

第191回  
地震予知連絡会資料

2011年6月13日

統計数理研究所



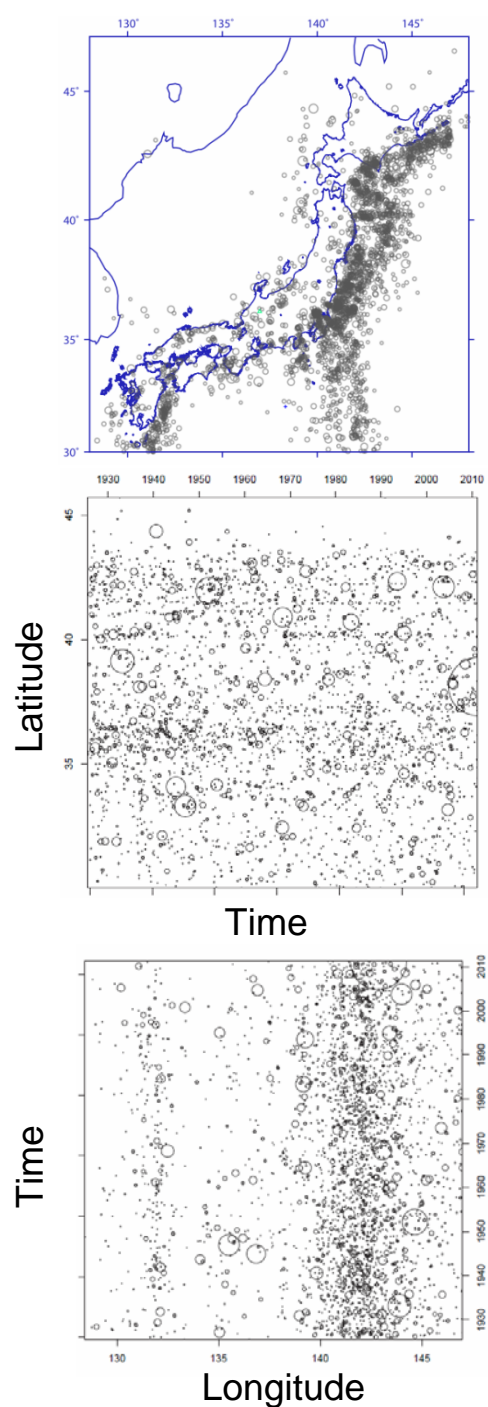
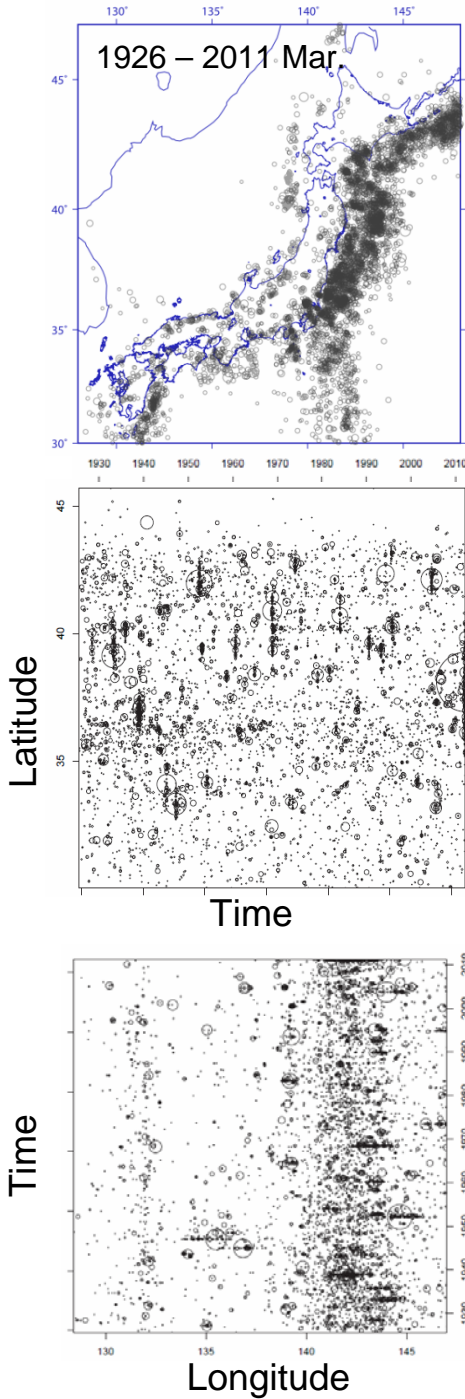
# 確率的除群法 (Stochastic declustering)

$M \geq 5.0, h \leq 100\text{km}$

1

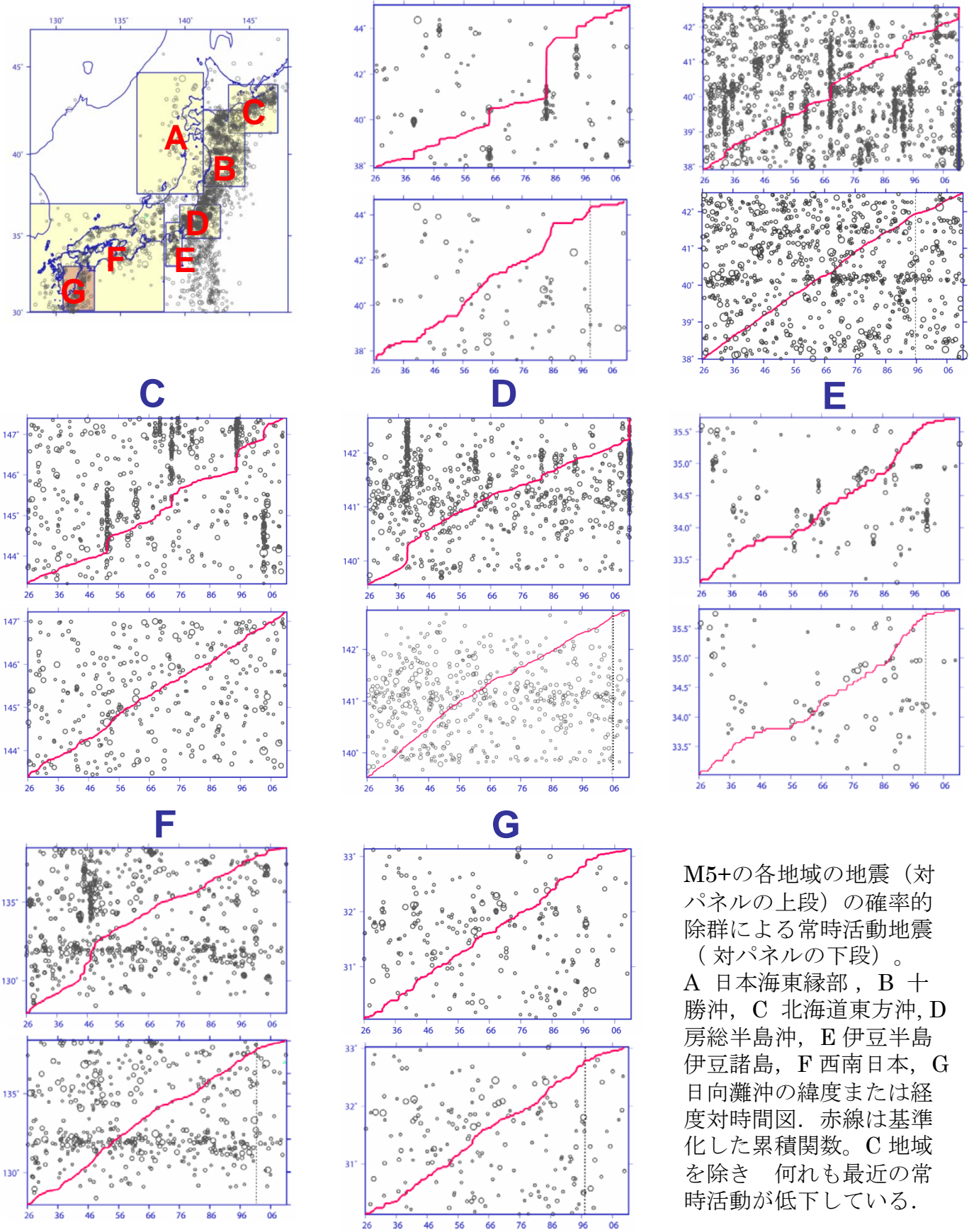
Original data

De-clustered data



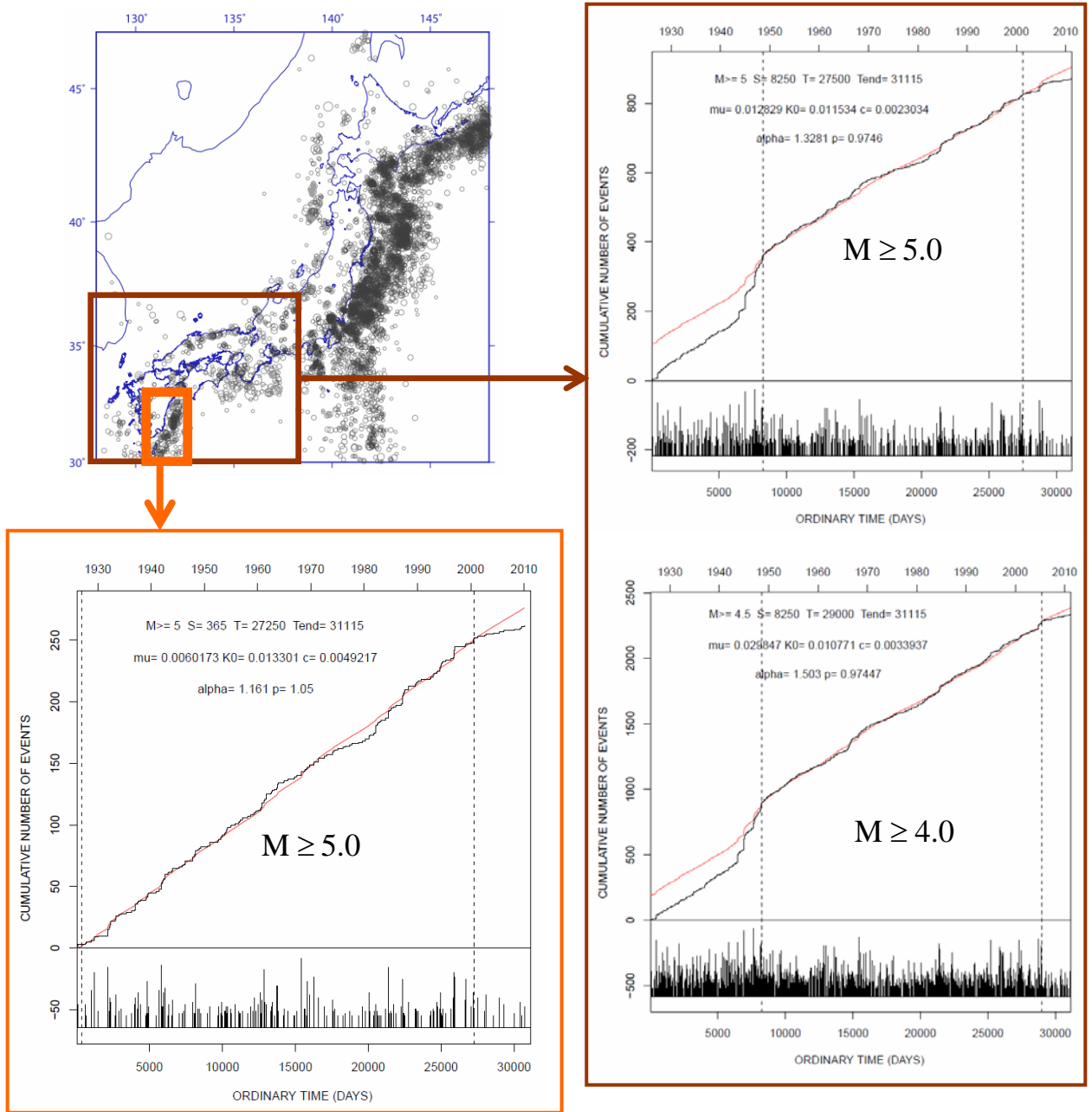
地震活動の地域的特徴（場所によって異なるパラメタ値）をもつ時空間ETAS（HIST-ETAS）モデル（尾形，予知連会報83巻，*EPS* 2011）による確率的除群法（Zhuang et al., 2004, 2005, *JGR*）で常時地震活動を示す地震を残した．すなわち各地震が常時活動の地震である確率は時空間ETASの危険度の中で常時地震活動の占める割合を計算して，その確率で取捨選択する．これを全ての地震について行う．全日本（南西諸島を除く）の1926年から2011年M9の地震時までの気象庁地震データM5+（左側）と除群化によって得られた常時地震（右側）．

# 2 M ≥ 5.0



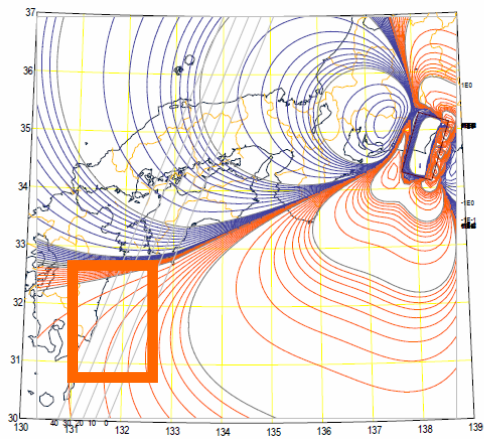
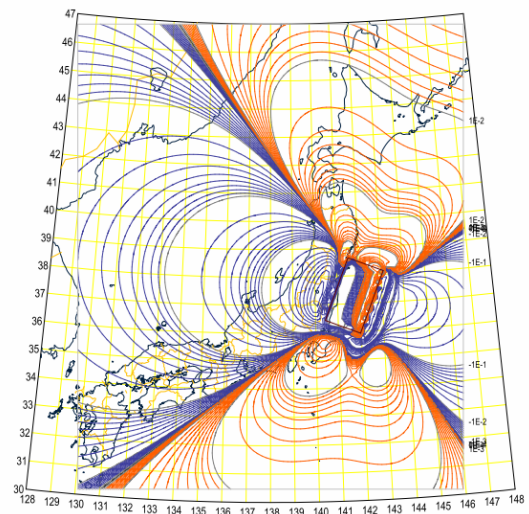
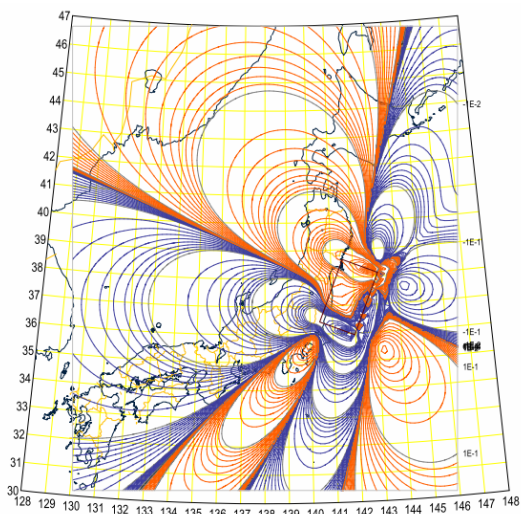
M5+の各地域の地震（対パネルの上段）の確率的除群による常時活動地震（対パネルの下段）。  
 A 日本海東縁部, B 十勝沖, C 北海道東方沖, D 房総半島沖, E 伊豆半島伊豆諸島, F 西南日本, G 日向灘沖の緯度または経度対時間図。赤線は基準化した累積関数。C 地域を除き 何れも最近の常時活動が低下している。

## Original data

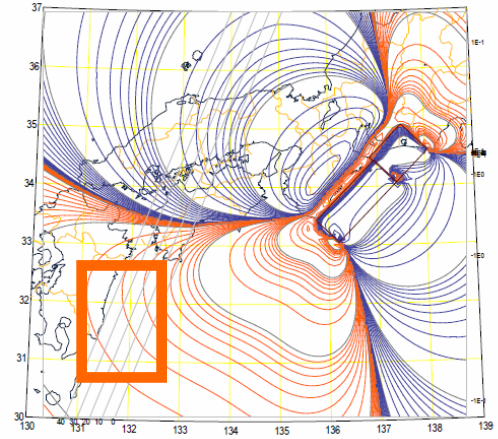


非除群データのETASモデルによる解析。右図では西南日本の1946年南海地震後からの活動に関して（南海地震以前の履歴を考慮して）あてはめを行っている。右下図は日向灘沖の1926年からの解析。いずれも相対的静穏化が有意である。

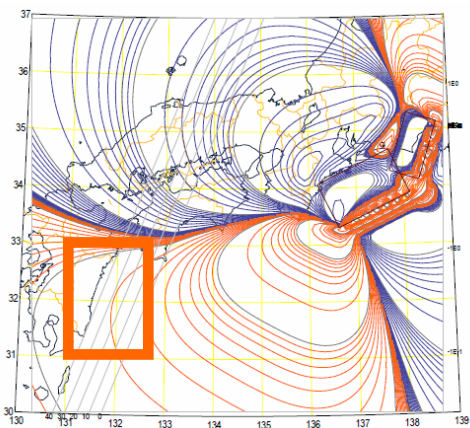




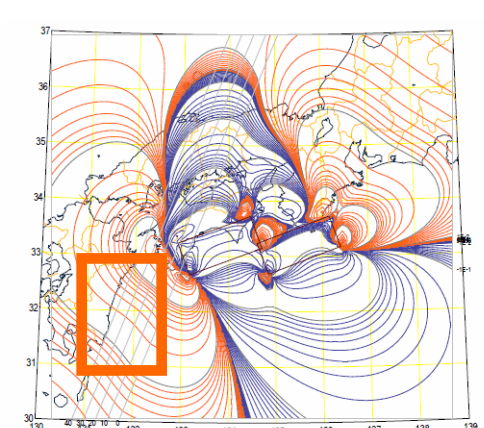
Source: assumed Tokai



Source: 1944 Tonankai

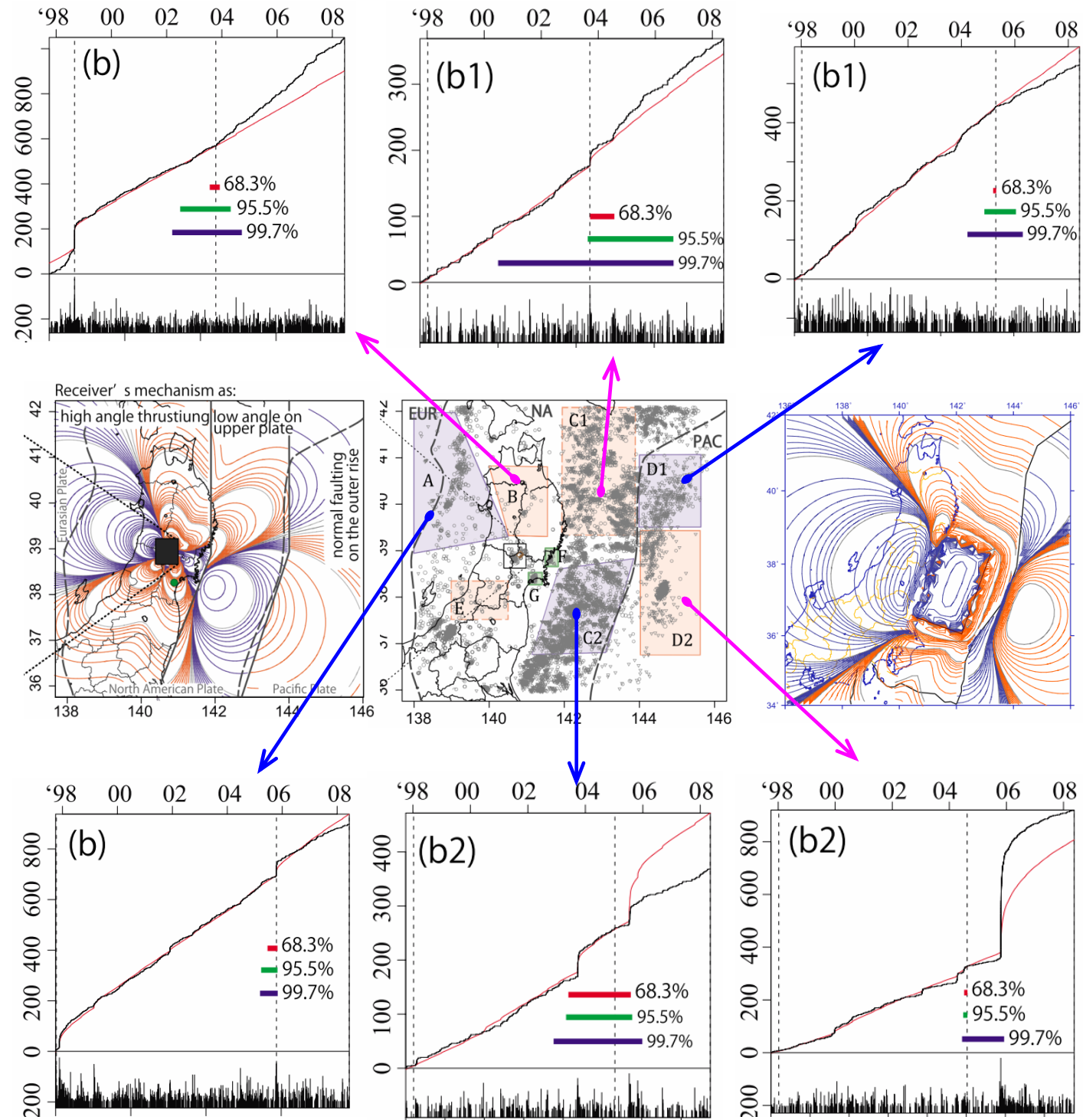


Source: 1854 Tokai-Tonankai



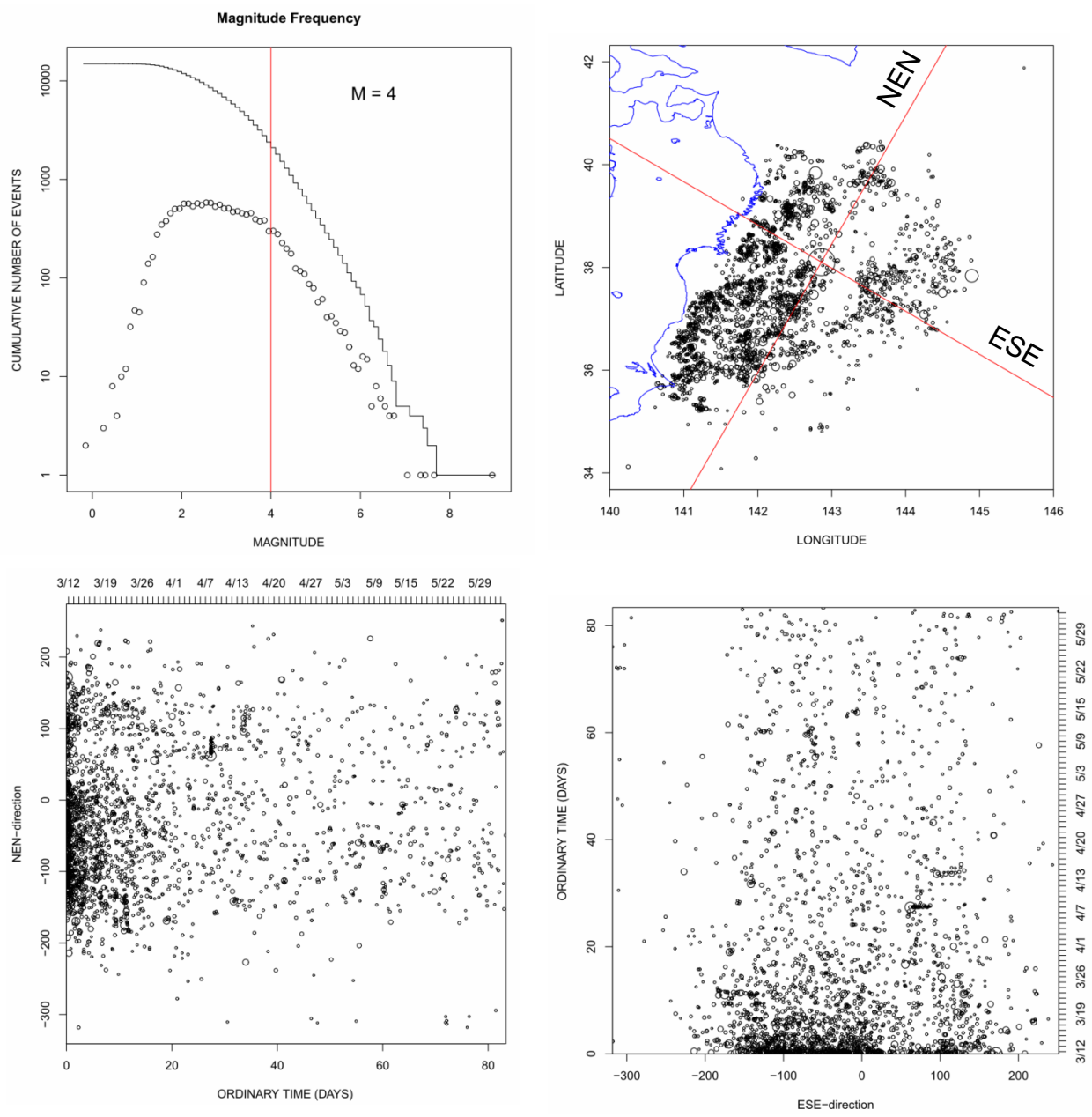
Source: 1946 Nankai

上段の $\Delta$ CFFs図は東北地方太平洋沖で「ゆっくりすべり」の加速を仮定し、受け手は東西圧縮の縦ずれ（左）または逆断層（右）。中下段は東海東南海（安政）昭和東南海・南海の各地震の断層角を仮定した「すべり」を仮定して、受け手は東西圧縮の逆断層の $\Delta$ CFFs図。中下段のシナリオの $\Delta$ CFFsでは南西日本全体、特に日向灘領域、の静穏化と調和的でない。



東北地方周辺の広域的な地震活動異常(A-Dの各地域; Kumazawa et al.(2010)を説明するために採用した、2008年岩手県宮城県内陸地震の、先駆的なすべりを仮定した $\Delta$ CFS図の広域的な特徴(中段左パネル)は宮城県福島県沖でのすべり(中段右)と同様であり、A-Dの各地域の地震活動異常は東北地方太平洋沖地震の前駆活動である可能性がある。

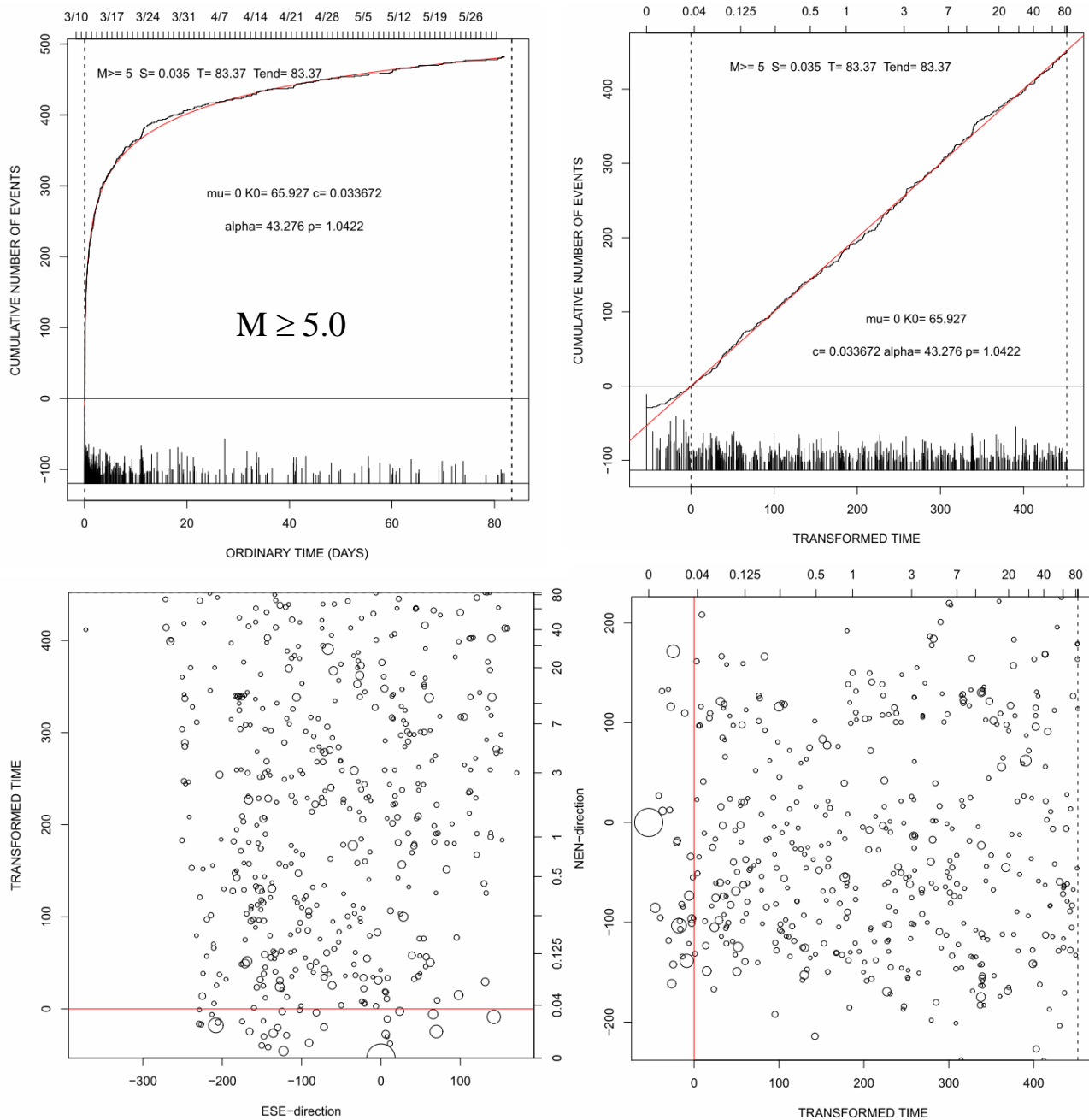
## 東北地方太平洋沖地震の余震活動の特徴



東北地方太平洋沖地震の余震活動時空間分布 (M4+, 5月31日現在)。  
 本報告ではこれ以後、空間は本震震央を原点にした座標軸、北北東 (NEN) と  
 東南東 (ESE) の方向に射影したもの。

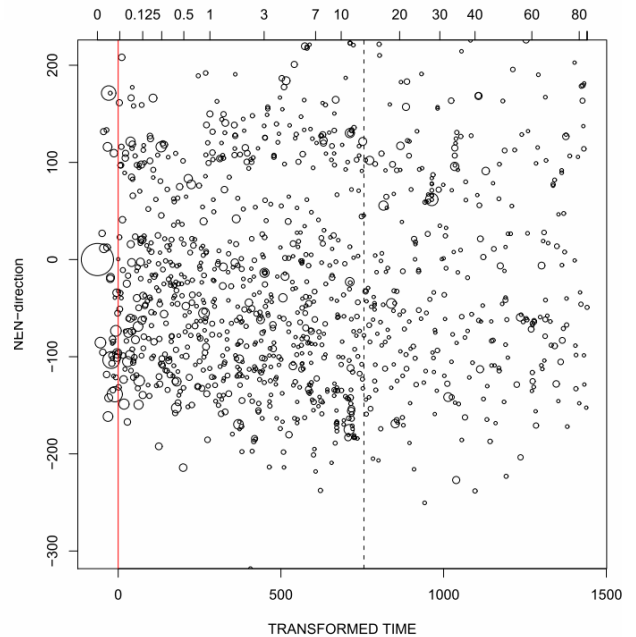
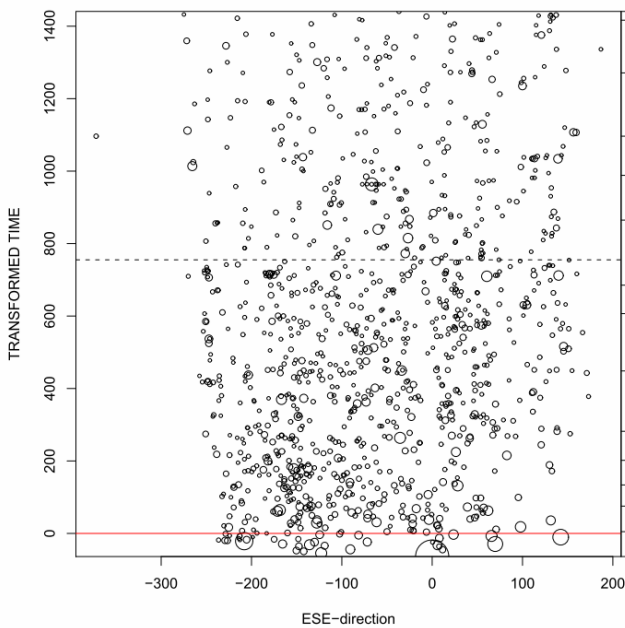
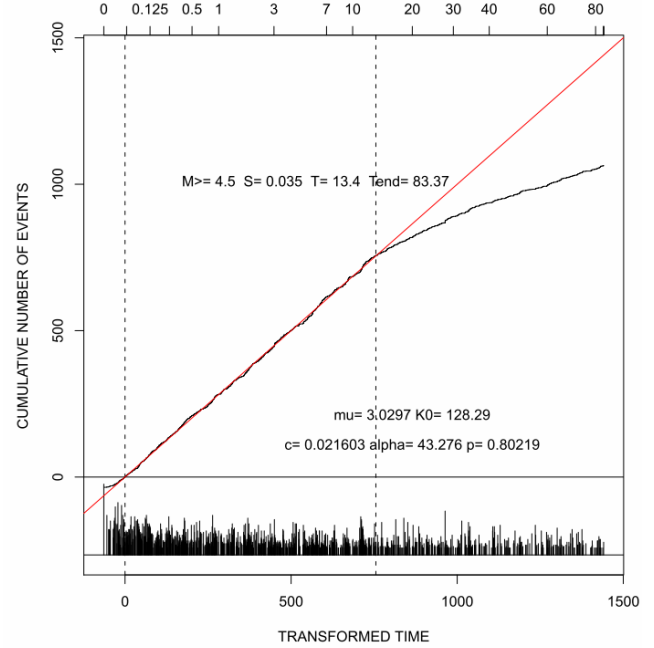
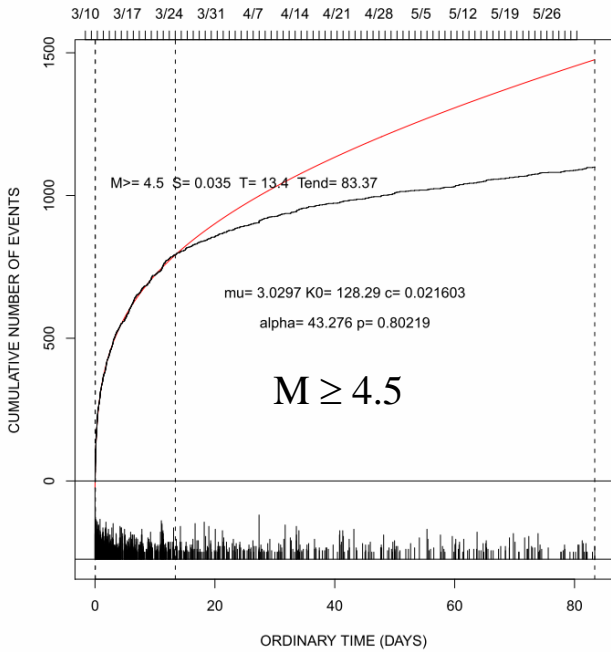


## 東北地方太平洋沖地震の余震活動の特徴(続き)



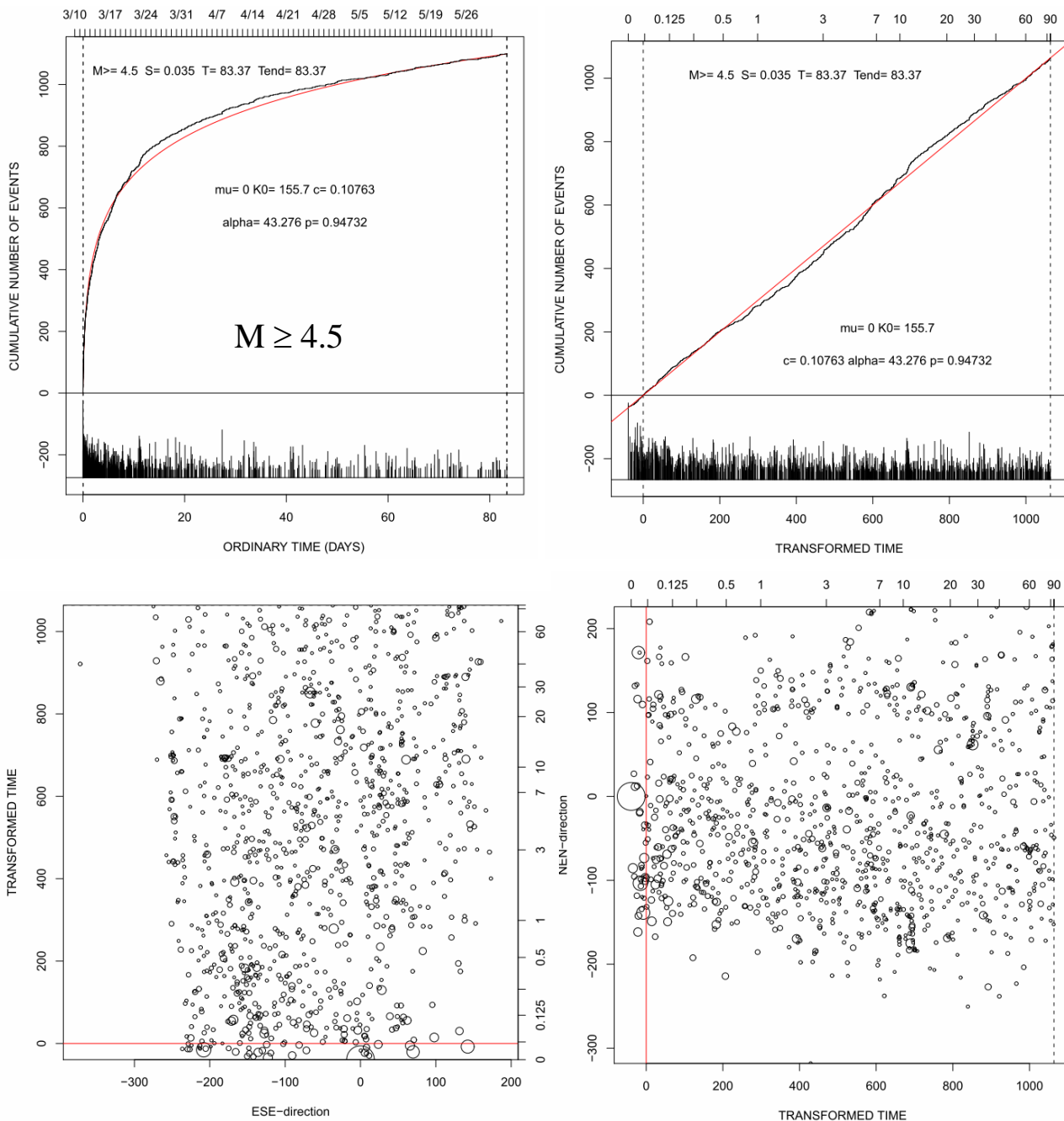
余震活動モニタリング時空間分布 ( $M5+$ , 5月31日現在)。全体的にE T A Sモデルの $\alpha$ 値が大きく2次余震の効果が小さい(大森・宇津の公式に近い)。

## 東北地方太平洋沖地震の余震活動の特徴(続き)



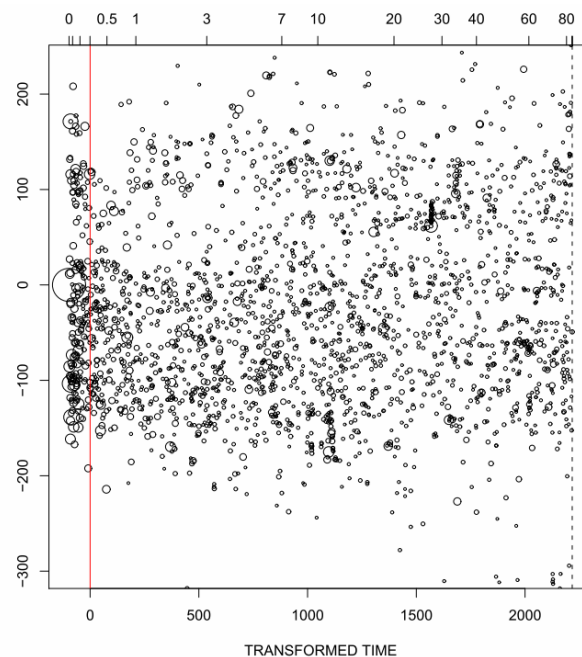
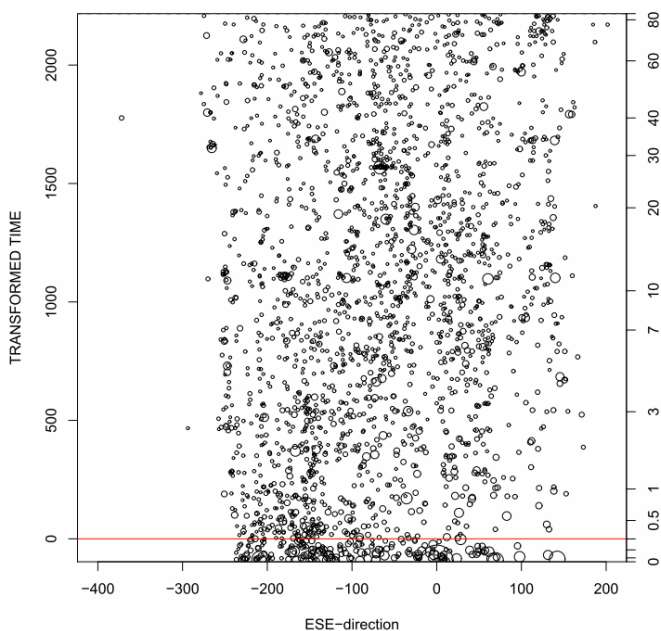
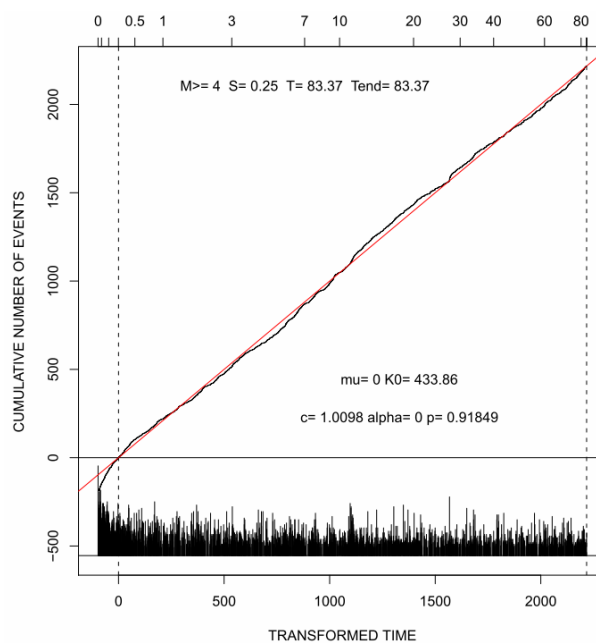
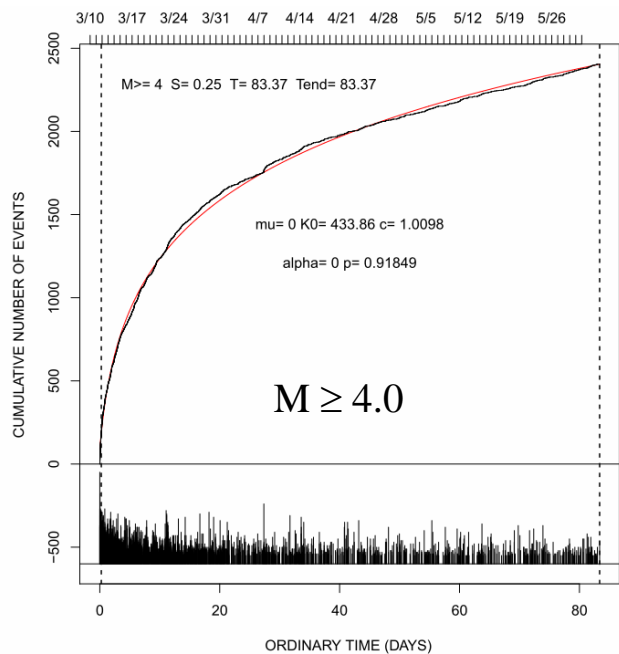
余震活動モニタリング時空間分布 ( $M4.5+$ , 5月31日現在)。静穏化が陸寄りの深い部分で顕著である。

## 東北地方太平洋沖地震の余震活動の特徴(続き)



余震活動モニタリング時空間分布 ( $M4.5+$ , 5月31日現在)。全体的な静穏化を仮定しないモデルでも陸寄りの部分、かつ余震域の高・中緯度部分で静穏化が示唆される。

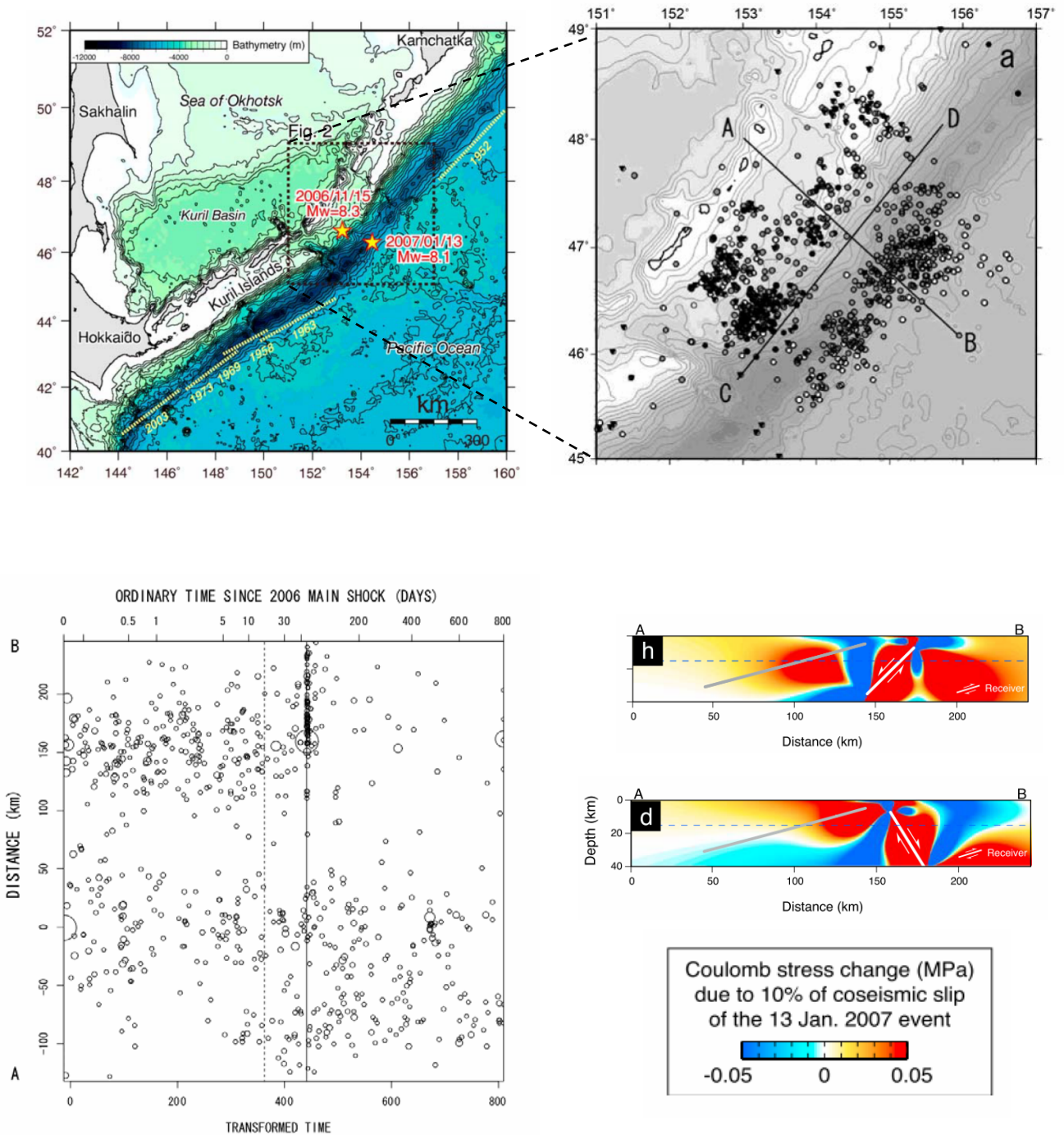
## 東北地方太平洋沖地震の余震活動の特徴(続き)



余震活動モニタリング時空間分布 (M4.0+, 5月31日現在)。検出率の時間的な不均質性 (特に本震直後) を大森・宇津の式でデトレンドした。陸寄りの部分、且つ余震域の中緯度部で静穏化が示唆される。地震後滑り分布 (地理院) と相関か。またアウターライズ地域が最近数週間活発化しているように見える。

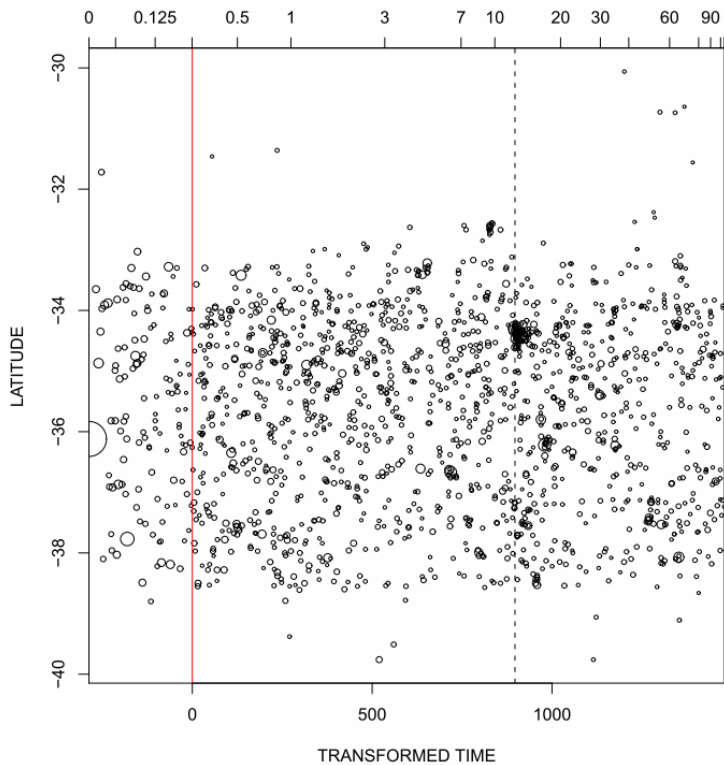
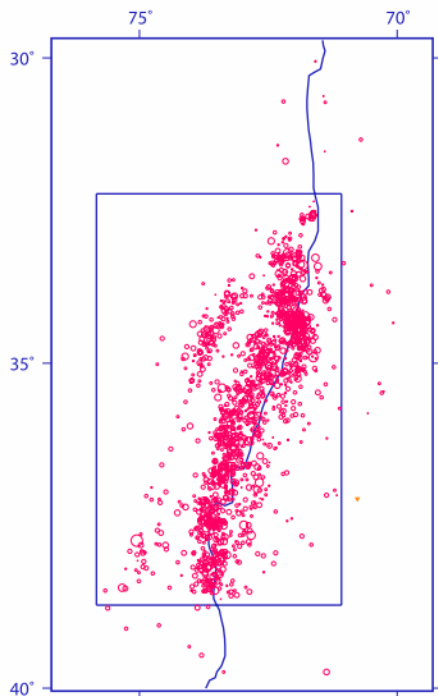


## 2006/11/15 千島沖Mw8.3プレート境界地震の余震活動と 2007/01/13 Mw8.1アウターライズ地震の関係

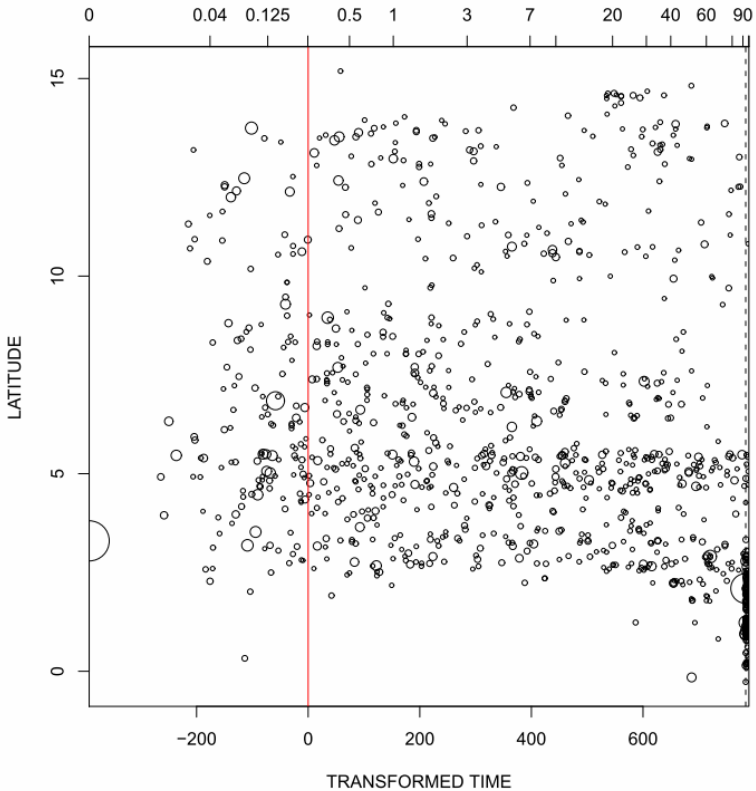
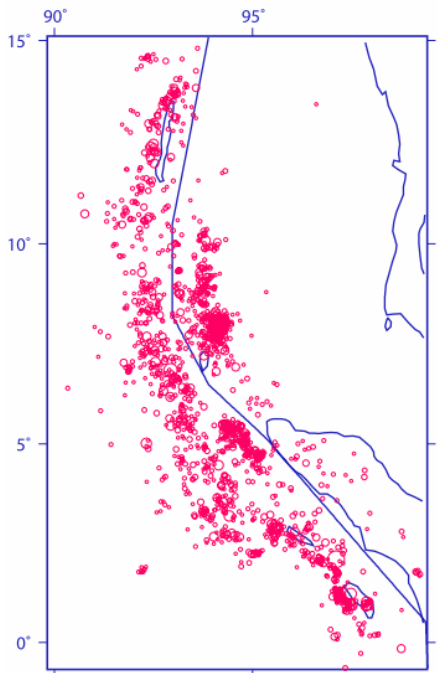


本震 (Mw8.3) プレート境界の余震が活発化、誘発されたアウターライズ部分の余震活動が静穏化してMw8.1の地震がアウターライズで起きた (Ogata & Toda, 2010)。

2010/02/27 00:00-2010/06/10 24:00 N= 1645  
H:0.0-700.0km M:4.0-8.5

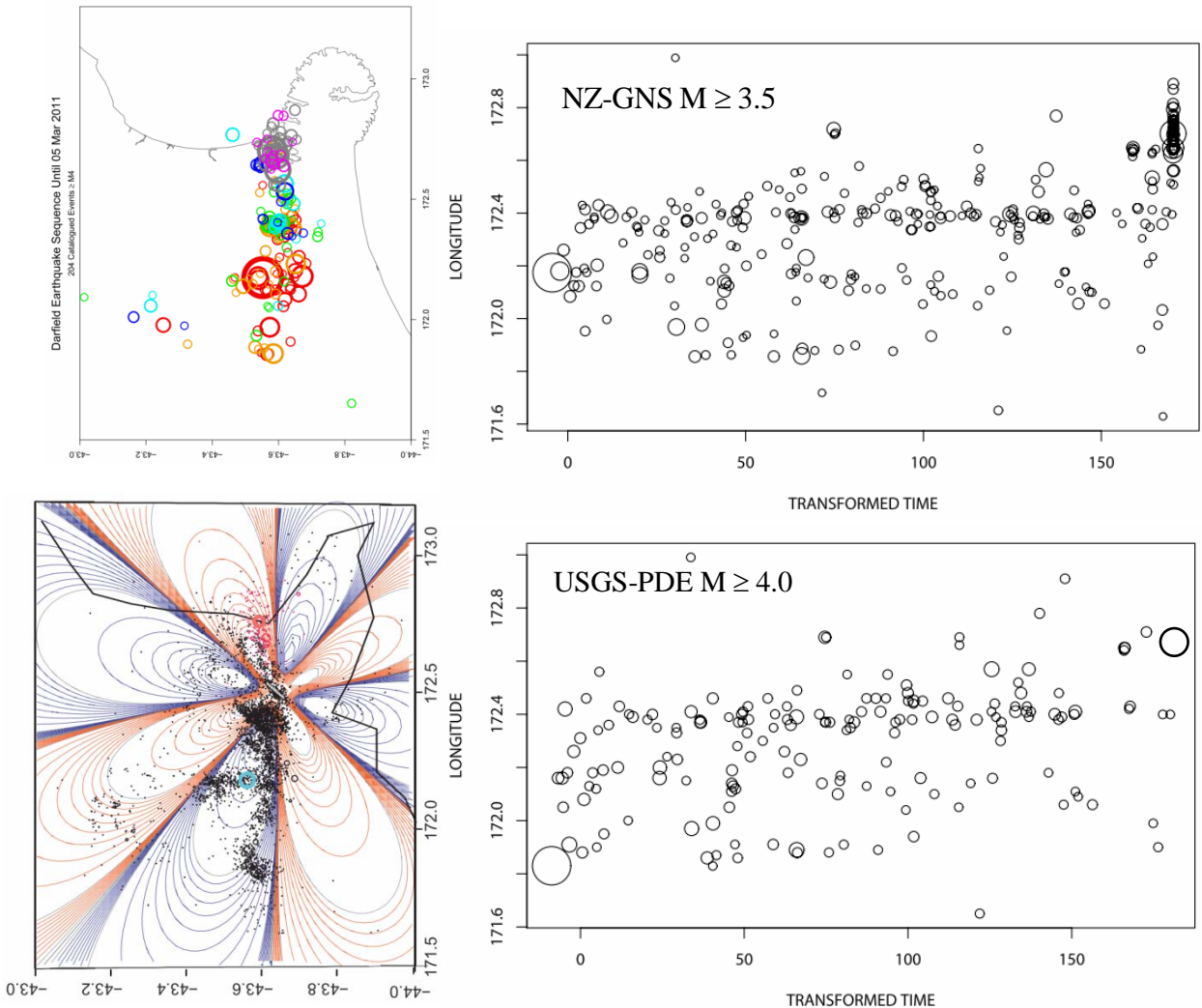


2004/12/20 00:00-2005/03/31 24:00 N= 1782  
H:0.0-100.0km M:4.5-8.5



2010年チリ地震 (Mw8.8) の余震活動 (上図) と2004年スマトラ地震 (Mw9.0) のプレート境界部分の余震活動 (下図)。

## New Zealand Darfield 地震の余震活動とChristchurch地震の関係



余震の時空間分布についての文献：

尾形良彦 (2006) 余震活動の時空間的異常とストレス変化の空間分布, 予知連会報, [第76巻](#).

Ogata (2010) Space-time heterogeneity in aftershock activity, *Geophys. J. Int.*

# 14

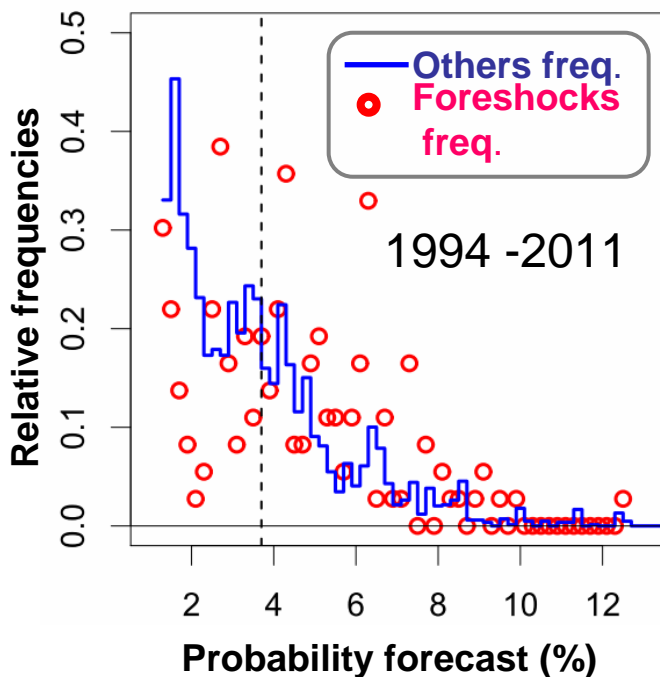
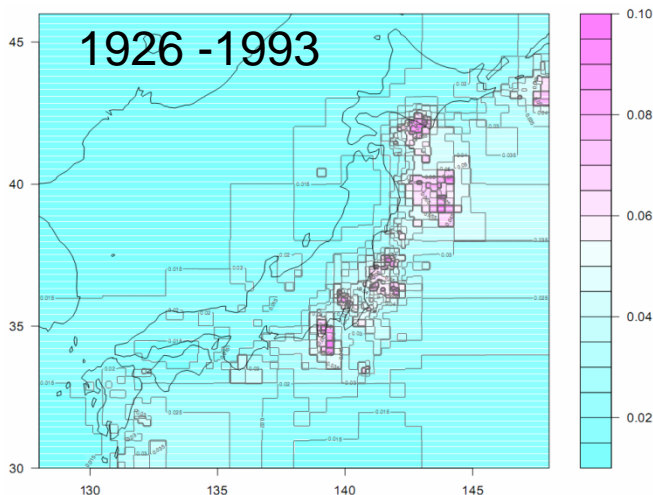
気象庁カタログ1994 - 2011年4月まで、 $M \geq 4.0$  の地震を時空間距離

$$d_{ST} = \sqrt{\Delta_{space}^2 + (c\Delta_{time})^2} \leq 0.3^\circ \text{ (or 33.33km)}$$

で連結する。ただし  $c$  は 1日=1km となるように決める。

群れの先頭地震(含孤立地震)について  
下記の下記の地図で確率予測する。

## Forecasting & Evaluation



1994 - 2011

Forecast	0-2.5%	2.5-5%	5%-	All
Foreshocks	33	84	65	182
Others	1572	1849	770	4191
All types	1605	1933	835	4373
Ratio (%)	2.1	4.3	7.8	4.2

Diff-entropy = -22.7 DiffAIC = -40.0 (cross-table)

左上図は1926年から1993年までのデータから推定した最初の地震 ( $M \geq 4$ ) が前震である確率地図。右上図は1994年から2011年3月まで左図の確率地図で予測した確率に対する発生結果の相対度数(正規化したもの)で赤丸が前震で青がその他で、縦の点線は予報に地域性を入れない場合の前震の全日本での平均値(3.8%)。分割表は予報と実現頻度を取りまとめたもの。



# 複数地震の前震確率予測の計算アルゴリズム

複数の地震がおきた場合、群れ内の地震間同士の時間間隔  $t_{ij}$  (days), 震央間距離  $r_{ij}$  (km), マグニチュード差  $g_{ij}$  を以下のように単位立方体に納まる正規化変数変換する。

$$\text{i.e., } (t, r, g) \rightarrow (\tau, \rho, \gamma) \text{ in } [0, 1]^3 \text{ such that}$$

$$\tau = \begin{cases} 0 & \text{for } t \leq 0.01 \\ \log(100t) / \log(3000) & \text{for } 0.01 < t \leq 30 \\ 1 & \text{for } 30 \leq t \end{cases}$$

$$\rho = 1 - \exp\{-\min(r, 50) / 20\}$$

$$\gamma = \begin{cases} (2/3) \exp\{g / \sigma_1\} & \text{for } g \leq 0 \\ (2/3) + (1/3)[1 - \exp\{-g / \sigma_2\}] & \text{for } g > 0 \end{cases}$$

ただし  $\sigma_1 = 6709, \sigma_2 = 0.4456$

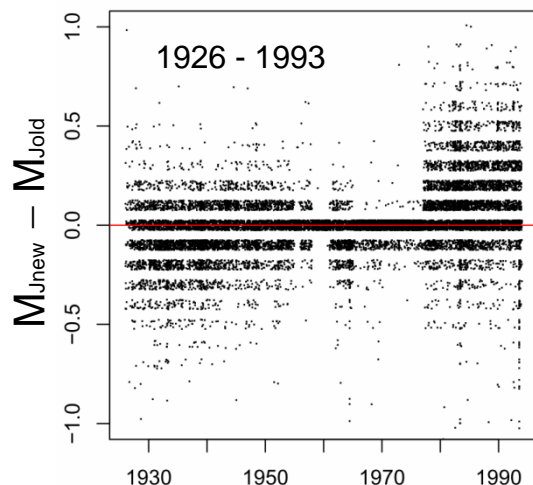
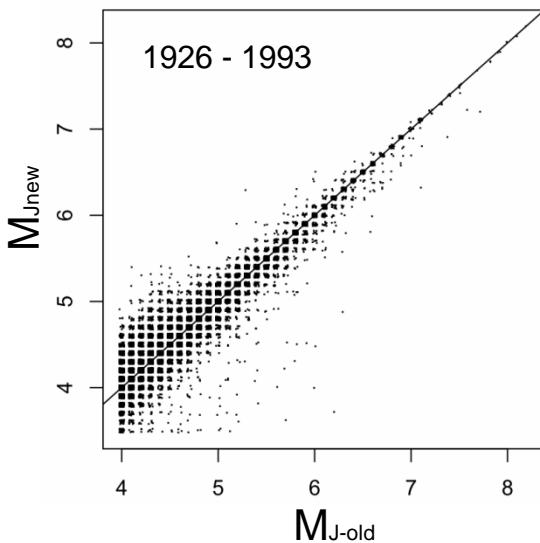
群れのメンバーが追加するごとに確率予測  $p_c$  を次のように計算する

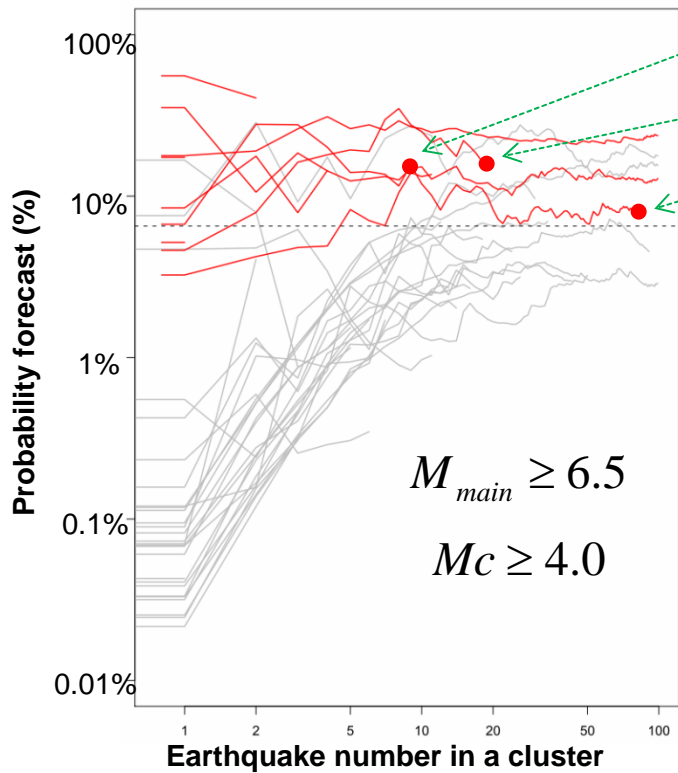
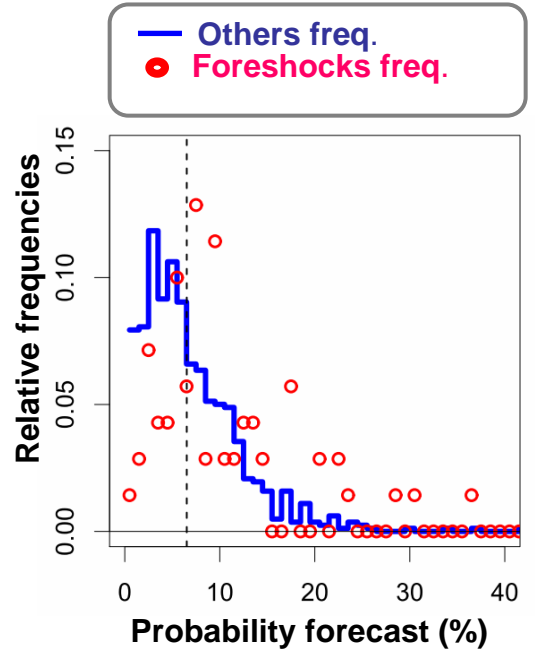
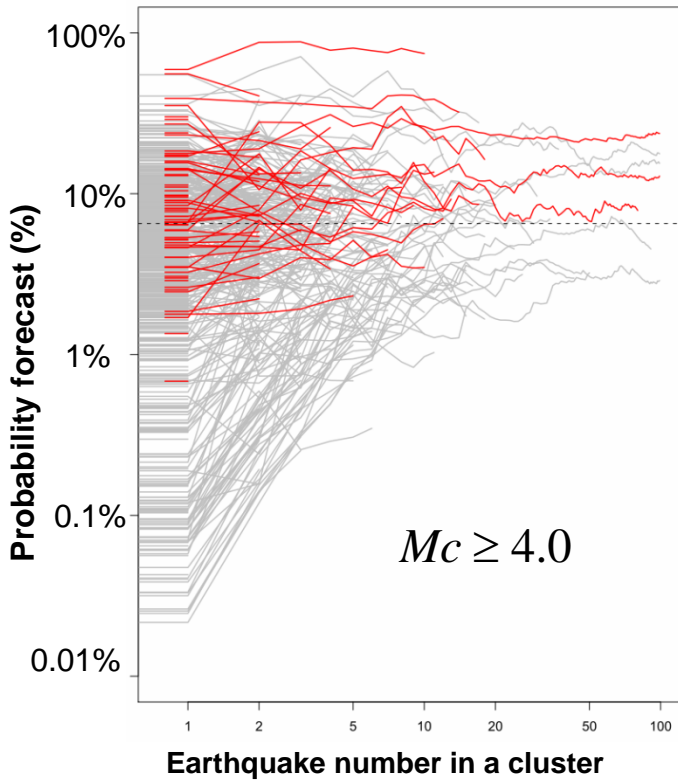
$$\text{logit}(p_c) = \text{logit}\{\mu(x_1, y_1)\} + \frac{1}{\#\{i < j\}} \sum_{i < j} \left[ a_1 + \sum_{k=1}^3 b_k \gamma_{i,j}^k + \sum_{k=1}^3 c_k \rho_{i,j}^k + \sum_{k=1}^3 d_k \tau_{i,j}^k \right]$$

ここで  $\mu(x, y)$  は群れの先頭の前震確率(前頁参照)であり、後項は予測時点での群れの中の全ての地震のペア ( $i < j$ ) について内の関数値を計算し、それらの算術平均をとったものである。係数  $a, b, c, d$  については以下のとおり。

$k$	$a_k$	$b_k$	$c_k$	$d_k$
1	8.018	-33.25	-1.490	-10.92
2		62.77	2.805	295.09
3		-37.66	-2.190	-1161.5

## 気象庁・新旧カタログのマグニチュード比較





- M7.3 Foreshock of 9 Mar 2011
- M7.0 Ibaragi-Ken of May 2008
- M9.0

2\*Entropy0 = 523.96 / 2\*Entropy = 460.29  
 2\*Entropy = -63.68

Forecast & performance

	2.5	5%	10%	15%	
+	4	10	30	12	14   70
	179	211	263	115	51   819
+	183	221	293	127	65   889
+	2.2	4.5	10.2	9.4	21.5   7.9

aic0 = 3178.62 aic1 = 3157.15  
 aic = -21.47

左上図は1994年から2011年3月まで地震群に対して新しい地震が追加(横軸)されるごとに予報される前震の確率(縦軸)で赤線が前震だった場合で灰色線がその他。右上図は左図の予報に関して発生結果の相対度数(正規化したもの)で赤丸が前震で青がその他で横の点線は予報に地域性を入れない場合の前震の全日本での平均値(3.8%)。縦の点線は予報に地域性を入れない場合の前震の全日本での平均値(6.8%)。左下図は左上図の予測で本震がM6.5以上のものだけを取り出した。クロス表は予報と実現頻度を取りまとめたもの。