

# 設計用入力地震動作成手法としての 疑似点震源モデルを用いた強震動シミュレーション

仲野健一<sup>\*1</sup>・境 茂樹<sup>\*1</sup>

強震動シミュレーションは、詳細な設定が可能な手法であればあるほど複雑になり、パラメータの設定によって計算結果が大きく変動しやすい。そこで本研究では、シンプルな数理的表現である疑似点震源モデルを用いた強震動シミュレーションを実施し、その設計用入力地震動作成手法としての利用の可能性について検証した。その結果、複数の地殻内地震について、一般的なパラメータを使用することで地震観測記録を精度よく再現でき、設計用入力地震動作成手法としての有効性を確認した。そして複数の点震源を仮定した十勝沖地震 ( $M_{\text{JMS}}8.0$ ) でも同様の検討を行い、疑似点震源モデルの巨大地震への適用性と現状の課題について整理した。

キーワード：疑似点震源モデル、経験的サイト増幅特性、設計用入力地震動、強震動シミュレーション

## 1. はじめに

本研究で取り扱う疑似点震源モデルによる地震動計算手法は、野津<sup>1)</sup>によって提案された強震動シミュレーションの1つである。過去に発生した地震を対象にして、疑似点震源モデルによる観測波形の再現性が野津らによって確認されている<sup>(例えば2), 3)</sup>。彼らによれば、複数の点震源(サブイベント)の適切な配置とスペクトルインバージョン<sup>4)</sup>等で推定された経験的サイト増幅特性の評価、および位相特性として用いる過去の地震観測記録の適切な選定によって、他の計算手法(地下構造モデルに基づいて解析的に求められる計算手法等)に比べて精度よく観測波形を再現できるとされている。また、疑似点震源モデルはシンプルな思想であるから、設計用入力地震動作成手法等の工学的な利用が期待されている。課題としては断層面を考えた際のディレクティビティ効果やサブイベントの選定に関する知見の蓄積などが挙げられ、他の研究者による十分な検証が行われているとは言えないのが現状である。

仲野ほか<sup>5)</sup>もしくは仲野・境<sup>6)</sup>では、日本で発生した過去の地震(2005年千葉県北西部地震, 2014年長野県神城断層地震)を対象にして、疑似点震源モデルに基づく強震動シミュレーションを実施しており、一般的な統計的グリーン関数法に比べて、波形とスペクトルの形状や計測震度分布をよく再現できており、疑似点震源モデルの再現性と経験的なパラメータの違いによって計算結果が顕著に変動しないこと(ここでいう経験的なパラメータとは、上記の経験的サイト増幅特性などを指す)を確認している。彼らは、直下型地震を対象にして、1つの点震源

を仮定している。その理由は、1つの点震源仮定が成立するであろうM6-7程度の地震が人口密集地域の直下で発生した場合、大きな被害となることが想像に難くないことと、複数のサブイベントの設定による計算結果の変動を極力避けるためである。

疑似点震源モデルによる計算手法は、上記のような1つの点震源仮定が成立するような規模の地震だけでなく、複数のサブイベントを仮定することで、2011年東北地方太平洋沖地震のような超巨大地震にも適用可能である<sup>1)</sup>。日本では直下型地震のみならず、M8クラス以上の海溝型地震が頻繁に発生する地理的環境にあり、そういった地震の想定が不可欠である。特に、太平洋プレートが沈み込んでいる三陸沖や十勝沖、南海トラフなどでは周期的に巨大地震が発生しており、そういった地震を評価しておく必要がある。

冒頭で述べたように、疑似点震源モデルでは、サブイベントの設定が計算結果に与える影響は大きく、非常に重要である。その現実的な設定手段としては、既往研究等で想定されている巨大地震の断層モデルにおけるアスペリティの位置にサブイベントを配置する方法が考えられる。

上記のことから、本研究では、日本で発生した3つの地殻内地震(2004年新潟県中越地震, 2005年千葉県北西部地震, 2014年長野県神城断層地震)への疑似点震源モデルの適用性をまず確認した後、2003年十勝沖地震( $M_{\text{JMS}}8.0$ )を対象にして、複数のサブイベントで構成されるような巨大地震への手法拡張に取り組み、巨大地震に対する設計用入力地震動作成手法としての有効性と現状の課題について整理する。

\*1 建築研究第一部

## 2. 疑似点震源モデル

疑似点震源モデルに基づく強震動計算は、下の (1)、(2) 式に従って行われる。振幅成分について Boore の  $\omega^{-2}$  モデルに基づくフーリエ振幅<sup>7)</sup>を、位相成分について対象地震に近い震源位置で発生した過去の地震で観測された時刻歴波形の位相スペクトルを用いる。

$$F^{PRE}(f) = |S(f)| \times |P(f)| \times |G(f)| \times |O(f)| / |O(f)|_P \quad (1)$$

$$|S(f)| = R_{\theta\phi} \cdot FS \cdot P_{RTTN} \cdot \frac{M_0}{4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot V_s^3} \cdot \frac{(2 \cdot \pi \cdot f)^2}{1 + (f/f_c)^2} \quad (2)$$

ここで、 $F^{PRE}(f)$  は地表面での加速度フーリエスペクトルを、 $S(f)$  は震源スペクトル、 $P(f)$  は伝播経路特性、 $G(f)$  は経験的サイト増幅特性を示し、 $O(f)$  は過去の中小地震の加速度フーリエスペクトルである。ただし  $P(f)$  は震源距離  $R$  と振動数依存の  $Q$  値に従い減衰するモデルとする。また、 $R_{\theta\phi}$  は放射特性、 $FS$  は地表か地中で決まる係数、 $P_{RTTN}$  はエネルギーの分配係数、 $M_0$  は地震モーメント、 $\rho$ 、 $V_s$  はそれぞれ震源層の密度と  $S$  波速度、 $f_c$  はコーナー振動数である。なお、各スペクトルは複素数で定義されており、 $| \quad |$  はその絶対値を、添え字  $P$  は Parzen window (0.05Hz) による平滑化処理を意味する。この平滑化処理によって時刻歴波形の位相特性が保持される<sup>8)</sup>

## 3. 日本の地殻内地震への適用

### 3.1 2005年千葉県北西部地震 ( $M_{JMA} 6.0$ )

筆者らは、工学院大学久田教授を中心に取り組みされているベンチマークテスト<sup>9)</sup>の一環として、2005年千葉県北西部地震を対象にした統計的グリーン関数法の任意ケースで取り組んだ疑似点震源モデルに基づく強震動シミュレーション結果を、仲野ほか<sup>5)</sup>で報告している。ここではその一部を紹介する。表-1に千葉県北西部地震に対して設定したパラメータを、図-1に対象とした計算対象地点をそれぞれ示す。

表-1 設定パラメータ  
(千葉県北西部地震)

設定パラメータ	
地震モーメント (N.m)	9.11*10 <sup>17</sup> (F-netより)
コーナー振動数 (Hz)	0.75
放射特性	0.63
FS	2
$P_{RTTN}$	1/√2
密度 (g/t <sup>3</sup> )	3.2
$V_s$ (m/sec)	4460
サイト増幅特性	仲野ほか(2014,2015)
位相特性	2002年5月19日 $M_{JMA} 4.6$

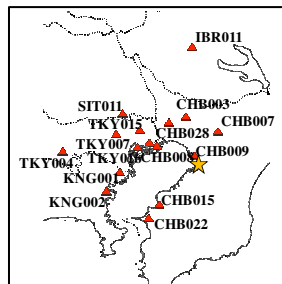


図-1 計算対象地点

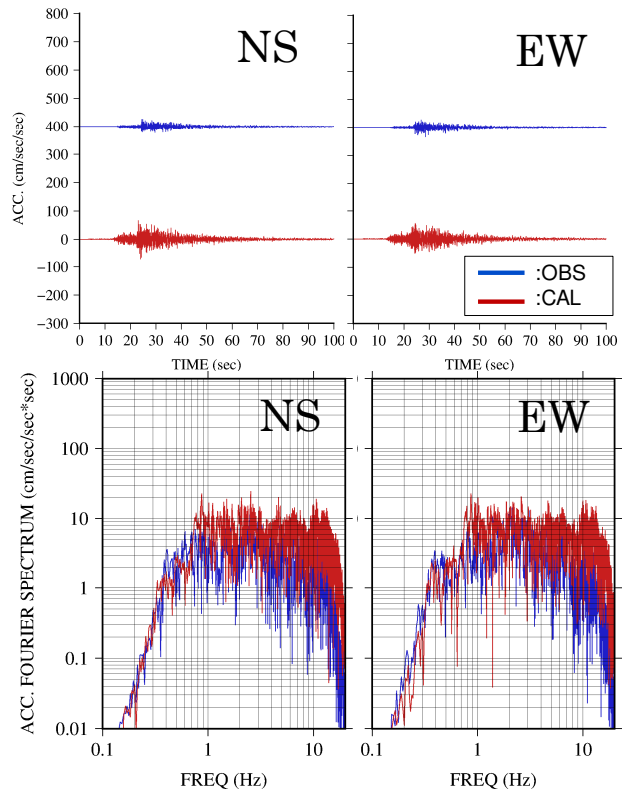


図-2 加速度時刻歴波形とスペクトルの比較 (IBR011)

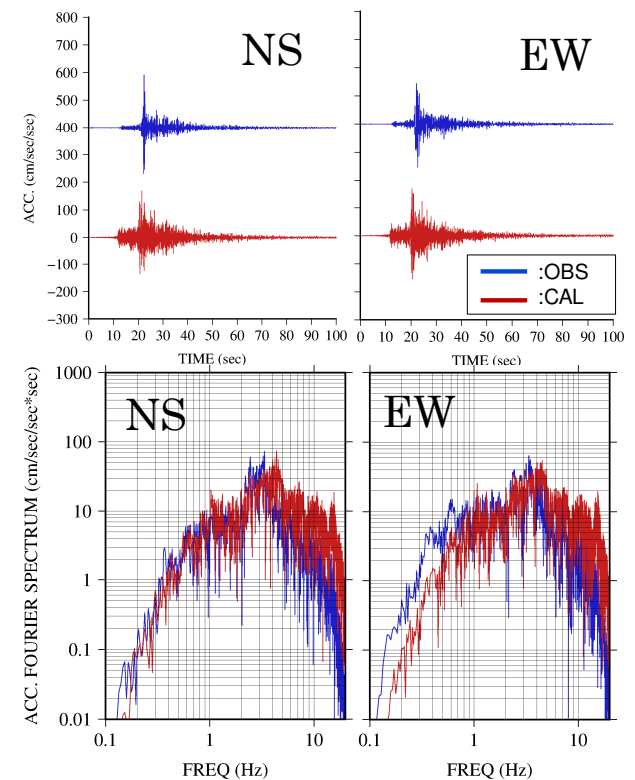


図-3 加速度時刻歴波形とスペクトルの比較 (CHB003)

図-2, 図-3に, IBR011 (つくば), CHB003 (白井) での計算結果 (加速度時刻歴波形とフーリエスペクトル) と観測波形の比較をそれぞれ示す。赤色の実線は計算結果, 青色の実線は観測記録である。また各図左はNS方向, 各図右はEW方向を示している。時刻歴波形を見れば, その波形の形状や振幅などがよく似通っていることがわかる。また, スペクトルの比較においても, ほぼ同様の周波数特性を示している。このことから, 予測問題としての疑似点震源モデルに基づく強震動シミュレーションは, 千葉県北西部地震に対して, 有効な手法であることが確認できた。ただし, 設定したコーナー振動数 (応力降下量) はその地震モーメントに見合う平均的な値より高いことから, 震源に関するパラメータ (応力降下量や放射特性の考え方など) について今後検討する必要がある。

### 3.2 2004年新潟県中越地震 ( $M_{JMA}6.8$ )

#### 3.2.1 非線形の影響の考慮

ある特定のサイト (対象サイト) で観測される地震動は, 震源の性質 (震源特性) と伝播の影響 (伝播経路特性), そして対象サイトの地盤の影響 (サイト増幅特性) を定性的に含んでいる。この3つの特性を強震動特性と呼ぶ。通常, 強震動特性はS波を対象にして推定される。なお, サイト増幅特性は経験的サイト増幅特性とも呼ばれる。

経験的サイト増幅特性は, 仲野ほか<sup>10), 11)</sup>で示されているように, 例えばスペクトルインバージョンによって地震観測記録から推定される。この場合, 非線形の影響を排除した平均的な性質をあらわすパラメータとして, 強震動特性は一般的に求められる。大地震における特定のサイトでの観測波形の中には, 非線形や伝播などの影響がすべて含まれている。従って, 非線形の影響を考慮した経験的サイト増幅特性は, 非線形の影響が含まれている観測波形のフーリエスペクトルを, 非線形の影響が含まれていない震源特性と伝播経路特性の積で除したものと定義される。ここでの「非線形の影響」とは, 定性的な地盤の卓越周期と波形の振幅・性状の変動のことを意味している。

上記から, 非線形の影響を考慮した経験的サイト増幅特性は, 以下の (3) 式で定義される。

$$|G_{ij}^N(f)| = \frac{O_{ij}^N(f)}{|S_i(f)| \cdot |P(f)|} \quad (3)$$

ここで,  $G(f)$  は非線形の影響を考慮した経験的サイト増幅特性,  $O(f)$  は大規模な地震で非線形の影響が疑われるサイトでの観測波形の加速度フーリエスペクトル,  $S(f)$ ,  $P(f)$  はスペクトルインバージョン等によって推定された震源特性と伝播特性をそれぞれ示している。添え

字Nは非線形の影響が含まれていることを, 添え字  $i, j$  は  $i$  地震における  $j$  観測地点での特性であることをそれぞれ意味している。| | は絶対値である。なお, ここでの強震動特性にはNS・EW方向の異方性を考慮しておらず, 水平方向の平均的なものであることに注意されたい。ちなみに仲野ほか<sup>10), 11)</sup>の経験的サイト増幅特性は, 解放地震基盤に対する地表面までの地盤増幅を示している。

K-NETの観測地点NIG019 (小千谷) を例にして, 非線形の影響を考慮した経験的サイト増幅特性と平均的なサイト増幅特性の比較を図-4に示す。非線形の影響を考慮した経験的サイト増幅特性は, (3)式に従って, 2004年新潟県中越地震で観測された地震波形の加速度フーリエスペクトルを, 仲野ほか<sup>10), 11)</sup>の震源特性と伝播経路特性の積で除すことで計算した。平均的なサイト増幅特性は, 仲野ほか<sup>10), 11)</sup>で推定されたものである。赤色の実線が前者, 青色の実線が後者である。図を見れば, 地盤, 卓越周期は低く, 振幅値は大きくなっていることがわかり非線形の影響が疑われる。

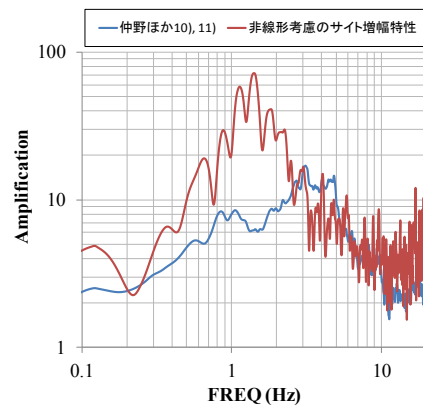


図-4 NIG019における経験的サイト増幅特性の比較

#### 3.2.2 比較結果

新潟県中越地震で設定した疑似点震源モデルのパラメータを表-2に示す。対象地震の規模を考慮し今回は1つの点震源を仮定した。なお, 放射特性・ $P_{RTTN}$  は平均的な値とした。また, 経験的なサイト増幅特性には仲野ほか<sup>10), 11)</sup>のものを, 位相特性には2004年8月6日に発

表-2 設定パラメータ (新潟県中越地震)

地震モーメント $M_0$ (N.m)	1.24*10 <sup>19</sup>
コーナー振動数 (Hz)	0.109
放射特性	0.63
$P_{RTTN}$	1/√2
密度 $\rho$ (g/t <sup>3</sup> )	3.2
$V_s$ (m/s)	3600
経験的サイト増幅特性	仲野ほか <sup>10), 11)</sup>
位相特性	2004年8月6日3時23分 ( $M_{JMA}4.6$ )

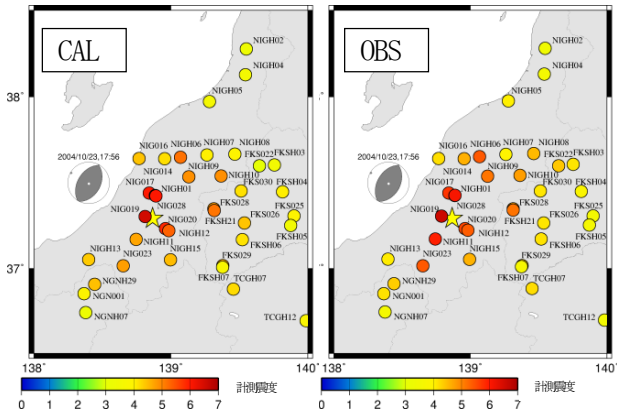


図-5 計測震度の比較 (左:計算, 右:観測)

生じた地震の観測記録を用いる。ただし、仲野ほか<sup>10), 11)</sup>のサイフ特性はフーリエスペクトルの平均値から推定されたものであるから、ここで示すNS・EW方向の結果には平均的なサイト増幅特性が反映されている点に注意されたい。なお、NIG019 (小千谷) のみ (3) 式による非線形の影響を考慮したサイト増幅特性を使用した。

強震動シミュレーションと観測記録それぞれにおける計測震度分布の比較を図-5に示す。図-5左は計算結果、図-5右は観測記録のものである。図中の星印は震源位置を示し、丸印はK-NETもしくはKiK-netの観測地点であり、その色が黒いほど計測震度が大きいことを示している。ただし、計測震度の計算は藤本・翠川<sup>12)</sup>によっている。なお、図中にF-netによる地震のメカニズム解を併せて示している<sup>13)</sup>。図をみれば明らかなように、震源に近いNIGH11, NIG023での計測震度が観測記録に比べて不足しているが、全体的に計測震度分布はよく似通っている。

比較の一例としてNIG019 (小千谷) での計算結果と観測記録の時刻歴波形とフーリエスペクトルの比較を図-6に示す。時刻歴波形は上図から加速度波形、速度波形、変位波形であり、図-6左はNS方向、図-6右はEW方向のものを示している。黒色の実線は観測記録、赤色の実線は非線形を考慮した経験的サイト増幅特性を用いて計算した結果、青色の実線は非線形を考慮せずに計算した結果である。非線形の影響を考慮した結果は、考慮しなかった場合に比べて、時刻歴波形の形状は若干異なっているものの振幅は加速度・速度・変位に関わらずほぼ同等である。このことは、位相特性に用いている過去の観測記録に依っていることが原因である。なお、フーリエスペクトルの比較では、ほぼ同一の振幅および周波数特性であることがわかる。

詳細に検討するため、図-6 (NS成分) の拡大 (0-30秒) を図-7に示す。凡例は図-6と同様である。先の比較で述べたように、振幅についてはほぼ同等であることがわかる。一方で、その波の継続時間については異なっ

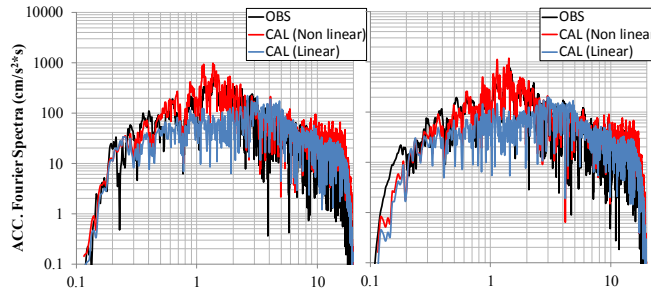
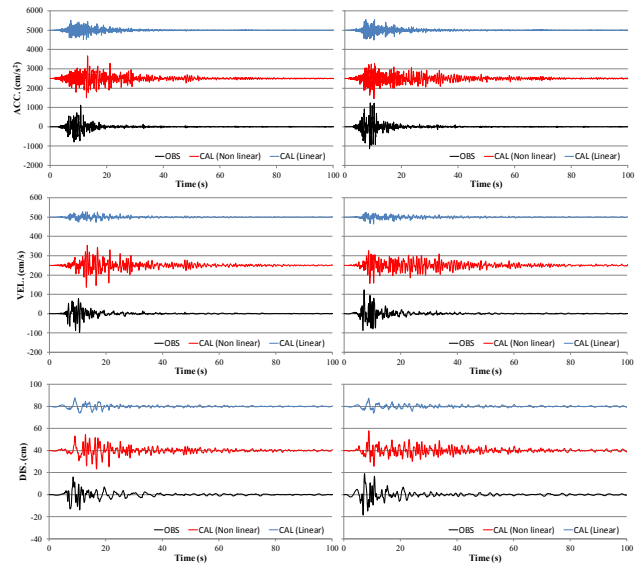


図-6 NIG019 (小千谷) における時刻歴波形とフーリエスペクトルの比較 (黒色の実線:観測, 青色の実線:線形での計算, 赤色の実線:非線形を考慮した計算 ; 図左: NS, 図右: EW)

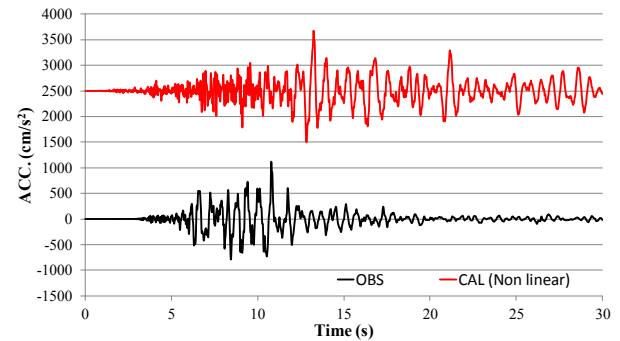


図-7 NIG019 (NS) での時刻歴波形の比較 (拡大)

おり、観測波形の継続時間に比べて計算波形の方が長く続いている。この違いは、位相特性に用いている過去の地震観測記録に依っているためである。今後の予測問題の精度向上のためには、定量的に説明する取り組みが必要と考えらえる。

### 3.3 2014年長野県神城断層地震 ( $M_{\text{JMA}}6.7$ )

長野県神城断層地震で設定した計算パラメータの一覧を表-3に示す。ここでは、対象地震の規模を考慮し1つの点震源を仮定した。なお、放射特性・PRITINは平均的な値とした。また、経験的なサイト増幅特性には仲野ほ

か<sup>10,11)</sup>のものを、位相特性には2014年11月23日に発生した余震( $M_{JMA}4.4$ )の観測記録を用いる。ただし、仲野ほか<sup>10,11)</sup>のサイト増幅特性はフーリエスペクトルの平均値から推定されたものであるから、ここで示すNS・EW方向の結果には平均的なサイト増幅特性が反映されている点に注意されたい。また、長野県神城断層地震の検討結果の詳細については、仲野・境<sup>6)</sup>を参照されたい。

図-8に、計測震度分布の比較結果を示す。

表-3 設定パラメータ (長野県神城断層地震)

地震モーメント $M_0$ (N.m)	$2.76 \times 10^{18}$
コーナー振動数 (Hz)	0.17
放射特性	0.63
$P_{RTTN}$	$1/\sqrt{2}$
密度 $\rho$ ( $g/t^3$ )	3.2
$V_s$ (m/s)	3600
経験的サイト増幅特性	仲野ほか <sup>10), 11)</sup>
位相特性	2014年11月23日12時46分 ( $M_{JMA}4.4$ )

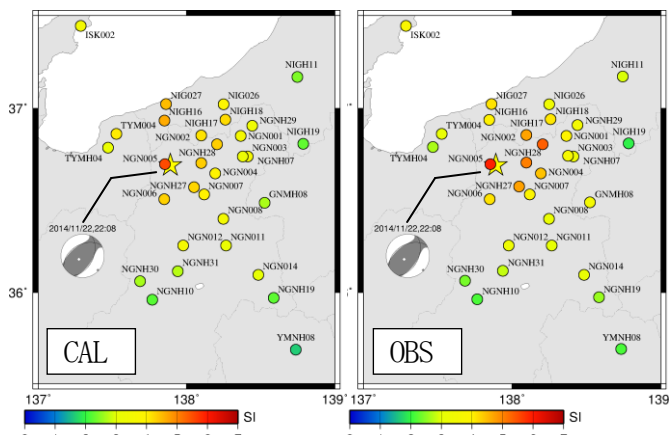


図-8 計測震度分布の比較

図-8右が観測記録(OBS)における計測震度分布、図-8左が疑似点震源モデルによる強震動計算結果(CAL)における計測震度分布である。計測震度は、藤本・翠川<sup>12)</sup>によって提案された手法に基づいて、時刻歴波形(水平方向)のPGAとPGVから推定した。なおF-netで推定された地震のメカニズム解を図中に併せて示す<sup>13)</sup>。各図の星印が震央位置、丸印がK-NETもしくはKiK-netにおける観測地点を示す。図を見れば明らかなように、NGN005(白馬)のような震源直上での計測震度や全体的な計測震度の分布はよく似通っている。また、NGN014(小梅)などの比較的離れた地点でもほぼ同程度の計測震度を再現できていることがわかる。仔細に見れば、震源位置北側のNIGH16、NIG027等で過大に、震源位置東側のNGNH28、NGN002等で過小に評価していることがわかる。紙面の都合上載せて

いないが、擬似速度応答スペクトル( $h=5\%$ )で比較すれば、前者では約1Hz以上の高振動数成分が高めに、後者では、1-2秒程度以上の長周期成分が低めに推定されている。仲野ほか<sup>10,11)</sup>の経験的サイト増幅特性は、地震波形のS波部分をターゲットにして推定されたものであるから、長周期成分を過小評価している可能性がある。従って、経験的サイト増幅特性についての適切な評価が必要である。

図-9、図-10に、震源直上のNGN005(白馬)と震源から約85km離れているNGN014(小梅)の時刻歴波形および加速度フーリエスペクトルの比較をそれぞれ示す。各図左がNS方向、右がEW方向の比較結果であり、時刻歴波形は上から加速度、速度、変位を示している。黒色の実線が観測記録(OBS)、赤色の実線が計算結果(CAL)である。なお、経験的サイト増幅特性の有効振動数範囲を考慮してBPF(0.1-20Hz)を施している。図を見れば明らかであるが、NGN005(白馬)、NGN014(小梅)とも観測記録の振幅値や波の形状、スペクトルの周波数特性をよく再現できている。ただし、NGN014(小梅)での変位波形をみると主要動部分の振幅は似通っているものの、観測波形に見られる後続波形を再現できていない。これは表面波の影響と考えられるが、疑似点震源モデルにおける位相特性は過去の観測記録に依っているため、その考慮は容易ではなく、断層面のディレクティビティ効果の考慮と併せて、今後の検討課題である。

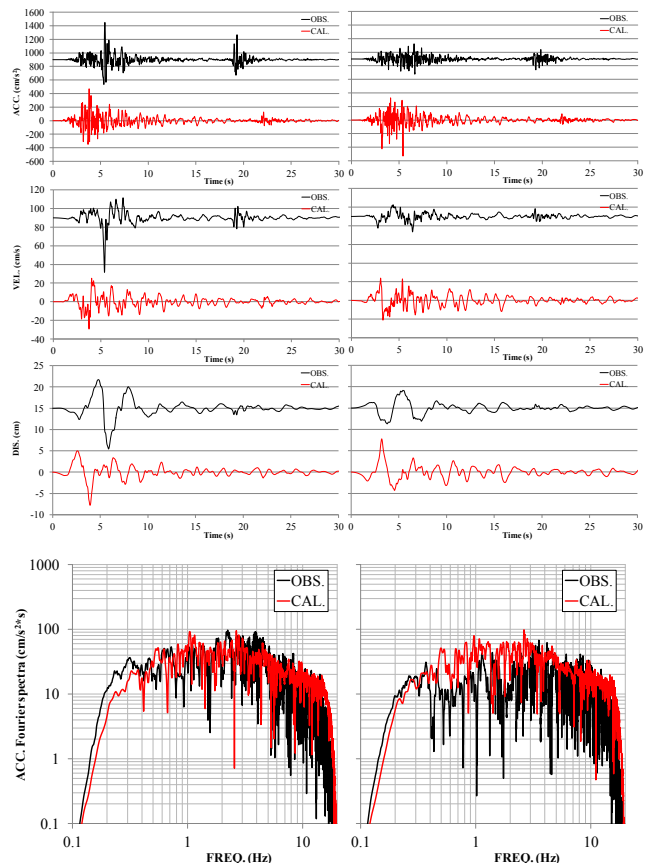


図-9 NGN005(白馬)での比較(左: NS, 右: EW)

#### 4. 十勝沖地震 ( $M_{JMA}8.0$ ) への適用

十勝沖地震は北海道十勝地方の沖合で周期的に発生する地震で、2003年に発生したものはマグニチュード  $M_{JMA}8.0$  の巨大地震であり、人的被害として死者・行方不明者2名・負傷者849名、一部破損を含めた住家被害として2064棟もの被害を出した<sup>17)</sup>。

十勝沖地震を対象にした波形インバージョンが多数実施され例えば<sup>18), 19)</sup>、その目的に応じた断層モデルが推定されている。その中でも、釜江・川辺<sup>19)</sup>によって提案された3つの強震動生成域(アスペリティ)を持つ断層モデルは、強震動予測レシピ<sup>20)</sup>に基づく経験的グリーン関数法による強震動シミュレーションによって、観測波形を精度よく再現できることが報告されている。

野津によって、疑似点震源モデルを用いた2011年太平洋沖地震の強震動シミュレーションが実施され、疑似点震源モデルを用いた計算手法でも、点震源(サブイベント)の適切な配置によって、巨大地震を評価できる可能性とその再現性が確認されている<sup>1)</sup>。

上記を受けて、釜江・川辺<sup>19)</sup>によって設定された断層モデルを用いて、その各アスペリティでの破壊開始点にサブイベントを仮定することで、断層面としての巨大地震の強震動シミュレーションを実施する。

図-12に、釜江・川辺<sup>19)</sup>の断層モデルを参考に設定した疑似点震源モデルにおけるサブイベントの配置を示す。

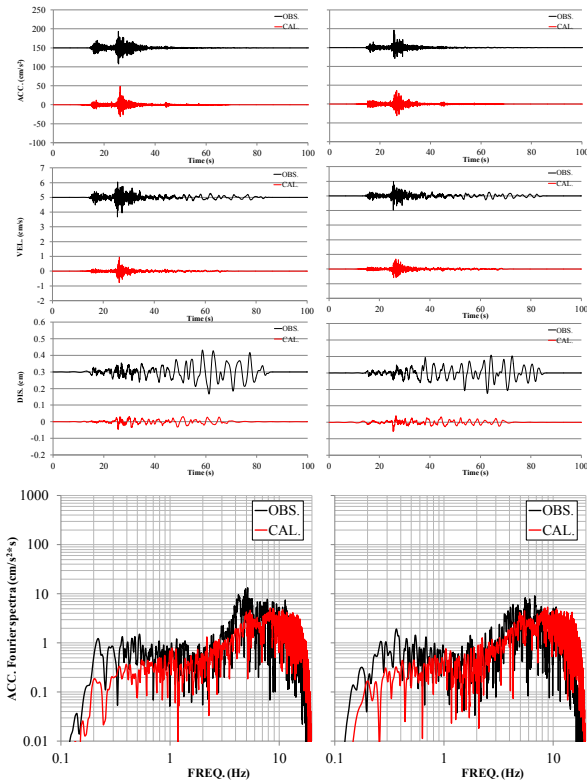


図-10 NGN014 (小梅) での比較 (左: NS, 右: EW)

図-11に、NGN005 (白馬), NGN014 (小梅) での水平変位オービットの比較を示す。図-11左が NGN005 (白馬), 図-11右が NGN014 (小梅) である。黒色の実線が観測記録 (OBS), 赤色の実線が計算結果 (CAL) である。なお、変位波形は図-9, 図-10で示したものをを用いており、時刻歴波形の全データを使用している。図を見れば明らかに、NGN005 (白馬) では水平面オービットが楕円を描き、観測記録と調和的な結果が得られている。このことから、疑似点震源モデルは、仲野ほか<sup>14)</sup> や鈴木ほか<sup>15), 16)</sup> で指摘されている水平2方向の入力地震動の問題を解決する手段としても有力であることがわかった。一方で、NGN014 (小梅) の結果は観測記録と整合しないように見えるが、図-9の変位波形を見れば明らかに、これは主要動部分によるものではなく観測波形の40秒以降の後続波で生じているため、主要動部分では楕円のオービットは両者とも顕著に見られない。

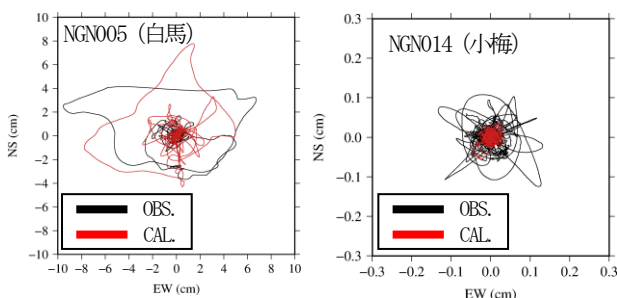


図-11 変位オービットの比較

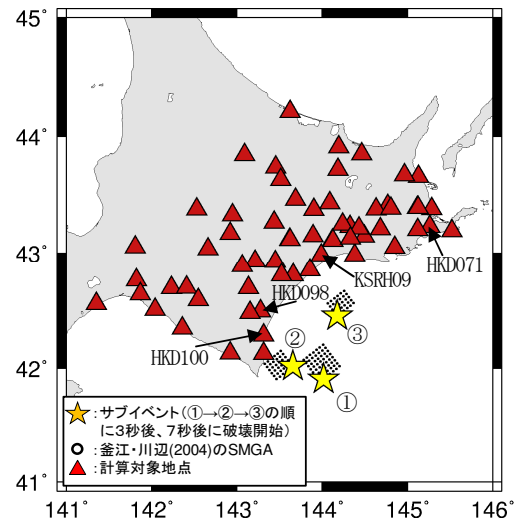


図-12 設定した疑似点震源の配置

図-12の星印は仮定したサブイベントを、丸印は釜江・川辺<sup>19)</sup>の断層モデル(3つのSMGA)、三角印は計算対象地点(K-NETおよびKiK-netの観測地点)を示している。本研究では、彼らの断層モデルを参考にして、3つのサブイベント①, ②, ③を設定した。ここでは彼らが選定した2つの余震を用いて、各サブイベントにおける位相特性と

して使用する。

表-4に、十勝沖地震で設定したパラメータを示す。各サブイベントは図-12と対応している。コーナー振動数は、釜江・川辺<sup>19)</sup>の各アスペリティにおける応力降下量からBoore<sup>7)</sup>の $\omega^{-2}$ モデルを仮定してそれにフィッティングするように推定した。

表-4 設定パラメータ (十勝沖地震)

パラメータ	サブイベント①	サブイベント②	サブイベント③
地震モーメント $M_0$ (N.m)	$1.99 \times 10^{20}$	$8.75 \times 10^{19}$	$6.43 \times 10^{19}$
コーナー振動数 (Hz)	0.098	0.128	0.142
放射特性	0.63		
$P_{BTTN}$	$1/\sqrt{2}$		
密度 $\rho$ ( $g/t^3$ )	3.2		
$V_s$ (m/s)	4000		
経験的サイト増幅特性	仲野ほか <sup>10), 11)</sup>		
位相特性	2003年9月26日7時20分 ( $M_{JMA}5.4$ )	2003年9月27日17時6分 ( $M_{JMA}5.2$ )	

図-13に、計測震度分布の比較を示す。図-13右が観測記録 (OBS) における計測震度分布、図-13左が計算結果 (CAL) における計測震度分布であり、計測震度は藤本・翠川<sup>12)</sup>によって推定した。星印は設定したサブイベントを、丸印は釜江・川辺<sup>19)</sup>の震源モデル、三角印は計算対象地点をそれぞれ示している。なおF-netで推定された地震のメカニズム解を図中に併せて示す<sup>13)</sup>。計測震度の全体的な傾向は再現できているが、仔細に見れば震源に近い地点では過大に、遠い地点では過小に評価していることがわかる。

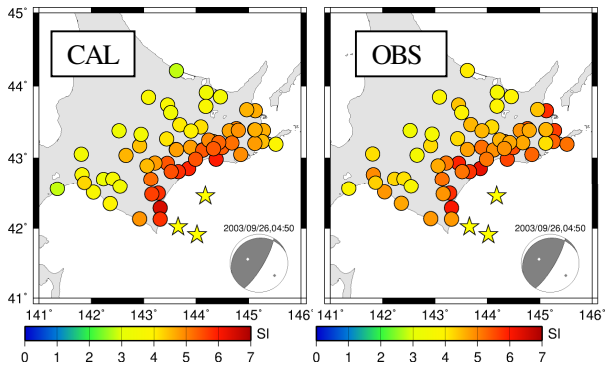


図-13 計測震度分布の比較

図-14-17に、HKD098 (大樹), HKD100 (広尾), KSRH09 (白糠南), HKD071 (厚床)での計算結果と観測記録の時刻歴波形および加速度フーリエスペクトルの比較をそれぞれ示す。各図左がNS方向、右がEW方向の比較結果であり、時刻歴波形は上から加速度、速度、変位を示している。黒色の実線が観測記録 (OBS), 赤色の実線が計算結果 (CAL) である。図-14, 15より、振幅値や波形形状およびスペクトル特性は、観測記録と計算結果に若干の差異があるものの、概ね再現できている。一方で、KSRH09 (白糠南)においては、速度・変位波形で観測記録と顕著な

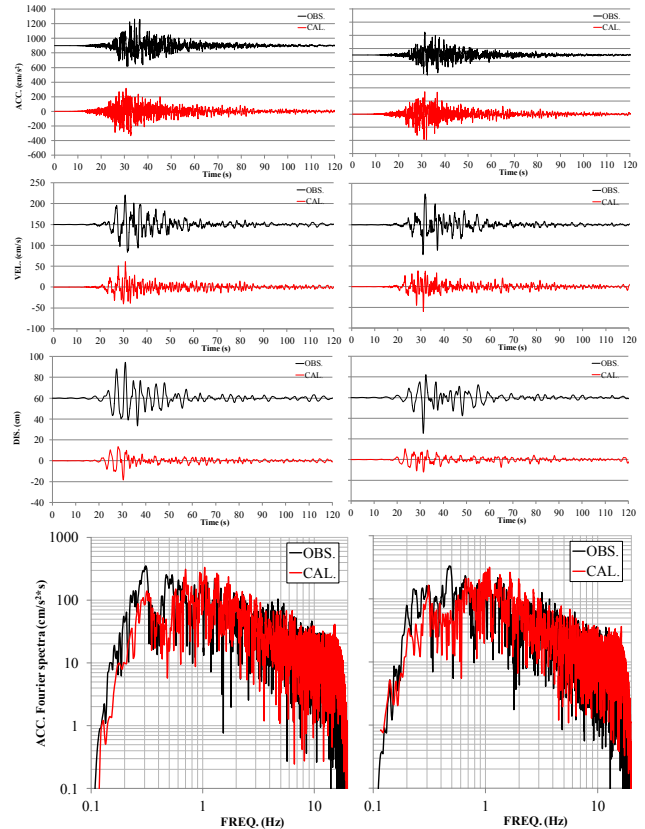


図-14 HKD098 (大樹)での比較 (左: NS, 右: EW)

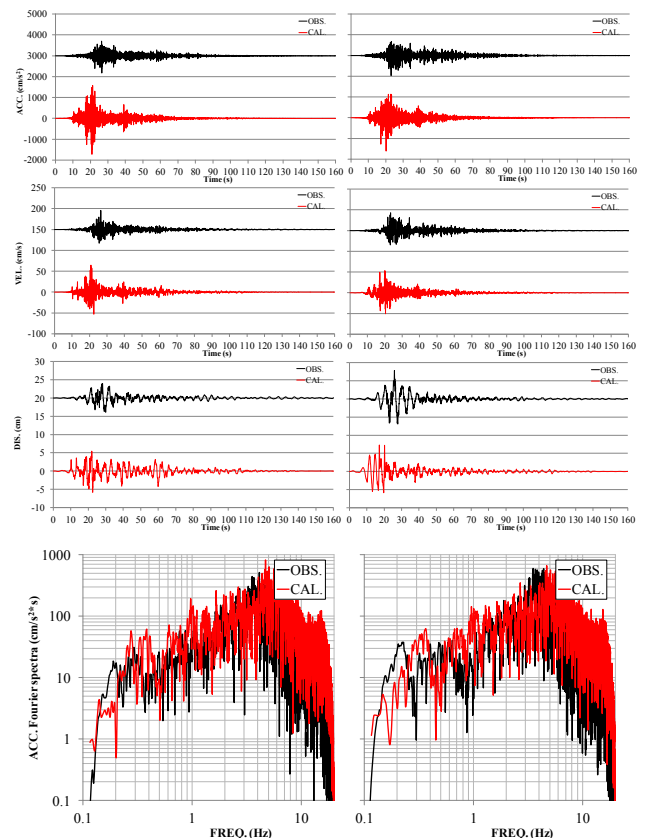


図-15 HKD100 (広尾)での比較 (左: NS, 右: EW)

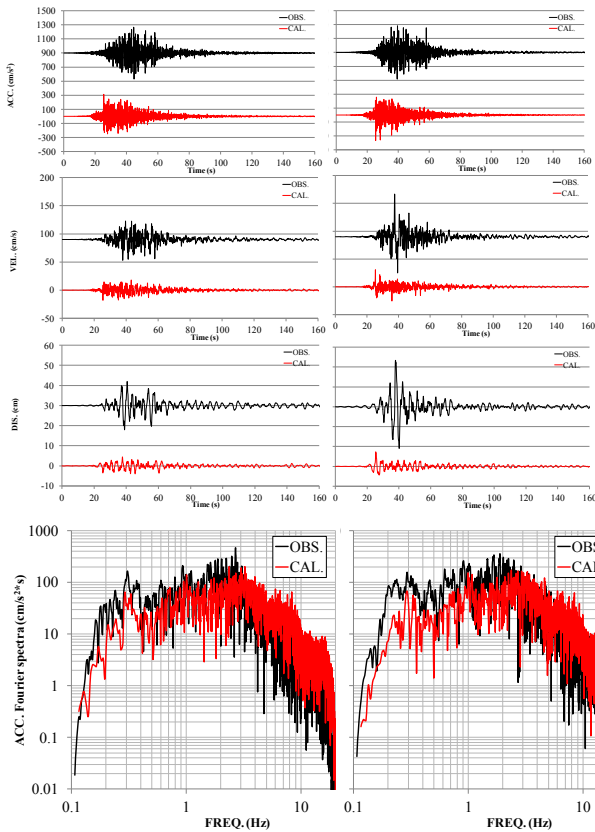


図-16 KSRH09 (白糠南) での比較 (左: NS, 右: EW)

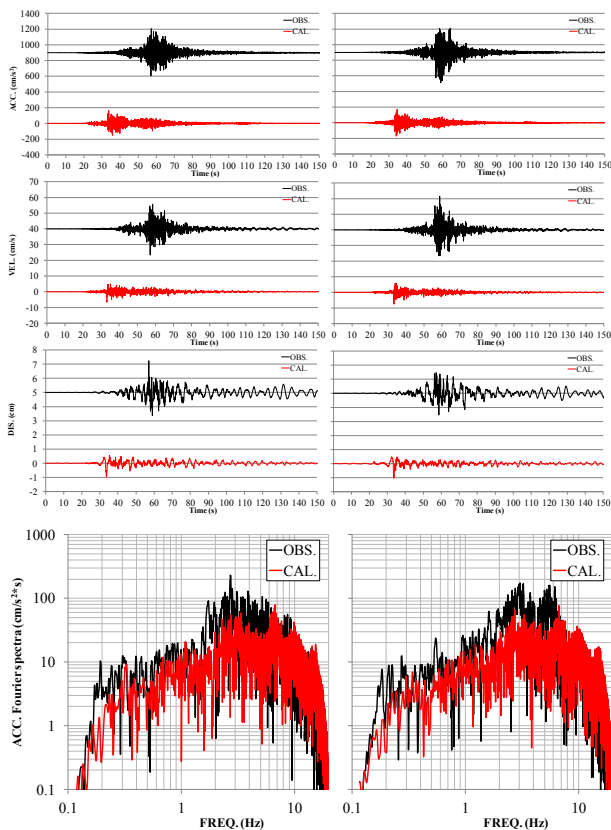


図-17 HKD071 (厚床) での比較 (左: NS, 右: EW)

差異が生じている。他の3地点より震源から離れているHKD071 (厚床) においては、観測波形に比べて明らかに振幅値が過小評価となっており、その波形の形状も異なっている。スペクトルの比較においても、長周期を含めた広帯域で振幅が過小評価となっている。本研究では、点震源の重ね合わせで評価することを試みているので、断層面のディレクティビティによる効果を考慮できていないため、過小評価となった可能性もある。従って、経験的サイト増幅特性の長周期成分の評価と併せて、ディレクティビティの考慮が今後の課題である。なお、時刻歴波形のS波到達時刻がずれているのは位相特性の選択と調整に依るためであり、適切な到達時刻の調整を考える必要がある。

### 5. まとめ

本研究では、疑似点震源モデルによる強震動シミュレーションを、3つの地殻内地震、1つの海溝型地震に対して実施した。その結果、設定したパラメータ (放射特性など) は平均的な値であり観測記録をよく再現するパラメータの事前推定を行っていないにも関わらず、観測記録を概ね再現可能であることがわかった。このことから、設計用入力地震動作成手法としての有効性が示唆される。

海溝型の巨大地震である十勝沖地震を対象とした強震動シミュレーションにおいても、震源に近く震源の影響が大きいと考えられるサイトにおいては、釜江・川辺<sup>19)</sup>によって提案された断層モデルを参考にサブイベントの配置や応力降下量の設定を行うことで、観測波形の再現性が確認できた。一方で、震源から離れた地点では、波の伝播の影響や経験的サイト増幅特性の性質から、特にスペクトルの長周期側で計算結果と観測記録に差異が認められるため、今後より詳細な検討が必要であると考えられる。

上記から、仲野ほか<sup>10), 11)</sup>のS波を対象にした経験的サイト増幅特性における1-2秒程度以上の長周期成分の詳細な評価が必要であると考えられる。また、設計用入力地震動作成手法としての今後の利用を考えれば、サブイベントの配置を決定するための具体的案方策を構築する必要がある。例えば、本研究で示したような、強震動予測手法 (「レシピ」)<sup>20)</sup>に基づいて推定 (想定) された断層モデルに従う方法等がある。

現状では公的な観測サイトでのみ強震動の評価が可能であるが、超高層建物や免震構造物の構造設計における入力地震動作成の場面では、任意の地表面での時刻歴波形が求められる。そのため、地震基盤に対する工学基盤での経験的サイト増幅特性があれば、地表面へは種々の計算方法を駆使することが可能であるから、任意地点での強震動が計算できると推察される。



謝辞：防災科学技術研究所の地震観測網（K-NET, KiK-net）で観測された地震記録を使用させて頂きました。また、京都大学釜江教授には釜江・川辺<sup>19)</sup>における十勝沖地震の断層モデルを提供して頂きました。本研究の一部に、民間7社（㈱安藤・間、㈱熊谷組、佐藤工業㈱、戸田建設㈱、西松建設㈱、㈱フジタ、前田建設工業㈱）による平成26-27年度共同研究「南海トラフ・相模トラフの巨大地震による長周期地震動に関する研究」の成果を用いています。ここに記して感謝の意を表します。一部の図の作成には GMT<sup>21)</sup>を用いています。

### 参考文献

- 1) 野津厚：強震動を対象とした海溝型巨大地震の震源モデルをより単純化する試み，地震 第2輯，第65巻，2012年，pp. 45-67.
- 2) 若井淳，長坂陽介，野津厚：疑似点震源モデルによる2003年5月26日宮城県沖スラブ内地震の強震動シミュレーション，土木学会論文集A1（構造・地震工学），第70号，2014年，pp. 818-829.
- 3) Hata, Y., and A. Nozu. : Pseudo point-source models for shallow crustal earthquakes in Japan, 2nd ECEES, 2014.
- 4) 岩田知孝，入倉孝次郎：観測された地震波から，震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み，地震 第2輯，第39巻，第4号，1986年，pp. 579-593.
- 5) 仲野健一，境茂樹，田邊朗仁，石川理人，久保智弘，久田嘉章：首都直下地震を対象にした強震動予測手法に関するベンチマークテスト その3：2005年千葉県北西部地震における変位オービットによる比較，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造II，2014年，pp. 311-312.
- 6) 仲野健一，境茂樹：疑似点震源モデルを用いた長野県神城断層地震の強震動シミュレーション，日本地震工学会年次大会，2015年，ポスターセッション．
- 7) Boore, D. M. : Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 73, No. 6, 1983, pp. 1865-1894.
- 8) 野津厚，菅野高弘：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法—因果性と多重非線形効果に着目した改良—，港湾空港技術研究所資料，No. 1173，2008年．
- 9) 久田研究室 HP：強震動予測手法に関するベンチマークテストの実施，<http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/>（閲覧：2015年9月30日）.
- 10) 仲野健一，川瀬博，松島信一：スペクトルインバージョン手法に基づく強震動特性の統計的性質に関する研究 その1，日本地震工学会論文集，第14巻，第2号，2014年，pp. 67-82.
- 11) 仲野健一，川瀬博，松島信一：スペクトルインバージョン手法に基づく強震動特性の統計的性質に関する研究 その2，日本地震工学会論文集，第15巻，第1号，2015年，pp. 38-59.
- 12) 藤本一雄，翠川三郎：マグニチュードの影響を考慮した計測震度と地震動強さ指標の関係式，日本地震工学会，第10巻，第2号，2010年，pp. 1-11.
- 13) 広帯域地震観測網 F-net：地震のメカニズム情報，<http://www.fnet.bosai.go.jp/event/joho.php?LANG=ja>（閲覧日：2015年9月24日）
- 14) 仲野健一，境茂樹，田邊朗仁，石川理人，久保智弘，久田嘉章：首都直下地震を対象にした強震動予測手法に関するベンチマークテスト その3：2005年千葉県北西部地震における変位オービットによる比較，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造II，2014年，pp. 311-312.
- 15) 鈴木文乃，渡辺哲史，加藤研一：震源近傍の理論的強震動が示すオービット特性—免震構造物の2次元応答に及ぼす影響に基づく検討—，第14回日本地震工学シンポジウム，2014年，pp. 3045-3046.
- 16) 鈴木文乃，渡辺哲史，加藤研一：オービット形状に着目した震源極近傍の理論的地震動評価—免震構造物の2次元応答に与える影響—，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造II，2015年，pp. 201-202.
- 17) 消防庁：平成15年（2003年）十勝沖地震（確定報），<http://www.fdma.go.jp/data/H160331TokachiJishin.pdf>（閲覧日：2015年9月30日）
- 18) Honda, R., S., Aoi, N., Morikawa, H., Sekiguchi, T., Kunugi, and H., Fujiwara. : Ground motion and rupture process of the 2003 Tokachi-oki earthquake obtained from strong motion data of K-NET and KiK-net, Earth Planets Space, V0. 56, 2004, pp. 317-322.
- 19) 釜江克宏，川辺秀憲：2003年十勝沖地震（M8.0）の震源のモデル化と強震動予測レシピの検証，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造II，2004年，pp. 519-520.
- 20) 地震調査研究推進本部：震源断層を特定した強震動予測手法（「レシピ」）（平成21年12月21日改訂），2008年 [http://www.jishin.go.jp/main/p\\_hyoka.htm](http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka.htm)（閲覧日：2015年10月3日）
- 21) Wessel, P. and W. H. F. Smith. : New, improved version of the Generic Mapping Tools released, EOS Trans. AGU, 79, 1998, p. 579.

---

---

Simulations of Strong Ground Motions Based on the Pseudo Point-Source Model as the Method  
Calculating the Waves in the Time Domain for Structural Design

Kenichi NAKANO, Shigeki SAKAI

The pseudo point-source model was one of the simulation methods for strong ground motions, and it proposed by Nozu (2012). This model has potential to re-calculate the previous earthquakes accurately. In this study, we applied this method to three crustal earthquakes (less than  $M_{\text{JMA}} 7$ ) occurred in Japan, and we obtained the good agreement with observation records, through the comparison of instrumental seismic intensity distributions, waves, and Fourier spectra. For the structure design, we need to investigate that we are able to apply this method to large earthquakes (larger than  $M_{\text{JMA}} 7.0$ ). We applied this method to the 2003 Tokachi-oki earthquake ( $M_{\text{JMA}} 8.0$ ), and we obtained the good agreement with observation records, although we didn't perform the pre-simulation for the optimized parameter. The results (as mentioned above) show that you can use this method to calculate the waves in the time domain for structural design, if you need to consider crustal earthquakes or large ones.