

◎ 第 36 回技術予測シンポジウム講演録

日本列島の地震動の最新研究と構造物に与える影響 ～早急に対応すべき原子力施設の耐震安全性の課題～

京都大学名誉教授・愛知工業大学客員教授

入倉 孝次郎

1. 日本の地震学の歩み

まず最初に日本の地震学がどのようなかたちで発展してきたかお話ししたい。日本の地震学は非常に長い歴史を持っており、その中でも地震学会は 100 年以上の歴史を持ち、世界で最も古い学会の 1 つである。地震学とそれを応用した地震工学の研究は世界をリードしてきた。1995 年に非常に大きな災害、阪神淡路大震災が起こったが、これ以前には 1923 年に関東大震災があり、もうこれ以上の大震災は起きないだろうということで大震災と言えば関東大震災のこととされていた。

その証拠に地震防災を考える上で最も重要な強震動の研究が軽んじられていた。強震動地震学というのは地震学の中でもマイナーな研究で、地震が起きたらどのような揺れが生じ、その揺れが構造物にどう影響するかという研究を行うものである。強震動の研究者は日本できわめて少ない。

関東大震災以降、日本の地震学の研究をリードしてきたのはピュアなサイスモロジー（純粋地震学）、その中でも地震予知という研究、これはサイエンティフィックに地震学を研究する者が大きな予算を取るために考え出したことである。地震予知研究が防災に役立つという考えで、地震予知研究というものが日本の地震学をリードすることになった。

日本の地震予知研究はその後現在まで 40 年以上も歴史があるわけだが、途中から予知事業と結びついた。予知事業は予知研究が実用段階に入ったという意味で使われたのではないと思う。その意味で地震予知が進んでいるから突

然地震がやってくることはないだろうと幻想を与える状況があったのではないかと思う。それが阪神淡路大震災までの日本の地震学に対する国民の認識だった。もちろん地震学の研究者の中でそういうことを信じている人はほとんどいないと思うが、少なくとも国民と地震学の専門家との間に大きなギャップがあった。

もう 1 つ重要な点は、地震学だけでなく、地震工学の研究者にも大きな問題があった。関東大震災以降、日本では大きな被害地震はほとんど起きなかったが、実はマグニチュード 8 クラスの地震は起こっていた。2003 年の十勝沖地震もその 1 つだが、それ以外にもマグニチュード 7 クラスの地震は 10 年に 1 度ぐらいの割合で起きていたが、幸いなことに大きな災害には至らなかった。例えば戦後一番大きな地震は、1948 年の福井震災と言われているもので、4000 人以上の方が亡くなっている。それは戦後の混乱期、日本が経済的にも疲弊していて、建物なども非常に弱い。そういうところを襲ったので 4000 人以上の方が亡くなったが、それはある意味で特殊なものと考えられていた。

その後の日本の経済発展から考えたら、そのような構造物はもう残っていないので、大きな地震が来ても、大勢の方が亡くなるような大災害にはならないだろうと考えられていた。福井地震の次に大きな被害が起こったのは日本海中部地震である。このときには津波で 100 人ぐらいの方が亡くなっているが、建物が壊れて亡くなった方というのはほとんどいなかった。その後、1978 年の宮城沖地震では典型的な災害の例として、ブロック塀が倒れて、近くを歩いていた人がブロックの下敷きになって亡くなっ

たことがあげられる。これは非常に不幸なことで、今から 30 年ほど前、ブロックというのはどこでも手軽に使われていた。いわゆる日曜大工でブロック塀を積んだりすることが、地方などではポピュラーに行われていた。そのため日本中至るところにほとんど耐震のないブロック塀があった。それでいくつかの地震の経験から、ブロック塀は耐震性が弱いためあまり大きくない揺れでも崩れてしまうことがわかった。

要するに 1995 年兵庫県南部地震の前には木造家屋や鉄筋コンクリート構造物が崩壊することは想像もつかないと、当時の地震工学の技術者は考えていた。それほど日本の技術は発達していると思っていた。

2. 1995 年兵庫県南部地震の衝撃とその教訓

ところが阪神淡路大震災が起こってみるとそうではなかった。図 1 に示すように 6000 人以上の方が亡くなった。それまで建築や土木の先生方が言っていた、日本の木造建築は地震に強いという学説、私も大学時代はそう聞かされていたが、実はそうではなかった。木造といえどもいくらでも壊れることがわかったのである。

地震のあと、どうして震災の帯が生じたかはいろいろな説があったが、震災の帯の主要な建物は木造だったので、たまたま木造があったから帯ができたのだという意見を言われる方もおられた。実際はそれが主要な原因ではなくて、あとで少し説明するが、やはり揺れが大きいところで大きな被害が起こっているが、そのとこ

ろに木造があり、そうした印象を与えた。

やはり大きな災害になった理由は複合災害で、地震が起こり、揺れのあと火災や山崩れなど、いろいろなことが重なった。通信や交通が混乱して救助が間に合わない。そういうことが連鎖的にいろいろ起こり複合災害となった。

この 1995 年の兵庫県南部地震（阪神淡路大震災）はその後の日本の災害に対する考え方を大きく変えたと思う。地震に関して言えば、それまで地震予知を中心にくつもの委員会があり、その中心的な役割を果たしていたのが、地震予知連絡会であった。しかしこの地震をきっかけに新たに地震調査研究推進本部が設置された。発足当初は科学技術庁が主管庁だったが、関係ある各省庁が関係するというかたちを取り、ある意味では地震調査研究は挙国体制となっている。

またそれまでは地震予知を中心とした考え方だったので、大地震が起こりそうな地域を指定してそこだけを中心に観測していたが、予知は正確にできないのならば日本全国をカバーする観測態勢が必要であるということで、地震調査委員会が基盤的観測網を作った。これによって日本全国を一様に観測できるようになった。

その基盤的観測の 1 つは GPS である。ご存知のように GPS は今はナビゲータとして使われていて、位置情報、つまり自動車なら自動車の動く位置を知らせるものだが、それがわかることは日本各地域の動きがわかる。もちろん自動車のようにすぐに動くわけではなく、非常に小さな動きではあるが地殻変動がわかるようになった。

Hi-net は高感度の地震観測網だが、これほど密な観測網は海外ではほとんどない。どんなに小さな地震でも地震が起こればどこで起こったかわかる。現在、気象庁と防災科学技術研究所が開発した緊急地震観測網などにも使われている。

それ以外に重要なのは、Kit-net、K-net などの強震動の観測網である。地震のときに構造物に影響をもたらす強震動は震源に近いところに集中して生じる。大きな強震動のところに被害が生じるが、阪神淡路大震災が起こる前まではそうした観測は軽視されてきた。なぜならば地震予知さえできれば被害は防げるのだから、地



図1 阪神・淡路大震災の被害状況

震が起きた後、強震動がどのような記録であったかがわかって後祭り、お金をかける必要はないと考えられていた。しかしこれは極めて誤った考え方である。阪神淡路大震災のとき初めて、被害が起きた場所でどのような揺れであったか記録がとれた。これは政府が行ったのではなく、民間ベースで行われた強震観測がほとんどで、それがなければ強震動記録は得られなかった。

構造物が揺れて被害が出るが、揺れた地点での強震動はこれまでまったく記録されておらず、どのような揺れが構造物に被害を与えるのかわからなかった。それまで地震工学の研究者たちはどうやっていたかというと、国内外の地震のときの諸外国の被害状況の調査を行い、その被害から揺れがどれくらいだったかを推定していたのである。ある意味では揺れと被害が自己完結してしまっている。被害の大きさから地震の大きさを予測して、それに合わせて設計していたのである。これでは揺れと被害の関係が正しかばいいが、そうでなければ正しく設計されたとはいえないことになる。

例をあげると、関東大震災のときの被害状況からその揺れは 300 ガル程度だったと仮定する。したがって、300 ガルの揺れに耐えるようにすれば関東大震災のようなことは 2 度と起こらないという設計をしていたのである。しかしその 300 ガルという数字が正しいかどうかは被害状況から適当に決めたものであるから、実態とはまったく関係ないものだった。それが極めて問題であった。そういう考え方が阪神淡路大震災まで残っていて、そういう問題があること自体が地震工学の世界で十分に議論されなかったことに問題があったと私は思っている。

それで阪神淡路大震災を受けて、今私が申し上げたようなことについて、いろいろな方が基本的に解決すべき課題として取り組んだ。それにより地震学、地震工学が発展できたし、単に予測だけではなく地震の震源のメカニズムとはどういうものか、破壊的な強震動が出るのはどうしてか、そうした破壊的な強震動に耐える耐震設計の必要性がわかるようになった。

阪神淡路大震災で阪神高速道路が倒れたのは非常に象徴的であるように、この地震で多くの方の尊い命が亡くなるという大きな被害をもた

らした。この地震の原因となったものは活断層である。地表に見える活断層は震源そのものではなく、震源はその下にあるわけで、地震を引き起こした断層の一部が野島断層である。現在この場所は北淡震災記念公園になっていて、野島断層が顕著に見られる。

この野島断層は淡路島にあるが、淡路島側はこうした断層が地表で見えているが、神戸側では見えていない。

図 2 は神戸側の地図である。神戸に行かれた方はすぐに気が付くが、六甲断層が神戸のいわば壁のようになって走っている。それが断層地形であると以前から知られていたし、断層地形は昔そこで地震が起こった地形だから、神戸の街はいわば地震とともに発展してきた街とも言える。しかし、阪神淡路大震災の前にはそういうことは必ずしも都市計画の中でも考慮されていなかった。

図 2 は地震の直後に発表された地図だが、走っている線がもともとわかっていた活断層。ここに丸が付いているのが地震のあとに起こった余震分布である。そして斜線が入った領域が震災の帯で、非常に被害の集中した地域だった。この震災の帯をめぐっては、地震直後に様々な論争が行われた。論争の 1 つは、ある地質学者が言い出したことで、被害が大きかった場所の下に知られざる活断層があるのではないかと、である。被害がこんなに大きいんだから実際の震源断層は震災の帯の下にあるはずだという説である。

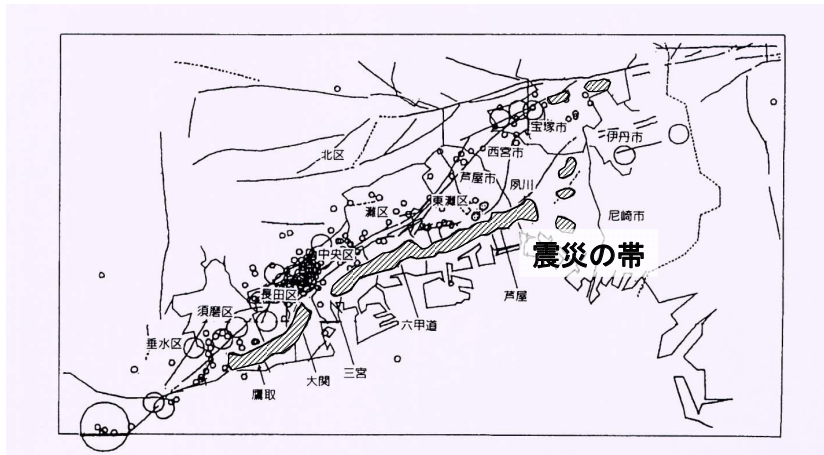
しかしそれまでの研究で既にわかっていたことは、震源断層面と余震が起こる場所はほとんど一致しているということである。つまり震源断層面がどこにあるかを知るのは余震分布が最も信頼できる情報と考えられる。この図を見ると既知の活断層に沿って余震が拵がっているようで、ここに出ている余震分布と震災の帯は対応していない。

これまでは被害が出たらその下に震源となった断層がなくてはいけない、と考えられていたが、この地震では余震の分布と活断層分布が独立の情報として得られたので、より詳しい議論が可能となった。

要するに地震の被害が出たらそこに断層がある。だから震源断層というのは被害のあった場

兵庫県南部地震の教訓

震災の帯：震源断層直上ではなく、震源断層から1~2km離れたところに被害が集中した。



兵庫県南部地震に対する余震分布と震度7の領域。

図中の○印は、余震分布。余震は、一般に本震の震源域およびその延長域に沿って発生する。この地震の余震はほぼ北東-南西方向に直線上に分布し、その方向は既にこれまで知られていた六甲断層系にそっています。しかしながら、被害の集中した震度7の領域(斜線)は、断層系から1~2km離れて、带状に神戸、芦屋、西宮市にいたる範囲に広がっている。(入倉、1995に加筆)

図2 兵庫県南部地震の教訓

所に置けばいいというのは、科学的に誤った考えである。地震が起こることと被害が出ることは別の現象であり、地震によって大きな揺れが生じ、その揺れが構造物を破壊させるので、構造物が破壊したところに活断層があるというわけではない。しかし、それまではそうした安易な考え方が通っていた。

この阪神淡路大震災のときには、地震のあと、どこに余震が起こるという詳細な調査が行われたし、また、被害分布がどうであったかも調査し詳しい分析が行われた。

それで、神戸の街には六甲断層があり、六甲断層は主として横ずれだが、横ずれは縦ずれを伴う。そういう意味で山側が常に上がる。そこに水が来て、水によって堆積作用が起こる。だから山のすぐそばから平地ができる。これは地震の良い点である。断層で持ち上げられると片方が下がり、下がったところに水が来て、そして堆積して、そこは非常に豊かな堆積層になり、土ができ、そこに人が住む。それが神戸の街で

あるし、非常にわかりにくいのが東京の周辺部でもそのようになっている。関西で言えば大阪平野はまさにそれである。要するに周りを活断層に囲まれ、地震によって下がったところに水が堆積作用を起こして豊かな土を作り、平らなところは人が住みやすいので人口が集中する。地震は、悪いことだけではなく、新たな文明を生み出すという良い面もある。

ではなぜ震災の帯が起こったかは、いろいろなシミュレーションからわかってきている。基盤を通過して早く地表に到達した波が二次的な波(表面波)に変換され、堆積層を上がってきた波(実体波)と重なり合って大振幅の地震動が形成されたため、堆積層と岩盤の境にある断層から少し離れたところに被害が集中する。

このようにこの阪神淡路大震災によって非常に大きな研究成果を上げた。最も重要な成果の1つが、地震調査研究推進本部が地震の直後にできて、総合基本施策を決め、その中で地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進につい

て総合的・基本的施策を出していることである。その中でいろいろなことをしているが、先に述べたように 1 つは GPS による観測で、これも地震の前はほとんどなかったものが地震のあとに 1000 点ぐらいの GPS による観測点が置かれた。まだまだ十分とは言えないが、GPS による観測点の位置は常に観測している。それを 1 年後のものと組み合わせると地面が 1 年間にどのように動いたかがわかる。

もう 1 つは強震観測で、地震のときにどこがどれくらい揺れるかを測定するものだが、1995 年兵庫県南部地震の前は気象庁が震度を決めるために置いていたものだけでなく全国に約 150 点だった。しかしこれでは全然足りなかったため、以前は大きな地震が起こっても被害が出た地域ではどの程度の動きがあったかわからなかった。その後、強震観測網が全国に、これは気象庁だけでなく、いろいろなものを入れて 3500 点。さらに防災科学研究所が 1800 点置いているので、合わせると 5000 点を超える強震計が置かれている（図 3）。

この観測点が全国で 1800 ぐらいでは間隔はせいぜい 20 キロぐらいである。地震発生時に最も被害が出るのは震源断層から 5～10 キロぐらいまでの範囲である。だから 20 キロでは足りないということである。これをいろいろなかたちの観測網を合わせると全国で約 5000 点で補間しているがまだ十分とはいえない。

日本の被害対策を講じるためには、こうした観測を行うと同時に、地震の揺れに耐えられる建物なり都市を造るにはどうしたらいいかを考えていかなければいけない。それには地震動予測が必要になってくる。

3. 全国を概観した地震動予測地図

地震調査研究推進本部が中心になって、地震動予測地図を作るプロジェクトがスタートした。その地図は 2 種類あって、1 つは確率論的地震動予測地図、もう 1 つが震源断層を特定した地震動予測地図である。

この地震動を予測するために、まず長期評価を行う。例えば活断層の調査をして、次に動く

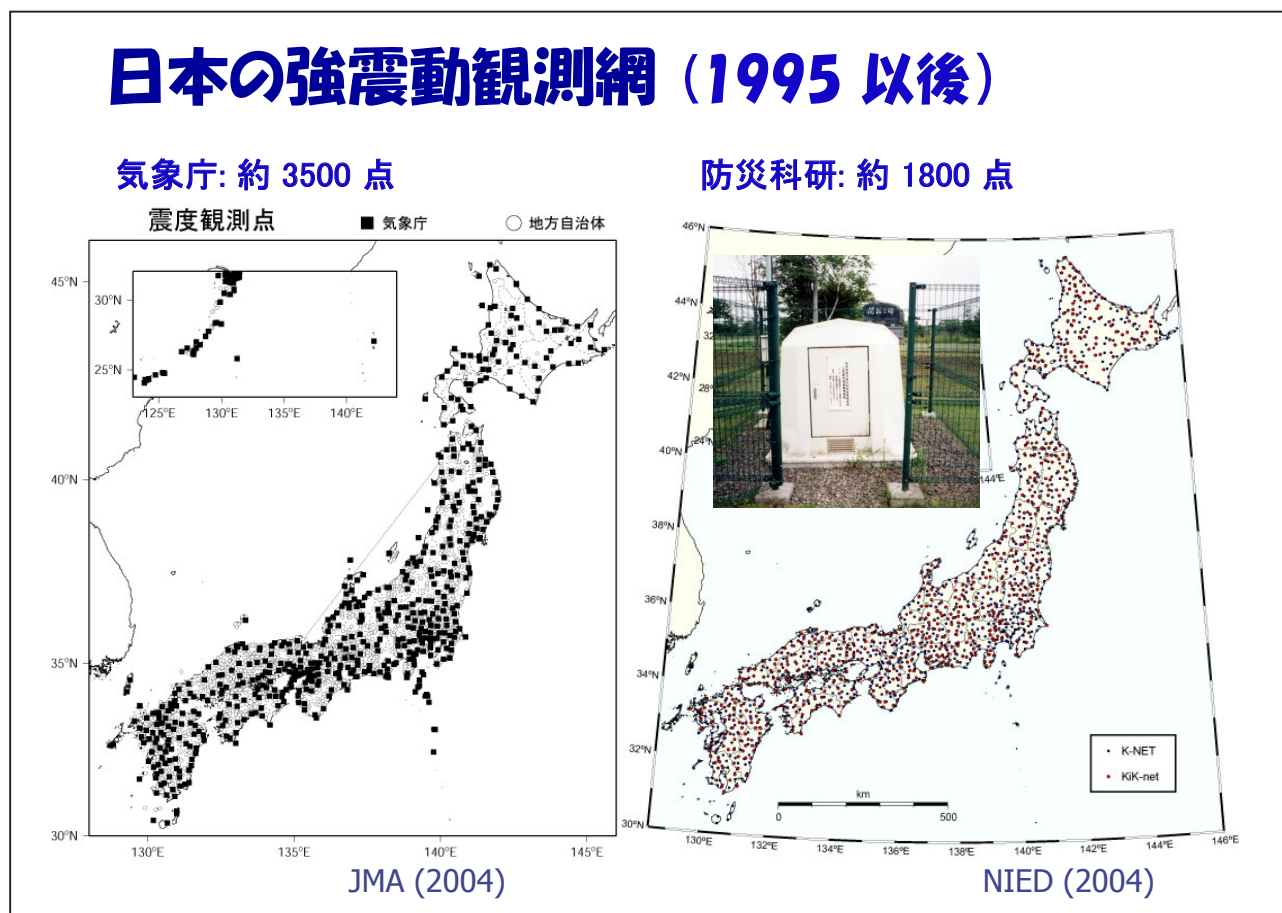


図 3 日本の強震動観測網（1995 年以後）

とするとどのくらいの可能性があるかを評価する。活断層に起こる地震だけでなく海溝型地震もあるので、海溝域に地震が起こる確率も評価する、これを長期評価という。しかし、長期評価だけでは次に地震がどれくらいの確率で起こるかということしかわからないので、さらに地震が起こったならばどのような揺れが生じるかを評価する、それを強震動予測と言う。その2つ、長期評価と強震動予測、を組み合わせることで地震動の予測をする。地震動予測とは、地震ではなくて地震動、つまり揺れの予測をするということである。

揺れの予測をする方法は2つあり、1つは確率論的なもので、ある場所で今後30年間に震度6弱以上の揺れが発生するのはどれくらいの確率かということである。確率というのはいくつだったら本当に起こるかわからないが、少なくとも相対的な比較は可能である。だいたい3%以上だと非常に高い確率で起こるという評価にしているが、3%に特に意味があるわけではない。それに対して地震の発生確率が高い断層を取り出して、その断層が動いたらどのような揺れが生じるかを計算する。それがもう1つの

震源断層を特定した地震動予測地図である。

地震動予測地図を作成するため、個々の活断層と海溝域の地震発生の確率評価が必要である。日本では主な活断層は98あって、それらについては全て詳細に調査し、次の地震がどれくらいの確率で起こるか調べる研究が行われた。海溝型地震についても歴史地震などの文献や地震活動、その他の資料から地震発生の確率が評価された。

もう1つ必要な資料は、地震のときに揺れやすいところと揺れにくいところがある、すなわち場所ごとの揺れやすさの指標である。例えば東京のように厚い堆積層のところは揺れやすく、中部圏の山岳部は山ばかりで地表近くは岩盤に覆われているため揺れにくい。そのような揺れやすさを日本中で計算しておく。こういうものを組み合わせることによって地震動の予測地図ができる。

確率の予測はどのように理解するか、日常的に起こっていることと確率的意味付けを理解して頂くために図4をご覧ください。通常は今後30年に3%以上を確率の基準として示している。地震動予測地図で確率が最も高いところで

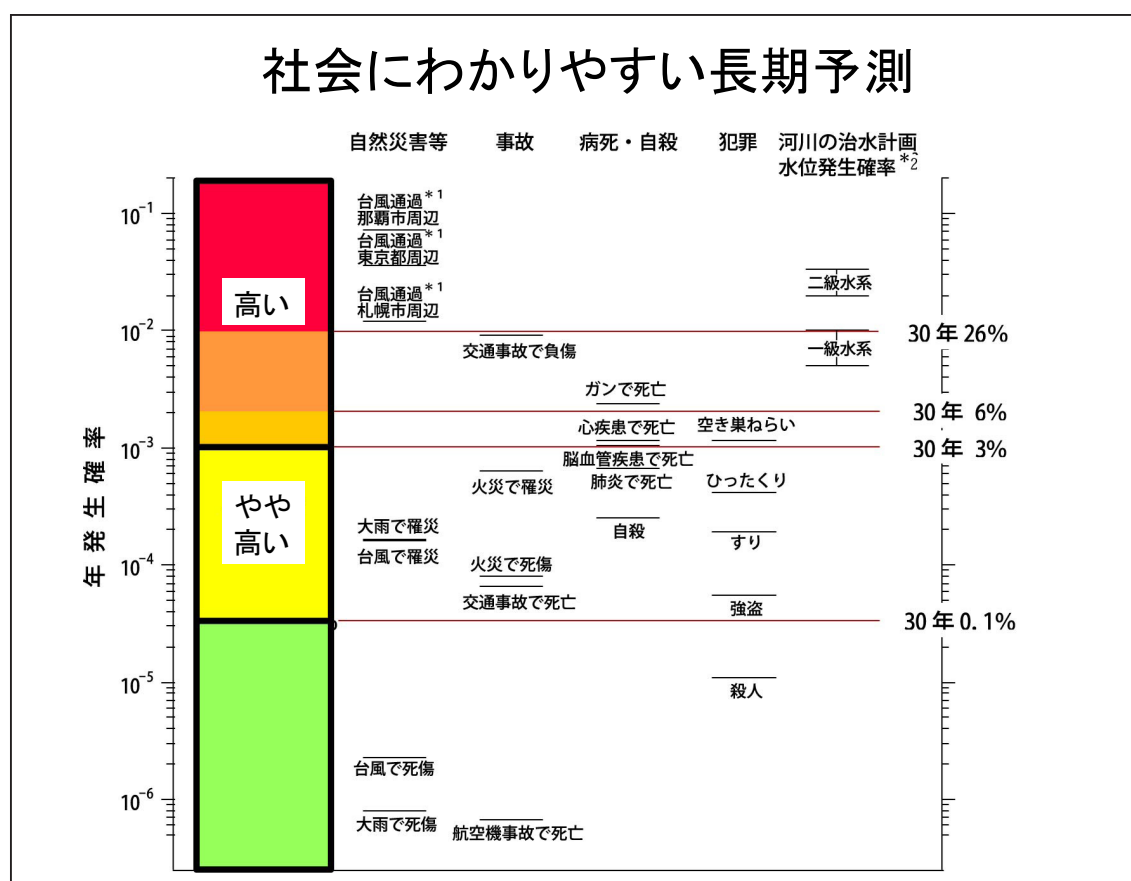


図4 社会にわかりやすい長期予測

は今後 30 年に震度 6 以上の確率が 26 % 以上で起こる可能性がある。他の現象でこの確率は、台風がある地域を、ここでは札幌を挙げているが、今後 30 年間に通過する可能性にほぼ対応している。台風なら日本全国どこでも通過する可能性があると思われるが、東京ならもっと高いことになる。札幌だと日本の中では比較的確率は低いが、それでも相当可能性の高い確率ということなのである。

その次の基準としては 6 % で、これはガンで死亡する確率に対応する。今後 30 年間に 3 % の確率というのは非常に小さいようだが、心疾患で亡くなったり、空き巣に狙われたりなど、普通の人が遭いやすい確率になるわけである。3 % 以下は火災に遭うとかひったくりに遭うとかなど、この表からだいたい確率というものを実感して頂くことができる。

今後 30 年間に震度 5 弱以上の地震動が起こる確率は日本中どこでもだいたい 3 % 以上で、非常に高い。震度 6 弱以上となると図 5 のようになんかなり限られてくる。しかしこの限られているというのが非常に曲者である。なぜかという、東南海、南海地震というのは 100 年に

1 回起こっているのに対し、それ以外の地域はそれだけ大きい発生確率の地震はない。地図で地震動の確率が高いというのは東南海、南海地震など近くに海溝型の地震が起こることである。

最近起こっている地震と確率論的地震動予測を比較してみると興味深いことがわかる。鳥取県西部地震は 2000 年に起こっているが、決して確率が高い地域ではない。ただこれは内陸の地殻内地震であるので、そこは注意してほしい。その次に起こったのは 2003 年の十勝沖地震である。実はこの地図は十勝沖地震発生後に作ったものである。そのため確率は比較的小さくなっているが、それでも十勝沖地震は揺れの確率が高いところで起こっていることがわかる。内陸地震の場合とちがって、海溝型の場合は確率が高いところで起こっている。

2004 年の中越地震も内陸の地震で、確率が低いところで起こっている。また翌 2005 年の福岡県西方沖地震も確率が低いところで起こっている。そのあと起こったのが 2005 年の宮城沖地震である。ここは確率が高いところで海溝型の地震である。2007 年に相次いで起きた能

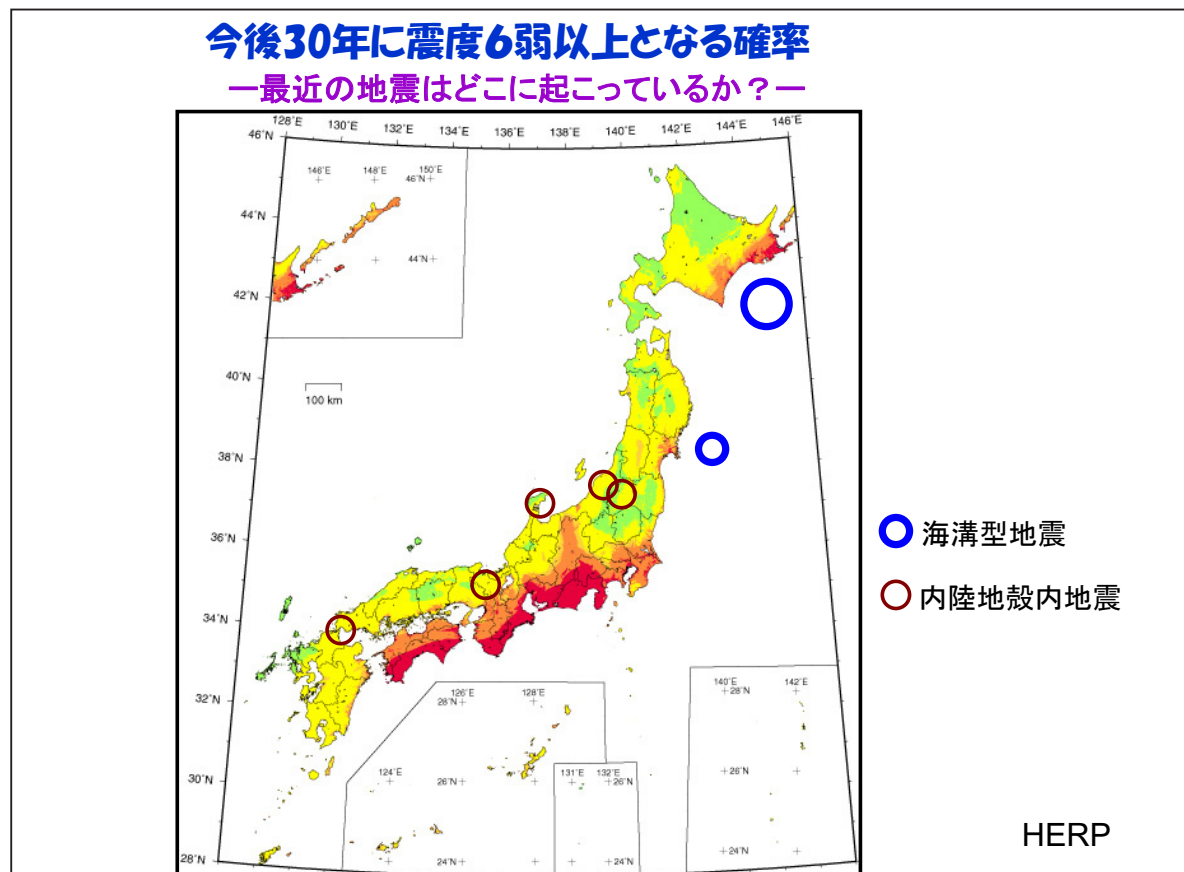


図 5 今後 30 年に震度 6 弱以上となる確率

登半島地震や中越沖地震も低いところで起こっていて、内陸地震である。

要するに内陸地震はほとんど当たっていない。それはもちろん手法の問題もあるが、地震の性質の違いが大きい。確率論的地震動予測地図は海溝型地震が起こるところに対しては非常にわかりやすい地図だが、1000年とか1万年に1度しか起こらないような内陸地震に対しては必ずしも適切に予測できていないことがわかる。海溝型地震は確率で予測してもそれなりに使えるが、内陸地震については非常に使いにくい。

そのためどのようなことが必要だろうか。それが震源断層を特定した地震動予測地図である。特定の活断層にもしこの地震が起こったならどのような揺れが起こるかを評価して防災に役立てるものである。そのためには震源の断層破壊過程がわからないといけない。断層破壊過程の研究は兵庫県南部地震以降日本で急速に進んだ。地震のとき震源となった断層面上には、すべりが大きく強震動をたくさん出すところとそうでないところがある。強震動をたくさん出すところをアスペリティと呼ぶが、そういうところが前もってわかれば強震動を予測できる。

アメリカでは1980年代からすでにいろいろ強震計が置かれていたので大きな地震のときに得られる強震記録を用いて断層破壊過程の研究が発達したが、日本では1995年の兵庫県南部地震以前は強震観測がなかったためアメリカに遅れをとった。しかしアメリカの研究者と情報を共有することによって、我々も大地震のとき単に断層面全体から強震動が出るわけではなく、アスペリティという比較的小さなところだけから強く出るということがわかってきた。大地震のときの強震動は震源断層全体の面積だけではなくアスペリティの面積がわからないと評価できない。そういう現象を断層パラメータのスケーリング則であらわせることも分かってきた。

断層パラメータのスケーリング則として、地震を引き起こす断層面全体の面積に関するスケーリング則と、断層面全体ではなく、その中の微細な構造、アスペリティ、に関するスケーリング則、の2つのスケーリング則があることを理解する必要がある。

第1のスケーリング則は断層全体の面積と地震のモーメントの関係である。地震のモーメントというのは地震の大きさを表す単位で、マグニチュードと一定の関係があると考えて頂いて良いと思う。地震のマグニチュードが大きくなると断層の面積が大きくなる。これは非常によく使われていて、兵庫県南部地震以前はこの関係しか使われていなかったと言っても過言ではない。だから断層の面積がわかれば地震の大きさがわかる。しかし、強震動予測はそれだけでは不十分で、強震動を出す場所である、アスペリティの面積がわからないと強震動が計算できない。第2のスケーリング則はアスペリティ面積と地震モーメントの関係である。この2つの関係を使うと震源断層を想定してそこから生じる強震動のシミュレーションができることになる。

それで強震動が実際にどういうところで大きな揺れが起こるかを少し説明しておきたい。地震のときに断層破壊がどのように進むかで断層の近くで揺れが大きいところと小さいところがある。このことが最初にわかったのは1993年に起こったアメリカのランダース地震のときである。大きな地震動は断層の破壊が進行する方向に生じていることが強震動記録から明らかになった。

地震動の再現ができる研究はその後急速に進んだ。一例として福岡県西方沖地震では断層面が約25キロぐらいだが、そのうちアスペリティが10キロ四方ぐらいのものと考え、観測とシミュレーション結果が良い一致を見る。極めて単純なモデルだが、強震動が再現できることがわかる。

4. 強震動予測のためのレシピ

強震動を再現する方法論について説明する。それは強震動予測のためのレシピという考え方で、我々が提案したものである。今までにも都市の防災対策などを立てようとすると、活断層があつたら断層の周りでどれくらいの揺れが生じるかということが都市計画上はどうしても必要だった。しかし、都市計画上は必要でも手法が確立していなかった。それで国や地方が行ったのは、定年退官した先生や、定年間際の著名な地震学の先生のところに行って、揺れのマッ

プを作ってくれと頼むのである。そうすると、その先生は自分の経験から強震動の予測を行ってくれた。

一般的には、震源断層があったら断層のそばでは地震動は大きいし離れば小さい。同じ距離でも地盤が柔らかいところは大きく揺れるし地盤が固ければ揺れは小さい。そういうことは誰でも知っていることである。そうした知見を適当に組み合わせて、その先生が地震動マップを作る。何々先生が作ったマップというのができて、それが都市計画に利用されてきた。震源断層のパラメータや、距離の取り方、地盤の増幅などまちまちな基準で評価されるなどいろいろな問題があった。だからでき上がったマップはその先生の権威だけでもっており、他の人に頼んだら当然別のマップができてしまう。それは非常におかしいと思う。

レシピというのは、皆さんご存知の通り、カレーライスでも一定の材料を揃えて、焼いたり煮たり順番を決めておけば、それなりに作ることができる。普段は料理を作ったことがない人でもレシピさえあればできるわけである。地震動予測も同じ情報なら同じ結果にならないとおかしい。そうしたかたちでないと実際には防災に役立たないと思い、強震動予測のためのレシピを提案した。

それでレシピはどのように作るか。これは専門的になるが、例えば断層の長さや幅を掛けると面積が出る。断層の面積がわかると断層がどれくらいの大きさかということがわかる。そうすると全体の面積から地震のモーメントがわかる。断層の長さや幅から面積がわかって、マグニチュードがわかって、そのあと強震動計算をするために必要なパラメータが順番に決まっていく。

もう 1 つ重要なことは、これまで断層面は 1 枚が一様に動くと考えられていたが、それだけではなく断層面の中に微細な構造を考える必要があることである。断層の中に、大きな揺れを生じる場所アスぺリティがあるが、そのアスぺリティの面積と全体の面積の割合からアスぺリティの応力降下量というのがわかる。これが非常に重要なパラメータになる。そういうものがどのようにしたら定義できるか理論的にもわかっている。だから活断層の調査結果から断層面

全体の面積がわかれば、地震のマグニチュードが推定できると同時に、スケーリング則からアスぺリティの面積、そこでの応力降下量などのパラメータが次々に決めることができることになる。

図 6 は実際に地震調査委員会が行った例だが、糸魚川・静岡構造線は阪神淡路大震災のあと国が調べた断層の中で最も地震の発生確率の高いところで、今後 30 年間に 14 % の確率で起こるとされているところである。そういうことがなぜわかるかというと、トレンチ調査といわれるもので、活断層にそっていろいろな地域で穴を掘れば、過去いつ頃地震が起こったかがわかる。そうした過去の歴史から確率的予測が行われ、震源のモデルを決めることもできる。

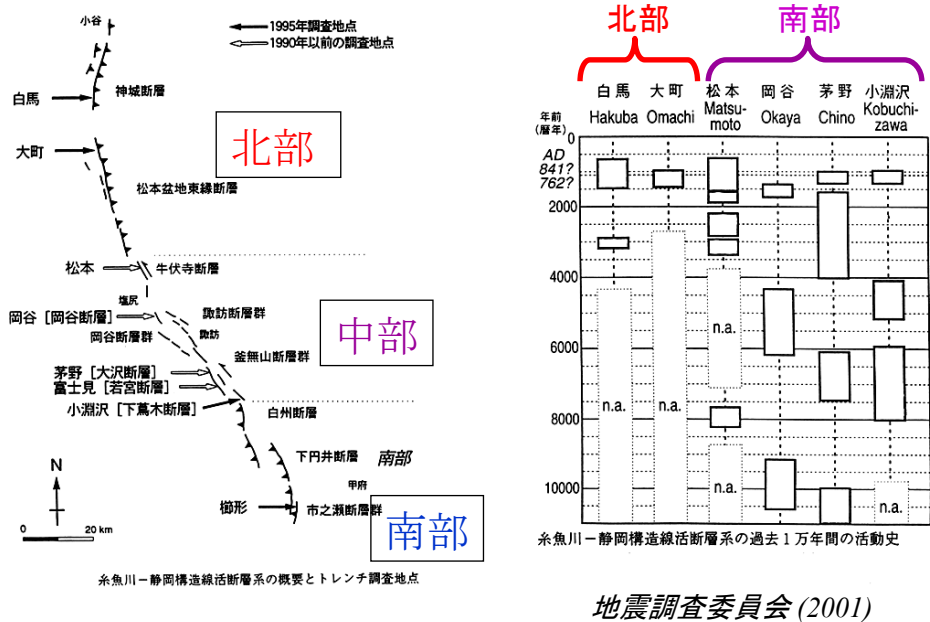
トレンチを行った場所で、いつ地震が起こったかだけでなく、そこで過去の地震で地表面の変位がどれくらいあったかもわかる。そういうことを研究することによって震源断層をモデル化してアスぺリティをどこに置いたらいいかわかる。それがわかると地震動が計算できる。地震動の評価結果は、マグニチュードを与えたときの震源断層からの距離と最大加速度の関係であるとか、距離と最大速度の関係など、経験的な距離減衰式と比較して検証することができる。

この方法は、活断層調査で地震発生の確率が高いことが分かった断層に対して、震源断層を特定して地震動を予測するために、地震調査委員会が用いているものである。震源断層のモデルとしては、必ずしもこのモデルが確実に起こる保証はないので、いくつかのモデルで計算をする方法をとっている。

中央防災会議も、例えば東海地震に対して過去の評価結果の見直しにこの方法を用いて地震動予測の再評価を行っている。この結果を基に強化地域の見直しも行った。さらに、東南海地震、南海地震にも適用して地震動の予測を行い、推進地域の指定に利用している。

図 7 は中央防災会議が行った東海地震・東南海地震・南海地震に対する被害予測である。これらの巨大地震が起きたならばどの程度被害がでるかを評価するには、はじめに地震動予測を行い、それを基に種々の構造物・施設の被害予測を行い、その結果に基づいて、備蓄がどの程

糸魚川・静岡構造線断層帯の
調査結果(1)



北部と南部が同時に活動する可能性がある

図6 糸魚川・静岡構造線断層帯の調査結果

想定南海トラフ地震(東海・東南海・南海地震)による被害の予測				
区 分		東南海+南海	(参考) 東 海	(参考) 東海+東南海+南海
死者数(人)	建 物 倒 壊	6,600	6,700	12,200
	津 波	8,600	1,400	9,100
	斜 面 災 害	2,100	700	2,600
	火 災	500	600	900
	合 計	17,800	9,200	24,700
全壊建物数(棟)	揺 れ	170,200	170,000	308,500
	液 状 化	83,100	26,000	89,700
	津 波	40,400	6,800	42,300
	斜 面 災 害	21,700	7,700	27,200
	火 災	313,200	250,000	472,500
	合 計	628,700	460,000	940,200
経済被害	直 接 被 害	43兆	26兆	60兆
	間 接 被 害	14兆	11兆	21兆
	合 計	57兆	37兆	81兆
(注) 1 数字は概数。内訳と合計は必ずしも一致しない。 死者数は午前5時発生、全壊棟数は午後6時発生を想定。 2 東海；中央防災会議「東海地震対策専門調査会」平成15年3月18日公表 東南海+南海；中央防災会議「東南海、南海地震等に関する専門調査会」9月17日公表 東海+東南海+南海；同上				

図7 想定南海トラフ地震による被害予測

度必要かなどの防災対策に関する情報が得られる。東海地震・東南海地震・南海地震が起これば、建物が倒壊する可能性、斜面が崩壊する可能性、火災が発生する可能性など、直接的被害による経済的被害、さらに波及効果による間接的な被害予測も全て試算して発表している。こうした被害予測評価の基となる地震動予測に先ほど述べたレシピが使われている。

5. 2007 年新潟県中越沖地震と原子力発電所

こうした 1995 年兵庫県南部地震以後の地震動予測研究の進展を背景に、原子力施設の耐震安全性の向上のため原子力発電所の耐震指針の見直しの検討がなされ、2006 年 9 月に指針の改訂がなされた。ところが改訂指針に対して原子力発電所のバックチェックが行われようとしていた矢先に中越沖地震が発生した。この地震は柏崎刈羽原子力発電所のすぐそばに起こり、極めて強い地震動が原子力発電所の本体を直撃した。原発の耐震安全性の観点から新指針がこのような地震に対して有効かどうか詳細な検証

が必要とされている。

まずこの地震がどのような地震であったか、揺れはどうだったか、この地震の揺れは再現可能なのかについて、お話させて頂く。

図 8 に示すように、この地震が起きた場所は日本海東縁のひずみ集中帯の延長上にあり、地震発生の可能性が一番高い地域の 1 つであった。過去にもこの歪み集中帯では日本海中部地震とか北海道南西沖地震など大きな地震が起きている。こうした歪み集中帯ではいろいろな地形調査から活褶曲という地形が生まれる。今回の地震の震源域は褶曲と褶曲の間にある。図 9 の地図をご覧くださいとわかるが、このように活断層が縦（南北方向）にたくさん並んでいるのは、このあたりは褶曲構造が発達しているためである。地震が起こりやすいところは、通常原子力発電所は建てないようにしている。しかし、なぜここに建てられたかという、このような活断層の分布を見ると、ちょうど発電所が建てられた場所は活断層帯と活断層帯の谷間になっていて、地表だけを見ると活断層から最も離れているように見える。地表の情報からだと、地

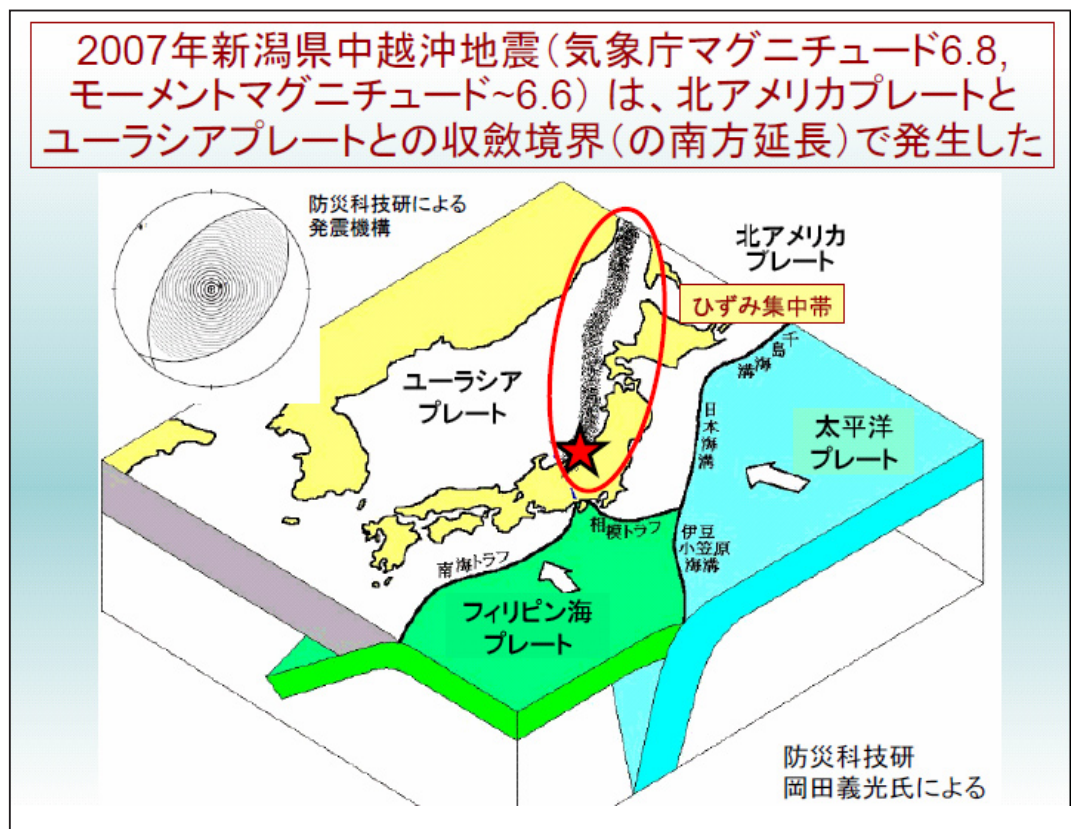


図 8 新潟県中越沖地震

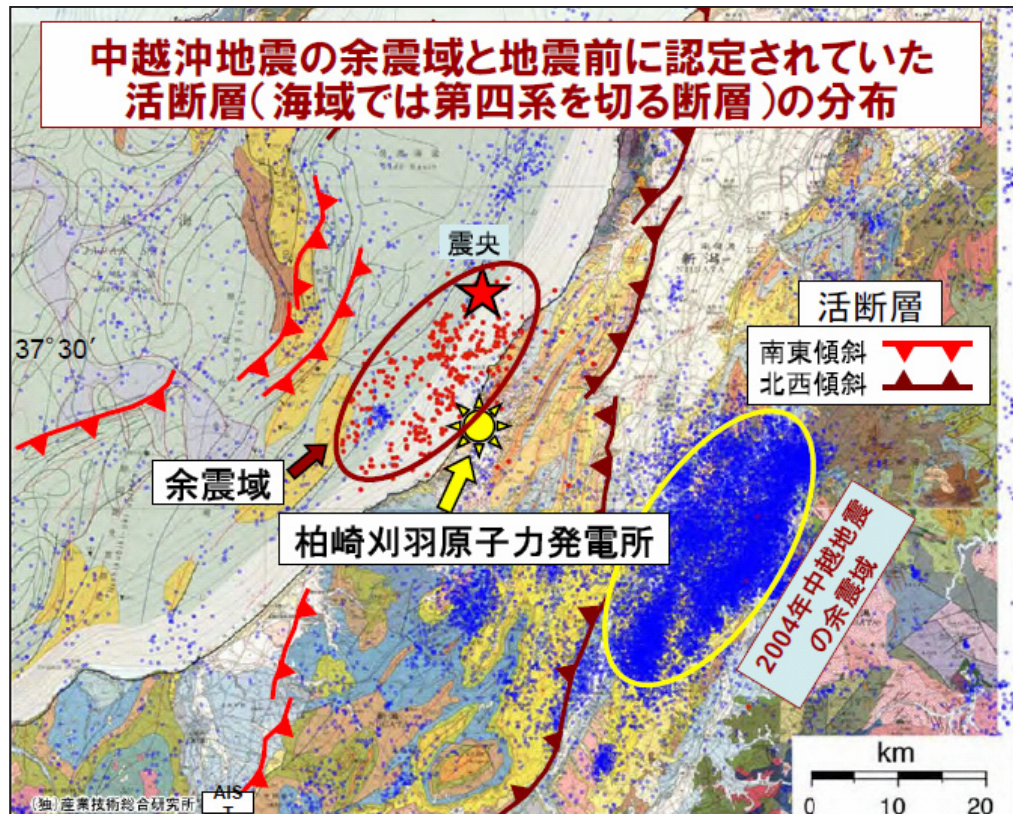


図9 中越沖地震の余震域と活断層の分布

震を引き起こす活断層から最も遠いところに位置しているように見える。おそらく、このような地表の活断層の分布からサイトが選ばれたのではないだろうか？ しかし、こうした活断層の分布は単に地表だけの情報であって、地下の部分はわからない。それが大きな問題であった。

今回の地震と、そのあとの余震分布から、この地震の震源断層は南東傾斜の逆断層で、震央と書かれている地点が破壊の開始点となって、そこから破壊は柏崎刈羽の方向に向けて進んだことが分かってきた。

この地震は海域で起こったため、事前の震源域付近の地下構造の情報が不正確で、余震の震源の決定精度が悪くて、地震発生直後は震源断層面が南東傾斜か北西傾斜かすぐにはわからなかった。これまでの陸域で起こった地震では、余震は震源断層に沿ってほぼ線状に並ぶが、今回の地震では余震が当初団子状に起こっているように見えた。

地震後、震源域の海底に海底地震計（OBS）を置いて地下構造を再決定し、それを用いて余震の震源を決め直すと、余震が主として南東傾斜の断層面に沿って分布していることが分かってきた。すなわち、この地震の震源断層は陸に

向かって深くなり柏崎刈羽原発のすぐそばまで達していた可能性があるということである。逆断層だから、動きとしては陸側の面が上に持ち上がったようなかたちと考えられている。GPSやSARなど地殻変動の観測結果を説明するには震源断層の北部ではそれに直行する面も考慮する必要があることも指摘されている。

断層がどうであったかだけでは柏崎刈羽の問題は論じられない。柏崎刈羽で地震動が大きかったことは事実だが、なぜ大きかったのかは震源の影響か、それとも近くの地盤の効果か、それとも震源から原子力発電所の敷地までの伝播経路の地下構造によるものかを調べる必要がある。図10に示されるように、地表で観測された地震動の最大加速度は経験的距離減衰式(司・翠川, 1999)にほぼ従っている。しかしながらばらつきがある。通常、ばらつきの理由は固いところで採れると小さいし、柔らかいところで採れると大きいということで、こうしたばらつきは当たり前である。この経験式自体も平均値とそれに対するばらつきというかたちで表現されているくらいだから、このばらつきの1シグマの間にほぼ収まっている限り、この地震の強震動は普通の大きさということになる。とこ

本震記録と距離減衰式との比較

広域の最大加速度記録は、過去の同規模の地震の最大加速度と調和的

→ 本震は、過去の同規模の地震と比較して平均的な大きさの地震

しかしながら、柏崎刈羽原発における観測記録は、距離減衰式より顕著に大きい。

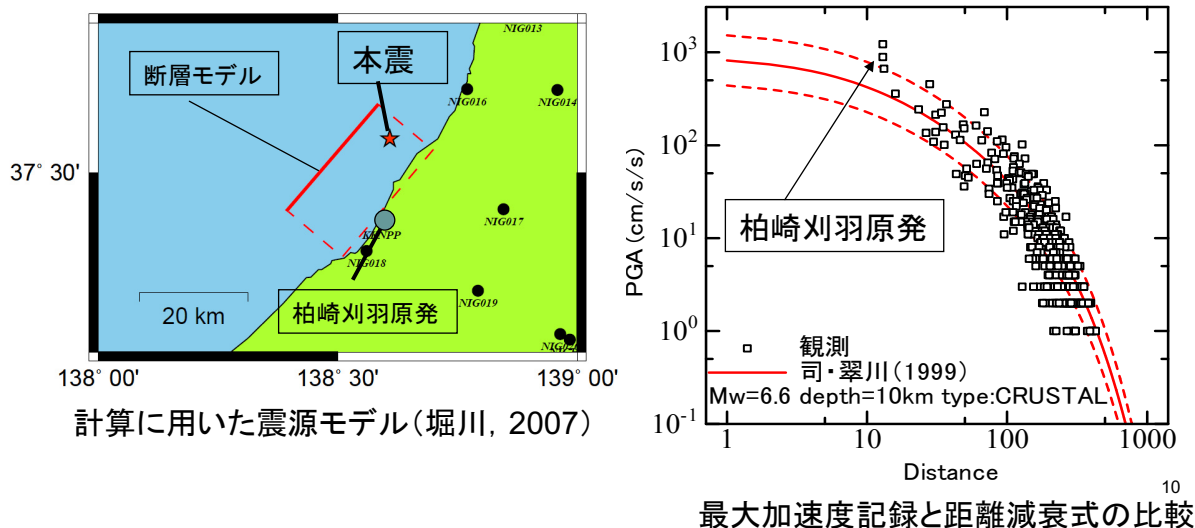


図 10 本震記録と距離減衰式との比較

ろが震源域近くの柏崎刈羽原発での地表の最大加速度は経験式に比べて顕著に大きい。なぜ柏崎刈羽では大きいのか？

そういうことを知るためにまず震源がどうか。この地震の強震動記録の特徴の1つとしては、どこでも2つないし3つの顕著なパルスが見られることである。このようなパルスはたいいていアスペリティに対応するとわかっており、パルスの場所からアスペリティの場所を決めることができる。もう1つ重要なのは、柏崎刈羽発電所には、7基の原子炉が1キロぐらいの範囲にあることである。7基の原子炉の基礎版は地中の岩盤の上に設置されており、そこで地震記録が得られている。その記録を比較すると各パルスの到着時刻の差と振幅の変化からどの方向から来たかがわかる。

これらの情報を基に、余震の記録を使って本震を合成する方法、経験的グリーン関数法という方法で、本震の震源モデルを仮定して強震動の計算と観測を比較することで、この地震の最

適モデルを求めた。その結果、3つのアスペリティを考えると、非常に良い再現ができること、および1号機の基礎版で記録された最も大きな加速度(680ガル)のパルス波は敷地の西方約10kmにあるアスペリティ3からのものと考えられることがわかった。

経験的グリーン関数法というのは、観測された余震を使うので、余震自体が震源の性質だけでなく観測点近くの構造の影響を受けている。適切な震源モデルを設定して適切な余震記録を用いると、柏崎刈羽の観測記録が極めてよく再現できることから、柏崎刈羽で大きな地震動が記録された原因として、やはり地下構造の影響が一番大きいと考えられる。この付近の層構造がどうなっているかを詳しく調べると、震源域付近から柏崎刈羽に向けて地下の構造が浅くなっていることがわかる。そうした地下構造のところでは、図11に示されるように波が集まってくるフォーカシングの性質を持つことが分かる。

次に、原子力発電所の耐震安全性に関して、新潟県中越沖地震に関わる問題点は何かについて議論する。

1つは「今回の地震に関係する活断層は事前に特定可能だったか？」である。

今回の地震の震源断層を延長すると、申請の時点の書類にも記載されていたFB断層に関係していた可能性が高いとがわかってきた。しかし、申請の時点ではこの断層はそれほど重要視されていなかった。旧指針の下での安全審査では必ずしもこの断層を考慮すべき断層と見なしていなかった。その後の海底の活褶曲の分布の調査が進み、専門家からFB断層は活断層として考慮すべきという指摘がなされ、東京電力はFB断層を活断層と認定して地震動の計算も行っていった。ところが、地震動の計算のための震源断層をFB断層の直下に鉛直断層を設定して、従来の方法である大崎スペクトルを用いて地震動評価を行ったため、地震動が過小評価されていたことが分かった。このことは、例え活断層を認定しても震源断層が適切に設定されなければ地震動評価は適切にできないという重大な問題を突きつけている。

2つは、今回の地震の後で、地形地質の専門家が東電の申請資料を再解析して認定したFB断層の位置は、地震の後の余震分布に加えて、音波探査や反射法探査など詳細な調査で決定した震源断層とはよく対応していることである。このことは、旧指針の下で行われた安全審査に問題があったことを示唆していると考えられる。

今回の指針改定の中では、図12に示すように変動地形学、地質学、地球物理学的な詳細な調査に基づき、活断層を認定し、さらに震源断層を適切にモデル化して、従来行われていた応答スペクトルによる方法だけでなく、断層モデルに基づいて地震動評価を行うことが明記されている。理想

的な調査が可能ならば、今回地震を引き起こした活断層を特定して、地震動を予測できることになる。しかしながら、柏崎刈羽の1号機から7号機までの建設時に明らかに考慮すべき活断層を見逃していた事実は重く受け止める必要がある。安全審査の在り方についても今後検討が必要とされている。

あともう1つ重要な点は、設計上で想定されていた地震動を2.5倍も上回る地震動が記録されたが、重要構造物については今のところ原子力安全・保安院やIAEAの調査でも大きな被害

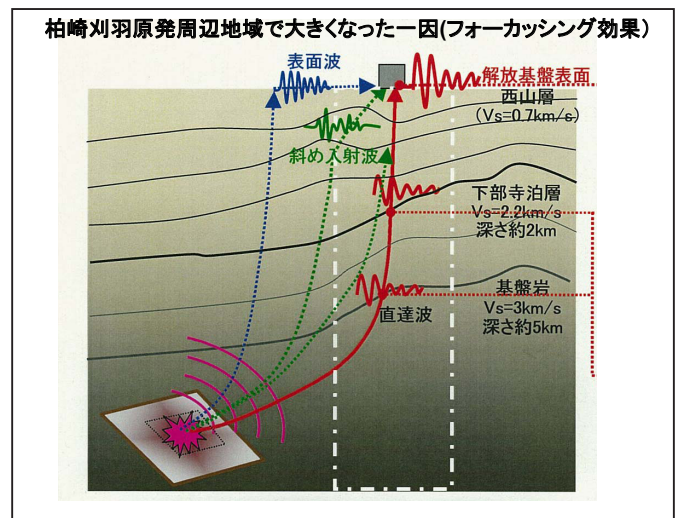


図11 フォーカッシング効果

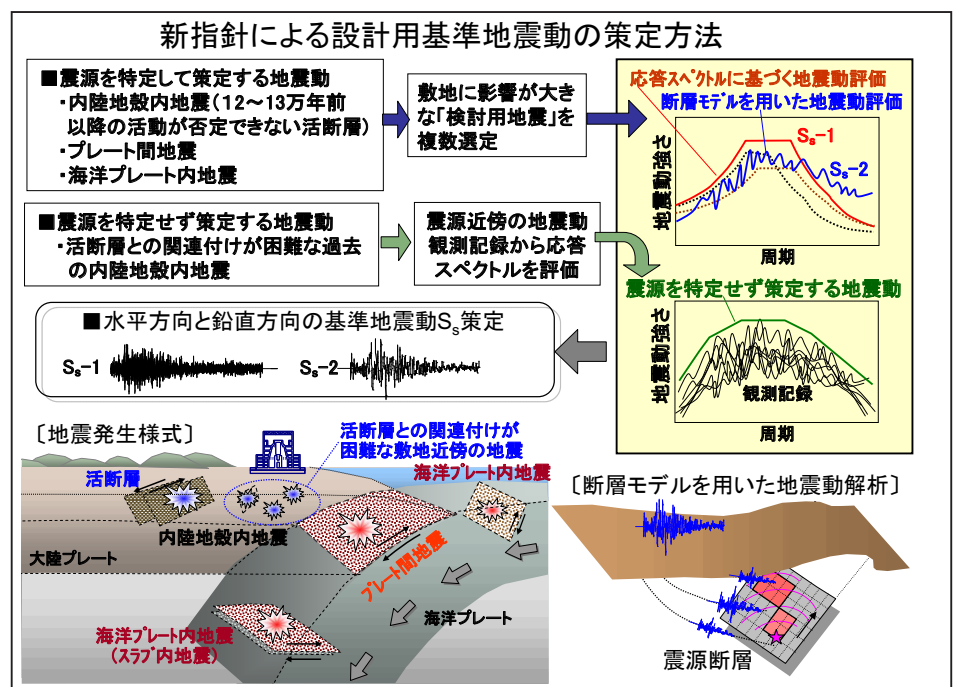


図12 新指針による設計用基準地震動の策定方法

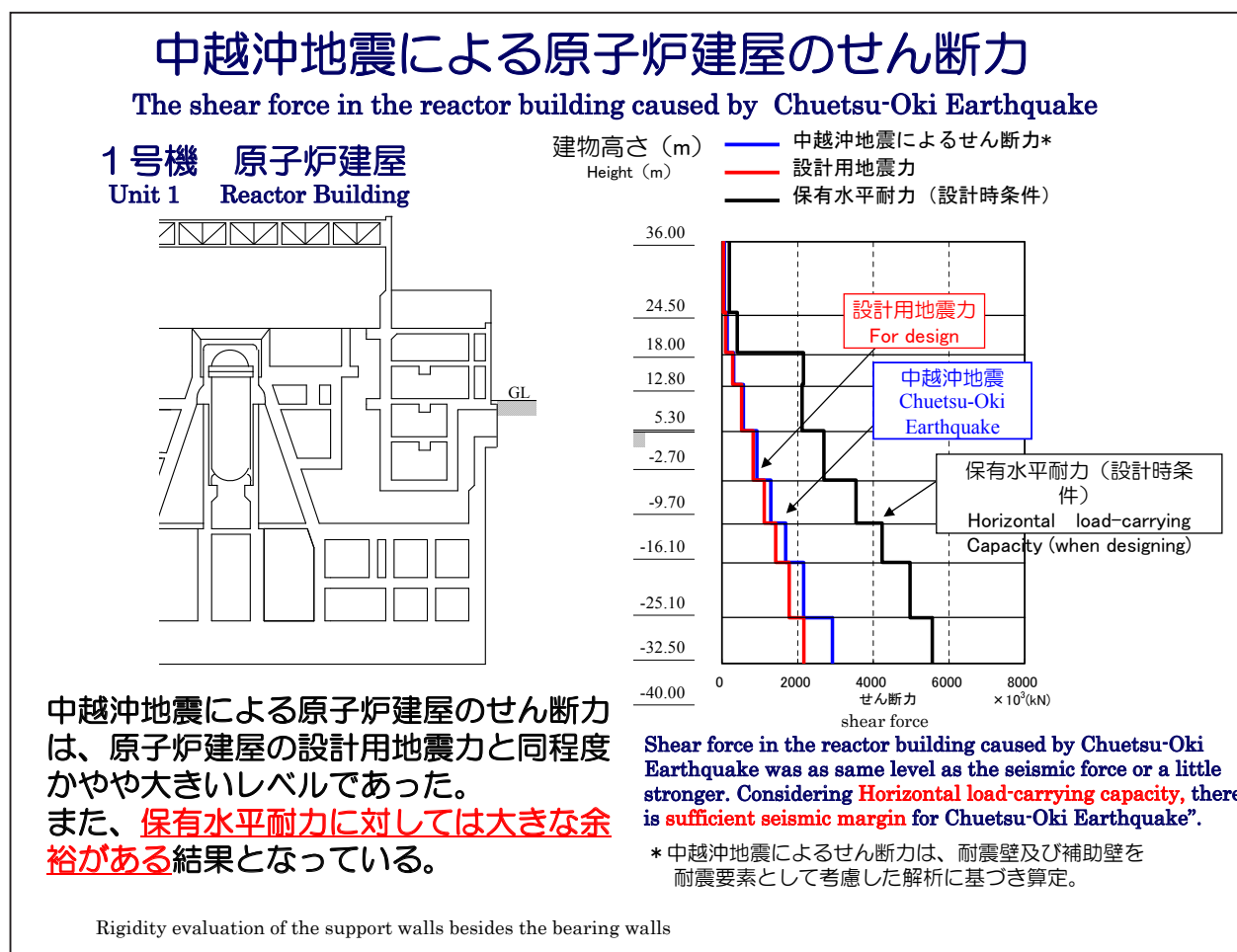


図 13 中越沖地震による原子炉建屋のせん断力

は確認されていない。このこと自体は良しとしても、実際には放射能漏れなどに繋がる重要構造物は被害がなかったといっているだけで、原子炉施設内にある一般的な構造物である施設は大きな被害を受けていることも事実である。それは原子力の被害としてはカウントされない。そのために今回の地震は国際基準でいうと被災度はゼロマイナーというレベルになる。一般構造物の被害が重要構造物へ波及しないかどうか今後さらなる検討が必要とされている。

大きな揺れに襲われたけれども被害は少なかった、少なくとも重要構造物に損傷がなかった理由は、図 13 に示されるように余裕をもって設計されていたということに尽きると考えられる。実際にいろいろな設計をする場合、先ほど述べたように検討用地震に対して揺れを評価する、これは動的に決めた地震動のレベルで、設計にはそれ以外に建築基準法の 3 倍の静的な地震力も考える。図 13 に示されるように、柏崎刈羽の 1 号機の場合には建築基準法の 3 倍と

して静的に決めた地震力が基準地震動から決めた動的地震力を上回っていた。そのため、設計用地震力はほぼ静的地震力で決まっていた。設計のとき考慮されていない耐震壁や補助壁を考えて、中越沖地震による原子炉建屋のせん断力を評価すると、原子炉建屋の設計用地震力をやや上回るが、保有水平耐力に対しては大きな余裕があったという結果になっている。

重要構造物の設計では、これまでは大きな余裕を持たせて設計されていたことが設計値を大幅に超える地震動に襲われてもほとんど損傷を受けなかった原因と考えられている。原子炉が設計レベルに対してどの程度の余裕を持てるかについて定量的な評価方法を確立する必要がある。

(いりくら こうじろう)

※尚、本稿は、2008 年 4 月 18 日に開催された第 36 回技術予測シンポジウムの講演内容を要約し、取り纏めたものです。