

2011 年東北地方太平洋沖地震の強震動を対象とした複数の震源モデルの パフォーマンスの比較

野津 厚¹⁾

1) 港湾空港技術研究所、地震防災研究領域長 博士 (工学)

e-mail : nozu@pari.go.jp

要 約

2011年東北地方太平洋沖地震の強震動を対象に提案されている複数の震源モデルに関して、各々の震源モデルから計算される地震動と、実際に観測された地震動を比較することにより、震源モデルのパフォーマンスの評価を行った。その結果、構造物に影響の大きい周波数帯域の波形（強震動パルスなど）や「1-2秒震度」を精度良く計算できるSPGAモデルと疑似点震源モデルが、巨大地震に対する構造物の耐震検討に用いる地震動を評価するための震源モデルとしては適していると考えられる。

キーワード： 巨大地震、強震動、震源モデル、SPGAモデル、SMGAモデル、疑似点震源モデル

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震 ($M_w9.0$) は、今日のような密な強震観測網¹⁾²⁾が構築されて以来、初めて発生したM9クラスの巨大地震である。この地震の発生により我々はM9クラスの巨大地震による強震動の実態を初めて知ることになったと言える。今後、他の地域を対象として、同程度の規模の地震を想定した強震動評価を行う機会が増えるものと考えられるが、その際の震源のモデル化においては、東北地方太平洋沖地震の強震記録から得られる知見を反映させることが極めて重要と考えられる。その際、強震動予測の目的が構造物の耐震検討である場合には、対象とする構造物に影響を及ぼしやすい周波数帯域の地震動を正確に計算できる震源モデルが求められる。これまで、東北地方太平洋沖地震の強震動を対象として複数の震源モデル³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾が提案されているが、それらの震源モデルのパフォーマンスを包括的に比較・検討することはこれまで行われていない。本研究では、今後の強震動予測に用いる震源モデルの選択に資することを目的とし、各々の震源モデルから計算される地震動と、実際に観測された地震動との誤差を、構造物への影響が大きい帯域を中心に定量的に評価し、震源モデルのパフォーマンスに関する定量的な比較を行った。

ここで、このような検討を行う上で考慮する必要のある、1995年兵庫県南部地震以降の土木構造物の耐震設計の潮流について述べる。兵庫県南部地震以降、土木構造物の耐震設計においては、それ以前に考慮されていたレベル1地震動に加え、構造物に弾性範囲を超える応答をもたらすようなレベル2地震動を考え、レベル2地震動に対しては構造物の損傷過程に立ち入って耐震検討を行うことが求められるようになった¹⁰⁾。港湾構造物の場合には、主に地盤－構造物系の非線形時刻歴応答解析（有限要素法など）

により照査が行われる。この場合に用いられる地震動は、単に線形応答スペクトルの観点から適切というだけでは不十分であり、経時特性の観点からも適切な地震動である必要がある。例えば、大振幅の波を一波含む地震動か、小振幅の波を多数含む地震動かによって、構造物の応答は変わってくる。このことを考慮し、本研究では、構造物への影響が大きい帯域における時刻歴波形の再現性に特に着目して、震源モデルのパフォーマンスの比較を行う。

港湾の分野では、岸壁に対して最も影響を及ぼしやすい周波数帯域は0.3-1Hzであることが指摘されている¹¹⁾。建築の分野では周期1-2秒程度の地震動が建物の被害に大きく影響することが境ほか¹²⁾¹³⁾により指摘されている（対象は低層住宅および中低層RC建物）。これらに加え、多くの高層建物の固有周波数が0.2-1Hzの範囲に存在することを考えると、0.2-1Hzの周波数帯域は、工学上極めて重要性の高い周波数帯域であると言える¹⁴⁾。東北地方太平洋沖地震をはじめとする海溝型巨大地震においては、この帯域における波形を特徴付けるものとして強震動パルス⁴⁾の生成が確認されている（図1に例を示す）。そこで、以下においては、震源モデルのパフォーマンスの比較を行う際、特にこの帯域における地震動（強震動パルスなど）の再現性に着目することとし、次いで、高周波を含む地震動の再現性についても見ていく。

2. 対象とする震源モデルと比較の条件

本研究で対象とした震源モデル（表1）は、SPGAモデル（＝スーパーアスペリティモデル）³⁾⁴⁾、疑似点震源モデル⁵⁾、およびSMGAモデル⁶⁾⁷⁾⁸⁾である。SPGAモデルとは、東北地方太平洋沖地震をはじめとする海溝型巨大地震において特徴的な強震動パルスのパルス幅と調和的なサイズのサブイベント

（SPGA）から構成される震源モデルであり、サブイベントのサイズは対象地震の場合一辺が数km程度である（表2）。一方、SMGAモデルは、より広い領域（対象地震の場合、一辺が数十km程度）からまんべんなく強震動が生成されるとする震源モデルである。これらはいずれも特性化震源モデルの範疇に属するもので、グリーン関数の重ね合わせにより地震動が計算される。東北地方太平洋沖地震を対象とした場合のSPGAモデルとSMGAモデルの比較を図2に示す。断層面上においてサブイベントが位置する場所については、細部はともかくとして、SPGAモデルとSMGAモデルとの間に類似性が見られる。SPGAモデルとSMGAモデルとの本質的な違いはサブイベントのサイズである。

一方、疑似点震源モデルは、特性化震源モデルよりもさらに単純化された震源モデルであり、各サブイベントに起因する地震動のフーリエ振幅だけが規定される。東北地方太平洋沖地震を対象とする疑似点震源モデル⁵⁾のサブイベントの位置はSPGAモデル³⁾⁴⁾をもとに設定されている。

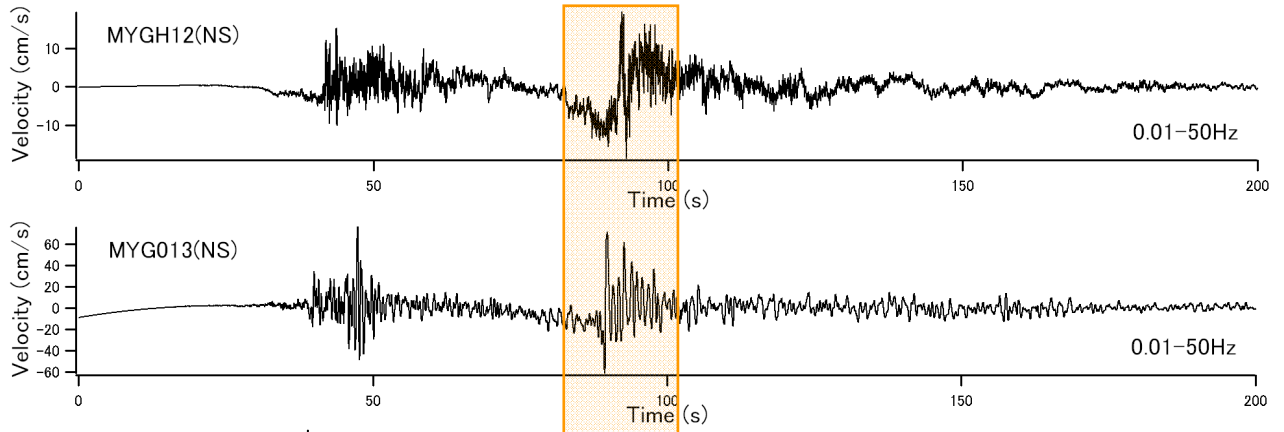
なお、本地震に対して提案されているSMGAモデルのうちKurahashi and Irikura(2013)⁹⁾のものについては本研究では対象としなかった。その理由は、Kurahashi and Irikuraの震源モデルにおいては、2005/8/16宮城県沖の地震（ M_w 7.2）の記録の後半部分がグリーン関数として用いられているが、一部の観測点では、記録を前半部分と後半部分に分けることが、本研究の著者にとっては困難であったためである。

表1 本研究で対象とする震源モデル

著者	震源モデル	強震波形計算手法
野津他(2012) ³⁾⁴⁾	SPGAモデル	経験的サイト増幅・位相特性を考慮した統計的グリーン関数法（古和田他，1998；野津他，2009） ¹⁷⁾¹⁸⁾
佐藤(2012) ⁶⁾	SMGAモデル	経験的グリーン関数法（壇・佐藤，1998） ¹⁵⁾
Asano and Iwata (2012) ⁷⁾	〃	経験的グリーン関数法（入倉他，1997） ¹⁶⁾
川辺・釜江(2013) ⁸⁾	〃	〃
Kurahashi and Irikura (2013) ⁹⁾	〃	〃
野津(2012) ⁵⁾	疑似点震源モデル	疑似点震源モデル独自の計算方法

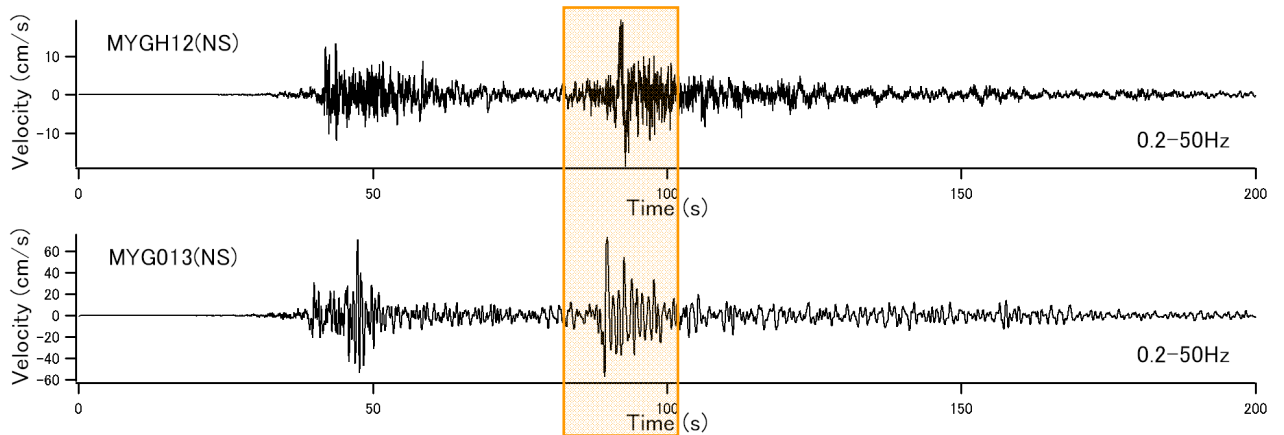
※Kurahashi and Irikuraの震源モデルにおいては、2005/8/16宮城県沖の地震（ M_w 7.2）の記録の後半部分がグリーン関数として用いられているが、一部の観測点では、記録を前半部分と後半部分に分けることが、本論文の著者にとっては困難であったため、今回は対象外とした。

0.01-50 Hz (broadband)



↓ remove low frequency components lower than 0.2Hz

0.2-50 Hz



↓ remove high frequency components higher than 1Hz

0.2-1Hz

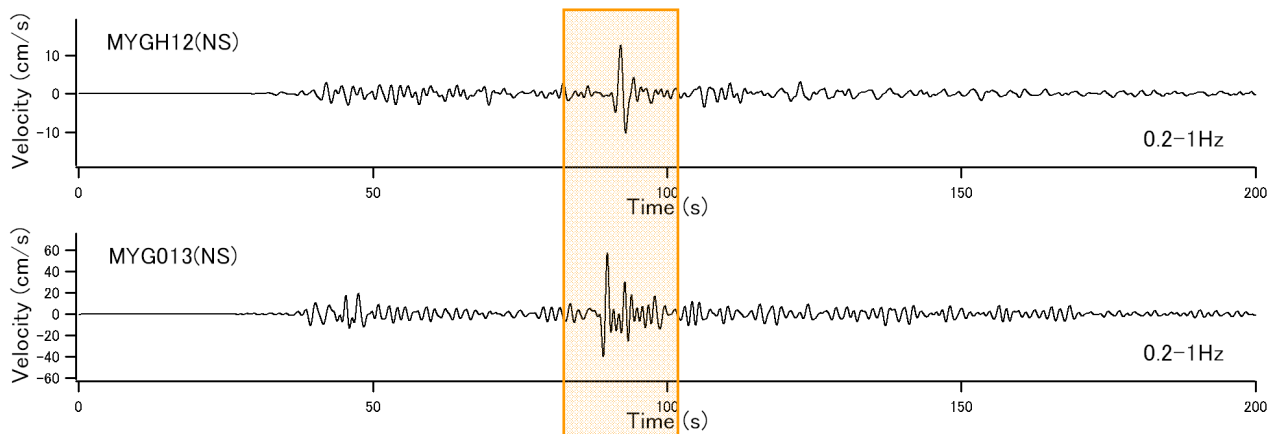


図1 2011年東北地方太平洋沖地震の際に観測された強震動パルス例

地震動の計算には、基本的に、各々の震源モデルの構築に用いられたのと同様の計算手法を用いた。すなわち、佐藤⁶⁾のSMGAモデルについては壇・佐藤の経験的グリーン関数法¹⁵⁾を用い、Asano and Iwata⁷⁾、川辺・釜江⁸⁾によるSMGAモデルについては入倉他の経験的グリーン関数法¹⁶⁾を用いた。グリーン関数イベントとして用いた中小地震も、個々の文献に示されたものと同様である。SPGAモデルについては、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した統計的グリーン関数法¹⁷⁾¹⁸⁾を用いた。疑似点震源モデルに関しては文献5)に記載されている疑似点震源モデル独自の計算方法を用いた。対象地点については、①サブ

SPGAモデル

東北地方太平洋沖地震をはじめとする海溝型巨大地震において特徴的な強震動パルスのパルス幅と調和的なサイズのサブイベント(SPGA)から構成される震源モデルであり、サブイベントのサイズは対象地震の場合一辺が数km程度。

SMGAモデル

より広い領域(対象地震の場合、一辺が数十km程度)からまんべんなく強震動が生成されるとする震源モデル。

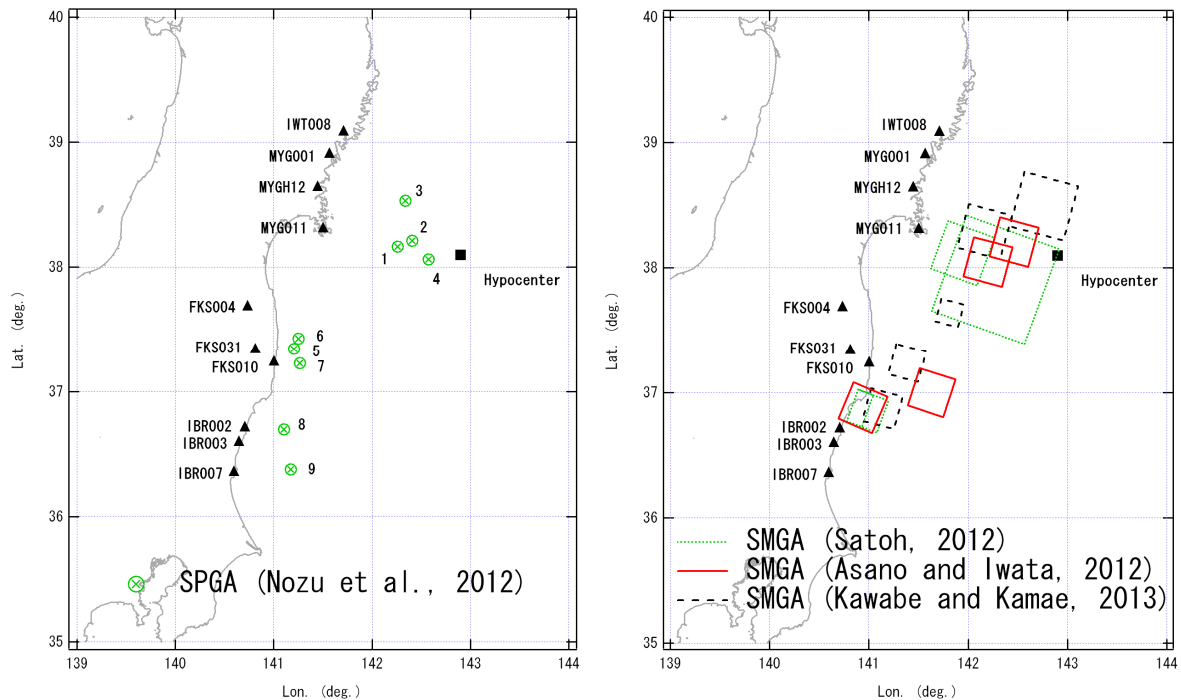


図2 2011年東北地方太平洋沖地震を対象としたSPGAモデルとSMGAモデルの比較

表2 2011年東北地方太平洋沖地震を対象としたSPGAモデルのパラメーター

	Rupture time (h:m:s)	Length (km)	Width (km)	Area (km ²)	M ₀ (Nm)	Rise time (s)
SPGA1	14:46:43.5	3.0	2.0	6.0	8.00E+18	0.17
SPGA2	14:46:46.9	4.0	3.0	12.0	8.00E+18	0.25
SPGA3	14:47:33.4	4.0	2.0	8.0	4.00E+18	0.17
SPGA4	14:47:26.3	3.5	3.0	10.5	2.10E+19	0.25
SPGA5	14:47:57.1	3.0	4.0	12.0	3.00E+18	0.33
SPGA6	14:48:04.4	3.0	4.0	12.0	3.00E+18	0.33
SPGA7	14:48:15.0	6.0	2.0	12.0	5.00E+18	0.17
SPGA8	14:48:25.8	8.0	3.0	24.0	9.00E+18	0.25
SPGA9	14:48:30.9	7.0	7.0	49.0	2.00E+19	0.58

イベントが存在する宮城県から茨城県までの範囲をカバーすること、②地盤の非線形挙動の影響が大きいサイトを避けること、③各々の文献で用いられた中小地震記録が漏れなく観測されていること、を念頭に置き、図2の10地点を選定した。

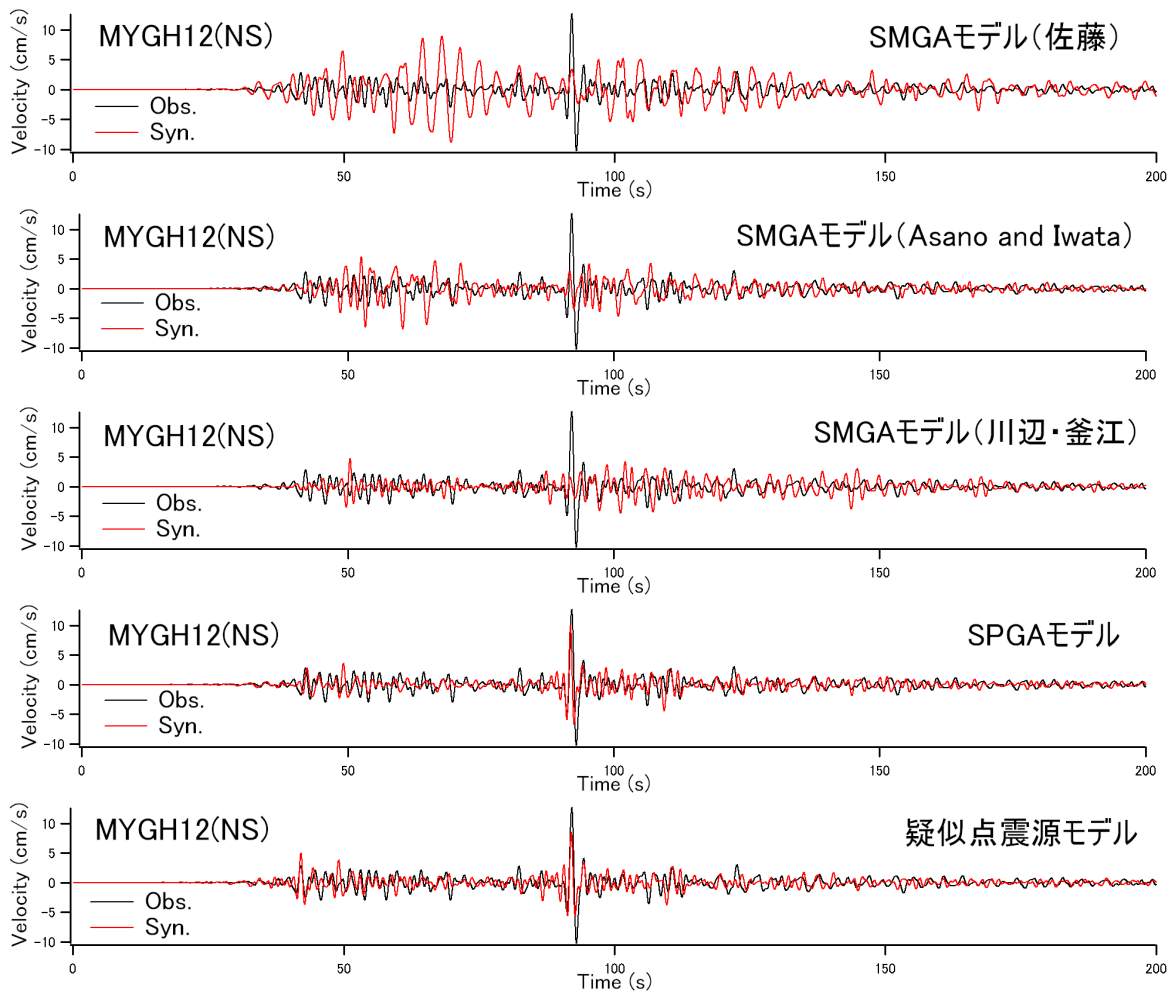


図3 MYGH12における速度波形（0.2-1Hz）の観測結果と各震源モデルによる計算結果

3. 速度波形（0.2-1Hz）の計算結果

図3および図4に、MYGH12およびIBR007における観測波形（0.2-1Hz）と、各震源モデルによる計算結果との比較を示す。図3および図4では、観測波形には強震動パルスが明瞭に表れており、SPGAモデルではそれを再現できているが、SMGAモデルでは残念ながらそれを全く再現できていない。Asano and Iwataと川辺・釜江のモデルでは、強震動パルスに該当する部分が過小評価となっている。佐藤のモデルでは、過小評価とはなっていないが、計算結果はランダムな波形となっており、観測された波形とは特性が全く異なっている。

ここに示している帯域は、はじめに述べたように、岸壁や建物など多くの構造物にとって極めて重要性の高い周波数帯域である。従って、この帯域が正確に計算できないということは、構造物の耐震検討に用いる入力地震動を策定するための震源モデルとして見た場合には、SMGAモデルの致命的な問題点であると言わざるを得ない。

SMGAモデルでは強震動パルスが再現できず、SPGAモデルではそれが再現できる理由は極めて単純である。もともと、SMGAモデルやSPGAモデルの構築に用いられている入倉他の波形合成法¹⁶⁾では、低周波側では要素波がコヒーレントに重なり合ってパルスを生成し、高周波側では要素波がランダムに重なり合うように工夫されている（壇・佐藤の波形合成法¹⁵⁾も同様）。ただし、ここで言う「低周波」「高周波」がどの程度「低周波」「高周波」なのかが問題である。

入倉他の方法で生成されるコヒーレントなパルスは、サブイベントのサイズに起因した時間幅を持っている。この時間幅に対応したコーナー周波数（patch corner frequencyと呼ばれる）よりも高周波側では、入倉他の方法では、ランダムな波形が生成される。サイズの大きいSMGAモデルにおいては、patch corner frequencyは0.1Hz程度あるいはそれよりも低周波側となるので、0.2-1Hz程度の帯域はラン

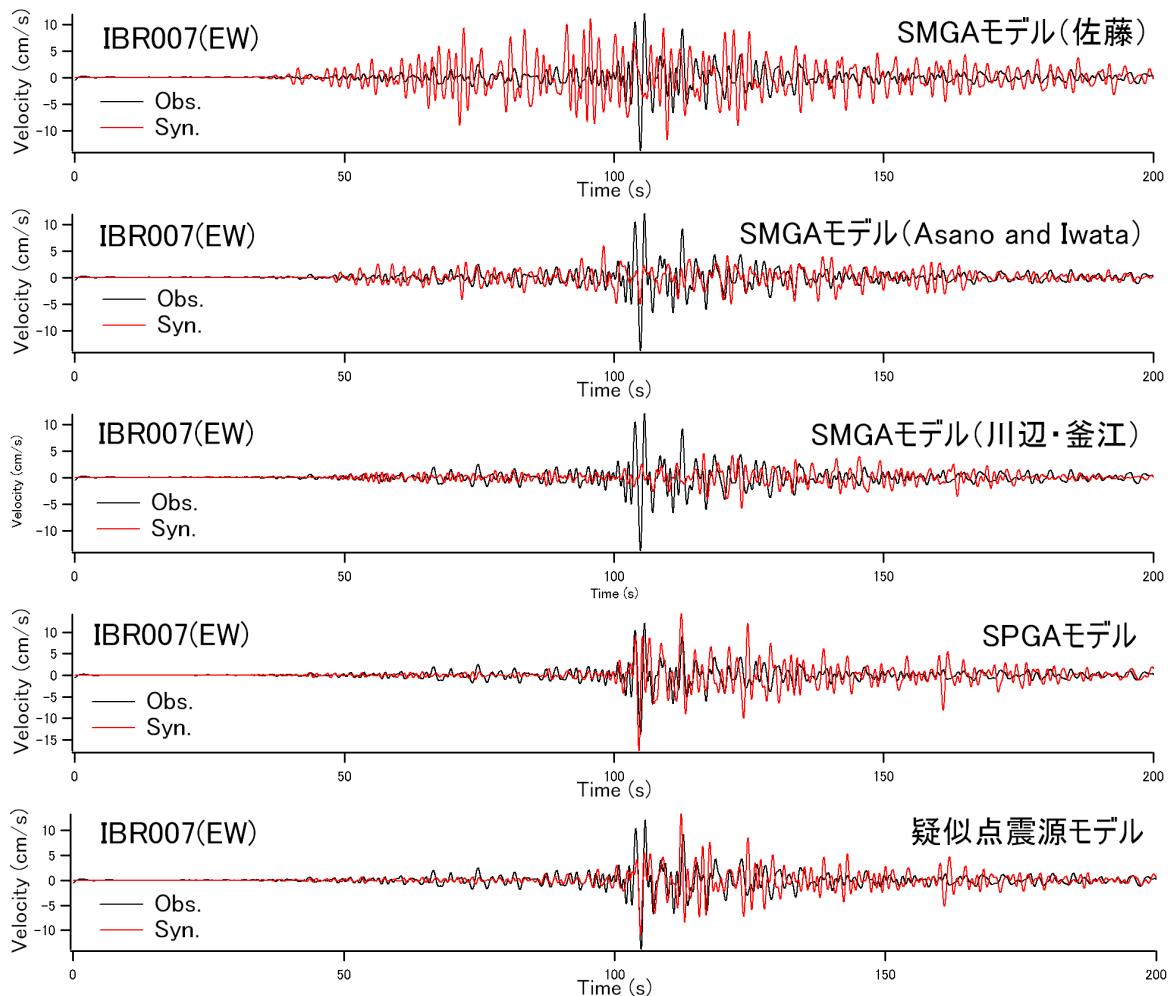


図4 IBR007における速度波形（0.2-1Hz）の観測結果と各震源モデルによる計算結果

ダムな波形にしかならず、この帯域にコヒーレントなパルスを生成することは不可能である。一方、SPGAモデルでは、観測されたパルスの時間幅と調和的なサイズのサブイベントを導入しているので、パルスを再現することができる。

以上のように、0.2-1Hzの帯域のパルスをSMGAモデルで再現できないのは本質的な理由によるものであり、既存のSMGAモデルの枠組みを維持したまま、パラメータの修正のみで0.2-1Hzの帯域での波形の計算精度を向上させることは困難であると考えられる。

さて、図3および図4には疑似点震源モデルによる計算結果も示しているが、疑似点震源モデルによるこの帯域の強震動の計算結果は、SPGAモデルと同程度に良好である。これは、疑似点震源モデルにおいては各々のサブイベントのサイズを陽には規定していないものの、サブイベントの有限性と関連のあるパラメータであるコーナー周波数を導入しており、コーナー周波数をSPGAのサイズと整合するように設定しているため⁵⁾、パルスの時間幅を制御できるためであると考えられる。

4. 各種の指標による観測記録との適合性の評価結果

ここまで、0.2-1Hzの帯域の波形の再現性に着目して震源モデルのパフォーマンスに関する議論を行ってきたが、以下においては、各種の誤差指標を用い、より短周期側も含め、震源モデルのパフォーマンスを総合的に検討する。ここでは文献5)と同様の誤差指標を用い、速度波形（0.2-1Hz）、速度envelope（0.2-10Hz）およびフーリエスペクトル（0.2-10Hz）に関する誤差評価を行った。結果を図5および表3に示す。図5では、SPGAモデルおよび疑似点震源モデルの結果にSMGAモデルによる結果を重ねている。もともと図3および図4に示すように佐藤のSMGAモデルは安全側に設定されている印象があるが、それに対応して図5では、佐藤のSMGAモデルは大きい誤差を与える傾向がある。一方、Asano and Iwata

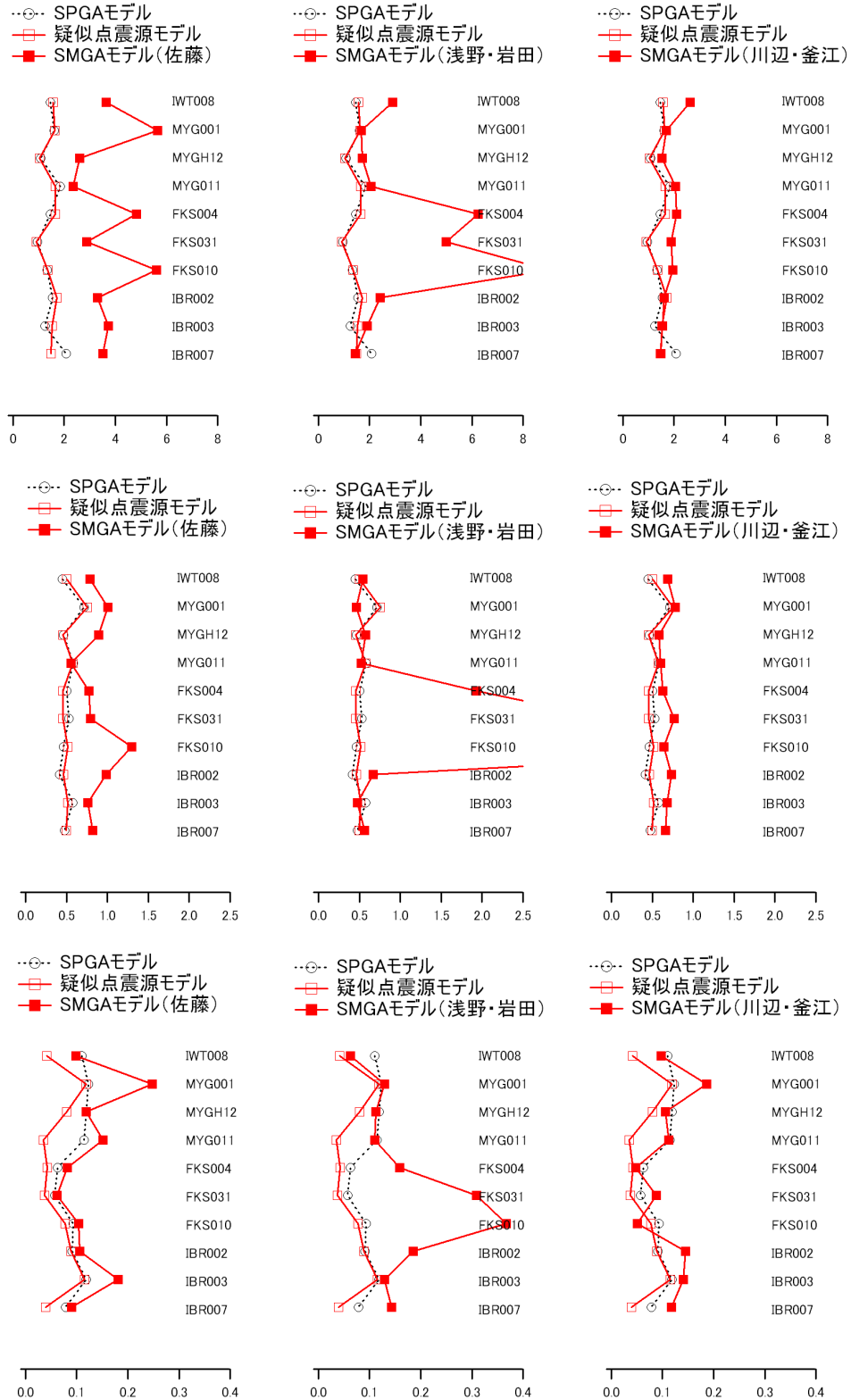


図5 速度波形 (0.2-1Hz) (上)、速度エンベロープ (0.2-10Hz) (中) およびフーリエスペクトル (0.2-10Hz) (下) を対象とした場合の各種震源モデルによる計算誤差の評価結果

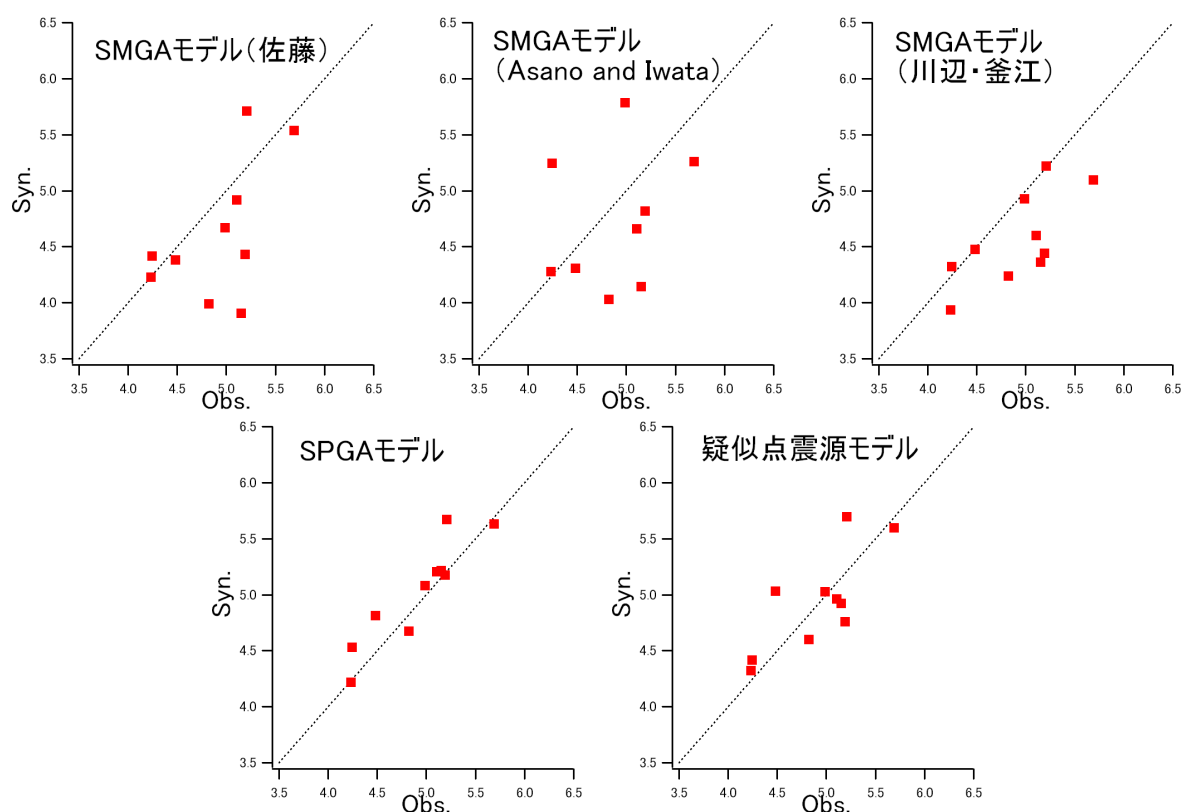


図6 「1-2秒震度」¹³⁾の観測値と計算値の比較

表3 各種の誤差の全地点における平均（赤字は当該指標に関する誤差の最小値）

	速度波形 0.2-1Hz	速度envelope 0.2-10Hz	フーリエスペクトル 0.2-10Hz	1-2秒震度
SPGAモデル	1.46	0.52	0.096	0.21
疑似点震源モデル	1.45	0.52	0.067	0.30
SMGAモデル（佐藤）	3.81	0.87	0.124	0.57
SMGAモデル（浅野・岩田）	3.43	1.61	0.171	0.80
SMGAモデル（川辺・釜江）	1.84	0.68	0.109	0.47

のSMGAモデルは福島県で誤差が大きくなる傾向がある。SMGAモデルの中では、川辺・釜江のものが、速度波形、速度envelope、フーリエスペクトルのいずれの指標で見ても、最も誤差が小さい（表3）。しかし、SPGAモデルおよび疑似点震源モデルと比較すると誤差が大きい（表3）。0.2-1Hzの帯域だけでなく、0.2-10Hzの広帯域で見ても、SPGAモデルおよび疑似点震源モデルによる誤差はSMGAモデルによる誤差よりも小さいという結果であった。

最後に、建物被害と対応の良い指標として境ほか¹³⁾により提案されている「1-2秒震度」の計算を行った。観測波による「1-2秒震度」と合成波によるそれとの比較を図6に示す。この図から、SPGAモデルは観測波の「1-2秒震度」を概ね再現できており、疑似点震源モデルもそれに次ぐ精度を示すのに対し、SMGAモデルは観測波の「1-2秒震度」を再現できていないことがわかる。「1-2秒震度」の誤差を全地点に対して平均したものを表3に示す。SMGAモデルではSPGAモデルに対して2.2倍～3.8倍程度の誤差が生じている。

5. まとめ

本研究では、巨大地震を対象とした強震動予測に用いる震源モデルの選択に資することを目的とし、2011年東北地方太平洋沖地震の強震動を対象に提案されている複数の震源モデルに関して、各々の震源モデルから計算される地震動と、実際に観測された地震動との誤差を、構造物への影響が大きい帯

域を中心に定量的に評価し、震源モデルのパフォーマンスに関する定量的な比較を行った。対象とした震源モデルは、SPGAモデル、SMGAモデル、および疑似点震源モデルである。

まず、港湾構造物をはじめとする多くの構造物にとって重要性の高い0.2-1Hzの帯域の速度波形については、観測波形に明瞭に表れている強震動パルスを再現できるのはSPGAモデルと疑似点震源モデルであり、SMGAモデルではこの帯域の波形を正確には計算できないことを示した。また、その原因は明確であり、既存のSMGAモデルの枠組みを維持したまま、パラメーターの修正のみでこの帯域の波形の計算精度を向上させることは困難であることを指摘した。

次に、各種の誤差指標を用いた震源モデルのパフォーマンスの総合的な検討では、速度波形(0.2-1Hz)、速度envelope(0.2-10Hz)およびフーリエスペクトル(0.2-10Hz)のいずれに関しても、SPGAモデルおよび疑似点震源モデルによる誤差はSMGAモデルによる誤差よりも小さい結果となることを示した。建物被害と対応の良い指標である「1-2秒震度」についても、観測との対応がよいのはSPGAモデルおよび疑似点震源モデルであった。

以上のことから、巨大地震に対する構造物の耐震検討に用いる入力地震動を策定するための震源モデルとしては、SPGAモデルまたは疑似点震源モデルが適していると考えられる。

謝 辞

本研究では(独)防災科学技術研究所のK-NET、KiK-netの強震記録を使用しています。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-net), Seism. Res. Lett., Vol. 69, 1998, pp.309-332.
- 2) Aoi, S., T. Kunugi and H. Fujiwara: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, J. Japan Assoc. Earthq. Eng., Vol.4, 2004, pp.65-74.
- 3) 野津厚: 2011年東北地方太平洋沖地震を対象としたスーパーアスペリティモデルの提案、日本地震工学会論文集、Vol.12、2012年、pp.21-40.
- 4) 野津厚、山田雅行、長尾毅、入倉孝次郎: 海溝型巨大地震における強震動パルスの生成とその生成域のスケーリング、日本地震工学会論文集、Vol.12、2012年、pp.209-228.
- 5) 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ー疑似点震源モデルによる2011年東北地方太平洋沖地震の強震動シミュレーションー、地震2、Vol.65、2012年、pp.45-68.
- 6) 佐藤智美: 経験的グリーン関数法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデループレート境界地震の短周期レベルに着目してー、日本建築学会構造系論文集、No.675、2012年、pp.695-704.
- 7) Asano, K. and Iwata, T.: Source model for strong motion prediction in 0.1-10 Hz during the 2011 Tohoku earthquake, Earth Planets Space, Vol.64, 2012, pp.1111-1123.
- 8) 川辺秀憲、釜江克宏: 2011年東北地方太平洋沖地震の震源のモデル化、日本地震工学会論文集、Vol.13、2013年、pp.75-87.
- 9) Kurahashi, S. and Irikura, K.: Short-period source model of the 2011 Mw9.0 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.103, 2013, pp.1373-1393.
- 10) 土木学会、土木構造物の耐震設計法等に関する第3次提言と解説、2000年、<http://www.jsce.or.jp/committee/earth/propo3>.
- 11) 野津厚、井合進、一井康二、沼田淳紀: ケーソン式岸壁の変形に寄与する地震動の周波数成分、レベル2地震に対する土構造物の耐震設計シンポジウムおよび講習会テキスト、2000年、pp.311-318.
- 12) 境有紀、瀨瀬一起、神野達夫: 建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案、日本建築学会構造系論文集、No.555、2002年、pp.85-91.
- 13) 境有紀、神野達夫、瀨瀬一起: 建物被害と人体感覚を考慮した震度算定方法の提案、第11回日本地震工学シンポジウム、2002年、pp.17-22.
- 14) 野津厚: 海溝型巨大地震による周期1-5秒の帯域の地震動の予測手法について、日本地震学会講演予稿集、B12-04、2010年.
- 15) 壇一男、佐藤俊明: 断層の非一様すべり破壊を考慮した半経験的波形合成法による強震動予測、日本建築学会構造系論文集、No. 509、1998年、pp.49-60.
- 16) 入倉孝次郎、香川敬生、関口春子: 経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良、日本地震学会講演予稿集、No.2、B25、1997年.
- 17) 古和田明、田居優、岩崎好規、入倉孝次郎: 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上

下動の強震動評価、日本建築学会構造系論文集、No.514、1998年、pp.97-104.

18) 野津厚、長尾毅、山田雅行：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良－因果性を満足する地震波の生成－、土木学会論文集A、Vol.65、2009年、pp.808-813.

Performance Evaluation of Source Models to Explain Strong Ground Motions for the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

NOZU Atsushi ¹⁾

1) Director of Earthquake Disaster Prevention Engineering Division, Port and Airport Research Institute, Dr. Eng.

ABSTRACT

In the conventional studies, several source models have been proposed to explain strong ground motions for the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. In this study, the performance of these source models was systematically evaluated by comparing the synthetic ground motions produced by these source models with the observed ground motions. As a result, it was revealed that the SPGA model and the pseudo point-source model can reproduce strong ground motions in the frequency range relevant to structural damage and therefore they are suitable for calculating strong ground motions for future mega earthquakes as long as the calculation is aimed at providing design ground motions of structures.

Keywords: Mega earthquake, Strong ground motion, Source model, SPGA model, SMGA model, Pseudo point-source model