

2011年東北沖地震の三ヶ月前から生じていたとされる重力変化

北海道大学 理学部 地球惑星科学科4年 宇宙測地学研究室 蓮實尚輝

1. 背景と目的 Background & Purpose

2002年に打ち上げられた重力衛星GRACEを用いることで地球力静的重力場の高精度観測とその時間変化の観測が可能になった。これまでにGRACEデータの時系列解析から、巨大地震時および地震後の重力変化が数多く報告されてきた(田中、日置, 2017)が、Panet et al.(2018)は今までの解析方法とは異なる手法で2011年東北沖地震(Mw9.0)の約三か月前から重力変化が生じていたことを報告した。彼女らの手法の特徴は、重力鉛直成分ではなく重力水平成分の空間勾配を観測していること、特殊なバンドパスフィルタを使用していること等である。本研究ではPanet et al.(2018)の内容を追試し、同様の結果が得られるか調べた。

2. GRACEによる重力測定の仕事 How does GRACE measure gravity?

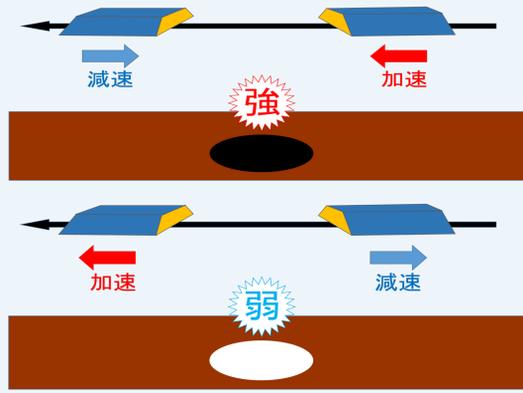
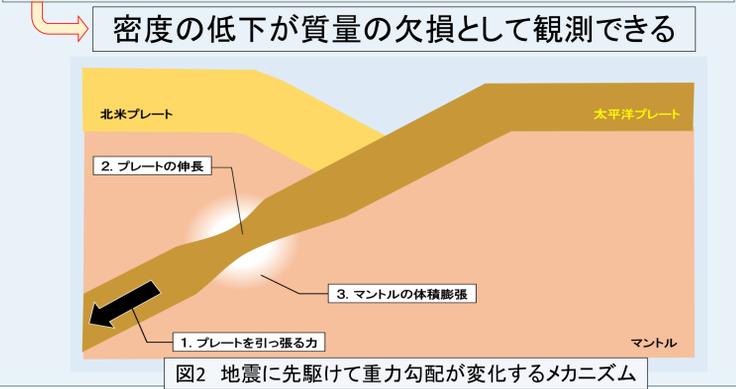


図1. 2002年に打ち上げられた重力衛星GRACEは、双子衛星で互いの間の距離をマイクロ波測距装置で精密に計測することで、重力異常の分布を一ヶ月の時間分解能、約300kmの空間分解能で求める。

3. 地震に先駆けて質量が変化するメカニズム How did the mass changed before the earthquake?

1. スラブプルによる太平洋プレートの進行方向への引っ張り
2. 太平洋プレートの伸長
3. マントルの体積膨張による密度低下



4. 重力勾配 Gravity gradient

2011年東北沖地震について、今までは日本周辺でのみ解析を行っていた(Matsuo & Heki, 2011)のに対し、Panet et al.(2018)では日本周辺150° × 100°と非常に広い範囲で、波長が800~1600kmの重力に限定して解析を行っている。

また、本研究では地震時の重力の変化を重力加速度で見るのではなく、**東西方向の重力成分(東向き正)**を空間微分して求めた**重力勾配**を用いて解析している。

重力勾配で質量欠損はどのように見えるか

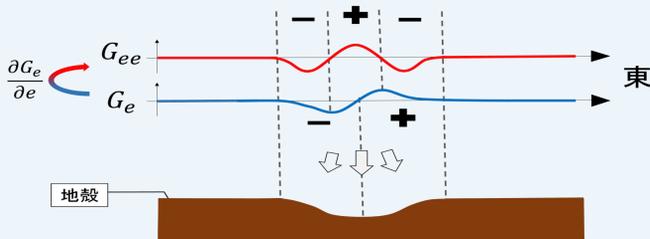


図3. 質量欠損と東向きの重力加速度(G_e)、その東西方向空間微分(重力勾配 G_{ee})の関係

5. 使用データと解析方法 Data analysis

Panet et al.(2018)の論文ではフランス国立宇宙研究センターで解析されたStokes係数データを用いているが、本研究ではテキサス大学宇宙観測センターが公開しているLevel2, RL06データを用いた。このデータに図4のバンドパスフィルタを施すことで波長が800~1600kmの重力を強調した。Wang et al.(2012)によると、GRACE level2データに含まれる C_{nm} , S_{nm} のStokes係数を(1)の式に代入することで地球の重力場を表現することができ、そこから派生させた(2),(3),(4)の式を用いることで重力勾配の東西成分の式(5)を求めることができる。

$$U = \frac{GM}{r} \left(\sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a_e}{r}\right)^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos\theta) \right) \quad \dots\dots(1)$$

$$V_r = -\frac{GM}{R^2} \left(\sum_{n=2}^{\infty} (n+1) \left(\frac{R}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P'_{nm}(\cos\theta) \right) \quad \dots\dots(2)$$

$$V_{\theta} = -\frac{GM}{R} \left(\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P'_{nm}(\cos\theta) \sin\theta \right) \quad \dots\dots(3)$$

$$V_{\lambda\lambda}(r, \theta, \lambda) = -\frac{GM}{R^3} \left(\sum_{n=2}^{\infty} (n+1)(n+2) \left(\frac{R}{r}\right)^{n+3} \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos\theta) \right) \quad \dots\dots(4)$$

$$V_{yy}(r, \theta, \lambda) = \frac{1}{r} V_r(r, \theta, \lambda) + \frac{1}{r^2} \cot\theta V_{\theta}(r, \theta, \lambda) + \frac{1}{r^2 \sin^2\theta} V_{\lambda\lambda}(r, \theta, \lambda) \quad \dots\dots(5)$$

U : 重力ポテンシャル, V : 重力ベクトル, θ : 余緯度, λ : 経度, r : 半径, M : 地球の質量(5.974×10^{24} kg),

重力勾配の単位(eötvös)
1eötvös = 10^{-9} Gal/cm
= 10^{-9} s⁻²

G : 万有引力定数(6.674×10^{-11} m³kg⁻¹s⁻²), a_e : 地球の平均半径, n : 次数,
 m : 位数, C_{nm} と S_{nm} : ストークス係数, P_{nm} : ルジャンドル陪関数 (ν は東方向)

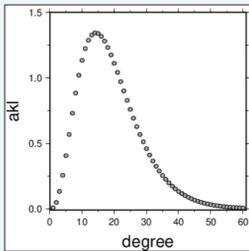


図4. 本研究で用いたバンドパスフィルタ。横軸が次数で、縦軸がストークス係数にかけらる値。

6. 結果①: 時間変化 Result #1 Temporal changes

Periodic components removed Trend, co/post-seismic signals removed

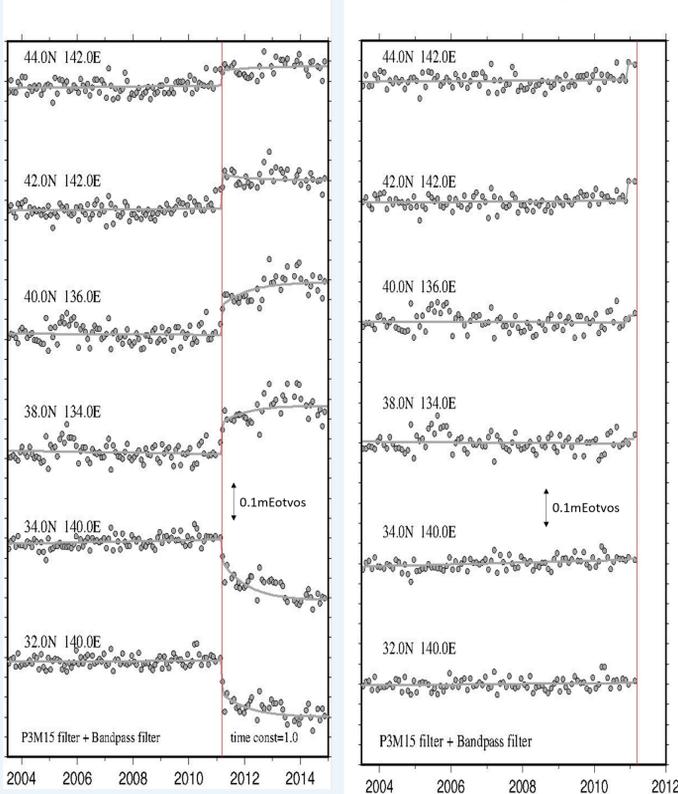


図4. 日本周辺における周期成分を取り除いた重力勾配東西成分(左)の時系列と地震時・地震後の変動を取り除いた重力勾配東西成分の時系列(右)。(赤い線は2011年3月11日)。

周期成分を取り除いた重力勾配(G_{ee} (Panet et al.,(2018)))

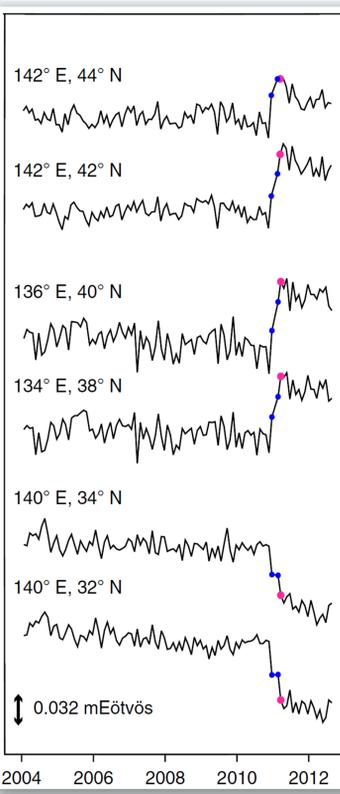


図5. Panet et al.(2018)で報告された、日本周辺における重力勾配東西成分の時系列。赤点が2011年3月の値。2010年12月頃から重力勾配の変化が生じている。

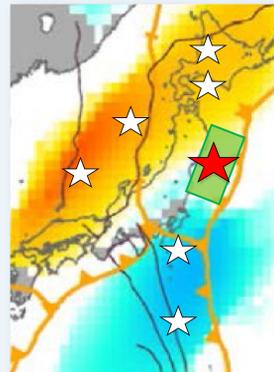


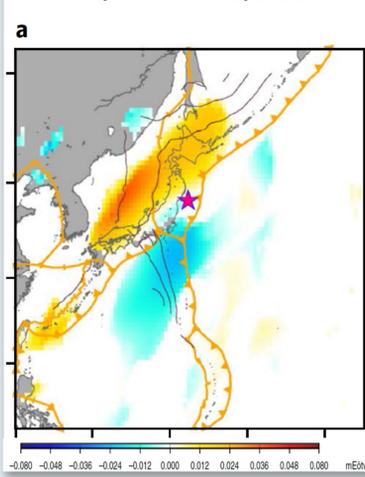
図6. 図4と図5で重力の値の時系列で表した地点の位置関係(白い星印)と、2011年東北沖地震の震源(赤い星印)と断層(四角)。(Panet et al.,(2018)の重力勾配東西成分のグラフをもとに作成)

Panet et al.(2018)の論文で重力勾配の時系列が取り上げられていた地点について重力勾配の時系列を作成した結果、北緯44度・東経142度と北緯42度・東経142度の時系列で地震に先駆けた重力勾配の変化が見られた。一方、その他の座標では地震前から始まる重力勾配のはっきりとした変化は見られなかった。

→ **確かに地震前から重力勾配の変化が始まっている場所がある！！**

7. 結果②地震前の変化 Result #2 pre-seismic changes

July 2010–February 2011



Panet et al.(2018)

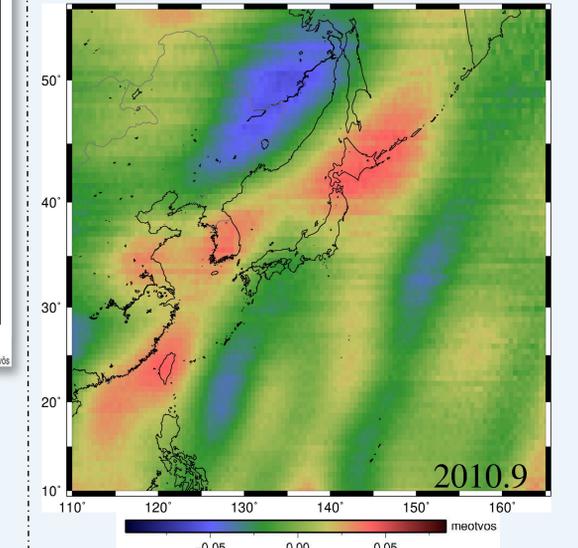
2010年7月~2011年2月にかけて日本周辺で重力勾配が変化

本研究

2010年11月末に重力勾配の変化があったと仮定し、重力勾配の東西成分をプロットしたところ、日本周辺で重力勾配の変化が見られた。本研究で作成したグラフは北海道から日本海にかけて重力勾配の**増加**が見られており、東北沖で重力勾配の**減少**が見られた。

←図7. Panet et al.(2018)で報告された東北沖地震の数か月前から生じていたとされる重力勾配を地図上にプロットしたもの(Panet et al.(2018)赤い星は震源、黄色線はプレート境界)。

↓図8. 2010年11月末に重力勾配の変化があったと仮定したときの重力勾配のジャンプをプロットしたグラフ。



7. 結論と課題 conclusion and challenges

1. 座標によって地震前に重力勾配の変化が始まっているところがある。
2. Panet et al.(2018)のグラフと多少のずれはあるが地震前に日本周辺で重力勾配の変化が見られた

以上の結果からPanet et al.(2018)で報告された、東北沖地震の数か月前から生じていた重力勾配の変化は確かに起こっていたと考えられる。しかし、本研究とPanet et al.(2018)では重力勾配の変化が見られる地域に差がある(図7・図8)。そのため、本研究では作成した時系列6つのうち4つでは重力勾配の変化がはっきりと見られなかったと考えられる。今後、新たな補正を加えていくことにより、今回は変化が見られなかった地域においても重力勾配の変化が観測できるようになるだろう。

参考文献

- Panet et al.(2018): "Migrating pattern of deformation prior to the Tohoku-Oki earthquake revealed by GRACE data" Nature Geoscience, 11, 367–373, 2018.
- 田中優作, 日置幸介 (2016): "GRACE地震学 一衛星重力観測による地震研究のこれまでとこれから" 地震2, 第69巻, pp.69-85, 2017.
- Wang et al. (2012): "Gravitational gradient changes following the 2004 December 26 Sumatra-Andaman Earthquake inferred GRACE" Geophysical Journal International (2012)191, 1109-1118
- Matsuo, K. & Heki, K.: "Coseismic gravity changes of the 2011 Tohoku-Oki earthquake from satellite gravimetry, Geophys. Res. Lett., 38, L00G12,(2011)