

# 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

佐藤智美<sup>1</sup>・片岡正次郎<sup>2</sup>・田村敬一<sup>3</sup>・奥村俊彦<sup>4</sup>

1 非会員 工博 大崎総合研究所 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-2 富国生命ビル)

2 正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 つくば市旭 1 番地)

3 正会員 工博 独立行政法人土木研究所耐震研究グループ (〒305-8516 つくば市南原 1-6)

4 正会員 工修 大崎総合研究所 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-2 富国生命ビル)

K-net 強震観測点のうち I 種地盤と判断される 549 地点で得られた 98 地震、約 5,000 波の水平成分記録(S 波以降)を用いて、二段階回帰分析手法により海溝性地震(東日本と九州の 2 グループ)と内陸地震(全国)に対する加速度応答スペクトル(固有周期 0.05~5 秒)及び加速度波形の経時特性の推定式を作成した。両推定式は、気象庁マグニチュード  $M_j$  と震源距離  $X$  を説明変数とした回帰式である。得られた応答スペクトルの推定式には、同じ  $M_j$  と  $X$  において、海溝性地震の方が内陸地震より 3~5 倍大きい傾向が認められた。Jennings 型でモデル化した経時特性の推定式には、立ち上がり部+主要動部は  $M_j$  依存性が大きく、減衰部は  $X$  依存性が大きいという特徴がみられた。

**Key Words :** K-net strong motion records, acceleration response spectrum, envelope model, crustal earthquake, subduction earthquake

## 1. はじめに

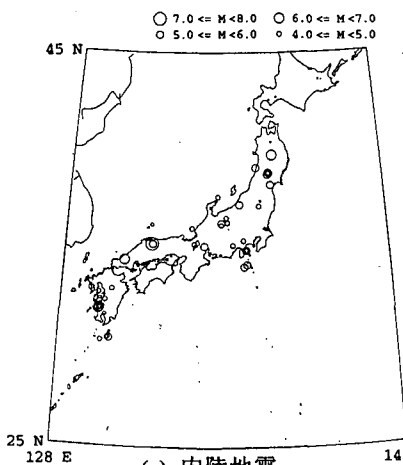
統計的グリーン関数法は、地震動評価に有効な手法であり、これまでも種々の大規模地震のシミュレーションや予測に適用されている<sup>1),2)</sup>。この手法で定量的な地震動評価を行うためには、中小地震の地震動特性を反映した時刻歴波形(統計的グリーン関数)を作成することが重要となる。そこで、本研究では、日本全国 K-net 観測点のうち I 種地盤で観測された多数の中小地震の強震記録を用いて、加速度応答スペクトルと加速度波形の経時特性の回帰式(推定式)の作成を行った。近年、内陸

地震と海溝性地震では、震源特性や伝播経路特性が異なることが指摘されている<sup>3),4)</sup>ことから、それぞれに対する回帰式を求めた。

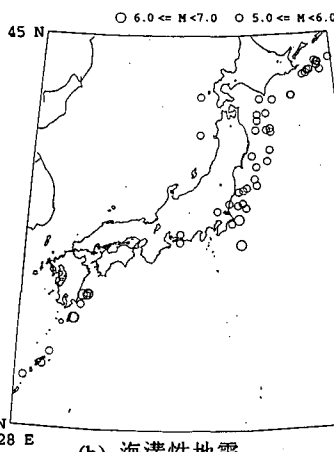
## 2. データ

データは、K-net の観測開始 1996 年 5 月から 1999 年 11 月までの地震と、2000 年鳥取県西部地震の水平成分の記録から以下の条件で選択した。

- 1) 海溝性地震は気象庁マグニチュード  $M_j \geq 5.0$ 、内陸地震は  $M_j \geq 4.5$ 。
- 2) 震源深さ  $\leq 60\text{km}$ 、震源距離  $X \leq 200\text{km}$ 、3 地点



(a) 内陸地震



(b) 海溝性地震

図-1 震央位置

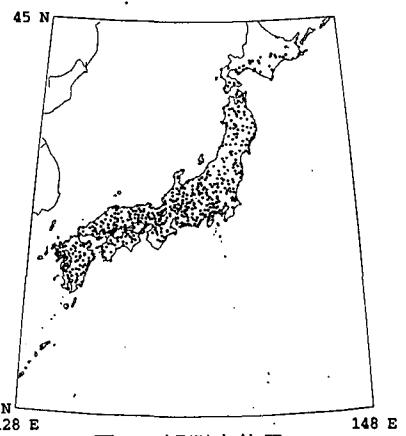


図-2 観測点位置

表-1 データセットの概要(気象庁の震源情報を使用)

	海溝性地震		内陸地震	
	東日本	九州	全国	全国*
地震数	43	10	45	44
波形数	1498	444	3190	2994
観測点数	308	67	478	468
$M_j$ の範囲	5.0-6.4	5.0-6.6	4.5-7.3	4.5-6.5
震源距離(km)	37-200	45-200	4-200	4-200
震源深さ(km)	0-60	32-54	0-23	0-23

\*鳥取県西部地震を除いた場合

以上でトリガー。

3) PS 検層結果から道路橋示方書<sup>5)</sup>の方法で評価した地盤種別がI種地盤となる観測点のデータ。

4) S 波部以降の水平 2 成分、周期 0.05~5 秒のフーリエスペクトルに顕著なノイズが認められない。

回帰分析に用いる内陸地震、海溝性地震の震央位置を図-1 に、観測点位置を図-2 に示す。海溝性地震は、東日本と九州のデータが互いに独立となったため、これら 2 地域のデータセットで別々に回帰分析を行なった。また、鳥取県西部地震のみ地震諸元が速報値であり規模も大きいため、内陸地震に対してはこの地震を含めた場合と含まない場合の両方について検討を行なった。データセットの概要を表-1 に示す。計 549 観測点で観測された 98 地震の約 5,000 波であり、水平 2 成分は独立に扱った。なお、ここでいう内陸地震は地殻内地震であり、海溝性地震には、プレート境界地震とスラブ内地震が含まれる。

図-3 には、検討に用いたデータの地震モーメント  $M_0$ (ハーバードの推定値)と  $M_j$  の関係を、既往の回帰式<sup>6),7),8),9)</sup>とともに示す。用いたデータは、同じ  $M_0$  に対して、内陸地震の  $M_j$  が大きく、次いで、東日本の海溝性地震の  $M_j$  が大きく、九州の海溝性地震の  $M_j$  が小さい。回帰分析を行った結果、東日本の海溝性地震、九州の海溝性地震、鳥取県西部地震を含む及び含まない内陸地震に対して、それぞれ、(1)、(2)、(3)、(4)式が得られた。

$$\log(M_0)=1.217M_j+17.83 \quad (e=0.208) \quad (1)$$

$$\log(M_0)=1.149M_j+18.62 \quad (e=0.162) \quad (2)$$

$$\log(M_0)=0.950M_j+19.07 \quad (e=0.138) \quad (3)$$

$$\log(M_0)=0.938M_j+19.14 \quad (e=0.142) \quad (4)$$

ここで、e は標準偏差である。

### 3. 検討手法

加速度応答スペクトル(減衰定数 5%)は、(5)式でモデル化し、ダミー係数を用いた二段階回帰分析手法<sup>10)</sup>で回帰分析を行った。

$$\log A_{ij}(T)=$$

..... Fukushima (1996)  
 ..... Takemura (1990) for SUBDUCTION EARTHQUAKE  
 ..... Takemura et al.(1990) for CRUSTAL EARTHQUAKE  
 ..... Sato (1989)  
 X SUBDUCTION EARTHQUAKE (KYUSYU)  
 Δ SUBDUCTION EARTHQUAKE (EASTERN JAPAN)  
 ○ CRUSTAL EARTHQUAKE

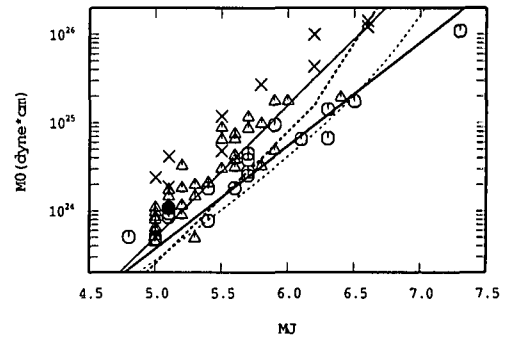


図-3  $M_0$  と  $M_j$  の関係

$$a(T)M_j - \log(X) + b(T)X + c_0(T) + \sum \delta_{kj} c_k(T) \pm e(T) \quad (5)$$

(5)式で、 $T$  は固有周期、 $A_{ij}(T)$  は、 $i$  番目の地震の  $j$  番目の観測点における加速度応答スペクトル、 $X$  は震源距離、 $c_k(T)$  は  $k$  番目の観測点の地点補正值、 $e(T)$  は標準偏差である。 $c_0(T)$  は  $c_k(T)$  の平均が 0 となるように求められており、 $c_k(T)=0$  の場合は、I 種地盤の平均的な加速度応答スペクトルを評価する式とみなすことができる。なお、加速度応答スペクトルは固有周期 0.05~5 秒の間を対数軸で等分割した 100 ポイントで計算した。

加速度波形の経時特性の推定式は、佐藤・他<sup>11)</sup>に準じた手法により作成した。経時特性モデルは、(6)~(9)式で示す Jennings 型<sup>12)</sup>包絡形  $E(t)$  とする。

$$E(t)=0.0 \quad (0.0 \leq t \leq t_a) \quad (6)$$

$$E(t)=A((t-t_a)/(t_b-t_a))^2 \quad (t_a \leq t \leq t_b) \quad (7)$$

$$E(t)=A \quad (t_b \leq t \leq t_c) \quad (8)$$

$$E(t)=A \exp(-b(t-t_c)) \quad (t_c \leq t \leq t_d) \quad (9)$$

はじめに、観測加速度波形から 0.4 秒間の window で絶対値の最大値を 0.2 秒刻みで取り出した観測包絡形を作成した。次に、観測包絡形と  $E(t)$  の残差が最小となるように、 $t_a$ 、 $t_b - t_a$ (立ち上がり部)、 $t_c - t_b$ (主要動部)、 $t_d - t_c$ (減衰部)、 $A$  を非線形最小二乗法で推定した。ただし、 $t_b - t_a$  は概して短く、感度が小さいため、佐藤・他<sup>11)</sup>を参考に  $t_c - t_b$  は  $t_b - t_a$  の 3 倍という条件を付与した。そして、 $t_c - t_b$  と  $t_d - t_c$  を次式でモデル化し、ダミー係数を用いた二段階回帰分析手法により回帰分析を行った。

$$\log(t_c - t_b) = a M_j + bX + c_0 + \sum \delta_{kj} c_k \pm e \quad (10)$$

$$\log(t_d - t_c) = a M_j + bX + c_0 + \sum \delta_{kj} c_k \pm e \quad (11)$$

ここで、 $c_k$  は  $k$  番目の観測点の地点補正值、 $e$  は標準偏差である。 $c_0$  は  $c_k$  の平均が 0 となるように求められており、 $c_k=0$  の場合は、I 種地盤の平均的な経時特性を評価する式とみなすことができる。

### 4. 加速度応答スペクトルの推定式の作成結果

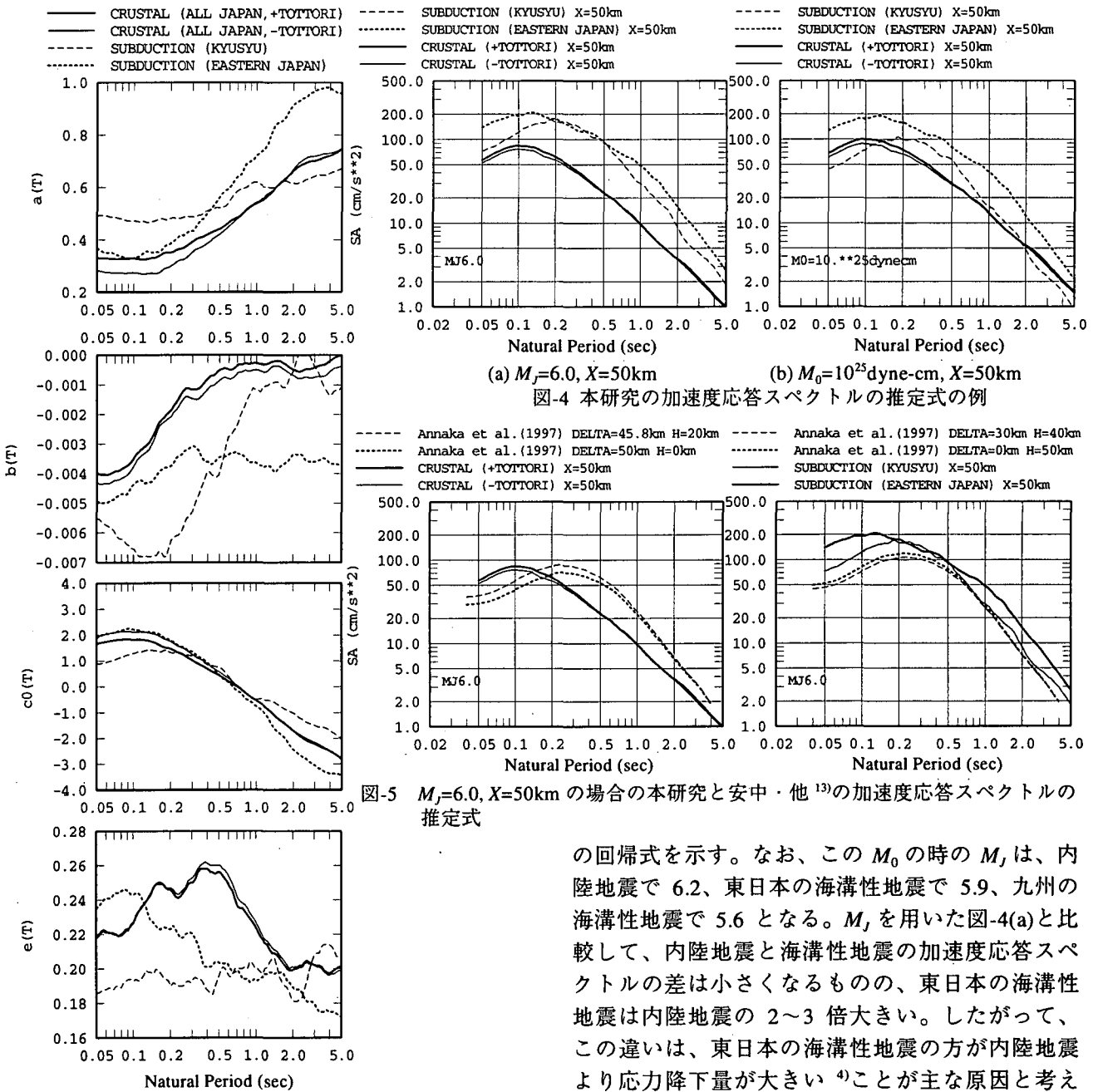


図-3 加速度応答スペクトルの回帰係数

図-3 には、加速度応答スペクトルの推定式  
 の回帰係数  $a(T)$ 、 $b(T)$ 、 $c_0(T)$ 、及び  $e(T)$  を示す。内  
 陸地震と海溝性地震では、 $a(T)$  と  $b(T)$  に顕著な差  
 があり、海溝性地震でも東日本と九州では異なっ  
 ている。内陸地震の  $b(T)$  の絶対値が海溝性地震に  
 比べ小さい原因の 1 つとして、内陸地震は震源深  
 さが浅く表面波が卓越しやすいことが考えられる。

$M_j=6.0$ 、 $X=50\text{km}$  の場合の本研究の回帰式  
 ( $c_k(T)=0$  の場合) を図-4(a) に示す。海溝性地震のほ  
 うが内陸地震よりスペクトルレベルが大きく、東  
 日本の海溝性地震は内陸地震の 3~5 倍である。  
 この原因として、上述の  $M_0$  と  $M_j$  の関係の差が考  
 えられる。そこで、図-4(b) には、(1)~(4) 式を用  
 いて  $M_0=10^{25}\text{dyne-cm}$  に換算した、 $X=50\text{km}$  の場合

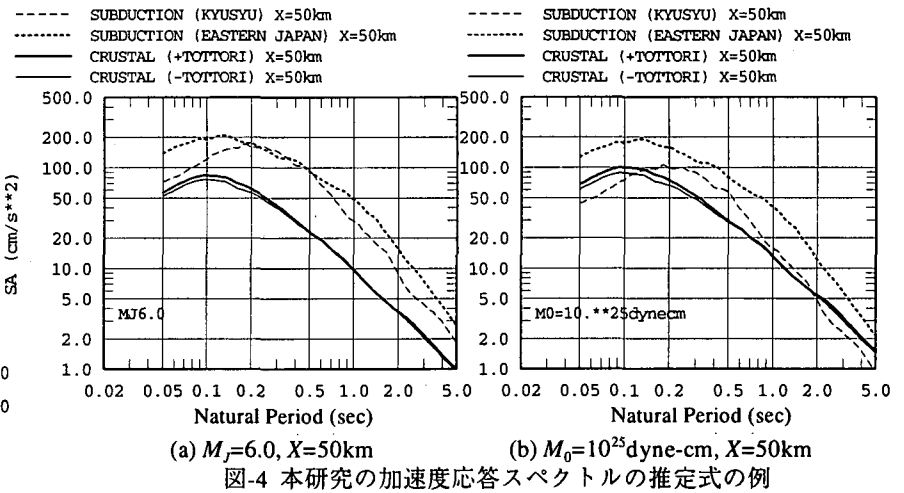


図-4 本研究の加速度応答スペクトルの推定式の例

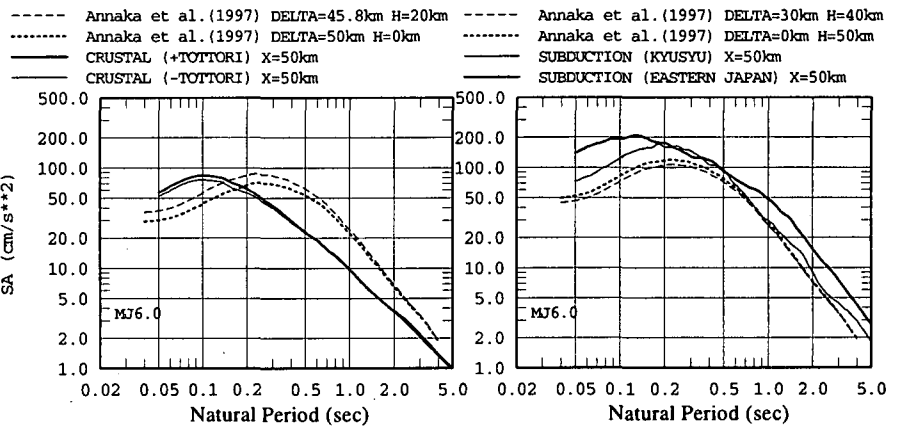


図-5  $M_j=6.0$ 、 $X=50\text{km}$  の場合の本研究と安中・他<sup>13)</sup>の加速度応答スペクトルの推定式

の回帰式を示す。なお、この  $M_0$  の時の  $M_j$  は、内  
 陸地震で 6.2、東日本の海溝性地震で 5.9、九州の  
 海溝性地震で 5.6 となる。 $M_j$  を用いた図-4(a) と比  
 較して、内陸地震と海溝性地震の加速度応答スペ  
 クトルの差は小さくなるものの、東日本の海溝性  
 地震は内陸地震の 2~3 倍大きい。したがって、  
 この違いは、東日本の海溝性地震の方が内陸地震  
 より応力降下量が大い<sup>4)</sup>ことが主な原因と考えら  
 れる。

図-5 には、 $M_j=6.0$ 、 $X=50\text{km}$  の場合の本研究  
 の回帰式( $c_k(T)=0$  の場合)と安中・他<sup>13)</sup>の回帰式(支  
 持基盤相当)との比較を示す。安中・他<sup>13)</sup>の式は、  
 震源深さの項があるため、内陸地震との比較にお  
 いては、震源深さ 0km と 20km、海溝性地震との  
 比較においては、震源深さ 40km と 50km の場合  
 について示した。固有周期 0.2 秒付近より長周期  
 領域では、内陸地震では本回帰式の方がやや小  
 さいのに対して、海溝性地震では本回帰式の方が大  
 きい。また、いずれの地震でも本回帰式の方が安  
 中・他<sup>13)</sup>の式より固有周期 0.1 秒以下で大きい。

### 5. 経時特性の推定式の作成結果

得られた加速度波形の経時特性の推定式( $c_k=0$   
 の場合)を以下に示す。

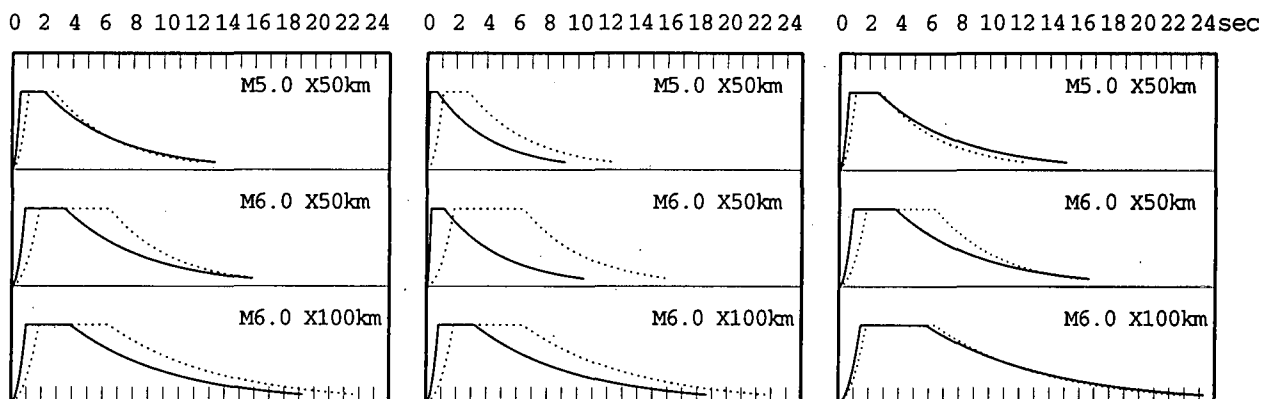


図-6 本研究(実線)と佐藤・他<sup>11)</sup>(点線)の経時特性の推定式の比較

○海溝性地震(東日本)

$$\log(t_c - t_a) = 0.230M_j + 1.500\log(X) - 3.874 \quad (e = 0.258) \quad (12)$$

$$\log(t_d - t_c) = 0.038M_j + 0.734\log(X) - 0.507 \quad (e = 0.123) \quad (13)$$

○海溝性地震(九州)

$$\log(t_c - t_a) = 0.167M_j + 0.635\log(X) - 1.507 \quad (e = 0.138) \quad (14)$$

$$\log(t_d - t_c) = 0.012M_j + 0.519\log(X) + 0.159 \quad (e = 0.101) \quad (15)$$

○内陸地震(鳥取県西部地震含む)

$$\log(t_c - t_a) = 0.212M_j + 0.161\log(X) - 1.004 \quad (e = 0.272) \quad (16)$$

$$\log(t_d - t_c) = 0.040M_j + 0.319\log(X) + 0.306 \quad (e = 0.140) \quad (17)$$

○内陸地震(鳥取県西部地震含まない)

$$\log(t_c - t_a) = 0.221M_j + 0.178\log(X) - 1.078 \quad (e = 0.269) \quad (18)$$

$$\log(t_d - t_c) = 0.050M_j + 0.340\log(X) + 0.220 \quad (e = 0.141) \quad (19)$$

$t_d - t_c$  は、どのケースも  $M_j$  依存性が小さく、 $X$  依存性が大きい。 $t_c - t_a$  は、 $t_d - t_c$  に比べ  $M_j$  依存性が大きく、 $X$  依存性は海溝性地震が内陸地震と比べて相対的に大きいという特徴がある。

本研究と佐藤・他<sup>12)</sup>の仙台の工学的基盤での経時特性モデルとの比較を、 $M_j=5.0$  で  $X=50\text{km}$ 、 $M_j=6.0$  で  $X=50\text{km}$ 、 $M_j=6.0$  で  $X=100\text{km}$  の場合について図-6に示す。本研究の東日本の海溝性地震の立ち上がり部+主要動部( $t_c - t_a$ )は、他の地震と比較して短い傾向があることがわかる。

## 6. まとめ

K-net 観測点のうち I 種地盤で得られた中小地震の記録(水平成分、S 波部以降)を用いて、二段階回帰分析手法により、東日本の海溝性地震、九州の海溝性地震、全国の内陸地震の 3 つのデータセットに対する地震動の加速度応答スペクトル及び加速度波形の経時特性の推定式の作成を行った。検討データは、全国の 549 観測点で得られた 98 地震の約 5,000 波形であり、加速度応答スペクトル、経時特性とも、気象庁マグニチュード  $M_j$  と震源距離  $X$  を変数とした回帰モデルである。作成した加速度応答スペクトル、経時特性の推定式

は、この 3 つのデータセットで顕著な違いがみられた。特に、加速度応答スペクトルの推定式は、同じ  $M_j$  と  $X$  において、東日本の海溝性地震の方が内陸地震より 3~5 倍大きいという傾向があった。また、立ち上がり部、主要動部、減衰部からなる Jennings 型包絡形でモデル化した経時特性の推定式は、主要動部は  $M_j$  依存性が大きく、それに続く減衰部は  $X$  依存性が大きいという特徴があった。

謝辞:本研究では、K-net 強震記録を用いました。

### 参考文献

- 釜江克宏・他: 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, 430, 1-9, 1991.
- 佐藤智美・他: 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, 463, 27-37, 1994.
- 松島信一・他: スペクトルインバージョンに基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性(その 1), 2001(投稿中).
- 佐藤智美, 巽脊樹: スペクトルインバージョンに基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性(その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2001(投稿中).
- 日本道路協会: 道路標示方書・同解説 V, 耐震設計編, 1990.
- Sato, R.: Theoretical basis on relationships between focal parameter and earthquake magnitude, J. Phys. Earth, 27, 353-372, 1979.
- Takemura, M. et al.: Scaling relations for source parameters and magnitude of earthquakes in the Izu peninsula region, Japan, Sci. Rep. Tohoku Univ., 32, 77-89, 1990.
- 武村雅之: 日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係, 地震 2, 43, 257-265, 1990.
- Fukushima, Y.: Scaling relations for strong ground motion prediction models with  $M^2$  Terms, Bull. Seism. Soc. Am., 86, 329-336, 1996.
- 壇一男・他: 中小規模地震の観測記録から得られる地盤増幅特性に基づく大規模地震の応答スペクトルの簡易評価法, 日本建築学会構造系論文集, 480, 35-46, 1996.
- 佐藤智美・他: ボアホール観測記録を用いた表層地盤同定手法による工学的基盤波の推定及びその統計的経時特性, 日本建築学会構造系論文集, 461, 19-28, 1994.
- Jennings, P. C. et al.: Simulated earthquake motions, E. E. R. L., Pasadena, 1968.
- 安中正・他: 気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, 1, 161-164, 1997.