

震源過程モデルによる兵庫県南部地震の強震記録の再現性

東京大学 瀬瀬一起・吉田真吾¹
東京電力 植竹富一²

Yoshida *et al.* (1995) は地殻変動、強震動、遠地実体波という3種類のデータセットを用いて同時インバージョンを行っており、ここでは彼らの震源過程モデルについて検討する。Yoshida *et al.* (1995) は神戸市内で観測された強震記録のうち、比較的地盤が良いと思われる神戸気象台、神戸大と、地中深く表層の影響が少ないと思われるポートアイランド-83mの記録を、1 Hz以下の速度記録として用いている。当然のことながら、得られたモデルを用いてこれらの記録を再現してみると、神戸気象台の上下動を除いて観測記録によく一致する。しかし用いることのできなかった葦合や新神戸変電所の記録などでは、よく再現できているとはいえない。神戸市内の強震記録、特にその第二波には神戸側断層のすべり分布が大きく影響している。そこでここではさらに多くの強震記録を、地盤構造を考慮しながらインバージョンに導入し、神戸側断層のより詳細な震源過程モデルを求めることをめざす。

1. はじめに

兵庫県南部地震のように強震動を再現すべき地域と震源断層が非常に近い場合、その断層の大きさを無視して点震源を仮定することはできない。しかも断層運動は断層全面で同時に起こるのではなく、ある破壊開始点から徐々に全体へ伝播していくことが、多くの地震で知られている。そこで想定される断層面に沿って点震源を並べて断層モデルを作るだけでなく、それぞれの点震源の破壊時刻に断層運動の伝播を考慮しなければならない。こうした震源断層のモデル化は震源過程 (source process, rupture process) モデルと呼ばれ、兵庫県南部地震に対しても各種の地震学的、あるいは測地学的データから逆問題 (インバージョン, inversion) を解くことによりすでにいくつかのモデルが提案されている。

インバージョンに用いられたデータは

1. GPS や水準測量による地殻変動データ^{1,2}
2. 海外の地震計で観測された遠地実体波
3. 震源に近い強震計で観測された強震記録

に大別される。1のデータセットを単独に用いたインバージョンは Hashimoto *et al.* ¹⁾が、2では

菊地²⁾が、3では Ide *et al.* ³⁾と Sekiguchi *et al.* ⁴⁾が行っている。また、堀川・他⁵⁾は1と3、Wald⁶⁾が2と3の両方を同時に用いてインバージョンしている。それぞれのデータセットは断層運動を異なった周期帯で見ている (1から3へ短周期になる) が、単独に用いた結果は相互に大筋でよく一致しているため、基本的に断層運動は周期帯によらず相似であると考えられる。したがって1~3のすべてのデータセットを用いた Yoshida *et al.* ⁷⁾の結果が震源過程の全体像をもっともよく表していると考えられよう。ここではその結果から強震記録がいかに再現されるかを、モデルを改良しながら考察する。

2. 震源過程のモデル化

Yoshida *et al.* は京大防災研 (神戸側) と緊急調査ネット (淡路側) による余震分布 (図1)、および活断層地図⁸⁾や地殻変動の水平変位パターンを参考にして、神戸側と淡路側に $36 \times 16 \text{ km}^2$ と $24 \times 16 \text{ km}^2$ のふたつの断層面を想定した。図1右側の断面図から断層面はほぼ垂直と考えられるが、両側とも多少の傾斜が見えており、神戸側が西向き 85° 、淡路側が東向き 75° に取られた。これら断層面は $4 \times 4 \text{ km}^2$ の小断層に分割され、それぞれの小断層による地殻変動や地震動はその中心におかれた double couple の点震源で代表されるとする。

¹東京大学地震研究所, 03-3812-2111

²東京電力原子力研究所, 045-585-8983

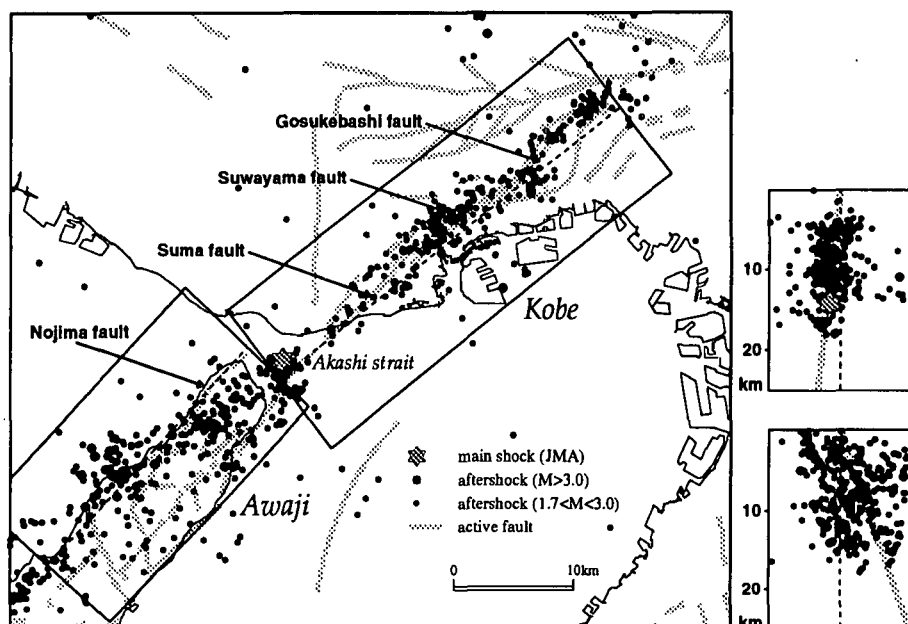


図1. 京大防災研と緊急調査ネットによる余震分布

さらに、図2のように断層の傾斜角を δ 、下盤に対する上盤のすべり角を λ とし、断層の走向 (x 軸方向) に対する観測点の方位と距離が θ と r であるとする。この時、double couple の点震源による r ,

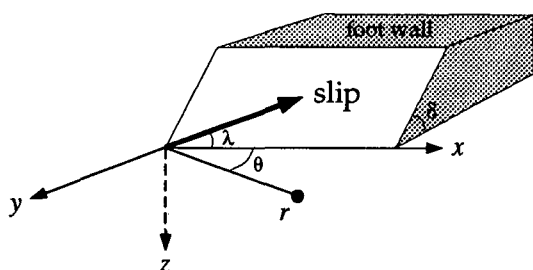


図2. 点震源のパラメータ

構造から決まる。また Λ_l は

$$\begin{aligned} \Lambda_0 &= 1/2 \sin \lambda \sin 2\delta \\ \Lambda_1 &= \cos \lambda \cos \delta \cos \theta - \sin \lambda \cos 2\delta \sin \theta \quad (2) \\ \Lambda_2 &= 1/2 \sin \lambda \sin 2\delta \cos 2\theta + \cos \lambda \sin \delta \sin 2\theta \end{aligned}$$

という形をしており、 r および z 方向変位の方位特性 (radiation pattern) を規定していると同時に、その θ 微分は θ 方向変位の方位特性を規定している。

兵庫県南部地震はほぼ垂直な断層で、すべりは基本的に右横ずれであると言われているので、ここで $\delta = 90^\circ$, $\lambda = 180^\circ$ とおくと、 Λ_1 とその微分は Λ_2 と $\partial\Lambda_2/\partial\theta$ を除いてすべて 0 になり、残った二項は

$$\begin{aligned} \Lambda_2 &\propto \sin 2\theta \\ \partial\Lambda_2/\partial\theta &\propto \cos 2\theta \quad (3) \end{aligned}$$

という方位特性を持っている。兵庫県南部地震に

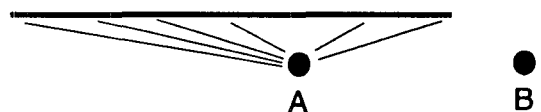


図3. 震源断層と想定地点の位置関係

対する神戸市内のように、想定地点と震源断層との距離が断層の長さには比べ小さい時 (図3のA地点)、断層上のほとんどの点震源に対して方位角 θ は 0° または 180° に近い値を持っている。この場合、

θ, z 方向の変位の周波数スペクトルは、すべりの時間関数を除いて

$$\begin{aligned} \bar{u}_r &= \sum_{l=0}^2 \Lambda_l \int_0^\infty \left(\frac{U_l}{ik} \frac{\partial J_l}{\partial r} + l^2 V_l \frac{J_l}{r} \right) dk \\ \bar{u}_\theta &= \sum_{l=0}^2 \frac{\partial \Lambda_l}{\partial \theta} \int_0^\infty \left(\frac{U_l}{ik} \frac{\partial J_l}{\partial r} + l^2 V_l \frac{J_l}{r} \right) dk \\ \bar{u}_z &= \sum_{l=0}^2 \Lambda_l \int_0^\infty W_l J_l dk \quad (1) \end{aligned}$$

で表現される⁹⁾。ここで J_l は kr を変数とする l 次 の Bessel 関数で、それぞれに対応した P-SV 波の Fourier-Bessel スペクトル U_l, W_l と、SH 波の Fourier-Bessel スペクトル V_l は震源の深さと地下

$\cos 2\theta \sim 1$ であるのに対して $\sin 2\theta \sim 0$ であるから、A地点における地震動はほとんど u_θ で構成されている。しかも $\theta \sim 0^\circ$ or 180° であるから、その震動方向は断層に垂直な方向になる。実際、震源断層に近い強震速度記録の粒子軌跡を描かせた図4では、明らかに断層に垂直な方向の震動が卓越している。この傾向は断層から離れるに従って明瞭でなくなるが、 u_θ が卓越する θ の条件が満たされなくなることで、複雑な地下構造を伝播するうちに単純な傾向が乱されてしまうのが原因と思われる。

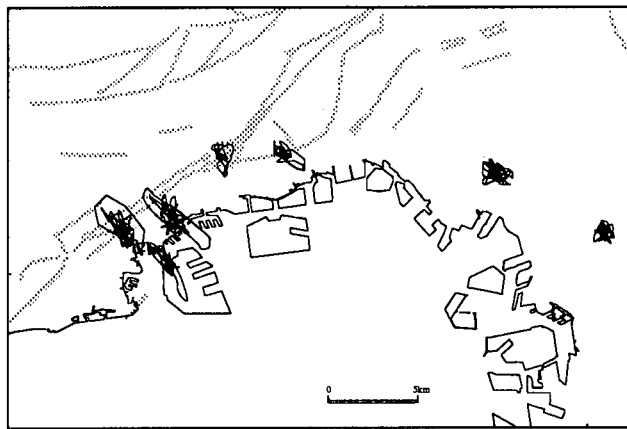


図4. 速度記録の粒子軌跡

一方、図3のBのように断層からややはずれるが、その延長方向にある地点では、断層上のすべての点震源に対して $\theta \sim 0^\circ$ になる。したがって距離は遠くなるものの、点震源から到来するすべての地震波が *in phase* になるので、やはり断層に垂直方向に大きな地震動を持つが、この傾向は、断層の破壊伝播が想定地点に向かっている時、地震波の建設的な干渉が起こってより顕著になる。こうした断層破壊伝播の方向に依存した地震動の増幅 (*directivity*) は、たとえば各地の最大加速度値、速度値が兵庫県南部地震の震源断層の延長上で、それ以外の方向より大きくなっていることに現れている (図5)。

以上のように、単に地震動記録の震動方向を見たり、最大加速度値の分布を見るだけで、兵庫県南部地震の震源断層が横ずれであり、断層面の破壊伝播が北東方向に進んだということがわかる。しかし震源過程の詳細を得るためには、種々のデータを定量的に評価することが必要なのは言うまでもない。

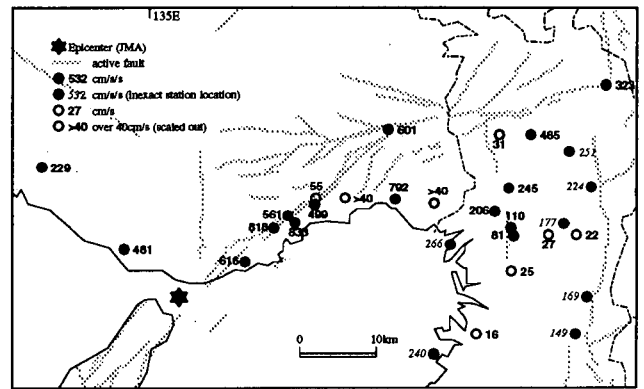


図5. 各地の最大加速度値・最大速度値

3. Yoshida *et al.* の震源過程モデル

震源断層は大局的に右横ずれであったが、たとえば神戸の海岸線沿いに行われた水準測量では大きな上下変動が観測されており、ある程度の縦ずれ成分も含まれている。そこで Yoshida *et al.* は各点震源のすべりベクトルを $\lambda = 145^\circ$ と 225° のふたつのベクトルの組み合わせで表現し、断層運動は明石海峡下の気象庁による震源付近から神戸と淡路に向かって伝播したと仮定して、それぞれのベクトルの大きさをインバージョンで求めた。用いたデータは図6に■で示したGPS観測点での水平変動 (一部、上下変動も) と水準測量測線 (海岸線沿いの太線) に沿った上下変動、および○で示した強震観測点における速度波形記録である。海外17観測点での変位波形記録も合わせて用いられた。

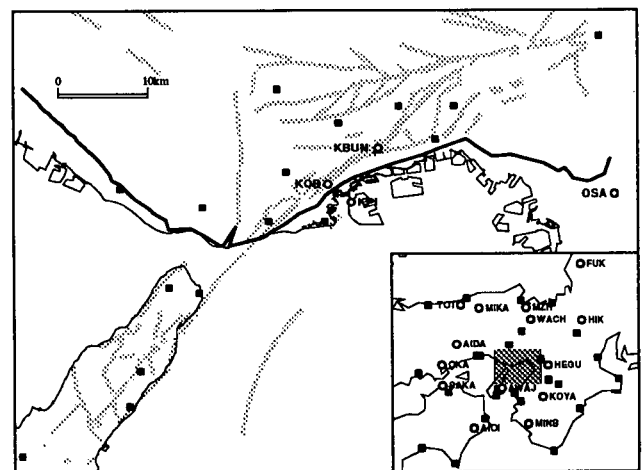


図6. GPSと強震計の観測点

図7が得られた断層面上のすべり分布である。すべりは淡路島の浅い部分と明石海峡の震源近傍の深い部分で大きく、神戸側の浅い部分では小さい。

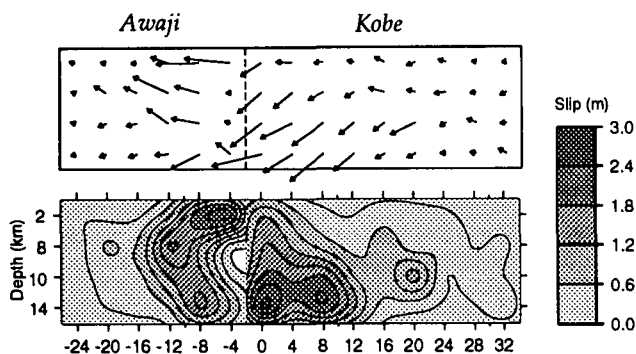


図7. Yoshida *et al.* による断層面上のすべり分布

また、淡路島の浅い部分は東側が上向きの、明石海峡と神戸側の深い部分は下向きの縦ずれ成分を持っている。このモデルから理論的に計算される変動量と観測値を比較すると（図8）、水平変動、上下変動とも両者はよく一致している。なお、ここでは想定した断層モデルの地表への投影も併せて示してある。

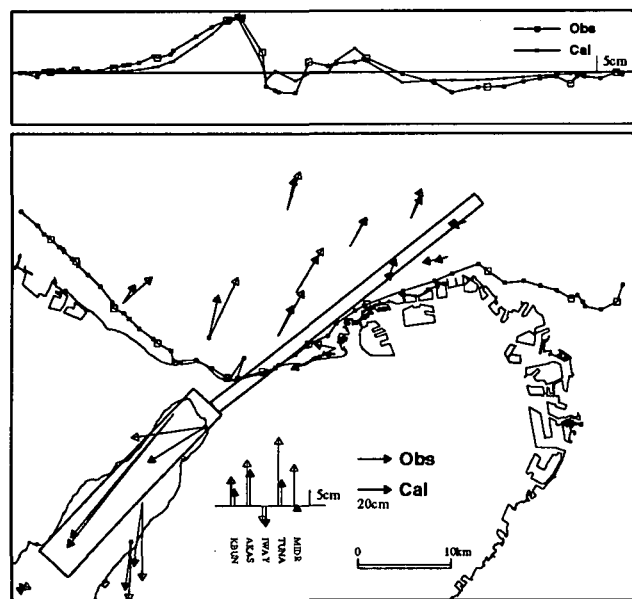


図8. 地殻変動の観測値と計算値

4. 強震動の再現性

Yoshida *et al.* は神戸市内で観測された強震記録のうち、比較的地盤が良いと思われる神戸海洋気象台 (KOB)、神戸大 (KBU) と、地中深く表層の影響が少ないと思われるポートアイランド-83mの記録 (KPI) を、1 Hz 以下の速度記録として用いている。短周期側に 1.5 Hz まで取った場合も計

算されているが、あまり良好な結果は得られておらず、震源過程モデルを用いて決定論的に速度記録を再現する場合、こちら辺が限界と思われる。

当然のことながら、得られたモデルを用いてこれらの記録を再現してみると基本的に観測記録（点線）によく一致する（図9）。しかし KOB や KBU

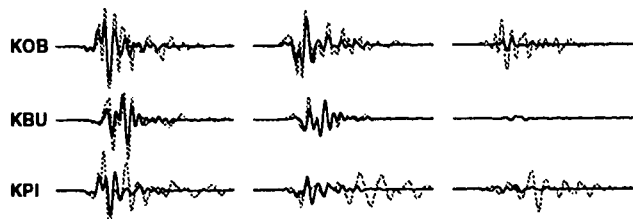


図9. 解析に用いられた記録と合成波形 (NS, EW, UD)

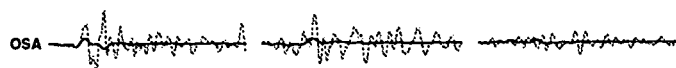


図10. OSA における記録と合成波形 (NS, EW, UD)



図11. Yoshida *et al.* が使っていない記録と合成波形

に比べると、KPI ではあまり良い一致が得られていない。同様の不一致は大阪平野の中にある大阪管区気象台 (OSA) の記録にも見られるので（図10、ただし遠方であるので 0.4 Hz でハイカット）、その原因は、理論波形の計算に用いられた基盤の露頭した速度構造モデルが KPI や OSA では適切でなかったことによると思われる。

また、インバージョンに用いることのできなかった葺合 (FKA) や新神戸変電所 (SKB) の観測記録が、Yoshida *et al.* の震源過程モデルで再現できるか否かを試みてみた。図11に見るようによく再現できるとはいい難い。震源過程モデルのどの部分が強震記録に貢献しているか見ると（図12）、KBU については直下の深い部分にやや大きいすべりを与えて第二波の再現を行なっている。多くの強震記録を再現するためには速度構造の考慮とともに、同様の調整を広く行なう必要がある。なお、KOB の上下動記録は合成波形に比べ数倍の振幅を持っているが、この点に関しては六甲から海岸線に到る傾斜構造が非常に強く上下方向地震動

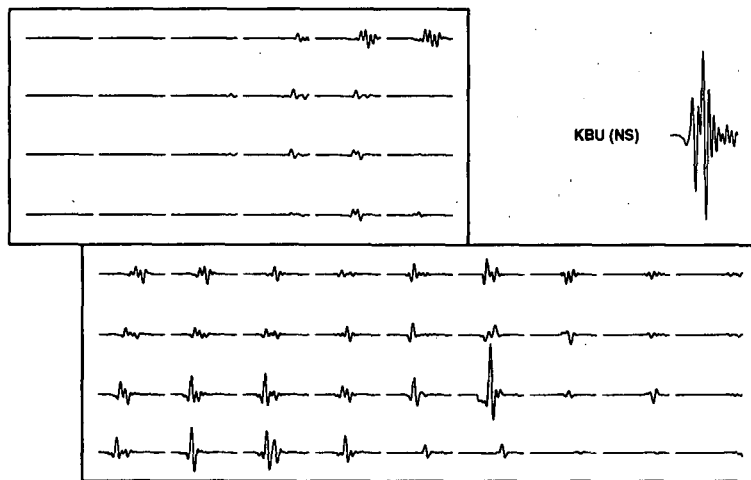


図 12. KBU に対する要素波

を増幅するというシミュレーション結果¹⁰⁾が出ているので、ここでは特に考慮しないことにする。

5. 震源過程モデルの改訂

前節で述べた Yoshida *et al.* のモデルの欠点を改善すべく、インバージョンをやり直した。まず速度構造の影響については、Sekiguchi *et al.*⁴⁾ が余震などの観測記録と理論波形を比べることにより速度構造を決め直しているのので、そこで与えられている地点については彼らの速度構造モデルを用いることにした。Sekiguchi *et al.* が求めてはいないが、市街地の堆積層上にあることがわかっている KPI, FKA については、同じような地盤条件にあると思われる尼崎第三発電所 (AM3) に対する彼らのモデルを用いると同時に、AM3 と SKB における速度記録をデータとして追加した。また、KPI の -83m の地震計は 12°ほど方位がずれている可能性があるという報告¹¹⁾があるので、それに従って記録を正しい方位に戻すとともに、理論波形の計算では観測点が地中に埋まっている効果も考慮した。こうして得られた新しい震源過程モデルが図 13 である。先のモデルに比べると明石海峡下の破壊開始点付近のすべり量が大きくなるとともに、大きなすべりの領域はそこから神戸側の深い部分に連続的に広がるようになった。このモデルによれば KPI や FKA の記録も、図 14 のように合成記録とよく一致するようになる。また、OSA における長周期で継続時間の長い後続波もよく再現できるようになった。

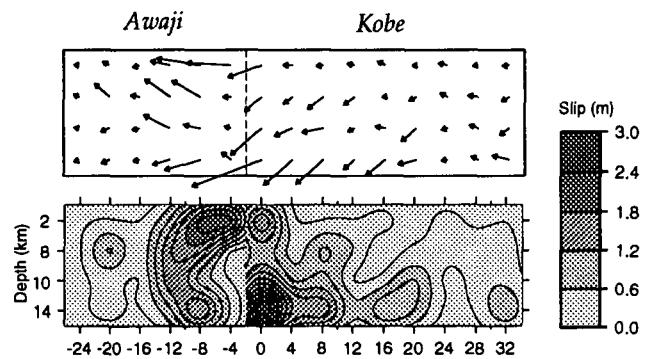


図 13. 新しい震源過程モデルにおけるすべり分布

謝辞 波形記録に関しては関西地震観測研究協議会、大阪ガス、関西電力のご協力をいただきました。記して感謝致します。

参考文献

- [1] Hashimoto, M., T. Sagiya, H. Tsuji, Y. Hatanaka and T. Tada: Coseismic displacements of the 1995 Kobe earthquake, *J. Phys. Earth*, submitted.
- [2] 菊地正幸: 兵庫県南部地震の震源過程モデル-遠地の地震波解析速報-, *地質ニュース*, **486**, pp12-15, 1995.
- [3] Ide, S., M. Takeo and Y. Yoshida: Source process of the 1995 Kobe earthquake: Determination of spacio-temporal distribution by Bayesian modeling, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, submitted.
- [4] Sekiguchi, H., K. Irikura, T. Iwata, Y. Kakehi and M. Hoshiba: Minute locating of fault planes and source process of the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe), Japan earthquake from the waveform inversion of strong ground motion, *J. Phys. Earth*, submitted.

- [5] 堀川晴央・平原和朗・梅田康弘・橋本 学・草野富二雄: 強震記録と測地データから見た兵庫県南部地震の震源過程, 日本地震学会講演予稿集, 2, P42, 1995.
- [6] Wald, D. J.: Slip history of the 1995 Kobe, Japan, earthquake determined from strong motion, teleseismic and geodetic data, *J. Phys. Earth*, submitted.
- [7] Yoshida, S., K. Koketsu, B. Shibazaki, T. Sagiya, T. Kato and Y. Yoshida: Joint inversion of the near- and far-field waveforms and geodetic data for the rupture process of the 1995 Kobe earthquake, *J. Phys. Earth*, submitted.
- [8] 活断層研究会: [新編] 日本の活断層, 東京大学出版会, 1991.
- [9] Harkrider, D. G.: Potentials and displacements for two theoretical seismic sources, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 47, pp97-133, 1976.
- [10] 川瀬 博・林 康裕: 兵庫県南部地震時の神戸市中央区での基盤波の逆算とそれに基づく強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 投稿中.
- [11] 川瀬 博・佐藤智美・福武毅芳・入倉孝次郎: 兵庫県南部地震による神戸市ポートアイランドでのボアホール観測記録とそのシミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 475, pp83-92, 1995.

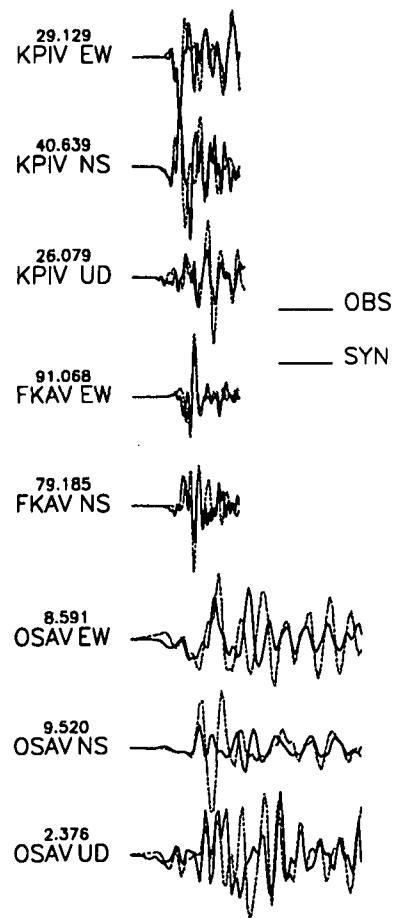


図 14. 観測記録と新モデルによる合成波形

Reproducibility of strong motion records of the Hyogo-ken Nambu earthquake by a rupture process model

K. Koketsu, S. Yoshida and T. Uetake

The rupture process model of the 1995 Kobe earthquake by Yoshida *et al.* (1995) is revised to simulate velocity seismograms below 1Hz. The underground velocity structures have been modified, and several waveform data have been additionally included. Synthetic seismograms generated with this new rupture process model well agree to observed records even at sites on deep sediments.