

南海トラフの地震 ($M_w 9.0$) を対象とした SPGAモデルによる強震動評価事例

野津 厚¹

¹正会員 港湾空港技術研究所 地震動研究チーム (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: nozu@pari.go.jp

2011年東北地方太平洋沖地震 ($M_w 9.0$) の発生を受け、南海トラフにおいても、従来より規模の大きい $M_w 9.0$ 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。本研究では、震源モデルとして、東北地方太平洋沖地震など既往の巨大地震への高い適用性を示すSPGAモデルを用い、南海トラフの地震 ($M_w 9.0$) に対する強震動の評価を行った。その際、事前の予測が困難なSPGAの位置については、極めて多くのケースを考慮できるように計算上の工夫を行った。その結果、SPGAの中でも特に厳しい地震動を生じるものが対象地点に近い場合には、従来の設計で想定されている地震動よりもはるかに強い地震動となること等がわかった。

Key Words : strong ground motion, Nankai Trough, SPGA, the 2011 Tohoku earthquake

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震 ($M_w 9.0$) の発生を受け、南海トラフにおいても、従来より規模の大きい $M_w 9.0$ 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¹⁾。このような場合、強震動の評価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。特に、構造物の耐震検討を目的として強震動評価を行う場合には、震度のみならず、地震動の波形やスペクトルを適切に再現することのできる震源モデルを用いる必要があると考えられる。文献1)の検討では、採用する震源モデルについて、東北地方太平洋沖地震の強震記録を用いて震度の再現性を確認しているが、波形・スペクトルの再現性については確認を行っていない。

著者らは、密な強震観測網²³⁾により捉えられた初の海溝型巨大地震である2003年十勝沖地震 ($M_w 7.9$) の発生以降、強震動を対象として、海溝型巨大地震の震源のモデル化に取り組んできた⁴⁾¹²⁾。その中で、著者らが特に着目したのは、2003年十勝沖地震や1978年宮城県沖地震 ($M_w 7.6$) のような規模の大きい海溝型地震の際、震源近傍で観測されるパルス状の地震波である。これらの地震波は、構造物に対して影響の大きい0.2-1Hzの帯域に表れているという点で、たいへん重要であると考えられる。

このような、工学上重要な周波数帯域に現れるパルス状の地震波を、本稿では文献11), 12)に倣い強震動パルスと呼ぶ。著者らは、強震動パルスの時間幅に着目し、これと調和的なサイズのサブイベントを組み合わせる震源モデルを構築することを提案した⁴⁾⁷⁾。この方法で設定されたサブイベントは、海溝型巨大地震に対して一般的に仮定されることの多い強震動生成域¹⁵⁾ (Strong Motion Generation Area: SMGA) と呼ばれるサブイベントと比較して、面積がかなり小さいものとなる。この「小さめのサブイベント」からなる震源モデルにより、海溝型巨大地震による多くの地点での波形・スペクトルが適切に再現されることが、東北地方太平洋沖地震発生以前の段階でわかっていた⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。なお、同様の観点から海溝型地震の震源モデルを構築した研究として1978年宮城県沖地震を対象とした松島・川瀬の研究¹⁴⁾がある。

東北地方太平洋沖地震の際、震源断層に比較的近い宮城県から茨城県にかけての比較的堅固なサイトで観測された0.2-1Hzの帯域の波形は、やはり明瞭なパルスによって特徴付けられるものであった^{11), 12)}。この地震についても著者ら⁸⁾¹⁰⁾はパルスの幅に着目して「小さめのサブイベント」からなる震源モデルを作成し(図-1, 表-1)、それにより、多くの地点での波形・スペクトルが適切に再現されることを示した。

文献4)-10)では、断層面上で強震動パルスを生成した

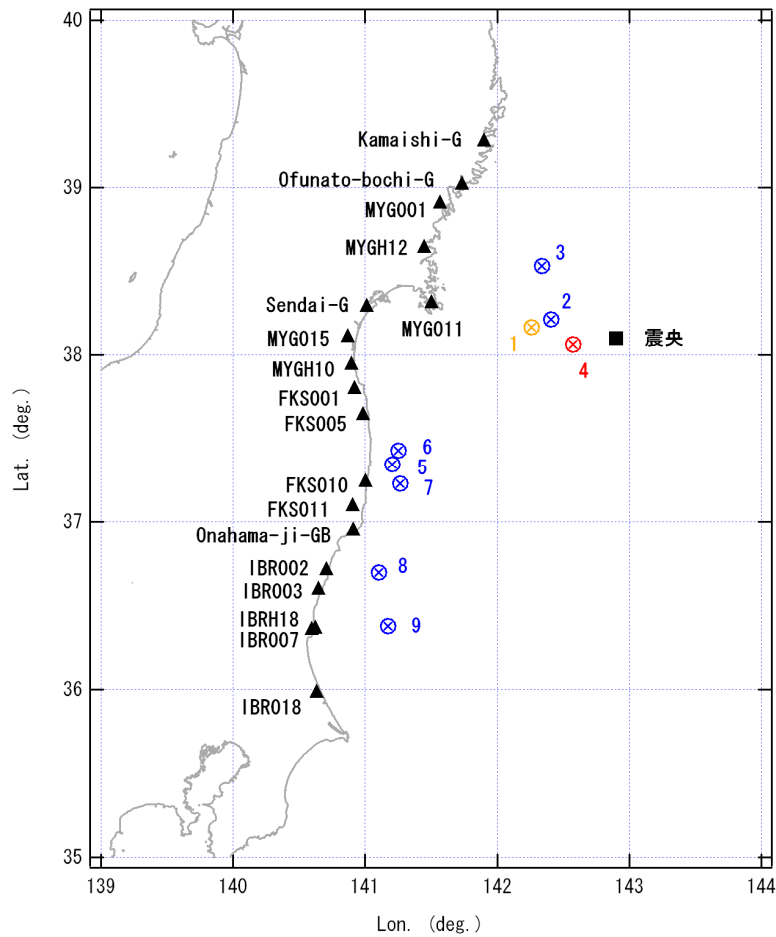


図-1 2011年東北地方太平洋沖地震を対象としたSPGAモデル⁸⁾¹⁰⁾

表-1 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⁸⁾¹⁰⁾

	破壊開始時刻 (h:m:s)	長さ km	幅 km	面積 km ²	地震モーメント Nm	すべり量 m	ライズタイム s
SPGA1	14:46:43.5	3.0	2.0	6.0	8.00E+18	28.3	0.17
SPGA2	14:46:46.9	4.0	3.0	12.0	8.00E+18	14.1	0.25
SPGA3	14:47:33.4	4.0	2.0	8.0	4.00E+18	10.6	0.17
SPGA4	14:47:26.3	3.5	3.0	10.5	2.10E+19	42.4	0.25
SPGA5	14:47:57.1	3.0	4.0	12.0	3.00E+18	5.3	0.33
SPGA6	14:48:04.4	3.0	4.0	12.0	3.00E+18	5.3	0.33
SPGA7	14:48:15.0	6.0	2.0	12.0	5.00E+18	8.8	0.17
SPGA8	14:48:25.8	8.0	3.0	24.0	9.00E+18	8.0	0.25
SPGA9	14:48:30.9	7.0	7.0	49.0	2.00E+19	8.7	0.58

と考えられる領域を「アスペリティ」または「スーパーアスペリティ」と呼んでいた。しかしながら、現時点では「アスペリティ」という用語の用いられ方自体が転換期にあるため^{11), 12)}、本研究では、文献11), 12)に従い、断層面上で強震動パルスを生成したと考えられる領域を強震動パルス生成域 (Strong-motion Pulse Generation Area: SPGA) と呼ぶ。また、SPGAから構成される震源モデルをSPGAモデルと呼ぶ。

このように、SPGAモデルは、東北地方太平洋沖地震を含む海溝型巨大地震を対象として、地震動の波形や

スペクトルを適切に再現することのできる震源モデルであると言える。しかしながら、巨大地震の発生が懸念される南海トラフを対象として、SPGAモデルを用いた強震動評価の結果は、これまで報告されていない。

本稿は、既往の巨大地震への高い適用性を示す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 (M_w 9.0) に対する強震動評価を行い、その結果について報告する。本研究の主眼は二点ある。一点目は、SPGAの位置について、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

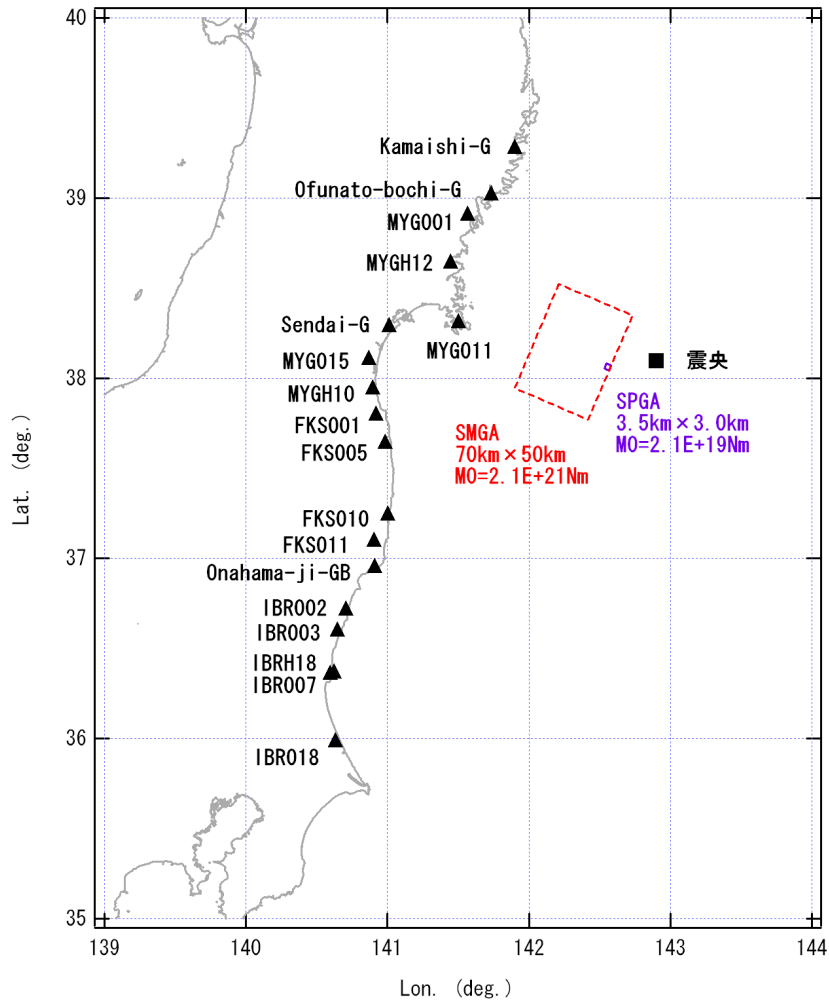


図-2 第2章で計算の対象とするSPGAとSMGA (SMGAの面積は文献1)を参考に設定)

行ったとしても、計算上の工夫を行えば、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実行可能であることを示すことである。もう一点目は、SPGAモデルを南海トラフの地震 ($M_w 9.0$) に適用した場合にどのような結果が得られるか確認することである。

検討の結果、SPGAの中でも特に厳しい地震動を生じるものが対象地点に近い場合には、従来の設計で想定されている地震動よりもはるかに強い地震動となること等がわかった。

2. SPGAモデルおよびSMGAモデルから計算される地震動の特徴

ここで、南海トラフの地震に対する強震動評価に移る前に、文献8)-10)で設定された東北地方太平洋沖地震のSPGAの一つと、他の文献で設定されている東北地方太平洋沖地震のSMGAのうち前記のSPGAに対応するも

のをを用いて、それぞれ震源付近の強震動を計算することにより、SPGAおよびSMGAから計算される地震動の特徴について把握を行う。

(1) 震源モデル

東北地方太平洋沖地震を対象に設定されたSPGAモデル⁸⁾⁻¹⁰⁾は、図-1に示すように、9つのSPGAを含むものとなっている。この中で、震央に最も近いSPGA4は、地震モーメント、短周期レベル、放射エネルギーのいずれの点においても9つのSPGAの中で最大であり¹¹⁾、宮城県の多くの地点で観測された2つめの波群は、ほぼ、SPGA4により説明することができる⁸⁾⁻¹⁰⁾。そこで、ここではこのSPGA4を比較の対象とする。SPGA4の位置を図-2に示す。SPGA4の面積は10.5km²、地震モーメントは 2.1×10^{19} Nmである(表-1)。

一方、文献1)では、東北地方太平洋沖地震の震度の再現を目的として、岩手県沖から茨城県沖にかけて4つのSMGAを設定している。この中で、ここでは、宮城県沖のSPGA4と比較することを目的として、宮城県沖の

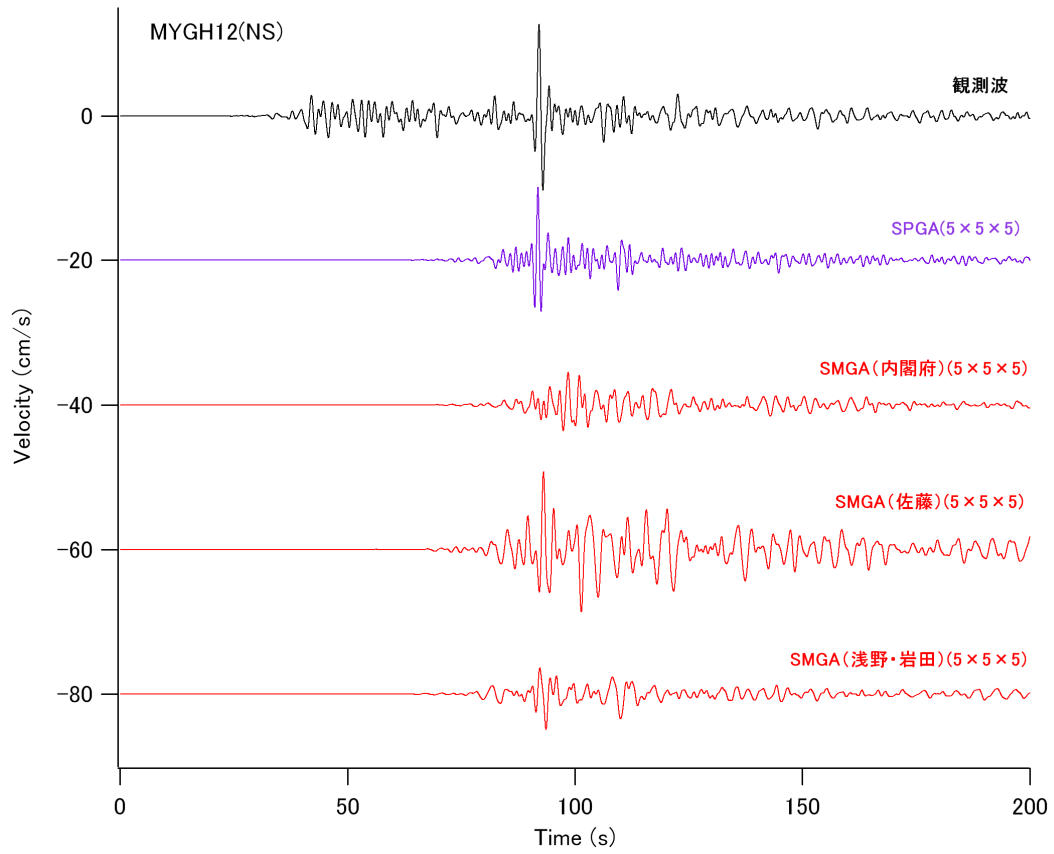


図-3 SPGAモデルとSMGAモデルによる速度波形の計算結果と観測結果との比較 (分割数 $5 \times 5 \times 5$)

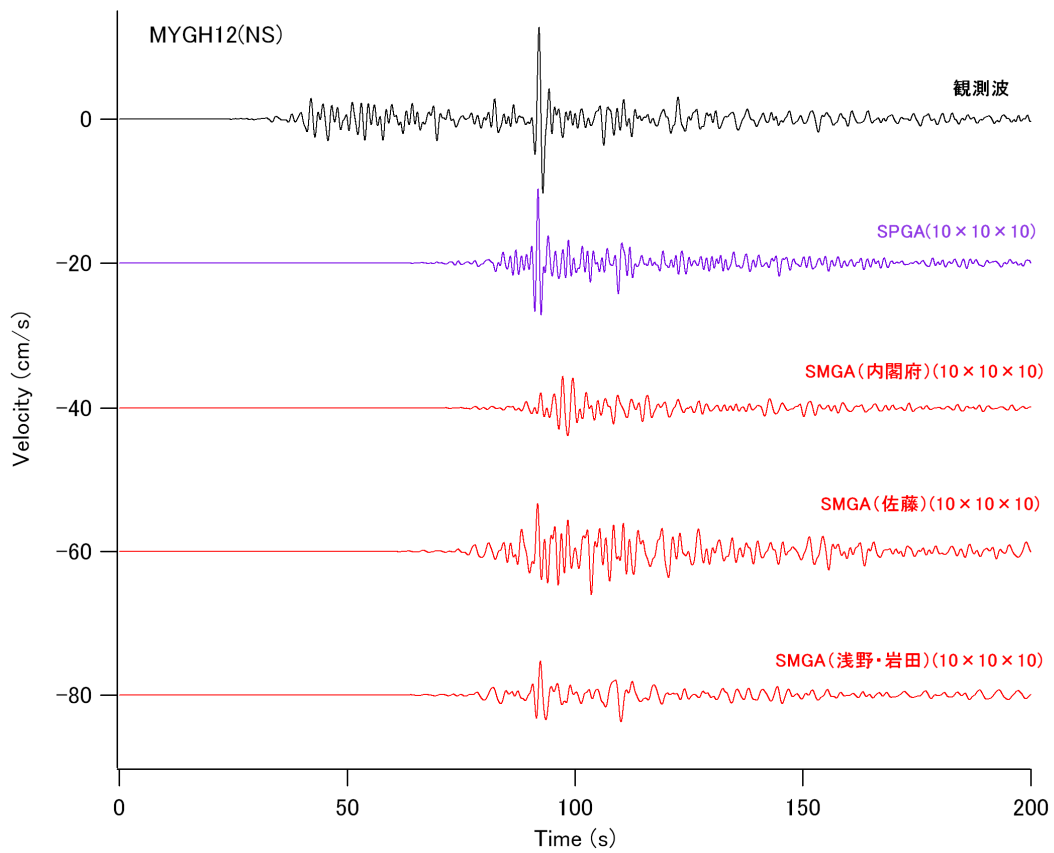


図-4 SPGAモデルとSMGAモデルによる速度波形の計算結果と観測結果との比較 (分割数 $10 \times 10 \times 10$)

SMGAを比較の対象とする。宮城県沖のSMGAの位置を図-2に示す。面積は3500km²である。地震モーメントについては、文献1)では3通りのパラメータスタディーが行われているが、その中で、震度の再現性が最も良好であったとされるケースを取り上げ、その場合に対応する値をここでは用いた。その場合の宮城県沖のSMGAの地震モーメントは 2.1×10^{21} Nmである。

佐藤¹⁵⁾は、東北地方太平洋沖地震の強震動の再現を目的として、宮城県沖から福島茨城県境付近にかけて4つのSMGAを配した震源モデルを提案している。この中で、ここでは、宮城県沖のSPGA4に対応すると考えられるSMGA2を比較の対象とした。SMGA2の面積は8100km²、地震モーメントは 7.73×10^{21} Nmである。

Asano and Iwata¹⁶⁾は、東北地方太平洋沖地震の強震動の再現を目的として、宮城県沖から福島県沖にかけて4つのSMGAを配した震源モデルを提案している。この中で、ここでは、宮城県沖のSPGA4に対応すると考えられるSMGA2を比較の対象とした。SMGA2の面積は1296km²、地震モーメントは 5.33×10^{20} Nmである。

(2) 地震動算定条件

地震動の計算は、比較的震源に近く明瞭なパルスが観測されているKik-net⁹⁾のMYGH12を対象に実施した。計算方法としては、SPGAモデルの構築を行った際⁸⁾¹⁰⁾と同様、経験的サイト増幅・位相特性を考慮する方法¹⁷⁾¹⁹⁾を用いた。

SPGAまたはSMGAの小断層への分割に関しては、分割数の影響を見るため、5×5×5の場合と10×10×10の場合を検討した。経験的サイト増幅特性としては既往の研究⁶⁾で得られているものを用いた。位相特性としては、2005年12月17日宮城県沖の地震(M6.1)によるものを用いた。伝播経路のQ値としては佐藤・巽²⁰⁾による東日本の海溝性地震のQ値を用いた。位相特性とQ値の条件はSPGAモデルの構築を行った際と同様である。

(3) 地震動算定結果

図-3に、分割数が5×5×5の場合について、SPGAモデルおよびSMGAモデルによる速度波形の計算結果と観測結果との比較を示す。図-4に、分割数が10×10×10の場合について、SPGAモデルおよびSMGAモデルによる速度波形の計算結果と観測結果との比較を示す。これらの図において、速度波形はいずれも0.2-1Hzのバンドパスフィルタを適用したものである。

観測波(黒)には90s付近に明瞭なパルスが認められる。このパルスは、文献8)10)の震源モデルではSPGA4によりもたらされたものと解釈されており、ここでも、

SPGA4を考慮した計算結果は、当該パルスを良好に再現している。また、その再現性は分割数にはほとんど依存しないことがわかる。

一方、SMGAモデルによる結果を見ると、計算結果の速度波形は1つのパルスを構成しておらず、ばらけており、観測された波形を正確に再現しているとは言い難い。これは、SMGAモデルにおいては、広い領域からの地震波が時間差をおいて到来するため、1つのコヒーレントなパルスを構成しにくいためである。このような特徴は、震度の再現を目的として設定されたSMGA¹⁾と強震動の再現を目的として設定されたSMGA¹⁵⁾¹⁶⁾に共通して見られる。

また、SMGAモデルのもう一つの特徴として、分割数が5×5×5の場合と10×10×10の場合で計算結果が一致していない。すなわち、SMGAモデルによる計算結果は分割数依存性が大きいと言える。SMGAモデルのこのような性格は、予測問題への適用において必ずしも好ましいものとは言えない。なお、分割数依存性については付録でも補足説明を行う。

3. 南海トラフの地震を対象としたSPGAモデルの設定

(1) 対象とする地震

本研究では、文献1)と同様、南海トラフの地震(M_w9.0)を対象とした。文献1)では、南海トラフの地震(M_w9.0)による震度分布を推定することを目的として、SMGAの組み合わせからなる震源モデルを提案している。このとき、図-5に示すように、SMGAの配置は、基本ケース、東側ケース、西側ケース、陸側ケースの4通りが考えられている。いずれのケースも震源モデルは12個のSMGAから成り立っている。

本研究の趣旨はSPGAモデルによる強震動評価を行うことにあるので、上記のSMGAモデルの震源パラメータ(面積、地震モーメント等)を用いることはしない。しかし、以下に述べるように、SPGAの配置にあたっては、提案されているSMGAの位置を参考にしている。

(2) SPGAのパラメータとその配置

野津他¹¹⁾¹²⁾は、海溝型巨大地震による強震動パルスの再現を目的として作成された既存の震源モデルについて整理を行い、強震動パルス生成域(SPGA)の諸特性と地震規模との関係について検討し、経験式も示している。一般に、地震全体の規模が与えられた場合に、SPGAのパラメータを決定するためには、上記の経験式

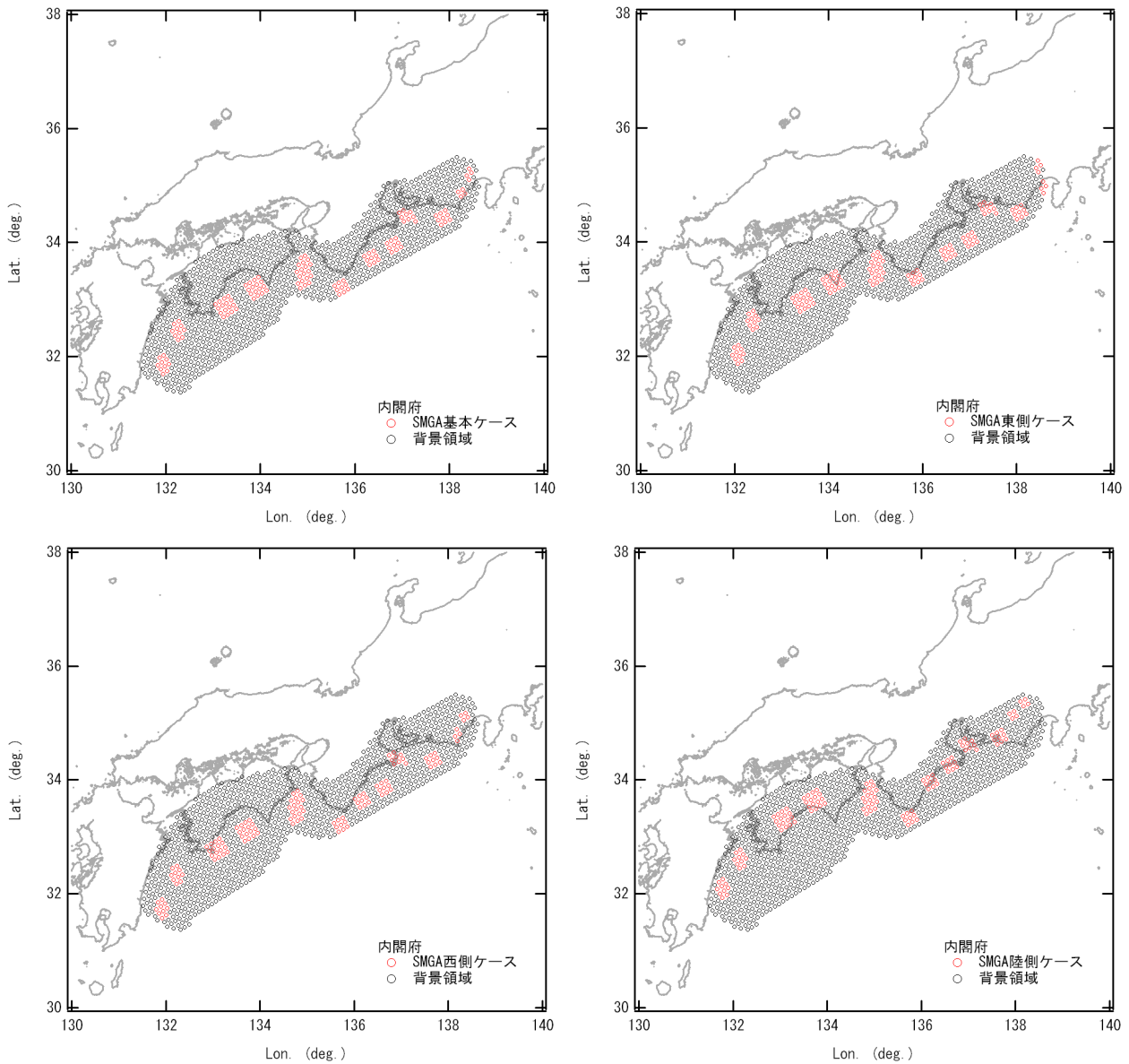


図-5 南海トラフの巨大地震モデル検討会¹⁾におけるSMGAの配置

を利用することが考えられる。しかし、ここでは、対象とする地震の規模は $M_w 9.0$ であり、東北地方太平洋沖地震と同規模であることから、個々のSPGAのパラメータ（面積、地震モーメント等）としては、東北地方太平洋沖地震の震源モデルにおける個々のSPGAのパラメータ（表-2）を用いることとした。

SPGAの位置については、予測が困難であるため、以下に述べるように、極めて多数のケースについて計算を行った。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。

まず、文献1)のSMGAの配置（図-5）のうち、基本ケースを取り上げ、12個のSMGAを順次SPGAに置き換えていくことを考える。このとき、SPGAは、SMGA上で最も対象地点に近い位置に配置した。ただし、基本ケ

ースのSMGAは12個あるのに対し、東北地方太平洋沖地震のSPGAは9個であるため、9個のSPGAを配置し終えた後、残り3個については、東北地方太平洋沖地震の最下位のSPGA（SPGA5およびSPGA6）と同じパラメータのSPGAがさらに3個あるものと考え、配置を行った（ここでは放射エネルギーが最小のものを最下位のSPGAと呼んでいる）。本研究では、後述のように、多数の計算ケースによる地震動を（振幅の観点から）順位付けし、90%非超過あるいは50%非超過の地震動を算出することを念頭に置いているが、残り3個のSPGAを加えるかどうかは、下位の地震動のみに影響するため、90%非超過あるいは50%非超過の地震動の抽出結果に対してはほとんど影響を及ぼさない。

この方法でSPGAを配置すると、配置の仕方は全部で12!（階乗）通り存在する。配置の仕方の一例として、

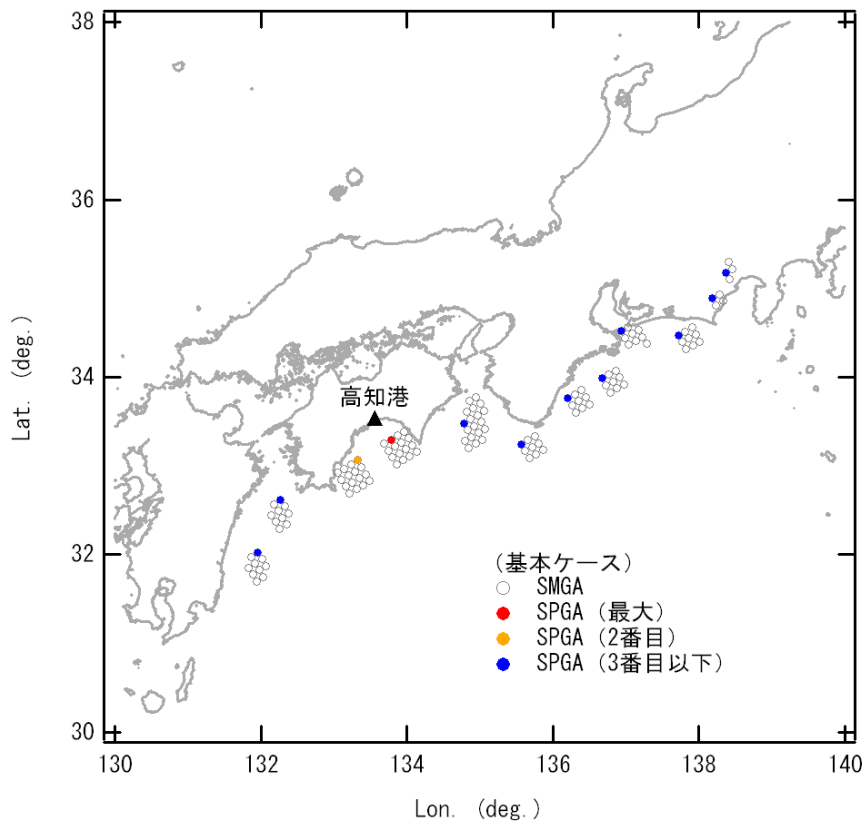


図-6 基本ケースの場合のSPGAの配置の一例(高知港に対して厳しい場合)

図-6には高知港にとって最も厳しくなるようなSPGAの配置を示す。図の赤丸は(放射エネルギーの観点から)最大のSPGAであり、東北地方太平洋沖地震のSPGA4に相当する。図の黄色の丸は(放射エネルギーの観点から)2番目のSPGAであり、東北地方太平洋沖地震のSPGA1に相当する。図の黒丸は(放射エネルギーの観点から)3番目以下のSPGAである。このように(当然ではあるが)最大のSPGAと2番目のSPGAがともに対象地点に近い場合に厳しい地震動となる。

ここまで、SMGAとしては基本ケースを考えてきたが、同様の作業を東側ケース、西側ケース、陸側ケースに対しても実施すると、SPGAの配置の仕方は全部で $12! \times 4$ 通り存在する。なお、下位4つのSPGAのパラメータは等しいので、実際に独立なものは $12! \times 4 \div 4!$ 通り存在することになる。

(3) 振幅による順位付け

以上のように、SPGAの配置の仕方には極めて多くのものが存在するが、それらによる地震動を(振幅の観点から)順位付けし、50%非超過、90%非超過等となる地震動を算出することを考える。

本稿の後段の強震動評価においては、基本的に、東北地方太平洋沖地震等の地震動の再現に用いられたのと同じ、文献17)-19)の方法を用いている。しかしながら、

すべてのSPGAの配置に対して対象地点での地震動を上記の手法で計算することは、計算時間の観点から現実的でない。そこで、以下においては、対象地点の地震基盤における地震動を近似的に計算し、その振幅に応じて、地震動の順位付けを行うことを考える。このとき、地震動の順位付けはPSI値²¹⁾の大小によって行うこととした。PSI値は岸壁の被害程度と良い対応を示す量であり、式(1)で定義される。

$$PSI = \left(\int_0^{\infty} (v(t))^2 dt \right)^{0.5} \quad (1)$$

ここに $v(t)$ は速度波形である。PSI値は、平井・澤田²²⁾の定義する「入射エネルギー密度」とも密接な関係がある。「入射エネルギー密度」をインピーダンス(密度 \times S波速度)で除し、平方根をとったものがPSI値である。また、Parsevalの定理により、PSI値は次式のように速度フーリエスペクトルから計算することもできる。

$$PSI = \left(\frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} (V(\omega))^2 d\omega \right)^{0.5} \quad (2)$$

ここに、 $V(\omega)$ は速度フーリエスペクトルである。以下、地震基盤におけるPSI値の近似計算について説明する。

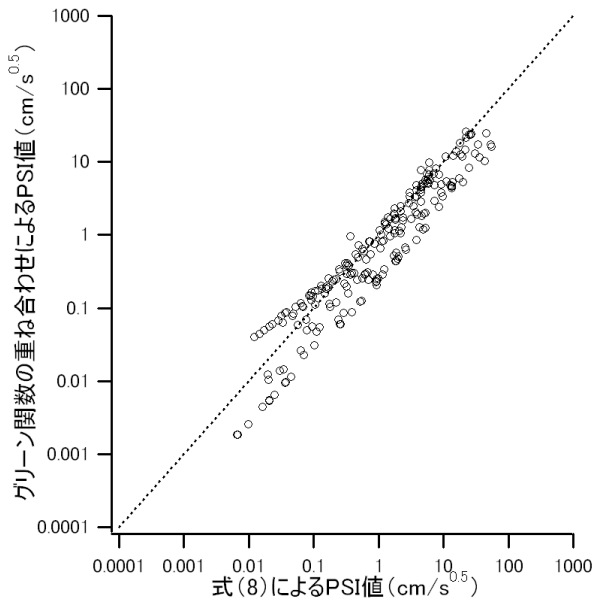


図7 グリーン関数の重ね合わせで計算される個々のSPGAのPSI値と、式(8)で求まるPSI値

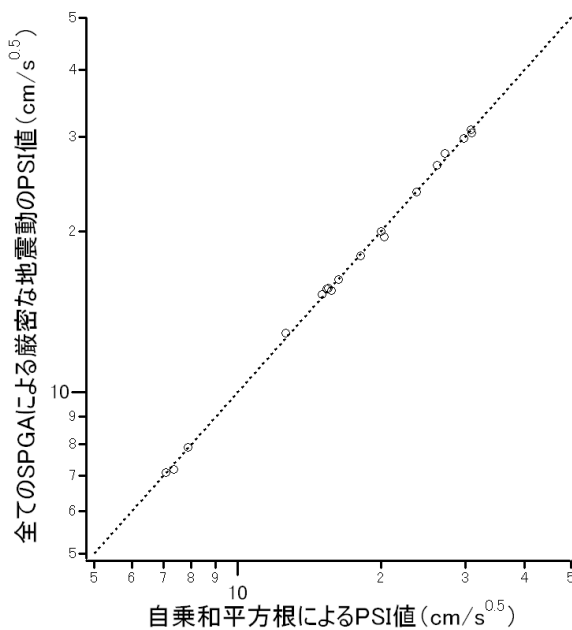


図8 全てのSPGAによる厳密な地震動のPSI値と個々のSPGAからの地震動のPSI値の自乗和平方根

文献17-19)の方法では、震源において ω^2 モデル²³⁾に従うグリーン関数を生成し、これを入倉他の方法²⁴⁾で重ね合わせるにより、SPGAからの地震動を生成するところが、もともと入倉他の方法は、グリーン関数が ω^2 モデルに従うとき、重ね合わせ後の地震動も近似的に ω^2 モデルに従うように配慮されている。従って、文献17-19)の方法により計算されるSPGAからの地震動は、震源において近似的に ω^2 モデルに従うと考えられる。

そこで、PSI値の近似計算においては、SPGAからの

地震動の震源スペクトルが完全に ω^2 モデルに従うと仮定する。このとき、速度の震源スペクトルは次式で表される。

$$V_s(\omega) = M_0 \omega / (1 + (\omega/\omega_c)^2) \quad (3)$$

ここに $V_s(\omega)$ は速度震源スペクトル、 M_0 は地震モーメント、 ω_c はコーナー周波数である。対象地点の地震基盤における速度フーリエスペクトルと速度震源スペクトルとの関係は次式で与えられる。

$$V(\omega) = CP(\omega) V_s(\omega) \quad (4)$$

ここに、 $P(\omega)$ は伝播経路特性であり、

$$P(\omega) = (1/r) \exp(-\omega r/2QV_s) \quad (5)$$

で与えられる。また、係数 C は

$$C = R_{\theta\phi} FS PRITIN / (4\pi \rho \beta^3) \quad (6)$$

で与えられる。ここに $R_{\theta\phi}$ はラディエーション係数であり本研究では全方位への平均値である0.63を用いる。 FS は自由地表面による増幅の効果(=2)である。 $PRITIN$ は地震動エネルギーの水平2成分への分配係数であり、本研究では0.71とする。

式(4)を式(2)に代入し、 $P(\omega)$ を1Hzでの値 P_0 で置き換えると、PSI値は次式で近似される。

$$PSI = C P_0 \left(\frac{1}{\pi} \int_0^\infty (V_s(\omega))^2 d\omega \right)^{0.5} \quad (7)$$

式(7)の右辺に式(3)を代入し、積分を実行すると

$$PSI = (1/2) CP_0 M_0 \omega_c^{1.5} \quad (8)$$

が得られる。

そこで、個々のSPGAによる地震基盤でのPSI値を式(8)で求め、最後に、12個のSPGAに対する自乗和平方根をとることで、ある一つのSPGA配置に対する地震基盤でのPSI値を求める。

同様の作業をすべてのSPGA配置に対して繰り返すことで、50%非超過、90%非超過等に対応するSPGA配置を求める。

いったん、50%非超過、90%非超過等となるSPGA配置を求めた後に、サイト特性を考慮して対象地点での地震動を求めるには、文献17-19)の方法を用いる。

なお、ここまでの過程における近似の精度について以下に検討する。

まず、個々のSPGAによる地震基盤でのPSI値を式(8)で求めることについては、震源スペクトルが完全に ω^2 モデルに従うと仮定しているため、グリーン関数の重ね合わせで計算される震源スペクトルの ω^2 モデルからの乖離が誤差要因となる。そこで、実際に、4.で述べる18地点、および、上記の方法で求められた50%非超過となるSPGA配置に対して、グリーン関数の重ね合わせで計算される個々のSPGAのPSI値と、式(8)で求められる個々のSPGAのPSI値を比較したものが図-7である。この結果から、個々のSPGAのPSI値は式(8)により一定の精度で計算できると考えられる。

次に、全てのSPGAからの地震動のPSI値を、個々のSPGAからの地震動のPSI値の自乗和平方根で求めることの妥当性について検討する。4.で述べる18地点、および、上記の方法で求められた50%非超過となるSPGA配置に対して、全てのSPGAからの地震動を厳密に計算してそのPSI値を求めた結果と、個々のSPGAからの地震動のPSI値の自乗和平方根とを比較した結果を図-8に示す。この結果から、この近似の精度は極めて良好であることがわかる。

以上のように、計算の過程における近似については一定の精度があるものと考えられる。また、これらの近似を用いることにより、効率的な計算が可能となる。実際、12!×4通りのSPGA配置から50%非超過および90%非超過となる配置を選定し、サイト特性を考慮した地震動を計算するまでに要する時間は、一般的なデスクトップパソコン(1.6GHzのCPU)で、1地点あたり16分程度である。なお、前述のように、ここでは下位4つのSPGAのパラメータは等しいので、12!×4通りのSPGA配置の中には等しいものもあるが、上記の計算時間は12!×4通りのSPGA配置を考慮した場合の計算時間である。また、上記の計算を一般的なデスクトップパソコンで行うため、メモリの節約についても工夫を行っている。例えば、12!×4通りのSPGA配置に対する地震基盤でのPSI値を全て記憶することはメモリの浪費につながるため、PSI値を有限個の階級(1cm/s^{0.5}刻み)に分け、各々の階級に含まれるPSI値が最初に得られたときのSPGA配置を記憶するようにしている。このようにすれば、階級の個数(PSI=0~100 cm/s^{0.5}まで考えたとしても高々100)だけSPGA配置を記憶すれば良いことになる。

4. 地震動算定条件

本研究で強震動評価の対象としたのは、東海から九

州にかけての16港湾18地点である。それらを図-9と表-2に示す。各々の地点に対して、地震基盤でのPSI値が50%非超過となるSPGA配置を図-9に示している。例えば高知港の場合、紀淡海峡付近に最大のSPGAが存在するケースが、50%非超過のケースとして選択された。

文献(17)-(19)の方法で地震動を計算するためには、サイト増幅特性と、グリーン関数の位相特性を決めるための中小地震観測記録が必要である。

ここで、サイト増幅特性としては、国土技術政策総合研究所港湾施設研究室²⁹⁾によるものを用いた。これは、主にスペクトルインバージョンにより求められた地震基盤～地表のサイト増幅特性^{6), 26)}を、工学的基盤～地表の伝達関数で除することにより求められたものである。サイト増幅特性の評価に用いられた強震観測地点を表-2に示す。伝達関数を求めるのに用いられた地盤モデルは港湾施設研究室のホームページ²⁹⁾から公開されている。

グリーン関数の位相特性を決めるための中小地震は、可能な限り、対象とする地震と入射角およびback azimuthという点で類似した地震を選ぶことが望ましい。ここでは対象とする地震の震源域が広いので、対象地点の地震動に対して最も影響が大きいと考えられる最寄りのSPGAに対して、入射角およびback azimuthという点で類似した地震を選択した。その選択結果を表-2に示す。また、選択された地震の震央を図-9に示す。図-9に示すように、名古屋港と四日市港では、利用可能な記録の制約から、最寄りのSPGAからやや離れた地震が選択されているが、大多数の地点に対しては、最寄りのSPGA付近で発生した条件の良い地震を選ぶことができています。

選択した地震による対象地点の地表での観測記録を、線形の重複反射理論で工学的基盤に引き戻し、その位相特性を用いた。このとき用いる地盤モデルとしては、サイト増幅特性の算出に用いられた地盤モデルと同じもの²⁹⁾を用いた。

伝播経路のQ値については、対象地点毎に、表-2に示すものを用いた。

5. 地震動算定結果と考察

(1) PSI値の空間的な分布

対象とした全地点における50%非超過および90%非超過の(工学的基盤における)地震動のPSI値の分布を図-10に示す。まず、図-10の■は、東北地方太平洋沖地震発生以前の段階において、中央防災会議が示していた東南海・南海地震(M_s8.7)の震源モデル²⁷⁾に基づいて、同じ地点で評価されていた地震動のPSI値である。これ

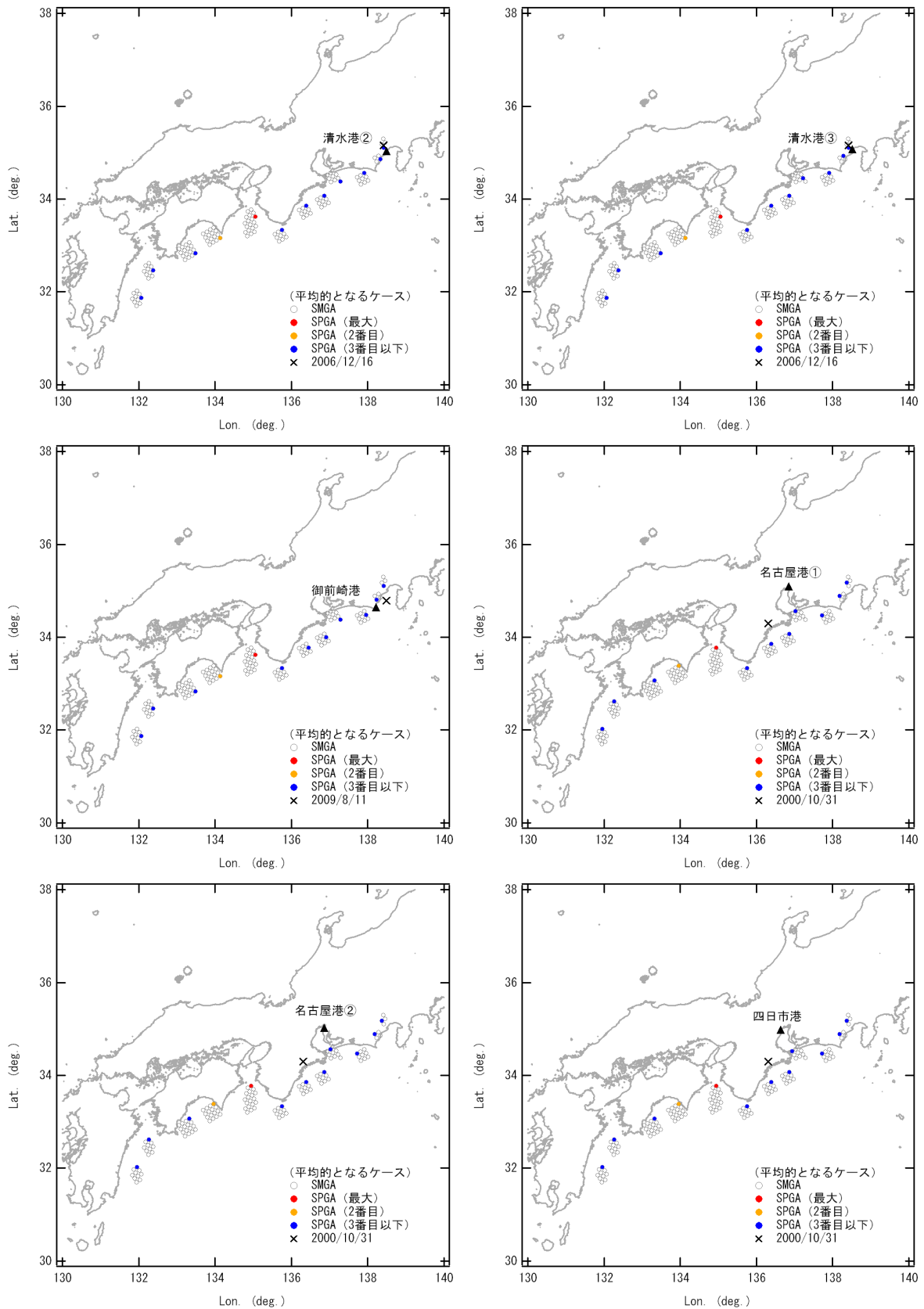


図9 対象港湾(地点)および50%非超過の地震動をもたらすSPGA配置(×は採用した中小地震の震央)

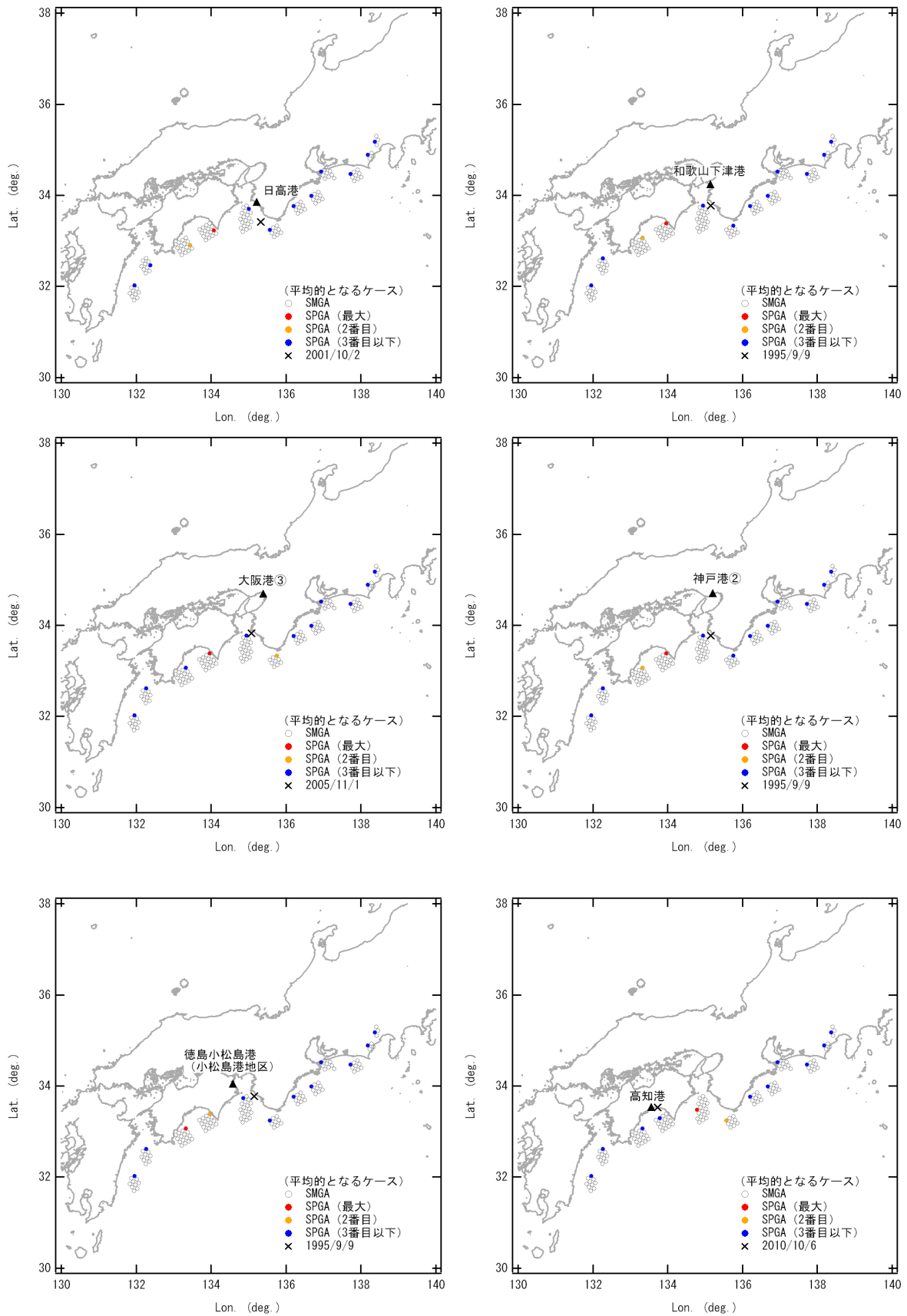


図-9 (つづき)

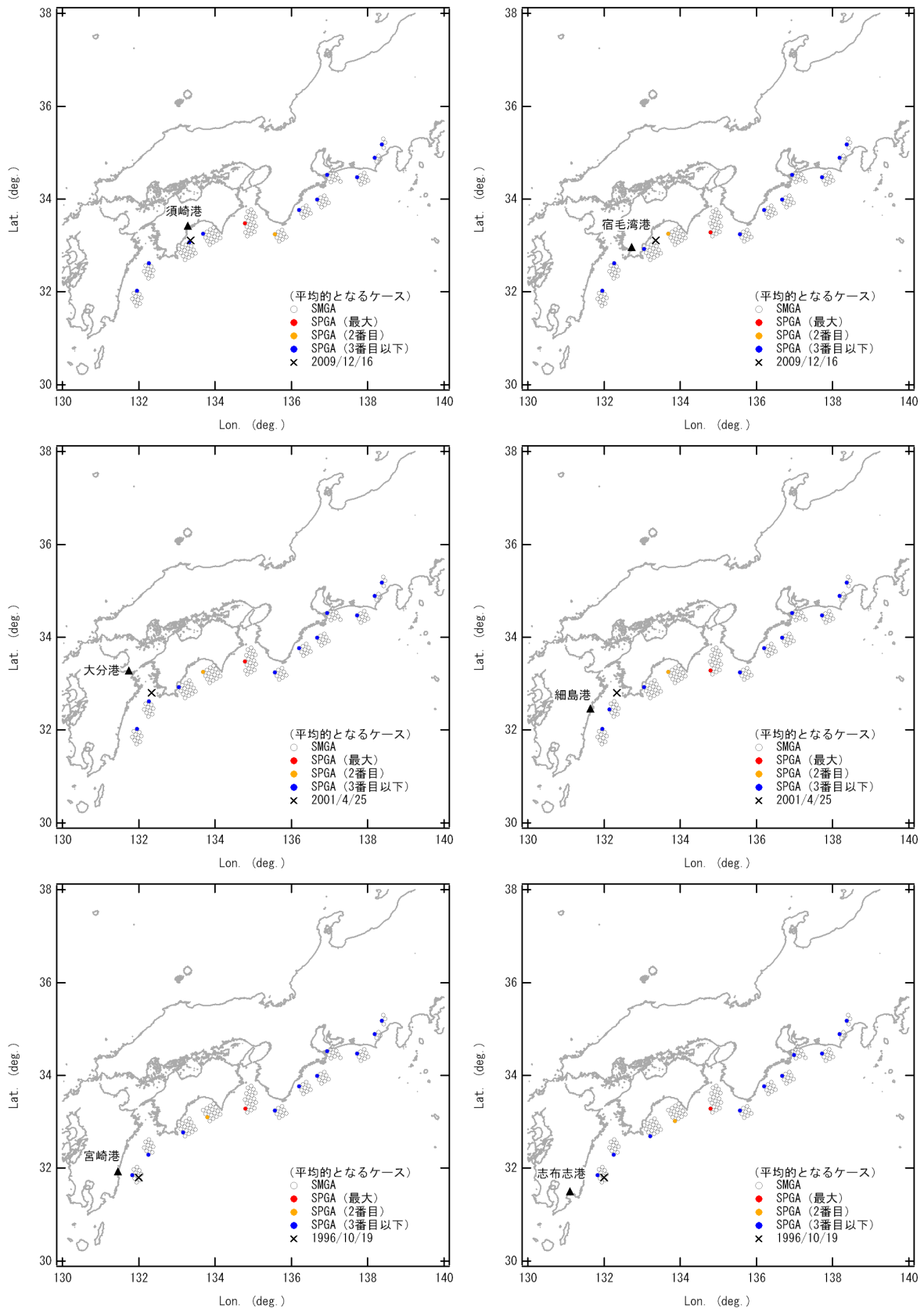


図-9 (つづき)

表-2 地震動算定の対象地点, 選択した中小地震, および伝播経路のQ値 (地点番号は国総研港湾施設研究室²²⁾による地点番号)

地点番号	港湾(ゾーン)	観測点	中小地震			伝播経路のQ値	
			発生日	震央	M	Δ	
9310	清水港②	清水日の出-U	20061216	静岡県中部	4.0	17.8	佐藤・巽(2002)
9321	清水港③	新興津-U2	20061216	静岡県中部	4.0	15.5	〃
9314	御前崎港	御前崎-G	20090811	駿河湾南部	6.5	32.4	〃
9308	名古屋港①	名古屋空見-G	20001031	志摩半島	5.7	97.1	〃
9320	名古屋港②	AIC011	20001031	志摩半島	5.7	92.0	〃
9312	四日市港	四日市-G	20001031	志摩半島	5.7	78.2	〃
9406	日高港	WKYH10	20011002	紀伊半島南方沖	4.6	46.0	Petukhin et al.(2003)
9411	和歌山下津港	和歌山-G	19950909	紀伊水道南部	4.5	49.6	〃
9414	大阪港③	OSKH02	20051101	紀伊水道	4.3	97.0	〃
9415	神戸港②	神戸PI	19950909	紀伊水道南部	4.5	49.6	〃
9613	徳島小松島港(小松島港地区)	小松島-G	19950909	紀伊水道南部	4.5	59.7	佐藤・巽(2002)
9611	高知港	高知-G	20101006	高知県中部	4.5	15.4	〃
9609	須崎港	KOCH07	20091216	土佐湾	4.6	32.0	〃
9610	宿毛湾港(池島地区)	KOC015	20091216	土佐湾	4.6	62.0	〃
9727	大分港	大分-G	20010425	日向灘	5.8	74.6	〃
9725	細島港	細島-G	20010425	日向灘	5.8	76.4	〃
9726	宮崎港	宮崎-G	19961019	日向灘	6.9	53.4	〃
9730	志布志港	志布志-G	19961019	日向灘	6.9	92.4	〃

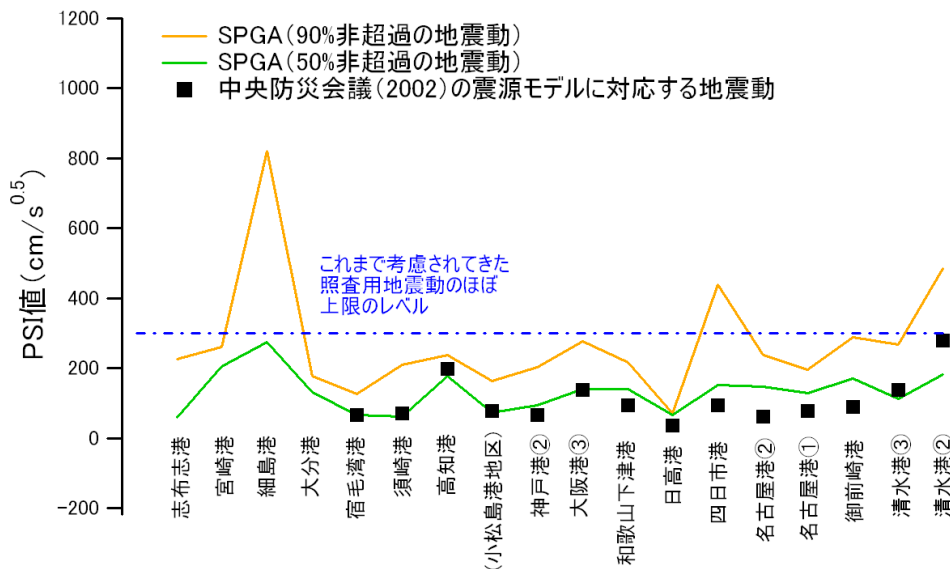


図-10 工学的基盤における50%非超過および90%非超過の地震動のPSI値の計算結果

らの地震動は, これまで, 港湾施設の耐震性評価に利用されてきている. その値は, $50\sim 100\text{cm/s}^{0.5}$ の範囲にある場合が多く, 大きい場合でも, 清水港のゾーン②を除けば $200\text{cm/s}^{0.5}$ を下回っている. それに対して, 本研究で計算された90%非超過の地震動は, 18地点のうち13地点で $200\text{cm/s}^{0.5}$ 以上となっており, さらに, 3地点では $300\text{cm/s}^{0.5}$ を上回るなど, はるかに大きい地震動となっている.

一方, 本研究で計算された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値となっている. その理由としては, 中央防災会議が示していた東南海・南海地震 ($M_w8.7$) の震源モデル²⁷⁾が, 宝永地震, 安政東海地震, 安政南海地震の震度分布を包絡するように設

定されたもので, 必ずしも $M_w8.7$ の平均に該当していない可能性と, $M_w8.7$ の地震と $M_w9.0$ の地震による強震動に平均的には大差がない可能性の両者が考えられ, ここでの解析結果だけからでは, いずれが正しいか判断することは困難である.

(2) 時刻歴波形

計算された地震動の時刻歴波形(速度波形)の例を図-11に示す. ここでは清水港ゾーン②, 大阪港ゾーン③, 高知港における90%非超過と50%非超過の速度波形を示している. いずれの地点においても, 90%非超過の地震動は, 大振幅のパルスによって特徴付けられている. 大阪港ゾーン③のように, 堆積層の影響で後続位相の発達する地点においても, 90%非超過の場合には,

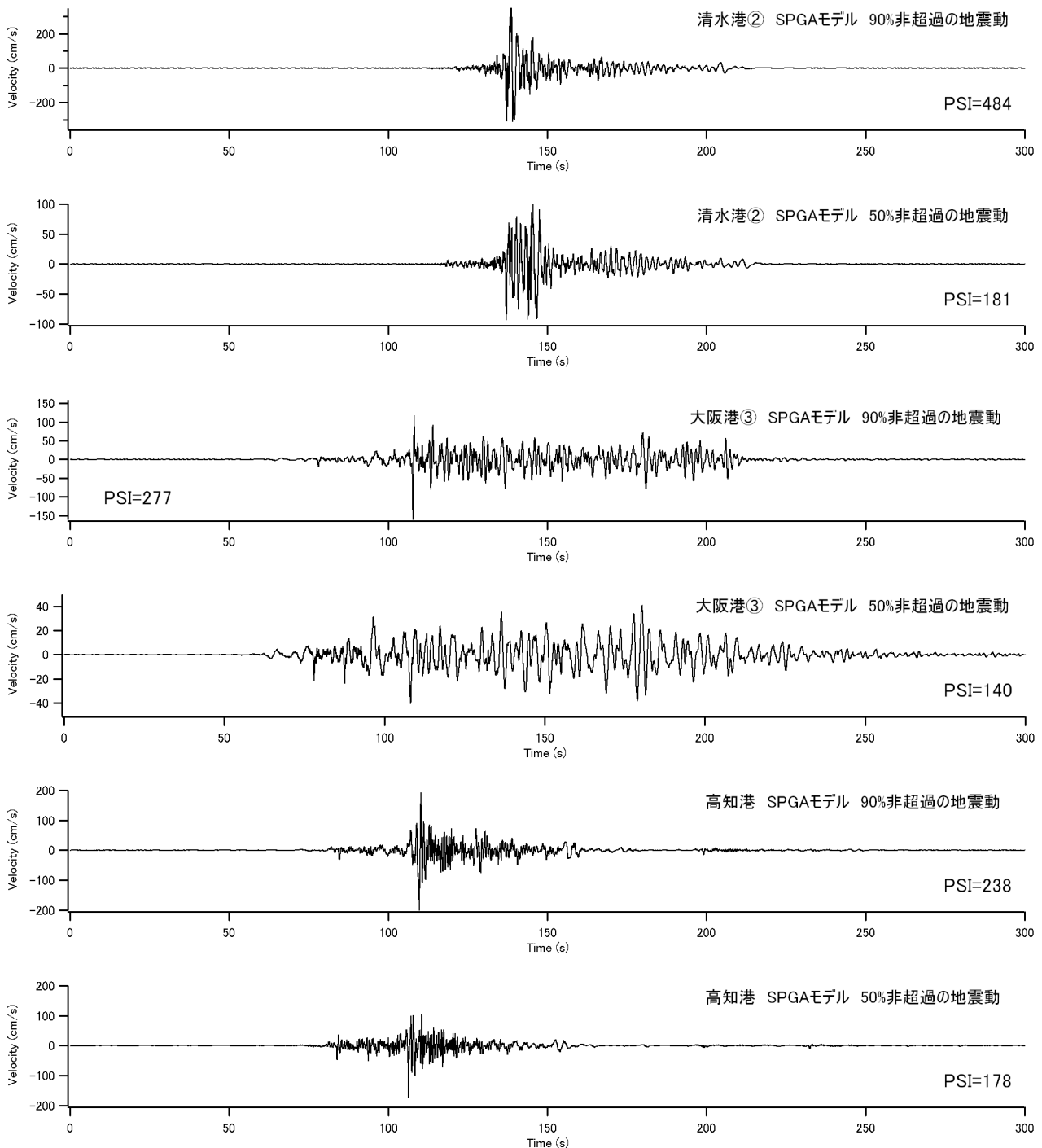


図-11 工学的基盤における速度波形の計算結果の例 (清水港はSN成分, 大阪港はEW成分, 高知港はEW成分)

後続位相よりもパルスが卓越している。これは、90%非超過の地震動を選択した場合、対象地点に比較的近い所に(放射エネルギーの観点で)強力なSPGAが配置されたモデルが選択される傾向にあり、その場合、当該SPGAからの強震動パルスが対象地点の速度波形において支配的となるためであると考えられる。

(3) フーリエスペクトル

計算された地震動の加速度フーリエスペクトルの例

を図-12に示す。ここでは清水港ゾーン②, 大阪港ゾーン③, 高知港における例を示している。図-12には比較のため、地震動の計算に用いたサイト増幅特性(地震基盤~工学的基盤)²⁵⁾を併せて示している。各地点とも、サイト増幅特性の特徴が、地震動の計算結果に反映されていることがわかる。例えば、清水港ゾーン②での0.5Hz付近の卓越、大阪港ゾーン③での0.2-2Hzの卓越、高知港での1Hz付近の卓越などが、地震動の計算結果に反映されている。

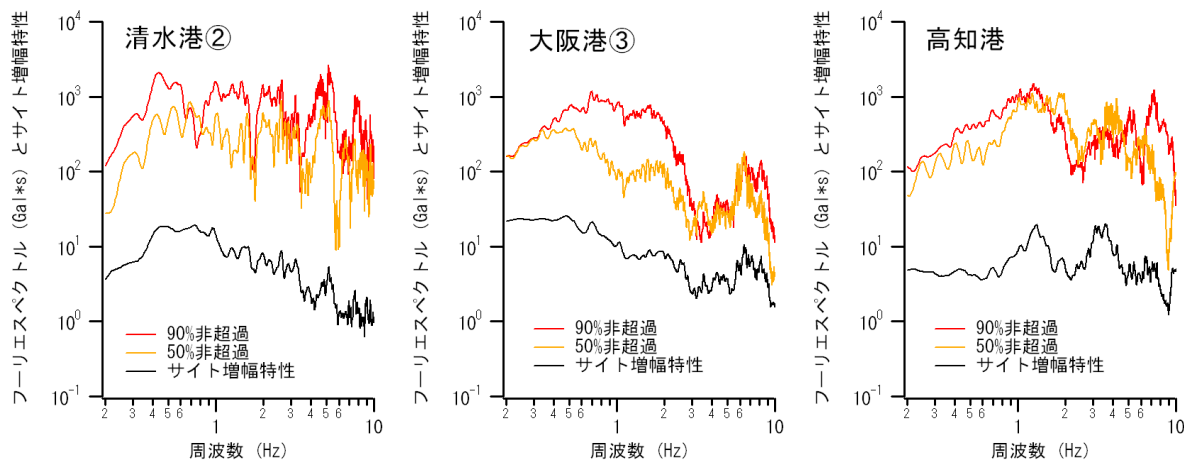


図-12 工学的基盤における加速度フーリエスペクトルの計算結果の例 (サイト増幅特性との比較)
(清水港は SN 成分, 大阪港は EW 成分, 高知港は EW 成分)

なお、地震動の大小の順位付けは本研究ではPSI値により行っているため、一部の周波数帯域では、90%非超過と50%非超過の逆転も生じている。特定の周波数帯域での地震動の大小を重視する場合には、本研究の手法を一部修正して、特定の周波数帯域における振幅で順位付けすることも考えられる。

6. まとめ

本稿では、既往の巨大地震への高い適用性を示す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 ($M_w9.0$) に対する強震動評価を行い、その結果について報告した。

SPGAモデルを用いた強震動評価では、SPGAの位置の設定が一つの課題であるが、この点について、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ったとしても、計算上の工夫を行えば、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実行可能であることを示した。具体的には、対象地点の地震基盤におけるPSI値を近似的に計算し、それをもとに、50%非超過、90%非超過等となるSPGA配置を求めることを提案した。

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。大阪港ゾーン③のように、堆積層の影響で後続位相の発達する地点においても、90%非超過の場合には、後続位相よりもパルスが卓越している。

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。

なお、本研究では、SPGAモデルを予測問題に適用する場合の不確実性に着目した検討を行ったが、すべての不確実性を網羅的に取り扱っているわけではない。しかしながら、本研究で扱われていない不確実性、例えば、複数のSPGAが非常に近接して存在する可能性等の取り扱いにも、本研究の手法の応用は可能であると考えられる。

謝辞：本研究では防災科学技術研究所のK-NET, KiK-netの強震記録を利用しています。記して謝意を表します。

付録

SPGAモデルおよびSMGAモデルによる地震動計算結果の分割数依存性について補足説明を行う。野津²⁸⁾は入倉他の重ね合わせ方法²⁴⁾で得られる地震動の分割数依存性について数値実験を行っており、大地震(本研究で言うところのSPGAまたはSMGA)のコーナー周波数よりも高周波側で分割数依存性が見られることを示している(文献28)のFig.3)。また、同時に、分割数が大きいほど中間周波数帯域での落ち込みが顕著になることを示し、これは、分割数が大きい場合、理論地震動に従う周波数帯域(すなわち ω^{-3} となる周波数帯域)が高周波側まで延びるためであると考察している。入倉他の重ね合わせ方法では、コーナー周波数よりも高周波側の成分を計算しようとする場合には、分割数を大き

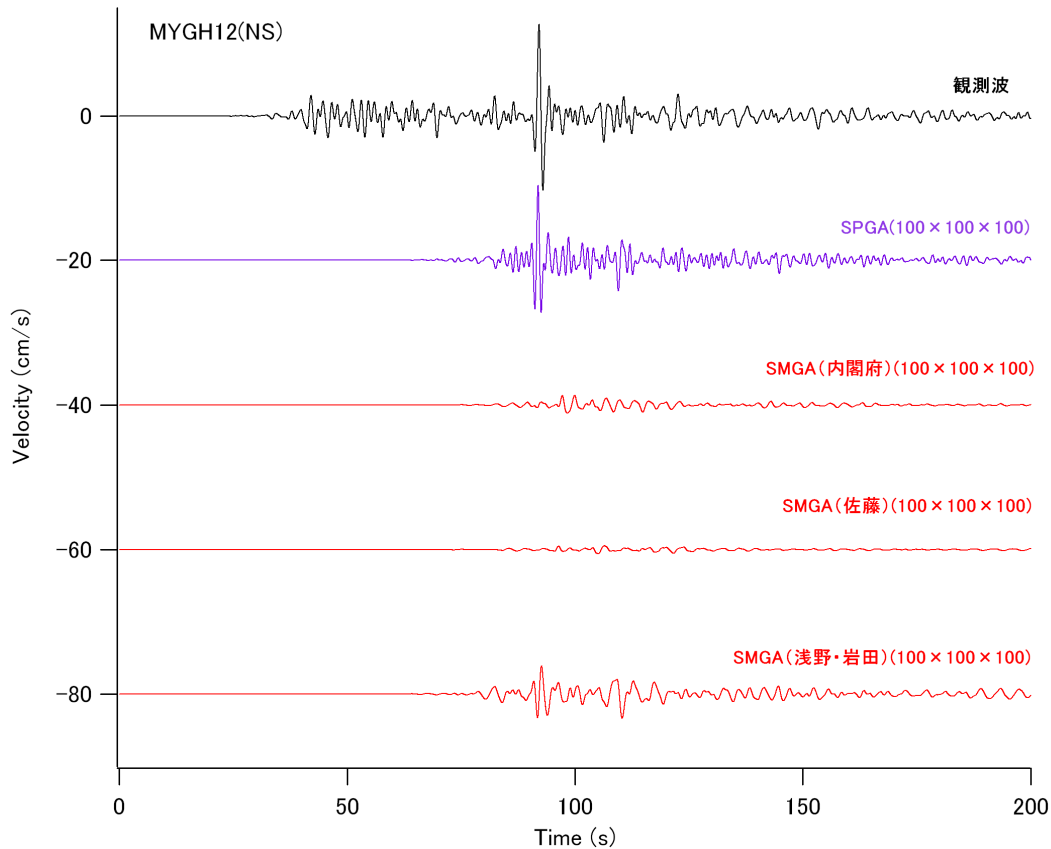


図-A.1 SPGAモデルとSMGAモデルによる速度波形の計算結果と観測結果との比較 (分割数 $100 \times 100 \times 100$)

くし過ぎないことが必要である。すなわち、有限要素法や差分法で期待されているような、分割を細かくするほど精度が向上し計算結果が収束する性質は、入倉他の重ね合わせ方法では、コーナー周波数よりも高周波側では期待できないことになる。すなわち、入倉他の重ね合わせ方法は、コーナー周波数よりも高周波側では不可避免的に分割数依存性を有する方法である。

ところで、SMGAとSPGAを比較すると、SMGAは一辺が数十km程度であることから、コーナー周波数は低周波側となり、工学上重要な0.2-1Hz程度の帯域はコーナー周波数よりも高周波側、すなわち、入倉他の重ね合わせ方法で分割数依存性が表れる帯域となる。一方、SPGAは一辺が数km程度であることから、工学上重要な0.2-1Hz程度の帯域はコーナー周波数と同程度となり、分割数依存性が表れにくくなる。本文の図-3と図-4の比較で、SPGAの場合だけ分割数依存性が表れていないのはそのためである。

このことをより明確化するために、さらに極端なケースとして、分割数を $100 \times 100 \times 100$ とした場合の結果を図-A.1に示す。ただし、実用上はSPGAモデルもSMGAモデルもこのように分割数を大きくすることは想定しておらず、この計算はあくまでも思考実験のためのものである。図-A.1からわかるように、分割数を大きくす

ることで、SMGAモデルの分割数依存性はより明瞭に表れる。特に、面積の大きい内閣府¹⁾のモデルと佐藤¹⁵⁾のモデルでは、振幅が著しく小さくなる。これは、先に説明したように、分割数が大きい場合、理論地震動に従う周波数帯域(すなわち ω^{-3} となる周波数帯域)が高周波側まで延びるためである。

これらの結果から、工学上重要な0.2-1Hz程度の帯域において分割数によらない安定した結果を得るためにはSPGAモデルが必要であることがわかる。

参考文献

- 1) 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による震度分布・津波高について（第一次報告），2012，http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai_trough/1st_report.pdf（2012年6月1日閲覧）。
- 2) Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-net), *Seim. Res. Lett.*, Vol. 69, pp.309-332, 1998.
- 3) Aoi, S., Obara, K., Hori, S., Kasahara, K. and Okada, S.: New strong-motion observation network: KiK-net, *EOS. Trans. Am. Geophys. Union*, Vol. 329, 2000.
- 4) 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－内陸活断層地震および海溝型地震への適用性の検討－，港湾空港技術研究所資料，No.1120，2006.
- 5) 野津厚：海溝型巨大地震の特性化震源モデル作成におけるこつ，日本地震学会講演予稿集，D004，2006.

- 6) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例, 日本地震工学会論文集, Vol.7, pp.215-234, 2007.
- 7) 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.
- 8) 野津厚: 東北地方太平洋沖地震を対象とする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, No.2, pp.21-40, 2012.
- 9) 野津厚, 若井淳: 強震動を対象とした 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源モデル, 港湾空港技術研究所報告, Vol.51, No.1, pp.23-53, 2012.
- 10) 野津厚: 強震動パルスの生成に着目した 2011 年東北地方太平洋沖地震の特性化震源モデル, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会予稿集(CD-ROM), 2012.
- 11) 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ジング, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.4 (特集号), pp.209-228, 2012.
- 12) 野津厚, 長尾毅: 海溝型巨大地震による地震動の予測のための震源パラメータの経験式-強震動パルスの生成に着目して-, 港湾空港技術研究所資料, No.1257, 2012.
- 13) Miyake, H., Iwata, T. and Irikura, K.: Source characterization for broadband ground-motion simulation: kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.93, pp.2531-2545, 2003.
- 14) 松島信一・川瀬博: 海溝性地震におけるスーパーアスペリティモデルの提案, 月刊地球号外, No.55, pp.98-102, 2006.
- 15) 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, 日本建築学会構造系論文集, No.675, pp.695-704, 2012.
- 16) Asano, K. and Iwata, T.: Source model for strong ground motion generation in 0.1 – 10 Hz during the 2011 Tohoku earthquake, *Earth Planets Space*, <http://www.terrapub.co.jp/journals/EPS/pdf/free/inpress/201205003.pdf> (2013 年 1 月 24 日閲覧).
- 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, pp.97-104, 1998.
- 18) 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.
- 19) 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, pp.808-813, 2009.
- 20) 佐藤智美, 巽誉樹: 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, No.556, pp.15-24, 2002.
- 21) 野津厚, 井合進: 岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察, 第 28 回関東支部技術研究発表会講演概要集, 土木学会関東支部, pp.18-19, 2001.
- 22) 平井俊之, 澤田純男: 地震動のエネルギー指標に基づく地震動予測結果の妥当性評価, 日本地震工学会論文集, Vol.12, pp.31-42, 2012.
- 23) Aki, K.: Scaling law of seismic spectrum, *J. Geophys. Res.*, Vol.72, pp.1217-1231, 1967.
- 24) 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.
- 25) 国土技術政策総合研究所港湾施設研究室: レベル 1 地震動について, <http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html> (2012 年 6 月 1 日閲覧).
- 26) 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.
- 27) 中央防災会議: 東南海・南海地震等に関する専門調査会 (第 7 回) 図表集, 2002.
- 28) 野津厚: 円形クラックモデルの経験的グリーン関数法への応用, 地震 2, Vol.56, pp.337-350, 2004.

(2012. 11. 16 受付, 2013. 1. 25 修正, 2013. 2. 23 受理)

AN EXAMPLE OF STRONG MOTION EVALUATION FOR A SCENARIO EARTHQUAKE WITH M_w 9.0 ALONG THE NANKAI TROUGH WITH THE SPGA MODEL

Atsushi NOZU

The occurrence of the 2011 Tohoku earthquake (M_w 9.0) along the Japan Trench motivated us to hypothesize an equally gigantic earthquake along the Nankai Trough, which is another plate boundary close to the coast of Japan. The evaluation of strong ground motions for such an earthquake should be based on a source model whose applicability for gigantic earthquakes has been demonstrated using existing strong motion records including those from the Tohoku earthquake. In this article, strong ground motions for a scenario earthquake with M_w 9.0 along the Nankai Trough are evaluated using a source model called the "SPGA model", which can reproduce strong ground motions from gigantic earthquakes quite accurately. Because it is difficult to predict the locations of SPGAs, many cases are considered with different distributions of the SPGAs. The result indicates that the ground motions are strongly dependent on the locations of the SPGAs. When an intense SPGA is close to the target site, the ground motions can be much more intense than those conventionally assumed for the design of infrastructures.