

中国地方の地震基盤における地震動の統計的経時特性

高田, 将輝

九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻：修士課程

神野, 達夫

九州大学人間環境学研究院都市・建築学部門

阿比留, 哲生

中国電力株式会社電源事業本部：マネージャー

<https://doi.org/10.15017/1560198>

出版情報：都市・建築学研究. 27, pp. 43-49, 2015-01-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

バージョン：

権利関係：

中国地方の地震基盤における地震動の統計的経時特性

Stochastic envelope characteristics of earthquake motions on seismic bedrock in Chugoku-District

高田将輝*, 神野達夫**, 阿比留哲生***

Masaki TAKADA, Tatsuo KANNO and Tetsuo ABIRU

In order to predict strong ground motions by the stochastic Green's function method, the envelope characteristic and the amplitude characteristic of seismic bedrock motions are needed. Because site effects greatly influence observed earthquake motions, when the seismic bedrock motions are estimated based on the observed earthquake motion records, the site effects included in the records must be removed. In this paper, first, the site effects are removed from the observed records based on the 1-D multi-reflection theory using underground structures down to the seismic bedrock. And the stochastic envelope characteristics of the seismic bedrock motions in Chugoku-District are estimated by regression analysis with the hypocentral distance and the moment magnitude.

Keywords : Envelope characteristic, Seismic bedrock, Chugoku-District, Stochastic Green's function, Regression analysis
経時特性, 地震基盤, 中国地方, 統計的グリーン関数, 回帰分析

1. はじめに

地震動を特徴付ける要素は、震源、伝播経路、地盤の3つの特性であり、特に地盤特性の影響は大きい。一般に、この地盤特性はS波速度3000 m/s程度の地震基盤以浅の地盤構造による地震動の增幅特性を表すが、近接する地点でも地震動を大きく変化させるなど、それぞれの地点でも大きく異なることがあり、非常に複雑である。そのため、地震動の平均的な特性を地震基盤上で評価し、それに対して評価地点ごとに地盤特性を加味することで地表面の地震動を評価する場合が多い。地震動の評価手法の一つである統計的グリーン関数法(Boore, 1983¹⁾)においても、中小地震記録から抽出された統計的な振幅特性と経時特性をもとに統計的グリーン関数を作成し、これを震源断層のスケーリング則にしたがって重ね合わせることで大地震の地震波形を合成するが、この際に用いられる統計的グリーン関数は地盤特性を含まない地震基盤波として定義されることが望ましい。しかし、この統計的グリーン関数の導出に用いられる地震波形の多くは地表面で観測されたものであり、さらに工学的基盤以浅の地下構造データに比べて、それ以深のデータは非常に限られることもあり、地震基盤ではなく工学的基盤で統計的グリーン関数を定義し、地盤特性の影響を取り除ききれていない場合も多くみられる。

本論文では、別途推定された中国地方の地下構造モデル(真鍋・他、2012²⁾)を用いて、防災科学技術研究所の強震観測網K-NET、KiK-net³⁾の地震記録から地震基盤波を推定し、統計的グリーン関数のもととなる統計的経時特性の抽出を行う。また、本研究で得られた地震基盤波や既往の研究と比較し、得られた統計的経時特性の特徴を考察する。

2. 経時特性を規定するパラメータの抽出

2.1 解析方法

解析には、1999年7月から2012年9月までのK-NET、KiK-netデータのうち、気象庁マグニチュード $4.0 \leq M_j \leq 6.0$ 、震源距離 $X \leq 300\text{ km}$ 、震源深さ $h \leq 100\text{ km}$ 、最大加速度 $\leq 200\text{ gal}$ 、同一地震トリガー地点数 ≥ 20 を満たすデータを用いた。解析に用いた地震を表1に示す。地震のタイプについては、震源の位置と深さで分類した。なお、プレート境界地震に該当するデータはなかったため、本研究では地殻内地震とプレート内地震の2つに分類した。また、 M_j は5.0~6.0に該当するものは無かった。本研究では、解析の対象とする地震のうち、F-net⁴⁾によって M_w (モーメントマグニチュード)が明らかになっている地震を用いて、式(1)のような M_j と M_w の関係式を導いた。両者の関係を図1に示す。なお、図中の直線は回帰式(式(1))である。表1の M_w はこの式を用いて M_j から求めた。

* 都市共生デザイン専攻修士課程

** 都市・建築学部門

*** 中国電力株式会社電源事業本部・マネージャー

震源深さは気象庁が決定した値を用いている。観測点は、中国地方の K-NET (83 地点)、KiK-net (72 地点) の観測点 155 地点 (図 2) である。解析データは 2643 個の観測波形の各 2 成分 (NS 成分、EW 成分) の計 5286 個である。

本研究では、1次元重複反射理論を用いて地震基盤以浅の地盤の影響を取り除き、地震基盤における基盤波（入射波）を推定した。この際に用いられた地下構造モデルは、武田（2011）⁵⁾においてスペクトルインバージョン法によって求められた地盤増幅特性から逆解析的に地下構造を推定した真鍋・他（2012）のモデルである。本研究では、地震波が地震基盤以浅の地盤を鉛直方向に伝播すると近似している。

表1 解析に用いた地震

No.	発生日時	深さ(km)	M_i	M_w	タイプ
1	1999/7/16 2:59	20	4.4	4.3	プレート内
2	1999/10/30 6:25	13	4.5	4.4	地殻内
3	2000/1/17 20:56	17	4.0	3.8	地殻内
4	2000/7/17 8:00	17	4.3	4.1	地殻内
5	2000/10/6 14:43	11	4.1	3.9	地殻内
6	2000/10/6 14:52	11	4.4	4.3	地殻内
7	2000/10/6 16:21	10	4.2	4.0	地殻内
8	2000/10/6 19:57	13	4.0	3.8	地殻内
9	2000/10/6 23:13	8	4.1	3.9	地殻内
10	2000/10/7 6:38	11	4.4	4.3	地殻内
11	2000/10/7 12:03	9	4.2	4.0	地殻内
12	2000/10/10 21:58	11	4.4	4.3	地殻内
13	2000/11/3 16:33	10	4.5	4.4	地殻内
14	2000/12/7 23:09	12	4.2	4.0	地殻内
15	2001/2/11 9:17	13	4.3	4.1	地殻内
16	2001/3/24 15:48	46	4.2	4.0	プレート内
17	2001/3/24 16:25	46	4.2	4.0	プレート内
18	2001/3/24 17:02	51	4.2	4.0	プレート内
19	2001/3/24 22:37	47	4.1	3.9	プレート内
20	2001/3/25 19:19	51	4.4	4.3	プレート内
21	2001/3/26 5:41	49	5.0	5.0	プレート内
22	2001/8/24 21:44	48	4.3	4.1	プレート内
23	2001/10/8 11:23	8	4.1	3.9	地殻内
24	2002/1/24 16:08	9	4.5	4.4	地殻内
25	2002/3/25 22:58	46	4.7	4.6	プレート内
26	2002/7/1 20:49	47	4.0	3.8	プレート内
27	2002/10/23 6:22	11	4.4	4.3	地殻内
28	2003/3/27 13:47	13	4.2	4.0	地殻内
29	2003/4/2 1:38	11	4.2	4.0	地殻内
30	2004/9/21 10:13	48	4.2	4.0	プレート内
31	2005/1/4 5:06	19	4.0	3.8	地殻内
32	2005/5/27 3:17	42	4.7	4.6	プレート内
33	2006/5/8 12:45	13	4.2	4.0	地殻内
34	2006/7/11 3:09	16	4.0	3.8	地殻内
35	2007/5/13 8:14	9	4.6	4.5	地殻内
36	2007/11/10 1:47	18	4.3	4.1	地殻内
37	2008/3/8 3:52	45	4.1	3.9	プレート内
38	2008/5/2 12:23	9	4.0	3.8	地殻内
39	2008/5/20 14:41	15	4.2	4.0	地殻内
40	2010/2/21 11:49	13	4.5	4.4	プレート内
41	2011/1/16 20:33	44	4.5	4.4	プレート内
42	2011/10/4 19:19	44	4.2	4.0	プレート内
43	2011/11/25 4:35	12	4.7	4.6	地殻内
44	2011/11/25 4:52	13	4.3	4.1	地殻内
45	2012/9/8 10:41	50	4.5	4.4	プレート内

経時特性は Boore (1983) の包絡線関数 $W(t)$ でモデル化し、地震基盤波からそれを規定するパラメータの抽出を行う。Boore のモデルは、継続時間 T_d 、振幅が最大となるまでの時間 T_r の T_d に対する比 ε ($=T_r/T_d$)、時刻 T_d における振幅の最大振幅に対する比 η ($=$ 時刻 T_d における振幅/最大振幅) で規定される。 $W(t)$ の式を以下に示す。

$$b = \frac{-\varepsilon \cdot \ln \eta}{[1 + \varepsilon \cdot (\ln \varepsilon - 1)]} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

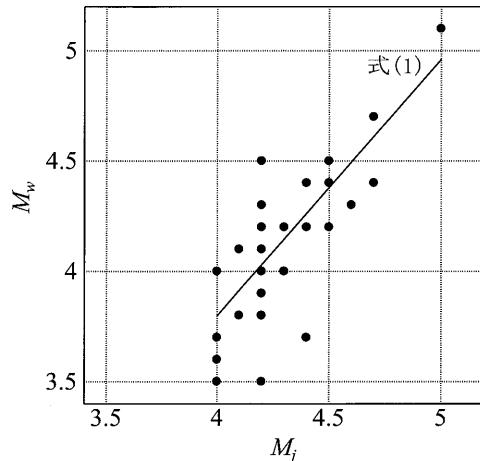


図1 M_j と M_w の関係

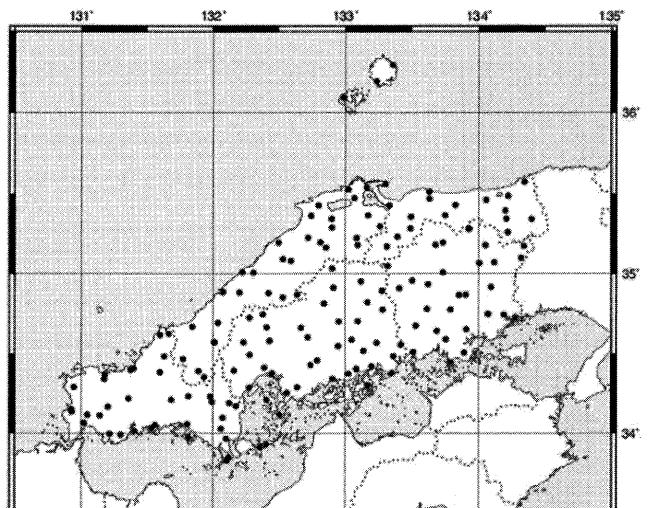


図2 解析に用いた観測点の位置

ここで、(2)式の $H(t)$ は単位ステップ関数を表し、(3)式の α は関数 $W(t)$ の最大値が 1 になるように規定されている。

まず、S 波の初動を目視で読み取り、そこから 40.96 秒間のデータについて振幅の絶対値をとる。この際 KiK-net のデータについては 0.01 秒にリサンプリングしている。次に、Parzen Window を用いてバンド幅 $T_w = 0.5$ (sec) で平滑化する。その上で地震基盤波の最大値を 1 に基準化する。その地震基盤波の T_r を読み取った後、 ε の最適解を二段階で探索した。Boore の包絡線関数 $W(t)$ の η は 1/10 で固定し、 ε の値を 0.001~1.0 の範囲を 0.001 刻みで変化させ、最小二乗法によって最適な ε を求める。さらにそこで得た最適な ε を中心とする ± 0.001 の幅の範囲において再び ε の値を 0.00001 刻みで変化させて最終的な最適解を探査した。なお、 T_d は波形から読み取った T_r と探査された ε から算出した ($T_d = T_r / \varepsilon$)。

2.2 解析結果

図 3 に HRS07 (KiK-net 呉) の No. 40 地震 (EW 成分) における包絡線曲線のフィッティングの例を示す。残りの全ての観測記録について同様の作業を行った。 M_w と同定した T_r 、 T_d の関係を図 4、5 に、 X と T_r 、 T_d の関係を図 6、7 に示す。 M_w や X が大きくなるほど T_r 、 T_d も大きくなる傾向が見られる。これは、 M_w が大きいほど断層の破壊に時間が掛かり、また最大値に達するまでの破壊の進展に時間が掛かること、 X が大きいほど散乱により速度の遅い波の到着時間が遅れることに起因していると考えられる。本研究では、 T_r 、 T_d は M_w および X と一定の相関があることから M_w および X で回帰分析が可能であると判断した。

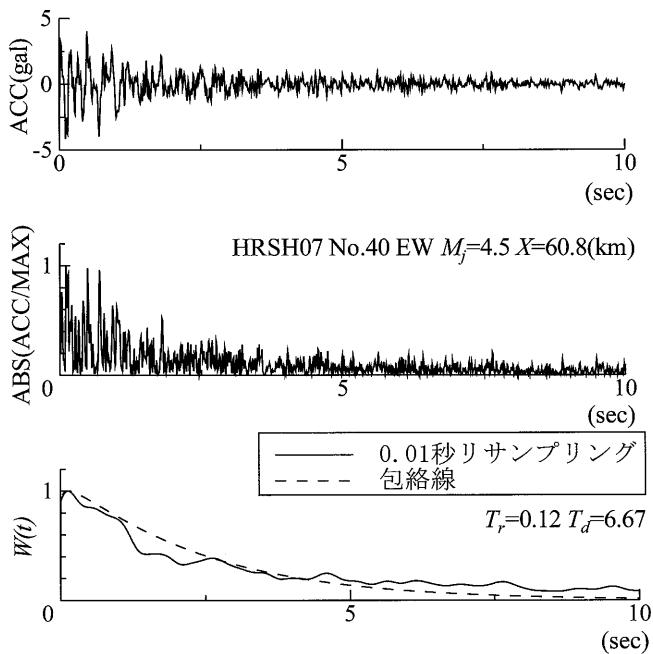


図 3 包絡線関数 $W(t)$ のフィッティングの一例

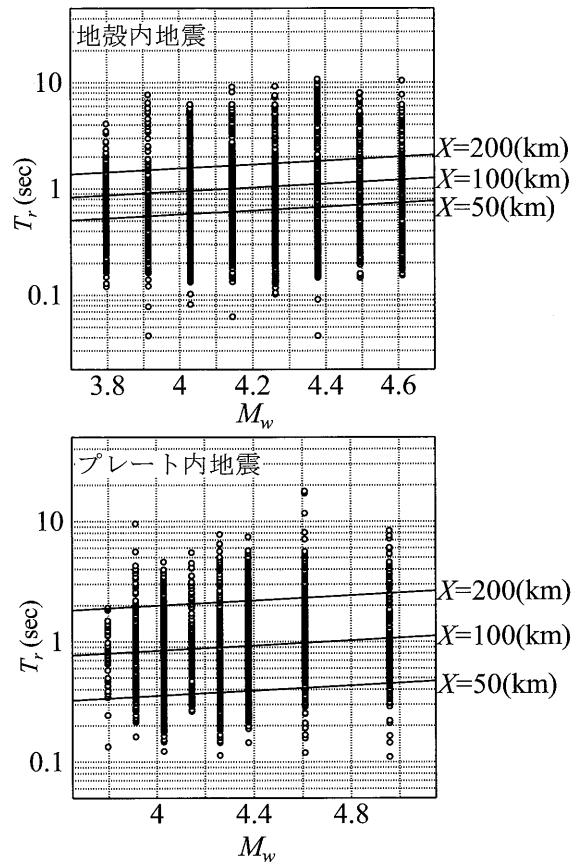


図 4 M_w と T_r の関係

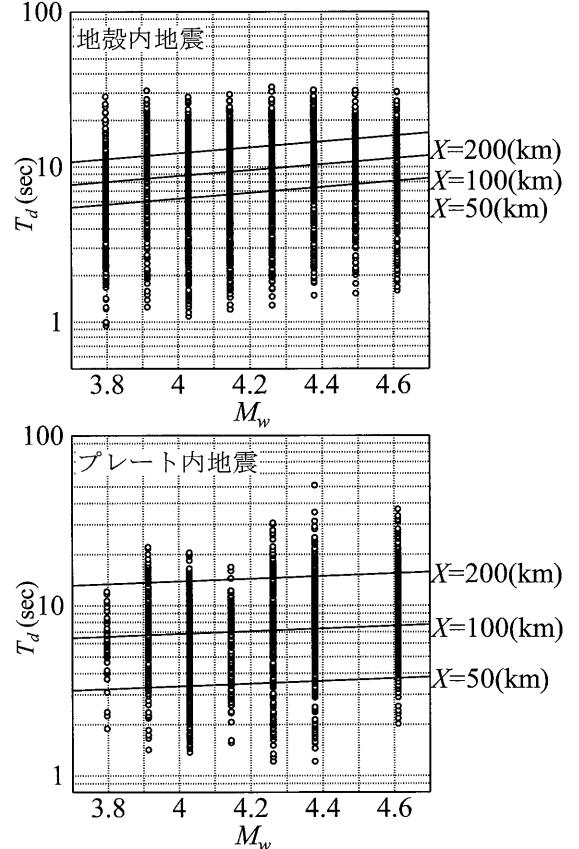


図 5 M_w と T_d の関係

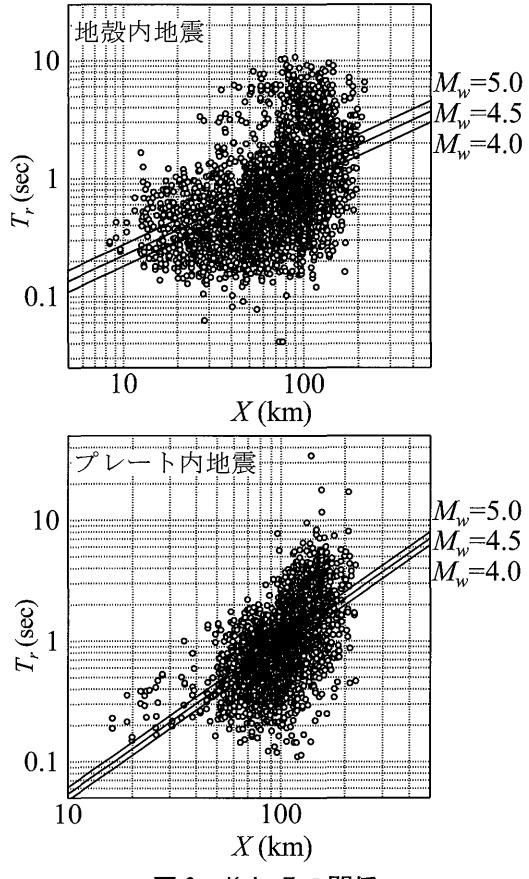


図6 X と T_r の関係

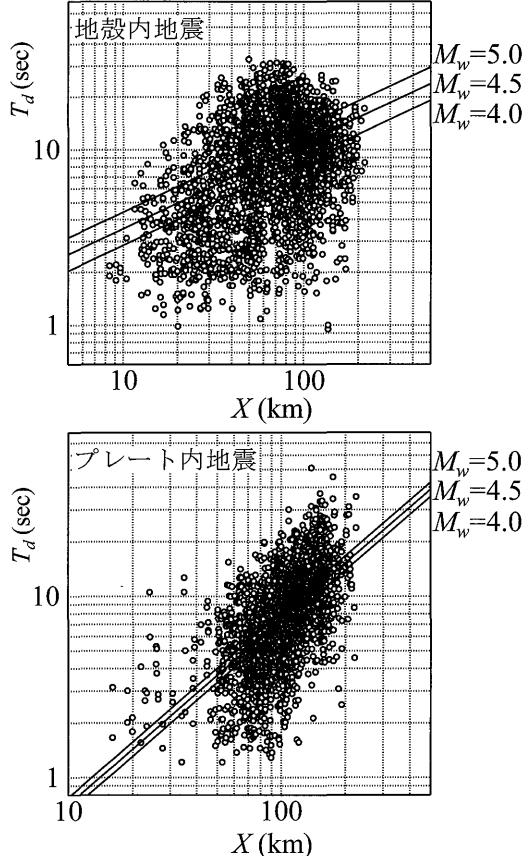


図7 X と T_d の関係

3. パラメータ T_r 、 T_d の回帰分析

3.1 解析方法

2章で得られた T_d と T_r を M_w と X で回帰する。導出された回帰式の妥当性を検証するため、地震タイプごとにデータセットをランダムに、推定式の導出用（データセットA）と検証用（データセットB）の2つに分割した。図8は2つのデータセットにおける T_r 、 T_d の確率分布であるが、データセットAとBの分布の傾向は類似していることから、データセットに大きな偏りは無いと判断した。また、図9に示すように、若干ではあるが M_w と X に正の相関があることによる悪影響を取り除くために二段階回帰分析を行う。まず一段階目では T_{dij} を次式でモデル化する。

$$\log T_{dij} = \alpha_i + \beta \cdot \log X_{ij} \quad \dots \dots \dots (6)$$

i は地震番号、 j は観測点番号を表し、 α_i は震源に関する回帰係数（震源項）、 β は距離に関する回帰係数である。次に二段階目では、(7)式のように震源項を M_w の一次式でモデル化し、一段階目で得られた β を用いて回帰係数 α' と γ を求める。

$$\log T_{dij} = \alpha' \cdot M_{wi} + \beta \cdot \log X_{ij} + \gamma \quad \dots \dots \dots (7)$$

T_r についても同様の解析を行う。

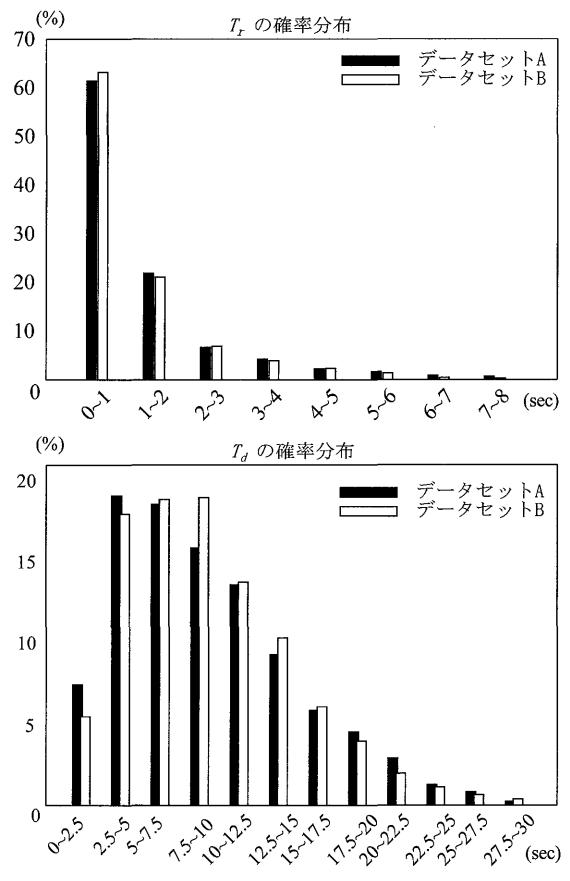


図8 T_r 、 T_d の確率分布

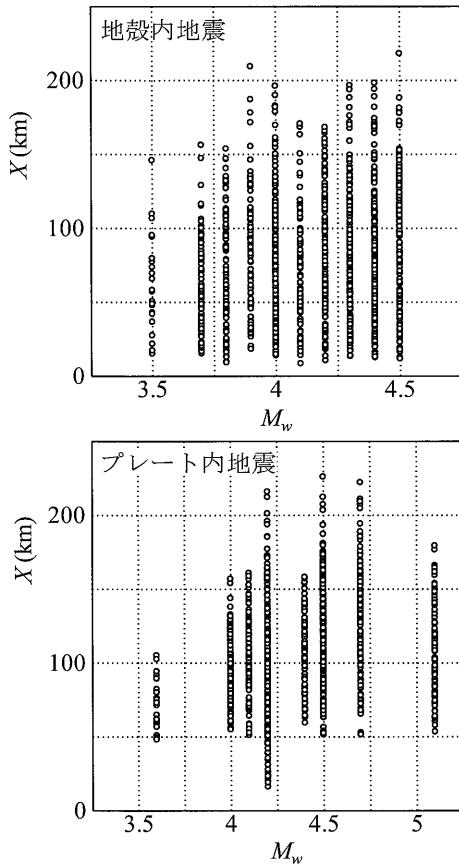


図9 M_w と X の関係

3.2 解析結果

データセット A に対して二段階回帰分析を行い、回帰式を求める。地殻内地震の T_r 、 T_d の回帰式を式(8)、(9)に、プレート内地震の T_r 、 T_d の回帰式を式(10)、(11)に示す。

$$\log T_r = 0.1828 \cdot M_w + 0.7198 \cdot \log X - 2.1948 \quad \dots\dots(8)$$

$$\log T_d = 0.1892 \cdot M_w + 0.4866 \cdot \log X - 0.7878 \quad \dots\dots(9)$$

$$\log T_r = 0.1087 \cdot M_w + 1.2453 \cdot \log X - 3.0013 \quad \dots\dots(10)$$

$$\log T_d = 0.0793 \cdot M_w + 1.0245 \cdot \log X - 1.5321 \quad \dots\dots(11)$$

図 10 に回帰式から得られた T_r と T_d を用いて計算された $\eta=1/10$ の包絡線関数と地震基盤波の比較の一例を示す。地震基盤波と回帰式から得られた包絡曲線は良く一致している。

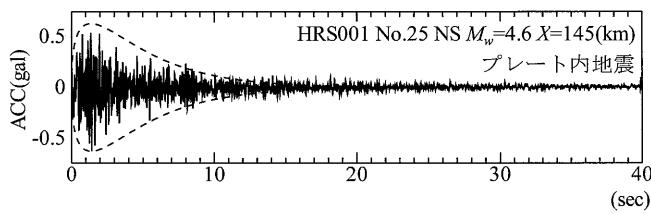


図10 地震基盤波と回帰式から得られた包絡曲線の比較

4. 考察

データセット B を用いて、既往の研究と比較することにより本研究で得られた経時特性の回帰式 (式(8)～(11)) の特徴を考察する。比較対象は、村上・他 (2002)⁹、伊藤・他 (2000)⁷、伊藤・川瀬 (2001)⁸、久原・川瀬 (2001)⁹ の 4 つである。それぞれの論文に用いられた地震データの選定条件を表 2 に示す。なお、村上・他 (2002) の研究では経時特性を規定するパラメータとして T_r の他、 $T_d - T_r$ を用いており、ここでは T_d を計算で求めて比較した。また本論文および村上・他 (2002) では観測波を S 波の初動から切り出しているのに対して、伊藤・他 (2000)、伊藤・川瀬 (2001)、久原・川瀬 (2001) の研究では S 波初動の 2 秒前から切り出しているため、同条件に合わせてから比較を行った。これらを以下、3 つの方法で比較する。

第一に、地震基盤波から抽出した T_r 、 T_d と回帰式から得られた T_r 、 T_d の誤差を評価する。評価は次の式(12)によって計算される誤差 e を用いる。

$$e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\log obs - \log pre)^2} \quad \dots\dots(12)$$

ここで n はデータ数、 obs は観測波から得られた T_r 、 T_d 、 pre は回帰式のよって推定された T_r 、 T_d である。また、伊藤・他 (2000)、伊藤・川瀬 (2001)、久原・川瀬 (2001) に合わせるために、全ての観測波の切り出しを S 波初動の 2 秒前とした。それぞれの研究で得られた T_r 、 T_d を式(12)によって評価すると図 11 のような結果になる。本研究の推定式による T_r 、 T_d の精度は他の研究と同等もしくはそれより高く、地震基盤波に他よりフィットした包絡曲線が推定できている。

次に、回帰式の定数項 (式(7)の γ) について検討する。なお、村上・他 (2002) の論文において T_d に対する直接の回帰式がないため、 T_r についてのみ検討する事とする。定数項の値に関して、伊藤・他 (2000) は回帰式の定数項の値が地盤の固さ、即ち S 波速度に依存し、S 波速度が大きいと定数項の値は小さくなり、S 波速度が小さいと定数項の値は大きくなることを指摘している。図 12 は定数項を比較したものであるが、全てに値において本論文における定数項の値が小さい。S 波速度が 3000 m/sec 程度の本論文、S 波速度が 2000 m/sec 程度の村上・他 (2002)、S 波速度が 1000 m/sec 程度の伊藤・他 (2000)、伊藤・川瀬 (2001)、久原・川瀬 (2001) と順に定数項の値が小さくなっている事からも本研究でもそれに調和的な結果が得られた。

最後に、 M_w もしくは X を固定して、個別に T_r 、 T_d との関係を検討する。図 13 は、 M_w を固定した時の X と T_r 、 T_d の関係である。本論文のプレート内地震の回帰式は、 X の値が大きくなるにつれて傾きが増大しており、 X への依存度が高くなる。一方、地殻内地震の回帰式の傾きは一定であり、 X への依存度が一定である。 T_d との関係は村上・他 (2002)

の回帰式のみ大きな値をとっており、他と異なる傾向を示す。これは、本研究を含めた他の研究が地表地震動から表層地盤の影響を取り除き、基盤入射波を用いているのに対して、村上・他（2002）は地中観測記録を使用していることから、反射波の影響を受けたためであると考えられる。図14に X を固定した時の M_w と T_r 、 T_d の関係を示す。本論文のプレート内地震の回帰式は傾きが小さく M_w への依存度が低い。一方で地殻内の回帰式は、 T_d において傾きが大きく M_w への依存度が比較的高い。 T_d の値は M_w 固定時と同様、村上・他（2002）のみ大きくなるが、先述の通り反射波の影響に起因すると考えられる。また、図13、14ともに本論文の地殻内地震とプレート内地震の回帰式に異なる傾向が見られることから、地震タイプ毎に分類して回帰する事が望ましいと考えられる。

5. まとめ

中国地方の地表で観測された地震波形データから地下構造モデルを用いて地盤の影響を取り除き、地震基盤波を求めた上で、この地震波から経時特性を規定するパラメータとして抽出したS波初動から最大値が生じるまでの時間 T_r と地震動の継続時間 T_d について、モーメントマグニチュード M_w と震源距離 X を用いて回帰分析し、統計的経時特性の推定式を求めた。

求められた推定式を既往の研究と比較した結果、得られた知見を以下に示す。

- ・中国地方の地震基盤波と推定式の T_r 、 T_d の誤差は、村上・他（2002）、伊藤・他（2000）、伊藤・川瀬（2001）、久原・川瀬（2001）と比較して本研究が最も小さい。
- ・推定式の定数項の値が他の研究と比較して最も小さく、定数項の値が地盤のS波速度に依存するという既往の研究結果に調和的である。
- ・地殻内地震において、 T_r 、 T_d の X への依存度が一定であり、 T_d は M_w への依存度が比較的高い。
- ・プレート内地震において、 T_r 、 T_d の X への依存度は X の値の増加に伴い高まり、 T_r 、 T_d の M_w への依存度が低い。
- ・推定式の特徴が地殻内地震とプレート内地震で異なることが見て取れるため、地震タイプ毎に分類して推定式を導出するのが望ましい。

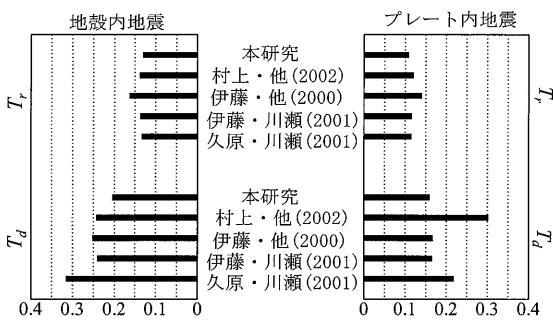


図11 誤差 e の比較

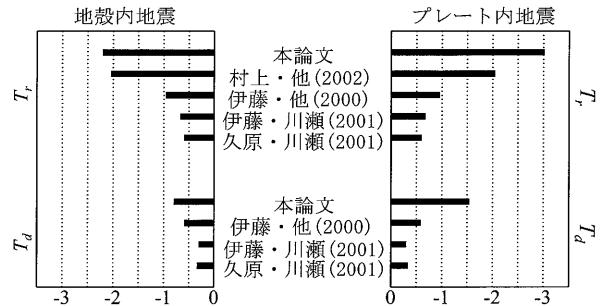


図12 定数項の比較

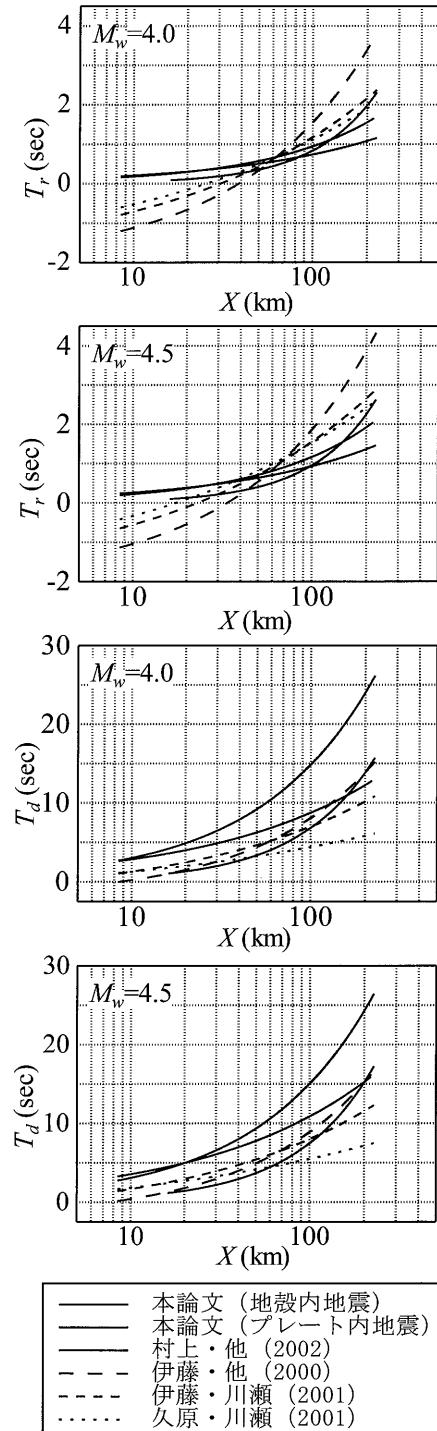


図13 M_w 固定時の X と T_r 、 T_d の関係

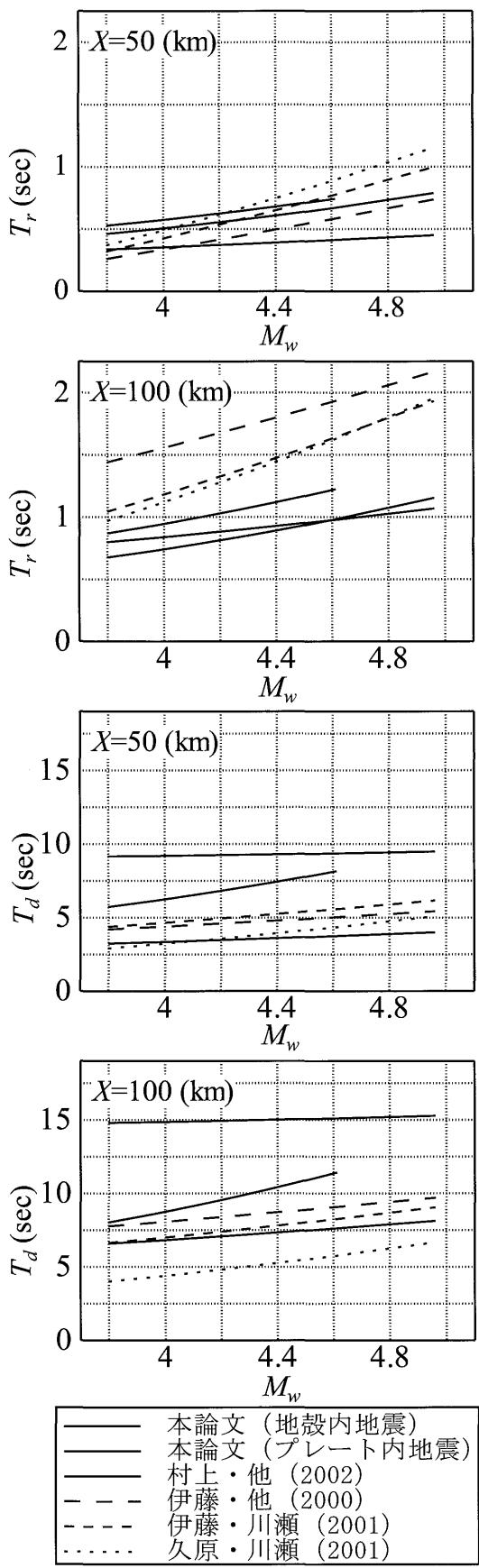


図 14 X 固定時の M_w と T_r 、 T_d の関係

表 2 地震データの選定条件一覧

	対象範囲	M_j	X (km)	h (km)	V_s (m/sec)
本論文	中国	4.0 ~ 6.0	300以下	100以下	3000程度
村上・他（2002）	近畿	3.5 ~ 5.5	10 ~ 200	指定なし	1900, 2300
伊藤・他（2000）	九州	4.5以上	300以下	60以下	1070
伊藤・川瀬（2001）	九州	4.5 ~ 6.6	15 ~ 300	指定なし	1070
久原・川瀬（2001）	中国・四国	4.1以上	300以下	60以下	1160

【謝辞】

本研究では防災科学技術研究所の K-NET、KiK-net および F-net の記録を使用した。また、作図の一部に GMT (The Generic Mapping Tools)¹⁰⁾を使用した。ここに記して感謝の意を表する。

【参考文献】

- Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 73, pp. 1865-1894, 1983.
- 真鍋良輔・小谷啓祐・神野達夫：強震記録に基づく地盤增幅特性を用いた地下構造モデル構築、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、B-2、pp. 115-116、2012.9.
- 防災科学技術研究所：強震観測網（K-NET、KiK-net）、<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoushin/>（参照：2014-1-31）
- 防災科学技術研究所：広帯域地震観測網（F-net）、<http://www.fnet.bosai.go.jp/freesia/top.php>（参照：2014-1-31）
- 武田純也：スペクトルインバージョンに基づく中国地方の地盤增幅特性評価に関する研究、2010 年度広島大学大学院修士論文、p. 177、2011.3.
- 村上洋介・野畠有秀・圓幸史朗：近畿地方の硬質地盤における中小地震の経時特性、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、B-2、pp. 113-114、2002.8.
- 伊藤茂郎・久原寛之・川瀬博・多賀直恒：K-NET 強震観測記録を用いた九州地方の統計的地震動特性 その 1. 地震動の統計的経時特性、日本建築学会九州支部研究報告、第 39 号、pp. 269-272、2000.3.
- 伊藤茂郎・川瀬博：統計的グリーン関数法による強震動予測法の検証と仮想福岡地震への適用、日本建築学会構造系論文集、第 540 号、pp. 57-6、2001.2.
- 久原寛之・川瀬博：統計的グリーン関数法を用いた鳥取県西部地震の強震動シミュレーション、日本建築学会九州支部研究報告、第 40 号、pp. 213-216、2001.3.
- Wessel, P., W. H. F. Smith, R. Scharroo, J. F. Luis, and F. Wobbe: Generic Mapping Tools: Improved version released, *EOS Trans. AGU*, 94, pp. 409-410, 2013.11.

（受理：平成26年11月13日）