

## 寄 書

### 最近の大地震による 極運動の励起について

小林 裕太・日置 幸介

北海道大学理学院自然史科学専攻

(2012 年 1 月 10 日受付, 2012 年 2 月 17 日改訂,

2012 年 3 月 13 日受理)

### On the polar motion excitations by recent mega-thrust earthquakes

Yuta Kobayashi, Kosuke Heki

Dept. Natural History Sciences, Hokkaido University,  
N10 W8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan

(Received January 10, 2012; Revised February 13,

2012; Accepted March 13, 2012)

#### Abstract

The Earth's spin axis moves by various factors, and mass redistribution associated with seismic faulting is also expected to contribute to this movement. However, there have been no space geodetic observations of coseismic polar motion excitations to date. In this study, we analyze the time series of the excitation functions of the polar motion, and try to detect steps due to the three recent M9 class earthquakes, i.e. the 2004 Sumatra-Andaman, the 2010 Chile (Maule), and the 2011 Tohoku-Oki earthquakes. For the 2010 Chile earthquake, a significant step was detected but was not consistent with the anticipated direction.

#### 1. はじめに：地震による極運動の励起

地球の自転運動の変動には、月や太陽の潮汐力によって自転軸が空間中を動く歳差・章動、月一地球系の力学

進化による永年減速などの自転速度変動、地球に対する自転軸の移動を表す極運動の三種類が存在する。地震に伴って断層に生じる食い違いは質量再配分をもたらし、自転速度変動と極運動の原因となる。

地震に伴う極運動は震源パラメータから理論計算によって求めるのが一般的であったが (e.g. Chao et al., 1996), 2002 年に打ち上げられた重力観測衛星 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) による地震時重力変化の実測値 (e.g. Han et al., 2006) から極運動を計算することが出来る。一般に沈み込み帯で発生した低角逆断層の巨大地震に伴う極運動では、震源が属する半球の極が震源の方向にわずかに移動する。地震時重力変化には、密度コントラストのある境界面 (地表やモホ面) の隆起・沈降も効くが、断層下端の上側の密度減少と下側の密度増加の貢献が大きい (Ogawa and Heki, 2007)。これは等価的に質量が下方移動することになり重力の減少をもたらすが、それに対する応答として地球の慣性主軸が動くのである。例えば 2004 年スマトラ・アンダマン地震 ( $M_w$  9.2, 以下スマトラ地震と呼ぶ) では北極を東経 145 度方向に約 2.5 cm 動かしたことが示唆された (<http://www.jpl.nasa.gov/news/>)。また GRACE によって観測された重力変化から、2010 年チリ (マウレ) 地震 ( $M_w$  8.8) では南極が西経 70 度方向へ約 8.7cm (Heki and Matsuo, 2010), 2011 年東北地方太平洋沖地震 ( $M_w$  9.0, 以下東北沖地震と呼ぶ) では北極が東経 135 度方向へ約 15 cm 動いたことが推察された (Matsuo and Heki, 2011)。

しかし地球回転パラメータの測地学的観測によって地震による極運動の励起を捉えた例は、今までにない。Chao et al. (1996) によると、1960 年チリ地震 ( $M_w$  9.5) は北極 (南極) を東経 115 度 (西経 65 度) 方向へ約 68 cm 動かしたとされ、また 1964 年アラスカ地震 ( $M_w$  9.2) でも北極を東経 198 度方向に約 23 cm 動かしたと考えられている。地球の極運動は国際緯度観測事業による眼視天頂儀を用いた観測が 1899 年に始まって以来、観測の歴史は百年を超えている (大江, 1979)。しかし、光学望遠鏡による観測には数 cm の極移動を捉える精度がなく、それらの地震に伴う極運動の検出には至っていない (Chao et al., 1996)。Figure 1a はこれらの地震による極運動の予測値を比較したものである。

1980 年代後半から始まった超長基線電波干渉法 (VLBI, Very Long Baseline Interferometry) や全地球測位システム (GPS, Global Positioning System) 等の宇宙技術を用いた測地観測により地球回転パラメータの

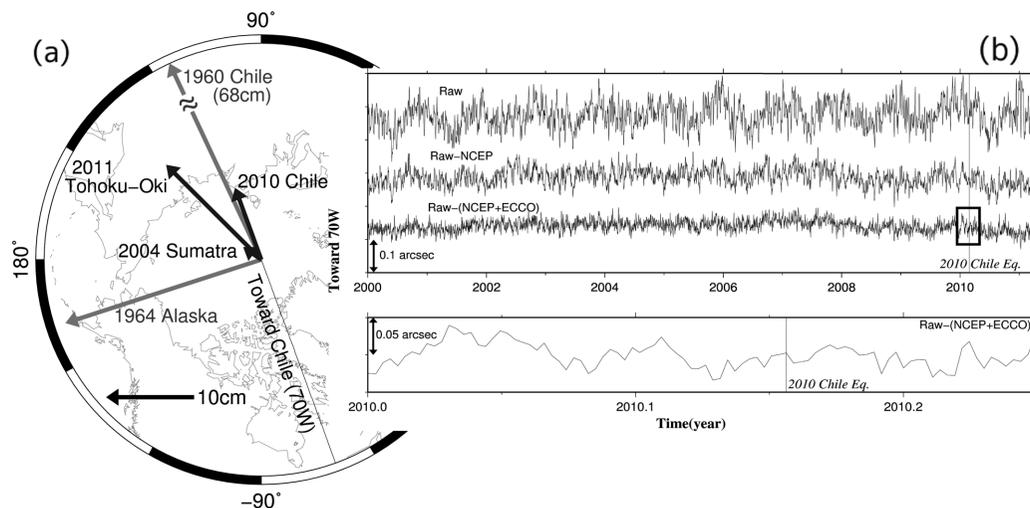


Figure 1. (a) Polar motion (north pole) calculated for five magnitude-9 class earthquakes during 1960-2011. We studied the recent three earthquakes shown by black arrows. (b) Time series of the polar motion excitation toward 70W. The three time series in (b) indicate raw values (top), those corrected for the atmospheric excitation (middle), and for the atmospheric and oceanic excitations (bottom). Vertical line shows the time of the 2010 Chile (Maule) earthquake. The part within a black square is magnified below. 0.1 arcsec corresponds to approximately 3 meters on the Earth's surface.

観測精度は高度に向上し、現在では一日ごとの地球の自転軸の位置を±1ミリ秒角の精度で捉えられる(横山, 1994)。本研究では、宇宙測地技術誕生後に発生した、2004年スマトラ地震、2010年チリ地震、2011年東北沖地震の三つのマグニチュード9クラスの地震を取り上げ、それらに伴う極運動の励起(慣性主軸の移動に伴う平均極の移動)の検出を試みる。スマトラ地震は低緯度で発生したため、地震の規模に比べて極運動の励起が小さい(地震による極運動の励起は緯度45度で最大になり、赤道直下および極でゼロになる)。また東北沖地震の場合は地震後の極運動のデータがまだ少ない。本研究では、地震に伴う極運動の検出の可能性が高い2010年チリ地震に特に注目する。

## 2. 地球の極運動とその主な励起源

### 2.1. 大気・海洋による極運動励起とその補正

短期的な極運動の主要な部分は大気や海洋、陸水(土壌水分、積雪、雪氷等)などの移動や変動によって励起されている(Gross, 2000; Chen and Wilson, 2003; 2008)。従って、それらを取り除かないと地震による極運動の励起を見ることはできない。国際地球回転・基準座標系サービス(IERS)の解析センターであるパリ天

文台のページ(<http://hpiers.obspm.fr/>)からは、宇宙測地的に観測された極運動のデータだけでなく、NCEP(National Centers for Environmental Prediction)の風・気圧データ、ECCO(Estimating the Circulation and Climate of the Ocean)の海流・海底圧力モデルの値から計算された極運動の励起関数(励起極の位置のX, Y成分の時系列)がダウンロードできる。一般に大気や海洋による極運動の励起には運動項と質量項があるが、風と海流が前者に、気圧と海底圧力が後者に相当する。本研究では、極運動データから第3章で述べる手法で励起極を求め、さらに上記の大気と海洋による励起の補正を行なった。陸水変動による極運動は補正していない。

### 2.2. 地震による極運動の励起の検出法

瞬間的な自転軸の位置は約14ヶ月周期のチャンドラー極運動と年周極運動の重ね合わせとして、反時計周りの螺旋を描く。螺旋の中心が慣性主軸の位置(励起極)である。北緯90度の点を原点として経度0度方向(グリニッジ方向)をX軸、東経90度方向をY軸に取り、励起極の位置(X, Y)は、Wilson(1985)の式を用いて計算した。Wilson(1985)によると複素チャンドラー角速度 $\sigma_c$ は、 $\sigma_c = 2\pi F(1 + i/2Q_c)$ で表される。ここ

で  $F$  はチャンドラー周期の逆数で  $0.843 \text{ yr}^{-1}$ ,  $Q_c$  はチャンドラー極運動の減衰を表す定数で 100 とした (Wilson, 1985). 地震による励起は極めて小さいため, 信号対雑音比を上げるために地震によって極が動いたと考えられる方向 (地震による重力変化の中心がある方向) に座標を回転させ, その方向の励起関数 (励起極位置の成分の時間変化) に注目した. Figure 1b は, ステップの検出可能性が最も高いと思われる 2010 年チリ地震前後の励起極の動きを示す. 補正前の時系列に比べて, 大気や海洋の励起を補正した後の時系列の振幅が小さいことがわかる. しかしそれらの励起の補正後も, 陸水変動等による励起が残存しており, わずかな地震時のステップが見える状態ではない. 次章では解析方法を工夫して地震に伴うステップの検出を試みる.

### 3. 地震に伴う励起関数のステップ検出の試み

Figure 1b に示すように, 極運動データから得られた励起関数から大気と海洋の励起を除くと, ランダムな観測誤差に加えて陸水等の未補正成分に由来する季節成分が残る. 最初に, 励起関数の一年毎の平均を取ることで季節成分を除去し, それら年平均データを時間の 2 次多項式と地震時のステップで近似してみた. これは多項式による近似モデルから各データを引いた残差の減少が, 次数を 1 次から 2 次に増やした時に最も大きかったためである. 励起関数の震源方向成分とその直交成分をそれぞれ Figure 2 と Figure 3 に示す. 地震時のジャンプは前者にのみ現れるはずである. 得られた地震時のステップの符号は, そもそも極運動の励起が微小な 2004 年スマトラ地震を除き予測値と調和的である. しかしそれらの量はいずれも予測値を大きく超えている. ステップの推定誤差は残差でスケールしたものだ

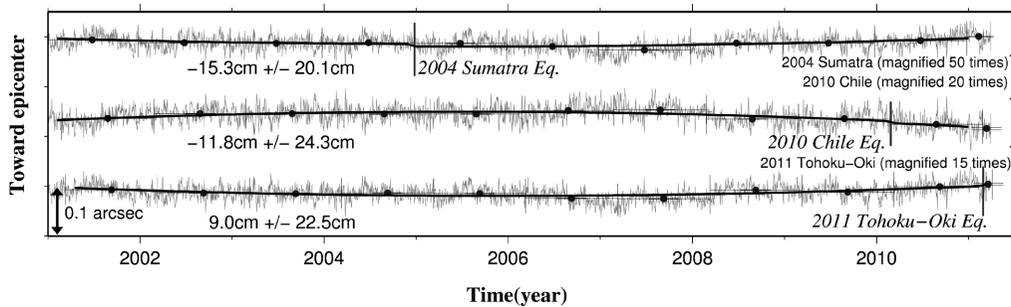


Figure 2. Time series of the excitation pole toward the epicenters of the 2004 Sumatra-Andaman (top), the 2010 Chile (Maule) (middle), and the 2011 Tohoku-Oki (bottom) earthquakes. Gray vertical bars show the occurrences of these earthquakes. Black curves show the models estimated for the annual averages of the excitation functions (black dots) assuming quadratic polynomials of time. Values show estimated steps associated with the earthquakes and their standard deviations. Black arrows at the right-hand edge show predicted pole shifts (enlarged to make them visible).

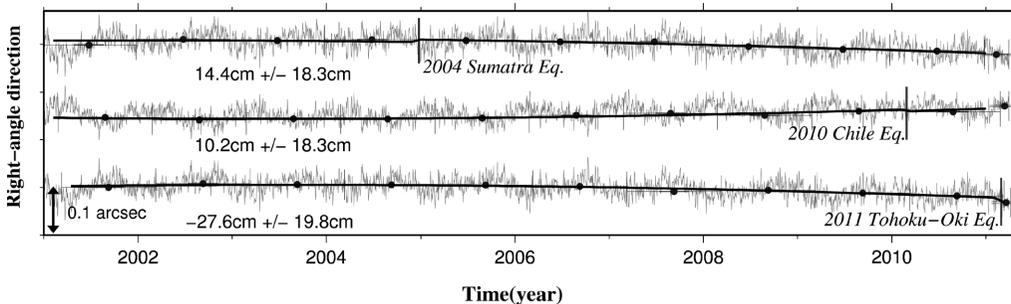


Figure 3. Time series of the polar motion excitations perpendicular to the direction of the epicenters. See the Figure 2 caption for the detail.

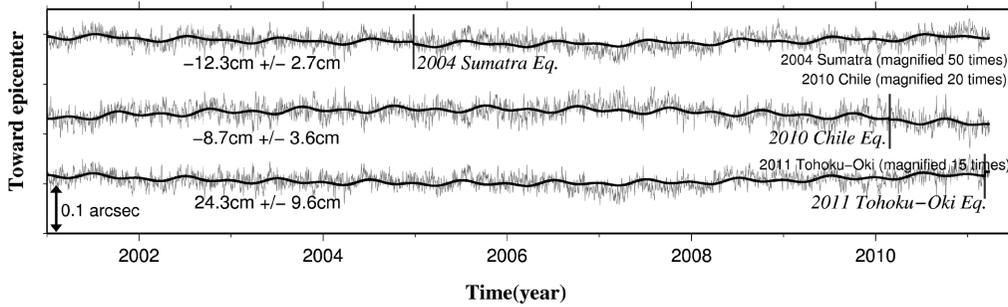


Figure 4. Same as the Figure 2, but the model curves are derived by assuming seasonal changes as well as quadratic functions of time.

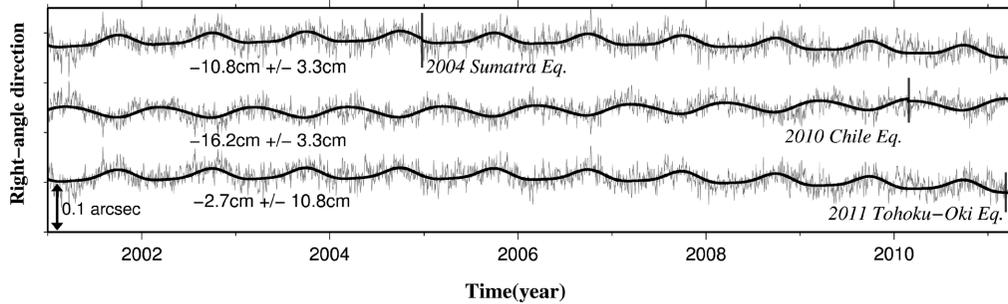


Figure 5. Same as Figure 3, but the model curves are derived by assuming seasonal changes as well as quadratic function of time.

が、いずれも推定された値を超えており、ステップは統計的に有意とは言えない。いずれの地震でも、予測と直交した方向にも同程度のステップが検出されており (Figure 3)、Figure 2 のステップが地震と関係しているとは言いがたい。

次は、データの年平均を取らずに、2001年から2011年3月末までの全データを用いて、地震時ステップや長期的な変化 (時間の二次多項式) に加えて季節 (年周と半年周) 成分をパラメータとして推定した。震源方向とその直交方向での推定結果をそれぞれ Figure 4 と Figure 5 に示す。年平均を用いた場合と比較してデータ数が二桁ほど多く、ステップの推定誤差も一桁ほど小さくなった。Figure 4 に見るように、2010年チリ地震と2011年東北沖地震に伴うステップの符号は予測と調和的である。また2010年チリ地震におけるステップの大きさは予測値の8cmに近い。ただし Figure 5 に示す震源と直交方向の動きでも約16.2cm ± 3.3cmのステップが推定されている。これは推定された極運動の方向と大きさが、予測と大きく食い違っていることを意味している。

#### 4. まとめと考察

本研究では極運動の主要な励起源である大気・海洋の成分を取り除いた後の極運動の励起関数から、最近発生した三つの海溝型巨大地震に伴うステップの検出を試みた。それらは検出限界より小さく、明瞭に検出されなかった。その原因は地球回転パラメータの観測精度の不足ではなく、大気・海洋以外の励起源を補正する適切なモデルがないためである。例えばしばしば用いられる陸水モデル GLDAS (Global Land Data Assimilation System, Rodell et al., 2004) には山岳氷河や大陸氷床の質量変動は考慮されていない (Matsuo and Heki, 投稿中)。また本研究で用いた大気・海洋による励起のモデルにも不完全な部分があるだろう。将来は、GRACEによる重力変化データから別途求めた雪氷圏の質量変化を用いて補正することによって、地震による極運動の励起を検出できる可能性が高まるかも知れない。

最後に長期的な極移動と地震の関係について考察する。Figure 1aを見ると、海溝型巨大地震で極が動く方向はいずれも東経110-140度であることに気づく。地

震による極運動が特徴的な移動方向を示すことには Chao et al. (1996) や Spada (1997) が既に指摘している。これは偶然ではなく、北半球の沈み込み帯の多くが太平洋西北岸に分布し、かつ南半球の沈み込み帯の主要な部分はその裏側である太平洋東南岸に分布することを反映している。ただし地震時の地殻変動は地震間の変動で打ち消されるため、地震に伴う極運動の励起も永年的に蓄積されることは考えにくいだろう。

## 謝 辞

匿名の査読者に多くの適切なコメントをいただいた。

## 参 考 文 献

- Chao, B. F., R. S. Gross, and Y. Han (1996): Seismic excitation of the polar motion, *PAGEOPH*, **146**, 407-419, doi: 10.1007/BF00874727.
- Chen, J. L., and C. R. Wilson (2003): Low degree gravitational changes from earth rotation and geophysical models, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, L018688, doi: 10.1029/2003GL018688.
- Chen, J. L., and C. R. Wilson (2008): Low degree gravity changes from GRACE, Earth rotation, geophysical models, and satellite laser ranging, *Geophys. Res. Lett.*, **113**, B06402, doi: 10.1029/2007JB005397.
- Gross, R. S. (2000) : The excitation of the Chandler wobble, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 2329-2332, doi: 10.1029/2000GL011450.
- Han, S.-C., C. K. Shum, M. Bevis, C. Ji, and C.-Y. Kuo (2006): Crustal dilatation observed by GRACE after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake, *Science*, **313**, 658-662, doi: 10.1126/science.1128661.
- Heki, K., and K. Matsuo (2010): Coseismic gravity changes of the 2010 earthquake in central Chile from satellite gravimetry, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L24306, doi: 10.1029/2010GL045335.
- 国際地球回転・基準座標系サービス (IERS) : (<http://hpiers.obspm.fr/>). (参照 November 24, 2011) .
- Matsuo, K., and K. Heki (2011) : Coseismic gravity changes of the 2011 Tohoku-Oki earthquake from satellite gravimetry, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L00G12, doi: 10.1029/2011GL049018.
- Matsuo, K. and K. Heki (2012), Anomalous precipitation signatures of the Arctic Oscillation in the time-variable gravity field by GRACE, *Geophys. J. Int.*, submitted.
- NASA/JPL ホームページ (<http://www.jpl.nasa.gov/news/>). (参照 November 24, 2011) .
- Ogawa, R., and K. Heki (2007): Slow postseismic recovery of geoid depression formed by the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake by mantle water diffusion, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L06313, doi: 10.1029/2007GL029340.
- 大江昌嗣 (1979) : 「地球回転」, 現代天文学講座, 恒星社, 第4章, 169-214.
- Rodell, M., et al. (2004): The global land data assimilation system, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **85**, 381-394, doi: 10.1175/BAMS-85-3-381
- Spada, G. (1997): Why are earthquakes nudging the pole toward 140°E?, *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 539-542, doi: 10.1029/97GL00247.
- Wilson, C. R. (1985): Discrete polar motion equations, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **80**, 551-554.
- 横山紘一 (1994) : 地球回転, 「現代測地学」第6.3章, 日本測地学会, 292-313.