

観測記録から求めた地震動スペクトルによる 震度増分の評価

西川 隼人¹・池本 敏和²・東 春樹³・鈴木 優磨³・宮島 昌克⁴

¹正会員 福井工業大学工学部建築土木工学科 准教授 (〒910-8505 福井県福井市学園3丁目6番1号)
E-mail: nishikawa@fukui-ut.ac.jp

²正会員 金沢大学理工研究域地球社会基盤学類 講師 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: tikemoto@se.kanazawa-u.ac.jp

³非会員 福井工業大学工学部建築土木工学科 (〒910-8505 福井県福井市学園3丁目6番1号)

⁴正会員 金沢大学理工研究域地球社会基盤学類 教授 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: miyajima@se.kanazawa-u.ac.jp

本研究では福井平野のその周辺地域の地震観測点を対象に著者らの既往研究に基づき地震波の加速度フーリエスペクトルを用いて震度増分を評価した。評価した震度増分を観測された計測震度から求めた震度増分と比較した結果、両者の対応が非常に良いことが明らかになった。続いて、サイト増幅特性と基準点の基盤スペクトルの積により求めた加速度フーリエスペクトルを用いて震度増分を評価したところ、解析対象地震の約7割で計測震度の観測値から評価した震度増分と良い相関が見られた。

Key Words: JMA seismic intensity, earthquake motion spectrum, amplification factor, site amplification effect

1. 序論

著者の一部は震度増分を精度良く予測するための基礎的な知見を得るために、地震動スペクトルと震度増分の関係式を求め、震源スペクトルのコーナー振動数や高域遮断振動数、サイト増幅特性の1次ピーク振動数との対応を調べている¹⁾。この研究で用いた地震動スペクトルはサイト増幅特性を表す関数と ω -2則の震源スペクトルにより構成されているものであるが、地震動予測において地震動スペクトルと震度増分の関係式を利用するためには、実観測記録から求めた地震動スペクトルにおいても、著者らの求めた地震動スペクトルと震度増分の関係式が成り立つか調べる必要がある。

本論文では著者らの研究¹⁾を発展させ、福井県の福井平野とその周辺地域に位置する地震観測点、震度観測点を対象に地震観測記録から求めた地震動スペクトルと震度増分の関係式の妥当性を検証した。また、対象地震において地震観測記録が得られていない場合に他の地震の観測記録から求めたサイト増幅特性と基準観測点の解放地震基盤のフーリエスペクトルを用いて、震度増分を評価する手法を提案し、評価精度を調べた。

2. 地震動スペクトルと震度増分の関係

(1) 震度増分の定義

震度増分を定義するにあたり、まず、任意の地点と基準となる解放地震基盤面（以降、基盤面）の計測震度を、次のように定義する。

$$I_s = 2\log_{10}A_{0s} + 0.94 \quad (1)$$

$$I_b = 2\log_{10}A_{0b} + 0.94 \quad (2)$$

ここに、 I_s と I_b は任意の地点と基盤面の計測震度、 A_{0s} と A_{0b} は任意地点と基盤面の実効加速度である。 A_{0s} と A_{0b} は以下のように表されるものとする。

$$\log_{10}A_{0s} = \log_{10}S - \log_{10}R_s - kR_s + \log_{10}F \quad (3)$$

$$\log_{10}A_{0b} = \log_{10}S - \log_{10}R_b - kR_b \quad (4)$$

S は震源特性を表す項、 R_s と R_b は任意地点と基盤面の震源距離、 k は内部減衰と散乱減衰に対応する係数、 F は基準となる基盤面に対する任意地点の地盤増幅度であり、後述する式で定義される。

続いて、式(3)、(4)をそれぞれ式(1)、(2)に代入して両者の差を求めると次式となる。

$$2\log_{10}F = I_s - I_b + 2(\log_{10}R_s - \log_{10}R_b) + 2k(R_s - R_b) \quad (5)$$

ここで $2\log_{10}F$ を震度増分 dI とする。式(5)右辺で距離減衰項として幾何減衰項のみ考えた場合は次式となる。

$$dI = 2\log_{10}F = I_s - I_b + 2(\log_{10}R_s - \log_{10}R_b) \quad (6)$$

既往研究²⁾によると実効加速度と計測震度の算出に用いるフィルター（以降、震度フィルター）の処理を施した地震波の最大振幅の対応が良い。震度フィルターによる処理を行った任意地点と基盤面の地震波の最大振幅をそれぞれ A_f 、 A_b とし、式(3)、(4)の A_0 、 A_0 と置き換え、整理すると以下の関係が得られる。

$$\log_{10}F = \log_{10} \frac{A_{fs}R_s}{A_{fb}R_b} + k(R_s - R_b) \quad (7)$$

式(7)で右辺第2項を無視し、両辺を2倍して以下のように震度増分 dI として表わす。

$$dI = 2\log_{10}F = 2\log_{10} \frac{A_{fs}R_s}{A_{fb}R_b} \quad (8)$$

(2) フーリエスペクトルと震度増分の関係

著者の一部^{3) 4)}はパーセバルの定理と極値理論に基づき、ある地点の地表面と S 波速度=2~3km/s 程度の基盤面における地震波の最大振幅の比（地盤増幅度）とフーリエスペクトルの関係式を導いている。本研究でも、著者の一部^{3) 4)}の研究で求めた関係式をもとに、式(8)の地盤増幅度 F が次式で表されるものとする。

$$F = \frac{A_{fs}R_s}{A_{fb}R_b} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 F_s(f)^2 R_s^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 F_b(f)^2 R_b^2 df}} \quad (9)$$

$H(f)$ は震度フィルター、 $F_s(f)$ は地表面の地震波の加速度フーリエスペクトル、 $F_b(f)$ は基盤面の地震波の加速度フーリエスペクトル（以降、基盤スペクトル）、 f は振動数 (Hz) である。

式(9)を式(8)に代入すると次式のように、地震動スペクトルの無限積分値と震度増分 dI_1 の関係が得られる。

$$dI_1 = \log_{10} \left(\frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 F_s(f)^2 R_s^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 F_b(f)^2 R_b^2 df} \right) \quad (10)$$

(3) 基盤スペクトル、サイト増幅特性と震度増分の関係

対象地点の地震波形が残されていない場合、または未入手の場合は基準観測点の基盤面に対するサイト増幅特性を基準観測点の基盤スペクトルに乗じることで、地表の加速度フーリエスペクトルを求める。この場合、式(10)は以下のように表すことができる。

$$dI_2 = \log_{10} \left(\frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 F_b(f)^2 G(f)^2 R_s^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 F_b(f)^2 R_b^2 df} \right) \quad (11)$$

$G(f)$ はサイト増幅特性であり、基盤面を基準としたフーリエスペクトルの増幅特性と定義する。

3. 地震動スペクトルによる震度増分の評価

(1) 解析対象の地震観測点と地震

本論文では図-1 の福井平野とその周辺地域に位置する 17 の地震観測点、震度観測点を対象に検討を行った。観測点の内訳は表-1 に示す K-NET 観測点 3 地点、KiK-net 観測点 1 地点、気象庁観測点 2 地点、自治体観測点 11 地点である。自治体観測点に対しては 2010~2013 年に発生した地震の観測記録を入手したが、あわら市国影 (FKIP14) の地震観測記録は得られなかった。また、K-NET 三国 (FKI001) は解析対象期間で移設したため、移設前後で別々の観測点として取り扱った。

図-2 に解析対象地震の震央分布、表-2 に解析対象地震の諸元を示す。解析対象地震は M_{MM} が 6.2~9.0、震源深さは 5~78km、震源距離の範囲は 91~636km である。

(2) フーリエスペクトルによる震度増分の評価

観測された計測震度から評価する震度増分 dI は幾何減衰のみを考慮した式(6)により求めた。基準点は KiK-net 永平寺 (FKIH01) とし、基盤面の計測震度 I_b は安井他⁵⁾の求めた表-3 の地盤構造をもとに剥ぎ取り解析により求めた。気象庁の計測震度は 3 成分から計算するが、KiK-net 永平寺の地表面の地震波形 3 成分の計測震度と水平動 2 成分から計算した値に大きな違いがなかったことから、基盤面の計測震度 I_b は水平動 2 成分から計算した値を用いた。

式(10)の震度増分 dI_1 はほとんどの自治体観測点で地震観測記録が入手できた No.11~No.15 の地震を対象に求めた。式(10)の任意観測点の $F_s(f)$ と基準点 KiK-net 永平寺の $F_b(f)$ は水平動 2 成分のフーリエスペクトルのベクトル値とした。フーリエスペクトルは目視で判読した S 波到達時間から地震規模に応じた長さの波形を抽出して計算した。抽出した区間長は No.11 の地震は 80 秒間、

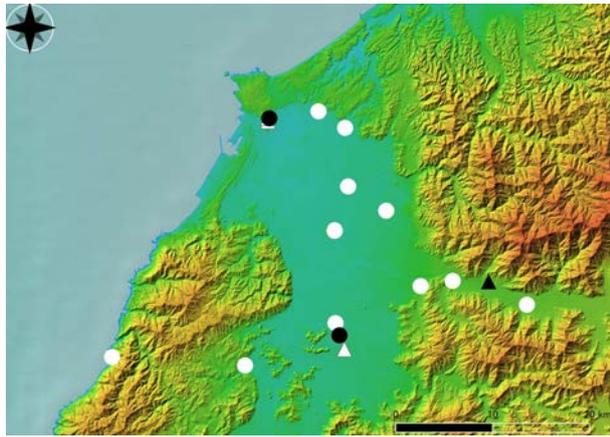


図-1 地震観測点，震度観測点分布 (●気象庁，△K-NET，▲KiK-net，○自治体)

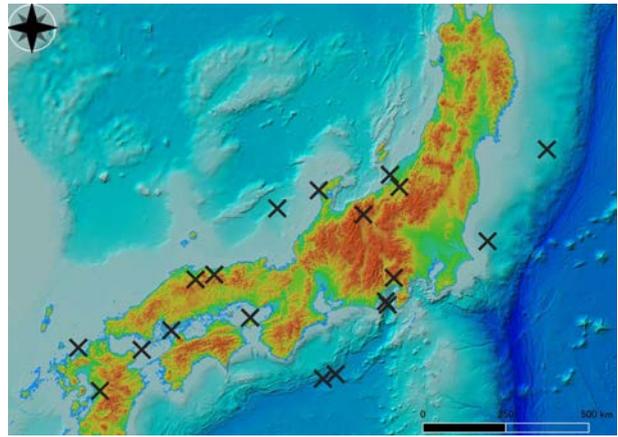


図-2 解析対象地震の震央分布

表-1 地震観測点，震度観測点情報

観測網	観測点名	観測点コード	緯度(°)	経度(°)	備考
気象庁	三国	916	36.2183	136.1583	
	福井	E20	36.0550	136.2233	
K-NET	三国	FKI001	36.2161	136.1571	移設前
			36.2184	136.1570	移設後
KiK-net	福井	FKI003	36.0444	136.2279	
	永平寺	FKIH01	36.0955	136.3617	
自治体	福井市大手	FKIP01	36.0642	136.2197	
	永平寺町松岡春日	FKIP09	36.0922	136.2986	
	永平寺町東古市	FKIP10	36.0961	136.3283	
	永平寺町栗住波	FKIP11	36.0781	136.3972	
	あわら市国影	FKIP14	36.2236	136.2039	波形なし
	あわら市市姫	FKIP15	36.2111	136.2286	
	坂井市丸岡町西里丸岡	FKIP16	36.1486	136.2667	
	坂井市春江町随応寺	FKIP17	36.1339	136.2189	
	坂井市坂井町下新庄	FKIP18	36.1669	136.2314	
	福井市蒲生町	FKIP27	36.0386	136.0125	
	福井市小羽町	FKIP29	36.0322	136.1358	

表-2 解析対象地震の情報

No.	地震の発生日時	震央地名	緯度(°)	経度(°)	深さ(km)	M_{JMA}
1	2000/6/7 6:16:43	石川県西方沖	36.8250	135.5617	21	6.2
2	2000/10/6 13:30:18	鳥取県西部	35.2733	133.3483	9	7.3
3	2001/3/24 15:27:55	安芸灘	34.1317	132.6933	46	6.7
4	2004/9/5 19:07:08	三重県南東沖	33.0317	136.7967	38	7.1
5	2004/9/5 23:57:17	三重県南東沖	33.1367	137.1400	44	7.4
6	2004/10/23 17:56:00	新潟県中越地方	37.2917	138.8667	13	6.8
7	2005/3/20 10:53:40	福岡県北西沖	33.7383	130.1750	9	7.0
8	2007/3/25 9:41:58	能登半島沖	37.2200	136.6850	11	6.9
9	2007/7/16 10:13:22	新潟県上中越沖	37.5567	138.6083	17	6.8
10	2009/8/11 5:07:06	駿河湾	34.7850	138.4983	23	6.5
11	2011/3/11 14:46:18	三陸沖	38.1033	142.8600	24	9.0
12	2011/3/11 15:15:34	茨城県沖	36.1200	141.2517	43	7.6
13	2011/3/15 22:31:46	静岡県東部	35.3083	138.7133	14	6.4
14	2011/8/1 23:58:11	駿河湾	34.7067	138.5483	23	6.2
15	2013/4/13 5:33:18	淡路島付近	34.4183	134.8283	15	6.3
16	2014/3/14 2:06:51	伊予灘	33.6917	131.8900	78	6.2
17	2014/11/22 22:08:18	長野県北部	36.6917	137.8900	5	6.7
18	2016/4/16 1:25:05	熊本県熊本地方	32.7533	130.7617	12	7.3
19	2016/10/21 14:07:23	鳥取県中部	35.3800	133.8550	11	6.6

表-3 KiK-net 永平寺 (FKIH01) の地盤構造⁵⁾

No.	層厚(m)	密度(t/m^3)	S波速度(m/s)	減衰定数(内部減衰)
1	4	1.62	108	0.102
2	2	1.62	108	0.102
3	14	2.27	1674	0.014
4	44	2.34	1954	0.018
5	36	2.39	2173	0.016
6	8	2.39	2173	0.016
7	730	2.52	2800	0.003
8	-	2.58	3100	0.002

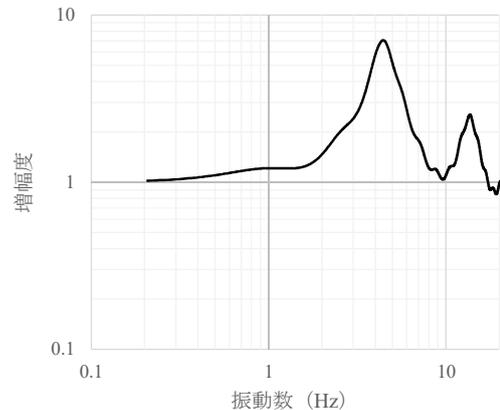


図-3 KiK-net 永平寺 (FKIH01) のSH波理論伝達関数

No.12は40秒間，その他3つの地震は10秒間である。抽出する際は両端にcosテーパを施したフィルターをかけた。フーリエスペクトルはバンド幅0.1HzのParzen windowで平滑化した。また、 $F_b(f)$ はKiK-net永平寺の地表の地震波のフーリエスペクトルを表-3の地盤構造から計算した図-3のSH波理論伝達関数で除して求めた。図-4に例としてNo.11の地震の幾何減衰補正前の加速度フーリエスペクトルを示す。震源距離が600km以上

のため，高振動数成分が大きく減衰している。次に求めた $F_s(f)$ と $F_b(f)$ を用い，式(10)の dH を計算した。式(10)の分子，分母のフーリエスペクトル2乗値の積分値は0.2~20Hzの範囲で台形積分により求めた。図-5，6にNo.11，No.15の地震の計測震度分布， dI と dH の分布図，図-7にNo.11~No.15の地震における dI と dH の対応を示す。図-7の赤い実線は dI を変数とした dH の回帰式による直線であり， R^2 は回帰式を求めた際に

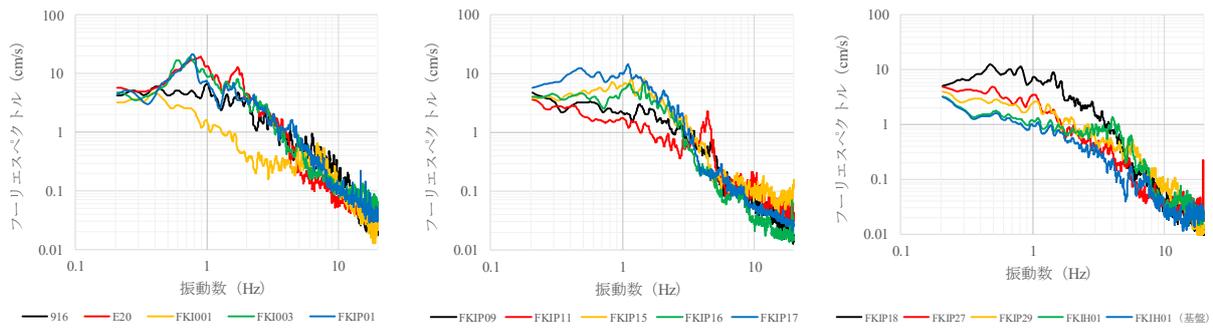


図4 No.11の地震の加速度フーリエスペクトル

得られた決定係数である。

図-5, 6を見ると2つの地震とも、計測震度、 dI , dH が福井平野の中央部分で大きいことが分かる。これは平野中央部の方が周辺部よりも地盤が軟弱なことに起因すると考えられる。

次に図-7の dI と dH の対応を見ると、両者の対応が非常に良く、フーリエスペクトルをパラメータとした式(10)の評価精度が高いことが分かる。

(3) 基盤スペクトル、サイト増幅特性による震度増分の評価

続いて、対象地点の地震波形がない場合にフーリエスペクトルから震度増分を評価するために、同地点の他の地震の観測記録から求めたサイト増幅特性と基準点の基盤スペクトルから式(11)により震度増分 dH を計算し、 dI と比較した。基準点の基盤スペクトルは前節のフーリエスペクトルと同じ手順で計算し、 M_{MI} が7未満の地震はS波到達から10秒間、 M_{MI} が7以上の地震のうち、No.2, No.4, No.7, No.18は15秒間、No.5は40秒間S波部を切り出して計算に用いた。

dH の計算にあたり、まず、各地震観測点のサイト増幅特性を評価した。No.11~No.15の地震の観測記録から求めた加速度フーリエスペクトルを基準点であるKiK-net永平寺の基盤スペクトルで除して、各地震観測点で複数サイト増幅特性を求め、幾何平均値を式(11)の計算に用いた。ただし、K-NET三国(FKI001)はNo.11~15の地震の期間で十分な数の地震記録が得られなかったため、観測点移設前はNo.10以前、移設後はNo.16以降の複数の地震観測記録からサイト増幅特性を評価した。

図-8に評価したサイト増幅特性を示す。同図を見ると、JMA福井(E20)、K-NET福井(FKI003)、自治体観測点の福井(FKIP01)などの福井平野の中央付近に位置する地震観測点では1Hz前後の増幅度が大きくなっていることが分かる。

図-5(4)、図-6(4)にNo.11とNo.15の地震の dH の分布、図-9に dI と dH の対応を示す。 dH の分布を見ると、 dI , dH と似た傾向を示していることが分かる。図-9の dI

と dH の対応を見ると、13の地震で dI と dH の回帰式の決定係数 R^2 が0.8以上という高い値になっているが、No.8の地震(2007年能登半島地震)は決定係数 R^2 が低い値となっている。この要因はK-NET三国(FKI001)を除き、震源距離の大きいNo.11~15の地震からサイト増幅特性を計算しているため、他の地震に比べて震源距離が小さい能登半島地震ではサイト増幅特性の違いが大きかった可能性が考えられる。今後はNo.11~15以外の地震でも記録が得られている地震観測点については他の地震で得られた観測記録も用いてサイト増幅特性を評価し、式(11)により震度増分を評価する予定である。

本研究では式(11)による震度増分 dH の評価において、地震観測記録から求めたサイト増幅特性を用いたが、サイト増幅特性の代わりに、地盤構造から計算できるS波の理論伝達関数を用いれば、地震観測点以外の地点に対しても、震度増分 dH を評価することができる。

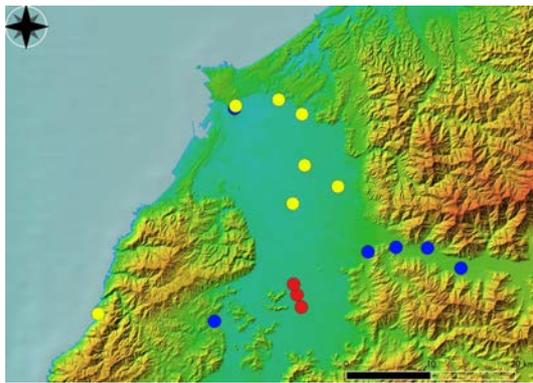
福井平野では安井他⁹⁾が常時微動記録をもとに地表から地震基盤までの地盤構造を評価していることから、今後は評価した地盤構造から計算したS波伝達関数をサイト増幅特性の代替として用いて震度増分 dH を求め、評価精度を検証する予定である。

4. まとめ

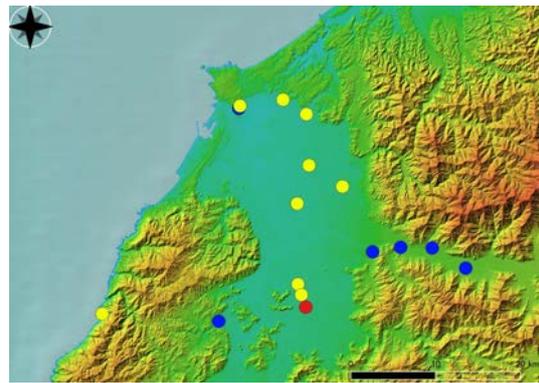
本研究では著者の一部が提案した地震動スペクトルと震度増分の関係式を地震観測記録に対して適用し、フーリエスペクトルによる震度増分の評価精度を調べた。

5つの地震において、加速度フーリエスペクトルから評価した震度増分と観測された計測震度から評価した震度増分の対応が非常に良いことが明らかになった。

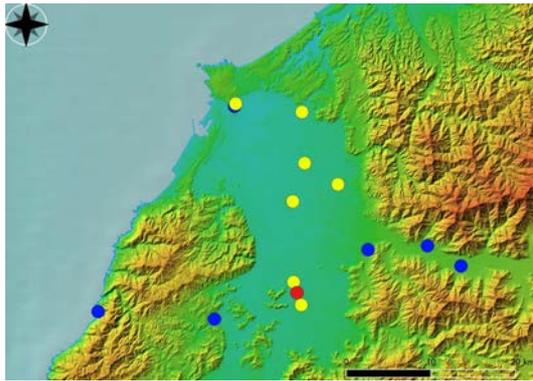
続いて、加速度フーリエスペクトルがサイト増幅特性と基準点の基盤スペクトルの積で表されるものとして、震度増分を評価したところ、解析対象地震の約7割で精度良く震度増分を評価することができたが、2007年能登半島地震を対象とした場合は評価精度が低くなった。この要因はサイト増幅特性の評価に用いた地震の震源距離が能登半島地震に比べて大きく、そのためサイト増幅



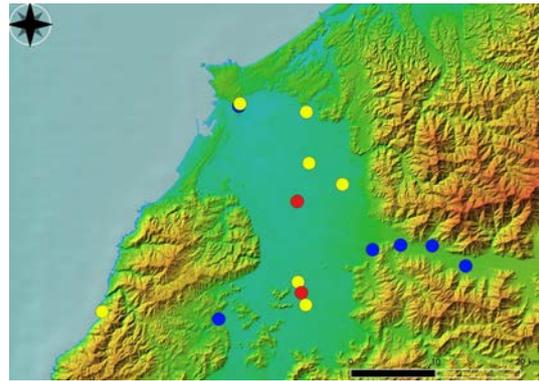
(1) 計測震度 (●震度3, ●震度2, ●震度1)



(2) dI (●2以上, ●1~2, ●1未満)

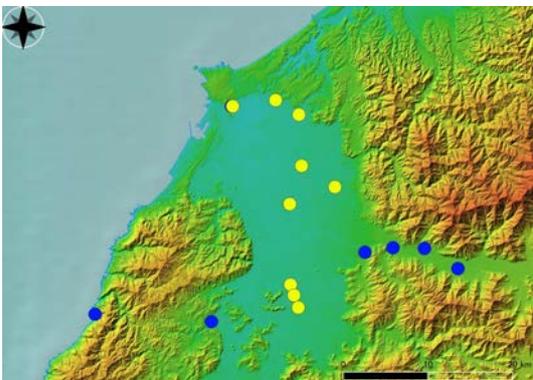


(3) dI_1 (●2以上, ●1~2, ●1未満)

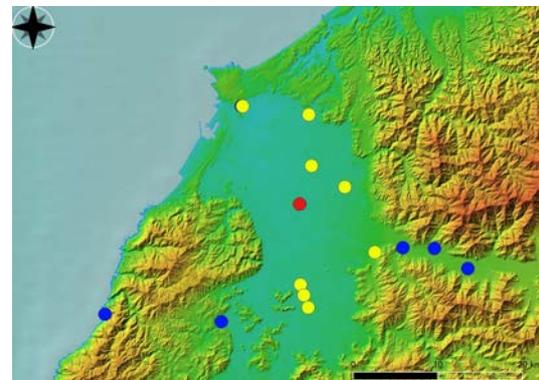


(4) dI_2 (●2以上, ●1~2, ●1未満)

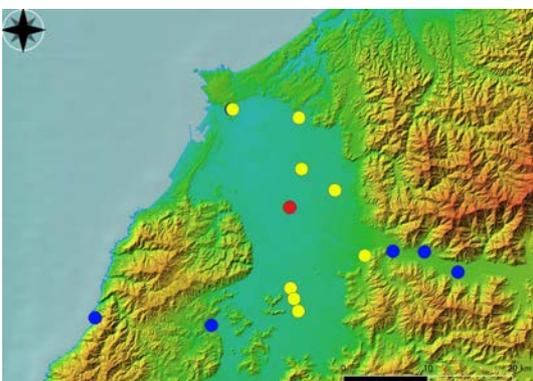
図-5 No.11の地震の計測震度と震度増分の分布



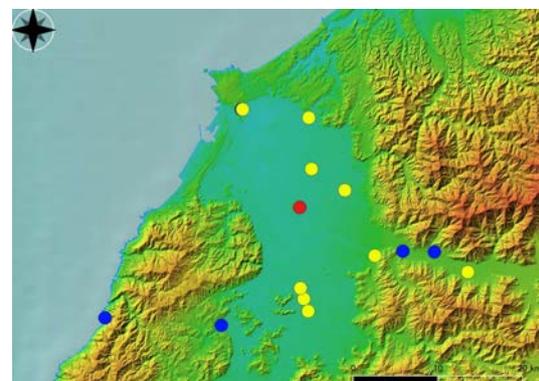
(1) 計測震度 (●震度2, ●震度1)



(2) dI (●2以上, ●1~2, ●1未満)

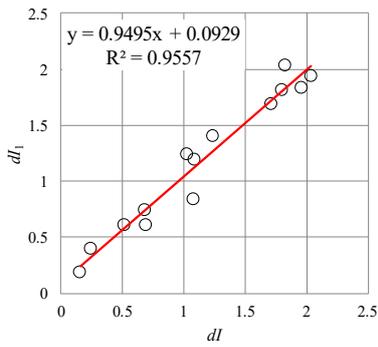


(3) dI_1 (●2以上, ●1~2, ●1未満)

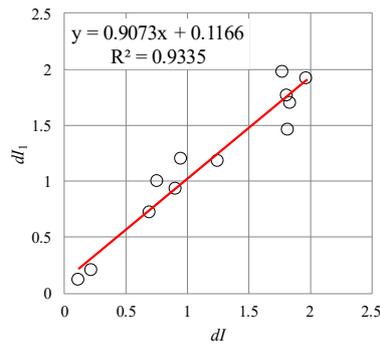


(4) dI_2 (●2以上, ●1~2, ●1未満)

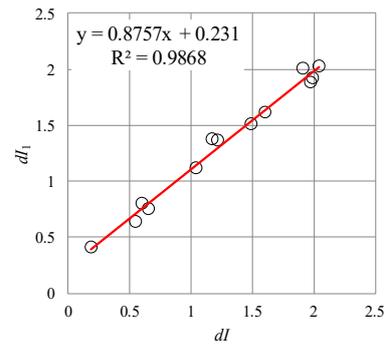
図-6 No.15の地震の計測震度と震度増分の分布



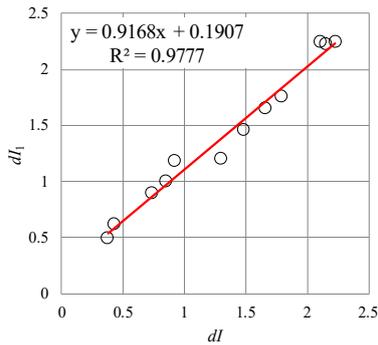
(1) No.11



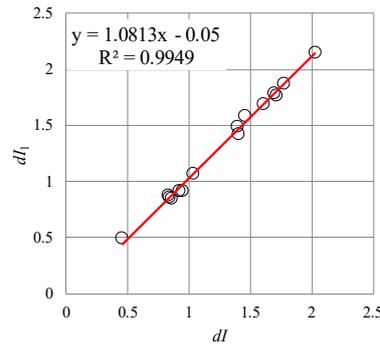
(2) No.12



(3) No.13



(4) No.14



(5) No.15

図-7 dl と dl₁ の対応

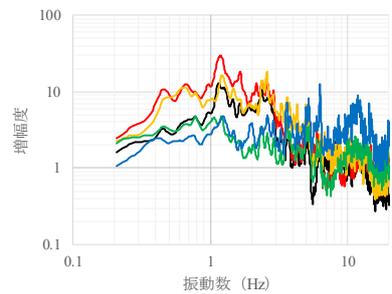
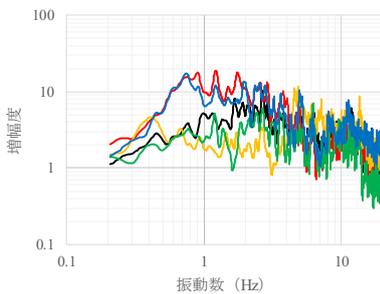


図-8 サイト増幅特性

特性に違いが生じたためと推測される。今後は自治体観測点に対して、新しい地震観測記録を入手し、震源距離が小さい地震の観測記録もサイト増幅特性の評価の際に用いる予定である。

また、地震計のない地点の震度増分を評価するために、サイト増幅特性の代替として地盤構造から計算したS波伝達関数を利用した場合についても震度増分を評価し、その精度を検証する予定である。

謝辞：本研究では気象庁、国立研究開発法人 防災科学技術研究所、および、福井県の地震観測記録を使用させて頂きました。一部の図の作成において、QGIS³⁷⁾、国土地理院の地理院タイル⁸⁾を利用させて頂きました。標高

図の海域部は海上保安庁海洋情報部の資料を使用して作成しました。福井県の地震観測記録の取得の際には福井大学の堀道広先生にお世話になりました。また、福井県の地震観測記録は京都大学防災研究所の浅野公之先生が整理したデータを使用させて頂きました。早稲田大学の安井譲先生に貴重なご意見を頂きました。本研究はJSPS 科研費 JP18H01677 (研究代表者：宮島昌克) の助成を受けたものです。記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 西川隼人, 池本敏和, 宮島昌克: 震度増分に及ぼすサイト増幅特性と震源スペクトルの影響に関する基本的考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 第 75 巻, 第 4

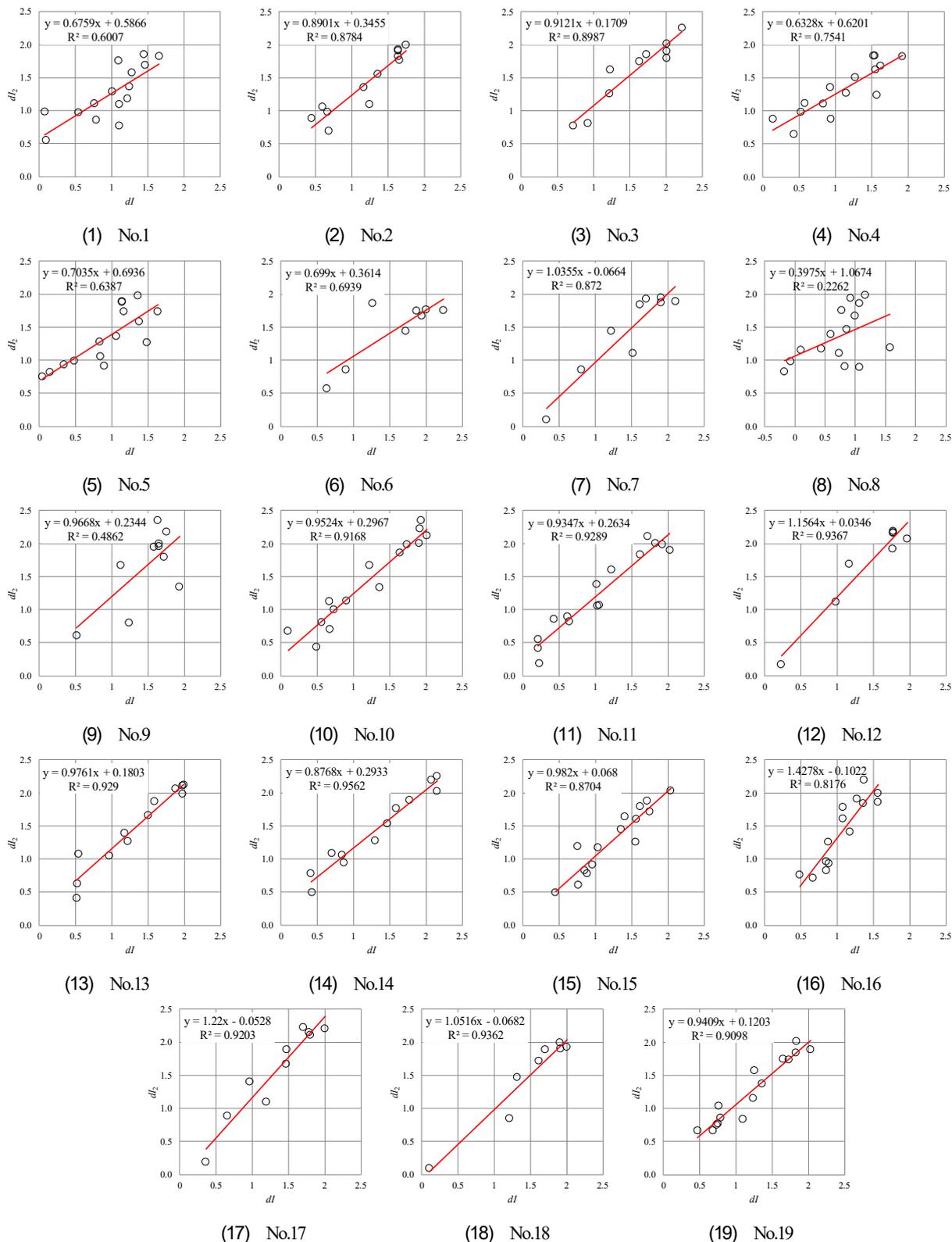


図-9 dl と dz の対応

- 号, 2019 (登載決定) .
- 2) 西川隼人, 宮島昌克: 2011 年東北地方太平洋沖地震における最大加速度, 計測震度と地震動スペクトルの関係, 日本地震工学会論文集, 第 12 巻, 第 4 号, pp.94-103, 2012.

- 3) 西川隼人, 宮島昌克: 地震動スペクトルのパラメータによる地盤増幅度の表現と地震規模依存性の評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 第 66 巻, 第 1 号, pp.20-29, 2010.

- 4) 西川隼人, 宮島昌克: 合成したサイト増幅特性による地

- 盤増幅度評価式の検討, 日本地震工学会論文集, 第 15 卷, 第 7 号, pp.180-193, 2015.
- 5) 安井 謙, 西川隼人, 前田寿朗, 長 郁夫, 小嶋啓介, 瀧瀬一樹, 宮島昌克: 地震動 H/V スペクトルによる地盤構造逆解析の適用性—福井地域の記録を用いた事例研究一, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 第 70 卷, 第 4 号, pp.628-643, 2014.
- 6) 安井 謙, 小嶋啓介, 野口竜也, 香川敬生, 目代智滝, 清水健博, 前田聖弘, 堀川晋老: 微動 H/V 探査に基づく福井平野の 3 次元地盤構造の推定, 土木学会第 67 回年次
- 学術講演会講演梗概集, I-221, pp.441-442, 2012.
- 7) QGIS ホームページ: <https://www.qgis.org/ja/site/index.html>, (2019 年 9 月 2 日閲覧) .
- 8) 国土地理院ホームページ, 地理院タイル一覧: <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>, (2019 年 9 月 3 日閲覧)

EVALUATION OF AMPLIFICATION OF SEISMIC INTENSITY BASED ON EARTHQUAKE MOTION SPECTRUM OBTAINED FROM OBSERVATION RECORDS

Hayato NISHIKAWA, Toshikazu IKEMOTO, Haruki AZUMA, Yuma SUZUKI and Masakatsu MIYAJIMA

In this study, an amplification of seismic intensity was evaluated using the acceleration Fourier spectrum of the seismic wave based on the author's previous study for the seismic observation sites in the surrounding area of the Fukui Plain. As a result of comparing the evaluated amplification with the ones obtained from the observed JMA seismic intensity, it was found that the correspondence between them was very good. Nextly, evaluating the amplification of seismic intensity using the acceleration Fourier spectrum obtained from the product of the site amplification effect and the basement spectrum of the reference site, the evaluated amplifications were good correlation with the ones evaluated from observed JMA seismic intensity in about 70% of the target earthquakes.