

講演①

## 東北地方太平洋沖地震の特徴と今後の課題



瀬瀬 一起 (こうけつ かずき)

東京大学 教授 (損害保険料率算出機構理事、地震災害予測研究会委員)

只今ご紹介いただきました、東京大学地震研究所の瀬瀬と申します。このような格好で大変失礼致します。今回の地震に関しては、私ども科学に携わる者も責任を感じております。少なくとも1年間ぐらいはこういう服装で失礼させて頂くことにしております。

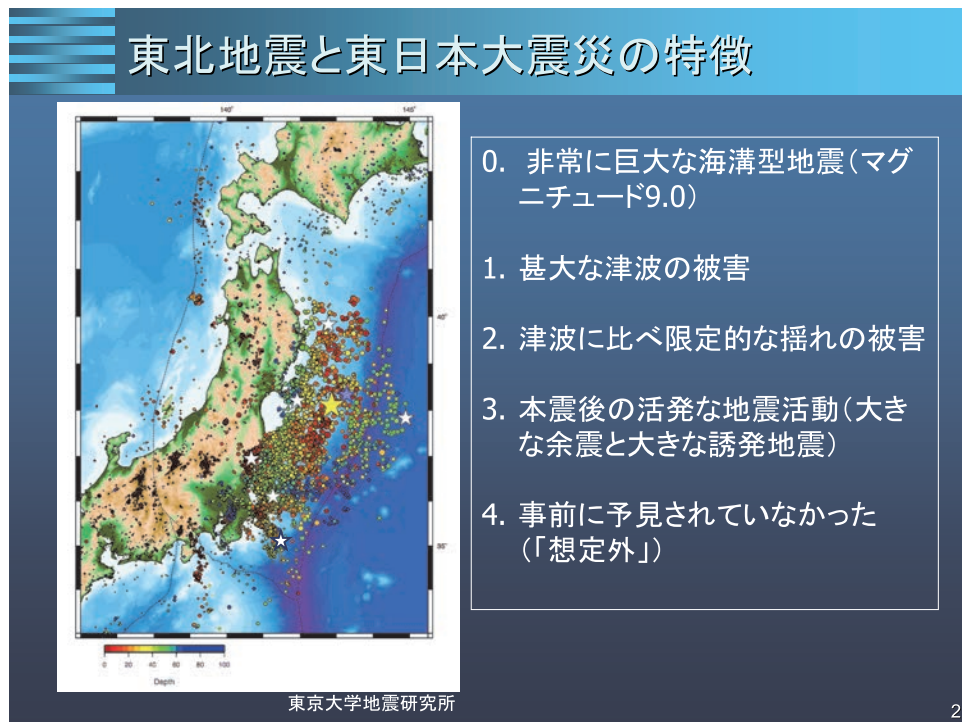


図 1

今日は「東北地方太平洋沖地震の特徴と今後の課題」ということでお話しさせていただきます。今回の地震の名前は「東北地方太平洋沖地震」。私は「東北地震」という略称を好んで使っています。

関東地震、つまり1923年の関東大震災のときの地震と並び称される地震だと思っているからです。「東北地震」は自然現象の名前。それによって起こった自然災害は、内閣が閣議決定して決めた「東日本大震災」という名前です。私のパートでは、その特徴についてお話させていただきます(図1)。

まずは特徴というか、一番ベーシックなことですが、非常に巨大な海溝型地震であることです。気象庁によればマグニチュード9.0。世界的な標準的なマグニチュードを決める機関がアメリカにありますが、そこによれば9.1という値が出されています。

特徴を4点挙げさせていただきます。1つは甚大な津波被害ということです。詳しいお話はこの後の越村先生からあると思いますが、その元になった地震については、私から少し説明させていただきます。2番目、津波に比べると揺れによる被害が限定的ということです。少しポジティブな話になりますが、これも詳しいところは境先生からして頂きますが、その地震の震源に絡む部分をお話させていただきます。3番目は、本震後も非常に活発な地震活動があったことです。活発といっても本震がマグニチュード9と考えれば実は普通なのですが、マグニチュード7や8の本震に比べれば相対的には非常に活発で、大きなマグニチュードの余震であるとか、今回初めて顕在化しましたが、誘発地震という地震が多数起きました。最後4番目に、事前に想定されていなかった、ということです。いわゆる「想定外」で、「想定外と言うな」と多くの方にお叱りを受けますが、やはり科学からは想定外だったとしか言いようがありません。ただ、それは言い訳で言っているわけではなくて、そういう事実、歴史からみてということです。

ちょっと話が逸れますが、原発は想定外だったからあんな事故を起こしてよかったのかということ、私は言えないと思います。あのような危険なものは想定外のことが起こっても何とか対処するように設計するべきだったと思いますが、その前の自然現象の想定、予測に関しては、やはり想定外だったと言わざるを得ないと思っています。

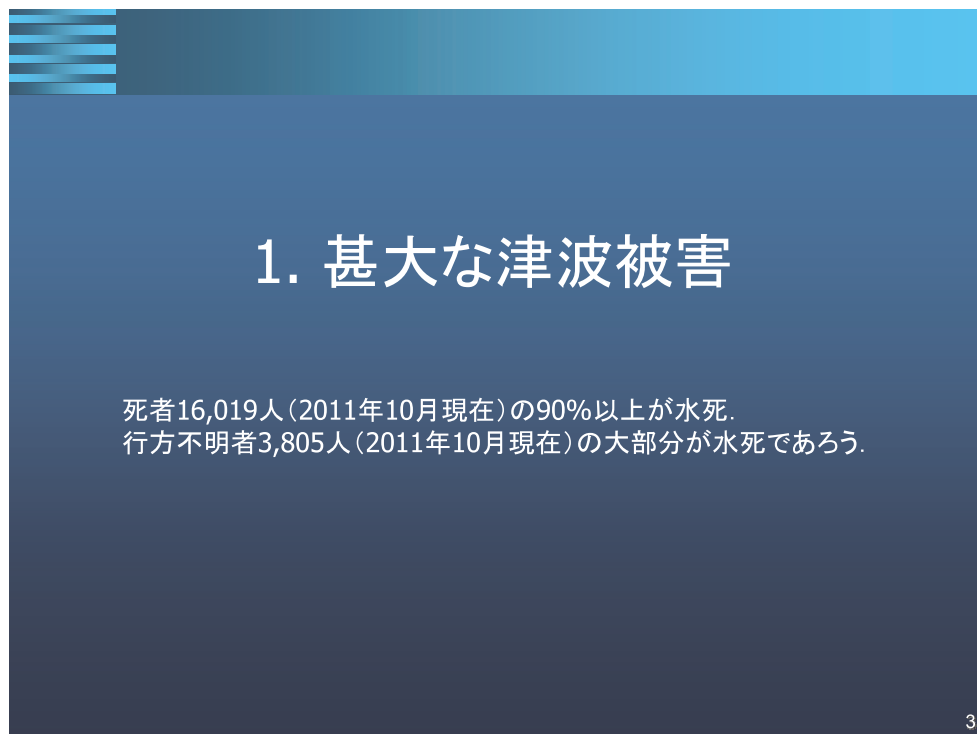
それぞれの特徴について順を追って説明させていただきます。

まず始めに甚大な津波被害についてです(図2)。先月10月現在で、亡くなられた方16,019名の90%以上が水死だと、警察庁が発表しております。行方不明の方3,805人。これも10月現在ですが、大部分水死の方だろうと想像させて頂かざるを得ない。そうするとやはり人的被害という面でも9割以上は津波によって起こったということだと考えられます。

どういうメカニズムで津波が起こるかということ、地震の発生も含めて簡単にご説明します。今われわれの科学では、プレートテクトニクスという考え方、流行の言葉で言うとパラダイムというものの中で、色々な研究をさせて頂いております。地球をプレートテクトニクスで解釈すると、日本列島というのは沈み込み帯という地域に属していて、日本列島の乗っている大陸のプレート、東北地方の場合ですとここは少し説があるのですが、この大陸のプレートの下に太平洋プレートが沈み込むという、地球全体の運動の中にあるということです。その沈み込む太平洋プレートと大陸のプレートが沈み込み口付近でくっついている、固着しているというのが普段の状態です。くっついているにも拘らず、太平洋プレートは年間約8センチ程度、人間のほぼ爪の伸びる早さだと言われていますが、その速さで沈み込んでいますので、それに引きずられて大陸のプレートも一緒に奥のほうに引きずり込まれています。その引きずり込みようをバックスリップと呼びます。地震は断層という非常に

大きな「面の滑り」です。滑りということはスリップです。その状態が起こると地震になります。バックスリップによってくっついている部分、これを固着域と言いますが、そこに歪みがどんどん溜まってきて最終的にこの岩盤の強度まで歪みの蓄積が累積すると、岩盤がくっついていることに耐えられなくなりますので、歪みを解放して地震を起こす。これが地震の発生メカニズムになります。

先ほど少し述べましたが、地震が起きるとくっついていた部分が剥がれて、上と下にずれて動きます。この面に沿って岩盤が滑ることになりますので、それを英語ではスリップと言います。くっついているときは地震のときと反対方向に少しずつ引きずり込まれています。逆向きなのでバックスリップと呼びます。この固着が剥がれて、超巨大地震が起きると、大陸のプレートは、引きずり込まれていた部分が元に戻り、さらに跳ね返ってもっと上まで戻ります。そうすると海底面がそれだけ隆起して、合わせて海水も一緒に隆起する。それが大きな津波になるというメカニズムになっています。



1. 甚大な津波被害

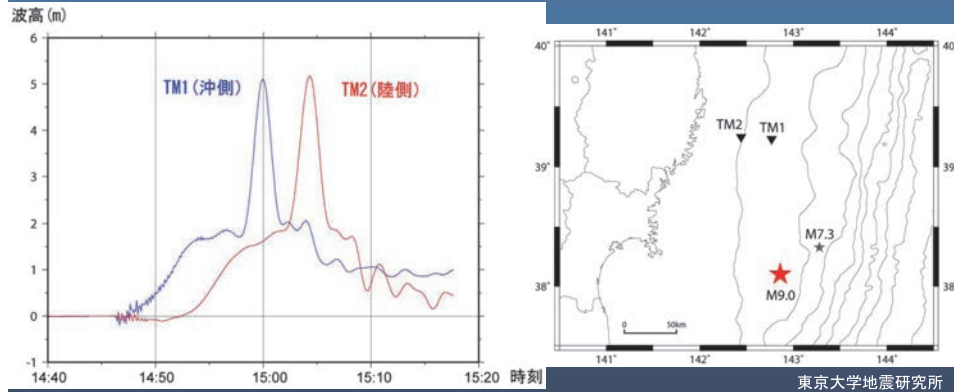
死者16,019人(2011年10月現在)の90%以上が水死.  
行方不明者3,805人(2011年10月現在)の大部分が水死であろう.

3

図 2

## 海底ケーブルシステムで観測された津波

2011/3/11 14:40~15:20



海底水圧計の記録. TM1(海溝寄り)では14時46分頃に地震波(P波)が到達し、その時から徐々に海面が上昇している. 約2m上昇し、約11分後にはさらに約3m急激に上昇し、合計約5m海面が上昇した. 約30km陸寄りに設置されているTM2では、TM1から約4分遅れて同様の海面上昇を記録した.

5

図 3

図 3 は実際に私どもが持っている海底ケーブル観測システムで観測したもので、沖合のほうが TM1、陸側が TM2 のものですが、そこで観測された津波の波形を示しています。地震発生が 14 時 46 分ごろです。最初にチョロチョロという小さい波が見えていますが、これは地震による揺れの海底面の動きを見せています。その後ゆっくり 10 分弱上昇して行って、その後急激に大きい津波が来るという状態を示しています。沖合での波の高さは 5.5m ぐらい、陸地ではリアス式海岸等の地形でそれが大きく増幅されますので、最終的には最大で 40m 弱ぐらいの津波が観測されたということです。陸側のほうが震源よりやや遠いので、少し遅れて来るということです。

地震・津波の翌日に、朝日新聞社の協力を得て、私ども東京大学地震研究所の佐竹健治教授が空撮の写真を撮ってきました(会場では各地の写真を上映)。まず大船渡では、津波の後、火災が発生いたしました。津波は水の災害だから火災は起こらないと思いがちですが、実際は起こるということをこれが示しています。次に陸前高田ですが、私は 11 月のはじめに宮古から気仙沼まで見させて頂きましたが、陸前高田が一番状況が悲惨という気がしました。住民の方が住まわれている平地部分の全部が津波で浸水しておりました。少し高くなっているグラウンドにかなりの方が避難されていて、現在は仮設住宅が建っています。気仙沼でも一箇所だけでなく火災が起きているのが見てとれます。次に原子力発電所があった女川。石巻につきましては、男鹿半島を回りこんで仙台湾側まで被害津波が起きたというのは歴史上ほとんどの人が記憶もしてないし、記録もほとんどないという状況だと私は思っております。有名な仙台空港。福島県の相馬も、ここが津波以前の海岸線で、ここが全部陸地だったと思いますが、水浸しになってしまった。このような状況には、地震による地殻変動で最大 120 センチの沈降が起きて津波被害を助長したということがあります(図 4)。そ

のために水が引かないという状況が長く続いていたわけです。

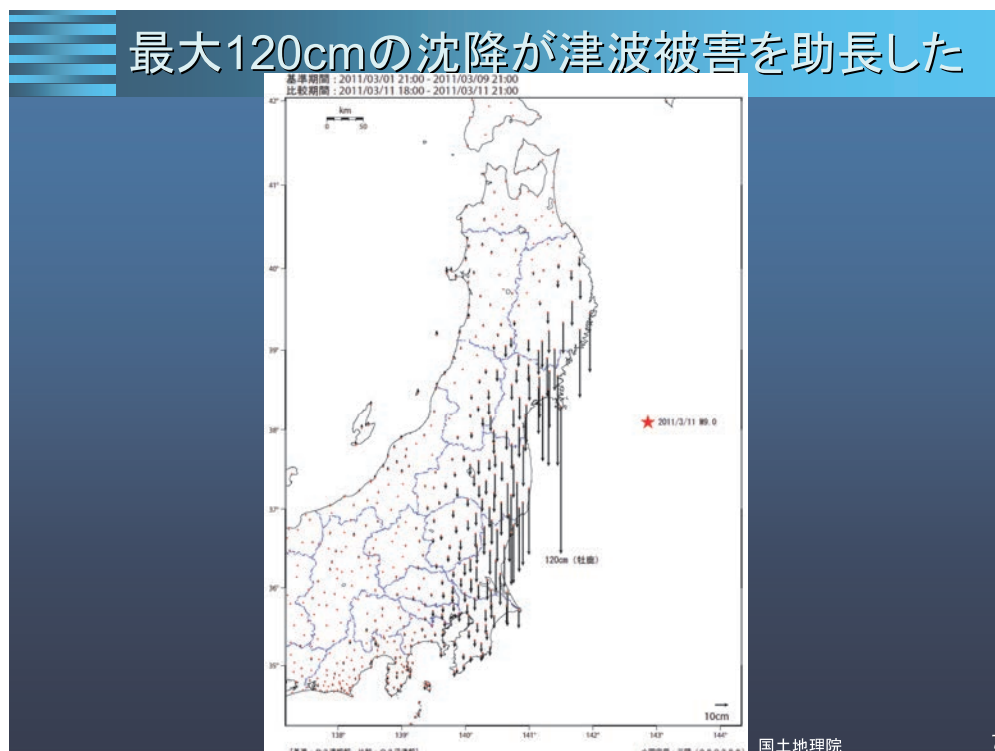


図 4

最後に福島第一原子力発電所を襲う津波と水が来た瞬間の水煙です(会場では動画を上映)。これは NHK で放映された発電所を襲う津波が連続写真で、タンクが埋まってしまうほど、水が来たということです。今回はこの話題と少し外れますので詳しくは述べませんが、基本的には発電所の事故も津波によって非常用電源が停止してしまったこと、揺れで外部電源が入ってこなかったこと。その両者によって全電源を喪失したということが、根本的な原因だと思っています。

2 番目の特徴です。津波に比べて限定的な「揺れ」による被害について。図 5 の最初の 2 行は 1 番目の特徴と同じです。津波がほとんどだから、揺れはそれほどでもない。もう 1 つ事実関係を挙げさせていただきます。負傷者は 6,121 人の方ということです。これは亡くなられた方の約 3 分の 1 で、非常に珍しい。普通の地震の場合は、負傷された方が亡くなられた方の数倍に達することがほとんどです。どうして今回の地震はそうなったかという、津波というのは、逃げ切れた皆さんは健全な状態でいらっしゃるけれども、逃げ遅れると亡くなってしまいます。揺れによる被害では命は助かるが負傷されるという方も多くなりますが、津波による人的被害は生か死かという状況が多いため、結果的にこういう数字になったということです。

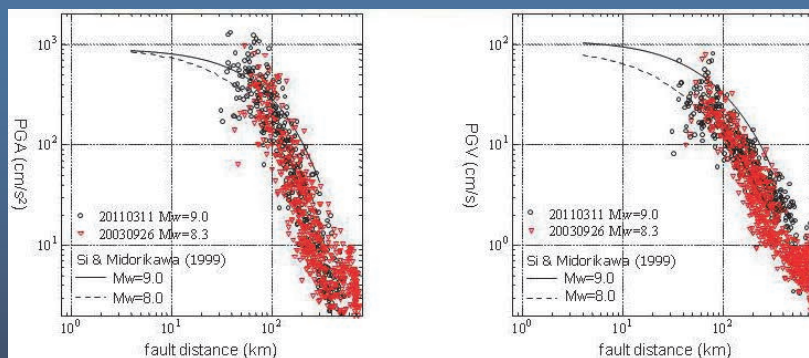
## 2. 津波に比べ限定的な揺れの被害

死者16,019人(2011年10月現在)の90%以上が水死。  
行方不明者3,805人(2011年10月現在)の大部分が水死であろう。  
負傷者6,121人(2011年10月現在)も死者数に比べ少ない。

9

図 5

## 2003年十勝沖地震(Mw 8.3)との比較



最大加速度(PGA)

最大速度(PGV)

揺れはマグニチュード8.3の地震と同じ。

10

図 6

図 6 で今回の地震の特徴を端的に申し上げます。ちょっと専門的になりますが、地震の揺れは、加速度という数値か、速度という数値で表わします。地面が揺れて行ったり来たりして加速度とか速度の値が大きくなったり小さくなったりしますが、一連の揺れの中での最大値をとって、それを最大加速度や最大速度と言います。この図は、それらの値を縦軸に、地震を起こした断層からの最短距離を横軸にプロットしたものです。赤いほうが 2003 年に起きた十勝沖地震。この地震のマグニチュードは 8.3 でした。黒いほうが今回の東北地震の最大加速度、最大速度のデータを表わしています。お分かりになるように、両者ほぼ一致してしまっています。これが何を意味するかというと、今回の地震の揺れはマグニチュード 8.3 の揺れに相当するということです。9.0 で考えなければいけないような非常に強い揺れではなかったということです。それが揺れの被害が限定的だったという原因のひとつを表わしているかもしれません。

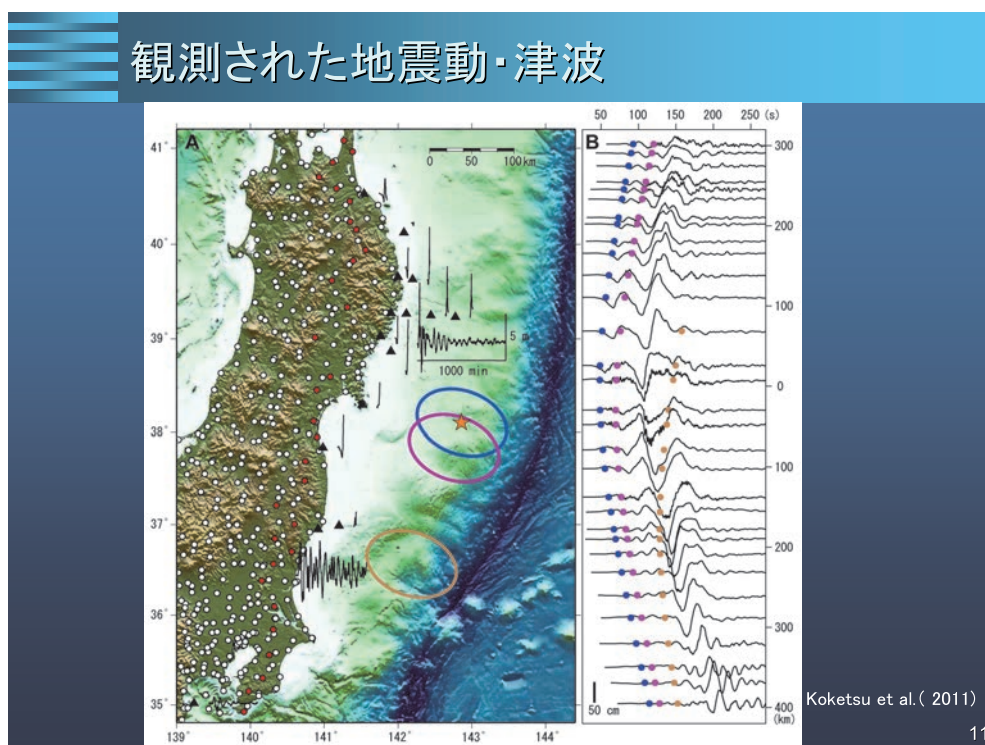


図 7

もうちょっと掘り下げて、科学的にどうしてそういうことが起きるかを少し研究しました。阪神大震災以降、科学者だけでなく、行政にも色々反省点を踏まえていただき、このような地震計の観測網を作って頂きました(図 7)。日本列島上にある点1つ1つに地震計が置かれています。日本列島にはこれほど高密度な地震計による観測網が作られています。そこで色々な、ここでお示したような揺れの記録が取られています。それからカーナビでも使う GPS で、列島の地殻変動を直接測るという観測網も作って頂きました(図 8)。矢印1個1個が GPS 受信機の観測点を表わしています。これらのデータも使うことができます。

## 観測された地殻変動

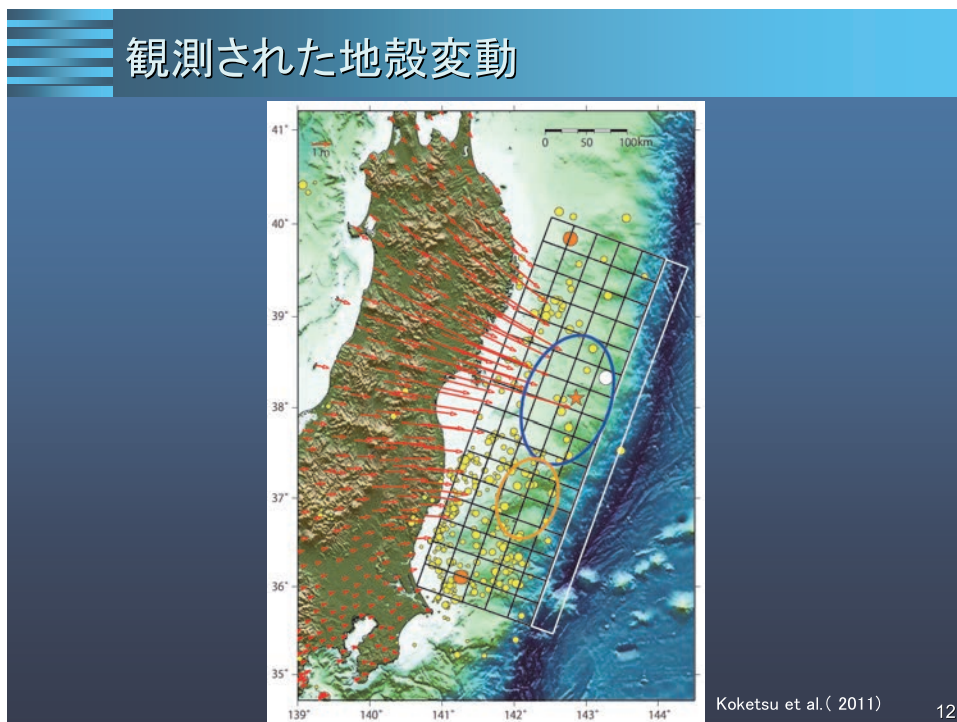


図 8

これらのデータを使って、東北地方太平洋沖地震の断層面上のどこが一番滑ったか、断層の滑りの分布はどのようなものかを逆算することが出来ます。その結果が、図 9 です。

## いろいろなデータの解析から得られた固着域

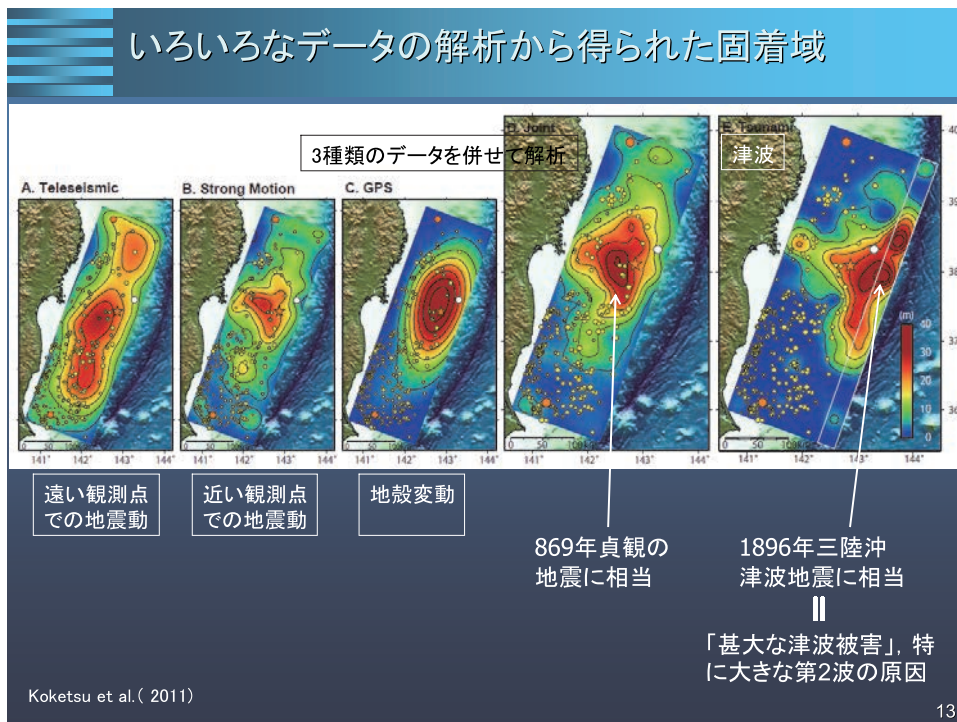


図 9

津波で逆算すると図 9 の一番右の図になります。それ以外の先ほどお見せした観測ネットワーク



で逆算すると図9の右から2番目の図になります。宮城県沖からずっと非常に広い領域で、150キロから 250 キロの領域で非常に大きく滑っている。最大で 40m 近く滑っているという結果になりました。

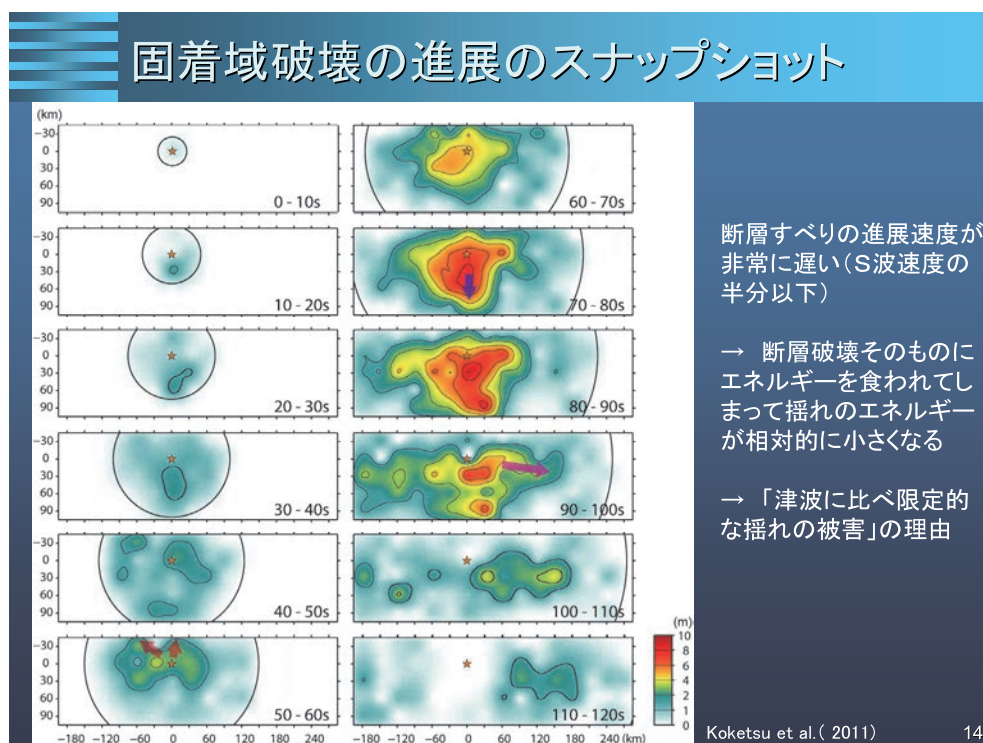
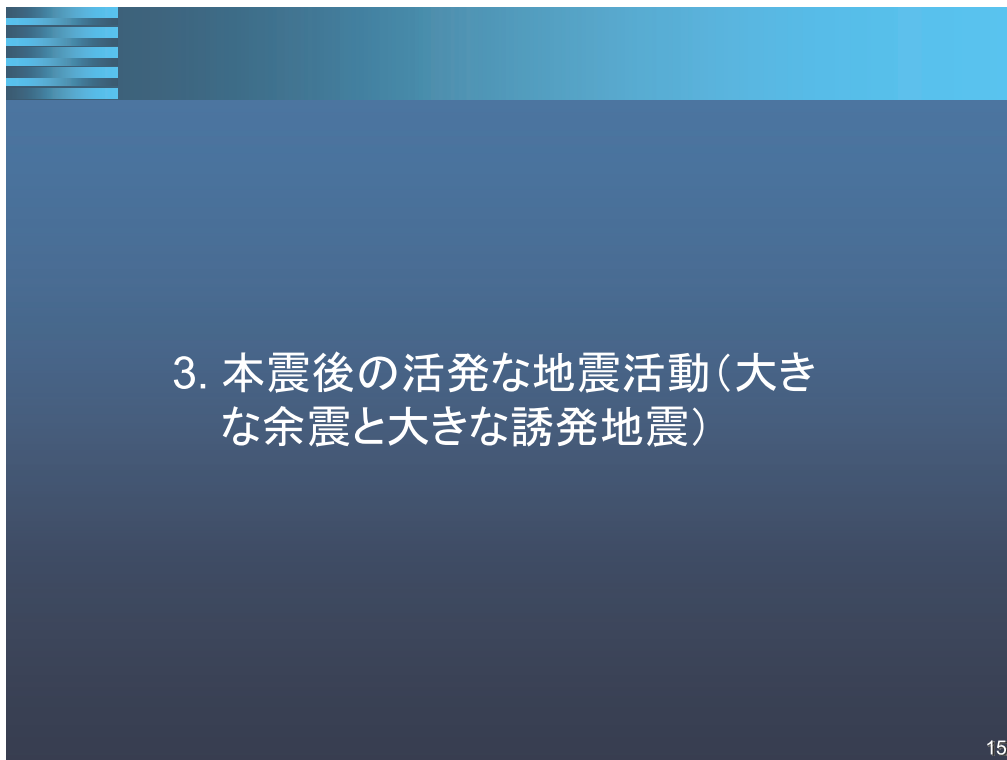


図 10

時間を追って、10 秒ごとに断層の滑りがどのように進展して行くかということ、写真と同じスナップショットで表わしたものが図 10 です。結果だけ申し上げますと、断層滑りの進展速度が非常に遅い。地震波の S 波が伝わる速度の半分以下という結果になりました。そうすると、地震を起こす断層破壊そのものにエネルギーが食われてしまって、その分揺れに回るエネルギーが少なくなるという現象が起きます。それが津波に比べて限定的な揺れの被害となった原因だったのではないかという研究をさせて頂きました。

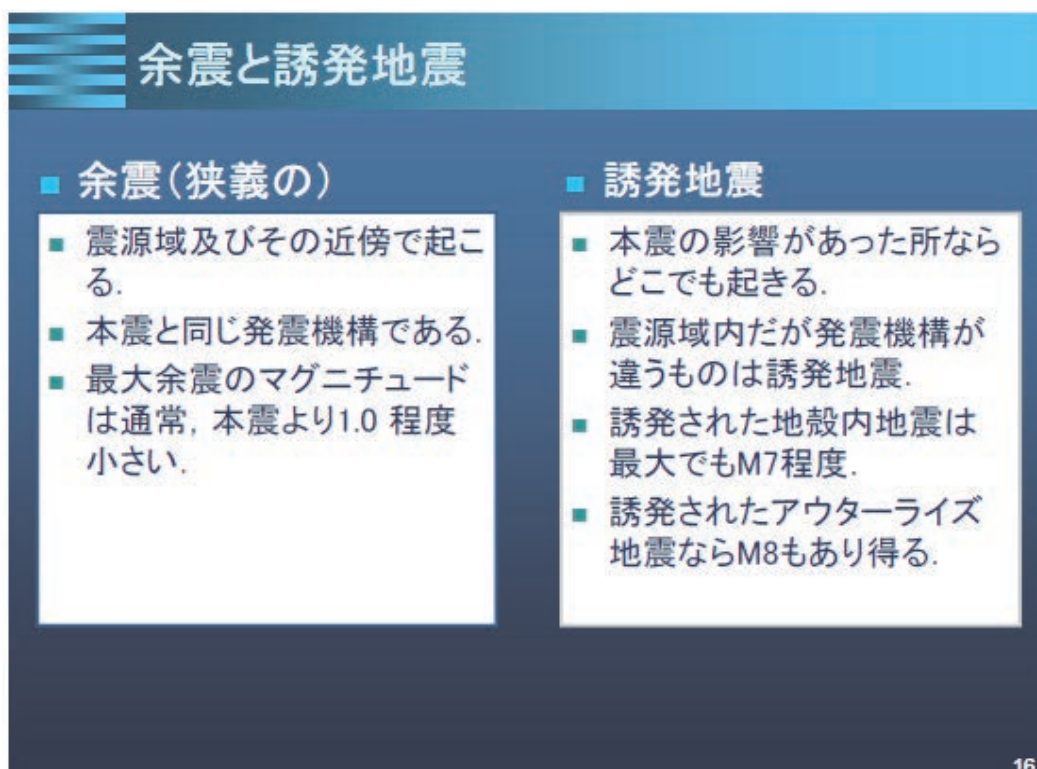
3 番目の特徴、本震後の活発な地震活動について(図 12)。「余震」というのはほとんどの方がご存知だと思いますが、微妙に異なる色々な定義があります。ここでは狭義の定義を申し上げます。震源域およびその近傍で起きる、本震と同じ発震機構の余震というのがそれです。発震機構というのは、どういう断層のどういう滑りで地震が起きたかということを意味します。それが本震と同じようなタイプであるということです。経験的に、最大の余震のマグニチュードは通常、本震より 1.0 程度小さいということが分かっています。「余震」に対し、狭義の余震以外の全ての、本震によって起こった地震を「誘発地震」と言います。そういう定義ですので、本震の影響があったところほどどこでも起きます。今回も長野県まで本震の影響が飛び火して誘発地震が起きました。震源域の中で起こっても発震機構が違くと、私の定義では誘発地震ということになります。



### 3. 本震後の活発な地震活動(大きな余震と大きな誘発地震)

15

図 11



## 余震と誘発地震

### ■ 余震(狭義の)

- 震源域及びその近傍で起こる.
- 本震と同じ発震機構である.
- 最大余震のマグニチュードは通常、本震より1.0程度小さい.

### ■ 誘発地震

- 本震の影響があった所ならどこでも起きる.
- 震源域内だが発震機構が違うものは誘発地震.
- 誘発された地殻内地震は最大でもM7程度.
- 誘発されたアウターライズ地震ならM8もあり得る.

16

図 12

「余震」の場合とは違って、地殻内地震の誘発地震の最大規模は、普段陸で起こっている地殻内

地震の最大規模になります。ですからマグニチュード7程度は起きます。それから海でも誘発地震が起きます。アウターライズと言って、日本海溝よりもっとアメリカ側の場所で、誘発地震が起きました。そういう場合ですと陸の地震の最大規模よりも少し大きい、マグニチュード8クラスの地震も起きる可能性があります。図13は早い段階での余震と誘発地震のプロットです。アウターライズ地震というのは図13の右側にある部分です。

今後、これらの余震・誘発地震がどうなるかですが、日本で初めての規模の地震ということで、日本の経験で申し上げるのは難しいので最近の世界中の超巨大地震から2004年のスマトラ島沖地震を例に引いて言えば(図14)、5年半後にマグニチュード7.5の余震が起きていますので、その程度の可能性は踏まえざるを得ないと思っています。

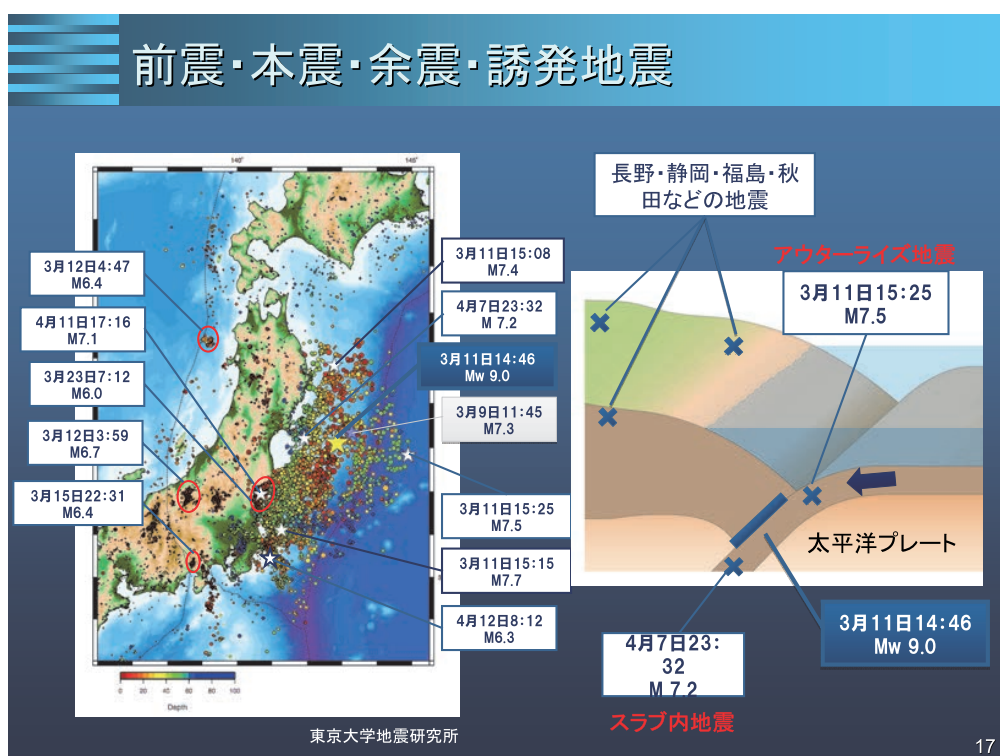
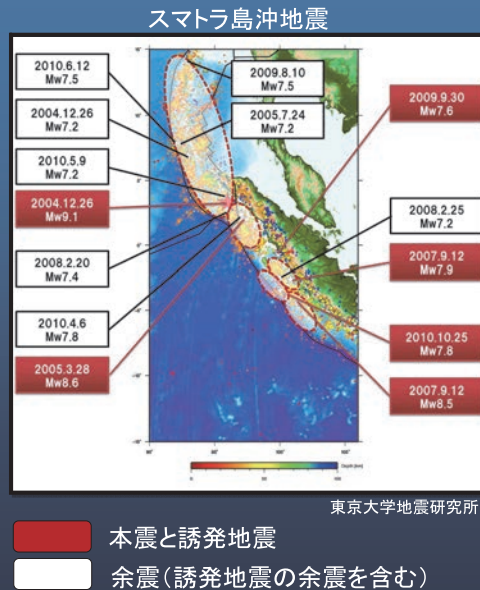


図13

## 余震・誘発地震はいつまで続くのか

- 2004年スマトラ島沖地震の例では、5年半後の2010年6月にM7.5の余震が起きている。
- 安政の東海地震(1854年, M8.4)では、11ヶ月後にM7クラスの最大余震が起きている。
- 大正の関東大震災(1923年, M7.9)では、4か月半後にM7.3の余震が起きている。
- 明治三陸地震(1896年, M8クラス)では、2か月半後に陸羽地震(M7.2)が秋田と山形の県境で起きている。



18

図 14

## 4. 事前に予見されていなかった 「想定外」

19

図 15

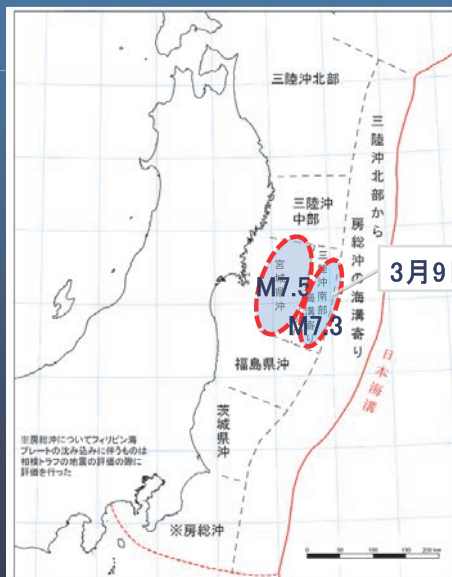
# 海溝型地震の長期評価



地震調査研究推進本部

図 16

# 東日本太平洋側の長期評価



地震調査委員会資料より

		規模	今後30年発生確率
三陸沖から房総沖の海溝寄り	津波地震 (M <sub>t</sub> は津波の高さから求める地震の規模)	M <sub>t</sub> 8.2前後	20%程度 (6%程度)*
	正断層型	8.2前後	4%~7% (1%~2%)*
三陸沖から房総沖にかけての地震	三陸沖北部	8.0前後	0.5%~10%
	固有地震以外のプレート間地震	7.1~7.6	90%程度
	宮城県沖	7.5前後	99%
	三陸沖南部海溝寄り	7.7前後	80%~90%
	福島県沖	7.4前後(複数の地震が続発する)	7%程度以下
	茨城県沖	6.7~7.2	90%程度以上

図 17

最後に4つ目の特徴をお話し、まとめさせていただきます。

地震発生の確率については、ある程度、科学の知見に基づいて長期評価というものが行なわれていました(図16)。細かくて見づらいたと思いますが、地震調査研究推進本部のホームページに行きますとこの図面がダウンロードできますので、是非ご覧になってください。東北地方に対しても、このくらいの規模の、このくらいの地震が何パーセント程度の確率で起こるといふ予測、「想定」が出されています。

実際どういふものかを詳しく見て頂くと、東北地方太平洋沖を点線で示す幾つかの小さい区域に分けて、それぞれの領域で独立にこのくらいの規模の地震をこのくらいの確率で起こすという予測が出ております(図17)。一番顕著なのは、宮城県沖で起こるマグニチュード7.5前後の地震で、今後30年以内に起こる確率は99%と考えられております。それより少し沖合の三陸沖南部海溝寄りでは、マグニチュード7.7程度が80~90%くらいの発生確率だといふ予測が公表されておりました。

これらの地震の規模を単純に足し算してもマグニチュード8.3位にしかありませんが、実際に起きたのは黄色で示しましたこんな広い領域のマグニチュード9.0という地震だったわけで、これをもって科学の想定外と、私は申し上げております(図18)。

時間が少なくなりましたので、図19の「想定」といふ言葉の意味についての話は端折らせて頂きますが、お話ししたように、地震調査委員会から国民へ向け、地震防災の意識向上とそれに基づく効果的な対策を進めるための基礎資料として活用されることを目的として、長期評価の想定に基づいて「全国地震動予測地図」が作られ、公表されておりました。しかしご覧頂いたように東北地方太平洋沖地震で大変な揺れが起こった所は、仙台付近を除くと比較的低い確率しか示しておりました。ですので、この地図をもってしても「想定外」と言わざるを得ません。

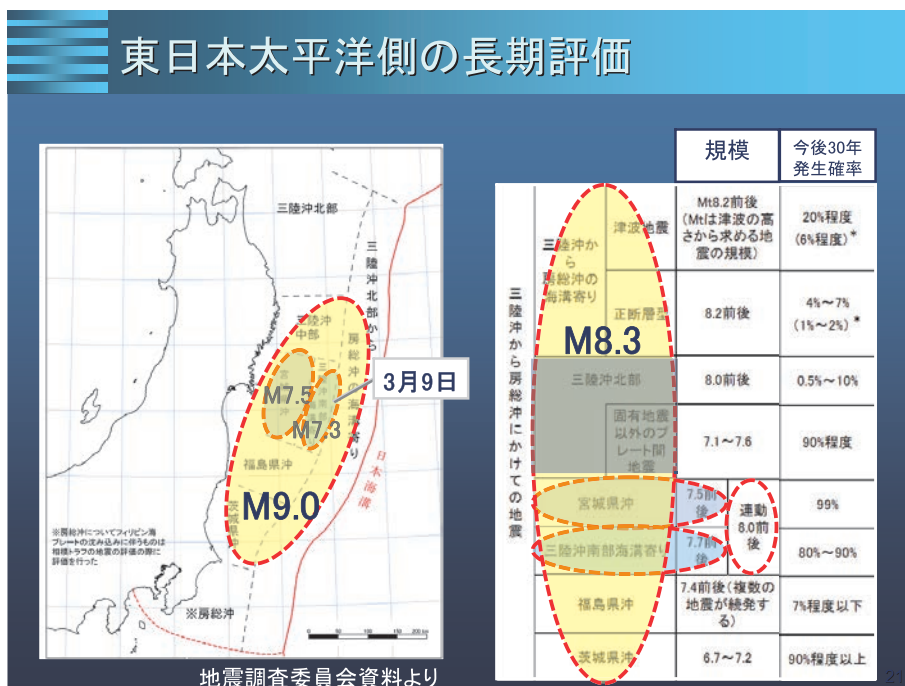
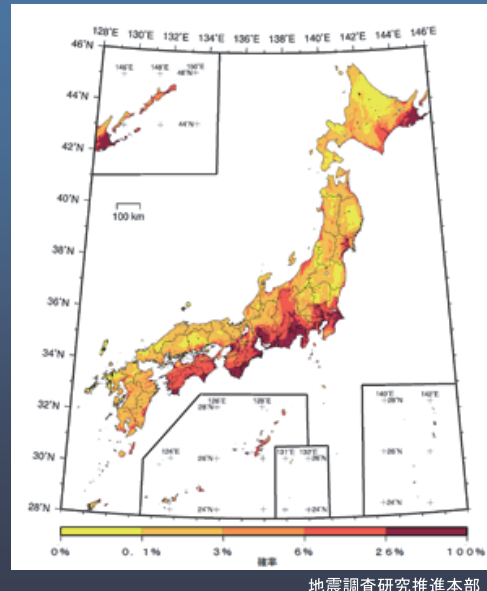


図18

## 「想定」の意味

- 広辞苑には「ある一定の情況や条件を仮に思い描くこと」としか書かれていない。
- しかし、政府の公表する地震の想定の場合には「将来の地震を予測して、起こる場所と規模を設定すること」ぐらいの重い意味があるだろう。
- 「地震予知の科学」がいうように科学的根拠があるものとしたら、筆者を含めた地震の研究者コミュニティにとってはさらに重い意味がある。
- 長期評価の想定に基づいて「全国地震動予測地図」が作られて、地震調査委員会から「国民の地震防災への意識向上とそれに基づく効果的な対策を進めるための基礎資料として活用されることを」目的として公開されている。



22

図 19

それから貞観(じょうがん)の地震(貞観 11 年に、陸奥国東方の海底を震源として発生した巨大地震)というのを多くの方がご存知だと思いますが、純粋な科学としてだんだん研究が進んできて、それをまさに地震調査委員会で 2011 年 4 月の委員会で取り上げて検討しようとしていました。これは本当に事実です。原子力発電所の耐震安全性の審査をそれに入れようとしていたことも事実なのですが、間に合わなかったということです。でも間に合ったとしても、それで想定外でなかったかどうかということを考えますと、最新の研究でもこの領域を震源域とした地震はマグニチュード 8.4 が想定されていました。ですからこれを想定に含めたとしても、残念ながら依然として想定外だったろうと私は考えています。

私どもの大学の理学部にゲラー先生という方がいらっしゃいます。「ネイチャー」という、論文が載れば科学者として非常に高い業績になる雑誌があります。論文ではありませんが、そこにコメントを書かれておまして、先ほど申し上げた地震動予測地図において、ここ数年の被害地震は「確率の低い」黄色の部分で起きているということをこのように図面で示した(会場では図面を上映)上で、日本の地震学は間違っているというふうに仰いました。これは事実です。

ですが、では日本の地震学はどういうことを考えていたかということ、ひとつにアスペリティモデルというのがありまして、日本と同じような沈み込み帯を幾つかの地域特性に分けて研究していました。チリ海岸のタイプですと今回のような超巨大地震が割り合い頻繁に起きます。アリューシャン列島ですともう少し小さいサイズの地震も起きるし、それらが連動して超巨大地震も起こると考えられていました。千島列島のタイプですと、1 個 1 個が独立したマグニチュード 7 か 8 ぐらいの地震しか起き

ないと考えられており、マリアナ諸島のタイプでは全く巨大地震は起きないと考えられていました。日本海溝付近は3番目の千島列島タイプに当たるだろうと多くの研究者が考えていました。ですので、今回の地震は事前に想定することが出来なかったということです。

言ってみれば、千島列島型に対するアスペリティモデルの知見は精度が乏しく、超巨大地震が起こってしまったということになります。

ゲラー先生が仰っている事実は正しいのですが、それをどう解釈するか。私の解釈はこうです。複雑系という数学・物理の用語がありますが、地震という現象は非常に複雑系です。しかも実験が出来ません。それから地震は発生頻度が低いのでデータの蓄積も非常に遅い。ある意味三重苦という状態にあります。そのような中で科学が予測する「予測の精度」は実は非常に低いものです。残念ながら私は予測を直接的に防災に役立てることは現状の科学のレベルでは非常に難しいと考えています。役に立つのは緊急地震速報や津波警報などのリアルタイム情報であろうというふうにまとめさせて頂きたいと思っています。

ゲラー先生は「地震学が間違っている」と仰いましたが、そうではなくて、基本的にはやり方や予測の方法もそれなりの正しさに基づいてやっていたわけですが、それによって出てくる「精度」が予測に役立つほどなかったということです。先ほど見て頂いたように「全国地震動予測地図」では確かに黄色く塗られて確率が低いと予測されていた場所で地震が発生していますが、発生する確率がゼロだと言っているわけではありません。ゼロではないから何か起こる可能性はあるわけで、それが最近起こるかどうかの予測の精度が無かったということです。

科学から言えることは、とりあえず今回の東北地震は、今まで起きた中では最大の地震だということです。例えば非常に重要な構造物ならば、日本国内で起こった最大のものに備えて頂くというのが、科学から言える最低限のことだろうと私は思います。それ以上の責任を持ってくれと言うのは科学の限界を超えています。政治や行政、あるいは国民が直接、国民投票等を通して判断して頂くということが重要だと私は考えています。最後になりますが、こういう記事が産経新聞に出ました(図20)。



**【東日本大震災】岩手・釜石の死者・不明65%が「津波想定区域外」 ハザードマップ、避難に逆効果か**

2011.6.21 14:28

東日本大震災で甚大な被害を受けた岩手県釜石市内で、死者・行方不明者のうち65%がハザードマップ(被害予想図)の浸水想定区域外に住んでいたことが21日、群馬大学の片田敏孝教授(災害社会工学)と釜石市の調査で分かった。犠牲者の住所地と被害との関連が分かったのは初めて。近い将来、高い確率で発生が予想される東海、東南海、南海地震の防災計画についても影響を与えそうだ。片田教授は「住民への防災情報の提供方法について、抜本的な見直しが必要」と訴えている。

調査の対象となったのは、これまで釜石市が確認した市内居住の死者・行方不明者1032人のうち、番地まで住所が確認された868人。

浸水想定区域外での死者・行方不明者を釜石市内の4つの湾別に分類した。大槌湾に面した輪住居(うのすまい)町などは419人(想定区域内、66人)と最も多く、死者の8割以上が想定区域外だった。次いで、釜石湾が115人(同205人)、唐丹(とうに)湾は12人(同9人)、両石(りょういし)湾は19人(同23人)。浸水想定区域外の死者・行方不明者は計565人で65・1%を占めた。

浸水想定区域については、過去の地震や津波のデータから国と県が算出した被害想定にもとづき、平成17年に釜石市がハザードマップとして各戸に配布している。

片田教授は「ハザードマップで浸水想定の外だった場合、避難行動に抑制をかけた可能性が非常に高い」と分析している。

27

図 20

科学の成果としてハザードマップというものが作られていますし、それに基づいて津波のときの避難場所も作られます。ここら辺まで津波が来るとハザードマップが言っていれば、それを多少でも超えていれば安心するというのが、普通の住民の方の考え方だと思います。今回、そのような避難をされた方、実際に避難場所において津波に遭われて亡くなられた方が非常にたくさんいます。釜石ではそれが 65%にも達するという群馬大学の片田先生のご研究ですが、それを考えれば科学の責任は非常に重いと、反省している次第です。以上です。

