

2016 年 11 月 22 日に発生した福島県沖地震 Mj7.4 (Mw6.9) の地震について

中村 豊 (SDR)

1. はじめに

この地震では地震動被害はないと判断される程度の震度であったが、緊急地震速報（警報）が出されたほか、津波の発生が予想され、福島県沿岸に津波警報、宮城県沿岸に津波注意報などが出された。仙台港では 1.4m の津波が観測された後、宮城県沿岸地域の注意報が警報に格上げされた。地震規模に対して大きめの津波（仙台で 1.4m）であったが、その要因については、仙台港はたまたま正断層のすべりの方向にあったためとするものや、異なる経路を経た津波がたまたま重なりあって大きくなったというものなどがある。興味深い問題であるが専門家の分析結果を待つことにして、ここでは、強震記録の分析結果について述べることにする。ただし、周波数分析などについては扱わず、GPS による地殻変動量と積分変位波形の比較やリアルタイム震度 (RI) 波形に基づいて警報タイミングや破壊開始点や主要破壊地点に関する震源計算結果について報告する。

2. 積分変位波形と GPS 変位波形の比較

図 1 は、各観測点の緯度に対応して、3 方向（EW 方向 NS 方向 UD 方向）の積分変位波形を並べたものである。永久変位の発生状況や各地点の表層地盤の震動特性がよく現れている。算定された積分変位を使って各地点の変位軌跡や永久変位の大きさを地図上に示したものが図 2 であり、これには GPS による地殻変動ベクトルなども示されている。これらの図によると、積分変位から求められる永久変位は最大 5cm 程度であるが、各地点の変位ベクトルは GPS の変位ベクトルと整合的であり、この程度の変位に対しても積分変位は十分な精度を有しているものと思われる。またこれらの図には震央位置なども示されているが、詳細については § 4. で述べる。

3. リアルタイム震度の時間変化と警報シミュレーション

図 3 は各地のリアルタイム震度波形を重ね書きしたもので、地震発生時刻や、緊急地震速報時刻なども示した。また、FREQL (P 波) 警報シミュレーションの結果得られた、FREQL 警報時刻も示した。この図によると、緊急地震速報（警報）は、震度 5.3 となった地点では概ね最大震度に到達した時点に発信されており、震源が遠かったにもかかわらず、大きな揺れに先行できていない。この地震では、震度の成長も緩やかで、FREQL 警報も検知から数秒を要しているが、それでも緊急地震速報第一報よりも 5 秒以上早く警報を発信す

るものと期待される。緊急地震速報（警報）より 13 秒以上先行することになる。

4. リアルタイム震度波形に基づく震源推定

ここでは、リアルタイム震度波形に基づいて、当該地震の震央（いわゆる破壊開始点）や最大動発震源などを推定する。リアルタイム震度波形から P 波動到達時刻や最大動発現時刻などを読み取って表 1 に示した。これらの時刻から、破壊開始点や地震発生時刻、最大動発震源やその時刻を最小二乗法で推定した。この時、P 波と S 波の伝播速度はそれぞれ 6km/s と 3.9km/s を仮定した。その結果は図 4 および図 5 に示している。

これまでの知見によれば、内陸の地震については、最初の 5 地点の情報だけで、かなり正確に震央を把握できたが、震央が観測点群の外側にある今回の場合、どの程度の観測点が必要か検討した。その結果、5 地点だけではほとんど海岸線近くに留まり、正しい震央を算定することはできなかった。しかし、海に突き出た牡鹿半島にある観測点のデータ（7 点め）が加わると、ほぼ正しい震央を算定できるようになった。ここでは K-NET の 11 地点を用いた破壊開始点を示しているが、それでも最初の地震検知から 7.5 秒～10.5 秒後には概ね正しい震央位置が得られることになる。

次に最大動の震源（MAX 震源）を RImax の発生時刻から推定した。この時、観測点群が震央から離れているので、これらの観測点の最大動は同じ震源から発しているとして、ここで検討しているすべての観測点（K-NET11 地点、KiK-net7 地点の合計 18 地点）の最大動発現時刻を用いて MAX 震源を推定した。その結果が、図 5（防災科研の震源過程解析図に重ね書きした）や図 4 の＊印である。これらの推定結果（震央位置、深さ、発生時間）などは表 1 に数値で示されている。これによると、地震発生後、約 18 秒経過して最大動が放出されていると推定されるが、防災科学技術研究所による震源過程の解析結果（防災科研 HP 参照）と矛盾しないものとなっている。今回の場合、破壊開始点については、地震検知後 10 秒後に、MAX 震源については地震検知後 1 分程度で判明するものと期待される。破壊開始点から MAX 震央に向かう方向の延長線上に今回の地震で大きな軌跡を描く観測点群が存在することは興味深い。

ここでは、最大加速度 5HzPGA とリアルタイム震度 RImax を用いた地震規模（マグニチュード）の簡易推定結果も表 1 に示している。これによると、各観測点での簡易推定マグニチュードはリアルタイム震度 RI5.3 を記録した KiK-net いわき東が最大で Me7.5 となったほか Me6.5 前後にばらつく結果となり、平均的には M7 程度の地震が沖合で発生したことがわかる。

なお、表 1 の KiK-net 観測点の表では、地表に S、地中に B を付している。

5. おわりに

強震記録を使って、警報のタイミングなどを調べた結果、今回も緊急地震速報は必要な地域には大きな揺れに先行できていないことがわかった。そのほか、断層近傍では一般に大

きな被害になるが、積分変位により少なくとも数 cm の地殻変動量は把握できる可能性が明らかになるとともに、破壊開始点や最大動発震源を迅速に把握できることがわかった。特に後者は内陸地震の場合、甚大な被害が集中する可能性のある地域を特定するのに役立つと考えられ、防災上有効な情報を提供することができるようになると期待される。

以上

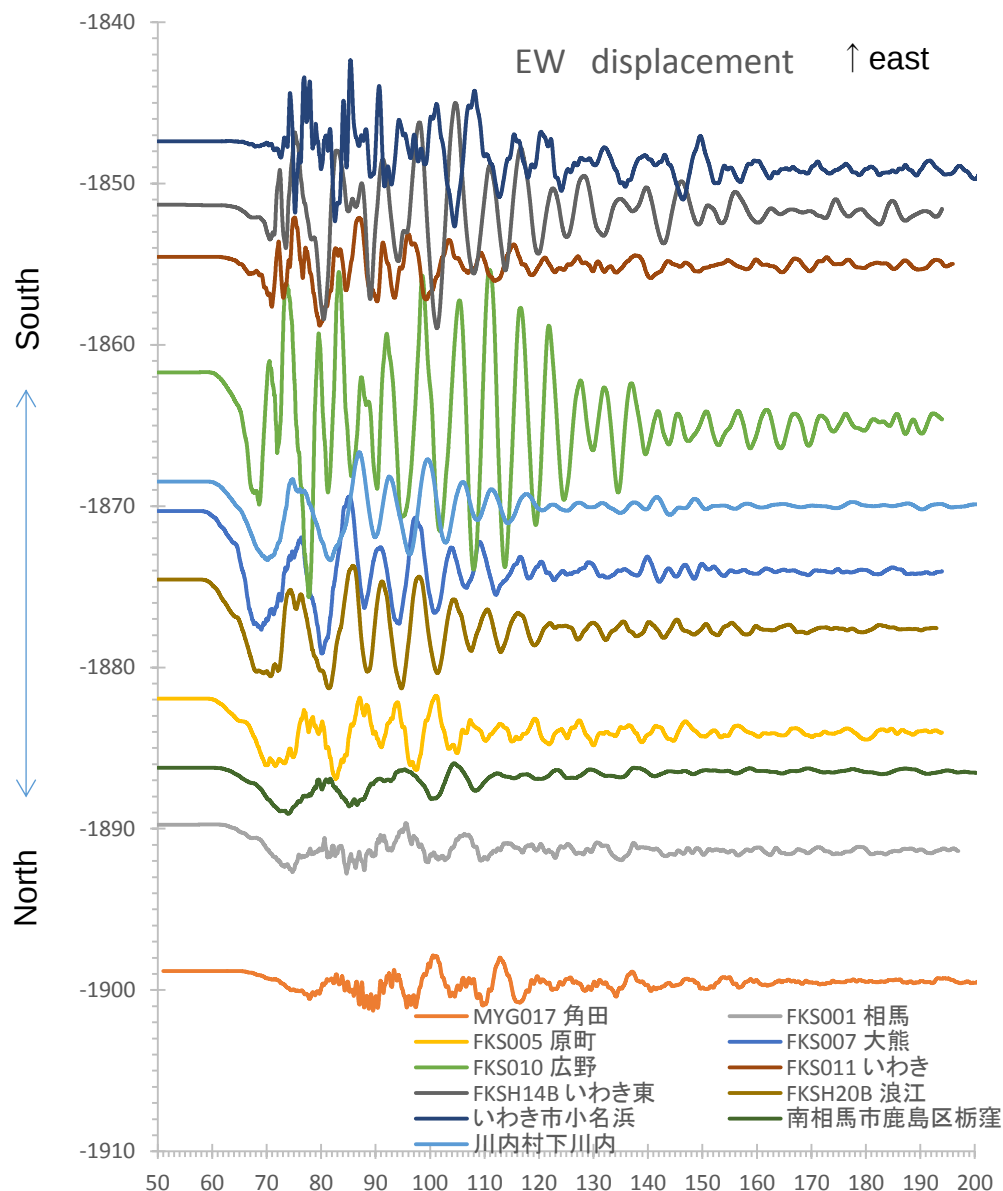


図 1 (1) 各地の積分変位波形 (EW 方向成分)

ほぼ南北に並んだ地点を選び、各地の積分変位波形(EW 方向成分)を緯度に対応させて示したもの。変位の方法は上が東に対応する。縦軸は上が南方に、下が北方に対応している。縦軸の 1 目盛の大きさは 1cm の変位に対応する。横軸は 2016 年 11 月 22 日 05 時 59 分からの経過時間(秒)である。

ここに示した各地の初動はすべて西向きであり、永久変位も K-NET 広野を中心に西に変位しているのがわかる。広野では永久変位の他に周期の長い大きな振動変位も認められ、表層地盤が共振していることが伺われる。共振波形は広野の他、いわき東、川内村、浪江、大熊などでも認められる。

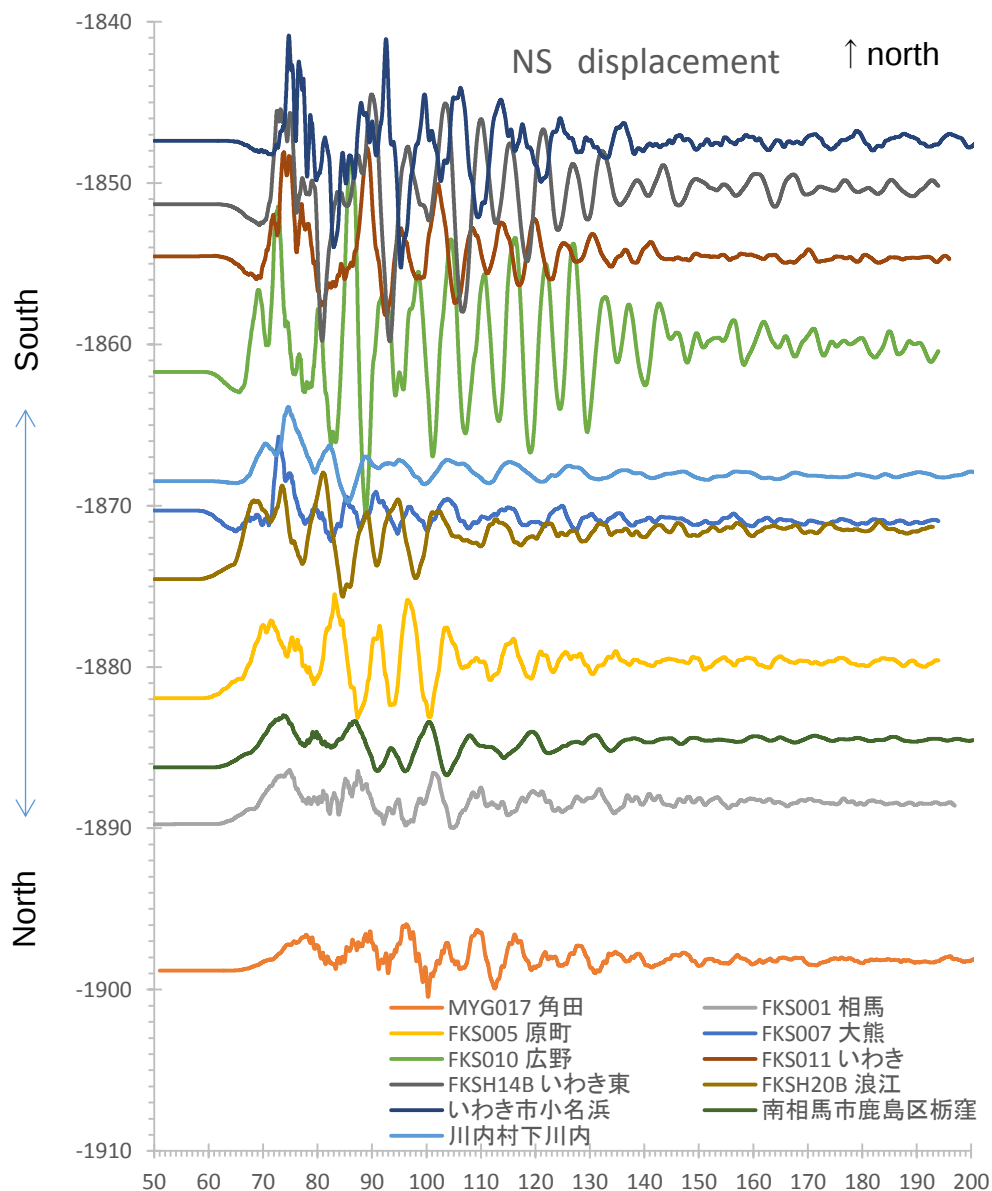


図 1 (2) 各地の積分変位波形 (NS 方向成分)

ほぼ南北に並んだ地点を選び、各地の積分変位波形(NS 方向成分)を緯度に対応させて示したもの。変位の方法は上が北に対応する。縦軸は上が南方に、下が北方に対応している。縦軸の 1 目盛の大きさは 1cm の変位に対応する。横軸は 2016 年 11 月 22 日 05 時 59 分からの経過時間(秒)である。

初動の向きは、川内村や大熊あたりを境に南側では南に、北側では北に変位している。永久変位の大きさは EW 方向に較べて小さく、広野、原町、浪江、南相馬で北に変位している。共振波形は広野と相馬で認められるが、他は EW ほど目立たない。

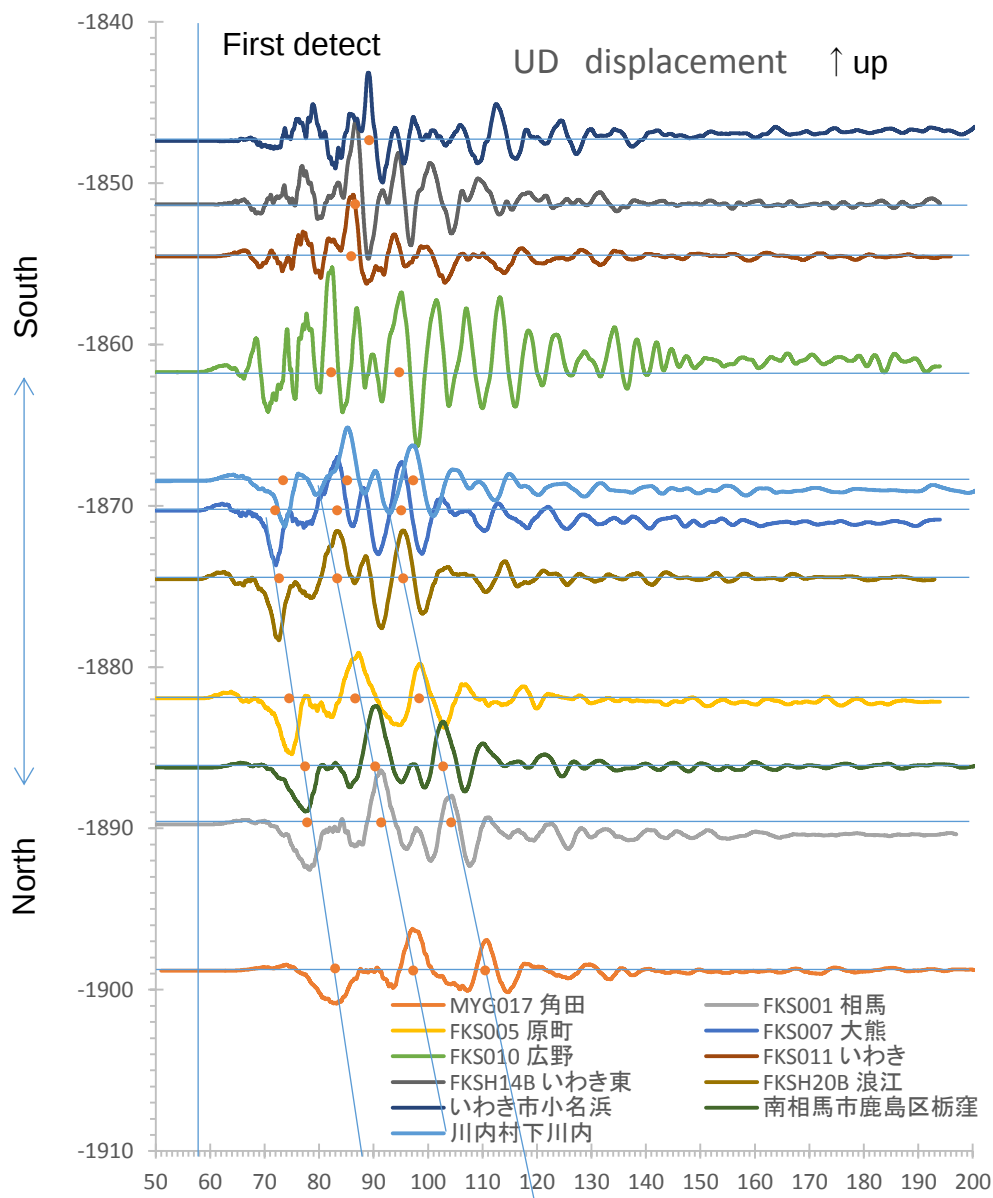


図 1 (3) 各地の積分変位波形 (UD 方向成分)

ほぼ南北に並んだ地点を選び、各地の積分変位波形(UD 方向成分)を緯度に対応させて示したもの。変位の方向は上が上に対応する。縦軸は上が南方に、下が北方に対応している。縦軸の 1 目盛の大きさは 1cm の変位に対応する。横軸は 2016 年 11 月 22 日 05 時 59 分からの経過時間(秒)である。

初動の向きは、概ね上方であるが、波形形状は広野を境に南方と北方とで明らかに異なっている。広野だけで共振波形が比較的顕著に認められる。

北方では 3 つの位相が顕著でその位置に丸印を付した。南方諸点にも顕著な位相は認められるが、北方の位相との対応関係はよくわからない。

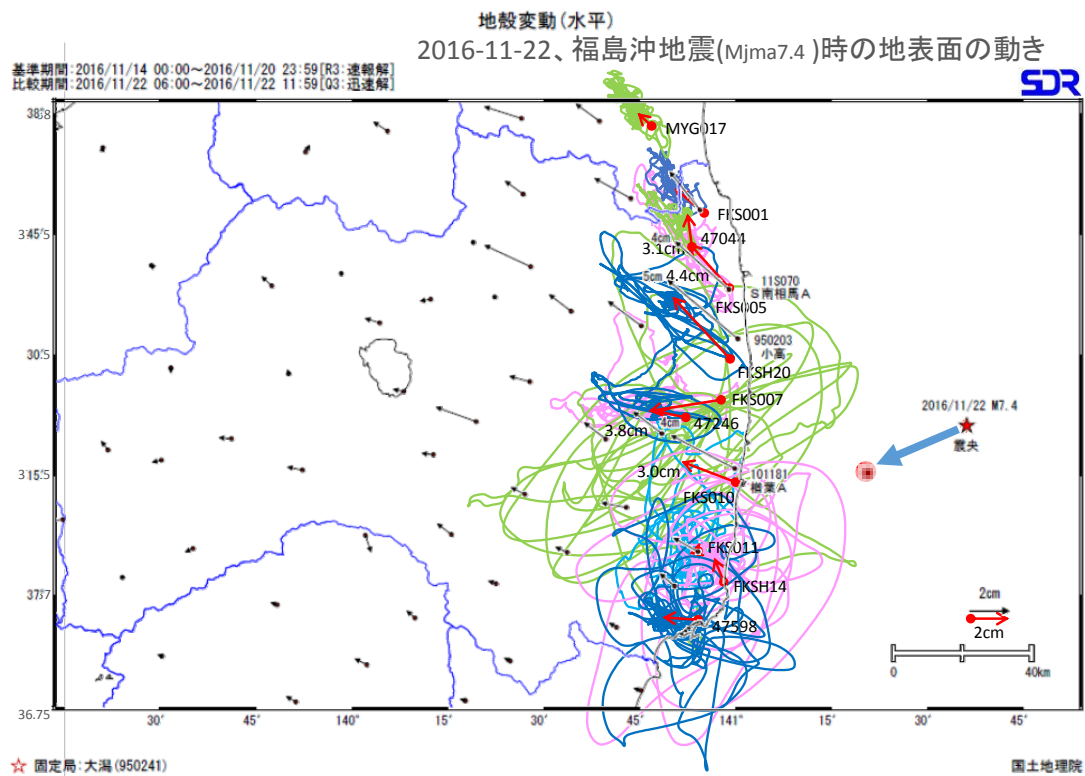


図 2(1) 地殻変動図 : GPS と積分による変位の比較、積分変位軌跡、本震の破壊開始点と MAX 震央

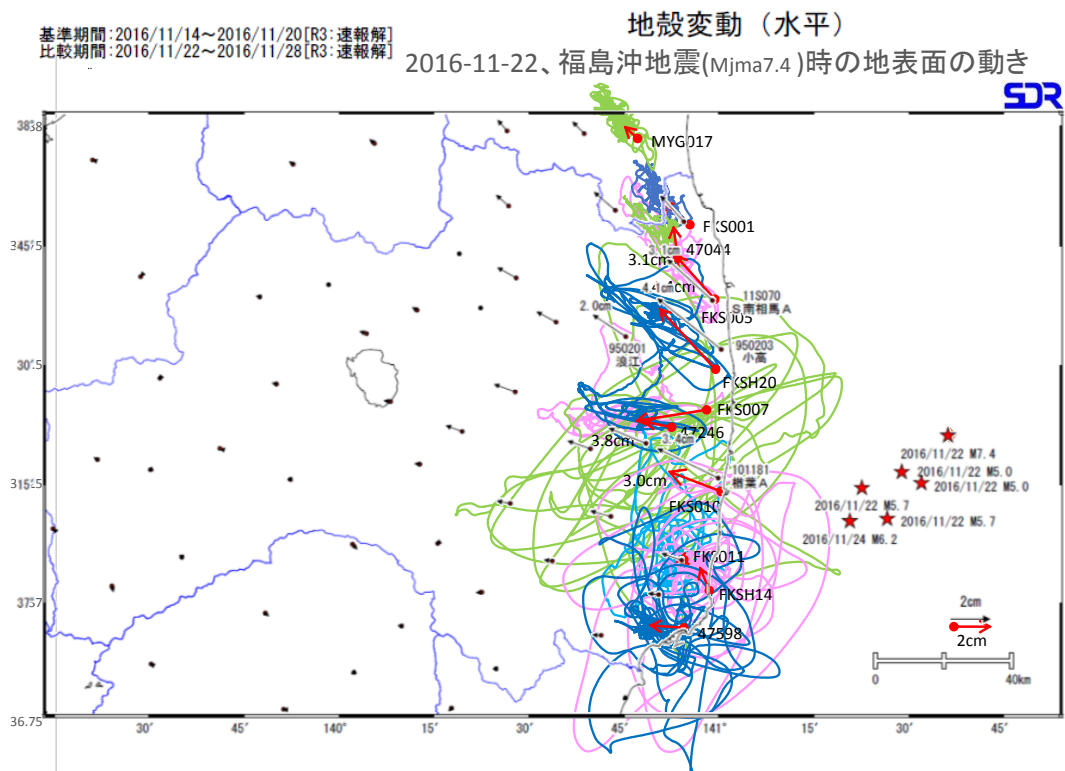


図 2(2) 地殻変動図 : GPS と積分による変位の比較、積分変位軌跡、本震と主な余震分布

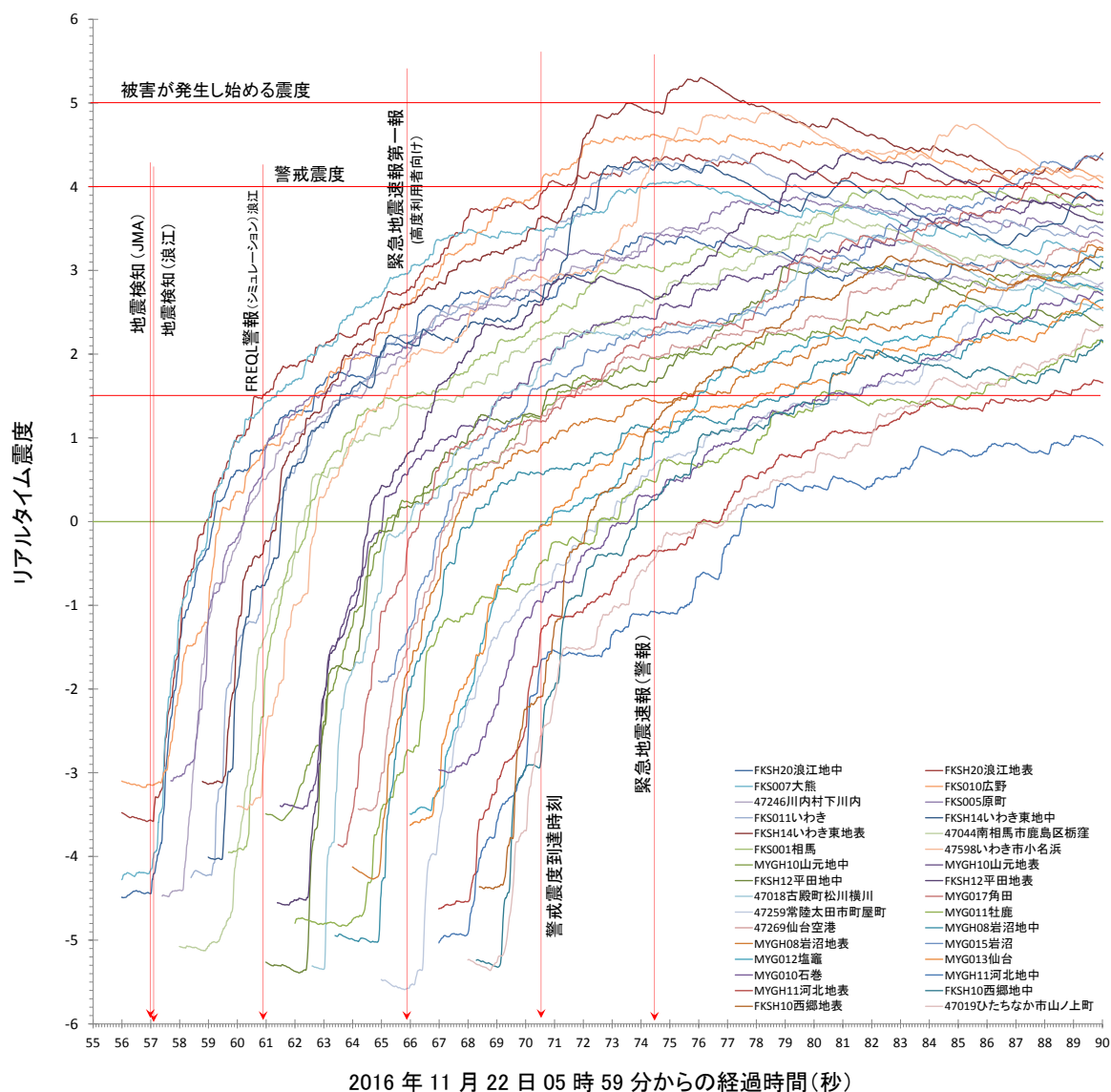


図 3 (1) 各地のリアルタイム震度 RI の時間変動：重ね描画

各地のリアルタイム震度を重ね書きしたもの。縦軸はリアルタイム震度で、横軸は2016年11月22日05時59分からの経過時間(秒)である。

気象庁による検知時間はほぼ57秒で、緊急地震速報第一報は約66秒、一般への緊急地震速報(警報)は74秒より遅れている。これに対して、FREQ(LP波)警報シミュレーションによれば、検知時間はほぼ同じ約57秒(浪江)であるが、警報は約61秒(気象庁の第一報の約5秒前、警報の13秒以上前)に出されると期待される。気象庁の予報(第一報など)や警報は、被災するかもしれないところでは明らかに人が感じた後や大きな揺れの最中であり、予報や警報の意味を全く成していない。

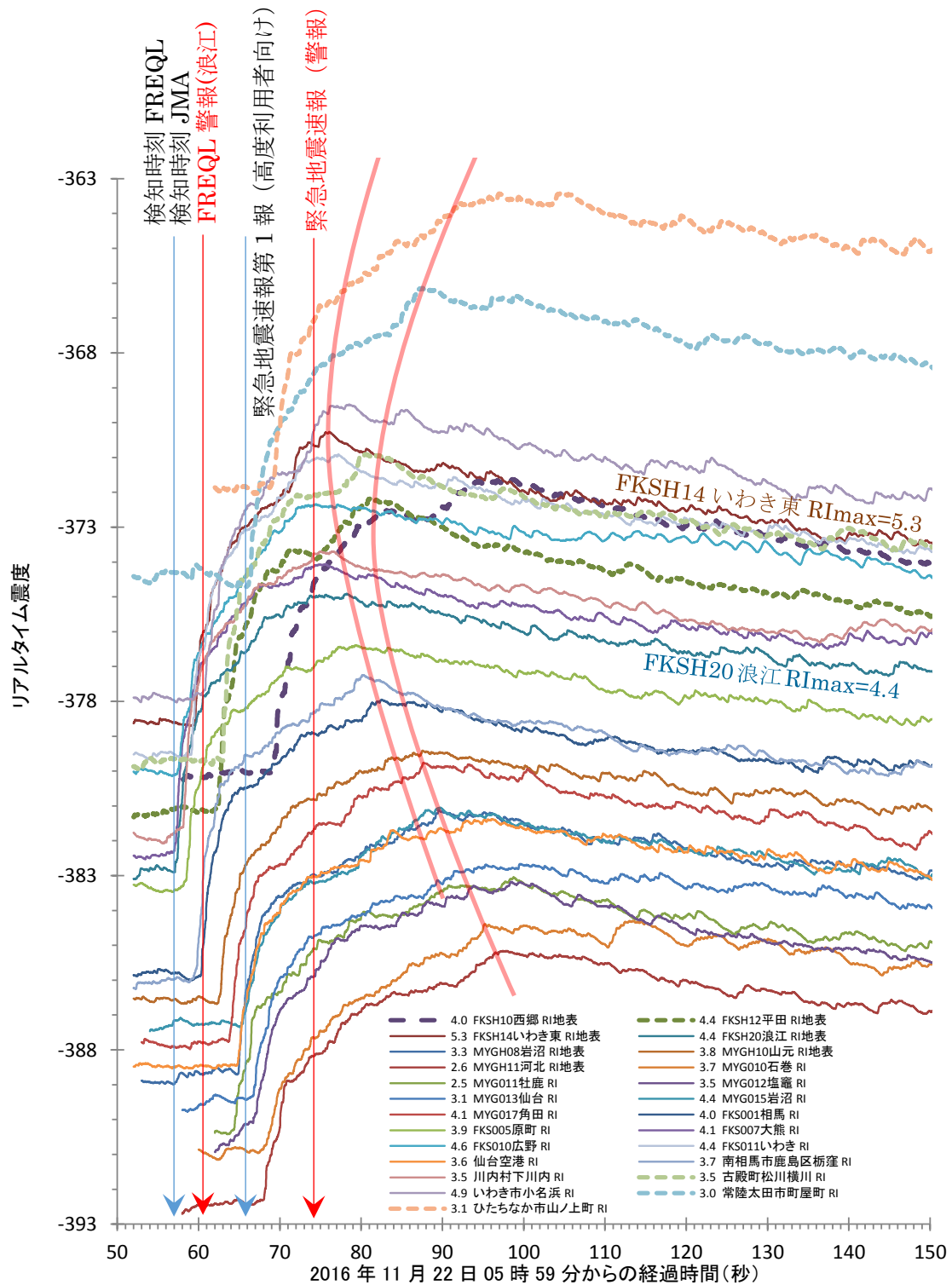


図 3 (2) ● 各地のリアルタイム震度 RI の時間変動：緯度対応表示

最大リアルタイム震度発現時の縦軸位置が当該地点の緯度に対応するように図示した。縦軸の 1 目盛の大きさが震度 1 の大きさに対応する。横軸は 2016 年 11 月 22 日 05 時 59 分からの経過時間(秒)である。凡例の最初の数字がその後に表示された地点の最大リアルタイム震度を表す。

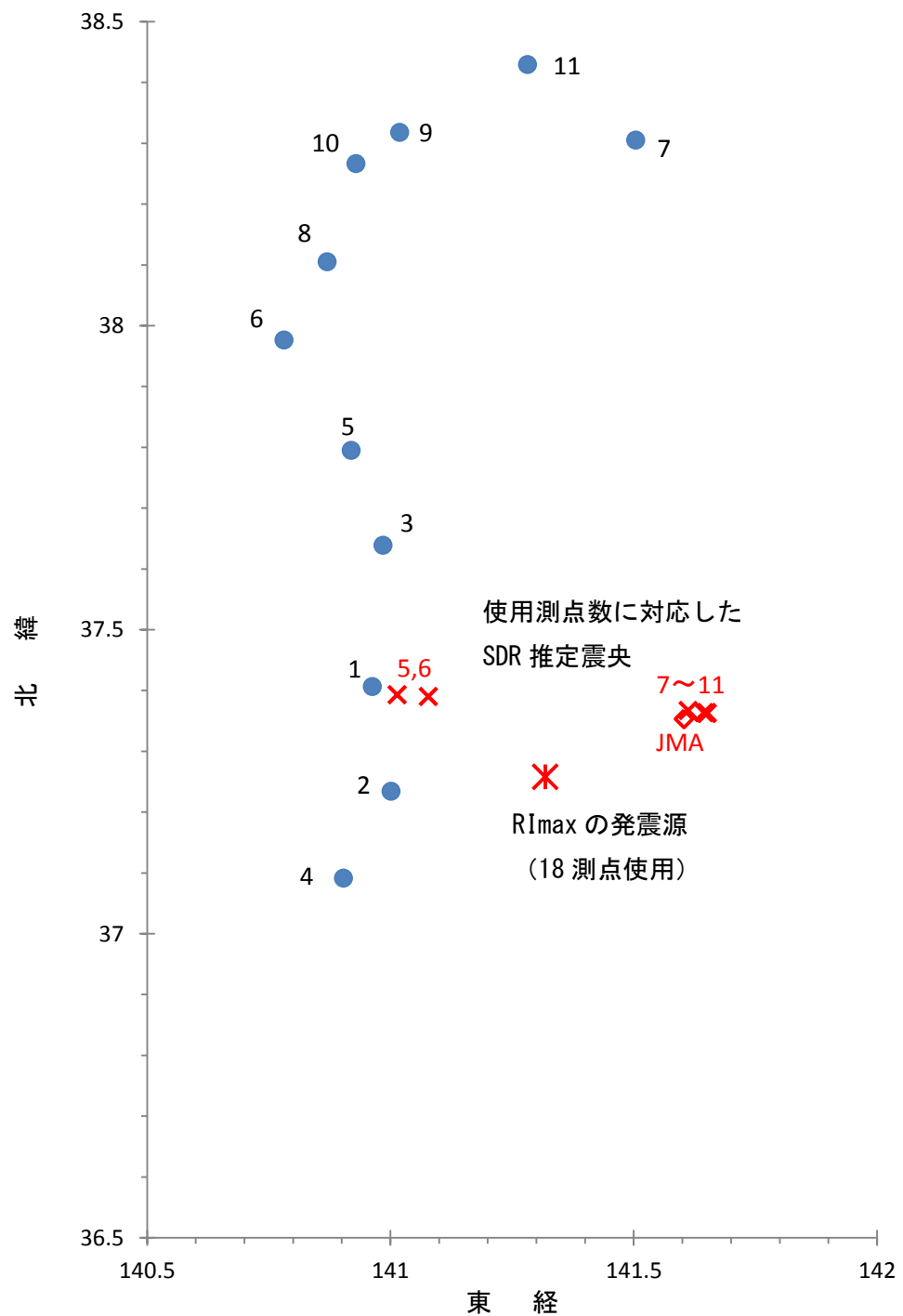


図 4 解析に使用した K-NET 測点の分布状況と震源推定に用いる測点数と推定震央位置の関係

これらの K-NET 観測点への波動到達時間から震源推定を試みた。最初の 5 地点、6 地点のデータを用いた推定震央(×)は海岸線付近に留まっているが、牡鹿半島の観測点が 7 番目に波動検知した後、推定震央(×)は、ほぼ気象庁の暫定震央(◇)と一致している。*印は主要な破壊が起きたところと推定される位置を示す。

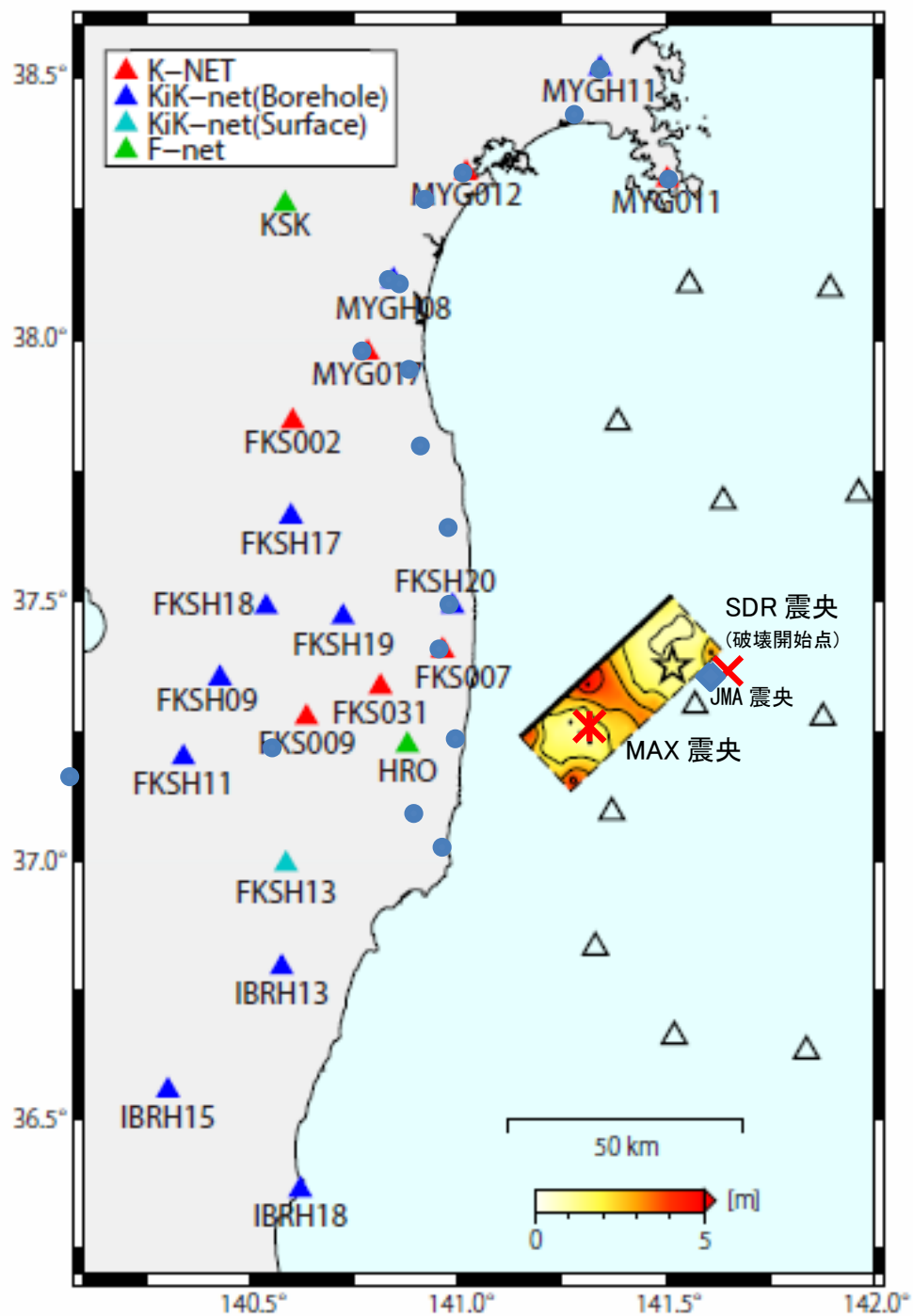


図 5 防災科学技術研究所による震源過程の解析結果と諸推定震央の比較

●印で示した観測点はここで用いた波形が記録された地点。◇印は気象庁による暫定震央、☆印は防災科学技術研究所の推定震源、×印は K-NET8 地点のデータを用いた推定震央(破壊開始点)、* 印はここで推定した主要破壊地点(MAX 震央)を示している。MAX 震源は K-NET と KiK-net 併せて 18 地点の情報を用いた。

表1 分析に使用した各観測点での各種検知時刻と推定震源など(検知時刻などは5時59分からの経過時間で表記)

指定震源														
	N	E	h(km)	震源時										
破壊開始時	Vp	6km/s仮定		5:59:00										
K11points	37.364	141.644	23.4	46.7										
Max震源	Vs	4.0km/s仮定												
K11KK7	37.258	141.318	22.8	65.3										
JMA暫定	37.353	141.603	25	46.8										
自治体観測点														
SITE CODE	47269	47044	47246	47018	47598	47259	47019							
SITE NAME	仙台空港	南相馬市鹿島区柗窪	川内村下川内	古殿町松川横川	いわき市小名浜	常陸太田市野屋町	ひたちなか市山ノ上町							
LAT	38.1379	37.7246	37.3695	37.0909	36.9479	36.614	36.3405							
LON	140.9278	140.8874	140.8712	140.5611	140.9033	140.5653	140.5868							
height(m)														
YMD	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####							
HMS	5:59:50	5:59:50	5:59:40	5:59:50	5:59:50	5:59:50	6:00:00							
p-detect	64.87	59.8	58.13	63	60.86	64.3	69.24							
Rt1.5	71.3	67.9	63.7	69.1	65.1	74.8	84							
Rtmax	96	80.4	76.6	80.6	77	87.5	97							
P-alarm		alarm	alarm	alarm	alarm									
Rt	3.6	3.7	3.5	3.5	4.9	3.0	3.1							
5HzPGA	41	52	60	37	121	36	30							
Me	6.4	6.2	5.7	6.2	7.6	5.3	5.8							
K-NET観測点														
SITE CODE	MYG011	MYG010	MYG012	MYG013	MYG015	MYG017	FKS001	FKS005	FKS007	FKS010	FKS011			
SITE NAME	牡鹿	石巻	塩竈	仙台	岩沼	角田	相馬	原町	大熊	広野	いわき			
LAT	38.3052	38.4292	38.3175	38.2663	38.1049	37.9763	37.7949	37.6385	37.4061	37.2342	37.0911			
LON	141.5044	141.2818	141.0193	140.9293	140.8699	140.7818	140.9196	140.9849	140.9632	141.0016	140.9035			
height(m)	132	2	1.7	5	3	35	9	16	70	50	165.1			
YMD	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####			
HMS	6:00:00	5:59:58	6:00:00	5:59:56	5:59:52	5:59:51	5:59:47	5:59:44	5:59:44	5:59:44	5:59:46			
p-detect	64.48	67.54	66.75	66.79	65.45	63.82	60.33	58.53	57.06	57.59	59.23			
Rt1.5	80.25	81	76.1	78	70	71.9	66.1	63	61.1	62.9	64			
Rtmax	98.7	95.1	98.6	99.8	89.7	87.9	82.8	79.3	75	74.7	77.1			
P-alarm	alarm				alarm	alarm	alarm	alarm	alarm	alarm	alarm			
Rt	2.5	3.7	3.5	3.1	4.4	4.1	4.0	3.9	4.1	4.6	4.4			
5HzPGA	11	33	50	25	96	59	67	77	91	164	89			
Me	5.9	6.8	5.9	6.1	6.8	6.9	6.6	6.1	6.3	6.6	6.9			
KiK-net観測点														
SITE CODE	FKSH14B	FKSH14S	FKSH12B	FKSH12S	FKSH10B	FKSH10S	FKSH20B	FKSH20S	MYGH10B	MYGH10S	MYGH08B	MYGH08S	MYGH11B	MYGH11S
SITE NAME	いわき東	いわき東	平田	平田	西郷	西郷	浪江	浪江	山元	山元	岩沼	岩沼	河北	河北
LAT	37.0264	37.0264	37.2169	37.2169	37.1616	37.1616	37.4911	37.4911	37.9411	37.9411	38.1133	38.1133	38.5158	38.5158
LON	140.9702	140.9702	140.5703	140.5703	140.093	140.093	140.9871	140.9871	140.8924	140.8924	140.8441	140.8441	141.3421	141.3421
height(m)	-144	3	365	470	364.4	364.4	-97	12	-187	18	-90	10	-202.1	5
YMD	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####
HMS	5:59:44	5:59:44	5:59:49	5:59:49	5:59:56	5:59:56	5:59:43	5:59:43	5:59:49	5:59:49	5:59:51	5:59:51	5:59:56	5:59:56
p-detect	59.5	59.6	62.44	62.46	69.14	69.27	57.03	57.1	61.54	62.45	64.91	64.92	68.3	68.7
Rt1.5	63.5	63.1	70.65	66.9	80.6	75.8	62.9	60.6	71.1	69.3	79.1	76.4	94	86.7
Rtmax	74	78	81.2	81.2	93.4	98	74.1	78	90.3	88	91.6	89.6	97.4	96.3
P-alarm	p-alarm	p-alarm	p-alarm	p-alarm		p-alarm	p-alarm	p-alarm		p-alarm				
Rt	4.3	5.3	3.1	4.4	3.0	4.0	3.4	4.4	3.1	3.8	2.8	3.3	1.9	2.6
5HzPGA	68	235	19	155	19	104	27	112	21	66	13	33	6	24
Me	7.1	7.5	6.4	6.2	6.2	6.0	6.5	6.7	6.3	6.2	6.2	6.1	5.6	5