

「内陸地震の予測と活断層評価—その現状と課題—」



京都大学防災研究所地震予知研究センター准教授
遠田 晋次（とおだ しんじ）

要旨

内陸直下型地震は、地下数km～十数kmで起こる断層運動により発生する。その断層による「ずれ」が地表に到達・出現したものを地震断層という。約千年～数万年間隔で繰り返される断層運動（大地震）によって、地震断層のずれが集積し地形に刻まれたものが「活断層」である。現在の内陸地震の予測は、この活断層の評価によって成り立っている。特に、阪神・淡路大震災以降、全国約110の主要活断層が調査され、2005年に「確率論的地震動予測地図」が公表された。しかし、最近10年間、内陸被害地震は主要活断層から離れた比較的確率の低い地域に続発した。しかも、ほとんどが地表に地震断層を残していない。過去約90年間でも、マグニチュード（M）7以上の地震で約40%、M6.5以上で約20%しか明瞭な地震断層が残されていない。すなわち、活断層から地震発生を予測する現状評価では、M7前後の地震の多くが見落とされる。したがって、大小多数の断層が網目状に密集する日本列島では、主要活断層の個別調査のみではなく、中小規模の断層や火山周辺の地殻構造等も含めた地震発生場の総合理解が不可欠である。また、複数の断層をシステムとして捉え、地震活動の連鎖などを考えた予測手法の開発が今後重要となろう。

京都大学防災研究所の遠田と申します。本日はよろしく申し上げます。私は藤岡先生と同じくバックグラウンドは地形とか地質なのですが、長年活断層の研究を続けてきまして、それが内陸地震の研究に役立っていると考えています。

さて、いきなりたとえ話をさせていただきたいのですが、いくら腕のいい料理人がいたとしても材料が良くないとなかなかおいしい料理はできない、というのは皆さん大体お分かりかと思います。何のたとえをしたいかと申しますと、いくら地震工学とか強震動の研究者、古村先生、翠川先生、瀬瀬先生のような素晴らしい研究者がいらっしゃっても、その材料となる我々の活断層のデータとか、内陸地震のデータとか、

そういうものの評価が非常に悪いものであったら、最終的に出てくるアウトプットも非常に質の悪いものになって、防災にあまり使えないものが出てきてしまうわけです。我々はそういう重要性を実感しております。

内陸地震といいますと、海溝型地震に比べるとインパクトがある地震が最近起こっています。一番最近の地震でいいますと、2008年の岩手・宮城内陸地震が挙げられますが、非常にある意味、今脚光を浴びているといえます。

内陸地震はどういうものかというイメージをまず簡単にお示ししたいと思います。スライド2に示した図は、私が以前所属していた産業技術総合研究所のパンフレットから取ってきたものです。先程藤岡先生からもご説明ありま



したが、日本列島はプレートがせめぎ合っていて、プレート境界型の地震が起こります。それは例えばM8といった非常に大きいものですが、ただラッキーなことに、規模は大きくても我々が住んでいるところから多少距離はあります。ところが、内陸地震は、我々が住んでいるところの直下で起こります。直下というのは、大体深さ10km~20kmのところです。ですから、規模は多少小さくても、受ける被害や地震動は非常に大きくなります。ここで私は餅の絵を持ってきていますが、何故餅の絵かと言いますと、日本列島の内陸には火山がたくさんありますから、実は20kmよりも深いところでは地殻はどろどろに近く、比較的流動しています。ところが、20km~10kmよりも浅いところになると、がちがちです。我々は、「ブリットル（脆性的）に破壊する」と言いますが、地殻は餅の表面の皮のようになっていますから、それが太平洋プレートの押しによって簡単に割れてしまう、という状況であるということです。そういう形で内陸地震が起こります。

内陸地震が起きるとどうなるかといいますと、岩手・宮城内陸地震が起こった後すぐ調査に行ってこういうものを見つけました（スライド3）。地震というのは断層運動だというのはよく教科書に出ていると思いますが、内陸直下型地震は震源が浅いものですから、地下で起こった断層運動がよく顔を出します。これを我々は地表地震断層と言っていますけれども、岩手・宮城内陸地震のときには、こういった高さ4mくらいの崖がいきなり山の中に現れました。



実際、どのくらいの地震規模 (M) 以上で地表にこうした痕跡が残るのか、すなわち地表地震断層が出現するののかについてはいくつか研究例がありますが、武村先生 (鹿島建設) によれば、M が6.7~6.8以上になるとこうした地表地震断層が出現するといわれています。このように、痕跡が残ることによって、過去どういう地震が起きたのかが分かるわけです。

活断層の動きが繰り返し起こり、こういった痕跡が何度も何度も繰り返すということが続けていくとどうなるかといいますと、たとえば**スライド4**がその例です。これは顕著な例ですが、サンアンドレアス断層といいまして、カリフォルニアにある非常に活発な活断層です。河川があると思いますが、河川がこの断層によって30m程横ずれを起こしています。1回の地震で30mもずれるという事例はなかなかありませんから、何度も何度も過去に地震を起こしながら、少しずつ川がずれていったということです。また、**スライド4**を見ますと、大きな川はずれが大きいですが、脇の小さな川はほんの少ししかずれていません。ですから、川ができてから断層運動を何回受けてきたかによってずれの量が決まってくるわけです。

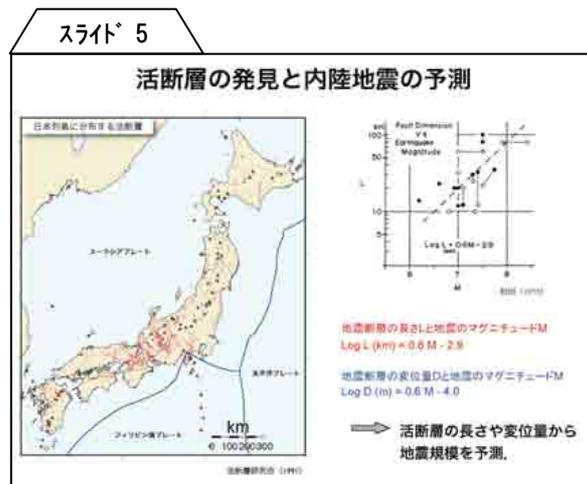


ここで非常に重要になるのが、平均変位速度というものです。時間が経てば経つほど地震が繰り返されて、岩盤がこの場合だと横にずれていきますが、丹念に地形・地質を調べると、この活断層はどのくらいアクティブか、つまりどのくらい元気かということが分かってきます。サンアンドレアス断層だと、ならずと年間に平均して3cmも動きますし、日本の非常に活発な活断層だと年間数mmくらい動きます。毎年数mm徐々に動くということではなくて、非常に長期間にならしていくとそのくらいのスピードで動くということです。活断層は、この平均変位速度によってそれぞれA、B、C、D級までカテゴリー分けされています。

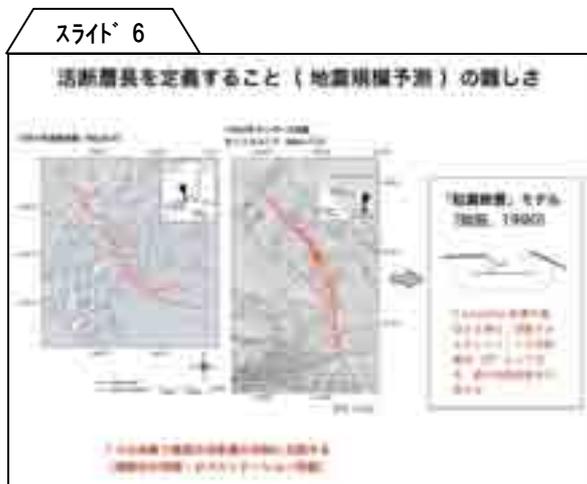
もう一つ重要なのは、地震の頻度です。地震の頻度を予測するとき、地震学では、その地域で起きる小さい地震を観測して、それを大きい地震に外挿してどのくらいの確率で地震が起きるかを予測します。一方、地質学ではそういうことはやらずに、直接断層を掘ってしまっって、過去どのようなずれを起こしてきたかを調べます。実際に調べますと、予測されたものよりも頻度が高いく、すなわちもっと活発に断層が動いているということがほとんどの断層で見つかっています。

皆さんが最も気になるのは、地震の規模ですね。どのくらいの大きさの直下型地震が起こるのか、ということだと思います。我々は、断層の長さによって地震の規模を予測します。断層が長ければ長いほどエネルギーをたくさん放出しますから、断層の長さによって地震の規模を予測するというのは直感的に考えてお分かりかと思います。**スライド5**に示したのは、活断層研究会から出版されている日本列島の活断層断層分布図ですが、こういった断層長さを1個1個測っていったら、短い活断層は例えばM7、長い

活断層、例えば糸魚川・静岡構造線や中央構造線など非常に主要な活断層がありますけれども、そういった長い活断層はM8だろう、というように地震の規模を決めていきます。その決め手になるのが、松田先生が1975年に地表地震断層と実際に起きた地震の規模から経験的に導かれたこのような式です（スライド5右図）。こうして、活断層の長さからMを決めています。



ただ、この活断層の長さというのがまたやっかいなもので、例えば日本列島の真ん中では活断層は非常に密集していますから、どこまでが「〇〇活断層」でどこからが次の「××活断層」なのか、区別が非常に難しいという問題があります。例えば、スライド6に1981年濃尾地震、それから南カリフォルニアで起こった1992年ランダース地震の活断層を示しました。これらの地震では、図にある活断層のうち1個が動くのではなく、複数にわたって断層運動が起こりました。



こういうものを詳しく解析した結果、実は5km以内くらいの距離に隣の断層があった場合は、その断層に破壊が乗り移る可能性が極めて高いということが示されています。1990年代に研究され、これも同様に松田先生によって「5kmルール」というような基準がつけられました。つまり、5km以内にある活断層はひとくくりに扱いたまおうということ、これは最大地震規模を予測するのに非常に良い手法だということです。ここで、最大地震規模というのがキーなのですが、後からまたこの辺に問題が出てくることをお示ししたいと思います。

さて、活断層の規模が分かると、やはり最終的には確率マップがあり、確率を出さないといけないのですが、そうするとやはり直接断層を掘るということになります。スライド7の写真はトレンチではなく露頭の一例ですが、地層が水平ではなく少し波打っています。また、赤線のとおり断層が2本あることが分かります。左側の断層は緑線の地層まで切っていますが、その上の地層は切っていません。右側の断層は青線の地層まで切っていますが、最後に黒い腐植土に覆われています。この露頭からは、過去の断層運動を2回、すなわち地震を2回読めるわけです。

こういったことをやってそれぞれ地層の年代を計測すると、平均活動間隔、つまり地震の繰り返しの周期というものが出ます。ただし、それは100%レギュラーに、毎回

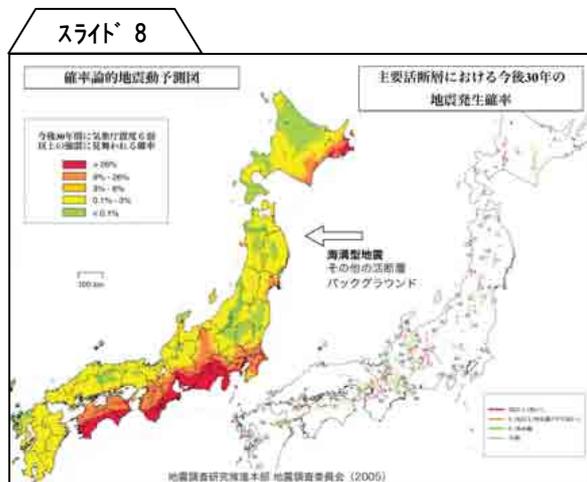
同じように地震を繰り返すということではなくて、若干それぞれにばらつきがあります。このばらつきというのはなかなか1個の活断層では得にくいのですが、統計学的に、全体的にどのくらい活断層の動きが平均からばらついているかというのが、ある程度分かってきつつありますので、そういうものを評価に入れていきます。

また、一番重要なのが、最後に起こった地震からの経過時間です。例えば、今野島断層に行っても、その断層が動

いて地震を起こす確率は非常に低いのです。1995年に地震を起こしてずれたため、ひずみが開放されたということです。逆に、過去の地震の記録がなかったり、トレンチ掘削をしても最近の動きがないような断層はひずみが非常にたまって危険といえます。我々は条件付き確率というもので計算して確率を求めますから、最新活動からの経過時間というのは非常に重要です。

ただし皆さん、よく政府から「〇〇断層の地震発生確率は何%」というものが出て数字が一人歩きすることがありますけれども、その中には非常に多くの不確定要素が入っているということに注意してください。例えば今の例でも、過去の地震はたった2回しか検出できていませんから、地震の間隔は1回しか分からないですし、さらに、エロージョンといいまして、途中で地層の記録が欠如するような、川によって堆積物が流されるようなことが起きているとデータが完ぺきではなくなります。それから、この年代測定自体が数10年もしくは数100年の誤差を含んでいますので、そういったものを含めて本当は皆さんにきちんと伝えないといけない、何%という数字だけが一人歩きするのはちょっとまずいかなと思っています。実際に地震調査研究推進本部はスライド7右図のようなダイアグラムをまとめています。縦軸に時間、四角は実際に地震が少なくとも1回起こったらしい時期を示していますが、これを見てもお分かりのように、1回の地震は20~30秒で起きるにもかかわらず、四角は数100年~数1,000年も幅がありますから、かなりエラーがあるということをご承知置きください。

さて、これらのデータを使ってスライド8右図のような確率マップを出します。これは2005年のものなので、調査が進めば毎年更新されます。3%以上で確率は「高い」とありますが、皆さんもいろいろなところでお聞きされているとおり、活断層は数1,000年に1回ずつ動くので確率はそこまで高くなる



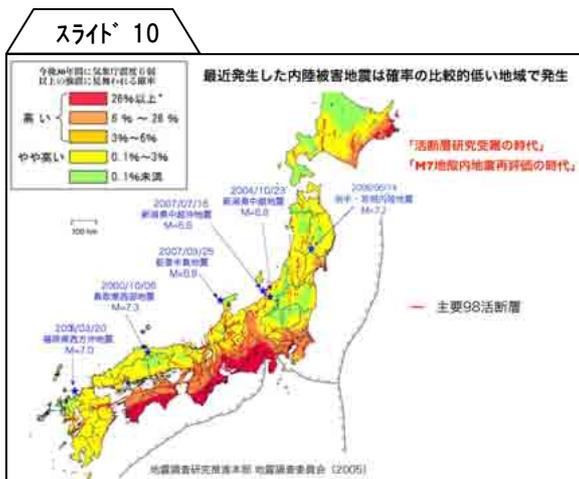
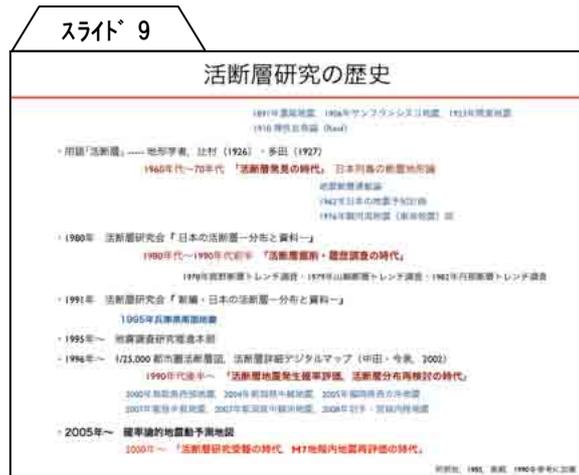
ことはなく、最も確率が高い糸魚川・静岡構造線で12%とされています。兵庫県南部地震直前の野島断層の発生確率が8%程度といわれていることを考えると、数%以上あれば、かなり次の地震を控えている状況だといえると思います。これを使って、強震動の研究者がこういった（スライド8左図）予測図をつくります。

ここで、また一つ問題があります。例えば東海エリアで確率が非常に大きくなっていますが、これは東海地震を待っているからです。この地図は海溝型地震にかなり影響されていて、内陸でせっせと穴を掘って調査をした成果があまり見えてくる形になっていないというのが現状です。

今、確率の評価をお見せしましたが、活断層の研究には歴史があり、確率評価がいつごろからなされるようになったかといいますと、まず「活断層」という言葉自体が使われはじめたのは1920年代後半です。当時は主に地形学分野の言葉でしたが、それが弾性反発説と結び合っ、地殻のひずみを開放する役割としての断層ということでもとめられてきました。そして1980年、活断層研究会の「日本の活断層」でかなり日本全国の活断層が見つけられて、マップが作られてきました。その後、一番インパクトがあったのは当然1995年兵庫県南部地震だと思いますが、それによって地震調査研究推進本部ができ、活断層の地震発生を確率で評価するシステムになってきたわけです。ただ、皆さんもご存じのとおり、最近、こういった地震（2000年鳥取県西部地震、2004年新潟県中越地震、2005年福岡県西方沖地震、2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震）が起こってしまして、私が適当につけたのですけれども、現在は「活断層研究受難の時代」とか「M7地殻内地震再評価の時代」ということができると思います。

というのも、スライド10に示した通り、この予測図を出した前後に起こった地震はこの主要活断層では全く起きておらず、それから離れたところでぼつぼつと起きています。しかも、それらの地震にはM7前後の地震が非常に多くなっています。

ですから、見方によっては「全然、この予測図は使えないな」と言われても仕方がない気もするのですが、これは単に地震をプロットしただけなので、地震動の分布を書いたわけではないことには注意していただきたいと思います。ただし、いずれにしても活断層というものを見直す必要があります。そこで、こういった



こういった観点から、2005年に地震調査研究推進本部が公表した活断層評価のMと発生確率を用いて、実際にどのくらいの頻度でどのくらいの規模の地震が起きるか検証してみました。これは、強震動の検証ではなく地震の頻度の検証である点にはご注意くださいと思います。

スライド17の赤線が主要98断層帯、青線がその他の活断層です。これらの活断層について、横軸にM、縦軸に年間発生頻度を取ったものがスライド18のグラフです。主要98断層帯は断層が長いですからMも大きく、こういった頻度曲線（赤）を描きます。その他の活断層はそれほど大きい地震は起こさずM6.5~7.0の地震をたくさん起こします（青）。これを足し算すると、こういった頻度曲線（緑）になります。

ところが、先ほどお示した過去の内陸地震ではどうだったかといいますと、これよりもはるかに大きな頻度で地震が起きています（星印）。スライド18では平均ケースの発生確率を使用していますが、最大ケースでも同様に実績のほうのはるかに頻度高くなります。我々がまだ知らない震源がたくさんあるということです。

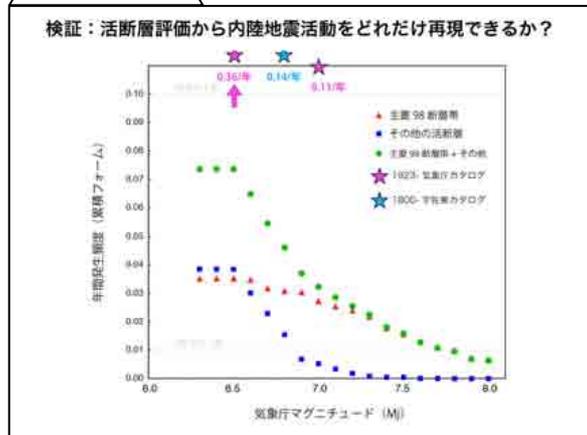
それは何故かご説明します。地震断層の出現にかかわる条件としては、スライド20に示すとおりいろいろな要素があります。特に被覆層の問題は大きく、柔らかい層がたまっていると断層が地表まで顔を出してくれないことがあります。また、例えば地震断層として地表に震源が顔を出したとしても、その後台風や大雨のためにそういった傷が保存されないこともあります。

これがC級活断層問題といわれているもので、浅田先生という地震学者が最初に指摘されました（スライド21）。最近100年のうち地震を起こした活断層は、A級、B級、C級、すべて同等の数がありました。そうすると、これはなぞなぞみたいですが、C級は

スライド 17



スライド 18



スライド 20

「不明な震源」「未知の活断層」となる理由

地震断層出現に関わる要因

- マグニチュードと震源の深さ
- 断層上の「被覆層」の層厚
- 断層「成熟度」、幾何構造
- 断層破壊の不完全性
- 発見に関する地理的条件

地震断層保存、活断層検出に関わる要因

- 堆積速度、侵食速度と断層変位速度との関係
- 人口改変

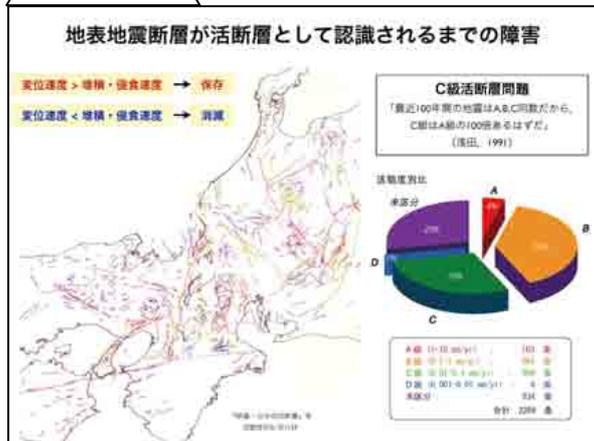
A級の100倍ないとかいうことは起こらない。ところが、日本の活断層を分類してみると、B級はA級の10倍ぐらいあり、B級の10倍ないといけないC級はB級よりもかえって少ない。つまり、実はまだ発見されていない活断層がかなりある、ということです。こういったことを常に考えておかなくてはならない、ということがいえると思います。

その最たるものが、最近起こった2008年岩手・宮城内陸地震でしょう(スライド22)。この地震は震源断層の長さが約40kmありましたが、実際に地表に地震断層として傷が見えたのは20kmぐらいで、しかも所々です。これは岡山というところで、磐井川沿いに厳美溪という非常に美しいところがありますが、その西に約10cmの段差ができました。

実際にこの地震断層をトレンチ掘削しますと、スライド23のような形で見えます。ここはローム層がたまった地層ですけれども、風成のローム層という地層の上の礫層がたわんでいます。そして、赤線のところに断層があるのですが、このへんから出てきた地層の年代が数万年前くらいですので、数万年に1回くらい動いているような活断層が、今回たまたま動いてしまったということです。

このように、活断層というのは潜在的にたくさん埋もれている可能性がある、というわけですが、それならば単に危険率を数倍すれば良いかということもそういうわけにもいきません。それに対する対策についてお話ししたいと思います。

スライド 21



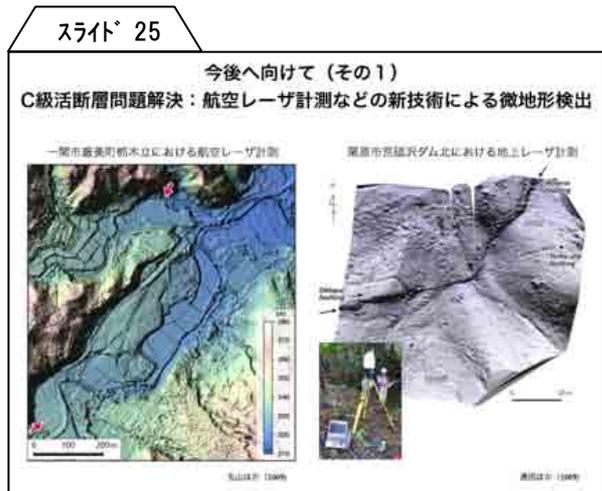
スライド 22



スライド 23

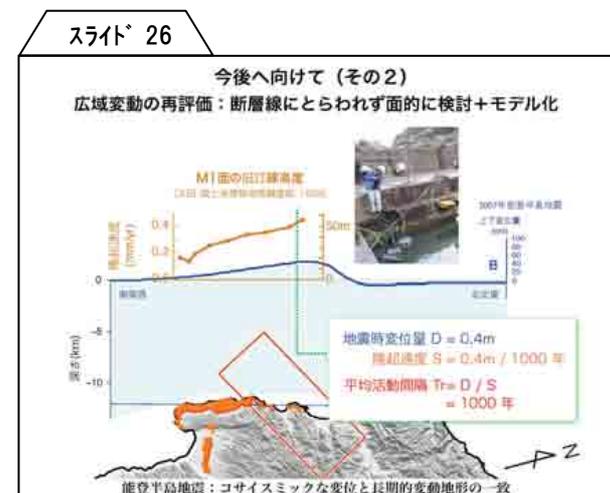


一つは、最近よく導入されている航空レーザー計測です。飛行機からレーザーを照射して、それで地形を再現するものですが、木やビルがあっても地表まで透過できるレーザーもあるので、それを用いて地表の変形や詳細な地形を再現します。スライド25左図は岩手・宮城内陸地震が発生した地域を計測した画像ですが、今まで空中写真や現地調査で必死に断層を探していたところを、木を剥ぎ取られた状態の地形をレーザー計測で知ることが出来ます。矢印の部分にきれいに地震断層が見られると思いますが、実際現地に行くと70cm~80cmくらいの崖ができているのを確認することができます。



また、地上で丹念にレーザー計測を行うことも可能です。スライド25写真にあるように、三脚にこういったレーザー機器をつけて計測します。低い草を処理で取り去ると、現地の生の地形を見ることができます。するとスライド25右図のようになります。きれいに崖が見えるのがお分かりかと思いますが、こういった形で最近の技術を導入すれば、ある程度、検出が可能な断層もあるだろうというわけです。

それから、断層を線で見るとは無く、もっと広域で変形（緩い撓曲）を検出することもできます。スライド26は能登半島地震で生じた海岸の隆起と沈降です。震源断層の長さは15kmぐらいです。写真にあるように40cmぐらい隆起していますが、この海岸に行きますと、先ほど藤岡先生の話にも出てきました海岸段丘というものがあります。一番高いところは50mぐらいのところにありますが、地質学の研究によれば、これは12万年前に形成されたものだといわれています。今回の地震でも南に傾動するような形の変形が見えており、ここの段丘自体が傾動しているように見えることから、こういった能登半島地震型の地震を何度も繰り返し発生させてこういう変形が起きたということがいえます。ですから、こういった段丘を調査することでも、海岸線の内陸地震を評価できる、ということがいえると思います。



もっとマクロな視点で見れば、その地域ごとの特性を考えるべきではないか、ということもいえます。つまり、どの地域でも必ず活断層が埋もれているというわけではなくて、ある地域は非常に大きいA級の活断層がひずみを開放してくれて、ある地域はもっと細かい断層が働いている、といったことも考えることができます。

スライド27はサンフランシスコの湾岸地域で起きた地震の系列です。横軸が時間になっていますが、1906年サンフランシスコ大地震以前はたくさん地震があり、その後地震が起きなくなっているという例です。これは、このサンアンドレアス断層400kmが一気に大地震を起こしたために、ローカルな地域のひずみが一気に開放された、と説明されています。こういう場所では大きな断層が弾性ひずみを逃がしてくれるので、小さい地震の役割は非常に低くなっています。逆に、中越などの日本の内陸部にいくとそういう大きな断層がなく、普段から少しずつM7程度の地震を発生させるということになります。

最後に、アウトプットも再検討する必要があります。例えば静岡県では東海地震の寄与が非常に大きく予測図では真っ赤になっていますが、普段、M6程度の地震というのは、伊豆周辺を除いてはそんなにないわけです。ところが、内陸にいきますと、小さい活断層はたくさんありますから、こういうものがたくさん起きると、被害地震を受ける頻度はもっと高くなります。

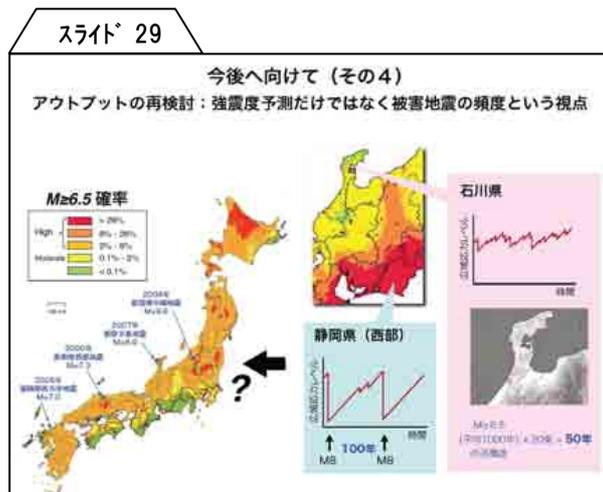
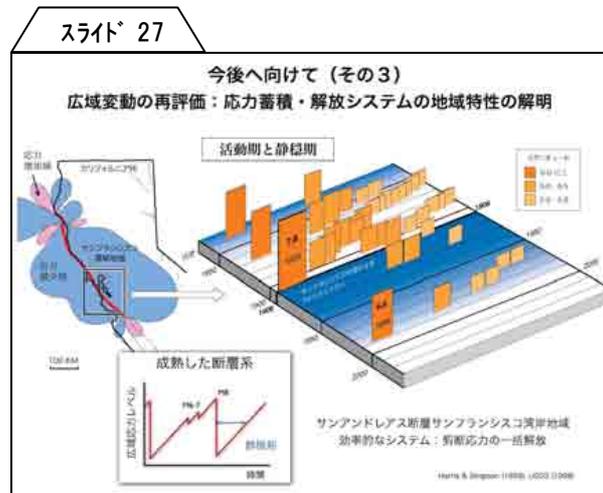
だから、こういうものを考えると、例えばM6.5以上の地震に関しては、スライド29のように、日本海側や内陸のほうが頻度が高くなります。最近起こっている地震でこういうものを説明できるのではないかと思います。

カリフォルニアではこの点が少し先走って進められていまして、最大規模の地震だけでなく、若干小さめだけでも被害を起こす地震も考慮に入れたマップづくりをしています。日本の場合は、最大規模の地震だけだと思ってください。今後はこういったものもうまく考慮して予測図に取り入れていく必要があるのではないかと思います。

以上がまとめです。ご清聴ありがとうございました。(拍手)

【質疑】

質問者 私は、岩石を破壊したときに出るマイクロ波の電力の測定を地震に応用できないかという勉強をしています。その関係で2点ほど質問させていただきます。一つは、岩石が破壊されるという現象と、地震で断層が破壊されるということと



の時間の関係はどのようなものなのか、ということです。それからもう一つは、岩石が破壊されると結構なマイクロ波の電力が出ますが、過去の地震の事例でそういう痕跡があるとか、あるいは地震が発生したときにマイクロ波が発生したという観測例とかをご存知でしたら教えてください。

遠田 岩石破壊に関しては、実験室でやる岩石破壊と、断層運動とはちょっと違った意味合いがあります。実験室だと岩石ピースが一瞬だけ割れますが、断層運動では、破壊速度3km/s程度で次々に破壊が伝わっていくイメージです。破壊がどんどん伝播していくイメージですので、断層運動は時間の関数というか、そういったものを考えないといけないということです。マイクロ波に関しては全く専門外でして、答えを持ち合わせていません。申し訳ありません。