

10 - 19 福岡県西方沖の余震活動について：最大余震 (M5.8) 以前に報告された相対的静穏化と余震域をストレスシャドウにするような前駆すべりのシナリオ
Relative quiescence reported before the occurrence of the largest aftershock (M5.8) in the aftershocks of the 2005 earthquake of M7.0 at the western Fukuoka, Kyushu, and possible scenarios of precursory slips considered for the stress-shadow covering the aftershock area

統計数理研究所 尾形良彦

Yosihiko Ogata, Institute of Statistical Mathematics

余震の確率予報によると M5.5 以上の大余震の可能性は高々 10% と見積もられていたが、本震後 1 ヶ月経って 4 月 20 日朝に M5.8 の最大余震が起きた。余震の確率予報は余震活動が改良大森関数に則って順調に推移している事を前提としているので、裏を返せば今回の余震活動はそうでなかった可能性が高い。余震活動の静穏化の有無を解析することによって大きな余震または付近での本震以上の地震発生¹⁾の確率的な予測の利得があがることが期待されている²⁾ので、今回の余震を解析することでそのような予測を試みた。

第 1 6 3 回予知連の会議 (4 月 6 日開催) で 4 月 4 日までの余震活動を E T A S モデルで解析した結果が第 1 図に示されている。下限マグニチュード 2.6 (以下 M2.6+ と記す) の余震について $p = 1.0$ で減衰していたが 3 月 28 日頃から有意に相対的静穏化となっている。M3.0+ については $p = 1.1$ の減衰をしていたが 3 月 21 日頃そして 3 月 29 日頃にと、段階的に低下するような有意な静穏化が続いていた (第 1 図下段)。そこで、余震域が概ね stress-shadow となるように、以下のようなシナリオの前駆すべりを考えた。それらは余震北部の本震断層に共役な右ずれの余震断層、オフフォールト余震分布 (海の中道 - 石堂断層) が北の方に延びていると仮定したもの、西山断層の北端部、本震断層に平行に走る北東側の海底断層の一部であった。他方、警固断層は陸上に示された範囲で滑らせると福岡県西方沖の地震の余震域全体の CFS を増加させており stress-shadow にならない。

その後も、最大余震が発生する直前まで M2.6+ と M3.0+ について余震活動の経過をモニターしたが、静穏化は継続しており、その有意性の程度は変わっていなかった (第 2 図)。

結果的には、最大余震として警固断層の博多湾延長部の北端部がすべり、これによる stress-shadow のパターン (第 3 図右下図) と類似のものはあったが、上記のシナリオのいずれでもなかった。二次余震の震源分布 (第 3 図) から、最大余震の震源域は南部の 10 km 弱より深いところに位置しており、走行角が本震のものより時計回りに若干ずれており、警固断層のものとはほぼ一致する。二次余震面を北の方に延長し、震源の間隙を中央に据えた断層モデル (第 3 図左側図) を考え、ここでの前駆すべりを仮定した。受け手の断層群として本震と同様のメカニズムをもつ一次余震群への Δ CFS 分布を求めた (第 3 図右側)。深さ 10km 前後では余震域の大方でストレスシャドウになっているが、5km 前後の浅い部分では逆に CFS が増加している。これは、震源の深さ対経過時間のプロット (第 3 図中列) から分かるように、時間経過とともに余震分布密度が浅いほうに移動していることと調和的である。

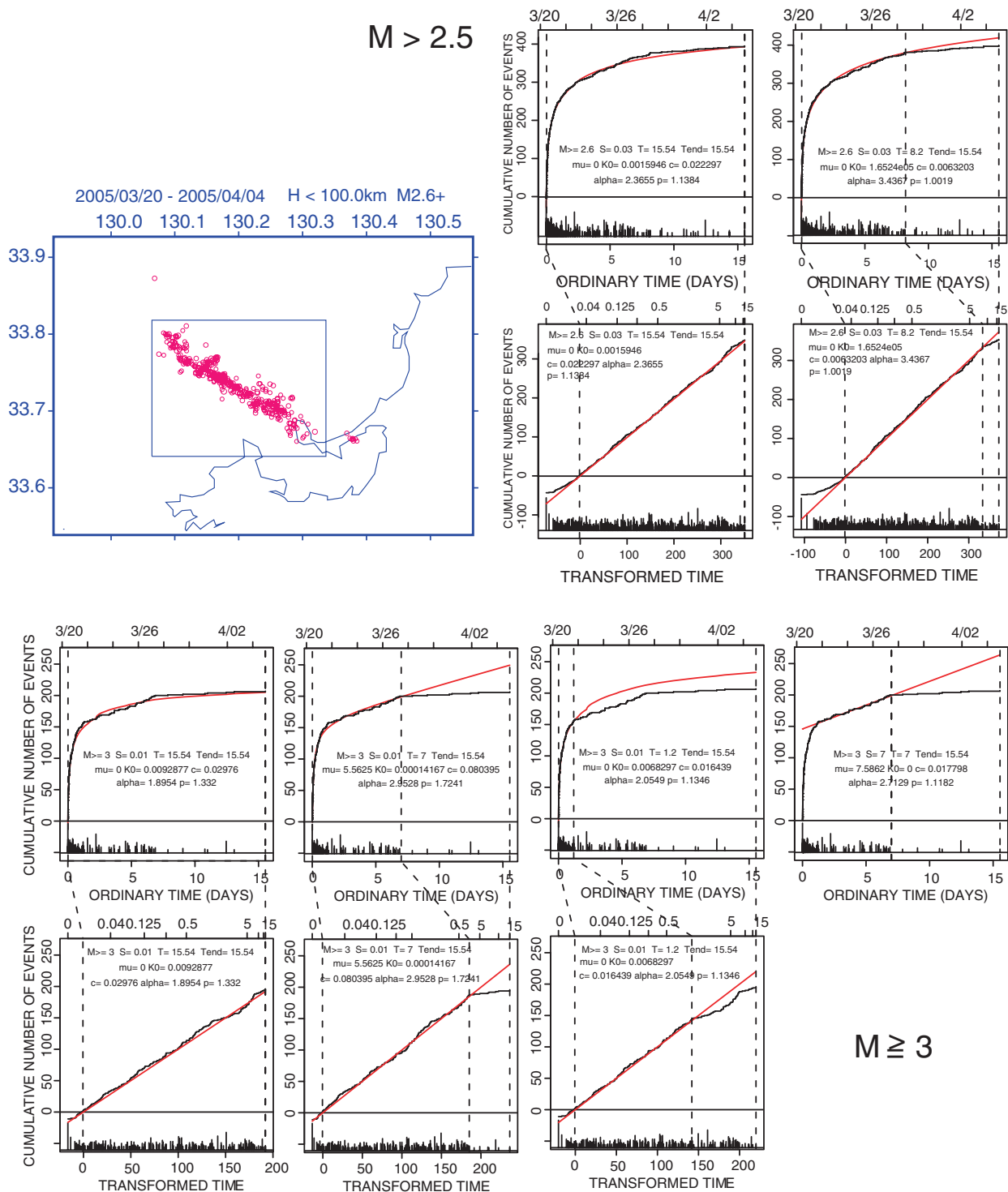
また、海の中道から博多湾のオフフォールト地震活動が最大余震 10 日前頃から顕著に低下している (第 4 図累積図)。これも先程の最大余震断層内の前駆的なすべりによって説明可能である。海の中道直下と箱崎埠頭直下の地震群について、いずれも本震による Δ CFS は +1 ~ +2bar (第 4 図の上 2 図) で、これでトリガーされた高い活動が、最大余震内のすべりにより Δ CFS が負に転じたからであると考えられる³⁾ (第 4 図の右下および左下図)。

最大余震の余震，つまり2次余震についても解析した。これらの中で最大の M5.0 の余震が5月2日未明に発生したが，この直前までの発生データに改良大森公式をあてはめた。活動に変化がある可能性が高いが，下限マグニチュードによって有意性が違う。たとえば M1.5+ は微妙で，M2.0+ の場合（第5図左上図）は有意である。第5図の左下図は二次余震の最大 M5.0 の余震が最大余震M 5.8 によって励起されていることを示している。右下の図は，その M5.0 の余震の断層内で前駆すべりも励起されたものと仮定したときに，今度はそれによって二次余震の余震域がその中央部を除きストレスシャドウとなり二次余震の活動が相対的に静穏化したのではないかということを示唆する図である。震源帯 X - Y に沿った時空間プロット（右上）によると，二次余震が M5.0 の余震に向かって収束している様に見え，話が合う。

本解析にかんして気象庁一元化震源データ，防災科技研 F-net メカニズムデータおよびソフトウェア TSEIS（東大震研）と MICAP-G（気象研）を使用した。

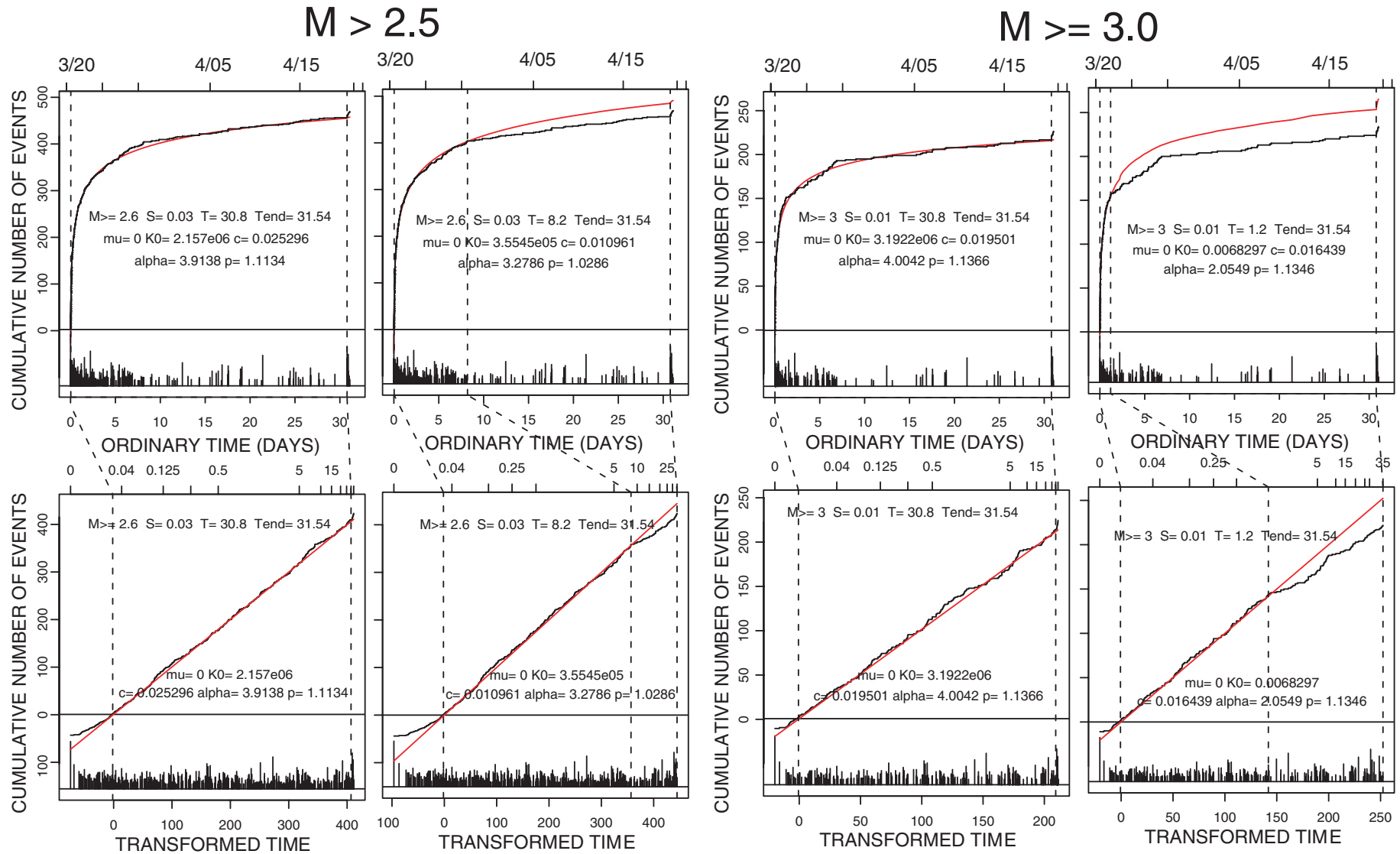
参考文献

- 1) 尾形良彦，連絡会報，71 巻 (2004), 260-267 頁 .
- 2) Ogata, Y., J. Geophys. Res., 106, (2001), 8729-8744.
- 3) Toda, S. and Stein, R., Geophys. Res., 108, (2003), B12, 2567.
- 4) 国土地理院，連絡会報 74 巻 (2005),412.



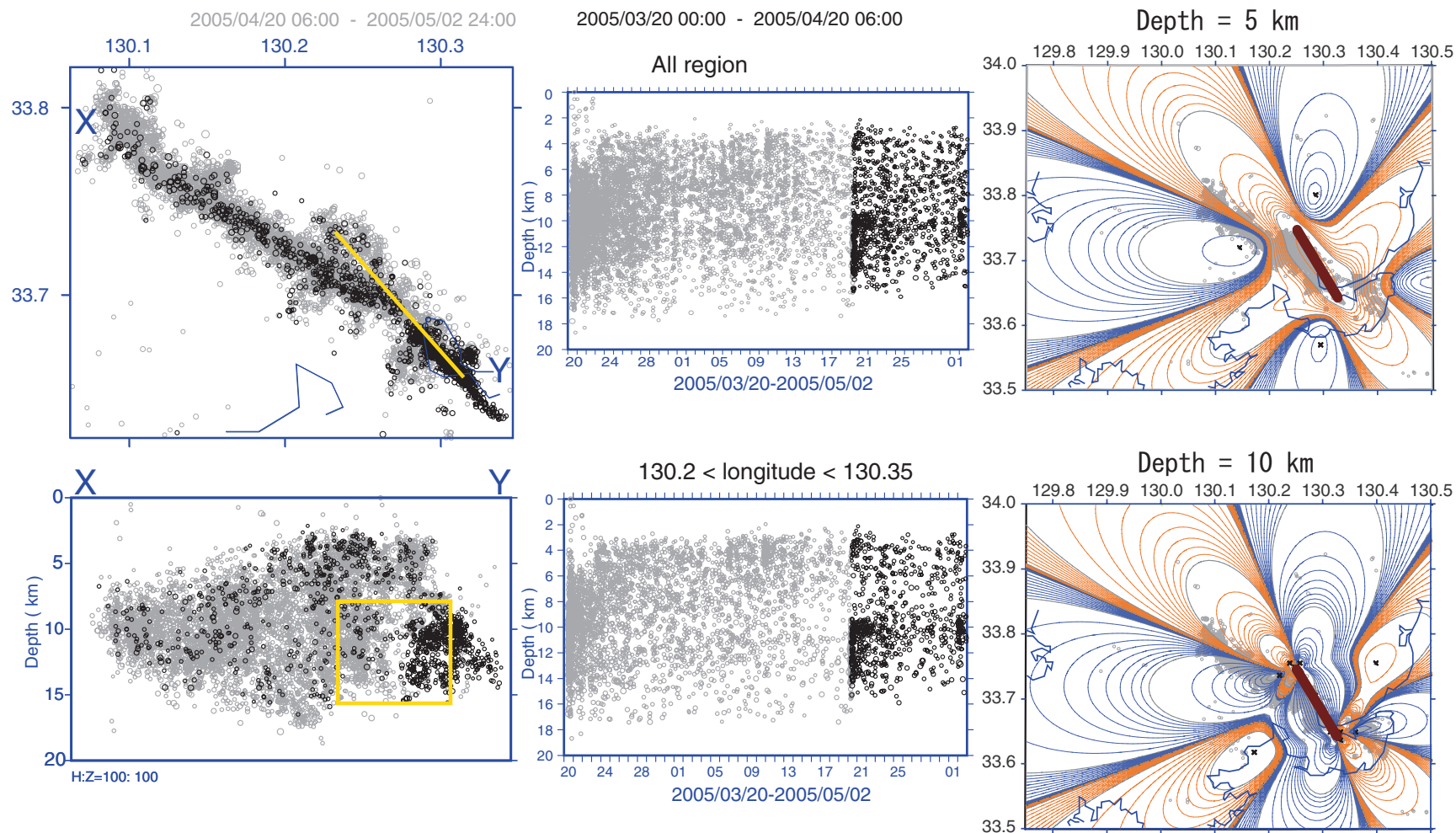
第1図 2005年3月20日の福岡県西方沖の地震 ($M7.0$) の4月4日までの余震 (左上の震央図) の累積数 (黒色は実際のもので赤色は理論的なもの) とMT図。上段が $M2.6+$ で下段が $M3.0+$ の余震列。上下段とも左側図は余震全体に一つのETASモデルを当てはめたもの、上段右側図は変化点 (3月28日の点線 $\Delta AIC = -5.2$) を境に前半はETASで後半はポアソン過程モデルを当てはめたものである。下段右3列の図は、左から順に同様の変化モデル (3月27日, $\Delta AIC = -4.2$)、そして2回分の変化点のモデル (3月21日と27日, $\Delta AIC = -4.2$) の図である。横軸は点線で繋いだ2図の上図が通常の時間経過で下図がETASによって変換された時間。

Fig.1 The aftershock sequence ($M2.6+$ and $M3+$ for the top and bottom blocks, respectively) led by the $M7.0$ earthquake of March 20, 2005 in the Fukuoka-Ken western offshore, till the April 4, 2005: their cumulative numbers and magnitudes against ordinary time (the top of the paired diagrams) and transformed time by the fitted ETAS model (the bottom of the paired diagrams). The left side panels show the fit of one ETAS model to the events throughout the entire period, while the other panels show the best fit of the two-fold model (ETAS for the former period and the stationary Poisson for the latter) for the two periods divided at the possible change-points (vertical dotted lines) even taking account of the model complexity including the searched change-point.: in $M2.6+$ case it is at March 28 ($\Delta AIC = -5.2$), and in $M3.0+$ case those are either March 27 ($\Delta AIC = -4.2$), or the three-fold model divided at March 21 and then 27 ($\Delta AIC = -4.2$).



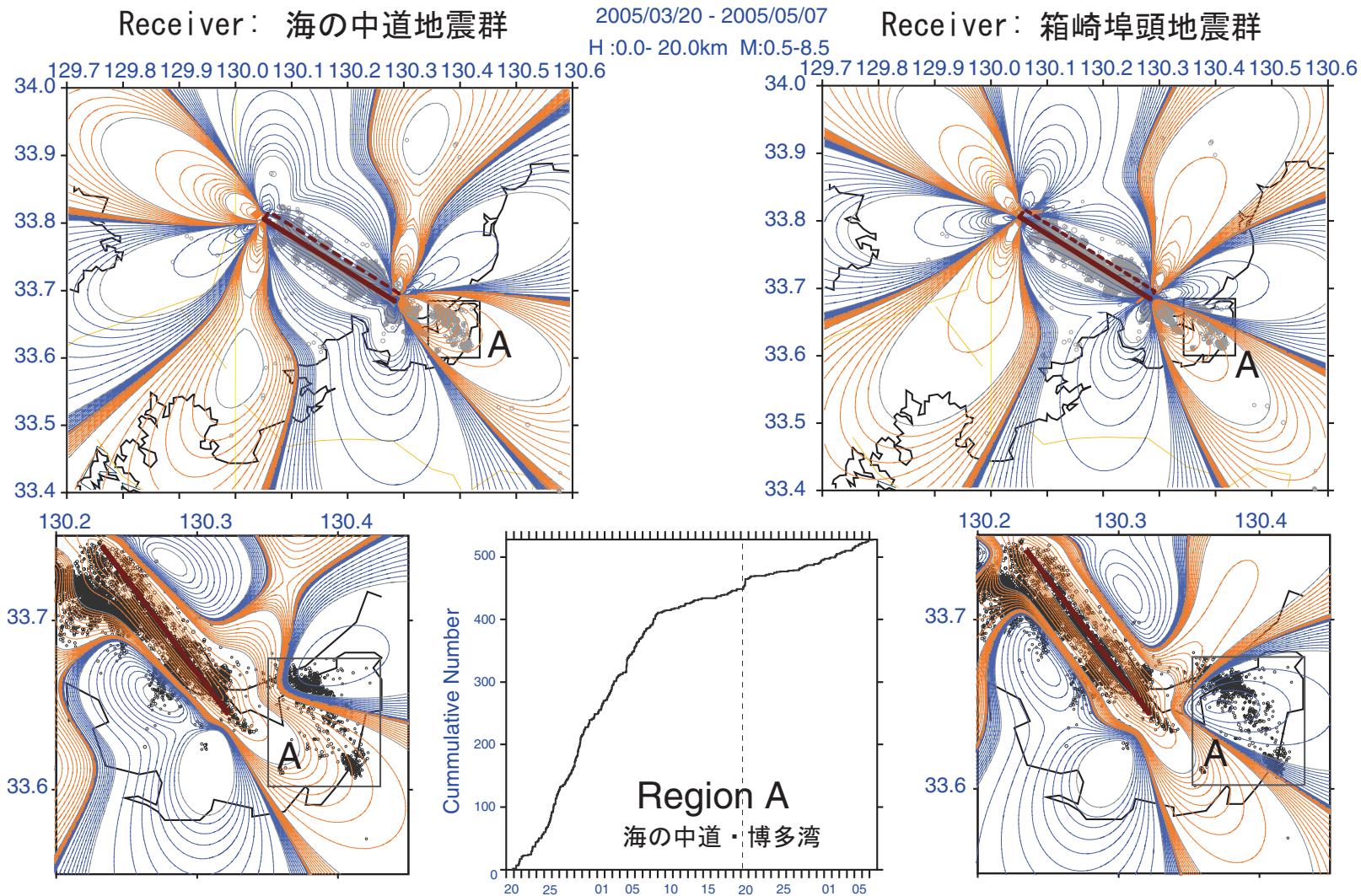
第2図 第1図の余震列の4月20日の最大余震(M5.8)までの累積数とMT図。第1図と同じ変化点で有意な静穏化の継続がみられる(M2.6+で $\Delta AIC = 0.0$, M3.0+で $\Delta AIC = -7.8$)

Fig.2 The aftershock sequences till the largest aftershock of M5.8 at April 20, 2005. The models with the same change-points as in Fig. 1 still remain better fitted with $\Delta AIC = 0.0$ for M2.6+ case and $\Delta AIC = -7.8$ for M3.0+ case.



第3図 5月2日までの余震震央分布（左上），地表線分XYで切った深さ断面の余震分布（左下），全ての余震域の余震の深さ対経過時間（中上）および最大余震寄りの領域のもの（東経130.2度以東，中下図）。黒丸プロットは最大余震発生以後のものである。黄色線の面領域内（ $H = 8\text{km}$, $L = W = 8\text{km}$, $\text{strike} = 320^\circ$ ）で仮定された左横ずれの前駆的すべりによる，本震と同様の左横ずれのメカニズム⁴⁾（ $\text{strike} = 300^\circ$ ）の余震に対する，深さ5km（右上）と深さ10km（右下）での ΔCFS パターン；赤色が正の値で，青色が負の値。

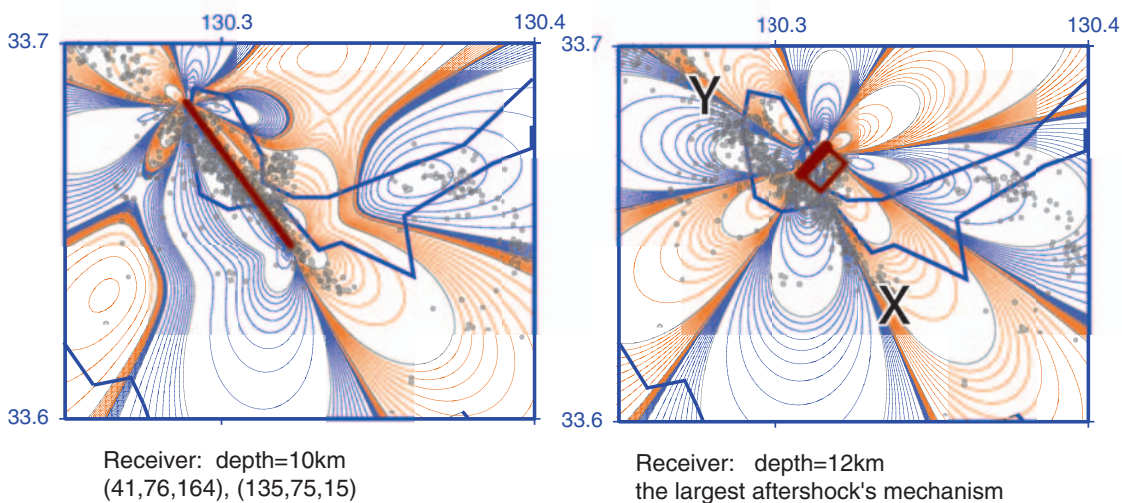
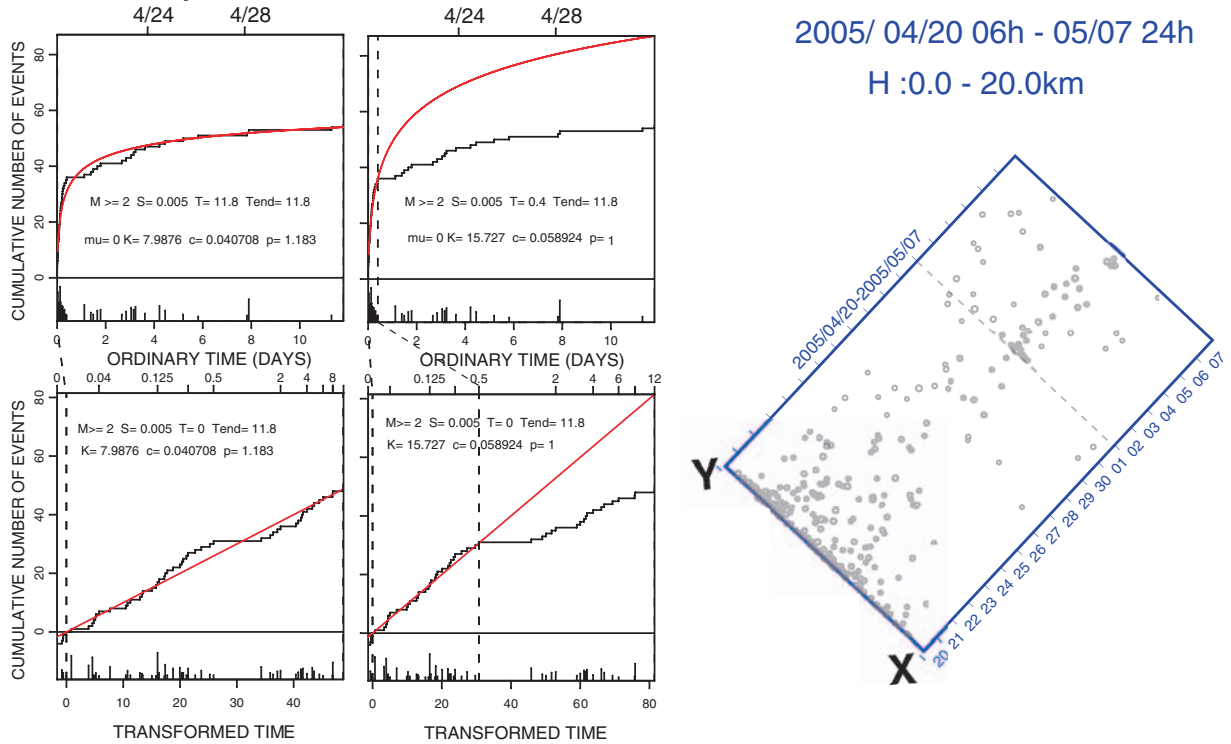
Fig.3 The left-side two panels show aftershock epicenters (top) and the projection of hypocenters to plane of X-Y against depth (bottom). The middle two panels show the depth against elapsed time of events in the entire aftershock region (top) and in the region close to the largest aftershock (bottom). Black circles represent the aftershocks after the largest aftershock. The right-side two panels indicate ΔCFS contours at the depth of 5km (top) and 10km (bottom) for the aftershocks of similar mechanism⁴⁾ to the mainshock's assuming the precursory slip on the yellow color rectangular region ($H = 8\text{km}$, $L = W = 8\text{km}$, $\text{strike} = 320^\circ$) shown in the left panels.



第4図 博多湾地域でのオフフォールト余震活動（下図中央の累積数，縦の点線は最大余震の発生時）に対する深さ7km前後での Δ CFSパターン。本震モデル⁵⁾（上2図）と最大余震の前駆すべりモデル（下両脇図，第3図参照）に対して受け手の断層群は左横ずれを仮定，走行は海の中道近辺（左側2図）で300度，箱崎近辺（右側2図）で320度。

Fig.4 The Δ CFS contours at the depth of 7km for the off-fault aftershocks in the region A, the cumulative number of which against the time is shown in the bottom middle panel where the vertical dotted line indicates the occurrence of the largest aftershock of M5.8. The source models are of the mainshock⁵⁾ in the top panels and of the assumed precursory slip (left lateral, strike = 320°, cf. Fig. 3) in the bottom panels; and the strike angle of the receiver fault is 300° and 320° in the northern part (left panel) and southern part (right panel) of the region A, respectively.

Secondary aftershocks of the M5.8 event



第5図 左上4図は最大余震 (M5.8) の二次余震 (M2.0+) で5月2日未明の M5.0 の余震までの累積数と MT 図。左側の列のものが全体区間、右側のものが点線の時刻 (0.4 日) を境に別々の改良大森公式モデルを当てはめたものである。変化モデルを支持する有意性は $\Delta AIC = -1.0$ である。左下図は最大余震 (M5.8) の断層モデル (第3図参照) に対して M5.0 の余震の断層パラメタ (気象庁メカニズム解) を受け手としたときの ΔCFS パターン。右下図は逆に M5.0 の2次余震の前駆すべり断層モデルに対して最大余震のメカニズムを受け手とする ΔCFS パターン。右上図は2次余震の震源帯 X-Y に沿った時空間プロットで、点線は M5.0 の2次余震の発生時刻。

Fig.5 The secondary aftershock sequences of the largest aftershock of M5.8 till the M5.0 event at May 2, 2005. The significance of the change-point models against the normal decay by fitting the modified Omori model (red curves) is $\Delta AIC = -1.0$. The bottom panels show the ΔCFS contours at the depths shown in the figure bottom. The source models are of the largest aftershock (M5.8, left diagram) and of the assumed slip (right diagram) preceding M5.0 events whose depth and mechanisms indicated in the figure are due to the JMA; and the receiver fault is opposite to each other. The top right panel shows XY segment versus time plot of the secondary aftershocks where dotted line indicates the occurrence time of the M5 event.