

台風通過時における断層破碎帯の挙動

向井 厚志 (福山市立大学都市経営学部)

大塚 成昭 (神戸学院大学人文学部)

福田 洋一 (京都大学大学院理学研究科)

1. はじめに

台風等の低気圧が通過する場合、地表面を押す大気荷重が減少することに伴い地盤変形が生ずる。神戸市にある六甲高雄観測室では、台風通過に伴って 10^{-8} オーダーの歪変化や約100ml/sの湧水量変化が観測された。観測室周辺の岩盤が均質様な弾性体であれば、荷重グリーン関数に地上気圧分布を当てはめることによって、台風通過時の歪変化を推測することができるが、現実の地表面付近の岩盤は多様な地質で構成され、亀裂の発達した非様な弾性構造となっている。六甲高雄観測室は地下240mに開設された地殻変動観測室であるが、万福寺断層を横断しており、歪計近傍には力学的に顕著な不均質構造が存在している。向井・大塚(2009)は、六甲高雄観測室で観測された歪潮汐と理論潮汐を比較した結果、水平様な弾性体では歪潮汐の観測値を説明することができなかった。このことから、同観測室で得られた歪観測値には、断層破碎帯による不均質な力学的構造の影響が含まれると考えられる。観測室壁面の断層破碎帯からは常時500ml/s前後の湧水が生じており、台風接近時には気圧低下による吸出し効果によって湧水量の増大が観測される。こうした強制的な排水は、観測室周辺の地下水分布を変化させ、間隙水圧分布の変動による歪変化も引き起こしていると考えられる。

台風通過時の歪変化観測値と荷重グリーン関数に地上気圧分布を当てはめて求めた歪変化推測値を比較したとき、両者の間に差異が生じる原因としては、断層破碎帯の影響の他に、潮位の気圧応答の影響が考えられる。海面上で局地的な気圧変動が生じた場合、海水が低気圧側の領域に移動することによって、海底面に作用する海水の荷重量が変化する。このことは、海面に作用する大気荷重の一部のみが海底面に伝わることを意味する。

六甲高雄観測室の約5km南方には大阪湾があり、約20km西方には淡路島で隔てられた瀬戸内海が存在する。こうした内海で大気荷重がどの程度海底面に伝わるのかは、気圧変動の時間スケールや海域を取り巻く海岸線の地形に影響される。例えば、短周期の気圧変動が生じた場合、海水が十分に移動できず、大気荷重の大部分が海底面に作用すると考えられる。また、狭い海峡で外海とつながっている内海の場合も、海水の移動が妨げられるため、同様に大気荷重の大部分が海底面に作用することになる。

以上のことから、台風通過時に観測された歪変化には、周辺岩盤の不均質な力学的構造など、断層破碎帯の影響に加えて、大気荷重に対する海域ごとの応答特性に関する情報が含まれていると言える。本稿では、台風通過時の歪変化に対する断層破碎帯の影響とともに、潮位の気圧応答特性について、予備的な推定を行なった結果についてまとめる。

2. 六甲高雄観測室における台風通過時の歪変化

六甲高雄観測室の埋設型石井式歪計は万福寺断層の北側約50m地点に埋設されており、現在、0.1秒間隔で連続的に歪変化の観測を続けている(図1)。

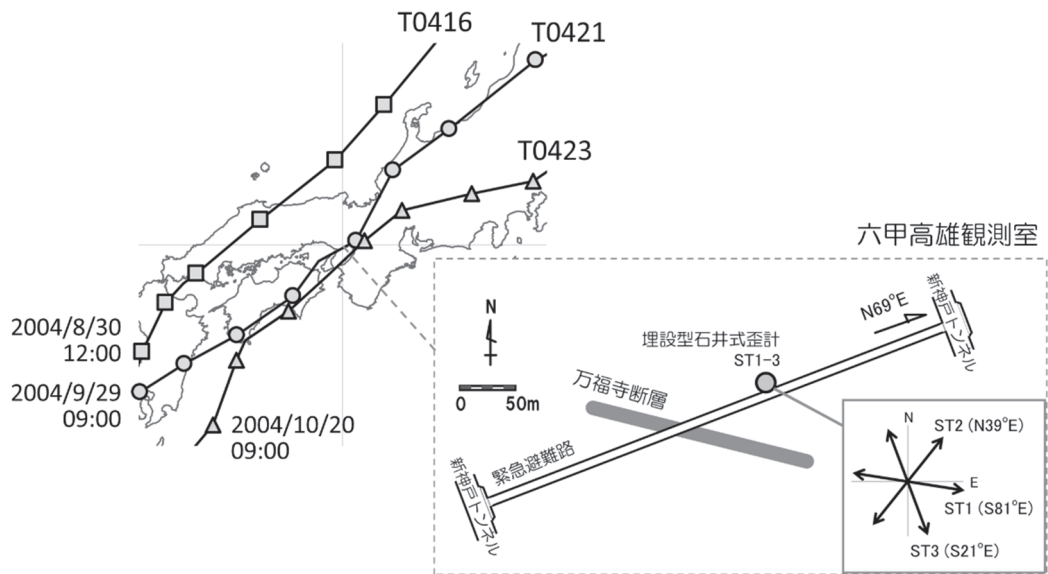


図1. 2004年に六甲高雄観測室周辺を通過した主な台風の移動経路

日本地図上の□、○および△印を付した折れ線は、2004年に発生した台風16号(T0416)、21号(T0421)および23号(T0423)の移動経路を示しており、マークは3時間ごとの台風の位置を記している。図右下には、地図中央に位置する六甲高雄観測室における埋設型石井式歪計と万福寺断層の配置を示す。

本稿では、神戸市周辺を複数の台風が通過した2004年に観測された歪変化を解析した。図1には、本稿で取り上げた2004年の台風16号(T0416)、21号(T0421)および23号(T0423)の移動経路を示している。台風16号、21号および23号は、それぞれ2004年8月30日23:00、9月29日21:00および10月20日18:00に神戸市へ最接近し、そのときの中心気圧はそれぞれ970、990および970hPaであった。

図2は、上記の台風通過時を含む2004年8月1日～10月29日に埋設型石井式歪計ST1、ST2、ST3によって観測された歪変化、ならびに神戸地方気象台で観測された地上気圧および1時間降水量を示す。台風16号、21号および23号の通過に伴って、地上気圧はそれぞれ18、24および38hPa変化し、通過前後の2日間にわたる積算降水量はそれぞれ16、118および142mmであった。

図2に見られる2004年9月5日の顕著な歪変化は、同日19:07および23:57に発生した紀伊半島南東沖地震に起因する。これらは紀伊半島南東沖約100km地点で発生した地震であり、前者はM7.1の前震、後者はM7.4の本震とされる。これらの地震によって、数日程度の時定数をもつ歪変化が生じたが、その後の台風21号および23号の通過時には、地震の影響は十分におさまっていたとみなせる。なお、歪計ST2には、2004年9月15日頃および10月8日頃にステップ状の歪変化が見られるが、同時期に顕著な地震はなく、他の2成分に同様な歪変化が記録されていないことから、これらは実際の地殻変動ではなく、測定システムに起因するノイズと考えられる。

図3は、台風通過前後4日間にわたる歪観測値および地上気圧観測値を示す。多くの歪成分は台風が接近するにつれて収縮し、通過直後に大きく伸長に反転した。その歪変化の大きさは、台風通過時の気圧低下量に比例しており、通過時の気圧低下が38hPaと大きな台風23号では、約 10^{-7} の歪変化が観測された。

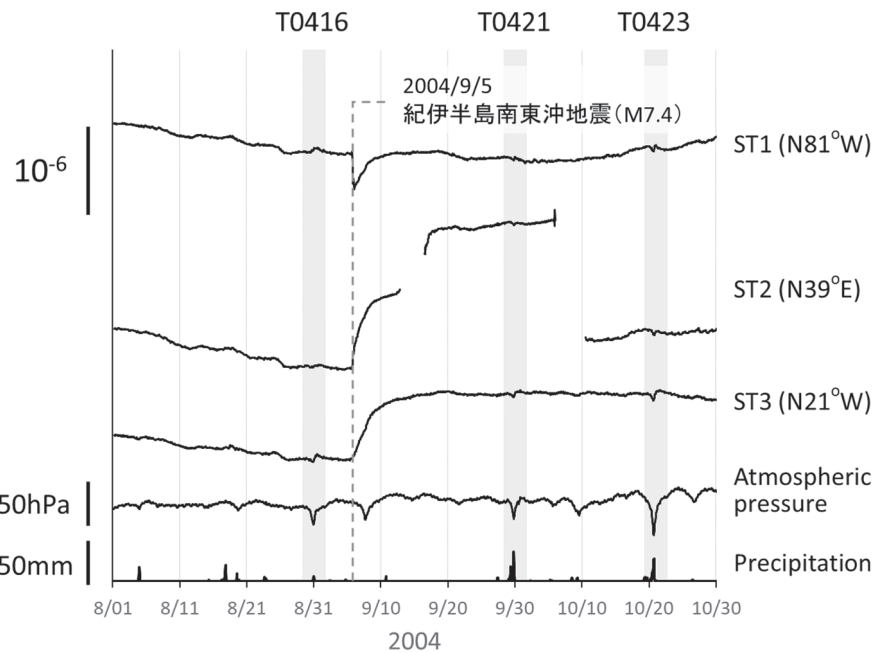


図2. 2004年に六甲高雄観測室で観測された歪変化

2004年8月1日～10月29日に埋設型石井式歪計 ST1, ST2 および ST3 で観測された歪変化を示す。また、六甲高雄観測室の南方約6km地点に位置する神戸地方気象台で観測された地上気圧および降水量も同時に示す。縦の破線は、2004年紀伊半島南東沖地震(M7.4)の発生時期を示す。

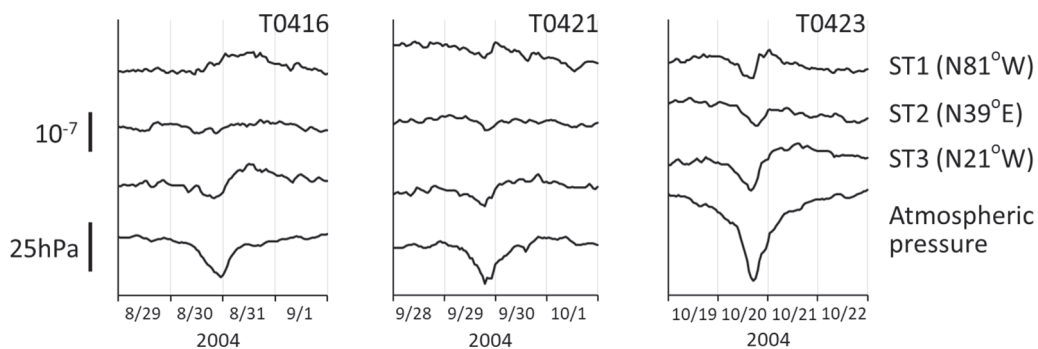


図3. 台風通過前後4日間に観測された歪変化

左から、それぞれ2004年台風16号(T0416)、21号(T0421)および23号(T0423)が観測室周辺を通過した期間を含む4日間の歪観測値を示す。地上気圧は神戸地方気象台の観測値である。

3. 台風通過時の歪観測値と推測値の比較

観測室周辺の岩盤が均質一様な弾性体であると仮定して、台風接近時に生ずる歪変化を計算した。この計算では、Farrell(1972)の荷重グリーン関数に天気図から読み取った気圧分布を当てはめた。天気図は気象庁が提供しているアジア太平洋地上天気図を利用し、東経 131.5～138.5°、北緯 32～38° の範囲で 0.5° 間隔で地上気圧を読み取った(図4)。

本稿では、台風接近時に生ずる歪変化を計算するため、台風16号では2004年8月30日15:00と21:00、台風21号では2004年9月29日15:00と21:00、台風23号では2004年10月20日12:00と18:00と、台風ごとに2つの日時を選択した。これらの日時の後半は、天気図が利用できる時刻のうち、台風の中心位置が神戸市に最も近い日時とした。

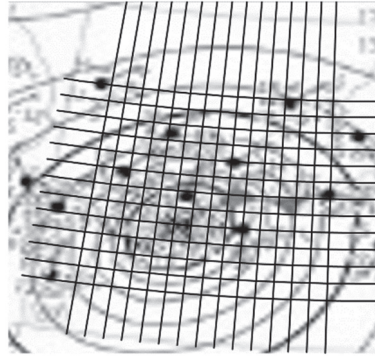


図4 気圧分布の読み取り

東経 131.5~138.5° , 北緯 32~38° の範囲で 0.5° 間隔で格子を設定し, 格子点位置の気圧を気象庁のアジア太平洋地上天気図から読み取った。図は 2004 年 10 月 20 日 18 時の場合を示す。

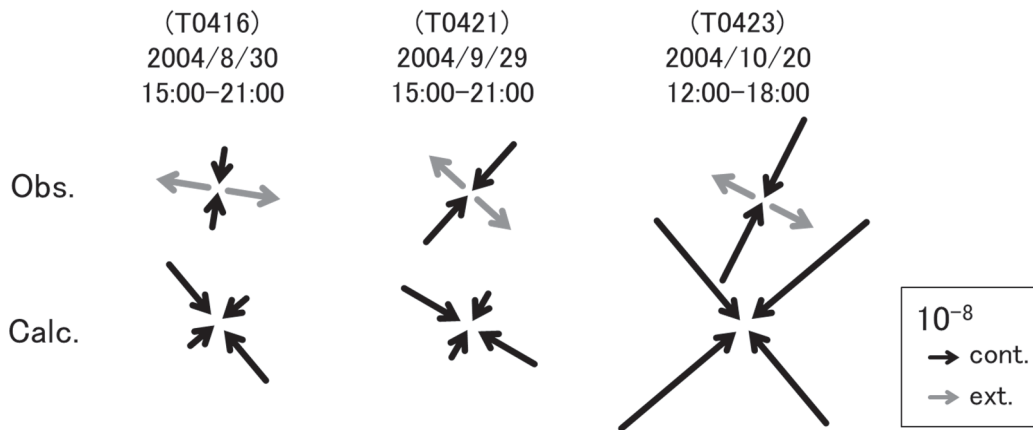


図5. 台風接近時に観測された歪変化と推測値との比較

左から, それぞれ 2004 年台風 16 号 (T0416), 21 号 (T0421) および 23 号 (T0423) が観測室に接近した際に観測された歪変化 (Obs.) および気圧分布に基づく弾性変形から計算した推測値 (Calc.) を示す。いずれも, 観測室に最接近した時刻の6時間前から最接近時までの歪変化から求めている。黒色の内向き矢印は収縮, 灰色の外向き矢印は伸長を示す。

表1 台風接近時に観測された歪変化と推測値の比較

		T0416	T0421	T0423
観測値	最大歪 ($\times 10^{-8}$)	+1.8	+1.5	+1.6
	最小歪 ($\times 10^{-8}$)	-1.2	-2.1	-3.0
	最大歪の方位 ($^{\circ}$)	0099	0132	0117
推測値	最大歪 ($\times 10^{-8}$)	-1.1	-1.1	-4.4
	最小歪 ($\times 10^{-8}$)	-2.2	-2.3	-5.1
	最大歪の方位 ($^{\circ}$)	0050	0030	0140

図5および表1は、台風接近時に観測された歪変化と均質一様な弾性体を仮定し、荷重グリーン関数から求めた推測値を比較した結果である。なお、歪観測値から主歪を求める際には、図3の歪観測値からは長期トレンドを取り除いた。

歪観測値から求めた主歪変化は、北北東-南南西方向の収縮、その直交方向の伸長を示すのに対して、推測値は全方位収縮となり、明瞭な差異が見られた。万福寺断層の走向がほぼ東西方向であること、また南側に大阪湾や瀬戸内海といった内海が存在することから、断層破砕帯の不均質な力学的構造の影響、断層破砕帯内部の局所的な地下水分布の変動、大気荷重に対する海面応答の特性が強く影響している可能性が示唆される。そこで、次のようにこれらの影響を近似的に考慮し、推測値の修正を試みた。

まず、断層破砕帯の影響としては、間隙水圧分布の変動に伴う断層破砕帯の膨張・収縮が考えられる。そこで、断層の走向を N80°W-S80°E とし、断層破砕帯の膨張・収縮によって生じる断層の走向方向およびその直交方向の歪変化をパラメータとした。また、大気荷重の一部が海底面に伝わることを想定して、海底面に作用する大気荷重の割合もパラメータとした。これらのパラメータに基づく修正を図5の推測値に適用したとき、観測された歪変化を最もよく説明できるパラメータを推定した(表2)。

表2 台風接近時の歪変化の推測値に対する補正効果の設定値

	T0416	T0421	T0423	
断層破砕帯の 影響 ($\times 10^{-8}$)	走向方向	+4.0	+3.6	+7.2
	その直交方向	-0.5	-1.4	-0.3
海底面への大気荷重の割合 (海面への大気荷重を1)	*0.6	*0.5	*0.6	

表2のパラメータを考慮した補正後の推測値は、図6および表3に示すようにほぼ観測された歪変化を再現することができた。このことは、六甲高雄観測室で観測された歪変化の気圧応答は、断層破砕帯や海面の気圧応答特性の影響を強く受けていることを示している。

表2に見られるように、歪観測値を説明するためには、均質一様な弾性体から推測される歪変化に対して、断層破砕帯の影響として、断層の走向方向に 10^{-8} オーダーの伸長、その直交方向に約 10^{-8} の収縮を加える必要がある。この断層の走向方向への伸長は、台風通過時の気圧低下量にほぼ比例している。台風通過時には気圧低下に伴って断層破砕帯から観測室へ地下水が吸い出されており、こうした断層の走向方向への伸長は、観測室から少し離れた地点の断層破砕帯内で間隙水圧の低下が生じたことに起因すると推測される。

また、大気荷重が海底面に伝わる割合は、いずれの台風においても 5~6 割と見積もられた。これは 10hPa の気圧低下に対して、海面が約 4~5cm 上昇したことを意味しており、大阪湾に南方の紀淡海峡や西方の明石海峡を通して海水が流入していたことが伺える。こうした海水の移動は時間を要するため、一般的に気圧変化に対して海面応答は遅れることになる。そのため、台風のように局地的な低気圧が数時間程度で通過する場合、より厳密な解析を行なうためには、応答の遅れを考慮した海面応答をモデル化する必要があると言える。

以上のように断層破砕帯の影響や海面の気圧応答特性を考慮することによって、台風通過時に観測

された歪変化を説明することができる可能性がある。しかし、本稿では、断層破砕帯の影響として、断層の走向方向および直交方向の歪変化を加算するという単純な補正方法をとっており、物理的に意味のある補正量とはなっていない。また、海面の気圧応答についても、海水の移動による応答の遅れや、大阪湾や瀬戸内海といった海域による違いを考慮していない。今後は、より現実的なモデルを用い、台風通過時に観測された歪変化に含まれる断層破砕帯の影響等を推測していく予定である。

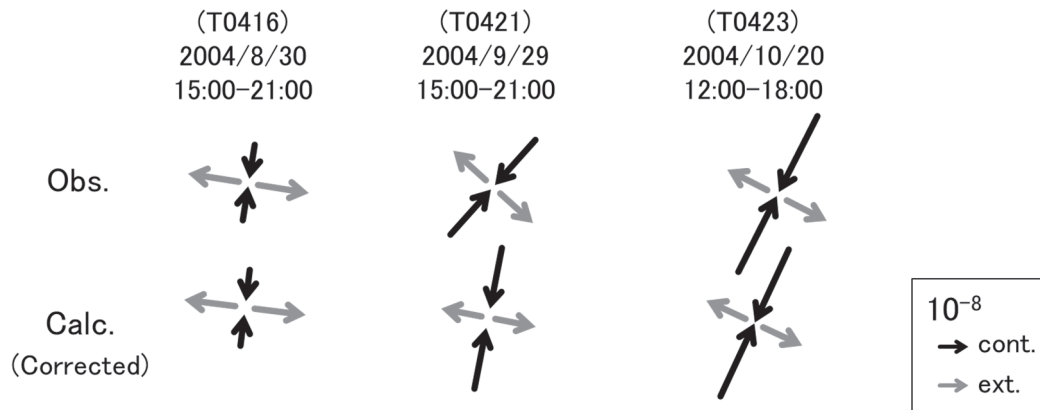


図6. 台風接近時に観測された歪変化と補正後の推測値との比較

左から、それぞれ2004年台風16号(T0416)、21号(T0421)および23号(T0423)が観測室に接近した際に観測された歪変化(Obs.)および補正後の推測値(Calc.)を示す。推測値の補正では、断層破砕帯の影響や海面の気圧応答を考慮した。黒色の内向き矢印は収縮、灰色の外向き矢印は伸長を示す。

表3 台風接近時に観測された歪変化と補正後の推測値の比較

		T0416	T0421	T0423
観測値	最大歪 ($\times 10^{-8}$)	+1.8	+1.5	+1.6
	最小歪 ($\times 10^{-8}$)	-1.2	-2.1	-3.0
	最大歪の方位 ($^{\circ}$)	0099	0132	0117
推測値	最大歪 ($\times 10^{-8}$)	+1.8	+1.4	+1.5
	最小歪 ($\times 10^{-8}$)	-1.1	-2.2	-2.8
	最大歪の方位 ($^{\circ}$)	0097	0101	0115

謝 辞

六甲高雄観測室の整備と観測継続に関しては、神戸市道路公社および阪神高速道路株式会社のご理解とご援助の賜である。また、本研究を進めるにあたり、その一部として神戸学院大学人文学部研究推進費が使用された。ここに謝意を表す。

参考文献

- 向井厚志・大塚成昭(2009): 淡路島と六甲における歪観測値から得られた潮汐振幅の経年変化の比較, 東濃地震科学研究所報告, 23, 133-138.
- W.E.Farrell (1972): Deformation of the Earth by surface loads, Reviews of Geophysics, 10, 3, 761-797.