainfall combined landslide disasters