



分岐断層の特性化震源モデルを用いた兵庫県南部地震の 強震動シミュレーション

平井俊之¹⁾、釜江克宏²⁾、長沼敏彦³⁾、伊藤進一郎⁴⁾、
西岡勉⁵⁾、入倉孝次郎⁶⁾

- 1) 正会員 株式会社ニュージェック
e-mail: hiraits@newjec.co.jp
- 2) 正会員 京都大学原子炉実験所、教授 工博
e-mail: kamae@kuca.rii.kyoto-u.ac.jp
- 3) 正会員 財団法人阪神高速道路管理技術センター、Dr.Eng.Sci.
e-mail: naganuma@tech-center.or.jp
- 4) 正会員 本州四国連絡高速道路株式会社
e-mail: shinichiro-ito@jb-honshi.co.jp
- 5) 正会員 阪神高速道路株式会社、工博
e-mail: tsutomu-nishioka@hanshin-exp.co.jp
- 6) 正会員 愛知工業大学、客員教授、理博
e-mail: irikura@geor.or.jp

要約

断層破壊が途中で分岐して進行していく兵庫県南部地震の震源インバージョン結果をもとに、既往の断層モデルを修正して、分岐断層にアスペリティを配置した、経験的グリーン関数法のための新たな断層モデル(分岐断層モデル)を提案した。分岐断層モデルを用いた波形合成結果は、分岐断層の寄与が大きい断層東側の地点において、既往の断層モデルを用いた場合より観測記録との整合性が高いことが示された。

キーワード：兵庫県南部地震、分岐断層、特性化震源モデル、経験的グリーン関数法、広帯域強震動

1. はじめに

兵庫県南部地震では、多くの建物が倒壊し、甚大な被害が発生した。被害の発生原因等を明らかにするためには、被害の発生地点における強震動を精度よく推定することが必要であり、そのために、強震動評価や震源断層のモデル化に関する研究が数多く行われてきた。

強震動評価手法については、観測された余震波形から、その地点での本震波形を推定する経験的グリーン関数法[Irikura¹⁾]が精度の高い手法であるとして知られている。既往の観測記録を精度よく再現できる経験的グリーン関数法は合理的な地震動評価手法であると考えられ、鳥取県西部地震など、多くの地震記録の再現計算に用いられている^{2,3)}。

経験的グリーン関数法に適用するための兵庫県南部地震の断層モデルについては、Kamae and Irikura⁴⁾が、Sekiguchi et al.⁵⁾による震源インバージョン結果をもとにして単純な形状のアスペリティを配置したモデル(以後、釜江-入倉モデルと呼ぶ。)を設定し、断層近傍の強震波形を再現している。

Kamae and Irikura⁴⁾により提案されたモデルは、関西地震観測研究協議会(以後、関震協)の本山観測点や神戸大観測点の観測波形と整合するように決定されているが、尼崎市の観測点など断層東側における地点での観測波形との整合については、十分考慮されているわけではなかった。その後、山田・他⁶⁾などにより、釜江-入倉モデルを修正したモデルがいくつか提案されている。本研究では分岐断層が存在するとの新たな知見⁷⁾をとりいれて、山田・他⁶⁾による兵庫県南部地震の断層モデルをさらに修正し、既往の断層モデルによる合成結果との比較を行って、その妥当性を評価した。兵庫県南部地震の断層モデルの精度を高めていくことは、構造物が被害を受けた地点の強震動推定結果の妥当性を高めることになり、被害のメカニズム解明やその対策などの研究に資することができる。

2. 用いた記録と波形合成地点

波形合成を実施した地点は、兵庫県南部地震断層の近傍で、本震と余震が観測されている地点を選定し、関西地震観測研究協議会の神戸大学(KBU)、本山(MOT)、尼崎(AMA)、福島(FKS)および関西電力電力技術研究所(SOK)の5地点とした(図-3 参照)。

経験的グリーン関数として用いる波形は、Kamae and Irikura⁴⁾と同様、表-1 に示す余震の観測記録とした。波形合成手法には入倉・他⁸⁾を用いた。

表-1 余震の諸元および震源パラメータ

	余震 1	余震 2
日時	1995.2.2 16:09	1995.1.23 6:02
緯度(°)	34.695	34.530
経度(°)	135.150	134.907
深さ(km)	17.9	15.0
M_{jma}	4.2	4.5
$M_0(N \cdot m)$	1.7×10^{15}	4.5×10^{15}
fc(Hz)	3.2	2.1
S(km ²)	0.6	1.2
$\Delta \sigma$ (bars)	86	82

3. 断層モデルの改良

経験的グリーン関数法に用いる断層モデルには、図-1 に示す釜江-入倉モデルがある。そのモデルはSekiguchi et al.⁵⁾の震源インバージョン結果を参考に、関震協の神戸大学観測点(KBU)と本山観測点(MOT)の合成波形が観測波形に整合するように決定されている。さらに、山田・他⁶⁾は、波形の一致度に改善を加えるため、図-2 に示すように、釜江-入倉モデルのサブイベント 1 を 2 つに分割し、釜江-入倉モデルのサブイベント 3 を東側に延長したモデル(以後、修正釜江-入倉モデルと呼ぶ。)を提案し、KBU および MOT における観測波形との整合性を高めるとともに、断層の北東方向に位置する箕面川ダムや一庫ダムでの観測波形との整合性も高めた。また、松島・川瀬⁹⁾は、釜江-入倉モデルをもとにして神戸海洋気象台(JMA)、KBU、MOT の観測波形と合うように最適化したモデルを提案した。しかし、山田・他⁶⁾、松島・川瀬⁹⁾ともに断層東側に位置する観測点における検討が不足しており、断層モデルの改善の余地が残されていた。

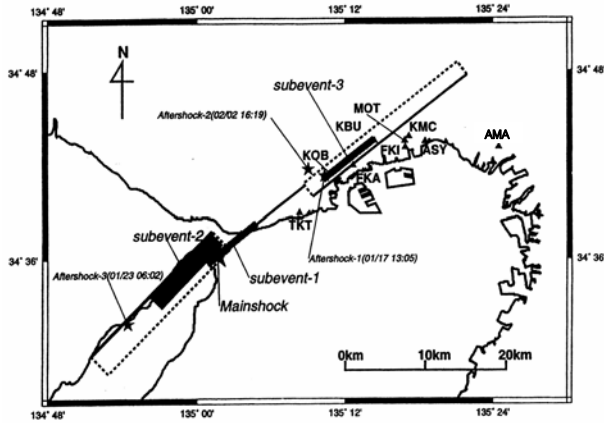


図-1 釜江-入倉モデル⁴⁾

(観測点名を本稿に合わせて一部修正)

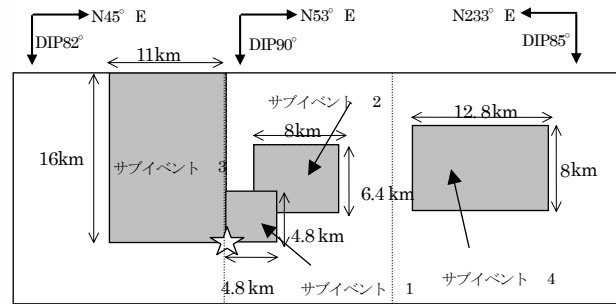


図-2 修正釜江-入倉モデル

Sekiguchi et al.⁸⁾は、その後の研究において、神戸側の断層破壊が北東方向へ進行していく過程で、途中で岡本断層が分岐してほぼ東方向へ破壊が進展していくような震源イメージング結果を示している。関口らのイメージング結果は周期数秒以上の地震動に対するものであるが、本論文では、東側の分岐断層がどの程度強震動の生成に寄与したかについて検証するため、Sekiguchi et al.⁸⁾に基づき、修正釜江-入倉モデルに対して、岡本断層を分岐断層として考慮し、分岐断層モデルとして提案する。

図-3、図-4に分岐断層モデルを示す。サブイベント1からサブイベント3までの配置は、修正釜江-入倉モデルと同じであり、サブイベント4は、釜江-入倉モデルのサブイベント3と同じとしている。分岐断層部のサブイベント5については、Sekiguchi et al.⁸⁾の震源イメージング結果を参考にしつつ、他のサブイベントと同様、複雑な破壊過程をシンプルな矩形のサブイベントに置換する方針とし、AMA、SOKの一致度を検討した結果、4.8km×4.8kmの正方形のサブイベントを、サブイベント4と下端深度が一致するように配置することとした。

表-2に各サブイベントのパラメータを示す。サブイベント1からサブイベント3までは修正釜江-入倉モデルと同じで、サブイベント4は釜江-入倉モデルのサブイベント3と同じである。サブイベント5のストレスドロップ $\Delta\sigma$ はフォワードモデリングによりサブイベント4と同じ値とした。サブイベント4の重ね合わせ数Nが10でサブイベントの大きさが8km×8kmであることから、サブイベントの大きさに合わせて重ね合わせ数を算定し、大きさが4.8km×4.8kmのサブイベント5の重ね合わせ数Nを6とした。NとCと要素地震の地震モーメントからサブイベント5の地震モーメントを算定した。

サブイベント5のライズタイム τ はフォワードモデリングによりAMA、SOK、FKSの観測波形を再現できるように設定したが、その値は、Somerville et al.¹⁰⁾によりサブイベント5を1つの断層として算出した値とほぼ整合した。破壊伝播速度については、Kamae and Irikura⁴⁾で用いられている値を用いた。

破壊伝播は震源から円状に広がるとし、サブイベント2およびサブイベント4については釜江-入倉モデルと同様、破壊が到達した時点で南西側最深部から同じ破壊速度で円状に広がるものとした。サブイベント4とサブイベント5とは図-5に示すような位置関係とし、サブイベント5については、フォワードモデリングの結果、破壊開始点を置かず、サブイベント4からの破壊が続くものとした。

波形合成に際しては、余震2を淡路側のサブイベント3に用い、余震1を神戸側のサブイベント1,2,4,5に用いた。

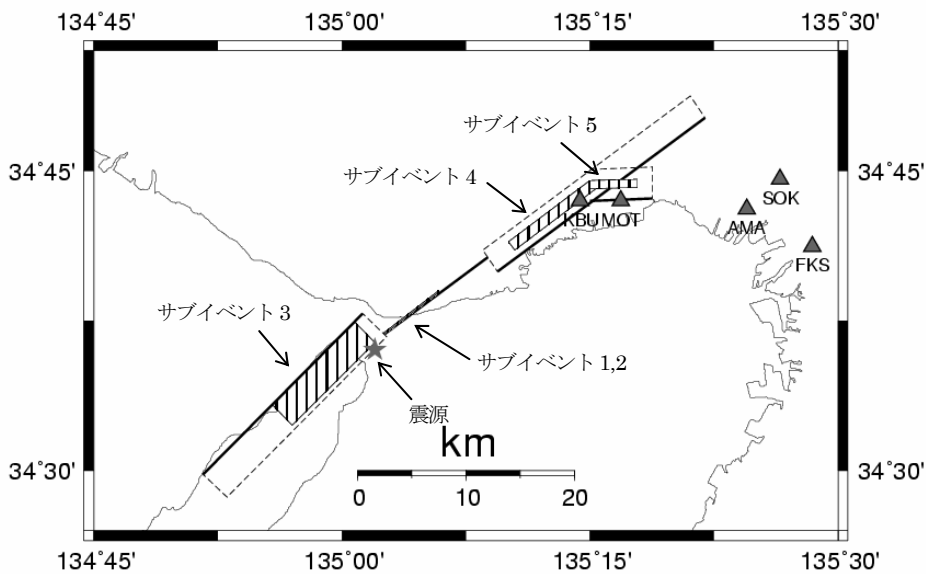


図-3 分岐断層モデルと波形合成地点

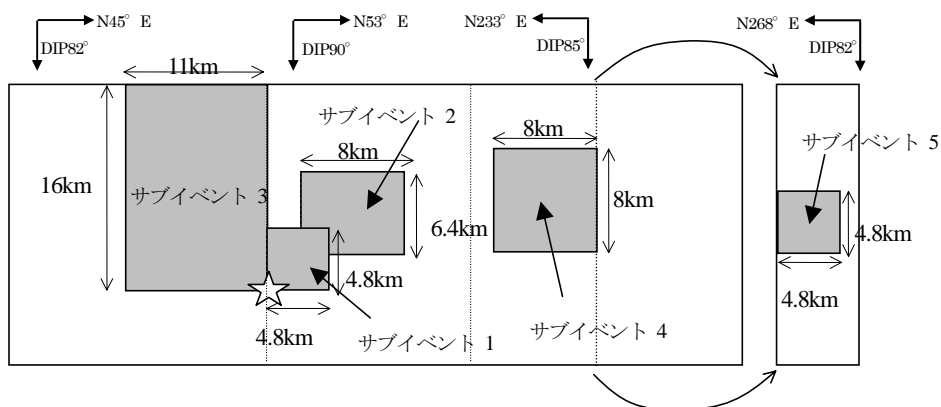
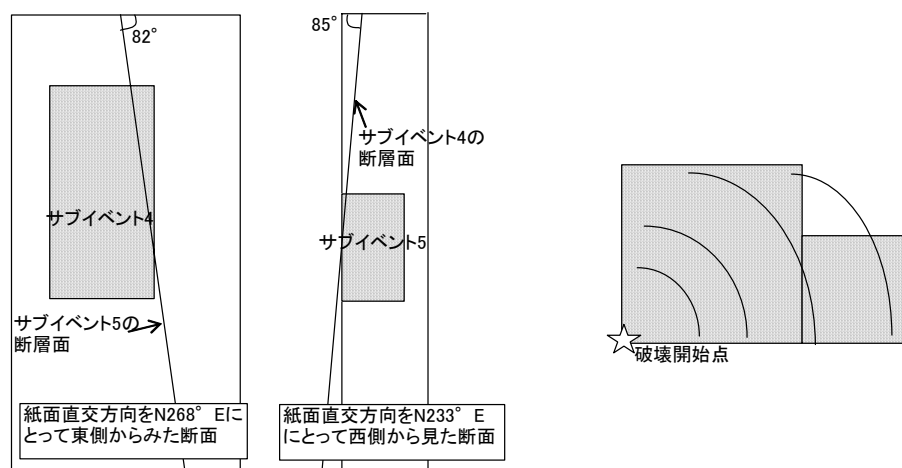


図-4 分岐断層モデル



(a)位置関係

(b)破壊伝播のモデル

図-5 分岐断層モデルのサブイベント4とサブイベント5との関係

表-2 分岐断層モデルの各サブイベントのパラメータ

	規模 (km×km)	地震モーメント M_0 (dyne · cm)	ストレス ドロップ $\Delta \sigma$ (bars)	ライズ タイム τ (sec)	破壊伝播 速度 V_r (km/s)	要素地 震	ストレスド ロップ比 C	重ね合わ せ数 N^3
サブイベント 1	4.8×4.8	0.11×10^{26}	234	0.4	2.8	余震 1	2.7	238
サブイベント 2	8×6.4	0.23×10^{26}	156	0.5	2.8	余震 1	1.8	746
サブイベント 3	11×16	1.0×10^{26}	86	0.6	2.8	余震 2	1.1	2119
サブイベント 4	8×8	0.18×10^{26}	86	0.6	2.8	余震 1	1.0	1059
サブイベント 5	4.8×4.8	0.04×10^{26}	86	0.4	2.8	余震 1	1.0	235

分岐断層モデルは、修正釜江-入倉モデルと比較して、サブイベント 4 を東側に延長する代わりに分岐断層にサブイベント 5 を付加している点が異なる。ここではサブイベントの配置による合成波形の違いを比較した。

図-6 に KBU と MOT における波形合成結果と観測波形とを比較して示す。分岐断層モデルは、KBU や MOT で最適化された修正釜江-入倉モデルのシミュレーション結果に影響を与えていないことがわかる。

図-7 に修正釜江-入倉モデルと分岐断層モデルを用い、AMA、SOK および FKS における波形合成を行った結果を比較して示す。合成波形にはバンドパスフィルタをほどこし、有効周波数範囲を 0.2Hz~10.0Hz とした。図中、修正釜江-入倉モデルの結果と分岐断層モデルの結果とが異なる部分に矢印を付している。KBU や MOT については、いずれの断層モデルを用いた合成波形も観測波形とよく一致している。モデルにより大きな違いがみられないのは、破壊伝播に伴う指向性の効果により両モデルで異なる東側のサブイベント 4 や 5 からの寄与が小さいためである。それに対して AMA や SOK、FKS では、第 2 ピーク以後の波形について両モデルで違いが見られる。これは、両モデルで異なるサブイベント 4,5 からの寄与が大きいためであり、分岐断層モデルでは修正釜江-入倉モデルに対して第 2 ピーク付近でより観測波形とよく一致しており、その後続波形も観測波形との一致度が高い。

強震動評価の結果の妥当性をある程度定量的に評価するため、図-6、図-7 に示す 0 秒から 15 秒までの速度波形について、合成結果と観測波形との相関係数を算出した。表-3 に両モデルによる合成波形と観測波形との相関係数を相互比較して示す。分岐断層モデルによる合成波形の相関係数を 1.0 として、修正釜江-入倉モデルとの相対的な大きさを比較している。波形からもわかるとおり、KBU や MOT については、両モデルともほぼ 1.0 であり、モデルによる差が見られない。しかし、AMA、SOK、FKS については、FKS の NS 成分を除いて分岐断層モデルの方が相関係数が高く、修正釜江-入倉モデルよりも観測波形との一致度が高いことが示されている。図-8 に FKS を例にとって各サブイベントからの合成波形を示す。第 2 ピーク以後の波形には、主にサブイベント 4 とサブイベント 5 が寄与していることがわかるが、サブイベント 4 に加えて、サブイベント 5 すなわち分岐断層の寄与によって、修正釜江-入倉モデルのサブイベント 4 の寄与よりも観測波形の周期帯に近い短周期の波形が生成され、観測波形との整合性が上がっていると考えられる。

図-9 に、分岐断層モデルを用いた合成波形の最大速度および最大加速度について、Fukushima et al.¹¹⁾を参考に距離減衰式および観測値と比較して示す。最大速度値については観測値と合成波形はよく一致している。最大加速度値については SOK で若干乖離が見られるが、これは観測波形にパルス的な波形が記録されているためである。なお、最大速度値および最大加速度値は釜江-入倉モデル、修正釜江-入倉モデルでも分岐断層モデルと大きな差はなかった。これは、分岐断層モデルが、釜江-入倉モデルに対して、主に主要動の後半部分

の修正を行っているためである。

断層モデルを用いて算定した強震波形は、工学的には構造物の応答を考慮するために用いられることが多いため、応答スペクトルについて観測値と比較した。図-10にAMA、SOK、FKSの3地点において、両モデルの加速度応答スペクトル(減衰=5%)を比較して示す。修正釜江-入倉モデルも分岐断層モデルも観測値とよく一致しているが、特にFKSにおいては、周期2秒以下では分岐断層モデルの結果の方が修正釜江-入倉モデルの結果よりも、より観測値との整合性が高いことがわかる。

断層の北東方向に位置する箕面川ダムや一庫ダムにおいて、釜江-入倉モデルではこれらの地点の合成波形の振幅が観測記録と比較して小さいことから、修正釜江-入倉モデルが提案された。分岐断層モデルを用いてもこれらの地点における振幅値が改善されるかどうか検討した。波形合成に用いるグリーン関数はBoore¹²⁾による方法により作成し、統計的グリーン関数法¹³⁾を用いて波形合成を行った。波形合成結果を表4に示すが、分岐断層モデルによってもこれらの地点の振幅は改善されていることがわかる。

表-3 合成波形と観測波形との相関係数の比較
(分岐断層モデルによる結果を1.0としたときの基準化された相関係数)

	KBU		MOT		AMA		SOK		FKS	
	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
修正釜江-入倉モデル	1.00	1.01	0.92	0.88	0.87	0.67	0.56	0.58	1.12	0.81
分岐断層モデル	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

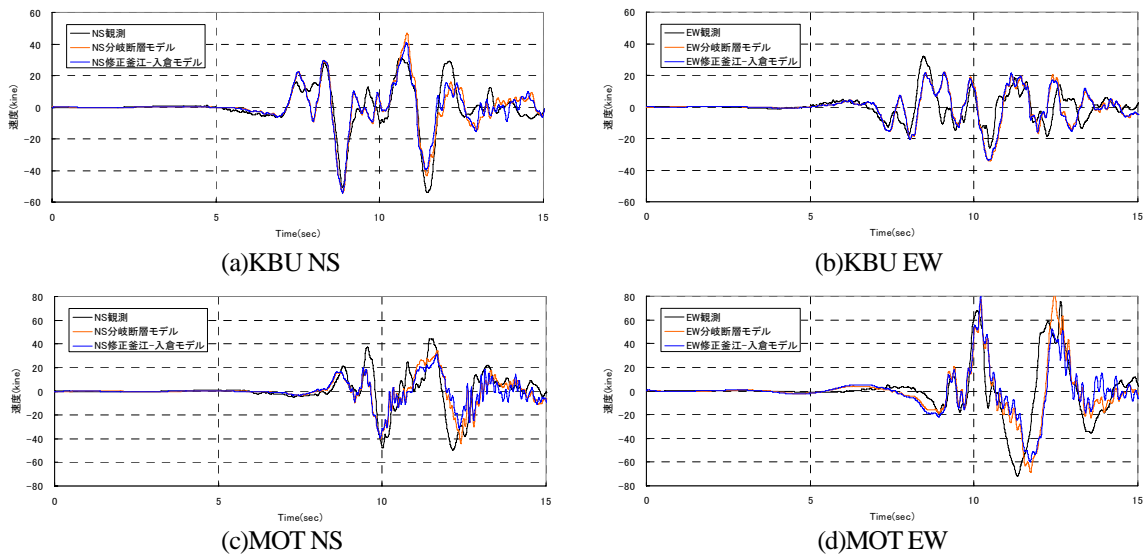
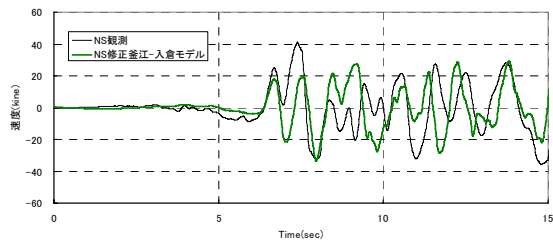
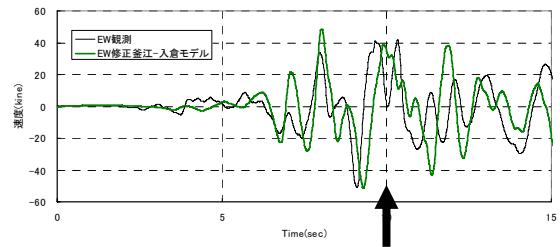


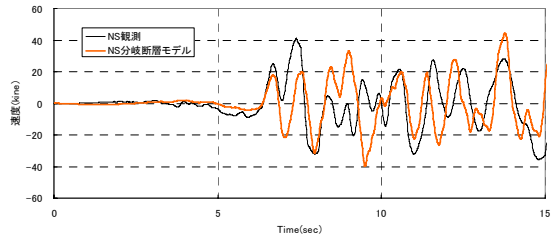
図-6 KBU と MOT における波形合成結果と観測記録との比較



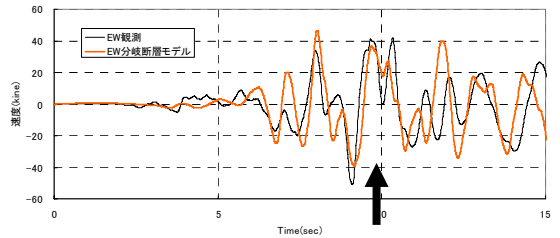
(a)AMA NS(修正釜江-入倉モデル)



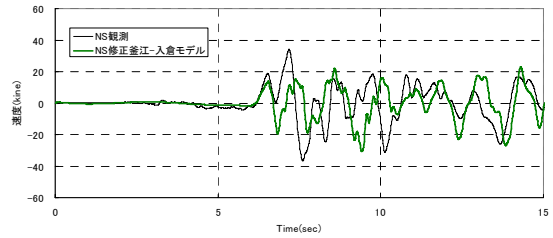
(b)AMA EW(修正釜江-入倉モデル)



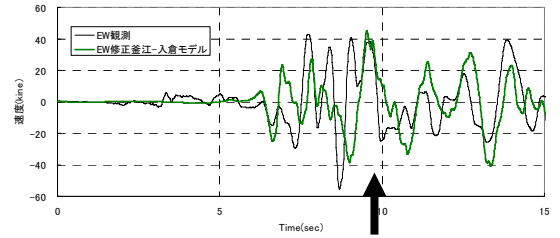
(c)AMA NS(分岐断層モデル)



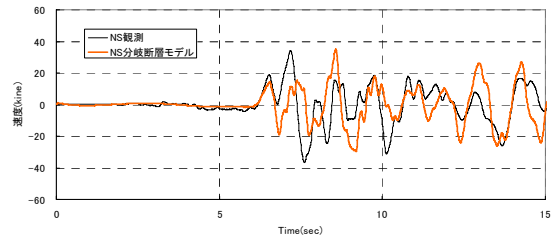
(d)AMA EW(分岐断層モデル)



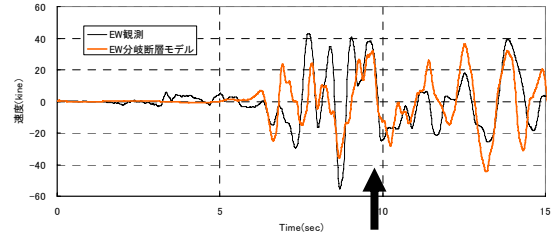
(e)SOK NS(修正釜江-入倉モデル)



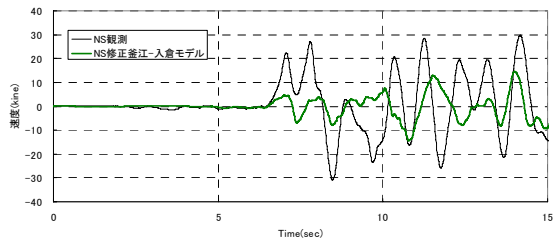
(f)SOK EW(修正釜江-入倉モデル)



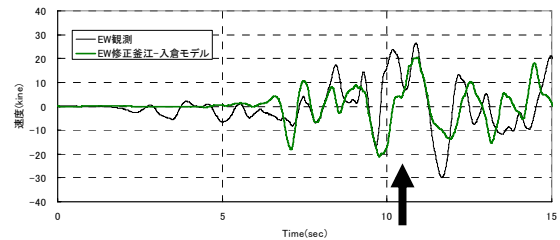
(g)SOK NS(分岐断層モデル)



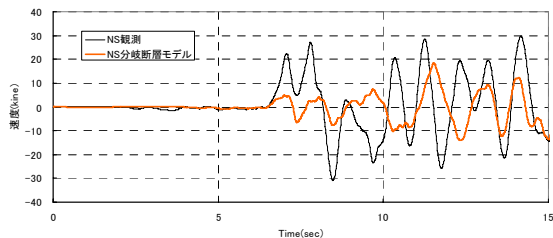
(h)SOK EW(分岐断層モデル)



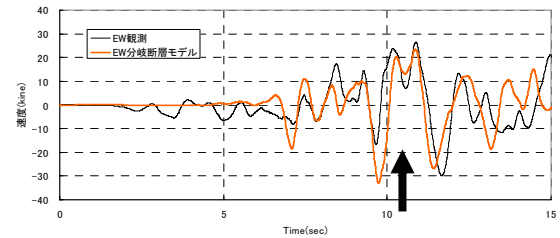
(i)FKS NS(修正釜江-入倉モデル)



(j)FKS EW(修正釜江-入倉モデル)

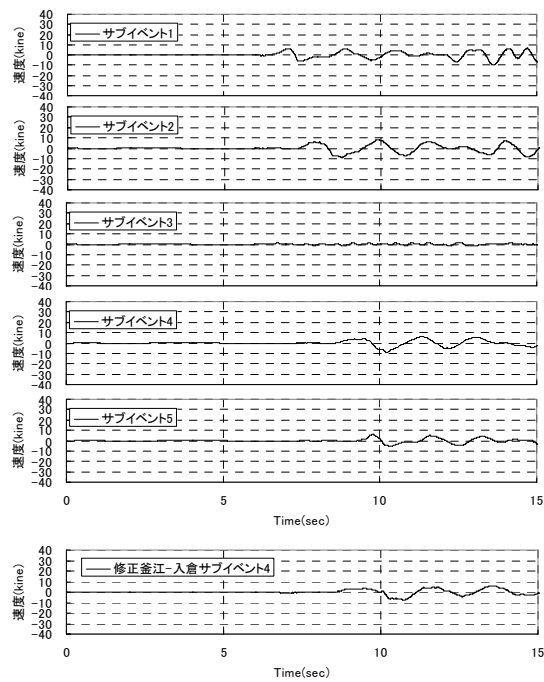


(k)FKS NS(分岐断層モデル)

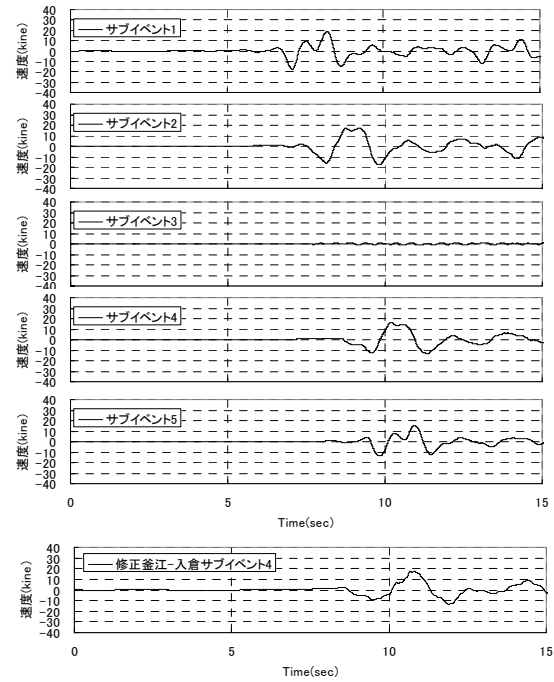


(l)FKS EW(分岐断層モデル)

図-7 AMA、SOK、FKS における波形合成結果と観測記録との比較

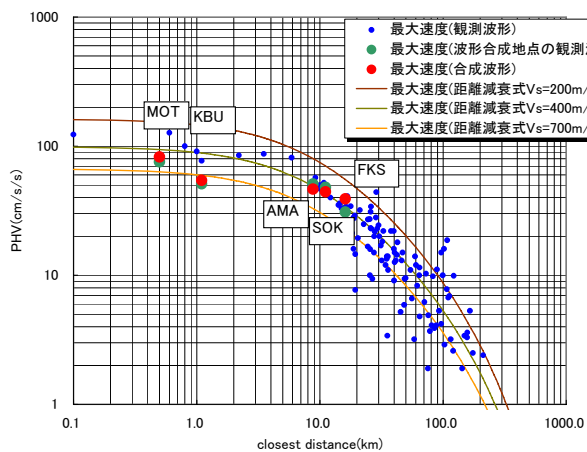


(a)FKS NS

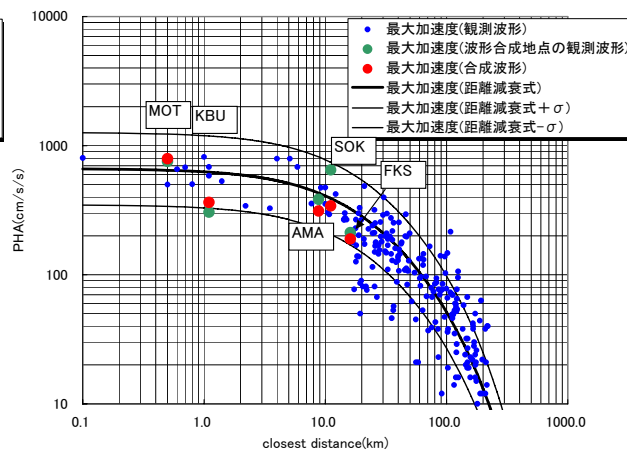


(b)FKS EW

図-8 分岐断層モデルによる各サブイベントからの速度合成波形

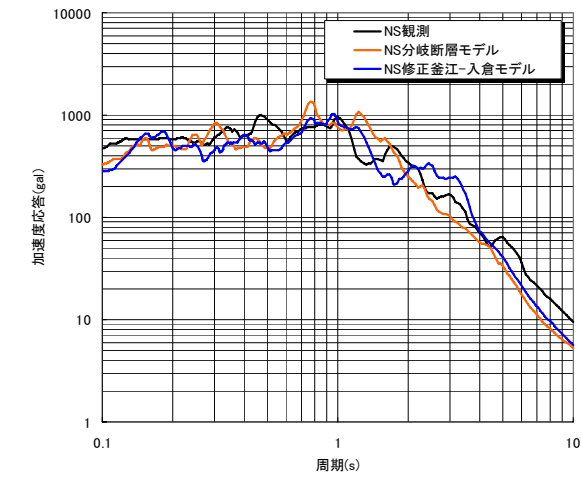


(a) 最大速度

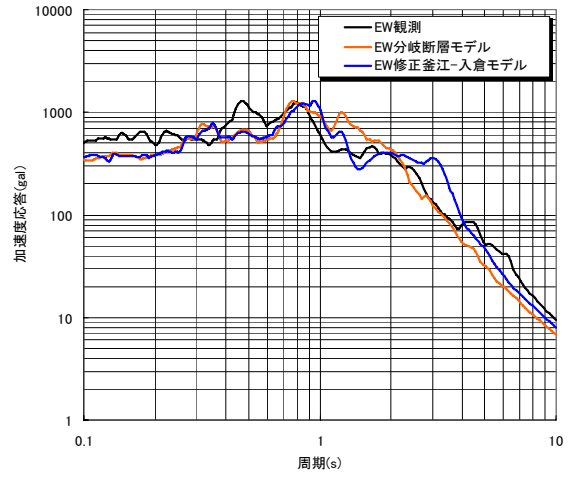


(b) 最大加速度

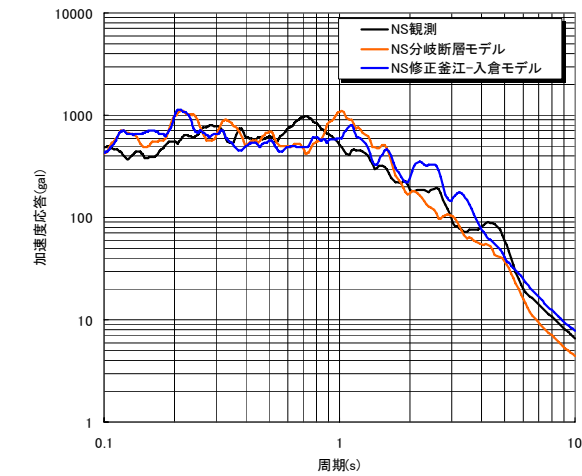
図-9 距離減衰式との比較



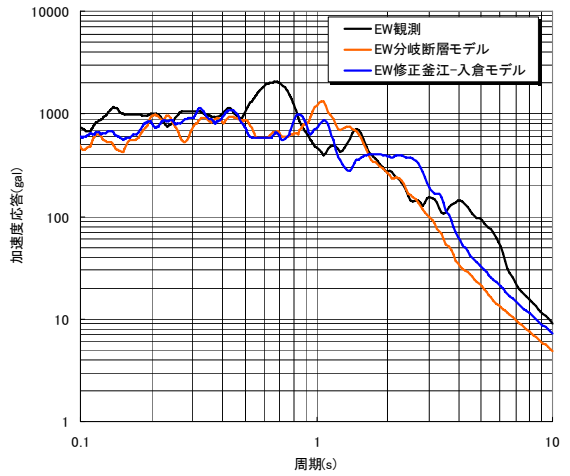
(a)AMANS



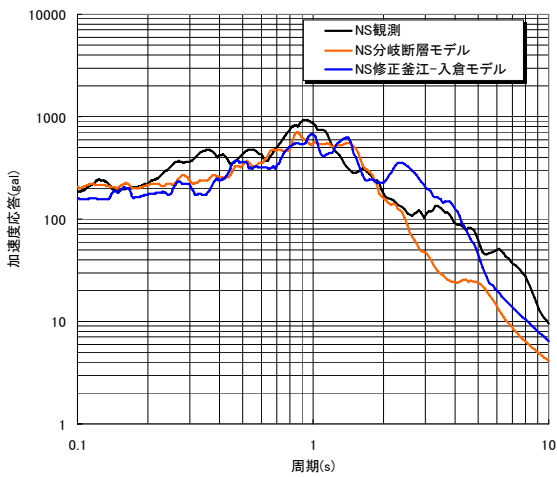
(b)AMA EW



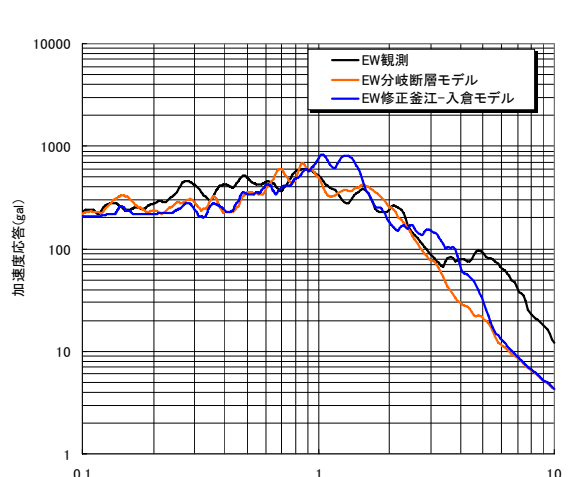
(c)SOK NS



(d)SOK EW



(e)FKS NS



(f)FKS EW

図-10 応答スペクトルの比較

表4 箕面川ダムおよび一庫ダムにおける波形合成結果の比較
(釜江-入倉モデルによる結果を1.0としたときの合成波形の最大値)

	箕面川ダム		一庫ダム	
	最大速度	最大変位	最大速度	最大変位
釜江-入倉モデル	1.0	1.0	1.0	1.0
修正釜江-入倉モデル	2.1	2.2	1.8	2.2
分岐断層モデル	1.5	1.6	1.3	1.4

4. おわりに

兵庫県南部地震の強震動推定のための既往の断層モデルによる合成波形は、本山や神戸大の観測点の観測波形と整合しているが、尼崎市など断層東側の観測点の観測波形との整合については、十分考慮されているわけではなかった。本研究では、震源インバージョン結果による新たな知見をとりいれて、既往の断層モデルを修正し、強震動推定に用いるための分岐断層モデルとして提案した。分岐断層モデルを用いた結果と既往の断層モデルを用いた結果とを比較し、分岐断層モデルの妥当性を評価した結果、断層東側にある尼崎市の観測点等における兵庫県南部地震の強震動がより精度よく再現できるようになった。今後、兵庫県南部地震で被害を受けた構造物の破壊メカニズムの解明や地震時挙動解析においてもより精度の高い結果を得ることが期待される。

謝辞

関西地震観測研究協議会および関西電力電力技術研究所の地震観測記録を使用させて頂きました。3名の査読者からの意見は本稿の不備を改善する上で大いに役立ちました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Irikura, K. : Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, Proceedings of the 7th Japan Earthquake Engineering Symposium, 1986, pp.151-156.
- 2) 池田隆明, 三輪滋, 釜江克宏, 入倉孝次郎 : 経験的グリーン関数法を用いた 2000 年鳥取県西部地震の震源のモデル化と強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, No.561, 2002, pp.37-45.
- 3) 三宅弘恵, 岩田知孝, 入倉孝次郎 : 経験的グリーン関数法を用いた 1997 年 3 月 26 日(MJMA6.5)及び 5 月 13 日(MJMA6.3)鹿児島県北西部地震の強震動シミュレーションと震源モデル, 地震, Vol.51, No.4, 1999, pp.431-442.
- 4) Kamae, K, Irikura, K : Source Model of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake and Simulation of Near-Source Ground Motion, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.88, 1998, pp.400-412.
- 5) Sekiguchi, H., Irikura, K., Iwata, T., Kakehi, Y., Hoshiba, M. : Minute Locating of Faulting beneath Kobe and the Waveform Inversion of the Source Process during the 1995 Hyogo-ken Nanbu, Japan, Earthquake Using Strong Ground Motion Records, J. Physics Earth, 44, No.5, 1996, pp.473-487.
- 6) 山田雅行, 平井俊之, 岩下友也, 釜江克宏, 入倉孝次郎 : 兵庫県南部地震の震源モデルの再検討, 日本地震学会講演予稿集, 1999 年度秋季大会, 1999, A14.
- 7) Sekiguchi, H., Irikura, K., Iwata, T. : Source Inversion for estimating the continuous slip distribution on a fault-introduction of Green's functions convolved with a correction function to give moving dislocation effects in subfaults, Geophys. J. Int., Vol.150, 2002, pp.377-391.
- 8) 入倉孝次郎, 関口春子, 香川敬生 : 経験的グリーン関数法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, 1997 年度秋季大会, 1997, pp.54
- 9) 松島信一, 川瀬博 : 1995 年兵庫県南部地震の複数アスペリティモデルの提案とそれによる強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第 534 号, 2000, pp. 33-40.

10) Somerville P.G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, and A. Kowada : Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismological Research Letters*, 70, 1999, pp. 59-80.

11) Fukushima, Y., Irikura, K., Uetake, T., Matsumoto, H. : Characteristics of Observed Peak Amplitude for Strong Ground Motion from the 1995 Hyogoken Nanbu (Kobe) Earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.90, 2000, pp.545-565.

12) Boore, D.M. : Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, 1983, pp. 97-104.

13) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長 : 地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測 統計的波形合成法による予測, *日本建築学会構造系論文報告集*, No.430, 1991, pp.1-10.

(受理 : 2005 年 9 月 6 日)
(掲載決定 : 2006 年 5 月 11 日)

Simulation of Strong Ground Motion due to the 1995 Hyogo-ken-Nanbu Earthquake by using Characterized Source Model with Branch Fault

HIRAI Toshiyuki¹⁾, KAMAE Katsuhiko²⁾, NAGANUMA Toshihiko³⁾,
ITO Shinichiro⁴⁾, NISHIOKA Tsutomu⁵⁾ and IRIKURA Kojiro⁶⁾

1) Member, NEWJEC.,Inc.

2) Member, Kyoto University Research Reactor Institute, Dr. Eng.

3) Member, Hanshin Expressway Management Technology Center, Dr. Eng.Sci.

4) Member, Honshu-Shikoku Bridge Expressway Company Limited

5) Member, Hanshin Expressway Company Limited, Dr. Eng

6) Member, Aichi Institute of Technology Disaster Prevention Research Center, Dr. Sci.

ABSTRACT

We propose an improved fault model of the Hyogo-ken Nanbu Earthquake for which an asperity is placed on the branch fault(branch fault model). The branch fault model is based on the result of source inversion which suggests that the rupture of the fault propagated also to the branch fault on the way. The result of the ground motion simulation by using the branch fault model agree better with observed motions than the results by using the previous fault model, for the sites located east of the fault for which the branch fault contributes much.

Key Words: the Hyogo-ken Nanbu Earthquake, Branch Fault ,Characterized Source Model, Empirical Green's Function Method, Broadband Strong Ground Motion