

1 2 - 1 4 雑微動の自己相関関数による地下構造の時間変化のモニタリング Monitoring of the Temporal Change of Subsurface Structure Using the Autocorrelation Function of the Seismic Ambient Noise

京都大学防災研究所地震防災研究部門 大見士朗
Earthquake Hazard Division, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

1. はじめに

本報告では、2007 年能登半島地震の震源域周辺を例に、単独微小地震観測点の雑微動の自己相関関数(Autocorrelation function, ACF)を利用した、地下構造の時間変化検出の可能性について述べる。Claerbout (1968)¹⁾以来の地震波干渉法の立場からは、得られる ACF は、地下の反射面からの擬似反射波とみなされるが、最近の研究では、ある条件のもとでは地下の散乱体からの擬似散乱波とみなしてもよいという結果も得られている (たとえば, Sato, 2009²⁾)。本報告では、前者の立場から、ACF の個別のフェイズのラグタイムの時間変化について、後者の立場から ACF の decay rate の時間変化について考察する。特に記載のない図表は、大見・平原 (2009)³⁾による。

2. 対象地域とデータ処理手法について

図 1 に対象地域と本報告で使用した観測点を示す。2 観測点のうち、DP.NNJ は京都大学の地表観測点、N.TGIH は防災科学技術研究所の Hinet のボアホール観測点であり、いずれも固有周期 1 秒の短周期地震計が設置してある。図 1 には、能登半島地震の震源断層モデルとそれによる体積歪み変化も併せて示してある。

データ処理手法は既出の報告 (Ohmi et al., 2008⁴⁾) と同様である。なお、本報告ではこれに加え、ACF の decay rate も考察の対象にするが、これは日々の ACF に、コーダ Q の解析等に用いられる、 $E(t) \propto (1/t^{*n}) \exp(-2\pi f/Q)$ の式をあてはめ、Q を求めたものである。ここで E(t) は ACF のエンベロープ波形、t は lapse time、f は中心周波数である。以下、この方法で求めた Q を便宜的に ACF-Q と呼ぶ。

3. ACF のフェイズのラグタイムの時間変化

図 2 に、DP.NNJ と N.TGIH の、2006 年 12 月から 2007 年 5 月末までの半年間の ACF の様子を示す (Ohmi et al., 2008 による)。それぞれ、特徴的なフェイズが時間的に安定して現れていることが見て取れる。これらのフェイズのラグタイムの時間変化を詳細に見るために、それぞれの A から E の記号を付したフェイズのラグタイム変化を図にしたものが図 3 である。図 3 (a) および (b) は、DP.NNJ の各フェイズの本震をはさむ 6 ヶ月間 (a) および 3 年半 (b) の記録である。フェイズ A, B, C では、本震前 2 週間程度の変化が顕著で、これらは本震発生とともに元に戻ったようにみえる。このほか、全般に、夏から秋にかけてラグタイムが減少する季節変動が見て取れるほか、2006 年から 2007 年にかけてラグタイムが減少する長期トレンドがみえる。図 3 (c) および (d) は、N.TGIH に対して同様の処理を行ったものである。N.TGIH では、本震後にラグタイムのオフセットがみられ、これは本震後 2 年半を経過後も回復していない。また、本震前の特段の変化や、長期トレンド等は認めがたい。

両観測点とも、体積歪みの解析結果からは本震後の膨張領域に位置しており、本震後の地震波速度の低下が期待される地域であるが、この観点からは、N.TGIH のみ整合的である。

4. ACF-Q の時間変化

図 4 に、両観測点の ACF-Q の時間変化を示す。それぞれ、+印は、日々の Q を示し、実線はそれらの 10 日間の移動平均を示す。図 4 (a) は、DP.NNJ における、ACF-Q の時間変化を示す。ACF-Q に認められる 2008 年上半期以降のトレンドは、図 3 (b) においてこの時期のフェイズ B や C のラグタイム変化が不安定になっていることに対応しているのかもしれない。ただし、逆にラグタイムの季節変化は ACF-Q では不明瞭である。図 4 (b) は N.TGIH における、ACF-Q の時間変化を示す。ここでは、2006~2007 年前半の ACF-Q の年周変化の振幅が大きいという特徴が見てとれる。しかし、この振幅変化に対応する現象は図 3 (c) や (d) のラグタイムの時間変化からは不明瞭である。逆に図 3 (d) で明らかな、本震後のラグタイムのオフセットが ACF-Q の変化にどのように対応しているかも不明瞭である等、一見して両者で共通の特徴は認めるのは困難である。

5. まとめ

雑微動の自己相関関数の個別フェイズのラグタイムや ACF-Q には、長期的に比較的安定しており、かつ、緩やかな時間変化が見られることがある。一般に、ACF 形状が安定している観測点では ACF-Q も安定している傾向が認められるが、必ずしも ACF 形状が安定していなくても、ACF-Q が比較的安定しているケースも散見されるようである。

フェイズのラグタイムの変化の傾向と、ACF-Q の変化の傾向は必ずしも一致はしておらず、解析方法や解釈に検討の余地が残っていると思われる。前者は、ACF を擬似的な反射波とみなし、後者は散乱波とみなす立場であり、両者が別の量を観測している可能性もある。これらの量の性質をあきらかにするために、従来からの手法による反射法探査等の構造探査や、コーダ Q の解析等の結果と比較することが重要であると考えられる。

ACF のモニタリングは手法としては簡便であるので、これらのラグタイムや Q の変化が地殻活動の指標として利用可能であれば興味深い。

謝辞

今回の解析では、Hinet の地震波形データを参照させていただいた。記して感謝する。

参考文献

- 1) Claerbout, J. F., 1968, Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response, *Geophysics*, 33:264-269.
- 2) Sato, H., 2009, Green's function retrieval from the CCF of coda waves in a scattering medium, *Geophys. J. Int.*, 179:1580-1583.
- 3) 大見士朗・平原和朗, 2009, 雑微動の自己相関関数に地震前後の変化は見えるか??~2007 年能登半島地震を例に~, 日本地震学会 2009 年秋季大会, D11-11.
- 4) Ohmi, S., Hirahara, K., Wada, H., and Ito, K., 2008, Temporal variations of crustal structure in the source region of 2007 Noto Hanto earthquake, central Japan, with passive image interferometry, *Earth, Planets and Space*, 60:1069-1074.

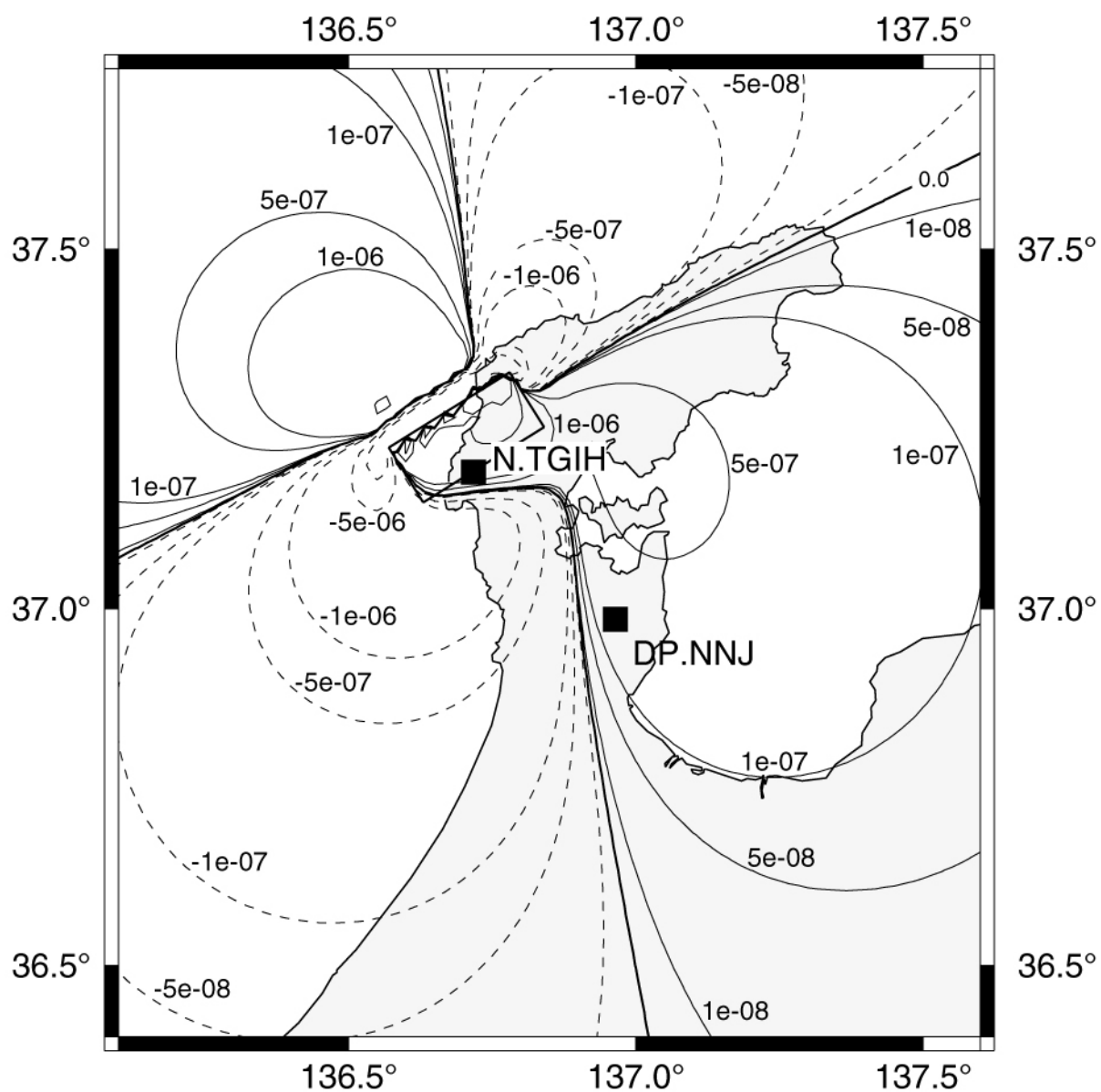


図 1：能登半島地震震央位置と解析に使用した観測点．本震に伴う体積歪変化も示す．

Fig.1: Map around the hypocenter of the 2007 Noto Peninsula earthquake. Seismic stations (solid squares) used in this study together with the volumetric strain change caused by the mainshock are shown.

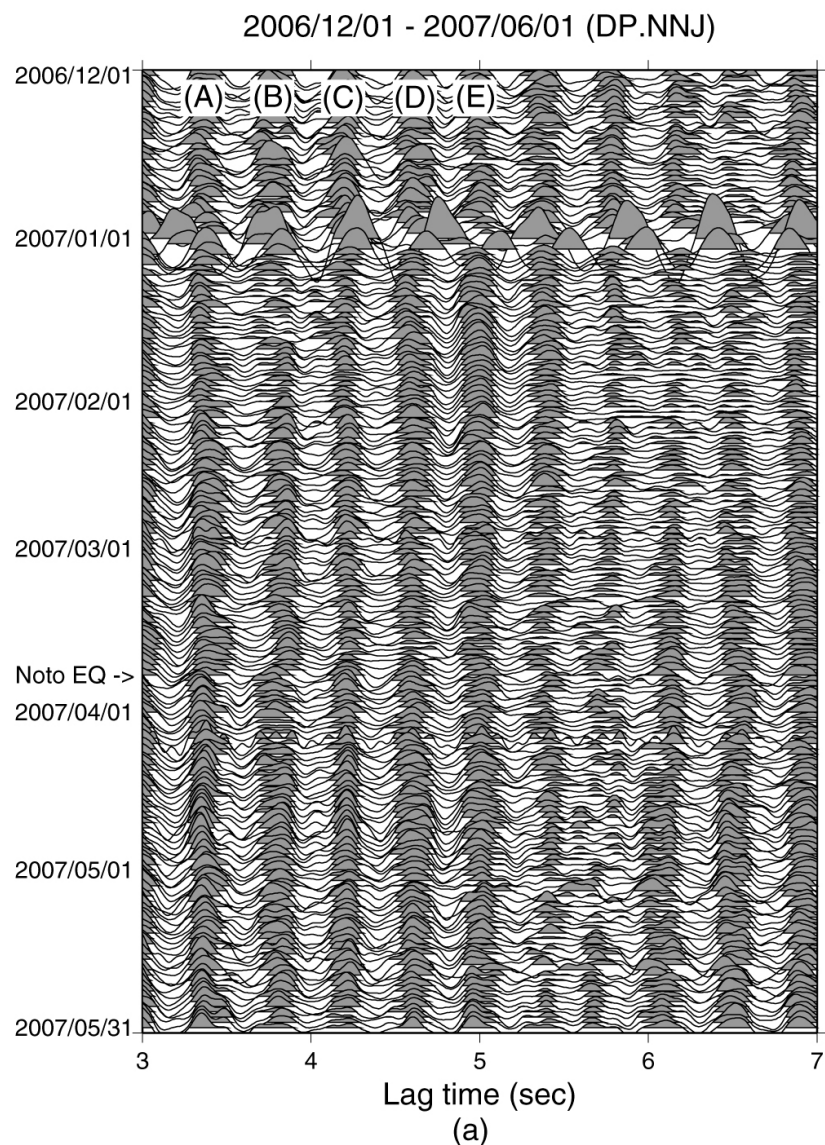


図 2(a) 能登半島地震本震を含む 6 ヶ月間の自己相関関数 (ACF) の時間変化. 日々の ACF を時間順に並べてある. (a)は DP.NNJ (震央距離 36km), (b)は N.TGIH (震央距離 4km) の結果を示す.

Fig.2(a) Temporal variation of the ACF of ambient seismic noise at each station during 6 months including the occurrence of the mainshock of the Noto Peninsula earthquake. Fig.2a shows ACF at DP.NNJ (epicentral distance = 36km) while Fig.2b shows those at N.TGIH (epicentral distance = 4km).

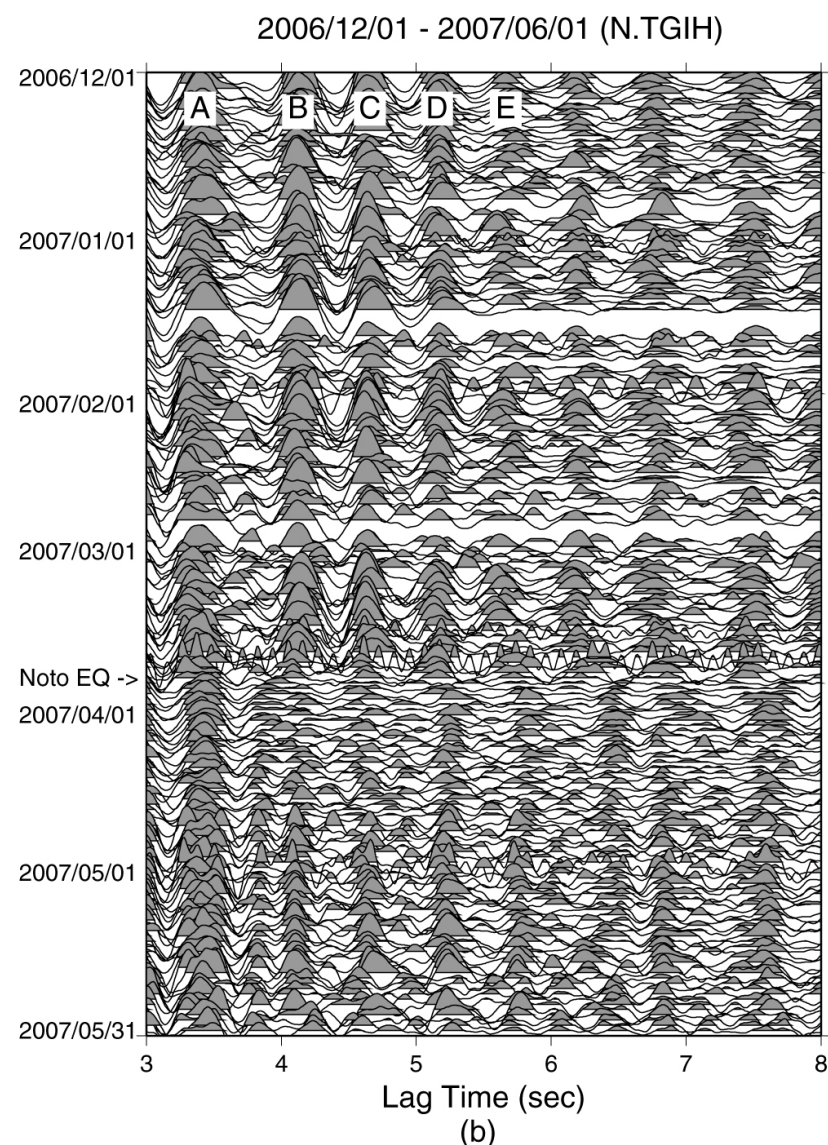


図 2(b) 能登半島地震本震を含む 6 ヶ月間の自己相関関数 (ACF) の時間変化. 日々の ACF を時間順に並べてある. (a)は DP.NNJ (震央距離 36km), (b)は N.TGIH (震央距離 4km) の結果を示す.

Fig.2(b) Temporal variation of the ACF of ambient seismic noise at each station during 6 months including the occurrence of the mainshock of the Noto Peninsula earthquake. Fig.2a shows ACF at DP.NNJ (epicentral distance = 36km) while Fig.2b shows those at N.TGIH (epicentral distance = 4km)

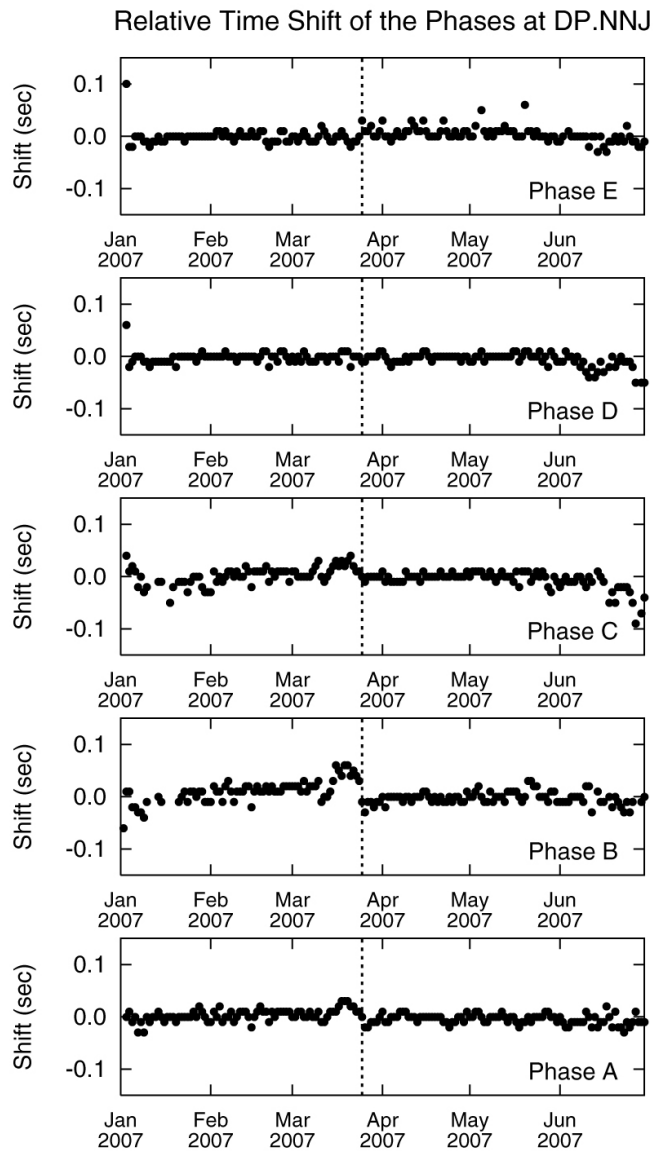


図 3(a) ACF の特定のフェイズのラグタイムの時間的な変化. (a)および(b) DP.NNJにおける、フェイズ A からフェイズ E (Fig.2a 参照) のラグタイムの変化. (a)は本震をはさむ 6 ヶ月間の記録, (b)は 3 年半の記録を示す. (c)および(d) N.TGIH における同様の結果.

Fig.3(a) Relative time shifts of several particular phases at each station. Time shifts are calculated by taking cross-correlation among the focused phases in ACFs. Only time shifts of the phases whose correlation coefficients larger than 0.75 are plotted. (a) and (b): Relative time shifts at station DP.NNJ during a period of 6 months (a) and 3.5 years (b). (c) and (d): Same as (a) and (b), but for station N.TGIH.

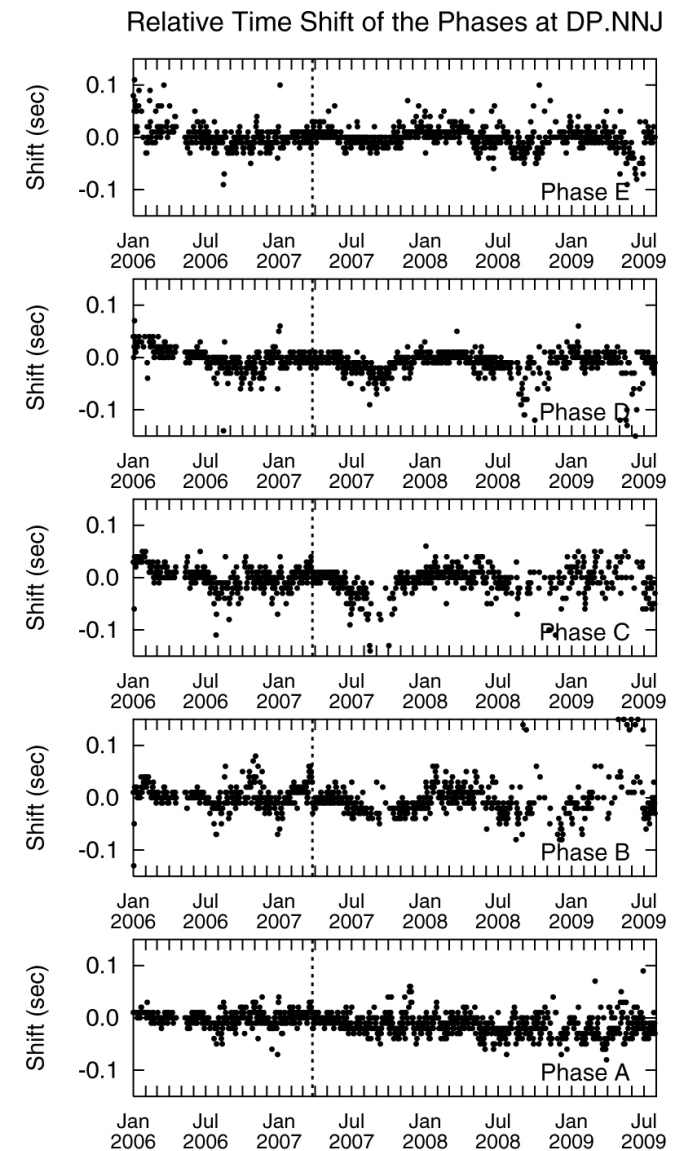


図 3(b) ACF の特定のフェイズのラグタイムの時間的な変化. (a)および(b) DP.NNJにおける、フェイズ A からフェイズ E (Fig.2a 参照) のラグタイムの変化. (a)は本震をはさむ 6 ヶ月間の記録, (b)は 3 年半の記録を示す. (c)および(d) N.TGIH における同様の結果.

Fig.3(b) Relative time shifts of several particular phases at each station. Time shifts are calculated by taking cross-correlation among the focused phases in ACFs. Only time shifts of the phases whose correlation coefficients larger than 0.75 are plotted. (a) and (b): Relative time shifts at station DP.NNJ during a period of 6 months (a) and 3.5 years (b). (c) and (d): Same as (a) and (b), but for station N.TGIH.

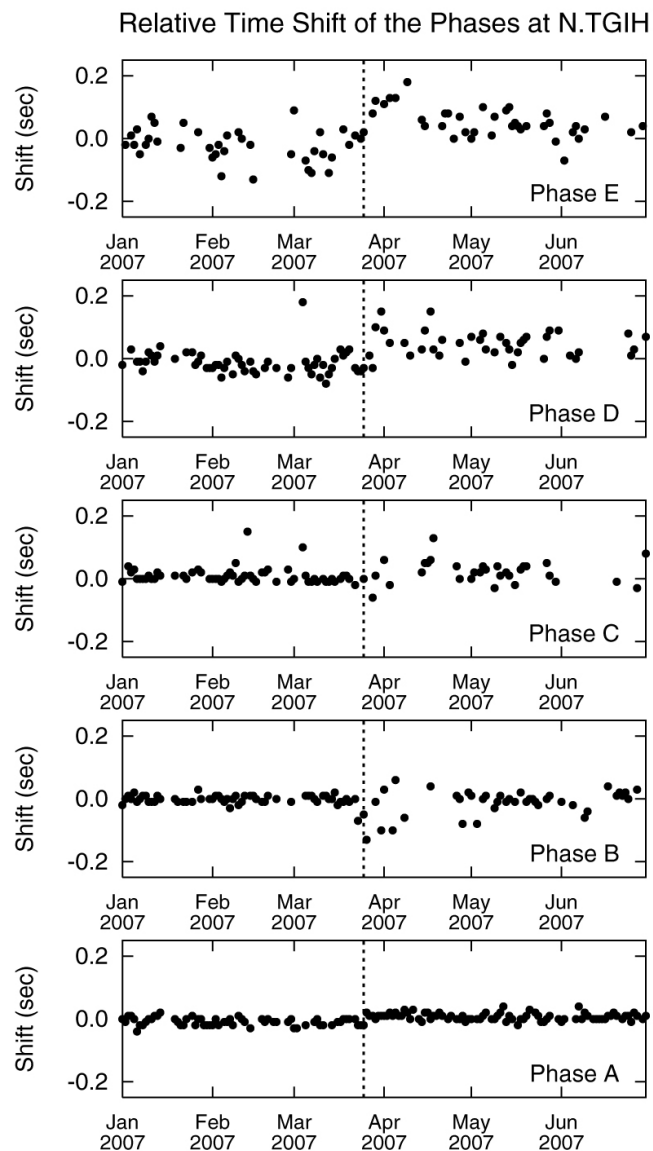


図 3(c) ACF の特定のフェイズのラグタイムの時間的な変化。(a)および(b) DP.NNJ における、フェイズ A からフェイズ E (Fig.2a 参照) のラグタイムの変化。(a)は本震をはさむ 6 ヶ月間の記録、(b)は 3 年半の記録を示す。(c)および(d) N.TGIH における同様の結果。

Fig.3(c) Relative time shifts of several particular phases at each station. Time shifts are calculated by taking cross-correlation among the focused phases in ACFs. Only time shifts of the phases whose correlation coefficients larger than 0.75 are plotted. (a) and (b): Relative time shifts at station DP.NNJ during a period of 6 months (a) and 3.5 years (b). (c) and (d): Same as (a) and (b), but for station N.TGIH.

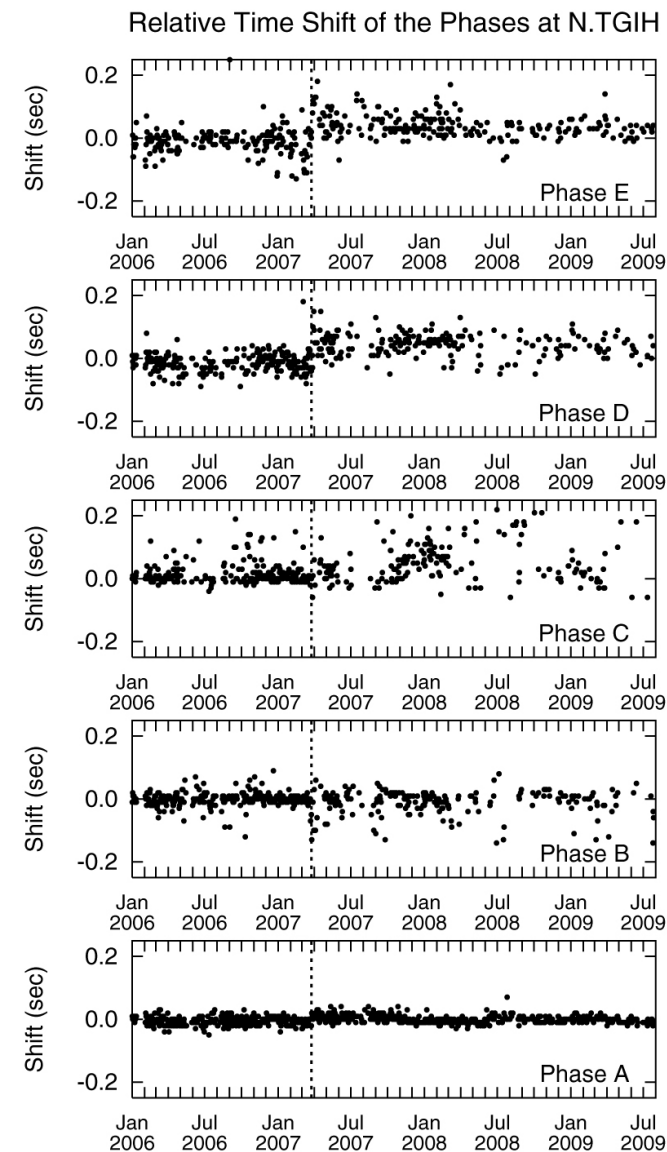


図 3(d) ACF の特定のフェイズのラグタイムの時間的な変化。(a)および(b) DP.NNJ における、フェイズ A からフェイズ E (Fig.2a 参照) のラグタイムの変化。(a)は本震をはさむ 6 ヶ月間の記録、(b)は 3 年半の記録を示す。(c)および(d) N.TGIH における同様の結果。

Fig.3(d) Relative time shifts of several particular phases at each station. Time shifts are calculated by taking cross-correlation among the focused phases in ACFs. Only time shifts of the phases whose correlation coefficients larger than 0.75 are plotted. (a) and (b): Relative time shifts at station DP.NNJ during a period of 6 months (a) and 3.5 years (b). (c) and (d): Same as (a) and (b), but for station N.TGIH.

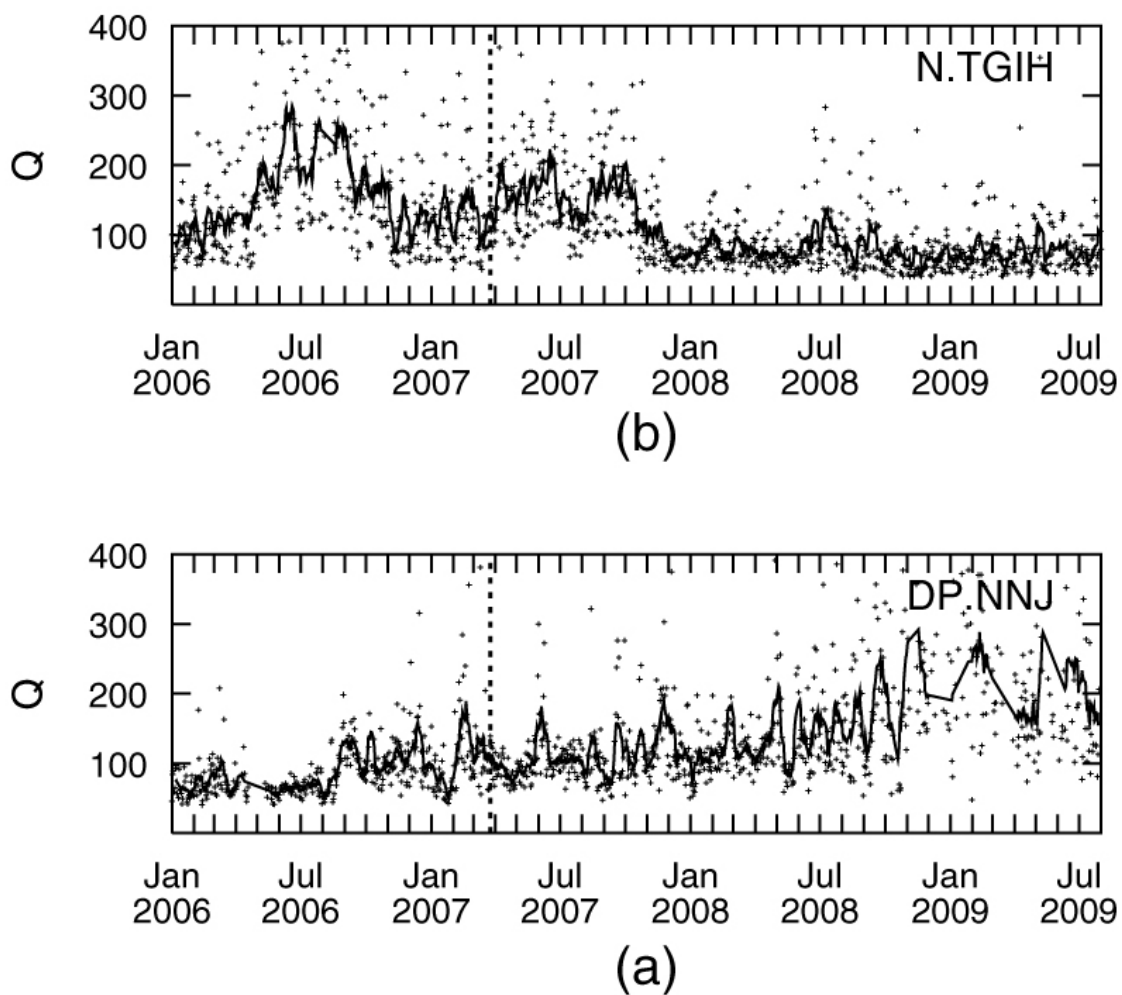


図4 ACF-Q の時間変化. +印は日々の Q を示し, 実線はそれらの10日間の移動平均を示す.
 (a)DP.NNJにおける3.5年間のACF-Qの時間変化. (b)N.TGIHにおける,3.5年間のACF-Qの時間変化.

Fig.4 Temporal variation of ACF-Q at each station. (a) ACF-Q during the period of 3.5 years at station DP.NNJ. (b) Same as (a), but for station N.TGIH.