南海トラフ巨大地震による長周期地震動の評価

田　中　清　和　　野　畑　有　秀

Evaluation of Long-Period Ground Motion during Huge Earthquakes along the Nankai Trough

Kiyokazu Tanaka　　Arihide Nobata

Abstract

Long-period ground motion from huge earthquakes is known to cause significant resonance and severe damage in high-rise buildings. A huge earthquake is expected to occur along the Nankai Trough in the near future. In order to evaluate the long-period ground motions in major metropolitan areas of Japan during the predicted huge earthquake along the Nankai Trough, we simulated the long-period ground motion using the three-dimensional finite difference method. We assumed seismic rupture models such as the M9.0 earthquake and other coupled earthquakes published by the government to determine the characteristics of the seismic response spectra level and contribution of seismic fault zones. Changing the seismic fault depth was found to affect the predicted long-period ground motion by increasing or decreasing the response spectral level.

概　　要

2011年東北地方太平洋沖地震の際に超高層建物等の長周期構造物が大きく揺れる現象が観測され一部建物に実被害が発生したことから，近い将来の発生が予想されている南海トラフ巨大地震に伴う長周期地震動による超高層建物等での被害発生の懸念が高まっている。この南海トラフ巨大地震で予測される主要都市での長周期地震動について評価するため，国が想定するM9地震(四連動地震)，三連動，二連動の各ケースを対象に，三次元有限差分法による長周期地震動予測計算を実施し，各想定震源ケースごとの影響度の違いや地震応答スペクトル振幅についての知見を得た。また，震源深さの変更が地殻・プレート構造との関係により地震動レベルに影響を与える，との結論を得た。

1.　はじめに

近い将来の発生が懸念されている南海トラフ沿いの巨大海溝型地震に伴う長周期地震動については，従来から超高層建物等の長周期構造物に与える影響が問題視されてきた。2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)において実際に震源から遠く離れた東京や大阪で超高層建物が大きく揺れる現象が認められ一部建物の非構造部材に実被害が発生したことで，改めて被害発生の懸念が高まっている。一方，国の防災対策においては，1707年宝永地震級として中央防災会議(2003) [1)]が想定していた東海, 東南海, 南海地震の同時発生（三連動地震, マグニチュードM8.7）に代えて, 内閣府(2012) [2)]から東北地方太平洋沖地震を受けた「あらゆる可能性を考慮した最大クラス」として想定震源領域を約2倍に拡大した南海トラフ巨大地震(M9.0)の被害想定が公表されている。このようなM9地震が発生した場合には長周期成分がより多く含まれた地震動を伴うことで被害を増大させる恐れがある。このため，超高層建物等の長周期構造物における耐震設計・地震対策のためには南海トラフ巨大地震による長周期地震動の特性を適切に予測評価することが重要である。

そこで本論文では，南海トラフ巨大地震による長周期地震動のレベルを把握することを目的に，国が想定する南海トラフM9地震（東海・東南海・南海・日向灘域のいわゆる四連動地震）および三連動地震，二連動地震を対象として三次元有限差分法により長周期地震動の試算を実施した。三次元有限差分法による南海トラフ地震の長周期地震動の試算結果については，比較のため国土交通省(2010) [3)]の長周期地震動対策試案に示された経験的手法を用いて算定した結果を併示した。また，試算における地震動レベルのばらつきへの影響要因として，震源深さ変更と深部地盤・地殻プレート構造が与える影響について検討した。

2.　三次元有限差分法による長周期地震動予測シミュレーション解析の方法

2.1　解析条件

南海トラフ巨大地震の各想定震源ケースによる主要都市での長周期地震動の評価のために，三次元有限差分法による長周期地震動予測シミュレーションを実施した。

長周期地震動のシミュレーション解析計算には不等間隔格子のスタッガードグリッドを用いた三次元有限差分法 [4), 5)]を用いた。関東以西の西日本地域を対象として，

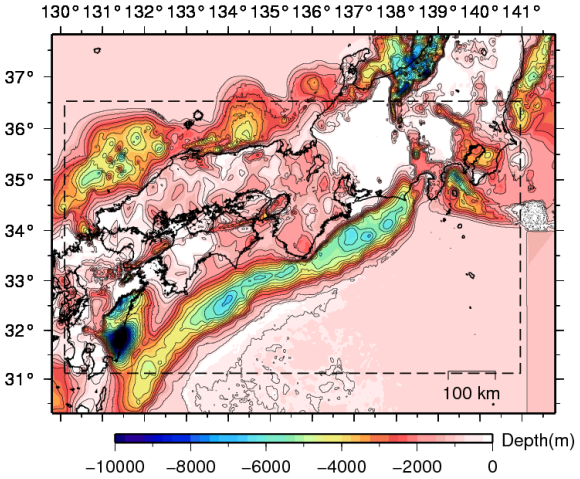


Fig. 1　差分モデル化範囲と地震基盤構造の等深度線図
(Vs3.2km/s層上面)
Region of Finite-Difference Modeling and Depth Contours
for the Sediment-Bedrock Interface

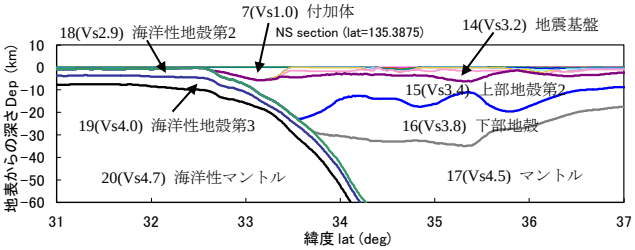


Fig. 2　地盤構造モデルの断面形状
（大阪平野を通るNS断面）
Vertical Cross Sections of the Underground Structure Model

地殻から工学的基盤(Vs500m/s)までの深部地盤の三次元不整形構造をモデル化して解析を実施した。解析モデル化範囲は，東西993km，南北600km，深さ61kmの領域である。Fig. 1 にモデル化範囲を破線で示す。解析に当たっては時間刻みを0.011秒，差分メッシュ間隔を水平0.2km，上下0.2km～0.6kmとして，最小S波速度500m/sの層において周期2.0秒以上の帯域で計算精度が確保されるように設定した。このときのグリッド数は約18億7690万格子（2999×4967×126），計算機メモリサイズは約290GBとなった。減衰の考慮についてはGraves [5]による手法を用いることとし，リファレンス周期T_0=5秒でTable 1 に示す所定のQ値となるように設定した。

2.2　地盤構造モデル

地盤構造については，現時点で最新の知見が反映されていると考えられる，地震調査研究推進本部が長期地震動予測地図2012年試作版 [6]のために構築した地下構造モデルに基づき設定することとした。なお，数値計算上の計算機メモリサイズ及び計算時間の抑制を意図してS波速度(Vs)500m/s層までの地盤構造による地震動予測を対象とするものとして，地震調査研究推進本部による地下構造モデルの最表層Vs350m/s層の地盤定数をVs500m/s層と同一の値へ単純に差替えて用いた。設定した地下構造モデルの地震基盤（Vs3.2km/s層上面）の深度分布をFig. 1 に，断面をFig. 2 に示す。地盤定数をTable 1 に示す。

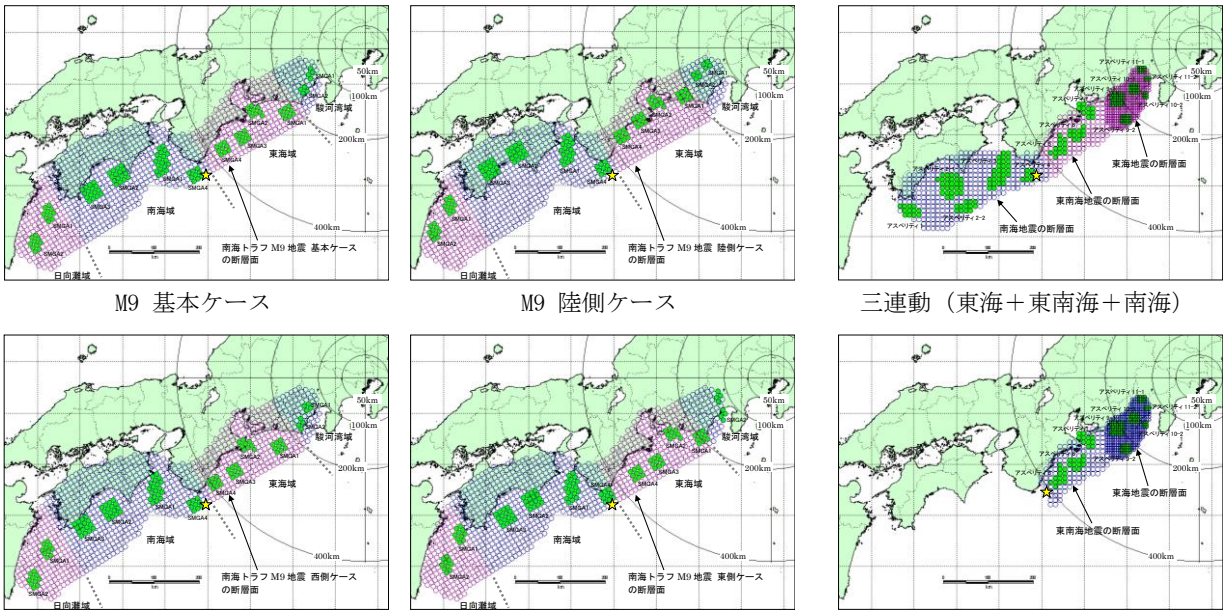
Table 1　三次元地下構造モデルの地盤定数
［推本長周期地震動予測地図2012年試作版を一部改］
Layer Parameters of Underground Structure Model

Layer	Vp [km/s]	Vs [km/s]	Density [t/m^3]	Q value	備考
1	1.8	0.5	1.95	100	※原地盤モデルの第1層（Vs0.35km/s）の地盤定数を第2層と同一に置換。
2	1.8	0.5	1.95	100	
3	2.0	0.6	2.0	120	
4	2.1	0.7	2.05	140	
5	2.2	0.8	2.07	160	
6	2.3	0.9	2.1	180	
7	2.4	1.0	2.15	200	付加体を含む
8	2.7	1.3	2.2	260	
9	3.0	1.5	2.25	300	
10	3.2	1.7	2.3	340	
11	3.5	2.0	2.35	400	
12	4.2	2.4	2.45	400	
13	5.0	2.9	2.6	400	近畿圏での地震基盤
14	5.5	3.2	2.65	400	地震基盤（上部地殻第1層）
15	5.8	3.4	2.7	400	上部地殻第2層
16	6.4	3.8	2.8	400	下部地殻
17	7.5	4.5	3.2	500	マントル
18	5.0	2.9	2.4	200	海洋性地殻第2層（フィリピン海PL）
19	6.8	4.0	2.9	300	海洋性地殻第3層（フィリピン海PL）
20	8.0	4.7	3.2	500	海洋性マントル（フィリピン海PL）
21	5.4	2.8	2.6	200	海洋性地殻第2層（太平洋プレート）
22	6.5	3.5	2.8	300	海洋性地殻第3層（太平洋プレート）
23	8.1	4.6	3.4	500	海洋性マントル（太平洋プレート）

2.3　震源モデル

想定震源モデルには，内閣府(2012) [2]が想定する南海トラフM9地震（東海・東南海・南海・日向灘の四連動地震，モーメントマグニチュードMw9.0）の4破壊ケース（基本，陸側，東側，西側），および中央防災会議(2003) [1]が想定する東海・東南海・南海地震の同時発生ケース（三連動地震，Mw8.7），東海・東南海地震の同時発生ケース（二連動，Mw8.3）と東南海・南海地震の同時発生ケース（二連動地震，Mw8.6）を採用した。

内閣府(2012) [2]による南海トラフM9地震は，2011年東北地方太平洋沖地震を受けた「あらゆる可能性を考慮した最大クラス」として想定された地震であり，地震規模がM9.0と巨大であることから長周期成分がより多く含まれた地震動を伴うことが予想される地震である。基本となる断層破壊ケースに対して，強震動生成領域と呼ばれる強い地震波を発生する領域の配置を，陸側へ移動させた場合，東側へ移動させた場合，西側へ移動させた場合が想定されており，地域によって各破壊ケースによる



M9 基本ケース　　M9 陸側ケース　　三連動（東海＋東南海＋南海）

M9 西側ケース　　M9 東側ケース　　二連動（東海＋東南海）

（a）M9地震（内閣府2012想定）　　（b）連動地震（中央防災会議2003想定）

Fig. 3　想定地震の断層面位置
（○印は要素断層位置(緑色塗はアスペリティまたは強震動生成領域)，☆印は破壊開始点の位置）
Location of Fault Models of the Nankai Trough Earthquakes

地震動の大きさが異なることで予測結果に幅が生じることが予想されるため，これら4破壊ケースを対象とした。

一方，中央防災会議(2003) [1]による想定地震は，東北地方太平洋沖地震の発生以前に，過去に発生した地震の震度分布再現を基に想定された地震であり，例えば東海，東南海，南海地震の三連動地震は1707年宝永地震級として想定されている。すなわち，より現実性が高く発生の可能性が高い想定地震であると言えることから，想定ケースの中で過去の発生地震に対応する連動3ケースを採用して対象とした。

Fig. 3 に想定地震の断層面位置を示す。図中の○印は断層面を構成する要素断層，☆印は断層破壊の開始点の位置である。各震源ケースの詳細な断層パラメータは各機関からの公開データを使用して設定し，想定震源モデルの各要素断層を点震源でモデル化した。断層面の破壊は，破壊開始点から放射状に拡がり東西に伝播する。各点震源の震源時間関数については，中村・宮武(2000) [7]によるすべり速度時間関数に要素断層内でのユニラテラル破壊仮定時の破壊伝播効果を加味した震源時間関数を作成し，これを複数のCosine型関数で近似して設定した。なお，内閣府(2012) [2]によるM9地震では，断層域について従来の東海・東南海・南海地震という領域区分ではなく，プレート形状の変化や過去の地震の境界位置に基づく4領域（駿河湾域，東海域，南海域，日向灘域）に分割している。M9地震の断層面位置図ではこの領域区分を示した。

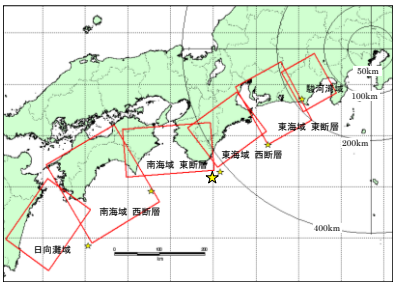
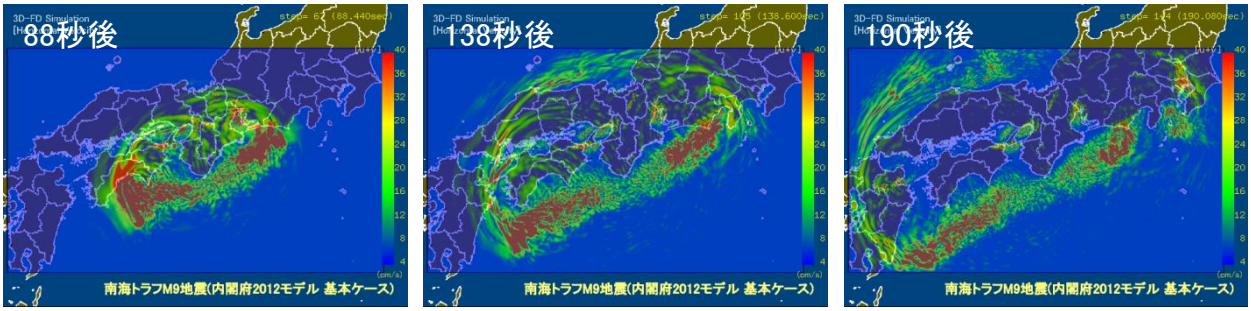


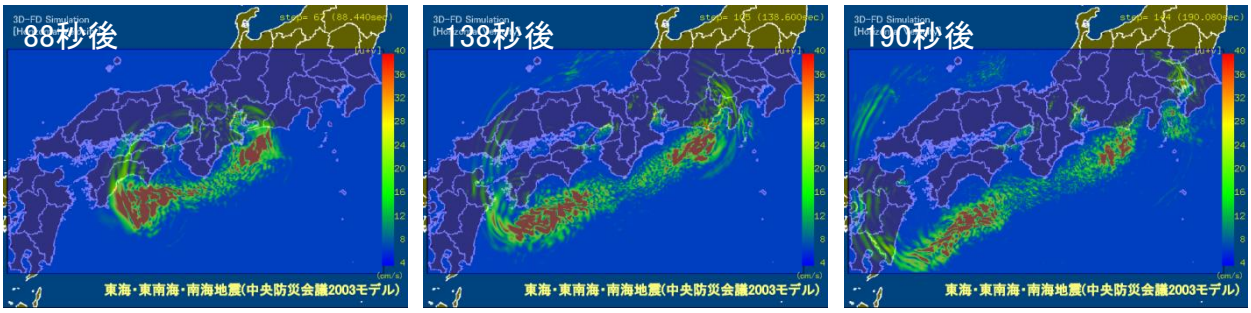
Fig. 4　国交省長周期対策試案の方法に用いた想定地震の断層面位置（内閣府想定M9地震の震源を矩形化）
Fault Model of the Nankai Trough M9 Earthquake for a Empirical Method

3.　国交省長周期対策試案の方法による地震動評価

三次元有限差分法による南海トラフ地震の長周期地震動予測結果を経験的手法による予測結果と比較するため，国土交通省(2010) [3]の「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案について」に示された設計用長周期地震動作成手法（以下，国交省試案の方法）を適用し，M9地震による工学的基盤波を求めた。国交省試案の方法は観測記録の統計処理から求められた応答スペクトルの距離減衰式やサイト増幅特性，位相特性に基づく簡易的な評価手法であり，詳細な地震動特性の評価はできないが，概略の地震動レベルの妥当性確認には有用と考えられる。計算に当っては内閣府想定の震源断層面を矩形断層6枚にモデル化し（Fig. 4 ），各断層毎に求めた波形を時刻

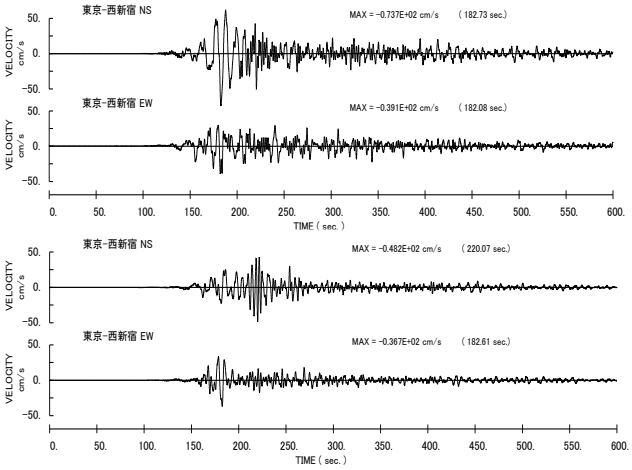


（a）南海トラフM9・基本ケース

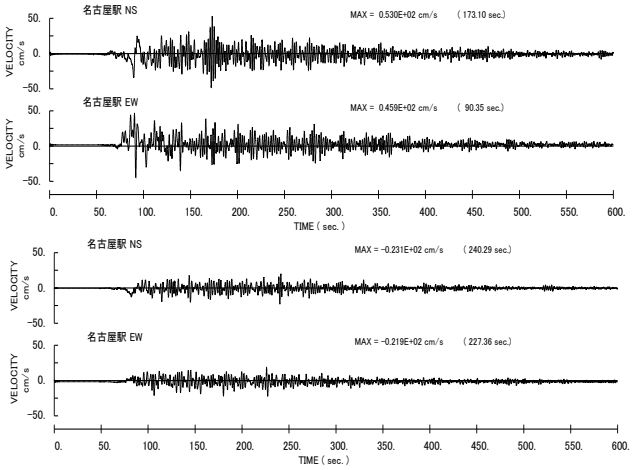


（b）三連動（東海＋東南海＋南海）

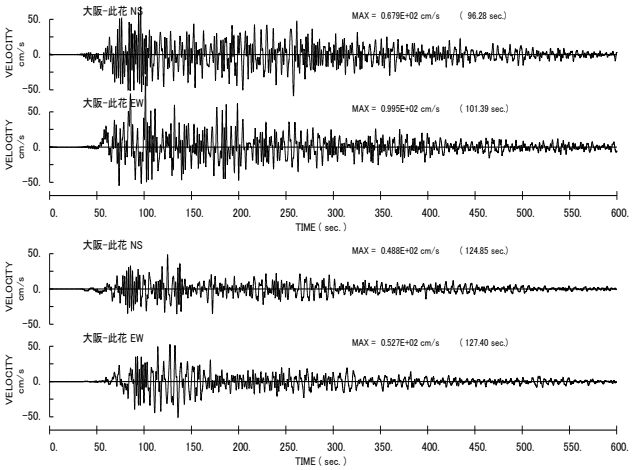
Fig. 5　南海トラフ地震による長周期地震動の波動伝播（速度振幅，水平方向成分絶対値，BPF 2～50 sec）
Synthetic Long Period Ground Motion of the Nankai Trough Earthquakes (Absolute Value of Horizontal Velocity Component)



西新宿



名古屋駅



大阪-此花

Fig. 6　南海トラフ地震の長周期地震動予測波形
（水平方向，速度波形，周期2秒以上）
上段：M9・基本ケース，下段：三連動
Calculated Long-period Ground Motion Waveforms of the Nankai Trough Earthquakes (Horizontal, Velocity Component)

歴で合成して断層全体波形とした。時刻歴位相波作成に用いる群遅延時間のばらつき（乱数列）を10通り与え，得られた地震波10波の平均スペクトルを求めた。

4.　計算結果

差分法計算によるM9地震・基本ケース時の長周期地震

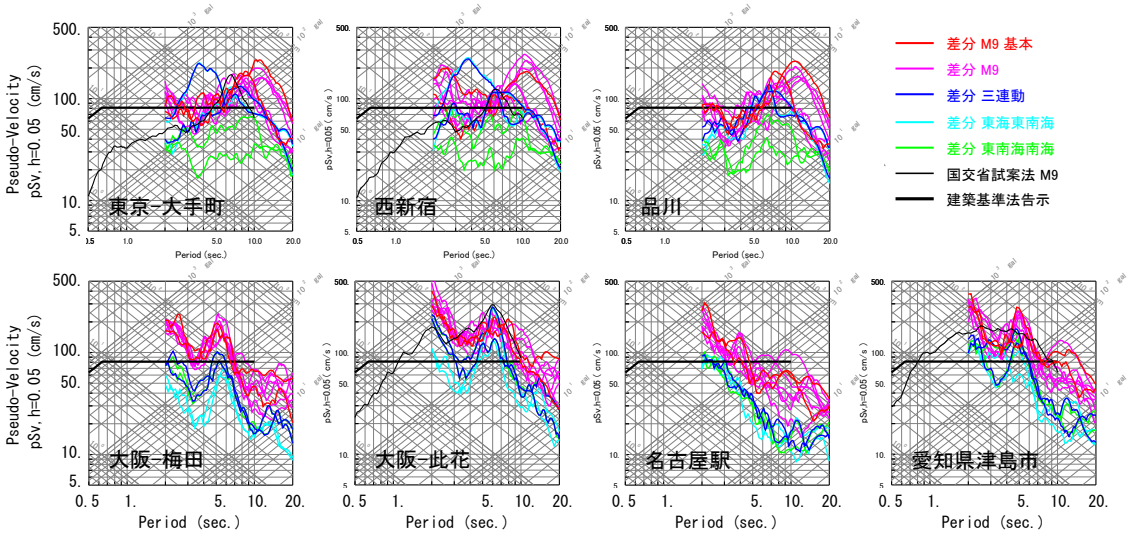


Fig. 7　南海トラフ地震の長周期地震動予測波の擬似速度応答スペクトル（減衰5%，水平成分）
Pseudo-velocity Response Spectra of Calculated Ground Motion of the Nankai Trough Earthquakes

動の波動伝播(水平成分，速度振幅，周期2秒以上)の様子をFig. 5 (a) に示す。図から発震約88秒後に大阪平野や濃尾平野で大振幅となっていること，約190秒後には関東平野の東京都区部付近にも大振幅が到達する一方で大阪平野や濃尾平野も継続して比較的大きな振幅の揺れとなっていることが確認できる。Fig. 5 (b) には三連動地震時の波動伝播の様子を示す。波動伝播の拡がりはM9地震と同様だが，地震規模の差を反映して波動の振幅が相対的に小さくなっている。

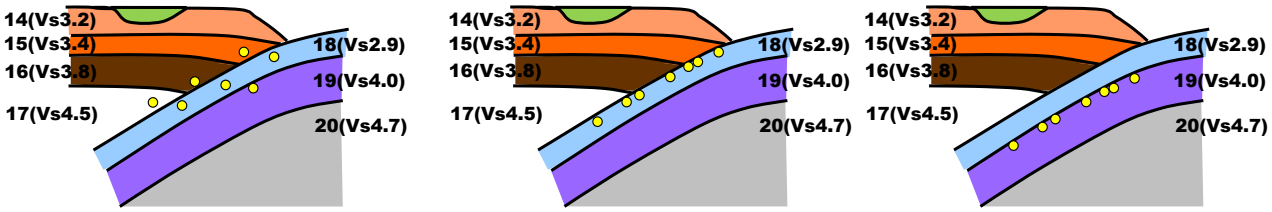
主要都市（東京，大阪，名古屋）の代表地点における差分法長周期地震動予測波形（周期2秒以上）をFig. 6 に，擬似速度応答スペクトル（減衰5%）をFig. 7 に示す。各都市圏の代表地点については，超高層ビルが比較的多く存在する地域および各都市が立地する堆積平野内で著名な地震観測地点の中から，東京では大手町（気象庁-東京千代田区大手町観測点）と西新宿，品川を，大阪では梅田と此花（KiK-net此花観測点）を，名古屋では名古屋駅と津島市（K-NET津島観測点）を選択した。応答スペクトルでは方向成分については区分せず示し，国土交通省(2010) [3]の長周期地震動対策試案の方法にて求めたM9地震の工学的基盤波を併せて示した。波形からは，地震規模の差違を反映してM9地震・基本ケースの方が三連動地震よりも大きな振幅となっていること，波形の概略の形状と周期成分の時刻歴変化性状は類似しているが異なる部分も多いことが読取れる。応答スペクトルからは，大阪や名古屋周辺ではM9地震・基本ケースの方が三連動よりも全周期帯で概ね1.2～2倍程度大きいのに対して，東京ではあまり顕著な差が見られない。これは，大阪や名古屋では地震規模の差違に加えて三連動地震に対してM9地震の震源域が北側に拡張されて震源距離が短くなっているが，東京では両地震間で震源距離の差違が少ないためと推察される。一方，大手町と西新宿サイトでは三連動地震のNS成分が周期3～5秒でM9地震よりも顕著なピークを示す。この傾向は大手町から新宿にかけての地域で共通に見られるが，例えば品川サイト等では見られない。西新宿の速度波形NS成分（Fig. 6 ）で時刻220秒付近に見られる波群の影響と考えられるが，発生原因の検討は今後の課題である。

さらに，応答スペクトルからは，M9地震の4破壊ケースのばらつき幅が，最小で2倍程度から最大で5倍程度であることが読取れる。また，東京では三連動と東海東南海が同程度の振幅で東南海南海の影響が相対的に小さいこと，大阪では逆に三連動と東南海南海が同程度で東海東南海が相対的に小さい，名古屋では3地震が同程度だがやや東南海南海が小さいという傾向が見られる。

差分法によるM9地震・基本ケースと国交省試案の方法によるM9地震の応答スペクトルを比較すると，此花では振幅レベル・周期特性ともに概ね同等の結果である。一方，東京の大手町と新宿では差分法がやや過大である。津島では振幅レベルは両手法で概ね同等であるが，差分法結果に見られる2秒，5秒のピークが国交省試案法には見られず周期特性は整合していない。但し，地震動予測におけるスペクトルの山谷の形状は震源過程の不均質性のばらつきの影響が大きく，これらの性状は今回の震源設定に限った傾向の可能性がある。

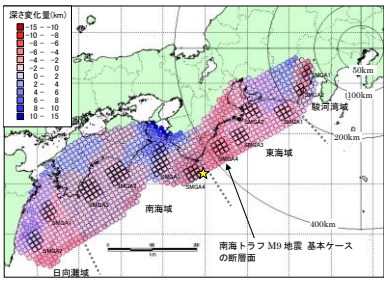
5.　震源深さと深部地盤・地殻構造の影響検討

前節までの差分法地震動予測計算に用いた震源モデルの深さは適用している地盤構造モデル（長周期地震動予測地図2012年試作版 [6]）のプレート境界深さとは一致していない。そこで，要素震源深さをフィリピン海プレート上面（海洋性地殻第2層Vs2.9km/s層上端，Table.1のNo.18層上端）の深さに変更した場合と，震源モデルの出典 [1), 2)]で想定されている地殻層（Vs3.82m/s）とS波速度が近い同プレート内の海洋性地殻第3層（Vs4.0km/s層，No.19層）上端深さに変更した場合について検討する。Fig. 8 に震源深さ変更の模式図を示す。プレート上面深

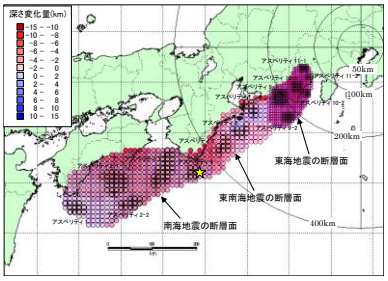


オリジナルの震源深さ（深さ変更なし）　海洋性地殻第2層上端（フィリピン海プレート上面）深さに変更　海洋性地殻第3層上端（フィリピン海プレート内）深さに変更

Fig. 8　プレート深さに合せるための震源深さ変更検討ケースの模式図（○印は震源位置）
Illustration of Changing Fault Depth Cases Fitted to Upper Interface of the Plate Structure



M9地震（内閣府2012想定　基本ケース）



三連動地震（中央防災会議2003想定）

Fig. 9　断層面位置と要素震源深さの変化量（プレート上面（海洋性地殻第2層上端）の場合）
Distribution of Fault Depth to Change

さに変更した場合について，Fig. 9 に断層面位置と要素震源深さの変化量を示す。

M9地震・基本ケースと三連動地震の計算結果の擬似速度応答スペクトルをFig. 10～11 に示す。M9地震では震源深さをプレート上端に変更しても差違が小さいが，海洋性地殻第3層上端に変更すると最大で半分程度に減少する。一方，三連動ではプレート上端深さでは増大，海洋性地殻第3層上端深さでは減少となる。

このような変化が単純に震源深さの違いに因るのか，或いは地殻やプレートの形状・速度構造に起因するのかを把握するため，地殻・プレート構造なしの堆積地盤構造のみとした場合と堆積地盤なしの地殻・プレート構造のみとした場合について三連動地震を対象に計算した。このとき，地殻・プレート構造なしの堆積地盤構造のみのケースは，上部地殻第2層以深とプレート以深の速度構造（No.15～20層）を全て同一媒質(Vs3.82km/s)に変更することで設定した。また，堆積地盤なしの地殻・プレート構造のみのケースは，地震基盤以浅の速度構造（No.1～13層）を全て地震基盤（No.14層）と同一媒質(Vs3.2km/s)

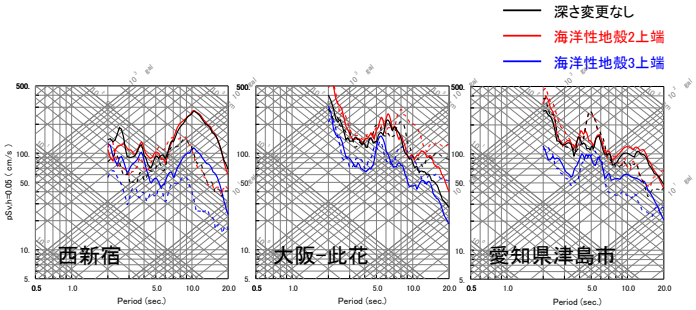


Fig. 10　震源深さ変更時の予測波　M9地震基本ケース
Effect of Fault Depth Change (M9 Basic Case)

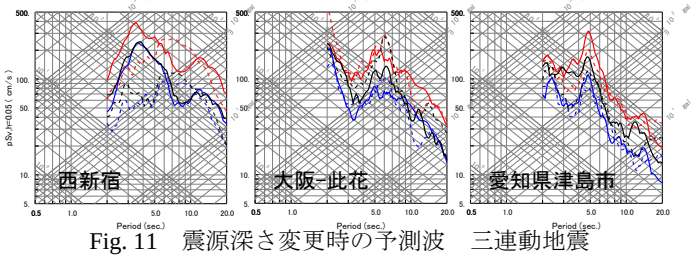


Fig. 11　震源深さ変更時の予測波　三連動地震
Effect of Fault Depth Change (Tokai-Tonankai-Nankai Case)

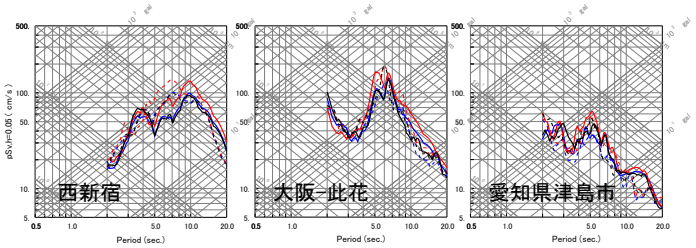


Fig. 12　震源深さ変更時の予測波（堆積地盤のみ，三連動）
Effect of Fault Depth Change for Sedimentary Only (TTN)

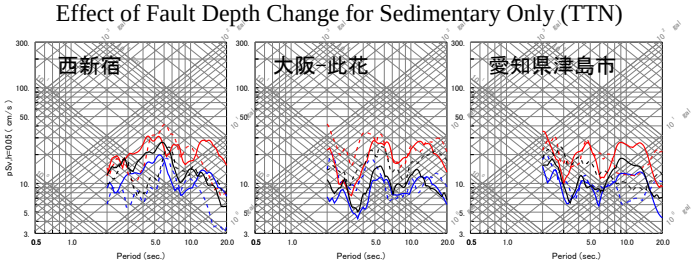


Fig.13 震源深さ変更時の予測波（地殻プレートのみ，三連動）
Effect of Fault Depth Change for Crust and Phl. Plate Only (TTN)

に変更することで設定した。

堆積地盤のみの結果の応答スペクトル（Fig. 12）をみると，震源深さによる増減変化は小さく単純深さの影響が小さいこと，但しプレート上端深さの場合ではやや増大し深さ変化の影響があることが分かる。一方，地殻・

プレートのみの結果（Fig. 13 ）をみると，震源深さによる増減が大きい。つまり震源深さを変更したことに伴い地殻・プレートの形状・速度構造の影響で地震動レベルが増減している。このことは，異なる地盤構造モデルで設定或いは算定された震源モデルの震源深さを変更して適用する場合には注意を要することを示している。

なお，堆積地盤構造のみとした場合の西新宿サイトの結果では前節で指摘した三連動地震NS成分の周期3～5秒の顕著なピークが見られなくなっており，発生原因が堆積地盤構造のみに起因するものではないことが推察される。

6.　まとめ

南海トラフ巨大地震による主要都市での長周期地震動について評価するため，国が想定するM9地震(四連動地震)，三連動，二連動の各震源ケースを対象に，三次元有限差分法による長周期地震動予測計算を実施した。その結果，東京・大阪・名古屋における各想定震源ケースごとの影響度の違いや地震応答スペクトル振幅についての知見を得た。また，プレート形状に合せるための震源深さ変更の影響と堆積地盤・地殻・プレート構造の影響を検討した結果，震源深さの変更に伴い地殻・プレートの形状・速度構造の影響で予測地震動レベルが大きく増減するため震源深さ変更には注意を要するとの結論を得た。

長周期地震動の評価では，計算手法として三次元有限差分法のような理論的予測手法が有効であり必須であるが，震源モデルや深部地盤モデルの影響を受けるため継続してそれらを調査検証することが必要である。今後もこれらの改良を実施し，長周期地震動の予測評価精度を向上させていく予定である。

謝辞

一部の図の作成にGMTを使用させて頂きました。地震動計算を実施するに当たり，京都大学原子炉実験所・川辺秀憲先生から提供頂いた差分法プログラムを改良して使用しています。また，本研究の数値計算はHPCIシステム利用研究課題の成果によるものです（課題番号:hp120247）。ここに記して関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

1) 例えば，中央防災会議：東南海，南海地震等に関する専門調査会（第16回）資料，2003.12
2) 内閣府 南海トラフの巨大地震モデル検討会 : 南海トラフの巨大地震による震度分布･津波高について（第一次報告），2012.3
3) 国土交通省住宅局建築指導課：超高層建築物等における長周期地震動への対策試案について，平成22年12月21日報道発表資料，2010.12
4) Pitarka, A. : 3D elastic finite-difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.89, No.1, pp.54-68, 1999.2
5) Graves, R. W. : Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences., Bull. Seism. Soc. Am., Vol.86, No.4, pp.1091-1106, 1996.8
6) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：「長周期地震動予測地図」 2012年試作版，http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/index.htm, 2012.1
7) 中村洋光，宮武隆：断層強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式，地震第2輯，第53巻，第1号, pp.1-9, 2000.