

長周期地震動予測地図

瀬瀬 一起／三宅 弘恵

●東京大学地震研究所

1. はじめに

会誌編集委員会（境委員長、藤田幹事、森川担当委員）の依頼により、特集「長周期地震動と構造物に及ぼす影響」の冒頭の記事を書かせていただいている。2009年9月10日にいただいた依頼内容は「地震本部の長周期地震動予測地図（試作版）が公表される見通しであることから、長周期地震動地図に関して」というものであった。したがって、この記事は9月17日に公表された同地図の報告書¹⁾や、同じような依頼による日本建築学会地震震動シンポジウムの発表²⁾に類似せざるを得ないことをあらかじめお断りしておく。

2. 長周期地震動とは

長周期地震動^{3),4)}は、2003年十勝沖地震（マグニチュード（以下、Mと略記）8.0）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の原因のひとつとして注目されるなど、地震動による災害を考える上で、主要な課題のひとつとなっている。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る。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400 km離れたメキシコシティー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った^{5),6)}。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－」⁷⁾（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のひとつとして、長周期地震動の調査研究が挙げられている。

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が

それぞれ試作され、2009年9月に公表された。ここでは、この試作版で用いられている手法およびその予測結果について地震調査委員会（2009）¹⁾、瀬瀬・他（2008, 2009）^{8),9)}に基づいて解説する。

3. 長周期地震動の予測手法

長周期地震動といえども地震動（地震による地表や地中の揺れ）の一種であるから、それを予測する手法は一般的な地震動を予測する手法と大きく異ならない。たとえば、地震本部地震調査委員会が2005年から毎年発行してきた「全国を概観した地震動予測地図」や2009年7月に公表した「全国地震動予測地図」では、一般的な地震動を『震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）』（たとえば地震調査委員会（2008）¹⁰⁾の付録3を参照）に基づいて予測している。そこでは地震動、中でもこれらの「地震動予測地図」が対象とするような強い揺れ（強震動）の予測手法を、震源特性（震源モデルまたは震源断層モデル）、地下構造モデル、強震動計算、予測結果の検証という四つの構成要素に分けて記述している。

長周期地震動も基本的にこの「レシピ」に沿って予測されるが、一般的な地震動との第一の違いは、長周期地震動は地震動の短周期成分を含まないので、「レシピ」のうちこの短周期成分を統計的グリーン関数法で予測する部分が不要であるという点にある。また、短周期成分を含まないので、長周期成分と短周期成分とをハイブリッド合成法により合成する部分も必要がない。

第二に、試作版が対象とする地震はすべて海溝型地震であるので、活断層で発生する地震を対象とする震源モデルの部分が不要である。また、対象地震は海溝型地震のうちプレート境界地震と呼ばれる種類の地震である。一般に、プレート境界地震は活断層で発生する地震に比べ発生間隔が短く、かつ似通った震源モデルが繰り返すことが多いと言われている。そこで、過去の地震の震源モデルがわかっている場合、その震源モデルに基づいて長周期地震動の予測を行うこととした。一方、過去の地震の震源モデルがわかっていない場合には、「レシピ」の特性化震源モデルの部分に概ね沿って震源モデルを作成した。

第三に、長周期地震動は地下構造のうち浅い地盤構造に大きく影響されることが少ないという前提に立って、「レシピ」のうち「地下構造モデル・浅い地盤構造」の部分は省略された。それ以外の深い地盤構造と地震基盤以深の地殻構造については、「レシピ」における地下構造モデルの作成法(地震調査委員会(2008)¹⁰⁾の付録2参照)にしたがってモデル化された。特に、深い地盤構造に対しては長周期地震動予測における重要性を鑑み、標準的なモデル化手法¹¹⁾(図1)を新たに作成し、それに基づいて、0次モデルや0.5次モデルに比べ一段と精度の高い1次モデルが構築された。この標準的なモデル化手法は、プレート境界地震の場合に必要なプレートや下部地殻などのモデルにも適用可能である。

4. 長周期地震動予測地図の見方

ここでは、長周期地震動予測地図の見方について、宮城県沖地震を例に示す。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」¹²⁾の一種に相当する。そのうち図2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を示している。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る。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2と同様の表現をすることができない。

そこで長周期地震動予測地図では、図3や図4のような別の表現方法を用いることとした。図3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、水平2方向(NS方向とEW方向)の最大速度のうち大きい方を表示している(単位:cm/s)。また図4は、速度1cm/s以上の揺れが継続する時間の分布を示している。これらは、地震動の特性を示す要素のうち、振幅特性と経時特性を表している。

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(減衰率5%)の分布を図5に示す。こちらも水平2方向のうち大きい方を表示している(単位:cm/s)。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(40階程度の超高層ビルなど)がどの

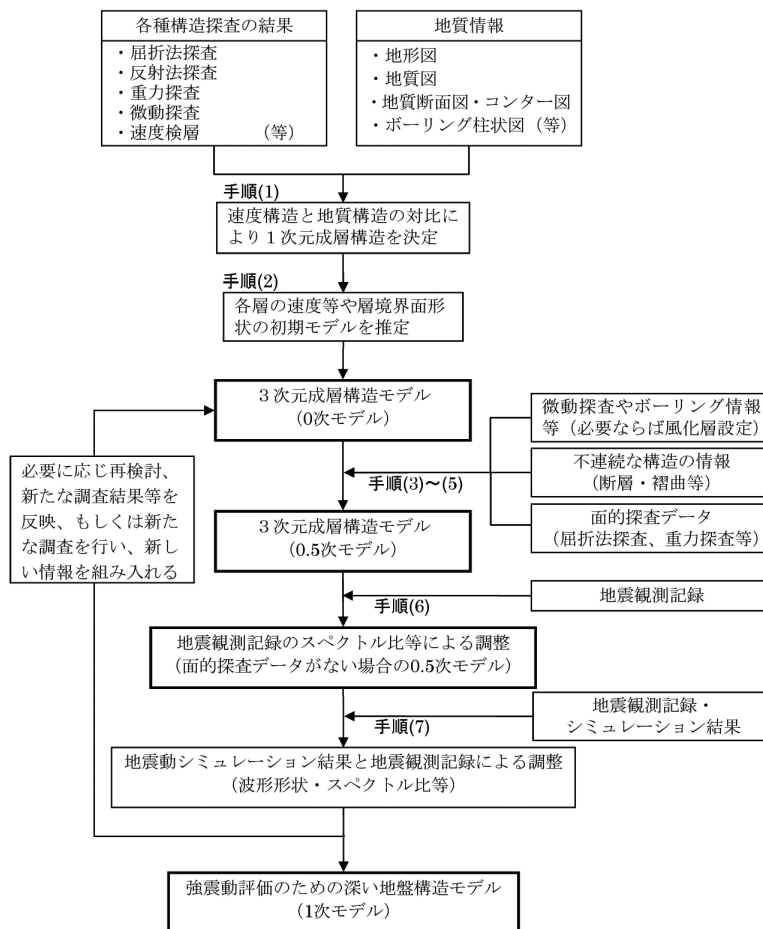


図1 深い地盤構造の標準的なモデル化手法^{10),11)}

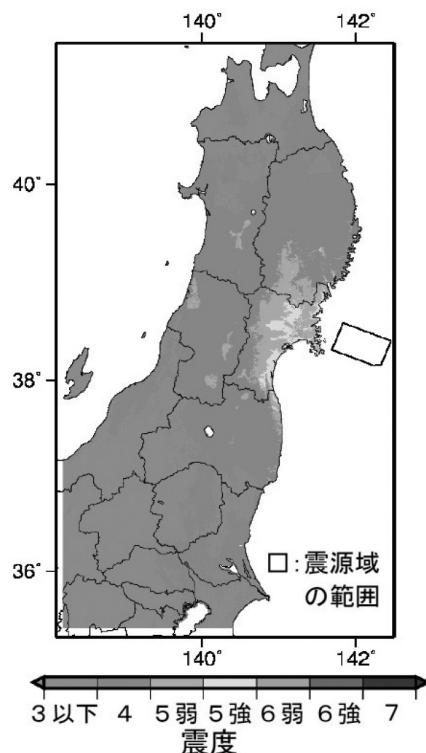


図2 宮城県沖地震A1の簡便法による予測震度分布¹⁰⁾

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ある。

この他にも、本予測地図では周期7秒と周期10秒の図が含まれている。なお、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る。

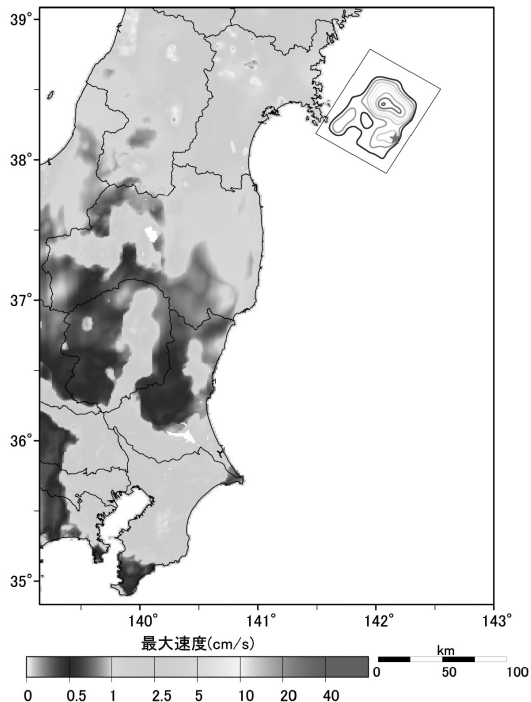


図3 宮城県沖地震における長周期地震動の最大速度分布¹⁾

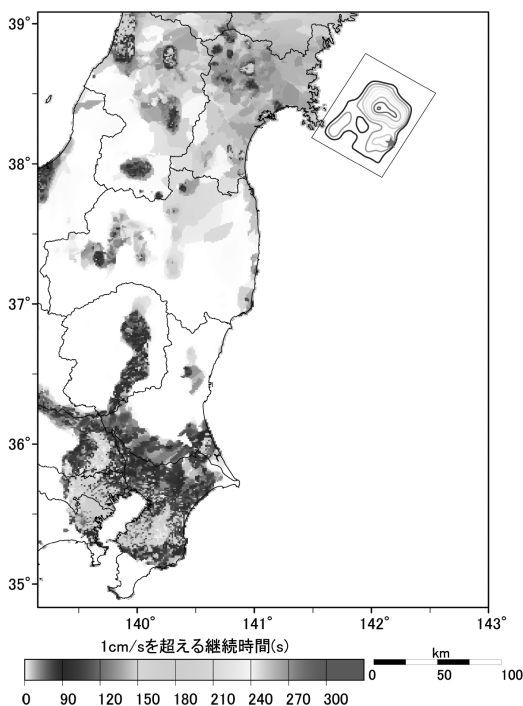


図4 宮城県沖地震における長周期地震動の継続時間の分布¹⁾

図2と図3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い。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3の長周期地震動の影響をほとんど受けずに図2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2の影響を受けて、それぞれの固有周期に応じて揺れる(図5など)ことになる。

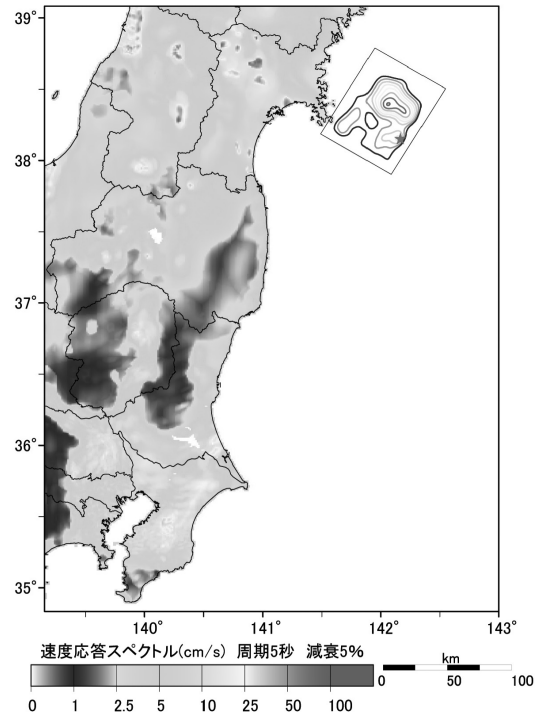


図5 宮城県沖地震における速度応答スペクトル(周期5秒)の分布¹⁾

しかし、定性的には次のように見ることもできるだろう。図2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ない。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3)が関東平野で長く続く(図4)。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、震源に近い場所と同等か、場所によってはそれ以上の揺れが予測されている(図5)。長周期構造物が揺れ続ける時間には地表の揺れの継続時間(図4)が一つの目安になるが、それよりも長く揺れる場合がある。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が、継続時間は必ずしも長くはないこともわかる。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る。

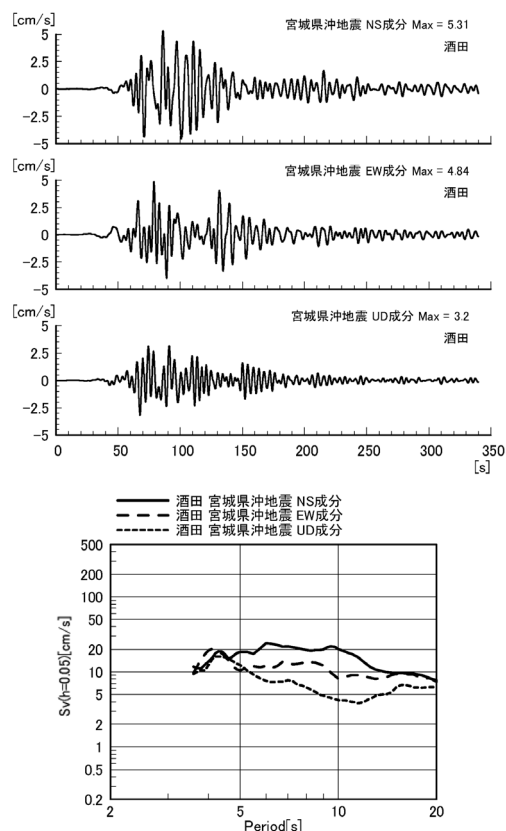


図6 宮城県沖地震において計算された速度波形と速度応答スペクトル(酒田市役所)¹⁾

以上のような地図のほかに、長周期地震動のいろいろな性質を一挙に示す図として、都府県庁などいくつかの代表地点で計算された長周期地震動の速度波形と速度応答スペクトルを付け加えた(図6)。なお、速度応答スペクトルの図からわかるように、示された長周期地震動の速度波形のうち、相応の精度を持っているのは周期3.5秒以上の成分である。

5. 想定東海地震の場合

2009年試作版のうち、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は、前節で長周期地震動予測地図の見方の一例としてすでに示した。この節では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のうち、首都圏への影響の大きい想定東海地震を対象地震とした地図を示す。想定東海地震は南海トラフ沿いを震源とする地震のうち、駿河湾～浜名湖沖の領域を震源とするM8クラスの地震である。過去に南海トラフで発生した地震のうち、この領域だけを震源域とした地震は知られていないが、1944年の東南海地震(昭和東南海地震)

の際に破壊せずに残ってしまった領域に相当しているため、想定東海地震の発生が切迫していると考えられている。

本予測地図では、中央防災会議(2001)¹³⁾による震源域を基本として、震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)¹⁰⁾の考え方を取り入れた震源モデルを設定し、関東地方から近畿地方に至る地域での長周期地震動予測を行った。計算手法や震源モデル、地下構造モデルの詳細は報告書の6～7章を参照されたい。

図7～9には長周期地震動の指標となる速度応答スペクトルの周期5秒、7秒、10秒での分布を示す。それぞれの固有周期を持つ超高層ビルなどの長周期構造物においては、震源に近い地域では大きな揺れが予測されるが、それ以外にも関東平野や濃尾平野、大阪平野など、平野部で長周期地震動の揺れが大きいことがわかる。周期ごとの違いを見てみると、濃尾平野などでは特に5秒の揺れが大きく、関東平野では7、10秒での揺れが大きくなっている。これらは長周期地震動に大きな影響を与える、地下構造の違いを反映したものと考えられる。

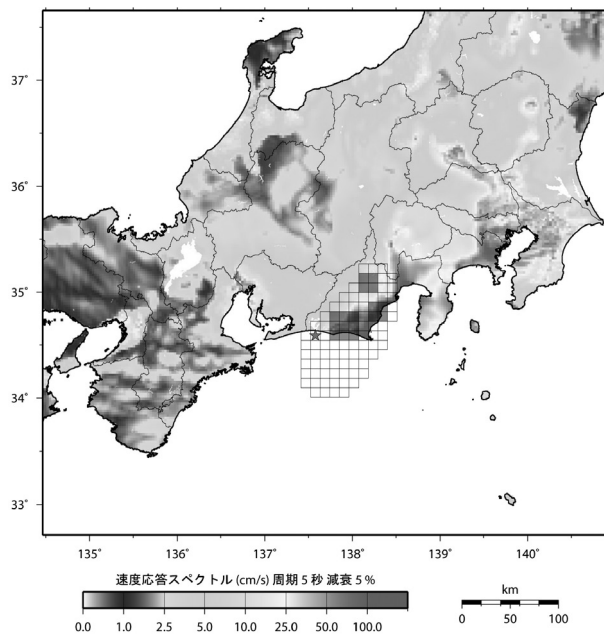


図7 速度応答スペクトル(周期5秒)の分布¹⁾

地表での速度として計算された長周期地震動の揺れ幅の最大値(最大速度)を分布図にしたもの、および速度1 cm/s以上の地表の揺れが継続する時間の分布図を報告書¹⁾に示した。これを見ると、想定東海地震に対して、最大速度は関東平野や震源に近い地域で大きい、継続時間は震源に近い地域では限定的である。それに比べて平野部では、関東平野に限らず濃尾平野、

大阪平野、富山平野、金沢平野などで継続時間が長く、ある程度の揺れ幅で数分間も揺れ続けることが予想される。なお、長周期地震動が卓越している場合には、超高層ビルなどの揺れの継続時間は、地表の地震動よりも長くなる場合がある。

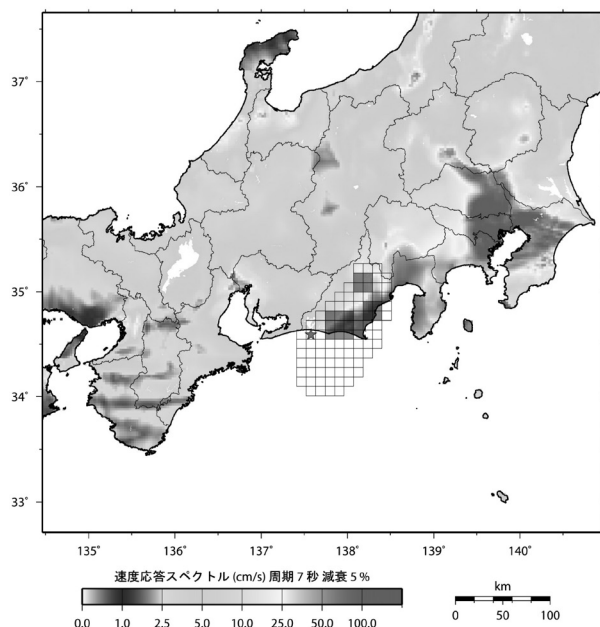


図8 速度応答スペクトル(周期7秒)の分布¹⁾

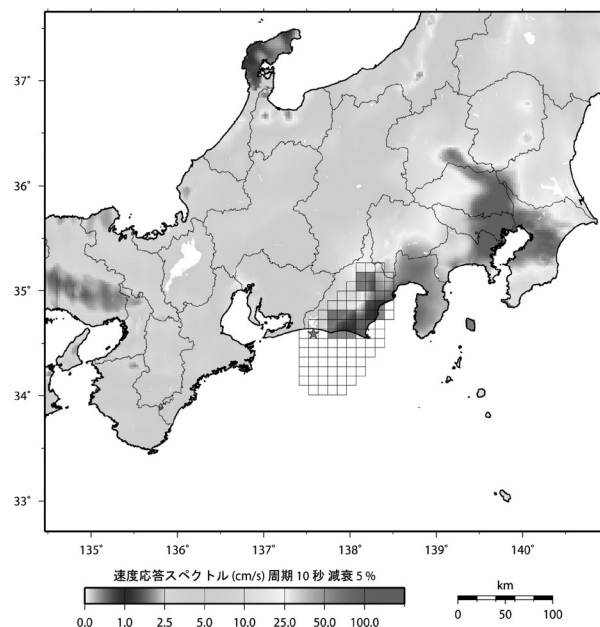


図9 速度応答スペクトル(周期10秒)の分布¹⁾

図10には、いくつかの代表地点で計算された長周期地震動の速度波形と速度応答スペクトルのうち、東京都庁での速度波形・速度応答スペクトルを示した。なお、ここでも示された速度波形のうち、相応の精度を持っているのは周期3.5秒以上の成分である。

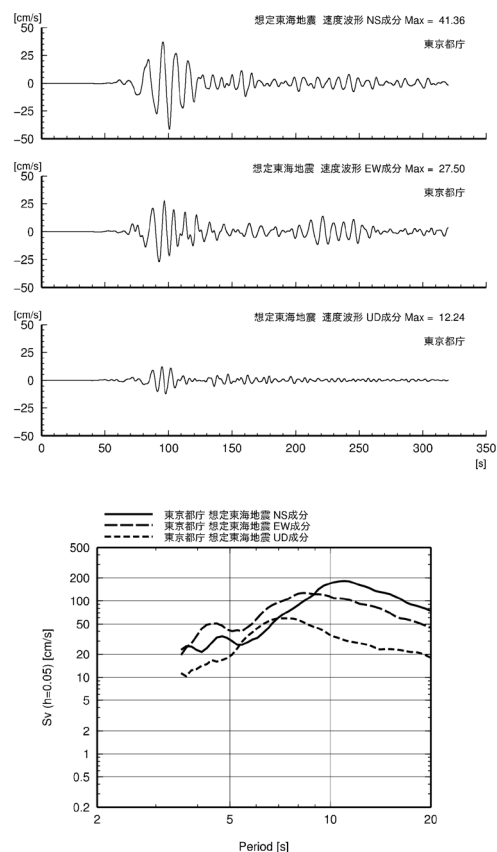


図10 東京都庁での速度波形と速度応答スペクトル¹⁾

6. 課題と将来展望

この2009年試作版で初めて、地震本部から長周期地震動の予測地図が公表されることになった。本予測地図では、海溝型地震の長周期地震動が、堆積層・地殻・海域などを含む地下構造の1次モデルを用いて決定論的に予測されていることが大きな特徴である。長周期地震動予測地図は従来の「全国を概観した地震動予測地図」¹⁰⁾や最近公表された「全国地震動予測地図」¹²⁾、中でも震源断層を特定した地震動予測地図などの経験を活用することにより作成されたが、以下のような課題が記されている。

1. 過去のイベントの震源モデルが得られている東南海地震、宮城沖地震については、それらを前イベント震源モデルとして用いた。想定東海地震については、そのようなモデルがないため、特性化震源モデルを作成したが、海溝型地震の特性化震源モデルに関しては、内陸地殻内地震（活断層等で発生する地震）に比べて、さらなる研究が必要な部分が残っている。
2. 今回、長周期地震動予測地図を作成した地域は、全

国的に見た場合、まだ限定的なものになっている。また、これらの地域を除くと、地下構造の1次モデル化が行われた地域がまだ少なく、今後、全国1次地下構造モデルの構築に向けて検討を進める予定である。

3. 周期が3秒以上の長周期地震動の予測を目指して検討を進めたが、本予測地図では数値計算上の問題などにより周期3.5秒以上の長周期地震動のみを計算した。将来的には工学的な利用の需要を念頭に、周期2～3秒程度以上の予測を目指したいと考えている。

特に、課題1に記した理由により、想定東海地震の長周期地震動は、周期5秒未満において実際の場合より小さめに計算されている可能性がある。

これらを踏まえて、長周期地震動予測地図に関し、地震本部では次のようなロードマップが考えられている。まず、南海地震を対象とした長周期地震動予測地図の2010年試作版に向けて検討を進める。南海地震はマグニチュード8.4前後と非常に規模の大きな地震なので、その長周期地震動が影響を及ぼす範囲も非常に広がる。そのため、2010年試作版の検討の過程で同時に課題2の何割かを解決することにより、その時点で暫定的な全国1次地下構造モデルが公表される予定である。

引き続き、2010年度以降は、新総合基本施策に則り、長周期地震動予測地図の作成が本格的に推進される予定である。課題1、3の解決を目指し、特性化震源モデルや数値計算手法の調査研究、地下構造モデルの改良等を進めるとともに、「防災・減災に向けた工学及び社会科学的研究を促進するための橋渡し機能の強化」に向けて、予測地図の提示方法に関する調査研究が行われる。また、試作版で扱った想定東海地震、東南海地震、宮城県沖地震以外の主要な海溝型地震や、内陸の長大な活断層を対象とした長周期地震動の予測も試みられる予定である。併せて、試作版と同じように、それぞれの地震の長周期地震動が影響を及ぼす範囲の地下構造の改良と1次モデル化を図って課題2を解決し、全国1次地下構造モデルの完成が期待される。また、それぞれの海溝型地震や長大活断層が単独で活動する場合だけではなく、複数の同時に活動する（連動する）ことによって一層大きな長周期地震動を発生させるような場合についても検討される予定である。さらには、長周期地震動予測に関連して新たな知見が得られれば、必要に応じて試作版で扱った海溝型地震も再び検討対象となる可能性がある。

謝辞

本予測地図の実現には文献8)、9)の共著者の方々、および文部科学省地震・防災研究課各位の尽力に負うところが大きい。また、地震本部の地震調査委員会、同強震動評価部会、同強震動予測手法検討分科会、同地下構造モデル検討分科会の主査・委員各位による議論は有益でした。記して感謝致します。

参考文献

- 1) 地震調査委員会:「長周期地震動予測地図」2009年試作版, 66pp., 2009.
- 2) 額部一起: 地震本部による長周期地震動予測地図の試作版, 第37回地盤震動シンポジウム, pp.11-16, 2009.
- 3) 座間信作: やや長周期の地震動, 地震2, 46, 329-342, 1993.
- 4) 座間信作: 長周期地震動, 地震2, 61, S433-S440, 2009.
- 5) 工藤一嘉: 地震に伴う諸現象と災害, 藤井敏嗣・額部一起(編)「地震・津波と火山の事典」, 丸善, pp.46-60, 2008.
- 6) Koketsu, K. and H. Miyake: A seismological overview of long-period ground motion, J. Seismol., 12, pp.133-143, 2008.
- 7) 地震調査研究推進本部:「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－」, 37pp., 2009.
- 8) 額部一起, 三宅弘恵, 藤原広行, 橋本徹夫: 全国1次地下構造モデルと長周期地震動予測地図の構築に向けて, 日本地球惑星科学連合2008年大会, S225-001, 2008.
- 9) 額部一起, 三宅弘恵, 引間和人, 木村武志, 古村孝志, 藤原広行, 橋本徹夫, 石井透, 吾妻瞬一, 室谷智子, 早川崇, 渡辺基史, 鈴木晴彦:「長周期地震動予測地図」2009年版の作成－想定東海地震・東南海地震・宮城県沖地震－, 日本地球惑星科学連合2009年大会, S221-015, 2009.
- 10) 地震調査委員会:「全国を概観した地震動予測地図」2008年版, 94pp., 2008.
- 11) Koketsu, K., H. Miyake, Afnimar, and Y. Tanaka: A proposal for a standard procedure of modeling 3-D velocity structures and its application to the Tokyo metropolitan area, Japan, Tectonophysics, 472, pp.290-300, 2009.
- 12) 地震調査委員会:「全国地震動予測地図」別冊2 震源断層を特定した地震動予測地図, 352pp., 2009.
- 13) 中央防災会議, 2001, 東海地震に関する専門調査会報告, <<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/20011218/siryou2-2.pdf>>, 17pp.