# 震源モデルの各種パラメータの違いが南海トラフ巨大地震の強震動予測に与える影響

Strong Ground Motion Simulation of Huge Earthquakes along the Nankai Trough Using Several Source Models

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻 博士前期課程2年 福和研究室 渡辺 莉奈

# 1.はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は.Mw 9.0 という我が国観測史上最大の地震であった. これは改めて巨大 地震の持つ脅威を知らしめた事例であり, 適切な地震対策は, 建築設計の分野のみならず我が国全体にとっても重要な課題で ある. 特に, 南海トラフにおける今後 30 年間の巨大地震の発生 確率は、東海地震88%(他地域との連動が不明確のため参考値)、 東南海地震70%程度,南海地震60%程度(2012年1月1日現在) と評価されており<sup>1)</sup>,東海地域における地震防災に対する切迫 性は極めて高い. 中部圏においても超高層建築及び免震建築物 などの長周期構造物が多く造られるようになったが、これらの 構造物の耐震設計には、より信頼性のある設計用入力地震動が 求められる. 加えて、 地震時の揺れは一様ではなく、 震源特性・ 伝播特性・サイトの地盤増幅特性が影響した、サイト固有の揺 れとなって構造物に入力する.したがって、建設サイトでの地 震動をいかに正確に推定するかが建物の耐震安全性を考える上 で重要な要素の一つといえる.

このような背景から、南海トラフ巨大地震において震源モデ ルの設定や各種パラメータの与え方に着目し、それらの違いが 強震動予測結果に及ぼす影響を検討しておくことが重要である. これらの要因をどのように決めるかによって、強震波形やスペ クトルの表す性質は全く違うものになる.よって本論では、建 物の設計や被害予測に用いる強震動予測に資することを期待し て、これらの要因が強震動予測に及ぼす影響について検討する。

# 2. 強震動予測の概要

来るべき地震のレベルを推定する強震動予測は、都市の防災 計画や構造物の耐震性評価のために基礎的かつ重要な研究であ る. 地震動に影響を及ぼす要因として重要なものは、震源の性 質 (震源特性), 震源から地震基盤に至る伝播経路の性質 (伝播 経路特性),基盤から地表に至る地下構造の性質(サイト特性) の三者である. これらを考慮し、数々の強震動予測手法が提案 されている.本章ではこれらの概要について述べているが,詳

細は紙面の都合上割愛する.

# 3. 各種震源過程を用いた 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震 記録の再現性に関する検討

本章では、八木<sup>2)</sup>による東北地方太平洋沖地震の震源過程に 着目し、図1に示した八木による震源過程の断層すべり分布に 基づき震源断層モデルと、対比のため、倉橋・入倉<sup>3)</sup>により提 案されている強震動生成域から成る震源モデル (図 2) を作成 する. 以上 2 つの震源モデルについて、東北地方太平洋沖地震 の前震とされる3月9日11:45 に発生した M7.3 の地震をグリー ン関数とし、経験的グリーン関数法によって波形合成を行うこ とにより、当該モデルの3月11日の本震の強震動記録の再現性 について検討する.

要素地震は、2011年3月9日11:45に発生した地震を用いた. ここで、要素地震の断層面積 S、平均応力降下量 $\Delta \bar{\sigma}_c$ 、平均すべ り量Dは、地震モーメントをMo, 剛性率をµとして、以下の式に 従って求めた.

... (1)

... (2)

 $\Delta \overline{\sigma_c} [\text{MPa}] = 7\pi^{3/2} \cdot M_0 / 16 \cdot S^{3/2}$ 

 $\overline{D}$  [m] =  $M_0/\mu S$ 今回の地震では、震 度6強が広域で観測さ れていることから,強 震動を合成するサイト を図3に示す北海道か ら関東地方にかけての 5 点とした. 各サイト での要素地震の加速度 波形の EW 成分を図 3 に合わせて示す.

モデルについては次の ように設定する. はじ







に基づき大断層の分割数を求める. 今回想定する大断層は長さ ×幅が 520×200[km]と長方形であり,分割する小断層がほぼ面 積の等しい正方形となるように,長さ方向に 13 個,幅方向に 5 個ずつに分割することとした. 八木が推定に用いているメッシ ュサイズは,本検討で用いるサイズに比べて小さいため,検討 に用いる各小断層のすべり量は,小断層に含まれる全メッシュ のすべり量の平均値を用いることとした. また,各小断層の応 力降下量は,断層全体での平均応力降下量が,海溝型地震の標 準的値である 3.0[MPa]となるように,すべり分布に比例して与 えることとした. 想定した断層モデルの応力降下量の分布を図 4 に示す.

一方, 倉橋・入倉モデルについては, 推定パラメータに基づき 設定した. なお, 倉橋・入倉モデルには背景領域がなく, 長周期 領域の地震波には十分な精度がないことに注意が必要である.

以上により合成された加速度波形と本震で観測された加速度 波形のEW成分の比較を図5に、それぞれの減衰定数5%の擬似 速度応答スペクトルの比較を図6に示す.加速度波形を見ると、 宮城県K-NET東和観測点と岩手県K-NET種市観測点で顕著な、 観測波形が第一波と第二波に分かれている特徴を、1 八木モデ ルの合成波形は再現できていないことが分かる.ここで八木の 震源過程は、すべりが大きい部分が震源の東側に1 ヶ所のみ存 在しているため、二波に分かれる地震動は表現できない、一方 で、倉橋・入倉モデルのようにアスペリティモデルとして強震 動生成域を分散させて設定すると2つの波群を表現できる.

また,擬似速度応答スペクトルの比較では,特に震源より南 の観測点で八木モデルは本震より過小評価である.これは,八 木モデルで地震のエネルギーを多く放出する領域は震源付近に 集中しており,福島県や茨城県の評価地点に到達するまでに多 くが減衰してしまうためであると考えられる. これらの評価地 点で本震のようなレベルの振幅を表現するためには, この付近 に存在する強震動生成域を適切に評価する必要がある.

八木モデルが対象とする周期が数十秒程度の長周期域である のに対し、倉橋・入倉モデルの対象周期は0.1~8秒程度の短周 期領域である.よって、八木モデルは、例えば津波などの長周 期域の波形を表現するモデルに適しており、構造物などに影響 のある短周期領域で地震動を考えるとすると、八木モデルより も倉橋・入倉モデルの方が再現性が高いと言える.

### 4. 震源モデルの各種パラメータが強震動予測に与える影響

本章では、南海トラフ巨大地震について震源域や断層パラメ ータの異なる複数の震源モデルによる強震動計算を行い、それ が、強震動評価結果に及ぼす影響について検討する.

## 4.1 震源モデルの設定

断層パラメータの設定方法には、内閣府の方法<sup>4</sup>や地震調査 研究推進本部の方法<sup>1)</sup>がある.震源モデル設定のための主要な パラメータは平均応力降下量、断層面積、地震モーメント、短 周期レベル、強震動生成域面積、強震動生成域の応力降下量で ある.断層面積と平均応力降下量を設定した場合、内閣府の方 法では強震動生成域面積を、地震調査推進研究本部の方法では 短周期レベルをもう一つの与条件として残りのパラメータをパ ラメータ間の関係式から求める.また、内閣府の方法ではセグ メントモデル(カスケードモデル)を、地震調査研究推進本部 の方法では全域モデル(スケーリングモデル)を採用している.

## 4.2 断層パラメータの設定方法が異なる震源モデル

本節では、南海トラフ巨大地震の震源モデルとして、断層パ ラメータの設定方法が異なる 6 つのモデルを考える.一つめの モデルは、2012年3月31日に内閣府より公表された震源モデル



のうちの基本ケース (モデル A) とする<sup>4</sup>. 断層は, 4 つのセグ メントからなるセグメントモデルで,内閣府の方法に従って, セグメント毎にスケーリング則を適用する. 各セグメントの面 積および平均応力降下量,セグメント全体の面積に対する強震 動生成域の面積比の 3 つの断層パラメータを与条件として,そ の他の断層パラメータを設定するものである. 実際,震源域を 駿河湾域から日向灘域までとして断層全体の面積を求め,断層 全体の平均応力降下量を 4MPa とし,強震動生成域の面積比を 約 12%としている.

ー方, 平均応力降下量については, 過去の M8 クラスの海溝 型地震の平均値が約 3MPa であり, また 2003 年の内閣府による 南海トラフの地震の震源モデルは 3MPa としていた<sup>5</sup>. そこで 二つめに, モデル A で平均応力降下量のみ 3MPa に変更したモ デル (モデル B) を考える.

三つめは、2003年に内閣府が公表した南海トラフの地震の震 源モデル(モデルC)を考える.これは、震源域を駿河湾域から 南海域までとしたセグメントモデルで、平均応力降下量を 3MPa,強震動生成域の面積比を約25%としている.

四つめに、セグメントモデルで、地震調査研究推進本部の強 震動予測レシピ<sup>の</sup>に従い、短周期レベルを壇・他(2001)による 経験式<sup>n</sup>の2倍として与えたモデル(モデルD)を考える. 震源 域をモデルAと同様とすると、強震動生成域面積が全体の面積 の約7.3%となるので、モデルAの強震動生成域のうち陸から 遠い断層をいくつか削ることで、強震動生成域面積を調整した. 五つめに、全域モデル (スケーリングモデル) とし、強震動 予測レシピ<sup>の</sup>に従い、短周期レベルを壇・他 (2001)の経験式<sup>の</sup> の2倍として与えたモデル (モデルE) とする.モデルDと同様 の方法で強震動生成域面積を調整して与えた.

同じく全域モデルとして,強震動予測レシピに従う一方で, 短周期レベルではなく強震動生成域面積の割合をモデルAと同 様として与条件とし,その他のパラメータを設定するモデル (モデルF)を六つめのモデルとした.

これまでの各モデルについて,設定した断層パラメータを表 1に,震源モデルの一例を図7に示す.モデルA,B,C,D,E,Fの 地震モーメント $M_0$ と短周期レベルAの関係を図8に示すとと もに,壇・他による経験式<sup>7)</sup>を併せて示す.図8より,短周期レ ベルの大きさはモデルAが最も大きく,次いでBとDとEが同 程度,そしてF,最後にCの順になっている.

## 4.3 震源域または強震動生成域の位置が異なる震源モデル

本節では震源域または強震動生成域の位置の異なる4つの震 源モデルを考える.まず,基本ケース(モデルA)の震源域は東 から駿河湾域,東海域,南海域,日向灘域の4つの領域から成る が,各セグメントで連動せずに地震が発生した場合を想定し, 東側の駿河湾域と東海域のみを震源域としたケース(モデル Ae)と西側の南海域と日向灘域のみを震源域としたケース(モ デル Aw)を考える.モデルAはセグメントモデルであるため, モデル Ae, Aw の各セグメントの断層パラメータはモデルAと 同じとなる.また,基本ケースの強震動生成域を可能性がある

表1	設定し	た南海	4	ラ	フ巨	大地震(	の断層ノ	ペラ >	メータ	
----	-----	-----	---	---	----	------	------	------	-----	--

パラメータ	単位	А	В	С	D	Е	F	Ar(陸側)	Ae(東側), Aee	Aw(西側)
モデル		セグメント	セグメント	セグメント	セグメント	全域	全域	セグメント	セグメント	セグメント
設定方法		内閣府	内閣府	内閣府	地震本部	地震本部	地震本部	内閣府	内閣府	内閣府
与条件		面積比	面積比	面積比	短周期	短周期	面積比	面積比	面積比	面積比
断層面積		2012年	2012年	2003年	2012年	2012年	2012年	2012 年(陸)	2012 年(東)	2012 年(西)
セグメント全体										
面積	km <sup>2</sup>	110150	110150	60835	110150	110150	110150	110150	37307	72843
地震モーメント	×10 <sup>21</sup> Nm	34.2	25.7	12.2	25.7	45.0	45.0	34.2	9.5	24.8
$M_{ m W}$		9.0	8.9	8.7	8.9	9.0	9.0	9.0	8.6	8.9
平均応力降下量	MPa	4	3	3	3	3	3	4	4	4
短周期レベル A	$\times 10^{20}$ Nm/s <sup>2</sup>	5.35	4.01	3.10	3.94	3.94	3.46	5.35	3.18	4.30
短周期レベル(壇・他)ADAN	$\times 10^{20}$ Nm/s <sup>2</sup>	1.72	1.56	1.22	1.56	1.89	1.89	1.72	1.12	1.55
$A \swarrow A_{\rm DAN}$		3.11	2.56	2.54	2.52	2.09	1.68	3.11	2.83	2.78
強震動生成域										
個数		12	12	14	12	12	12	12	6	6
面積	km <sup>2</sup>	12670	12670	15257	7985	7985	12670	12791	4515	8156
面積比	%	11.50	11.50	25.08	7.25	7.25	11.50	11.61	12.10	11.20
地震モーメント	×10 <sup>21</sup> Nm	7.89	5.92	5.90	3.83	6.72	4.28	8.00	2.31	5.58
平均応力降下量	MPa	35~48	26~36	22~25	40.2	40.2	26.08	34~48	35~47	35~48
短周期レベル	$\times 10^{20}$ Nm/s <sup>2</sup>	5.21	3.91	3.00	3.78	3.78	3.04	5.22	3.10	4.19
平均すべり量	m	$7.0 \sim 20.8$	5.2~15.6	2.8~13.4	5.3~15.3	9.4~26.7	9.3~27.1	7.1~20.8	7.0~14.0	11.0~20.8





範囲で最も陸側の場所に設定した, 陸側ケース (モデル Ar) を 取り上げる. 最後に、モデル Ae と震源域・断層パラメータは等 しいが、破壊開始点を駿河湾域の東端に設定したケースをモデ ルAeeとする.

### 4.4 地震動の計算手法

地震動の計算方法は、内閣府と同様に統計的グリーン関数法 3) とした. ただし、ここでは断層近傍での強震動の強さの飽和 効果 3 は考慮しないものとする. 地震動の計算地点は、名古屋 大学構内の1地点とした (図7■印).計算地点の地震基盤から 工学的基盤までの地盤構造は、堀川・他<sup>8)</sup>による中京地域の3 次元地盤構造モデルから抽出した計算地点直下の1次元地盤構 造とした.計算結果の加速度波形を図9、図10に、減衰定数5% の擬似速度応答スペクトルを図11 (a),図12 (a) にそれぞれ示 す. この図には、水平2成分のうち、最大速度が大きいNS成分 のみについて示すこととする.

### 4.5 断層パラメータの設定方法の違いの検討結果

モデルA, B, C, D, E, Fについて、図9より、最大加速度はA, B, E, D, F, Cの順に小さくなり、モデルAの最大加速度はモデルC の約2倍を示し、震源モデルや断層パラメータによっては倍半 分の差異が生じることが分かる.また,図11 (b) ではモデル C に対するモデルA.B.D.E.Fの比率を示している. 周期2秒以下 の周期域に着目すると、擬似速度応答スペクトルのレベルは最 大加速度の大小関係とほぼ等しく、Aが最も大きく、次いでBと DとEが同程度,次にF,最後にCの順である.これは図8の短 周期レベルの大小関係によく対応している.以上から、南海ト ラフ巨大地震に対し、建物被害や震度への影響が大きいとされ る 0.1~2 秒の周期域の地震動レベルは、地震モーメントの大き さよりも短周期レベルの大きさに依存していることがわかる.

## 4.6 震源域・強震動生成域・破壊開始点の違いの検討結果

モデル A, Ae, Aw, Ar, Aee について, 図 10 より, 最大加速度は

はモデルAの1/20程度の小さな加速度で、モデルArが最も大 きく 1000[Gal]を越える大きな加速度となった. 以上から、今回 の名古屋市内の観測点においては、東海域・駿河湾域で生成さ れる地震動が大きな割合を占め、南海域・日向灘域で生成され る地震動の影響は少ないことが分かる. また図 12 (b) より, 周 期1秒以下の周期帯において、モデルArはモデルAより大きく、 1~2 倍程度である. モデル Ar は強震動生成域を陸側に近づけ たモデルであるので、距離減衰の観点から、スペクトルレベル があまり減少しなかったものと考えられる. モデル Ae とモデ ル Aee を比較すると、スペクトルレベルに大きな差はみられな い. 今回検討したケースの計算地点は、検討に際して設定した 破壊開始点のほぼ中間に位置するため、破壊開始点の位置を変 更した結果による影響はあまりみられないと考えられる.

## 5. まとめ

本論では、東北地方太平洋沖地震や南海トラフ巨大地震に対 して震源モデルを設定し、断層パラメータが強震動予測に及ぼ す影響について検討した. 予測される地震動は, 各種パラメー タの設定によって大きく異なる.これらを念頭に置いた上で, 本研究が,建物の設計や被害予測のための強震動予測に用いら れることを期待する.

#### 参考文献

62.8) 堀川・他(2008):中

京地域の3次元地盤構造モ

1) 地震調査研究推進本部 http://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/kaikou.htm. 2) Yuji Yagi Geodynamics, University of Tsukuba, http://www.geol.tsukuba.ac.jp/~yagi-y/EQ/To hoku/ 3) Susumu Kurahashi and Kojiro Irikura: Source model for generating strong gr ound motions during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth Plan ets Space, 63, 571-576, 2011. 4) 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).5) 中央防災会議(2003): 「東南海,南海地震等に関する専門 調査会」(第 16 回) . 6) 地震調査研究推進本部(2009) . 7) 壇·他(2001) : 断層非一 様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震 動予測のための震源断層のモデル化、日本建築学会構造系論文集、第 545 号, pp.51-

**干デル**Α

Acc[gal] 1,500 T

