

断層すべり方向と継続時間を考慮した鹿児島県北西部地震の地震動の再現

SYNTHESIS OF STRONG GROUND MOTION FOR THE 1997 KAGOSHIMAKEN-HOKUSEIBU EARTHQUAKE

大角恒雄*・原田隆典**

Tsuneo OHSUMI and Takanori HARADA

In this paper, the motions from small earthquakes are produced by a stochastic model where the spectrum amplitude is given from a stochastic source model with ω^{-2} property and the duration of motion depends on the observer relative to the fault. By summing the simulated motions and making use of the scaling relations between large and small earthquakes, the ground motions from an extended rupture too large to be treated as a point source model are simulated. As a verification of the proposed method, simulated ground motions are compared with the K-Net recorded ground motions during the Kagoshimaken-hokuseibu earthquake (M6.3, 1997)

Key Words : Green's functions, stochastic simulation, empirical simulation, Kagoshimaken-hokuseibu earthquake

1. まえがき

観測された地震動記録には、震源の影響と、震源から観測点までに地震波が伝播する影響が反映されている。したがって、大地震による地震動を予測する場合に、大地震の震源近くで発生した同じような震源特性を持つ小地震の観測波形を用いると、この観測波形にはすでに地震波の伝播特性が反映されているので、あとはこの小地震と予測の対象である大地震の震源特性の違いのみを修正すればよいことになる。したがって、このような経験的グリーン関数法の長所は、小地震による観測波形をグリーン関数として用いるところにある。しかし、本文では、確率論的震源モデルによる波形をグリーン関数として用い、大地震の断層破壊伝播、断層の大きさと観測点の幾何学的関係等を考慮して大地震による強震動波形を合成する。経験的グリーン関数法は、現実地盤における地震波の伝播特性を評価しているという長所を有するが、本方法では、この伝播特性が近似的に評価されるが、従来の方法のように大地震の断層破壊伝播特性や観測点との幾何学的関係が考慮されるという

点に加えて、グリーン関数として用いることのできる適切な観測波形がない建設地点においても震源特性を考慮した強震動の波形合成が可能となる。このような本方法の考え方は、すでにIrikura¹⁾、Joyner and Boore (1986)²⁾、釜江・他(1991)³⁾、佐藤・他(1994)⁴⁾、原田・他(1995)⁵⁾が示しているが、上述したように地震波の伝播特性が近似的に評価されるという弱点があり、また、小地震によるグリーン関数に断層破壊方向と継続時間の関係が考慮されていないため、これらの適用に当たっては、用いたモデル・パラメータとの関係を明確にしなが、実地震波形との比較を通じて問題点や有効性を検討しておかなければならない。そこで、本文では、提案モデルによる合成波形と実地震による観測波形を比較してモデルの適用性を検討した。

そこで本文では、小地震によるグリーン関数において断層すべり方向と継続時間を考慮し、鹿児島県北西部地震(M=6.3、1997.3.26)を再現した。比較検討では、余震(M=3.8、1997.3.27)による観測波形を用いる経験的グリーン関数法並びに、一様確率分布位相角を有する正弦波の級数和から計算するShinozuka・他⁶⁾の手法から計算した波形をグリーン関数として用いる確率論的グリーン関数法⁷⁾により本震の記録を再現し、防災科学技術研究所の地震観

* 中央研究所 開発研究部 主任研究員

** 宮崎大学教授 工学部土木環境工学科 工博

測ネット (K-Net) で得られた観測波形と比較検討することとした。

2. モデルの概要

2.1 グリーン関数を用いた強震動の波形合成法

小地震の地震動 $u_0(x, \omega)$ から近似的に大地震の地震動 $u(x, \omega)$ を求める計算式は次式で与えられる (Figure. 1)

$$u(x, \omega) = \sum_{m=1}^{N_L} \sum_{n=1}^{N_w} \frac{R_0}{R_{mn}} T_{mn}(\omega) e^{i\omega(\tau_{mn} - t_{mn})} u_0(x, \omega) \quad (1)$$

この式やそのパラメータの詳細は原田・他 (1995) に譲るが、ここでは、後述の観測波形との比較において重要と思われる高振動数地震波に関する本モデルの特徴を記述する。

式(1)を時間領域に変換したものは、Irikura (1986) と一致するが、伝達関数 $T_{mn}(\omega)$ の評価が異なる。伝達関数 $T_{mn}(\omega)$ とは、大地震と小地震のすべり速度時間関数の違いを表す伝達関数であり、本論文では、次式のものを用いる。

$$T_{mn}(\omega) = \left[\frac{i\omega + \frac{N}{\tau}}{i\omega + \frac{1}{\tau}} \right] \left[\frac{1 + \kappa \left(\frac{\omega\tau}{2}\right)^2}{1 + \left(\frac{\omega\tau}{2}\right)^2} \right], \quad \left(\frac{M_0}{m_0}\right)^{1/3} = N, \quad \tau_{mn} = \frac{\xi_{mn}}{V_R}, \quad t_{mn} = \frac{R_{mn} - R_0}{C_S} \quad (2)$$

ここに、 V_R は断層の破壊速度、 C_S はS波の伝播速度を表わす。式(2)の提案モデルは、指数関数形のすべり時間関数を採用し、震源スペクトルの高振動数領域の値を N によってコントロールできるモデルである。地震断層の破壊による高振動数地震波は、断層のすべりがスムーズでないこと、断層面上においてすべり量や応力降下量が一様でないこと、断層破壊速度が一定でないこと等によって発生することが考えられるが、これらの断層破壊の不均質性を取り入れた種々の物理モデルが提案されている。ここで重要な点は、

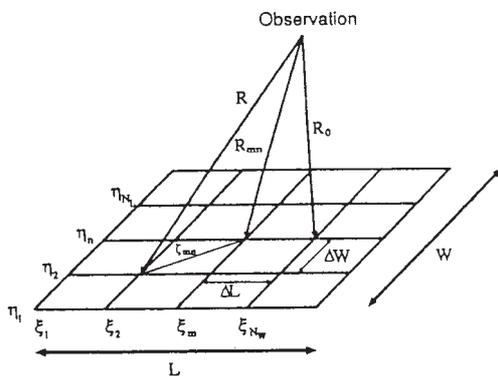


Figure. 1 Schematic diagram of the Green's function method and its notation

このような断層破壊の不均質性の影響が混在した結果として地震動が観測されるため、記録の解析から一義的に、高振動数地震波に影響するこれらの種々の不均質性を分離することは不可能である。したがって、これらの物理現象を決定論的に仮定して、地震動予測を行なうことは困難である。そこで、現状では経験的に予測できるような簡易なモデルが工学的に意義があるので、これらの断層破壊の不均質性を考慮する因子として、 N によって震源スペクトルの高振動数成分が調整可能な式(2)の $T_{mn}(\omega)$ の右辺の第2因子のようなモデルを提案している。ここでは日向灘地震の検討結果⁷⁾から $N = 3$ を用いた。

2.2 確率論的震源モデルによるグリーン関数

確率論的グリーン関数として用いる小地震の地震動波形 $a(t)$ は非定常パワースペクトル $S_{aa}(t, \omega)$ を用いて次式により計算する。

$$a(t) = \sqrt{2} \sum_{j=1}^{N_w} \sqrt{2S_{aa}(t, \omega_j) \Delta\omega} \cos(\omega_j t + \phi_j) \quad (3)$$

$$\omega_j = j\Delta\omega; \Delta\omega = \frac{\omega_u}{N_w}; j = 1, 2, \dots, N_w \quad (4)$$

ここに、 ω_u は振動数の上限値で、これ以上の振動数では非定常スペクトルの振幅が数学的または物理的理由から十分に小さく、零とみなされる振動数である。式(3)において、 ϕ_j は $(0, 2\pi)$ の間で一様分布を持つ互いに独立なランダム位相角である。非定常パワースペクトルは、次のように与えられるものとする。

$$S_{aa}(t, \omega) = \frac{1}{2\pi T_e} |W(t, \omega)|^2 |A(\omega)|^2 \quad (5)$$

$$|A(\omega)| = CA_S(\omega) A_D(\omega) A_A(\omega) \quad (6)$$

ここに、 $W(t, \omega)$ は非定常特性を表現する修正関数を表わすが、本文では、大崎 (1994)⁸⁾ の提案式のように時間のみの関数 $W(t, \omega) = W(t)$ を用いる。

$$W(t) = \begin{cases} \left(\frac{t}{T_b}\right)^2 & 0 \leq t \leq T_b \\ 1 & T_b \leq t \leq T_c \\ \exp[-c(t - T_c)] & T_c \leq t \leq T_d \end{cases} \quad (7)$$

T_e は強震動の継続時間 (有効継続時間: ほぼ定常部分の継続時間) で、次式から計算する (Ohsumi・他 (1997))⁹⁾。

$$T_e = \frac{L}{V_R} \left(1 - \frac{V_R}{C_S} \cos\theta\right); T_d = 2.63 T_e \quad (8)$$

ここに、 L : 地表面への断層投影長さ (km)、 V_R : 断層破壊速度 (km/s)、 C_S : S波速度 (km/s)、 T_d : 強震動振幅が90パーセント以上の継続時間を表わす。式(8)の継続時間と地震マグニチュード M の関係を久田の経験式¹⁰⁾ ($\log T_d = 0.31$)

M - 0.774)とも示す (Figure. 3)。式(8)では、 $\log L = 0.5$ M - 1.88、 $V_R/C_s = 0.7$ を用いた。断層線と観測点の角度によって継続時間に違いが生じるが、経験式は理論式のほぼ中間値を与えている。

式(6)の C 、 $A_s(\omega)$ 、 $A_d(\omega)$ 、 $A_A(\omega)$ は、それぞれ、振幅定数、震源スペクトル、伝播経路特性、およびサイト特性を表す係数である。振幅定数と震源スペクトルは次式で与えられる。

$$C = \frac{R_{\theta\varphi} F V}{4\pi\rho C_s^3}, \quad A_s(\omega) = \frac{m_0 \omega^2}{1 + (\omega/\omega_c)^2} \quad (9)$$

ここに、 $R_{\theta\varphi}$ は、震源からの地震波の放射パターンに対する平均補正係数(0.63)、 F は自由表面の影響による波動の増幅補正係数(2.0)、 V は2方向の水平成分のエネルギー分配を説明する低減係数(0.5)である。 ρ は媒質の密度、 C_s は媒質のせん断波速度である。

なお、コーナー振動数 ω_c は次式から定めた¹¹⁾。

$$\omega_c = 2\pi \times 4.9 \times 10^6 C_s \left(\frac{\Delta\sigma}{m_0} \right)^{1/3} \quad (11)$$

ここに、 c の単位は (rad/sec)、 m_0 の単位は (dyn-cm) は応力の単位 (bars) で地震の規模によらず一定であると仮定する。

減衰特性係数と表層地盤による地震波の増幅特性は次式で与える。

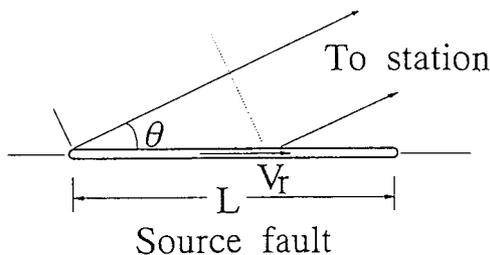


Figure. 2 Geometry of a rupturing fault and the path to an observation station

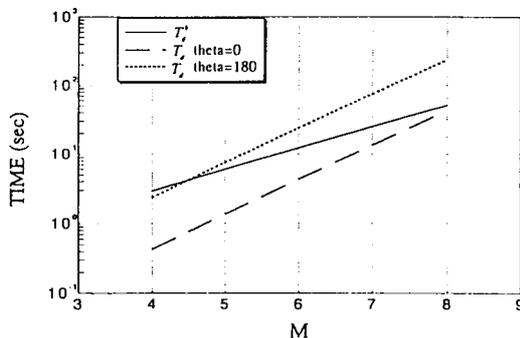


Figure. 3 Comparison of a theoretical ground motion duration (T_d) with the Hisada (1987) empirical relation.

$$A_d(\omega) = \frac{1}{1 + (\omega/\omega_{\max})^n} \frac{1}{R} \exp\left(-\frac{\omega R}{2QC_s}\right) \quad (12)$$

$$A_A(\omega) = \sqrt{\frac{\rho C_s}{\rho_0 C_{s0}}} \frac{\sqrt{1 + 4h_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2}}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2\right)^2 + h_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2}} \quad (13)$$

高振動数の遮断振動数に関しては、釜江・他の経験式³⁾を用いて以下のような値を決定した。

$$\omega_{\max} = 2\pi \times 10^{(1.824 - 1.16M)} = 66.4 \text{ (rad/s)} \quad (14)$$

地盤の材料減衰特性係数 Q 値は、Kiyono(1992)¹²⁾の式より以下のように定めた。

$$Q = 10^{(q_1 \log(\omega/2\pi) + q_2)}, \quad q_1 = 0.64, \quad q_2 = 0.6 \quad (15)$$

本文では、地震基盤から工学基盤面までの地震波の増幅特性 A_A をBoore(1983)¹⁾により式(13)左辺の第1因子のように評価し、工学的基盤から地表までを第2因子として、金井・田治見スペクトルで評価した。 ω_g は表層地盤の卓越振動数、 n は増幅率を制御するパラメーターである。硬質地盤では、 $\omega_g = 15.6$ (rad/sec)、 $h_g = 0.6$ を用いた。

3. 観測記録による検証例

3.1 経験的グリーン関数による波形合成

本方法の検証のためにK-Netを利用し、鹿児島県北西部地震(M = 6.3、1997.3.26)と、その余震(M = 3.8、1997.3.27)記録を用いて検討した。

解析に用いた断層モデルは田中・他¹³⁾の地殻変動から求めた断層モデルを用いた(Figure. 4、Table. 1)。また、震源からの破壊伝播は、震源(N35.68°、E136.55°)を破壊開始点とし、角田・他¹³⁾によるとbilateralに広がったとされているが、ここでは、 $V_r = 2.5$ km/sで放射状に破壊伝播するものとした。

K-Netで得られた観測波形は、震源域の中心から8 km以内を取り囲む方向に分布した6ヶ所(阿久根、出水、大口、宮之城、横川、川内：Figure.5)；KGS002~007(Table. 2)とした。経験的手法に用いた余震は、本震がM6.3とあまり規模の大きくない地震であるので、サブフォルトの分割数が6以上となるM = 3.8の余震を採用した。

3.2 確率的グリーン関数による波形合成

次に、確率的震源モデルから計算で求めたM3.8の地震波形を余震の波形とみなして、本震(M6.3)による加速度波形の再現を試みる。計算にあたり、本震の震源パラメータおよび断層モデルはTable. 1のものを用いた。確率的震源モデルによる地震波形の作成に当たっては、震源位置と

地震のマグニチュードは余震と同じとする。

3.3 加速度時刻歴の計算例

Figure. 6 に地震波形の比較を示す。経験的グリーン関数法によるものは、最大加速度値、水平 1 方向のみの計測震度：I、ならびに継続時間において、観測記録とよく対応している。特に出水地点では継続時間が他の地点と比較して短い、経験的グリーン関数法においても継続時間の短い波形が得られている。経験的グリーン関数法に比べ、確率論的グリーン関数法の継続時間はやや長めであるが、出水地点の継続時間の特性がよく表現できている。

阿久根は、港湾地域での液状化現象が確認されており、阿久根地点の本震記録にみられる長周期成分の原因がその液状化のためと考えられがちであるが、余震記録 (Acc19ga1) でも長周期成分が卓越していることを考えると (Figure.7)、観測地点の表層地盤が軟弱であることが推察される。よって、経験的グリーン関数法および確率論的グリーン関数法とも観測波の比較および計測震度において、継続時間を考慮することで再現性が向上すると思われる。

Figure. 8 に 55 の観測地点における最大加速度値と確率論的グリーン関数法から求めた地震動の最大値を示す。断層すべり方向を図中に示す。断層の上盤に相当する北側地域での加速度が大きいことが示され、断層の傾斜角が断層すべり方向と継続時間の関係¹³⁾を考慮することが重要であると思われる。また、経験的グリーン関数法においても用いる

Table. 1 The fault parameters

地震モーメント [M_0 -dyne.cm]	1.98×10^{26}
微小地震 [m_0 -dyne.cm]	2.716×10^{12}
マグニチュード [M]	6.3
長さ [L-km.]	12
幅 [W-km.]	11
変位 [U-cm.]	50
走向 [θ (N° E)]	275
傾斜 [δ (°)]	81
滑り [λ (°)]	-19
深さ [d-km.]	4
サイクリック [τ -sec.]	1.0
破壊速度 [Vr-km/s]	2.5
せん断波速度 [Vs-km/s]	3.7
密度 [U -m ³]	2.7
地盤の基本頻度 [ω_0 -rad/s]	15.6
地盤の減衰 [h_0]	0.6

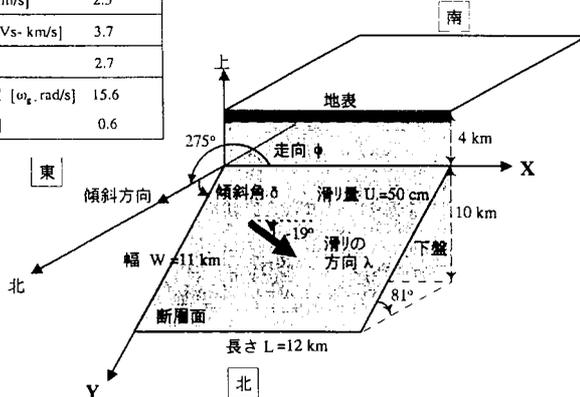


Figure. 4 The fault model proposed by Tanaka, 1997.¹³⁾

小地震の方向性を考慮することはともかく、確率論的グリーン関数法においても断層すべり方向と継続時間の関係を考慮することにより、観測波形の特徴をより精度よく再現できるものと思われる。

4. おわりに

本文では、サイト特性として金井・多治見スペクトルによる工学的基盤面 ($V_s = 250$ km/sec程度)での地震波を考慮したが、特に軟弱層による影響が大きい阿久根地点では、サイト特性を加味した増幅地震動が必要となる。別途解析等を実施することも考えられるが、地域防災計画や地震計の少ない地域の直後予測システム等では、当該再現地震波と一次元波動論等と組み合わせる程度で、従来の加速度の経験式 (アッテネーション式) に比べ精度よく算定が可能であると思われる。また、経験的手法において余震データを用いる場合も、サイト (求める地震動位置) と断層の位置関係を考慮し、方向が一致する位置での余震観測記録を用いることが精度の高い予測地震動を得るためには重要と思われる。

[参考文献]

- 1) Irikura, K., Prediction of Strong Accelerations Motions using Empirical Green's Function, *Proc. of 7th Japan Earthquake Engineering Symposium*, pp.151-156, 1986.
- 2) Joyner, W. B. and Boore, D.M., On Simulating Large Earthquakes by Green's Function Addition of Smaller Earthquakes, *Earthquake Source Mechanics*, Maurice Ewing Series 6, edited

Table. 2 K-Net observation points for comparing wave form

Site code (地点コード)	Site Location (位置)	Site name (地点名称)
KGS002 ㉒	32.0875 N° 130.3555 E°	(IZUMI - 出水)
KGS003 ㉓	32.0525 N° 130.5897 E°	(OHKUCHI - 大口)
KGS004 ㉔	32.0111 N° 130.1950 E°	(AKUNE - 阿久根)
KGS005 ㉕	31.8972 N° 130.4536 E°	(MIYANOJOH - 宮之城)
KGS006 ㉖	31.9025 N° 130.7044 E°	(YOKOKAWA - 横川)
KGS007 ㉗	31.8108 N° 130.3055 E°	(SENDAI - 川内)

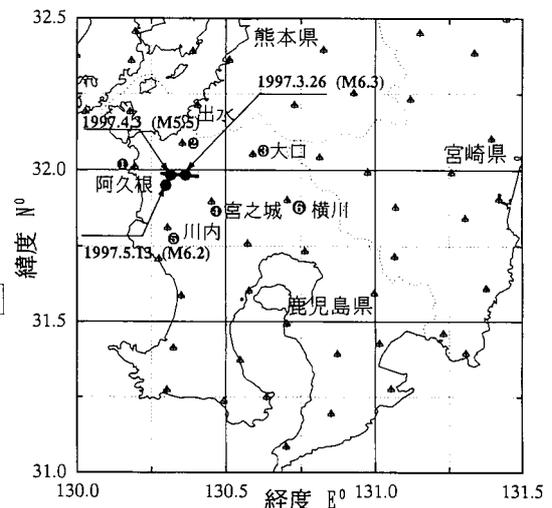


Figure. 5 Location of the fault and observation points

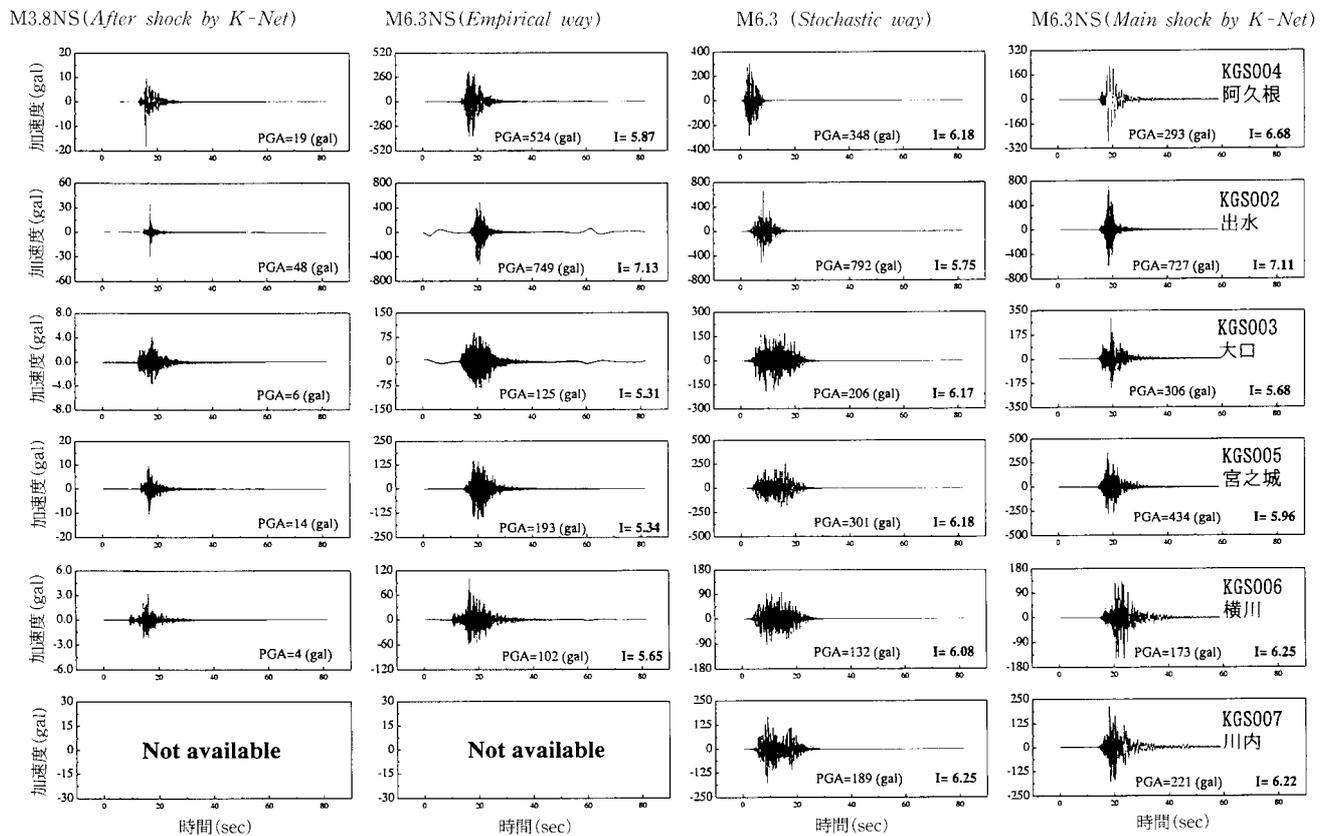


Figure. 6 Comparison of the simulated wave forms by the empirical and stochastic Green's function methods with the K-Net recorded ground motions during the Kagoshimaken-hokuseibu earthquake (M6.3, 1997) .

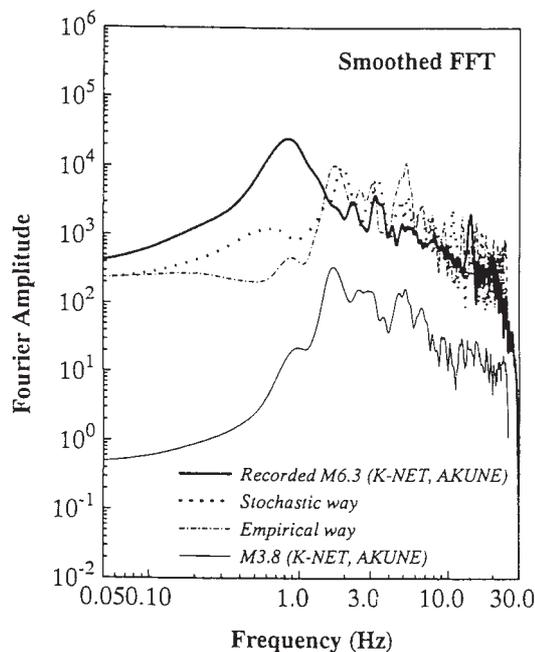


Figure. 7 Comparison of the Fourier spectra of simulated and recorded time histories at Akune site

by Das, S. and Boatwright, J., pp.269-273, 1986.

- 3) 釜江克宏、入倉孝次郎、福知保長：地震のスケールリング則に基づいた大地震時の強震動予測、日本建築学会構造系論文報告集、第430号、pp.1-9、1991。
- 4) 佐藤智美、川瀬 博、佐藤俊明：観測記録から同定した地震動の

統計的特性と地盤の非線形性を考慮した強震動予測、日本建築学会構造系論文報告集、第463号、pp.27-37、1994。

- 5) 原田隆典、田中 剛、田村好文：震源特性を考慮した地震動のシミュレーション手法、土木学会論文報告集、第507号/I-30、pp.209-217、1995。
- 6) Shinozuka, M. and Sato, Y., Simulation of nonstationary random process, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.93, No. EM1, pp.11-40, 1967.
- 7) 大角恒雄、原田隆典、泉谷恭男：確率的グリーン関数を用いた強震動の波形合成法とその検証例による震源パラメータの考察、土木学会・応用力学論文集、Vol.1、1998.8
- 8) 新・地震動のスペクトル解析入門、大崎順彦、鹿島出版会
- 9) Ohsumi, T., Harada, T., and Darama, H. (1997), Engineering simulation of ground motions using a seismological model, Proc. of the 7th international Conference on Structural Safety and Reliability, Kyoto, November 24-28.
- 10) Hisada, T. and Ando, H. : Relation between Duration of Earthquake Motion and the Magnitude, Kajima Institute of Technology, June 1976.
- 11) Boore, D.M., Stochastic Simulation of High Frequency Ground Motion Based on Seismological Model of Radiated Spectra, Bull. of Seism. Soc. of Am., Vol.73, pp.1865-1894, 1983.
- 12) Kiyono, J., Identification and Synthesis of Seismic Ground Motion in Structural Response Analysis, PhD thesis, Dept. of Civil Engineering, Kyoto University, 1992.
- 13) 平成9年度建設技術講演会「鹿児島県北西部地震について」(鹿児島県建設技術センター (1997.11.17))
- 14) 大角恒雄、奥倉英世、原田隆典：地震断層を考慮した強振動の波形合成、土木学会第52回年次学術講演会 (1997.9)

Recorded (NS) by K-Net

Stochastic way

Recorded PGA (NS)

Simulated PGA

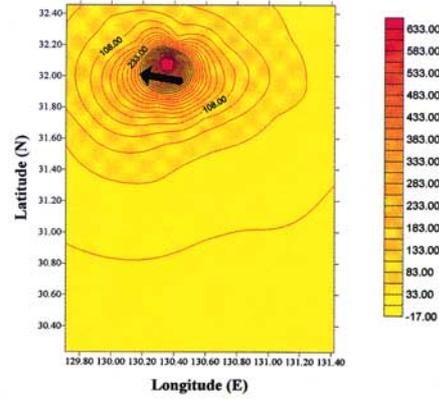
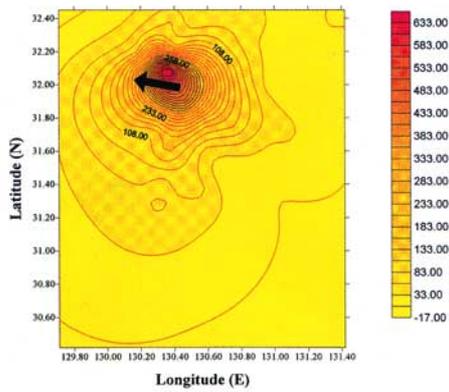
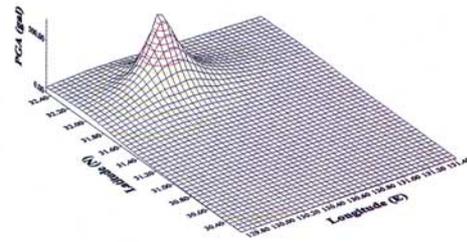
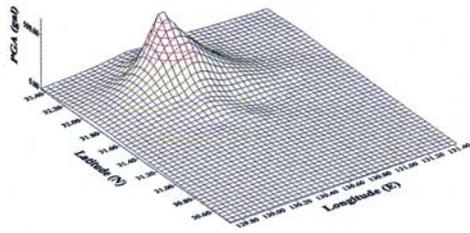


Figure. 8 Comparison of the spatial distribution of peak ground accelerations by the stochastic Green's function method with the K-Net data during the Kagoshimaken-hokuseibu earthquake (M6.3, 1997)