

# 長周期地震動に関する情報検討会 多様なニーズに対応する予測情報 検討ワーキンググループ報告書

平成 31 年 3 月

長周期地震動に関する情報検討会  
多様なニーズに対応する予測情報検討ワーキンググループ

気象庁地震火山部

## 目次

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| はじめに                            | 1  |
| I. 迅速性と確度を踏まえた予測情報の分類           | 2  |
| 1. 長周期地震動の予測情報について              | 2  |
| 2. 予測情報のカテゴリー分類                 | 3  |
| II. 予測情報の利活用方法の検討               | 8  |
| 1. 3つのカテゴリーの予測情報の利活用について        | 8  |
| 2. 取り組み事例                       | 13 |
| III. 予測技術の検討                    | 17 |
| 1. 予測技術の体系化                     | 17 |
| (1) 「震源情報」を用いた予測                | 18 |
| (2) 「観測データ」を用いた予測               | 21 |
| (3) 構造物の揺れの予測技術                 | 22 |
| 2. 即時予測技術の開発事例                  | 24 |
| IV. 長周期地震動の予測情報に関する実証実験         | 34 |
| 1. 実証実験について                     | 34 |
| 2. 実験事例                         | 38 |
| 3. 実証実験の総括と今後について               | 43 |
| V. まとめと今後に向けて                   | 45 |
| 1. 検討結果の主要なポイント                 | 45 |
| 2. 今後の多様なニーズに対応する予測情報の実現に向けて    | 45 |
| ワーキンググループ委員名簿                   | 47 |
| 多様なニーズに対応する予測情報検討ワーキンググループの開催経過 | 48 |
| 参考文献等                           | 49 |

## はじめに

気象庁は、平成 23 年度以降、有識者等による「長周期地震動に関する情報のあり方検討会」や「長周期地震動に関する情報検討会」（以下、情報検討会）を開催し、長周期地震動に関する情報のあり方について検討を進めてきた。平成 29 年 3 月、情報検討会は、「長周期地震動に関する情報のあり方について」（以下、平成 28 年度報告書）をとりまとめた。

この中で、長周期地震動を即時的に予測する技術を提示し、この技術を用い、南海トラフ沿いの巨大地震で想定されるような重大な災害が起こるおそれのある長周期地震動を予測し、気象庁が警戒や注意を呼びかける予測情報を発表するよう求めた。一方、高層ビル等の在館者への情報提供、高所作業の安全確保、エレベーター等の制御など多様なニーズに対応するために、個々の高層ビル等の特性まで考慮した詳細な揺れの予測が必要とされ、その情報提供は、現状の緊急地震速報（予報）と同様に民間の役割が重要とされた。

多様なニーズに対応する予測情報の実用化に向け、今後民間事業者が提供すると想定される予測情報のための予測技術、その利活用方法や利活用にあたっての留意事項などの検討や検証が必要であるとされ、情報検討会のもとで、「多様なニーズに対応する予測情報検討ワーキンググループ（以下、WG）」を開催することとなった。

本 WG は、平成 29 年 3 月から平成 31 年 3 月において、情報検討会委員でもある北村春幸東京理科大学副学長を主査とし、情報検討会委員 3 名に、建築分野等の有識者、研究機関、建設会社、都市開発デベロッパー、情報配信事業者、ビル設備等の関係団体等から 13 名を加え計 17 名の委員により、以下の課題に関する検討を進めた。

- ① 観測結果の活用を含めた予測情報の利活用促進のため、情報利用者のニーズと予測精度を踏まえたさまざまな利活用方法の検討（予測情報の利活用方法の検討）
- ② 多様なニーズに対応する予測のために、建物の構造などを踏まえた予測技術の検討及び検証（予測技術の検討）
- ③ リアルタイムでの情報提供における課題を抽出するため、予測情報を試行的に提供し、実際の利活用についての検証（実証実験の実施）

本報告書は、WG における上記 3 つの課題の検討を通じ、予測情報の利活用方法と情報に用いる予測技術の整理とともに、高層ビル等における情報を利用した地震対策の取り組み事例や地震動または高層ビル等の揺れの予測技術やシステムの開発事例、さらに予測情報の提供とその利用に関する実証実験の事例と合わせ、長周期地震動の予測情報が広く活用されることを目的としてとりまとめたものである。

## I. 迅速性と確度を踏まえた予測情報の分類

### 1. 長周期地震動の予測情報について

情報検討会は、平成 28 年度報告書において図 1 に示すように予測情報のあり方を 2 つに大別した。

1 つは、警戒・注意を呼びかける予測情報である。近年、大都市圏を中心に高層ビル等の増加により長周期地震動の影響を受ける人口は急増しており、長周期地震動による被害の軽減・防止の社会的な重要性、必要性が益々高まっている。この広く国民に警戒・注意を呼びかけるための予測情報の発表は気象庁の任務である。

もう 1 つは、高層ビル等の在館者への情報提供や誘導案内、高所作業の安全確保、エレベーターやライフラインなどの制御、情報システムの障害回避など長周期地震動対策の多様なニーズに対応する予測情報である。このようなニーズに適切に対応するには、高層ビル等の立地する地盤や建物の構造等の特性を反映した地点ごと、階層ごとの詳細な予測情報が提供できなければならない。このような多様なニーズに対応する予測情報は、緊急地震速報（予報）と同様、民間事業者にもその提供の役割が期待されるものである。

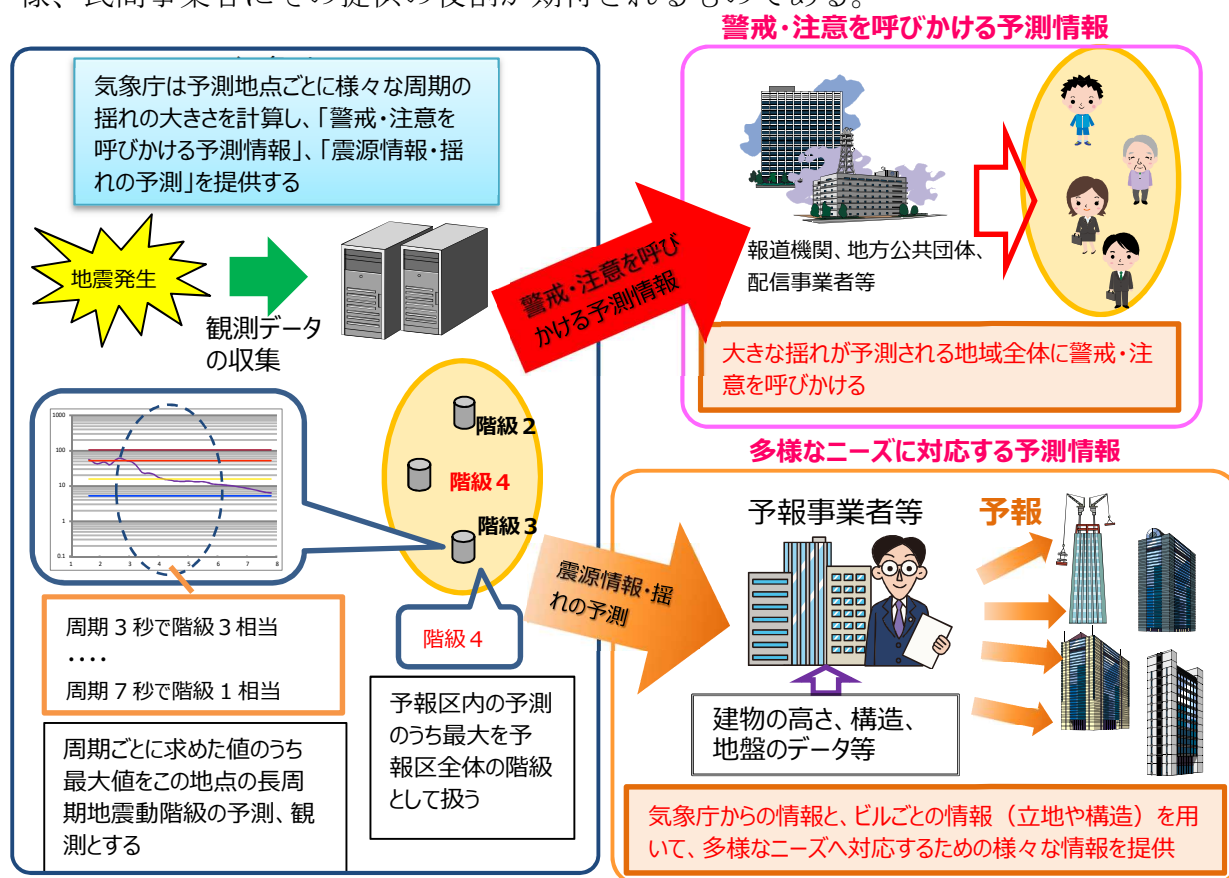


図 1 長周期地震動に関する予測情報のあり方の概念図

## 2. 予測情報のカテゴリー分類

予測情報を作成するための予測技術や情報の利活用策を検討するにあたり、情報の迅速性と確度の観点から、以下の通り3つのカテゴリーに分類し（図2参照）、各カテゴリーの予測情報の提供者、情報の迅速性、確度、内容などの特徴と利用にあたっての留意点をまとめる。

[カテゴリー1] 気象庁から発表される警報・予報

[カテゴリー2] カテゴリー1をもとに事業者等により作成、配信される予測情報

[カテゴリー3] リアルタイムの観測データを用いた事業者等による精度の高い揺れの予測情報

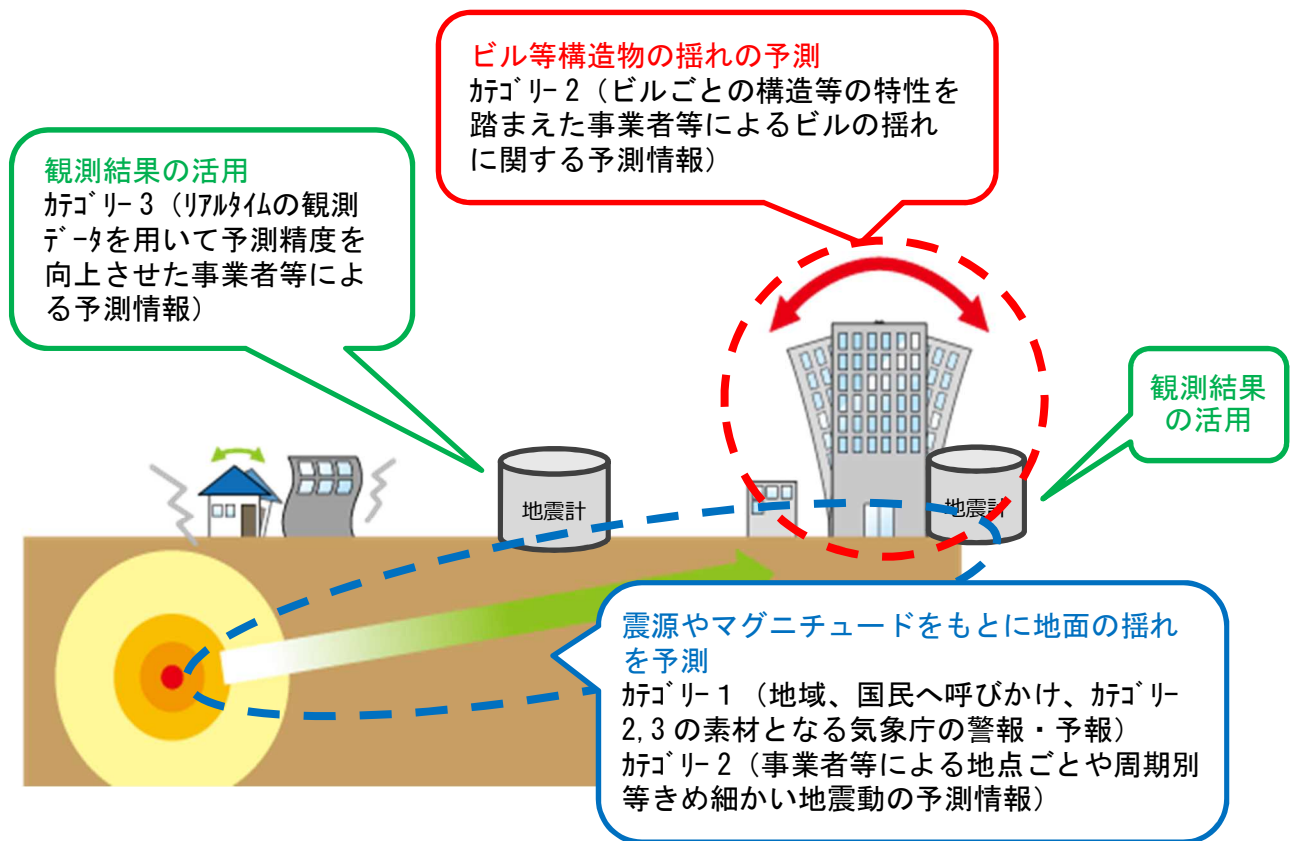


図2 予測情報の3つのカテゴリーの分類イメージ

### ① カテゴリー1（気象庁が発表する警報・予報）

これは、気象庁が発表する長周期地震動の予測情報であり、以下の警戒・注意を呼びかけるための警報と予報に区分される。

警報としては、緊急地震速報(警報)の現行の発表基準と発表内容(震度5弱以上を予測した場合の震度4以上を予測した予報区)に、長周期地震動階級3以上を予測した予報区を追加した緊急地震速報(警報)として発表する。

予報は、以下のように現状の緊急地震速報(予報)の内容に長周期地震動の予測結果を加えて発表することを想定している。図3に予報内容のイメージを示す。

- ・緊急地震速報処理による地震の発生時刻、地震の発生場所の推定値
- ・緊急地震速報処理による地震のマグニチュードの推定値
- ・予報区(地震情報や緊急地震速報で用いる区域)ごとの長周期地震動階級及び震度の予測値と予報区の名称
- ・上記の予報区への主要動(S波)の予測到達時刻

平成●●年 ●月●●日06時13分14秒  
気象庁発表

長周期地震動の予報(仮称) (第○報)  
●●日06時12分58秒頃  
宮城県沖 M7.1  
北緯38.9度 東経142.1度 震源50km

長周期地震動階級1以上が予測される地域の予測階級を掲載

予測震度は緊急地震速報(予報)の内容を掲載

| <主要動の到達予測> |       |                        |
|------------|-------|------------------------|
| 岩手県内陸南部    | 階級4程度 | 震度5強程度 06時13分19秒頃以降    |
| 宮城県北部      | 階級3程度 | 震度5強程度 06時13分22秒頃以降    |
| 宮城県中部      | 階級3程度 | 震度5弱程度 06時13分23秒頃以降    |
| 岩手県内陸北部    | 階級3程度 | 震度4程度 06時13分29秒頃以降     |
| 岩手県沿岸北部    | 階級2程度 | 震度4から5弱程度 06時13分32秒頃以降 |
| 宮城県南部      | 階級2程度 | 震度4程度 06時13分35秒頃以降     |
| 青森県三八上北    | 階級2程度 | 震度4程度 06時13分40秒頃以降     |
| 山形県最上      | 階級2程度 | 震度4程度 06時13分42秒頃以降     |
| 福島県浜通り     | 階級2程度 | 震度3から4程度 06時13分44秒頃以降  |
| 秋田県内陸南部    | 階級2程度 | 震度3程度 06時13分46秒頃以降     |
| 福島県中通り     | 階級1程度 | 震度3から4程度 06時13分47秒頃以降  |
| 山形県村山      | 階級1程度 | 震度2程度 06時13分47秒頃以降     |
| 山形県庄内      | 階級1程度 | 震度3程度 06時13分49秒頃以降     |
| 秋田県沿岸南部    | -     | 震度3から4程度 06時13分50秒頃以降  |

<主要動が既に到達したと思われる地域>  
岩手県沿岸南部 階級4程度 震度5強程度

<警報対象の地域>  
岩手県内陸南部 宮城県北部 宮城県中部 岩手県沿岸北部 宮城県南部 青森県三八上北 山形県最上 福島県浜通り 秋田県沿岸南部 福島県中通り

緊急地震速報(予報)に掲載されている地域については、予測階級が1未満でも掲載(予測階級1未満は“-”と記載)

強い揺れに警戒してください。

図3 気象庁の長周期地震動の予報の内容のイメージ

予報は、地震発生後、最も早く提供できる長周期地震動の予測情報であるとともに、カテゴリ2、3の予測情報の発表トリガーであり作成材料となるため、他のカテゴリに比べ大きく揺れ出すまでの猶予時間がある。

長周期地震動階級※の予測値は、1.6 秒～7.8 秒まで 0.2 秒刻みの周期ごとに予測した絶対速度応答スペクトルの最大値から求める。また、最小の発表単位は府県を数分割した地域である予報細分区域であり、区域内に平均して 3、4 箇所程度設置している気象庁の震度観測点を長周期地震動階級の予測ポイントとし、そのポイントの中で最大の長周期地震動階級がその地域の予測値として発表される。つまり、カテゴリー 1 の予測情報に掲載される予報区ごとの長周期地震動階級は、最も大きな揺れが想定されるポイントおよび固有周期の建物の揺れに基づく値であるため、この予測情報は地域の代表的な長周期地震動によるリスクを示すものである。このため、実際の高層ビルの固有周期や立地ポイントが、絶対速度応答スペクトルが最大となった周期や予測ポイントと大きく異なる場合には、必ずしもそのビルの揺れと一致しないことに留意が必要である。

※長周期地震動階級は固有周期 1.5～8.0 秒の高層ビルなどを対象とした指標であり、地表面の揺れに基づき算出する。

## ② カテゴリー 2（カテゴリー 1 をもとに事業者等により作成、配信される予測情報）

これは、カテゴリー 1 の気象庁の予報あるいは緊急地震速報（予報）から入手できる地震の発生時刻、震源、マグニチュードの推定値をもとに民間の事業者等が情報利用者のニーズに応じ作成して提供する予測情報である。多様なニーズに対応する予測情報の中心となるものであり、気象庁が技術的な信頼性を認めた方法で任意地点における長周期地震動階級等を予測するものと、地震動によるビルの揺れを予測し提供するものに大別される。

前者は、地震発生時、情報利用者が知りたい地点ごとの長周期地震動階級等の予測値を速やかに提供する情報であり、1 質点モデルの標準的建物の予測情報である。

後者は、構造・地盤などを反映した個々の高層ビル各階の揺れなど、構造物の揺れに関するさまざまな指標を予測し提供する情報である。

カテゴリー 2 の予測情報は、材料となるカテゴリー 1 などの入手が前提であるためカテゴリー 1 より後の提供となるが、情報利用者が知りたい地点や構造などビルの特性を反映した詳細な揺れの予測情報は、ニーズに適合しやすく確度も高いため、多様な利用と相応の効果が期待できるものである。

## ③ カテゴリー 3（リアルタイムの観測データを利用した事業者による精度の高い揺れの予測情報）

これは、予測ポイントよりも震源側に位置する、より早く地震動を観測する観測点でリアルタイムに観測する地震動のデータをもとに、予測ポイントやビルでの揺れを予測する情報である。実際の観測データを利用することで予測精度の向上や予測内容の充実が期待できる。

カテゴリー3の予測情報の作成には、緊急地震速報の予測手法のうち観測した揺れの強さから直接、その周辺の震度を予測する手法（PLUM法）のようにリアルタイムの地震動の観測データから予測ポイントの長周期地震動を予測する技術や、予め観測点と予測ポイント間の伝達関数を求めておき地震時の観測データから予測ポイントでの揺れを予測する技術などが用いられる。

実際の観測データの利用により予測精度の向上が期待できるが、観測点で先に地震動を捉えないと、予測ポイントで地震動を予測することができないため、猶予時間は短く、揺れ始めてから提供するケースも考えられる。しかしながら、揺れ終わった直後の建物の健全性の応急診断やエレベーターの点検と復旧等、スピーディかつ丁寧な措置が必要な場合にカテゴリー2から予測精度のより高いカテゴリー3へ更新し、さらに観測情報なども判断に加えることにより、より確実な対応を執ることが可能となる。

既に地震計を整備し、その観測データを使い地震発生時に建物の健全性や被災度を早急に判断するシステムを利用しているビルもある。カテゴリー3の予測情報や事後対応のため利用する観測データは、このようなビル管理者や民間事業者等が設置する地震計の利用が期待される。地震発生後10分程度からオンライン配信を検討している気象庁の観測情報や速やかな公開が行われている国立研究開発法人防災科学技術研究所（以下、防災科研）の強震観測網（K-NET、KiK-net）のデータなどは、揺れが終わった後の被災度判定などへ利用できる。

PLUM法で活用されているリアルタイム震度データのように、将来、長周期地震動の観測指標が即時に利用できるようになり、さらに今後コスト面や技術面の課題が解決され各処の観測波形データが即時に利用できるようになれば、カテゴリー3の予測情報はその内容や予測技術、利活用策を大きく進展、拡大させる可能性を持つ情報である。

以上の3つのカテゴリーに分類した予測情報とさらに観測情報について、気象庁が発表するもの、事業者が提供するものとして想定している情報の種類とその地震の検知から情報提供までの経過時間、対象範囲、内容を表1に整理する。



表1 想定される長周期地震動の情報

|    | 種類                                 | 地震検知から情報提供までの時間 | 情報の対象範囲            | 情報の内容                                                                           |
|----|------------------------------------|-----------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 予測 | 気象庁が発表する警報<br>(緊急地震速報(警報))         | 数秒～数分程度         | 予報区※               | ・強い揺れに警戒すべき予報区名<br>(震度5弱以上が予想される場合の震度4以上の地域+長周期地震動階級3以上の地域)                     |
|    | 気象庁が発表する予報<br>(長周期地震動の予報)          | 数秒～数分程度         | 予報区※               | ・長周期地震動階級、到達予想時刻(S波)、震源情報(マグニチュード、緯度経度、深さ)                                      |
|    | 事業者が行う長周期地震動の予報(1質点モデルの標準的建物の予測情報) | 数秒～数分程度         | メッシュ、ビル立地場所等ポイント地点 | ・長周期地震動階級、応答スペクトル値などビル高層階での揺れの大きさ<br>・卓越周期、到達時刻                                 |
|    | 事業者が行うビル等の構造物に応じた揺れの予測情報           | 数秒～数分程度         | ビル等施設              | ・各階層等における各種の揺れの指標<br>・卓越周期、到達時刻、継続時間<br>・その他(予想波形、独自の指標等)                       |
| 観測 | 気象庁が発表する観測情報(PUSH型)                | 10分程度           | 予報区※、観測地点          | ・長周期地震動階級、周期別の長周期地震動階級データ、震度                                                    |
|    | 気象庁が発表する観測情報(HP掲載、PULL型)           | 20分～30分程度       | 予報区※、観測地点          | ・長周期地震動階級、周期別の長周期地震動階級データ、震度<br>・画像データ(応答スペクトル、時刻歴波形)<br>・csvデータ(応答スペクトル、時刻歴波形) |
|    | 事業者が行う観測                           | 観測後随時           | ビル等施設              | ・観測地点の長周期地震動階級、周期、スペクトル、継続時間、時刻歴波形                                              |

(予報区※：震度情報や緊急地震速報の発表で用いられている区域(全国188区域)、  
府県予報区単位)

## Ⅱ．予測情報の利活用方法の検討

本節では、検討課題①「観測結果の活用を含めた予測情報の利活用促進のため、情報利用者のニーズと予測精度を踏まえたさまざまな利活用方法の検討」をとりまとめるとともに、取り組み実例を2つ紹介する。

とりまとめにあたっては、情報利用者それぞれの現場や利用環境における地震動対策や被害への対応実績、情報利用への期待や課題等を把握することを目的とした建築関係者、都市開発デベロッパー、情報通信関係会社、エレベーターメーカー、高層マンションの管理組合や関係自治会、地方公共団体、電力・ガス・高速道路関係者などへ実施したヒアリングから得た意見も参考とした。ヒアリングでは、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（以下、東北地方太平洋沖地震）において、建物や設備への被害や負傷者の発生その他、「大きな揺れに高層ビルの就業者や在館者がビル管理者側の誘導も聞かず非常階段に殺到するなど混乱した状況に陥った」、「長周期地震動対策を施したと説明してもまったく揺れないようにはできないため強い恐怖心を持った就業者等には安心材料にならない」といった高層階などで突然遭遇する大きな揺れが精神状態に悪影響を与えるおそれがあることがうかがえた。南海トラフ沿い等で発生が懸念されている大地震などに対し、ほとんどが長周期地震動対策の必要性・重要性を認識しており国全体として実効性ある対策を望む声も聞かれた。その中で、震度情報では表現しきれない長周期地震動の発生や揺れの大きさを知らせる観測情報、さらに緊急地震速報のような揺れる前に知らせる予測情報などは分かり次第ただちに提供して欲しいと期待する一方で、「震度とは異なる長周期地震動階級が示す揺れや被害の程度が理解できていない」、「新たな情報を受けての対応や判断をどうすべきか」と言った意見も少なからずあり、長周期地震動により引き起こされる各分野での被害の様態や長周期地震動階級、情報の利活用策などに関する普及啓発が引き続き重要な課題であると考えられる。

### 1. 3つのカテゴリーの予測情報の利活用について

3つのカテゴリーの予測情報について、さまざまな利用環境・分野での具体的な利活用方法と想定される効果や留意点を述べ、表2に整理する。

#### ① 人への周知（ビル等在館者、ビル周囲の通行人・利用者）

予測情報を利用すべき対象は、高層ビル在館者のほか、ビルからの落下物や免震ピット付近での建物の移動などに備える必要があるビル利用者やビル周囲の通行人である。

カテゴリー1の情報は、館内アナウンスや一斉同報メールなどを使い通知することで身の安全の確保、不安感の低減・混乱回避、エレベーター停止やその

予告、及び防災センターの初動準備など、限られた猶予時間で安全を最優先して備えるためのトリガーとなる。一方、広く地域全体に対し、大きく揺れる最大の可能性を伝えるため、カテゴリー1の情報で示される予測よりも小さな揺れとなる地区や建物も多いと考えられる。自分が居る場所や周辺の地震リスクの内容や程度を把握しておくとともに、カテゴリー1は地域の長周期地震動によるリスクに対し警戒・注意を促すことを第一の目的とする予測情報であることに国民の理解が必要である。

カテゴリー2の情報は、ビルの立地点やビル各階の揺れなどの予測であり、階ごとの適切なアナウンスによる丁寧な誘導や不安解消等に役立つことが期待される。一方、利用者が先にカテゴリー1の情報を既に入手している中で伝えることも想定し、カテゴリー1の情報のフォローとなるようその伝え方に工夫が必要である。

カテゴリー3の情報は、長く続く揺れに対し揺れの継続や収束に関する丁寧なアナウンスや建物の継続使用の判断に用いるなどよりの確な措置に利用できる。

## ② ビル内の設備・機器等の制御

予測情報を自動制御等に利用し効果が期待されるビル内の設備・機器等の代表は、高層ビル内の移動手段であるエレベーターである。エレベーターは地震時管制運転装置（地震の揺れを感知しエレベーターを制御するシステム。平成21年建築基準法施行令改正によりP波感知型地震時管制装置の設置が義務化された。）、さらに長周期地震動の検知装置を設置し利用している事例もあるが、いずれも地震動を観測し始めてからの制御となる。大きく揺れるまでの猶予時間が予測情報を利用することで長くなれば、最寄り階での停止による閉じ込めの防止のほか、エレベーターのかごを移動させ、かご及び昇降路内にある機器が損傷を受けにくくすることなど、効果がより高い安全対策を速やかに行うことができる。損傷を免れれば速やかな運転再開が可能であり効果は大きいと期待される。さらに点検や運転再開のために揺れの収束に関する情報を求める意見も多い。特に、ビルごとに異なる共振等の特性を考慮した継続時間を即時に定量的に見積もることはニーズが高く、今後の技術的開発に期待するところである。ただし、継続時間が把握できた場合でも続発する地震による新たな揺れの可能性にも留意する必要がある。

一方で、高層ビル内で唯一と言える移動のためのサービスを予測情報で止めるには情報の確度が高いものであるとともに、施設の管理者と利用者あるいは情報の提供者と利用者において、情報の使い方について理解を一致させることが必要との考えもうかがえた。

予測情報で早めに制御を行い、長周期地震動の検知装置や地震計による揺れの監視から制御の確定や修正、さらに収束の判断から運転再開につなげる一貫した制御管理が可能となるよう、予測情報と観測情報を組み合わせた利用が現実的かつ有効性が高いと考えられる。この中で、カテゴリー1で安全第一の制御を行うケース、カテゴリー2で猶予時間の若干のロスを織り込んでも確度の高い情報に基づき制御を行うケース、さらにカテゴリー3や観測情報を利用し運転開始や復旧へ向かうケースなど、個々のビルごとにエレベーターの運行・利用停止の影響、地震時管制運転装置や長周期地震動検知装置の有無、万一の事故対応等を考慮しコストパフォーマンスに応じ利用するカテゴリーの予測情報等を適宜組み合わせることが対策の実効性を上げることにつながると考える。

エレベーター以外でも、病院には放射線科にある遮蔽扉による閉じ込めや、集中治療室や手術室のように平時は人がコントロールできるよう固定できないが地震の揺れにより転倒・移動させてはいけない機器など、長周期地震動による大きな揺れへの対策が必要となる建物内設備は少なくない。これらにおいても危険回避・事故防止の重要性と情報の確度から利用すべきカテゴリーの予測情報等を選択し、有効な対策を講じることが期待される。

### ③ ビル等の被災判断

地震後、建物や施設の速やかな被災度判定の実施は、長周期地震動による揺れに見舞われた高層ビルにおいても重要な課題である。過去、国内で長周期地震動の影響で倒壊・放棄を余儀なくされた高層ビルの事例は報告されていないが、東北地方太平洋沖地震において首都圏や関西圏などでは室内の装備品類の転倒や移動、経験したことのない恐怖感や混乱の発生、天井や内装材等の損傷などが発生し、対策を講じなければならなくなった高層ビルは少なくない。なにより安全に利用し続けられるのか、居住し続けられるのかというビルの健全性は、就業者や住民、利用者にとって重要な情報であり、健全性の速やかな診断のためには予測情報の利用も考えられる。ビルごとの判断となるため、カテゴリー2やさらに精度が向上したカテゴリー3の予測情報や観測情報の利用が期待される。これらを利用しビルの健全性を応急的に診断することで、安全であれば安全情報を速報し、リスクがあれば精緻な点検・診断へつなげることができる。ビルが生活や事業活動の場として安全に利用し続けられることを早く知らせることで、不安感の増幅やそれによる混乱を抑え、地震が発生して間もない緊急を要する時間に他の優先すべき救助・復旧事業等へ力を注ぐことができる。ビルや地域全体として損失の低減や被害拡大の防止につながれるものとする。

#### ④ ビル以外への利用

ビル以外については工事現場や大規模工場等において予測情報の活用が見込まれる。例えば高所作業やタワークレーンなど重機を扱う作業の停止や危険な現場からの退避など作業員や周辺環境の安全確保へ利用できる。また、鉄道や高速道路などの長大橋、大型の水槽やタンク、ため池など固有周期が長く長周期地震動の影響を受けやすい施設における安全対策や業務継続、被災への備えなどのため、施設や作業の特殊性を考慮し選択したカテゴリーの予測情報や観測情報の効果的・効率的な利用が期待される。

ただし、長周期地震動階級は、固有周期 1.5 秒～8.0 秒、減衰定数 5 % の高層ビルなどを主な対象とした設定となっている。国内の長大橋や大型タンクなどには固有周期 10 秒を超えたり、大型タンクなどでは減衰定数が小さなものもあるなど階級の対象外の構造物も存在することから、そのような構造物のため予測情報や観測情報を提供また利用しようとする場合、現行の長周期地震動階級では完全には揺れの大きさを表現できない可能性があることに留意が必要である。

#### ⑤ その他

緊急地震速報と同様に、実際に地震が発生した時に予測情報が十分に効果を発揮するためには、訓練を重ねることが重要である。3つのカテゴリーの予測情報と観測情報は、それらを組み合わせた訓練に取り組むことで、地震時の応急計画や対応マニュアルの整備、関係者の理解や啓発へとつながり、長周期地震動への対応力向上に役立てることができる。

以上のように、予測情報を3つのカテゴリーに分類したことで、それぞれの予測情報の内容とその確度、大きく揺れるまでの猶予時間と執るべき対応、さらにコストパフォーマンスから、利用者がその都度有効な予測情報を効率的に選択できると考えられる。さらにカテゴリー3の予測情報や観測情報を、揺れの最中や揺れが収まった直後から高層ビルの健全性の早急な判断に利用できれば、就業者や在館者が非常階段に殺到しビル外の避難所や帰宅へ向かわせることなくビルに留まらせることができるばかりか、逆に周辺の帰宅困難者の受け入れや業務の復旧・継続に力を注ぐなど、地域や企業の防災拠点として活動できる高層ビルとなれば、地域全体の防災力向上が期待できる。

高層ビルなどを大きく揺らす長周期地震動が発生したことを伝える観測情報は、予測情報の内容等を検証し予測情報に基づき当初執った対応や設備機器の

制御を一早く適正化するため、予測情報とセットで用いることで、情報利用の実効性を上げることができる。

表 2 3つのカテゴリーの予測情報の利用環境・分野ごとの利活用策・留意点等

|                              | カテゴリー1<br>(気象庁の予報・警報)                                                                                                    | カテゴリー2<br>(民間事業者の<br>予測情報)                                                                                        | カテゴリー3<br>(観測データを利用した<br>予測情報等)                                                            | 留意点等                                                                                                                                                            |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ビル等の<br>在館者への<br>周知          | ○館内アナウンス<br>(身の安全の確保、不<br>安感の低減・混乱回避)<br>○防災センター・施設管<br>理者の受信<br>(対応準備・時間があれ<br>ば避難誘導・管理者の<br>高層階配置)<br>○エレベーター停止の<br>予告 | ○基本はカテゴリー1と同<br>じであるが、より信頼度の<br>高い注意喚起<br>(階によって注意喚起内<br>容を変える。館内放送や<br>デジタルサイネージ等で予<br>想される長周期地震動階<br>級や到達時刻を周知) | ○カテゴリー1・2と同様で<br>あるが、より信頼度の高<br>い注意喚起<br>(揺れがまだ続くのか、収<br>束してきているのか。実<br>際の被害状況を速やかに<br>把握) | ○カテゴリー1は、従来の<br>緊急地震速報と同様の使<br>い方。<br>○カテゴリー2は、建物・<br>位置毎に情報を提供し具<br>体的な行動判断に活用。                                                                                |
| ビル周囲の<br>通行人・利<br>用者への周<br>知 | ○落下物からの避難                                                                                                                | ○落下物からの避難<br>○免震機能の動作への注<br>意呼びかけ                                                                                 | ○カテゴリー2と同じ                                                                                 | ○カテゴリー1は、緊急地<br>震速報と同じく安全確保<br>が主眼<br>○高層ビルや免震ビルの<br>周囲では長周期地震動の<br>揺れによる落下物や建物<br>自体の移動などへの注意<br>呼びかけに活用。                                                      |
| ビル内の<br>設備・機器<br>等の制御        | ○エレベーターの制御<br>(利用者の安全確保、<br>損傷・閉じ込め防止)<br>○漏電防止・ガス栓遮<br>断<br>○キャスター付き医療<br>器具の固定                                         | ○基本はカテゴリー1と同<br>様であるが、個別のビル・<br>機器に即した制御が可能<br>(個々のエレベーターの制<br>御、病院の扉の制御等)                                        | ○カテゴリー1・2と同様で<br>あるが、より正確な制御<br>が可能<br>(建物のモニタリングに基<br>づくエレベーターの停止解<br>除等)                 | ○カテゴリー1は、個別の<br>エレベーター管制に用い<br>るには確さに不安。<br>○該当ビルに影響を与え<br>る周期成分の情報が必要                                                                                          |
| ビル等の<br>被災診断                 | —                                                                                                                        | ○大まかな被害の推定<br>(災害対応の準備、点検<br>等の判断)                                                                                | ○詳細な被害の推定<br>(部材等の損傷推定、点<br>検優先順位・避難誘導等<br>の判断、復旧計画)                                       | ○カテゴリー2では、応答<br>スペクトルが提供されれ<br>ば応答スペクトル法で建<br>物の応答が推定可能。<br>○カテゴリー3は、提供が<br>遅くなるが、カテゴリー2の<br>修正など他の予測情報と<br>の併用を期待。<br>周辺地点の観測を使う方<br>法は、地震計を設置して<br>いない建物には有効。 |
| ビル以外の<br>利用                  | ○タワークレーンオペ<br>レータ・高所作業者等の<br>安全確保                                                                                        | ○基本はカテゴリー1と同<br>じであるが、より信頼度の<br>高い利用が可能                                                                           | ○カテゴリー1・2と同じで<br>あるが、より信頼度の高<br>い利用が可能                                                     | ○長大橋等での交通管理<br>や大型タンク、貯水池等<br>のスロッシング発生の予<br>測・監視などへの利用も<br>可能性がある                                                                                              |

## 2. 取り組み事例

高層ビルで情報を活用した長周期地震動対策の現状と課題を把握するため、WG 委員において取り組まれている 2 つの実例を紹介する。

### ① 森ビル株式会社

平成 7 年（1995 年）兵庫県南部地震を契機に、「逃げ出す街から逃げ込める街へ」をコンセプトとした開発を進めている森ビルでは、一般的な超高層ビルを上回る耐震性能を持ち、制振装置の積極的な使用を進めている。

例えば、六本木ヒルズ森タワーには、オイルダンパー356 基、座屈拘束ブレース 192 基を装備し、小さな揺れから大きな揺れまでへの制振効果を獲得している。この取り組みの結果、東北地方太平洋沖地震で制振装置がない場合に片振幅 61cm と想定された頂部の変位が実際には 32cm に抑えることができてい

る。また、平成 16 年（2004 年）新潟県中越地震において、東京では震度 3 ながらも長周期地震動の影響で森タワーではエレベーターの主索（ロープ）が共振し一部損傷するなどの被害発生に至った。この対策として、ビル頂上部に設置したペンデュラム方式、及び地下階に設置した地震計による長周期地震動スペクトル方式の 2 種類の長周期地震動検知システムを開発しエレベーター管制を行っている。

さらに、東北地方太平洋沖地震での教訓と南海トラフ及び相模トラフ沿いの巨大地震への備えとして、地震後の建物被害の早期把握と健全性のモニタリングのため、被災度推測システムを開発運用している。これは、ビルの構造的特性とビル内に設置した地震計の観測データを組み合わせリアルタイムで解析し、フロアごとの躯体ダメージと什器転倒・天井脱落の可能性を導出し、結果を防災センター内でアナウンスする他、管理責任者の携帯端末へ自動送信するシステムである（図 4 参照）。

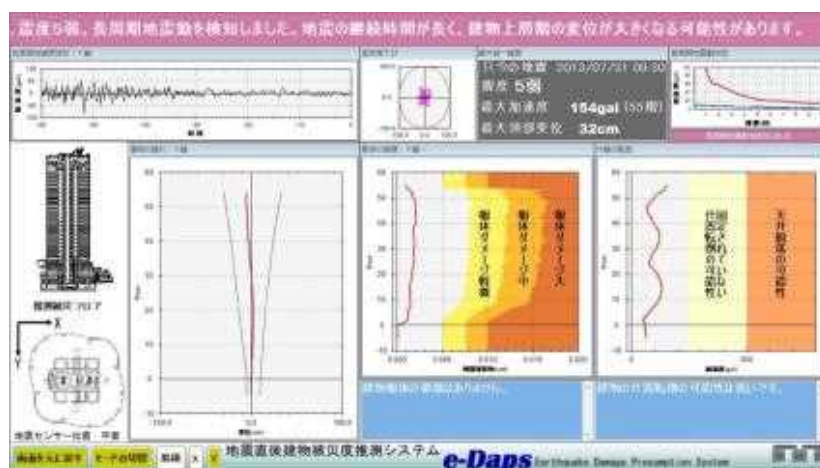


図 4 六本木ヒルズ森タワーの被災度推測システム画面

現在、長周期地震動の早期検知システムや被災度推測システムは、既に揺れ始めてから地震動を検知し判定している。このため、共振したビルが最大の揺れとなるまで若干の猶予が期待されるものの、ビルの運営管理上、猶予時間は十分あるとは言えない（図5参照）。

地震発生直後に長周期地震動の予測情報が入手できれば、猶予時間をより長く確保でき、エレベーターのかごの適切な階への移動、防災要員の配置準備、在館者への案内などさらに進んだ対応の可能性が広がり、安全対策・事故防止の推進につながることを期待される。

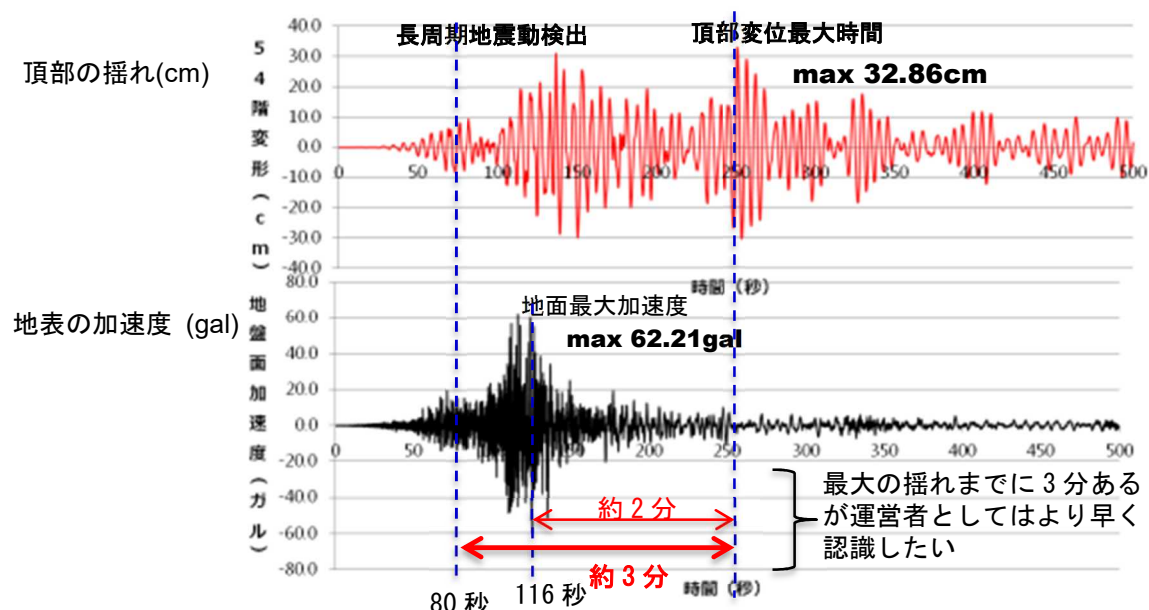


図5 六本木ヒルズ森タワーにおける事例

（東北地方太平洋沖地震において六本木ヒルズ森タワーの地表部と頂部に設置した地震計で観測した波形記録と、長周期地震動の検出から大きく揺れるまでの時間間隔）

## ② 三菱地所株式会社

首都圏と関西圏に所有管理する高層ビルにおいて長周期地震動によるエレベーター被災事故の状況及び課題、期待する情報の利活用策を紹介する。

平成28年（2016年）熊本地震では、震源から離れた大阪は震度2であったが、長周期地震動の影響でエレベーターの主索（ロープ）の引っ掛け事故が発生した。ビル内のエレベーターのP波センサーでは長周期地震動の検出ができず、運行を継続したため破損等の被害拡大や閉じ込めにつながった（図6参照）。気象庁HPに公表されている長周期地震動に関する観測情報（試行）では、大阪府北部は長周期地震動階級1を観測していた。



平成 28 年 11 月 22 日の福島県沖の地震（M7.4）では、震度 3 を観測した千代田区内のビルで P 波センサーと S 波センサーによるエレベーター管制が作動し停止したほか、長周期管制装置を導入した一部のビルでもエレベーターが停止した。実際、主索の破断等の損傷が発生したものもあり適切な管制制御であったが、S 波や長周期の管制が作動したエレベーターは点検の上、復旧させる必要があるため機能停止の時間が長くなった。ニュース等で報じられる震度 3 の地震で鉄道等は平常通り運行されている中、地階や 1 階に常駐しているビル管理者は高層階で揺れたことを把握できず、ビル利用者はエレベーターが利用できなくなっている理由を理解できず混乱が起きた。このとき、東京都 23 区は長周期地震動階級 1 を観測していた。



図 6 エレベーターの主索周辺の損傷事故（主索切断）[写真左]と長尺物の接触により着床装置破損等[写真右]の事故例

これら 2 つの地震は夜間や早朝に発生しており、昼間のエレベーター運行中であれば閉じ込めなどさらに被害が拡大したおそれがある。この事例検証から、長周期地震動に関する情報は、図 7 に示すように、エレベーターの制御トリガーとして利用できる他、ビル管理者やビル利用者へ広く周知することによって事態の把握・理解に役立つ可能性がある。地震発生直後から発表される予測情報で大きく揺れ始める前に事態を把握できれば、対応行動や判断の幅が広がる。さらに、エレベーター等の復旧作業を開始する判断に活用するため、地震動が収束したという情報が発表されることを期待する。

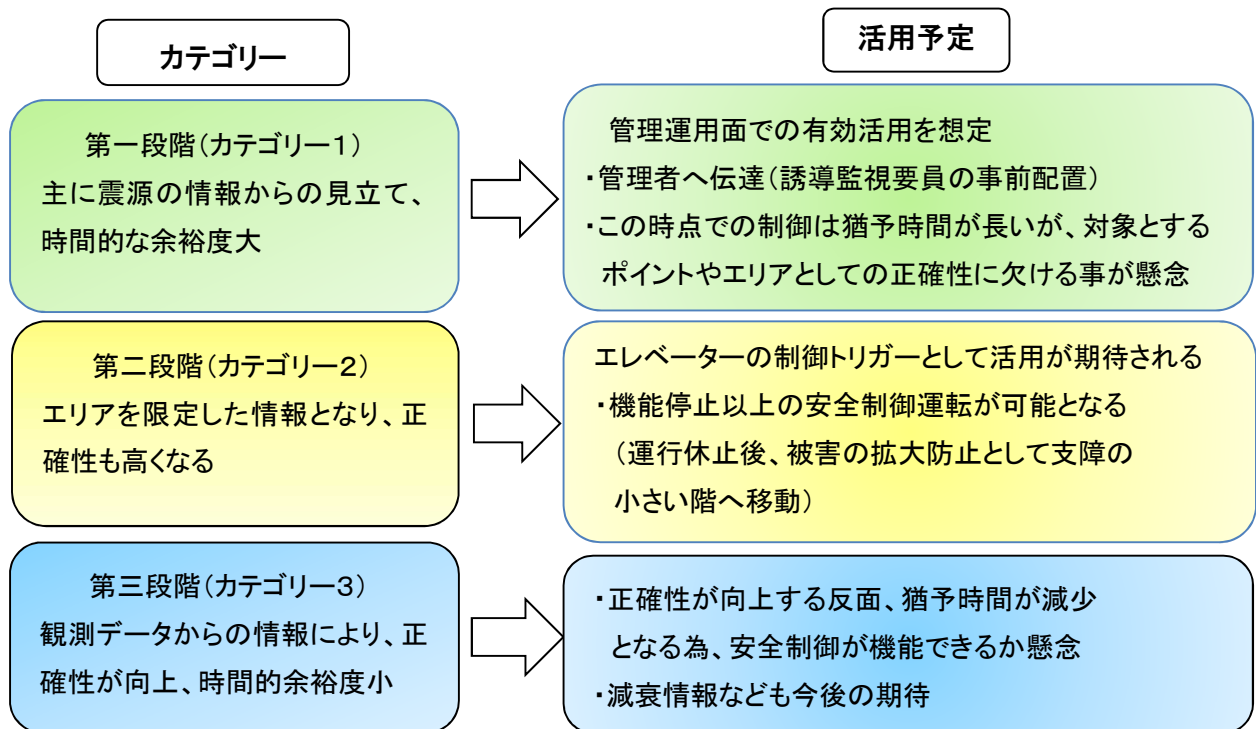


図 7 情報利活用の今後の展開

### Ⅲ. 予測技術の検討

本節では、検討課題②「多様なニーズに対応する予測のために、建物の構造などを踏まえた予測技術の検討・検証」についてとりまとめ、WG 委員より紹介のあった技術開発・適用の事例を紹介する。

#### 1. 予測技術の体系化

情報検討会が設けた予測技術検討ワーキンググループ（以下、予測技術検討WG、平成 25 年 9 月～平成 27 年 2 月）は、長周期地震動の予測技術として、発生した地震の時刻、震源とマグニチュードの情報（以下、震源情報）を用い任意地点の長周期地震動階級を予測する距離減衰式（地震動予測式）について検討した。

本 WG は、地震動予測式をもとに予測される長周期地震動階級やその他の指標、さらに地震動の影響によるビルそのものの揺れを予測する予測技術まで、それぞれの揺れの即時的な予測に利用できる予測技術を網羅的に扱う。図 8 に、予測ポイントやそこに建つ構造物の揺れを、震源あるいは地震計による観測データをもとに予測する過程のイメージを示す。一般には構造物の揺れの予測は、地震動に対するその構造物の建物応答を求めるため地震動の予測が必要であり、予測技術は地震動の予測と構造物の揺れの予測の 2 段階のイメージとなる。

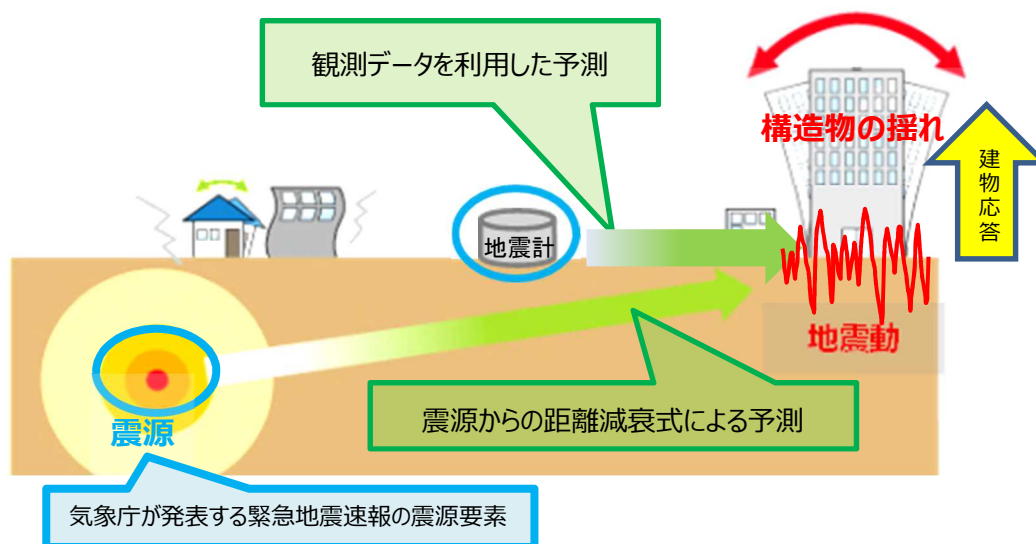


図 8 震源あるいは観測データから予測ポイントの長周期地震動や構造物の揺れを予測する過程のイメージ

長周期地震動の予測手法については、内閣府や地震調査研究推進本部においても、それぞれ南海トラフ沿いの巨大地震に係る被害想定を検討や長周期地震

動予測地図（試作版）作成のため詳細に推定する技術を紹介している。高層ビル等の揺れを予測するにあたっては、建築分野等で構造設計等のために用いられている手法や指標が利用されている。

以下、「震源情報」あるいは「観測データ」をそれぞれ入力とし、地震動やビルの揺れに関するさまざまな指標等を出力とする、即時的な予測に利用できる技術・方式について、体系的に整理する。

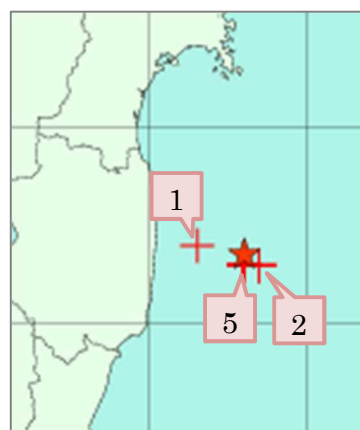
### （１）「震源情報」を用いた予測

予測情報の作成には、カテゴリ１の気象庁の警報・予報で発表する緊急地震速報の震源情報を用いる。緊急地震速報（予報）の発表等基準は、

- ・いずれかの地震観測点において、P波またはS波の振幅が100ガル以上を観測
- ・マグニチュード3.5以上、または最大予測震度が3以上と解析
- ・更新報は、震源要素や予測震度に一定以上の変化

である。この震源精度が各カテゴリの予測情報の精度を決定づけることになる。図9の例のように、緊急地震速報（予報）の震源精度は、第1報から順次向上していくものであることに留意が必要である。

| 報数 | 震源要素等       |      |       |      |     |
|----|-------------|------|-------|------|-----|
|    | 時間<br>(秒) ※ | 震源要素 |       |      |     |
|    |             | 北緯   | 東経    | 深さ   | M   |
| 1  | 7.9         | 37.4 | 141.3 | 30km | 6.0 |
| 2  | 10.1        | 37.3 | 141.7 | 10km | 6.4 |
| 3  | 10.2        | 37.3 | 141.7 | 10km | 6.4 |
| 4  | 13.8        | 37.3 | 141.7 | 10km | 6.3 |
| 5  | 15.3        | 37.3 | 141.6 | 10km | 6.2 |
| 6  | 16.5        | 37.3 | 141.6 | 10km | 6.5 |
| 7  | 30.2        | 37.3 | 141.6 | 10km | 6.8 |
| 8  | 35.7        | 37.3 | 141.6 | 10km | 7.1 |
| 9  | 55.0        | 37.3 | 141.6 | 10km | 7.3 |
| 10 | 75.0        | 37.3 | 141.6 | 10km | 7.3 |
| 11 | 76.3        | 37.3 | 141.6 | 10km | 7.3 |



震央の位置の推移  
 （数字は報数。★は事後解析  
 で決定した最終的な位置）  
 ※地震検知からの経過時間

図9 緊急地震速報の震源の更新状況例

（平成28年11月22日05時59分のM7.4福島県沖の地震）

予測技術検討WGは、警報の発表において震源精度を確保するため、「マグニチュード決定に係る観測点数が3点以上、または地震検知から15秒経過した以降の緊急地震速報震源」の利用が適当であると提言している。一方、民間事

業者はカテゴリ 2 の予測情報の提供条件について、ニーズに応じた迅速性と確度のバランスを考慮し決定する必要がある。

なお、以下の各手法の説明で付加した記号 (A~H) は、後述の図 13 中にするものに対応している。

#### ① 走時表による揺れの到達時刻の予測 (A)

予測技術検討 WG は、長周期地震動の到達時刻の予測対象として揺れの最大となる時刻ではなく、大きく揺れ始める時刻と定めた。それは S 波到達時刻付近となる場合やそれより遅い表面波付近の場合があるが、防災上の観点からより早い S 波の到達時刻を長周期地震動の到達時刻とした。

S 波到達時刻の予測は、緊急地震速報と同様に予測ポイントまでの震央距離及び震源の深さごとの走時（地震波、ここでは S 波が震源から観測点まで到達するのに要する時間）を示す表（以下、走時表）に基づいて求めることとなる。

#### ② 距離減衰式（地震動予測式）による予測

##### ア) 長周期地震動階級（絶対速度応答スペクトル）の予測 (B)

予測技術検討 WG は、任意地点の長周期地震動階級を即時的に予測する手法として、マグニチュードと震源距離から絶対速度応答スペクトル (Sva) を求める Dhakal et al. (2015) による地震動予測式（以下、Sva 予測式（図 10 参照））の採用を決めた。これは、現在のシステム環境や観測インフラ等を考慮し最も現実的な方法として、精度よく長周期地震動階級を即時的に予測する技術であると評価されている。

$$\log_{10} Sva(T) = c(T) + a(T)M_j - \log_{10} R - b(T)R + \text{siteFactor}(T)$$

※ (T) は固有周期の関数であることを示す

絶対速度応答スペクトル 定数 c 係数 a マグニチュード 震源距離 係数 b 予測点ごとの補正係数

補正係数の求め方（①がない場合は②を使用する）

- ①観測記録から統計的に得られる補正係数
  - ・各観測点の実際の観測値から統計的に得られた補正係数。
- ②地盤情報から推定される補正係数
  - ・J-SHIS 深部地盤構造モデルの S 波速度 1.4km/s 上面深さと AVS30 から算出する補正係数。



深部地盤構造モデル  
S 波速度 1.4km/s  
上面深さ  
(J-SHIS のページより)

#### 【本手法の特徴等】

- ・長周期地震動階級を算出するために必要な絶対速度応答スペクトルを直接算出。
- ・距離減衰式に入力する距離とマグニチュードが、点震源からの震源距離と  $M_j$  を直接利用。
- ・この手法を用いて長周期地震動階級を予測した場合、予測と観測の適合度は、 $\pm 1$  階級以内で一致する割合が 9 割程度となる。

図 10 地震動予測式 (Sva 予測式) の概要

Sva 予測式は、長周期地震動階級の予測に必要な周期ごとの絶対速度応答スペクトルを求める式である。1996 年から 2013 年のマグニチュード 6 以上、深さ 150km 以浅の地震データを使った実測と予測との精度検証において、階級の完全な合致は 4 割、± 1 階級以内での合致は 9 割以上と実用的な予測精度を持つと検証された。

予測ポイントごとの補正係数 (siteFactor) は、観測記録から統計的に得ることを基本とし、観測記録が十分でない場合にはその地点の地盤情報から推定する。実測との精度検証を行った気象庁の予測ポイント（ほぼ気象庁の震度観測点に該当）は一部を除き、観測記録からの補正係数を求めた。

Sva 予測式と震源情報を用いれば任意地点の長周期地震動階級を即時に予測することができるが、予測情報を提供する際には以下の技術的課題に留意する必要がある。

- ・ 緊急地震速報は震源要素が未推定の段階においても仮定震源要素を記載して PLUM 法による予測結果のみで発表される場合があり、この場合には Sva 予測式による予測はできない。
- ・ Sva 予測式は、深さ 50km 以浅の地震データを基に作成された式であり、実測との精度検証において 150km より深い地震では精度が低下することが判明している。

#### イ) その他の指標の予測 (C)

絶対速度応答スペクトル以外の長周期地震動に係る応答スペクトルを求める距離減衰式は、予測技術検討 WG において Sva 予測式との比較で検証した「絶対加速度応答スペクトルを求める建築研究所式」や「相対速度応答スペクトルを求める内閣府式」などがある。

#### ③ データベース方式による予測 (D)

本方式は、過去記録や予め想定した震源モデルによる地震動の数値シミュレーション結果を集め、予測ポイントでの地震動予測データベースを作成し、地震発生時に震源情報と最も適合するケースの結果を検索する方式である（図 11 参照）。

データベース化する指標あるいは予測値としては、応答スペクトル等の定量的数値や時刻歴波形である。事前にある程度震源の位置や規模を想定できる場合においては、伝播経路や地盤の情報その他、建物の構造などの情報も取り込んで詳細な揺れの状況を予測することが可能となることが期待される。ただし、観測記録による検証が困難な過去の巨大地震などを想定する場合には、震源等



の想定や計算方法の妥当性を検証しながら精緻な計算を行なう必要があり技術上の課題は多い。

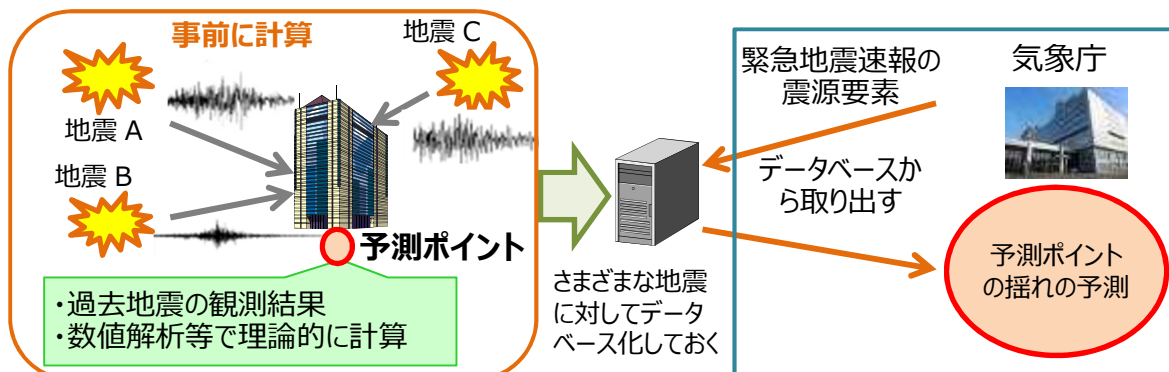


図 11 データベース方式による予測イメージ

## (2)「観測データ」を用いた予測

「観測データ」を用いた予測 (F) である本方式は、波動場理論や観測点と予測ポイント間であらかじめ求めておいた伝達関数を使い、リアルタイムの観測データから予測ポイントの地震動の応答スペクトルや時刻歴波形を予測する方式である (図 12 参照)。

緊急地震速報では、東北地方太平洋沖地震などの震源域の広い巨大地震発生時でも精度良く震度を予測するため、震源情報から震度を予測する手法に加えて、波動場理論を応用した観測点で観測されるリアルタイムの揺れの実測値 (リアルタイム震度) を用いて直接揺れを予測する PLUM 法を導入した。Sva 予測式を用いた長周期地震動階級の予測手法も緊急地震速報の震源情報を用いるため、緊急地震速報の震源の情報が出なかったり、不正確だったりすれば、長周期地震動階級を正しく予測できない。PLUM 法と同様に、各観測点における長周期地震動の観測指標をリアルタイムで取得・処理できれば、これから地震動が伝播してくる予測ポイントで長周期地震動階級などを精度良く予測できると考えられる。

また、蓄積された過去記録や地震動の数値シミュレーション結果から観測点と予測ポイント間の伝達関数を求めておき、地震発生時、観測点でのリアルタイムの観測データから、伝達関数を用いて予測地点での予測波形を即時的に求めることができる。予測精度の確保には、予測対象とする地震の発生領域における過去地震の観測記録や数値シミュレーション結果の選択・蓄積が重要となる。これら観測記録を用いる予測技術は、観測点で主要地震動を捉えきれないと予測ポイントの地震動を正確に予測できないため猶予時間は短くなるが、巨大地震等でマグニチュードを不正確に予測した際の誤報を防ぐとともに、震源

情報を用いる予測より精度の高い予測が可能な技術として開発・導入が期待される。

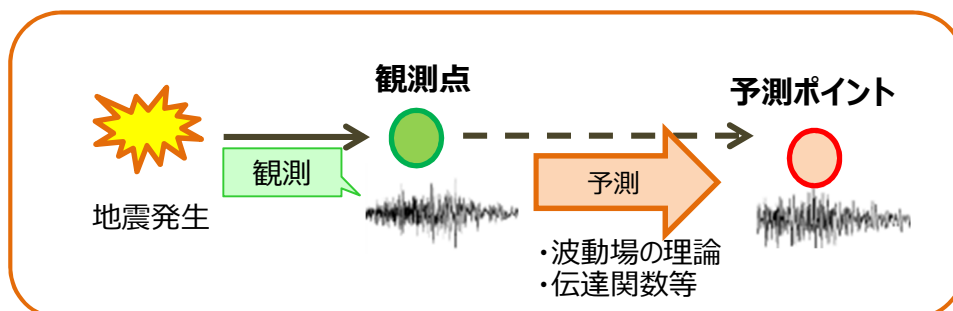


図 12 観測データを利用した予測イメージ

### （３）構造物の揺れの予測技術

構造物の揺れとは、地震動によるビルそのものの揺れであり、予測するものは地震動ではなく実際のビルの入力地震動に対する建物応答である。個々のビルの構造・地盤などの特性や建設条件を考慮した詳細な予測情報は、実際のビルにおけるさまざまな地震への対応に的確に利用できるものとなる。建築分野等において設計や研究用に開発・利用されてきた技術の中から即時的な予測に利用できる主な技術として応答スペクトル法や時刻歴応答解析がある。

応答スペクトル法（G）は、地震動の応答スペクトルから各モードの建物応答の最大値を推定し重ねあわせることで、各階における各種指標を即時に推定する方法である。なお、高次モードを考慮する場合は、対象の建物の固有周期に応じて、周期１秒以下の短周期の応答スペクトルも必要となることがある。

時刻歴応答解析（H）は、入力した地震動に対してビルの構造モデルの時刻歴応答を求めるもので階ごとなど詳細な揺れを予測でき、ビルの設計や建設にあたり基準となる地震動波形に対するビルの揺れを正確にシミュレーションする方法として利用されている。ビルへの入力地震動の求め方として、ビル立地点における過去地震の波形データや想定地震による理論波形データをデータベースとして地震発生時に最適な波形を検索する方法（D）やリアルタイムで観測した波形データを用いる方法（F）が考えられる。即時的な予測には、過去地震や想定地震の波形データを用いた時刻歴応答解析結果を予測値のデータベースとして作成しておく方法（E）が、リアルタイムの観測データを用いる方法（F+H）を用いるより精度は劣る可能性はあるが現実的と考えられる。

図 13 は、カテゴリー 2、3 の予測情報作成のため、「震源」または「観測波形」の①入力から、②対象地点の揺れ（地震動）の予測技術や③構造物の揺れ



の予測技術を用い、その④出力までの関係をつなげて整理したものである。出力は、長周期地震動階級や階級判定のもととなる絶対速度応答スペクトルほか各種応答スペクトル、最大加速度値・速度・変位、層間変形角などの建築分野等で用いられている揺れに関わる指標も含む。

揺れの大きさ以外の指標として、揺れの到達時刻がある。長周期地震動の到達時刻は予測技術検討WGで検討したとおりS波の到達時刻とみなし、緊急地震速報と同様に走時表から求める。

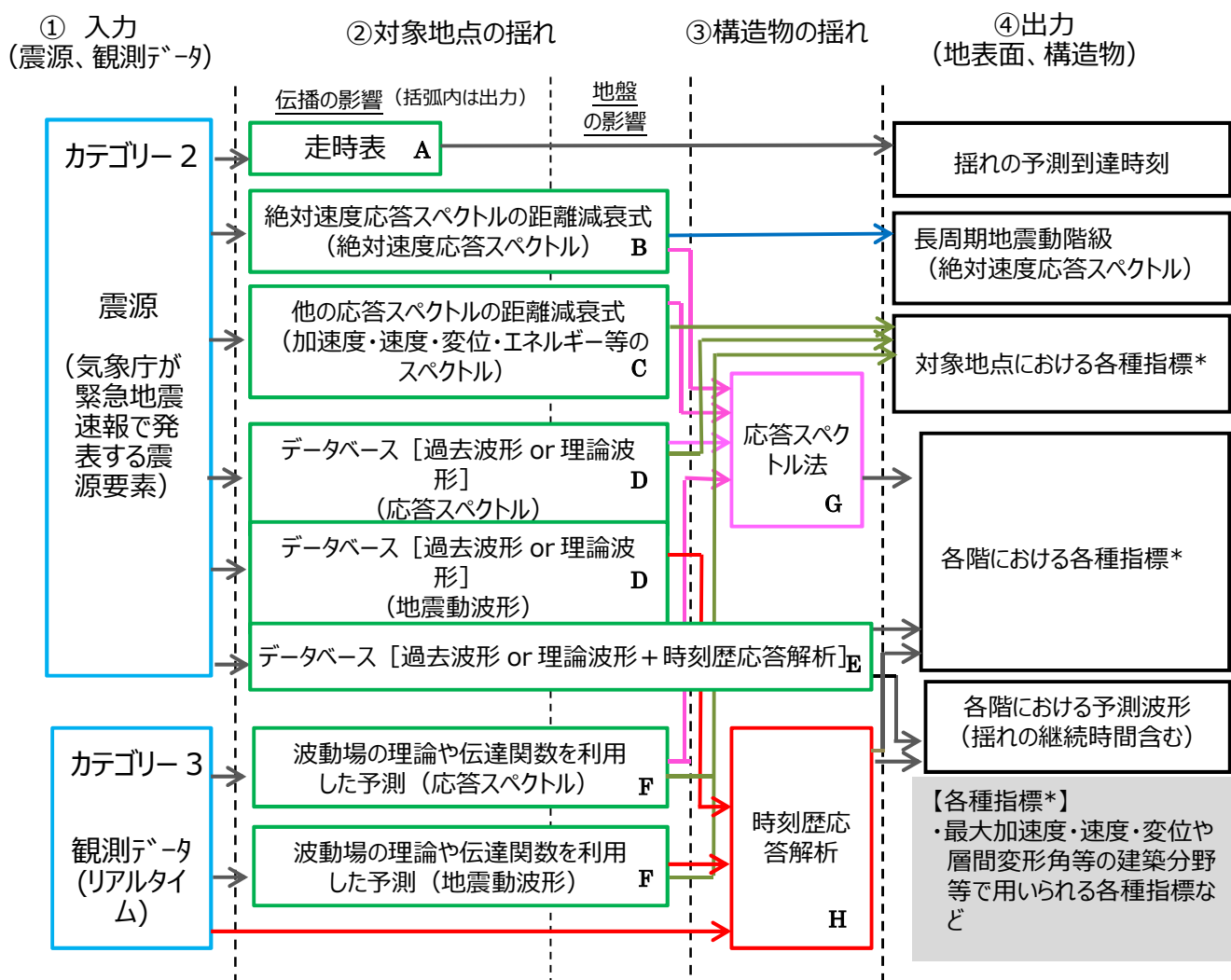


図13 カテゴリー2、3の予測情報作成に用いる予測技術の体系的な整理  
(枠内右下のアルファベット：本文中の対応部分を示す)

## 2. 即時予測技術の開発事例

前節で述べたカテゴリー 2、3 のための予測技術は、主に建築分野等で開発・実用化されている技術がもとである。ここでは地点ごとのきめ細かい地震動予測やビルの詳細な揺れの予測を即時に求める技術の実例とその利用可能性について、本 WG で紹介された研究開発事例で示す。

### ① 応答スペクトル法による構造物の揺れの予測（工学院大学 久田教授）

図 13 の B または C の成果を使い各階の揺れを予測する技術（G）である。 $\{X\}$ （ビルの任意振動形）は、 $\beta_i \{U_i\}$ （ $i$  次モードの刺激関数）と  $q_i$ （ $i$  次モードの固有周期・減衰定数の応答スペクトル）から、

$$\{X\} = \sum_{i=1}^n q_i \beta_i \{U_i\} \approx q_1 \cdot \beta_1 \{U_1\} + q_2 \cdot \beta_2 \{U_2\} + q_3 \cdot \beta_3 \{U_3\}$$

で表すことができる（図 14 参照）。

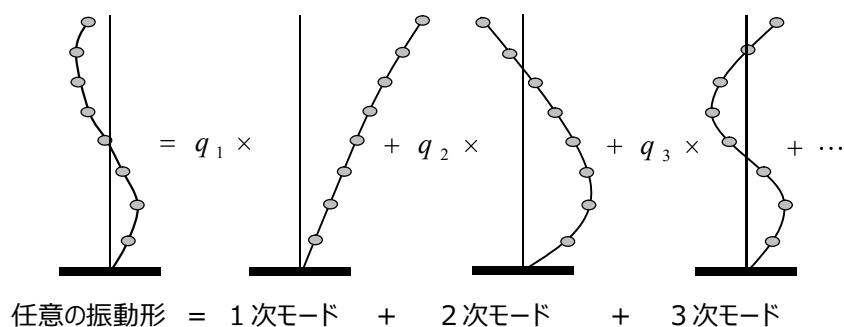


図 14 応答スペクトル法による計算イメージ

その最大値  $\{X\}_{\max}$  は、 $S_i$ （ $i$  次モードの固有周期・減衰定数の地震応答スペクトル値）から、

$$\{X\}_{\max} \approx \sqrt{(S_1 \cdot \beta_1 \{U_1\})^2 + (S_2 \cdot \beta_2 \{U_2\})^2 + (S_3 \cdot \beta_3 \{U_3\})^2}$$

と求めることができる。

ここで、構造計算書や実測値がない場合のため、応答スペクトル法で用いる高層建築各種パラメータの経験式を挙げておく（鉄骨造建物の例）。

#### a. 固有周期の推定

1 次モードの固有周期  $T_1 = 0.11 \times N$

2 次モードの固有周期  $T_2 = 1/3 \times T_1$

3 次モードの固有周期  $T_3 = 1/5 \times T_1$

$N$ ：建物の地上階数

b. 減衰定数の推定

$$h_1 = 0.81 \times f_1 + 1.05$$

$f_1$  : 1次固有振動数 (Hz)

c. 応答スペクトル ( $h=5\%$ ) の補正

$$\text{告示式 } F_h = 1.5 / (1 + 10h)$$

d. 刺激関数 (1～3次モード) の近似 (図 14)

$$\beta_1\{U_1\} = -0.37x^2 + 1.86x - 0.06$$

$$\beta_2\{U_2\} = -3.04x^2 + 2.27x + 0.01$$

$$\beta_3\{U_3\} = 7.53x^3 - 10.11x^2 + 3.10x - 0.03$$

$$x = n \div N, \quad n: \text{対象の階}, N: \text{建物の階数}$$

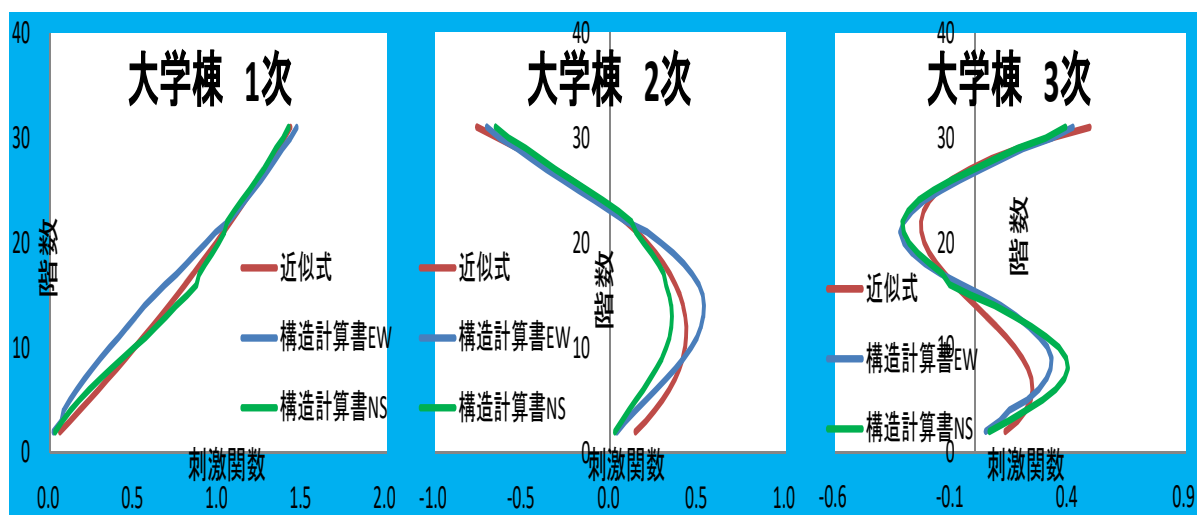


図 15 工学院大学新宿キャンパスビルの近似式と構造計算書それぞれから求めた各モードの刺激関数の比較

これらを使い工学院大学新宿キャンパスビル各階の揺れを予測する。入力地震動は、東北地方太平洋沖地震時に実際に新宿キャンパスビルの地上部に設置していた地震計による観測データから求めた1階の速度応答スペクトルを利用する (図 16 は相対速度応答スペクトルの例。その他、絶対加速度応答・相対変位応答スペクトルも利用)。

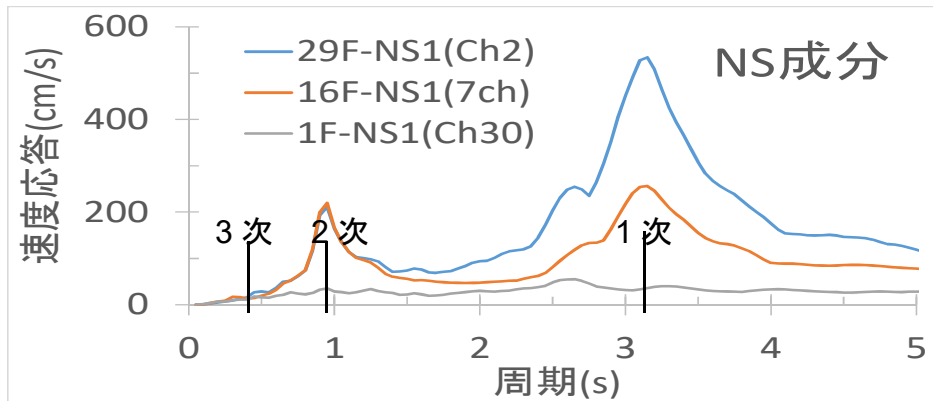


図 16 東北地方太平洋沖地震での観測データ（新宿キャンパスビル地上部設置の地震計）から求めた相対速度応答スペクトル

結果は、図 17 に示すとおり、近似式による刺激関数と応答スペクトルによる予測は、観測記録に完全には一致しないものの、加速度、速度、変位の高さ方向の複雑な分布を概ね表現しており、応答スペクトルが与えられれば即時に構造物の各階の揺れの簡易的な予測ができる。

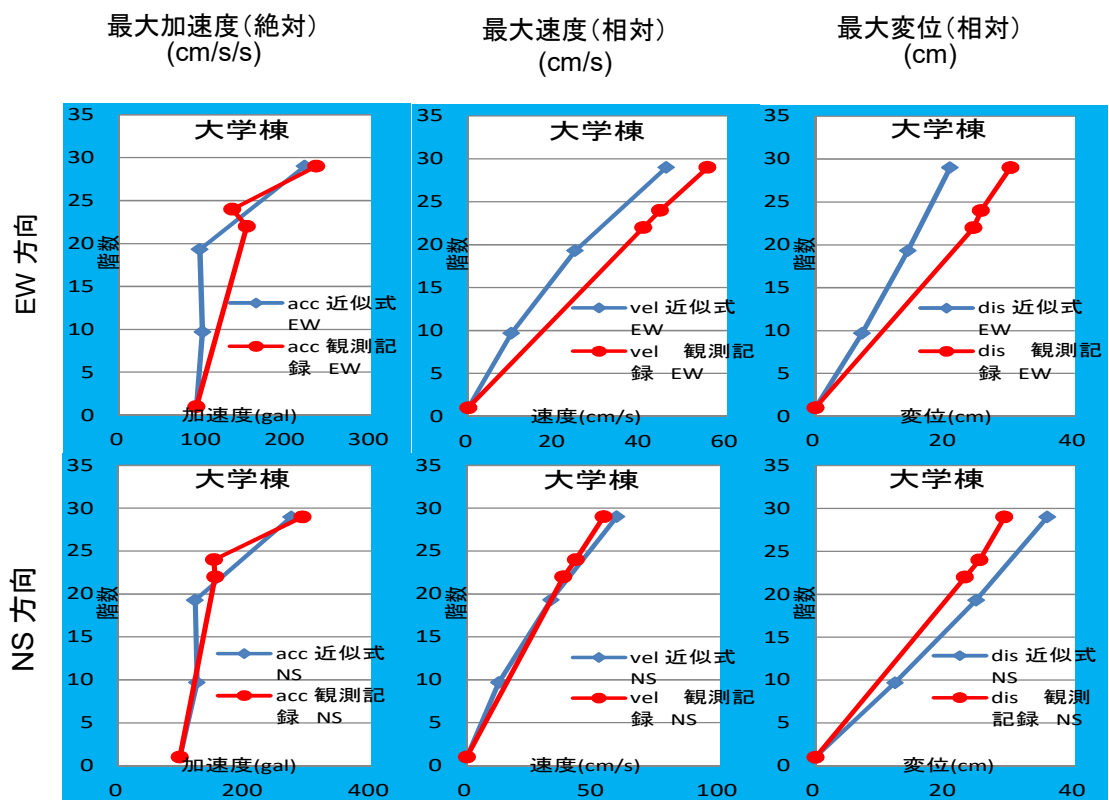


図 17 東北地方太平洋沖地震での工学院大学新宿キャンパス各階の揺れの予測

② 長周期地震動の即時予測技術（大成建設株式会社）

a. 観測記録を利用した予測ポイントの地震動の予測

観測地点と予測ポイントの観測記録から両地点の伝播特性をモデル化し、観測地点で観測した地震動をもとに、予測ポイントの地震動を予測する（図 18 参照）。図 13 の F に相当する技術である。

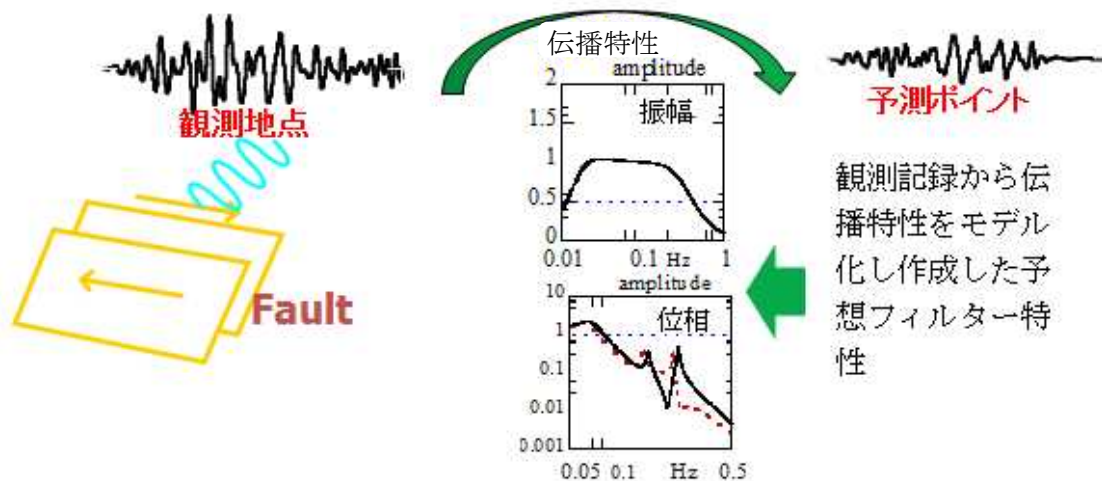


図 18 モデル化した伝播特性を使った地震動予測イメージ

事例として、平成 16 年 9 月 5 日の紀伊半島南東沖の地震活動に対し、観測記録から伝播特性をモデル化し、予測波形を検証した（図 19 参照）。

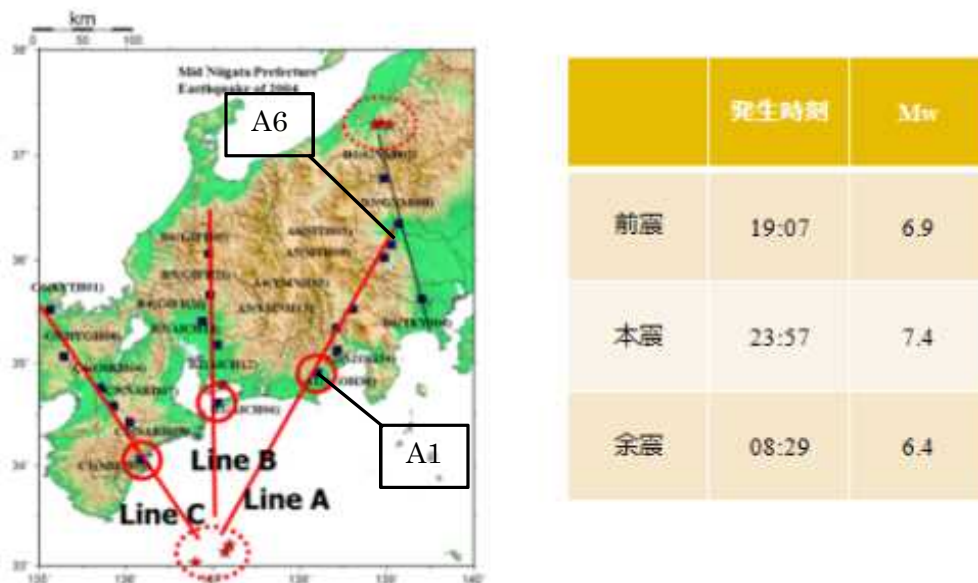


図 19 平成 16 年 9 月 5 日の紀伊半島南東沖の地震での検証図  
(LineA, B, C 上の■が、震源域から順に観測点 1, 2, 3, 4, 5, 6 を示す)

測線 A、B、C 上の観測点での 3 地震の観測記録から、図 20 の測線別と同一測線での地震別の観測記録から伝播特性をモデル化した予測フィルターを作成する。

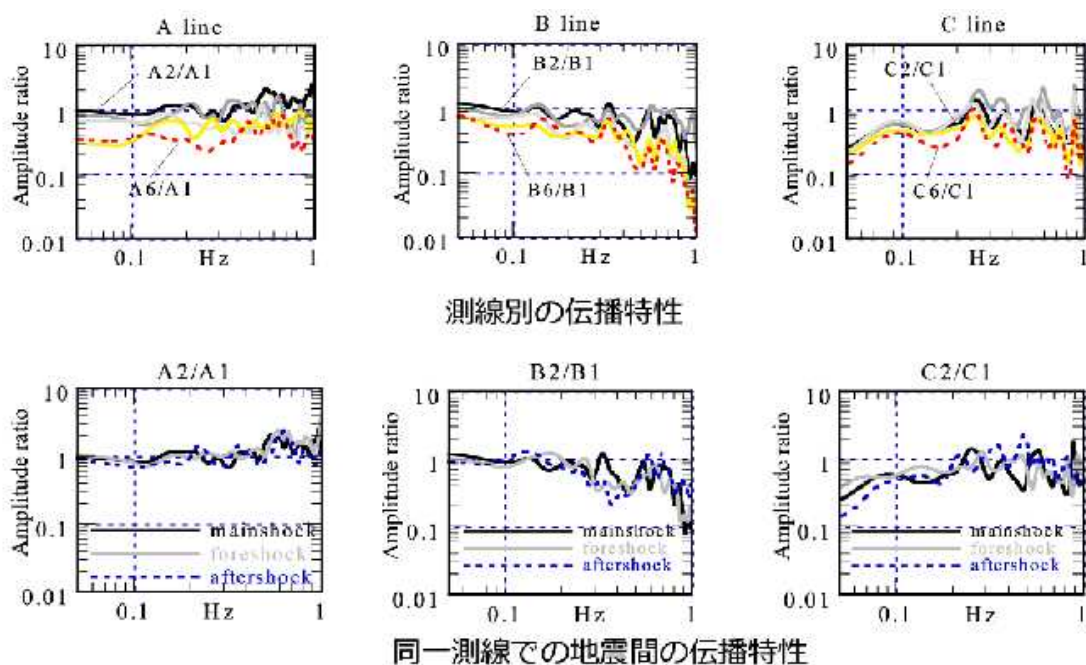


図 20 伝播特性図（上：測線別、下：地震別）

例えば、測線 A に沿って赤丸内の A1 地点の観測波形を予測フィルターにかけて、78km 離れた（S 波到達時間差 15.4 秒）A6 地点の波形を、即時的に推定し、その観測波形と比較を図 21 に示す。

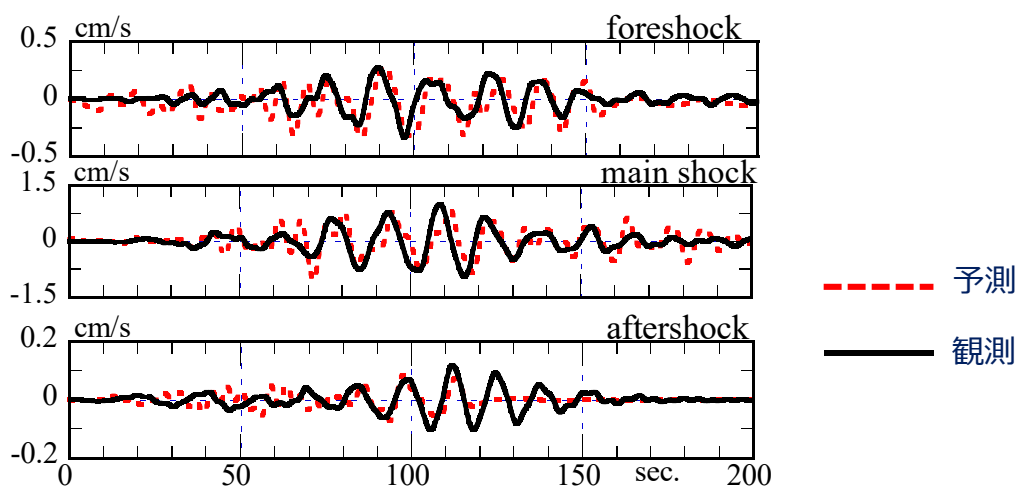


図 21 伝播特性を使い A1 地点から A6 地点の 3 地震の波形予測結果



測線別、前・本・余震の観測記録から求めた伝播特性を利用すれば、離れた地点の観測データを使った予測は実測によく近似することがわかる。ただし、ここで求めた伝播特性が他の測線や他の地域で発生した地震に対して有効なのかどうかについては、更なる検証を行い利用範囲を定める必要がある。

## b. 長周期地震動判定システム

本システムでは、地震動の定量的な予測ではなく、関東平野における地震観測記録を解析し、発生した地震により長周期地震動が励起し影響を受ける可能性を判定する技術を用いている。これは、長周期地震動の励起に影響する堆積層の厚さを J-SHIS (地震ハザードステーション) を用いて 0 km～1 km、3～4 km といった深さに応じて分類し、その上に位置する観測点の過去記録から擬似速度応答スペクトルを求める (図 22 参照) もので、図 13 の D に相当する技術である。

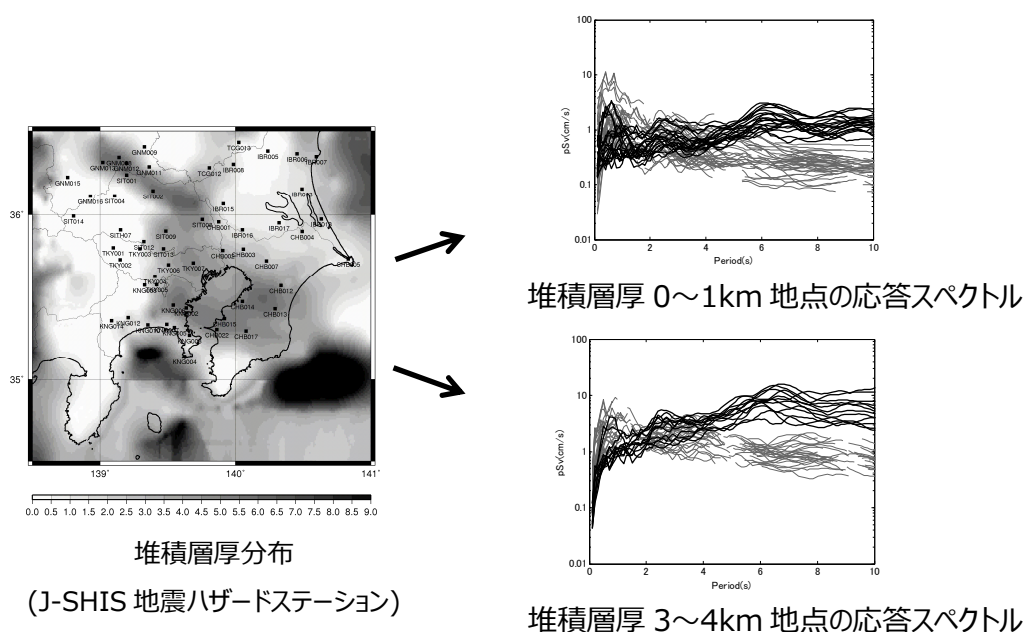


図 22 堆積層別の擬似速度応答スペクトル

ここでは図 23 に示すように、震源の深さ、震央距離、マグニチュードの 3 軸立体図上に、求めた応答スペクトル値で分類を行い閾値を設定し、その回帰分析により判定面を作成する。長周期地震動の有無は、発生した地震の震源の深さ、マグニチュードと予測ポイントの震央距離を 3 軸立体図にプロットし判定面との上下関係から判定する。



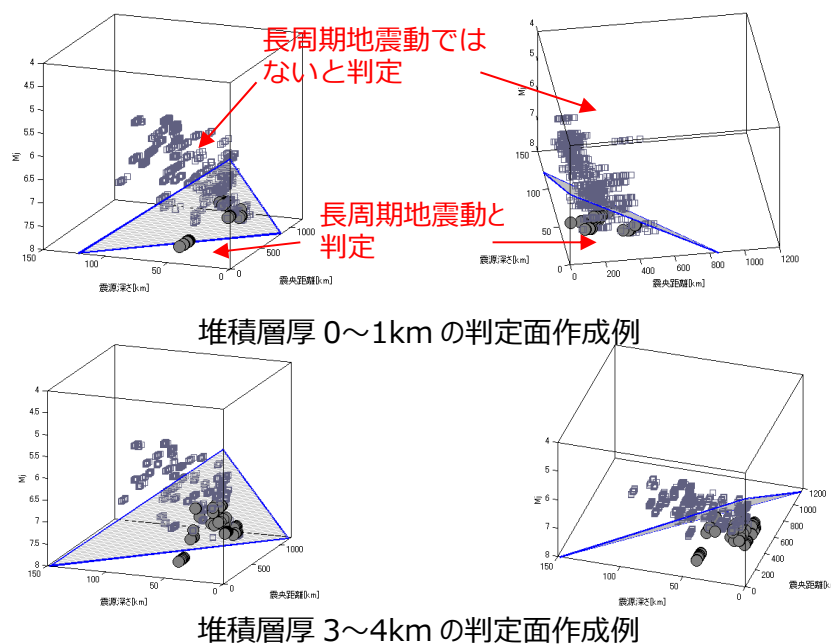


図 23 堆積層別に作成した長周期地震動の判定面

- ③ 緊急地震速報の震源情報に基づいた建物応答予測（清水建設株式会社）  
 緊急地震速報に基づいた建物の応答予測の試みとして開発した手法について、東北地方太平洋沖地震における観測記録を使った検証内容とともに報告する。

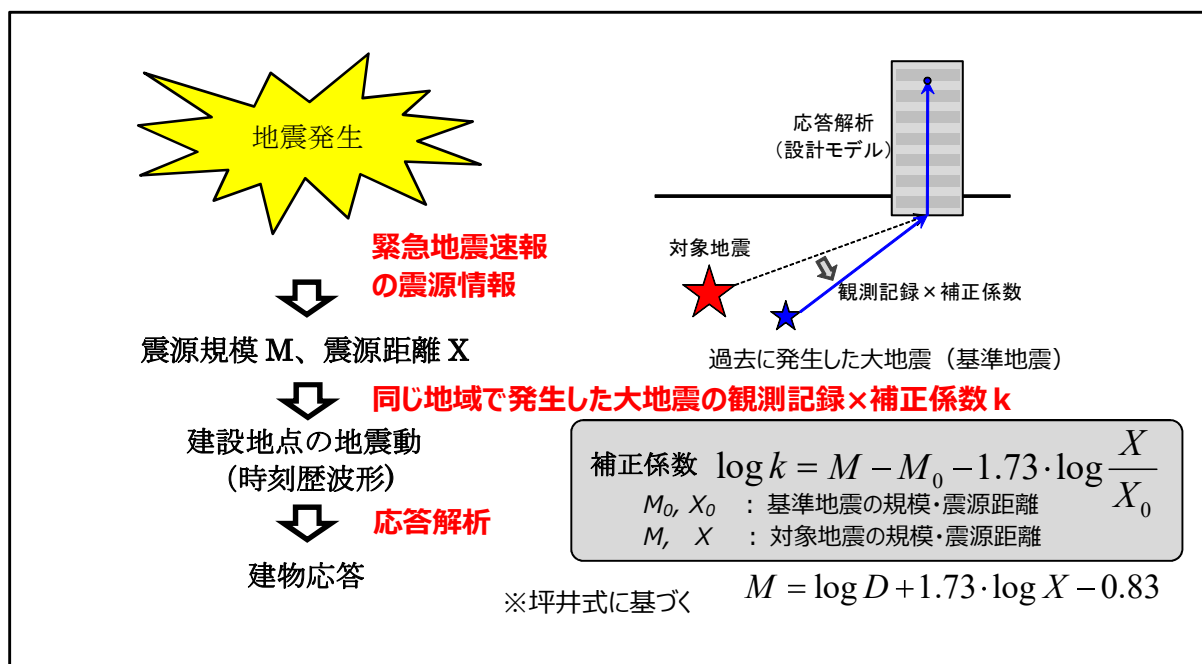


図 24 震源情報に基づく建物応答予測 1

図 24 に示すように、過去の大地震による予測ポイント（建設地点）で観測した時刻歴波形を基準とし、その基準となる時刻歴波形を発生した地震のマグニチュード（M）と震源距離に応じ補正した時刻歴波形をその地震の入力地震動として建物応答を求めておくことができる。地震発生に対し即時に建物応答を予測するため、過去の大地震を基準地震とみなす領域を設定し、それぞれの領域の標準地震の時刻歴波形を小さい補正係数から大きい補正係数までに対応する入力地震動とし建物応答を計算したデータベースを用意する。

地震発生時、緊急地震速報の震源情報から対象領域を選定しそのデータベースを用いることを決める。予測ポイントまでの震源距離とマグニチュードから、図 24 に示す補正係数を求め、選んだデータベースからその補正係数に対応する建物応答の予測を検索する。

ここでは、清水建設技術研究所（以下、技研本館：設計固有周期 4.0 秒の 6 階建免震ビル）の建物応答を予測するため、図 25（左）に示すような基準地震とその領域を設定し、それぞれの基準地震に対し補正係数を変え建物応答を求めた。図 25（右）は、各階における最大応答を補正係数に応じて事前解析し作成したデータベースのイメージを示す。

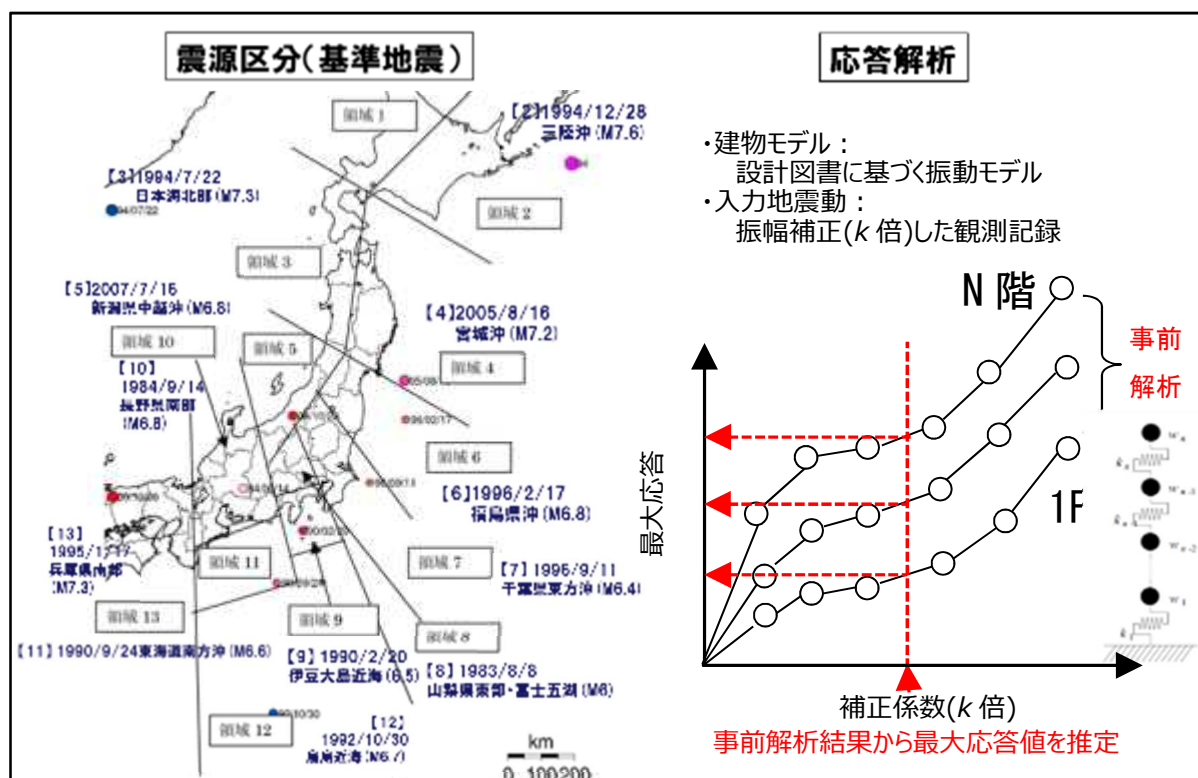


図 25 震源情報に基づく建物応答予測 2

図 26 に、図 25 の検証例として、領域 4 で発生し緊急地震速報が発表された地震について、震源情報から定まる補正係数と実際に観測された最大応答の関係を予測と比較した結果を示す。

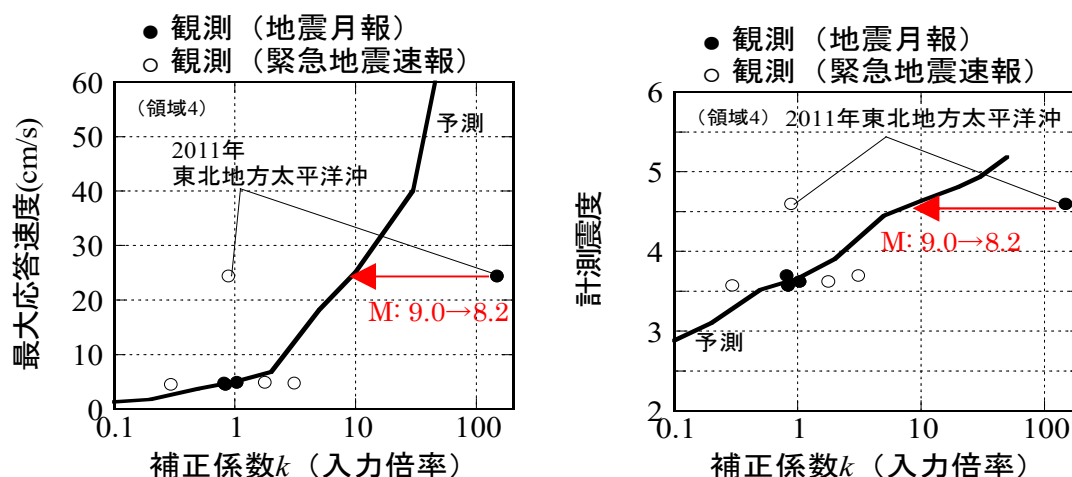


図 26 領域 4 に対して東北地方太平洋沖地震での建物応答予測の検証

東北地方太平洋沖地震では技研本館 6 階で最大応答速度 25cm/s 程度、計測震度 4.6 程度を観測した。図中の「2011 年東北地方太平洋沖」で示す黒丸の観測（地震月報）は確定震源のマグニチュード（M9.0）と震源距離を用いて算出される補正係数を横軸にとって観測値をプロットしたもの、同じく白丸の観測（緊急地震速報）は当時発表された緊急地震速報のマグニチュード（警報発表時点の M7.2）と震源距離を用いて算出される補正係数を横軸にとって観測値をプロットしたものである。この領域の基準地震は、平成 17 年 8 月 16 日宮城県沖の地震（M7.2）である。マグニチュードを過小評価した当時の緊急地震速報を用いた場合は、この宮城県沖地震に近いマグニチュードで補正係数は 1 前後となり、それによる予測も 5 cm/s 前後、計測震度 3.5 前後と過小となる。一方、確定震源の M9.0 による補正係数は 100 を超え大幅な過大予測となる。観測と一致する予測となるには補正係数 10 前後、マグニチュードでは 8.2 程度となる必要があった。M9.0 はモーメントマグニチュードであり即時の決定は難しく、緊急地震速報では気象庁マグニチュードを使う。東北地方太平洋沖地震当時、地震検知から 105 秒後に発表した緊急地震速報（予報）は M8.1 までマグニチュードを更新しており、これを使えば観測とほぼ合致した予測を導いていると言えるが、巨大地震に対しては緊急地震速報の震源の推定を含めて断層破壊が進行している段階での精度の高い予測は難しい。

図 27 は、技研本館から数 km 離れた 24 階建 S 造の高層事務所棟の最上階の観測値と予測値を領域ごとに検証した例を示す。ここは標準地震に対する観測

記録が無いため、技研本館の観測記録を表層地盤の増幅特性の差で補正した地震動に補正係数をかけ入力地震動を作成し建物応答を事前解析した。

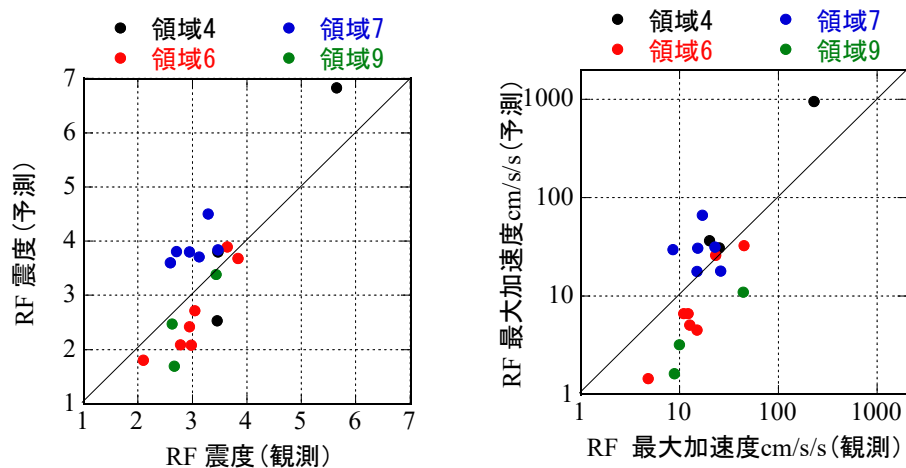


図 27 高層事務所棟での観測値と予測値の比較

今回示した予測方法は、図 13 の E の技術に相当するものであり、技研本館では震度相当 1 階級程度、高層事務所棟では計測震度 1 程度の差で予測でき、領域ごとや基準地震の変更など観測データの蓄積によって予測精度の向上が期待できると考えられる。

#### IV. 長周期地震動の予測情報に関する実証実験

本節では、検討課題③「リアルタイムでの情報提供における課題を抽出するため、実際に予測情報を試行的に提供し、利活用についての検証」として、実際に予測情報を試行的に提供し利活用することを目指した気象庁と防災科研共同の実証実験についてとりまとめる。

##### 1. 実証実験について

本実験は、気象庁が提供する緊急地震速報に基づき、防災科研が開発・運用するシステムが即時的に約1 km メッシュ単位の長周期地震動階級等を予測し、その結果を実験参加者へ提供するものであり、

- ① 一般の実験参加者が長周期地震動階級の予測結果等を表示する「長周期地震動モニタ」を利用する実験（以下、長周期地震動モニタ実験）
- ② WG 委員等の実験参加者が長周期地震動階級の予測結果等を WebAPI（HTTP 通信を用いてネットワーク越しにデータをやり取りするためのインターフェース）を通して機械処理可能な情報形式で即時的に取得し利用する実験（以下、機械処理可能な予測結果を利用した実験）

の2通りからなる（図 28 参照）。

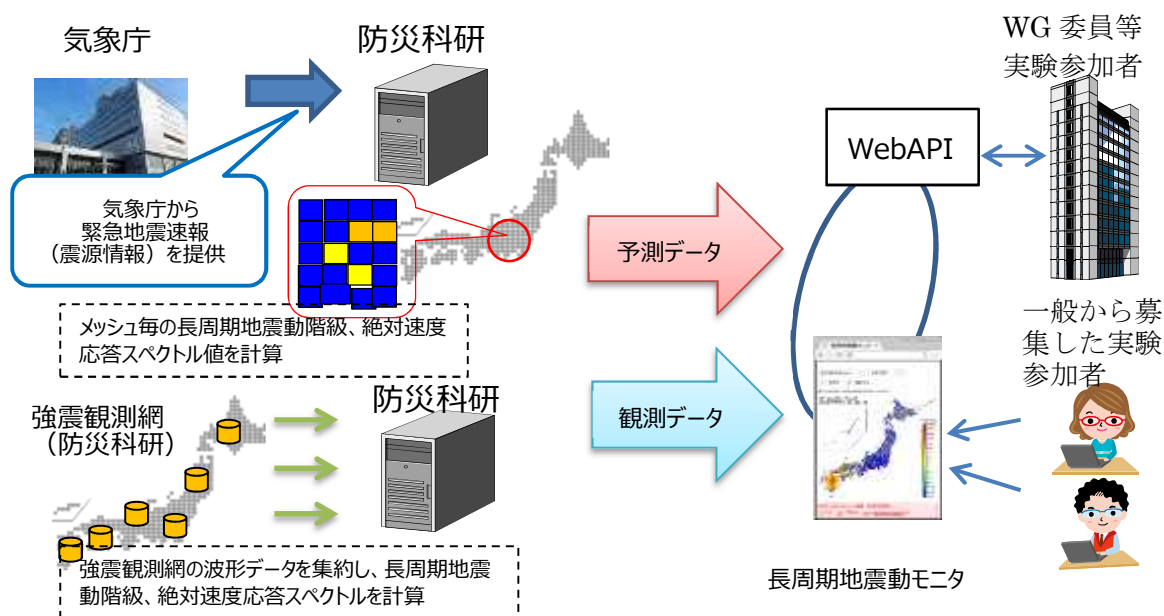


図 28 実証実験のイメージ

##### ① 長周期地震動モニタ実験

実験は、第Ⅰ期（平成 29 年 11 月 14 日～平成 30 年 3 月 31 日）、第Ⅱ期（平成 30 年 10 月 25 日～平成 31 年 3 月 31 日）として行った。それぞれ事前に実



験への協力に同意いただける一般の方から参加者を募り、第Ⅰ期は約1,500人、第Ⅱ期は約1,800人が参加した。参加者には、長周期地震動の情報や長周期地震動モニタの利用状況や改善意見のほか、長周期地震動階級等への理解度を確認するアンケート調査を実施した。

実験参加者がインターネットに接続したPCや携帯端末で閲覧する長周期地震動モニタは、防災科研の強震観測施設で観測している長周期地震動階級や周期ごとの長周期地震動階級データを日本地図上にリアルタイムで表示するほか、緊急地震速報の発表時には長周期地震動階級の5kmメッシュの予測分布の表示し、その地震で予測した最大の長周期地震動階級も表示できる（図29、30参照）。なお、第Ⅱ期は、第Ⅰ期に対するアンケートを踏まえ各参加者が指定した任意地点における予測値表示や震度の予測値などを表示する既存の強震モニタとの並列・切替表示などの機能等を追加した（図29参照）。



図29 長周期地震動モニタの画面イメージ

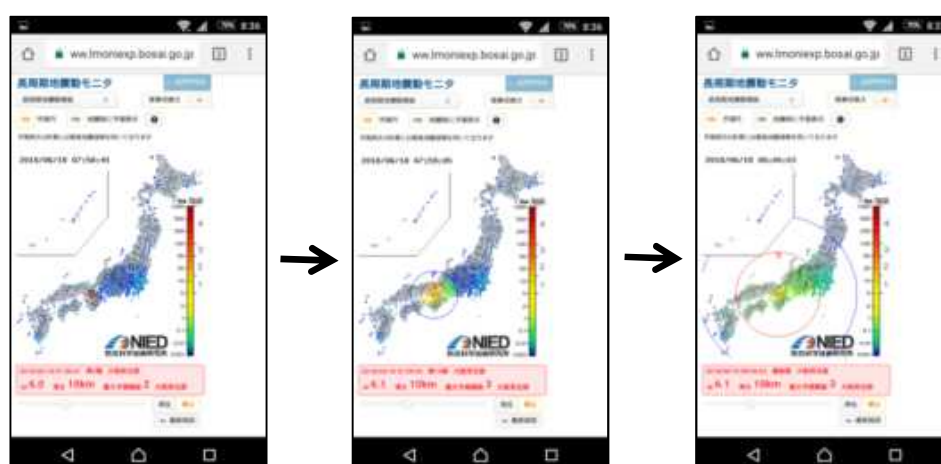


図30 平成30年6月18日大阪府北部の地震時の長周期地震動モニタ表示の時間経過例

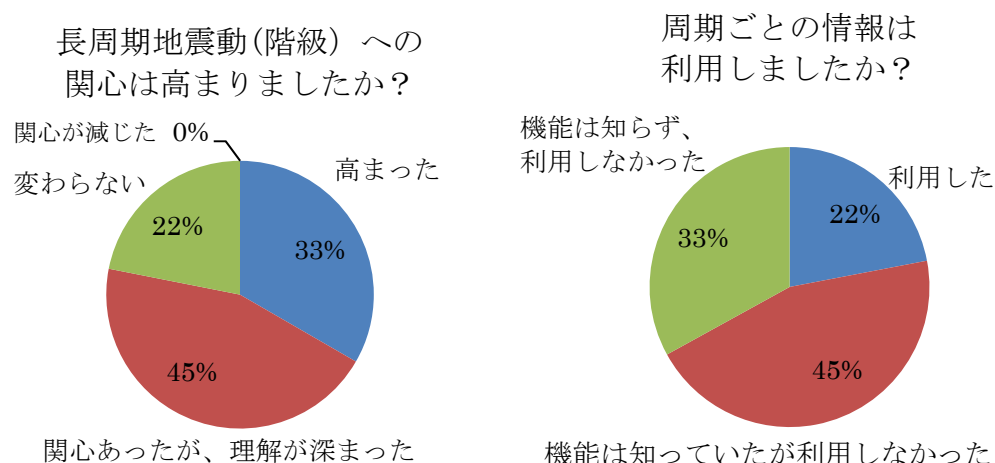


図 31 長周期地震動モニタ実験参加者アンケートの主な質問とその回答

第 I 期のアンケート結果（図 31 参照）を踏まえ、本実験の成果を以下に取りまとめる。アンケートによると 4 分の 3 以上の実験参加者に、長周期地震動や長周期地震動階級への関心の高まり、理解の深まりといった理解促進等の成果があった。一方、高層ビル等の揺れは、実際にはビルの固有周期に対応した長周期地震動の大きさに左右されるため周期ごとの長周期地震動の情報の利用方法等を具体的かつわかりやすく周知することが必要と考えられる。また、長周期地震動モニタの改善等への意見では予測が提供された時点でポップアップするなどの通知機能を望む回答が多かった。

以上のように、長周期地震動モニタは長周期地震動や長周期地震動階級の普及啓発に大きな効果があったことや情報利用者の利便性を高めるには PUSH 型の通知機能が重要であることがあらためて認識された。

## ② 機械処理可能な予測結果を利用した実験

本実験は、WG 委員や WG で承認した関係者 11 組の実験参加者が防災科研の開発・運用している WebAPI を利用し予測情報を入手し、情報の取得状況、精度検証、利用システムの開発等を試みるため、気象庁、防災科研との共同実験として取り組んだものである。WebAPI を利用した情報の提供は、簡易かつ負担の少ない方法として採用した。防災科研から WebAPI により提供される主なデータは、次のとおりである。WebAPI を利用した配信形態は、PUSH 型情報ではなく実験参加者が取得する PULL 型情報ということになるが、実験参加者は 1 秒毎などの短い間隔で定期的に情報を取得し続ける設定を行うことで、リアルタイムに情報を入手できる。さらに、本実験では現在時刻のデータ提供とあわせて過去データの提供も可能としており、東北地方太平洋沖地震での対応を検証するため、当時発表した緊急地震速報に基づき同地震に対する長周期



地震動階級の予測値や観測値等を再現し提供している。なお、当時発表した緊急地震速報のマグニチュードの最大は M8.1 であり、提供している予測値もそのマグニチュードに対応したものである。当時のマグニチュード計算手法にはマグニチュード依存性（マグニチュード小で過大、マグニチュード大で過小評価）があったが、それを改善した現在の計算手法が平成 25 年 2 月より導入されており、その手法では M8.5 が最大となる。

#### 【予測値】

- ・ 緊急地震速報で提供される震源情報（時刻、緯度、経度、深さ、マグニチュード）
- ・ 指定した地点の震度
- ・ 指定した地点の S 波到着までの猶予時間
- ・ 指定した地点の長周期地震動階級
- ・ 指定した地点の絶対速度応答スペクトル値（周期 1.6～7.8 秒の 0.2 秒刻みの値及びそのうちの最大値）

#### 【観測値】

- ・ 指定した防災科研の強震観測施設で観測したリアルタイム震度、長周期地震動階級
- ・ 指定した防災科研の強震観測施設で観測した絶対速度応答スペクトル値（周期 1.6～7.8 秒の 0.2 秒刻みの値及びそのうちの最大値）

表 3 に本実験の概要をまとめる。Ⅱ． 1 で検討した利用分野ごとの予測情報の利活用案に沿う実験や利用システムの開発などが行われた。

しかしながら、WebAPI を通じた予測情報の本格的配信をおこなった平成 30 年 2 月から約 1 年の間、実験参加者が実験フィールドとした首都圏や中京圏で顕著な長周期地震動を励起させるような地震発生はなく、実際の地震での予測情報を用いた利用システム等の実験・検証はできなかった。一方、実験期間中に発生した平成 30 年 6 月 18 日の大阪府北部の地震や平成 30 年北海道胆振東部地震で入手した予測データと観測データの比較検証、東北地方太平洋沖地震時のデータによる予測情報と自社の観測記録との検証を行い、その利用のための課題を抽出する試みが行われた。

表 3 機械処理可能な予測結果を利用した実験まとめ

| 利活用分野         | 計画・提案内容                                                                                                         | 実施状況                                                                                                                                           | 成果・課題                                                                                                                  |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ビル等在館者への周知    | ○防災センターへの連絡、初動対応への活用（ビル管理者）<br>○自社内への館内放送（建築関係者、予報事業者）                                                          | ○予測情報、観測情報のデータの閲覧、保管をし、注意喚起に利用（ビル管理者、予報事業者）                                                                                                    | ○大きな地震の揺れがないため実測データとの比較検証が引き続き必要                                                                                       |
| ビル内の設備・機器等の制御 | ○エレベーターの制御（ビル管理者、建築関係者、予報事業者）                                                                                   | ○データを常時受信し保存するプログラムを開発し予測情報を常時保存している。また、予測情報を用いてエレベーターを自動停止する仕組みを開発した（建築関係者）                                                                   | ○実験地域では実際に対象となる地震が起きていないため、引き続き検証が必要                                                                                   |
| ビル等の被災診断      | ○建物の健全性判断（大学）<br>○震度分布と長周期地震動階級分布を組み合わせ可視化することで、被害分布の想定、応急対応に活用（大学）                                             | ○運用中の強震観測システム及び災害対応Webシステムに組み込むための技術的な検討を行っている（大学）<br>○東北地方太平洋沖地震時の絶対速度応答スペクトルと上部記録の最大速度を比較（大学）                                                | ○絶対速度応答スペクトル値を入力した応答スペクトル法解析で、上部の揺れがある程度精度良く求められた<br>○より詳細な揺れ予想には高次モードの応答スペクトル法解析のため、短周期の情報も併せて必要                      |
| その他           | ○自社観測データとの比較（ビル管理者、建築関係者、大学、予報事業者）<br>○データ取得・配信方法の検討（建築関係、予報事業者、設計事業者）<br>○超高層ビルを対象とした情報提供の実験を地域防災訓練で活用して実施（大学） | ○東北地方太平洋沖地震あるいは北海道胆振東部地震時の自社の観測データとの比較（ビル管理者、建築関係者）<br>○長周期地震動が到達するどの程度前に予測値を取得できるか調査（予報事業者）<br>○受信プログラムを作成し取得タイミングの検討、発信地点へのデータ転送方法の検討（建築関係者） | ○観測データとの比較調査では、予測情報の有効性が示されたが、事例が少ないこともあり震源域近傍での予測情報の利用などには引き続き検証が必要<br>○利用策をさらに幅広く検討するにはPUSH方式のデータや面的なメッシュ情報を用いた実験も必要 |

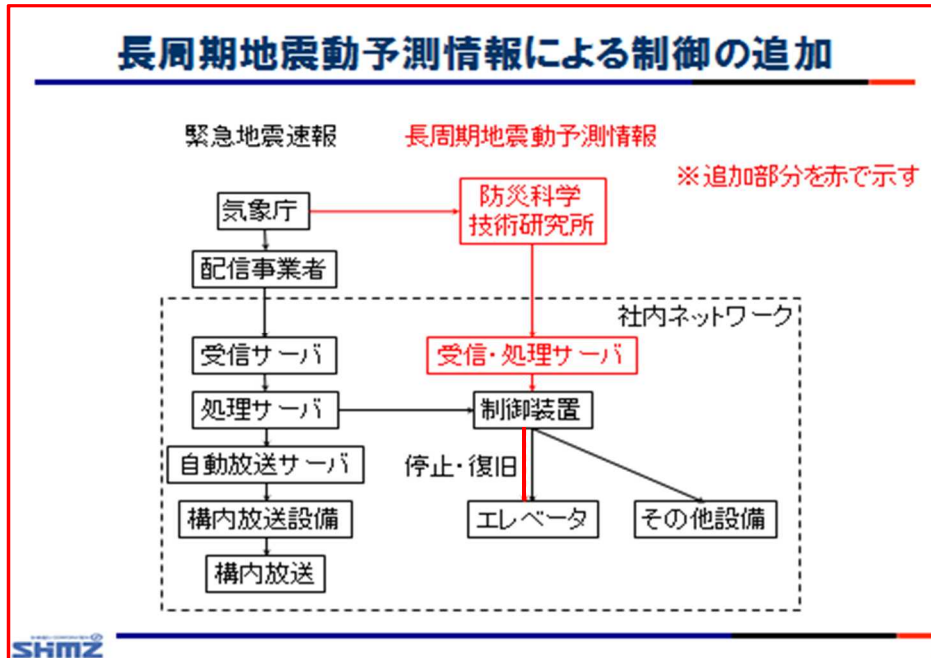
## 2. 実験事例

ここでは、予測情報の利用方策やシステムの開発・導入の参考として、清水建設株式会社、三菱地所株式会社・白山工業株式会社、森ビル株式会社の実験報告を要約して紹介する。

### ① 清水建設株式会社

清水建設技術研究所の本館は、設計固有周期 4.0 秒の S 造 1 階柱頭免震の 6 階建ビルで 2 台のエレベーターを運用している。本館で平成 18 年より運用している緊急地震速報を利用したエレベーター制御システムに WebAPI から受領

した長周期地震動の予測情報を追加しエレベーターを制御するシステムを開発した（図 32 参照）。



| エレベーターの制御仕様 | 緊急地震速報                                                                                                          | 長周期地震動予測情報                                                                                                                        |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 停止条件        | <ul style="list-style-type: none"> <li>・複数観測点の緊急地震速報(予報)</li> <li>・当該地が震度4以上の予想</li> <li>・猶予時間が10秒以下</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・長周期地震動階級3以上の予想</li> </ul>                                                                 |
| 停止状況        | 最寄階に停止し、扉を開放                                                                                                    | 最寄階に停止し、扉を開放                                                                                                                      |
| 復旧条件        | 5分後に復旧信号送出(手動リセットも可)                                                                                            | 10分後に復旧信号送出(手動リセットも可)                                                                                                             |
| 備考          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・赤字は設定変更可</li> <li>・エレベーター自体のセンサーが作動した場合はその地震時管制運転優先</li> </ul>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・緊急地震速報による制御とOR結合</li> <li>・赤字は設定変更可</li> <li>・エレベーター自体のセンサーが作動した場合はその地震時管制運転優先</li> </ul> |

図 32 長周期地震動の予測情報によるエレベーターの制御

実験中、当該地で最大の長周期地震動階級の予測値は2であったため、予測情報によるエレベーターの制御までの確認はしていない。なお、緊急地震速報で予測震度4となりエレベーター停止となった地震があったが、長周期地震動の予測情報は階級1であった。実験ではWebAPIにより1秒ごとにPULL型の情報を取得する形式であったが、制御までの猶予時間ロスをできるだけ小さくするにはPUSH型情報の発信が望まれる。

## ② 三菱地所株式会社・白山工業株式会社

三菱地所では、平成 30 年 6 月 18 日の大阪府北部の地震においても関西エリアで運営管理するビルのエレベーター全数が停止し、救出まで最長 2 時間を超えた閉じ込めも 5 件発生するなど、エレベーターの地震対策の強化が大きな課題となっている。首都圏などで多くのビル建設が続けられており、長周期地震動で大きく揺れることが想定される超高層建築物のエレベーターの制御のほか、ゴンドラやクレーンなどの高所作業（図 33 参照）での安全退避行動などで予測情報の効果を期待する。

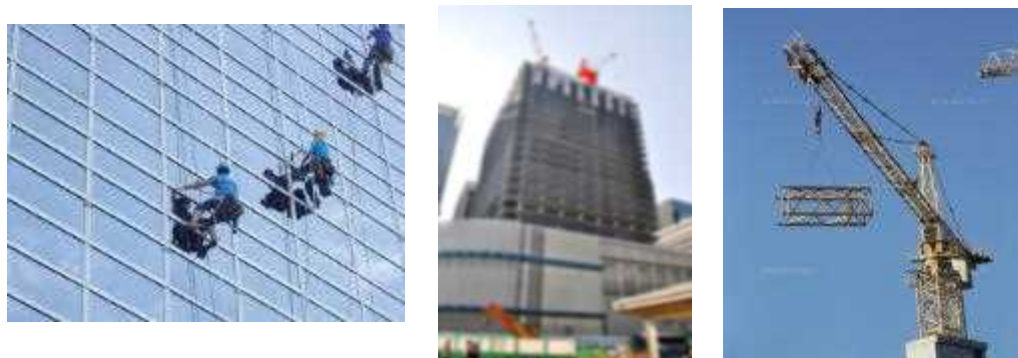


図 33 高所作業や高層ビルの建築現場の様子

実証実験において、三菱地所と白山工業は、三菱地所の 37 階建丸の内ビルにおいて予測情報の長周期地震動指標（長周期地震動階級や対象ビルの固有周期における絶対速度応答スペクトル値など）によってエレベーターを停止するという利用を目指し、予測情報とビルの実測データを比較検証できるシステムを開発、実装した。図 34 に利用イメージと図 35 に実装した表示画面例を示す。



図 34 エレベーター停止操作のための長周期地震動指標の利用イメージ



実験では、実際の地震での予測情報における長周期地震動指標等の画面表示内容を、丸の内ビルの被災度判定支援システムによる観測データを用いて検証を行い、エレベーターの停止等の判断方針の決定を目指す。これまでの実験期間中には、丸の内ビル地点で階級2以上となるような地震発生事例がなく検証まで進んでいないため、過去地震での事例検証を進めることも重要である。

### ③ 森ビル株式会社

長周期地震動の発生に関する情報を早期に入手し、超高層ビルの揺れに対し備えることを目標に、

- ・地表面で観測した速度応答スペクトルと比較した予測情報の精度
- ・ビル最上部で観測した速度応答時刻歴と予測情報の発表時間との関係

を検証した。

検証は、東京都港区の六本木地区、愛宕地区に立地する4棟の超高層ビルで実施した。ここでは、Ⅱ．2-①でも紹介した六本木ヒルズ森タワー（54階建S造、固有周期は設計時5.8秒、観測時5.2秒）での結果概要を報告する。

図36に、東北地方太平洋沖地震時に六本木ヒルズ森タワーの地表面で観測した擬似速度応答スペクトル(pSv)と再現実験で入手した予測情報の絶対速度応答スペクトル(Sva)の比較を示す。

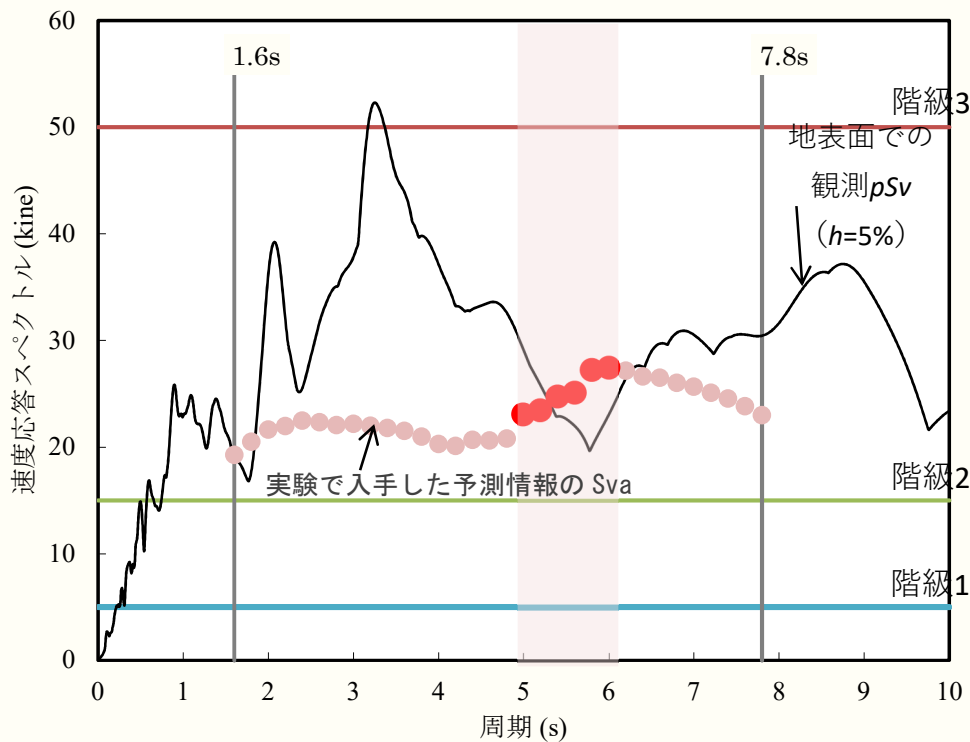


図 36 東北地方太平洋沖地震当時の再現実験で入手した予測値と当時観測した値の比較

(●と●：予測情報の絶対速度応答スペクトル Sva (●は森タワーの固有周期帯における予測値)、  
実線：観測した擬似速度応答スペクトル pSv )

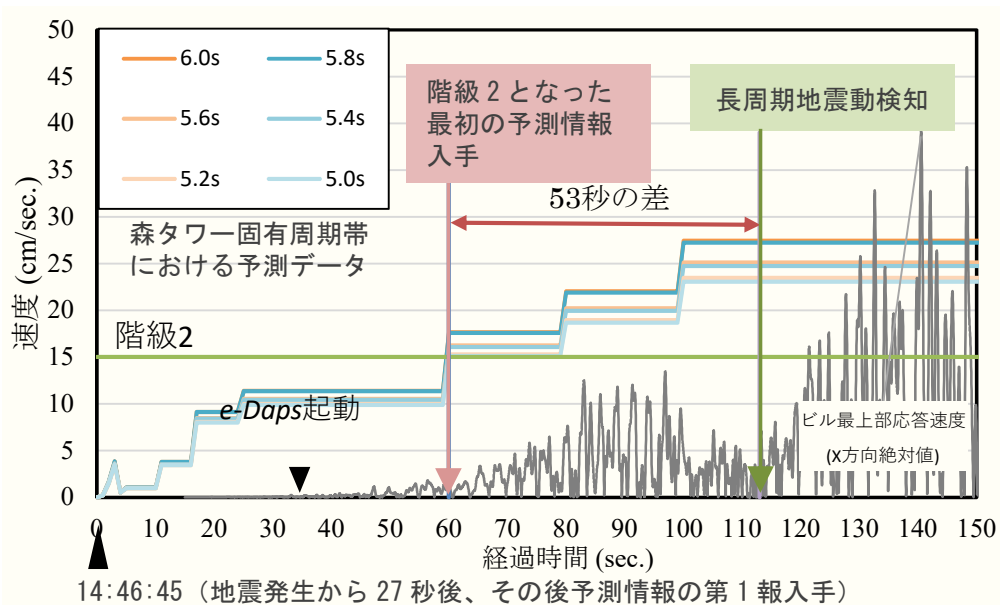


図 37 長周期地震動の検知時刻と再現実験での予測情報の入手時刻との比較



図 36 に示すとおり、階級 2 となった予測情報は、森タワーの固有周期帯（5 秒台）では速度応答スペクトルで 20kine 台を予測し、地表面での観測結果から求めた速度応答スペクトルと概ね合致していた。また、図 37 に示すとおり、階級 2 の予測情報は森ビル独自の被災度推測システム（e-Daps）の長周期地震動検知より約 50 秒早く入手できた。

検証を行った他の超高層ビルにおける比較もほぼ同様の結果であった。相応に離れた大地震に対する長周期地震動の予測情報の精度と猶予時間は、ビル管理業務における初動対応のトリガーとして有効なものであると考えられる。

### 3. 実証実験の総括と今後について

約 1 年間の実証実験の成果は、予測情報を機械処理等し利用するものとして、施設管理関係者の情報収集を目的としたもののほか、エレベーターの管理・制御を目的としたシステム開発等があり、予測情報の社会実装が可能なことを示していると考えられる。また予測情報と実際の揺れ等による実測値との比較・検証では、東北地方太平洋沖地震当時を再現した検証から地点ごとの予測情報がビルでの観測結果と実用可能な範囲でほぼ合致し、観測によって長周期地震動を検知するよりも早い段階で対応判断に利用できる情報が入手できることを示した。

このように本実証実験では、社会実装可能な予測情報を利用した長周期地震動対策の先駆的な取り組みが確認できた。

一方、実際のエレベーターの制御に適用するには、低層、中層、高層と分けビル内全てのエレベーターを一度に停止させないような予測情報利用の選択や制御の仕方を検討する必要があるという意見もあった。実験期間中、実際に実験を実施していた首都圏等では制御システム等の稼動を検証できるような長周期地震動は観測されなかったため、このような高度な検討には至らなかった。

また、個別のビルの固有周期等の特性を考慮したカテゴリー 2 の予測情報を用いたビルの階ごとの揺れの館内アナウンスなどにおいては、予報区に広く伝えられるカテゴリー 1 や気象庁の観測情報の長周期地震動階級とは対象とする周期や予測地点が異なるため、複数の情報を入手した利用者が混乱しないような伝え方の検証も重要であることが指摘された。

このような意見を踏まえ、実際の地震発生での実験とともに過去地震の事例の再現実験により、課題の検証が進むことが期待される。

今後、更なる予測情報の利活用策の開発や普及のためには、カテゴリー 2 の予測情報として現在、防災科研より提供されている以外の予測項目の利用実験や、WebAPI による PULL 型ではなく実用的な PUSH 型情報の提供による実験も検討すべきである。また、実験参加者の中には、緊急地震速報の予報業務許可事



業者など自ら長周期地震動の予測情報を作成する技術を有する者もいることから、参加者自ら必要な予測情報の作成を行う形での実験も考えられる。

また、猶予時間が見込めない直下地震への対策として、予測情報だけでなく観測情報を利用した対応策を合わせて構築する実験も検討すべきである。

さらに、一般参加者を募集して行った長周期地震動モニタ実験については、常に利用していることはできないため PUSH 型情報を期待するなど多くの意見をいただいた。概して、参加された方の長周期地震動の予測情報への関心や期待は大きく、長周期地震動情報の社会実装を目指す取り組みへの理解促進や普及啓発にも寄与したものと考えられる。

以上、実証実験の成果から、本実証実験のしくみは、予測情報の利活用策やノウハウの醸成、効果の検証、普及を目指す手段として有効であることが確認できた。

気象庁は長周期地震動の多様なニーズに対応する予測情報の実用化を見据え、広く社会に利用される準備を促進するため、本実験のような取り組みを拡大・継続すべきである。

## V. まとめと今後に向けて

本 WG では、検討課題①～③を踏まえて、情報の迅速性と確度から予測情報を 3 つのカテゴリーに分け検討を進めた。検討結果の主要なポイントとそれを踏まえた今後の多様なニーズに対応する予測情報の実現に向けて取り組むべき事項は以下のとおりである。

### 1. 検討結果の主要なポイント

○長周期地震動の予測情報には、大きな揺れが予測される地域へ警戒・注意を呼びかける気象庁の警報とビルごとなどの多様なニーズに対応して提供・利用される予測情報がある。利活用策等を検討するため予測情報の迅速性と確度の観点から、この情報を以下の 3 つのカテゴリーに分けた。一般的にカテゴリー 1、2、3 の順に、情報提供から大きく揺れ出すまでの猶予時間が短くなるが、予測の確度は高くなる。

- ・カテゴリー 1：気象庁から発表される警報・予報
- ・カテゴリー 2：カテゴリー 1 の予測情報をもとに事業者等により作成、配信される予測情報
- ・カテゴリー 3：リアルタイムの観測を利用した事業者等による精度の高い揺れの予測情報

○検討課題①（予測情報の利活用方法の検討）について、高層ビル等における「人への周知」、「設備・機器等の制御」、「被災診断」、「ビル以外への利用」、「その他（訓練など）」のさまざまな利用環境や分野ごとに、各カテゴリーの予測情報の利用可能性、情報利用にあたっての留意事項等を整理するとともに、WG 委員からの長周期地震動対策の事例の報告により現状と課題についての知見の共有が図られた。

○検討課題②（予測技術の検討）について、震源情報及び観測データのそれぞれを入力とした場合の地震動および構造物の揺れに関する予測指標を出力するまでの技術要素と予測技術のつながりを整理するとともに、WG 委員からの実際の技術開発・適用事例の報告により知見の共有が図られた。

○検討課題③（実証実験の実施）について、予測情報を試行的に提供し利活用の検討を行うため気象庁と防災科研が共同で行った実証実験において、長周期地震動モニタでの普及啓発効果や機械処理可能な予測情報の利用実験での社会実装を見込んだシステム開発の成果等が示され、予測情報の提供サービスの有効性と可能性、本実験のような広く社会に利用される準備を促進するための取り組みの拡大・継続の必要性を確認した。

### 2. 今後の多様なニーズに対応する予測情報の実現に向けて

本 WG では、多様なニーズに対応する長周期地震動の予測情報について、予測

手法とそこから得られる様々なアウトプットの利活用方法等について利用上の留意事項も含め体系的にとりまとめることができ、また、委員からは予測等の事例を報告いただくことで重要な知見の共有も図られた。

気象庁は、長周期地震動の情報を広く社会に役立てるため、国民にあまねく警戒・注意を呼びかける長周期地震動の予測情報の実現に努める必要がある。

また、本 WG の成果を踏まえて、民間事業者が提供する予測情報を安心して利用することが可能となるよう、緊急地震速報の予報業務許可制度なども参考にしつつ、必要な仕組みの構築等の検討を速やかに進めることが必要である。

さらに、今回整理した予測情報の社会実装に向けては、今後さらに具体的な検証に役立つよう実証実験の取り組みを拡大・継続させるとともに、より多くの過去事例を使った検証や実際の揺れに対する情報の活用事例の蓄積などを行うことで情報の有用性等を確認していくことも重要である。

**長周期地震動に関する情報検討会**  
**多様なニーズに対応する予測情報検討ワーキンググループ委員名簿**

(◎：主査、○：主査代理)

- ◎北村 春幸 東京理科大学副学長【長周期地震動に関する情報検討会委員】
- 久田 嘉章 工学院大学建築学部教授【長周期地震動に関する情報検討会委員】
- 青井 真 国立研究開発法人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  
長【長周期地震動に関する情報検討会委員】
- 秋山 伸一 伊藤忠テクノソリューションズ（株）科学システム本部 事業企画推進部エ  
キスパートエンジニア【長周期地震動に関する情報検討会委員】
- 大庭 敏夫 三菱地所（株）ビル運営事業部 ビル安全管理室長
- 大類 哲 鹿島建設（株）建築設計本部 構造設計統括グループ（先進技術統括）グル  
ープリーダー
- 木村 雄一 大成建設（株）設計本部 構造計画部長
- 栄 千治 （株）日建設計 エンジニアリング部門 設備設計グループエネルギー・情  
報計画部長
- 下秋 元雄 一般社団法人 日本エレベーター協会 専務理事（第1回～第3回）
- 坂田 幸司 一般社団法人 日本エレベーター協会 部長（第4回、第5回）
- 土橋 徹 森ビル（株）設計部 構造設計部 部長
- 鳥井 信吾 （株）日建設計 執行役員 構造設計グループ代表
- 中井 俊樹 白山工業（株）営業本部 防災営業部 部長
- 金子 美香 清水建設（株）技術研究所 安全安心技術センター センター所長（第1  
回）
- 南部 世紀夫 清水建設（株）技術研究所 安全安心技術センター 主任研究員（第2回～第  
5回）
- 練木 道夫 明星電気（株）気象防災事業部 営業部
- 小山 信 国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部 建築新技術総括研究官
- 森田 高市 国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部 構造基準研究室長
- 干場 充之 気象研究所地震津波研究部第三研究室長

（長周期地震動に関する情報検討会 座長）

福和 伸夫 名古屋大学減災連携研究センター長

（事務局） 気象庁地震火山部管理課地震津波防災対策室及び地震津波監視課

## 多様なニーズに対応する予測情報検討ワーキンググループの開催経過

第1回 平成29年3月15日 13:00～15:00 於：気象庁大会議室

### 議 題

- (1) 説明事項
  - ①ワーキンググループの趣旨等について
  - ②気象庁が行う予測手法と提供する予測情報について
  - ③予測技術とその利活用について
  - ④リアルタイムでの予測情報の試行的な提供について
- (2) 多様なニーズに対応する予測情報について
- (3) その他

第2回 平成29年6月28日 15:00～17:00 於：気象庁大会議室

### 議 題

- (1) 多様なニーズに対応する予測情報の利活用について
- (2) 多様なニーズに対応する長周期地震動の予測情報に関する実証実験について
- (3) その他

第3回 平成29年12月13日 13:00～15:00 於：気象庁大会議室

### 議 題

- (1) 多様なニーズに対応する長周期地震動の予測技術について
- (2) 長周期地震動の予測情報に関する実証実験の実施状況について
- (3) その他

第4回 平成30年10月30日 15:00～17:00 於：気象庁大会議室

### 議 題

- (1) 長周期地震動の予測情報に関する実証実験の実施状況について
- (2) 多様なニーズに対応する予測情報検討WG報告書について
- (3) その他

第5回 平成31年1月17日 10:00～12:00 於：気象庁大会議室

### 議 題

- (1) 多様なニーズに対応する長周期地震動の予測情報に関する実証実験について（実験結果のまとめ及び今後の方向性）
- (2) 多様なニーズに対応する予測情報検討WG報告書について
- (3) その他

## 参考文献等

- 1) 気象庁地震火山部 (2017) : 長周期地震動に関する情報のあり方について (長周期地震動に関する情報検討会平成 28 年度報告書)
- 2) 気象庁(2018 改訂) : 気象等及び地震動の予報業務許可等の申請の手引き
- 3) 気象庁地震火山部 (2017) : 多様なニーズに対応する予測情報検討ワーキンググループ (第 2 回) 資料 2 長周期地震動による事象例 (大庭委員資料)
- 4) 気象庁地震火山部 (2017) : 多様なニーズに対応する予測情報検討ワーキンググループ (第 2 回) 資料 3 長周期地震動への備え (土橋委員資料)
- 5) 気象業務法施行規則第十条の二第一号ロの規定による計算 方法を定める件 (平成十九年十一月二十六日 気象庁告示第十一号)
- 6) Dhakal, Y. P., W. Suzuki, T. Kunugi, and S. Aoi (2015) : Ground Motion Prediction Equations for Absolute Velocity Response Spectra(1 - 10s) in Japan for Earthquake Early Warning、日本地震工学会論文集、15 巻、91 - 111 ページ
- 7) 内閣府 (2015) : 南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告 (南海トラフの巨大地震モデル検討会・首都直下地震モデル検討会)
- 8) 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2016) : 長周期地震動評価 2016 年試作版ー相模トラフ巨大地震の検討ー
- 9) 気象庁地震火山部 (2013) : 長周期地震動予測技術ワーキンググループ(第 2 回) 資料 1 距離減衰式を用いた長周期地震動予測に関する検討
- 10) 気象庁地震火山部 (2014) : 長周期地震動予測技術検討ワーキンググループ (第 4 回) 資料 2 実時間の観測データを利用して地震動を予測する技術について (干場委員資料)
- 11) 気象庁地震火山部 (2017) : 多様なニーズに対応する予測情報検討ワーキンググループ (第 1 回) 資料 3 長周期地震動の予測技術とその利活用の事例紹介 (久田主査代理資料)
- 12) 市村将太、他 : 鋼構造超高層建築物の設計用パラメータに関する研究その 1、剛性分布・固有周期・ベースシャー係数日本建築学会、1999
- 13) 市村将太、他 : 超高層鋼構造建物の弾性設計用パラメータに関する研究 (その 1)、各パラメータの定式化日本建築学会 2000 年
- 14) 日本建築学会 : 建築物の減衰 2000 年 pp. 131-137
- 15) 横田治彦、他 : 振動試験および地震観測データに基づく鉄骨造高層建物の減衰性状 日本建築学会構造系論文報告集第 453 号 pp. 77-841993. 11
- 16) 大宮憲司、久田嘉章 (2014) : 応答スペクトルを用いた超高層建築の簡易応答評価に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿)、pp. 1011-1012
- 17) 気象庁地震火山部 (2017) : 多様なニーズに対応する予測情報検討ワーキンググループ (第 3 回) 資料 2 長周期地震動技術 (大成建設資料)

- 18) Nagashima et al. (2008) : REAL-TIME PREDICTION OF EARTHQUAKE GROUND MOTION USING EMPIRICAL TRANSFER FUNCTION, 14WCEE
- 19) 大成建設：長周期地震動の到来判定方法及び到来判定システム（特許：特開 2013-174529）
- 20) 気象庁地震火山部（2017）：多様なニーズに対応する予測情報検討ワーキンググループ（第 3 回）資料 3 多様なニーズに対応する長周期地震動の予測情報に関する実証実験について
- 21) 気象庁地震火山部（2018）：多様なニーズに対応する予測情報検討ワーキンググループ（第 4 回）資料 3-1, 3-2, 3-3, 3-4