



## 石川県内の観測点における地盤増幅度の評価

西川隼人<sup>1)</sup>、宮島昌克<sup>2)</sup>、堂下翔平<sup>3)</sup>、北浦 勝<sup>4)</sup>

1)正会員 舞鶴工業高等専門学校、技術職員、博士 (工学)

e-mail : nisikawa@maizuru-ct.ac.jp

2)正会員 金沢大学大学院自然科学研究科、教授、工博

e-mail : miyajima@t.kanazawa-u.ac.jp

3)株式会社 三谷商事、修士 (工学)

4)正会員 金沢大学大学院自然科学研究科、教授、工博

e-mail : kitaura@t.kanazawa-u.ac.jp

### 要 約

本論文では石川県の震度情報ネットワークなどの記録を用いて、観測点ごとの計測震度と最大加速度の地盤増幅度を評価した。各観測点の最大加速度と計測震度の地盤増幅度を比較したところ、両者に相関が見られた。また、最大加速度の地盤増幅度が小さい地点でも地盤の卓越周期が長い場合は震度増幅度が大きい傾向にあった。続いて、震度増幅度が最大加速度増幅度と地盤の卓越周期の関数として表わされると仮定し、回帰分析によって、それぞれの震度増幅度への影響度を調べた。その結果、最大加速度増幅度が地盤の卓越周期に比べて、震度増幅度との相関が高いことが明らかになった。

キーワード：震度情報ネットワーク、最大加速度、計測震度、地盤増幅度、地盤の卓越周期

### 1. 序論

1995年の兵庫県南部地震以降、気象庁や自治体、独立行政法人 防災科学技術研究所などの公的機関や東京ガスなどの民間企業によって、地震観測網が整備されてきた<sup>1)~4)</sup>。公的機関による観測網において各都道府県の市町村に設置されている震度計が全体の計器の大半を占めており、市町村の震度計や気象庁の地震計などで構成されている震度情報ネットワークによる地震動情報は被害状況の把握などに利用されている。このようなことから、対象とする都道府県全域の地震被害予測や地震動予測を行なう上で、市町村の計器で記録された地震動データを解析することは非常に重要であり、観測点の地盤特性の評価などに関する研究が実施されている<sup>5)~7)</sup>。しかし、気象庁やK-NET、KiK-netの地震記録を対象にした研究<sup>8)~11)</sup>に比べて検討事例が少ないのが実情である。その要因の一つとして地震波形データの回収の際に様々な問題点があることが考えられる。そもそも、震度情報ネットワークは地震発生時に自治体での初動体制を整えるために都道府県に震度情報を

送信することを主たる目的としていたもので、研究用としての配慮がなされていない場合が多い<sup>12)</sup>。そのため、地震波形データを保存するシステムが確立されていない、あるいは回収に煩雑な手続きを要するという問題点がある。近年は大都市圏で自治体や他機関の計器で記録された地震波形を収集するシステムが構築されており<sup>13)</sup>、観測された記録に基づいて地震動特性の評価が行われている<sup>14)</sup>。しかし、地方ではそのようなシステムの整備が十分に進んでいない。2000年鳥取県西部地震や2004年新潟県中越地震のように、大都市圏以外の地域で大きな被害地震が発生していることを考えると、地方の自治体でも各市町村で得られた地震データを可能な限り収集し、検討を行うことによって、地震防災に有効活用する必要があると考えられる。

そこで本論文では石川県の震度情報ネットワークやK-NET、KiK-netで観測された記録を用いて各観測点の地盤増幅特性の検討を行った。震度情報ネットワークでは地震波形の回収は困難な状況にあるが、地震防災対策や耐震設計において基礎的資料となる最大加速度、計測震度のデータは記録されている。ここではこれらの2つの地震動指標の地盤増幅度を評価した。最大加速度と計測震度の地盤増幅度の評価は森本・富樫断層帯<sup>15)</sup>や砺波平野断層帯・呉羽山断層帯<sup>16)</sup>のように全国的に見て地震発生確率の高い断層帯による地震動予測を行う上でも、有効な資料になると考えられる。

また、地震動の周期特性が構造物の被害に密接に関係していること<sup>17)</sup>から、最大加速度と計測震度の地盤増幅度の評価を被害予測に活用するためには周期領域での地盤増幅特性と最大加速度などの地盤増幅度との関係を把握する必要がある。本論文では短周期の地震波の影響を受けやすい最大加速度の地盤増幅度や地盤の卓越周期のある周期帯の地盤増幅特性を表わす指標として用い、それらと計測震度の地盤増幅度の相関を検証することにより、地震動において計測震度の地盤増幅度に影響を及ぼしやすい周期帯を調べた。

## 2. 解析データ

### 2.1 震度情報ネットワークの概要

1995年の兵庫県南部地震を契機として、地震発生時の初動体制を整えるために震度情報を迅速に収集する必要性が指摘され、当時の自治省消防庁によって全国の市町村単位で設置した震度計から成り立っているネットワークシステム（震度情報ネットワーク）が構築された。ネットワーク構築に当たって、計測震度計、加速度計が設置されていない市町村では消防庁によって新たに計測震度計が設置された。地震時に市町村、気象庁、K-NET観測点で記録された計測震度や最大加速度などの情報は各都道府県庁に収集されるとともに、各都道府県で収集されたデータは消防庁に送られ、さらに他の都道府県にフィードバックされるシステムとなっている<sup>18)</sup>。

石川県の震度情報ネットワークは平成9年5月から運用されており、各市町村に設置されている震度計27台、気象庁地震計5台、K-NET地震計9台から得られた計測震度、最大加速度（時刻歴波形上で3成分をベクトル合成した際の最大値）を収集している。ただし、市町村に設置されている震度計の台数は市町村合併が行われる以前の段階のものである。また、平成12年4月からは地震被害緊急推定システムに接続し、集めた震度情報を基に自動的に被害推定を行うようになっている。

### 2.2 解析対象とした観測点と地震記録

解析には石川県の震度情報ネットワークの観測点で得られた記録以外にも情報ネットワークに属していないK-NET観測点やKiK-net観測点の記録を用いた。また、石川県以外の地域で発生した地震も解析の対象とするので、福井、富山、岐阜県にある一部の観測点の記録も用いた。対象とした地点は震度情報ネットワークで利用されている38地点と、K-NET、KiK-net観測点からなる72地点である（図1）。これらの観測点では3つ以上の地震記録が得られている。なお、観測された最大加速度は1~548cm/s<sup>2</sup>、計測震度は0.1~4.7であった。観測記録のなかには地盤の非線形化が生じる可能性がある大きな振幅の記録が含まれているが、そのような記

録の数は少なかったため、その際の地盤増幅度を独立に扱わなかった。

対象とした地震は2000～2005年に石川県近傍で発生した地震である。地震を選定する際には地震のタイプによる震源特性、伝播経路特性の違いを可能な限り避けるために、震源深さが概ね20km以内の地殻内地震の記録を用いた。また、2000年の鳥取県西部地震と2004年新潟県中越地震などのような地震では今回対象とする観測点の大半で震源距離が200kmを超えており、地震記録において表面波が卓越している可能性があるため検討に用いなかった。対象とした地震の諸元を表1、震央位置を図2に示す。これらの地震の気象庁マグニチュード $M_{MM}$ は3.6～6.1、震源深さは1～24kmである。

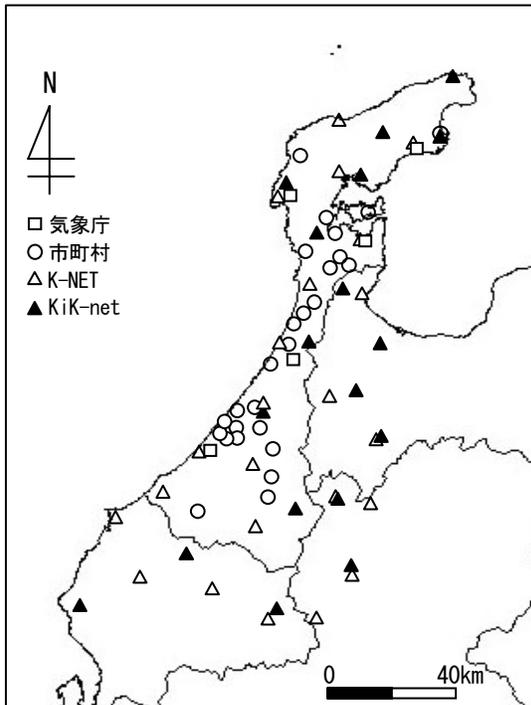


図1 対象とした観測点の分布

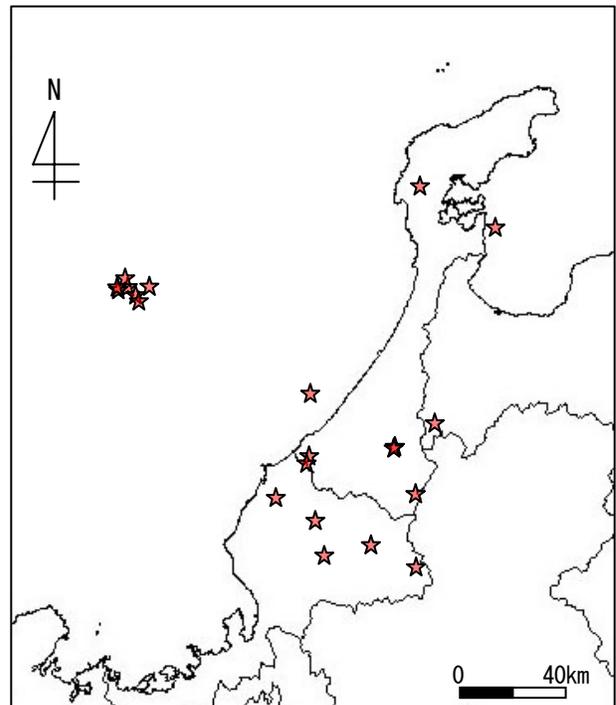


図2 地震の震央位置

### 3. 解析手法

地盤増幅度は工学的基盤のような揺れの小さい地点を基準として評価することが多い<sup>19)</sup>。著者らは石川県の震度情報ネットワークの観測点を対象にして、各地点における計測震度の地盤増幅度の傾向を調べたところ、K-NET観測点の白峰（観測点コードISK013）の揺れが相対的に小さいことを明らかにした<sup>20)</sup>。この結果に基づき、白峰を地盤増幅度算出の際の基準点とした。白峰で観測された加速度の時刻歴波形を用いて重複反射理論<sup>21)</sup>によって工学的基盤相当の層（S波速度が670m/sの層）における加速度波形を求めた。地盤材料による減衰はS波に関する $Q$ 値（ $Q_s$ ）によって考慮した。周波数依存性を考えず $Q_s=V_s/15$ という関係式<sup>22)</sup>から $Q_s$ を求めた。得られた波形から最大加速度と計測震度を求め、この地点を基準とした相対的な地盤増幅度を評価する。ただし、重複反射理論で求める加速度波形は水平2成分であるので、最大加速度と計測震度は3成分から求めた値に補正する必要がある。そこで、地表で得られたデータから最大加速度の水平成分合成値と3成

表 1 地盤増幅度算出の際に対象とした地震の諸元

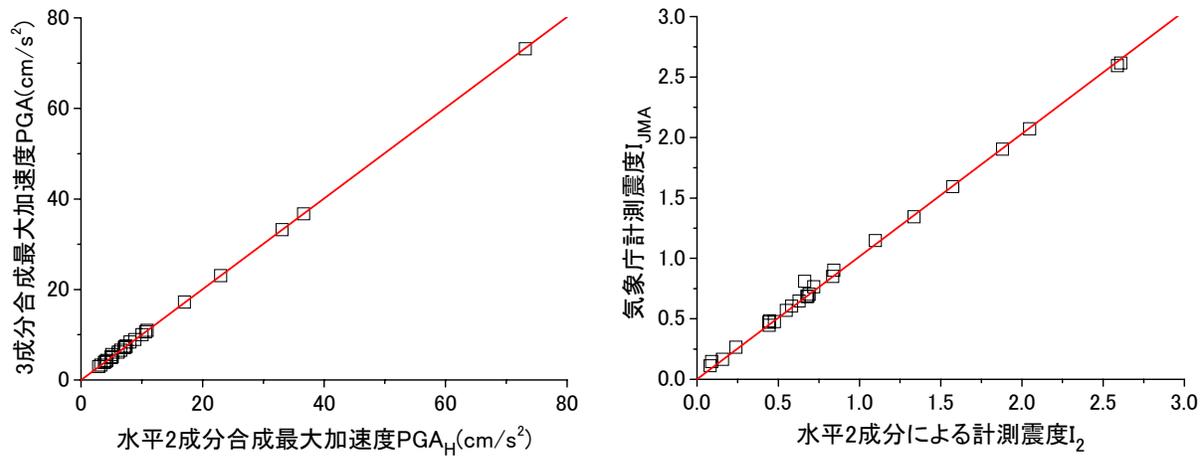
| No. | 発生年月日      | $M_{JMA}$ | 緯度<br>(° N) | 経度<br>(° E) | 震源深さ<br>(km) | 観測点数 |
|-----|------------|-----------|-------------|-------------|--------------|------|
| 1   | 2000/1/10  | 3.6       | 36.25       | 136.30      | 11           | 14   |
| 2   | 2000/3/24  | 4.0       | 35.90       | 136.76      | 10           | 18   |
| 3   | 2000/6/7   | 6.1       | 36.84       | 135.55      | 22           | 59   |
| 4   | 2000/6/12  | 3.9       | 36.85       | 135.55      | 5            | 15   |
| 5   | 2000/6/13  | 4.3       | 36.81       | 135.58      | 20           | 37   |
| 6   | 2000/6/22  | 4.6       | 36.84       | 135.52      | 13           | 50   |
| 7   | 2001/1/22  | 3.8       | 37.20       | 136.79      | 18           | 22   |
| 8   | 2001/4/6   | 4.2       | 36.88       | 135.54      | 13           | 16   |
| 9   | 2001/4/14  | 3.6       | 37.05       | 137.10      | 18           | 23   |
| 10  | 2001/6/13  | 4.4       | 36.80       | 135.60      | 20           | 56   |
| 11  | 2002/4/22  | 3.7       | 36.39       | 136.83      | 11           | 28   |
| 12  | 2002/8/18  | 4.5       | 36.13       | 136.18      | 11           | 46   |
| 13  | 2002/9/8   | 3.9       | 35.97       | 136.57      | 10           | 17   |
| 14  | 2002/11/15 | 3.7       | 36.31       | 136.68      | 8            | 17   |
| 15  | 2002/11/17 | 4.5       | 36.30       | 136.67      | 8            | 57   |
| 16  | 2003/2/11  | 4.0       | 36.06       | 136.34      | 6            | 25   |
| 17  | 2003/2/22  | 4.0       | 36.49       | 136.32      | 17           | 14   |
| 18  | 2003/6/5   | 4.2       | 36.27       | 136.31      | 12           | 37   |
| 19  | 2003/10/12 | 4.7       | 36.85       | 135.64      | 24           | 19   |
| 20  | 2004/10/5  | 4.8       | 35.93       | 136.38      | 12           | 36   |
| 21  | 2005/10/3  | 4.5       | 36.15       | 136.76      | 1            | 11   |

分合成値の関係式を求め、水平2成分から評価した最大加速度と計測震度を3成分から評価した値に換算した。関係式を構築するには十分なデータ数を確保するために、表1に含まれていない地震も対象とした。追加した記録は1997～2005年に発生した地震 ( $M_{JMA}$ は3.4～4.8、震源深さは8～20km) で得られたものであり、観測された最大加速度、計測震度はそれぞれ5～37  $\text{cm/s}^2$ 、0.1～2.0であった。最大加速度、計測震度の水平2成分合成値と3成分合成値の関係を図3に示す。それぞれの場合の関係式は次のようになった。

$$PGA = 1.0024PGA_H \quad (1)$$

$$I_{JMA} = 1.016I_2 \quad (2)$$

$PGA$ は3成分を合成して求めた最大加速度、 $PGA_H$ は水平2成分を合成して求めた最大加速度である。また、 $I_2$ は水平2成分から計算した計測震度、 $I_{JMA}$ は3成分から計算した気象庁計測震度である。



(1) 最大加速度 (2) 計測震度  
 図3 水平2成分と3成分から求めた地震動強さ指標の関係

各地点の地盤増幅度は距離減衰式を二段階回帰分析<sup>23)</sup>によって求めることによって算出した。最大加速度の距離減衰式は代表的な研究である福島・田中<sup>24)</sup>や司・翠川<sup>25)</sup>と同タイプのものとした。計測震度については著者ら<sup>25)</sup>が先に関東地方を対象に求めた距離減衰式と比較するために、その距離減衰式と同タイプのものを用いた。最大加速度と計測震度が次式のような係数の和から成り立っていると仮定した上で係数を評価した。

$$\log PGA_{ij} = S^A_i - \log R_{ij} + b^A R_{ij} + \sum_{k=1} \delta_{kj} g^A_k \quad (3)$$

$$I_{ij} = S^I_i + b^I \log R_{ij} + \sum_{k=1} \delta_{kj} g^I_k \quad (4)$$

$$S_i = aM_{JMA} + c \quad (5)$$

$PGA_{ij}$ と $I_{ij}$ はそれぞれ*i*地震における*j*観測点の最大加速度と計測震度である。 $S_i$ は*i*地震の震源特性を表す係数(震源係数)、 $R_{ij}$ は*i*地震における*j*観測点の震源距離(km)、 $b$ は距離減衰を表す係数(距離係数)、 $g_k$ は*k*観測点の地盤増幅特性を表す係数(地盤係数)である。添え字*A*、*I*はそれぞれ、最大加速度と計測震度に対応している。 $\delta_{kj}$ はクロネッカーのデルタであり、 $k=j$ の場合は1、それ以外では0である。式(3)、(4)の右辺第2項は常用対数である。解析対象とした地震記録をもとに式(3)、(4)の係数を求める。係数を求める際に基準観測点である白峰の $g_k$ を0に固定した。よって、得られる各地点の地盤係数 $g_k$ は工学的基準を基準とした場合の値となる。一段階目で得られた震源係数 $S_i$ を二段階目で式(5)のような気象庁マグニチュード $M_{JMA}$ との関係式として求める。なお、回帰分析の二段階目においてデータ数に応じて重み付けを行っている研究<sup>例え</sup>ば<sup>25)</sup>もあるが、本研究では重み付けを行わなかった。

## 4. 解析結果

### 4.1 回帰分析の結果

解析の結果、得られた回帰係数、及び、標準偏差 $\sigma$ は表2のようになった。表中の $\sigma_r$ は地震内偏差、 $\sigma_e$ は地

震間偏差を示している。地盤係数については次節で説明する。まず、距離係数について検証する。既往の研究<sup>25)</sup>によると最大加速度の距離係数は-0.002~0.005程度であるので、本論文で得られた係数(-0.0046)は妥当な値と言える。計測震度の係数は同タイプの距離減衰モデルを用いている西川他<sup>26)</sup>や神田他<sup>27)</sup>の結果(それぞれ-4.49、-4.70)に比べて小さい。次に震源係数 $S_i$ を既往の研究による結果と比較した(図4)。既往の研究結果との比較には最大加速度については本論文と同じように $S_i$ を気象庁マグニチュードの関数で表した福島・田中<sup>24)</sup>の研究結果を用い、計測震度については西川他<sup>26)</sup>や神田他<sup>27)</sup>の結果を用いた。最大加速度の震源係数 $S_i$ については本論文と福島・田中<sup>24)</sup>による直線に大きな違いは見られない。一方、計測震度の場合には本論文の結果が西川他<sup>26)</sup>や神田他<sup>27)</sup>の結果に比べて、かなり小さい。これまでの研究で地震のタイプや震源深さの違いによって震源係数や距離係数に違いが見られることが指摘されている<sup>25)、28)</sup>。本論文で距離減衰式の構築の際に対象とした地震は地殻内で発生した地震であるのに対して、既往の計測震度の距離減衰式<sup>26)、27)</sup>に関する研究で対象とした地震の多くはプレート境界地震やプレート内地震である。このような本論文と既往研究で対象とした地震のタイプの違いなどが計測震度の距離減衰式の係数の差異に影響を及ぼしたと推測される。

続いて、距離減衰式による予測値と観測値の適合度を検証する。本論文で得られた標準偏差 $\sigma$ は最大加速度、計測震度でそれぞれ0.332、0.589であった。解析に用いたデータ数などが異なるので単純に比較することはできないが、既往の研究結果<sup>25)、29)</sup>の標準偏差(最大加速度では0.2~0.3程度、計測震度では0.5程度)と比べて大きな違いはない。次に距離減衰式による予測値と観測値の対応を見た。図5に2000年6月7日に発生した地震( $M_{JMA}=6.1$ )と2002年8月18日に発生した地震( $M_{JMA}=4.5$ )の観測値と本論文で得られた距離減衰曲線の関係を示す。本論文で求めた距離減衰曲線として、回帰分析の1段階目で得られた震源係数 $S_i$ を直接用いた曲線と式(5)から $S_i$ を計算した曲線の2つを比較に用いた。便宜上、前者を曲線1、後者を曲線2と呼ぶ。観測値

表2 回帰係数と標準偏差(表中の $\sigma$ は $\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_e^2}$ で計算される。)

|       | a    | b       | c     | $\sigma_r$ | $\sigma_e$ | $\sigma$ |
|-------|------|---------|-------|------------|------------|----------|
| 最大加速度 | 0.64 | -0.0046 | -0.14 | 0.198      | 0.267      | 0.332    |
| 計測震度  | 1.54 | -2.93   | -1.34 | 0.347      | 0.477      | 0.589    |

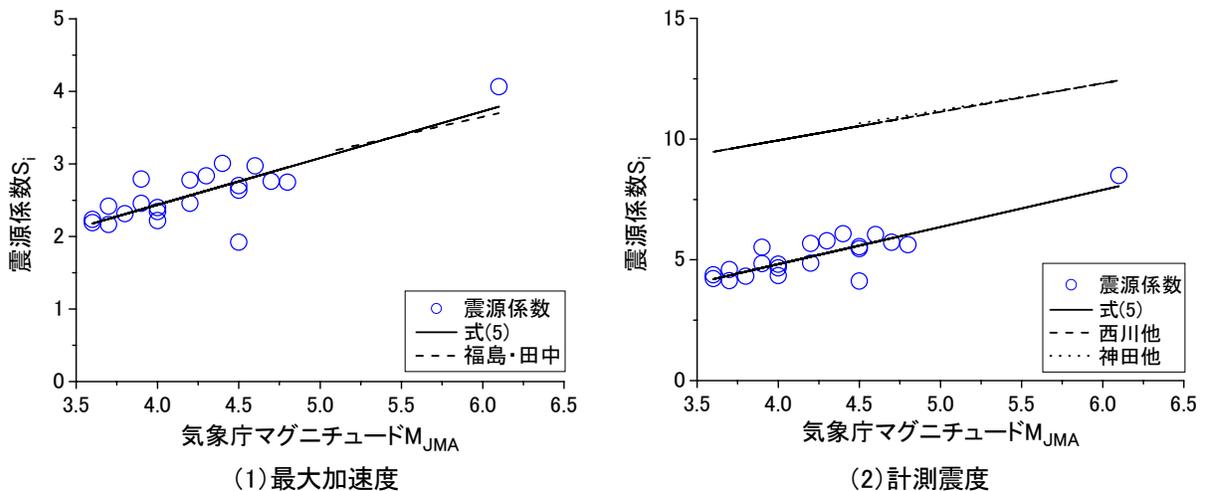
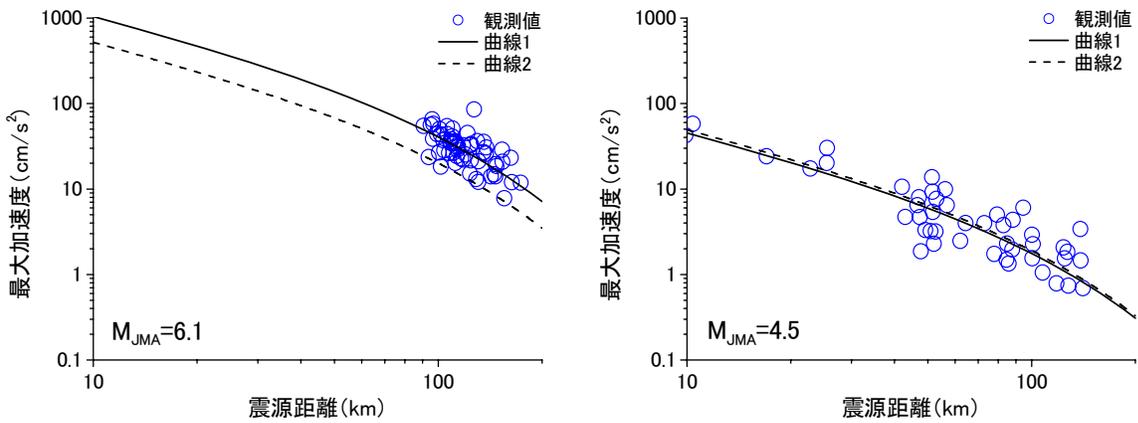
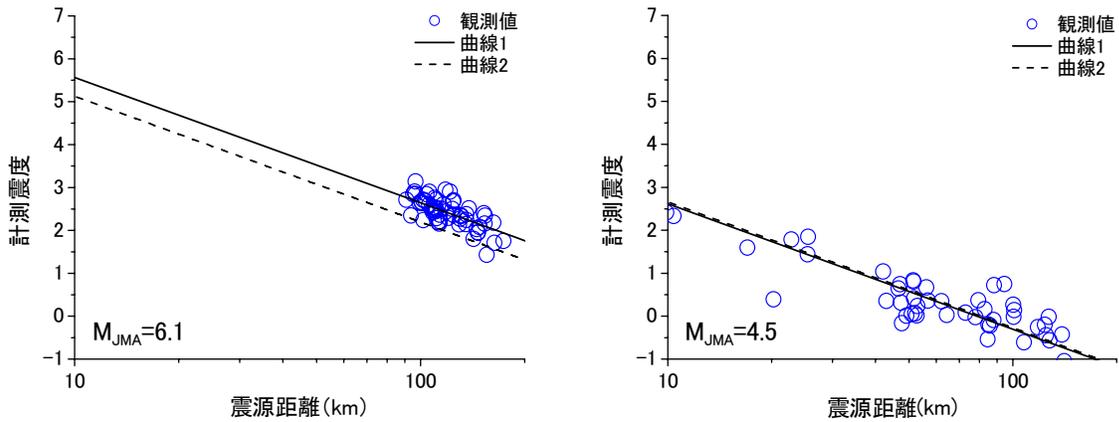


図4 震源係数 $S_i$ の比較



(1) 最大加速度



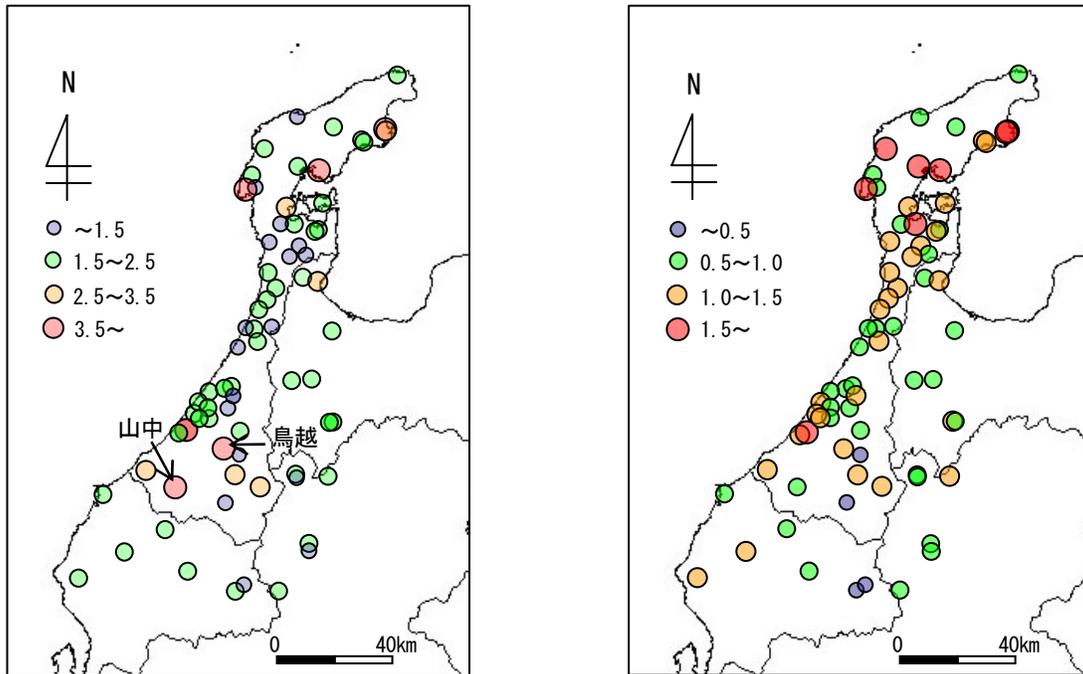
(2) 計測震度

図5 距離減衰式の比較

は地点ごとに求めた地盤係数を考慮した値を用いた。まず、最大加速度の場合について見ると、 $M_{JMA}=4.5$ の地震では曲線1、2ともに観測値と対応が良いが、 $M_{JMA}=6.1$ の地震では曲線2が観測値に比べて小さい。計測震度の場合も同様の傾向が見られ、 $M_{JMA}=6.1$ の地震において曲線2は観測値に比べて小さい。 $M_{JMA}=6.1$ の地震において曲線2が観測値との対応が良くなかった要因は式 (5) から計算した震源係数 $S_i$ と回帰分析の1段階目で得られた震源係数 $S_i$ の対応が悪いためである。 $M_{JMA}=6.1$ の地震は震源での応力降下量が内陸地震の一般的な値に比べて、大きかったことが指摘されており<sup>30)</sup>、そのために1段階目で求めた $S_i$ と式 (5) から計算した $S_i$ の差異が大きくなった可能性がある。このような震源での応力降下量による影響を考慮するためには震源係数 $S_i$ とマグニチュードの関係式を求める際に各地震の震源における応力降下量をパラメータとして導入する必要があると考えられる。

#### 4.2 地盤増幅度の評価

各観測点の地盤増幅度は最大加速度では1.06~5.21、計測震度では0.27~1.85であった。なお、最大加速度の地盤増幅度 $F_{k,l}^A$ は $10^{g_{k,l}^A}$ 、計測震度の地盤増幅度 $F_{k,l}^I$ は $g_{k,l}^I$ で表される。対象とした観測点の地盤増幅度の分布



(1) 最大加速度

(2) 計測震度

図6 地盤増幅度の分布

を図6に示す。ここでは主に石川県の観測点を対象に検討を行った。地盤増幅度分布を見ると、計測震度の地盤増幅度（以降、震度増幅度）が大きい地点（1.5以上の地点）は平野部に集中しているのに対して、最大加速度の地盤増幅度（以降、最大加速度増幅度）が大きい地点（3.5以上の地点）は図6に示す山中、鳥越のように山地などの平野部以外の地域にも存在している。K-NET観測点である鳥越のボーリングデータによると、地表から深さ3mまでにS波速度が100m/sの層が堆積している。鳥越においてはこの軟弱な層の影響によって、最大加速度増幅度が大きくなったものと推測される。図7に示す地形区分との対応を見ると、扇状地に位置する観測点では地盤増幅度が小さい傾向にある。続いて、最大加速度増幅度と震度増幅度の相関関係を調べる。その際に地盤の卓越周期の影響を見るために、両者の関係を地盤の卓越周期ごとに検証した。地盤の卓越周期は常時微動の水平・鉛直スペクトル比（ $H/V$ ）<sup>31)</sup>のピーク周期から評価したものであり<sup>32)</sup>、卓越周期の分布図は図8に示すとおりである。微動 $H/V$ から地盤の卓越周期を判読する際には既往の研究の方法<sup>33)</sup>を参考にした。明瞭なピークがある場合はそのピークの周期を地盤の卓越周期とし、明瞭なピークが見られずとも明瞭な谷があり、その周期の2倍程度の周期でピークが見られるならば、そのピークの周期を卓越周期とした。微動 $H/V$ において、これらの条件を満たさない観測点は図8において不明瞭と記してある。図9に示す最大加速度の地盤係数と震度増幅度の関係から明らかのように両者には正の相関があり、また、最大加速度の地盤係数が同一の場合、地盤の卓越周期 $T_g$ が長いほど震度増幅度が大きい傾向にある。能登地方での地盤の卓越周期が0.8秒以上の地点では、地盤の卓越周期の影響によって、最大加速度増幅度が小さいわりに震度増幅度が大きくなったと考えられる。以上のように最大加速度増幅度と地盤の卓越周期には震度増幅度との間に相関が見られた。地盤増幅度と地盤の卓越周期の関係については次節で詳しく考察する。

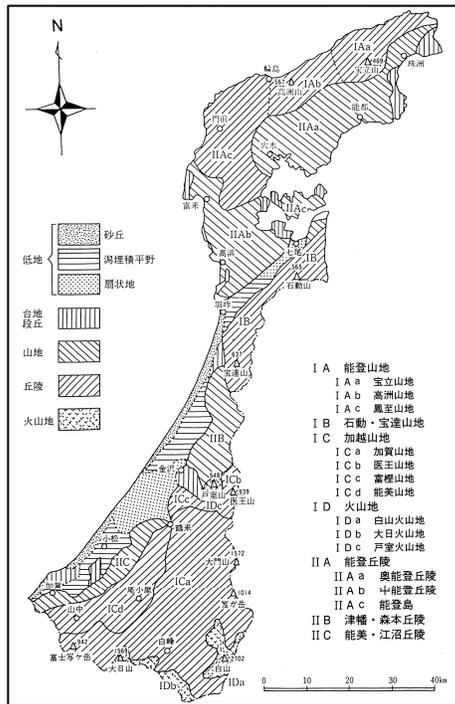


図7 石川県の地形区分<sup>34)</sup>

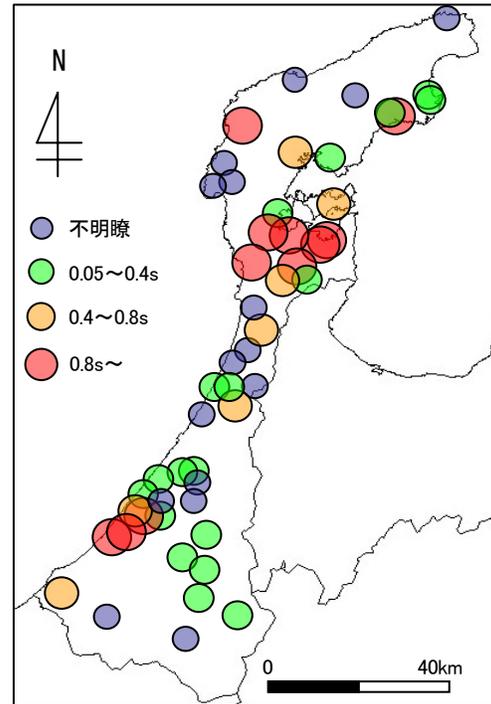


図8 地盤の卓越周期の分布

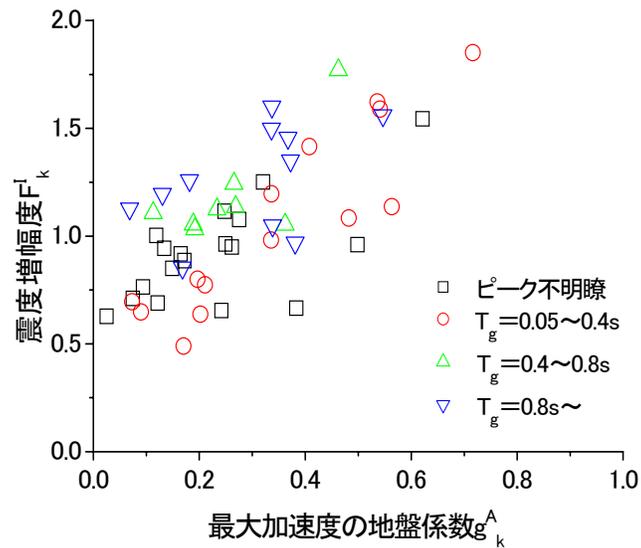


図9 卓越周期 $T_g$ ごとの $g_k^A$ と $F_k^I$ の関係

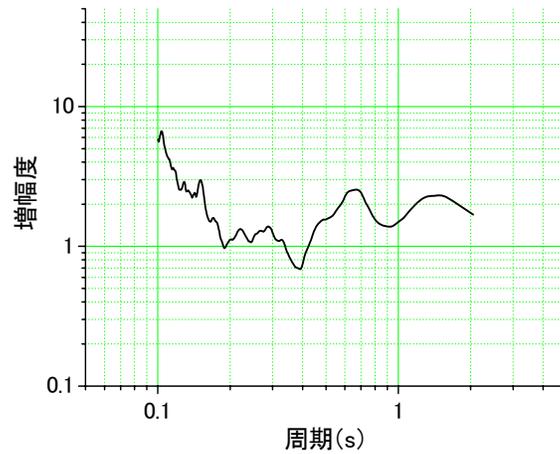


図10 鳥越(ISK012)のサイト増幅特性

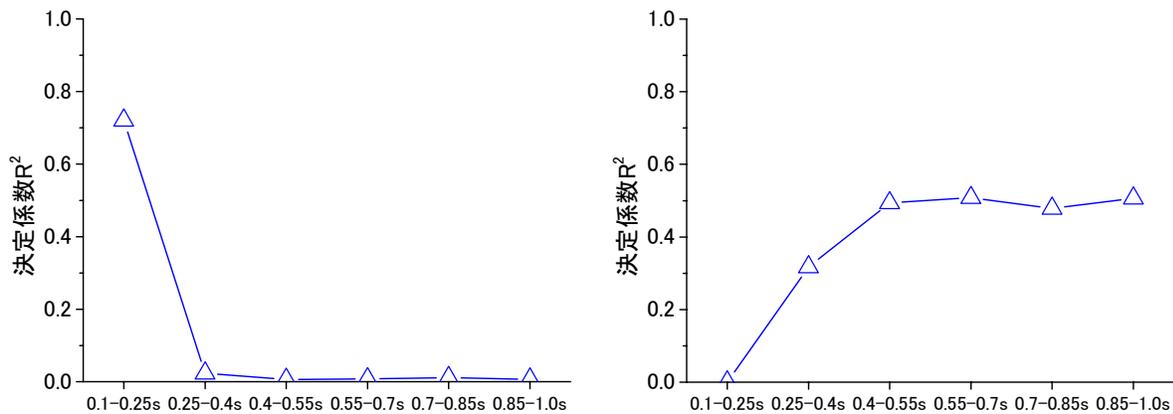
#### 4.3 地震動の周期特性と地盤増幅度の関係

1で述べたように地震動の周期特性が構造物の被害に密接に関係していること<sup>17)</sup>から、震度増幅度の評価を被害予測に活用するためには周期領域での地盤増幅特性と震度増幅度の関係を把握する必要がある。周期領域での地盤増幅特性を表すサイト増幅特性を地震波形から求めることによって、地盤増幅度と相関が高いサイト増幅特性の周期帯を調べることが可能であり、過去にサイト増幅特性において計測震度などの地盤増幅度と相関が高い周期帯が調べられている<sup>35)</sup>。しかし、自治体の観測点のように地震波形が得られていない場合は、そのような検証は不可能である。そこで本論文では自治体の観測点でも得られている最大加速度増幅度と地盤の卓越周期のある周期帯のサイト増幅特性を間接的に表わす指標として用い、これらの指標と震度増幅度との関係を調べた。ここでは著者ら<sup>36)</sup>が先に石川県と福井県のK-NET、KiK-net観測点を対象に求めたサイト増幅特性を検討に用いた。観測点数はそれぞれ19、12地点である。サイト増幅特性の一例を図10に示す。サイト増幅特性において最大加速度増幅度や地盤の卓越周期と相関が高い周期帯を調べるために任意の周期帯のサイト増幅特性の平均値と最大加速度増幅度や地盤の卓越周期との決定係数 $R^2$ を求めた(図11)。サイト増幅特性の平均値を算出する際に周期0.1~1.0秒を対象とし、0.15秒刻みで計算する周期帯を変化させた。図11から最大加速度増幅度は周期0.1~0.25秒というような短周期でのサイト増幅特性との相関が高く、地盤の卓越周期は周期0.4~1.0秒というような中~長周期でのサイト増幅特性との相関が高いことが分かる。震度増幅度が最大加速度増幅度と地盤の卓越周期の関数として表わされると仮定し、最大加速度増幅度や地盤の卓越周期と震度増幅度との相関を調べることによって、サイト増幅特性において震度増幅度に影響を及ぼしやすい周期帯を調べた。計測震度と最大加速度、地震動の卓越周期の関係式を求めた研究<sup>37)</sup>を参考に、最大加速度の地盤係数 $g_k^A$ 、地盤の卓越周期 $T_g$ と震度増幅度 $F_k^I$ の関係が式(6)のような関数で表されると仮定し、回帰分析によって、それぞれの指標に関する係数を求めた。また、それぞれの指標の震度増幅度 $F_k^I$ への影響度を調べるために標準化回帰係数と偏相関係数を算出した。標準化回帰係数は標本となるデータを標準化し、説明変数間の単位の違いによる影響を取り除いたものであり、式(7)によって表される。式(6)、(7)の $C_i$ 、 $C'_i$ はそれぞれ回帰係数、標準化回帰係数であり、 $S_{ii}$ は各指標の分散( $i=1$ の場合は $g_k^A$ 、 $2$ の場合は $T_g$ の常用対数に対応)、 $S_{yy}$ は $F_k^I$ の分散を表す。

$$F_k^I = C_1 g_k^A + C_2 \log_{10} T_g + C_3 \quad (6)$$

$$C'_i = C_i \times \sqrt{S_{ii}} / \sqrt{S_{yy}} \quad (7)$$

得られた回帰係数は $C_1=1.533$ 、 $C_2=0.342$ 、 $C_3=0.829$ であり、相関係数は0.83であった。二段階回帰分析より求めた震度増幅度 $F_k^I$ と式(6)によって得られた震度増幅度の関係は図12に示すとおりである。式(6)において最大加速度の地盤係数 $g_k^A$ のみをパラメータとした場合の相関係数は0.66であることから、地盤の卓越周期 $T_g$ をパラメータに加えた場合、相関関係が改善されることが分かる。最大加速度の地盤係数 $g_k^A$ と地盤の卓越周期 $T_g$ の影響度を調べるために求めた標準化回帰係数は $C'_1=1.289$ 、 $C'_2=0.883$ 、偏相関係数は $g_k^A$ と $F_k^I$ では0.719、 $T_g$ と $F_k^I$ では0.493であった。標準化回帰係数と偏相関係数から明らかなように最大加速度の地盤係数 $g_k^A$ が地盤の卓越周期 $T_g$ よりも震度増幅度との相関が高い。これより、最大加速度増幅度と相関が高い短周期でのサイト増幅特性が中～長周期におけるサイト増幅特性に比べて震度増幅度に影響を及ぼしていることが分かった。



(1) 最大加速度増幅度 (2) 地盤の卓越周期  
 図11 サイト増幅特性の平均値と最大加速度増幅度、地盤の卓越周期との決定係数

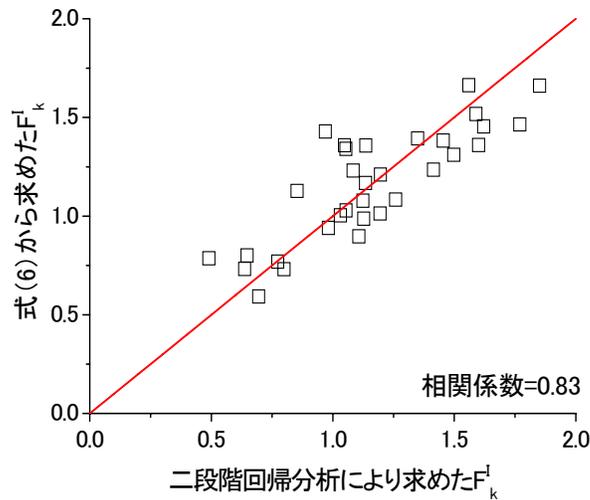


図12 二段階回帰分析と式(6)から求めた $F_k^I$ の比較

## 5. 結語

石川県の震度情報ネットワークに接続している観測点、及び、K-NET、KiK-net観測点を対象にして、最大加速度と計測震度の地盤増幅度を評価した。地盤増幅度分布を見ると、震度増幅度が大きい地点（1.5以上の地点）は平野部に多く見られるのに対して、最大加速度増幅度が大きい地点（3.5以上の地点）は平野部以外の地域にも存在している。また、地盤の卓越周期が長周期側に位置する観測点では最大加速度増幅度が小さいわりに震度増幅度が大きい傾向にあった。

続いて、震度増幅度に影響を及ぼしている地震動の周期特性を調べるために、最大加速度増幅度と地盤の卓越周期をそれぞれ短周期と中～長周期での地盤増幅特性を表わす指標として用い、これらの指標と震度増幅度との相関を調べた。最大加速度増幅度や地盤の卓越周期と震度増幅度との相関の程度をこれらの関係式を回帰分析によって求めることで検証した。その結果、短周期の地盤増幅特性と相関が高い最大加速度増幅度が地盤の卓越周期に比べて震度増幅度との相関が高いことが明らかになった。石川県の震度情報ネットワークのように地震波形データが蓄積されていない場合でも、本論文のように最大加速度や計測震度の地震動特性を評価することによって、地震データを地震防災対策などに有効活用できると考えられる。そのためにも今後とも自治体による継続した地震動データの収集、管理が望まれる。

## 謝 辞

解析には石川県の震度情報ネットワーク、独立行政法人 防災科学技術研究所のK-NET、KiK-netの観測記録を使用させて頂きました。3名の査読者の方々から本論文に関する貴重なご意見を頂きました。また、一部の図の作成の際に福山大学の鎌田輝男先生作成のソフト白地図KenMap Ver.8.0を使用させて頂きました。記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 気象庁：ホームページ、[http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/intens\\_st/index.html](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/intens_st/index.html).
- 2) 防災科学技術研究所：強震ネットワーク（K-NET）ホームページ、<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>.
- 3) 防災科学技術研究所：基盤強震観測網（KiK-net）ホームページ、<http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>.
- 4) 中山 渉、清水善久、小金丸健一、山崎文雄：超高密度リアルタイム地震防災システム（SUPREME）、第55回土木学会年次学術講演会講演概要集、2000、pp.554-555.
- 5) 泉谷恭男、金子雅子：長野県の震度計設置点における相対的な揺れ易さ、第11回日本地震工学シンポジウム論文集、2002、pp.39-42.
- 6) 片岡俊一、山本博昭：青森県周辺における地震動指標の距離減衰特性とサイト増幅特性、第11回日本地震工学シンポジウム論文集、2002、pp.35-38.
- 7) 能島暢呂、杉戸真太、大田 裕：2000～2004年に岐阜県内で観測された計測震度の分析、第28回土木学会地震工学論文集、2005（CD-ROM）、No.54.
- 8) 中村亮一、植竹富一：地震動における三次元減衰構造の影響(3) 強震速報・気象庁 87 型強震計・K-net データによる減衰構造の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、1997、pp.57-58.
- 9) 川瀬 博、松島信一、佐藤智美、伏見 実、巽 誉樹：JMA87型強震計の観測記録に基づいた震源・伝播経路・サイトの各特性の分離（その1）内陸浅発地震の場合、日本建築学会大会学術講演梗概集、1999、pp.201-202.
- 10) 大西淳一、山崎文雄、若松加寿江：気象庁地震記録の距離減衰式に基づく地点増幅特性と地形分類との関係、土木学会論文集、No.626、1999、pp.79-91.

- 11) 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、No.556、2002、pp.15-24.
- 12) 座間信作：次世代震度情報ネットワークに関する検討状況、日本地震工学会-2005梗概集、2005、pp.6-7.
- 13) 首都圏強震動総合ネットワーク：<http://www.sknet.eri.u-tokyo.ac.jp/>.
- 14) 川上洋介、額瀨一起、久田嘉章：地震観測記録より推定した関東平野におけるサイト特性と地形分類との関係、日本建築学会大会学術講演梗概集、2004、pp.687-688.
- 15) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：森本・富樫断層帯の評価、[http://www.jishin.go.jp/main/chousa/01dec\\_morimoto/index.htm](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/01dec_morimoto/index.htm)、2001.
- 16) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：砺波平野断層帯・呉羽山断層帯の評価、[http://www.jishin.go.jp/main/chousa/02dec\\_tonami/index.htm](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/02dec_tonami/index.htm)、2002.
- 17) 例えば、境 有紀、吉岡伸悟、額瀨一起、壁谷澤寿海：1999年台湾集集地震に基づいた建物被害を予測する地震動の破壊力指標の検討、日本建築学会構造系論文集、No.549、2001、pp.43-50.
- 18) 日本地震学会：ホームページ、強震観測の最新情報、(5) 震度情報ネットワークシステムの整備、<http://www.soc.nii.ac.jp/ssj/>.
- 19) 翠川三郎、松岡昌志、作川孝一：1987年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価、日本建築学会構造系論文集、No.442、1992、pp. 71-78.
- 20) 宮島昌克、堂下翔平、北浦 勝：石川県内の地震観測点の特徴が計測震度に及ぼす影響、第59回土木学会年次学術講演会講演概要集、2004、I -772 (CD-ROM).
- 21) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門、鹿島出版会、1994、pp.186-198.
- 22) 翠川三郎：地震断層を考慮した地震動スペクトルの推定手法と適用例、昭和63年度理工学振興セミナー、震源域での地震動強さの予測、1988、pp.25-34.
- 23) Fukushima, Y. and Tanaka, T. : A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.84, 1990, pp.757-783.
- 24) 福島美光、田中貞二：新しいデータベースを用いた最大加速度の距離減衰式の改訂、地震学会講演予稿集、1992、p.116.
- 25) 司 宏俊、翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、No.523、1999、pp.63-70.
- 26) 西川隼人、宮島昌克、池本敏和、岩端一貴、北浦 勝：高密度地震計ネットワークの地震記録による計測震度増幅度の評価-石川県金沢市における計測震度分布推定への適用-、地域安全学会論文集、No.6、2004、pp.103-110.
- 27) 神田克久、武村雅之、諸井孝文：1923年関東大地震の震度インバージョン解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、2004、pp.503-504.
- 28) 西村利光、堀家正則：強震ネットワーク(K - NET)データから推定した水平・上下最大加速度の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、No.571、2003、pp.63-70.
- 29) Shabestari, T. K. and Yamazaki, F. : Attenuation relationship of JMA seismic intensity using recent JMA records、第10回日本地震工学シンポジウム論文集、1998、pp.529-534.
- 30) 西川隼人、北浦 勝、宮島昌克：2000年石川県西方沖地震の強震動特性に関する考察、土木学会論文集、No.731、2003、pp.257-266.
- 31) 中村 豊：常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定、鉄道総研報告、1988、pp.18-27.
- 32) 堂下翔平、宮島昌克、北浦 勝：石川県における地震観測点の特徴と計測震度に及ぼす影響、日本地震工学会-2004梗概集、2005、pp.42-45.
- 33) 大町達夫、紺野克昭、遠藤達哉、年縄 巧：常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周

期推定方法の改良と適用、土木学会論文集、No.489、1994、pp.251-260.

- 34) 鮎野義夫 (編著) : 「石川県の自然環境、第1分冊、地形・地質」、付図「石川県地質図」(10万分の1)、別刷「石川県の環境地質-10万分の1地質図説明書」、石川県、1977、p.128.
- 35) 川瀬 博、松尾秀典 : K-NET, KiK-net, JMA 震度計観測網による強震記録から分離したサイト増幅特性とS波速度構造との対応、地震工学会論文集、2004、第4巻、第4号、pp.126-145.
- 36) 西川隼人、宮島昌克 : 地盤条件とサイト増幅特性の関係の評価、第61回土木学会年次学術講演会講演概要集、2006、I -260 (CD-ROM).
- 37) 藤本一雄、翠川三郎 : 近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法、地域安全学会論文集、No.7、2005、pp.241-246.

(受理 : 2006年3月28日)

(掲載決定 : 2006年10月23日)

## Evaluation of Site Amplification Factor of Observation Sites in Ishikawa Prefecture

NISHIKAWA Hayato<sup>1)</sup>, MIYAJIMA Masakatsu<sup>2)</sup>, DOUSHITA Syohei<sup>3)</sup> and  
KITAURA Masaru<sup>2)</sup>

1) Member, Maizuru National College of Technology, Dr.Eng

2) Member, Professor, Kanazawa University, Dr.Eng

3) Mitani Corporation, M.Eng

### ABSTARCT

The site amplification factors for peak ground acceleration(PGA) and JMA seismic intensity( $I_{JMA}$ ) at each observation point was evaluated from earthquake motion records of seismograph network in Ishikawa Prefecture, K-NET and KiK-net. Compared with the site amplification for PGA and  $I_{JMA}$ , these show positive correlation. And, the site amplification for  $I_{JMA}(F^I)$  shows large value in sites where the site amplification factor for PGA ( $F^A$ ) is small but predominant period of ground( $T_g$ ) is long. Next, assuming that  $F^I$  is expressed as function in terms of  $F^A$  and  $T_g$ , the influence of  $F^A$  and  $T_g$  on  $F^I$  is examined by regression analysis. As a result of analysis, it shows that  $F^A$  highly correlates with  $F^I$  more than  $T_g$ .

*Key Words* : Seismograph Network, Peak Ground Acceleration, JMA Seismic Intensity, Site Amplification Factor, Predominant Period of Ground