

強震動予測における震源モデルの設定に関する考察

仲野健一 *1

建設地点で想定される設計用入力地震動を求める方法として経験的グリーン関数法が知られている。経験的グリーン関数法は、震源と建設地点を結ぶ測線の波動伝播や建設地点直下の地盤構造の情報が潜在的に含まれるため、予測問題への適用に有利である。しかし、巨大地震を想定する場合、震源モデルの設定に応じて地震動が大きく変動する。将来の巨大地震による地震動を適切に予測するためには、その変動の幅を把握しておくことは重要である。本稿では、2003年十勝沖地震を対象に複数の震源モデルに基づいて地震動波形を求め、それらの波形の差異を定量的に評価した。その結果、観測記録に対して最大加速度振幅で0.1～2.5倍程度の幅が生じることがわかった。

キーワード：強震動予測，経験的グリーン関数法，2003年十勝沖地震，震源モデル

1. はじめに

超高層や免震建物等で性能評価機関の審査を受ける場合、建設地点の地盤や地震環境に応じ、設計者の判断に基づいてサイト波を作成する必要がある。サイト波を作成する方法としては、地震調査研究推進本部が策定した強震動予測レシピ（以下、レシピ）¹⁾に従うことが多い。サイト波作成において地震動を計算する行為は強震動予測とも呼ばれる。

経験的グリーン関数法（以下、EGF）では、地震波の伝播の影響や建設地点周辺の地盤構造の情報が潜在的に含まれるため、強震動予測において有用な計算手法とされている^{例えば2)}。この手法では実際の地震観測記録を直接利用するため、伝播と地盤の影響を暗黙的に含むことになる。しかしながら、伝播と地盤の影響を固定したとしても、巨大地震においては、震源モデルの設定には多くの自由度が残るため、その設定するパラメータによって最終的に評価される地震動が大きく変動する可能性が高い。

本稿では、2003年十勝沖地震を対象に、使用する経験式や強震動生成域（SMGA）の配置等に応じて異なる震源モデルを設定し、それらに基づいてEGFで計算した地震動に生じる差異を定量的に検討する。

2. 計算手法の概要

EGFは中小地震の波形を用いて大地震の波形を合成する方法である^{例えば2)}。中小地震の波形としては、過去の地震観測記録が用いられる。EGFの概念を図-1に示す。

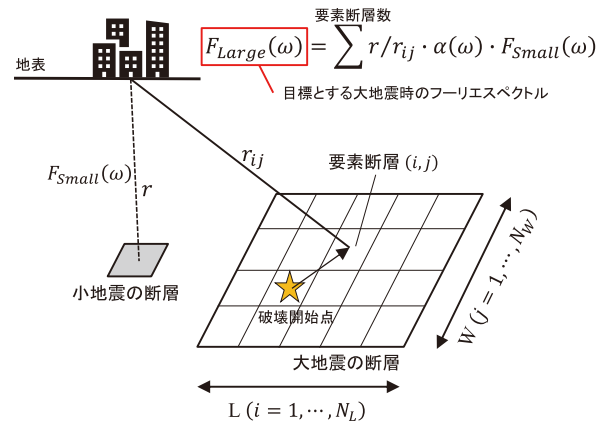


図-1 経験的グリーン関数法（EGF）の概念図

図-1中の r は震源距離（各断層から地表までの直線距離）、 ω は角振動数である。また、 α は小地震と大地震の断層面上のすべりの違いを補正する関数である。簡単に言えば、大地震の波形を得るためには、小地震のフーリエスペクトルを要素断層数だけ重ね合わせた上で逆フーリエ変換すればよい（別途距離とすべりの違いは補正が必要）。ただし、図-1はあくまで概念的な表現であり、実際には小地震と大地震の応力降下量の違いや破壊開始の時間差等を考慮する必要がある。それらを考慮すると、大地震の波形は周波数領域において式(1)のように表される。

$$U(\omega) = \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_W} \frac{r}{r_{ij}} \cdot C_{ij} \cdot \alpha_{ij}(\omega) \cdot u(\omega) \cdot \exp(-i\omega \cdot t_{ij}) \quad (1)$$

ここで、 $U(\omega)$ は大地震の波形の複素フーリエスペクトルであり、図-1中の $F_{Large}(\omega)$ に対応する。 $u(\omega)$ は要素

*1 建築研究部

地震として用いる小地震（通常は地震観測記録）の波形の複素フーリエスペクトルであり、図-1中の $F_{Small}(\omega)$ に対応する。 C は小地震と大地震の応力降下量比である。また、 $\alpha(\omega)$ は小地震と大地震のすべりの違いを補正する関数である。exp内の i は虚数単位、 t_{ij} は破壊開始点から各要素断層までの伝播時間と要素断層から地表の計算地点までの伝播時間（小地震の断層位置と要素断層位置の差異を補正した伝播時間）の和である。式(1)で合成した後、逆フーリエ変換により大地震の波形を得ることができる。本稿では基本的に釜江・入倉³⁾のEGFに倣って地震動を計算するが、放射特性等については後述のように別途指定する。

3. 設定した断層モデルと計算条件

本章では、2003年十勝沖地震を対象に設定した断層モデルと計算パラメータ等について示す。

図-2に設定した断層モデルを示す。図中の三角印は計算対象地点である。また、矩形で囲われた領域の内、色の濃い領域は強震動生成域（SMGA）であり、残りの領域は背景領域と呼ばれる。星印は破壊開始点である。Model 1はKamae and Kawabe⁴⁾の多重クラックモデルを参考に壇ら⁵⁾の方法でアスペリティモデルに置換したモデルである（モデル化の都合から断層面積等はKamae and Kawabe⁴⁾と完全には一致していない点に注意されたい）。Model 2は、Model 1と同様の断層面積及び地震モーメント M_0 を有するが、佐藤⁶⁾の経験式（プレート境界地震）で短周期レベル A を再設定し、残りのパラメータはレジピに従って設定したモデルである（Model 1に比べてその値は約0.82倍）。Model 3は、Model 2と同様のSMGA面積及び短周期レベル A を有するが、SMGAを2つに分割し、配置を変えたモデルである。本稿では、これらのようにSMGAの面積、数、配置を変えることで、異なる震源モデルを設定している。なお、いずれの断層モデルにおいても、

SMGA 1の破壊開始点から断層の破壊が開始されると仮定した。また、各SMGAの寄与を大きく見積もるために震源の破壊様式としてはマルチハイポセンター形式を採用した。

表-1に、図-2で示した断層モデルに対する計算パラメータの一覧を示す。これらのパラメータの内、巨視的パラメータ及び微視的パラメータの一部（震源層の物性値等）はモデル間で共通とした。ただし、断層モデル形状を矩形とするためにSMGAの配置も制約を受けることから、短周期レベル A はKamae and Kawabe⁴⁾と佐藤⁶⁾の経験式から得られる値と完全には一致していない点に注意されたい。

表-2に、本稿で使用する計算ケースの一覧を示す。ここでは、図-2及び表-1に示した断層モデル及び基本的な計算パラメータの組み合わせで、計15ケースを設定した。この時、小地震と大地震のすべりの違いを補正する関数としてIrikura²⁾、入倉ら⁷⁾、大西・堀家⁸⁾の3種類を設定した。また、放射特性については、Case 1~3, 6~8, 11~13では、Aki and Richards⁹⁾の理論的な値を用いることとした。なお、Case 4, 5, 9, 10, 14, 15においては、長周期域では前述の理論的な値を用い、高周波数域では香川¹⁰⁾もしくはBoore and Boatwright¹¹⁾に従って平滑化させた値を使用した。なお、以下では全て0.1~10 Hzのバンドパスフィルターをかけた波形について議論する。

図-2に示した計算対象地点としては、KiK-netの地中記録を対象として、全27地点を選択した。これは、工学的基盤より浅い表層地盤に主に起因する地盤非線形の影響を排除して、2003年十勝沖地震の地震観測記録と比較するためである。また、EGFの要素波形としては、Kamae and Kawabe⁴⁾に倣い、2003年9月26日7時20分に発生した $M_{JMA}5.4$ の余震において前述の計算対象地点で観測された波形を採用した。

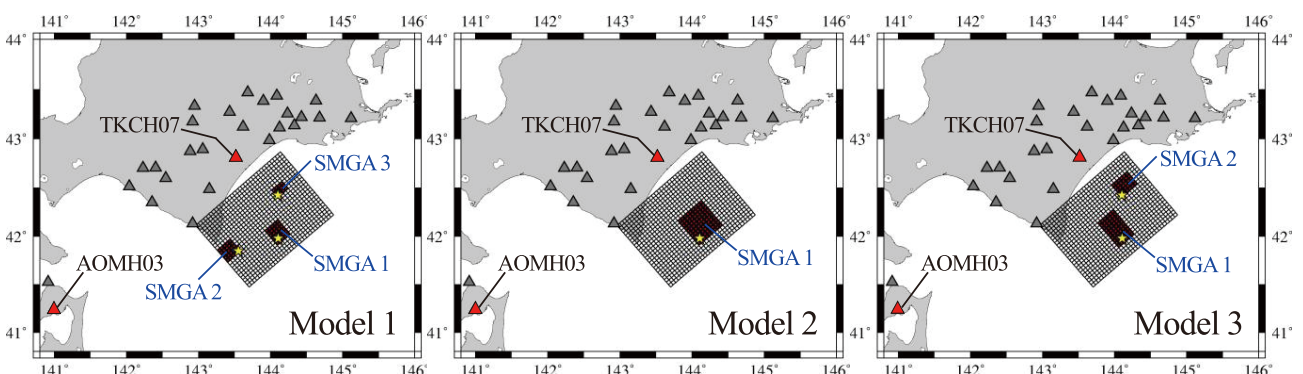


図-2 設定した断層モデル

表 - 1 断層モデル毎の計算パラメータ

設定パラメータ		Model 1	Model 2	Model 3	
巨視的 パラメータ	断層面積 (km ²)	12,800			
	地震モーメント (N・m)	1.81×10 ²¹			
	モーメントマグニチュード <i>M_w</i>	8.1			
	平均滑り量 (m)	2.97			
	平均応力降下量 (MPa)	3.03			
	要素断層分割数	800			
	短周期レベル <i>A</i> (N・m/s ²)	1.28E+20	1.05E+20		
微視的 パラメータ	共通	震源層密度 ρ (g/cm ³)	3.3		
		震源層 <i>V_s</i> (m/s)	3800		
		地震基盤密度 ρ (g/cm ³)	2.7		
		地震基盤 <i>V_s</i> (m/s)	3450		
		破壊伝播速度 <i>V_r</i> (m/s)	2800		
		走向 (deg)	230		
		傾斜角 (deg)	20		
		すべり角 (deg)	109		
		<i>f_{max}</i> (Hz)	-		
		放射特性	別途指定	別途指定	別途指定
	SMGA1	面積 (km ²)	480	1140	960
		すべり量 (m)	10.1	5.93	6.58
		ライズタイム (s)	0.88	1.53	1.25
		応力降下量 (MPa)	50	27.07	27.07
	SMGA2	面積 (km ²)	400	-	480
		すべり量 (m)	4.59	-	4.65
		ライズタイム (s)	0.81	-	0.88
		応力降下量 (MPa)	25	-	27.07
	SMGA3	面積 (km ²)	192	-	-
		すべり量 (m)	3.21	-	-
		ライズタイム (s)	0.56	-	-
		応力降下量 (MPa)	25	-	-
	背景領域	面積 (km ²)	11728	11360	11360
		すべり量 (m)	2.61	2.59	2.59
		ライズタイム (s)	6.84	6.73	6.73
		応力降下量 (MPa)	3.40	2.69	3.51

表 - 2 計算ケース一覧

断層モデル	小地震と大地震の滑りの違いを補正する関数			放射特性の平滑化の方法	
	Irikura (1986)	Irikura et al. (1997)	Onishi and Horike (2004)	Boore and Boatwright (1984)	Kagawa (2004)
Model 1	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Model 2	Case 6	Case 7	Case 8	Case 9	Case 10
Model 3	Case 11	Case 12	Case 13	Case 14	Case 15

4. 計算結果

4. 1 地震観測記録との比較

本節では、2003年十勝沖地震（本震）の地震観測記録と計算結果を比較する。震源モデルの差異が地震動の評価結果に与える影響を確認することが目的であるから、計算結果が地震観測記録と整合している必要はないが、

波形の形状等がどの程度異なるのかを把握するため、比較の基準として使用する。紙面の都合から、以下では代表的な2地点（TKCH07, AOMH03）の速度波形（NS成分；南北成分）について、Case 3, Case 8, Case 13の結果を比較する。

図 - 3に、2003年十勝沖地震の地震観測記録と計算結果について、時刻歴波形の比較を示す。黒線が地震観

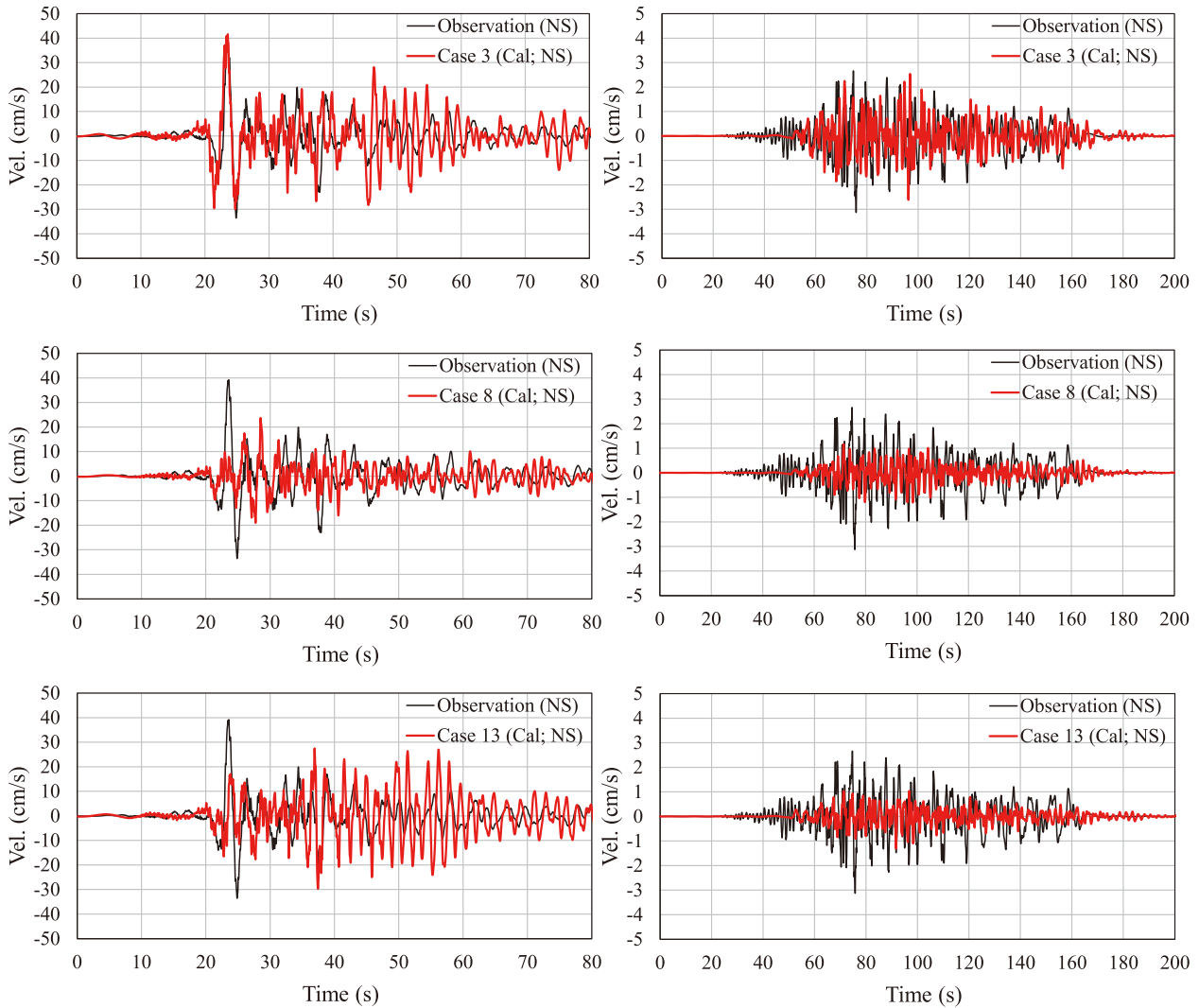


図-3 時刻歴波形の比較 (左: TKCH07, 右: AOMH03)

測記録, 赤線が計算結果である。波形の到達時刻については目視で調整した。TKCH07については, Case 3 (断層 Model 1) では 20 ~ 30 秒の時間帯において, 特徴的なパルス状の波形が見られる。このパルス波形は, 断層破壊の進行に伴うディレクティビティ効果によって生成されたと考えられる。ディレクティビティ効果によって生じるパルス波形は, 建築物の構造被害につながる可能性が高いことが近年の地震被害において指摘されている^(例えば¹²⁾)。Case 8 (断層 Model 2), Case 13 (断層 Model 3) においては, Case 3 (断層 Model 1) と同様の波形形状は認められるものの, 振幅値は大きく異なっている。従って, ディレクティビティ効果は, SMGA の配置とそのパラメータに極めて敏感であることが改めて確認できた。また, 40 秒以降の時間帯において, Case 3 (断層 Model 1) と Case 13 (断層 Model 3) では 20 cm/s 程度の振幅が 10 ~ 20 秒間程度続いているが, Case 8 (断層 Model 2) ではそのような振動成分はみられない。このことは, Case 8 (断

層 Model 2) では Model 2 を参照しているため, 比較的大きな面積を有する SMGA を 1 つ設定したことにより単純な破壊形態となったことが原因と考えられる。他の Case 3 (断層 Model 1) と Case 13 (断層 Model 3) では SMGA が複数設定されており, SMGA 1 で破壊が起きた後 (この破壊が 20 ~ 30 秒の時間帯に表れている), SMGA 2 の破壊の影響によって, 後続の振動成分 (40 秒以降の時間帯に表れている) が形成されたと推察される。AOMH03 においては, TKCH07 に比べて, 断層最短距離で 150 km 程度離れていることから継続時間が長く, 振幅値が小さくなっていることがわかる。また, Case 3 (断層 Model 1) に比べて Case 8 (断層 Model 2), Case 13 (断層 Model 3) で振幅値が全体的に低いことがわかる。このことは, Case 3 (断層 Model 1) では図-2 の Model 1 を参照しているため, 青森県側に SMGA2 を設定したことにより振幅値が大きくなったと考えられる。しかし, Case 8 (断層 Model 2), Case 13 (断層 Model 3) では, 図-2 の Model 2,

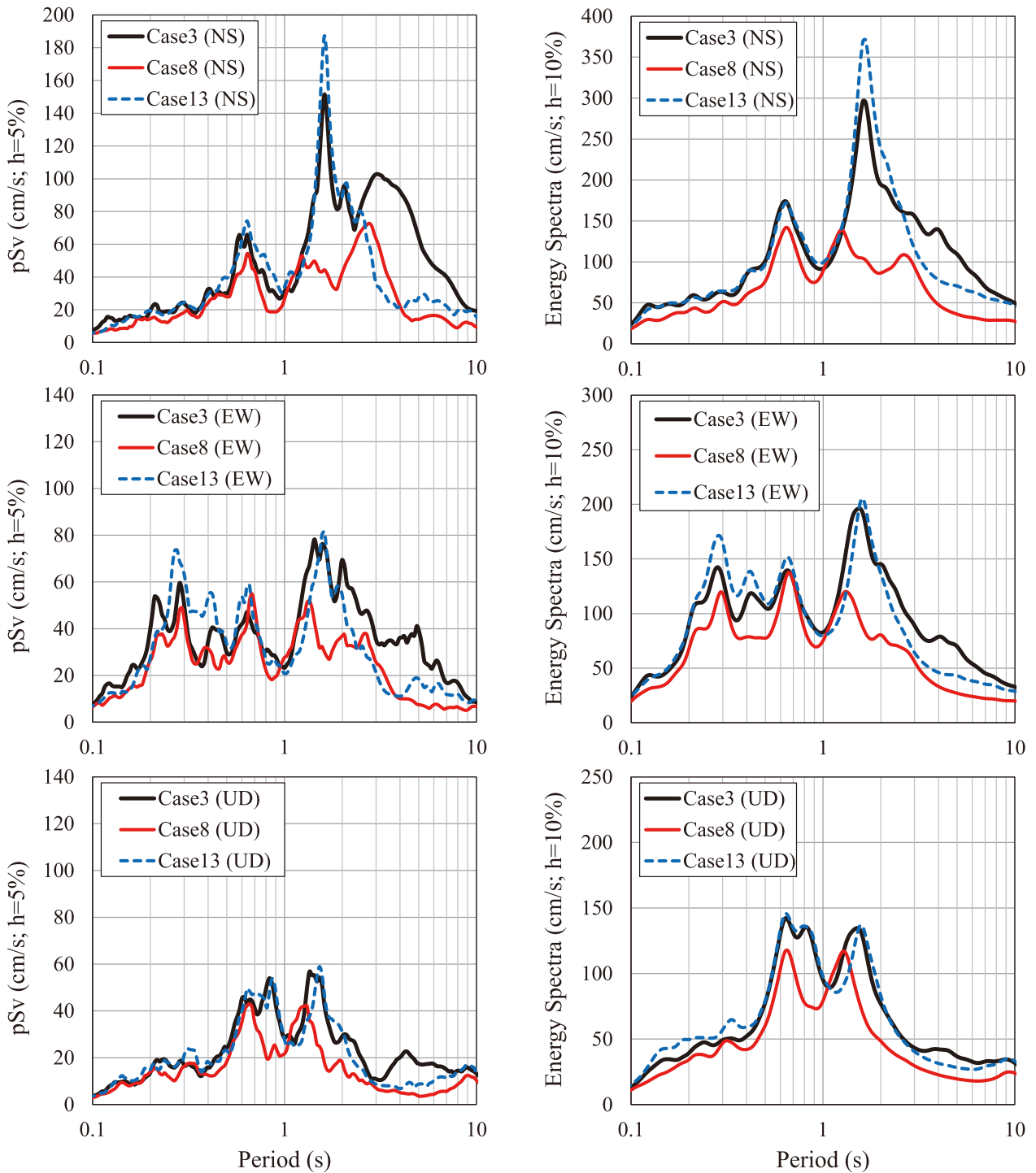


図-4 pSv とエネルギースペクトル V_E ($h=10\%$) の比較 (TKCH07)

Model 3を参照しているため、青森県側にはSMGAがないことから、振幅値が低くなったと考えられる。

図-4に、代表例としてTKCH07における計算波形の擬似速度応答スペクトル pSv ($h=5\%$) とエネルギースペクトル V_E ($h=10\%$) の比較を示す。エネルギースペクトル V_E とは、構造物へ入力される総入力エネルギーの速度換算値である^{例えば13)}。ここでは、Case 3 (断層 Model 1)、Case 8 (断層 Model 2)、Case 13 (断層 Model 3) の結果を比較する。全体的な傾向としては、Case 3(断層 Model 1)

と Case 13 (断層 Model 3) がやや似通っており、Case 8 (断層 Model 2) は周期1秒以上で他のケースとやや異なっていることがわかる。一方で、周期1秒程度より短周期のスペクトルの形状はいずれのケースでも概ね一致している。また、NS方向の比較においては、周期3～4秒において、Case 3 (断層 Model 1) と他のケースで差異が大きいことがわかる。このピークは、図-3の時刻歴波形において20～30秒付近でみられるパルス波形によって生じていると考えられる。このことは、構造物の地震

動応答を考えた場合、総入力エネルギーだけではなく、応答に影響する瞬間的なエネルギーの強さにも注目する必要があることを示唆している。また、既往研究でも同様の指摘がなされている¹⁴⁾。なお、周期 1.6 秒程度に見られる鋭いピークについては、図-3の時刻歴波形において 40 秒付近以降の波群によって生成されていると推察される。従って、SMGA 3 から放射された要素断層の波形が式 (1) で重ね合わされることによって、距離と伝播速度の関係から生じた人工的なピークと考えられる。なお、観測記録にはこの周期帯である程度大きな振幅は確認できるものの、図-4の計算波形の 6 割程度の振幅に留まっている。本研究では観測記録の再現そのものは目的ではないが、観測記録の再現性という観点での詳細な検討も必要と考える（例えば破壊様式の見直しや震源不均質性の導入など）。

4.2 最大加速度・速度の比較

本節では、地震観測記録と計算結果について、波形の最大加速度 PGA、最大速度 PGV について検討する。

図-5に、地震観測記録と計算結果の PGA 及び PGV に関して、距離減衰特性の比較を示す。ここでは Case 5, Case 10, Case 15 の計算結果を比較する。司・翠川¹⁵⁾の距離減衰式（図中では SM1999 と表記する）も併記するが、今回対象とする波形は地中内の波形（進行波と反射波の両方を含む波）であるから、彼らの距離減衰式（地表面波形に基づいて評価されている）と物理的には整合しないため、あくまで参考扱いである点に注意されたい。なお、最大加速度及び最大速度の距離減衰式は、 $V_s = 400 \text{ m/s}$ の工学的基盤相当における値とした。全体的な傾向として Case 5 に関しては、他の計算ケースと比べ、特に 50 km 程度よりも遠方の地点において、観測記録と計算結果の最大加速度及び最大速度は良好に整合している。このことは、Case 5 で設定した震源モデルの SMGA が既往研究（観測記録に合うように試行錯誤的に震源モデルを調整している）を参考に設定されているためと考えられる。すなわち、SMGA の配置や応力降下量の設定によって大きく変動する可能性が高いことを示唆している。また、Case 10 及び Case 15 については、前述のように Case 5 に比べて 50 km 程度より遠方での観測記録との対応がよくないように見える。このことは、図-3で考察したように、Model 1 における SMGA 2 の寄与が重要であることを意味していると推察される。また、要素地震として用いる小地震記録の震源位置と要素断層の位置の違いの補正が十分ではない可能性もあり、今後検討したい。前述

のように司・翠川¹⁵⁾の距離減衰式とは物理的な定義が異なるのであくまで参考のために示しているが、今回の計算結果はどの計算ケースでも平均的には距離減衰式より小さい傾向にある点の特徴的である。今後、地表面波形を対象にした検討を実施し、この差異について検討を加えたい。

図-6に、今回検討した全 15 ケースについて、地震観測記録を基準とした場合の最大加速度比と最大速度比の比較を計算対象地点毎に整理した。なお、図中の横軸に対して右側の計算地点ほど断層最短距離が長くなるよう並べてある。これらの結果をみれば、計算地点毎にやや傾向は異なるものの、最大加速度の場合は 0.1 ~ 2.5 倍程度、最大速度の場合は 0.1 ~ 2 倍程度の範囲で変動していることがわかる。本研究では 3 章で示したように短周期レベル A を経験式から求め直すとともに、複数の SMGA の配置を変えている。図-6の結果から、震源モデルの設定は地震動評価に対して非常に敏感に影響を及ぼしており、少なくとも特定（単一）の建設地点を対象にする場合には、極めて慎重に検討する必要があることが示唆される。すなわち、強震動予測においては、複数の震源モデルを検討した上で、工学的な視点から、建設地点に対して適切な設計用入力地震動（サイト波）を選択する必要があることを改めて示唆している。また、最大加速度の比や最大速度の比において、横軸に対する比の分布に特定の傾向は見られない。前述のように横軸については断層最短距離の昇順に並べているが、この図から、この比が断層最短距離のみに依存しているとは判断できない。従って、現時点では明快な物理的解釈を与えることは難しい。しかしながら、本研究では、数 Hz までの低振動数域（長周期域）に理論的な放射特性を採用していることから、放射特性の設定が影響している可能性はある。今後、継続的に検討したい。

4.3 GOF を用いた定量的な差異の評価

本節では、地震観測記録と計算結果の差異を定量的に評価する。ここでは、Olsen and Mayhew¹⁶⁾による GOF (Goodness Of Fit) を用いた式 (2)。

$$GOF = 100 \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{2 \cdot |x - y|}{x + y} \right) \quad (2)$$

ここで、 x は観測波形、 y は計算波形の最大値である。 erfc は、相補誤差関数である。Olsen and Mayhew¹⁶⁾によれば、GOF は観測波形と計算波形の両者が完全に一致した場合は 100 をとり、65 以上で両者の対応は良いと考え

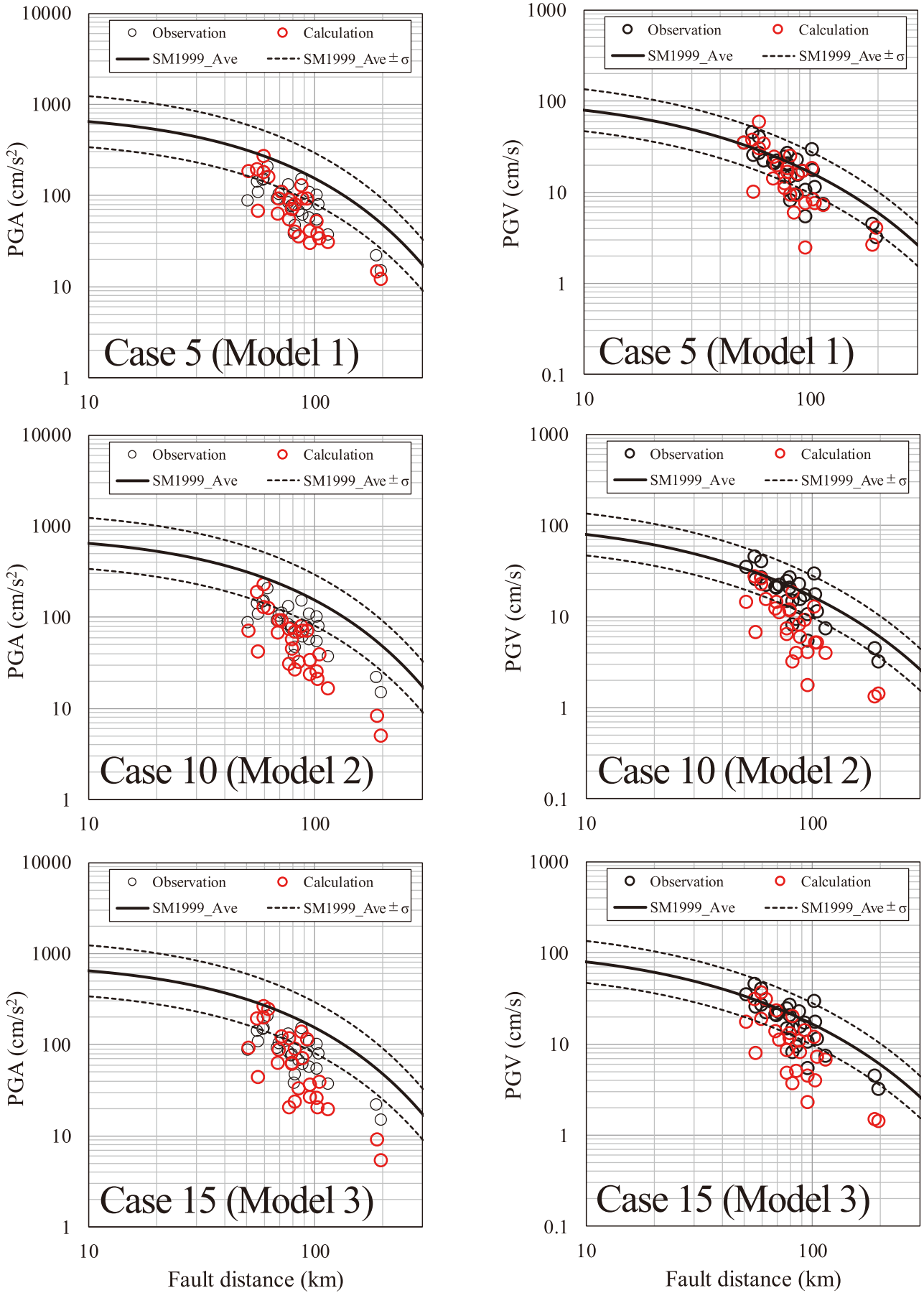


図 - 5 距離減衰特性の比較 (左: 最大加速度, 右: 最大速度)

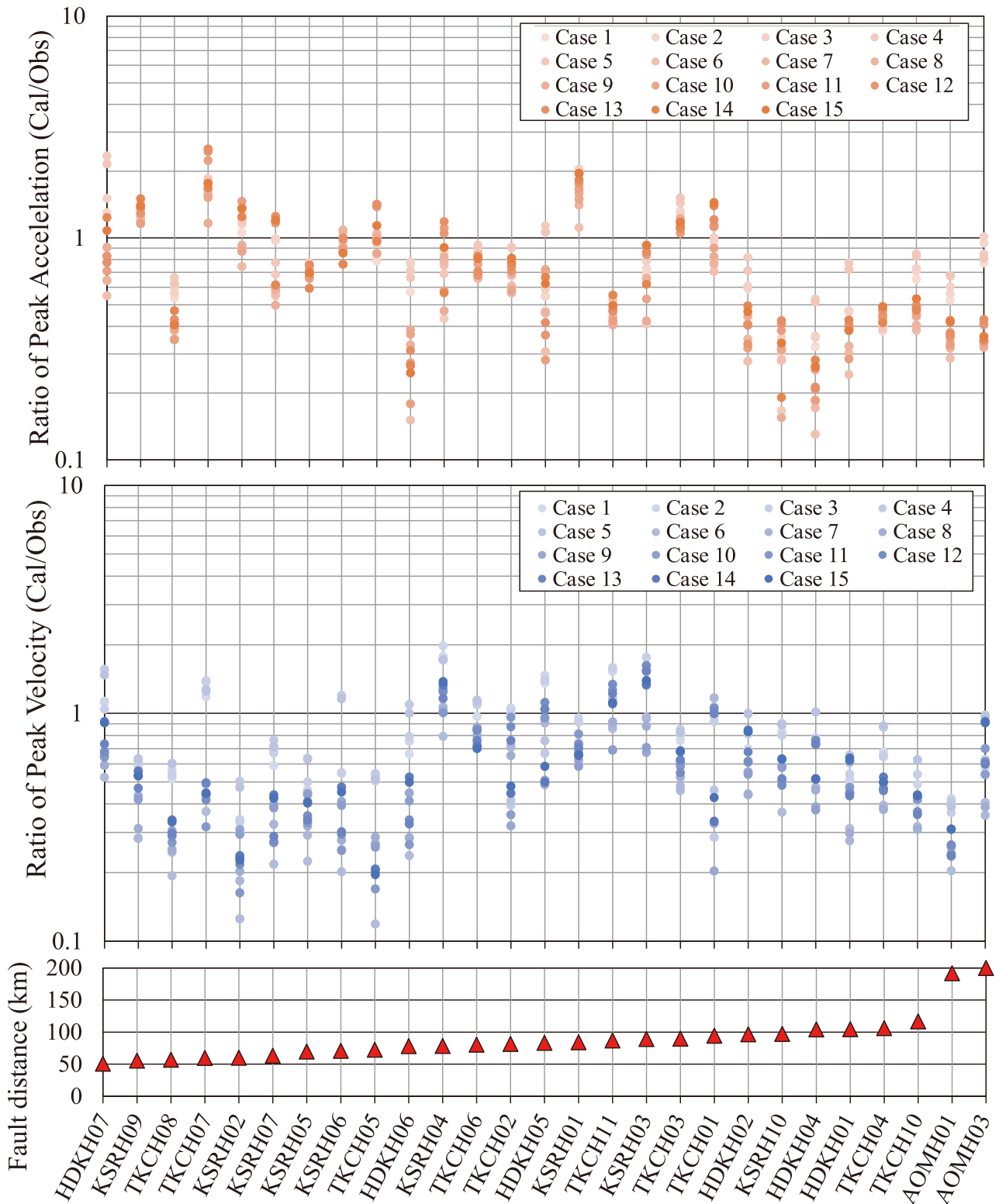


図-6 計算対象地点ごとの最大加速度比及び最大速度比（基準は地震観測記録）

られ、45以下では対応が悪いとされる。本研究では、最大加速度、最大速度、フーリエ振幅スペクトル、擬似速度応答スペクトル、エネルギースペクトルについてGOFによる比較を行う。ただし、全計算地点の平均値で比較する。また、フーリエ振幅スペクトル、擬似速度応答スペクトル、エネルギースペクトルでは、各サイトにおい

て振動数毎の振幅値の総和を計算することで比較した。

図-7に、GOFによる比較結果を示す。横軸は計算ケースであり、縦軸はGOFのスコアである。これを見れば、全体的なスコアとしては、ケースCase 1～5（断層Model 1）のスコアが相対的に高く、Case 6～10（断層Model 2）及びCase 11～15（断層Model 3）は相対的に

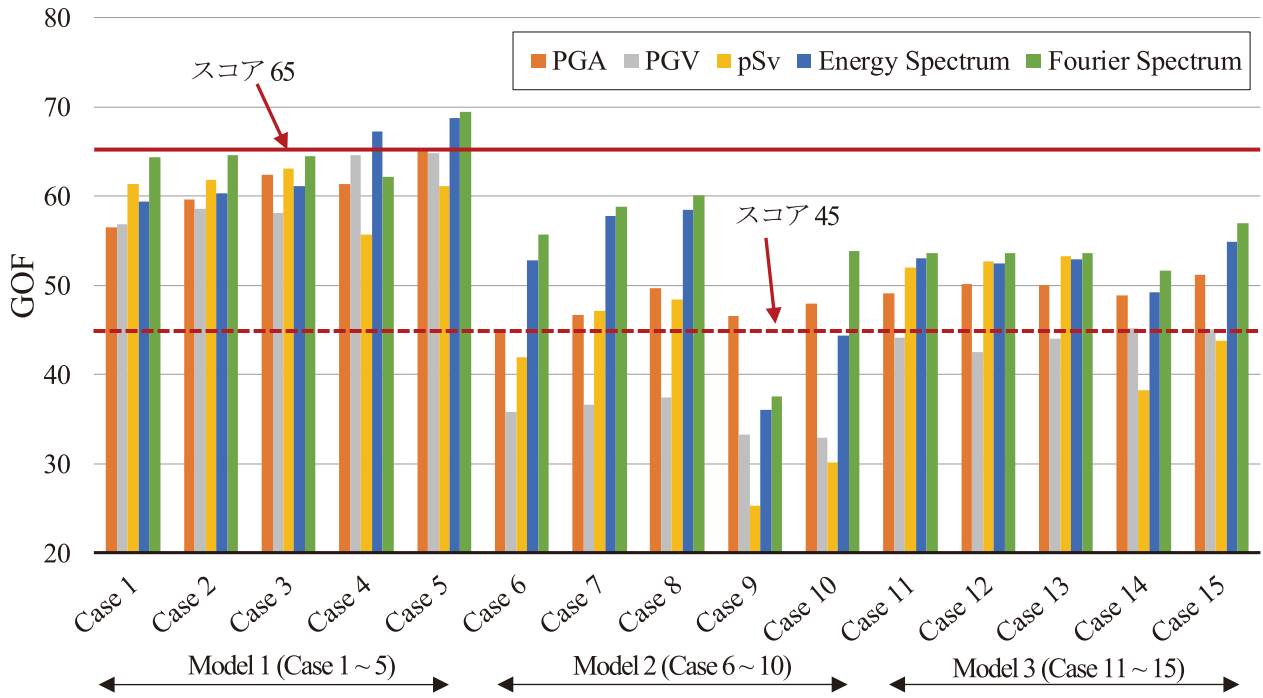


図-7 計算ケース毎のGOFの比較

スコアが低いことがわかる。また、Case 9とCase 10のケースのスコアが相対的に最も低いことがわかる。Case 9とCase 10では、断層モデルはModel 2であり、同じModel 2の断層モデルを用いたCase 6, Case 7, Case 8に対して、異なる方法で放射特性を修正していることから、大きな差異に繋がったと考えられる。子細にみれば、最大加速度に関するGOFのスコアは、他の項目に比べて、ケース間の差異は比較的小さいことがわかる。このことは、加速度の最大値に影響する振動成分は概ね数Hz以上の高振動数領域であるが、その帯域の位相情報はランダムに近く、その重ね合わせもまたランダムな重ね合わせと見做せることから一定の値に収束しているものと推察される。また、ここまでの考察から、GOFのスコアに対しても、SMGAの設定の違いが大きく影響していると推察される。

5. まとめ

本研究のまとめは以下の通りである。

- 2003年十勝沖地震を対象に複数の震源モデル（短周期レベルAの値やSMGAの配置等）を設定し、それらのモデルから計算される地震動を定量的に比較した。
- 2003年十勝沖地震（本震）の地震観測記録を基準とした場合、最大加速度は0.1～2.5倍程度、最大速度は0.1～2倍程度の範囲で変動することがわかった。

- GOFのスコアで観測記録と計算結果を比較すると、Kamae and Kawabe⁴⁾の断層モデルを参照した計算ケースにおいて、相対的に高いスコアになることがわかった。従って、SMGAの配置や放射特性の組み合わせによって、計算結果が大きく変動することが確認できた。
 - TKCH07で見られたパルス形状をした波形（パルス波形）は、pSv等の建物の最大応答値に強く影響すること、また、そのパルス波形は、震源モデルの設定を強く受けることがわかった。
 - 建物の応答を考える場合、設計用入力地震動（サイト波）の作成において、単純に複数のSMGA配置や破壊開始点を設定するだけではなく、パルス波形を意識した検討をする必要もあると考えられる。
- 今回取り上げた計算ケースでは、いずれの場合でもレシピ¹⁾に記載されている手順に極力倣って震源モデルを設定している。このことから、今回検討したような差異は、将来の強震動予測において十分生じ得る。ただし、レシピでは、あくまでも最新の科学的知見から標準的な地震動作成手順が示されている。従って、任意の建設地点を対象にした場合、地震動作成者は具体的な震源モデルの設定に関して、当該地域を対象にしたレシピ以外の研究論文等から情報を収集する等、事前に十分な検討が必要である。

今回参考にしたKamae and Kawabe⁴⁾の後継研究¹⁷⁾では、

地震観測記録の再現性向上に成功しているため、彼らの結果も参考にして継続的に検討したい。また、前述の通り、震源モデルの設定は慎重に行う必要がある。一方で、モンテカルロ法により単純に最大級の地震動を与えるモデルを選択するのは、工学的な立場からすると必ずしも最善手ではない。設計用入力地震動の設定には、地震動作成者と構造設計者および施主とのリスクコミュニケーションが重要になろう。また、将来的には、統計的もしくは確率論的なアプローチにより、直接的に震源における地震動波形を設定することが重要になる可能性がある^{と推察される(例えば18)}。

謝辞

一部の図の作成には GMT¹⁹⁾ を用いています。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 地震調査研究推進本部：震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」），地震調査委員会，2017，https://www.jishin.go.jp/main/chousa/20_yosokuchizu/recipe.pdf（参照 2021-08-04）。
- 2) Irikura, K. : Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp., Tokyo*, pp. 151-156, 1986.12.
- 3) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長：地域的な震源スケーリング則を用いた大地震（M7級）のための設計用地震動予測，日本建築学会構造系論文報告集，Vol. 416, pp. 57-70, 1990.10, doi:10.3130/aijsx.416.0_57.
- 4) Kamae, K., and H. Kawabe: Source model composed of asperities for the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake ($M_{JMA} = 8.0$) estimated by the empirical Green's function method, *Earth, Planets and Space*, Vol. 56, pp.323-327, 2004.6, doi:10.1186/BF03353059.
- 5) 壇一男, 島津奈緒未, 武藤真菜美：多重クラックモデルからアスペリティモデルへの置換方法と想定地震による強震動予測への適用，Vol. 75, No. 647, pp. 57-66, 2010.1, doi:10.3130/aijs.75.57.
- 6) 佐藤智美：逆断層と横ずれ断層の違いを考慮した日本の地殻内地震の短周期レベルのスケーリング則，日本建築学会構造系論文報告集，Vol. 75, No. 651, pp. 923-932, 2010.5, doi:10.3130/aijs.75.923.
- 7) 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手法の改良，日本地震学会講演予稿集，No. 2, B25, 1997.9.
- 8) 大西良広, 堀家正則：震源近傍での地震動予測のための拡張統計的グリーン関数法とそのハイブリッド法への適用に関するコメント，Vol. 69, No. 586, pp. 37-44, 2004.12, doi:10.3130/aijs.69.37_5.
- 9) Aki, K., and P. G. Richards: *Quantitative Seismology*, 2nd Edition, University Science Books, 2002.8.
- 10) 香川敬生：ハイブリッド合成法に用いる統計的グリーン関数法の長周期帯域への拡張，日本地震工学会論文集，Vol. 4, No. 2, pp. 21-32, 2004.5, doi:10.5610/jaee.4.2_21.
- 11) Boore, D. M. and J. Boatwright: Average body-wave radiation coefficients, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 74, No. 5, pp. 1615-1621, 1984.10, doi:10.1785/BSSA0740051615.
- 12) 林康裕：パルス性地震動の特徴と耐震設計の方向性，日本建築学会パネルディスカッション資料，pp. 41-54, 2011.8.
- 13) 秋山宏, 北村春幸：エネルギースペクトルと速度応答スペクトルの対応，日本建築学会構造系論文報告集，Vol. 71, No. 608, pp. 37-43, 2006.10, doi:10.3130/aijs.71.37_4.
- 14) 井上範夫, 五十子幸樹：建物の変位制御設計 - 地震に対する免震・長周期建物の設計法，丸善出版，332p, 2012.12.
- 15) 司宏俊, 翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文報告集，Vol. 64, No. 523, pp. 63-70, 1999.9, doi:10.3130/aijs.64.63_2.
- 16) Olsen, K. B., and J. E. Mayhew: Goodness-of-fit criteria for broadband synthetic seismograms, with application to the 2008 Mw5.4 Chino Hills, CA, earthquake, *Seismological Research Letters*, Vol. 81, No. 5, 2010, doi:10.1785/gssrl.81.5.715.
- 17) 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（北海道）学術講演梗概集，2004.7.
- 18) 平野史朗： ω^{-2} モデル，モーメントの3乗則，およびGR則を満たす確率的震源時間関数，日本地震学会秋季大会，S08-23, 2021.10.

- 19) Wessel, P. and Smith, W. H. F.: New, improved version of Generic Mapping Tools released, *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 79, No. 47, p. 579, 1998.10, doi:10.1029/98E000426.

A study on source model construction to predict strong ground motion

Kenichi NAKANO

The Empirical Green's Function method (EGF) predicts strong ground motion at construction sites. However, in the case of large earthquakes, the predicted strong ground motion fluctuates significantly, depending on the source model. It is important to understand the range of fluctuations in order to obtain a precise estimation of the seismic motion caused by large earthquakes in the future. In this study, I focused on the 2003 Tokachi-oki earthquake and computed the strong ground motions using multiple source models to investigate the differences between these waveforms. The result revealed that the peak acceleration of these waveforms was roughly 0.1 to 2.5 times greater than observation records at the 2003 Tokachi-oki earthquake.