本田財団レポート　No.154
第130回 本田財団懇談会（2014年6月30日）

「暴れる地球を理解する
～地震を予知するための新しい考え方と取り組み～」

独立行政法人海洋研究開発機構 数理科学・先端技術研究分野長

阪口　　秀

公益財団法人 本田財団

講師略歴

阪口　　秀（さかぐち　ひで）

独立行政法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）数理科学・先端技術研究分野長　（専門：粒状体の力学）

《略　　歴》

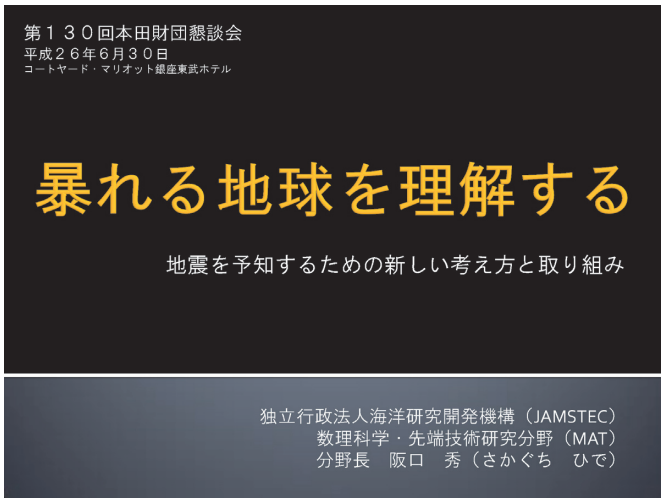
１９６２年	東京都生まれ
１９８５年	京都大学農学部農業工学科卒業
１９９１年	京都大学大学院農学研究科農業工学専攻博士課程単位取得退学
１９９１年	神戸大学農学部助手
１９９５年	オーストラリア CSIRO Exploration and Mining 客員研究員
１９９８年	オーストラリア CSIRO Exploration and Mining 専任研究員
１９９９年	（独）理化学研究所特別研究員
２０００年	オーストラリア CSIRO Exploration and Mining 上級研究員
２００２年	（財）高度情報科学技術研究機構招聘研究員
２００３年	東京大学地震研究所客員教授
２００３年	（独）海洋研究開発機構（JAMSTEC)地球内部ダイナミクス研究領域チームリーダー
２００８年	（独）海洋研究開発機構（JAMSTEC）地球内部ダイナミクス研究領域固体地球動的過程研究プログラム プログラムディレクター
２０１０年	神戸大学大学院システム情報学研究科客員教授
２０１３年	同志社大学大学院理工学研究科応用化学専攻客員教授
２０１４年	神戸大学都市安全研究センター客員教授

《主な受賞歴》

２０１０年	海洋研究開発機構研究開発功績賞
２０１１年	日本計算工学会論文賞
２０１４年	日本計算工学会グラフィックスアワード特別賞

《主な著書・編著》

１９９８年	『粉体シミュレーション入門』阪口 秀 その他 共著（産業図書）
２００８年	『階層構造の科学―宇宙・地球・生命をつなぐ新しい視点』阪口 秀、末次 大輔、草野 完 共著（東京大学出版会）



こんばんは、たいへんご丁寧にご紹介いただきました、海洋研究開発機構の阪口と申します。本日は 70 分と少し長時間になりますが、よろしくお願いします。

それでは、私の紹介をしていただきましたが、学歴にもあるように、私は大学院の理学部で地震学を勉強したわけではなく、農学部の土木に近い分野で大学を過ごし、神戸大学に最初は就職し、そこで運良くというか悪くというか、阪神・淡路大震災に被災しました。ただ、そのとき私は体力がありまして、偶然にも京都大学の先輩から神戸大学の地下トンネル、今はその地下トンネルは立派な実験場になっているのですが、その当時は裏六甲からポートアイランドと六甲アイランドに土砂を運ぶトンネルが通っていまして、そのトンネルの中を懐中電灯のヘッドライトを点けて、当時は電源も何もなかったので、電源のバッテリーを背中に背負って、地下トンネルの地震を計測する係を仰せ付かり、ひたすら毎日地下に潜って地震計のデータを取って、また吸い上げて持っていくというオフラインの仕事をしていました。それが、私が地震の研究に少し携わらせていただいたきっかけです。以後も地震学をきちんとやったことはないので、地震に関しては全くのど素人です。おそらく会場の皆様のほうが、造詣が深い方がたくさんおられると思うので、その辺に関しては少しご容赦いただいて、話を始めたいと思います。

■ 地球は忘れた頃にときどき暴れる

図－1

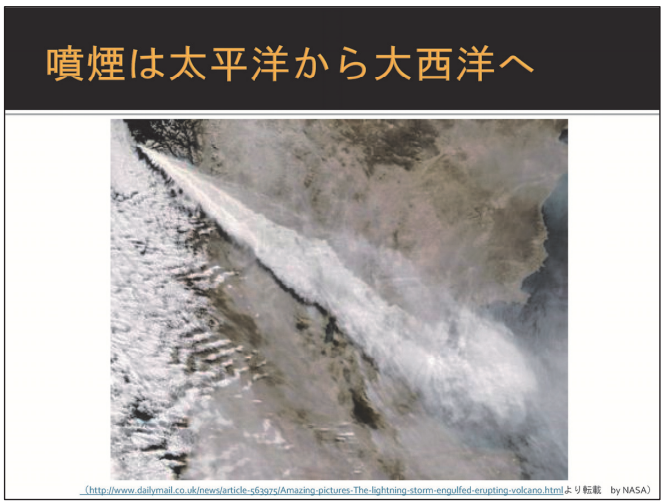
〈図－1〉　本日は先ほどご紹介にありましたように「暴れる地球を理解する」という少し大風呂敷なタイトルにさせていただいております。まず最初に、重要なことは、地球は忘れた頃にときどき暴れるということです。例えば、3 年前の東日本大震災を思い浮かべる方が多いと思いますが、私はちょっと視点を変えて南米の大陸を見ますと、昨今テレビを賑わせておりますサッカーのワールドカップの話かなと思うかもしれません。実際、南米の 11 カ国の中で、コロンビア、ブラジル、チリ、ウルグアイ、アルゼンチンという 5 カ国が予選リーグを突破して、確かに強いと。日本が 1 勝もできずに予選リーグを敗退したのとは裏腹に、南米の各国は、出場した国はほとんど、1 カ国を除いて、みんな決勝トーナメントに上がりました。ですが今日はその話は置いておきます。

2008 年の 5 月にチリで、チャイテン山という火山が大噴火をしたことは、日本ではあまり大きなニュースになっていなかったと思います。インターネットなどで、パッと「チャイテン山」というキーワードを入れると、このような映像がまだまだ多数残っています。これはチャイテン村の近くから写されたものらしいです。この爆発的な噴煙の量は、ピナツボ火山よりはワンランク下ですが、この 7、8 年の中では、地球の暴れ方としてはトップランクに位置する大きな火山噴火でした。

図－2

〈図－2〉　このとき、夕方に撮影した画像では、上がった噴煙の中に雷が発生しました。雷雲ではなく、火山の噴煙の中に雷が発生するという、すさまじい爆発的な事象がありました。

少し話が逸れますが、私が粒の研究家だと紹介いただいたので、雷についてお話します。雷というのは基本的に、雷雲の中に含まれている水蒸気の粒と粒が、擦れ合うことで静電気が起こります。擦れ合って静電気が起こるというのは、下敷きを擦って起こるものと全く同じです。噴煙の場合は、山体が吹き飛んで上に上がって、上がるものと重力で落ちてくるものが両方ありますから、非常に高頻度で擦れ合うわけです。そしてこれは、上がれば上がるほど擦れ合う量が猛烈に増えてきますので、このように噴煙の中に雷が起こったという記録が残っています。これはもうまさに地球の終焉かと思うような暴れ方であったというのが、現地の方々の記述に残っています。

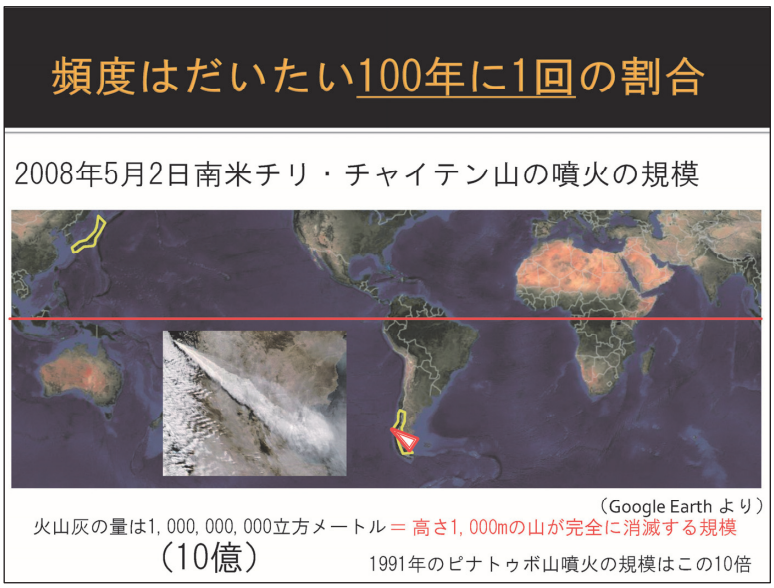


図－3

〈図－3〉　チリは太平洋側にある細長い国ですが、その太平洋の近くにあるチャイテン山から南米大陸の南端のほうへ、大陸を渡って、大西洋まで風に乗って噴煙が到達しました。

図－4

〈図－4〉　これはチリ、アルゼンチンとサッカーが強い国を横断したわけです。そして、この左の大陸全体の図でいくと、この南端の部分を拡大して、さっきの噴煙が太平洋側から大西洋まで流れる絵を当てはめると（右図）、これくらいの規模で噴煙が流れていったというすさまじい地球の暴れ方の一つでした。



図－5

〈図－5〉　この噴火の規模がどれくらいかと考えたときに、日本をざっと囲ってみて（左上黄色枠）、これを北半球から南半球にくるっと回してみますと、これは少し緯度が微妙に違うので、少し大きさのずれがありますが、およその大きさの比較でいくと、日本列島はここに入ります（中央下黄色枠）。そして、さっきの噴煙の様子をスケールして描くとこれくらいです（中央赤矢印）。ということは、東京から北海道ぐらいまでぶち抜くような噴煙が南米大陸南端を全部覆ってしまったという、非常にスケールの大きな現象がありました。この火山灰の量をざっと見積もると 10 億 m^3 で、これは高さ 1000m の山が円錐形であると考えると、ちょうど高さ 1000m の山、まる 1 個分が完全に消滅する量になります。どれくらいすさまじいかというと、毎日見ていた高さ 1000m の山が、その日を境に全部なくなって、平地になっているのと同じだけの規模の噴煙が、火山灰となって吹き飛ばされたと。ちなみに、さっきちらっと話しました 1991 年のピナツボ火山は、この 10 倍の規模の爆発でした。

重要なことは、これはほんの一例ですが、この 10 億 m^3 の火山灰が吹き飛ぶような噴火は、世界中で 100 年に 1 回の割合で起こっているということです。この後にアイスランドで、もうひと回り規模の小さい噴火があって、ヨーロッパ航路の国際線が非常に多数欠航になって、皆様方の中にもご出張でたいへん苦労された方がもしかしたらあるかと思います。あのアイスランドの火山の噴火は 100 年に 1 回ではなく、統計的には約 50 年に 1 回起こっています。そうなると、われわれが生きている間に、平均寿命の中で必ず 1 回、あれぐらいの噴火は世界のどこかで起こっています。ピナツボ火山になると、150 年に 1 回ぐらいの統計的な量になります。いずれにしましても、忘れた頃に、われわれがボーッとして数十年生きている間に世界中のどこかで、これぐらいの規模の大きな地球の暴れ方に遭遇してしまうということを言いたかったわけです。

■ 地震がもたらす甚大な損失

図－6

〈図－6〉　少し規模の小さい火山の噴火は、わが日本でもつい最近起こっています。それは東京から太平洋をずっと南に下ったところにある西ノ島というところで、これは今も噴火が継続しています。

図－7

〈図－7〉　ただ、この噴火は非常に都合の良い噴火で、もともとこの黄色く囲んだところ（左）が西ノ島でしたが、1 辺が 5、600m ぐらいの小さな無人島でした。ここから海底火山が噴火して、その噴出物が海の中にたくさんたまっていって、もともとあった島よりも大きな島が西ノ島に合体するほど大きく成長しています（右）。これは現在も成長中です。これはある意味、国土の拡大が現実に進行しているわけで、都合のよいこともたらしています。

図－8

〈図－8〉　しかし、何と言っても、2011 年 3 月に東北、茨城、千葉、東京の一部にも大きな被害をもたらした、津波を伴うような地震。これは 4、500 年に 1 回と言われていますが、もう少し小さい規模の地震だと、1995 年に神戸であったわけで、これも忘れた頃にわれわれはときどき、遭遇しているわけです。そして、重要なことは、地震が起こるとものすごい多額の被害が出るということです。お金だけで考えても、構造物等の被害で 17 兆円。それから、3 年前の地震では原発も事故を起こしました。これの今のところ数えられている被害想定額が約 11 兆円で、トータルして 30 兆円規模の損失が出てしまいました。これは日本の去年の GDP の実質額が約 530 兆円ですが、これと比較して大きいと感じる方も、大したことはないと感じる方もいるかもしれませんが、現実にわれわれの所得税から復興のために引かれる 2.1％の税金は、これから二十数年、脈々と続くわけで、そうするとわれわれの手取りが減るわけです。そうなれば、いくら安倍内閣が経済成長といろいろなことを言っていても、この地震が 1 回起こったために 25 年間、特に働き盛りの人は、働けど働けど、税金を持って行かれる、この損失の補填に当てられるという、非常に国家的な大損失をもたらしてしまいます。

図－9

〈図－9〉　私自身も冒頭に述べましたように、1991 年から 1995 年まで神戸大学に勤めていた関係で、兵庫県の宝塚にある神戸大学の官舎に住んでいました。これは 1 月 17 日朝の、家から歩いて 30 秒ぐらいのところの写真です。幸い、私のボロアパートは鉄筋コンクリートだったので、建物自体は壊れませんでしたし、家具も大したものは持っていませんでしたが、家の中はもう全部破壊されて住めない状態になりました。

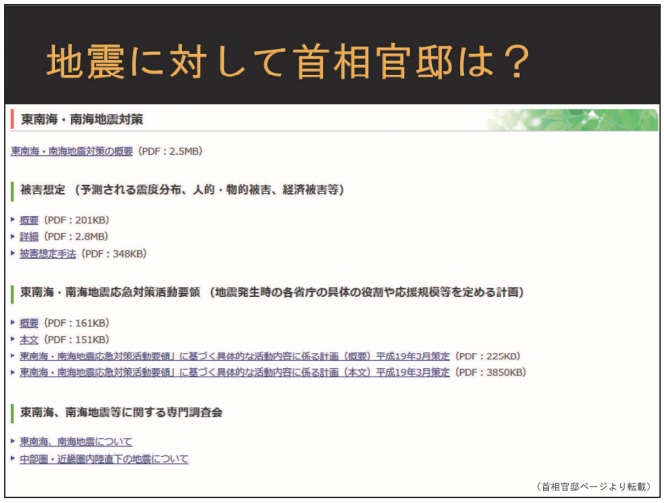
図－10

〈図－10〉　仕事に行こうにも、阪急今津線が軌道ごと破壊されてしまい、これは家のすぐ前の道路ですが（右）、道路も何もかも破壊されて、職場に行こうにも行くすべがありませんでした。このあと、自転車やらで行こうと思ってもとにかく道がないので、神戸大学までは数日歩いて行って、その後自分の家はどうせ住めないので、ずっと大学に寝泊まりを強制させられました。それから半年間、神戸大学は被災者の避難所になっていたので、当時私は 30 歳になるかならないかの頃でしたから、われわれ若い大学の職員は大学の避難所のお世話係をずっとやらされて、学問も教育も研究も半年間、完全にストップでした。もちろん、自宅も電気、ガス、水道が 3、4 カ月全く復旧しませんでしたので、とても住める状態ではありませんでした。命は助かったのですが、非常に長期に渡って、非常に

ストレスの多い時間を過ごしたことを、今でもよく覚えています。まさに人生で二度と体験したくない出来事でした。これに加えまして、自分の教えていた学生が２名、下宿先で亡くなったのですが、この間の地震も含めて、命を落とされた方は本人も無念、遺されたご家族の皆様もたいへん無念だったと思います。

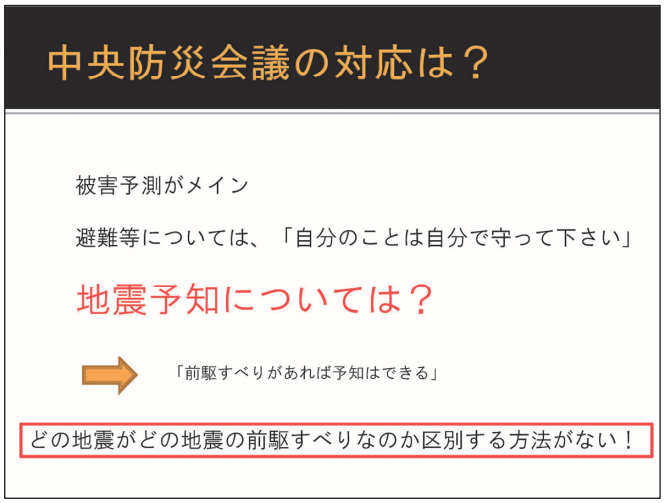
特に日本は地震の巣窟帯の上にある小さな島国ですが、わが国と国民は、地球が暴れることに対してどう対峙してきたかということを少し考えるべきだと思います。それはつまり、先ほどの１回の地震・津波で 30 兆円の損害が出るような出来事に対して、われわれはどう立ち向かってやるかということを少し考えるべきではないかと思います。

■ 被害予測重視の政府と期待されない地震予知



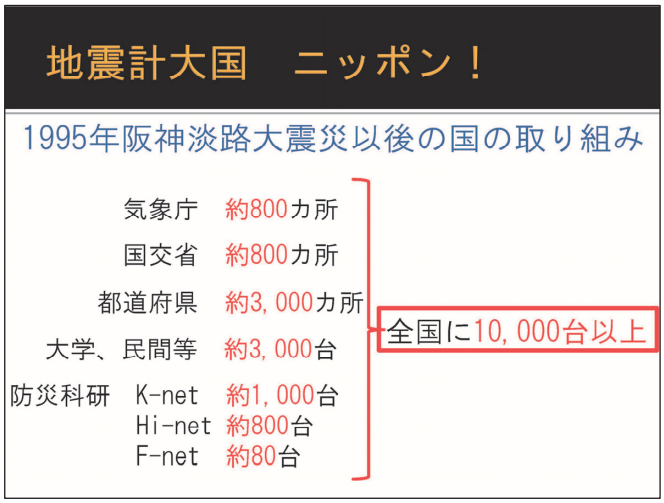
図－11

〈図－11〉　地震に対して、首相官邸のページに何が書いてあるか、皆様もご帰宅されたらちらっと見てください。そうしますと、首相官邸の国の地震対策に対するページがあります。例えばその中の南海地震の辺りをパッと開くと、被害想定額というものがありまして、それから、もう一つが緊急時にどう対応するかということがありまして、あとは地震の専門委員会の名簿と、それぞれの地震に対する意見みたいなものがつらつらと書いてあるだけで、これといって地震からはこう避けろとか、いろいろな指示は書いてありません。地震は起こるものであるということと、起こったら行政・国としてどう対処するかが書いてありますが、「国民の皆様は自らの命を自分で守り～」という言葉が書いてあるだけです。地震からわれわれを直接守ってくれるということはできないから書いていないのだと思いますが、そういうくだりはございません。



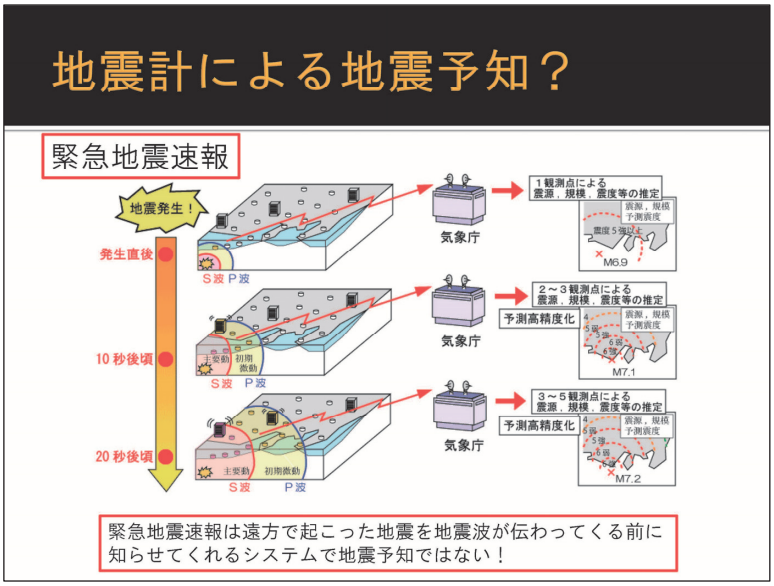
図－12

〈図－12〉　中央防災会議の対応を簡略に書くと、やはり被害予測がメインで、それから、避難時は「自分のことは自分で守って下さい」と明確に記されています。そして、地震予知については、われわれが一番知りたいわけです。次の大きな、30 兆円とまではいきませんが、自分の財産を失ってしまう、自分自身または家族を失ってしまうような地震はいつどこで起こるのかということに関して、情報が欲しいわけです。それは、例えば、今日の夜に大雨が降るのか降らないのかということでさえも、皆さん非常に敏感で、今日ここに来たあと、帰れるだろうかとか、いろいろなことを考えられると思うのですが、忘れた頃にやってくる地震に対してだって、それぐらいの情報はあってもいいはずだと。これは私が自分で体験しただけに、二度と自分の周り、もちろん他の人の周りでは起こっていいというわけではありませんが、自分の周りでは起こってほしくないという気持ちから、地震の予知について非常に知りたいわけです。ところが、どこにもない、残念ながら。唯一、ちらっとそばにいた地震学者に教えていただいたのは、前駆すべりというものがあれば、予知はできるということが、一応明記されていますと。だから、地震予知について完全に見放しているわけではありませんと。ただし、この前駆すべりというのは、たくさんの地震のデータを取って、本すべりがあったら初めて「それの前にあったやつが前駆すべりだったね」ということであって、どの地震がどの地震の前駆すべりなのかを区別する方法は今のところ、ないわけです。だから、地震が起こってからのデータを見ることによってわかりますと言っても、現実にはわからないというのが悲しいかな、現状です。



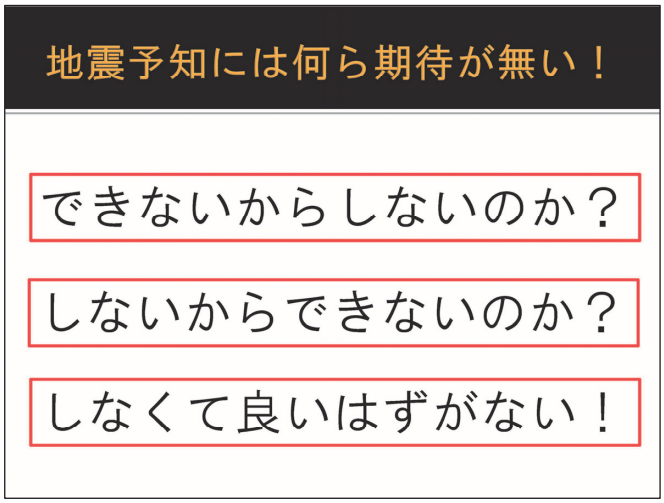
図－13

〈図－13〉　では、何もしていないかというとそうではなくて、1995 年の阪神・淡路大震災以降の国の取り組みで目ぼしいものは、日本中に地震計を撒いたことです。省庁もばらばらに、気象庁が 800 カ所、これはもっとも 1 カ所に数台あるのかもしれませんが。そして、国土交通省も置きました。さらに、各都道府県が別々に置きました。それから、大学や民間の研究機関も、自分たちを守るためには地震計を置かなければいけないという錯覚に陥って、みんな猫も杓子も地震計、今、日本には登録されているものだけで 1 万台以上の地震計があります。だから、ほんの小さな地震が起こっても、緊急ニュースとかで画面が全部「〇」で埋まって、裏の地図が見えないぐらいに震度分布というものが出て、自分の家の近所は 2 だったのか 3 だったのかということで文句を言う人もいるほど、地震計の値に皆さん、敏感になっているのです。今日この会場に来られている上田誠也先生もずっと前から主張されているように、地震計は起こった地震を測る道具であって、これから起こる地震に対しては何も教えてくれないわけです。だから、地震計をどれだけ撒いても、これから起こる地震に対しては無力。ただ、たくさんデータを取れば統計量というものが生まれてくるので、その統計量から将来を推測するという手法には使えると思いますが、眼前に迫っている地震が起こるか起こらないかということに関して、地震計は何も答えてくれないというのが、これは正しい話です。上田先生もずっと前から主張されていますが、私も全くその通りだと思います。



図－14

〈図－14〉　一方、緊急地震速報というのがあります。皆様も携帯電話に登録されている方も多いと思いますが、あれは３年前の地震のときは、地震が起こったあとから鳴ったりすることがたくさんありました。最近はあまり鳴らないようになっているのか、あまり高頻度に職場でも放送がかかるようなことが少し減ってきました。あれはどうなっているのかと申しますと、遠くで起こった地震を地震計で捉えて、地震波が今、皆様が住んでおられる場所に到達するよりも早く、「遠くで地震がありましたから、伝わってくるのは何秒後です」ということを知らせてくれるシステムであって、あれは起こった地震を測ってそれを早く情報として伝えているだけで、緊急地震速報は地震予知ではないわけですよね。ちょっと数秒とか数分早く知らせてくれますが、予知しているわけではなくて、起こった地震を早くお知らせしてくれているに過ぎません。だから、地震計によって地震予知はできないということを、システム全体で示してくれているものと思ってよろしいと思います。

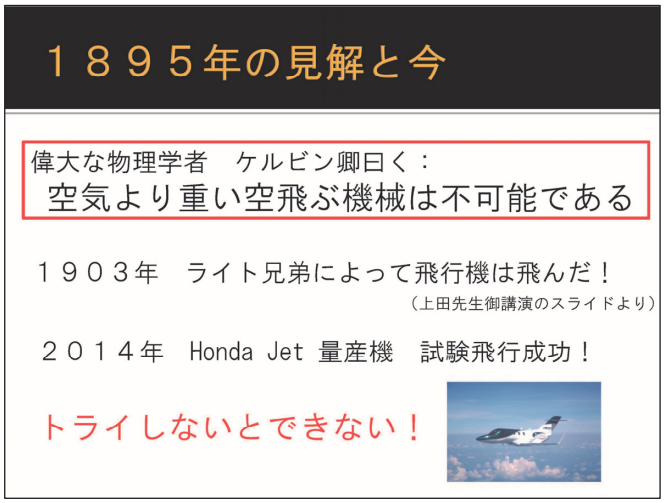


図－15

〈図－15〉　地震予知には、見かけ上、何ら国も何もかもが期待していないと。それの一つの大きな理由は、「できないからしない」。例えば、地震学会の偉い先生が「地震予知は不可能です」と。「いまのところの技術と知識と情報から地震予知は不可能です」という宣言をされて、マスコミ等に地震学の敗北だとかいう名目で一時、新聞やニュースを賑わせていたときがあったことを皆様もご記憶かと思います。では、「できないからしない」、その逆は「しないからできない」。これの両方が悪循環しているのが悲しいかな今の現状ではないかと私は思います。

■ トライしないとできない

でも、しなくて良いはずがないわけですよね。例えば、3 日後にどこそこに地震がくるかもしれない、100％の確率ではないかもしれなくても、その情報があったら、そこにいなかったために、もちろん、自分の家やら車やらは流されてしまうかもしれませんが、命だけは落とさずに済む方法がどこかにあるわけですね。台風が来るところに泳ぎに行く人が今はほとんどいないように、もし地震予報ができていれば地震が起こる場所をその日のその時間に避けることは可能で、それによって命を救うことができるわけなので、「できればする」ではなくて、地震予知の研究というのはしなくて良いはずがないわけです。これが非常に重要なことです。



図－16

〈図－16〉　この間、上田先生のご講演のスライドを見ていましたが、私にも非常に響いた一つのスライドがあります。それは、1895 年に物理学者のケルビンは「空気より重い空飛ぶ機械は不可能である」と明言されたそうです。ところが、そのほんの数年後の 1903 年に、1 分よりは短かったらしいですが、ライト兄弟によって飛行機が飛んだわけで、物理学者のケルビンの予言を、ライト兄弟は外したわけです。これはとても重要な事実で、今、どんなに権威のある地震学者が「地震予知は不可能である」と言っても、非常に強い熱意と努力によっては、それを覆すことができる可能性があるということを、この話は物語っていると思います。

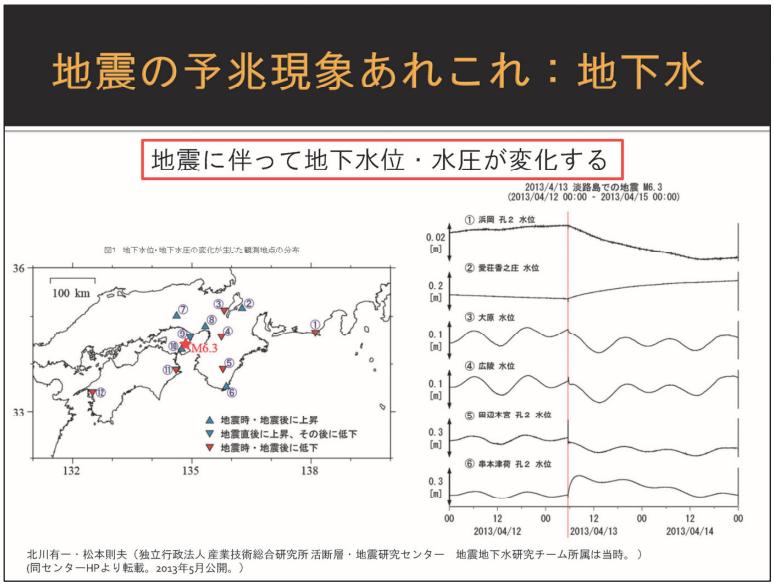
そして、ちょっとお世辞になるかもしれませんが、昨日のニュースで、HONDA の小型ジェット機の量産機が初飛行に成功したというニュースがありました。昨日のニュースを見ていて、翌日、私が本田財団にお招きいただいてお話をする。これはたまたまではないなと。そして、このスライドは一昨日まではここまでしか用意していなかったのです。別のことを書いていたのですが、HONDA も確か「トライしないとできない」ということを昔から会社の中で言われていたと思います。これは非常に重要なことで、おそらく非常に高級で高性能なエンジンを二輪車から四輪車に供給して、次は飛行機だと。ところが、陸で走るものを作るのと飛行機はまるで違うのだよということで、私は知りませんが、想像するに非常に多くの苦労とか、抵抗勢力とかいろいろなものがあったと思うのですが、それを見事に打ち破って、独自に量産機としてジェット機を飛ばしたというのは、日本にとって、世界にとって、とても偉大なニュースです。逆にさっきの地震予知もしなくて良いはずがなくて、これはトライすることによって可能としなければならないということを、HONDA がわれわれに対して強くメッセージとして残した偉大なニュースだと、私は昨日、強く感じました。

■ 地震の前兆・予兆現象を捉える研究

図－17

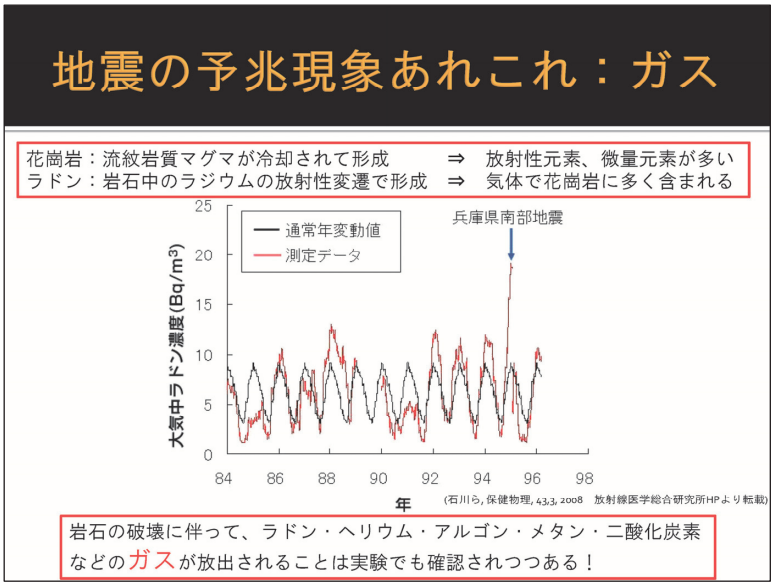
〈図－17〉　では、これまで何もしていなかったかというと、そうではありません。多くの研究者が、地震の前兆現象というものを捉えるために多くの努力を払ってきています。例えば、ナマズの異常行動が地震の前に起こるということが、ことわざだとか言い伝えにありますが、これも最近はだいぶわかってきて、魚類は地電流、要するに地面の中を流れている電流に非常に敏感であると。なので、地震が起こり始めたときに、地面が割れたりずれたりし始めたことによって地電流が変化して、その変化を水を通して感じているのではないかというところまでわかってきたらしいのですが、残念ながら、生物を介在する地震予知というのは、生物に聞けないという。どんなに「それで合っていますよね、地電流で感じたんですよねナマズさん」と問い合わせても、少しエサをたくさんあげても、こいつは決して答えてくれないと。それから、地電流に敏感なナマズと鈍感なナマズと、生物の場合はいろいろいます。人間だって、よく働く人間と全然働かない人間といろいろいますよね。だから、生物の場合は個体差が非常に大きいということで、傾向はあるのですが、その日はたまたま休みだったから反応しなかったなどというやつもいるかもしれませんよね。だから、確率的に言うと、なかなか高くはなりません。

ただ、地電流を直接地面に電極を刺してずっと観測した研究者がいます。そうすると、陸地での地震に限りますが、地電流を連続観測して、その変化から近いうちにこの近所で地震の可能性があるということをきちんと論文に書いて示唆して、それが当たったそうです。そして、それをきちんと検証する研究をずっとされて、今は VAN 法という名前で、地電流の連続観測から地震を予知するという、研究レベルから実用化にまで非常に有力な方法となっています。



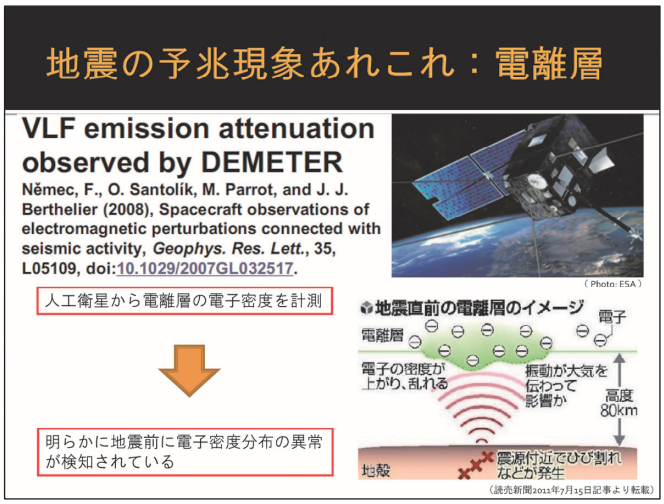
図－18

〈図－18〉　　それから、地下水。これは地震に伴って地下水が変化して、圧力も変化する。それから、水脈も変化するそうです。例えば、近畿地方で何カ所か地下水を測って、この図は去年の４月の地震のものですが、現実に地震の前と地震の後で地下水位も変化するし、それから、水圧も変化すると。これはこんな小難しい話をしないでも、新潟の酒杜氏の方に直接聞いてみますと、地震が起こる前の辺りから、水の味が変わってくるそうです。杜氏の方は日本中の水の味を非常に敏感にかぎ分けられますが、水の味が変わる、つまり水系が変わる。地下でつながっている水の道が変わることで、これから地震が起こると。そして、地震が起こってしまうと二度と同じ味の酒が造れなくなるから、いろいろな混ぜ物をして前の味を取り戻さないといけないのでたいへんなのだという説明を、新潟と山形の杜氏の方に聞いたことがあります。地下水は地震に対して非常に敏感です。ただこの図にもあるように、地震が来た日からぐっと変化するので（右グラフ赤線）、少し前の状態が変化しているのかどうかというのはなかなかわからないです。だから、変化することは間違いないのですが、敏感性ということに関しては、少し地下水は駄目かなという感じもします。



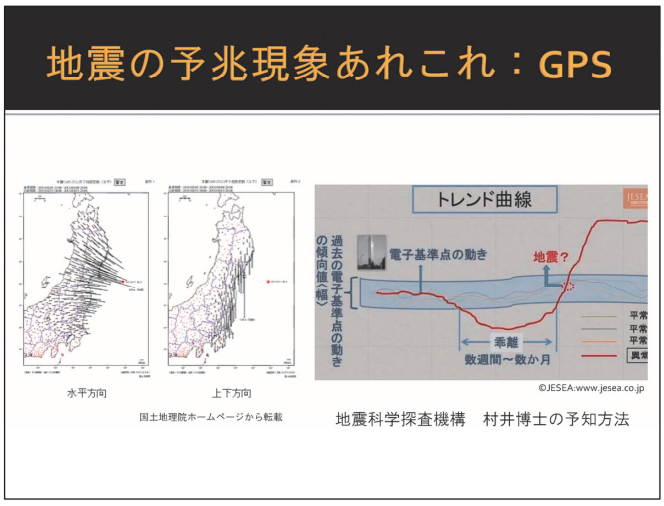
図－19

〈図－19〉　今度は、水ではなくガス。いろいろなガスがありますが、例えば、地下深くからマグマが直接上がってきたと考えられている花崗岩。私は昔、神戸にいたのですが、六甲山などはほとんど風化花崗岩でできていて、花崗岩は地下深くから上がってきたために、地下深くの放射性元素をたくさん含んでいます。ラジウムが岩石の中で変遷して形成されるラドンというものが、花崗岩にはたくさん含まれています。ラドンは常温で気体です。なので、平時は岩石の中に水に溶けているか、閉じ込められているのですが、ほんの少し割れると気体が地面から上がって空気中に放出されます。このラドンの量をずっと測ってみると、これが兵庫県南部地震のときのデータで、赤色がその年の測定データ、黒が平年のデータらしいですが、地震の前に大気中のラドンの濃度が思い切り上がって、これは何かが起こると。これもあとからわかった話らしいですが、非常に敏感に変化します。岩石を破壊すると、ラドン以外にヘリウム、アルゴン、メタン、二酸化炭素など、いろいろなガスが放出するということが今、実験でどんどんわかってきています。なので、こういうガスを綿密に測定することによって、地震予知が可能になるかもしれません。



図－20

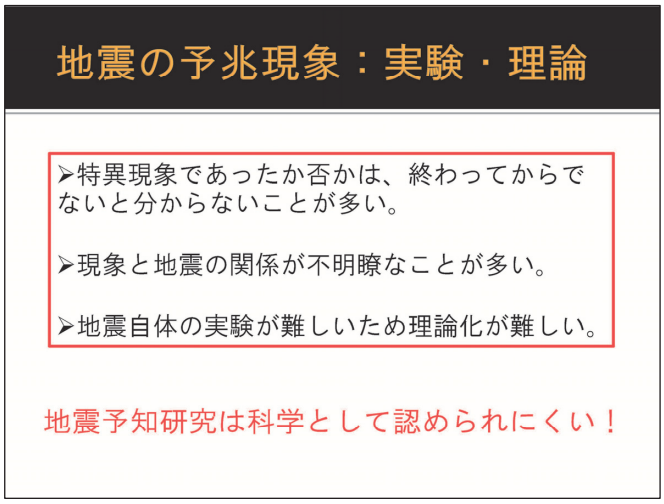
〈図－20〉　それから、もっと大がかりな話になりますと、地球の外から人工衛星を使って、電離層の電子の密度を測ると、ひび割れなど、要するに地震の前駆現象が起こると、地表に近いところで電子の密度が上がって、空高い電離層で電子の密度がぐっと下がるということが、人工衛星の測定で既にわかっています。これはもう何本かの論文になっています。なので、できるだけ安くて小さい人工衛星を、日本の空を隈なく覆うように、そんな大がかりな人工衛星ではなく、小型の人工衛星をたくさん飛ばすことによって連続観測して電離層中の電子密度を測定することで、地震を予知できると主張しているグループもあります。これもかなり信憑性が高い話だと思います。



図－21

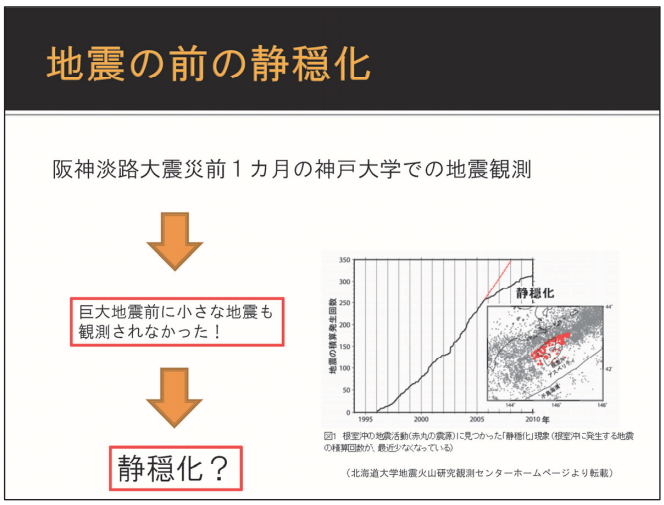
〈図－21〉　あと、GPS（Global Positioning System）で日本列島がどう変形して、どう動いているかということを測定していることは、国土地理院のホームページを見ると出ているのですが、これを短い時間スケールで隈なく調べると、これは村井俊治先生という方が考えられている予知の方法で、常時はずっと、一定の電子基準点にある GPS 測定点が、あるとき負の方向に動いたあと、プラスに転じると地震が起こるということを主張されている研究もあります。これもかなりの確率で当たるそうです。ただ、当たる、当たらないという言葉を使うと、占いなどの当てもののように捉えられてし

まうのですが、残念ながら、まだ 100％とか 90％の確度で予知することはできていない。だから採用されていない、そういうレベルです。



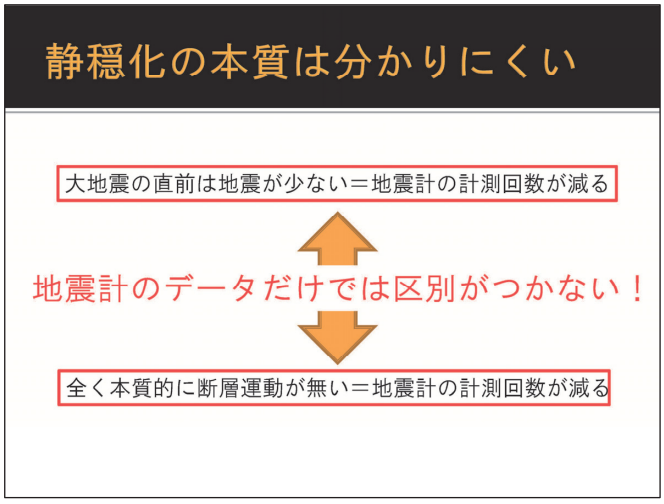
図－22

〈図－22〉　その他、地震雲、発光現象、動物の異常行動など、さまざまな指標を用いて地震を予知する研究が進められています。測っている量が特異な現象だったのか、それとも普通の現象でちょっとずれただけなのかということが、終わったからでないとわからないことが多いというのが、一つの重要な問題です。それから、現象そのものと地震そのものの関係が不明瞭なことが多い。もう一つは、地震自体を実験することができないので、再現したり、もう 1 回検証しようということがなかなかできないというのが、地震予知研究が科学として認められにくい一つの原因ではないかと思います。



図－23

〈図－23〉　それからもう一つ、これは私自身が自分で計測していたデータから見出したことですが、阪神・淡路大震災の１カ月ぐらい前から、神戸大学の地震計が非常におとなしくなって、全然動かなくなったのです。私に地震計のお守りを命じた京都大学の澤田先生という先輩が「メンテナンスを間違っているんだろ、お前、適当にやっているんだろう、バッテリーを入れていないだろう」などといろいろなことを言われて、地震計の感度を一つレベルアップしないと針が動かないので、私も確かめようがないので、少し感度を上げていたときに、１ カ月後に地震が来て振り切れたというアホなことが起こったのです。現実に、大地震の前に地震が減るということは、他のところでも言われています。北海道大学の先生も、大きな地震が来る前に地震の数がだんだん、だんだん減ってくるということがあって、これを「静穏化」という単語で括られているのですが、これはこれで本質はよくわかっていないというのが現状です。

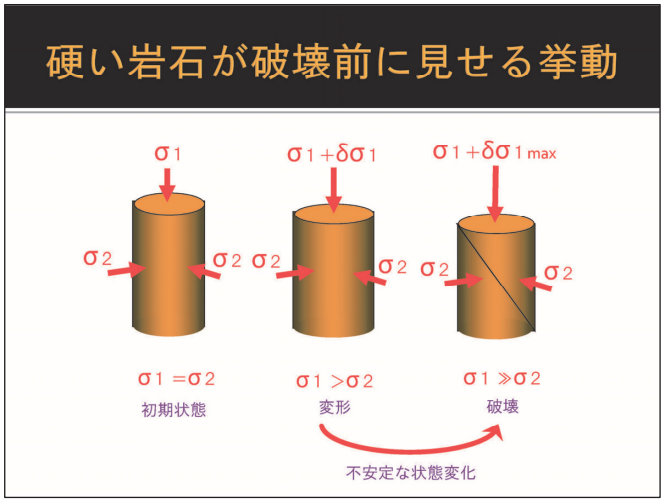


図－24

〈図－24〉　つまり、大地震の前に地震が少なくなると、地震計の計測回数が減るわけです。それは、全然、力がかからなくなったから、地震が減ったのかどうかというのが、これも終わってからでないと、地震計のデータからだけでは区別がつかないわけです。だから、全部これもあと出しじゃん

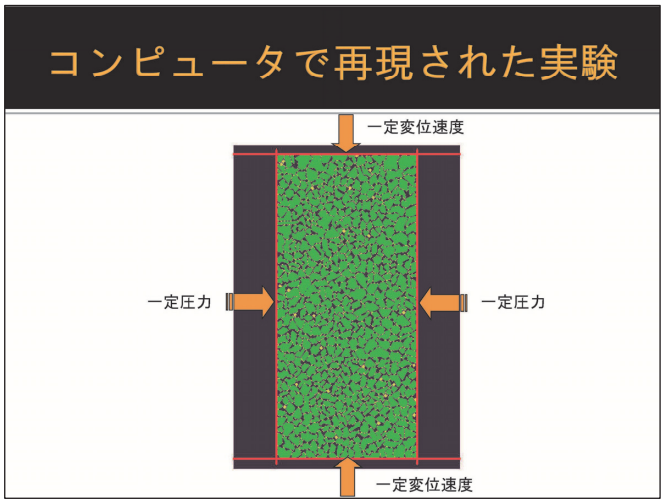
けんみたいに、あとから「ああ、あのときは減っていたやつが、地震の前兆現象だったな」ということを言うに過ぎないことがあります。

■ 断層破壊前に見られる地震の予兆現象



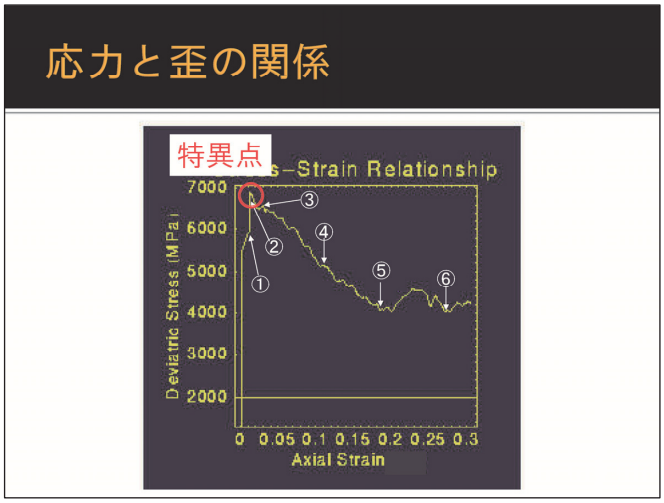
図－25

〈図－25〉　ここからは私自身の研究に入らせていただきます。硬い岩石を押しつけて割ると、斜めに割れます。これが、断層を実験室で模擬する一番簡単な実験です。このときに、左の最初の状態から、上から強く押して横からは弱く押しているわけですから、空き缶でも何でもいいですが、上から押しつけて、横から押しつける力が弱いと、横に膨れて上下方向が縮みます。その順調に変形している状態（中央）から、突如として斜めに割れるわけです（右）。



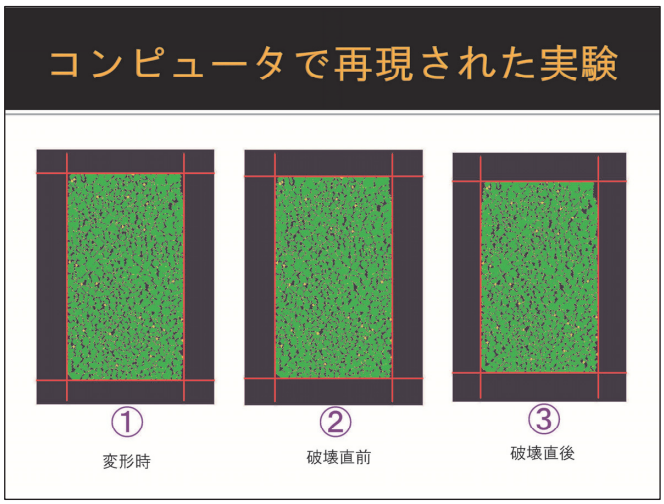
図－26

〈図－26〉　このときにどういうことが起こっているかということを、これは私が 20 年以上前にオーストラリアにいたときに今のポンチ絵で描いた実験を、そのままコンピュータのシミュレーションで再現しました。



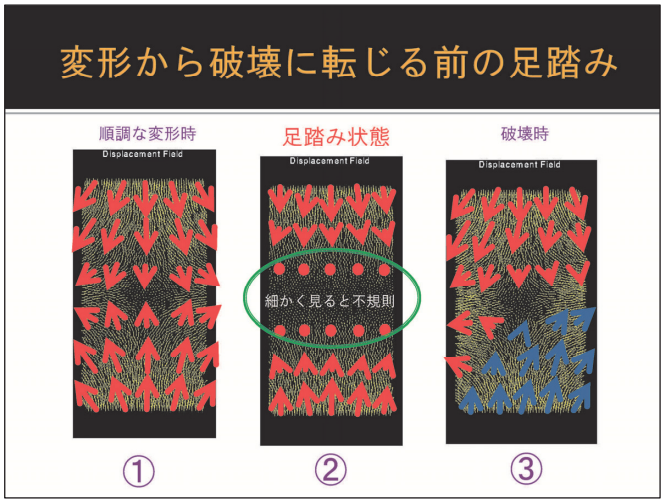
図－27

〈図－27〉　普通に実験をやったときと同じように、最初にグッと力が上がって、バーンと頂点で割れたらあとは力が落ちてくる。このコンピュータのシミュレーションは、実験そのものをそのまま模擬できているのですが、ちょうど尖ったところ、力が一番かかるピークの前後でどんなことが起こっているかということを、実験では計測の精度が足りなくて測れないのですが、コンピュータはいくらでも精度を上げて計算することができるので、この特異点の部分でどうなっているかということをコンピュータ上で大昔に見たことがあります。



図－28

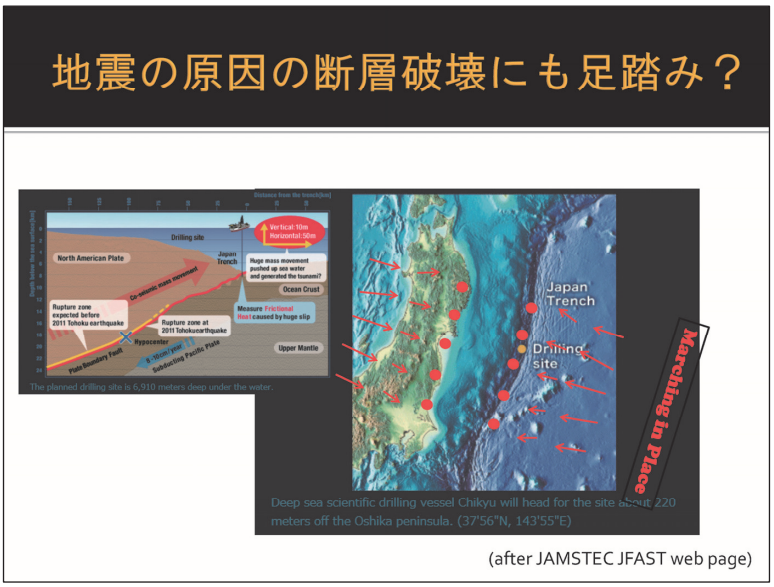
〈図－28〉　それは、変形しているときは上から押されて、これも横に膨れてきているのですが、右が破壊直後です。しかし、見た目には何もよくわからないわけです。実験で測定している量というのは、これぐらいしかわかりません。歪みゲージとかいろいろなものを張っても、あまりよくわかりません。これは破壊直前です（中央）。直前と直後では、この縦が微妙に短くなって横が膨れていること以外は、中の構造の変化というのはほとんどわかりません。



図－29

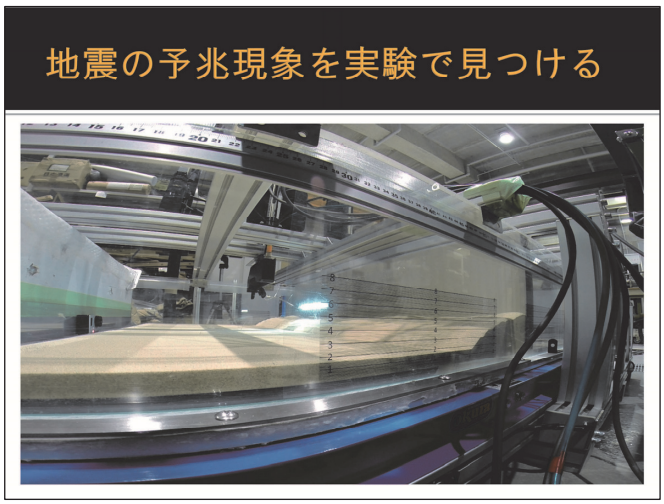
〈図－29〉　ところが、ものすごく細かい点の変異をコンピュータで描くことができます。そうすると、変形しているときは、上と下から縮められて横に膨れているわけですから、全部の速度を点で打ってみるとこんな感じになるわけです（①）。ところが、破壊したときはこれです（③）。わかりやすく描くと、上と下から縮まって横に膨れている。破壊したときは上の半分が左斜め下に行って、下の半分が右斜め上に行こうとします。このちょうど間はどうなっているのかというと、不思議なことに、もう変形しきって、これ以上は変形できないよと（②）。変形できないから破壊するわけで、変形できないときというのは、もう真ん中辺りというのは全然動いていないわけです。そして、破壊のスタートが起こるのはだいたい真ん中なのですが、破壊を始めるポイントというのは、実は破壊直前

は全然動かなくなります。もうにっちもさっちも、右にも左にも、前にも後ろにも動けなくなっている状態で、いわゆる足踏み状態をして、ここから少しぐだぐだと、右に行くか左に行くか、振動が始まって、そして、ここで割れましょうと。反対の斜めで割れてもいいのです、どこで割れてもいいのです。こちらと決まる直前に１回止まって、ぐだぐだと動き出してから割れるということが、コンピュータでわかっていました。



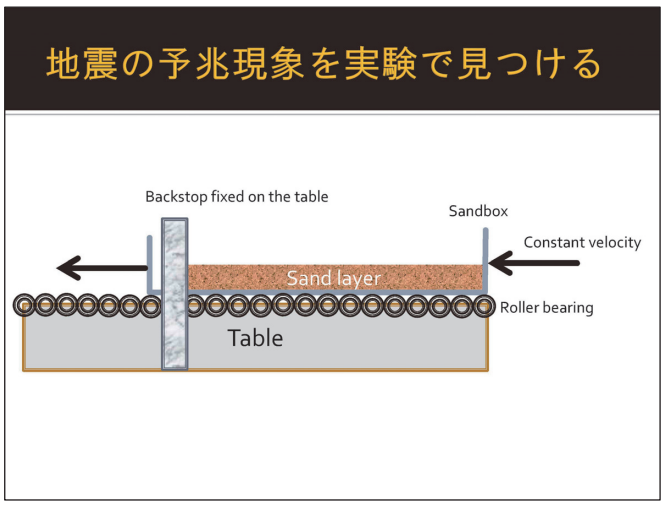
図－30

〈図－30〉　ここ最近、これをもう少し大きい断層の実験で見られないかというのをやってみたのが、このスライドです。これを考えたのは、今のように大きな断層、これはちょっと模擬的に描いたものですが、大きな断層のすべりが起こる前も、さっきの実験を横斜めにしておいたように、止まると。



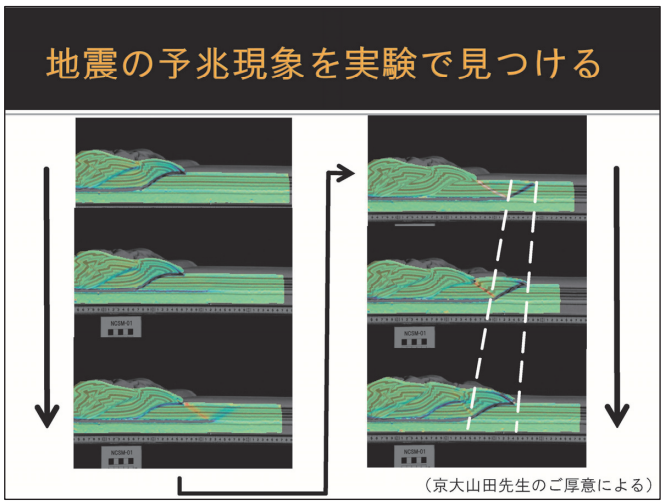
図－31

〈図－31〉　だから、これが静穏化のメカニズムではないかと考えて、1 辺が 1 メートルのでかい砂の箱をつくって、砂を撒いて最初に敷きならすのに、砂粒の 20 分の 1 のサイズできっちり敷き詰める。要するに、ミクロンオーダーの精度で箱をつくって、ミクロンオーダーの精度で砂を敷き詰めて、ミクロンオーダーの精度で砂を敷きならして、完全に均質な砂の箱をつくります。



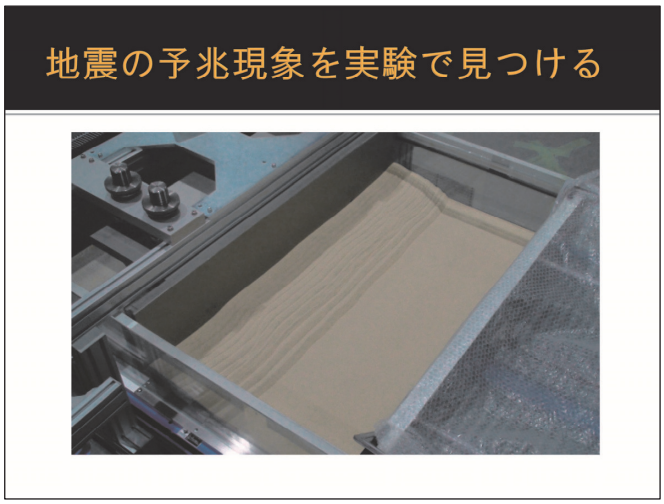
図－32

〈図－32〉　そして、その箱をローラーの上に置いて、押して片方の壁で止めるという、システムとしては非常に単純です。



図－33

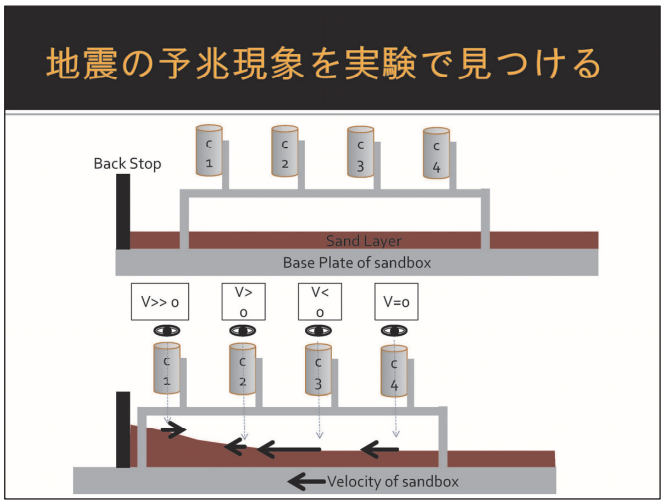
〈図－33〉　実験をやって横から見ると、止められているところにどんどん山ができて、その山ができるところで断層運動が起こるのです。これは大昔から砂箱実験と言って、断層を模擬した研究でよく使われていました。



図－34

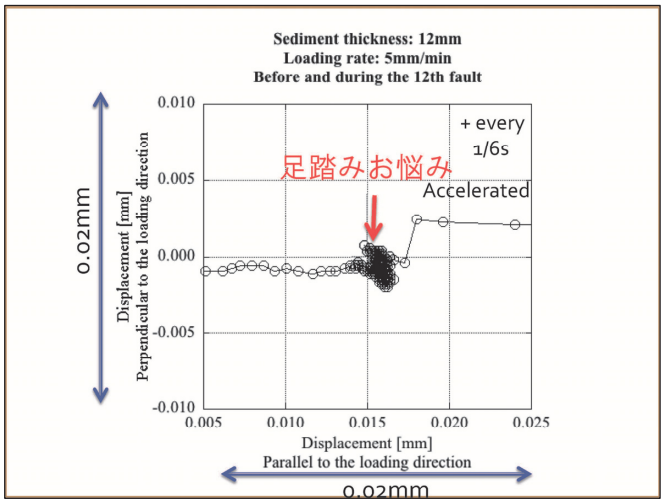
図－35

〈図－34、35〉　これを上から見て、予兆現象はないかというのを調べてみました。どうやったかというと、高速カメラの先にマクロレンズをたくさん付けて、この装置だけで 2000 万円ぐらいかかってしまって、それは怒られるかもしれませんが、このような実験を真面目にやってみました。



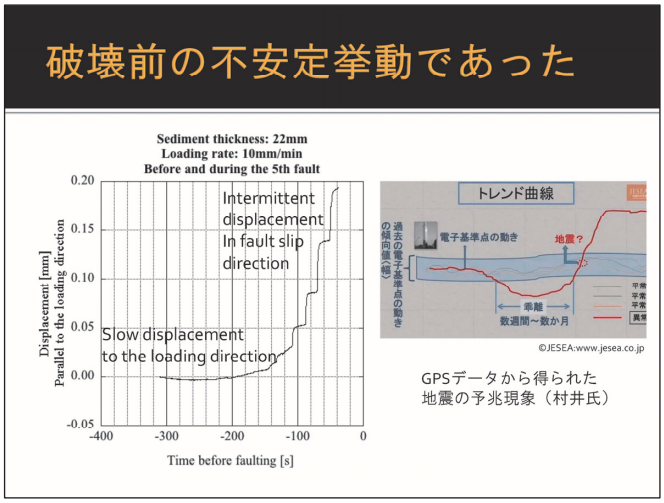
図－36

〈図－36〉　高速カメラを 4 台付けて、砂粒 1 粒の平均粒径がだいたい 200 ミクロンですが、1 ミクロンの解像度で見ることができます。実際には左の壁に向かって動くので、山ができたときにどう見えるかということを測ってみました。



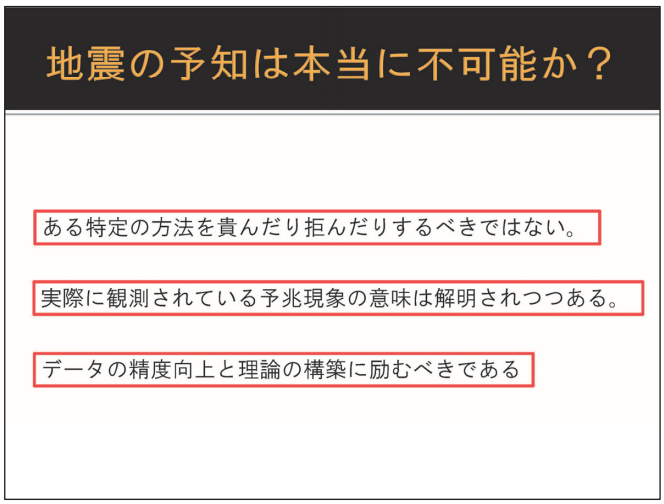
図－37

〈図－37〉　平時は、砂粒とカメラが同じ速度で動いているので、カメラから見た砂粒は、ずっと一緒に動いている場合は、全然動いていないように見えます。ところが、地震の前、要するに断層破壊が起こる前は、少し動き出して、グニャグニャとここ（赤矢印）で足踏みをします。右や左に砂がどっちに行けばいいのか、要するにそれ以上行けなくなった状態ですよね。悩みだして、その悩みが終わったらスーッと加速して破壊が起こるということが、この実験ではほぼ 100％の再現性をもって見ることができました。



図－38

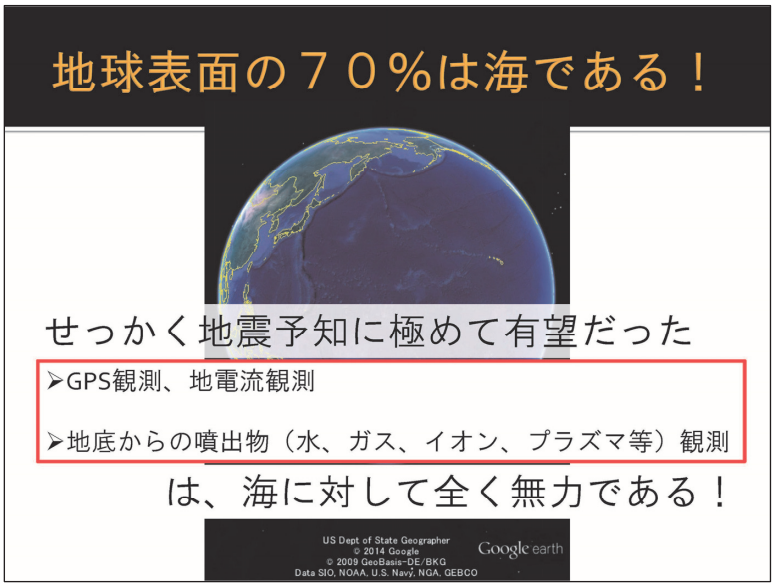
〈図－38〉　同時に、今の横軸を時間にして、縦軸をその変異で書いてみると、真横に行っている場合は全然動かないのですが、少し悩んで、反対方向に動いたりしてから一気に滑り出すというのは、これは村井先生が GPS で見ていた様とほとんど同じトレンドです。要するに、大きな破壊が起こる前に、右や左に悩んだ動きをするということが、たった 1m×1m ですが、砂箱の実験装置をミクロンオーダーで観察するとこういう動きがよく見えました。



図－39

〈図－39〉　テンタティブな結論は、今、たくさんの方法を皆様にご紹介いたしましたが、ある特定の方法を、あれはいいと言ったりこれは駄目だというレベルでは今はないわけです。もっといろいろな方法を、みんなが協力して複合的にデータを見るべきです。それから、実際に観測されている量の物理的な意味が何かというのを、もう少し突き詰める。そして、データの精度向上と理論の構築をやることによって、もっとたくさんの人がタックルすることで、地震の予知はかなり可能になるかもしれません。

■ 観測に立ちはだかる海



図－40

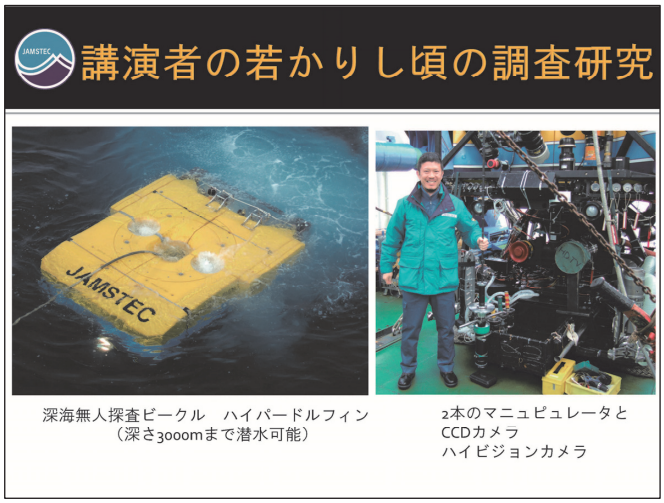
〈図－40〉　ただ、最後に一つ、地球ということを対象としたときにどうしようもない制約条件が一つあることをご紹介させていただきます。それは、地球表面の 7 割は海なんですよね。海だから、せっかく地震予知に極めて有望だった GPS の観測だとか、それから、地電流の観測、これは海でも海底に電流計測すればできないことはないですが、たいへん、お金と時間がかかります。それからガスの噴出物も、大気に出る前に海水に溶けてしまいますので、計測が非常に曖昧になります。

大事なことは、南海トラフだのそういうプレート境界で起こる巨大地震は、ほとんど海起源です。内陸で起こる大きな地震ももちろんありますが、プレート境界はほとんど海の下にありますので、大きな地震の巣窟というのは、残念ながら海にあるということになり、今まで紹介した方法が、かなり無力になるという現実にわれわれは遭遇します。この海の障壁を克服するために、私は JAMSTEC（海洋研究開発機構）というところに行けば、本当にこの問題を解決できるのではないかと思って、門を叩きました。

図－41

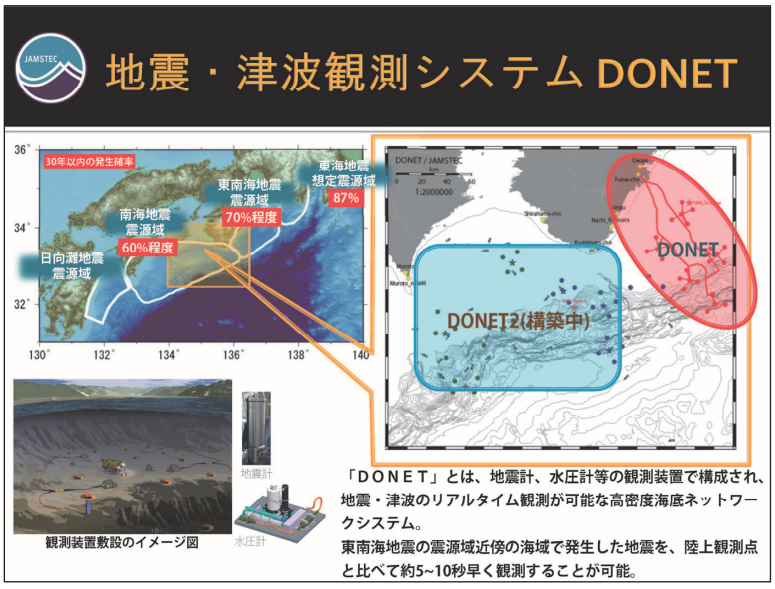
図－42

〈図－41、42〉　今、JAMSTEC はたくさんの、ここに出ている以外の船も含め、研究観測船をたくさん持っています。そして、マントルまで掘れると自慢している一番大きな船、「ちきゅう」という船も擁しています。それから、無人の潜水艦もたくさん持っています。なので、海と海底での観測技術に関しては、JAMSTEC が一番進んでいます。



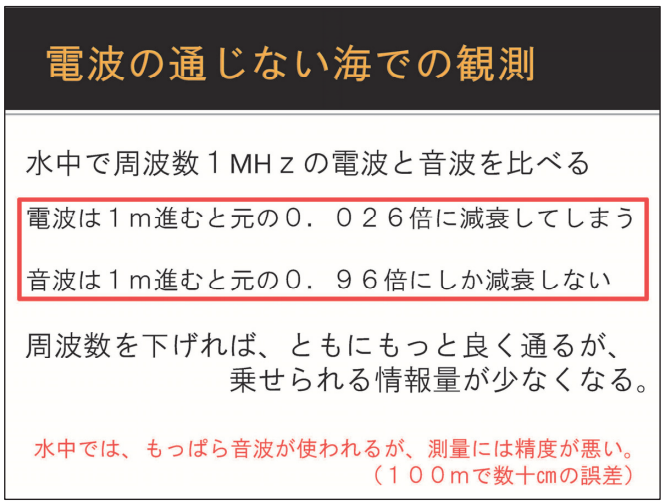
図－43

〈図－43〉　そこで私も、昔ある無人潜水艇を使って、海底の地盤の強度を測るとか、そういうことを実際に海に行って観測していたこともあります。



図－44

〈図－44〉　現在、JAMSTEC は紀伊半島沖に海底ケーブルを張りめぐらせて、地震計と水圧計を取り付けて、海底の地震を測っています。ただ、だいぶ前に話しましたように、地震計は地震予知をしてくれません。それから水圧も、予知という点では鈍感です。地震が起こると同時ぐらいに変化します。この水圧計は津波を測るものであって、その地震の予知を行うために付けたものではありません。



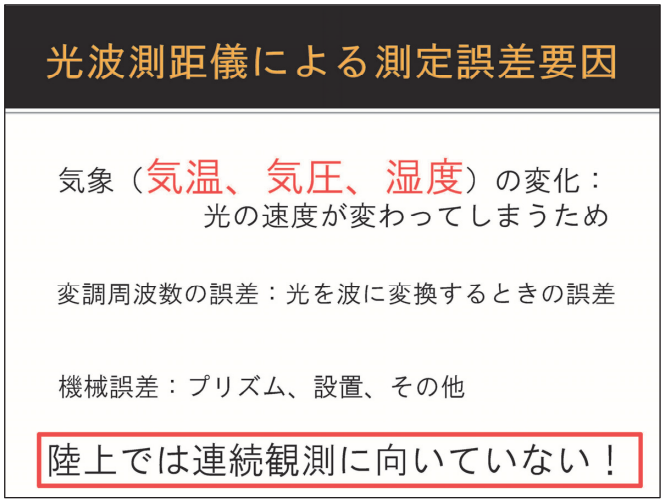
図－45

〈図－45〉　もう一つ大きな障害は、電波の通じない海で観測した情報をどうやって送るのか。それができないから、電源を引っ張ってきて、ケーブルでデータをまた陸に返すのですが、できることなら、海中でスタンドアローンで測りたいし、データも飛ばしたいと。そのときに障害となるのは、海中に電波が通じないことです。例えば、1MHz の電気の波と音の波を比較すると、電波は 1m 進むと、1MHz の電波は基を 1 とすると 1m 進んだだけで 0.026 になってしまうわけです。だから、ほとんどすぐに減衰してしまう。逆に言うと、近い距離だったら、電波は通じないことはないわけです。ところが音波だと、1m 進んでも 0.96 で、ほんの少し、0.04 だけ減衰します。そして、周波数がこの 1MHz というのは比較的高周波ですので、周波数を下げればもう少しお互いに通るようになるのですが、周波数を下げれば下げるほど、持っていく情報量がどんどん少なくなってしまいますよね。そして、もっぱら今、水中では音波というものが使われていますが、私がさっきの実験で示したように、あれは縮尺してミクロンですが、100 ミクロンとか 1mm という精度での変位を正確に測るためには、音波だと 100m で数十 cm の誤差が出ますから、音波を使った測量では私は満足できません。

■ **水中レーザーを用いた測量技術開発**

図－46

〈図－46〉　そこで、陸上で最も高精度な測量方法というものは、光の波を用いた測量、光波測距儀という単語で書かれていますが、これは何のことはない、よく工事現場とかいろいろなところで目にすると思います。1 台の光を出す機械があって、反対側のお兄さんが反射するプリズムを持って立って、光を出して返って来たときの光の波長、入れた波長がわかって、往復数と位相差から距離がわかるというこの簡単な原理で、光を使って距離を測ることが今はできるのです。これに光源にレーザーを使うと、最も高精度に測れることがわかっています。100m で 1mm 以下の精度で測れます。



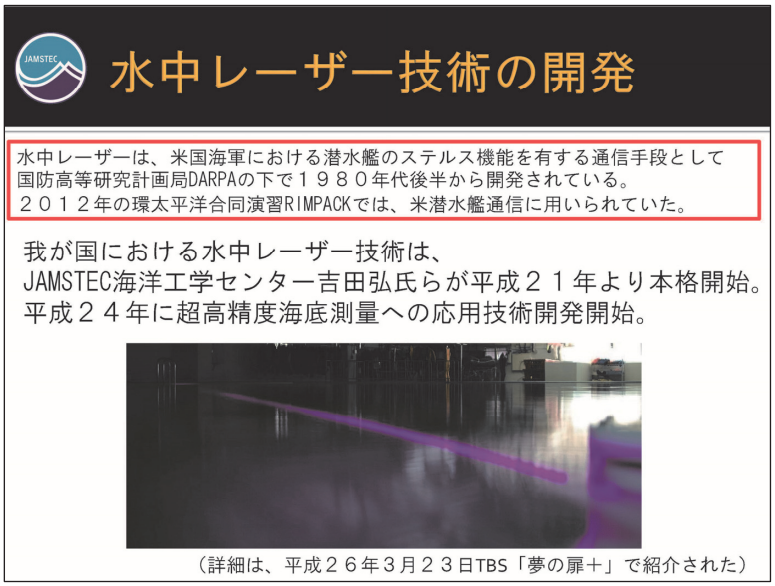
図－47

〈図－47〉　ところが、このレーザーで陸上でレーザー網をつくって連続観測しているかというと、ほとんどそんなものは見たことがないと思います。一つは、動植物に与えるレーザー光の健康問題といった問題があるのですが、それがなかったとしても、レーザー光は気温、気圧、湿度によって光の速度が変わってしまいます。そのため、連続観測すると、夜になったり朝になったり、嵐が来たり、かんかん照りになったりしたりするという、そういう気象の条件で光の速度が変わるために、精度が

どんどん悪くなってしまいます。なので、地上でレーザーによる高精度測量を連続でやっても、実はあまり意味がないわけです。それ以外に連続観測によって機械の特性というのがいろいろ出てきますが、これは地上でやっても水中でやってもあまり変わりません。

図－48

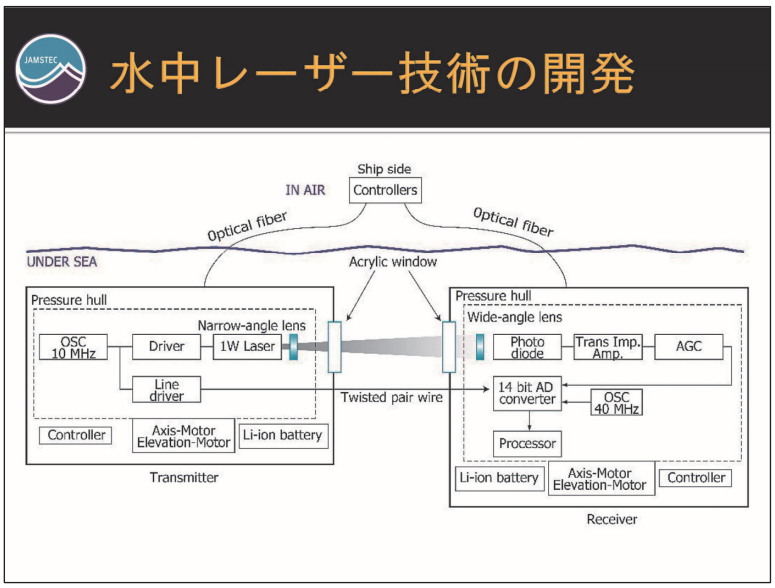
〈図－48〉　では、深い海の底はどうかと。気温というのは水温、気圧は水圧になります。そして、湿度は 100％ですよね。そうすると、海が深ければ深いほど、水温はだいたい 2℃ぐらいで一定、それから、気圧も水圧になりますから、水の圧力はその上にのっている大気圧力が深くなると圧倒的に大きいため、多少気中の圧力が変化してもあまり影響しないと。ということは、深い海の底でレーザーで連続距離測量するということは、実はものすごく理に適った方法になります。そこで、深海底でこそ光波測距をするべきだと。そして、水中レーザーを用いた技術を今、JAMSTEC で開発しています。



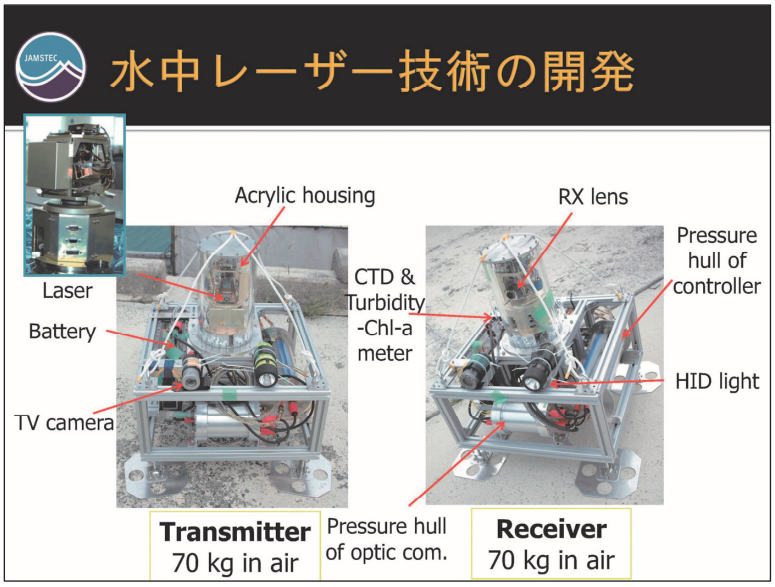
図－49

〈図－49〉　ところが、そんなことは全然自慢にもならなくて、水中レーザーというのは、アメリカ海軍でもう 1980 年代後半から開発されて、2 年前の合同演習 RIMPACK（環太平洋合同演習）では、アメリカは潜水艦同士の通信にレーザーを使っています。それから、この技術開発自体がアメリカの有名な DARPA（国防高等研究計画局）の下で、潤沢な研究資金の下で開発されて、開発しきった結果、今はもう民生品も出ています。水中レーザーというのはアメリカではそんなに特殊な話ではなくなっている。ところが、日本には全然なかったわけです。むしろ、「水中でレーザーなんて」とばかにして、研究が始まらなかったということが事実です。

JAMSTEC では、平成 21 年より前から少しはやっていたのですが、お金がなくて全然できなかったのを、平成 21 年から本格的に水中レーザーを開発して、平成 24 年にこんな技術を JAMSTEC で開発しているということを私が知ってから、自分の研究費をこの吉田さんという水中レーザーをやっている方にどっと寄付して、ぜひ水中レーザーをやってくださいと。これで私が実験で見出していたことが、実際に海底で見出すことができる可能性があるということで、水中レーザーの開発を一緒に始めました。詳細は、3 月に TBS でこの水中レーザーによる地震予知の研究について紹介してもらいました。また、実は昨日の朝と来週の朝にも放送される菅原文太さんの「日本人の底力」というラジオ番組で、この水中レーザーについて対談をしました。

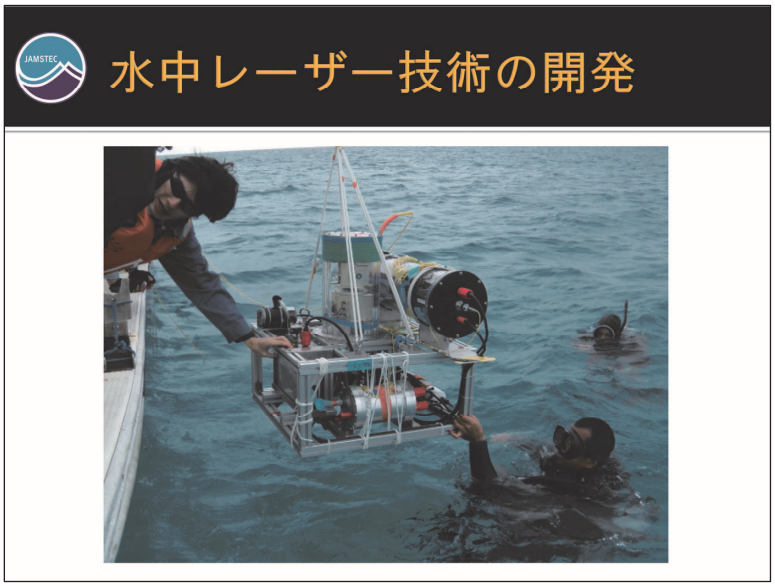


図－50

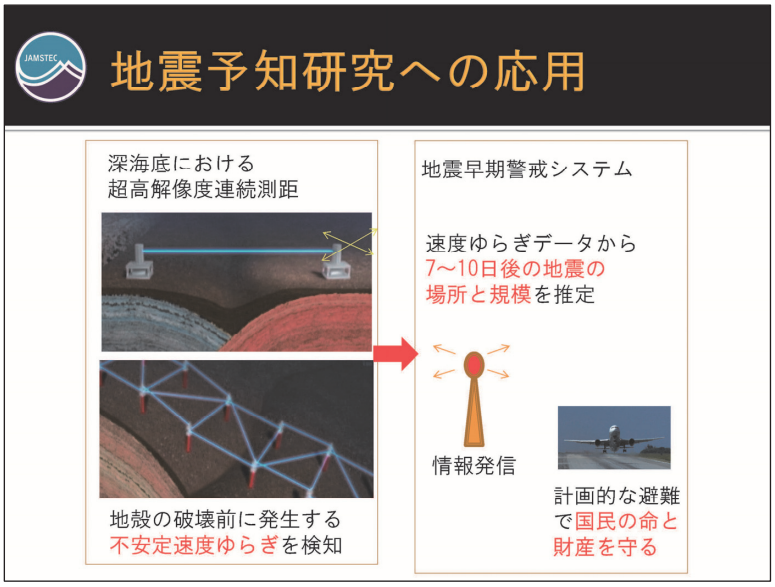


図－51

〈図－50、51〉　原理は、陸上でやっている光波測距儀と同じものを水の中に漬けて、耐圧容器の中に装置を入れて測っています。今のところ、レーザーを飛ばして、プリズムで返して受信して測定するというのは、そもそもワンランク上の技術なので、レーザーを飛ばして向こうで受信して、その光の位相差から距離を測定する技術を確立して、現状 20m で約 1mm の誤差で測定できるようにJAMSTEC でやりました。

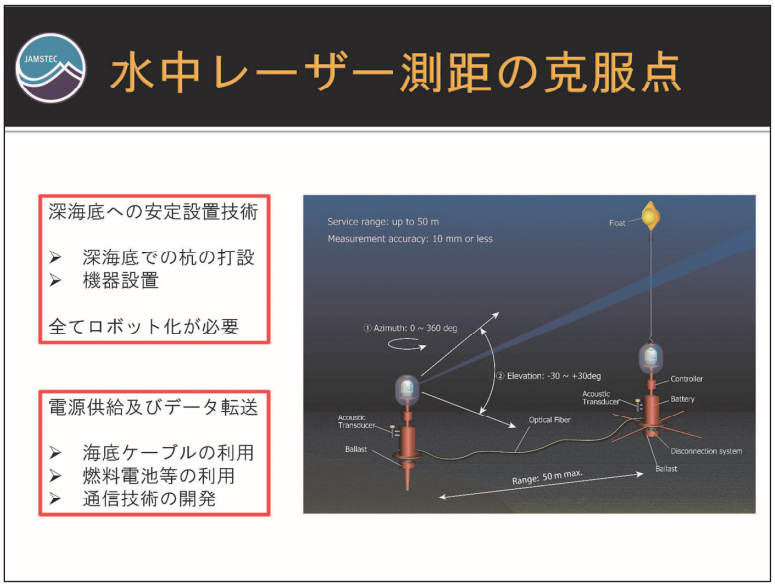


図－52



図－53

〈図－52、53〉　私自身も今年の 2 月に実海域でこの水中レーザーの実験に参加しています。将来的にはこの水中レーザー観測網を、地震が起こるであろう場所に三角の網目をつくって、海底にできるしわを詳細に観測することによって、数十枚前のスライドで示しましたように、海底地殻が順調に動かない、もまれる状況をキャッチすることによって、将来、その近所で大きな断層運動が起こるであろうということを予知する方法を今、提案しています。



図－54

〈図－54〉　残念ながら、先日、この提案を日本の DARPA ということで、安倍内閣の肝入りで募集していた ImPACT（革新的研究開発推進プログラム）という大きな研究基金に応募したのですが、なぜかけんもほろろに「地震予知研究はどうせできないのだから」ということで、門前払いをくらいました。これはまさに「やらないからできない」「できないからやらない」の悪循環をそのまま継承していっているのではないかと、非常に危惧しています。

とは言え、これだけのことを深海底でやろうと思うと、大がかりな装置が必要で、イノベーションが必要です。例えばこの装置は、今は浅海でやっているのでダイバーさんに持っていってもらって設置して測定するのですが、300m より深いところには人間が潜れません。そうすると、機械で全部設置しなければいけない。それから、設置したものがゆらゆら、ぐらぐらしては何の意味もないので、深海に固定杭を打たなければいけないと。しかしこれまで人類は深海に固定杭を打ったことがないのです。大手のマリコン、ゼネコンさんに今、お願いをして、何とか研究費と技術開発費を集めて、まずは深海に固定杭を打設する技術をつくってくださいという、そういうレベルからスタートしています。それから、電源供給、データ転送もこれ自体も乗り越えなければならない技術で、電源は燃料電池とかいろいろなものが今はできていますので、必ずしもケーブルにつながなくていいですが、データ転送は難しいと。そこで、データ転送自体をレーザーでやるということも考えればいいのではないかと。だから、距離を測量するレーザーと、データを海面まで持っていくレーザーと両方開発しなければいけないと。

■ おわりに

いずれにしても非常に難しい問題を抱えていますが、今、少しだけ話しました水中レーザーの技術そのものだけにも水中に固定杭を打つ技術の開発が必要になります。これは、地震の予知のために使われるだけではなくて、非常に近い将来、海底資源を日本がたくさん持っているということを徐々に明らかにしていますが、その海底資源を持ってくるために、数千メートルの海面まで揚げるというのは非常にナンセンスなことで、精錬自体を海底でやってしまうと。ということは海底に精錬工場をつくって、精錬されたガスから希土類、そういうものをそこで集めて持ってくるという技術をつくれば、エネルギー的にものすごく効率が良くなるわけです。そのためには海底プラットフォームをつくらなくてはいけなくて、どんな構造物をつくるにしても、まずは測量して、基礎をつくるというのは、陸上でも海底でも同じです。だから、われわれの主張しているような海底の固定杭の安価な技術をつくるということは、いろいろな意味で、他のことにその応用ができます。

要するに、地震予知研究を真面目にやるということ自体がイノベーションをつくるわけで、水中レーザーはその一つですが、国の面積の大半が海の日本にはこれは絶対に必要な技術です。通信にも必要、いろいろなことに使えます。海洋生物の監視というものにも使えます。なので、この水中レーザー技術はアメリカに大きく遅れをとっておりますが、JAMSTEC だけでなくいろいろなところで力を合わせて取り組むべきです。そして、最終的には、そうやってできた技術をアメリカが海軍だけでなくて、民生化して売り出そうとしている、その戦略というのは非常に重要で、単に地震のために研究費を使ってそれでおしまいということだと国民が納得しないで、なかなかできないのですが、最終的なゴールは、いろいろなところで培った技術を産業化して国際展開するということを、最初から肝に銘じて進めていくということが非常に重要なことではないかと思います。

ほぼ時間となりましたの、私の話はこの辺で終わらせていただきます。どうも、ご清聴ありがとうございました。

【質疑応答】

参加者： 静穏化、足踏み状態を再現するために、砂を使った室内実験をされました。もしこれを粘土とか粘り気の強いタールみたいなものでやったら、同じことが起こったのでしょうか。

阪口： 1m×1m で厚みが数 cm の砂の層は、サイズをスケールして強度をスケールすると、ちょうど堆積岩に該当するということが相似則でわかっています。そういう理由で砂を使ったのですが、これに粘土を混ぜたりすると、動き方はどんどん悪いほうに向かいますよね。そうすると、測定量が小さくなってきます。なので、今の同じ実験方法で測定して、今の解像度は最小 1 ミクロンですが、同じような現象が出るかもしれませんが、小さいほうに出るので、より測定しにくくなる可能性があると思います。

参加者： コンピュータで 3 軸の再現実験をされていますね。それも砂という条件ですよね。

阪口： あれは、砂岩を想定していました。だから、砂よりは動きにくいです。

参加者： それが仮に等方均質体であったら、やはり同じ現象が起こるのでしょうか。

阪口： 等方均質体の定義にもよると思いますが、完全等方均質な物体だと、なかなかこれが起こらないということが、数値シミュレーションでもわかっています。微妙に不均一性を、最初にばらけさせて入れておくというか、さっきのシミュレーションだと 1 個 1 個の粒子が、形が全然、円形からほど遠い形状になっているので、意図的に不均質性は入れていないのですが、勝手に入っています。そうすると、非対照な破壊モードを選びやすいので、最初、前半対象形で変形していたものが非対照の破壊モードを選ぶ、その遷移状態のところで足踏み状態が出たものと思いますので、より等方均質にするとより見えにくくなると思います。

参加者： どんなレーザーで、波長はどれくらいのものを使っているのでしょうか。

阪口： これはアメリカのまねをしたわけではないのですが、最初は赤色レーザーから使って、一番通りやすいレーザーがブルーグリーンレーザーです。その波長が、理由はいろいろあるらしいのですが、水の中で一番遠くまで通るレーザーの波長が、ちょうどブルーグリーンの辺りぐらいでした。これは実験でいろいろな波長のレーザーを入れてやりました。最初はプールでやったのですが、一番通りやすかったのがその辺の波長だったので、今は海中でやるときもブルーグリーンのレーザーでやっています。

■ このレポートは平成 26 年 6 月 30 日コートヤード・マリオット銀座東武ホテルにおいて行われた、第 130 回本田財団懇談会の講演の要旨をまとめたものです。本田財団のホームページにも掲載されております。
講演録を私的以外に使用される場合は、事前に当財団の許可を得て下さい。

発 行 所　公益財団法人 本田財団
104-0028 東京都中央区八重洲2-6-20ホンダ八重洲ビル
Tel.03-3274-5125 Fax.03-3274-5103
http://www.hondafoundation.jp
発 行 者　松 澤　　聡