

## 強震観測記録に基づく濃尾平野における地盤震動特性の変動域

都築和敏<sup>1)</sup>、平井敬<sup>2)</sup>、護雅史<sup>3)</sup>、福和伸夫<sup>4)</sup>

1) 名古屋大学大学院環境学研究科、大学院生

e-mail : tsuzuki\_k@sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp

2) 名古屋大学大学院環境学研究科、助教・博士 (工学)

e-mail : hirai.takashi@nagoya-u.jp

3) 名古屋大学減災連携研究センター 特任教授・博士 (工学)

e-mail : m.mori@sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp

4) 名古屋大学減災連携研究センター 教授・工博

e-mail : fukuwa@sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp

## 要 約

強震観測記録に基づいて濃尾平野の地盤震動特性の変動の幅を分析した。全国の観測記録から推定された応答スペクトルの距離減衰式に対する観測記録の応答スペクトルの比により各周期における濃尾平野の地盤震動特性を抽出した。また、推測された各要因の変動域を統計的に推定した。分析の結果、地震規模、地震タイプ、地震波の到来方向の3つの要因により地盤震動特性は変動していると推定された。この地盤震動特性の変動は、地震規模については固有周期2秒、地震波の到来方向は西方向において顕著に表れた。

キーワード： 応答スペクトル、距離減衰式、地震規模、地震タイプ、地震波の到来方向

## 1.はじめに

一般的に地震動は、震源特性、伝播特性、サイト特性の3つの特性に分けて考えられる。ゆえに各特性をより正確に評価することが精度の高い地震動予測につながると考えられる。地盤震動特性の評価方法として例えば丸山ら(2001)<sup>1)</sup>は常時微動観測記録あるいは地震観測記録のH/Vスペクトルを用いて地震動の応答スペクトルを推定している<sup>1)</sup>。また先名ら(2008)<sup>2)</sup>は距離減衰式から求められる応答

スペクトルに対する強震観測記録の応答スペクトルの比を地盤のスペクトル増幅率と考え、これと H/V スペクトルとの関係を用いて、微動記録からスペクトル増幅率を推定する関係式を提案している。しかし、実際の地震動に対する地盤のスペクトル増幅率は同じ観測点であっても地震により変動するという知見もある。例えば、西川ら(2014)<sup>3)</sup>は地震基盤までの地盤構造が地盤増幅度の地震規模依存性に与える影響について検討している。寺島ら(2013)<sup>4)</sup>は大規模堆積盆地において同じ観測点での異なる地震の表面波部分について検討し、地震により卓越周期が約 1~2 秒と大きく変動することを示している。したがって各地点の地盤震動特性の変動の幅を把握することが地震動予測をするうえで非常に重要であるといえる。

そこで本論では、愛知県、岐阜県、三重県にまたがる大規模堆積盆地である濃尾平野の地盤震動特性が、全国の地盤震動特性の平均的性状と比較してどの程度の幅で変動するか検討する。具体的には既存の地震動予測手法のひとつである応答スペクトルの距離減衰式を用いて、強震観測記録に基づき周期ごとの特徴をみる。

## 2. 検討に用いた強震観測記録

本検討では、名古屋大学の管理する大都市圏強震動総合観測ネットワークシステムに収集されている強震観測記録を用いた。このシステムは都市圏の各種機関による既設強震観測網を有機的に結合し、波形データ等を一元管理できる総合的な強震動観測ネットワークを構築する事を目的として大都市圏の拠点国立大学に設置された<sup>5)</sup>。中京圏においては、観測点は約 680 点、収録地震は 700 地震以上となっている。

本検討にはこのシステム内の 6 つの強震観測網（愛知県、名古屋市、静岡県、三重県、防災科学技術研究所 K-NET・KiK-net）の記録を使用する。このシステムの東海圏内の観測点（図 1）で収集された強震観測記録のうち愛知県の県境からの震源距離 100km 以内、気象庁マグニチュード 5.0 以上の 16 地震（表 1）について検討を行った。気象庁マグニチュード、震源深さ、震央北緯、震央東経については気象庁<sup>6)</sup>の値を、モーメントマグニチュードは防災科学技術研究所 F-net の値を、地震タイプについては地震調査研究推進本部<sup>7)</sup>を参考にしている。

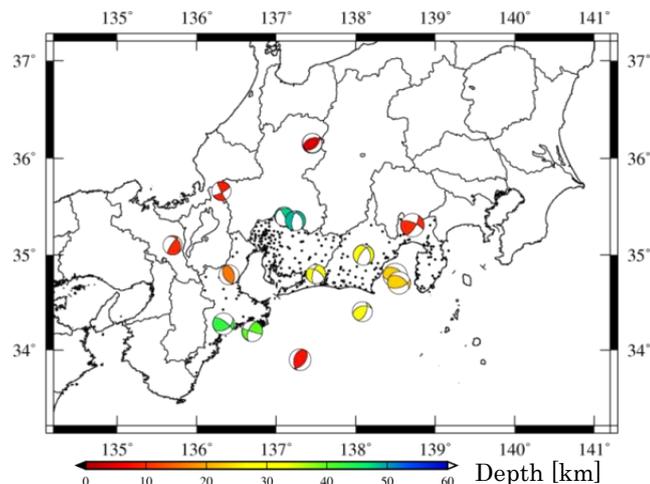


図 1 検討する観測点分布・震央分布及びモーメントテンソル

表 1 検討する地震の情報

No.	発生日	発生時刻	Mj <sup>6)</sup>	Mw	震源深さ(km) <sup>6)</sup>	震央北緯(°) <sup>6)</sup>	震央東経(°) <sup>6)</sup>	地震タイプ <sup>7)</sup>
1	2000/10/31	1:43	5.5	5.5	43	34.2983	136.32	スラブ内
2	2001/1/6	11:48	5.3	4.8	48	35.3866	137.1166	スラブ内
3	2001/2/23	7:23	5	4.9	32	34.7933	137.5483	スラブ内
4	2001/4/3	23:57	5.3	5.2	30	35.0233	138.0933	スラブ内
5	2001/8/25	22:21	5.3	4.9	10	35.1516	135.66	地殻内
6	2003/1/19	4:50	5.1	5.4	8	33.875	137.24	プレート境界
7	2004/1/6	14:50	5.2	5.2	40	34.215	136.7133	スラブ内
8	2007/4/15	12:19	5.4	5	16	34.79	136.4067	地殻内
9	2009/2/18	6:47	5.2	4.8	9	35.6616	136.3133	地殻内
10	2009/8/11	5:07	6.5	6.2	23	34.785	138.4983	スラブ内
11	2011/2/27	5:38	5.5	5.1	4	36.155	137.4533	地殻内
12	2011/2/27	2:19	5	4.8	4	36.1566	137.4566	地殻内
13	2011/3/15	22:31	6.4	5.9	14	35.3083	138.7133	地殻内
14	2011/8/1	23:58	6.2	5.8	23	34.7066	138.5483	スラブ内
15	2011/8/12	4:37	5.2	5	27	34.4083	138.0816	スラブ内
16	2011/12/14	13:01	5.1	5.1	49	35.355	137.2433	スラブ内

### 3.分析方法

各観測記録の地震規模、震源距離、震源深さなどのパラメータの補正、及び周期ごとの特徴を検討するため、既存の応答スペクトルの距離減衰式に対する強震観測記録の加速度応答スペクトルの比を検討する。以下、本論ではこの比を応答スペクトル比とする。既存の応答スペクトルの距離減衰式としては Zhao *et al.* (2006)<sup>8)</sup> (式(1))を用いた。式中  $M_w$  はモーメントマグニチュード ( $5.0 \leq M_w \leq 8.3$  を使用)、 $X$  は震源距離 ( $X \leq 300\text{km}$  を使用)、 $h$  は震源深さ ( $h \leq 162\text{km}$  を使用)である。 $a \sim e$  は周期ごとの回帰係数である。 $F_R$ 、 $S_I$ 、 $S_S$ 、 $S_{SL}$  は地震のタイプを補正する係数で、地震タイプとしては、地殻内、プレート境界、スラブ内で発生する地震の地震動に有意な差がみられるので、各地震動ごとの回帰係数を導出している。 $C_k$  は表層地盤の影響を表す係数である。

$$\ln SH = aM_w + bX - \ln(X + c \cdot \exp(d \cdot M_w)) + e(h - h_c) \delta_h + F_R + S_I + S_S + S_{SL} \ln(X) + C_k \quad (1)$$

また本論では式中の地盤の評価については最も硬い地盤種別を選択している。

Zhao *et al.* (2006) による距離減衰式は K-NET、気象庁を含む日本全国の 4518 の強震観測記録と 208 の海外の記録の統計的処理により得られているので、応答スペクトル比は全国の岩盤上の平均的な性状と強震観測記録との違い、つまり相対的な地盤震動特性を表している。一例として K-NET

津島における No.1 地震の加速度波形の観測記録から算出した加速度応答スペクトル及び Zhao *et al.* (2006) により算出された加速度応答スペクトルを図 2 に示す。また図 3 に応答スペクトル比を示す。本検討では距離減衰式の周期帯である周期 5 秒までを分析対象とする。また各観測記録は周期 5 秒までで十分なパワーを持っているものを使用している。応答スペクトル比には強震観測記録から算出した加速度応答スペクトルの水平 2 成分の相乗平均の値を用いる。

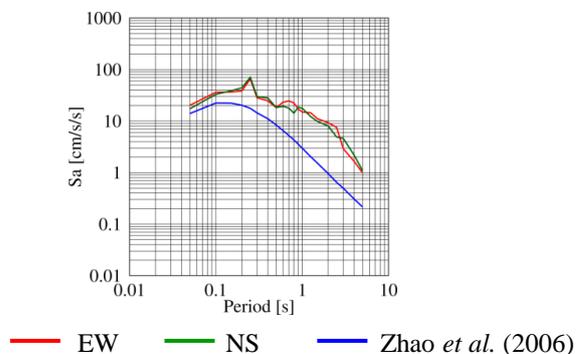


図 2 K-NET 津島(AIC003)の加速度応答スペクトル

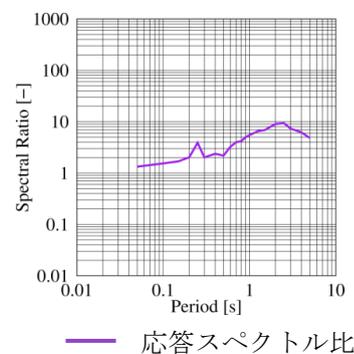


図 3 K-NET 津島の応答スペクトル比

#### 4.地盤震動特性の変動の検討

##### 4.1 広域的な地盤震動特性の検討

本節では、同じ観測点における応答スペクトル比の値の変動を各固有周期について検討していく。図 4 に例として検討を行った 16 地震における固有周期 1 秒での各観測点の応答スペクトル比の大きさをカラースケールで表した分布を地震タイプごとに、地震規模の大きい順に示す。図 4 より特に濃尾平野において地震ごとの応答スペクトル比の値の変動が顕著にみられる。

ここでどのような要因によりこの変動が現れているかを検討する。まずひとつに地震規模が挙げられる。地震規模の検討にはモーメントマグニチュードを用いる。図 4 において同一の地震タイプの地震では概ね地震規模の大きいものは大きい応答スペクトル比の値を示す傾向がみられる。また、この傾向は固有周期 1 秒だけでなく、ほぼすべての固有周期においてもあてはまっている。次に挙げられる要因が地震タイプである。図 4 においてもほぼ同じ地震規模の地震を比較すると、地震タイプが違えば応答スペクトル比の値は大きく異なっていることがわかる。また特にプレート境界地震に関しては、ほかの 2 つの地震タイプに比べて小さい値を示す傾向がみられる。さらにほぼ同じ地震規模、地震タイプであっても地震波の到来方向により応答スペクトル比の値が異なる傾向がみられる。図からも、濃尾平野において東方向からの地震である No.4 とほぼ下方からの地震 No.16 の地震においても応答スペクトル比の値は大きく異なっていることがわかる。

以上より地震による応答スペクトル比の値の変動に係る要因として地震規模、地震タイプ、地震波の到来方向の 3 つを推測することができる。しかし地震タイプ、地震波の到来方向は震源深さの影響も入っていると考えられるので一概に地震タイプ、地震波の到来方向の影響とすることはできない。そこで震源深さを追加した 4 つの要因が応答スペクトル比、つまり相対的な地盤震動特性に影響を与えると推測し、検討を進める。

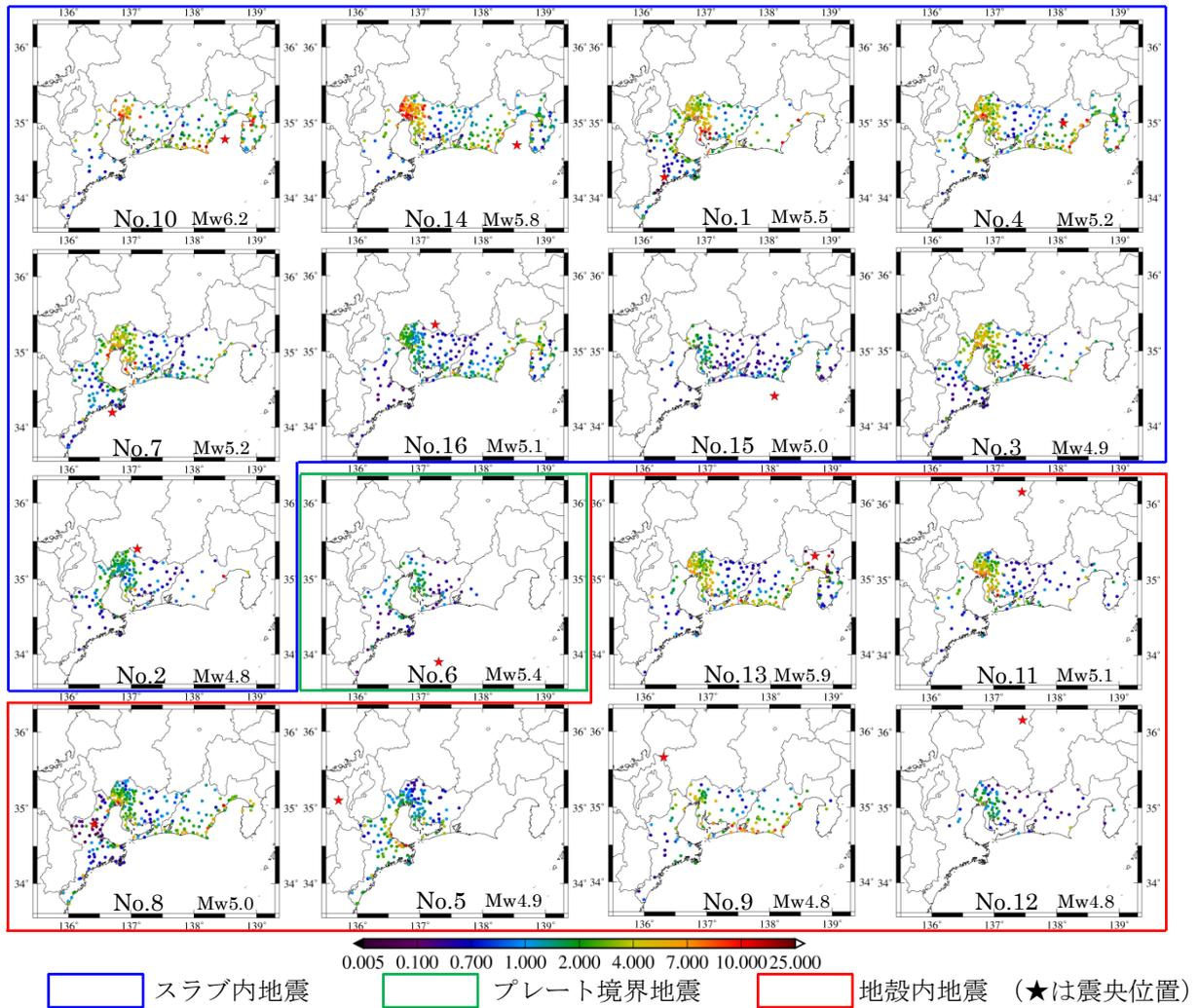


図4 固有周期1秒における応答スペクトル比の分布

#### 4.2 応答スペクトル比に与える4つの要因の影響

4.1で推測した4つの要因の濃尾平野における応答スペクトル比に与える影響がどのように変動するか検討する。はじめに地震規模の違いが応答スペクトル比に与える影響を検討する。図5に固有周期ごとに応答スペクトル比の値をプロットした図を示す。いずれの固有周期においても地震規模（モーメントマグニチュード）の増大に伴い応答スペクトル比の値も増加する傾向を示す。特に固有周期2秒付近でその傾向が強い。しかし地震ごとで観測点により値が大きくばらつく。そこで地震ごとすべての観測点の平均値、標準偏差を求め、図6にプロットする。応答スペクトル比の平均値についても地震規模の増大に伴い、増加する傾向がみられる。また、これに加え、平均値を利用し最小二乗法を用いて回帰直線を求めた。 $R^2$ は決定係数を表す。回帰直線をみるとほとんどの固有周期において地震規模の影響は大きく、固有周期2秒で最も大きい傾きを示す。また短周期域である固有周期0.1秒ではあまりその影響は見られない。観測点ごとのばらつきも固有周期2秒で最も大きい。

以上より応答スペクトル比に地震規模の違いが与える影響は大きいと考えられる。そこで他の要因を検討する際、応答スペクトル比の値をこの回帰直線で除すことにより、応答スペクトル比への地震

規模の与える影響を補正する。この際、異なった地震タイプの記録もすべて含んだまま補正を行うので、これらの影響に何らかの変化を与えてしまう可能性がある。しかし、本検討では各地震タイプの地震記録がそれぞれ十分に多いわけではないので、この地震記録の少なさを補間する意味でもすべての地震タイプを含んだまま地震規模の補正を行った。

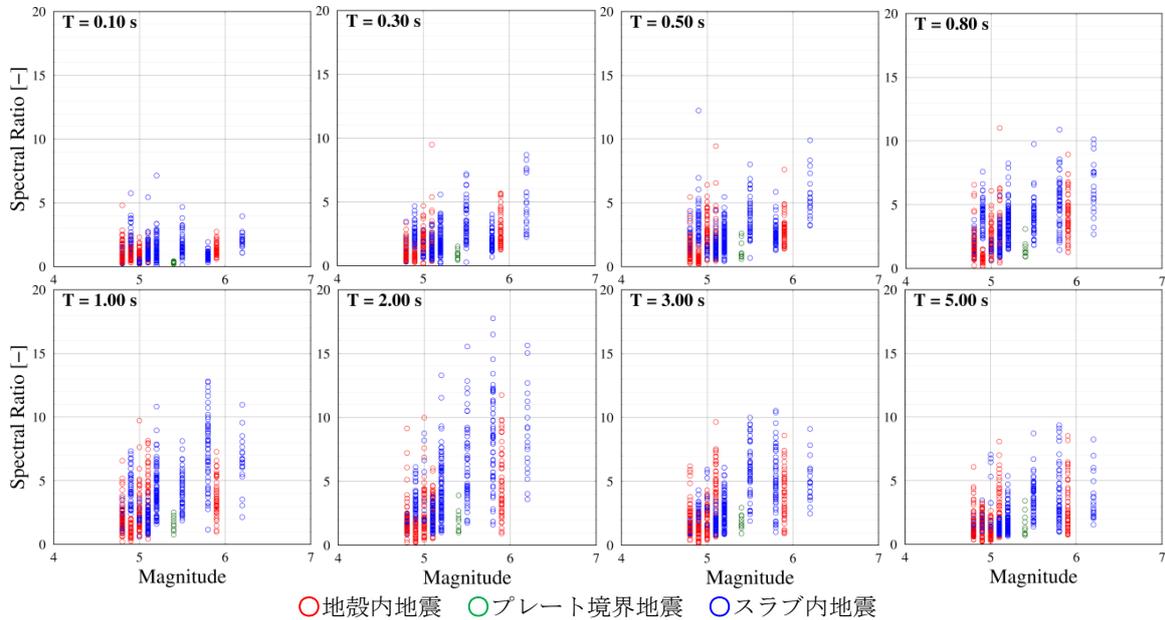


図5 濃尾平野における地震規模と応答スペクトル比の関係

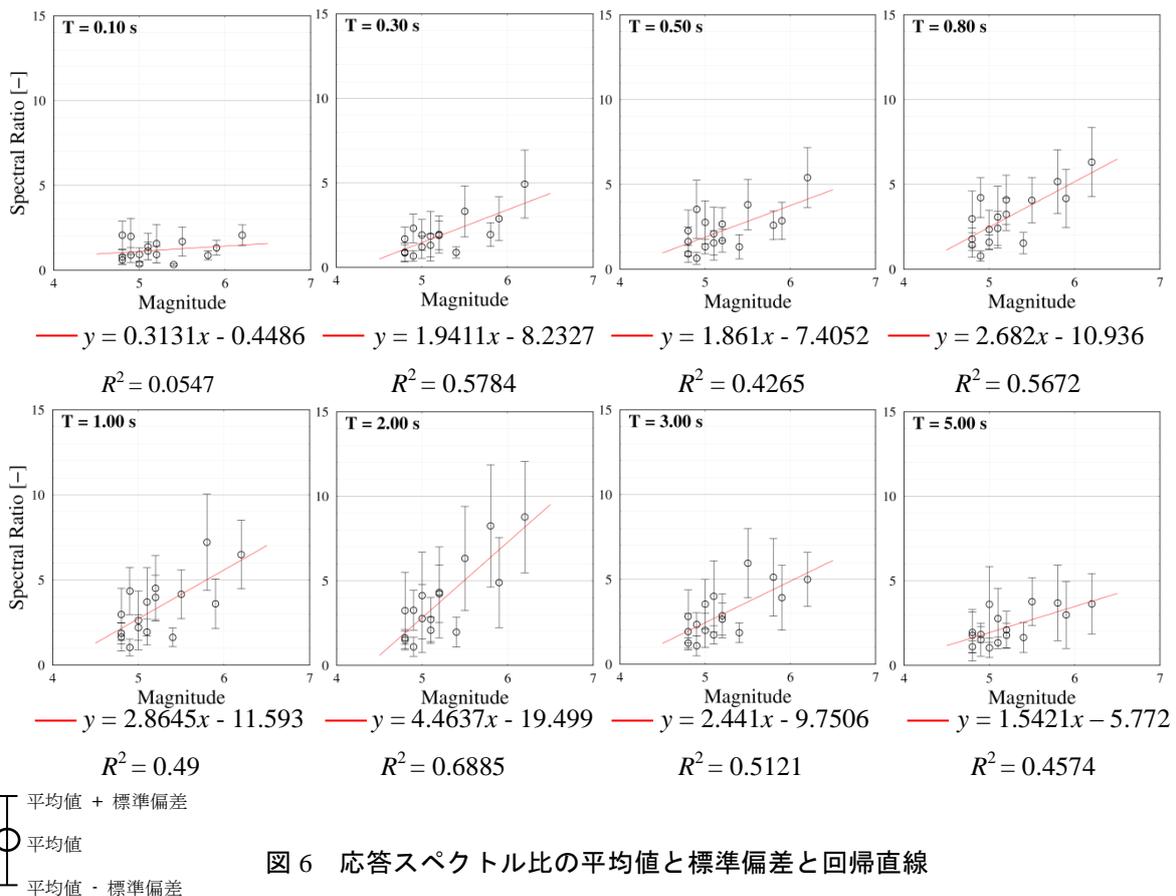


図6 応答スペクトル比の平均値と標準偏差と回帰直線

次に震源深さについて検討する。濃尾平野における地震規模について補正した応答スペクトル比と震源深さの関係と中央値を図7に示す。図7はいずれの固有周期においても各地震の応答スペクトル比は平均的には1.0程度で、震源深さの影響は小さいことがわかる。よって震源深さについては補正を行わずに検討を進める。

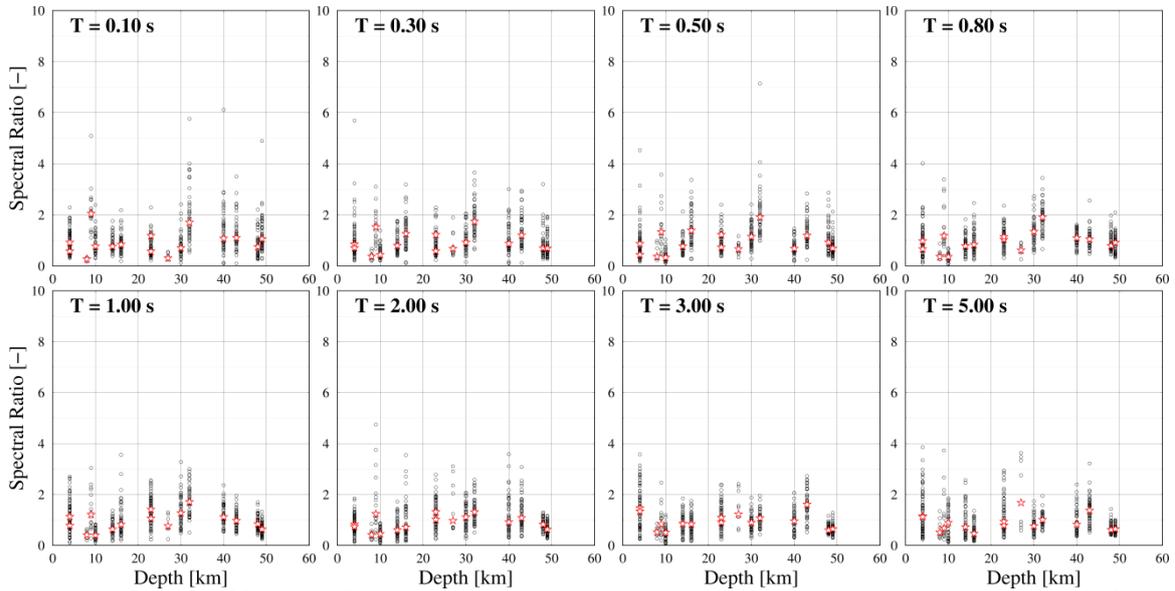


図7 地震規模を補正した濃尾平野における震源深さと応答スペクトル比の関係(☆は中央値)

3つめに地震タイプについて検討する。図8に濃尾平野における地震規模を補正した地震タイプと応答スペクトル比の関係と中央値を示す。いずれの固有周期でも応答スペクトル比の中央値は概ね地殻内地震とスラブ内地震で1.0程度であるが、プレート境界地震は1地震に限られるが0.5程度と小さい。

このような関係は応答スペクトル比に大きく影響していると考えられるため補正する必要があるので、地震タイプについては応答スペクトル比を各タイプの中央値で除すことにより補正をした。

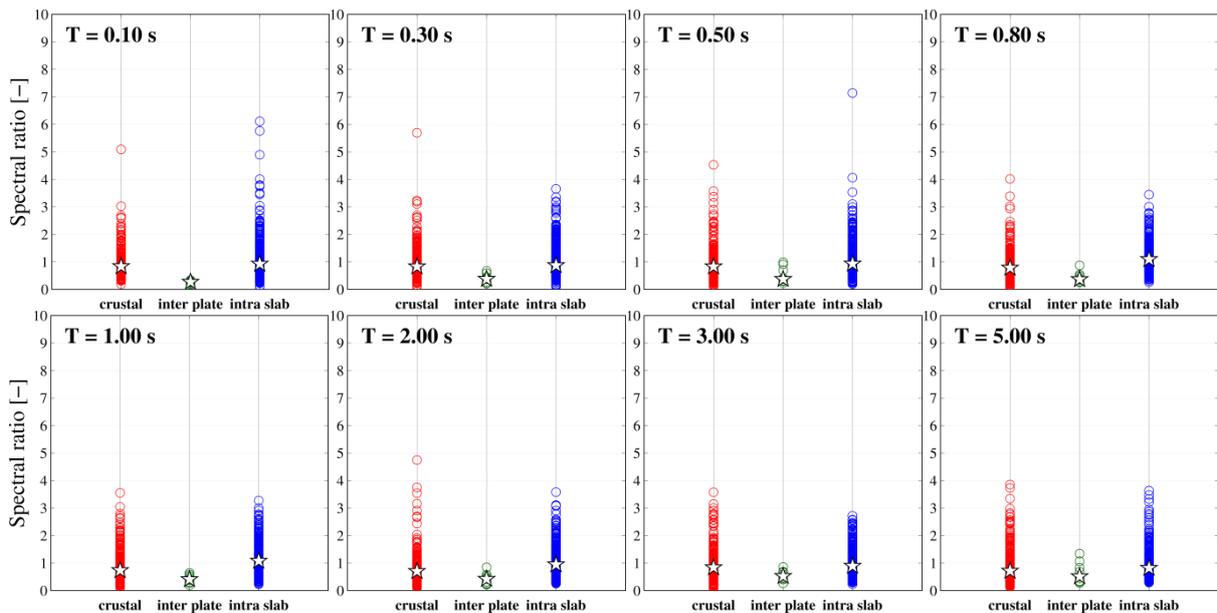


図8 濃尾平野における地震規模を補正した地震タイプと応答スペクトル比の関係(☆は中央値)

最後に地震波の到来方向の違いが応答スペクトル比に与える影響について検討する。この検討には応答スペクトル比に地震規模、地震タイプについて補正を行った。図 9 に濃尾平野における全観測点の経度緯度の平均値の経度緯度を基準として 16 地震を 4 つの地震波の到来方向に分類し示す。ただし No.2 と No.16 の地震は下方からの入射とした。地震規模、地震タイプについて補正した応答スペクトル比を、各地震波の到来方向内で平均し、その平均値を用いて検討する。図 10 に示すように、固有周期 0.1 付近の短周期帯では地震波の到来方向による応答スペクトル比の差異は小さく、下方から入射する地震波は長周期帯において小さい応答スペクトル比の値を示す傾向にある。また北、東、南からの地震波と比較して、西からの地震波については固有周期 0.3 秒から 1 秒の周期において 1/2 以下の小さい値をとる傾向を示す。しかし固有周期 4 秒から 5 秒にかけての長周期帯では他の方向と大きな差異のない応答スペクトル比の値を示すことがわかった。

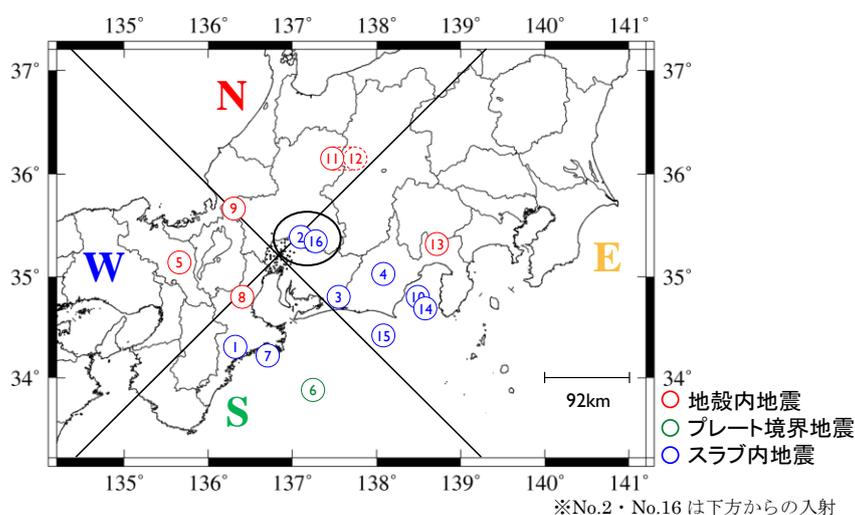


図 9 濃尾平野における地震波の到来方向

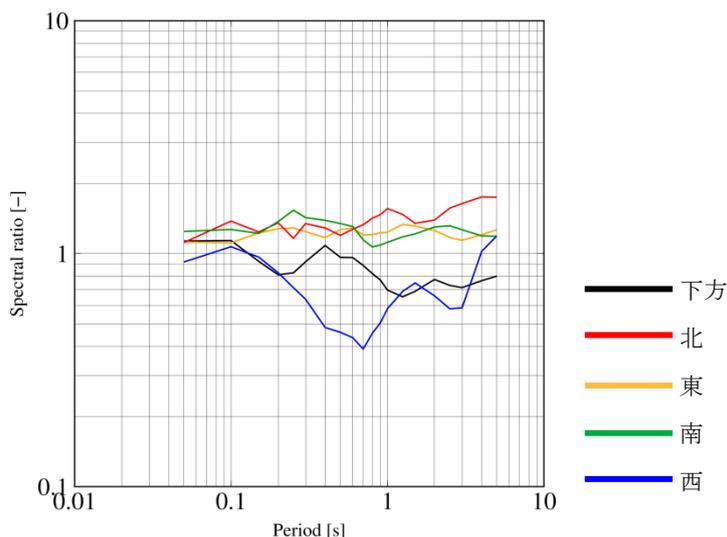


図 10 濃尾平野における地震波の到来方向と応答スペクトル比の関係

## 5.まとめ

本論では強震観測記録に基づき、濃尾平野における 16 地震における各観測点の観測記録と既存の応答スペクトルの距離減衰式から応答スペクトル比を算出し、これを用いて全国の平均的性状に対する濃尾平野の相対的な地盤震動特性の変動について検討し、以下の結果が得られた。

i) 濃尾平野において地震ごとの地盤震動特性の変動に影響を与える要因として、地震規模、地震タイプ、地震波の到来方向が影響している。また震源深さの影響は小さい。

ii) 地震規模に関しては全国の平均的な地盤震動特性に比べ濃尾平野の地盤震動特性への影響が大きい。特に固有周期 2 秒においてその影響が最も大きく、観測点ごとの応答スペクトル比の値のばらつきも最大となる。

iii) 地震タイプの影響についてはほぼすべての固有周期で地殻内地震、スラブ内地震の応答スペクトル比は概ね 1.0 程度の値であるのに対し、プレート境界地震は 1 地震の分析ではあるが 0.5 程度と小さい値を示した。

iv) 地震波の到来方向の影響は北、東、南の地震には大きな差異はない。しかし西からの地震は、固有周期 0.3 秒から 1 秒の間で 1/2 以下の小さい応答スペクトル比をとる傾向を示す。下方からの地震については長周期の周期帯で他方向に比べ小さい応答を得る傾向にある。

今回の検討では観測された地震のモーメントマグニチュードが 5.0 付近に集中していること、地震タイプではプレート境界地震が 1 つしかないことや地震波の到来方向については偏った分布をしていることなど記録の偏りが大きい。今後、検討する地震の数を増やすなど記録の偏りを減らした検討が必要である。

## 謝辞

本研究では、地震の震源情報として、気象庁による決定値を用いた。また防災科学技術研究所 K-NET・KiK-net による地震記録を使用した。地震の発震機構としては、防災科学技術研究所の F-net によるメカニズム解を用いた。論文中の一部の図の作成には Generic Mapping Tools<sup>9)</sup>を用いた。本論文の作成にあたっては、名古屋大学災害対策室 飛田潤教授、清水建設 宮腰淳一博士、竹中工務店 寺島芳洋氏には有益な助言を頂いた。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 丸山喜久, 山崎文雄, 本村均, 浜田達也: 常時微動の H/V スペクトル比を用いた地震動推定法の提案, 土木学会論文集, No.675/I-55, 2001, pp.261-272.
- 2) 先名重樹, 翠川三郎, 若松加寿江: 常時微動の H/V スペクトル比と地形・地盤分類を用いたスペクトル増幅率の推定, 日本地震工学会論文集 第 8 巻, 第 4 号 2008.
- 3) 西川隼人, 宮島昌克: 地震基盤までの地盤構造と地盤増幅度の地震規模依存性の関係, 日本建築学会構造系論文集 第 79 巻 第 698 号, pp.445-451, 2014, pp.445-451.
- 4) 寺島芳洋, 高橋広人, 福和伸夫: 大規模堆積盆地における地盤卓越周期の変動と長周期建物の耐震設計における課題, 日本建築学会東海支部研究報告書 第 51 号, 2013, pp.153-156.

- 5)日本地震学会(2014年4月参照)[http://www.zisin.jp/modules/pico/index.php?content\\_id=1934](http://www.zisin.jp/modules/pico/index.php?content_id=1934)  
6)気象庁(2014年7月参照) <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>  
7)地震調査研究推進本部(2014年7月参照) <http://www.jishin.go.jp/main/index.html>  
8) Zhao et al. : Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period ,Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.96, No.3,pp.898-913,2006  
9) Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J. F., and Wobbe, F., Generic Mapping Tools: Improved version released, EOS Trans. AGU, 94, pp.409-410, 2013. 11

## Fluctuation range of the Dynamic Characteristics in the Nobi Basin based on the Strong Ground Motion Records

TSUZUKI Kazutoshi <sup>1)</sup>, HIRAI Takashi <sup>2)</sup>, MORI Masafumi <sup>3)</sup> and FUKUWA  
Nobuo <sup>4)</sup>

1) Grad. Student, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ.

2) Asst. Prof. , Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ. , Dr. Eng.

3) Designated Prof. Disaster Mitigation Research Center. , Nagoya Univ. , Dr. Eng.

4) Prof. Disaster Mitigation Research Center. , Nagoya Univ. , Dr. Eng.

### ABSTRACT

This study aims to estimate the fluctuation range of the dynamic characteristics in Nobi Basin based on ground motion records. The dynamic characteristics is estimated from the ratio of the response spectrum of the record to that of the nationwide average calculated by the attenuation relationship, and the factor of fluctuation is considered to be magnitude of earthquake, earthquake type, and arrival direction of seismic waves. The fluctuation range of the dynamic characteristics due to each factor is estimated by statistical procedure.

*Keywords: Response spectrum, Attenuation relationship, Magnitude of earthquake, Earthquake type, Arrival direction*