

1.1-1 余震活動の時空間的異常とストレス変化の空間分布

Anomalies of aftershock activities in space and time measured by the Omori-Utsu formula and stress changes

統計数理研究所 尾形良彦
Yoshihiko Ogata, Institute of Statistical Mathematics

震源データの一元化によって、微小地震の検知率が飛躍的に高まっただけでなく、震源の相対的な位置の精度が向上し、余震分布によって震源断層などの輪郭が見えるようになった。本報告では余震活動の時空間的異常を比較的明瞭に見る方法を提案する。この為には、先ず大森・宇津の余震減衰公式（改良大森公式）を当てはめ、それを積分した理論的累積関数を使って余震の発生時刻を伸縮変換する。すると、順調に経過している余震活動は全体として変換時刻のもとで一様な分布になるという統計的性質がある。この事に依拠して余震の変換時刻の時空間分布が一様に各部分で推移しているか否かを調べる。変換時刻の時空間分布が或る部分で非一様であれば、そこで大森・宇津の余震減衰公式と実際の余震発生の乖離があることを示す。この様にして異常が何処にあるかを比較的明瞭に見ることができる。

本報告では最近の地震の余震活動の例をとて、変換時刻に関する余震の深さ、緯度及び経度の時空間分布を示した。順調な余震活動の場合は、各領域で密度の濃淡があるものの、変換時刻に関して一様な推移をするか、または外側に多少滲みだすような広がりを示す（第2図参照）。しかし、余震域が明確に拡大するような新たな破壊（二次余震）がある場合は、その前に主余震の活動域が縮小（一部静穏化）するか、または余震の活発な部位の移動（一部静穏化と一部活発化）が見られる（第3図参照）。そのような変化を説明するために、大きな余震破壊の断層モデルに依拠して、その一部または周辺の前駆的または事後的非地震性のすべりモデルを仮定し、本震と同様のメカニズムを持つ余震を受け手としたクーロン・ストレス変化のパターンを試みに計算し、その関係で静穏化・活発化が説明可能なものを図示した（第3図参照）。ただし福岡県西方沖のストレス変化のパターンについては文献1と2にあるので省略し、2005年宮城県沖の地震の場合は余震域南部境界（北緯38.1度付近）のプレート境界のすべりを考えた。

このほかの余震活動の時空間的異常に関しては、2003年十勝沖地震の余震³⁾、2004年釧路沖地震の余震³⁾およびカルフォルニアの1992年Landers地震の余震⁴⁾に関する解析例がある。2003年宮城県北部地震の前震の様に、余震活動の異常の後に本震と同規模またはそれ以上の地震が近隣に起きる例⁵⁾も数多くあるので、このようなプロットによって余震活動の監視を積み重ねる価値があると思われる。

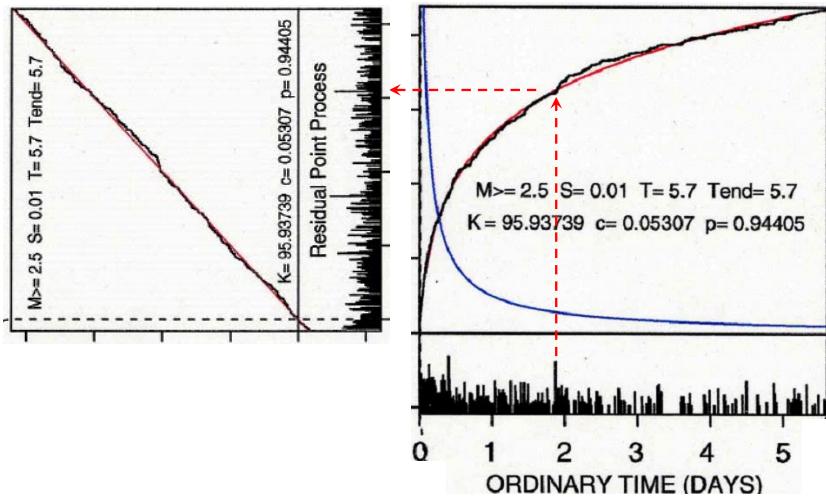
本解析にかんして気象庁一元化震源データおよびソフトウェアTSEISとMICAP-Gを使用した。

参考文献

- 1) 統計数理研究所（尾形良彦），予知連会報，74巻（2005），529-535.
- 2) Ogata, Y., Geophys. Res. Lett., 33 (2006) doi:10.1029/2005GL024405.
- 3) 統計数理研究所（尾形良彦），予知連会報，74巻（2005），83-88.
- 4) Ogata, Y., L. M. Jones, and S. Toda, J. Geophys. Res., 108 (2003), doi:10.1029/2002JB002009.
- 5) Ogata, Y., J. Geophys. Res., 106, (2001), 8729-8744.

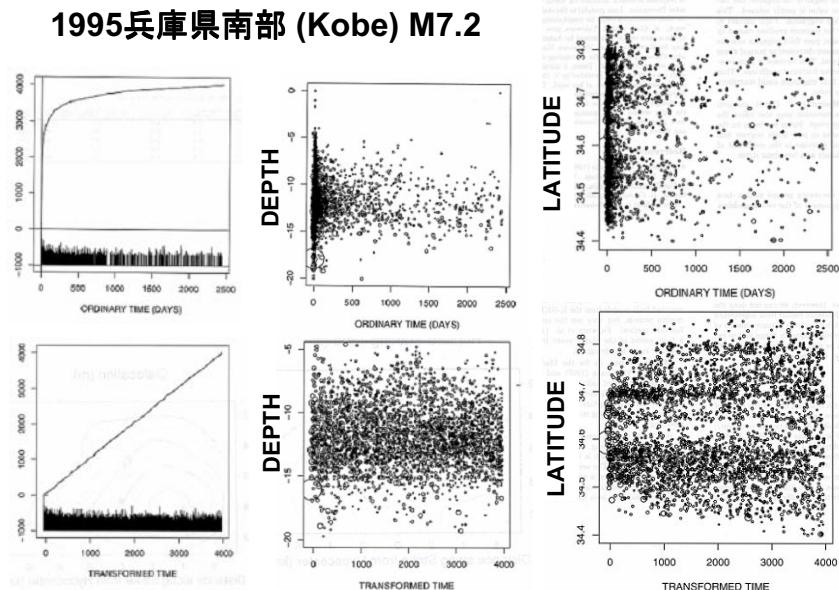
Theoretical cumulative number of the events:

$$\Lambda(t) = \int_0^t \lambda(s) ds$$



第1図 大森・宇津公式の理論的累積関数に基づく時間変換の模式図. 本目的のためには必ずしも余震の検出率が時間的に一様でなくても空間的に一様であれば良い. 本震直後の検出率の低さはパラメタ c の大きさで吸収する.

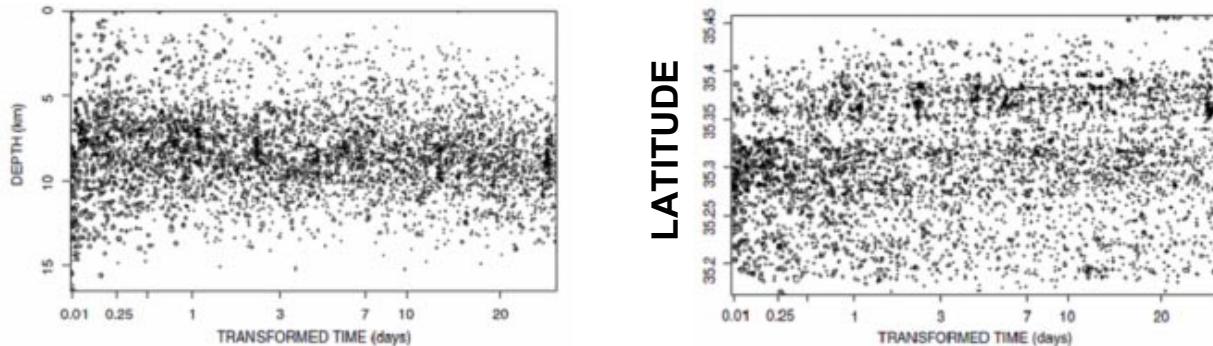
Fig. 1. The increasing function of time that is obtained by integrating the Omori-Utsu (modified Omori) formula is used to transform the occurrence times to the uniformly distributed occurrences (stationary Poisson process) if the formula fits the data accurately. Then we discriminate anomalous zones of the space-time plots of actual aftershocks with the transformed time axis. We allow large c -value for the low detection rate in the beginning.



第2図 變換時刻に対する深さ、北緯あるいは東経の時空間経過で特に顕著な(相対的)静穏化や活動重心の移動が見られないもの. すなわち, これらは場所的には活動度が違うものの, その時間推移については一定あるいは境界部に滲みだしている(拡散).

Fig. 2. Space-time plot of depth, latitude or longitude against the transformed time, where we see no conspicuous gap of (relative) quiescence nor migration of activity, or allowing the examples showing a slight diffusion of the activity (e.g., the Kobe case).

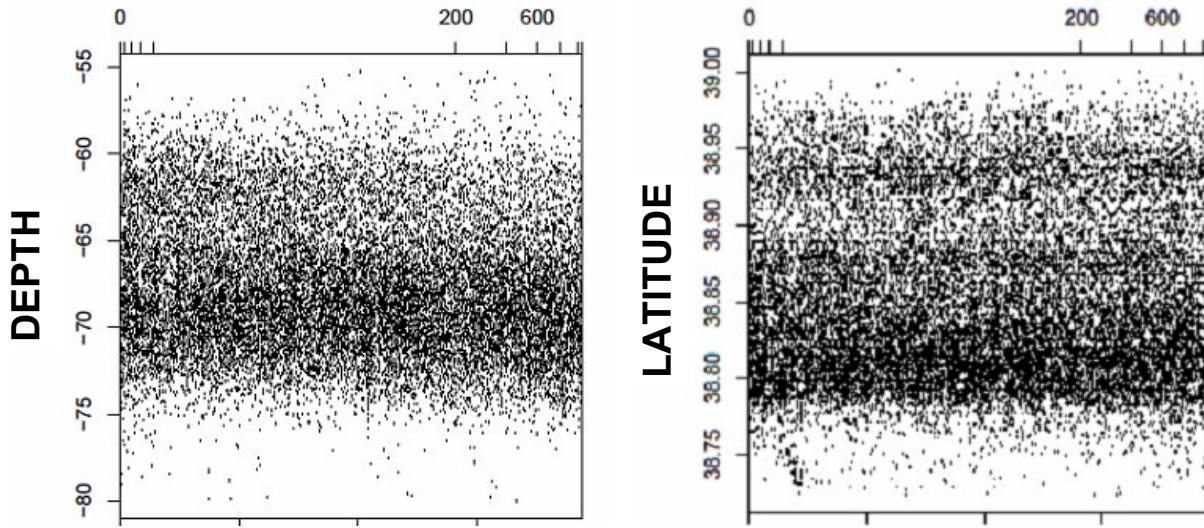
2000年鳥取県西部 (Tottori-Ken-West) M7.2



第2図 変換時刻に対する深さ、北緯あるいは東経の時空間経過で特に顕著な(相対的)静穏化や活動重心の移動が見られないもの。すなわち、これらは場所的には活動度が違うものの、その時間推移については一定あるいは境界部に滲みだしている(拡散)。

Fig. 2. Space-time plot of depth, latitude or longitude against the transformed time, where we see no conspicuous gap of (relative) quiescence nor migration of activity, or allowing the examples showing a slight diffusion of the activity (e.g., the Kobe case).

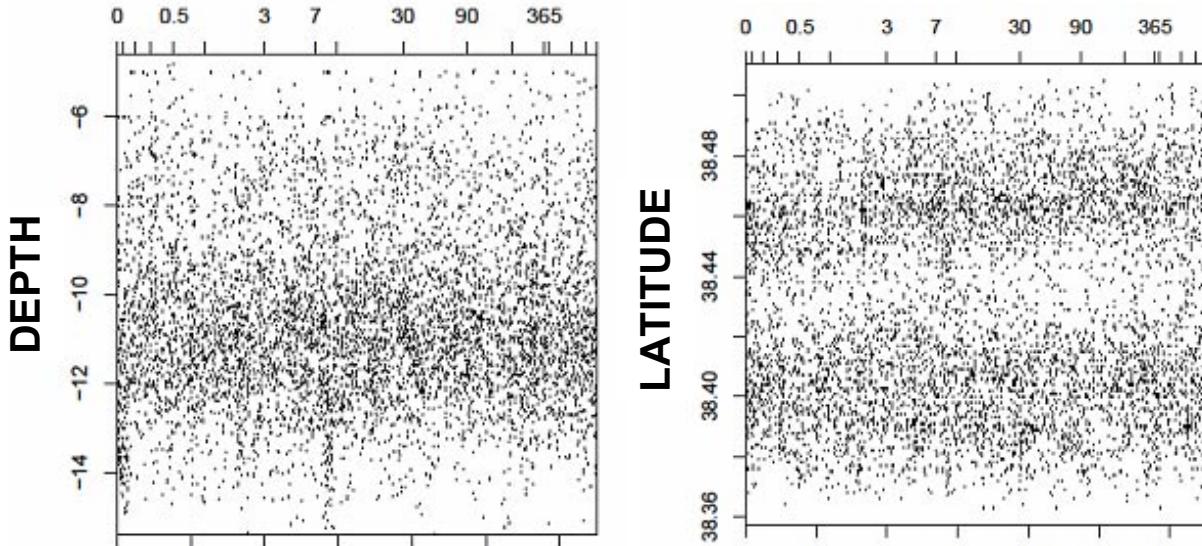
2003年宮城県沖 (Miyagi-Ken-Oki) M7.1



第2図 変換時刻に対する深さ、北緯あるいは東経の時空間経過で特に顕著な(相対的)静穏化や活動重心の移動が見られないもの。すなわち、これらは場所的には活動度が違うものの、その時間推移については一定あるいは境界部に滲みだしている(拡散)。

Fig. 2. Space-time plot of depth, latitude or longitude against the transformed time, where we see no conspicuous gap of (relative) quiescence nor migration of activity, or allowing the examples showing a slight diffusion of the activity (e.g., the Kobe case).

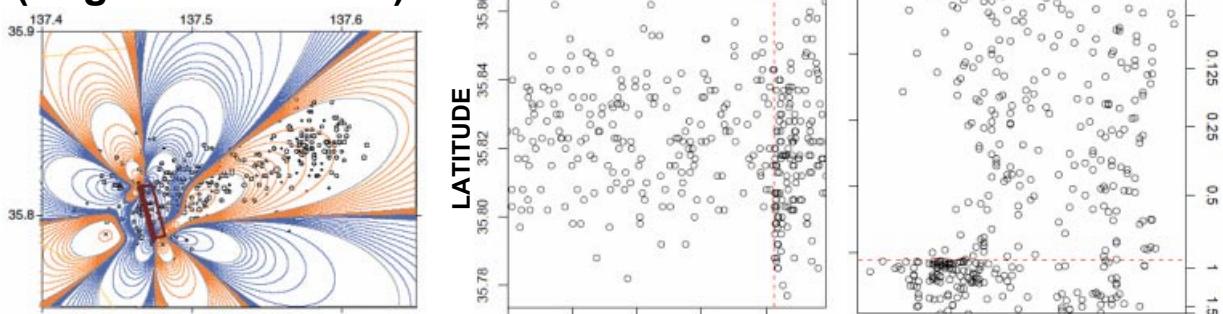
2003年宮城県北部 (Miyagi-Ken-North) M6.2



第2図 変換時刻に対する深さ、北緯あるいは東経の時空間経過で特に顕著な(相対的)静穏化や活動重心の移動が見られないもの。すなわち、これらは場所的には活動度が違うものの、その時間推移については一定あるいは境界部に滲みだしている(拡散)。

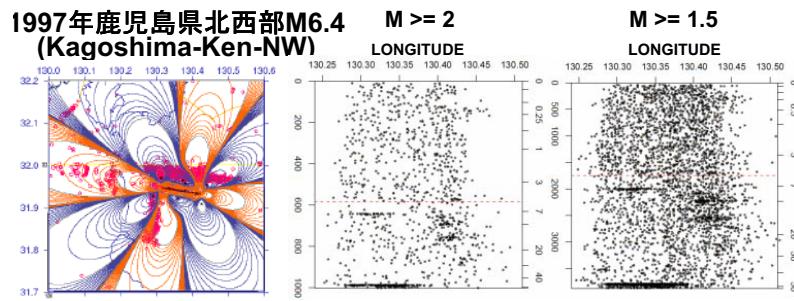
Fig. 2. Space-time plot of depth, latitude or longitude against the transformed time, where we see no conspicuous gap of (relative) quiescence nor migration of activity, or allowing the examples showing a slight diffusion of the activity (e.g., the Kobe case).

1984年長野県西部M6.9 (Nagano-Ken-West)



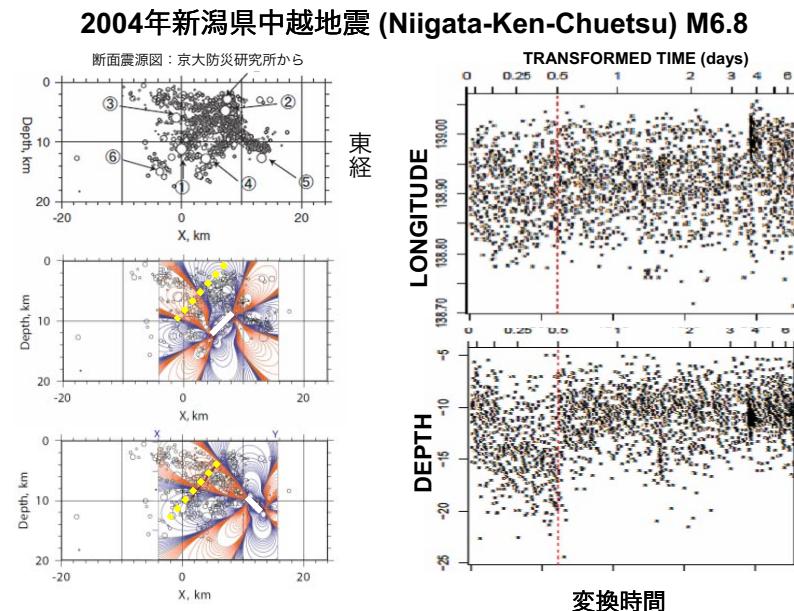
第3図 変換時刻に関する深さ、北緯あるいは東経の時空間経過で顕著な(相対的)静穏化や活動重心の移動が見られるもの。顕著な二次余震の付くような大余震が起きている場合が多いが、そこまで大森・宇津公式を当てはめ、その先は外延した。静穏化の場所(疎らになった余震配置)がストレスシャドウになる様なすべりモデルを考えΔCFS パターンを描いてみた。

Fig. 3. Space-time plot of depth, latitude or longitude against the transformed time, where we see a reduction of aftershock area, conspicuous gaps of quiescence (sparser configuration of points) or migration of activity (i.e., quiescence on one side and activation on the other side) before the largest aftershock. In this case the Omori-Utsu formula is fitted to the sequence till the largest aftershock, and then it is extrapolated. The Coulomb-stress increments are calculated assuming the precursory slow slip in or around the rupture fault of the largest aftershock to see whether the ΔCFS pattern corresponds to the sparse gap or the migrating pattern of aftershocks.



第3図 変換時刻に関する深さ、北緯あるいは東経の時空間経過で顕著な(相対的)静穏化や活動重心の移動が見られるもの。顕著な二次余震の付くような大余震が起きている場合が多いが、そこまで大森・宇津公式を当てはめ、その先は外延した。静穏化の場所(疎らになった余震配置)がストレスシャドウになる様なすべりモデルを考えΔCFS パターンを描いてみた。

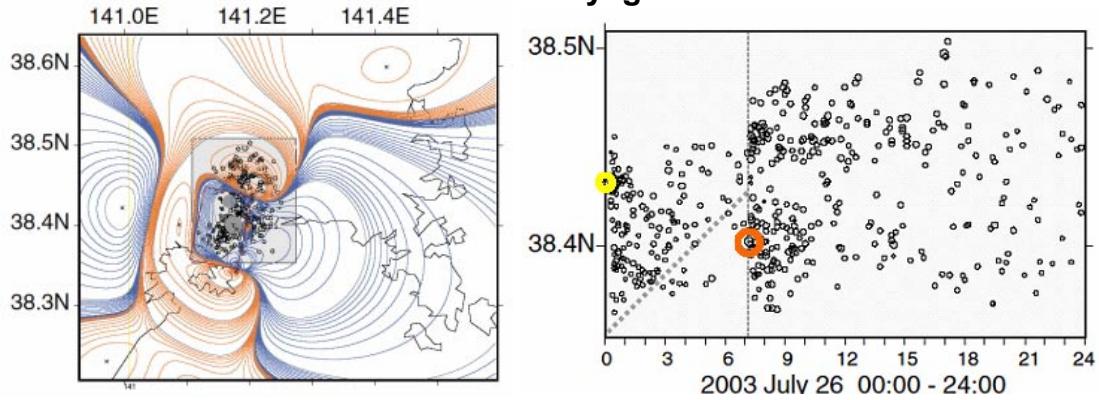
Fig. 3. Space-time plot of depth, latitude or longitude against the transformed time, where we see a reduction of aftershock area, conspicuous gaps of quiescence (sparser configuration of points) or migration of activity (i.e., quiescence on one side and activation on the other side) before the largest aftershock. In this case the Omori-Utsu formula is fitted to the sequence till the largest aftershock, and then it is extrapolated. The Coulomb-stress increments are calculated assuming the precursory slow slip in or around the rupture fault of the largest aftershock to see whether the ΔCFS pattern corresponds to the sparse gap or the migrating pattern of aftershocks.



第3図 変換時刻に関する深さ、北緯あるいは東経の時空間経過で顕著な(相対的)静穏化や活動重心の移動が見られるもの。顕著な二次余震の付くような大余震が起きている場合が多いが、そこまで大森・宇津公式を当てはめ、その先は外延した。静穏化の場所(疎らになった余震配置)がストレスシャドウになる様なすべりモデルを考えΔCFS パターンを描いてみた。

Fig. 3. Space-time plot of depth, latitude or longitude against the transformed time, where we see a reduction of aftershock area, conspicuous gaps of quiescence (sparser configuration of points) or migration of activity (i.e., quiescence on one side and activation on the other side) before the largest aftershock. In this case the Omori-Utsu formula is fitted to the sequence till the largest aftershock, and then it is extrapolated. The Coulomb-stress increments are calculated assuming the precursory slow slip in or around the rupture fault of the largest aftershock to see whether the ΔCFS pattern corresponds to the sparse gap or the migrating pattern of aftershocks.

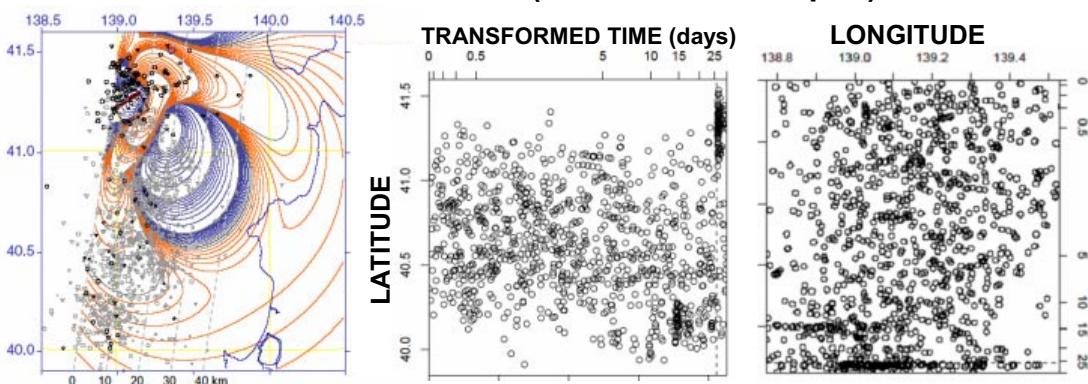
2003年M6.2宮城県北部地震の前震 Foreshocks of the Miyagi-Ken-North



第3図 変換時刻に関する深さ、北緯あるいは東経の時空間経過で顕著な(相対的)静穏化や活動重心の移動が見られるもの。顕著な二次余震の付くような大余震が起きている場合が多いが、そこまで大森・宇津公式を当てはめ、その先は外延した。静穏化の場所(疎らになった余震配置)がストレスシャドウになる様なすべりモデルを考えΔCFS パターンを描いてみた。

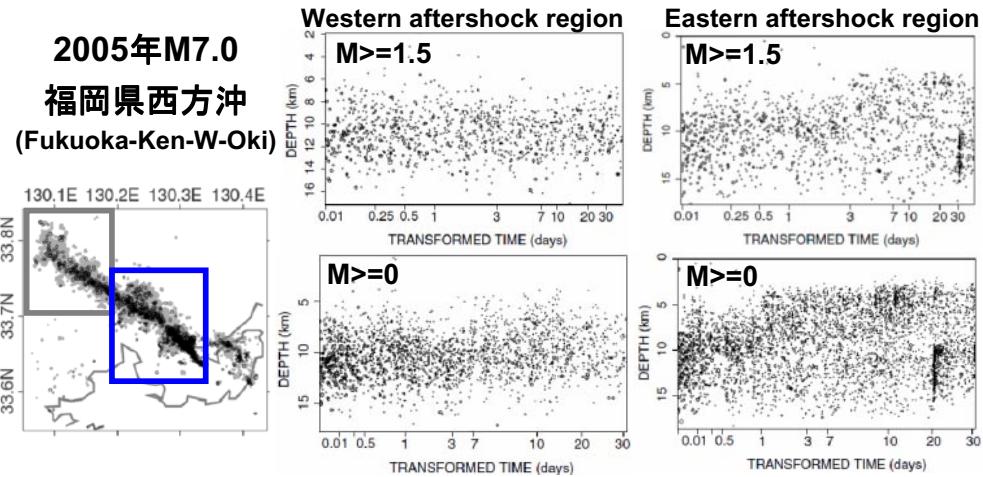
Fig. 3. Space-time plot of depth, latitude or longitude against the transformed time, where we see a reduction of aftershock area, conspicuous gaps of quiescence (sparser configuration of points) or migration of activity (i.e., quiescence on one side and activation on the other side) before the largest aftershock. In this case the Omori-Utsu formula is fitted to the sequence till the largest aftershock, and then it is extrapolated. The Coulomb-stress increments are calculated assuming the precursory slow slip in or around the rupture fault of the largest aftershock to see whether the ΔCFS pattern corresponds to the sparse gap or the migrating pattern of aftershocks.

1983年M7.7日本海中部 (Central Sea of Japan)



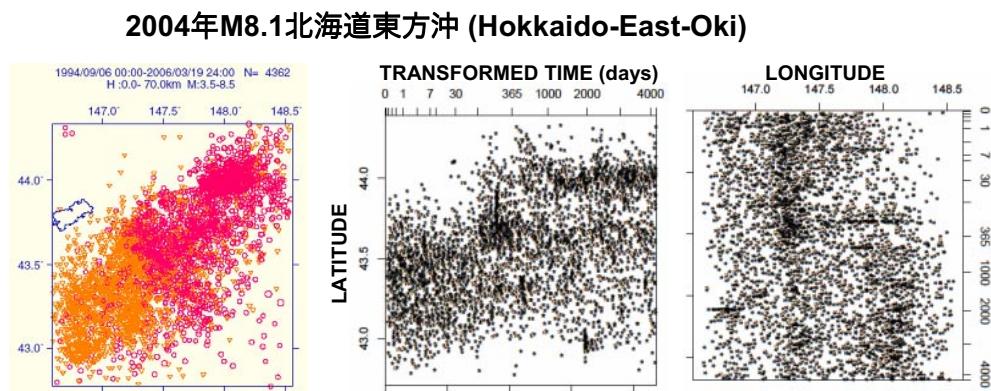
第3図 変換時刻に関する深さ、北緯あるいは東経の時空間経過で顕著な(相対的)静穏化や活動重心の移動が見られるもの。顕著な二次余震の付くような大余震が起きている場合が多いが、そこまで大森・宇津公式を当てはめ、その先は外延した。静穏化の場所(疎らになった余震配置)がストレスシャドウになる様なすべりモデルを考えΔCFS パターンを描いてみた。

Fig. 3. Space-time plot of depth, latitude or longitude against the transformed time, where we see a reduction of aftershock area, conspicuous gaps of quiescence (sparser configuration of points) or migration of activity (i.e., quiescence on one side and activation on the other side) before the largest aftershock. In this case the Omori-Utsu formula is fitted to the sequence till the largest aftershock, and then it is extrapolated. The Coulomb-stress increments are calculated assuming the precursory slow slip in or around the rupture fault of the largest aftershock to see whether the ΔCFS pattern corresponds to the sparse gap or the migrating pattern of aftershocks.



第3図 変換時刻に関する深さ、北緯あるいは東経の時空間経過で顕著な(相対的)静穏化や活動重心の移動が見られるもの。顕著な二次余震の付くような大余震が起きている場合が多いが、そこまで大森・宇津公式を当てはめ、その先は外延した。静穏化の場所(疎らになった余震配置)がストレスシャドウになる様なすべりモデルを考えΔCFS パタンを描いてみた。

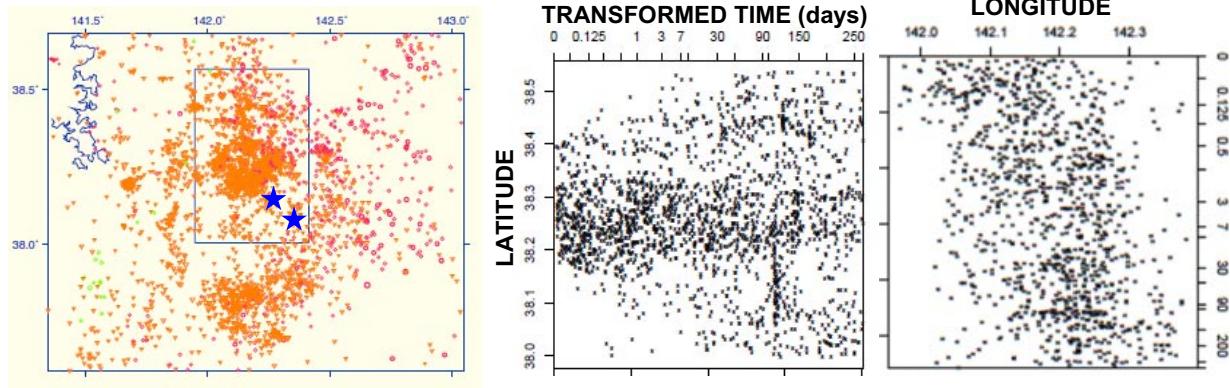
Fig. 3. Space-time plot of depth, latitude or longitude against the transformed time, where we see a reduction of aftershock area, conspicuous gaps of quiescence (sparser configuration of points) or migration of activity (i.e., quiescence on one side and activation on the other side) before the largest aftershock. In this case the Omori-Utsu formula is fitted to the sequence till the largest aftershock, and then it is extrapolated. The Coulomb-stress increments are calculated assuming the precursory slow slip in or around the rupture fault of the largest aftershock to see whether the ΔCFS pattern corresponds to the sparse gap or the migrating pattern of aftershocks.



第3図 変換時刻に関する深さ、北緯あるいは東経の時空間経過で顕著な(相対的)静穏化や活動重心の移動が見られるもの。顕著な二次余震の付くような大余震が起きている場合が多いが、そこまで大森・宇津公式を当てはめ、その先は外延した。静穏化の場所(疎らになった余震配置)がストレスシャドウになる様なすべりモデルを考えΔCFS パタンを描いてみた。

Fig. 3. Space-time plot of depth, latitude or longitude against the transformed time, where we see a reduction of aftershock area, conspicuous gaps of quiescence (sparser configuration of points) or migration of activity (i.e., quiescence on one side and activation on the other side) before the largest aftershock. In this case the Omori-Utsu formula is fitted to the sequence till the largest aftershock, and then it is extrapolated. The Coulomb-stress increments are calculated assuming the precursory slow slip in or around the rupture fault of the largest aftershock to see whether the ΔCFS pattern corresponds to the sparse gap or the migrating pattern of aftershocks.

2005年M7.2宮城県沖地震 (Miyagi-Ken-Oki)



第3図 変換時刻に関する深さ、北緯あるいは東経の時空間経過で顕著な(相対的)静穏化や活動重心の移動が見られるもの。顕著な二次余震の付くような大余震が起きている場合が多いが、そこまで大森・宇津公式を当てはめ、その先は外延した。静穏化の場所(疎らになった余震配置)がストレスシャドウになる様なすべりモデルを考え Δ CFS パターンを描いてみた。

Fig. 3. Space-time plot of depth, latitude or longitude against the transformed time, where we see a reduction of aftershock area, conspicuous gaps of quiescence (sparser configuration of points) or migration of activity (i.e., quiescence on one side and activation on the other side) before the largest aftershock. In this case the Omori-Utsu formula is fitted to the sequence till the largest aftershock, and then it is extrapolated. The Coulomb-stress increments are calculated assuming the precursory slow slip in or around the rupture fault of the largest aftershock to see whether the Δ CFS pattern corresponds to the sparse gap or the migrating pattern of aftershocks.