

地点間フーリエスペクトル比に基づく 伝播・増幅特性のばらつき評価

福島 康宏¹・長尾 毅²

¹正会員 株式会社エイト日本技術開発 中国支社 防災保全部 耐震・保全グループ

(〒700-8617 岡山市北区津島京町 3-1-21)

E-mail: fukushima-ya@ej-hds.co.jp

²正会員 神戸大学教授 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: nagao@people.kobe-u.ac.jp

地震動を決定する要素であるサイト増幅特性・伝播経路特性のばらつきについて検討を行った。対象地点での地震観測記録のフーリエスペクトルを、対象地点と同時記録が得られている近隣強震観測点(基準点)での地震観測記録のフーリエスペクトルで除した比を基準点における経験的サイト増幅特性に乘じるとともに理論伝播経路特性の比を考慮することにより、対象地点のサイト増幅特性を多数の地震について算定し、そのばらつきを検討するとともに、基準点-対象地点間の距離との関係を整理した。

Key Words: earthquake ground motion, site amplification factor, path characteristic

1. はじめに

地震を対象としたハザード評価や構造物の地震作用に対するリスク評価、さらには構造物の耐震設計などの観点において、地震動のばらつきを評価することは極めて重要である。地震動は震源特性、伝播経路特性、サイト特性によって表現できる¹⁾。したがって、地震動のばらつきを検討する際には、これら3特性について個別に論じることが適切となる。3特性のうち、サイト特性とは深層地盤と表層地盤による増幅特性であり、地点により大きく異なることが知られている。表層地盤による増幅のみをサイト特性として議論することが多いが、本研究で表層地盤の影響のみならず増幅倍率として支配的な深層地盤の影響を含んだ増幅特性をサイト増幅特性と称して検討対象とする。すなわち、サイト増幅特性とは、周波数ごとの地震基盤に対する地表の増幅倍率のことである。強震記録に基づいたサイト増幅特性の評価には、スペクトルインバージョンによる方法(例えば野津・長尾²⁾)と、対象地点とその周辺での同時記録から評価する方法とがあるが、いずれも複数の記録による平均的な増幅特性が議論の対象となり、そのばらつきについてはほとんど考慮されてこなかった。

福島・長尾³⁾では、IBR003 強震観測点を対象地点、周辺強震観測点2地点を基準点とし、同時観測されている

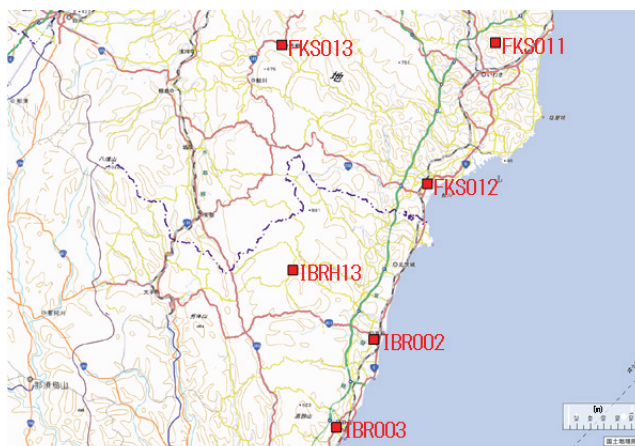


図-1 検討対象地点(地理院地図に加筆)

基準点に対する対象地点の強震記録のフーリエスペクトル比を基準点における経験的サイト増幅特性に乘じることにより、対象地点のサイト増幅特性を多数の地震について算定し、サイト増幅特性のばらつきを評価している。また、Fukushima and Nagao⁴⁾では、基準点を5地点として同様の検討を行っており、基準点-対象地点間距離が大きくなるほど、サイト増幅特性のばらつきが大きくなる傾向があることを示している。その理由として、基準点-対象地点間距離が大きいと伝播経路特性の変動の影響

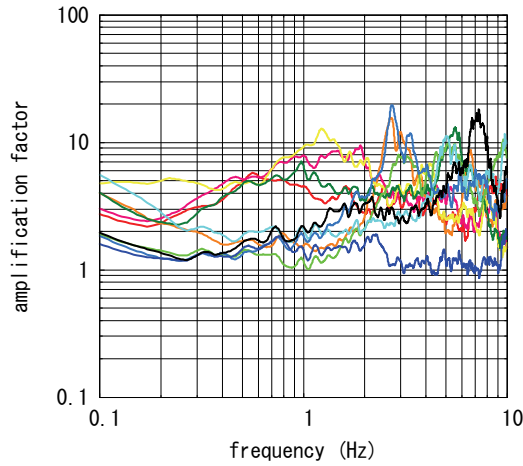


図-2 スペクトルインバージョンによる
検討対象地点のサイト増幅特性

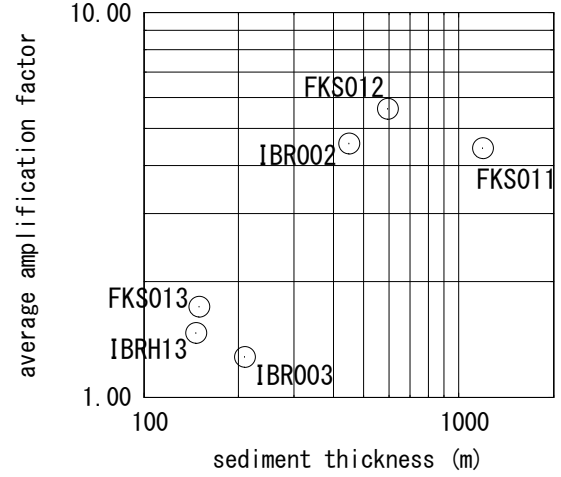


図-3 検討対象地点の堆積層厚とサイト増幅特性の
0.2～1Hz 平均値の関係

が大きくなるからと考えられる。ここで、後述するように 2 地点の観測記録のスペクトル比により求められている“サイト増幅特性”とは実際にはサイト増幅特性と伝播経路特性の積どうしの比であり、従って既往の研究で評価された“サイト増幅特性のばらつき”とは、厳密にはサイト増幅特性と伝播経路特性の積のばらつきであることに注意する必要がある。本稿では、これを“伝播・増幅特性”と称する。

本研究では、Fukushima and Nagao⁴⁾で基準点、対象地点とした 6 地点(図-1 参照)について、どれか 1 地点を対象地点としたときに残り 5 地点を基準点とした場合の観測記録のスペクトル比をもとに伝播・増幅特性を算定し、そのばらつきを評価した。また、伝播・増幅特性のばらつきと地点間距離の関係を整理した。

2. 伝播・増幅特性の評価方法

福島・長尾³⁾や Fukushima and Nagao⁴⁾と同様の方法で伝播・増幅特性について検討する。サイト増幅特性が既知の地点 R を基準点、同じ地震が観測されている地点 T を対象地点とする。両地点での地震動の観測記録のフーリエ振幅スペクトル $O_R(f)$, $O_T(f)$ は、震源特性 $S(f)$ 、伝播経路特性 $P_R(f)$, $P_T(f)$ 、サイト増幅特性 $G_R(f)$, $G_T(f)$ の積として次式で表現できる。

$$O_R(f) = S(f) \cdot P_R(f) \cdot G_R(f) \quad (1)$$

$$O_T(f) = S(f) \cdot P_T(f) \cdot G_T(f) \quad (2)$$

ここで、伝播経路特性 $P_R(f)$, $P_T(f)$ は

$$P_R(f) = \exp\left\{-\left(\pi f r_R\right) / \left(Q(f) V_s\right)\right\} / r_R \quad (3)$$

$$P_T(f) = \exp\left\{-\left(\pi f r_T\right) / \left(Q(f) V_s\right)\right\} / r_T \quad (4)$$

とモデル化する。ここで、 r_R , r_T はそれぞれ地点 R , T までの震源距離、 V_s は S 波速度、 $Q(f)$ は伝播経路の減衰を表す Q 値である。ここでは、野津・長尾²⁾のスペクトルインバージョンでも用いられている、佐藤・巽⁵⁾の東日本海溝型地震を参照して、式(5)を用いる。

$$Q(f) = 114 f^{0.92} \quad (5)$$

これより、地点 T のサイト増幅特性 $G_T(f)$ は次式で表される。

$$G_T(f) = G_R(f) \cdot \frac{O_T(f)}{O_R(f)} \cdot \frac{r_T}{r_R} \cdot \frac{\exp\left\{-\left(\pi f r_R\right) / \left(Q(f) V_s\right)\right\}}{\exp\left\{-\left(\pi f r_T\right) / \left(Q(f) V_s\right)\right\}} \quad (6)$$

本稿では式(6)の形式で伝播・増幅特性のばらつきを評価する。すなわち、サイト増幅特性としてばらつきを表現するが、上述のように実際には伝播経路特性もばらつきを有しており、式(6)の形で得られるばらつきはサイト増幅特性と伝播経路特性の積 (=伝播・増幅特性) のばらつきであり、両者を分離することはできない。観測スペクトルは 100Hz サンプリングの 163.84 秒間のデータとし、バンド幅 0.2Hz の Parzen ウィンドウにより平滑化を行った。また、ラディエーションパターンの影響を排除するために、水平 2 成分の二乗和平均の平方根とした。

表-1 検討に用いた同時観測の強震記録の数(上段：ケース1，下段：ケース2)

		基準点					
		FKS011	FKS012	FKS013	IBR002	IBR003	IBRH13
対象地点	FKS011		334	237	310	194	159
			62	35	35	15	21
	FKS012	334		276	378	235	185
		62		105	74	33	47
	FKS013	237	276		265	173	134
		35	105		60	18	39
	IBR002	310	378	265		266	198
		35	74	60		113	130
	IBR003	194	235	173	266		142
		15	33	18	113		65
	IBRH13	159	185	134	198	142	
		21	47	39	130	65	

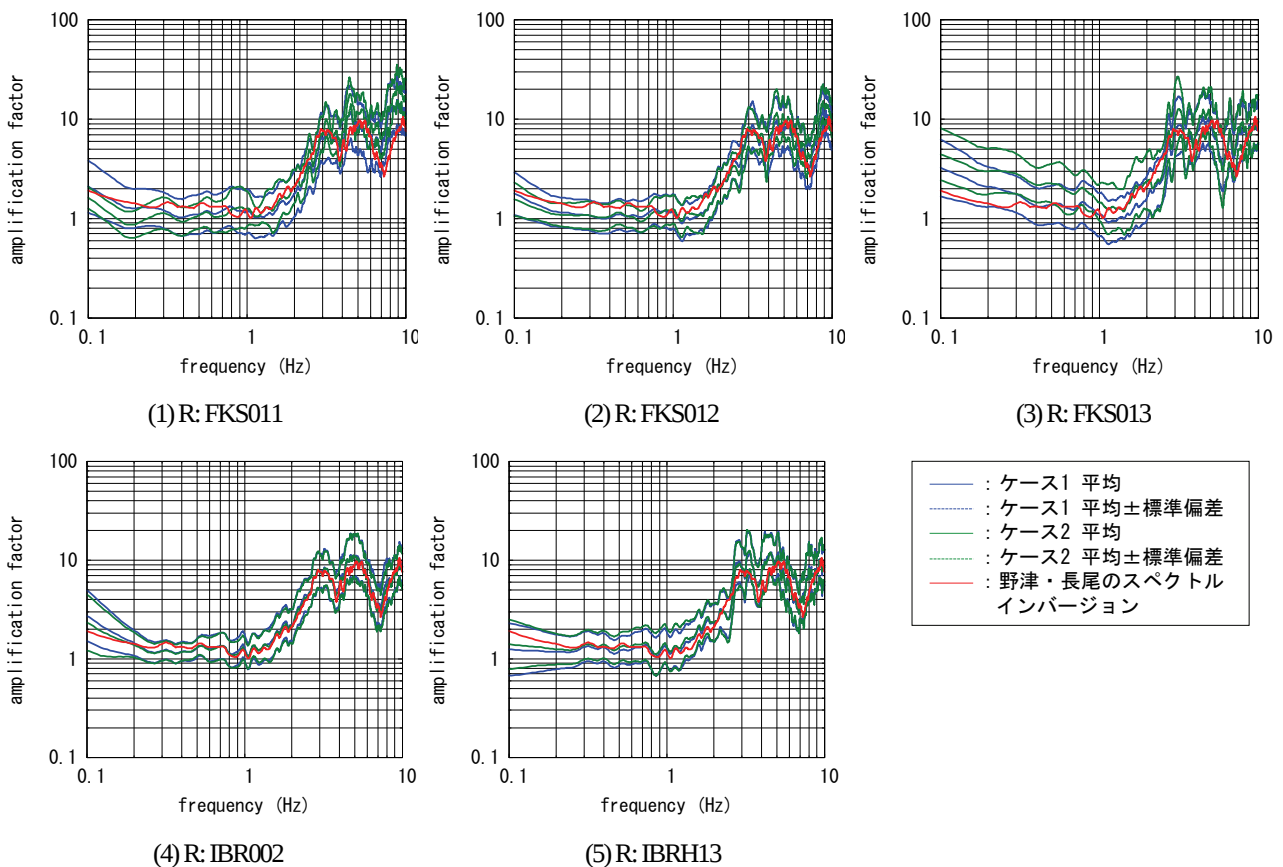


図-4 算定した IBR003 のサイト増幅特性

3. 伝播・増幅特性のばらつき

(1) 基準点と対象地点

Fukushima and Nagao⁴⁾と同様に、図-1 に示した福島県内・茨城県内の K-NET, KiK-net 強震観測点⁶⁾6 地点を対象とする。対象とした 6 地点について、スペクトルインバージョンによるサイト増幅特性²⁾を図-2 に示す。なお、各観測点について、スペクトルインバージョンに用いられている地震記録数は、FKS011 が 51 記録、FKS012 が 65 記録、FKS013 が 66 記録、IBR002 が 83 記録、IBR003

が 74 記録、IBRH13 が 17 記録である。FKS011, FKS012, IBR002 では 1Hz 以下の周波数帯で大きな増幅率を示しているのに対し、FKS013, IBR003, IBRH13 では 1Hz 以下での増幅率は小さく、2.5Hz 以上の高周波数領域でピークを有している。この低周波側のサイト増幅特性の違いは各地点における堆積環境の違いを反映している。各観測点の堆積層厚とサイト増幅特性の 0.2~1Hz 平均の関係を図-3 に示す。ここで、堆積層厚は、せん断波速度 3km/s 以上の地震基盤の深さとし、「地震ハザードステーション J-SHIS」⁷⁾での値を参照している。堆積層厚

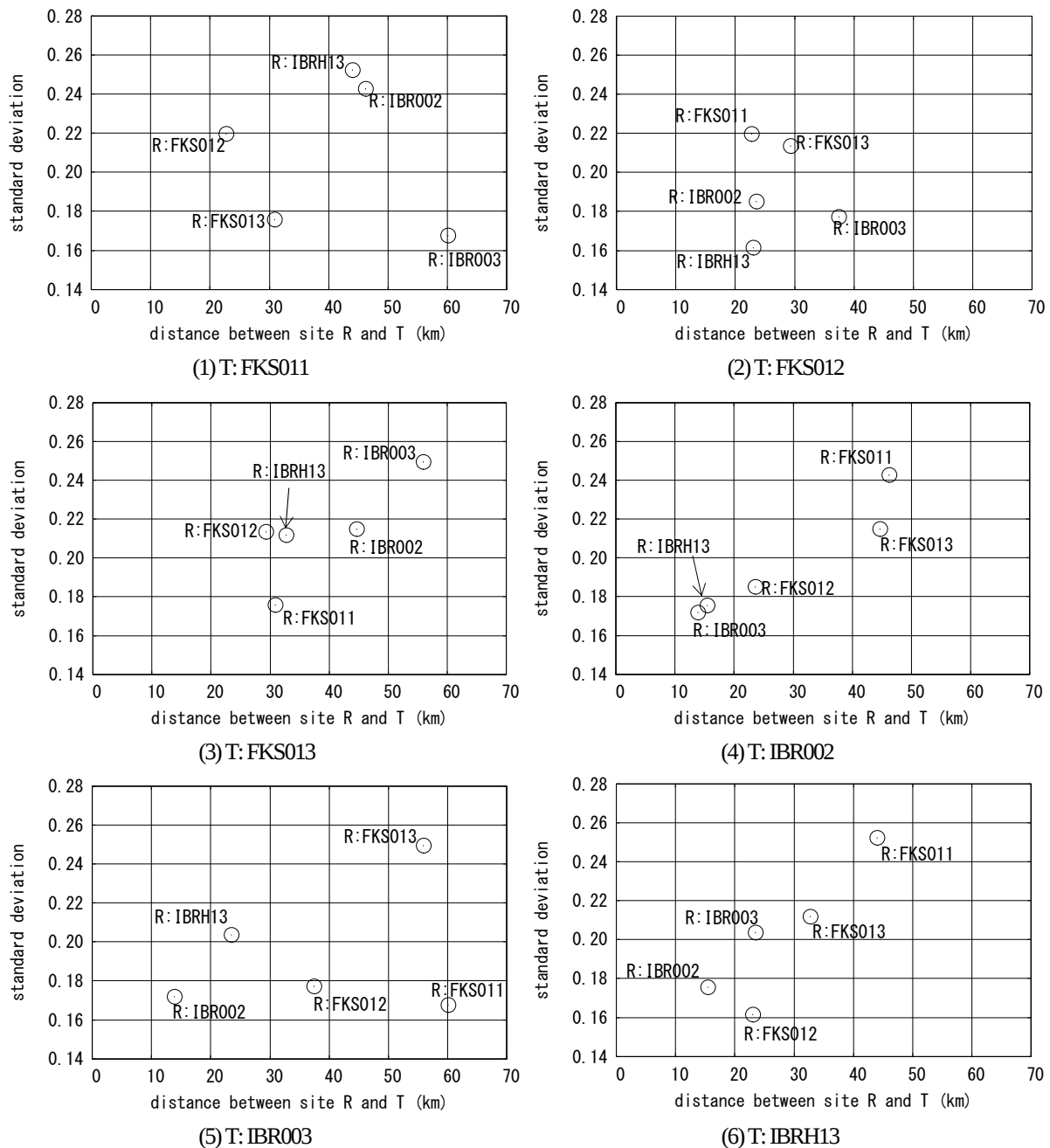


図-6 基準点一対象地点間距離とサイト増幅特性の標準偏差(0.5~5Hz 平均)の関係(ケース 2)

常用対数軸上での相加平均であり、標準偏差も常用対数軸上で計算している。ケース 1 の結果に着目すると、基準点が IBR002 の場合はスペクトルインバージョンによる増幅特性とよく整合しているが、基準点が FKS011 や FKS013 の場合には、高周波数側のピーク、ディップの周波数がスペクトルインバージョンによる増幅特性とずれている。

(3) 基準点一対象地点間距離と増幅特性のばらつきの関係

基準点一対象地点間距離と 0.2-5.0Hz の周波数帯におけるサイト増幅特性の標準偏差の平均の関係を図-5 に

示す。この周波数帯は、用いた地震記録の S/N 比として 0.2Hz まで精度を確認していることと、土木構造物の重要な周波数帯としては概ね 5Hz までと考えられること(例えば、道路橋では固有周期として 0.2 秒以上が想定される⁸⁾)から設定している。Fukushima and Nagao⁴⁾の結果と同様に、基準点一対象地点間距離が大きくなるにつれてサイト増幅特性の標準偏差が大きくなる傾向が見られる。上述のように、Fukushima and Nagao⁴⁾ではこの理由として基準点一対象地点間距離が大きいと伝播経路特性の変動の影響が大きくなる可能性を指摘している。伝播経路特性として、幾何減衰は式(3)~(4)に示すように球面実体波の理論値として距離の逆数を想定しているが、幾何減

衰のばらつきについては観測記録に基づく評価例では必ずしも距離の逆数とはならない例が示されている⁹⁾。基準点一対象地点間距離が大きくなると両地点間の伝播経路特性が微妙に異なり、このために式(6)で表現されるサイト増幅特性のばらつきが大きくなると仮定するならば、震源距離が同程度の地震記録のペアに制限して同様の解析を行えばサイト増幅特性のばらつきは基準点一対象地点間距離に依存しない可能性がある。このような観点で、基準点までと対象地点までの震源距離が概ね同じ組合せ(相違が 10%以下)に限定してばらつきを再評価した。これをケース 2 とする。基準点一対象地点間距離と 0.5~5Hz でのサイト増幅特性の標準偏差の平均の関係を図-6 に示す。基準点一対象地点間距離が大きくなるにつれてサイト増幅特性の標準偏差が大きくなる組合せが多いように見えるが、図-5 と比較すると相関が低くなっていると考えられる。T: FKS011-R: IBR003, T: FKS012-R: IBRH13, T: IBR003-R: FKS011, T: IBRH13-R: FKS012 のように、ケース 2 では一部にばらつきが顕著に減少する組み合わせがある。震源距離を同程度に制限することで一部の組み合わせで標準偏差が顕著に減少するということは、幾何減衰特性の地点間の違い以外の要因である可能性も排除できない。なお震源距離による幾何減衰特性の違いについては、Somerville et al.¹⁰⁾により、北米の内陸地震を例に、震源距離 r が 50~150km 程度では $1/r$ 、それ以上では $1/r^{0.5}$ の減衰を仮定すると観測記録の距離減衰をよく表現できるとされているが、本研究で対象とした記録はほとんどが震源距離 150km 以下であり、震源距離による幾何減衰特性の違いはあてはまらない。

伝播・増幅特性のばらつきに影響を及ぼす他の要因としては、震源距離への依存性、地震動到来方向への依存性、入射角の影響、表面波の影響などが考えられることから、今後検討する必要がある。

4. まとめ

本研究では、福島県・茨城県の強震観測点 6 地点を対象として、同時観測記録を用いた地点間フーリエスペクトル比を元に対象地点での伝播・増幅特性を算定し、そのばらつきを評価した。その際、基準点までと対象地点までの震源距離の違いを考慮しない場合と、基準点までと対象地点までの震源距離がほぼ同じ組み合わせに限定した場合の両方を検討した。その結果、前者では基準点一対象地点間距離が大きくとサイト増幅特性の標準偏差も大きくなる傾向が見られるのに対して、後者では、標準偏差の基準点一対象地点間距離依存性があるようには

見えるものの、サイト増幅特性の標準偏差の相関が低くなる結果となった。

サイト増幅特性が既知の地点から、地点間フーリエスペクトル比に基づき補正することは、サイト増幅特性を考慮した地震動設定の実務においてしばしば行われる。地震活動が活発でなく観測記録が少ない場合に、離れた強震観測点を基準点として補正するケースも考えられるが、対象地点に近い地点を基準点として補正すべきであると考えられる。

今後は、伝播・増幅特性のばらつきに影響を及ぼす要因について検討を行う予定である。

謝辞：防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net の強震記録を使用しました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：2016 年制定 土木構造物共通示方書 性能・作用編，2016。
- 2) 野津厚，長尾毅：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測点におけるサイト増幅特性，港湾空港技術研究所資料，No. 1112, 2005。
- 3) 福島康宏，長尾毅：サイト増幅特性のばらつきを考慮した強震動のばらつき，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol. 75, No. 4 (地震工学論文集 Vol. 38)，2019.(印刷中)
- 4) Y. Fukushima and T. Nagao: Variation of Earthquake Ground Motions with Focus on Site Amplification Factors: A Case Study, Engineering, Technology & Applied Science Research Vol. 9, No. 4, pp.4355-4360, 2019。
- 5) 佐藤智美，巽誉樹：全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性，日本建築学会構造系論文集，第 556 号，pp.15-24, 2002。
- 6) 国立研究開発法人防災科学技術研究所：防災科研 K-NET, KiK-net, <https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004> (2017 年 9 月閲覧)
- 7) 国立研究開発法人防災科学技術研究所：地震ハザードステーション J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/> (2019 年 1 月閲覧)
- 8) 公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編に関する参考資料，2015。
- 9) 加藤研一：観測記録に基づく伝播経路の減衰評価(6.1 節)，地盤震動—現象と理論—，日本建築学会，pp.180-193, 2005。
- 10) Somerville, P. G. and Helmberger, D.V.: The effect of crustal structure on the attenuation of strong ground motion in eastern north America, *Proc. of Fourth U. S. National Conf. on Earthq. Eng.*, Vol.1, pp.385-394, 1990。

VARIATION OF SEISMIC CHARACTERISTIC BASED ON THE RATIO OF FOURIER AMPLITUDE SPECTRA

Yasuhiro FUKUSHIMA and Takashi NAGAO

In this study, by using simultaneous observation record at neighbouring earthquake ground motion observation stations, the variations of the site amplification factors was evaluated with 6 earthquake ground motion observation stations in Ibaraki prefecture. The standard deviation of the site amplification factor in two ways: not considering the difference in hypocentral distance between the target site and the reference site, and limiting the hypocentral distance to the same combination.