講演 / 令和3年10月31日（日）京都市市民防災センター

Theme：自然災害を教訓に

# 南海トラフ沿いの巨大地震と近畿地方の内陸地震

京都大学 防災研究所
地震予知研究センター 教授
澁谷 拓郎氏

## I 地震と津波の発生メカニズム

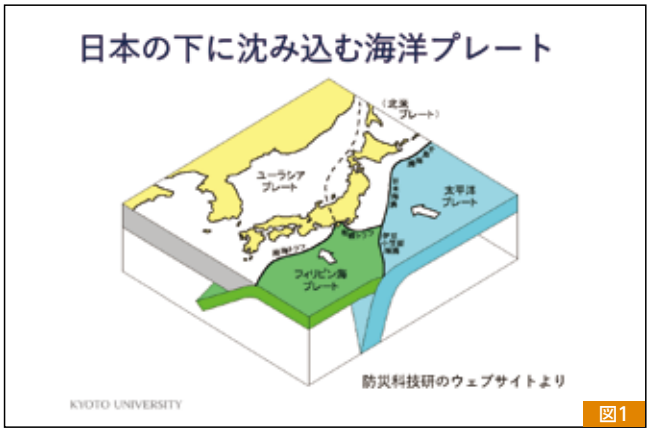

図1

日本列島は、ユーラシアプレートと北米プレートの上にあります。フィリピン海プレートが南海トラフと相模トラフから日本列島の下に沈み込んでいます。さらに太平洋プレートが、千島海溝と日本海溝から東北日本の下に沈み込んでいき、伊豆小笠原海溝からフィリピン海プレートの下に沈み込んでいます【図1】。このように、プレートが沈み込むことで日本列島が歪むわけです。国土地理院は日本全国にGPSの観測点を1,000点位持っていて、それによって、日本列島の歪みを確認することができます。紀伊半島と四国等は北西方向に移動しています。これは沈み込んでいるフィリピン海プレートに引きずり込まれているということです。また、中国地方は東の方向に動いています。これはユーラシアプレートが1年に2㎝位のスピードで東に動いているということです。ちなみに、フィリピン海プレートは1年に5㎝ないし6㎝のスピードで北西方向に動いています。日本列島は、太平洋プレートの沈み込みにより西にも押されています。東からも西からも押されて歪み、その歪みの集中帯が新潟県から神戸の辺りに見られます。1995年の兵庫県南部地震、阪神淡路大震災もその歪み集中帯で起こりました。

海溝型巨大地震の発生の仕組みですが、フィリピン海プレートが紀伊半島や四国の下に沈み込んでいて、このプレート境界で摩擦力が働いています。この摩擦力によってフィリピン海プレートと陸側のプレートがくっついているわけです。フィリピン海プレートが年間5㎝ないし6㎝沈み込むと、この陸側のプレートも引きずり込まれ、歪みが生じます。陸側の岩盤はバネの性質をもっており、歪みに比例して元に戻ろうとする力は大きくなります。元に戻ろうとする逆向きの力が摩擦力より大きくなったとき、陸側プレートの跳ね上がりが起こります。この跳ね上がりのときに、このプレート境界面、これが断層面になりますが、この面を境に陸側のプレートと海側のプレートの間で食い違いが起こり、それが地震を発生させることになります。また、跳ね上がることにより、海底の地形が変わります。あるところでは隆起し、あるところでは沈降します。それにより海面に変動が起こり、それが波として伝わっていくのが津波です。

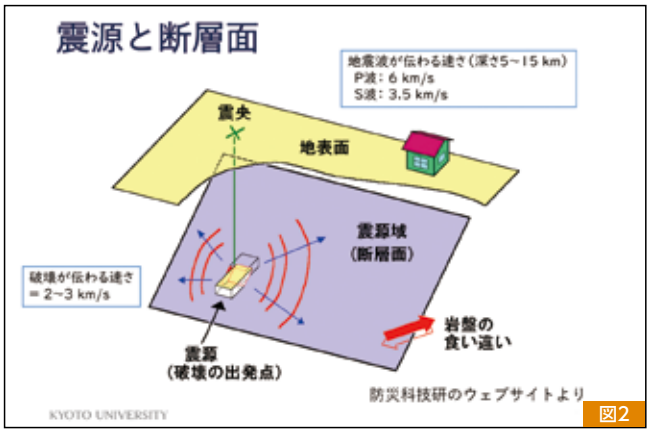

図2

断層面は、地震のときにずれる領域です。震源というのは、岩盤の食い違いが始まる点をいいます。この破壊の出発点です。そして、震源を地表面に投影させたものを震央といいます【図2】。実際に断層面と言っても均質ではなく、破壊が伝わり易いところ、伝わりにくいところ、断層面のくっつきの度合いが強いところと弱いところがあります。それが地震の波形のぎくしゃくを生み、

強い加速度を生む原因になっています。破壊が伝わる際に断層面で食い違いが起こると、そこで地震波が生成され、周囲に伝わっていきます。地震波が伝わる速さは地面の深さにもよるのですが、深さ5～15km位の範囲では、P波が1秒間に6km、S波が3.5km位のスピードで伝わります。P波はS波の1.7倍位のスピードです。

断層の大きさを比べてみます。これまで知られている中で一番大きな地震は、1960年に南米のチリで発生した地震です。海溝型巨大地震で、断層の長さが1,000km、Mw9.5です。これはモーメントマグニチュードと言って、気象庁が決めているマグニチュードと少し違います。その次に大きいのが、1962年のアラスカの地震でMw9.2です。次に2004年のスマトラ地震で、Mw9.1です。2011年の東北の地震も大きい地震で、Mw9.0でしたが、スマトラの地震とほぼ一致するぐらいの断層の大きさをもっています。今日お話する南海トラフ巨大地震、昭和の南海地震と昭和の東南海地震ですが、それぞれMw8.4とMw8.2です。東北の地震と比べると、かなり小さい地震であったと言えます。

図3

内陸地震を引き起こす活断層についてですが、【図3】の左の写真は、1891年の濃尾地震でM8.0、内陸地震では最大級の地震で、断層の長さは約80kmでした。この地震では根尾谷断層がずれ動きました。上下に6m、左に2mずれています。道路が、この断層を境にしてずれています。6mの落差をもつ断層崖が見られます。【図3】の右の写真は1995年兵庫県南部地震のときに淡路島でできた野島断層です。モグラが通った後のように見えているのが断層です。英語でもモールトラックと言われます。田んぼの畦がこの断層のところで右に2mずれています。

海溝型地震と内陸地震についてまとめます。海溝型地震の断層面はプレート境界面で、巨大地震になる可能性が高く、マグニチュードは8から9となります。海底面の地殻変動により、津波が起こることもあります。地震の発生間隔は、100年オーダーです。一方、内陸地震の断層面は活断層です。最大のマグニチュードは7～8です。足元で起こるため、被害は甚大になります。間隔は1,000年オーダーです。

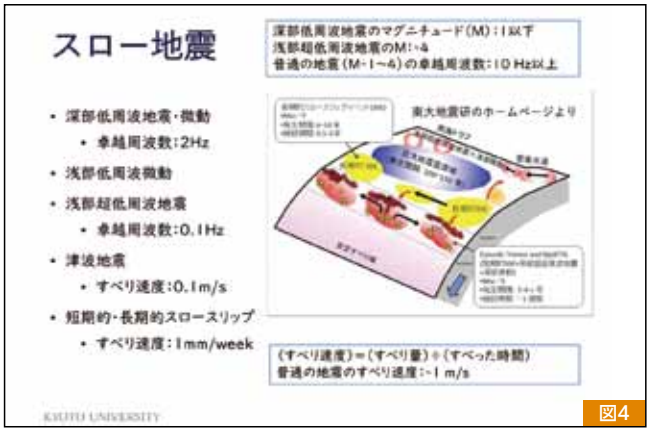

図4

スロー地震【図4】についてです。普通の地震では、M1～4の地震の卓越周波数は10Hzぐらいで、1秒間に10回ぐらい揺れるのですが、それに比べて1秒間に揺れる回数が少ない地震を低周波地震と言います。深部低周波地震というものがあり、卓越周波数2Hzぐらいで、1秒間に2回ぐらい揺れます。単発的に起こる場合は地震として捉えられますが、それが連続して起こる場合は微動と言われます。浅部超低周波地震は卓越周波数が0.1Hzで、10秒間に1回揺れるという地震です。津波地震というものもあります。すべり速度というのは、すべり量をすべった時間で割ったものです。すべり量とは、断層面上のある点が、地震時にすべった長さです。普通の地震のすべり速度は、1秒間に1mぐらいですが、津波地震だとすべり速度は1秒間に0.1m程です。長期的・短期的スロースリップになると、すべり速度は1週間に1㎜ぐらいです。このスロースリップは、もはや地震波を出さないので地震としては観測されず、地殻変動と言われます。これらが、多く起こっているということが最近わかってきました。これらを総じてスロー地震と呼んでいます。

スロー地震が何故最近注目を集めているかというと、1つは類似現象です。スロー地震の活動様式は巨大地震と類似しています。さらに巨大地震は100年に1回程しか起こらないのに比べて、スロー地震は高頻度で発生することから、巨大地震の発生様式を理解するためのヒントを与える可能性があるということです。２つ目は応力状態の指標です。スロー地震は周囲の応力変化に敏感であるため、巨大地震の震源域における応力蓄積の状況に応じて、スロー地震の活動様式が変化する可能性があります。スロー地震の活動領域の変化や様式の変化を調べれ

ば、どの程度応力が蓄積しているかがわかる可能性があるのです。３つ目は、スロー地震が大きな地震の引き金になる可能性があるということです。これらの理由から、スロー地震が着目されていて、今、非常に精力的に研究されています。

## Ⅱ 南海トラフ沿いの巨大地震

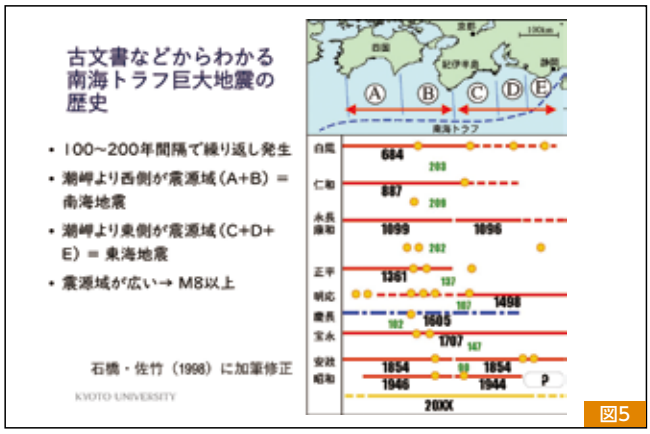

図5

まず南海トラフ巨大地震の歴史について述べます。【図5】は、四国から東海にかけて、南海トラフの地震の震源域をAからEまで5つの領域に分けたものです。これらをセグメントと言います。その下に、684年に起こった白鳳の地震から1944年と1946年に起こった昭和の地震において、どのセグメントが破壊されたかを示しています。例えば昭和の地震では、1944年の東南海地震はCとDのセグメントを破壊していますが、Eが破壊されたかどうかわかっていません。1946年の南海地震はAとBのセグメントを破壊していて、2年差があります。安政の地震は両方共1854年に起こっていますが、C、D、Eを破壊した東海地震のほうがAとBを破壊した南海地震より30時間前に起こっています。1707年の宝永の地震は三連動地震と言われていて、AからEまで全部破壊しています。緑で書いてある数字が、繰り返しの間隔です。白鳳～平安時代には200年位の間隔で起きています。最近では、昭和が安政から90年、宝永と安政が147年と、間隔が結構短いです。繰り返し間隔が違うのは、南海トラフ巨大地震の多様性を表していると考えられています。

図6

次に地震の発生予測についてです。【図6】は、島崎先生と中田先生が1980年に論文で発表された時間予測モデルに関する図です。縦軸は四国の室戸岬の室津港の隆起を示しています。横幅は西暦です。1707年に起こった宝永の地震では室津港が1.7m程隆起しています。安政の地震では1m強隆起していて、昭和の地震でも1.2m程隆起しています。これの意味するところは、一つ前の地震の隆起量が大きいと、次の地震が起こるまでの時間が長く、隆起量が少ないと、次の地震が起こるまでの時間が短いということです。一つ前の地震の大きさを見ると、次の地震までの時間が予測できるということから、時間予測モデルと言われています。これによると、昭和の南海地震の隆起量からして、次の地震は88.2年ぐらいで起こると考えられます。

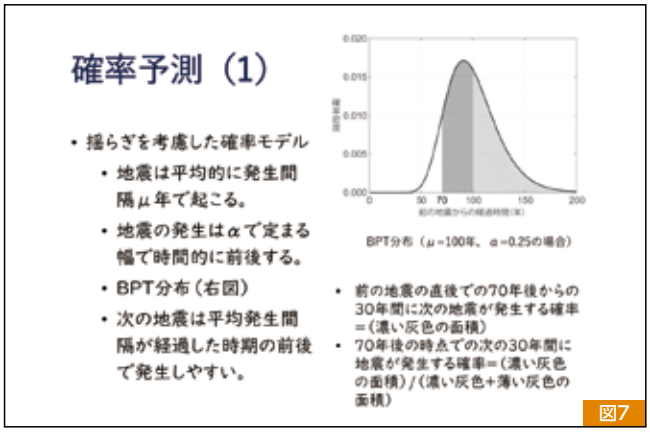

図7

次に確率予測です。揺らぎを考慮した確率モデルを考えます。地震は平均的に発生間隔μ年で起こるとします。その地震の発生はαで定まる幅で時間的に前後すると考えます。これが地震の発生の揺らぎです。【図7】にBPT分布という確率モデルが示されています。この図は、平均的に100年間隔で発生するという場合で、揺らぎが0.25という場合についてのBPT分布です。100年の辺りで発生する確率が一番高くなります。また、前の地震の直後は発生しにくく、平均発生間隔より長い時間が経過しても発生しにくいことを意味しています。

次に時間予測モデルの場合の地震発生確率について見てみます。μを88.2年として、αを0.20から0.24まで動かすのですが、これは仮定です。そして2013年時点で評価しています。昭和の南海地震からの経過時間は67年です。2013年から30年間に次の地震が発生する確率は60%から70%となります。ここで、αに0.20から0.24と幅を持たせているので、

発生確率も幅をもっているということです。ここで言いたいことは、南海トラフ巨大地震も非常に多様性があるのだということです。島崎・中田（1980）の時間予測モデルも、一つの説ではありますが、それが全てではなく、いくつかの仮定のもとに確率を計算して、長期予測を立てているのです。

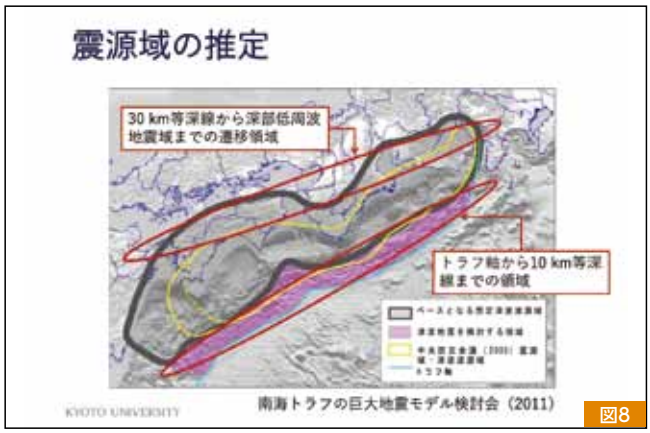

図8

次は震源域の推定です。【図8】に黄色で書いてあるのが、以前の想定震源域でした。日向灘まで広がっているのが、宝永の地震のように三連動地震を考慮した震源域です。2011年の東北の地震以後、南海トラフ巨大地震の考えられる最大級の大きさを評価しようということになり、この太い灰色の線で囲っているところぐらいまでは地震を引き起こす可能性があるのではないかということで、今はこのような大きな震源域が想定されています。この震源域では、モーメントマグニチュード9程度の超巨大地震、東北の地震と同じ位になります。

次の南海トラフ巨大地震がどのような地震になるのかが大きな問題で、最大級の地震はMw9と想定されましたが、それは考えられる最大級の地震がそうであろうということであって、次の地震がそこまで大きな地震になるとは限りません。考えられるのは、昭和の東南海・南海地震のパターン、安政の東海・南海地震のパターン、宝永地震のパターンです。この3つとその見直し後の超巨大地震が考えられると思います。どれになるかは、今のレベルでは何とも言えません。次の地震に備えるために、知りたいことの一つが、震源域の一部で地震が起きたらその後どうなるかということです。昭和と安政の南海トラフ巨大地震のように東側の東海地震、東南海地震と言われるものが先に起きる場合、それから、これはあまり例がないのですが、西側の南海地震が先に起きる場合です。これらは半割れという状況なのですが、その次に割れていないところが割れるまでの時間はわかりません。安政のように30時間後かもしれないし、昭和のように2年後かもしれません。ですがこういうことが起こったら、次に割れ残っているところで、同じ規模の、M8.5程度の地震が起こる可能性は高くなるので、注意が必要になります。それに対して国や地方自治体もどういうことをすればいいかということを考えておく必要があります。

また、知りたいことの二つ目は、これ程大きな地震でなくても、東北地方太平洋沖地震の2日前に起こった前震のように、震源域でのＭ７クラスの地震が起こったときに、どうなるかということです。我々がやらないといけないことは、起きた地震の震源域の広がりを、時間をかけずに正確に把握するということです。また地震後、どのような変動が起きているかをモニターし、それを踏まえて、残りの震源域で巨大地震に進展するかどうかを推測することを我々研究者として今後やらないといけないと考えています。

次の南海トラフ巨大地震のまとめですが、予想される規模はモーメントマグニチュードで8から9です。Mw9は考えられる最大級の地震であって、次の地震がMw9であるとは限りません。今後30年の発生確率は、70から80%と言われています。これは2019年時点での評価で、時間予測モデルの場合です。広範囲に震度5強以上の揺れが起こると、広範囲に被害が及ぶため、支援・救助の分散・遅延が起こるということが予測されるので、我々、市民としては、常に準備をし、非常時に対して蓄えを持っておく、耐震の補強等をしておく必要があります。

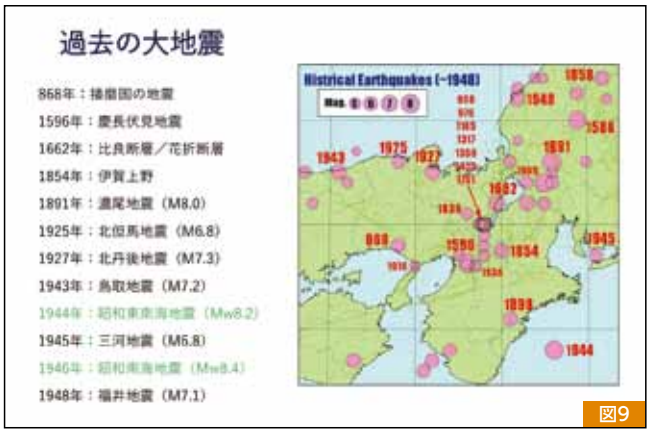

図9

## Ⅲ 近畿地方の内陸地震

次に近畿地方の内陸地震についてです。

【図9】に1948年までの内陸の大地震の分布を示しています。この中で一番古い地震は868年の播磨国の地震です。それから1596年の慶長伏見地震、1662年の比良断層・花折断層、1927年の北丹後地震で、これはM7.3です。1943年の鳥取地震はM7.2です。その後、緑で書いてある1944年の昭和

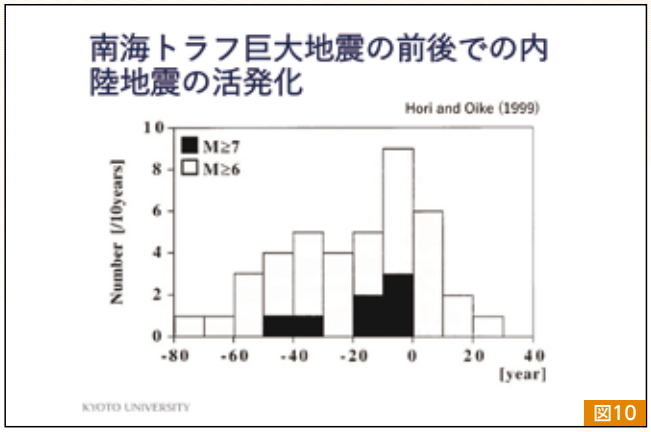

図10

東南海地震と1946年の昭和南海地震の南海トラフの巨大地震が発生します。それに挟まれるように1945年に三河地震、それからその後1948年の福井地震と続きます。これらからこの南海トラフ巨大地震の前後に、この地図の範囲で大きい地震が集中して発生しているのではないかと思われます。それをもうちょっと詳しく見たのが【図10】で、これはHori and Oike（1999）に出ています。縦軸は地震の数です。白抜きのバーがM6以上で、黒く塗りつぶしてあるのがM7以上の数です。横幅の0が南海トラフ巨大地震が発生したところです。【図５】に書いた南海トラフ巨大地震の全てを0年として、その前後にいくつ内陸地震が起こっているかを10年ごとに数えてみると、このような頻度分布が得られ、南海トラフ巨大地震の前50年から後ろ10年ぐらいまでが、内陸地震が活発化する時期にあたることがわかります。現在はもう、南海トラフ巨大地震の前50年の内陸地震が活発化する時期に入っているのではないかと考えられます。

## Ⅳ 地震波で地下を覗く

ここからは、地震波で地下を覗くという話です。これは私がここ20年来、精力的に進めているテーマです。

リニアアレイ観測といって、臨時観測点を測線に沿って多く設置します。そしてレシーバ関数解析により、大陸モホ面、フィリピン海プレート上面、沈み込むフィリピン海プレートの海洋モホ面の形状を推定します。モホ面とはモホロビチッチの不連続面の省略形です。次にトモグラフィ解析では、地震波速度の不均質構造を推定し、それから深部流体と地震活動の関係について議論します。

研究の動機ですが、南海トラフ巨大地震を引き起こす紀伊半島の下のプレート境界は、どのような構造をしているか、京都や大阪で強い揺れを引き起こす地震波が伝わっていく紀伊半島の下はどのような構造をしているのかという疑問に答えるために、紀伊半島の下を覗いてみようと考えました。そして見えてくる構造から、地震発生や強震動の予測に役立つ情報を得たいというのが研究の動機です。地震波で見るとはどういうことかというと、地球内部の地震波速度やその分布をイメージするということになります。

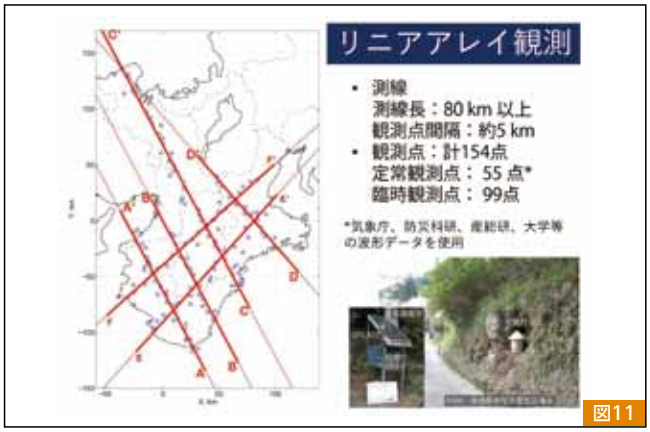

図11

私が進めてきた紀伊半島を中心とする観測では、【図11】に示す6つの測線上に定常観測点も含めて約5㎞間隔になるように臨時観測点を設置しました。この6つのリニアアレイには、合計で154点の観測点があります。そのうち55点は、京大の点もありますが、気象庁等が設置した定常観測点を使っています。臨時観測点は99点です。どういう観測をしているのかというと、【図11】の写真のように露岩の上に地震計を置き、地震計に雨が直接かからないように、傘を被せます。箱の中に地震波形データを記録する装置と自動車用のバッテリーを入れ、このバッテリーはソーラーパネルで充電します。

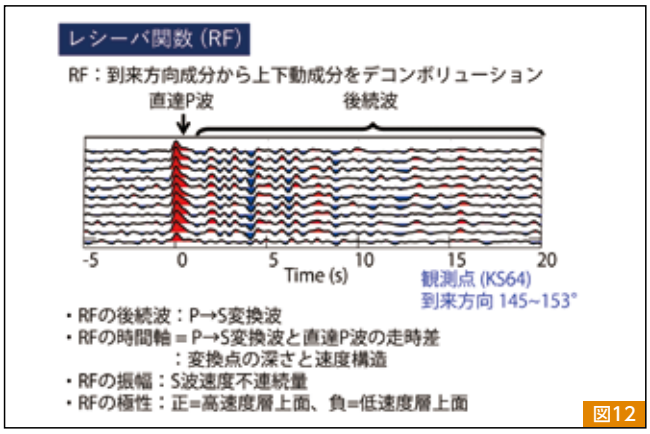

図12

レシーバ関数は地震波形の水平動成分から上下動成分をデコンボリューションすることによって、計算することができます。横軸のゼロのところに見えているのが直達P波です。この後ろに続いているのが後続波で、地震波速度不連続面でP波からS波に変換した波です。この速度不連続面として考えられるのは、地殻とマントルの境界面とか、フィリピン海プレートの上面等です。

横軸のレシーバ関数の時間軸は、直達P波からの相対的な走時で、P波からS波に変換した波と直達P波の走時差になります。それは、変換点の深さと速度構造で決まるので、逆に速度構造を仮定すると、変換点の深さを求めることができます。レシーバ関数の後続波の振幅はS波速度不連続量と関係します。レシーバ関数の極性についてですが、赤で描いてある正のものは高速度層上面で変換、青で描いてある負のものは低速度層上面で変換したということを示します。レシーバ関数を見ると、高速度層や低速度層がどこにあるかというのがわかります。

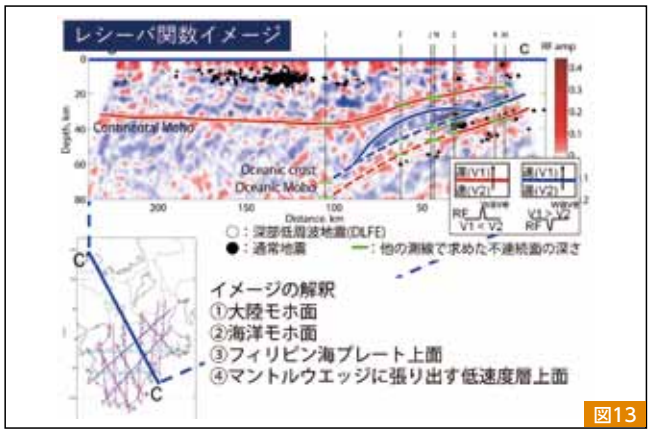

図13

レシーバ関数を使って地球内部をイメージしたのが【図13】です。赤で描いてあるレシーバ関数の正の振幅が繋がっているところは、高速度層上面なので、大陸のマントルと地殻の境界の速度不連続面である大陸モホ面と考えられます。それから、青で描かれている負の振幅が連なっている部分が、紀伊半島の地下に沈み込んでいるフィリピン海プレートの上面です。その下にフィリピン海プレートの中の海洋モホ面が見られます。

プレートの上面が青い負のレシーバ関数の振幅をもつことから海洋地殻は低速度層になっているということがわかります。海水は、海洋底が生成される際に岩石の中に取り込まれるのですが、30～40kmの深さになると、不安定になり、岩石の中から吐き出されます。水を含んでいる状態では低速度で、水を吐き出すと少し高速度になります。

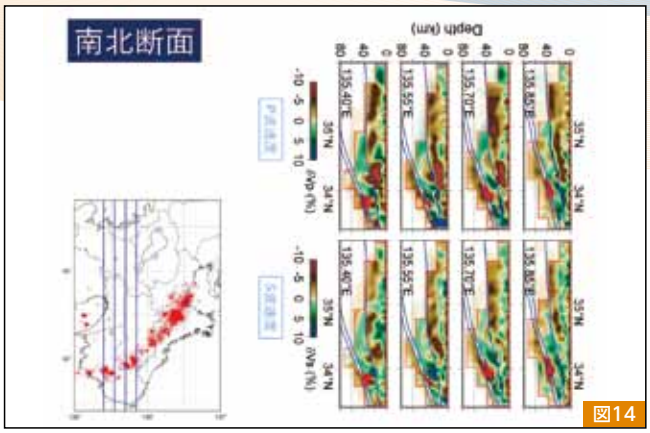

図14

最後にトモグラフィの話をします。多くの地震と観測点のペアについて、その間を地震波が伝わる時間（走時）のデータから、コンピュータ上での計算により、地震波の速度構造を3次元的に推定します。

【図14】に示すように、沈み込んだフィリピン海プレートが深さ30kmから40kmに達するところで深部低周波地震が多く起こっています。そこは低速度異常になっています。ここで脱水が起こり水を吐き出し、その流体の影響で低周波地震が起こると考えられます。

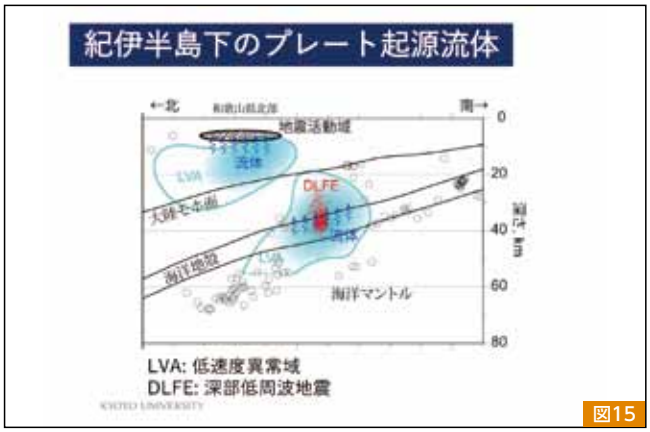

図15

もう一つ、和歌山県北部の微小地震が多く起こっているところの下部地殻に顕著な低速度異常が見られます。P波速度で10%以上、S波速度でも5%ぐらい地震波速度が遅い領域があります。16kmから20kmの深さで、こういう低速度層を作るのは、流体が存在するのが一番考えられる原因です。【図15】に示すように沈み込むプレートの30kmから40kmのところで脱水が始まり、深部低周波地震を引き起こします。その流体が、どういう経路を通って和歌山県北部の下に来るかまではわかっていませんが、流体は軽いので、上のほうに上がってきて、和歌山県北部の地震活動が活発なところの下部地殻から上部地殻に流れ込み、そこで地震を引き起こしているのではないかと考えています。