HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	孔井式歪計によって観測された福島県沖の地震に伴った余効変動
Author(s)	三品, 正明; 立花, 憲司; 三浦, 哲
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 72, 287-298
Issue Date	2009-03-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.72.287
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/38160
Type	departmental bulletin paper
File Information	20_Mishina.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan.
No.72, March 2009, pp.287-298

孔井式歪計によって観測された福島県沖の地震に伴った余効変動

三品　正明・立花　憲司・三浦　　哲
東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター

(2009 年 1 月 9 日受理)

Postseismic Deformation Associated with off Fukushima Earthquakes as Inferred Data of Borehole Strainmeters

Masaaki MISHINA, Kenji TACHIBANA and Satoshi MIURA
Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions,
Graduate School of Science, Tohoku University

(Received January 9, 2009)

Borehole strainmeters installed in the coastal area of Miyagi and Fukushima prefectures recorded the remarkable postseismic strain change following earthquake off Fukushima Prefecture on July 19, 2008 (*M*6.9). Using exponential function, we simulated the postseismic strain change and obtained time constant and amplitude of the postseismic change. Time constant was 57 h. The amplitude ratio to the amplitude of the co-seismic change was 0.9 (KNK: Kinkazan), 1.1 (EN3: Enoshima) and 1.6 (MH2: Mihodo), respectively. This means almost the same amount of slip as the main shock occurred on the fault plane after the shock. We also analyzed data at an off Fukushima Prefecture earthquake on October 31, 2003 (*M*6.8). Time constant of the postseismic change was 40 h. The amplitude ratio was 0.5 (KNK), 0.6 (EN3) and 1.5 (MH2), respectively. This earthquake also had similar feature as the 2008 event. These characteristics of postseismic slips are considered to relate the distribution of the coupling coefficient between Pacific plate and continental plate. In off Fukushima area, the coupling coefficient may be weaker around the epicenter area of the 2008 earthquake than around the 2003 event.

Ⅰ．はじめに

大地震の本震後に本震断層面で余効的なすべりがあることが地殻変動の観測から明らかにされている．特に近年はGPS連続観測網の整備によって，内陸の浅発地震やプレート境界の大地震など多くの報告がある．例えば内陸の浅発地震では，2004年新潟県中越地震（*M*6.8）（鷺谷・他，2005），2005年福岡県西方沖地震（*M*7.0）（Nakao et al., 2006），2007年新潟県中越沖地震（*M*6.8）（Ohta et al., 2008；Iinuma et al., 2008），プレート境界の地震では1994年三陸はるか沖地震（*M*7.5）（Nishimura et al., 1998），2003年十勝沖地震（*M*8.0）（Takahashi et al., 2004），2005年宮城県沖の地震（*M*7.2）（三浦・他，2007）などである．

1960年代に始められた地震予知研究計画に基づき整備された地殻変動連続観測網では，非常に高感度の連続観測が行われているにも関わらず，大地震の余効変動が精度良く観測された例は数少ない．伸縮計による歪観測により余効変動が検知された例は，1992年7月18日岩手県沖の地震（*M*6.9）（三浦・他，1993；Kawasaki et al., 1995）や，1994年三陸はるか沖地震（*M*7.5）（Nishimura et al., 1998）などである．旧来の伸縮計は，機器の設置状況から強震動に対する応答には疑問が持たれ，名古屋大学の観測点のように特に注意深く設置された伸縮計（山内，2007）以外では，大地震に伴った地殻変動の検知の信頼度は低い．このことから大地震の大振幅の歪変化の後に続く余効変動についての解析や議論はほとんど行われていない．一方，孔井式の歪観測計器には，震動による精度低下の問題はなく，高精度の観測が保証されているにも関わらず，やはり余効変動の観測例は，GPS観測にくらべて少ないのが現状である．東北地方においては，20点を超える孔井式の歪観測点がある（三品，2007）．それぞれの観測点の計器設置深度や周辺環境に応じて，降雨の影響などのノイズに大小があり，必ずしも全点で高精度観測が実現できているわけではないが，大地震の余効変動を観測した例は数少ない．

Kawasaki et al.（2001）や川崎（2006）は，岩手県沖の1989年（*M*7.1），1992年（*M*6.9），1994年（*M*7.5）の3度の大地震で余効変動が観測されたとして，三陸沖での地震による歪解放と，非地震性の歪解放とからプレート間のカップリングを議論した．本報告では，宮城，福島両県の沿岸域にある孔井式歪観測点で記録された2008年7月19日の福島県沖の地震（*M*6.9）に伴う顕著な余効変動を中心に，福島県沖のプレート間カップリングについて考える．

Ⅱ．2008年7月19日の地震（M6.9）

2008年7月19日福島県沖の地震の際に顕著な余効変動が観測されたのは，宮城県および福島県の沿岸部にある孔井式観測点である．Fig.1に観測点の位置と，震央を示す．金華山（KNK）および三程（MH2）には体積歪計，江ノ島（EN3）には坂田式の3成分歪計（坂田，1981）が設置されている．震央距離はそれぞれKNK 103km，MH2 124km，EN3 113kmである．それぞれの観測点では1秒ごとにサンプリングされ，毎秒値が仙台にある観測センターに伝送され，1秒値およびそれをもとに平均計算された毎分値が観測データとして，それぞれのファ

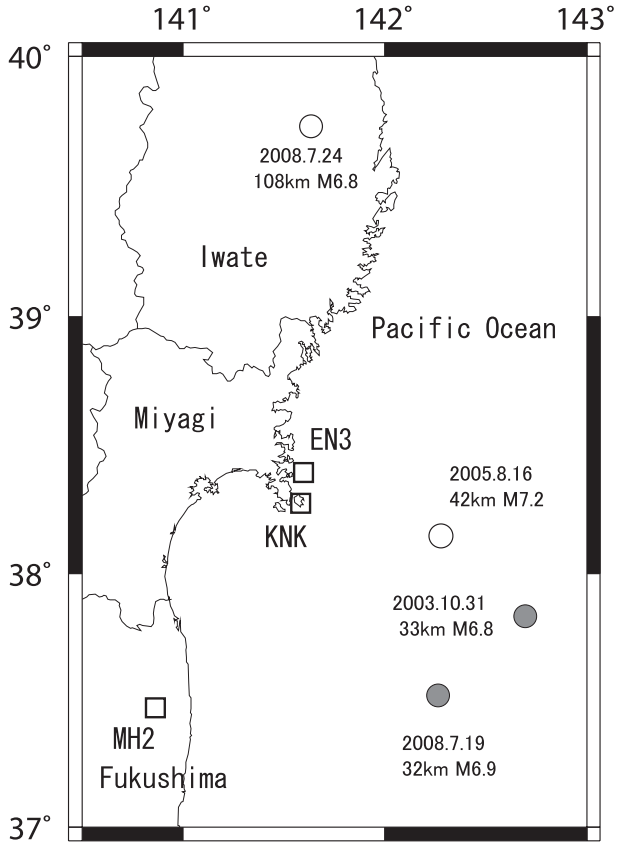

Fig. 1. Locations of borehole strain observation points (square) and epicenters. Solid circles denote epicenters of analyzed earthquakes and open circles denote that of referred earthquakes, respectively.

イルに保存されている．本報告では，基本データとして毎分値を用いた．

前述のように，観測機器の設置状況によって，観測データへのノイズ状況が異なっている．KNK および EN3 は離島にあり，周囲が海洋であることから海洋潮汐等海水位変動に伴う荷重変化が，歪観測値に大きく影響している．Fig.2 は，2008 年 1 月から 2008 年 11 月の間の KNK での歪と気圧の変化である．歪データは灰色の線で観測値を表している．この図からわかるように，潮汐による変化を伴いながら，収縮傾向が続いている．その中で 2008 年 6 月 14 日の岩手・宮城内陸地震（M7.2）と 2008 年 7 月 19 日の福島県沖の地震（M6.9）の際に，記録のジャンプが見られる．孔井式歪計は圧力変化の観測でもあるので，観測値には海水荷重や気圧変化の応答が含まれている．地球潮汐と海洋潮汐荷重による潮汐成分，および気圧変化に対するレスポンスは，潮汐解析プログラム BAYTAP-G（石黒・他，1984；Tamura et al., 1991）によって推定できる．ここでは，BAYTAP-G によって求められた潮汐パラメタおよび気圧レスポンスをもとに，同プログラムと一緒に提供された予測値計算プログラム（TIDE4N.F）によって潮汐補正値を計算し，気圧変化の補正値と合せて，観測値から引いたものを歪変化と考えた．Fig.2 で観測値に重ねられた黒線が，歪変化である．気圧や潮汐に関係しない海水位変動もあるので，小振幅のノイズ波形が残ってはいるが，地震時以外ではおおむね滑らかな変化であることがわかる．

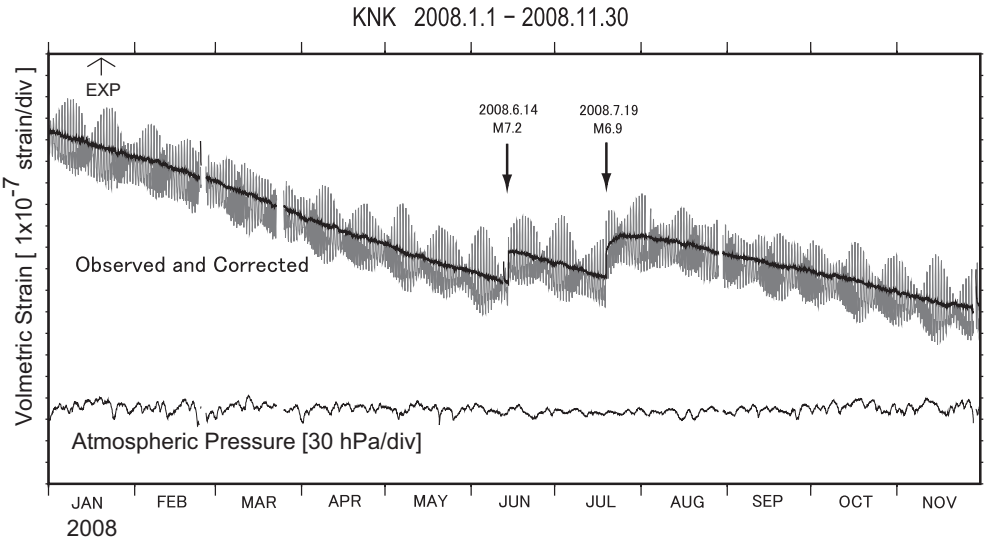

Fig. 2. Example of observed strain data at Kinkazan (KNK) of the period from January, 2008 to November, 2008. Corrected strain change (thick line) is obtained from observed data (gray line) correcting for the response to atmospheric pressure change and predicted tide change. Coseismic strain changes accompanied to two major earthquakes are shown by arrows.

6 月と 7 月の 2 回の地震時の変化には，大きな違いがある．6 月の地震では地震後にその影響と思われる変動がほとんどなく，地震時のステップ状の変化のみが顕著である．それに対して，7 月の地震では，地震時のステップ状の変化の後に，ゆっくりと歪が進行するような変化が見られる．これが本報告でいう余効変動と考えられ，KNK だけに見られる変化ではないので，震源域での状態変化を反映したものと考えられる．

地震に伴う歪変化を次のような手順で量的に推定した（Fig.3）．データは毎分値を使用した．観測された歪変化（Fig.3 の Observed 曲線）に対して，前述の潮汐予測値と気圧応答とを補正し，補正された歪変化（Fig.3 の Corrected 曲線）を求めた．Corrected 曲線には，長期的な収縮傾向の変化が重畳しているので，7 月 1 日から地震直前までの期間に対して 1 次回帰式によって長期傾向をもとめ，地震後も含めてこの長期傾向を補正された歪変化値（Corrected）から差し引いて，残差歪変化（Fig.3 の Detrended 曲線）を計算した．これにより，地震前後の長期変化傾向は補正されたものとみなす．残差値をもとに，地震に伴った地震時変化（coseismic change）と地震後変化（postseismic change）とに分離した．KNK の例では，地震時変化は地震の 3 分後までの変化とし，その後 7 月 24 日までの変化を余効変化とした．

地震後の地殻変動（余効変化）を近似する数式モデルとして，指数関数と対数関数とが良く用いられている（例えば，Donnellan and Lyzenga, 1998）．指数関数が Maxwell 粘弾性体の緩和を表しているのに対して，対数関数はすべり速度-状態依存摩擦構成則に従う緩和を表している（Marone et al., 1991）．第 I 節にあげた国内の多くの地震に対しても，双方のモデルが用いられている．緩和現象の時定数に対して，充分に長いデータ期間がないと，対数関数と指数関数

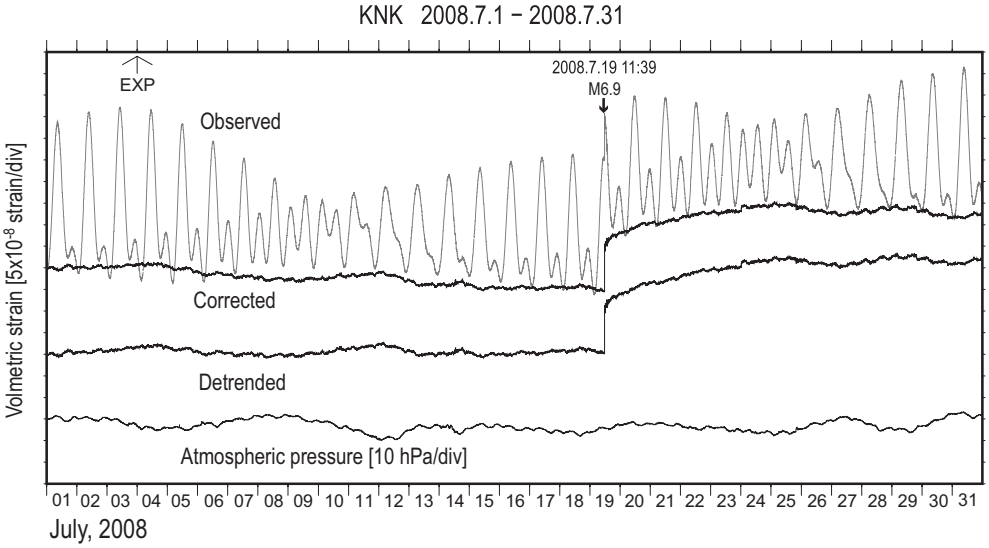

Fig. 3. Display of processing scheme to obtain coseismic and postseismic strain changes. Detrended change is residual of corrected data from linear regression applied to corrected data of before the earthquake.

のどちらが適切かは判別しにくい．特に地震後の期間が短い場合は，数値の差が小さく，ふたつの関数形を明瞭には区別できない．天候の影響を受ける歪観測データに対しては，長期トレンドの推定が難しく，地震の充分時間後までの歪変化の振幅と時定数を正確に決めることはできない．ここでは，指数関数を用いて余効変化の振幅と時定数を推定した．

地震後の歪変化 x を時間 t に対して，

$$x = C_o + P_o\left\{1 - e^{-(t-t_0)/T}\right\} \tag{1}$$

と表せるものと考えて，地震時変化の振幅 C_o，余効変動の振幅 P_o と時定数 T とを試行錯誤法で求めた．ここで，t_0 は本震の発震時である．その結果は $C_o = 1.1\times10^{-7}$，$P_o = 1.1\times10^{-7}$，$T = 57.3$ 時間ともとまった．

KNK 以外の 2 点（EN3，MH2）についても同様に毎分値をもとに地震に伴った変化を抽出した．EN3 は 3 成分歪計であるが，ここでは他の 2 点と同成分となるように，面積歪に換算して比較した．Fig.4 に 3 観測点の残差歪変化（Detrended 成分）を示す．灰色の線で観測された Detrended 成分を表し，それに重ねた破線で（1）式による計算値を示した．図に見られるように，MH2 や EN3 では地震時以外にもステップ状の変化が見られるなど，(1) 式の各定数を精度良く決めることは難しい．そこで，Fig.4 に示した破線では，MH2，EN3 ともに KNK と同じ時定数を持つものとして，振幅のみを求めた．このように 3 観測点とも共通の時定数の変化と考えて矛盾しない．すなわち，地震後のこの変化は観測点に特有な変化ではなく，震源域すなわち地震断層面のすべり現象を表すものである．

各観測点での振幅 C_o と P_o を Table 1 に示す．KNK と EN3 では，地震時変化の振幅 C_o に対

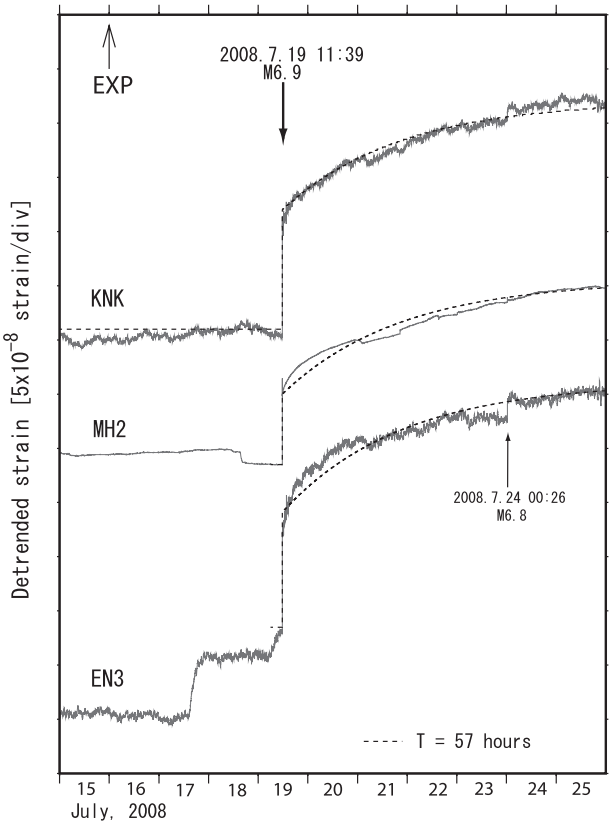

Fig. 4. Co- and post-seismic changes in detrended component of strain at three stations for Off-Fukushima earthquake on July 19, 2008. Simulated change is shown by broken line for each station. Small strain disturbance by the earthquake on July 24, 2008 is denoted by dating and arrow.

Table 1. Amplitude of co- and post-seismic strain change and time constant.

		Amplitude [nanostrain]			Time Constant Averaged ratio
		KNK	EN3	MH2	
2008.7.19	Coseismic	110	105	65	
M 6.9	Postseismic	101	120	105	T= 57 h
	Ratio (P_o/C_o)	0.9	1.1	1.6	1.2
2003.10.31	Coseismic	103	101	21	
M 6.8	Postseismic	52	60	31	T= 40 h
	Ratio (P_o/C_o)	0.5	0.6	1.5	0.9
2005.8.16	Coseismic	−1523			
M 7.2	Postseismic	−87			T= 17 h
	Ratio (P_o/C_o)	0.06			(0.06)

する余効変動の振幅 P_o の比 P_o/C_o がほぼ 1 であり，MH2 でのそれは 1.6 に達している．すなわち，余効変化を起こす断層すべりのすべり面が，本震断層面と同じと考えるならば，地震時のすべりと同程度のすべりが地震後の断層面にも起きていたといえる．この地震に伴う地震時，地震後の地殻変動は GPS 観測によっても検知されていて，地震時のすべり量は 1m と推定されている（水藤・西村，2008）．

Fig. 4 の記録上に 2008 年 7 月 24 日 0 時 26 分に岩手県中部の深さ 108km に発生した地震（M6.8）に伴った歪変化も明瞭に見えている．

III．2003 年 10 月 31 日の地震

余効変化が地域の特性を表すものならば，同地域（海域）でおきたほかの地震にも同様に余効変化が伴うことが期待される．2008 年 7 月の福島県沖の地震の北東約 50km で 2003 年 10 月 31 日に起きたマグニチュード（M）6.8 の地震時にも同様な余効変化が観測されていた．Fig.5 は 2003 年 10 月の地震前後の 3 ヶ所の記録である．震央距離はそれぞれ KNK 110km，EN3 115km，MH2 167km である．Fig.3 の手順により Detrended 成分で比較している．震央距離が遠い MH2 では明瞭でないが，KNK，EN3 では明瞭に余効変化が記録されている．その振幅値も Table 1 に示した．この地震では，地震時変動に対する余効変動の振幅比は，KNK，EN3 で 0.5〜0.6，MH2 で 1.5 である．2008 年地震よりは小さいが，本震時すべり量の 1/2 以上の余効すべりが記録されていたといえる．また，この地震でも，GPS 観測から地震時，地震後地殻変動があったことが指摘されている（東北大学理学研究科，2004；国土地理院，2004；三浦・

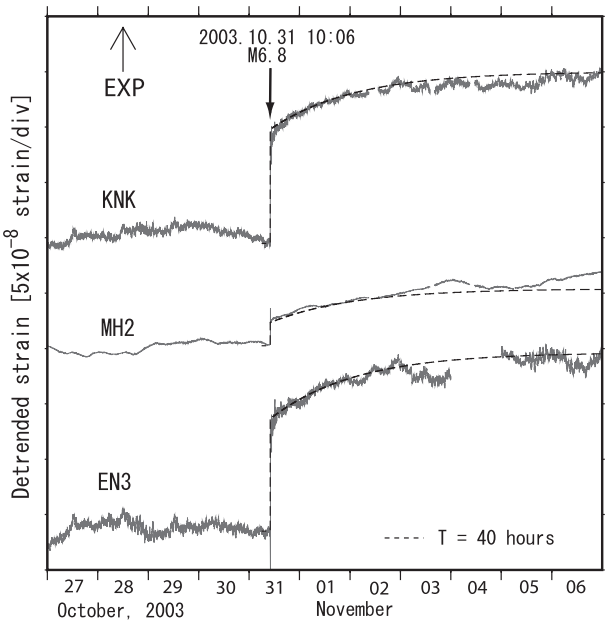

Fig. 5. Co- and post-seismic changes in detrended component of strain at three stations for Off-Fukushima earthquake on October 31, 2003. Simulated change is shown by broken line for each station.

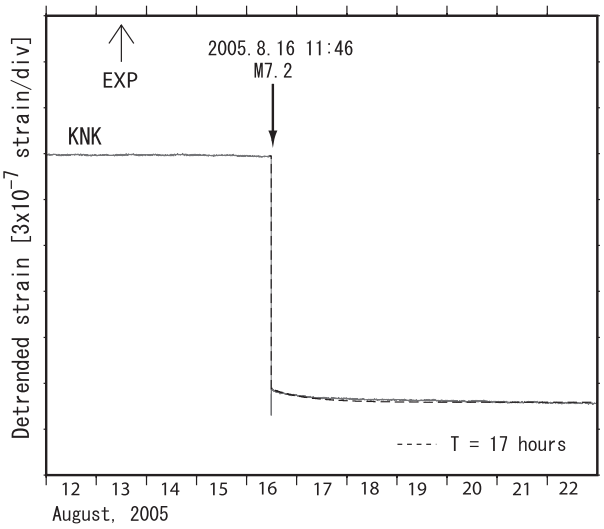

Fig. 6. Co- and post-seismic changes in detrended component of strain at KNK for Off-Miyagi earthquake on August 16, 2005. Simulated change is shown by broken line. Co-seismic change is dominant.

他，2004)．

比較のため解析した，2005 年 8 月 16 日の宮城県沖の地震（*M*7.2）の際に KNK で記録された P_o/C_o 比は 0.06 である（Fig.6，Table 1)．2005 年宮城県沖の地震は，2003 年，2008 年福島県沖の地震と同様にプレート境界の地震ではあるが，震源の深さは 2 回の福島県沖の地震よりやや深い．なお，この地震については GPS 観測から顕著な余効変動が報告されている (Miura et al., 2006；三浦・他，2007)．その結果からは本震震源域での余効すべりが本震後 1 ヶ月ほど続き，その後すべり域が周辺に広がっていったことが指摘されている．歪計記録に指数関数を当てはめて推定した時定数 17 時間は短めの推定値となっている．

Ⅳ．議　　論

前 2 節に挙げた観測例のように，プレート境界の地震のすべてに顕著な余効変動が伴っているわけではない．余効変動の大きさが，プレート境界の状態の地域差を表していると考え，その地域差の原因を考える．

Kawasaki et al.（2001）や川崎（2006）は三陸沖の大地震に伴った余効変動をもとに，三陸沖ではプレート間のモーメントが通常の地震と非地震性の断層運動とで解放されている．すなわち定常的なクリープはプレート間のモーメント解放の主要な要因ではなくて，地震間のプレート間は基本的にはロックしていると考えた．福島県沖についても同様に考えることができる．地震後変化と地震時変化の振幅比は，0.5 から 1.6 である（Table 1)．前述のようにここでは指数関数で近似して余効変動の振幅を決めている．地震後もっと長期間のデータを使い，対数関数を仮定すれば，余効変動の振幅はもっと大きな振幅となる．しかし，これが定常的にプレート間ですべっていることを意味するものではない．Nishimura et al.（2004）は 1995 年 4 月から 2002

年 3 月までの GPS 観測データをもとに，十勝沖から茨城県沖でのプレート間バックスリップ量の分布を求めた．その結果は岩手県南部の沖から宮城県・福島県沖にかけての海域下でのカップリングが強いことを示している．約 5 年間続いた 1994 年三陸はるか沖地震（M7.5）の余効すべりの終了後でも，岩手県北部から青森県の沖では，バックスリップ量が他より小さい(0〜2cm/y）ことを明らかにしている．さらに Suwa et al.（2006）は，1997 年 1 月から 2001 年 12 月までの GPS データをもとに，釧路沖から茨城県沖までのバックスリップ量分布を求めた．結果は同様で，1989 年，1992 年，1994 年の岩手県沖から三陸はるか沖地震までの 3 回の地震の震源域ではバックスリップが小さい（2〜4cm/y）．プレート間カップリングが強ければ，地震時あるいは余効変動期以外のバックスリップ量は約 10cm/y が期待される．ここで得られたバックスリップ量は，Kawasaki et al.（2001）がこの海域でのサイスモ・ジオデティック・カップリング係数が 50〜80%と大きいと指摘していることと同等で，プレート間のモーメントが通常の地震だけでなく，非地震性のすべりを含んだ活動によって解放されていることを表している．Uchida et al.（2003）は小繰り返し地震の活動から三陸沖のプレート間の準静的なすべり量を求めた．その結果この海域のプレート間すべり量は 2〜5cm/y で，GPS によるバックスリップ推定量と同等である．また，この海域の準静的すべりはほぼ定常的に発生している（Uchida et al., 2003）.

一方，福島県沖ではバックスリップは上記の三陸沖の地震震源域のようには小さくはない(Nishimura et al., 2004；Suwa et al., 2006）．内田･他（2007）によれば，福島県沖の北緯 37.5 度以南では，広範囲に準静的すべりがおきている．そして，その活動は海溝に近い側はエピソーディックで，海岸に近い側では定常的であるとされている．海溝に近い領域では，2001 年 2 月 25 日の地震（M5.8）後，2002 年末頃までに非定常すべりがあったことが三浦・他(2005）によって指摘されている．GPS 観測から得られたバックスリップ量は三陸沖のそれより大きいが，準静的すべりが定常的に発生している領域であるということで，共通性が見られる．

福島県沖の北緯 37.5 度以北では，2003 年 10 月，2008 年 7 月の震源域の大部分はエピソーディック活動をする領域にあって，定常的な準静的すべりはほとんどない（内田・他，2007）．この 2 回の地震のうち 2008 年地震の震源域は，2003 年地震のそれに比べてより定常的な活動を見せる領域である．さらに，Yamamoto et al.（2008）は 2008 年地震の西側に隣接する地域では沈み込むプレート上面の海洋性地殻やウェッジマントルの P 波速度が低速であることを見出し，そこではプレート間カップリングが弱いと指摘している．2003 年と 2008 年の 2 回の地震で余効変動の大きさ（P_o/C_o）の違いは，2 つの震源域でのカップリングの強さの違いを反映しているものと考えられる．このように，三陸沖も含めて，余効変動の大小はプレート間のカップリングの強さを表すものと見ることができる．

福島県沖の 2 回の地震の余効変動の時定数は約 2 日である（Table 1）．同様に指数関数を用いたプレート間地震の三陸沖の 3 例では，1989 年 3 日（三浦･他，1993），1992 年約 0.5 日(三浦・他，1993)，1994 年 3 日（Nishimura et al., 1998）あるいは 10 日（三浦・他，1995)である．前述のように，余効変動の終了時を正確に特定することが難しいので，その精度を含め

て時定数の詳細を議論はできないが，福島県沖と三陸沖とでほぼ同程度のものと見ることができる．しかし，2005 年 8 月 16 日の宮城県沖の地震の余効変動の解析結果にも見られるように，本震後にすべり域が拡大して，本震断層面より広い範囲に及んでいる（Miura et al., 2006；三浦・他，2007）．ここで得られている時定数には当然この両者の寄与が含まれているが，数少ない歪観測記録から本震断層面のすべりと，周辺部に拡大したすべりとを分離することは難しい．Marone et al.（1991）の式にあるように，対数関数を用いる場合の時定数には，剛性率やすべり速度，すべり速度強化層の厚さ，すべり速度－状態依存摩擦係数のパラメータ（A-B）等，時定数に関係する量が多くて，時定数の物理的意味を単純に考察することはできない．ここでは指数関数を用いているが，事情は同様であるのでこれ以上の議論はしない．

V．ま と め

宮城県および福島県の沿岸部に設置された孔井式歪計の観測によって，2008 年 7 月 19 日の福島県沖の地震（*M*6.9）に伴う顕著な余効変動が記録された．余効変動を指数関数で近似して求められた時定数と振幅はそれぞれ 57 時間で，振幅は地震時変化と同程度である．この地震の震源域の北側に隣接する震源域をもつ 2003 年 10 月 31 日の地震（*M*6.8）に伴う余効変動も同様に解析され，時定数と振幅はそれぞれ 40 時間と，地震時変動の 1/2 以上である．三陸沖のカップリングが弱い海域での大地震後に顕著な余効変動が観測されていることと考え合わせて，福島県沖の 2 回の地震の余効変動振幅の違いは，震源域プレート境界のカップリングの違いを表すものと考えられる．

謝辞　三程観測所（MH2）は（財）地震予知総合研究振興会により設置，維持管理されている観測点である．ここに記して関係各位に感謝します．潮汐解析プログラム BAYTAP-G の使用について，国立天文台田村良明博士から便宜と，助言をいただいた．また，佐藤忠弘博士の適切な助言も，同プログラムの使用に際して大変有用だった．北海道大学笠原稔博士には，地震予知研究計画の初期から現在に至るまで，終始地殻変動連続観測と全国の地殻変動研究者グループをリードしていただきました．記して感謝の意を表します．作図には，GMT（Wessel and Smith, 1998）を使いました．

文　　献

Donnellan, A. and G. Lyzenga, 1998. GPS observations of fault afterslip and upper crustal deformation following the Northridge earthquake, *J. Geophys. Res.*, **103**, 21285-21297.

Iinuma, T., Y. Ohta, S. Miura, K. Tachibana, T. Matsushima, H. Takahashi, T. Sagiya, T. Ito, S. Miyazaki, R. Doke, A. Takeuchi, K. Miyao, A. Hirao, T. Maeda, T. Yamaguchi, M. Takada, M. Iwakuni, T. Ochi, I. Meilano and A. Hasegawa, 2008. Postseismic Slip Associated with the 2007

Chuetsu-oki, Niigata, Japan, Earthquake (M6.8 on 16 July 2007) as Inferred from GPS Data, *Earth Planets Space*, **60**, 1087-1091.

石黒真木夫・佐藤忠弘・田村良明・大江昌嗣，1984．地球潮汐データ解析　－プログラム BAYTAP の紹介－，統計数理研究所彙報，**32**，71-85．

川崎一朗，2006．スロー地震とは何か　巨大地震予知の可能性を探る，NHK ブックス　日本放送出版協会，270pp．

Kawasaki, I., Y. Asai, Y. Tamura, T. Sagiya, N. Mikami, Y. Okada, M. Sakata and M. Kasahara, 1995. The 1992 Sanriku-Oki, Japan, Ultra-Slow Earthquake, *J. Phys. Earth*, **43**, 105-116.

Kawasaki, I., Y. Asai and Y. Tamura, 2001. Space-time distribution of interplate moment release including slow earthquakes and the seismo-geodetic coupling in the Sanriku-oki region along the Japan trench, *Tectonophysics*, **330**, 267-283.

国土地理院，2004．東北地方の地殻変動，地震予知連絡会会報，**71**，279-329．

Marone, C. J., C. H. Sholtz and R. Bilham, 1991. On the Mechanics of Earthquake Afterslip, *J. Geophys. Res.*, **96**, 8441-8452.

三浦　哲・立花憲司・佐藤俊也・橋本恵一・加藤尚之・三品正明・平澤朋郎，1993．三陸はるか沖地震に伴って観測された余効的地殻変動，シンポジュウム「これからの地殻変動研究・観測と地震予知」集録，130-136．

三浦　哲・立花憲司・橋本恵一・佐藤俊也・堀　修一郎・村上栄寿・河野俊夫・仁田交市・西村卓也・平澤朋郎，1995．GPS 連続観測により推定された 1994 年三陸はるか沖地震の断層運動，1994 年三陸はるか沖地震とその被害に関する調査研究，97-104．

三浦　哲・諏訪謡子・佐藤俊也・立花憲司・油井智史・長谷川昭，2004．GPS によって観測された 2003 年 10 月 31 日福島県沖地震（M6.8）に伴った地震時・地震後地殻変動，地球・惑星科学関連学会 2004 年合同大会，S044-018．

三浦　哲・油井智史・長谷川昭・佐藤俊也・立花憲司，2005．宮城県沖および周辺における最近の地震活動と地殻変動，月刊地球，**27**，126-131．

Miura, S., T. Iinuma, S. Yui, N. Uchida, T. Sato, K. Tachibana and A. Hasegawa, 2006. Co- and post-seismic slip associated with the 2005 Miyagi-oki earthquake (M7.2) as inferred from GPS data, *Earth Planets Space*, **58**, 1567-1572.

三浦　哲・飯沼卓史・油井智史・佐藤俊也・立花憲司・長谷川　昭，2007．2005 年宮城県沖地震（M7.2）に伴った地震時・地震後地殻変動から推定されたプレート境界面上のすべり分布，地震Ⅱ，**59**，371-379．

三品正明，2007．東北大学における地殻変動連続観測，測地学会誌，**53**，359-368．

Nakao, S., H. Takahashi, T. Matsushima, Y. Kohno and M. Ichiyanagi, 2006. Postseismic deformation following the 2005 West Off Fukuoka Prefecture Earthquake (M7.0) derived by GPS observation, *Earth Planets Space*, **58**, 1617-1620.

Nishimura, T, S. Miura, K. Tachibana, K. Hashimoto, T. Sato, S. Hori, E. Murakami, T. Kono, K. Nida, M. Mishina, T. Hirasawa and S. Miyazaki, 1998. Source Model of the Co- and Post-seismic Deformation Associated with the 1994 far off Sanriku Earthquake (M7.5) Inferred from Strain and GPS Measurements, *Tohoku Geophysical Journal* (Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. 5), **35**, 15-32.

Nishimura, T., T. Hirasawa, S. Miyazaki, T. Sagiya, T. Tada, S. Miura, and K. Tanaka, 2004. Temporal change of interplate coupling in northeastern Japan during 1995-2002 estimated from continuous GPS observations, *Geophys. J. Int.*, **157**, 901-916.

Ohta, Y., S. Miura, T. Iinuma, K. Tachibana, T. Matsushima, H. Takahashi, T. Sagiya, T. Ito, S. Miyazaki, R. Doke, A. Takeuchi, K. Miyao, A. Hirao, T. Maeda, T. Yamaguchi, M. Takada, M. Iwakuni, T. Ochi, I. Meilano and A. Hasegawa, 2008. Coseismic and Postseismic Deformation

Related to the 2007 Chuetsu-oki, Niigata Earthquake, *Earth Planets Space*, **60**, 1081-1086.

鷺谷　威・大園真子・西脇周平・大田雄策・山室友生・木股文昭・佐々木雅子，2005．2004 年新潟県中越地震の震源域南部周辺における余効変動，地震Ⅱ，**58**，359-369．

坂田正治，1981．新しく考案したボアホール式 3 成分歪計，国立防災科学技術センター研究報告，**25**，95-126．

水藤　尚・西村卓也，2008．2008 年 7 月 19 日福島県沖の地震（M6.9）の地震前・地震時・地震後の地殻変動，日本測地学会第 110 回講演会要旨集，137．

Suwa, Y., S. Miura, A. Hasegawa, T. Sato and K. Tachibana, 2006. Interplate coupling benearth NE Japan inferred from three-dimensional displacement field, *J. Geophys. Res.*, **111**, B04402, doi: 10.1029/2004JB003203.

Takahashi, H., S. Nakao, N. Okazaki, J. Koyama, T. Sagiya, T. Ito, F. Ohya, K. Sato, Y. Fujita, M. Hashimoto, Y. Hoso, T. Kato, T. Iinuma, J. Fukuda, T. Matsushima, Y. Kohno and M. Kasahara, 2004. GPS Observation of the First Month of Postseismic Crustal Deformation Associated with the 2003 Tokachi-oki Earthquake (M_{JMA} 8.0), off Southeastern Hokkaido, Japan, *Earth Planets Space*, **56**, 377-382.

Tamura, T., T. Sato, M. Ooe and M. Ishiguro, 1991. A Procedure for Tidal Analysis with a Baysian Information Criterion, *Geophys. J. Int.*, **104**, 507-516.

東北大学理学研究科，2004．2003 年 10 月 31 日の宮城県・福島県沖の地震について，地震予知連絡会会報，**71**，252-255．

Uchida, N., T. Matsuzawa and A. Hasegawa, 2003. Interplate quasi-static slip off Sanriku, NE Japan, estimated from repeating earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, **30** (15), 1801, doi:10.1029/2003GL017452.

内田直希・松澤　暢・三浦　哲・平原　聡・長谷川　昭，2007．小繰り返し地震解析による宮城・福島県沖プレート境界の準静的すべり，地震Ⅱ，**59**，287-295．

Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1998. New, Improved Version of Generic Mapping Tools Released, *EOS Trans., AGU*, **79**, 579.

Yamamoto, Y. R. Hino, K. Suzuki, Y. Ito, T. Yamada, M. Shinohara, T. Kanazawa, G. Aoki, M. Tanaka, K. Uehira, G. Fujie, Y. Kaneda, T. Takanami and T. Sato, 2008. Spatial heterogeneity of the mantle wedge structure and interplate coupling in the NE Japan forearc region, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L23304, doi:10.1029/2008GL036100.

山内常生，2007．坑道を利用する諸観測装置の開発と地震予知に関わる成果，測地学会誌，**53**，135-146．