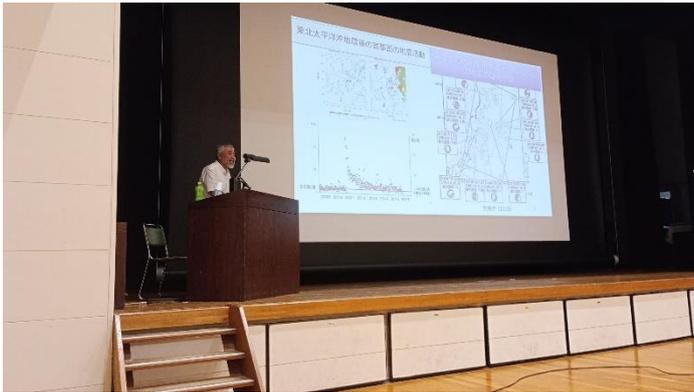


2050 年までの地震予測

～正しく地震の仕組みを理解する～

東京大学名誉教授
佐藤 比呂志

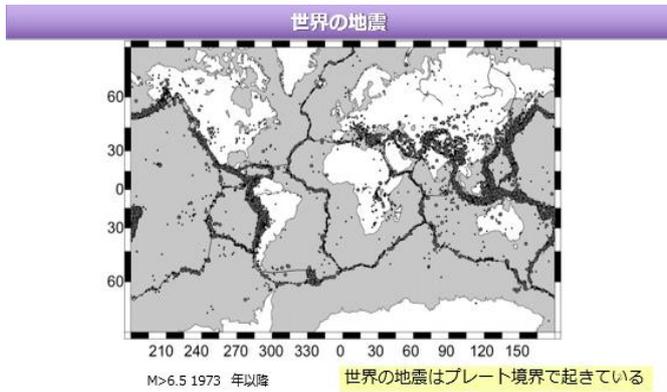
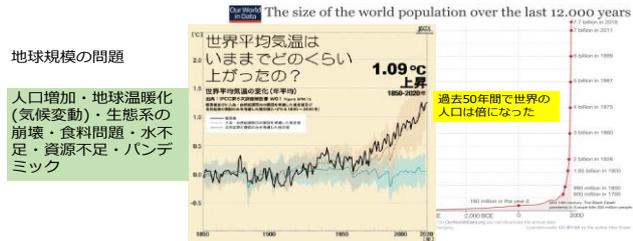


本日は日本列島全域で今後 30 年くらいの間にどのような地震発生の可能性があるか話していききたいと思います。地震とひと言ってもその揺れ方の違いによっていろいろな種類があり特徴があります。また、首都直下型地震についても触れていききたいと思います。

さて、過去 50 年くらいの間に地球規模で気温が上昇してきていますが、それとともに

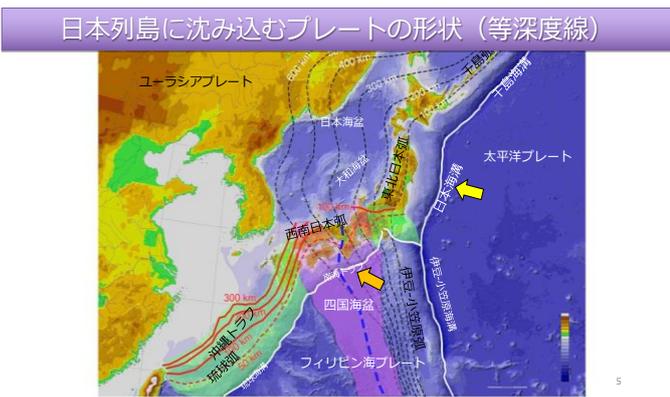
地球全体の人口も倍くらいに増えています。日本にいると人口減少が気になりますが世界的にみると人口が大きく増えていて CO₂ (炭酸ガス) の増加や資源枯渇の問題が 2050 年頃まで続いています。日本列島においては、それにプラスしてかなり巨大な地震が発生するのではないかと懸念もあります。

2050 年問題に加えて欲しい日本の地震災害リスク

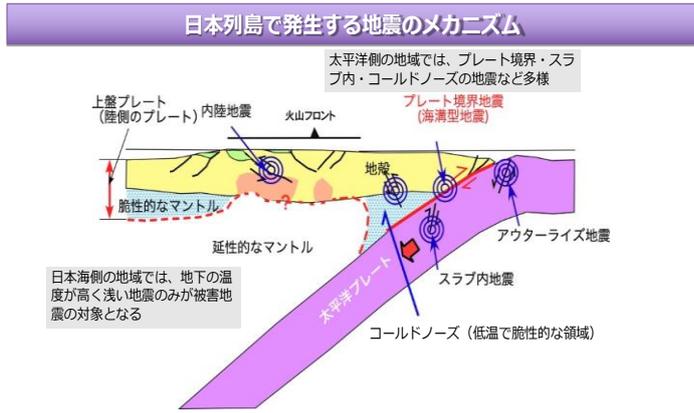


左の地図上の黒い点は過去に地震が発生した場所を表わしていますが、見て分かるように地震が起きていないところの方が圧倒的に多くなっています。地震の発生は厚い岩盤(テクトニック・プレート)の境界線に沿っているのが見て取れます。このプレートの境界部が動く時に地震が発生します。

それでは日本列島はどうなっているかというと、右の図にあるように太平洋プレートが東から西の方に向かって沈み込んでいきます。それと少し小型のフィリピン海プレートが関東や西南日本・沖縄の下に沈み込んでいます。過去にこのプレートは日本列島が載っているユーラシアプレートの下に潜り込もうとして擦れて起きたのが関東地震(関東大震災)や元禄地震です。また今後、このフィリピン海プレートが西南日本



の下に沈み込んで大きくズレ動くと南海トラフ地震を引き起こすことが懸念されています。



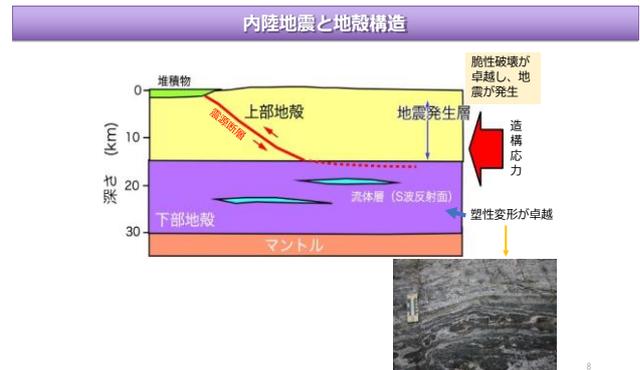
左の図は日本列島で発生する地震のメカニズムを表していますが、2011年に発生した東日本大震災はこのプレート境界地震(海溝型地震)でした。また、その巨大地震以降、太平洋側では活発な地震活動が続いています。これは相対的に温度が低い太平洋プレートの沈み込みに伴って、低温で脆性的な領域(コールドノーズ)が形成されていて地震を発生させやすい領域が広がっているためです。一方、日本海側では内陸地震といって阪神淡路大震災や新潟地震、熊本地震が発生しています。

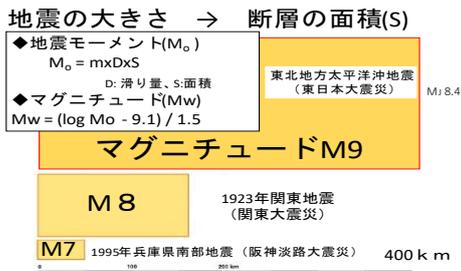
他に内陸地震の発生事例として、1999年に台湾中部の集集鎮で起きた大地震や2014年に白馬村を震源として起きた長野県神城断層地震などがあります。ただ、内陸地震というのは地下15kmぐらまでしか地震を発生させないので、海溝型に比べると一回り小さなものになります。内陸では地下の温度が高



いので深さ15kmを超えると、岩石が水飴のように曲がってしまい地震が起きにくくなっています。

地震の大きさを表す単位にマグニチュードというものがありますが、これを使うと関東地震はマグニチュード8、神戸の地震はマグニチュード7となります。この値が一つ違うと断層のズレ動いた領域の面積が32倍くらいの差になります。東北太平洋沖地震のマグニチュード9はとてつもなく恐ろしいことで、あの神戸の地震とか熊本の地震を千個ぐらいかき集めた広い面積で地震波が発生したということになります。震度というのは揺れの強さを表し、マグニチュードは地震が持っているエネルギーを表し概ね断層面の広さに相当する値です。また、内陸地震と海溝型の地震とではその性質が異なります。海溝型の関東地震はマグニチュード8クラスと言われていますが、熊本地震や神戸地震に比べ30倍以上の断層面積を持っています。兵庫県南部地震クラスの内陸地震すなわち震源が非常に浅い地震というのは、震源から離れば揺れを感じなくなってしまい、県レベルぐらいの被害で収まります。震源が浅いと局部的に非常に強い揺れに襲われますが、破壊している領域が小さいのでその揺れは割とすぐ収まります。





右の写真は兵庫県のコンビニエンスストアの状況を映したビデオですが、初期微動に続いてワッと揺れが来てこれでほとんど終わってしまいました。

下の写真は、東北太平洋沖地震ですが、揺れがなかなか収まりません。神戸の時の震源はせいぜい30 km

2011年東北地方太平洋沖地震 仙台空港での揺れ



内陸地震と海溝型地震双方の波形の記録を見てもみますと右の図のようになっています。左側のグラフが1995年の兵庫県南部(神戸)の地震です。横軸が揺れの時間を表していますが、これを見ますと非常に強い揺れはほんの10秒ぐらいでドーンと来て終わりです。真ん中のグラフは1993年に北海道南西沖地震のもので、このとき奥尻島では津波で大きな被害を受けました。日本海側では結構大きい地震で、強い揺れは1分程度です。右側のグラフは東北太平洋沖地震ですが、神戸に比べると恐ろしく揺れが長くなります。揺れを作り出す断層の広さが、神戸の場合は相対的に小さいのですけれども、東北太平洋沖地震の場合はものすごく大きかったから非常に長い時間揺らされました。また、地盤の要因なども入ってきて揺れがなかなか収まりませんでした。東北太平洋沖地震の場合、地下で最大50mもズレ動いて水を押し上げ伝搬していき津波になります。日本海溝の場合、一番深いところで9,000mから1万mぐらいの深さがあり、その上に乗って載っている水を掻き揚げて膨大な量の海水が津波となって非常に長い間押し寄せました。

2011年東北太平洋沖地震に伴う津波シミュレーション



http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/people/furumura/movies/Fulab_OffTohoku_tsunami.mpg

それが東北太平洋地震クラスになると震源は深くて遠いので非常にゆっくりとした揺れが長い時間続くというのが全体の特徴になります。ただ、関東地震というのは割と震源が浅かったので、非常に強い揺れも発生していました。

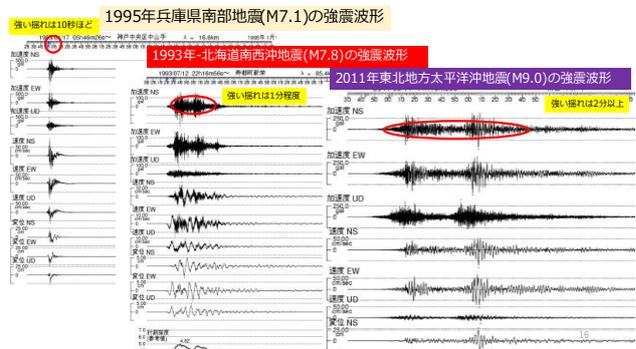
1995年兵庫県南部地震の揺れ



範囲の断層を壊すだけでしたが、東北太平洋沖地震では400 km

とか500 kmぐらいの広い断層を順番に破壊していき、その中の引っ掛かりの強いところで、また地震波を出しています。そうするとその時にまた揺れを感じて延々と収まりません。恐ろしく長い時間、揺れが続きます。

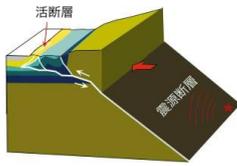
地震による揺れの違い



活断層とは?

活断層: 地形・地質学的に認められる断層で、最近の地質時代に繰り返し活動したもの(松田時彦, 2002)

※震源断層: 地震波を発生させる断層

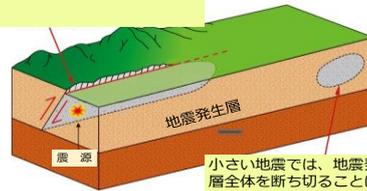


ここで活断層という用語は、活断層-震源断層システムの浅部に限定して使用する。

うのはナンセンスで、これは揺れを起こす断層と地表に変位(ズレ)を生じさせる断層との関係とはそれほど単純ではありません。日本列島の内陸地震の場合、断層が動く間隔というのは早くても1,000年または3,000年に一回という程度です。1万年に一回程度しか動かないという断層も結構あります。マグニチュードが6.8より大きい地震だと地表に割れ目を出す例はかなり増えます。地表に割れ目(変位)すなわちズレが出て、そういうものが積み積み積もっていくと山が高くなったり川筋が曲がったりとか地形を丹念に見ていけば、どこに活断層があるのか判別することができます。

活断層と地震発生

Mが6.8より大きくなると地震発生層全体を断ち切るようになり、地表に地震断層が現れる。

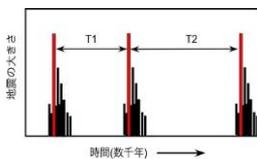


小さい地震では、地震発生層全体を断ち切ることはないので、地表まで地震断層が現れない。



活断層の活動履歴に基づく活断層の長期評価(地震調査推進本部による)

※ 発震調査で決められる過去の地震の年代の誤差は、数10~100年程度が普通。地震は規則正しく発生していない→大まかな目安程度にしかならない。



https://www.jishin.go.jp/main/img/hyoka_katsudanso.png

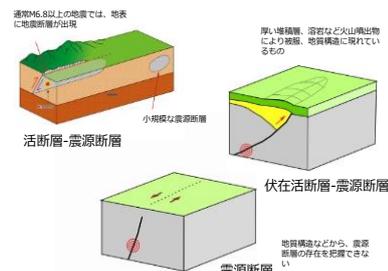
左の図は政府の地震調査推進本部という機関が、全国の活断層を評価した結果を表しています。地震を引き起こす断層がどれほど危険かが地域ごとに表示されていますので参考にしてください。これは一つの断層について、横軸に時間をとって縦軸を地震の大きさとして表した図面です。地震を起こして断層が活動した後は、次の活動まで長い期間にわた

って動きませんので、活動の履歴が分かると将来の予測精度が向上します。活断層の調査や地下構造の調査によりどこに活断層があるかはぜひぶん知識が増えてきましたが、拾えている活断層-震源断層は印象として50%ぐらいかなという感じです。

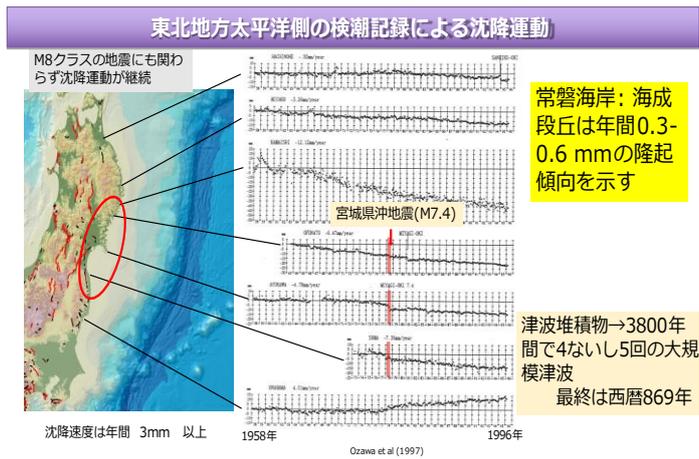
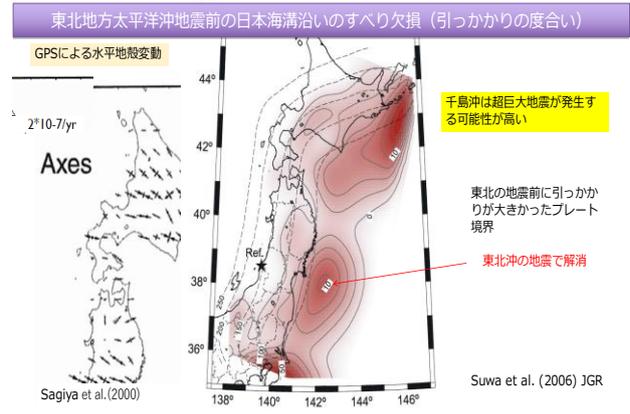
次に、こうした評価の難しい点について話をしたいと思います。マグニチュードが6.8を超えると地表に割れ目が現れる例が多いと言いましたが、鳥取県西部で1999年に起きた地震ではマグニチュードが7.3もあったのに地表に出た断層というのは600mぐらいでそれ以外には全然出現しませんでした。明治年間に地震があって丹念に調べても痕跡が見つからないというふうな事象もあるし、関東に多いスタイルで堆積層がかなり厚いと下の方の岩盤で壊れても、なかなか上の方までその現象が伝わらず地盤が盛り上がっているような格好しか出てきません。

そこで「活断層」「伏在活断層」「震源断層」の3種類に分けて20世紀に起きた地震について見たものが右の図です。活断層で起きている地震は40%程度、地下に潜っていてその存在が良く解らない震源断層(伏在活断層)が同じく40%ぐらいで、残りの20%は震源断層の存在が把握不能な箸にも棒にも引っ掛からないものです。

活断層-震源断層システムの分類

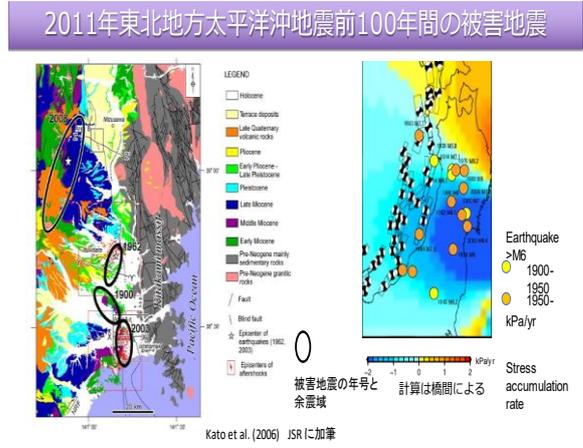


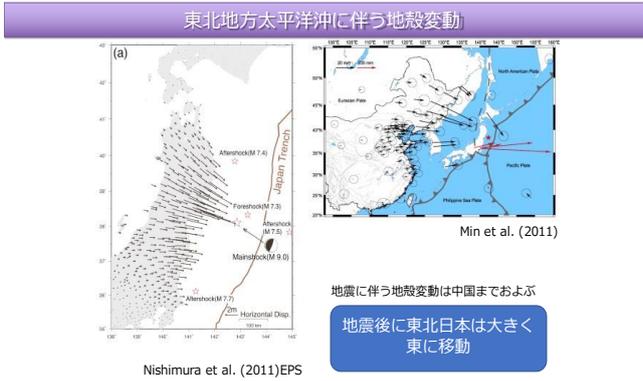
次に、日本で観測史上最大の2011年に起きた東北太平洋沖地震について詳しく見ていきたいと思
 います。右の図はGPSで地殻変動を観測したのですが、この手法による観測の歴史はそんなに古く
 なく1990年代ぐらいから観測が始まっています。GPSで地殻変動を測っていると言っても、雨
 が降ると地面が膨らんで数値が変わってしまったりするので経年の観測というのは非常に重要で
 す。GPSの機械そのものは1990年初頭ぐらい、あるいは1980年末ごろには出現してはいた
 ますが、地殻変動が正確に測れるようになったのは大体2000年ぐらいからです。それでその時ど
 ういう方向で地表が縮んでいるかを示しているのが図の左側に書かれている矢印です。私が非常に
 意外に思ったのは、東北の断層というのは南北に走っているのに東西に縮んでいるはずで
 す。それが何でこんなにズレてるのだろうと思いました。東北の下に沈み込む太平洋プレートと
 ユーラシアプレートとの境界面のところでの引っ掛かりについての論文が2006年に出版され
 ました。それによって、東北地方の真ん中ぐらいの沖合と房総半島沖、北海道沖でプレート境
 界が強く固着していることが分かりました。つまり、ここではプレートが引っ掛かっていてな
 かなか沈み込めない状態にあることを示しています。この固着が剥がれると大きな地震が起き
 ることになります。



左の図では、縦軸は海面の高さを表しています。日本列島での海面の高さを継続的に測り続けていますが、その値が変化していることが分かりました。宮城県や岩手県南部では海岸の沈降運動が数十年にわたって進行しています。しかし、数万年間の地質データではむしろゆっくりと隆起していることが知られていて矛盾しています。つまり、宮城県沖ではプレート境界の強い固着によって地表が下に引きずり込まれる現象が継続していたことが分かります。

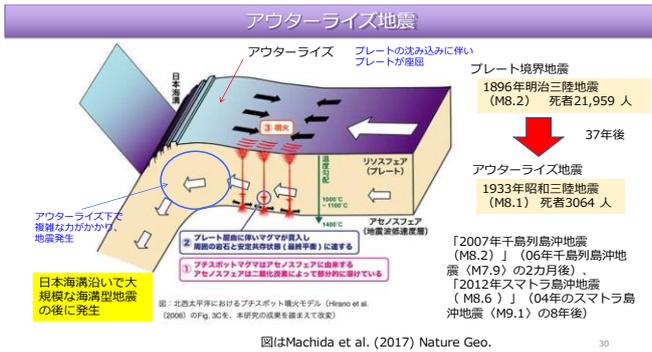
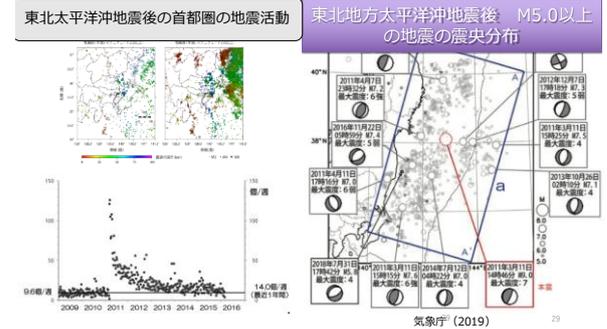
右の図は宮城県北部、松島の辺りですが、2003年ぐらいから内陸部や新潟や能登半島でも結構大きな地震が起きています。右の図面に於いて青など寒色系で示したのが横に押される力がかかっている度合を表します。この値は東北太平洋沖地震で以前のプレート間の固着を考慮して求めたものです。1950年代からマグニチュード6以上の地震が起きた場所は、このモデルで東西方向からの力が大きく作用した領域とほぼ一致しています。後知恵になりますが、地殻変動や地震活動から東北太平洋沖地震の発生は予測が可能であったと思います。





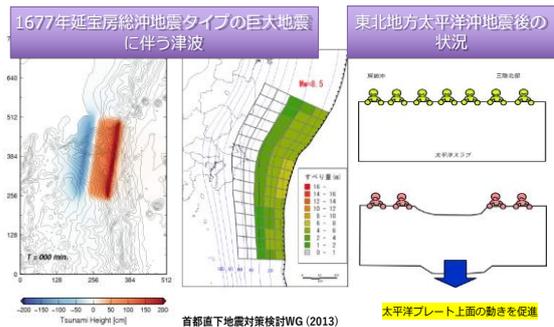
右の図の左下のグラフは関東地方における地震発生の大きさによる頻度分布を表したものです。これを見ると東北太平洋沖地震のあった2011年が特出して翌年から大きく下がってはいますが、未だ完全なレベルまでは下がりきっていません。東北地方太平洋側では今でも余震が続いていることを右側の地図は示しています。依然として地殻は東に向けて動いており巨大地震前の状況には戻っていません。

かつて東北地方の地殻変動は西の方を向いて移動していましたが、東北太平洋沖地震により今度は東側に向けて大きく動きました。その動きは日本列島だけでなく、中国大陸にまで及んでいます。中国・北朝鮮国境にある白頭山の噴火予測もこのことに起因するという見方もありました。福島県安達太良山のように西向きときは強く圧迫されていたのが東向きになると今度は緩慢になったために噴火しやすくなっているという話も出ていました。



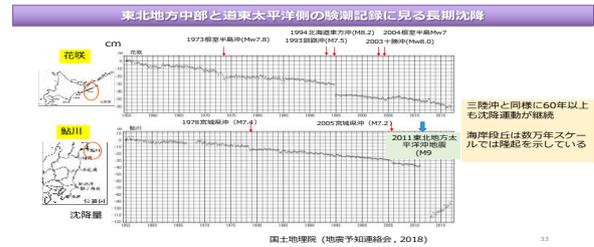
東北太平洋沖地震による地震の被害は殆ど収まってきていますが、アウターライズ地震というのが今、心配されていてこれが終われば一段落と言えます。これは太平洋プレートが日本列島の下に水平状態から斜め下向きに潜り込むときに境界部分で幾何学的に無理な力が掛かりこのアウターライズ地震を発生させます。発生時期はまちまちで、30年後に起こることもありますので注意が必要です。

右の図は超巨大地震発生の様子を漫画チックに描いています。通常は小人(こびと)全員で絨毯(太平洋スラブ)を支えていたものが、東北太平洋沖地震後はたった4人で両端だけで支えている状態になっています。それだけ両端に負担がかかることを示しています。房総沖でも巨大地震が発生する可能性があります。その場合の津波の大きさを計算したのが左側の地図です。東京湾内はともかく、外房ではかなり大きな津波が発生することが予想されます。

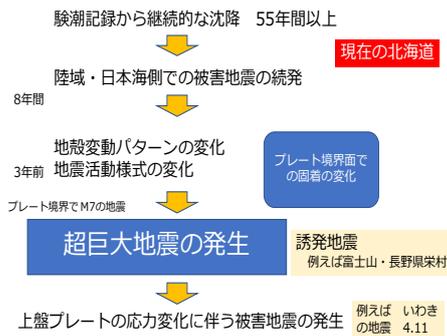


また、千島沖でも同様のことが考えられ地震調査推進本部によって東北太平洋沖地震と同じくらいの大きな地震の発生が予想されています。過去の巨大津波に伴う堆積物の発生間隔が根拠になっていますが、東北沖と同様に検潮記録も重要です。

右のグラフでは宮城沖と北海道東部での地盤沈降の状況を表しています。北海道も東北と同様に、地質学的には数万年間では海岸線はゆっくりと隆起してはならないので、観測されている沈降運動は永久には続かず隆起する必要があります。宮城沖では東北太平洋沖地震の2年後の2013年から隆起し始めています。北海道ではマグニチュード8の地震が発生しても沈降を続けていますので、それ以上の大きさの超巨大地震の発生が予測されます。



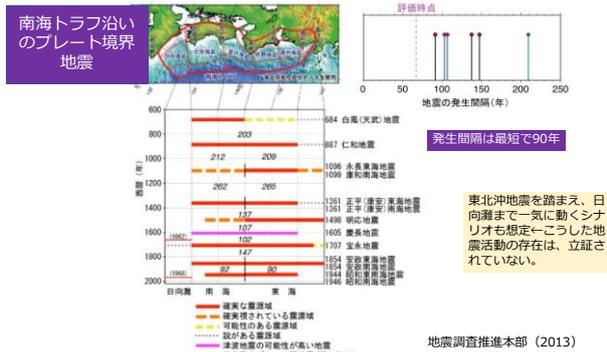
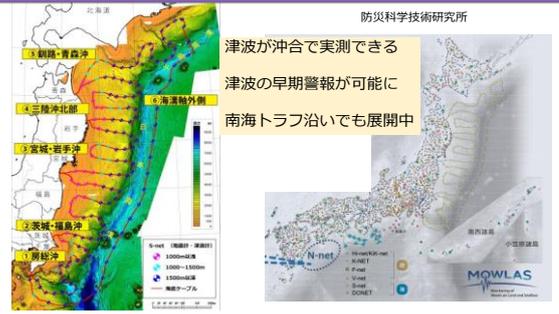
2011年東北太平洋沖地震からの推定



東北沖地震発生までの経緯をまとめると、検潮記録から数十年間にわたって海岸の沈降が続いていました。北海道でも同様に沈降運動がみられます。東北では東北太平洋沖地震以前の8年間は内陸部で地震が続きましたが2008年を最後に3年前からは地震が無かったのですが、その間にも地殻変動パターンが変化していました。プレート境界断層の一部が滑り出していた可能性があります。そういう時期を経てプレート境界付近でマグニチュード7の地震が起き、この地震を前触れとして超巨大地震が発生しました。

それに対する備えとして今、海底ケーブルによる観測網というのが用意されています。東北太平洋沖地震当時も1本だけ試験的なものがあり、その変位で津波の発生が観測できました。ただ、それが警報システムに繋がっていなかったため役には立っていませんでした。観測システムとして整った現在では、水かさの大小が即時電磁的に伝えられ素早く確かな警報が出せる仕組みになっています。即時対応することで人的被害は大幅に削減できます。

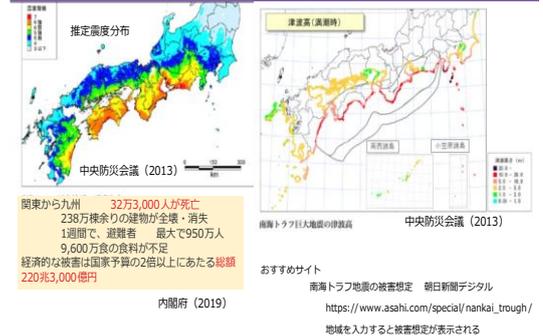
海底ケーブルによる観測網



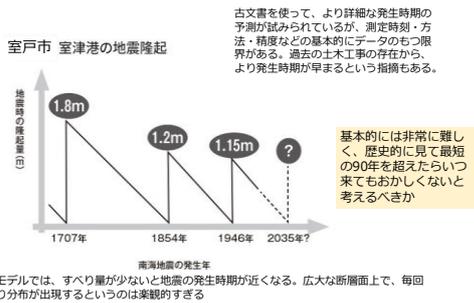
左の図は南海トラフでの地震の発生周期を過去の発生履歴から予測したもので、最短で90年間隔で起きていることが分かります。最後に起きた昭和南海地震が1946年ですから2035年ぐらいまでは大丈夫と思われま。ただ、東北太平洋沖地震の例を見ると遠州海盆から日向海盆まで一気に動くことも想定されますが未だ立証されてなく、あくまでも仮説の段階で、個別に割れる確率の方が高いと思います。

右の図は南海トラフ地震が発生した時の各地の震度と津波の高さの予想を描いたものです。それによると32万人余が死に、240万棟近くの建物が全壊或いは焼失し、その経済損失はわが国の国家予算の倍の220兆円を超えと言われています。興味のある方でもっと詳しい情報の欲しい人は図の右下に書いてあるURLをご覧ください。ただ、最悪の事態を想定したモデルですのでその点を十分留意してご覧ください。

南海トラフ地震に伴う震度分布と津波波高



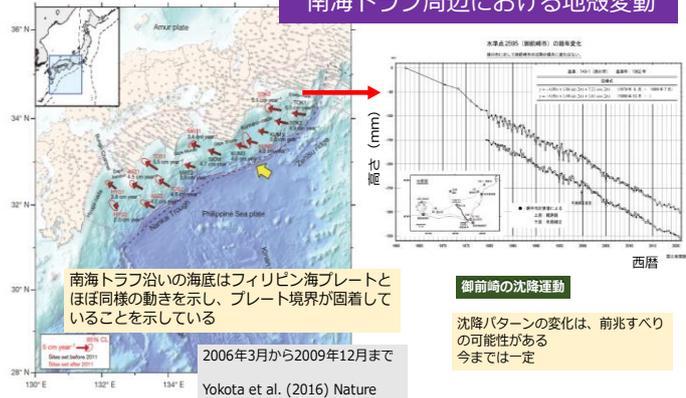
南海トラフ地震の発生時期予測



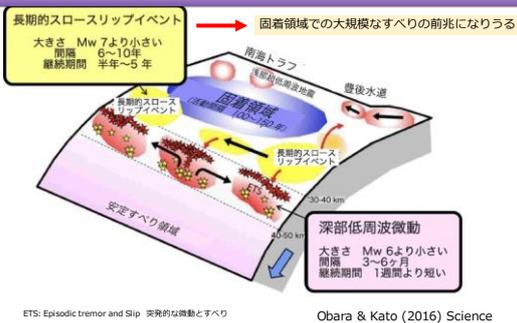
一方、GPS を使った地殻変動の動きを見ると、四国や紀伊半島では西北西方向に動いています。これはフィリピン海プレートの動きを反映しています。右の図の右側のグラフは静岡県御前崎での地盤沈下の推移を表していますが、この継続する沈降運動がいつ止まるかその時が地震発生の予兆です。しかしそれがいつかは今もって分かりません。ただ、間違いなく大地震発生が近づいてきていることは明白です。

次の巨大地震がいつ頃起きるかが最大の関心事ですがこの予測は非常に難しく、左の図にある室戸市での300年間に起きた地震による地盤の隆起経過を見ても、滑り量が大きいと次の地震発生までの期間が長く、逆に滑り量が小さいと次の発生時期が近くなるという傾向が見られます。そこで大体90年を超えたら次の地震がいつ来てもおかしくないと考えた方が良さそうです。

南海トラフ周辺における地殻変動



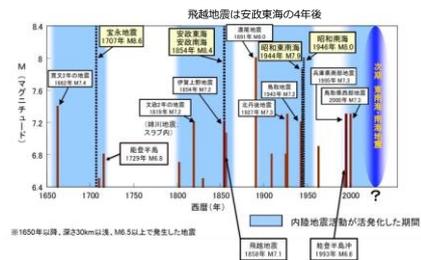
南海トラフ沿いのスロー地震



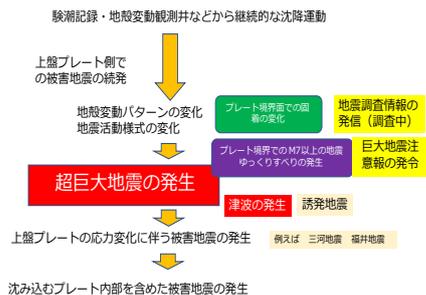
ここ10年ぐらいで分かったことですが、プレートが沈み込んでいる断層面の浅い領域は固着していて100年から150年間隔で剥がれて大きな地震を引き起こします。固着領域より深い場所ではそれより短い間隔でゆっくりとした滑り(スロースリップ)が起きています。スロースリップの発生が大地震のきっかけになる可能性があるため精神的に観測が進められています。

西南日本の地震の発生状況を見てみますと、1707年に宝永地震、1854年に安政東海/南海地震などいずれもマグニチュード8以上で発生しましたが、その前50年ぐらいの間にそれぞれ内陸地震が起きています。南海トラフ地震の発生が危惧されていますが、その地震の前に内陸地震が発生しやすい状況にあることに留意すべきです。

南海トラフ沿いの巨大地震と内陸被震地震



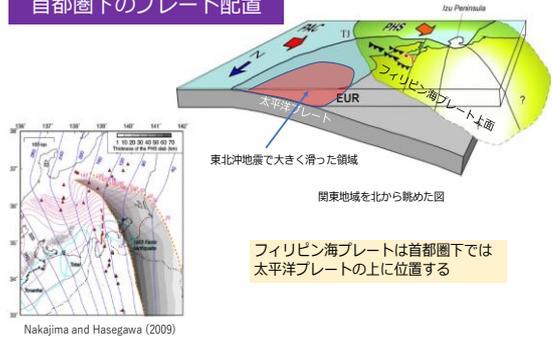
南海トラフ地震前後の地震・地殻変動



東北沖地震発生の経緯をまとめると、潮位記録や地殻変動記録などからプレートの動きに同期して地殻変動が進行しています。その間に内陸のプレートにも力が掛かるようになり大きな内陸地震が発生するようになります。そうした状況でプレート境界でのスロースリップやプレート境界でのやや大きい地震が発生すると地震調査委員会から巨大地震注意報が発令されます。巨大地震発生後には津波のほか、地震発生1カ月後程度までには大きな内陸地震も発生する場合がありますので注意が必要です。

首都直下型地震についても触れておきますと、右の図にありますように太平洋プレートの上にフィリピン海プレートが載っています。ちょうど関東地方南部の真下に入り込んでいて陸地とフィリピン海プレートの境界で関東地震(関東大震災)を引き起こしました。

首都圏下のプレート配置



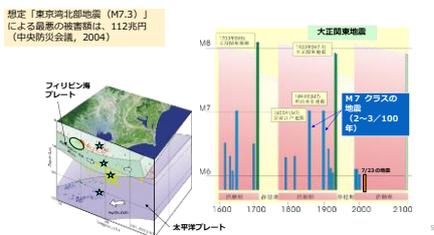
首都直下で起きた大地震



佐倉市も直接影響を受けるフィリピン海プレートは従来言われていたよりも浅い層にあり、一旦地震が起きると非常に強い揺れに見舞われます。1703年の元禄関東地震や1923年の大正関東地震もこのためマグニチュード8クラスの広範囲で大きな被害をもたらしました。

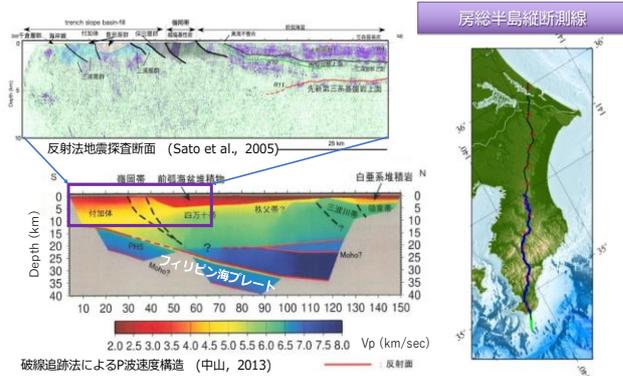
下のグラフも同様のことを表しています。

首都圏直下の大地震



右の図では、今後30年以内に発生が予想されるマグニチュード7クラスの首都直下型地震の確率は70%としていますが、これはデータのとり方に無理があり過大評価の可能性にあります。国民への大まかな警告としては仕方ないのかも知れません。

過去に首都直下で起きた地震は左の図に記載のとおりです。西南日本のところでも述べましたが、巨大地震の前にマグニチュード7クラスの内陸地震が頻発しています。1923年に発生した関東地震の68年前に安政江戸地震、29年前に明治東京地震が起きています。



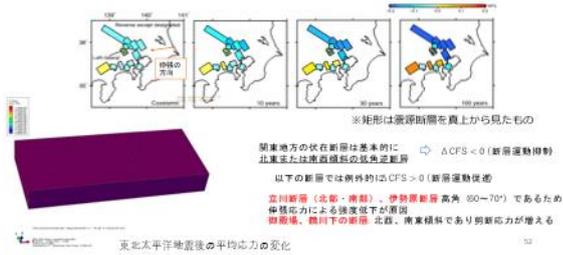
南関東の評価領域と過去の主な地震



ただし、この見積りは1923年の関東地震前後の地震を含んでいて過大評価の可能性あり ←佐藤コメント

東北地方太平洋沖地震後の関東の活断層の応力状態の変化

首都圏の活断層は総じて、東北沖地震後の地殻変動のため動きにくくなっている。

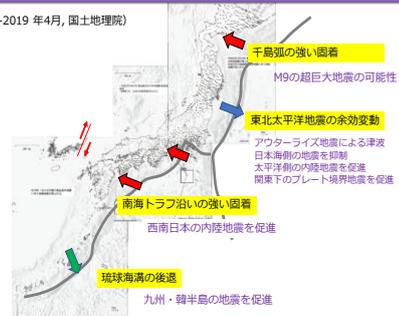


左の図にあるように、東北太平洋沖地震発生後の東向きの地殻変動は首都圏にある活断層の動きを抑制しています。従って、大規模地震は当分の間、起きにくいと思われます。

右の図には日本列島全般のGPSの向きが書かれています。これを見ると東北地方では東北太平洋沖地震の力が解放された結果、地殻変動が東の方向に動いていますので当面、プレート境界で発生する巨大地震については心配いりません。一方、道東では西方向に強い地殻変動が続いており危険な状態です。また、南海トラフでは西北西の方向にプレートと同時に動いていますので長くは耐えられない状態です。

GNSSによる日本列島の地殻変動

(2018年4月-2019年4月, 国土地理院)



2050年までの地震発生見通し

西暦	2020	2030	2040	2050
北海道		内陸地震が発生しやすい		超巨大地震
東北地方		太平洋側でスラブ内~上盤プレート地震		アウターライズ地震 (津波)
首都圏	安政地震・明治東京はプレート境界地震間 200年の後半に発生。2050以降の方が危ない。東京区部では若い人は死ぬまでに会おう可能性大			
東海から近畿・四国		内陸地震が発生しやすい		南海トラフでのプレート境界地震
山陰 北陸		内陸地震が発生しやすい		M7クラスは、あと1~2回か?
九州中部		内陸地震が発生しやすい		

※プレート境界地震発生後、数年で減少

北海道東部では内陸地震が発生しやすい状況にあり、東北では巨大地震は収まりつつある半面、アウターライズ地震の懸念があります。首都圏では巨大地震は当面ないものの、マグニチュード7クラスの地震発生可能性があります。近畿・四国では南海トラフの巨大地震が近づいているため内陸地震発生の可能性が高いと思います。

時間となりましたので、ここで質疑応答に移りその中でこれまでの説明不足についても補っていきたいと思います。ご清聴どうもありがとうございました。

【質疑応答】

Q1：千葉県庁が発表している地震予測によると、震源は千葉市の海岸沖となっています。千葉市では震度6強、内陸の佐倉市や成田市では震度6弱 or 震度5程度としていますが、逆にこちら側が震源になる可能性はないのでしょうか？

A1：それは私もわかりません。安政江戸地震のときも震源がどこかは今も論争中です。フィリピン海プレート中の岩盤が原因ではないかという説が有力ですが、震源になるそのプレートの割れ目がどこにあるのかも充分には分かっていません。どちらかという防災上の観点から自治体側でより被害が大きくなる地域に震源を持ってきているのではないのでしょうか。

Q2：2011年に起きた東日本大震災では福島県の原子力発電所での事故がいまだにいろいろな問題を引きずっています。東京電力では専門家から震災前に大地震の際の危険防止についてアドバイスを受けていたようですが現実には何の対策も取られず残念な結果となりました。専門家の皆様の方で事業者に聴いてもらえるような何かより有効な手法は用意されているのでしょうか？

A2：活断層の認定の段階で事業者にも周知徹底することが肝要ですが、その事業者がその土地を取得したのは認定時期より遙か前の段階ですので現実的には難しい問題です。昨今の急激な温暖化現象の中でエネルギー源としての原子力について国民的レベルで議論すべきテーマです。

Q3：地震の原因はプレート間のぶつかり合いと認識していたのですが、大陸のど真ん中の地震発生はこのぶつかり合いが原因なのでしょうか？地震発生がない地域というのはプレートが1枚しかないということなのでしょうか？

A3：プレートテクトニクスでは説明のつかない部分です。海のプレートに比べ軟弱な陸のプレートでは600℃ぐらいで溶ける長石や石英を多く含み地殻変動を起こしやすいのと、20億年の歴史を持つ大陸ではその生成期に起きたねじれやしわ、岩石の硬さなど揺れの原因となる要素があります。

佐藤 比呂志(さとう ひろし)先生のプロフィール

【経 歴】

1955年 宮城県生まれ

東北大学理学部地質学古生物学教室卒

東北大学大学院理学研究科中退、茨城大学理学部を経て

東京大学地震研究所に勤務(2021年3月まで)

【主な著書】

『地震予知連 50年の歩み』(分担執筆, 国土地理院, 2020)

『巨大地震はなぜ連鎖するのか-活断層と日本列島』(NHK出版, 2016)

『日本の地形・東北地方』(分担執筆, 共立出版, 2005)

『第四紀逆断層アトラス』(共編著, 東京大学出版会, 2002)