

## 論文の内容の要旨

氏名：岡本 隆

博士の専攻分野の名称：博士（生物資源科学）

論文題名：積雪荷重が作用した地すべり運動の長期動態観測に基づく研究

### 1. 背景と目的

日本列島は世界屈指の豪雪地帯である。国土面積の51%が豪雪地帯に指定され、そこに人口の約15%が居住する。東北地方の日本海側や北陸地方は豪雪地帯であるとともに新第三紀層地すべりの分布域でもあるため、積雪期に融雪を誘因とする地すべり災害が多発し住民の生命と財産を脅かしてきた。このため融雪地すべりに関する研究が水文学や雪氷学の視点から精力的に進められ、その発生機構に関して多くの知見が得られてきた。一方、技術進歩にともなう観測精度の向上により、積雪期の地すべりは融雪期に限らない複雑な運動様式をもつことが分かってきた。例えば、新潟県猿供養寺地すべりでは一般的な認識とは異なり、積雪深の増加にともなって活動が活発化し、融雪期に沈静化する。このような積雪環境下の多様な地すべり機構を理解するためには、融雪以外の積雪要素も考慮しなければならない。

積雪期の複雑な地すべり機構を解き明かす要素のひとつに、積雪の力学的性質である「積雪荷重」がある。厚さ5mの積雪層が斜面に堆積すると約20 kN/m<sup>2</sup>、(≈2000 kgf/m<sup>2</sup>)の積雪荷重が鉛直下方へ作用する。この力は地すべりの安定性や運動に少なからず影響を及ぼしうると考えられる。しかしこれまでのところ、積雪荷重の作用を受けた地すべりの動態やその力学的解釈に関する研究蓄積はほとんどなく、その多くは未解明のままである。そこで本研究では、積雪荷重が地すべり運動に及ぼす影響を解明することを目的として、国内外2カ所の積雪地域の地すべり試験地において地すべりの長期動態観測をおこなった。得られた地すべり移動量、水文諸量、気象要素を統計解析してその実態を把握するとともに、力学解析を通してその背景にある物理則の理解に取り組んだ。

### 2. 結果と考察

第1章では、まず本研究で取り扱う地すべりの概念を定義し、雪と地すべりに関する既往研究を整理して現段階における理解の到達点を述べた。地すべり機構解明に向けた観測研究の意義を述べ、地すべり観測技術の変遷を追いながら最新の地すべり観測技術に触れた。最後に本研究の目的と構成について概説した。

第2章では、本研究で対象とする2カ所の地すべり（伏野地すべり、Roesgrenda地すべり）の地形、地質的背景や既往の地すべり活動について述べた。積雪寒冷地域の厳しい環境下に耐えうる地すべり観測システム的设计思想を示したのち、地すべり移動量、水文環境、気象環境に関する具体的な観測方法やセンサーの仕様、自動観測システムの仕組みを説明した。

第3章では、冬期の最大積雪深が3-5mに達する新潟県伏野地すべり地を中心とした面積0.3 km<sup>2</sup>の山地斜面において積雪期と無積雪期に航空レーザ測量を実施し、両者の標高差分から地すべり地の積雪深分布を求めた。地すべり地の積雪深は遷急線、遷緩線や尾根、谷などの地形変換点で局所的な増減が認められるほかは概ね均一に分布することを確認した。地すべり地内4カ所で実測した積雪深と積雪荷重の値は近傍の気象露場における自動観測値とほぼ等しいことから、以降は気象露場で観測される積雪量を地すべり地の代表値とみなして議論を進めることとした。

第4章では、緩慢な移動を繰り返す伏野地すべりにおける約3年間の観測結果に基づき、積雪荷重が地すべり活動を抑制する機構について議論した。議論に先立ち、本論では地表面に供給される水分

量を降雨や融雪の形態によらず一括して *MR* (Meltwater and/or Rain) として扱うことを宣言した。伏野地すべり中部ブロックでは 1082 日の観測期間に計 3536 mm の地すべり移動量が生じ、次のような季節変動を示した。地すべりは秋期から初冬期にかけて *MR* (主に降雨) に鋭く応答して大移動する。厳冬期になり積雪深が増加すると急速に沈静化しほぼ停止する。春期は大量の *MR* (主に融雪) が供給されるが地すべりの応答は鈍く緩慢な移動に留まる。本研究では一連の季節変動の中で積雪層の発達にともなう地すべり運動の沈静化に着目し、その要因として積雪荷重によるすべり面の応力変化を考えた。地すべりの二次元無限長斜面に積雪層を載荷して斜面安定解析をおこなったところ、積雪荷重はすべり面に作用するせん断応力 (推力) と垂直応力 (抑制力の指標) の両方を増加させ、すべり面の勾配条件と土質条件に応じて地すべり全体の安定性を決定するとの結論を得た。斜面安定解析を伏野地すべりの地形、土質条件下で適用したところ、積雪荷重は地すべり運動を抑制する方向に働くと推算され、前述の観測結果と一致する結果が得られた。以上から、積雪荷重による地すべり活動の抑制機構を観測と解析の両面から明らかにした。

第 5 章では、積雪荷重による地すべり土層の鉛直圧縮機構について議論した。既往研究によれば、積雪期の地すべり土層は透水性の低下により間隙水圧の *MR* に対する応答が次第に鈍化する傾向が指摘されている。本研究では、その要因を積雪荷重によって生じる土層の鉛直圧縮 (沈下) のためと考え、その検証用機器として鉛直変位計を開発した。鉛直変位計は既存の地中変位計をベースにインバー線をカーボンロッドに、ポテンシオメータをひずみ式変位計に置き換えることで、地すべり土層の鉛直圧縮量の高精度計測を可能にする。伏野地すべりにおける 3 年間の観測によれば、土層は積雪荷重によって圧密され積雪期に最大 0.64-0.82 % の鉛直圧縮ひずみを生じた。その後、積雪荷重が低下すると土層は膨張に転じ消雪とともに停止した。以上の観測結果から、地すべり土層では積雪荷重によって圧密されることが分かり、既往研究で指摘された土層の透水性低下や間隙水圧の応答性低下を支持する根拠を得た。

第 6 章では、難透水層 ( $K_{sat} \leq 10^{-9}$  m/s) のクイッククレイ層が堆積するノルウェー国 Roesgrenda 地すべりにおける 3 年間の観測結果に基づき、積雪荷重による過剰間隙水圧の発生機構を議論した。Roesgrenda 地すべりの間隙水圧は降雨や融雪には応答せず、積雪深の増減にのみ応答して上昇、低下する特異な変動を繰り返した。この間隙水圧変動は積雪荷重の非排水緩速載荷によって励起されたクイッククレイ層中の過剰間隙水圧である。積雪荷重と間隙水圧は比例関係にあり、比例式から積雪荷重に対する間隙水圧の負担割合  $ru_{snow} = 0.49-0.53$  を得た。この値は理論的には積雪荷重の約半分が間隙水圧に変換されて斜面の不安定化に寄与することを意味する。一方、土層の透水性が相対的に高い伏野地すべり ( $K_{sat} = 2.7-3.9 \times 10^{-6}$  m/s) では、積雪荷重の排水載荷となることから過剰間隙水圧は発生せず、融雪期にのみ間隙水圧が上昇した。以上から、積雪期における地すべり地の間隙水圧は土層の透水性に依存した変動特性を示すことを明らかにした。

第 7 章では、Roesgrenda 地すべりで積雪期に発生した地すべりの移動過程と誘因について観測結果に基づき議論した。地すべりは 95 日間の継続移動を経て斜面崩落に至った。一定応力のもとで物体のひずみが時間とともに増大するクリープ理論を用いて観測結果を整理し、地すべり移動は明瞭な第 2 次クリープ領域 (等速度運動) と第 3 次クリープ領域 (加速度運動) を経て崩落に至ることを示した。地すべりの誘因については次の 3 点が示された。1) 既往の崩落事例の直前に強い *MR* は生じていない、2) 第 2 次クリープ領域の移動速度は表層部の土壌水分量に依存して上昇する、3) 第 3 次クリープでは誘因にかかわらず加速度的運動が継続する。このことから積雪期の Roesgrenda 地すべりの移動機構は、*MR* (主に融雪) と土壌水分量の増加を誘因として表層部の移動が先行し、それらが下位のクイッククレイ層の変形と構造破壊を引き起こして急激な斜面崩落へ至ると結論づけ、本地すべりに限っては積雪荷重の影響は小さいと判断した。

第 8 章では、各章の結論を取りまとめ積雪荷重が地すべりに与える影響を総括するとともに、今後の課題や方向性を示した。

### 3. 総括

積雪期の地すべり活動を規制する重要な因子として「融雪」と「積雪荷重」がある。本研究はこのうち解明の進んでいない積雪荷重に着目し、地すべり活動に与える影響を多岐にわたる視点から議論した。その結果、地すべり運動に対する積雪荷重の作用は大きく次の 3 点にまとめられた。1) 積雪荷重は地すべりのすべり面に対しせん断応力（推進力）と垂直応力（抑制力の指標）の増分としてともに働き、すべり面の勾配や土質条件に応じて地すべりの安定性を変化させる。2) 積雪荷重は地すべり土層を鉛直に圧縮させて、透水性の低下や間隙水圧の応答性低下を招く要因になる。3) 難透水性土層の地すべりに対して積雪荷重は非排水緩速载荷による過剰間隙水圧を励起させ、降雨や融雪とは無関係な間隙水圧の上昇をもたらして斜面の不安定化に寄与する。

本研究で明らかとなった積雪荷重の作用と、従来の融雪の作用を組み合わせることによって、これまで複雑に見えた積雪期の地すべり運動機構をより容易に理解できるようになるだろう。この知見は積雪期の地すべりの警戒・避難の判断基準や適切な地すべり対策事業などの行政の防災施策へも活かすことが可能である。