

Theme : 自然災害を教訓に

地震災害の予測と備え

京都大学 防災研究所
社会防災研究部門 准教授

関口 春子氏



講演の内容

- 地震はなぜ起こるか？どこで起こるか？
- 地震動予測(将来の地震の揺れの予測)とは
- 地震動予測で重要な要素
- 京都市付近の地震環境・地盤・地震動予測
- 2018年大阪府北部の地震とその教訓

I 地震はなぜ起こるのか？どこで起こるのか？

地震はどういうところで起こっているのでしょうか。【図1】は、世界で、深さ50kmより浅いところで起きたM4以上の地震が発生した場所を示しています。その20%が日本付近で発生しています。地震が起きる場所として、まずプレート境界があげられます【図1】【図2】。近づき合うプレート境界の海溝、擦れ違うプレート境界のトランスフォーム断層、そして離れ合うプレート境界の海嶺です。地震のほとんどがこのプレート境界の周辺で起こっています。日本の近くには、プレート境界が非常に複雑に入り組み、日本列島の真下にプレート境界が延びています。日本は地震の多い地域であるということは、お分かりいただけると思います。

世界の地震分布
(深さ50km未満、M4以上)

約20%が日本付近で発生

世界のプレート境界



図1

地震が起きる場所 3種類のプレート境界

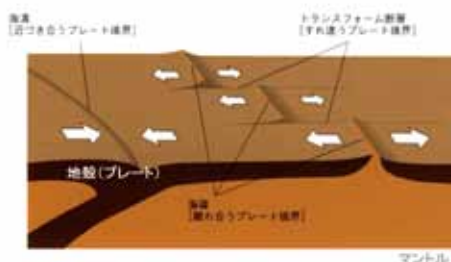


図2

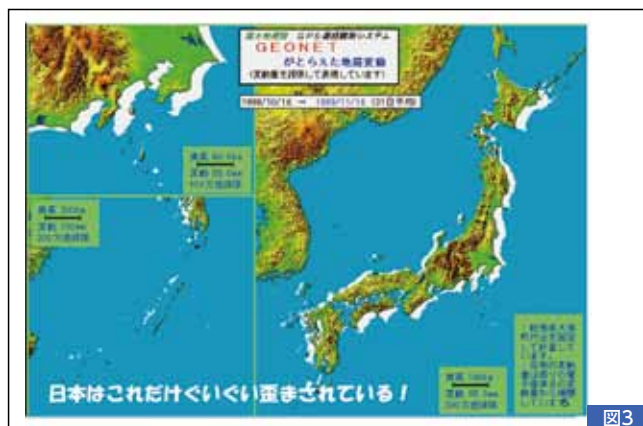


図3

プレート運動は地殻をひずませます。【図3】は、国土地理院の連続観測システムGEONETが捉えた地殻変動のアニメーションです。一年間、日本列島がプレートによって押し潰されていく様子を、ひずみの大きさを200万倍に誇張して表したものです。幅の狭い方向に、押し縮められて、日本列島はさらに幅が狭くなっていきます。実際には、ずっと縮められ続け

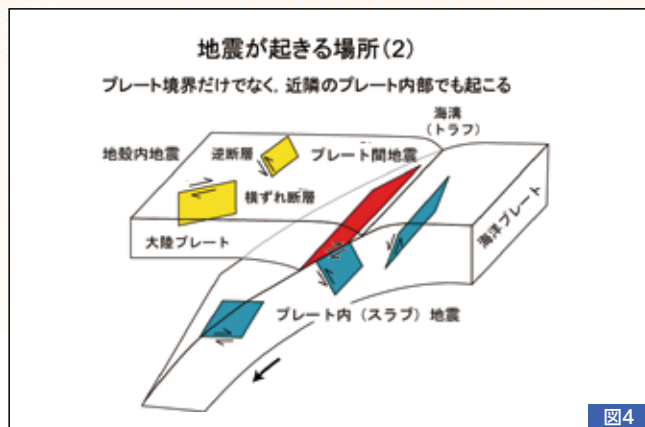


図4



図5

ているのではなく、時々起こるプレート境界の地震によってリバウンドしています。プレート境界周辺域に蓄積されたひずみは、プレート境界地震だけでなくプレート内部にも地震を起こします【図4】。

地震調査研究推進本部は、日本列島周辺で地震が起こる可能性が高いと予測されるプレート境界地震や活断層の地震を挙げています【図5】【図6】【図7】。活断層の活動評価は、トレンチ調査と言って、活断層が通っている部分の地面を掘り、断層を挟んだ地層のずれ方や地層の年代を調べて行います。京都周辺ですと、例えば、琵琶湖西岸断層が挙げられており、平均活動間隔が1000年から2800年で、最新活動時期は2800年から2400年前とされています。しかし、仮に地表に現れないような地震が起こっていたら、トレンチ調査では知り得ません。もっと新しい時代に地震が起こったかもしれませんし、活動間隔がもっと短いかもしれません。

※地震調査研究推進本部とは、平成7年1月17日に発生した阪神・淡路大震災の経験を活かし、地震に関する調査研究の成果を社会に伝え、政府として一元的に推進するために設置された特別の機関です。



図6

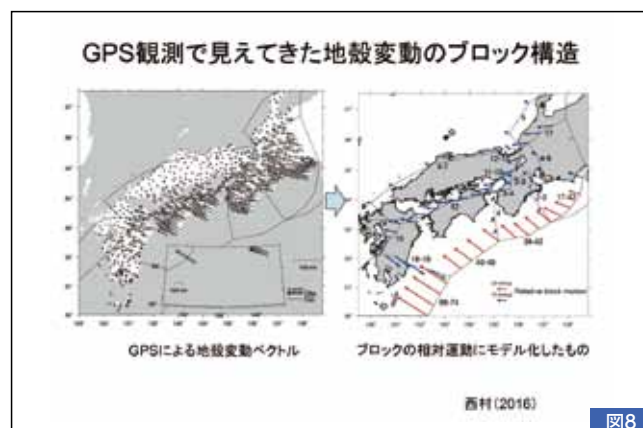


図8

掘って調べるのには限界があるので、他の方法でも探られています。その一つとして、まだ研究段階なのですが、地殻変動の観測データを使う方法が検討されています【図8】。GPSによって地殻変動を把握し、そこから現在、ひずみの蓄積が集中している場所を調べています。トレンチ調査ではわからない部分を補強するものとして、5年後、10年後になれば、こういうものが日本の活断層の長期予測に使われていくのではないかと考えています。

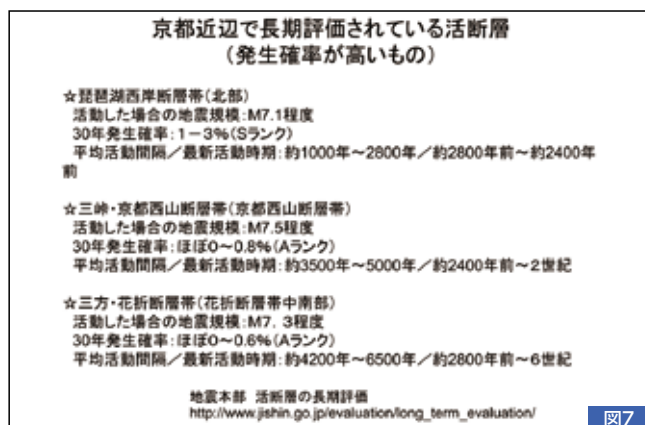
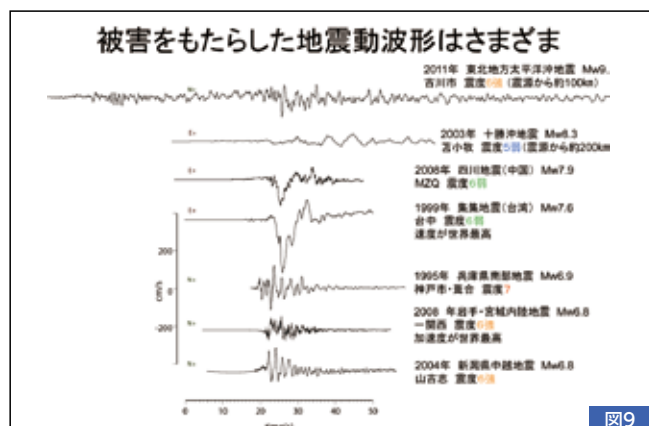


図7

Ⅱ 地震動予測(将来の地震の揺れの予測)とは



地震動予測についてお話ししたいと思います。まず、実際に起こった被害地震の揺れとはどういうものなのかを最初に見ていきます。【図9】には、大きな地震被害を受けた地域で観測された地震波形(速度波形)を挙げました。下の5つは震源断層に近い(数km程度)ところ、上の2つはプレート境界の地震による震源からかなり離れた地点のものです。

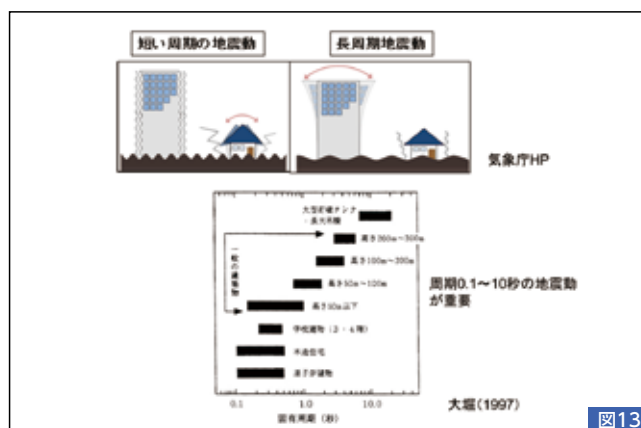
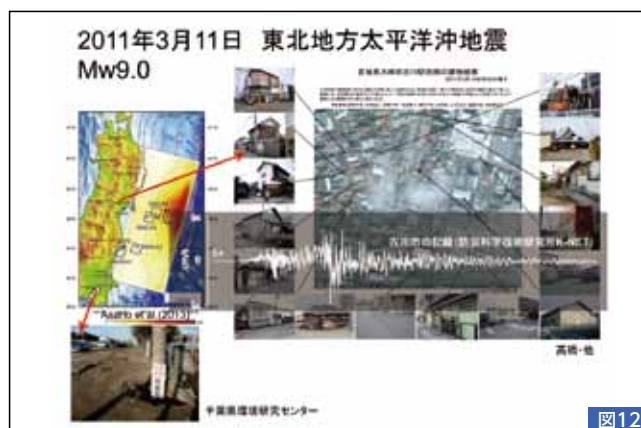


1995年に起きた兵庫県南部地震では、神戸の激震地域で写真の高速道路が倒れる被害が発生しましたが、地震波形はその地域で観測されたものです【図10】。2004年新潟県中越地震は、建物被害や地滑りが多発し、山古志村では全村避難を余儀なくされました。2008年岩手・宮城内陸地震は、神戸の地震よりはちょっと小さい地震ですが、この記録の加速度は世界最大です。かなり短周期の揺れで、地すべりが多発しました。1999年の台湾の集集地震と2008年の中国の四川地震は、兵庫県南部地震よりずっと大きい活断層の地震です。【図11】は、集集地震による断層で5mの滝ができ、橋が落ちた状況の写真と近傍の観測波



形です。

2003年十勝沖地震では、震源から200kmも離れた苫小牧で多数の石油タンクがスロッシングを起こし火災となる被害が発生しました。苫小牧では一般の建物の被害は大きくなかったのですが、石油タンクだけが集中的に破壊されたのです。2011年東北地方太平洋沖地震は津波被害が甚大だったのに比べれば、揺れによる建物被害は小規模でしたが、建物被害に加え液状化被害も多数発生しました。【図12】は、揺れによる被



害が最も大きかった古川市の被害の様子と観測波形です。

このように、被害をもたらした地震動波形は、振幅

(揺れの大きさ)だけでなく、特徴的な周期や継続時間などの点でもさまざまです。地震波形の特徴がさまざまである原因には、地震の規模やずれ破壊の仕方の違い、震源から観測点までの距離の違い、そして、観測点周辺の地盤の違いが挙げられます。地震波の特徴により、地震被害も変わってきます。特に、その周期の違いが建物被害のあらわれ方に影響するのです。

【図13】は、一般の木造住宅や高層ビル、先程出てきた石油タンクのような大きな構造物、それぞれがどのような周期で揺れやすいかを示した図です。横軸が固有周期で、それぞれの大きさの建物がどれぐらいの周期で揺れやすいかということを表しています。例えばブランコに乗ったとき、ブランコが揺れやすいタイミングで、足を伸ばしたり縮めたりしないと揺れてくれません。ブランコにはブランコの周期があって、それに合った力を与えてやると大きく揺れますが、それに合わないといくら足を動かしても揺れは大きくなりません。そのようなことが建物にもあります。地震の波自体には色々な周期の波が含まれており、その中で、その建物に合った周期の成分が建物を大きく揺らし、ずれた周期の成分は、あまり影響がないのです。ですから、先ほど、苫小牧で石油タンクだけが集中的に壊れたという地震の話をしたましたが、石油タンクに影響する長周期成分が強く、一般建物に影響を与える、より短い周期の成分が弱かったために、他の建物には影響がなかったのですが、石油タンクだけが被害を受けたのです。地震波に混ざっている各周期成分を的確に予測することも、建物等の被害の予測には重要です。

Ⅲ 地震動予測で重要な要素

地震動予測で重要な要素について、どのようなモデル化がされているかということをお話したいと思います。重要な要素は、一つは震源断層、もう一つが地盤です。

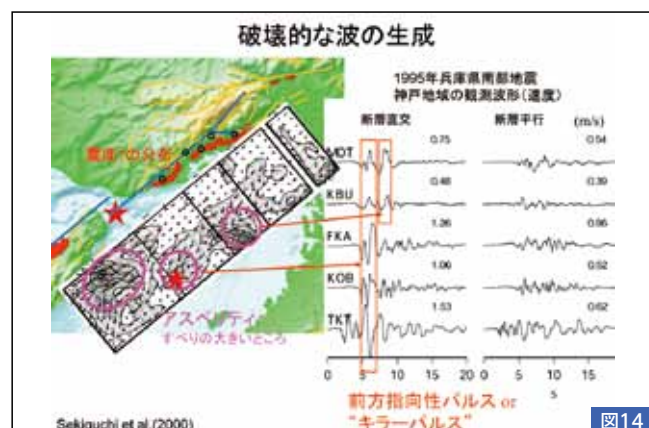


図14

まず、震源断層でどんなことが起こって破壊的な波が生成されるのか、1995年の神戸の地震を例に説明したいと思います【図14】。神戸側の○の場所で、このような地震波形が観測されました。観測波形に2つ強い波が見えますが、これによって建物が一発で壊されたということで、当時、キラールパルスと呼ばれました。観測波形を解析すると、震源断層での滑り破壊は明石海峡の下から始まって、南西の淡路島側と北東の神戸側に進みましたが、淡路島側の比較的浅い部分と、神戸側の深い部分が大きく滑ったことがわかりました。そして、神戸側で観測された地震波形のキラールパルスは、神戸側の深い部分の2か所の大きな滑り域から発していたことがわかりました。細かく見ると、キラールパルスが、神戸大学や本山辺りでは2つ見えているのですが、南西寄りの地点では1つしか見えていません。大きな滑りが近づいていく方向にある観測点には強いパルスが表れて、遠のいていく方向にある観測点では大きなパルスにはなりません。これはドップラー効果と同じです。ドップラー効果は、音の発生源が近づいてくるとき音が高く、遠ざかるとき低く聞こえる現象ですが、地震波でも原理的には同じことが起き、振幅に着目すると、すべり破壊が近づいてくるときに振幅が大きく、遠ざかるときに小さくなります。南寄りの観測点は、神戸側の2か所目の大きい滑りが生じているときは、破壊の伝播方向の後ろ側になっているため、2か所目の大きな滑りからの波は大きくならなかったと考えられます。また、淡路島側の滑りは神戸側の滑りより大きいのですが、神戸側の観測波形には大きな影響を与えていません。

このようなことがあるので、地震動予測の震源断層の設定では、震源断層上で滑りの大きいところとそうでないところを作り、破壊開始点（震源）の位置とそこからどのように破壊が伝播していくかでモデル化する必要があるのですが、それを地震が起こる前に推定するのは非常に難しいのです。

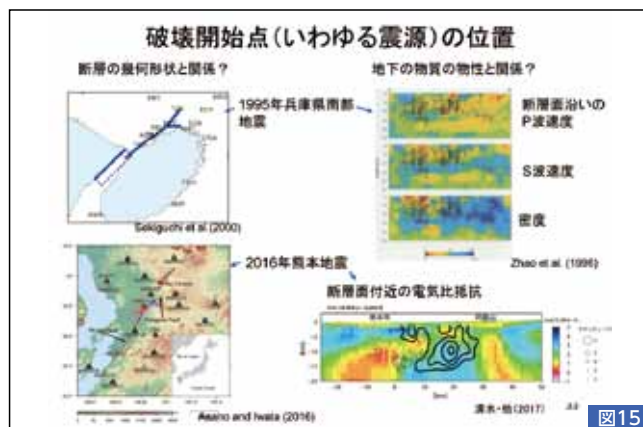


図15

破壊開始点がどこになるかというのも、非常に難しい問題です【図15】。神戸の地震のときは、断層が

神戸側ではほぼ鉛直に立ち、淡路島の方では傾斜した断層があり、この継ぎ目のところが複雑だったため、そのように断層面の幾何学的形状が複雑なところにひずみが溜まりやすいのではないかとという考察も出ています。図の右側は、断層沿いの地下の構造を地震波を使って推定したものです。地下の物質の密度や地震波伝播速度などにどのような違いがあるかということを調べ、地震の破壊開始点になったところに何か特別な特徴がないか、検討されています。今、こういう検討結果がいろいろと積み上げられてはいますが、まだ研究者のコンセンサスが得られるほどには証拠が集まっていないというのが現状です。

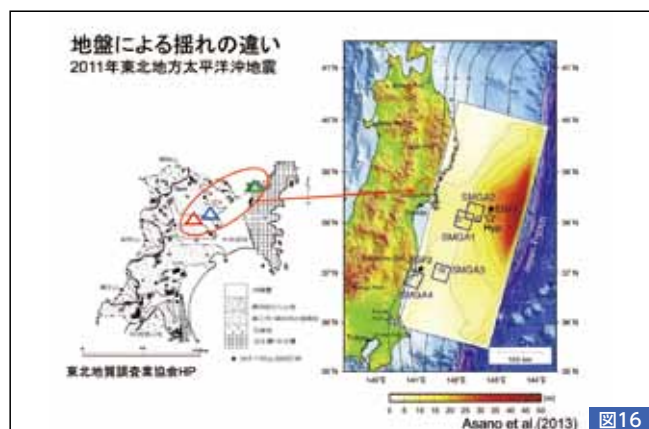


図16

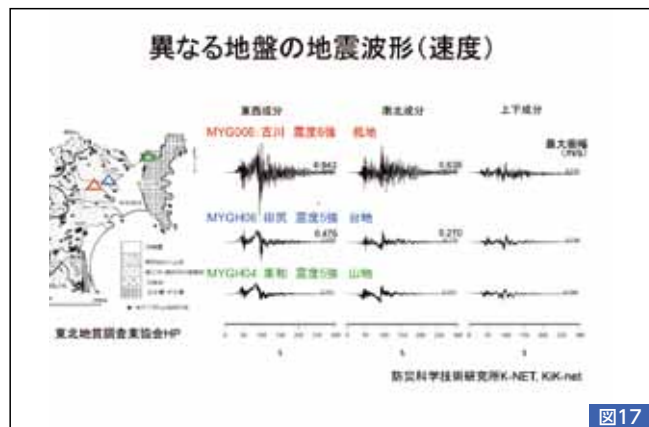


図17

次は、地盤による揺れの違いをお話します。まず、2011年東北地方太平洋沖地震の際の事例で見ていただこうと思います【図16】。この地震では、沖合の地下の震源断層上にこのような滑り分布があったと推定されています。宮城県に設置されていたこの3つの観測点に着目しますが、震源断層が結構遠いので、震源断層との相対位置はそんなに変わりません。3地点の観測波形を比べると【図17】、短周期の揺れを除けば、お互いとてもよく似ているのですが、短周期成分が大きく違ってきます。振幅は山地の観測点が一番小さく、次に台地で、低地で一番大きくなり、震度も5強から6強までの違いが生じました。たぶんこれらの



図18

観測点の地下10kmあたりに達したときの地震波はほぼ同じだったのが、最後、地表までの数kmもしくは数百mを伝播する間に違いが生じたと考えられます。このように、断層から放出される地震波の性質だけではなく、最後の数kmの地盤構造が揺れの様相をかなり左右します。地盤が揺れに影響を与える例は、過去の地震被害でも多数見られます。【図18】の左上の図は、1923年の関東大震災で建物が全壊した割合から推定された震度の分布です。関東地震はプレート境界地震で、フィリピン海プレートが神奈川県と千葉県の方から関東平野の深い方に沈み込んでいるので、この断層の真上の地域、神奈川県や千葉県の南側で揺れが大きいのは当然なのですが、今注目していただきたいのは、埼玉県や千葉県北部の地域です。埼玉県東部から東京都の東部にかけての地域で全壊率が高く、大きな震度が推定されているのに比べ、断層から同様な距離にある千葉県北西部には、ほとんど被害がなく、震度が小さく推定されています。この大きな違いの主たる原因は地盤の違いです。

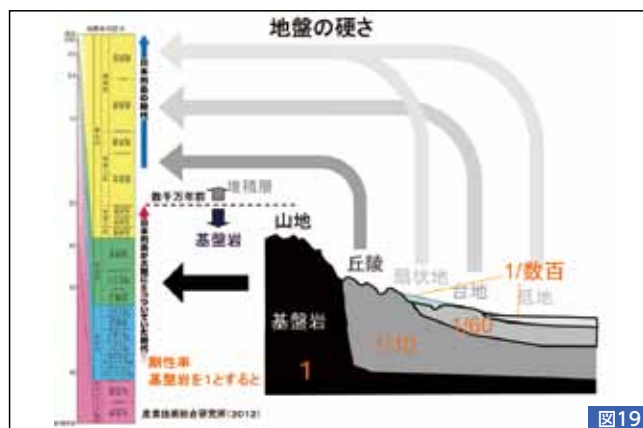


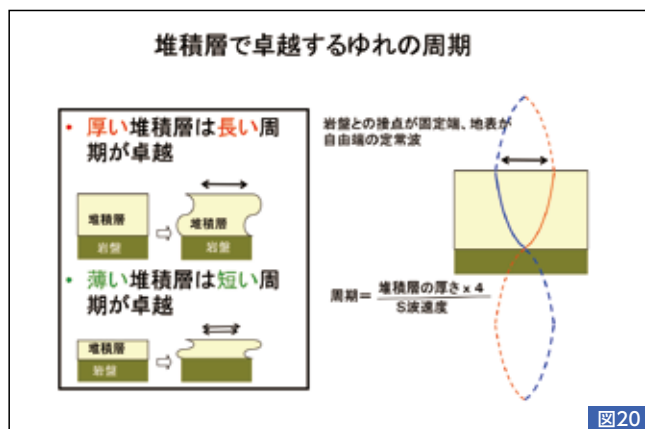
図19

日本の一般的な地盤構造は【図19】のような感じですが。山地のようなところは、ごく表層を除けば固結した岩でできており（基盤岩）、丘陵や扇状地、台地、低地と呼ばれるところは堆積層と呼ばれる、固結していないもので埋められています。ただこの固結してい

ないところでも、色のグラデーションで表現したように硬さの違いがあります。礫や砂、泥が堆積してからどれくらい時間が経っているか、どのくらい圧密を受けてきたかによって硬さが変わります。堆積層が固結して岩になるには、2000万年以上を要すると考えられています。

岩や堆積層の硬さのスケールに剛性率というものがあります。剛性率は、せん断力（ずれを起こす力）が与えられたときの変形しにくさです。剛性率が小さいほど、軟らかい、揺れやすいということになるのですが、例えば基盤岩と台地の地盤の地層を測ると、60倍位剛性率が違います。基盤岩の剛性率を1とすると、丘陵の地盤が10分の1、台地で60分の1、低地ですと数百分の1くらいになります。堆積層地盤に何故注目しなければならないのかをまとめますと、まず軟らかいので揺れが大きくなりやすい。また、一旦硬い基盤岩から軟らかい堆積層に地震波が入ると、その後、地表面で反射して深いほうへ戻って行っても硬い基盤岩へはあまり抜けていかず、地震波が堆積層の中にずっと居座り続けるという現象が起こります。

堆積層の厚さというのは場所によって大きく違うのですが、堆積層が厚いところほどその地盤を揺らす周期、揺れやすい周期が長くなります。先ほどお話ししたように、揺れの周期は構造物被害を左右する要素ですから、地表が堆積層かどうかだけでなく、堆積層の厚みも重要です。



ここでもブランコを例にお話ししますが、ブランコの紐が長いとゆっくりした周期で揺れますが、逆に紐を短くしてしまうと短い周期でしか揺れません。堆積層地盤の揺れやすい周期が堆積層の厚さで決まるのも同様の仕組みです【図20】。

東北地方太平洋沖地震のとき、震源断層から600kmくらい離れた京都や大阪でも揺れを感じた方がおられると思います。比較的堆積層が厚い地盤の上にいたり、建物のやや高い階にいたりした場合、ゆっくりとした揺れを感じられたのではないのでしょうか。地震の波は、当然、遠くに広がるほど振幅が減衰していくの

ですが、減衰の仕方が周期によって違います。先程、地震波には色々な周期があると言いましたが、短い周期の成分はすぐに減衰してしまって、遠くには届かないのですが、長い周期の成分は遠くまで伝播します。更に大阪のような堆積層の厚いところでは、その厚い堆積層の地盤によって増幅することになります。ただ、長周期の揺れというのは、一般の建物には影響を及ぼさず、非常に高い高層ビル等だけが被害を受けます。

IV 京都市付近の地震環境・地盤・地震動予測

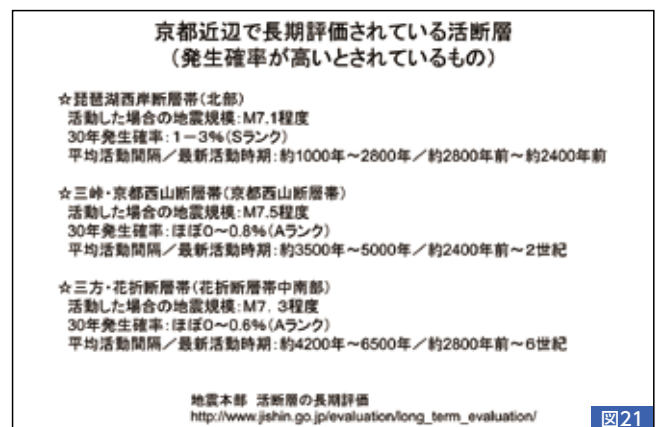
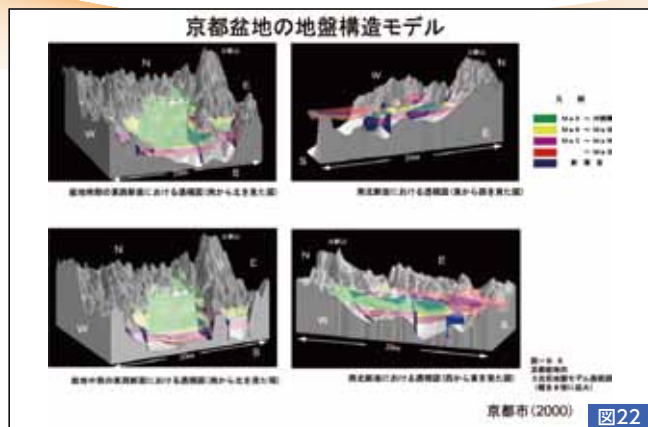


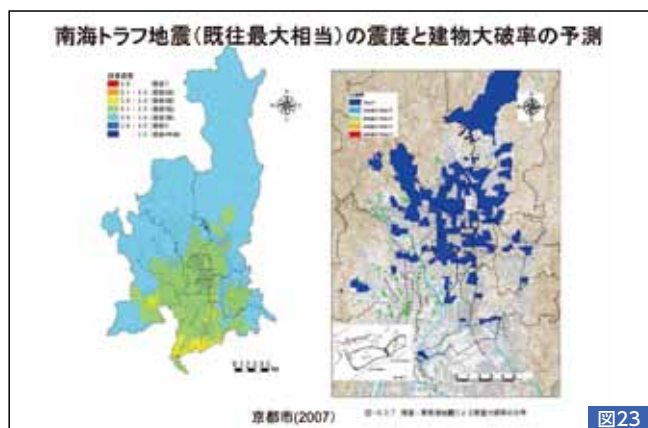
図21

京都周辺の地震環境のお話を少ししておこうと思います。先程紹介しました地震調査研究推進本部で、それぞれの地域の過去の大地震やその被害についてもまとめられていますので、ご興味があれば見ていただきたいと思います【図21】。現在調べられている限りでは、これらの断層帯が、発生確率が高いものとしてピックアップされ、震源断層の設定や地震動の予測がされています。

地盤構造については、京都市が京都盆地の構造を調べるためにさまざまな地下構造探査を実施しています。地面を重いもので叩いて揺らすと、波が深いほうへ伝わっていき、地下に物質の変化するところがあるとそこで波が反射して戻ってくるのですが、その反射波の戻ってくる時間を測り、地下の物質の構造を調べる探査を反射法地震探査と言います。京都盆地では、東西・南北に走る複数の測線で反射法地震探査が実施されていますが、それによりすると、京都市の中心部では堆積層が200〜300m位の厚さで、宇治川のところに宇治川断層帯という活断層があるのですが、ここでガクンと深くなって、それより南の地域では600〜800mというような厚い堆積層があります。また、地面に穴を掘って、地下にどのような物質があるかを直接調べる調査もされています。こういうものをまとめて、京都盆地の地盤構



造モデルが作られています【図22】。地震動予測を行う際には、この地盤構造モデルをコンピュータに入れ、例えば、花折断層の位置に断層のずれの変形を入れて、地震の揺れが広がって行く様子を計算します。さらに、揺れの強さと建物被害の経験的モデルを使って、計算された揺れの強さから建物の大破率分布が推定されています。このようにして、主要な活断層について地震動の予測計算がなされ、震度や建物大破率などの被害の予測結果が市や区のサイトで公開されています。南海トラフについても少しお話しします。南海トラフ地震についても勿論、地震動予測や被害想定結果が出されています。過去に南海トラフで起こった地震についての歴史的・地質学的な資料から推測した既往最大の地震や、東北地方太平洋沖地震の経験を踏まえたM9規模の地震など、複数の震源断層が想定され、そこから京都市内の震度が計算されています。既往最大の地震を想定すると、大きくて震度5強、震度6弱位という数字が出ています【図23】。南海トラフ地震が起きたとき、京都市の揺れが震度6強や7になる確率は低そうです。ただ、南海トラフ地震は、京都の南の奈良県や和歌山県の更にその沖合に起こる遠くの地震と考えておられる方も多いと思うのですが、震源断層自体は陸地の下に延びてきて、特に大きめのM9を想定した場合は、割と近いところで起こるのだということも意識していただきたいと思います。



V 2018年大阪府北部の地震とその教訓

2018年の大阪府北部の地震はM6.1の地震で、被害が発生した地震としては小さい地震でした。震度分布を見ると、京都の南部で震度5強から5弱でした。どういう被害だったかという、大破は多くはなく、一方、屋根瓦が落ちるというような小破は沢山ありました。しかし、小破でも件数が多かったため、直し手が足りず、修復作業までに時間がかかって、建物が駄目になってしまったということがありました。すぐ直せず放置する間に、台風等の影響もあり、被害の状況が悪化したということもありました。また、公共交通機関が一時止まり、大勢の人々の生活に影響が出ました【図24】。人口密集地域で大きな地震が起きると、一つ一つの被害の深刻さの度合いは高くなくても、被害や影響の総量は大きくなります。南海トラフ地震が起こった場合、前述の震度の予測どおりですと、京都市では壊滅的な被害にはならないと考えられますが、中小規模の被害が大量に発生する可能性があります。南海トラフ地震は、地震規模が大きくなるので日本の広い範囲でこのようなことが起こるでしょう。被害の復旧が進まないという状況は、大阪府北部の地震のときよりずっと深刻な状況になるのではないかと思います。

地震の多い日本で生活するうえで、自身の生活圏の地震環境を確認し、常に地震災害への対策、備えを考えていただきたいと思います。



まとめ

- ・地震の時に生じた地表地震断層がくりかえし活動することにより活断層が作られる。将来の地震の震源断層もそこになる。
- ・地震動予測は、減災のための対策を行う際の基礎情報を提供。
- ・被害をもたらす地震動は、断層の破壊プロセスや地盤によりさまざま。
- ・構造物被害や液状化は、地震動の強さ、周期特性、継続時間に影響を受ける。
- ・地震動予測では、これらを適切に予測するため、震源のモデル化と地盤のモデル化の精度を高める努力をしている。
- ・内陸地震の震度7は、震源近傍x地盤条件で発生。
- ・超高層建物等の被害は震度では予測できない。
- ・中程度の被害でも、罹災人口が多いと社会全体へのダメージが大きくなる。
- ・自分の生活圏の地震環境の確認を。