

令和 6 年元旦に発生した令和 6 年能登半島地震 M7.6 について

中村 豊
システムアンドデータリサーチ

1.はじめに

まず始めにこの地震に被災された皆様の一日も早い生活再建を心からお祈り申し上げます。
ここ数年群発地震に悩まされながらも、このような激甚災害に発展するとは思わなかった人々が遭遇した非常な災難に深く同情するものです。ここでは今後の教訓として、少しでも役立つ事実を、今回の地震の記録から探りたいと思います。

2.リアルタイム震度 (RI) と新しい指標“可能最大層変形角 (PMDA)”について

弊社が提唱しているリアルタイム震度 (文献 1) は、人間の感覚を指標化した気象庁の計測震度などとは異なり、地震動のエネルギー供給能力を指標化したもので、物理的背景を持っています。その時間的な変動は、地震動 (P 波) の到来とともに急激に増大し、S 波以後の主要動の到来で最大値に達してのち次第に減少するという経過をたどります。その最大値は、気象庁の計測震度とほぼ一致するように調整されています。弊社のリアルタイム震度の背景となるエネルギー供給能力は、 w/kg (ワット/キログラム) という単位で表現され、自分自身を 1 秒間に 0.1m 持ち上げるエネルギー供給能力がおおよそ $1w/kg$ ということになります。そしてこのエネルギー供給能力に対応するリアルタイム震度は定義上 6.4 となります。つまり $1w/kg$ は、震度 6 強の上限に対応し、今回の地震では能登半島北部地域全般で観測された地震動のエネルギー供給能力に対応します。今回の地震はこのような地震動が 20 秒程度も継続したことに特徴があります。これは規模の大きな地震の特徴で大きな断層破壊に対応する時間だけ地震動エネルギーが供給され続けたことを物語っています。

現在、観測地震動から建物の層間変形角をリアルタイムに把握する手法を開発中で、その指標として可能最大層間変形角、PMDA (Possible Maximum Drift Angle) の提案を検討しています。

気象庁や防災科学技術研究所によって管理されている強震計のデータを利用して、リアルタイム震度を算定し、各観測点の時系列変化を総合して、今回の地震波動の伝播状況をリアルタイム震度で表現した動画を弊社 HP に掲げていますので、ご覧ください。今回の地震波動の広がり様子や揺れやすい地域などが一目瞭然です。

算定されたリアルタイム震度 (RI) の時系列変化を能登半島周辺地域の観測点について示したものが図 1 で、これから建物内波動伝播速度が 100m/s の場合の建物の PMDA の時系列変化を算定したものが図 2 です。2 階建木造家屋の固有振動数を 3Hz、高さを 8m とすれば、伝播速度は概ね 100m/s となります。家屋の耐震性はここでは伝播速度で評価されています。耐震性の低い家屋では伝播速度は遅く、標準的な RC 建物や鉄骨造建物では 130m/s ~ 200m/s とより速い伝播速度となります。事前に伝播速度を計測していれば、地震観測データから直接的に計測された伝播速度に対応する PMDA を算定することができ、倒壊の危険性に立脚した的確な警報を迅速に発信できることとなります。ここでは、木造家屋を対象に 100m/s 程度の伝播速度を標準的なものとして検討を進めます。

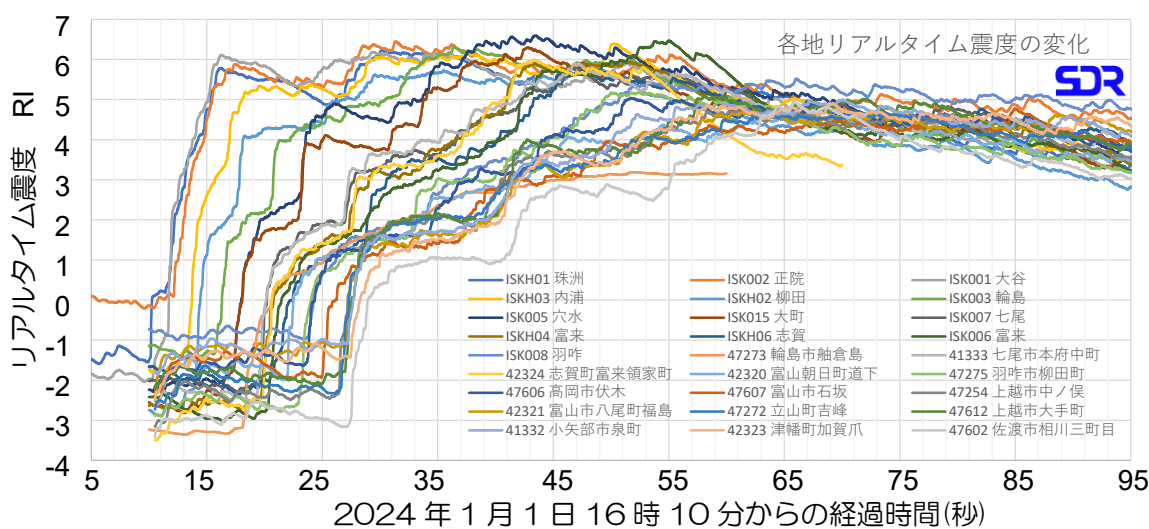


図 1 各地のリアルタイム震度の時系列変化

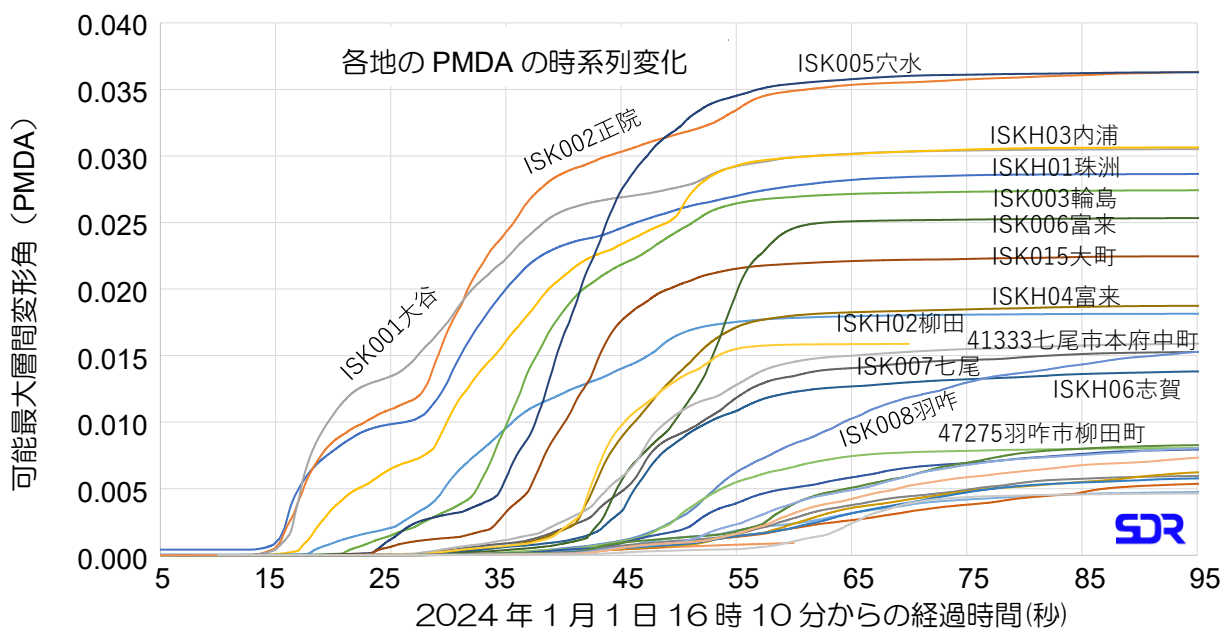


図 2 各地の PMDA の時系列変化

各地の RI 最大値（計測震度に相当します）や PMDA の最大値を地図上にバブルの大ききで示したものが図 3 と図 4 ですが、能登半島北部の地域が大きな PMDA の地点で覆われていることがわかります。PMDA は供給エネルギーのすべてが変形エネルギーに転換された場合ですが、実際には建物の固有振動数と入力振動数の関係などで供給エネルギーがすべて変形に費やされる訳ではありません。可能最大層間変形角 PMDA の「可能最大」とは生じ得る層間変形角の上限値を意味しています。建物の層変形角は概ね 1/80 を上回ると崩壊と解釈されるようですので、PMDA が 1/80 までは概ね崩壊しないと考えることができます。

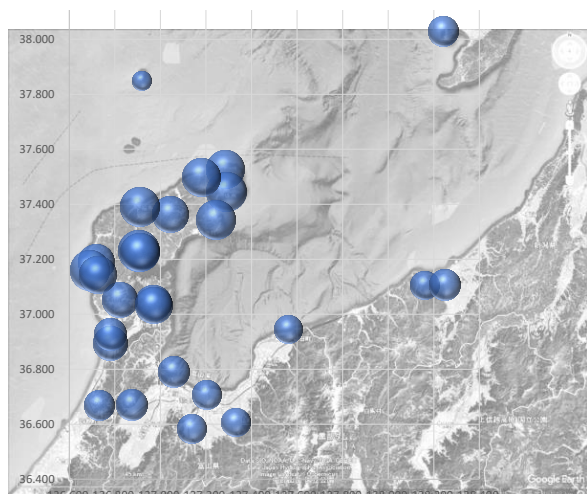


図 3 各地の最大リアルタイム震度の分布

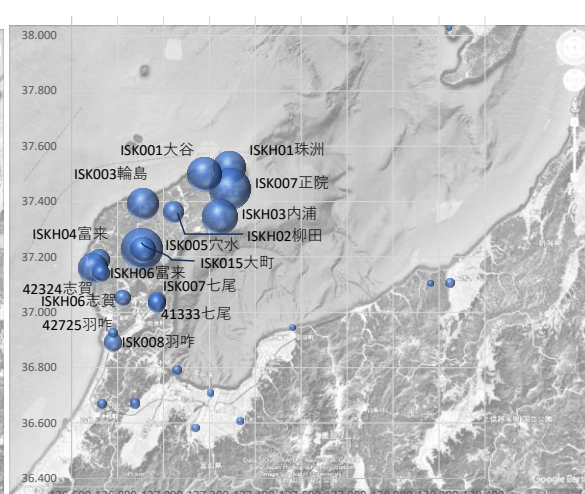


図 4 各地の PMDA の分布

それでは崩壊の可能性が高まる $PMDA > 1/80$ までの時間的な猶予は各地でどれくらいであったのかを、図 1 や図 2 に示した RI や PMDA の変化から読み取ってみます。

ここでは、静かにしている人が気付くリアルタイム震度 0.5 の時点の時刻や、誰もが気付くリアルタイム震度 3 の時点の時刻、 $PMDA > 1/80$ となる時刻を能登半島内の強震観測点で読み取りました。その結果を表 1 に示します。ここに示した猶予時間は $RI > 0.5$ から $PMDA > 1/80$ までの秒数であり、これによると、大谷観測点で最小ですがそれでも 9 秒程度の猶予があることがわかりました。そのほかの震度 6 強の地点では 15 秒～20 秒の猶予時間でした。また、大きな PMDA となる地点では RI の成長が早く $RI > 0.5$ から $RI > 3$ までの時間が 1～2 秒でした。つま

表 1 各地の $RI > 0.5$ や $RI > 3.0$ 、 $PMDA > 1/80$ の発現時と猶予時間ほか **SDR**

令和6年能登半島地震	ISKH03	ISKH01	ISK001	ISK003	ISK005	ISK015	ISK002	ISK007	ISK008	ISK006	ISKH04	ISKH06	ISKH02
地点名	内浦	珠洲	大谷	輪島	穴水	大町	正院	七尾	羽咋	富来	富来	志賀	柳田
北緯	37.3458	37.5266	37.5	37.3924	37.2309	37.2265	37.4473	37.0426	36.8937	37.1603	37.1902	37.0533	37.3644
東経	137.2436	137.2844	137.1767	136.9078	136.9041	136.9087	137.2877	136.968	136.7784	136.6896	136.7176	136.8206	137.0413
Rimax	6.39	6.23	6.18	6.32	6.60	6.30	6.45	5.83	5.52	6.47	5.95	6.39	5.87
PMDAmax	0.0307	0.0287	0.0307	0.0275	0.0365	0.0225	0.0366	0.0154	0.0161	0.0259	0.0189	0.0307	0.0182
最初の $RI > 0.5$ 時 (秒)	15.76	11.74	11.76	16.51	18.14	18.16	12.22	20.54	24.8	22.56	21.9	13.76	14.64
最初の $R > 3$ 時 (秒)	17.7	13.13	12.65	20.76	23.28	23.23	13.56	27.76	36.55	33.56	29.03	15.7	17.83
$PMDA > 1/80$ (秒)	33.66	29.6	21.18	36.36	38.54	41.74	27.88	56.22	73.1	51.58	48.62	31.66	40.76
猶予時間 (秒)	17.9	17.9	9.4	19.9	20.4	23.6	15.7	35.7	48.3	29.0	26.7	17.9	26.1

猶予時間以外の (秒) は 2024 年 1 月 1 日 16 時 10 分からの経過秒数を表す。

り、少なくとも大きな RI の変化に気付いた時点から最短 8 秒程度、多くは 15 秒～20 秒程度の時間で安全を確保する必要があったと思われます。非常に短い時間ではありますが、常日頃から身の回りの状況を鑑みて安全な場所に逃げ込む訓練がなされていれば、適切に行動できるものと期待します。

3.常時微動を用いた地盤の壊れやすさ指数 Kg 値について

今回の地震では耐震補強があまりされていなかったことも指摘されていますが、地盤の状況や建物の状況を地域の方々が的確に把握できていなかったことも耐震化が進まなかった要因ではないかと危惧しています。今回リアルタイム震度 RI が 6.6 であった穴水町については、2007 年 3 月に発生した能登半島地震 M6.9 で大きな被害を受けた後、比較的稠密な常時微動調査が行われていたことに最近気づきました。地震学会が今回の半島地震に関連する過去の論文として周知された論文のひとつに穴水町で 150 点近くの場所で常時微動を計測したものがあつたのです（文献 2）。そこには HVSR（補足参照）の処理がなされて、町内の卓越振動数の分布地図がカラーで描かれたものが載っていました。しかし、HVSR のもうひとつの特徴である地盤の増幅特性についてはほとんど無視されていました。このため、表層地盤の速度構造が判明したことを成果としていますが、地盤として防災上注意すべき地域がどこなのかは不明確なまとなっています。せっかく稠密な微動測定を行ったのにこれではもったいないと思い、論文に掲載された図面から可能ないくつかの地点の固有振動数と増幅倍率を読み取り、測定地点の被災しやすさ指数 Kg 値を算定してみました。Kg 値はこれに地震動の最大値を掛けると、表層地盤に生じるせん断歪の大きさが大まかに算定でき、その大きさが液状化発生の可能性や近傍構造物の被害をある程度予測できるという独自の指標です（補足参照）。その結果を固有振動数の分布図の上に重ねてバブルで図 5 に示しますが、これによると今回の地震で大きな被害が出ているのではないかとと思われる地域（実際の被害はまだ判明していませんが、株式会社パスコに

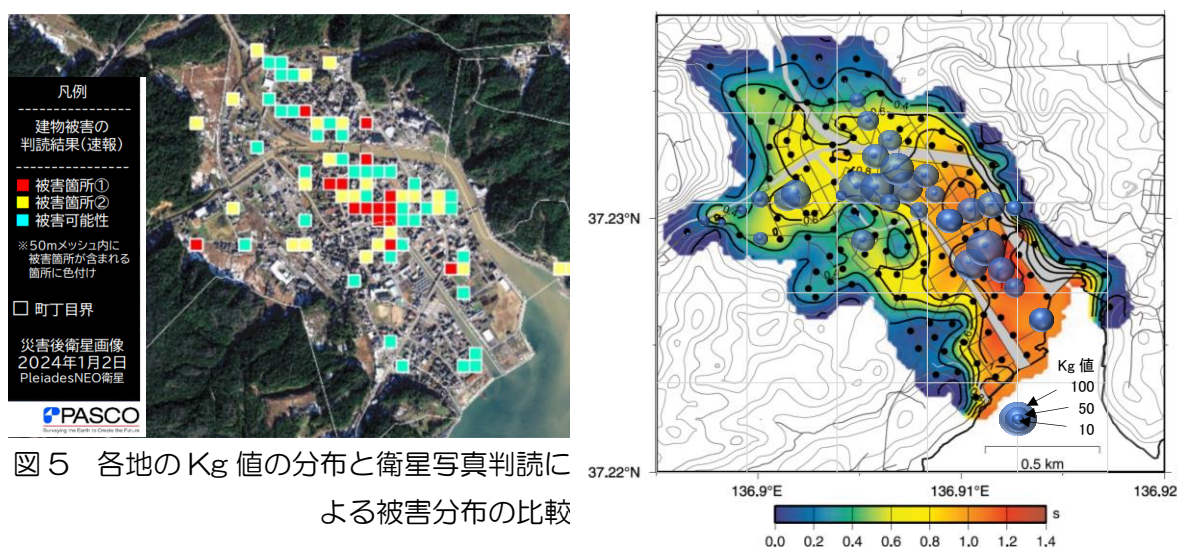


図 5 各地の Kg 値の分布と衛星写真判読による被害分布の比較

よって判読された高分解能光学衛星 Pléiades Neo の画像に基づく建物被害の判読結果図（文献 8）から引用）で大きな Kg 値になっていることがわかります。しかし、Kg 値は論文の図面からの読み取り結果なので、すべての地点での結果が推測できている訳ではなく、また読み取り誤差も少なくないと思われます。勝手な思いで恐縮ですが、原著者による正確な計測位置と Kg 値分析結果を公開していただければ、今後判明する被害状況と照らし合わせて Kg 値の的確で実用的な利用が進むものと期待します。

4.まとめ

ここでは、今回の地震被害に関して、被害発生タイミングやより適切な警報手法について検討しました。今後、可能最大層間変形角 PMDA を活用することで、より迅速かつ的確な地震時対応が可能になると期待しています。地震防災は耐震強化が基本であるの言うまでもないことですが、耐震強化できない事情や必要性が感じられずにいる場合も少なくないと思われます。突然の地震動であっても適切に対処することで、最悪の事態を回避できる可能性があるならば、次善の策として、そうした対応策を具体的に提示していくことも大切ではないかと思えます。耐震強化の必要性を知るためにも、また、突然の地震動に対して適切に対応するためにも、周辺環境の脆弱性を把握することは大事です。完全ではないにしても、常時微動を測定し Kg 値などを算定することによって被災しやすさなど建物や地盤の脆弱性をある程度把握できることは、今後のリアルタイム地震防災の要になるものと考えています。

補足：HVSR と Kg 値

文献 3 および 4 は、地表面で 3 成分同時計測された地震動や常時微動の水平スペクトル H と上下スペクトル V の比スペクトル HVSR のピークは当該地点の表層地盤の固有振動数と増幅倍率にほぼ等しいことを観測事実として初めて示した論文です。しかし、多層地盤を伝播する Rayleigh 波の理論的 HVSR と実測された HVSR が類似の形状を示すため、誤解が蔓延しているのではないかと危惧しています（文献 5）。多層地盤に関して伝播する Rayleigh 波は、概ね多層地盤内を重複反射する S 波の増幅特性の基本振動数付近では事実上存在せず、それより高い周波数で次第に大きく成長し概ね基本振動数の 2 倍で最大に達した後、その大きさを維持します。多層地盤を伝播する Rayleigh 波の HVSR は S 波増幅特性の基本周波数付近で上下成分 V がゼロまたはゼロ近くになるため明瞭なピークを示しますが、そこには Rayleigh のエネルギーはほとんどなく他の波動が存在すればそのピークは消滅してしまいます。Rayleigh のエネルギーは基本周波数のほぼ 2 倍の周波数で極大を示すため、Rayleigh 波の HVSR はこの周波数で谷（トラフ）形状を示します。地表面で計測される実際の震動には様々な波動が含まれており、時間的にも空間的にも変動していると考えるのが自然です。つまり、実際の震動の HVSR と Rayleigh 波の HVSR の形状が類似しているからといって、すべての周波数帯域で Rayleigh 波が

主体的であると考えるのは早計でしょう。Rayleigh 波の影響が少ない場合には、実際の震動の HVSR には Rayleigh 波特有のトラフが現れず、S 波増幅特性の基本周波数のみならず、高次のピークも明瞭に識別できるようになります。Rayleigh 波の影響が強い場合には、その特徴である明瞭なトラフが現れ、その影響は基本周波数近くまで及ぶかも知れませんが、一般的には、計測された震動の HVSR のピークは S 波重複反射によるピークと考えることができ、その周波数とピーク値を固有振動数 F とその増幅倍率 A とみなせます。

増幅倍率 A は、基盤と表層地盤のインピーダンス比に等しく、通常それぞれの地盤の密度の違いはそれほど大きくないので、基盤と表層地盤の伝播速度 V_b と V_s の比率 V_b/V_s で表現することができます ($A=V_b/V_s$)。表層地盤の S 波重複反射による基本固有振動数 F は、層厚 H と表層伝播速度 V_s とを使って、 $V_s/4H$ で表されます ($F=V_s/4H$)。さらに、表層地盤伝播速度 V_s より地域的な変化が少ないと考えられる基盤伝播速度 V_b を使って、 $F=V_b/4AH$ 、と表せます。

地震時の表層地盤のせん断歪 γ は、地震時の表層地盤の変位 δ を表層厚さ H で除したもので与えられ、 δ は基盤地震動最大加速度 α と当該地盤の固有振動数 F を使って、 $\delta = eA \alpha / (2\pi F)^2$ 、と表すことができます。 e は効率を表します。

したがって、 $\gamma = \delta / H = eA \alpha / (2\pi F)^2 / H = A(4AH/V_b)e \alpha / (2\pi)^2 / F/H = (A^2/F) \alpha e / \pi^2 / V_b$ 、となります。ここで、効率を 0.6、 $V_b=600\text{m/s}$ とし、 α を cm/s^2 (Gal) 単位で与えるとすれば、 $\gamma \doteq (A^2/F) \alpha = K_g \times \alpha$ 、となります。 γ の単位は μstrain (1/1000000) です。

ここに、 $K_g=A^2/F$ 、であり、こうして地点特性を表す被災しやすさ指数 K_g 値が誕生しました (文献 6、7)。その単位は、 $\mu\text{strain}/\text{Gal}$ 、です。 K_g 値で液状化の発生しやすさを相対化または序列化することができますので、 K_g 値の大きい場所から優先的に対策を行うなど、防災対応を合理的に行うことができるようになります。また、小規模構造物では K_g 値が大きい場所にあるほど被害が大きい傾向があるので、構造物の耐震補強も強固なものにする必要があるでしょう。このように K_g 値は防災対策を合理的に実施する指標となることが期待されます。

謝辞

ここでは、気象庁が管理・公開している強震観測記録や防災科学技術研究所が運営管理・公開している K-NET および KiK-net の記録を使用しています。記して謝意を表します。

文献

- 1) 中村 豊：合理的な地震動強度指標値の検討—DI 値を中心にした地震動指標値間の関係—、第 27 回地震工学研究発表会、2003.12.
- 2) 浅野公之・岩田知孝・岩城麻子・栗山雅之・鈴木亘. 地震および微動観測による石川県鳳珠

郡穴水町における地盤震動特性, 地震 第2輯, 62, 121-135, 2009.

3) 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、Vol.2、No.4、pp.18-27、1988.4.

4) NAKAMURA, Yutaka: A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface, Quarterly Report of RTRI, Vol.30, No.1, pp.25-33, 1989.1.

5) Nakamura, Y. : What is the Nakamura method? Seismol. Res. Lett. 90, 1437-1443, 2019. 5., doi: 10.1785/0220180376.

6) 中村 豊、滝沢太朗: 常時微動を用いた地盤の液化化予測、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集、I -519、pp.1067-1069、1990.9.1.

7) 中村 豊: 総合地震防災システムの研究、土木学会論文集 I、No.531/I-34、pp.1-33、1996.1.

8) https://corp.pasco.co.jp/disaster/.assets/PNEO4_建物被害の判読結果.pdf