

南海トラフ巨大地震 最大級の地震津波をどう考えるかー

The great Nankai-trough earthquake-how can we handle largest earthquake and tsunami-

古村 孝志^{1*}

Takashi Furumura^{1*}

¹ 東京大学総合防災情報研究センター / 地震研究所

¹ CIDIR/ERI Univ. Tokyo

2011年東北地方太平洋沖地震を契機として、南海トラフでの最大級の地震の発生可能性と、強震動と津波想定の方針に大きな転換が迫られた。従来、南海トラフでは歴史地震の履歴に基づき、「既往最大クラスの地震」像を明確化し、その再来を想定した対応がとられることが多かった。しかし、私たちが知り得る地震の過去は、津波堆積物や液状化跡の調査など地質調査研究でも最大数千年程度であり、さらに古文書等に基づく歴史地震研究では数百年程度と地震の長い歴史のごく一部に過ぎない。しかも、直近に起きた、昭和東南海・南海地震、安政東海・南海地震、宝永地震の3つを見ても、地震の発生間隔も連動性のパターンも大きく異なっていることは明確であり、これらの知見から将来「備えるべき」地震像を明確化すること自体に大きな壁があった。

加えて、東日本大震災の教訓から、過去に起きたことが知られている規模の地震だけでなく、将来起きる可能性が否定できない「最大クラス」の地震想定的重要性も認識された。防潮堤などのハード対応で備える「施設対応レベル(レベル1)」とは別に、発生頻度は希だが、甚大な被害が危惧される最大クラスの(レベル2)地震についても意識して、適切な避難計画を含めたソフト対策と併せた総合的な防災対策が求められている。

しかし、過去に起きたかどうか分からない、最大クラスの地震モデルの評価は容易ではない。地震津波の発生をできるだけ過去に遡るための地質学的研究を進めるとともに、南海トラフという幾何学的制約の下で起きうる最大サイズの地震を、地震学・測地学的に検討する必要がある。津波堆積物を説明する波源モデルを地震津波シミュレーションから評価し、推定された震源モデルは、近年の地震解析や、GPSデータに基づくプレートの固着状態と照らし合わせた検証を行うなど、あらゆる科学的知見を総動員し、多面的な議論が必要である。

昨年、内閣府の「南海トラフ巨大地震モデル検討会」により、南海トラフで起きうる最大クラスの震源モデルの考え方が示され、これに基づく各地の津波高と浸水域、震度分布の推計値が提示された。こうした最大クラスの想定を各地の防災対策に活用するためには、発生頻度と現時点での発生確率が欠けている。また、東北地方太平洋沖地震で巨大津波を作り出した、日本海溝の浅部プレート境界での50mを超える「超大すべり」が、南海トラフでも起きうるかという疑問は依然として残る。さらに、東北地方太平洋沖地震では、浅部の超大すべり域からは強震被害を起こす数秒以下の周期の強震動や長周期地震動の放射は少なかったが、南海トラフの地震でも同様に考えて良いのであろうか？南海トラフ地震と沖縄トラフへの延長や、相模トラフの地震との連動は明確に否定できるのか？こうした問題に対して、地震学・測地学・地質学的な議論が必要である。

東南海地震被害の再調査 (その2): 震度分布と震度7の地域 Re-Investigation of Disaster from the 1944 Tonankai Earthquake (Part 2): the Seismic Intensity Distribution

武村 雅之^{1*}, 虎谷健司¹

Masayuki Takemura^{1*}, Kenji Toraya¹

¹ 名古屋大学減災連携研究センター

¹ Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University

昨年秋の日本地震学会大会で武村は、1944年12月7日の東南海地震の被害を再調査する意義を述べ、主に宮村(1946)と飯田(1985)の被害データをもとに新しいデータベースを作成したことを報告した。データは13府県に渡り、そのうち静岡、愛知、岐阜、三重、和歌山、奈良、滋賀の7県では当時の市区町村毎の集計値があり、1940年と1944年の国勢調査による世帯数や人口データを用いて、主に住家の全潰率から震度分布を評価した[諸井・武村(2002)]。震源域を基準にしてその広がりを見ると震度6弱の地域はほぼ現在の静岡県御前崎市付近から熊野灘中部の三重県熊野市付近まで広がり1923年関東地震よりもやや広いようである。一方、震源域が陸域にかかる地域がなく震度7(全潰率30%以上)の地域は少なく、静岡県の(1)菊川市付近と(2)袋井市付近、愛知県の(3)西尾市付近の3所である。

それぞれの地域の特徴を見ると、(1)の地域は菊川沿いの低地が広がる横地村と平田村(いずれも菊川市)で、より下流域の海岸に面した千浜村(掛川市)や池新田村(御前崎市)では震度はやや低くなる。(2)の地域は太田川流域で前者と同様に海岸部よりやや内陸に入った太田川とその支流である原野谷川に挟まれた低地である。特に太田川に近い今井村や田原村では全潰率が100%近くに達した。軍需工場の倒壊で多数の死者を出した名古屋市南区や半田市を除くと、揺れによる被害としては最も大きな被害を出した地域である。いずれも現在は袋井市に属し、現在の市域全体の死者数は161名で、静岡県全域での295名の半数以上がこの地域の犠牲者である。袋井市では慰霊碑などの現地調査を実施した。

(3)の地域は三河湾にそそぐ矢作古川の流域の福地村(西尾市)である。下流部の一色町や吉田村(いずれも西尾市)ではやや震度が低いが、それでも震度6強で吉田村の東に隣接する幡豆町(西尾市)や形原村(蒲郡市)さらには幸田町の震度が5以下であるのと対照的である。この地域は翌年1月13日に発生した三河地震でも大きな被害を受けた。その際に地表地震断層(深溝断層)が現れた幸田町や形原村、さらには近接する幡豆町などに比べ吉田町や福地村などの被害が大きかったことも上記の傾向と同じである。地盤条件の違いが大きく影響しているものと思われる。三重県では現在の南伊勢市、紀北町、大紀町、尾鷲市、熊野市のごく一部に震度6強と評価された地域があるが震度7の地域はない。

次に震源からより遠い地域で震度6強になったところを見ると、一つは伊勢湾に面し名古屋市の西に隣接する飛島村や鍋田村(弥富市)で木曾川と日光川に挟まれた地域である。震度の比較的高い地域(6弱)はこれらの地域から東へ南陽町(港区)、港区、南区と名古屋市臨海部に続いている。また岐阜県下では揖斐川と長良川・木曾川に挟まれた西江村(海津町)が震度6強で、さらに上流では木曾川と長良川に挟まれた現在の羽島市付近で震度6弱となっておりいずれも地盤条件の影響が大きいと思われる。さらに遠方では、長野県の諏訪湖周辺、奈良盆地、大阪平野でかなりの被害が出ているが、奈良盆地以外は市区町村単位の集計データがなく震度分布の評価が出来ていない。飯田(1985)によれば大阪府では死者14名(うち市部13名)で、この数は岐阜県(16名)に匹敵する。人口が多い大阪市の被害は今後の防災対策に資する上でも重要でさらに調査が必要である。

キーワード: 東南海地震, 震度分布, 震度7

Keywords: 1944Tonankai Earthquake, Seismic Intensity

南海トラフ南方の銭洲断層と1498年明応地震 Zenu fault, south of Nankai trough and 1498 Meio earthquake

中田 高^{1*}, 徳山 英一², 隈元 崇³, 渡辺 満久⁴, 鈴木 康弘⁵, 後藤 秀昭¹, 西澤 あずさ⁶, 松浦 律子⁷

Takashi Nakata^{1*}, Hidekazu Tokuyama², Takashi Kumamoto³, Mitsuhisa Watanabe⁴, Yasuhiro Suzuki⁵, Hideaki Goto¹, Azusa Nishizawa⁶, Ritsuko S. Matsu'ura⁷

¹ 広島大学, ² 高知大学, ³ 岡山大学, ⁴ 東洋大学, ⁵ 名古屋大学, ⁶ 海上保安庁, ⁷ 震予知総合研究振興会

¹Hiroshima Univ., ²Kochi Univ., ³Okayama Univ., ⁴Toyo Univ., ⁵Nagoya Univ., ⁶Japan Coast Guard, ⁷ADEP

目的

東海沖海底活断層研究会(1999)は、南海トラフ東部の南に位置する銭洲の南縁にそって長さ150の活断層を認定し、銭洲断層系と命名している。新たな地形判読の結果、この断層は神津島の南から銭洲を経て浜名湖沖に達する長さ250以上の長大な活断層であることが明らかになった。2011年東北地方太平洋沖地震以降、中央防災会議によって、南海トラフ沿いの巨大地震と津波の想定がなされているが、トラフから外れたこの海底活断層については詳しい検討は行われていない。このため、発表者らは、南海トラフ東部の南に位置する銭洲断層系活断層の位置・形状を明らかにしたうえで、この活断層から発生する地震・津波の特徴および1498年明応地震との関連を検討する。

1498年明応地震の特徴

南海トラフ沿いで発生した歴史時代の巨大な地震のうち、1498年明応地震は、紀伊半島から房総半島の海岸に津波が襲来したが、四国南岸では報告がない(宇佐美, 2003ほか)。したがって、安政東南海地震と似ているが、津波波源域が南海トラフより東の伊豆半島沖まで拡大しているという特徴がある。この地震による沿岸での津波の波高分布(飯田, 1980)は、海岸地形の影響もある志摩半島で8-15mに達するほか、渥美半島南岸から駿河沿岸、および相模湾沿岸と房総半島南東岸に至る広い範囲でおよそ5-6mであった。

使用データと画像作成

主として海上保安庁海洋情報部が長年にわたって収集した詳細測深データと250mグリッド地形(岸本, 2001)を重ね合わせ作成したグリッドデータを使用した。これもとに、DEM画像処理ソフト(Simple DEM Viewer)を利用して海底地形を立体視できるアナグリフ画像を作成し、陸域の地形判読と同じ要領で活断層認定を行い、海底活断層図を作成した。

海底活断層の位置・形状

東海沖海底活断層研究会(1999)は、音響地殻断面と崖地形の連続性をもとに、長さ120を超えるZEN1断層群などを認定している。銭洲海嶺の南東半部には台地状の高まりがあり、南銭洲トラフとの間には比高1000m程度の崖が連なるが、その基部には比高200m程度の直線的な崖が認められるところがある。変動地形学的に新たに認定された銭洲断層系活断層は、さらに東に連なり、銭洲海底谷を越えてお神津島沖の北東-南西に延びる崖に向かって延びる東西性の崖の基部に達する可能性が高く、銭洲断層系活断層は、全体では長さ275以上にも及ぶ長大な断層と考えられる。

断層モデルと地震規模・明応地震津波

銭洲断層系活断層の位置・形状をもとに、断層長:275、断層幅:50、断層の走向:北60度東、傾斜:北西に24度の断層モデルを想定し、断層の上端の深さ:0.1と2、断層のすべり量:逆断層的に8mと10mの4つのケースを検討した。想定した断層モデルから発生する地震のマグニチュード(Mw)は、8mではMw8.32、10mではMw8.39となり被害などから推定された明応地震の規模(たとえば、宇佐美, 2003のM8.2-8.4)と整合的である。

上記の断層モデルをもとに、銭洲断層活断層計から発生する津波を構造計画研究所の津波シミュレーターを使って計算した。その結果は、いずれのケースでも志摩半島周辺と御前崎周辺で高く8-10mとなる。また、遠州灘沿岸で6-8m、伊豆半島の南部と房総半島南部にも津波の5-6mに達する場所が認められる。南海トラフ沿いで発生した歴史時代の巨大地震のうち、シミュレーション結果に対応する地震は、1498年明応地震である。相田(1981)は、明応地震の特徴に着目し、南海トラフの東部・御前崎沖から東北東に伊豆半島南東海岸沖に広がる震源断層を想定して数値計算を行い、本報告と似た結果を得ているが、南海トラフから独立している銭洲断層は考慮していない。

本発表は、平成23-26年度科学研究費補助金(基盤研究(A))の研究成果の一部である。

キーワード: 1498年明応地震, 海底活断層, 巨大地震, 銭洲断層, 津波, 南海トラフ

Keywords: 1498 Meio earthquake, submarine active fault, large earthquake, Zenu fault, tsunami, Nankai trough

津波堆積物を用いた静岡県太田川低地での津波遡上範囲の復元 Geological evidence of the tsunami inundation area during the historical Tokai earthquakes in the Otagawa lowland, Japan

藤原 治^{1*}, 小野 映介², 市川 清士³

Osamu Fujiwara^{1*}, Eisuke Ono², Kiyoshi Ichikawa³

¹産業技術総合研究所活断層・地震研究センター, ²新潟大学教育学部, ³ 阪神コンサルタンツ

¹AFERC GSJ AIST, ²Faculty of Education, Niigata University, ³Hanshin Consultants Co., Ltd.

静岡県中部の太田川低地では、工事露頭や遺跡発掘現場から7世紀から15世紀にかけて形成された4枚の津波堆積物が報告され、東海・東南海地震の履歴が検討されている(藤原ほか, 2012)。これらは684年白鳳地震, 887年仁和地震(これら二つの地震の歴史記録は南海地震のみ), 1096年永長地震, 1498年明応地震に対応すると考えられる。これらの津波がどれ程の遡上規模を持っていたかを調べるため、掘削調査により津波堆積物の分布範囲を追跡している。

海-陸方向の測線(最大で現在の海岸から約3.8km内陸まで)を合計3本設定した。掘削はコア径100mmのオールコアボーリング(最大深度25m)を7地点と、コア径90mmの定方位簡易ボーリング(通称ロングフェース)による46地点(深度2~4m)を行った。これまでに14C年代測定値が幾つか得られた1測線について、津波堆積物の内陸への広がりを予察的に報告する。

太田川低地は浜堤列が発達する(顕著なものは3列)が、津波堆積物は浜堤列の切れ目(太田川の旧流路におよそ一致)付近で厚く粗粒で、そこから離れるにしたがって薄く細粒化する傾向がある。よって、これらの砂層を形成した津波は、地形的低まりであるかつての太田川沿いに遡上し、浜堤の切れ目や自然堤防の低い部分から溢れて平野へ流入したことが想定される。

津波堆積物を使った遡上範囲の推定は、自然の低湿地が残る北海道や東北地方の海岸平野で成果を上げてきた。こうした地域に比べ南海トラフに面した海岸では平野が小規模であったり、古くからの耕作によって歴史時代の堆積層が乱されているため、津波堆積物の発見例自体が少ない。太田川低地は近世まで湿地が広く残っており、津波堆積物の保存条件が良い。このため、南海トラフでは初めて津波堆積物から遡上距離が具体的に明らかになる可能性がある。

キーワード: 東海地震, 津波, 津波堆積物, 歴史地震, 静岡

Keywords: Tokai earthquake, Tsunami, Tsunami deposit, Historical earthquake, Shizuoka

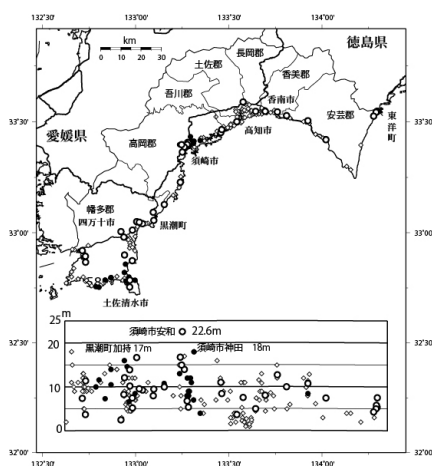
谷陵記の記載からみた宝永地震津波(1707)による高知県での浸水状況 Study on the 1707 Hiei Tsunami on the basis of the descriptions in Kokuryoki along the coast of Kochi Prefecture

都司 嘉宣^{1*}, 今井健太郎², 村上嘉謙³, 今村文彦²Yoshinobu Tsuji^{1*}, Kentaro Imai², Yoshikane Murakami³, Fumihiko Imamura²¹ 深田地質研究所, ² 東北大学災害科学国際研究所, ³ 関西電力¹Fukada Geolog. Inst., ²IRIDeS, ³KEPCO

宝永4年10月4日(1707年10月28日)に、東海沖、および南海沖の海域の連動型巨大地震となって起きた宝永地震の津波の土佐国(高知県)の浸水高さについては、今村(1941)、羽鳥(1978,1981)、都司ら(1994)、村上仁士ら(1994,1996)などによって、史料に記録された浸水到達点の記載や、伝承に基づいて高知県の沿岸各地で浸水標高の測定が行われた。これらの成果は、当然のことながら浸水点の記録のある場所を測定した成果である。ところが、土佐国の海岸にある合計208ヶ所の集落について、被害状況を克明に記録された『谷陵記』(『増訂大日本地震史料・第2巻』, p104-119)の記載は、以上の調査研究にあまり参考とはされてこなかった。この史料は土佐国の藩校の教官であった奥宮正明によって被災直後に記録されたものであり、宝永地震の津波に関する最も信頼性の高い、最重要な文献であることは言うまでもない。それではなぜ、これまでの調査研究でこの文献が余り参照されなかったのであろうか？それは、この文献には多くの集落について単に「亡所」と記載されているのみで、そこにあった集落が津波で壊滅・消滅したことはわかって、海水到達点の記載が明記されていないため、現地で測量目標とすべき地点が確定しがたかったからであろう。しかしながらこの文献には、「潮は山まで」とか、「潮は田丁(水田の意味)三ヶまで」などの記載がある。これらの記載は、やや精度は劣っていても、測定可能な情報を含んでいる。すなわち、「山まで」とは、市街地や水田地の背後の、山の斜面が始まる場所であり、後者のような記録は、その集落に属する水田の三分の一が浸水したという記録である。このような記載の集落を数えると124ヶ所に達する。さらに、単に「亡所」とある63ヶ所の集落については、少なくともその集落の敷地標高プラス3m以上の浸水高であったことを示している(東日本大震災の亡所事例を参照した)。これも、津波浸水標高の下限の数値だけは推定しうることになる。本研究では、先行研究ではほとんど取り上げられることのなかったこのような記事をデータベース化した。これらのうち、41点については2012年12月末までに、現地を訪れ測量作業を行った。現地を訪れる機会の得られなかった点は、各市町村発行の2,500分の一都市計画地図(等高線2mごと)を入手し、これらによって、およその標高を推定した。以上の結果、宝永地震津波の浸水標高の分布を図に示す。図において、黒丸は既往研究の成果、白丸は本研究による現地測定成果、菱形は、「潮は山まで」、「水田浸水、家屋無事」などの記載に基づき、2,500分の一地形図によって標高を推定した地点である。H20-24年度文科省「東海・東南海・南海地震の連動性評価研究プロジェクト(2)連動性を考慮した強震動・津波予測及び地震・津波被害予測研究」(代表:古村孝志)として行われた。

キーワード: 宝永地震, 南海地震, 津波, 古文書調査, 津波浸水高, 歴史地震

Keywords: the 1707 Hiei Earthquake, the Nankai gigantic earthquake, tsunami, old documents, inundation height of a tsunami, historical earthquakes



2011年東北地方太平洋沖地震による東京低地部の長周期地震動伝播 Propagation of long-period ground motion in the Tokyo lowlands, Japan during the 2011 Tohoku Earthquake

植竹 富一^{1*}

Tomiichi Uetake^{1*}

¹ 東京電力株式会社

¹Tokyo Electric Power Company

東京周辺では過去の強震記録の分析から大地震時に周期7~8秒の長周期地震動の卓越が予測されていたが、2011年東北地方太平洋沖地震の記録では卓越は見られなかった。津野・他(2012)は、地震基盤に対する地表のスペクトル比の評価から、2011年東北地方太平洋沖地震では周期8秒の地盤増幅が小さかったことを示している。関東平野の盆地構造による表面波(Love波の基本モード)の励起が、この周期帯の卓越に関係していると考えられるが、京浜地域(品川~横浜)の広帯域速度計アレイの解析結果は、基本モードが卓越していない可能性を示している[植竹(2012)]。そこで、東京低地部を対象にK-NET観測点の記録を用いて、2011年東北地方太平洋沖地震による周期5~20秒の波動伝播性状を検討した。

2011年東北地方太平洋沖地震の記録が得られている東京低地部のK-NET観測点15地点を用いてアレイ解析を行った。アレイサイズは、東西・南北ともほぼ10kmである。観測点の組み合わせ105組のうち、1km以内が4組、1~5kmが46組で、平均観測点間距離は、5.8kmである。アレイ内で観測された加速度記録の包絡形は、揺れ始めからおよそ90秒後に最大となる紡錘形をしている。減衰5%の擬似速度応答スペクトルは、周期5秒以上では概ねフラットな形状をしているが、周期5秒30~80cm/s、周期10秒では30~50cm/sと観測点毎に変化している。

バンドパスフィルター速度波形を用いてセンブランス解析(Neidel&Taner, 1971)を行い、スローネス平面での最大ピークから位相速度・伝播方向を求めた。バンドパスフィルターは、中心周期を5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 15, 20秒とし、中心周期の逆数(中心周波数)に対して±20%の幅を持つフィルターとした。解析の時間長は40秒として、20秒ずつずらして解析を行い時間帯による変化を検討した。なお、水平動は、震央の見かけ方位でRadial-Transverse変換を行い、Transverse成分に対して解析を行った。

最大ピークのセンブランス値は、記録前半部(90秒ぐらいまで)は、周期によらず大きい。後半部では周期が短いほど、また、遅れた時間帯ほどセンブランス値が下がる傾向が見られる。周期8秒で見ると前半はセンブランス値が0.8以上、後半部は0.5程度に低下している。位相速度は、前半部は周期によらず3km/s以上を示すが、後半部では分散性が見られ、周期10秒で2.5km/s、周期7秒で1.4km/sと、周期が短いほど遅くなる傾向が見られた。波の伝播方向は、概ね震央方向からの伝播を示すが、後半部では震央と逆方向からの伝播が抽出される場合もある。後半の時間帯のセンブランス値分布をスローネス平面で見ると、複数の低いピークが確認でき、多方向から波動が伝播している事がわかる。観測点アレイの重心位置の地下構造[地震調査委員会(2009)]に対してLove波位相速度を計算し、センブランス解析で求めた位相速度と比較した。センブランス値の高い記録前半部で求められた位相速度は、高次モードの速度と対応するが、センブランス値の低い後半の時間帯の位相速度の分散性は基本モードと対応していることがわかった。

キーワード: 長周期地震動, 東京低地部, 東北地方太平洋沖地震, アレイ解析

Keywords: Long-period ground motion, the Tokyo lowlands, the 2011 Tohoku Earthquake, Array analysis

大阪湾岸部で観測される長周期地震動について

A Study on the Long Period Ground Motions Observed in Osaka Bay Area

香川 敬生^{1*}

Takao Kagawa^{1*}

¹ 鳥取大学大学院工学研究科

¹Tottori Univ. Graduate School of Eng.

大阪湾岸部では、既往の地下構造調査より基盤岩深度が約 1600 m と推定されており、これに伴う地盤卓越周期は約 6 秒と想定されている。2011 年東北地方太平洋沖地震において、震源距離が大きいにもかかわらず大阪平野では比較的大きな長周期地震動の影響を受け、湾岸部の超高層ビルが少なからぬ被害を受けた。湾岸部に位置する防災科学技術研究所 KiK-net 観測点 (OSKH02) では周期 6 秒程度の地震動が観測されており、地下 2000 m の岩盤中と地表におけるこの周期帯のスペクトル振幅比は 30 倍程度となっている。周期 6 秒程度の地震動が卓越する現象は 2000 年鳥取県西部地震や 2004 年紀伊半島沖の地震の際にも観測されており、遠地大地震時に大阪湾岸では周期 6 秒程の地震動の影響を強く受けることが懸念される。

OSKH02 では長時間の観測記録が得られており、地表と地中における観測記録を注意深く見ると、記録の初期と後半では振幅比が変化していることが分かる。記録の初期における周期 6 秒付近の振幅比は 10 倍強であり、堆積層への実体波鉛直入射による応答で説明できるものと考えている。一方、記録の後半では振幅比が数十倍に大きくなっており、地中がほぼ節となり地表が腹となるような表面波の卓越による影響で大きな振幅比が得られていることが想定される。今後発生が想定されている南海トラフの地震によっても長周期表面波の影響が顕著であることが懸念されるため、他の地震観測記録や周辺岩盤における観測記録とも比較し、大阪湾岸における大振幅の長周期地震動の実態と成因について考察をおこなう。

謝辞 解析にあたり、防災科学技術研究所の KiK-net の観測記録を利用させて頂きました。記して観測体制の維持と記録に公開に感謝します。

キーワード: 長周期地震動, 大阪湾岸, 2011 年東北地方太平洋沖地震, 表面波

Keywords: long period ground motion, Osaka bay area, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, surface wave

ベンチマークテストから見えてきた強震動評価法の課題 (その1: 概要および理論・ハイブリッド手法)

Several issues revealed from benchmark tests for strong ground motion simulations (Part 1: Theoretical & Hybrid Methods)

久田 嘉章^{1*}, 加藤 研一², 吉村 智昭³, 永野 正行⁴, 川辺 秀憲⁵, 野畑 有秀⁶, 早川 崇⁷, 山本 優⁸

Yoshiaki Hisada^{1*}, Kenichi Kato², Chiaki YOSHIMURA³, Masayuki Nagano⁴, Hidenori Kawabe⁵, Arihide Nobata⁶, Takashi Hayakawa⁷, Yu Yamamoto⁸

¹ 工学院大学建築学部, ² 小堀鐸二研究所, ³ 大阪大学, ⁴ 東京理科大学, ⁵ 京都大学, ⁶ 大林組, ⁷ 清水建設, ⁸ 大成建設

¹Kogakuin University, School of Architecture, ²Kobori Research Complex, ³Osaka University, ⁴Tokyo University of Science,

⁵Kyoto University, ⁶Obayashi Co., ⁷Shimizu Co., ⁸Taisei Co.

1. はじめに

著者らは2009~2011年に強震動予測における代表的な3手法(理論・数値・統計的手法)によるベンチマークテストを実施した。今回の発表(その1~3)では3手法の有効性や課題を整理するとともに、今後、南海トラフ巨大地震や首都直下地震を対象とした強震動予測を前提とした新たなベンチマークテストの実施案の報告を行う。(その1)では、理論的手法に加えて、統計的手法とのハイブリッド手法を適用する際の課題点を中心に報告する。

2. 強震動予測に関するベンチマークテスト(2009~2011)で明らかになった課題

(1) 理論的手法(久田ほか, 2011, 2012; 松本ほか, 2013)

理論的手法では平行成層地盤を対象として厳密なモデル化が行われるため、どの手法(波数積分法・離散化波数法・薄層法)を用いても、実用上はほぼ同等の結果が得られることを確認したが、下記に示す課題が明らかとなった。

・Q値の導入には、地盤速度の虚数化する方法や、一定Q値などの制約のもとで因果性を満足する方法などがあるが、用いる手法によって、波形の立ち上がり部の因果性や、遠方での後続波形の位相などに差が現れる場合がある(ステップ1・2)。

・地表に震源と観測点がある場合、波数積分における被積分関数は波数の増大とともに発散する。実用上、震源を少し地中にずらして積分を行う場合があるが、厳密な手法に比べ、表面波の励起を過小に評価する(ステップ3・4)。

・振動数比例型のQ値は、低振動数では0に近い値になり、地表地震断層の断層近傍の観測点では速度波形の基線ずれが生じるなど、フリッグステップでの永久変位の精度が悪化することがある(ステップ3・4)。

・関東平野での実地震を対象とした場合、観測点が震源の直上に近く、実体波が卓越する場合は理論的手法による観測波形の再現は十分に可能であるが、震源が浅い場合、後続の堆積層表面波は全く再現できない(ステップ5・6)。

(2) ハイブリッド手法について

ハイブリッド手法における接続周期帯域(0.5~4秒程度)は、工学上で最も重要な帯域である。異なる手法による計算波形を接続する際、下記に示すような様々な課題が存在し、今後はさらなる検討が必要である。

・ランダム位相とコヒーレント位相の波形接続: 統計的手法では一般にランダム位相を、理論的手法ではコヒーレントな位相を、それぞれ使用する。異なる位相の重ね合わせでは接続周期帯域での振幅スペクトルは落ち込んでしまう(図1)。統計的手法において低振動数でコヒーレント位相を導入するために、香川の手法(香川, 2004)や久田の手法(低振動数で0位相, Hisada, 2008)などがあり、さらには接続周期での振幅の落ち込みを、2モデルのスペクトルで振幅を再調整する方法などが考えられる(図1)。

・異なるグリーン関数による波形接続: 統計的グリーン関数法におけるグリーン関数はS波の遠方近似解が用いられるため、理論・数値的手法による波形とは、一般に到達時間・振幅レベル・継続時間などが全く異なる波形となる。特に遠地では高振動数でも様々な反射波・回折波・表面波が卓越するが、これらは全く評価されない。現在では、平行成層地盤であれば高振動数まで高速かつ高精度なグリーン関数の計算が可能であるため、統計的手法でもグリーン関数はより精度の高いグリーン関数を使用すべきである。

3. おわりに

近年、最悪想定地震などを対象とした様々な地震被害想定が行われているが、これらは被害の全体像を求めることが主目的であり、一般に個別の観測点で高い精度の強震動予測計算が行われている訳ではない。また歴史地震などに比べて、一般に震度分布なども大きめに出る傾向がある。今後、本プロジェクトでは、南海トラフ巨大地震や首都直下地震を対象として、観測波形や歴史地震の震度分布などとも整合するステップを加えた、新たなベンチマークテストを実施する予定である。過去の結果やデータは下記ページを参照されたい。

<http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/test/home.htm>

謝辞：本プロジェクトは文部科学省・科学研費・基盤研究（B）「大都市圏で想定される広帯域強震動と超高層建築の減災対策」（平成 24-26 年度）の研究助成で行われ、日本建築学会・地盤震動小委員会および工学院大学・総合研究所・都市減災研究センターとの連携のもとに行われています。

参考文献：

久田ほか (2011)、強震動予測に関するベンチマークテスト - 理論的手法の場合（その 1）日本建築学会技術報告集、第 35 号、43-48

久田ほか (2012)、強震動予測に関するベンチマークテスト - 理論的手法の場合（その 2）日本建築学会技術報告集、第 38 号、101-106

松本ほか (2013)、強震動予測に関するベンチマークテスト - 理論的手法の場合（その 3）日本建築学会技術報告集、第 41 号、71-76

キーワード: 強震動評価法, ベンチマークテスト, 理論的手法, ハイブリッド手法, 南海トラフ巨大地震, 首都直下地震

Keywords: strong ground motion simulation, benchmark tests, theoretical method, hybrid method, Large Earthquake on the Nankai Trough, Large Earthquake under the Kanto Basin

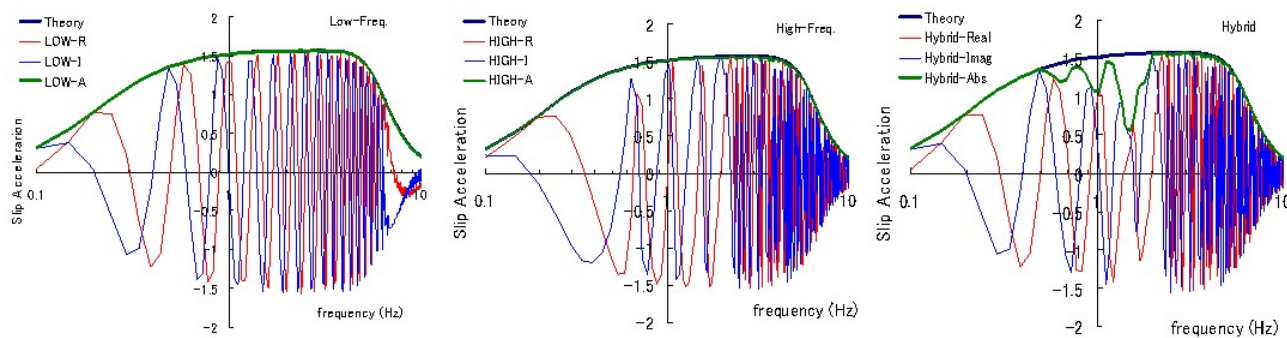


図1 2種類異なる位相スペクトルを持つ2モデルの波形の合成による振幅スペクトル (左: 0位相、中: ランダム位相、右: 0.5-2 Hzで合成したハイブリッド)

ベンチマークテストから見えてきた強震動評価法の課題 (その2: 数値解析手法) Several issues revealed from benchmark tests for strong ground motion simulations (Part 2: Numerical methods)

吉村 智昭^{1*}, 永野 正行², 久田 嘉章³, 川辺 秀憲⁴, 早川 崇⁵, 山本 優⁶, Citak Seckin Ozgur⁷, 松島 信一⁸
Chiaki YOSHIMURA^{1*}, Masayuki Nagano², Yoshiaki Hisada³, Hidenori Kawabe⁴, Takashi Hayakawa⁵, Yu Yamamoto⁶,
Seckin Ozgur Citak⁷, Shinichi Matsushima⁸

¹大阪大学, ²東京理科大学, ³工学院大学, ⁴京都大学, ⁵清水建設, ⁶大成建設, ⁷海洋研究開発機構, ⁸京都大学
¹Osaka University, ²Tokyo University of Science, ³Kogakuin University, ⁴Kyoto University, ⁵Shimizu Corporation, ⁶Taisei Corporation, ⁷JAMSTEC, ⁸Kyoto University

1. はじめに

数値解析手法(三次元差分法や三次元有限要素法)は、関東、濃尾、大阪平野といった堆積平野を含む数百 km の地盤領域を対象に、長周期地震動の計算を行うのによく用いられる。震源や堆積盆地構造の影響を考慮して精度よく地震動が計算できる一方、それらのモデル化の違いが結果に与える影響が大きく、また手法の違いによる結果の違いもある。筆者らは、数値解析手法のベンチマークテストを 2009 年度から 3 年間にわたって実施した。そこで明らかとなった課題点を整理するとともに、南海トラフの震源域を対象とした新たなベンチマークテストを計画したのでその概要を述べる。

2. ベンチマークテスト(2009~2011 年度)で明らかになった課題

2009 年度のステップ 1, 2 では、半無限および 2 層地盤を対象に点震源と面震源を考慮した。実用上ほぼ同等の結果が得られているものの、詳細にみると、差分法で地層境界上に格子点が位置する場合、この格子点に上の層、下の層、あるいは平均のうちの物性値を与えるかで、波形がわずかに異なった。

2010 年度のステップ 3, 4 では、単純な堆積盆地構造として、対象な台形盆地と非対称な傾斜基盤盆地を考慮した。不整形地盤を離散化した場合、曲面や傾斜面付近で物性値の配置がチームにより僅かに異なっており、これに起因する波形の差が表面波の部分で見られた。

2011 年度のステップ 5, 6 では、関東平野モデルを考慮し、3 つの中小地震および 1923 年の関東地震のシミュレーションを行った。実体波部分はチーム間でよく一致していたが、差分格子の間隔が異なるチーム間で、表面波部分で差が見られた。格子間隔が異なると、表層付近で深さ方向の地盤物性のモデル化が異なり、水平方向に長距離伝播する表面波で差が蓄積すると考えられる。

以上のように、表層付近のモデル化は表面波に与える影響が大きく、数値解析手法で主に対象とする長周期地震動の検討では重要な点である。

3. 新ベンチマークの実施

上記のような課題点に留意しつつ、南海トラフの震源域を対象として、2004 年紀伊半島南東沖地震(前震、9/5、19:07、M7.1)のシミュレーションを行うベンチマークテストを計画した。

表 1 に概要、図 1 に震源位置および計算地点の案を示す。

計算領域は、参加者各自の興味と計算能力に従い、関東平野、濃尾平野、大阪平野のいずれか、あるいは複数の平野を含む領域とする。震源モデルは、山本・吉村(2012)の点震源を用いる。地盤モデルは、関東平野では長周期地震動予測地図 2012 年度試作版のモデルを用いる。濃尾平野と大阪平野では上部地殻以浅(1~14 層)は 2009 年度版モデル、下部地殻以深(15 層以深)は 2012 年度試作版を用いる。計算周期は、関東平野は 4 秒以上、他は 2.5 秒以上とする。計算点は、図 1 に示すように、各平野内で 5~10 点程度、震源から各平野への伝播経路地盤で 5 点程度選んでいる。

なお、実施要領の詳細は、<http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/test/home.htm> で公開している。

謝辞: 本プロジェクトは文科省・科研費・基盤研究(B)「大都市圏で想定される広帯域強震動と超高層建築の減災対策」(代表: 久田嘉章、平成 24-26 年度)の研究助成で行われ、日本建築学会・地盤震動小委員会(主査: 久田嘉章)および工学院大学・総合研究所・都市減災研究センターとの連携のもとに行われています。

1) 吉村他(2011)、強震動予測手法に関するベンチマークテスト: 数値解析手法場合(その 1)、日本建築学会技術報告集、17 巻、35 号、67-72。

2) 吉村他(2012)、強震動予測手法に関するベンチマークテスト: 数値解析手法場合(その 2)、日本建築学会技術報告集、18 巻、38 号、95-100。

3) 吉村他(2013)、強震動予測手法に関するベンチマークテスト: 数値解析手法場合(その 3)、日本建築学会技術報告集、19 巻、41 号、65-70。

SSS35-09

会場:103

時間:5月23日 14:45-15:00

4) 山本・吉村 (2012)、3次元大規模FEMによる東海・東南海・南海連動地震の長周期地震動シミュレーション、日本建築学会構造系論文集、第77巻、第677号、1055-1064

キーワード: 断層モデル, 有限差分法, 有限要素法, 関東平野, 濃尾平野, 大阪平野

Keywords: Fault Model, Finite Difference Method, Finite Element Method, Kanto Plain, Nobi Plain, Osaka Plain

表1 計算条件

ステップ7	
モデル名	N71
対象地震	2004年紀伊半島南東沖地震(前震)
震源	点震源
地盤	関東平野…長周期地震動予測地図2012年度試作版 濃尾、大阪平野…上部地殻以浅は同2009年版、下部地殻以深は2012年版
減衰	あり
有効振動数	関東平野: 0~0.25Hz(4秒以上)、濃尾、大阪平野: 0~0.4Hz(2.5秒以上)
計算点	平野内で5~10点程度、震源から各平野への伝播経路地盤で5点程度

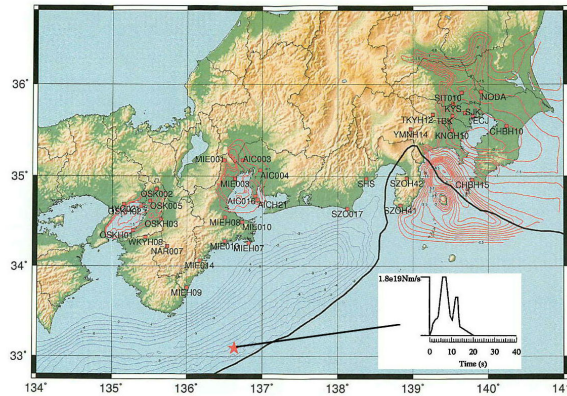


図1 震源位置と出力点

ベンチマークテストから見えてきた強震動評価法の課題 (その3: 統計的グリーン関数法)

Several issues revealed from benchmark tests for strong ground motion simulations (Part 3: SGF)

加藤 研一^{1*}, 久田 嘉章², 大野 晋³, 野畑有秀⁴, 森川 淳¹, 山本 優⁵

Kenichi Kato^{1*}, Yoshiaki Hisada², Susumu Ohno³, Arihide Nobata⁴, Atsushi Morikawa¹, Yu Yamamoto⁵

¹ 小堀鐸二研究所, ² 工学院大学, ³ 東北大学, ⁴ 大林組, ⁵ 大成建設

¹Kobori Research Complex, ²Kogakuin Univ., ³Tohoku Univ., ⁴Obayashi Co., ⁵Taisei Co.

1. はじめに

統計的グリーン関数法は高振動数帯域までの強震動波形を簡易に計算できるため、現在、国や自治体による強震動の面的評価や建設地点のサイト波の評価などに広く用いられている。しかしながら、乱數位相を用いた小地震動の作成法や、重ね合わせ法などに関して多様な手法が提案されており、手法間の相違が計算結果に及ぼす影響を把握する必要がある。

以上の背景のもと、参加者が各々保有する計算コードを用い、同一条件の震源・伝播・地盤モデルに基づいて強震動計算を行うベンチマークテスト(ステップ1~6)を3年間のプロジェクトとして実施した(加藤ほか, 2011, 2012, 2013)。本報はその結果を再整理して統計的グリーン関数法固有の課題を抽出すると共に、観測記録のシミュレーションに基づく新たなベンチマークテストを計画し、課題の解決を図ることを目的とする。

2. ベンチマークテスト(ステップ1~6)の概要と課題の抽出

初年度は半無限および2層の平行成層地盤を対象として計6名の参加者のもと、点震源を対象としたステップ1、面震源を対象としたステップ2の2段階のベンチマークテストを実施した。震源の放射係数は振動数に対して一定としてSH波のみを対象とした。2層地盤についてはSH波の鉛直平面波入射を仮定して地盤増幅特性を評価した。その結果、応答スペクトルの計算結果は概ね一致したが、乱數位相の影響により違いが見られる周期帯もある。平均的なスペクトル振幅を得るには、乱數位相をどの程度発生させれば良いか等の目安が必要である。また、すべり速度関数の与え方により、ライズタイムの逆数に相当する振動数帯にスペクトル振幅の落ち込みが共通して生じており、過小評価となる可能性がある(加藤ほか, 2011)。

次年度のステップ3(点震源)とステップ4(面震源)ではより複雑な解析条件を設定し、計5名が参加した。ステップ1、2との相違はSH波に加えてSV波も考慮し、振動数依存の震源の放射係数と基盤からの斜め入射を考慮した点である。その結果、上下動も励起されることになり、3成分の地震動波形の提出を条件とした。なお、1名は平行成層地盤の厳密なグリーン関数を用いて参加した。この結果は周期約1秒以上の長周期側において他の参加者に比べて異なる傾向を示し、遠方10kmで顕著となっている。設定した震源が2~6kmと浅いこともあり、表面波の影響と考えられる。もともと統計的グリーン関数法は実体波を対象としており、手法としての制約も理解した上での適用が重要と指摘した。また、要素波のパルス性状の違いにより、長周期側がばらつくことも課題として挙げられる(加藤ほか, 2012)。

最終年度は1923年関東地震を取り上げ、実地盤と実地震を対象としたベンチマークテストを4名の参加者で実施した。ステップ5は特性化したアスペリティ内の1小要素を、ステップ6は特性化震源モデルに基づく面震源を対象とした。震源近傍の計算結果を距離減衰式による平均的なスペクトル振幅と比較したところ、周期0.2秒以下の短周期帯域は良く一致した。一方、周期0.2秒以上は計算結果が距離減衰式に比べて一様に小さい傾向を示した。その原因として、平面波斜め入射や震源の放射特性の平滑化が実現象と適合していない可能性が課題として挙げられた(加藤ほか, 2013)。

3. 新ベンチマークテスト(ステップ7)の概要

以上の課題を受け、2004年紀伊半島南東沖の地震(前震)を対象とし、平面波斜め入射と震源の放射特性の平滑化に焦点を当てたベンチマークテスト(ステップ7)を、表1に示すように企画した。対象の観測点は関東、濃尾、大阪平野内に位置するK-NETまたはKiK-netの数点であり、震央と対象観測点位置を図1に示す。対象地震と観測点は(その1: 数値解析手法)と同一である。実施要領の詳細は<http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/test/home.htm>にて公開されている。講演当日に計算結果の速報を発表する予定である。

謝辞: 本プロジェクトは文部科学省・科学費・基盤研究(B)「大都市圏で想定される広帯域強震動と超高層建築の減災対策」(平成24-26年度)の研究助成で行われ、日本建築学会・地盤震動小委員会および工学院大学・総合研究所・都市減災研究センターとの連携のもとに行われています。

参考文献:

加藤ほか(2011)、強震動予測に関するベンチマークテスト - 統計的グリーン関数法の場合(その1)、日本建築学会技

SSS35-10

会場:103

時間:5月23日 15:00-15:15

術報告集、第17巻、第35号、49-54.

加藤ほか(2012)、強震動予測に関するベンチマークテスト - 統計的グリーン関数法の場合(その2)、日本建築学会技術報告集、第18巻、第38号、67-72.

加藤ほか(2013)、強震動予測に関するベンチマークテスト - 統計的グリーン関数法の場合(その3)、日本建築学会技術報告集、第19巻、第41号、37-42.

キーワード: 強震動予測手法, ベンチマークテスト, 統計的グリーン関数法, 乱数, 2004年紀伊半島南東沖の地震

Keywords: Strong motion prediction methods, Benchmark tests, Stochastic Green's function method, Random numbers, the 2004 Kii-hanto-nantou-oki earthquake

表1 統計的グリーン関数法の解析条件一覧

ステップ7: 2004年紀伊半島南東沖の地震(前震)				
モデル名	S71	S72	S73	S74
地盤	多層地盤(岩盤、平野内)			経験的 地盤増幅率 (野津・長尾、 2005)
入射角	斜め入射		鉛直入射	
Q値	振動数依存のQ値(岩盤、平野内)			
震源	点震源			
ラティエーション (SH & SV)	振動数()依存	振動数()一定		
破壊開始時間				
有効振動数	0~20 Hz			
出力点	関東、濃尾、大阪平野内のK-NET、KiK-net地点(図1)			
出力成分	NS, EW, UDの3成分		NS, EWの2成分	
乱数の設定	各自の乱数3パターン			

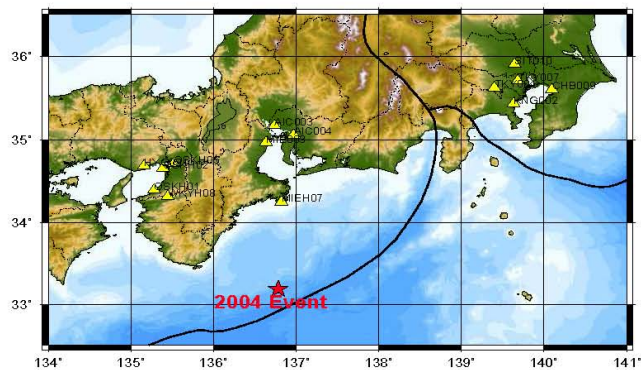


図1 2004年紀伊半島南東沖の地震(前震)と
計算点位置

相模トラフの海溝型巨大地震による長周期地震動：震源モデルの違いが地震動に及ぼす影響

Long-period ground motion for megathrust earthquakes at the Sagami Trough: Effects of source variety on ground motion

岩城 麻子^{1*}, 森川 信之¹, 前田 宜浩¹, 青井 真¹, 藤原 広行¹

Asako Iwaki^{1*}, Nobuyuki Morikawa¹, Takahiro Maeda¹, Shin Aoi¹, Hiroyuki Fujiwara¹

¹ 防災科学技術研究所

¹ NIED

相模トラフで発生する海溝型地震について、地震調査研究推進本部ではこれまでに大正型・元禄型の二つの型について長期評価を行ったが、現在は新たな長期評価に向けて大正型・元禄型にとどまらず当該地域で歴史上発生したことが明らかではない領域を含めた震源域の検討を行っている。それを踏まえ、本検討では地震本部で審議中の相模トラフ沿いの既往最大を超える震源域案に基づいて長周期地震動予測のための震源モデルを設定し、長周期地震動計算を行う。

相模トラフの海溝型地震については歴史上の記録が少なく、次に発生する地震の震源像に関する知見が少ないと言える。そのため、地震動予測のための震源モデルは大きな不確実性を含む。このような背景のもとで長周期地震動評価を行うに当たり、震源域や各震源パラメータの不確実性を考慮して可能な限り多くの震源モデルについて地震動計算を行い、震源モデルの差が地震動に与える影響を調べるとともに、それぞれのモデルに対して得られる地震動を統計的に評価することを目指す。

震源域には相模トラフ沿いの地震の暫定震源案を6つのセグメントに分割し、各セグメントを組み合わせた複数のケースについて長周期地震動ハザード評価を行うことを提案する。そのうち、大正型 ($M_W 7.9$)、元禄型 ($M_W 8.3$) の2ケースと、それよりも大きい地震 ($M_W 8.6$) を加えた計3ケースの長周期地震動シミュレーションを行い、セグメントの組み合わせによって関東地域における最大速度値 (PGV) や速度応答値に数倍から十倍程度の差が生じることを示した。

続いて、微視的震源パラメータのモデル化手法の違いが地震動に与える影響を調べるために、大正型に相当するケースを対象として複数のモデル化手法に基づく震源モデルを用いて長周期地震動シミュレーションを行い、地震動分布の違いを調べた。まず、均質なパラメータ分布を持つアスペリティと背景領域からなる「基本モデル」について、破壊開始点およびアスペリティ配置パターンをそれぞれ数通り考慮し、それぞれのPGV分布を比較した。破壊開始点の違いによってPGVが最大で数倍から20倍程度異なること、アスペリティ配置パターンによって特にアスペリティ近傍のPGVが数倍程度異なることを示した。このような差異は特に破壊の進む方向で大きいため、関東地域への震源の指向性効果の影響が強いことが示唆される。次に、基本モデルに対して破壊伝播速度およびプレートの相対運動方向に空間的なマルチスケール不均質 (関口・吉見, 2006) を導入した「不均質モデル」を作成し、それぞれのパラメータの不均質性が地震動に及ぼす影響を調べた。不均質モデルによって得られた地震動のPGV分布について、不均質性を与える前の基本モデルに対する比をとると、破壊伝播速度とプレート運動方向のいずれの不均質モデルについても、PGVの比が1以下になる領域が破壊の進む方向に広がる様子が見取れた。これは破壊伝播様式に不均質性が加わったことにより波の重ね合わせの効果が弱まった影響と考えられる。

以上のように、シナリオ地震の地震動は巨視的、微視的震源パラメータの設定に強く依存する。相模トラフのように震源像に関する知見が少ない中でのシナリオ地震の震源モデルはパラメータの設定に任意性が強くならざるを得ないが、適切な地震動ハザード評価のためには、各パラメータに自然現象として適切な不均質性を導入するとともに、可能な限り多くのシナリオを統計的に評価することによって不確実性を補うことが重要である。

キーワード: 海溝型巨大地震, 長周期地震動, 相模トラフ

Keywords: megathrust earthquake, long-period ground motion, Sagami Trough

南海トラフの海溝型巨大地震による長周期地震動ハザード評価について Long-period ground motion evaluation for the Nankai Trough megathrust earthquakes

前田 宜浩^{1*}, 森川 信之¹, 岩城 麻子¹, 青井 真¹, 藤原 広行¹
Takahiro Maeda^{1*}, Nobuyuki Morikawa¹, Asako Iwaki¹, Shin Aoi¹, Hiroyuki Fujiwara¹

¹ 防災科学技術研究所

¹NIED

長周期地震動は、規模が大きく震源が浅い地震ほど強く励起されると考えられることから、海溝型巨大地震に対しては強震動、津波の評価だけでなく長周期地震動の評価も重要である。経験式に基づいた評価を行うためには十分な量の観測記録が必要となるが、マグニチュード8~9程度の巨大地震による観測記録は限られており、理論的な地震動シミュレーションに基づいた評価が有効であると考えられる。

本検討で対象とする南海トラフでは、100年から200年間隔で巨大地震が発生していると考えられている。ただし、発生様式には多様性があり、次の地震がどの発生様式となるかを予測することは現状では極めて困難である。したがって、南海トラフの地震による長周期地震動の予測においては、限られた少数の震源モデルに基づいた評価を行うのではなく、単独型や連動型地震などの様々な規模の地震を考慮し、さらに震源パラメータの不確実性を考慮して多数の震源モデルに基づいた長周期地震動シミュレーションを行い、個々の震源モデルによる結果を示すとともに、震源モデルの違いによる結果のばらつきを定量的に評価することが重要である。

我々はこれまで、南海トラフの単独型地震やそれらが連動した場合についての長周期地震動シミュレーションを行ってきたが、それらよりもさらに規模の大きな最大級地震に関する検討が地震調査研究推進本部や内閣府で進められている。そこで、本検討では内閣府の南海トラフの巨大地震モデル検討会により公表された震源断層モデルを参考として長周期地震動シミュレーションを行った。震源モデルについては、アスペリティの配置や破壊開始点を変えた複数のケースを設定した。また、2011年東北地方太平洋沖地震の震源過程解析から示されるように、巨大地震では地震波の発生源が周期帯によって異なるケースも考えられることから、トラフ沿いの浅い領域については、深い領域と同様に設定した震源モデルに加え、津波地震の際に強震動が強く励起されないことの類推から震源時間関数や破壊伝播速度を変化させることにより地震動が強く励起されないモデルについても検討した。

このように設定した複数の震源モデルに対して、全国1次地下構造モデルを用いて3次元差分法により長周期地震動を計算した。最大級地震による長周期地震動に対してはトラフ沿いの浅い領域にくらべ、それよりも深い領域の寄与が強い傾向がみられた。最大振幅値に対する影響としては、アスペリティ配置によって2倍程度、破壊開始点の設定により数倍~5倍程度のばらつきがみられた。また、これまで行ってきた一回り小さな地震による検討結果と合わせると、震源域が小さい地震では長周期地震動の振幅レベルは低い、震源域が広がり地震規模が大きくなるほど振幅レベルは高くなり、最大級地震では振幅レベルの平均もばらつきも大きくなっていった。今後は、様々な規模の地震について多数の震源モデルに基づいたシミュレーションを行い、その結果とそれぞれの地震の発生頻度の情報などを組み合わせることによって長周期地震動のハザード評価を行うことが重要だと考える。

キーワード: 南海トラフ, 長周期地震動, 海溝型巨大地震, GMS

Keywords: Nankai Trough, long-period ground motion, megathrust earthquake, GMS

SPGA モデルを利用した南海トラフの巨大地震に対する強震動評価 Strong motion evaluation for a scenario earthquake along the Nankai Trough based on the SPGA model

野津 厚^{1*}

Atsushi Nozu^{1*}

¹ 港湾空港技術研究所

¹Port and Airport Research Institute

2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)の発生を受け、南海トラフにおいても、従来よりも規模の大きいMw9.0程度の巨大地震を想定し、強震動評価が行われるようになってきた。その場合に用いられる震源モデルは、既往の強震記録を通じて、巨大地震への適用性が検証されたものでなければならない。

著者らは、既往の巨大地震において、大振幅のパルス状の地震波が観測されていることに着目し、これらを含む強震動を適切に再現することのできる震源モデルとして、強震動パルス生成域(SPGA)からなる震源モデル(SPGAモデル)を提案している。本研究は、このSPGAモデルを用い、東海から九州の港湾を対象として、南海トラフの地震(Mw9.0)に対する強震動評価を実施したものである。

SPGAモデルを用いた強震動評価においては、SPGAの位置の設定が一つの課題である。この点に関して、本研究では、事前の予測が困難であるとの立場から極めて多くのケースについて検討を行い、50%非超過、90%非超過等となる地震動を求めた。その際、一般的に利用可能な計算機資源および現実的な計算時間の範囲内で強震動評価が可能となるよう計算上の工夫を行った。

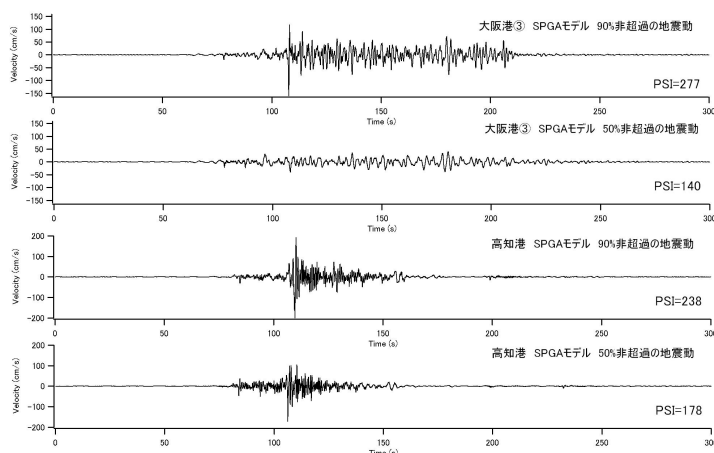
この方法を、東海から九州にかけての16港湾18地点に具体的に適用したところ、計算された90%非超過の地震動は、従来から港湾施設の耐震性評価に利用されてきた地震動よりもはるかに大きい地震動となることがわかった。一方、計算された50%非超過の地震動は、全体的に見ると、従来から港湾施設の耐震性評価に利用されてきた地震動と同程度のPSI値となった。時刻歴波形の特徴としては、特に90%非超過の速度波形が大振幅のパルスによって特徴付けられていることが挙げられる。大阪港のように堆積層の影響で後続位相の発達する地点でも、90%非超過の速度波形では震源起因のパルスが目立つ結果となっている。

今後は、海溝型巨大地震による地震動の一つの大きな特徴が強震動パルスの生成であることを十分認識し、それに対する構造物の耐震性の検討を行っていくことが重要であると考えられる。

謝辞：防災科学技術研究所のK-NETおよびKiK-netの強震記録を利用しました。記して謝意を表します。

キーワード: 強震動, 南海トラフ, 強震動パルス生成域, 2011年東北地方太平洋沖地震

Keywords: Strong ground motion, Nankai Trough, Strong motion pulse generation area, the 2011 Tohoku earthquake



日本全国を対象とした津波ハザード評価に向けて Towards tsunami hazard assessment for Japan

藤原 広行^{1*}, 中村 洋光¹, 森川 信之¹, 青井 真¹, 河合 伸一¹, 平田賢治¹, 長田正樹¹, 松山 尚典², 村嶋 陽一³, 秋山 伸一⁴
Hiroyuki Fujiwara^{1*}, Hiromitsu Nakamura¹, Nobuyuki Morikawa¹, Shin Aoi¹, Shinichi Kawai¹, HIRATA, Kenji¹, OSADA,
Masaki¹, Hisanori Matsuyama², Yoichi Murashima³, Shinichi Akiyama⁴

¹ 防災科研, ² 応用地質, ³ 国際航業, ⁴ CTC

¹ NIED, ² OYO, ³ KKC, ⁴ CTC

防災科研では、東北地方太平洋沖地震による津波被害を踏まえ、全国を対象とした津波ハザード評価に向けた取り組みを平成24年度より開始した。本取り組みにおいては、日本全国を対象として津波波源となる可能性のある全ての地震について考慮した確率論的な津波ハザード評価と、特定の地震に対するシナリオ型の津波の詳細解析も併せて実施することを予定している。

全国を概観した確率論的な津波ハザード評価は、地震調査研究推進本部による地震の長期評価を踏まえ、さらに震源を特定しにくい地震による津波も考慮することにより、将来起こりうる全ての地震を対象として、各種不確かさを考慮した上で波源モデルを作成し、確率論的手法を用いて、沿岸での津波高を対象としたハザード評価を実施する。確率論的な津波ハザードの試算を、日本海溝の地震を対象として実施した。全国概観版の計算においては、陸側の最小メッシュサイズは50mとし、外洋側により大きなメッシュ(150m, 450m, 1350m)を設定する。さらに、地域を限定することにより、全国概観版の津波ハザード評価よりも細かいメッシュ(陸域の最小メッシュサイズ10m)で津波シミュレーションを行い、カルテ形式で確率論的な津波ハザード情報を表現する手法を検討する。津波ハザードカルテとしては、沿岸波高の確率、陸域の浸水確率、浸水深さ到達時間などを示すことで、地域ごとの津波危険度が理解できるような表現方法を検討する。

シナリオ型の津波解析においては、各地域で想定される最大級の規模の地震等による津波について、津波高、浸水範囲、浸水深を予測する。予測結果については、既往記録(歴史津波の記録、津波堆積物、観測記録など)に照らして波源設定の妥当性を検討する予定である。

これら津波ハザード評価を実施するために、日本全国を対象として海図、沿岸海域地形図等のデータ収集・整理を行い、津波計算に必要な海域地形モデル・沿岸域地形モデル等を作成する。津波ハザード評価のための波源設定の考え方をまとめるとともに、設定に用いた各種調査に関する資料を整理・データベース化する。ハザード評価の信頼性の向上・地域連携強化のため、自治体の津波ハザードマップに関する情報を収集・整理し、計算用モデルに反映する。

こうした津波ハザード評価に関する作業の方針、作業の流れと作業方法をまとめ、標準的な津波ハザード評価手法をとりまとめる。また、津波ハザード情報について、多様な利用者を想定し、活用方法、データの提供方法、それらの有効性などについて検討する予定である。

本研究は、地震調査研究推進本部津波評価部会での検討に資するものとして準備されたものである。

キーワード: 津波, ハザード評価, 確率

Keywords: Tsunami, Hazard Assessment, Probability

2011年東北地方太平洋沖地震の強震記録による震源モデルを用いた津波シミュレーション

Tsunami simulation using fault model from strong motion records of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

秋山 伸一^{1*}, 河路 薫¹

Shinichi Akiyama^{1*}, Kaoru Kawaji¹

¹ 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

¹ ITOCHU Techno-Solutions Corporation

2011年東北地方太平洋沖地震では観測された多数の地震記録や津波記録から、いくつもの震源モデルが提案されている。これらのモデルを概観すると、日本海溝に近い位置で大きなすべりが発生することで一致している。このことは、地震動と津波がひとつの震源モデルから同時に評価できる可能性を示唆する。このような観点から、筆者らは地震観測記録から設定される震源モデルを用いた津波予測の可能性について検討している。このうち、昨年の報告では、Yoshida et al.(2011)による遠地実体波のインバージョン解析から得られた震源モデルを用いて地震動シミュレーションを行い、ここから得られる海底地盤の鉛直変位を初期水位の変動と見なした津波シミュレーションを行った。その結果、最大波高を示す津波の第一波については、シミュレーション結果は観測記録に対して過小評価となった。これは日本海溝付近の大きなすべりによる津波を再現できないためである。

これに対して、Yoshida et al.(2011)が近地強震記録から設定した震源モデルには、上記の遠地実体波による震源モデルと比べて、岩手県沖から茨城県沖にかけての日本海溝に沿った場所に大きなすべり領域が見られる点に特徴がある。したがって、この震源モデルを用いた津波シミュレーションを行えば、前回のシミュレーションで再現できなかった津波の最大波高を表現できる可能性が推察される。そこで、今回は近地強震記録のインバージョン解析から求められた震源モデルを用いた津波シミュレーションを行う。ここでは、まずボクセル有限要素法による東日本全域の大規模地震動シミュレーションを行い、海底地盤の鉛直変位を求める。つぎに、この鉛直変位が初期水位に等しいと見なし、浅水理論に基づく差分法コードを用いた津波シミュレーションを行う。

謝辞：本研究で用いた近地強震記録による震源モデルは、気象研究所吉田康宏氏より提供いただきました。記して感謝の意を表します。

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 津波, 強震記録, 震源モデル, シミュレーション

Keywords: the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, tsunami, strong motion record, fault model, simulation

「京」コンピュータを用いた広域かつ詳細な南海トラフ津波計算 Large-scale tsunami modeling in the Nankai trough implemented on the K computer

馬場 俊孝^{1*}, 安藤 和人¹, 江洲 盛史¹, 高橋 成実¹, 金田 義行¹, 加藤 利広²

Toshitaka Baba^{1*}, Kazuto Ando¹, Morifumi Takaesu¹, Narumi Takahashi¹, Yoshiyuki Kaneda¹, Toshihiro Kato²

¹ 海洋研究開発機構, ² NEC

¹ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ² NEC Corporation

東日本大震災のような大規模津波災害の場合、救助や救援物資の手配などの緊急災害対応のために、広域にまたがる被災の状況を詳細かつ迅速に把握しなければならない。しかし、航空機を用いた浸水域調査では調査範囲に限られるし、衛星画像も衛星が被災地上空を通過しなければ取得できない。ましてや、夜間に津波災害が発生した場合、被災状況の把握は夜が明けるまではほぼ不可能である。このため、津波警報に間に合う早さで予測計算を完了できれば被害軽減に資するのはもちろんであるが、たとえ間に合わなくとも、可能なかぎり高速で広域かつ詳細な浸水予測を行う必要がある。本研究ではこれを目的として、理化学研究所の京コンピュータで広域・詳細な津波計算を行ったので、その現状と課題について議論する。津波計算コードには我々が開発した JAGURS(Baba et al, 2013) を用いた。このコードは非線形長波近似の式を Leap-Frog 差分法で解くプログラムで、ネスティングにより空間分解能を向上させることができる。ただし、ネスティングレイヤー間の通信では遠く離れたノードとの通信も必要となるが、離れたノード間での通信速度がばらつく京のシステムの場合、性能を引き出すためにはネットワークジオメトリに応じたチューニング等が必要となる。予想どおり、チューニングをしないコードを用いた京での試計算においてレイヤーの数が多いと極端に計算が遅くなることが判明した。ここでは、ネスティングレイヤーを高知県の上沿岸部を含む空間分解能 5m 格子の 140km x 100km の領域を最上位の層とした 3 層に減らして、南海トラフ全体の津波伝搬計算を実施した。総格子数は約 6.7 億、タイムステップは CFL 条件を満たすように 0.01 秒と設定した。京コンピュータの 5184 ノードを使用した場合、5 時間分の津波伝播計算に必要な時間は約 7.5 時間であり、緊急災害対応の開始が災害発生後およそ数時間とすると、やや遅い。ただし、前述の通り、この結果は京向けのチューニングをほとんど行っていないコードによるものである。今後、チューニングや使用するノードを増やし、さらに高速な計算の実現に取り組んでいく。

キーワード: 津波, 大規模計算, 南海トラフ, 京コンピュータ

Keywords: Tsunami, Large-scale computation, Nankai Trough, K computer

日向灘における巨大地震の地震動と津波の統合シミュレーションに向けて Integrated simulation of strong ground motion and tsunami for large earthquakes in Hyuga-nada, Japan

藏本 稔大¹, 藤岡 慧^{1*}, 竹中 博士¹, 中村 武史², 岡元 太郎³

Toshihiro Kuramoto¹, Akira Fujioka^{1*}, Hiroshi Takenaka¹, Takeshi Nakamura², Taro Okamoto³

¹九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻, ²九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門, ³海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト, ⁴東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, ²Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University, ³Earthquakes and Tsunami Research Project for Disaster Prevention, Japan Agency for Marine-Earth Scie, ⁴Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Instit

日向灘では、九州が載っている陸のプレートの下へ太平洋側からフィリピン海プレートが約 40-70 mm/year の速さで沈み込むことに伴い、これら二つのプレートの境界では大きな地震が発生し、津波も引き起こされる。日向灘では大きな被害が及ぶ規模ではなかったものの場所によっては地震後最短 1 分不足らずで津波が到達した記録もあることから、大規模の地震における防災・減災のために津波の早期予測・対策が重要であると考えられる。日向灘においては M7.5~M7.6 の規模の地震が約 200 年に 1 回の頻度で発生すると推定されるプレート間地震と、M7.0~M7.2 の規模の地震が約 20~27 年に 1 回の頻度で発生すると推定されるひとまわり小さいプレート間地震の 2 つのタイプが考えられる。その例として今回は後者のひとまわり小さいプレート間地震である 1996 年の 10 月 19 日に発生した M6.9 のイベントなどの地震動および津波の統合シミュレーションを実施した。計算スキームは Takenaka et al. (ACES, 2012) を使用した。また、現在まだ陸上地形や海底地形並びに海水を考慮した強震動シミュレーションはほとんど行われていないが、本研究ではその条件を考慮して計算を行った。陸上地形及び海底地形は Kishimoto (1999) を使用し、深部地盤構造およびフィリピン海プレートの物性値・各層境界上面深さの幾何学的データは地震調査研究推進本部の全国 1 次地下構造モデルを使用した。この様に実際に則した条件下でシミュレーションを行うことにより精度の向上が望まれる。プレゼンテーションでは上述の 1996 年 10 月 19 日 (M6.9) などの地震を例に挙げてその計算例を紹介する。

キーワード: 日向灘, 地震波動, 津波, シミュレーション, 強震動

Keywords: Hyuga-nada, seismic wave, tsunami, numerical simulation, strong motion

17世紀北海道巨大地震 (M8.8) の再来に対応するリアルタイム津波浸水予測 Real-time tsunami inundation forecast which works for a recurrence of 17 century great Hokkaido earthquake (M8.8)

谷岡 勇市郎^{1*}, Gusman Aditya¹, 伊尾木 圭衣¹
Yuichiro Tanioka^{1*}, Aditya Gusman¹, Kei Ioki¹

¹ 北海道大学理学研究院地震火山研究観測センター

¹Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University

北海道太平洋沿岸は、2003年十勝沖巨大地震 (M8.0) のような M8 クラスのプレート境界型巨大地震により発生した大津波により、たびたび津波災害に見舞われてきた。また、津波堆積物調査結果より、最近の M8 クラスの巨大地震による津波よりもはるかに大きな津波が太平洋沿岸を襲っていたことも明らかになってきた。それらの巨大津波の中で最新のものとは 17 世紀に発生したとされ、津波堆積物調査データも最も多い。そこでまず、最新の津波堆積物調査データを全て説明できる 17 世紀巨大地震の断層モデルを推定した。その結果、これまで佐竹・他 (2003) がこの地震に対して推定した断層モデルに加えて、海溝沿いのプレート境界で大きなすべり (約 25m) が必要であることが明らかになった。また、17 世紀の巨大地震の地震モーメントは 1.7×10^{22} Nm (Mw 8.8) と推定された。2011 年東北地方太平洋沖巨大地震でも深部のプレート境界でのすべりに加えて、海溝近傍のプレート境界で 40m を超えるすべりがあったことが知られており、17 世紀に北海道沖で発生した巨大地震も同様の震源過程を持っていたことが明らかになった。このようなプレート境界型巨大地震が発生すると、大津波を引き起こし北海道太平洋沿岸の自治体で甚大な被害が予想されている。被害を最小限に抑えるためには、この様な大津波に対応したリアルタイム津波浸水予測の開発が急務である。

津波浸水域を精度よく予想するためには、10m 以下の細かい格子間隔で津波遡上数値計算を実施する必要があり、地震が発生してから津波数値計算を実施している、北海道太平洋沿岸の津波を予測することができない。そこで、本研究では、あらかじめ多くの断層モデルに対して津波遡上数値計算を実施しておき、それをデータベース化することで、リアルタイムで津波浸水域を予測する手法を開発する。

巨大地震が発生し、震源とマグニチュードが気象庁により決定されれば、まず、プレート境界型地震である事を仮定し、地震のスケーリング則を利用して、断層モデルを決定する。その断層モデルを用いて線形長波近似式を用いた津波数値計算を実施する。北海道太平洋沿岸に対する上記津波数値計算は、通常のパソコンでも 1-3 分程度で完了するため、十分に津波予測に利用することができる。この結果を利用してデータベースから最適の津波浸水予測結果を抽出することでリアルタイム津波浸水予測を実現しようと考えた。

データベースの作成は様々な大きさ・規模の断層モデルをプレート境界上に仮定して実施する。その際、移動境界条件のもとで、海底摩擦を考慮した非線形長波近似式を用いた津波遡上数値計算を実施する。さらに、津波遡上計算を実施する地域の沖で水深 50m 程度の地点でかつ津波第 1 波が非線形の効果をほとんど受けないと予想される場所を、津波遡上計算地域を囲むように数か所抽出する。それら数か所での津波数値計算結果の時系列をリアルタイムで最適の津波浸水結果を抽出するための指標津波波形としてデータベースに保存する。

巨大地震発生した場合、推定された断層モデルにより、線形長波近似式を用いて計算時間 1-3 分程度で計算された津波波形とデータベースに保存された指標津波波形を比較し、計算津波波形を最もよく説明できる指標津波波形をもつ津波浸水域をデータベースより抽出し、それを予測津波浸水域とする。この手法を用いれば、リアルタイムで津波浸水域を予測できる。さらに、地震発生後、W-phase など地震波形解析が進み断層パラメーターが推定されれば、その結果を用いた断層モデルから、線形長波近似式を用いた津波数値計算を再度実施し、データベースより最適の津波浸水域を再抽出し、予測津波浸水域を更新することができる。

上記手法を用いて、釧路市での津波浸水域をどの程度予測可能であるか実験した。まず、釧路市近傍の津波遡上数値計算を様々な断層モデルから実施しデータベースとして保存した。次に、北海道太平洋沖で 17 世紀の巨大地震が発生したとして、上記の最新の断層モデルより津波遡上数値計算を実施し、その津波浸水域が実際に発生したとする。線形長波近似式により計算した津波波形をもとにデータベースから最適の予測津波浸水域を抽出した結果、良好な浸水域を予測することができることが分かった。

参考文献

佐竹健治・他 (2003) 17 世紀に北海道東部で発生した異常な津波の波源モデル、活断層・古地震研究報告、3、315-362.

キーワード: 津波浸水予測, 北海道太平洋沖, 17 世紀北海道巨大地震

Keywords: tsunami inundation forecast, 17 century Hokkaido earthquake, Tsunami numerical simulation

GPS-TEC Back Projection 法による津波伝搬の推定 Tsunami wave estimation using GPS-TEC back projection

伊藤 武男^{1*}Takeo Ito^{1*}¹ 名古屋大学大学院環境学研究科¹Nagoya Univ

1. はじめに

地震によって発生した津波は大気を押し上げるため音波が生じる。この音波が電離圏に達して電子密度の擾乱を引き起こすことで、電離圏総電子数 (TEC) に変化を生じさせる。たとえば、Heki (2006) は 2004 年の浅間山噴火によって生じた TEC の変化から火山爆発のエネルギーを推定している。本発表では GPS によって観測された TEC (GPS-TEC) の時間変化から 2011 年東北沖地震 (M_w 9.0) で発生した津波の伝搬を面的に推定する手法を開発したので報告する。

2. GPS-TEC Back Projection

Back Projection (BP) 法は地震波の解析などで実績がある (たとえば, Ishii *et al.* (2005))。BP 法を GPS-TEC に適用し、津波伝搬を面的に推定する。GPS-TEC を用いた BP 法は音波速度を用いて波動を逆伝搬させ、音波の発生源 (津波の励起) をイメージングする。ここで、 $S(j,t)$ を音波の発生源とし、 j を発生源の場所、 t を発生時刻とする。観測された GPS-TEC の観測は $s_k(t)$ とし、 k を GPS-TEC の観測場所、 $t_{j,k}^a$ を音波の伝搬時間とすると BP 法は下記のように記述できる。

$$S(j,t) = \text{Sum}_k s_k(t - t_{j,k}^a)$$

なお、地震波の解析と大きく異なるのは GPS 衛星が時間と共に移動するため、各時刻における GPS-TEC の観測場所も時々刻々と変化する。そのため、計算プログラムは複雑になるが、本質的な違いはない。また、電離圏に存在する電子数は約 300km 上空をピークとして存在しているため、300km 上空での音波伝搬時間を用いるが、BP 法のフォーカシング向上のため、同時に電離圏の高さも簡易的に推定することで、フォーカシングを向上させた。

3. GPS-TEC データ

GPS-TEC は GEONET の約 1200 点で観測された 1 秒サンプリングの RINEX データから抽出した。TEC の変化量は 2 つの周波数 (f_{L1} :1575.42MHz, f_{L2} :1227.60MHz) で観測された位相情報を用いて

$$\Delta \text{TEC} = (1/40.308) f_{L1}^2 f_{L2}^2 (f_{L1}^2 - f_{L2}^2) \Delta (P_{L1} - P_{L2})$$

のように記述することができる。ここで P_{L1} と P_{L2} は観測された位相にそれぞれの波長 (L_1 :0.19m, L_2 :0.24m) をかけた値である。TEC の単位は TECU (視線に沿った底面積 1m^2 の円柱に 10^{16} 個の電子が含まれることを意味する) を用いている。本研究では 2011 年 3 月 11 日 14:00 から 16:00 (JST) の 2 時間分を解析した。GPS-TEC の情報は GPS 衛星と GPS 受信機との組み合わせの数だけ存在する。そのため、通常 GPS は 7-10 個程度の GPS 衛星を捉えていることから、GEONET 全体からすると、常に 10,000 箇所以上の GPS-TEC データを観測していることになり、2011 年東北沖地震の震源域上空では各サンプリング毎に平均的に 400 箇所程度の GPS-TEC を用いて逆伝搬を行っている。しかしながら、GPS-TEC の時系列データに Slant TEC と呼ばれる見かけ上の TEC の時間変化が含まれており、それらの影響を 2 次の多項式近似を用いて取り除いた。その後、10s から 300s のバンドパスフィルターを適用させたのち BP 法を適用した。

4. 結果

本解析により、津波が断層破壊により生成される様子が GPS-TEC の BP 解析から明瞭に確認できる。このことから、将来的には断層破壊により生じる津波から直接、断層の震源過程を議論することが可能になるかもしれない。また、津波生成を 1 秒毎に面的に捉える事が可能であることから、津波シュミレーションなどは面的な観測データを基に検証する事ができるようになるであろう。

キーワード: GPS, TEC, バックプロジェクション, 津波

Keywords: GPS, TEC, Back Projection, Tsunami