

# 耐震設計と地震動

## Seismic Design and Earthquake Ground Motion in Japan

鈴木 紀雄 池浦 友則 引田 智樹 笠松健太郎 友澤 裕介

Norio Suzuki, Tomonori Ikeura, Tomoki Hikita, Kentaro Kasamatsu and Yusuke Tomozawa

### 目 次

- I. はじめに
- II. 日本の耐震設計と設計用地震力
- III. 日本の地震と地震動の概要
- IV. 観測地震動の分析・再現技術
- V. 入力地震動の予測
- VI. おわりに

### I. はじめに

2023年は関東大震災100周年の年であった。「大震災」とは、特に規模が大きい地震被害に対して政府が命名するもので、関東大震災以外に1995年の「阪神・淡路大震災」、2011年の「東日本大震災」がある。被害には震災ごとの特徴があり、関東大震災では、全体の90%近くが火災による焼死者であった。一方、阪神・淡路大震災では、全体の約80%が建物の倒壊や家具などの転倒による圧死、約10%が火災による焼死であった。また、東日本大震災では、津波の犠牲者数が全死者数の約90%を占めた。津波被害を建物単独で防ぐことはできないが、建物の耐震化（免震、制震を含む）により圧死者を減らすことができる。また、火災の発生件数と建物の倒壊数の間には密接な関係があるので、建物の耐震化は火災による家屋の喪失や焼死者を減らすことにも有効である。

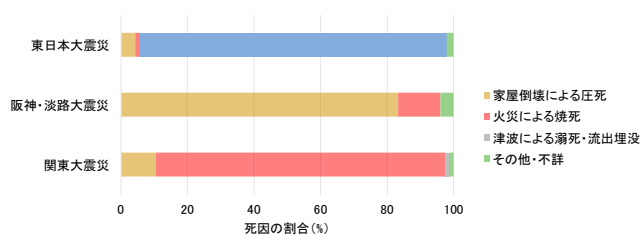


Fig.1 大震災における犠牲者の死因割合 <sup>1)</sup>を改変  
(Percentage of Deaths in Past Great Earthquakes)

構造物の耐震設計は、地震の作用を適切に取り入れることから始まる。本論は、我が国の耐震設計における地震の扱い方と、設計に使われる入力地震動について述べるものである。II章では、我が国の耐震設計において地震をどのように扱っているかを説明し、III章で、我が国に発生する地震と地震動の特徴を述べる。IV章では、コンピュータ解析で地震動を予測するための技術と研究を紹介する。さらにV章で、この技

術を使った設計用地震動の作成法について述べる。IV章とV章は、やや難しいかもしれないが、本論全体で、耐震設計における地震力・地震動の考え方をイメージしていただければ幸いである。

### II. 日本の耐震設計と設計用地震力

本章では、建物の耐震設計法と地震の扱い方を述べ、その後土木分野の状況に触れることとする。建築を中心にしたのは、道路・鉄道・ダムなど構造物ごとに規基準が用意されている土木分野に比べて、「建築基準法」という一つの法律で統一されている建築分野の方が理解しやすいためである。実際には、両分野の耐震設計法は互いに影響しあいながら発展してきたので、基本的な考え方は同じと言える。

#### 1. 建物の耐震設計の歴史

古来、我が国は大きな地震に襲われ続けてきたが、耐震構造という概念がほとんどなかったようで、筋交いのような水平力に抵抗する部材が使われたのは、きわめて少数の建物に限定されている<sup>2)</sup>。

日本で建物の耐震性に関する研究が本格的に始まったのは、1891年の「濃尾地震」からとされている。1915年、佐野利器（さの・としかた）が後述する「震度法」を提案し、合理的な耐震設計（静的設計）が可能となった。1923年の関東大震災時、耐震設計がなされていない米国流のビルが大きな被害を受けたのに対し、震度法で耐震設計された日本興業銀行ビルがほとんど無被害であったことから、1925年、我が国初の建物に関する法律である「市街地建築物法」に震度法が取り入れられた。



(a) 米国流の郵船ビル<sup>3)</sup>  
(Yusen Bldg. in the U.S. Style)



(b) 日本興業銀行<sup>4)</sup>  
(Nippon Kougyo Bank Bldg.)

Photo 1 関東大震災時の被害  
(Damage of Bldgs. at Great Kanto Earthquake)

太平洋戦争中の臨時規格などを経て、震度法を用いた静的設計は1950年に公布された「建築基準法・同施行令」に引き継がれ、1981年の大改正まで適用された。改正前と改正後の耐震基準はそれぞれ「旧耐震基準」、「新耐震基準」と呼ばれている。阪神・淡路大震災で、旧耐震基準に従って設計された多くの建物が大きく損傷したのに対し、新耐震基準で設計された建物は、一部を除いて無被害あるいは軽微な損傷にとどまったことから、新耐震基準の有効性が確認された。また、旧耐震基準によって設計された建物の「耐震改修」が進められることになった。

市街地建築物法以来、我が国の建物高さは住宅地で20m、そのほかで31mが上限とされてきたが、1963年に一部が撤廃され、1968年に我が国初の超高層建物である霞が関ビル（36階、147m）が竣工した。この建物の設計で採用されたのが、時々刻々の建物の揺れをコンピュータで計算する「時刻歴地震応答解析（以降、「地震応答解析」）」を用いた設計であり、今日まで超高層建物、免震建物、制震建物の設計に適用されてきた。

## 2. 一般建物の設計

### (1) 旧耐震基準まで

震度法では、「水平震度」という、建物に加わる水平加速度の重力加速度に対する比率を設定する。これに建物各階の重量を乗じれば、その階に作用する水平力となる。実際には時々刻々変化する慣性力を、静かに作用する、ある一定の大きさの外力に置き換えることにより、地震自体の正体が未解明の時代でも耐震設計（静的設計）が可能となった。なお、地震情報などで各地の揺れの程度として「震度」が発表されるが、正しくは「震度階（級）」で、ここで言う「震度」と異なるので、以後、「震度階」と呼ぶことにする。

旧耐震基準では、水平震度は、建物の高さ16m（4、5階）までは一定値（通常地盤で0.2、軟弱地盤で0.3）とし、高さ16mを超えると4mごとに0.01増加すると定められた。この値は、震度階5強の地震で建物が倒壊しないことを狙って決められたものである。実際には震度階6、7といったより強い揺れが極めて稀に生じる可能性があるが、これに対する規定はなかった。

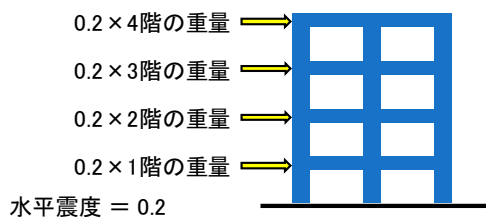
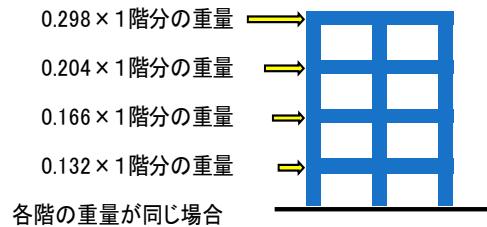


Fig.2 旧耐震基準の水平力  
(Earthquake Force Specified by Old Earthquake Resistance Standards)

### (2) 新耐震基準

新耐震基準では、「稀に起こる地震」と「極めて稀に起こる地震」が設定された。基準には明記されていないが、稀に起こる地震は50年に1回程度発生する震度階5強程度の中地震、極めて稀に起こる地震は500年に1回程度発生する震度階6強から7の大地震を想定している。それぞれの地震により、建物1階の柱や壁に、建物全体の重量の20%（軟弱地盤では30%）および100%（建物の粘り強さに応じて低減される）の水平力が加わるとされ、建物は、稀に起こる地震に対して「軽微な損傷」、極めて稀に起こる地震に対して「倒壊しない」ように設計することが求められている。

水平力は、建物の高さ・固有周期、地盤を考慮して決められる。また、地震時には、上層階ほど大きく揺れるので作用する水平力が大きくなるという実際の現象が反映された。



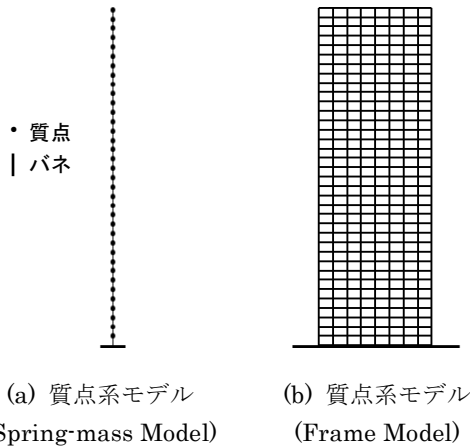
新耐震基準では、旧耐震基準と異なり、外から各階に作用する水平力ではなく、各階の柱全体が受ける力で地震荷重を表現している。例えば、2階の柱には、それより上の屋上階、4階、3階に作用する水平力の和が加わる。この図は、Fig.2と比較するため、外から各階に作用する水平力で表現してある。建物全体に作用する力の総和はFig.2とFig.3で等しい。

Fig.3 新耐震基準の稀に起こる地震時の水平力  
(Earthquake Force for Moderate Earthquake Motions Specified by New Earthquake Resistance Standards)

## 3. 超高層建物・免震建物・制震建物の設計

### (1) 霞が関ビルの設計と入力地震動

武藤清の指導の下、当社が設計・施工した霞が関ビルの耐震設計では、静的水平力を仮定して建物を設計した後、部材（柱や梁）1本1本が力を受けたときにどのように変形するかを数学モデルで表し、これらを組み合わせて建物全体の数学モデルを作成した。このモデルの基礎部分に、実際に観測された地震動（時々刻々の加速度）を入力し、地震応答解析により建物全体や部材が受ける力や変形などを計算して、許容値以下であることを確認した。許容値を超える部分があれば、設計を修正して再び地震応答解析を行った。地震応答解析には、米国で測定されたEL CENTRO NS波、我が国で観測されたTOKYO 101 NS波とSENDAI 501 NS波の加速度記録が使用された。“EL CENTRO”などは地震動が記録された土地の名、“NS”は南北方向の揺れを表している。記録された最大値は、それぞれ341.7 Gal、74.0 Gal、57.5 Gal



震が関ビル設計時にはコンピュータの能力が不十分だったので、各階の重量を表す質点を柱や梁の抵抗力を表すバネで結合した「質点系モデル」で地震応答解析が行われた。現在は、柱や梁を1本ずつ表現した「フレームモデル」が使われる。

Fig.4 地震応答解析用の建物モデル  
(Model of Bldg. for Earthquake Response Analysis)

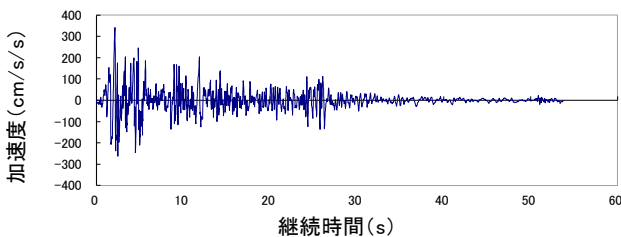


Fig.5 入力地震波の例 (El Centro NS)  
(Input Earthquake Motion; El Centro NS)

（“Gal”はガリレオに由来する加速度の単位で、 $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2$ ）であるが、地震応答解析では、最大値が  $100 \text{ Gal}$ （重力加速度の約  $1/10$ ）、 $300 \text{ Gal}$ 、 $500 \text{ Gal}$  になるように拡大あるいは縮小して用いられた。この操作を「基準化」と呼ぶ。 $300 \text{ Gal}$  の地震に対して、層間変形（ある階の床と天井の水平ずれ）が  $2 \text{ cm}$  以下であれば可とされた。震が関ビル以後の超高層建物では、この設計法が適用されることとなった。

(2) 設計用地震動の変遷

a. 観測波の使用

震が関ビル以降の超高層建物の地震応答解析でも、過去の地震記録を、最大加速度が  $250 \sim 300 \text{ Gal}$  あるいは  $400 \sim 500 \text{ Gal}$  で基準化し、それぞれを稀な地震、極めて稀な地震として、稀な地震で建物が損傷しないこと、極めて稀な地震で倒壊・崩壊しないことを確認する設計が行われた。その後、最大値は速度で基準化することとなった。

b. 模擬波の採用

地震応答解析で建物の挙動を適切に予測するには、建設予定地の地震記録を使うことが望ましいが、大きな地震記録が存在することはほぼない。これに対処する方法として、「模擬

波」あるいは「模擬地震動」と呼ばれるコンピュータ解析で作成する地震動が適用されるようになった。

c. 長周期地震動の考慮

2003年の十勝沖地震で、震源から  $250 \text{ km}$  離れたタンク内の石油が共振して大きく揺れ、浮き屋根が損傷・沈下して火災が発生したことをきっかけに長周期地震動が注目された。また、2011年の東日本大震災時に、東京新宿の超高層ビルが大きくゆっくりと揺れたことで、再び長周期地震動への関心が高まり、超高層建物の設計で長周期地震動を考慮する必要性が認識された。このため、2016年に国土交通省助言「超高層建築物における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について」が公布され、関東・静岡・中京・大阪で考慮すべき長周期地震動を含む模擬波の作成方法が示された。

(3) 現在の設計用地震動

超高層建物・免振建物・制震建物の建設には、国から指定された機関による耐震性能の評価を受けた後、国土交通大臣の認定を取得する必要がある。評価には、次の①から④の地震動を使った地震応答解析が求められる。

また、重要な建物のように高い耐震性が求められる場合、あるいは建設地に及ぼす影響が大きい地震が考えられる場合などには、設計者の判断で、①から④に追加して、別の地震動を使った地震応答解析を行うこともある。

①と③は地震動の特性が指示されているが、④や追加検討に用いる地震動は、IV章・V章に記すような方法で予測する必要がある。

① 「告示波」と呼ばれる模擬波3波以上

解放工学的基盤面（硬い地盤）に建つ建物の応答加速度の最大値が、稀に起こる地震では  $160 \text{ Gal}$ （震度階5強程度）、極めて稀に起こる地震では  $800 \text{ Gal}$ （震度階6強から7程度）となるように建築基準法に基づく告示で定められている。この応答をもたらず模擬波を作成し、それを建設地の地表近くの柔らかい地層により増幅させた地震波を入力地震動とする。増幅するため、入力地震動の加速度は前記の値より大きくなる。

② 過去における観測波の内3波以上

最大速度  $25 \text{ cm/s}$ 、 $50 \text{ cm/s}$  で基準化し、それぞれを稀に起こる地震、極めて稀に起こる地震として用いる。

③ 長周期地震波形1波以上

前述の長周期地震動に関する国土交通省助言で指定された地域で、同助言に従い模擬波を作成する。「基整促波」と呼ばれる。

④ （任意）建設地で予測される地震動3波以上

建設地周辺における活断層、過去の地震活動などに基づいて作成した模擬波で、「サイト波」とも呼ばれる。極めて稀に起こる地震として、①の地震波と置き換えることができる。



#### 4. 土木構造物の耐震設計

土木分野では建築基準法のような法的拘束力のある基準はなく、道路、鉄道、ダムなど構造物ごとに、耐震設計に関わる主要機関によって規基準が作成されている。これらの規基準の耐震設計部分は、土木学会から刊行されている、コンクリート構造、複合構造、鋼構造など構造種別ごとの「標準示方書」を参照して作成されているため、基本的な考え方は共通しているが、実務においては異なっている点もある。

土木分野でも建築分野と同様に、関東大震災以降、水平震度を0.2とする震度法による静的設計が行われてきたが、阪神・淡路大震災後に、レベル1地震動とレベル2地震動を設定することになった。レベル1地震動は構造物の設計耐用期間中にしばしば発生する規模の地震動（再現期間50年）、レベル2地震動は極めて稀に発生する大きな地震動（再現期間1000年）と位置付けられていたが、現在では多くの基準で再現期間の記述はなくなり、例えばレベル2地震動については「構造物の建設地点で想定される最大級の地震動」<sup>5)</sup>、<sup>6)</sup>と定義され、発生確率に関する記述が削除されている。

レベル2地震動について見てみると、土木学会の示方書<sup>5)</sup>では、地震応答解析を行う場合の地震波は過去の観測記録から選択する方法や、建設する構造物に最も大きな影響を与える既往の地震（想定地震）を文献調査などによって選択し、その地震が発生したときの建設地での地震動を作成することが推奨されており、これに沿った規基準<sup>6)</sup>もある。一方で、2011年東北地方太平洋沖地震などの大規模地震は発生前の時点で発生位置や地震規模が特定されていなかった事実や、設計地震動を個別に設定するために必要な情報を十分に得ることは現状においても容易ではないという考えから、地震動作成の規定が削除された規基準<sup>7)</sup>もある。

構造物の地震応答の計算には、静的解析と地震応答解析のいずれかが使われるが、原則、地震応答解析を使うよう規定している規基準が多い。どちらの解析法を使っても、計算した変位・変形などを、それぞれの地震時・地震後に構造物のあるべき状態（要求性能）を満足する変位・変形と比較することで、耐震性能を確認する方法がとられる。要求性能は構造物によって異なり、例えば鉄道構造物ではレベル1地震中に車両の脱線を極力防ぐこと、ダムではレベル2地震時に貯水機能が維持される、あるいは短期間で修復できる損傷にとどめることが必要とされている。

#### Ⅲ. 日本の地震と地震動の概要

入力地震動の予測技術は、当然のことながら、地下深くを起源とする地震現象の理解に基づいている。これについては気象庁<sup>8)</sup>、地震調査研究推進本部<sup>9)</sup>、防災科学技術研究所<sup>10)</sup>、<sup>11)</sup>などのホームページに詳しい解説がある。入力地震動の予測技術はこれらの知識と深い関係にある。そこで、はじめに、

これらの解説を参考にして我が国における地震と地震動の特徴をごく大まかにおさらいしておくことにしよう。

##### 1. 日本周辺のプレートと地震

地球の表面はプレートと呼ばれる複数の厚い岩盤で覆われている。プレートはその下で対流するマントルに載ってゆっくりと動いている。この動きによるプレート同士の接触やプレート自体の変形のため岩盤が破断してずれ動く現象が地震である。

日本列島は、南西側と東北側がそれぞれヨーロッパから続くユーラシアプレートと北アメリカから続く北米プレートという2つの陸のプレートの上に位置しているが、その下にはフィリピン海プレートと太平洋プレートという2つの陸のプレートがそれぞれ南と東から沈みこんでいる（Fig.6）。これらの海のプレートは、陸のプレートを押しながら、年間数cm～10cm程度のペースで、その下に潜り込み続けている。日本周辺では、これらの4つのプレートが絶えずそれぞれ変形しながらずれ動いており、このプレート同士の接触面や各プレートの内部で岩盤同士の接着と破断が繰り返され絶え間なく地震が発生する。こういった複雑な条件の地域は世界的に見ても珍しく、日本周辺で発生する地震の数は全世界で発生する地震の約1割にのぼるとされる。

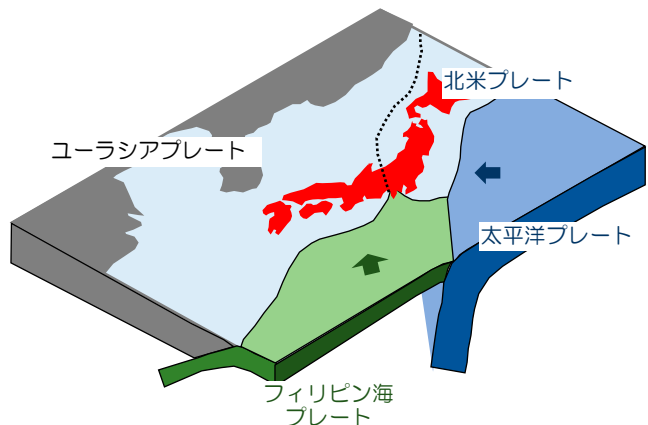


Fig.6 日本周辺のプレート

(Tectonic Plates around the Japanese Archipelago)

##### 2. 地震現象とタイプ

地震の発生時には、始め狭い範囲で岩盤の破断とずれ動きが始まるが、その後、周囲に高速で広がって最終的に大きな破断面（断層面）が形成される。また、岩盤の破断の拡大とともに周囲に強い衝撃波が放射され、それが地表まで伝わって地盤や建物に激しい揺れがもたらされる。この衝撃波が地震波、その発生源が震源である。また、地震波が震源から地表に向かって岩盤中を伝わっていく現象を「波動伝播」と呼び、その結果として地表に生じる地盤や建物の揺れが「地震動」である。

地震の大きさはマグニチュード(M)で表される。一般に、

マグニチュードが大きい地震ほど、最終的に形成される断層面の面積が広くなり、ずれ動く幅も大きい。同時に、より長い時間にわたって強い地震波が放射されるようになるため、地表には長い時間にわたって強い地震動がもたらされるようになる。

地震で生じる断層面の形態には、大まかに、破断面を挟む2つの岩盤が横にずれ動く場合、片方の岩盤がもう一方の岩盤に対してずり下がる場合、逆に載り上がる場合の3通りがある。これらは断層タイプとして、それぞれ、横ずれ断層型、正断層型、逆断層型と分類される (Fig.7)。

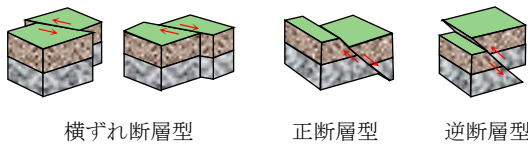


Fig.7 断層タイプ (Fault Type)

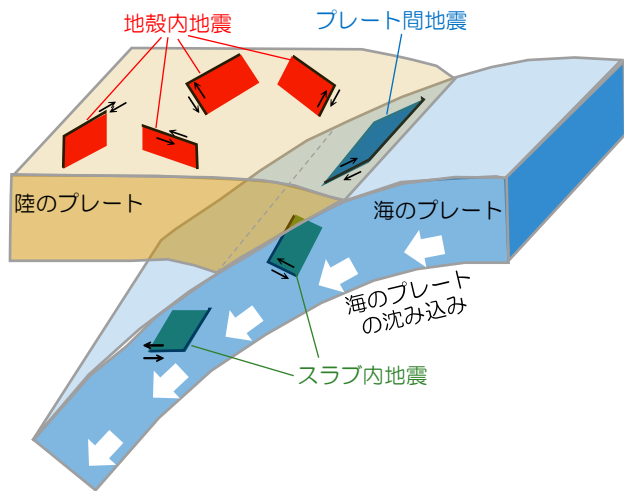


Fig.8 地震タイプ (Earthquake Type)

地震の発生の仕方や地震動の特徴には、その発生場所に応じて系統的な違いがあり、特に揺れの強さの点で問題となるのは「地殻内地震」、「プレート間地震」、「スラブ内地震」の3つのタイプである。このうち「地殻内」の「地殻」はプレートの最表層部分であり、その厚さは日本列島の周辺では概ね30 kmである。また、「プレート間」は主に陸のプレートと海のプレートあるいは海のプレート同士の接触面、「スラブ内」は陸のプレートの下に沈み込んだ海のプレートの内部を表す (Fig.8)。なお、このほかに防災上注目される地震タイプとして津波との関連が深い「沈み込む前の海のプレート内の地震」もあるが、ここでは地震による揺れに注目することとして割愛する。

これらの地震タイプの発生場所と過去の地震の例をTable

Table 1 地震タイプ (Earthquake Type)

地震タイプ	発生場所	近年の代表的な地震
地殻内地震	陸のプレートの地殻内部 深さ：0 km ~ 約 30 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>■北米プレート内</li> <li>2004年新潟県中越地震 (M6.8)</li> <li>2008年岩手宮城内陸地震 (M7.2)</li> <li>■ユーラシアプレート内</li> <li>1891年濃尾地震 (M8.0)</li> <li>1995年兵庫県南部地震 (M7.3)</li> <li>2016年熊本地震 (M7.3)</li> </ul>
プレート間地震	プレート同士の接触面 (プレート境界面) 深さ：0 km ~ 約 60 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>■北米プレートと太平洋プレート</li> <li>2003年十勝沖地震 (M8.0)</li> <li>2011年東北地方太平洋沖地震 (M9.0)</li> <li>■北米プレートとフィリピン海プレート</li> <li>1923年大正関東地震 (M7.9)</li> <li>■ユーラシアプレートとフィリピン海プレート</li> <li>1707年宝永東海地震 (M8.6)</li> <li>1854年安政東海地震 (M8.4)</li> <li>1944年昭和東南海地震 (M7.9)</li> </ul>
スラブ内地震	沈み込んだ海のプレートの内部 深さ：約 30 km ~ 約 600 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>■太平洋プレート内</li> <li>1993年釧路沖地震 (M7.5)</li> <li>2015年小笠原諸島西方沖地震 (M8.1)</li> <li>2022年福島県沖地震 (M7.4)</li> <li>■フィリピン海プレート内</li> <li>2001年芸予地震 (M6.7)</li> </ul>

1 に示す。以下では、各地震タイプについて、発生時期や位置にかかわる特徴とともに簡単に触れる。

(1) プレート間地震

プレートとプレートの接触面 (プレート境界) で発生する地震がプレート間地震である。例えば、東北日本では海のプレートである太平洋プレートが陸のプレートである北米プレートの下に年間10 cm 程度の速度で東側から沈み込んでいる。ただし、この2つのプレートは普段は強く接着しているため、太平洋プレートが北米プレートを引きずりながら沈み込み続ける。この沈み込みによる変形が大きくなってプレート間の接着力が耐えられなくなると、その接着が切れて両プレートが高速 (1 m/s 程度) で食い違い、逆断層型の地震が発生する。このとき、ごく浅い位置の大規模なプレート間地震では、引きずり込まれていた陸側のプレートが広域で跳ね上がり、その周辺の海底面が大きく上昇して大津波を発生させることが知られている。同様のことは西南日本においてもフィリピン海プレートとユーラシアプレートの間で繰り返される。

なお、プレート間地震の破断面は基本的に海と陸のプレートの接触面であるが、深さ60 km程度よりも深くなると岩盤の温度が高くなり、プレート同士の硬い接着が維持できなくなる。そのため、プレート間地震の発生深さは概ね60 kmよりも浅い範囲となる。

ところで、プレート間地震は、接触するプレート間の相対運動によって生じているが、そのプレート間の相対速度はほぼ一定であり、基本的には概ね一定間隔で発生することが期待できる。そのため、大規模な地震については、最後に発生した時期が判明すれば、次の発生時期は比較的予測し易い。

(2) 地殻内地震

地殻自体も、その下のマントルや海のプレートの移動に伴って徐々に変形するが、その変形が大きくなって限界を迎えると、地殻の岩盤が破断して高速でずれ動くことにより地震を発生させる。大規模な地殻内地震では、過去に繰り返し地震を発生してきた断層面が破断面となり易く、地表付近に過去の地震活動による痕跡が残されていることが多い。そのため、そのような断層の調査が国や実体によって全国各地で行われ、現在では今後も地震を発生する可能性がある断層が「活断層」として警戒されている。

なお、地殻内地震では、Fig.7に示した横ずれ断層型、正断層型、逆断層型のすべての断層タイプの地震が発生するが、我が国では、西日本地域で横ずれ断層型の地震が多く、一方、東日本地域で逆断層型の地震が多いという地域的な特徴がある。

また、大規模な地殻内地震については、活断層調査などにより過去の発生履歴が明らかにされ、同じ断層面で繰り返し発生することが知られている。ただし、地殻の変形はプレート間の相対速度ほどは速くないため、プレート間に比べて地震発生の間隔が長く、次の発生時期の予測も難しい。

(3) スラブ内地震 (沈み込んだ海のプレート内部の地震)

スラブ内地震は陸のプレートの下に沈み込んだ海のプレートの内部で発生する地震である。先に述べたとおり、プレート同士の接触面では地下深部での温度上昇のため地震が発生する深さが限られるが、スラブの内部では温度が上昇し難いため、より深い位置でも地震が発生することが知られている。

スラブ内地震ではプレート間地震と同程度かむしろ上回る強さの地震波が発生されることが多い。そのため、比較的浅い位置で発生するスラブ内地震は、プレート間地震よりも大きな被害を地表に及ぼす可能性があり、警戒されている。

しかしながら、スラブ内地震の予測については、その発生場所や発生時期を予測するための物理的な手がかりが乏しく、現在のところ、これまでの観測による発生履歴に基づく統計的な方法に頼るしかない状況である。

3. 地震動の基本的性質

我が国では地震動の揺れの激しさは通常、震度Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、...といった震度階(気象庁震度階)によって表される。ただし、実際の地震動は詳しくみると振幅が異なる様々な周期の揺れが混ざり合った状態で観測されている。ここで、「振幅」とは揺れの幅、「周期」とは1往復の揺れにかかる時間である(Fig.9)。地震動の特徴をより詳しく表現する際には、揺れの強さを周期ごとの振幅で表した「スペクトル」が用いられる(Fig.10)。

さて、地震動の強さを決める要因は、大まかに、震源特性(震源から放出される地震波の強さ)、波動伝播特性(震源か

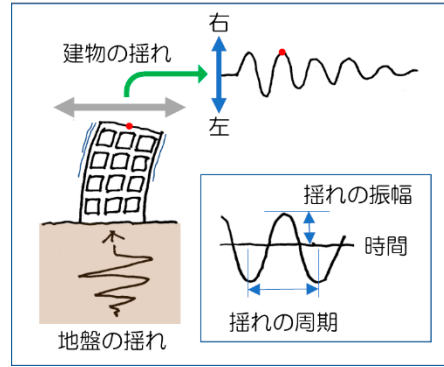


Fig.9 揺れの周期と振幅  
(Period and Amplitude of Seismic Motions)

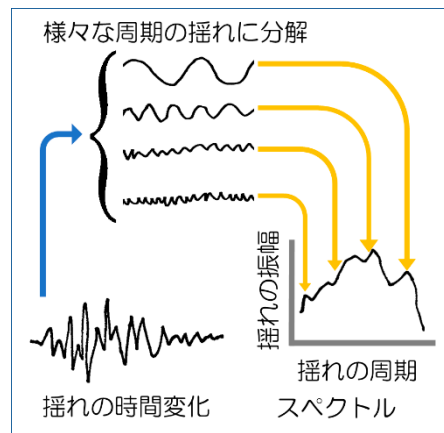


Fig.10 揺れのスペクトル  
(Spectrum of Seismic Motions)

ら地盤に入るまでの波動伝播における変化)、地盤増幅特性(地盤における振幅の増大効果)の3つである。これらの主な特徴は以下のとおりである。

(1) 震源特性

まず、地震が発生すると震源から様々な周期の地震波が周囲に放射される。このとき地震の規模が大きくなるほど、周期の長い地震波や振幅の大きな地震波が、長い時間をかけて放出され続けることになる。ただし、地震波の放出は広い断層面の中で一様ではなく、特に強い地震波を放出する領域がある。また、断層破壊が進む方向に向かって相対的に強い地震波が放出されることも重要な特徴として知られている。

(2) 波動伝播特性

震源から放射された地震波は、周囲に広がり、震源からの距離(震源距離)が大きくなるとともに振幅が徐々に小さくなっていく。このように地震波が伝わっていく間に振幅が減少してゆく現象は「減衰」と呼ばれる。減衰の強さは地震波が伝わる部分の岩盤の硬さや地震波の周期によって異なり、相対的に硬い岩盤で弱く(振幅が減少し難く)、柔らかい岩盤で強い(振幅が減少し易い)。また、短周期の地震波は減衰が



強く（振幅が減少し易く）、長周期の地震波は減衰が弱い（振幅が減少し難い）。

このほかに、地震波は、震源から地表に伝わる間にその経路の地下構造を反映して変化するが、短周期の地震波ほど地下構造の微細な違いに敏感であり、不規則に変化する特徴を示すようになる。そのため、短周期の地震動は長周期の地震動に比べて不規則な揺れとなり易い。

### （3）地盤増幅特性

最後に、地表付近まで近づいた地震波は、地盤内部を伝わって地表面に地震動を生じる。一般に、地盤は古く硬い地層（基盤層）の上に比較的新しく軟らかい地層（堆積層）が載る構造となっている。また、地震波の振幅は伝わる地層の硬さに応じて変化し、地層が軟らかくなるほど増大する。その結果、地表付近に近づいた地震波が地盤によって増幅され、その結果として地表に大きな地震動がもたらされることになる。地震動の振幅は、この堆積層が相対的に硬いほど小さく、軟らかいほど大きい。また、堆積層が厚いほど長い周期の揺れの振幅が大きくなり易い。特に、人口が集中する平野部では厚い堆積層が広がっていることが多く、大きな振幅の長周期地震動が問題となることがある。

このように、地震動の周期・振幅といった特徴には地点ごとの地盤構造によって違いがあり、比較的揺れ易い地点とそうでない地点が存在する。そのため、ある地点の地震動や揺れ易さを理解するには、予めその地点の地盤構造を詳しく把握しておくことが非常に重要であり、特に実際の地盤震動を的確に再現するための地盤情報が必要となる。

## IV. 観測地震動の分析・再現技術

本章では、II. 3. (3) で述べた地震動を予測する技術と研究について述べる。

地震動予測法は、過去の地震による観測地震動の分析・再現から研究が始まり、再現技術の精度向上とともに、実務において将来の地震に対する地震動予測問題に活用されるようになってきた。したがって地震動予測は基本的に過去の地震動の再現技術の応用であり、地震動予測の精度は再現技術の精度にかかっている。その意味で、観測地震動の再現技術は地震動予測を支える重要な役割を担っている。ここでは、観測地震動の分析・再現に関わる技術として、観測地震動の再現、地盤構造の調査、短周期地震動の分析、長周期地震動の分析に関わる技術を概観する。

### 1. 観測地震動の再現技術

過去の地震による観測地震動を再現する方法は、(1) 統計的な方法と (2) 理論的な方法の2つに大別される。

#### (1) 統計的な方法（地震動予測式）

地震動の強さを決める基本的な要因は、先に述べたように震源特性（震源から放出される地震波）、波動伝播特性（震源

観測される地震動＝  
震源特性×伝播経路特性×サイト増幅特性

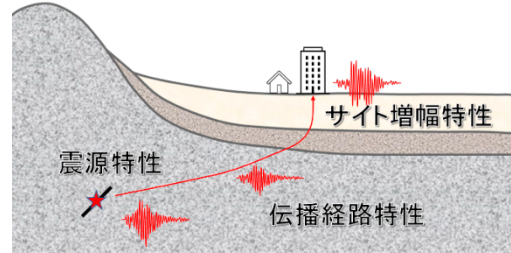


Fig.11 地震動の考え方

(Concept of Short-Period Earthquake Ground Motion)

から地盤までの波動伝播における地震波の変化)、地盤増幅特性（地盤における地震波の増幅効果）の3つであり、観測される地震動の強さは、この3つの要因の掛け算で表される（Fig.11）。そこで、統計的な方法では、これまでに観測した地震動記録をもとに、地震動の強さとこれらの3要因に関わる観測条件のパラメータ（マグニチュード、震源距離、地盤条件など）との統計的な関係を調べ、平均的な関係を地震動予測式として用い、想定した地震からの地震動を推定する。

なお、統計的な方法は、後述する理論的な方法と比べると専ら過去の地震動の経験に重きを置いた推定法であるため「経験的方法」と呼ばれることもある。この経験は地震観測によって培われる。我が国では、地震の検知や震源の研究を目的とした全国範囲の地震観測は気象庁や大学などによって早くから実施されていたが、特に1995年兵庫県南部地震を契機として、強い地震動（強震動）の情報が地震発生時の被災状況把握の迅速化に有効であるとして、自治体での強震観測の普及とともに、防災科学技術研究所によって全国にわたる高精度の強震観測網が展開された。その後、基盤や海域での観測網も整備され、現在では日々膨大な地震動データが蓄積されるようになってきている<sup>12)</sup>。これらのデータは一般に公開され、震源や地下構造および強震動予測の研究に広く活用されるようになっており、地震動予測式の高精度化を支える重要な研究基盤となっている。

さて、統計的な方法で中心となる地震動予測式の精度は、分析に用いた地震動の観測データの量と質、および分析の詳細さに依存する。したがって、その精度は観測データを増やすとともに、観測条件をより詳細に反映させることによって改善可能である。そのため、精度向上に向けて、日々蓄積された新しい観測データを追加することはもちろんのこと、震源や波動伝播および地盤増幅などの条件をより詳細にパラメータで表す改良が試みられた。最近では、これらのパラメータの具体的な値も膨大な観測データの統計解析で推定されるようになっており、統計的な方法における観測地震動の再現精度は大幅に向上している。

(2) 理論的方法 (断層モデル・地盤応答解析)

地震・地震動については、現象を理論的に表す試みが早くから始まり、計算機の進歩とともに断層の破壊や地震波の伝播を数値的に表す技術が進歩してきた。その結果、現在では、震源での断層運動や波動伝播経路の地下構造、および地盤構造を仮定すれば、それに従って岩盤の力と変形の関係に基づく理論的な数値計算により、地表に届く地震動が求められるようになっている。ただし、過去の地震で観測された地震動をある程度正確に再現するには、その震源における断層運動や波動伝播経路の地下構造、観測地点の地盤構造について、詳細かつ正確な情報が必要である。ところが、地下深部におけるそういった情報を詳しく正確に把握することは大変難しい。そのため、厳密には理論的な計算だけで観測された地震動を完全に再現することはできない。

とはいえ、長周期の地震動であれば、断層運動や地下構造中の細かな特徴に影響され難いため、それほど詳細な情報がなくとも概ね再現可能である。また、正確には再現できないまでも揺れの強さという点では実際の地震動と同等の結果が得られることが期待できる。そのため、長周期の地震動に関しては、実際の断層運動と地下構造を単純に表した断層モデル、地下構造モデルを仮定して理論計算で地震動予測を行う機会も増えている。

これと同様に、複雑な地形や地盤構造を考慮して揺れを予測する際には、比較的狭い範囲の地形や地下構造を単純化した地盤モデルで表し、地下深部における地震動を仮定して理論計算で地表の地震動を推定する検討(地盤応答解析)が良く行われる。

これらの理論計算による地震動予測で重要なのは、地下構造のモデルがどれだけ正確に与えられるか、という点である。そのため、地下構造モデルの設定に際しては、周辺における各種の地下調査結果を参照するとともに、現地で実際に地盤の揺れを計測し、それをを用いて地盤構造を解明する検討も導入されるようになった。

特に、過去の地震で地震動が観測されている地点であれば、その観測結果と再現解析結果を比較することで仮定した地下構造モデルを用いたときの地震動の再現精度が確認可能であり、その再現精度が予測精度の目安となる。そこで、最近では、地下構造モデルを修正しながら、観測地震動が十分な精度で再現されるまで理論計算を繰り返して最適な地下構造モデルを求める解析(地下構造モデルの逆解析)も行われるようになってきている。

(3) 統計的な方法と理論的な方法の比較・組合せ

上記では、地震動の再現に関わる方法として、統計的な方法と理論的な方法を紹介した。両者は基本的には同じ地震動を与えるものの、適用性を比較すると Table 2 のようになる。

統計的な方法は、過去の観測結果に沿った推定であるため

Table 2 統計的な方法と理論的な方法  
(Statistical Approach and Theoretical One)

分類	概要	利点	難点
統計的な方法	【地震動予測式】 震源・波動伝播経路・地盤等の条件に関する比較的少ないパラメータを与え、地震動予測式により推定	■予測にあたって必要となる仮定条件や計算量がさほど多くないため、適用し易い。 ■過去に経験した地震の範囲内であれば推定結果が外れ難い。	■地震動予測式の作成時よりも詳細な条件での評価は困難。 ■観測記録が乏しい条件下での評価結果の信頼性は劣る。
理論的な方法	【断層モデル】 断層運動のモデルと地下構造モデルを仮定して理論計算で地表の地震動を推定 【地盤応答解析】 地下深部の地震波と地盤構造モデルを仮定して、理論計算で地表の地震動を推定	■想定地震の断層運動や実際の地下構造に合わせて詳細な条件を仮定した推定が可能。 ■適用条件が整えば様々なケーススタディが可能であり推定結果の解釈も容易。	■信頼できる結果を得るには高精度の地下構造モデルが必要。 ■場合によっては地下構造調査が必要になる等、準備が多い。 ■評価地震動が短周期になるほど計算量が増大。

再現結果は大きくは外れ難い。また、事前に必要となる情報が少なく済み、計算も比較的簡易であるため、総じて簡単に適用できる。ただし、その一方で、複雑な条件を反映させることは困難であり、それほど高精度で地震動を再現することはできないという限界がある。これに対して理論的な方法は、ある程度の再現精度を確保するためには断層運動や地下構造などについて正確で詳細な情報が必要であり、また膨大な計算が要求されることも多いため、その適用は必ずしも容易ではない。しかし、それが解決すれば、複雑な断層運動や実際の地下構造を詳細に反映して地震動を精緻に再現できる利点がある。

これら2つの方法はアプローチが違うだけであり、基本的には同じ地震動を与える。目標とする観測地震動が同じであることを考えればこれは当然であろう。また、絵で例えると、統計的な方法は濃淡のある水墨画であり、一回の計算で「当たらずとはいへども遠からず」の結果を狙っている。一方、理論的な方法は一つひとつの計算結果は製図機で描いたシャープな線画であるが、断層運動や地下構造の仮定の不確かさを考慮して揺らぎを与え、無数の計算結果を重ねれば水墨画と同様の濃淡が現れることになる。

ところで、現実の地震動予測問題では、長周期の地震動は実際の条件を反映し易い理論的な方法で求めるが、それが難しい短周期の地震動は統計的な方法を適用して求める、というように両者を組み合わせて用いることも多い。そのため、要求される精度や適用の可能性に応じて統計的な方法と理論的な方法を組み合わせた様々な地震動予測法が提案されており、状況に応じて使い分けられている。

2. 地下構造の調査技術

地盤中の地震動の伝わり方は、地盤を構成する地層の性質が分かれば、理論的な計算によってある程度明らかにできる。地層の性質は場所によって異なるため、地震動予測に際しては、対象位置の地下構造を調べるのが重要となる。特に、



地震波が伝わる速度と、伝わる過程で振幅が小さくなる減衰特性の評価が重要であり、様々な方法による調査が行われている。

地震動予測のための地下構造調査法として、PS 検層、屈折法地震探査、反射法地震探査、常時微動探査などがある<sup>13)</sup>。PS 検層では地盤にボーリング孔を設け、それを活用して地表面の打撃で発生させた地震波を様々な深さで計測し、地盤深部に向かって伝わっていく時間をもとに地盤構造の各地層における地震波の速度を推定する。屈折法地震探査と反射法地震探査ではともに地表面に並べたセンサーで地表面の打撃によって生じた地震波を計測し、その地震波が伝わる時間をもとに地層ごとの地震波の速度を推定する。ただし、屈折法地震探査では、地盤内部の地層境界に沿って伝わる地震波（屈折波）に注目するが、反射法地震探査では地層の境界面で反射してくる地震波（反射波）に注目するという違いがある。微動探査では、地表面に配置した高精度のセンサー（Photo 2）を用い、海の波浪や人間の活動（工場の稼働、車の走行など）に起因して日常的に発生している微弱な地盤震動（常時微動）を観測し、その揺れ方をもとに付近における地盤の地震波速度を推定する。単点観測による検討も行われるが、多くの場合、多点で観測した微動間の相関解析により周辺地盤で地震波が伝わる速度を推定する微動アレー探査が実施される。微動探査は比較的簡便であり、安価に実施できることから、例えば大地震発生直後に被災地で地下構造を調査する際にも多用される。



Photo 2 浅部地盤の微動探査時のセンサー配置例  
(Example of Sensor Installment for Investigating Shallow Underground Structure)

地下の速度構造と減衰構造を明らかにする手段として、もっとも理想的と考えられる方法は、調査地点で鉛直アレー地震観測を行うことである。鉛直アレー地震観測では、地盤をボーリングして地中に地震計を設置し、地表と地中で同時に地震観測を行う。そして、観測された地震動データから地震計間の地震動の比を求め、それが理論計算によって再現できるような地盤構造のモデルを探索する解析（逆解析）を行う。この方式は、予測で用いる地盤構造を、現地の観測データに

基づいて推定する極めて実証的な方式であり、地盤の揺れ方を高精度で予測する上で有効である。

防災科学技術研究所の強震観測網“KiK-net”では、2 測点から成る鉛直アレー地震観測を全国約 700 地点に展開しており、このデータを用いた地下構造検討は、地震動研究を進める貴重な資源となっている。Fig.12 は、KiK-net のいわき東を例とした地下構造の調査例である<sup>14)</sup>。地震計間の振幅比と位相差の再現性に基づいて(c)、速度構造(a)と減衰構造(b)を推定した。

上記の鉛直アレー地震観測による方法は確かに理想的であるが、地中に地震計を設置して地震観測を実施するには多大な費用と時間を要するため、民間では原子力施設などの一部の重要施設を除いて実施されることは少ない。そこで、より簡便に対象地点で直接的に地盤震動を計測し、その結果を

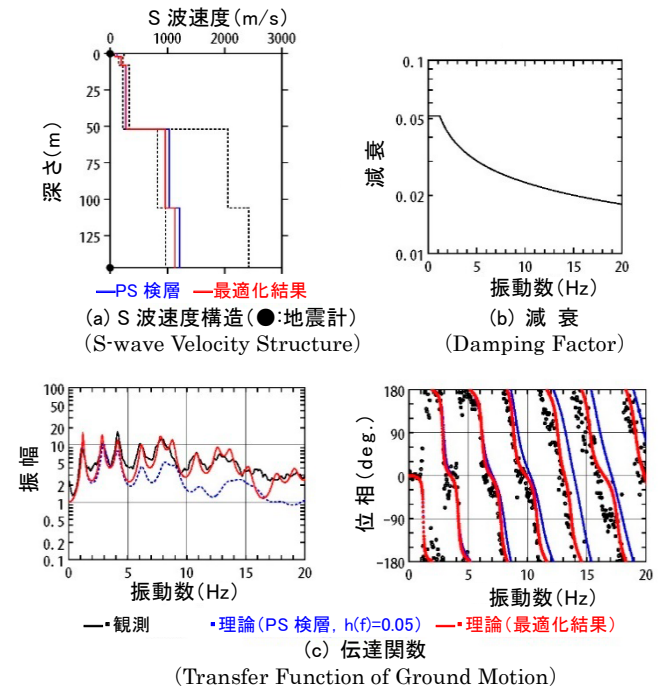


Fig.12 鉛直アレー地震観測記録を用いた地下構造調査  
(Investigation of Underground Structure Using Seismic Data Observed at the Vertical Array)

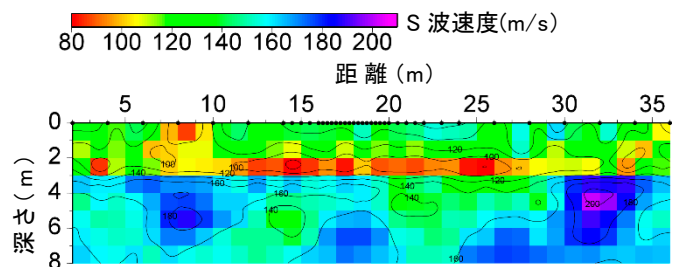


Fig.13 二次元地盤構造の推定結果  
(Estimated Two-Dimensional S-Wave Velocity Structure)

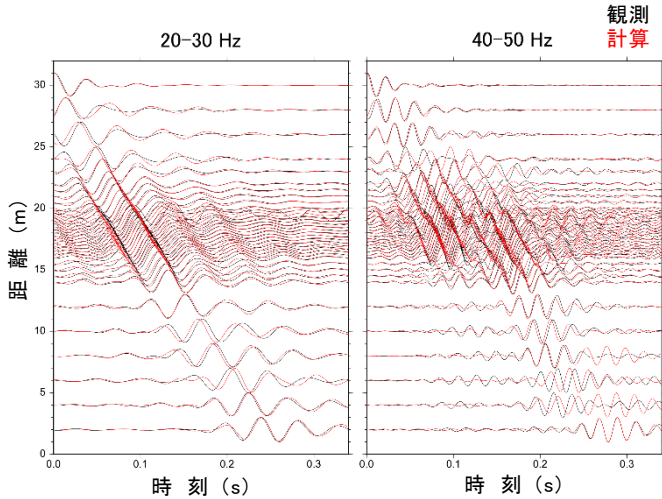


Fig.14 再現計算波形と計測波形との比較

(Comparison of Observed and Synthetic Waveforms)

理論計算で再現することによって詳細な地下構造モデルを推定する方法<sup>15)</sup>も試みられるようになってきている。

例えば、Fig.13は、検討地点において地表を上から打撃した際の地盤震動を多点で同時に計測し、それらの地震波を用いて推定した表層付近の二次元地盤構造モデルであり、Fig.14はその再現計算波形を計測波形と比較した結果である。この例では、敷地の地表で35m程度の直線区間に39点のセンサーを配置して水平成分と上下成分の震動データを同時に計測している。また、地盤構造モデルの推定では、理論計算による再現波形がそれらの計測波形に一致するように、水平34m、深さ8mの直線区間の地層断面を1m×1mのブロックに分割した計272ブロックの二次元地盤構造を推定している。

### 3. 短周期地震動の分析技術

ここでの短周期地震動とは、周期1秒程度以下の地震動とする。短周期地震動は波長が短いため地盤構造の微細な変化に影響され易く地震波の伝わり方が複雑である。理論的な波動伝播解析を行うには地盤構造モデルが必要となるが、短周期地震動の計算に耐えうるような十分な分解能と精度を現状で有しているとは言い難い。そのため、短周期地震動は、統計的な手法を用いて分析・予測が行われることが多い。

短周期地震動の分析では、地震動を震源特性(断層においてどのような破壊が起こったか)・伝播経路特性(生じた地震波がどのように伝播、減衰してきたか)・サイト増幅特性(対象地点近傍の地盤構造によって地震波がどのような影響を受けたのか)の3つの特性の積で表現する(Fig.11)。

この3特性をそれぞれ詳細に知ることは、強震動予測の高精度化に資するものであり重要な課題である。地震観測は地表や地下数十mから数百mの地中で行われており、得られた観測記録には3特性が掛け合わさったものである。これらをうまく分離するために、これまで多くの研究がなされてき

た。一連の研究の基礎となったのは、1980年代初頭の研究である。当時の手法は、観測記録を震源特性と伝播経路特性の二項に分離するのみであったが、その後、多数の研究により、手法の改善や多数の地域への適用がなされてきた。一方、1996年から運用が始まった防災科学技術研究所による地震観測網“K-NET”、“KiK-net”により強震観測記録の蓄積は着実に進んできた。観測記録が増えるにつれて、分析手法もさらに高度化が進んでいった。例えば、伝播経路特性では減衰性の不均質性が評価できるようになった。地震波トモグラフィ解析と呼ばれる理学的な視点の検討では、詳細な三次元減衰構造が解明され、プレートの沈み込み帯の構造、岩石中の水の存在、火山直下の熔融体の減衰性などが明らかにされてきた。工学的な視点での検討では、伝播経路特性の不均質性を考慮しつつ、各地震の震源特性と各地点のサイト増幅特性を適切に分離する手法が開発<sup>16)</sup>され、大陸地殻と海洋プレートでそれぞれの短周期地震動の減衰性の違いが明らかになった(Fig.15)<sup>16)</sup>。

今後も強震観測記録は増え続ける。大量に蓄積された観測記録を有効に活用し、手法を改善することで震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の推定精度をさらに向上させる取り組みは今後も必要である。

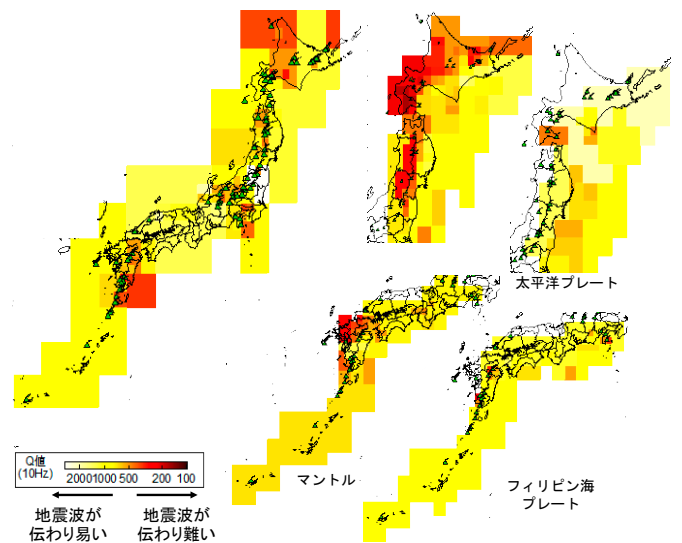


Fig.15 全国の不均質減衰構造  
(Estimated Inhomogeneous Attenuation Structure in Japan)

短周期地震動の予測式は、地震動予測モデルとも呼ばれ、地震動強さの指標(地震動振幅の最大値や応答スペクトルなど)が震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の積で表されている。震源特性としてマグニチュードや断層タイプなど、伝播経路特性として距離など、サイト増幅特性としてVs30(表層30mの平均S波速度)などをパラメータとして、地



震動指標との関係を回帰分析により推定する。非常に少ないパラメータで過去に得られた観測記録の平均特性を評価できるため、観測記録が存在する領域（マグニチュードや距離の範囲など）では非常に安定した予測となるという利点がある。

短周期地震動の分析技術と同様に、観測記録の蓄積により地震動予測モデルの高度化もなされてきた。Fig.16 に示した不均質減衰構造を反映した地震動予測モデル<sup>17)</sup>が検討されており、予測精度の向上に大きく貢献した。最近では、機械学習を用いた地震動予測モデルの構築も行われているが、現在蓄積された観測記録への適合度と、将来発生する地震に対する予測精度は必ずしも一致しないという議論もあり、機械学習を用いた地震動予測モデルの構築には過適合に注意が必要と考えられる。

このような地震動予測モデルの開発は、複数の研究機関が現在取り組んでいる。防災科学技術研究所が主導して、各研究機関の地震動予測モデルを相互に比較する取り組みも行われており、今後もこの作業を行いながらモデルの高度化が進められていく。

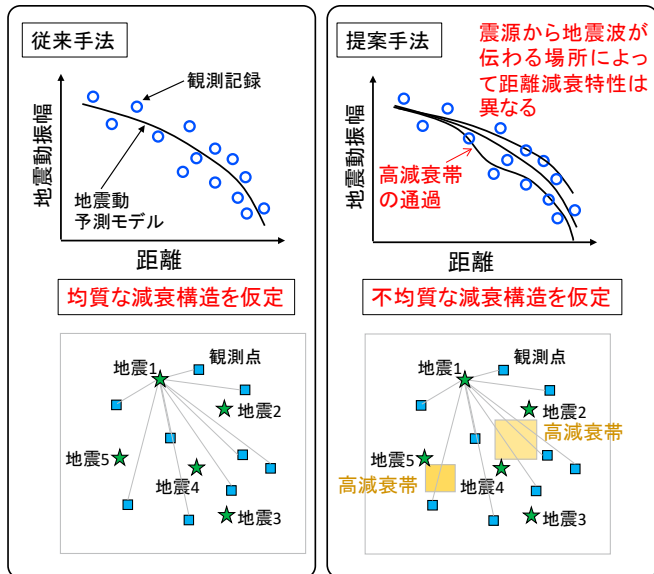


Fig.16 不均質減衰構造を反映した地震動予測モデル (Earthquake Ground Motion Prediction Model Considering Inhomogeneous Attenuation Structure)

#### 4. 長周期地震動の分析技術

長周期地震動とは、規模の大きな地震で生じる周期数秒以上の地震動のことである。波長が長いので、減衰せずに遠地に伝播しやすい。そのため、震源から数百 km 離れた場所で、石油タンクのスロッシングによる火災事故や、高層ビルのエレベーター停止事故など、比較的長い周期の揺れやすい構造物で被害事例が報告されている。大地震が発生すると気象庁により、4段階に区分した長周期地震動階級が発表される。

長周期地震動は、地下数百～数 km に至る深部の平野規模の地下構造の影響を受けて増幅され易い特徴があるが、波長が長いので表層付近の地下構造の微細な空間変化の影響を受け難く、理論に基づいた数値計算で比較的精度良く再現できる。そのため、理論に基づいた数値計算で長周期地震動のシミュレーションを行い、観測記録の再現や巨大地震による地震動の予測が検討されている。

Fig.17 は、2011 年富士山付近で発生した M6.4 の地震における周期 6～10 秒の表面波の伝播特性を調べた結果である<sup>18)</sup>。表面波とは、主要動に遅れて地表面に沿って伝播する地震波の種類の一つであり、関東平野ではこの長周期の表面波が卓越することで知られる。図では矢印の向きで伝播方向、長さで伝播速度、色の濃さで振幅を表しており、地震動予測に際しては、このような表面波の伝播特性を理論計算によって適確に再現するための深部地下構造モデルが必要である。

深部地下構造については、文科省の地震調査研究推進本部によって全国各地のモデルが公開されている<sup>例えば 19)</sup>。そのモデルを用いたシミュレーションにより、Fig.17 に示した長周期地震動を再現した結果を Fig.18 に示す。赤色のコンターは、堆積層の底面深度を表す。観測記録の分析結果 (Fig.17)

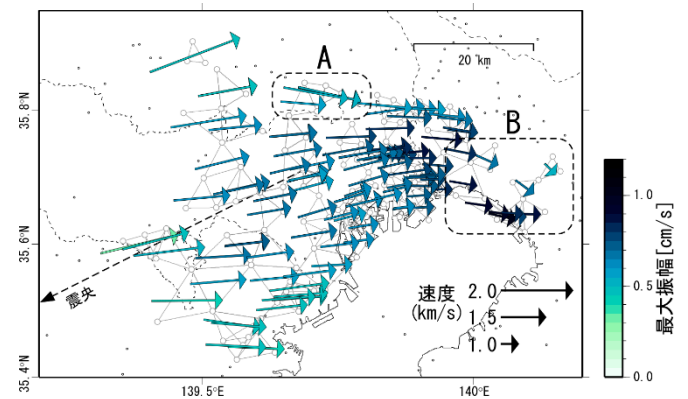


Fig.17 観測記録を用いて推定した長周期地震動の伝播特性 (Propagation Characteristics of Long-Period Ground Motion Estimated with Observation Records)

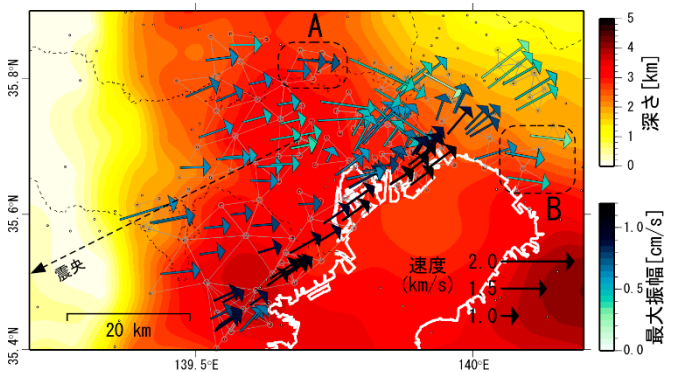


Fig.18 シミュレーションによる長周期地震動の再現結果 (Reproduction Result of Fig.17 by the Simulation)



と比べると、埼玉県南東の領域 A で伝播方向が東北東から東南東に変わる様子、東京湾北側を東に伝播した表面波が領域 B で東京湾に沿うように東南東に向きを変える様子はおおむね再現される。しかし、例えば、神奈川県東部で観測記録の振幅を過大評価する傾向も見られ、このような観測記録との相違を改善し、地震動の予測精度を向上させるためには、深部地下構造モデルを修正する必要がある。

深部地下構造モデルの修正にあたっては、多数地点で微動探査を行う方法、地震観測記録を用いる方法などが試みられており、ここでは後者の一例を概説する。深部地下構造モデルに微修正を加えながら、計算負荷の小さい2次元数値解析で震源から伝播する長周期地震動のシミュレーションを繰り返す、最適な二次元の地震波速度構造を探索する<sup>20)</sup>。Fig.19は、東京都青梅市～茨城県古河市を結ぶ測線を対象とした推定結果である。推定した深部地下構造は、特に傾斜が急な盆地端部において第1層が薄くなる結果となった。また、観測記録の再現結果を Fig.20 に示す。得られた深部地下構造モデルによる計算地震動は、既存の深部地下構造モデルを用いた場合のそれに比べて再現性が向上している。

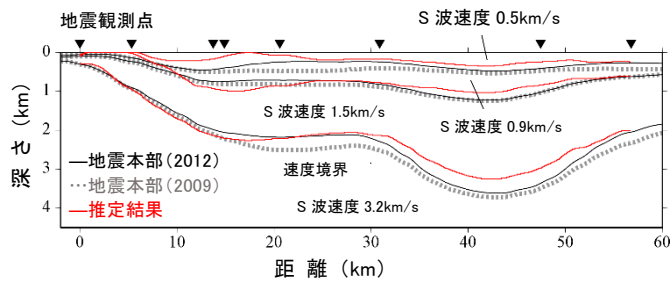


Fig.19 二次元深部地下構造の推定例  
(Example of the Estimated Two-Dimensional Deep Underground Structure)

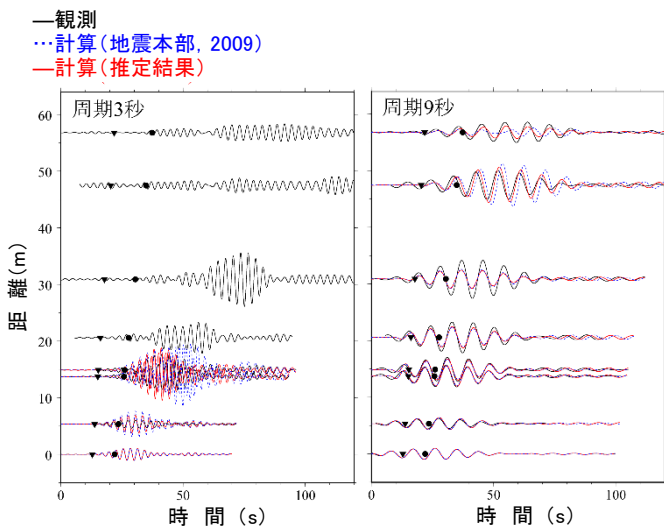


Fig.20 逆解析による観測記録の再現例  
(Example of Observation Records Reproduced by the Inversion)

ここでは、一つの地震に関する二次元深部地下構造の推定法を紹介したが、実際に様々な方向から地震波が到来することを考えると三次元の深部地下構造モデルが必要である。とはいえ、三次元の理論計算は計算負荷が大きく、その繰り返し計算による広域の三次元地下構造モデルの逆算は現在でもなお難しい。これに対しては、一つの現実的な方策として、計算負荷が低い二次元の地下構造モデルの推定を多数の断面に適用しながら既存の三次元モデルを高度化していく方式が考えられている。

ところで、大地震の地震動予測では、震源の想定、すなわちどのような断層破壊を想定するかが問題となる。これについては過去に発生した大地震の断層破壊の特徴を知っておくことが重要である。そのため、上記のようにして高精度化した深部地下構造モデルを用い、数値計算によって過去の大地震で観測した長周期地震動を再現するような断層破壊を探索する解析(波形インバージョン解析)も行われるようになってきている。

### V. 入力地震動の予測

例えば、敷地の近くに活断層がある場合など、その地震による影響が懸念される場合は、IV. 1で示した地震動の再現技術を応用して、想定する地震が発生した時の敷地における地震動を予測し、その予測地震動に対する構造物の安全性を検査することができる。このように、想定する地震のシナリオ(地震の発生場所や地震規模など)を特定して行う地震動予測を「シナリオ型地震動予測」と呼ぶ。シナリオ型地震動予測では、想定する地震の発生可能性はさておき、仮に発生した場合に大きな影響が生じる地震を選んで予測を行うことが多く、最悪に近い地震動を把握するために使われる場合もある。

シナリオ型地震動予測では、選定したシナリオの発生確率を考えていないため、その地震動予測結果がどの程度の稀な事象に対応するのかが不明である。一方で、構造物の耐震性能評価などのために、一定の期間において、どの程度の地震動がどの程度の確率で生じるかを定量的に把握することが求められる場合がある。このような場合、特定の地震だけでなく、可能性がある全ての地震による影響を考慮して、地震動と発生確率の関係を定量的に求めることが行われる。その結果に基づき、発生確率を考慮して入力地震動を予測することを「確率論的地震動予測」と呼ぶ。シナリオ型地震動予測と確率論的地震動予測の特徴を以下に示す。

#### 1. シナリオ型地震動予測

シナリオ型地震動予測では、通常、大規模な地震による震源に近い場所での強震動が予測対象となる。このような強震動は、断層の破壊過程(拡がりのある断層面がどのようにすべるか)の影響を強く受けることが知られており、現実的な

強震波形を計算するためには、断層の破壊過程を模擬した断層モデルを用いた強震動予測が有効である。現状では、将来発生する地震の断層破壊過程を正確に予測することはできないが、過去の大地震の断層破壊過程の知見などに基づいて起こり得る断層破壊のシナリオを仮定し、実際に生じる可能性がある現実的な地震動を予測する。

断層モデルを用いた強震動予測を用いたシナリオ型地震動予測のフロー（文献<sup>21)</sup>に基づく）を Fig.21 に示す。最初に、建設地点周辺で発生する地震の調査を行う。対象地点の周辺で、内陸地殻内地震、プレート境界地震、スラブ内地震それぞれの発生状況を調査し、検討対象とする地震を選定す

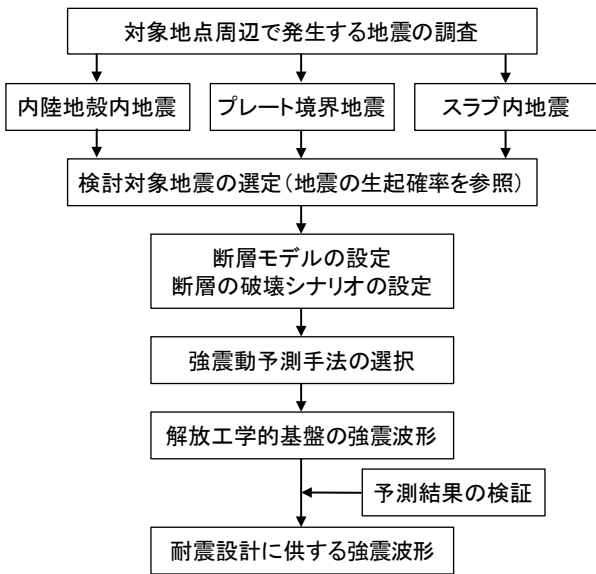


Fig.21 シナリオ型強震動予測のフロー  
(Scenario-Based Strong-Motion Evaluation Flow)

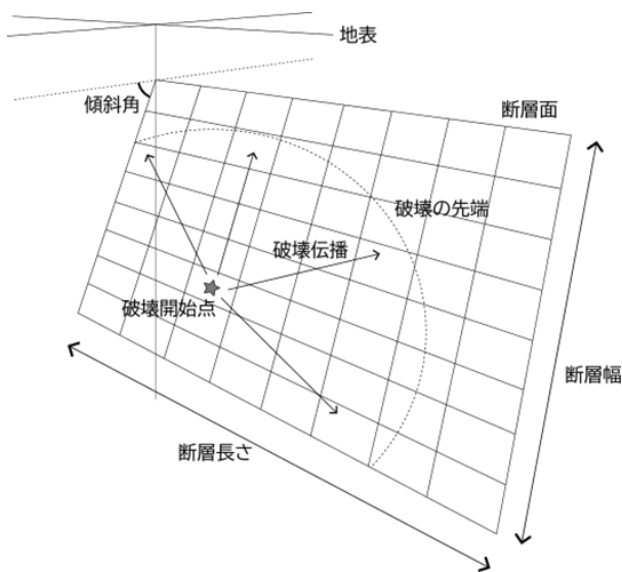


Fig.22 断層モデルのイメージ図  
(Diagram of the Fault Model)

る。対象地震の絞り込みにおいては、公的機関によって予測されている地震の生起確率<sup>22)</sup>などを参照することができる。次に、断層モデルの設定と断層の破壊シナリオの設定を行う。このステップが強震動予測のための断層モデルの設定に対応する。そして、条件に応じて適切な強震動予測手法を選択して強震波形を計算し、地震動予測モデルなどとの比較を通じて結果を検証した上で地震動予測結果を利用する。

一般的な断層モデルでは、断層を矩形平面で近似し、矩形平面を複数の小断層に分割して、各小断層のすべりの条件を変えることで、実際の地震のような複雑な断層破壊シナリオを表現できるようにしている (Fig.22)。断層の破壊シナリオは無数に考えられるが、断層面上のすべりの不均質性に関しては、過去の大地震による知見に基づいて、ある程度は標準的な条件設定が可能であり、その方法論<sup>23)</sup>が提案されているので、それによって断層モデルを設定することができる。

強震動予測手法には様々な種類があるが、上記の断層モデルと、対象地点の地下構造を考慮した理論的な方法が適用されることが多い。仮に、断層から対象地点を含む領域の地下構造に関する情報が十分にあれば、有限差分法、有限要素法などの数値シミュレーションによって、断層から放出された地震動が対象地点まで伝播する過程を計算することができる (Fig.23)。しかし、我々が知ることができる地下構造の情報が限られていることや、現状の計算機能力の問題から、モデル化できる地下構造の精緻さには限界がある。そのため、このような方法では、微細な地下構造の情報が必要となる短周期地震動の予測は難しく、予測対象は周期数秒以上の長周期地震動に限られる。短周期地震動の予測には、ある小断層から対象地点までの応答を観測地震波や模擬地震波で代用し、断層破壊過程に従って波形を重ね合わせることで、大地震の地震動を予測する方法（経験的グリーン関数法、統計的

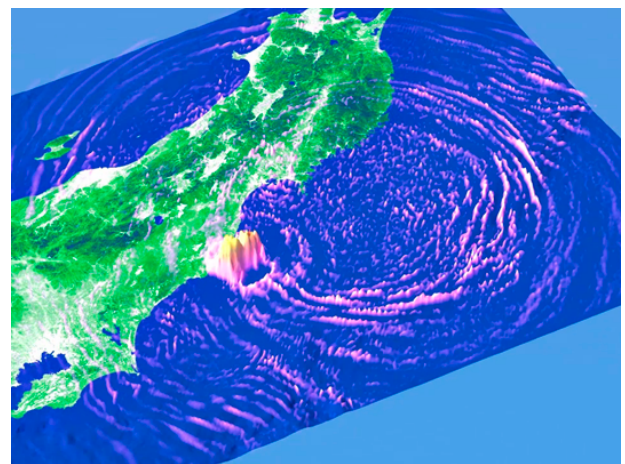


Fig.23 有限差分法による地震動シミュレーション  
(Ground Motion Simulation by Finite Difference Method)

グリーン関数法) を適用することが多い。また、両者の方法による予測結果を組み合わせ、長周期成分と短周期成分を含む広帯域の地震動を作成する場合もある。

シナリオ型地震動予測の課題の一つとして、断層モデルの不確かさが挙げられる。仮定した断層破壊シナリオは、起こり得る可能性の一つではあるが、仮定した断層破壊シナリオどおりの地震が発生するとは限らない。断層破壊シナリオによって地震動予測結果が大きく変動する可能性があるが、現状では、そのような断層破壊シナリオの不確かさを十分に考慮していない場合が多い。しかし、最近では、可能性がある断層破壊シナリオを大量に作成し、それら全てに対して地震動予測を行うことで、地震動の分布を予測することも試みられている (Fig.24)。このような方法によって、限られたシナリオによる予測結果だけでは把握できない、予測地震動振幅の平均値やばらつきなどの重要な情報を把握することができるようになる。今後このような検討事例は増えると予想されるが、地震動予測における不確かさとして、どのような不確かさをどの程度考えるべきなど今後の研究課題も少なくない。

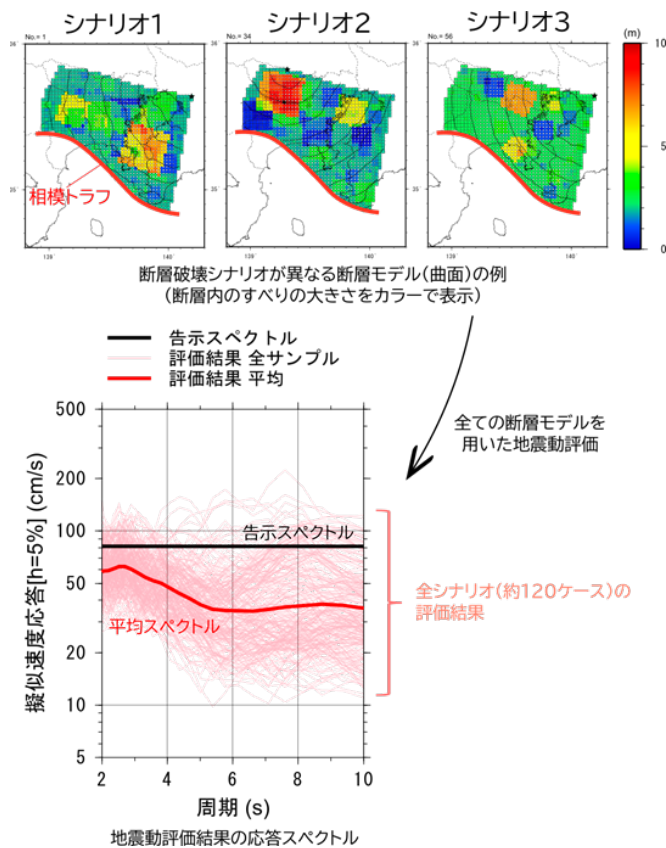


Fig.24 多数のシナリオに基づく地震動予測結果 (Ground Motion Simulation Based on Multiple Scenarios)

## 2. 確率論的地震動予測

確率論的地震動予測は、確率論的地震ハザード評価とも呼ばれ、ある地点に影響を及ぼす全ての地震を考慮して、その地点が大きな地震動に見舞われる危険度を評価することである。

地震ハザード評価の概要を Fig.25 に示す。地震活動モデル (地震の規模や発生確率を表すモデル) は、地震調査研究推進本部による調査結果が公開されている。発生の可能性が高まりつつある南海トラフ巨大地震や、ひとたび発生すれば首都圏の超高層建物へ影響が大きい相模トラフ沿いの地震のみならず、例えば 2016 年熊本地震のような活断層による地震や、〇〇断層や〇〇トラフの地震のような名称がつけられてはいないがどこでも発生の恐れのある地震も含めて対象地点の周辺で発生し得る全ての地震を考慮している。

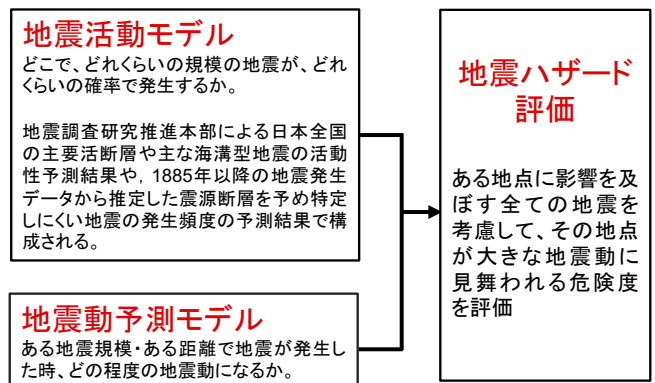


Fig.25 地震ハザード評価の概要 (Outline of Probabilistic Seismic Hazard Analysis)

南海トラフの巨大地震の過去の発生履歴は、古文書に記載された被害状況、津波堆積物、地殻変動などから Fig.26 のように明らかにされている。過去の発生履歴から判断しても南海トラフの発生パターンは複雑であり、次に発生する南海トラフの地震の発生シナリオを 1 つに限定することは現在の技術レベルでは困難である。そこで、地震ハザード評価では、南海トラフ巨大地震として 177 通りの発生パターンを考慮しており、それぞれの起こりやすさを考慮した重み付けがなされている。このような多様な発生パターンは、南海トラフ巨大地震の他にも相模トラフ沿いの地震や千島海溝沿いの巨大地震などで考慮されている。

地震動予測モデル (対象地点の地震動を予測するモデル) としては「IV. 3 短周期地震動の分析」に示した地震動予測モデルを用いることが多いが、「V. 1 シナリオ型地震動予測 (地震を特定する地震動予測)」に示した断層モデルを用いて詳細な予測を用いる事例もある。地震動の予測の際には、地震という自然現象に存在する不確かさを考慮するため、予測結果はばらつきをもった確率分布として表現される。この



2つのモデルから対象地点において大きな地震動に見舞われる危険度として地震ハザードを評価する。

地震ハザード評価の事例を示す。東京都内のある対象地点において、国が公表している地震活動モデルに従った地震ハザード評価を行った結果を Fig.27 に示す。今後 50 年間にある確率で見舞われる地震動レベルを示しており、設計用入力地震動のレベルを再現期間（何年に 1 回の地震動レベルか）という定量的な指標で表すことができる。周期 3~4 秒程度の建物に対する告示 L2（極めて稀に起こる地震）は、再現期間 475 年の地震ハザードレベルと概ね対応する。地震ハザードを個々の地震に分解して、どの地震の影響が大きいかを検討することも可能である。例えば Fig.28 は、地震ごとのマグニチュードと対象地点への距離に対して、棒の高さでその地震の影響度を示している。

この影響度は建物の固有周期と再現期間によって異なり、Fig.28 では周期 3 秒の建物に対する約 500 年に 1 回の地震動レベルに対する影響度を示している。南海トラフの地震や、相模トラフ沿いの M8 クラスの地震、フィリピン海プレート

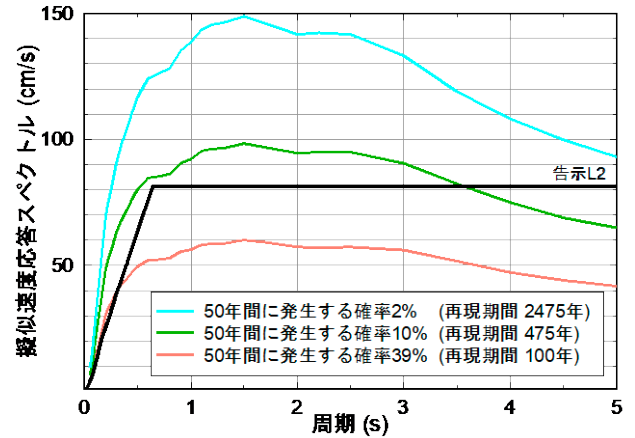


Fig.27 地震ハザード評価の例  
(Example of Probabilistic Seismic Hazard Analysis)

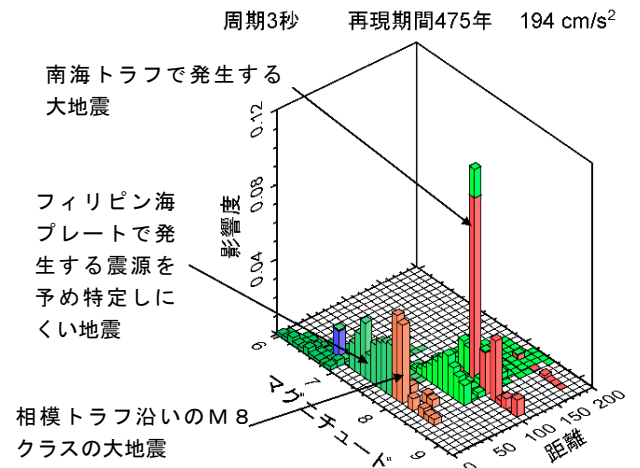
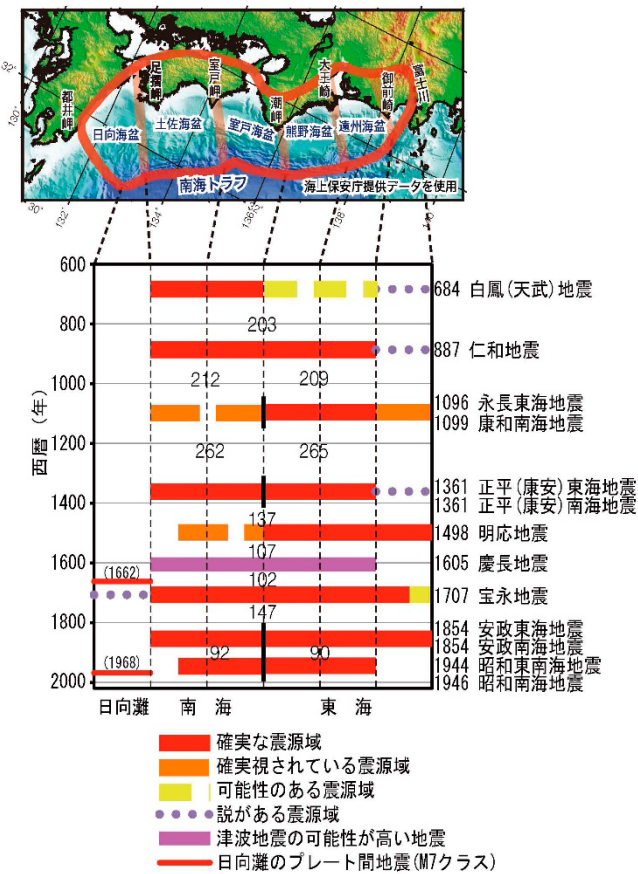


Fig.28 地震ハザード評価の影響度の確認  
(Authentication of Probabilistic Seismic Hazard Analysis)

で発生する震源を予め特定しにくい地震の影響が大きいことが分かり、対象地点の地震環境に基づき、建物の重要性に応じて今後備えるべき地震の選定をすることができる。

今後、地震ハザード評価の活用場面は増えると予想している。想定する地震や地震動の合理性がますます重視されるようになっており、超高層建物、医療施設、エネルギー施設といった重要構造物の設計用入力地震動と地震ハザードの比較検討や備えるべき地震の合理的な設定など地震ハザード評価に対する関心が高まっている。海外に目を向けると、米国の耐震設計基準では超高層建物の設計用入力地震動に地震ハザード評価結果が用いられている。そのため、グローバルスタンダードを要求する外資系企業やそれらの企業を顧客に持つ施主への対応として、日本国内の超高層建物に対しても米国と同等の地震ハザード評価を行えることは必須の要件である。国の動向として、2022年11月に国の機関で



図中で表した数字は、地震の発生間隔（年）を示す。

Fig.26 南海トラフの巨大地震の過去の発生履歴

出典：地震調査研究推進本部<sup>24)</sup>

(Past Occurrence History of Earthquakes in the Nankai Trough)

ある地震調査研究推進本部より「応答スペクトルに関する地震ハザード評価（試作版）」<sup>25)</sup>が公表された。この報告書では建築分野の設計実務での利活用への期待が整理されており、地震ハザード評価の機運が高まりつつある。

## VI. おわりに

我が国の建築・土木構造物の耐震設計法は、震災の経験を踏まえながら進歩してきた。これには、地震動や地震時の建物に加わる力が明らかにされてきたことが大きく寄与している。しかし、地震が発生し、地震波が地中を伝わって建設地に到達して地表を揺らすまでを高い精度で予測するには、いまだ多くの課題が残されている。建物の耐震性をより高めるために、本論で紹介した地震動を予測する技術の向上を続けていくことが大切と考えられる。

## 参考文献

- 国土交通省；平成 22 年度国土交通白書，  
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h22/hakusho/h23/index.html>
- 柴田明德；時代で見る耐震工学の今と昔，第 1 回 有史～江戸期までの大地震と耐震構造，NTT ファシリティーズ SEINWEB，  
[https://www.sein21.jp/TechnicalContents/Shibata/Shibata010\\_1.aspx](https://www.sein21.jp/TechnicalContents/Shibata/Shibata010_1.aspx)
- Wikipedia；内外ビルディング，  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/内外ビルディング>
- 久田嘉章；過去の被害地震から学ぶ建物の耐震化，  
[http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/urban-resilience\\_1/pdf/過去の被害地震から学ぶ建物の耐震化.pdf](http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/urban-resilience_1/pdf/過去の被害地震から学ぶ建物の耐震化.pdf)
- 土木学会；2022 年制コンクリート標準示方書設計編，2023.
- 国土交通省鉄道局監修鉄道総合技術研究所編；鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計，2012.
- 日本道路協会；道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012.
- 気象庁；地震発生のしくみ，  
[https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/jishin/about\\_eq.html](https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/jishin/about_eq.html)
- 地震調査研究推進本部；地震・津波に関する用語集，  
<https://www.jishin.go.jp/resource/terms/>
- 防災科学技術研究所；防災を学ぶ，災害の基礎知識，地震災害，  
[https://www.bosai.go.jp/activity\\_general/foundation/earthquake.html](https://www.bosai.go.jp/activity_general/foundation/earthquake.html)
- 防災科学技術研究所；地震の基礎知識とその観測，  
[https://www.hinet.bosai.go.jp/about\\_earthquake/](https://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/)
- 防災科学技術研究所；地震津波火山ネットワークセン  
ター，  
[https://www.bosai.go.jp/activity\\_special/center/network.html](https://www.bosai.go.jp/activity_special/center/network.html)
- 物理探査学会；物理探査ハンドブック増補改訂版，2016，  
<http://www.segi.org/publication/guidance.html>
- 笠松健太郎，池浦友則，土方勝一郎；KiK-net 地点における解放基盤地震動評価のための地盤モデル最適化検討，日本建築学会学術講演梗概集，2011，pp. 183-184.
- 安達直人，秀川貴彦，鈴木康嗣，笠松健太郎，上野嘉之；微生物代謝を利用した原位置地盤の液状化強度評価，鹿島技術研究所年報，第 67 号，2019，pp. 23-28.
- 友澤裕介，加藤研一，中尾隆，本村一成，赤司二郎；九州地域の震源特性・不均質伝播経路特性・サイト増幅特性の推定，日本建築学会構造系論文集，86 巻，790 号，2021，pp. 1597-1606.
- 友澤裕介，引田智樹；地震動の伝播経路特性の不均質性を考慮した海溝型地震の地震動予測モデル，日本建築学会学術講演会，2023.
- 笠松健太郎，山中浩明，酒井慎一；ラブ波を用いた波形逆解析による深部地盤の二次元 S 波速度構造の推定，物理探査，第 68 巻，第 4 号，2015，pp.265-275.
- 地震調査研究推進本部；「長周期地震動予測地図」2021 年試作版，2012，  
[https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic\\_hazard\\_map/lpsh/m/12\\_choshuki/](https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpsh/m/12_choshuki/)
- Kasamatsu, K., Yamanaka, H., and Sakai, S.; Inversion of Love Waves in Earthquake Ground Motion Records for Two-Dimensional S-wave Velocity Model of Deep Sedimentary Layers, Earth, planets and space, 73:17, 2021.
- 日本建築学会；最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法，2009.
- 地震調査研究推進本部；活断層及び海溝型地震の長期評価結果一覧，2023.
- 地震調査研究推進本部；震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」），2020.
- 地震調査研究推進本部；南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）について，2013，  
[https://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou\\_pdf/nankai\\_2.pdf](https://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/nankai_2.pdf)
- 地震調査研究推進本部；応答スペクトルに関する地震動ハザード評価（試作版），2022，  
[https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic\\_hazard\\_map/sh\\_response\\_spectrum/](https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/sh_response_spectrum/)