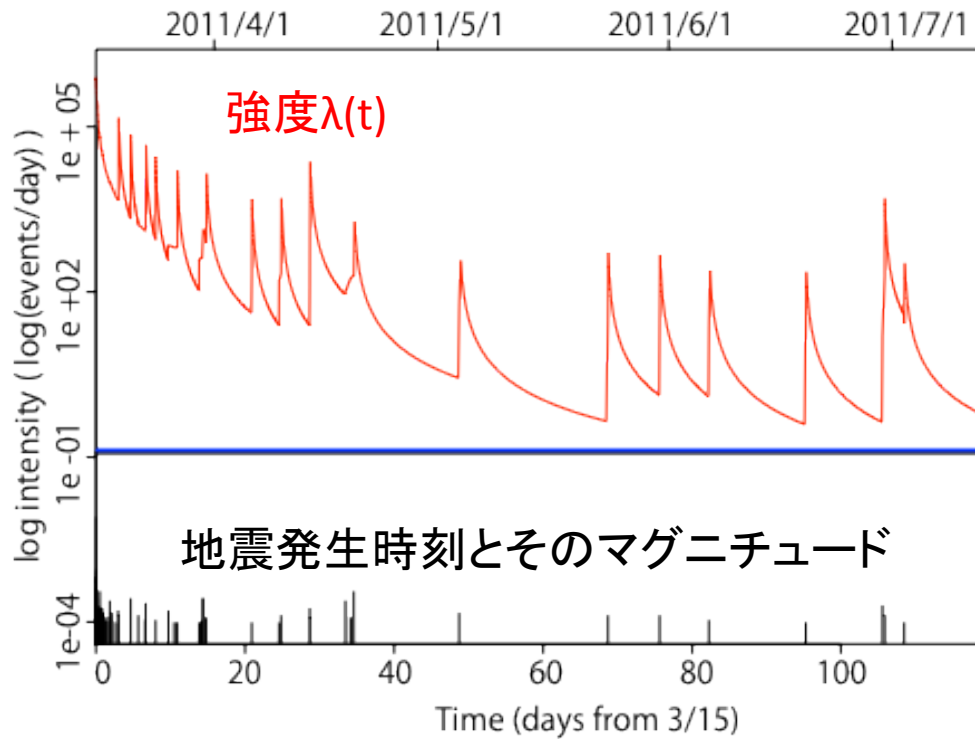


# ETASの逸脱からの地震活動異常の推定 (変化点の視点から)

熊澤貴雄(総研大)

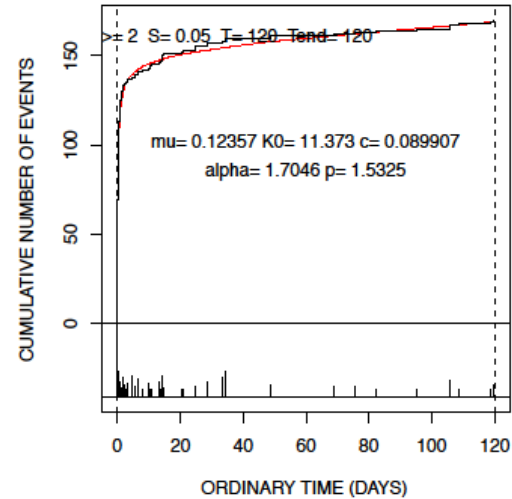
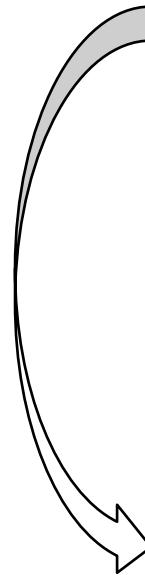
ETASモデル:  $\lambda(t) = \mu + \sum_{i; t_i < t} K_i (t - t_i + c)^{-p}$ ,  $K_i = K \exp\{-\alpha(M_i - M_z)\}$



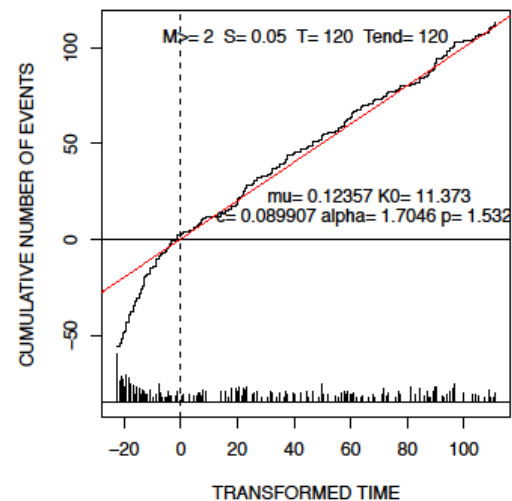
$$\text{ETASモデル: } \lambda(t) = \mu + \sum_{i; t_i < t} K_i (t - t_i + c)^{-p}, \quad K_i = K \exp\{-\alpha(M_i - M_z)\}$$

通常時間  $t$  から残差時間  $\tau$  (タウ) に時間変換

$$\tau = \Lambda_{\hat{\theta}}(S, t) = \int_S^t \lambda_{\hat{\theta}}(u) du$$



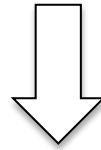
Residual Point Process



$$\text{ETASモデル: } \lambda(t) = \mu + \sum_{i; t_i < t} K_i (t - t_i + c)^{-p}, \quad K_i = K \exp\{-\alpha(M_i - M_z)\}$$

## モチベーション

ETASモデルは簡単な仮定の下に、少数のパラメータで地震の性質を精度良く記述する点過程モデルである。



ETASモデルによる推定が観測値から外れる場合、基となる仮定を見直す必要がある。

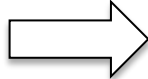
$$\text{ETASモデル: } \lambda(t) = \mu + \sum_{i; t_i < t} K_i (t - t_i + c)^{-p}, \quad K_i = K \exp\{-\alpha(M_i - M_z)\}$$

## ETASモデルの仮定

1. パラメータは考慮するエリアで一定

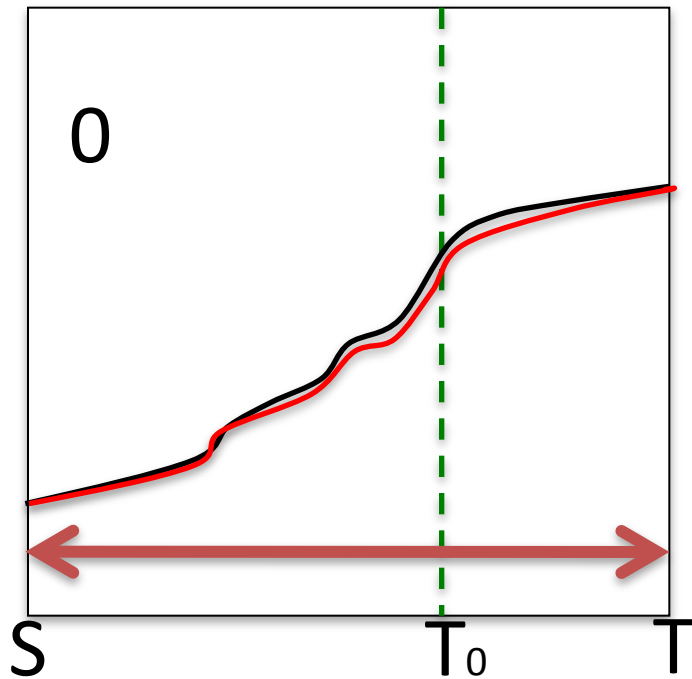
緩めると  時空間ETAS

2. 5つのパラメータ( $\mu, K, c, \alpha, p$ )は時間的に不変

 以下これについて考える

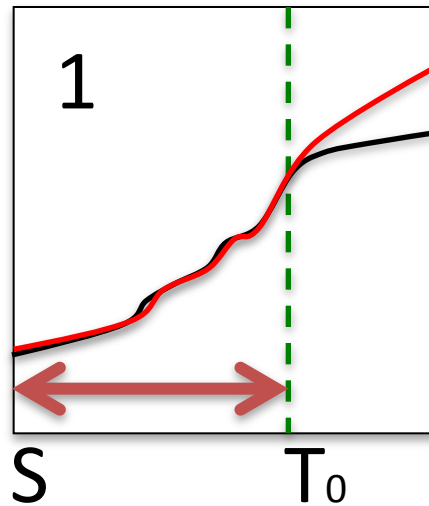
(全データが同一パターンの地震活動をしていると仮定される。)

# 変化点を含むETASモデル



$H_0$

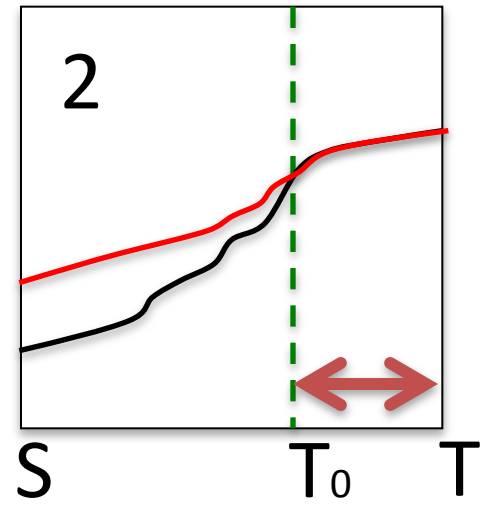
$$AIC_0 = -2 \max_{\theta_0} \ln L(\theta_0; S, T) + 2k_0$$



$H_1$

$$AIC_1 = -2 \max_{\theta_1} \ln L(\theta_1; S, T_0) + 2k_1$$

$$AIC_2 = -2 \max_{\theta_2} \ln L(\theta_2; T_0, T) + 2k_2$$



+

Compare  $AIC_0$  with  $AIC_{12} = AIC_1 + AIC_2 + 2q$

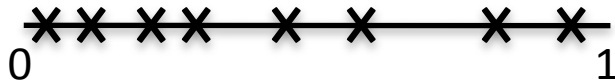
where  $q$  is the degree of freedom for a change - point

# 変化点の自由度

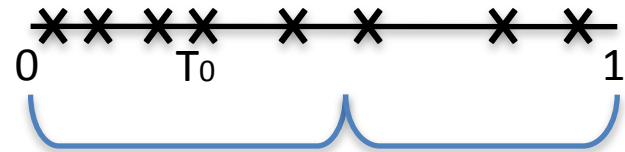
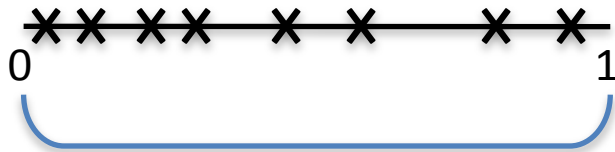
$$AIC_{12} = AIC_1 + AIC_2 + 2q(N) \leftarrow \text{イベント数}N\text{に依存}$$

Monte Carlo simulation (Ogata 1992, 1999)

1. 一様分布 $[0,1]$ から $N$ 個の点を生成する.



2. 定常ポアソンの強度を $[0,1]$ の期間と (H0), 二つの期間  $[0, T_0], (T_0, 1]$ で別個に(H1)推定する.

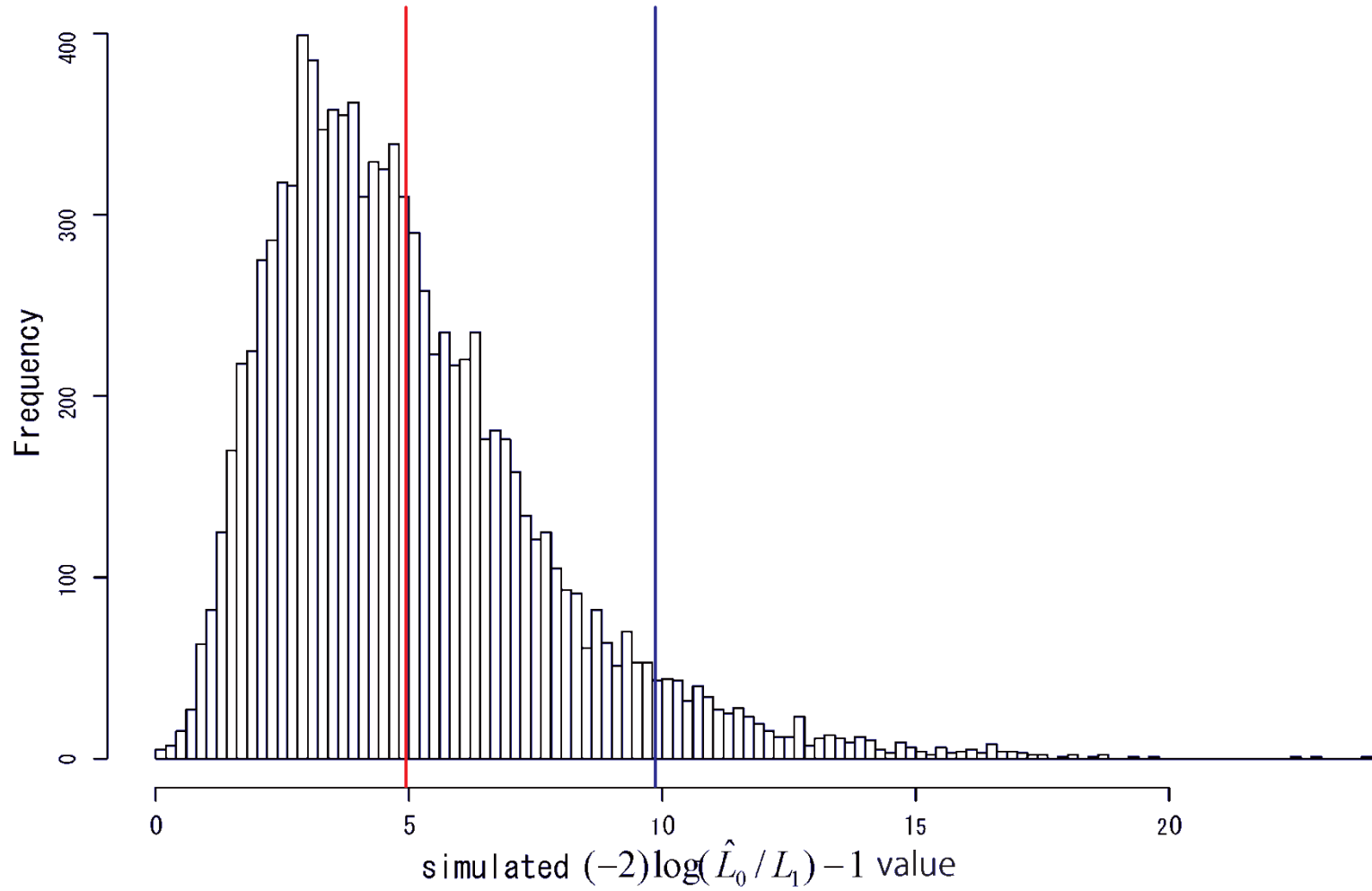


3. 対数尤度比から自由度を得る。

$$(-2) \log \left( \hat{L}_0 / \hat{L}_1 \right) = 2 \max_{0 < T_0 < 1} \left[ N_{T_0} \log \frac{N_{T_0}}{T_0} + \{ N_1 - N_{T_0} \} \log \frac{N_1 - N_{T_0}}{1 - T_0} \right] - 2N_1 \log N_1,$$

where  $N_t = N[0, t]$

Histogram of simulated  $(-2)\log(\hat{L}_0/L_1) - 1$



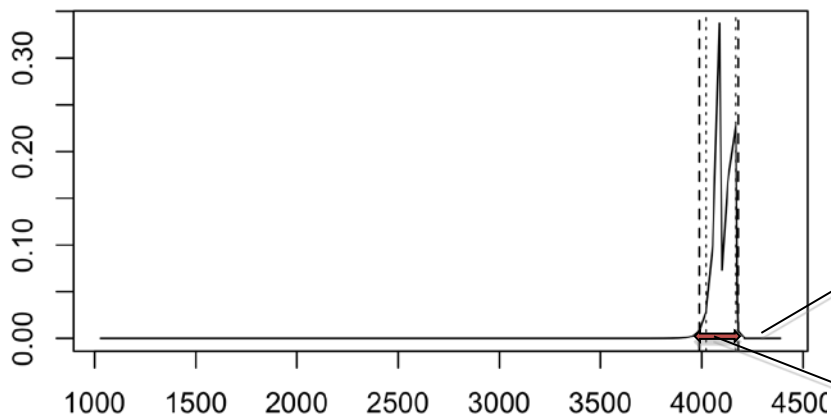
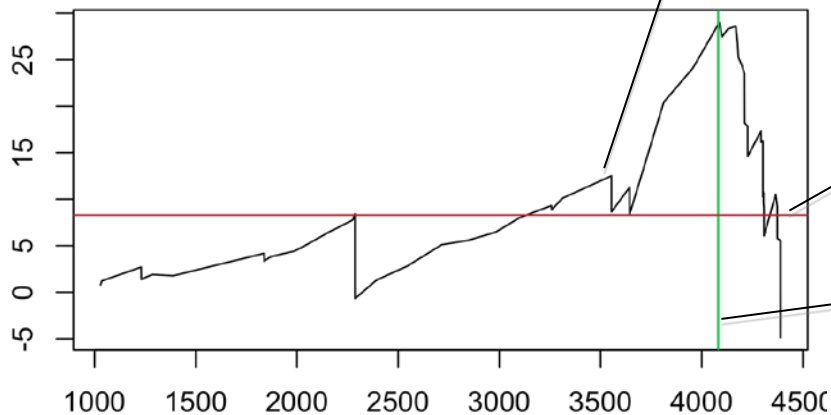


全期間で推定したAICから、各イベント間それぞれに変化点を設定して推定したAICの和を引いたもの

$$AIC_0 - (AIC_1 + AIC_2)$$

変化点選択のペナルティ  $2q$

差の最大点を最適(或いは most likely)変化点とする



$$\exp\{-(\Delta AIC)/2\}$$

AIC差を尤度に変換

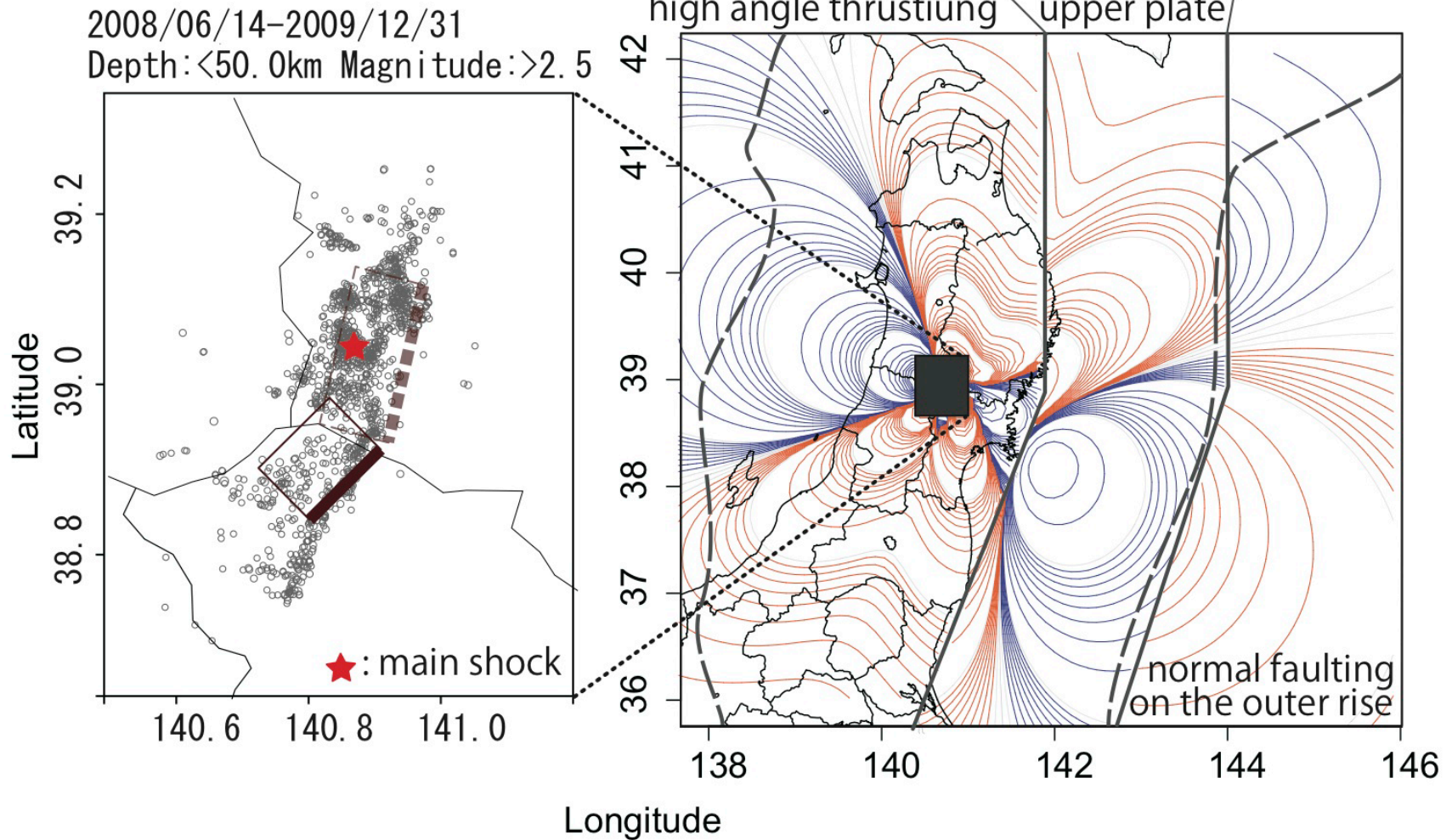
エラーバー

# 2008年岩手宮城内陸部地震

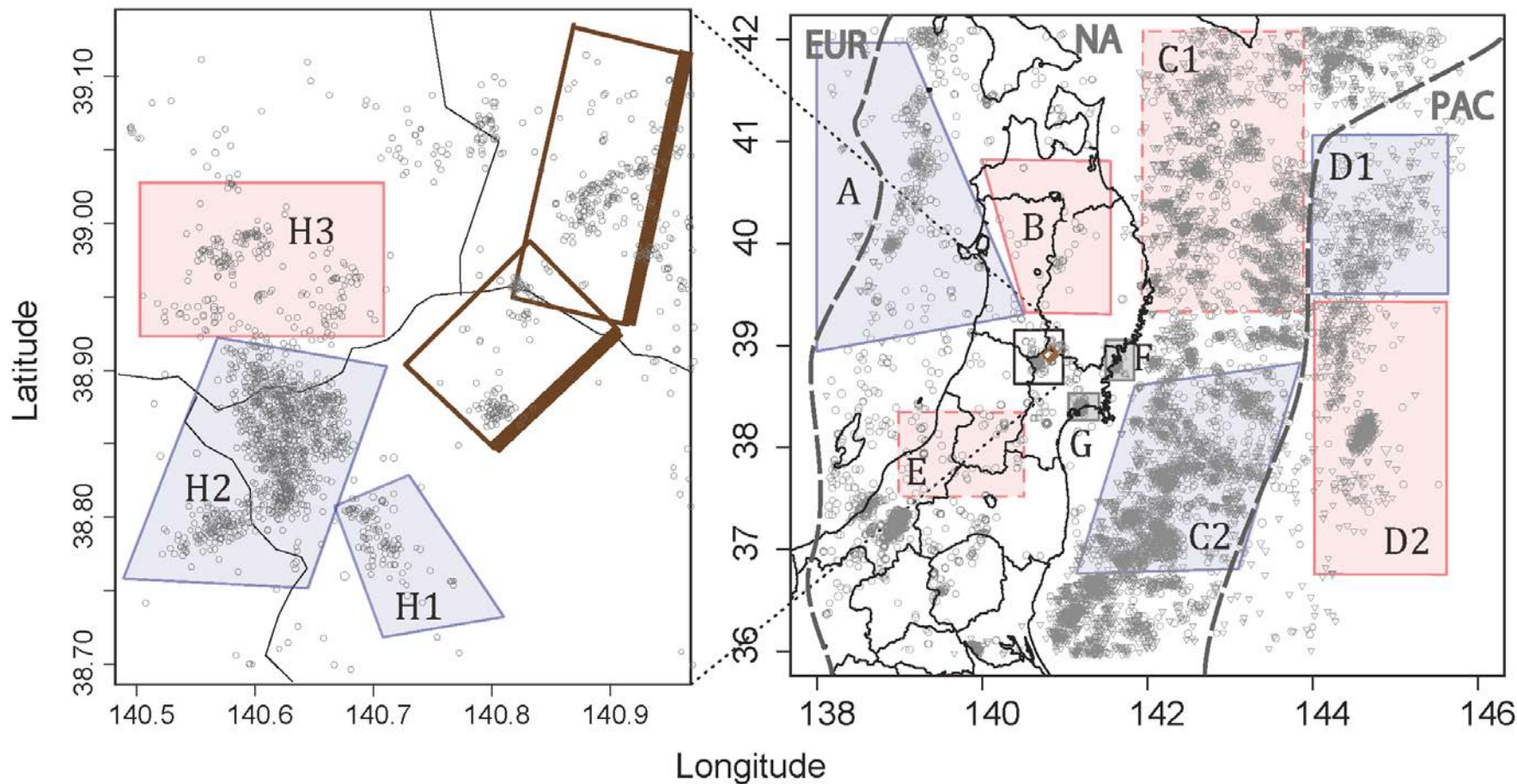
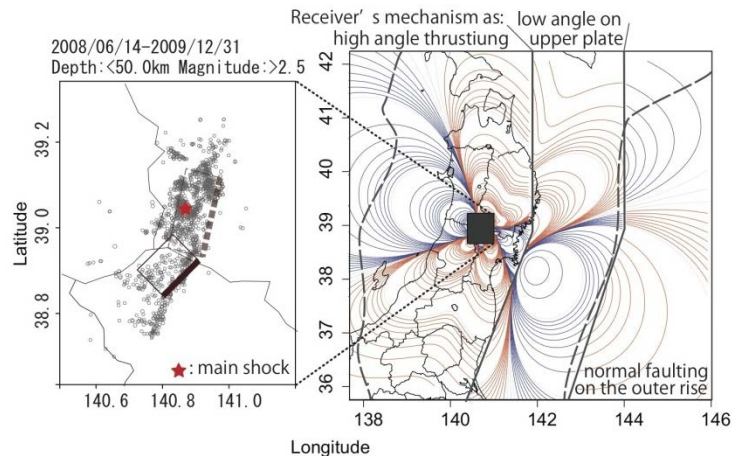
The mechanism  
(Ohta et. al. 2008)

	<i>longitude</i> (east)	<i>latitude</i> (north)	<i>depth</i> (km)	<i>length</i> (km)	<i>width</i> (km)	<i>strike</i> (deg.)	<i>dip</i> (deg.)	<i>rake</i> (deg.)	<i>slip</i> (m)
Northern	140.979	39.109	0.46	20.57	12.06	195.2	44.9	105.5	1.83
Southern	140.907	38.927	0.4	12.57	10.1	225.3	25	80.9	3.53

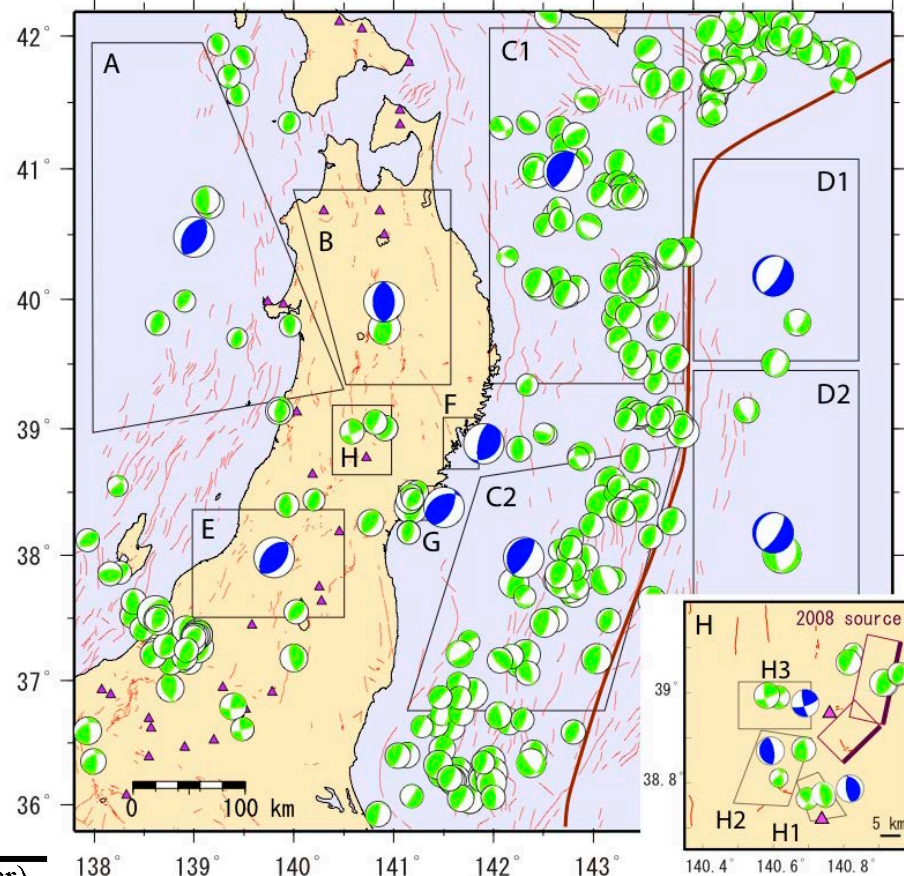
Receiver' s mechanism as: low angle on high angle thrusting upper plate



# 地域の選択

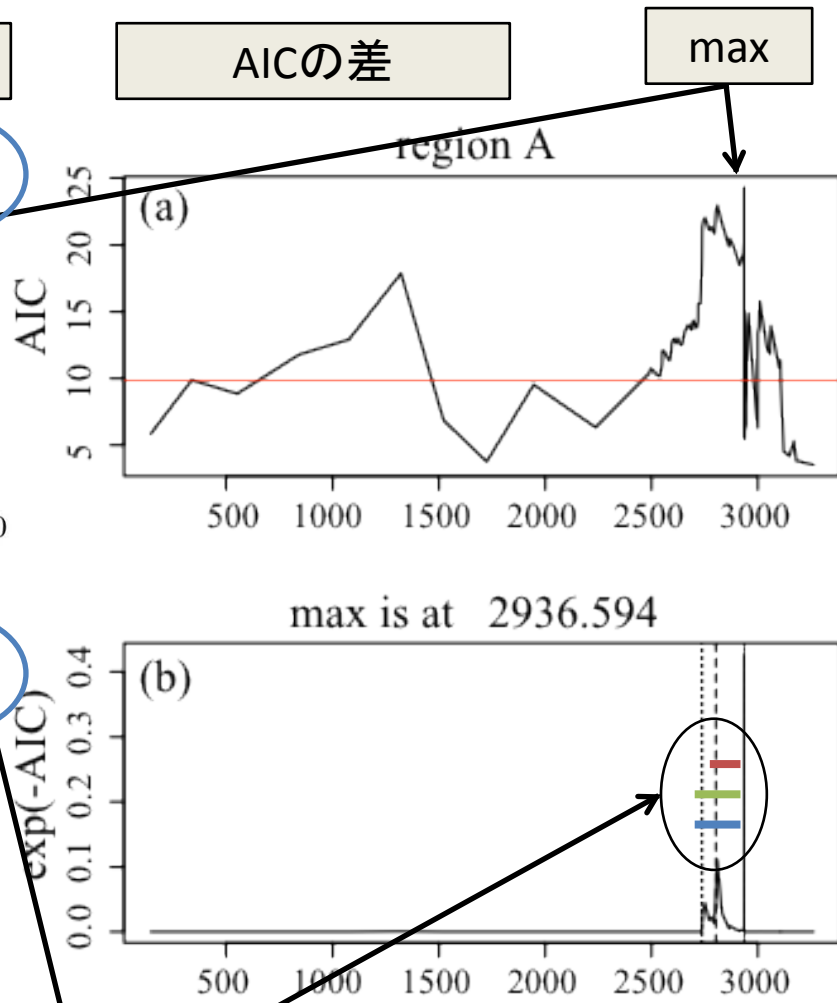
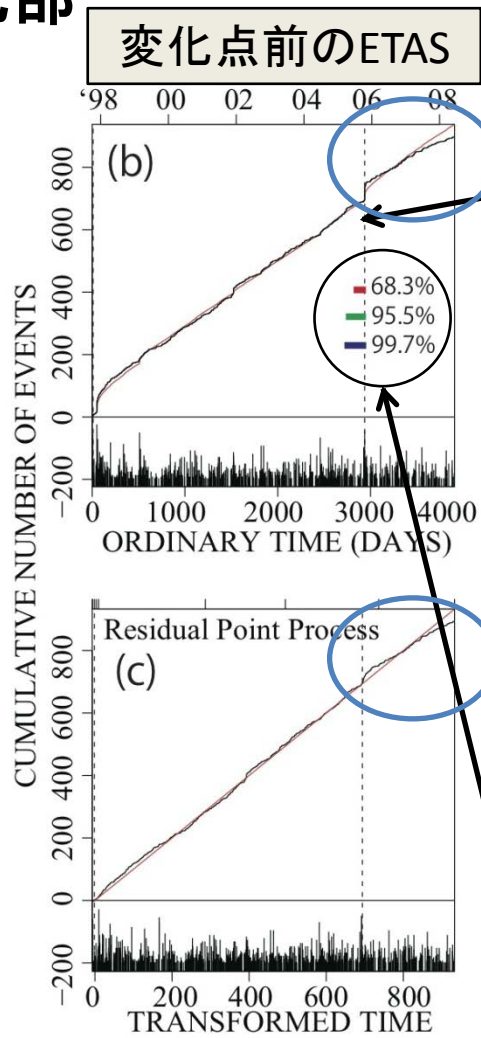
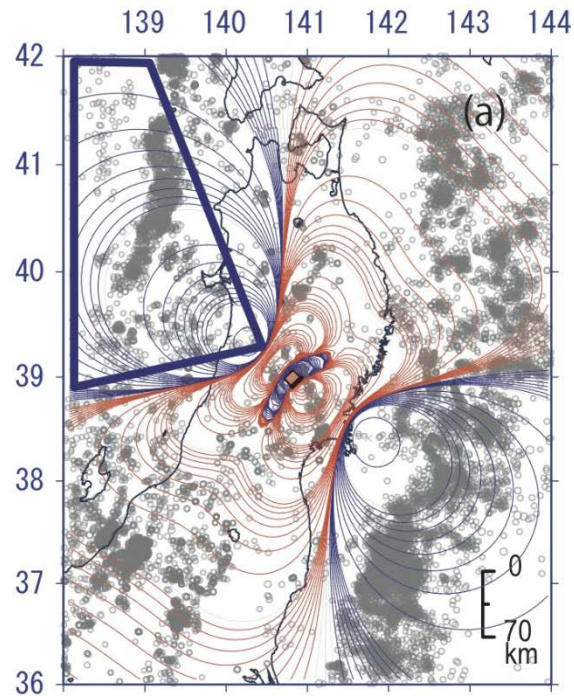


# 受け手のメカニズム



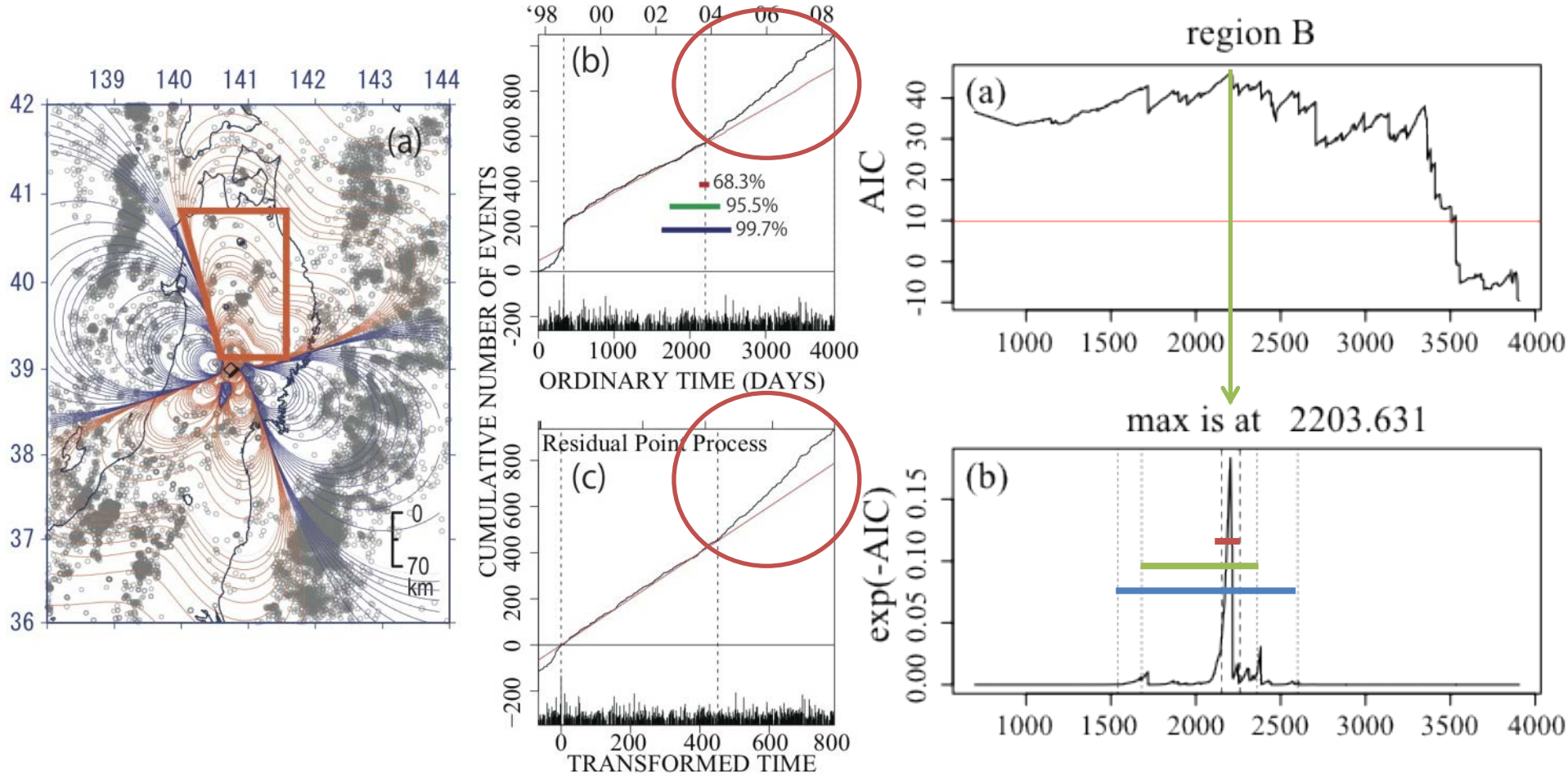
Region	Strike	Dip	Rake	depth (km)	$\Delta$ CFS (mbar)
A	210	45	90	20	-7400. ~ -1.4
B	180	45	90	7.5	0.9 ~ 500.
C1	198	20	76	10.~50.	-32. ~ -0.98
C2	198	20	76	10.~50.	0.17 ~ 15.
D1	198	20	-104	10	-0.45 ~ -0.093
D2	198	20	-104	10	0.30 ~ 3.8
E	220	45	90	10	2.8 ~ 54.
F	192	68	73	70	-100. ~ 71.
G	243	40	117	15	-70. ~ 22.
H1	174	66	101	7.5	-11000. ~ -830.
H2	351	68	90	12.5	-20000. ~ 710.
H3	73	73	168	2.5	-5.0 ~ 540.

# Region A: 日本海北部



変化点後へのETASの延長と地震累積数の比較から、静穏化が見られる。この変化は有意であり、変化点を考慮することでAICが約10改善する。

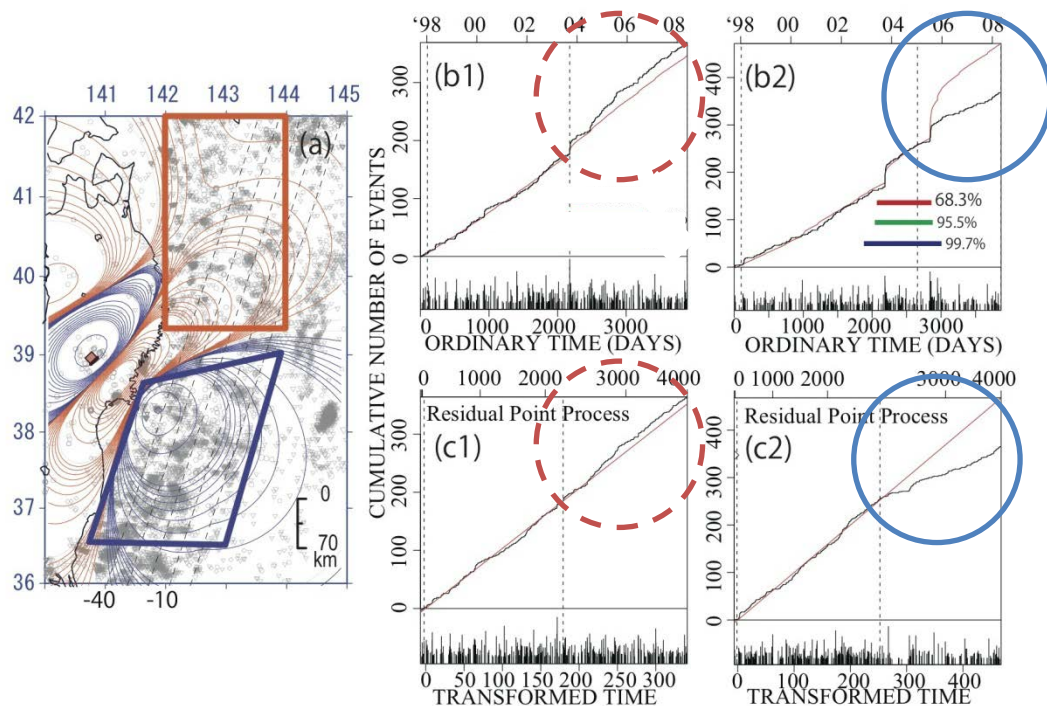
# Region B: 東北内陸北部



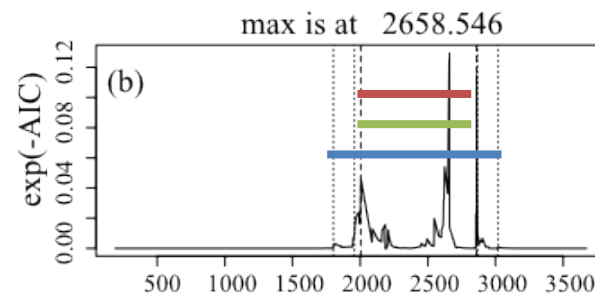
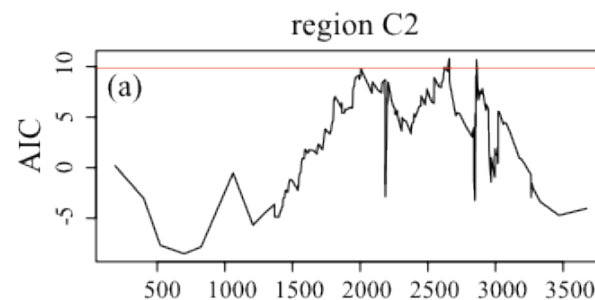
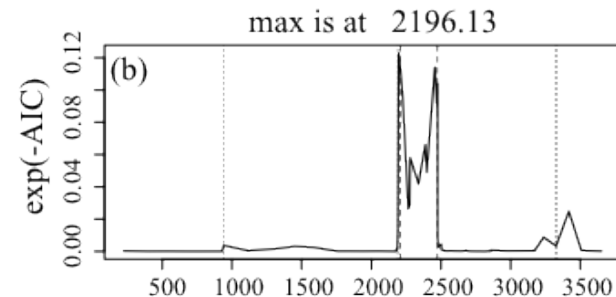
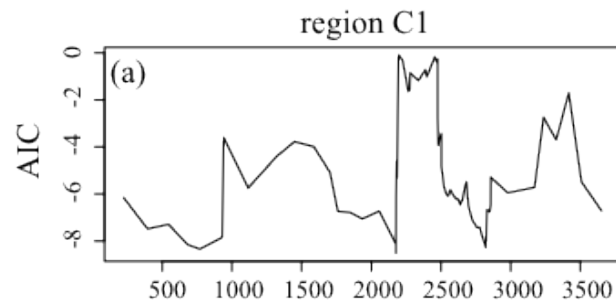
変化点前のETASを変化点後に延長すると、活発化が見られる。  
変化点を含むAICは約36良くなる。

# Region C: 東北太平洋沖

北側では  
活発化しているように見えるが、  
変化点を設定してもAICは改善しない。

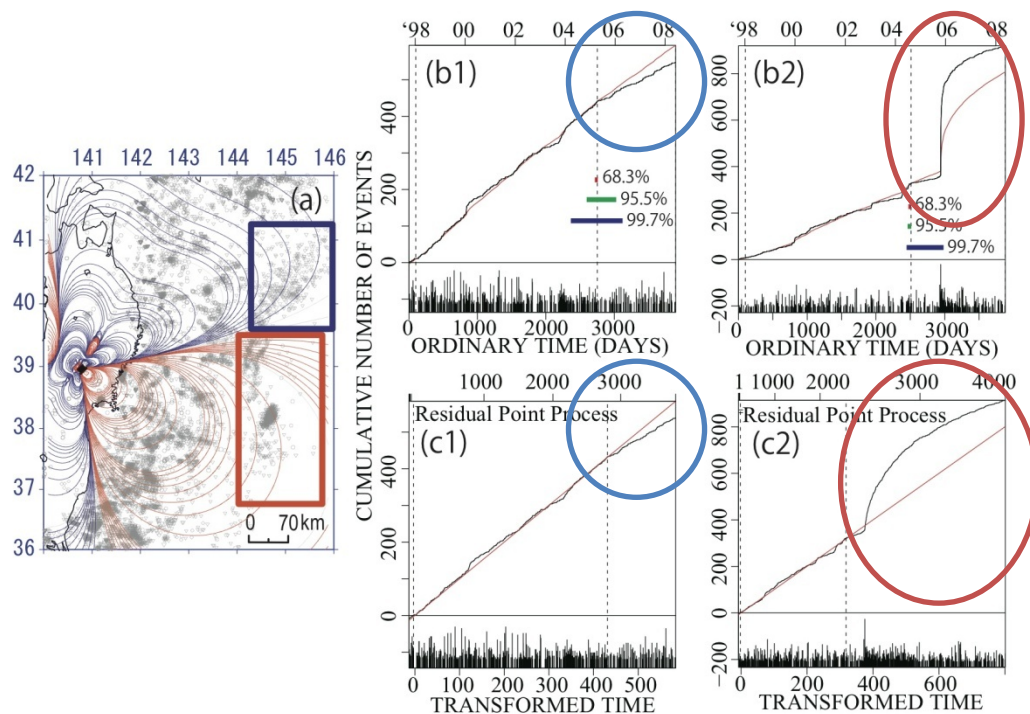


南側では静穏化が見られる。  
変化点を含むAICは約10改善する。

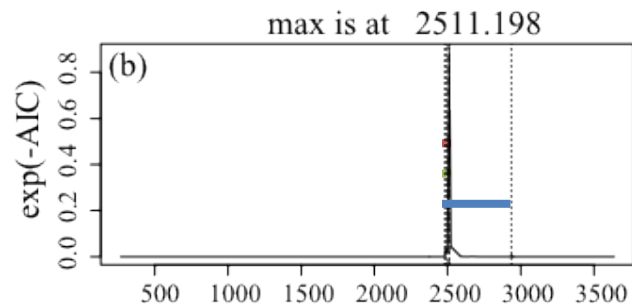
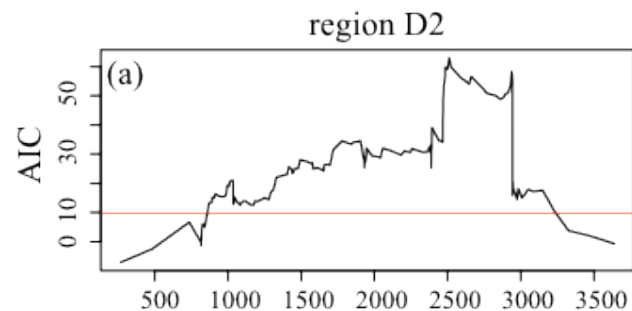
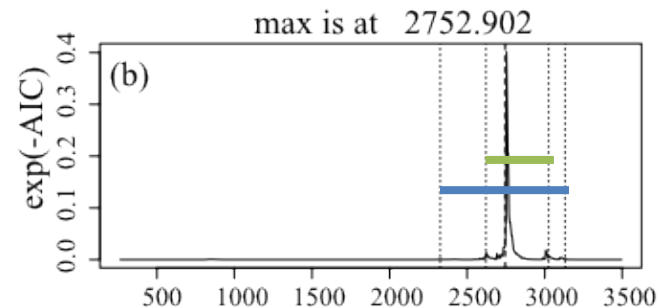
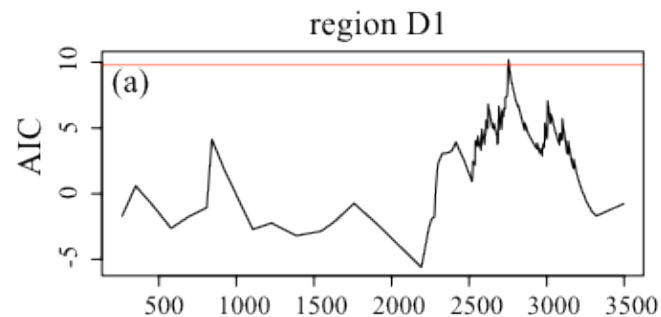


# Region D: アウターライズ

北側では  
 静穏化が見られた。  
 変化点を含むAICは約1良くなる。

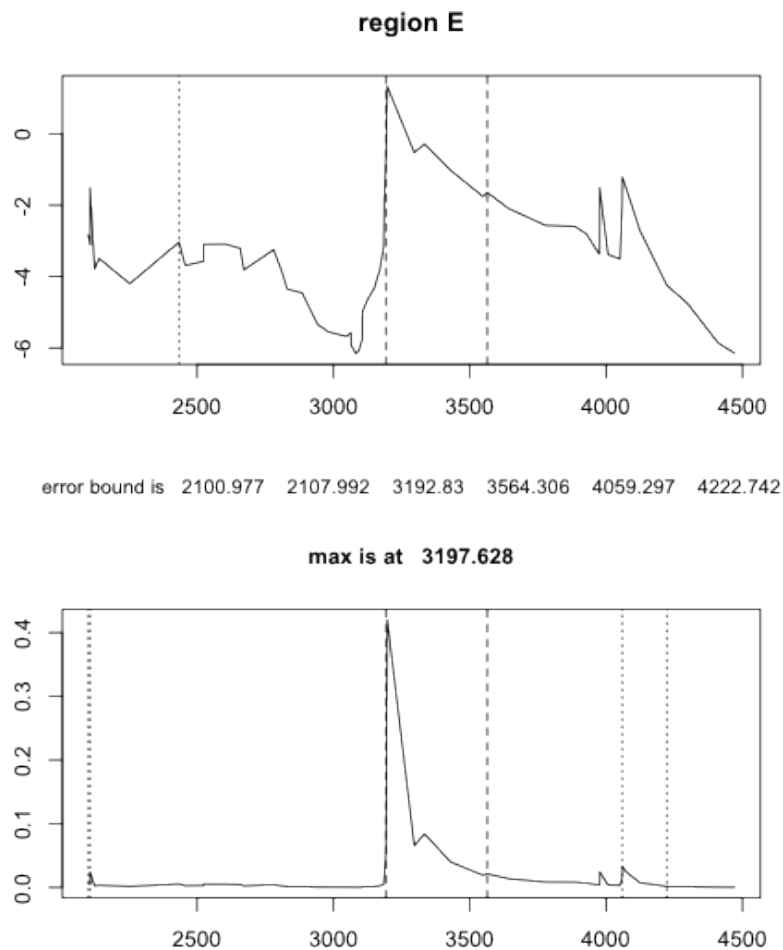
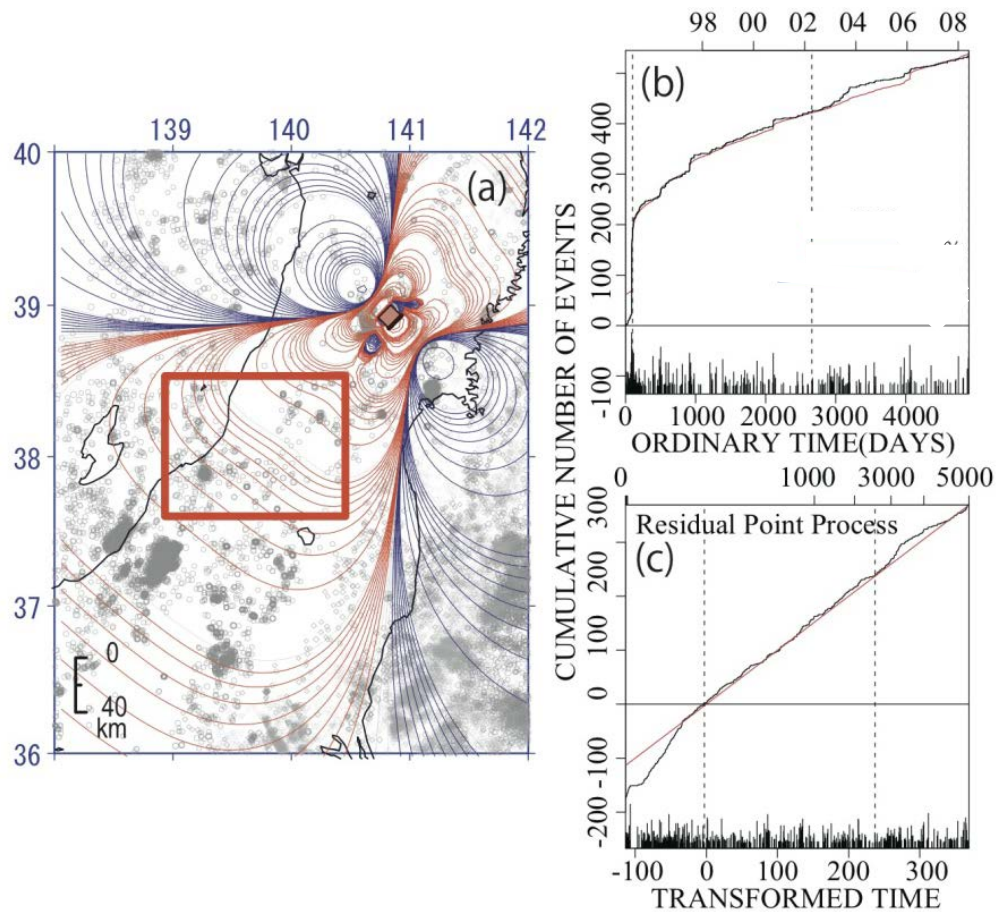


南側では活発化が見られた。  
 変化点を含むAICは54良くなる。





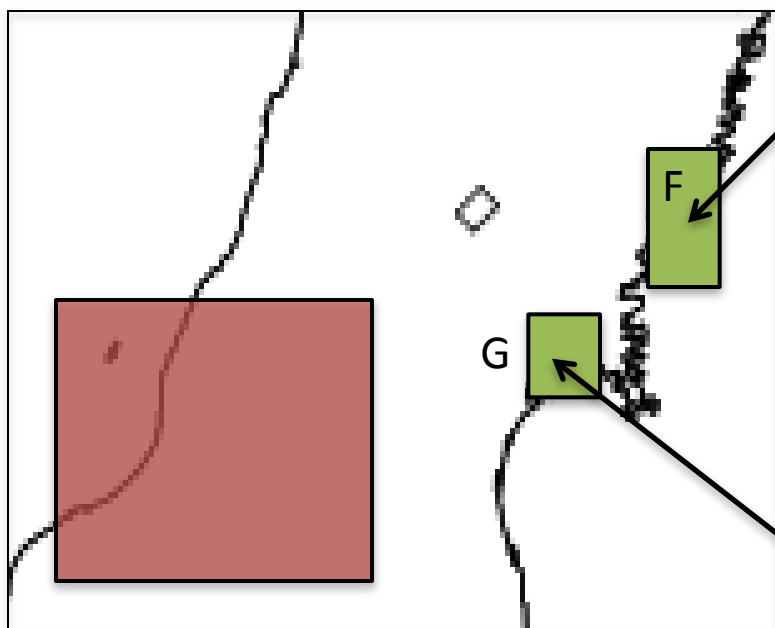
# Region E: 断層南西部、新潟方面



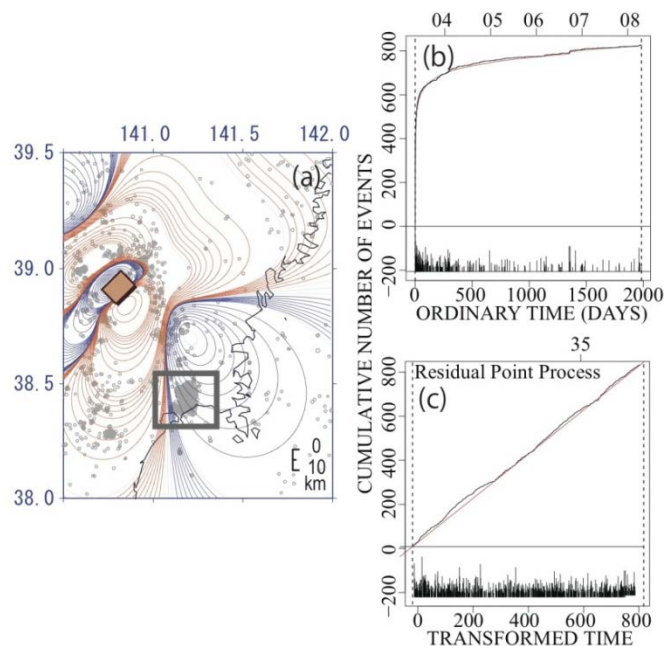
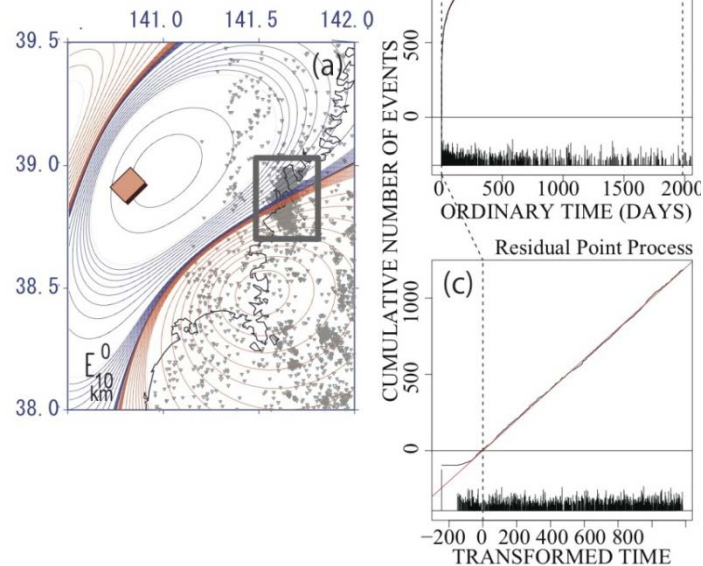
有意な変化点は見つからなかった。

# Region F: 三陸南地震(M7.0, 2003/5/26)の余震

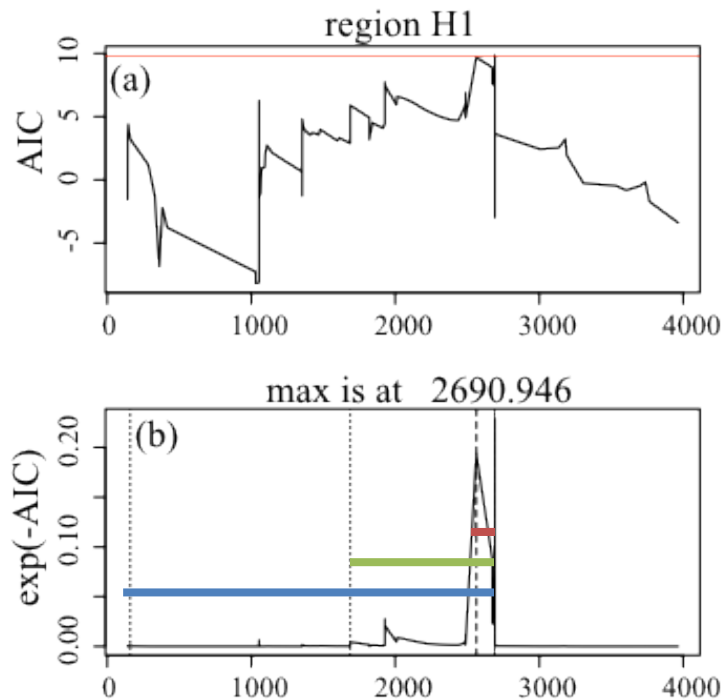
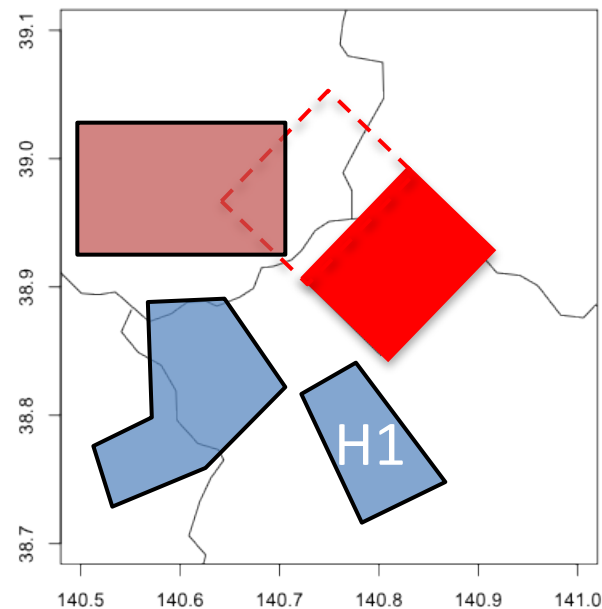
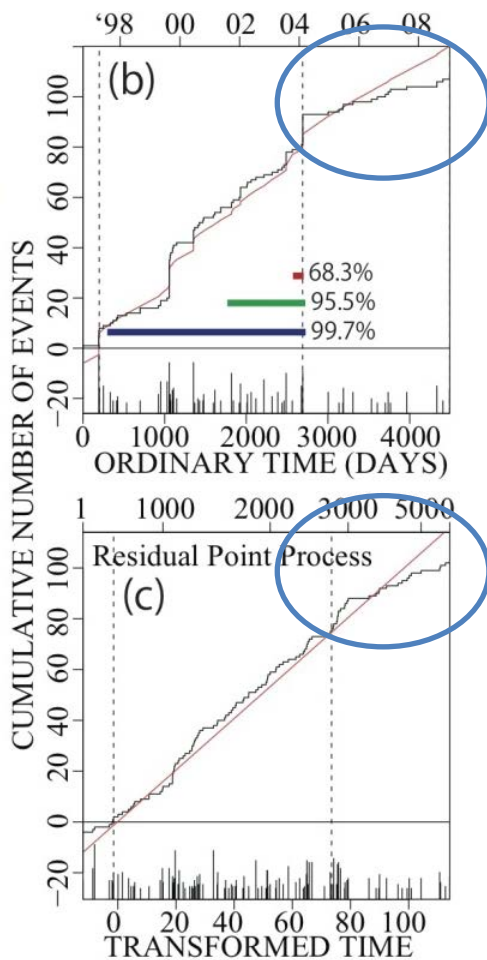
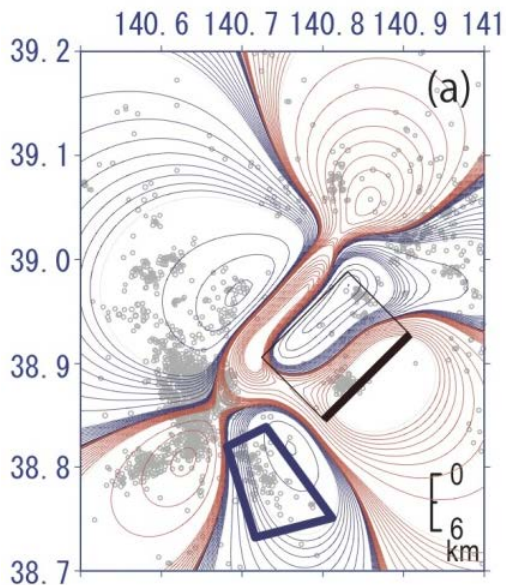
余震はETASの推定に綺麗に従う。



Region G: 宮城県北部地震  
(M6.4, 2003/7/26)の余震  
ETASに綺麗に従う。

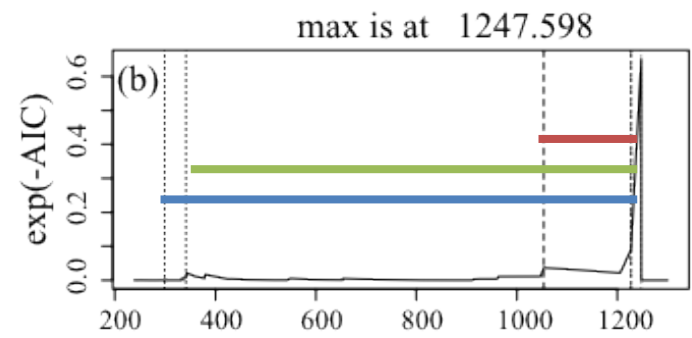
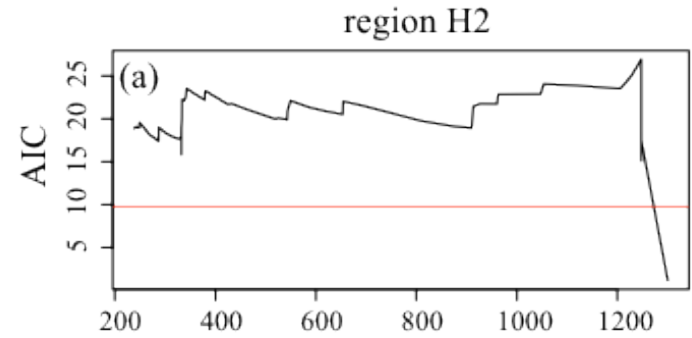
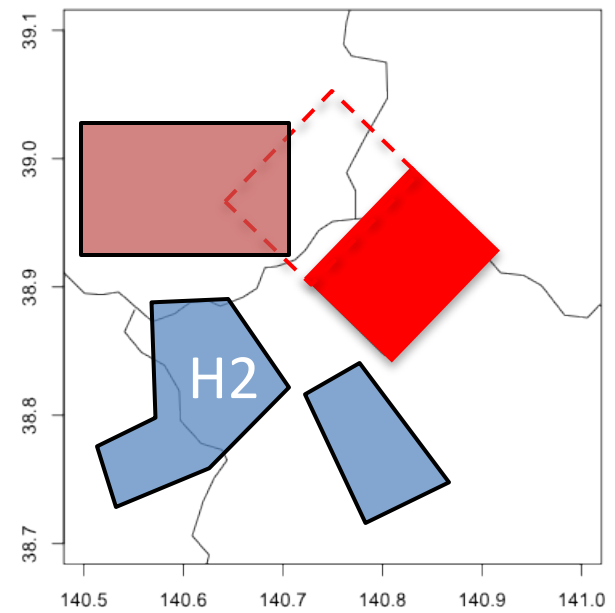
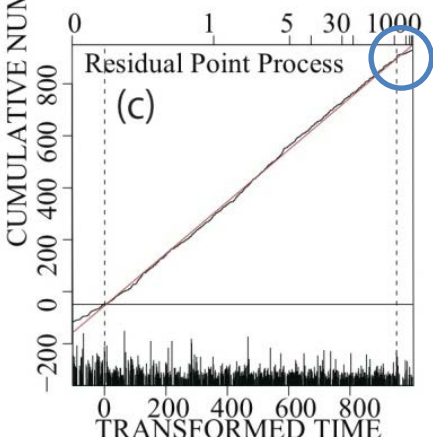
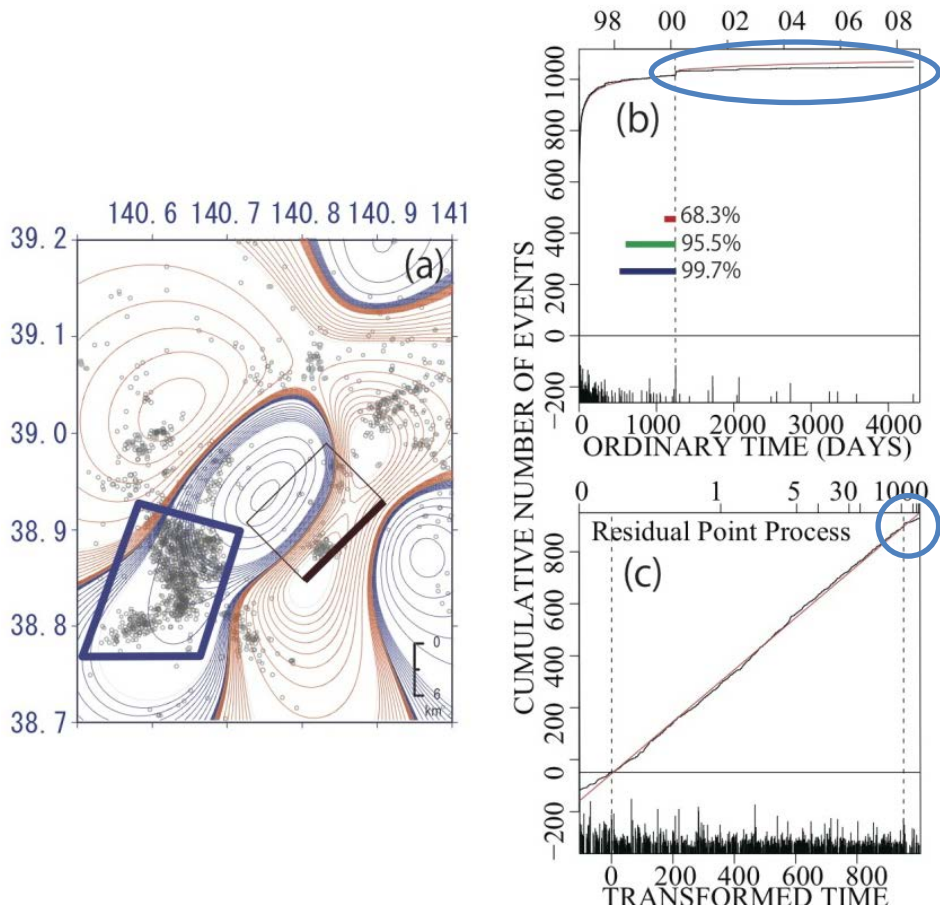


# Region H1: 断層の南側



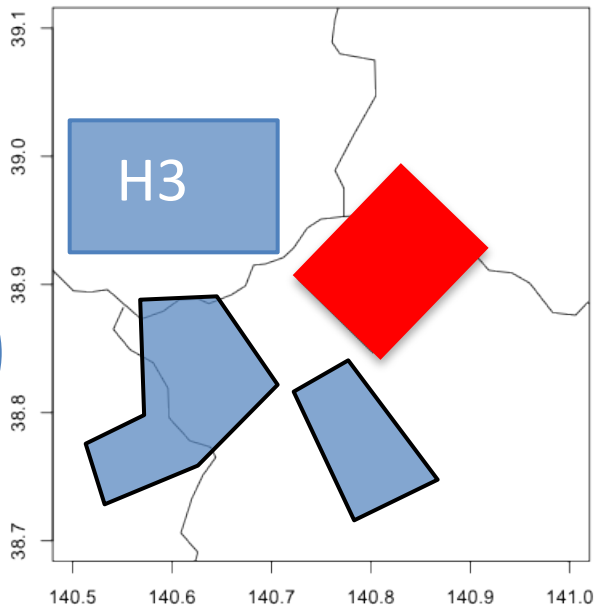
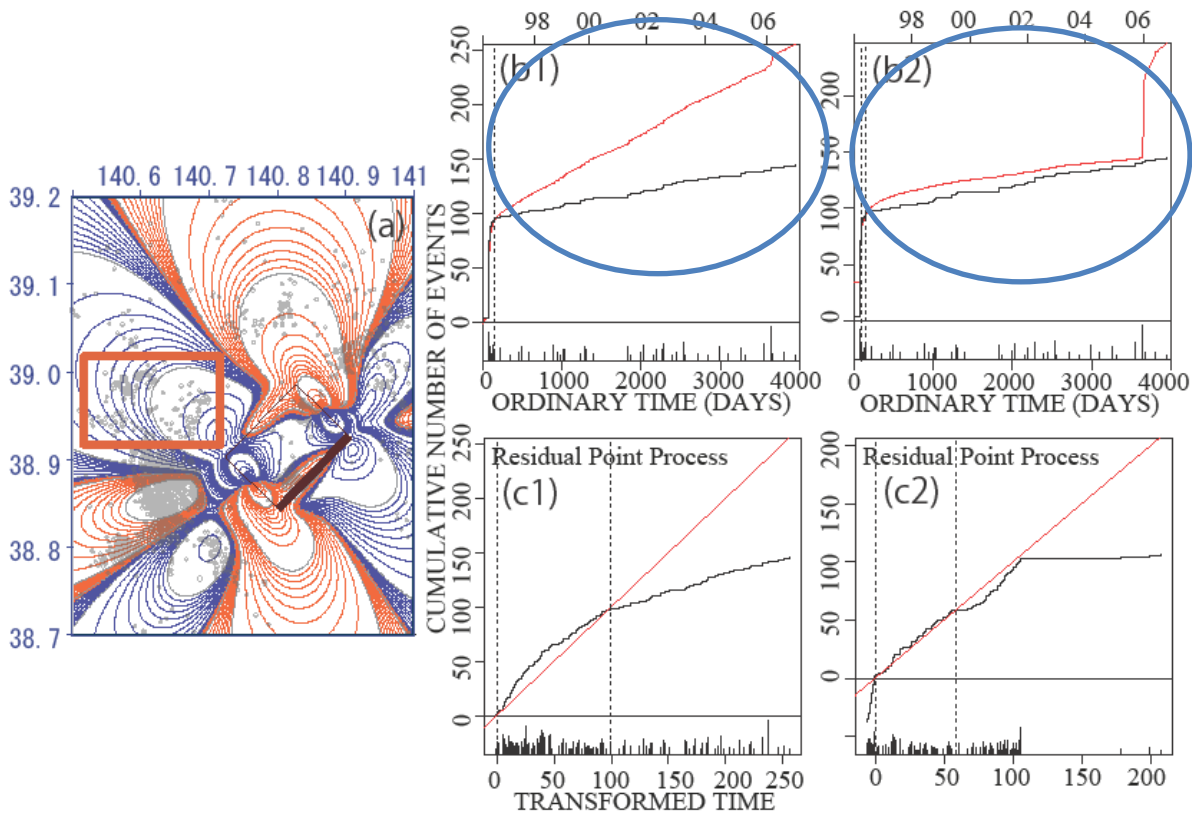
静穏化がみられる。  
 変化点を含むAICは約2改善する。

# Region H2: 断層の南西部



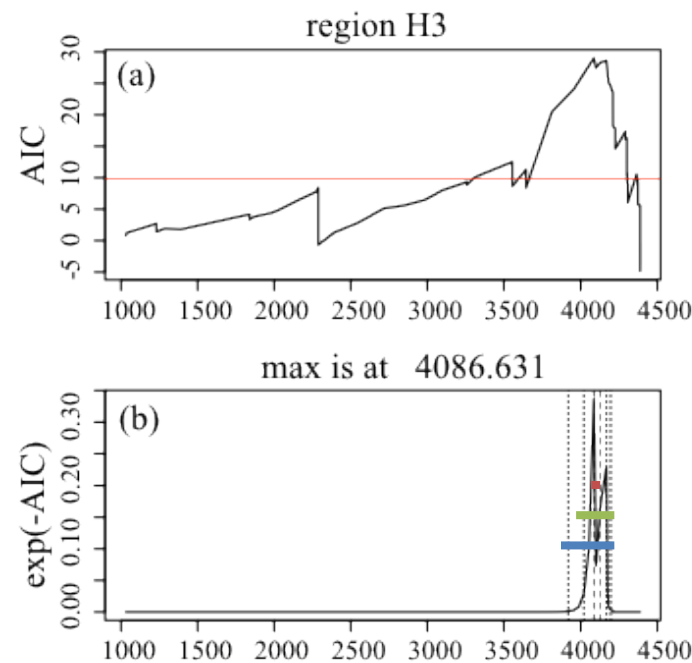
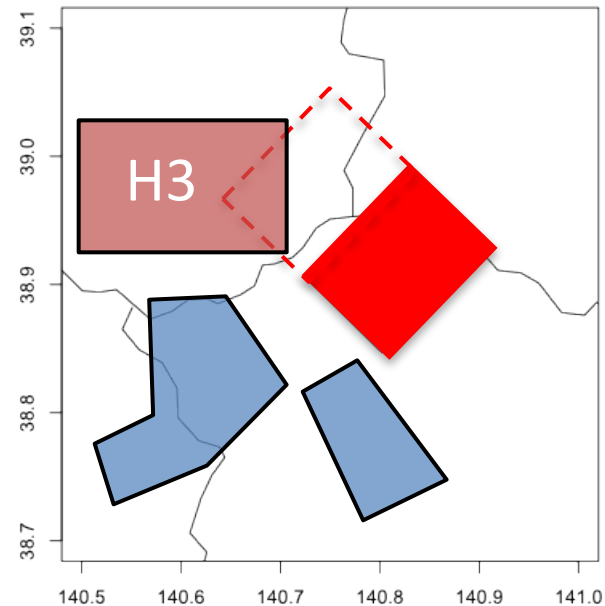
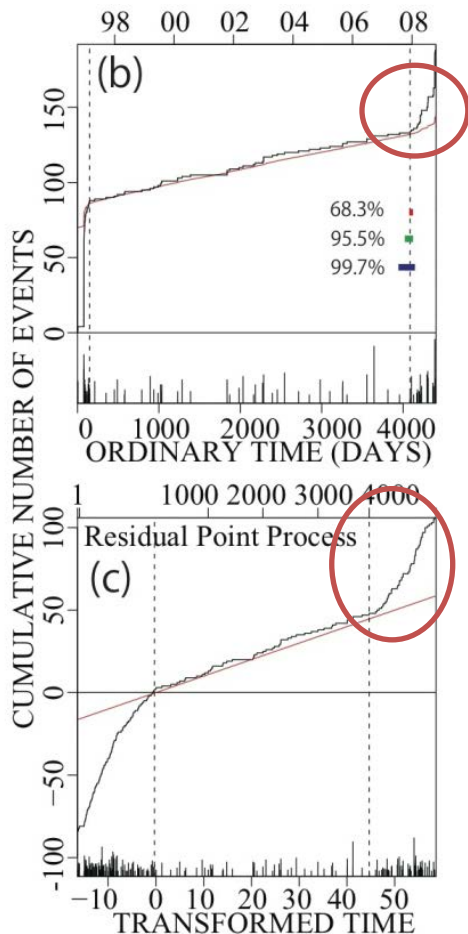
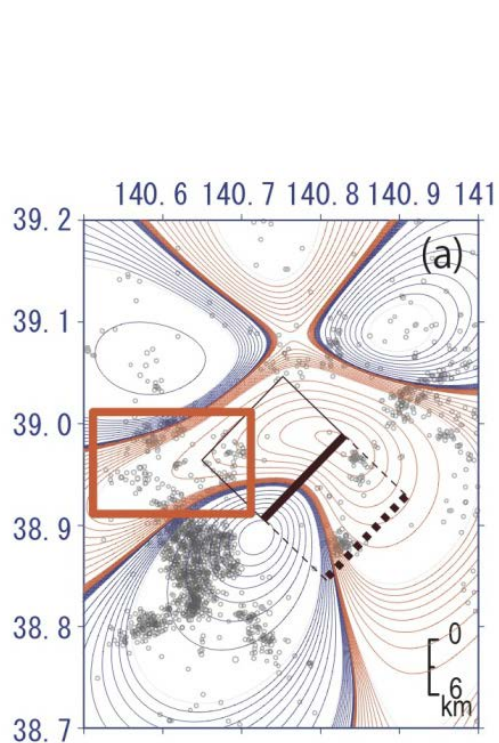
2000年以降静穏化が見られる。  
変化点を含むAICは約17良くなる。

# Region H3: 断層の西側



1996年終わりより静穏化が見られる。  
 真ん中はデータの開始直後より最尤変化点まで推定したものを延長したもの  
 右は開始後約50日後から最尤変化点までを推定したもの  
 それぞれでAICは約20改善する。

# Region H3: 断層の西側



2008年より明らかな活発化が見られる。  
 変化点を含むAICは約11改善する。

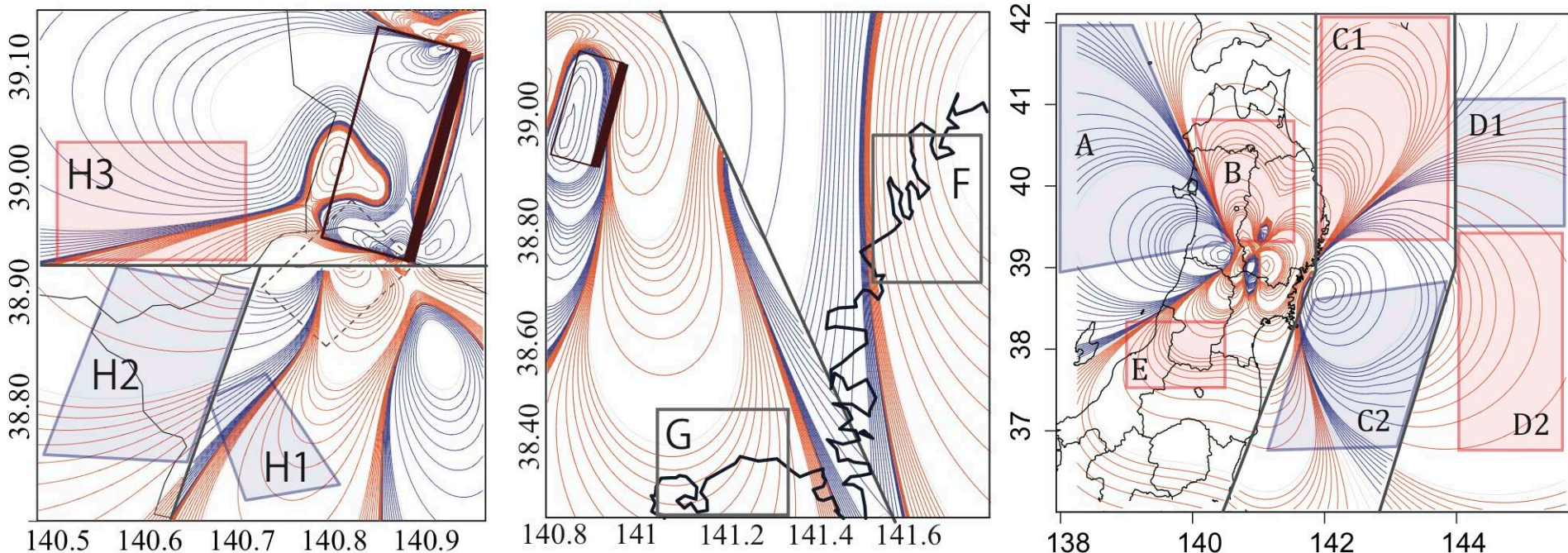
Region #data	$S$	$T$	$M_z$	$m$	$K_0$	$c$	$a$	$p$	$AIC_0$	$2q$
									$AIC_1+AIC_2$ $\Delta AIC$	
A 899	10	3905	2.5	0.1378	695.83	0.00735	2.01	0.95	3498.27	
	10	2936.6	2.5	0.1288	335.24	0.00501	1.82	0.89	3478.06	9.7
	2936.6	3905	2.5	0.1314	2015.1	0.00242	2.93	1.09	20.2	
B 1050	335.9	3907	1.5	0.1749	1.44	0.0044	1.39	1.13	3186.11	
	335.9	2203.6	1.5	0.1627	3.97	0.0141	1.67	1.24	3140.25	9.8
	2203.6	3907	1.5	0.1682	0.69	0.0056	0.86	0.97	45.9	
C1 361	100	3900	4	0.0583	9.41	0.0041	1.58	0.949	2192.28	
	100	2475	4	0.0454	8.58	0.0024	1.52	0.86	2189.63	9.0
	2475	3900	4	0.0904	5.47	0.0523	2.14	2.53	2.6	
C2 369	100	3871	4	0.0518	0.298	0.0076	1.51	1.03	1992.03	
	100	2600	4	0.0571	107.8	0.0066	2.29	0.95	1973.23	9.1
	2600	3871	4	0.0393	5.91	0.0051	1.41	1.04	18.7	
D1 548	100	3898	3	0.0721	12.42	1.863	0.79	1.32	3118.6	
	100	2752.9	3	0.0863	20.06	3.295	0.73	1.51	3108.39	9.4
	2752.9	3898	3	0.063	0.92	0.1086	0.6	1.01	10.2	
D2 920	100	3882	3	0.0699	544.76	0.1382	1.86	1.19	1105.64	
	100	2511.2	3	0.0471	0.2715	0.0601	0.34	0.89	1042.43	9.7
	2511.2	3882	3	0.0579	1480.3	0.1542	2.39	1.11	63.2	
E 545	100	4901	2.2	0.0254	750.43	0.0004	1.84	0.99	1635.21	
	100	2780	2.2	0.0202	455.52	0.0001	1.7	0.96	1633.42	9.4
	2780	4901	2.2	0.0395	858.73	0.0026	2.01	1.21	1.8	
F, 1260	0.1	1983	2.5	0.0193	803.37	0.0004	2.86	0.91	-1076.3	
G, 784	0.1	1922	2	0.0119	7.22	0.0194	2.27	1.1	-2761.4	
H1 108	200	4490	1.5	0.0127	40.87	0.0018	2.01	1.32	445.02	
	200	2690.9	1.5	0.0163	17.91	0.0008	1.73	1.26	435.6	7.9
	2500	4490	1.5	0.01	--	--	--	--	9.8	
H2 1048	1	4490	1.5	0	23.52	0.0287	1.66	1.25	-4830.03	
	1	1247.6	1.5	0	25.21	0.0333	1.68	1.24	-4856.97	9.8
	1247.6	4490	1.5	0.0095	--	--	--	--	26.9	
H3 192	150	4404	1.5	0.0097	1.141	0.0015	0.87	1.15	521.45	
	150	4086	1.5	0.0087	0.0133	0.0013	0	1.11	492.45	8.3
	4086	4404	1.5	0.0487	2.287	0.0021	1	1.22	29	

## ここまでのまとめ

各地域の地震活動で見つかった活発化、静穏化は南側断層に滑りを仮定した場合の $\Delta CFS$ とよく合う。

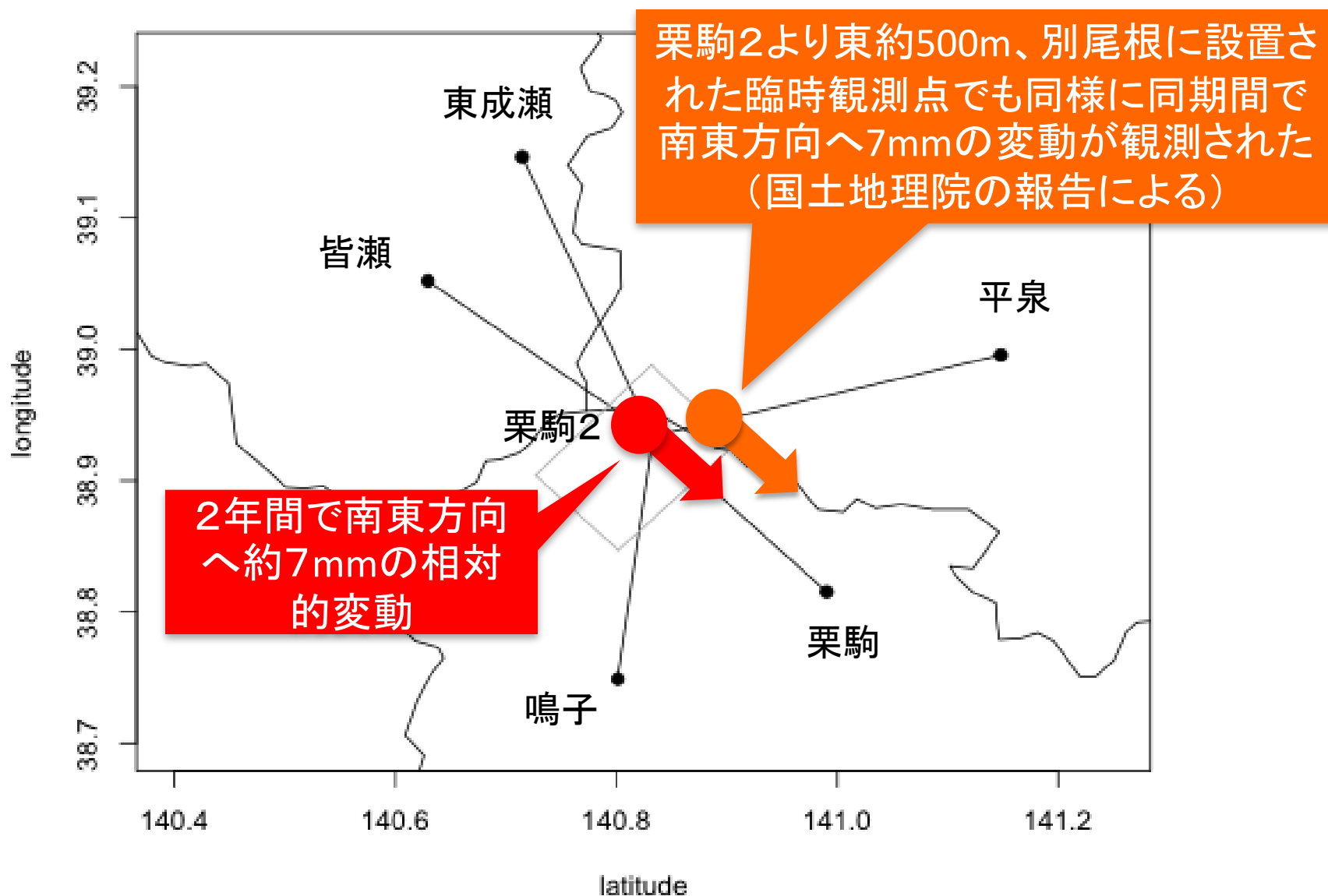
変化の時期は2000から2008年まで大きくばらつくが、エラーバーを考慮すると大体2003~2005に収まる。

北側の断層が滑ったと仮定した場合は、近傍地域(F,G,H)においてこの合致が見られなくなる。





# 断層周辺の地殻変動



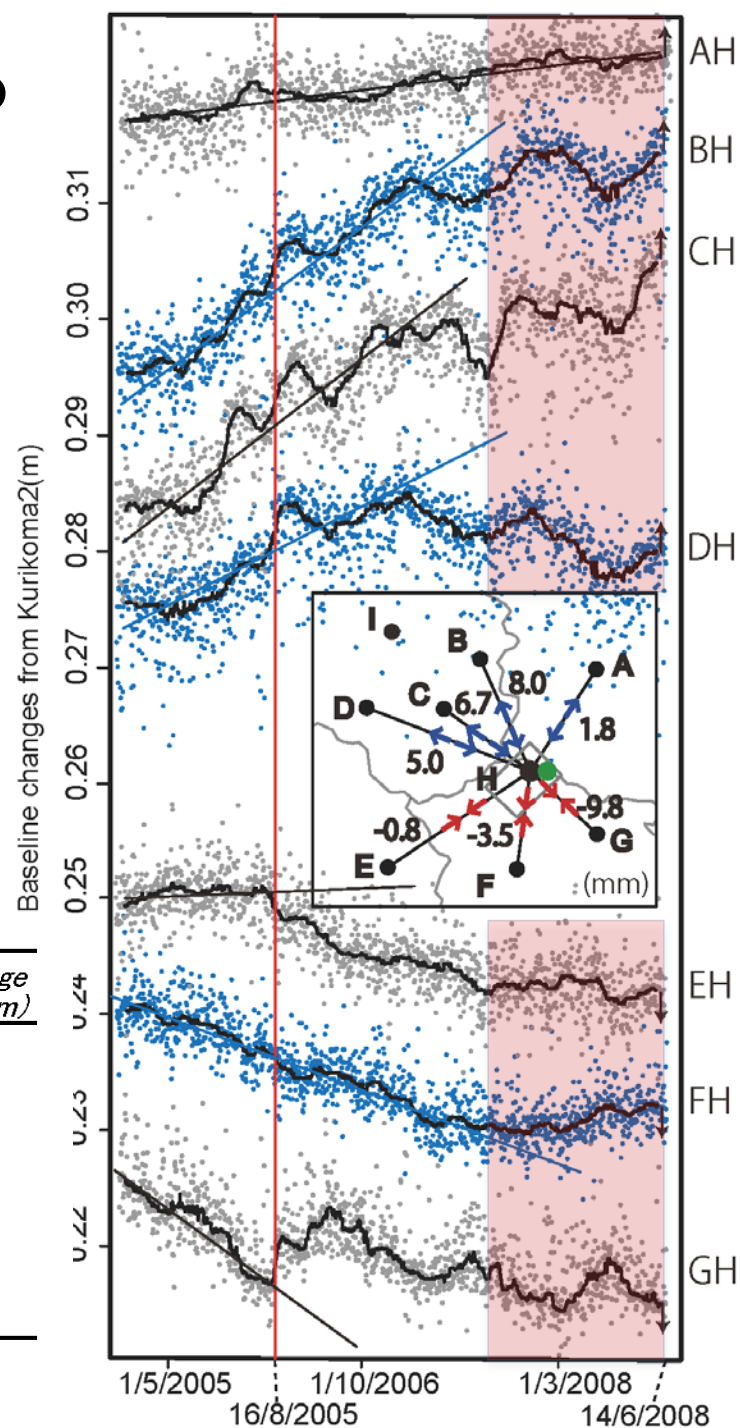
2005/11/12~2005/11/22 から 2007/11/09~2007/11/14 の2年間

# 先ほどのステーション(栗駒2)と周辺ステーション間の距離の変動

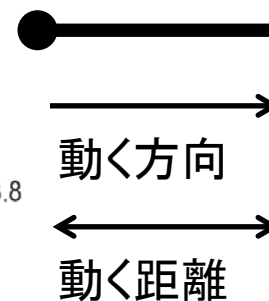
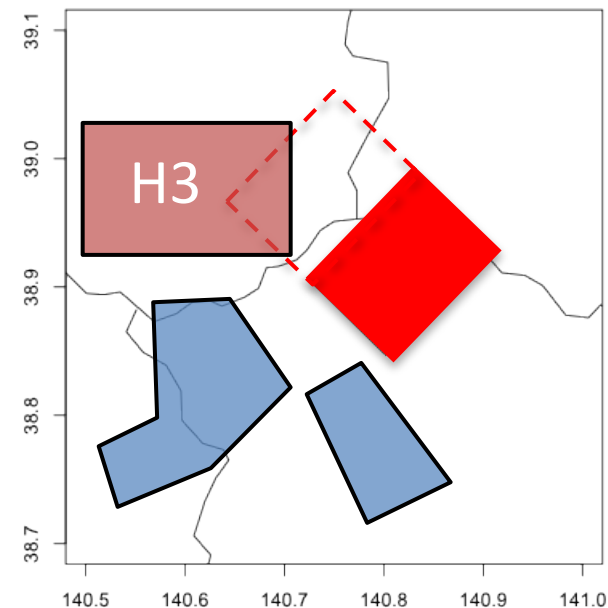
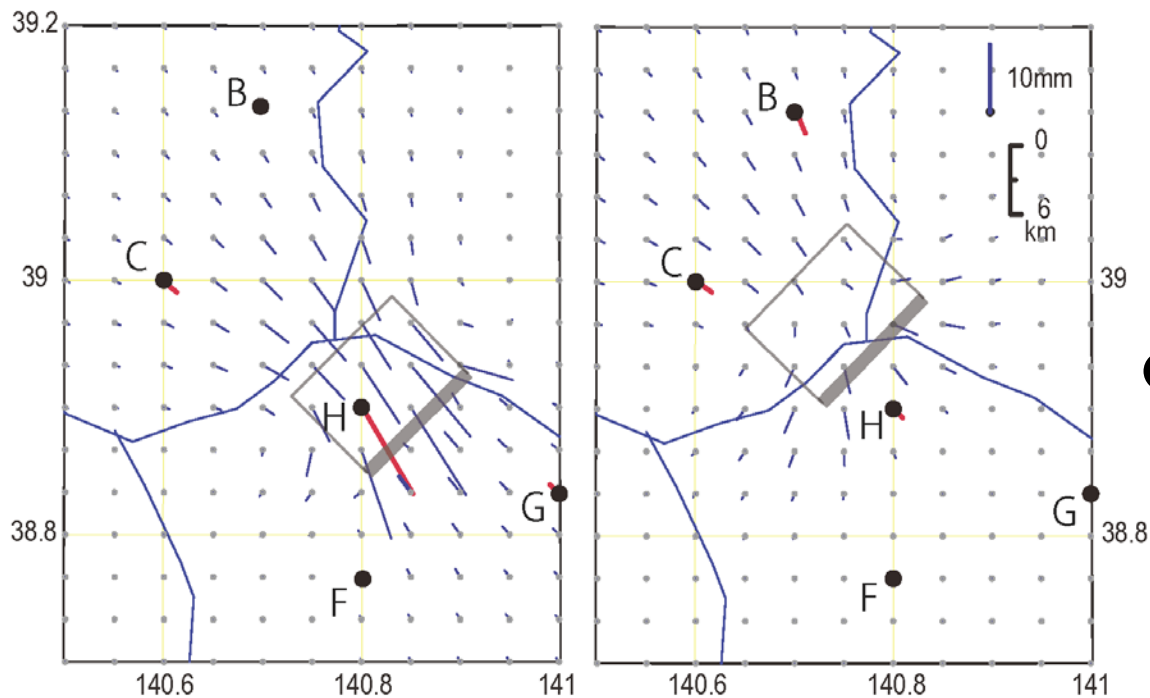
国土地理院のGEONETからのデータを使用

2005年半ばまでの傾向(ミニマップの矢印方向)は  
シャドウを付けた時期には弱まっている。

Station	Name	ID	lon(deg.)	lat(deg.)	Baseline change (mm)
A	Isawa	970796	140.9885	39.127	1.8
B	Higashinaruse	20928	140.715	39.1462	0.8
C	Minase	950193	140.6296	39.0519	6.7
D	Ogachi	20929	140.4473	39.0544	5
E	Mogami	20931	140.4973	38.7522	-0.8
F	Naruko	950174	140.8016	38.7489	-3.5
G	Kurikoma	950173	140.9906	38.8153	-9.8
H	Kurikoma2	20913	140.8332	38.934	
I	Yuzawa	960554	140.5067	39.1991	

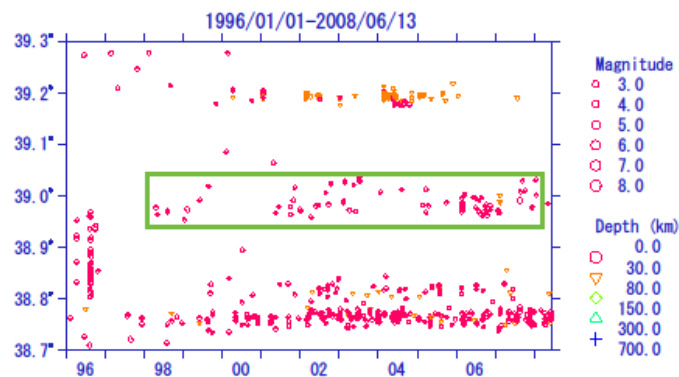
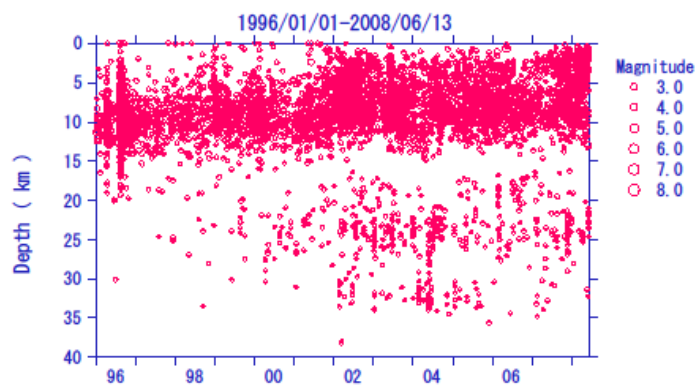
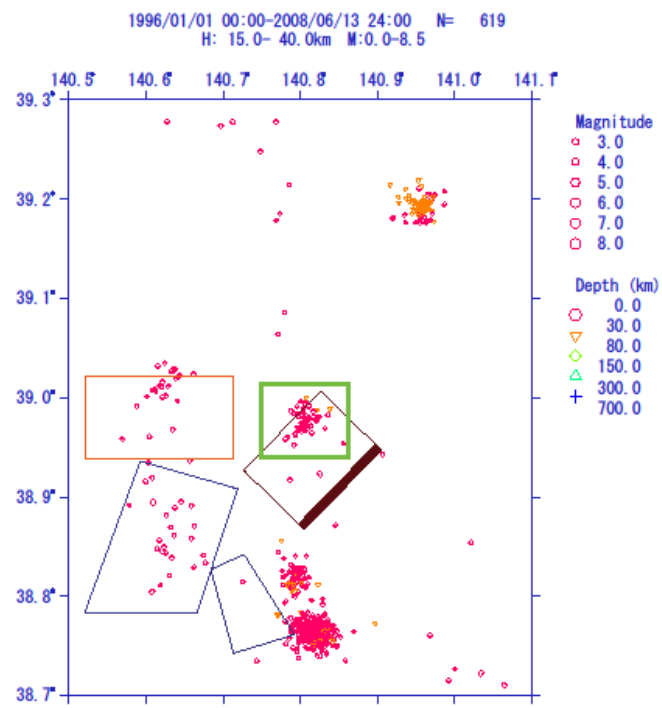
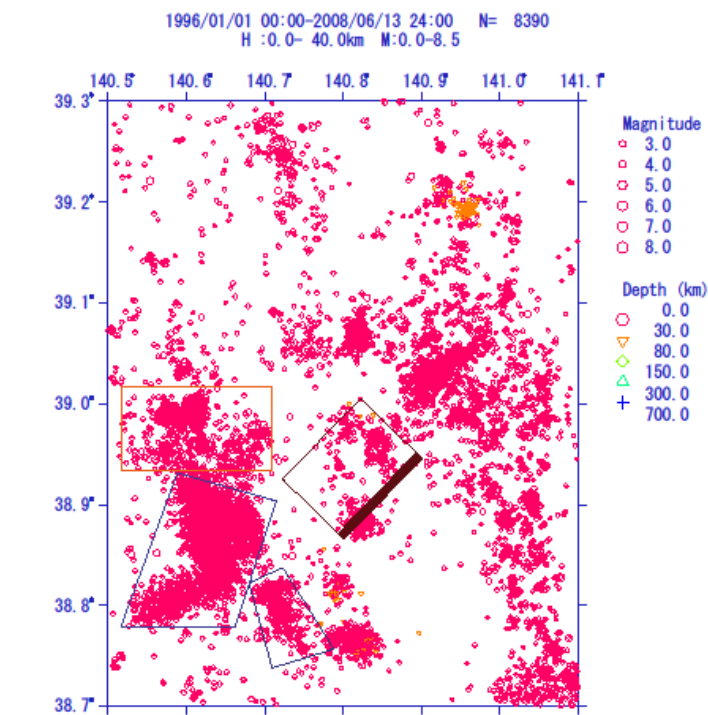


# 南側断層(左)、及びその深部(右)が動くと仮定した場合の地表の動き



活動が深部に移動すると地表での栗駒2の動きは相対的に弱まる。

# 一連の地殻運動に付け加えて



# 変化点のまとめ

変化点を含むETASモデルを岩手宮城内陸地震前の周辺地域の活動に用い、異常の有無を調べた。

1. 変化点による活発化、静穏化は南側断層に前駆的滑りを仮定した場合の $\Delta CFS$ と概ね合致する。
2. 変化の時期は一部の例外を除いて2003年から2005年であった。
3. GPS観測による地殻変動もこれらとよく合う。
4. H3地域の地震活動の変化、及びGPSステーション間距離の変化から、この滑りが2008年初頭により深部に移動したと考えられる。