

南海トラフ巨大地震に備える

京都大学名誉教授 梅田 康弘
産業技術総合研究所 客員研究員

地震への備えは、政府、行政、個人など様々なレベルでの備えがありますが、ここで話しする備えは、南海トラフ巨大地震の予知に向けた備えです。

第1章では「そもそも南海トラフ地震とは何か」という素朴な疑問からおさらいします。地震発生メカニズム、統計的手法による長期予知、想定東海地震と大規模地震対策特別措置法、いわゆる大震法についてなどです。大震法は今また問題になっており見直しが言われていますが、制定の発端となった当時の事情や想定東海地震の予知に関する問題点などをお話しします。

第2章は、巨大地震に備えて様々な観測網が展開されています。その概要を説明すると共に、現時点で得られている成果についてお話しします。観測成果は着々と蓄積されつつありますが、地震予知につなぐとなると非常に難しいのが現状です。今起こっていることを把握したり理解することはずいぶん進歩しましたが、時間軸の先を読み取ることは、現状把握とは次元の異なることです。簡単ではありません。

第3章では、その困難さを打開するひとつの手段として、前回の昭和南海地震の前にはどんな異常現象があって巨大地震に至ったのかを調べ、それをどのように次の南海トラフ巨大地震の予知につなげているかを、個人的な研究も含めてお話しします。

地震予知の手法が確立されていない現状では、過去の例を参照しながら現実のデータを注視していくことが重要と思われます。そういう意味では南海トラフ巨大地震だけにとらわれず、その前に活発化する内陸部の地震にも備えが必要です。

南海トラフ巨大地震に備える

1. 南海トラフ巨大地震とは
 - ・メカニズム, 発生確率, 大震法のおさらい
2. 巨大地震に備える
 - ・観測体制の現状 ・深部低周波微動, スロースリップ
3. 巨大地震を迎える
 - ・予知をめざして ・内陸地震の活発化

京都大学 名誉教授 梅田康弘
(産業技術総合研究所 客員研究員)

1

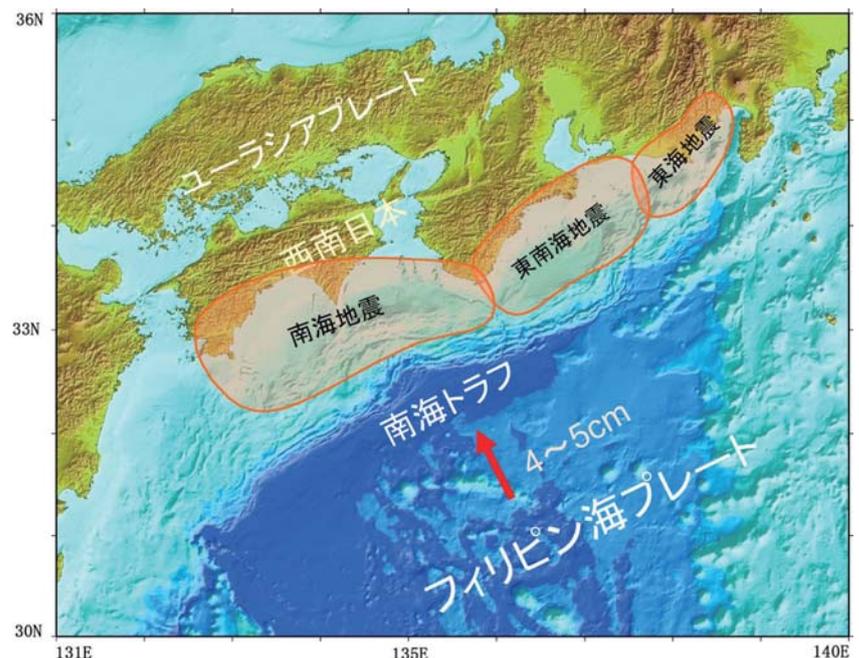
1. 南海トラフ巨大地震とは

南海トラフ地震の起こる場所

フィリピン海プレートは年間4~5cmの速さで北北西に進み, 南海トラフからユーラシアプレートの下に沈み込んでいく。

ふたつのプレートの接触面で南海トラフ巨大地震が発生する。

この図には「東海地震」「東南海地震」「南海地震」と, 3つに分けて描いているが, 過去には連動して起こったこともある。



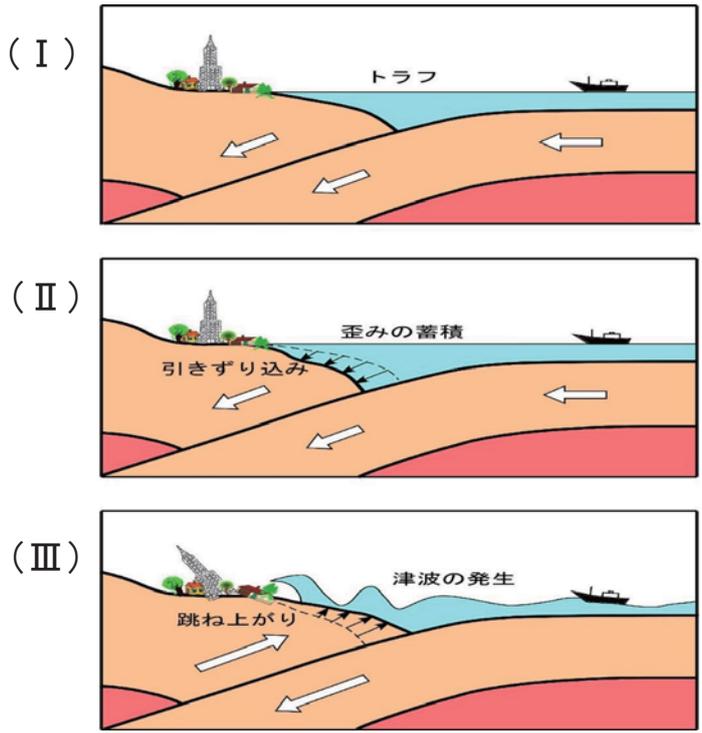
南海トラフ地震発生のメカニズムと予知

- (Ⅰ) 海側のプレートの沈み込みと共に、陸側のプレートも沈みこんでいく
- (Ⅱ) 陸側のプレートの先端が引きずり込まれ、ひずみが次第に大きくなる。
- (Ⅲ) 陸側のプレートの先端がはね上がり、地震が発生する。

(Ⅲ)の地震発生のおあとは、また(Ⅰ)に戻り、(Ⅰ)→(Ⅱ)→(Ⅲ)→(Ⅰ)・・・を繰り返す。

(Ⅰ)から(Ⅲ)の跳ね返り直前までトラフの水深は次第に深くなり、跳ね返りと共に浅くなる

このことから、水深を測定しておれば地震発生のおおよその時期を知ることが出来る

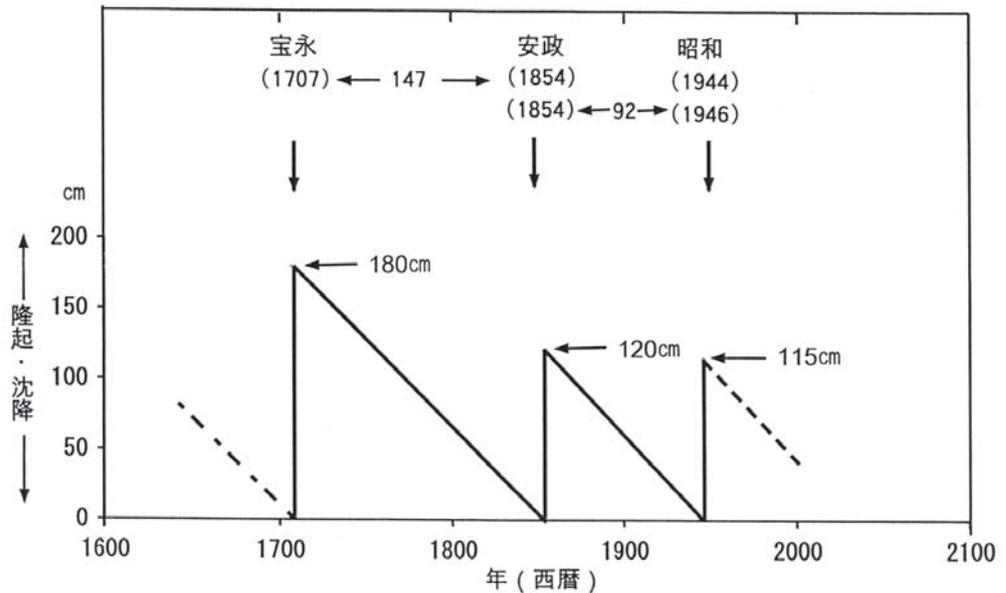


南海地震の繰り返しと室戸の隆起・沈降

南海トラフの巨大地震の繰り返しと陸側の隆起・沈降

横軸は西暦、縦軸は高知県室津港の水深から推定された室戸の隆起・沈降

地震のたびに隆起し、次の地震に向かって沈降していく

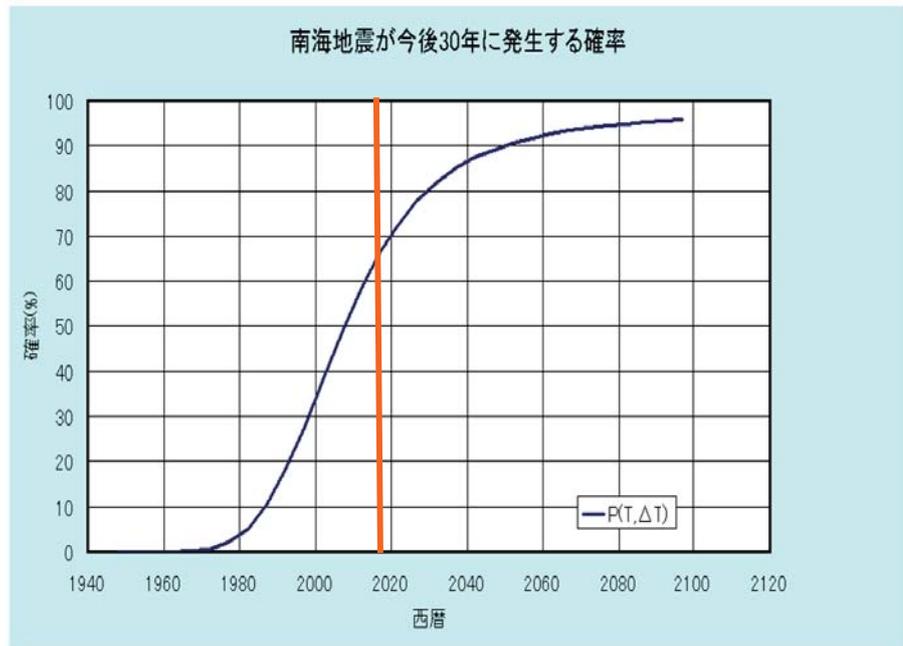


「時間予測モデル」と呼ばれるもので、次の地震の発生時期を予測できる
しかし、繰り返し間隔にばらつきがあり、決定論的な予知にはならない

確率予測

政府は、繰り返し間隔のばらつきを考慮して、地震発生 の予測を確率で表した

2017年1月の時点 (右図の橙の縦線) で、30年以内に発生する確率は70%である

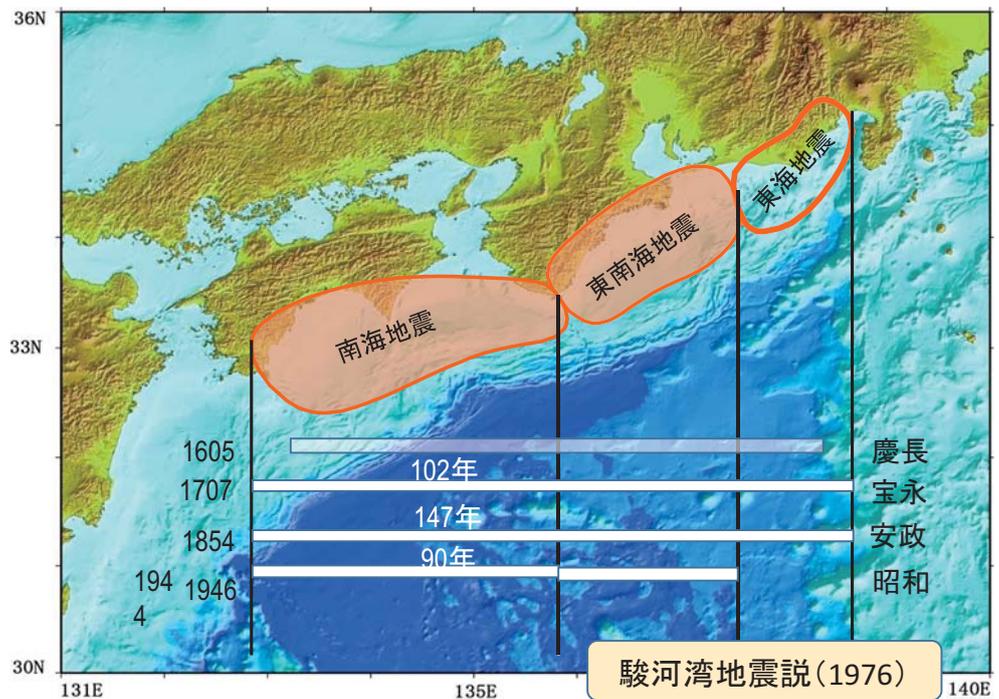


5

3つの地震と発生年

3つの地震の破壊域を示したが、過去には3つ連動したことも多い

昭和の東南海地震では駿河湾まで破壊が達していないことから、“明日起こっても不思議ではない”と言われた「駿河湾地震説」が1976年に発表された。



1854年から約120年

後に想定東海地震となり、大震法制定のきっかけになる

想定東海地震と大震法

- ・ 東海地震の基になった「駿河湾地震説」は1976年
- ・ 大規模地震対策特別措置法(大震法) 1978年6月制定. 12月施行
- ・ 東海地震への批判
「明日起こっても不思議でない」と言われた東海地震は40年経っても起こっていない.
- ・ 大震法の問題点
大震法では「東海地震が起こりそうになったら, 国民生活を制限する」
“起こりそうになったら”の判断をどうするか. 国民生活を制限できるか.

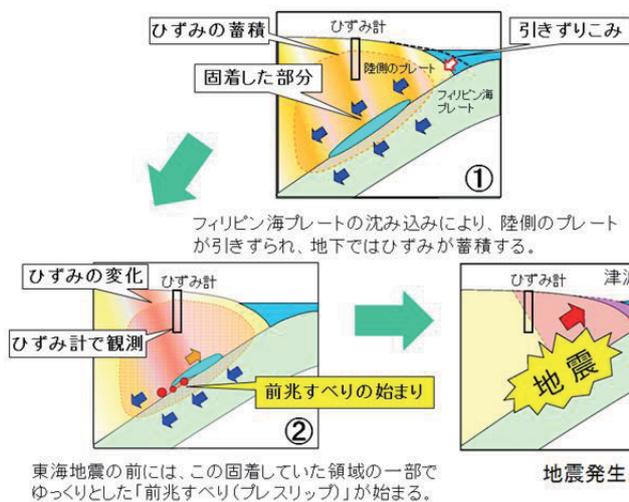
地震予知が不確実にもかかわらず, 問題のある「大震法」を制定させた当時の背景

- ・ 1960年代末, 南関東の異常隆起があった.
・ ダイラタンシーモデル(地震の前に地殻が膨張するというモデルで南関東の異常隆起が説明された)
- ・ 1974年からの伊豆半島の異常な地殻活動
- ・ 1974年伊豆半島沖地震を皮切りに, 夥しい群発地震が発生
- ・ 静岡県民の心配

7

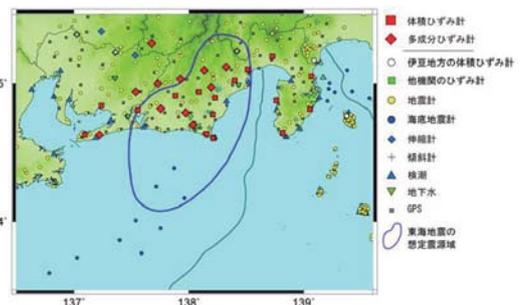
想定東海地震発生までに想定されているプロセス

気象庁のホームページより



前兆すべりを捉えるために多くの観測が展開されている。

■◆印のひずみ計の変化によって地震予知に関する情報が発信される

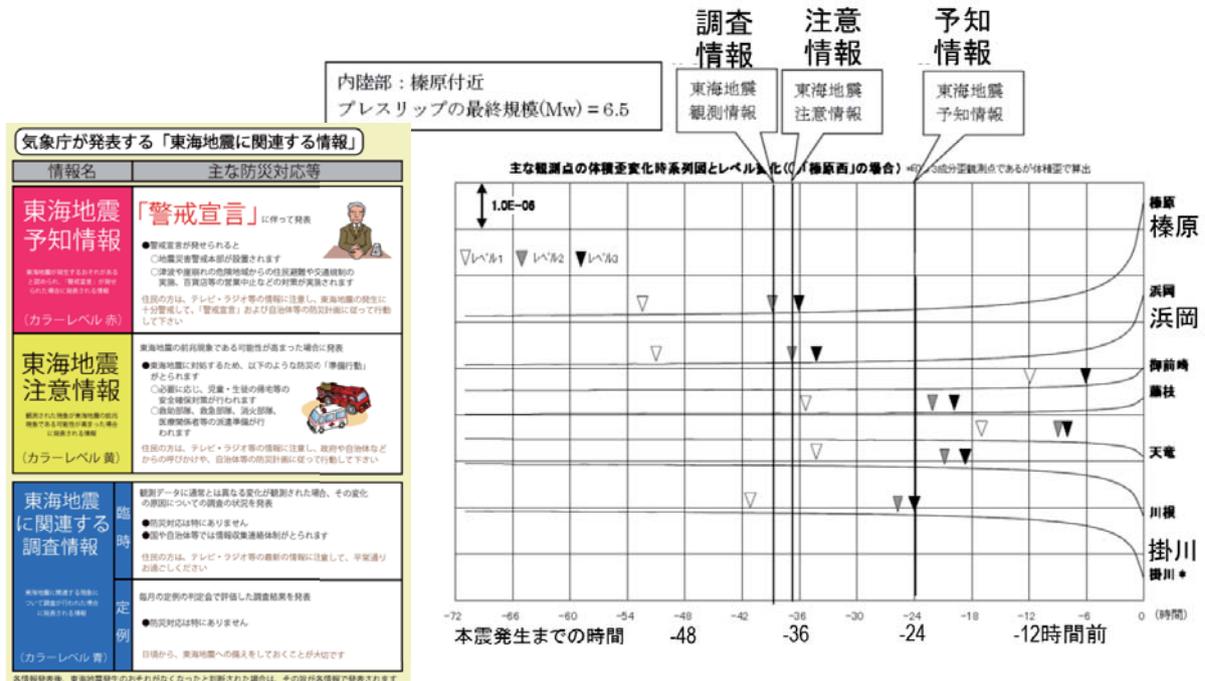


↑ 地震発生前にはプレート境界で前兆すべりが起こると想定されている(上の図の②)

↑ 東海地域に展開されている観測点

想定東海地震発生までに予想される歪み変化と発表される情報

ある観測点の歪みが、あるレベルを超えたら「調査情報」を、
 複数の観測点で歪みレベルを超えたら「注意情報」を、
 さらに歪みが大きくなったら「予知情報」が出される。



前兆すべり(プレスリップ)が起こったらと言うが...

何が問題か

- この予測曲線は岩石破壊実験に基づいたシミュレーション曲線である。
- 岩石実験では必ず最終破断を起こすが、自然の場合は地震が起こらないこともある。
- “前兆すべり(プレスリップ)が起きたら”という仮説の基に作られたが、
- 実際に起こったことをモデル化したものではない。

それでも、上図のような予測曲線は必要不可欠。

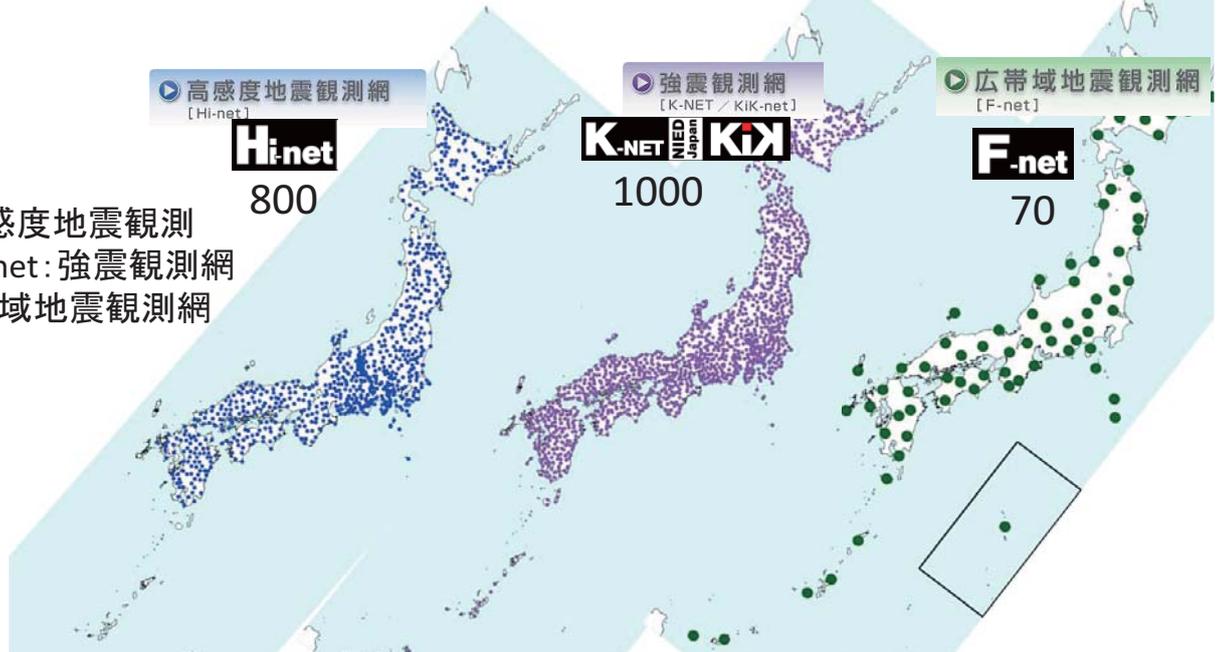
この図が無ければ、例えば図でスクリーンを掛けた左側の時点で、注意情報を出すことはできないだろう。

どうやってこの問題点を解決していくかは3章で述べる

2. 巨大地震に備える

防災科研による
全国の地震観測網

NIED 国立研究開発法人 防災科学技術研究所
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

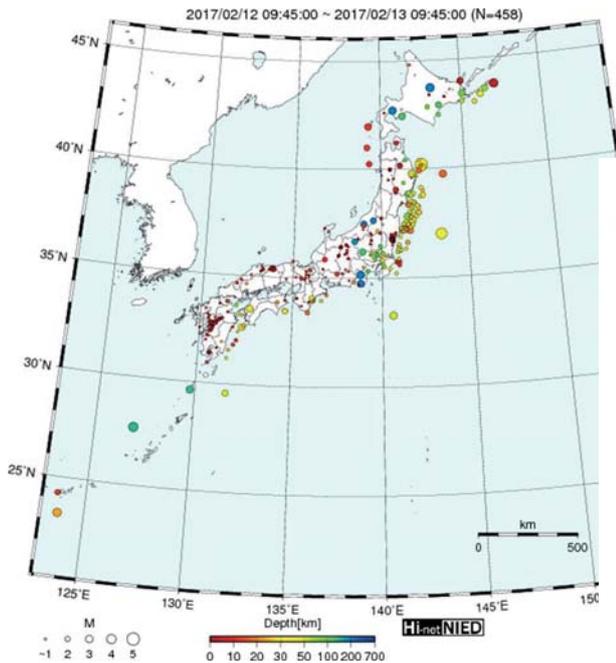


- ・Hi-net : 高感度地震観測
- ・K-net, KiK-net: 強震観測網
- ・F-net: 広帯域地震観測網

- ・地震活動がリアルタイムで把握できるようになった

NIED 国立研究開発法人 防災科学技術研究所

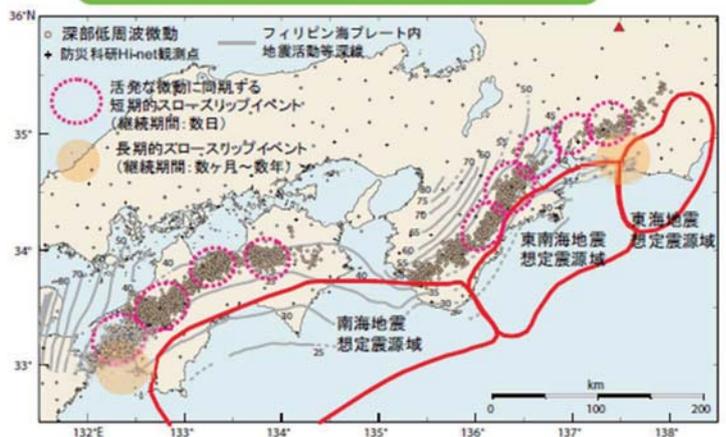
左図, 下図ともに防災科研のHPから引用



<http://www.hinet.bosai.go.jp/hypomap/?ft=1&LANG=ja>

深部低周波微動・スロースリップの発見

深部低周波微動とスロースリップの分布



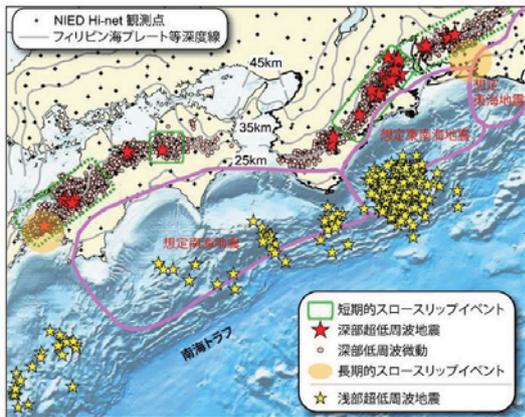
http://www.bosai.go.jp/activity_special/pdf/a05.pdf

深部低周波微動／低周波地震／
超低周波地震ってなんだ？

なみふるNo.106 日本地震学会

京都大学防災研究所 伊藤 喜宏

<http://www.zisin.jp/pdf/nf-vol106.pdf>



のHPから引用

<http://www.jamstec.go.jp/donet/rendou/en/report/search04.html>

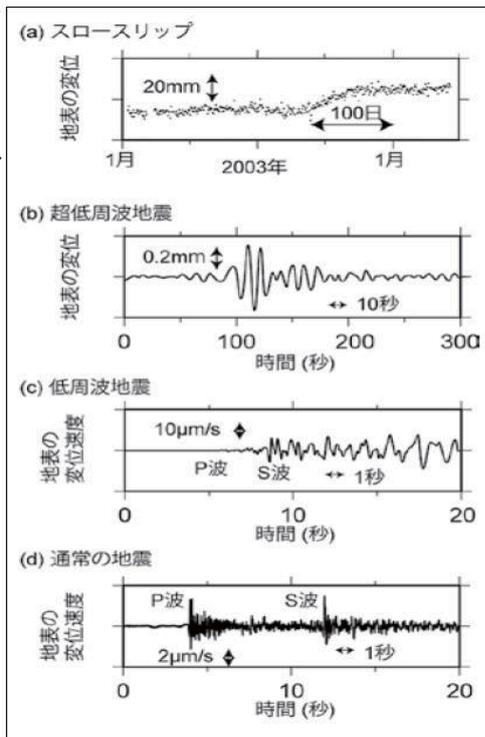
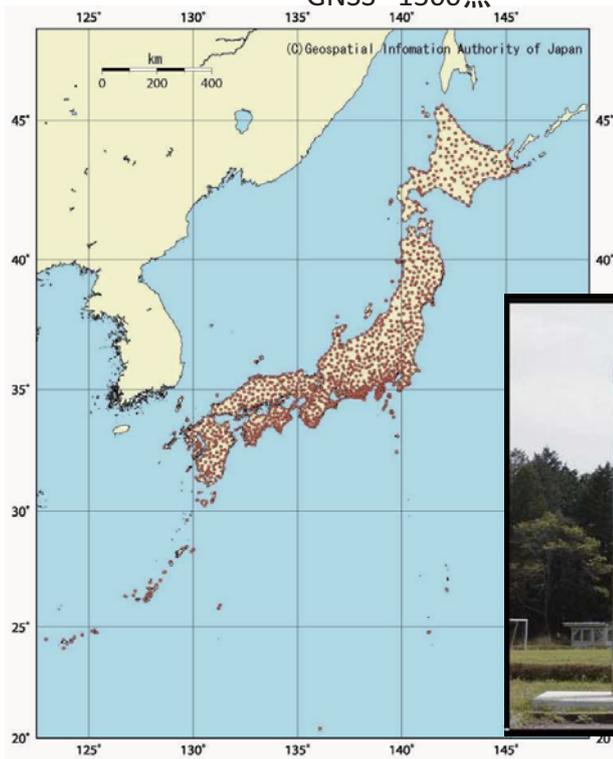


図1 さまざまなスロー地震による地面の動き (a-c)と、通常の地震の記録 (d)。

日本列島の動き(歪み)がリアルタイムで把握できるようになった

国土地理院 電子基準点配置図

GNSS 1300点



アンテナ



全国の地殻水平変動 1年間 (2)

基準期間: 2015/03/26 - 2015/04/09 [F3: 最終観]
比較期間: 2016/03/26 - 2016/04/09 [F3: 最終観]



地震予知連絡会報96巻(2016)

GNSS(Global Navigation Satellite System)

海底観測

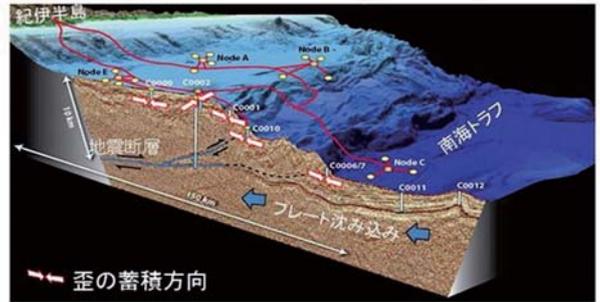
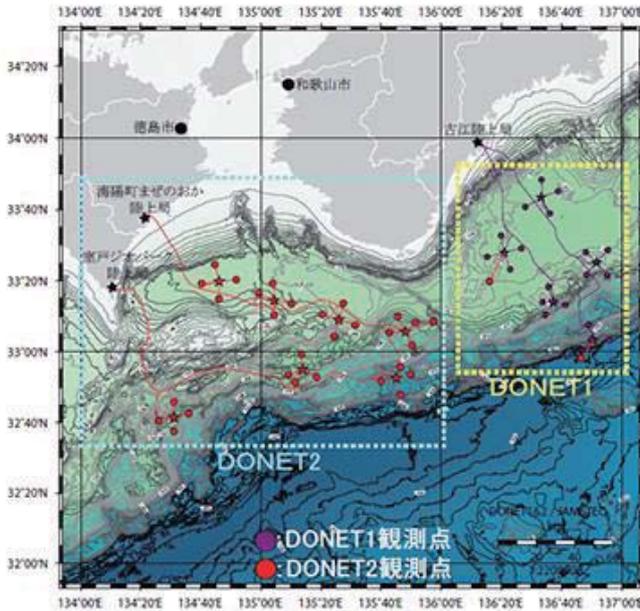
DONET

紀伊半島沖、紀伊水道沖に展開



左図、下図共
海洋研究開発機構 (JAMSTEC)
沈み込み帯掘削研究グループ
南海トラフ地震発生帯掘削
のHPから引用

<https://www.jamstec.go.jp/donet/j/donet/donet2.html>

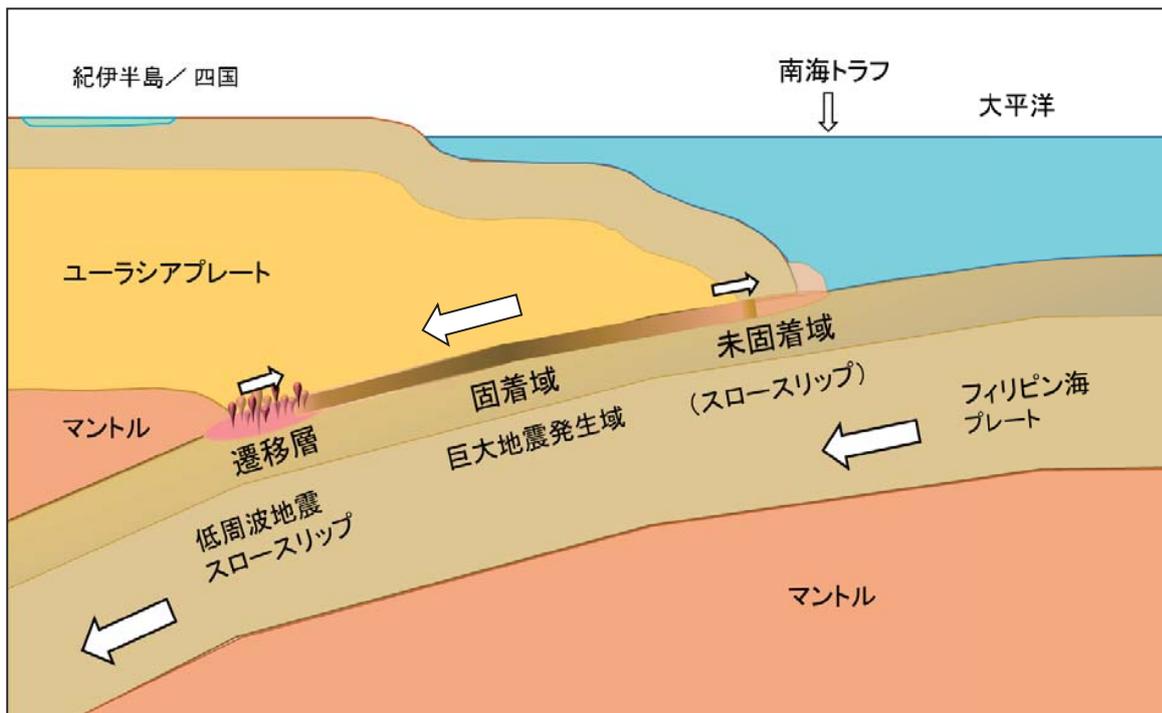


プレートの沈み込みや分岐断層が確認された

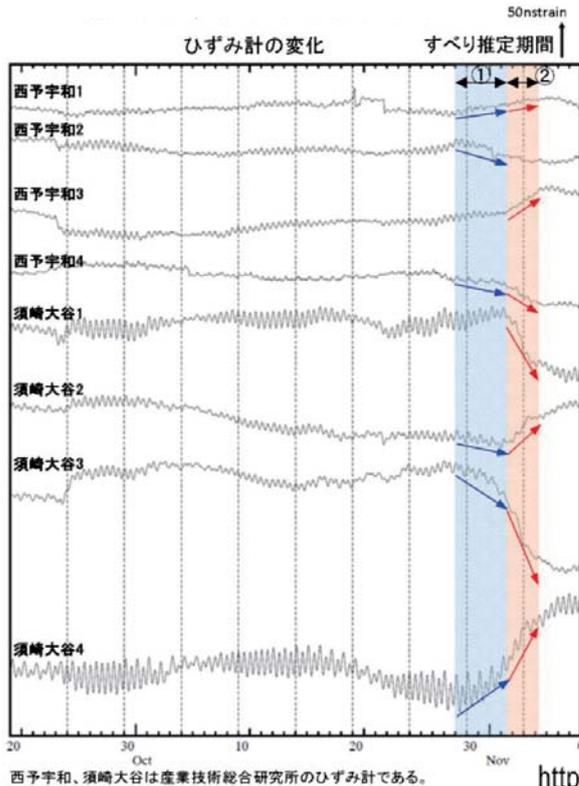
15

プレート境界の模式図

- ・ 固着域が滑ると巨大地震
- ・ その前に、遷移層でスロースリップが拡大
- ・ 未固着域でもスリップが起こるかも知れない



産総研のひずみ計で観測されたスロースリップ



左図の青と赤矢印で示されたところの歪みの変化から、下図の青と赤の位置でスロースリップが起きたことが推定された。

ひずみ変化を説明する断層モデル候補

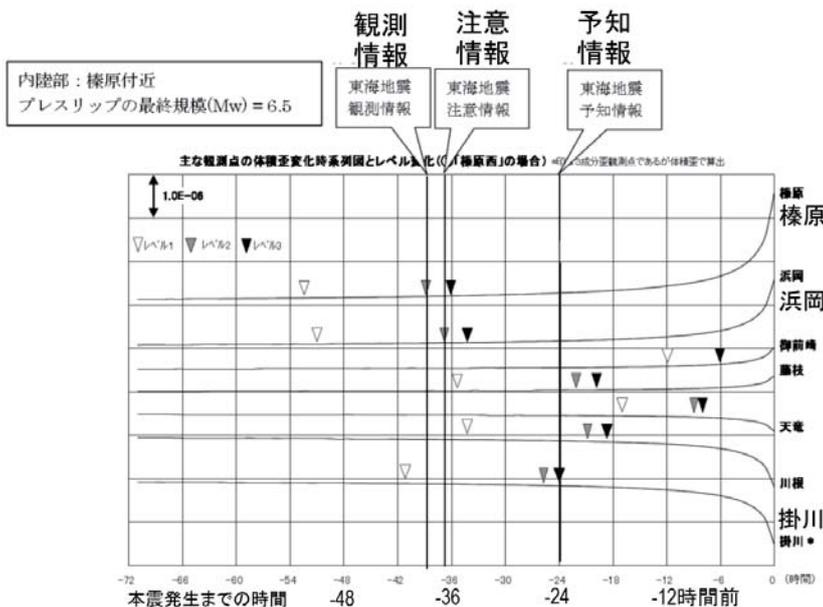


http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou95/08_01.pdf

気象庁 大阪管区 予知連会報 95巻, 2016 8-1

3. 巨大地震を迎える

— 予知をめざして —



左図のような予測曲線がないと、24時間前、36時間前に判断できない。

岩石実験から推定された曲線だが、
実証的裏付けが必要

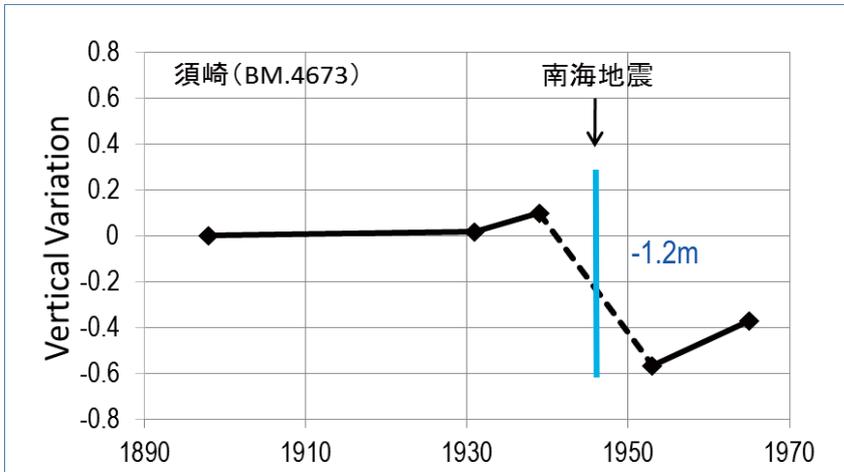


昭和南海地震の前はどうだったのか

昭和南海地震の前は

- ・ 戦中・戦後で観測データは乏しい。
- ・ プレートテクトニクスは無い時代。

利用できるデータは、下図のように地殻変動をとらえる測量。しかし・・・



黒◆と黒実線は、
地理調査所(現:国
土地理院)の
高知県須崎市での
データ(水準測量)

残念ながら、南海地震を挟んで点線の期間は測量データは無い

一方、

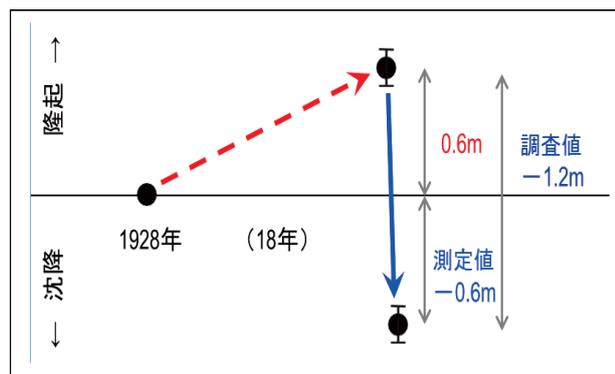
青色縦棒は、地震時の須崎港の沈降で、海水位の変化から1.2m沈降したことが判っている。

しかし、このままでは二つのデータは繋がらない。

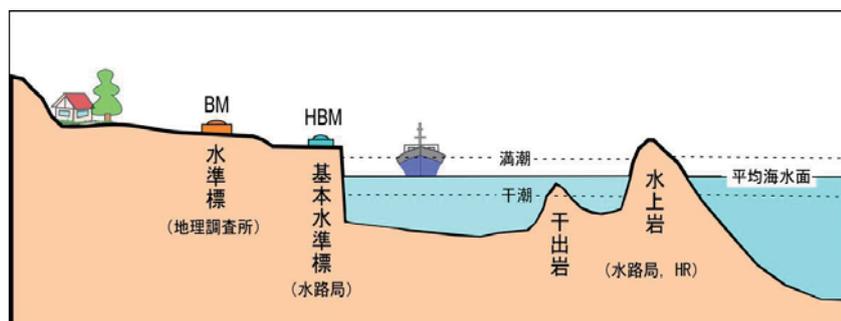
水路部の調査値と測定値の違いは？

水路部(現:海上保安庁海上情報部)では、地震直後の調査に加え、港湾などの水深の変化を測定するため、港湾などに設置していた「基本水準標」(下図右)で改測を行っていた。

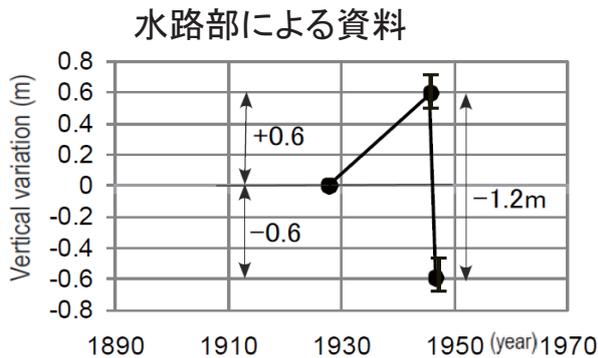
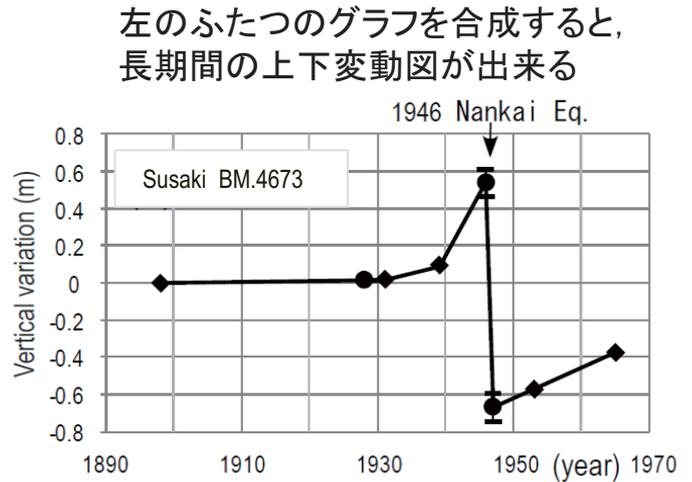
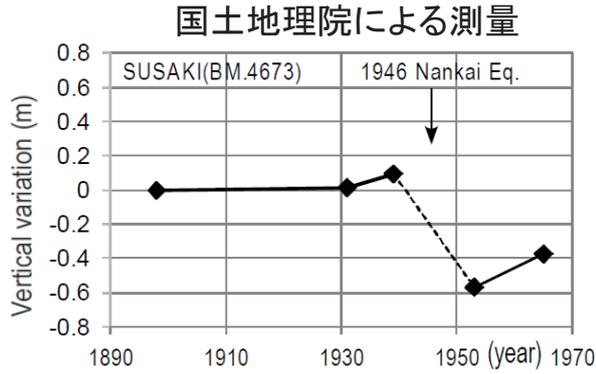
- ・ 地震直後の調査では、右図の青い矢印で示すように1.2mの沈降
- ・ 18年前と地震直後の測定では、右図の測定値で示す0.6mの沈降
- ・ この差は？
- ・ 右図の赤い点線で示すように、18年間に須崎は0.6m隆起していたとすればつじつまが合う。



水路要報



ふたつのデータを結合させる

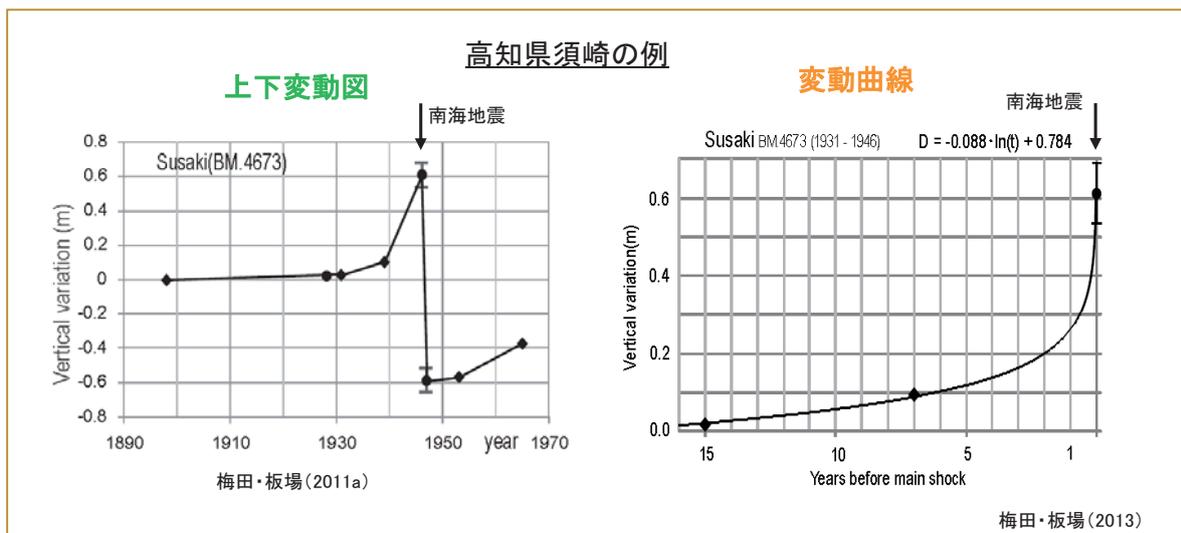


1889年—1970年の上下変動図が四国の13ヶ所で得られた。

梅田康弘・板場智史 (2011a)
1946年南海地震前の四国太平洋沿岸の上下変動。
地質調査研究報告, 62, 243-257.
www.gsj.jp/publications/bulletin/index.html

21

本震直前までの変動を対数近似して変動曲線(右図)を求める。

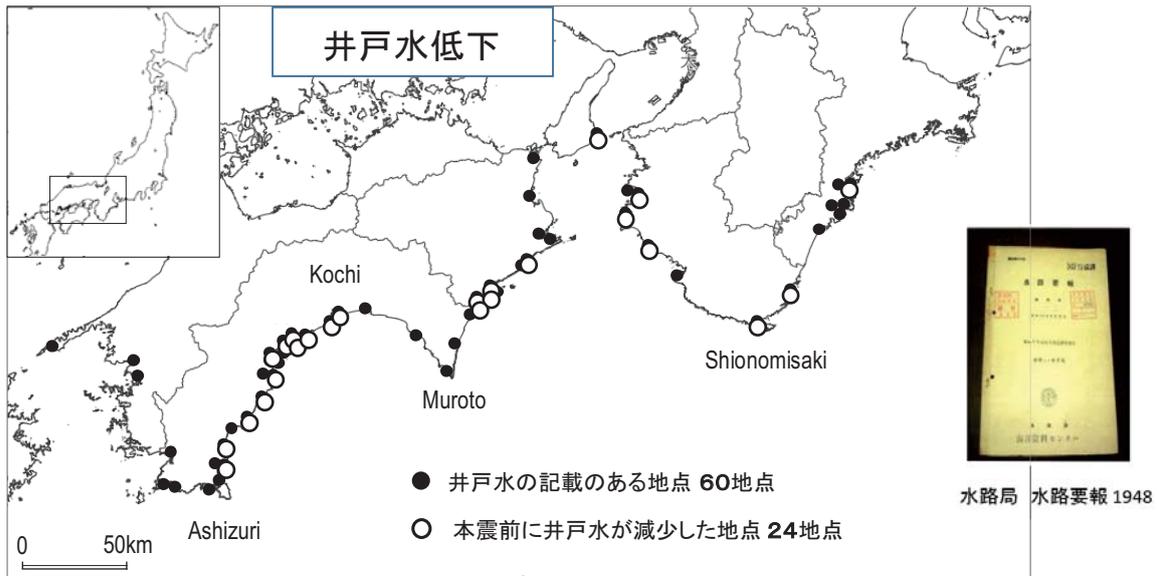


本震直前までの変動曲線が得られた。ただし、横軸は年単位の長期間である。

本震の数日前、数時間前の変動も知りたい。

⇒ 目撃証言を定量化しよう！

南海地震の前に井戸水が減少した



- ・ 調査は120ヶ所近く行われた.
- ・ 高知・徳島・和歌山といった大都市には無い.
- ・ 当時, 使われていた井戸の数から見ると, 涸れた井戸は極めて稀と言える.

⇒ 井戸水が減少するメカニズムを解明して, 水位低下と土地の隆起量の関係を求める

23

水位が低下した井戸の特徴

高知県黒潮町佐賀



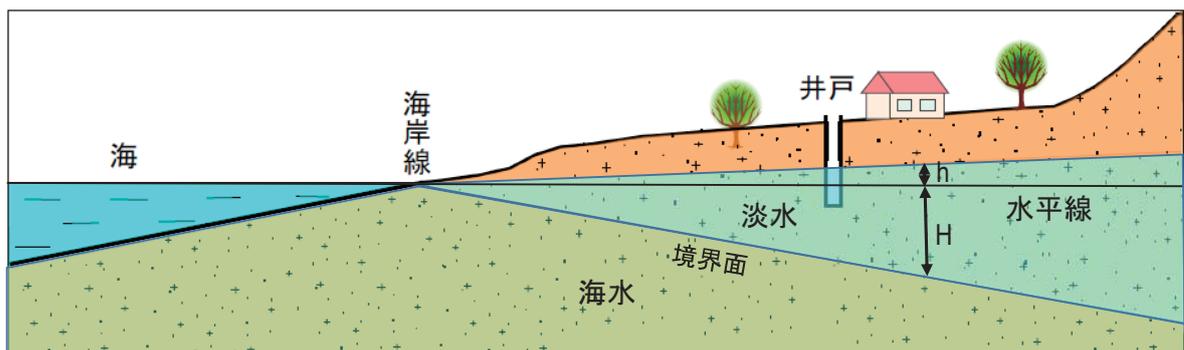
- ・ 小さな三角州か砂州にある井戸 (左右の地図).
- ・ 三方山に囲まれ, 周囲から淡水の供給が少ない

高知県四万十市布



三角州の地下水構造(下図)

- ・ 海水(塩水)が三角州の下に浸透し,
- ・ 淡水はその上に浮かんでいる

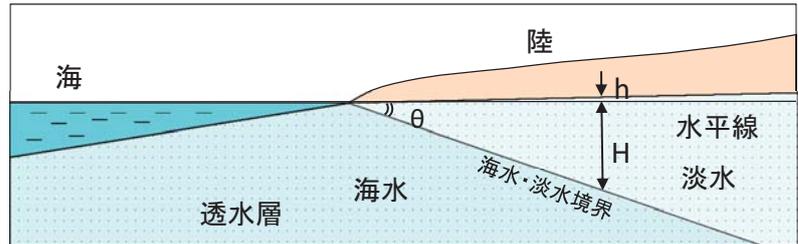


- ・ h/H は海水と淡水の比重の差から約40

海水と淡水のバランスは土地が隆起しても同じ

透水性のよい海岸付近では、海水は陸地の地下に浸透し、淡水は浮力でその上に浮いている。

h: 水平線からの地下水位
 H: 水平線から境界面まで
 淡水と海水の密度差を
 1:1.025とすると。
 $h/H = 1/40$

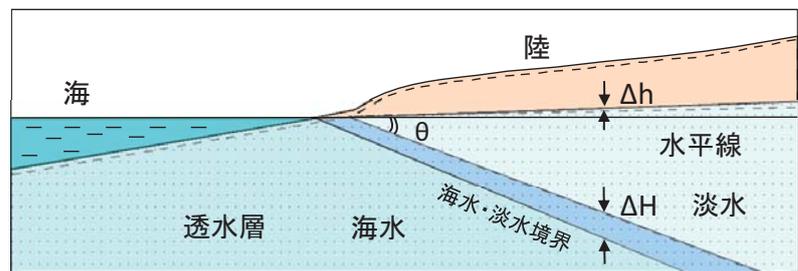


$\Delta h / \Delta H = 1/40$ なので、
 土地の隆起 (Δh) に対して
 境界面はその40倍下がる。

隆起後もバランスを取るためには、
 右図の濃い青色で示した分の
 淡水が下支えのため必要になる。

その水はどこから？

土地が僅か隆起すると、塩水と淡水の境界面はバランスを取るため下図の実線のように下がる。**隆起に対して40倍下がる**

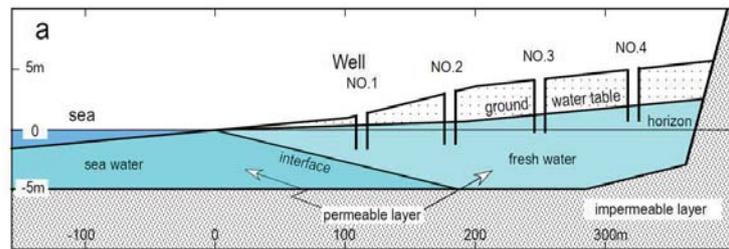


θ は $1^\circ \sim 2^\circ$ である。

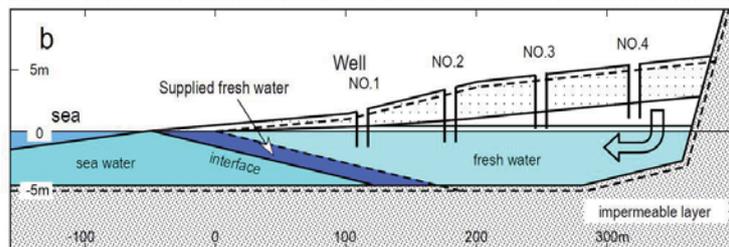
地震前に涸れる井戸もあるが、涸れない井戸もある

高知県黒潮町佐賀の地下水構造

隆起前



隆起後



梅田康弘・他
 (2010)地震2,
 63, 1-10

- ・ 下支えの淡水は水位の高い山手から下図の白矢印のように供給される。
- ・ 三角州以外からの淡水の供給が無ければ、つまり大きな河川が無く、三方を山に囲まれた小さな三角州では
- ・ 井戸No.4は涸れ、No.3は減少、No.2は僅かな減少、No.1は変化なし

謎は解決した！

井戸水減少の程度と減少に要した時間から 変動曲線の検証

井戸水の低下量と土地の隆起量の関係が右図のように求められた。

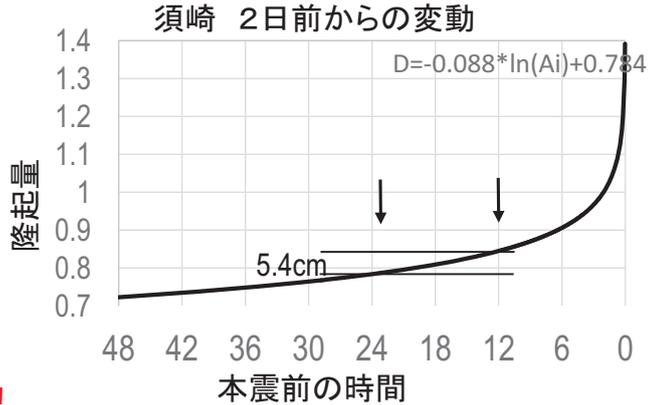
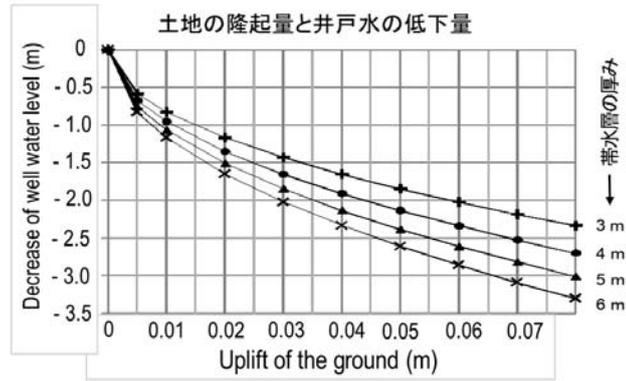
帯水層が4m～5mの場合、5cmの隆起が起これば、井戸の水位はおよそ2m強～2.5m弱低下する。

高知県土佐市宇佐新居地区での証言によると前日の朝(本震の22時間前)には水は汲めたが、夕方(12時間前)には汲めなくなった。10時間に2mの水位低下があった。

先に推定した変動曲線からは、この時間に5.4cmの隆起であり、上記の隆起量とほぼ一致する

1週間前に涸れたところもある。3日間で3cm、5日で5cmの隆起が見込まれる

本震前に隆起は加速した！



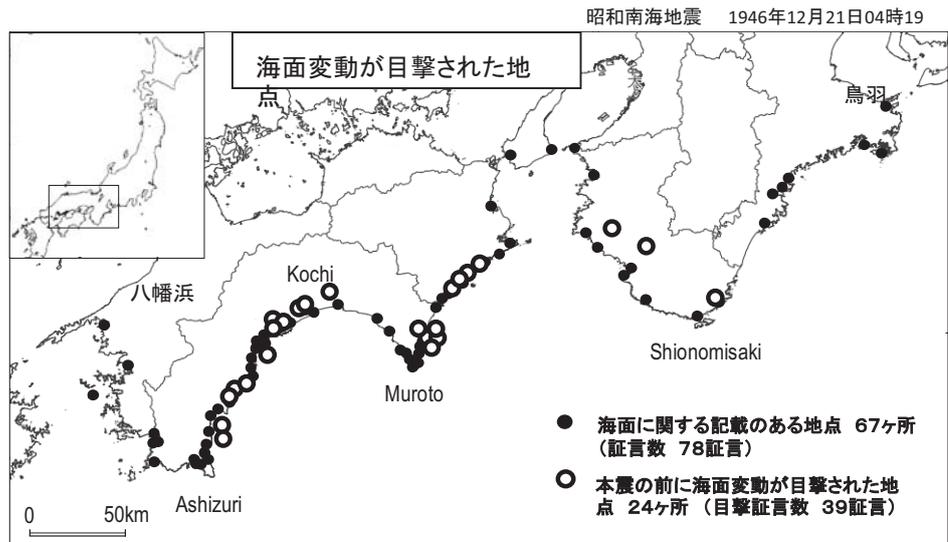
27

1946年南海地震の前には海面変動も目撃されていた

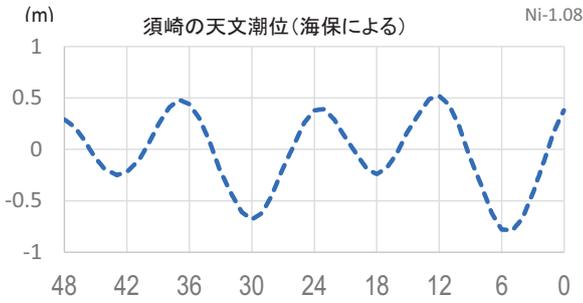
昭和南海地震の前のスロースリップは観測されていないが

もし起こっていたら、小規模の津波が発生する可能性がある。

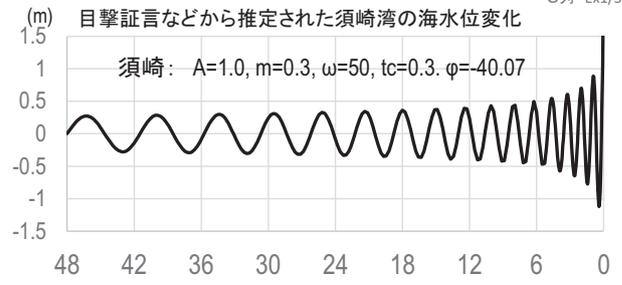
海面変動が目撃されており、津波が起こっていたらしい。



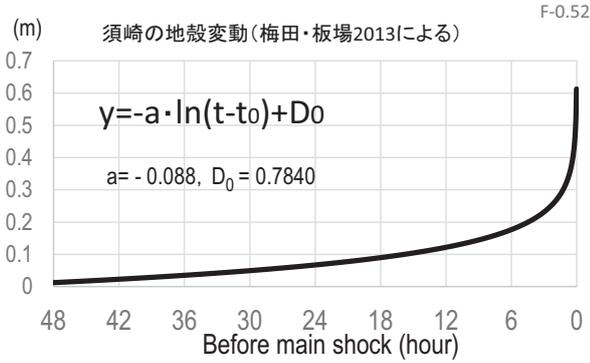
- ・前日には小規模な海面変動、おそらく小規模な津波が目撃されている
- ・当夜には帰港した漁船が接岸できないほど海水位が低下していた。
- ・当夜に海水位は上昇したという目撃証言は無い



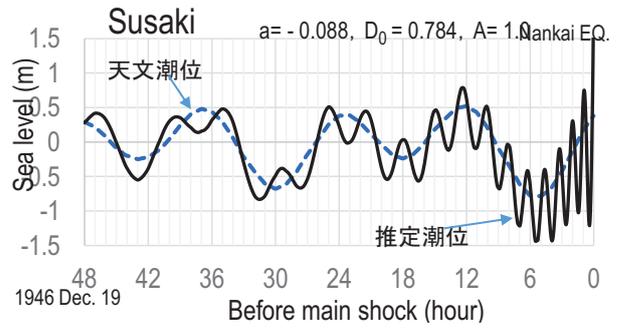
何事もなければ須崎の潮位はこのようになるはずだった



目撃証言から推定された須崎湾での海面変動。変動を起こした海底地殻変動の場所などは不明。



須崎では大地が徐々に隆起していった



3つのグラフを足した潮位。

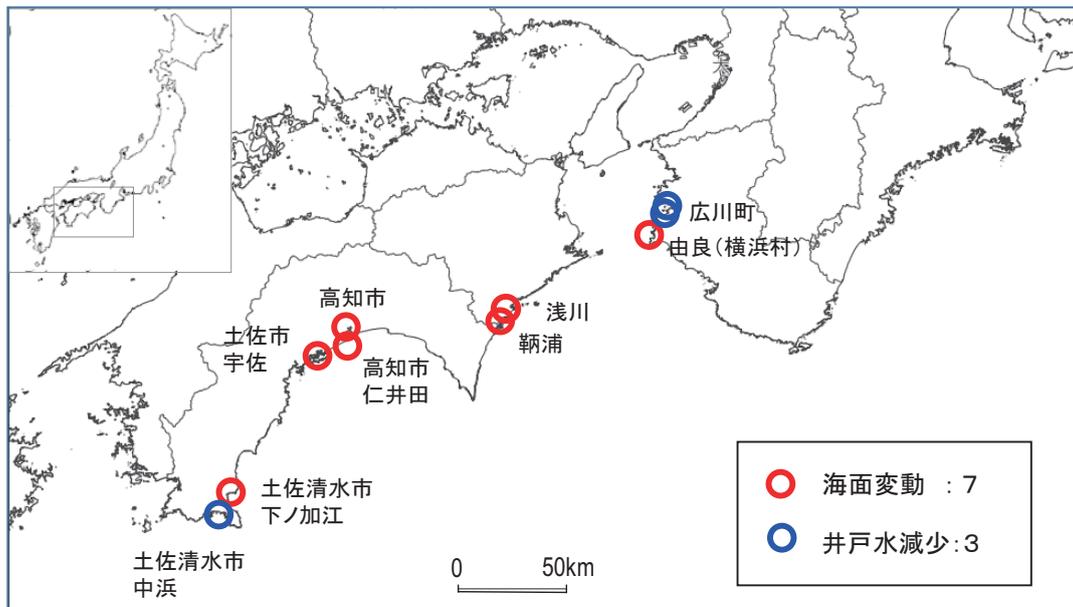
これが須崎で実際に目撃された海面変動

海面変動(おそらく津波)は前日から起きており、本震の5~6時間前には海面が大きく下がった。このモデルによって、帰港時に海水位が上昇したと言う目撃が無いことの説明が出来る。

昭和南海地震の時だけか？ 再現性はあるのか？

1854年安政南海地震の前

1854年12月24日16時半頃
(嘉永7年(安政元年)11月5日申下刻)



1854年安政南海地震の前にも井戸水の減少や海面変動が目撃されている

安政南海地震の32時間前に安政東海地震が起こっており、その津波の目撃証言を避けるため海面変動に関する証言は安政東海地震よりも前の目撃のみ採ってある

2011年東北地方太平洋沖地震(3月11日, M9.0)の前に

- ・ 2月16日にM5.5の地震が発生し, その余震はM9.0の本震に向かって移動していった. 移動速度は2~5km/日
- ・ 同時にスロースリップ(余効変動)の移動もあった.
- ・ 3月9日にM7.3の地震が発生し, その余震はM9.0の本震に向かって移動していった. 移動速度は10km/日
- ・ 同時にスロースリップ(余効変動)の移動もあった.

このような前駆的現象が1946年南海地震前にあった可能性がある.
また次の南海トラフ巨大地震の前にも起こるかも知れない.

しかし・・・

31

- ・ しかしながら, 再現性と言っても過去2回.
- ・ 3.11の例もあるとは言え, 次も同じことが起こるとは限らない.
- ・ 時間の先を読むことは難しく, 地震予知は難しい.
- ・ しかし, 南海トラフ地震は必ず起こる.
- ・ 備えは必要. 内陸地震にも注意を.

南海地震が起きて半世紀くらいは静穏期, 近づく50年ほど前から活動期

1995年兵庫県南部地震(M7.2, 死6434)

2000年鳥取県西部地震(M7.2, 死0)

2005年福岡県西方沖の地震(M7.0, 死1)

この状況は, 昭和南海地震の前もよく似ている.

1925年但馬地震(M6.8, 死428)

1927年北丹後地震(M7.3, 死2925)

1943年鳥取地震(M7.2, 死1083)

まとめ

1. 南海トラフ巨大地震とは

- ・ プレートの跳ね返り. プレート運動が続く限り繰り返り起こる.
- ・ 30年以内に起こる確率は70%. 年と共に確率は増す.
- ・ 想定東海地震の予知と, 問題の多い大震法の見直し.

2. 巨大地震に備える

- ・ 観測体制が整備されつつある.
- ・ 低周波地震・微動やスロースリップが観測され, 日本列島の動きもリアルタイムで把握できるようになった.

3. 巨大地震を迎える

- ・ 過去の南海トラフ地震の前にはなにが起こっていたか
- ・ 現在の知見をもとに説明が進められつつある.
- ・ 前回同様のことがおきるとは限らず, なお予知は難しい.
- ・ 活発化している内陸地震にも注意が必要.

33

日本地すべり学会関西支部
シンポジウム

2017年 4月 13日
大阪建設交流館

おわり

ありがとうございました.

京都大学 名誉教授 梅田 康弘
(産業技術総合研究所 客員研究員)

《話題提供》

南海トラフ巨大地震による斜面崩壊について

Landslides induced by huge earthquakes along the Nankai trough

千木良雅弘(京都大学防災研究所)

Masahiro Chigira (Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

南海トラフでは繰り返し巨大地震が発生し、大きな被害が発生してきた。斜面崩壊については、必ずしも詳細な発生記録が残されているわけではないが、大規模なものが発生してきた。次の巨大地震が予期される今、斜面崩壊の直接的な被害軽減、さらに、海岸地域への重要なインフラの安全確保のために、斜面崩壊の発生場所予測と評価は急務である。

地震時の斜面崩壊の発生の有無や挙動は、地震動そのものと地域の地形・地質特性に強く依存しており、地域的に大きな違いがある。南海トラフ沿いの西南日本外帯には四万十帯などの付加体が広く分布しており、それは、斜面崩壊を多発した 2004 年新潟県中越沖地震（新第三紀の堆積岩地帯）と 2017 年熊本地震の場合（第四期の火山噴出物地帯）とは大きく異なる。そのため、南海トラフの巨大地震による斜面崩壊は、後 2 者の場合とは大きく異なると予想される。また、2011 年東北地方太平洋沖地震の強震域と西南日本外帯とでは、地質・地形条件がかなり異なることから、大地震時の斜面崩壊発生状況も異なると推定される。

本報告では、従来の巨大地震による発生場所が特定されているものについて、地質特性を整理し、それらの共通性を考える。なお、発生記録については、日本地すべり学会 (2012) および井上公夫 他 (2013) 他を参照した。地質構造については、特に引用のないものは私たちの調査結果に基づく。

東海地方では、新第三紀の堆積岩と白亜紀の破断層およびメランジュ、また古第三紀のスレート地域の崩壊が 1707 年宝永、1854 年安政東海・南海地震によって発生したことが知られている。これらの多くは、重力斜面変形を伴う斜面に発生しており、重力斜面変形のタイプとしては、トップリング 6 件、および座屈 2 件であった。さらに、貫入岩に高角な境界で接する堆積岩の崩壊も認められた。また、1923 年関東地震の時には、神奈川県で降下火砕物の流動的な地すべりが多数発生した。静岡県側にも地震時に不安定となる降下火砕物は分布している可能性もある。

紀伊半島では、1889 年十津川災害や 2011 年台風 12 号により、四万十帯で多数の深層崩壊が発生したが、南海トラフの巨大地震による発生記録はほとんど見当たらない。これらの雨による深層崩壊の多くは、付加時に形成された衝上断層の大規模な破砕帯と

関係していることが明らかになりつつあり、地震時に発生する大規模な崩壊とは地質条件を異にしているようである。紀伊半島南部には球状風化した花崗斑岩が広く分布しており、それがむき出しになった個所では、地震動により崩落する可能性が大きい(Hirata and Chigira, 2015)。また、紀伊山地には広く谷中谷が発達しており、2009年中国汶川地震(Chigira et al., 2010)や2015年ネパールゴルカ地震の時の経験からすると、谷中谷の斜面に規模は大きくないにしても多数の崩壊が発生する可能性がある。

四国山地では、四万十帯や秩父帯の付加体、さらに三波川変成帯に大規模な崩壊が発生したことが知られている。地質構造については、明らかになったものは少ないが、1707年宝永地震によって発生したカナギ崩れは、トップリングタイプの重力斜面変形をした斜面に発生した(千木良, 1999)。ただし、これは、1707年宝永地震で発生しただけでなく、それに引き続いた降雨で拡大したと考えられている。

上記のように、南海トラフの巨大地震によっては、地層がトップリングまたは座屈した地層が崩壊した事例が多い。ほかの地震時の経験では、過去に地すべりがあり、それが対岸に衝突して停止したのち浸食を受けて下部切断されて不安定になり、それが地震時に再度すべるといった事例が多い。また、あらかじめ重力変形し、また、下部切断された流れ盤斜面の崩壊も多い(Chigira, 2014)。このような履歴のある斜面は西南日本の外帯には少ないかもしれないが、要注意であることは変わらない。また、今まで意識されて来なかったと思われるが、西南日本の外帯には谷中谷が紀伊山地以外にも広く分布していると考えられ、そこを主要道路が通過している場合も多い。谷中谷は地震時に崩壊を多発する可能性があることから、このことは広域的な安全確保の面からも重要である。

引用文献

- Chigira, M., 2014. Geological and geomorphological features of deep-seated catastrophic landslides in tectonically active regions of Asia and implications for hazard mapping. *Episodes* 37, 284-294.
- Chigira, M., Wu, X., Inokuchi, T., Wang, G., 2010. Landslides induced by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. *Geomorphology* 118, 225-238.
- Hirata, Y., Chigira, M., 2015 Geological and geomorphological features of landslides induced by 2011 Typhoon Talas in a granite porphyry area, 10th Asian Regional Conference of IAEG, Kyoto, p. 8p.
- 井上公夫, 土志田正二, 島田徹, 森島成昭, 藤原信成, 斎藤仁, 2013. 東北地方 太平洋沖震災害調査委員会報告書(平成25年9月30日)1班過去の地震レビュー, (公社)砂防学会東北地方太平洋沖震災害調査委員会報告書(平成25年9月30日). 砂防学会, p. 3-29.
- 千木良雅弘, 1999. 加奈木崩れ, 中村浩之, 土屋智, 井上公夫, 石川芳治(編), 地震砂防. 古今書院, pp. 38-40.
- 日本地すべり学会, 2012. 地震地すべり—地震地すべりプロジェクト特別委員会の総括編—.

地震時斜面変動の危険度評価に関する考察

国土交通省四国地方整備局四国山地砂防事務所 林孝標

1. はじめに

地震時における斜面変動の危険度評価については、平成26年2月に（公社）地すべり学会にて、「地震時斜面変動発生危険地域調査要領案」（以下、要領案）が策定された。四国地方においては、南海トラフ巨大地震の発生が危惧されており、地震動や津波による直接被害だけでなく、山間地における地すべりやがけ崩れなどの斜面災害の発生も懸念される。

今回は、多様な地形・地質を呈している四国地方で要領案を適用した場合にどのような細部の検討が必要になるか試行的に解析を行ったので報告する。

2. 要領案の概要

要領案は、地震に伴う地すべりや崩壊等が地質的要因の違いにより発生しやすい現象に特徴がある事に着目し、階層構造分析法（以下、AHP法）を用いて地震による斜面変動の発生危険地域を広域的に評価する手法である。

具体的には、(a)新第三系以降地域での地すべり・崩壊、(b)火山灰被覆丘陵地域での斜面変動、(c)古第三系以前の地質での崩壊性地すべりの3つの地域・現象を対象として、どのような指標で解析・評価を行えば良いかを示している（図-1、表-1）。

また、AHP得点を評価するためには、これらの指標毎にウェイト、配点、閾値を設定して算出する。

なお、(c)の評価手法については、四国地方における過去の地震による斜面変動に関する資料・データが少ないことから、宝永南海地震（1707年）での安倍川上流域大谷崩れを事例として構築している。

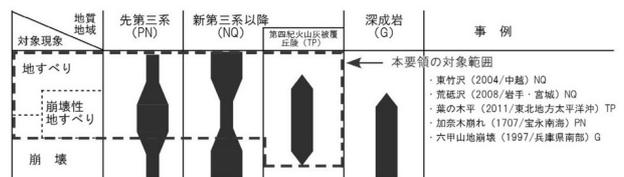


図-1 要領案で対象とする現象と地質

表-1 要領案で対象とする現象と指標の例

地域区分	対象現象と指標
先第三系以前地域	【崩壊性地すべり】 断面凸度 起伏量
新第三系以降地域	【地すべり】 地質（岩相） 地すべり土塊 凸凹度 地上開度 谷次敷
火山灰被覆丘陵地域	【崩壊性地すべり】 平均勾配 地上開度 起伏量

3. 四国における要領案の適用

3-1 試行エリアの選定

要領案の広域危険度評価を適用するにあたり、四国地域内で試行エリアを選定した。

選定に当たっては、地すべり地形や地質、過去の地震で発生した斜面変動のデータの有無、重要交通網等の保全対象の分布状況等に着目し、(i)吉野川中流域、(ii)善徳地すべり周辺、

(iii)仁淀川上流域、(iv)仁淀川下流域、(v)土佐湾岸を選定したとした。

なお、これらの地域はすべて要領案における(c)古第三系以前の地質帯に属する。

3-2 AHP法を用いた評価方法の概要

統計的手法を用いるためには、過去の斜面変動に関する資料・データを教師データとして配点の閾値を設定する必要があるが、四国地域では過去の斜面変動の資料・データが少なく、試行エリアにおいても十分なデータはない。そのため、要領案に基づき、図-2のBの手法を適用することとした。

また、古第三系以前の地質地区ではAHP法の指標として、重力山体変形地形を評価する「断面凸度」と崩壊性地すべりが生じうる起伏を有する斜面を評価する「起伏量」を用いるが、それぞれの解析方法及び標準的な配点、ウェイト、閾値を表-2、3に示す。

要領案に基づくAHP得点の算出手順は、①標高DEM(10mメッシュ)の作成、②地形指標値(断面凸度、起伏量)の計算、③GISを用いた統合データの作成、④AHP得点計算、⑤出力結果を用いた図化とした。

AHP得点の計算方法を詳述すると次のとおりである。

- ④-1 バッファ移動分析により、中心メッシュから半径R内の「断面凸度」、「起伏量」のデータを検索し平均

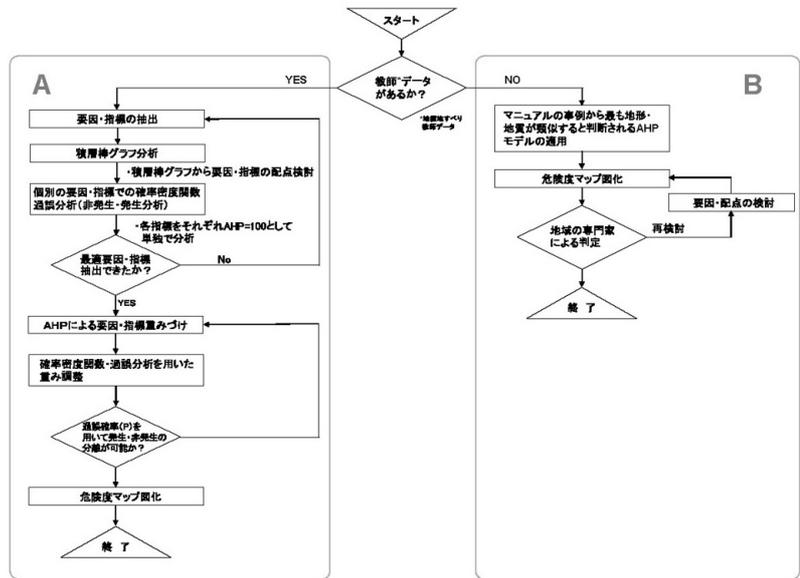


図-2 AHPによる危険度評価の流れ

表-2 指標の分析方法と配点

(静岡県安倍川上流域における先第三系以前地区の崩壊性地すべりを対象に検討した例)

要因	指標	指標の解説
重力山体変形地形	断面凸度	<p>検索半径Lのなかでθが最小となる地形との接線を描き、接線と地下角θからなる直角三角形の面積Waと、接線と地形断面からなる面積とWaの和である面積Wbとの面積比を求める。 $PC = Wb / Wa \dots (式)$ 中心メッシュから8方位の断面について同様の処理を行い、8方位のPC値の平均を各メッシュに与える。ここではL=1000mとした。バッファ内の平均値からAHP得点を算出する。</p>
一定の起伏	起伏量	<p>あるメッシュを中心に一辺の距離Lの窓領域を設定し、領域内の最高点と最低点の標高差を中心メッシュに与える。ここでは距離L=1000mとした。バッファ内の平均値からAHP得点を算出する。</p> <p>P1の起伏量 = Pmax - Pmin</p>

(静岡県安倍川上流域における先第三系以前地区の崩壊性地すべりを対象に検討した例)

指標	ウェイト	配点			バッファ移動分析時条件	
		1.0倍	0.5倍	0.1倍	検索半径	R=500m
断面凸度	50点	1.10以上	1.09~1.10	1.09以下	スキップ距離	L=200m
起伏量	50点	650m以上	550~650m	550m以下		

値を求める。中心メッシュはスキップ距離 L 毎に移動させる。(200m メッシュデータになる)

④-2 200m メッシュの「断面凸度」、「起伏量」の値を用いて要領案のウェイト、配点、閾値に基づき AHP 得点を算出する。

④-3 「断面凸度」、「起伏量」のそれぞれの AHP 得点を合計する。

なお、AHP 得点の算出にあたり使用したデータ、ソフトウェアの主な諸元を表-3 に示す。

表-3 AHP 得点算出で使用した主なデータ等の諸元

項目	諸元
標高 DEM データ	国土地理院「基盤地図情報サイト」
DEM データ座標系変換ソフトウェア	基盤地図情報ビューア ver.4.00/国土交通省、 国土地理院
GIS ソフトウェア	ArcGIS ver.10.2.2/ESRI
指標値計算プログラム (断面凸度、起伏量)	
AHP 得点計算プログラム	GIS_support_2013.exe

4. 適用結果と運用性能向上に向けた検討

4-1 要領案に基づく試行検討

前項で記載した手法で試行検討した結果のうち善徳周辺地区について、地形図、起伏量 (バッファ移動分析後)、断面凸度 (バッファ移動分析後)、AHP 得点を図-3 に示す。

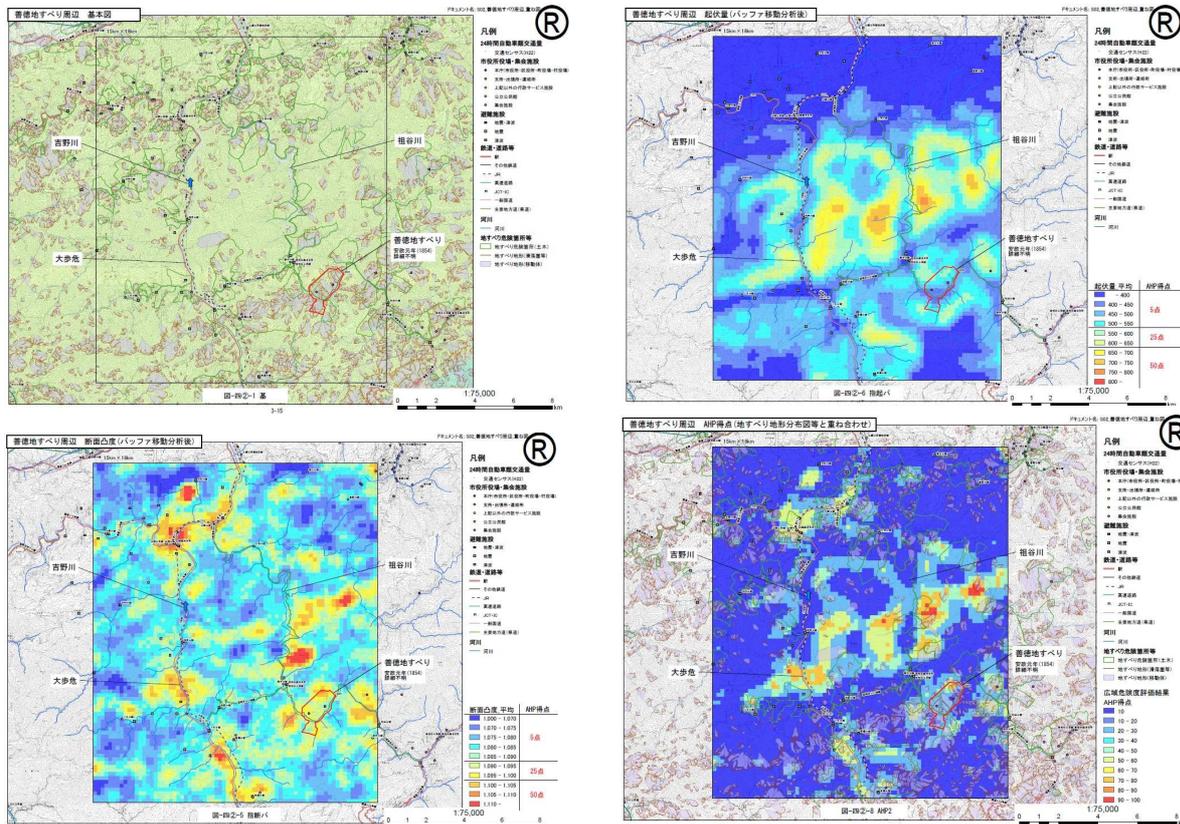


図-3 解析結果 (左上：基本図、右上：起伏量、左下：断面凸度、右下：AHP 得点)

起伏量が低い検討対象エリアでは、要領案の閾値で危険度を表現するとコントラストが不明瞭な結果が得られた。そのため、検討対象エリアにおける起伏量の頻度分布をもとに閾値の設定を検討し、当該区域内の相対的な危険度の明瞭化を試みた（図-4,5）。当該区域内における相対的な危険度を表すには、このような手法も有効であると考えられる。

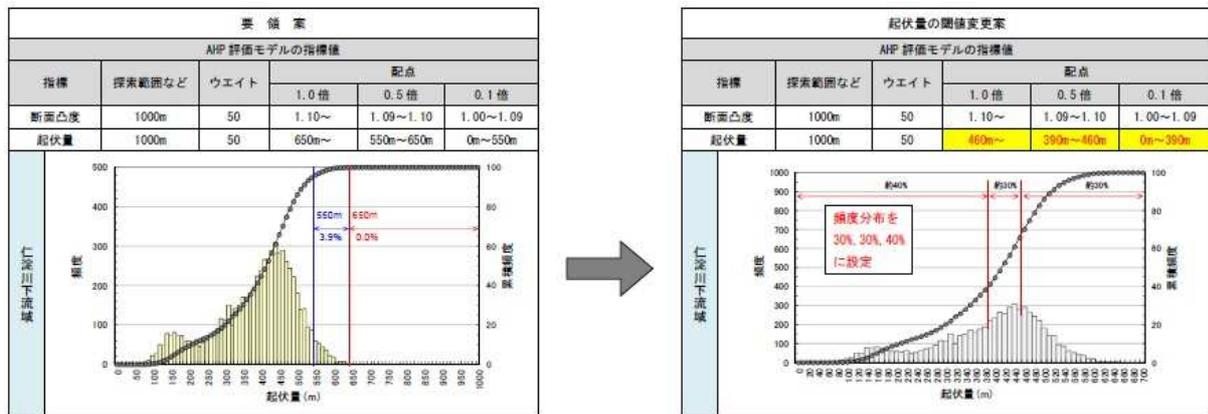


図-4 起伏量の閾値の変更（仁淀川下流域地区）

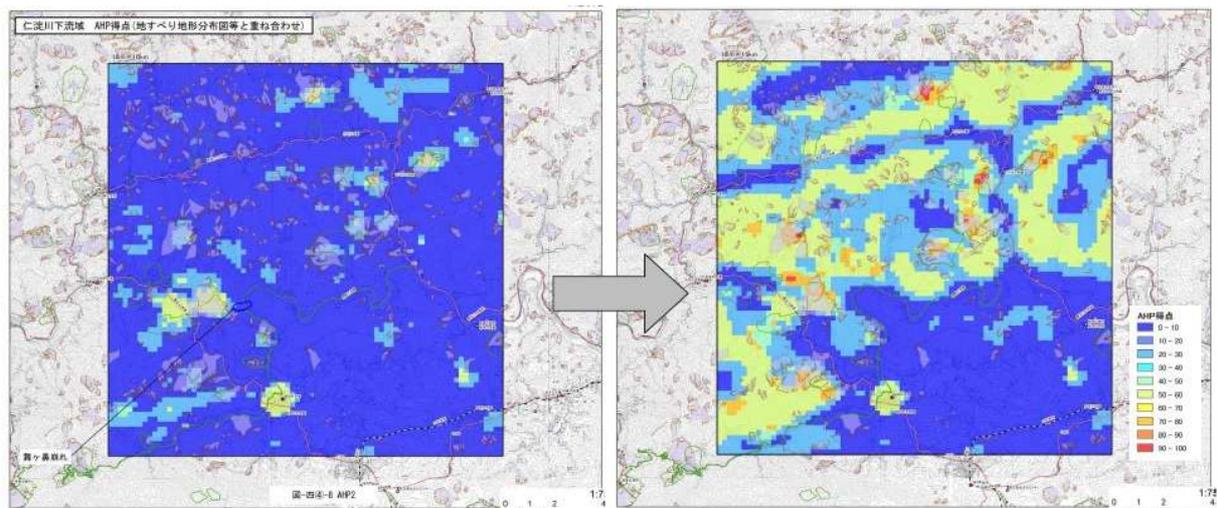


図-5 起伏量の閾値の変更後の AHP 得点の変化（仁淀川下流域地区）

4-2 力学的モデル解析と AHP 法の比較

AHP 法に基づく指標の算出結果を検証するため、検証するモデル地区をさらに選定し、力学的モデルを構築し、想定される地震動による FEM 解析を行った。

モデル地区としては、各種地質関係データが豊富な「善徳周辺地区」と過去の地震時に大規模な斜面崩壊が生じた「仁淀川下流域」とした。なお、この2地区の比較により、起伏量の閾値についても比較検討が可能と推察される。

力学的モデルの主な諸元については、表-4 に示す。

表-4 力学的モデルの主な諸元

項目	諸元
DEM データ	基盤地図情報 10m メッシュ (標高)
メッシュサイズ	50m
地震動	中央防災会議「東南海・南海地震等に関する専門調査会」南海ケース
解析モデル底面	EL20m
層厚	第1層 GL-5 第2層 GL-15m 第3層 GL-30m 第4層 GL-75sm 以上
地盤物性値	四国地整内のトンネル調査資料、日本道路公団、地盤工学会等の文献を参考に一般値等から設定 (下表)

FEM 解析の結果の内、最大水平加速度について2地区の結果を図-6 に示す。概ね次のような事が判明した。

- ① 最大水平加速度は尾根部、遷急線、凸地形で周辺よりも大きくなる傾向にある
- ② 崩落跡地形では、最大水平加速度の増幅は見られず、周辺の地すべり地形では増幅が見られる。

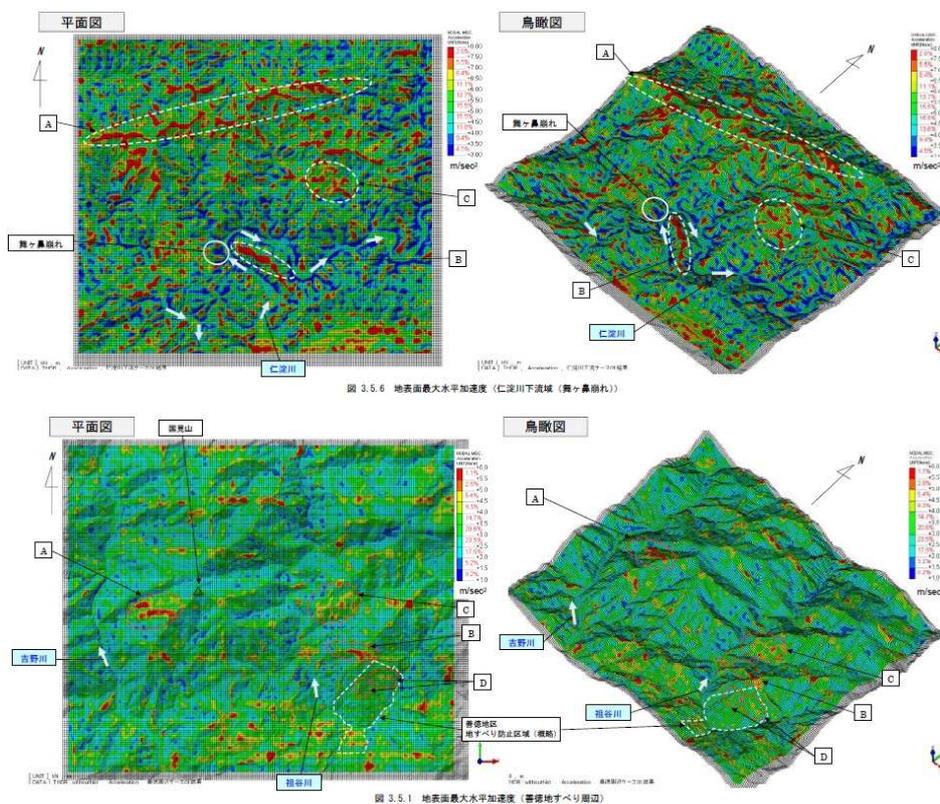


図-6 FEM 解析による最大せん断応力の結果
(上：善徳周辺地区、下：仁淀川下流地区)

また、FEM 解析結果と AHP 指標を比較したところ次のような結果が得られた。

- ① FEM 解析の最大水平加速度と AHP 指標の断面凸度（バッファ移動分析前）は概ね正の相関がある（図-7）。ただし、バッファ移動分析後の相関は不明瞭となった。
- ② FEM 解析の最大せん断応力と起伏量（バッファ移動分析後）は概ね正の相関がある（図-8）。

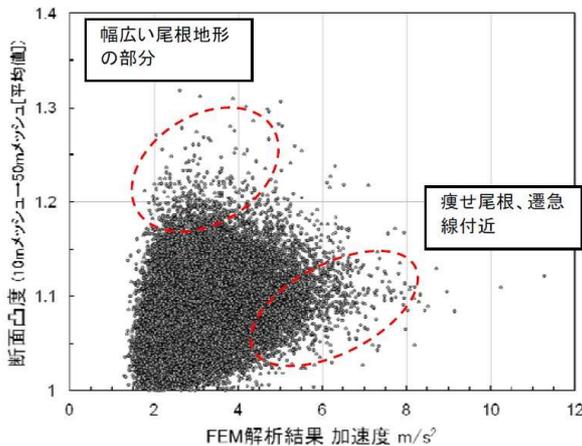


図-7 最大水平加速度と断面凸度（バッファ移動解析前）との関係

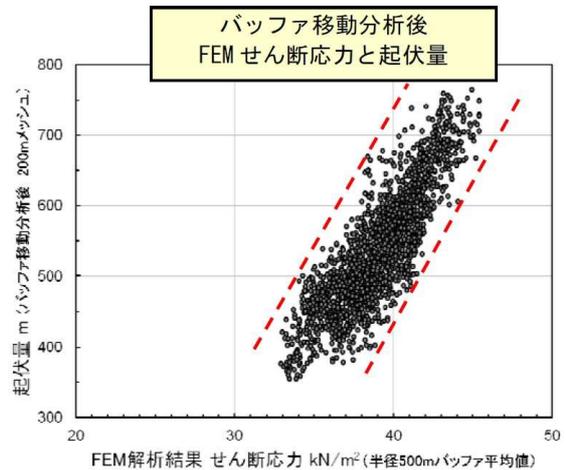


図-8 最大せん断応力と起伏量（バッファ移動解析後）との関係

なお、FEM 解析の最大せん断応力と AHP 得点とを比較してみると、善徳周辺地区では相関性が見られるが、仁淀川下流域では不明瞭であり、モデル地区間で異なる結果が得られた。

4-3 地すべり地形分布図を使った閾値の設定の試行

地すべり地形の中で、滑落崖と移動体との水平距離（LA）が大きい場合、大規模な変動の痕跡である可能性が高い。また、移動体の頂部と末端部を結んだ勾配（ ϕb ）が急な場合、クリープ的な変形箇所である可能性が高く、他よりかなり緩い場合は周囲よりも大きく動いた可能性が高い（図-9）。

そのため、LA、 ϕb について、4-2 のモデル地域の内、さらに細分した「代表範囲」を設定し、その中の地すべり地形について起伏量との関係を調べた。結果を図-10 に示す。

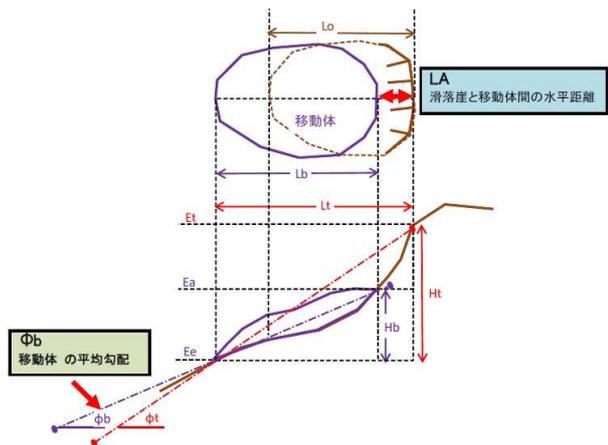


図-9 着目した地すべり地形の部位

善徳周辺地区では、その分布から試行的に $\phi b < 18^\circ$ 、 $34^\circ < \phi b$ の地すべり地形、 $150m < LA$ の地すべり地形、 $LA < 150m$ で起伏量 $450m$ 以上の地すべり地形を「標準的ではない地すべり地形」として抽出した。抽出された地すべり地形の数は、代表範囲内の地すべり地形

377箇所中64箇所であり、このうち30箇所はAHP得点が最低点に相当する。この箇所数は全体の約1割以下となっており、当該モデル地区でのAHP得点の閾値は妥当であったと考えられる。

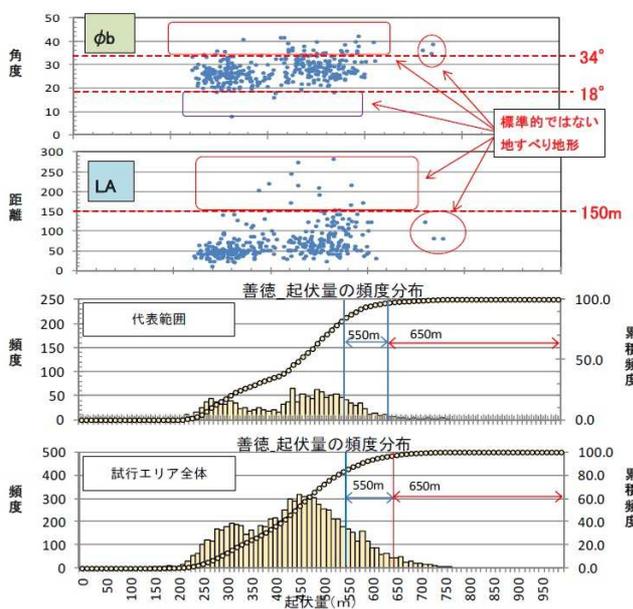


図-10 起伏量と地すべり地形 (ϕb 、LA) の分布図 (善徳周辺地区)

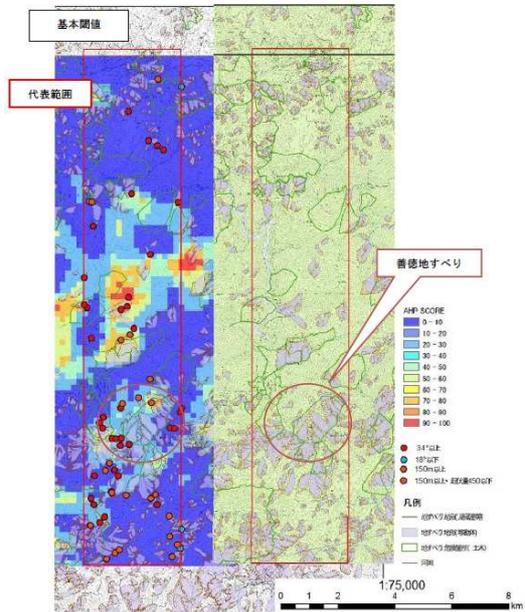


図-11 代表範囲における標準ではない地すべりの分布とAHP得点 (善徳周辺地区)

同様に、起伏量の比較的少ない仁淀川下流域で分析した。

なお、仁淀川下流域は起伏量の最大値が650m以下であるため、要領案の閾値(基本閾値)で評価するとAHP得点の最大値が75点以上になることはない。そのため、起伏量の頻度分布から40%、30%、30%に分割されるよう閾値を調整した(按分閾値)。その結果を図-12に示す。

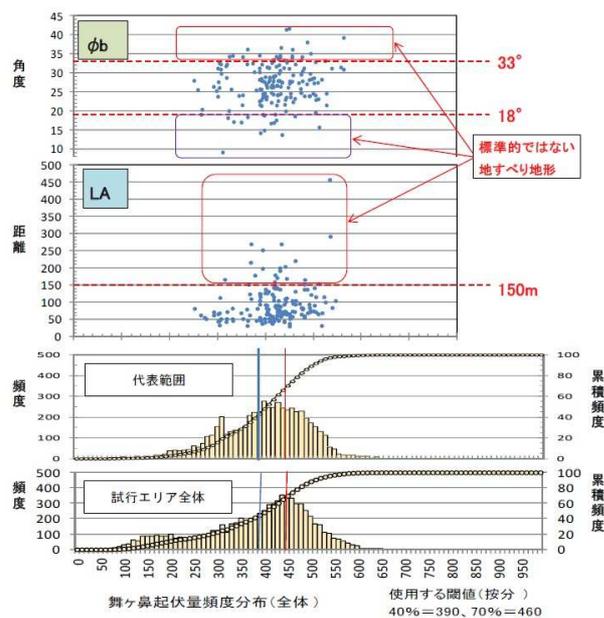


図-12 起伏量と地すべり地形 (ϕb 、LA) の分布図 (仁淀川下流地区)

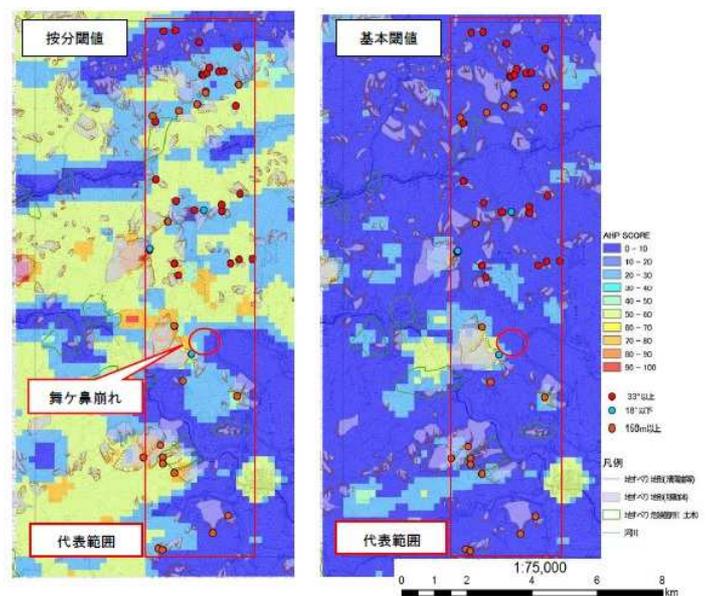


図-13 代表範囲における標準ではない地すべりの分布とAHP得点 (仁淀川下流地区)

代表範囲を同様に設定し、範囲内の地すべり地形の LA、 ϕb を分析し、頻度分布の集合度合いから、 $\phi b < 18^\circ$ $33^\circ < \phi b$ の地すべり地形、 $150m < LA$ の地すべり地形標準的ではない地すべり地形」として抽出した。抽出された地すべり地形の数は 172 箇所であり、按分閾値による AHP 得点が最低点に相当するのは 5 箇所となった。

基本閾値の得点分布と重ね併せると標準的ではない地すべり地形との整合は確認できないことから按分閾値を用いることが妥当であると考えられる。

4-4 航空レーザープロファイラーの地形データの活用

古第三系以前の地質帯における崩壊性地すべりの前兆現象を示す代表的な微地形として、溝状凹地や二重山稜からなる山体重力変形地形が上げられる。

そのため、レーザープロファイラー（以下、LP）による高精度地形データを用いて、「航空レーザ測量データを用いた地すべり地形判読用地図の作成と判読に関する手引き（案）（土木研究所）」を参考に、主に遷急線、遷緩線、ガリー、凹地等の微地形を判読した。

「室戸東部エリア」の「池山崩れ」の周辺を判読したところ、池山崩れの周辺の尾根沿いに緩斜面が広がっていることが判読できた。

また、四国内の AHP 得点について、地質毎に分類して集計すると、起伏量の分布を 40%、30%、30%に区分した結果、概ね 300~400m と 400~500m の間に区分線が入ることが判明した。そこで、現時点では、AHP 得点を与える際の起伏量の閾値として、300m と 400m とすることとした。

この閾値で室戸東部エリアの AHP 得点を算出した結果と地形判読結果を図-14 に示す。

池山崩れの周辺で AHP 得点が高く評価されていることがわかり、LP 判読による表面地形からの危険箇所抽出と相関のとれた結果となった。

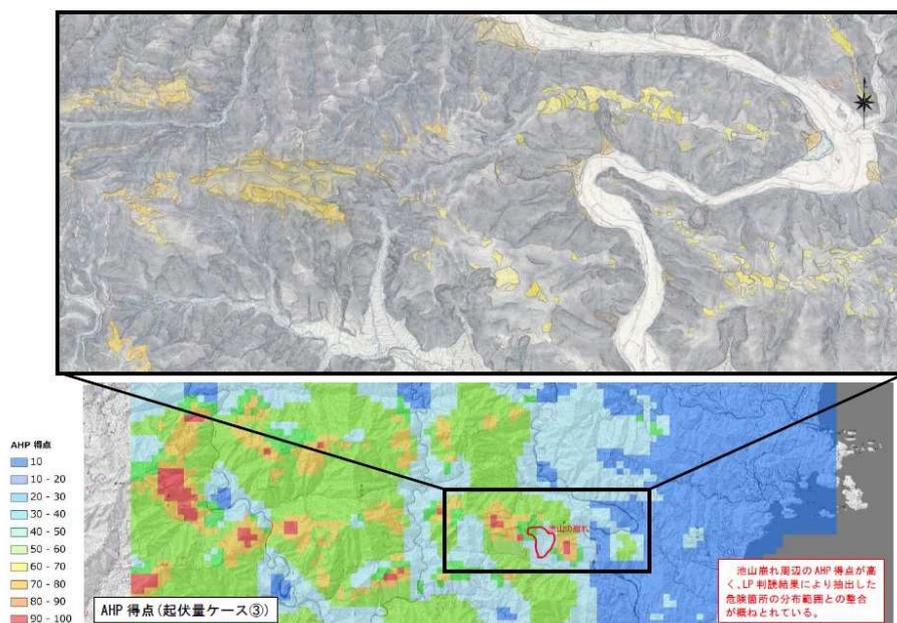


図-14 地すべり地形判読結果と AHP 得点
(室戸東部エリア、池山崩れ周辺)

4-5 広域 FEM 解析の感度分析

同様に「室戸東部エリア」の池山崩れを内包する地域において、地盤の物性値に幅を持たせるとともに、深度分布をいくつか変動させて広域 FEM 解析を行い、感度分析を行った。

物性値の変動ケースは表-5 のとおりせん断強度、地盤剛性に着目して 8 ケースの解析を行った。

表-5 感度分析のケースと変動物性値一覧

着目点	ケース名	ケースの設定内容	層番号 第1層=地盤	せん断強度		地盤剛性	
				粘着力	内部摩擦角	S波速度	ヤング率E
				c (kN/m ²)	φ (°)	Vs (m/sec)	E (kN/m ²)
基本	ケース1	基本	第2層	300	30	800	2083000
			第3層	1000	35	1100	7383000
せん断強度	ケース2	「地すべり地」 第2層のせん断強度を低減	第2層	100	30	800	2083000
			第3層	1000	35	1100	7383000
	ケース3	「地すべり地」 第2層、第3層のせん断強度を低減	第2層	100	30	800	2083000
			第3層	300	30	1100	7383000
地盤剛性	ケース4	「地すべり地」 第2層の地盤剛性を低減	第2層	300	30	350	709000
			第3層	1000	35	1100	7383000
	ケース5	「地すべり地」 第2層、第3層の地盤剛性を低減	第2層	300	30	350	709000
			第3層	1000	35	800	2197000
性にせん断強度	ケース6	「地すべり地」 第2層のせん断強度、剛性を低減	第2層	100	30	350	709000
			第3層	1000	35	1100	7383000
	ケース7	「地すべり地」 第2層、第3層のせん断強度、剛性を低減	第2層	100	30	350	709000
			第3層	300	30	800	2197000
最低減	ケース8	「地すべり地」および「山地」 第2層、第3層のせん断強度、剛性を低減	第2層	100	30	350	709000
			第3層	300	30	800	2197000

最も特徴的な結果となったケース 7 及び基本物性値による解析結果を図-15 に示す。

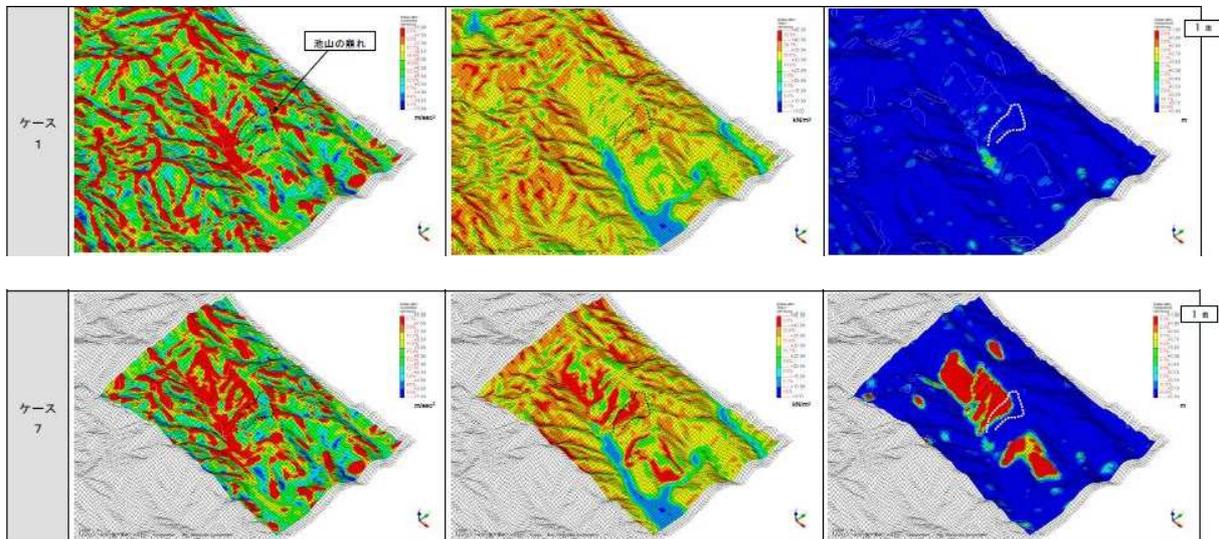


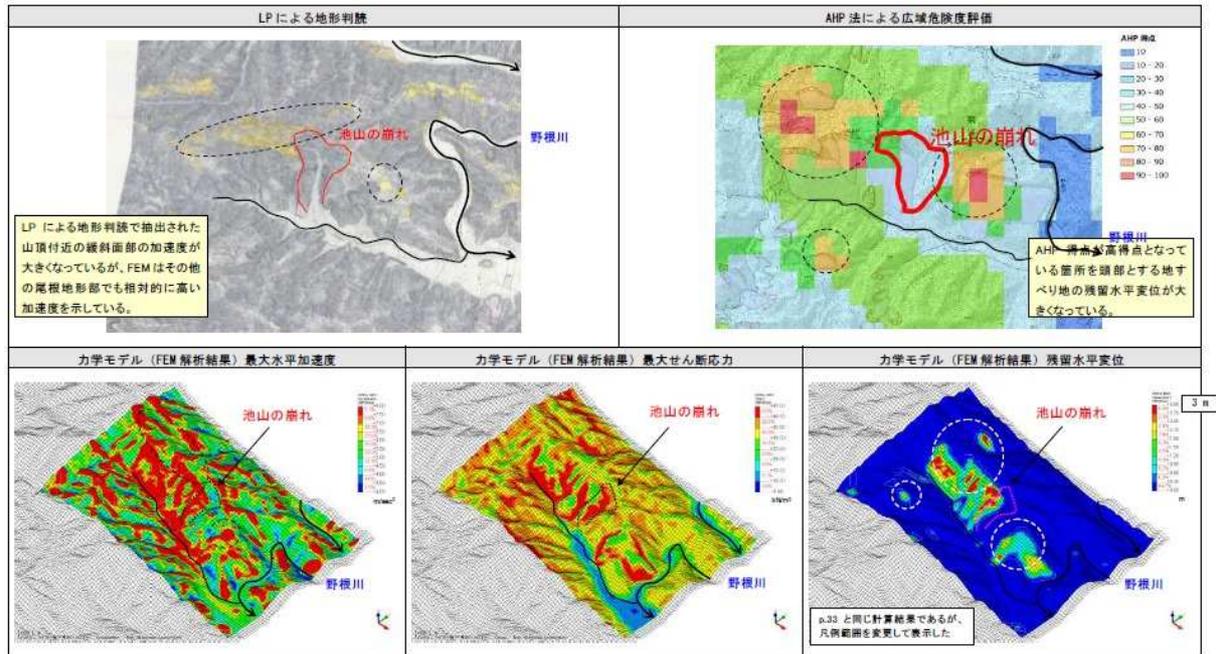
図-15 FEM 感度分析の結果（上：ケース 1、下ケース 2、左：最大水平応力、中央：最大せん断力、右：残留水平変位、室戸東部エリア、池山崩れ周辺、）

これらの解析結果から、地すべり地内のせん断強度、地盤剛性を低減させることで、最大水平加速度は地すべり地内で増加し、最大せん断応力は地すべり地内の凹地形部及び地すべり地と山地との境界部分の沢筋や末端部で増加した。また、残留変位は地すべり地内で増加

傾向になるが、特に凸地形部で顕著な傾向を示した。

LP による地すべり地形判読、AHP 得点（閾値修正後）、広域 FEM による解析結果（ケース 7、残留変位は深度 3m を表示）を比較する（図-16）。

AHP 得点が高くなっている箇所を頭部とする地すべり地の残留水平変位が大きくなっていることがわかる。



5. 考察

これまで、AHP 法を用いた地震時における斜面変動の広域的な適用に当たって、教師データの少ない地域における閾値の検討を先ずは行った。その結果、起伏量が比較的大きい箇所では、AHP 得点の差が出やすいが、起伏量が小さい箇所では明瞭な違いが出ないことから、閾値を修正することで明瞭にすることができた。ただし、閾値の修正をした箇所と離れた箇所との相対的な比較はできなくなり、広域的な比較評価においては課題が残っている。

一方で、地すべり地形を LP データ等から判読することで、表面的な地形の危険性を評価する一助になることは明確であり、また、力学的モデルに適切な物性値を適用することで、内部構造的な観点からの弱部も評価できることが明らかになった。

さらに、これらの手法を用いた解析結果を相互に比較検討することで、一定程度の範囲について AHP 法を用いた危険度評価の妥当性も示唆できたと考える。

6. まとめ

前述のとおり、AHP 法は単独で用いることも広域的な危険度評価にある程度の有効性はあるが、地すべり地形判読や広域 FEM 解析もそれぞれに有効性と適用に当たっての課題があるため、相互に補完して危険度を判断することが重要である。

検討対象をマイクロな観点にした場合には、現地踏査やボーリング等の各種データの入手は

有効であると考え、マクロな観点で危険度評価をする場合における解決すべき課題はまだ多いため、引き続き、当該手法の適用について検討してまいりたい。

【参考文献】

話題提供

現場地震観測に基づく 斜面における地震動の特徴の理解

土井 一生 (京都大学防災研究所)

本発表における研究内容は

- 1) 盛土：釜井俊孝先生（京大防災研）
- 2) 重力変形斜面：釜井俊孝先生・千木良雅弘先生・王功輝先生（京大防災研）・小川内良人氏・川島正照氏（国土防災）・佐藤朗氏（ジオテクサービス）・今森直紀氏（紀伊山地砂防）
- 3) 海岸地すべり：松浦純生先生・大澤光氏（京大防災研）・柴崎達也氏・土佐信一氏・喜田豊氏（国土防災）

との共同研究、または、ご協力を得ておこなっています。

また、これらの研究は、文部科学省の建議「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の課題「強震動によって発生する地すべり現象の発生ポテンシャル評価と事前予測手法の高度化（代表：千木良雅弘教授）」の一環により進められています。

国土地理院による地図データ、気象庁による気象庁一元化震源データおよび、気象観測データを使用しました。ここに記して感謝いたします。

地震時の斜面災害を取り巻く現況

近年、強震動により多数の斜面が崩壊
甚大な被害が生じている

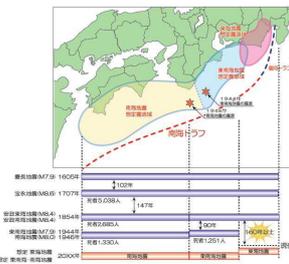


釜井 (2016)



国土交通省ホームページ

南海トラフ巨大地震の発生
内陸地震活動の活発化



<http://rokaru.jp/wp-content/uploads/2016/05/4f1336e85690e0bcae667e6c7463cf6.jpg>

地震時の斜面の挙動

- 斜面における地震観測事例の少なさ



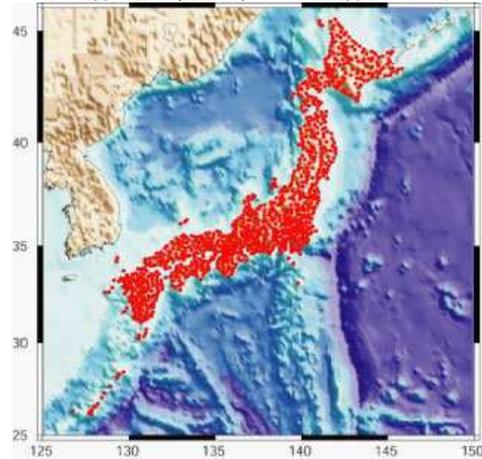
どんなふうに揺れる？

地下水にどういふ影響がある？

地すべり・崩壊はどのような地震動でどのようにして起こる？

<http://www-seis1.kugi.kyoto-u.ac.jp/da/wave/k-net.jpg>

強震観測網 (K-NET) の地震観測点分布



安定解析の入力としての地震動

- もっともシンプルな入力は

瞬間値

斜面傾斜（または水平）方向の最大加速度（PGA）

- 上下動は？
- 揺れ方は？
 - 周期、周波数（素早い、ゆったり）
 - 継続時間

文科省：建議課題等による京大防災研の地震観測・調査概略



1. 盛土における地震動

- 東京都目黒区における観測 (釜井、2011)

盛土内： 地震計
間隙水圧計

地山： 地震計

地震計： 200 Hz サンプリング

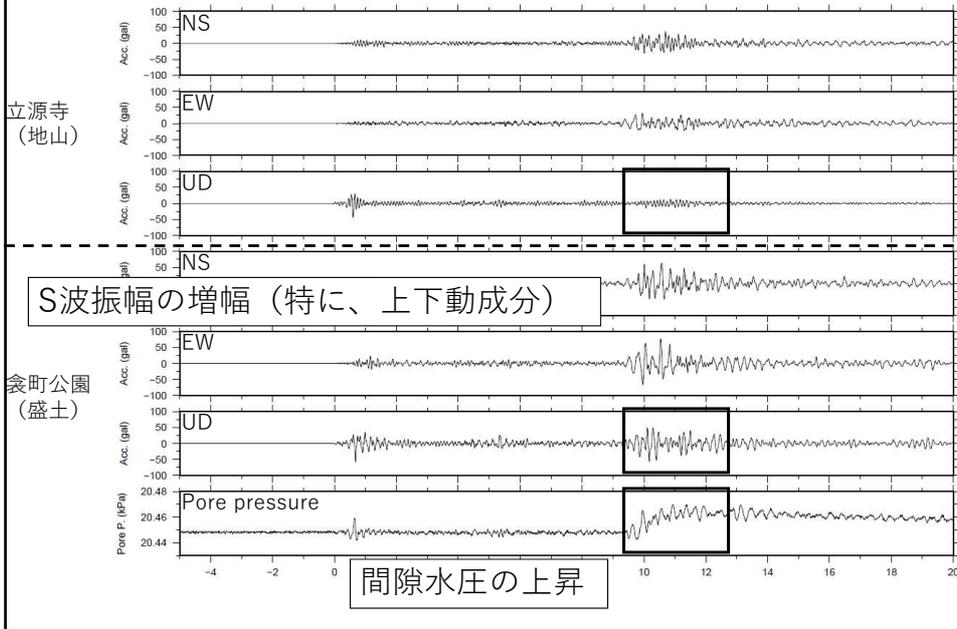
高感度速度計 KVS300 (固有周波数： 2 Hz)

間隙水圧計： 100 Hz サンプリング

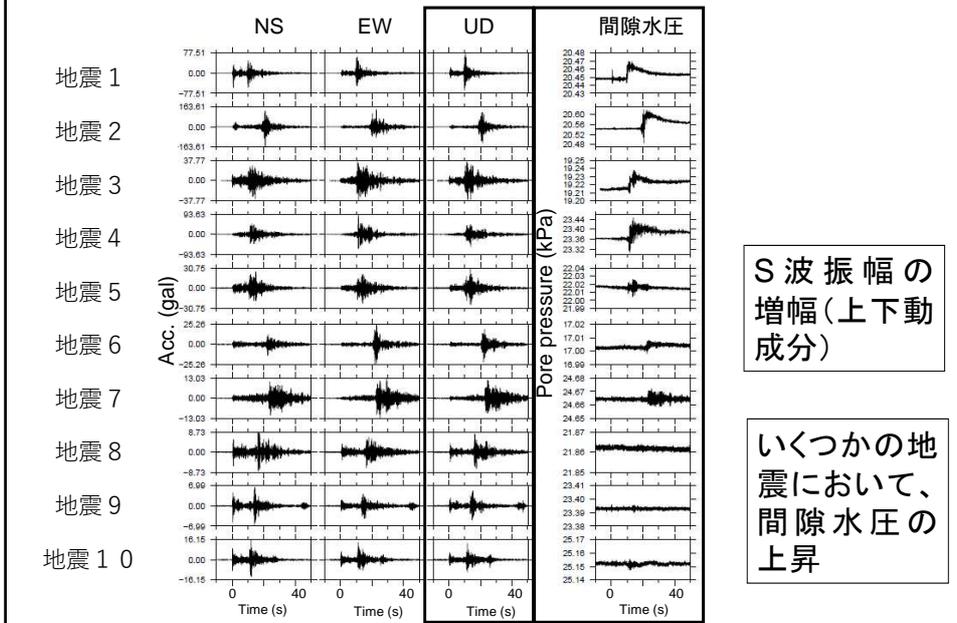
(盛土底面付近；深さ 4.8 m)

2013年10月より連続集録

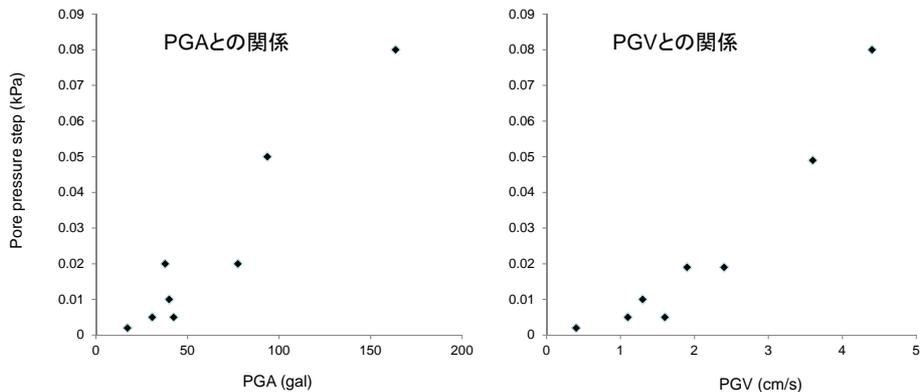
2013.11.29 (震源距離 69 km、深さ 42 km)



観測された地震動・間隙水圧記録



間隙水圧上昇量とPGA・PGV



PGA, PGVと正の相関を持つ
事例数は少ないが、PGVのほうがより高相関？

2. 重力変形斜面における地震動

- 赤谷 落ち残りブロック内に地震計 1 点
- 栃尾 新しく開発した加速度計・傾斜計一体型
プローブをボーリング孔内に 2 点
地表に地震計 1 点

地震計：高感度速度計 KVS300（固有周波数：2 Hz）

加速度計・傾斜計：低温度依存MEMS

200 Hz サンプリング

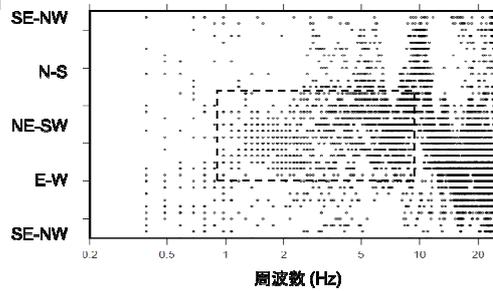
2014年12月（赤谷）、2016年3月（栃尾）より連続集録

赤谷斜面の揺れ方

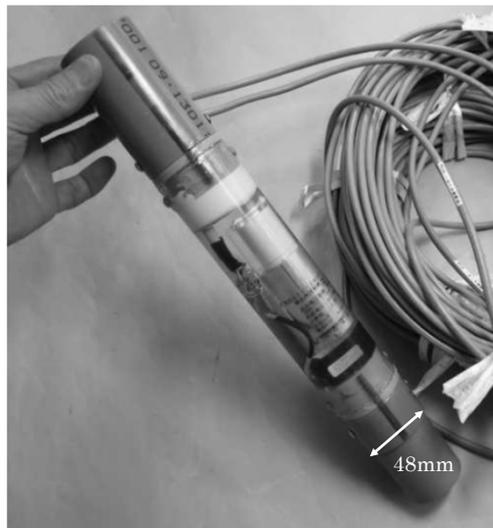


地震波の水平動／鉛直動が最大値を取る方向

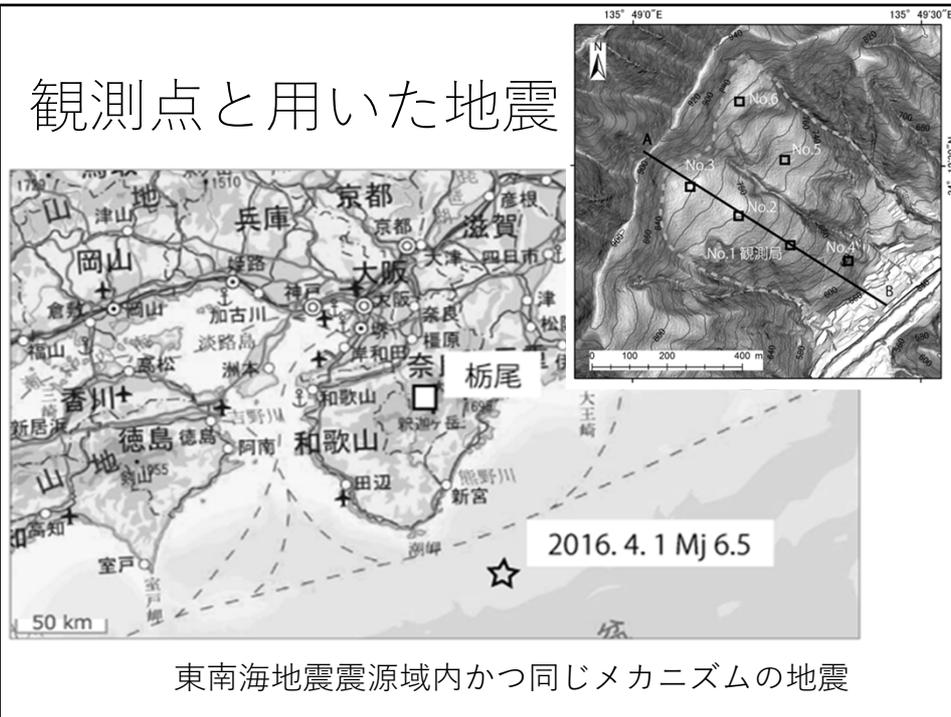
深層崩壊によって解放されている
方向に揺れやすい



開発した加速度計・傾斜計 一体型プローブ

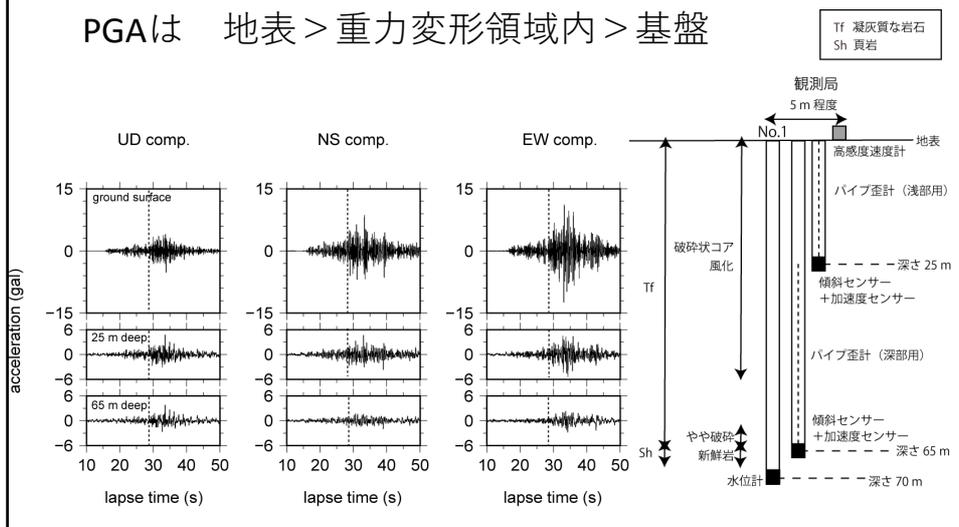


観測点と用いた地震

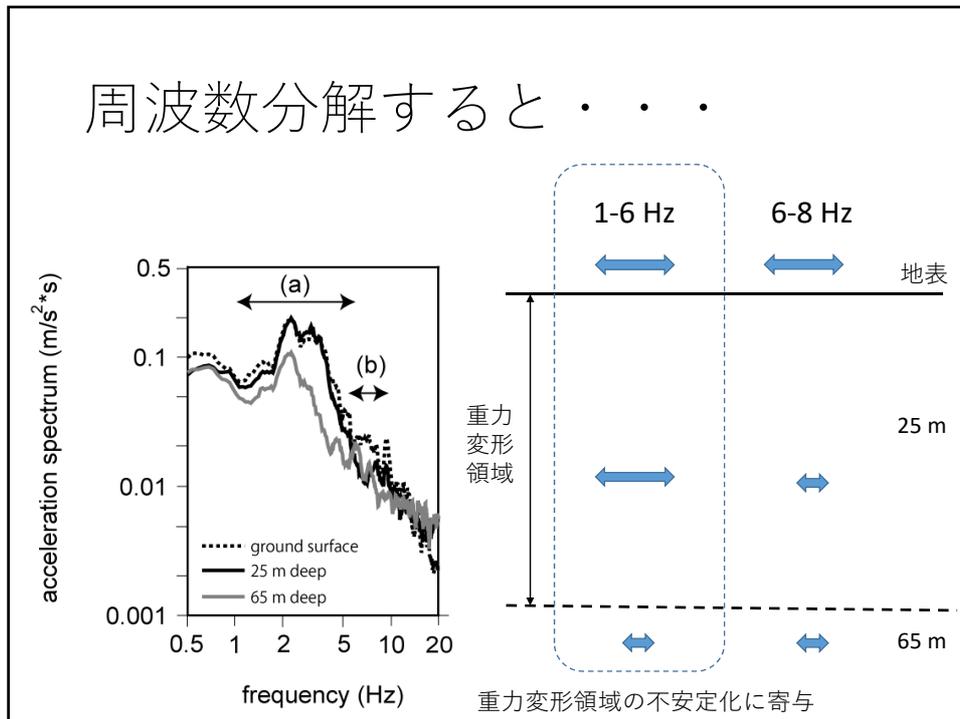


記録された地震動

PGAは 地表 > 重力変形領域内 > 基盤



周波数分解すると・・・



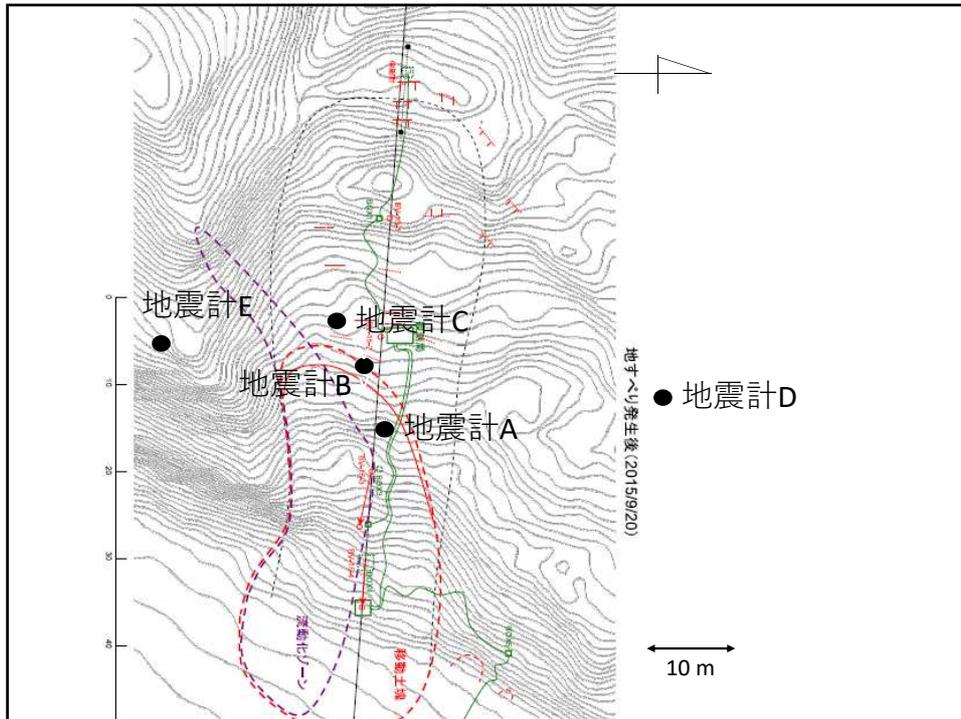
3. 海岸地すべりに おける地震動

- 北海道厚岸町における観測（松浦ほか、2016）
気象観測、地中・地上伸縮計、間隙水圧計
- 地震計 5 点
地すべり地内 3 点、地外 2 点

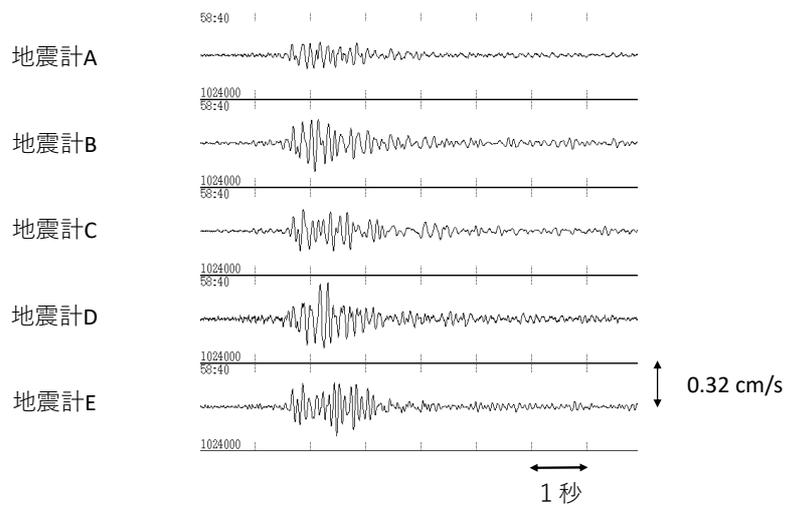
地震計： 200 Hz サンプリング

高感度速度計 KVS300（固有周波数： 2 Hz）

2014年9月より随時連続集録

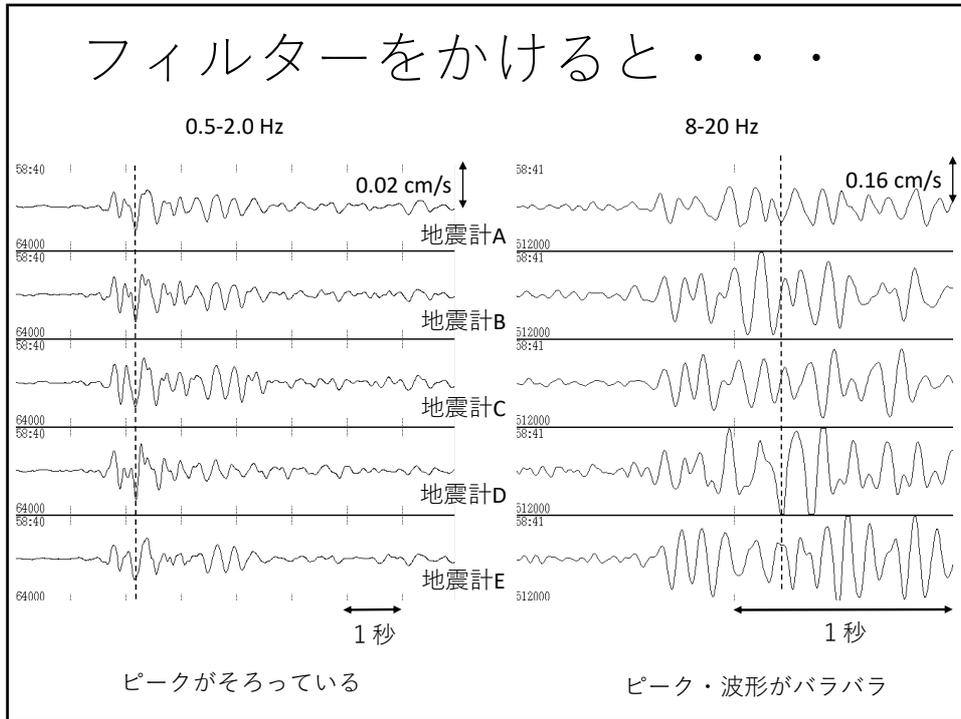


記録された地震動のS波部分 (東西動)



2015/10/16 23:58 の地震

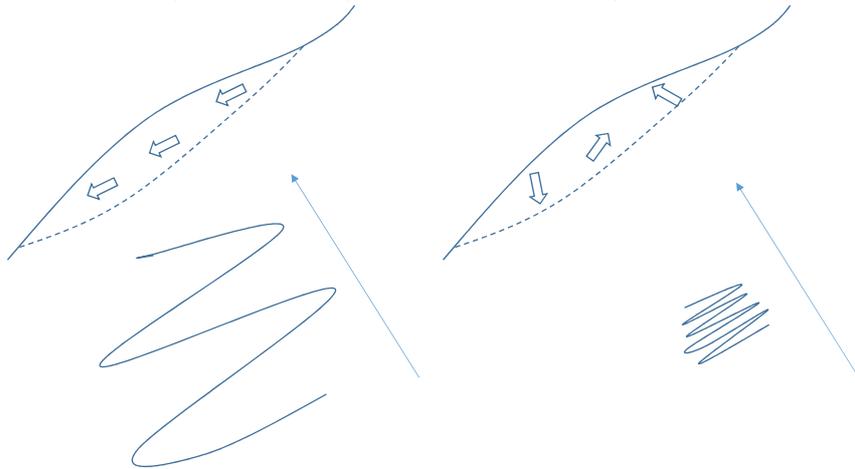
フィルターをかけると・・・



地すべりブロックでの地震動の特徴

0.5-2.0 Hz (低周波・長波長)

8-20 Hz (高周波・短波長)



全体を動かす運動

局所的な破壊を作る？運動

まとめと今後

- 現場斜面において地震動を実測することによって、斜面内部での地震動の特徴が明らかになりつつある。
- とりわけ、地震動の振る舞いを周波数ごとに分離して考慮することが重要と考えられる。
- 強震時の水圧応答も含めた斜面の非線形プロセスを明らかにするためにも、観測事例を増やす必要がある。
- 斜面における地震動を含めた他項目観測にご理解いただけると幸いである。

地震地すべりシミュレーションの基礎及び応用面からの取り組みと課題

Technical transfer for countermeasures against landslides in the Abay gorge in Ethiopia

榎田充哉* (国土防災技術株式会社)

Mitsuya ENOKIDA (Japan Conservation Engineers & Co., Ltd)

キーワード：動的土質試験，地震動観測，地震応答解析，対策工設計

Keywords : Dynamic soil test, Observations of earthquakes, Earthquake response analysis, and Design of countermeasures

1. はじめに

有限要素法 (FEM) などの解析的手法を用いた地震地すべりの解析は発生場所の予測や発生機構の解明、斜面の危険度評価、地震時の斜面对策工の効果推定などでの用途が期待されている。解析手法も FEM や個別要素法 (DEM)、不連続変形法 (DDA)、ニューマーク法などいろいろと開発されており、それらの解析コードはほとんどが市販又は公開されている。コンピュータの高性能化と低価格化もあり、各種解析コードを気楽に使う環境が整ってきた。

地震による地すべりは発生しないという定説を覆した 2004 年の中越地震では多くの地震地すべりが発生したが、地震直後から地震地すべりの各種シミュレーションがいろいろな機関や研究者によって盛んに実施されるようになった。その後の 2008 年に発生した岩手・宮城内陸地震の後の数年間までが地震地すべりのシミュレーションの最盛期であったと考えている。津波被害が甚大であった 2011 年の東北地方太平洋沖地震でもいくつかの地震地すべりは発生したが、シミュレーションによる検証等はあまり実施されていないと感じている。2016 年に発生した熊本地震による斜面災害についてもシミュレーションによる検証等はまだまだ実施されていない。

当社でも 2004 年から 2012 年頃までは頻繁に地震地すべりのシミュレーションを実施したが、最近の数年間は新しい地震地すべりのシミュレーションを実施していない。

一方、すべり面粘土の動的特性に関する基礎的な研究は 2009 年頃から本格的に取り組んでおり、現在も継続している。また、地すべり地での地震動の伝搬の実態を把握するための現地計測については 2007 年から 2011 年まで 5 年間実施したが、その後、現場提供者側の予算継続が難しくなり中止している。

地震地すべりのシミュレーションをより実用的にするためにはこれらの基礎的な研究は不可欠だと考えている。ここでは基礎分野と応用分野でのこれまでの取り組みと課題について話題提供する。

2. 基礎的な取り組みと課題

2.1 すべり面粘土の動的特性の把握

地盤の地震応答解析をする場合、地震時の地盤の動的変形特性を調べるために振動三軸試験がよく用いられる。しかし、振動三軸試験では再滑動型地すべりのすべり面粘土の動的特性を調べることは難しい。

当社では既存のすべり面の不攪乱の粘土試料を用いた繰り返し一面せん断試験 (すべり面せん断試験) に力を入れてきた。図-1 は 2001 年頃に開発したすべり面せん断試験機である。すべり面粘土の不攪乱試料の繰り返しせん断試験が実施できるということで画期的であったが、動的なせん断試験ができなかった。



図-1 すべり面せん断試験機 (繰り返し一面せん断)

図-2 は 2009 年頃に開発した動的な一面せん断試験機である、動的なせん断荷重の制御機能を付加したすべり面せん断試験機である。これにより不攪乱のすべり面粘土の動的なせん断特性を調べることができるようになったが、排水条件の制御ができないという欠点があった。

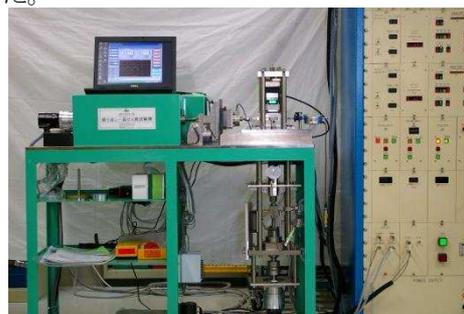


図-2 開発した動的な一面せん断試験機

図-3は動的一面せん断試験機の排水条件を制御するため、振動三軸試験機の圧力室内にすべり面せん断試験のせん断箱の機構を組み込んだ動的な非排水一面せん断試験機である(図-3)。写真-1は開発した一面せん断機構部分の写真である。

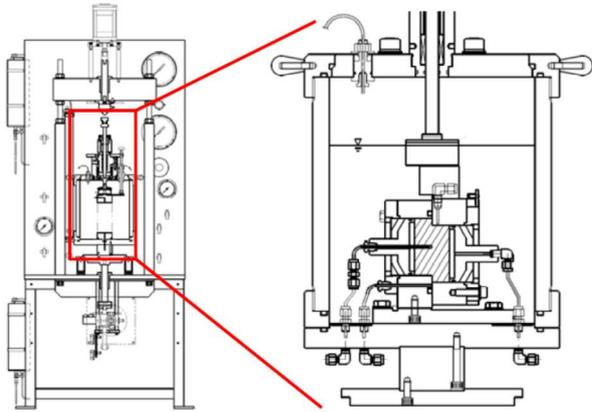


図-3 振動三軸試験機を改良した非排水一面せん断試験機

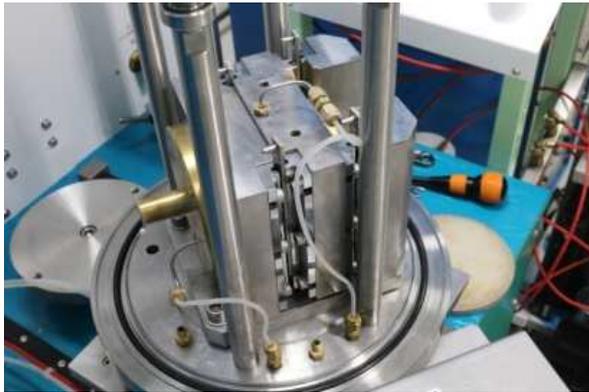


写真-1 開発した圧力室部分

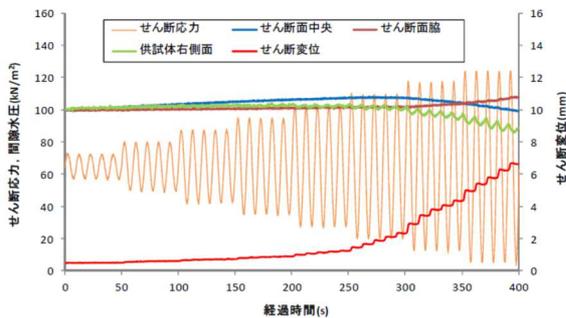


図-4 定圧非排水動的せん断試験結果の例(初期せん断応力 65kPa、周波数 0.1Hz)(長谷川ほか,2016)

図-4 にこの動的非排水一面せん断試験機を使用した定圧非排水での試験結果の事例を示す。今後は適切な試験方法を模索しながら、いろいろな地質地帯のす

べり面粘土の動的特性を調べて行きたいと考えている。

2.2 地すべり地の地中の地震動観測

気象庁の地震観測網は市町村など、観測点の住所表示が可能な地点に設置されており、防災科学技術研究所の k-net や KIK-net は緯度・経度で設置位置が表現されているが人の生活圏やその近傍に設置されている。地すべりが多発する中山間部での地震観測点は少ない。

中山間地にある地すべり地内での地震動の伝搬の実態と間隙水圧の地震時挙動を把握するため、2007年に徳島県の蔭名地すべり地に動的観測機器を配置し、約5年間の計測を行った。

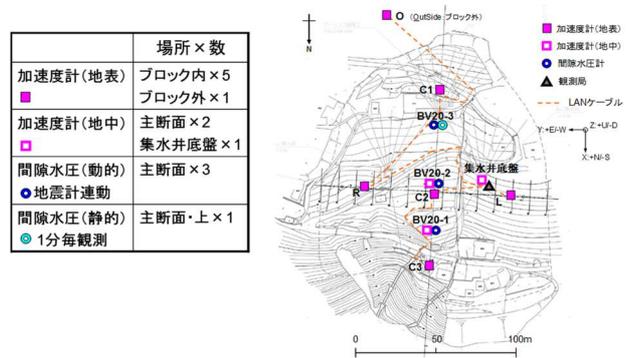


図-5 蔭名地区の動的観測機器の配置平面図(土佐ほか,2009)

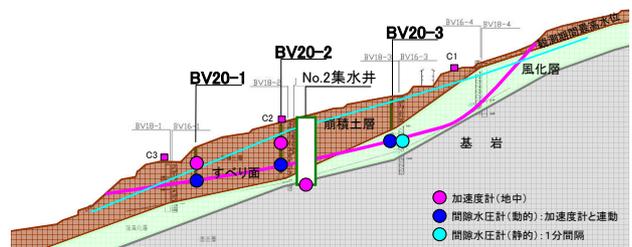


図-6 蔭名地区の動的観測機器の配置断面図(土佐ほか,2009)

図-5は蔭名地区の観測機器の配置平面図である。図-6が主測線上の断面で地中の地震動および間隙水圧計の設置位置を示している。地表の他に各ボーリング孔の中間震度に加速時計を設置し、各孔のすべり面付近には加速時計と連動した動的間隙水圧計を設置した。動的間隙水圧計は周りに砂を充填し、その周りと上部をベントナイトで充填した埋設型間隙水圧計である。これらの動的観測機器は、地表の加速時計の観測値をトリガーとして、加速度が閾値を超えた場合にその前後のデータを記録するシステムとなっている。BV20-3には比較のため1分間隔で観測する通常の埋設型間隙水圧計も併設していた。図-7にそれらの観

測結果の一例を示す。これらは平面図的には同一地点のデータであるが、地表と地中で加速度の時系列変化が異なり、間隙水圧も地震動に応じて変動している。

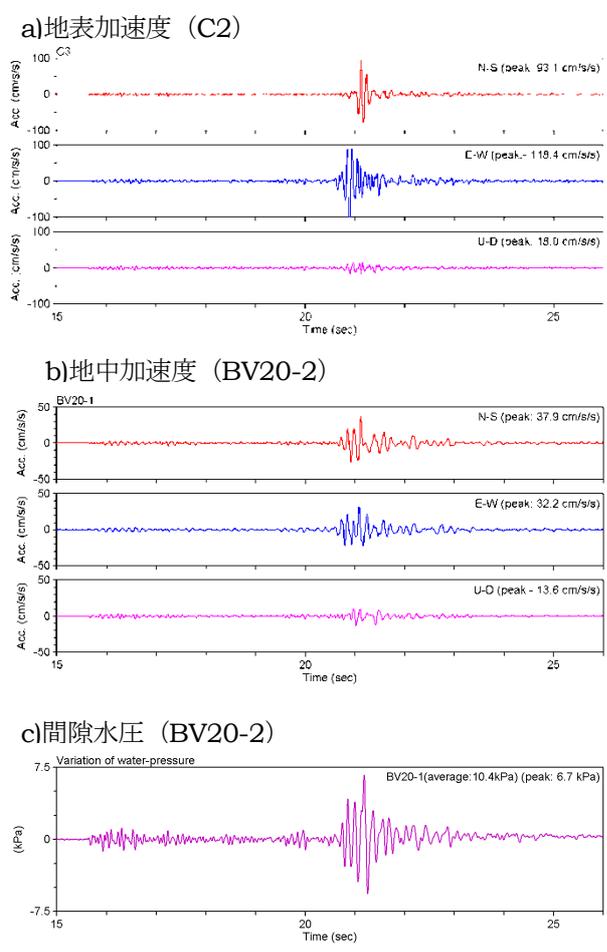


図-7 蔭名地区での地震動の観測事例(土佐ほか,2009)

2.3 基礎的な取り組みの課題

地すべり地を含む山間地での三次元的な地震動の観測網が不足している。また、すべり面あるいはその周辺地盤での間隙水圧の地震応答特性も不明である。

若井ら(2008)や長谷川(2010)など、地震地すべりの発生リスクを広域の地震応答解析により評価する試みがいくつか行われているが、これらの地震応答解析の教師点となる地震観測点が中山間地に少ないことからモデルや解析手法の検証が十分に出来ていない。地震地すべりの発生メカニズムを把握するためにはこれらの動的観測網の整備が重要となってくる。

また、再滑動型地すべりが地震時に再活動する現象や地震によって一時停止する現象の解明についてはすべり面粘土の動的変形特性を知ることが重要であるが、それらのデータが不足している。今後は、いろいろな地質条件のすべり面粘土の動的変形特性を調べてデー

タを蓄積する必要がある。

3. 応用的な取り組みと課題

3.1 大滑動した地震地すべりの再現

大滑動した地すべりの再現計算は2004年中越地震での地震地すべりをFEMで再現した若井ほか(2007)や秦ほか(2007)などの研究があるが、我が社でも2008年の岩手・宮城内陸地震で発生した荒砥沢地すべりなどで再現計算を実施した。荒砥沢地すべりは約300m滑動していることからFEMによる再現計算は難しく、差分法と不連続変形法(DDA)を用いて再現計算を行った。図-8は大野ほか(2010)としてDDAによる再現解析結果を発表したものである。

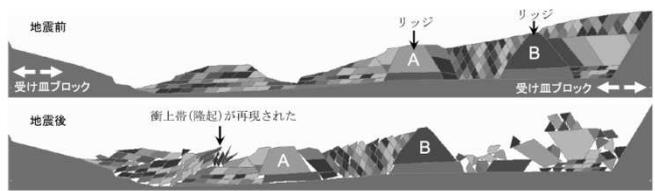


図-8 不連続変形法(DDA)による荒砥沢地すべりの再現解析結果(大野ほか,2010)

3.2 広域を対象とした三次元地震応答解析

広域の地震応答解析を用いて、斜面の安定度のリスク評価をした事例は浅野ら(2006)や若井ら(2008)などがある。当社でも広域の地震応答解析をこれまでにいくつか実施している。図-10は岩手・宮城内陸地震で多数の崩壊が発生した耕英地区に対して、広域地震応答解析を実施した事例である(丹羽ほか,2010)。領域の広さは2.42km×1.94km(4km²以上)で、図-11に示すように、地震地すべり(崩壊)の発生場所が地震応答解析によるせん断変形量の大きい箇所やせん断破壊安全率の小さい箇所と一致していることを確認した。

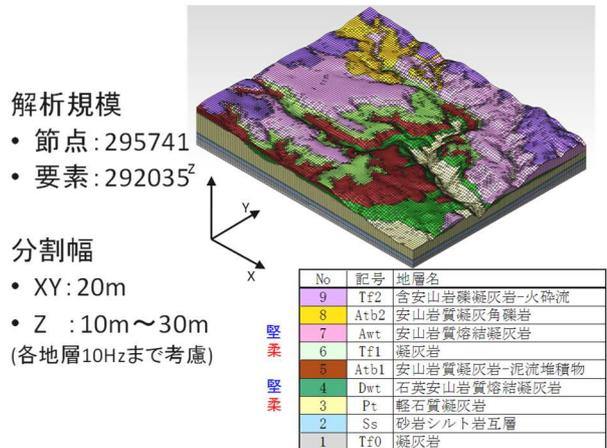
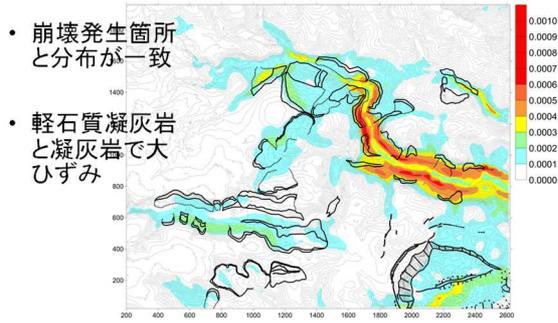


図-10 広域地震応答解析のモデルの例(丹羽ほか,2010)

a) 履歴最大せん断ひずみと崩壊の分布



b) 履歴最小せん断破壊安全率と崩壊の分布

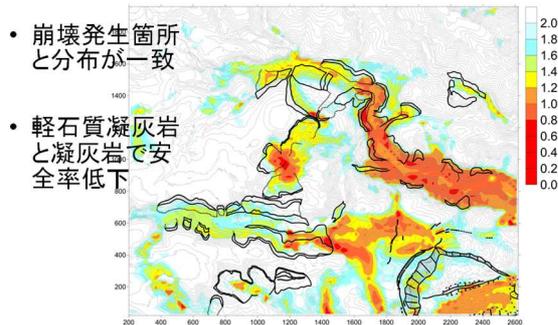


図-11 広域地震応答解析結果の例(丹羽ほか,2010)

3.3 対策工の効果推定

盛土工や切土工の効果は地形条件の違いとして解析することができることから地震地すべりのシミュレーションに組み込むことは容易である。地下水排除工による水圧や地下水位の変化をシミュレーションで推定することについては解決しなければならない課題が多数あるが、水圧や水位が低下した結果を地震地すべりのシミュレーションに組み込むことは容易である。

一方、杭工やアンカー工などの抑止工は地すべりの変位量や移動体の変形量に応じて抑止力、つまり対策工から移動体に伝わる力が変化することから、抑止力の変化を取り入れたシミュレーションが必要となる。FEM等のシミュレーションを使って平常時の抑止工の効果を評価するところのみが実施されているが(日本地すべり学会,2006など)、まだ実用的になっていない。地震地すべりを対象にした場合、地震によるすべり面での相対変位が発生するか否かの問題もあり、更に難しい状況である。

当社ではより実用的な方法として、ニューマーク法の発展形である渡辺・馬場法を改良し、移動層の変位に伴う抑止力の増加を考慮して地震時の斜面对策工の効果を評価する方法を開発した。渡辺・馬場法はFEMの地震応答解析を用いて移動体に発生する水平加速度の時間変化を求め、移動体全体の平均値としての等価水平震度の時刻暦毎に求める方法である(図-12)。

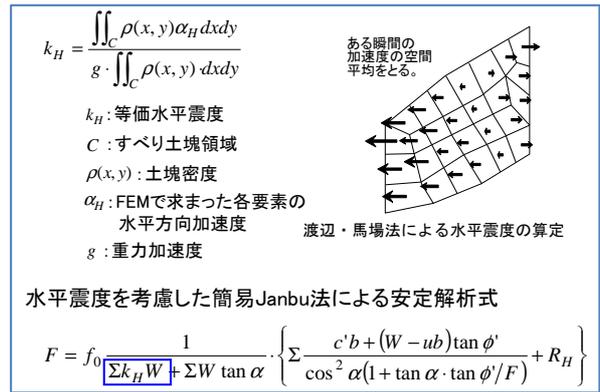


図-12 渡辺・馬場法による水平震度の算定

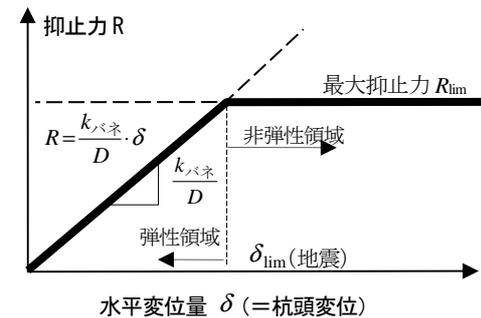


図-13 水平変位量と抑止力の関係

移動体の変位と抑止力との関係を図-13のように定義して変位量に応じた抑止力の変化を求め、それをニューマーク法の時刻暦解析に逐次適用する。図-14に岩手・宮城内陸地震の地震地すべりに適用した事例を示す。

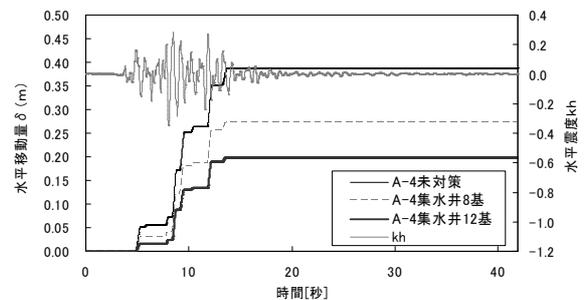


図-14 改良した渡辺・馬場法による解析例(丹羽ほか,2011)

3.3 応用的な取り組みの課題

応用的な取り組みにはいろいろな課題があるがここではその中の4点を上げる。

1点目は斜面对策工の各部位の地震時の挙動に関するモニタリングが圧倒的に不足していることである。これまでは地震発生後の被災状況を見て破損・損傷機構を推測しているだけであり、その地点にどのような地震加速度が作用し、どの部位にどのような加重が作用しかたの実態がほとんど把握していない。

2点目は地震地すべりのさまざまな現象、例えば微小な変形が発生するだけのすべりから、大滑動に至るすべり、滑動から流動に変化するすべりなど、いろいろな現象を適切に表現するモデルを作成できる解析手法が確立していないことである。例えば、大滑動する地震地すべりを再現するためには、FEM、DEM、DDAのどの方法も予めすべり面を設定する必要がある。

3点目は順解析の課題である。地震地すべりについて、これまで発生後の再現計算（逆解析）は数多く実施されているが事前の予測、例えば、対策工対象斜面で地震地すべりが発生するか否かの評価や発生すると予測される場合の抑止工効果の評価など、順解析に関するシミュレーションはほとんど実施されていない。

4点目は抑止工と地盤のモデル化の課題である。図-15に示すように、例えば抑止杭工の解析をする場合、鋼管内に発生する応力も算出するためには鋼管そのものをソリッド要素などでモデル化する必要がある。また、周辺地盤と杭との力の受け渡しの他、両者の境界面で発生する“すべり”も考慮する必要がある。日本地すべり学会（2006）でもそのモデル化の事例が紹介されているが、まだ、実用的なレベルには達していない。

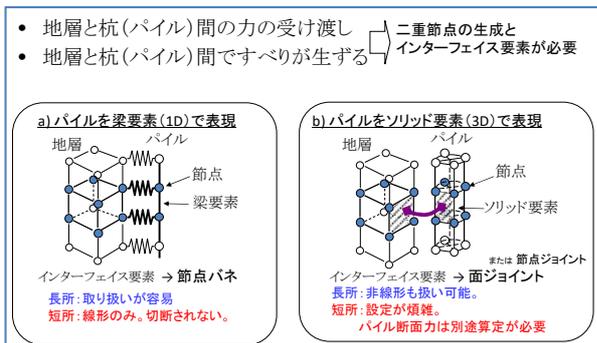


図-15 抑止杭工のFEMでのモデル化の方法

<参考文献>

眞弓孝之・柴崎達也・山崎孝成（2003）：すべり面せん断試験によるすべり面のせん断強度評価，
 長谷川陽一・柴崎達也・山崎孝成（2010）：地震地すべり地盤の動的性質評価を目的とした動的一面せん断試験機の開発，第49回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp. 246-247.
 長谷川陽一・柴崎達也（2016）：非排水一面せん断試験機構を組み込んだ三軸試験装置の開発，第51回地盤工学研究発表会講演集，pp.2047-2048.
 丹羽諭・柴崎達也・大野亮一・山崎勉・山崎孝成（2010）：FEM地震応答解析を用いた地震後の崩壊危険箇所の抽出手法に関する研究、平成22年砂防学会研究発表会概要集，No.57，pp.56-57.
 若井明彦・田中頼博・阿部真郎・吉松弘行・山邊康晴・

渡邊泰介（2008）：中山間地の地震時斜面崩壊リスクを評価するための有限要素法に基づく広域被害予測システム、日本地すべり学会誌、Vo.45, No.3, pp.21-32.
 若井明彦・鶴飼恵三・尾上篤生・樋口邦弘・黒田真一郎（2007）：層理面のひずみ軟化挙動に起因する流れ盤斜面の地震時崩壊の有限要素シミュレーション、日本地すべり学会誌、Vol.44, No.3, pp.1-11.
 土佐信一・山田正雄・橋本英俊・伊藤岳（2009）：蔭名地区における地震時の地下水排除工の効果検討，第48回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp.203-204.
 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.47, No.2, pp.8-14.
 奏吉弥・杉山仁實・新屋浩明・倉岡千郎・佐藤誠一・白石保律（2007）：過剰間隙水圧の影響を考慮した地すべりの地震応答解析—旧山古志村東竹沢地すべりをモデルとして—、日本地すべり学会誌，Vol.44, No.1, pp.39-45.
 浅野志穂・落合博貴・黒川潮・岡田康彦（2006）：山地における地震動の地形効果と斜面崩壊への影響，日本地すべり学会誌，Vol.42, No.6, p.1-10.
 渡辺啓行・馬場恭平（1981）：フィルダムの動的解析に基づくすべり安定評価手法の一考察，大ダム，第24巻，第97号，pp.25-38.
 日本地すべり学会（2006）：有限要素法による地すべり解析、山海堂，pp.70-85.
 丹羽諭（2011）：最近の数値シミュレーションと斜面防災技術（その2）、斜面防災技術，Vol.38, No.1, pp.14-23.