

地震地すべりの発生メカニズムと発生分布の究明に向けて

(株)三協技術, (株)アドバンテクノロジー 濱崎英作

1. はじめに

2008年の岩手・宮城内陸地震から数えて早10年たつ。その後も2011年の東北地方太平洋沖地震、2016年の熊本地震と激甚地震が立て続けに発生し、それぞれに甚大な土砂災害を引き起こしてきたのは周知の通りだ。とりわけ2008年岩手・宮城内陸地震の土砂災害は後者2つの地震と比較し、東日本の第三紀層～火山岩層エリアの山地内に震央をもつ特徴的な巨大震動により地すべり・崩壊の様相が多少異なっていた。すでに将来予想される首都圏地震、南海地震、東南海地震の発生に対する危機認識も高まりつつあるが、それへの備えも含め岩手・宮城内陸地震から10年目の今、当時の地震地すべりを振り返ってみたい。まず最初はもっとも印象が深く多くの研究者・技術者がその発生機構に不可思議なものを感じた「荒砥沢地すべり」について独自の視点で述べてみたい。次に地すべり発生危険度を予測するモデルの研究についても述べてみたい。

2. 荒砥沢地すべりとホバークラフト

2.1 荒砥沢地すべり、噴火してお湯が沸いたのかと思った

平成20年6月14日2008年岩手・宮城内陸地震(M7.2)の際に発生した荒砥沢地すべりは幅900m、長さ1300m、深度100mを超える巨大地すべりで、主要すべり面の平均勾配は約2°と著しく緩いながら移動距離で300～350mにも達するものであった (Fig. 1)

國生剛治(2009)は自著「液化化現象」¹⁾のなかで荒砥沢地すべりの発生の様子を桜の湯の大場さんのインタビューから以下のように書いている。

「地震の発生は、朝の8時43分。今回はこの巨大なすべりの一部始終を目撃した人がいた。荒砥沢ダム直下にある温泉宿「桜の湯」会長の大場さんである。地震の激しい揺れが収まってからまずはダムが心配になった大場さんは、直ちに家からジープに飛び乗ってダムの上まで様子を見に行った。ダムが何の異常もないことを確かめたまでは良かったが、次の瞬間、貯水池対岸の山で噴火のように蒸気のようなものが吹き上がっているのが目に飛び込んできた。温泉堀りに関心の高い大場さんは、まず温泉が湧いたんじゃないかと考えた。よく見ると山が滑りを起こして、舞い上がった土煙や水煙のようなものが空を覆っているじゃないか。…… 中略 …… この間、地震からゆうに30分以上は経っていたが、対岸の滑りはまだ続いていたとのことである。山は次々と貯水池に向かって滑り出してきたが、最も手前側の滑った部分が貯水池に突き出た岬に届いたところから、斜面の滑る速度が遅くなったように見えたそうである。」

実は、地すべり調査団も大場さんから聞き取りをしたのであるが、その噴火のような水蒸気についてももう少し詳しい話を聞いている。

調査団： 土煙はどこから？

大場さん： 森の陰あたりからでた（頭部付近や西側サイド付近・・）。

水蒸気や雲のように。噴火してお湯が沸いたかと思った。

調査団： そのとき土煙は、あの崖の上まで上がったか？

大場さん： 崖より土煙のほうが下だった。

調査団： 今水蒸気の雲が見える、あのような感じか？

大場さん： ああいう感じではなく、パワーとした感じ、それから飛び上がるような感じ。

調査団： 音はどうだった？

大場さん： 聞こえなかった。落ちているすごい迫力はあるが、音はあまりしなかった。サーサーとものすごいスピードだった。

私は、この話からまず頭に浮かんだのは「空飛ぶ絨毯」「ホバークラフト」だった (Fig. 2)。空飛ぶ絨毯はアラビアンナイトのおとぎ話だが、ホバークラフトは浮上用ファンを使い地面（海面）に対して下向きに空気を送り込み浮かせ、地

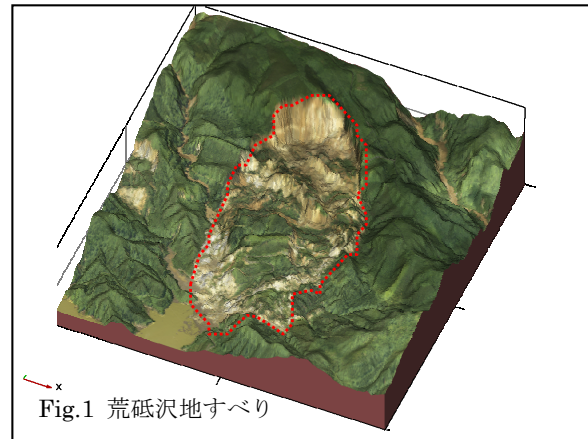


Fig.2 大分と大分空港を結ぶホバークラフト
「ドリーム・サファイア」号

<http://inacafe.exblog.jp/i4/2/>

面との摩擦抵抗をなくし一方で推進用プロペラを使って前進させるもので、水陸併用の高速艇などに使われたりする。空気を溜め込み下向きの圧力を有効に働かせるスカートが周囲をぐるりと囲み、水上を走るときこの周囲には波しぶきがすごい勢いで舞い上がる。私は直感的に地すべりがこのホバークラフトのように周りが漏れ出る空気で波しぶきを上げフワーと浮き上がって滑り落ちるイメージをもった。

2.2 大規模な地震地すべりなのに、損傷が大きい・

私がホバークラフトのように浮いて移動するイメージもった理由には、そのほかに3つばかり訳がある。ひとつは長さ1300mもの巨大地すべりが300~350mもの長距離を移動したにもかかわらず移動土塊の損傷が意外と少なくS字に曲がりくねった道路を乗せたままの数百mもの地塊が3ブロックほどそのまま残っていることだ。

とりわけ、その後のボーリング調査結果のコアを見ても、ボーリング孔の多くが移動土塊としての破壊がほとんど無く、どこがすべり面なのか判然としなかった。誰もが本当にこれが地すべりのコアなのか？と強い疑問を持ったり、掘り足りないのでは？との疑念の声などが出たりした。

もうひとつは一般に地すべりが大規模に動くとき、もの凄い山鳴りが生じることはよく知られることである。しかし、この場にいた大場さんの証言ではサーとかフワフワとか静けさのある音の記憶や情景の印象があって、これを聞いた我々は奇妙な感覚をもった。最後はすべり面強度のことがある。実は当地区のすべり面付近の岩質は比較的新しいカルデラの中に堆積した鮮新世の湖成堆積物である浮石質凝灰質泥岩-シルト岩-砂岩で、確かにそれほど材料のせん断抵抗角は強くない。しかし土質試験結果を見るとだいたい約20~30度で最も低い値でも約10度である。後にすべり面勾配が堆積構造と平行で2度くらいであることが判明し、滑った後の見通し角から判断すると、実際はせん断抵抗角 Φ は限りなく0度に近い値であるべきである。実際、2次元DDA（不連続変形法）という地震動を入れた動的解析を用いても、動き出しでこそ地震力を移動土塊に伝えるための Φ の強度を必要としているが、動き出した後はみかけ抵抗角を0度近くにまで低下させないと現況のような地すべりは再現できない（Fig. 3）

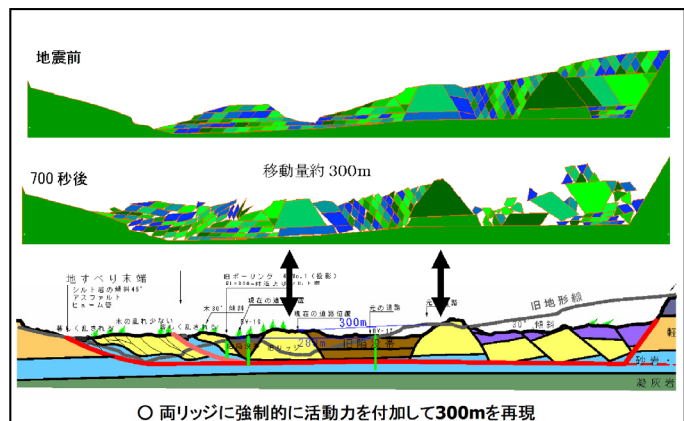


Fig.3 DDA 解析による再現（大野,2010）²⁾

実は、このような巨大な地すべりで長距離移動したにもかかわらず土塊の損傷が少ない事例は地震の場合には少なからずある。

近くは2004年の中越地震での東竹沢、寺野、大日山地区の巨大地すべりである。東竹沢地すべりは芋川沿いの20度程度の流れ盤斜面で発生したもので、長さ300m、幅250m、厚さは20m程度で、土量は約150万m³で芋川を閉塞させた。これは80-100mもの移動をしたにもかかわらず移動ブロック上の樹木は移動方向先端部を除いては、ほとんど直立した状態を保っていた。また寺野地すべりも全長370m、幅150mで東竹沢と同じく芋川を閉塞させたもので同程度の移動距離だったと推定されている。寺野は東竹沢に比べると、幾つかのブロックに分断できるものであったがそれでも道路や畑が概ねほとんどそのままの形を保って移動している。

一方、小千谷市塩谷地区の大日山斜面で発生した大日山地すべりも幅450m、長さ550m、厚さ50mに及ぶ中越地震における最大規模の地すべりだったが、約70mの落差で100mほど南南東方向に動いた。ここでは滑り落ちた滑落崖と末端の一部を除いてほとんど損傷も無く鯉の養殖池や林の木々がそのまま直立していた。

海外にもある。モンゴルに近い中国奥地の甘肅省では、1920年12月16日海原地震というマグニチュード8.5の巨大地震が発生し、当時推定死者24万に達する大災害を引き起こした。この一帯は黄土地帯で、いわゆるレスが分布する。ここで巨大地すべりが発生した。再度國生剛治さんの本から、その様子を引用したい。

「・・・破壊の様子は目撃されていないが、一晩明けると地震によって、住人の言い方を借りると“丘が歩いた”、つまり地形がまったく様変わりしていたのである。地震から一年半後に、国際救護委員の後援で現地を視察したアメリカ人ホール氏ら一行の報告には、驚きを込めて多くの興味深い逸話が紹介されている。“例えば、てっぺんにお寺を載せたまま、丘全体が谷に移動した。その少し先では、ポプラの並木の植わった街道が、地すべりの上に載って、並木は何事もなかったかのように、枝に小鳥の巣を載せたまま、はるばる1.2Kmもかなたに移動した。”」

2.3 なぜこのように“静かにゆっくり”動くのか？

地震時の土塊の破壊現象の一つに「液状化」がある。「液状化」は間隙水で満たされた緩い砂などが地震などの外的な力で揺さぶられると砂粒子のかみ合わせが失われ、土塊の抵抗力が失われた結果、水のような振る舞いをして噴砂したり、そこに基礎を置いた建物が傾いたり沈下したりする現象である。これは1964年の新潟地震での

信濃川沿岸の建物や新潟空港、港湾施設での被害で初めて注目されこの研究はその後現象解明が大いに進んだ。

実際、この岩手・宮城内陸地震でも沖積層が分布する低地や田んぼなどでは同様の現象も生じた。また、2003年宮城県沖地震の際に築館で発生した造成盛土の高速流動化現象も液状化ではないかという報告もある。これまでの研究では粘土などの粘り気が多い材料や粒度がバラケたりしている砂質土などでは粒子がばらばらになりにくい液状化しないが粒度がそろった砂層ではかみ合わせ面積が少なく液状化しやすいことは今ではよく知られている。実は、一般に地すべりは粘土層がすべり面となっていることが多く、そこではすべりながら強度が低下し擦痕をもつ鏡肌という特別にテカテカした面が生じる。すなわち液状化の条件とは真っ向対立する条件である。しかし中越などの地すべりの地層をよく見るとすべった面である粘土の直上は砂岩やシルト岩であったことも報告されている。また、荒砥沢地すべりの滑動面近くの地質はシルトから砂質土のような粒度のものである。とはいえ、一般にはこのように長く続成作用を受けた固結した岩が液状化を起こすという話は無理がある。

ところで、土塊内では有効応力 $\times$ せん断抵抗角が作用し強度を発揮する。この強度は地塊をそこにとどめようとするもので有効応力は「鉛直方向の応力」－「間隙水圧」という式であらわされる。したがって、土塊内の間隙水圧が上昇すると有効応力が減少し土塊を支える力も減少する。荒砥沢ではすべり面勾配が2度で土塊厚さを100m、せん断抵抗角 ϕ を10度とすると間隙水圧が水頭高さにして土塊厚さの1.5倍である150mまで上昇すると動き出す。 ϕ が30度では1.8倍の180mまで必要となる。地震時には結晶格子が変形（ダイラタンシー）するときに生じる過剰間隙水の発生もありえるので地震による動き出しのきっかけになるものとして間隙水圧の発生＋有効応力の減少のシナリオはありえると思う。しかし間隙水圧の上昇は砂の液状化現象とは異なるし、これだけではゆっくりとした長距離移動の説明はできない。

2.4 ベイパーロック現象

さて、話は変わるが皆さんは車の免許を取るために教習所に行ったとき「ベイパーロック現象」という言葉を習った記憶がおりだろうか？（最近はどうなのか・・・お年を召した方だけが知っているのかもしれないが・・・）

じつは車の事故にかかわることで、昔日本では「坂道などで、長くブレーキペダルを踏んで走ると摩擦熱のためブレーキオイル内に気泡ができる。このため、車輪をとめる力が伝達できなくなり、その結果制動不能に陥る現象」と習ったはずである（Fig. 4）

もっとも、欧米では燃料タンクからエンジンへの燃料供給系内での気泡の発生も「ベイパーロック現象」と言ったりする。最近の車ではこれらの現象も電子制御でブロックするフェールシステムができていたようだが、その話は横においておこう。

実は、気泡ができるとなぜ制御不能に陥るかという液体は大局的には「非圧縮性」のものであるが、他方気体は「圧縮性」であることが原因となっている。つまりパスカルの原理では両端に水などを入れた管のA端からの力は液体を通じてB端に伝わる。実際にはロスが少しはあるけどほぼ伝わる。しかし、気泡があると力は気泡に吸収される。すなわち、気泡は空気で「圧縮性」に富んでいるため外力の増減で縮んだり膨れたりするためA端の力はB端へ及ばない。このため車の油圧ブレーキも制御不能になるのである。

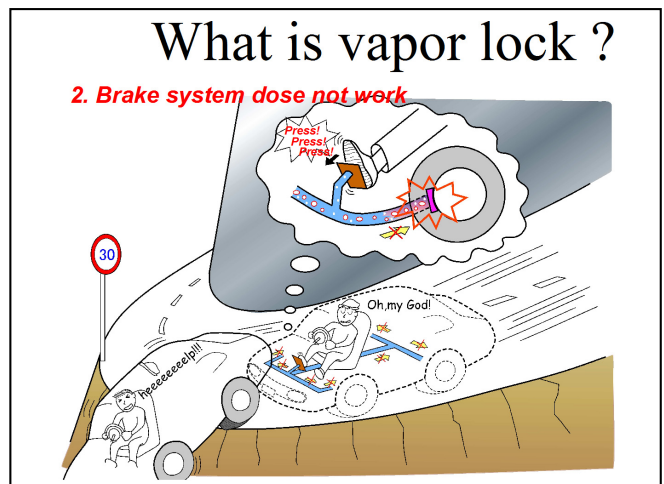


Fig.4 ベイパーロック現象

もうひとつ、気泡のもつエネルギーや液体と気体の振る舞いの違いにはいくつもの興味深い点がある。流体中にできる泡のことをキャビテーションという。つまり発泡（沸騰）現象である。キャビテーションは沸騰、すなわち液体から気体になる現象が温度-圧力の関係（ボイルシャルルの法則）で低気圧下でも起きるという原理に基づいている。したがってスクリュー周りの液体では気圧が低くなる場所では水温が低くても沸騰し泡ができるのである。キャビテーションは船のスクリューが回る際にも出たりするが、それが破裂するとき、数万気圧にも達する衝撃圧が発生することがわかっている。このため少なからずスクリューには傷の発生（壊食）や振動が生じることから気泡の発生をできるだけ抑制することが船の設計者にはもとめられる。また液体中に気泡が生じているなかで一旦圧力が下がると爆発的に体積膨張が起こる。

2.5 新しい仮説

少しまとめよう。

私は現場の証言や踏査、調査結果から、

「巨大地すべりにもかかわらず、破壊が少なく、スーッと運動した。」ことと、

「せん断抵抗角 ϕ が最低10～30度もあるのに、300m以上も動いた」こと、

「湯煙のようなものが吹き上がっていた」ことに興味を持った。

そこで、

「ホバークラフト」のような運動状態を仮定し、以下の仮説を立てた。

すなわち、

「気泡」のもつエネルギーとその振る舞いに着目するとともに、「ベーパーロック現象」のような仕組みが地すべりを浮かせることに成功したのではないかと仮説を立てた。

つまり、

地震動による揺れが、何らかの原因で地層内の弱いところ、かつ水のあるところで運動エネルギーが熱エネルギーに変わり水が沸騰し泡が生じる。泡は一旦できてしまうと、ベーパーロック現象のため地すべり土塊の圧力が下向きに伝わりにくくなり、接触面がなくなり $\phi=0$ 度と等しくなる。

ところで、この現象が地震動の揺れで上向きに作用してその地層の中の圧力が一旦下がったときに起きたと仮定しよう。そうすると当然その場の泡は急速に増加し爆発的な浮力と推進エネルギーをもつとともに一部は閉塞された層間を出てしまい側方や割れ目では湯煙のような噴煙がでてしまう・・・のではないかと考えた。

つまり、このような現象が地震時に地すべり地下内部でおきると仮定したら地すべりは「泡が発生して、浮き上がるため、摩擦がない状態になり、フワと動きだす」というように、まるでホバークラフトのように動くんじゃないか・・・と。

2.6 気泡ができる条件

とは言っても、それを直接証明する手段はなかなかないので、ここではいくつかの仮説と物理の知識を使いながら話を進めて行きたい。さいわい近傍には荒砥沢ダム基礎岩盤監査廊に埋設された地震計があつて、およそその一帯がどのような揺れだったかがわかっている (Fig. 5)。地すべりについて直線すべり面を持つ土塊と仮定し、榎明潔 (2001) ³⁾ による「地震時の斜面剛塑性体の挙動をグランベールの原理による慣性力の関係と加速度の連続条件でモデル化」して計算してみた。すなわち 100m の土塊が 2 度のすべり勾配の中にあり、そのときの地震動ですべり面の移動量がどの程度になるかを計算してみた。

このときの水圧はいろんな証言や元の池の存在などから約 70m の水頭圧がかかると仮定しまた ϕ を 20 度、粘着力 C も 25kPa として計算した結果 12.65 秒までは移動体は基盤とズレることなく同体であるが、その後徐々に移動し始め 15 秒から 16 秒の間で 4cm の移動量を示す。結果的に地震によるトータル移動量は 5.0cm となる (Fig. 5)。

さて閉鎖系としてのエネルギー保存則を考え運動エネルギーがすべて熱エネルギーに変わると考える。すなわち、すべり面面積 1 m^2 で摩擦のみが熱上昇の仕事 (W) に関わるとし刻々の垂直応力と相対変位の積分から、総仕事量 $W=1,690,000 \text{ J} (= \text{kgf} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2)$ が求められた。

一方で、今、すべり面付近での変形層厚を 5mm と想定し、有効空隙率 0.1、岩盤の密度 $\rho=1.7 \text{ g/cm}^3$ 、土粒子の比熱 $C_b=0.8 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ とする。

このとき地下水の温度を 15°C と仮定すれば水の比熱 $C_w=4.178 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ となる。すべり面での水頭を 70m と想定していることから、飽和水蒸気圧は概ね 8atm となり国際研究用状態式 (IAPWS-95) から約 170°C がすべり面深度での水の沸点となる。

この場合、温度上昇幅で 155°C 以上となる熱量が得られれば、すべり面地下水は沸騰し得る。すなわち液相-気相混合状態に変化し得ることがわかる。細かい話はさておくが、変形層厚を 5mm の間隙水が水蒸気になるのに必要な熱量は $Q=1,280,000 \text{ J}$ となり、変位から求められた総仕事 $W=1,690,000 \text{ J}$ はこの値を上回る。すなわち、地震時のすべりによって気泡ができる条件は満たされるということである。

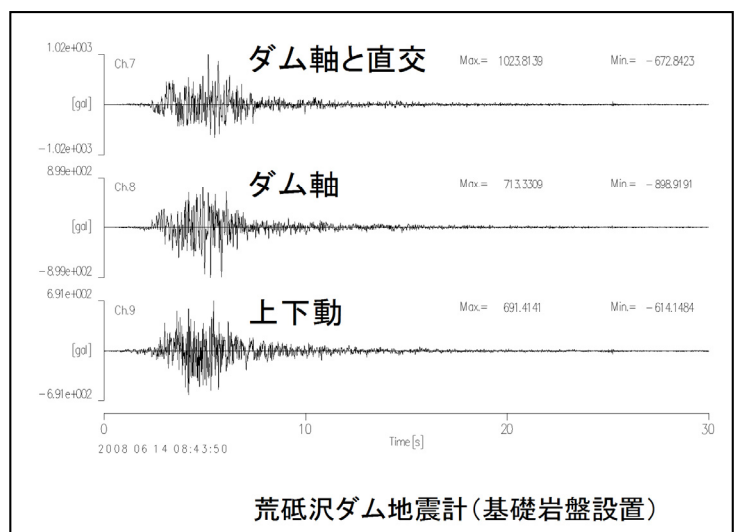


Fig.5 荒砥沢ダム地震計による地震波形

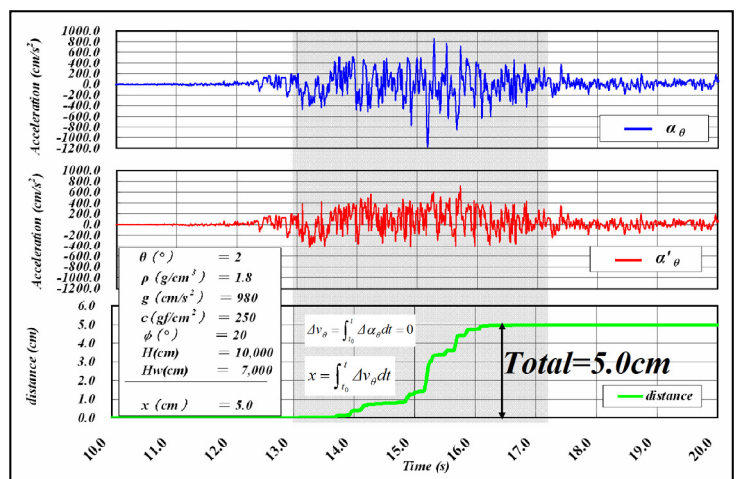


Fig.6 荒砥沢モデル解析結果（地震応答解析と変位量）⁴⁾

かくして封圧下にあるすべり面地下水では地震時に気泡が生じはじめ、上向きの地震動がかかると一気に圧力が低下することで気泡は拡大して移動体の荷重は下盤には伝わらなくなる。結果、移動体はぷかぷか浮くような現象が生じ、移動体の両サイドでは気体の一部が漏れはじめ湯煙がサーサーとあがり、緩い勾配の中を音をあまり立てずに時間をかけてゆっくり進む、というシナリオ完成と相成る・・・(Fig. 7)

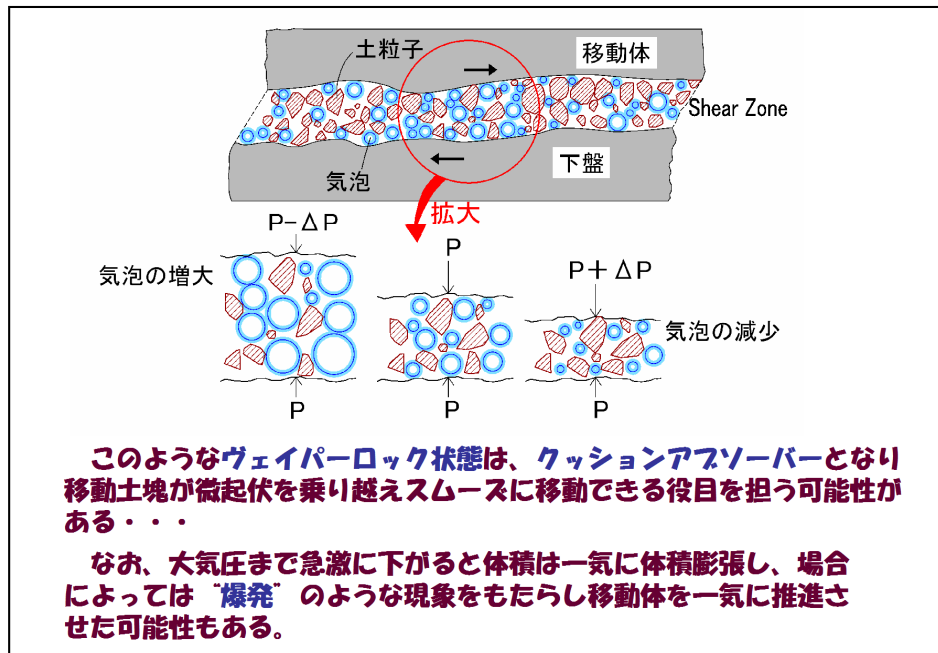


Fig.7 ベイパーロック現象モデル 4)

2.7 どうすればこれが実証できるか？

仮説は、その後の実証研究を経てそれが本当かどうかわかっていく。アインシュタインの特殊相対性理論の「 $E=mc^2$ 」が1世紀余りの後、フランス、ドイツ、ハンガリーの物理学者のチームが行ったコンピューターによる演算の結果によって証明されていたように。

では、今回の仮説をどのように実証すればいいのだろうか？

次の地震に備えて動き出しそうな巨大地すべりの内部に変位計や温度計、圧力計などを設置する案もあるが、残念ながら地震がどこで発生するかを予測することはかなり難しい。また、仮に地震の発生場がわかったとしても、そのような場で都合のよい地すべりがなかなか見つからないだろうと思われる。つまり、この検証方法は結構厳しい。

一方、実際に長距離移動した地すべりのコアを使えば、エビデンスを積み上げるいくつかの手法はあると思う。たとえば、地質温度計（ジオサーモメーター）。もし気体への相転移に必要な温度が 170° であれば滑ったと思われる地層付近には 170° 付近で晶出する方解石が認められるかもしれない。地すべり変動は短時間と予想されるので晶出量は少なくX線回折では検出困難な恐れがあるけれど、顕微鏡観察などでの観察は可能かもしれない。

もうひとつは気泡の発生が剪断強度に与える影響を確認することである。つまり直接的にせん断試験装置に発熱装置を組み込み、強制的に気泡を作ることである。もし剪断強度が泡の発生するような温度になって強度を失えばそれも傍証の一つとなる。

これらの検証方法についてはまだまだ議論があるかもしれない。ただし、今後の私にはそれほど時間もお金もあまり無いのでもし興味ある後輩の皆さんがいるのであればこの検証を託したい。

3. 地震時の地すべり・崩壊斜面変動予測図

3.1 斜面変動予測図を作るために

2004年中越地震、2008年岩手・宮城内陸地震、2011年の東日本大震災を経て地震による斜面変動発生危険箇所評価手法開発のプロジェクトが地すべり学会で始まった。これまでの地震地すべり・崩壊のデータなどから地震に対する斜面変動予測図（感受性マッピング：susceptibility mapping）を作りたいという話である。

実は人の医療現場などでは収集された医療カルテや健康診断などのビッグデータは統計分析（例えば回帰分析）することで病名特定や有効な薬の発見などに極めて有効となり得るが、残念ながら地震で発生した100や200個程度の地すべり事象では、それらをつづつ分析してモデル作成につなげるには心許ないデータ数である。そこで、これまでの専門家のもつ経験知を形式知として補完できればと言うことでAHPを採用することにした。もちろん統計分析が全く不要ということではない。その処理過程こそが重要でAHP的に経験的発想が表現できるような図を作り可視化できるようすることがキモなのである。

ところで、GISソフトウェアによる解析では、標高データやそこから求められる各種の地形量がメッシュ単位で表現されることから、結果として斜面変動の危険度評価単位もDEMデータの解像度に依存していると言ってよい。この場合、相対的に規模の小さい崩壊分布は説明できても、地すべりなどの規模の大きな現象には適用が困難である。特に、地すべりのような規模が大きく多様な性状を示す現象は、数mから50mメッシュ単位の地形量よりも、斜面全体の特性を代表するようなより広い範囲の地形的特徴との関係を検討する必要がある。

以上を踏まえ、GISのこれらの問題を補完する新解析手法としてバッファ移動解析法と過誤確率分析を開発した。またバッファ移動解析で収集した統計データを可視化し分析する上で積層棒グラフを使い、それを参考にAHPの総点数をもって地すべり・崩壊の発生容易さを表現した。

3.2 バッファ移動解析

崩壊・地すべりの発生・非発生の分離を行う際、通常、地図上での発生領域は非発生領域に比べると圧倒的に少ない。このため発生場の要因を統計的・機械的に数値化・定量化しモデル化するには不十分である。そこでバッファ移動解析を考案した（Fig. 8）。このバッファ移動解析は、半径Rの円領域をもって間隔(dx, dy)でグリッド分割されたセルの集合領域上をある一定距離でスキップしながら移動しバッファ内の統計データを収集するものである。これは、時系列データのある区間で平滑化しつつ視点を変えながら全体傾向・特徴を概括する移動平均解析（Moving Average Analysis）に似ている。

実は事象を目を皿のようにして細かく理解しようとするのももちろん大事であるが、傾斜量図や地質図などの主題図と崩壊・地すべり発生現場を重ね薄目で引いて見るとボンヤリではあるがけっこう傾向が見えてくることがある。このように

薄目で見つめる広がり範囲の傾向と事象の集まりを大まかに判断することは大事なことで、バッファ移動解析はそのようなざっくりとした感覚を数値化することを目指したものである。

バッファ毎に取得されるデータは説明変数である崩壊・地すべりのセル数である。また、各地形量（勾配、曲率、起伏度、谷次数、地上開度等々の平均値や最大値、もしくは最頻値など）や地質、既存地すべり地形の面積なども説明変数として同時に取得できる。結果、従来の統計手法と比較して解析がシンプルにシステム化され有意な要因が何であるかを分析するのが容易となる。

3.3 積層棒グラフの採用

バッファ毎に集められたデータは、十分な教師データがある場合にはロジスティック回帰分析や重回帰分析など帰納法的に発生要因を解析することも可能であるが、実際には発生地すべりは教師データとして見ると数が少なすぎる。ただし、この場合でも演繹的手法であるAHP分析を主として用いれば何とかできるのであるが、そのためには、このAHP分析を有効にバックアップするビジュアルなグラフとして積層棒グラフが有効と考えた。

まずは説明変数の事象からバッファ内の事象発生率を $Or = \text{発生セル数} / \text{全セル数}$ として定義した。

Fig. 9は、崩壊現象に対し地上開度（横山他、1999）⁶⁾データをバッファ移動解析で5度刻み毎に集積し、積層棒グラフとして示したものである。ここで地上開度はあるグリッド中心点から8方位に対して地上角（90°－仰角）をもとめ、その平均値をもってそのグリッドの値とする地形量である。

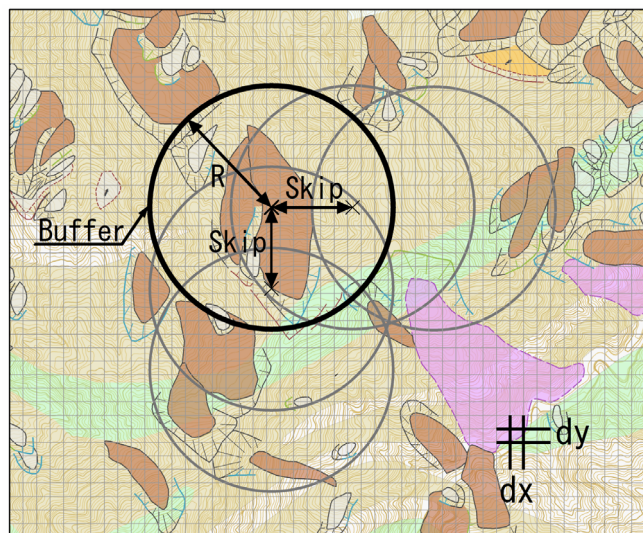


Fig.8 バッファ移動解析の概念図 ⁵⁾

事例は後述する 2008 岩手宮城内陸地震時の崩壊ケースで解析したものである。デジタル標高データとして地震前のものを使った。ここではバッファを発生した崩壊地の規模等から $R=100m$, $skip=50m$ と設定し、バッファに集められるデータはセルごとに与えられた地上開度の平均値とした。データは、地上開度の角度による分布割合を崩壊非発生 ($0r=0\%$) の卓越傾向を積層図で表したほかに、発生面積率 $0r(\%)$ を $0 < 0r \leq 10$, $10 < 0r \leq 20$, $20 < 0r \leq 30$, $30 < 0r \leq 40$, $40 < 0r$ の計 6 区分で積層表示した。このとき抽出されたバッファ数は $0r=0\%$ で 76,751 個、また $0r > 0\%$ では順に 14,931 個, 2,029 個, 507 個, 137 個, 56 個である。この結果、平均地上開度が 70° から 75° の範囲では面積率 $0r$ の増大とともに崩壊発生率が増し $0r > 40\%$ になると崩壊発生率の 55% 以上を $70 \sim 75^\circ$ が占めた。また $75 \sim 80^\circ$ は $0r$ の増大とともに崩壊発生率もやや増大傾向にあり、他方 $80 \sim 85^\circ$ では発生領域にはあるものの減少傾向があることがわかった。このことから地上開度が崩壊発生場の判断基準として有力な情報を持つことが予想できた。

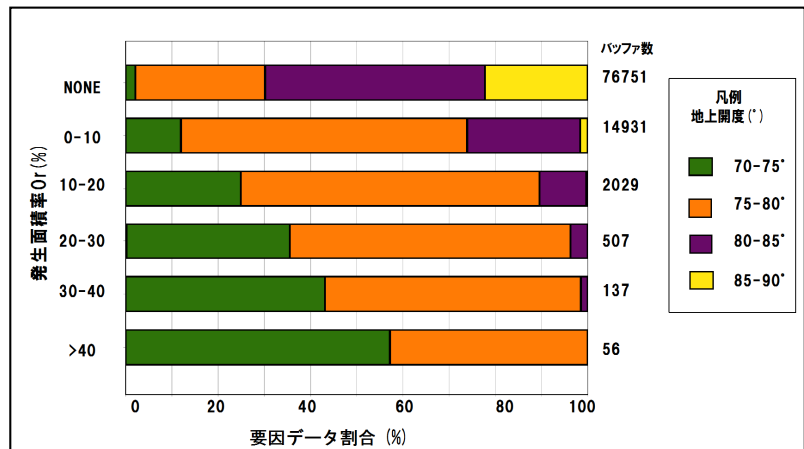


Fig.9 地上開度の要因割合と崩壊発生面積率の関係(積層棒グラフ) ⁵⁾

3.4 AHP によるモデル化

まず評価モデルを AHP で作る。すなわち、積層棒グラフ等を見て AHP によって要因毎に地すべり・崩壊発生危険度の高いと判断されるものほど高いウェイト値を与える。そしてバッファの中心セル毎に、それらを足し合わせた危険度 (AHP スコア, 式(1)) を与える。

すなわち式 (1) が、バッファの中心セル毎に与える AHP スコア (x) である。

$$x = \sum \alpha_i \cdot W_i \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで W_i は各評価基準 i ごとの最大ウェイトであり α_i はその条件の範囲で定めた係数 ($0 \leq \alpha_i \leq 1$) である。AHP スコアの x はそれらの総和であり各ウェイトが最小のとき 0, 他方各ウェイトが最大のとき 100 となるように設定される。このとき x 値が小さいほど発生バッファ数が少なく非発生バッファが多い。 x 値が大きいくほど発生バッファ数が多くなり非発生バッファ数が少なくなる。つまり x 値が小さいほど事象が発生しにくく、大きいほど事象が発生しやすい。

3.5 過誤確率分析

過誤確率分析は、ひらたくいえば、たくさん試行錯誤して作成される AHP モデルのモデル適合性を判断し、より高いモデル式は何か? を客観化するためモデル毎に出てくる発生・非発生の正規確率分布形状の距離を利用した手法と考えれば良い。

ただしモデルを最適化する上では、モデルの適正を評価するための目的関数が必要である。ここでは非発生と発生の分布特性に着目し過誤確率 (P) の概念から最適モデルを導く手法を考案した。以下に過誤確率 (P) をもとめる過程を述べる。

まず、非発生と発生、およびそれらの合計の AHP スコア (x) の得点分布をヒストグラムで表す。結果として、その分布形状が正規分布に近似できることから、それぞれ平均値 (μ) と標準偏差 (σ) をもとめることで、正規分布として表わすことができる。

実際は発生と非発生のバッファ数は大きく異なり、ほとんどは非発生のバッファ数が圧倒的に多い。しかしながら発生・非発生をたがわず、変数 x に対する μ と σ から正規確率密度関数として表すことで互いを同じ土俵上で比較することが可能となる。

平均値 (μ) と標準偏差 (σ) による発生・非発生の正規確率密度関数の分布は式 (2) で導かれ、その曲線分布は Fig. 10 のようになる。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

Fig. 10 に示した確率密度関数の左側の分布は非発生 (安定)、右側の分布は発生領域 (不安定) である。図の μ_1 , σ_1 は非発生領域の平均値と標準偏差で、 μ_2 , σ_2 は発生領域のそれである。さておおざっぱに言えばそれ

ぞれの正規分布の山が大きく離れたモデルが良いモデルである。では、どのようにそれを数式化すれば良いかと言うことである。

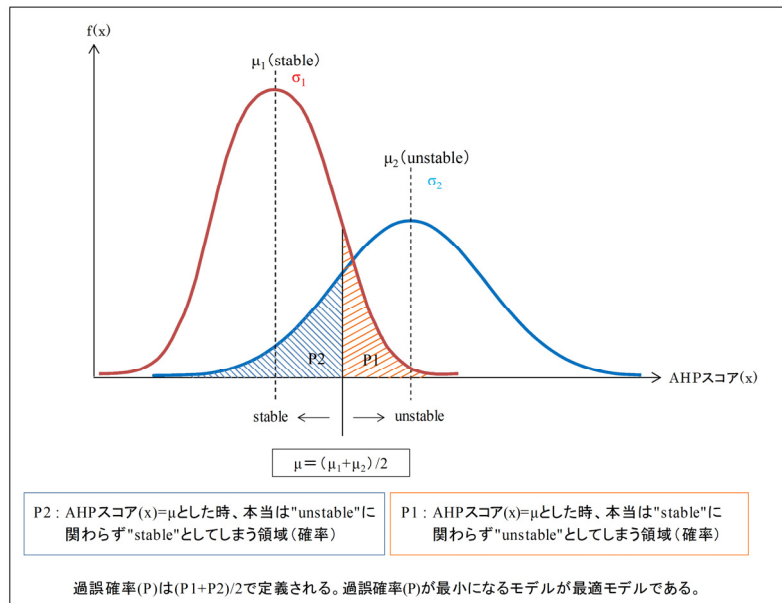


Fig.10 過誤確率(P)の概念図 5)

ところで、図の $\mu = (\mu_1 + \mu_2) / 2$ は安定、不安定の正規分布中心から等しく離れた AHP スコア (x) である。 μ を基準として図の P1 領域 は "AHP スコア (x)= μ としたとき、実際は安定にもかかわらず不安定と過誤する確率"、一方、P2 領域は "AHP スコア (x)= μ としたとき、実際は不安定なのにもかかわらず安定と過誤する確率" と言える。

ここで $P = (P1 + P2) / 2$ を過誤確率 (P) と呼ぶこととする。過誤確率 (P) は最適化問題の目的関数であり、これを小さくするということは「誤る」確率が小さくなるということであり、結果としてモデルの適合度が高いことを示す。概念的には、 μ_1 と μ_2 がより離れ、標準偏差 σ_1 、 σ_2 がそれぞれ小さくなれば過誤確率 (P) は小さくなる。

3.6 事例解析（2008 岩手・宮城内陸地震）

分析に当たって地すべり（大規模崩壊を含む）と崩壊分布については八木他（2008）の判読図⁶⁾を採用した。なお、海外の論文の幾つかは崩壊・地すべりの仕分けがなく一緒クタになっているため危険度評価アルゴリズムがあいまいになっているものもある。日本では昔から崩壊と地すべりを別の破壊現象として区別し正しく仕分けしている。したがってここでも崩壊と地すべりを明確に区別して解析することとした。

試行錯誤の上、当該地区では地すべりと崩壊のバッファ R とスキップ距離 L を、それぞれの現象大きさにあわせ $R=250\text{m}$ 、 $L=150\text{m}$ と $R=100\text{m}$ 、 $L=50\text{m}$ とした。なお、八木他（2008）によって示された大規模崩壊は、ここではサイズや発生要因が地すべりに近いと判断し地すべりとして扱った。地すべり・崩壊の初期モデルとしてそれぞれ 5 つずつ抽出された各評価基準の初期の最大ウェイト (Wi) と条件ごとの係数値 (α_i) について Table 1 にまとめる。またモンテカルロ法で係数を少しづつ変化させ過誤確率分析によって最適化させた結果を Table 2 にまとめた。

最終的に得られた地すべりと崩壊の過誤確率 (P) 正規分布図と斜面変動予測地図を Fig. 11 示す。それぞれ AHP スコアの高いところで事象が発生しているのが視覚的に分かるが、特に崩壊はモデルの精度が高いのがわかる。

Table 1 評価基準の選定と初期最大ウェイト (Wi) と各設定範囲毎に掛かる係数 (α_i) 5)

地すべり	要因	評価基準	バッファ集積法	初期モデルの Wi	範囲の条件単位	バッファの数値に掛かる係数 (α_i) と条件範囲				
						1.0	0.6	0.3	0.1	0
						3	2	4	5~7	左記以外
地すべり	地質	地質(岩相)	地質(岩相)の最頻値	27	地質(岩相)番号	0.35~	0.25 ~ 0.35	0.15~0.25	0~1.15	左記以外
	地形	起伏量	(最高点-最低点)/2点間の距離	20	数値の範囲	75~80	70~75	80~90	90~100	左記以外
	地形	地上開度	地上開度の平均値	20	角度の範囲	6~10	4~6	3~4	0~3	左記以外
	地下水	谷次数	谷次数の最大値	20	次数	50~100	20~50	10~20	0~10	左記以外
	地質	地すべり土塊	既存地すべり地形(移動体)の面積率	13	%					
崩壊	要因	評価基準	バッファ集積法	初期モデルの Wi	範囲の条件単位	バッファの数値に掛かる係数 (α_i) と条件範囲				
						1.0	0.6	0.3	0.1	0
	地形	平均勾配	最大勾配の平均値	25	角度の範囲	35~50	30~35	25~30	5~25	左記以外
	地下水	谷次数	谷次数の最大値	10	次数	6~10	4~6	1~4	0~1	左記以外
	地質	地質(岩相)	地質(岩相)の最頻値	10	地質(岩相)番号	5~10	3	4	2	左記以外
	地形	凸凹10m	凸凹10mの平均値	25	数値の範囲	0.8~2.0	0.6~0.8	0.4~0.6	0~0.4	左記以外
崩壊	地形	地上開度	地上開度の平均値	30	角度の範囲	65~75	75~80	80~85	85~100	左記以外

Table 2 初期モデルおよび最終適合モデルのAHP最大ウェイト(Wi)と過誤確率(P)⁵⁾

地すべり					崩壊				
地すべり要因	評価基準	初期 AHP判断	AHP最大ウェイト(Wi)		崩壊要因	評価基準	初期 AHP判断	AHP最大ウェイト(Wi)	
			初期モデル	最終適合モデル				初期モデル	最終適合モデル
地質	地質(岩相)	◎	27	18	地形	平均勾配	◎	25	24
地形	起伏量	○	20	22	地下水	谷次数	△	10	21
地形	地上開度	○	20	15	地質	地質(岩相)	△	10	9
地下水	谷次数	○	20	17	地形	凸凹10m	◎	25	21
地質	地すべり土塊	△	13	28	地形	地上開度	◎	30	25
過誤確率(P)			0.3481	0.3457	過誤確率(P)			0.3070	0.3044

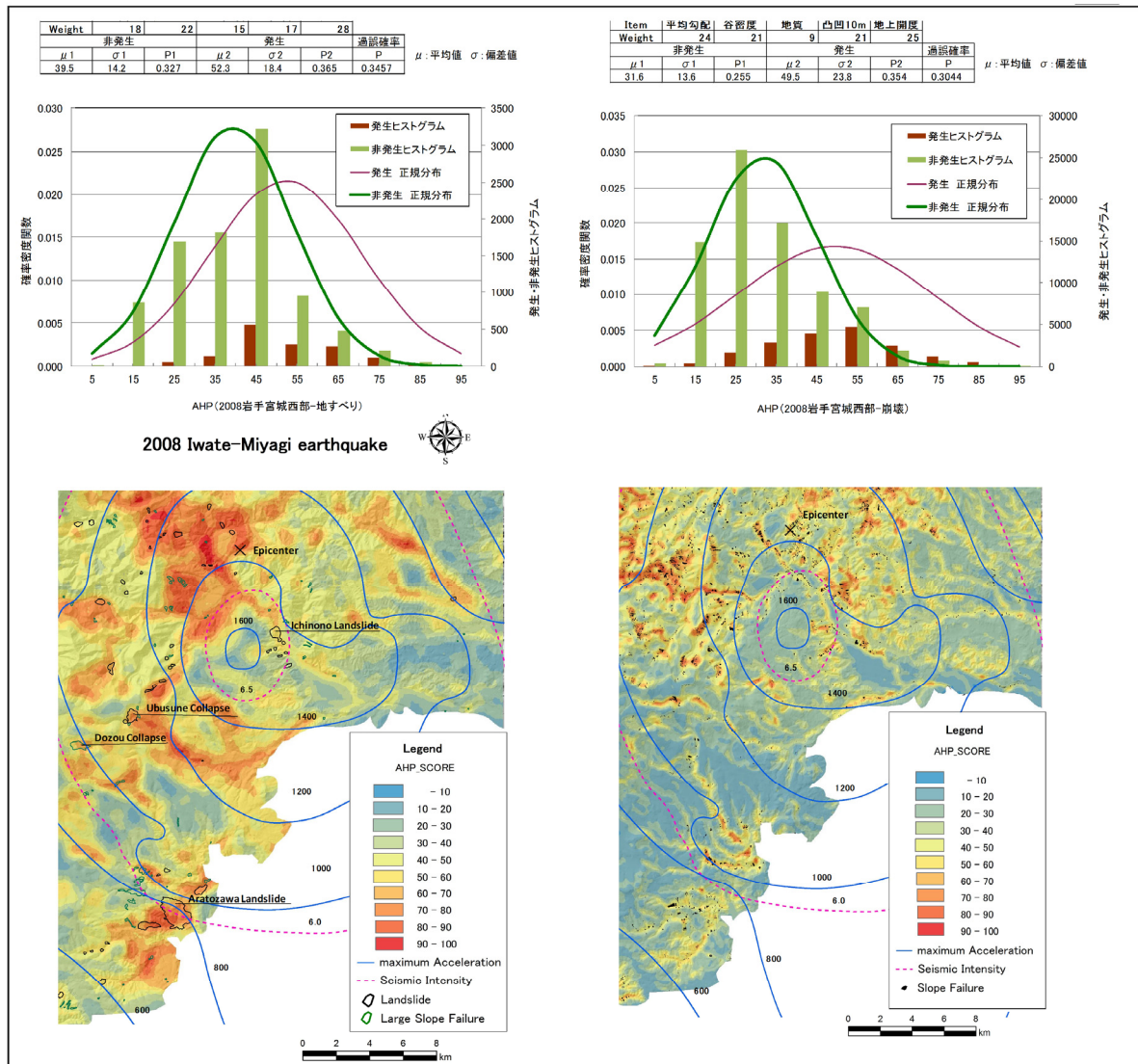


Fig.11 2008 岩手・宮城内陸地震での地すべり・崩壊斜面変動予測図による再現モデル⁵⁾

この2008年岩手宮城内陸地震の地すべり発生要因分析では「地質」「起伏量」「地上開度」「谷次数」「地すべり地形(防災科研)=地すべり土塊面積」の5アイテムが選定され、それぞれ最大ウェイトが18%, 22%, 15%, 17%, 28%のモデルがもっとも良好な結果を示した。他方、崩壊については「平均勾配」「谷次数」「地質」「凸凹度10m」「地上開度」が選定されたが、過誤確率(P)でみるとそれぞれ24%, 21%, 9%, 21%, 15%の最大ウェイトがもっとも適合するモデルとなった。このことから従来から多くの地すべり専門家が述べてきたように地震発生による崩壊は地形要素のウェイトが高いといえる。一方、地すべり発生では、やはりもともと地すべり地形のある脆弱なところで多発し、かつ地質要因でも第三紀堆積岩類や火砕流堆積物分布範囲においてより多くの発生があることがわかった。

4. おわりに

2008年 岩手・宮城内陸地震の翌日、地すべり学会東北支部の調査団の一人として荒砥沢の踏査に加わった。あのときに荒砥沢地すべり頭部から見た光景は今もって忘れがたい。見下ろした崖下150mの向こうは何も遮るものがなく荒涼と広がった正面風景には陥没帯とリッジ・移動体の列が夕日に映えていた。

如何に震源に近いとはいえこのような巨大地すべりの移動現象を目の当たりにすることができたのは、不謹慎ではあるが地すべり解析を生業とするものにとって得がたい経験であった。この現場には何度か足を運んだが、地すべりの末端付近では、突き上げるようにそびえる圧縮擾乱帯が形成されていて本来谷底にあったはずのカルバートや枡、軽石凝灰岩やシルト岩泥岩互層がクシャクシャと上昇していた（Ph. 1）。

まさにダイアピルが上昇してきたかの印象ですさまじいエネルギーを感じた⁷⁾。現場では、このような爆発的なエネルギーの発散を感じた一方で、そのままの形を残している中腹移動体の有様に30分もかけてサーサーとゆっくり静かに移動するイメージからパイパーロック現象によるホーバークラフト移動を考えたが、あくまで仮説に過ぎない。ただ地震地すべりには、すべり面がわかりにくく移動体の乱れも少ない地すべりが多くあることも事実で、我々の想像を越えた物理現象が働いていることは間違いないと思う。なお地形的に見ると、荒砥沢地すべりには、やや形状を異にするもののほぼ同じ規模での旧地すべり地形が認められていたところである。

今回のAHPによる地すべり斜面変動予測モデルでも地すべり発生には元々ある地すべり地形のもつウェイトが3割近くあった。このことは今後、他の地域でも検討される地震地すべりハザードマップ上で重要な一つの教訓になるのではと思う次第である。

なお中越地震地すべりの変動モデル検証結果も良好であった。おそらく本手法は他の予測図作成にも応用できるのではないかと、思う次第である。



Ph.1 荒砥沢地すべりの中の擾乱帯⁷⁾

参考文献

- 1) 國生剛治（2009）：液状化現象－巨大地震を読み解くキーワード－，鹿島出版会，308p
- 2) 大野亮一・山科真一・山崎孝成・小山倫史・江坂文寿・笠井史宏（2010）：地震時大規模地すべりの発生機構－荒砥沢地すべりを例として－，日本地すべり学会誌，Vol. 42，No. 2，pp. 8-14
- 3) 榎明潔（2001）：安定と変形の解析法，電気書院，266p
- 4) 濱崎英作・渡辺修・橋本修一・山科真一（2010）：巨大地震時の地すべり運動メカニズムに関わるすべり面地下水沸騰の可能性，日本応用地質学会東北支部 第18回研究発表会 予稿集
- 5) 濱崎英作・檜垣大助・林一成（2015）：GISに基づく斜面変動予測評価のためのバッファ移動解析と過誤確率分析法－2008年岩手・宮城内陸地震での事例研究－，日本地すべり学会誌，Vol. 52，No. 2，pp. 3-10
- 6) 八木浩司・佐藤剛・山科真一・山崎孝成（2008）：2008年岩手県・宮城内陸地震により発生した地すべり・崩壊分布図，http://japan.landslide-soc.org/education/report/iwate_miyagi_EQ_080717
- 7) 千葉則行・橋本修一・加藤彰・前田省吾・大場司・山崎孝成・阿部真郎・濱崎英作（2008）：荒砥沢ダム上流の巨大地すべり発生に関わる地質・地質構造所見，第47回日本地すべり学会研究発表会，ポスター発表

以上