

パーティクルフィルタを用いた 統合震源決定手法 (Integrated Particle Filter法: IPF法)

本手法は、内閣府の最先端・次世代研究開発支援プログラムに採択された「東南海・南海地震に対応した正確な地震情報を提供する実用的早期警報システムの構築」(代表:京都大学防災研究所 山田真澄助教)の成果の一つです。

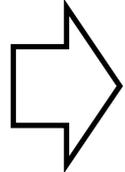
IPF法の概念図

これまでの手法

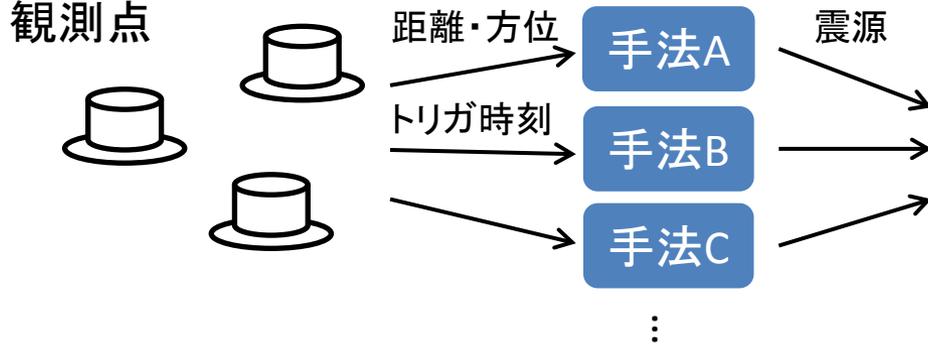
P, S読み取り時刻
振幅(マグニチュード)
過去の震源分布
ボロノイ分割, B-Δ法など
を各々の手法で利用

今回の手法

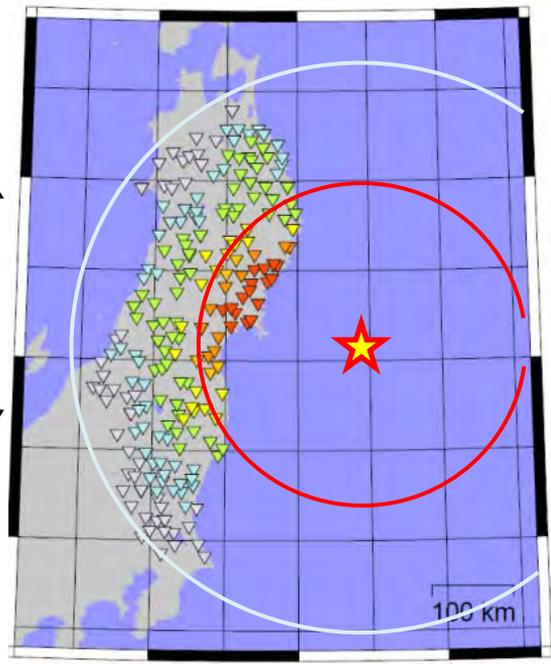
P読み取り時刻
未着情報(ボロノイ分割含む)
振幅(マグニチュード)
B-Δ法
を統合する



観測点



観測点



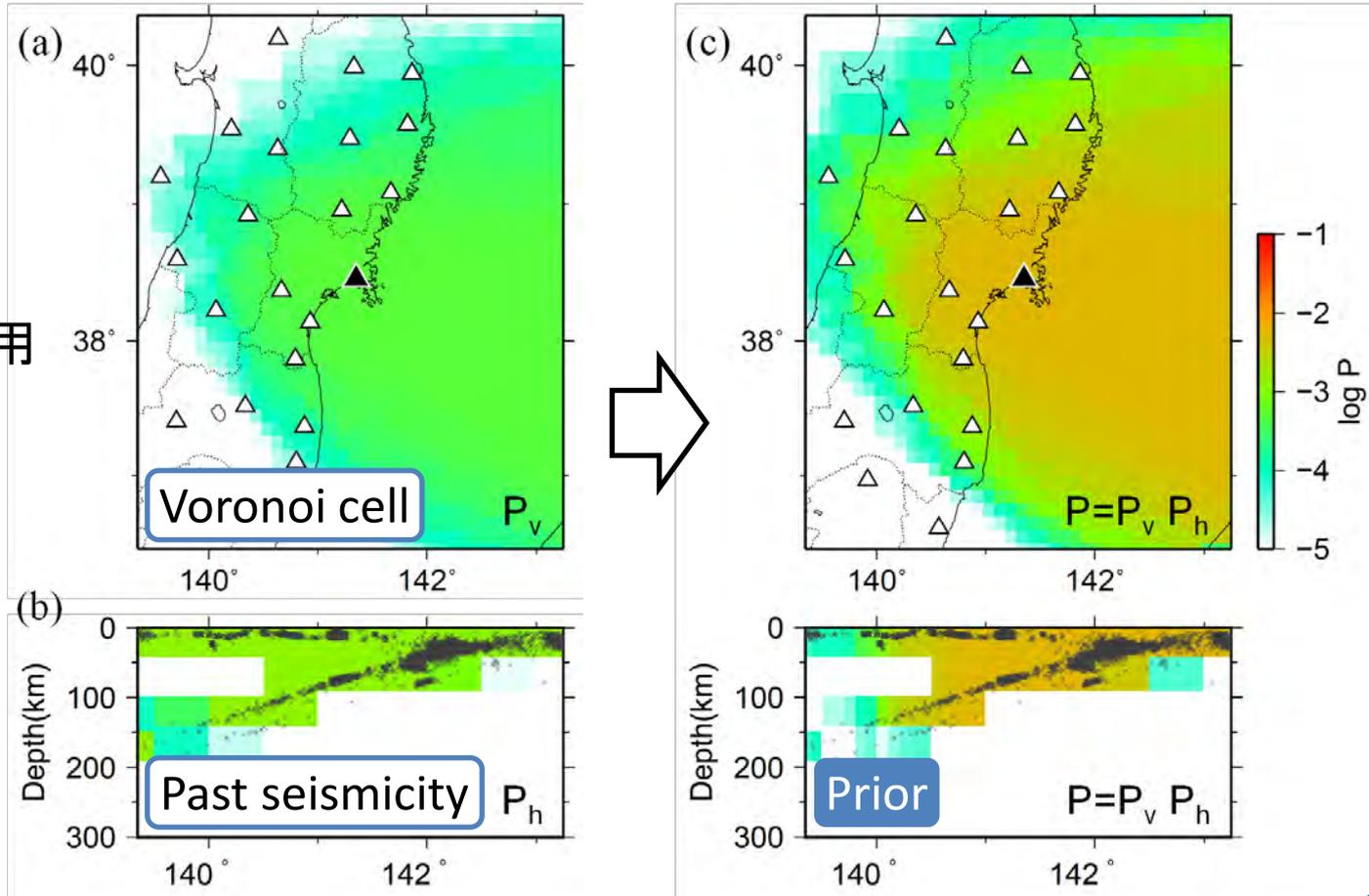
ベイズの定理

$$p(\theta | \mathbf{D}) = \frac{\text{尤度関数 } p(\mathbf{D} | \theta) \times \text{事前確率 } p(\theta)}{p(\mathbf{D}) \text{ 定数}}$$

D: 観測値
 θ : 震源

事前確率

過去の震源分布
 ×
 ボロノイ分割の応用
 (テリトリー法)



※ 上図は深さ10kmの水平断面図、下図はトリガ観測点を含む鉛直断面図。

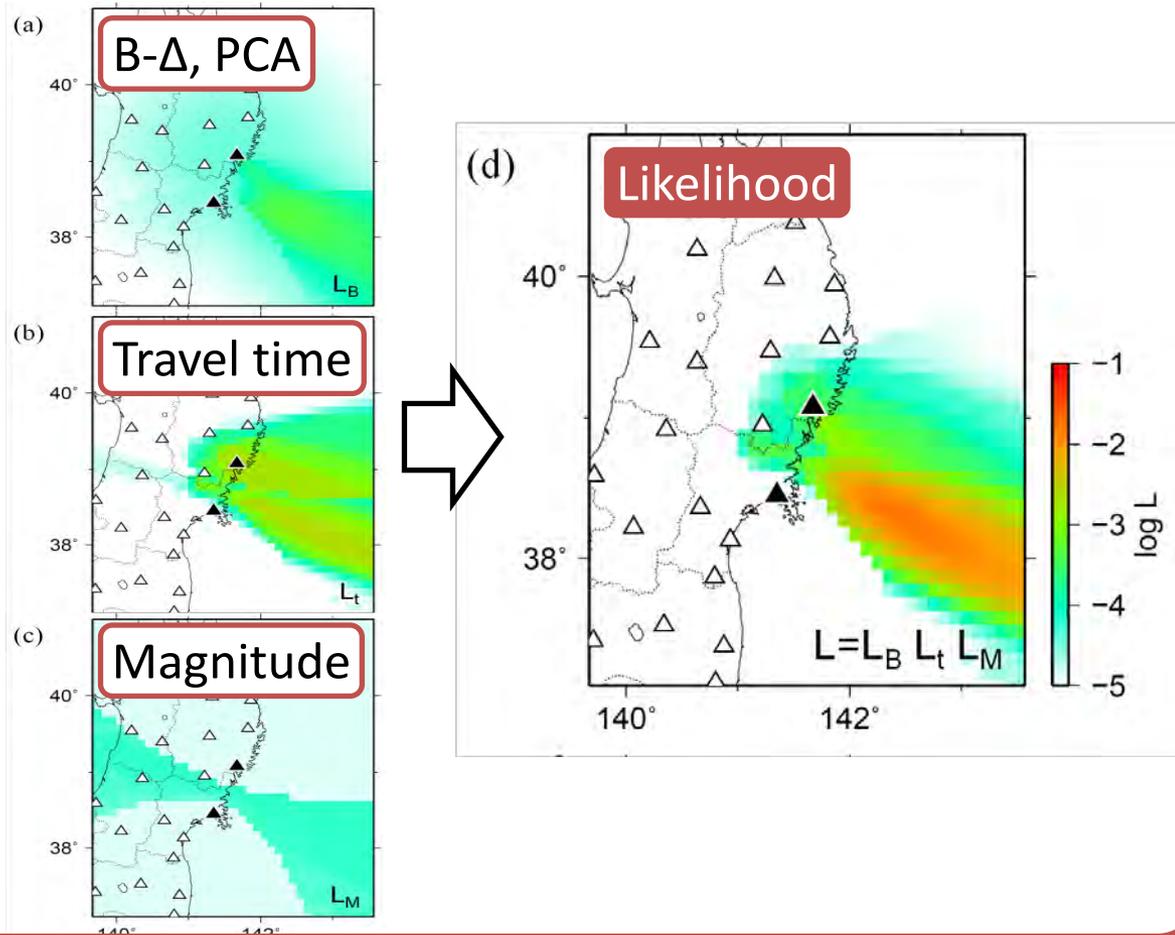
ベイズの定理

$$p(\theta | \mathbf{D}) = \frac{\text{事後確率} \quad \text{尤度関数} \quad p(\mathbf{D} | \theta) \times \text{事前確率} \quad p(\theta)}{p(\mathbf{D}) \quad \text{定数}}$$

D: 観測値
 θ : 震源

尤度関数

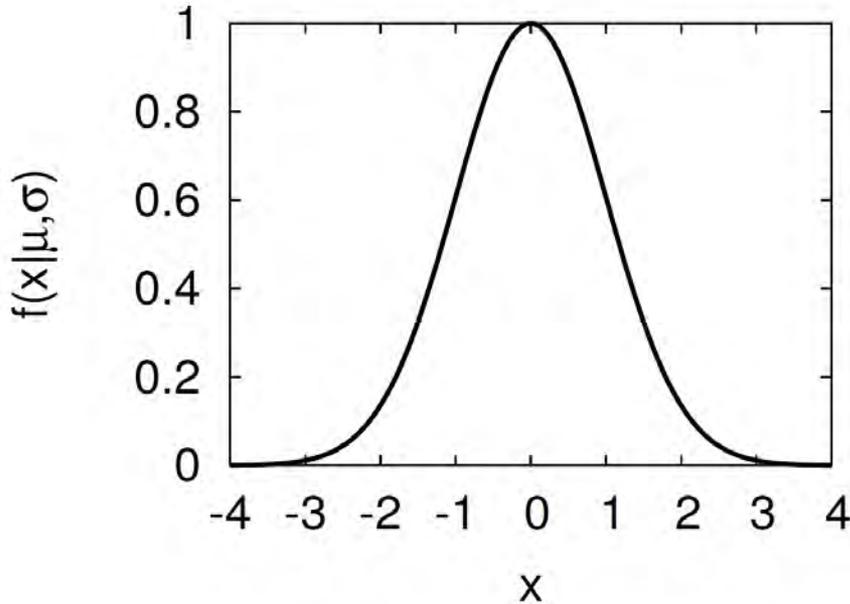
B- Δ 法による震央距離
×
主成分分析による震源方位
×
走時残差
×
観測点Mのばらつき



※ 図は深さ10kmの水平断面図。

尤度関数

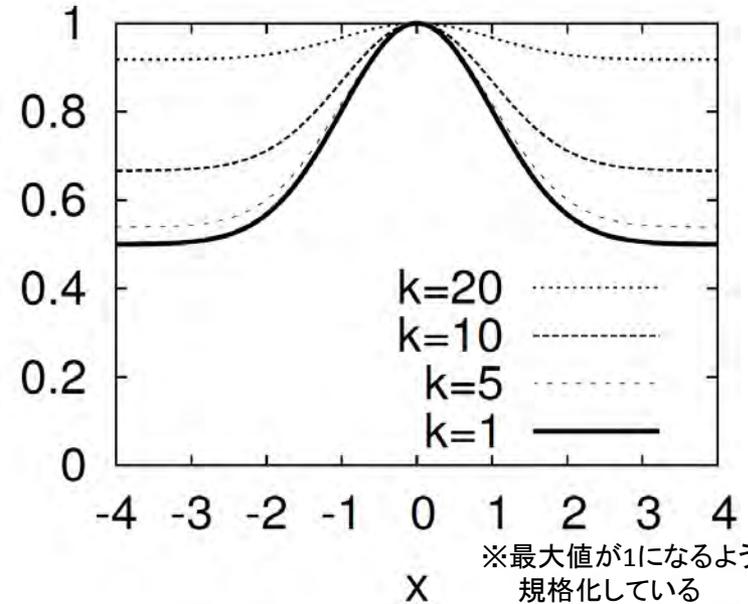
kは震源から何番目に近いかを示す。



$$f(x|\mu,\sigma) = \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}$$



$g(x|\mu,\sigma,k)$



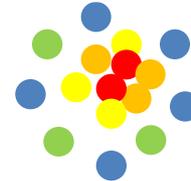
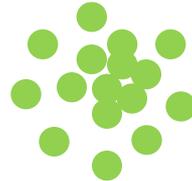
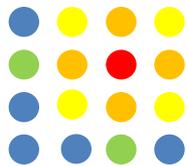
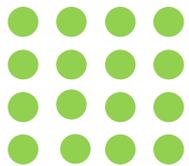
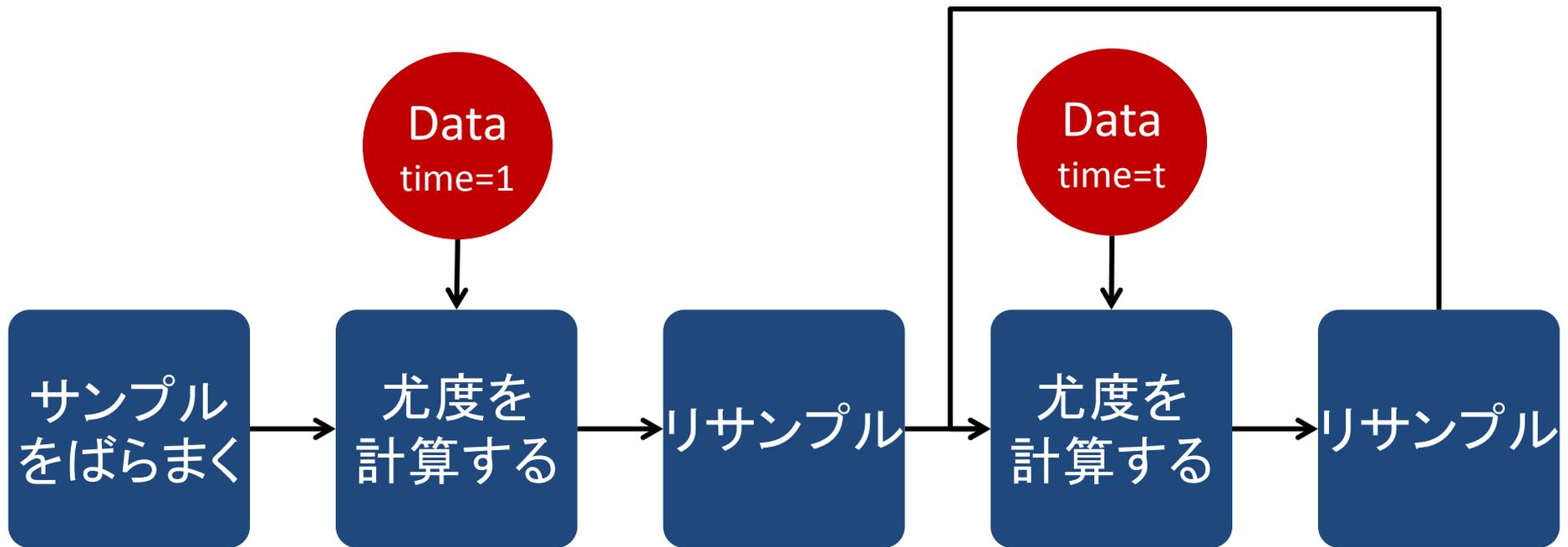
※最大値が1になるように規格化している

$$g(x|\mu,\sigma,k) = (1 - g_0(k))f(x|\mu,\sigma) + g_0(k)$$

$$g_0(k) = 1 - \frac{1}{2} \exp\left\{-\frac{(k-1)^2}{2c^2}\right\} \quad c=10と設定.$$

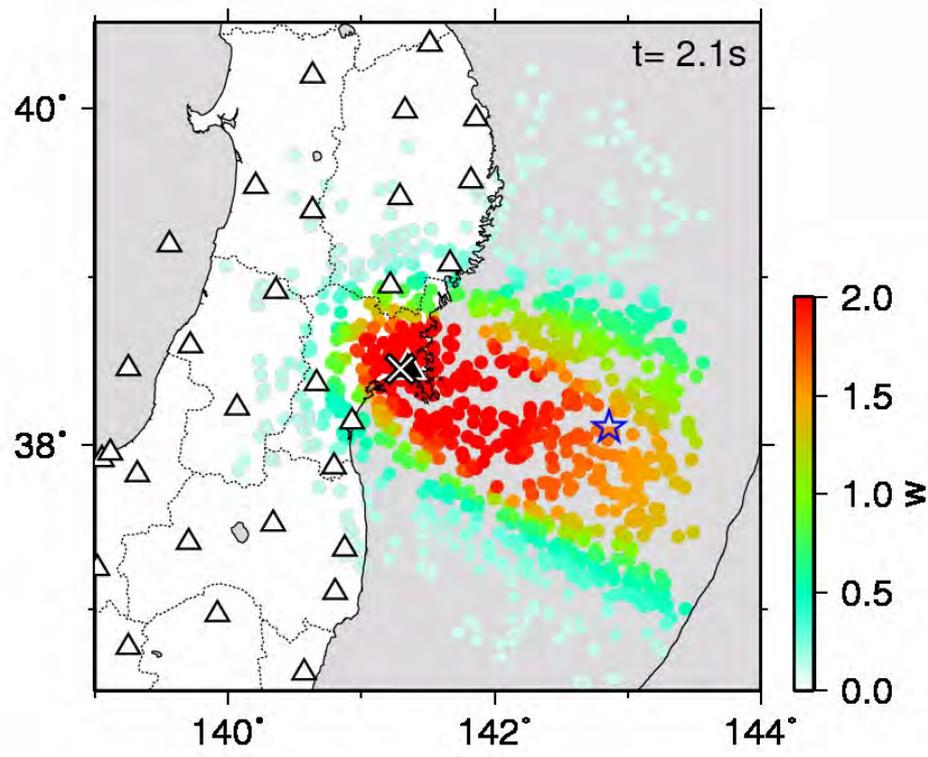
	x (観測データ)	μ (モデル: 震源を仮定)	σ (標準偏差)
B-Δ法	B-Δ法で推定された震央距離	震央距離	100km
主成分分析	主成分分析で推定された震源方位	震源方位	20°
走時残差	P波検測時刻 (震源近傍5地点かつ未トリガの場合、) 処理時点における時刻	P波理論走時	1.5秒
最大振幅	検測時刻から5秒間の速度M	速度Mの中央値	0.7

最尤値探索の効率化 (パーティクルフィルタ)

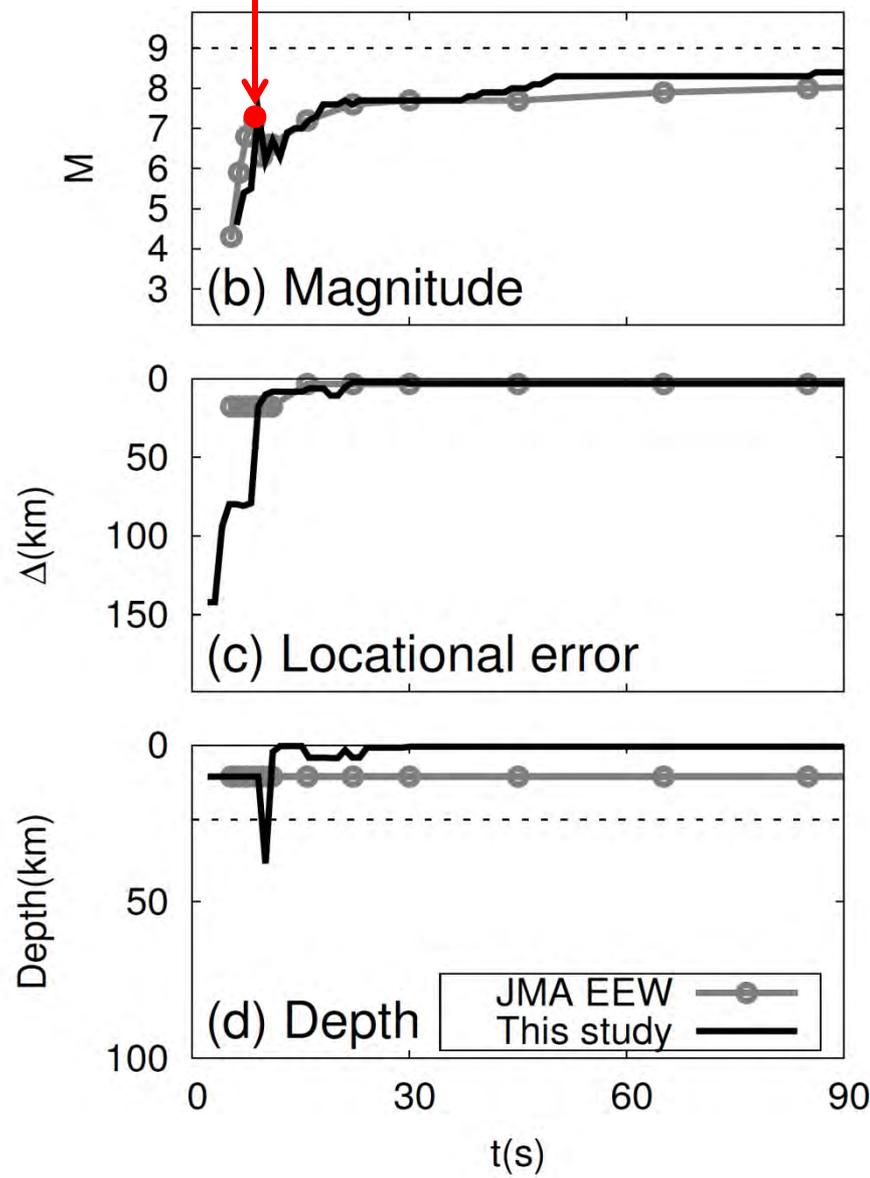


事例：東北地方太平洋沖地震

警報発表

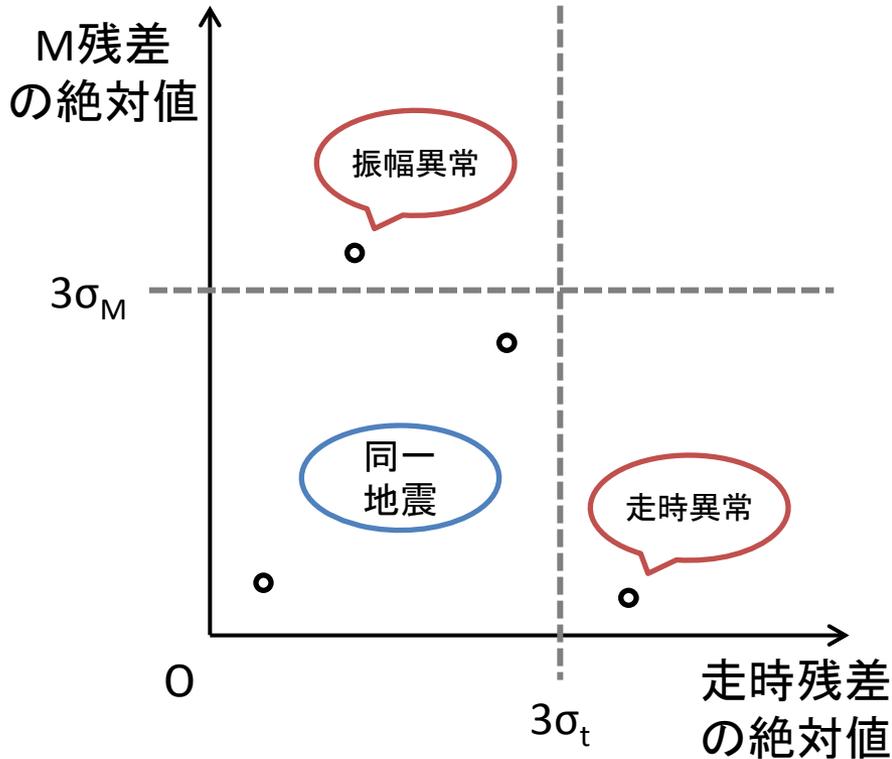


Trigger Time:2011/03/11 14:46:40.23
Now Time:2011/03/11 14:46:42.35

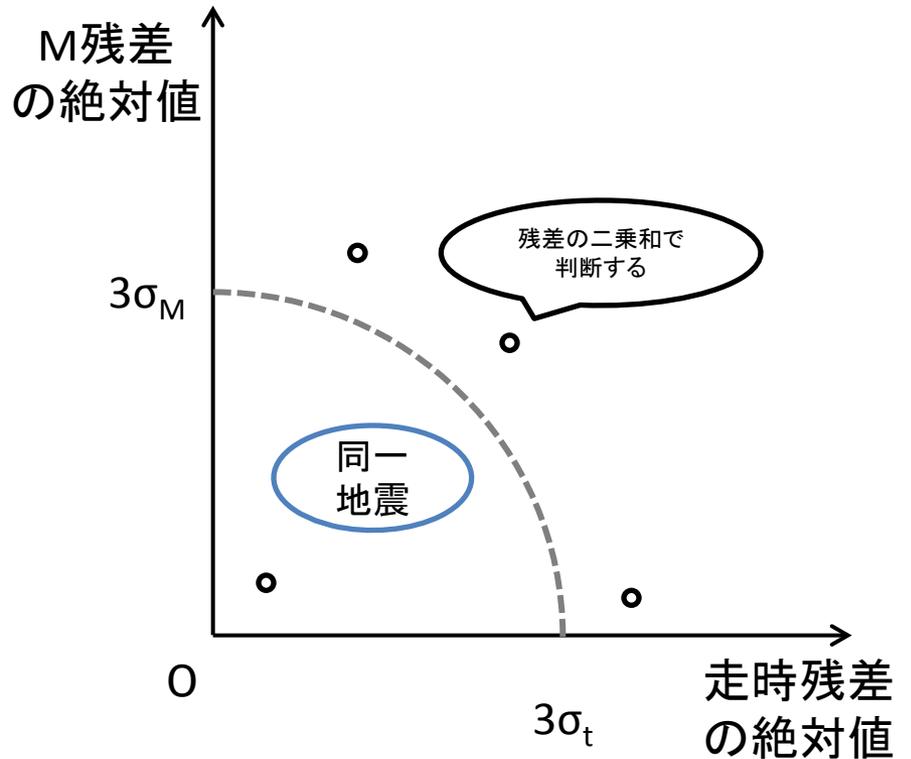


同一地震判定

それぞれに閾値を設ける場合

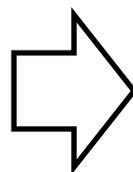
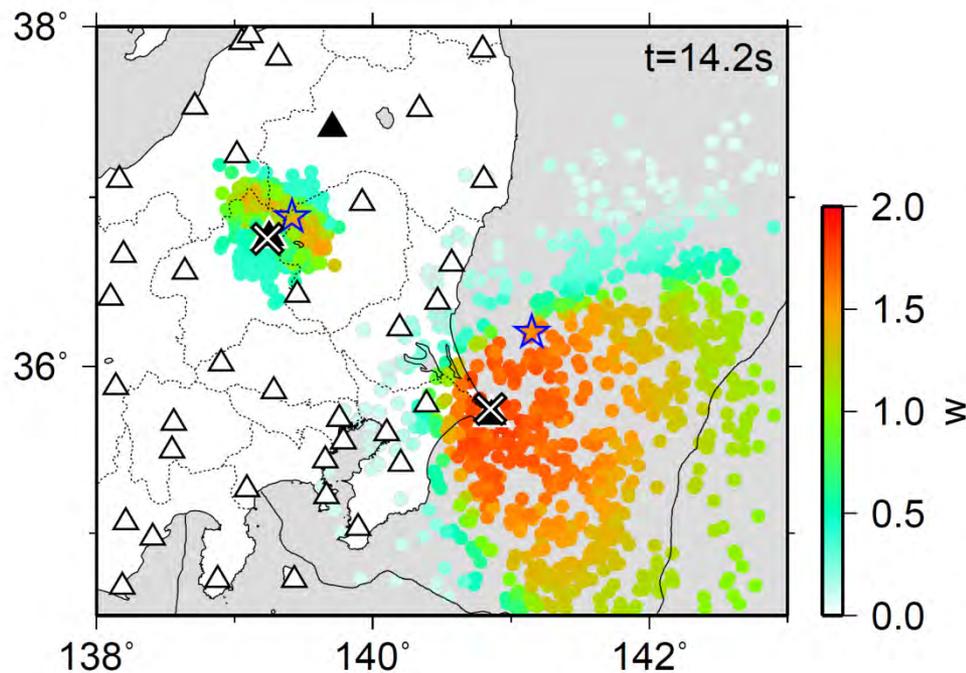
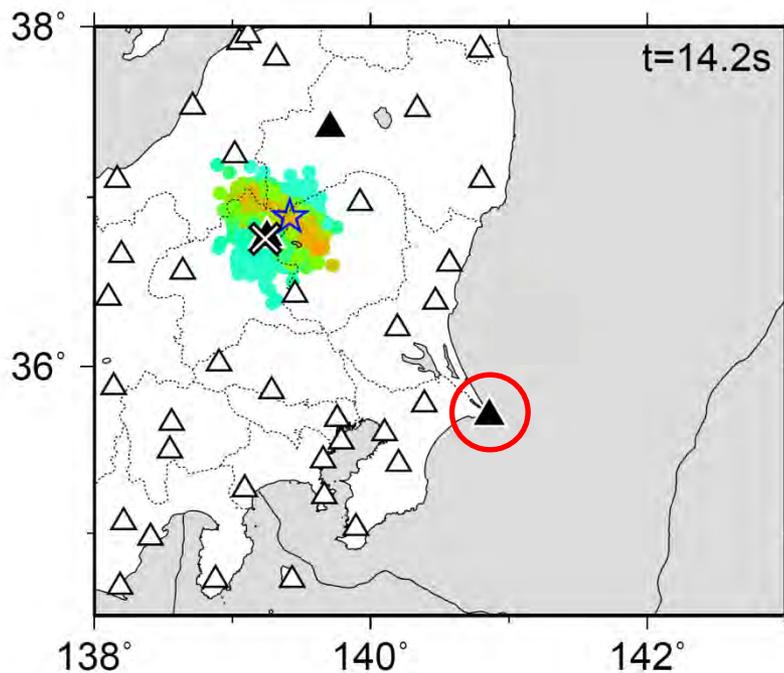


尤度関数の掛け合わせの場合



従来手法は、トリガ時刻(走時残差や見かけ速度)を用いた判定を行っていた。
今回提案するIPF法では、上記の判定に加え、最大振幅を統合的に考慮する。

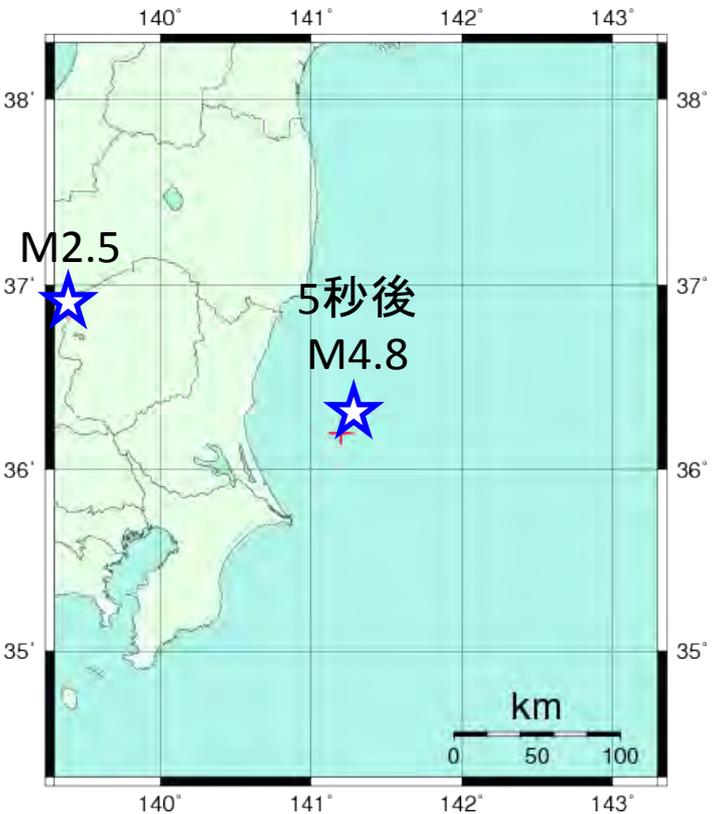
複数の地震が発生した場合（同一地震判定）



トリガ時刻, Mが条件の範囲外の場合,
新たな地震の発生と認識

事例：2011年3月19日（2つの地震が発生した例）

Date	Time	Epicenter	Lat.	Lon.	Dep.	Mag.	Max I.
2011/03/19	06:18:48	NW Gunma Pref.	36.9	139.4	10km	2.5	1
	06:18:53	E Off Ibaraki Pref.	36.2	141.2	40km	4.8	2

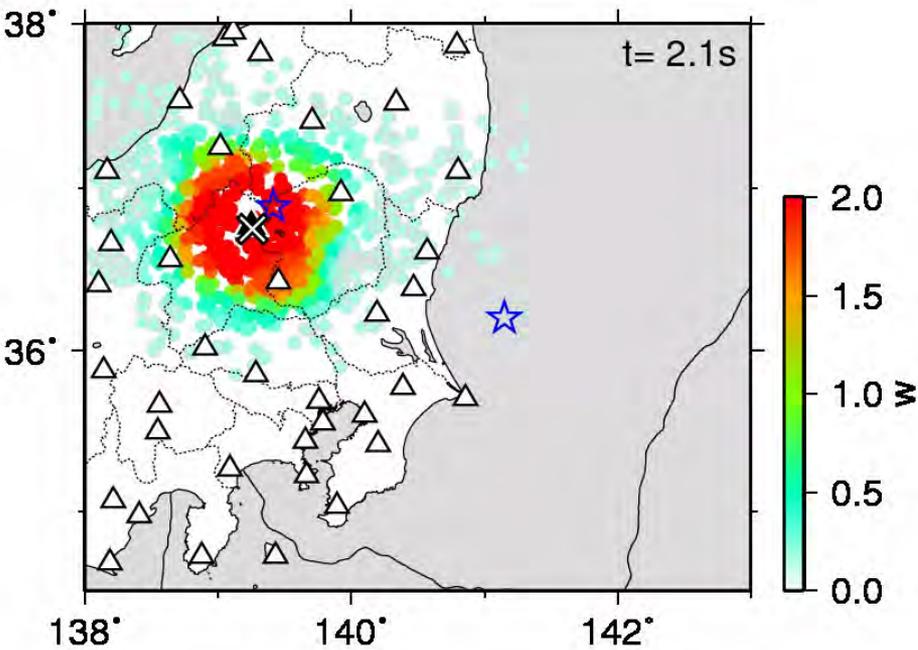


提供時刻等		震源要素等					予測震度
		地震波検知からの経過時間(秒)	震源要素				
			北緯	東経	深さ	マグニチュード ¹⁾	
地震波検知時刻	06時18分52.1秒	—	—	—	—	—	—
1	06時19分22.1秒	30.0	36.9	139.4	10km	5.8	※1
2	06時19分22.4秒	30.3	36.9	139.4	10km	5.8	※2
3	06時19分31.6秒	39.5	36.9	139.4	10km	5.3	※3
4	06時19分42.1秒	50.0	36.2	141.2	20km	4.7	最大震度 3程度以上と推定
5	06時19分53.4秒	61.3	36.2	141.2	20km	4.7	最大震度 3程度以上と推定

- ※1 震度4から5弱程度 栃木県北部
震度4程度 福島県会津、群馬県北部、群馬県南部、栃木県南部
震度3から4程度 新潟県中越
- ※2 震度4から5弱程度 栃木県北部
震度4程度 福島県会津、群馬県北部、群馬県南部、栃木県南部
震度3から4程度 新潟県中越
- ※3 震度4程度 栃木県北部、福島県会津、群馬県北部

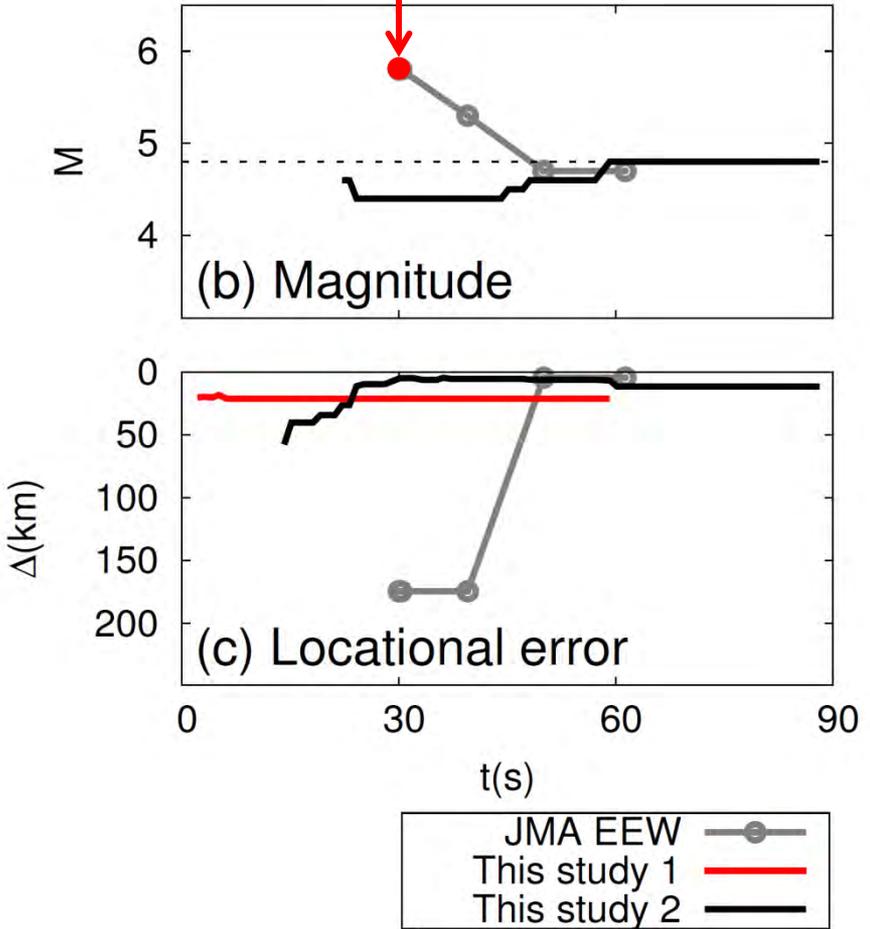
※ 地震波検知から30秒後に警報発表(第1報)

事例：2011年3月19日（2つの地震が発生した例）



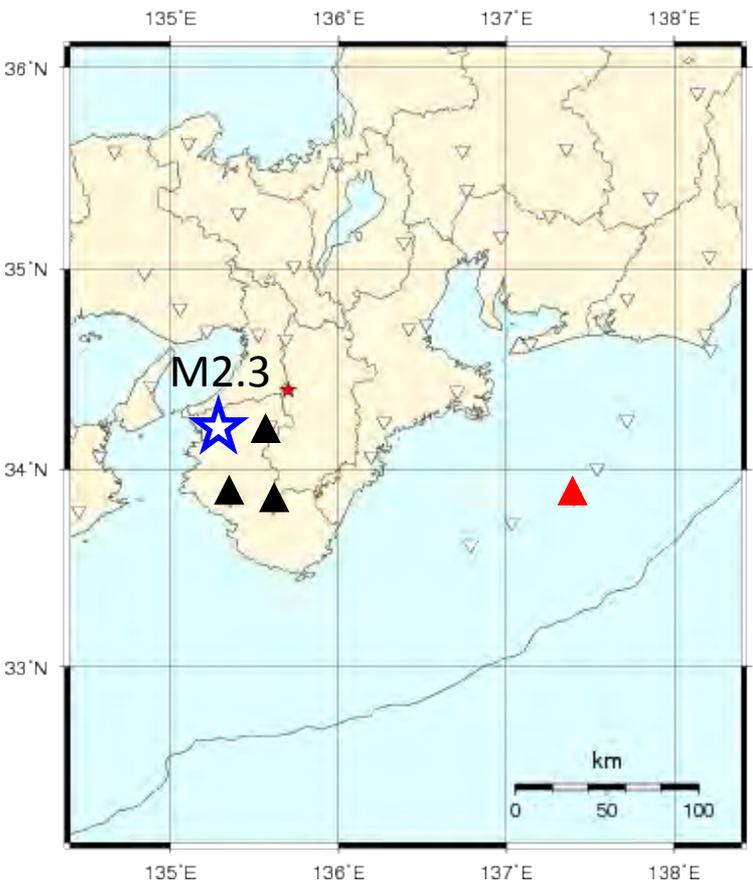
Trigger Time:2011/03/19 06:18:52.13
 Now Time:2011/03/19 06:18:54.28

警報発表



事例：2013年8月8日（地震とノイズが混在した例）

Date	Time	Epicenter	Lat.	Lon.	Dep.	Mag.	Max I.
2013/08/08	16:46:04	Wakayama Pref.	34.2	135.8	10km	2.3	-

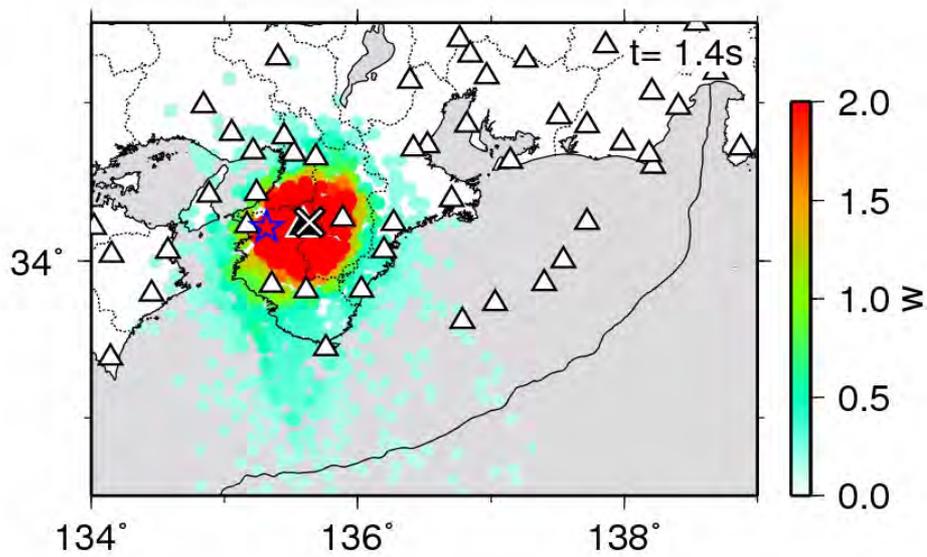


提供時刻等		震源要素等					予測震度
		地震波検知からの経過時間(秒)	震源要素				
北緯	東経		深さ	マグニチュード ¹⁾			
地震波検知時刻	16時56分8.6秒	—	—	—	—	—	—
1	16時56分27.1秒	18.5	34.4	135.7	60km	7.8	※1
2	16時56分37.3秒	28.7	34.4	135.7	60km	7.8	※1
3	16時56分38.2秒	29.6	34.4	135.7	60km	7.8	※1
4	16時56分45.7秒	37.1	34.4	135.7	60km	7.8	※1
5	16時56分56.1秒	47.5	34.4	135.7	60km	7.8	※1
6	16時57分02.2秒	53.6	34.4	135.7	60km	6.8	※2
7	16時57分14.7秒	66.1	34.4	135.7	60km	6.8	※2

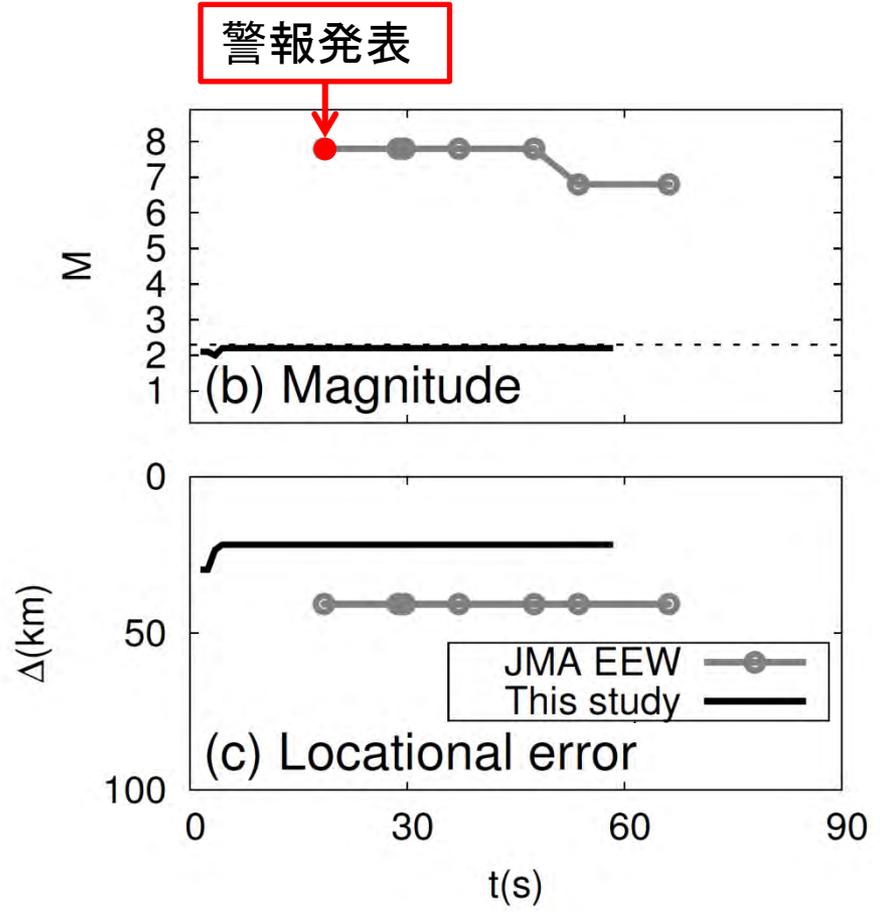
- ※1 震度6弱から7程度 奈良県、大阪府南部、大阪府北部
- 震度6弱から6強程度 和歌山県北部、京都府南部、兵庫県南東部、三重県中部、三重県南部、滋賀県南部
- 震度6弱程度 香川県東部
- 震度5強から6弱程度 和歌山県南部、兵庫県淡路島、三重県北部、徳島県北部、徳島県南部、滋賀県北部、京都府北部、兵庫県南西部、愛知県西部、岡山県南部
- 震度5強程度 福井県嶺南
- 震度5弱から5強程度 兵庫県北部、岐阜県美濃中西部、愛知県東部、香川県西部、高知県東部
- 震度5弱程度 岡山県北部、岐阜県美濃東部、鳥取県東部、福井県嶺北、静岡県西部、鳥取県中部、石川県加賀、愛媛県東予、鳥取県西部、広島県南西部
- 震度4から5弱程度 岐阜県飛騨、長野県南部、広島県南東部、高知県中部、静岡県中部、島根県東部、石川県能登
- 震度4程度 高知県西部、広島県北部、愛媛県中予、富山県東部、静岡県東部、長野県中部、山梨県中・西部、静岡県伊豆、島根県隠岐、富山県西部、長野県北部、山梨県東部、富士五湖、山口県東部、神津島、新島、愛媛県南予、神奈川県西部、伊豆大島、神奈川県東部、島根県西部、群馬県南部、大分県北部、大分県南部、山口県中部、新潟県上越、新潟県中越、埼玉県北部、埼玉県南部

※ 地震波検知から18.5秒後に警報発表(第1報)

事例：2013年8月8日（地震とノイズが混在した例）



Trigger Time:2013/08/08 16:56:08.64
 Now Time:2013/08/08 16:56:10.06



Conclusion

ベイズ推定を用いて、複数のデータ・手法を結合したアルゴリズムを開発した。

トリガ時刻と振幅を使用し、震源の不確定性を考慮した識別アルゴリズムを開発した。

その結果、いくつかの事例で同時多発地震の識別が可能となり、緊急地震速報の精度向上が期待できる。