

2016 年 12 月 28 日 21 時 38 分頃の茨城県北部地震 M6.3 について

中村 豊 (SDR)

1. はじめに

昨年末、緊急地震速報（警報）が出された。これにともなって、NHK の TV 放送は、総合、教育、衛星第 1 および第 2 のすべてが同じものになってしまった。この状態は、1 時間ほど継続した後、通常状態に戻ったが、過剰対応を繰り返すのではなく適宜、有効な対応を望みたい。緊急地震速報については、2016 年 12 月 14 日 14 時から新しいシステムの運用が始まっている（気象庁 HP、2016 年 12 月 13 日報道資料）。表記の地震は新しいシステムによる最初の緊急地震速報（警報）であったが、警報ではない緊急地震速報（予報）は新システム運用後（約 2 週間）でもかなり出されている。動作状況を見ると、以前に比べて地震規模 M の推定が小さめから始まり確からしい M に向かって次第に大きくなる傾向が顕著で、警報がさらに遅くなることが懸念される。

ここでは、防災科学技術研究所が公開している強震記録のうち、震央から概ね 30km 程度の領域にある 11 地点（KiK-net の高萩、十王、大子、山方、いわき西の 5 地点、K-NET の高萩、勿来、大子、日立、矢祭、大宮の 6 地点）の記録を用いて、警報タイミングや地震動の状況を分析した。さらに、軽微ながらも報告されている被害を地図上にプロットし、分析結果と比較してみたので報告する。

2. 警報タイミングと震源情報

気象庁の緊急地震速報（警報）の発令状況によると、地震の検知は 2016 年 12 月 28 日 21 時 38 分 51.8 秒、第一報は 55.8 秒（検知後 4.0 秒）に、警報は 39 分 0.7 秒（検知後 8.9 秒）に出されている。緊急地震速報による震源情報は、震央（北緯 36.7 度、東経 140.6 度）、深さ 10km、地震規模 M6.1 であり、2 日後の暫定値は、震央（北緯 36.720 度、東経 140.573 度）、深さ 11km、M6.3 であった。

11 地点のリアルタイム震度（RI）を算定したものが図 1 である。これによると、震央にもっとも近い KiK-net 十王ではなく、二番目に近い KiK-net 高萩で最大震度 RI5.6（震度 6 弱）となっている。気象庁の最大震度 6 弱は高萩市下手綱（KiK-net 高萩からほぼ南東方向約 14km、K-NET 高萩からほぼ北方約 2.4km の地点）で観測されている。

FREQL（フレックル）P 波警報シミュレーション（PI1.5 での警報発信）の結果、最初の地震検知は、21 時 38 分 51.1 秒であり、最初のフレックル警報は、51.4 秒（検知から約 0.3 秒後、緊急地震速報第一報の約 4.4 秒前）に発信されたと推定される。これらのタイミングを図 1（RI の時間変化）および図 2（最大加速度の時間変化）に示している。また、各地の警報時刻や震度発現時刻を震央距離に対して示したものが図 3 である。これによると、緊

急地震速報（警報）は、想定被害域（震央を中心に半径 R 約 19km の円内、 $\log_{10}(R)=0.71M-3.2$ 、 M :マグニチュード、で算定）では、概ね最大動が発現した後であり、第一報発令時でも被害域では震度 4 を超えている。つまり、被害域では人々が地震を認識した後に、緊急地震速報（警報）が発令されている。新しく運用が始まったシステムでも、少なくとも迅速さの点では改善されていないようである。

次に震源情報を最初に検知した 5 地点の検知情報を用いて震源計算した結果を報告する。これまでの経験では、内陸地震であれば、数秒でほぼ正確な震源を特定できることがわかっている。ここでもリアルタイム震度波形を使って震源を算定したが、各検知点での検知時刻や最大 RI 値発現時刻などを表 1 に、震源計算結果などを表 2 に示す。これによると、5 地点での検知時間が出揃うのは最初の検知から 1.8 秒後であり、P 波速度を 6km/s と仮定して求めた震源が表 2 に示す SDR 震源である。これは気象庁の暫定震央と 400m 程度の誤差であり、概ね 38 分 52.9 秒には、ほぼ正しい位置情報が判明したことになる。さらに、最大動の伝播速度を 4km/s とし、最大 RI の放射源である MAX 震源を推定してみると、表 2 に示すようになる。これを図示したものが図 11（後述）である。図 4 と図 5 は気象庁震央と SDR 震央に対する距離と RI_{max} の関係を見たものであり、図 6 は MAX 震央に対する距離と RI_{max} の関係を見たものである。初動の立上りは概ね気象庁震央から直線的に並んでいるが、 RI_{max} は MAX 震央に対してほぼ直線的に並んでおり、MAX 震央の妥当性を示している。また、5HzPGA を気象庁震央や MAX 震央に対して図示したものが図 7 と図 8 であり、図中の曲線は $M6.3$ で深さ 4.8km（オレンジ曲線）または 11km（青曲線）に対する推定基盤加速度である。観測された最大加速度（5HzPGA）は、やや小さめ（推定 M がやや大きいということか？）であるが、MAX 震源に対して推定曲線に概ね整合しており妥当な結果と思われる。こうした MAX 震源の情報は最初の地震検知から 20 秒後には明らかになると期待される。またこの時には簡易的に求める地震規模についても判明しており、5 地点の平均で $M6.1$ と評価される。地震規模については、最大加速度 5HzPGA とリアルタイム震度 RI から簡易的に推定した結果を表 1 に示している。つまり、地震検知後 20 秒程度で、ほぼ正確な破壊開始点やマグニチュード、さらには主要な破壊箇所などの情報がだまかに把握できると見込まれる。これらの情報は被害箇所推定などに力を発揮するものと期待される。なお、気象庁震央や MAX 震央に対する RI_{max} の分布を図 9 や図 10 に示す。これらも MAX 震央の妥当性を示している。

3. 積分変位と GPS 変位や干渉 SAR 解析結果の比較および被害との関係

図 11 は、各地点の強震波形を 2 回積分してから算定された変位を軌跡の形で示したもので、変位の始末端を結んだ永久変位ベクトルを赤矢印で示した。図の背景には、国土地理院によって解析された GPS による地殻変動ベクトル分布地図と干渉 SAR 解析結果図を示して比較している。図中の震央と記された☆印は気象庁の当初震央であり、その北西にある◇印および+印は、それぞれ、気象庁の暫定震央および SDR による推定震央である。さらに

その北方にある+印は **MAX** 震央を示し、×印は茨城県の調査による被害情報の位置を特定したものである。図 12 には中心部分を拡大表示した。この拡大図には推定被害限界円も示した。×印で示した被害箇所は、二カ所（約 1 時間で復旧した 25 戸の断水と消防本部体育館天井の破損：いずれも詳細は公表されていない）を除いて概ねこの円内に納まっている。これらの結果をみると、GPS で算定された永久変位は 2cm 程度であるが、積分変位では KiK-net 高萩でほぼ南に水平最大 5cm 近くに達しており、3 成分の合成では 9cm（沈降分約 8cm）を超えている。KiK-net 高萩の動きを細かく見ると、まず南方に変位した後西方に変位している。これは、ほぼ東西方向の引張に対して、中心付近にある断層近傍では引張帯の中央（高萩からは南）に向かって変位し、その後、断層が切れたため、西方に変位したと解釈できる。おそらく高萩は上盤側に位置し、地表断層があるとすれば高萩の東に存在するものと推測される。GPS による変位ベクトル群と積分変位ベクトルは調和的であり、数 cm の永久変位程度でも積分変位が概ね妥当であることを示している。最大の積分変位が算定された高萩付近は対応する干渉 SAR 解析でも大きな変位が算定されており、高萩の約 3km 東側では最大 27cm の衛星から遠ざかる向き（沈降または西向き）の変位が推定され、その北側には変位の不連続が 2km 程度続いている（国土地理院 HP の説明）、としている。こうした干渉 SAR 解析によって大きな変位が観測された楕円形の領域（山間地域）では、軽微ながらも被害がいくつか報告されており、地殻変動に伴う被害と推測される。被害はこのほか地殻変動のほとんどない平地でも報告されており、こちらは表層地盤の共振作用による被害と推測される。

4. おわりに

今回の地震でも、リアルタイム震度波形を用いた震源推定は、最初の 5 地点の情報でかなり正確に行えることが確認された。また主要破壊が起きたところを迅速に特定できる可能性も確認された。マグニチュードの推定は初動振幅を使って震源推定とほぼ同時に行うことができるが、最大加速度 5HzPGA と最大リアルタイム震度 RImax とから簡易的に推定しても大まかに評価できることが分かった。以上の知見は、迅速な地震情報の取得や被害推定に直結するものであり、さらに確認を続けていきたい。

積分変位は地殻変動量と直結しており、数 cm の永久変位でも概ね妥当性のある結果が得られた。妥当性のある積分はリアルタイムにはできないが、遅くとも数分後には算定できるので、地殻変動をいち早く把握するのには適している。DC から計測できる精度の高い加速度計であれば震源域での正確な積分波形を 1 分程度で得ることは可能と思われる。GPS を設置できない海底にこうした地震計があり、震源近傍で地震を捉えることができれば、海底の地殻変動を正確に捉えることができると期待され、正確で迅速な津波警報に結び付くものと期待される。巨大地震の場合には広い範囲で類似の地殻変動になることが期待されるので、必要となる海底地震計の数もそれほど多くはないのかもしれない。

以上

表 1 各地点の震央距離や地震検知時刻、警報時刻など

						※検知時刻などは		21:38:00	を基準とした		地点毎	最初の
		site	location	JMA震源基準		Start	震度4に	Max	警報シミュレーション		検知から	警報から
		N	E	EpiDis	Azimuth	p-detect	達した時刻	peak1	RI 1.5	警報基準	警報までの	Maxまでの
name	code								P波警報	警報時間	時間(秒)	時間(秒)
十王	IBRH14	36.6922	140.5484	4	36	51.12	53.5	58.6	あり	51.36	0.24	7.24
KiK高萩	IBRH13	36.7955	140.575	8	181	51.51	53.15	56.81	あり	51.74	0.23	5.07
K高萩	IBR002	36.7061	140.7068	12	277	52.17	55	59.9	あり	52.9	0.73	7
日立	IBR003	36.5915	140.6453	16	336	52.54	54.8	61.9	あり	53.66	1.12	8.24
山方	IBRH16	36.6405	140.3976	18	61	52.92	61.3	62.1	あり	53.17	0.25	8.93
K大子	IBR001	36.7761	140.3569	20	108	53.25	60.5	61.9	あり	54.4	1.15	7.5
矢祭	FKS014	36.8864	140.4166	23	143	53.66	60.8	62.6	あり	56.85	3.19	5.75
大宮	IBR004	36.5516	140.4102	24	38	53.99	64	65.5	あり	55.96	1.97	9.54
KiK大子	IBRH12	36.8369	140.3181	26	120	54.18	62	63.4	あり	57.73	3.55	5.67
勿来	FKS012	36.9069	140.7929	29	223	54.69	60.8	65.3	あり	55.6	0.91	9.7
いわき西	FKSH13	36.9951	140.5853	31	182	54.75	64.63	64.63	なし	—	—	—

表 2 各種推定震源と各地点の震央距離、最大リアルタイム震度、最大加速度など

		JMA震源 暫定		SDR震源first5sites		Max震源first5sites			
		緯度	36.72	36.721	6km/sを	36.765	4km/sを		
		経度	140.5733	140.569	仮定	140.582	仮定		
		深さ(km)	11	8		4.8			
		震源時	49	49.6		57.3		Gal簡易推定M	
site		震央距離	震央方位	震央距離	震央方位	震央距離	震央方位	Rlmax	5HzPGA
十王	IBRH14	3.8	36	3.7	30	8.6	20	4.4	242
KiK高萩	IBRH13	8.4	181	8.3	184	3.4	530	5.6	528
K高萩	IBR002	12.0	277	12.4	278	12.9	300	4.6	183
日立	IBR003	15.6	336	15.9	335	20.1	344	4.5	300
山方	IBRH16	18.0	61	17.7	60	21.5	50	3.8	79
K大子	IBR001	20.3	108	19.9	108	20.1	94	4.4	127
矢祭	FKS014	23.2	143	22.8	144	20.0	132	3.9	95
大宮	IBR004	23.7	38	23.6	37	28.2	33	3.8	97
KiK大子	IBRH12	26.2	120	25.8	120	24.9	109	3.9	96
勿来	FKS012	28.5	223	28.7	224	24.5	230	4.2	65
いわき西	FKSH13	30.5	182	30.5	183	25.5	181	3.5	65

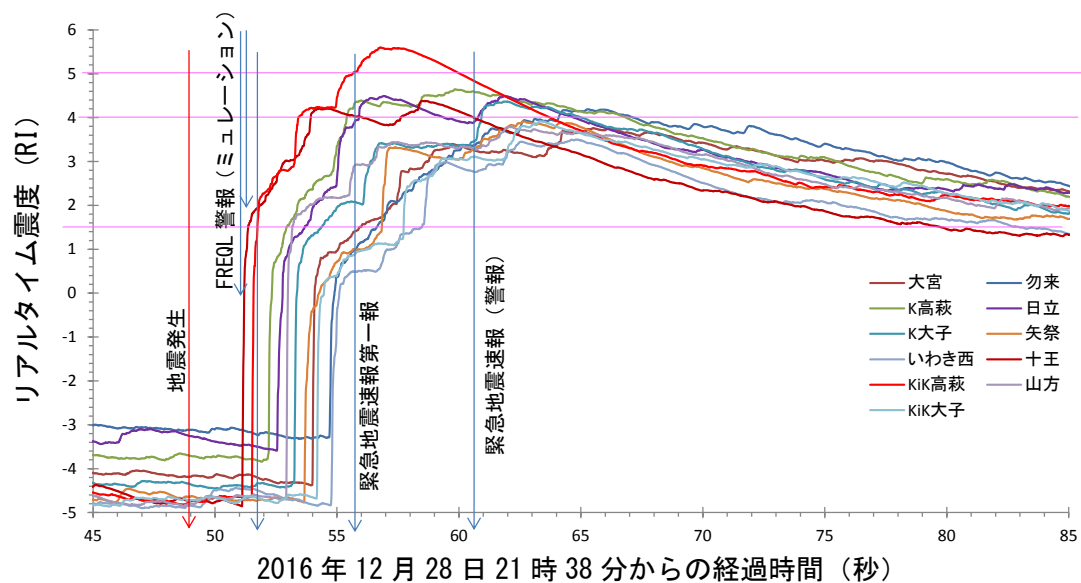


図1 各地のリアルタイム震度 (RI) の時間変動と各種警報のタイミング

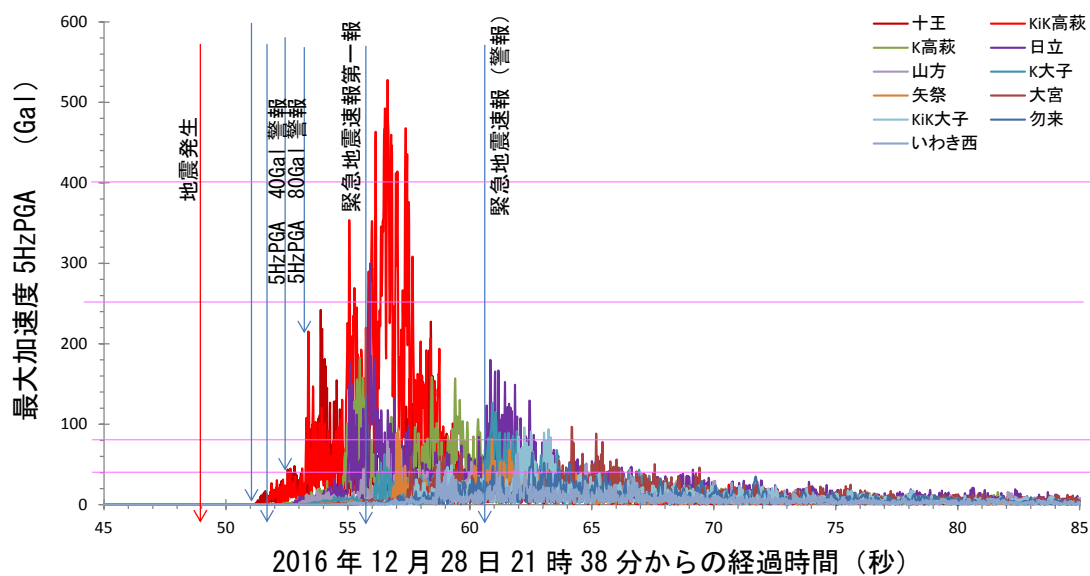


図2 各地の最大加速度 (5HzPGA) の時間変動と各種警報のタイミング

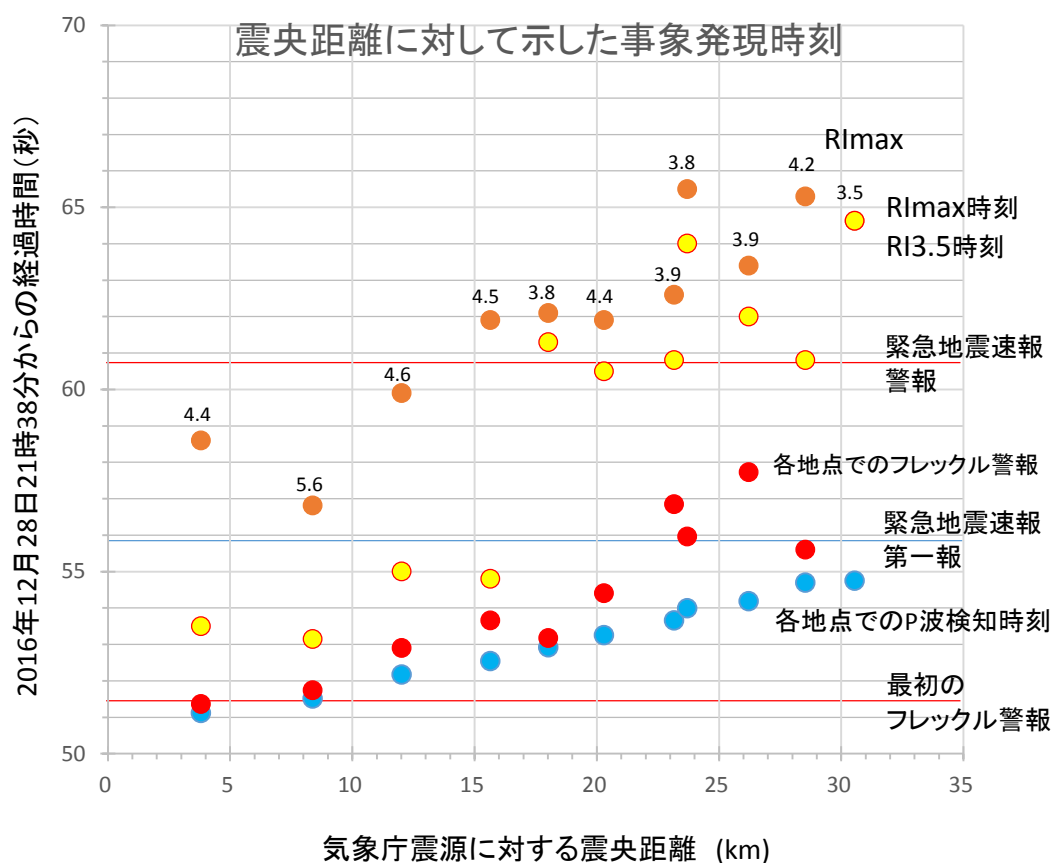


図3 各種警報と地震動の発現状況

各観測点での諸事象の発現時刻（縦軸）を、気象庁の暫定震源を基にした震央距離（横軸）に対して示したもの。●、●、●および●は、それぞれ、各検知点でのP波検知時刻、FREQ（フレックル）警報時刻、震度4（RI=3.5）到達時刻および最大震度到達時刻を表す。●の上の数値は、最大リアルタイム震度である。また赤細線は最初のフレックル警報時刻、青細線は緊急地震速報第一報時刻および赤太線は緊急地震速報（警報）時刻を示す。

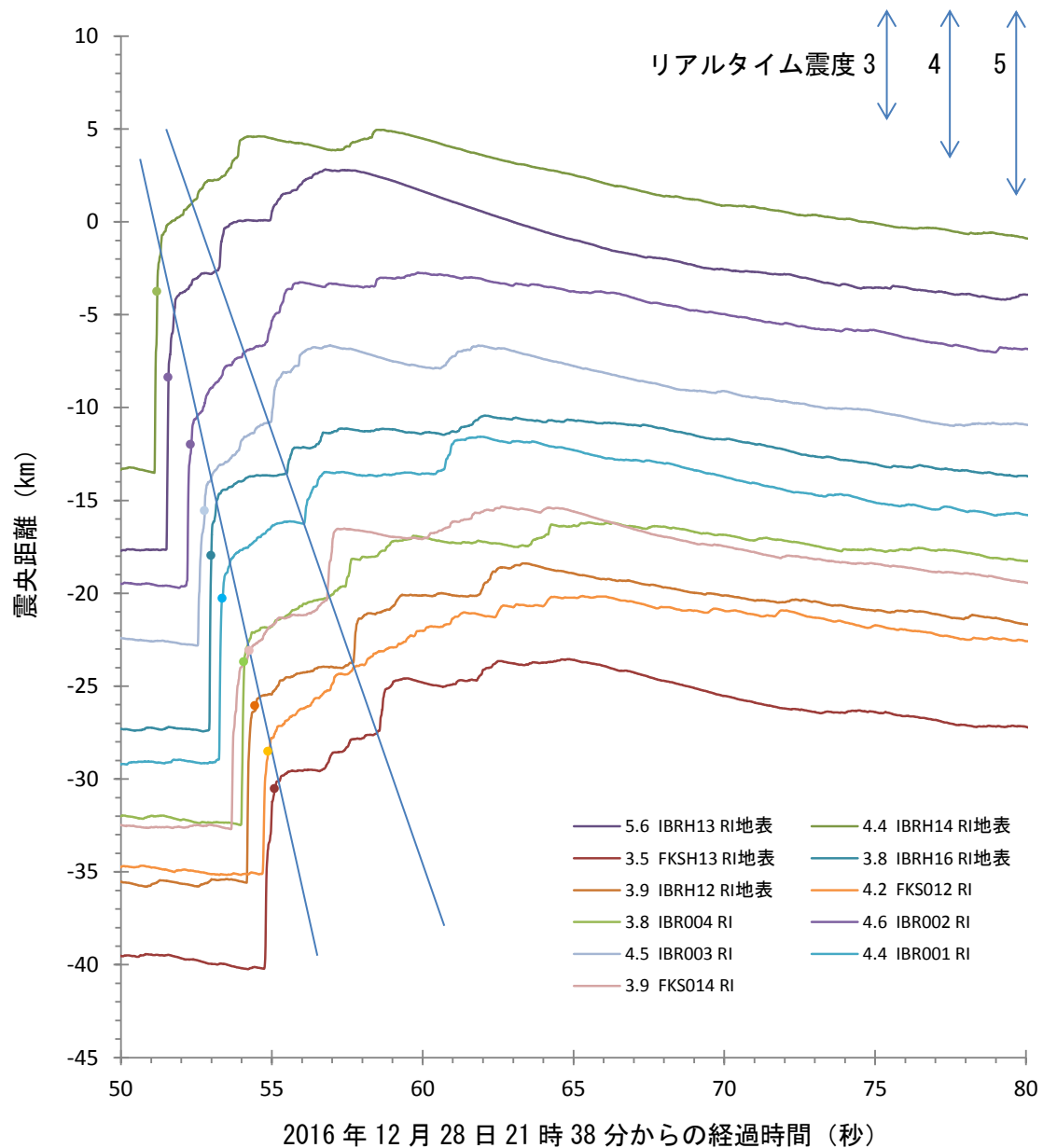


図 4 JMA 震源に対する震央距離順に並べた各観測点でのリアルタイム震度波形

丸印は各地点でのリアルタイム震度 0 を示し、これに対応する距離が気象庁推定震央に対する各地点の震央距離となっている。凡例の数字は、その後にあるコード地点の最大リアルタイム震度である。

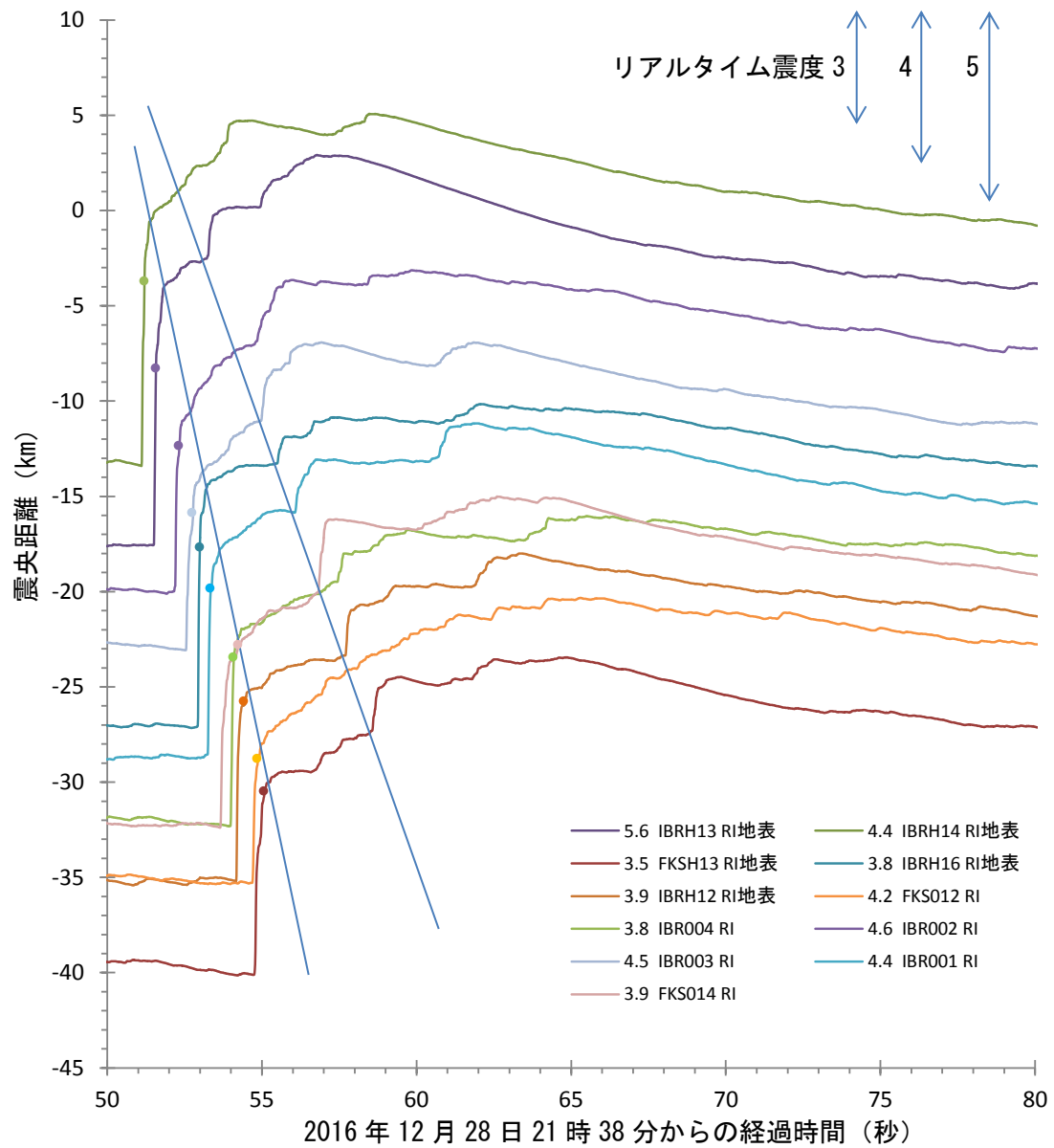


図 5 SDR 震源に対する震央距離順に並べた各観測点でのリアルタイム震度波形

丸印は各地点でのリアルタイム震度 0 を示し、これに対応する距離が SDR 推定震央に対する各地点の震央距離となっている。凡例の数字は、その後にあるコード地点の最大リアルタイム震度である。

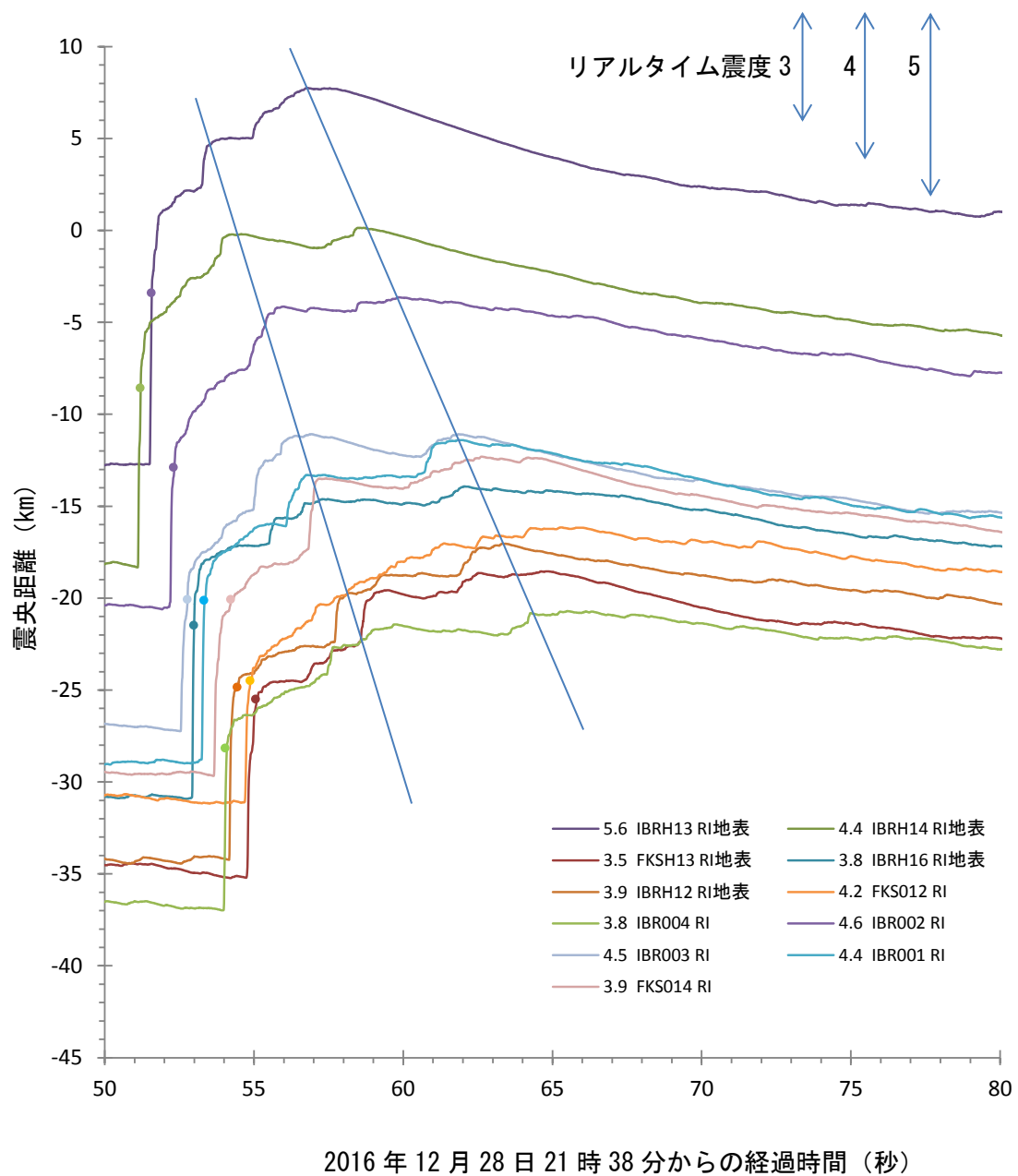


図 6 MAX 震源に対する震央距離順に並べた各観測点でのリアルタイム震度波形
丸印は各地点でのリアルタイム震度 0 を示し、これに対応する距離が MAX 震央に対する各地点の震央距離となっている。凡例の数字は、その後にあるコード地点の最大リアルタイム震度である。

JMA震央距離に対する5HzPGAと減衰曲線

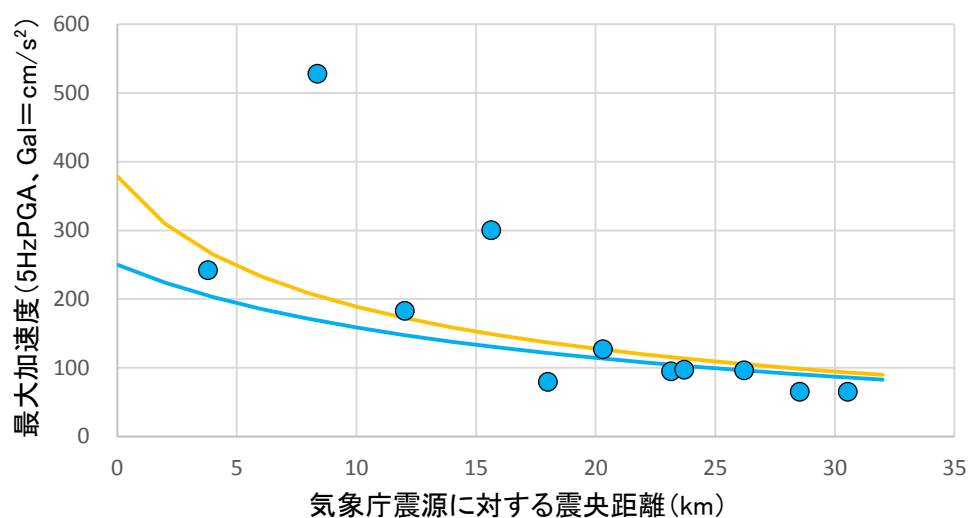


図 7 最大加速度（5HzPGA）の気象庁震源に対する減衰曲線

MAX震央距離に対する5HzPGAと減衰曲線

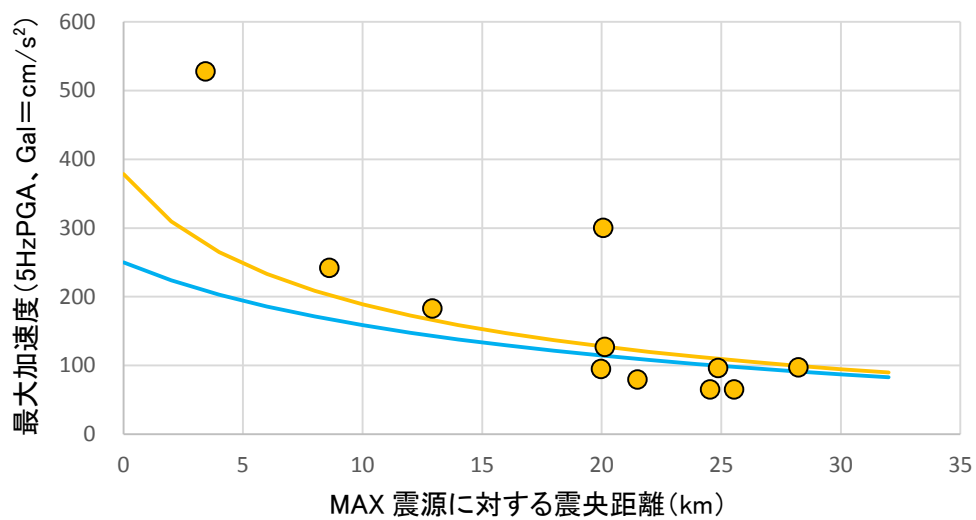


図 8 最大加速度（5HzPGA）の MAX 震源に対する減衰曲線

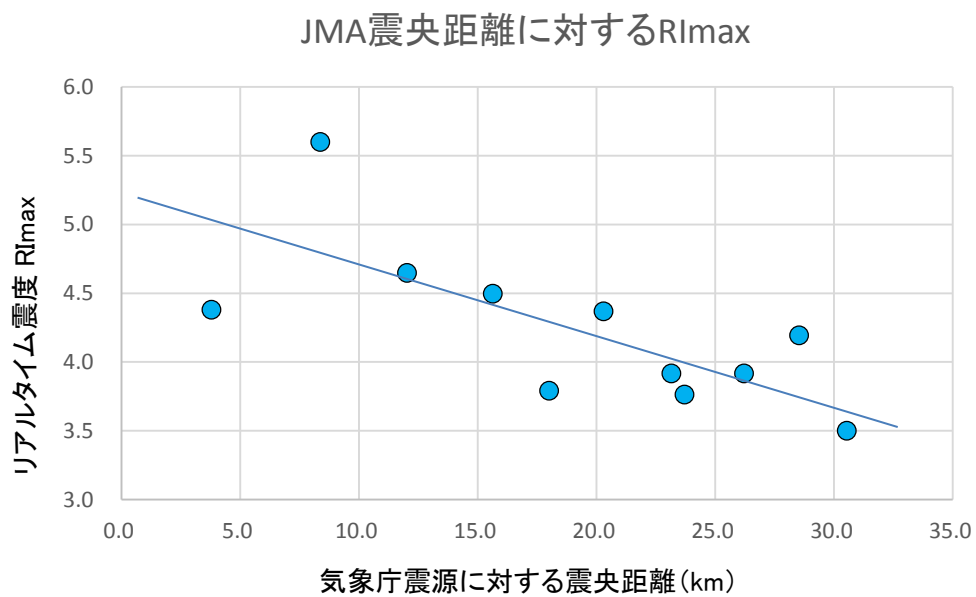


図 9 最大リアルタイム震度 RImax の気象庁震源に対する減衰曲線

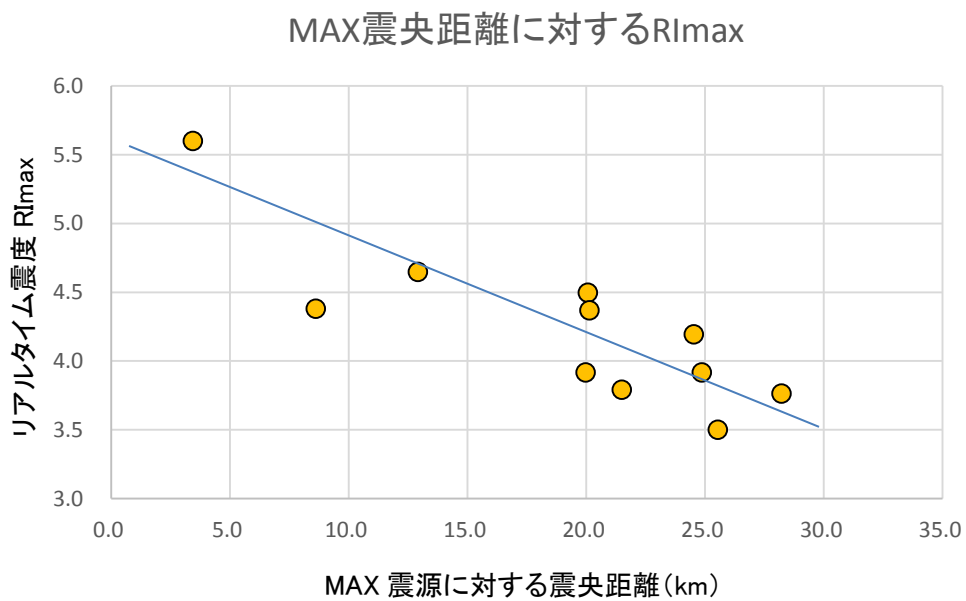
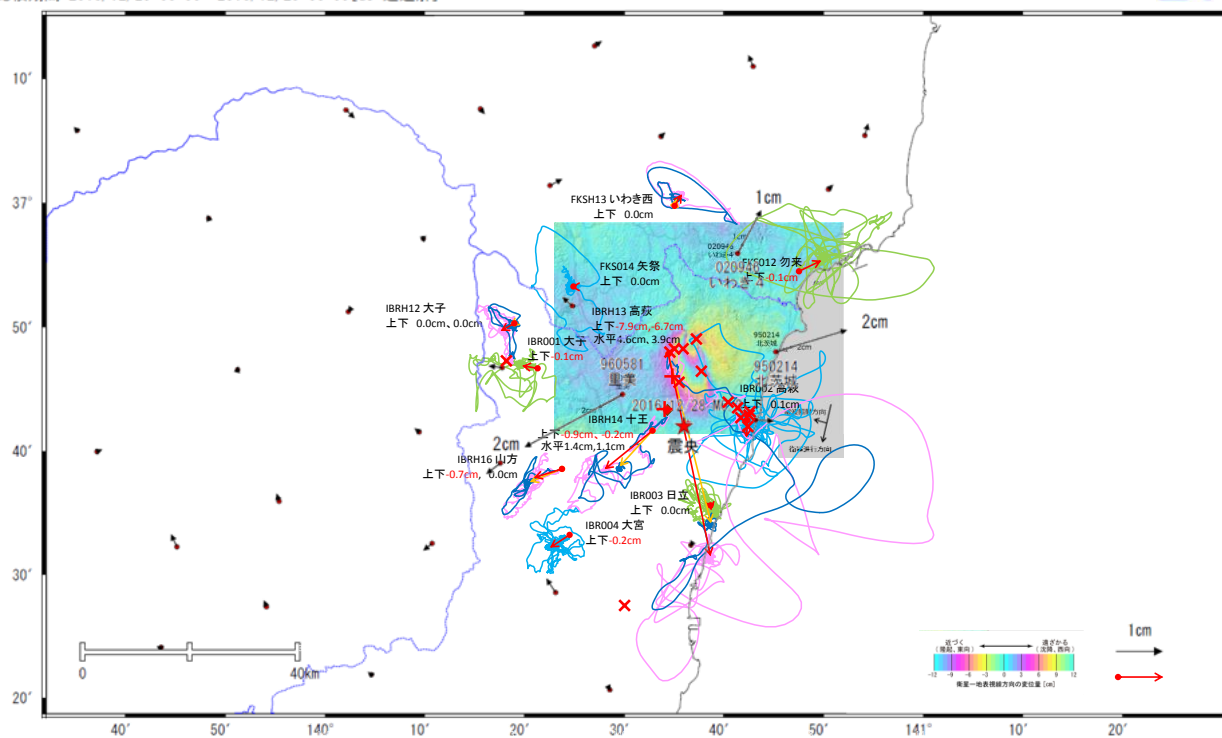


図 10 最大リアルタイム震度 RImax の MAX 震源に対する減衰曲線

基準期間: 2016/12/21 00:00~2016/12/27 23:59 [R3: 速報解]
比較期間: 2016/12/29 00:00~2016/12/29 06:00 [Q3: 迅速解]

2016-12-28、茨城県北部の地震(Mjma6.3)時の地表面の動き(水平)

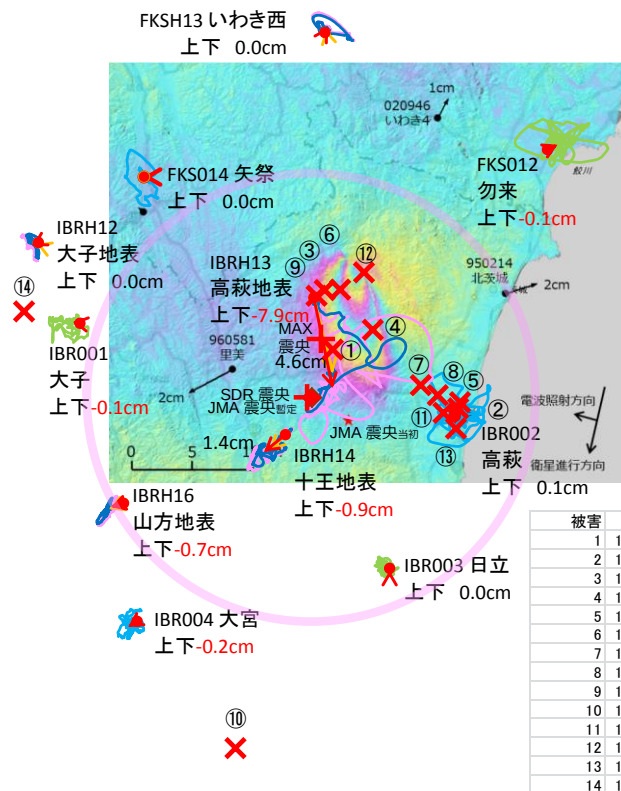
SDR



☆ 固定局: 大宮 (950241)

国土地理院

図 11 GPS による地殻変動量および干渉 SAR 解析による地殻変動推定図 (国土地理院)
に各地の積分変位軌跡および震央位置や被害位置などを重ね書きしたもの



この図は国土地理院の InSAR 解析画像 (GPS 変位付) に強震記録から算定した地震動軌跡や被害カ所などを重ね書きしたものである。被害カ所は福島県の調査結果を基に場所を特定した。また十文字と菱形で示した JMA 震央^{当初}および JMA 震央^{推定}とは、気象庁による震央である。それぞれ、地震後 2 日後までの速報値およびそれ以降の暫定値で、各々深さは 10km および 11km である。なお、確定値は半年後以降に公表される。十文字で示した SDR 震央および MAX 震央は、検知順に 5 地点のリアルタイム震度 RI の立ち上り時刻と最大値発現時刻を用いて算定した震央で、それぞれ破壊開始点および最大動発震源に対応する。深さは各々、8.0km および 4.8km である。矢印は、地震による地殻変位の推定値で、黒は GPS によるもの、赤は強震記録の二回積分によるものである。1cm 以上のものには矢印の先端付近に値を記した。薄青と薄緑は K-NET 観測点 (地表) の変位軌跡、青とピンクは各々 Kik-net 観測点の地下と地表の変位軌跡を示す。傍らには観測点コードと観測点名、上下方向の永久変位推定値を示した。X 印は被害カ所で、位置や被害内容は下表の対応数字欄を参照のこと。ピンク円は、 $\text{LOG}_{10}(R) = 0.71M - 3.2$ 、で算定した被害発生限界 R (中心は JMA 震央^{推定}) を示す。

被害	E	N	被害内容			
1	140.5931	36.7570	宿泊施設ロビー天井と底の一部落下			
2	140.7102	36.7128	寺の位牌転倒			
3	140.5855	36.8019	中学校体育館窓ガラス約10枚破損落下			
4	140.6304	36.7719	障害者施設内壁ひび割れ蛍光灯カバー落下、受水槽ポンプ故障			
5	140.7120	36.7174	保育所天井板ずれ			
6	140.6000	36.8021	消防団詰所建物ゆがみ			
7	140.6752	36.7302	集会所内外壁亀裂			
8	140.6912	36.7227	集会所内外壁亀裂			
9	140.5779	36.7976	交流館窓枠ゆがみ			
10	140.5022	36.4568	消防本部体育館天井破損			
11	140.6964	36.7094	ため池コンクリート継目から漏水			
12	140.6223	36.8152	道路脇斜面土砂崩壊			
13	140.7081	36.6975	190戸断水、約5時間後復旧			
14	140.3046	36.7858	25戸断水、約1時間後復旧			

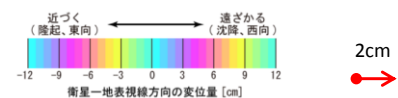


図 12 GPS による地殻変動量および干渉 SAR 解析による地殻変動推定図 (国土地理院) に各地の積分変位軌跡および震央位置や被害位置などを重ね書きしたもの (その 2) 被害表付