

加速度応答スペクトルの放射特性補正係数の経験的モデルに関する研究

Study on empirical radiation pattern correction model for acceleration response spectra

佐藤智美*, 片岡正次郎**

Toshimi Satoh, Shojiro Kataoka

*博士(工学), 大崎総合研究所, 主任研究員 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-2)

**博士(工学), 国土交通省国土技術政策総合研究所, 主任研究官 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地)

In order to evaluate strong motions by stochastic Green's function method more accurately, an empirical radiation pattern correction model for empirical attenuation model of acceleration response spectra is proposed using K-NET strong motion records of small and middle-sized earthquakes. The proposed model depends on theoretical radiation pattern coefficients at periods longer than 0.2 sec and the dependence becomes stronger at periods longer than 0.5 sec. Observed response spectra in the long period range depend on theoretical radiation patterns to hypocentral distances of 200 km. For strike-slip type crustal earthquakes, the model depends on seismic moment at periods longer than 2 sec. Based on the model, acceleration response spectra at a period of 10 sec are 2.5 times larger at the maximum than the average for an earthquake with the same seismic moment and source mechanism as the 2000 Tottori-ken Seibu earthquake.

Key Words: radiation pattern, acceleration response spectra, strong motion records, source mechanism

キーワード: 放射特性, 加速度応答スペクトル, 強震記録, 発震機構

1. はじめに

地表で観測される地震動は、震源特性、伝播経路特性、地盤増幅特性の影響を受けており、入力地震動の設定に際しては、これらの影響を適切に評価することが必要となる。近年、震源の不均質性を考慮した断層モデルの設定手法が提案される¹⁾とともに、統計的グリーン関数法²⁾による地震動評価事例が蓄積されつつある^{例として 3, 4)}。統計的グリーン関数法では、経験的グリーン関数法における中小地震記録に相当する統計的グリーン関数をいかに設定するかが重要となる。観測記録に含まれる伝播経路特性、地盤増幅特性を反映した統計的グリーン関数を作成する目的で、筆者らは先の研究^{5, 6)}で多数の中小地震記録の水平成分を用いて加速度応答スペクトルと加速度波形の経時特性の推定式を提案した。片岡・他⁷⁾は、この推定式を用いて統計的グリーン関数を作成し、レベル 2 地震動の設定手法の試案に基づき想定地震に対する地震動の試算を行っている。本研究では、統計的グリーン関数法によるより高精度な地震動評価(水平成分)を目指して、中小地震に対する加速度応答スペクトルの推定式に放射特性の影響を補正するための経験的モデル(評価式)の作成を行う。

地震動の放射特性は、理論的には地震のメカニズム解(発震機構解)と観測点の位置関係及び地下構造により決まり、観測される長周期地震動は理論放射特性でよく説明できることが知

られている。一方、観測される短周期地震動は、伝播経路特性や地盤での媒質の不均質性や震源過程の不均質性により放射特性が不明瞭となることが指摘されている^{8, 9, 10)}。このような放射特性の周期依存性をモデル化して補正する手法が提案され、大地震の強震動予測に適用されている^{11, 12, 13)}が、中小地震記録によりモデルの妥当性が十分には検証されていない。佐藤¹⁴⁾は、周期依存性、震源距離依存性を考慮した放射特性の経験的モデルを提案しているものの、検討データは 2000 年鳥取県西部地震(気象庁マグニチュード $M7.3$)とその余震に限られている。また、以上の放射特性に関する既往の研究では最大加速度やフーリエスペクトルを対象としており、応答スペクトルを対象としたものではない。これに対して、本研究は、全国の K-NET 強震記録の応答スペクトルを用いて、周期依存性、震源距離依存性、マグニチュード依存性を考慮した経験的モデル(評価式)を提案するものである。

最近の研究では、大地震の強震記録を用いて、最大加速度、最大速度や応答スペクトルの推定式(距離減衰式)に対する rupture directivity の補正係数が提案されている^{15, 16, 17)}。この補正係数には、地震のメカニズムに依存した放射特性と破壊伝播効果が含まれている。一方、本研究では、放射特性を中小地震記録を用いて経験的にモデル化することを目的としており、大地震で顕著となる破壊伝播効果は断層モデルを設定して合成することにより評価するという立場にある。

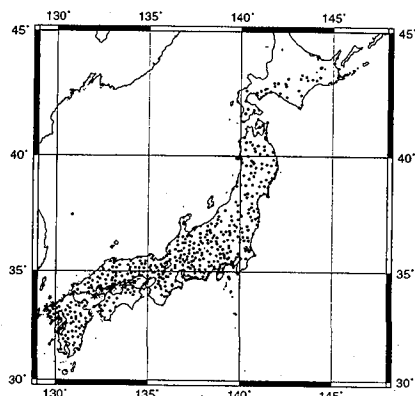
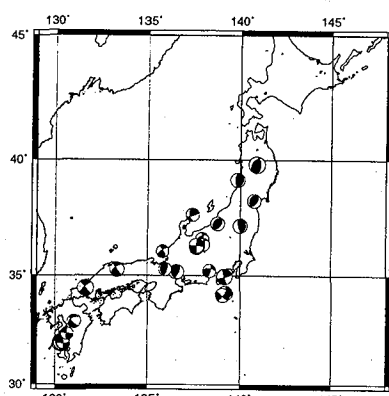
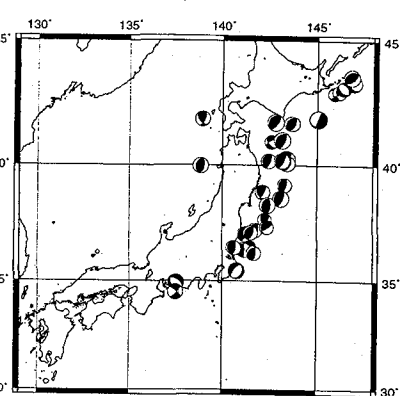


図-1 観測点位置

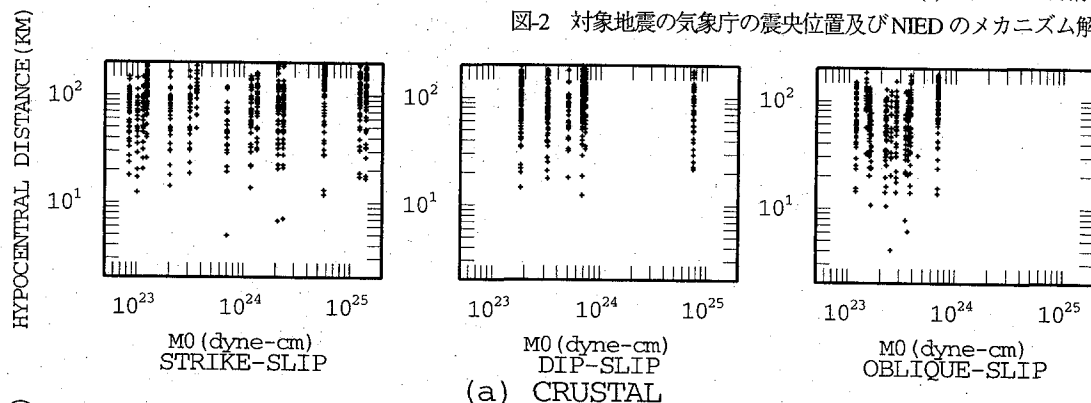


(a) 内陸地震

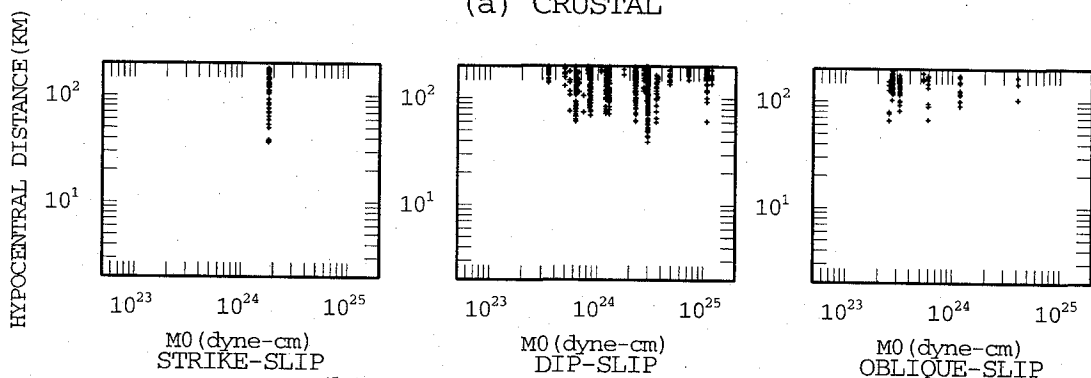


(b) 東日本の海溝性地震

図-2 対象地震の気象庁の震央位置及びNIEDのメカニズム解



(a) CRUSTAL



(b) SUBDUCTION (EASTERN JAPAN)

図-3 データの地震モーメント M_0 と震源距離との関係

2. データ

用いるデータは、筆者ら^{5,6)}が内陸地震と東日本の海溝性地震に対する加速度応答スペクトルと経時特性の推定式作成の際に用いたI種地盤¹⁰⁾で観測されたK-NET強震記録のうち、防災科学技術研究所(NIED)により¹⁰⁾、メカニズム解及び地震モーメントが推定されている69地震の記録である。1996年5月から1999年11月までの震源深さ60km以下で、 $M_{5.0}$ 以上の海溝性地震と $M_{4.5}$ 以上の内陸地震の記録のうち、震源距離200km以下の4376の水平成分記録が選択された。検討対象は、S波部とそれ以降の加速度波形の減衰定数5%の加速度応答スペクトルである。

図-1には、対象データが得られている526地点のI種地盤のK-NET観測点位置を示す。図-2には、NIEDによる内陸地震、海溝性地震のメカニズム解を、気象庁発表の震央位置にプロットした。本研究では、すべり角(rake angle)が $0^\circ \sim 30^\circ$ または $150^\circ \sim 180^\circ$ の地震を横ずれ断層(strike-slip fault)の地震、 $60^\circ \sim 120^\circ$ の地震を縦ずれ断層(dip-slip fault)の地震、それ以外を縦ず

表-1 地震数(カッコ内)とデータ数

	全地震	Strike-slip	Dip-slip	Oblique-slip
内陸地震	2914 (35)	1260 (15)	862 (7)	792 (13)
東日本の海溝性地震	1462 (34)	90 (1)	1192 (25)	180 (8)

れと横ずれが混在している断層(oblique-slip fault)の地震として、3種類の断層タイプに分類した。3種類の断層タイプ毎の内陸地震と東日本の海溝性地震の地震モーメントと震源距離の関係を図-3に示す。データのモーメントマグニチュード M_w は $4.5 \sim 6.0$ の範囲にある。表-1には、地震数及びデータ数を示す。

3. 解析手法

はじめに、NS成分とEW成分の加速度波形S波部とそれ

以降)を radial 成分と transverse 成分の波形に変換し、transverse 成分の応答スペクトルに対する radial 成分の応答スペクトルの比 R_{ss}/T_{ss} を計算する。そして、radial 成分の放射特性補正係数 $P_r(T)$ を、 R_{ss} の水平 2 成分の幾何平均に対する比 $(R_{ss}/T_{ss})^{0.5}$ として定義する。同様に、transverse 成分の放射特性補正係数 $P_t(T)$ を、 T_{ss} の水平 2 成分の幾何平均に対する比、 $(T_{ss}/R_{ss})^{0.5}$ として定義する。この考え方は、Somerville et al.¹⁵⁾や大野・他¹⁶⁾が rupture directivity 補正係数を、断層直交方向成分 FN の水平 2 成分の幾何平均に対する比として定義しているのと同様である。

次に、観測記録に基づく $P_r(T)$ を SV 波の理論放射特性係数の絶対値 SV (以後、理論 SV と略す)、観測記録に基づく $P_t(T)$ を SH 波の理論放射特性係数の絶対値 SH (以後、理論 SH と略す) で次式によりモデル化し、回帰係数 $A(T)$ 、 $B(T)$ を求める。

$$\log P_r(T) = A(T) + B(T) \times SV \quad (1)$$

$$\log P_t(T) = A(T) + B(T) \times SH \quad (2)$$

これらの式は、観測記録に基づく $P_r(T)$ 、 $P_t(T)$ と理論 SV 、理論 SH を経験的によく説明できることから(図 5、図 6)設定した。

地震モーメント M_0 の範囲が広い strike-slip の内陸地震のデータセットに対しては、予備解析として M_0 の大きさ別にデータセットを分類して $A(T)$ 、 $B(T)$ を求めた結果、これらに M_0 依存性が認められたため、次式による回帰分析も行なう。

$$\log P_r(T) = s(T) + p(T) \log M_0 + (q(T) + r(T) \log M_0) \times SV \quad (3)$$

$$\log P_t(T) = s(T) + p(T) \log M_0 + (q(T) + r(T) \log M_0) \times SH \quad (4)$$

係数 $s(T)$ 、 $p(T)$ 、 $q(T)$ 、 $r(T)$ は、非線形最小自乗法のひとつである改訂準ニュートン法²⁰⁾により求める。 $s(T)$ 、 $p(T)$ 、 $q(T)$ 、 $r(T)$ の初期値は、(1)、(2)式で得られた回帰係数 $A(T)$ 、 $B(T)$ を参考に、それぞれ、-0.01、0.0、0.1、0.0 としたが、初期値を変化させても安定的に同じ値が得られた。なお、予備解析として震源距離別にデータセットを分類して $A(T)$ 、 $B(T)$ を求めた結果、これらに震源距離依存性が認められなかったため、震源距離はパラメータとはしない。

(1)~(4)式の理論 SV 、理論 SH は、次式で表現される²¹⁾。

$$SV = |\sin \lambda \cos 2\delta \cos 2i_\xi \sin 2(\phi - \phi_s) - \cos \lambda \cos \delta \cos 2i_\xi \cos(\phi - \phi_s) + 0.5 \cos \lambda \sin \delta \sin 2i_\xi \sin 2(\phi - \phi_s) - 0.5 \sin \lambda \sin 2\delta \sin 2i_\xi (1 + \sin^2(\phi - \phi_s))| \quad (5)$$

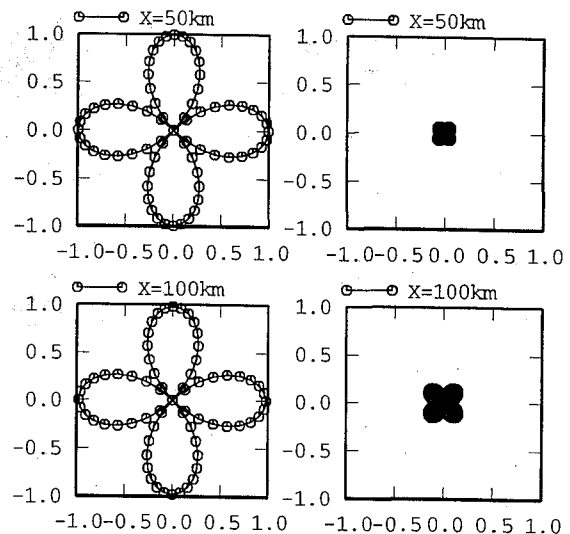
$$SH = |\cos \lambda \cos \delta \cos i_\xi \sin(\phi - \phi_s) + \cos \lambda \sin \delta \sin i_\xi \cos 2(\phi - \phi_s) + \sin \lambda \cos 2\delta \cos i_\xi \cos(\phi - \phi_s) - 0.5 \sin \lambda \sin 2\delta \sin i_\xi \sin 2(\phi - \phi_s)| \quad (6)$$

ここで、 ϕ_s は走向(strike angle)、 δ は傾斜角(dip angle)、 λ はすべり角(rake angle)、 i_ξ は射出角(take off angle)、 ϕ は方位角(azimuth)である。射出角は、地下構造及び震源深さ、震央距離に依存して変化する。日本全国の地震の記録を対象とするため、気象庁が日本の近地地震の震源決定に用いてきた地下構造に基づく射出角²²⁾を用いる。

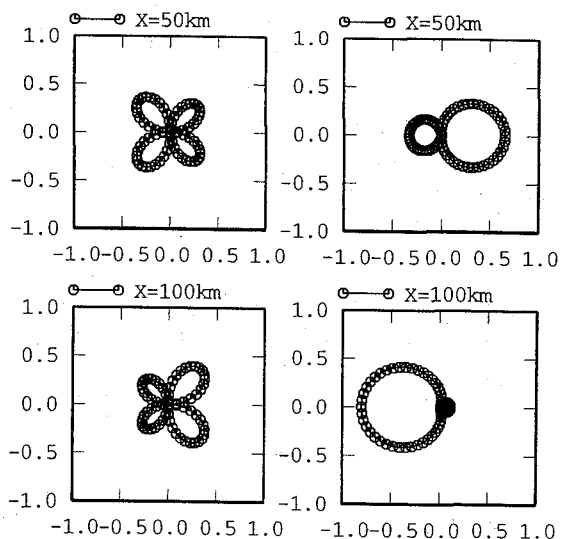
水平 2 成分の幾何平均の応答スペクトルは、I 種地盤の応答スペクトルの推定式^{5,6)}で平均的に説明できるから、放射特性補正係数 $P_r(T)$ 、 $P_t(T)$ を応答スペクトルの推定式に乘じることで、放射特性を考慮した radial 成分、transverse 成分の応答スペクトルを評価することができることになる。

4. 理論放射特性係数と観測放射特性補正係数との関係

提案する放射特性補正係数モデルは、理論 SV 、理論 SH の関数となることから、はじめに、断層タイプや震源距離による理論 SV 、理論 SH の変動について検討する。図 4(a)に傾斜角が 90° ですべり角が 0° の strike-slip の地震、図 4(b)に傾斜角が 30° の西落ちですべり角が 90° の dip-slip の地震に対する理論 SV 、理論 SH を示す。各図とも、縦軸のプラス方向が北、横軸のプラス方向が東である。両断層の走向は 0° (南北軸が断層の走向)で震源深さは 10km である。方位角を 5° 刻みで計算し、震源距離 50km



SH-WAVE SV-WAVE
(a) strike-slip の地震



SH-WAVE SV-WAVE
(b) dip-slip の地震 (dip angle=30°)

図4 理論放射特性係数

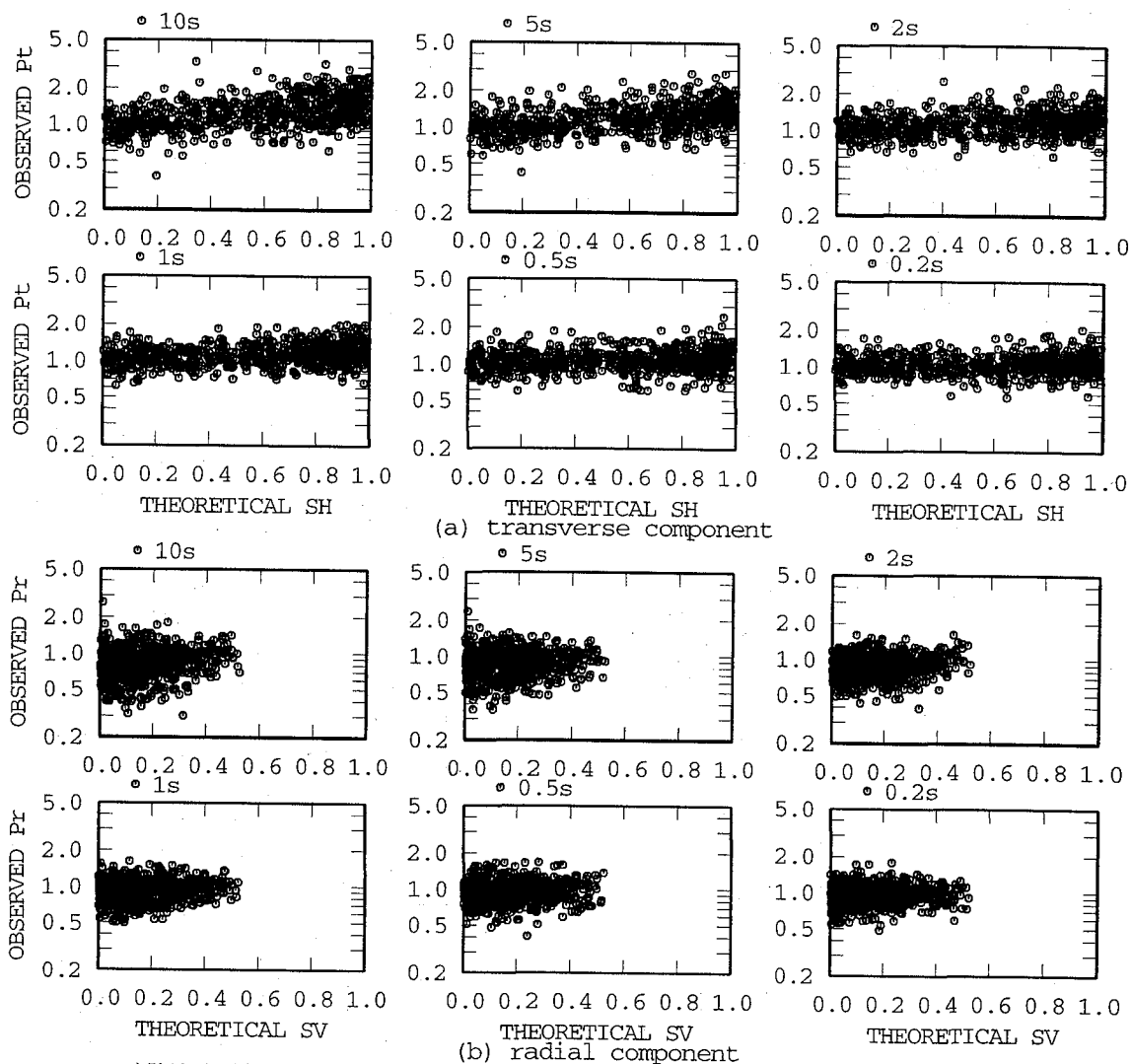


図5 strike-slip の内陸地震に対する理論放射特性係数の絶対値 SH 、 SV と観測放射特性補正係数 $P_t(T)$ 、 $P_r(T)$ との関係

と 100km のケースを示した。原点が震央位置であり、半径が方位角毎の理論 SV 、理論 SH の値に対応する。strike-slip の地震では、大半の方位角において SH 波が SV 波より卓越する。また、理論 SH は理論 SV に比べ、震源距離による違いが小さい。これは、この純 strike-slip の地震では、理論 SV は(5)式の第3項目のみが残り、理論 SH は(6)式の第2項目のみが残ることからも理解できる。つまり、震源距離による違いによる射出角の違いが理論 SH より理論 SV の方により影響する。一方、dip-slip の地震では strike-slip の地震に比べ、理論 SH 、理論 SV と震源距離による違いが大きい。これは、strike-slip の地震では方位に出る影響が dip-slip の地震では距離に出ることが大きく寄与している。なお、dip-slip の地震では strike-slip の地震に比べ、理論 SH 、理論 SV と震源深さ依存性も大きかった。

図5には、strike-slip の内陸地震に対する理論 SH と観測 $P_t(T)$ の関係、理論 SV と観測 $P_r(T)$ の関係を、周期 10 秒、5 秒、2 秒、1 秒、0.5 秒、0.2 秒を例として表示した。長周期領域では、理論 SH 、理論 SV が大きくなるほど、 $\log P_t(T)$ 、 $\log P_r(T)$ が線形的に大きくなる傾向がある。また、短周期ほど傾きが小さくなり、周期 0.2 秒では傾きはほぼ 0 となる。これは、短周期領域では観測 $P_t(T)$ や観測 $P_r(T)$ は理論放射特性係数に依存せず、応答スペ

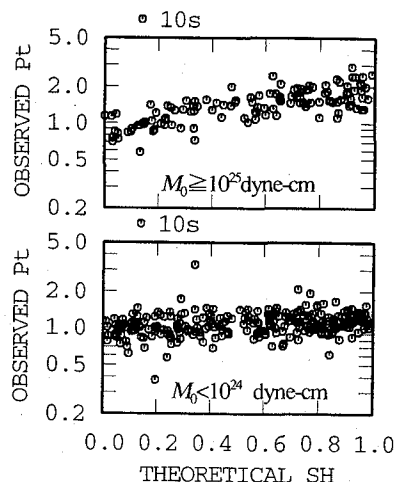


図6 M_0 の違いによる理論 SH と観測 $P_t(T)$ の関係

クトルは観測点位置によらず水平面内で等方的になることを示唆している。長周期領域での理論 SH と観測 $P_t(T)$ との相関は理論 SV と観測 $P_r(T)$ の相関より高い。この原因として、理論 SV は理論 SH より小さい場合が多いため、最大値指標である応答スペクトルに振幅の小さい理論 SH の影響が現れにくいことが考えられる。また、射出角の違いが理論 SH より理論 SV の方により

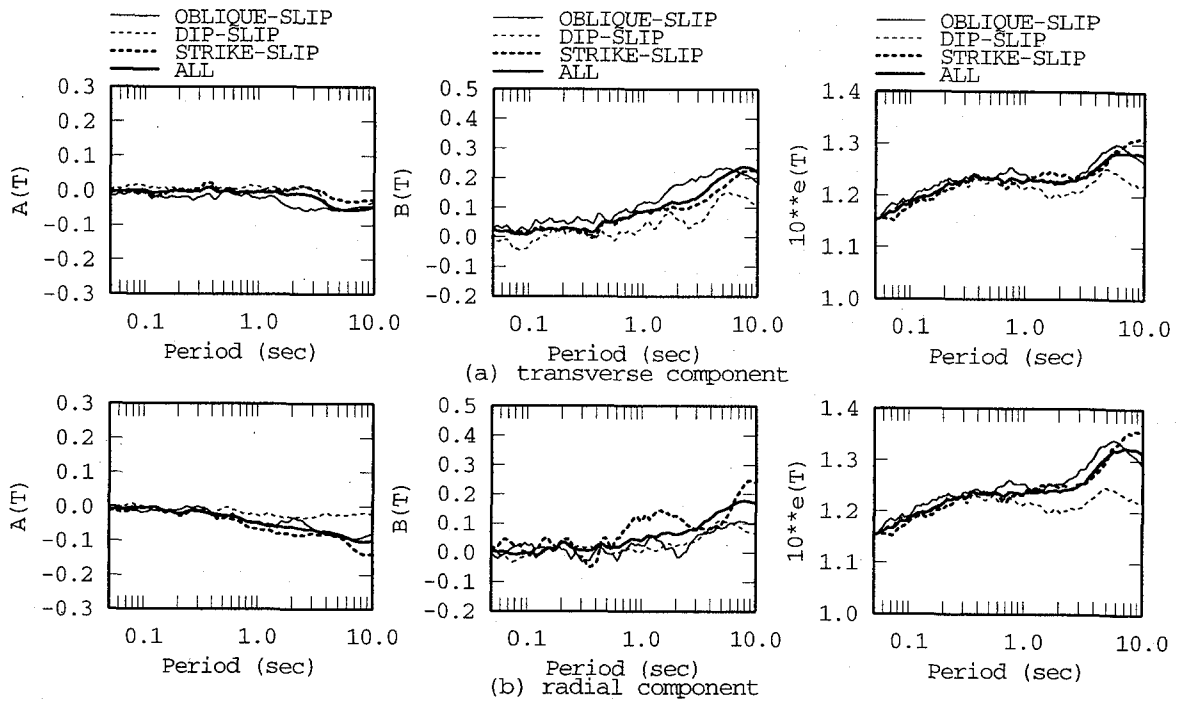


図7 内陸地震のデータセットに基づく回帰係数 $A(T)$ 、 $B(T)$ 及び回帰誤差 $10^{e(T)}$

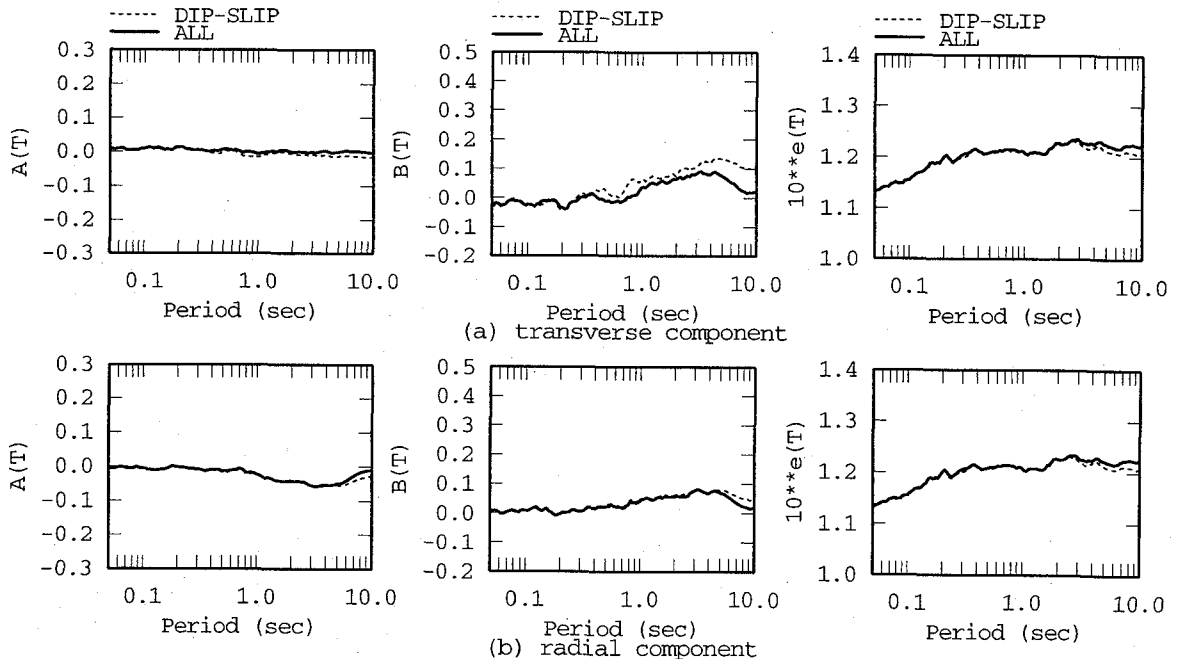


図8 東日本の海溝性地震のデータセットに基づく回帰係数 $A(T)$ 、 $B(T)$ 及び回帰誤差 $10^{e(T)}$

影響するため、理論 SV の方が理論 SH より地下構造の仮定の影響を受けやすいことも原因のひとつと考えられる。

図-5 のデータから $M_0 \geq 10^{25}$ dyne-cm のデータと $M_0 < 10^{24}$ dyne-cm のデータを選択して、周期 10 秒での理論 SH と観測 $P_i(T)$ の関係を比較したものを図-6 に示す。 $M_0 \geq 10^{25}$ dyne-cm のデータの方が $M_0 < 10^{24}$ dyne-cm のデータより傾きが大きい、つまり、観測 $P_i(T)$ の M_0 依存性があることがわかる。

5. 放射特性補正係数モデル

内陸地震のデータセットを用いて、(1)式、(2)式により算出し

た回帰係数 $A(T)$ 、 $B(T)$ 及び回帰誤差 $10^{e(T)}$ を図-7 に示す。3 つの断層タイプに分類した場合と、全データを用いた場合の計 4 ケースを比較している。strike-slip の内陸地震の $A(T)$ 、 $B(T)$ は、それぞれ、図-5 の切片、傾きに対応する。断層タイプによらず、周期約 0.2 秒以下では、 $A(T) \approx 0$ 、 $B(T) \approx 0$ であるから、放射特性補正係数モデル $P_i(T)$ 、 $P_r(T)$ は理論放射特性係数に依存せずほぼ 1 となる。一方、周期約 0.2 秒以上では、 $A(T)$ は 0 より小さく、 $B(T)$ は 0 より大きい。特に、周期 0.5 秒以上でこの傾向が顕著である。これは、長周期領域では、 $P_i(T)$ 、 $P_r(T)$ は理論放射特性係数に依存し、観測点位置により応答スペクトルの水平面内での卓越方向が異なることを意味している。断層タイプ別に

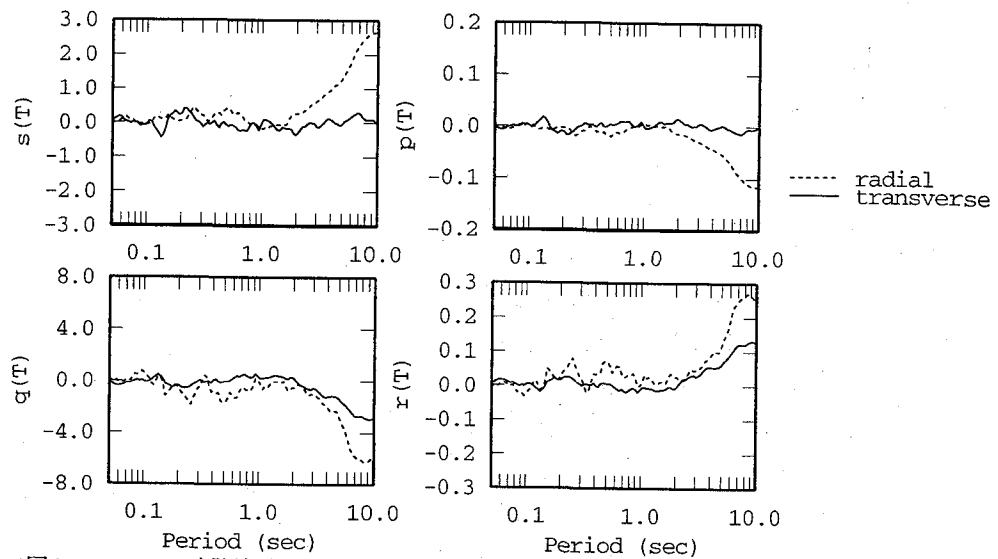


図9 strike-slip の内陸地震のデータセットに基づく回帰係数 $s(T)$, $p(T)$, $q(T)$, $r(T)$

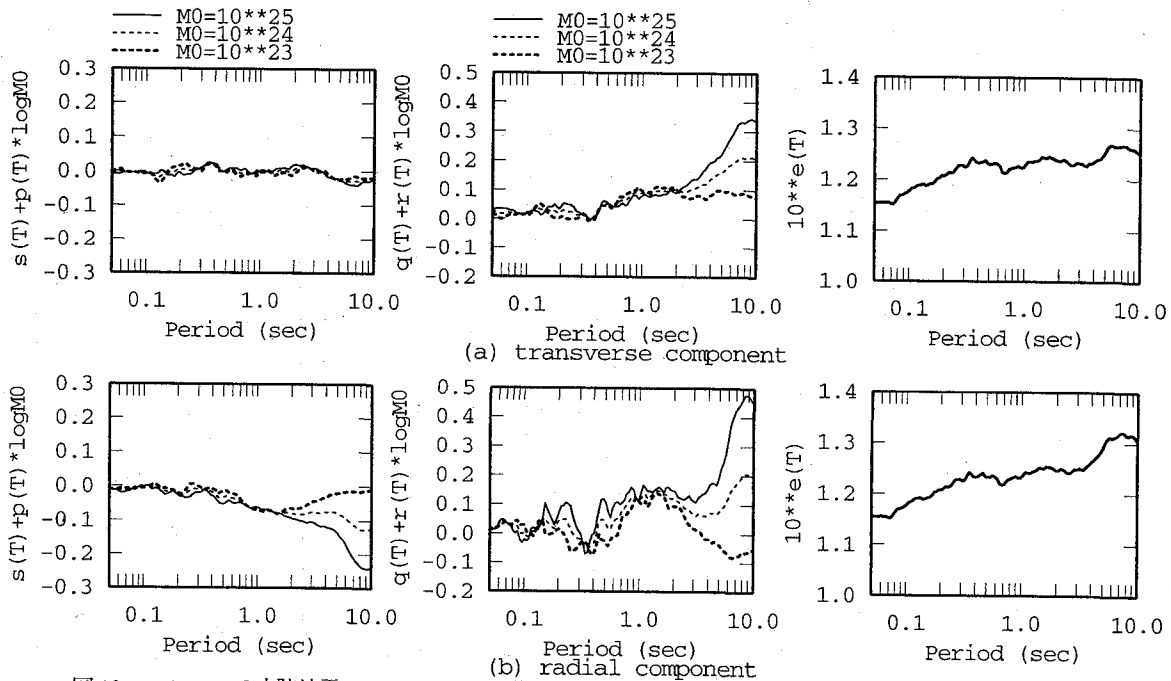


図10 strike-slip の内陸地震のデータセットに基づく $s(T)+p(T)\log M_0$, $q(T)+r(T)\log M_0$ と回帰誤差 $10^{e(T)}$

比較すると、dip-slip の地震が他の地震より長周期領域での放射特性補正係数モデル $P_r(T)$, $P_r(T)$ の理論放射特性係数依存性が小さい。

東日本の海溝性地震のデータセットに対する回帰係数 $A(T)$, $B(T)$ 及び回帰誤差 $10^{e(T)}$ を図-8 に示す。内陸地震のデータセットと同様、周期約 0.5 秒以上で、放射特性補正係数モデル $P_r(T)$, $P_r(T)$ の理論放射特性係数依存性が顕著となるものの、この依存性は小さい。

strike-slip の内陸地震のデータセットを用いて、 M_0 をパラメータにして回帰分析を行った際の回帰係数 $s(T)$, $p(T)$, $q(T)$, $r(T)$ を図-9 に示す。また、 $M_0=10^{23}$, $M_0=10^{24}$, $M_0=10^{25}$ dyne-cm の 3 ケースの $s(T)+p(T)\log M_0$, $q(T)+r(T)\log M_0$ と回帰誤差 $10^{e(T)}$ を図-10 に示す。 $s(T)+p(T)\log M_0$, $q(T)+r(T)\log M_0$ は、周期 2 秒以上で M_0 依存性が顕著となり、 M_0 が大きいほど理論放射特性依存性が大きくなる。この原因として、 M_0 の小さい地震では、長周期成

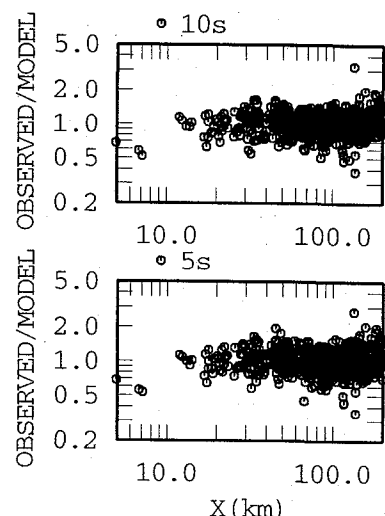


図-11 strike-slip の内陸地震の M_0 をパラメータとしたモデル $P_r(T)$ に対する観測 $P_r(T)$ の比と震源距離 X との関係

分の加速度応答スペクトルの振幅が小さく短周期成分の影響を受けやすくなる²³⁾ため、理論放射特性係数との関係が不明瞭となることが考えられる。なお、長周期領域での回帰誤差 10^{40} は、 M_0 をパラメータとした場合(図-10)の方が M_0 をパラメータとしない場合(図-7の太破線)より小さいことが確認できる。

観測 $P_i(T)$ の震源距離依存性を検討するため、strike-slip の内陸地震の M_0 をパラメータとしたモデル $P_i(T)$ に対する観測 $P_i(T)$ の比と震源距離 X との関係、周期 10 秒と 5 秒を例として図-11 に示す。震源距離 10~200km の範囲では、震源距離依存性は小さい。震源距離 10km 以下の 3 つのデータでは観測 $P_i(T)$ の方がモデル $P_i(T)$ より小さい傾向があるが、これが近距離のデータの特徴であるか否かについては、今後、近距離のデータを収集して検討していく必要があると考えられる。

図-12 には、strike-slip の内陸地震に対する M_0 をパラメータとしたモデルに基づく、図-4(a)と同じ条件(震源深さ 10km、走向 0° 、すべり角 0°)の strike-slip の地震に対する $P_i(T)$ 、 $P_r(T)$ を示す。 $M_0=10^{25}$ dyne-cm で震源距離が 50km と 100km の例であり、 $0^\circ \sim 45^\circ$ の方位角を 15° 刻みで表示した。回帰係数は震源距離には依存しないが、図-4 に示したように理論放射特性係数は震源距離に依存する。したがって、震源距離に依存して $P_i(T)$ 、 $P_r(T)$ も変化している。周期 0.2 秒以下ではいずれの方位角でも $P_i(T)$ 、 $P_r(T)$ はほぼ 1 であり、周期 0.5 秒以上では長周期ほど $P_i(T)$ が 1 から隔たる傾向が顕著となる。この $M_0=10^{25}$ dyne-cm の場合、transverse 成分では、SH 波が卓越する方位角 0° で $P_i(T)$ は最大となり、周期 10 秒で約 2 倍である。radial 成分では、SV 波が卓越しない方位角 0° でモデル放射特性係数は最小となり、周期 10 秒で約 0.6 倍である。図-4(b)と同じ条件(震源深さ 10km、走向 0° 、傾斜角 30° の西落ち、すべり角 90°)の dip-slip の地震に対する $P_i(T)$ 、 $P_r(T)$ を震源距離が 50km のケースについて図-13 に示す。 $P_i(T)$ 、 $P_r(T)$ は長周期領域でもほぼ 1 であり、理論放射特性依存性は小さい。なお、strike-slip の地震と同様、距離依存性もほとんどみられなかった。

6. 適用性の検討及び既往の研究成果との関係

回帰データに含まれている 1997 年の 5 月 13 日の鹿児島県北西部地震($M_f=6.3$ 、 $M_0=1.22 \times 10^{25}$ dyne-cm)の観測 $P_i(T)$ 、 $P_r(T)$ と M_0 をパラメータにしたモデル $P_i(T)$ 、 $P_r(T)$ との比較を、周期 10 秒、5 秒、3 秒、1 秒を例として図-14 に示す。この図の表示法は、半径が $P_i(T)$ 、 $P_r(T)$ の値である以外は図-4 と同じである。なお、この地震は、L 字型の南北断層と東西断層からなる strike-slip の内陸地震であるが、南及び東のどちらの方向への破壊伝播も走向方向にはそれほど進展していないことが指摘されている²⁴⁾。図-14 から、観測 $P_i(T)$ 、 $P_r(T)$ は、平均的にはモデル $P_i(T)$ 、 $P_r(T)$ ではほぼ表現されていることがわかる。ただし、長周期領域において $P_i(T)$ の方が $P_r(T)$ より回帰誤差が大きいことからわかるように(図-7)、周期 10 秒でのモデル $P_i(T)$ はモデル $P_r(T)$ より観測との整合性が悪い。1997 年の 5 月 13 日の鹿児島県北西部地震とメカニズム解や震源位置がほぼ同じで M_0 が小さい地震(1997 年 4 月 5 日鹿児島県北西部地震、 $M_f=4.8$ 、 $M_0=3.11 \times 10^{23}$ dyne-cm)に対して、モデル $P_i(T)$ と観測 $P_i(T)$ の比較を行った結果を周期 10 秒と 5 秒を例として図-15 に示す。図-14 と図-15 の比較から、 M_0 が小さい方が観測 $P_i(T)$ の方位依存性は小さく、これがモデル $P_i(T)$ で表現されていることが確認できる。

図-16 には、回帰データの M_0 の範囲外である 2000 年鳥取県西部地震($M_f=7.3$ 、 $M_0=8.62 \times 10^{25}$ dyne-cm)に対して、モデル $P_i(T)$ と観測 $P_i(T)$ の比較を行った結果を示す。図-16(a)は I 種地盤の K-net 観測点のみ、図-16(b)は I 種地盤以外の K-net 観測点も含めた結果である。本研究のモデルは I 種地盤の K-net 観測点の記録を用いて作成されたものであるが、モデル $P_i(T)$ は、I 種地盤以外の地盤のデータに対しても I 種地盤のデータと同程度に観測 $P_i(T)$ を説明している。これは、 $P_i(T)$ や $P_r(T)$ が、radial 成分と transverse 成分の応答スペクトルの比の平方根とその逆数で定義されているので、地盤増幅の影響は第一義的にキャンセルされるためと考えられる。周期 10 秒での観測 $P_i(T)$ とモデル $P_i(T)$

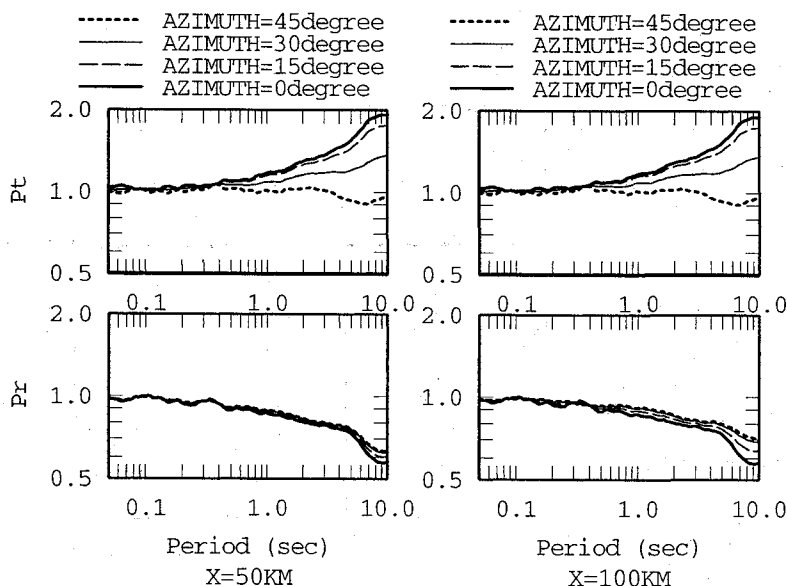


図-12 strike-slip の内陸地震に対する回帰式に基づく、図-4(a)と同じ条件(震源深さ 10km、走向 0° 、すべり角 0°)の strike-slip の地震($M_0=10^{25}$ dyne-cm)に対する $P_i(T)$ 、 $P_r(T)$

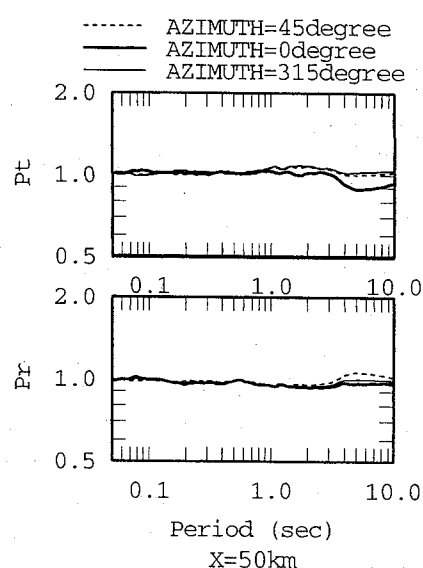


図-13 dip-slip の内陸地震に対する回帰式に基づく、図-4(b)と同じ条件(震源深さ 10km、走向 0° 、傾斜角 30° 、すべり角 90°)の dip-slip の地震に対する $P_i(T)$ 、 $P_r(T)$

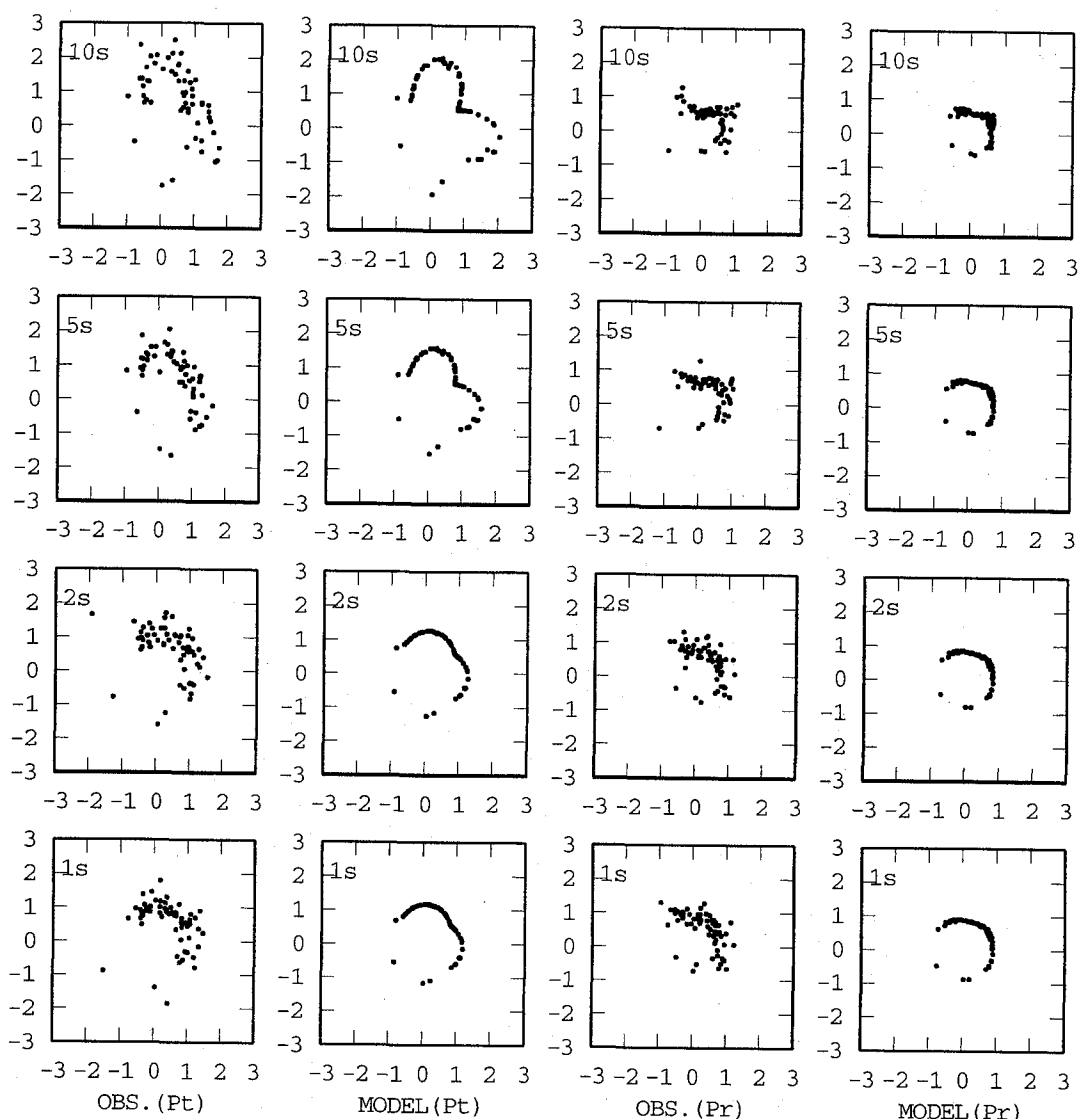


図-14 回帰データに含まれている1997年の5月13日の鹿児島県北西部地震 ($M_f=6.3$, $M_0=1.22 \times 10^{25}$ dyne-cm) の観測 $P_i(T)$, $P_r(T)$ と M_0 をパラメータにした回帰モデルに基づくモデル $P_i(T)$, $P_r(T)$ との比較

を丸の大きさで表現して、I 種地盤以外の観測点も含め地図上にプロットした結果を図-17 に示す。周期 10 秒では、モデル $P_i(T)$ は最大で約 2.5 倍となり、観測 $P_i(T)$ がモデル $P_i(T)$ でよく表現されている。なお、モデル $P_r(T)$ は図示はしないが最小で約 0.5 倍となる。

鳥取県西部地震の震源の破壊過程は、主に破壊開始点から上方への破壊伝播と浅いところを南東及び北西方向に広がる破壊伝播とからなっていることが指摘されており²⁹⁾、南東方向の観測点の断層直交方向成分で周期 1 秒～2 秒の forward rupture directivity パルスが生じている(例えば^{14),26)}。図-16 に示した周期 2 秒、1 秒の観測 $P_i(T)$ がモデル $P_i(T)$ より南東方向や北西方向の観測点でやや大きい傾向があるのは、forward rupture directivity 効果が寄与していると考えられる。forward rupture directivity パルスの幅より長周期と考えられる周期 5 秒以上では、観測 $P_i(T)$ はモデル $P_i(T)$ より南西方向でやや大きい。これは、震源から南西方向の観測点において周期 5 秒以上の Love 波が卓越している²⁷⁾ためと考えられる。このような長周期表面波の卓越は本研究のモデルでは表現できない。しかし、本研究の放射特性補正係数モデル

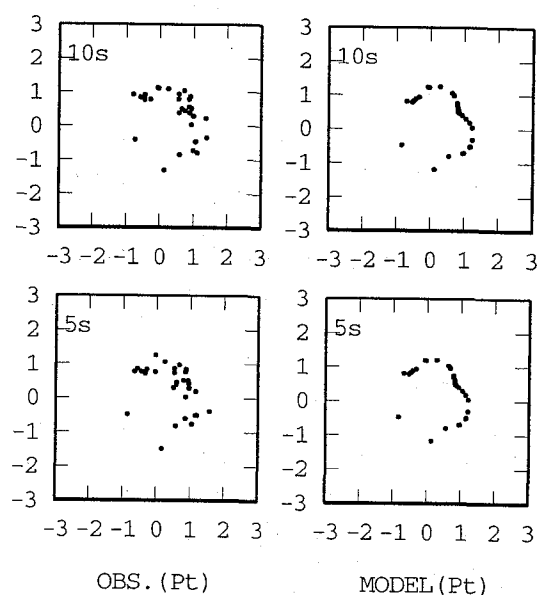


図-15 回帰データに含まれている1997年4月5日鹿児島県北西部地震($M_f=4.8$, $M_0=3.11 \times 10^{23}$ dyne-cm)の観測 $P_i(T)$ とモデル $P_i(T)$ との比較

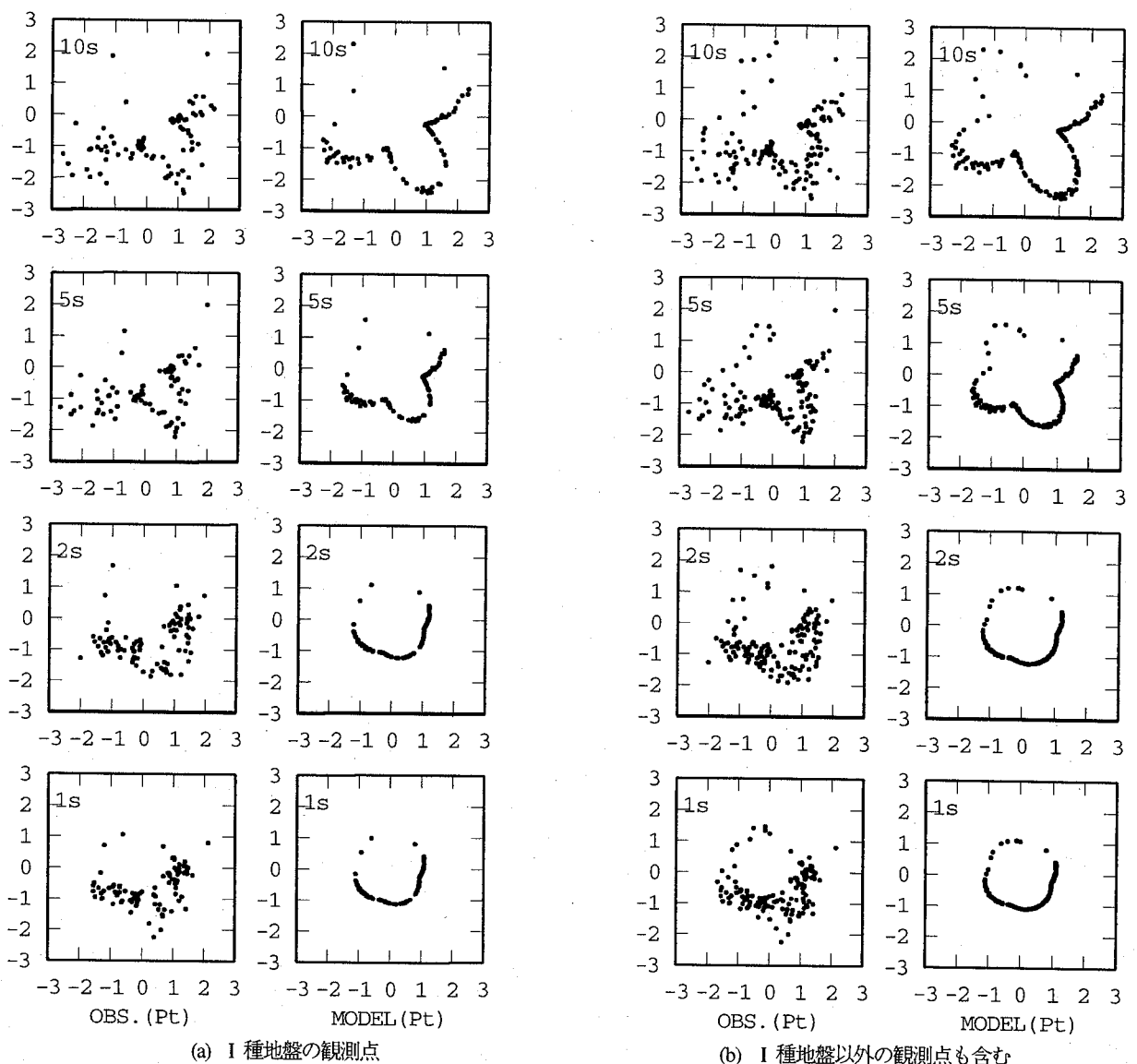


図-16 回帰データの M_0 の範囲外の 2000 年鳥取県西部地震 ($M_j=7.3$ 、 $M_0=8.62 \times 10^{25}$ dyne-cm) のモデル $P_i(T)$ と観測 $P_i(T)$ の比較

ルで補正した応答スペクトルから統計的グリーン関数を作成し、適切な断層モデルを設定することにより、統計的グリーン関数法で放射特性と破壊伝播効果により生じる forward rupture directivity 効果は表現可能である。

最後に、本研究の放射特性補正係数モデルと既往の研究との関係について議論する。「1. はじめに」で触れたように、応答スペクトルに対して放射特性補正係数モデルを作成している研究はないため、フーリエスペクトルを用いた佐藤の研究¹⁴⁾と比較する。佐藤¹⁴⁾は、周期 0.5 秒以上で放射特性が顕著であるが、0.5 秒以下で放射特性が顕著でなくなり 0.2 秒以下では等方的となることを指摘しており、本研究の放射特性補正係数の周期依存性はこの研究と調和的である。しかし、応答スペクトルの方がフーリエスペクトルより同じ周期における理論放射特性依存性が明瞭でない。この原因として、フーリエスペクトルと応答スペクトルの違いの他、フーリエスペクトルによる検討では継続時間 3~5 秒の S 波部を対象としているのに対して、本研究の応答スペクトルによる検討では S 波部とそれ以降の表面波も含

む長い継続時間を対象としていることが考えられる。また、佐藤¹⁴⁾の研究では鳥取県西部地震とその余震のフーリエスペクトルの放射特性には差がみられなかったのに対し、本研究の応答スペクトルの放射特性には M_0 依存性が認められた。この違いは、フーリエスペクトルと応答スペクトルの違いに起因していると考えられる。すなわち、応答スペクトルのパワーの小さい小地震の長周期成分は短周期成分の影響を受けやすくなるため、理論放射特性との関係が不明瞭となるものと考えられる。放射特性補正係数の震源距離依存性については、本研究の応答スペクトルではほとんど確認できなかった。一方、佐藤¹⁴⁾でも 3Hz 程度で弱い震源距離依存性があるがそれ以外の周波数帯域では依存性がほとんどないことを指摘している。

また、既往の応答スペクトルに対する forward rupture directivity 補正係数^{15),16)}は、震源近傍のみが方位依存性の補正の対象であるが、本研究では、放射特性は応答スペクトルであっても長周期領域では 200km 程度の遠方まで影響を及ぼしていることを示した。

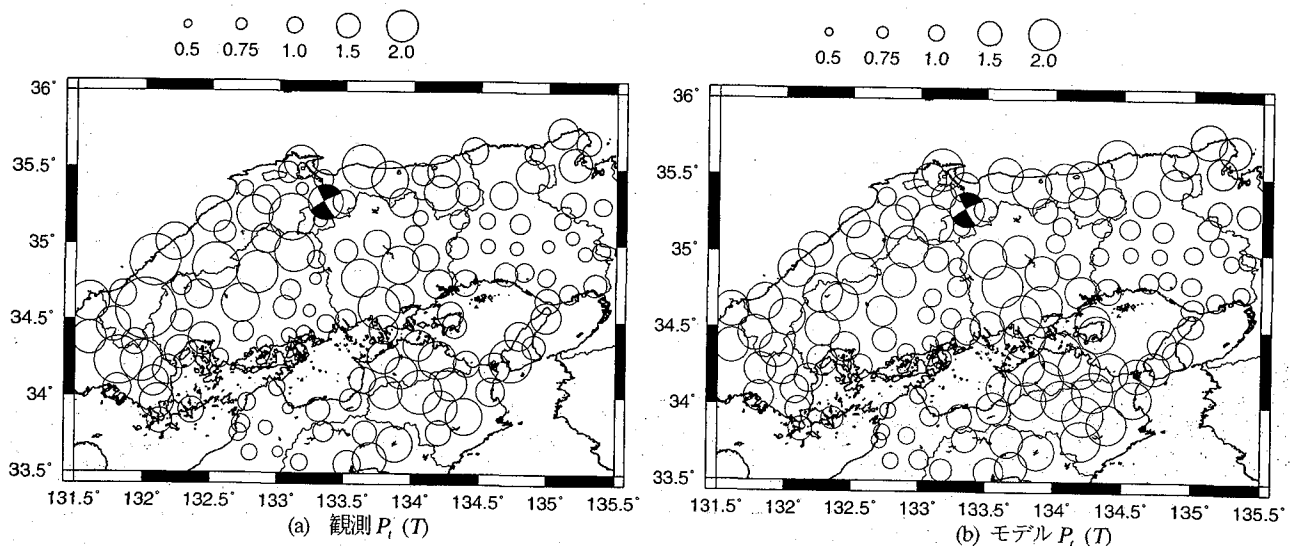


図-17 2000年鳥取県西部地震に対する周期10秒での観測 $P_i(T)$ とモデル $P_i(T)$ の比較 (I 種地盤以外の観測点も含む)

7. まとめ

統計的グリーン関数法に基づく水平動の入力地震動評価の高精度化を目指して、I 種地盤で得られた中小地震記録の加速度応答スペクトルを用いて放射特性の周期、震源距離、地震モーメント依存性を検討し、加速度応答スペクトルの推定式を補正するための放射特性補正係数の経験的モデル(評価式)を K-net 強震記録を用いた回帰分析に基づき作成した。放射特性補正係数モデルは、理論放射特性係数の絶対値がパラメータとなっており、この理論放射特性係数は、メカニズム解(走向、傾斜角、すべり角)、震源と観測点の位置関係を表す方位角、震源深さと震央距離(震源距離)から地下構造情報を基に得られる射出角から算出される。

本研究で作成した、放射特性補正係数モデルは以下のような特徴がある。

- ・周期 0.2 秒以下では、放射特性補正係数モデルは理論放射特性係数に依存せず、応答スペクトルは地点によらず水平面内で等方的で方位依存性がない。周期 0.5 秒以上では放射特性補正係数モデルの理論放射特性係数依存性が顕著になる。
- ・放射特性補正係数モデルの回帰係数は 10~200km の範囲で震源距離には依存せず、長周期領域では理論放射特性係数に依存した方位依存性がある。ただし、射出角が震源距離により変化するため放射特性補正係数モデルは震源距離により変化する。
- ・strike-slip の 内陸地震に対する放射特性補正係数モデルは M_0 に依存し、 M_0 が大きいほど理論放射特性係数依存性が大きい。なお、データの M_0 の範囲が狭い dip-slip や oblique-slip の内陸地震に対しては M_0 依存性の検討はできなかった。
- ・dip-slip の内陸地震、dip-slip の海溝性地震は strike-slip の内陸地震と比べ、放射特性補正係数モデルの理論放射特性依存性は小さく、長周期領域でも方位依存性は不明瞭であった。
- ・strike-slip の 内陸地震に対する放射特性補正係数モデルは、transverse 成分の方が radial 成分より観測とよく整合する。この原因として、radial 成分の方が、射出角の変動の影響を受けやすいことや、SV 波の理論放射特性係数が SH 波のそれ

より小さい場合が多いことが考えられる。

- ・鳥取県西部地震の M_0 である 8.62×10^{25} dyne-cm を用いて外挿した strike-slip の 内陸地震に対する放射特性補正係数モデルでは、transverse 成分では最大で 2.5 倍、radial 成分では最小で 0.5 倍となり、概して鳥取県西部地震の観測放射特性補正係数と調和的であった。しかし、詳細にみると、forward rupture directivity の影響や表面波の影響が考えられる周期では、モデルの方が観測より方位依存性がやや小さい傾向があった。なお、forward rupture directivity の効果は、放射特性補正係数モデルで補正した応答スペクトルから統計的グリーン関数を作成し、統計的グリーン関数法により大地震の強震動評価を行うことにより考慮することができる。

strike-slip の 内陸地震に対する放射特性補正係数モデルが M_0 依存性をもつことから、今後、大規模地震のデータを収集して、本研究で中小規模のデータから作成した放射特性補正係数モデルの検証及び改良を行っていくとともに、提案した放射特性補正係数モデルを適用した統計的グリーン関数法に基づく合成波と観測波との比較による検証が必要である。

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所の K-NET 強震記録とその地盤情報、メカニズム解、気象庁の震源情報を用いました。また、一部の図の作成には、Wessel and Smith²⁸⁾の図化ソフトを使用しました。記して感謝致します。

参考文献

- 1) 入倉孝次郎, 三宅弘恵: シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, Vol.110, No.6, pp.849-875, 2001.
- 2) 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, 日本建築学会構造系論文報告集, 第430号, pp.1-9, 1991.
- 3) 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集, 第463号, pp.27-37, 1994.

- 4) 壇一男, 渡辺基史, 佐藤俊明, 宮腰淳一, 佐藤智美: 統計的グリーン関数法による 1923 年関東地震($M_{\text{JMA}} 7.9$)の広帯域強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 530 号, pp.53-62, 2000.
- 5) 佐藤智美, 片岡正次郎, 田村敬一, 奥村俊彦: K-net 強震記録を用いた加速度応答スペクトルと経時特性の推定式の検討, 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, Vol.1, pp.397-400, 2001.
- 6) 佐藤智美, 片岡正次郎, 奥村俊彦: K-Net 強震記録に基づく工学的基盤における加速度応答スペクトルと経時特性の推定式の検討, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, pp.615-620, 2002.
- 7) 片岡正次郎, 村越潤, 田村敬一: 統計的グリーン関数法を用いた震源近傍における強震動のシミュレーション, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, pp.561-566, 2002.
- 8) Liu, H. L. and D. V. Helmberger: The 23:19 aftershock of the 15 October 1979 Imperial Valley earthquake: more evidence for asperity, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.75, pp.689-708, 1985.
- 9) Vidale, J. E.: Influence of focal mechanism on peak accelerations of strong motions of the Whittier Narrows, California, earthquake and an aftershock, J. Geophys. Res., Vol.94, pp.9607-9613, 1989.
- 10) Satoh, T.: Empirical Frequency-Dependent Radiation Pattern of the 1998 Miyagiken-Nambu earthquake in Japan, Bull. Seism. Soc. Am., pp.1032-1039, 2002.
- 11) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長: 地域的な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, 第 416 号, pp.57-69, 1990.
- 12) Pitarka, A., P. Somerville, Y. Fukushima, T. Uetake, and K. Irikura: Simulating of near-fault strong-ground motion using hybrid Green's functions, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.90, pp.566-586, 2000.
- 13) 大西良広, 堀家正則: 統計的グリーン関数を用いた 3 成分地震動合成法の兵庫県南部地震への適用, 構造工学論文集, Vol.46B, pp.389-398, 2000.
- 14) 佐藤智美: Kik-net 強震記録に基づく鳥取県西部地震とその余震のラディエーションパターン及び f_{max} の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 556 号, pp.25-34, 2002.
- 15) Somerville, P. G., N. F. Smith, R. W. Graves, and N. A. Abrahamson: Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity, Seism. Res. Lett., Vol.68, pp.199-222, 1997.
- 16) 大野晋, 武村雅之, 小林義尚: 観測記録から求めた震源近傍における強震動の方向性, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, Vol.1, pp.133-138, 1998.
- 17) 司宏俊, 翠川三郎: 統計的グリーン関数法に基づく地震動最大振幅に対する破壊伝播効果による方位依存性の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 546 号, pp.47-53, 2001.
- 18) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V, 耐震設計編, 1990.
- 19) 福山英一, 石田瑞穂, D. S. Dreger, 川井啓廉: オンライン広帯域地震データを用いた完全自動メカニズム決定, 地震, 第 2 輯, 第 51 巻, pp. 149-156, 1998.
- 20) Fletcher, R.: FORTRAN subroutines for minimization by quasi-Newton methods, Report R7125 AERE, Harwell, England, 1972.
- 21) Aki, K. and P. G. Richards: Quantitative Seismology, Theory and Method, Vol.1, W. H. Freeman and Company, 1980.
- 22) 浜田信生: 近地地震走時表の再検討, 気象研究所研究報告, 第 35 巻, 第 3 号, pp.109-167, 1984.
- 23) 佐藤智美, 佐藤俊明, 川瀬博, 植竹富一: 地震観測記録の応答スペクトルとフーリエスペクトルの回帰係数の違いとその解釈, 日本建築学会構造系論文集, 第 506 号, pp.83-92, 1998.
- 24) 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 ($M_{\text{JMA}} 6.5$) 及び 5 月 13 日 ($M_{\text{JMA}} 6.3$) 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 2, 第 51 号, pp.431-442, 1999.
- 25) 岩田知孝, 関口春子, 三宅弘恵, 浅野公之, Z. Wenbo: 不均質震源特性の抽出と分析, 地震災害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究第 1 回シンポジウム論文集, pp.21-28, 2002.
- 26) 古村美津子, 浜田和郎, 釜江克宏, 入倉孝次郎: 2000 年鳥取県西部地震の強震動シミュレーションによる震源の特性化手法の検討, 日本地震学会講演予稿集, A79, 2001.
- 27) 引田智樹, 丹羽正徳: 2000 年鳥取県西部地震の中国地方で観測されたやや長周期地震動の解析, 第一回日本地震工学研究発表会・討論会梗概集, pp.114, 2001.
- 28) Wessel, P. and W. H. F. Smith: New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS, AGU, 1998.

(2002年9月13日受付)