

1. 長周期地震動について

1. 1 はじめに

長周期地震動は、「平成 15 年（2003 年）十勝沖地震」（平成 15 年 9 月 26 日、マグニチュード（ M ）8.0、以下「2003 年十勝沖地震」と呼ぶ）の際に震央から約 250 km 離れた苫小牧市内で発生した石油タンク火災（図 1.1）の原因の一つとして注目されるなど、地震動による被害を考える上で、主要な課題の一つとなっています。歴史的には、1968 年十勝沖地震（ M 7.9）の際に初めて長周期地震動が確認され、遡って 1964 年新潟地震（ M 7.5）でも発生していたと考えられています。世界的にも、1985 年のミチョアカン地震（メキシコ地震、 M 8.1）により、震源から約 400km 離れたメキシコシティに長周期地震動による甚大な被害がもたらされたことから広く知られるようになりました（工藤, 2008 ; Koketsu and Miyake, 2008）。地震調査研究推進本部（以下「地震本部」と呼ぶ）が平成 21 年 4 月に公表した「新たな地震調査研究の推進について－地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策－」（以下「新総合基本施策」と呼ぶ）においても、当面 10 年程度に推進すべき地震調査研究の主要な課題として、長周期地震動の調査研究の必要性が謳われています（地震調査研究推進本部, 2009）。

地震本部地震調査委員会強震動評価部会では、地下構造モデル検討分科会が中心となり、新総合基本施策の実施に先駆けて平成 19 年度から、長周期地震動の予測手法とその結果の公表方法について検討してきました。今般、想定東海地震、東南海地震を対象地震とした関東地方から近畿地方にかけての長周期地震動予測地図、および、宮城県沖地震を対象地震とした東北地方中部から関東地方にかけての長周期地震動予測地図をそれぞれ試作しましたので、ここに報告します。

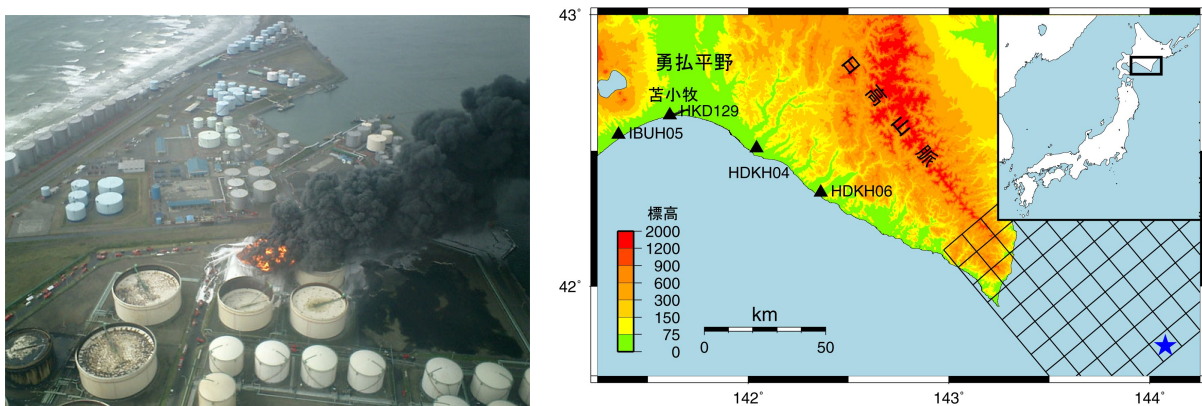


図 1.1 2003 年十勝沖地震によって発生した長周期地震動による
苫小牧の石油タンク火災

左は総務省消防研究センター提供のタンク被災状況の航空写真。右は 2003 年十勝沖地震の震央（星印）や震源域（黒格子）と苫小牧の位置関係を示した地図（Koketsu *et al.*, 2005）。

1. 2 本報告書の位置づけ

正確な長周期地震動予測を行うためには、精度の高い対象地震の震源モデルと計算範囲の地下構造モデルの構築が必要不可欠となります。今回の予測では、宮城県沖地震と東南海地震を対象とした前イベント震源モデル（6章を参照）による長周期地震動予測地図を作成するとともに、構築した地下構造モデルと計算手法の妥当性の検証を行いました（7章を参照）。さらに、東南海地震によって検証した地下構造モデルを使用して、東南海地震の東隣に震源域が想定されている想定東海地震の長周期地震動予測地図を作成しました。その際、想定東海地震は過去のイベントの震源モデルが得られていないので、特性化震源モデル（6章を参照）を新たに作成して予測を実施しています。このような検討の位置づけから、今回の予測では、宮城県沖地震が沖合の震源域と連動した場合や、想定東海地震と東南海地震が連動した場合などを対象としていないので、その点には注意が必要です。つまり、地震本部では、今回の予測を今後いろいろな震源モデル群を含む本格的な長周期地震動予測を行うための重要な第一ステップと位置づけています。また、今回の予測では、関東平野や濃尾平野、大阪平野、仙台平野といった主要な平野における長周期地震動予測に重きをおいて、地図の計算範囲を限定しています。以上を踏まえて、本報告書の長周期地震動予測地図を試作版と位置づけています。

なお、引き続き来年にも、南海地震を対象とした長周期地震動予測地図を「2010年試作版」として公表する予定です。これらの長周期地震動予測地図の試作は地震本部にとって初めての試みですが、その予測をさらに精緻化する必要があり、今回の検討を皮切りに、新総合基本施策に沿って新たな知見を反映させつつ長周期地震動の調査研究を推進していく予定です。

1. 3 長周期地震動とは

長周期地震動を文字通り解釈すれば、長い周期の地震動（地震による地面や地中の揺れ）です。海における波と同じように、地震波とは地面や地中を伝わる波と見ることができます。海を波が伝わっているときには、海面のある一点（船やブイなど）が揺れるように見えますが、同じように、地震波が伝わっているときにも、地面や地中のある一点が揺れます。この揺れを地震動と呼んでいます。ここで、周期とは、ある地点が波の山となってから再び山になるまでの時間のことです（図 1.2）。地震動には、短い周期の波によるガタガタとした揺れと、長い周期の波が伝わってきた結果生じる、ゆっくり繰り返す揺れが同時に混ざっています。長周期地震動は後者の揺れを指します。長い周期の波は短い周期の波に比べて減衰しにくく、海の波のうねりのように、震源から遠くても、あまり弱くならず伝わってきます（図 1.2B）。また、長い周期の波は深い地下構造の影響を受けやすい性質があります。特に、深い地下構造が凹形の形になっているところ（堆積盆地）では、その中に堆積した軟弱な地盤により揺れが増幅したり、表面波と呼ばれる地表に沿って伝わる波が発達したりして、揺れの継続時間が長くなってしまいう傾向があります（図 1.2C）。また、周期の長い揺れは、影

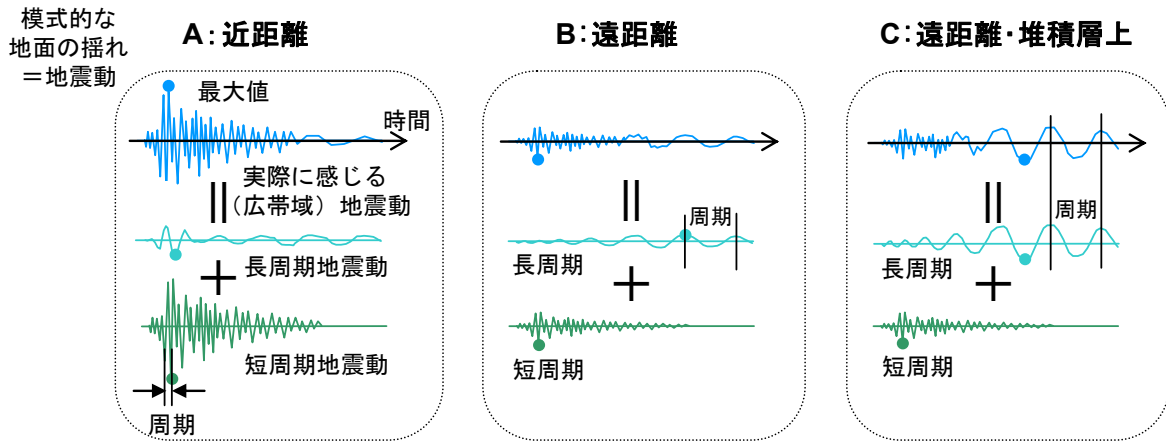


図 1.2 実際に感じる地震動と短周期および長周期地震動との関係

響を与える建物や構造物（橋や石油タンクなど）が、周期の短い揺れとは異なります。このような長周期地震動の特徴を踏まえ、長周期地震動予測地図では、「全国地震動予測地図」に示されたような揺れの強さ（振幅）の分布だけでなく、周期の特性や継続時間の特性も表現できるような地図を提示しています（図 1.3）。

周期が何秒より長い地震動を長周期地震動と呼ぶかについては、あまり明確な定義がありません。大きな地震の近くで発生する、継続時間は短いが振幅の大きい揺れを含めるとすると、周期 1 秒程度を下限とすることが考えられます (Koketsu and Miyake, 2008)。一方で、固有周期の長い大型構造物などに被害を及ぼす地震動という観点から定義することも可能です。すなわち、前述の 2003 年十勝沖地震の時に、苫小牧において、周期約 4 秒以上の成分を多く含む地震動が発生し、長周期地震動による特徴的な被害をもたらしたことをもとに、周期 4 秒以上を長周期地震動と呼ぶ（瀨瀨, 2006）という考え方も可能でしょう。また、一般的な高層建物が揺れやすい周期（固有周期）は 2～3 秒とされていますので（図 1.3）、これらを下限とすることも考えられます。これに対して、主要な都市圏の立地する堆積盆地が揺れやすい周期を必ず含むように長周期地震動を定義するという考え方もあります。中央防災会議（2008）によれば、想定東海地震や東南海地震、宮城県沖地震の影響が及ぶ範囲にある大都市圏のうち、揺れやすい周期が最も短いのは、中京圏を含む濃尾平野と仙台圏を含む仙台平野の 3 秒前後です。

以上様々な見方がありますが、計算上の制約等から、今回は周期が 3.5 秒以上の地震動について計算を行い、周期 5 秒、7 秒および 10 秒を中心に長周期地震動予測地図を作成しました。将来的には、周期 2～3 秒の地図が作成できるように検討していきます。

1. 4 長周期地震動の影響

長周期地震動予測地図について紹介・解説する前に、まずここでは、一般的な生活空間を念頭に置いて、長周期地震動の影響について説明しておきましょう。まず、建物や構造物への影響から始めると、通常の木造家屋、中低層のビルやマンションには、ここで示した周期3.5秒以上の長周期地震動は、一般に大きな影響を及ぼしません。これに対して高層ビルでは、それぞれのビルが持つ固有周期が長周期地震動の周期に一致するとき、非常に大きな影響を与えると考えられています。実験や解析によれば、一般的な鉄骨造ビルの場合、その固有周期 T (秒) は、階数を N とすれば概ね $T=0.1N$ (日本建築学会, 1973)、高さを H (m) とすると概ね $T=0.02\sim0.03\times H$ (日本建築学会, 1981) であり、大きく揺れる際には、固有周期はさらに長めになるといわれています。たとえば、30階建て高さ120m程度の高層ビルでは $T=3.0\sim3.5$ 秒程度、50階建て超高層ビルでは $T=5.0\sim6.0$ 秒程度と見積もられ、実際に新宿副都心の50階程度の超高層ビルでは5秒前後となっています(金田・他, 1995)。長周期地震動の強さに関しては、超高層建築物の構造耐力上の安全性を確かめるための構造計算に用いられる、加速度応答スペクトルで定義された極めて稀に発生する地震動(平成12年建設省告示第1461号)の値を速度応答スペクトル(10頁のコラムを参照)に換算すると、長周期の範囲においては80 cm/s強であることなども参考になるでしょう(建設省, 2000; 中野, 2006)。

一方、建物以外の構造物では、たとえば首都圏の代表的な長大道路橋は、揺れ方によって4秒程度から9秒程度までの固有周期を持っているようです(小森・他, 2005)。このほか、2003年十勝沖地震で再認識されましたが、大型の石油タンクでは長周期地震動により内部の液体が揺さぶられるスロッシングという現象が起こることが知られています。この現象が液体のあふれなどを起こし、さらに火災へつながったと考えられています。各種の評価式等(Housener, 1957; 座間, 1985)を参考にすると、満液状態にある直径30mと60mの石油タンクのスロッシング固有周期は、それぞれ約7秒と約10秒となります。これらの長い固有周期を持つ長大橋や石油タンクなどを、超高層ビルや免震ビルなどの建物も含めて長周期構造物と呼ぶこともあります。

人体感覚などに目を転じると、風による振動を概ね何%の居住者が感じるかという居住性の観点の調査から、長周期地震動に対する人体感覚を見積もることができます。

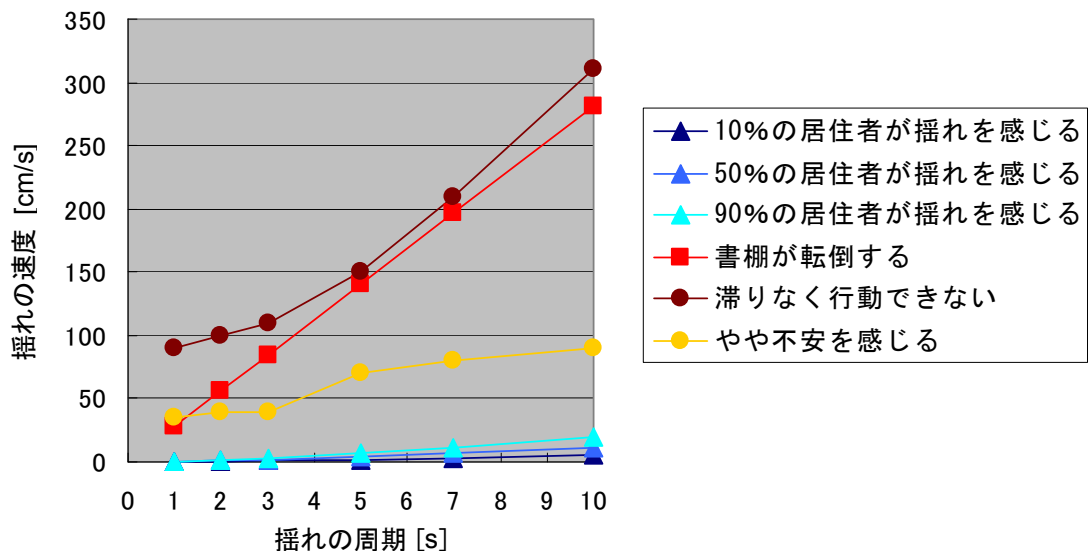


図 1.4 人体感覚・家具転倒に長周期地震動が及ぼす影響

それをグラフにした図 1.4 を見ると、周期が長くなるほど人体は感じづらくなってきますが、それでも周期 10 秒で 20 cm/s の強さがあれば 90% の人が揺れを感じるようになります（日本建築学会, 2004）。また、不安を感じるような揺れの強さは、周期 5 ～10 秒では 70～90 cm/s とあまり変化しません。避難行動を困難にする長周期地震動は、周期 5 秒では約 150 cm/s、周期 7 秒では 200 cm/s 以上と非常に強い揺れになっています（Takahashi *et al.*, 2007）。このほか、住宅内の家具の転倒に関する調査によれば、書棚は周期 5 秒では約 140 cm/s で転倒するようです（日本建築学会, 2003）。

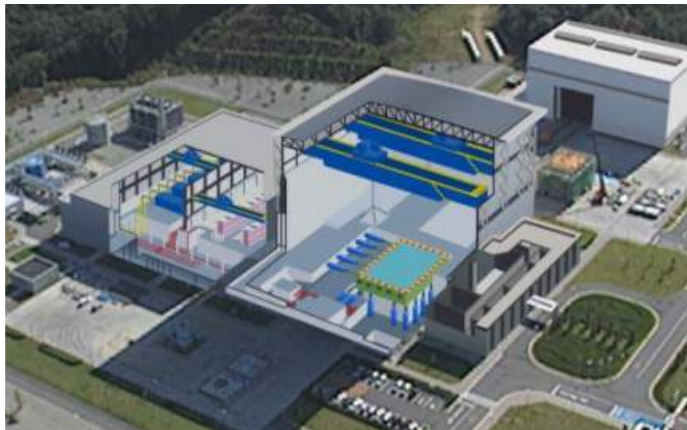


図 1.5 E-ディフェンスの概観図

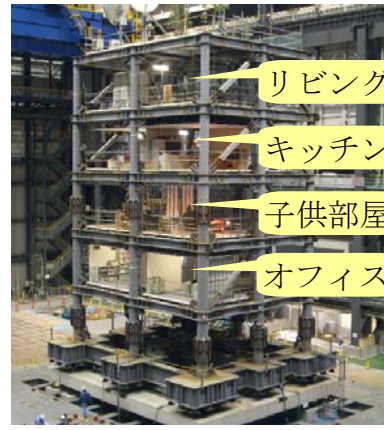


図 1.6 試験体

それでは、大きな長周期地震動が発生すると、高層ビルの室内はどうなるでしょうか。最近、図 1.5 の E-ディフェンスと呼ばれる実験施設（兵庫県三木市にある独立行政法人防災科学技術研究所の実大三次元震動破壊実験施設）の 20m×15m の大きな震動台上に、30 階建物の上層部 5 階を模した図 1.6 に示すような試験体（固有周期約 3 秒）を載せて、実物大の室内の状況を再現し、長周期地震動によりどうなるのかを検証した実験が行われています（榎田・他, 2009）。別途実施したシミュレーション解析をもとに、この試験体が南海地震を想定した長周期地震動による高層ビルの上層階の揺れの状況を再現するように、震動台を加振して実験を行っています。今回の実験では、試験体の床は周期約 3 秒で約 200 秒間揺れ、その間の揺れの速度の最大値は約 230cm/s、変位の最大値は約 1.3m でした。



図 1.7 オフィスの状況（左：加振前，右：加振後）（榎田・他, 2009）

図 1.7 は、先の試験体において、オフィスを模した部屋の地震前と後の様子を示しています。一般に、オフィスには収納能力の高い、背の高い書棚等があります。実験から、背の高い書棚は、治具等で床や壁に固定されていなければ、転倒は免れないことが検証されました。また、仮に書棚を固定していても、収納物の飛散を完全に防ぐことは容易ではありません。さらに、ストッパーが効いていないキャスター付きの家具や 100 kg にもおよぶコピー機などの機器は、一度に最大約 3m ほど大きく移動しました。長周期地震動は継続時間が長くなることから、キャスター付きのコピー機などは机や壁に何度も衝突しながらふらふら動いている時間が長くなり、壁に穴を開ける状況も観察されました（榎田・他，2009）。



図 1.8 集合住宅のキッチンの状況（左：家具転倒対策なし，右：対策あり）
（榎田・他，2009）

図 1.8 は、先の試験体において、集合住宅のキッチン内を模した部屋が、長周期地震動で揺らされた後の様子を示しています。家具を固定した場合と、固定していない場合を再現して実験しています。集合住宅でも、家具や収納物の振る舞いは、基本的にはオフィスの場合と同じです。キッチンでは、背の高い冷蔵庫や食器棚が転倒する可能性が非常に高く、またリビングでも、重いテレビが大きく移動してしまうことも実験で確認されています。

では、このような被害を軽減するために、どのような対策を事前に講じておけば良いのでしょうか。図 1.8 の比較から、こうした背の高い家具や重量物については、種々の固定器具や粘着性耐震マットなどによって、適切に固定することが有効であることが分かります。また、食器棚などでは、たとえ棚を固定していても、中に入っている食器類や調理器具が落下、飛散してしまう可能性が十分にあります。このため、扉開放防止器具などを取り付けることも大切です。遠方の大きな地震による長周期地震動においても、家具や収納物等が突然に凶器となってしまうことをオフィスや各家庭でしっかり認識し、対策する必要があります。しかしながら、日常生活の中では、万全な状態を維持し続けるのはなかなか無理があることから、物をできるだけ置かない比較的安全な部屋を決めておき、地震が来たらそこに逃げ込むことなど、日常からオフィスや家庭で良く相談し対応を確認することなども対策の一つと考えられます。遠方の大きな地震による長周期地震動の場合は、通常の（短周期の）地震動に比べて、揺れ始めてから揺れが大きくなるまでに少し時間がかかります。今後、緊急地震速報の有効活用など、長周期地震動が来る前の退避行動などの対策について検討を進めることも必要です。

図 1.7 や図 1.8 に示した状況は、独立行政法人防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センターのホームページ（<http://www.bosai.go.jp/hyogo/movie.html>）から動画を入手することが出来ます。ご覧になると、より一層、対策を施す必要性をご理解いただけるでしょう。

1. 5 長周期地震動予測地図の見方

次に、長周期地震動予測地図の見方について、宮城県沖地震（第 4 章を参照）を例に示します。長周期地震動予測地図は、最近公表された「全国地震動予測地図」における、「震源断層を特定した地震動予測地図」の一種に相当します。そのうち図 1.9 は「全国地震動予測地図」に納められた、1978 年に発生した宮城県沖地震と同じタイプの地震について簡便法を用いて求められた予測震度分布図（地震調査委員会, 2009b）を示しています。この「震度」は、比較的短周期（約 0.1~1 秒程度）を中心とした揺れに対応しています。したがって、この震度と対応していない長周期地震動については、図 1.9 と同様の表現をすることができません。

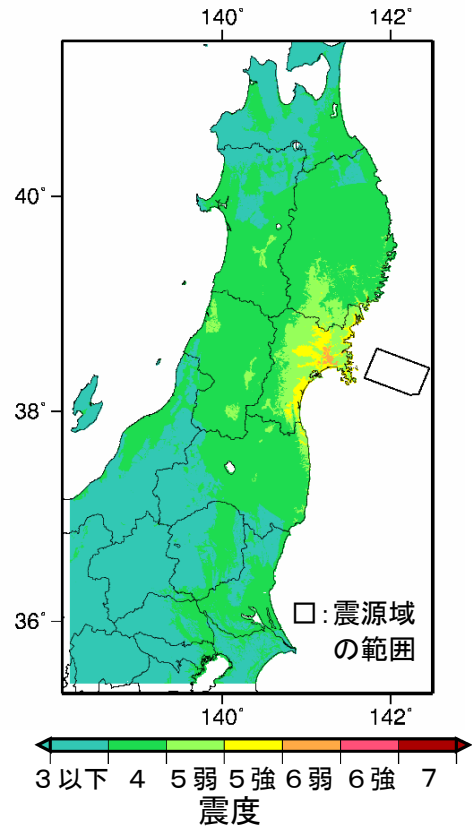


図 1.9 宮城県沖地震（A1）の簡便法による予測震度分布図（地震調査委員会, 2009b）

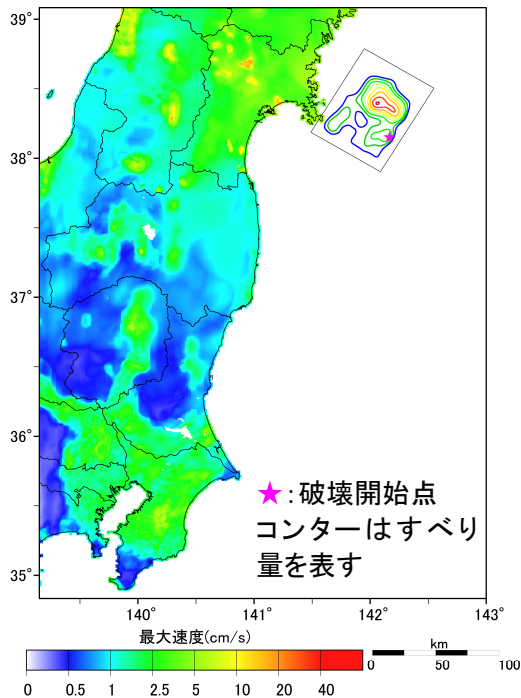


図 1.10 宮城県沖地震における長周期地震動の最大速度の分布

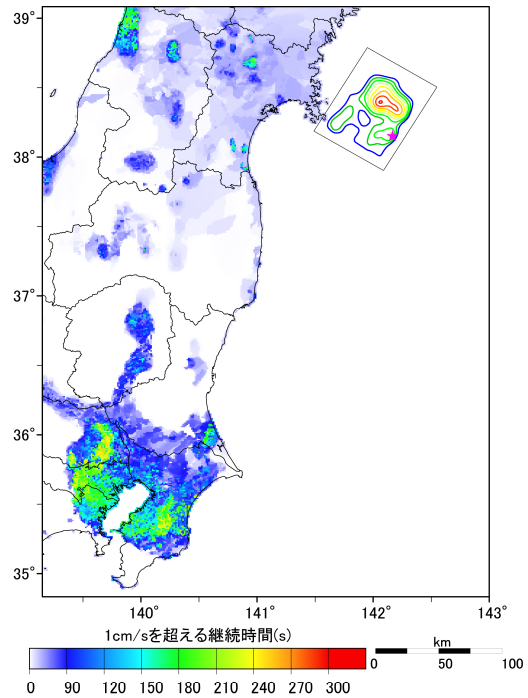


図 1.11 宮城県沖地震における長周期地震動の継続時間の分布

そこで長周期地震動予測地図では、別の方法で揺れの強さや揺れの継続時間を表現します。図 1.10 や図 1.11 がその例になります。図 1.10 は、速度波形で表した長周期地震動の揺れ幅（振幅）の最大値（最大速度）の面的な分布を示したものです。水平 2 方向（NS 方向と EW 方向）の速度のうち大きい方を表示しています（単位：cm/s）。本来、工学的基盤上の地中の揺れを計算していますが、長周期地震動の場合は、これを地表の揺れと同程度と見なすことが出来る特徴があります。また図 1.11 は、速度 1 cm/s 以上の揺れが継続する時間の分布を示しています。これらは、図 1.3 に挙げた地震動の特性を示す要素のうち、振幅特性と経時特性を示しています。

また、周期特性を示す図として、周期 5 秒の速度応答スペクトルの分布を図 1.12 に示します。こちらも水平 2 方向のうち大きい方を表示しています（単位：cm/s）。前節で述べたように高層ビルなどの構造物は、その固有周期が長周期地震動の周期に一致するとき、非常に大きな影響を受けて揺れます。この構造物の揺れ方を応答と呼びますが、ある固有周期の構造物の応答の大きさを見積もる目安として、応答スペクトル（10 頁のコラム参照）という指標がしばしば用いられます。この図は、地表の揺れに対して、固有周期が 5 秒である構造物（50 階程度の超高層ビルなど）がどのように揺れるかを、応答の速度最大値の分布で表したものです。この他にも本報告書では周期 7 秒と周期 10 秒の図を作成しています（第 4 章を参照）。図に示す応答速度は長周期構造物の代表的な揺れの速度であり、その上層では、それ以上の揺れになる可能性があります。

図 1.9 と図 1.10 は地表の揺れ方を別の表現で示したものであるため、直接比較することは難しくなっています。また、それぞれ影響を受ける構造物が異なり、固有周期が短い建物などは、図 1.10 の長周期地震動の影響をほとんど受けずに図 1.9 の震度に応じて揺れる一方、固有周期が長い長周期構造物は、図 1.10 の影響を受けて、それぞれの固有周期に応じて揺れる（図 1.12）こととなります。しかし定性的には次のように見ることもできるでしょう。図 1.9 の震度分布からは、仙台平野の東部では最大震度 6 弱の揺れとなっており、宮城県北西部や山形県内の一部の盆地、庄内平野などでは震度 5 弱となっているのに対して、関東平野では最大でも震度 4 程度しか予測されていません。一方、長周期地震動の観点から見た場合は、震源に近い場所と同等程度の長周期の揺れ（図 1.10）が関東平野で長く続きます（図 1.11）。さらに、固有周期が短い建物などが震度 4 以下程度で揺れているのに対し、周期 5 秒の長周期構造物では、

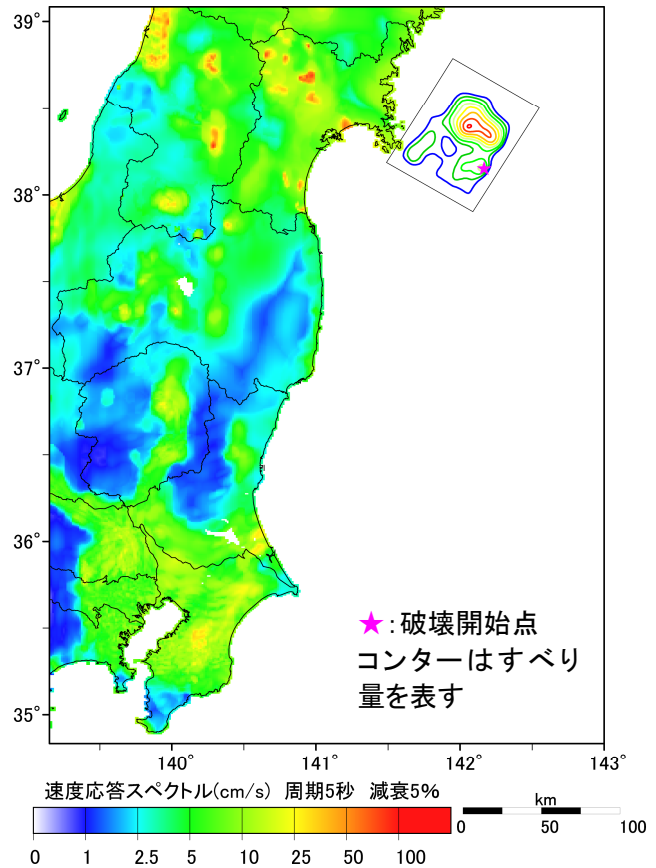


図 1.12 宮城県沖地震における速度応答スペクトル（周期 5 秒）の分布

震源に近い場所と同等か、所によってはそれ以上の揺れが予測されます（図1.12）。長周期構造物が揺れ続ける時間は地表の揺れの継続時間（図1.11）が一つの目安になりますが、それよりも長く揺れる場合があります。また震源に近い場所では、長周期地震動による揺れは比較的大きいですが、継続時間は必ずしも長くはないこともわかります。このように、従来の震度と長周期地震動では、影響を受ける建物などが異なるほか、震源から遠く離れた場所における分布の状況などに、しばしば明瞭な違いが現れることがあります。

第2章から第4章までに示す長周期地震動予測地図と、参考として掲載する「全国地震動予測地図」から抜粋したそれぞれの地震の予測震度分布図を比較しながら、それぞれの地震に対する各地域の揺れ方の特徴を読み取ってみると、長周期地震動の意味をより深く理解できるでしょう。

コラム：速度応答スペクトルとは？

応答スペクトルとは、いろいろな固有周期（建物や構造物が揺れやすい周期）を持つさまざまな建物や構造物に対して、地震動がどの程度の揺れの強さ（応答）を生じさせるかをわかりやすく示したものです（図を参照）。

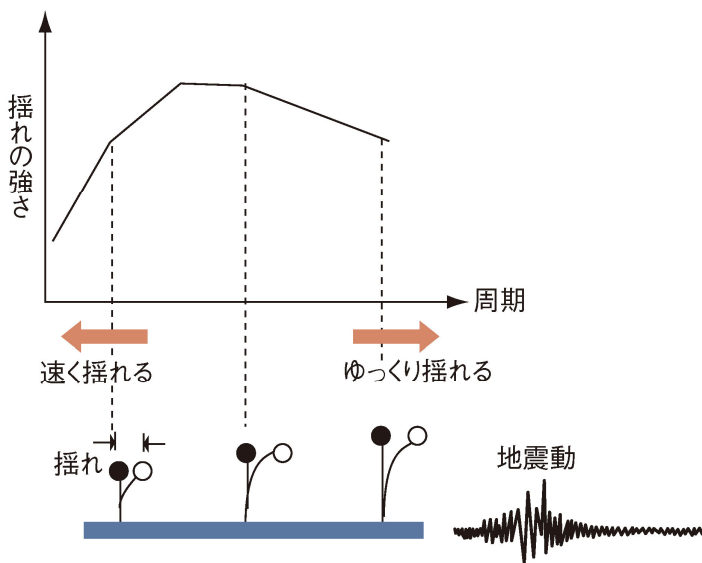


図 応答スペクトルの模式図
(原子力安全委員会, 2007)

建物や構造物の揺れは、その固有周期や減衰定数（揺れが時間とともに弱まっていく程度。減衰率：本予測地図では5%としています。）と同じ固有周期や減衰定数をもつ振り子の揺れとして計算され、その最大値が採用されます。また、揺れの強さは振り子の振れ幅（変位）だけでなく、その単位時間における変化（つまり速度）やその変化率（つまり加速度）でも表現されます。速度応答スペクトルとは速度を評価量とした応答スペクトルのことです。