



西南日本を襲う

巨大地震

寒川旭 小泉尚嗣 平原和朗 安藤雅孝

防災アカデミーアーカイブ vol.1

2008年3月
名古屋大学災害対策室

西南日本を襲う巨大地震

防災アカデミーアーカイブ vol.1

名古屋大学災害対策室

はじめに

名古屋大学災害対策室は、2003年1月より防災についての講演会を開催して参りました。はじめ地震防災連続セミナーとしてスタートし、2004年度からテーマを地震防災以外にも広げ「名古屋大学防災アカデミー」と改称するとともに市民の皆様にも公開することになりました。地震・火山噴火・津波・台風といった様々な災害についての最新トピックに焦点を当て、2007年度末までの開催回数は37回（地震防災連続セミナーから通算では47回）を数えます。

講演会で聴くことのできる第一線で活躍されている著名な講演者のお話は貴重で、最近では「過去の講演をもう一度聞きたい」という声も、災害対策室に多数寄せられるようになりました。そこで今回、「防災アカデミーアーカイブシリーズ」を刊行することと致しました。

本書は、その第1集として、東海・東南海・南海地震とよばれる南海トラフで発生する巨大地震に関係の深い4つの講演録を再編集したものです。南海トラフで発生する巨大地震は、名古屋市をはじめ東海地方でもっとも恐れられており、新聞やテレビの報道でも頻繁に取り上げられています。これらの地震がどのようなメカニズムで発生し、次の地震はいつ起こるのか、といったことに関する最新の情報をご講演の中でも語っていただきました。4つの講演はいずれも、滅多にお聞きすることができない貴重なものばかりで、本書も臨場感あふれるものとなりました。

本書に講演録を収録させていただきました安藤雅孝氏（当時、名古屋大学、現在、台湾中央科学院地球科学研究所）、小泉尚嗣氏（独立行政法人産業技術総合研究所）、寒川旭氏（独立行政法人産業技術総合研究所）、平原和朗氏（当時、名古屋大学、現在、京都大学）には、研究の最前線の話を知りやすくご紹介いただき、また、今回その講演録を再編集するにあたり、原稿掲載を許可していただくとともに、改めて原稿にも筆を入れていただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

なお、名古屋大学防災アカデミーは、今後も継続して平日のイブニングタイムに、春休みと夏休みを除く月に一度、名古屋大学東山キャンパス内の環境総合館で開催していきます。どなたでも自由にご参加いただくことができますので、災害対策室のホームページ (<http://anshin.seis.nagoya-u.ac.jp/taisaku/>) の開催案内をご覧ください、ますます多くの方に御参加頂きますようお願い致します。

2008年3月

名古屋大学災害対策室長

鈴木 康弘

目次

はじめに

1. 「遺跡が語る地震の歴史ー地震考古学への招待ー」
寒川 旭（独立行政法人産業技術総合研究所） 3
2. 「地下水で東南海・南海地震を予測する」
小泉尚嗣（独立行政法人産業技術総合研究所） 40
3. 「地震発生予測に挑むーコンピュータ地震なまずの飼育法ー」
平原和朗（名古屋大学大学院環境学研究科） 70
4. 「南海トラフ巨大地震の残された謎」
安藤雅孝（名古屋大学大学院環境学研究科） 111

おわりに

※ 講演者の所属は講演当時のものです。

遺跡が語る地震の歴史 —地震考古学への招待—



講師 寒川 旭
(産業技術総合研究所)

はじめに・地震考古学とは

私は学生時代、ずっと活断層の研究をしていたのですが、1988年、今から18年ぐらい前に、地震考古学というものを始めました。今日はその地震考古学に絡んだお話をいたします。

一言で地震考古学とは何かというと、考古学の人たちが遺跡発掘調査をしていますと、昔の地震の跡がたくさん出てきます。名古屋の周辺でも、例えば清洲城の跡など、けっこうたくさん出てきますが、それを中心に研究する分野です。なぜ遺跡の調査で地震の痕跡かという、そもそも遺跡というのは、例えば家の跡や溝の跡など、私たちの祖先が生活した痕跡がたくさん

残っているところを遺跡として指定するわけです。言い換えると、時代の分かるものがたくさん埋まっているところが遺跡です。そこを掘っていて、昔の地震の痕跡が出てくると、その地震の年代もすぐ分かるというメリットがあります。それを使って地震の歴史を調べようというのが地震考古学です。

今日はそれに沿ってお話をしますが、2部構成になっています。前半は、近々来るのが確実視されている海の巨大地震に地震考古学はどんなアプローチができるかという話、もう一つは活断層の話をしします。私は今、大阪に住んでいるので、今日の話はどうしても関西のネタが中



図表 1

心になります。

図表1は今から11年前の阪神大震災のときの映像です。もう11年もたってしまいました。最近、出前授業に行って、小学生にお話しすることがたくさんあるのですが、ついうっかり「この前の地震」と言ったら、神戸の小学生でもきょとんとしていました。考えてみたら、もう11年前ですから、小学生にとっては歴史的な地震なのです。これもやはり時間がたつにつれて、歴史的な出来事になってしまいます。

これは木造2階建ての家屋ですが、1階のほうが地面の揺れが建物に伝わる部分ですので、すごく強い揺れが襲います。それで、1階がつぶれてしまって、本当は2階建てがぺしゃんと1階建てになってしまったという写真です。11年前の阪神・淡路大震災。1月17日、午前5時46分です。激しい揺れが十数秒間ぐらい続きました。

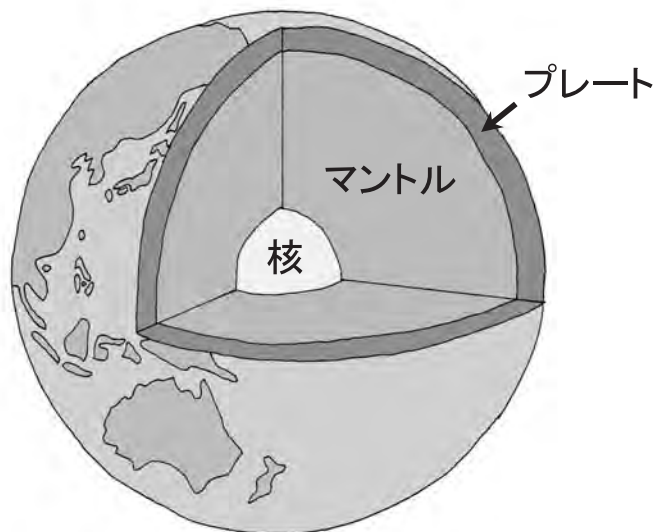
地震のメカニズム

皆さんいろいろな講演会などに行かれて、地震がどうして起きるかということはよくお聞きになると思うのですが、一応、私はいつも、ま

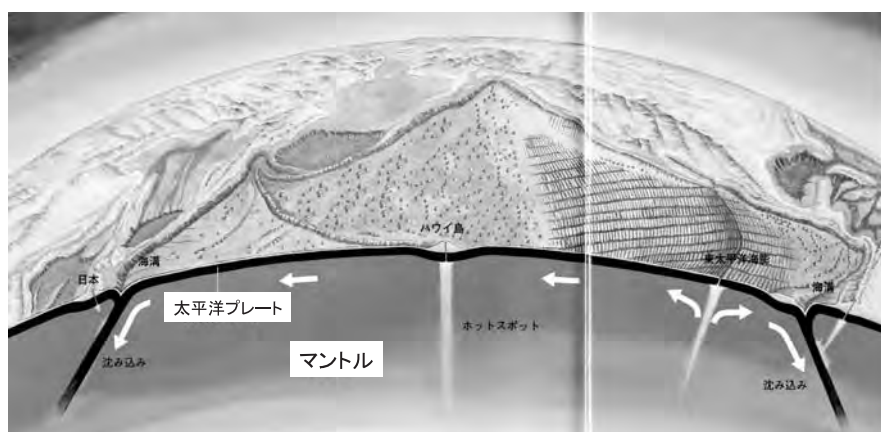
ず、ここから始めます。ごく簡単に地震のメカニズムの話をしてします。

地球というのは卵とすごく似ています（図表2）。卵は真ん中に黄身がありますが、黄身の部分を核といいます。地球はもともとすごく熱くて、どろどろした液体でした。46億年ぐらい前にできたのですが、そのときは周りからいん石がほんほんぶつかってきて、火の玉のような状態でしたが、その中で比較的重い物質だけが真ん中に吸い寄せられていきました。核は、地球を構成するものの中でいちばん重い鉄やニッケルなどでできています。卵はその次に白身があります。白身の部分をマントルといいます。これは基本的に固体ですが、少し液体の要素を持っていますから、ゆっくりですが動きます。それから、表面が殻ですが、これをプレートと呼んでいます。地球はものすごく熱いですが、このプレートの部分だけは少し温度が低くなって、卵の殻のように地球を覆っています。

図表3は地球の内部をかいたものです。左が日本列島で、右がアメリカです。マントルは下の方がめちゃくちゃ熱くて、上の方が少し温度が低くなっていますから、対流運動をします。



図表2



プレートは1億3千万年かけて日本へやって来た

図表 3

太平洋のど真ん中ではなく、ずっとアメリカ大陸に近いところで対流が起きています。ぐっとマントルが上がって行って、地球の表面まで来ると、ここで火山活動などがありますが、表面まで達すると、冷えて冷たくなって、プレートになります。ここで新しいプレートが生産されて、古いプレートは少しずつ横へ寄っていきます。プレートの新入生が入ってきて、古い生徒がだんだんこちらへ動いてきて、日本列島の近くまで来るのは1億3000万年もかかります。ものすごく長い旅をして、日本列島へやってきているわけです。こちらにも日本の載っている別のプレートがあって、これは少し古めのプレートです。新しいプレートがやってきて、この下に潜り込んでいきます。

図表4は安藤先生たちが作られた『東海地震がわかる本』にモデルになった漫画があって、それにヒントを得てかいたものです。左が日本列島で、右が海のプレート、太平洋からやってくる太平洋プレートです。二つのプレートがあるのですが、海のプレートはぎゅっと下の方へ潜り込んでいます。なぜかという、日本列島は大半が花崗岩からできていますが、海のプ

レートは玄武岩からできていて、こちらのほうが少し比重が大きくて重いのです。陸のプレートは分厚いけれども、少し比重が小さくて軽い。それで、比重の大きいもののほうが下へずっと潜り込んできています。

よく見ると、この漫画は足でぎゅっと突っ張って、前へ来させないようにしていますね。こちらは少しずつ前へ進もうとしています。もうアメリカ大陸の近くで新しいプレートができてくるから、どうしても前へ進まないといけな。進もうとしているのですが、このところがくっついていて、ここは平らにかいていますが、本当は山あり谷あり、でこぼこがあって、くっついていて、なかなか前に進めないのです。一生懸命進もうとするけれども、進ませてくれない。

このところはちょっと盛り上がったようにかいていますが、両方から押されて、しわのように盛り上がります。このしわが細長くずっと続いています、これが日本列島です。ですから、日本列島というのは、二つのプレートがぶつかって、潜られたほうのプレートがぎゅっとしわのように盛り上がっている。私たちは一本

陸のプレート



図表 4

のしわの上に住んでいると思っていただければいいと思います。

海のプレートは少しずつ進んでいると言いましたが、どれぐらいのスピードかというところ、つめの伸びる速さがちょうどぴったりです。指のつめが伸びる速さを測ってみると年に数cmぐらいで、プレートの進んでくるスピードも大体それぐらいです。年に数cmから、大きくて10cmぐらいです。ものすごくゆっくりしたスピードです。

ところが、それを侮ってはだめなのです。生まれたままの赤ちゃんが、一生つめを切らずに100歳まで生きて、同じスピードで爪が伸びるとしたら、10m近く伸びてしまうわけです。これも一生懸命頑張っていると、100年余りたつと10m近く伸びるぐらいの力を持ちます。ぎゅっぎゅっ、と毎年強い力で押していて、10mぐらい進めるほどのパワーになると、パーンと10m進んでしまうわけです。もう海のプレートの力がすごく強くて、陸のプレートは一気にパーンと跳ね上がります（図表5）。このときに一気に沈み込んで、日本列島周辺がぶる

ぶるっと震えます。このようにして、巨大地震が発生するわけです。東海地震や南海地震、東南海地震、関東地震という最大級の地震はこのようにして発生します。

それから、このほっぺたに傷がたくさんありますね。これは日本列島がぎゅっと押されて盛り上がりますと、花崗岩のような固い岩盤でできていますから、盛り上がるときに傷がばりばりとできます。この傷のことを活断層と呼んでいるわけです。この活断層も、日本列島は力がかかっていますから、いったん傷ができると、そこは弱いですから、ぐっと力がかかると、またそこでバンと割れるということで、これも周期的な動きをしています。

ここにヒゲみたいなケバをかいていますが、ケバの方が下がった側です。反対側が上がった側です。阪神大震災のときもそうですが、活断層が壊れて地震を起こすときに、地面がずれて、片一方が上がることが多い。これを何回も繰り返すと、例えば50万年とか、100万年ぐらい断層活動を繰り返すと、何百mとか、1000m近い落差になります。こちらが山になって、こ

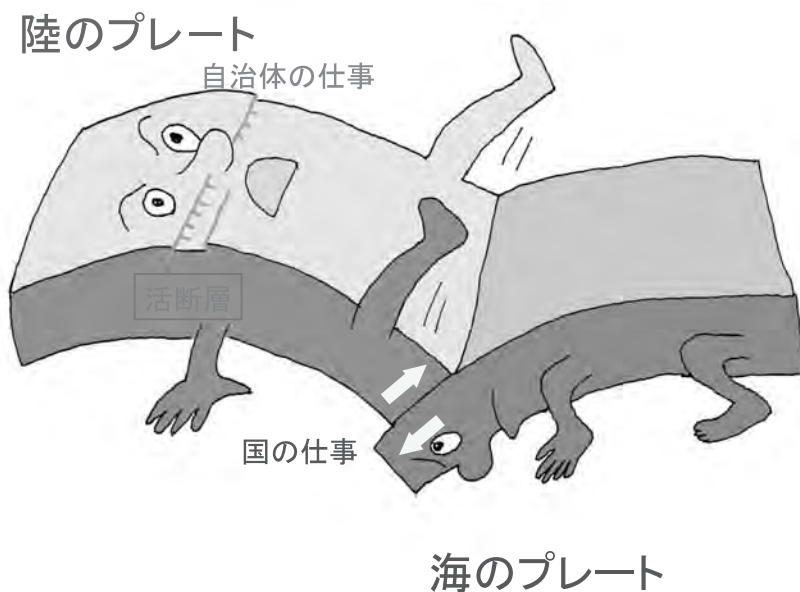
ちらが盆地になる。例えば養老山地と濃尾平野というように、地形の起伏ができてしまいます。日本列島は山地や平野、湖があったり、地形の起伏が多いですが、この大部分が活断層の活動によってできたものです。

どちらも大きな地震が起きますが、こちら(プレート境界型)のほうが大きいのです。例えばマグニチュードでいったら、8クラスの巨大地震です。こちら(活断層型)はランクが低くて、7クラスで、阪神大震災のときは7.3でした。ちょっと小さいのです。こちら(活断層)は1回地震を起こすと、長く休みます。こちら(プレート境界型)は地震を起こしても、すぐ次のがやってくる。図表5にこちらを「国の仕事」と書いていますが、この地震は日本列島全体を作るような、例えば省庁でいうと経済産業省のような、そういう国としての仕事をしているから、予算も多いのです。エネルギーもめちゃくちゃ多いから、地震そのものの規模が大きいし、いったん地震を起こしても、また次の地震が起きる。100年余りの周期でもものすごく大きい地震を起こすわけです。こちらは県や市ぐらいの

仕事をしています。例えば養老山地を一つ造るような動きとか、濃尾平野を造る動き、いわば地方自治体の仕事ですから、予算も小さく、地震の規模も小さいのです。1回地震を起こすと、予算を要求してお金を貯めるまでに時間がかかるから、次の地震までの間隔も長い。短いもので5000年ぐらいの間隔です。そのように住み分けて地震を起こしているわけです。

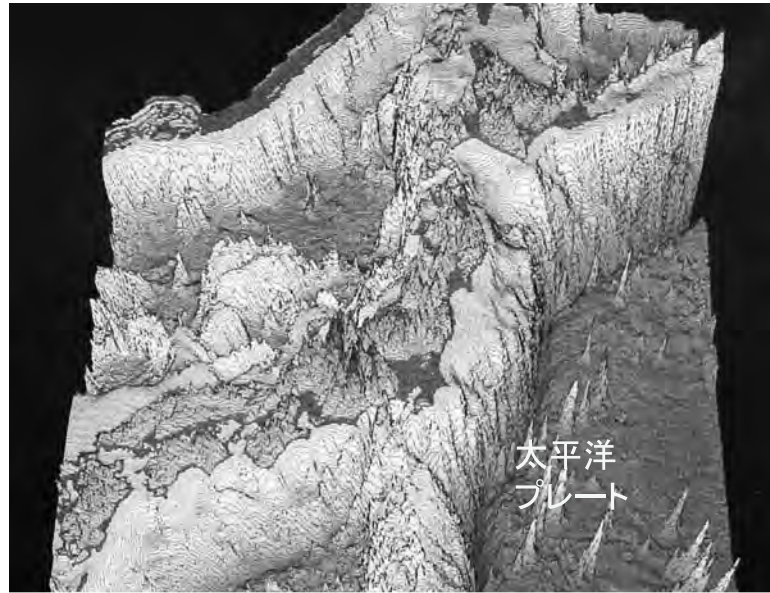
図表6は日本列島ですが、ここで太平洋プレートという大きいプレートが潜り込んできています。もう一つ、フィリピン海プレートという小さなプレートがあります。フィリピン海プレートは東側で太平洋プレートに潜り込まれて、北側で今度は日本列島の下へ潜り込んでいます。名古屋や大阪の人たちには、むしろこちらで起こる地震のほうが身近な問題です。ここに南海トラフというくぼみがあって、ここでフィリピン海プレートが下へ潜り込んでいます。先ほどの漫画のように、しばらく辛抱して押しつけて、時々バーンと跳ね上がるということを繰り返しています。

西側ほど深く潜り込んでいて、こちらは先端



図表5

プレートがぶつかって日本ができた！



図表 6

は 100 km 近いところまで潜り込んでいますが、東へ行くにつれてだんだん浅くなっています。伊豆半島は本当は海のメンバーで、本来ならば、これは日本列島の下へ深く潜っていかないといけません。でも、ここは火山活動など、下から上がってくる要素もあって、なかなか下へ潜り込めないでいるわけです。伊豆半島を過ぎると、また関東の方で潜り込んでいます。ですから、このところはちょっと変な感じになっています。

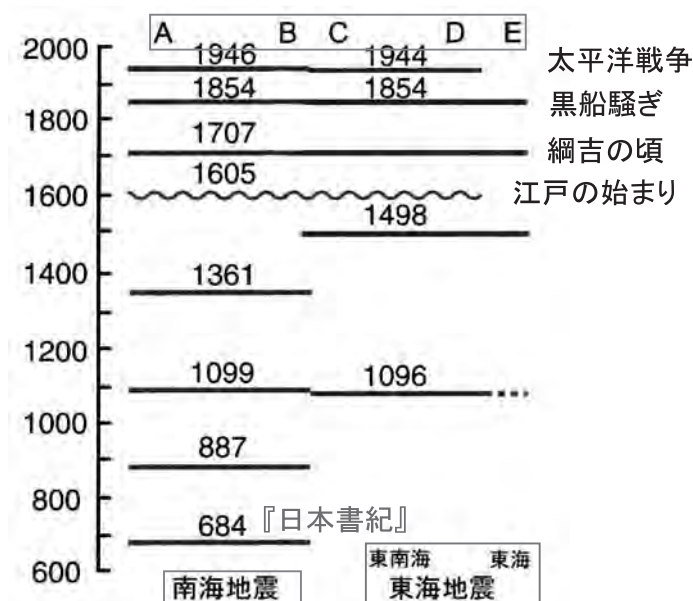
西半分で起きるのが南海地震です。東半分で起きるのを一括して東海地震と呼ぶ言い方もありますが、細かく分けると、駿河湾の部分が東海で、こちらが東南海と、二つに分かれます。でも、ちょうど潮岬のあたりで潜り込んでいるプレートの形が少し変わって、ここがすごく顕著な境になっています。そこで右と左に、プレートの運動も二つに大きく分かれます。

記録に残る南海・東南海・東海地震

これを A、B、C、D、E と五つに区分しますと、こんな図ができます (図表 7)。これはそもそ

も名古屋大学の安藤先生がずっと昔に原型のような図を作られたのですが、それにみんないろいろ書き加えて、最近すごくよく使われている図です。A、B が南海地震のゾーン、C、D、E を含めて東海と呼ぶこともあるし、C、D が東南海、E だけ東海地震と呼ぶ呼び方もあります。数字で書いたのは、日本は過去千数百年にわたって記録があって、その中に東海地震や南海地震のことが書かれていることが多いのです。それで、記録から分かる発生時期を書きました。

例えば、日本でいちばん古い歴史書である『日本書紀』に、この地震のことが書かれています。『日本書紀』の天武 13 年 (西暦 684 年)、「*亥のときにいたりて大いなるふる (人定に逮りて大きに地震る) *」、地震のことを昔「なみふる」といっていました。「国挙りて男女叫び唱ひて不知東西 (まど) ひぬ。則ち山崩れ河涌く」。山が崩れたり、川がせき止められたり、いろいろなことが起きて、「諸国の郡の官舎」、公の建物、人々の蔵や家、寺社、「破壊れし類、勝 (あげ) て数ふべからず」。もう全国で山が崩れたり、家が倒れたり、広い範囲で地震の被



図表 7

害が起きたと書いています。「人民及び六畜」、人や家畜がたくさん死んだと。こういう被害が書かれています。

次に、「時に伊豫温泉（いよのゆ）、没れて出でず」。伊豫温泉というのは愛媛県の道後温泉ですが、実は昭和の南海地震のときもそうですが、南海地震が起きると道後温泉は必ず止まるのです。ちゃんと『日本書紀』に、道後温泉がかれるということも書いてあります。

「土左國の田苑五十余万頃没れて海と為る」。実は南海地震が起きると、四国の高知で変なことが起きます。高知平野は1mぐらい沈みますが、反対に南側の室戸半島や足摺半島は1mぐらいポンと跳ね上がります。あそこでシーソーみたいな運動を必ずするのです。それが実に『日本書紀』に、室戸や足摺が上がったということは書いていませんが、高知平野が沈んだということを書いています。

次に「土左國司言さく、大潮高く騰りて海水飄蕩ふ。是に由りて調運ぶ船」、これは税金の租庸調の調ですが、運ぶ舟が「多（さわ）に放れ失せぬ」。これは大きな波がやってきて、船

が流されてしまったということですから、津波です。

南海地震の特徴を考えると、ものすごく広い範囲が激しく大きく揺れる。太平洋の沿岸に大津波がやってくる。高知が変なシーソーみたいな動きをする。四つめに道後温泉のお湯が止まる。『日本書紀』のほんのわずかな記載の中に、この四つの特徴が全部漏らさず書いてあります。ですから、これは非常に信頼できる記録だということになります。

同じように、その四つの特徴を見合わせて書いていくと、けっこうたくさん見付かります。これを見ると、江戸時代になってから急に地震が多くなって、プレートが活動的になったと言う人もいますが、これは見かけ上のことです。大体、記録といたら、江戸時代からあとが大半、もう9割5分以上です。江戸時代からあとは記録の洪水で、それより前になると記録はすごく少なくて、一生懸命探さないと出てきません。江戸時代から後だったら、そこそこ大きい地震は記録されていますが、江戸時代より前になると、大きい地震でも記録されていないこと



会場の様子

がある。ですから、江戸の始まりごろを境にして、それより前は地震の数が少なくて、それ以降は地震がたくさんあるように見えるのは、極めて自然なことです。

江戸時代から後は、大きい地震はほとんど把握されていますから、これは非常に信頼性があります。例えば1605年、江戸時代の始まりですが、このとき多分地震が起きたらしい。東海と南海が恐らく同時に起きたらしい。この地震については異論もありますが、このときは特殊な地震で、揺れがすごく小さくて、京都でもあまり揺れていません。そのかわり津波だけはやってきた。何か不気味な地震ですが、地震の規模も小さかった。でも、これは同時に起きています。1707年は綱吉のころですが、このときはEからAまで全部一斉に一瞬にして割れて、ものすごく大きい地震（宝永地震）です。1854年のときは、12月23日に先に安政東海地震が起きて、そのあと12月24日に安政南海地震が起きました。このときも、東海も南海もすごく大きかった。最後に1944年と1946年。1944年の地震を体験されたかたがおられるか

もしれません。大きな地震だったのですが、これはこのシリーズの中からいうと小さかったのです。1854年が8.4なのに、1944年は7.9ぐらいで、すごく小さかったために、Eの駿河湾のゾーンが割れ残りました。

この四つを見ますと、大体同じぐらいの間隔で、南海トラフの東側と西側が大体一緒に起きています。片一方が小さいと片一方も小さい、片一方が大きいと片一方も大きいという特徴があります。ちょっとその下を見てみますと、少し変です。例えば1498年は、東海地震の記録はあるけれども、南海は全然記録がない。これが本当だったら、この両方の地震がいつも一緒ということは成り立たなくなります。これがすごく重要な問題です。

考古学の遺跡で噴砂の跡を発見

江戸より前の古文書を新たに見付けるのはとても難しいのですが、ここで地震考古学を登場させます。これは文字記録がないところを遺跡で探ってみるという話です。

図表8は京都の遺跡ですが、遺跡を見るのが



図表 8

好きなかたがおられたら、濃尾平野の沖積地だったら2か所に1か所ぐらいこんなものが出てきます。今よく遺跡調査をしているところ、稲沢市や昔の清洲の近辺など、特に濃尾平野の北の方へ行くと、濃尾地震の痕跡がたくさん出てきます。ほかの地震の痕跡も出てきます。地震の痕跡は名古屋近辺はたくさんあります。こ

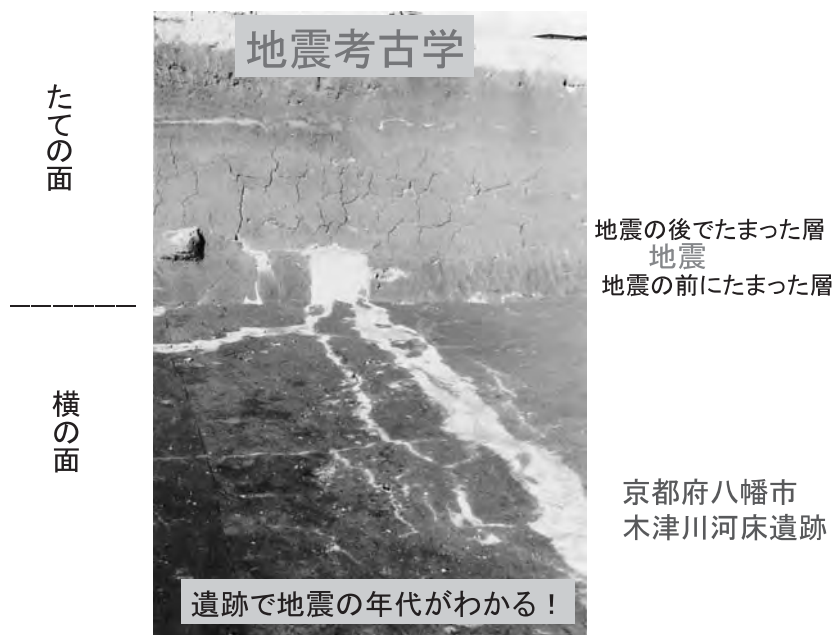
れは京都の遺跡ですが、下にまっすぐ細長い筋があります。周りはみんな粘土ですが、この部分だけ砂なのです。細長い割れ目があって、その中に砂が詰まっている。

図表9は、1995年、阪神大震災のときですが、地面の下から水と一緒に砂がスーと上がってきて、地面に広がりました。ここにずっと割れ目



1995年阪神・淡路大震災

図表 9



図表 10

が続いていて、この割れ目を通して、下から砂が噴き出してきて、地面に広がったのです。先ほどの遺跡では、地面に広がった噴砂はもう無くなっていますが、下の割れ目が出てきたのです。

もう一回、先ほどの遺跡を近くに寄ってみますと（図表 10）、下半分は床面ですから、水平な面を見えています。上は壁面ですから、垂直な面で見えています。白い筋が下から砂が上がってきた噴砂の通り道です。ここまで上がっていますが、ここで止まっていて、上の層に覆われています。

本当はここで地面に大量に砂が広がったと思うのですが、ここは水田です。水田だと、砂が広がったら困るから、よくお百姓さんが地震の後でこういう砂を取り除いています。ですから、ここも砂は広がったけれども、取り除かれたと思います。

黒いのは粘土ですが、粘土というのは、下からゆっくり時間をかけてたまります。ここまでやっとたまったときに、地震が起きたわけです。

地震のあとも延々とたまり続けて、どんどんたまり続けて、上の方に白っぽい砂の層がありますが、これは幕末のころの洪水のあとです。ここが地面です。

ここは遺跡ですから、昔の年代が分かるものがたくさん埋まっています。実はこの噴砂に引き裂かれている部分では、室町時代とか、中世のお皿がたくさん出てきます。ところが、この地震の直後から、それが江戸時代のものにならんと変わります。ということは、室町から江戸にかかる時代に大きい地震が起きたことが分かるわけです。このように遺跡で地震の痕跡を見付けて、大体の年代を絞り込んで、あとは古文書でこれに相当する地震がないか探すわけです。この場合は、ちょうど安土桃山時代、豊臣秀吉のころにすごい大地震があって、その地震にどんぴしゃり相当することが分かりました。

図表 11 は液状化現象です。この白い砂が地面を引き裂いて噴き出してきたのですが、このように、遺跡だと、下まで掘ってもらって、どこにあった砂が上がってきたかということまで

これが液状化現象だ！



砂がいつぱい流れ出した！
京都府八幡市内里八丁遺跡

図表 11

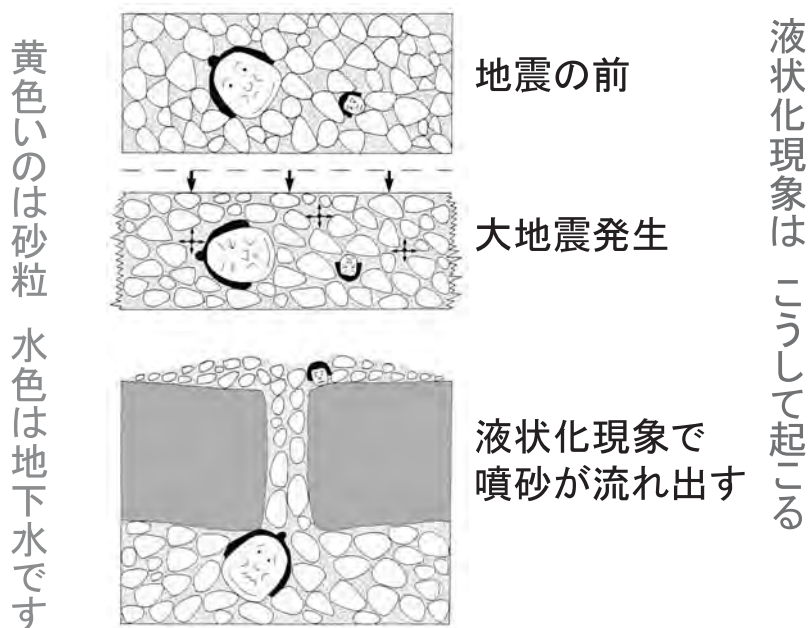
チェックすることができます。

液状化現象はこうして起こる

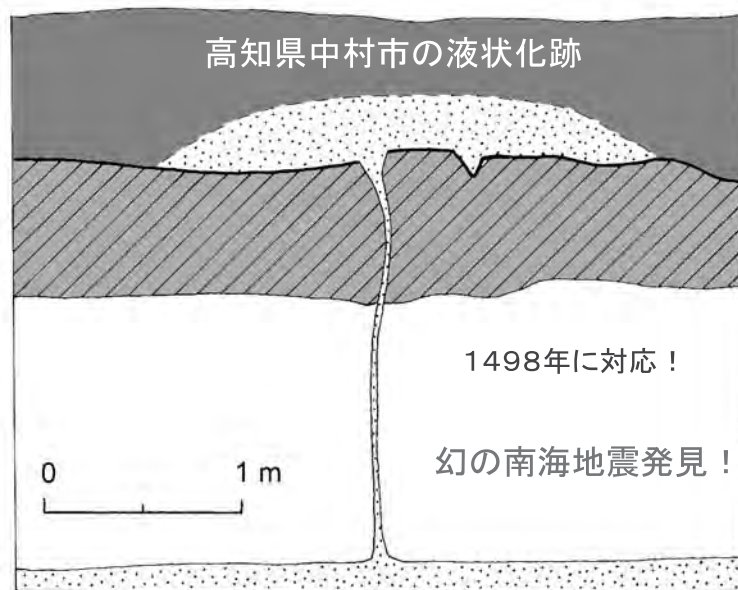
地震が起きると、下から砂が上がってくるわけですが、なぜこんなことが起きるかというメカニズムはすごく簡単です。ゴミ袋の中に、ご

みを一つ一つほうり込んで、満杯になったときに揺ると、さっと下がって行って、また少し入れることができます。これと同じことが地面の下で起きているわけです。

図表 12 で、上が地震の前です。黄色いのは砂粒で、青いのは地下水です。地面の下の砂の



図表 12



図表 13

層は、地下水が満杯になっていることが多いです。砂の層というのは、砂粒と砂粒の間がすき間だらけです。砂粒どうしがくっついて安定はしていますが、本当はすき間だらけなのです。すき間がなくなってしまうと、すごく安定して、それを私たちは岩と呼んでいます、砂という限りはすき間だらけです。たまって時間がたっていない軟らかい砂ほど、すき間が多いわけです。そういう軟らかい砂で液状化現象がよく起きます。

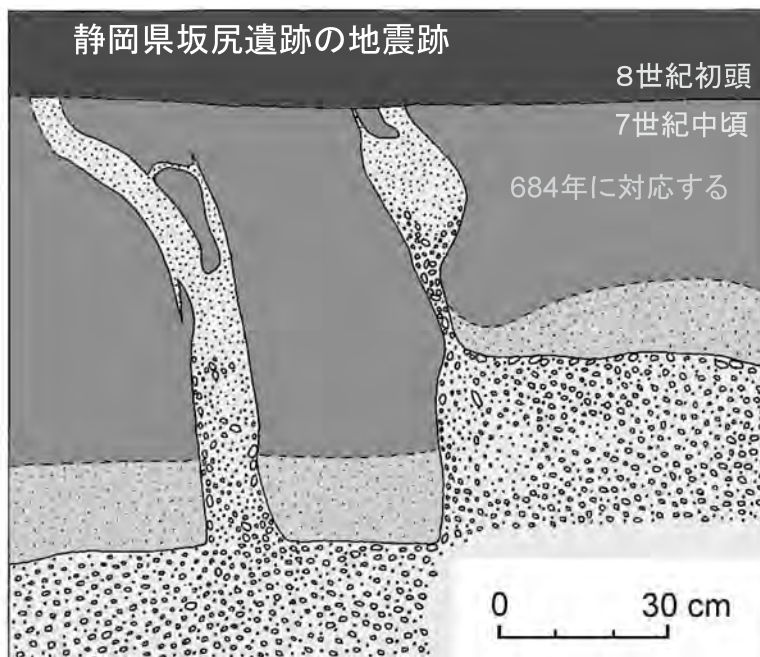
これを揺ると砂粒は動きますが、動くときに、できるだけ安定しようと思って、すき間を小さくするように動きます。ごみと同じです。あれはすき間を小さくするように、ごみの一個一個が動いているわけです。そうすると、地層がきゅっと締まって縮みます。そのときに困るのが地下水です。それまで砂粒のすき間にゆったりと構えていたのですが、きゅっと縮まると、圧縮されて水圧が上がります。水鉄砲と同じです。それで、例えば、地下に砂の層があって、地面に粘土みたいに水を通さない地層があると、地震が起きると、ここでぎゅっと水圧が

上がる。そうすると、水圧がぎゅっと上がると苦しくなって、粘土を引き裂いて、ゴボゴボと地面に逃げてくるわけです。このときに、地下水と一緒に砂が逃げてきて、地面に広がります。ですから、ここに自然の水鉄砲ができたと思ってください。そういうメカニズムで起きます。

これは人間が立ってられないぐらいの激しい揺れでないと起きませんから、これが遺跡で見付かると、ここで人が立ってられないぐらいの、震度6近い揺れがあったことの証拠になります。

噴砂の痕跡で記録がないところを埋める

例えば1498年、戦国時代です。南海のほうは記録がないのですが、高知県の中村市（現四万十市）に下の砂の層がバーッと地面に広がった痕跡があります。これが15世紀の終わりごろの年代になって、1498年に対応するのです。これと同じ年代のものが、今度は徳島県の東の方、吉野川の河口付近の遺跡でも見付かりました。ですから、四国の東と西で同じところに地震の痕跡が見付かった。意地悪くいうと、



図表 14

たまたま、あっちとこっちで地震が起きたといえますが、いちばん考えやすいのは、四国全体が揺れるような大きな地震が起きたということです。そうすると、記録にはないけれども、1498年に対応するような南海地震が起きたのではないかということになります。

次に、『日本書紀』に南海地震のことは詳しく書いてあるのですが、東海の記録はありません。図表 14 は静岡県の浜名湖の東にある袋井市の坂尻遺跡ですが、ここで液状化現象が起きて、砂が7世紀中ごろまでの地層を引き裂いています。8世紀初めの地層には完全に覆われています。そうすると、『日本書紀』に書かれていたのが684年ですから、684年前後に浜名湖のあたりが激しく揺れたことになります。そのほか愛知県の田所遺跡、駿河湾の中の静岡市内の川合遺跡でも、全く同じ時代の激しい液状化現象の痕跡が出てきたので、そのとき東海(東南海)地震が起きたと考えてもおかしくないわけですね。となると、ここも埋まってきます。

次に、この間が通常100～150年ですが、

262年も空いているところがあります。倍ぐらい空いているのですが、この間はどうなっているか。時々周期が倍になることがあるのではないかという懸念がありますが、ちょうど最近、和歌山県那智勝浦町の川関遺跡でこんな建物の跡が出てきました(図表 15)。大体、考古学の発掘調査では柱穴を見付けます。柱穴を全部きちんと見付けて、場所を押さえて、その柱穴に匹敵するような建物を考えるわけです。この場合、このような柱穴が見付かって、ここに昔、倉庫があったことが分かりました。それも1100年代の後半にこの倉庫ができた。

ところが、1200年代の前半になると、すぐこの倉庫が使われなくなって、新しい倉庫がここに重なるようにできているのです。造り直しているのです。どうしてかと思ってよく調べると、この倉庫に沿うような感じで割れ目ができて、この中から砂が噴き出しているのです。恐らく、倉庫には米俵など重い物を入れますから、重い物を入れた状態で揺られると、これに沿う形で地割れができて、下から砂が噴き出した

和歌山県那智勝浦町川関遺跡の地震跡



図表 15

のではないかと。となると、1200年前後ぐらいにここで大きな地震が起きたらちょうどいいわけですね。これは和歌山県の南端ですから、南海地震の可能性は非常に強い。東海（東南海）地震かもしれませんが、ちょうどこのあたりに大きな地震があったこととなります。こうして、だんだん埋まってくるわけです。

記録にない時期のものばかりが見付かるのではなくて、記録にぴったり合うものもたくさん見付かります。大体この記録に書かれた時代のものは、地震の痕跡が何らかの形でどこかで見付かっています。最近見付かったもので、1361年の南北朝時代のものを取り上げてみたいと思います。

明日香にカヅマヤマ古墳という古墳があります。後ろに丘がありまして、丘を平らに削って大規模な造成工事をして、古墳を造ったわけです。この古墳の周りをよく見ると、大きなえぐられたような地形があります。古墳もここを境にして、こちら側は滑り落ちているのです。

古墳の内部に石室がありまして、ここに埋葬者のお棺を入れているわけです。これは、かな

り場所的にもいいところであって、明日香の一等地です。去年の秋に見付かって、関西方面ではテレビや新聞で大々的に何日も取り上げられたのですが、どうも、かなり高貴な人で、いちばん有力な説は、663年に白村江の戦いがあったとき、日本は朝鮮半島で大敗北をします。そのときに日本が支持した百濟王朝の皇子が日本へやってきたのですが、その皇子の息子ぐらいがちょうどぴったりの年代だそうです。それぐらい高貴な人の古墳ですから、すごくりっぱな古墳ですが、よく見ると、ここを境にして、左側は水平ですが、右側は石が傾いています。もう少し向こうへ行くと、ずるずると滑り落ちています。この古墳の石材は、ものすごく堅固に造られていたのですが、この地滑りを境にして、こちらが2mほど滑り落ちた。

この年代を探るうえで、一つ大きなことがありました。実はこの古墳は、ある時期に大規模な盗掘を受けていたのです。もう一回、石室を見ますと、ここに石材があるけれども、こちらは全然石材がありません。ここから悪い人がやってきて、宝物を全部持って帰った。石材



会場の様子

もりっぱな石を使っているのです、石も一緒に抜き取って持っていったのです。ですから、この古墳はすごくがっちり造られているのですが、ある時期に1か所抜き取られて耐震性が落ちたのです。もともとしっかり造っていたものが、ちょっと抜き取られて、耐震性が落ちた。去年似通った話があったので、それに結びつけた報道がたくさんなされました。あれは設計段階ではちゃんとしていたのですが、ある時期に抜き取って耐震性を落とした。この盗掘があったために、そのあとの大地震で滑り落ちたという解釈に達しました。石材や何かを抜き取ったあとに泥をかぶせて帰ったのですが、この泥も石室と同じだけの量がずれていましたから、やはり盗掘があったあとで地滑りが起きたことが分かります。

盗掘した人がこんなお皿を置いて帰っています。これは何に使ったか、素人判断で考えると、明日香の冬は大変寒いので、寒いところで、いろいろ掘ったりなどの作業をするので、恐らくこの中に液体を入れて、きゅっと飲んで、体を温めて作業をしたのだと思いますが、これも用なしになったので置いて帰ったのですね。これが13世紀から14世紀の初めごろ、1300年ごろに一般に普及していたお皿なので、この

ちょっとあとに地震が起きたら都合がいいわけです。

ちょうど1361年8月3日にこういう記録があります。『斑鳩嘉元記』という法隆寺の当時のお坊さんが書いたものですが、法隆寺の御塔の九輪の上が火災、仏壇の下が崩れた、薬師寺は二階が傾いて破れ、門や廻廊は全部倒れて、建物まで壊れて、唐招提寺も大被害。天王寺も金堂が破れた。これはもう大地震の記録ですね。

同じく1361年8月3日、『太平記』に、「阿波の雪の港という浦には、にわかには大山の如くなる潮みなぎり来て」、家が流されてしまったと書いてあります。これは大津波の記録です。『太平記』は戦記物なので、記述が全部確かかどうかは分かりませんが、天王寺のことも書いていますし、「紀州の山々ほど裂けたる地もなければ」と、紀伊山地の山々が地割れが起きたり、地滑りが起こったことを書いていますから、これはけっこう信頼性のある記述です。

徳島県に津波が来たと書いてありますが、実際、徳島県の由岐町（現美波町）へ行きますと、1361年の大地震の慰霊碑がちゃんと残っています。もうぼろぼろになった石碑ですが、数百年前のものでちょうどいいぐらいのぼろぼろのなり方で、これはそのときの石碑だと、ちゃん



会場の様子

と地元の文書に書いています。だから、この地震だったら、ちょうどいいわけです。

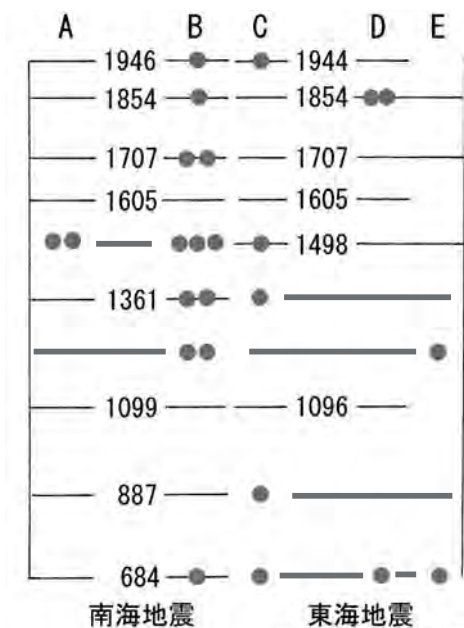
おまけに地滑りのあとでもう一回盗掘して、そのときに15世紀の鍋の底を置いて帰っているのです。そのときも、盗掘しながらご飯を食べたのです。悪いことをするときにはいろいろ物を残してくれて、それが我々の手がかりになるわけです。1300年ごろのお皿を残したあとに地滑りが起きて、そのあともう一回来た人が、1400年代のものを残しておいたということだから、1361年でぴったりなのです。

そのように地面が激しく揺れた痕跡を手がかりにして、表を埋めてみますと、大体このように埋まってしまうのです(図表16)。記録にないところも、これも愛知県の遺跡です。Cの部分はほとんど愛知県の遺跡で、ほとんど愛知県の埋蔵文化財センターが掘った記録です。けっこうたくさんの資料を提供してくれています。これを埋めてみますと、江戸時代からあとに見られたような、右と左がいつも一緒という規則性が、どうも昔からあるようです。となると、将来もこの辺に地震が起こるのではないかと

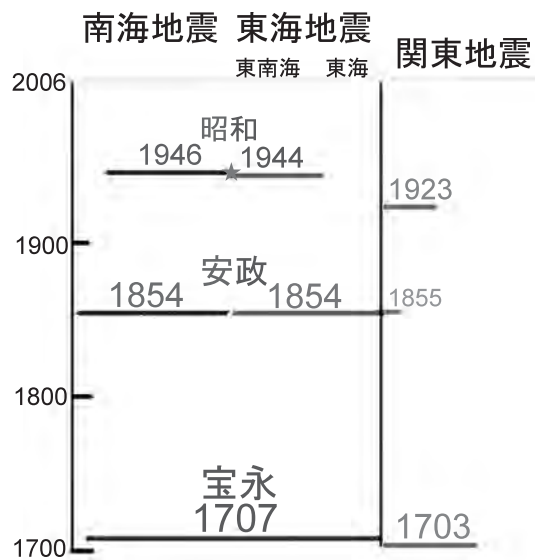
気になるのは、この辺だけ200年空いていますが、この間を埋めるような記録はなかなか出てこないで、ひょっとして、200年ぐらい空くこともあるのかもしれない。

最近のものを細かく見てみますと(図表17)、1707年は全部一斉に動きました。関東地震のこともこの表に入れていますが、実は関東地震も東海、南海と全く無関係ではありません。1703年に関東地震が起きて、4年後にバーンと一斉に大地震が起きていますし、この地震から四十何日後に富士山が噴火しています。ですから、このフィリピン海プレートの先端で起こるべきことは全部起きた。このときは100点満点の活動を地面はしたわけです。

1854年になると、右と左がちょっと分かれます。最初、東海が起きて、明るる日に南海が起きた。東海のゾーンまでずっと割れていったわけです。このあと1855年に、江戸でマグニチュード7前後の地震が起きています。これは当初活断層の地震かと思ったのですが、最近ではプレートの潜り込んだ先端部分で起きた地震ではないかといわれています。



図表 16



図表 17

最後、昭和の場合は、1944年に起きたけれども、小さかったので、推定東海地震の地域が割れ残った。恐らくこちらも割れ残っているのだらうと思います。このときも、大正の関東地震がここ（1923年）で起きていますから、広い目で見ると影響しあっているのではないかと

思われます。

次の巨大地震は21世紀前半、安政・宝永タイプ
恐らくこの長い歴史のシリーズからいうと、推定東海地震の地域が割れ残って、エネルギーをためたままですから、ここで何らかの地震が

起きるかもしれませんが、もしこれが持ちこたえらと、もう今度はここが割れ残るようなことはなくて、全部が割れるような地震が起きるはずです。この次は宝永や安政などの大きなタイプの地震が近々起きるのではないか、どうも21世紀の前半ぐらいにその時期が来るのではないかということです。私たちは昭和のこの二つの地震を目安に対策したのではだめであって、普通の大きさだった安政地震、全く同時に起きた宝永地震、この二つを目安にして、将来の対策を立てる必要があると思います。

気になるのは、関東地方です。関東地震絡みのことを書きましたけれども、関東地方にも活断層はたくさんありますから、関東も何か大きな地震とまた連動する可能性もけっこうあるのではないかと思います。

次に巨大地震がやってくるのは21世紀の前半、今度は安政・宝永のタイプです。どれぐらいの大きさかという、阪神大震災のときはマグニチュード7.3でした。マグニチュードが0.2増えると、地震のエネルギーは2倍になります。また、0.2増えると4倍、また増えると8倍。次の東海・南海地震は8.4とか8.6とかいわれていますから、エネルギーでいうと数十倍で、非常に大きいです。兵庫県南部地震の比ではない。

ただ、兵庫県南部地震は陸上の活断層が動きましたから、その上に住んでおられるかたがものすごい被害を受けたわけですが、幸い東海・東南海・南海は震源の真上に住んでいるのはお魚だけです。直下からは起きない。ですから、揺れそのものの強さは壊滅的な揺れではないかもしれませんが、広い範囲が大きく揺れると思います。阪神大震災のときは揺れの時間が十数秒ぐらいでしたが、今度はめちゃくちゃ規模が大きいですから、バリバリと割れている時間も多いですし、大きい波があちこち反射して

やってくることもありますから、愛知県などでは数分ぐらい揺れるのではないか。大きい揺れが数分ぐらい。江戸時代の日記を見ると、ぶらんこに乗っているような感じだったという記録があります。ぶらんこに乗っているような大きい揺れが長いこと続きます。

今度の地震のときは、太平洋沿岸地域には大きな津波がやってきます。図表18は1946年の南海地震のときのものですが、南海地震としては規模が小さかったですが、それでも和歌山県には大津波がやってきました。これは和歌山県編集の「南海地震から50年」にある写真ですが、津波の波に乗って、船が陸上に打ち上がってきたわけです。大体、津波というのは船や木材などを運んできて、そういうものがガーンと家をぶち壊すわけです。

安政東海地震で津波に遭ったプチャーチン

東海地方に絡んだ逸話ですが、息抜きに歴史のエピソードを盛り込みますと、1854年に安政の東海地震と南海地震が起きましたが、これはペリーが日本にやってきた明くる年です。この年に、ロシアからプチャーチンという人がやってきました。ロシアもやはり日本と国交を結ぼうとしてやってきたわけです。プチャーチンはディアナ号という船に乗ってやってきました。最初は大阪の港へやってきたのですが、大阪は京都に近いですから、大阪に上がってもらってはまずいということで、大阪の城代や幕府が説得して、伊豆半島の下田で開国交渉をしようということになりました。江戸ではペリーが来たときに大騒ぎになりましたが、大阪ではむしろプチャーチンが来たときに黒船騒ぎが起きたわけです。下田へ回ってもらって、下田で交渉が始まって、2日目に安政東海地震が起きました。

下田は大津波がやってきて、プチャーチンが



1946年南海地震による田辺市の津波被害

図表 18

乗っている船は壊れてしまいました。そのあと、下田は伊豆半島の東側ですが、西側の戸田で船を修理するというので、そこまで延々と船を引っ張っていったのですが、その途中で暴風雨が起きて、伊豆沖の、今の富士市の沿岸で船は沈んでしまったわけです。ロシアの宣教師の日記を見ると、そのときに、日本の人たちは地震で家を失っているのにもかかわらず、ロシアの人たちにすごく親切にしてくれた、なんと日本人は心温かい人たちなのだろうと、感激して書いています。

プチャーチンは、日露和親条約は結ばれて、大願成就したのですが、ロシアへ帰れなくなってしまった。どうしようかと困っているときに、伊豆の代官の江川太郎左衛門などが中心になって船頭を集めて、船を造りました。そのでき上がった船で、プチャーチンは国へ帰ったわけです。

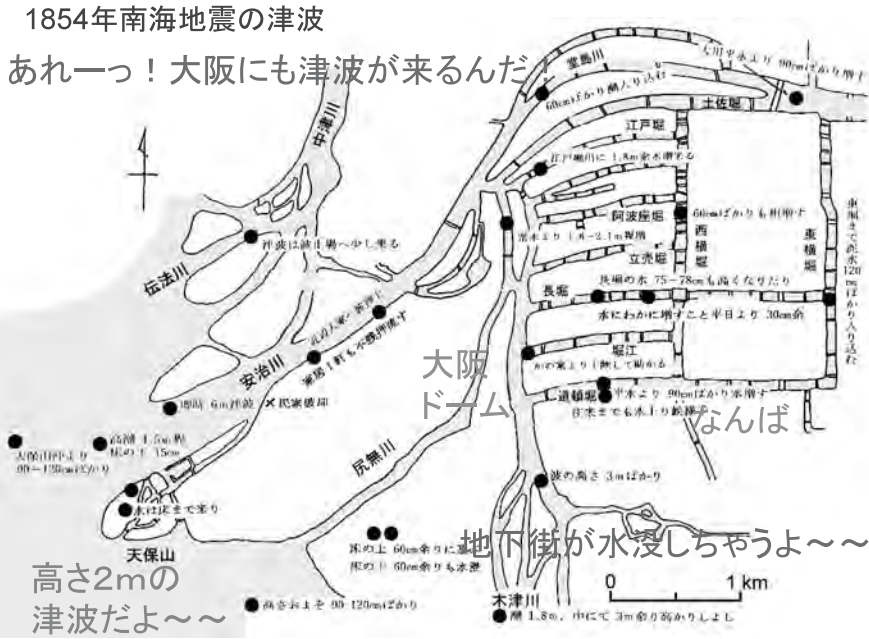
実はこのときに、プチャーチンが持っていたボートの設計図を見本にして船を造ったのですが、これが日本で造られた最初の西洋式の船で

す。その後、そこに集まった船大工さんたちが西洋式の船の作り方を身に付けて、日本の造船業界の中核になって働いたわけです。ですから、日本の造船が進歩した一つのイベントになったのが、この大地震なわけです。

今度の地震では津波の被害も

昭和の南海地震のときは小さかったので、大阪に津波は来なかったのですが、1854年の安政の南海地震のときは大阪に大津波がやってきました。恐らく今度は名古屋の沿岸にもそこそこの津波がやってくると思います。これは大阪城天守閣にある絵図を基にして、京都大学の河田先生が作られた図を示したのですが、このとき地震から2時間ぐらいたって、2mぐらいの津波がやってきました。中之島のところを見ると、家が一軒も残らずに流されたと書いてあります。なんばでは、道頓堀ですが、ここも水が地面を覆ったと書いてあります。

ちょうどこのときに、一つのとんでもない誤解が被害を拡大させました。地震で大きく揺れ



図表 19

ているときに、陸上の方は揺れをすごく感じたのですが、船に乗っている人は揺れをあまり感じなかったのが、地震のときは船は大丈夫ということになりました。ですから、この安政の南海地震が起きた直後にみんな船へ逃げました。そのときは、老若男女、金持ちも貧乏人も分け隔てなく、みんな船に満載に乗せ上げたわけです。その直後に大津波が来たので、一網打尽にみんなやられてしまって、すごくたくさんの方が亡くなりました。

もう一つ将来的に怖いことですが、大阪に限らず市街地に津波がやってくると、地下街に水が入ってきます。今度、大阪などでは、津波で地下街に泥水がやってくる、地震のあとで地下街でおぼれ死ぬということが出てくると思います。そういう意味で、津波もけっこう怖いわけです。

1923年の関東大震災

1923年の関東地震の話も出します。文化財の関係ですごく興味深いのは、これは茅ヶ崎の

水田ですが、地震のあとに急に地下からぼこぼここと11本の柱が浮き上がってきました（図表20）。実は鎌倉時代に、ここに相模川が流れていて、大きな橋が架かっていたのです。そのあと橋は腐ってしまったのですが、柱だけが地面の下で腐らずに残っていたのです。どうも、この柱はいちばん底のところ細かい砂の層に突き刺してしまっていました。地震で砂の層が液状化現象を起こすと、地下水の水圧が上がります。そうすると、軽い物が入っていると押し上げるのです。それで、このようにぼこぼここと上がってきたわけです。今、茅ヶ崎市でこの周りは公園になっていますから、いつでも見ることができます。

1923年の関東地震のときの、被服廠というところの空き地は江戸東京博物館や蔵前の国技館がすっぽり収まるような広い空き地だったわけです。関東大震災は9月1日、午前11時58分。ちょうど台風が迫っていて、風も強かったのです。11時58分というのは、家で火を使う時間です。ですから、火事が起こって、強い風



図表 20

に乗って、火がワーッと回っていったわけです。ここは広い空き地の中にたくさんの人が逃げてきました。この人たちは火事のことをあまり心配していなくて、よく見ると、向こうのほうで燃えているのに、みんな和やかに談笑しています。地震は起きたけれども、命が助かってよかったとか、そんな話をしていたのだと思いますが、この1時間ぐらいあとの、バーッとここも火の海に包まれて、ここで数万の人が亡くなりました。

1703年の関東地震と1923年とを比べると、1703年はマグニチュード8.2～8.3で非常に大きいです。1923年は7.9で、地震規模は1703年のほうが大きいのに火事がごく小さかった。1923年はものすごく大きな火災を出したので、死者の数は10万人あまり。1703年は1万人足らずですから、2次災害で死者の数が全然違ったわけです。

野島断層

今度は活断層の話ですが、図表 21 は活断層

の写真です。ここに活断層があります。左に古い岩があって、右下に新しい地層、ふにゃふにゃの粘土層があります。古くて固い岩が下にあって、それを新しい地層が覆っているのが普通ですが、この活断層の線を境に、左側が地震のためにボンボンと上がっていったので、古いものが上に乗っかって、新しい物が下にあるという逆転現象が起きています。実はこれは阪神大震災を起こした野島断層の、1979年に撮った写真です。ですから、もちろん阪神大震災のずっと前です。

地震のあと、私は飛んでいきました(図表 22)。全くあの線に沿って断層が動きました。あの線にぴったり沿って、田んぼがずれ、道もずれています。ですから、いったん活断層という傷がしっかりできてしまうと、そこでばかり次も地震が起きるわけです。

「野島断層」東京大学出版会にある写真で、ここに平たい地面があります。もともとここは2万年ぐらい前に川が流れていたのですが、断層が何回も活動して、ここに段差ができました。



図表 21



図表 22

この段差は10mありますが、2万年間かけて断層が活動した痕跡が、この10mのがけとして残っているわけです。1mのがけが阪神大震災でまた新たに加わりました。計算すると、2000年に1回ずつぐらい地震を起こしていると、ちょうどいいわけです。活断層の発掘調査

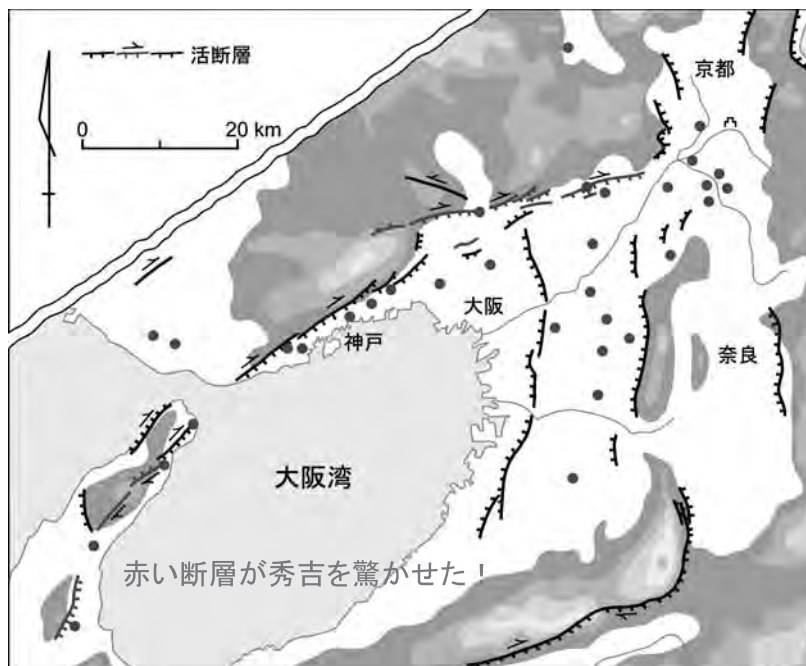
をやって、この活断層が一つ前はいつ動いたかを調べると、西暦50年前後になりました。ちょうど2000年ぐらい前で、ぴったりうまくいくわけです。今から2000年ぐらいたつと、また阪神大震災のような地震が起きます。

活断層の発掘調査

これが野島断層です。大阪平野にこういう活断層がずっと延びています。この断層が思い切り動いて、阪神大震災を起こしました。このような断層がいつ動いたかということがすごく注目されて、阪神大震災のあとで、全国の大

体98ある主な断層を発掘調査するという大きなプロジェクトが始まりました。

最初の年に、京都からここまでに至る断層をずっと発掘調査したのですが、実は赤丸印をつけたのは遺跡で見付かった地震の痕跡です。最初に紹介したように、室町時代の地層を引き裂



図表 23



秀吉さんのころ、京阪神を巨大地震が襲った！
伏見地震(ふしみじしん)という名です！

図表 24

いていて、江戸時代の地層に覆われている地震の痕跡がたくさん出てくるのです。どうも安土桃山時代ぐらいにこれぐらいの範囲で大地震が起きたのではないかとということで、この断層はどうもそのころに動いたのではないかという見通しを持って発掘調査をしました。

図表 24 は発掘調査をしたときのスケッチです。これが活断層です。黒いのが昔の水田の土です。本当はまっすぐ水平でないといけませんが、断層を境にして、バツとずれています。室町時代と鎌倉時代の茶わんがたくさん出てきます。これ (b) は盛り土ですが、田んぼが上下に食い違ったので、お百姓さんが困って、ここに盛り土をして、新たに水田を作って、現在まで耕作したわけです。この中からは江戸時代の茶わんがたくさん出てきます。室町時代の茶わんが出てくるところがずれて、江戸時代の茶わんがこれを覆っているのだったら、やはりこれは安土桃山時代ぐらいの地震です。

ちょうど豊臣秀吉のころの 1596 年 9 月 5 日

に大地震があったという記録があります。このときにこの断層が動いたことが分かったわけです。もう一つ前の時期を調べたら、大体 3000 年ぐらい前ということが分かりました。

活断層のある場所

活断層はどういう場所にあるのか、どういうところを掘ると活断層がうまくつかまるかということ、ちょっとお話ししたいと思います(図表 25)。ここががけが続いていまして、こちらがちょっと高く、こちらが低いのです。実はここに 8000 年ぐらい前に川が流れていたことが分かりました。これは川が削ったがけです。これがずっとここまで続きます。ここまで来ると、これは前が見えなくなっている。よく探すと、ここに出てくる。ずっとこっちへ続いています。川が削ったがけが、ここからぴよんと飛ぶわけです。ここに小さな水路がありますが、これもちょっとこちらにずれます。

本来まっすぐ続くものが、このように横にずれている。ここもちょっとずれている。これは



図表 25

3m のずれで、こちらが 12m のずれですが、恐らくこれはここに活断層があって、これが 1 回分のずれ、これは 4 回分のずれではないかと思って、ここで発掘調査をしました。そうしたら、このようなものが出てきました（図表

26）。

このように、活断層の場所がどこにあるかを調べるのは、地形や土地利用を細かく見ると分かることが多いです。そのようにして、私たちは活断層の場所を見付けました。これには長年



有馬一高槻構造線活断層系トレンチ壁面

図表 26



京都府京田辺市門田遺跡の液状化跡

図表 27

の経験や何かかけっこうものをいいますが、先ほどの推定した場所にこういうものがある、これと同じ砂利の層がこの下に出てきますから、こちら側が上に上がったことが分かります。これは年代を見ますと、縄文時代ぐらいです。

伏見地震の痕跡

秀吉のころの1596年の伏見地震ですが、地震の痕跡がたくさん見付かります。図表28は住居跡を噴砂が引き裂いているものです。

図表28は、液状化現象というのは砂でしか



神戸市玉津田中遺跡の液状化跡

図表 28



神戸市住吉宮町遺跡の井戸枠の変形

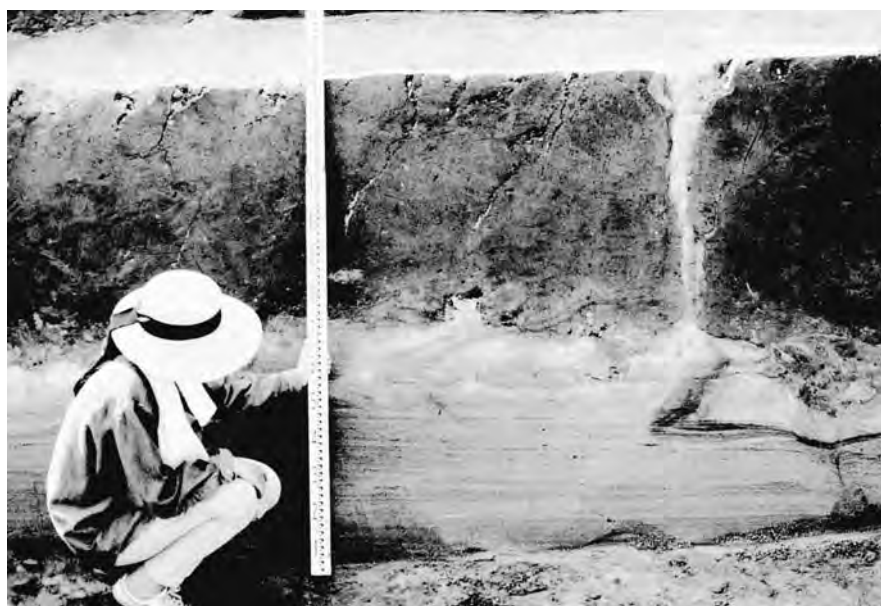
図表 29

しないと常識的に考えられていましたけれども、大きな地震の揺れがありますと、石ころの層でも液状化するのです。その証拠に、この砂利の層が液状化して、石ころが上へ噴き上がっています。

図表 29 は、少し前にアイススケートで荒川選手のイナバウアーがすごく流行しましたが、井戸がイナバウアー状態になっているわけです。本来まっすぐ造られていた井戸が、上半分がこちらへ動いています。豊臣秀吉の地震が起きた時代から、1.5m ほどの深さまで掘ったところがここですが、表面の厚さ 1.5m ぐらいの地層が、こちらへ動きまわりました。何で動いたかという、ちょうどこの部分だけ、薄く軟らかい砂の層があります。ですから、その層が液状化現象を起こして、こちらへすっと地面が動いたわけです。

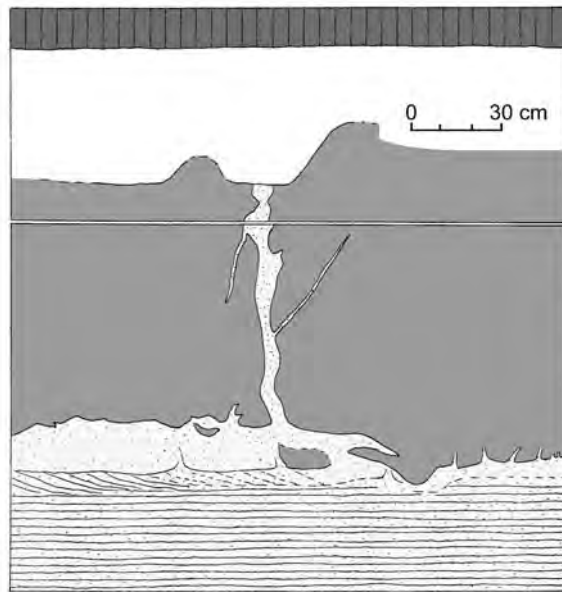
それから、ちょっと専門的になりますが、これは液状化した砂の層です（図表 30）。よく見ると、ここにたくさん横に筋があります。この

筋は、砂の層がごく緩やかな水の流れて、1枚1枚たまった跡なのです。ところが、この範囲だけこの筋がぐちゃぐちゃとなってしまうんです。液状化現象がこの地層で起きたのですが、地層が乱れているのはこの範囲だけで、ここからは全く平気なのです。砂の層の中で液状化現象がよく起こると言いましたが、そのときに砂の層全体で起こるのではなくて、ある一か所で地下水の水圧ががーっと上がって、地面に砂がピューッと流れてしまうと、もう広がっていかないのです。ですから、砂の層で液状化現象が起きたといっても、激しく動き回って被害が起きるのはこの範囲です。私は当初は、液状化が起きると、もう砂の層全体が壊れてしまって、めちゃくちゃになるのかと思ったのですが、そうではありません。こういうことは防災対策に役立つかもしれません。図表 31 はこれをスケッチしたものです。ここからは非常にきれいで、全然液状化の影響を受けておりません。



京都府八幡市内里八丁遺跡の液状化跡

図表 30



京都府八幡市内里八丁遺跡の液状化跡

図表 31

古墳に見る地震の痕跡

地震で古墳などがつぶれることもあります。図表 32 は古墳と地震の関係を示したのですが、ここに巨大古墳が二つあります。今城塚古墳と大田茶臼山古墳で、ここに活断層があります。これは豊臣秀吉のときに活動して、3m ぐらい横にずれた断層です。上下に数十 cm ぐらいずれています。この断層もこの断層も豊臣秀

吉のころにずれていますから、この古墳ができたあとにこの断層は活動しています。最近の地下探査で、この古墳の下を断層が走っていることが分かりました。この巨大古墳は偶然活断層の真上に造られていました。こちらの古墳は活断層をちょっと外れて造ったわけです。おまけに黄色いところは地盤が固いところなので、地盤のいいところに造っています。



図表 32

ちょっと活断層から外れて、地盤のいいところの古墳は全然何ともありません。ということは、活断層のすぐ近くに住んでいても、地盤のいいところに住んで、きちんとした建物を造っておけば、被害はけっこう少なくて済むということです。

活断層の直上に造った古墳は、えぐられたよ

うながけ状の地形がたくさんあります。古墳の形もものすごく乱れています。この黄色いところは、全部地滑りで滑り落ちた部分です（図表33）。ですから、元の古墳の形はほとんど残っていません。これは真下に活断層があって、おまけに地盤の軟らかいところに造ったものですから、断層が動いて、ものすごい地震動がこの



図表 33



図表 34



今城塚古墳の墳丘に刻まれた地滑りの痕跡

図表 35

古墳を襲って、こうなってしまったわけです。

この地滑りでめちゃくちゃになった古墳ですが、ここはもう自由に立ち入りできます。古墳の墳丘の上に上ると、がけがあって、小さいブロックがあります。これはここから下へ滑り落ちたものです。滑り落ちたブロックを発掘調査しますと、もう地層が60度ぐらい傾いています(図表34)。本来これはまっすぐ水平に積んでいないといけないのですが、ここを境にして、こちらがぎゅっとブロックになって動いたものですから、このようにぎゅっと傾いてしまったわけです。

それから、こんなものもあります(図表35)。ここを境にして、上の墳丘の盛り土が滑ったのですが、これは二つに盛り土が分かれて、こちらのほうが滑るスピードが遅くて、こちらはスピードが速いので、後ろのやつが乗り上げてしまったような感じです。

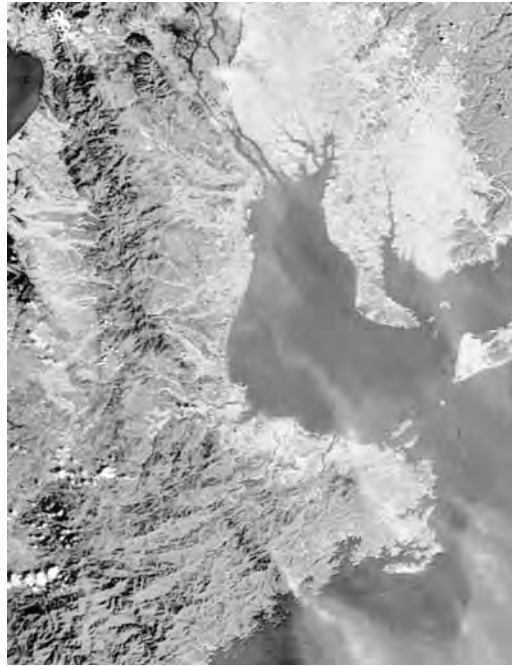
このように発掘調査をすると、地滑りの痕跡がたくさん出てきます。実はこれは継体天皇の陵墓であることが間違いない古墳です。鎌倉時

代までの記録を見ると、こちらは継体天皇陵と書かれています。ところが、江戸時代になると、大田茶臼山古墳のほうを継体天皇と幕府が指定してしまったのです。今もこれを継体天皇陵として、宮内庁は間違った指定をしています。なぜ変わったかという、一つの原因としては、もともとこちらだったのだけれども、地震でつぶれてぐちゃぐちゃになってしまって古墳として認定できなかったか、あるいは天皇陵にするにはあまりにもおそまつなので、こちらのきれいなほうにしてしまったのではないか。どちらにせよ、地震の前後で天皇陵の位置が変わってしまいました。これは別の意味で非常に面白い。

三重県の活断層

伊勢湾の衛星写真です(図表37)。実は私は名古屋大学の鈴木先生と一緒に三重県の活断層の調査委員になっていて、三重県の活断層をいろいろ発掘調査しました。一つ大きいのは、養老山地のふもとにある養老断層、それから桑名・

伊勢湾周辺の衛星写真



図表 36

四日市と続く、養老-桑名-四日市断層があります。それから、鈴鹿山地のふもとに鈴鹿山地東縁断層があります。この二つがとても大きいです。伊賀上野の北縁に木津川断層という断層もあります。

図表 38 は鈴鹿山地の東のへりの断層を掘ったときですが、この砂利の層が断層を境にして、これだけずれています。これが鈴鹿山地の東縁断層の姿です。これが大体 3000 年ぐらい前に活動したことが分かりました。どうもこの断層



図表 37

鈴鹿山脈東縁断層帯のトレンチ調査



図表 38



1854年伊賀上野地震で活動した断層

図表 39

の周期は数千年ぐらいの周期ですから、3000年前に活動したきりですが、近々活動の危機が迫っているわけではありません。

これが断層で、この砂利の層が、この青い粘土層がこれだけずれています（図表 38）。この

上を覆っている地層は、全然ずれていません。

図表 39 は、実は 1854 年に伊賀上野で大地震がありました。上野盆地の北縁に断層がありますが、ちょうどこの部分に断層がありまして、こちらの部分が上へのし上がったわけです。年

代を見ますと、やはり幕末の伊賀上野地震で活動したことが分かりました。ですから、伊賀上野の上野盆地の北縁の断層は活動した直後ですから、しばらくは大きい活動はないと思います。

1586年の天正地震

先ほど1596年に京都近辺で大地震があったという話を延々としました。豊臣秀吉のころに起きて、伏見地震という名前がついているとお話しましたが、実はその10年前に中部地方でものすごく大きい地震が起きています。このタイプの地震と1891年の濃尾地震、この二つのタイプが、内陸地震としては名古屋地域にもものすごく大きい被害をもたらす地震です。

このとき動いた断層はどれかという、一つは、恐らく養老山地のへりにある、養老-桑名-四日市断層が動いたのだと思います。これは名古屋にとってすごく怖い断層ですが、一つ前の活動時期はいつかという、西暦745年に大地震があった記録がありますが、調査をしますと、一つ前はそのときらしいのです。だから、

大体1000年前後、800年に1回ぐらいの活動で地震を起こしています。活断層としては周期がものすごく短いですが、皆さん幸運な時期にいて、ちょうど中間ぐらいの時期にいます。この地震が起きて400年ですから、あと400年ぐらいしたら、またすごく怖いですが、今のところ特別怖い断層ではないわけです。このときこれと一緒に動きました。

それで、帰雲城と書いていますが、ここで歴史上指折りの大悲劇が起きました。ここにお城があって、城下町が栄えていたのですが、地震とともに、ものすごく大規模な土石流が流れてきて、お城も城下町も一瞬にして埋まってしまうました。一瞬にしてだれもいなくなったのです。この帰雲城は合掌造りで有名な白川郷の近くにありました。今でも地滑りを起こした跡がくっきりと山肌に残っていますから、興味のあるかたは行かれて見学をしてください。これはもうすごい悲劇だったわけです。記録を見ますと、明るる日に祝賀会があって、みんな大騒ぎをする予定だったのですが、その準備が全



一五八六年の天正地震で被害を受けた地域

図表 40

部終わった直後に地震が起きて、埋まってしまったわけです。

そのときの地震は、富山県でもすごい被害を起こしています。富山県に木舟城というお城がありますが、そのお城もすごい被害を受けて、地震のあと、お城も城下町もどこかへ移転してしまいました。最近の発掘調査で、その城下町

の一部、井戸の跡ですが、これを噴砂が引き裂いているものが見付かりました（図表 41）。

これは山内一豊の妻、千代さんです（図表 42）。1557 年生まれ。1580 年によね姫を出産しました。よね姫は天正 8 年生まれです。「功名が辻」を見ておられるかたがいると思いますが、司馬遼太郎さんのよね姫の年齢は 5 歳ぐらい間

かいほつ
開辭大滝遺跡で石組み井戸を引き裂く砂脈

幻の木舟城下町の発見



図表 41

山内一豊の妻

千代(見性院)

1557年生まれ
1580年よね姫を出産
天正8年生まれ！



旭川 寒画

図表 42

違っています。天正8年(1880年)、これは非常に正確な年代です。山内一豊の妻の千代さんは地震に関係があります。

天正地震が起きたときに、山内一豊は長浜城の城主だったのです。もう少ししたら、それが多分大河ドラマに出てくると思いますが、山内一豊は長浜城の城主で、たまたま地震の日に一豊は京都へ出張して、千代さんと娘さんだけが残っていました。この地震で長浜もものすごく揺れました。琵琶湖の西の方で震度5強ぐらい、ここは震度6ぐらい揺れています。

それで、天正地震のナマズがやってきました。地震を起こす活断層は悪気があって起こしているわけではなくて、自然現象で起こしているの、最初はナマズが襲っている感じの絵にしようかと思ったのですが、花束を持ってきた絵にしました。

このときの家老の五藤為重の日記を見ますと、地震が起きたときに長浜城で建物がたくさんつぶれました。千代さんはかろうじて逃れ出て、為重が千代さんを一生懸命探して、やっと見付けて、「ご無事ですか」と言うと、千代さんはすごく取り乱した感じで、「よね姫はどうした」と言うのですね。為重はそのときに、よね姫の場所は家が粗末で耐震性が悪いので、無事ではないだろうと思ったのですが、安心させようと思って、「よね姫さんにご無事ですよ」と言って、千代さんを安全なところに連れて行って、そのあと、よね姫がいた屋敷へ行くと、案の定、家がつぶれていて、中を見ると、乳母と一緒によね姫は死んでいたのです。そのとき本当は数えの6歳ですが、原作を読むと10歳になっています。僕は20歳ごろに『功名が辻』を読んで、10歳と書いてあったので、ずっと10歳と思い込んでいたのですが、最近ちゃんと調べたら満5歳でした。どちらにせよ千代さんは子供は一人だけだったので、そのたった一

人の子供がこのとき死んでしまいます。そのあと子供はできなかったの、山内家は代々江戸の終わりまで続きましたが、弟の子を養子にして跡を継がせました。

地震とナマズを結びつけたのは？

最後にクイズです。私はナマズの絵をたくさんかきますが、地震とナマズを結びつけるのは日本人だけのことです。フランス人もイギリス人もナマズの絵を見せても、地震とはなかなか思いつかない。中国人もそうです。日本だけの唯一の文化ですが、地震のことを最初にナマズに例えたのはだれだと思いますか。

1番、豊臣秀吉。2番、徳川綱吉。3番、平賀源内。

どこでも平賀源内が大人気ですが、実は秀吉です。天正地震のときに、長浜はすごい被害でした。ここに坂本というお城があります。これは明智光秀の城ですが、明智光秀はもう秀吉に殺されて、秀吉はその地震のときに坂本にいたのです。秀吉は地震がすごく怖かったと見えて、地震のときにもものすごくおびえて、大阪へ一生懸命になって逃げて帰ったと、宣教師の日記に出てきます。大阪へ帰ってから、京都の伏見に伏見城というお城を造ります。そのときに秀吉が伏見城を造った奉行の前田玄以に手紙を出しています。

その手紙は秀吉の直筆なので、平仮名だらけですが、「ふしみのふしん、なまつ大事にて候」と書いています。伏見のお城を造るときに、ナマズに気をつけなさいと。このナマズはもちろん地震という意味です。秀吉はすでにこのときにナマズで地震を示すような発想を持っていたわけです。

調べてみますと、鎌倉時代に地震を起こす生き物という絵図があるのですが、それはナマズではありません。それで、どうもこれが地震と

ナマズを結びつけた最古の資料です。この手紙の文面だけで意味が通じたということは、秀吉の周りの人たちもみんな、ナマズという言葉で地震をイメージできたわけです。

しかし、1596年、先ほどの伏見地震が起きて、このときに伏見城はつぶれてしまいました。そのとき、ちょうど謹慎処分だった加藤清正が謹慎処分中にもかかわらず、秀吉のもとに助けに飛んできて、秀吉はすごく喜んで罪を許したという有名な話があります。これは「地震加藤」という市川団十郎が得意とした歌舞伎になっていて、江戸時代から有名な話です。

なぜ秀吉とナマズが結びついたかという、秀吉は琵琶湖のほとりの坂本にいたので、恐らく養老断層が動いたら、琵琶湖のナマズが暴れたのではないかと思います。恐らくその地震のときに、百姓や下級武士などがナマズが暴れるのを目撃して、それが秀吉の耳に伝わって、こうなったのではないかと。

その後、1855年の江戸地震のときに、ナマズ絵が流行します。ナマズを描いて地震当時の

世相を風刺したユーモラスな絵が、当時流行したかわら版に載って、全国に広まりました。その影響で、私たちは地震をナマズと結びつける非常に奇妙な文化を持ったわけです。それで、私は非常に奇妙な文化のもとで、こんな絵(図表43)をかいているわけです。

質疑応答

(質問者1) 次に起こるプレート型の地震は21世紀前半ということですが、前半というのはいつごろなのか。周期が100年以内ということはありませんね。100年から150年の間だと。そうすると、1944年に起こったのですから、次は2044年から2100年ぐらいだと、安心していいのでしょうか。私はそう思っていたのですが、先生が前半と言いましたから、私の生きている間に起こってはまずいなと今思ったのですが……。

(寒川) いちばん関心を持たれるご質問です。昭和のときに二つとも地震規模が小さく、エネ



旭川 寒画

図表 43

ルギーの消費量が小さかったので、この次はけっこう早いのではないかと、皆さん感じています。もう一つ、これは関西のほうではけっこう言う人が多いのですが、地震の活動期と静穏期という発想がありまして、巨大地震が起きる数十年ぐらい前になると、大きい地震、中規模な地震、小さい地震、地震がけっこう多くなるという考えがあります。多くの人が、阪神大震災をきっかけにして活動期に入ったと言っています。そうしますと、活動期に入って、今10年ぐらいたっているの、あと40年ぐらいまでは次の本番の地震が起きていいということになるわけです。そういう意味で、21世紀の前半ぐらいに次の地震が起きるのではないかと。

こうは言っても、みんな確たる証拠をもって、この時期に起きるといことをちゃんと言える人はほとんどいないと思いますが、前の地震が小さかったから、次はけっこう短い周期で早く来るのではないかと。安政の地震と昭和の地震の間が90年ぐらいだったから、次は90年ぐらいで来てもおかしくない。もし活動期に入っているのだったら、21世紀の前半ぐらに来て、決しておかしくないということになります。

(質問者2) 静岡で、地震空白域ということが言われていました。その空白域を埋めるために静岡でドーンと地震が起ると、東南海地震も起るのですか。

(寒川) 過去にここだけ単独で大きな地震を起こした事例がなかなか見付からないので、ここで地震が絶対起きるといことも、なかなか言いにくいのではないかと思います。ここでもし地震が起きたら、関東にも近いし、非常に危険な状態なので、ここをマークするというのは非常に正しいと思いますが、ここでなかなか起きないから、もうこの地域は大丈夫だということではなくて、本来の意味の巨大地震にだんだん近づいているわけです。

過去の地震の際には南海トラフ沿いで一斉に割れるような地震が起っている。そういう地震の再来が21世紀前半かもしれない。今からそろそろ、宝永や安政を目安にして、全部一斉に地震が起きて日本列島の大半が被災することについて、ちゃんと準備をしなければならぬということとは言えると思います。

地下水で東南海・南海地震を予測する



小泉 尚 嗣

(産業技術総合研究所・地震地下水研究グループ長)

私は地下水観測による地震予知研究を学生のころからずっとやっております。今年49歳ですのでもう30年ぐらいやっております。89年に京都大学の助手になり、95年に阪神・淡路大震災を京都で経験しました。それは良い意味でも悪い意味でも私に大きな影響を与えています。

96年に京都大学から当時の地質調査所に移りまして、それが2001年に独立行政法人に変わったときに今のグループのグループ長になりました。それ以外に日本地震学会の広報委員や地震予知検討委員といった仕事もしています。その関係で、ここ名古屋大学の山岡耕春教授らと共著で『地震予知の科学』を最近出版しました。自分で言うのも何ですが、良い本だと思いますのでご興味があれば読んでいただけたらと思います。

それから地震防災対策強化地域判定会の説明委員。これは「判定会」という名称で皆さん知られていると思いますが、東海地震予知の判定を実質的に行うところです。そこには大学の先生が6名ぐらい委員でいらっしゃいますが、気象庁、防災科学技術研究所、国土地理院、産業技術総合研究所が観測データを提供しております。毎月一回判定会の委員打ち合わせ会というのが気象庁でありますので、そこに行ってデータを説明しています。産業技術総合研究所は、地下水等の観測データを提供しているので、我々は、東海地震予知のための地下水観測分野

を担当しているということになります。

地震予知と地震予測

昔はとにかく「地震予知」といいましたが、最近では「地震予測」という言葉がよく使われるようになりました。1995年の兵庫県南部地震があって、あれほどの被害をもたらした地震が予知できなかったということで、地震予知研究に対する批判がかなり高まりました。予知という言葉は、読んで字の如し、予め知るという意味です。一方、予測は予め推し測るという意味で、予知の方が予測にくらべて確実性が高いイメージです。つまり昔は予め知ることができると思っていたのですが、研究が進むにつれてそれが段々難しいと分かってきた。加えて、1995年の兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）をきっかけに、地震予知研究への批判が高まったので、地震予測という言葉の方がよく使われるようになってきたという経緯があります。「予測」という言葉は、良く言えば謙虚、悪く言えば自信がないということにもなります。

あえて言わせていただくと予知は目標です。現状は、「予測」すなわち推し測っているのです。東海地震予知と申しますが私たちは推し測っているにすぎません。地震発生を知っているわけではないので、一生懸命いろんな観測をして推し測っているのです。昔は、異常な観測データの意味を完全に理解してから予報を出すということが前提でしたが、今は確率予測といって、



会場の様子

現在の天気予報などと同じように、確率を入れることである程度あいまいな情報を社会に出して、予報を受ける社会の方でも、対策について個別に判断してやっていただくというふうになってきました。そういう意味で、地震予知は相変わらず難しいですが、最近の研究成果はそれなりに震災軽減に活かしていくことができつつあると私たちは思っています。

名古屋の方では名古屋大学がこういう催し物を定期的にされ、あるいはマスコミとの情報交換を密にされているので、皆さんは、地震予知に関する基礎的な知識をたくさんお持ちだと思いますが、基本ということでプレートテクトニクスと東海地震の話をもっと詳しくお話しします。それから今日のテーマである地下水観測による東海地震予知の原理と東海地震予知についてお話しします。最後に、地下水観測による東南海・南海地震の予測研究の話をしていきます。東南海・南海地震は、基本的に予知できる体制にはなっておりません。何とか予測をしようと努力していますが、現状は不意打ちで来るということです。

地震予知と言った場合の言葉の定義にはあいまいなところがあります。あるときは、定義があいまいなまま、「予知できる」・「予知できな

い」という議論がなされる場合もあります。一般の方にとって意味があるのは、地震の前に何らかの変化を検出して、地震が起こる前に公的な機関から予報が出され、それによって震災が軽減されるという一連の流れではないでしょうか。医療にたとえてみると、前兆現象の検出が「診断」で、地震の前に対策を取ることが「治療」になると思います。一般の方にとっては、この2つが一緒になって初めて地震予知として意味をもつと思います。そのような観点から考えると、前兆現象検出に対する「対応」が決められていないので、現状では東南海・南海地震は予知できる体制にはなっておりません。予知できるのは東海地震だけです。東海地震が予知できるといっても必ず予知できるというわけではありません。診断（前兆現象検出）ができる場所は東海以外にも可能性がある所は幾つかありますけれども、きちんと治療ができる所、すなわち、事前に対策が取れる所は東海地域だけです。これは知っておいていただきたいと思いません。

プレートテクトニクスとは

プレートテクトニクスとは、地球の表面が厚

さ 100 キロメートルほどの何枚かの板状の岩盤で覆われていて、地球表面上で起こる主な変動現象は、地震も含めて、プレート同士の相互作用によって生じるという考えです。地球表面上の変動というのは非常に長い時間がかかるものも含まれます。例えば造山運動です。ヒマラヤ山脈は、インド大陸がアジア大陸にぶつかることによって圧力を受けて地盤が盛り上がることによって生じているわけですが、その山脈形成には非常に長い時間がかかっています。また、このような場所では、地震活動や火山噴火といったもの起こります。プレート同士がぶつかり相互作用を及ぼす場所、つまりプレート境界付近で、地形の急変や地震・火山噴火が起こるとというのがプレートテクトニクスの考え方です。

図表 1 は世界の地震の分布図です。大事なことは地震が起こる場所は限られているということです。例えばヨーロッパは、トルコ付近を除いてほとんど地震は起こりません。それからアメリカ合衆国も、西海岸を除いて地震はほとんど起こりません。しかし、日本を見ると全土がほとんど地震で埋めつくされています。日本は

いわゆる先進国であって、全国土が地震の危険地域にある数少ない国であるということです。従って他の国に比べて、地震対策に重点を置くということはある意味当たり前です。

グローバルという言葉がよく使われますが、私たちはグローバル=欧米と考える場合が多いようです。でも、本当はそうではないのです。地震の場合は、ヨーロッパではこうだ、アメリカではこうだ、だから日本ではこうだという論理は使えないのです。よく考えれば当たり前の話です。自然災害というのは基本的に局所的なものなのです。たとえば、雨が降らない所では、洪水の心配はないし、そのための対策も必要ありません。従って研究の必要もないわけです。

もちろん海外の状況は知らなくてはいけません。基本的に自然災害というのは地域ごとに個性があるので、ある災害が非常にたくさん起こる国では当然それに対して対策を取るべきだし、予算を使い研究もするべきだと思います。それからもう一つ、日本が地震災害について地域特性を踏まえた対策や研究を進めることで、地震危険度が高いにもかかわらず対策が進んでいない多くの発展途上国に対して、日本独自の



地震が起こる場所は限られている
日本: 先進国・国土全体で地震が起こる(数少ない)国

図表 1

貢献ができることも指摘することができます。そういう意味でも地震の研究・地震予知の研究というのが大切であるとあらためて申し上げたいと思います。

昔はこのようなプレート運動、年に数センチというスピードで大陸が動くなどというのを直接測定する方法がありませんでした。そこで、いわゆる構造地質学という分野で、岩石の年代を調査し、その岩石のある場所がプレート境界といわれるところからどのくらい離れているかということ調べることによって年間にプレートが何センチくらい動いているかを計算しました。最近では、皆さんご存じのとおりGPSというものができプレートの動きを直接測れるようになりました。日本を見ても太平洋プレート、フィリピン海プレート、ユーラシアプレートといった基本的に3つ、ないし4つのプレートが押し合いへし合いしています(図表2)。従って地震も火山も活動は活発であるということになるわけです。

プレートテクトニクスの要点の一つは「プ

レートの真ん中のところでは何も起こらない」ということです。端っこのところだけいろいろな地殻変動が起きる。さっき述べたように地震の分布などもこれで簡単に説明できるわけです。プレートの中心部ではほとんど地震が起こらなくて、境界でのみ地震が起こることが説明されるわけです。

日本列島周辺のプレートを拡大し、立体的に書くと図表3のようになります。基本的にはユーラシアプレート、フィリピン海プレート、それから太平洋プレートの3つのプレートがあり、最近では4つ目のプレートとして、日本海東縁にもプレート境界があってその東側は北米プレートであるとかオホーツクマイクロプレートであるとかいう言い方がされています。東南海・南海、それから東海地震というのはこのフィリピン海プレートとユーラシアプレートの境界で起こります。紀伊半島から四国沖の部分南海トラフとよび、駿河湾の部分駿河トラフと呼ばれます。ちなみに相模湾から日本海溝にかけての溝(トラフ)を相模トラフといい、ここで

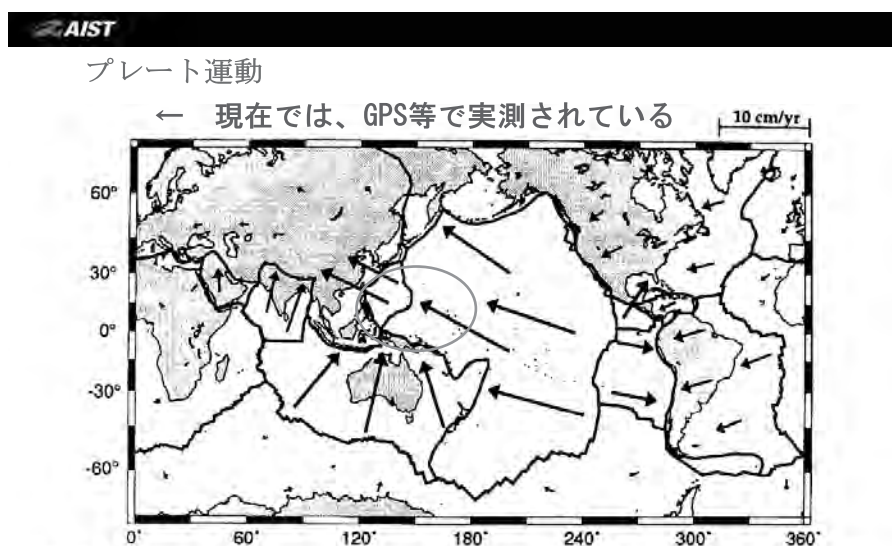
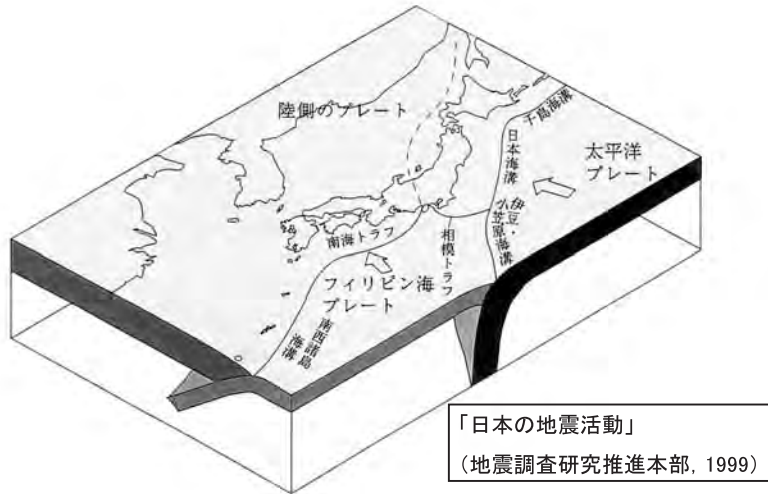


FIGURE 11.4. Absolute plate motions based on model NUVEL-1. The vectors point in the direction of plate motion relative to a fixed frame of reference (hot spots). The length of the vectors is proportional to the velocity in cm/yr. (Based on DeMets et al., 1990. Figure courtesy of R. Richardson.)

産業技術総合研究所

図表 2

日本列島周辺のプレート

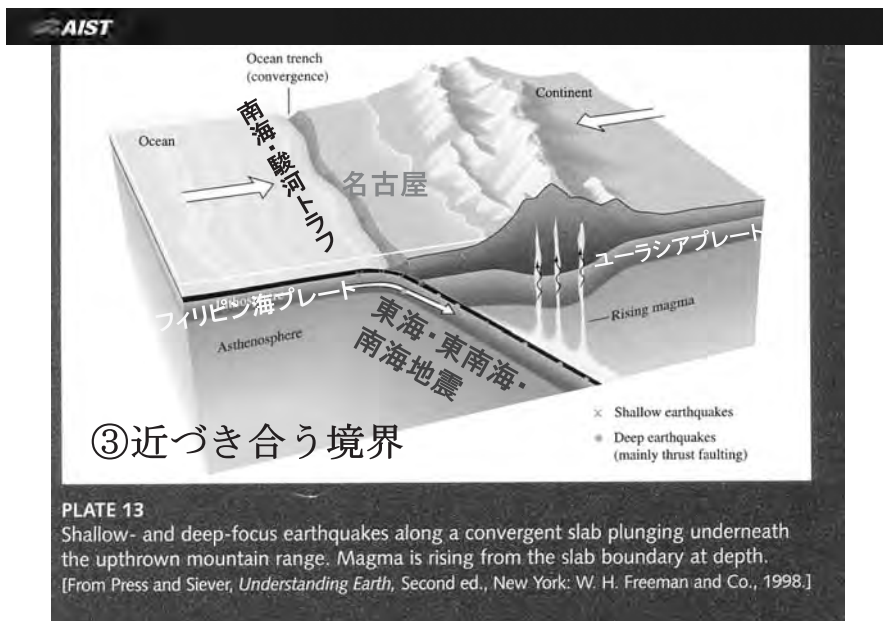


図表 3

起こった最近の大地震が 1923 年の関東地震です。

図表 4 にプレート境界同士でどのようなことが起こるのかを模式的に示しました。日本列島はいわゆる「沈み込み帯」というところにあります。名古屋の場合は、すぐ沖合いでフィリ

ピン海プレートが沈み込んでいて、陸側のユーラシアプレートと両方で押し合いをしています。ちょうどそのぶつかる場所に溝ができていますが、それが南海あるいは駿河トラフです。この境界で起こるのが東海、東南海・南海地震になるわけで、我々はこういった所に住んでい



図表 4



会場の様子

ることになるわけです。大きな地震はプレートの境界で起きますが、プレート同士が押し合っているのです。ユーラシアプレートの内部にもエネルギーがたまり、内陸でも地震が起こります。いわゆる活断層の地震です。また、沈んでいったプレートが溶けてマグマとなって上がってきて火山ができる、これがプレートテクトニクスによるおおまかな地震あるいは火山活動の説明になります。

名古屋に限らず、日本列島に住んでいる人は、皆、ローンを背負っていると言ってもよいかもしれません。どういうローンかという、名古屋という土地に皆さん愛着をお持ちだろうと思いますが、そこに住むために目に見えない借金という、そういうものを持っているわけです。ここの災害対策室をはじめ、いろいろな人から耐震対策をしなさいと言われていたかもしれませんが、そういった耐震対策とは少しずつローンを払うことと同じだと言えるかもしれません。払っておかないと自分の時は大丈夫でもお子さんの代にひどい目に合う、お子さんの時は大丈夫でも孫の時に必ず不意打ちのように借

金取りがやって来ます。100年から200年に1回来る借金取りが東海、東南海・南海地震です。1000年から数千年に1回やって来るのが内陸地震という借金取りです。自分の代はたとえ大丈夫でも必ずやって来るのです。だから各家庭の事情を考慮しながらも、子や孫の代まで考えた息の長い対策を取ることが必要なのです。

地下水観測による地震予知の原理と東海地震予知

次に地下水観測による地震予知の原理と東海地震予知についてお話したいと思います。図表5の黒い点線で引いたところにプレート境界があってフィリピン海プレートが北西方向に年間数センチの速さで沈みこんでいます。

地形等から、南海トラフは、A・B・C・Dという領域にわけることができます。このことを1970年代半ばに最初に指摘したのは、2007年3月で名古屋大学を定年退官された安藤雅孝先生です。以来もう30年たっていますが、いまでも多くの地震学者がこの区分を使っており、安藤先生の研究は大変先駆的なものでした。そして、Eの所が東海地震が起こると言われてい

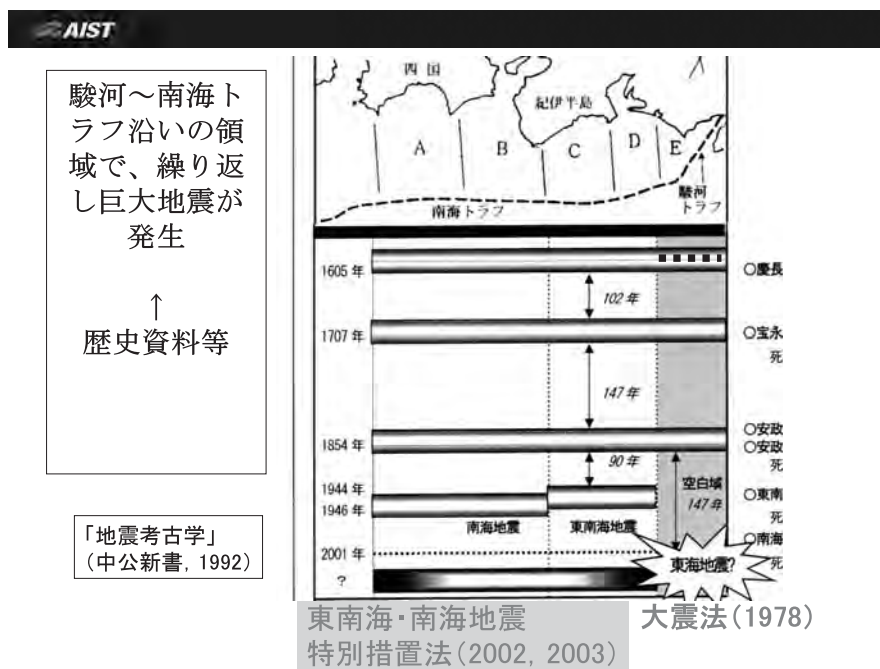
る駿河トラフの場所になるわけです。

図表5にABCDEのところを繰り返し発生している地震の歴史を示します。この場所を繰り返し破壊しているのが東海、東南海・南海地震です。ここでは1605年以降の図を描いています。1605年の地震に関しては駿河湾の中のEの領域が破壊されたかどうかははっきりとは分からないのです。1707年と1854年の地震に関しては被害などから見て、このAからEの全ての領域を破壊していたと考えられています。ところが最近の1944年と1946年の地震に関してはAからDの領域は壊されましたが、Eの領域が破壊されていなかったと考えられるので、「いつ地震が起こっても不思議ではない」ということで東海地震に対する警戒がなされたわけです。このような背景の中、大規模地震対策特別措置法が1978年にでき、これに基づいて地震予知の体制が東海地震に関して整備されました。他方、幸か不幸か東海地震が起こらないうちに2000年を迎え、過去を見ると最短では90年くらいの間隔で地震が起こっているわ

けですから21世紀の前半ぐらいには、もう次の東南海・南海地震も起こる可能性があるわけです。そこで、それに備える必要があるということから東南海・南海地震の特別措置法というのができました。2002年に公布され2003年に施行です。

大規模地震対策特別措置法には東海地域というのどこにも書いてありません。大地震の危険性があってかつ地震前兆現象を検出できる可能性がある地域に関しては、対策を取って、地震予知の体制を取って震災軽減をするように国はやりなさいというのが大規模地震対策特別措置法です。今のところは、その地域が「東海」だけであるということです。

東南海・南海地震の対象地域はどうなっているかと言うと、地震危険性はもちろんありますが、東海のように地震前兆現象が検出できるかどうかまだよく分からない状況です。だからとりあえず防災対策は取って下さい、その準備はして下さい、それと同時に研究を進めてくださいというのが、東南海・南海地震の特別措置法



図表5

です。研究の結果、もし事前に前兆現象を検出できる可能性が高くなったら、この地域も大規模地震対策特別措置法の枠組みに入りますよというようなことになっています。

東海地域周辺の観測網

1978年に大規模地震対策特別措置法ができ、そのすぐ後の中央防災会議で決められた想定震源域は単純な形でした。その後約20年たって、その間の研究成果を踏まえて見直しを行った結果、もう少し複雑な形ではないかということになり東海地震の震源域は西に膨らんだ形状となりました(図表6)。その結果、愛知県でも広い範囲で震度6弱を越える揺れが想定されることになり、新たに愛知県の大部分が地震防災対策強化地域に組み入れられたわけです。

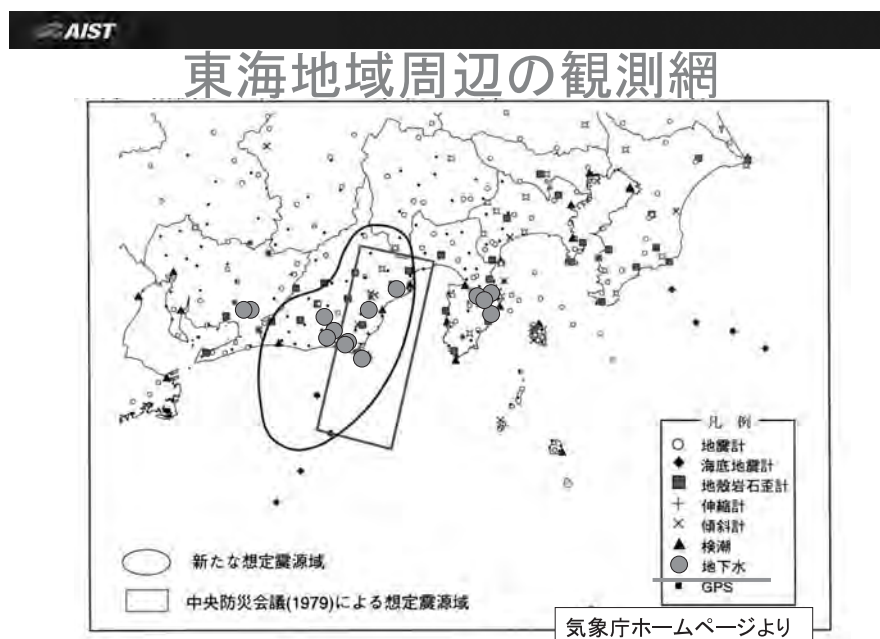
東海地域では、様々な観測が1978年頃からなされ、かれこれ30年続いています。図表6の■は気象庁が設置している歪(ひずみ)計で、その他に地震計をはじめ様々な観測機器が置かれています。ここで、歪とは地面の伸縮のこと

です。私たち産業技術総合研究所は地下水の観測を分担しています。愛知県では豊橋市に観測点を置いて観測を行っています。1978年当初は想定震源域が静岡県下に限られていたので、そちらに集中して観測点を置いていました。その後、想定震源域が西の方に伸びていると考えられるようになったので、それを受けて新しく設置したのが豊橋観測点です。ちなみにこの場所は名古屋大学の豊橋地殻変動観測点で、そこに私たちの井戸を掘って観測機器を置いております。

近年の地震予知研究

以前の地震予知研究では、とにかく観測してデータを取ることが重視されていました。しかし最近は観測だけではだめで、理論・シミュレーションと観測を両方並行して進めることが重視されています。

地下水観測データに関しては、地震の理論・シミュレーションと結びつけるのが非常に難しかったのです。地震前に地下水の変動がある



図表6

とか、あるいは地震の前後に変動があるという報告は昔から非常に多いのです。それにもかかわらず地震の発生理論と結びつけるところが弱かったので、地震活動や地殻変動を用いた地震予知研究に比べて遅れていました。1975年ぐらいから日本では地震と地下水の関係を解明する研究が本格的に始まり、ちょうどそのころに私は大学に入りました。研究がはじまったばかりの盛り上がっている空気もあって、私はこの世界に足を踏み入れたわけです。まだよく分からないからやめたほうがいいよと言ってくれる先輩もいらっしゃいました。しかし、私も若く、また地震予知を本気でやりたいという気持ちが強かったので飛び込んでしまいました。実際、かなり苦労しましたが、最終的にはこうして皆さんの前でしゃべれるようになりましたので、その当時この道に誘ってくれた先生には感謝しています。

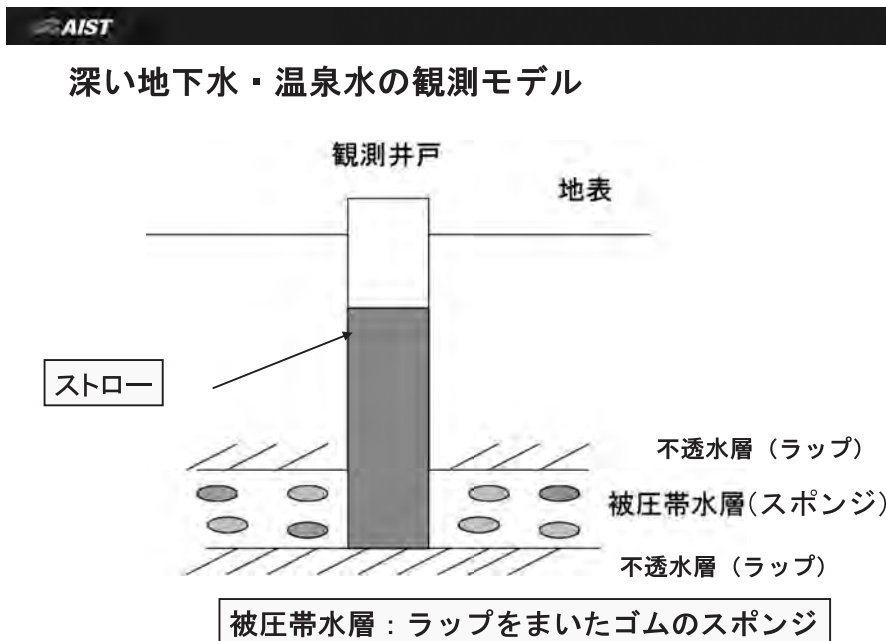
地震と地殻変動（歪とか地盤の隆起・沈降）に関しては理論的な研究やシミュレーションが進んでいます。一方、地下水と地殻変動を結び

つける理論もありますから、間に地殻変動を挟むことによって地震と地下水とをくっつけようというのが私たちの考え方であります。

地下の割と深い地面に閉じ込められているような地下水（被圧地下水）は地面の伸び縮みに対して非常に敏感です。歪により水圧が変化するのは。あるいは、単純に地面が上がったり下がったりすれば、例えば陸が隆起すれば相対的に海水面が下がるわけですから、そうすると沿岸付近の浅い地下水の水位も下がります。そういった地下水の観測結果を、地殻変動を介して地震の理論とかシミュレーションと結びつけようというのが私たちの研究の戦略です。特に歪と地下水位を対応させようというのが私たちの考え方です。

深い地下水・温泉水の観測モデル

簡単なモデルで説明したいと思います（図表7）。地面があって、不透水層、すなわち、水を通さない層がある。これは粘土層であっても固い岩盤であっても構いません。その間に挟まれ



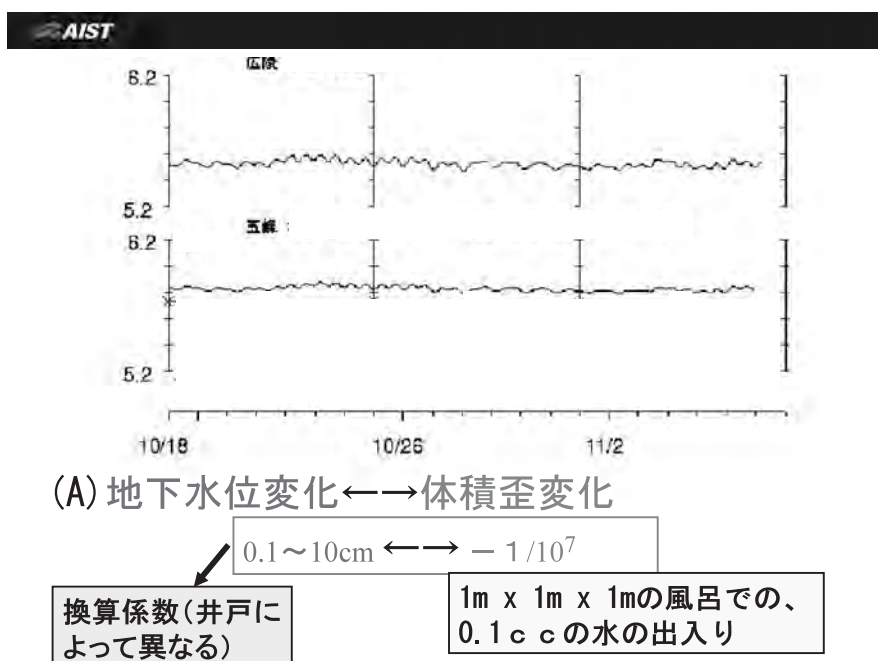
図表7

た水を含んだ地層、または、岩盤の中で割れ目のつながった物（割れ目系）をイメージします。この水を含んだ層や割れ目系（被圧帯水層）をスポンジだと思い、それをラップで包んだとイメージしてください。それにストローを打ち立てたものが観測井戸です。

このスポンジに力を加えます。力を加えると当然この体積が変化して、水は外に出ることができませんからスポンジの中に入っている水の圧力が上がります。そうするとこのストローの水位が変わる、これが私たちの考えているモデルです。具体的にはラップを巻いたスポンジの変形によってストロー内の水位が変化し、力が圧縮方向にあったら水位が上がりますし、逆にこれが伸びる方向ですと下がるということです。

図表 8 は実際の観測例です。近畿地方にある観測点の例ですが、ここに示したものは約 1 カ月のデータです。横軸 1 目盛が 1 日のデータとなります。また、縦軸 1 目盛が 20 センチです。このグラフをみると、1 日きざみぐらいで水位

が上下する「ピクピクした」変化があるのが分かると思います。大体 1 日に 2 回、12 時間周期ぐらいのものが振幅を変化させながら繰り返しています。これは海の満ち引きと同じような周期を持ち、潮汐変化と呼んでいます。なぜこういう現象があるかと言うと、地球の表面は、太陽とか月の引力の影響で、海の満ち引きと同じように非常にわずかですが伸び縮みしているのです。その大きさは、1000 万分の 1 ～ 1 億分の 1 という非常に小さな量です。1 m × 1 m × 1 m のちょっと深めの浴槽をイメージしていただくと、その中には 1 m³、10⁶ (100 万) cm³ の水が入っています。その中に 0.1 cc の水を入れたり抜いたりすると、それが 10⁻⁷ 分の体積変化ということになります。非常にわずかな量なのです。ところが、この微小な変化によって地下水の水位が数センチから 10 センチ近い変化になることが、この図からわかります。非常に小さな 1000 万分の 1 というような微小な体積変化が、地下水の水位で見ると 0.1 センチから 10 センチというかなり大きい変化になるの



図表 8

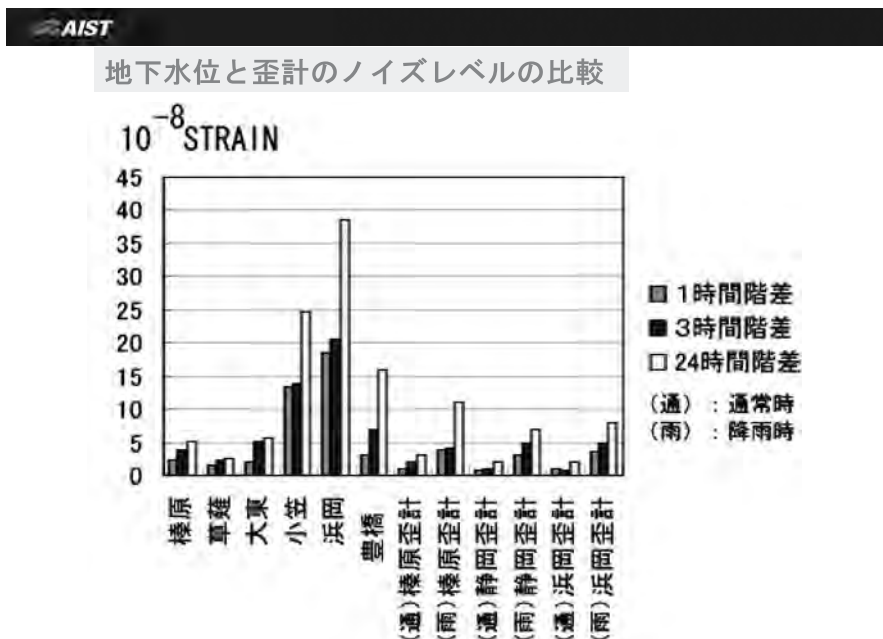
です。

このような微小な地面の伸縮を直接検出する機械は歪計とありますが、これを作るのはなかなか大変で高価です。しかし、図表8で示された水位変化を検出するのであればちょっと良い水位計を使うことで可能となります。つまり非常に微小な地面の伸び縮みというものを、水位を使うことで簡単に測定することができるのです。ただ井戸によって、井戸の特性、すなわち、帯水層の特性とかその物理的な性質などが異なります。ですから元の伸び縮みは同じでも水位に出てくる変化というのは井戸ごとに違ってくるわけです。従ってこの2つを結び付ける「水位-歪換算係数」が実際にシミュレーションを行う上では大事になってきます。

気象庁は歪計を使って地面の伸び縮みを直接測定しています。私たちは地下水位を使ってそれを測定するわけです。そこで、我々の地下水観測が、どのくらいの精度があるのかを示したいと思います。シミュレーションするためには物理的な意味が明確な「歪」に戻してやらなく

てはいけませんから、換算係数を使って水位の変化を歪に戻してやります。そして、そのノイズレベル（通常の時の変化）がどれくらいかというのを調べたのが図表9です。

右半分にある気象庁の歪計はどの観測点でもノイズレベルがだいたい同じですが、左半分にある我々の水位観測井戸は観測点によってノイズレベルが大きく異なります。気象庁の歪計では1億分の1 (10^{-8}) を単位として、1から10ぐらいの間にノイズレベルが収まっていますが、6つ例を挙げた地下水観測点で歪に関する感度の良い所もあれば悪いところもあるため、悪いところでは、数倍くらいノイズレベルが高くなっています。こういったことも考慮した上で、シミュレーションしなければならないということです。非常に地味な図ですが、これは我々が、長年観測した結果得られたものです。これを用意できたことで、やっと地震発生のシミュレーションと結びつける研究へと進歩させることができたわけです。



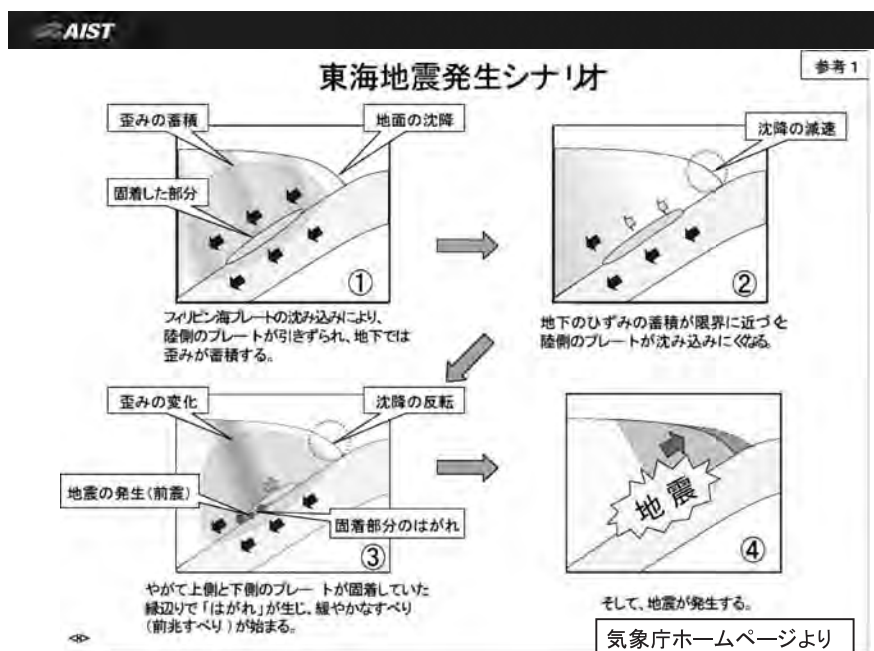
図表9

東海地震発生シナリオ

図表 10 は気象庁のホームページから持ってきた東海地震発生シナリオの図です。ステージの1～4が示してあります。左が陸側のユーラシアプレート、右側が海側のフィリピン海プレートになります。アスペリティまたは固着域と近年呼んでいる部分で2つのプレートはくっついており、一緒になって沈み込んでエネルギーを蓄積しているのが通常の状態です（ステージ1）。エネルギーの蓄積が進み段々耐えられなくなってくると、地面の沈降速度が鈍ってくる。もし、これをとらえることができれば、地震の中期予測、地震発生前の異常な状況を検出できるのではないかと考えられます（ステージ2）。そこで、掛川 - 御前崎の間では国土地理院が3カ月に1回、長年にわたって測量をしているわけです。最近ではGPSがあるので掛川 - 御前崎の間にずらっとGPSを並べ、地盤の上下を連続的にモニタリングしています。いいかえると、御前崎の先端が下がって行くスピードがどういふふうに変わるか・変わらないかとい

うのを見ているわけです。

私たちの地下水観測の狙いは、それよりももう少し地震が迫った状況です。さらに地震発生が近づくと、直前の数日ぐらい前に、地震が起こる領域で地震の波をださないようなゆっくりした滑りが先行して起こる可能性が高いといわれています（ステージ3）。この前兆滑り（プレスリップ）は、必ず起こるというわけではないしその大きさがどれぐらいになるか、あるいはどれぐらい早くから始まるかというのはまだよく分かってません。しかし、シミュレーションや岩石破壊実験、それから過去のわずかな観測例から、これは数日から10日ぐらい前に起こる可能性が高いと考えられています。そのとき、例えば沈降していた場所が急に反転するとか、歪変化が生じるとか、あるいは小さい地震が起こるとかそういった現象が発生するであろうし、それを検出すると地震の予測ができます。これが前兆滑りモデル、あるいはプレスリップモデルと呼んでいる東海地震予知の根拠となるストーリーです。そしてこのストーリーに従う



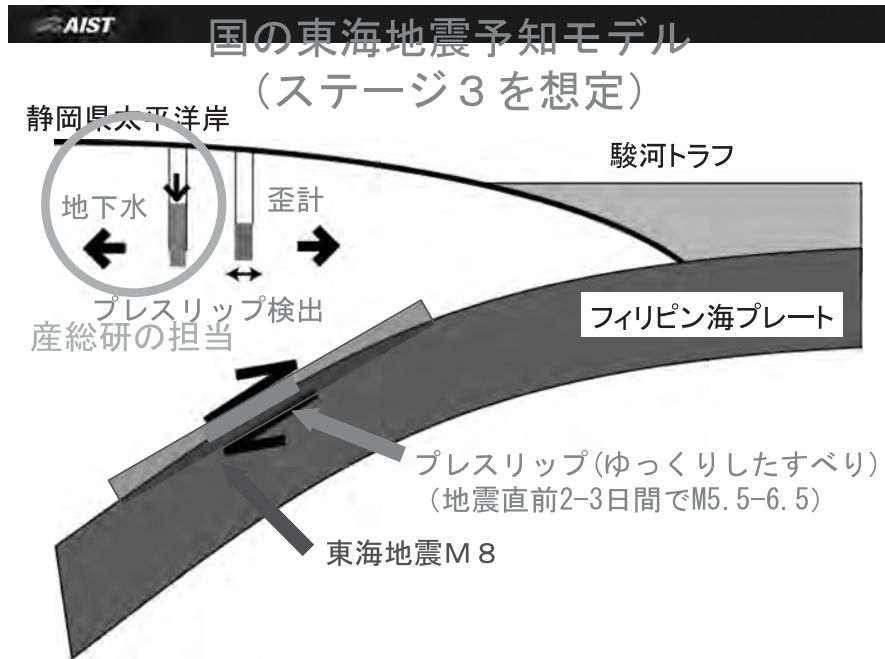
図表 10

地盤の変化を検出できれば予知できることとなります。

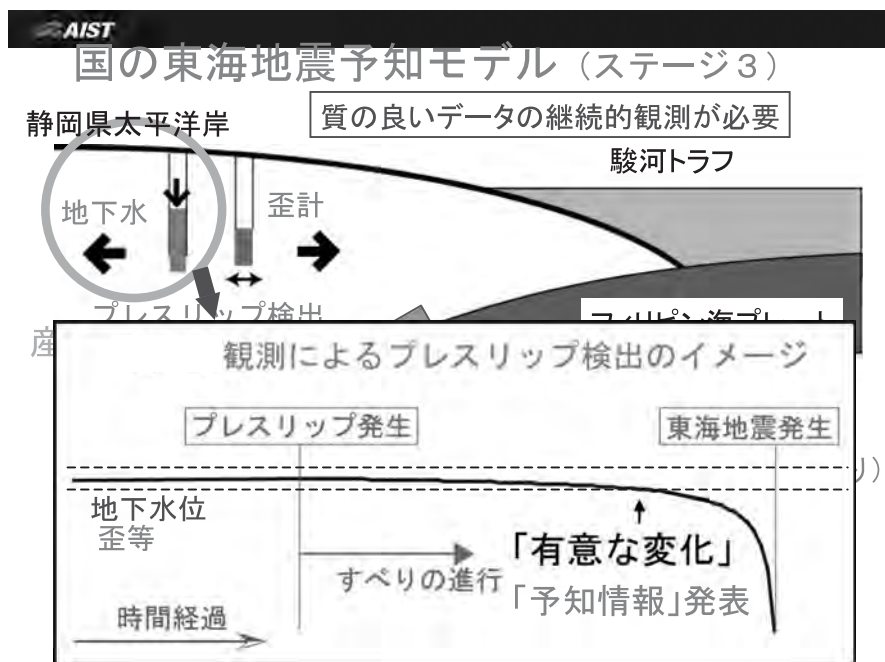
地震の直前、ステージ3をもうすこし詳しく見てみましょう（図表11）。プレート上面の四角い枠が固着帯（アスペリティ）です。その一

部で、地震直前の数日間でマグニチュード5.5から6.5の地震に相当するようなゆっくり滑り（プレスリップ）が起きると考えます。これにより歪が変化し地下水位も変化します。

この地下水位変化を時系列で書くと図表12



図表 11



図表 12

のようになります。地下水位でも歪でも一緒ですが、プレスリップが発生すると変化します。この図の場合は水位が下がっていますが上がる場合もあります。あるしきい値（ノイズレベルの1～2倍）を越えたところで有意の変化があったと認められ、それが複数点であって、プレスリップによるものだと認定されると予知情報が出され、その後、地震発生に至ります。これが、現在私たちの抱えている東海地震予知のシナリオです。このしきい値を超えると異常と判断するわけですから、その値を事前によく把握しておかなければならないし、前兆すべり以外のいかなる要因でどういう風な変化をするかということも把握しておかなければなりません。それゆえ、質の良いデータを長期にわたって観測し、そのデータを解析し続けることが必要になってくるわけです。

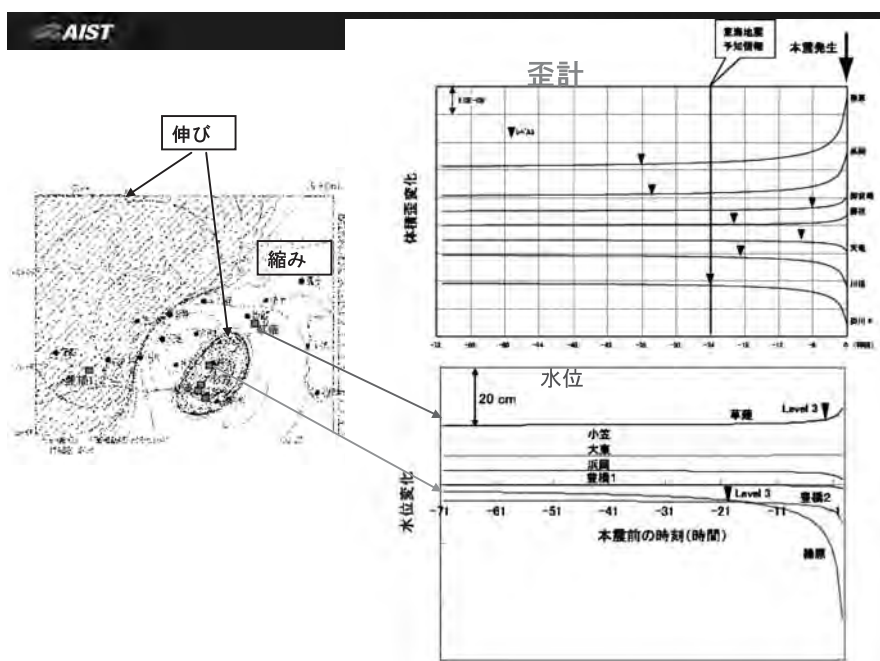
東海地域周辺地域の観測網

今示したのは1点だけのデータの例ですが、実際には東海地方にはたくさんの観測点からな

る観測網があります（図表13）。気象庁は、どこでプレスリップが起こるか分からないので、この広い範囲のそれぞれの場所全部で予め計算して、どういうパターンで歪変化が生じ、プレスリップがどのように検出できるのかをすべて検討しているわけです。同じようなシミュレーションは、私たちの地下水の観測点についても可能です。ある観測点は地面が伸びて広がり、別の観測点は縮む。いいかえると体積が増加した所は水位が下がり、減少した所は水位が上がるという形になっています。

このシミュレーションは東海地震発生前の72時間を計算しています。しきい値を越えた観測点が3点あった所で東海地震予知情報が出て、この例ではその24時間後に東海地震が起こっています。

同様のシミュレーションを地下水観測のデータでもこれまでに述べた、水位-歪換算係数を使うことができます。例えばある観測点はプレスリップが起こる場所の真上にあり、歪に対する感度も良いので早めに大きく変化してしきい



図表 13

値を越える。一方、他の観測点は歪みに対する感度が小さく、なかなかしきい値を超えない。また、別の観測点は、離れているが感度が良いので早めに変化する。そういったバラツキがあって気象庁の歪計よりは若干感度は劣るのですが、同じ様な変化をすることが計算で確認できました。気象庁は歪計のデータにもとづいて東海地震の予知をしていますが、実際は、地下水のデータや国土地理院によるGPSの観測データ、さらには防災科学技術研究所の地震・傾斜データや気象庁の地震データなど、全部の観測結果を総合的に見て地震予知情報を出すことになると思います。

最後に東海地震予知についてのまとめをしたいと思います。私たちは、地震予知について、1打数1安打を求められています。東海地震が10回起こってそのうち3回当てればよいという話ではありませんので、どんなデータが出る可能性があるかを予め見ておかなければならないわけです。そのために予めシミュレーションしておく必要があるし、シミュレーションで得られる変化を見て、それに対してどういうふうに変化をとらえるかという目を養っておく必要があるわけです。こういうシミュレーションを繰り返すことで、「少しでも地震予知の打率をあげよう」と考えているのです。

東海地震は予知できるか

中締めとして、東海地震は予知できるかという意識調査を皆さんに行います。選択肢は、(1) 100パーセント予知できる。(2) 予知できない。(3) 予知できるかもしれないしできないかもしれない。の3つです。まず1番、100パーセント予知できると思っている方、手を挙げて頂けますか。では2番、予知できないと思われる方。3名いらっしゃいました。3番、予知できるかもしれないしできないかもしれない

という方、ちょっと手を挙げてください。ありがとうございます。今日の出席者は80人ぐらいということですので、圧倒的多数をもって3番に決定しました。私個人の意見も3番です。

次、質問2です。今、東海地震の予知はできるかもしれないしできないかもしれないと思われる方に対する質問です。今度は2択です。(1) 予知できる可能性は50パーセント以上。(2) 予知できる可能性は50パーセント未満。どちらかで手を挙げてください。まず予知できる可能性は50パーセント以上あると思われる方、21名ですね。では50パーセント未満と思われる方。はい、ありがとうございます。先ほどから引き算させていただきますので。大体そうすると3対1です。60対20ぐらいで50パーセント未満とされている。ちなみに私も2番です。多分日本地震学会で地震学者に聞いた場合でも、50パーセント未満と語る方が多数だと思います。もちろん科学は多数決ではありませんから、誰が正しいかは分かりませんが、今の私たち研究者の考えと皆さんの考えはほとんど一緒だと思います。

最後に私が一番気にしている質問です。東海地震予知のために費やしている予算は必要なものか、無駄なものか、ということとどちらかに手を挙げていただきたいと思います。保留はなしでよろしくお願いします。東海地震予知のために費やしている予算は必要と思われる方、手を挙げて下さい。では無駄と思われる方は？

ありがとうございます。無駄は2名です。ということで私は2名の方には申し訳ないですが明日から安心して研究することができます。

講演の最後に私なりの回答を申し上げますが、必要か無駄かを判断する基準は何かということが重要だと考えています。例えば、可能性が50パーセントを超えたら地震予知研究をやってもよいのか、あるいは30パーセントを超えた

らやってもよいのか、10パーセント超えたらやってもよいのか、どこでどう判断したらいいのでしょうか。ある自治体の防災担当の方が「1パーセントでも可能性があればやってほしい」と言って下さったことがあります。とてもありがたいお言葉です。しかし私たちが例えば99回予報を出して99回外れたらその方が次の1回に期待して下さるのでしょうか？ お気持ちはとてもありがたいけれども1パーセントというのが実際に1パーセントであったらその方は許して下さらないと思います。では10パーセントならいいのか、15パーセントならいいのか。

必要か無駄かを判断するのは誰でしょうか。研究者でしょうか。この二つを少し私の話を聞きながら考えていただけたらいいかなと思います。もちろんこれに関する質問も受け付けます。

震災軽減策の費用対効果

一つの回答として、費用対効果（コストパフォーマンス）で考えることができます。地震予知に限らず自治体が、あるいは企業でもそう

ですが、予算を使うときにそれが役に立つかどうか、意義があるかどうかを見るのは基本的に費用対効果です。日本の自然災害対策の場合は、あまりこのことに表立って触れなかったと思います。「人の命は地球の命より重い」とか、そういった感情的なことをつい言ってしまいがちですが、実際のところはこれまでも、自然災害対策において、費用対効果の判断はなされていたように思います。例えば、なぜ東海地震予知に国が取り組んだかということです。日本には、他にも地震危険度の高い地域はあるのですが、東海地震で影響のある場所が日本経済の中心地であり、多くの人に住んでいて、そこで大きな地震が起こったら大きな被害が出るからです。明確な基準があるわけではないですが、被害の大きさを鑑みて予算を使ったわけです。

東海地震の予知の効果を計算した例があるので、ここで紹介します。図表14は静岡県が2001年5月30日に発表したものです。予知なし地震防災対策事業なし、これは静岡県が何もしていなかった場合はどうなったかという見積

AIST		
震災軽減策の費用対効果		
静岡県の被害想定(2001年5月30日)		
午後6時発生を想定		
	死者	被害額
予知なし・地震対策事業なし	6,099人	30.8兆円
予知なし・地震対策事業あり	4,016	26
予知あり・地震対策事業あり	790	23.5
費用対効果(1兆円あたり)		
*地震対策(耐震力強化)	1,500人	3.4兆円
*地震予知	>13,400人	>10.4兆円
ローリスクローリターンとハイリスクハイリターンの策を組み合わせることが重要。		
*地震対策費用	:1.4兆円(静岡県のみ, 1978~2000)	
*地震予知(研究)予算	:0.24兆円(日本全体, 1965~2001)	

図表 14

りですが、死者が6100人で被害額は30.8兆円と見積もられています。次に、地震予知ができなくて、地震対策事業あり、これは実際には地震対策事業を予知とは別に静岡県はしているのです、その効果を評価したものになります。すると死者は2000人ぐらい減って被害額は26兆円に減っています。最後に、地震対策事業もあって、地震予知にも成功した場合です。この場合は死者は790人と大幅に減ります。被害額も23.5兆円に減ります。

費用対効果を計算してみると、地震対策は1兆円当たり1500人ぐらい人を助けられるということが出来ます。また、被害額が4.8兆円減っていますから、地震対策にかかった費用1.4兆円を差し引くと3.4兆円も得をしていることになります。これが1兆円投資しても、9000億円しか被害が減らないのだったら、それは少なくともよいという評価になりますが、そうはなっていません。

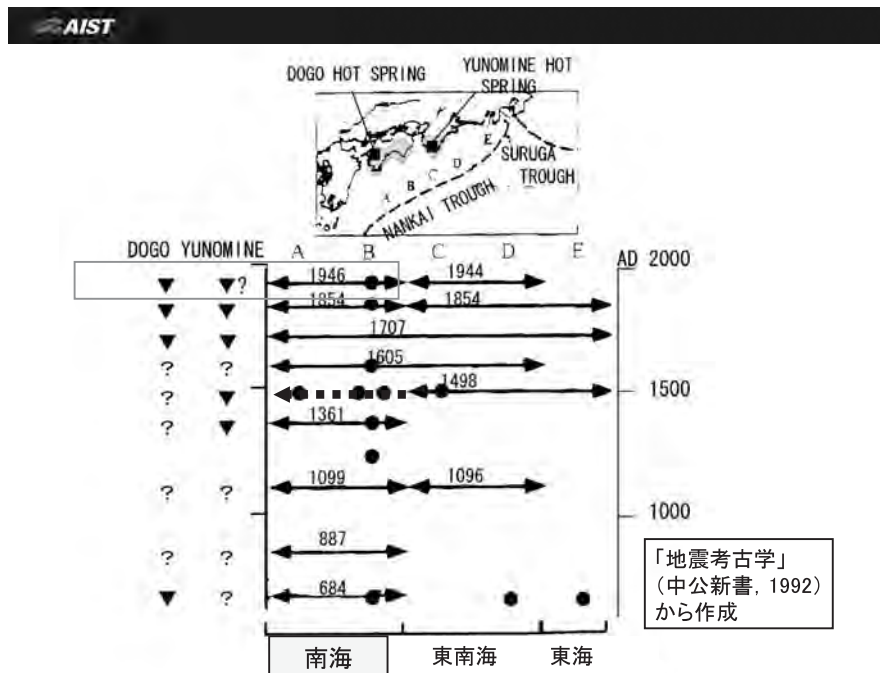
緑の部分は、私が計算したものです。地震予

知の研究予算を日本全体で1965年から2001年で積算したところ2400億円ぐらいになりました。それで単純にこの金額で地震予知による死者減少数 $4016 - 790 = 3226$ 人を割ると、1兆円あたり1万3400人以上の人が助かるという結果になりました。

まとめると、いわゆる地震対策事業とはローリスク・ローリターン、震災軽減策であって、地震予知とはハイリスク・ハイリターンの震災軽減策ということが出来るかと思います。皆さんがお金を増やすときに、一般にローリスク・ローリターンの手段とハイリスク・ハイリターンの手段を組み合わせると思います。地震災害軽減においても、同じように両者を組み合わせることが重要だと私は思っています。

東南海・南海地震の予測

もう一度、地下水と地震予知の話に戻したいと思います。これまで東海地震の話をして、地下水観測の意義と到達点を紹介しました。今度



図表 15

はこの東海の成果を東南海・南海地震にも応用しようということです。図表 15 に示すように、AB の領域で起こるのが南海地震、CD の領域で起こるのが東南海地震、E で起こるのが東海地震です。この図は上から下に向けて時代が古くなっていきます。

南海地震が起こると、古くから人が住み、都があった京都にも被害を与えます。その結果、南海地震の被害の記録が古文書にたくさん記されており、最も古いものでは飛鳥時代の 684 年までさかのぼることができます。これまでの研究成果によると、現在までに 8 - 9 回南海地震が起こっていると言われています。また、紀伊半島沖の東南海地震については、古文書に基づく、一番古くは 1096 年に地震があり、これまでに 6 回起こっていることがわかっています。

この図には 2 つの温泉も記されています。1 つは愛媛県の道後温泉、もう一つは和歌山県の湯峯温泉です。どちらも 1300 年を超える歴史を持っている大変由緒ある温泉ですが、ここでは特に南海地震が起きた時に湧水量や水位が低

下するという報告がなされています。上がったり下がったりではなくいつも低下です。ただしそれが地震の前から起こっているかどうかは、はっきりしません。しかし、地震の後に低下していることは確実です。

最近起こった南海地震は 1946 年南海地震です。このときには、地震の前に地下水に変化があったことがわかっています。当時の水路局、現在の海上保安庁が沿岸部の被害の調査をし、その中で地下水の水位変化についての調査を行っているのです。全部で 150 カ所以上調査しましたが、この図に示す 11 カ所で地震前に地下水位が低下したことが報告されています（図表 16）。

これによると 1 日～10 日ぐらい前に、沿岸部の浅い地下水の水位低下が 11 カ所でありました。紀伊勝浦の温泉では、湧水量の低下がありました。また、地震前に地下水の濁りが出た場所もあったということです。和歌山県のある場所では「地下水が枯れると大きな地震が来るから」と村の古老が言って住民が避難したということもこの報告書には載っています。つまり、



図表 16

非常に局所的ではありますが、このとき地震予知が行われたわけです。

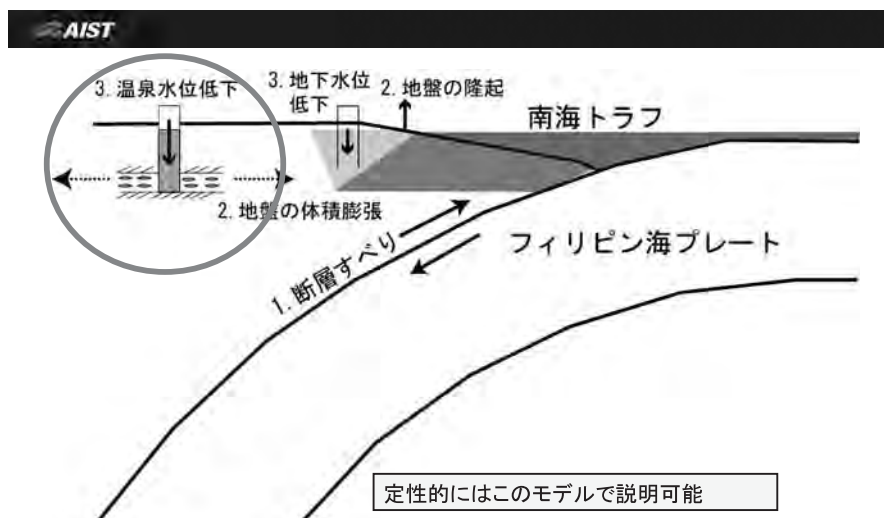
浅い地下水が変化したといっても、そこに水位計を置いて測定していたわけではなく、生活用水に使っていた地下水がくめなくなったり枯れたりしたという報告でした。全て海岸沿いで海の潮汐がある所ですから、普通に考えて5センチや10センチ水位が下がったからといってくめなくなるような井戸は掘らないはずで、最低でも数十センチ、場合によっては1メートル以上も水位が低下したのではないかと考えられます。

注意しなければならないのは、11カ所と非常に多いように思いますが、調査されたのは150カ所以上なので変化が出現した確率で見るとかなり低いのです。他方、非常に広い範囲でそういう異常があったという特徴があります。

広い範囲で地震前に変化があった理由としては、南海地震前のプレスリップがあったと考え、出現率が低い理由としては、地震前の微小な変化を拡大するような機構がある所だけにこの水位低下が出たと考えるところの現象が説明できます。また、1946年南海地震のときだけに、このような水位低下があったわけではないようで

す。先ほど言いましたように、和歌山県のある村ではこのような水位低下があると大きな地震があるという言い伝えがありました。ということは、過去にも同様なことがあったはずで、京都大学の方たちが調べたところ、もう一つ前の1854年南海地震の時にも和歌山県と四国の土佐清水で、地震前の地下水位低下があったことが分かりました。つまり再現性があったことになります。ちなみに道後温泉と湯峯温泉の記録には残念ながら地震前に変化があったという記録は残っておりません。

この現象は、先ほど東海地震のときに示したモデルで、一応定性的に説明することはできます。陸側のプレートがあり海側のプレートがある(図表17)。この沈み込んでいくプレートの深いところで前兆的な滑りがあったならば、海岸付近は隆起します。地面が隆起すると相対的に海面が下がりますから、海岸部の浅い地下水は下がったように見えてもおかしくないことになります。浅い地下水は先ほどまで述べた深い地下水(被圧地下水)とは違い、ラップをしていないスポンジのようなもので、地面の伸び縮みに対して敏感ではないのです。しかし、その横の水面が下がればスポンジの中の水面も下



図表 17

がるので、一応説明ができます。また、地震が起こった時も海岸付近は大きく隆起しますから水位が大きく下がります。

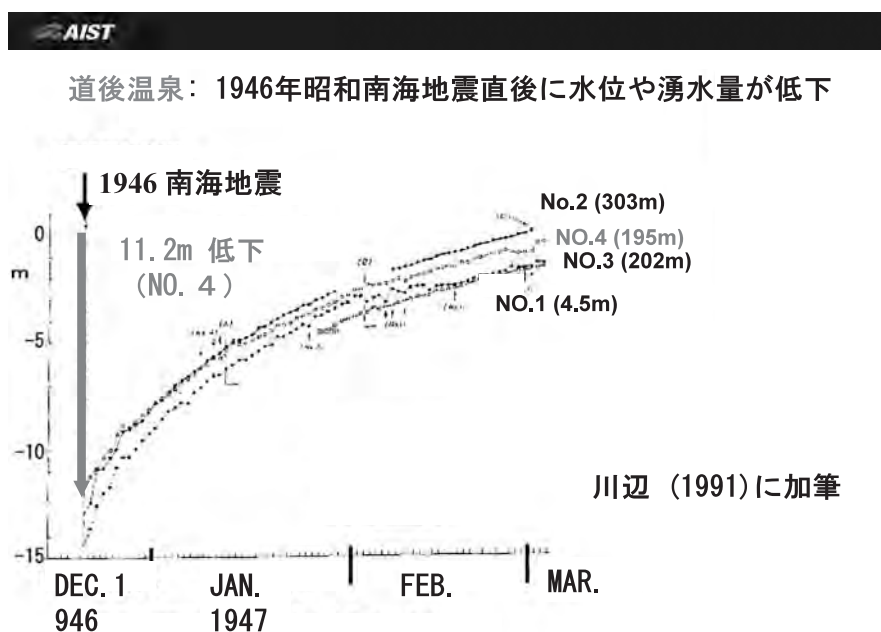
今度は定量的に説明が可能なのかどうかということ調べてみたいと思います。地震の時に水位の測定データがあったのは道後温泉の所だけで、それが図表18です。この図は、会場にいらっしゃる現名古屋大学、当時愛媛大学の川辺先生が書かれた論文の図です。1946年南海地震の後、道後温泉では10メートル以上水位が低下しました。当時道後温泉には4つ源泉がありました。図では、4つの源泉すべてについて、地震前の水位（想定値）がゼロメートルにしてあります。地震前の水位というのは測定データがないので実はよく分からないのです。1946年12月21日に南海地震があり、それ以前のデータから地震前の各源泉の水位を推定しているようです。No.2-4の源泉の水位は大きく下がり、自噴しているNo.1の源泉は水が出なくなりましたから、当時の道後温泉関係者が慌てて地震後に測定を始めたのだと思います。このNo.4

の源泉（井戸）に関しては11.2メートル水位が低下していることが分かります。

地下水位・湧水量の変化要因

さて、ここで地下水位や湧水量の変化の要因を考えてみましょう。ここから少し退屈になるかもしれませんが、研究の手順を知っていただきたいので少し我慢してください。地下水位は先ほど言った地面の伸び縮み（歪）で変化しますがそれ以外でも変化する要因があります。

1つは気圧変化です。気圧が上がったり下がったりすると水位も変化します。しかし一般的に最大でも1ヘクトパスカル(昔の1ミリバール)当たり1センチしか変化しません。気圧は、台風で急変する場合でも100ヘクトパスカルを越える変化はまれなので、一般に、気圧変化による水位変化は1メートル以下です。つまり、水位が10メートル以上も変化する原因にはなりえないのです。次に雨です。雨が降ってすぐ水位が上がってその後すぐに下がるような短期的変化と、年間を通して雨が多く降っている夏



図表 18

の時期には全体として水位が上がり、冬場の雨の少ない時期には下がるというような長期的変化があります。それから人が水を使うために地下水をくみ上げる（揚水する）とそれによっても変化します。これらが通常時の地下水位変化要因としての主なものです。

そして地震時の変化要因は、先ほど歪を言いましたが、それ以外に地面の揺れによる効果があります。揺らされることによって地盤の液状化が起きたり、あるいは揺らされることによって水の通る道がある意味掃除されて通りが良くなって地下水の流れが代わり、地下水位が変わることがあります。地下水の流速が変化することもあります。

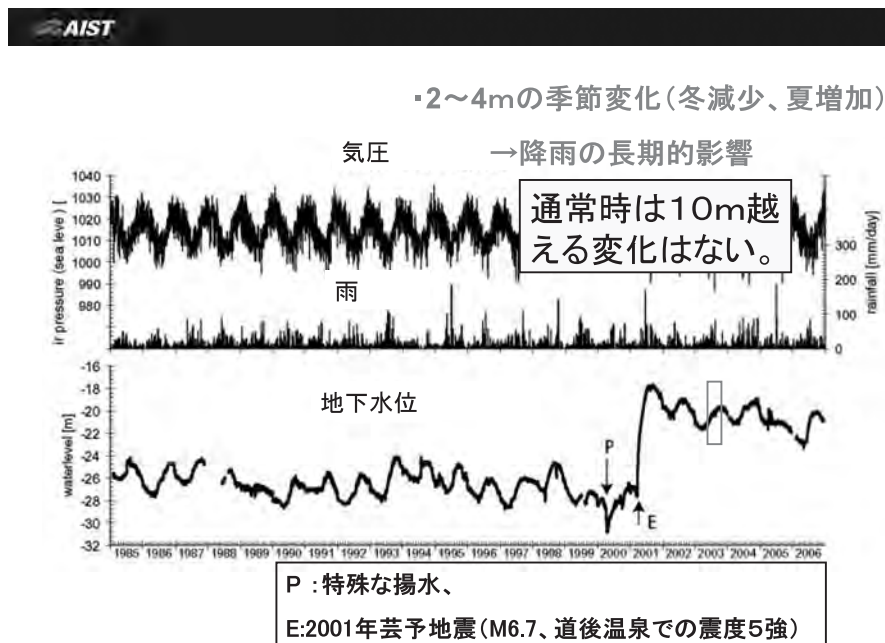
地下水位の変化があったときは、これらの要因を一つ一つ検討しなければならないわけです。今、気圧はとりあえず排除することができますので、雨や揚水の影響を考えてみましょう。

No.4の井戸に関しては、1985年から2006年までの観測データがあります（図表19）。道後温泉は松山市が管理する温泉ということも

あって、こうした観測データがあって1985年から2003年までの水位のデータがありました。No.4の井戸は1985年以前に、温泉水をくむのをやめていたので、道後温泉周辺の水位を調べるための井戸として使われていたわけです。なお、2003年6月からは、松山市の協力を得て私たちが観測をしています。

図には、気圧と雨が水位と一緒に描かれています。こんな感じで、水位が年周変化をすることが分かります。2000年のPと書いた時期に周囲で特別な揚水をしたので顕著に水位が下がっています。また、2001年には芸予地震があって松山では震度5強の揺れがありました。震度5強は、1946年南海地震以降に松山で観測された最大のゆれです。この図に示すように大きな水位変化があり、大体3カ月で10メートルほども水位が上昇しています。

この図で見ていただきたいのは、この地震のとき以外の水位変化です。大きい年では4メートルぐらい、小さい年でも2メートルぐらいの振幅の季節変化があるのです。パターンとして



図表 19

みると、冬の時期に水位が下がって夏の時期に水位が上がります。日本では、冬の時期は雨が少なくて夏の時期は雨が多いわけですから、これは雨による長期的影響であろうということがデータから分かります。大事なことは通常時には10メートルを越える大きな変化はないということです。20年を超える長期の観測データからそういうことが分かるわけです。

これは長期のデータですが短期のデータも見てみましょう。図表20は約3ヶ月間のデータです。全体を見ていただくと、8月に水位が下がっているのがわかります。ちょうどお盆の時期です。お盆の時期はお客さんがたくさん来るのでいっぱいお湯を使いますから周囲の源泉でたくさん揚水するので水位が下がるのです。また、その少し前には、台風が来て気圧が大きく変化したこともわかります。それにともない、水位が大きく変化していることもわかります。水位に気圧の影響もあるのです。また、1週間の周期の変化も認めることができます。土日にはお客さんがたくさん来るので、やはり周囲でたくさん揚水する結果水位が下がるのです。そ

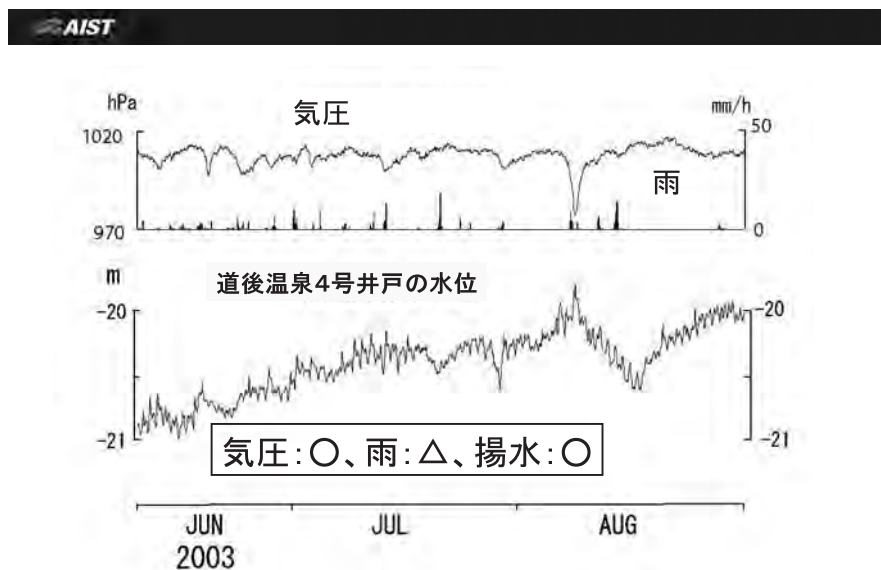
れから大事なことは約12時間周期の変化があることで、これは先ほど述べた地球潮汐による地盤の伸縮（歪）に対応するものです。

以上は私たちが2003年6月から観測して一時間ごとのデータがとれるようになったので分かるようになったことです。潮汐変化から見積もった水位-歪換算係数によれば、大体100万分の1の歪変化で2.3メートル、1000万分の1ですと23センチの変化があります。観測して分かったことは、この道後温泉4号源泉は歪に対して非常に敏感で大きく水位変化する井戸であるということです。

整理すると、いろいろな影響は確かにあるのですが、気圧変化や雨、周囲での揚水といった要因では、短時間で10メートル以上下がるという変化は考えにくいという結論です。

地下水位10メートル以上低下の要因

気圧・雨も周囲の揚水も10メートル以上水位低下の要因ではないということが分かりました。そうすると、地震時の地面の伸縮か地面の揺れということになります。1946年南海地震



潮汐変化→水位の体積歪感度： =2.3 m/ppm

図表20

の時はここで5.5から6ppm（100万分の5.5から6）くらいの歪変化（地面の伸び）があったと計算されています。南海地震の震源モデルに従ってこの場所の歪変化が計算できるのです。図表21は横軸に歪変化を縦軸に水位の変化を示した図です。断層モデルによって道後温泉での歪の計算値が少し違うため、5.5から6ppmと幅のある変化になっています。さきほどの水位の潮汐変化からの見積りによると、この井戸は1ppm当たり2.3メートル水位が低下するわけですから5.5から6ppmとなると、だいたい10メートルぐらい変化してもよいわけです。南海地震のときの水位低下は11.2メートルと見積もられていますから、この水位変化は地震に伴う体積歪で定量的にも説明できることが示されました。

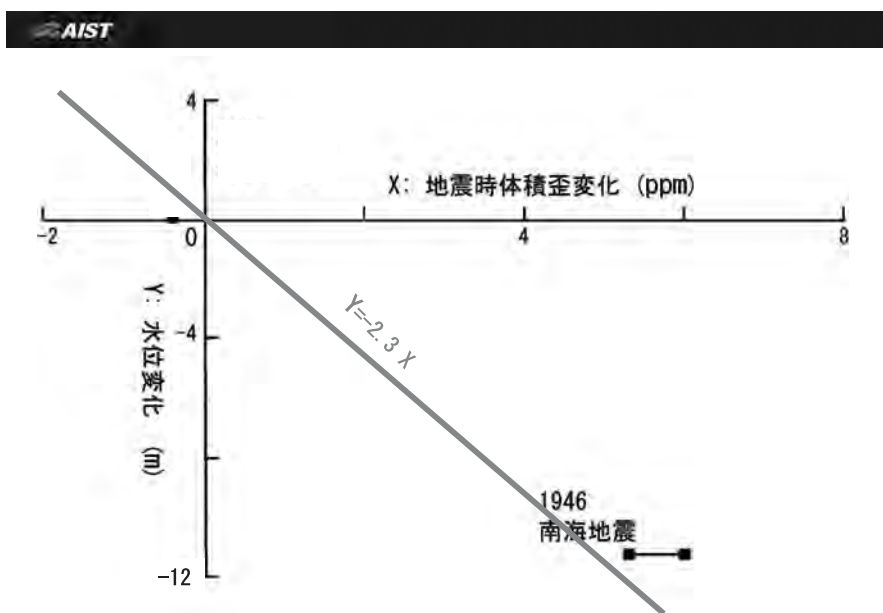
しかしながら揺れによる水位低下の可能性も残っているので、これもチェックしなければなりません。1946年南海地震の時、松山の震度は4でした。それで1946年の観測と1985年から2006年の間に松山市で震度3以上が観測された地震を全部洗い出したところ、1946年南

海地震を入れると全部で15個ありました。このときに地下水がどう変化しているかということ調べました。

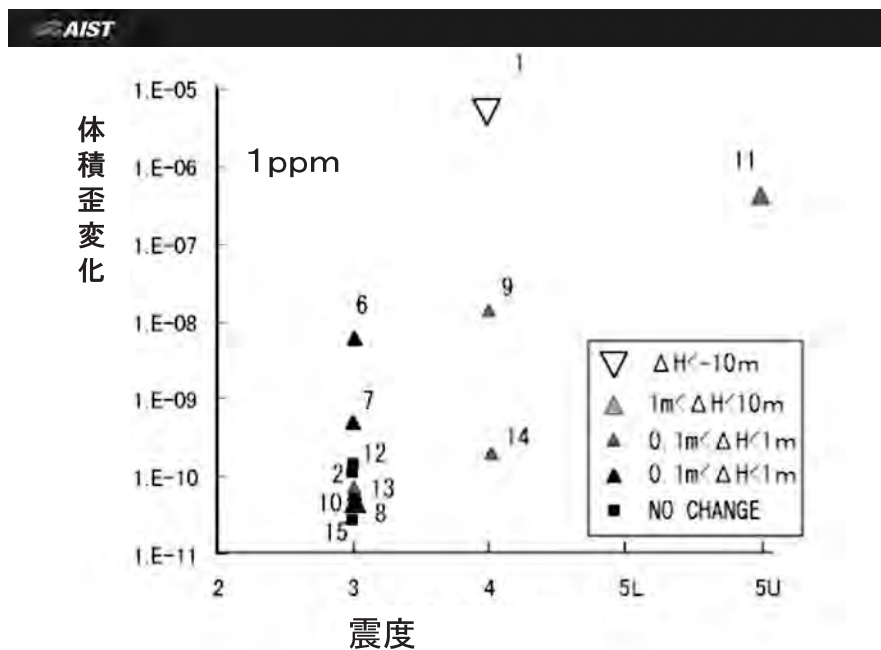
図表22にまとめましたが、上向きの三角が水位の上昇で、下向きの三角が低下です。横軸が震度で、縦軸の体積歪変化は対数で示しております。一見して分かることは、道後温泉のこの井戸は基本的に地震時に水位が上昇することです。1度だけ水位低下があり、それが1946年南海地震の時です（1の下向きの白い三角）。

灰色や黒で色が塗ってあるのは歪では説明できないものです。ですからその場合は、揺れによって、水位が上がったのではないかということが考えられるわけです。1946年南海地震の時だけは、非常に大きな伸びの体積歪変化があったので水位が下がったことになります。

ですから道後温泉は、基本的に地震で揺れた時に水位の上昇があると考えられます。それと同時に歪によっても水位は変化する（この場合は、地面が伸びか縮みかによって、下がる場合もあれば、上がる場合もある）。しかし、一般



図表21



図表 22

的には、揺れの効果の方が大きくて、揺れの効果が勝って水位上昇となります。しかし南海地震の時は非常に大きな地面の伸びがあるものですから、歪の効果が勝って水位が顕著に低下するということが分かりました。

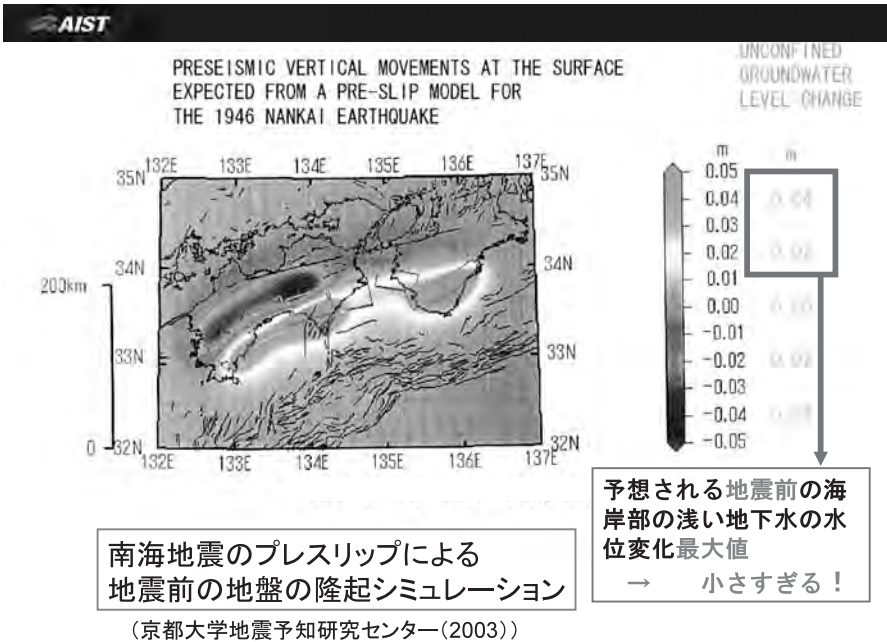
つまり 1946 年南海地震の時の 10 メートル以上の水位低下の原因は、地震時の道後温泉における歪変化にあるのだということが、このような考察をしたことによって分かるわけです。

四国・紀伊半島南岸の浅い地下水データの解析

このように 1946 年南海地震における温泉水の水位低下は、道後温泉のデータを見ると地震時の歪変化で定量的にも説明できることがわかりました。では、浅い方の地下水が地震前に低下する現象は定量的に説明できるのでしょうか？

これもシミュレーションすることができません。しかし、問題はこの 1946 年南海地震の時にプレスリップがどのように起こったかというのが分からないことです。本震については、地

震の観測記録や、地震後の地殻変動や津波の観測記録に基づいたモデルができていますが、プレスリップがあったのかどうか、あったとしてもどれだけの大きさであったかは分からないのです。そこで、1946 年南海地震のモデルをもとに、その 1/10 ぐらいのゆっくりしたすべりがプレスリップとしてあったのではないかと考えました。このすべり量は、プレスリップとしてはかなり大きい見積りです。計算結果である図表 23 に示すように、地面が隆起する部分と地面が沈降する部分が出てきます。確かに四国や紀伊半島の南部、地下水位が地震前に低下したとされている所では、地面が隆起していることがわかります。しかし、その量を見ると、このような大きいプレスリップを仮定した場合でもただか 5 センチメートルです。隆起に対応した分、地下水位が低下するわけですから、地下水位もせいぜい 5 センチメートルしか下がらないはずですが、報告されている事実は、井戸が枯れてしまうほどですから、せめて数十センチ、できれば 1 メートルは下がってほしいのです



図表 23

が、それほどは下がらないのです。つまり、プレスリップによる地盤の隆起だと、定量的には説明できないということになります。

浅い地下水には影響が少ないのですが、地盤の上昇・下降に加えて、伸び縮みも一応計算してみました。計算すると大体最大100万分の0.5ぐらい変わります。井戸ごとの水位-歪換算係数にもよりますが、これならば数十センチメートルぐらい水位が低下してもよいわけです。

結局、深い地下水なら水位低下があっても説明できそうということになりました。しかし、実際に観測されたのは浅い方の地下水ですから、それを説明するような仕組みを考えなければなりません。例えば、次のようなモデルが考えられます。深い地下水が先に変化した場合、深い所の地下水と浅い所の地下水がまるっきり独立ということは考えにくいので、例えば、底が抜けたようになっていて、深い地下水にひっぱられて浅い地下水も減るのではないかというものです。こういったモデルも一つの可能性として考えることができますが、他にも仕組みが

あるかもしれません。先ほど述べたように、共通の要因として、非常に広い範囲で何らかの地震前の地殻変動があり、そしてある特定の場所でそれを地下水位が増幅するような仕組みがあって、そのような場所で地下水の地震前の低下が観測されたのでしょう。

新規観測施設

以上のモデルは頭の中で考えただけなので、観測して実際に検証する必要があります。そこで、新しい観測網を現在作っています。具体的には浅い地下水と深い地下水と地殻変動を同時に観測するものです。浅い地下水測定用として、30メートルぐらいの井戸を作ります。深い方は、あまり深くなると温度が高くなり計測計器がもたなくなるので、そのことを考慮に入れて600メートルの井戸を作ります。それから、上述のモデルが正しければ、上下で地下水の流れがあるだろうから、30mと600mの間を取って、200メートルの井戸も作ることにしました。もし上下方向に水の出入りがあったら温度が変わ

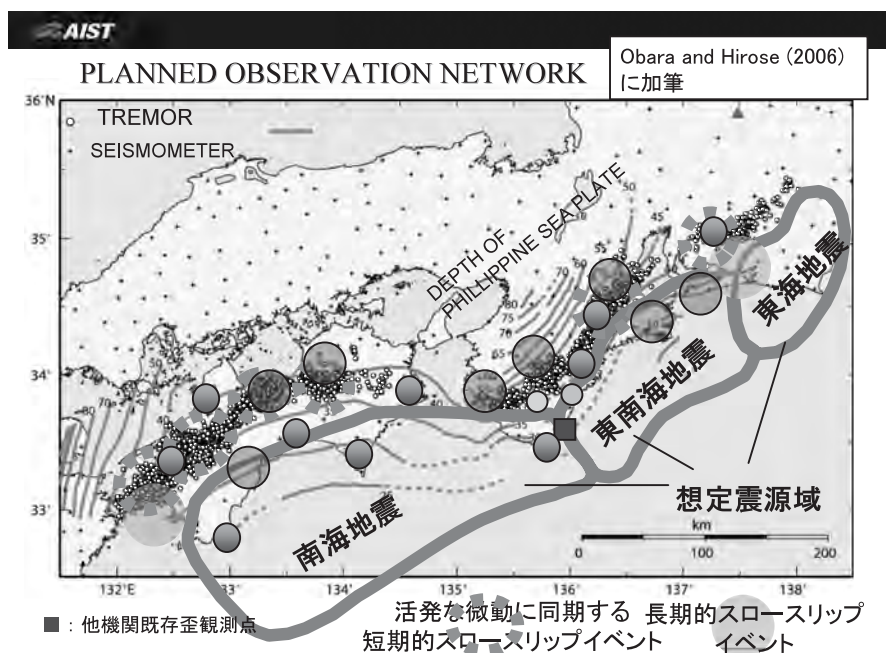
るでしょうから水位だけでなく水温も測定しています。それから共通の要因として地殻変動があったはずですから地面の伸び縮みを測る機械を置き、GPSも置きました、さらには地震計も置きました。それらのデータを全て1秒間隔あるいはそれより短い間隔で取ってリアルタイムでデータを送るというようにしています。

図表 24 は我々が現在整備を進めている観測点の分布（大・中・小の丸）を、既存の地震観測点や東海・東南海・南海地震の震源域などと重ねてプロットしたものです。小さなたくさんの点は Hi-net という防災科学技術研究所が整備した地震観測点です。この観測網のデータから、南海地震・東南海地震・東海地震の想定震源域の最も深いところに沿って「深部低周波微動」と言われる通常の地震より周期の長いそしてダラダラ続く振動を起こす地震が発生していることが分かっています。そしてその中でこれまで述べてきた「プレスリップ」にそっくりなマグニチュード 5.5 から 5.6 ぐらいのゆっくり滑りが起こっているということが分かりま

した。それを考慮に入れて私たちは、まず和歌山県と三重県に2つ観測点を作りました。何よりも 1946 年の南海地震も 1944 年の東南海地震も同じく和歌山県新宮市付近の沖合いで破壊が開始していますから、まずはここにターゲットを絞るという意味で先行して2つの観測点を作りました。それが昨年度の話です。今年度はさらに10点作ろうとしているところです。愛知県では豊田市に作らせていただくことになっております。前兆現象検出の可能性のあることを証明して地震予知ができる体制に持っていくための研究観測です。

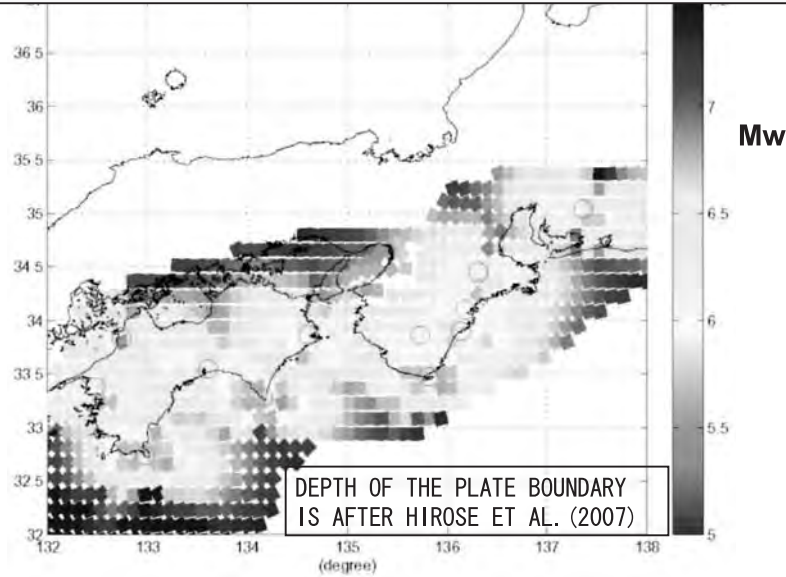
図表 25 は、この合計 12 点が整備された場合にどれぐらいの規模のゆっくり滑りが検出できるかというのを示した図です。これによれば、観測点のないところを除けばマグニチュード 5.5～6 ぐらいのゆっくり滑り、あるいは前兆滑りを検出できるような体制ができることになります。さらに8点を増やして合計20点置くと、もっと検出精度がよくなります。

まだできたばかりですが2つの観測点では

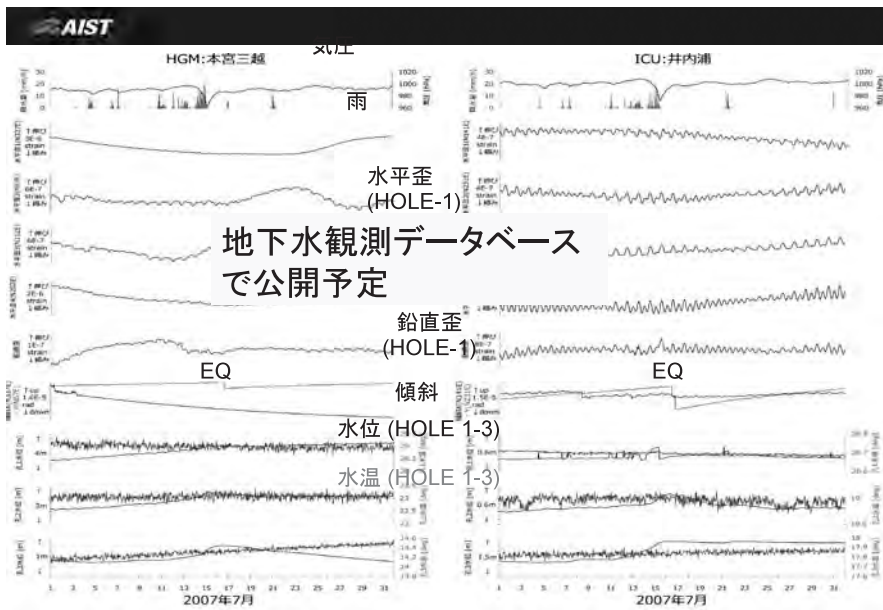


図表 24

DETECTABLE MINIMUM SLIP ON THE PLATE BOUNDARY WHICH CAUSES STRAIN OF 0.02 PPM ON THE SURFACE BY 12 STATIONS



図表 25



歪と傾斜からはトレンドを除去している

図表 26

データが取られています（図表 26）。左が和歌山県の湯峯温泉近くの本宮三越、右が三重県熊野市の井内浦観測点です。上から、気圧、雨量、水平歪 4 成分、鉛直（上下）歪、傾斜、水位・水温です。深さの違う井戸が 3 つありますから

3 つ水位のデータがあります。これらのデータは、いずれ地下水観測データベースで公開する予定です。（Google などの検索エンジンで「地下水観測データベース」と入力していただければ見つかります。）

まとめ

地殻変動を間に挟んで、地下水の観測結果を地震の理論・シミュレーションと合わせることで定量的な地震予測ができることをしめしました。過去の東南海・南海地震で繰り返している地下水・温泉水の変化はプレスリップによる地殻変動によって生じているとある程度説明できます。しかし十分ではないので、深さの異なる観測井戸を作って地下水と地殻変動を同時に観測することで上記現象を解明して東南海・南海地震の予測を目指しています。ただし現状では、地震予知のための体制が整っていないので、東南海・南海地震は不意打ちで来ます。

地震予知は「がんの特効薬」、「新入社員」だと私は言っています。何を言いたいかというと、「期待はしてほしいがまだあてにはできない」というところです。

地震予知に費やしている予算は必要か無駄かを判断する基準は何かということですが、要は費用対効果（コストパフォーマンス）だと思います。コストパフォーマンスを計算することは大変ですが、それをするのに必要で十分な情報を私たちは開示していく必要があると思います。

そしてもう一つ、必要か無駄かを判断するのは誰かということです。研究者は、ある人はやりたいというし、反対をする人もいます。その情報を両方見比べた上で、税金という形で研究費を出している国民の皆さんが判断していただくしかありません。

地震予知研究には様々な批判があります。研究者の中でも地震予知ができるという人は必ずしも多くはありません。でも、私たちが地震予知研究をできるのは、国民の皆さんの期待が高いからです。先ほども非常に多くの方に手を挙げていただいて感謝しておりますが、それで研

究をさせていただいているのです。今のところお返しできるのは、まだ地震予知はできませんので、情報をできるだけ皆さんにお示しするというレベルです。よりよい情報を出し、震災軽減ができるよう努力していきます。

質疑応答

(質問) 水位と流速は地震とはあまり関係ないのででしょうか。要するに流れがその歪みによって変化するとか、そういうことも考え得るのではないのでしょうか。

(小泉) おっしゃるとおり地下水の流速は変わり得ると思います。ところが流速を精度良く安定して長期に観測するのは大変難しいのです。地下水の流速はとても遅いため、それを精度良く測定することは大変難しいのです。結局、比較的安くて精度良く測定できるという理由から水位に注目してきました。水温を計っているのは、実は、流速が変わると温度が変わるだろうと予想している面もあります。温度は比較的高精度に長期間測定できるという利点があります。

(質問) 今24時間体制で観測しているとうかがいましたが、データとしては何分あるいは何秒とか、どういう単位で送信されているのですか。

(小泉) 基本的に私たちは2分間隔でデータを取っております。電話代を節約するために通常の所は1日に1回ないし2回、現地データを集めてまとめて送っています。東海地震に関係する特に重要な観測点は30分に1回送っています。それでも最大30分遅れるわけですが、今回、予算がついたので、東海・東南海・南海の観測点については、水位等の観測を1秒に1

回以上の頻度で行い、それらのデータを毎分送信できるようになります。東海に関してはそれをそのまま気象庁に送るようになります。

(質問) 地下水のデータから地殻変動のデータを推測するならば、間接的に測るのではなく、地殻変動の観測機器をそのまま置いた方がよいのではないのでしょうか？

地下水を含む層はある程度の範囲に広がっているんで、観測される地下水変化はその空間的な平均値を取っていると考えられます。地殻変動観測機器は、必ずしも地殻変動そのものを測っているわけではなく、さまざまなノイズ要因があります。ですからそれとは独立に地下水を観測することによって、両方の情報を合わせて本当の地殻変動を見ることができると考えています。

また、近代的な地殻変動観測機器のない場所や時代でも、地殻変動に関する知見を提供できるのも大きな特徴です。地下水しか観測記録がない時代のデータでも、地殻変動データに換算できます。あるいは、日本みたいに地殻変動の観測機器が豊富な所ではなくても、地下水のデータがある所は多いわけですから、それを地殻変動に換算することによって、そんな場所でも日本で進めている最新の地震予知研究の成果を生かすことができると考えています。

同じことの言い換えになりますが、安い、あるいは既存のデータや設備が活用できるということも言えるかと思います。地下水のデータは既にあるものが使えるので、今から始めたとしても、過去のデータにさかのぼって研究できるという利点があります。

質疑応答 (その2)

(質問) 東海地震を予知できるかということですが、予知できたという判断基準を先生はどの

ようにお考えでしょうか。地震予知で一番大切なのは時刻です。1日の誤差か1カ月の誤差か1年の誤差か10年の誤差か、私は有用な予知とは多分新幹線を止められるかどうかということではないかと思います。新幹線を明日1日中止めなさいとそのような判断ができたときに、予知が完成したと思うのです。地下水位からの地震予知を考えて先生はどうお考えでしょうか。

(小泉) 現在の大震法ははっきりしてほとんど戒厳令なのです。今のところ大きな被害が想定されるものは全部止めてしまいます。それが大変だからというので、注意情報ができてもう少し緩やかなことが各地の自治体でできるようになっています。

東海地震予知の場合、時間に関しては、非常にはっきりして数日以内です。数日以内と言っても、警報を出した直後に東海地震が起こってしまうかもしれませんが「数日以内」として、それ以内に起これば成功、起こらなければ失敗ということになるのでしょうか。数日たって観測データの異常が継続していて、しかし地震が起こらなかったときにどうするのかということは大きな課題です。

場所についてはもう決まっています。マグニチュードも決まっています。その中で、もしマグニチュード7ぐらいの地震が少し別の場所で起こったらどうするかというのは難しい問題です。それが成功なのか失敗なのか、大いにもめると思います。でもとりあえず私たちが目指しているのは、率直に言ってプレスリップに起因すると思われる地殻変動を予め検出してそれに対する予報を出すだけです。その結果がどうなるかは分かりません。そのように予報を出しても東海地震が起こらないかもしれないのです。今、いろんな所で観測されている、短期的スロー

スリップ。これは私たちが昔考えたプレスリップにそっくりな現象です。最初、あれをリアルタイムで検出した時には皆悩みました。気象庁の職員も青くなりました。2005年7月の時です。情報を出すか出さないかで悩みました。結局、観測されたデータは系統的な変化を示し有意と思われたのですが、予め決めていたしきい値に対してぎりぎり届かなかったのです。だから情報を出さなかったのです。おかしいと思われる観測データがあっても、何も起こらない場合が圧倒的に多いという過去の経験もありました。

しかしそれは観測の理屈だけであって物理ではありません。単に観測の精度が不十分だから情報を出さなかった、それだけとも言えます。あの時にもし東海地震が起こっていたら、私たちが気象庁職員も皆さんから「予め検出していたのになぜ出さなかったのか」と大変な非難を受けたと思います。明らかにリアルタイムで異常は検出していたのですから。その後いろいろ調べてみたら、以前にも（そして、2005年7月以降も）このようなことが時々起こっていることが分かってきて、これは今のところ直接東海地震につながる現象ではないと分かっています。

ですから、とりあえずは、プレスリップと考えられる現象を検出した場合、情報を出そうとしていますが、その先はまだ分からないのです。

(質問) どうして水位に焦点を絞っておられるのですか。どうせ井戸を掘るのならば他のパラメーター、ラドンや水質なども一緒に計測した方が効率がよいのではないのでしょうか。

(小泉) 私たちは最初ラドンもやっておりました。水質もやっておりました。続けていないのには2つ理由があります。1つはラドンや水質の長期的連続観測、安定した観測が難しいのです。そしてもう1つ、モデルを考えたときに水位は比較的簡単に地殻変動のモデルに結びつけることができます。しかしラドンあるいは水質は、地殻変動があったときになぜ変化するかという仕組みを、新たに考えなくてははいけません。従って、観測点が少ない時はいろいろとやっていたのですが、観測点が増えてくるに従って物理的モデルが作りやすく観測もしやすいものを優先的に進めるようになってきました。しかし、今でも一部の観測点では水質あるいはラドンの観測も行っています。

地震発生予測に挑む —コンピュータ地震なまの飼育法—



平原 和朗

名古屋大学大学院環境学研究科教授（現・京都大学理学研究科教授）

地震の予知というと、とりあえず自分のところはどうか揺れるだろうか、いつ揺れるだろうか、それだけを教えてくれればいい、あとはかまわないと皆さんはおっしゃいます。確かにそのとおりです。ところが、世界中で地震の起きないところのほうがはるかに多いのです。日本はいちばん地震が多いところですから、地震が怖いのなら日本列島に住まなければいいのです。それでも、どうして地震の多いところに人は住むのでしょうか。断層沿いには、いい湧き水があり、酒がうまい、そういうことがあって、やはり地震の多いところに人間は住みたがるのです。

このように、地震は決して悪者ではないのですが、残念ながら先日スマトラ沖のような地震が起ると、20万とか30万という考えられない数の人が亡くなります。そういうシリアスな面からも「地震発生予測」は重要な課題ですが、今はスタートにも立っていないひよこのような状態なのです。地震発生予測というと、前兆現象などいろいろな試みがあり、多くの方がやられているのですが、今日はコンピュータの中でどこまでできているのかという話をします。

はじめに

「地震発生の数値予測は夢か？」という問いは10年ぐらい前から出していますが（図表1）、こういうタイトルをつけると必ず総反撃を受けます。そんなものはできるわけがない、原理的

に無理であるとか、いろいろな人がいます。どこまで予測できるかということは、どこまで予測すればいいかという程度にもよります。何時何分何秒、どこで、というのをメートル単位で当てるといわれてもなかなか難しいのは確かです。

今回の防災アカデミーは『震災列島』の石黒耀さんですね。もう一つ似たような『M8（エムエイト）』という本があります。これは地震シミュレーションということで、地球シミュレータが出てくるのです。読んでみると「はてな？」と思うことがたくさんあるのですが、それはさておき、まあ面白い。この本の中に、「地震予知のシミュレーション」と「地球シミュレータ」が出てきますが、コンピュータの中で発生予測をして、実際に東京大地震と南海トラフの地震を当てるといような趣旨で、データを入れながらどんどんシミュレートしていくというものです。そういう時代がすぐに来るとは思いませんし、そういううまい話にはなかなかできないと思います。

僕は15年くらい前に京都大学で、次のような大学院の入試問題を作ったことがあります。「『気象の数値予報』に対応する『地震の数値予報』はどこまで可能であるか。さらにそれを実現するにはどのような研究および観測が必要であるか。また、気象の数値予報と異なる本質的な難点があるとすればどのようなことが考えられるか。述べよ。」



図表 1

これを作ったときは、こんな問いの答は書けないと地震学の仲間うちから総反撃を受けました。そのときは私は何とかなるのではないかと考えていたのですが、15年たって、いま数値予報みたいなことを試みると、これが非常に難しいのです。ただ、こういう難しい問題には、ドン・キホーテではないですが、やってみようかという若い人が必ず出てくると思います。覚えておいてください。昔からこういう問題が議論されていたことを。

今日のお話はだいたいこんな内容です（図表2）。まず、はじめにバックグラウンドとして、なまずを飼うのには環境が要りますので、日本列島に起こる地震についてお話します。15年前に「数値予報が可能か？」と書いたときと比べて、はるかに多くのことが分かってきましたが、それゆえはるかに難しいということが分かってきたことも確かです。実現に向けて、近づいているのか、遠ざかっているのか分かりませんが、ジグザグしながら多分近づいていると信じたいところです。

次に、大切なポイントとして、摩擦の問題です。プレートの境界で一方が沈み込んで、それがバーンと跳ね上がる時に地震が発生するというのは多分ご存じだと思うのですが、そのプレート同士のくっつき方をコントロールしているのは「摩擦」です。これがかなり重要なのは以前から分かっていて、1970年ぐらいから岩石を使って摩擦の性質を調べてきました。こんな小さな実験をしながら地球を見るというのはスケーリングと言う点で無理はあるかも知れませんが、何とかして摩擦を数式で表して、それをコンピュータの中に取り入れるということに取り組みました。それが1970～1980年ごろで、非常に小規模のコンピュータシミュレーションでした。地球シミュレータを使った超大規模シミュレーションで、今やっと南海トラフの地震ぐらいがターゲットになりつつあり、入り口に立ったところです。摩擦の話と言われても、何を言っているのか分からないかもしれませんが、なるべく分かりやすくお話しします。

次に、コンピュータ地震なまずの具体的な飼

メニュー

- ・地震なまぜの棲家としての日本列島
プレート収束域としての日本列島・日本の地震なまぜ
ゆっくり地震・アスペリティー分布(くつき方の多様性)
- ・摩擦が重要：摩擦法則→数式化→プログラミング
- ・コンピュータ地震なまぜの飼育法
 - ・簡単な飼育法
 - ・現実に近い飼育法
- ・地球シミュレーター
：本物の地震なまぜの飼育をめざして
- ・地震サイクル→強震動シミュレーション
- ・せめて揺れる前に！

図表 2

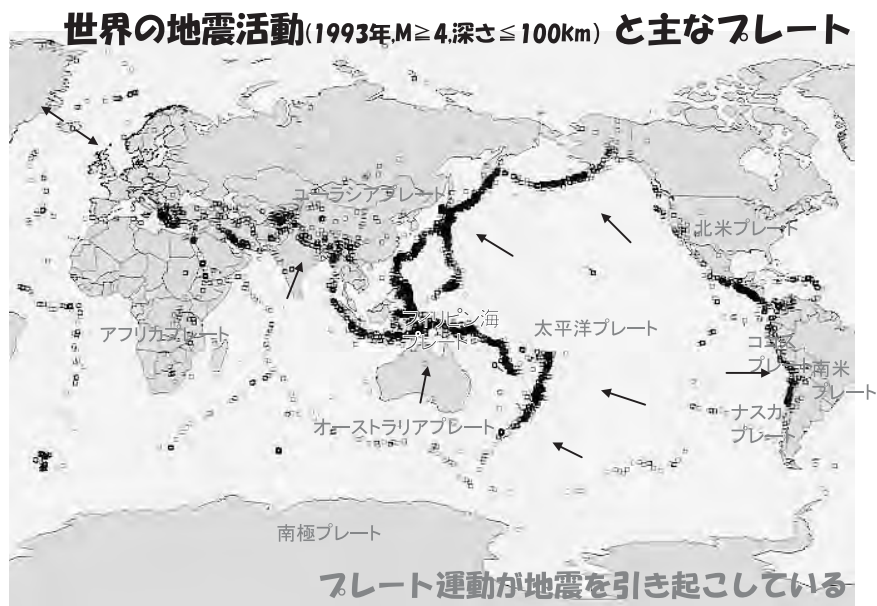
育法、そして、南海トラフの地震はどうして起きて、どこから割れはじめて、果たして東海地震が起きるのか、などについて地球シミュレーターで調べた話をします。これは少し自信があります。多分、いわゆる「東海地震」は単独では起きないと思います。ただ、そう言って起きたらどうしようかとはいつも思うのですが…。予測の現状はこの程度ですので、やはり、もし揺れたらどういう揺れが起こるか(強震動シミュレーション)や、少なくとも大きな揺れが来る直前に知りたい(緊急地震速報)、といったことについても最後にお話したいと思います。1時間半ぐらいかかるでしょう。

地震なまぜのすみか

図表 3 は世界で地震が起こっているところです。これを見ますと、日本列島に住むのはちょっとどうかと思われるでしょう…。住んでいる人が悪いと言いませんが、地震の危険度の高いところに人がたくさん住んでいることは確かです。

地震はプレートの運動によって引き起こされているということはいろいろな教科書に書いてあります。では、プレートはどうして動いているのでしょうか。体内を調べる CT と同じように、地震波を解析して得られる地球内部の CT とも言える地震波トモグラフィーにより、地球の 3 次元内部構造の研究が進み、大きなスケールのプルーム(マントル対流)の様子が見えてきました。こういうプルームの動きが表層のプレートを動かしています。

今度は日本列島に移ります。太平洋プレートが年間 9cm ぐらいのスピードで動いて沈み込んでいます。フィリピン海プレートは年間 4～6cm ぐらいのスピードでユーラシアプレートの下へ入って、東海・東南海・南海というような巨大地震を起こすのです。基本的にはプレートの境界で地震が発生するので、マントル対流からプレート運動まで全部シミュレーションしてしまおうという人もいますが、それは大変なので、プレート運動は観測事実で分かっていると考えることにします。



日本の地震活動(地震調査研究推進本部)に加筆

図表 3

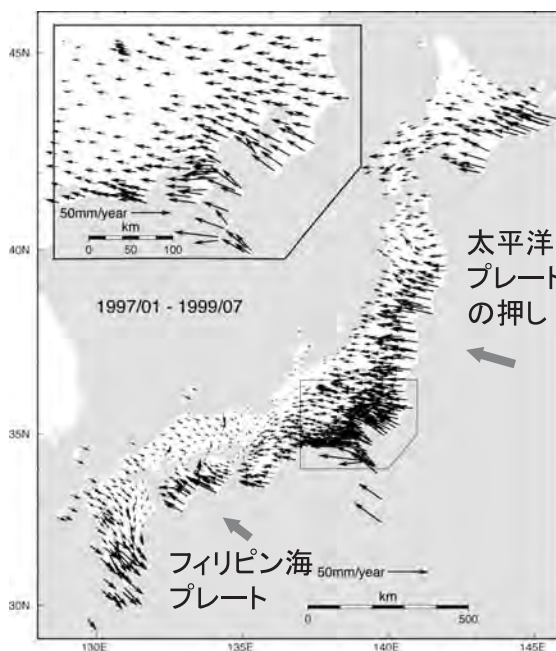
GPS で見た日本列島は東西に圧縮されて、100km の間で年間 1cm ぐらいのひずみ速度で縮んでいます。これ(図表 4) は名古屋大学の鷺谷さんの図です。太平洋プレートが西へ動いて日本列島がグッと押されています。西南日本

は、フィリピン海プレートに押されて北西方向に動いている。東海地方も北西へ動っていますが、あとで、最近では反対に動いているという話もします。

地震は 1 点から割れはじめて、ある大きさの

変動する日本列島

GPS観測で求めた
水平変動ベクトル
1997/01-1999/07
(Sagiya)



図表 4

範囲まで割れます。これを震源域といいます。最近、地震波の詳しい解析をしますと、震源域の中でも大きくすべったところと全然すべらないところと、非常にむらがあるということが分かりました。これはくっつき方、摩擦の性質がかなり違うという話につながります。

地震なますの種類

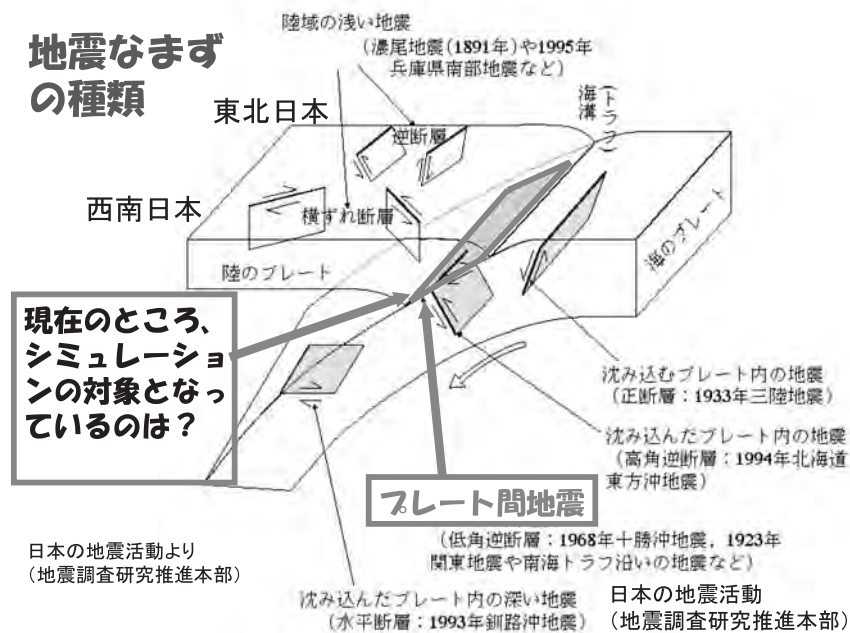
どうも最近では地震が多いようですが、それらの起こるメカニズムを見ると、異なるいくつかのタイプがあることがわかります（図表5）。ただ、これらのさまざまなタイプの地震を全部シミュレートするのは、残念ながら今はできていません。今、検討の対象としているのは、プレート間巨大地震だけです。特に南海トラフの地震や日本海溝に起こる地震で、マグニチュード8クラスの地震を予測しようとしています。本当は怖いのは内陸地震で、いずれは何とかシミュレーションに入れていこうとしています。いまはまだ難しい。今日のお話の最後に予測についてヒントだけを言います。

余効すべりとゆっくり地震

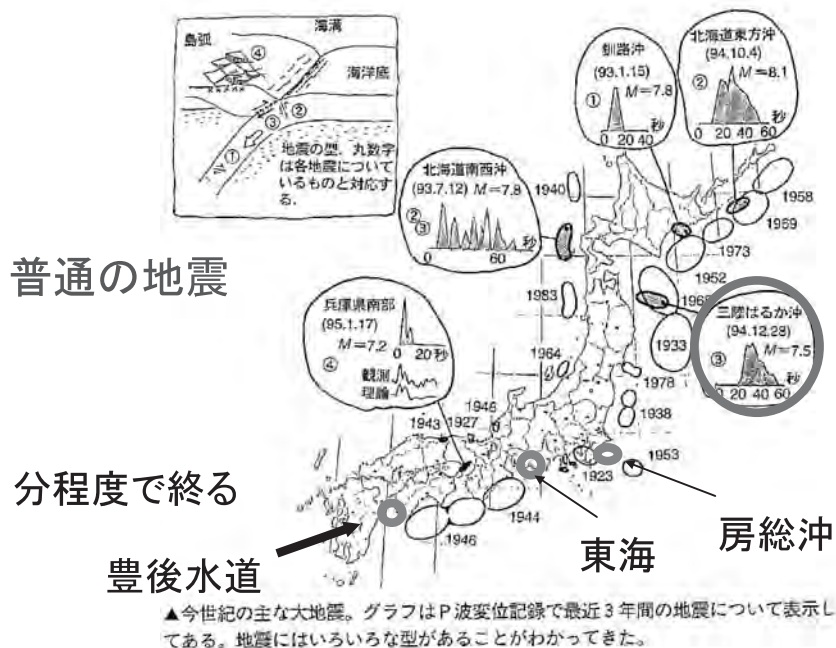
普通地震というのはほとんどが1分以内、数十秒で終わります（図表6）。特に内陸地震は数千年に1回動いて大変な被害を起こしますが、ほんの一瞬動くだけです。神戸の地震はほとんど20秒以内で終わっていますが、それが大被害を引き起こしました。これに比べると、この前のスマトラ沖の地震は非常に規模が大きく、500秒間も地震波を出し続けました。この前の地震がいかに、大きかったかがわかるかと思えます。

ところが、このような普通地震よりはるかに長い時間をかけて起こる現象もわかってきました（図表7）。たとえば1994年三陸はるか沖地震では、地震が起きたあとに1年以上かかってもう一回地震が起きたことに相当するゆっくりした動きがありました。これはGPSが初めて見つけたもので、余効すべりと呼ばれます。一回バリッと割れて動いたあとからズルズルとすべっています。

もう一つ、図表7右は世界で初めて、名古屋

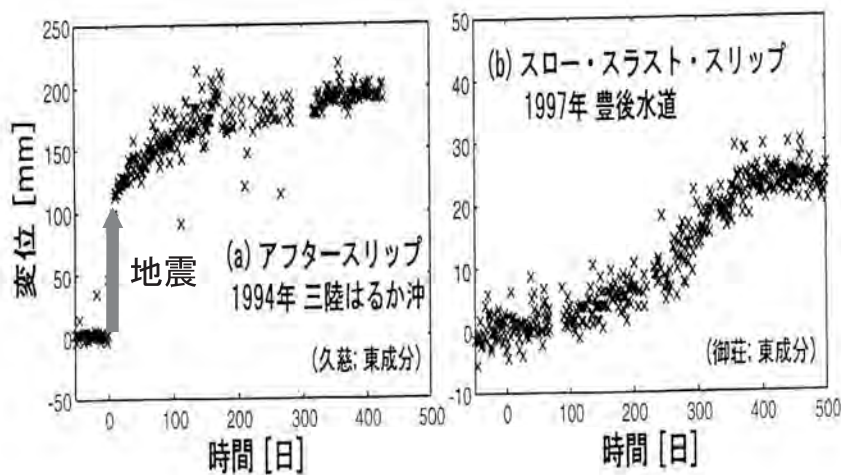


図表5



図表 6 菊地正幸 (2000)

余効すべりとゆっくり地震



GPSによる地表変位

図表 7 廣瀬・他 (2000)

大学の我々が見つけたのですが、豊後水道で1年以上もズルズルと動いています。これは全く地震波を出していません。全部こんな地震だったら我々は失業しているかもしれませんが、平和な地震です。ただ、このような地震が見つ

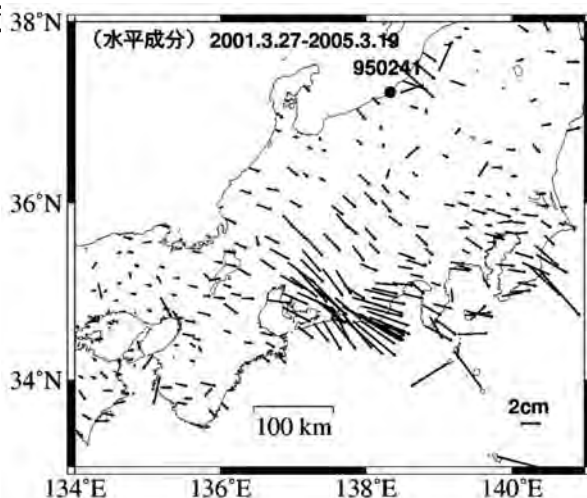
たということで、今まで勘定が合わなかったいろいろなことが合うようです。

東海ゆっくりすべりというのがあります (図表 8)。以前は北西の方向に押していたのが、2001年の半ばから反対に動いていてまだ動い

GPSで捉えた東海ゆっくりすべり

定常的な地殻変動からのずれ

2001年春頃から東海地方西部において、国土地理院のGPS観測結果にそれまでと傾向の異なる変化が見られています。この非定常地殻変動は、依然継続しているように見えます。定常的な地殻変動として1997年1月1日から1999年12月31日までの平均速度及び年周変化を推定し取り除いています。



図表 8 国土地理院 (2005)

ている。いつ止まるのだろうか。そろそろ止まるのではないかと思うのですが、そう言いながらなかなか止まらないで困っています。このような現象は過去に何回も起こっているのではないかという話もあります。

地震の発生予測といっても、いろいろなタイプの地震があります。1991年に大学院入試問題を作ったころ、私はこんな地震を知りませんでした。もっと簡単な、バリッと割れるものだけを何とかしようと思ったのですが、こんなにたくさんのタイプの地震があり、これを勘定に入れないと多分シミュレーションは完成しません。でも、とりあえずバリッと割れるものをまらず見ようということです。

海溝型プレート間巨大地震

海溝型プレート間巨大地震の発生機構は、図表9のようにプレートが入って行って、跳ね返ります。海側のプレートと陸側のプレートが摩擦力でくっついているので、摩擦の研究が必要であろうということです。ただ、このくっつき

方も場所により違いがあります。

(図表10) 例えば1968年のM8.3の十勝沖地震では、大きくすべったところは二つに分かれて、真ん中にほとんどすべっていないところもあります。三陸沖のプレート境界だと、マグニチュード7クラスに対応するような大きさでくっついている部分(アスペリティ)と、全くくっついていないところがあるのです。西南日本はまだよく分かっていないのですが、東南海地震の辺りでは、もっと大きいマグニチュード8クラスの固まりがあるかもしれない。これは太平洋プレートとフィリピン海プレートで違い、太平洋プレートの中でも場所により、プレート境界でくっつき方がかなり違います。

ふだんはくっついているところとズルズルすべっているところがあり、ぴったりくっついているところは地震のときにバーンと大きく跳ね上がるというイメージです。これはここ5年ぐらいの日本の地震研究の成果といわれていることです。

今進めているシミュレーションは、このくっ

海溝型プレート間巨大地震の発生機構

摩擦の研究が必要!

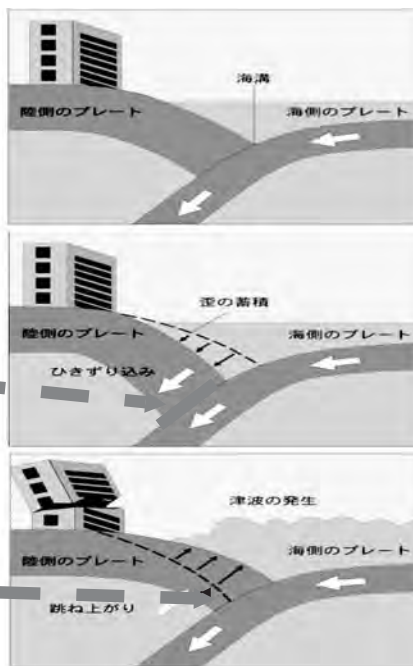


摩擦力でくっついている!
(固着)

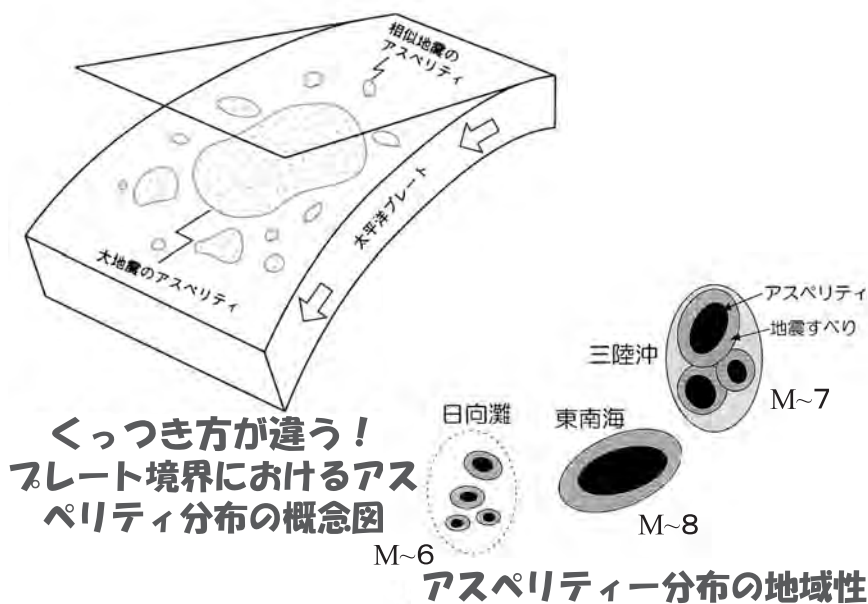
摩擦力に打ち勝ち跳ね上がる

すべり

日本の地震活動に加筆
(地震調査研究推進本部)



図表 9 地震調査研究推進本部



くっつき方が違う!
プレート境界におけるアスペリティ分布の概念図

アスペリティー分布の地域性

図表 10 地震予知研究協議会 (2003)

つき方を完全に理解して、摩擦に合うようなパラメータをセットしてやれば自動的に将来の地震が予測できる、という方向に持っていきたいのです。ただ、これは非常に難しく、データが足りないのです。そこで過去の地震を再現し

て、その延長で将来の地震を予測することを試みる訳です。この考え方のいいところは、プレート運動の速度が急に変わるわけではないので、くっついている領域に摩擦パラメータを一回与えれば、摩擦構成則に従ってすべりが確定して

きます。たくさんパラメータを与える必要はありますが、時間的に不変なモデルができるということです。そこに少し希望があるわけですが、実際にはまだ難しいのです。

摩擦のモデル化

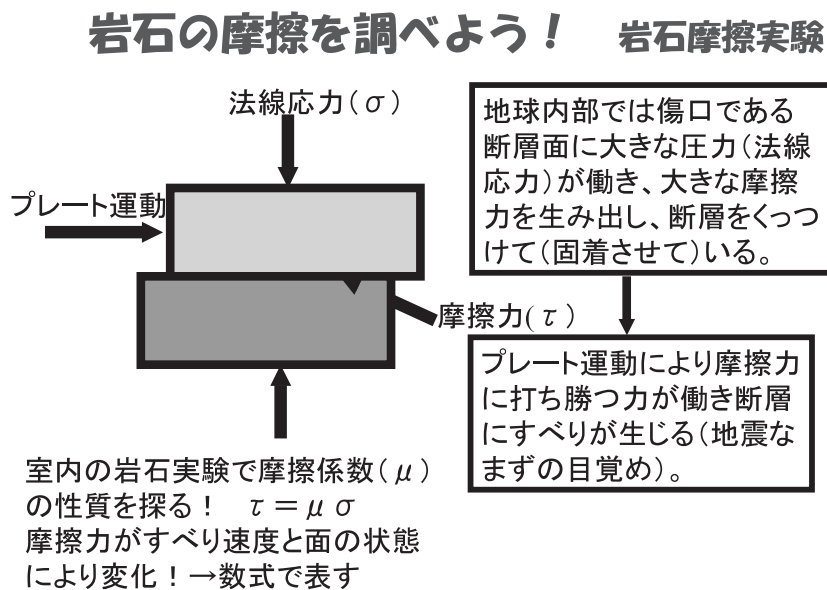
次に、摩擦を調べましょう（図表 11）。無傷の岩石をバーンと割るのではなくて、一度壊れたところがもう一度割れるのを再現しようということで、一度真っ二つに割った岩を（図の上下から）ギュッと押しつけます。これは地下深部に行くと大きな圧力が働いていますから、その状態を再現するためです。そして、横からプレート運動にならって押してみます。そうすると、摩擦力があってもなかなか動かないのですが、あるときギュッと動きはじめるのです。この摩擦の性質を調べてみようとして岩石摩擦実験をやってみました。

（図表 12）岩石をほとんど静止させておいてギュッと動かしますと、摩擦力がギュッと増します。これは静摩擦です。それからまた落ちて

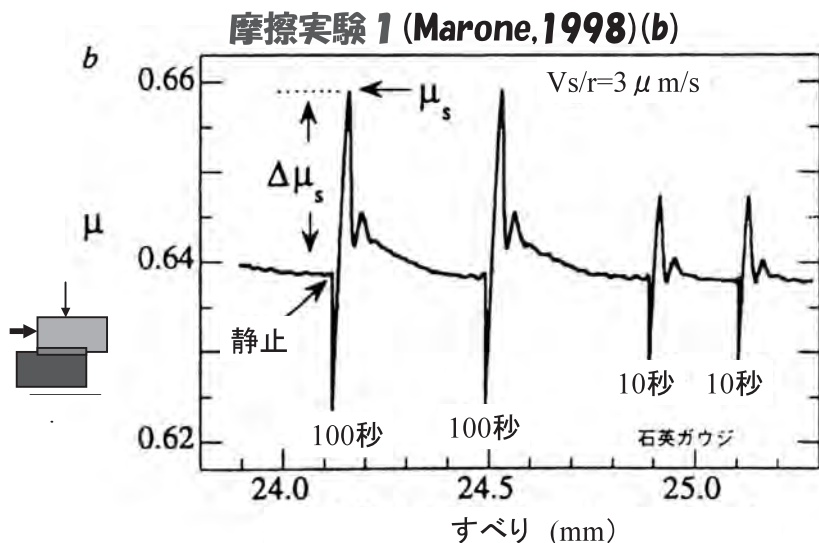
いく。100 秒静止したとき、10 秒静止したときの結果がこの図（図表 12）です。押しつけておく時間はけっこう重要で、これを 100 秒、1000 秒、1 万秒という形でずっと変えてみると、押しつけている時間の $\log t$ に比例するように、長く押しつけているほど摩擦力が増していくように見えます。

今度は急にキュッと押してやります（図表 13）。これをローディングと呼んでいます。これは実はズズッとすべっているのですが、0.4mm/s から 4mm/s にキュッと上げてやると、ここで摩擦力がグッと増します。それから、L ぐらいズルズルとすべって動摩擦力に落ちていきます。すべり速度（ V ）をどんどん速くしていくと、動摩擦係数はどんどん下がってきます。普通の岩石は $\log V$ ぐらいで下がってくる。

このような性質から、アメリカ地質調査所の Dieterich は地震発生シミュレーションのためのモデルを次のように考えました（図表 14）。何とかコンピュータで解析する形にしようとして、彼は、すべり速度ともうひとつ θ というパ

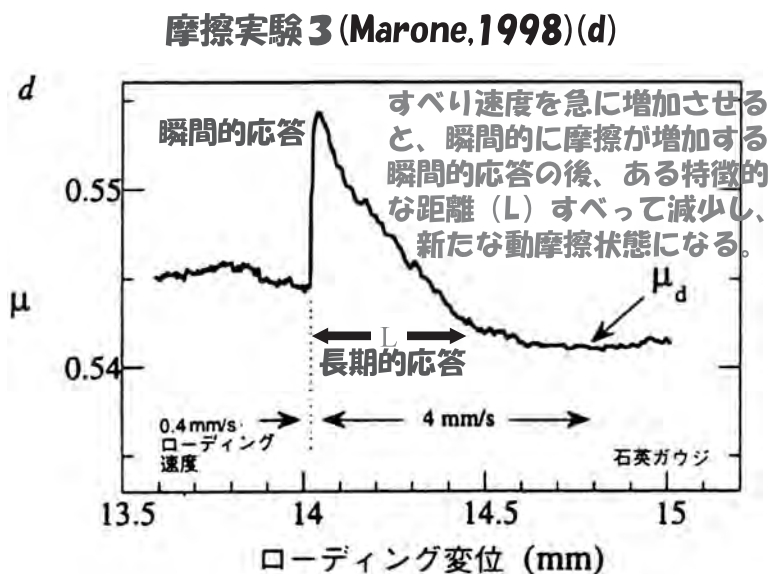


図表 11



静止—すべり実験における、摩擦係数(μ)とすべりの関係
すべり速度 ($V_s/r=3 \mu \text{ m/s}$) ですべらし、100秒、10秒の静止時間をおき、また
すべらせた実験

図表 12



すべり速度を0.4mm/sから4mm/sに増加させた時の動摩擦係数 (μ_d) の変化

図表 13

ラメータを導入しました。これはいろいろな解釈がありますが、とりあえず入れたパラメータで、面の状態に依存するので状態パラメータともいいます。この式にはいろいろなバリエーションがあり、これが唯一の決定版ではありま

せん。すべり速度ではなく、すべりにだけに依存する摩擦の式を使っている人もいます。

これを使って先ほどの実験と同じことを再現します (図表 15)。岩石実験で、 V_1 ですべていた速度から急に速度を V_2 にキュッと上げ

岩石実験から得られた摩擦の性質
→コンピュータで解析するため数式で表す

$$\tau = \mu (\sigma - p) = \mu \sigma^{\text{eff}} \quad \begin{array}{l} \tau : \text{摩擦応力} \\ \sigma : \text{法線応力} \\ p : \text{間隙流体圧} \end{array}$$

すべり速度(V)と状態(θ)に依存する摩擦構成則

$$\mu = \mu_0 + a \ln(V/V_0) + b \ln(V_0 \theta / L)$$

$$d\theta/dt = 1 - V \theta / L \quad \text{Dieterich-Ruina slowness law}$$

θ : 状態変数, a b: 摩擦パラメータ, L: 特徴的長さ
V: すべり速度, V_0 : 参照速度
 μ_0 : V_0 に対応する参照摩擦係数

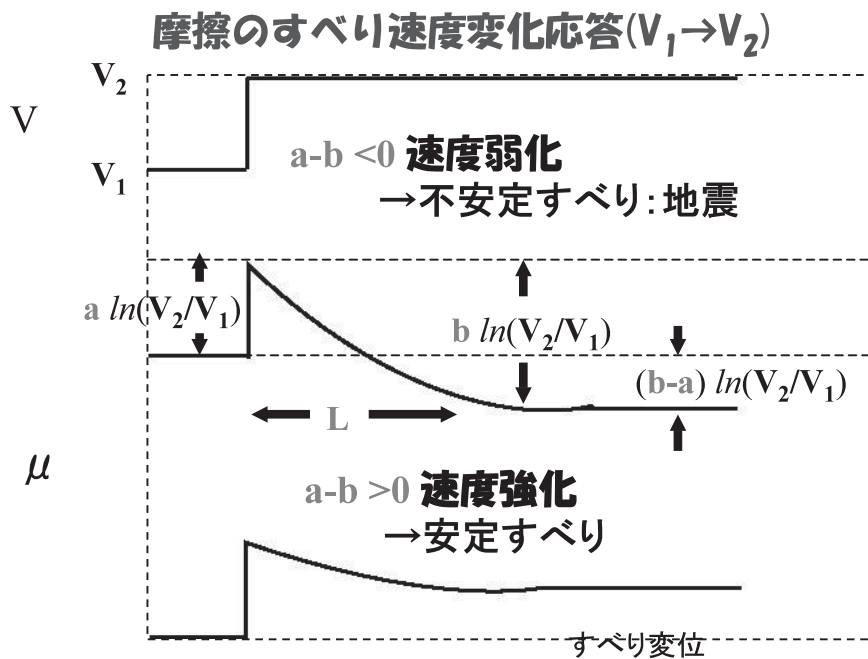
↓ $d\theta/dt = 0$

$$\mu_{ss} = \mu_0 + (a-b) \ln(V/V_0): \text{定常摩擦係数}$$

図表 14

ます。そうすると摩擦がキュッと上がりまして、L だけすべってある動摩擦に落ちついている。a とか b というのは摩擦パラメータで、重要なのはその差です。a - b < 0 ということは、いちどすべり出して、すべり速度が増すと摩擦力

が下がり、どんどんすべりやすくなっていく。これは速度依存の摩擦モデルでいうと「速度弱化」、すべりだけに依存する摩擦モデルを考えている人は「すべり弱化」と呼んでいますが、地震を起こせる一つの要素です。



図表 15

ところが、温度を上げたり、岩石の真ん中に柔らかいもの（ガウジ）を挟んだりしますと、すべりはじめて速度を上げたら、今度は逆に摩擦力を増してしまうことがあるのです（図表15下）。これは $a - b > 0$ の場合で、ズルズルとすべりはじめて勢いよくずれようとする摩擦力が大きくなり、それ以上すべらずに止められてしまうので、安定すべりという状態です。

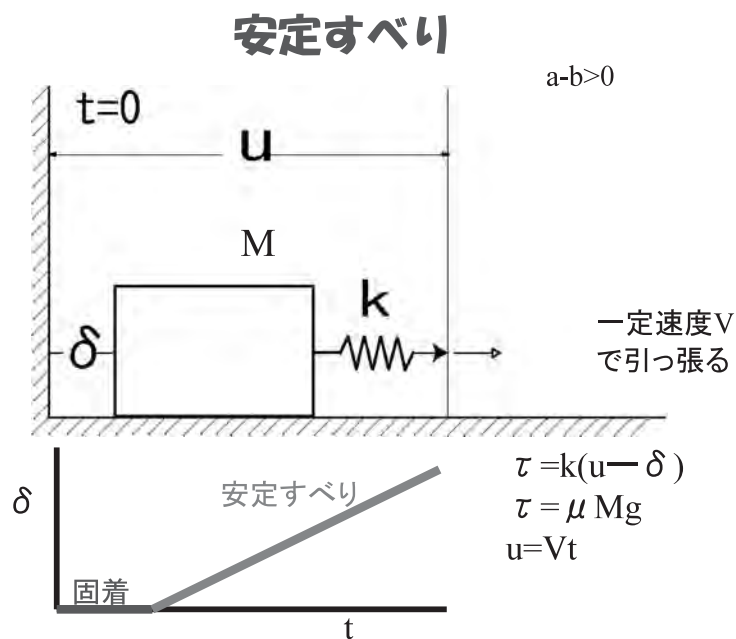
このような摩擦の式を使って地震をシミュレートするときに、よく「ブロッカー-バネモデル」というのを使います。

図表16のようにバネを挟んでブロックをひっぱる。床のところに先ほどの摩擦の性質を与え、バネの右側を一定速度で引っ張ります。そうすると最初バネがギュッと伸びるのですが、あとはズルズルとすべります。これは $a - b > 0$ の場合です。これはすべりはじめたら摩擦が増す。すべろうとするけれども、大きな摩擦力が働いて、いっぺんにすべらない。それで引っ張った分だけズルズルとすべる安定すべりになります。

図表17は固着していてすべる、固着—すべりの場合です。これは引っ張ったバネが伸びて、ある一定のところに来るとバネの力で一気にすべってキュッと動くのです。これには $a - b < 0$ という条件と、バネの固さが関係します。バネの固さはこのシミュレーションで重要な要因で、地球シミュレータを使った場合でも出てきます。具体的には、ある程度バネが柔らかくないといけない。バネがすごく固いと、イメージとしては針金のようなバネを持ってきて引っ張ることを考えれば、伸びたり縮んだりしませんから、ズルズル引っ張るだけで、キュッとすべらないことになります。そういう意味である程度柔らかいバネでないといけないのです。

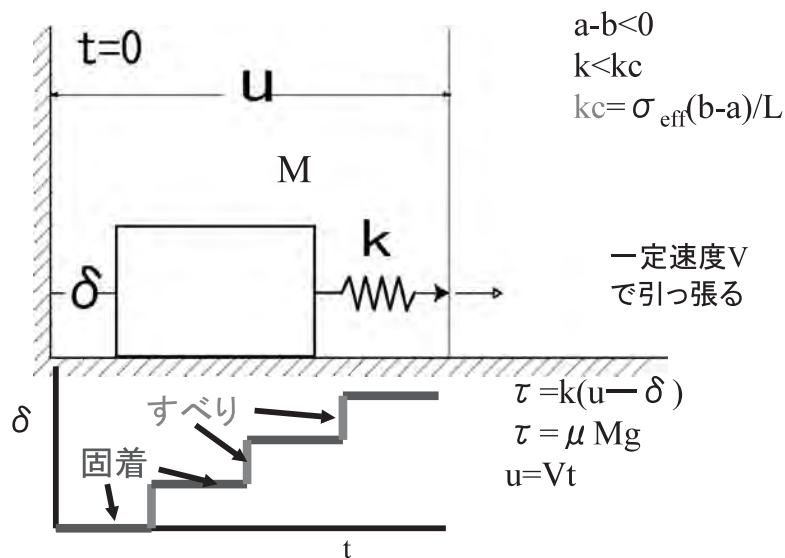
プレート境界の摩擦モデル

次にブロッカー-バネモデルから少し進歩させて、図表18に示す二次元のモデルを考えて見ます。このモデルでは、ものすごく単純化して、斜めに切れ目を入れます。切れ目を入れて、完全に切ってからまたくっつける感じです。こ



図表16

固着—すべり（不安定すべり）



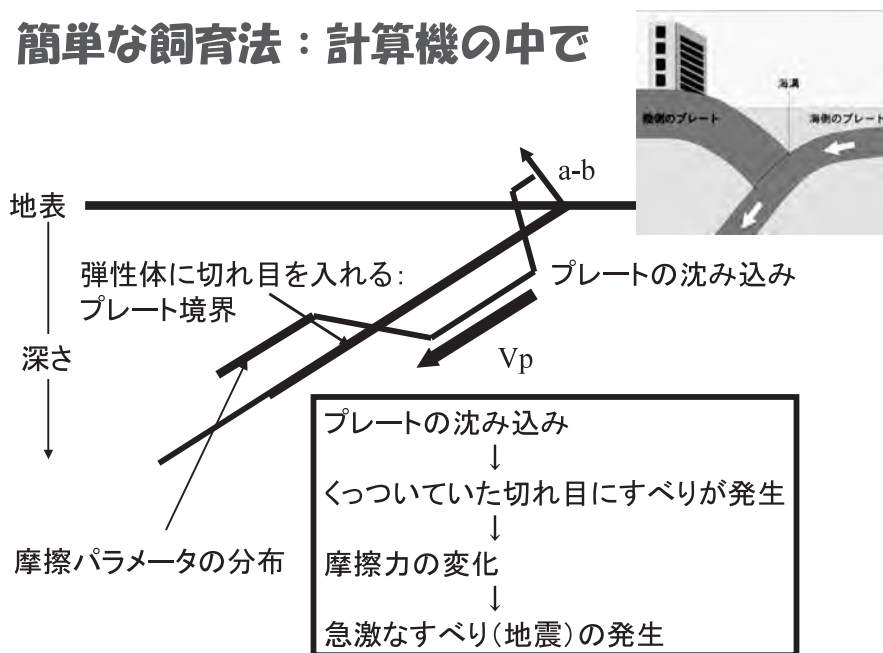
図表 17

れがプレートの境界で、その下側のプレートを V_p という速度で沈み込ませて、くっついてきた切れ目にすべりを発生させるというわけです。

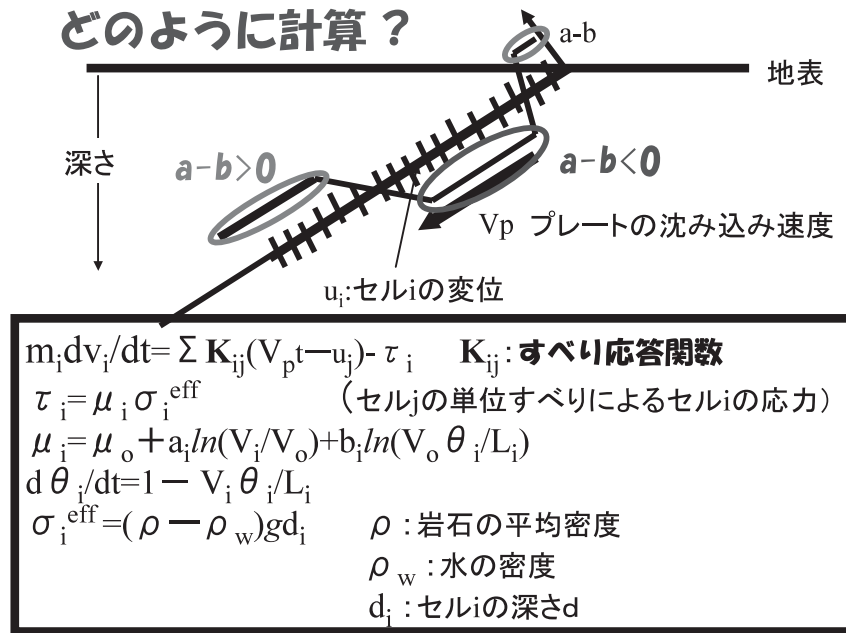
実際にこれを計算するためには、このような

式で表します（図表 19）。プレート境界を小さく分割して微分という量を取るのですが、ある小さなセルに分けて分割して方程式を解くのです。枠内の一番上の式は一つのセルの運動方程式で、式の左辺の dv_i/dt が加速度です。右辺

簡単な飼育法：計算機の中で



図表 18



図表 19

の K_{ij} は、ある i 番めのセルのすべりに注目しますと、どこかほかのところのセル j がすべったときに自分のところでどれぐらい応力が増すか、これをすべり応答関数と呼んでいます。これは自分がすべったときどれだけ応力が増したりするかというバネの固さでもあります。あとは先ほど出て来た θ_i というのがセルごとに入っています。プレートをずっと沈み込ませていくとすると、これを連立させておいて、地震発生を起こすことができます。

そのときに重要なのは、 $a - b$ という量です。境界のうち、 $a - b < 0$ の領域は固着で、この設定で地震を起こすかを定めるわけです。実際にもある深さのところは地震を起こします。その両側 $a - b > 0$ の領域がズルズルすべっている安定すべり領域です。深いほうは温度が高いため、浅いほうはガウジ（軟らかいもの）などが入っていてこのようになっています。

さて、先ほどのモデルでプレート境界を細分化しますが、その大きさに制約があります。これは重要なので覚えておいてください（図表

20）。岩盤などの中にある割れ目（クラック）を考えます。割れ目の長さを W とすると、これが Δu だけ少しすべるときにどれだけ応力を解放するか（ $\Delta \tau$ ）を考えて、その比を取りますとバネの固さ k になりますが、割れ目（断層）が長いほど k が小さくなります。すなわちちょっとした力ですべる。逆に小さい断層ほどすべりにくい。これは重要です。例えば後で出てくる紀伊半島などでどうして地震の破壊が発生するかというときも、これでほとんど説明できます。

これを考えると、先ほどのプレート境界のモデルで、小さく分割した部分（セル）がある大きさ以上だと、ばねが弱くなって、実際にはすべってはいないのにモデルではすべってしまう、という問題が出てきます。こうならないうためのセルの大きさの目安（ h^* ）というのはこんな量（図表 20 中ほど）です。 L に比例して $b - a$ に反比例します。

南海トラフを再現しようとしても、 h^* は 1km くらいになります。これは上限で、本当

連続体モデルとラフセルモデル(セルサイズ)

長さ W , 変位 Δu のクラック(割れ目)

応力降下量: $\Delta \tau = c \mu \Delta u / W$ ($c \sim 2$)

実効的バネ定数: $k = \Delta \tau / \Delta u = c \mu / W$

W: 断層(クラック)長で決まる

シミュレーションでは, セルサイズでこの最小断層長が決まる.
断層長が大きければ実効バネ定数が小さくなり, 長さ h^* (臨界セルサイズ(Rice, 1993))以上で不安定すべりの領域になる.

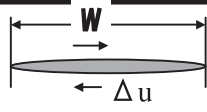
$$h^* = c \mu / kc = c \mu L / [(b-a) \sigma_{eff}]$$

よって離散化したつぶつぶが見えないようにするシミュレーションではセルサイズ h に

$$h \ll h^* \rightarrow h^* \sim 1\text{km (または数100m)}$$

が必要. \rightarrow 大型計算(ES)

または, 核形成サイズ l_c (Dieterich, 1986, 1992)と呼ぶ.
連続モデル: $h \ll h^*$ ラフセルモデル: $h \gg h^*$



図表 20

はこれよりずっと小さくする必要がありますから、セルサイズは数百 m くらいにしないといけない。数 100km から 1000km といった領域を数百 m で細かく区切っていくと、その数がとてつもないことになります。これが地球シミュレータを使わないと計算できない一つの理由です。パソコンとかワークステーションでは、メモリが足りなくて計算できないのです。

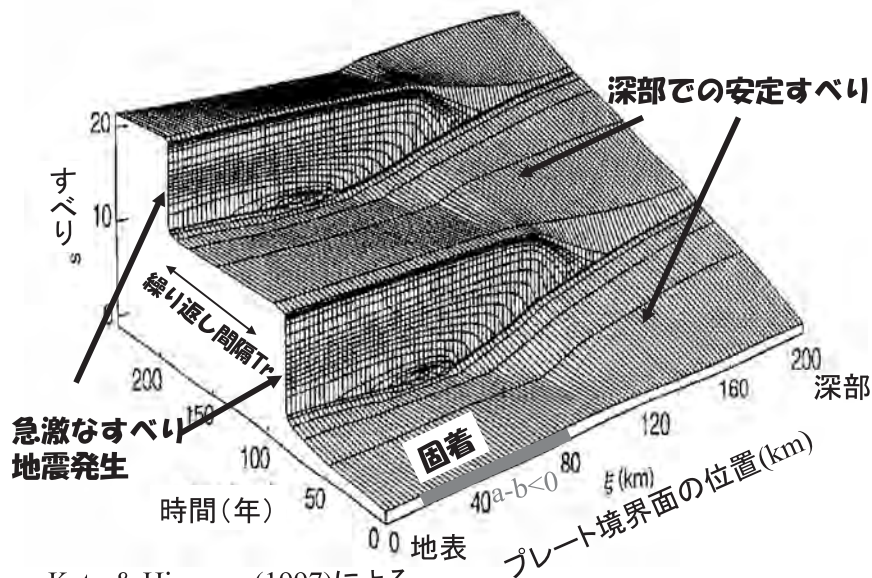
図表 21 は東大の加藤さんが、簡単なモデルを大型計算機でシミュレーションした結果です。横軸は東海地震などの深さ断面を見たところで、左下が地表で、図の右側はプレートが深くなっているのを示しています。固着と書いてある部分が $a - b < 0$ で、この深さではくっついていきます。それより深いところは $a - b > 0$ ですから、ズルズルすべっている。図の左奥に向かう軸は時間の経過です。固着しているところではあるときにすべりが発生して一気にバーンとすべってしまう。この場合、本当に同じ繰り返し間隔で同じ地震が起きます。こういうものだと本当に地震は簡単なのですが…。

イメージとして、応力降下量を大きくすると繰り返し間隔は大きくなるとか、 L が大きいと繰り返し間隔が大きくなる (図表 22)。こういう簡単なシミュレーションをしておきまして、プレート境界のどこに $a - b$ をどれぐらいの値で与えたらいいか、プレート速度はこれぐらいだったら、例えば南海トラフで知られている 90 ~ 150 年の地震間隔を作るにはどれだけの値を入れたらいいかというのを予想するわけです。複雑なシミュレーションの準備として、こういう検討が重要です。

地球シミュレータ

さて、いよいよ地球シミュレータ (ES) の登場です。今まではパソコン、ワークステーションでできるぐらいの簡単なモデルでしたが、今度は三次元にして、日本列島の地図が出てくると、ぐっと本物に近くなってきます。例えば長さ 1000km、幅 300km ぐらいの断層面をセルサイズ数百 m ~ 1km で分けると、大変な計算量になりますので、地球シミュレータを使って

プレート境界における地震発生サイクルシミュレーション

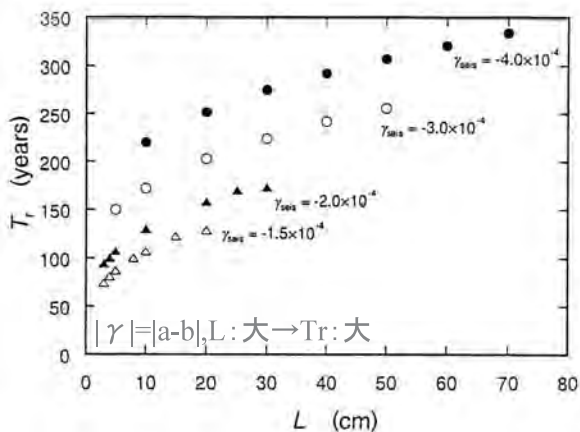


Kato & Hirasawa(1997)による

図表 21 Kato and Hirasawa (1997)

摩擦パラメータ分布 (a, b, L)

・繰り返し間隔Tr
(→大: b-a, L→大)



図表 22 Kato and Hirasawa (1997)

初めてできる計算になります。地球シミュレータを使って初めて分かったのですが、細かくしたものと大きなサイズでやったのではかなり割れ方が違うのです。

これ(図表 23)が地球シミュレータです。

左下の写真は地下で、ケーブル長が3000kmもあります。電気を食うおばけで、ほとんど発熱機と化していて、それを冷やすのに大変苦労しています。

地球シミュレータというのはベクトル並列計

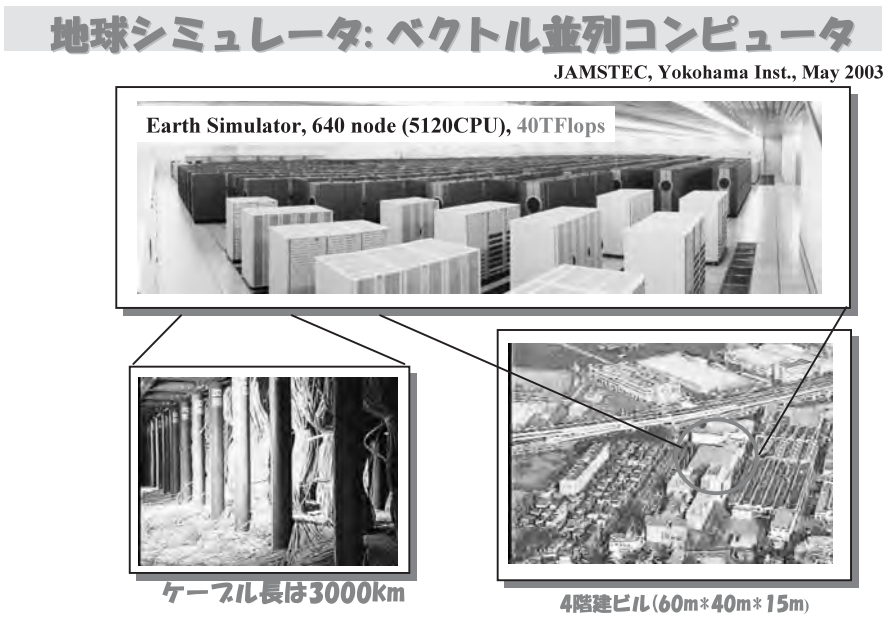
算機です。1個のノードの中に8個のCPU（コンピュータ）があり、そのノードが640個ありますから、全部で5,200台のコンピュータがあることになります。それらに同時に別々の計算をさせることを並列化というのです。ベクトル型というハード的に計算の速さを上げようという工夫もあり、これは地球シミュレータが世界トップになった一つの要素です。ただし、計算コード（プログラム）をうまく書かないと、普通のワークステーションより遅くなってしまいます。

この超高性能の計算機の使用料は、ユーザーから見ると今のところただですが、どうも料金徴収の動きがあります。建設費用が400億円で、電気代は年間数億ですが、そんなことを言われても私には払えませんので、請求されたらすぐに利用をやめるしかないのですが…多分大丈夫でしょう。横浜にあって、そこに行かないと使えないのですが、それでもユーザーが多くて、100%稼動しています。利用内容は、まずは大気・海洋のシミュレーション、要するに天気予

報、長期予報といったもので、これが50%ぐらいです。固体地球分野は、マントル対流とか我々のような地震のシミュレーションで、20%ぐらい。あとの30%が先端分野と称するもので、地球シミュレータを使わないと解けない問題を解くというものです。

利用するためには毎年、課題申請をして、審査があって、それに通ると今年も使ってよしいということになります。それから、計算する前にコンピュータ・プログラムのチェックをされるのです。これはものすごく遅いプログラムを流されるとほかが迷惑するからです。多数のCPUを同時に動かすための効率の指標、つまり並列化とかベクトル化といった数字が九十何%に達しているかどうか。並列化というのはCPUをどんどん増やしていくと落ちてくるのです。そうするとCPUを250個使いたいといっても120個にしなさいというように制限されるのです。

ちょっとまずいのは、2003年までは世界トップとっていたのですが、去年、第3位に転落



図表 23 地球シミュレータセンター

しました。上を行っているのはアメリカのシリ
 コングラフィックスと、あと一つは軍事専用機
 です。それでも十分速いです。

南海トラフの巨大地震なます

我々の課題名が「複雑な断層系の地震発生過
 程シミュレーション」です(図表 24)。基本的
 には有限要素法を使ってやろうとしたのです
 が、日本列島を一度にやるのは地球シミュレ
 タをもってしても難しいと思ったので、西南日
 本と東北日本で、別々にやろうとしています。

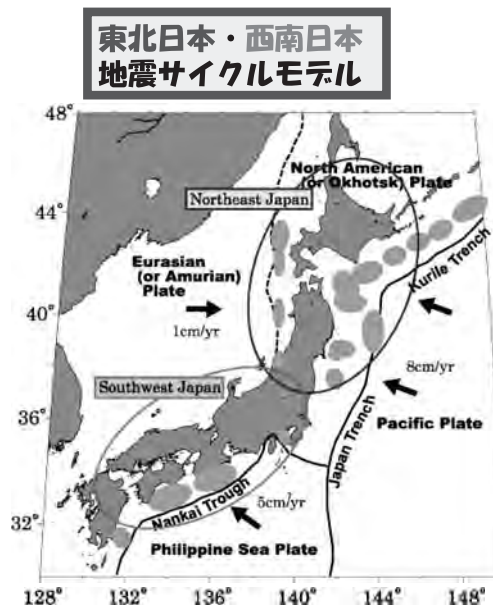
西南日本の話に絞ります(図表 25)。南海ト
 ラフの地震はいくつかの区域に分かれています
 ので、(図の) ABを南海セグメント、CDを
 東南海セグメント、Eを東海セグメントと呼ぶ
 ことにします。過去の記録を見ますと、これら
 がいろいろ運動しながら、あるときは同時に割
 れて、またあるときは東から割れて西が少し遅
 れる、などというパターンを繰り返しています。

東海地震(E)というのが大問題ですが、
 1944年の昭和の東南海地震のときはここまで

すべらなかったのです。ところがその前の安政
 のとき(1854年)にはすべったというわけで、
 明日起きてもおかしくない東海地震といわれ
 て30年以上たっています。これはいい例題で、
 これを説明できるような摩擦パラメータを設定
 して、次の南海トラフの地震がどうなるかとい
 うのが知りたい。そんなうまい話はまだできて
 いないのですが、現状をお話します。

最近の三つの地震を図表 26 に示します。こ
 の三つのうち次はどれが起きるかが問題です。
 1707年の宝永地震では、東海・東南海・南海
 がバーンと一度に割れています(図表 26 左下
 の図)。直後に起こった富士山の噴火はともか
 く、相模トラフの地震、つまり関東地震は時々
 起こるのでシミュレーションに入れないとまず
 いかかもしれませんが、今のところ入っていま
 せん。次の1854年の安政は、ちょうど江戸幕府
 が滅亡のときですが、これ(図表 26 右上の図
 の右側)は12月23日の9時に起きた安政東
 海地震で、駿河湾まで割れました。その32時
 間後に安政南海地震が発生しています。最近の

複雑断層系の地震発生過程シミュレーション



図表 24

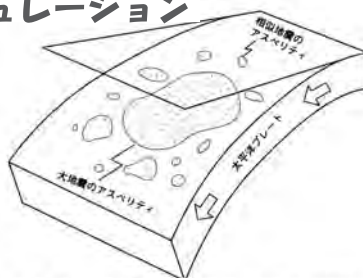


図3 プレート境界におけるアスペリティの分布の概念図

a-b,Lの分布

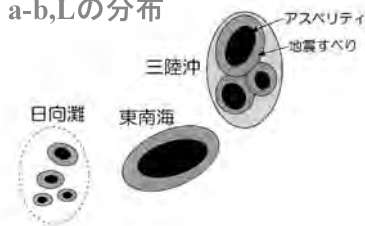
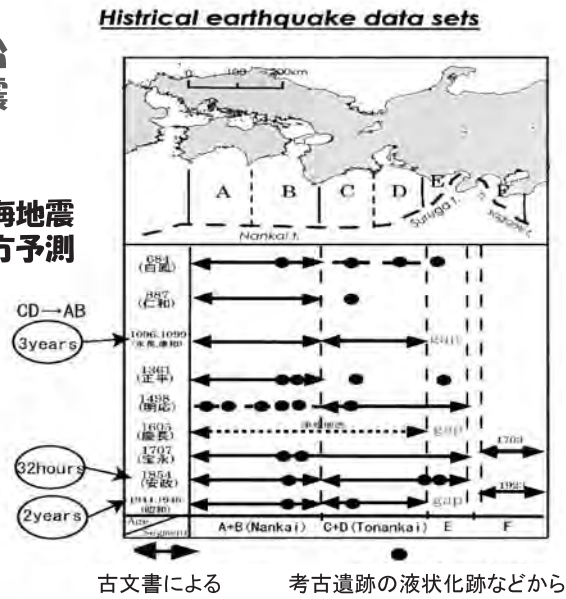


図4 アスペリティ分布の地域性

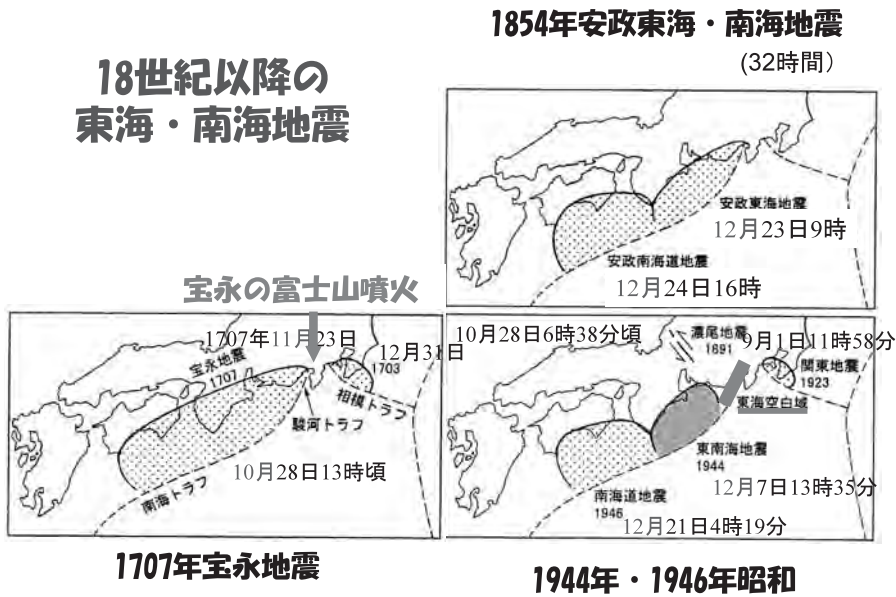
飼育したい
南海トラフ沿
いの巨大地震
なまずたち

次期東海・南海地震
なまずの暴れ方予測
に向けて



図表 25 兵藤・平原 (2004)

**18世紀以降の
東海・南海地震**



図表 26 茂木に加筆

1944年東南海地震、1946年南海地震は間が2年あいていて、そのときは東海は割れ残りしました(右下の図)。

多分この3パターンがすべてだろうと思いますが、次に違うパターンの地震が起きたら、そ

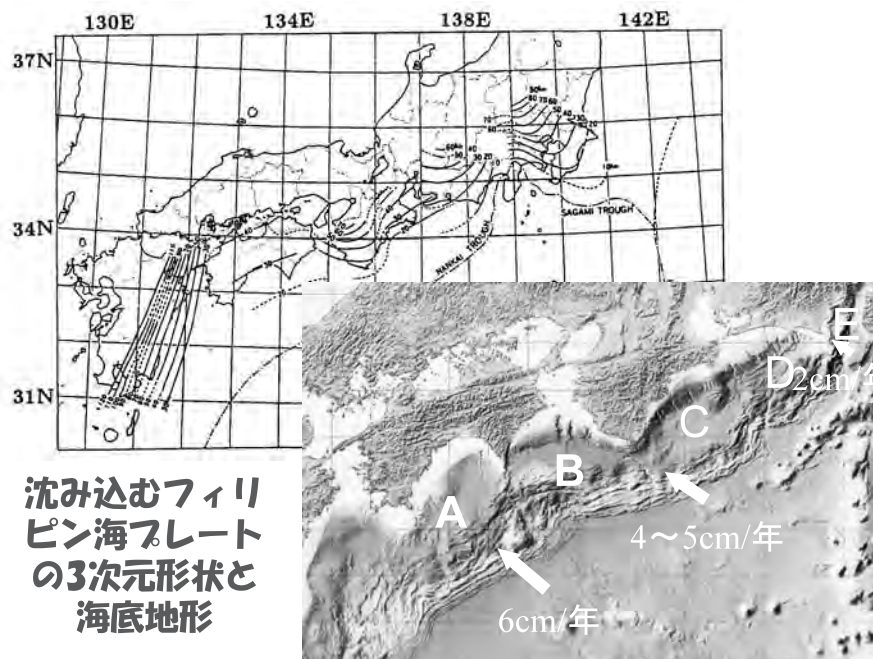
のときは「ごめんなさい」ということで、新しいデータとしてシミュレーションに取り込むこととなります。

図表 25 で ABCDE と言いましたが、海底地形を見ますと、本当に何か関係がありそうです

(図表 27)。プレートは変な形をして入っているのです。これがややこしいところです。これをモデル化しないとイケないのです。

計算の手法には、すべり応答関数という、あるセルがすべったときにその応力がどれだけ

変わるか、隣のセルがどれだけ変わるか、これがすべてです (図表 28)。この計算が実はいちばん時間がかかるのです。バネの固さなどを含まますから、そういうのを計算して、摩擦の構成則と合わせて、これは割と簡単な差分方程式と

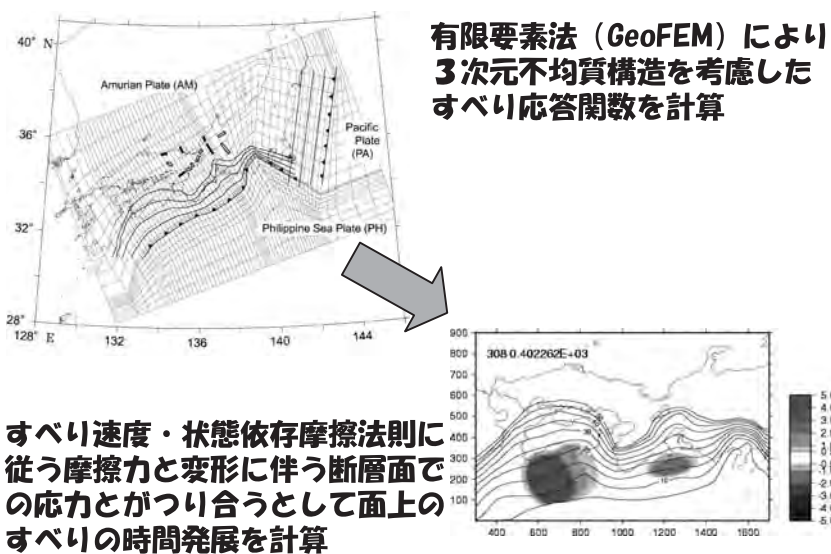


沈み込むフィリピン海プレートの3次元形状と海底地形

図表 27 石田

海上保安庁水路部

計算手法



有限要素法 (GeoFEM) により
3次元不均質構造を考慮した
すべり応答関数を計算

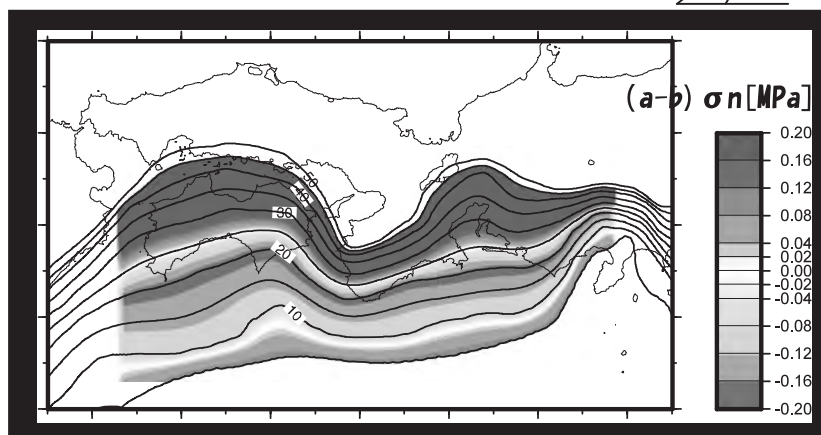
すべり速度・状態依存摩擦法則に従う摩擦力と変形に伴う断層面での応力とがつり合うとして面上のすべりの時間発展を計算

図表 28

PHSの沈み込み平面モデル

・ モデル

- 平面断層: 691.2km x 307.2km (1.2km x 1.2km cell)
- プレート形状に対応した摩擦特性の不均質分布
(摩擦パラメータ温度で決まる→深さで決まる
→高角で沈み込む紀伊半島沖で幅が狭くなる)



図表 29

して解きます。けっこう時間はかかりますが、手法としては確立しています。

これから計算結果をみていきます。プレートが三次元で曲がって入ってくるのを簡単な平面断層と考えます。それでも範囲が広いものですから、576 × 256 のセルに分割しないとイケないので、けっこう大変です。これは2年前くらいの話で、128 ノードですから1000 個ぐらいの計算機を使って、6時間弱で終わりました。

まず沈み込みモデルを説明します(図表29)。等高線はプレート境界の深さを表しています。モデルでは三次元の境界を平面に投影して、幅だけを変えています。摩擦パラメータは、実験事実から圧力と温度で決まります。深くなっていくと温度が上がっていくので、摩擦パラメータも深さの関数になります。一定の深さの範囲で固着域になりますので、紀伊半島のようにプレートの傾斜がきつところでは固着域の幅も狭くなっています。まえに述べたように、断層は幅が狭いほどバネの固さが大きくなり、同じすべり量に対して応力の蓄積量が大き

くなります。したがって、もし同じすべりが起こっていれば、幅の狭い紀伊半島沖でいちばん応力がたまりやすい。このモデルではそうなるので、地震の破壊が開始する点を決めるのは、固着域の幅の違いだけということになります。

北側の深いところは温度が高いため、南の浅いところは多分柔らかいもの(ガウジ)が入っているんで、 $a - b > 0$ になっていると仮定します。つまり、このモデルでは同じ深さだと同じ摩擦パラメータになっていて、横方向(水平方向)の不均質(場所による違い)は入っていません。

もう一つ、フィリピン海プレートの沈み込み速度が場所によってかなり違い、西に行くほど大きくなっています。図表30右下は陸上のGPS観測からとめられたもので、この観測事実から駿河湾で毎年2cmぐらいから西に行くくと直線的に増えて紀伊半島で毎年6.5cm、それより西では一定としています。かなり単純化していますが、このように紀伊半島の東西でプレートの沈み込み速度の傾向が大きく変わって

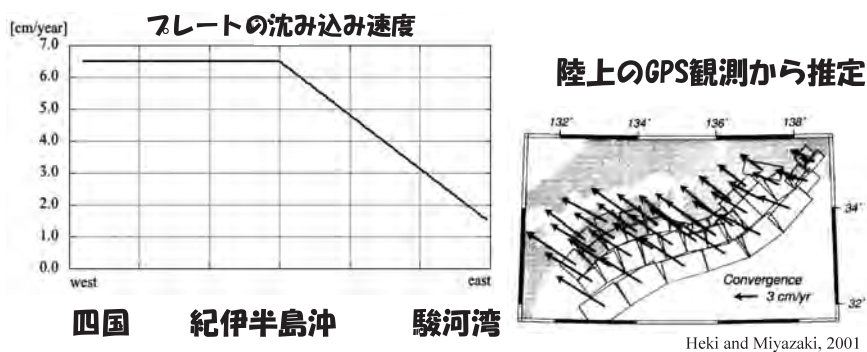
いるということも、このモデルの特徴のひとつです。

この仮定でシミュレーションを行います。図表 31 は大きな地震が起こった直後の状態で、色が濃いところは固着しています。この状態か

ら時間の経過を見たのが図表 32 です。右上の図からはバーンと割れて、すべり速度の速いところ、すなわち地震発生が見えています。このモデルでは、紀伊半島の先端で必ず割れ始めます。駿河湾では沈み込み速度は小さいのですが、

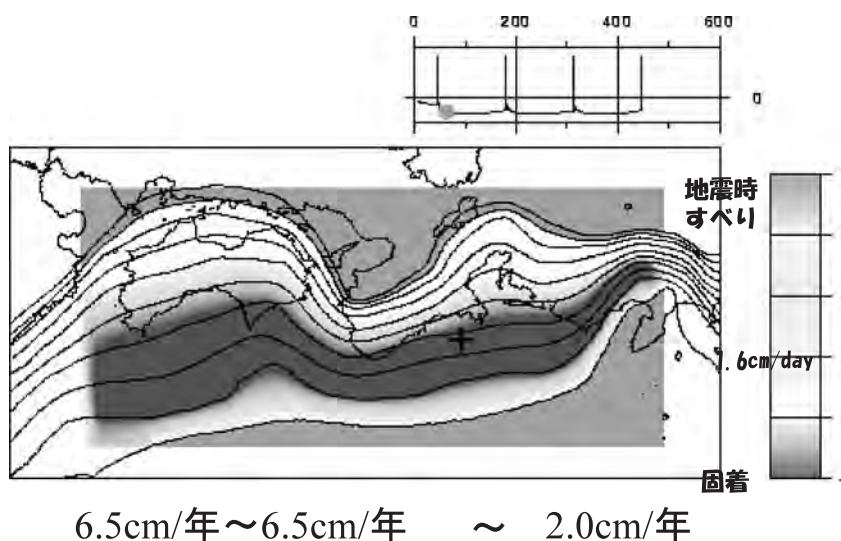
フィリピン海プレートの沈み込み速度

- 速度：東から西へ速度が増加
- 収束方向：N55° W (Miyazaki and Heki, 2001)



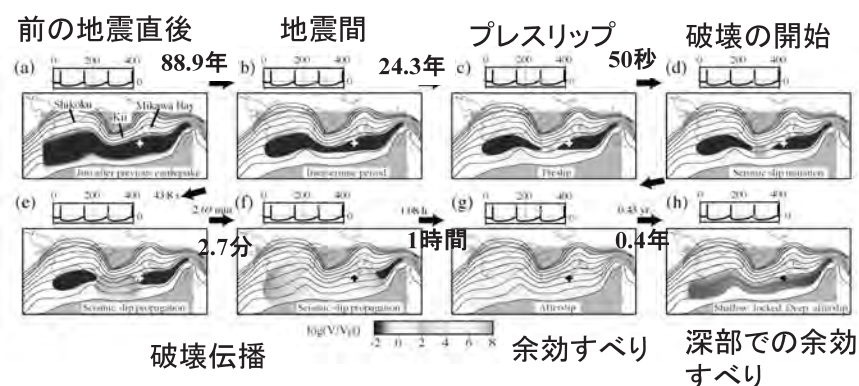
図表 30

シミュレーション結果 (摩擦パラメータ横方向均質モデル) : すべり速度分布



図表 31

1サイクルにおけるすべりの発展



**破壊の開始は絶えず紀伊半島沖！
全領域が破壊！**

図表 32

このモデルは必ず最後まで一気に割れて、割れ残すことはないようです。これでは本物とはかなり違います。

この経過（図表 32）をよく見ると、前の地震の直後（左上の図）では固着域の幅が広い。ところが時間がたってくると、その幅がだんだん狭くなっていく。上と下（浅いところと深いところ）がズルズルとすべりが進行して、真ん中でパシッとぶつかって、プレスリップを起こすといった特徴があります。これが本当かどうかは議論の分かれるところで、すべりだけを考慮した摩擦を用いると少し違うのですが、今回のようにすべり速度を考慮した摩擦を用いると、こういう形で地震を起こします。それから、先ほどお話した余効すべりも少し起きていて、深いところでは1年くらい続きます。まとめると、このモデルは破壊の開始が常に紀伊半島沖で、東海・東南海・南海地震の全領域が必ず破壊するという事です。

不均質の導入

今度は少しバリエーションをつけようということで、横方向にパラメータを変えてみました。そうしないと、南海地震、東南海地震、東海地震セグメントに対応した起き方を作れそうにないのです。ではどうしたらいいかということで、地震探査などの結果をいろいろ検討しました。また、JAMSTEC（海洋研究開発機構）は海底の探査をしています。

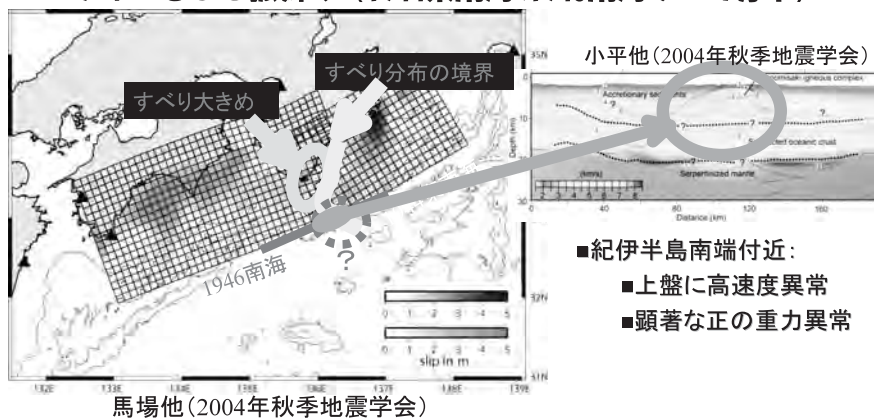
図表 33 は馬場さんという人が、津波の解析から東南海地震と南海地震のすべり量を求め、図に示したあたりに2つの地震の境界がありそうだと述べています。また紀伊半島南端にすべり量の大きなところがあります。

もう一つ（図表 34）、左図中の楕円付近を探索しますと、地震波速度の遅い場所があるのです。これも変だということで、モデルに考慮します。このへんは、地震探査をすると、スラブ内のマンタルのところに反射とか、変なものがあるようです（右図中の楕円）。

東海沖では、海底地形でも見えていましたが、

不均質①-1

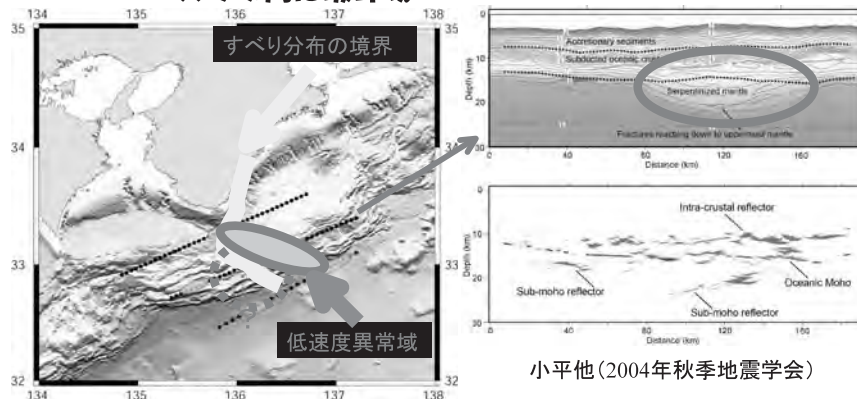
①-1: 紀伊半島南端付近に破壊エネルギーの大きい場所
 東側の破壊の際にバリア、西側が破壊する時にアスペリティとして振舞う (1944東南海&1946南海すべり分布)



図表 33

不均質①-2

①-2: 紀伊半島沖に定常すべり域
 スラフ内にマントル低速度異常域 & 多数の反射面
 →スラフ内に破碎域→weak zone



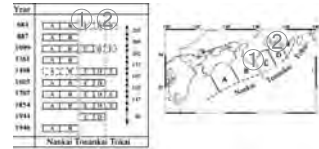
図表 34

非常にガタガタしています (図表 35)。下がプレートで、でこぼこしているものは一緒に沈み込んだ海嶺らしい。これは鷲谷さんが求めた固着域とも場所が合う。こういったものを考慮して、横方向にもくっつき方を変えてみます (図

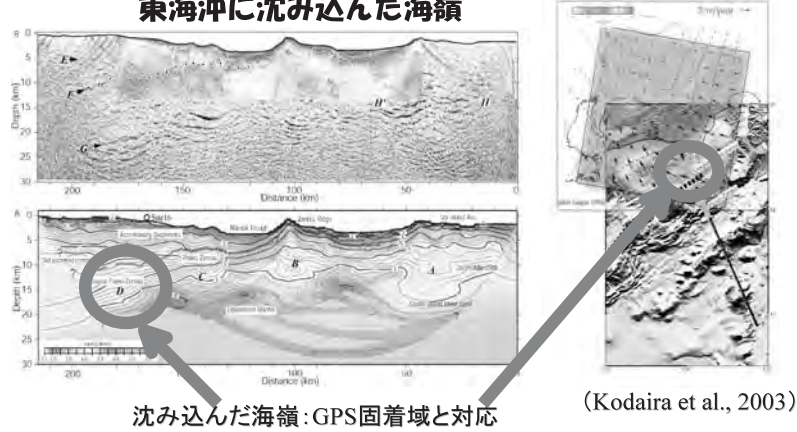
表 35)。今のようなくっつき方を紀伊半島沖と東海沖に入れます。

どうやるかという、図表 36 左図に示すように、紀伊半島沖では同じ深さでも $\sigma(a-b)$ を負の大きい値にしてある。こちら (その右下

不均質②

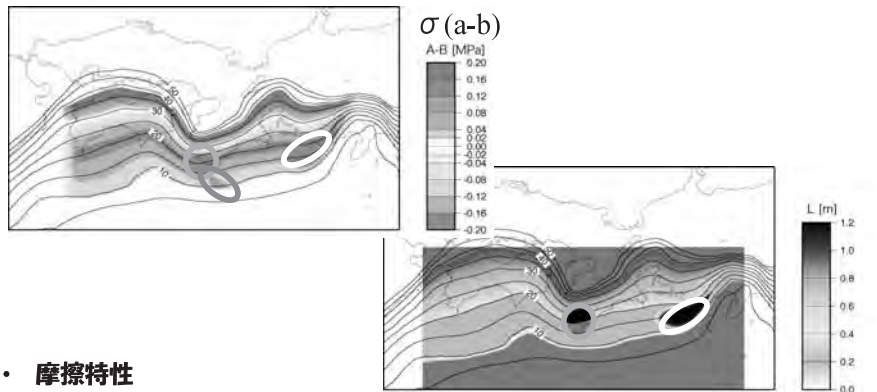


②東海への破壊の伝播に対するバリアの存在 東海沖に沈み込んだ海嶺



図表 35

モデル設定



- 摩擦特性
 - フレート境界深度に依存
 - Deformable backstop (9km) 以浅は常に定常すべり
 - 深部 (20km以深) でLが急激に増加
 - 小規模な不均質 (仮説+α)
 - バリア/アスペリティ: 有効法線応力 (+200MPa) とL (最大で5倍)
 - 定常すべり域: $b = 0$

図表 36

の楕円)は浅いところに地震波速度が遅い部分があったので、 $a - b$ を正にして、ズルズルすべりそうな性質を与えます。さらに東海沖の白い楕円では海嶺が沈み込んでいて、でこぼこの引っかかりが多そうです。それから軽そうです

から、浮力でギュッと押しつけている力が強く、 σ が大きいと考えることができるので、こも負の大きな $\sigma(a - b)$ を与えます。図表36右図のLというのは、今まであまり触れませんでした、Lを大きくすると割れにくくなります。

それからバリッと割れないで、ズルズルと割れる。先ほど注目した場所には、Lも周囲と違う性質を与えました。これらの設定は絶対的なものではありません。例えばこんなことをやってみると何が起こるかということのためしにやってみるわけです。

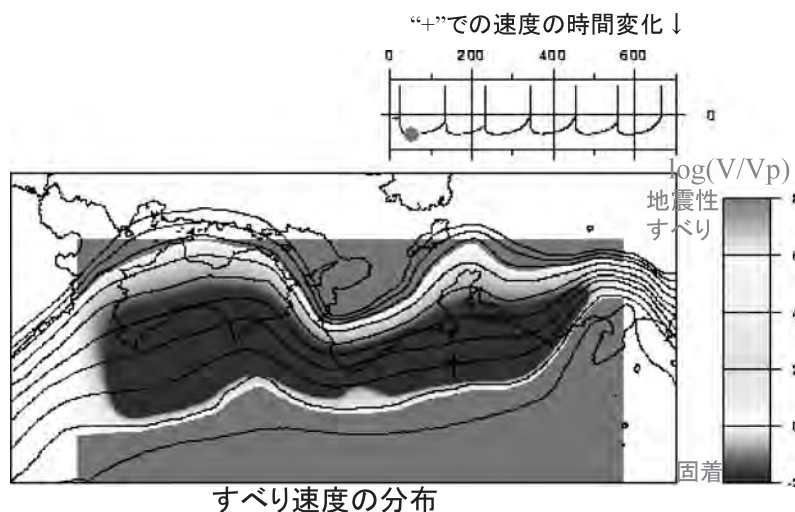
図表 37～38 がその結果の一例です。図表 37 が前回地震直後の状態です。その次の地震（図表 38 の上段）では東海が割れ残っていますが、110 年後の次の地震（中段右）は割れます。時間の経過に従って割れる場所が変わり、現実に近いセグメントらしきものがあります。この結果は絶対的ではなく、さらに構造の探査が必要です。それでも、このように、現実に近い結果ができて、めでたしめでたし、何とかこの1月の地球シミュレータの報告会に出られました。

このモデルは、考える要素がたくさんあるのですが、いろいろなことが再現できています。紀伊半島沖で破壊が開始しているのは、先ほどの固着域の幅が狭いところに対応します。一度

にまとまって割れるセグメントは、紀伊半島の先端で必ず分割され、また東海沖でも分割されるようになっていきます。つまり、それぞれの地震が起こるべくして起こっているのです。面白いのは、起こり方の間隔がいろいろなばらつきをすることです。こちら（図表 38 中段右の東海・東南海）が起きて6日後に南海が起こる。ところが図表 38 下段では東南海の91日後に南海。これには何が作用しているのかが分からなくて、東南海と南海の時間のずれというのはやれば出てくるのですが、なぜこうなるのかというのは非常に微妙なところがあります。

シミュレーションの結果を時間経過でまとめて、実際の地震発生と並べて書いてみます（図表 39、左が実際、右がシミュレーション）。シミュレーションで、いちばん上は東海は起きていません。東南海が起こって、26日後に南海が起きています。95年後に今度は東海・東南海が同時で、69日後に南海。さらに112年後は東海が起らず、東南海と南海が同時。それから109年たって今度は東海・東南海が同時

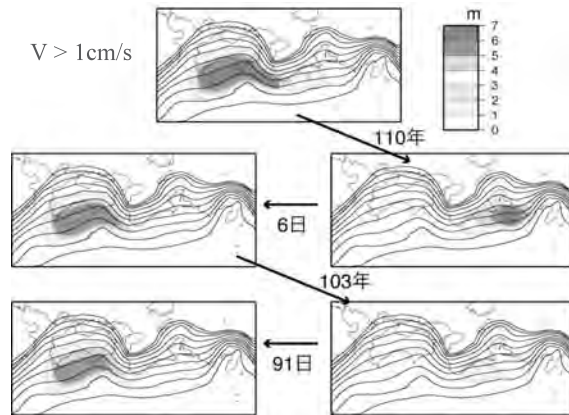
不均一モデルによる地震発生サイクルシミュレーションの一例



図表 37

不均一モデルシミュレーション結果

■地震性すべり分布



- 紀伊半島で破壊が開始し、セグメント分割、東海の割れ残りが再現
- 地震時のすべりの広がりや発生間隔がサイクルごとに変化する

図表 38

で、6日後に南海。次は最初と同じで東海が起これらに南海→南海。一番下のように、たまにバリッと全部割れることもある。これは少ないのですが起きます。このようにいろいろなバリエーションができます。

より実的なモデルへ

この調子でいって、ぴたっと合うようなモデルができるかという、すぐには難しい。去年は京都議定書の計算が優先されて、半年間ぐらいは全部気象が使ったので、時間待ちをし

セグメンテーション化と破壊の連動 シミュレーション

Year	南海	東南海	東海	年	間隔	南海	東南海	東海
684	A B	C D E		135.4	26日	×	○	×
887	A B			135.5	95.2年	○	×	×
1099	A B	C D E		230.7	69日	×	○	○
1361	A B			230.9	112.5年	○	×	×
1498	A B	C D E		343.4	109.6年	○	○	×
1605	A B	C D		453.1	6日	×	○	○
1707	A B	C D E		453.1	103.0年	○	×	×
1854	A B	C D E		556.1	91日	×	○	×
1944		C D		556.3	110.8年	○	×	×
1946	A B			667.1		○	○	○
Nankai Tonankai Tokai								

図表 39

ていた関係で、これを我々はまだ3回ぐらいしかシミュレーションできていないのですが、とりあえず、図表40のような検討をやったのです。この前にたくさんモデルがあるのですが、計算が十分ではないので、あまり理解できていないところがあります。

プレートの角度が急で固着域の幅が狭くなっているところは、ちょっとすべっただけで応力解放が大きくなります。つまり応力の蓄積が大きいということで、紀伊半島南端付近から割れます。プレートの速度を場所によって変えているのも少し効いています。割れはじめると、今度は紀伊半島南端のやや左がさらに西側への破壊を阻止するようになり、東南海の領域で割れはじめるのです。同様に、東海沖も破壊が東の駿河湾へ行かないようにせき止めています。東側へのバリアとして2回に1回破壊するぐらいというような感じです。これもさじかげんで、これもものすごくつげるとなかなか割れないのです。これも実際いろいろやってみてこういうものができます。サイクルごとの繰り返し間隔

が少し違うものも微妙にできます。

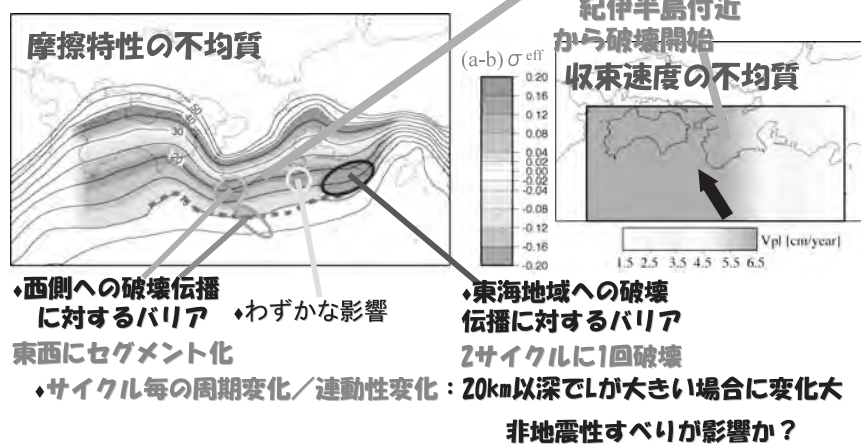
実は深いところでLも増やしているのです。そうするとこの辺で地震の前に非地震性すべりというのが起こるのです。これが起これば、このモデルだと予測は可能かもしれない。観測をすれば分かるかもしれませんが、まだ十分に検討できていません。ここのところの割れ方が最後まで効いている。前回どういう割れ方をしたかというので次が決まってくるシステムのようなのです。

ただ、計算結果のデータを全部残したつもりですが、容量が多くてじっくり見れていないのです。こういうものを詳細に解析すると、ひょっとしたら次の東南海地震へどういう観測をしたらいいかというのが提言できるかもしれません。非常に簡単なシミュレーションといってもすごい計算ですが、まだ十分ではありません。今のところ言えそうなことをまとめると図表41のようになりますが、多分間違っていないと思います。

1つめは、毎回、紀伊半島沖で割れはじめる

議論

・導入した不均質性の影響



図表40

ということです。我々は1944年・1946年の地震の一回しか知らないのですが、その前も多分そうだったのではないだろうか。これが（古い地震に関しても）震度分布などで分かればいいのですが、おそらく、四国の沖から割れたことはなさそうな気がします。

2つめは東海地震が単独で起きるかという問題ですが、これは駿河湾での沈み込み速度が紀伊半島以西の半分くらいということと、ブレーキとなるような海嶺の沈み込みの影響があります。東海セグメントというのは基本的には毎回割れる必要はなくて、2回に1回で十分のようです。

それでは、今言われている東海地震というのはどうなのだろうか。多分、東海地震単独では起きないのではないか。次も恐らく紀伊半島の先端から割れて、勢い余って必ず駿河湾まで達するだろうと思います。このような安政タイプの地震か、それとも宝永タイプのように南海も含めて全部が一度に割れるか、そのどちらかであろうと思います。そのときには駿河湾の割れ

残しは多分ないと思います。

ただ、このモデルはまだにせものです（図表42）。全く単純化していますので、まずプレート境界の形（三次元形状）を入れていません。これを入れると、実は K （すべり応答関数）が変わってくるのです。ただ、幅がかなり効くというところは今の平面モデルでも考慮していますので、結果は大きくは変わらないと思います。もう一つ考慮すべき点である粘弾性についてはあとで説明します。

我々が目指しているのは、過去の巨大地震の発生時系列に合うように、横方向の摩擦パラメータを変えるということです。観測がないと無理です。ですから地下探査をして、例えば速度構造が遅ければ $a - b$ を正にしようとか、そんなことを考えながら徹底的に探査をしないといけない。そうすれば、恐らくこの地震は再現できるでしょう。ただ、津波地震というのが発生したこともあるようですが、これは難しそうです。

いろいろ横方向の摩擦パラメータを変えて、

単純な南海トラフ巨大地震シミュレーション：今のところの言えそうな事！

1) 紀伊半島でのPHSの高角沈み込み



応力蓄積レートが大



紀伊半島沖で破壊が開始

2) 駿河湾での低沈み込み速度 + 東海沖での海嶺の沈み込み



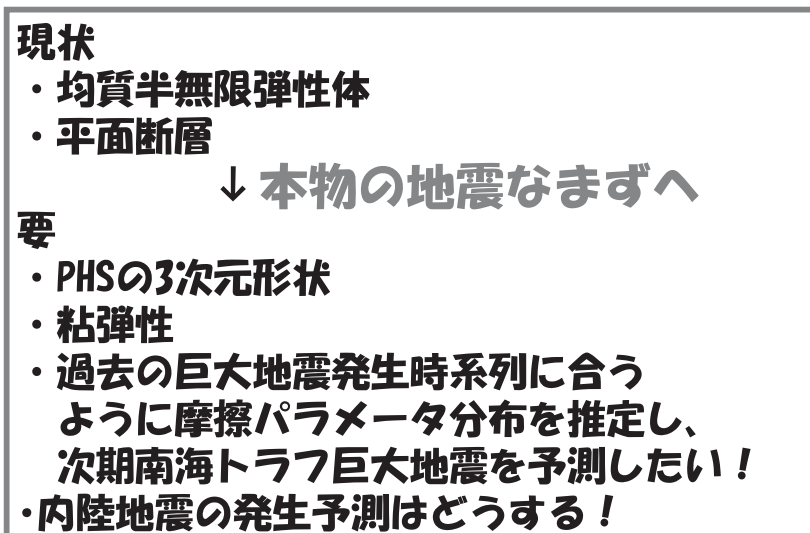
東海セグメントは毎回破壊する必要は無い

東海セグメントで破壊が開始する？

いわゆる東海地震???

図表 41

ただ！ まだまだにせものなまずモデル



図表 42

過去の時系列をある程度説明できるようにして、次の地震を予測する。これはいつごろ完成すると言われると、私の時代には多分無理で、次の世代の人が完成してくれると思っています。それは、地球シミュレータを使っても例題がほんの少ししかできないのです。この大きなシステムですっとやっている限りはたくさん（のケースの検討が）できないのです。それが問題です。だから個人で地球シミュレータを動かせるようになればいい。そういう時代はすぐ来ると思います。計算機の進歩は異常に早いものです。10年たてば全く違った世界になっていますから、地球シミュレータが僕の机の上で動いている時代が来ると思います。一家に1台地球シミュレータというような時代が来れば、いろいろな人が研究をやって、いろいろなアイデアを持ち込んでくれれば、予測ができるかもしれません。

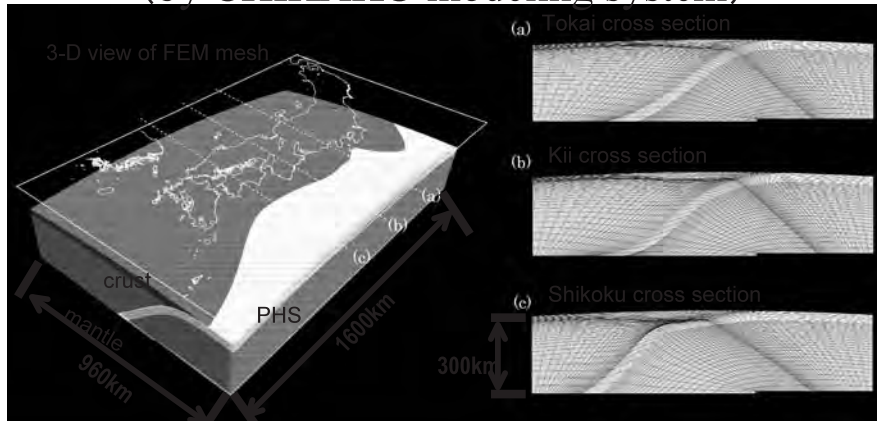
また、最初の設定でちょっとした状態を変えると、そのあとの現象が全然変わってくるのです。最初に非常に近いパラメータを与えても、

長い間で全然違った地震発生パターンになるので、検討はけっこう大変で、そう簡単ではないのです。

さらに「内陸地震の発生予測はどうするか」。これは全然手をつけていないのですが、日本でもいろいろな人がぼちぼちやろうかなと言っています。僕も実はこちらのほうが大変だと思うのです。南海トラフの地震では、紀伊半島から割れようと、東海から割れようと、名古屋は同じぐらい、せいぜい震度6弱で、バリッとすごい揺れが来るのではなくて、ゆっさゆっさと来る地震ですから、「そんなに怖くない」。脅しすぎているので最近ブレーキをかけようとしているのです。名古屋あたりですと、むしろそれよりは内陸の地震のほうがはるかに怖いのです。これはどこで起きるか全く分からない。どの断層が危ないかというのも分からない。これが次のターゲットになります。

今度は形を入れるというので、大規模な有限要素法モデルを作り、図表 43 ができたところです。これはちょっと動かすといろいろなとこ

西南日本FEMモデル (by CHIKAKU modeling system)



- 10kmメッシュ → ES上でプレート境界面を1kmに細分化**
→ 粘弾性3次元モデルですべり応答関数を計算
→ 摩擦構成則と組み合わせですべりの発展をシミュレート
今年度実施予定！

図表 43

ろで引っかかって動かないのですが、今年これをシェイプアップして来年度ぐらいからやろうとしています。

弾性から粘弾性へ

粘弾性という話をします。弾性でバリッと割れる性質ばかりをやりましたが、内陸の地震との相互作用を考えるとこれではだめです。上部地殻というところだけは弾性体で、あとは粘弾性体という、バネのほかにダッシュポット、つまりネバネバしたものが入っているような性質を持ちます。特に温度が高くなるとヌルッと動く（図表 44）。

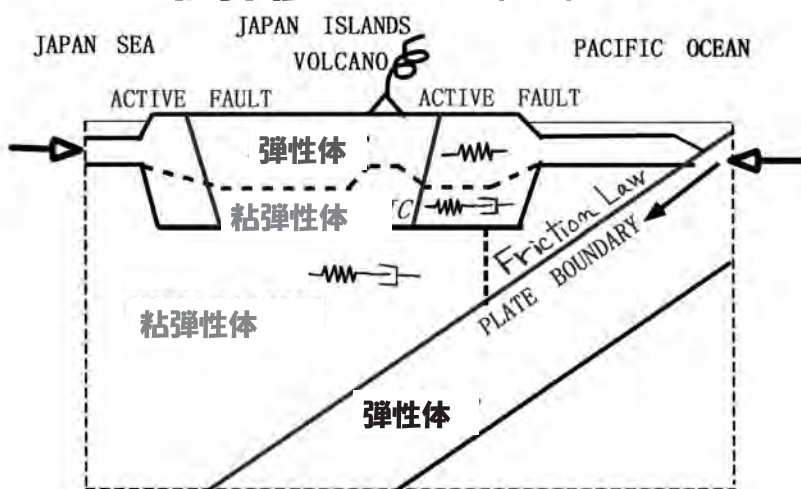
例えばバネとダッシュポットを入れて、 u という変位を与えますと、バネがキュッと伸びて、時間がだいぶたってダッシュポットが動く。つまり時間履歴の影響を受けるようになり、過去をどんどんさかのぼって影響を受けるというややこしいことになります。

図表 45 は、有限要素法に粘弾性でネバネバと動くものを組み込んだモデルの例で、その結

果が図表 46 です。一見シミュレーションできているように見えますが、これはプレートを沈み込ませて、あるときいっせいに地震が起こるように時間を指定して起こしているのです。そのときに日本列島がどう動くかというのが図表 46 左図で見えます。

1707 年からの 3 発の地震をやってみたのが図表 47 です。これは神戸の地震の断層にかかっている力の変化を示していますが、地震が起きてだいぶたってもとに戻ることがわかります。弾性体ではすぐにもとに戻りますが、粘弾性体では、ある程度同じ方向に動いてからもとに戻ります。将来的には摩擦構成則を入れて、時間を指定しないで、バーンと地震が起きて地面の変形も粘弾性を入れて計算します。こうやって内陸での応力を測ってみますと、これが面白いのです。地震を起こすときにどういう力が要るかということですが、普通横にギュッと横にこすっている力だけを考えますが、実は面を押しつけている力の変化も必要です。この最たるものは、神戸の地震です。これはむしろほとん

弾性から粘弾性へ 粘弾性って？ (1)



図表 44

粘弾性の影響：西南日本 運動学的シミュレーション

★仮定

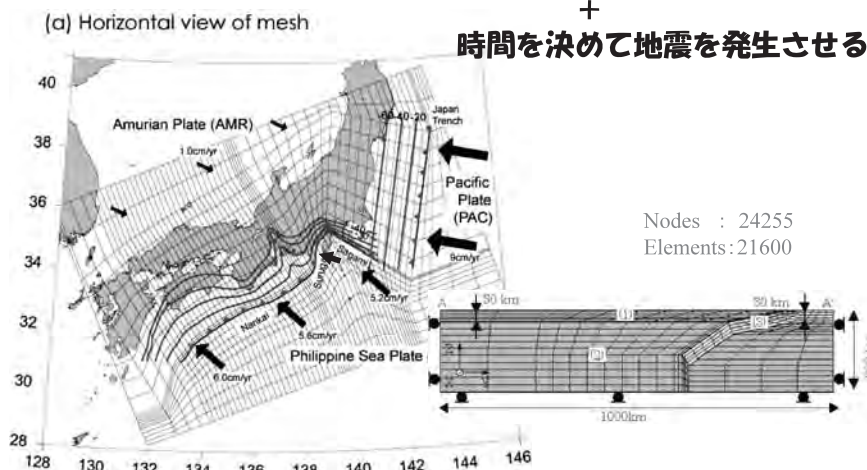
PHSの沈み込み

固着域：6-30km

沈み込み速度：2-4-6cm/yr

+

時間を決めて地震を発生させる



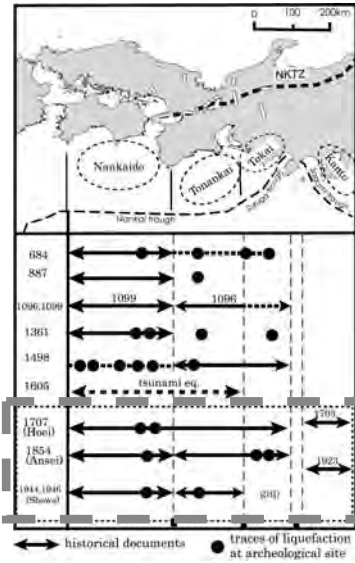
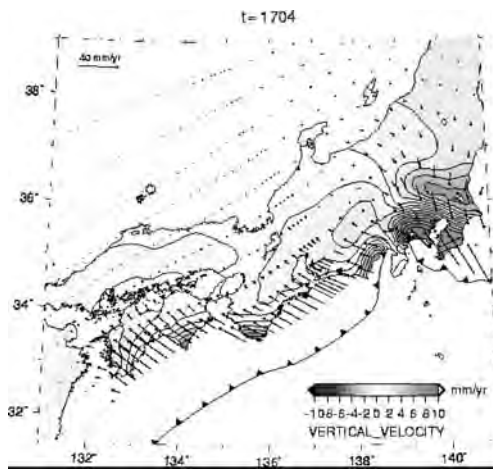
図表 45 兵藤・平原 (2004)

ど押しつけている力の変化だけで起こすことが可能です。もちろんもともと横に押すものがないとだめですが。

図表 47 のグラフを見ると面白いのですが、これは引っ張りの変化をプラスにしていますの

で、地震が起きると今までの反対の引っ張り側に跳ね上がります。青は法線応力、つまり断層を押し付けている力ですから、その変化が引っ張りになるということは断層が滑りやすくなる。ですから南海トラフの地震の発生が、神戸

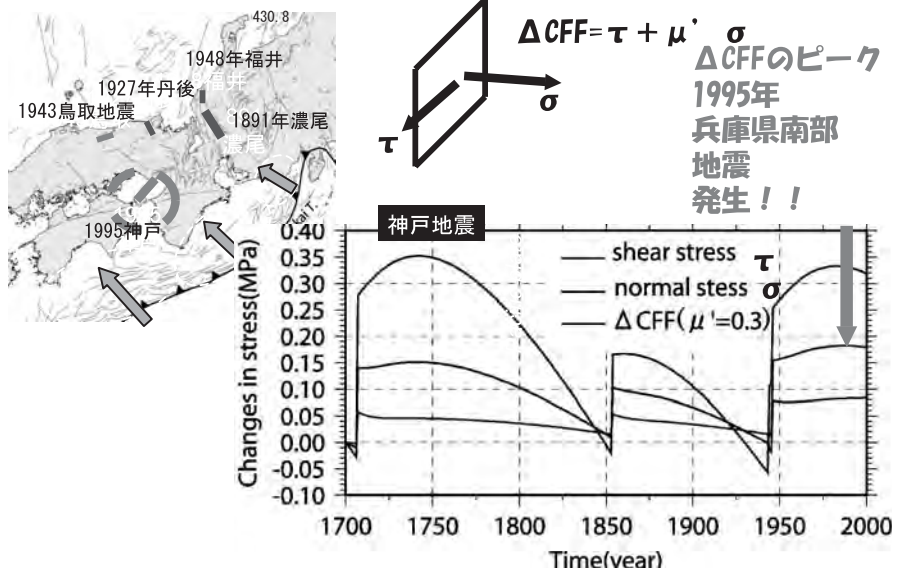
粘弾性地震サイクル シミュレーションイメージ



運動学的シミュレーション

図表 46

内陸地震発生予測に役立つかも！ 南海トラフ地震サイクルに伴う ΔCFF



図表 47 兵藤・平原 (2004)

の地震を起こしやすくするのです。プレートはすぐにひっつくのですが、粘弾性のために、しばらくの間は地震時と同じ方向に動いている。ですからその間は法線応力は引っ張る方向に行きますので、どんどん地震が起こりやすくな

る。やっこの辺（地震の中間で極大になるところの右）からプレートが押している効果が来てずっとまたくっついていく。法線応力だけではなくて断層を滑らせる力も加えた ΔCFF の値について、1944年、1946年の地震が起きて

だいたい、1995年辺りにちょうどピークになっているのを見ると、神戸の地震の発生予測ができた(?)。

ひょっとしてこういうことで説明できるのであれば、内陸の活断層というのはいつ起きるかは分かりませんが、1944年、1946年から次の地震までのように、南海トラフの地震が起きてから次の地震が起きるまでの地震サイクルで、内陸のどこの断層が今いちばん危ないかというのが分かるということになります。ただ、これはけっこう微妙な形が効いてきますので、神戸の地震以外、たとえば濃尾地震では全然説明できなかったのです。いちばんうまくいった神戸の一つの例だけでは、そう甘い話ではないのですが、ただ、希望はちょっと持てます。

このように、内陸地震をシミュレーションに入れて考えるのは大変ですが、南海トラフの地震によって押され方が変わったりするということによって、今、例えば1944年から次の地震までの間だといつ頃が危ないか、この時期に起きるとすればこの断層が割れる、次はこれが割れるということが分かるかもしれないと思っています。これは構造とかがきっちり分からないと難しいのですが、次にやりたいことの一つです。

過去の地震から

図表48は福和先生から頂いたものです。ここで強調したいのは、南海トラフの地震というのを予測の対象にしているわけですが、それより怖いのは内陸の地震です。これは有名な図ですが、南海トラフの巨大地震の前後に内陸の地震が活発化します。最近の地震をプロットすると嫌になるぐらいに増えています。最近10年は多いと言っていますが、これを見るといまだかつてないほど多いことが分かります。

これはなぜなのか？ 不安をあおるだけです

が、多分この調子でいくと、次は近畿とか中部地方でも一つぐらい内陸で起きるかもしれない。どうなるかわかりませんし、注意のしようもない。結局、耐震対策をする、これよりほかありません。

強震動シミュレーション

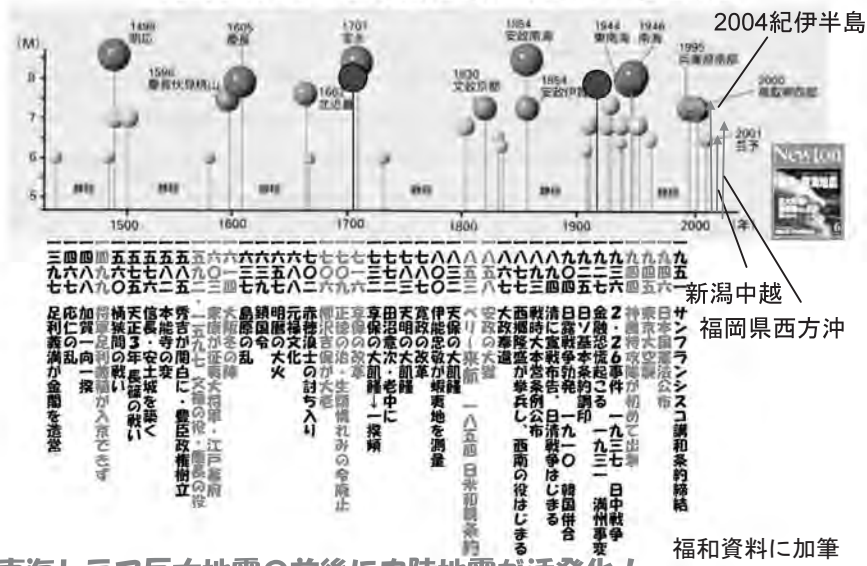
今、地震発生の予測はこのように厳しいので、せめて揺れの予測だけでもしようというプロジェクトが進んでいます。いつ起きるかではなくて、起きたらこう揺れるという予測です。

図表49は東大の古村さんが地球シミュレーターを使って予測したもので、東南海・南海が連動して発生した場合の揺れの様子です。大規模な地震の揺れはもともと周期の長い成分が多く、名古屋は濃尾平野の堆積盆地の影響もあるので、長周期の揺れが長い時間続きます。名古屋や大阪は地震発生から40秒後ぐらいに周期3～5秒ぐらいの波がゆっさゆっさと来て、30階～50階といった超高層のビルを大きく揺する。このような揺れの予測や防災対策のために、愛知県とか三重県は平野の地下構造探査をして、モデルを今作ったところです。古村さんの計算には、まだ細かい地下構造は入っていないので、そういう細かい構造を入れますと、もう少し詳しく揺れの分布が分かります。

せめて揺れる前に

今のところ、地震の発生予測といわれても使えそうなものはないということは分かったと思います。コンピュータで遊んでいるだけではないかと言われてもしょうがないのですが、では、せめて大きな揺れが来る前に分からないのか？ 最近、これを知らせる緊急地震速報が登場しました(図表50)。ナウキャストともいい地震が発生した直後に、まず震源に近いところの揺れから震源位置とマグニチュードを推定し

過去の地震と歴史の変化



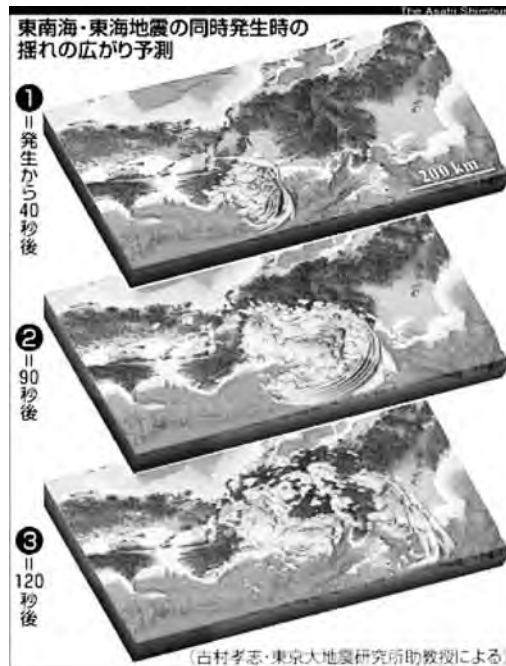
図表 48

東南海・東海地震同時発生時の揺れシミュレーション

強い揺れは主に東の方向に伝わり、約40秒で名古屋、50秒後に静岡・御前崎を通過。揺れ自体は拡散するほど弱くなるが、約100秒後に到達する関東平野では、軟らかい堆積(たいせき)層の影響で6~10秒という長い周期の揺れが増幅され、揺れは3分以上続く。ゆっくりとした「長周期地震動」で、超高層ビルや大型の橋などに被害を与える可能性がある。

一方、名古屋・大阪に揺れが伝わるのは約40秒および50秒後で、3~5秒周期の揺れが2分以上続く。

asahi.com

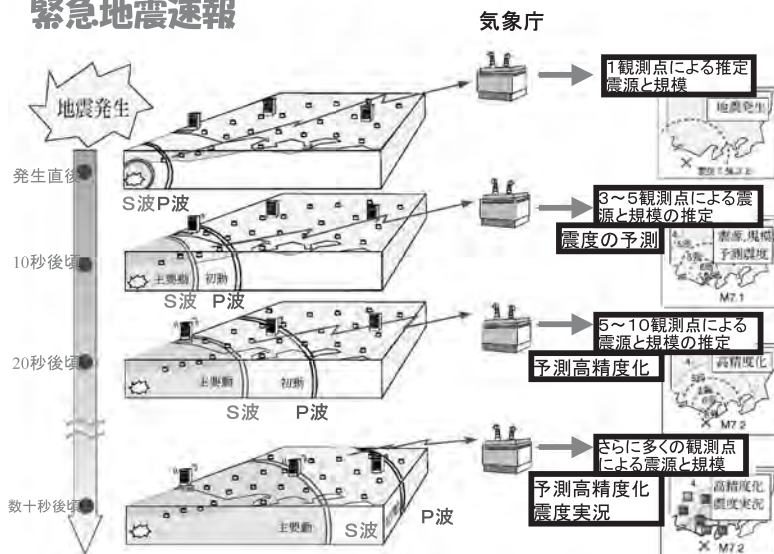


図表 49

て、遠方の地点へ地震波が伝わって来る前に警報を送って知らせようというわけです。たとえば東海地震の場合は、名古屋では、強くゆれる20秒とか40秒くらい前に警報を出せることになります。

名大では林さんがシステム開発をやっていますが、平成16年9月の紀伊半島の地震のときは実際僕もこの威力にびっくりしました。本当に来る前に分かったので、ある意味快感ではありました。ただ、このシステムの重要な点は、

ナウキャスト：大きな揺れが来る前に知らせる 緊急地震速報



図表 50 気象庁

揺れ始めても、大きな揺れがないということは分かっていたから安心して地震波の到来を待ち受けることができたという点です。

新聞報道によると、実際にナウキャスト（緊急地震速報）を使ったシステムを一般家庭に普及させようとしている、とのこと。電子情報技術産業協会が173戸を対象に地震発生情報を伝える実験をスタートし、恐らくこのシステムはあと2～3年後には実用化すると。そんなに早くできるかどうか分かりませんが、少なくとも名古屋だと東海地震、東南海地震のときかなり有効だと思います。医療とかそういうところに是非使ってほしいと思っています。

最後は少しはしよりましたが、税金を使って今行っている、無駄づかいかもしれませんが、ちょっと希望があるような気もする、地震発生および揺れの予測にまつわるお話でした。

(司会) 平原先生、面白いお話をありがとうございました。地震のことを面白いと言うとしかれますが、やはり地震が面白いというのは、

分からなかったことが分かるようになるから面白いのです。しかも分かりかけてきたときがいちばん面白い。

(平原) ただ、分かりかかったら、さらにその倍以上分からないことがあるというのが普通ですが。

(司会) そういうことで時間をうまく残してくださいましたので、何なりとご質問をさせていただいて、平原先生にお答えいただきたいと思います。今のお話に対していかがでしょうか。

(質問者1) ありがとうございます。今の東海地震とか南海地震の警戒宣言というのは、いろいろな異常な観測値をもとに出すと思うのですが、シミュレーションをやって、観測に異常値が出るような、例えばこういう観測をやればいちばん早く異常値が得られるとか、確実な異常値が得られるとか、そういう結果は得られるのでしょうか。

(平原) 気象庁は、東海地震のシミュレーションをやっています。起こるように設定すれば起こるのです。

それはどういうことかということ、紀伊半島まで入れなくて、駿河湾だけでやれば、深いところでするずるとすべて前兆現象が出て、東海地震が発生します。シミュレーションで発生したすべりと対応しているからどこが危ないという、かなり机上の空論に近いことをやっていると思うのですが、前兆現象をモニターすれば発生予測に役立つというシナリオです。それを実際のところに使おうとするのはかなり飛んでいると思うのですが、実際気象庁がそれをやっているのです。シミュレーションをもとに、どこが動いて、何点の観測で異常なうごきが検出されたら何とかしようということをやっているわけです。

ただ、それは一つのモデルですから、かなり危ないです。少し範囲を広げていくと全然違うことになってしまいます。彼らも今それをやっています。紀伊半島まで入れると、駿河湾で起こることは多分ないというのは彼らも知っています。ただ、法律（大震法）はどうしようもないので、5年ぐらいはそのままやって、ぼちぼち紀伊半島に変えようかなということになるのではないかと思います、分かりません。

(質問者 1) 分かりました。平原先生の理想としては、前兆現象なしに、例えばシミュレーションして、明日起こるとか、あさって起こるとか、そういうことを計算したいわけですか。

(平原) いいえ、そうではなくて、ここでお見せしたシミュレーションでは、前兆現象は出るのです。紀伊半島の沖合の深部でスロースリップが起こるのです。我々としてはこれだと思

ものがないからそんなことを言う勇気もない。似たようなものができたから、うれしいなという段階ですから、もう少し進んで、我々のグループのみんながこれなら本物らしいというものを見つければ、それを詳細に解析すれば、地震の前に何が起こるか分かる。多分このシミュレーションというのはそういう提言をするところまで行けば、大きな目的は達したことになります。当たる、当たらないというのは神のみぞ知るです。

同じ地震が起きたことはないのです。特に、最近の地震では、地震学の経験則が全部外れているのです。普通は全くシンプルにやると、全く同じ地震が起きるのです。これをちょっとだけ変えると毎回違う地震が起きますから、どこの地震を見ているか分からないので、予測というのはつらいのです。

ただ、共通する前兆現象というのは、このシステムに関しては、深部ですべりがあることです。それは小さくてなかなか観測にかからないということはあるかもしれないが、そういうシミュレーションの計算はできるので、もう少しまともなことができたなら、地震の発生予測に関して何らかの提言をできるかもしれません。

(質問者 2) 破壊の状況は固着面の幅とスリッププレートの沈み込む速さの兼ね合いで決まりますね。そうすると駿河湾のほうが幅が狭いけれども沈み込み速度は遅い。破壊開始点となるかどうかの条件が紀伊半島に近いように見えるのですが、図表 36 のように紀伊半島の沖の固着すべりの部分を狭くして、あそこに破壊開始点をはめようというところが適切でしょうか？

(平原) 一応はプレートの沈み込む角度を測って、無茶なことはしていないつもりです。

(質問者 2) 駿河湾は狭いですよね。その狭さ

に比べてもっと細くプレートが入ったら、そこから破壊が発せないといけないことになりませんか？

(平原) そういう説明をしています。実は駿河湾のところはモデルの端に近いので、このシミュレーション結果ではそこを強調してはいけないうちも知れませんが、伊豆半島までモデルに入れてどうなるか見ないと…。ただ、伊豆半島の入れ方も分からないのですが、ちょっと逃げているところもありまして、今起きないようにしているということもあります。駿河湾から割れることはこのモデルでは起こりません。

(質問者2) つまり、今のモデル化の範囲では駿河湾が端のほうにあるから表現できていない可能性があるが、伊豆半島を含む地域まできちんとモデル化できれば伊豆半島をどうやって入れていいか分からないということはあるにせよ、駿河湾だけで割れるという結果が出る可能性も否定できないということですか？

(平原) いや、それはそうでもないと思うのです。いまのところ、根拠は薄いかもしれませんが、僕は多分起きないと思います。ただ、伊豆半島をモデルに入れたとしても、どう入れるかということに議論が残るので、そこが(結果を左右する)バウンダリーになってしまいますから、それは水掛け論になってしまいます。

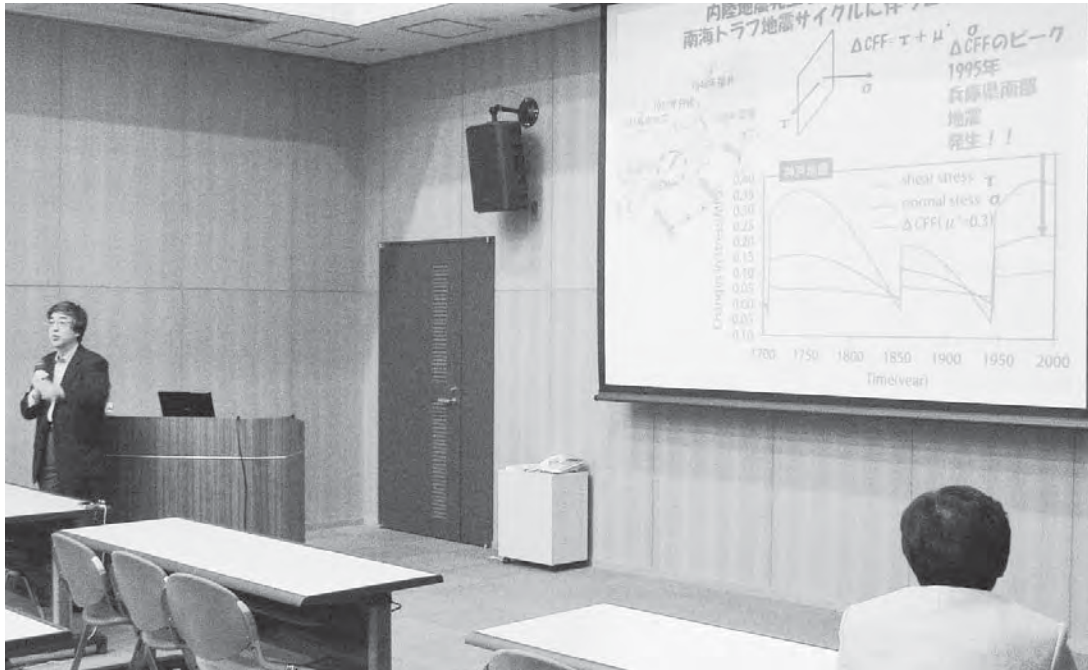
むしろ僕のほうから一般の人に聞きたいのですが、こういうシミュレーションを見られて、遊んでいるとか腹が立つとかいうことはありませんか。そういう危惧がいつもありながら研究をしているところがあるのです。おそらくこのように割れるという予測結果は、役に立つとは思いますが、これが皆さんの期待に添うほどのものが出せるものかどうか、正直なところど

うでしょうかということを知りたいのですが、どなたか初めて聞かれて感想をお持ちでしたら。

(質問者3) こういうお話は、大変勉強になるので感謝しています。神戸の阪神淡路大震災の場合は直下の活断層の地震でしたが、東南海地震では、今の先生の説明ですと、地震が起きてから強く揺れるまで時間の余裕がある。かなり早く揺れの危険を通達ができるということになるわけです。そうすると液状化で例えば防波堤とかそういうものが倒れる、津波が何分で来るということが分かるようになれば、非常に助かるのではないかと私は思います。私の住む名古屋市港区は埋立地がほとんどで、1944年のときには田んぼばかりのところ、今は埋め立てられてほとんど住宅地区になっておりますから、神戸のポートアイランドであったような液状化被害を心配しています。そういう点では、実際に地震が起こったときの揺れの伝わり方や時間、さらには被害の予測などを、シミュレーションでやっていただけたら非常に助かるのではないかと思います。

(平原) 少し気楽になりました。どうもありがとうございました。ほかにどなたかございますか。

(質問者4) こうやってシミュレーションをしていって、前兆が出そうだということが分かっている、どのくらい多くの地点でどんな量を測れば前兆を捉えることができるか。今までは、例えば気象庁はやたらに体積ひずみ計を設置して、その観測値を基準にしているのは適切か、そういう提言ができていくようになりそうですか。あるいは、そういう機器開発みたいなことを並行して進めていくようになっていくので



会場の様子

しょうか。

(平原) パラメータを少し変えたら結果が大きく変わるので、なかなかそれが本当にいいか…。でも無駄と知りつつやってほしいというのがあります。

機器開発というのはもちろん重要です。このモデルではプレスリップというのが起こるのですが、十勝沖地震（2003年）ではプレスリップは観測されなかったわけです。それは地表の観測だからとらえられなかったのか、そういうところがわからない。観測すべきプレスリップの量が小さければ、やはり地中で観測するという線で行くしかないです。それが機器開発になるかもしれません。

本当は断層面のすぐそばまで行けば前兆現象としてのプレスリップが見えると僕は思っているのですが、その量もパラメータによるのです。ここを正しく予測するというのは難しいかもしれません。ですから、いろいろなパラメータを変えてやってみて、これぐらいの範囲は確かだ

ろうというところがあればうれしいと思いますが、そのところは可能かどうかは分かりません。不可能かもしれない。

(質問者5) 学生のときに、アメリカのどこかで穴を開けて水を入れだしたら断層がガタガタと地震で揺れだして、これは怖いからということでやめてしまったということを知ったことがあるのです。それで固着すべりが起こってすべって、エネルギーがどこかへ出ていってしまって、大きいのが来なくなるのだったら、地震が起きそうなところに穴を開けて、どんどん水でも何でも突っ込んでやる。そうすると何が起きるかということ、例えば明日の午後5時ぐらいに中ぐらいの地震が起こる、また1か月後の日曜日に中ぐらいの地震が起こるということになったら、そのときはじっと覚悟をしておけば、大きな地震が突発的に来ることを避けることができるのではないか。

どこがすべるかということが問題で、名古屋の近いところがすべるのが困るなら、同じよう

なすべるところ、紀伊半島の先の辺りを主にすべらせて、そこでエネルギーを出してやったら名古屋ではあまりすべらないのではないかという考え方もできそうですが、そういう地震のエネルギーをうまく逃がしてやるというのはどうなのでしょう。

(平原) 地震の制御とって、それは地震学者の夢なのです。させていただけるなら、(させていただけるとは思いませんが、)それはだれでもやりたいのです。地震学者はそういう夢があるのです。

油田地帯で水をジャブジャブ入れたあとに地震が多発したということで、水をどこに入れるかということを中心に考えている人がいました。日本で、例えばマグニチュード8の地震を起こすのに小出しにするといいのではないかと。7だと30個ぐらい、6だと1000個要るわけです。1000個毎日マグニチュード6というのが起きる。本当にいつかそういう時代から来

るのかどうかは分かりませんか、絶えず昔から地震学者はそういう夢を持っています。予知なんてめんどくさい。起こしてしまえば絶対当たるのではないかと、そういうことができるかもしれません。

ただ、それも本当は難しいです。紀伊半島の先端はすごく深いのです。そこに高压の水を送るといのは、なかなか難しい。技術的にもかなり難しいです。それは多分いろいろなことで調べて、圧力が高まってとか…。まず聴診器を当ててどこがいちばんいいかという、そんな程度では全然話になりせん。ここはくつついていて、ここはくつついていない。それがばっちり分かっているようにならなければ無理です。ちょっと押せば動くというのがないと、かなり押さないと、これはすごいエネルギーですから、対費用効果はだめです。だからかなり分かって、もう予測もできるのと同じぐらいのレベルに達したらそれは可能かもしれません。



会場の様子

(司会) ほかにいかがでしょうか。京都議定書に関するシミュレーションのために地球シミュレータが占有されているということで、それも重要ですが、ぜひ平原先生のために地球シミュレータの利用時間をもっと割いてほしいと思います。今日のお話から、南海トラフの過去からの地震の繰り返しに近いものがシミュレーションで再現されつつあるということで、もし将来的に完全に再現すると、結局、東海地震は起こらないという話の確度が上がるかもしれません。それから、もし次に東南海地震が単独で起きてしまったら、南海地震はいつなのだろう。

32時間後なのか、2年後なのか、それによって対応のしかたがまったく変わってくる。その辺になると、本当に平原先生に答えていただくことが必要になってくるのではないかと思います。平原先生はこの秋から京都大学に戻られるということですが、この研究をぜひ進めていただいて、地球シミュレータによる研究がもっと発展することをお祈りしたいと思います。

それでは、時間も過ぎましたので、この辺でお開きにさせていただきたいと思います。今日はどうもありがとうございました（拍手）。

南海トラフ巨大地震の残された謎



安藤 雅孝

(名古屋大学大学院 環境学研究科 附属地震火山・防災研究センター 教授)

1. 南海トラフ地震

今日は「南海トラフ巨大地震の残された謎」というお話ですが、実は私には残されていない謎は一つもなく、分からないことばかりなのです。今日は、数多く残された謎の中のほんの一部をお話ししたいと思います。

今日（2006年12月21日）はちょうど、南海地震から60年目の日です。災害対策室のみなさんはそのことを知っていて、今日を設定していただいたのかと思います。

私は、今から三十数年前に南海トラフの地震のことでドクター論文を書いたのです。いろいろな古い論文、古文書などを見ると、地震の起こる場所がA・B・C・Dと分かれています。その組み合わせで、あとは繰り返しである、非常に簡単なことである、とそのときは思いました。それで、そんな論文を書いたのです。書いたときに、最後に残っている場所があるのでDというのを作り、東海という名前をつけたのです。

何年かたったあとに、「Dの場所は違う。東海地震はもっと駿河湾の中だ」と言われたのですが、私はこれを書いたあとアメリカに行って、全く違うことをしていました。私がちょうどアメリカにいるときに、東海地震という話が出てきたのですが、その後、南海トラフとはあまり縁がありませんでした。

ただ、10年ぐらい前から、やはり、またもうじき来るのではないかということで、もう一度考え直して海底地殻変動測定装置を開発する

ことを始めました。これを造るにあたって、名古屋大学にそういうメンバーが多かったので京都から移らせていただき、今、とてもいい成果が挙がっています。

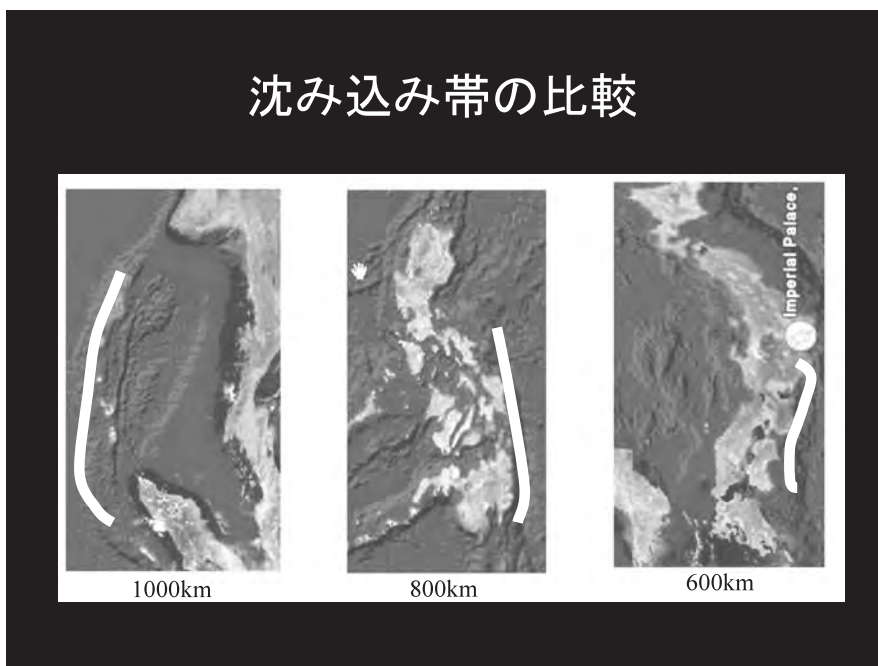
博士論文を書いていた当時は、自然は美しく単純であると思い込んだのですが、実はそんなに単純なものではなくて、最近はいかに複雑であるかということも分かってきました。今日は、その一端をお話ししたいと思います。

南海トラフの巨大地震は、人によって数え方が随分違いますが、1か所で見ると9回ぐらいは繰り返しています。9回も繰り返している場所は、古文書などで知ることができる人間の歴史上、世界のどこにもありません。歴史は中国が古いかもしれませんが、繰り返しは1回か2回でそれきりです。9回も繰り返しているのは日本だけですから、大変珍しいところで、資料も最も豊富です。

今日お話しするのは、日本列島周辺のプレート境界のほんの一部です。長さになると600～700kmで、世界地図から見ると本当に点のような場所ですが、我々の生活からすれば非常に大きな問題を引き起こす場所です。

図表1の左は2004年12月26日に起きたスマトラの地震、真ん中はフィリピン海溝で起きた地震、そして右が日本でこれから起こると言われているものです。規模でいうと、日本のものはずっと小さくて、自然現象としては決して大きいものではないのですが、近くに非常に大

沈み込み帯の比較



図表 1

きな人口密度を抱えた大都市があるということで大きな問題になるわけです。

図表2を見ていただきますと、海底に南海トラフがあって、プレートが沈み込んでいる場所で地震が起こります。

地震が起こる場所の東側を東海地震ということをご存じだと思います。本当は東南海と東海をあわせて一つで東海と言ったほうがいいかもしれませんが、現在ここに分けてあるのが、東南海、東海、南海と3つあります。これが震



図表 2



会場の様子

源域です。3つあわせると長さは600km。もうちょっと長く取って、九州まで延ばすこともありますが、せいぜい700kmぐらいです。

2. 歴史の大切さ

次に歴史の話をしていきます。歴史を見ないと、地震のことは絶対に分かりません。なぜかというと、地震計やいろいろな機械を使った観測の歴史は、せいぜい100年くらいしかありません。複雑な要素が絡み合う地震では、100年では短すぎるのです。いろいろな現象を100年では再現できないのです。

もちろん地震発生のモデルや理論はたくさんありますし、一生懸命やっている分野はいっぱいありますが、こういうことをするにも過去のことを知らなければ全く無理です。頭で考えてモデルや理論を作って、地震現象を予測することはできないと私は思います。

地震を研究している人は地震学者だけかと思うと、意外とほかのことをやっている人もいます。電気学会に地震予知委員会というものがあります。ここには地震学者と称する人はいませ

んが、時々面白いことを言われます。

昔の宇宙航空研究所のかたが「地震学者は、知識や経験ばかりで頭をあまり使わない。昔のことばかり言っている。我々の世界では、10年前の話は絶対に役に立たない。だから、知識や経験は要らない。我々は頭が9割、経験と知識は1割である。地震学者は経験と知識が9割、頭は1割である」という話を講演でしていたのです。

そのあと、懇親会で「あれはちょっとひどすぎるのではないか。大体、こんな複雑な現象を解明するには頭だけではだめで、経験や知識も必要なのですよ」と話したら、「あれは大変申し訳なかった。間違えました。我々は頭が8割、経験と知識が2割です」と1割だけ変えましたが、そういう分野だけにいると、そう思ふかたもいらっしゃると思います。

いくら頭ばかりを使っても、やはり我々は過去のことを知らないと、とても無理だと思います。100年というのは本当に短い。200年、300年見たらそれで十分かということ、これも足りないのです。なぜかということ、スマトラ沖の地震

は、推定では1000年は起きなかった可能性があるのです。100年、200年、300年見て、「ここにはあんな地震は起きません」という結論は幾らでも出てくると思いますが、もうちょっとたつと、あんなに大きい地震が起きたわけで、あれは頭だけでどんな理論を作ったところではなかなか推定できないと思います。やはり過去のことを知らないと、未来のことはとても作れないだろうと私は思います。

そこで南海トラフの巨大地震の歴史について話をします(図表3)。プレートが、引きずり込まれては跳ね返るということをして作ってきた歴史がまとめてあります。684年がいちばん古くて、いちばん新しいのが1946年の南海地震です。

古い文書から昔の地震を知るためには、手掛かりが必要です。南海トラフで地震が起きたことを知る条件とは何でしょうか。まずは広域で津波があるというのが1つめの条件です。2つめは、広域で強い揺れがあるというのも条件です。3つめは地下水の変化、多くは温泉の変化

です。道後温泉、湯峰温泉、井戸水がかれたという記述もけっこう使えます。そして4つめは、地殻変動で隆起したとか、沈降したということ。

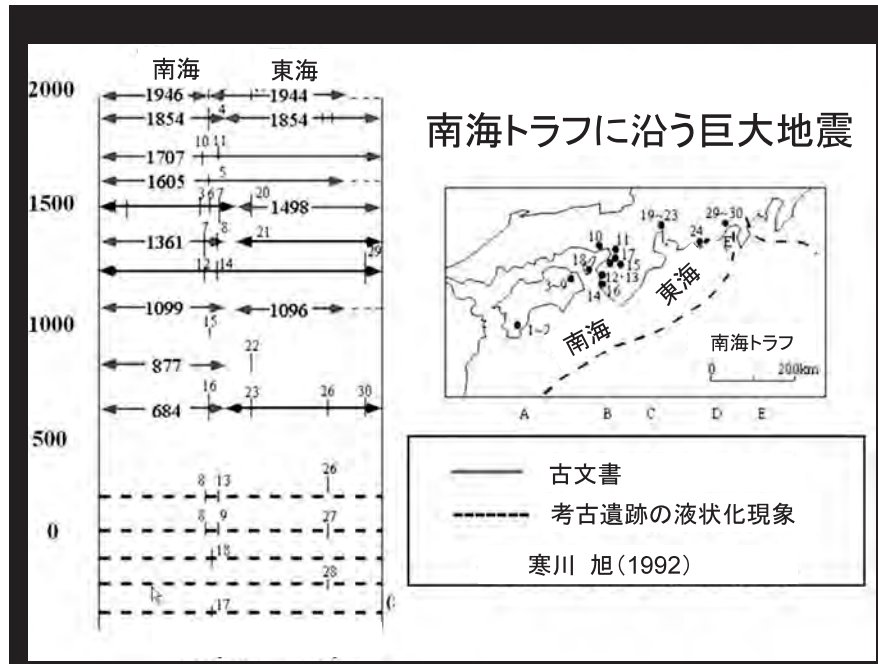
ただ、この4つめが残っていることは歴史的には非常に少ないです。というのは、自然現象だけを文書に書くのは最近のことで、何か理由がないと自然現象のことを古文書には残さないものなのです。ただ684年の白鳳時代に起こった地震は、この四つがセットで全部そろっているので南海地震だとわかりました。

このような古文書による歴史地震の掘り起こしに加えて、寒川旭さんが遺跡の発掘をしながら、古文書では見つからなかった地震を埋めています(図表4)。年号が描いていない矢印と点線の部分が、寒川さんが考古遺跡から見つけた地震です。点線については津波堆積物です。

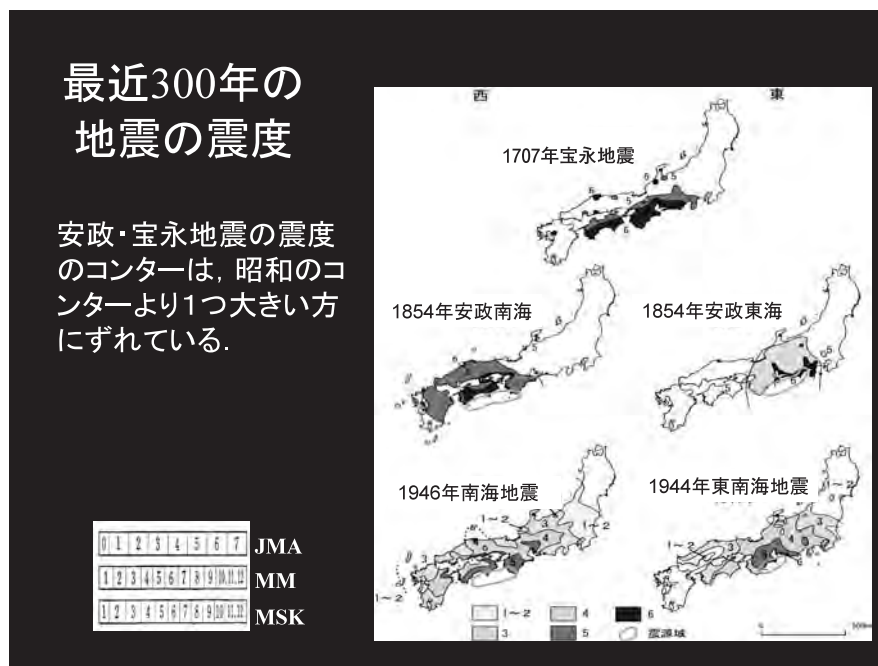
最近300年の地震の震度をまとめました(図表5)。300年ぐらいになると、再現がかなりできるようになっています。上が1707年、宝永の地震です。真ん中が安政の地震、それから昭和の東南海、南海地震です。



図表3



図表 4



図表 5

大きく違うことは、昭和の地震は、コンターが一つ違います。他では震度6のコンターの場所で震度5になっています。そういう意味では安政、宝永というのが昭和よりも大きい地震だったということです。こうやってまとめてみ

ると300年ぐらいなら、復元は可能であるということなのです。

3. 慶長地震

このように地震は繰り返されているわけです



会場の様子

が、私はこの300年間に起きた地震の1つ前に起きた1605年の慶長地震にたいへん注目しています。

今、政府の地震調査研究推進本部では、宝永、安政、昭和という300年間に起きた3つの地震をもとにして次の被害予測をしようとしています。それ以上昔のことをいっても切りがないし、そんな分からない話はやめましょうということになっています。

ただ、政府レベルの判断はともかく、研究者までもが「切りがない」といって話をやめてしまうのは大変なことなのです。それぞれの地震の特徴を検証して、今後の地震に備えて、今、対処しきれないことがあるのかどうかをチェックすることは大変重要なことです。そうやって考えていくと、実は1605年の慶長地震は他の地震と違った特殊な地震であることがわかってきているのです。

慶長9年12月16日（1605年2月3日）に地震が起きています。これはどんなときかというと、山内一豊が高知にいて、亡くなるのが1605年の11月1日ですからちょうど病氣静養

中のときです。今年（2006年）のNHKの大河ドラマ「功名が辻」で、地震の場面をごらんになったかたがいらっしゃるでしょうか。これは慶長地震よりも少し前、天正13年11月29日（1586年1月18日）に起きた天正の地震です。

ここでそのビデオをちょっと見てみましょう（ビデオ放映）。舞台は長浜城（現在の滋賀県長浜市）です。ここで「不思議だ、おや？」と千代役の仲間由紀恵を感じる。みんなもおかしいと思うのです。そして、ここで大きな揺れになります。この地震で、山内一豊と千代の子どもである、よね姫が亡くなるのです。

これはP波という小さい波が先に来て、次にS波という大きな横波が入ってくるということです。このドラマ、地震学的になかなか立派なドラマです（笑）。今日のお話は一切関係ないのですが、小さな揺れを感じて大きな揺れになるまで30秒とかではなくて12秒というのは真実味があるのです。脚本家は立派です。

長浜辺りで12秒ということは、多分、四日市辺りが震源地であると。天正の地震をうまく再現をしたNHKだから、最後にきっと慶長の

地震もやるのではないかと期待していたのです。なぜなら高知城には慶長の津波がかなり来たはずなのです。それで、実は揺れないのに津波が来たといったことまでやるかと思っていたら、その地震は一切無視でした。NHKもそこまでは時間が割けなかったのかもしれませんが、山内一豊が高知で静養している間に地震が起きたのが慶長地震です。高知にも大きな津波が来て、かなり被害が出ているはずですが、そこまではやってくれませんでした。

参考文献ですが、歴史家はこんなことまでするのかと私は驚いています。山本武夫さんという方が、1605年の慶長地震に関する資料を日本じゅうで集めてまとめておられます。B5で90ページにわたる、大変立派なものです。

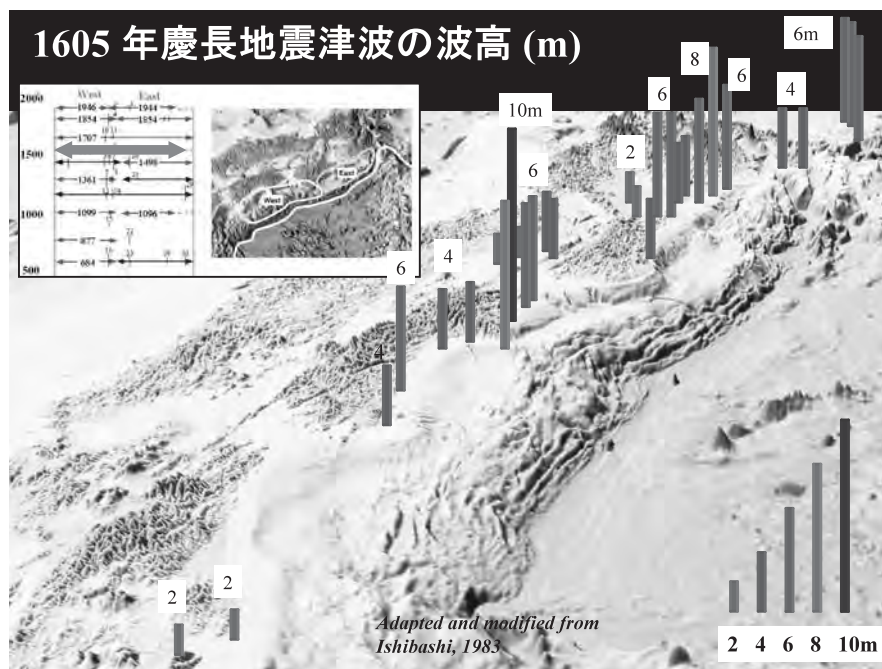
それから、私が直接会ってお話した田井晴代さんという方は、『震潮記』を訳されたのですが、徳島県の海陽町の穴喰というところのお話です。これをもとに、1605年の地震を明らかにしようと思います。この1605年の慶長地震に一体なぜそんなにみんなが興味を持つ

か、なぜ重要なのかをお話します。

図表6の棒グラフは、この地震の津波の高さです。古文書からいろいろなかたがまとめられたものを書き込んだものです。高知の室戸で10m、先ほどお話しした徳島の穴喰という場所では6m。渥美半島や志摩半島でも6m、8mとけっこう大きいのです。これは人によってちょっと違いもありますし、やや大げさに書いてあるかもしれませんが、山本さんが非常に詳しく検討を加えてあります。房総半島から九州までの津波の高さが書かれています。

ところが、京都では揺れなかったのです。西洞院時慶の日記という、日常のこまごましたことを書き込んだ日記があるのですが、地震の日、どこにも地震のことが書いていないのです。随分とこまごましたことが書いてあるから、大揺れに揺れたのだったら書くだろうというのが山本さんの考えです。

山本さんは京都のほかの日記もいろいろ調べたが、どこにも書いていない。だから、京都は何も揺れなかったのだろうと推測しています。



図表6

例えば、2004年9月5日に紀伊半島沖合に起きた地震はマグニチュード7.5ぐらいですから、こんな地震よりはずっと小さいのです。でもこのときは京都でも揺れています。というのも名古屋大学に去年までおられた平原先生は当時単身赴任でしたが、週末は京都府宇治市の自宅に帰られた。そこで地震に遭いました。彼は自宅のマンションがあまり揺れるので、テレビを押さえているのに必死だったということでした。ですから1605年に起きたマグニチュード8クラスの地震だったら京都は大揺れのはずです。しかし西洞院時慶の日記には「ハマグリを幾つもらった」などとしか書いていない。他の京都で書かれた日記を見ても地震の記述はない。ということは、京都は揺れていない。どうも、変な地震なのです。

大津波が、西日本を襲い房総半島まで来ているのですが、強震動に関する記述がほとんど残っていない。全くないという人もいます。揺れないのに、津波だけが来る。これも調べたのですが、道後温泉の温泉水の変化、下がった

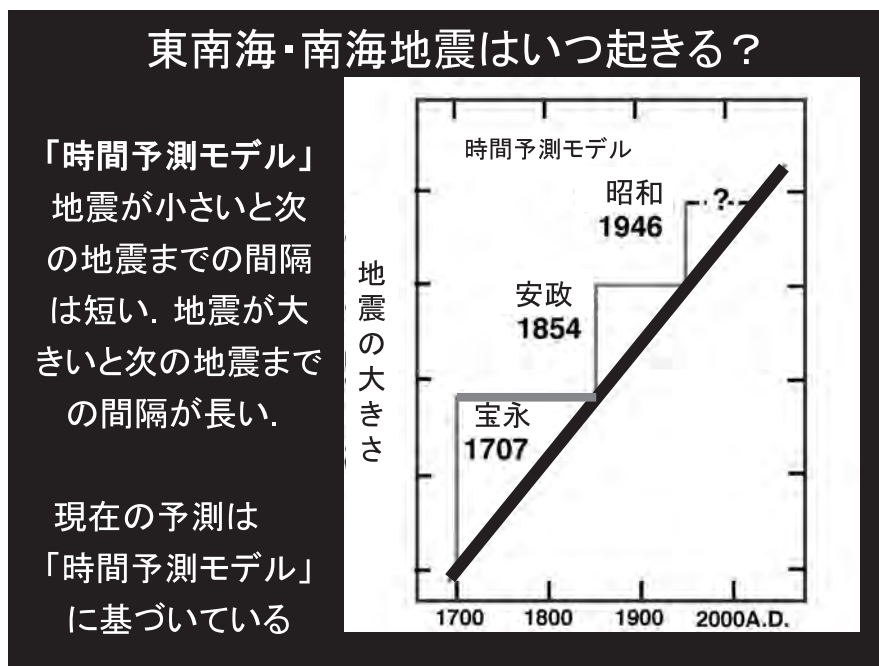
とか、かれたということも起きなかった。大体かかれると何十日も温泉に入れなくなるらしいのですが、戦国時代が終わって世の中も落ち着いているときですから、そういうことが書かれていてもいいのに、それが無い。地殻変動の記述も残っていないのです。

ということは、これはちょっと変な地震である。本当にプレート間地震、いわゆる昭和の地震、安政の地震、宝永の地震の仲間に入れていいのか。実は、これまではみんなずっと仲間に入れていたのです。仲間に入れて、その先は考えないようにしようとしているのです。

この謎は未だに残ったままです。

4. 地震モデル

地震の間隔はどうやって決めるのかという問題があります。地震の間隔を決めるときに、今よく使われるのが時間予測モデルです(図表7)。これは地震が大きいと、次の地震まで時間がかかる。地震が中くらいなら中くらいの時間、小さいと次はもっと短いということで、時間予



図表7

測モデルといっています。モデルですから幾らでもできるのですが、一応、過去のデータに合わせています。

もうちょっとモデルの話をして。今言った時間予測モデルと、規模予測モデルという二つの極端なモデルがあります（図表8）。

規模予測モデルは、応力がたまっていくものが上の軸だと思ってください。横軸が時間です。時間がたつと、ひずみや応力がたまっていく。ある時、何かよく分からないが、すっと地震が起きて、最後のぎりぎりまで落ち込む。そして、応力は解放してしまう。ある時、またためていって、何か分からないけれども、ある引き金で地震が起きて、最後のところまで落ちてしまう。

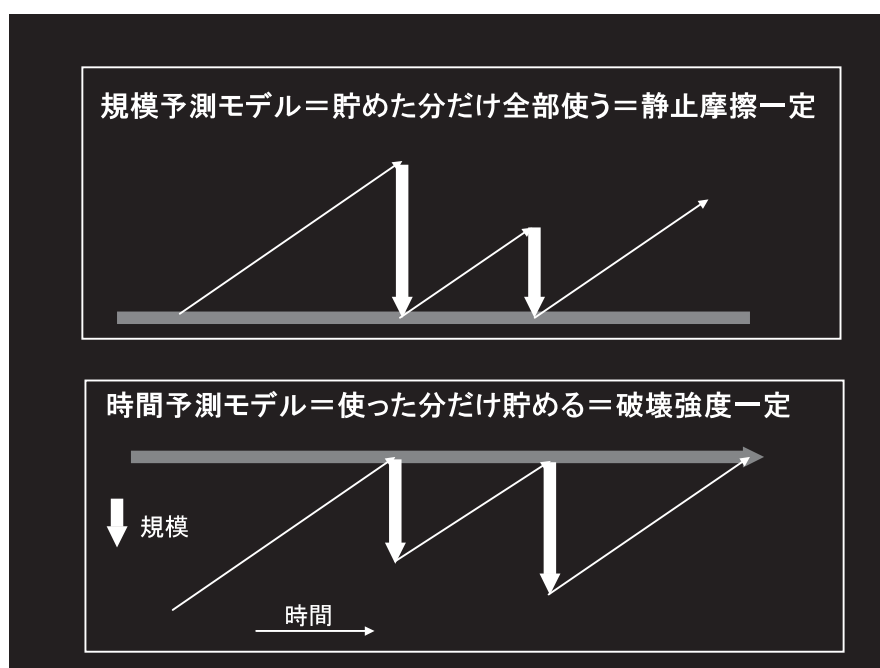
これは何かというと、地震が起き出したら、途中で止まることはできないということです。このモデルで規模が予測できます。ためた分だけ落ちるといことです。

平原先生が最後に防災アカデミーで話をされたときに、地震のシミュレーションをしたと思

いますが、このモデルを使っているのです。たまたま分だけ放出するというモデルを使って、うまくいくという話を見せたと思いますが、今は政府はこちらの予測をやっているのです。

下は先ほど話しましたように、ため込んでいって、あるところにつついたら壊れるというものです。岩石の実験からすると、こちらのほうが望ましいというのは、破壊強度があるところでつついたら壊れる。壊れるときには、どこで止まるか分かりませんというのが、このモデルです。ある日、何かに引っかかって止まってしまう。ためていって、あるレベルに行ったら、これ以上ためられなくなって、壊れてすっと落ちる。

こういった二つのモデルがあります。これはモデルですからどちらでもいいのですが、実際には、我々の次の地震を考える場合には重要です。どうでもいいからお好きにやりなさいというほど簡単なことではないのです。地震現象に関してどちらを取るかよく分からないが、どちらかという日本人は下が好きで、私の見る限



図表 8

り外国の人は上が好きなように感じました。これは好き嫌いの問題と、本当に自然に合うかどうかの問題です。

最近、間をとって中間型だという話もあります。いろいろな議論はありますが、自然現象だから、そう簡単ではないのではと思います。

それでは、過去の地震を振り返ってみます(図表9)。1707年に地震が起きました。縦軸は地震の大きさだと思ってください。横にぶつかり、次の地震が起こるまで時間がかかります。ここで地震が起きた。地震の大きさは分かりません。たまたま起きたというのが時間予測モデルです。ここで1854年、安政の地震が起きる。そしてまた横でずっとためていって、ぶつかったら、また小さかった。これは1944年、昭和です。

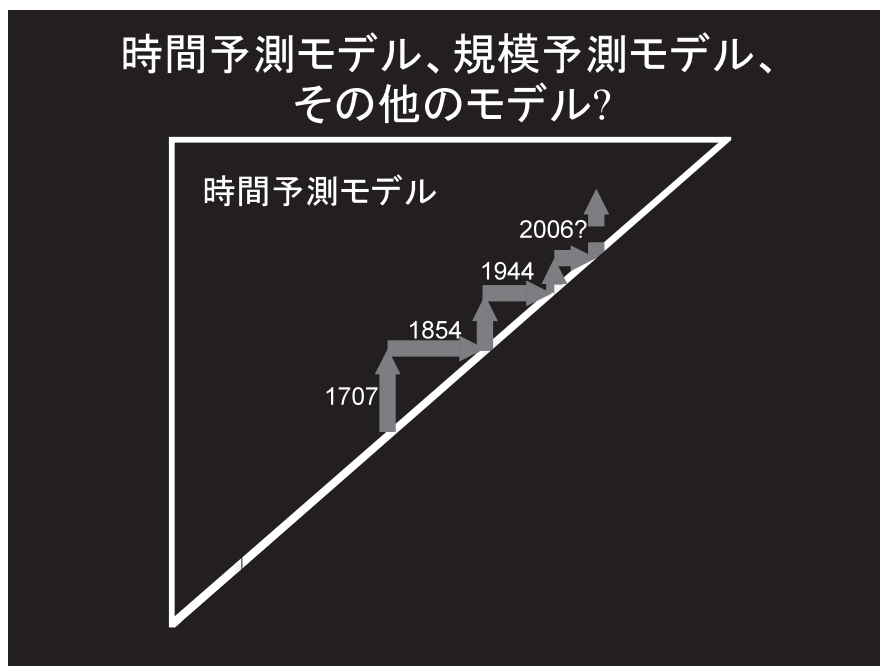
そして、今度はもっと早くぶつかるだろうということが、今やっている地震の予測です。確率が50%とか60%と言われているのは、こういうことが入り込んでやっているものです。ただし、もしも2006年、今地震が起きたら、ど

んな大きさは予測できませんということが時間予測です。でも、このモデルは、先ほどの1605年の慶長の地震を仲間に入れると使えなくなるのです。

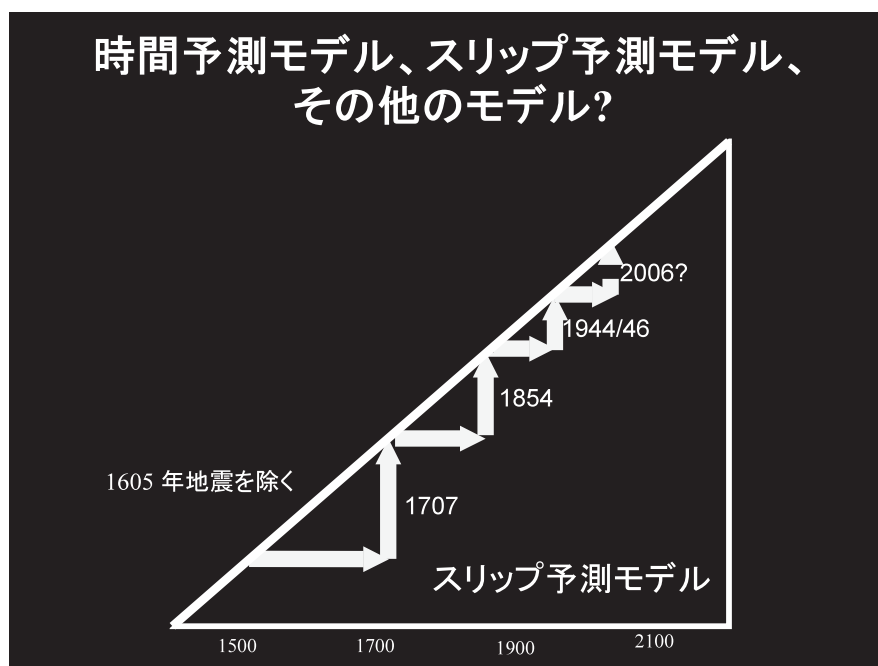
慶長地震は仲間に入らないという考えを持つと、どうもこういうことになると思います。スリップ予測モデル(図表10)は、書き方はちょっと違いますが、規模予測モデルと意味は同じです。

1700年から始めますが、ためた分だけ放出するから、矢印が斜辺まで行く。これが1707年の地震。この場合、1605年の地震は仲間に入れません。あれほど大きい地震は、この前からため込んだせいということで、慶長地震をもう相手にしないということです。それから時間がたって、1854年に地震が起きると、ためた分だけ放出する。90年後に地震が起きると、1944年、1946年はこんなになると。

このモデルを使うと、今、地震が起きたらどうなるかということ、斜辺にぶつかるだけですから大した大きさではないのです。昭和の地震の



図表9



図表 10

3分の2程度だから、そう心配することはない。今、起きても大したことがないのなら、30年ぐらい先を見越して、大きな計画を立てて地震対策をしたほうがよろしい。今日、明日、慌ててやることない、大きい計画で、地震に対して備えたほうがいいということになるわけです。

先ほどの時間予測モデルだったら、いつ起こるかは分かるが、大きさが分からないことになります。これほど違いが出てくるので、どのモデルを採用するのかは大事なことだろうと思います。それなのに、1605年の地震は、今のところ考えないということはいかかなものかと思えます。三つだけではとても分からないところが、もう一つさかのぼると考えられるわけです。

まとめると、南海トラフ地震の間隔のタイプは規模予測モデルなら、前の地震から60年たっているから、今起きてても小規模です。それなら、慌てるよりは時間をかけてじっくり対策を取ろうということになります。中間型タイプになると、時間も規模も予測できないのだから、やはり急ぎましょうということになります。

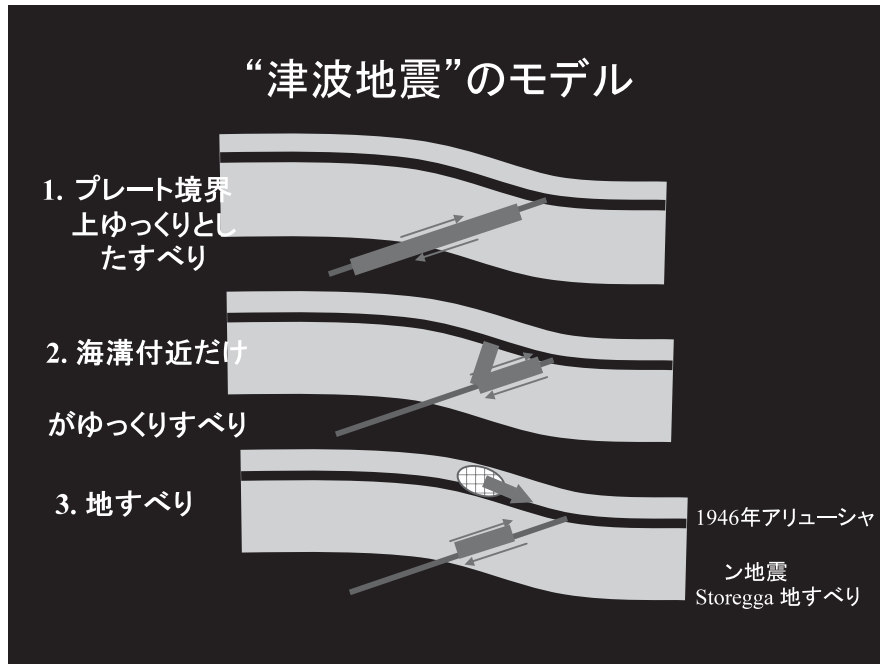
このように考えていくと、やはり1605年の慶長地震について検証する重要性がおわかりいただけると思います。そこで、この地震についてももう少し考えてみましょう。

5. 津波地震のタイプ

1605年の慶長地震のように、やたらに津波は大きいのに揺れがない地震を津波地震と言っています。これは地震のときの津波という意味ではありませんので、間違えないようにしてください。津波地震は特別なタイプの地震で、津波だけを出して揺れを出さない地震です。

これはモデルの話ですが、図表11のようなことがプレート境界で起こることがあります。まずタイプ1は、普段は大きな地震を起こすのに、ある時ゆっくり動いて、地震の波は出さないうちに、全体を盛り上げるから、海の水を持ち上げて津波を引き起こすというタイプです。

タイプ2は、海溝付近で切れると、海溝付近は柔らかい堆積物が多いところですから、あまり大きな地震の波を出せない。ただ、全体とし



図表 11

て持ち上げることは確かなので、津波を引き起こす。浅いところで地震が起きると、津波を引き起こして揺れを起こさないのです。あとで出てきますが、こういう地震は今年（2006年）の7月17日にジャワ島の沖合で起きています。海岸にいる人は全然感じなくて逃げないところへ津波が襲ってくるというのが2のタイプの地震です。

3つめのタイプとしては、地震が引き金となって海底の地滑りを起こします。そうすると、ここで海底の水が上下に動かされますから、ここから津波が発生する。日本では1771年に、石垣島の西表で大きな津波を起こしていますが、それではないかという話もあります。

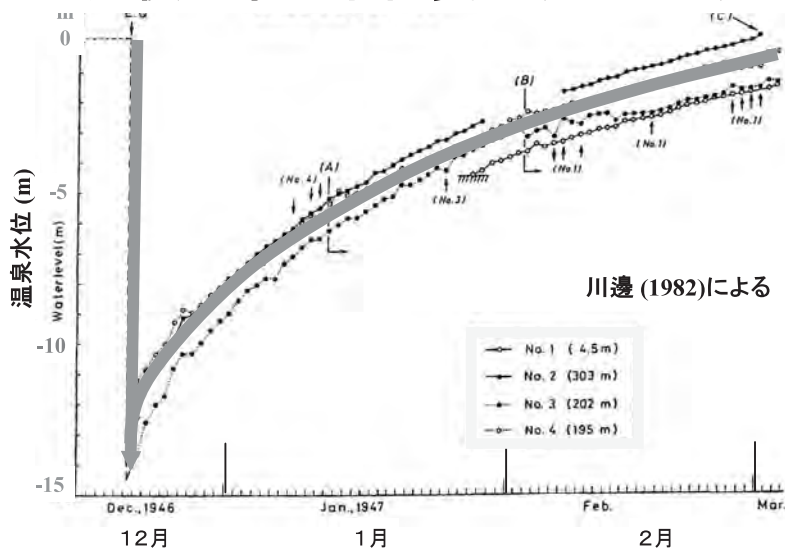
慶長の地震は一体どういうものかについて、モデルを1つずつ検討してみましょう。道後温泉は松山市経営の温泉ですが、古い温泉で地震のたびにお湯が出なくなることを繰り返しています。道後温泉は聖徳太子が五百九十何年から開いたものですが、この温泉が影響を受けます。

先ほどの1番目のプレートの境界がゆっくり動いたものだったら、多分この温泉の水が下がるはずであると。実は、今ここから取っていないのですが、昔は温泉を取っていた井戸があります。昔はお湯が吹き出ないように押さえていたふたが近くの公園にあります。今はこんなふたをしめなくても自噴するわけではなくて、一生懸命くみ上げないと取れないのですが、押さえていたふたらしいです。

これは環境学の川邊先生が、愛媛大学にいたときに調べたものですが、12月21日、この地震が起きたときに、この温泉の井戸の水が思い切り下がったということが書いてあります。それが復帰するまでに3か月くらいかかったといわれています。図表は、川邊先生が、データを発掘してプロットしたものです（図表12）。こんなに下がってしまうのです。

ですから、その間、温泉は使えなくなってしまう。こういうことは過去の地震でも幾つも書いてあります。ところが、1605年にはこれがないのです。ですから、巨大地震が起きたら、

道後温泉の水位変化(1946-47)

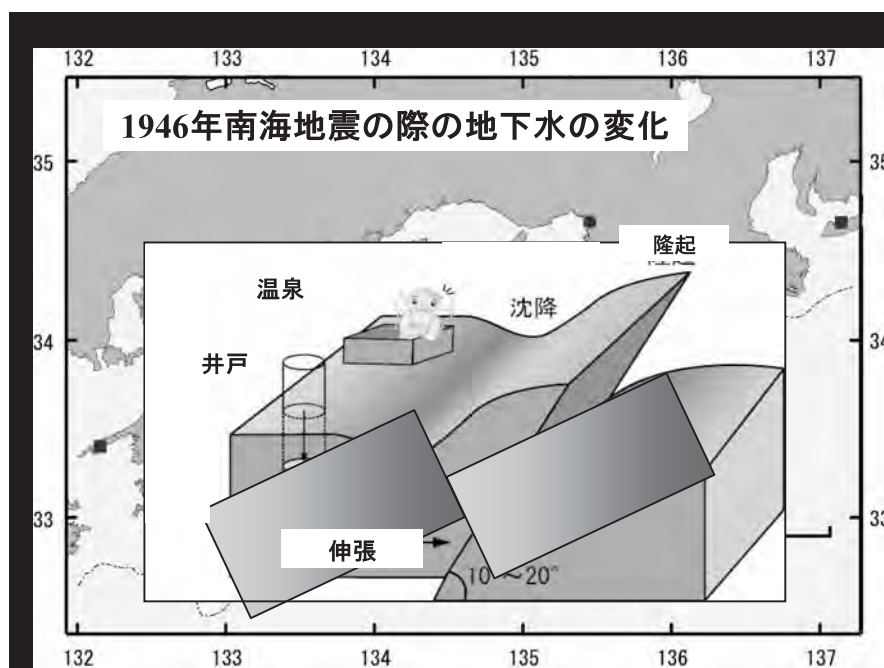


図表 12

ここで下がるはずですが、下がらなかった。

下がるメカニズムはどういうことかという
と、1946年、今から60年前の地震で井戸水が
下がっています。普通の家庭の井戸水まで下
がっています。なぜこういうことが起きるか
という、考えられることは巨大な逆断層、これ

は10°から20°です(図表13)。このように断
層が起きると、全体が引っ張られます。引っ張
られるために、割れ目に水がしみ込んで入っ
てしまい下がってしまう。こういうことを繰り返
し起こしてきたということです。ですから、巨
大な断層が滑ると四国全体が引き伸ばされるか



図表 13

ら下がってしまう。しかしそういう記録がないのです。たまたま書かなかったということもありますが、地震の前は井戸水で水を供給していたわけで、その井戸水が下がってしまったことを書かないのはどうもちょっと疑わしい。大きな断層が動いたとは思えないわけです。

次にモデル2ですが、モデル2は浅いところで動いたのかもしれないというものです。浅いところは、物質は割と柔らかめです。実際に、こういうことで地震が起きているのです。

図表14の右側は、文部科学省に置かれている地震調査研究推進本部ですが、こういう図を作っています。名古屋大学におられる鷲谷先生も作った1人ですから責任があるのですが、「ここに、こういう地震が起きます」と東北地方には書いてあるのです。そして、本当に起こっています。

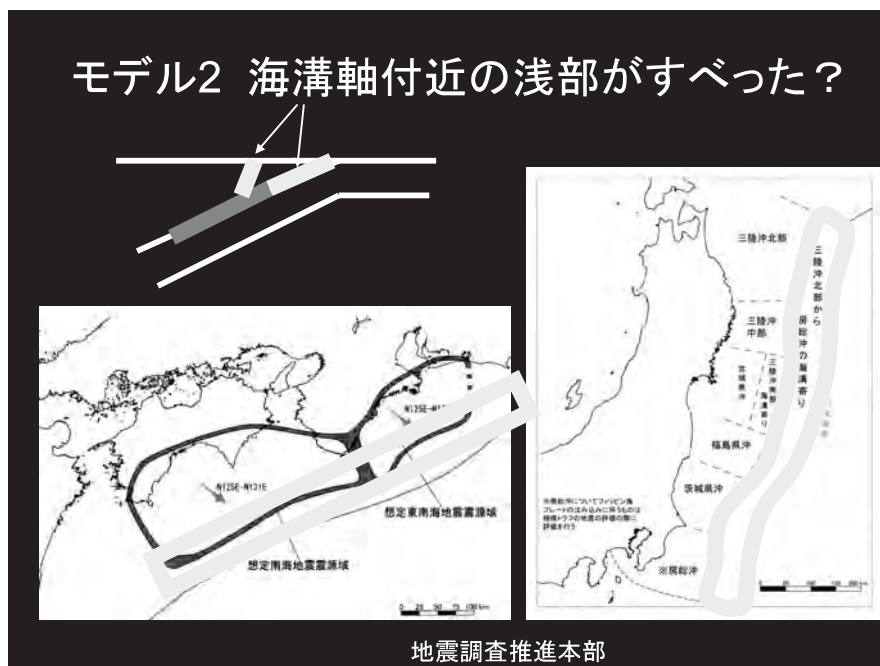
1896年にはほとんど揺れないのに津波だけが大きいというとてもない地震が起きて、2万2000人くらいの死者が、三陸沖海岸に出ています。これは非常にたちの悪い地震で、揺れ

もしなくせに津波だけを起こしている。ある程度ゆっくり動くために、地震の波を出さないので、地殻変動だけは起きて津波が襲ってくる。この図には起きる場所がちゃんと書いてあります。

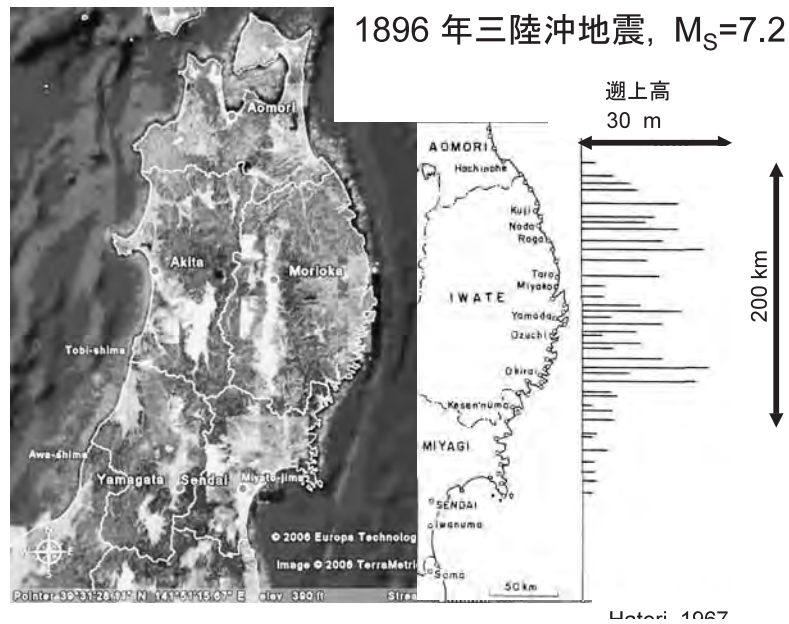
しかし南海トラフの西側については何も書いてないのです。このときにも鷲谷先生はいましたから、書いてないのには責任があるかもしれませんが、「ここはない」と言っているのです。私は一つの可能性として、ここにも本当は地震があるのではないか、我々が言わないだけではないのかと思います。

ただ、今の常識では、ここでは大きな地震を100年に1回起こして、何百年に1回は柔らかいところだけに地震が起こるといことはちょっと考えにくいのですが、2004年のスマトラの地震以来、常識は何しろ捨てたほうがよろしい、どの様なことでも可能性があるのではないかと思います。それが2番目のモデルです。

今お話しした1896年の三陸の津波の記録です(図表15)。大きなところは30m近くあり



図表14



図表 15

ます。こんなに広い地域に津波が襲ってきます。これが、1896年の明治の三陸の大津波です。地震のマグニチュードは7.2と小さいのですが、津波のマグニチュードにすると8.5とか8.6ぐらいになると思います。これが、恐ろしい津波地震です。

先ほどお話ししたように、今年（2006年）の7月17日にジャワ島沖で起きた津波もあります。これも、一部はスマトラ・アンダマンの津波と同じような現象が起きています。このときに人間から見て非常に困るのは揺れないことです。インドネシアの気象庁でも警報を出していません。地震そのものはマグニチュード6ちょっととなっておりますから、大したことはないだろうということで警報が出されていません。その辺の詳しいことは、今日ここにインドネシアのかたがおられるので、あとで聞いてみたいと思います。

世界じゅうに、この種の津波が幾つも起きています。例えば2000年のジャワ沖、1998年のパプアニューギニア、1996年のペルーが津波地震と言われています。こういうものが起きた

のかもしれないというのが、モデル2です。

次に、モデル3です。あまり検討してきませんが、地滑りも可能性があります。地滑りの場合には地面はあまり揺らさないでしょうが、水を移動させるために、当然、津波を起こすはずで

ただ、1か所に大きな地滑りが起きても、とても房総から九州まで起こすような津波はできません。ここで富士山ほどのものが滑ったところで、大きな津波を作ってもだんだん減衰して、日本全体に広がることはできないのです。そうすると、連鎖的に地滑りを起こすことも至難の業であると。

一つ考えられることは、メタンハイドレートはメタンが固体になっていて、比較的海の浅いところにたまっている、このメタンハイドレートが、何らかの理由で気体になる。それがきっかけになって、次々と地滑りに起こすというものです。

私が考えたことを専門家に話したら荒唐無稽であると言われたのですが、可能性は無いのではないかと思います。このときには、津

波は起こすけれども、揺れは起こさないから可能性はないことはないのではないかと思います。専門家は最初からそんなことはありえないと受け入れてくれませんでした。これももしかしたら怪しいかもしれない。

地滑りで有名なものは、1946年にアリューシャンで起こっています。これも大した地震ではなくてマグニチュード7.4です。ただし、起こった津波から考えると、推定マグニチュード9.3という大きいものです。この津波が南極で観測されています。1mぐらいの大変大きなものです。ハワイで死者が出ています。10mといった大規模なものを起こすので、地滑りでも侮れません。

6. 慶長地震は何者か

こうやって見ていくと、どれがいいのかよく分からないが、どうも1番目が疑わしいということです。

そこで私は、徳島県海部郡海陽町の宍喰というところで、最近、古文書を現代語訳に訳して『震潮記』という本を作られたかたにお会いして、いろいろ聞きました。田井晴代さんが、この古文書を7年かけて現代語訳されたのです。

『震潮記』は2回ほど転写されています。もとは1605年の地震のことですから、原本はもう残っていません。原本が残らないというのは、ちょっとした高台で保管されても津波にしょっちゅう襲われて記録がなくなってしまうからです。

その中に『円頓寺日記』というのがあります。住職の宥慶という人が体験記を書いています。これも現代に通ずるような書き方で、被災者や被災のようす、津波のようすを書いています。この人の書いた原本は134年後、確か1739年に見付けた。そのときに住職2人が立ち会って、これを写して残したと。お寺の住職は、あ

る意味では自治体の役員でもあるし、地域のすべてに責任を持っているし、歴史を残すという役割が昔はあったのです。そういう方々が残していたのです。

そのあとだいたいぶたってから、先ほどの田井晴代さんの何代か前の田井宣辰さんというかたが安政の地震に遭って、これはいかんということであつた町に残されていた地震の記録を全部集めてまた記録したのです。それを『震潮記』という形でまとめています。だから、原本はないのです。これは写しているの、どこか自分の思いを書き込んだ可能性はないかという問題もあるのです。それをいつも気にしなくてはいけない。

ただ、写す前にも元のものがあった、それと比べることができる。そういうものを見ると非常に似ているので、写したときに自分の思いは書いていない、ほとんどきちんと書いたらしい。この宣辰さんは、安政から明治の初めまでおられたかたです。

地震は、先ほどの旧暦で12月16日から毎日のように書いています。午後書いたとか、翌日に書いたとありますので、多分信用できると思います。

私が非常に気になったのは、田井晴代さんが訳したところに、「大地震があつて」と書いてあるのです。あの地震は突然津波が襲ってきて、揺れなどではなくて来たのではないかと確信していたので、本当に揺れたのかと。悪く考えると、もしかしたら田井さんが、津波があつたから地震があつたのだろうと200年たって書き込んでしまったのではないかと思ったのですが、どうも正確に写している。要は、揺れたということがあるのです。

これはよく見ると、先ほどお話しした山本武夫先生の本にも、この辺のことが書いてあります。

まとめてみると、夕方、津波が来た、その前からだいぶ揺れたというのです。ですから、前震がずっとあったのでしょう。そのあとに、どーんと地震が来て津波が来た。「津波がいきなり襲ってきた」という記述はないのです。

これも不思議なのですが、この100年前にある地震の記録が残っているのですが、それには「いきなり津波が来た」という記述があるので、やはりいきなり来たときには「いきなり来た」と書くのではないのかと思いました。

まとめると、これは解釈ですが、前震が続き、その後、津波が来た。少なくとも、四国南部で大きな揺れを感じたことは間違いがないらしい。しかし、京都では揺れていないらしいということです。

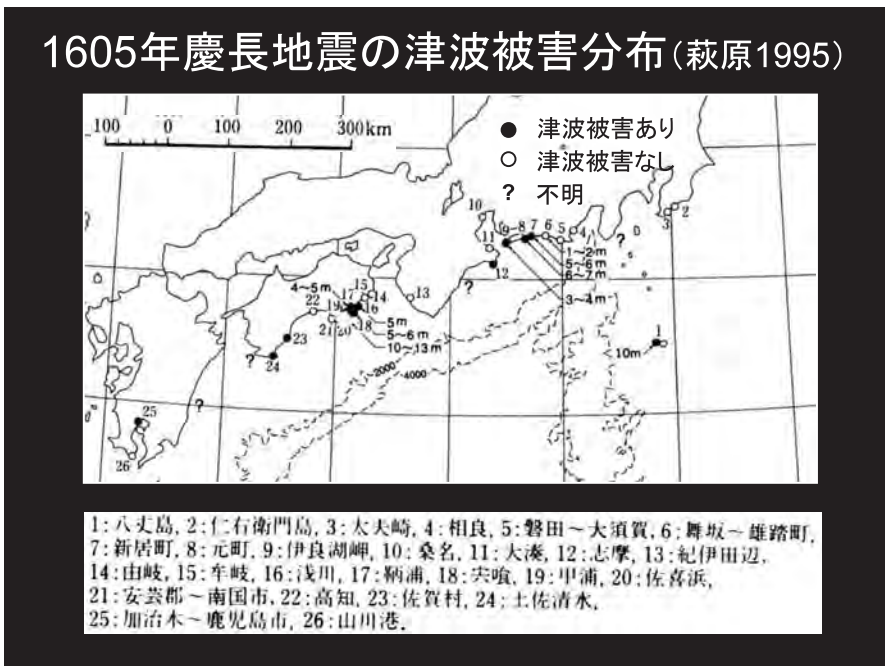
もう亡くなられましたが、萩原尊禮という有名な地震学者が、山本さんが書いたものをまとめて津波の分布図を描いています（図表16）。そうすると、5mや10mの津波が房総から九州まであったことは間違いがない。ただ、揺れを感じたのは、少なくともこの辺り。いろいろ調べ

てみると、この辺りもどうも揺れを感じたらしいが、大した揺れではない。だから、そんなに激しい揺れではないので、震度3か4ぐらいかなと思われまます。

それでも何度も来ると、震度4でも大変な揺れに感じられます。2004年9月5日に愛知県で感じたのは震度4ですから、けっこうな揺れです。

房総半島の被害もいろいろ調べられています。房総半島のほうは軍記ものです。軍記ものは非常に大げさに書くので怪しいということで山本さんは使わなかったのですが、防災アカデミーで以前話をした都司嘉宣さんは、やはりこれも使ってみようということで復元しています。それほど大きくないけれども来たらしいということです。

こういうことをまとめて慶長の地震は何者かということ、浜名湖、琵琶湖、伊勢湾、宍喰などの沿岸部ではどうも揺れたらしい。津波地震というが、全く揺れないわけではない。京都に記録がないのはしょうがない。津波被害は場所に



図表 16

より異なると、これは山本さんの報告です。房総の津波はそれほど大きくなって、1854年の安政のときと同じぐらいである。ですから、向こうに特別に津波を起こすものを作る必要はない。南海トラフの地震だけで十分かもしれないというものです。

結論として、先ほどの大きな断層でそういうことを起こしたのではなくて、一部だけがちょっと滑ったのだろうと。主には、海溝軸付近の浅い部分が動いたのではないかと。だから、こういうものは昭和、安政、宝永地震の仲間に入れてはならない、別口であるということが私の言いたいことです。別口になると、随分いろいろな問題が起きます。

スリップ予測、規模予測になると、こうなるのではないか。1707年は、非常にためたので大きくなった。安政は150年ためたので、こんな規模。昭和は90年しかためないので、せいぜいこんな規模。では、今地震が来たら小さいでしょうということになるのですが、これは非常に単純なモデルです。

これも一応の結論ですが、怪しい。常識がいかに危ないかというのは、「こんなに大きい地震がこの海域でくるはずがない」と言われていたのに起こったスマトラの津波地震でありますので、結論としては、これかもしれないが、やはり今起きる可能性がないとは言えないので、準備はしましょうということで、1605年の慶長地震をどうとらえるかというのは非常に大きな問題ではないかと思えます。

7. その他の地震

徳島県にはいろいろな碑がありますが、これは日本最古の地震の慰霊碑ではないかと思えます（図表17）。1331年、康安の地震は、この中に入っている地震の一つで南海地震です。四国のほうで起きた地震ですが、これにいついつだれが死んだかという名前が刻んであります。

三重県度会郡大紀町の錦に津波避難タワーがありますが、徳島県でも今造られつつあります。この地域は、住民からの要求で家の屋根の高さまでは逃げられるようにしてくれと。屋根の上



図表 17

に逃げられるぐらいまでなら、もっと高いところにしろということで、ぱっと逃げられるようなものが造ってありました。

高知県のいちばん北に甲浦という大阪からのフェリーが着くところですがあります。これは海岸ですが、いろいろな準備がされています。どんなモデルであろうとも、地震に対する備えが必要です。

その他いろいろ、昭和、安政、宝永と違うものがあるという例をお見せしたいと思います(図表 18)。例えば、明応の地震は東海側に起きた地震ですが、大変大きな津波を起こしました。ただ、全体が大きかったわけではなく、伊勢湾の中で非常に大きくなっています。

それから、浜名湖が切れた。これは 2004 年のスマトラ地震のときにも起きています。

伊勢市大湊は、津波のたびに大きな被害を出しますが、特に 1498 年の明応の大津波のときには、ここに住んでいた 5000 人が、5 人を残してみんな亡くなったという場所です。昭和の伊勢湾のときは、津波はほとんど入ってきてな

いのですが、こんなこともあるのです。ですから、常に同じものが繰り返されているわけではなく、地震によって個性があることがよく分かります。場所によって違うことがある。

津波の数値実験について、琉球大学の中村衛さんに計算してもらったのですが、先ほどのモデルを使って計算してみます。計算上は、なかなか房総半島に津波が行かないのです。中央防災会議の計算でも 1m となっていますが、実際に観察されているのは、2m とか 3m ぐらいが来るのです。ちょっと計算のしかたが悪いかもしれませんが、本当に 1m でいいのかという疑問も起きます。

我々の今知っている断層モデルを当てはめて、A と B と C の組み合わせで全部説明しようとするのではなく、どこか我々の知らないところで起きているのではないかと思っいろいろ作ってみました。

名古屋大学の鷲谷さんが「ここに断層がある」と言っていました(図表 19)。これが一つの候補かと、伊豆半島の沖合にも断層を作ってみた



図表 18

のです。もしかすると1回、2回、3回、4回は起きないけれども、5回めには起きるかもしれないということです。我々は知らないことがけっこうあるのです。

多くの地震のモデルは1回です。前回の地震をモデルに入れて使っているだけです。よくて2回、3回くらいでしょう。そこで、もうちょっとさかのぼると、こんなに違うものが起きる可能性があるということを、今日はあれこれ紹介しているわけです。

8. 西日本超巨大地震が起きる？

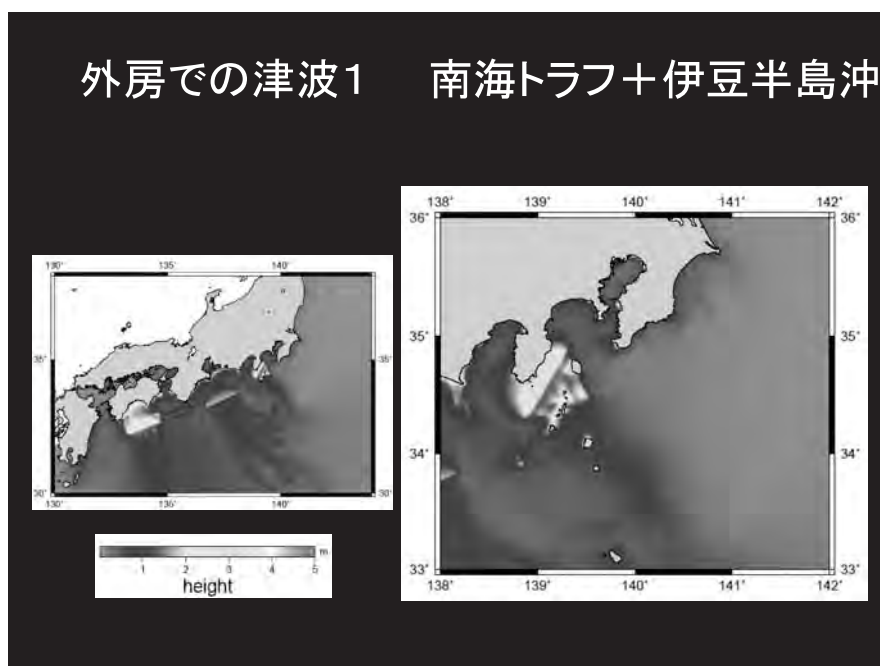
最後の話題になりますが、西日本超巨大地震は起きるのかということです。南海トラフは、今までAだ、Bだ、Cだ、Dだと、Eもあるかもしれませんが、そういう組み合わせです。本当にそんなことでいいのかと。

突然飛びますが、あとで関係がつくのでちょっと聞いてください。九州から台湾までの間を琉球海溝と呼んでいます。そこで、巨大地震は起きないことになっています。全く対象外

になっていますから、政府も何もしない。一応、対馬から南海トラフまでは法律、金は出さないけれども頑張れという対策ができています。でも、沖縄に関してはありません。これは政府がここでは地震が起きないと確信を持っているのです。

けれども、スマトラ・アンダマンで起きた地震も起きるはずがないとみんな思っていたところなのに、超巨大地震が発生した。琉球海溝も再検証してみる必要があるのではないのでしょうか。

なぜ、スマトラ地震が起きないと思ったのかというのは、過去200年ぐらいで巨大な地震は起きていなかったことがあげられます。せいぜいマグニチュード7.5ぐらいです。まだ、起きない条件がいろいろあります。プレートが潜り込むスピードが非常に遅い。大体、超巨大地震が起こる場所は潜り込むスピードが速いのです。それだけ応力、ひずみをためていくのですが、そういう場所でもない。起こりにくい条件が整っているのですが、それでも起きてしまっ



図表 19

た。

地震が起きたときには、断層の南のほうは一般的な地震活動でしたが、北のほうはどうも津波地震に近いのです。南が動いたために、引きずられるようにして北まで広がってしまった。そんなことが1000年に1回起きてしまったのです。

そんなことは日本付近でも起きないのか。図表20は台湾のHsuさんという人が、アメリカの地球物理の情報誌に書いたものです。日本列島を引っ繰り返してみると、スマトラともものすごく似ていると。この辺りは大きな地震を起こす。確かに、南のほうは起こす。琉球のほうは全然地震を起こさない。こちらのほうも、本来は起こさないところが、引きずられるように起きてしまった。ここに行くと大陸がある、こちらには台湾があると。

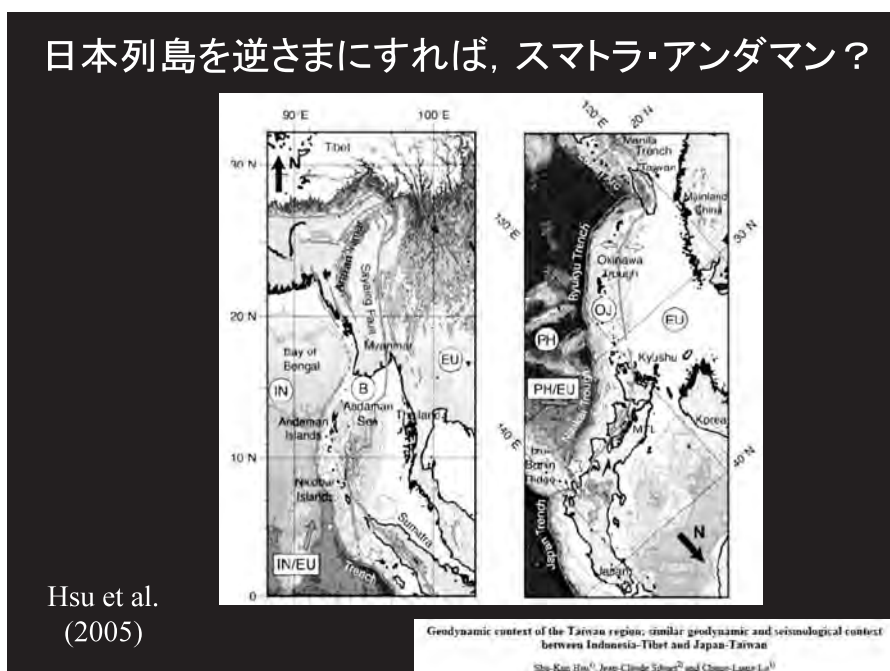
こんな絵合わせで論文を書いてしまうのは勇気のあるというか、かなり直感的ですが、スマトラの地震が起きてしまえば何でもありということです。これも最初はいろいろ批判もあった

のですが、よくよく考えてみるとやはり検討する必要があるのではないかと。名大の古本宗充先生は、もともとこういうことを考えていたということでした。

これもやはり検討しよう。ここは本当にため込んでいないのか。ずるずる入り込んでいて、地震は絶対に起きない場所なのか。それを今持っているデータでチェックする必要があると思いました。

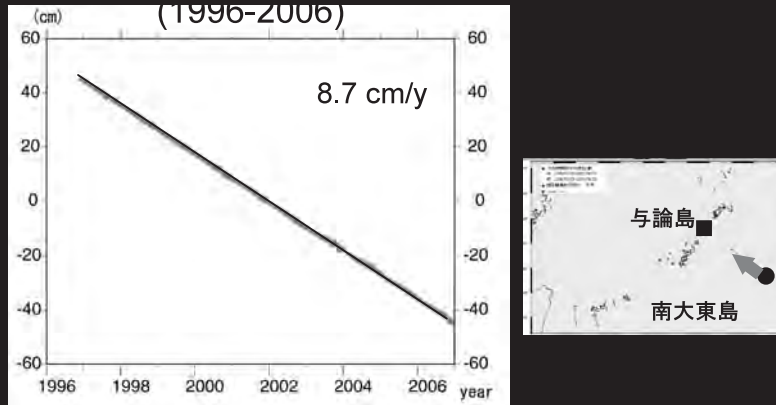
与論島、南大東島の間プレートが沈み込んでいく場所があります。もしも、引っかかっていけば分かるはず。GPSで二つの距離の縮み方が測られています(図表21)。そうすると、与論島と南大東島は、実にこの10年間ただただ直線状にずっと縮んでいるのです。これを見ると、大体素直に入り込んでいくのだ、決して引っかかったりして地震の起きるもとはならないと思うのです。

しかし、よくよく調べてみるとそう素直に考えることもできないことが分かりました。図表22を見てください。例えば、プレートがする



図表20

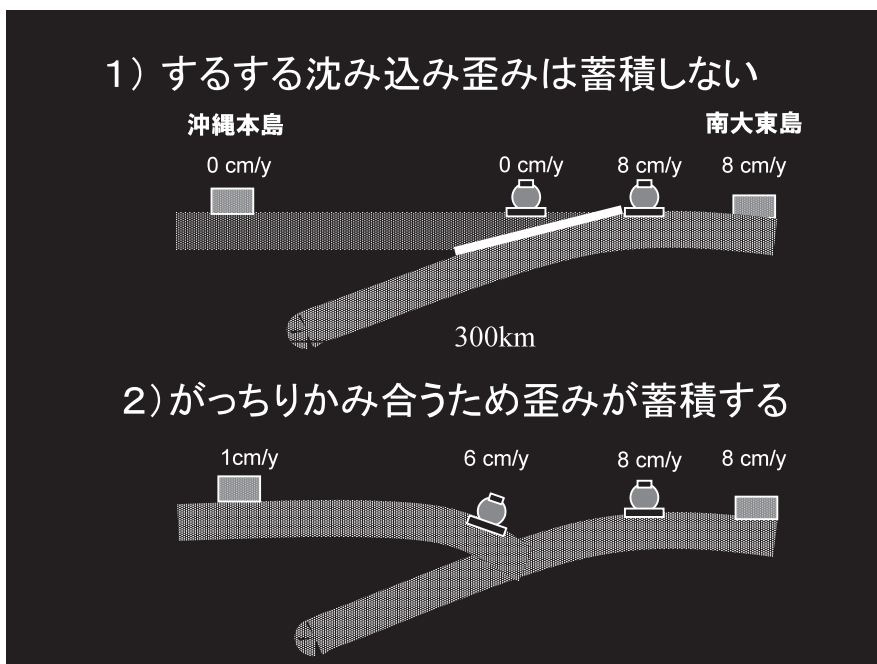
与論島—南大東島GPS基線長の変化 (1996-2006)



図表 21

する入っていくと、この間は入り込んだ分だけ沈んでしまう。ところが、あるところで引っかかってしまうと、そのまま押してしまう。沖縄も押されてしまう。引っかかっているかいないかというのは、この距離が縮むか縮まないかと

ということを見ればいいわけです。完全にプレートが入っていった量だけ縮めば、引っかかっている。ちょっと引っかかって、これが押されるようになってくると、それは引っかかっているということです。今のところは、これをチェッ



図表 22

クするすべがないことが分かりました。

そこで我々は、ここに地殻変動測定装置を置いてみて、こちら側に置いておいたものが引っかかって、ぐーっと押されれば、これは危ないよ、今、ため込んでいますよと。海底に置いたものが全然押されないで動かないとすれば、何も起きない、するすると入り込んでいく沈み込みであると。これをチェックすることになりました。

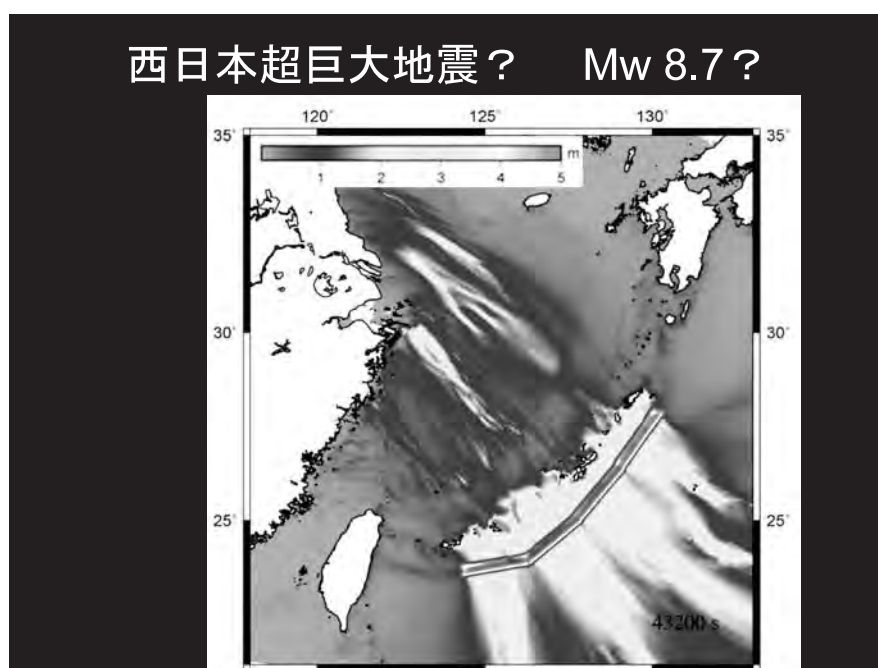
私たちが、地殻変動測定装置を開発したのですが、今、この精度もなかなかいいので、ここに置いておいて2～3年みてやると、置いたものがこっちに押されているのか、じっとしているのかが分かれば、引っかかっているか引っかかっていないかが分かる。これは大変重要なことだろうと思います。

もしかすると、引っかかっていたら、こんなことも起きるかもしれない。断層800kmがずっと壊れたようになると、津波が発生します。津波を計算して最大値を書いたものが図表23です。多くの津波が沖縄側に飛び出していきます。

津波は断層に対して指向性がありますから、沖縄側に大きな津波が出てきます。そして、もちろん沖縄のいろいろな島は津波でやられます。

こういう地震があると、当然これは中国に津波が行くはずですよ。ですから、もし過去に起こっていれば中国で津波堆積物が見付かると。古本先生は、中国で津波堆積物を見付けてくると言われておりますので、見付けてくれるかもしれない。ただ問題なのは、中国では非常に幅の広い大陸棚がありますので、津波の高さがどんどん減衰して、あまり小さくなくて見付からない可能性もある。こんなことが起きる可能性もあるし、起きていたかもしれない。

もう一つ、東海、東南海、南海で地震が起きたときに、何かの拍子でたまたまひずみで引き金を起こして、台湾まで割れる西日本超巨大地震が起きるかもしれない。そして、津波の計算をすると、こうなるかもしれない（図表23）。このタイプの地震は浅いところが動くので、津波は非常に大きくなって揺れが小さいものになるので、気象庁は対象外にしています。この辺



図表 23

で起きたら何とか頑張って警報を出すといっています、難しいかもしれない。

つまり、100年や200年なかったからといって「地震はない」とは言えないのです。300年、400年もなくても、1000年以上さかのぼったらもはやわからないわけです。スマトラの大津波は1000年程度の間隔だとすれば、我々が歴史に残していない可能性も非常にあるわけですから、そういう可能性を考えておく。考えておくことと全然知らないということはやはり違うのではないかと思います。

9. 前兆現象

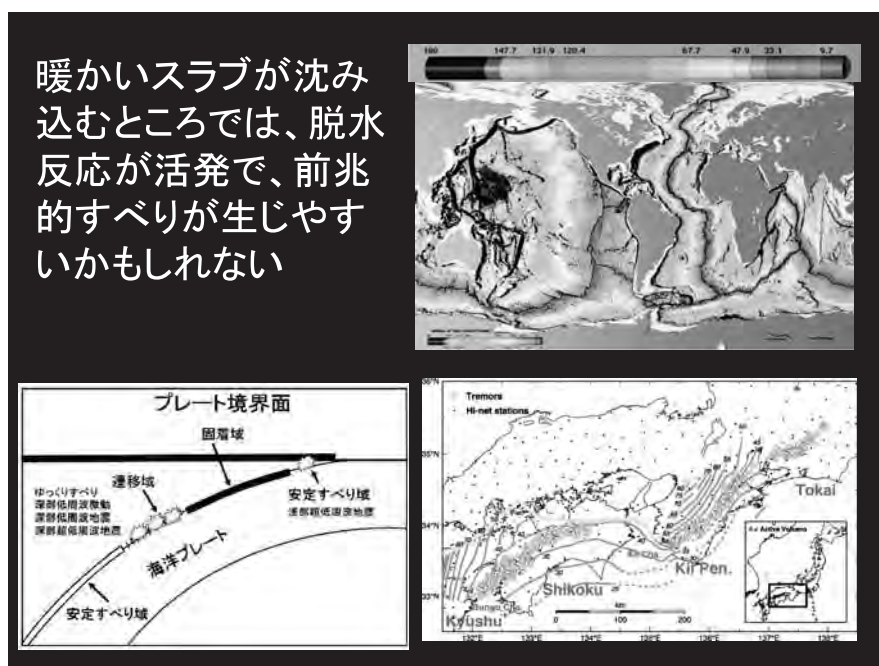
前兆現象が見つかるかということをお話したいと思います。前兆現象が見つかったら必ず予知できるかということはまだ違うステップのことですが、もしかしたら南海トラフは前兆現象を見つけることができる可能性があるという話です。

それは暖かいスラブ、つまり暖かいプレートが沈み込んでいくためです。これが信用できる

かは別として前兆現象が見つかったという報告も実際にはあるのです。同じようなものが同じ場所で1度、2度、3度という例があるので可能性、希望が持てるかもしれない。

暖かいスラブとはどういうことかという、プレートは必ずどこかで生まれてきますが、生まれたばかりは暖かいのです。生まれたばかりといっても、南海トラフのものはプレートができてから2000万年くらいです。暖かいスラブでは、いろいろな現象が起きます。暖かい場所で、しかも底が沈んだ場所は四国、カナダの沖合、メキシコ、チリといったところです。あとはみんな、冷たいプレートが沈み込むのです(図表24)。

暖かいと冷たいでは何が違うかという、低周波微動が起きる。これは北海道や東北では見つからない。こういうところでは脱水反応がプレートで起きてしまう。断面で、浅いところはぴたっとくっついていて、深いところでゆっくり滑るスロースリップや低周波微動が、暖かいプレートに関しては起きるのです。



図表 24

前兆現象は、例えば『震潮記』に「安政の地震の前に、突喰では音がよくしていた」ということが書いてあります。それから、寺田寅彦の随筆の中に「高知で、孕みのジャン、ジャンという音が地震前に聞こえる」と。それから、井戸の異常があったと。これは京大のかたが調べたものを川邊さんからお聞きしたのですが、四国の土佐で井戸水に変化があると。この種のことがあるのです。

どうもこういうものをまとめると、先ほどの暖かいスラブのプレートが潜り込んでいくところでは、いろいろな現象が起こりやすく、冷たいもの、古いものが潜り込んでいくところでは、このような現象が起こりにくいことが起きているのではないかと。

例えば、昭和の今日のこの日に、南海地震が起きていますが、これは海上保安庁が「地震前に井戸水に変化がありませんか」と海岸地域を調べた結果、出ているところがこの辺りです(図表 25 左下)。

この種のものが起こる一つの可能性として

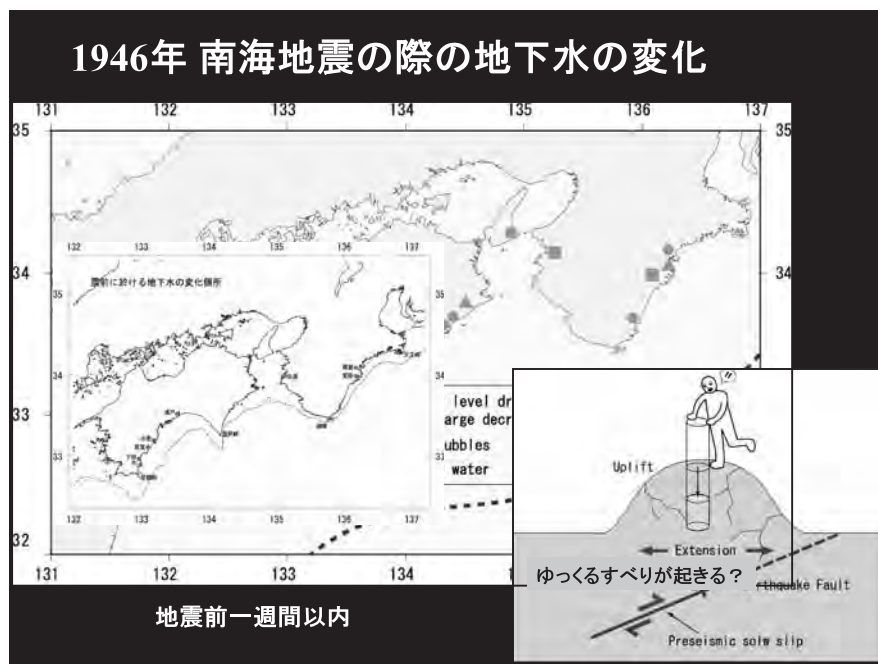
は、先ほどのゆっくり滑りとか、低周波微動を含めて、これがずるずると滑り出す。滑り出すと、上のほうが膨らんで割れ目が入る。そこで、地震時に起きたことと同じようなことが地震前に起きるかも知れないのです。

この点についても、まだ謎です。

10. まとめ

図表 26 は鷺谷威さんの図です。1793 年から 1995 年まで前兆的地殻変動につてまとめたものです。ある時は 1m の変化があった、3m の変化もあった。やたらに昔ほど大きい。最近になってくるとだんだん小さくなっていくという結果がまとめられています。

年代が新しくなるにつれ発見の頻度が下がり、変動の規模は小さくなり、発生間隔は長くなってきています。一方、測定器の精度が飛躍的にあがったわけです。もしかして、前兆的現象と思われていたものは、そうでないかもしれない。鷺谷さんの疑問です。しかし、もしかして、南海トラフの巨大地震は特別なものかもしれ



図表 25

地震の前兆的地殻変動の観測例

地震名	発生前	M	場所	タイプ	観測	時定数	モデル
兵庫県南部	1995	7.2	内陸	横ずれ	三角	100年?	△
日本海中部	1983	7.7	日本海	逆断層	水準・験潮(3cm)	5年	○
浦河沖	1982	7.1	内陸	逆断層	水準(3cm)	10年	○
伊豆大島近海	1978	7.0	内陸	横ずれ	歪	30日	○
秋田県南東部	1970	6.2	内陸	逆断層	水準(3cm)	10年	○
岐阜県中部	1969	6.6	内陸	横ずれ	水準(2cm)	5年	?
麻績	1967	5.0	内陸	?	水準(2cm)	100日	?
新潟	1964	7.5	日本海	逆断層	水準・験潮(5cm)	10年	○
北美濃	1961	7.0	内陸	横ずれ	水準(3cm)	10年	?
日向灘	1961	7.0	太平洋	逆断層	験潮(5cm)	5年	△
二ツ井	1955	5.9	内陸	逆断層	水準(3cm)	7年	○
南海	1946	8.0	プレート	逆断層	験潮(10cm)	2日	△
東南海	1944	8.0	プレート	逆断層	水準	3日	○
鳥取	1943	7.2	内陸	横ずれ	傾斜	6時間	?
男鹿	1939	6.8	日本海	逆断層	退潮(3m)	3時間	?
関原	1929	5.2	内陸	逆断層	水準(2cm)	30年?	△
北丹後	1927	7.3	内陸	横ずれ	退潮(1.5m)	2.5時間	?
関東	1923	7.9	プレート	逆断層	験潮, 基線	3年	△
庄内	1894	7.0	内陸	逆断層	退潮(0.5m)	15日	?
浜田	1872	7.1	内陸	?	退潮(2m)	30分	?
佐渡	1802	6.6	日本海	逆断層?	退潮(1m)	4時間	?
霧ヶ沢	1793	6.9	内陸	逆断層	退潮(1m)	4時間	?

鷺谷 (2004)によるまとめ

図表 26

ない。これが私の一つの答えです。

また、前兆現象の1つに、発光現象というものもあります。私は、これがいちばん前兆現象で信用されていると思いますが、来年(2007年)1月26日に、この会場で開きます。名大の相澤さんというかたが責任者になっています。

それから、東海地震のことは全然触れませんでした。野依記念館で来年(2007年)の1月12日に、次の東海地震はどこなのかというシンポジウムを行います。今までの大きい話でもよく分からないのに、そんな細かい話ができるかと私も疑問を持つところですが、一応、東海地震に限定されています。この中に鷺谷さんも入っていますが、5人の専門家をお呼びして、本当にそれでいいのかという議論をします。興味をもったかたはぜひご来場ください。

最後に、私が言いたいことをまとめると、過去3回程程度の地震発生メカニズムだけで次の地震を予測するなんてとんでもない、もっと古いことを知らなければいけない。これをまとめにして終わりたいと思います。どうもありがとう

ございました(拍手)。

質疑応答

(質問者1) 2年前まで静岡に住んでいて、東海地震が起きると脅されていたのです。2004年か2003年の3月を中心にして、プラスマイナス6か月の間に地震が起こりますと、名古屋大学の先生や東大の先生が大胆に予測したのですが、見事に外れました。あれはどういう根拠で予測したのか、その理屈はもうなくなってしまったのか。

もう一つ、10月の朝日新聞で先生のお名前が載っていて、次に起こる東海地震は規模が小さいと。というのは、東海と東南海に分けると、その境目がだんだん東に寄っているから、前回の地震でエネルギーを出したから、東のほうに寄っていけば東海地震の規模はすごく小さい、安心なさいという記事が載っていたと思うのです。それを興味深く読ませていただいたのですが、その辺は地震の予測、大きさと関係する重大な情報でしょうか。

(安藤) 最初のお話は2003年プラスマイナスというお話ですね。一つは、東海スロースリップというもので、浜名湖辺りの深さ30kmのところゆっくり滑っていたのです。それが、例えばこれが将来とんでもないことが起こるといふ仮定で、こういうカーブを当てはめると2003年ごろに異常なことが起きますよといふことを言ったのではないかと思います。

その仮定には、将来必ず異常が起きますといふカーブを当てはめるのです。将来、絶対起きませんといふカーブを当てはめると、そんな答えは出てこないで、そういうカーブを当てはめてみたら2003年ごろという話ではなかったかと思えます。

でも、今はスリップも止まっています。だから、地震は起きなかったということになります。そのときに、そのかたがどう言ったのか私は知りませんが、例えば、「地震が起きると仮定をすれば」と言ったら良かったかもしれませんね。

もう一つ、多分それは静岡県の下地震の起り方をもとにして推定したものだと思います。それも、やはりこういうモデルで、こういうことが起こるといえば地震の活動から2003年ごろが危ないということなのでしょう。

もう一つ、東大の先生が言われたのは、御前崎と掛川の間の水準測量の結果で、だんだん時間を取ると揺らぎが速くなって、しかも振幅が大きくなるというものです。これは、モデルがあるのです。株価の予測などにも使われているようです。株が急騰するとか、恐慌が起るとかに使われているとかも聞きます。結晶の変化などにも物理モデルにも使われるとかも聞きます。そういうモデルを単純に当てはめると、2003年ごろに発生するのではということになりました。ところが、最近の水準測量のデータそのものが怪しくなってきたのです。そもそも、このモデルを地震の予測に使って良いのかも疑

問です。その上データが怪しくなったので、予測は意味がなくなりました。

これらのモデルは、大地震が近い内に起こるとの仮定から出発した予測モデルですから、それらの仮定自体が問題です。それがあたかも明日でも起こるように伝わっているとしたら、そこはさらに問題だと思います。

次の質問ですが、私は10月の朝日新聞のことはよく覚えていないのですが、多分来年の1月12日に、シンポジウムに来る東大地震研の山中佳子さんが、「1944年の東南海地震は現在言われているよりももっと広い。紀伊半島先端から御前崎まで広がっていた。今の推定は間違いである」と言っているのです。それに、鹿島建設の地震研究者も震度のデータから似たようなことを言われています。

もし、それが本当ならば、東南海地震で割れ残った震源域が想定東海地震ですから、「今度起きるとしても、その地震(東海地震)は小さい」と言ったのかもしれませんが。私は自分で何を言ったのか、どういう記事だったのか覚えていないので、すみませんが、そういうことではないかと思えます。

一つ気をつけておくべきことは、地震の予測の幅は大きくすべきことです。予測にどれだけ幅があるかを常に言わないと非常に不正確になると思います。ある予測カーブを当てはめると、こうなりますが、このカーブ自体にこんなに幅があるから、分からないところは大きいと付け加えて予測すべきです。予測の幅がないようなカーブを書いて、2003年何月に地震が起こるといふのはよくないことだと思います。

私は言われたかたのことをよく知らずにお話ししておりますが、そんなことでよろしいですか。

(質問者2) 時間の関係で割愛された今村明恒

さんのところですが、すごく気になるので、申し訳ありませんが、これについてご説明をいただけないでしょうか。

(安藤) 時間をくださりましてありがとうございます。

今村先生は第2次世界大戦が近くなったときに、南海地震や東海地震がもうすぐ起こると考え、自分の退職金をなげうって観測所を造って観測をされました。図表27の星印のところが観測所です。最初のスライドは、そういうことをされた先生だという紹介です。今村先生は過去の地震データを頭に入れていたようです。今村先生は偉いと思いますが、『震潮記』を読んでいたら、やはり「もうじき地震が来る」と書いてあるのです。ということは、昔の人も地震の間隔を知って、地震が近いことが分かったということなのです。

東南海地震が起きたのは1944年(昭和19年)12月7日ですが、今村先生は、その直後

の1945年(昭和20年)2月5日に次の文を「地震」に投稿したのです。「今までの例を見ると、地震が東海地域1回だけで終わる例はない。必ず西側の南海地震が起きるから、注意をするべきだ」。時代が戦争の真最中ですから、こんなことは全く顧みられないで1946年(昭和21年)12月21日に南海地震が起きてしまうのです。今村先生は、ある意味で歴史を知っていて注意を促したのです。

現在も同じようなことを言われています。『震潮記』と今村先生が言ったことを、繰り返しも言っているのです。未来を予測することに関しては、本当に進歩がない。現在は、起こった地震現象に関してはものすごくよく分かるようになりました。ただし、未来のことは何百年も同じようなことを言っています。

あと今村先生は何を言っているかということ、「戦争中なので地震のことはつつい言わなくなった。新聞社でさえ、時局緊迫のりから地震談義でもあるまい」ということで、それまでは地震の講演会などを開いていたが、地震のこ



図表27

とは言わなくなったとのことです。「これは反省すべきだ。どんなときであっても、信念を込めて披歴しないといけない、言わないと悔やむことになる」と言われています。

これは1944年12月7日の東南海地震の直後に言ったことです。その2年あとに南海地震が起きます。きちんと地震の歴史を知っていたか

ら、こういうことを言えたのでしょうか。ただ、第2次世界大戦末期の世の中で、誰も今村先生の話を取り上げなかった。論文は読んだ人はいるのですが、取り上げることはなかったのです。今村先生の洞察力は鋭く、今読んでも驚かされるようなことがしばしば書いてあります。

おわりに

近い将来に発生が懸念される東海地震・東南海地震等への対策が急務となった平成13年以降、名古屋大学は東海地方の地域防災力を目指した地方行政・市民・関連企業・マスコミ等との協働を推進してきました。平成14～16年度には、文部科学省の地域貢献特別支援事業の一環として、環境学研究所を中心に「中京圏における地震防災ホームドクター計画」を実施し、さらに平成17年度以降は総長裁量経費の地域貢献枠や災害対策室の定常経費といった名古屋大学独自の予算により本事業を継続しています。

防災アカデミーはこの地域貢献事業の柱の一つともいえるべきもので、教育研究機関である大学の特徴をいかして継続的な講義を開催することにより地域防災力の向上に資する試みです。幸いにも多くの方のサポートが得られ着実に発展してきました。はじめの頃は40人程度の出席者で開催することが多かったのですが、最近では部屋の収容人数を大幅に超える100人以上の人が集まることも珍しくありません。防災というあまり楽しくはないテーマでこれだけ多くの人が集まる講演会を毎月開催している例は珍しいと、全国的にも広く知られるようになってきました。これは、防災アカデミーで講演していただいている講師の皆様のみならず、毎月、熱心に参加していただいている参加者の皆様のおかげであり、謝意の意を表します。

この報告書は、以下の日程で開催された4回の防災アカデミーにおける講演を元に作成されました。

- ・平原和朗「地震発生予測に挑む -コンピュータ地震なまぎの飼育法-」
(2005年4月21日 第8回防災アカデミー)
- ・寒川旭「遺跡が語る地震の歴史 -地震考古学への招待-」
(2006年6月19日 第20回防災アカデミー)
- ・安藤雅孝「南海トラフ巨大地震の残された謎」
(2006年12月21日 第25回防災アカデミー)
- ・小泉尚嗣「地下水で東南海・南海地震を予測する」
(2007年9月12日 第32回防災アカデミー)

ここに収録されている原稿は、これら講演を記録したビデオ映像から起されたものをもとに災害対策室の4人のスタッフが分担の上、責任をもって編集したものです。内容に関する質問などは、名古屋大学災害対策室までご連絡いただければ幸いです。本報告書の作成には平成19年度名古屋大学総長裁量経費を使用しました。

名古屋大学災害対策室 林 能成

防災アカデミーアーカイブ vol.1
「西南日本を襲う巨大地震」

発行日 2008年3月10日
編集 林 能成（名古屋大学災害対策室・助教）
発行 名古屋大学災害対策室
〒464-8601 名古屋市千種区不老町
表紙 稲吉直子（名古屋大学災害対策室）
印刷 株式会社クイックス
〒456-0004 名古屋市熱田区桜田町19-20



地下水で 東南海・南海地震を 予測する

えっ、
井戸で
地震予知するの？

今日、地震の前兆として期待されているのは、地震前の地殻変動です。これは、地震が発生する前に、その発生源となる断層付近を走るゆっつりとした滑り（スリップ）によって、引き起こられると考えられています。被圧地下水深い地下水は、地殻変動による体積変化に敏感に反応するので、地震前に変化すると考えられるのです。



小泉尚嗣

(産業技術総合研究所・地震地下水研究グループ長)

切腹鯨



第8回名古屋大学防災アカデミー

The Earth Simulator Center



地震発生予測に挑む

—コンピュータ地震なまずの飼育法—

平原和朗 環境学研究科教授

平成17年4月21日(木)

17:30~19:00

環境総合館1階 レクチャーホール



主催 名古屋大学災害対策室

第32回名古屋大学防災アカデミー

平成19年9月12日(水)18:00~19:30

環境総合館1階レクチャーホール

主催:名古屋大学災害対策室 TEL:052-788-6038 <http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/taisaku/>

災害対策室

検索



第20回名古屋大学防災アカデミー

遺跡が語る地震の歴史

—地震考古学への招待—

寒川 旭

産業技術総合研究所
(京都大学防災研究所客員教授)



遺跡から掘り出された過去の地震跡。なまめやかな震動であっても、いつの時代にも家や村を壊滅させるほどの力になる。地震考古学は、地震の歴史を考へるとともに、私達の将来の生活を守る学問分野と目される。 著書『地震考古学』あり



平成18年6月19日(月)
17:30~19:00

環境総合館1階レクチャーホール

主催:名古屋大学災害対策室

TEL:052-788-6038 <http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/taisaku/>



第25回名古屋大学防災アカデミー

地震火山・防災研究センター教授

安藤雅孝

南海トラフ
巨大地震の
残された謎

平成18年12月21日(木)17:30~19:00

環境総合館1階レクチャーホール

主催:名古屋大学災害対策室 TEL:052-788-6038
<http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/taisaku/>