

## 新潟県長岡市沢田地すべりの陥没地形（ボラ）の生成条件

佐藤 修\*・青木 滋\*・加村崇雄\*\*・本間利光\*\*  
鈴木朋成\*・鈴木幸治\*

### Formation of Bowl-shaped Depression in Sawada Landslide in Nagaoka, Niigata Prefecture

by

Osamu SATO, Shigeru AOKI, Takao KAMURA, Toshimitu HONMA,  
Tomonari SUZUKI and Koji SUZUKI

(Abstract)

Clay dispersion of soil from Sawada landslide in Nagaoka city, Niigata prefecture is investigated with a view to understand a formation process of bowl-shaped depression (Bora). Water samples are collected from springs and observation wells and analyzed for main components. Water is classified into two groups according to a ratio of chloride ion to total anions. The water which has the high ratio of chloride and low ions concentration is related with Bora formation as a result of analysis of distribution of water and Bora. Clay minerals in soils from Bora and surroundings are kaolin. One third of their exchangeable cations are occupied by sodium ion. The properties of the groundwater and the chemical and mineralogical constitution of soils in this area are suitable to disaggregate soil.

Key words Depression Geochemistry, Groundwater, Clay, Exchange ion.

キーワード 陥没地形, 地球化学, 地下水, 粘土, 交換性イオン

### I は じ め に

沢田地すべり地には円形, 楕円形, 時には谷に見える陥没地形が見られる。高野 (1987) は, 千葉県では地すべり地に陥没地形 (千葉県ではボラと呼んでいる, 以下, 地すべり地の陥没地形をボラと呼ぶ) が増えると地すべりが再活動するとの観察があることを述べ, 水溶成分の溶脱により生成したと考えている。また地すべり地内の地下水の流動による水溶性成分の溶脱の例として横孔ボーリング排水に伴う地盤沈下, 集水井の周りの陥没をあげている (高野, 1987)。伊藤 (1981) は, ボラの形成が山地の沢地形の形成に関係する現象であると指摘している。いずれも, 地下水による粘土の流出を仮定しているようだが, 明確な議論はない。

陥没地形としては, シンクホールがよく知られている。これは, 地下の石灰岩などの可溶性の岩石が地下水により溶かされてできた空洞に地表が陥没してできたものである。中国の黄土地帯ではガリー侵

---

\*新潟大学積雪地域災害研究センター  
\*\*新潟大学農学部

食にさきだつて地中のレスがパイプ状に侵食され、地表の土がそのうえに落ち込みガリー地形ができる例が報告されている (ZACHAR, 1982)。類似の過程がアメリカ合衆国でも知られている (ZACHAR, 1982)。この場合もいかなる物理化学的条件が土の流亡に必要なかは議論されていない。典型的なシンクホールは石灰岩の溶解によるものだが、その他は地下の土の流亡によるものであり、土の地下水による流亡の条件を明らかにする必要がある。粘土が分散、流亡してボラが形成されるとすれば、沢田地すべりには粘土を流動化させる条件があることになる。

粘土の分散性が高くなる条件として、溶液中で粘土の電気二重層を厚くすることが必要である (白水, 1988)。その条件は、

- (1) 溶液のイオン濃度を出来るだけ小さくすること、
- (2) 溶液中のイオンを、電荷が低くて水和度が高い、すなわち粒子表面に接近しにくい厚い二重層をつくりイオン (一価のナトリウムなど) にすること、
- (3) 粘土の端面などの変異電荷に対しては、溶液のpHをアルカリ性に調節して正の帯電を防ぎ、粒子表面の負電荷を増大させることなどである。

この研究では、新潟県長岡市の沢田地すべり地がこれらの条件を満たしているかどうかを、水質と粘土の分散性の見地から考察した。

## II 沢田地すべりのボラの概要

沢田地すべりの斜面の中段に凹地が幾つかあり、凹地が幾つか連なってできたと見える谷状の地形も見られる。この地すべりは長岡市の東、魚沼丘陵の北端部の西側斜面にある。斜面は油田地帯である東山山系の北端近くの西側山麓にあたる。斜面上部の急な崖は団地の造成のために古い地すべりの末端の一部がきられ、そのあとは石積の擁壁 (高さ約 2 m) が設けられている。擁壁の中段、下段の湧水を排出するため十数カ所の排水パイプが設けられている。

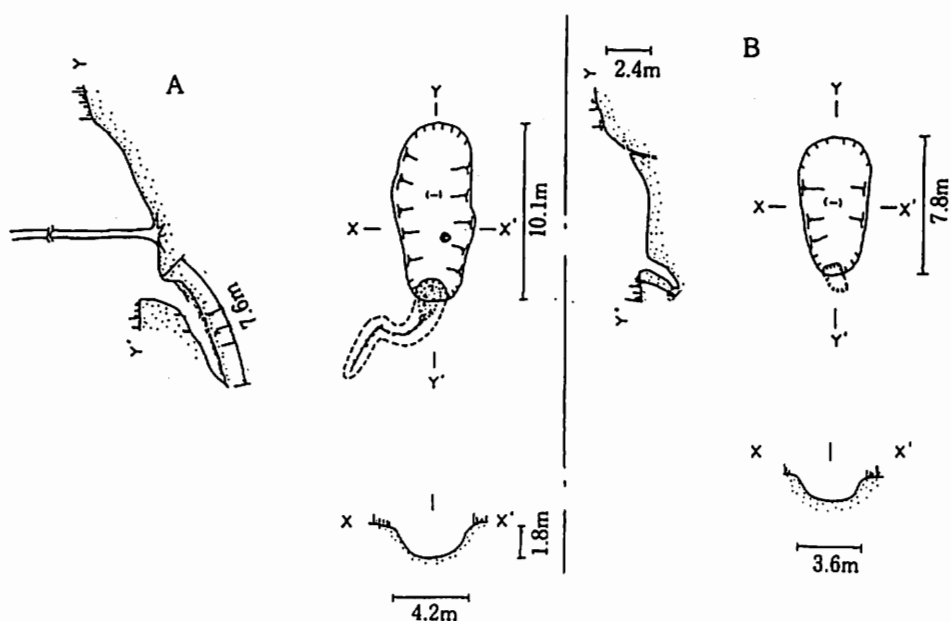


図-1 ボラ A, B, C の概観 (山辺ら [1990] 原図)  
Fig. 1 Sketch of bowl-shaped depressions A, B and C.

調査した地すべり地内の2つの陥没地形（以下ボラと称する）の概略を図-1に示した（山辺・坂井, 1990）。一番大きいボラAは斜面方向の長径10.1m, 短径4.2m, 深さは鉢状の部分が1.8mである。斜面の末端部に図のような径1mほどの洞穴が7.6mほどつづいている。洞穴の最下部には降雨の多い時期に水の流れる地下水路がある。Bも形態的には類似の構造である。ただし、洞穴の末端に水路が見られたのはAのみである。この他にも、周辺には陥没地形や、パイピングでできたとと思われる凹地が見られる。調査した凹地の形成時期の記録はないが、周りの状況から最近形成されたかと推察できる。凹地の分布する地域の周辺は樹齢30~40年の杉林であり、図-1-Aに示した凹地のなかに生育する杉の木も含めて、地すべりによる変形は認められない。地すべり、ボラの形成が杉の樹形に影響しなかったことになる。ボラの凹地内に生育する杉の木の根が、陥没していない場所では、地表に向かって伸びている。根が重力の逆方向、光の方向に伸びるとは考えられないから、杉が植えられたときは陥没していなかったが、その後、根が切れることなく徐々に陥没したことになる。洞穴状の部分には生きた木の根が垂れ下がっており、洞穴状の部分はごく最近形成されたものであることがわかる。

### Ⅲ 地下水の化学と粘土の性質

調査地域には多くの湧水が見られ、擁壁に設けられた排水パイプからはほとんどいつも水が出ている。湧水地点は図-2のNa0~12である。このあたりの地すべり地は一般に湧水が多いが、沢田地すべりはとくに湧水が多い。1989年の春に擁壁の一部が崩壊した。崩壊の拡大、地すべりの再活動を防ぐため、ボーリング調査が行われ、斜面に横穴排水、集水井による排水が施工された。水の試料として、これらのボーリング孔内水・排水なども採取し化学分析を行った。

#### 1. 湧水量の変動と水質の変化

湧水量の変動：降水によって排水パイプからの排水量（以下湧水量とする）が大きく影響される地点と、ほとんど影響されない地点とがある。5回の現地調査のおり湧水量の調査を行った。その結果、湧水量が少なく、量の変動のほとんどないNa2, 3, 4, 5, 7と、湧水量の変動の大きいNa0, 1, 6, 8, 9, 11, 12の2群に分けられる（図-3）。ボラのある沢の直下の湧水は変動の大きいNa0, 1と8, 9である。ボラAの底を流れる水は涸れることがあり、湧水が大量に出ているときにのみ水量が見られる。この現象はボラの生成に関係しているのは降水により流量が変動する水であることを示唆している。

水の化学的性質：電気伝導度の測定、水の主成分の分析の結果によれば、湧水量の変動の有無にかかわらず、各湧水の水質はほぼ一定である（図-4）。電解質濃度は全体に低く、これまでに報告（佐藤・青木, 1990）してきた新第三系の泥岩地帯の地すべり地内の水はもちろん、地すべり地周辺の湧水よりも電解質濃度が低い。主成分から見ても、泥岩地帯の電解質濃度の低い湧水では硫酸イオンとカルシウム・マグネシウムイオンが主成分となるが、沢田地すべりでは塩化ナトリウムの割合が高い。

この地域の湧水、地下水の水質は塩化物イオンの割合によって2群に分けることができる（図-5）。

A型、全陰イオンに対する塩化物イオンの割合の低い水：典型的には小滑落崖の中央の横孔排水口から出る水、集水井の排水である（図-2）。擁壁から排出されている水の中では主に湧水量の変わらない水がこれに相当する。この種の水は降水が小さい時期でも常に流れている特徴がある。ヘキサダイアグラムには現れていないが、第二鉄イオンを含むことも大きな特徴である。

B型、全陰イオンに対する塩化物イオンの割合の高い水：小滑落崖横に掘られた横穴排水口からの水、

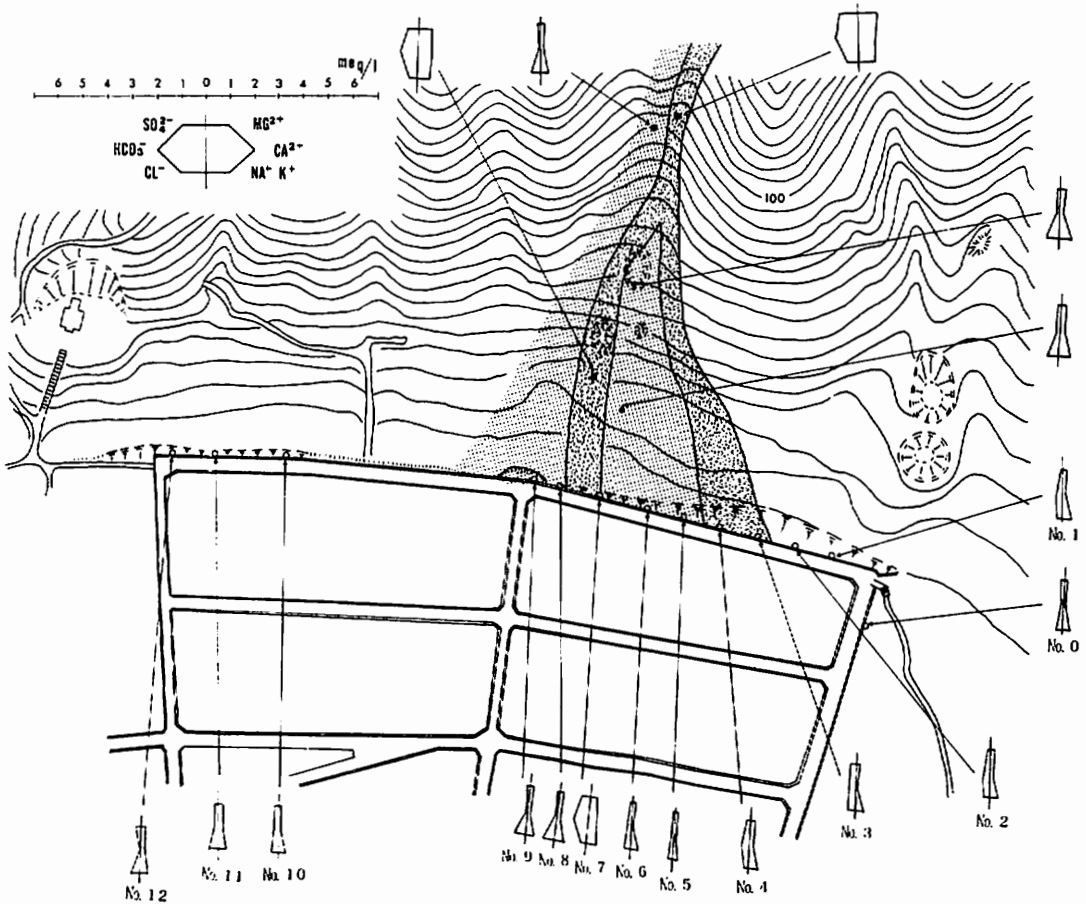


図-2 試料採取地点とその位置の水質および地下水のながれ  
 粗い点の地域：全陰イオンにたいする塩化物イオンの割合の低い水  
 細かい点の地域：全陰イオンにたいする塩化物イオンの割合の高い水  
 Fig. 2 Water quality shown at sampling sites and groundwater flow.  
 Coarse dots srea : water having low chloride ion ratio to total anions.  
 Fine dots area : water having high chloride ion retio to total ions.

ボラNa 1の流れる水、流出量の大きく変動する図のNa 0, 1, 8, 9, 10などがこれに相当する。このタイプの水は流出量の変動が大きい。

ボラAの底を流れる水が湧水の変動と同調し、湧水量の変動する水とボラAの底を流れる水がいずれもB型であることから、これらは同一の地下水系に属すると考えられる。

## 2. 粘土の分散性と粘土鉱物

粘土の分散性：ボラの内部および周辺から土を採取しそれらの分散性を検討した。湿潤土10gを遠心管にとり、水30ml加えて、ガラス棒でよく攪拌したのち、約1時間室温に静置後、3500rpm・10分間遠心分離した。このとき、沈殿しない粘土が肉眼で認められたとき粘土が分散したと判断した。分散が起こるかどうかが検討するためには、Na 8の湧水を用いた。分散が起きるときの電解質濃度を検討するために脱塩水を用いて、同じように実験した。上澄の液は電気伝導度を測定し分散時の電解質濃度の指標とした。

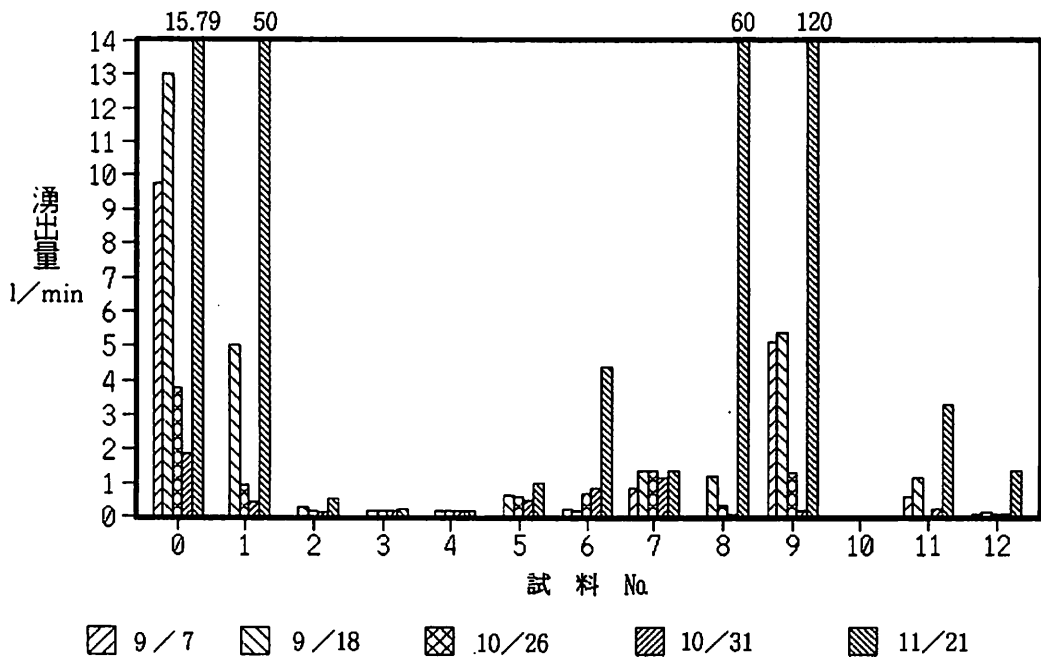


図-3 沢田地すべり地の湧水量の変動  
 Fig. 3 Change of volume of spring water in Sawada landslide.

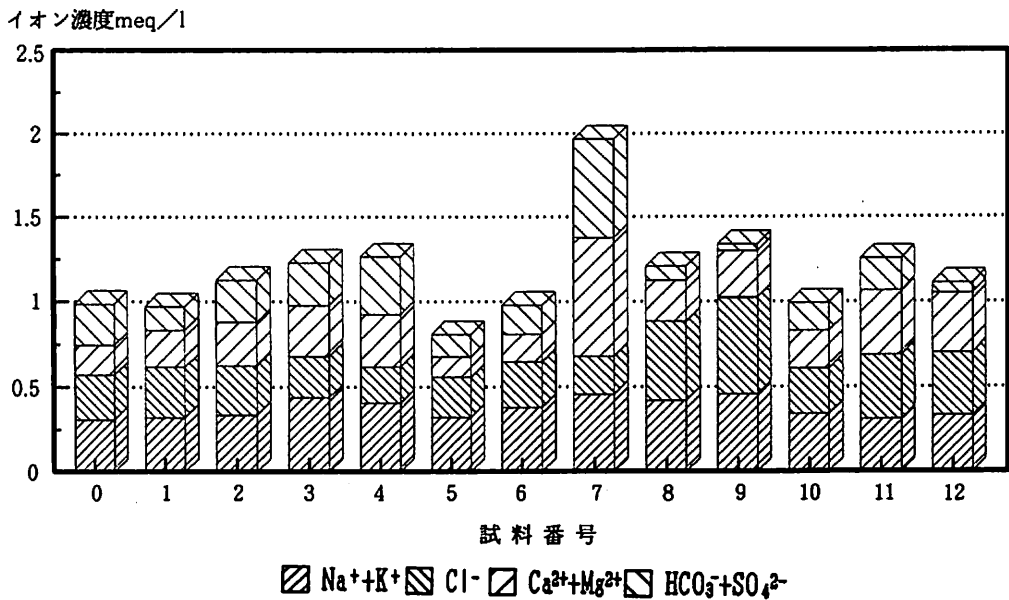


図-4 湧水の主成分の科学組成  
 Fig. 4 Chemical composition of major elements in spring water.

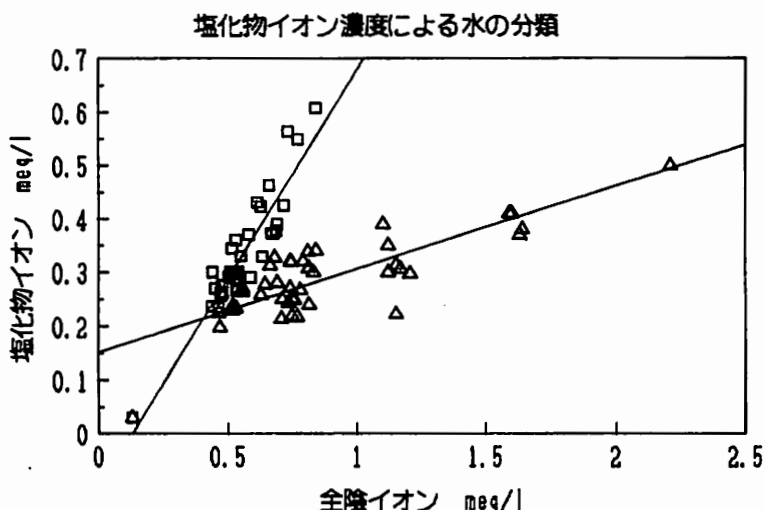


図-5 全陰イオンに対する塩化物イオンの割合による水の分類  
 Fig. 5 Classification of water by chloride ion ratio to total anions.

ボラおよびその周辺の土24試料を湧水で分散させた。最初の分散で、11の試料が分散し、3回目の分散によりすべての土が分散した。ボラの中を流れるような地下水によってボラの周辺の粘土が分散することは確実である。地すべり地の上部、分水嶺にあたる地域の土は分散させるまでに10回以上の洗浄が必要であった。ボラ周辺は堆積している状態で、化学風化が良く進んでいることが分かる。分散に使った水の電気伝導度は $90 \mu\text{s}/\text{cm}$ で分散時の水の電気伝導度もほぼ $90 \mu\text{s}/\text{cm}$ であった。

土壌は脱塩水で洗浄して、粘土のぶんさんの程度を観察した。11試料のうち8試料は1回の洗浄で分散した。一例を除いて6回の洗浄で分散した。分散時の水の電気伝導度は $12\sim 44 \mu\text{s}/\text{cm}$ であった。とりわけ、ボラの内部から採取した3試料は $40 \mu\text{s}/\text{cm}$ 以上で分散しており、ボラ内部の土は分散しやすい状態になっていたことになる。

比較のために行った他の地すべりちの結果はやや複雑である。虫亀地すべり地には、地すべりによる攪乱のため泥岩の風化程度の異なる土が見られる。ここではもっとも風化の進んでいる表層部から採取した土を試料とした。虫亀の表層土は2回目の洗浄で多量の粘土が分散した。分散時の電気伝導度は $59.2 \mu\text{s}/\text{cm}$ であった。濁沢地すべりの土は比較的風化の進んでいない泥岩由来の土である。8、11回の洗浄で分散した（分散時電気伝導度 $38 \mu\text{s}/\text{cm}$ ）。蓬平地すべりでは凝灰岩由来の土と、泥岩由来の土を採取した。凝灰岩由来の土は2回目に分散し（分散時 $81 \mu\text{s}/\text{cm}$ 、泥岩由来の土は18回目の洗浄により分散した（分散時 $30 \mu\text{s}/\text{cm}$ ）。玉の木地すべりは親不知火山岩に由来する土であり、極めて風化が進んでいる。8回の洗浄で電気伝導度が $10 \mu\text{s}/\text{cm}$ 以下になったにもかかわらず分散しなかった。

粘土鉱物：分散に適した粘土鉱物はなにかを調べるため、これらの土壌が含む粘土鉱物をX線解析によって検討した。ここでは、7A鉱物と14A鉱物を区別し、それぞれ、カオリン鉱物、スメクタイトと呼ぶことにする。新第三系の泥岩地帯の地すべり地からは、モンモリロナイトが報告されることが多いが、ボラおよび周辺のほとんどの土がカオリナイト鉱物のみであった。カオリン鉱物とスメクタイトの両者が存在したのは、18試料中3例であった。地下水の電解質濃度が低いこと、カオリン鉱物があることは、この地すべり地の堆積物は化学風化が進んでいることを示している。

### 3. 土の交換性イオン

粘土の分散は粘土の交換性イオンの性質に大きく依存するから、分散実験に使った土の交換性イオンを測定した。イオン交換容量、交換性イオンの測定には和田らの方法(原田, 1984)をもちいた。沢田地すべりの上のイオン交換容量は平均19.3 (12.6~26.1) meq/100gであり、濁沢と蓬平地すべり地の灰色の泥岩のイオン交換容量の平均は26.3 (24.2~29.4) meq/100gであった(図-5 A)。最も良く風化した表層土を試料にした虫亀の土は9.0meq/100gで最も小さい値であった。沢田地すべり地の塩基飽和度は30.7%, 灰色泥岩は100%以上, 虫亀は12.5%であった。100%以上の値が得られたのは、土に溶液として含まれていたイオンを除く処理がしてないためである。

沢田地すべり地の土の交換性イオンはNa + kが平均27.7%なのに対し、灰色泥岩ではわずか3.7% (平均) であり大部分がアルカリ土類イオン (Ca, Mg) である(図-5 B)。虫亀の表層土は31.5%である。よく分散した沢田地すべり、虫亀地すべりの土はナトリウムの割合が高く、粘土がナトリウムの割合の高い水と平衡になっていたことがわかる。

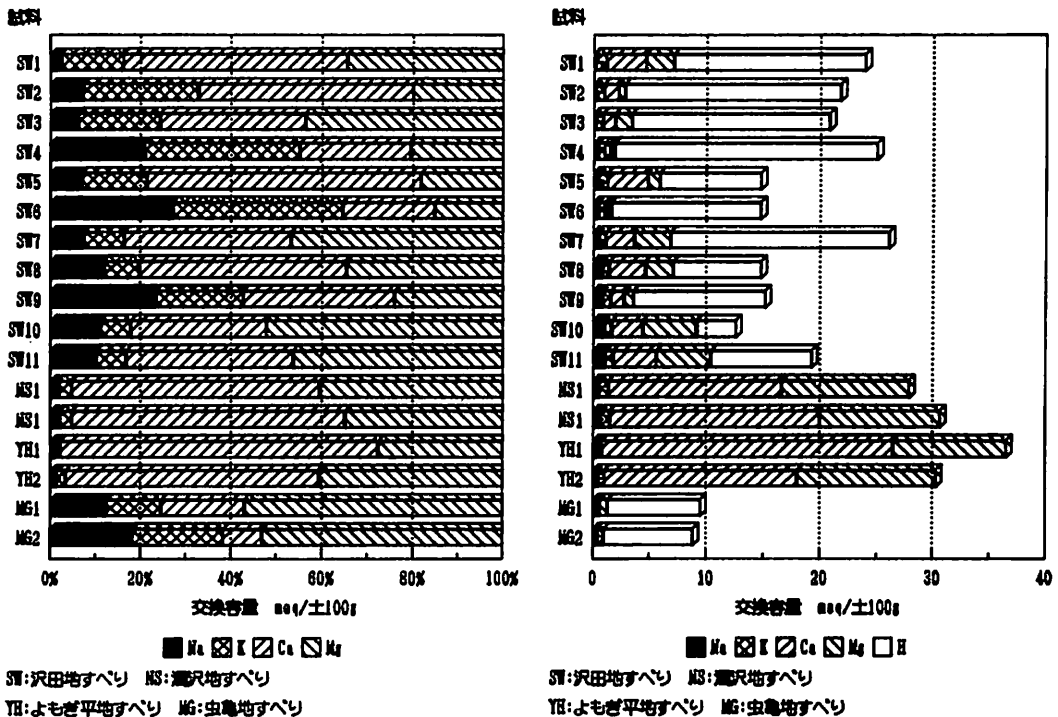


図-6 地すべりおよび周辺の土のイオン交換容量(A)と交換性イオン(B)  
 Fig. 6 Ion exchange capacity (A) and exchangeable cations (B) of soils collected from landslide area and its surroundings.

## IV ボラの生成過程の考察

### 1. 粘土の分散にたいする水の適否

調査地の水は化学的性質と流量の変動から2群に分けられたが、ボラに関係する水を、水質、流量の変化、水質とボラの分布から推定する。山辺ら(1990)により塩化ナトリウムを流して推定された5mより浅い地層を流れている地下水脈と、水質の分布を組み合わせる地下水流を推定した。図-2の粗い

点の部分は塩化物イオンの割合の少ないA型の水の流れる道であり、山辺らが5 m以浅の地下水流としたものである。細かい点の部分は地下水の分布から推定した、塩化物イオンの割合の高いB型の水の流れている部分である。A型の水はボラAの底を流れてはいない。図-2では深さが表現されていないのでボラCと重なっているが、山辺ら(1990)はこの水流はボラA、Bの分布域とは一致しないと指摘している。地下水流の解析から、ボラAを流れている水は塩化物イオンの割合の低いB型ではないことがわかる。

化学分析の結果から、ボラAを流れる水は塩化物イオンの割合の高いB型の水であり、湧水量の変化の大きい水と同じ水質である。湧水量の多い時期にボラAに水流がみられ、その水質がB型であることと、地下水流路の解析結果はいずれも、ボラの生成に関与する水は塩化物イオンの割合の高いB型であることを示している。陰イオンに占める塩化物イオンの割合は高いが全イオン濃度の低い水の生成過程の究明はこの地の地下水の動きを考えるうえで興味深い、その議論は別の機会にゆずる。

塩化物イオンの割合の高い水は粘土の分散に適しているのだろうか。沢田地すべりの湧水・地下水は、新第三系の泥岩地帯の地すべり地の内部はもちろん地すべり外の湧水よりもイオン濃度が低い(佐藤・青木, 1990)。すなわち、天然の地下水としてはイオン濃度の極めて低い水であり、初めにのべた電気的二重層を厚くする第1の条件を満足すると同時に、ナトリウムを主要陽イオンとしており、第2の条件も満足している。第3の条件である地下水のpHは7前後の値であり、特に強いアルカリではないが分散には十分な値である。

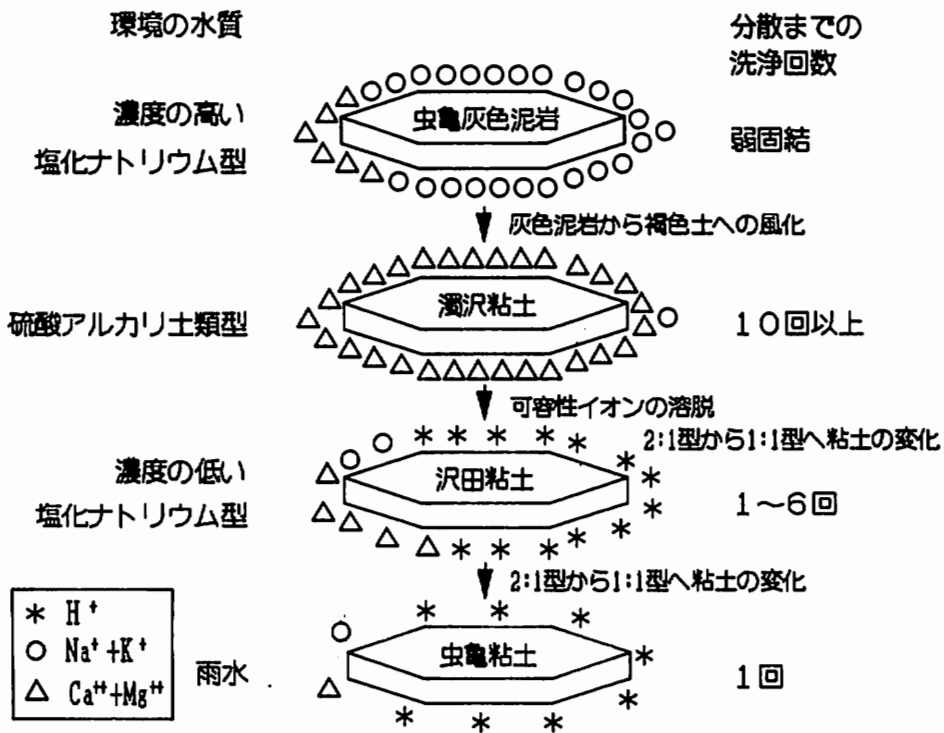


図-7 水質、交換性イオンと粘土分散性の関係

Fig. 7 Relation among water quality, exchangeable cation and dispersibility of clay.



ボラの内部や地すべり地から採取した土が、塩化物イオンの割合の高いB型の水により1回で分散したことは、B型の水が分散剤となり得ることの証拠である。この分散実験の結果と水の分析結果は電気的二重層を厚くする、言い換えれば分散させ易くする3条件を満たしている。この地の地下水は粘土の分散のために好条件をそなえていると結論できる。

## 2. 粘土の分散とボラの生成過程

従来の水質の研究(佐藤・青木, 1990)、粘土の研究と今回の研究を総合して地下水の水質、粘土鉱物の種類、交換性イオンと粘土の分散性を図-7にまとめた。ボーリングで得られた虫亀の新鮮な泥岩は濃度の高い塩化ナトリウム型の水でみたされ(小林, 1982)、粘土はスメクタイトで交換性イオンはナトリウムが主要である。灰色土壌でも濁沢の粘土では崩積物として、地表近くで雨水による風化を受け、泥岩に含まれる硫黄、カルシウムからできる硫酸カルシウム型の水により洗われることになる。それによりスメクタイトの交換性イオンはカルシウムに置換される。沢田地すべり地に見られたような電解質濃度の低い塩化ナトリウム型の水で長く風化されると、スメクタイトのケイ酸が溶解して、カオリン鉱物となり、置換性イオンはナトリウム、カリウムが多い状態に保たれる。さらに雨水で風化されると虫亀の表土のようにカオリン鉱物で、しかも交換性のイオンが水素となる。

粘土、交換性イオン、水質と粘土の分散性はこれらの結果から、図-7の右の欄のように整理できる。灰色泥岩は弱固結状態で分散することはない。カルシウムで飽和したスメクタイトは、土を脱イオン水で洗浄し、環境の水の電気伝導度が $30\mu\text{s}/\text{cm}$ になって初めて分散する。したがって、灰色の泥岩が存在する環境にみられる電解質濃度が高い、カルシウム、硫酸の割合の高い水では自然状態では粘土の分散は起こらない。

沢田粘土と虫亀の表層の粘土は簡単に分散する。沢田地すべりの粘土はその環境の水で分散するようになっており、地下水が大量に供給される場所では、粘土は水に分散し流亡する。虫亀の表層の粘土が雨により分散することが予想され、降水時に河川水が濁ることが、これにより理解される。

以上をまとめると、沢田地すべり地やその周辺にボラが形成されたのは、

1. 泥岩地帯の地すべり地にくらべてより化学風化の進んだ土が堆積していたこと、
2. そのような化学風化を促進するような電解質濃度の低い水が豊富に供給されたこと、
3. 低濃度に含まれる電解質がおもに塩化ナトリウムであったこと

などの条件が重なったことによる。

以上の結果と現地の調査結果を総合して、ボラの形成を図-8のようにまとめた。ボラAにみられる

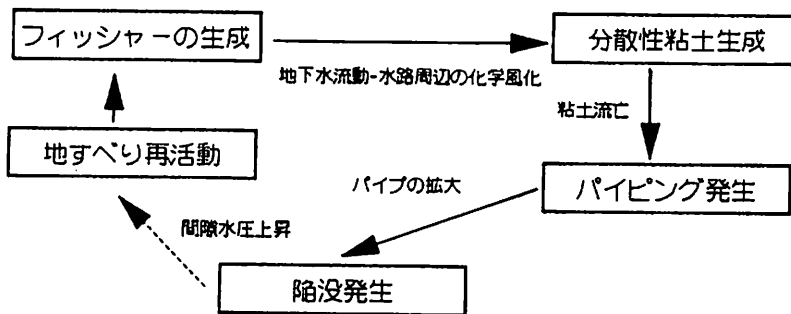


図-8 ボラの形成過程の模式図

Fig. 8 Schematic process of bowl-shaped depression (Bora) formation.

地下の水流はフィシャーによってできた水みちそのものである。化学風化により粘土は分散性が変わってくる。水が粘土を運び、地下にパイプができる。パイプが拡大し、そこに地表がゆっくり陥没してボラが形成されるのであろう。ボラの生成が地すべりの再活動と関係があるとすれば、陥没により一時的に水みちがふさがれ、排水されなくなった水が斜面に蓄積されて斜面を不安定にするのであろう。伊藤が指摘するように、ボラの形成が谷地形の形成に関係があるとすれば、水みちは地下の谷と考えれば、地表の谷地形の形成はボラが次々と谷にそって形成されたと考えることにより理解できる。

高野（1989）の指摘する人工的に排水した時に生ずる陥没が、沢田地すべりのボラと同じ条件でできるかどうかは分からない。地すべり地にはモンモリロナイトが多いことが知られている（須藤ら、1986；小林、1982）から、カオリン鉱物よりはむしろモンモリロナイトの分散を考える必要がある。分散し易いことが知られているナトリウムモンモリロナイト（YARIVら、1979）が排水に伴う水の急激な移動によって分散、流亡するかどうかを検討する必要がある。これは今後の問題である。

## 文 献

- 伊藤芳朗・熊谷 忍ほか（1981）：流動電位法を用いた地下水の追跡. 第20回地すべり学会研究発表予稿集
- 原田靖生（1984）：土壌の陽イオン・陰イオン交換容量 -測定法とその背景-. 土肥誌, 55(3), 273-283.
- 小林 久（1982）：地すべり構成土とその風化物の粘土鉱物学および理化学的性質について, 静岡大学大学院農学研究科修士論文.
- 佐藤 修・青木 滋（1990）：地すべり地内外の水質の特徴 -新第三系泥岩地帯の地すべりを例として-. 地すべり, 27(1), 27-33.
- 白水晴雄（1988）：粘土鉱物. P44~50, 朝倉書店.
- 高野秀夫（1989）：地すべり活動と地下水. 第17回シンポジウム 地すべりと地下水について, 地すべり学会新潟支部, 土質工学会新潟支部, P36~40.
- 東京天文台編（1988）：理科年表. p688, 丸善株式会社.
- 山辺康晴・坂井俊介（1990）：沢田地すべり地の地下水とボラ（陥没地形）との関係. 新潟応用地質研究会誌, 35号, 25~33.
- YARIV, S and H. CROSS (1979) : Geochemistry of colloid systems for Earth scientists, P370~373, Springer-Verlag, Berlin Heiderberg New York.
- ZACHAR R. (1982) : Soil Erosion, P64~71 elsevier Science Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York. 257~258 Oxford University Press, New York, Oxford.