

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1290 September 2014

S P G Aモデルによる歴史地震の震度分布の再現
—その手順の一例—

野津 厚
若井 淳
長坂 陽介

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. SPGAモデルのパラメター	7
3. 1707年宝永地震 (Mw8.7)	9
3.1 初期モデルの作成	9
3.2 強震動シミュレーション	11
3.3 初期モデルによる強震動シミュレーションの結果	11
3.4 モデルのチューニングと最終モデルによる強震動シミュレーションの結果	14
4. 1946年南海地震 (Mw8.1)	15
4.1 初期モデルの作成	15
4.2 強震動シミュレーション	16
4.3 モデルのチューニングと最終モデルによる強震動シミュレーションの結果	17
5. 港湾における地震動の比較	19
6. まとめ	20
謝辞	21
参考文献	21

A Procedure to Develop SPGA Models for Historical Earthquakes with Consideration of Seismic Intensity Data

Atsushi NOZU*

Atsushi WAKAI**

Yosuke NAGASAKA ***

Synopsis

The SPGA model (Nozu, 2012), which is a kind of characterized source model, has been applied to huge subduction earthquakes such as the 2011 Tohoku earthquake and the 2003 Tokachi-oki earthquake. The model is suitable for the simulation of strong ground motions from huge subduction earthquakes, especially in the frequency range of engineering importance. In terms of the application of the SPGA model, it can potentially be used for the prediction of strong ground motions for a variety of earthquake scenarios including a recurrence of a historical subduction earthquake. When a recurrence of a historical earthquake is considered, it is desirable to construct an SPGA model which is consistent with the seismic intensity data. Currently, however, we have only a few examples of the SPGA model which is compatible with historical seismic intensity data; it is preferable to provide more examples of such models, which will serve as references for practitioners. Thus, the aim of this study is to develop SPGA models with consideration of seismic intensity data for some of the historical subduction earthquakes. Two historical earthquakes along the Nankai Trough with different size, namely, the 1707 Hiei earthquake (M_w 8.7) and the 1946 Nankai earthquake (M_w 8.1) were considered. The number and the locations of the SPGAs were determined based on the results of seismic intensity inversion (Kanda et al., 2004) and the empirical formula for the SPGAs (Nozu and Nagao, 2012). In terms of the parameters (e.g., seismic moment and area) of the SPGAs, the initial values were determined based on the empirical relations (Nozu and Nagao, 2012). Then, strong motion simulations (Nozu et al., 2009) were conducted and, if the seismic intensity distribution from the simulation is not consistent with the historical data, the parameters of the SPGAs were corrected manually. As a result of the study, SPGA models were obtained for the two earthquakes. The model for the 1707 Hiei earthquake involves 6 SPGAs from Tokai through Shikoku. The model for the 1946 Nankai earthquake involves 3 SPGAs from Shionomisaki through Shikoku.

Key Words: historical earthquake, seismic intensity, SPGA model, subduction earthquake, strong ground motion

* Director of Earthquake Disaster Prevention Engineering Division

** Postdoctoral Fellow, Engineering Seismology Group, Earthquake Disaster Prevention Engineering Division

*** Research Engineer, Engineering Seismology Group, Earthquake Disaster Prevention Engineering Division

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5058 Fax : +81-46-844-0839 e-mail: nozu@pari.go.jp

SPGA モデルによる歴史地震の震度分布の再現

— その手順の一例 —

野津 厚*・若井 淳**・長坂陽介***

要 旨

SPGA モデル（野津他，2012）は特性化震源モデルの一種であり，これまで 2011 年東北地方太平洋沖地震や 2003 年十勝沖地震のような海溝型巨大地震に適用され，実際に観測された強震動，特に，港湾構造物に対して影響しやすい周波数帯域の強震動を精度良く再現できることが確認されている．この SPGA モデルの利用方法の一つとして，歴史地震の再来を想定して強震動評価を行う場合への適用が考えられる．その場合，歴史地震による広域での震度分布と整合するように SPGA モデルを設定することが求められるが，これまでのところ，実際にそのような条件を満足するように SPGA モデルを設定した事例は少なく，この面で実務者の参考になるような資料は少ない状況である．そこで，本研究では，実際にいくつかの歴史地震を対象として，広域での震度分布と整合するように SPGA モデルの設定を行い，その手順を明示することを試みた．研究の対象としては，南海トラフで過去に発生した海溝型巨大地震のうち，規模の異なる地震として，1707 年宝永地震 (M_w 8.7) と 1946 年南海地震 (M_w 8.1) を取り上げた．震源モデルを構成する SPGA の個数と位置については，震度インバージョン解析結果（神田他，2004）および野津・長尾（2012）の経験式に基づいて設定した．個々の SPGA のパラメータ（地震モーメント，面積）については，野津・長尾（2012）の経験式から初期値を設定し，それによる強震動シミュレーション結果が広域での震度分布と整合しない場合にパラメータのチューニングを行った．強震動シミュレーションには経験的サイト増幅・位相特性を考慮する手法（野津他，2009）を用いた．その結果，対象とした地震について，広域での震度分布と整合するような SPGA モデルを作成することができた．1707 年宝永地震については東海から四国にかけて 6 箇所の SPGA を含むモデル，1946 年南海地震については潮岬付近から四国にかけて 3 箇所の SPGA を含むモデルが得られた．

キーワード：歴史地震，震度，SPGA モデル，海溝型巨大地震，強震動

* 地震防災研究領域長

** 地震防災研究領域 地震動研究チーム 専任研究員

*** 地震防災研究領域 地震動研究チーム 研究官

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5058 Fax：046-844-0839 e-mail: nozu@pari.go.jp

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 クラスの海溝型巨大地震であり、数多くの強震記録をもたらした。この地震の発生により我々は M9 クラスの海溝型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。この地震の発生以前にも、南海トラフなどを対象として、海溝型巨大地震を想定した強震動の評価は行われていた³⁾⁴⁾⁵⁾が、当時は、海溝型巨大地震による強震動の実態に関する十分な知見が得られていなかったことから、実際の強震記録による検証を経ていない震源モデルを用いて強震動評価を行わざるを得なかった。しかしながら、今後、海溝型巨大地震を想定した強震動評価を行う場合には、東北地方太平洋沖地震から得られる知見を反映させることが極めて重要であり、震源モデルに関しても、東北地方太平洋沖地震等の強震記録を通じて、海溝型巨大地震への適用性が検証されたものを用いることが必要である。その際、強震動評価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強震動を正確に計算できる震源モデルが求められる。

SPGA モデル⁶⁾⁷⁾⁸⁾は、海溝型巨大地震による強震動、特に、港湾構造物に対して影響しやすい 0.2-1Hz 程度の周波数帯域の強震動を精度良く計算することを念頭に置いて著者らが開発を行ってきた震源モデルである。この震源モデルは、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⁸⁾のパルス幅と調和的なサイズのサブイベント (SPGA : Strong-motion Pulse Generation Area) から構成され、サブイベントのサイズは、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) からまんべんなく強震動が生成されるとする震源モデルも存在しており、それらは SMGA モデルと呼ばれる。

2011年東北地方太平洋沖地震を対象に著者らが開発した SPGA モデルと、他の研究者により提案されている SMGA モデル⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾を比較して図-1 に示す。また、SPGA モデルのパラメータを表-1 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 モデルとの間に共通性が認められる。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。

SMGA モデルと SPGA モデルによる強震動計算結果の一例を図-2 および図-3 に示す。ここでは、震源に比較的

近い観測点として宮城県の MYGH12 と茨城県の IBR007 (位置を図-1 に示す) をとりあげ、それらの地点における観測波形 (0.2-1Hz) と、SMGA モデルおよび SPGA モデルによる計算波形 (同じく 0.2-1Hz) との比較を示す。各モデルによる強震動の計算には、各々の文献で用いられているのと同様の計算手法を用いている。いずれの地点においても、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 モデルではそれを再現できていない。SMGA モデルによる計算結果では、強震動パルスに該当する部分が過小評価となっているか、または、過小評価となっていない場合でも、計算結果の波形の特徴がランダムなものとなっており、観測波形の特徴とは著しく異なっている。

これらの例に見られるように、港湾構造物に対して影響しやすい 0.2-1Hz 程度の周波数帯域の強震動を精度良く計算できることが SPGA モデルの特徴である。また、ここでは詳しく述べないが、同様のことは、海溝型巨大地震である 2003 年十勝沖地震 ($M_w7.9$) や、巨大地震と呼ぶにはやや規模が小さいが規模の大きい海溝型地震である宮城県沖地震 ($M_w7.6$) に対しても、強震記録に基づいて確認されている⁸⁾。このような確認がなされているのは現時点では SPGA モデルだけであることから、著者らは、港湾構造物の耐震検討を目的とした強震動評価において、SPGA モデルを利用する必要があると考えている¹²⁾¹³⁾。

さて、この SPGA モデルの予測問題への適用を考えた場合、二通りの場面が考えられる。一つは、①歴史地震 (歴史上の記録に残されている地震) の再来を想定して強震動評価を行う場合、もう一つは、②歴史地震を越える規模の地震を想定して強震動評価を行う場合である。例えば、南海トラフの地震を対象とした場合、東北地方太平洋沖地震の発生以前においては、歴史地震の中で最も規模の大きい 1707 年宝永地震 ($M_w8.7$) の再来を想定して強震動評価を行う場合が多かったが、これは①に該当する。一方、東北地方太平洋沖地震の発生以後においては、歴史地震の再来を想定するだけでは不十分との議論があり、東北地方太平洋沖地震と同じ $M_w9.0$ の地震¹⁴⁾を想定して強震動評価を行う場合が多くなってきているが、これは②に該当する。

SPGA モデルの予測問題への適用に関する研究としては、南海トラフ巨大地震 ($M_w9.0$) への SPGA モデルの適用方法に関する研究¹²⁾¹³⁾があり、実際にこの方法を用いて、各地で照査用地震動の評価が行われている。しかしながら、歴史地震の再来を想定する場合の SPGA モデルの設定方法については、これまで十分な研究が行わ

SPGA model	SMGA model
<p>SPGA model involves subevents with the size of several km, which is consistent with the time-width of S-wave pulses.</p> <p>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。</p>	<p>SMGA model involves larger subevents with the size of several tens of km.</p> <p>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。</p>

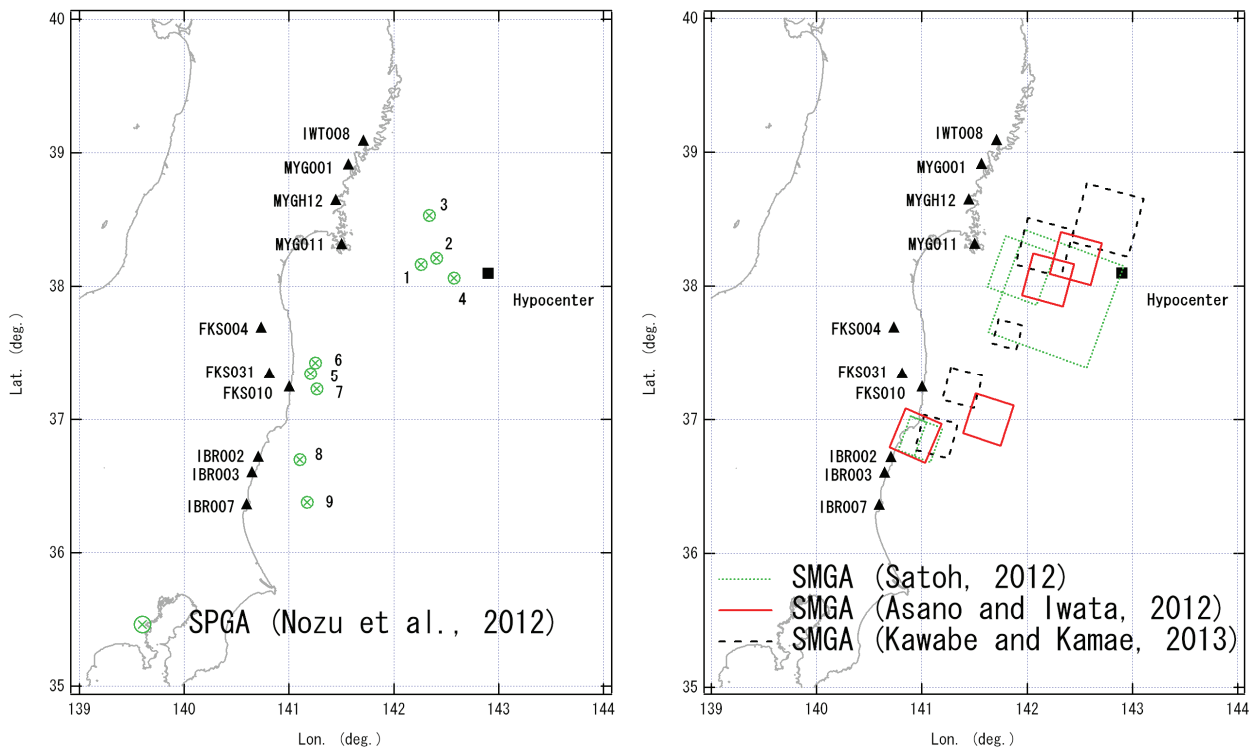


図-1 2011年東北地方太平洋沖地震を対象とした SPGA モデル⁶⁾⁷⁾⁸⁾と SMGA モデル⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾の比較

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⁶⁾⁷⁾⁸⁾

	破壊時刻 (h:m:s)	長さ (km)	幅 (km)	面積 (km ²)	地震モーメント (Nm)	ライズタイム (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

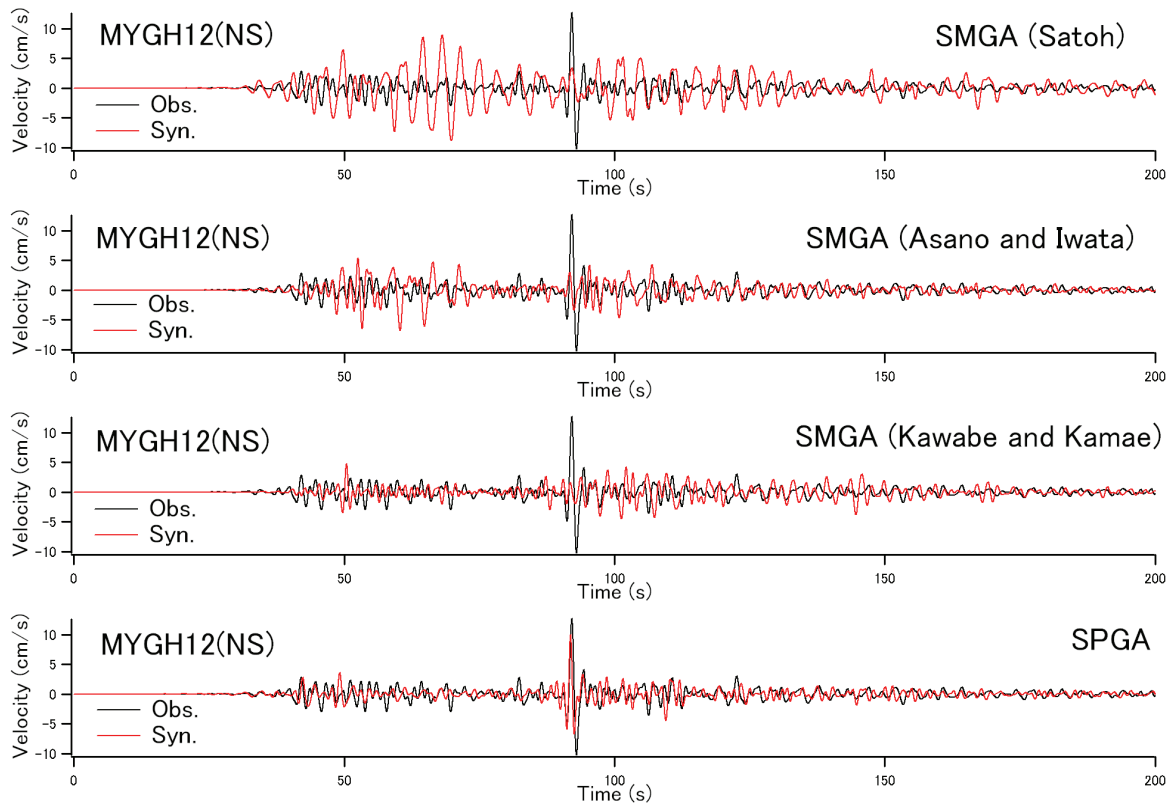


図-2 MYGH12 における速度波形 (0.2-1Hz) の観測結果 (Obs.) と SMGA モデルおよび SPGA モデルによる計算結果 (Syn.)

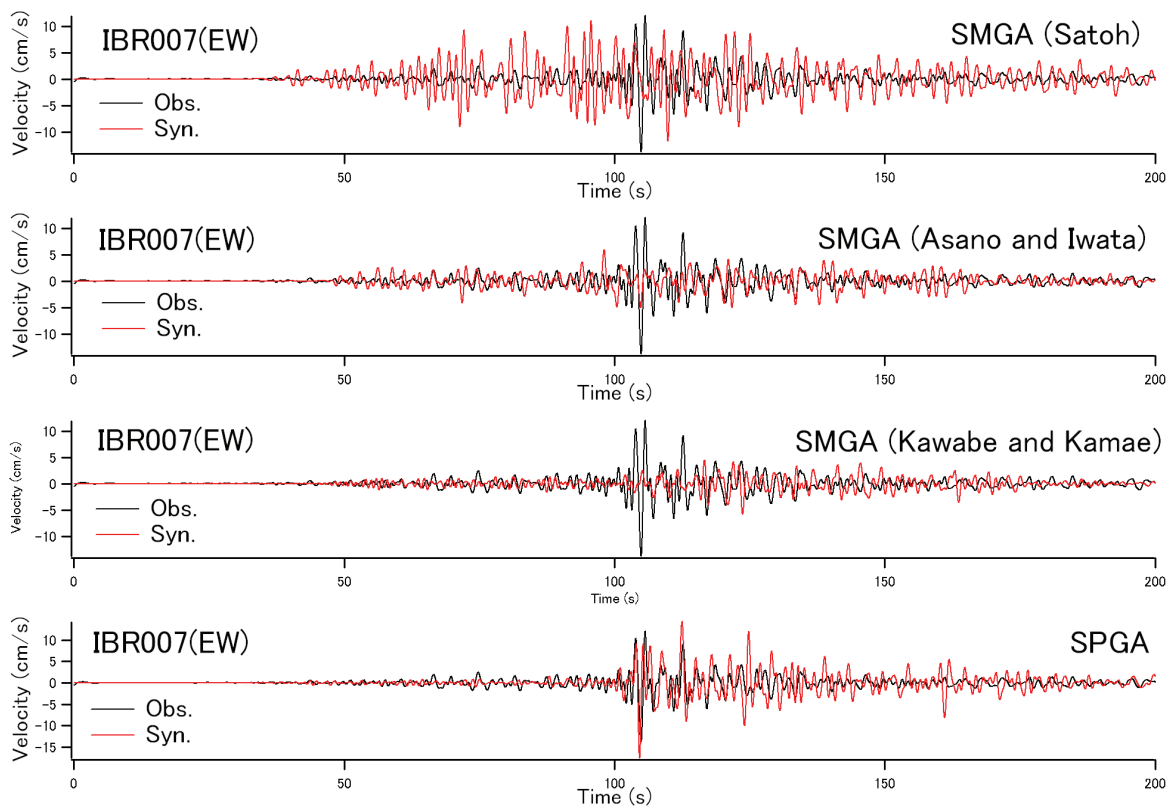


図-3 IBR007 における速度波形 (0.2-1Hz) の観測結果 (Obs.) と SMGA モデルおよび SPGA モデルによる計算結果 (Syn.)

れてこなかった。

港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁵⁾では、耐震設計のためのレベル2地震動の設定にあたって、次のi)～vi)に掲げる想定地震の中から対象地震を選定することになっている。

- i) 過去に大きな被害をもたらした地震の再来
- ii) 活断層の活動による地震
- iii) 地震学的あるいは地質学的観点から発生が懸念されるその他の地震
- iv) 中央防災会議や地震調査研究推進本部など国の機関の想定地震
- v) 地域防災計画の想定地震
- vi) M6.5の直下地震

南海トラフに関して言えば、東北地方太平洋沖地震以後、iii)あるいはiv)に該当する地震として $M_w9.0$ の巨大地震¹⁴⁾を想定することが一般的となっており、構造物の照査用地震動を安全側に設定するという立場から言えば、より規模の小さい歴史地震の再来を想定する必要性は小さくなってきている。しかしながら、他の地域では、歴史地震の再来を想定して耐震設計用のレベル2地震動を設定する機会もあるものと考えられる。また、南海トラフを対象とした場合においても、耐津波設計において、発生頻度の高い津波¹⁶⁾に先行する地震動を評価する場合など、歴史地震の再来を想定して地震動を設定するニーズも依然として存在する。この場合のSPGAモデルの適用方法については、これまで十分な研究が行われて来ていない。

歴史地震の再来を想定して強震動評価を行う場合には、古文書等から推定されている広域での震度分布¹⁷⁾と整合するように震源モデルを設定することが一般的である⁴⁾¹⁵⁾。これは、広域での震度分布と整合しない震源モデルは、当該地震の震源モデルとして信頼性が不十分と判断されるためである。従って、震源モデルとしてSPGAモデルを用いる場合にも、広域での震度分布と整合するようにSPGAモデルを設定することが求められる。

しかしながら、これまでのところ、実際にそのような条件を満足するSPGAモデルを設定した事例は少なく、そのための手順も明示されていない。従って、この方面で実務者の参考になるような資料は少ない状況である。

そこで、本研究では、実際にいくつかの歴史地震を対象として、広域での震度分布と整合するようにSPGAモデルの設定を行い、その手順を明示することにより、実務者にとって参考となる資料とすることを目的とする。

研究の対象としては、南海トラフで過去に発生した海溝型巨大地震のうち、規模の異なる地震として、1707年宝永地震($M_w8.7$)と1946年南海地震($M_w8.1$)を取り上げた。

震源モデルを構成するSPGAの個数と位置については、既往の震度インバージョン解析結果¹⁸⁾およびSPGAに関する経験式¹⁹⁾に基づいて設定した。個々のSPGAのパラメータ(地震モーメント、面積)については、SPGAに関する経験式¹⁹⁾から初期値を設定し、それによる強震動シミュレーション結果が広域での震度分布と整合しない場合にパラメータのチューニングを行った。強震動シミュレーションには経験的サイト増幅・位相特性を考慮する手法²⁰⁾²¹⁾²²⁾を用いた。

2. SPGAモデルのパラメータ

はじめに、ここで設定すべきSPGAモデルのパラメータとしてどのようなものがあるか整理する。

まず、SPGAの個数とその位置がある。実際には個々のSPGAは図-4に示すようにある程度の面的な広がりを持つているので、個々のSPGAの位置は破壊開始点(図-4の☆)の位置で代表させる。

SPGAの面の向きを規定するパラメータとして走向(strike)と傾斜(dip)があり(図-4)、面的な広がりを規定するパラメータとして長さ(L)と幅(W)がある(図-4)。また、破壊開始点(図-4の☆)とSPGAとの相対的な位置関係を規定するパラメータが必要であるが、本研究では一貫して破壊開始点はSPGAの浅い側の辺上に位置するものとしているので、設定すべきパラメータは図-4のXSとなる。

SPGAの破壊伝播様式としては、図-4の☆の位置を中心として、破壊フロントが同心円状に拡大するものとしている。SPGA上の一点(図-4)に着目すると、この点でのすべり(slip)は、同心円状の破壊フロントが通過した時点から始まる。この一点においてすべりが継続する時間はライズタイム(rise time)と呼ばれる(図-4)。よって、破壊の時間的経過を規定するパラメータとしては、まず、破壊開始点(図-4の☆)における破壊時刻があり(本稿では一貫して断層全体の破壊開始時刻に対する相対値を用いる)、次に、同心円状の破壊フロントの拡大速度(破壊伝播速度)があり、最後にライズタイムがある。なお、ライズタイムの値はSPGA上で一様としている。

最後に、SPGA上でのすべり量を規定する必要がある(これもSPGA上で一様としている)。これについては、すべり量を規定する代わりに、地震モーメント(=せん断剛性×面積×すべり量)を規定することが普通である。

以上のうち、SPGAから生成される地震動に対して特に重要な影響を及ぼすパラメータは面積(=長さ×幅)と地震モーメントであるが、これらを定める代わりに、以下に

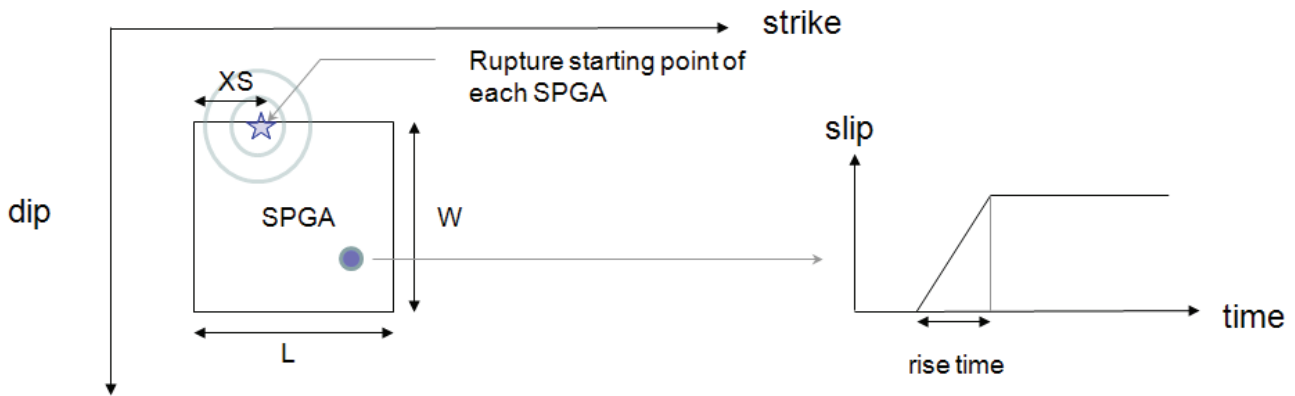


図-4 SPGA の面的な広がり と破壊開始点の関係

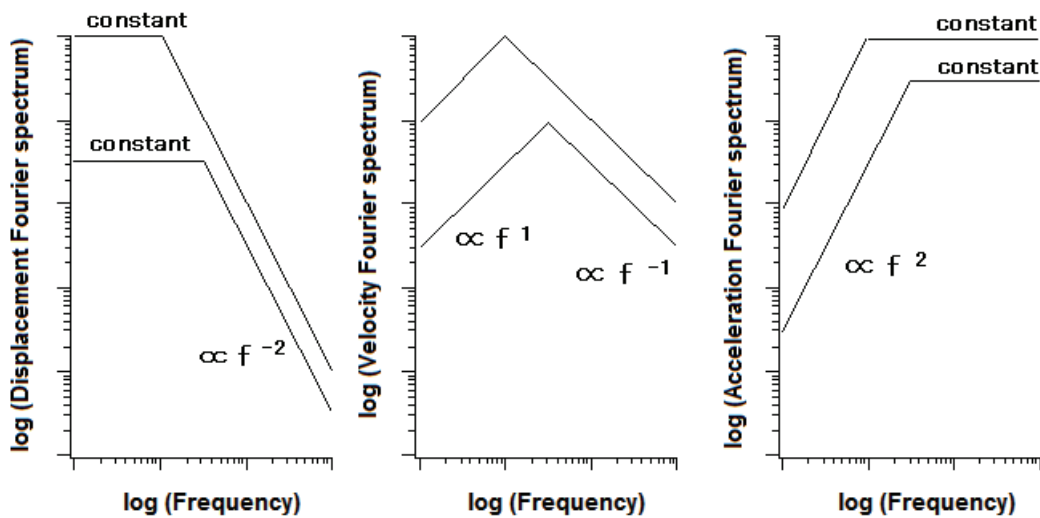


図-5 オメガスクエア・モデル²³⁾に従う震源スペクトル (左から変位, 速度, 加速度)

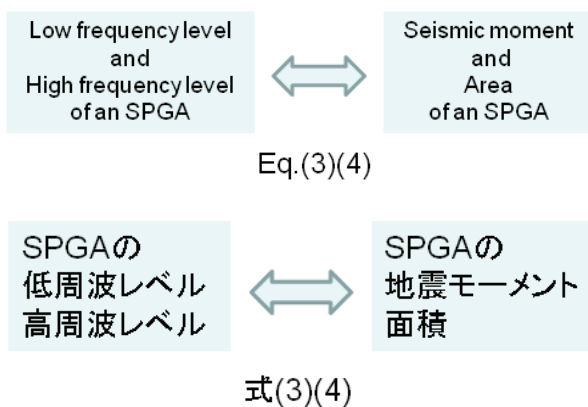


図-6 SPGA のパラメーター間の変換

述べており, SPGA の低周波レベルと高周波レベルを定めても良い。

SPGA モデルでは, 個々の SPGA から生じる地震動は近

似的にオメガスクエア・モデル²³⁾に従うとしている。オメガスクエア・モデルでは, 変位の震源スペクトル $S_D(f)$ は式(1)で表される。

$$S_D(f) = M_{0SPGA} / (1 + (f / f_c)^2) \quad (1)$$

ここに M_{0SPGA} は SPGA の地震モーメント, f_c は SPGA のコーナー周波数である。式(1)に比例定数を乗じたものを震源スペクトルと呼ぶこともあるが, ここでは式(1)を震源スペクトルと呼ぶ。式(1)は, 図-5 (左) に示すように, 低周波側でフラット, コーナー周波数より高周波側で f^{-2} に比例するスペクトルを表す。この時の低周波側のフラットレベル (M_{0SPGA} に一致) を低周波レベルと呼ぶ。

一方, 加速度の震源スペクトル $S_A(f)$ は式(2)で表される。

$$S_A(f) = M_{0SPGA} (2\pi f)^2 / (1 + (f / f_c)^2) \quad (2)$$

式(2)は, 図-5 (右) に示すように, 低周波側で f^2 に比例し, コーナー周波数より高周波側でフラットなスペクトルを表す。この高周波側のフラットレベルを高周波レベルと呼ぶ。

高周波レベル A_{SPGA} と低周波レベル M_{0SPGA} の間には式(3)の関係がある.

$$A_{SPGA} = (2\pi f_c)^2 M_{0SPGA} \quad (3)$$

また、コーナー周波数 f_c と SPGA の面積との間には式(4)の関係²⁴⁾²⁵⁾がある.

$$f_c = 0.66 \beta S_{SPGA}^{-0.5} \quad (4)$$

ここに β は震源域の S 波速度である. 従って、図-6 に示すように、SPGA の低周波レベルと高周波レベルが与えられれば、式(3)(4)を連立させて解くことにより、それらを SPGA の地震モーメントと面積に変換することができ、逆に SPGA の地震モーメントと面積が与えられれば、それらを SPGA の低周波レベルと高周波レベルに変換することができる. このことから、SPGA の面積と地震モーメントを定める代わりに、SPGA の低周波レベルと高周波レベルを定めても良い.

3. 1707 年宝永地震 (M_w 8.7)

1707 年宝永地震は、2011 年東北地方太平洋沖地震の発生まで、我が国における史上最大の地震として知られていた. 以下においては、まず、既往の研究¹⁸⁾や SPGA に関する経験式¹⁹⁾に基づいて初期モデルを設定する過程について述べる. 次に、強震動シミュレーションの結果と文献¹⁷⁾の震度分布との比較に基づいてパラメータのチューニングを行い最終モデルを作成する過程について述べる.

3.1 初期モデルの作成

まず、地震全体の規模について述べる. 文献²⁶⁾では、1707 年宝永地震の巨視的震源モデル(断層全体を巨視的に見た震源モデルであり、本研究のテーマである強震動の生成に着目した震源モデルとは異なる)として、2 つのモデルが挙げられている. 文献²⁶⁾では、このうち、相田²⁷⁾²⁸⁾のモデルを「現時点で最も妥当と思われるモデル」としている(文献²⁶⁾の p.47). そこで、相田²⁷⁾²⁸⁾のモデルにおける地震モーメント(東海側と南海側の合計で $M_0 = 1.48 \times 10^{22} \text{Nm}$)をモーメントマグニチュード M_w の定義式²⁹⁾

$$1.5 M_w = \log_{10}(M_0) - 9.1 \quad (5)$$

に代入し $M_w = 8.7$ とした.

次に、震源モデルを構成する SPGA の個数と位置について述べる. 著者ら¹⁹⁾は、SPGA モデルに関する種々の経験式を提案している. この中で、地震全体の規模と SPGA の個数 N_{SPGA} との平均的な関係式として次式を示している.

$$\log_{10}(N_{SPGA}) = 0.5 M_w - 3.55 \quad (M_w \geq 7.9) \quad (6)$$

この式に $M_w = 8.7$ を代入すると $N_{SPGA} = 6.3$ が得られる. つまり、この規模の地震に対して平均的には 6 個程度の SPGA

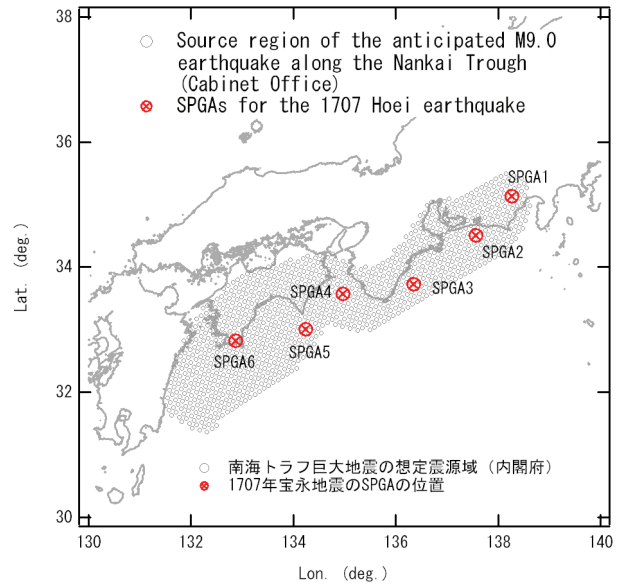


図-7 1707 年宝永地震に対する SPGA の位置

が存在すると考えられる. 一方、1707 年宝永地震に対して神田他¹⁸⁾は震度インバージョン解析を実施している. 震度インバージョン解析とは、各地で得られている震度データ¹⁷⁾をもとに、断層面上における短周期地震波発生の相対的な強度を求めるものである. 1707 年宝永地震については東海から四国にかけて 6 箇所の短周期地震波発生域が求められている. これらの情報を総合して、1707 年宝永地震の震源モデルは 6 個の SPGA から構成することとした. また、その位置については、神田他¹⁸⁾の解析結果に基づき、東海から四国にかけての 6 箇所とした.

設定した SPGA の位置を図-7 に示す. これらの位置の設定方法の詳細は以下の通りである. 南海トラフの巨大地震モデル検討会¹⁴⁾では、M9 クラスの巨大地震の想定震源域を多数の小断層を用いて表現しており(図-7)、各々の小断層の東経、北緯、深さ、走向、傾斜などの情報を与えている. これらはプレート境界面の情報を与えるものである.

そこで、これらの小断層の中から、神田他¹⁸⁾による短周期地震波発生域の重心に最も近い小断層を選択し、当該小断層における東経、北緯、深さ、走向、傾斜の情報を用いることとした(表-2). ただし、厳密には SPGA 自体が図-4 に示すようにある程度の面的な広がりを持している. そこで、表-2 に示す東経、北緯、深さの情報は、図-4 における破壊開始点(☆)の情報として用いた.

次に、個々の SPGA の低周波レベルと高周波レベルの初期値を定めることを考える. SPGA は 6 個あるので、未知数は 12 個となる. これらをすべて定めるためには 12 の拘束条件が必要となる. ここでは、12 の拘束条件を以下の通り与える.

表-2 1707年宝永地震のSPGAモデルのパラメーター（その1）（初期モデルと最終モデルに共通）

	東経 (deg.)	北緯 (deg.)	深さ (km)	走向 (deg.)	傾斜 (deg.)	破壊時刻 (s)
SPGA1	138.269	35.136	20.5	221.0	18.0	119.8
SPGA2	137.567	34.507	18.4	238.0	10.0	78.7
SPGA3	136.352	33.730	16.9	225.0	13.0	25.3
SPGA4	134.963	33.575	21.9	304.0	13.0	43.8
SPGA5	134.242	33.005	13.2	217.0	7.0	59.7
SPGA6	132.869	32.828	22.4	228.0	7.0	109.3

表-3 1707年宝永地震のSPGAモデルのパラメーター（その2）（初期モデル）

	$M_1^{(8)}$	地震モーメント (Nm)	高周波レベル (Nm/s ²)	f_c (Hz)	長さ (km)	幅 (km)	XS (km)	ライズタイム (s)
SPGA1	8.2	1.36E+19	1.92E+20	0.60	4.2	4.2	4.2	0.35
SPGA2	8.3	1.92E+19	2.15E+20	0.53	4.7	4.7	4.7	0.39
SPGA3	8.1	9.63E+18	1.71E+20	0.67	3.8	3.8	3.8	0.31
SPGA4	7.9	4.83E+18	1.36E+20	0.84	3.0	3.0	0.0	0.25
SPGA5	8.4	2.71E+19	2.42E+20	0.48	5.3	5.3	0.0	0.44
SPGA6	7.9	4.83E+18	1.36E+20	0.84	3.0	3.0	0.0	0.25

まず、文献19)では、SPGAの低周波レベルの総和および高周波レベルの総和と地震全体の規模との間の平均的な関係式として次式を与えている。

$$\log_{10}(M_{0SPGA} \text{の総和})=19.9 \quad (M_w \geq 7.9) \quad (7)$$

$$\log_{10}(A_{SPGA} \text{の総和})=0.5 M_w + 16.31 \quad (M_w \geq 7.9) \quad (8)$$

1707年宝永地震 ($M_w=8.7$) の場合にこれを当てはめると、 M_{0SPGA} の総和= 7.94×10^{19} Nm、 A_{SPGA} の総和= 4.57×10^{20} Nm/s²が得られる。

次に、各々のSPGAから放射される地震波エネルギーの相対的な大小に着目する。文献8)に示されているように、個々のSPGAから放射される地震波エネルギー E_{SPGA} は、SPGAから放射される地震波がオメガスクエア・モデルに従う限り、次式で表される。

$$E_{SPGA}=(1/8) \times M_{0SPGA}^{0.5} \times A_{SPGA}^{1.5} \quad (9)$$

一方、文献18)では、1707年宝永地震の6箇所短周期地震波発生域に対して「マグニチュード」を求めており(表-3の M_1)、これより、個々のSPGAから放射される地震波エネルギーの相対的な関係が次の通り求まる。

$$\log_{10}(E_{SPGA_j}/E_{SPGA_1})=(M_{1_j}-M_{1_1}) \times 1.5 \quad (j=2,3,4,5,6) \quad (10)$$

式(9)(10)から次式が得られる。

$$\log_{10}((M_{0SPGA_j})^{0.5} \times (A_{SPGA_j})^{1.5} / ((M_{0SPGA_1})^{0.5} \times (A_{SPGA_1})^{1.5})) = (M_{1_j}-M_{1_1}) \times 1.5 \quad (j=2,3,4,5,6) \quad (11)$$

さらに、初期モデルにおいては、SPGA1~SPGA6の応力降下量は一定と仮定する。ここに応力降下量とはSPGAのすべり量を長さで除し比例定数を乗じた値であり、これを

一定と仮定した場合には、SPGAのコーナー周波数が地震モーメントの1/3乗に反比例するとの関係が得られる。この関係から次式が得られる。

$$(A_{SPGA_j}/A_{SPGA_1})^3 = (M_{0SPGA_j}/M_{0SPGA_1})^{1/3} \quad (j=2,3,4,5,6) \quad (12)$$

式(7)(8)(11)(12)を合わせると拘束条件は12個となるので、これより、各SPGAの低周波レベルと高周波レベルを求めることができる(表-3)。さらに、図-6の関係から、各SPGAの地震モーメントと面積が求まる(表-3)。なお、式(4)で用いる震源域のS波速度は既往の研究¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾と同様3.82km/sとした。

次に、破壊伝播様式について説明する。南海トラフの巨大地震を対象とした既往の強震動評価⁴⁾¹⁴⁾においては、昭和の南海地震や南海地震の解析結果などに基づき、潮岬沖から破壊が始まり東西に破壊が伝播していくと仮定している。この仮定については本研究でも踏襲することとした。実際の宝永地震がこれと異なる破壊伝播様式で発生していた可能性はあるが、本地震のように広域にSPGAが分布している場合には、東北地方太平洋沖地震の解析結果⁶⁾からも分かる通り、計算対象地点の地震動に対しては最寄りのSPGAの影響が支配的となるため、全体的な破壊の順序は(本研究で主に着目している周波数帯域の)地震動に対して深刻な影響は及ぼさないと考えている。南海トラフの巨大地震モデル検討会¹⁴⁾では、潮岬沖(東経135.953°、北緯33.225°、深さ12.06km)から破壊した場合の各々の小断層の位置(図-7)における破壊時刻の情報を与えている。本研究ではこれを各々のSPGAの破壊時刻とした(表-2)。

ただしこれは厳密に言えば図-4の☆の位置での破壊開

始時刻である。実際にはこの時点から、☆の位置を中心として、破壊フロントが同心円状に拡大する。この破壊フロントの拡大速度（破壊伝播速度）は東北地方太平洋沖地震などの解析結果⁶⁾⁷⁾⁸⁾に基づき3.0km/sとした。なお、SPGA内における破壊開始点の位置については、SPGAの浅い側の辺のうち、全体の破壊開始点に近い側のコーナーとした。言い換えれば、図-4のXSを表-3のように設定した。ライズタイム（図-4）は片岡他³⁰⁾の経験式に基づき表-3の通り設定した。

3.2 強震動シミュレーション

以上の初期モデルに基づき、広域における強震動シミュレーションを実施した。対象とした地点は、静岡県、愛知県、三重県、和歌山県、徳島県、香川県、高知県、愛媛県におけるK-NET¹⁾の観測地点である。採用した強震動シミュレーション手法は経験的サイト増幅・位相特性を考慮する手法²⁰⁾²¹⁾²²⁾であり、東北地方太平洋沖地震や南海トラフの地震(M_w 9.0)を対象に実施した解析⁶⁾⁷⁾⁸⁾¹²⁾¹³⁾と同様である。

経験的サイト増幅特性は野津・長尾³¹⁾により推定されているものを用いた。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。具体的には、静岡県東部に対しては2006年12月16日静岡県中部の地震(M4.0)、静岡県西部および愛知県に対しては1997年5月24日遠州灘の地震(M6.0)、三重県に対しては2011年7月24日三重県南部の地震(M4.8)、和歌山県、徳島県、香川県に対しては2005年11月1日紀伊水道の地震(M4.3)、高知県東部に対しては2009年7月22日四国沖の地震(M4.6)、高知県西部と愛媛県に対しては2001年4月25日豊後水道の地震(M5.8)を用いた。

以上の条件で強震動シミュレーションを行うためには、経験的サイト増幅特性が得られていることと、上記の中小地震記録が得られていることが必要であり、これらの条件を満足するK-NET観測地点を選択した結果、静岡県23地点、愛知県15地点、三重県17地点、和歌山県14地点、徳島県10地点、香川県7地点、高知県16地点、愛媛県13地点が選定された。

その他の条件として、震源域の密度とS波速度は、既往の研究¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾と同様、 $2.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ および3.82km/sとした。伝播経路のQ値¹⁵⁾は、既往の研究¹²⁾¹³⁾と同様、地域毎に設

定した。SPGAの分割数は $5 \times 5 \times 5$ とした。表層地盤の非線形挙動の影響については文献32)の方法で考慮した。

3.3 初期モデルによる強震動シミュレーションの結果

図-8に古文書から推定されている1707年宝永地震の震度分布（静岡県～高知県）を示す（図面は宇佐美¹⁷⁾に基づいて作成）。一方、初期モデルに基づいて計算された1707年宝永地震の震度分布（静岡県～高知県）を図-9に示す。

これらの図を比較する上で注意すべき点はいくつかある。一つは色の塗り分けの問題である。計算結果の方は、気象庁の方法で計測震度に換算しており、震度7、震度6強、震度6弱、震度5強、震度5弱のように区分されている。それに対して、宇佐美¹⁷⁾の文献に示された震度はVII、VI～VII、VI、V～VI、Vのように区分されている。ここではそれらに対応させて、VIIと震度7、VI～VIIと震度6強、VIと震度6弱、V～VIと震度5強、Vと震度5弱をそれぞれ同じ色としている。これは神田他¹⁸⁾の方法に倣ったものである。ただし、例えばVI～VIIを「震度6または震度7のいずれか」と解釈するならば、上記のようにVI～VIIを震度6強に対応付けることは、実際の震度を小さめに解釈する方向のバイアスにつながる恐れがある。そこで、図面上の色分けは上記の通りとしたが、後に震度の値を散布図で比較する際には、VI～VIIは「震度6」と「震度7」の境界すなわち6.5として計算結果と比較した。

もう一点、注意すべきことは、古文書から震度が推定されている地点と、強震動シミュレーションの対象としたK-NET観測地点とが一对一には対応していないという点である。良く知られているように、地震動はサイト増幅特性の影響を大きく受けるため³¹⁾、地点間の距離が多少でもあれば、地震動は大きく変化する可能性がある。従って、古文書から推定されている震度と計算結果の震度とが一致することは期待できない。しかし、古文書から震度が推定されている地点と、K-NET観測地点とを比較したときに、前者のサイト増幅特性の方が大きい確率と、後者のサイト増幅特性の方が大きい確率は、同程度であると考えても良いであろう。そこで、ある程度の広がりをもった地域での平均的な震度は、震源モデルおよび計算手法が正しければ、両者の間で整合することが期待できると考えられる。

このような点に注意して図-8と図-9を比較すると、古文書による震度（図-8）は清水付近、浜名湖付近、豊橋付近、室戸岬付近および宿毛湾付近で震度7となっているのに対し、初期モデルの結果（図-9）もそれらの状況を再現できている。しかし、和歌山市付近と徳島市付近の震度は明らかに計算結果の方が過大評価となっている。

次に、古文書による震度と計算結果の震度を定量的に比

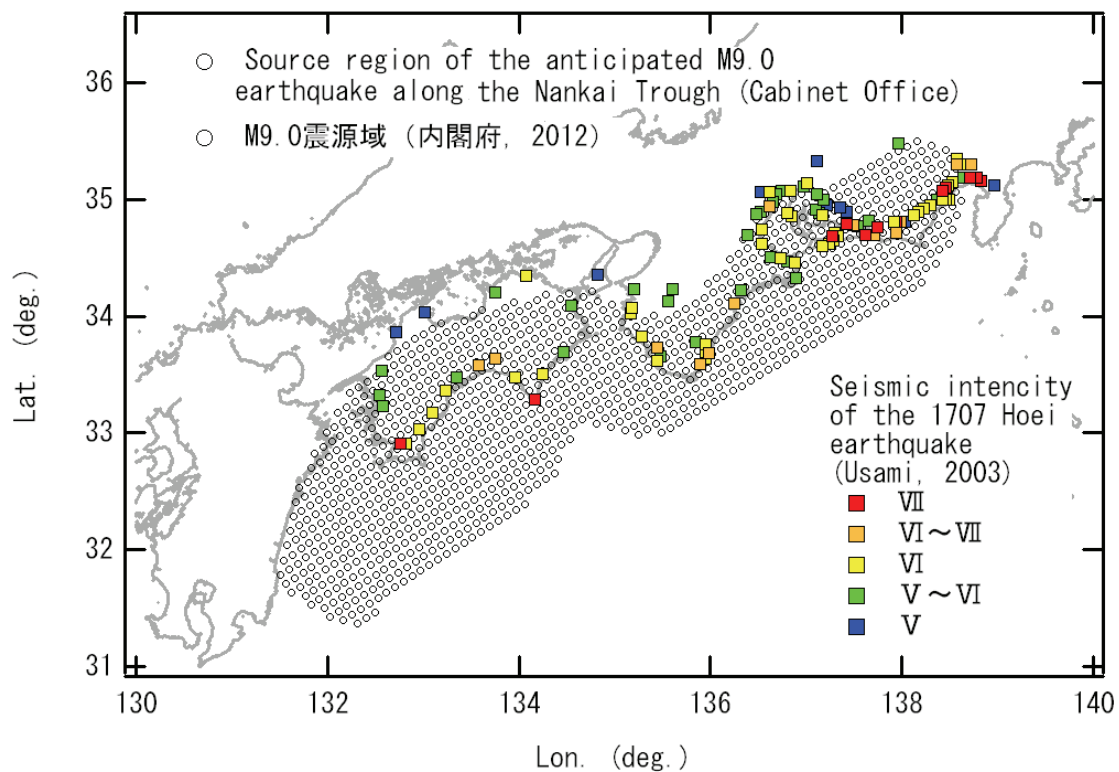


図-8 古文書から推定されている1707年宝永地震の震度分布（静岡県～高知県）（宇佐美¹⁷⁾に基づいて作成）

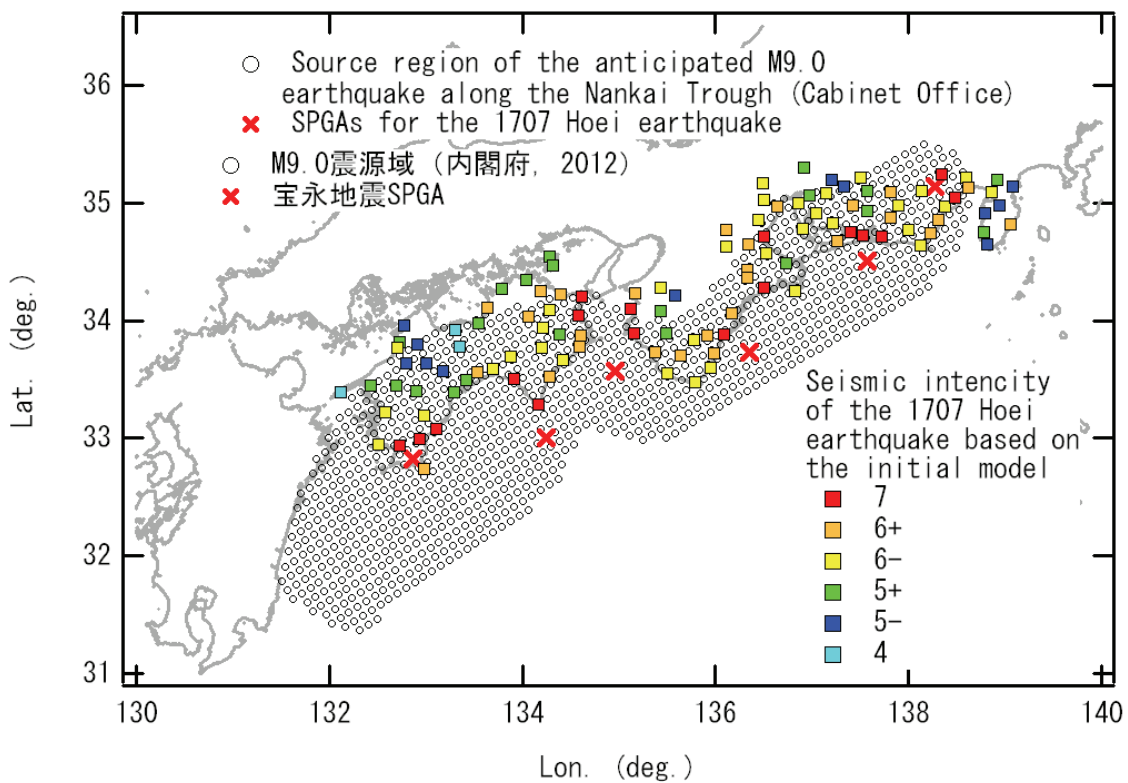


図-9 初期モデルに基づく1707年宝永地震の震度分布（静岡県～高知県）の計算結果

表-4 古文書から推定されている1707年宝永地震の震度（宇佐美¹⁷⁾）と計算結果の震度との比較

地点	古文書の震度	対応させたK-NET地点	初期モデル計算震度	最終モデル計算震度	地点	古文書の震度	対応させたK-NET地点	初期モデル計算震度	最終モデル計算震度
三島	5.0	SZO007	4.64	4.64	犬山	5.0	AIC002	5.14	5.14
原	7.0	SZO008	5.71	5.71	長島	5.5	AIC004	5.37	5.39
岩本	7.0	SZO012	6.42	6.42	桑名	6.0	MIE003	6.20	6.20
村山	6.5	SZO012	6.42	6.42	朝日	5.5	MIE003	6.20	6.20
蒲原	5.5	SZO012	6.42	6.42	菰野	5.0	MIE002	5.91	5.91
大宮	6.0	SZO011	5.89	5.89	四日市	6.5	MIE003	6.20	6.20
白鳥	6.5	SZO011	5.89	5.89	神戸	5.5	MIE004	5.75	5.75
長貫	6.0	SZO011	5.89	5.89	亀山	5.5	MIE004	5.75	5.75
由比	6.0	SZO012	6.42	6.42	津	6.0	MIE006	6.66	6.66
興津	6.0	SZO013	6.84	6.84	久居	5.5	MIE006	6.66	6.66
清見寺	7.0	SZO013	6.84	6.84	松坂	6.0	MIE009	5.82	5.82
清水	7.0	SZO013	6.84	6.84	山田	5.5	MIE010	5.44	5.44
三保	6.0	SZO013	6.84	6.84	山田・川崎	6.0	MIE010	5.44	5.44
久能	6.0	SZO014	5.98	5.98	鳥羽	5.5	MIE010	5.44	5.44
駿府	6.0	SZO014	5.98	5.98	国府	5.5	MIE012	5.78	5.78
丸子	5.5	SZO014	5.98	5.98	海山	5.5	MIE014	6.31	6.31
岡部	6.0	SZO014	5.98	5.98	尾鷲	6.5	MIE014	6.31	6.31
藤枝	6.0	SZO016	6.05	6.05	新宮	6.5	WKY009	6.22	6.22
島田	6.0	SZO018	6.39	6.39	熊野	6.0	MIE016	6.45	6.45
金谷	6.0	SZO018	6.39	6.39	湯峰	5.5	WKY007	5.60	5.60
日坂	6.5	SZO019	5.93	5.93	那智勝浦	6.0	WKY011	5.63	5.62
袋井	7.0	SZO019	5.93	5.93	太地	6.5	WKY011	5.63	5.62
掛川	6.5	SZO019	5.93	5.93	椿	6.0	WKY010	5.51	5.24
横須賀	6.5	SZO019	5.93	5.93	南富田	5.5	WKY010	5.51	5.24
見附	6.0	SZO019	5.93	5.93	田辺	6.5	WKY008	6.33	6.02
浜松	6.5	SZO024	6.58	6.58	印南	6.0	WKY006	6.71	6.20
雄踏	7.0	SZO024	6.58	6.58	有田	6.0	WKY003	7.00	6.54
気賀	5.5	SZO024	6.58	6.58	下津	6.0	WKY001	6.38	5.85
舞坂	6.5	SZO024	6.58	6.58	和歌山	5.5	WKY001	6.38	5.85
新居	6.5	SZO024	6.58	6.58	徳島	5.5	TKS002	6.90	6.46
白須賀	7.0	SZO025	7.52	7.52	海南	5.5	TKS006	5.96	5.95
二川	6.5	AIC015	6.93	6.93	高松	6.0	KGW004	5.41	5.15
吉田	7.0	AIC015	6.93	6.93	丸亀	5.5	KGW003	5.05	4.93
田原	6.0	AIC017	6.06	6.06	松山	5.0	EHM008	5.10	5.13
赤沢	6.0	AIC017	6.06	6.06	大洲	5.5	EHM011	5.04	5.03
野田	7.0	AIC017	6.06	6.06	吉田	5.5	EHM012	5.80	5.80
赤羽根	6.0	AIC017	6.06	6.06	宇和島	5.5	EHM012	5.80	5.80
池尻	6.0	AIC017	6.06	6.06	大島	7.0	KOC015	6.96	6.96
常光寺	6.0	AIC017	6.06	6.06	宿毛	6.0	KOC015	6.96	6.96
御油	5.0	AIC010	6.05	6.05	中村	6.0	KOC014	7.83	7.83
赤坂	5.0	AIC010	6.05	6.05	窪川	6.0	KOC013	7.11	7.11
藤川	5.0	AIC014	5.72	5.72	須崎	6.0	KOC010	5.42	5.41
根崎	5.5	AIC012	5.93	5.93	左川	5.5	KOC006	5.25	5.24
岡崎	5.5	AIC012	5.93	5.93	高知	6.5	KOC007	6.22	6.24
チリフ	5.5	AIC012	5.93	5.93	土佐	6.5	KOC005	5.60	5.61
常滑	6.0	AIC011	5.61	5.62	安芸	6.0	KOC003	6.80	6.78
大野	6.0	AIC011	5.61	5.62	室津	7.0	KOC002	7.87	7.87
熱田	5.5	AIC004	5.37	5.39	崎浜	6.0	KOC001	6.04	6.03
尾張	6.0	AIC004	5.37	5.39	平均	6.0		6.11	6.07

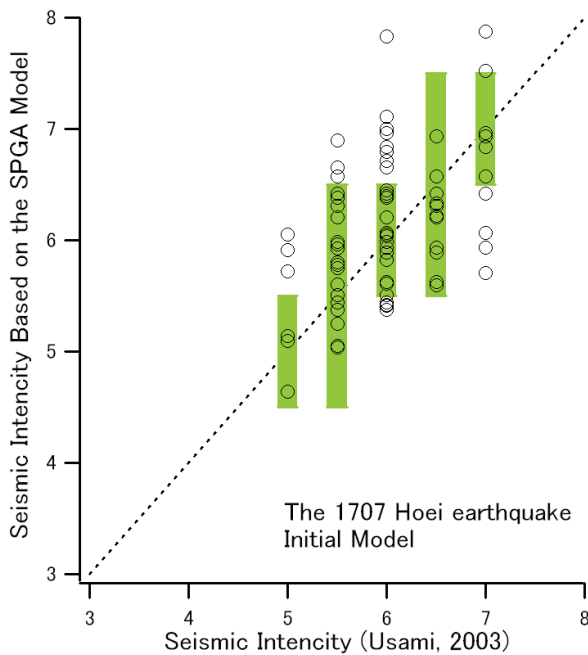


図-10 古文書による震度（横軸）と、それが得られている地点に最も近い K-NET 地点での初期モデルによる震度（縦軸）との比較

較するため、両者の対応付けを行った。図-8 および図-9 に示すように、計算結果の震度の方が古文書による震度よりもどちらかというと密であるため、古文書による震度が得られている個々の地点に対して、最も近い K-NET 地点（ただし計算結果が得られている地点）の震度を機械的に対応させた。その対応の状況を表-4 に示す。また両者の震度を比較して図-10 に示す。

図-10 において縦に帯を示しているが、これは計測震度の定義の幅を示している。すなわち、例えば古文書による震度が V となっていれば、現在の震度で 5 弱か 5 強のいずれかと判断し、計測震度の定義に照らして震度は 4.5~5.5 の範囲であったと判断して、この範囲を帯で示している。また、古文書による震度が V~VI となっていれば、現在の震度で 5 弱から 6 強のいずれかと判断し、計測震度の定義に照らして震度は 4.5~6.5 の範囲であったと判断して、この範囲を帯で示している。従って、もしもこの帯の範囲に計算結果が入れば、計算結果と古文書による震度は全く矛盾無く整合していることになる。

図-10 の結果を見ると、帯の範囲から外れたプロットも存在している。この原因としては、先に述べたようなサイト増幅特性の不整合も考えられる。しかしながら、全体としては、古文書による震度と計算結果の震度は良く整合していると考えられる。また、全地点での震度の平均は、古文書によるものが 6.0、計算結果が 6.1 であり（表-4）、大

きい側もしくは小さい側への偏りも少ない。

ただし、和歌山県と徳島県だけで平均をとってみると、古文書による震度が 5.9、計算結果が 6.1 であり、計算結果の震度がやや大きい側に偏っていると考えられる。

なお、図-10 の比較では、縦軸の値は 7 を越えることがあるが、横軸の値は原理的に 7 を越えることはないという不釣り合いが生じている。これは、横軸の値は震度階級であるのに対し、縦軸の値は震度階級に変換する前の計測震度であるためである。グラフの縦軸と横軸を計測震度と震度階級のいずれかに統一すれば、こうした不釣り合いが生じないことは確かであるが、縦軸の値を震度階級に変換することは計算結果の持つ情報量のかなりの部分を失うことにつながり、一方、横軸の値から計測震度を復元することは不可能である。こうした事情により、上記の不釣り合いを解消するための上手い方法が存在しないため、ここではこの比較をそのまま採用する。

3.4 モデルのチューニングと最終モデルによる強震動シミュレーションの結果

以上のように、初期モデルによる計算結果は全体として古文書による震度を良く再現しているが、和歌山県と徳島県では計算結果の震度が大きい側に偏っていると考えられる。そこで、震源モデルのチューニングを行うことにより、和歌山県と徳島県での震度の再現性を向上させることを試みた。具体的には、和歌山県と徳島県の震度に対しては SPGA4 が支配的となっていることから、和歌山県と徳島県での計算結果の震度が古文書による震度に近づくように、SPGA4 の地震モーメントを低減させることとした。そして結果的には SPGA4 の地震モーメントを初期モデルの 60% とした。これを「最終モデル」と呼ぶ。

最終モデルに基づいて計算された 1707 年宝永地震の震度分布（静岡県～高知県）を図-11 に示す。全体的には初期モデルによる計算結果と大きな違いはないが、和歌山市付近と徳島市付近の震度は、初期モデルよりも、古文書による震度に近づいていることがわかる。また、古文書による震度と、それが得られている地点に最も近い K-NET 地点（ただし計算結果が得られている地点）での最終モデルによる計算結果の震度を比較して図-12 に示す。グラフ上で計算結果が改善されていることを確認するのは難しいが、和歌山県と徳島県だけで平均をとると震度は 5.9 となり、古文書による震度と一致した。また、全地点における震度の平均は 6.1 であり、この点は初期モデルと変わらない。また、標準偏差に着目すると、初期モデルでは 0.59、最終モデルでは 0.58 であり、やや改善が見られる。最終モデルのパラメータを表-5 に示す。

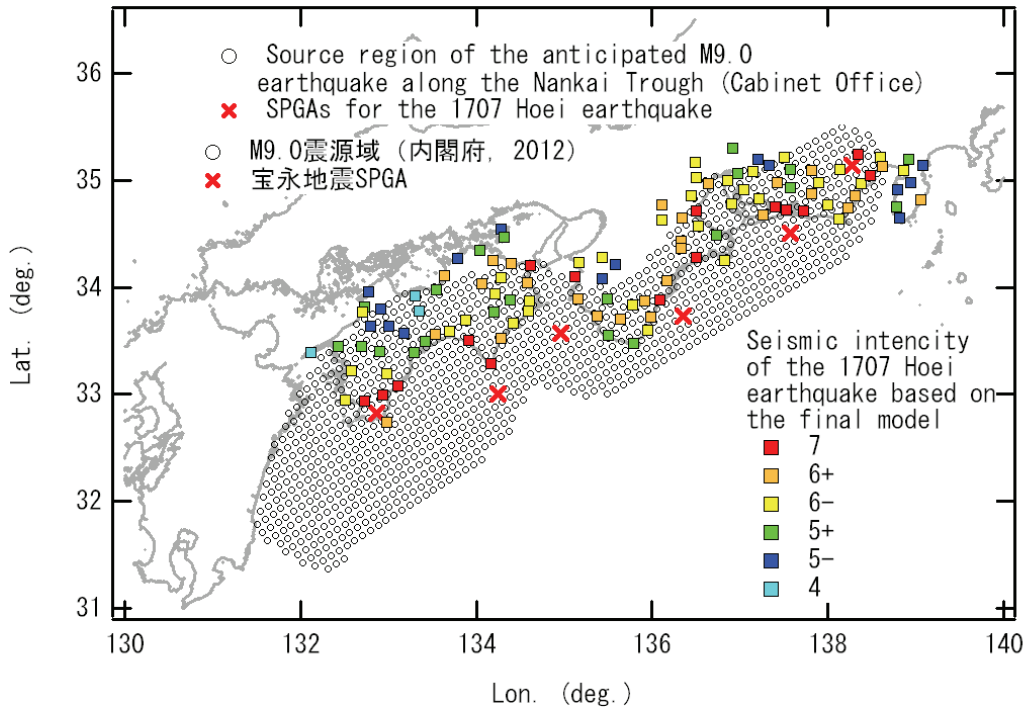


図-11 最終モデルに基づく1707年宝永地震の震度分布（静岡県～高知県）の計算結果

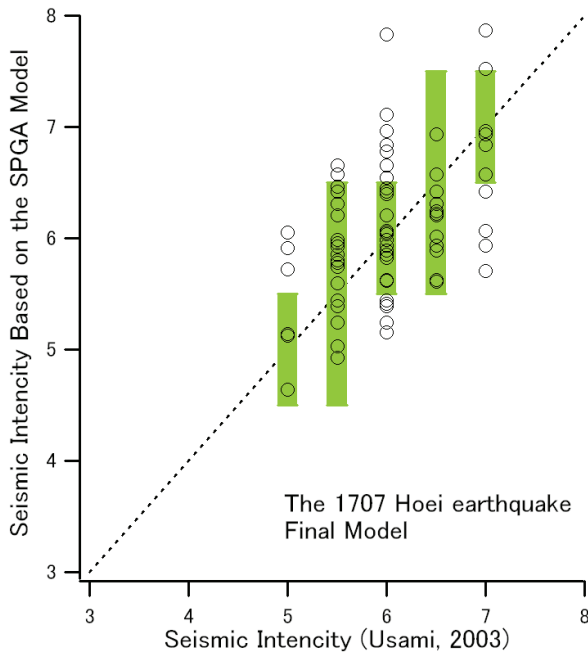


図-12 古文書による震度（横軸）と、それが得られている地点に最も近いK-NET地点での最終モデルによる震度（縦軸）との比較

表-5 1707年宝永地震のSPGAモデルのパラメーター（その3）（最終モデル）

	地震モーメント (Nm)	長さ (km)	幅 (km)	XS (km)	ライズタイム (s)
SPGA1	1.36E+19	4.2	4.2	4.2	0.35
SPGA2	1.92E+19	4.7	4.7	4.7	0.39
SPGA3	9.63E+18	3.8	3.8	3.8	0.31
SPGA4	2.90E+18	3.0	3.0	0.0	0.25
SPGA5	2.71E+19	5.3	5.3	0.0	0.44
SPGA6	4.83E+18	3.0	3.0	0.0	0.25

4. 1946年南海地震 (M_w 8.1)

以下においては、1946年南海地震を対象として、まず、既往の研究¹⁸⁾やSPGAに関する経験式¹⁹⁾に基づいて初期モデルを設定する過程について述べる。次に、強震動シミュレーションの結果と文献17)の震度分布との比較に基づいてパラメーターのチューニングを行い最終モデルを作成する過程について述べる。

4.1 初期モデルの作成

まず、地震全体の規模について述べる。文献26)では、1946年南海地震の巨視的震源モデルとして、9個のモデルが挙げられている。文献26)では、このうち、Iwasaki³³⁾のモデルを「現時点で最も妥当と思われるモデル」としてい

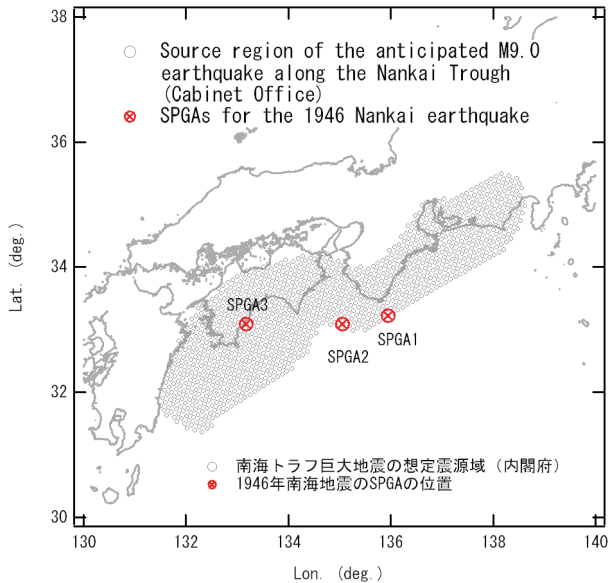


図-13 1946年南海地震に対するSPGAの位置

る(文献26)のp.47).そこで、Iwasaki³³⁾のモデルから、せん断弾性係数 μ を $4.1 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ として(密度 $2.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, S波速度 3.82km/s から換算)地震モーメントを求めると $M_0 = 1.83 \times 10^{21} \text{Nm}$ となり、これと式(5)からモーメントマグニチュード M_w は8.1となる。

次に、震源モデルを構成するSPGAの個数と位置について述べる。まず、著者らによる経験式(式(6))に $M_w = 8.1$ を代入すると $N_{\text{SPGA}} = 3.2$ が得られる。つまり、この規模の地震に対して平均的には3個程度のSPGAが存在すると考えられる。一方、1946年南海地震に対しても、神田他¹⁸⁾による震度インバージョン解析が行われており、潮岬沖から四国にかけて3箇所の短周期地震波発生域が求められている。これらの情報を総合して、1946年南海地震の震源モデルは3個のSPGAから構成することとした。また、その位置については、神田他¹⁸⁾の解析結果に基づき、潮岬沖から四国にかけての3箇所とした。

設定したSPGAの位置を図-13に示す。これらの位置の設定については、1707年宝永地震の場合と同様、南海トラフの巨大地震モデル検討会¹⁴⁾によるM9クラスの巨大地震の想定震源域を構成する小断層の中から、神田他¹⁸⁾による短周期地震波発生域の重心に最も近い小断層を選択し、当該小断層における東経、北緯、深さ、走向、傾斜の情報をを用いることとした(表-6)。ただし、厳密にはSPGA自体が図-4に示すようにある程度の面的な広がりを持つことから、表-6に示す東経、北緯、深さの情報は、図-4における破壊開始点(☆)の情報として用いた。

次に、個々のSPGAの低周波レベルと高周波レベルの初期値を定めることを考える。SPGAは3個あるので、未知

数は6個となる。これらをすべて定めるためには6つの拘束条件が必要となる。ここでは、6つの拘束条件を以下の通り与える。

まず、式(7)(8)を1946年南海地震($M_w = 8.1$)の場合に当てはめると、 $M_{0\text{SPGA}}$ の総和 $= 7.94 \times 10^{19} \text{Nm}$ 、 A_{SPGA} の総和 $= 2.29 \times 10^{20} \text{Nm/s}^2$ が得られる。次に、各々のSPGAから放射される地震波エネルギーの相対的な大小に着目する。文献18)では、1946年南海地震の3箇所の短周期地震波発生域に対して「マグニチュード」を求めており(表-7の M_1)、これより、式(11)と同様の拘束条件が得られる。さらに、初期モデルにおいては、SPGA1~SPGA3の応力降下量は一定と仮定する。これより、式(12)と同様の拘束条件が得られる。

これらの条件を総合すると拘束条件は6個となり、これより、各SPGAの低周波レベルと高周波レベルを求めることができる(表-7)。さらに、図-6の関係から、各SPGAの地震モーメントと面積が求まる(表-7)。なお、この過程で式(4)で用いる震源域のS波速度は既往の研究¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾と同様 3.82km/s とした。

破壊伝播様式については、1707年宝永地震と同様、潮岬沖から破壊が始まるものとした。1946年南海地震に対しては実際に潮岬沖に震央が推定されているので、この仮定は妥当であると考えられる。南海トラフの巨大地震モデル検討会¹⁴⁾では、潮岬沖(東経 135.953° 、北緯 33.225° 、深さ 12.06km)から破壊した場合の各々の小断層の位置(図-13)における破壊時刻の情報を与えている。本研究ではこれを各々のSPGAの破壊時刻とした(表-6)。ただしこれは厳密に言えば図-4の☆の位置での破壊開始時刻である。実際にはこの時点から、☆の位置を中心として、破壊フロントが同心円状に拡大する。破壊フロントの拡大速度(破壊伝播速度)は東北地方太平洋沖地震などの解析結果⁶⁾⁷⁾⁸⁾に基づき 3.0km/s とした。SPGA内における破壊開始点の位置については、SPGAの浅い側の辺のうち、全体の破壊開始点に近い側のコーナーとした。言い換えれば、図-4のXSを表-7のように設定した。ライズタイムは片岡他³⁰⁾の経験式に基づき表-7の通り設定した。

4.2 強震動シミュレーション

以上の初期モデルに基づき、広域における強震動シミュレーションを実施した。対象とした地点、および採用した強震動シミュレーション手法は1707年宝永地震の場合と同様である。経験的サイト増幅特性と中小地震記録も1707年宝永地震の場合と同様のものを用いた。

表-6 1946年南海地震のSPGAモデルのパラメーター（その1）（初期モデルと最終モデルに共通）

	東経 (deg.)	北緯 (deg.)	深さ (km)	走向 (deg.)	傾斜 (deg.)	破壊時刻 (s)
SPGA1	135.953	33.225	12.1	241.0	13.0	0.0
SPGA2	135.051	33.095	11.7	290.0	10.0	31.6
SPGA3	133.177	33.093	22.9	230.0	7.0	96.0

表-7 1946年南海地震のSPGAモデルのパラメーター（その2）（初期モデル）

	$M_1^{(18)}$	地震モーメント (Nm)	高周波レベル (Nm/s ²)	f_c (Hz)	長さ (km)	幅 (km)	XS (km)	ライズタイム (s)
SPGA1	7.9	1.80E+19	1.17E+20	0.41	6.2	6.2	6.2	0.52
SPGA2	8.1	3.59E+19	1.47E+20	0.32	7.8	7.8	0.0	0.65
SPGA3	8.0	2.54E+19	1.31E+20	0.36	7.0	7.0	0.0	0.58

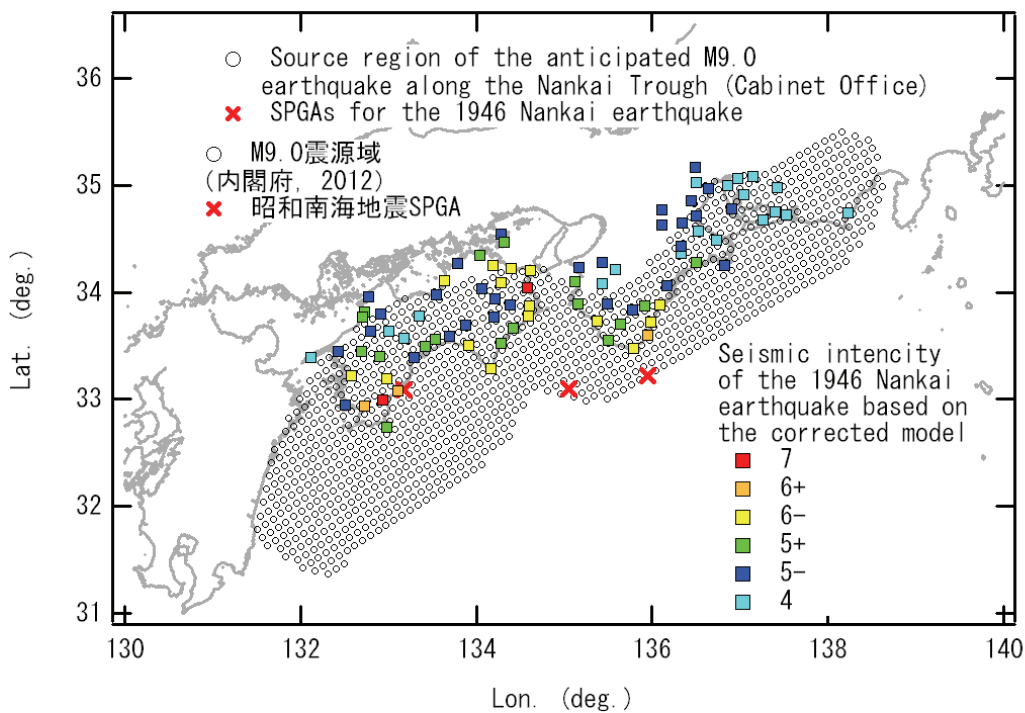


図-14 修正モデルに基づく1946年南海地震の震度分布（静岡県～高知県）の計算結果

4.3 モデルのチューニングと最終モデルによる強震動シミュレーションの結果

この地震の場合、初期モデルによる震度の計算結果は、文献 17)の震度に対して明らかに過大評価であった。そこで、初期モデルに対して全ての SPGA の地震モーメントを 60%とした「修正モデル」を考えた。修正モデルに基づいて計算された 1946 年南海地震の震度分布（静岡県～高知県）を図-14 に示す。

一方、文献 17)では、1946 年南海地震の震度分布は、1707 年宝永地震の場合と異なり、図-15 に示すように面的に与えられている。また、文献 17)では、図-15 とは別個に、高知県内における住家倒壊率分布の図が与えられており、中村では図-15 よりも震度が大きく 7 程度であったことが推

察される。図-14 の計算結果は、中村で震度 7 となっており、この点では、文献 17)と整合的である。

次に、文献 17)の震度と計算結果の震度を定量的に比較するため、両者の対応付けを行った。当該地震に対しては文献 17)の震度が面的に与えられているため、1707 年宝永地震の場合と反対に、計算を行った個々の K-NET 地点（ただし三重県以西）における震度を文献 17)から読みとり、対応させた。その際、高知県内については図-15 よりも住家倒壊率分布を優先させ、KOC002, KOC007, KOC010, KOC012, KOC013, KOC015, KOC016 の 7 地点については震度 6 を、KOC014（中村）については震度 7 を対応させた。

修正モデルによる震度と、それが得られている地点に最

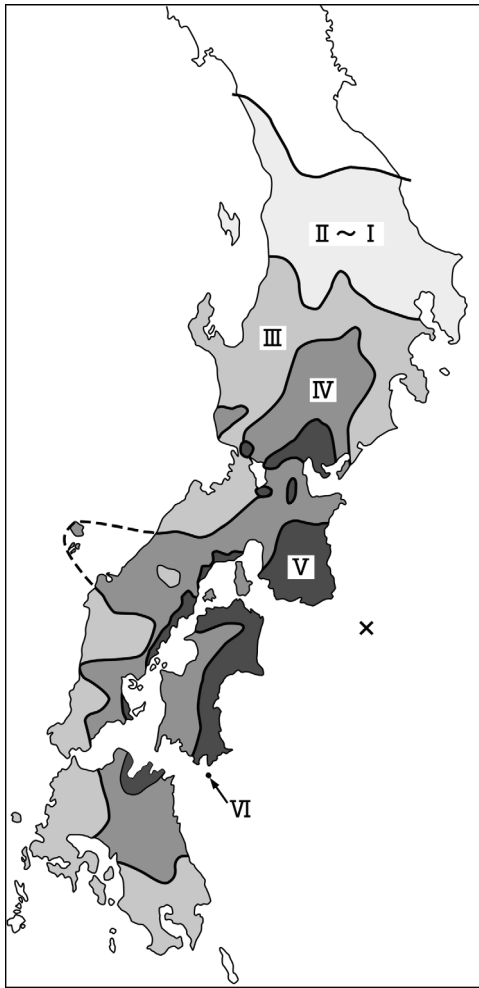


図-15 文献 17)で与えられている 1946 年南海地震の震度分布

も近い文献 17)の震度との比較を図-16 に示す。図-16 において縦に帯を示しているが、これは計測震度の定義の幅を示している (図-10 等と同様である)。

図-16 の結果を見ると、帯の範囲から外れたプロットも存在している。この原因としては、3. で述べたようなサイト増幅特性の不整合も考えられる。しかしながら、全体としては、文献 17)の震度と計算結果の震度は良く整合していると考えられる。また、全地点での震度の平均は、文献 17)によるものが 5.2、計算結果が 5.3 であり、大きい側もしくは小さい側への偏りも少ない。

ただし、和歌山県と徳島県だけで平均をとってみると、文献 17)の震度が 5.0、計算結果が 5.3 であり、計算結果の震度がやや大きい側に偏っている。また、図-14 において徳島市の震度が 7 と計算されているが、これも文献 17)と整合していない。

そこで、さらに震源モデルのチューニングを行い、和歌山県と徳島県での震度の再現性を向上させることを試みた。

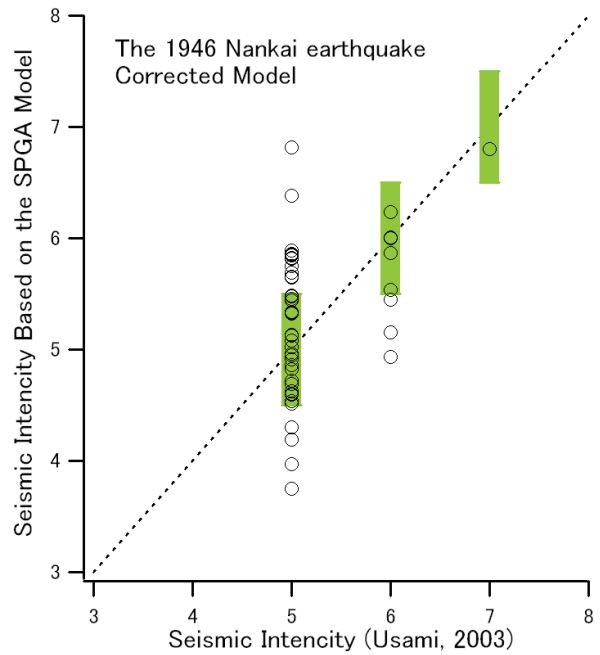


図-16 修正モデルによる震度 (縦軸) と、それが得られている地点に最も近い文献 17)の震度 (横軸) との比較 (震度が比較的大きい震度 5 以上の地点をプロット)

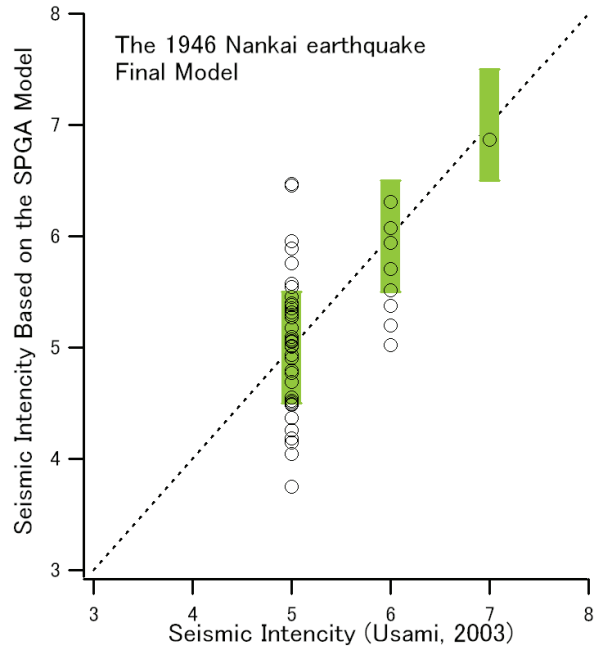


図-18 最終モデルによる震度 (縦軸) と、それが得られている地点に最も近い文献 17)の震度 (横軸) との比較 (震度が比較的大きい震度 5 以上の地点をプロット)

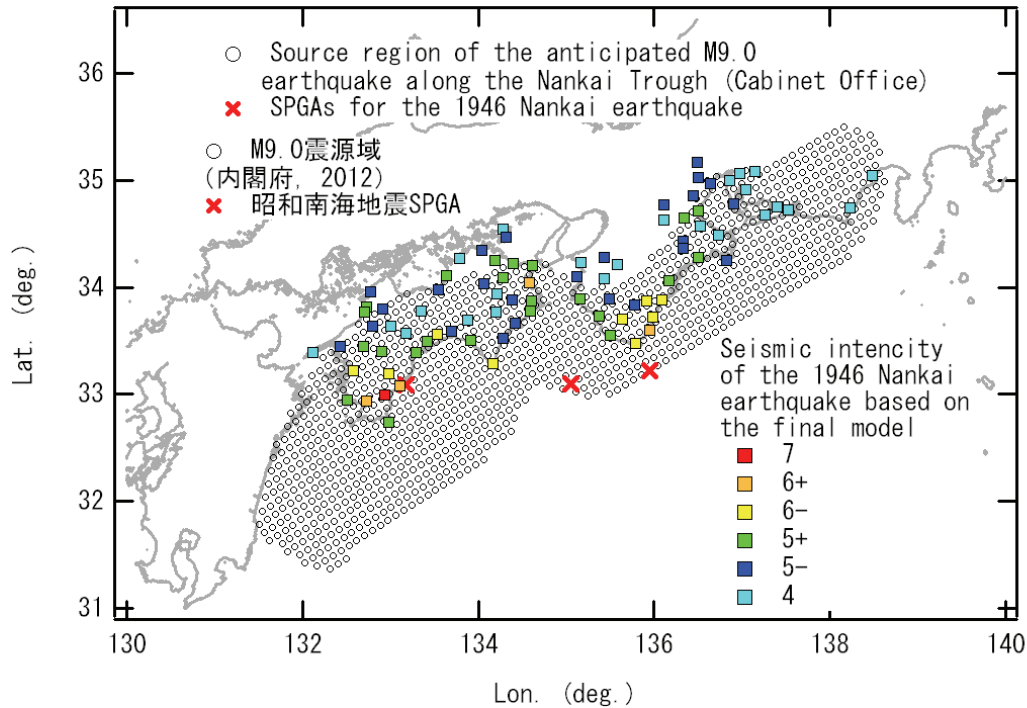


図-17 最終モデルに基づく1946年南海地震の震度分布（静岡県～高知県）の計算結果

表-8 1946年南海地震のSPGAモデルのパラメーター（その3）（最終モデル）

	地震モーメント (Nm)	長さ (km)	幅 (km)	XS (km)	ライズタイム (s)
SPGA1	1.17E+19	6.2	6.2	6.2	0.52
SPGA2	1.44E+19	7.8	7.8	0.0	0.65
SPGA3	1.65E+19	7.0	7.0	0.0	0.58

具体的には、和歌山県と徳島県の震度に対しては SPGA2 が支配的となっていることから、和歌山県と徳島県での計算結果の震度が文献 17)の震度に近づくように、SPGA2 の地震モーメントを低減させることとし、初期モデルの 40% とした。ただし、全体の震度分布の平均値を保つため、SPGA1 と SPGA3 の地震モーメントは若干増やして初期モデルの 65%とした。これを「最終モデル」と呼ぶ。

最終モデルに基づいて計算された 1946 年南海地震の震度分布（静岡県～高知県）を図-17 に示す。全体的には初期モデルによる計算結果と大きな違いはないが、徳島市の震度が 7 となることを回避できており、初期モデルよりも、文献 17)の震度に近づいていることがわかる。また、最終モデルによる震度と、それが得られている地点に最も近い文献 17)の震度とを比較して図-18 に示す。グラフ上で計算結果が改善されていることを確認するのは難しいが、和歌山県と徳島県だけで平均をとると震度は 5.1 となり、文献

17)の震度 (5.0) に近づいた。また、全地点における震度の平均は 5.2 であり、文献 17)の震度と一致した。また、標準偏差に着目すると、修正モデルでは 0.64、最終モデルでは 0.59 であり、かなりの改善が見られる。最終モデルのパラメーターを表-8 に示す。

5. 港湾における地震動の比較

以上により、1707 年宝永地震 ($M_w8.7$) および 1946 年南海地震 ($M_w8.1$) の再来に対応する SPGA モデルを作成することができたので、次に、これらの震源モデルにより計算される港湾での地震動について、既往の研究¹²⁾で計算した南海トラフ巨大地震 ($M_w9.0$) による地震動との比較を行う。

計算の対象としたのは、文献 12)と同様、東海から九州にかけての 16 港湾 18 地点である。それらを表-9 に示す。地震動の計算には、文献 12)と同様、経験的サイト増幅・位相特性を考慮する手法²⁰⁾²¹⁾²²⁾を用いた。

使用したサイト増幅特性、中小地震記録、Q 値¹⁵⁾などの条件も文献 12)と同様であり、違いは震源モデルだけである。

対象とした 16 港湾 18 地点における南海トラフ巨大地震 (50%非超過) の PSI 値¹²⁾と 1707 年宝永地震の再来を想定した震源モデルによる PSI 値の比較を図-19 に示す。1707 年宝永地震の再来を想定した場合の PSI 値は、一部の地点

表-9 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³⁴⁾による地点番号)

地点番号	港湾(ゾーン)	観測点	中小地震		M	Δ	伝播経路のQ値
			発生日	震央			
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	〃

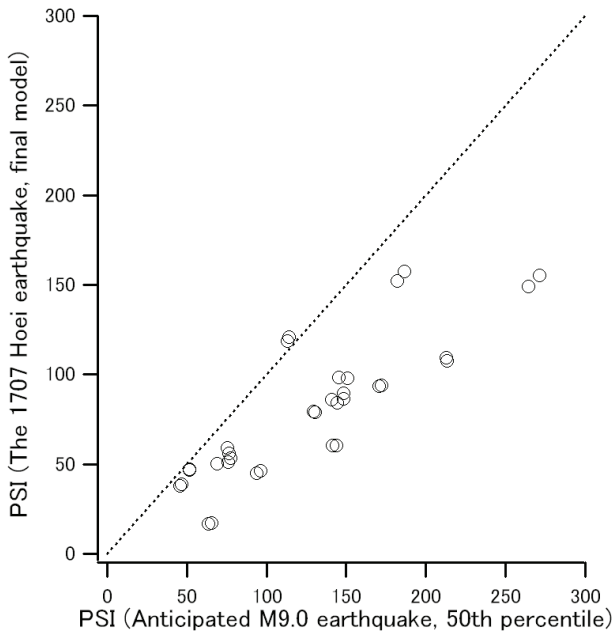


図-19 南海トラフ巨大地震(50%非超過)のPSI値(横軸)と1707年宝永地震の再来を想定した震源モデルによるPSI値(縦軸)の比較

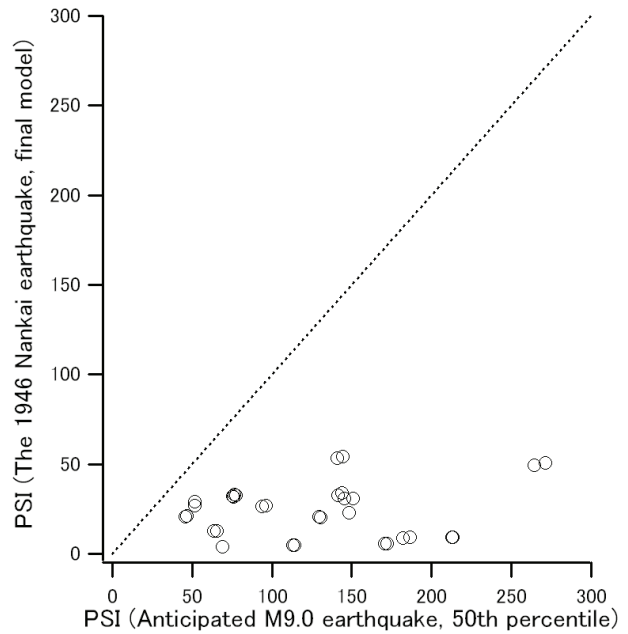


図-20 南海トラフ巨大地震(50%非超過)のPSI値(横軸)と1946年南海地震の再来を想定した震源モデルによるPSI値(縦軸)の比較

で南海トラフ巨大地震(50%非超過)のPSI値と同程度であるが、大多数の地点ではそれより小さい。

南海トラフ巨大地震(50%非超過)のPSI値と1946年南海地震の再来を想定した震源モデルによるPSI値の比較を図-20に示す。1946年南海地震の再来を想定した場合のPSI値は、いずれの地点においても、南海トラフ巨大地震(50%非超過)のPSI値よりも小さい。

6. まとめ

SPGAモデルの利用方法の一つとして、歴史地震の再来を想定して強震動評価を行う場合への適用が考えられる。その場合、歴史地震による広域での震度分布と整合するようにSPGAモデルを設定することが求められるが、これまでのところ、実際にそのような条件を満足するようにSPGAモデルを設定した事例は少なく、この面で実務者の

参考になるような資料は少ない状況であった。

そこで、本研究では、実際にいくつかの歴史地震を対象として、広域での震度分布と整合するように SPGA モデルの設定を行い、その手順を明示することを試みた。研究の対象としては、南海トラフで過去に発生した海溝型巨大地震のうち、規模の異なる地震として、1707 年宝永地震 (M_w 8.7) と 1946 年南海地震 (M_w 8.1) を取り上げた。

震源モデルを構成する SPGA の個数と位置については、既往の震度インバージョン解析結果および SPGA に関する経験式に基づいて設定した。個々の SPGA のパラメータ(地震モーメント、面積)については、SPGA に関する経験式から初期値を設定し、それによる強震動シミュレーション結果が広域での震度分布と整合しない場合にパラメータのチューニングを行った。強震動シミュレーションには経験的サイト増幅・位相特性を考慮する手法を用いた。

その結果、対象とした地震について、広域での震度分布と整合するような SPGA モデルを作成することができた。1707 年宝永地震については東海から四国にかけて 6 箇所の SPGA を含むモデル、1946 年南海地震については潮岬付近から四国にかけて 3 箇所の SPGA を含むモデルが得られた。

1. で述べたように、耐震設計用のレベル 2 地震動の設定においては、南海トラフを対象とした場合、 M_w 9.0 の巨大地震¹⁴⁾を想定することが一般的となっており、構造物の照査用地震動を安全側に設定するという立場から言えば、より規模の小さい歴史地震の再来を想定する必要性は小さくなってきている。しかしながら、他の地域では、歴史地震の再来を想定して耐震設計用のレベル 2 地震動を設定する機会もあるものと考えられる。また、南海トラフを対象とした場合においても、耐津波設計において、発生頻度の高い津波¹⁶⁾に先行する地震動を評価する場合など、歴史地震の再来を想定して地震動を設定するニーズも依然として存在する。

本稿の内容は、今後、南海トラフあるいは他の地域を対象として、歴史地震の震度分布と調和的な SPGA モデルを作成しようとする場合に参考になるものと考えられる。ただし、その際に利用可能な情報は地域毎あるいは地震毎に異なると考えられるため、臨機応変の対応が求められる部分もあると考えられる。

(2014年4月25日受付)

謝辞

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

参考文献

- 1) Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-net), *Seim. Res. Lett.*, Vol. 69, 1998, pp.309-332.
- 2) Aoi, S., Obara, K., Hori, S., Kasahara, K. and Okada, S.: New strong-motion observation network: KiK-net, *EOS. Trans. Am. Geophys. Union*, 81, 2000, p.329.
- 3) 中央防災会議事務局：中央防災会議東海地震に関する専門調査会(第7回)図表集, 2001年, <http://www.bousai.go.jp/jishin/tokai/senmon/7/pdf/7-02.pdf>.
- 4) 中央防災会議事務局：東南海・南海地震等に関する専門調査会(第7回)図表集, 2002年, http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/tounankai_nankaijishin/7/pdf/siryou2-1.pdf.
- 5) 野津厚・菅野高弘, 港湾におけるサイト増幅特性を考慮したレベル 2 地震動の算定事例, 港湾空港技術研究所資料, No.1146, 2006年.
- 6) 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, 2012年, pp.21-40.
- 7) 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, 2012年, pp.23-53.
- 8) 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, No.4 (特集号), 2012年, pp.209-228.
- 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一, 日本建築学会構造系論文集, No.675, 2012年, pp.695-704.
- 10) 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.
- 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, Vol.13, 2013年, pp.75-87.
- 12) 野津厚・若井淳: 南海トラフの地震 (M_w 9.0) を対象とした強震動評価への SPGA モデルの適用, 港湾空港技術研究所資料, No.1271, 2013年.
- 13) 野津厚: 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, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.69, No.4, 2013年, pp.I_872-I_888.
- 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による震度分布・津波高について(第一次報告), 2012年, <http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf>

- /1st_report.pdf.
- 15) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，2007年。
 - 16) 国土交通省港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン，2013年。
 - 17) 宇佐美龍夫：[最新版]日本被害地震総覧[416]-2001，東京大学出版会，2003年。
 - 18) 神田克久・武村雅之・宇佐美龍夫：震度インバージョン解析による南海トラフ巨大地震の短周期地震波発生域，地震2，Vol.57，2004年，pp.153-170。
 - 19) 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ターの経験式—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年。
 - 20) 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。
 - 21) 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。
 - 22) 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。
 - 23) Aki, K.: Scaling law of seismic spectrum, *J. Geophys. Res.*, Vol.72, 1967, pp.1217-1231.
 - 24) Brune, J.N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake, *J. Geophys. Res.*, Vol.75, 1970, pp.4997-5009.
 - 25) Brune, J.N.: Correction, *J. Geophys. Res.*, Vol.76, 1971, pp.5002.
 - 26) 佐藤良輔編：日本の地震断層パラメター・ハンドブック，鹿島出版会，1989年。
 - 27) 相田勇：東海道沖におこった歴史津波の数値実験，東京大学地震研究所彙報，Vol.56，1981年，pp.367-390。
 - 28) 相田勇：南海道沖の津波の数値実験，東京大学地震研究所彙報，Vol.56，1981年，pp.713-730。
 - 29) Kanamori, H.: The energy release in great earthquakes, *J. Geophys. Res.*, Vol.82, 1977, pp.2981-2987.
 - 30) 片岡正次郎・日下部毅明・村越潤・田村敬一：想定地震に基づくレベル2地震動の設定手法に関する研究，国土技術政策総合研究所研究報告，No.15，2003年。
 - 31) 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年。
 - 32) 野津厚・若井淳・長坂陽介：表層地盤の非線形挙動を考慮した2011年東北地方太平洋沖地震の強震動シミュレーション，港湾空港技術研究所資料，No.1284，2014年。
 - 33) Iwasaki, T.: Theoretical study on the surface deformation in a medium with viscoelastic layers (surface loads and dislocation sources) – Rheological structure of the upper mantle, Ph. D. Thesis, Univ. of Tokyo, 1981.
 - 34) 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.yks.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html>。

港湾空港技術研究所資料 No.1290

2014.9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2014) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています