

平成26年(行ウ)第152号 大間原子力発電所建設差止等請求事件

原告 函館市

被告 国 ほか1名

準備書面（5）

大間原発の基準地震動について（概説）

平成26年（2014年）12月18日

東京地方裁判所民事第2部B係 御中

原告訴訟代理人弁護士 河 合 弘 之

同 弁護士 井 戸 謙 一

同 弁護士 内 山 成 樹

同 弁護士 海 渡 雄 一

同 弁護士 青 木 秀 樹

同 弁護士 望 月 賢 司

同 弁護士 只 野 靖

同 弁護士 白 日 光

同 弁護士 兼 平 史

同 弁護士 中 野 宏 典

同 弁護士 金 裕 介

第 1	原発の耐震設計の流れ	4
1	原発の基準地震動について	4
(1)	基準地震動と耐震設計審査指針	4
(2)	旧耐震指針における基準地震動(S 1 と S 2)	4
(3)	新耐震指針における基準地震動(S s)	5
2	原発の耐震設計の全体像	5
3	基準地震動 S s 策定の全体像	7
第 2	基準地震動 S s の例	10
第 3	前提となる事実	13
1	耐震設計の基礎	13
(1)	地震と地震動	13
(2)	震源断層面, アスペリティ (強震動生成域)	14
(3)	地震 (動) の観測	15
(4)	地震の大きさ	16
(5)	地震動の大きさ	17
(6)	重力 (の) 加速度	18
(7)	加速度と力の関係	18
(8)	地震動の加速度	19
(9)	地震動の例	20
(10)	小括	22
2	地震動の性質	22

(1) 振動の基本的な性質	22
(2) 地震動の諸性質	23
(3) 周期特性とスペクトル	24
3 地震動の破壊力	26
(1) 地震動と建築	26
(2) 固有周期	27
(3) 共振現象	28
(4) 実際の地震動と建物の共振	28
(5) 応答スペクトル	29
(6) 地震動と応答スペクトル	31
(7) 原発の機器・配管の固有周期は0.02秒～0.5秒程度の短周期に集中して いること	32
(8) 耐震設計	35
(9) より詳細な耐震設計	36
(10) 短周期レベルの地震動と応力降下量	36
(11) 物が壊れれば、固有周期が変化すること	37
第4 「不確かさの考慮」が原発の耐震設計では必要となること	38
1 不確かさを考慮しなければならない理由	38
(1) 地震の科学には限界があること	38
(2) 地震学の現状	40
(3) 不確かさを安全側に十分に大きく考慮することが必須である	42
2 新耐震指針(平成18年指針)における不確かさの考慮の要求	43
3 新規制基準における不確かさの考慮の定め	45
第5 耐震設計上の問題点の概要	45

第1 原発の耐震設計の流れ

1 原発の基準地震動について

(1) 基準地震動と耐震設計審査指針

原発の耐震設計は、基準地震動（S1、S2、Ss）を基礎として行われる。基準地震動はその後のすべての設計の基本となるものであって、基準地震動の想定を誤れば、原発の耐震安全性は確保されない。

基準地震動は、全国一律に定められているものではなく、原子力安全委員会の「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」に基づき、各電力事業者が策定してきた。

この耐震設計審査指針は、平成18年（2006年）9月に大きく改訂された。改訂の契機となったのは、平成7年（1995年）の兵庫県南部地震と平成12年（2000年）の鳥取県西部地震である。特に、2000年鳥取県西部地震では地表に現れていた断層から想定される地震動を上回る地震動が観測されたことが直接の契機となり、原子力安全委員会は、平成13年（2001年）から耐震設計審査指針の見直し作業を始めた。

しかし、この見直し作業は難航を極め、最新の地震学の知見などを盛り込んだ新耐震設計審査指針が定められたのは、平成18年（2006年）9月のことであった（以下、2006年に見直された耐震設計審査指針を「新耐震指針」といい、これ以前のものを「旧耐震指針」という。）。

(2) 旧耐震指針における基準地震動（S1とS2）

旧耐震指針では、基準地震動は、S1とS2の二つに分けられており、以下のとおり定義される。

S1 設計用最強地震

「歴史的資料から過去において敷地またはその近傍に影響を与えたと考えられる地震が再び起こり、敷地およびその周辺に同様の影響を与えるおそれのある地震および近い将来敷地に影響を与えるおそれのある活動度の高い活断層による地震のうちから最も影響の大きいもの」

S 2 設計用限界地震

「地震学的見地に立脚し設計用最強地震を上回る地震について、過去の地震の発生状況、敷地周辺の活断層の性質および地震地体構造に基づき工学的見地からの検討に加え、最も影響の大きいもの」

このように、原発の基準地震動は、過去の地震および将来の地震のうち「最も影響の大きいもの」(S 1 設計用最強地震)、「地震学的見地に立脚し設計用最強地震を上回る地震について・・・最も影響の大きいもの」(S 2 設計用限界地震)とされており、最大規模の地震動の想定が求められていた。

(3) 新耐震指針における基準地震動(S_s)

これに対して、新耐震指針における基準地震動S_sは、以下のとおり定義される。

「施設の耐震設計において基準とする地震動で、敷地周辺の地質・地質構造並びに地震活動性等の地震学および地震工学的見地から、施設の供用期間中に極めてまれではあるが発生する可能性があり、施設に大きな影響を与えるおそれがあると想定することが適切な地震動」

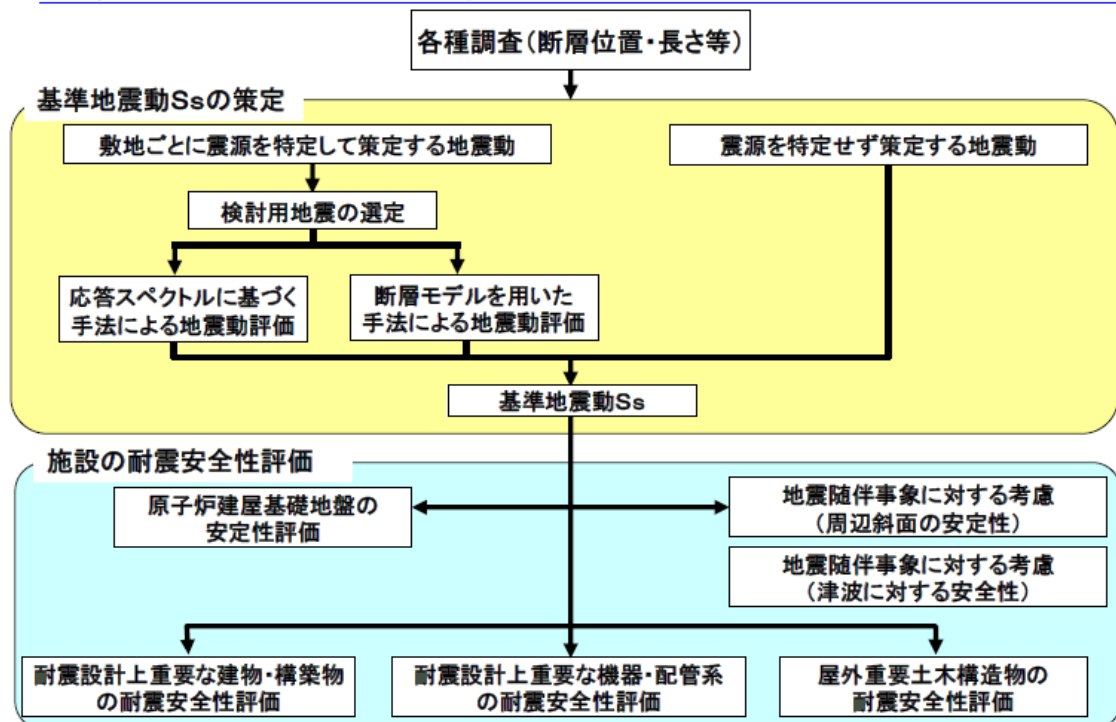
このように、新耐震指針における基準地震動(S_s)は、「極めてまれではあるが発生する可能性があり、施設に大きな影響を与えるおそれがある」とされており、最大規模の地震動の想定が求められることが、より明確になった。

しかしながら、本書面を通じて論ずるように、実際に設定された基準地震動は、全国すべての原発で、「平均像+ α 」でしかなくおらず、最大規模の地震動の想定は全くなされていなかった。

2 原発の耐震設計の全体像

原発の耐震設計は次のような流れでなされている。

耐震安全性評価全体フロー



「浜岡原子力発電所3，4号機「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価結果の報告について」平成19年4月4日

これを大きく分ければ、以下の3つに分けられる。

- ① 断層位置や長さ等の各種調査
- ② 基準地震動 S_s の策定
- ③ (基準地震動 S_s に基づく) 施設の耐震安全性評価

断層位置や長さ等の各種調査を適切に行うことは当然である。しかしながら、過去に発生した地震を完全に把握することは不可能である。

また、構造物を建設する地点で、将来起こる地震の記録は得られておらず、将来起こると予想される地震の記録と同様の性質を有する地震の記録が得られている場合もほとんどない。

そこで、将来起こる地震の当該地点での強震動を、シミュレーションによって予測することが必要となるのである（山中浩明編著「地震の揺れを科学するーみ

えてきた強震動の姿」 133頁)。

断層位置や長さ等の各種調査を受けてなされる、基準地震動 S_s の策定は、要するに、将来起こる可能性のある最大の地震の揺れ（地震動）を予測することと同義である。

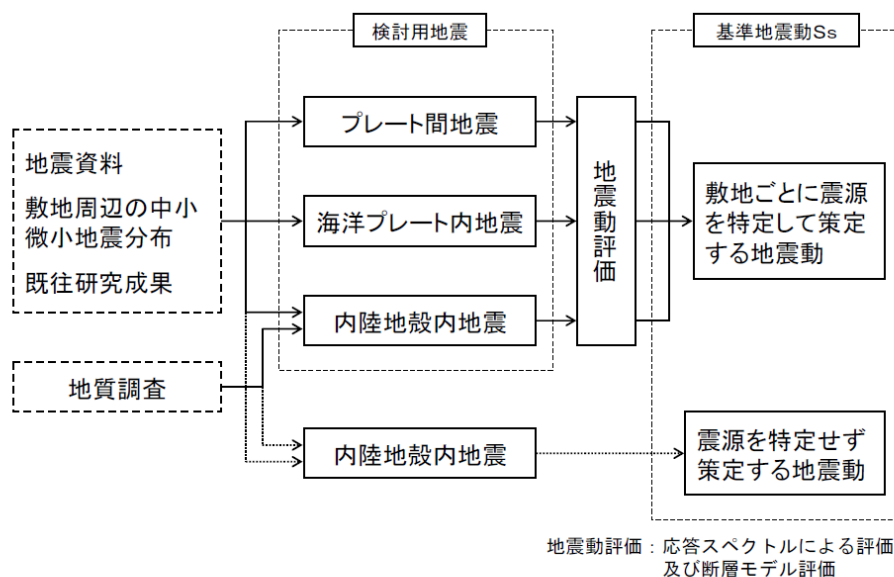
原発の安全性を確保するためには、将来起こる可能性のある最大の地震の揺れ（地震動）に対して、構造物が破壊されないように設計する必要がある。

そして、そのためには、構造物を数値的なモデルで表して、それと地盤が接している部分に入力する地震動（入力地震動ともいう。）を用意し、その地震動を受けた構造物がどのような挙動を示すかをシミュレーションする必要がある。

3 基準地震動 S_s 策定の全体像

基準地震動 S_s の策定は、次のような流れでなされている。

(2) 基準地震動 S_s 策定フロー



これを大きく分ければ、

- ① 地質調査や活断層の評価を前提とする、敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

② 震源を特定せず策定する地震動

の大きく 2 つに分かれる。

この点について、新耐震指針は、以下のように規定している。

「5. 基準地震動の策定

施設の耐震設計において基準とする地震動は、敷地周辺の地質・地質構造並びに地震活動性等の地震学及び地震工学的見地から施設の供用期間中に極めてまれではあるが発生する可能性があり、施設に大きな影響を与えるおそれがあると想定することが適切なものとして策定しなければならない。(以下、この地震動を「基準地震動 S_s 」という。) 基準地震動 S_s は、以下の方針により策定することとする。

(1) 基準地震動 S_s は、下記(2)の「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び(3)の「震源を特定せず策定する地震動」について、敷地における解放基盤表面における水平方向及び鉛直方向の地震動としてそれぞれ策定することとする。

(2) 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」は、以下の方針により策定することとする。

① 敷地周辺の活断層の性質、過去及び現在の地震発生状況等を考慮し、さらに地震発生様式等による地震の分類を行ったうえで、敷地に大きな影響を与えると予想される地震（以下、「検討用地震」という。）を、複数選定すること。

② 上記①の「敷地周辺の活断層の性質」に関しては、次に示す事項を考慮すること。

i) 耐震設計上考慮する活断層としては、後期更新世以降の活動が否定できないものとする。なお、その認定に際しては最終間氷期の地層又は地形面に断層による変位・変形が認められるか否かによることができる。

ii) 活断層の位置・形状・活動性等を明らかにするため、敷地からの距離に応じ、地形学・地質学・地球物理学的手法等を総合した十分な活断層調査を行うこと。

③ 上記①で選定した検討用地震ごとに、次に示す i) の応答スペクトルに基づく地震動評価及び ii) の断層モデルを用いた手法による地震動評価の双方を実施し、それぞれによる基準地震動 S_s を策定する。なお、地震動評価に当たっては、地震発生様式、地震波伝播経路等に応じた諸特性(その地域における特性を含む。)を十分に考慮することとする。

i) 応答スペクトルに基づく地震動評価

検討用地震ごとに、適切な手法を用いて応答スペクトルを評価のうえ、それらを基に設計用応答スペクトルを設定し、これに地震動の継続時間、振幅包絡線の経時的变化等の地震動特性を適切に考慮して地震動評価を行うこと。

ii) 断層モデルを用いた手法による地震動評価

検討用地震ごとに、適切な手法を用いて震源特性パラメータを設定し、地震動評価を行うこと。

④ 上記③の基準地震動 S_s の策定過程に伴う不確かさ(ばらつき)については、適切な手法を用いて考慮することとする。

(3) 「震源を特定せず策定する地震動」は、震源と活断層を関連付けることが困難な過去の内陸地殻内の地震について得られた震源近傍における観測記録を収集し、これらを基に敷地の地盤物性を加味した応答スペクトルを設定し、これに地震動の継続時間、振幅包絡線の経時的变化等の地震動特性を適切に考慮して基準地震動 S_s を策定することとする。」

以上のように、地震動評価の手法については、敷地ごとに震源を特定して策定する地震動と、震源を特定せず策定する地震動の双方を策定し、前者については、応答スペクトルに基づく地震動評価と断層モデルを用いた手法による地震動評価の双方を実施する、とされている。

なお、これらの基準地震動は、解放基盤表面において設定されるものである。解放基盤表面とは、以下のとおり定義される。

「基準地震動を策定するために、基盤面上の表層や構造物が無いものとして仮想的に設定する自由表面であって著しい高低差がなく、ほぼ水平で相当な広がりを持って想

定される基盤の表面。ここでいう「基盤」とは、概ねせん断波速度 $V_s=700\text{m/s}$ 以上の硬質地盤であって、著しい風化を受けていないもの」

第2 基準地震動 S_s の例

基準地震動 S_s の一例として、九州電力の川内原発の例を挙げる。川内原発でも、上記の「応答スペクトルによる手法に基づく基準地震動」「断層モデルを用いた手法に基づく基準地震動」「震源を特定せず策定する地震動による基準地震動」の3つの検討を行い、基準地震動 S_s を策定している。その具体的な基準地震動の形状は、以下のとおりである。

「川内原子力発電所 地震について 平成26年4月23日」

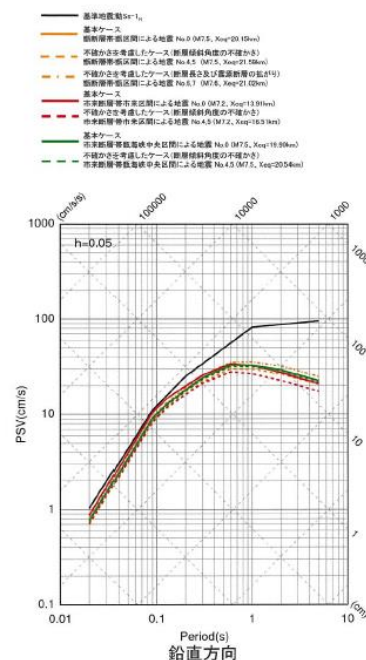
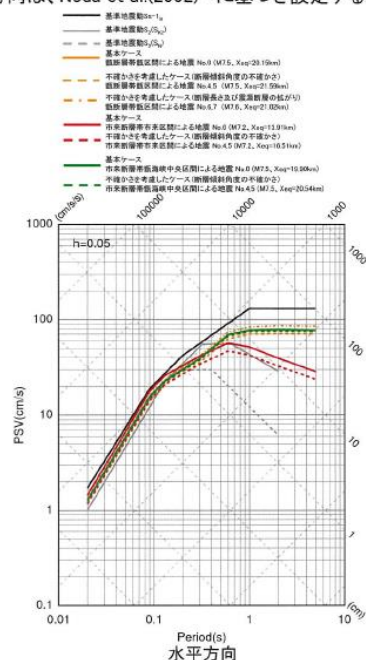
http://www.nsr.go.jp/activity/regulation/tekigousei/h26fy/data/0107_04-1.pdf

http://www.nsr.go.jp/activity/regulation/tekigousei/h26fy/data/0107_04-2.pdf

6.1 応答スペクトルによる手法に基づく基準地震動 S_s の策定

応答スペクトルによる手法に基づく基準地震動 S_s の策定

- 水平方向の基準地震動 S_{sh} は、検討用地震の応答スペクトルによる評価結果、及び旧耐震指針に基づく基準地震動 S_2 を包絡して設定する。
- 鉛直方向は、Noda et al.(2002)¹⁾ に基づき設定する。

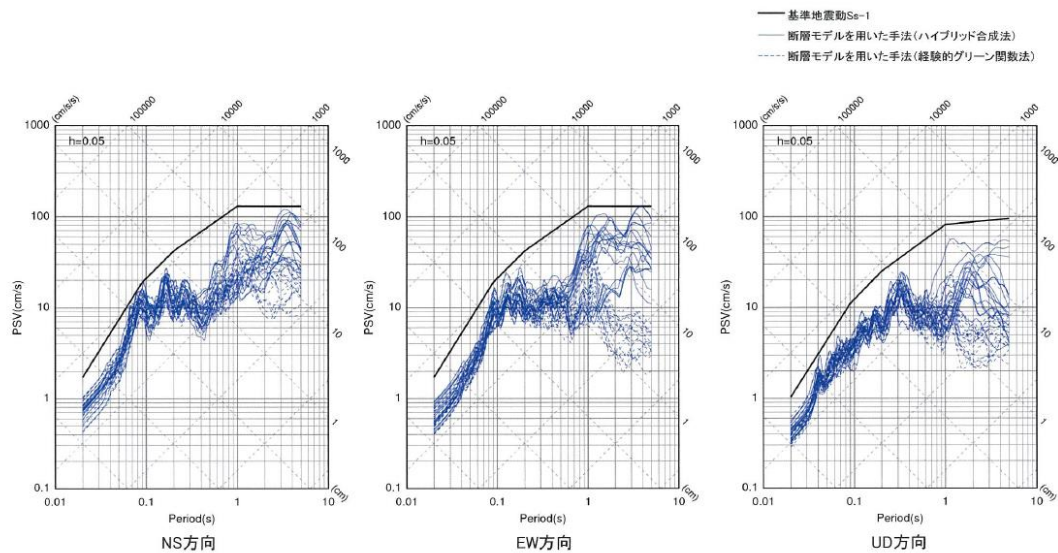


167

6.2 断層モデルを用いた手法に基づいた基準地震動Ssの策定

断層モデルを用いた手法に基づいた基準地震動Ssの策定

- 基準地震動Ss-1は、断層モデルを用いた手法による地震動評価結果を上回ることから、敷地ごとに震源を特定して策定する地震動の基準地震動はSs-1で代表させる。

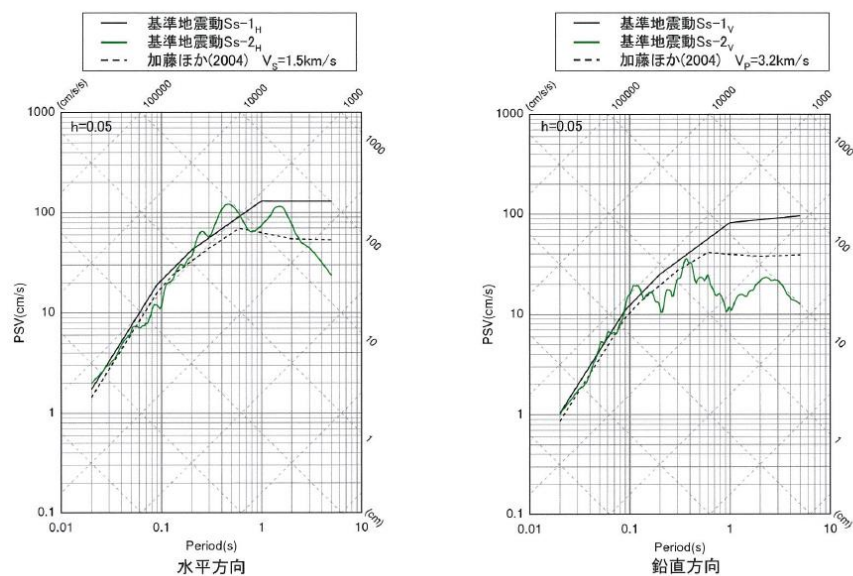


168

6.3 基準地震動の応答スペクトル

震源を特定せず策定する地震動による基準地震動Ssの策定

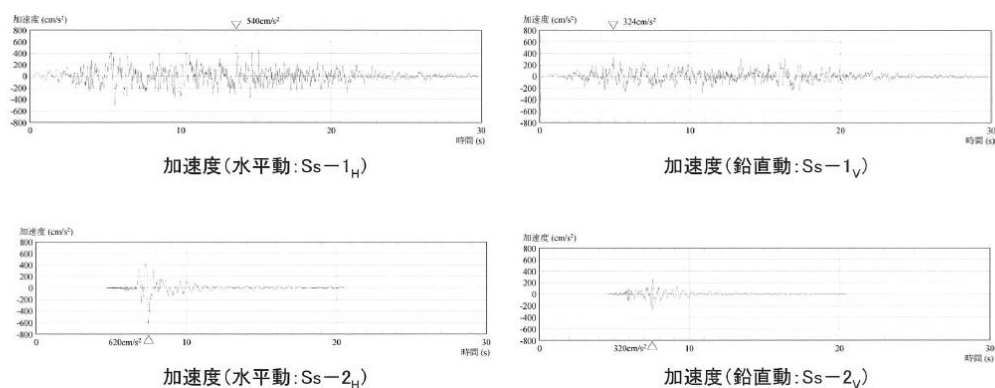
- 基準地震動Ss-1に加え、「震源を特定せず策定する地震動」として、2004年北海道留萌支庁南部地震におけるK-NET港町観測点の解放基盤波に当社独自の検討から余裕を持たせた地震動を、基準地震動Ss-2として追加。
⇒下図中緑線



169

6.4 基準地震動の加速度時刻歴波形

基準地震動の加速度時刻歴波形



基準地震動				最大加速度 (cm/s ²)
基準地震動 Ss-1	設計用模擬地震波	水平成分	Ss-1 _H	540
		鉛直成分	Ss-1 _V	324
基準地震動 Ss-2	2004年北海道留萌支庁南部地震 を考慮した地震動	水平成分	Ss-2 _H	620
		鉛直成分	Ss-2 _V	320

170

以上のとおり，川内原発の基準地震動 S_s は， S_{s-1} と S_{s-2} の2つが策定されている。

S_{s-1} （水平540ガル）は，旧耐震指針の S_2 に基づき策定されたものである。

S_{s-2} （水平620ガル）は，2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮したものである。

なお，基準地震動 S_s は，時刻歴波形と応答スペクトルの2つの形で示されている。

時刻歴波形とは，地震計で観測される（観測されるであろう）実際の地震動であり，応答スペクトルとは，地震動が建物に与える影響を示したものである（この応答スペクトルについては，後述する。）。

なお，震源を特定して策定する地震動評価の手法としては，「応答スペクトルに基づく地震動評価」と「断層モデルを用いた手法による地震動評価」の双方を実施することとされているが，その結果，地震動が建物に与える影響を示したもの

は、「応答スペクトル」と呼ばれる。

すなわち、断層モデルを用いた手法による地震動評価でも、応答スペクトルが示されるのであって、「応答スペクトルに基づく地震動評価」と「応答スペクトル」とは、名称は似ているが、異なる概念であることに注意を要する。

第3 前提となる事実

耐震設計の手法やその問題点を理解する前提として、応答スペクトルの理解が不可欠であり、応答スペクトルの理解のためには、地震と地震動、及びその地震動が建物に与える影響（すなわち、これが応答スペクトルであるが）についての基本的な理解が不可欠である。

そこで、本項では、これらの耐震設計の基本的な考え方について述べることにするが、本項の内容は、山中浩明編著『地震の揺れを科学するーみえてきた強震動の姿』（東京大学出版会）と、大崎順彦著『地震と建築』（岩波新書）とに基づいている。

1 耐震設計の基礎

(1) 地震と地震動

地震は、地下の岩盤が急速に破壊されることによって地震波が発生し、それが地殻内をあらゆる方向に伝わる自然現象である。地震動は、その地震がもたらす揺れである。地下の岩盤が大きく破壊されればされるほど、それだけ発生する地震波は大きなものになる。

地震は、ある特定の地点（震源域）で発生するものであり、その大きさは1つの決まった値（推定値）である。これに対して、地震動は、同一の地震であっても、それを観測する地点によって、その大きさは全く異なる。遠くで地震が起きた場合は、揺れ（地震動）は小さいが、近くで地震が起きた場合は、揺れ（地震動）は大きい。このことは、私たちが日常に体験することである。

(2) 震源断層面, アスペリティ (強震動生成域)

地下の岩盤のずれ破壊の面を,「震源断層面」という。この震源断層面は,鉛直であつたり,一定の方向に傾いていたりする。

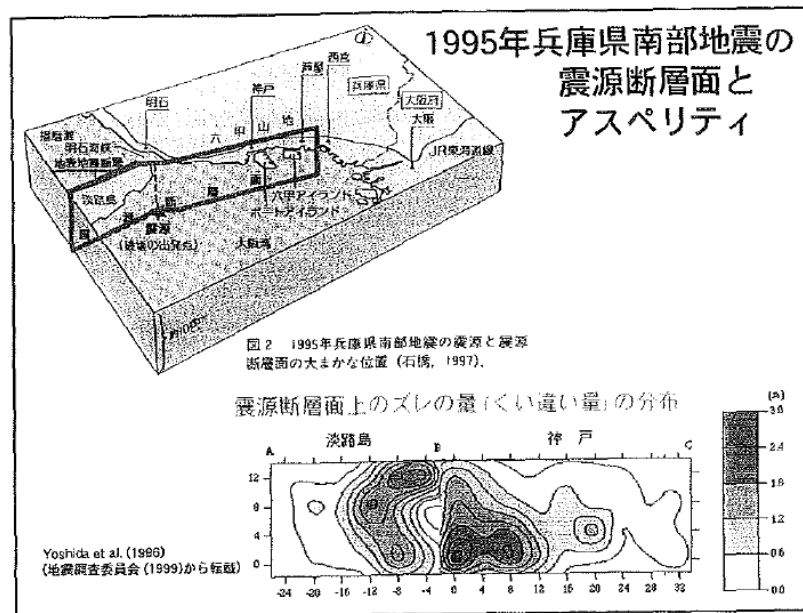
震源断層面での固着の程度は一様ではなく,強固に固着されている部分(これを「アスペリティ」といい,断層がズレを起こす場合に特に強い地震波を発する。)と,非強固部分(背景領域)があり,このアスペリティは,各断層ごとに,その位置,大きさ,強固さ,その数を異にする。

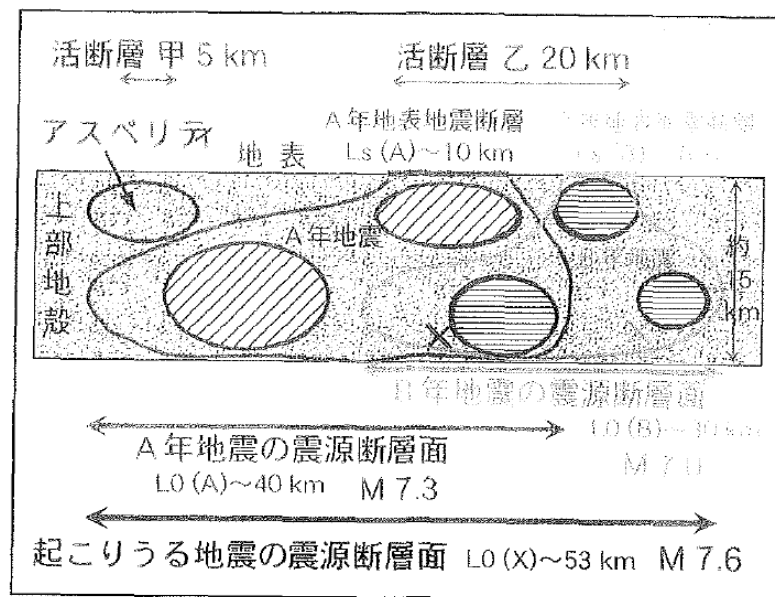
したがって,アスペリティの箇所・大きさ等の分析は,地震動の大きさを検討するうえで不可欠である。

下図のとおり,現実のアスペリティは不定形であり複雑な形状を有していて,後述するようなアスペリティの想定は極めて大雑把な想定でしかない。

また,地震ごとに動くアスペリティは同じとはいえない。

震源断層面の本体は,地表の断層の前後,地下深部に延びており,地表の断層は,地下の震源断層面の一部が地表に達したものでしかない。





(石橋克彦氏陳述書（もんじゅ事件（平成 12 年（行コ）第 12 号原子炉設置許可処分無効確認
請求控訴事件）で名古屋高裁金沢支部提出））

アスペリティの実体がどのようなものなのかは、必ずしもよく分かっていない。

しかし、一般的に、震源断層面の両側の地盤の性質や凹凸などの形状によって、固着する部分と固着しない部分とがあるといわれている。

(3) 地震（動）の観測

地震という事象の全体像としての大きさを直接測定する方法はない。地震は地中奥深くで発生するため、直接測定ができないからである。

私たちが観測できるのは地震動であり、地震動は地震計で測定することができるが、地震計は今日では全国中に多数設置されており、一つの地震に対して、瞬時に地震計が揺れを観測する。

このようにして観測された地震動の記録から、地下のどのあたりでどのような規模の地震が発生したのかを推定している。

これが、地震の震源（域）や深さ、大きさ（マグニチュード）として発表されるが、その後、地表での変位のデータや余震分布なども加えて、震源域がより詳細に特定されていくのである。

(4) 地震の大きさ

ア マグニチュードについて

地震の大きさ（地震の持つエネルギーの大きさ）はマグニチュード（M）で表わされるが、マグニチュードには幾つかの種類があり、代表的なものとしては、気象庁マグニチュード（M_j）と、モーメントマグニチュード（M_w）とがある。

気象庁マグニチュードは、周期5秒までの強震計の最大振幅を用いて計算するもので、大きな値になると飽和して、それ以上に大きな値にはならない。

そこで、東北地方太平洋沖地震のような巨大地震では、地震モーメント（M_o）によって導かれるモーメントマグニチュード（M_w）が用いられる。

イ 地震モーメント（M_o）について

地震モーメント（M_o）とは、震源断層面の面積（S）と断層面におけるずれ量（平均すべり量D）に、媒質の剛性率 μ （変形のしやすさ＝ずれ面の接着の強さ）を乗じた物理量である（山中・26頁）。

この地震モーメント（M_o）は、震源断層の規模を表すのに最適な量としてよく用いられ、後に述べる「断層モデルを用いた手法」において重要な要素となる。

ウ モーメントマグニチュード（M_w）について

モーメントマグニチュード（M_w）は、物理量である地震モーメント（M_o）から、 $\log M_o = 1.5 M_w + 9.1$ (①)

の式で算出される。

モーメントマグニチュード（M_w）からみれば、

$$M_w = (\log M_o - 9.1) / 1.5 \text{ (②)}$$

となる（山中・26頁）。

モーメントとは回転力を示すものであって、「力×長さ」であり、単位は、dyne・cm（もしくはN・m）である。

上記式の通り、マグニチュード(M_w)は地震によって放出されるエネルギーの量を、その対数によって表したものである。(1000 は 10 の 3 乗であるが、10 の何乗かを示す 3 を 1000 の対数という。「1000 の対数は 3 である」ことを「 $\log 1000=3$ 」と書く)。

例えば、 $M_w=6$ と $M_w=8$ を①式の右辺に入れると、それぞれ、 10^{18} と 10^{21} となり、対数で 3 の差があるから、真数では 10 の 3 乗、すなわち、1000 倍の差となり、エネルギーの量には大変な差がある(大崎・40 頁)。

エ 応力降下量について

応力降下量とは、断層運動生成前に断層面に働いていた剪断応力 σ_0 と、生成後の応力 σ_1 の差 $\Delta\sigma$ ($=\sigma_1-\sigma_0$) のことである。地震動のエネルギーとして放出される応力の解放量と理解できる (単位は、MPa)。

(5) 地震動の大きさ

これに対して、地震動の大きさは、日常的には、震度として示されているが、震度は、人の揺れの体感であるので、科学的厳密さに欠ける。

そこで、より科学的な尺度として用いられているのは、地震動の速度と加速度である。

速度と加速度は、極めて重要な基本的概念であるので、一言しておく。

例えば、A 点から B 点まで 100 m 進むのに 5 秒かかったとすれば、この時の速度は毎秒 20 m となる。

これに対して、A 点を通過する時の速度が毎秒 15 m で、B 点を通過する時の速度は毎秒 25 m だったとすれば、5 秒間に毎秒 10 m の速度の変化があったことになる。これを 1 秒間あたりの速度の変化にすると、毎秒・毎秒 2 m となる。

このような、「毎秒ごとに速度の変化する割合」を「加速度」という。

地震動の変位(位置の変化)は単位をセンチメートルで表すから、地面の速度は毎秒何センチメートル、加速度は毎秒・毎秒何センチメートルという表わし方を

するが、このような表わし方をした時の加速度(毎秒・毎秒何センチメートル)の単位を「ガル」と名付けている(大崎・51頁)。

(6) 重力(の)加速度

重力の加速度についても、後の議論のために、補充しておく。

高いところから物を落とすと、地球の引力に引かれて落ちるが、この時の落下速度は一定ではなく、刻々と速度が加わっていく。つまり物体は加速されている。

この時の加速度は、およそ980ガル(すなわち、毎秒・毎秒980センチメートル)という一定の値であるが、これを「重力(の)加速度」といい、1G(イチジーと読む)ともあらわす(大崎・52頁, 54頁)。

この重力加速度は、物体が鉄であっても、木であっても、羽毛であっても変わらない。

空気抵抗が無ければ、みな同じ時間で落ちるのは、重力加速度のためである。

(7) 加速度と力の関係

加速度は1秒あたりの速度の変化であり、速度が変化することとは、その物体に力が作用した、ということの意味している。これは、車を急発進した場合(毎秒ごとに速度が増加する割合が大きい場合)に、体がシートに押さえつけられること、逆に、車を急停止した場合(毎秒ごとに速度が減少する割合が大きい場合)に、体が前のめりになることで、体感できる。

「物体に力が働くとき、物体には力の同じ向きの加速度が生じる。その加速度 a の大きさは、働いている力の大きさ F に比例し、物体の質量 m に反比例する。」というのが、ニュートンの運動の第二法則であり、このように、「加速度と力は比例する」。

例えば、物には重さがある。「重さ」をもたらす力は重力であり、その重力によって生み出される加速度が重力加速度980ガル(1G)である。人間やビルは地面に支えられているが、地面が取り払われれば、980ガルの加速度で下に落ち

る。

このように、物体は支えがあるから落ちていかないだけであって、いつも下方に向かって980ガルの加速度をもたらす重力を、地球上のすべての物体は受けているのである。

(8) 地震動の加速度

地震動は、地面の振動である。

振動とはある量のプラスとマイナスが繰り返される状態であり、地面の振動は、プラス・マイナスの加速度が繰り返し作用する状態である。これは、車が急発進・急停止・急後進を何度も繰り返している状態と同じである。

加速度は力であり、地震動の加速度によって、地上の物体には力が作用する。加速度が大きければ、作用する力もそれだけ大きくなり、建築物を壊したりする。

図 I - 1 (大崎・9頁)は、小説「日本沈没」が映画化された際に、大崎順彦氏

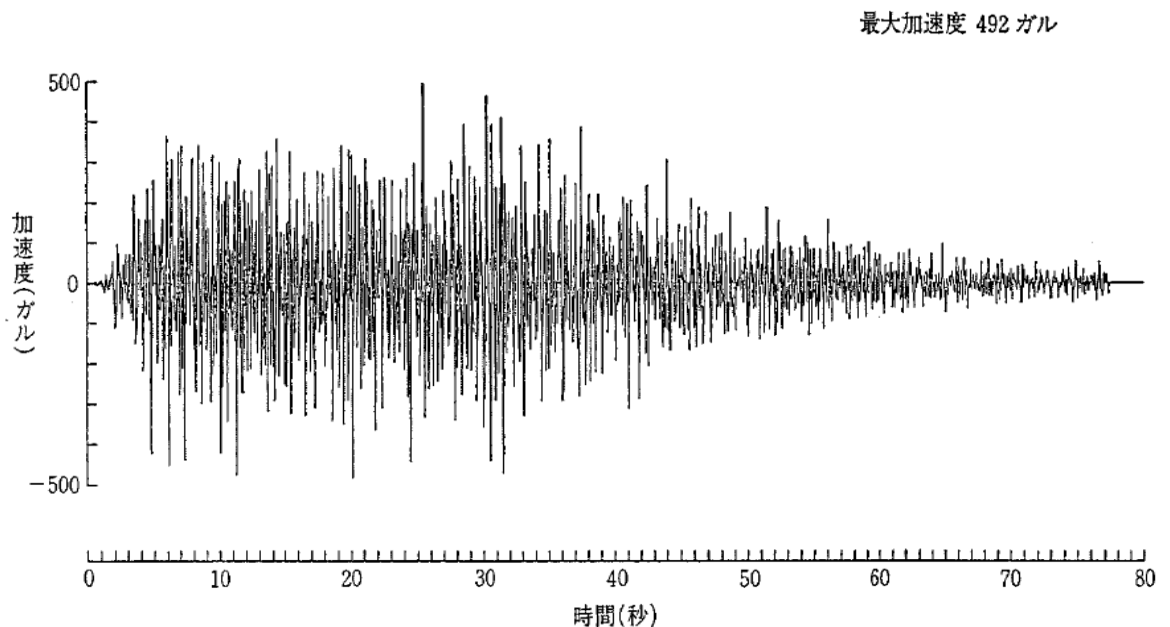


図 I-1 東京大学構内における加速度記録(「東京大地震」)

が作成した「東京大地震」の推定地震動の加速度記録である（実測ではない）。

この図では、約 80 秒間、大小様々な加速度を繰り返しながら、地面は振動を続けているが、最も大きい加速度は 25 秒付近に表れており、その値は 492 ガルである(大崎・8 頁)。

したがって、上記の地震は、(最大加速度) 492 ガルの地震といえることができる。

(9) 地震動の例

ただし、最大加速度が同じ地震であれば、その性質(影響)も同じ、というわけではない。むしろ、最大加速度が同じでも、その性質(影響)は全く異なる。

たとえば、次の図 V-3 (大崎・77 頁)では、4つの地震動の加速度記録が並べてある。

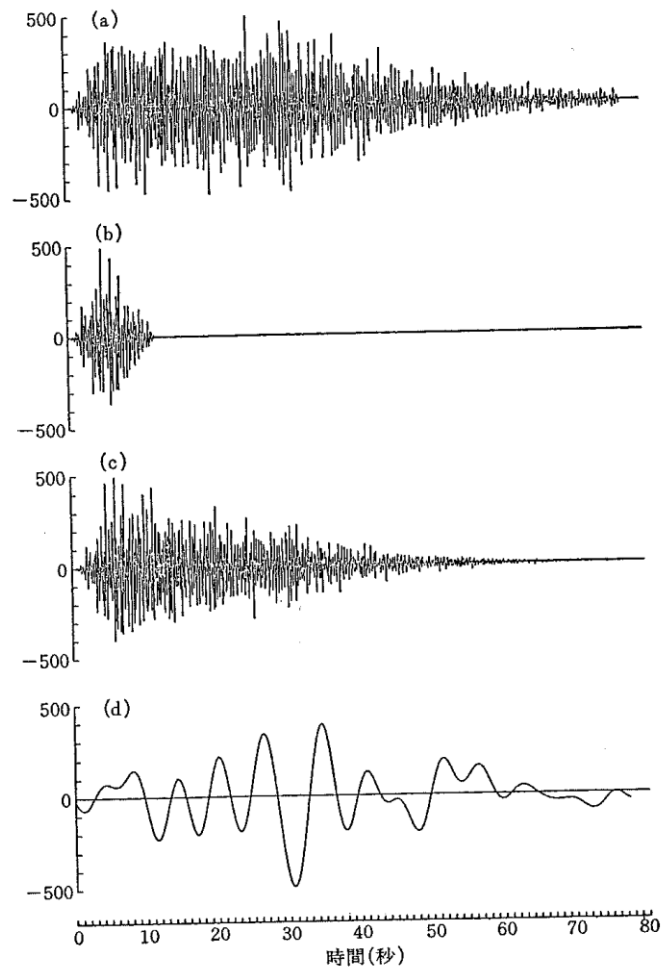


図 V-3 地震動のいろいろ

図 V-3 (大崎・77頁)の4つの地震動の最大加速度は、すべて490ガルである。ただし、その性質は全く異なる。

(a)は、激しい地震動が80秒近く続いている。

(b)は、継続時間が短く、12秒ほどである。

(c)は、立ち上がり直後にいったん強い加速度が作用するが、徐々に振動が収束する。

(d)は、(a)(b)(c)と異なり、長周期のゆっくりとした揺れである。

このように、同じ490ガルの地震でも、その性質は相当に異なる。もちろん、建物や機器・配管に及ぼす影響も全く異なるのである（このことは、後述する）。

(10) 小括

以上のとおり、「最大加速度が大きければ、地震動は強い」と言えることは、間違いない。

だから、最大加速度が大きい地震は破壊力が強く、大きい被害を引き起こす。破壊力は力であり、加速度も力であるから、加速度＝破壊力、ということが成り立つ。

ただし、最大加速度の大小だけが、破壊力を決定する要因ではない。地震動の破壊力は、最大加速度以外の特性（特に共振）の総合効果であることから、次に、最大加速度以外の地震動の性質を述べた上で、地震動の破壊力について述べる。

2 地震動の性質

(1) 振動の基本的な性質

振動の基本的な性質は、メトロノームの動きで（後述するように倒立振子でも）イメージできる。メトロノームの振り子は、同一線上を、左右に規則正しく、行きつ戻りつしている。

振り子が1秒間に1回往復する間に経過する時間を、「振動の周期」という。

① 1回往復するのに1秒かかるとすれば、周期は1秒

② 0.5秒かかるとすれば、周期は0.5秒

③ 2秒かかるとすれば、周期は2秒

である。速く繰り返すもの（例えば、0.5秒）を短周期、ゆっくり繰り返すもの（例えば、2秒）を長周期という。

これに対して、1秒間に何回振動するかという回数を、「振動数」といい、その単位はヘルツである。

① 1ヘルツは、1秒間に1回の振動

② 2ヘルツは、1秒間に2回の振動

③ 0.5ヘルツは、1秒間に0.5回の振動

となる。

周期と振動数は、逆数の関係になる。

次頁の図V－1（大崎・74頁）は、周期0.5秒の振動を表している。

横軸が周期、縦軸が振れ幅を表す。振れ幅は「振幅」ともいう。

図V－1のような同じ状態を単純に繰り返している振動を単振動という。

振幅がいくら大きくなっても、周期が同じであれば、戻ってくる時間は同じであるが、それは揺れの速度が速いということであり、すなわち、速度の変化量＝加速度も大きくなる、ということを意味している。

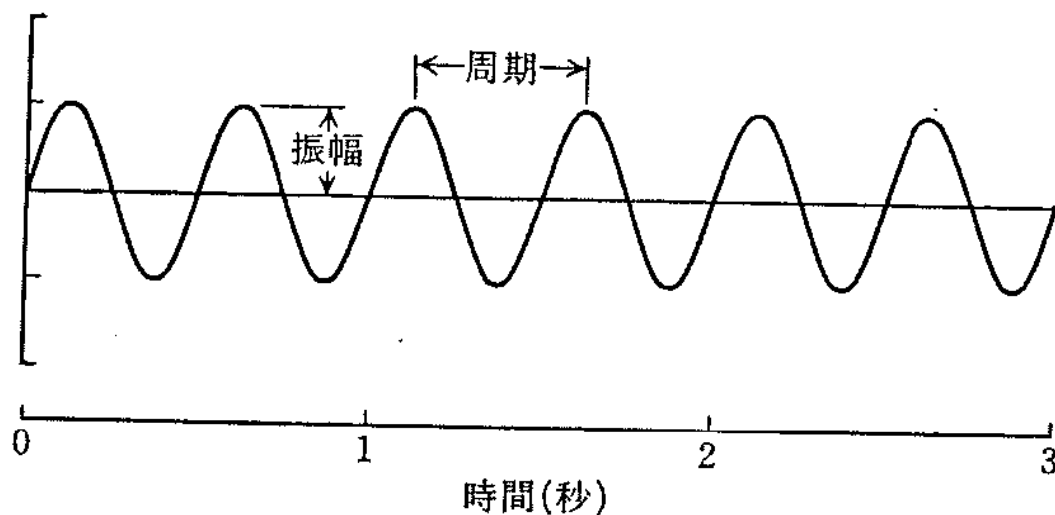


図 V-1 単振動

(2) 地震動の諸性質

実際の地震は、このような単純な振動ではなく、同じ状態が規則正しく繰り返されているわけではない。

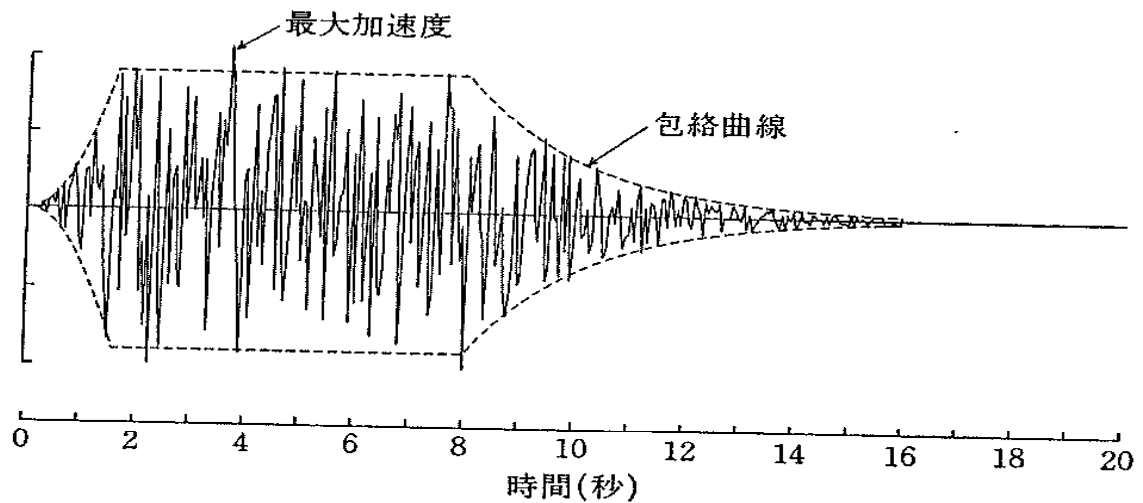


図 V-2 地震動

たとえば，図V－2（大崎・75頁）の地震動は16秒間続いているが，最大のものは3.7秒付近であり，これが，この地震動の最大加速度である。

破線は，地震動の振幅を包み込んでいるという意味で，包絡曲線という。

一見複雑に見える振動も，実は，いろいろな振幅と周期をもった振動の寄せ集めであり，単純な振動に分解することができる（このことは後述する）。

以上をまとめると，地震動の特性としては，

①最大加速度，②継続時間，③包絡曲線，④周期特性
の4つがあげられる。

(3) 周期特性とスペクトル

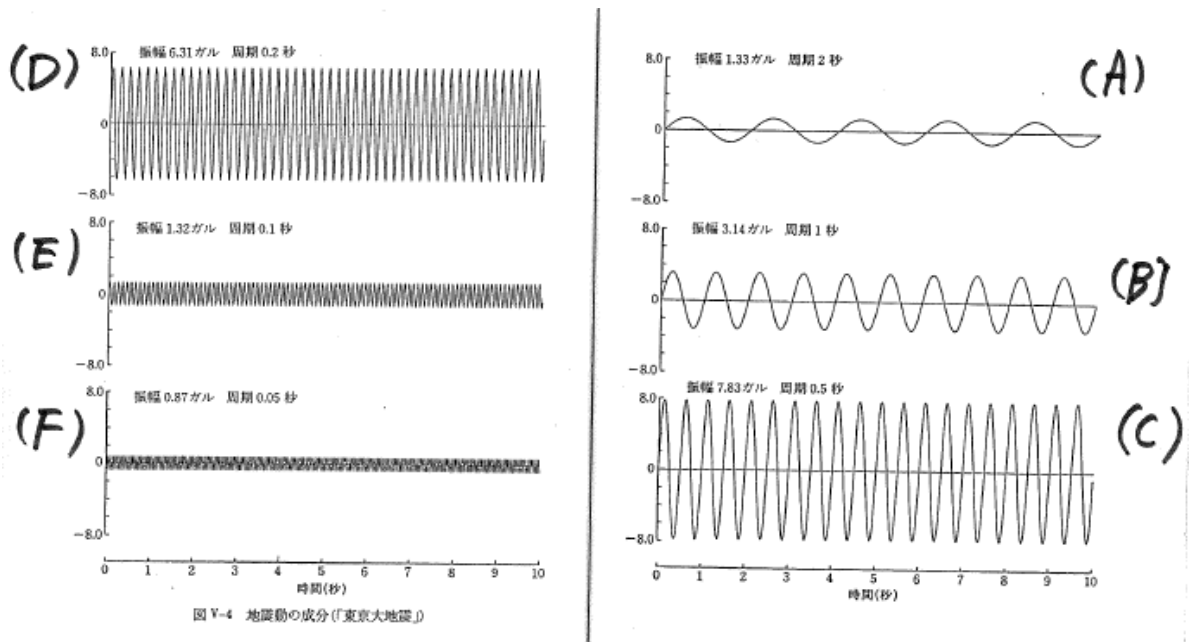
ここで，スペクトルという概念を説明しておく。

スペクトルを一般的に定義すると，「複雑な組成を持つものを，単純な成分に分解し，その成分を，それを特徴づけるある量の大小の順に従って並べたもの」と言える（大崎・83頁）。

地震動の加速度記録は，一見複雑に見えるが，実はいろいろな振幅と周期をもった振動の寄せ集めであり，単純な振動に分解することができる。分解する方法は，創始者である数学者フーリエの名前にちなんで，フーリエ解析と呼ばれている。

る。

前に紹介した図 I - 1 (大崎・9 頁)の地震動を分解 (フーリエ解析) して, 出てきた単振動 (もとの地震動の成分という。)のうち, 代表的なものの幾つかを並べたものが, 次頁の図 V - 4 (大崎・86 頁~87 頁)である。



この図 V - 4 に並べた成分は全部単振動であるが, 振幅と周期が違う。これをスペクトルの趣旨に従って, 周期の大きい順番に並べると以下のようなになる。

- (A) 右上振幅 1. 3 3 ガル周期 2 秒
- (B) 右中振幅 3. 1 4 ガル周期 1 秒
- (C) 右下振幅 7. 8 3 ガル周期 0. 5 秒
- (D) 左上振幅 6. 3 1 ガル周期 0. 2 秒
- (E) 左中振幅 1. 3 2 ガル周期 0. 1 秒
- (F) 左下振幅 0. 8 7 ガル周期 0. 0 5 秒

この結果を, 一覧できるようにしたものが, 次の図 V - 5 (大崎・89 頁)である。

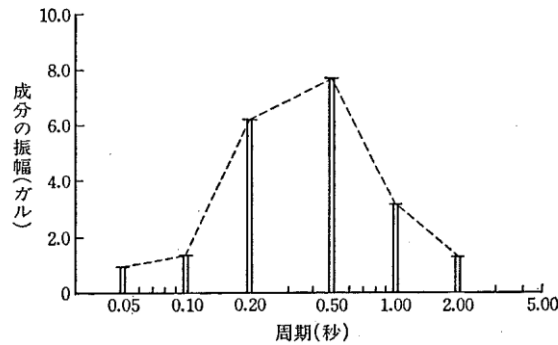


図 V-5 フーリエ・スペクトルの原理

さらに、図V－5をより細かく固有周期ごとに計算して一覧したものが、次の図V－6 (大崎・89頁)の曲線である。

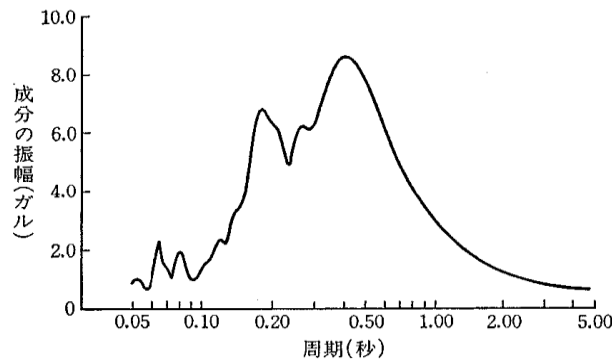


図 V-6 フーリエ・スペクトル(「東京大地震」)

図V－6をみると、周期0.5秒付近に高い山がある。これは、つまり、元の地震動の中に、周期が0.5秒程度の大きな振動が含まれていることによる。

このような性質は、元の地震動記録を見ただけでは分からないものであり、これをはっきりさせてくれるのがフーリエ解析であり、フーリエ・スペクトルである。この曲線は、フーリエの名をとって、フーリエ・スペクトルと呼ばれている(大崎・88頁)。

3 地震動の破壊力

(1) 地震動と建築

ここまで述べたことは、地震と地震動のことばかりであり、建築物は不在であった。そこで、ここから、地震動が建築物にどのような影響を及ぼすか、という

ことをみていく。

(2) 固有周期

小さな地震（地震動）では建築にはダメージはないが，反対に，大きな地震（地震動）は建築を破壊する。

建築が破壊されるのは，建築が揺れ動くからである。すなわち，建築は，力を加えればそれ自体揺れ動く振動体である。

では，建築は，どのように揺れるのか。

揺れによる破壊を考える場合は，振動体としての揺れ方の性質，すなわち，早く揺れるのか，ゆっくり揺れるのか，という振動の周期が重要となる。

建築には大小様々なものがあるが，板バネ（倒立振子）と錘（おもり）の簡単なモデルで示すことができる（図VI－6。大崎・103頁）。

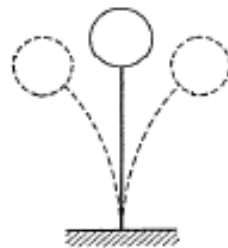


図 VI-6 倒立振子

錘の重さは建築全体の重量を表し，板バネは建築の堅さ・柔らかさを表す。

コンクリートの低層の建物は堅いので「厚くて短い板バネ」といえ，超高層のビルは柔らかいので「薄くて長い板バネ」といえる。

図VI－6の倒立振子を指でつついて揺らすと，振動を始める。

ひとりで揺れ動く振動を「自由振動」という。

この場合の振動の周期は，錘の重さと板バネの強さ（厚さと長さ）で決まる一定の値であって，それ以外の周期をもって自由振動することはない。メトロノームで言えば，錘の位置をずらさないかぎり，一定の周期で揺れるのと同じことである。

このように、自由振動の周期は、それぞれの振子に固有なものであり、これを「固有周期」という。

物にはすべて固有周期があり、建築にも、その重量と剛性で決まってしまうそれぞれに固有な固有周期がある。すなわち、堅い低層建築の固有周期はガタガタと速く揺れる短周期、柔らかい高層建築はユラユラとゆっくり揺れる長周期である（大崎・104頁）。

(3) 共振現象

では、なぜ、固有周期が問題となるのか。

それは、建物の固有周期と一致する地震動の成分によって、揺れ始めた振動が成長していき、ついには建物を破壊するに至るからである。

たとえば、固有周期が0.5秒の振子を想定して、この足下の地面を揺らしてみる。この時、地面の揺れの周期が振子の固有周期と一致しない短周期（たとえば0.2秒）あるいはずっと長周期（たとえば3秒とか5秒とか）だったとすると、振子はそれなりに揺れるけれども、揺れは成長しない。そして、この場合、揺れが少ないので、建物を破壊することはない。

これに対して、地面の揺れの周期が振子の固有周期と一致する0.5秒だとすると、振子の振動は次第に成長し、とめどもなく大きい揺れに成長してしまうのである。揺れが大きくなるということは、それだけ大きな力が振子に加わるということであり、そして、ついには建物を破壊するに至るのである。

このように、「外部から与えられる振動の周期と、物の固有周期とが一致したために、途方もなく大きい振動が出現する現象」を、共振という（大崎・106頁）。

(4) 実際の地震動と建物の共振

実際の地震動は、0.5秒の単周期ではなく、様々な周期の波の集合だということとは前述した。

これに対して、物の固有周期は一定（たとえば周期0.5秒）であるので、物

の側からすれば、いろいろな周期の地震動がやってくるうちの、自分の固有周期に近いものに特に反応して共振し、その都度大きく揺れる、ということになる。

(5) 応答スペクトル

「応答」とは、建築や振子が地震動を受け、地震動とその物(建築物や振子)自体の特性(固有周期)に応じて揺り動かされる、その反応(答え方)のことをいう。

「応答スペクトル」とは、応答のスペクトル、すなわち、建築や振子の反応を、周期の大小の順に従って並べたものであり、「要するに、ある地震動がいろんな建築に対して、どんな力を及ぼすかということを、一見してわかりやすいように描いた図形」(大崎・107頁)である。

次の図IV-8(大崎・109頁)は、応答スペクトルの概念を模式的に説明したものである。

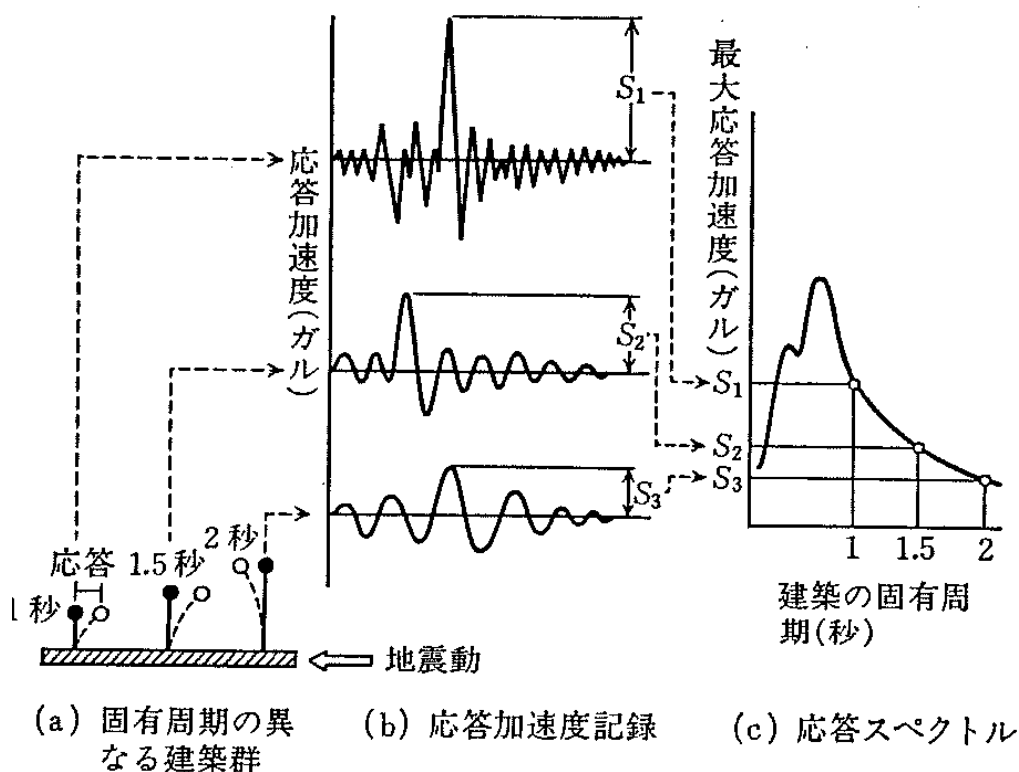


図 M-8 応答スペクトルの説明図

図VI-8の左側の(a)では、地面を模した台上に、固有周期が異なるモデルを3

つ（ここでは1秒，1.5秒，2秒）並べてある。今この台を，ある地震動の加速度で揺らしてみる。すると，3つのモデルは一斉に揺れ出す，つまり，応答を始めるが，その揺れ方は，①地震動の特性（揺れの特性，すなわち最大加速度，継続時間，周期特性など）と，②モデルの特性（固有周期）との関係で，それぞれ違ったものとなる。

この時，振子の錘に加速度計が取り付けであったとすると，加速度計はそれぞれのモデルが，与えられた地震動（仮にA地震動とする。）に対して応答することによって生じる加速度，すなわち応答加速度をそれぞれ記録する。

この記録が，図IV－8の真ん中の(b)の「応答加速度記録」である。

(b)の上段の記録は，固有周期が1秒のモデルの応答加速度を示しているが，その最大値がS1である（旧耐震指針のS1ではない）。これが(a)の左端のモデル，つまり固有周期が1秒の建築がA地震動によって揺さぶられている間に，その建築に対して作用した最大の加速度，つまり，A地震動に対する固有周期1秒の建築の最大応答加速度である。

同じように，固有周期1.5秒（(b)の中段）や2秒の建築（(b)の下段）には，それぞれ最大応答加速度S2，S3が作用する。

図IV－8右側の(c)は，横軸に建物の固有周期，縦軸に最大応答加速度を表したものである。(a)の3つのモデルの固有周期（ここでは1秒，1.5秒，2秒）を横軸にとり，それに対応する最大応答加速度S1，S2，S3が縦軸に取られている。

その結果が，(c)の白丸点である。

今みてきた固有周期は3つだけであるが，実際にはさらに細かく固有周期を分け，応答加速度を得ることができる。すなわち，さらに多くの固有周期におけるそれぞれの最大応答加速度を調べて，これを隙間無くつなげると，(c)の白丸も隙間なく埋められ，波線が得られる。これが，すなわち，A地震動の応答スペクトルである。

このことから明らかなように，ある地震動に対してはそれに対応した応答スペクトルが得られ，また，別の地震動に対してはその別の地震動に対応した応答ス

ペクトルが得られる。

(6) 地震動と応答スペクトル

ここで、図 I - 1 (大崎・9 頁) に示した地震動を、もう一度みる。

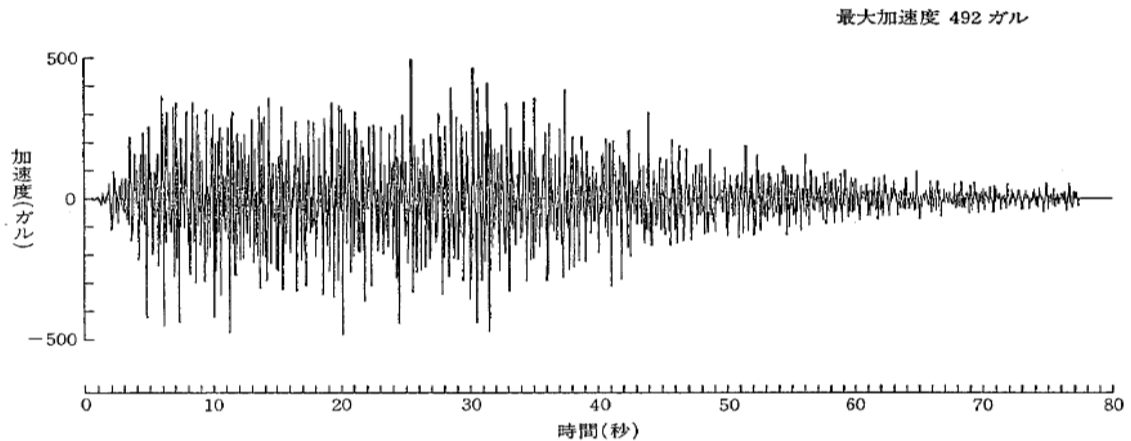


図 I-1 東京大学構内における加速度記録(「東京大地震」)

この地震動(図 I - 1)の応答スペクトルが、図 VI - 9 (大崎・110 頁)である。この地震動をフーリエ解析した図 V - 6 (大崎・89 頁)と並べてみる。

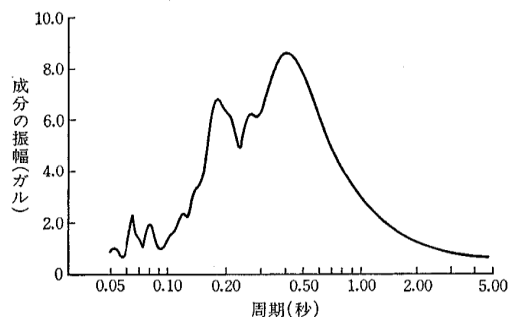


図 V-6 フーリエ・スペクトル(「東京大地震」)

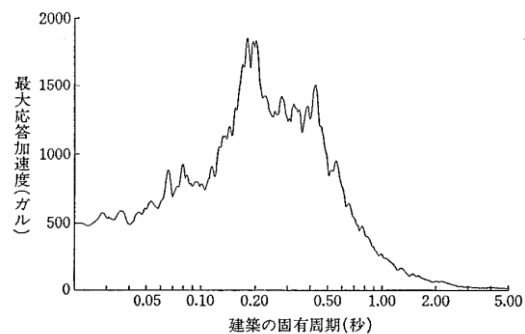


図 VI-9 応答スペクトル(「東京大地震」)

図 V - 6 のフーリエ・スペクトルでは、周期 0.5 秒付近に高い山(大きな加速度)があり、この地震動では周期 0.5 秒の成分が優勢であった。そして、周期 0.2 秒付近にも、やや低い山がある。

これに対して、同じ地震動に対応する応答スペクトル図 VI - 9 でも、0.5 秒と 0.2 秒のところに山があるが、山の高さが逆転しており、0.2 秒付近の方

が高い。

ということは、地震動の成分としては、0.5秒のものがより優勢であるが、建築に与える影響という点からみると、固有周期が0.5秒ではなくて、0.2秒の建築に対してもっとも強く作用する，ということを示している(大崎・113頁～114頁)。

なぜ，このような結果になるのか。

これは，地震動の破壊力は，最大加速度だけでは説明できず，継続時間（さらにその他の特性）も大きく影響することによるからである(大崎・112頁)。

極めて単純化して言えば，地震動の中で最大の加速度は周期0.5秒付近の成分だったが，その継続時間は短く，一方で，周期0.2秒付近の加速度は，地震動の中では最大の成分ではなかったが，継続時間が長く，共振により建物の揺れは成長したものだ，ということが出来る（実際にはさらに複雑であるが，ここまでにとどめる）。

このようにして得られた応答スペクトルは，地震動が建築物に与える影響を集約したものであって，ここに耐震設計の全体が表れるのである。

耐震設計ではこの応答スペクトルが重要であり，地震動の大きさそのものでは，地震の破壊力は示されない。

したがって，「何ガルの地震動にも施設は耐えられる」と言ったところで，それだけでは大した意味はなく，問題は，応答スペクトルが，建物や機器配管などの施設の固有周期付近でどれだけか，なのである。

(7) 原発の機器・配管の固有周期は0.02秒～0.5秒程度の短周期に集中していること

そして，原発の重要な機器・配管の固有周期は，0.02秒～0.5秒の短周期に集中している。次の図は，原発の重要な機器・配管の固有周期を，応答スペクトルに書き込んだものである。

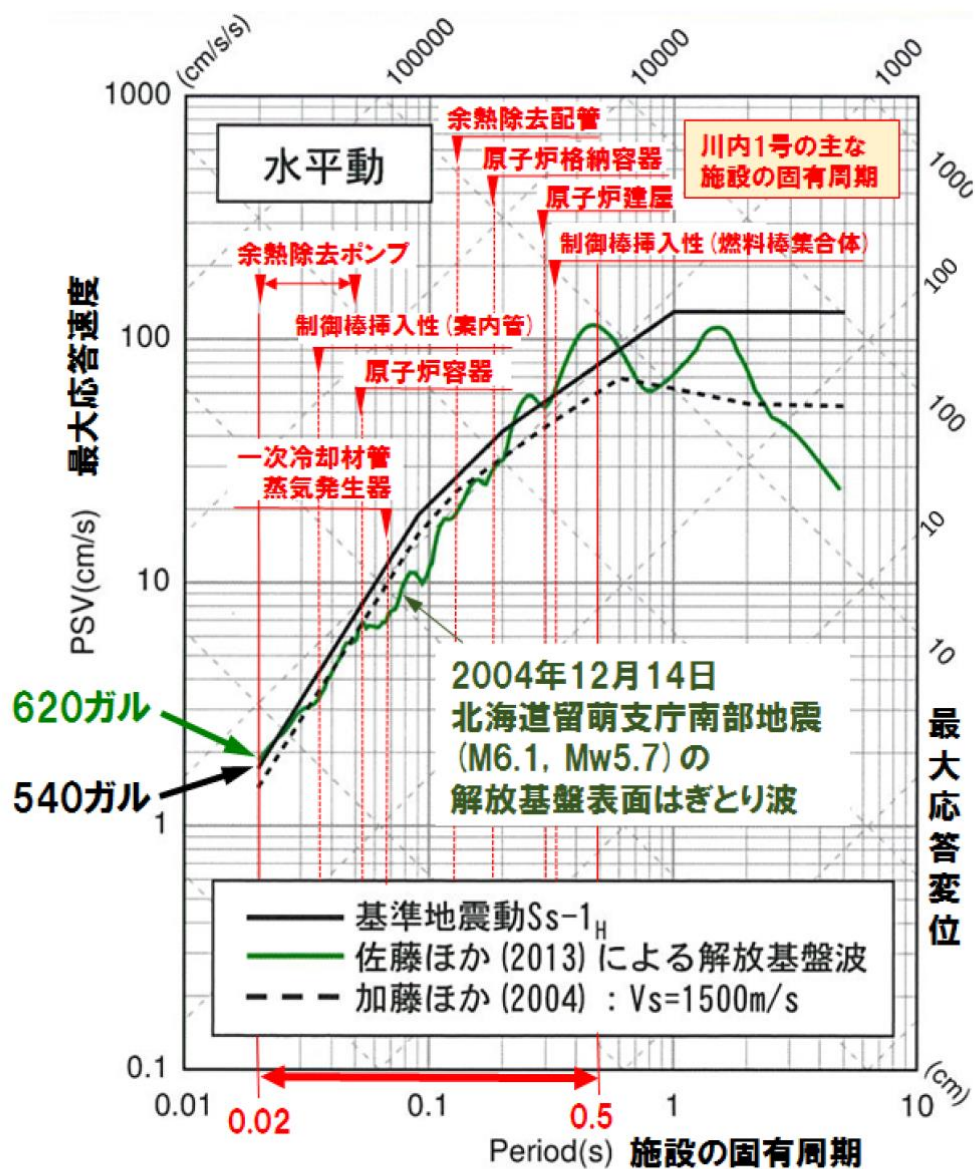
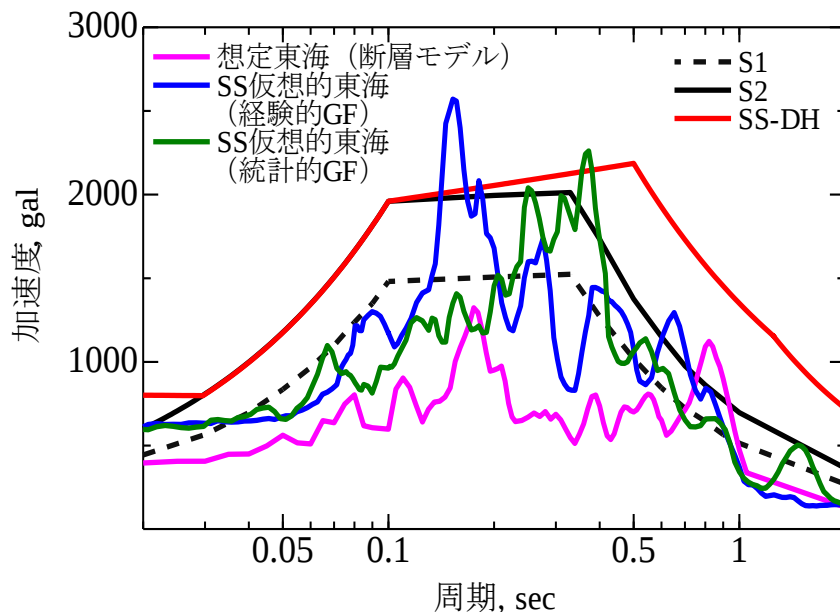


図 4 : 2014 年原子力規制委員会適合性審査における川内 1・2 号の基準地震動[16]と主な施設の固有周期[12]

(長沢啓行「川内 1・2 号機の耐震安全性は保証されていない」)

地震動の最大加速度だけに目を奪われてはならない。重要なのは、機器・配管の固有周期における応答加速度である。

このことをもっとも端的に表している応答スペクトルが、下記の浜岡原発の基準地震動である。



この図でS 2は6 0 0ガルであった(縦軸において周期 0.02 秒で6 0 0ガルであることが、これを示している)。

これに対して、S S－DHは8 0 0ガルの地震動に引き上げられたとされた。

しかし、その内容は、周期 0.02 秒～0.03 秒までが、引き上げられただけで、それ以降は、S 2と同じ軌跡をたどるというものであった。0.1 秒付近からは、S 2をやや上回る加速度を示しているが、重要な機器・配管における応答加速度には、ほとんど変化がないものであった。

すなわち、本来この地震動が施設に及ぼす影響は、赤線の下に隠れている黒の実線(S 2)の 600 ガル程度であるはずなのに、中部電力は、この図によって 800 ガルまで耐えられると喧伝したのである。

この地震動の引き上げは、施設には影響を与えないのであるから、中部電力による耐震偽装として評価されるべきものであった。

このように、生の地震動そのものの値では、地震が施設に与える影響の大きさの評価はできないことには注意が必要であり、問題は実際に当該建物、施設の固有周期に近い応答スペクトルがどうなのかなのである。

(8) 耐震設計

同じ土地の同じ地盤の上に立ち、同じ地震動を受けても、作用する力（すなわち地震動入力）は、建築自体の特性によって違う。

建築の特性を端的に表現し、直接地震動入力に反映させるのに、もっともふさわしい特性値、それが応答スペクトルである。

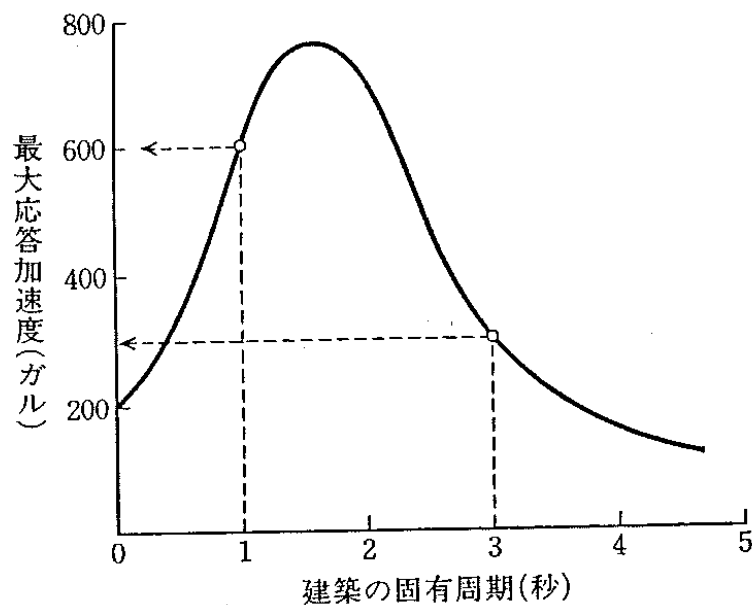


図 M-10 応答スペクトルの意味

たとえば、建築の固有周期が1秒だと決まると、上の図VI-10（大崎・111頁）の応答スペクトルから、最大応答加速度は600ガルに耐えられるようにすれば良いということになる。もし、この時、建築の固有周期が3秒だとすれば、最大応答加速度は300ガルに耐えられるようにすれば良いということになる。

600ガルというのは、つまり重力加速度（980ガル）のほぼ0.6倍であるから、建築には、その重量の0.6倍の力がかかるということになる。この力に対して壊れないように、部材や寸法など、具体的な設計に取りかかれば良い。

このような考え方が採用されたのは昭和56年（1981年）の建築基準法の改訂時であった。

(9) より詳細な耐震設計

ここまでみてきた応答スペクトルは、錘が一つだけの倒立振子のモデルであった。この錘は建築の全重量をひと塊にしたものと考えているので、これから求められるものは、建築に働く総体の力である。

しかし、建築の総体に働く力はこれでいいが、数階建ての建物の場合の各床に、どのような力が働くかは、これだけでは分らない。

原発では原子炉やポンプ等無数の機器・配管が設置されており、これらの機器・配管は、建物とは別の固有周期を有している。そして、その応答は、それが各階のどこに設置されているかによっても異なる。

そこで、各階の床にどのような力が働くかは、この階数分だけ、錘を縦につなげて串団子のようなモデルを考える必要がある。

このようにして得られた応答スペクトルは、床の数だけ得られるが、これを、「床応答スペクトル」という。

各階の床に設置された機器・配管の設計においては、機器・配管の固有周期を把握し、それを設置する床応答スペクトルから、最大応答加速度に耐えられるように設計しなければならない、ということになる。

このことは、数千本とも数万本とも言われている配管や、その他の機器・設備・施設について同様である。

(10) 短周期レベルの地震動と応力降下量

一般に、アスペリティの応力降下量の大きさと短周期レベルの地震動の大きさとは比例的関係にあるので、応力降下量を大きくした割合と短周期レベルが大きくなる割合はおおむね一致する。

平成21年(2009年)4月24日付けの、各原子力事業者への原子力安全・保安院の通知である「耐震バックチェックにおいて地震動評価を行う際の応力降下量の取り扱いについて」

<https://www.nsr.go.jp/archive/nisa/oshirase/2009/files/210427-1.pdf>

では、「基本震源モデルに対して応力降下量を大きくした割合と短周期レベルが大きくなる割合が異なる場合があることが確認されました。」としている。

これは、応力降下量を大きくした割合と短周期レベルが大きくなる割合はおおむね異ならないが、「異なる場合がある」ということを意味すると解される。

(11) 物が壊れれば、固有周期が変化すること

さらにやっかいなのは、物は、壊れれば、その固有周期が変化する、ということである。

前に、物にはすべて固有周期があり、堅い低層建築の固有周期はガタガタと速く揺れる短周期、柔らかい高層建築はユラユラとゆっくり揺れる長周期であると述べたが、今、これが、何らかの理由で壊れかけているとしよう。

そうすると、固有周期が短周期側から長周期側にずれることがあり、元の設計時の固有周期では最大応答加速度以下の応答だったものが（元々そうして設計された。）、固有周期が変化することによって、別の周期で共振することになってしまい、耐震設計時点での期待とは別の挙動を示すことがあり得る。

このとき、建築物にかかる力（すなわち加速度）が小さくなる方向であれば問題はないが、いつもそうだとは限らない。

したがって、物を設計する場合は、これらについても考慮する必要がある。

第4 「不確かさの考慮」が原発の耐震設計では必要となること

1 不確かさを考慮しなければならない理由

(1) 地震の科学には限界があること

自然現象の測定には必ずある誤差がある。測定の精度は、その測定の対象や手法によって種々であるが、たとえば地盤の速度構造の測定の誤差は決して小さくはない。

岩波書店の雑誌「科学」2012年6月号（「地震の予測と対策：『想定』をどのように活かすのか」）に掲載された、岡田義光防災科学研究所理事長、瀬瀬一起東京大学地震研究所教授、島崎邦彦東京大学名誉教授の鼎談では、瀬瀬教授と岡田教授の以下の発言が掲載されている。

「瀬瀬 地震という自然現象は本質的に複雑系の問題で、理論的に完全な予測をすることは原理的に不可能なところがあります。また、実験ができないので、過去の事象に学ぶしかない。ところが地震は低頻度の現象で、学ぶべき過去のデータがすくない。私はこれらを「三重苦」と言っていますが、そのために地震の科学には十分な予測の力はなかったと思いますし、東北地方太平洋沖地震ではまさにこの科学の限界が現れてしまったと言わざるをえません。そうした限界をこの地震の前に伝え切れていなかったことを、いちばんに反省しています。

編集部 限界があるとして、どういう態度で臨むべきでしょうか。既往最大に備えることになりますか。

岡田 どれくらいの低頻度・大事象にまで備えるかという問題になります。1000年に一度、1万年に一度と、頻度が1桁下がるごとに巨大な現象があると考えられます。大きなものに限りなく備えるのは無理ですから、どれくらいまで許容するかになります。日常的に備えるのは、人生の長さから考えると、100～150年に一度のM8くらいまでで、M9クラスになると、ハー

ドではなくソフト的に、避難などの知恵を働かせるしかないのではないのでしょうか。

編集部 原発の場合にはどうお考えになりますか。

岡田 施設の重要度に応じて考えるべきですから、原発は、はるかに安全サイドに考えなければなりません。いちばん安全側に考えれば、日本のような地殻変動の激しいところで安定にオペレーションすることは、土台無理だったのではないかという感じがします。だんだん減らしていくのが世の中の意見の大勢のようですが、私も基本的にそう思います。

瀬瀬 真に重要なものは、日本最大か世界最大に備えていただくしかないと言っています。科学の限界がありますから、これ以外のことは確信をもって言うことができません。しかし、全国の海岸すべてで日本最大の津波高さに備える経済力が日本にはないだろうと考えています。そうするとどうするか。それは政治などの場で、あるいは国民に直接決めていただくしかないであろうと思います。

編集部 中越沖地震で号機ごとにゆれがかなり違っていました。地質の影響は本当にあらかじめわかるのでしょうか。

瀬瀬 前述のような科学のレベルですから、予測の結果には非常に大きな誤差が伴います。その結果として、予測が当たる場合もありますし、外れる場合もあります。ですので、その程度の科学のレベルなのに、あのように危険なものを科学だけで審査できると考えることがそもそも間違いだったと今は考えています。」（636頁～637頁）

また、同じ鼎談の中で、島崎邦彦氏（原子力規制委員会委員長代理）は、「平均像のようなものを見ていることになります。解像度を一生懸命よくしようとしています。ほんとうに中で何がおきているのかには手が届いていない。」とも述べている。（642頁）。

これらの発言の意味するところは、極めて重大である。

要するに、地震の科学は、対象が複雑系の問題であるので、原理的に完全な予測が困難であること、実験のできるものではないので、過去のデータに頼るしかないが、起こる現象が低頻度であるのでデータが少ないこと、したがって、地震の科学には限界があるということである（瀬戸）。

また、頻度が1桁下がるごとに大きな現象があると考えられるとされている（岡田）。

真に重要なものは（既往）日本最大か世界最大で備えるしかない（瀬戸）とされているが、日本最大、世界最大と言っても、問題は、どれだけの期間での最大かであり、地震はたかだか何百年の間の最大でしかない。それで、何万年、何10万年の間の最大などわかるはずがない。

我々の手にしているデータは僅かであり、とりわけ詳細な地震動のデータは、日本においては、兵庫県南部地震後に多数の強震計が配置された平成9年（1997年）以降のものでしかない。

これらの発言の内容は、実は、科学者たちは当然に知っていたことであった。しかし、福島第一原発事故の前には、国の施策に反するものとして、科学者たちは言おうとしなかった。それをようやく今、言い出したというものである。いわば、これらの発言は、科学者たちの反省の弁とすることができる。

（2）地震学の現状

実際に、過去の地震では、それがどのような現象であるのかは必ずしも分かっていない。東北地方太平洋沖地震について見れば、それが良くわかる。

次の2つの図のうち、最初の図IV. 10は、東北地方太平洋沖地震で、ずれの量がどこでどれだけあったかを示した図である。宮城県沖で大きなずれが発生したことは共通して認められるものの、各見解は相当に異なっている。

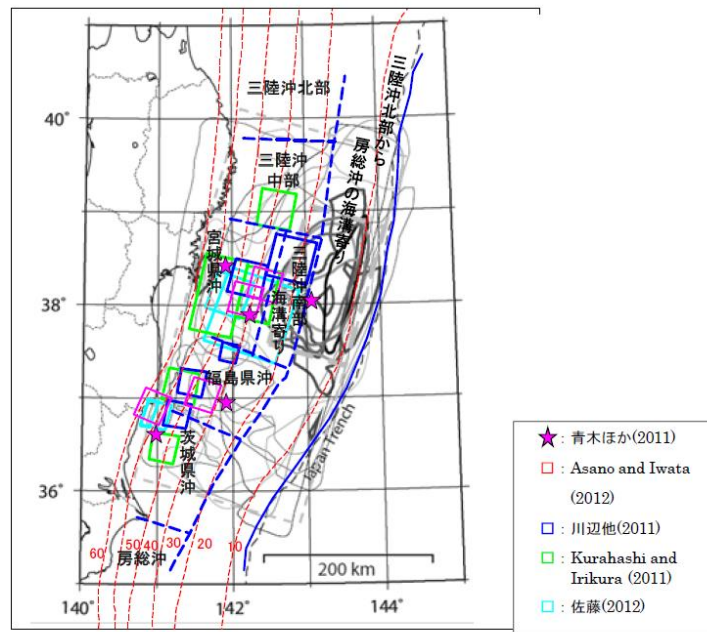
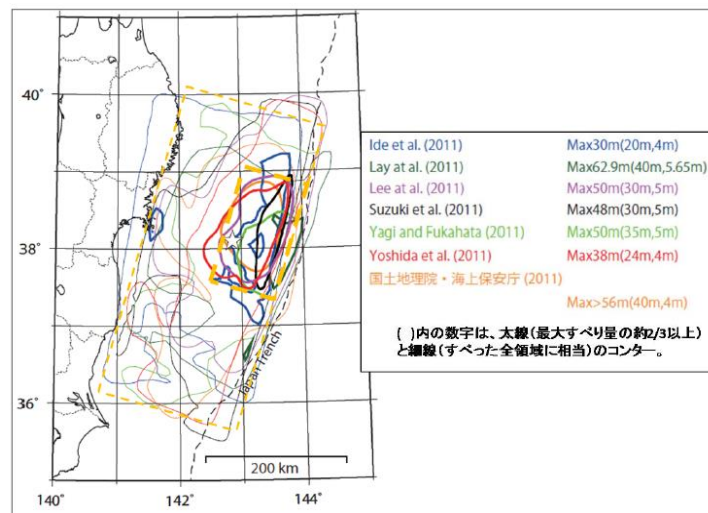


図6. ○ 東北地方太平洋沖地震の地震波形及び地殻変動による震源過程解析結果と強震動生成域



図IV.10 東北地方太平洋沖地震の地震波形及び地殻変動による震源過程解析結果（関係論文をもとに気象庁気象研究所作成）

上の図では、強震動生成域（強い地震動を発生させた領域、すなわちアスペリティ）と考えられる領域を4角形で示しているが、見解ごとに大きく異なっている。

このように、実際に起きた地震でも、どんな現象だったかは、正確には分からないというのが、地震学の現状である。

(3) 不確かさを安全側に十分に大きく考慮することが必須である

地震は地下深くで起こる現象であり、それを強震計で地震動を観測し、あるいは GPS でどれだけ地面がずれたかを観測するなどして、それらのデータから、地震現象を推し量ろうとする。

直接、地下深部で起こっていることが観測できるわけではなく、種々のデータから地下での現象を推測するものであるため、地震現象は正確には把握しきれない。前記瀬瀬発言の「隔靴搔痒」とは、まさしくそのような状態を表している。

そもそも過去の現象ですら正確には把握しきれないのに、将来の現象を正確に予測できるはずなどない。

したがって、このことのみからしても、将来の地震・津波の予測には大きな不確かさが必然的に伴わざるを得ないのである。

また、発生する現象である地震や津波も、同じ場所であれば常に同じ範囲で、同じ規模、同じ様相で生じるというわけではなく、発生する現象自体にもばらつき（不確かさ）がある。そして、そのばらつきは、極めて大きい。

将来発生する地震や津波の想定は、過去の地震、津波のデータに基づきなされ、また、地盤などの測定データも用いられるが、測定データやデータをもととした推定に誤差があり、さらに、発生する地震、津波という現象そのものにばらつきがあるため、この点からしても、将来事象の想定（推定）には必然的に大きな不確かさを伴わざるをえない。

一方、原発が極めて危険な施設であり、一旦重大な事故を起こしたときには、取り返しのつかない深刻な被害を広範に生ずる。

したがって、原発の耐震設計は「万が一にも」事故を起こさないように、安全側に行わなければならないが、現実には、これまでの原発の耐震設計は、後に詳述するように地震動・津波という現象の推定を「平均像」で行ってきたのである。

平均像で行えば、実際に起こる地震、津波の半分は無視され、著しい過小評価となる。平均像では 50% の事象しかカバーできないが、原発という極めて危険な施設の安全性のためには、このような、将来起こる 50% でのみ安全が確保さ

れるなどという設計では不足することは明らかである。

福島原発事故は、あらためてこの事実を示した。

したがって、原発の耐震設計において、地震動、津波という現象の推定を、平均像で行なうことは決して許されない。

また、仮にある程度の事象をカバーするように推定したとしても、完全に全ての現象をカバーできるわけではない。現実の地震が想定を上回る可能性は大きく、だからこそ、原発の潜在的な危険性の大きさに鑑みて、不確かさを安全側に十分に大きく考慮することは、原発の耐震設計における地震動評価の際に、地震動評価をするための全ての手法において必須なのである。

2 新耐震指針(平成18年指針)における不確かさの考慮の要求

新耐震指針(平成18年指針)は、不確かさの考慮について、以下のように規定する。

「3. 基本方針

耐震設計上重要な施設は、敷地周辺の地質・地質構造並びに地震活動性等の地震学及び地震工学的見地から施設の供用期間中に極めてまれではあるが発生する可能性があり、施設に大きな影響を与えるおそれがあると想定することが適切な地震動による地震力に対して、その安全機能が損なわれないように設計されなければならない。さらに、施設は、地震により発生する可能性のある環境への放射線による影響の観点からなされる耐震設計上の区分ごとに、適切と考えられる設計用地震力に十分耐えられるように設計されなければならない。

また、建物・構築物は、十分な支持性能をもつ地盤に設置されなければならない。」

「5. 基準地震動の策定

施設の耐震設計において基準とする地震動は、敷地周辺の地質・地質構造並びに地震活動性等の地震学及び地震工学的見地から施設の供用期間中に極めてまれではあるが発生する可能性があり、施設に大きな影響を与えるおそれがあると想

定することが適切なものとして策定しなければならない（以下、この地震動を「基準地震動」という。

(1) 基準地震動 S_s は、下記(2)の「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び(3)の「震源を特定せず策定する地震動」について、敷地における解放基盤表面における水平方向及び鉛直方向の地震動としてそれぞれ策定することとする。

(2) 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」は、以下の方針により策定することとする。

① 敷地周辺の活断層の性質・・・を考慮し、地震発生様式等による分類の上での敷地に大きな影響を与えると予想される地震（「検討用地震」）の複数選定

② 「活断層の性質」に関する考慮事項

③ 上記①で選定した検討用地震ごとに、次に示す i) の応答スペクトルに基づく地震動評価及び ii) の断層モデルを用いた手法による地震動評価の双方を実施し、それぞれによる基準地震動 S_s を策定する。なお、地震動評価に当たっては、地震発生様式、地震波伝播経路等に応じた諸特性（その地域における特性を含む。）を十分に考慮することとする。

i) 応答スペクトルに基づく地震動評価

ii) 断層モデルを用いた手法による地震動評価

④ 上記③の基準地震動の策定過程に伴う不確かさ（ばらつき）については、適切に考慮する。」

また、その（解説）では、以下のとおり解説している。

「(3) 基準地震動 S_s の策定方針について

④「基準地震動 S_s の策定過程に伴う不確かさ（ばらつき）」の考慮に当たっては、基準地震動 S_s の策定に及ぼす影響が大きいと考えられる不確かさ（ばらつき）の要因及びその大きさの程度を十分踏まえつつ、適切な手法を用いることとする。経験式を用いて断層の長さ等から地震規模を想定する際には、その経験式の特徴等を踏まえ、地震規模を適切に評価することとする。

(4) 震源として想定する断層の評価について

- ⑤ 活断層調査によっても、震源として想定する断層の形状評価を含めた震源特性パラメータの設定に必要な情報が十分得られなかった場合には、その震源特性の設定に当たって不確かさの考慮を適切に行うこととする。」

このように、新耐震指針は、「基準地震動 S_s の策定過程に伴う不確かさ」と「震源特性の設定に当たっての不確かさ」の2つの過程での不確かさを考慮するように求めている。

3 新規制基準における不確かさの考慮の定め

平成25年（2013年）6月に定められた新規制基準，すなわち，「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置，構造及び設備の基準を定める規則の解釈」でも，次のとおり規定されている。

「選定した検討用地震ごとに、不確かさを考慮して応答スペクトルに基づく地震動評価及び断層モデルを用いた手法による地震動評価を，解放基盤表面までの地震波の伝播特性を反映して策定すること」

このように、新たに定められた基準でも，新耐震指針を踏襲しており，やはり不確かさの考慮は求められている。

しかし，問題は，「不確かさの考慮」を，どのように行うかの具体的手法である。

この点について，新規制基準は，それ以上具体的規定を置かず，結果として，従来行われてきた全く不十分な「不確かさの考慮」を放置することとなってしまう。

第5 耐震設計上の問題点の概要

（原発の耐震設計が基本的に平均像で行われていること）

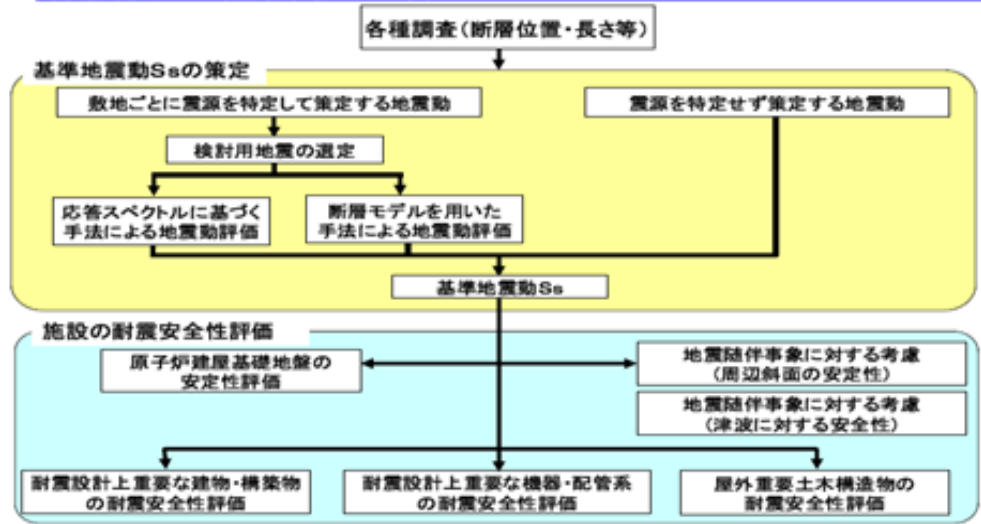
耐震設計の全体の流れを再度見れば，次のとおりである。

原発の耐震設計の流れ

2. 耐震安全性評価の基本方針

2007. 4. 4
耐震・構造設計小委員会

耐震安全性評価全体フロー



まず「各種調査」で活断層がどこにあるか（断層位置）やその活断層がどの程度の大きさのものか（長さ等）を推定する。

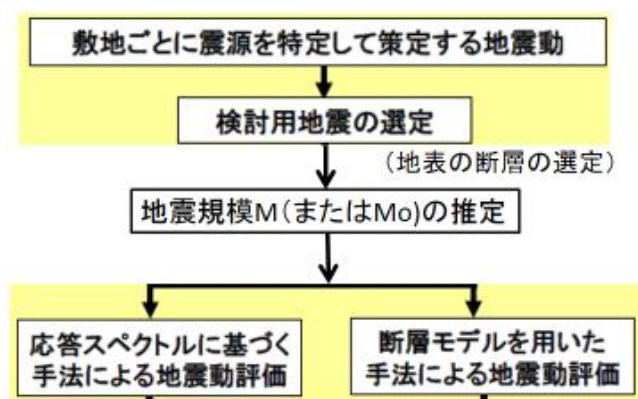
各種調査の第一は、活断層があると思われる場所での現地での調査である。この調査は、地表での活断層調査や海域では音波探査による調査が主となる。しかし、基本的には地表（海上）からの調査であり、地下深くまで潜って断層面を直接観察する調査ではないから、確実には活断層を捉えきることができない。地表での調査としても、地形の解釈が必ずしも確実なものではないなど、この各種調査にも、大きな不確実さ（誤差）が含まれる。

次のステップの1つである、「震源を特定して策定する地震動」は、特定の活断層について、その活断層が動いたときの地震動想定を行うものである。本来、危険な原発の地震動想定は、考えうる最大の地震動を想定すべきであり、一般には、原発の耐震設計は、最大規模の地震動に耐えられるようになされていると思われる。しかし、現実には、実は、この地震動想定は、決して最大規模の地震動を想定するわけで

はない。実は、基本的には、ある活断層が動いたときの平均的な地震動によって耐震設計は行われている。上記の「断層モデルを用いた手法」では、現実起きた2007年中越沖地震の知見によるとして、地震動を平均的値の1.5倍とするようになったが、それでもまだ「平均像+アルファ」程度のものでしかない。平均像からのかい離が、平均的地震動の値の何倍、あるいは10倍以上にもなるほどの誤差が存在することからすれば、1.5倍程度では、基本的には平均的値をもとに行っているものを若干修正した程度のもにとどまるに過ぎない。

このステップでは、まず敷地に大きな影響を与える可能性がある地震を選定する「検討用地震の選定」が行われる。

検討用地震を選定した後に、「応答スペクトルに基づく手法」と「断層モデルを用いた手法」による地震動想定（地震動評価）が行われるのが、その際にまずなされるのが、地震規模 M （または M_0 ）の推定である。



しかし、この地震規模の推定にも、極めて大きな誤差が存在する。この段階でとられる推定方法は、対象として選ばれた、ある長さの活断層で起こる平均的な地震の規模でしかない。しかもその誤差もまた極めて大きく、何倍あるいは10倍以上にも及ぶ。

その後、「応答スペクトルに基づく手法」と「断層モデルを用いた手法」により地震動の評価を行う。しかし、そのいずれの手法も、極めて誤差は大きい。この段階の誤差も何倍あるいは10倍以上に及ぶ。

これらの誤差は、地震現象が極めてバラツキの大きな現象であることに起因する。

結局、この「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の評価には、極めて大きな誤差（不確かさ）があり、しかもその誤差は、危険な原発であることを考えれば、控えめに見積もっても少なくとも10倍程度はとることが求められる。しかし、この手法自体の誤差については、現在の日本の原発の耐震設計では、ほとんど考慮されていない。「不確かさの考慮」として行われるものは、この推定手法自体に内在する誤差とは全く異なるものでしかなく、手法自体に内在する誤差などなかったものとして「不確かさの考慮」なるものがなされている。ここに日本の原発の耐震設計の極めて大きな問題がある。

何倍、あるいは一桁以上大きな値にも及ぶ地震動想定誤差があることは、規制当局も原子力事業者もみな分かっているのに、この点はタブーとされ、想定手法自体の誤差という観点では一切議論もされずに来ており、住民側がこの点を議論しようとしても、議論に応じようともせず無視してこれまで原発は推進され続けてきた。それは、この点を議論してしまえば、日本に原発など建設のしようがなくなることを意識した上でのことである。

さらには、もともと地震や津波などの現象のデータが少ないことからして、過去最大（既往最大）でも不足することは、しごく当然のことである。しかし、既往最大を超える現象の存在は、一切考慮されていない。この点は、現在も、地震のみならず、竜巻や火山現象などについても同様である。地震同様極めてバラツキの大きな火山の爆発について見れば、既往最大以上の火山爆発は、新規規制基準でも、一切考慮しようともしていない。自然現象は、既往最大を超える現象として、人類の前に立ち現われることはしばしばある。とりわけデータが少なければなおのこと、「既往最大」は、地質現象の長いスパンからすれば、ほんのわずかな期間での「既往最大」でしかなく、「既往最大」は容易に乗り越えられてしまう。このように既往最大以上のことを考慮しようとしらないという点にもまた、日本の耐震設計の大きな問題がある。誤差が莫大であること、既往最大でも不足することをしっかり認識すれば、福島第一原発の事故の起こりようがなかった。この議論を避け、日本を危険に陥れ、結果として福島第一原発事故を招いた責任を考えれば、国、電力会社のみならず、住民の同様の主張を安

易に排斥した「もんじゅ」訴訟，浜岡原発訴訟を担当した裁判所にも重大な責任がある。

これらの詳細については，今後さらに述べることとする。

以上