

# シンポジウム「日本の地震観測の現状と将来展望」

## 講演速記録集

平成 16 年 11 月 19 日（金）  
防災科学技術研究所  
研究交流棟 和達記念ホール

### 目 次

■開会の挨拶（片山恒雄）	・・・・・・・・・・・・・・・・	1
■招待講演 1（岡田義光）	・・・・・・・・・・・・・・・・	3
「最近におけるわが国の地震観測網の進展について」		
■招待講演 2（長谷川昭）	・・・・・・・・・・・・・・・・	29
「東北日本弧の深部構造と内陸地震の発生モデル」		
■招待講演 3（平田 直）	・・・・・・・・・・・・・・・・	45
「日本の地震予知研究計画と地震観測」		
■招待講演 4（安芸敬一）	・・・・・・・・・・・・・・・・	65
「地震予知研究の新時代」		
■閉会の挨拶（高木章雄）	・・・・・・・・・・・・・・・・	87

シンポジウム

「日本の地震観測の現状と将来展望」

講演速記録集

## 開会の挨拶



## 開会の挨拶

独立行政法人 防災科学技術研究所  
理事長 片山 恒雄

実は今日は、防災科学技術研究所にとって、11月に入ってから地震学とか地震工学に関する3つ目のシンポジウムでございます。11月9日と10日の2日間、「日本の強震観測の50年を回顧する」というシンポジウムを開催いたしました。それから15日から17日の3日間は、主に原子力施設の設計に最近の地震学の研究成果をどう生かすかというシンポジウムを開催いたしました。そして今日は、「日本の地震観測の現状と将来展望」という半日のシンポジウムを企画いたしました。

ご存じのように、1995年兵庫県南部地震の後、我が国には、世界に類のない、高密度、高感度の地震計のネットワークができ上がっております。私どもの研究所は約3,000台に上る地震計の整備を行っておりまして、それらから得られる地震記録は地震の調査研究や耐震設計の実務に大きく寄与しているという風に信じております。

今日のシンポジウムには、国内外の地震学をリードする5人の研究者の方々に世界一流レベルの講演をお願いいたしました。特に安芸先生には、日本に来られるたびに私たちの研究所でお話しいただき大変ありがとうございます。これもご存じの方が多いと思いますが、先生は、2004年、AGUのウィリアム・ボーイ・メダルを受賞されました。大変おめでとうございます。AGUには実はいろんな表彰制度がありますがけれども、その中でも11のメダルが最も価値の高い表彰のようで、その中でもボーイ・メダルというのは最高のメダルであります。

まず歴史が違いまして、ボーイ・メダルというのは1939年から設定されております。実はこれは私が生まれた年でもあるんですけども、残りの10のメダルというのはすべて1960年以降に制定されたものでございます。私は実はジオフィジックスの分野では全くの素人と言っているんですけども、ボーイ・メダルの受賞者リストというのを見ますと、ジェフリーズとか、ゲーテンベルグ、ユーイング、グレン、ベニオフ、バン・アレン、フランク・プレス、ドン・アンダーソン、ジーウォンスキー、私のような素人でも知っているような名前が、まさにきら星のごとく並んでおります。

そして、ボーイ・メダル以外、11個のうちあと10個メダルがあるんですけども、そのメダルのうち7つにはボーイ・メダルの受賞者の名前がついているというのをきのう実は調べました。将来、AGUに「安芸敬一メダル」というのができて、今日ここにおられる研究者の中から受賞される方が出ればいいなと思いつつ、挨拶を終わりたいと思います。

司会： どうもありがとうございました。では、講演に先立ちまして、私のほうから、今日のシンポジウムを開催する趣旨につきまして簡単にご説明申し上げたいと思います。

皆様ご存じのように、防災科研では国の方針に基づいて、高感度、広帯域、強震、そういった観測網を整備してまいりました。現時点ではある程度、当初の整備目標に近づきつつあるということでもありますけれども、今後の地震調査研究を推進していく中で地震観測はどうあるべきかということにつきまして、これまでの整備の現状、それからさまざまな成果を踏まえながら考えていきたいというのがこのシンポジウムの趣旨であります。特に今回、地震学で世界的な権威でいらっしゃる安芸先生が防災科研に滞在される、そういった機会をとらえまして、先生のお考えであるとか今後の地震学、地震観測に関する展望につきましていろいろお話を頂戴したいということとこの日程とさせていただいた次第です。今日は総合討論的なことは特に予定しておりませんので、各講演者のご講演の後に皆様から質問いただいて、その中で議論を深めていけばというふうに考えておりますので、どうぞよろしくお願いいたします。

シンポジウム

「日本の地震観測の現状と将来展望」

講演速記録集

## 招待講演 1



## 最近におけるわが国の地震観測網の進展について

岡田 義光\*

岡田でございます。大きなタイトルをつけてしまったんですけども、中身は防災科研の観測網の建設の歴史ということが中心になりますので、あらかじめご了承ください。こういったふうなタイトルで発表させていただきます [スライド 1]。

私どもの研究所は設立が1963年なんですけど、ここ [スライド 2] には1970年から最近までの約30年間で観測網の建設の歴史が書いてございます。一番古い時代は、地震予知計画で東京観測ということが叫ばれた時代にちょうど当たっております。首都圏に関する特別研究というのがスタートしたのが当研究所の本格的な地震観測の始まりであります。いわゆる深層観測という3,000メートル前後の観測網を岩槻、下総、府中とつくったわけですが、一番難しい岩槻というチャレンジングな仕事が一番最初だったというのは、その後の仕事は全部、易しくはないんですけども、ここでブレイクスルーがあったというものが後々まで響いております。

続きまして、東海地震震動が出されました1978年前後にこんなふうな法律のバックアップがございまして、関東東海プロジェクトというものがスタートしております。これは100メートル前後の浅い井戸の観測点を予算上は50点つくるということでスタートいたしました。その後、こういう資源を使って10年近く研究を続けてきたんですけど、首都圏の観測を強化すべしという世の中の世論がありまして、南関東地域の観測網を強化することによって、最初つくられた3,000メートル級の観測点の第4番目のものとして江東にもう一本増設、それから2,000メートルクラスの「中層の観測点」と呼んでいるものを12カ所、海底地震計を6カ所という風なことがこの頃にされました。ここまでは研究だったんですけど、これから後は施設整備費という色のついたお金でありまして、もうここからは研究ではなくて事業的な色彩を帯びてまいります。

この大変な仕事を遂行している最中に阪神・淡路大震災が勃発いたしました。これにかぶるように、ご存じのように全国の基盤観測を整備するという仕事が始まってございます。中層の観測点が予算上は6点、それから浅い観測点が毎年のように当初予算、補正予算がつきまして、一番ひどいときは1年に255点つくれという予算がついて、我々フーフー言っていたものがあります。

まず、しょっぱなの深層観測なんですけど、これ [スライド 3] は東京の府中の観測施設の風景でございまして、

東京の周り関東平野は非常に厚い堆積層に覆われていることはよく知られております。この赤い線が3,000メートルでしたか、こういう堆積層を貫いて設置するというので、岩槻、下総、府中という3点の深井戸観測が始まったわけです。どの建物もこういうタワーみたいなものが立ってございますけれども、これは地中に埋められたセンサーが引き上げたときにこの上におさめられるように、こんなふうなタワー状の構造になっております [スライド 4]。しばらくしてから江東の観測点が東京のお台場の沖につけ加わったわけです。

現在4つの観測点でやっておりますけれども、最初につくりました岩槻が一番深くて3,500メートルでありまして、この井戸の底ですと温度は86℃といった風な環境になります [スライド 5]。地表に比べますとノイズは20分の1から300分の1という、都心でも非常によい観測ができるという条件でございまして。

深層観測の風景なんですけど、これ [スライド 6] はポンチ絵ですが、50メートル、100メートルぐらいの非常に広大な敷地に50メートルぐらいのやぐらが立って掘削をするといったふうな感じになります。これ [スライド 7] は江東で掘削をしているときの掘削のやぐらとケーシングか何かを入れている風景であります。ボーリングの詳しい話はいたしませんけれども、例えば府中の例ですと、約3,000メートル掘るのに80日で掘り上がるということなんです [スライド 8]。

掘削をした際には井戸の中のいろんな物性を調べます。P波の速度、岩石の密度、電気抵抗といったふうなものを調べまして、いずれも、この辺、それからこの辺、この辺で大きく変化しているのは、かたい岩盤に入ったということを示しております [スライド 9]。中の計器は全長11メートルに及ぶ細長い状態をしておりまして、中に、速度型の地震計、強震計、傾斜計といった機械がおさめられております [スライド 10]。これは各々のコンポーネントなんですけれども、全体は、こういうケーブルでぶら下げまして力学的に支えると同時に、中に電気信号を通します。少ない芯数でたくさんの信号を送るために地下から地上へのテレメーターを行っております。当時はまだトランジスタを使った搬送装置なるものが使われておりました。これはケーブルを巻き上げる捲上装置です。これまでは通常3年に一遍とか4年に一遍ぐらいのペースで引き上げて修理をして再設置をするということを繰り返してまいりました。

\*独立行政法人防災科学技術研究所 企画部長



いざ、こういう深い井戸の観測を始めてみますと、3,000メートルの井戸の中には鉄管が入っていますけれども、鉄管がさびないようにさび止めが入っています。その水を伝わって地上のノイズが地下に伝わるということがございまして、そういうものを防ぐためにこういう吸振材を入れるといったふうな工夫もされているところです [スライド 11]。

地表の観測とこういう深いところの観測で周波数ごとにどれぐらいノイズレベルが違っていくかということ、これは山水さん他が調べられたものでして、周波数によって違いますけれども、大体1桁から2桁ノイズレベルが改善されるということがわかっております [スライド 12]。

こういう深い井戸を掘るとどういふ御利益があるかということですが、これは東京湾北部の深さ30キロで起きた非常に小さな地震を記録した例です。こちらは浅い井戸でありまして、ここで地震の波が到達しているんですが、とてもノイズが大きくて、どこで揺れが始まっているのやよくわかりません。ところが、こういう深い井戸ですとノイズが減るものですから、非常にクリアにいわゆる縦波、横波がキャッチされます。こういう精密なデータがたくさん集まったことによりまして、次のようなことが解かってきました。

これ [スライド 13] は東京を横切る東西の断面図ですね。ここが東京の都心に当たりますけれども、おぼろげにこういうY字型の震源分布というものは前から見えておりまして、これが太平洋プレートだということは認識されていたんですけども、東京の都心の直下には浅い地震はないと言われていました。しかし、こういう深井戸や何かが整備されて観測が進んでまいりますと、この正しい姿はこうであるということが今わかってきております。これは地震がなかったのではなくて観測できなかったということでありまして、今では、これがフィリピン海プレートの上面で、大正12年の関東大地震はここで起きたといったふうなことが解かってきたわけです [スライド 14]。このようなデータがたくさん集まってきて、首都圏は実は日本の中でも一番地震活動が複雑な場所でございますけれども、こういうところの地震の発生の仕方がよく解かってまいりまして、どんな様式の地震かということの理解が大変進んでまいりました。

次に、関東東海プロジェクトの時代になるわけですが、ご存じの東海地震の話と絡みまして、東海地方の観測を強化するという機運が盛り上がりまして [スライド 15]。日本の周辺でM8クラスの巨大地震が北海道の沖から九州の沖までたくさん起きますけれども、沖合に起きる地震と違い、関東地震と東海地震というのは特別であります。M8級の巨大地震が沖合ではなくて我々の足元で起きるという意味で、日本にとって最も恐ろしい地震というわけでありまして [スライド 16]。しかも東海地方は、これはよく知られていることで、安政の東海地震のときにはここまで破壊したけれども、なぜか前回はここがスキップされてしまって、もう150年ぐらい

うっと地震が起こらないままひずみがたまり続けているという状況で、すわ東海地震があす起きてもおかしくないと言われて既に25年たっておりますけれども、依然としてひずみがどんどんたまっているということで、いつかは起きるということだけは確かであります [スライド 17]。このような世界でも例を見ない法律ができて、こういうものに基づいて我々の観測網が整備されてきたところです。

これは深井戸と違いまして、100メートルぐらいの穴を掘りまして、その井戸の底に地震計、それから3分の1から4分の1の観測点には傾斜計というものを一緒に設置してございます [スライド 18]。この辺の井戸掘りのことは大体標準的なやり方ができておりまして、まず最初に大きな穴を掘って10インチのケーシングを入れて、その裏にセメントを流す。それから少し小さい穴を掘ってその裏側をセメントで固める。最後に、計器を設置する5インチのケーシングパイプを入れて、外側を全部セメントで固めるといったぐあいでき上がったところで、この中に計器をしずしずと設置するというわけです。

井戸の中には地震計を3成分入れます。上下と東西南北なんですが、その方位をきちんと設置するということが技術的には一つ問題でありまして、2つのやり方があります [スライド 19]。関東東海プロジェクトでやっていた頃は、キー溝方位方式というものでありまして、井戸の内側にこういうキー、これは上から見た絵ですけども、ここにキーがありまして、こちらにはこういう溝があります。普通に降ろしていくとぶつかってしまうわけですけども、ロッドを少しずつ回してやって、これがカチンとはまるまで何回か試行錯誤するわけです。合いますと、ここにきちんと鎮座しまして、ちゃんと設置されるというわけです。この方式はやぐらを使って設置するというわけです。掘削の工事と設置工事を連続してやらなければいけないという制約がありました。最近、Hi-net等で用いられておりますのは、これとは違うやり方のスクリー式方位設置というやり方をしております。これはこのようにパイプを斜めに切ったような形をしております、上から降ろしてくると、まず最初にこの辺が肩に当たりますと自然にこれがクルッと回ってこの溝にカチンとはまり込むという方式であります。あらかじめキーの方位をコンパスとかジャイロではかっておいて、正しく東西南北に設置するというやり方をやっているわけです。

こういう関東東海の観測網の整備が終わってしばらくした頃に、今度は首都圏の観測を整備するという機運が盛り上がりまして。これは中央防災会議で、阪神・淡路大震災の前の年なんですが、こういう風な大綱が出されて、首都圏のモデルとか、必要な対策を施すようにといった風なおふれ書きが出たわけですね [スライド 20]。これに呼応しまして、私どもでは首都圏の観測を強化するというので、まず、江東という場所に3,000メートルの観測点を増設する。それから、3,000メートルの観

測点をたくさんばらまければいいんですけども、これは物すごく大がかりですので、もう少し簡素な 2,000 メートル級というものを 12 カ所、この赤い点に設置する [スライド 21]。それから相模湾のところに 6 台の海底地震計を設置するという、かなり大きなプロジェクトが始まったわけです。深層、浅層に対してこれは中層と仮に呼んでおりますけれども、こういった風な見かけであります、長さ 7 メートルぐらいの機械が中に入ります。当初はここには傾斜計は入っていません。地震計と強震計だけでありました [スライド 22]。

実際の風景ですが、これ [スライド 23] は千葉の消防学校の敷地につくらせてもらったもので、これはカマボコ型の中に 2,000 メートルの井戸が掘られています。これ [スライド 24] は横浜の公園の中だったので緑色に塗れと言われてこういう色をしていますけれども、やはりこの下に 2,000 メートルの穴が掘ってあります。2,000 メートルクラスですと、3,000 メートル級に比べて約半分ぐらいの敷地でこういう掘削工事が行えます [スライド 25]。やぐらもやや小ぶりのものでオーケーということになります。3,000 メートルと違いますのは、設置のときに永久建築物としてのタワーをつくるということはずらずに、現地へこういうものを持ち込んでクレーンで吊り上げて設置するという形ができます [スライド 26]。必要なときには、こういうものを持って行って引き上げ可能というやり方をしています。

3,000 メートルクラスと 2,000 メートルクラスのお金の比較なんですけど、当時ということでご覧いただきます [スライド 27]。3,000 メートル掘るのに掘削のお金は大体 15 億円、2,000 メートルですと 2、3 億円ということなんです。観測装置も、3,000 メートルのほうは地下から地上への搬送という複雑な仕事があるために 2 億円ぐらいですが、2,000 メートルですと 1 億円というようなことがあります。温度の違いで信号ケーブルの材質が違うとか、いろいろ値段が違っていて、観測の建物にしても、こちらは立派な庁舎を建てますが、こちらは簡単な小屋でやっている。現地の記録は省略するという風なことでありまして、トータルいたしますと、3,000 メートル級は 1 カ所約 20 億円、2,000 メートル級は約 5 億円というお金がかかります。ただ、これは当時、1 カ所 1 カ所手づくりでつくっていた時代の値段でありまして、最近の Hi-net のように大量生産になりますとこういうもののコストが随分安くなってきているということで、これは当時の値段ということでご覧ください。

もう一つ、海底にも観測網をつくるということで、S T の 1 から 6 までというのが相模湾の海底に、これは光ケーブルで数珠つなぎにしてゴロンと転がっているだけなんですけれども、この中に地震計 3 成分と強震計の 3 成分が入っています [スライド 28]。それから、VCM というのはパーティカル・クラスタル・ムーブメントの略なんですけど、津波計、水圧計みたいなものが 3 カ所に設置されておりまして、こういうものも陸上の観測網と合わせて、つくばに常時送られてきております。

このような広域の首都圏の整備というものがなされたおかげで、首都圏の観測網は、今や他の地域とそれほど遜色ないぐらいな観測レベルになっております [スライド 29]。かつて地震予知連絡会で茂木先生が、首都圏は巨大な観測の空白域になる恐れがあるということで非常に憂慮されていたんですが、今はそれがほぼ解消されたのではないかなと思っております。

当時のデータの伝送のほうですけども、関東東海の観測網に先ほどの 3,000 メートルですとか広域深部でつくられた 2,000 メートルとか海底の観測点のデータは全部マージされてきて、関東東海観測網のテレメーターに全部当初は統一されておりました。今となってはもう二十数年前の技術なので陳腐化しておりますけれども、導入された当時は非常にモダンな品質、精度の高いものでありまして、当時はまだそれほど普及していなかった PCM 方式というデジタルの伝送を使う。それから、今のように GPS を使って絶対時刻をちゃんと付与することがまだできない時代でしたので、つくばと現地の観測点の間とで信号のやりとりをして、自動的に時刻を同期するような仕掛けを入れるとか、1 観測点 2,400 ビットに押し込んでおりますけれども、これを 4 カ所分束ねて 9,600bps のスピードで、なるべく安い専用回線で送るといった風なことを実現したわけです [スライド 30]。ただ、これだけ詰め込むわけですので、地震については例えば対数圧縮の 8 ビットという、最近のデジタルテレメーターの主流から見るとちょっと寂しいという状況がありますが、関東東海のプロジェクが始めた頃は非常にモダンなシステムでありまして、現在もこれは一部生きております。

関東東海の観測網は 1980 年ごろから始まりますけれども、80 年、85 年、90 年、95 年、5 年ごとにどんどん増えてきてまして、2000 年の状態では 120 点ぐらいの観測網に達しました [スライド 31,32]。これはわかりにくい絵で恐縮ですが、120 点ぐらいの観測点をできた年代から最近までの長さで書いています。白くなっているのは観測をやめてしまった観測点になります。一方、右上は井戸の深さの分布図でありまして、一番深いのが 3,500 メートルです [スライド 33]。まず、観測点の建設のほうの歴史から見ますと、ここで観測点がワッと増えているのは関東東海のプロジェク、ここで増えておりますのは広域深部の観測点、それからこの頃から阪神・淡路大震災とか基盤観測が始まるんですが、初期の観測点は関東東海の観測網でデータの処理を引き受けていた時代があります。そういったぐあいにどんどん観測点が増えていったわけでございます。井戸の深さの分布につきましては、地表点ですから 100 メートルが標準でありますけれども、1,000 メートルまでのもの、2,000 メートル級、3,000 メートル級といった風な分布になっています。

各観測点の稼働状況であります [スライド 34]。ちょっとわかりにくい絵で恐縮ですが、これは一つ一つの観測点で地震が 1 個起きると階段を 1 つ上って 10 個になるとリセットするという、そういう絵になっています。

これが黒くなっているほど地震をたくさんつかまえているということでありまして、例えばこれは愛知県の赤羽根という観測点ですけれども、こういう風に黒くなっているのは、何か地震が起きて余震や何かが増えているときです。ふだんはこれぐらいの傾きで地震をキャッチしているというわけです。こういうふうにならなくなっているところは、多分、観測点が故障してデータが取れていないといったふうなことが見えるわけです。この観測点よりもこっちの観測点のほうが地震をたくさんつかまえているということがわかりますし、右側は海底地震計ですけれども、こちらは相模湾の海底地震計、こちらは気象庁からいただいている御前崎沖の海底地震計です。地震の検出で、サイスミシティが違うので一概に比較できませんけれども、働きぐあいが随分違うということがわかりいただけると思います。

このようなデータで、関東東海地方の震源分布 [スライド 35] は非常に精密にわかってきたところでありまして、最近の稼働実績 [スライド 36] で見ますと、地震のキャッチしている数がこの水色でありまして、左の目盛りで見ますと2万個とか3万個という地震が毎年キャッチされている。そのうちの震源が決まるのが1万5,000個前後、発震機構まで決まるという大粒の地震は数千個ということになります。地震の読み取りの数は何十万個になりますけれども、1地震当たりで見ますと、読み取りの数が最近では10個前後というのが平均になっています。それから震源決定は、捉えられた地震のうちの大体60%が震源が決まっている。そのうちの発震機構解が決まっているものが最近では20%ぐらいといった風な稼働実績であります。

そうこうするうちに阪神・淡路大震災が発生いたしました。我々の研究所にも大変大きな影響がございました。それまで国は地震予知ということ割合絞り込んだターゲットで進めていたんですが、もっと基礎的な調査研究というほうに軸足を移すということがなされまして、ご存じのように地震調査研究推進本部というのが当時の総理府に発足いたしました [スライド 37]。これを受けまして、そもそも何のために地震の研究をするのかということ、当面は地震発生の長期評価をする、それから地震動の予測地図をつくるということが10年ぐらいの目標とされました [スライド 38]。こういうことをするためには、地震について我々まだ十分によくわかっていない基礎的な調査研究をどんどん進めましょうということになったわけです。その一番重要な道具になりますのは基盤的調査観測という計画でありまして、主要なものとしては、地震の観測網、GPSの観測、活断層の調査という3つを基盤として日本全国あまねくするという事になったわけです。私どもの研究所は地震観測について責任を持たされているという状況でありまして、ちなみに、GPSのほうは国土地理院、活断層調査は当時の地質調査所と地方自治体が共同してやるという形で進んできております。

以後、地震観測網のことですが、このシンポジウムに

いらっしゃる方はもう今さらですが、地震動の大きさ、周期によりまして3種類の地震計が使われているという状況であります。強震観測につきましては、阪神・淡路大震災の後いち早くK-NETという全国1,000点にばらまく観測網をつくりました。これは地表設置型でありまして、FRPの仏壇みたいな箱の中にこういう機械が入っています [スライド 40]。

強震観測が阪神・淡路大震災の前は日本全国でどれぐらいあったかということ、日本全国均一にやっていたというのは気象庁の観測網でありまして、「87型」とか「93型」といったふうな名前の機械が全国で約250点、50、60キロぐらいの間隔で日本を覆っていたという状況でした [スライド 41]。強震というのはちょっと場所が変わると様子が違うということで、これではとても密度が不十分であるということが認識されまして、我々の観測上でK-NETを当初1,000カ所、今1,034に増えております [スライド 42]。けれども、そういうものが追加されて、さらにHi-netに併設される形で、地上と地下の強震計のペアというものも設置されました。それから、広帯域地震計の観測点、F-netにも同じく強震計が設置されておりまして、現在はこれとこれを足し合わせた台数の強震計が動いている。私どもの研究所だけなんですけど、そのほかに気象庁とか、それからこの中にもちろん大学の観測点というものもあります。

K-NETは、全国を約25キロの間隔で約1,000カ所ということなんです。強い揺れが相手ですので、地表に設置するタイプの観測点になっております。当初の計器はこんなふうなスペックでありまして、地震が起きますと、気象庁から人工衛星を介して研究所に地震が起きたぞという知らせが届きます [スライド 43]。それに基づいて、大体どの辺の観測点でデータが取れているらしいということを見積もりまして、つくばから現地に電話をかけてやってデータを回収するという、こういうやり方をこれまでやってきました。当初こういう方式だったんです。普通の場合はこれでよろしいんですが、大地震になりますと現地の電話の輻輳という問題が起きて、なかなか肝心なところのデータが取れないという状況になってきて、ここ最近、次期のK-NETというものの計画が進んでおります。これは地震が起きて現地でデータが取れると、こちらへまだ電話が込まないうちに現地から送ってくるという方式に今切り替えつつあります。全国約1,000カ所あるんですが、既に今のような新しい方式に切り替わったのが青色のところ約420カ所ですね [スライド 44]。それから、宮城県、岩手県で特別な事情がありましてさらに26カ所、新式のK-NETというものに置きかえてございます。ここに置かれた機械は、今までのK-NETに比べますとダイナミックレンジが±4Gに、倍になったということ、それからサンプリングも、今まで100ヘルツだったんですけれども、200ヘルツまで可能な計器が設置されています。ただ、実際の運用は100ヘルツで行われています。

行政的には、私どものK-NETでとれた波形記録は気象

庁の震度情報としては公式には認められていなかったということで、地方自治体からいろいろクレームがついたこともあったんですけども、新しいものはちゃんと気象庁の検定を受けて、非常に短い時間で気象庁に震度情報を計算して送り届けるという機能が備わりまして、例えばこの辺の観測点などは今気象庁から震度の発表がされる観測点に加わっております。まだ500点ぐらい余っているんですが、これは予算の状況を見てなるべく早く整備したいと思っております。

K-NETのデータにつきましては、観測網が全国均一なものできたということと同時に、非常にオープンに、取れたデータを直ちに公開するというのがこれまでにない革新的な思想でありまして、加速度の分布、強震の記録そのもの、地盤条件といったものをWebページを通じて出させていただきますし、デジタルデータも当然ダウンロードできるようになっております[スライド45, 46]。そういうことで、世の中のいろんな方面に大変貢献しているという状況であります。

もう一つ、こういう強震観測と親戚みたいなものとして震度の観測というのは皆さんお馴染みだと思いますが、阪神・淡路大震災の前は、約150の気象官署で人間が今の震度は幾つだということをレポートしていた時代が長く続いていたわけです。そういうことをしているとどうしても迅速性に欠ける、報告する数がなかなか増やせないというようなことがありまして、阪神・淡路大震災の後、気象庁はこれまで続けてきた伝統を全部やめまして、これから震度は全部機械が測るという方針で大転換いたしました[スライド47]。それで96年4月の段階で約300カ所の計測震度計。しばらくしますとこれが倍の今600カ所になってございまして、気象庁に震度データが刻々と集まっています。それに加えて、消防庁が音頭を取って、全国の地方自治体のうち、気象庁の震度計とか、うちのK-NETが置かれていない市町村を重点にしまして、各自自治体にもこういう震度計というものがばらまかれました。これは関東地方の例なんです、赤い点が気象庁直営の震度観測点、それから緑というか青い粒々みたいなのが各市町村に置かれた震度計であります。物すごい数の震度計でありまして、ちょっと大き目の地震が起きると震度幾つというのがテレビに延々と出てくるのは皆さんご存じのとおりです。一昔前は気象の官署でしか報告をしていなかったものですから、例えば東京の隣は、横浜、千葉、銚子、熊谷といったふうな地点でしか震度の報告がされていなかったわけです。

これは日本中同じでありまして、これ[スライド48]は東北地方を含むところですが、昔は、黄色いところ、気象官署で震度の報告がされていただけだったんですが、最近、赤い気象庁直営の震度観測点、地方自治体の震度観測点というものが増えてきてまして、この間の新潟の地震みたいなものも、すぐ近くに震度計があるものですから震度6とか震度7がバンバン出るようになったわけです。去年の宮城県北部の地震でも1日に震度6が3回ということで騒がれたんですが、この一つの大きな理由

は、このように非常に高密度に震度計がばらまかれたということが昔との違いでありまして、この間の新潟のような地震ですと、例えば一番近い震度の観測点は新潟ですから、震度6ではなくて震度4の地震として公式記録が残されていたというようなことになろうかと思えます。

次に高感度地震観測であります、先ほどから申し上げますとおり、地表の雑音を避けて地下の深い静かなところで観測をするということで、これ[スライド49]は浅井戸の場合ですけれども、このようなボーリングをいたしまして、掘り上がった機械をこれから井戸の底へ設置しようとしているところでございます。

高感度地震観測の歴史につきましては、阪神・淡路大震災の前、いろんな機関が地震観測をやっておりましたが、気象庁は全国を覆う大中小地震というものをターゲットにしまして、200点足らずの観測網を北海道から沖縄までカバーしてやりました。大学は、各大学が自分のテリトリーのところに観測網を張っておりまして、全部合わせますと300点足らずの観測点が行われていたわけです。我々の研究所では、先ほど申し上げたとおり、関東東海地方を中心に100点近い観測をやっていました[スライド51]。これらの観測網はおのおの独自に処理をしております、隣同士で多少データの交換をするというようなことは行われていたんですが、こういうものを全部まとめて処理するということとは阪神・淡路大震災の前はなかなかなかったわけです。それではいかならうということになりまして、阪神・淡路大震災の前動いておりました各機関を全部集めると500点以上になるんですが、大学といわず、私どもといわず、すべて気象庁にオンラインでもってデータが流れまして、気象庁で全部統一的に処理をする。俗に「一元化震源」と呼んでおりますけれども、こういうものが97年10月から開始されまして、ルーチン的な観測は大体ここに任せとけばいいといった風な状態になりました。

それでもこれは既存の観測点のデータをただ集めたというだけでありまして、例えば中国地方ですとか北海道というのはまだ観測網の密度が十分ではありません。観測点をやたらたくさんあるところと非常に少ないところとまばらなわけです。こういう状態を解消しようということでこういう空白域を優先的にいわゆるHi-netというものの建設が始まりまして、約700カ所の井戸掘りと地震計の設置というものを続けてきたわけです。ですから今は、これとこれを足した約1,200点の高感度地震計が日本じゅうで動いているという状況になっております。西日本で比べますと阪神淡路の前と後が歴然と違うのでありまして、昔はこうだったのが今はこうということで非常に高密度の観測網が完成しております[スライド52]。

Hi-netの観測点のこれ[スライド53]は典型的な姿でありますけれども、地上で見ますと、こういう小さな小屋が立っているだけで、マンホールみたいなところの下に井戸が掘ってあります。井戸の底に3メートル足らずの機械が入ってまして、ここに上下、東西南北の3成

分の高感度地震計が入っています。それを Hi-net と呼んでおりますけれども、そのほかに、ついでは高感度だけではなくて強震計も地下と地表に設置しております。地表と地下のペアで強震の観測をしております。これは基盤の強震ネットということで「KiK-NET」という愛称をつけました。なお、ここには明記されておられませんけれども、この辺には「傾斜計」という名前の高感度加速度計も内蔵されております。

これらのデータは、モダンなテレメーター技術を使って今集められておまして、高感度地震計につきましては、24ビットでA/D変換した後でデシメーションをして、27ビット、100ヘルツのデータということで取得しておりますし、イベントにつきましてはオリジナルな1キロヘルツのサンプリングといったふうなデータもとれています。強震のほうはイベントトリガー方式であります。24ビット、200ヘルツ、運用は100ヘルツとっております。こういうものに絶対時刻を付与するために、最近はずべてGPSで簡単に時刻の付与ができます。高感度のほうは、つくばへ連続にデータを送ってきておりますし、こちらの強震計のほうは、大きな地震が起きたときだけダイヤルアップで送っていくという方式でデータが集められています [スライド 54]。

このように観測点が日本じゅうにばらまかれているわけなんです。距離が遠くなくても値段が余りかからないで済むというもので、パケット式のNTTの伝送網「フレームリレー」という名前のもを使って今データの伝送を行っております [スライド 55]。赤い点の観測点は東京のNTTの局社にあります中継装置に集めますし、水色の観測点は京都にありますNTTの建物の中のサブセンターというところに一旦収納されます。これは我々の研究所のようなどころよりもNTTの設備というのは非常にがっちりつくられていますし、何かあったときの停電対策とかそういうものが万端整っていますので、こういうところに一旦全部データを預けているわけです。そこからデータを分岐いたしまして、一つは気象庁に直ちに流れまして、皆さんご存じの地震速報等に使われております。それから同じものが東大の地震研究所に送られまして、ここから人工衛星を通じて全国の大学の研究所にデータが配られる。そして私どもの研究所にやってきました、データをシェイプアップしてインターネットを通じて公開しているという一連のことが、今すべての人たちがこういうデータを共有できるという状況になったわけです。

これ [スライド 56] はWebページの例でありまして、地震の速報ですとか震源分布図ですとかこういった風な情報のサービスをしてございますし、生記録についても、例えばこういう画面にたどり着いてどこかの観測点をクリックいたしますと、そこでどういう揺れがあったかという風なことがご覧いただけます [スライド 57]。大体、記録がとれてから2時間ぐらいしますとこういうものがご覧いただけるようになっておりますけれども、これは去年の宮城県沖の地震だか宮城県北部の地震だかの余震

活動の様子であります。これだけたくさんの観測点がありますと、地震の波が伝わってくるのが目で見えるようになります。これ [スライド 58] は茨城の南部で起きた地震ですけれども、時間を早送りして揺れが伝わっていく様子を再現しています。赤とか黄色っぽいところがたくさん揺れるところですが、東日本のほうがいままで揺れが残っているという状況が見えます。

別な例として、ウラジオストックで起きた深い地震ですけれども、このように日本列島全体に揺れが伝わっていきまして、西日本のほうは割合揺れがおさまっていくんですけれども、東日本から北海道にかけてはいつまでも揺れが続いているという、地下の不均質構造やプレート構造を反映する動きみたいなものがまさしく目に見えるようになってまいりました [スライド 59]。

このようなローカルな地震だけではなくて、外国で起きた大きな地震についても、地震の記録を全部並べますとこのように地球の中の構造を調べる助けになるようないろいろおもしろいフェーズが見えてくる [スライド 60] というようなことがありまして、これは小原さんが見つけた非常に有名な、西日本で延々と深部低周波地震という非常に珍しい現象が世界で初めて見つかった [スライド 61] というふうな思わぬ副産物ですね、Hi-netをつくる時にはこんなものが見つかるとはだれも思っていなかったんですけれども、こういう世界的な成果まで生み出されております。

それから、強震計が地表と地下にあるというのは工学関係の人にも非常に重要なことでありまして、2000年の鳥取県西部地震のときに、地下100メートルとか200メートルというところでは震源の周りで非常に単純な揺れ方をしているんですけれども、地表の揺れになりますと、いろいろ地盤の条件ですとか地形の条件ですとかそういうものが絡み合っただ変複雑な揺れ方の分布になります。もちろん揺れの絶対値そのものも大きくなりまして、このように地表と地下のセットでデータをとることによって、地表近くの地盤でどのように強い揺れが変質するかということが実データとしてとれるということの意味は大変大きいわけです [スライド 62]。

最後に、広帯域の地震計というグループもあります [スライド 63]。これは阪神淡路の前までは非常に研究的な色彩の濃い観測でありまして、全国で二十数点動いていたということですが、そのうちのオンラインでデータを送っていたのは、私どもの研究所でやっていた館山と都留と中伊豆でしたか、この3カ所だけ。あとはダイヤルアップというやり方だったわけです。まばら、かつ不均質という状況だったんですが、現在では「F-net」という名前と呼ばれておりますが、全国を約100キロの間隔で既に70カ所ぐらいの観測点ができ上がって、ほぼ概成しております [スライド 64]。この地震計は非常に温度に対してデリケートなものですから、通常このような30メートルぐらいの横穴を掘りまして、トンネルの一番突き当たりのあたりで広帯域地震計と、ついでは強震計も設置して観測している状況です [スライド 65]。

データの伝送は Hi-net と全く同じやり方でもってフレームリレーで送るようになっておりましたが、過渡的には直接送るというのもあったんですが、今はもうなくなったんでしょうか、すべて Hi-net と同じ方式でデータを送るように統一することを進めております [スライド 66]。F-net についても、このような各種の情報を Web ページを通じて公開しておりますし、外国の地震の波形データですとか計器の特性といったデータを自由に皆さん引き出して使っていただける状況になっております [スライド 67, 68]。これはすべて合わせますと 2,000 点近い観測網を我々今オペレーションしているということで、大変大きな責務を持っているわけでありまして [スライド 69]。これだけの観測点を維持するのはなかなか大変でありまして、回線使用料とかコンピューターの使用料、人件費と全部含めまして、年間の維持費は 20 億円程度使っております。

最後、まとめであります。全国の観測網ということで、現状は、強震計については 25 キロ間隔で 1,000 点、高感度地震計、強震計の地表と地下のセット、これは今は 700 点しかできていませんが、最終的には 20 キロ間隔で日本じゅう 1,200 点つくれたらいいなというふうに言われておりますし、F-net も今 70 点できておりますが、100 キロ間隔で全部埋め尽くすと 100 点必要ですので、もう少し観測点が残っています。これらのデータはすべてつくばに集まって、インターネットを通じて公開されているところであります [スライド 70]。

最後であります。これまでの歴史ばかりお話してきたんですが、これからどうするつもりだというものの絵を、これからの若い世代を担う人、小原さんのスライドから 1 枚コピーしてまいりました [スライド 71]。今やっている観測は大変高精度、高感度なんですけれども、いずれ陳腐化する時代が来ますので、こういうものをやっぱりグレードアップしていかなければいけないということでありまして、高感度地震計及び高感度加速度計、今「傾斜計」という名前の高感度加速度計が入っていますが、重力計に似たようなものの試作も笠原さんを中心に進んでおりまして、井戸の底で非常に広帯域にゆくりしたところまでとれるということで、いわゆる万能の地震計ですね、強震動、スロースリップから微動に至るまで広い範囲でとれる地震観測にグレードアップしていく。

それから、観測網は日本じゅうを覆い尽くすようになったとはいえ、都市部ではまだやはりノイズが高いというようなこともありますので、都市部についてはより密な観測網をつくって観測精度を向上させる。それから、国の調査研究推進本部では全国一律の配置は大体終わったので、これからは重点地域での観測というものを進めていく方針なんです、そういうものに対しては呼応して数カ所ずつ観測精度を向上させようではないかというようなことがありますし、全国 1,000 カ所、2,000 カ所のうち 100 キロメートル間隔ぐらいのところには基準観測点というものを設けて、例えば無停電化をきちんとする

とか、そういったことをするべきかなというのがあります。

もう一つ、いわゆる準基盤と言われております大学ですとか気象庁がキープしている観測点ですね、今の Hi-net などと比べると古い時代のものと言えるふうな観測点、うちでも関東東海の古い観測点があるんですが、そういうものを順次近代的なものに置きかえていくといったふうな仕事もこれから折を見ながら進めていかなければいけないと考えているところです。

駆け足でしたが、以上です。(拍手)

今日は、防災科学技術研究所にとって、11 月に入ってから地震学とか地震工学に関する 3 つ目のシンポジウムでございます。11 月 9 日と 10 日の 2 日間、「日本の強震観測の 50 年を回顧する」というシンポジウムを開催いたしました。それから 15 日から 17 日の 3 日間は、主に原子力施設の設計に最近の地震学の研究成果をどう生かすかというシンポジウムを開催いたしました。そして今日は、「日本の地震観測の現状と将来展望」という半日のシンポジウムを企画いたしました。

ご存じのように、1995 年兵庫県南部地震の後、我が国には、世界に類のない、高密度、高感度の地震計のネットワークができ上がっております。私どもの研究所は約 3,000 台に上る地震計の整備を行っております、それから得られる地震記録は地震の調査研究や耐震設計の実務に大きく寄与しているという風に信じております。

今日のシンポジウムには、国内外の地震学をリードする 5 人の研究者の方々に世界一流レベルの講演をお願いいたしました。特に安芸先生には、日本に来られるたびに私たちの研究所でお話いただき大変ありがとうございます。これもご存じの方が多くと思いますが、先生は、2004 年、AGU のウィリアム・ボーイ・メダルを受賞されました。大変おめでとうございます。AGU には実はいろんな表彰制度がありますが、その中でも 11 のメダルが最も価値の高い表彰のようで、その中でもボーイ・メダルというのは最高のメダルであります。

まず歴史が違いまして、ボーイ・メダルというのは 1939 年から設定されております。実はこれは私が生まれた年でもあるんですけれども、残りの 10 のメダルというのはすべて 1960 年以降に制定されたものでございます。私は実はジオフィジックスの分野では全くの素人と言っていいんですけれども、ボーイ・メダルの受賞者リストというのを見ますと、ジェフリーズとか、ゲーテンベルグ、ユーイング、グレン、ベニオフ、バン・アレン、フランク・プレス、ドン・アンダーソン、ジーウォンスキー、私のような素人でも知っているような名前が、まさにきら星のごとく並んでおります。

そして、ボーイ・メダル以外、11 個のうちあと 10 個メダルがあるんですけれども、そのメダルのうち 7 つにはボーイ・メダルの受賞者の名前がついているというのをきのう実は調べました。将来、AGU に「安芸敬一メダル」というのができて、今日ここにおられる研究者の中から受賞される方が出ればいいなと思いつつ、挨拶を

終わりたいと思います。

司会： どうもありがとうございました。では、講演に先立ちまして、私のほうから、今日のシンポジウムを開催する趣旨につきまして簡単にご説明申し上げたいと思います。

皆様ご存じのように、防災科研では国の方針に基づいて、高感度、広帯域、強震、そういった観測網を整備してまいりました。現時点ではある程度、当初の整備目標に近づきつつあるということでもありますけれども、今後の地震調査研究を推進していく中で地震観測はどうあるべきかということにつきまして、これまでの整備の現状、

それからさまざまな成果を踏まえながら考えていきたいというのがこのシンポジウムの趣旨であります。特に今回、地震学で世界的な権威でいらっしゃる安芸先生が防災科研に滞在される、そういった機会をとらえまして、先生のお考えであるとか今後の地震学、地震観測に関する展望につきましていろいろお話を頂戴したいということでこの日程とさせていただいた次第です。今日は総合討論的なことは特に予定しておりませんので、各講演者のご講演の後に皆様から質問いただいて、その中で議論を深めていけばというふうに考えておりますので、どうぞよろしくお願いいたします。

2004年11月 地震調査センター

# 最近における我が国の地震観測網の進展


## ー防災科研の観測網建設を中心としてー

防災科学技術研究所 岡田 義光



1

### 防災科研高感度地震観測網 建設の歴史




2

## 深層観測

(特別研究: 首都圏南部における地震活動に関する研究)

(鈴木, 2002)



3

## 深層地殻活動観測システム

### 岩槻・下総・房中+江東観測施設

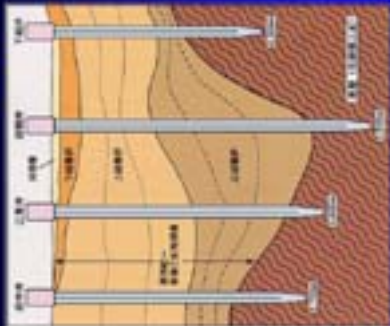
日本地質学会ニュースレター  
No. 199, p. 16  
2004. 10. 1



4



### 深層観測井

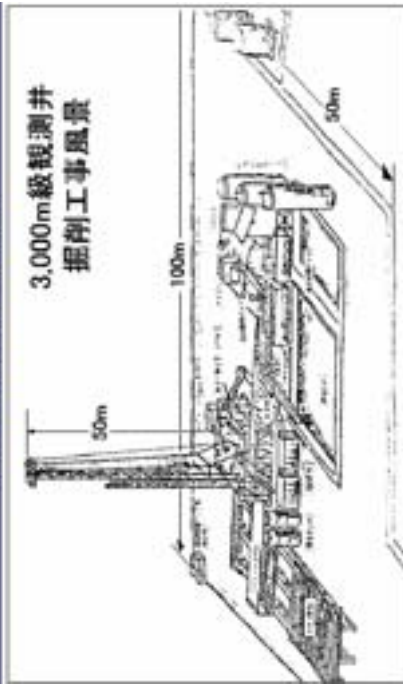


深さ (m)	温度 (°C)	水圧 (気圧)	ノイズ (地上比)	観測開始	江東
3,510	2,300	2,750	3,000		岩下
86	61	78	78		府中
350	230	275	300		総
1,000	1,050	1,200	1,250		江東
1973	1978	198	1995		観測開始
Mar	Apr	0Oct	Jan		観測開始

5



### 深層観測井の掘削



3,000m級観測井  
掘削工事風景

6



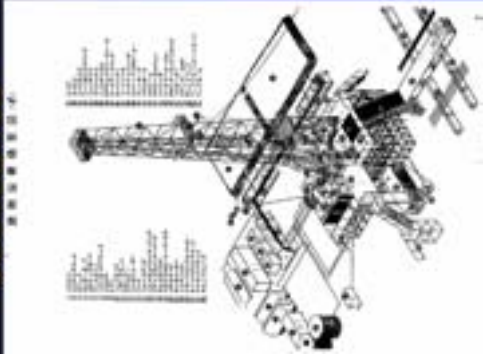
### 深層観測井の掘削工事(江東)



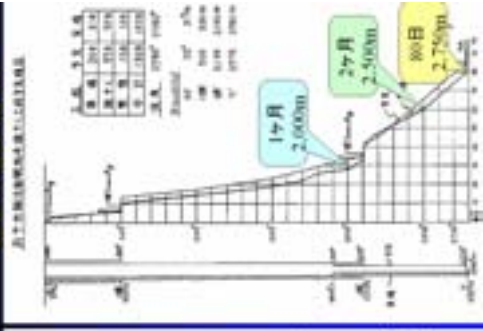
7



### 深層掘削装置の概要

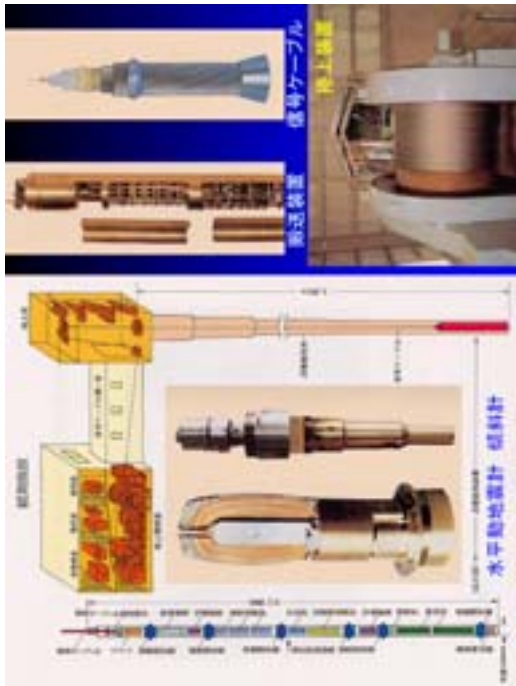


### 掘削工程例(途中)

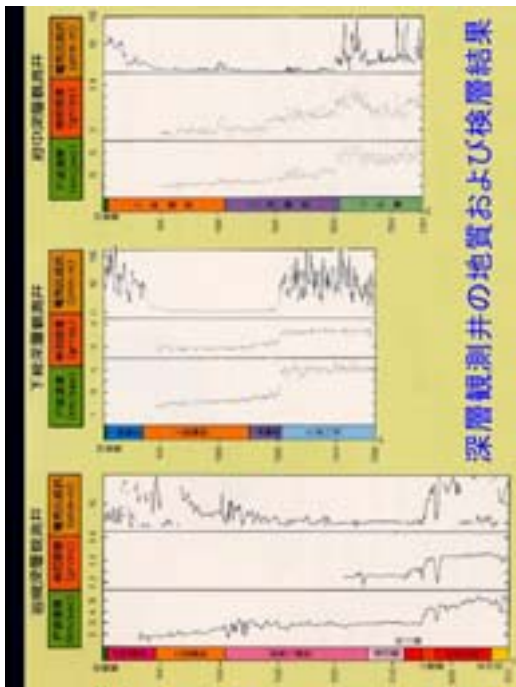


8

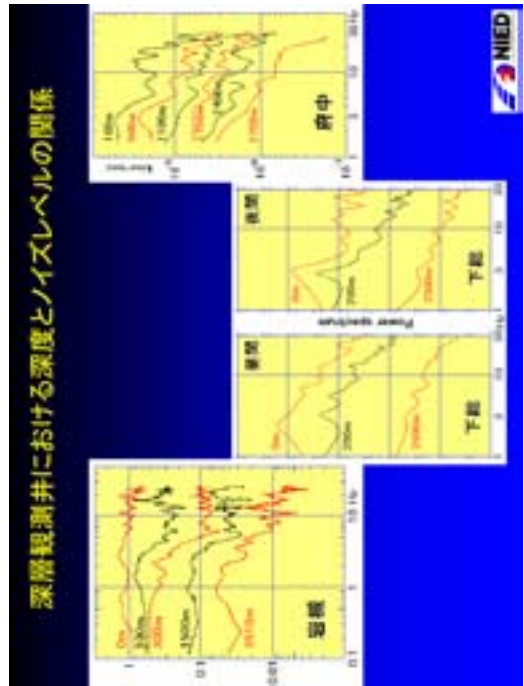




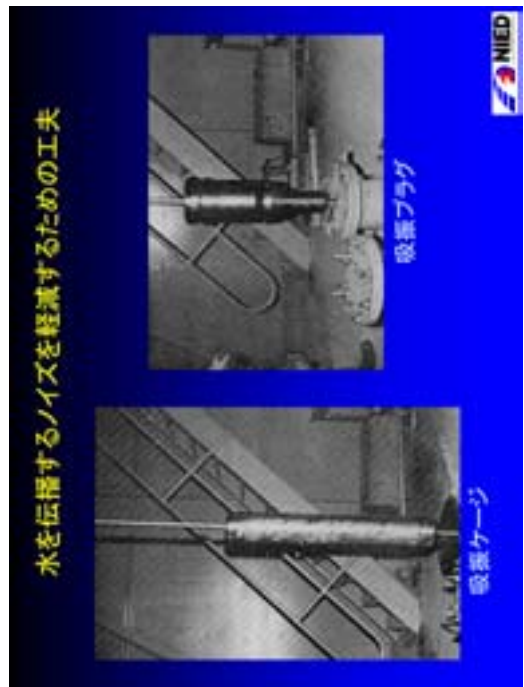
10



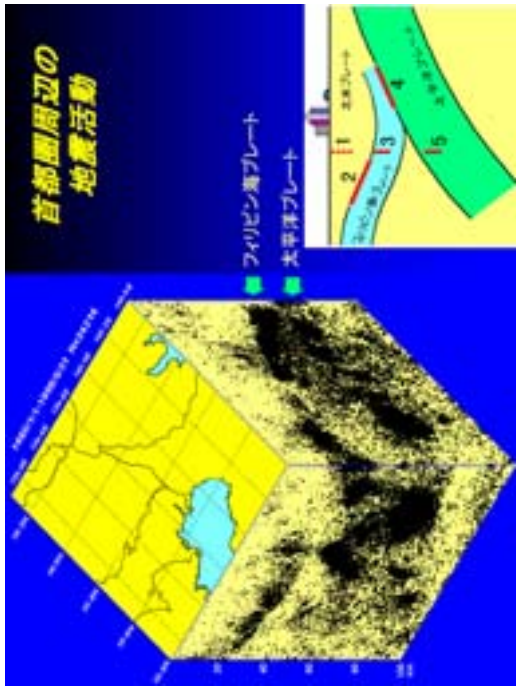
9



12



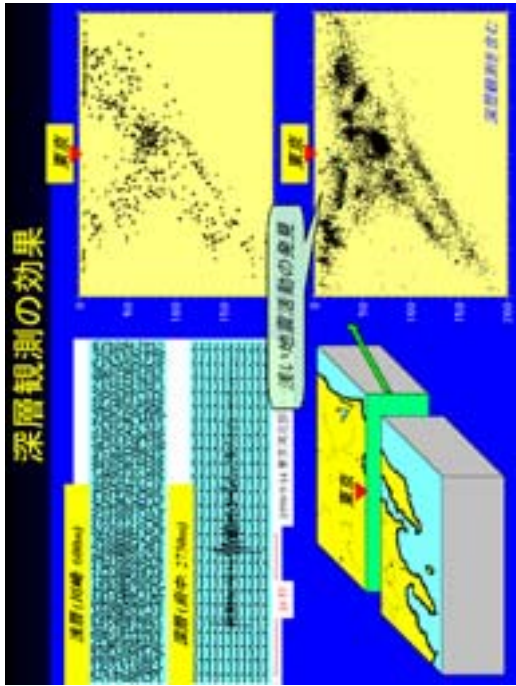
11



14



16

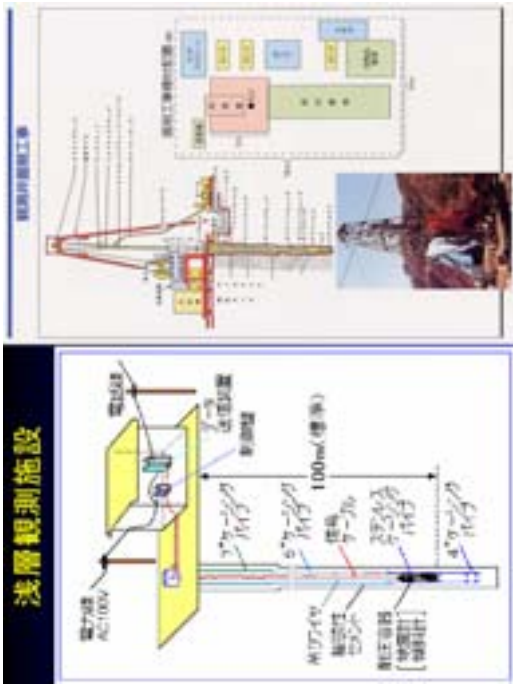


13

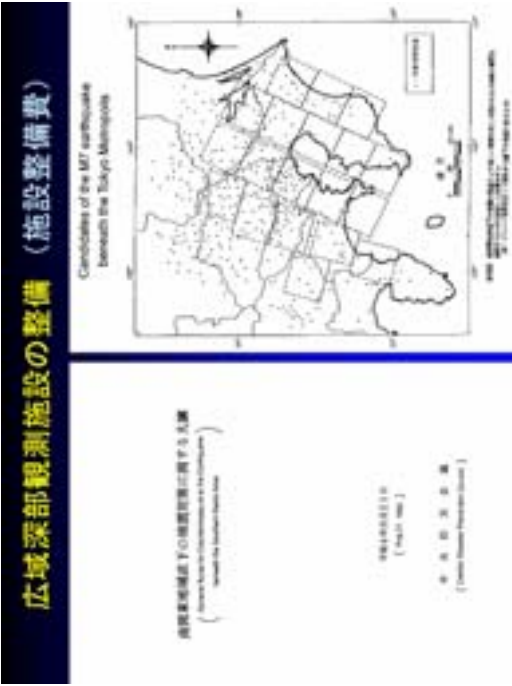
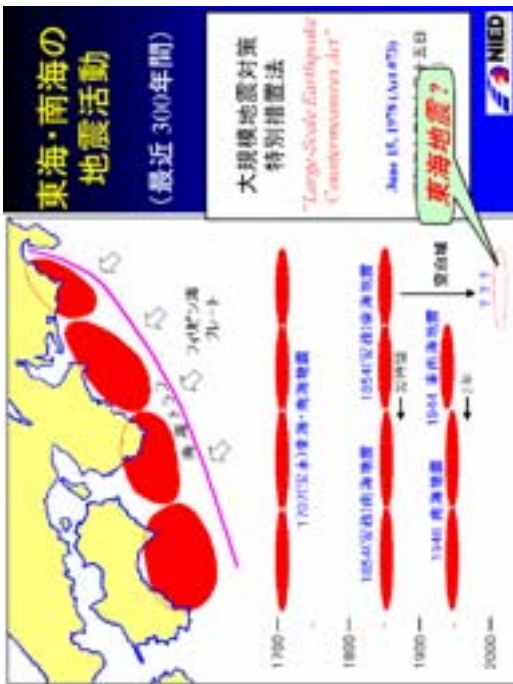


15

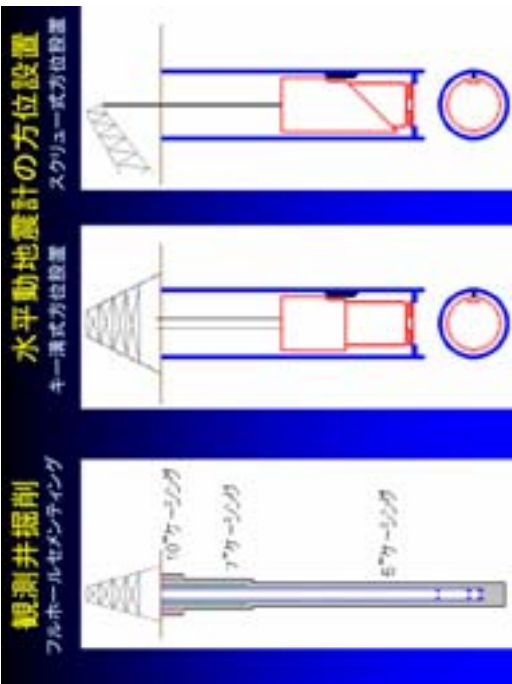
18



17



20



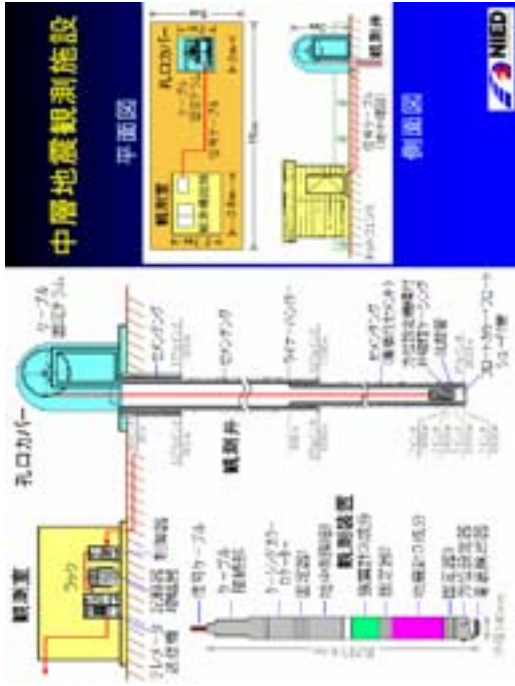
19



21



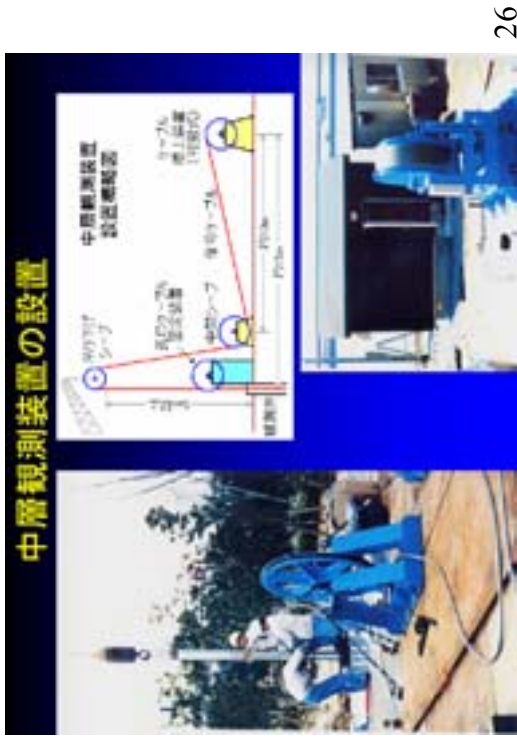
23



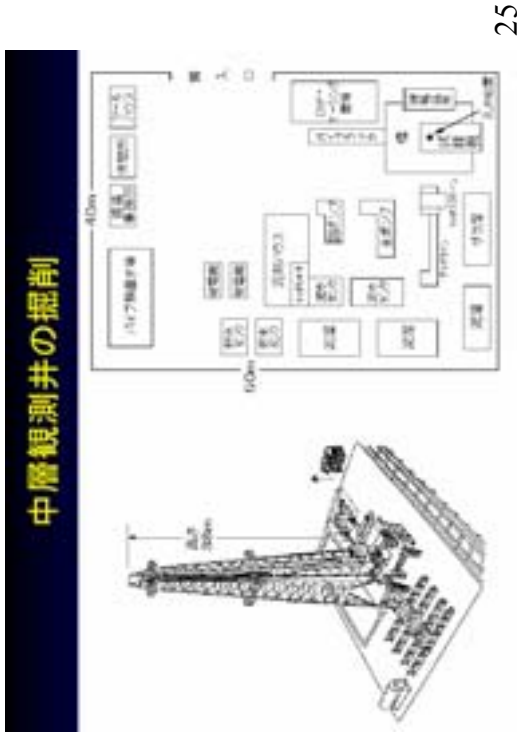
22



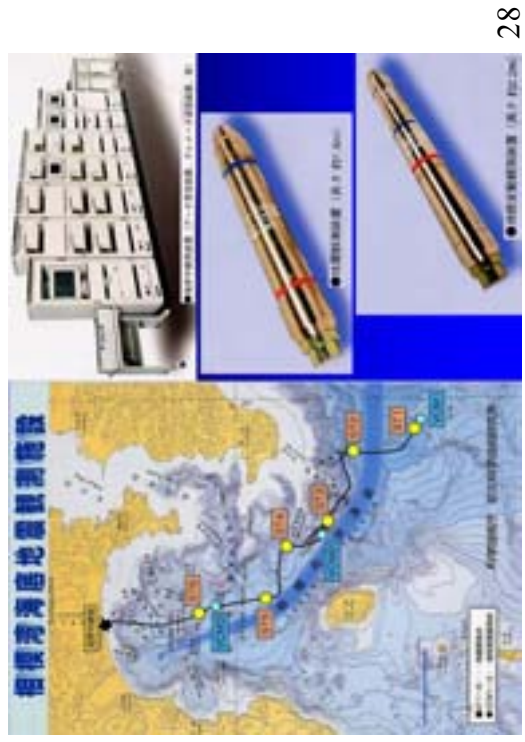
24



26



25



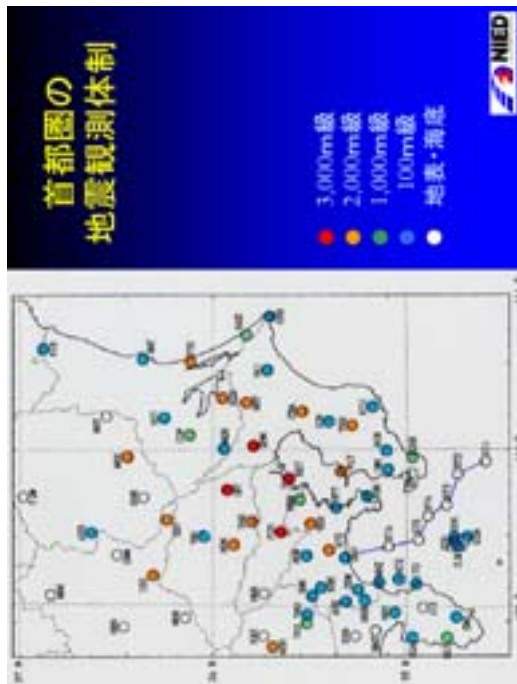
28

深層施設(3000m級)と中層施設(2000m級)の経費比較

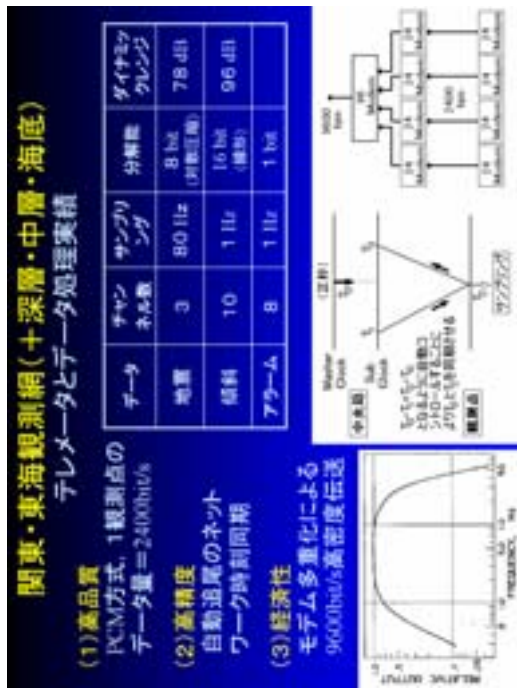
項目	3000m級	2000m級	備考
掘削工事	1500	250	基礎掘込 ⇄ 増積層中
観測装置	250	110	搬送 ⇄ 直送
信号ケーブル	120	60	ケーブル19芯 ⇄ ケーブル10芯
捲上装置	160	30	据置型 ⇄ 可搬型
観測棟	60	15	庁舎 ⇄ 小屋
記録装置	50	—	現地記録あり ⇄ なし
ケーブル装置	28	20	地震・傾斜 ⇄ 地震のみ
設置工事	35	20	
非常電源	20	—	非常電源あり ⇄ なし
合計(百万円)	2223	505	

NIED

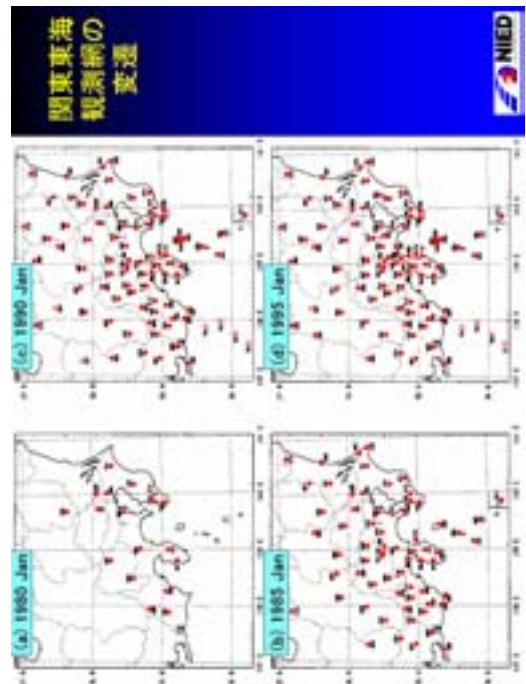
27



29



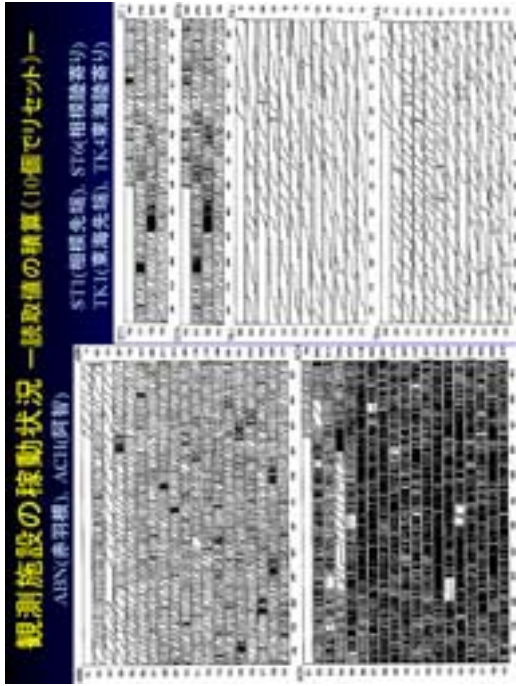
30



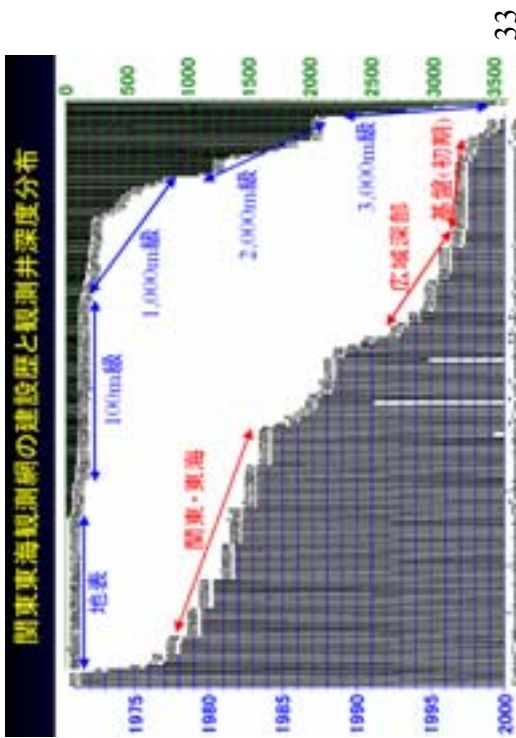
31



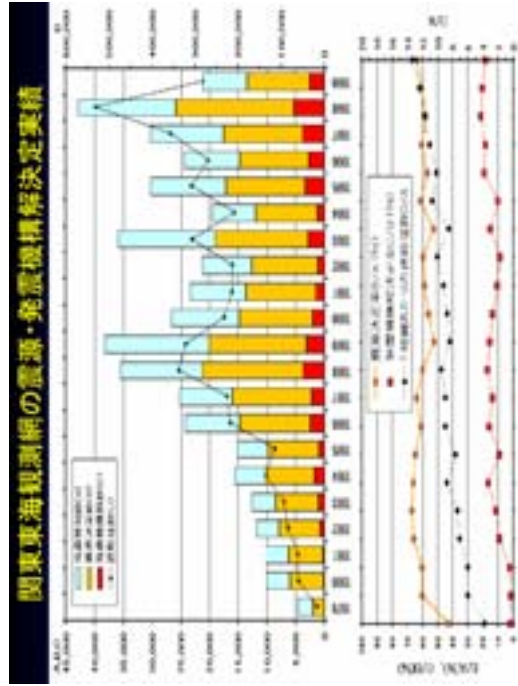
32



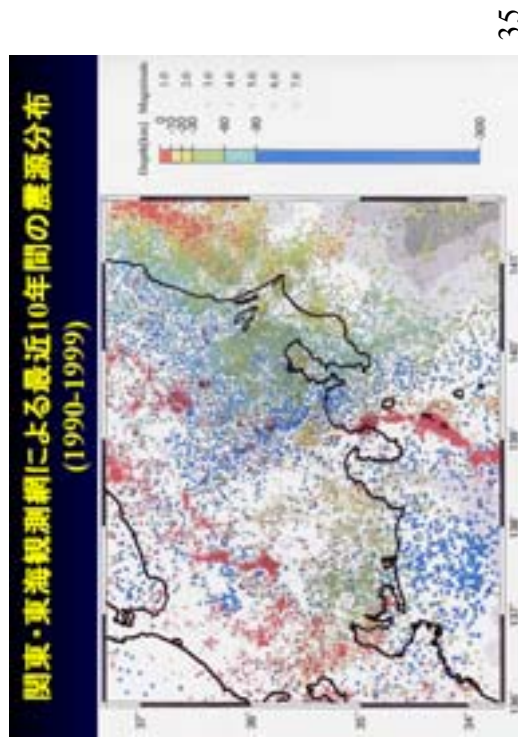
34



33



36



35

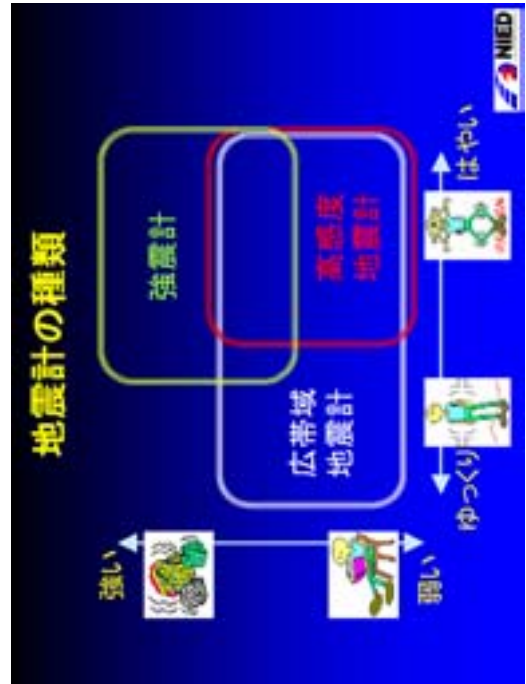




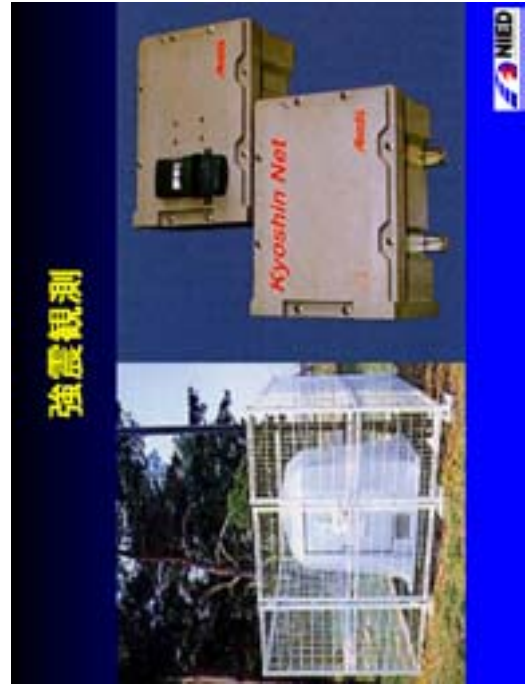
37



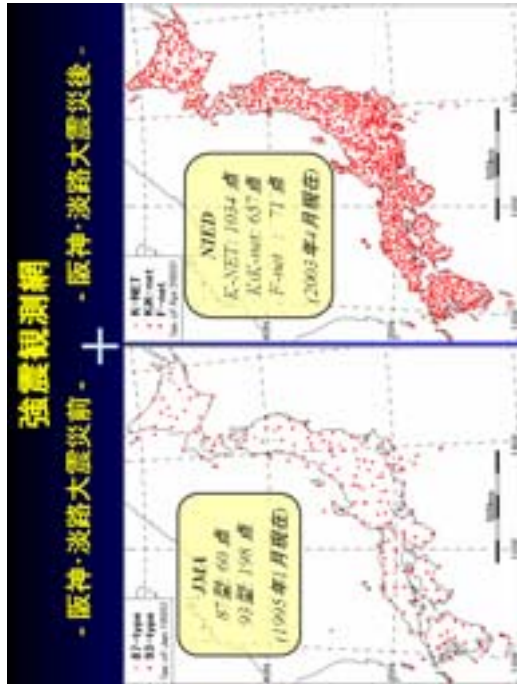
38



39



40



41



42

### K-NET: 地震計およびデータ収集

Resolution  
 Acceleration < 0.1mGal  
 A/D converter > 18bit  
 Dynamic range > 168dB  
 Sampling 100Hz  
 Memory capacity 8Mbyte

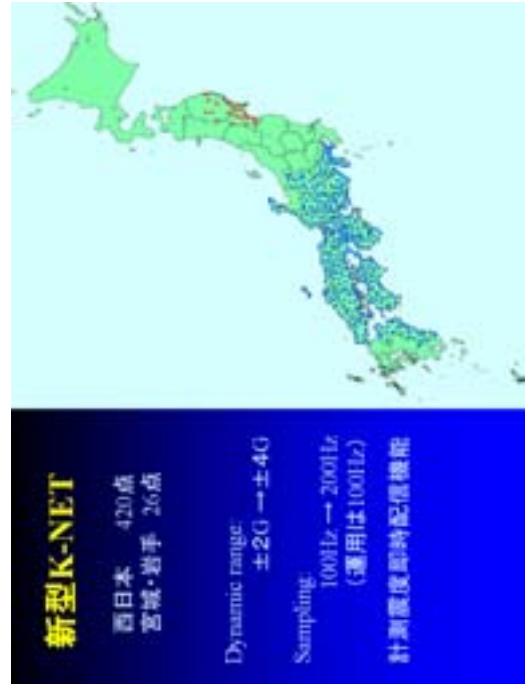
Eq!

satellite NIED  
 JMA

digital 16bit

NIED logo

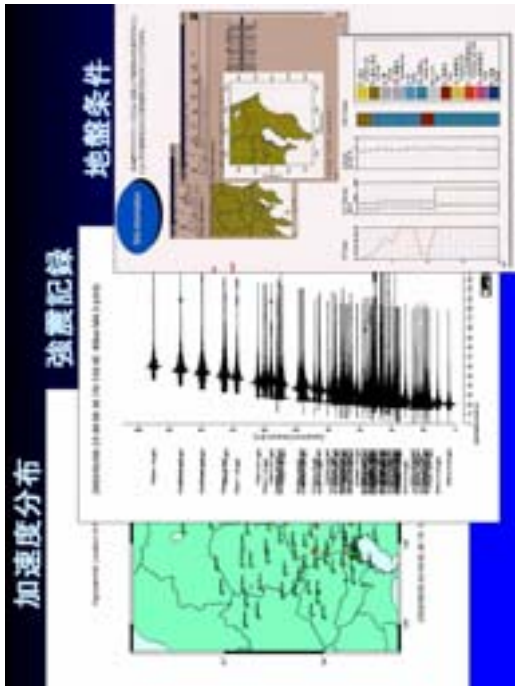
43



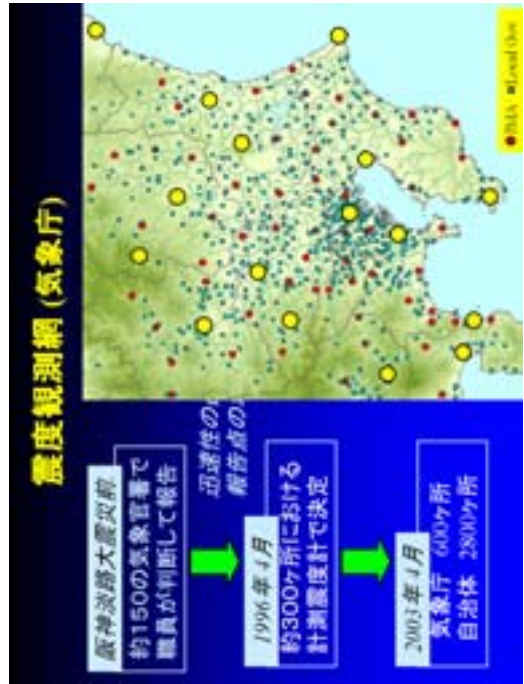
44



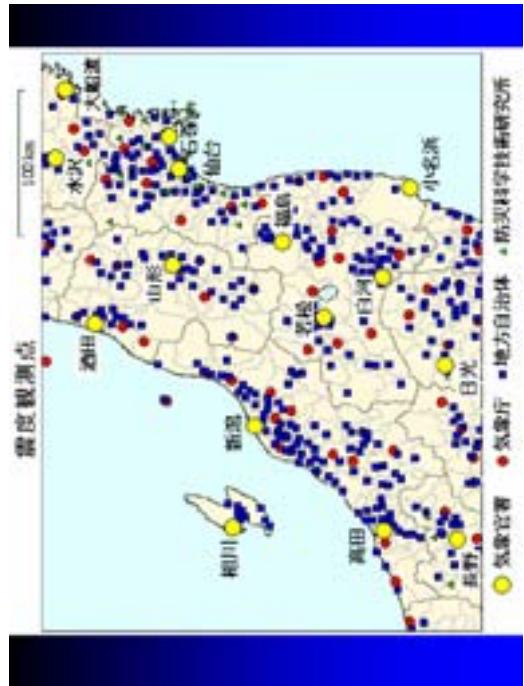
45



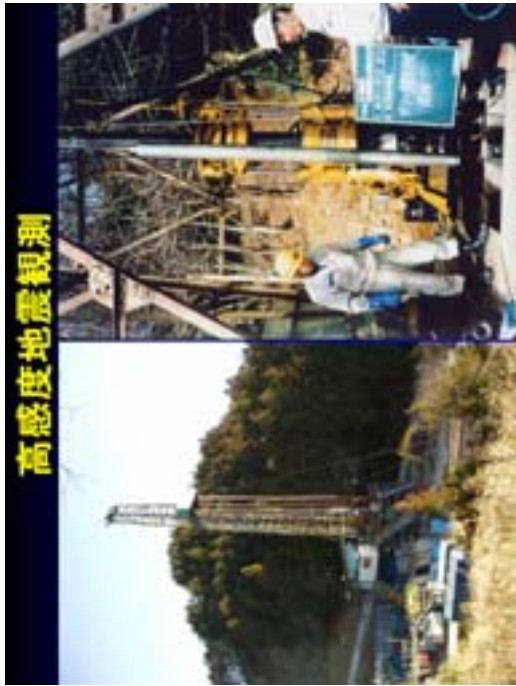
46



47

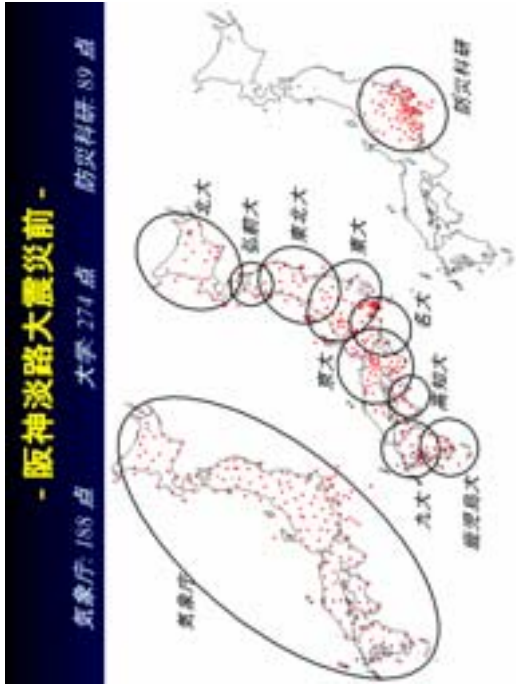


48

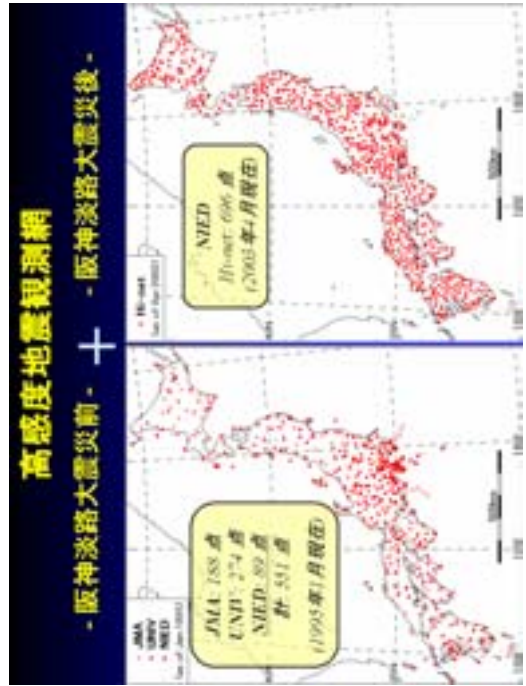


高感度地震観測

49

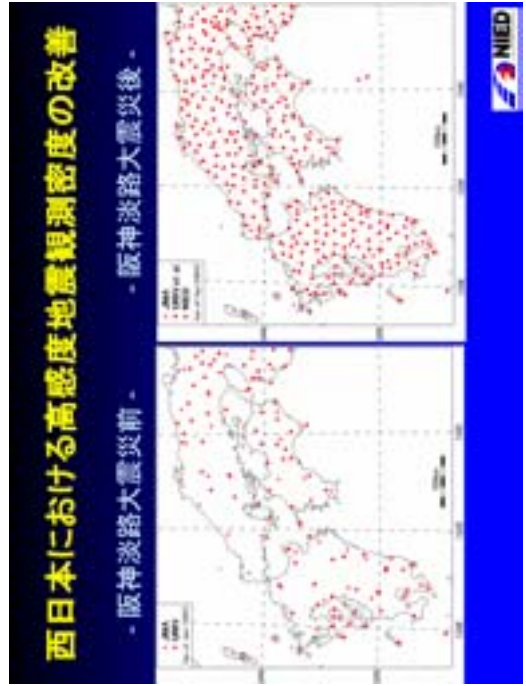


50



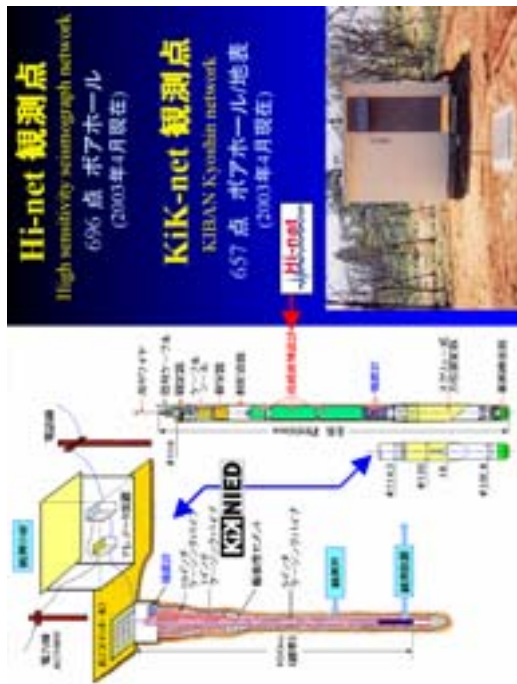
高感度地震観測網

51

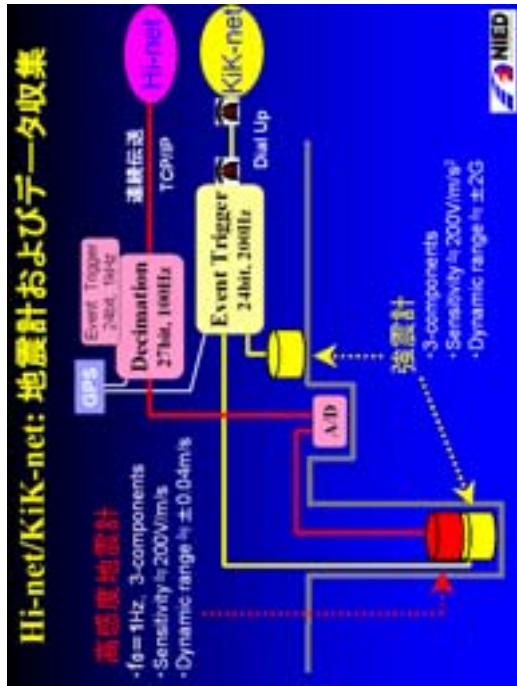


西日本における高感度地震観測密度の改善

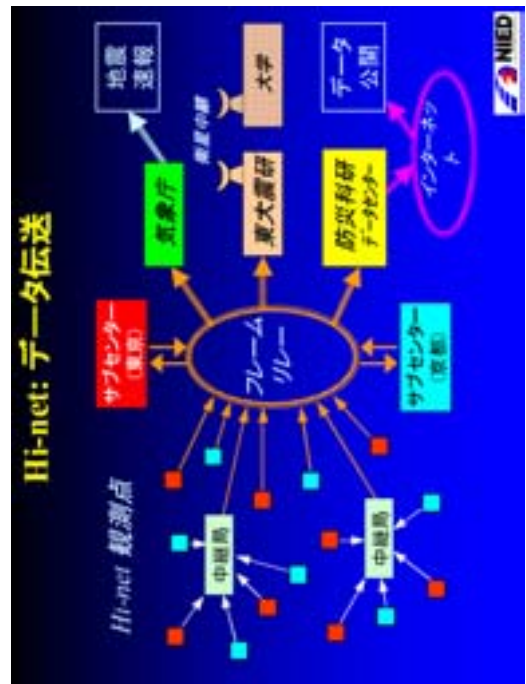
52



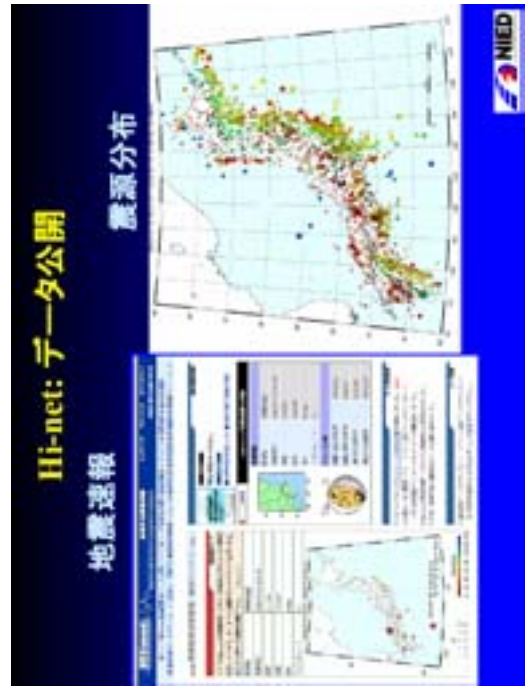
53



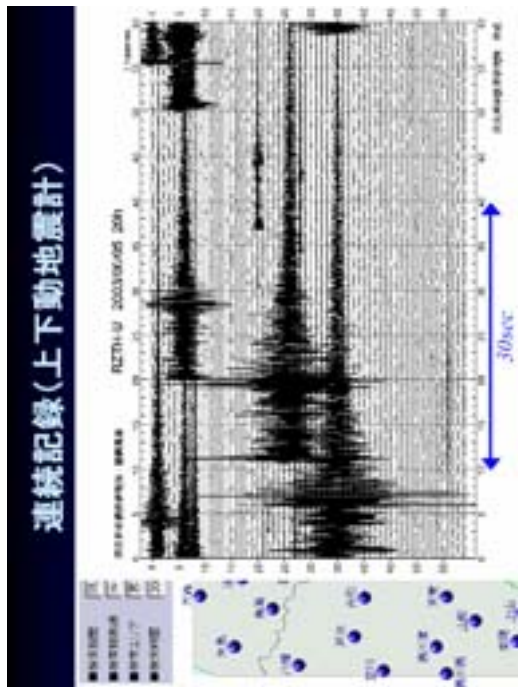
54



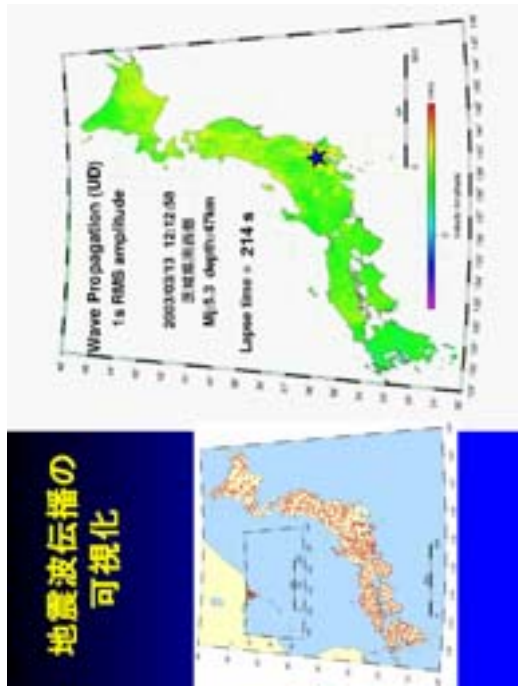
55



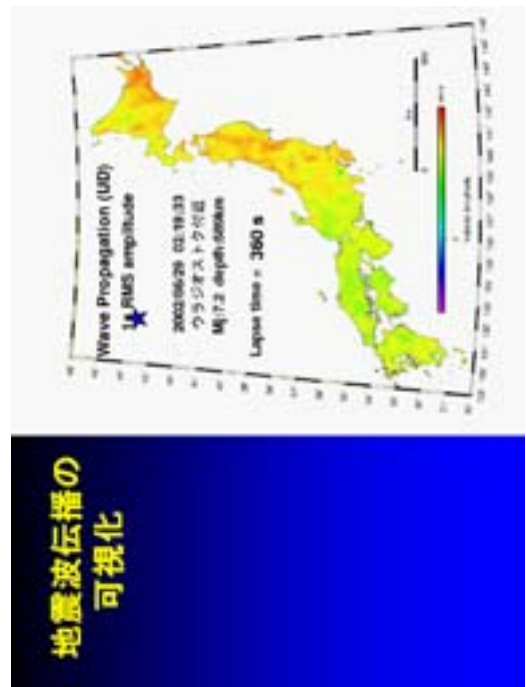
56



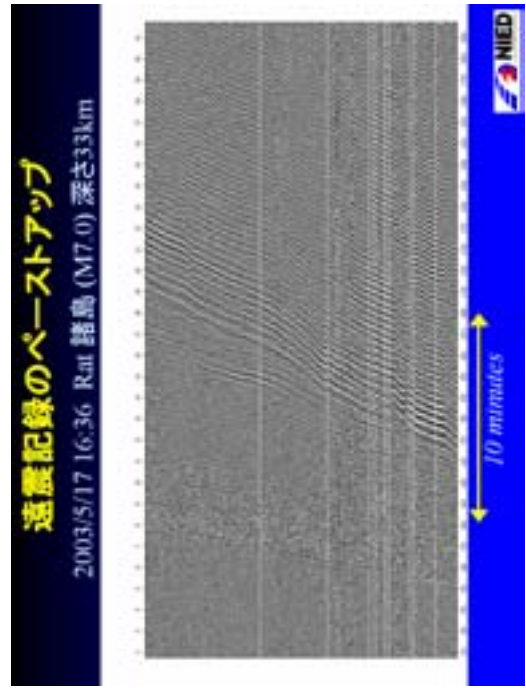
57



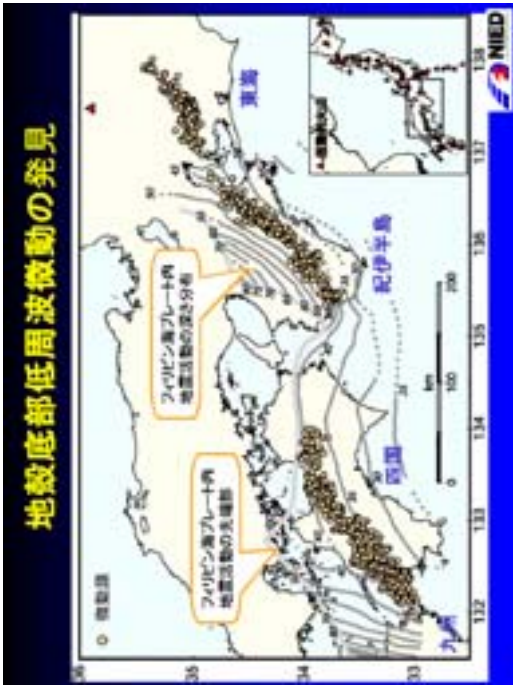
58



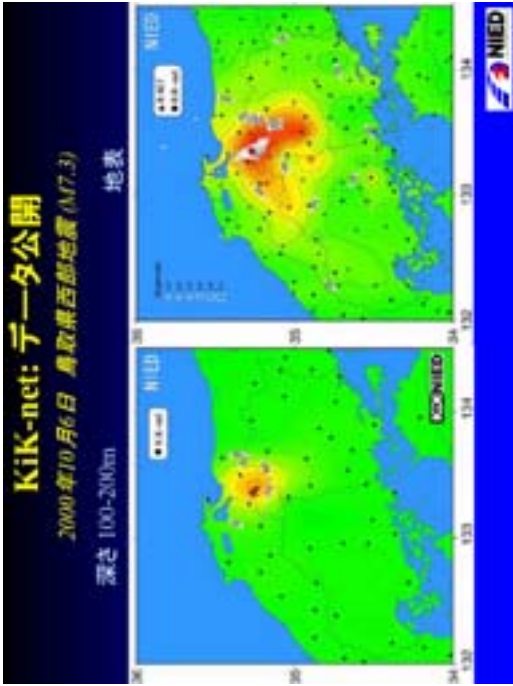
59



60



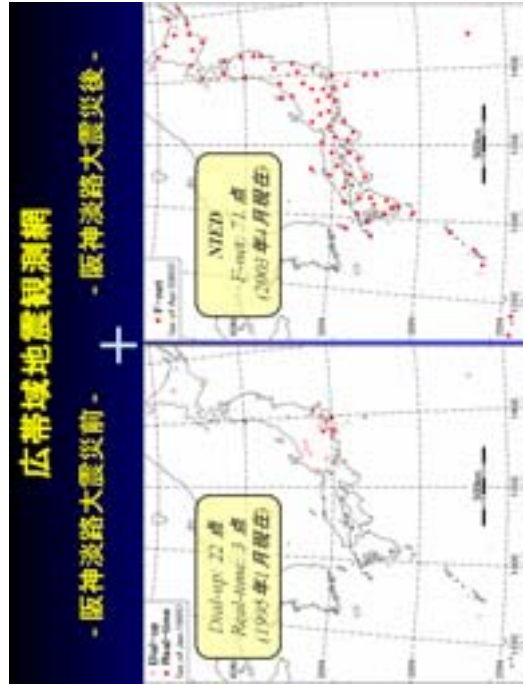
61



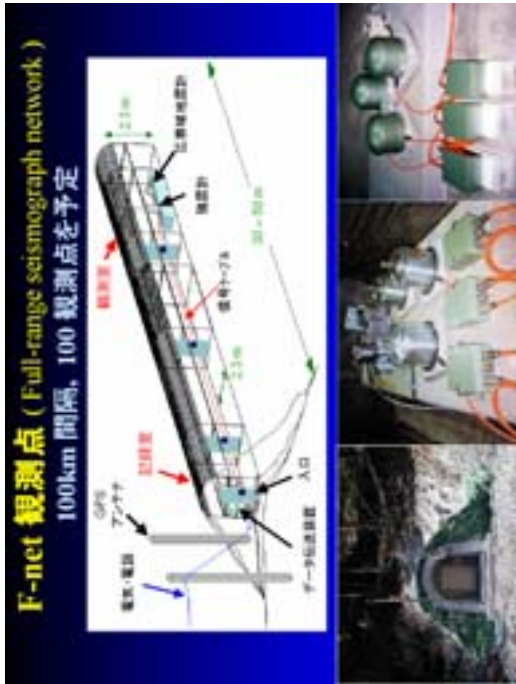
62



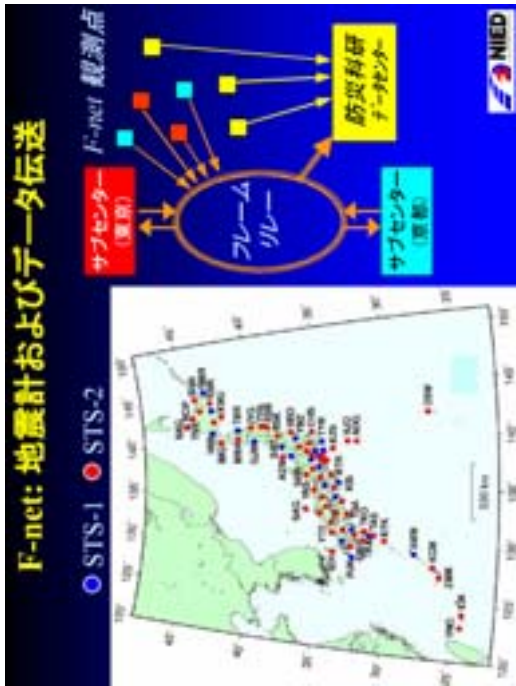
63



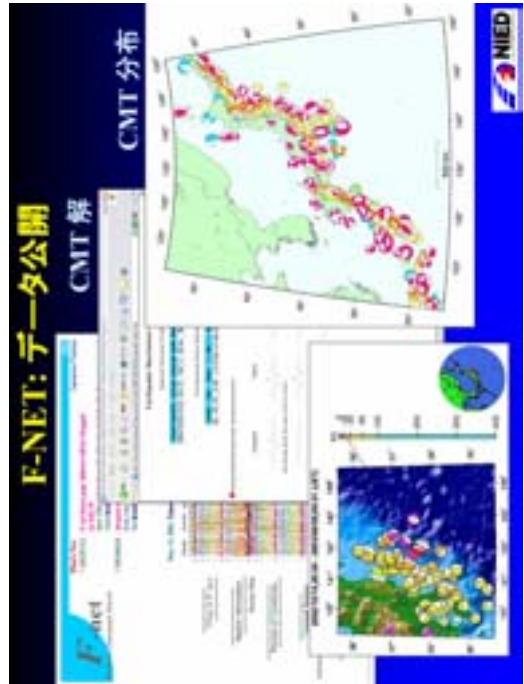
64



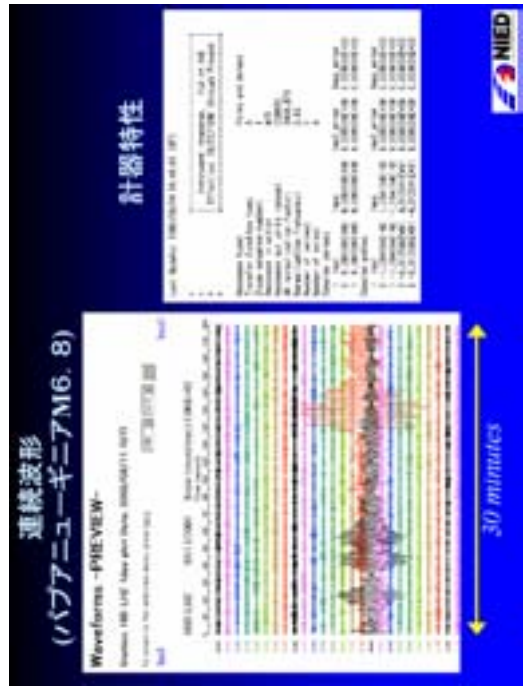
65



66

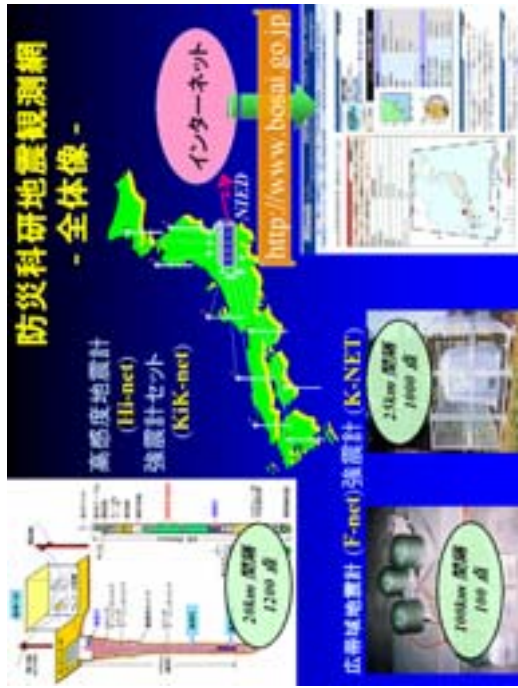


67

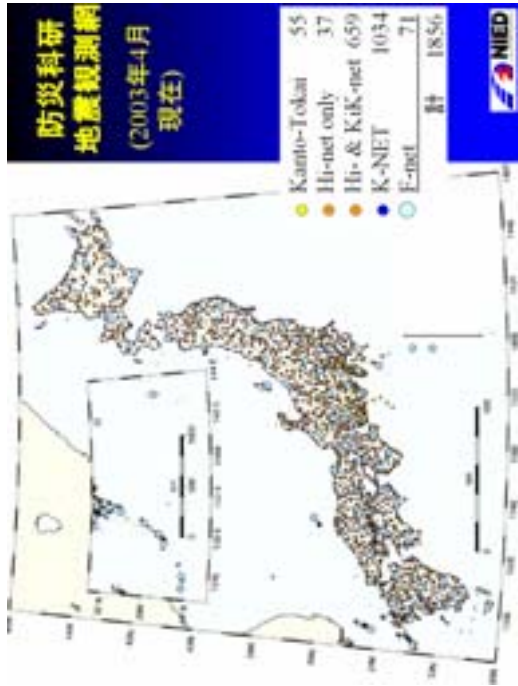


68





70



69

**— 今後の観測網整備に関する計画案 —**

1. 次世代基礎観測としての高精度広帯域地震観測 (中・深層式高感度広帯域地震観測)
  - ・高感度地震計及び高感度加速震計(傾斜計・重力計相当帯域)、傾斜計等による、低周数、スロー・スリップから短周期地震、微動までの広帯域・高ダイナミックレンジ地震観測
  - ・都市部での観測精度向上(15~20km間隔)
  - ・重点地域等での観測精度向上(1重点地域に対し数箇所)
  - ・全国的基準観測網整備(100km網)
2. 全国的「準基礎の基盤化」
  - ・空間配置の高密度化の維持、重点地域の観測の精密化

71

シンポジウム

「日本の地震観測の現状と将来展望」

講演速記録集

## 招待講演 2



## 東北日本弧の深部構造と内陸地震の発生モデル

長谷川 昭\*

ご紹介にあずかりました東北大学の長谷川です。今、岡田さんから紹介がありましたように日本列島には稠密な地震観測網が展開されております。そういった稠密な地震観測網を利用すると、今の岡田さんの話にもありましたように、それまで理解できなかったような、あるいは認識していなかったようなそういった現象が——例えば深部低周波微動がその典型的な例ですけれども、そういったものが出てくるわけです。

そういう稠密地震観測網で出てくるもう一つのものというのは、恐らく地球の内部を非常に詳しく詳細に見ていくということが多分あるんだろうと思うんです。データとしては一番新しいというわけじゃないんですけども、東北地方の下をのぞいた、そういった実例をお話させていただきたいと思います。

Hi-net の前身というのは恐らく大学の微小地震観測網だと思うんですが、先ほどの岡田さんの図にありましたように、大学の微小地震観測網は Hi-net に比べてはるかにまばらだったわけですね。ですが、合同観測というのを行いまして、衛星テレメーターを使って有限の期間、この場合は2年間ですけれども、テレメーターの観測網を東北地方のこの領域に非常に稠密に展開した、そういう観測を行いました [スライド 2]。

データとしては稠密地震観測網、テレメーターの観測網ですけれども、そのデータを軸として、地球内部をのぞくという方法は、Aki and Lee [1976]、Aki et al. [1977] で開発されて以来、多くの地震学者が地球の内部をのぞくということで活用してきましたサイスミック・トモグラフィーですね。解析としてはそれを軸にして、東北日本弧の深部構造とそれが非常に浅いところの地震活動や火山活動と密接にかかわっているように思えるわけです。その話をさせていただきたいと思います。

ご承知のように、東北日本には太平洋プレートがこのような方向に沈み込んでいるわけです [スライド 3]。その結果として、これは浅発地震の分布を黒い点であらわしているんですが、プレート境界あるいはその周辺に起こっていると思われる太平洋の下での地震活動だけではなくて、陸の下には浅い地震が一様に起こっているわけじゃなくて偏在して起こっている。どちらかというと、これは地形と一緒に重ねてプロットしてありますけれども、脊梁に沿って地震活動が密に見えるというような特徴があります [スライド 3]。

こういった浅い地震活動は、先ほども申し上げました

ように、深い構造とかかわっているように思えるというわけです。太平洋プレートが今の地形図に示しましたようにあの方向に、東北日本の下に沈み込んでいるわけですが、プレートが沈み込むと、例えばプレートの一番上、トップにある海洋地殻の中に含まれていた水はいずれ脱水するであろう。沈み込んでいって、温度や圧力が高くなると脱水するであろう。その結果、二重深発地震面上面の地震は、沈み込んだ海洋地殻の中のデハイドレーション・エンブリットルメント（脱水不安定）で起こるといような、そういう考え方がカービー(Kirby)さんたちによって出されました [スライド 4]。あるいは二重深発地震面の下面の地震も恐らくデハイドレーションで起こるのだろうと。そういった水が沈み込んでいく前に、保持していた水が沈み込んで温度や圧力が高くなると、結果として脱水して、その水は恐らくその上のマントル・ウェッジのほうに持っていかれるであろう。その結果、その水はどうなるかというのが問題なわけですが、例えば岩森さんは、プレートが沈み込んでいくにつれて水が脱水して、その水はその直上のマントル・ウェッジに行きますけれども、マントル・ウェッジでカンラン岩に水が取り込まれて、それがさらにドラッグされて深いところまで行って、いずれある深さに達する。再びその水は保持し切れなくなって上に行くだろう、このような脱水された水が地表に至るまでの経路を模式的に書いた推測図 [スライド 5] を出されていますけれども、こういった沈み込んだスラブから供給された水が最終的にどこに行くかという水の経路についても、地震観測網のデータというのは、それにある種のコンストレイント（拘束）を与えて、そういう情報を出してくれるんだろうと思っている訳でございます。

これは先ほど申し上げましたサイスミック・トモグラフィーですけれども、地殻の中で起こる浅い地震とスラブの中で起こる地震 [スライド 6] を両方使って、3次元の地震波速度構造を求めた。求めた結果はこれなんですけれども、島弧に直交する鉛直断面を6枚示してあります [スライド 7]。北から、a から f までの島弧に直交する鉛直断面で、太い実線が陸の範囲で、赤い三角が火山の位置をあらわしています。各鉛直断面の右端が海溝の位置ですけれども、この点線が沈み込んだ太平洋プレート、スラブになっているんですね。この鉛直断面は、P波速度のパターション、P波速度の平均の速度からのずれを赤・青のパターンで示しているわけです。沈

\* 国立大学法人東北大学大学院理学研究科 教授

み込んだ太平洋プレートに相当する青いものが見えると思うんですが、それが沈み込んだ高速度の地震波速度の速い太平洋プレートですが、その上のマントル・ウェッジの部分を見ると、太平洋プレートとほぼ平行に斜めに低速度域がどの鉛直断面でも見えると思います。火山のある鉛直断面以外のところでも火山のない鉛直断面でも、太平洋プレートにほぼ平行な低速度域が見える。

これは今度はS波の例です [スライド 8]。S波でも同じように高速度の太平洋プレートがきれいにイメージされていますが、マントル・ウェッジには、斜めに傾斜したというか、太平洋プレートにほぼ平行な低速度域がP波よりもより顕著に見えると思います。こういうような低速度域というのは実は東北日本で今のaからfの断面で見られたもの、つまり東北日本全域にこういった低速度域が見えたわけです。

今までは地震波の伝わるスピードですが、もう一つは減衰ですね [スライド 9]。地震波の減衰構造でも同じように、マントル・ウェッジ内にスラブとほぼ平行に傾斜した高減衰域が見えます。これがQpを色のパターンであらわしたものです。同じようにa、b、cの3つの鉛直断面をとったものですが、スラブ、つまり、沈み込む太平洋プレートでは減衰が小さくて、マントル・ウェッジでは先ほどの低速度域に対応するように高減衰域が傾斜して分布しております。したがって、マントル・ウェッジに、スラブにほぼ平行に傾斜した低速度域は、同時に高減衰域であるということが言えると思います。

こういった高減衰域あるいは低速度域というのは一体何なのかということですが、これ [スライド 10] はこの人たちがやったシミュレーションの結果です。この青い部分はプレートに相当しますが、一定の速度で沈み込ませてやったときにマントル・ウェッジ側で2次対流がどういふふうにできるかというシミュレーションですね。それまで行われたシミュレーションだと粘性係数が温度に非常に強く依存するというようなことがなかなかシミュレーションできなかつたんですけれども、この人たちは温度に強く依存する粘性係数を入れてシミュレーションをして、その結果がこの図であります。スラブが沈み込んでいきますので、その直上のマントル・ウェッジ物質は引きずり込まれる。引きずり込まれた結果、空いたスペースに下から反流が上昇流として上がってきて、赤・青のパターンは温度ですけれども、こういったところに高温域ができてくるというようなことがあるわけです。その温度を逆に地震波に伝わる速度に焼き直してやって計算した速度パータベーション、平均の速度からのずれを——P波の速度ですけれども、先ほどのトモグラフィの結果と同じようにあらわしたのですが、赤・青のパターンで表してやるとこうなるということで、沈み込んだスラブにほぼ平行にマントル・ウェッジ部分で斜めの低速度域がこのシミュレーションでもきれいに見える [スライド 10]。

つまり、この低速度域というのは、スラブの沈み込みに伴う2次対流の上昇流の部分が低速度域であるという

ことをこのシミュレーションの結果は示しているということだと思えるわけです。太平洋プレートが沈み込んでいくと、それに伴って、この上のマントル・ウェッジ部分でどういうことが起こっているかというのを模式的に書いてみたのがこの図です [スライド 11]。太平洋プレートが沈み込んでいくと、その沈み込みに伴って温度や圧力が高くなって、結果として、例えば海洋地殻の中に保持されていた水は脱水してマントル・ウェッジに上がっていく。それをこの印で示したつもりなんですけど、上がっていったマントル・ウェッジのカンラン岩にとらえられて、サーペンティン・クロライドになって、それがそのまま、より深部に引きずり込まれていくであろう。どんどん引きずり込まれていってもある深さに達すると、やっぱり水は保持できなくなって放出して、結果としてその水は上昇していくであろう。

先ほどのシミュレーションにありましたように、スラブの沈み込みに伴って2次対流が起こって、その上昇流がこういったところにあると思われるわけですが、そういったところに水が入っていくと、結局、この水が上昇流の部分で……。上昇流の部分というのはもともと深いところから上がってくるわけですから、周りに比べたら温度は高い。それに水が加わることによって融点を下げるといふ効果があって、結果として、この中で部分熔融が起こるだろう。メルトが部分的に含まれるだろうというふうに推定されるわけです。

実は、先ほどの減衰構造、マントル・ウェッジの地震波の減衰のQの値からある種の仮定をして、マントル・ウェッジの中の温度分布を推定した結果がこれ [スライド 12] なんですけれども、それによると、マントル・ウェッジの中の斜めの低速度域の温度というのはリキダスよりは高いということがわかっております。それがこの結果なんですけど、水が入ってくると、いずれここでは部分熔融が起こる。つまりメルトが含まれるということになるわけでありまして。そのような上昇流は、先ほどの位置関係でいうとどうやらボルカニック・フロントの直下にまで達する。モホとぶつかる場所は、ボルカニック・フロント、あるいは脊梁山地の直下に、先ほどのトモグラフィの結果だと対応するということになります。

このような2次対流が東北日本の下のマントル・ウェッジで起こっていると私たちは思っているわけです。さらに地表の浅いところまで部分熔融したマグマが上がってくれば一部は冷えて固まるなんていうことが起こると思うんですが、そうするとそこに保持していた水は吐き出さざるを得ない。結果として、その水はさらに上昇して地表まで来る。あるいはマグマそのものが地表まで来る。そうすると火山の形成になるわけですが、そういったことが繰り返し起こってきていて、現在も起こっているんじゃないかと私たちは思っているわけでありまして。

この上昇流の部分というか、低速度域の部分でメルトがどのくらい含まれているかという推定も、地震波のトモグラフィの結果からしております。それがこれなん

ですけれども、P波のリダクション・レートというか、P波がどのくらい遅くなるかというP波の遅くなる割合とS波の遅くなる割合の比、それを使って低速度域の中でメルトがどのくらい含まれるかという推定をしたわけでありまして。

これ [スライド 13] は a、b、c という島弧に直交する3つの鉛直断面について、低速度域の中でのP波の遅くなる割合、S波の遅くなる割合、それを40、65、90キロの3つの深さについて観測されたものをとったものです。その比がこれです。これはトモグラフィーから得られた結果ですけれども、この値を使って、武井さんのモデルでポア (pore) のアスペクト・レイシオとメルト・フラクションを推定した結果がこれ [スライド 14] であります。40、65、90 キロメートルの深さで、先ほどの a、b、c、3つの断面についてアスペクト・レイシオとメルト・フラクションはこのくらいの値になるという結果が得られました。

ヴォリューム・フラクション、体積率でメルトは、低速度域の中に上昇流の部分はどのくらい含まれているかということ、およそ0.1%から数%ぐらいメルトが含まれている。アスペクト比は  $10^{-3}$  から  $10^{-1}$  ぐらいの値であるというようなことが推定されたわけですね。

そのような上昇流があるとすると、マンテル・ウェッジの中にスラブの沈み込みに伴ってその直上のマンテル・ウェッジの物質が引きずり込まれて、結果として、あいた隙間の周りからというか深いところから上昇流が上がってくる。その上昇流は、多分温度が高くなって、あるいは水が加わることによって粘性係数が極めて小さくなって、上昇流の部分が非常に絞られた狭い範囲になってきて、多分ああいう低速度域、面状のというかシート状の低速度域になるかと思っているわけですね。そういう低速度域というか、そういう流れがあるとすると、もしかすると異方性にそういった情報が現れてくるんじゃないかと思って、少し異方性についても調べてみました。

S波のスプリッティング [スライド 15] ですけれども、S波の速い振動方向と遅い振動方向を、スラブの中で起こっているかという陸地の直下で起こっているやや深発地震、太平洋プレートの中で起こっているやや深発地震を使ってその直上の観測点、逆に言うと観測点から直下のやや深発地震の速いS波の振動方向がどの方向であるかというのをプロットしたのがこれ [スライド 16] なんですけれども、そうすると、これは稠密な観測網がある場所について調べたものでありまして、速いS波の振動方向というのは、バック・アーク側ではほぼこういう方向、東西である。これがプレートの相対運動の方向ですけども、フォア・アーク側ではそれにほぼ直交するとか、海溝軸にほぼ平行な傾向が見られました。速いS波の振動方向と遅いS波の振動方向の時間差ですけども、その時間差を棒の長さで示してありまして、背弧側ではその差が大きくて、その方向はプレートの沈み込みの方向にほぼ平行である。このことから私たちは、沈み込んだスラブに引きずられて起こるマンテル・ウェッ

ジ内での対流がバック・アーク側のS波のスプリッティング、異方性をつくっているんじゃないかと思ったわけでありまして。

先ほどの岡田さんのお話にもありましたように、その後、高密度の観測網が Hi-net で展開されてきました。それを使ってもっと広い範囲でS波のスプリッティングを調べてみたのが、これ [スライド 17] であります。言い忘れましたが、背景にあるカラーの濃淡は、マンテル・ウェッジ内の斜めの部分に沿ってS波の速度をプロットしたものです。つまり、赤系統の色が見えるということは低速度域が分布している範囲と想像していただければいいんですが、そういう低速度域が分布している範囲はこの辺までで、その東側の縁はこの辺まで。つまり大体火山フロントあたりですが、それより背弧側でこの領域、先ほどご覧になっていただいたのはこの領域ですが、東北日本全域について同じ傾向が見られる。したがって、これはプレートの相対運動の方向ですけども、それにほぼ平行に速いS波の振動方向が見られるということから、多分マンテル・ウェッジ内での2次対流によってこの異方性がつくられているのではないかと推定しているわけでありまして。

Hi-net は日本全国にあるわけですから、もっと広く見てみました。Hi-net はデータはあるんですが、人間のほうはなかなか解析が追いつかないで、今度は少し北に伸ばしてみたというわけでありまして [スライド 18]。まだデータが途中とか多くはないので少しばらばらなんですけど、ご覧になっていただくとわかるように、東北日本ではほぼプレートの相対運動の方向に平行に背弧側では速いS波の振動方向が見られるわけですが、北海道ではどうなるかということ、プレートの相対運動の方向はそんなに変わらないはずですが、実はバック・アーク側で見られるのはプレートの相対運動の方向に平行ではなくて、ここではどうやらこういう方向に見られるみたいだ。

じゃ何によっているのかということ、どうもプレートの相対運動の方向ではなくて、スラブの最大傾斜の方向にほぼ平行に速いS波の振動方向がバック・アーク側では見えるらしいというような……。つまり、東北日本で見られたことはプレートの最大傾斜の方向とプレートの相対運動の方向はほぼ同じだったんですけども、斜め沈み込みである北海道ではその方向は大分違ってくる。それによると最大傾斜の方向に速いS波の振動方向は来るみたいで、これからプレートの沈み込みに伴う2次対流、その流れを反映してS波の異方性がつくられるのではないかと想像していたわけですが、そうではないという可能性が一つと、もう一つは、プレートの沈み込みに伴うコーナーフローによってつくられるんだけれども、そのコーナーフローの方向がこの赤い矢印に示すような方向、つまりスラブの最大傾斜の方向に上昇流が上がってくるのであるというようなことで作られるかもしれないと私たちは思っているわけでありまして [スライド 19]。

最近、田村さんたちが——これは第四紀の火山の分布なんですけれども、赤で示してありますのが第四紀の火

山ですが、スラブの沈み込みの方向に……火山フロントに沿って火山は分布しているのが一つありますけれども、バック・アーク側の火山まで含めて見るとこういうふうには海溝軸に直交する幾つかの細長い領域に第四紀の火山が集中するように見える [スライド 20]。こういう空間的な地形の分布と、それから重力と、さらにボルカニック・フロント直下で趙さんがやったトモグラフィーの結果から、マントル・ウェッジの中ではこんなことが起きているんじゃないかというような指摘をされました [スライド 21]。つまり、先ほど見てきた上昇流ですが、上昇流の部分を島弧の走向方向に見ると、田村さんたちはこれを「ホット・フィンガー」と言っていますが、指状の上昇流部分があって、それがこういうような第四紀の火山とか、海溝軸に直交する狭い領域に火山が集中することがあると指摘されたわけです。

この部分、マントル・ウェッジの先ほど見た低速度域ですが、それが島弧の走向方向にどういふふうに変化しているか、こうであるのかどうかを見てみました。田村さんたちはトモグラフィーのそういう結果を見ずに、こういうことが実際マントル・ウェッジの中で起きているんじゃないかと想像されたわけですが、本当にそうなのかどうか私たちも調べてみたんです。調べるに際しては、先ほどのデータと同じデータセットで、スラブと地殻の中は既に得られた値に固定してマントル・ウェッジの中のグリッドの数を小さくして、つまり、より空間分解能を上げてインバージョンをもう一回やって出した結果なんです、それがこれ [スライド 22] であります。これはどういうところを見たかという、さっきの図と同じなんです、これは島弧に直交する鉛直断面のつもりですが、スラブにほぼ平行なマントル・ウェッジ内の低速度域、これは上昇流と思っているわけですが、この低速度域に沿って——これはS波の速度ですが、S波速度のパターションを見た。それがこれ [スライド 23] であります。そうすると先ほどの田村さんのモデルと似ているといえば似ているんです。この部分に沿って見たと思っていただけといいんですが、ここでは第四紀の火山を赤の丸で示しています。それから、モホ面付近で起こる低周波微小地震を白丸でプロットしてありますが、火山フロントあるいは脊梁山地に沿って第四紀の火山、低周波微小地震がいっぱい起こっています。そのほかにバック・アーク側に第四紀の火山が田村さんの指摘のように帯状に幾つか見えたわけですが、帯状に幾つか見えたところに相当する直下のマントル・ウェッジ、斜めですから深さにして 30 キロから 150 キロぐらいになりますが、そのマントル・ウェッジ内に、それに空間的に対応するように低速度域が見える。田村さんたちが言うようにフィンガー状ではなくて、フィンガーと言うよりもアヒルの水かきみたいにシート状にあって、低速度の度合いが大きいところがちょうど指になっているような、そういう構造をしているんじゃないかと思えるわけです。

今の地形と比べてみたのがこれ [スライド 24] ですが、

左側が今の図でありまして、右側が地形です。白丸が低周波微小地震で、赤丸が第四紀の火山です。そうすると、ここに岩木山がありますけれども、第四紀の火山があるところ、それからここにも地形の高まりがありますが、ここに地形の高まりがあつてというような地形の高まりにも対応して、あるいは第四紀の火山が地形の高まりに対応してあつて、その直下の深さ 30 キロから 150 キロメートルのところでは低速度域が複眼的に対応してある。

低周波微小地震は西南日本の場合と深さは大体同じぐらい。この場所ではモホ面の近くですが、30 キロメートルぐらいのところには低周波微小地震が白丸で示したようにあるということから、3次元的に模式的にこんなことが起きているんじゃないかと私たちは思っているわけです [スライド 25]。日本海溝のところから太平洋プレートが沈み込んでいくわけですが、その沈み込みに伴ってその直上のマントル・ウェッジの物質がドラッグされて、その中に水が含まれるわけですが、その水がある深さになると、その隙間を埋めるように下から上昇流が上がってくる。その上昇流の中には、スラブに含まれていた水がいずれ取り込まれて上昇流とともに上がってくる。恐らく低速度の度合いが大きい。もっと言うとメルトの溶融度が大きいというか、メルトのヴォリューム・フラクションが大きいところでは、そういうところがアークの走向方向に 80 キロメートル間隔ぐらいであったわけですが、そういうところではメルトが大きいので、場合によると早目に分離してしまうものがあるかもしれない。それが島海山や岩木山をつくっているようなバック・アーク側の火山ではないか。だけど主要な流れはボルカニック・フロントの直下のモホ面まで来ますので、そこに火山フロントがつくられるというようなことが起きているのではないかと思っているわけでございます。

そうすると、こういったことは連続的に起きているわけですから、スラブに含まれていた水は結果として、この上昇流、もちろんこういうセグリゲートした、早目に分離したものにも含まれていくでしょうが、主要な流れはここを推定しているわけですから、ここに水が連続的に上昇流に乗って上がってくる。結果として地殻底に底づけられるか、あるいは場合によると地殻の中に還流していく。それがそのまま上がってくれば火山の噴火になりますけれども、多くはその前に冷やされて固化して、結果としてそこに含んでいた水を吐き出して、それが地殻に供給される、あるいは浅いところまで上がってくるというようなことが起こると期待できるわけですが、もしそうだとすると、この上昇流が上がってくるボルカニック・フロントの下、あるいは脊梁山地の下では水が連続的にかなり多量に供給されると推定されるわけですから、そうするとその上側で地殻の変形はどんなことが起こるかということが推定できるわけですね。

ボルカニック・フロントに沿って水が供給されると、結果として軟化して塑性変形も起こるでしょうし、地殻全体が局所的に弱くなるということが期待されるわけですが、そうすると太平洋プレートの沈み込みに伴ってプレート

境界では固着していますし、場合によると日本海側でもプレートの衝突があるということで、この陸地の部分はほぼ東西にというかプレートの相対運動の方向に圧縮されているわけですが、そのような圧縮応力場で局所的に弱いところで変形が大きくなる可能性があるわけです。

これ [スライド 26] はプレートの相対運動の方向のつもりで、東西方向のひずみ速度を赤・青のパターンで示したのですが、青が短縮です。東西方向に火山フロントあるいは脊梁山地に沿って局所的に短縮している、そういうひずみ集中帯みたいなものが見えると思うんですが、それは先ほどの上昇流が上がってくる場所に相当しているわけです。

そこでは地震はどういうふうになって起こるかというところ、これ [スライド 27] は今の図に微小地震を重ねたものですけれども、赤が微小地震で、短縮レートが大きいところに沿って微小地震が集中しているということがわかかると思います。ちょっと見えにくいですが、グリーンの四角で書いたのは断層面です。大きい地震の断層面で、皆さん東北日本のサイスマシティーのことをご存じだと思いますけれども、脊梁山地の両側に活断層があって、例えば陸羽地震なんていうのは脊梁山地の西縁で起こった逆断層であるということが記憶にあると思いますが、そういう微小地震だけではなくて、ひずみが集中している脊梁山地付近に一つは大きな地震の活動帯があるということで、大きな地震と小さな地震も合わせて、下から上昇流が上がってくるような場所に対応して地震活動が見られる。

そのようなことから私たちは、上昇流がモホ面上がってきて底づけされるか中に還流してきて、結果としていずれ水を供給する [スライド 28]。ローカルに局所的に水が多量に供給されるので、結果として地殻全体が軟化する。特に下部地殻は軟化の度合いが大きいと思われるので、下部地殻が局所的に軟化すると、プレートの相対運動の方向に押されたときにこういったところで短縮変形をする。結果としてここに応力が集中する。あるいは場合によると上部地殻にも水が上がってきて軟化をして局所的な組成変形が起こる、なんていうことがあるかもしれません。微小地震もそういうところでは起こる。というようなことが起こっているんじゃないかというふうに想像しているわけでありませぬ。

今のこの部分を、この面に直交する方向——これ [スライド 29] は東西鉛直断面のつもりなんですけど、この面に直交する方向で見ると、つまり島弧の走向方向ですけども、例えばこれはバックは  $V_p/V_s$  比、深さ 40 キロ、つまりモホの直下の  $V_p/V_s$  比をとったところですが、 $V_p/V_s$  が非常に大きい赤のところというのは低速度域に対応しているんですけど、先ほど島弧に走向する方向で低速度の度合いが大きいところは 80 キロメートルぐらいの間隔で起こっているという話をしました。そうだとすると、供給される水の量も島弧の走向方向で変わってくるということが期待されるわけです。つまり、そういうところでは火山があって、その間に実は——これが活断

層のつもりですが、陸羽地震はここで起こったわけで、そういったところ、火山と火山の間、つまり水の供給量が少ないと想定されるような場所で地震が起こる。大きいと想定されるような場所では火山が入ることから、これ [スライド 30] はさっきの図ですけれども、これに直交する方向で上から見てみると、火山地域ではプレートの相対運動の方向に圧縮されるとより軟化の度合いが大きい。それに対してその間というのは軟化の度合いが小さいので、プレートの相対運動に圧縮されたら結果としてここは短縮が遅れる。遅れるということはここに応力が集中するというわけですが、その集中した応力が、つまり短縮のレートがこの場所とこの場所に比べて小さい場所では——ここにリバース・フォールトを示したつもりなんですけれども、いずれこういうところの地震として短縮レートの遅れを取り戻すように変形が起こるんじゃないか。つまり、プレート境界でアスペリティーの周辺がズルズル滑って行って、そのアスペリティーは固着していてその遅れを取り戻すのと同じように、こういったところで周りの短縮変形、組成変形の遅れを取り戻すように陸羽地震のような地震が起こるのではないかというふうに私たちは考えている次第でございます。

例えば今のこういったことは、こことここの間のこの部分で起こっていると思っているわけですが、そういった起こり方というのは階層構造になっていて、実はこの中でも同じようなことが起こっているように思えるんですね。これ [スライド 31] は今のこの場所ですけども、ここにカルデラがあって、これは深さ 4 キロメートルの S 波速度のパターションをあらわしているんですけど、遅いのが白ですね。カルデラに相当するように低速度域がある。ほぼ東西方向にというか、プレートの相対運動の方向に圧縮されたときに、恐らくこういったところというのは早く短縮変形、塑性変形を起こすと思えるわけですが、その間の部分はむしろ頑張っている。その頑張っているところで短縮変形を取り戻すように東側に傾斜した逆断層——この矢印に示すような逆断層ですが、そういう逆断層運動が起こるといようなことが 1996 年の鬼首地震でも見られました。

先ほどの東西方向の短縮変形の卓越しているところはほぼ脊梁山地に沿ってと申し上げましたが、実は宮城県北部地域だけは、脊梁山地からもう一本東側、フォア・アーク側に短縮変形が卓越しているところがあるんですけど、こういったところでは短縮変形が卓越するだけじゃなくて微小地震も活発ですし、実はこういうところで宮城県北部地震は起きているわけです [スライド 32]。じゃそれは一体何なのかというと、さっきはモホの直下だけを見てきたわけですが、トモグラフィーでもっと中を見てやると——今のこの部分、東西鉛直断面、a、b の断面をトモグラフィーでとったものですけども、これがモホで、これがコンラッドですから、地殻の中のトモグラフィーの結果を見ると、ボルカニック・フロントの直下にある低速度域だけではなくて、モホの下にある低速度域はこちら側にもブランチが見える [スライド 33]。



これがS波のパータベーション、これがP波のパータベーション、これが  $V_p/V_s$  ですが、特にS波のパータベーションで顕著な低速度域がある。つまり二股に低速度域が見えるということから、ここまで達した水はここだけではなくてこちら側にも供給されて、結果としてこういったところで短縮変形を局所的につくって、フォア・アーク側でもつくって、あるいは地震を起こすというようなことが起こっているんじゃないかと思っているわけです。

これは比抵抗の分布で、この部分の比抵抗をとったものがこれですが、Mitsuhashi et al. [2001] のやつですが、この低比抵抗の領域とこの低速度の領域がぴったり対応しています。つまり模式的に書くと、下からマントル・ウェッジでモホの直下まで上がってきた上昇流のメーンはボルカニック・フロントというか脊梁のほうに行きますが、もう一つ、プランチがあるとフォア・アーク側でも地震活動を起こす、あるいは短縮変形が卓越するというようなことが起こる、そういう例を見ているのではないかと私たちは思っているわけです [スライド 34]。

今見てきたのは、稠密地震観測網を軸にしてサイスミック・トモグラフィでのぞいてみて、そのほかのデータと合わせて、東北日本で何が起こっているかという私たちの想像していることをご紹介したんですが、地震の稠密観測網というのは地面の中をのぞく上で圧倒的に重要なものでありまして、まだ私たちは Hi-net の御利益をほんの一部しか使えないというか、データの量が圧倒的に多いのでまだ解析がなかなか追いつかないという状況にあるわけですが、今後 Hi-net をより活用して、東北地方から広く日本列島全体を見ていけたらなと思っております。

以上で、私の話を終わらせていただきます。どうもありがとうございました。(拍手)

#### 質疑応答

—： 低周波微小地震のことですが、こちらは明らかに火山と結びついている。西南日本のは空間分布も連続的ですし、時間的な性質も違うように思うんですけど、その違いがどこから来るか何かお考えはありますか。

長谷川： 答えを言うと、考えはないのですが、確かに東北日本は明らかに火山と結びついている。地表の今現在火山がないところでも実は低周波微小地震はあるんですね。ですが、それはさっきのマントル直下の構造に対応している。だからマグマが地表まで達したら火山で、達しなければ火山は見えないわけだから、そういったところで低周波微小地震がいるというケースがあるんだと思います。そうすると、地表の火山と結びついていない低周波微小地震もいるけれども、もっと深いところまで考えれば多分同じ原因であろう。そういう意味では、火山と結びついているという安芸先生のご指摘は当たっていると思います。

それと今度は西南日本の比較のところですが、低周波微小地震ではなくて低周波微小地震だけが起る、そういう

ものも西南日本で見られたわけですが、それと東北日本で見られる低周波微小地震が非常に違う、明らかに違うということは、多分そんなにきれいに違ってはいないんですね。微妙なところで若干違うということはありません。一目見たら大体同じだろうと思います。そのときに、小原君が見つけたもっと前弧側の深部低周波微小地震の中に含まれている低周波微小地震だけが単独で起こるものと比較したらどうなるかということ、パッと見て大分違うなという印象は私は持っていないんですが、小原君はどうですか。

—： 私の見た感じでは周波数特性的にはかなり似通っています。大体1ヘルツから3ヘルツぐらいに卓越しているような波ですけれども、前弧側に見える低周波微小地震についてはPがほとんど見えない。東北地方とか、長谷川先生が今紹介された西南日本の背弧側に見えるような低周波微小地震については、P、Sが非常にクリアに見える。そういった非常に大きな違いはあります。ただ、それが何に基づくのかということについてはまだよくわかっていません。

長谷川： それから、1回だけ東北日本でも微動があったんですね。それは Hi-net ができる前だったので高密度な観測網じゃなかったんですが、どうも福島県の沼沢沼のあたりで微動があって、松代まで届くような大きな微動だったんですね。継続時間が10分とか何分かという継続時間だったんですが、その3分ぐらい前に低周波微小地震がそのほとんど同じ場所で起きているという事例があるので、今後もう少し詳しい解析をしていくとそういったものがいずれ見つかるかもしれないですね。そうなってくると、今の安芸先生のご質問に対して何かヒントを与えてくれるような事象が出てくるかもしれません。

—： 低周波の部分で、ウェッジのところの水が両側に上がって2つに分岐しているとおっしゃったんですが、片方は火山を誘発して、片方は地震ですよ。これ、何が両側のこういう現象を変えているクリティカルなパラメーターだと思っていらっしゃるんですか。現象はかなり違いますよね、同じように部分熔融域が浅くなっていた部分で。

長谷川： 私は同じだと思っているんですよ。地表まで達したら火山で、達しなければ火山じゃない、それが一つだと思うんです。この場所に関してはフォア・アーク側は達しないんだと思うんですね。供給量が多分少ないから達することはできない。多分、中部地殻、そこに模式図がありますけれども、あの辺までしか部分熔融域は達してないだろうと思っていて、供給量も多分そんなに多くないので、地表までは来ないと思っています。

地震はそれと全然別の話で、そういうようにメルト、あるいはメルトのなれの果ての水、いずれにしても水が供給されてくると地殻のその部分を局所的に軟化して、結果としてそこで短縮変形が起こる。その短縮変形が空間的に一様に起らないので、場合によると大きい地震を伴うということだと思えます。この左側は火山しか書いてないんですが、実はさっきの図でござらなくなった

ように、そのすぐ北側、直近のところではM6の地震が起きているわけですね。そういう意味では、火山というか脊梁側でも地震は起きている。フォア・アーク側でも地震は起きている。それは局所的に水が供給されるから、それに伴って地震が起こる。違っているのはマグマが地表まで達するか達しないかということで、火山がある、ないという違い。あとは変わらないと思っています。

ー： そうするともしかしたら場合によっては、時間が経つと今フォア・アークと言っているのがいわゆるバック・アークで、ここだと火山フロントのもっとずっと東に移るといった可能性もあるということですか、もし量が変われば。

長谷川： 2次対流の上昇流部分の位置が変われば火山フロントは変わるはずですよ。地質的には東北日本でも火山フロントの位置はもっとフォア・アーク側にあって、それが後退してきて今の位置にあるという研究成果がありますので、火山フロントの位置は上昇流の位置によって変わる。今後変わる可能性ももちろんあると思います。それは時間スケールの中で実質的な……。つまり、サブダクションそのものが変わればということに対応しますから、時間スケールは遥かに長いということだと思います。

ー： マントル・ウェッジの対流とS波のスプリッティングが非常に調和的できれいな図だと思ったんですけども、見せていただいた図でプレートの速度とマントル・ウェッジの対流の速度がありましたよね。あれは1対1に対応している速度ですか、それとも強調して書い

てあるんですか。

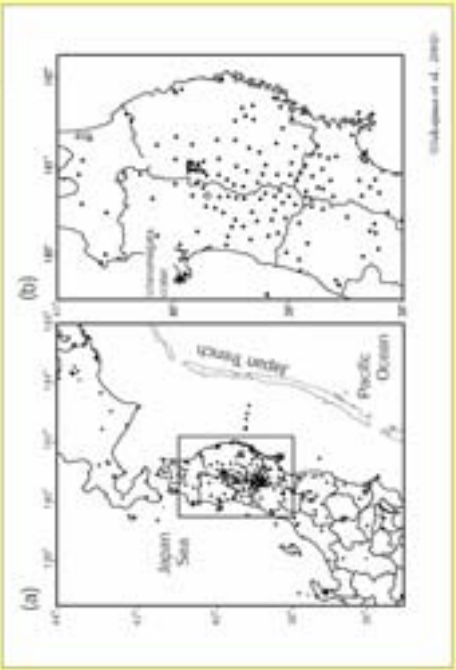
長谷川： あれは模式図なので、速度はあの中に入っているつもりはないんです。速度の情報は私たちは観測事実としては持っていません。ただ、あのシミュレーションで多分わかると思うんですけども、ギャップがあって、非常に粘性係数が小さくなったところが局所的にギャップを埋めるのにいっぱいというか、ほとんどそれがコントリビュートするとすると、プレートの沈み込みの速度に比べてけた違いに遅いということは多分ないというのは直観的に理解できると思うんです。シミュレーションでもそうですね。ですから、プレートの沈み込みの速度が8センチだとすると、シミュレーションは多分2センチとかそのくらいになったんだろうと。

ー： 深い地震のスラスト型の地震が起きてないで引きずる力というのがどのくらいかというのはわからないんですけども、そう大きくはないような感じもするんです。それはシミュレーションでは、プレート境界ではどのくらいの……。

長谷川： それは粘性係数によって違うので、どのくらいというのは誰も分からないじゃないでしょうか。ただ、斜めの低速度域は非常にきれいにシート状に見えるから、シミュレーションはあれを説明できる必要があると思うので、そういったことから、さっきのものは一つの例です。

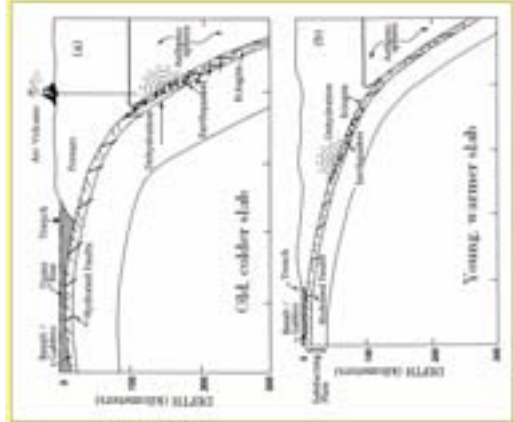
司会： 他に質問等ございますでしょうか。無ければ、どうもありがとうございました。(拍手)

©Seismic tomography study — Observation stations used



2

©Cause of upper plane seismicity: Dehydration embrittlement



(Raby et al., 1999)

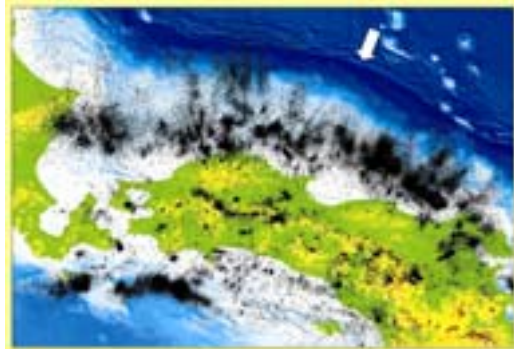
4

# 東北日本弧の深部構造と 内陸地震の発生モデル

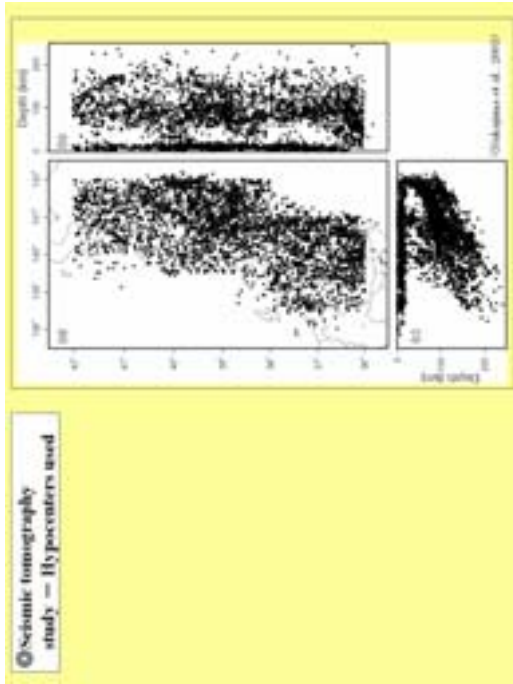
東北大学大学院理学研究科  
地震・噴火予知研究観測センター  
長谷川 昭

1

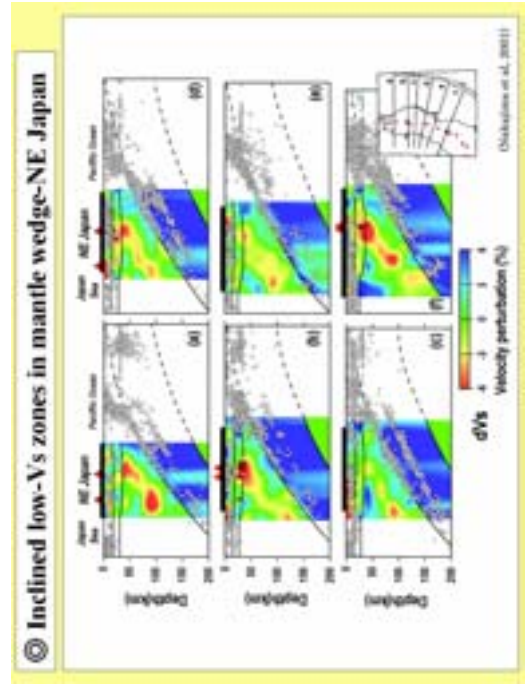
© Shallow seismicity map of NE Japan



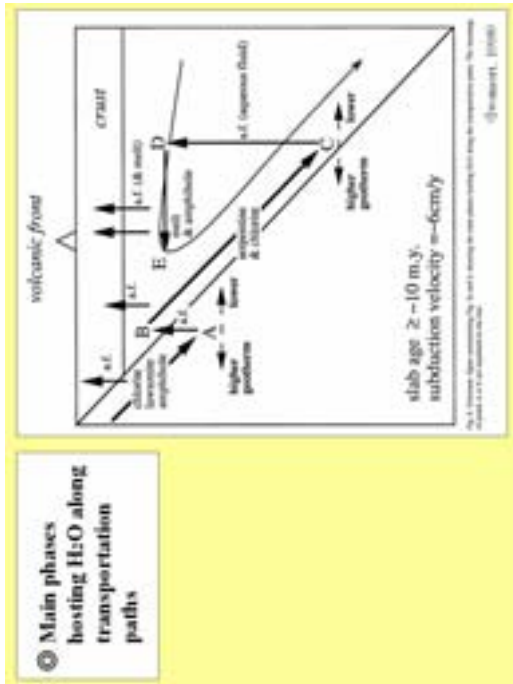
3



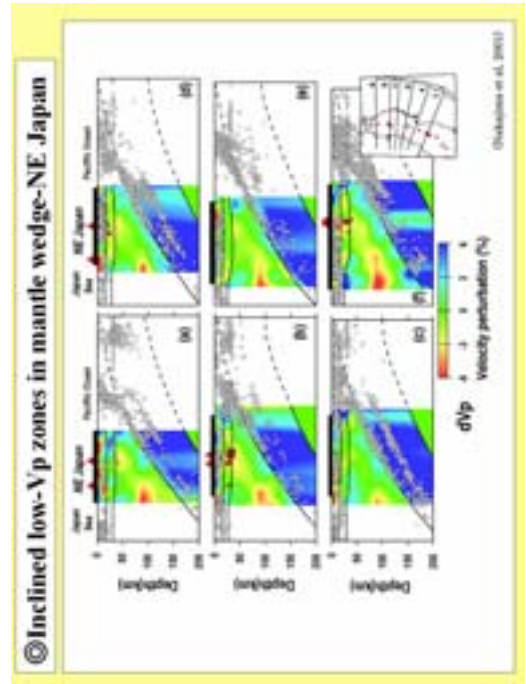
6



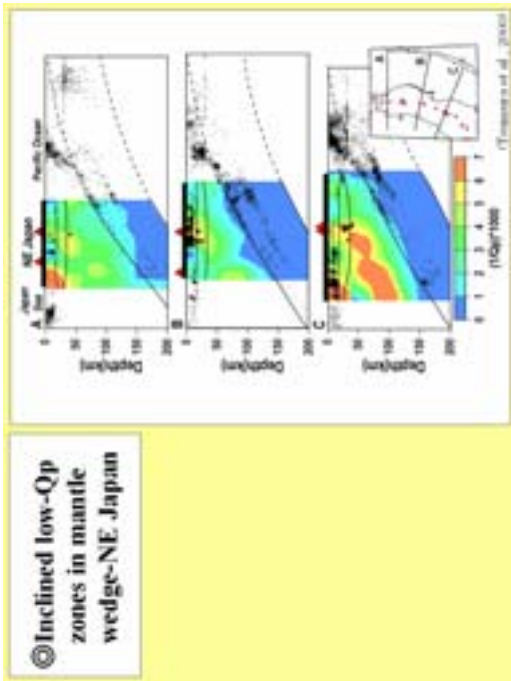
8



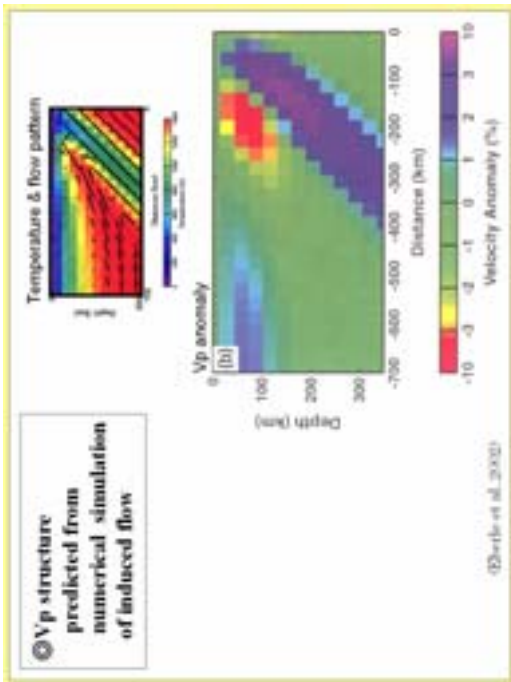
5



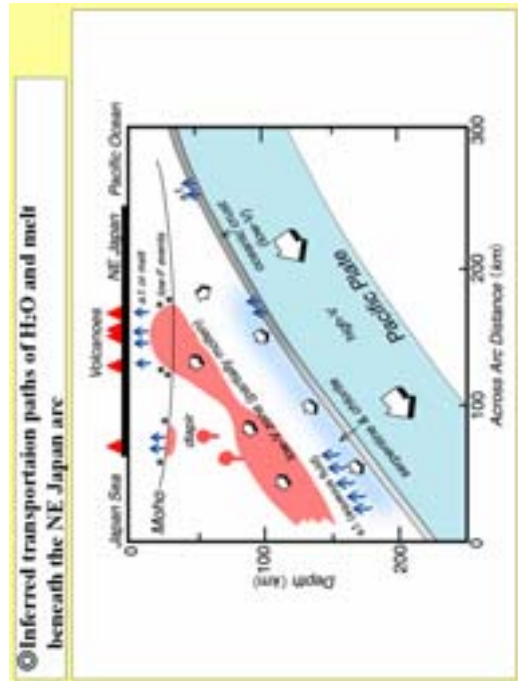
7



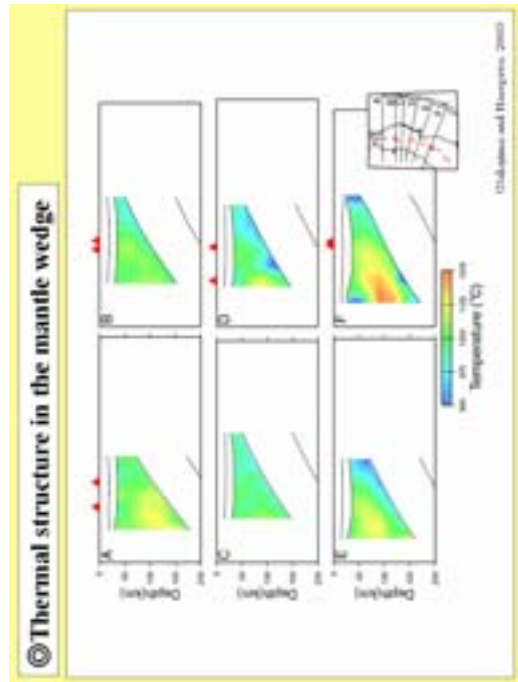
9



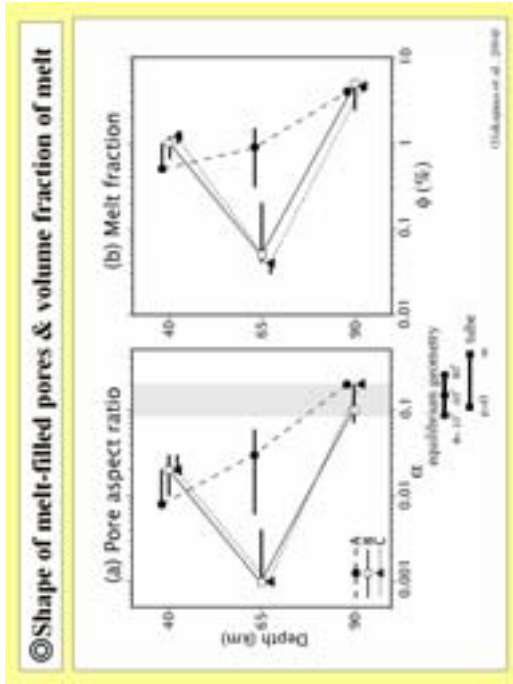
10



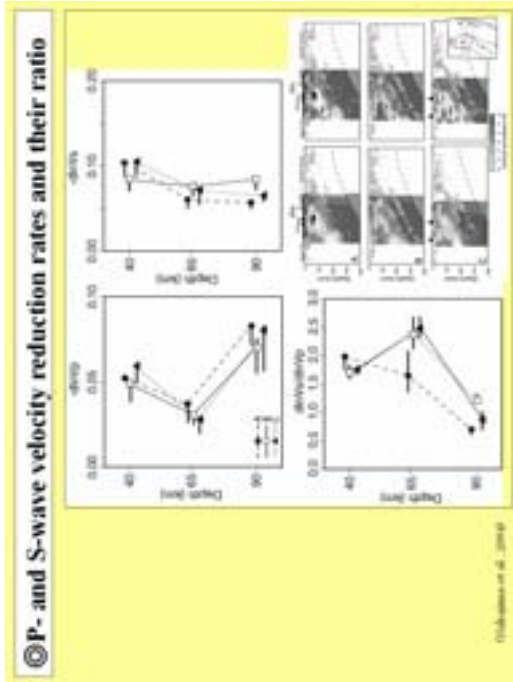
11



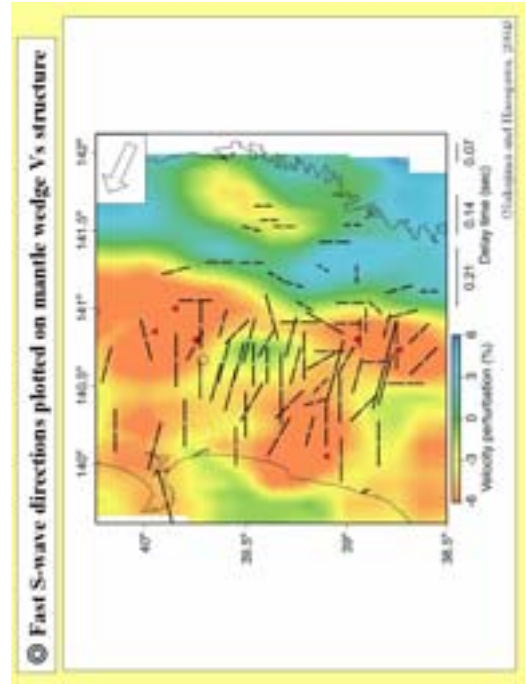
12



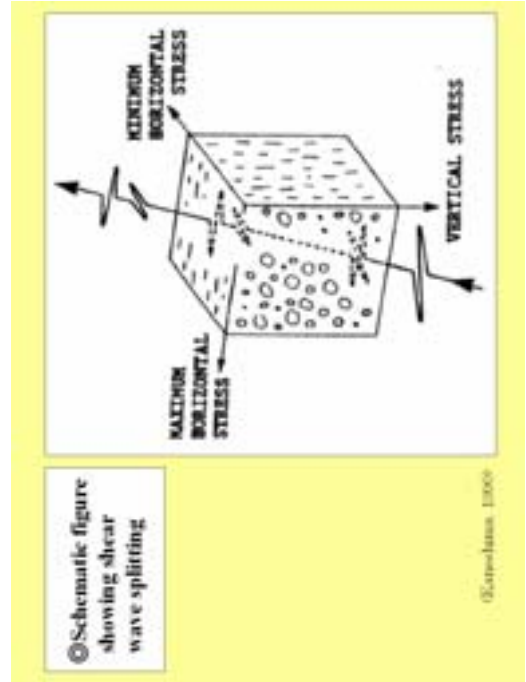
14



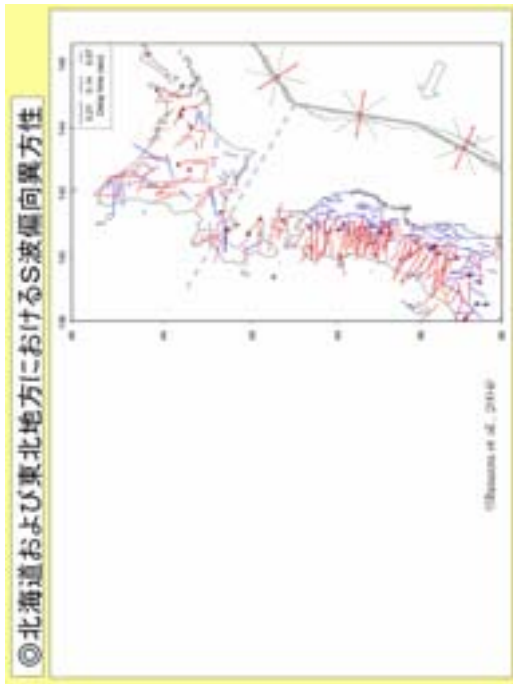
13



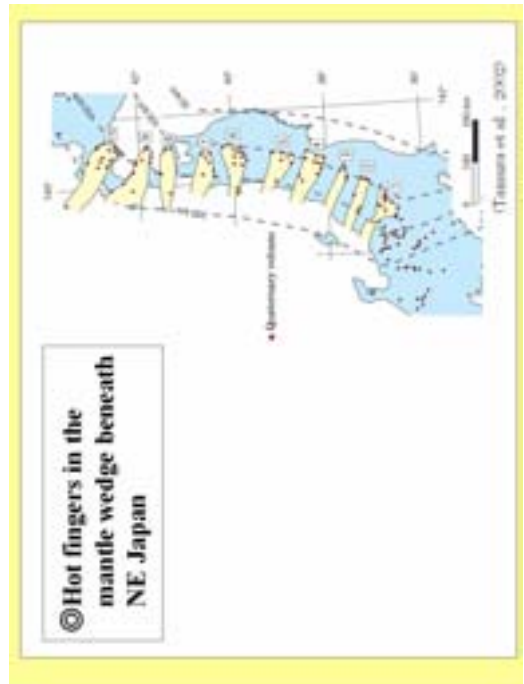
16



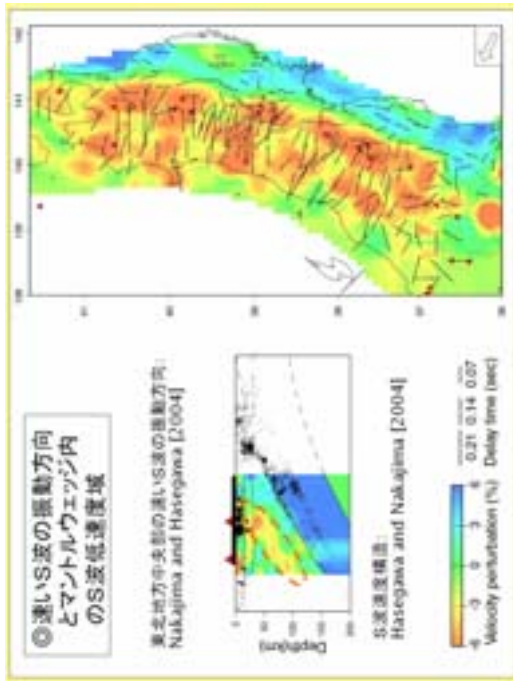
15



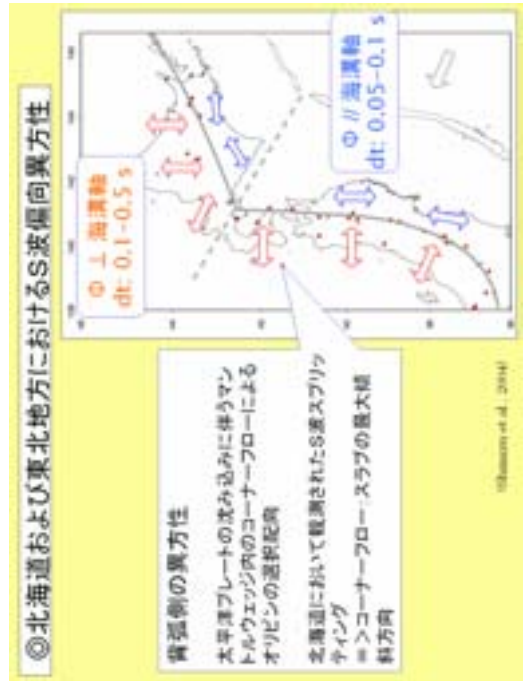
18



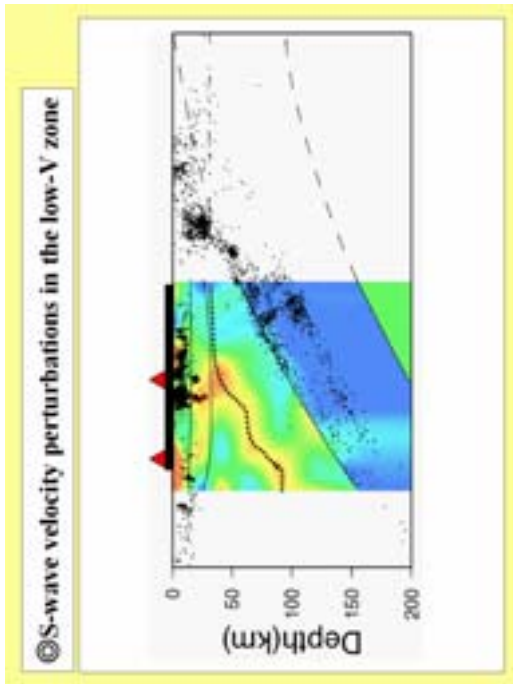
20



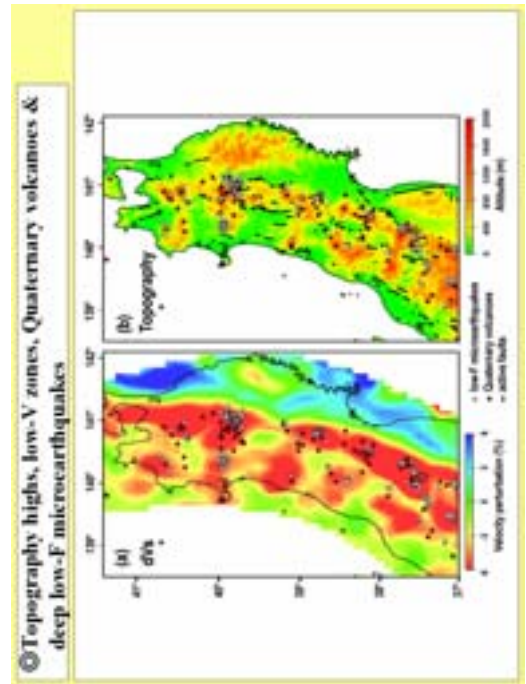
17



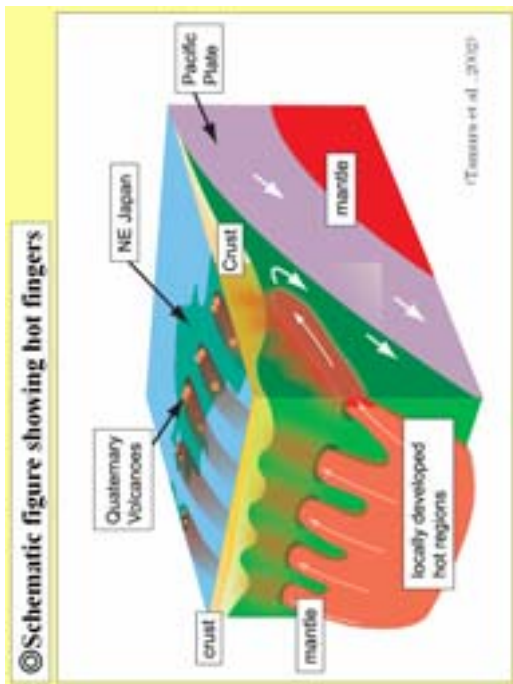
19



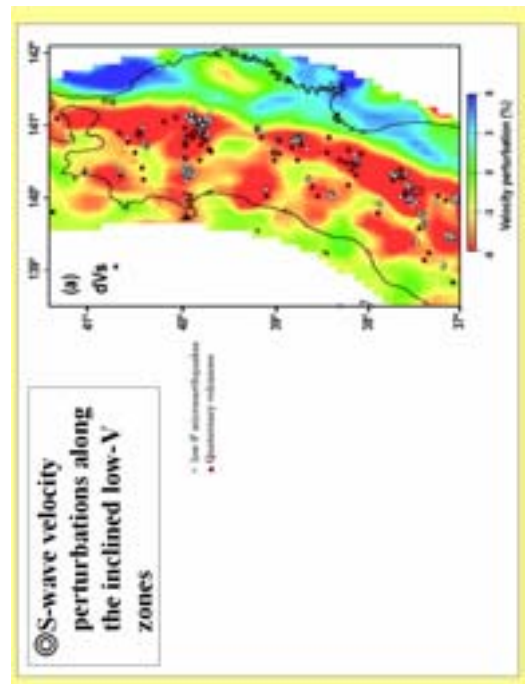
22



24

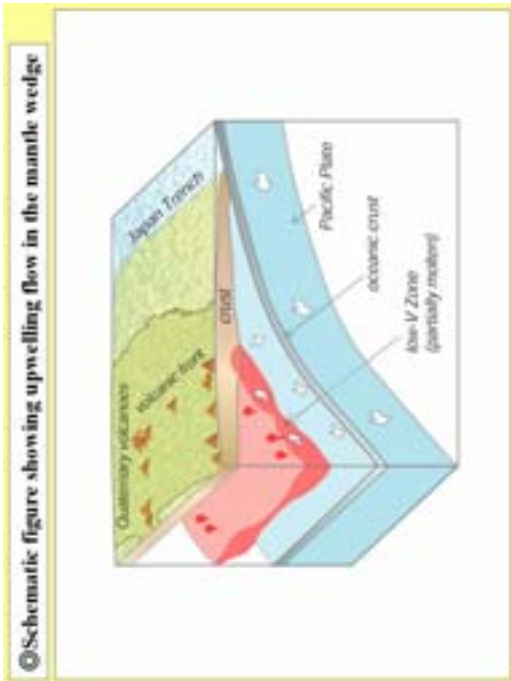


21

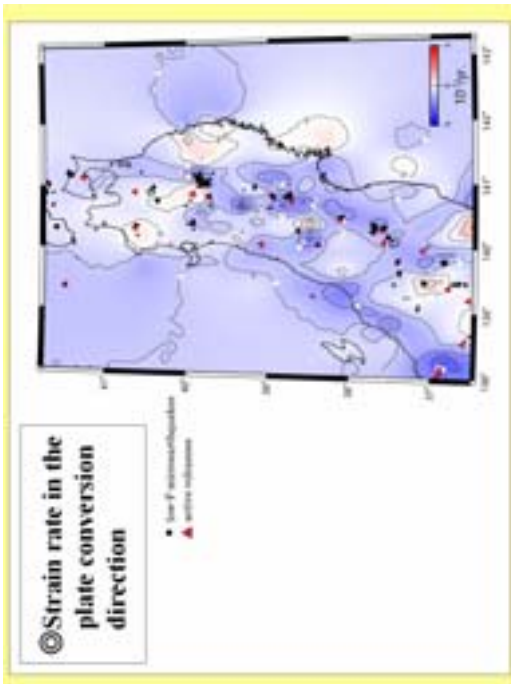


23

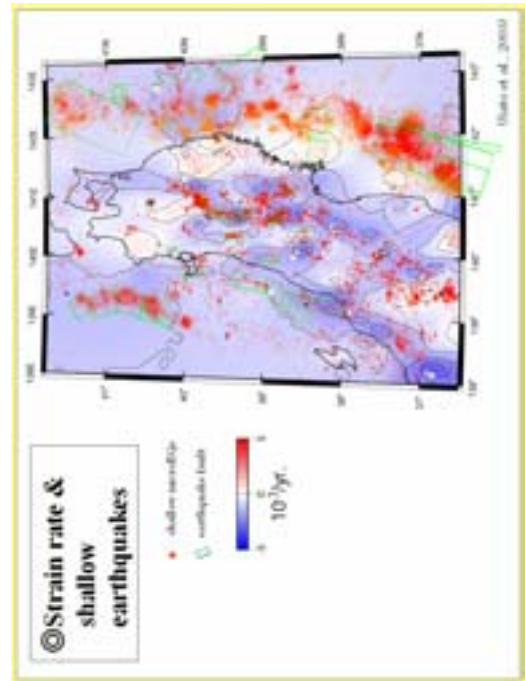




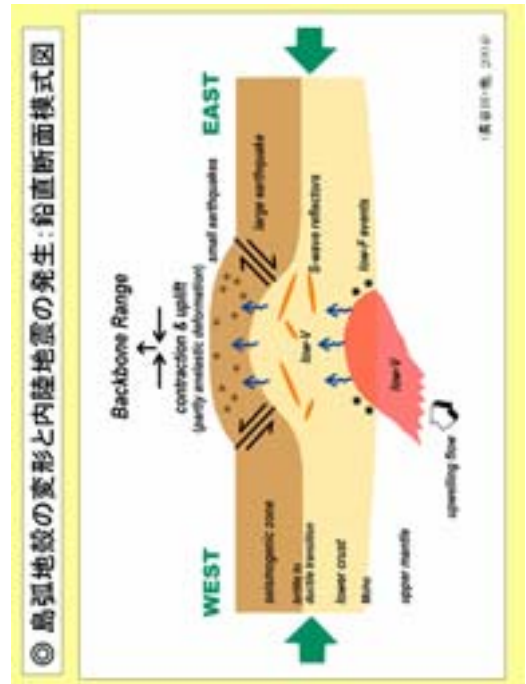
25



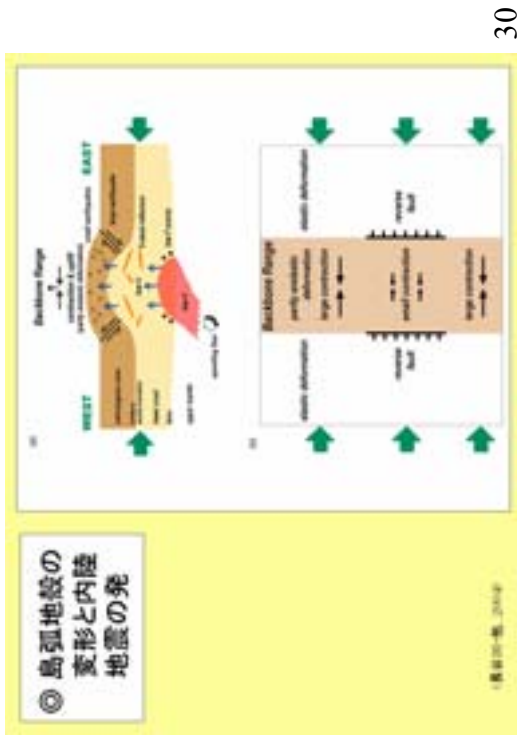
26



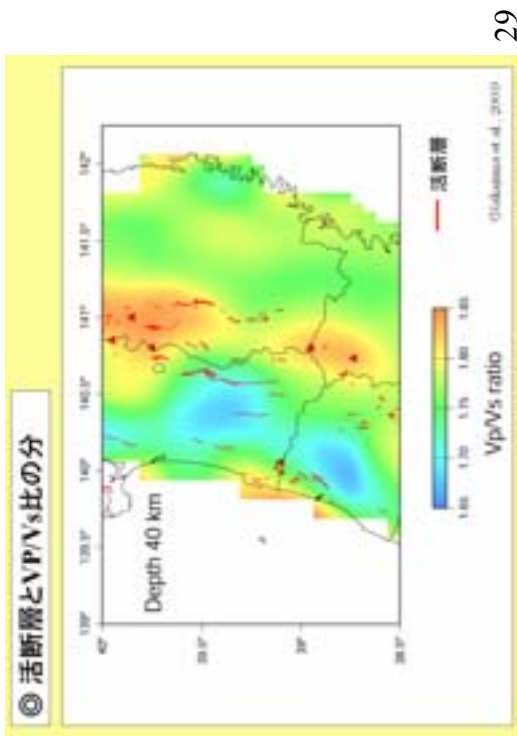
27



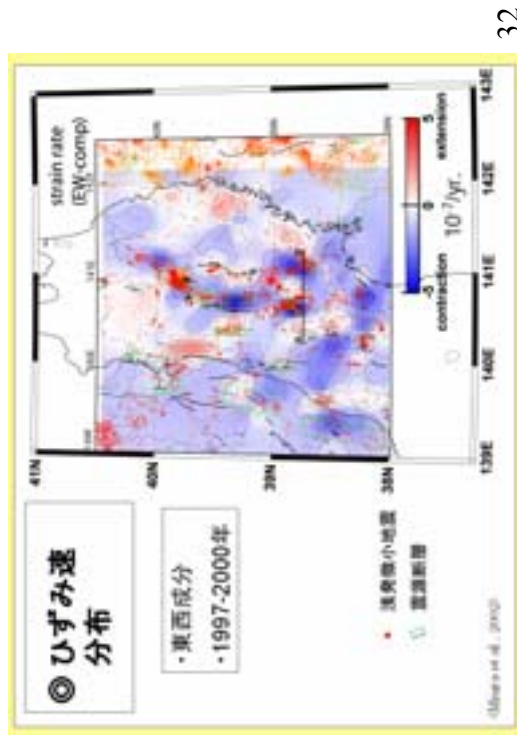
28



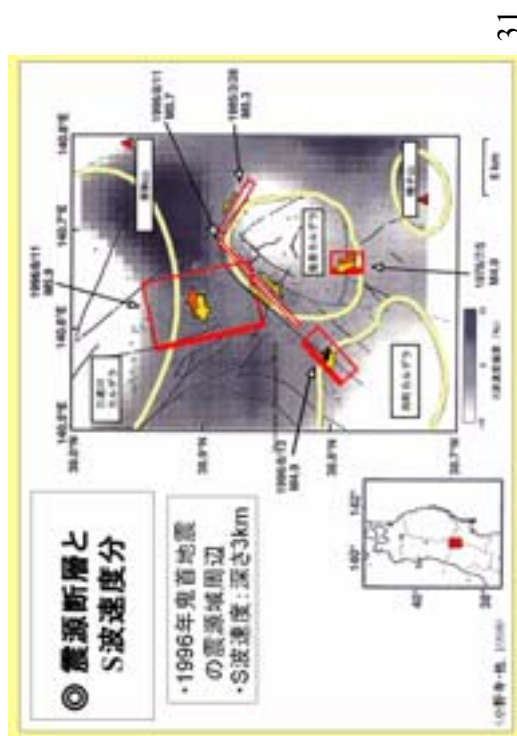
30



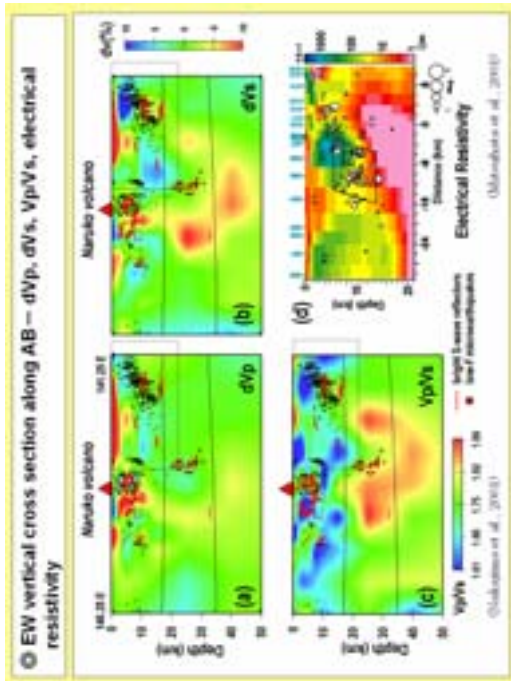
29



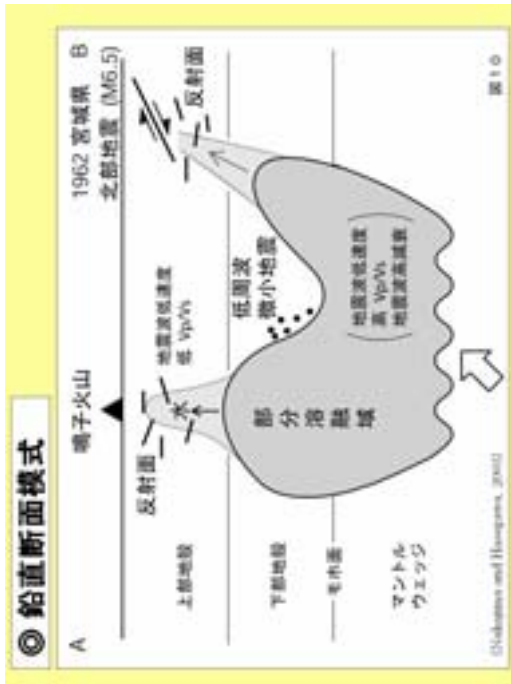
32



31



33



34

シンポジウム  
「日本の地震観測の現状と将来展望」  
講演速記録集

## 招待講演 3



## 日本の地震予知研究計画と地震観測

平田 直\*

今日は、話をさせていただく機会を与えていただきましてありがとうございます。ちょっと私には荷の重い題をいただいてしまったのでどうしようかと思っているんですが、私は実はフィールドを駆けめぐってデータを取るのを最も得意な種目としております。「フィールド地震学者」と称しているんですが、新潟で地震がございまして頭の中は新潟の山古志村のことばかりでありまして、なかなか格調高い講演をするのは難しいんですが、精一杯させていただきたいと思います。

日本の地震予知の計画全体をレビューするという時間もございませんし、その能力も今のところはございませんので、地震予知と観測というのは非常に密接でございますが、どういう観点から観測をするかということについて私の考えを述べさせていただきたいと思います。

まず、若干の経緯です [スライド2]。これは私が言うまでもなく、日本の地震予知計画というのは、1962年、私のはるか先輩諸氏、地震学会の有志たちがいわゆる「ブループリント」というのをつくって、日本で地震予知をするにはどういう研究をするべきかという計画を立てました。その研究計画が非常に重要であるということが国のレベルで認められまして、1965年から7次に分けて5カ年の地震予知計画というのが進んでまいりました。

ところが、ご存じのように1995年に兵庫県南部地震が起きまして、阪神・淡路大震災という関東地震以来の大震災を経験することによっていろいろなことが変わりました。地震観測、地震研究、地震予知あるいは地震予知研究というものがどう変わったかということの一端は岡田さんのほうから非常に明快に説明があったとおりですけれども、地震予知の研究という面からいっても非常にこれは大きな転換期でございました。

単に研究ではなくて地震予知計画というのは最終的には地震防災というものに非常に関係しているわけですし、その一研究計画ではないんですけども、最終的に地震予知の計画というのが、1995年の兵庫県南部地震を契機に議論をして、結果的に地震予知計画というものから地震予知のための新たな観測研究計画という研究計画に変わったわけです。これは当初一番最初に始まったときは第1次の地震予知研究計画だったものが、第2次から地震予知計画になって、ずうっと地震予知計画だったものがまた研究計画に戻ったということで、ある意味で後退ととられた、そういう議論をされたことがあったわけですけども、やっている本人から見るとそれはそれほど

後退とも思わないし、別に進歩とも思いませんけれども、それぞれの研究を進めるという観点からは大して違いがないと思います。しかし、大きな考え方、その根底にある地震予知の研究をするにはどうしたらいいかというのとはかなり変わったと思っております。

申すまでもなく阪神・淡路大震災の後に地震防災対策特別措置法というのができて、その中で、国として地震調査研究を推進するという体制が整いました [スライド3]。これによって、地震に対する政策的なこと、地震の観測、地震の調査研究をどうするかということを決める国の委員会と、それに基づいて地震の状態を評価する地震調査委員会という2つの国の組織ができて、今日も会場にそれぞれの非常に重要な役目をしている先生たちがいらっしやると思いますが、つまり、これは単に研究ではなくて、国としてのある種の責任をとるという体制ができたわけです。そのもとで、これは岡田さんが詳しく説明されましたけれども、基盤的調査観測というものが整備されて、その中には、地震観測、強震観測——強震観測というのも広い意味では地震観測ですが、それとGPSと活断層の調査というのが3本柱として実施されてきて、これについては非常に大きな成果が上がっているところですよ [スライド4]。

これも繰り返しですけども、もう700点以上、日本中にまんべんなく地震の観測網が整備されました [スライド5]。大学はそれまで何をやっていたかということはこの図でかなり明らかだと思います [スライド6]。岡田さんの説明でもありましたけど、大学は、ある研究目的に従ってあるところに関心があるとたくさん地震計を設置して研究をするということをやっていたので、疎密のあるというか、まばらというか、たくさん機械を置いてある場所と……例えばこういうところですね。長谷川先生が講演されましたデータはこういうところで得られたデータに基づいて研究したわけですが、ここにはたくさん地震計がある。それから阪神淡路の後、この辺にもあったし、鳥取県西部地震が起きたからその後の研究で地震計はたくさん置きました。というようなわけで、これはある研究の目的、もっとはっきり言うと、地震があるとそこにたくさん地震計を置いて研究をするというようなスタイルをとってきたわけで、これが現在は新潟から神戸にかけてのいわゆるひずみ集中帯での観測をやるということで、今年度から日本じゅうの大学、いろんな機関がここに機械を集中して研究をする

\*国立大学法人東京大学地震研究所 教授

という、そういう体制をとっているところです。

一方、北海道大学、東北大学、東京大学、京都大学、名古屋大学、九州大学とそれぞれが自分のところでデータをとっていくというのが今までのやり方だったんですけれども、阪神淡路の後、もう少し全体的にデータの流通をよくするという必要があったために、大学の中では衛星通信を用いたテレメーターのデータを集めて配るという仕組みをつくりました [スライド7]。これは阪神・淡路大震災の後いろいろな整備されたものの中で大学が取り組んだことの一つですが、結果的に大学のデータというのは、北海道で起きた地震を九州の人がリアルタイムで研究することが可能になってまいりました。

さらに、Hi-net が整備されたデータと気象庁のデータと先ほどの大学のデータというのが、これは実は岡田さんが既に説明されていることで「準リアルタイム」と言っているんですが、「準」というのは1秒とか2秒遅れていることですが、事実上のリアルタイムで、データのレベルで研究者がすべてのデータを使えるようになったというのが現実でございます [スライド8]。

それから、基盤的調査研究の中で3つのうちの1つの柱は活断層の調査をするということで、100弱の主要な活断層を選びまして、そこで基本的にはトレンチをやって、過去の活動履歴を調べることが進んでおります [スライド9]。これはそれぞれの断層についての活動の評価をして、将来の地震発生の確率を計算するという国として整備して、一応今年度中には終わるということになっています。ここで10番と書いてありますが、ここに長岡盆地西縁断層がありまして、この間起きた新潟の地震というのはこれに近いところであります。厳密にはここではありませんけれども、ちょっとだけ覚えておいてください。

さて、そういう国として地震の調査をする、ハードウェアも整備するし、行政的にも整備したという段階で、それでもやはり地震予知の研究というのが続けられております。1998年に今までの5カ年の、第7次までの研究全部をレビューして、今後どうしたらいいかということで、結局、新地震予知計画、地震予知のための新たな観測研究計画というのが1999年から始まって、その5カ年が終わって、今年度から第2次の新地震予知研究計画というものが始まっています [スライド10]。

今までの地震予知計画と新しい計画がどう違うかというのは、一言で言ったらこうなるだろうというのが私のまとめでございます [スライド11]。まず、地震予知計画というのは、最初の3次までの間では、基本的には将来地震の発生を予測する、地震予知をするためにはどういう観測網をつくったらいいかということを考えて、それを実行していたというのが前半でございます。そして、ある程度観測網ができた段階では、いわゆる長期的予知と短期的予知の戦略というのがとられました。これはどういうことかということ、長期的予知というのは、日本列島の中のどこで地震が発生する可能性が高いかということ、それを長期的に予測して、そして地震発生の確率の高いと

ころにいろいろな研究の資源を集中して、ここで実際に短期予知の実践をするということを目指したわけです。

ところが、ある幸福な時期には前兆現象が非常にはっきりと出た。日本の場合では、伊豆半島で起きた幾つかの地震について前兆現象が出ましたし、中国の地震についても前兆現象が出たということがあったんですが、それとは裏腹にというか、前兆現象の出ない大きな地震が発生して地震災害が発生したという経験があった。特に1995年の阪神・淡路大震災では、地震予知というものは全然役に立たないんじゃないか、そういう批判を受けたわけですが、地震学者の中には、阪神・淡路大震災を起こした兵庫県南部地震のような内陸地震の地震予知ができると思っていた人はいるかもしれませんが、普通の人は思っていなかったんで、批判されたときも困ったわけです。しかし、世間から見ると、1960年代からずっと地震予知研究あるいは地震予知計画とやっていたにもかかわらず予知ができなかったということに対しては、非常に厳しい批判が行われたわけです。

それに対してどういうふうにしたかという一つの国としての回答は、地震調査研究推進本部をつくって行政的に一元化したということもありますが、もう一つは、サイエンスとして地震予知の研究というのをどうするかというものを根本的に考えて議論をして新しい地震予知計画をつくって、現在に至っているわけです。

じゃ新しい地震予知計画というのは何かということ、大きく3つの柱から成っています [スライド13]。それをまとめるために4つ目の体制の整備というのがありますが、研究としては3つあります [スライド14, 15]。1つは、地震がどうして起きるかということ、これをまず理解する。そして、その理解したものをリアルタイムでモニターする。モニターしたことを——理解するということと同じですけれども、数値的な地殻活動のシミュレーションをして将来を予測する。理解する、モニターする、予測する、そういう3つの柱で研究をするというのが我々の基本的な戦略です。

第1次、最初の5カ年と今年から始まっている2次計画というのはほとんど同じですけれども、シミュレーションをしてモニターをするというところをもう少し現実的に考えましょうというところで、ここが若干マイナーチェンジしたというところですが、基本的には、地殻活動を理解する、モニターする、予測する。最後に、我々の持っている技術はまだ不十分ですから、新しい技術を開発するというのを含めて、これらが最終的に地震予知をするための研究であるというふうな位置づけたわけです。

さて、1、2、3と書いたから3つとも同じぐらいのウエートで研究をしているかということ、実は必ずしもそうではありません。基盤的な調査観測計画によって、地震活動、GPS、活断層の調査が進んでいまして、そういうモニターの体制は非常に整いました。しかし、実際にどういう過程で、どういうプロセスをたどって大きな地震が起きるかということについては依然として必ずし

もはっきりしていません。長谷川先生がご講演されたことは最近わかってきたことですが、まだまだ、ああいうことがわかったからといって最終的に予測ができるほどまではわかってないと思います。これは後でもう少し詳しく説明します。つまり、同じことです、理解することと、モニターしてシミュレーションする、それから新しい手法を開発するというのが新計画であります。

これからちょっとだけ、地殻活動をどの程度我々が理解できたかということについてご説明いたします [スライド 16]。

地震というのはいろんな地震があるわけですが、一番大きな地震が起きる可能性があるのはプレート境界の地震です。日本の場合はプレート境界という沈み込む海洋プレートと陸側のプレートの境界で起きる地震でありまして、それについてはかなりの進展がありました。

これはいわゆるアスペリティー・モデルというものがここ数年の間に提唱され、それが意味で実証されつつあります。実証されつつあるというのも、これも本当の意味で実証されたかということは議論のあるところですが、概念的なモデルとしてプレート境界にアスペリティーというある種の実体があって、それが大きな地震を引き起こすということについては、かなり学会のコンセンサスができつつあるように私は思います。

いわゆる固有地震というものが世の中にはあります [スライド 17]。その中で非常に優等生というか、予測のしやすい地震については釜石沖の固有地震というものがありまして、この地震はM 5 弱の地震が5年半ぐらいで繰り返して起きる。つまりこれは観測事実としてあったわけですが、この地震は、非常に不思議なことで——これは縦軸がマグニチュードで、横軸が時間ですが、前震のようなものがたくさん起きて、M 4.8 の地震が起きるとそれっきり地震が起きなくなるというような種類の地震です。これはどういうふう考えているかということ、海洋性のプレートが陸の下に沈み込んでいくときに、ある部分は定常的に滑っている、ある部分は非常に強く固着している、ある部分は滑ったり止まったりするところがありますが、固着している部分は「アスペリティー」と呼びます [スライド 18]。このアスペリティーが非常に小さいとアスペリティーの間の相互作用がほとんどなくて、一定のレートでプレートが沈み込んでいくところにだんだんひずみがたまっていって、最後にここを破壊することによって地震が起きる。これが釜石沖の典型的な繰り返し地震、あるいは固有地震と言ってもいいですが、そういうものに対応するというふう考えています。

大きい地震というのは実はこのアスペリティーが大きくて、隣り合うアスペリティーが近接したりするとこっち側が壊れたときに連動して壊れるとか、いろんな条件によって2つが一度に壊れるとか、1つの大きな地震でアスペリティーが滑ると、それよりも深いほうの延長部分でゆっくりとした余効すべりが発生するとか、そういう状態があります。こういうことは比較的理解しやすい

というか、海洋プレートが沈み込んでいて固着している部分と固着してない部分があって、基本的にはここには摩擦構成則、摩擦の法則に従った物理が働いていて、その摩擦の法則とここに加わっている応力の分布があらかじめわかれば、どのアスペリティーがあとどのぐらい持ちこたえられて、いつ破壊するか、あるいは大きなアスペリティーが壊れる前に小さなアスペリティーが壊れるかということモニターすれば大きな地震の発生が予測できるのではないかと、あるいはアスペリティーの破壊の前には前駆的なすべりが深部で起こるのではないかと、というようなことが予想されるわけです。

今の段階で我々が地震予知の研究の中でかなり確かだろうと思っているのは、こういう物理的な概念モデルは成り立っていて、次は、この物理的な概念モデルを計算機の中で再現してシミュレーションをする。そしてそのシミュレーションしたものが将来を予測することができるかという段階に至っていると思います。

そうはいつでも、アスペリティー a、アスペリティー b、アスペリティー c というものが具体的に例えば東北日本のどこにあって、それがいつすべるかということを知るためには、具体的にアスペリティーの場所を推定して、その他の定常的に滑っているものすべりの速度を推定するということが必要なのです。これは必ずしも簡単ではありませんけれども、例えば陸上のGPSの地殻変動のデータ、これから今開発しつつある海底での地殻変動のデータ、それから微小地震の活動などを使って、計算によって将来を予測するという意味でのシミュレーションのモデルをつくるということがだんだんとできるようになりつつあるというのが現状です。

さて、それに対して、先ほど長谷川先生がご説明されていた内陸の地震についてはどういう段階かということ、長谷川先生は非常にお話が上手なので、あれで内陸の地震がなぜ起こるかというのはみんなわかったような気がいたしますが、それはだまされないほうがよろしくて、ある地震はああいうふうに起こるのは間違いのないとしても、すべてあれで解決できるかというのは今のところ少し議論のあるところ [スライド 19]。つまり、プレート境界のアスペリティー・モデルに対応するものが長谷川先生は解かったとお思いですけれども、もしかすると解かったのかもしれないですね。今日聞いて解かったような気も私もしますけれども、それはまだまだ解からないという人もいます。つまり、内陸の地震についてはひずみレートがプレート境界に比べて1桁か2桁ぐらい小さいわけですから、そういうところでどうやってひずみ、応力が集中するかということについては必ずしもよく解かっていません。その一つの回答は、長谷川先生が先ほど講演された内容になっているわけです。

あの話でもおわかりになると思いますけれども、結局は、地震を起こす場所がどういう地殻構造、どういう力学的な構造あるいは物質的な構造になっているかということが非常に重要でございます。このときに広域な観測網、日本列島全体にわたって展開されているような観測



網によってわかる知識から、実際に地震が起きる断層の大きさ、例えば30キロメートルとか20キロメートルの差し渡しの大きさのスケールの不均質構造を理解することが、次のこういったことを理解するためには非常に重要でございます。

まず、広域の観測網についての現状がどうなっているかということ、これ[スライド20]は一昔前の気象庁の発表されている震源のデータと、現在の気象庁がいわゆる一元化震源と言って発表されているものの比較でございます。これを見ると、右側が非常によくなっているということは一目瞭然です。

それから、これ[スライド21]は大学だけの観測網によって得られた広域の震源分布、これは平面図で、東西の断面で太平洋プレートが沈み込んでいるということ、それと現在の一元化震源とを比較したものです。例えば東北地方の下でこういう絵をつくっても大した比較にはなりません、関東でやると少なくともこうなって、この絵の意図するところは一元化震源のほうがこれよりもいいということで、私が言うのもちょっと困ったものですが、これが現実です。

そうだったら、もういいのかと。大学はHi-netとデータを使わせていただいて、あとは一生懸命計算をすればいいのかということ、私はそうではないと思っております[スライド22]。この例[スライド23]は、Hi-netのデータを使って松原さんたちがトモグラフィーをやったものの、日本の真ん中辺の、これがP波で、右側がS波の構造です。アルプスの下のあたりに低速度層があるということが非常にはっきりと示されています。松原さんというのはこの研究員の方ですが、昔、私の学生だったことがあって、修士論文でこの領域で同じことをやりました。本人がいてかわいそうですけども、この結果とこの結果が変わると彼の修士論文はインチキだったということになるんですが、幸いなことに同じ結果が出ましたので大変結構です[スライド24]。彼の名誉のために言うておくと、Hi-netのデータは非常にすばらしい結果を出していますが、例えば立山の下構造がどうなっているかという絵をつくるとこのぐらいになって、ここには低速度層があるんですが、松原さんが修士論文で出した結果は大変立派な結果が出ておりまして、立山の下にマグマだまりがはっきりあるというのが出ています[スライド25]。

これとこれの違いは何かということ、これはたった3カ月間でですけども、1キロメートルおきに45カ所、現地収録型のオフラインのレコーダーを置いて、ここで観測をした結果を解析したということです。これは、15キロから20キロ間隔のデータと1キロ間隔では空間的な分解能が違うという全く当たり前のことを示しているわけです。私が言いたいのは、今や広域の日本では、世界に誇る非常に稠密な安定した、いい観測網がある。これは定常的なモニターをするには非常に適していますから、どこに応力が集中するか、あるいはどこが塑性変形しているかということを見出すためには非常にいいデータ

を提供いたします。しかし、そこが具体的にどうなっているかということを知るには、問題となっているところにもっと稠密なデータをとる必要があります。つまりこれは両方必要でありまして、どちらかだけではできなかったわけです[スライド26]。

ちょっとだけ、地震観測のネットワークが昔から今までどうなっているかということをお復習します。私が大学院の学生のころ浅田先生がよく言っていたのは、レコーダーを3台ぐらいリュックサックに担いで山に3カ月こもればドクター論文が書ける。それは浅田先生一流の言い方ですが、当時は、フィールドに出かけていってだれも取ったことのないデータを観測すればそれで新発見ができるという時代でした。しかし、それは実際には非常に運のいい人だけがそれでドクター論文を取れたわけで、実は地震の観測というのは3台や4台の地震計ではよくわからないことがたくさんあります。

そして、当時はオフラインのレコーダーをやるときに最大の問題は時計の精度をどうやって維持するかということでありましたので、次に、地震の観測というのは、ネットワークをつくってテレメーターをしてセンターにデータを集める、そういうことをしたわけです。これの最大の利点は、ある意味で同時刻にそれぞれの観測点からセンターにデータが集まるということによって時刻の精度が非常によくなったわけです。しかし、今から思うとそれは実際には本当ではなかったんですけども、それによっていろんなものが進歩しました。

例えば北海道大学のネットワーク、東北大学のネットワークというのができたわけですけども、その端をどうしてくれるんだということになって、次の世代はネットワークをつなぐということが必要になってまいりました[スライド27]。A大学、B大学、C大学というのがいろいろ連合しましてデータのやりとりをするという時代があった。しかし、だんだん電話代が高くなりまして、これを維持するのが非常に大変になってきました。そうこうしているうちにインターネットというのが進歩してまいりまして、インターネットを使うとデータのやりとりは非常にスムーズにいくということがわかったんですけども、そのときに一番問題だったのはデータに正しい時刻をつけるということがなかなか難しかったということで、昔は、NHKの時報であるとか、J J Yという電波を受信して時計をつけていたわけですけども、あるときからGPSの時計というのが使えるようになってこの問題が一気に解決して、インターネットの技術を使ってテレメーターをするということができるようになりました。これがここで言っている第2世代のテレメーターです。この技術を応用することによって、例えば衛星通信のような広域の通信手段を使って研究ができるようになりました。

ここで終わらなかつたわけです。こういう全体のネットワークができたときに、またオフラインのレコーダーを使って、オフラインのレコーダーとテレメーターされたデータとを合わせて、次の段階の研究をする必要が出

てきたと思います。

こういうことが始まったのは、実は阪神・淡路大震災を起こした兵庫県南部地震 [スライド 28] のときに初めて大学のチームが試みしました。このときは、兵庫県淡路島のあたりには京都大学と地震研の和歌山と高知大学とか異なる大学の定常的な観測網があったわけですが、そのほかに臨時に観測点を設置して、当時は電話でしたけれども、電話でこれらのデータを京都大学防災研の宇治のセンターに集めるということをしました [スライド 29]。これはインターネットの技術を使って、時計は、その当時はまだGPSというのがそれほどありませんでしたので、それぞれ工夫した時間をつけてやっていたというのが最初です。

この地震の余震 [スライド 30] は幾つかの特徴があったんですけども、一つは、時間的にクラスターしていたということが非常に興味深いことです [スライド 31]。数時間のうちに余震の分布が増えたり減ったりするという周期性があって、その周期性が 12 時間とか 24 時間とか 23 時間ということで、これは何となく潮汐と関係しているようなそういう余震の現象がありました。それから余震というのは、空間的にも集まっている、クラスターをなしているということもわかりました [スライド 32]。つまり、これは地表の活断層とか、地下の断層の分布と震源断層との関係がかなり明瞭にわかった例です。それから、その当時、このデータを使ってトモグラフィーをやって、震源域のところでポアソン比が小さかった。ここに水が関与していたんじゃないか、そういうことを示唆するデータも得られました [スライド 33]。

我々の研究はこういうものをすべて最終的にインテグレートして、日本列島規模のある特定の三陸とか東海とか南海というようなスケールの地殻活動の数値モデルをつくって、それに基づく予測をするということが最終的な目標です [スライド 34, 35]。これは間違いのないことなんですけれども、これをやるためにはそれぞれの物理過程をよく理解する必要があるということで、先ほど言った 1 番目の地殻活動を理解するというを引き続きやっていく必要があります。現在のところ、結局、計算して予測ができるのは何かというと、定常的な沈み込みに伴って定常的な隆起とか沈降はどうなるかということは、ある程度松浦さんたちのグループが計算しています [スライド 36]。この力が内陸にどう伝わるかということについては、実は例えば長谷川先生が示されたモデルをこういうモデルに組み込むことができれば予測はできますけど、それは今ちょうどやっているところで、成果はこれからでしょう。

時間ももうないので、ちょっとだけ新潟の中越地震についてどういうことをやったかということで、今私の説明したことをご説明しようかと思います [スライド 37]。この地震は実は外れたということになっていますが、広い意味では、こういう活断層のある地域で、長岡盆地西縁断層帯については活断層の評価が出て、実はその隣にあった六日町断層については何も言わなかったの

れは片手落ちだったということは時々言われますけれども、例えばひずみのレートの高い領域といえば新潟から神戸にかけてのこういう地域でありまして、これは現在の地殻の変形のレートも高いし、活断層だって広い意味で言えばあるということです [スライド 38]。ですけど、厳密にというか、特定の断層、何とか断層と言ったときには、ここはマークしてなかったんだから不意打ちだったと、そういう議論はあると思います。

これは内陸の地震で、はっきりとした逆断層の地震です。気象庁が今まで言っている一元化震源によって余震の活動を見ると、何となく東西断面で団子になっているけれども、どっちかという西傾斜かなというような断層でした。しかし、よく見ると何となく東傾斜のものもあるし、あまり良くわからない。これをもう少しクリアにしたいというのが我々の希望です [スライド 39]。

この地域にどのぐらいの定常的な観測網があったかということ、この青いところです。これには Hi-net と気象庁と大学の観測点がみんな入っています。運の悪いことに地震がちょうど観測網の間で起きてしまったので、深さの精度をよくするためにはこういうところに観測点を置く必要があります。京大と九大のチームは、ここに 3 点の衛星テレメーターを使った臨時テレメーター観測点をつくりました [スライド 40]。例えばこういうものです [スライド 41]。実はここは被災しておりまして電気が来ないところだったので、カーバッテリーを使ってシステムを動かして、2 週間に一遍、電池を交換して、来週には太陽パネルをつけてもう少し長くもつようにするというをやっています。

それから、テレメーターの点を 3 点つくったのでは内陸の地震がどうして起きるかということに答えるためには不十分だったので、オフラインの観測を行いました [スライド 42, 43]。これは地震研のチームが、こういう小さな電池 4 本で 96 時間連続記録することができるような機械を 30 台持って行って設置しました。これは単なる絵です。山古志村というのが、至るところ土砂崩れがあって道が遮断されて村が孤立したところ [スライド 44, 45]。こういうところに地震計も置きまして、いいかげんなものですが、土の中に物探用の 4.5 ヘルツのピックを突き刺して観測点としました [スライド 46, 47]。地震直後の、これは 23 日に地震が起きたその次の日に観測点をつくりましたけれども、この程度の観測点でも早くたくさん設置するというのが本質的に重要と考えましたので、Hi-net のような立派な観測点はつくれませんが、これで余震の観測には多分十分です。もともとこれは物探用に開発しましたので、数百チャンネルこういうものがズラッと並んで、反射法の地震探査とか屈折法の地震探査をするような機械を 3 つ組み合わせれば 3 成分の地震計ができるという発想です。

それでどういうことになったかということ、先ほど言いましたこっちに長岡盆地西縁断層というのがありますが、実は今回の地震は、それよりも東側の六日町盆地西縁の断層とかこの辺に関連したものだだったということが

わかります [スライド 48, 49]。余震の分布は西ほど浅くて東が深いんですけれども、回転してみると、ある傾きで幾つかの面に分かれていることがわかりました。ほぼ南から見ると、本震を起こした断層はこの辺にあります。つまり西傾斜の広角な震源断層と、それから最大余震を起こした断層は実はそれよりも平行にちょっとだけ東にある西傾斜の広角な断層、それから4日後に起きたM 6.1の余震は実はここに発生しまして、また別な断層を形成したように見えます。

今言ったことがこれですが、震源域を細かく分けて南西から見るとこの部分はGHで、ここに本震があって、ここに震源断層に沿った余震の分布、それからここは最大余震があって分布して、それから4日後に起きた6.1の地震とそれに伴う2次余震というような分布があります。実はこの領域に現在現地収録型の地震計が100台ぐらい展開されておりまして、来週それを引き上げるというようなことをやっているんですが、この結果はここにある17台の地震計と周辺の地震計を使った解析結果なので、余震の分布とかは大体こういう格好をしているだろうということとはわかりますが、1月間ぐらいの余震の活動とここでの速度構造については今後もっと詳しい成果が出てくると思います。

これ [スライド 50] は最初に開始された17台を使ったトモグラフィの結果ですけれども、震源断層と思われるところは、実は深さ10キロぐらいのところの高速領域と低速領域の境目ぐらいに地震が起きているということを示唆する解析結果が得られております。地質学的にはこちらは基盤岩が地表まであらわれていまして、ここには非常に厚い堆積層があるということが知られています。地質学者が絵をかくと、ここに堆積層があって、古い構造の下にこういう断層があるということが想像されまして、この地域が非常に高いストレッチング・レートになっていたということを示唆する構造です [スライド 51, 52]。ただ、具体的にどのぐらいの大きさで力が加わっていたかということは今後モデル化する必要があると思いますけれども、そういうことを考えるためには、少なくとも2、3キロの空間分解能でこういった絵がかかれている必要があると思います。

これ [スライド 53] はまとめですが、基本的には、今や日本列島全体を覆うような20キロ、15キロ間隔の観測網があります。それによって定常的なモニターをして、例えば大きな地震が起きて余震がどこに起きているかというものは一つの例ですけど、それ以外にも注目すべきものを発見する。発見したらば、その領域に対してより稠密な研究をする。そのことによって広域的な観測と機動的な観測を結合する。それが結局は、物理的モデルを構築してその予測をする、予測が検証するような新しい観測をするということにつながっていくのではないかと思います。

というわけで、今日の趣旨は、日本の定常的な観測網がいかにできたかということを皆さんに理解していただくことだと思いますが、それと同時に、じゃそれでいい

のかというと、実は、それと同様かどうかわかりませんが、それとともに、ある非常に詳しい観測をする必要が依然としてあるということを申し上げたいと思いました。以上でございます。(拍手)

#### 質疑応答

――： 今、日本の中で1番というところはどんなところですか。これから機動的な稠密な観測をすればよさそうなどころというのは。

平田： 1つは、例えば活断層があるというか、ジオロジカルに変形が大きいところ、それから例えばGPSで見えて変形のストレイン・レートの大きいところということで、地名でいえば、今大学は「新潟神戸ひずみ集中帯」と称していて、その中心に跡津川断層があるんですけども、ちょうど新潟の地震が起きている領域のもうちょっと南側を注目してやろうとしていたわけですが、今の時点では例えば中越の地域というのは非常に注目すべき地域だと思います。

――： そうすると、活断層で100ぐらい調べてやられるうちで、そのうちの例えば3つとか4つが2番に進むべきところだというのは、今およそ見当がつくわけですか。

平田： ある考え方に基つけば、つくと思います。ある考え方というのは、評価する座標軸みたいなものが幾つかあると思いますけれども、研究を進める、理解をするという観点からどこどこをやらなければいけないかということと、もう一つは防災的な観点からやらなければいけないということがあるから、それは違うある種の座標ですけれども、それはあると思います。

――： Hi-netは非常に立派な観測網ですけれども、Hi-netだけで予知は難しいにしてもそういう方向に詳しいことがわかるというのは不可能で、機動的な観測をやるというのは絶対やらなければならない問題だと思うんですけども、地震が起きたときにそういう観測するというのもあるんだと思うんです。例えば微動みたいなものを明らかにするような、要するにいろんな計器をどんどん開発して見えなかったものをどんどん見えるような、何かそういうふうな機動観測というものが今後非常に重要じゃないかという感じがするんですけども、そういう具体的な計画みたいなものはあるんでしょうか。

平田： 具体的かどうかわかりませんが、例えば微動についてHi-netでわかったこと以上のことをわかるために、微動に特化したような観測の手法を開発してやるというのは非常に重要だと思います。結局、地震計というのは、ダイナミック・レンジを広げて帯域を広くすれば何でもとれるけれども、そうはいつでも数には限りがあることだから、ある目的に一番最適な方法を開発するという必要だと思います。

司会： よろしいでしょうか。ほかにご質問等ございましたでしょうか。無ければ、どうもありがとうございました。(拍手)

# 日本の地震予知研究計画と地震観測

東京大学地震研究所  
平田 直

日時：平成16年11月19日(金)13:30～  
場所：防災科学技術研究所 研究交流棟 和  
達記念ホール



1

## 経緯

- 1962: 地震予知計画 (Blueprint)
- 1965-1998: 第1次から第7次 地震予知計画
- 1995 兵庫県南部地震(阪神淡路大震災)

1995: 地震調査研究推進本部

- 1999-2003: 地震予知のための新たな観測研究計画
- 2004-2008: 地震予知のための新たな観測研究計画 (第2次)

2

## 地震調査研究推進本部

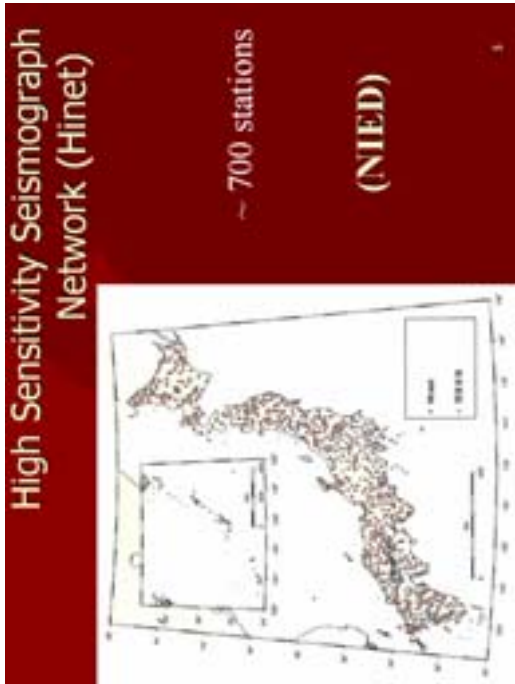
- 地震防災対策特別措置法(1995)
- 地震調査研究推進本部
  - 政策委員会
  - 地震調査委員会

3

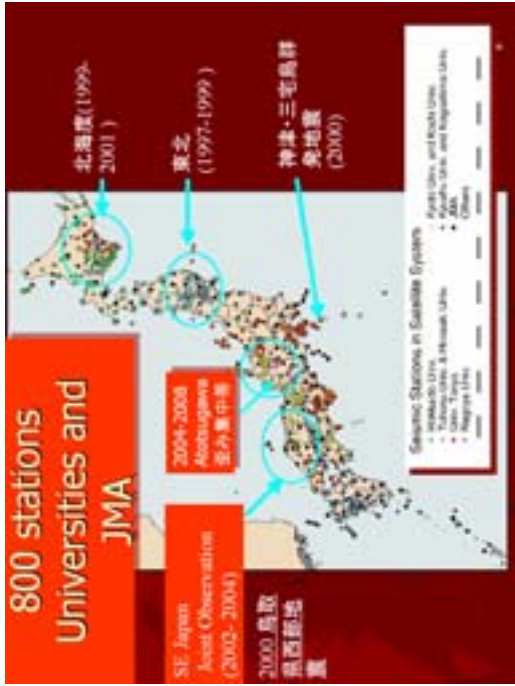
## 基盤的調査観測 (1997)

1. 地震観測
  - 高感度: 15 - 20 km 間隔 1180 (Hi-net: 700, UNV: 200, JMA: 180, Kanto-Tokai net 100)
  - 広帯域: 100 km間隔
2. 強震観測: 15 - 20 km (地表: 5700, 孔内: 700)
  - 自治体: 2700
  - KiKnet: 452
3. GPS 観測網
  - GEONET (GSI): 1124, every 20 - 25 km
4. 活断層調査: 98 faults

4



5



6

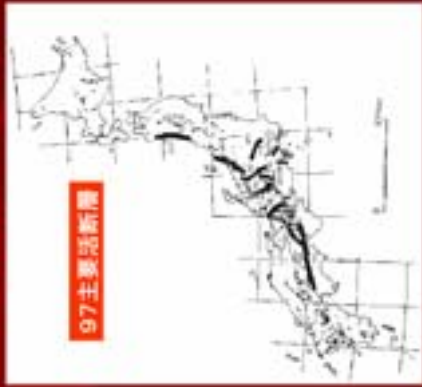


7



8

## 活断層の分布



9

## 建議

- 1998測地学審議会が「地震予知のための新たな観測研究計画に推進について」を文部科学大臣と関係の大臣に建議
- 1999年からの5カ年計画：新地震予知研究計画
- 2004年から、第2次新地震予知研究計画

10

## 研究の戦略

- 第1次から3次計画：観測網の建設 (1965 - 1978)
- 第4次から7次計画：長期的予知と短期的予知の戦略 (1979 - 1998)
- 第1次新計画：地震発生にいたる地殻活動の全過程の理解 (1999 - 2003)
- 第2次新計画：物理的モデルに基づくシミュレーションへ (2004-2008)

11

## 新地震予知研究計画

12

### 地震予知のための新たな観測研究計画 第1次新計画 と 第2次新計画

- |   |  |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 地震発生に至る地殻活動の解明</li> <li>2. 地殻活動モニタリングシステムの高度化</li> <li>3. 地殻活動シミュレーション手法と観測技術の開発</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 地震発生に至る地殻活動の解明</li> <li>2. 地殻活動の予測シミュレーションとモニタリング</li> <li>3. 新たな観測・実験技術の開発</li> </ol> |
|---|--|

#### 4. 本計画推進のための体制の整備

13

### 第2次新地震予知研究計画 (平成16年—平成20年度)

1. 地殻活動を理解する
2. 地殻活動をモニターして、シミュレートして、予測する(これまでは、気象庁等)
3. 地殻活動を計る新手法を開発する

14

### 第2次新地震予知研究計画 (平成16年—平成20年度)

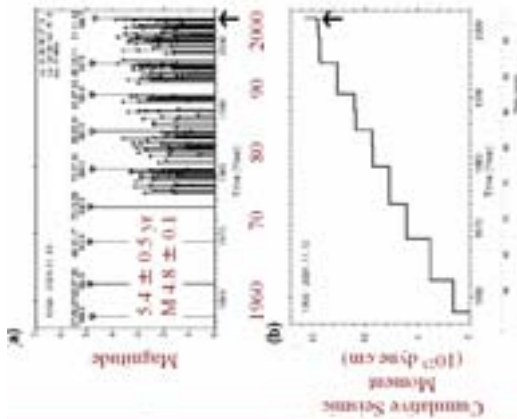
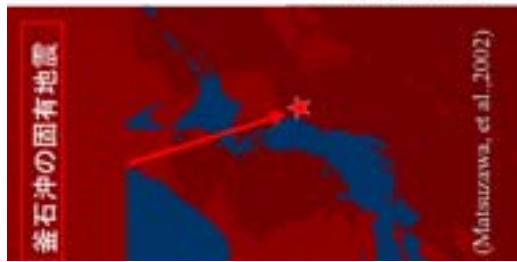
1. 地殻活動を理解する
2. 地殻活動をモニターして、シミュレートして、予測する
3. 地殻活動を計る新手法を開発する

15

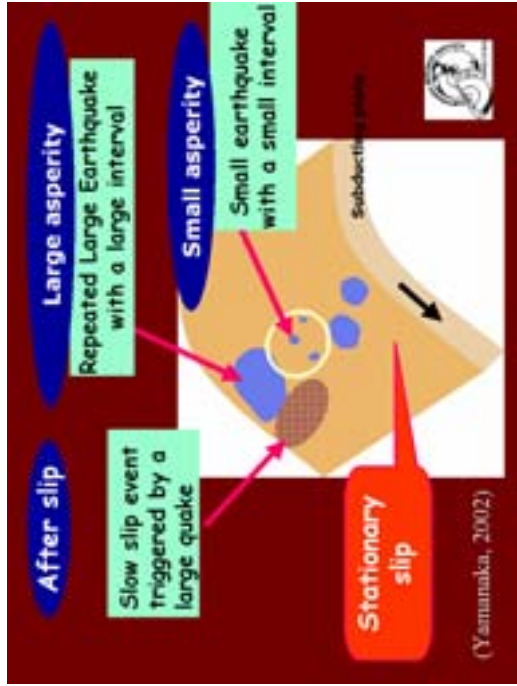
### 1. 地震発生に至る地殻活動の解明

- 課題1: プレート境界域における歪・応力集中機構
- 現状: 概念モデル「アスベリテーターモデル」
  - 課題: 込み込み型プレート境界の素体解明
    - 「アスベリテーター」の素体解明
    - 予測可能な物理モデルの構築
  - 観測の候補:
    - 広域観測+「アスベリテーター」スケールの空間分解能を持つ観測
    - 海陸統合、陸上での稠密観測、ケール式海底地震観測、機動観測(陸上+海底)
    - 対象地域: 海城

16



17



18

### 1. 地震発生に至る地殻活動の解明

課題2:

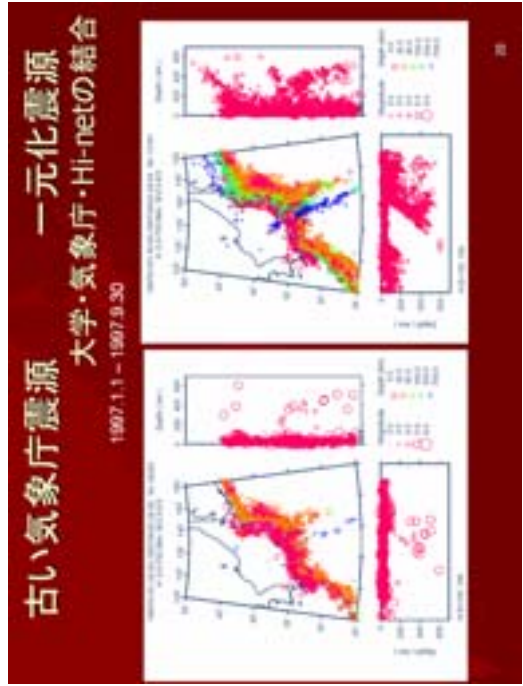
内陸地震発生域の不均質構造と歪・応力集中機構

- 現状: 概念モデル「アスペリティモデル」が無い
- 課題: プレート内での歪・応力の集中機構の解明
  - 地殻・マントルの不均質構造と歪れの関係の解明
  - 内陸の歪速度(現在+地質学的時間スケール)の大きい所の原因

→ 概念モデルの構築を目指す (どこで歪が集中しているか)

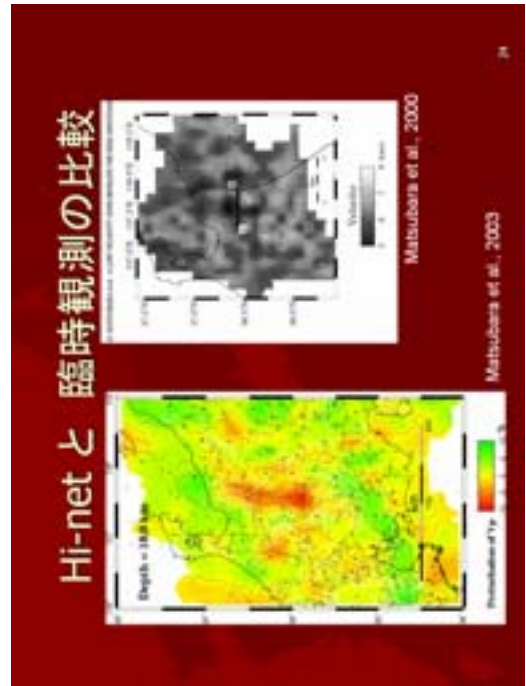
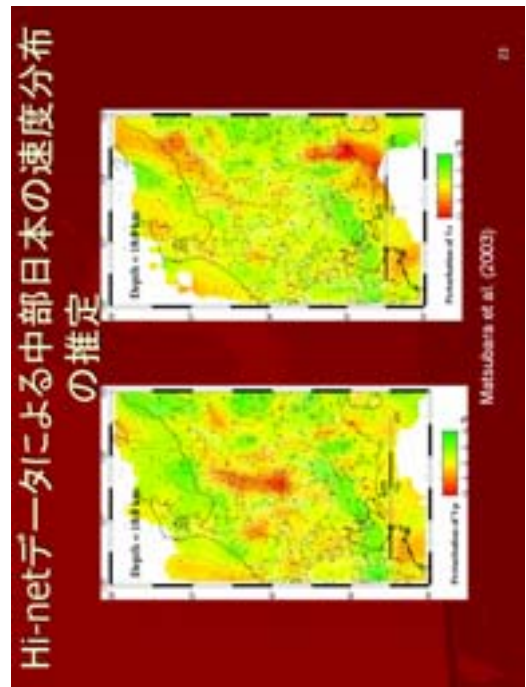
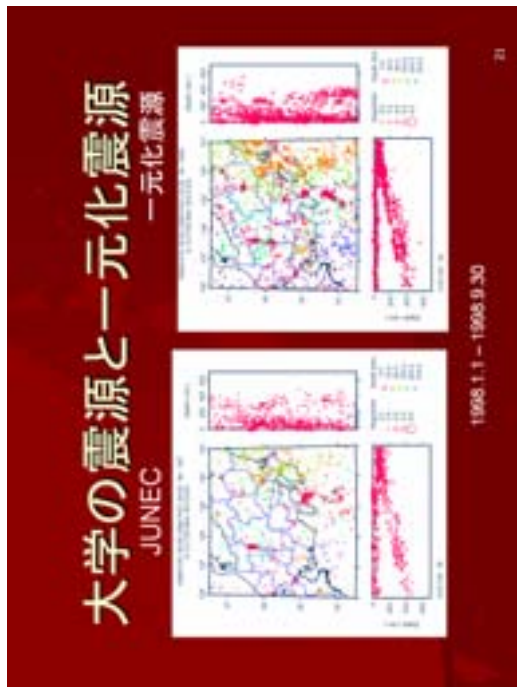
- 観測の規模:
- 広域観測+「断層」スケールの空間分解能を持つ観測
- 対象地域(例): 糸魚川-静岡構造線断層帯～新潟/歪集
- 中帯

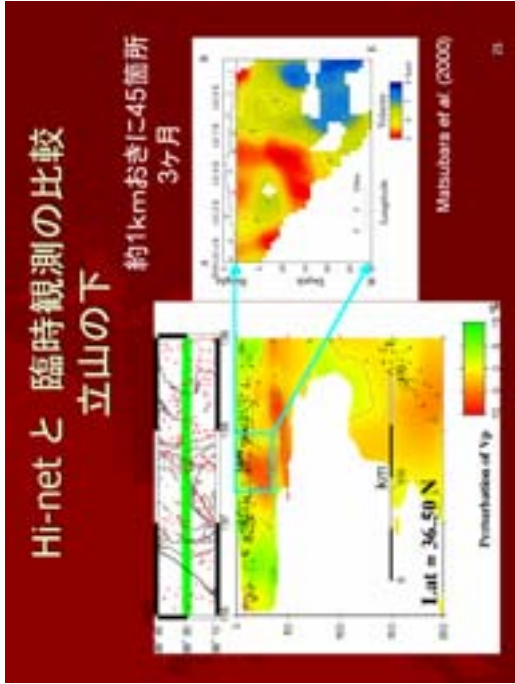
19



20







25

### 地震観測の今後の方向

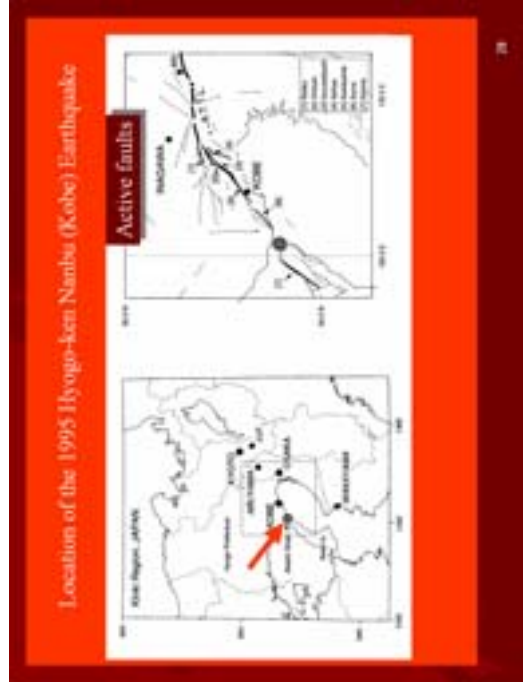
- 広域的定常観測網
  - 定常的なモニター
- 問題発見型:どこに応力が集中?
- 機動的な稠密観測
  - 問題解決型:なぜ応力が集中?
- 両者の結合

26

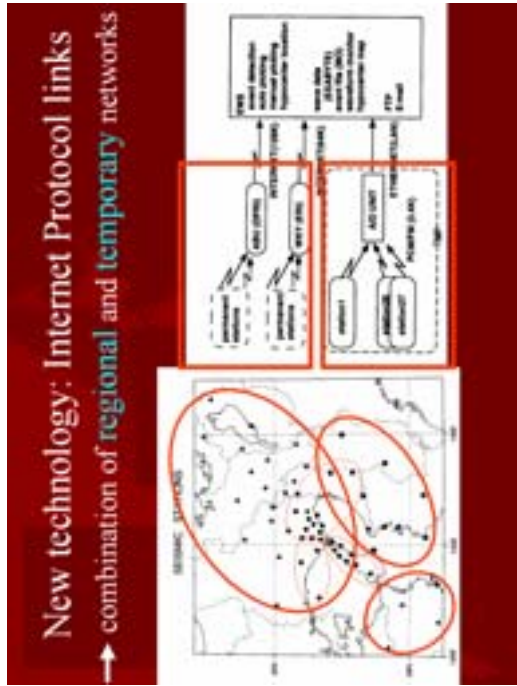
### Networks

- off-line observation
  - field observation stations
- 1-st generation telemetry
  - single center with field stations
- 2-nd generation telemetry
  - inter network communication
- Satellite telemetry
  - nation-wide data link
- Hybrid:
  - telemetry + off-line

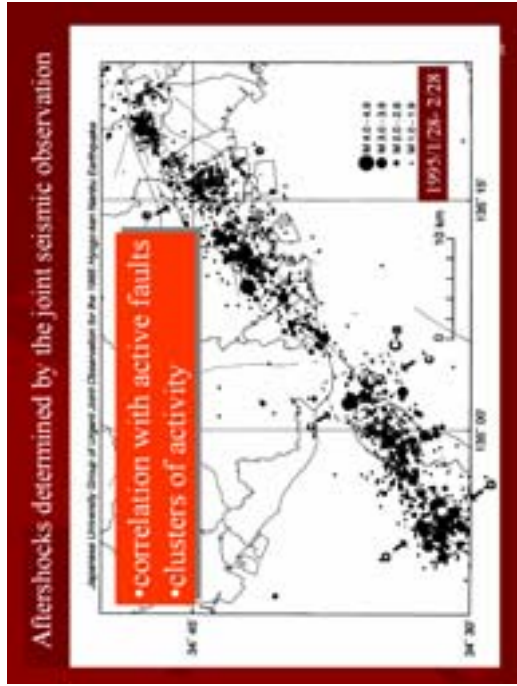
27



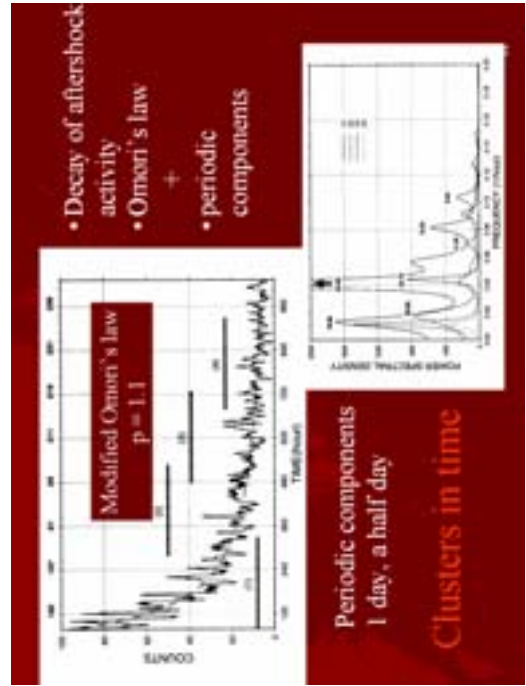
28



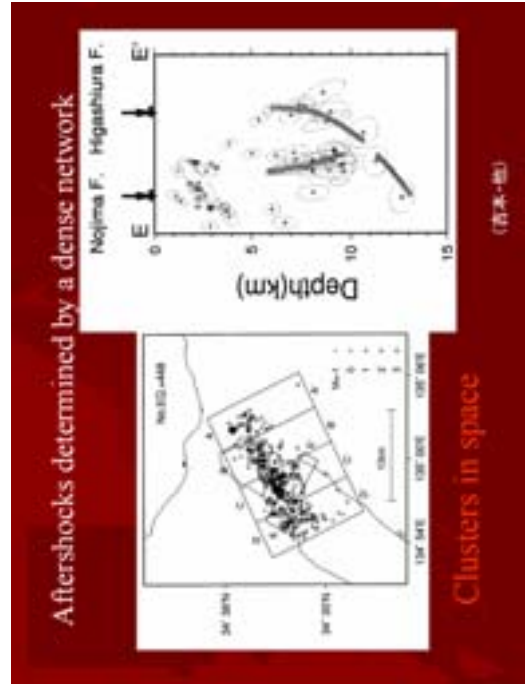
29



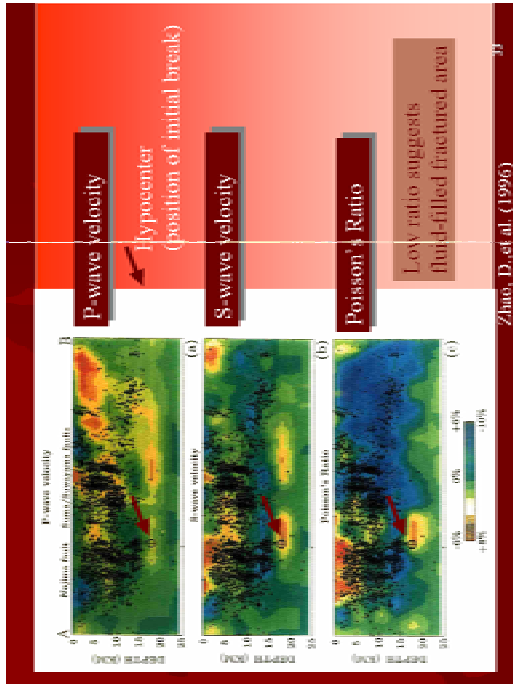
30



31



32



33

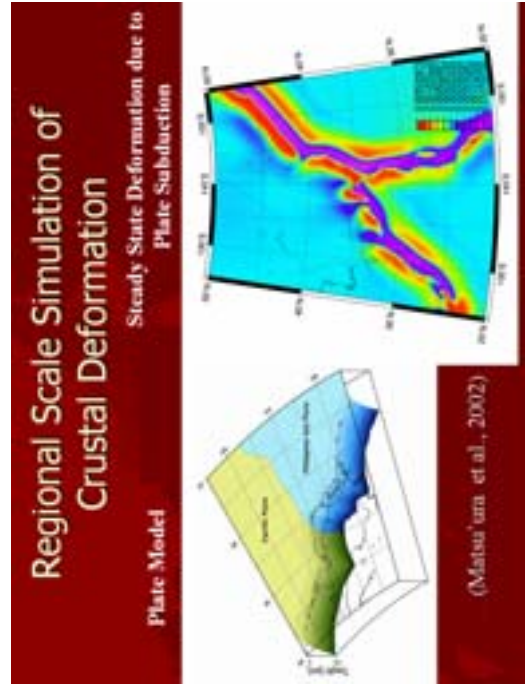
今後の方向

34

地殻活動の  
 予測シミュレーション

1. Island-arc (Regional) scale
2. Specific regions (Sanriku, Tokai, Nankai, ..)
3. Improvement of models

35



36

# 最近の観測の例

## 2004年新潟県中越地震 の余震観測

37

### 新潟県中越地震

#### 2004年10月23日17:56Mj6.8

97主要活断層

(10) 震源域西縁断層線

38

### 余震活動 (気象庁一元化データ)

Regional Seismic Network  
(気象庁、大学、HI-net)

39

### 臨時テレメータ 観測点

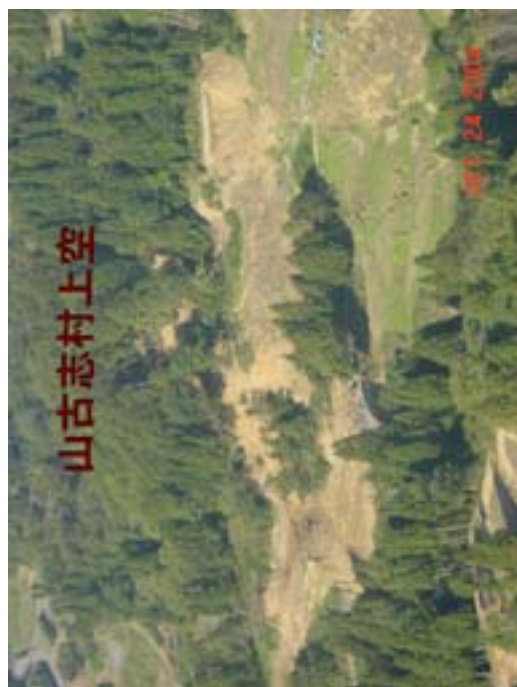
#### 10月25日

京大・九大合同観測

40



42



44



41



43



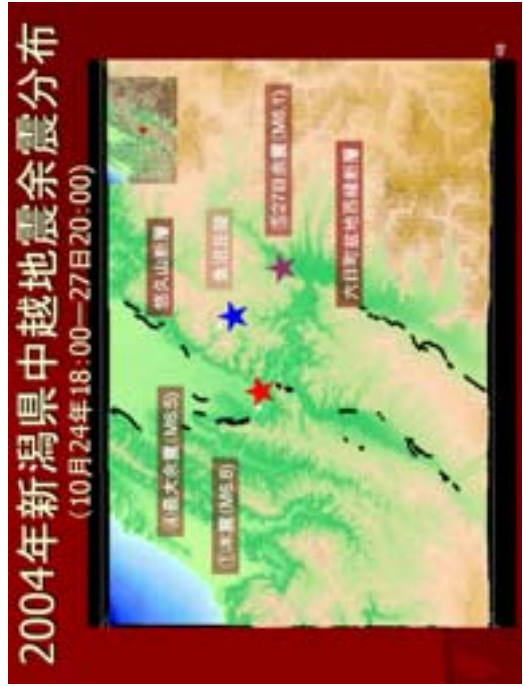
45



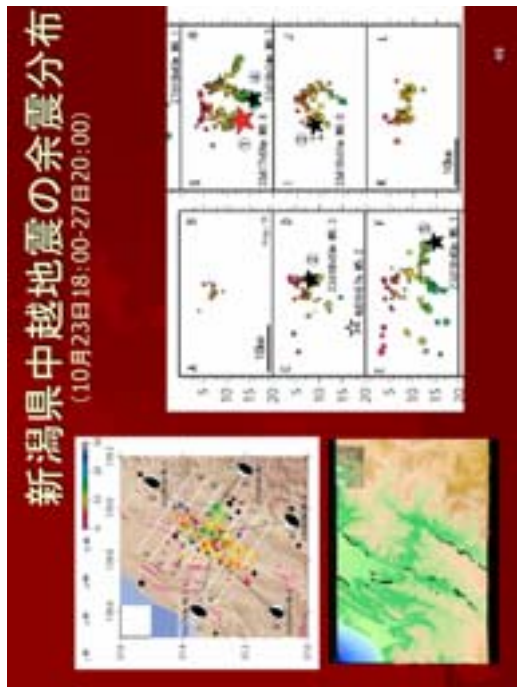
46



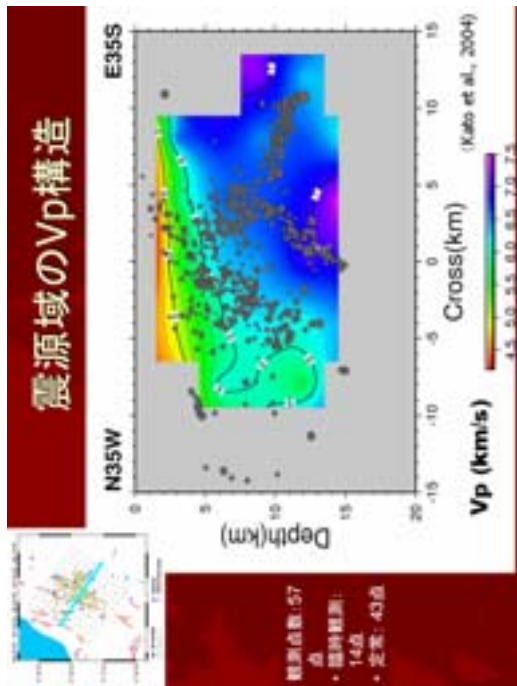
47



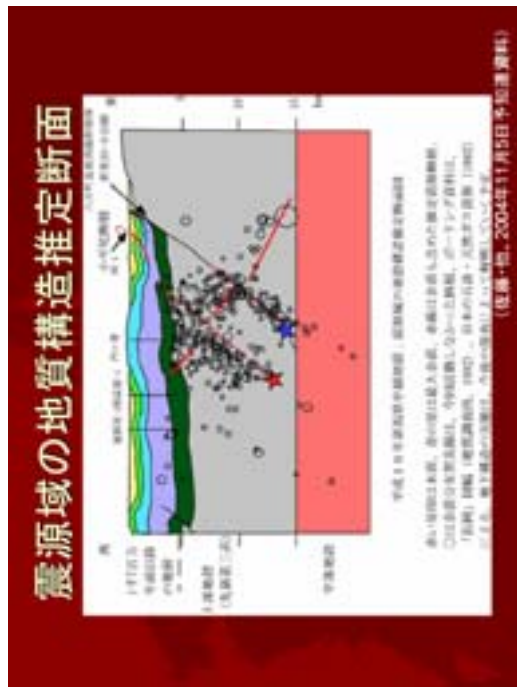
48



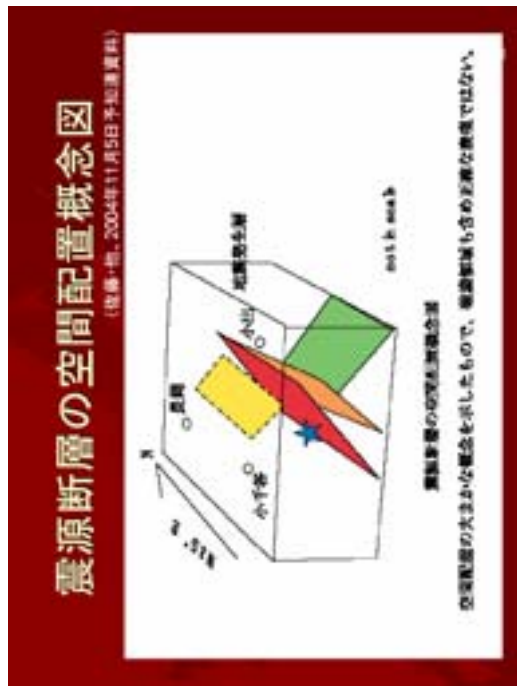
49



50



51



52



## 地震観測の今後の方向

- ① 広域的定常観測網
  - 定常的なモニター
  - 問題発見型:どこに応力が集中?  
→ ② ^
- ② 機動的な稠密観測
  - 問題解決型:なぜ応力が集中?
- ③ 両者の結合(①+②)
- ④ 物理的モデルの構築と予測 →②

53

End

54

シンポジウム

「日本の地震観測の現状と将来展望」

講演速記録集

## 招待講演 4



写真1. 本シンポジウムにて講演される安芸先生



写真2. 懇親会にてスピーチされる安芸先生

## 地震予知研究の新時代

安芸 敬一\*

### Opening of a New Era for the Earthquake Prediction Research

Keichi AKI

7年ほど前、振興会の高木先生から、日本の地震予知研究がちょっとディスカレッジしているから盛り立ててくれないかと言われまして、2000年の秋から考え始めました。その結果が2001年の鹿児島での地震学会の特別セッション、2002年の横浜での地震学会の特別セッション、それで盛り上がったところで、2003年の札幌でのIUGGの萩原シンポジウムとなりました。1年経ってそのプロシーディングがEPS 8月号のspecial issueに掲載されております。私が意図したことはそのシンポジウムで大体達成したと思いますので、先ずそのはしがき(preface)にまとめたこととお話します[スライド1、2、および3]。先ほどの平田さんの話にありましたように、過去の地震予知計画は非常に経験的で、理論というものが入ってなかった。(それに対して)新しいのは、モニターからモデリングまでやってしまう。そういう機運がありましたし、それには私も賛成して、そのことがまず基本になっています。

(シンポジウムの)タイトルは“Hagiwara symposium on Monitoring and Modeling of Earthquake and Volcano Processes for Prediction”です。萩原先生で象徴される地震予知研究の初期の時代にはモニタリングが強調されて、いろんな種類のモニタリング・データを集めて、その中から前兆現象を探すとということが行われてきました。40年ぐらいの期間ですが、その間に観測の量も質も非常に向上したわけです。

しかし、地震研究者の中で、特に日本では、さっきの平田さんの話にありましたように、モデリングがモニタリングと同じくらい必要である。それは地震予知の研究を物理科学の一分野としてやっていくには当然のことである。このspecial issueには、これまでにどういうことがなされたか、これから何をしていくかということを書いてある。

スライド1は主に過去のことをまとめたものですが、第1の論文では、萩原先生がどういう仕事をなされたかを大竹さんに書いていただきました。それから、この40年間にどのような観測網が整備されたか。地震観測網については岡田さん、GPSについては鷲谷さんのお書きに

なりました。その後に平田さんが、これまでの日本の地震予知計画の過去から現在、そしてまたどういう将来の方向に進むかと、さっきお話しになったようなことをまとめて書かれました。これで地震予知研究の一時代が終わって、これから新しい時代に入るということは、日本の皆さんは合意されているように思います。

地震予知研究というのは、普通のサイエンスと非常に大事な2点について違うことがあると思います。というのは、普通のサイエンスでは、できるだけ条件を狭く一定にして、原因と結果の関係、因果律を調べる。しかし、予知科学では自然そのものを取り扱わなければならない。したがって、モデルを作るといっても、一人の個人が考えた一つのモデルではとても追いつかない。多くの人が多くのデータで制約されるようなモデルをたくさん作る必要がある。そういうたくさんのモデルがあれば、非常に複雑な自然の将来を予知できるようなシナリオをたくさん用意できる。そうすれば、モニターしているデータに応じて正しいモデルを選んでいける。

もう一つ大事な点は、研究結果が社会に与える影響が非常に大きい。研究結果といいますか、予報自身が社会に大きな影響を与える。社会にメッセージを効果的に送るためには、科学者が合意した意見を1つにまとめる必要があります。ばらばらな意見が出たのでは社会のほうで信用しませんから。つまり、自然を相手にするためにたくさんモデルが要る。大勢の人が一緒にやらなきゃいかん。しかし、一方では、社会に情報を伝達するにはそれを全部1つにまとめなければならない。この2つの兼ね合いが大変難しいところです。茂木さんの論文がこのspecial issueにあるのですが、いかに科学的情報を公的施策に取り入れていくことが難しいか、その一例が茂木さんの論文に書かれています。

この3つを、ここで“3m&ms”[スライド4]と3つにまとめています。まず、モニタリングとモデリングはphysical scienceの一分野として当然必要である。第二に、非常に複雑な自然に対抗できるようにたくさんのシナリオをつくるためにはそういうモデルがたくさん必要である。1人の個人の頭で考えることでは、複雑な自然には

\*独立行政法人防災科学技術研究所 グローバルアドバイザー

とても対抗できない。第三に、このたくさんのモデルから出てくるものをどうやって1つにまとめて社会に伝えるかということです。このまとまったものをマスターモデルと呼びます。

このマスターモデルというアイデアは、漠然としているにもかかわらず南カリフォルニアの地震センターでもう15年ぐらい役に立っているようです。要するに科学者協同体の全体の見解、その中には対立する意見も含めて、そういうものをいかに一緒にしてそれを社会に伝えるかが重要なのです。

端的な例で言うと、有名な大森・今村の論争の場合は、関東大震災の前に今村先生が大地震になってたくさんの人が死ぬと言って、大森先生がそんなことはないから心配するなと言いました。そういう風に対立させてしまっただけではいけない。この2つの意見を両方も、もっともである。そういう風に考えて、今村先生も正しい、大森先生も正しい、その正しさは多分半分ずつという風に見える人がいて、その人が政府を説得して被害対策を作ることを進めていたら、多分、関東大震災の被害は少なかったらと思うんです。

そのような科学者協同体の全体見解をあらわす、それはサイエンティストにはとってはとても難しいんですね。なぜかというと、自分の考えが一番正しいと皆思っている。他人は間違っていると思っている。それではマスターモデルは作れない。科学者の集団を外から見ると。例えば、地震工学の一分野に probabilistic seismic hazard analysis (地震災害確率評価) というのがあります。Allin Cornell が始めたものですが、そういう人たちは、サイエンティストが持っている仮説に likelihood (正しさの確率) を勝手に与えるんです。これは科学者にはできないです。外から見ている人ならできる、何かそういうものがが必要です。

だから、第一が、今までのスタンダードなサイエンス。第二が、それだけじゃだめで、大勢と一緒にやらなきゃいけない。そうしないと、たくさん違うデータを吸収できないわけです。それをどういうふうにまとめていくか。この"3m&ms"で、科学と自然と社会、この3つのエレメントをカバーしなくてはならないのです。

Special issue の残りの論文は、どうやっていくかという将来の方向のお話です [スライド 5]。私の論文がその初めにあります。なぜかといいますと、私の論文では前兆現象には2種類あって、1つは brittle part から、もう一つは、brittle part と ductile part の相互作用から来ている。brittle part から来ているものは、self-similar な、フラクタルな、chaotic な現象であって、power law の分布に従う。したがって、簡単な構造をあらわすようなユニークなスケールはない。そういう brittle なところから来ているシグナルです。

もう一つは、そういう self-similarity から外れていると思われる現象。例えば繰り返し地震とか。繰り返し地震の場合にはいつも地震の大きさが同じですから、ユニークなスケールのアスペリティーというようなものがそ

こにあるわけで、こういうものは簡単にモデルできる。そこで、self-similarity から外れたものを探す。そういうものだけを使えば簡単なモデルが作られる。しかし、そういう self-similarity から外れたデータというものは簡単には大地震の予知とは経験的に結びつかないのが普通である。一方、brittle part から来ているシグナルは、いつも信頼できる予測はできないにしても、例えば前震のように経験的に、統計的に役に立つものがある。

ですから、この2つの前兆現象があって、1つは、モデルをつくるのに使えるが、もう一つは使えない。使えないからといって捨てることはないのであって、それは経験的に予測方法を発展させれば、その両方を組み合わせてやっていける。しかし、この2種類の前兆現象を区別するのがまず第一ではないか。

こういう目で見ますと、今度のシンポジウムに提出された論文はきれいに2つに分かれます [スライド 6]。例えば、Shebalin・他というのは、Keilis-Borok のパターン認識。Wyss and Clippard の静穏化。井元さんのは前震、Evison も大体同じようなもの。Rundle も seismicity pattern なんです。これらはすべてデータが brittle part から来ている。こういうものを扱うには、empirical ないしは statistical な方法以外ない。簡単なモデルでこういうのを説明しようということではできない。

しかし、これらは予知に役に立つので、例えば十勝沖地震の例でいいますと、Shebalin・他などは事前予知に成功しているわけです。チェーン・メソッドという新しいものです。しかし、井元さんによると前震はなかった。鷲谷さんのGPSのほうにも地殻変動は見えなかった。

Brittle events というのは non-linear dynamics ですから、非常に複雑で、統計的に扱うしかないわけで、あるときには出てきて、あるときには出てこない。だからといって捨てることはないのであって、大事なことはこういう情報を一緒に考えることだと思うんです。十勝沖の地震で松村さんが quiescence を見つけたというお話を聞きました。ですから、ある方法があるときには役に立ち、他の方法が他のときには役に立つ。だから全体と一緒に考えることができればいいのであって、最近、井元さんに聞いたのですが、彼はそういうものを一緒に考えて確率を出すという新しい方法を発展させていらっやうようです。

それが一つのグループの論文で、もう一つグループは、大中さん、吉田さん、松澤さん、川崎さん、Jinさん、飯尾さん、石橋さん、これらはすべてモデルをつくられています。モデルをつくられて、そのデータは self-similar scaling から外れたようなもの、それから brittle fracture と ductile/anelastic deformation の相互作用のようなもの、そういうものを見ている論文ではモデルがどんどんできつつある。

もう一つ私の論文で強調したかったのは、こういう目で見ますと前兆現象が2種類あるという点では、地震予知も火山予知も同じである [スライド 7]。実はこのアイデアは、私が火山で9年ばかり毎日毎日その前兆現象を

見てきて、その結果出てきたアイデアです。ですから、今まで火山と地震予知の研究は別々に行われてきたけれども、もっと共同してやれるのではないかと思います。

例えば、石橋さんの小田原地震というのがありますが、関東地方の非常に周期的な現象で、関東地方の大地動乱の時代にあらわれるものと言われていますが、私の火山でそれと非常によく似た現象があって、それをモデルに入れますとモデルの予測能力が非常に増えたということがありました。

ですから、今や日本では明らかに新しい時代に入っているんですが、これ [スライド 8] は川崎さんに送ってもらった “Nature” 2004 年 10 月 28 日の news feature ですが、大分長いことアメリカでは prediction (予知) という言葉は禁句であった。しかし、データの蓄積や考え方の変化によって、それがだんだん緩やかになってきて、多分これからは地震予知の新しい研究がアメリカでも行われるのではないかと、そういう論文を David Cyranoski が書いています。

この論文に何が出ているかというと、Keilis-Borok や Rundle の予報とか、繰り返し起こる地震、サイレントな地震、それから小原さんの深部低周波微動もそこに入っていました。しかし、これはちょうど萩原シンポジウムが行われる前に書かれたものらしく、萩原シンポジウムのことは何も書いてありません。

つらつらと、地震学において決定論的モデルというのが如何にあらわれてきたかを考えてみました。すなわち、地震学において最初地震の記録を見て何をするかというと、まずはやっぱり統計的に、経験的に調べてみるというわけです。振幅が距離とともにどうなるかとかそういう経験的なものをやっているわけですが、決定論的に物理法則を入れて、例えば Green's function とかそういうものでデータを見る [スライド 9]。そういうもので説明できるのをシグナルと呼びますが、データはシグナルとノイズからできている。ところが、地震の記録というのは初期においては、今でもかなりそうですが、必ず圧倒的にノイズだらけです。つまり、決定論的に説明できる部分というのは非常に少ないわけです。

例えば探査地震学、あれは地表の震源で、地表で観測しているのですから、ご存じのようにラムの問題というのがあって、出てくる波はほとんどレイリー波とか非常に遅い波です。horizontal wavenumber が非常に高い。そういうものをスタッキングで全部殺してしまう。だから、データのほとんど全部を殺して、初めて reflection seismogram というものが出てくるわけです。

だから、ノイズを多量に含んだデータからノイズを全部取り去らないと簡単な deterministic model はつukれない。earthquake seismology でも同じことです。ラムの論文というのは 1904 年、ちょうど 100 年前ですが、それから 60 年間も地震の研究に全然使われなかったのです。それが使われるようになったのは、長周期地震学というのが 1960 年代に開発されてからです。何かというと、普通観測されるデータ、地震の主なデータは全部どけて、

high frequency を全部どけてしまって、長周期だけ、非常に低周波のものだけ取り出す。だからデータの大部分を捨てるということが大事だ。そうしないと簡単なモデリングはできない。

簡単なモデリングをすると、長周期地震学が初めて応用されて、例えば地震モーメントが出てきて、地質学者がその地震モーメントを簡単に理解できるわけですね。断層面積に平均変位を掛けたもの。それから測地学のほうにもすぐに使える。それから、地震についての古い記録を新しい目で見て、同じモデルをらせる。ですから、あらゆる地震に関するサイエンスに共通に使えるので、それらを一緒にすることができたんだと思うんです。そういうことに役に立ったわけです。deterministic modeling というのは非常に大事なわけです。そうするためにはデータのほとんど全部を捨てなきゃいけなかったんです。

私は、IUGG 萩原シンポジウムで brittle events をノイズとしてこれをまずデータから捨て去る、それが決定論的モデリングの出発点ではないかと提案しました。それはシンポジウムのプロシーディングではっきりと打ち出していると思います。

昨日、木村さんがこの部屋でお話しになったのですが、関東地方で繰り返し地震が見つかった。これがその図ですが、this study と書いてある太い線が繰り返し地震だけを使って決めたプレート境界です [スライド 10]。ほかの、それまでに求められたものに比べて非常にスムーズに、平らになっています。それから、この結果の中には物理的なモデルが入ってきていて、繰り返し地震が起きているところには小さなアスペリティー、マグニチュード 3 くらいですから大きさ数百メートル、そういうものが幾つかあって、その中間には何も無いから、多分これは固着域と考えられる。これでもちゃんと物理モデルができたわけです。それをつくるために、何万個か知りませんが、地震の中から十数個とか数十個とかそういうものを選び出した。それで、繰り返し地震というのは明らかに self-similar ではないんです。ですから、そういう self-similarity から外れたものだけを集めて、ほかは全部捨ててしまう。そうすると簡単な決定論的モデルがつかれる。

昨日も議論があったんですが、ここにそういうモデルができたが、ここには同時に捨てた地震もプロットしてあるわけです。この捨てた地震は多分 self-similar な brittle fracture だと思いますが、繰り返し地震のほうはアスペリティーのまわりにすべっているところがあるわけですから、いわば brittle ductile interaction が起きているところですね。

要するに brittle ductile interaction が起きているところからのデータ、それからつくったモデル、そうやってモデルをつくる。だけど、そのモデルができた以上は何か言えるわけですね、この brittle part についても。繰り返し地震の起きているまわりにバタバタとブリットル地震も起きている。これは多分、アスペリティーのところですべりがローカルに小さなスケールで起こるの

で、そこに応力集中ができる。その応力集中が brittle part に伝播して行って、そこで地震の巣のようにになっているのじゃないか。

繰り返し地震だけだと、一体どういうふうにして大地震の予知に使っていいかわからないわけですね。しかし、これで繰り返し地震の起こり方と brittle な地震の起こり方の間の関係を調べて、ノーマルな荷重過程での関係がわかったら、大地震の前には近くの物性が変わりますから、ひょっとするとその関係が崩れるかもしれない。そういうことを使って大地震を予知することができるんじゃないか。そういうことを実際に Jinさんと私はここ10年ぐらいやってきていたわけです。それを残った時間で説明させていただきます。

カリフォルニアのサンフランシスコのちょっと南の辺を中心にしたところとロサンゼルス南のリバーサイドを中心としたところに注目します [スライド 11]。この領域に起こる地震から、coda Q という統計的なモデルに基づいた地殻での地震波減衰の性質を表すと思っているのですが、それを50年にわたって測って、それと同時にサイスミシティーのほうからも1つの量を出して、その間に非常に強い関係がある。その関係を見つけたのが15年ぐらい前なのです。

これは [スライド 12] 北の地域の結果で、上に示したのがマグニチュード4から4.5の間の地震のパセンテージ、全体の数に対する比率を1940年ごろから50年間ぐらいの結果です。下の図は、coda Q という地震波減衰のパラメータを同じ時期について出したもので、 $Q^{-1}$  という減衰の強い方をプラスに書いてあります。この二つの間に非常に強い相関があるのです。片一方は地震の数ですから、カタログから出たもの。こちらは減衰ですから、記録を見て出したものです。この2つにこんなに相関がある。相関係数をとってみると、同時相関、ゼロシフトで0.8以上になる。相互相関関数は非常に対称で、時間をプラスにずらしてもマイナスにずらしても非常に小さくなっており、強い同時相関を示しています。

次のスライド [スライド 13] は南のほうですが、南カリフォルニアでも全く同じことがあって、この場合にはマグニチュードの範囲を3から3.5にすると一番きれいに出るんですが、そうやって相関をとると、ゼロシフトで0.8以上で、非常に対称的なものになる。どうやってこれを説明するか。15年前、いろいろモデルを考えて creep model と呼んだのですが、coda Q であらわされる減衰は多分 ductile part に起因し、ductile part の変形が小さなクラックでできて、その生成を通して変形が起こっている。その ductile crack の大きさが大体同じで、あるユニークな大きさを持っていて、その大きさの波長のストレスがその周りに強化される。そのために、それに対応するマグニチュード、ここでいえば3から3.5ですから、数百メートルのクラックがあれば数百メートルの波長のストレスの空間変動があって、それがこういう特別な大きさの地震を出すのではないかと。ですからこれは brittle ductile interaction で、しかも、Mc と呼んでい

ますが、特別なマグニチュードが関係したものなので、明らかに self-similarity とは考えられない。ですからこれから簡単なモデルがつけられる訳です。

これ [スライド 14] は皆さん良くご存じの日本の GPS から求められた地殻変動のマップで、ここにひずみ集中帯というのがあります。これをいろいろなモデルでいろいろな人が解釈して、detachment model、collision model、back slip model などがあります [スライド 15]。飯尾さんたちは、ここ一番下に書きました lower crust にフラクチャーがあって、plate driving force が両側からかかってきたときにここが弱いから非常に変形しやすい。そのためにその上部の brittle part ではストレスが集中しますから、変形が集中すると考えておられます。これが私たちの creep model に非常によく似ていると思いますのは、もしもこのフラクチャーがこんな大きなくて、数百メートルの大きさでたくさん分布しているとしますと、ここでデフォーメーションが大きい。つまり coda  $Q^{-1}$  が大きいときにはここでストレスの集中が起こって、数百メートルの大きさを持つマグニチュードの地震が増えてくる。そういう正相関をこの荷重過程から説明できて、我々の creep model とこのモデルとは本質的に同じものではないかと思えます。

実験室で岩石の破壊をやってみますと、破壊寸前にいろんな現象が起こって物性が変化していく。その物性の変化は quiescence とか foreshock とかいろんな形で brittle part に出てきますが、loading のほうから見ますと、実験室では loading process は外から与えられています。しかし、自然においては loading process 自身も地殻の一部ですから、もしも物性が変化して破壊寸前になったときには loading process も変わるのではないかと。brittle part で何か変化が起これば、それがまずサイスミシティーにあらわれて、その結果が ductile part に伝わって、coda Q の変化がそれに遅れて現れるのではないかと。

そういうアイデアが浮かんだものですから、さっきの図を見直しまして、Kern County の地震がここです [スライド 16]。その前、数年間を見ましたら、 $N(Mc)$  といって我々が brittle part の事件と思っているものが、coda Q と同時でなく、coda Q の変化のほうに1年ばかり遅れていることが見つかりました。相関係数をとってみると、明らかにピークはゼロではなく、1年ばかりシフトしています。

それではというので、次の地震、これ [スライド 17] は Loma Prieta 地震ですが、これも  $N(Mc)$  が coda Q の1年ばかり前、大体同じような cross correlation (相互相関) のピークがゼロから1年シフトしています。

これ [スライド 18] は Landers の地震ですが、Landers のときにはかなり大荒れに荒れていますが、10年ぐらいとってみますとやはり同じようにシフトしていて、この場合には3年ないし4年の遅れがあります。

これ [スライド 19] はセントラル・カリフォルニアのデータを、15年前の論文では1990年ごろまでしかやってなかったんですが、その後またデータがありますので

それを足してやってみますと、今度は同時相関なくて何だか荒れてきている。Cross correlation をとると、この cross correlation のカーブが Landers の前の 10 年と非常に似ているわけです。

中部カリフォルニアは今までずっと静かでしたから、これは何かあるぞと思い、去年の 6 月、このことを簡単なノートにまとめまして主だった人に配ったのです。Keilis-Borok のほうでもやはり、チェーン・メソッドというので、中部カリフォルニアが危ないと言って一緒に警告を出したのですが、その後、去年の 12 月にサンシメオンの地震があって、最近パークフィールドの地震があった。M 6 クラスですが、Landers の前にも M 6 クラスがバタバタ起こって、それが最後に Landers の M 7.5 になった。ですから、これまでのところではこのモデルと調和的なことが中部カリフォルニアに現在起こりつつあります。

このカリフォルニアの地震のほかにも、日本の三朝地震（の震源域周辺）で佃さんが coda Q とサイスミシティーを比べた論文や、神戸の地震について平松さん等の論文がありますし、Tangshan 地震については昔からのデータで coda Q が調べられています [スライド 20]。

これで見ますと、今のモデルでこれは全部解釈できて、例えば Stone Canyon の Chouet の論文では、Mc が非常に小さい。1 から 2。coda Q の変化した周波数も非常に高い。Mc と fp とは逆関係にある。我々のモデルの中では Mc はフラクチャーのサイズに当たるもので、fp は一番よく散乱されるか一番強く減衰する周波数帯ですから、その周波数の逆数と Mc のフラクチャーのサイズとは比例関係にあるというのが我々のモデルですが、その逆関係が大体成り立っているようです。

Mc ないしは fp の逆数が、目標の地震のマグニチュードを推定するのに使えます。それから、遅れの時間は、異変の起こる anomalous な期間に比例するようで、それは目標の地震のマグニチュードにはよらないようです。三朝地震でも長いし、もっと大きな地震でも同じように長い。どうもこれは目標とする地震の再来時間に比例しているのではないかと思います。

こういう時間変化の例については我々のモデルが調和的ですが、今度は空間的な変化はどうだろうか。Hi-net が 4 年間働いていますから、それを使って Jin さんがつい最近出した結果を次にお見せします。

これ [スライド 21] は coda Q の 1~2 Hz、これは 2~4 Hz ですが、赤が減衰の大きい、 $Q^{-1}$  の大きい、Q の小さいところで、ここのひずみ集中帯にあたる場所がきれいに現れています。2~4 Hz でもそれがあらわれています。

これ [スライド 22] が high frequency になりますと、例えば 8 Hz 以上になりますと、こういう変動が非常に少なくなりまして、だんだんのっぺりして、日本中で余り違いがない。しかし、1~8 Hz までは随分変動して、場所によって Q の値がファクター 2 ないし 3 変わっています。これは昔、干場さんなどが日本でやられた Q

のマップがありますが、それには出てなかったのが、Hi-net のデータで空間分解能を上げることができた。これは Hi-net のおかげで、地震も選ぶことができますし、coda Q の分解能が良くなった。

これ [スライド 23] はいろいろな Mc の地震のパワーセンテージで非常に簡単な図です。それを過去 4 年間、coda Q を測ったのと同時に、その時間について日本じゅうやってみますと、黄色いのがスタンダード・エラー（標準誤差）の中。赤がスタンダード・エラーよりも大きいところ。青が小さいところ。マグニチュードが 3 以下では非常にのっぺりしています。coda Q のほうは高周波でのっぺりしている。それに対応するのではないか。変動の量も非常に小さくて、せいぜい 20 %とか 30 %ぐらいしか日本じゅうで変わらない。ところが M 3 以上になりますとガクンと増えまして、これが場所によって 3 倍ぐらいの差を示します。Mc が 3 より小さいものは  $N(Mc)$  がのっぺりするし、fp が 4 Hz より大きいものは  $Q^{-1}$  のっぺりする。これは我々のモデルと調和的であります。

時間的な変化で、 $Q^{-1}$  の大きいときには  $N(Mc)$  が大きかったわけですが、どうも西南日本は、空間的に見て  $N(Mc)$  の大きいところは  $Q^{-1}$  も大きいというような正相関になっている。これはひょっとすると normal loading のところではないか。ところが中部地方はちょっと空間分布の位相がずれている感じで、ひずみ集中帯が、特に  $N(Mc)$  が大きくはないわけです。大きいところから小さいところに移るようなトランジェントな感じがあります。ですから、もしも時間的なことを空間的に移すことができるとすれば、この辺はちょっと anomalous であると見ることもできるかもしれません。Jin さんが、時間的にどうなったかということを目下調査中です。

Coda Q の空間分布というのは前からやっております、これ [スライド 24] は中国における coda Q の図なのですが、地震活動と非常によく合っています。しかも非常に大きく変わります。地震のないところでは Q が 1000 とか 2000。地震の多いところに行くとそれが 100 になる。ローカルに high Q などところがありますが、例えばこれはオルダスブロックといって、全然地震がないブロックなのです。

一つ面白かったのは、中国では大地震の起こるところが過去 300 年の間に移ったと言われているのですが、現在はこの辺が活動地帯で、ちょうど Q の小さいところがそれに合っています。しかし、昔の地震の震度の減衰が、Nuttli という人が開発した方法で Q を出すことができるのですが、それで出しますと、どうも昔ここで地震があったところには Q は小さくて、今起こっている所ではむしろ大きかった。Coda Q が小さいところもサイスミシティーと一緒に移動したのではないかとということです。

現在、朝鮮で熱心に Q を調べている人がいますが、ちょうど朝鮮の Q はこれにきれいに乗るわけです。Q



は今 400 くらいとかなり高く、サイスミシティーは非常に小さいのですが、三、四百年前ですか、朝鮮は大地震が非常に多かった時期があります。そのときにもしも coda Q を測っていれば coda Q は小さかったろうと思うので、多分、coda Q というのは時間的にも空間的にも変わるのではないかと思います。

こういう coda Q のマップはほかの国でも作られています。これはスペインですが、ここに非常に high Q のところがあって、low Q に取り囲まれている。ここが有名なリスボンの地震の起こったところです。この図は現在のサイスミシティーと非常によく対応します。

もっと大きい規模で見ますと、Mitchell・他が、日本、朝鮮ぐらいからヨーロッパ大陸のあたりの非常に広い地域の Lg coda Q というのを出しています [スライド 25]。これで非常にはっきりするのは、大地震が起こるゾーンが、coda Q<sup>-1</sup> が非常に大きくなって、1 桁ぐらい違っている。インドの楯状地は high Q、シベリアも high Q。ですから大地震帯と coda Q<sup>-1</sup> の大きいところは空間的によく合っているんですが、この方法は Lg 波を使っているものですから空間的分解能が悪いので、これに分解能がよいローカルな地震を使ったものをまとめて次のスライドに載せますと、例えば日本は全体として Q が非常に低い。low coda Q。それから中国で非常に小さいですから、その途中に高いところがなければいけません。朝鮮あたりが非常に高い。ここに Q の非常に高いところがある。それから非常に低いところがある。それからインドでもこの前ここで大地震がありました、プジというのですが、大被害を起こした地震ですが、その地震のところの coda Q を最近調べると、ここは Mitchell・他の図では high Q の近くでありながら非常に low Q になっています。

これ [スライド 26] は最近見つけたのですが、インドの楯状地のご真ん中に地震が起こる場所がありますが、その coda Q を調べると、そこだけローカルに Q が非常に小さくなっている。それから、スペインの例も同じです [スライド 27]。

こうやってみますと、日本からスペインまでを結んで、この地帯はものすごく被害地震の起こるところです。そこに Hi-net みたいな観測網を拡張して、ここを日本と同じようにカバーして時間・空間的に coda Q と N(Mc) を調べたら、hazard prediction に非常に役に立つのではないかと。ちょっと夢のような話ですが、そういうプロポーザルをもって今日のお話を終わりたいと思います。(拍手)

#### 質疑応答

――： Coda Q を測ったときは、下部地殻に、ダクティルなところに coda Q でもっと……。

安芸： Coda Q は全体のものですが、変動はそこから来るのじゃないか。下部地殻から。これは coda Q の観測だけからはわかりません。coda Q 自身、どこにソースがあるかというのは coda Q だけからはわかりませ

ん。昔は僕は brittle part だと思っていたんです、特に coda Q の空間的な変化は。一旦それが起こって、地震の起こるところは断層がたくさんあるから coda Q が小さいのだろうと思っていたわけですが。だけど、時間的に調べてみると、余震があったときに Coda Q が増えている例がかなりあるんです。そういった関係が余りはっきりしない。

どうも brittle part は、少なくとも変動にはコントリビュートしていないみたいなのです。そうだとすると、ductile part ではもっと温度も高いし、もしもフラクチャーがあってそれがデフォルメしているとすれば、時間的に変動してもおかしくないですね。

カリフォルニアのさっきの coda Q の変化はファクター 2 なんです。ちょっと大き過ぎるなとみんなに言われるのです。だけど、ここで空間分布を Hi-net から見ると、あれもファクター 2 とか 3 というのです。だから、空間変動と時間変動が同じぐらいのオーダーがあるのですから、ここで時間的にも二つ三つ、ファクター 2、3 が変わってもいいのじゃないか。これは Hi-net をあと 10 年やればすぐわかるだろうと思います。

――： 先ほど平田さんが、中越地震は長岡の西縁断層と 97 の断層から外れていると言っていましたけれども、例えば日本みたいなどころだと至るところに断層がありますよね。そういう地震の前にこの断層が滑るかというのはわからないにしても、変動がどこにあるかということとは分かりますか。非常に広域にあれば多分 coda Q で出てくると思うのですけれども。

安芸： Coda Q にそんなレゾリューションがあるかという (ご質問ですか)。

――： はい、そうです。

安芸： 結果が出ている。高いところと低いところとがマップになっているのですから、レゾリューションがあったんじゃないですか。だけど、Hi-net (のデータ) だからできたことだと思うのですけど、Jin さん (の仕事) は。

Coda Q が非常にローカルに変わるという例はあるわけですが。北米の中部でも大体 Q は 1000 とか 2000 なんですけれども、ミシシッピーとか東海岸に地震の起こるところがありますね、ああいうところでは Q はローカルに非常に小さくなっています。僕は、それは多分 brittle な地殻が破壊されているからだろうと昔は思っていたのですけれども、今ここで完全にそれを変えまして、多分 lower crust がコントリビュートしているのだろうと思うわけです。そうするとさっきの飯尾さんなんかのモデルとも合うし、調和的ですし、coda Q のマップを見る見方も、周波数で分けてみたりするとき何を見ているかはモデルに基づいていろいろなことが言えるわけです。今までのところ特に矛盾した結果にならないというお話です。

――： 最後のところがよく聞こえませんでしたけれども、中国からずっと……

安芸： ああ、プロポーザル。日本からスペインまでが

世界中で一番被害地震の多いところですね。そこら辺はお金持ちの国ではないですから、日本みたいな非常にお金のかかる仕事はできないですよ。Coda Q とか N(Mc) というのは割に簡単なことで、そんなにお金かからないですから。ただ、データとして Hi-net が日本の分布ぐらいにできたら、10年ぐらいでパッといろんなことが解るのではないかと思います。

――： それを、どういうお名前をつけたのですか。

安芸： それはただ夢のようにポッと出ただけです。今私がやっていることは、あちこちの国の人にこういうアイデアはどうかと聞いて、もしもみんながやる気があるのなら一緒にやってやろうじゃないかと、そういうふうに思っているんです。

――： 1985年ころだと思いますけど、僕は Kisslingerさんと中国に、ユネスコが中国を援助したから、そのエバリュエートをしてほしいというわけで2人で訪ねていきました、そのときになぜ中国にユネスコがそういう援助をしたかと僕が聞きましたら、ユネスコが21世紀には、いま先生のおっしゃったところを地震のベルトとし

て、日本からはお金と頭を出してもらって、中国からは観測する人たちを大いに派遣してもらってやりたいんだと、相当大きな今世紀のプロジェクトを考えておられましたが、先生は大いにそのプロジェクトを、いい名前をおつけになってお進めいただきたいと思います。

安芸： このプロジェクトは、僕は「裏日本プロジェクト（裏日本という一寸暗い感じですが、スペインまで広がる広々としたものです）」と呼んでいるのです。

――： これは来年からフィージビリティスタディで、アジア太平洋地域観測ネットワークというのを立ち上げようと思っていて、それがそんなに Hi-net のような観測網がすべてできるとは思わないんですけど、その核となるような観測網で、リアルタイムでデータを集められるような観測網ができればいいと思ひまして、デプロイメント・オブ・ダフネという名前をつけて今プロポーザルを出しているところなのです。ぜひそういう先生のアイデアも入れて進めたいと思っています。

司会： では、どうもありがとうございました。改めてまた拍手をお願いします。（拍手）

Preface to the EPS issue on the IUGG Hagiwara symposium

The present special issue is a collection of papers presented at a symposium of the 2003 Sapporo IUGG titled "the Hagiwara symposium on Monitoring and Modeling of Earthquake and Volcano Processes for Prediction". *Takahiro Hagiwara* symbolizes *an era of the earthquake prediction research in which monitoring was emphasized* and a variety of monitoring data have been accumulated throughout the world with the ever increasing quantity and improving quality. We now find, however, a growing recognition among earthquake scientists, especially in Japan, that *modeling is as important as monitoring for a healthy development of earthquake prediction research as a branch of Physical Science*. The papers in this issue review the progress made in the earthquake prediction research in the past and address the promising directions in the future.

1

The first paper in this issue is about Takahiro Hagiwara and his contribution to the earthquake prediction research by *Ohtake*. The past accomplishment in the earthquake prediction research in Japan since the blue print of 1962 is well demonstrated by papers by *Okada et al.* and *Sagiya* on the current seismic and geodetic network, respectively. They are followed by a broader perspective of the past, present and future earthquake prediction research in Japan by *Hirata*, who recognizes that we are in a transient period from the empirical approach of the Hagiwara era to the more physically based one in which monitoring observations will be coupled closely with modeling of the earthquake process.

2

The earthquake prediction research, however, is different from the traditional science in the following two important aspects. First, unlike the traditional science in which causal relations are sought under conditions controlled or restricted as much as possible, the *prediction science must deal with the diverse nature as it is*. Thus we need to consider, simultaneously, *many models that can be constrained by the monitored data* to cope with the complex course of nature. The other aspect is the direct impact of the outcome of research on human society. The scientific community must give a *consensus message to the public for an effective communication*. It is not a simple problem to reconcile the need for multiple models to deal with nature and the need for a single voice to deal with society. The paper by *Mogi* in this issue, which may not be a scientific paper in the traditional sense, is important to *expose serious problems in implementing scientific information into public policy*.

3

### 3*m&ms* for Prediction Science

- (1) Close coupling of *monitoring* (observation) and *modeling* (theory) is essential for a sound development as a branch of *Physical Science*.
- (2) *Many models* that can generate a variety of scenarios are needed to cope with the future course of complex *Nature as it is*.
- (3) The concept of *master model* may be useful for synthesizing the total view of the scientific community and transmit it as a *single voice to Society*.

4

The rest of the present special issue is concerned with the future of the earthquake prediction research. It is convenient to start with Aki's paper in which *precursory signals originating in the brittle part of the lithosphere was distinguished from those in the ductile part*. The former is dominated by *the self-similarly scaled phenomena* without any unique scale length which cannot be explained by a simple physical model, but sometimes allow us a useful empirical prediction. The latter shows a clear *departure from the self-similarity* suggesting the possibility of simple modeling, but appears to behave erratic for predicting individual earthquakes. This recognition of distinct difference between two types of precursory phenomena came from *an on-site prediction research on the eruption of an active volcano, Piton de la Fournaise, but seems to apply to earthquakes also*.

5

Papers by *Shebalin et al., Wjys and Clippard, Imoto, Evison and Roades, and Rundle et al.* are all concerned with the signals from the brittle part, and their *empirical or statistical approaches are inevitable*. The success of the advance short-term prediction of the recent Tokachi-oki earthquake by *Shebalin et al.* and the lack of imminent foreshocks as reported by *Imoto* and the absence of short-term precursor in crustal deformation reported by GPS monitoring (*Sagiya*) before the occurrence of this earthquake underline the complex non-linear dynamics operating in the brittle part of the lithosphere.

In papers by *Ohnaka, Yoshida et al., Matsuzawa et al., Kawasaki, Jin et al., Iio et al., and Ishibashi*, we see the *emergence of deterministic physical modeling of the earthquake process* that deviates from the self-similar scaling relation and concerns with the interaction between brittle fracture and ductile/inelastic deformation. As mentioned earlier, we need many such models that can be constrained by the monitored observations in order to cope with the complex nature.

6

Another idea introduced in Aki's paper about the *fundamental similarity between the earthquake and volcano prediction research* may open some productive interaction between the two research communities so far worked separately. For example, the most important factor in the long-term predictability of the eruption of Piton de la Fournaise came from the recognition of a phenomenon similar to "the Odawara earthquake" of Ishibashi.

*Keiiti Aki*

*Anshu Jin*

*Eiichi Fukuyama*

7

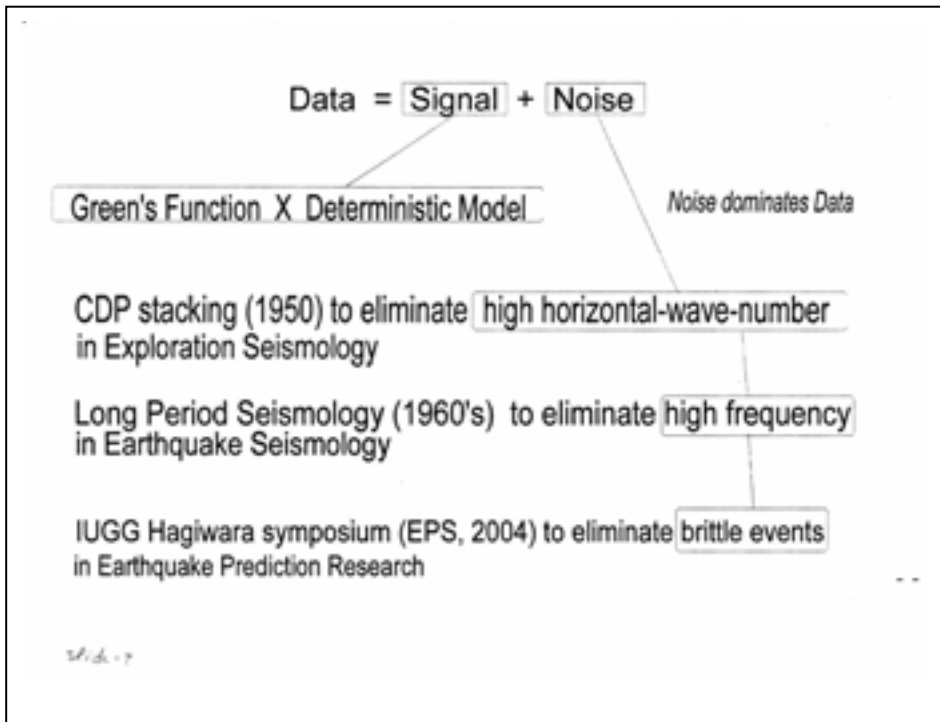
**news feature** (Nature, 28 October, 2004)

## A seismic shift in thinking

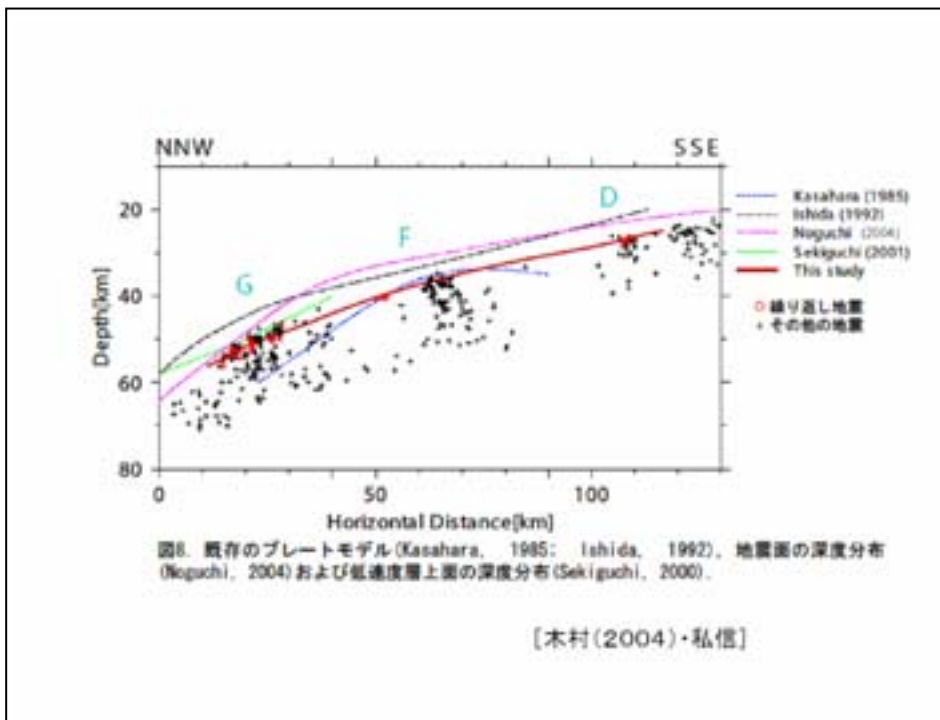
Earthquake researchers in the United States have long shunned the word 'prediction'. But, thanks to improved data and a change in public perception, cracks are beginning to appear in their resolve. David Cyranoski tracks the debate.

*K-B, Rundle, repeated events,  
silent earthquakes  
non-volcanic LP*

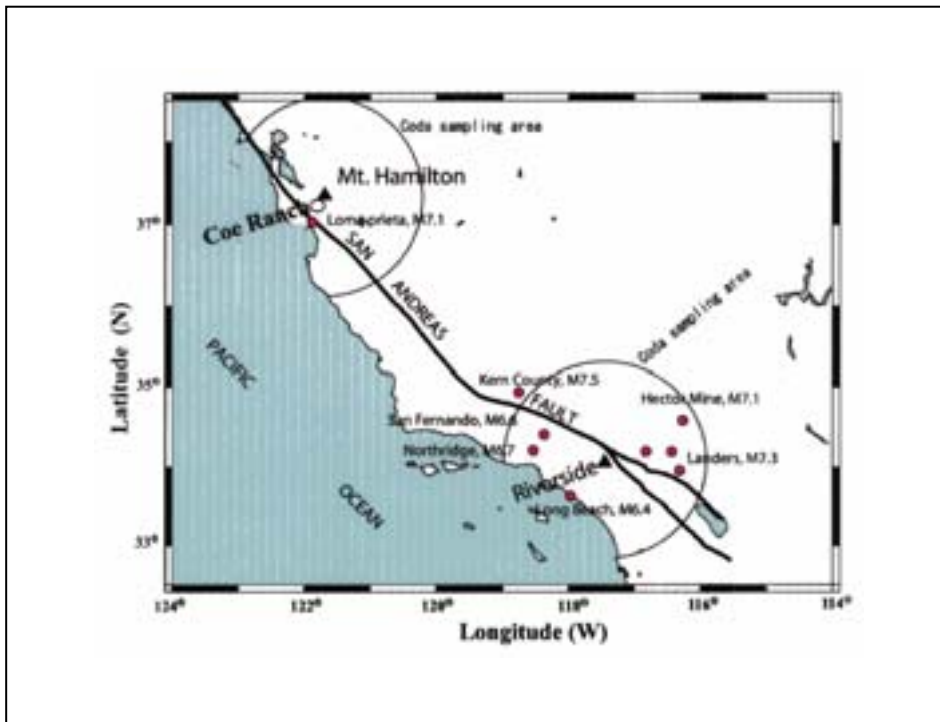
8



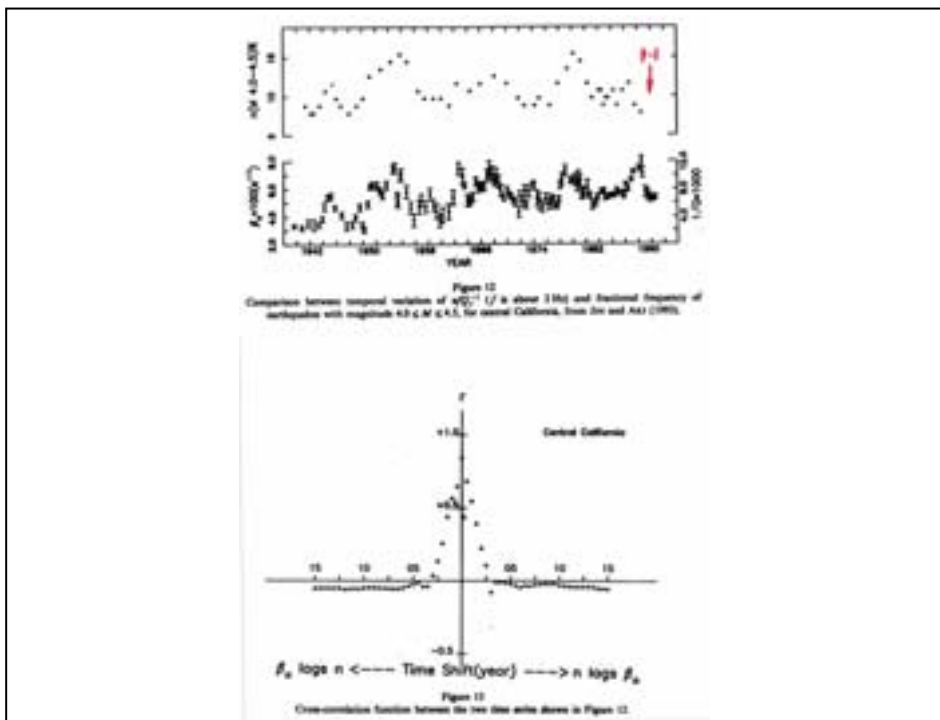
9



10

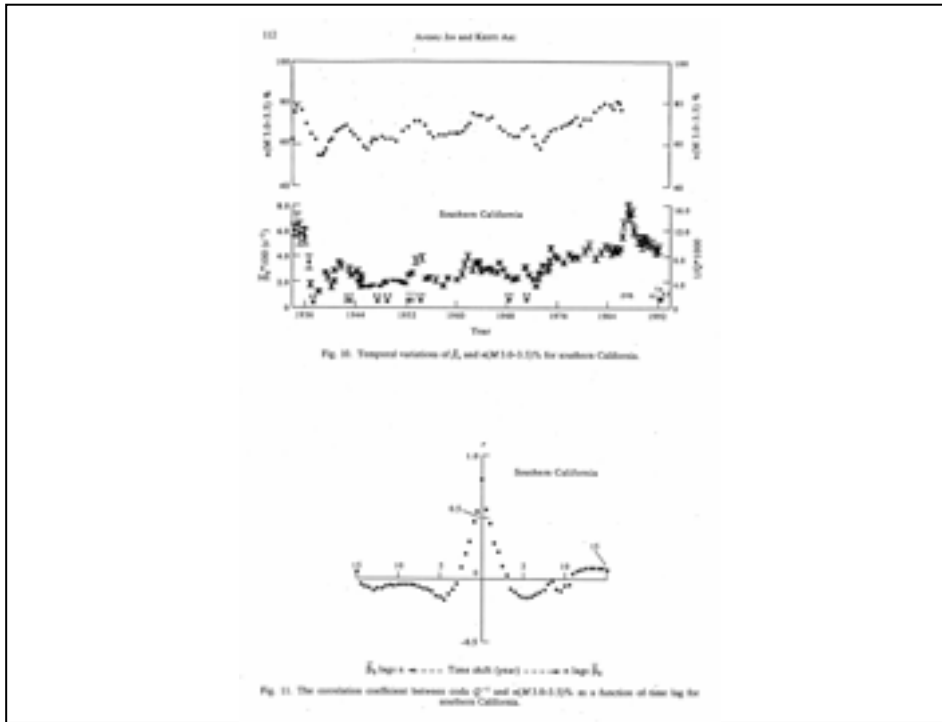


11

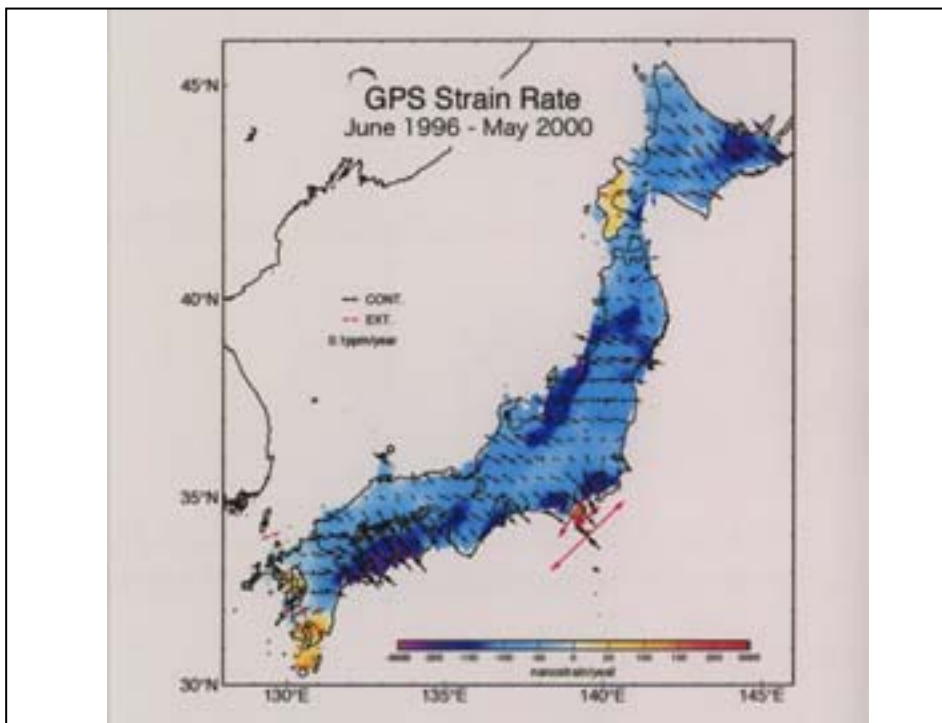


12

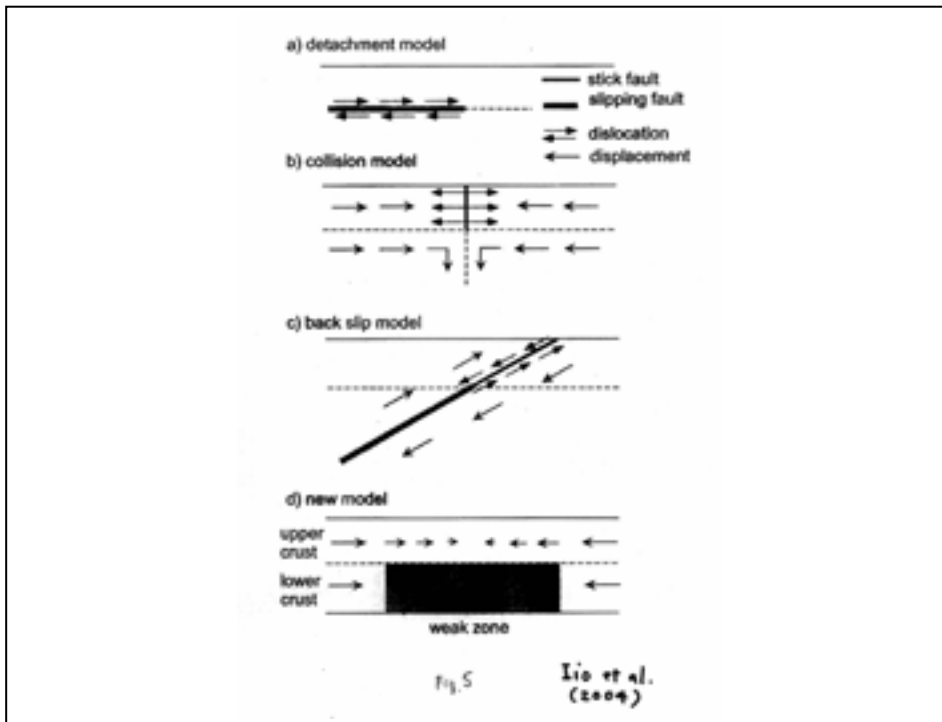




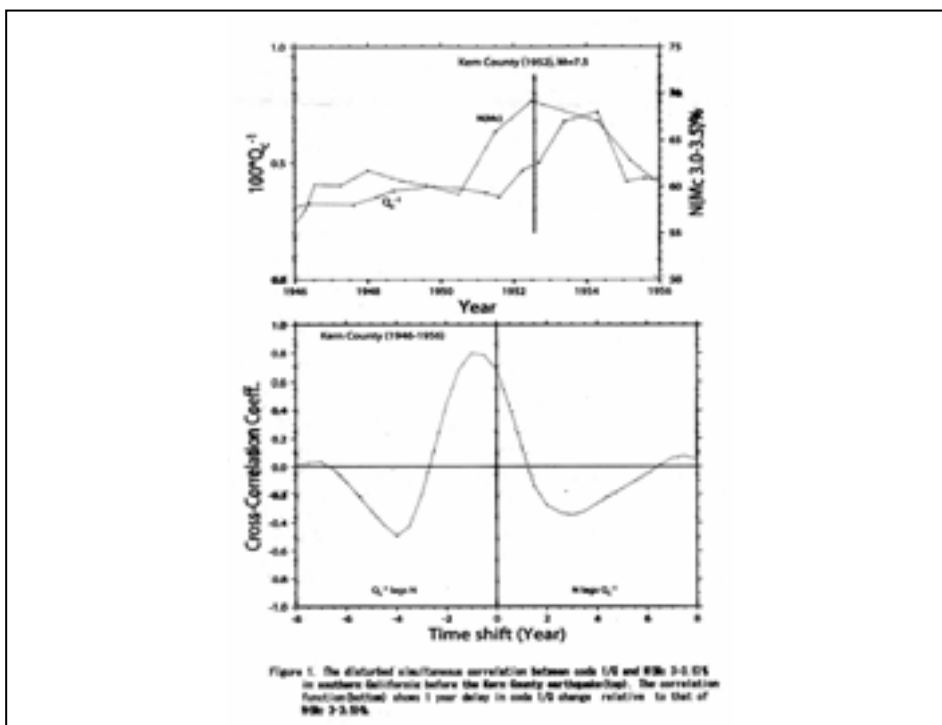
13



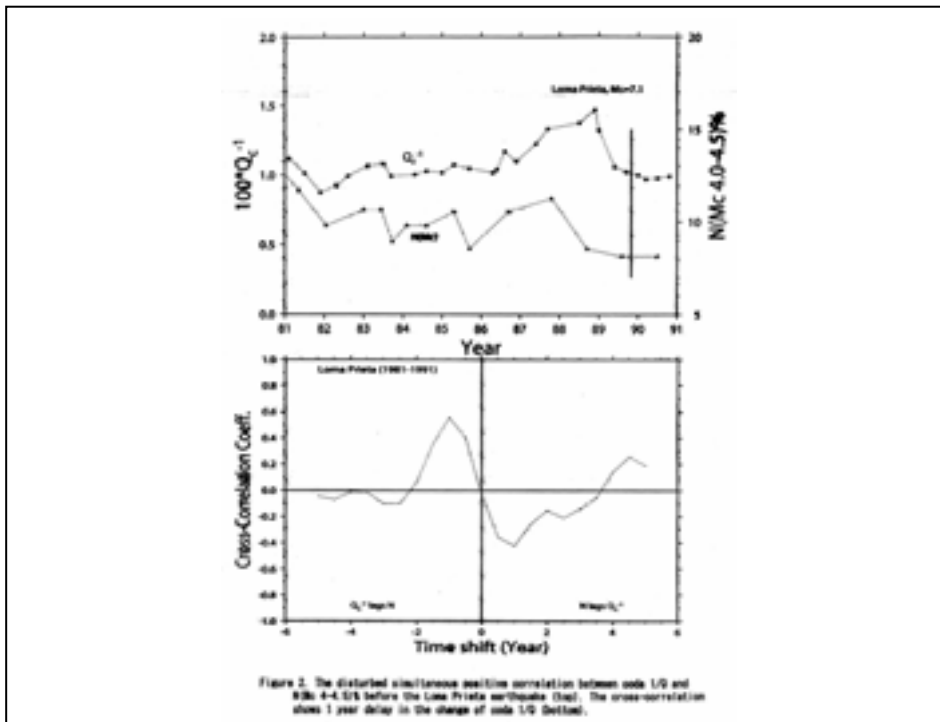
14



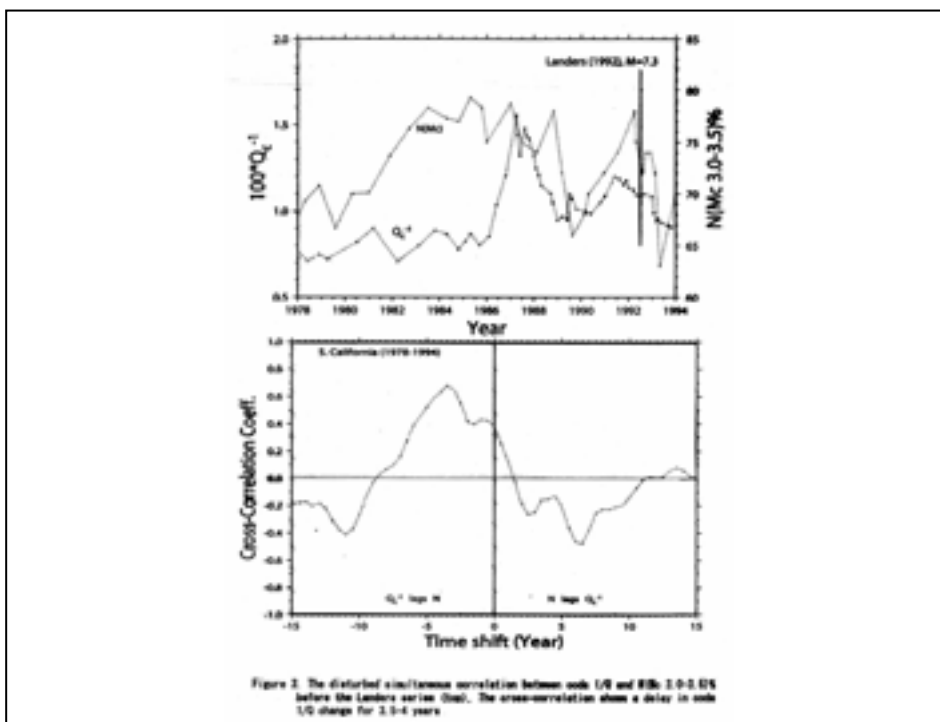
15



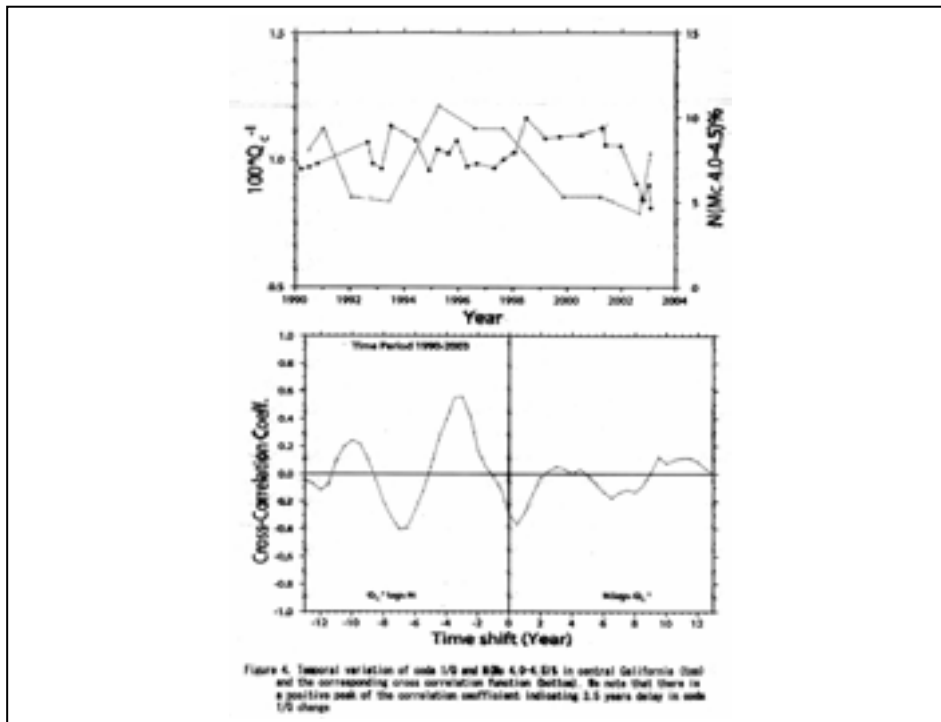
16



17



18

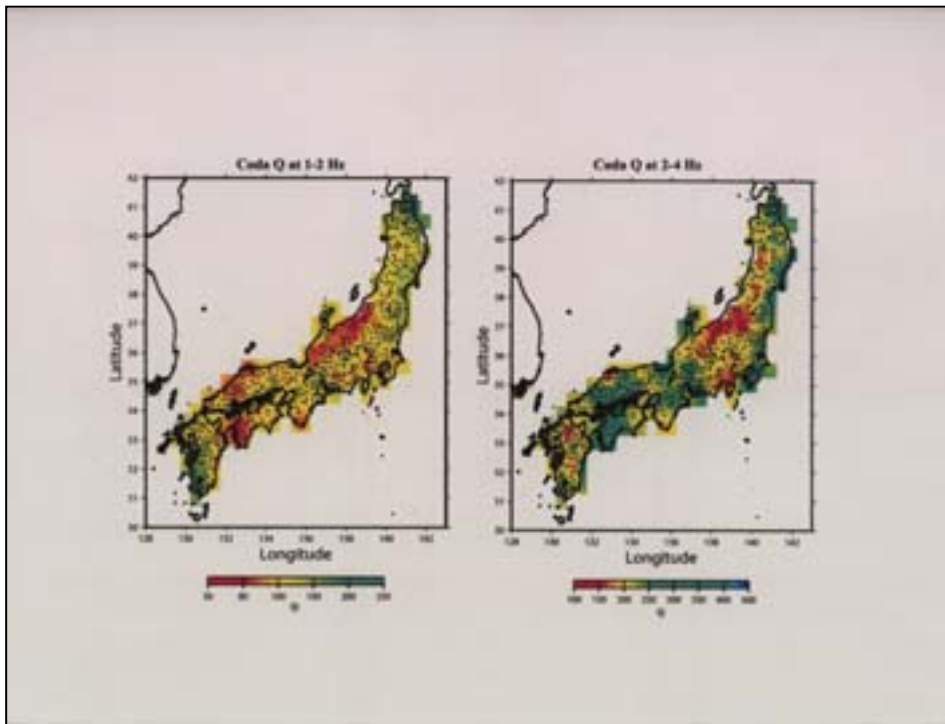


19

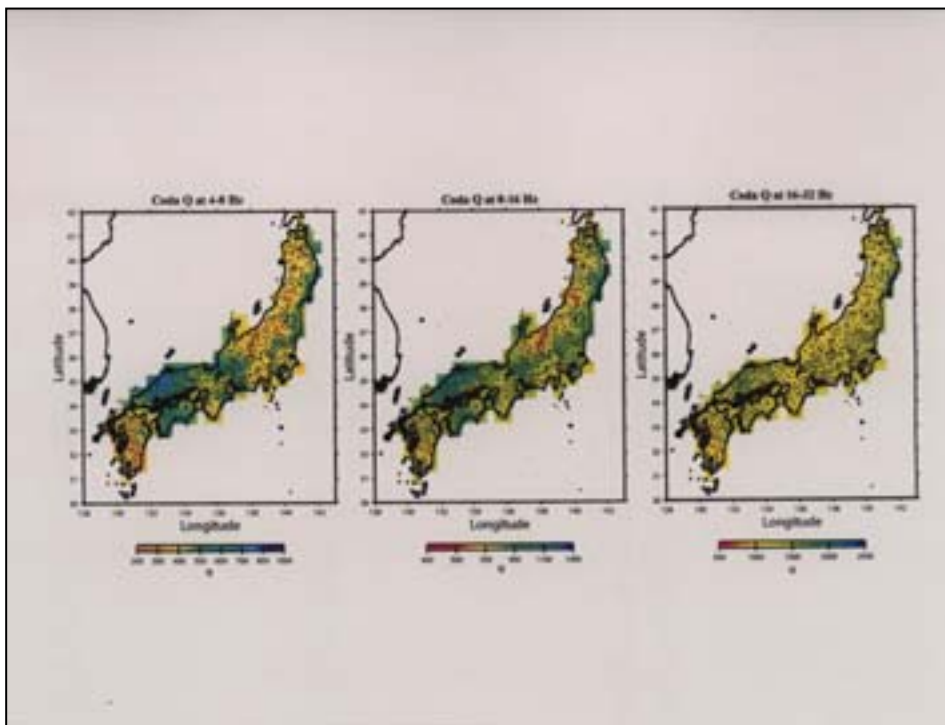
**Table of the Parameters of the Brittle-Ductile Interaction Model**

Target Earthquake	Reference	Duration (year)	Delay Time (year)	$M_c$	$f_p$ (Hz)
Stone Canyon(M5)	Chouet(1979)	(Normal Period)		1-2	24
Misasa, Japan(M6.2)	Tsukada(1988)	> 8	2 - 3	2-3	5-10
Loma Prieta(M7.1)	Jin & Aki(1993)	7	1	4-4.5	1-3
Kobe, Japan(M7.2)	Hiramatsu et al.(2000)	6	2	2.6-3.6	1.5-4
Kern County(M7.5)	Jin & Aki(1989)	8	1	3-3.5	1-3
Landers(M7.3)	Jin et al. (2003)	10	4	3-3.5	1-3
Hector Mine(M7.1)	Jin et al. (2003)	6	3.5	3-3.5	1-3
Tangshan(M7.8)	Jin & Aki (1986) Li et al. (1981)	?	3	4.5-5	1-2

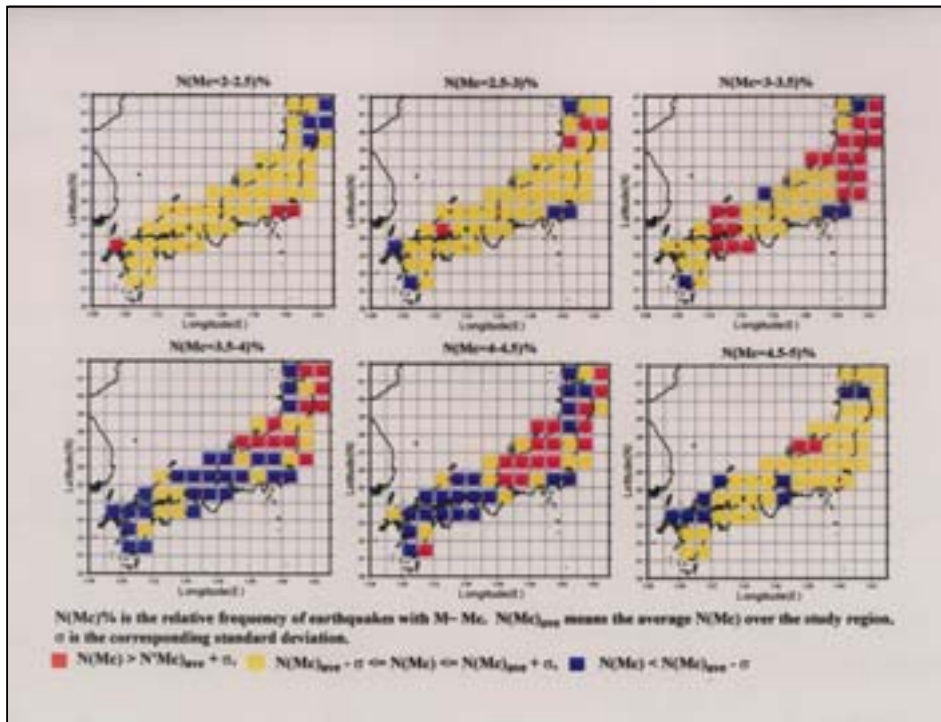
20



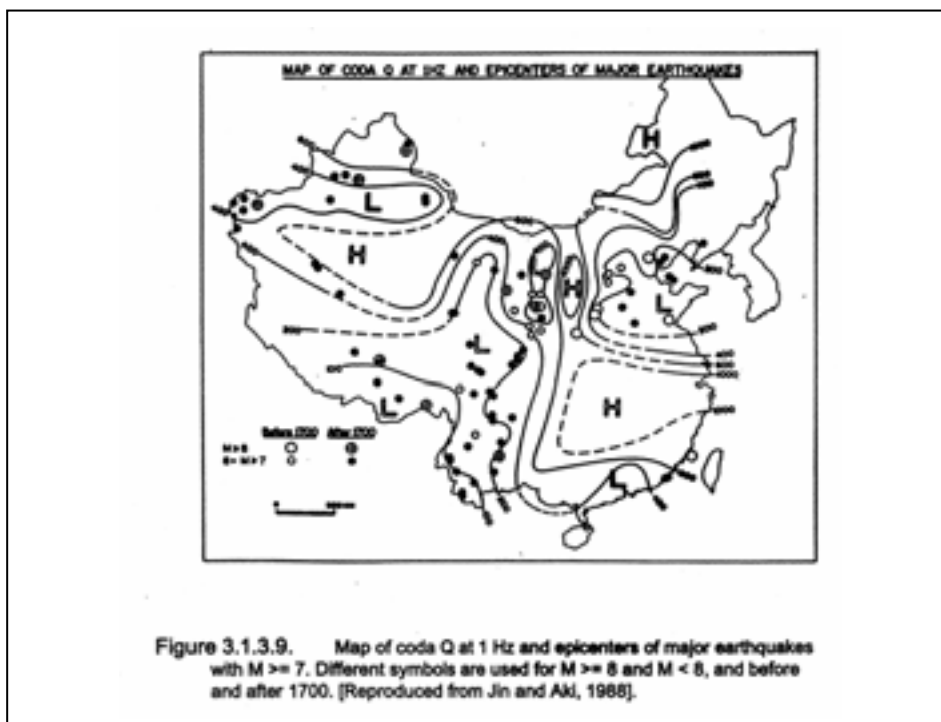
21



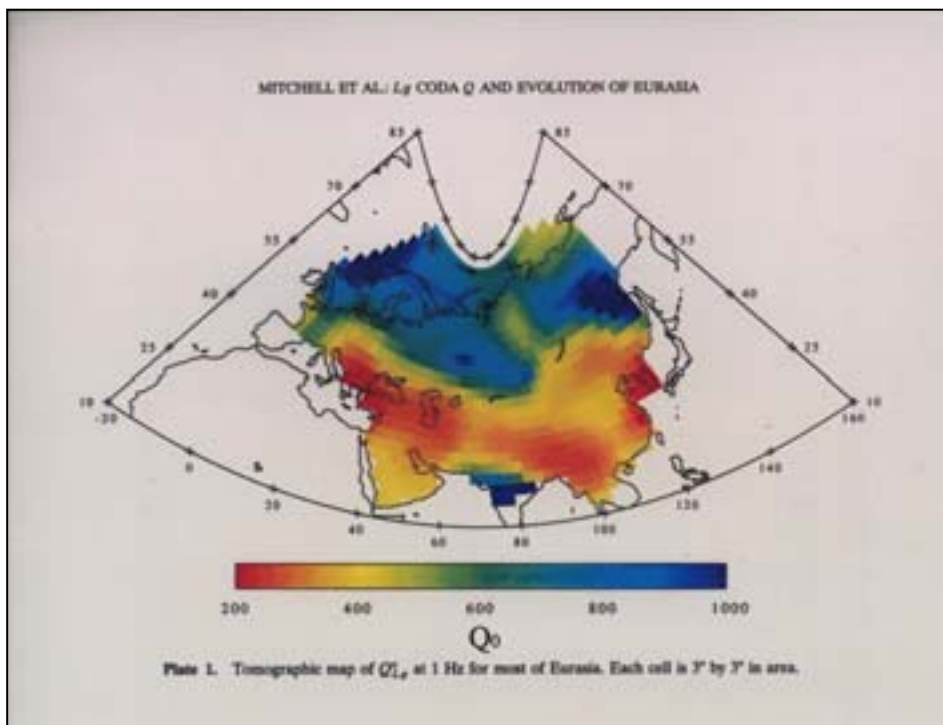
22



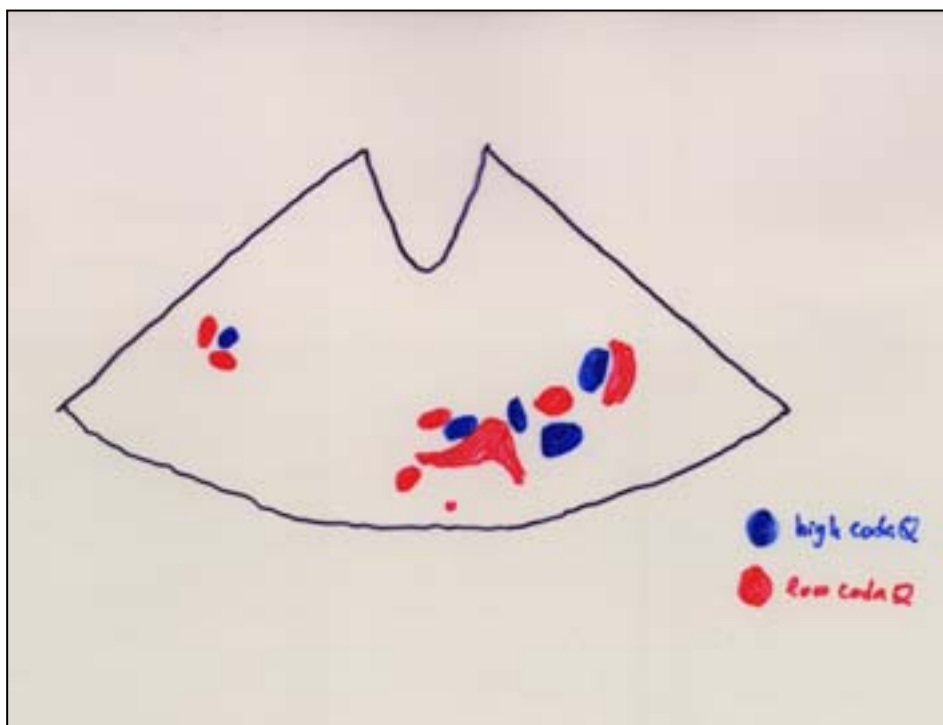
23



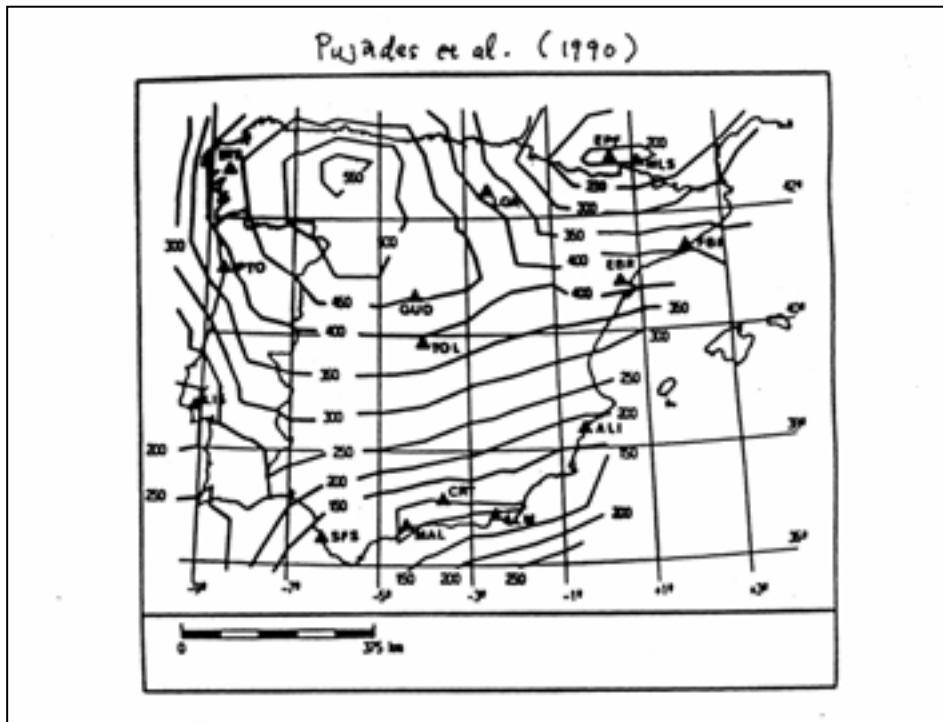
24



25



26



27



シンポジウム

「日本の地震観測の現状と将来展望」

講演速記録集

## 閉会の挨拶



## 閉会の辞にかえて「地震をのぞく窓」

財団法人 地震予知研究総合振興会  
理事長 高木 章雄

ただいま紹介いただきました高木でございます。閉会の辞を申し上げるということでありましたけれども、それだけでは足りないから何か話をするようにという注文がありまして、「地震をのぞく窓」ということで、若干、私の最近考えたことを申し上げようと思っています。

今日は、最初に開会の辞に片山理事長さんからこの研究所の活発な活動をお伺いしたのですが、11月でももう3回もこういうシンポジウムをなさっている。これは大変な活動だと思っております。大いに敬意を表します。

それから、今日初めに、ご挨拶の後で岡田企画部長さんから今までのいきさつとこれからの考え方でさらに一層、質を高めて、等質の研究観測網をつくるんだというお話で大変心強く思いました。

それから、長谷川さんは、先生のウルトラ高密度の観測網を使って東北地方の地震発生場について非常に詳しく、かつ、我々昔の人間は「なるほどな、こんなになるのかな」と思うくらいのお話をさせていただいて大変ありがとうございました。

それから、平田先生は、地震予知の、僕らは最初のころからいいますが、最初のころから現在までのことのお話がありまして、そしてさらに相当発展的な、意欲的な将来計画をお持ちになっているということで私自身も非常に心強い感慨を得ました。

安芸先生のお話は、私、安芸先生の今までのいきさつについて申し上げたほうがよいと思いますから、それを時間が余りありませんけれども申し上げさせていただきます。安芸先生にお願いする前からでないとなかなか話が通じませんから、1995年の阪神・淡路大震災のときからのお話を申し上げようと思います。

阪神・淡路大震災が起こりまして、全くあれほどの大災害で、我々も気が転倒するような境地でしたが、そのときに京都のあるご婦人が、どうして神戸に地震が起こったのか、地震は東海地方に起こるはずではないか、そのようなことをある会合で話されたそうです。そのときに、研究している我々と一般の国民の人たちの地震に対する思いとか、そういうものがいかに乖離しているかということがはっきりしたわけです。

そういうようなことがありまして、代議士の後藤田という先生——これは大変立派な方だと思いますが——が会長になって、「日本を地震から守る国会議員の会」というのをつくりまして、法律をつくって、先ほど岡田部長さんのお話にありましたように、政府に地震調査研究推進本部をつくられて、その一環の仕事として K-net、

Hi-net、それから今は F-net といいますが、広帯域の観測網の構築に進んだわけでございます。そのときに私が学問の大切さを思いましたのは、まず K-net に関しましては、今月、強震動観測事業連絡会議というのが防災科学技術研究所につくられています、その前の、我々の先輩の先生たちが 1988 年には日本列島に強震計をどのように配置するかという議論をされて、800 点の観測点をつくる、あるいは特定地域にはまた何点つくるという、そういうようなことを全部議論されて、その議論の成果があれば早く 1,000 点の K-net の設置になったんじゃないかと思ひまして、まさに強震動の研究グループの古い先生から現役の人までの一致したものであったようにつくづく思いました。

それから、Hi-net は等質のデータをつくろうというわけで、岩盤のいいところは浅くてもよろしいですが、岩盤の悪いところは深い井戸を掘って、とにかく全体で 1,000 点になるようにということでございますが、高感度、質の高い、しかも同じ質を保つような 1,000 点の観測網をつくろうというのは学問的には大変な仕事でございますが、それに近いことをなさったということが今日のいろいろないい成果に結びついているのではないかと考えております。

そういうような観測網ができてだんだんと成果が上がってききましたが、その場合に、それじゃそれを今度どうするかというわけで、この研究所では、国内、国外に全部データを公開しよう、その後では気象庁に一元化データも入れよう、非常にオープンになされたわけです。そういうことがあって、ちょうど今から 4 年ないし 5 年前だと思ひますが、安芸先生にお会いしたとき、この企画部長の岡田先生とかデータセンターの笠原さんから、とにかく国際的にデータをオープンにするから国際的な考えで研究を遂行する、それから、データに限らずそういう取り扱いをしたい、それにはぜひ安芸先生をグローバルアドバイザーとしてお招きしたいというお話がございまして、そのことを安芸先生に申し上げ、快くお引き受けいただいたわけです。

それは、僕も多分引き受けていただけるだろうと思ひましたのは、安芸先生は、1991 年、南カリフォルニアに社会に貢献するための一つのプロジェクトをお作りになっていたわけです。そういうようなことで安芸さんに快諾をしていただきまして、それから、最初の 2000 年の年には既に安芸先生から地震予知科学の原則というものを教えていただきまして、そのお話は今日、モニタリング

とモデリングの重要性、一緒にやらなければいけない理由、それから、そういうモデルをつくるのは分野の違う人も含めてたくさんのモデルをつくらなきゃいかん、そういうお話がございまして、これから研究を進めていくのに安芸先生のその思いをどのようにして実現しているかと思っておりましたが、最近になりまして——最近というか、ここの皆さんはそんなの当たり前だということだと思えますが、いい成果が出て、たくさんのモデリングをつくれるんじゃないかとか、こんな精度のあるデータが一目で見えるようになったんじゃないかということで、非常に安心しております。

そういう意味で、今日は僕が、これはあるいは皆さんには陳腐かもしれませんが、今こんなデータが得られて、こんな絵が作られて、そして物を考える、モデルをつくる、それには事欠かない、今の若い研究者は寝る暇もないだろうと思うくらいのデータが出ていますから、それを紹介しようと思えます。

これは、先ほど安芸先生から萩原シンポジウムというご紹介がありました。萩原先生が「地震予知と災害」というのに書かれたものを一部取り出してきましたけれども、その上に「インストルメントは自然の窓である」と、レオナルド・ダ・ヴィンチはそういうことを言った。それで先生は、これは中を読んでいただければいいですけども、要するにきちんとデータを得るのが観測であって、いろいろなものから見た自然現象をインプットすることによって全体が見えてくるんだと。しかも何十年の観測の蓄積が必要である。実に先生らしいことを言われております。そういう意味で、我々は観測してそのデータに基づいてモデルをつくる。それが一つの大きな仕事でございまして、そういうことに対して、今日もお話がありました。安芸先生の考えたことに僕らも少し近づいているのではないだろうかということをお示しいたします。

これは昨年だと思えますが、11月12日に、ここの辺ですか、401キロくらいの深発地震が起こったわけです。これは笠原さんのつくった、これは太平洋プレート、こちらがフィリピン海プレートでございまして、深さごとに出してある。赤が一番深いところですが、その一番深いこの辺に起こった地震が日本列島をどのように伝わったか。これはプレートの影響がどのくらいあるのか、それから、関東平野とか釧路原野というのはどのような揺れ方をするのか、そんなようなことが一目瞭然で見られるのでございます。

これは先ほども同じような図を岡田部長さんがお示しになったと思えますから、同じような仕事であります。まず、地震が起こって、左側がバーティカルなコンポーネント、右側が水平なコンポーネントでございまして、今S波が出発して、ほとんど西日本にはフィリピン海プレートの下のマントルで減衰してしまっていて、太平洋プレートのほうは減衰が少のうございまして、それに沿って行くのが……今東北地方を北上していますが、あれは北上山脈のところは太平洋プレートの影響で振幅

が大きくなって、今は八戸平野があるために……。それから北海道へ行きまして、最後が釧路原野の付近で、赤いのは振幅が大きいものでございまして、こういうようなことがわかって、前にメキシコシティで非常に大きな災害がありましたけれども、盆地とか北上だったら北上の川に沿った平地、そういうところが非常に長く揺れているということがこれでわかると思えます。

こういうような仕事は、ほとんど同じところに起こった、9月に宮城県沖に起こった地震でもやられておりました、それは非常に浅い地震でございまして、西日本にも大きな振幅を伝えているような地震波が到達しているわけです。

これは、先ほどのモデルをつくるということにはちょっと外れていますが、地震の発生から経路、こういうものを見てみると、地震工学、強震動の方だったらいろいろ頭に描くものが出てくると思えます。

これは防災技研の関根さんの力作でございまして、許可を得て今日はお見せしようと思えます。これは、細長い直方体といいますか、この鉛直断面図、これの中に入って起こっている、深いところの地震までの鉛直断面図がここに出てくるわけです。これは今、日本列島を横断しながらそれぞれの場所の、これは関東平野は三重にも四重にもなっていることがわかりますけれども、これが名古屋の付近。この辺では非常に立派な二重深発地震面に見えますけれども、場所によっては、このように下面は必要でなくなってくるようなところもあります。

ここになりますと、これは福島付近ですが、二重深発面になってもこの絵で幅が狭くなるということは傾斜が急になっている。プレートの形状、あるいは動態がこういうものでよく見れるわけです。

これが関東平野に入ったところですが、伊豆バーのところ。フィリピン海プレート沈み込みがあります。これは太平洋プレートのほうの境界ですか、海溝軸に沿ってずっと走らせた断面図です。これでおわかりのように、深発地震面といってもなかなか複雑な形をして、あつたりなかつたりするのは、プレートの沈み込みのを助けるための破壊じゃないかと思っております。

この辺はちょうど伊豆バーといいますか、フィリピン海プレートが関東の直下に入ってくる。こちらが駿河湾に……。この辺には変な不連続のものがあるような感じがして、この辺は非常に詳しく調べれば大変いろいろなことがわかってくるんじゃないかと思えます。

この辺になると非常に複雑なことがあるということがよくわかってきて、プレートの沈み込む動態は、先ほどもお話がありましたけれども、内陸のひずみを蓄えるものに対して非常に影響を与えますから、このようなことを頭に描きながら大いにモデリングをたくさんつくる。そういうことに努めていただければ非常にいいと思えますけれども、この関根さんの力作は大変なお仕事だと思えます。

これは気象庁の一元化震源決定の観測分布で、1年ごとにHi-netが増えていくということがありありと見えて、

いろいろなデータを解析するとき観測点配置を非常に気にしなきゃいけないということを、こういうもので頭に入れておく必要があると思います。なぜならば、防災科学技術研究所が1,000点観測しようということを出して実行したんですが、20キロというのは、佐藤康夫先生などがおやりになった観測点配置でどのくらいの精度があるかというのがありまして、それを使いまして、45度くらいのところでやると非常に精度がよくなる。だから、深さ10キロよりも深いところは20キロ以内くらいの精度があるから、M7クラスの地震では、日本列島、十分自信を持ったデータを使えるんだということで20キロにしたんですが、これが2002年のデータです。これは気象庁の一元化のデータです。これだけの観測点でいろいろ調べていることがこれでわかります。

それから、先ほど伊豆バーと申し上げましたけれども、あれは単なる丹沢が衝突したんじゃないで、相当大きい幅を持った陸的な構造ですから、フィリピン海プレートの東のウィングに陸の構造を持ったものが衝突して、関東あるいは駿河湾に沈み込んでいくということでございますが、実は北海道にも同じようなことがあるんだというのがこれです。北海道もこの辺から島があって、こういうふうになってきまして、この辺ではこういう活断層が起こって、昔、この辺にカンラン岩が出てきたというようなことがありまして不思議に思っておりましたが、カンラン岩というのは速度で8キロぐらいですから、そういうことに関して数年前にはここを解析して、クラストが、上に入って、下にはげたとような議論がされて、そのとおりの思いますが、そういうものが出てくるから、この近辺の問題というのはそんなに簡単にプレートが沈み込むなんていうことじゃなくて、特に十勝沖のこの辺のところのプレートの形状というのは大変複雑であって、あまり簡単にモデルをつくることは大変だろうということをお願いいたします。

これはそれぞれ深さ20キロ台ですけれども、こういうようになかなか複雑になっております。これは30キロ台のところなんです。この赤い印がそうですけれども、プレートの形状としては、こういうようなこの線。これは海底の地形を含めてプレートの一つの形状の境だと思えますが、それが実は釧路の付近にもある。こんなようなことでございまして、プレートの問題に関しては相当慎重に話を進めなければだめだと思います。

これは40キロから49.9キロのところ、この辺は全くプレートが違っているんですね。深さの違いがありますから。

東北地方は5キロ間隔にやっていますから、60キロぐらいまで。これが5キロ以浅の地震の分布図です。それから10キロ。10キロになると先ほど長谷川先生がお話したようなこの付近の陸の問題が出てきて、この形状などは覚えておいていただければいいと思います。

この辺になりますと、深さ25キロと30キロの間ところが陸のプレートの衝突で相当抵抗を受けているところから、フィリピン海プレートの、今浅く

衝突していますが、あの辺のことを想像していただければ、太平洋プレートで昔、この付近はそういうことがあったんだということがわかります。

この辺になりますと、ここは先ほどの凹凸がだんだんジェントルになってきて、しばし福島から日本で一番地震活動の高い茨城沖、太平洋プレートが急にここで変形しております。この辺の傾斜、海底面で考えても傾斜がこのように違うわけですね。これがよくわかります。

この辺に来るとフロントが、ここは60キロから65キロですが、きれいになって、2003年に宮城県沖地震がここに起こりましたが、この付近は二重でなくて、途中で普通は地震がないんですけども、ここだけはつながっちゃうというのは、プレートの上面と下面の間に地震があるというのはそこに破壊面があるということで、プレートとしては形状が不思議というか、ほかと違ってることがわかって、ここにこういう膨らみがありますけれども、沈み込むプレートの形状がこの辺は違うのかなと。そうすると先ほど浅い地震がここに起こりましたが、そういうもののひずみ集中にこういうのが影響するかどうかということも関係するかもしれません。

それから、この辺の二重面の距離ですが、福島になりますと非常に狭くなるのは、ここで急に形状が下に向かって高くなっているということを暗示しております。

それから、もう一つは、一番下で本当は出すべきだったですけれども、時間が間に合わなくて、でもこの辺は防災科研で皆さんおやりになっていると思いますが、東北の火山フロントがこれなんです。ここに来ると、赤城山、榛名、浅間というのは急にここで、今までつくってきたものに対して外れますね。外れたのが、これは何と80から85ですが、ここに出るわけなんです。さらにここに前進してきて、これは太平洋プレートの仕業じゃなくて、これはたしかフィリピン海プレートの仕業じゃないかと、そういう風に思っております。

深さ95キロぐらいになると、先ほどの榛名、この辺のところ、太平洋プレートじゃなくて、違ったものの何か破壊が起こっているということがわかります。

先ほどの伊豆バーというのをお話しましたが、伊豆バーとこの絵が丹沢ですが、そこに衝突しただけじゃなくて、大きなウィングとして銭州海嶺がこの辺まで来ておりますから、かなり幅の大きいのが日本列島に衝突していると考えていいと思います。

最近になりますと、9月にここに地震が起こりました。これが銭州海嶺のちょうど突端、一番端で起こったわけです。それから、11月にはここに起こりました。これはやっぱりフィリピン海プレートの駿河湾ですが、ここに来て、このように曲げられてこうやってこちらに行くんですが、そういう非常に特異なところに地震が起こっている。しかも、先ほどの地震はここに起こって、これが9月で、これが11月でございまして、気象庁が1923年から2004年の11月までのこの周辺の地震活動を調べておりますが、この付近にはほとんど地震というのがなくて、余り経験してないところに今回の地震が起こっている

ます。それから、1945年の8月29日にはこの辺で地震が起こっている。というようなことがございまして、いろいろ東海地震や何か言われますが、先ほど安芸先生がモデリングしてモニタリングする、そのモニタリングというのはここに刻々と入れていく必要がある。そして新しいモデルをつくる必要があるだろうという一つの現象ではないかと思っています。

さらに、最近報告がありまして、宮城県沖にも同じ観測点——今、海上保安庁海洋情報部というそうですが、ここに2キロ間隔の四角形で、4点に反射のあれを置いて、音波だと思いますが、ここの位置を調べているんですけども、それが何回も……これは2002年から始まってもう5回もありますけれども、そうすると、こちらが東西成分、こちらが南北成分で、このような動きをしているだろうと。これの変化で、下北を固定した……下北は北米プレートとの間の関係がわかっていますから、そういう結果から、この方向に7.8cm/yの動きがキャッチされている。こういうようなものがだんだんと出てきて、

モデリングに非常に寄与するんじゃないかということが感じられまして、安芸先生のマスターモデル、そういうものをつくっていくのに大いに役に立つのではないかと考えています。

時間を超過して申しわけありませんけれども、これで終わらせていただきます。(拍手)

司会： どうもありがとうございました。閉会の辞ということで質問がもしあれば幾つか受け付けますけれども、よろしいでしょうか。では、高木先生、どうもありがとうございました。

今日は大変すばらしい講演を先生方にしていただきまして、我々としても大変勉強になったと思います。改めまして、今日講演された先生方に対して拍手でもって謝したいと思います。(拍手)

途中不手際があったことをおわび申し上げます。

以上をもちまして今日のシンポジウムは終わらせていただきます。どうもありがとうございました。(拍手)

(原稿受理：2005年8月11日)