

原子力発電所の基準地震動策定のために 東北地方太平洋沖地震から何を学ぶべきか

野津 厚

のづ あつし

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所

原子力発電所の基準地震動の策定では、南海トラフ地震などのプレート間地震も考慮されるが、その強震動の評価において、東北地方太平洋沖地震の教訓は十分に活かされているとは言えない。大きな加速度と速度を同時にもたらし構造物にとって脅威となる強震動パルスを正確に計算するためには現状の SMGA モデルでは不十分であり、より狭い領域から鋭いパルスが生成されるモデル(SPGA モデル)を用いる必要がある。

福島第一原子力発電所の事故を受けて、原子力発電所の審査体制が見直され、原子力規制委員会による審査が行われるようになった。そこでは、電力事業者が提出した資料にもとづき、基準地震動策定の妥当性についても議論され、南海トラフ地震などのプレート間地震も対象となる。

東北地方太平洋沖地震の際、福島第一原子力発電所と女川原子力発電所では、基準地震動を超える地震動が観測されている(例えば文献1)。断層面上でどのように強震動が生成され、その結果としてどのように基準地震動を上回る地震動となったのか、十分な分析を行い、その結果を次の予測に活かすことは、電力事業者の責務であると考えられる。しかしながら、電力事業者が規制委員会の審査会合に提出した資料(例えば文献2)を見ると、東北地方太平洋沖地震の経験から十分に学ばないうちに南海トラフ地震の予測に進んでしまっているという印象を受ける。

本稿では、伊方原子力発電所の事例²を通じ、プレート間地震を対象とした強震動評価の問題点を論じる。本稿で論じるのは主に以下のような点

である。①東北地方太平洋沖地震の際、断層面上の狭い領域(SPGA)から生成された鋭いパルスが原子力発電所での地震動の最大振幅を決めていること、②このパルスを正確に計算するためには現状の SMGA モデルでは不十分であること、③ SPGA が原子力発電所に近いとの想定で評価された地震動は電力事業者による想定を上回り得ること。

女川原子力発電所と福島第一原子力発電所に基準地震動を超える地震動をもたらしたパルス波

東北地方太平洋沖地震の際、宮城県内の多くの観測点で時間幅 1~2 秒程度の鋭いパルス状の地震動が観測されたこと、特に第 2 波群の先頭に位置するパルスが強力で、それは仙台市から見て 150 km も沖合(図1の SPGA4)から到来したと考えられること、などについてはすでに既報³で述べた。このパルスは、東北工業大学が仙台市とその周辺に展開していたアレー強震観測網 Small-Titan⁴(位置を図1に示す)によっても捉えられている。図2はその様子を示したものである。図の横軸は震央での破壊開始時刻からの経過時間、縦軸は SPGA4 から各観測点までの距離である。斜めの破線は、仮に SPGA4 において 14 時 47 分 26.3 秒にパルスが生成され、それが S 波速度 3.9 km/s で伝播するとした場合に、各観測点にパルスが到達する時刻を示したものであるが、実際ほぼその時刻にパルスが到来していることがわかる。この結果からも、上述の場所で上述の時刻にパルスが

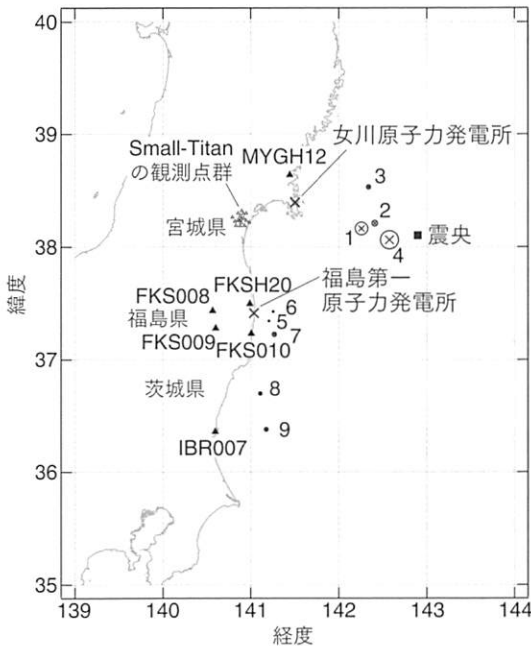


図1—東北地方太平洋沖地震のSPGAモデル^{5,6}
 円の半径はSPGAの短周期レベル⁶に比例させている。×は女川原子力発電所と福島第一原子力発電所の位置、△はSmall-Titan⁴の観測点、▲は本稿に登場する防災科学技術研究所の強震観測網⁷の観測点。

生成されたと考えることの妥当性を確認できる。また、ほぼすべての観測点でSPGA4起因のパルスが観測地震動の最大振幅を決定していることがわかる(ここで示しているのは周期1~5秒の速度波形)。

SPGA4に起因するパルス波は女川原子力発電所でも観測されている。図3は地中(-128m)での南北成分(水平2成分のうち大きいほう)の加速度波形と速度波形(周期10秒以上をカットして周波数領域で積分)を示している。ここでの時間軸の原点は記録開始時刻で、記録開始の約90秒後にSPGA4からのパルスが到来し、そのときに加速度波形、速度波形とも最大値を示している。すなわち、SPGA4の破壊が女川原子力発電所に基準地震動を超える地震動をもたらしたと言える。

鋭いパルス波は宮城県だけでなく福島県や茨城県でも観測されている⁵。筆者らはこれらのパルスを含む強震動を説明できる震源モデルの構築を行ってきた(図1)^{5,6}。この震源モデルでは、福島沖で3つのSPGA(図1のSPGA5~7)が7~11秒ほどの間隔をおいて破壊するとしている。図4はこ

のうち最も強力なSPGA7からのS波の伝播の様子を示したものである。図の横軸は震央での破壊開始時刻からの経過時間、縦軸はSPGA7から各観測点までの距離、斜めの破線はS波速度を3.9 km/sと仮定した場合に各観測点にパルスが到達する時刻である。福島第一原子力発電所の波形はP3地点(6号機原子炉建屋基礎版上)の東西成分(水平2成分のうち大きいほう)であるが、SPGA7からのパルスの到来とともに最大値を示している。ここで示しているのは周期1~5秒の速度波形であるが、加速度波形も対応する時刻に最大値を示している。すなわち、SPGA7の破壊が福島第一原子力発電所に基準地震動を超える地震動をもたらしたと言える。

パルスを正確に計算するためには現状のSMGAモデルでは不十分である

このようなパルス波を正確に計算するためには現状のSMGAモデルでは不十分であり、より狭い領域から鋭いパルスが生成されるモデルを用いる必要がある^{5,6,8}。このような重要な知見が伊方発電所の強震動評価⁹には反映されていない。

既報⁹で議論したように、パルスの時間幅は、そのパルスを生成した断層面上の小領域(SPGA)が一定の時間地震波を出し続けると考えたとき、地震波が観測点に最初に到来してから最後に到来するまでの時間差で決まる。これには、SPGA上を破壊が伝播するのに要する時間、SPGA上の各部分が地震波を出し続ける時間、観測点の方向などが関係するが、東北地方太平洋沖地震の際に観測されたような時間幅1~2秒の鋭いパルス波を計算で再現するためには、そのパルスを生成した領域(SPGA)として比較的狭い領域を考える必要がある。筆者らが開発した震源モデルであるSPGAモデル^{5,6}は、このような比較的狭い領域(SPGA)から構成される震源モデルであり、SPGAのサイズは、地震にもよるが、一辺が数km程度である。

それに対して、より広い領域(東北地方太平洋沖地震の場合、一辺が数十km程度の領域)からまんべんなく

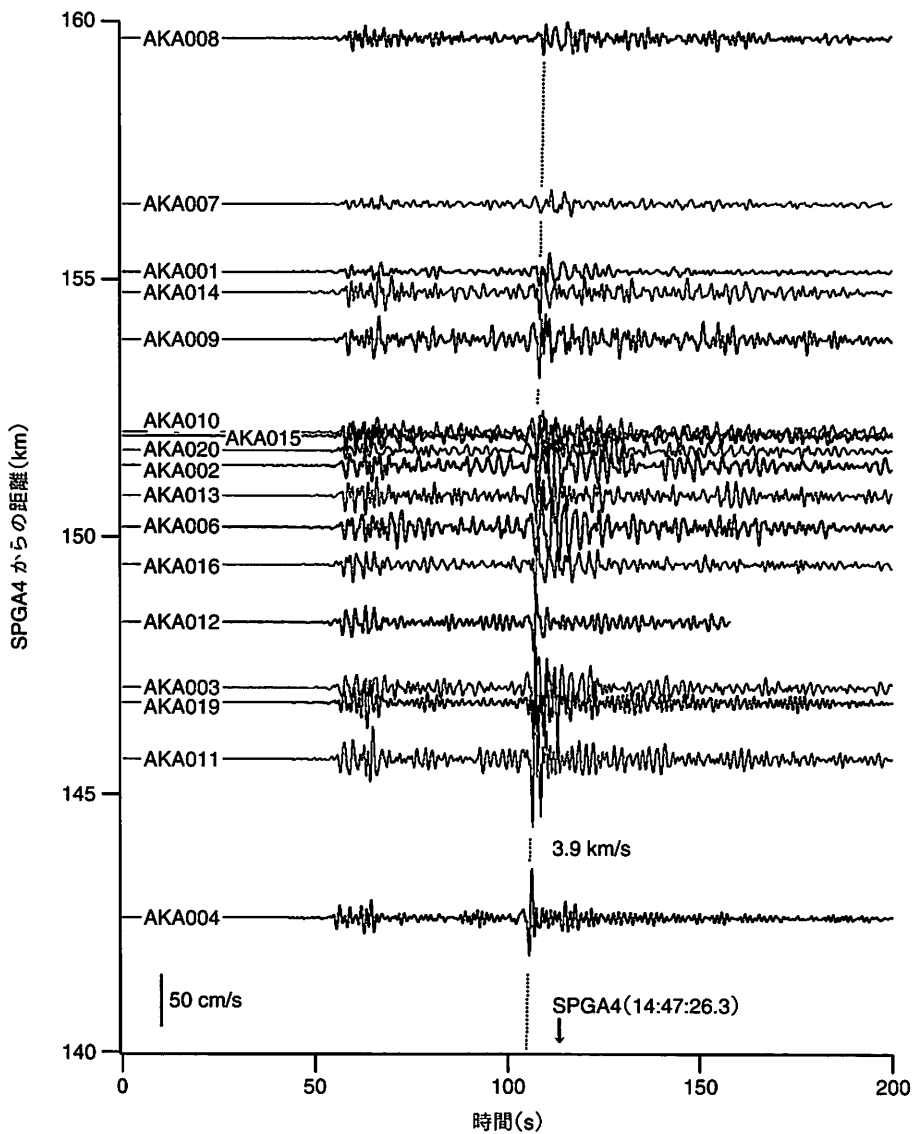


図2—Small-Titan⁴が捉えたSPGA4に起因するパルスの伝播の様子

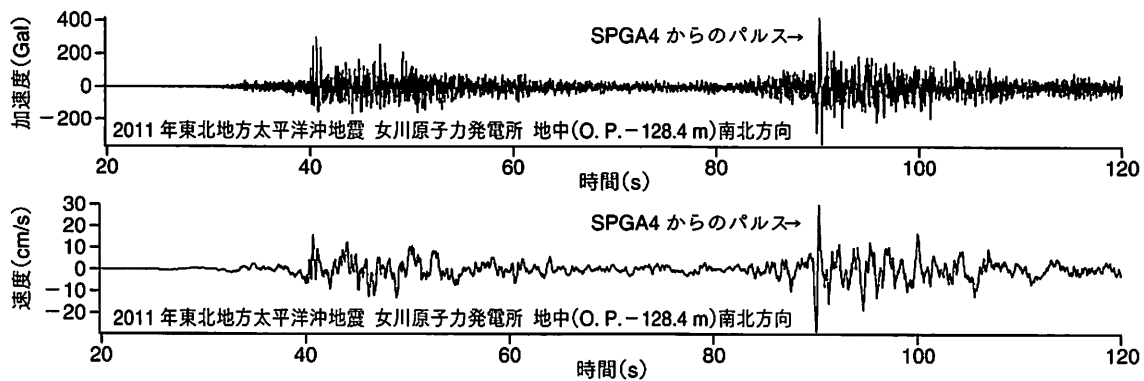


図3—女川原子力発電所で観測されたSPGA4起因のパルス波(上:加速度, 下:速度)

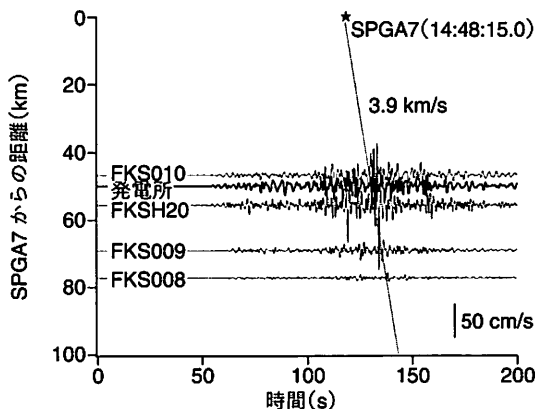


図4—SPGA7に起因するパルスの伝播の様子

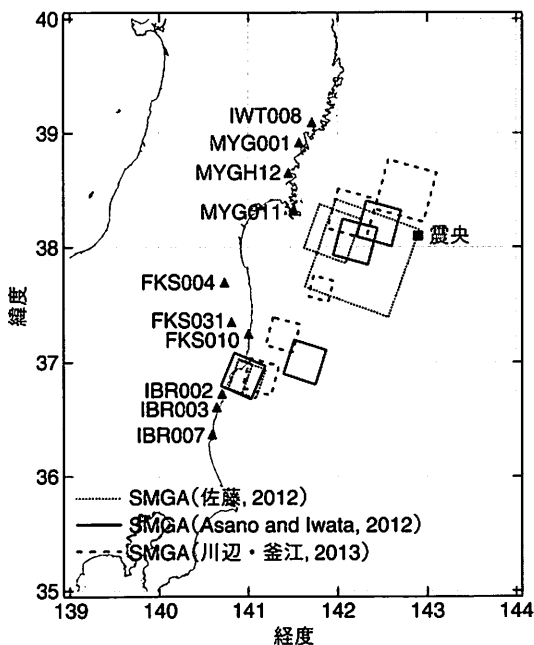


図5—東北地方太平洋沖地震を対象として提案されているSMGAモデル⁹⁻¹¹

強震動が生成されるとする震源モデルもあり、それらはSMGAモデルと呼ばれる。伊方原子力発電所の事例²で南海トラフ地震に対して用いられているのはSMGAモデルである。東北地方太平洋沖地震を対象に提案されているSMGAモデル⁹⁻¹¹を図5に示す。以下においてはSMGAモデルによる地震動の計算結果をSPGAモデルの結果と比較して示すが、最初に述べておきたいのは、これらのSMGAモデルはいずれも第一線の優れた研究者によって開発されたものであるとい

う点である。それにもかかわらず、以下に述べるように、SMGAモデルは観測された地震動の最も重要な部分を再現することに成功していない。このことは、現状のSMGAモデルに限界があることを示唆している。なお、東北地方太平洋沖地震を対象としたSMGAモデルとしてはKurahashi and Irikura⁸のモデルもあり、これについては後述する。

図6および図7に、MYGH12およびIBR007(位置を図1に示す)における観測波形(周期1~5秒)と、SMGAモデルおよびSPGAモデルによる計算結果との比較を示す。各モデルによる地震動の計算には、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ている。すなわち、佐藤⁹のSMGAモデルについては壇・佐藤の経験的グリーン関数法¹²を用い、Asano and Iwata¹⁰、川辺・釜江¹¹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¹³を用いている。経験的グリーン関数法とは中小地震波形の重ね合わせにより大地震波形を合成する手法である。重ね合わせに用いる中小地震も個々の文献に示されたものと同じものを選択している。SPGAモデルについては文献^{5,6}に示された方法、すなわち、経験的サイト増幅・位相特性を考慮して設定したグリーン関数を入倉他の方法¹³で重ね合わせる方法で地震動を計算している。

図6および図7では、観測波形には鋭いパルスが現れており、SPGAモデルではそれを再現できているが、SMGAモデルではそれをまった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まったく性質が異なっている。

SMGAモデルにより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以下の通りである。もともと、SMGAモデルやSPGAモデルで採用されているグリーン関数の重ね合わせ^{12,13}では、低周波側では要素波が効率的

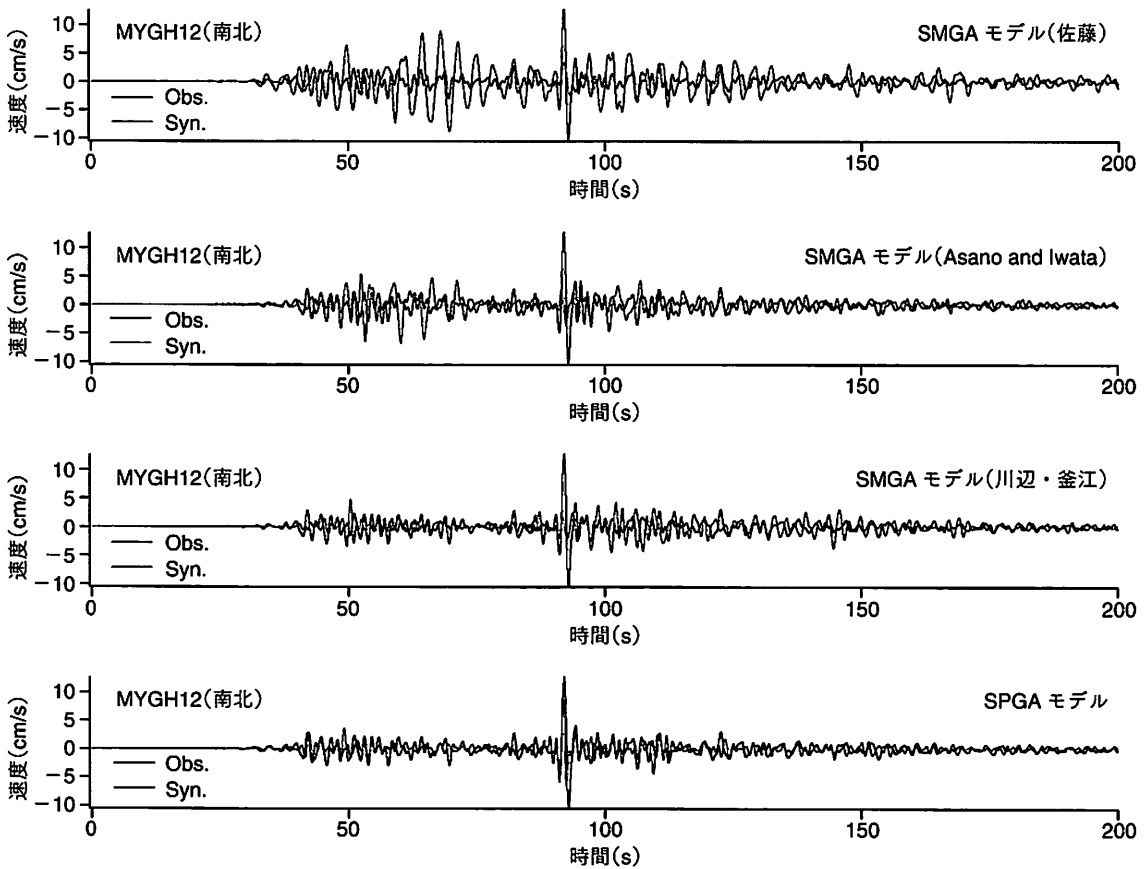


図6—MYGH12における速度波形(周期1~5秒)の観測結果(Obs.)とSMGAモデルおよびSPGAモデルによる計算結果(Syn.)

に(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。ここで「コヒーレントに」あるいは「ランダムに」重なり合うとは次のようなことである。いま、同じ周期で同じ振幅の正弦波を N 個重ね合わせることを考えたとき、これらの正弦波の位相が揃うように重ね合わせれば(すなわち山と山、谷と谷が合うように重ね合わせれば)、最も効率的に重なり合い、振幅は N 倍となる。これが最もコヒーレントな重ね合わせである。それに対して、 N 個の正弦波をばらばらのタイミングで重ね合わせれば、山と山、谷と谷が合わないため、加算は非効率となり、重ね合わせ後の振幅の期待値は理論上 $N^{1/2}$ 倍となる。これがランダムな重ね合わせである。グリーン関数の重ね合わせ^{12, 13}では、要素波は時間軸上で少しずつずれながら加算されるが、このとき、要素波の低周波成分(=長

周期成分)は、時間軸上で多少ずれたとしても、ほぼ山と山、谷と谷が重なる。すなわちコヒーレントに重なる。しかし、要素波の高周波成分(=短周期成分)は、時間軸上でずれることにより、簡単に山と山が合わなくなるため、ランダムに重なる。

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。グリーン関数の重ね合わせで生成されるコヒーレントなパルスは、仮定するSMGAやSPGA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とよばれる)よりも高周波側では、グリーン関数の重ね合わせによりランダムな波形が生成される。したがって、サイズの大きいSMGAモデルにおいては、patch corner frequencyは0.1 Hz程度以下(周期10秒以上)となるので、周期1~2秒の帯域はランダムな波形にしかならず、この帯域にコヒーレ

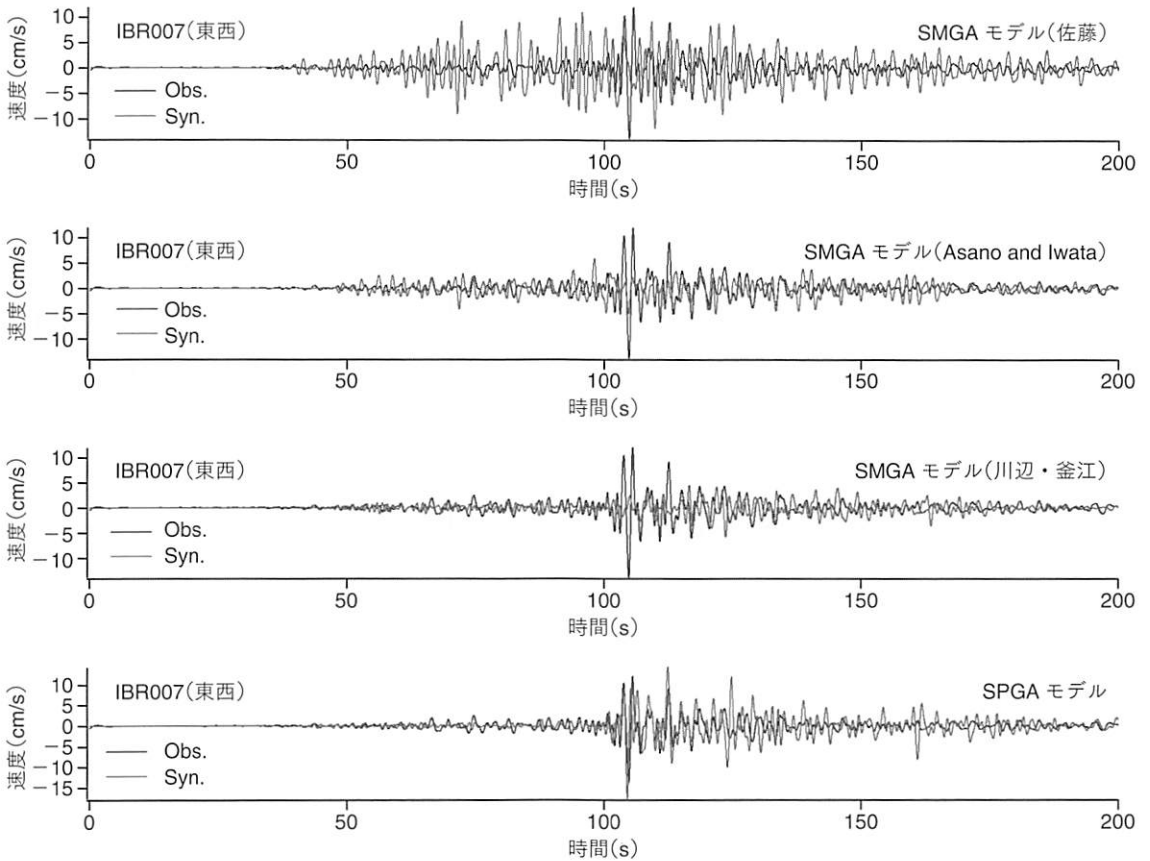


図7—IBR007における速度波形(周期1~5秒)の観測結果(Obs.)とSMGAモデルおよびSPGAモデルによる計算結果(Syn.)

ントなパルスを生成することは不可能で、実際の観測に一致しない。一方、SPGAモデルでは、これまで述べてきたように、観測されたパルスの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、周期1~2秒の帯域のパルス波を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、従来の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と考えられる。

従来のSMGAモデルでは東北地方太平洋沖地震の際の女川原子力発電所での観測波を再現することが困難であることはKurahashi and Irikura⁹も指摘している。この研究では、SMGAの中にパルスを生成するための小領域を設定しており、この小領域が筆者らの研究^{5,6}のSPGAに相当する

と考えられる。

SPGAが原子力発電所に近いとの想定で評価された地震動

東北地方太平洋沖地震の際、最も強い地震波を励起したSPGA4は、震央より若干陸側であったとは言え、仙台市から見ても150kmも沖合であったことは不幸中の幸いであった³。今後懸念されるのは、原子力発電所がプレート境界に近い場合に、同じように強いSPGAの破壊が原子力発電所に近い場所で生じることである。伊方発電所付近のフィリピン海プレート上面深度はわずか約41kmとされている²。したがって上述のような強いSPGAの破壊が原子力発電所の近くで生じる可能性も否定できない。その場合に想定される地震動を、手元で利用可能な情報のみを用いて試

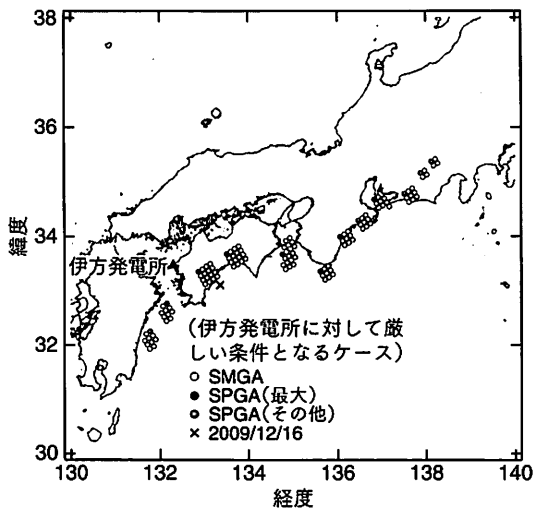


図8—内閣府¹⁴の陸側ケースのSMGA(白丸)内に設定したSPGAの位置(黒丸または灰色の丸)
黒丸は最大のSPGAを、灰色の丸はその他のSPGAを示す。

算してみた。

まず、図8に示すとおり、内閣府による南海トラフ巨大地震のSMGAモデル(陸側ケース)¹⁴を出発点とし、各SMGAを構成する小断層の中で最も伊方発電所に近いものを選び出し、そこにSPGAを配置する。このとき配置するSPGAのパラメータは、東北地方太平洋沖地震の地震動の再現に用いたパラメータとする。ただし、東北地方太平洋沖地震の各SPGAのうち、最も強力なSPGA4を図8の黒丸の位置におく。地震動の計算手法は、東北地方太平洋沖地震による地震動の再現に用いたのと同様の手法^{5,6}である。ただし、経験的サイト増幅特性は、伊方発電所の敷地における地震観測記録を筆者は入手できていないため、伊方発電所の敷地における地盤が堅固であることを考慮し、利用できるデータの範囲で愛媛県ではもっともサイト増幅特性の小さいEHMH07地点での経験的サイト増幅特性(図9)¹⁵を用いた。ここで経験的サイト増幅特性とは、当該地点における中小地震観測記録から経験的に導かれたサイト増幅特性である。またサイト位相特性としては2009年12月16日の地震におけるEHMH07の記録を用いた。

計算結果の加速度波形と速度波形を図10に示

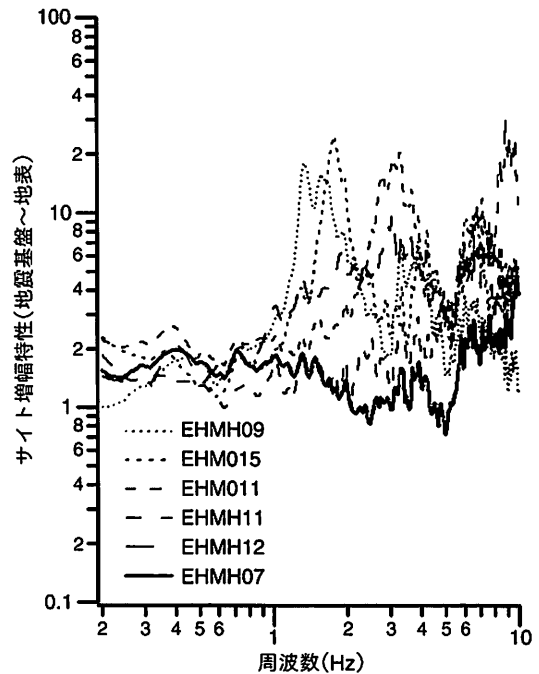


図9—試算に用いたEHMH07の経験的サイト増幅特性¹⁵
他の地点における経験的サイト増幅特性と併せて示す。

す。この図にあるように、最大加速度は約1066 Gal、最大速度は約129 cm/sとなり、サイト増幅特性が小さいという条件を織り込んで、SPGAからの最短距離が小さいために、加速度、速度ともに大きな値となった。これらの数字は伊方発電所の基準地震動を超過している。なお、図9に示すEHMH07地点の経験的サイト増幅特性は、5~10 Hzの高周波側では薄い堆積層に起因する増幅が見られる。この増幅は地盤が堅固である伊方発電所の解放基盤面では見込む必要がないと考えられるため、EHMH07のサイト増幅特性において5 Hz以上の増幅している部分を強制的に1と設定したケースも検討しているが(このケースは基準地震動の設定とほぼ同等の地盤条件になっていると考えられる)、最大加速度は約878 Gal、最大速度は約128 cm/sで大きな変化は見られなかった。この場合も現在設定されている基準地震動を上回る地震動となる。こうした結果が得られるのは、このケースではSPGAから生成される周期1秒前後のパルス状の地震波が最大加速度および最大速度を決定しており、高周波成分の堆積層内での増幅が最

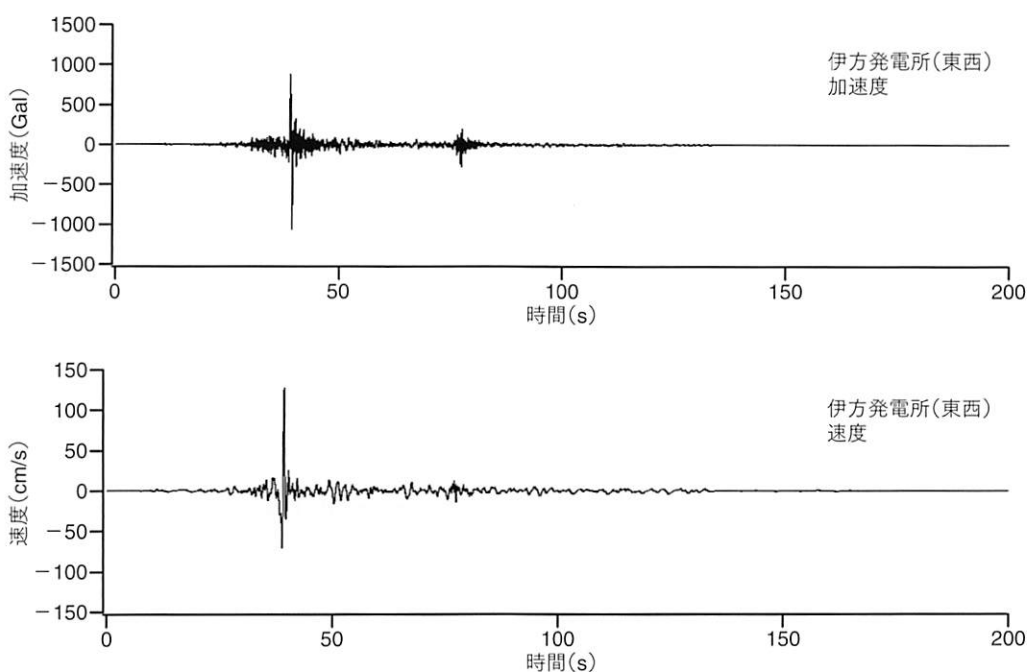


図 10—加速度波形および速度波形の試算結果

大加速度や最大速度を決定しているのではないためである。

SPGA モデルと SMGA モデルの違いは、一辺が数 km 程度の狭い領域 (SPGA) から地震波が集中的に生成されると考えるか、一辺が数十 km 程度のより広い領域 (SMGA) からまんべんなく生成されると考えるかである。前者の場合、その狭い領域が対象施設の近くにあればより厳しい地震動となり、遠くになればより厳しくない地震動となる。ところが、一般の SMGA モデルの場合、SMGA の内部は均質として扱うために、このような異なるシナリオを描くことができず、両者の平均的な地震動しか存在しないかのような錯覚を利用者に与えてしまうことになる。このことも、前節で議論した波形の精度の問題と併せて、SMGA モデルの欠点である。

今後のために

これまでの検討から、現状の SMGA モデルでは工学上重要な時間幅 1~2 秒のパルス波を正確に計算できないこと、その原因もはっきりしてい

ることを指摘せざるを得ない。このことから、プレート間地震を想定して原子力発電所の基準地震動を策定するための震源モデルとして SMGA モデルは相応しくない。なぜなら、構造物の耐震性を精緻に検討するためには、基準地震動は応答スペクトルという点だけでなく時刻歴波形の点からも妥当でなければならないためである。原子力発電所の基準地震動には、一般的な構造物の設計入力地震動以上の信頼性が求められることから、その策定に用いる震源モデルは、図 6 と図 7 に示される SPGA モデルによる結果と少なくとも同程度またはそれ以上の精度で東北地方太平洋沖地震による地震動を再現できるものでなければならない。そうでなければ、東北地方太平洋沖地震による教訓をふまえた基準地震動の策定とは言えないだろう。

また、本稿で議論してきた時間幅 1~2 秒のパルス波が、原子力発電所に多く見られる固有周期の短い構造物の耐震安全性とは関係がないと考えるのは誤りである。この点について川瀬¹⁶⁾は、時間幅 1~2 秒のパルス波が大被害に結びつきやすい原因を分析する中で、「PGA(加速度)が大きい限

り速度パルスはその卓越周期より短周期の構造物に対してのみ大きなインパクトを持つ」と述べている。すなわち、たとえ線形時の固有周期の短い構造物であっても、大きな加速度を受ければ塑性化する可能性があり、いったん塑性化すれば線形時の固有周期は意味をなさなくなる。そして、いったん塑性化した構造物に大きな損傷が生じるかどうかは速度の振幅と関係している。したがって大きな加速度と速度を同時にもたらす時間幅1~2秒のパルス波は大被害に結びつきやすい。以上が川瀬¹⁶⁾の分析である。そして上述の通り、SPGAの破壊が発電所の近くで生じる場合には、加速度と速度の両者が大きく破壊力の大きいパルスとなる。

したがって、たとえ塑性化を許容しない構造物であっても、パルス波に対して塑性化が生じないか検証する必要がある。また、ある程度の塑性化を許容する構造物では、パルス波に対する塑性化の程度を評価する必要がある。さらに、斜面の安定解析などでは、地山に塑性化を生じさせないことは困難であるから、パルス波に対する塑性化の程度を評価する必要がある。

謝辞 防災科学技術研究所(K-NET, KiK-net)、東北工業大学(Small-Titan)、東北電力および東京電力が取得した強震記録を利用しました。ここに記して謝意を表します。

文献

- 1—浜田信生: 原発の基準地震動と超過確率, 日本地震学会モノグラフ第3号日本の原子力発電と地球科学(2015)
- 2—四国電力: 伊方原子力発電所地震動評価について, 「第210回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合」資料3-4-1(2015)
- 3—野津厚: 不幸中の幸いであった東北地方太平洋沖地震の強震動生成過程から原子力発電所の耐震安全を考える, 科学, 85, 974(2015)
- 4—神山真・他: オンラインアレー地震観測システムの構築とその記録の若干の考察, 土木学会論文集, No. 668/I-54, 283(2001)
- 5—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, 12, 21(2012)
- 6—野津厚・他: 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, 12, 209(2012)
- 7—S. Aoi et al.: Strong-motion seismograph network operated

- by NIED: K-NET and KiK-net, Jour. Japan Association for Earthquake Engineering, 4, 65(2004)
- 8—S. Kurahashi & K. Irikura: Short-period source model of the 2011 M_w 9.0 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., 103, 1373(2013)
- 9—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—プレート境界地震の短周期レベルに着目して—, 日本建築学会構造系論文集, No. 675, 695(2012)
- 10—K. Asano & T. Iwata: Source model for strong motion prediction in 0.1-10 Hz during the 2011 Tohoku earthquake, Earth Planets Space, 64, 1111(2012)
- 11—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, 13, 75(2013)
- 12—堀一男・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成法による強震動予測, 日本建築学会構造系論文集, No. 509, 49(1998)
- 13—入倉孝次郎・他: 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)
- 14—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モデル検討会(第二次報告)強震断層モデル編(2012), http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/20120829_2nd_report05.pdf
- 15—野津厚・長尾毅: スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料, No. 1112(2005)
- 16—川瀬博: 震源近傍強震動の地下構造による増幅プロセスと構造物破壊能—1995年兵庫県南部地震での震災帯の成因に学ぶ, 第10回日本地震工学シンポジウム, パネルディスカッション資料集, 29(1998)