

**2010年チリ地震における地震時および地震後の  
重力変化：重力衛星 GRACE による観測**

北海道大学理学部 地球惑星科学科

宇宙測地学研究室

学生番号 22080081

**田中 優作**

指導教官名 日置 幸介

## 概要

古くからその存在が予測されていた科学的事実、地震に伴う重力の変化がある。これは大きく2つに分けることができる。一方は地震時の瞬間的な重力変化であり、他方は地震後のゆっくりとした重力変化である。

地震に伴う重力の変化は、断片的ではあるが、21世紀に入ってから地上の精密重力観測で初めて検出に成功した。さらに、2002年に打ち上げられたGRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) と呼ばれる重力を測定する人工衛星から得られたデータを使うことで、地震に伴う重力変化を二次元的に観測できるようになった。

本研究では、その人工衛星GRACEから得られたデータを用いて、2010年2月27日に起こったチリ地震に伴う重力変化を観測した。その結果、重力は地震に伴って瞬時に減少した後、ゆっくり回復した事を見いだした。2004年12月26日に起こったスマトラ・アンダマン地震の地震後にも同様の重力変化が見いだされており、その原因は間隙水の拡散であると結論づけられている。本研究も、その結果を支持するものである。尚、地震後の重力の変化量と、変化するのに要した時間については、チリ地震とスマトラ・アンダマン地震の間に良い一致が見られた。

本研究ではさらに、2011年3月11日に起こった東北地方太平洋沖地震における地震時および地震後の重力変化とも比較検討した。この地震は、まだ起きてから1年も経っておらず、地震後重力変化が今も続いている可能性が高いため、他の二地震に比べて地震後の変動の議論には不十分である。それでもチリ地震、スマトラ地震と同じように、間隙水の拡散と調和的なゆっくりとした地震後の重力増加が見いだされた。

## 目次

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 1. はじめに                       | 4  |
| 1. 1 地震に伴って重力が変化するメカニズム       | 4  |
| 1. 2 人工衛星GRACEが重力を測定する仕組み     | 5  |
| 1. 3 本研究の目的                   | 6  |
| 2. データ解析の方法                   | 6  |
| 2. 1 GRACEデータの処理              | 6  |
| 2. 1. 1 球面調和関数の係数としてのGRACEデータ | 7  |
| 2. 1. 2 縦縞フィルター               | 9  |
| 2. 1. 3 ファンフィルター              | 12 |
| 2. 2 時系列解析の方法                 | 14 |
| 2. 2. 1 重力が時間変化する要因           | 14 |
| 2. 2. 2 季節変化を除外する方法           | 14 |
| 3. 結果と考察                      | 18 |
| 3. 1 2010年チリ地震に伴って起こった重力変化    | 18 |
| 3. 2 他の地震との比較                 | 22 |
| 3. 2. 1 2004年スマトラ地震との比較       | 22 |
| 3. 2. 2 2011年東北沖地震との比較        | 25 |
| 3. 3 まとめ                      | 30 |
| 4. 今後の課題                      | 31 |
| 5. 謝辞                         | 31 |
| 6. 参考文献                       | 32 |

## 1. はじめに

### 1.1 地震に伴って重力が変化するメカニズム

地震に伴う重力の変化は、大きく2つに分けることができる。一方は地震に伴って瞬時に起こる重力の変化である（地震時重力変化）。この変化には4つの原因がある。1つ目は断層が動いた事による地面の隆起・沈降、2つ目は1つ目と同じ原因によるモホ面の隆起・沈降、3つ目は地殻の体積膨張による密度の減少、4つ目はマンツルの体積圧縮による密度の増大である（図1）。

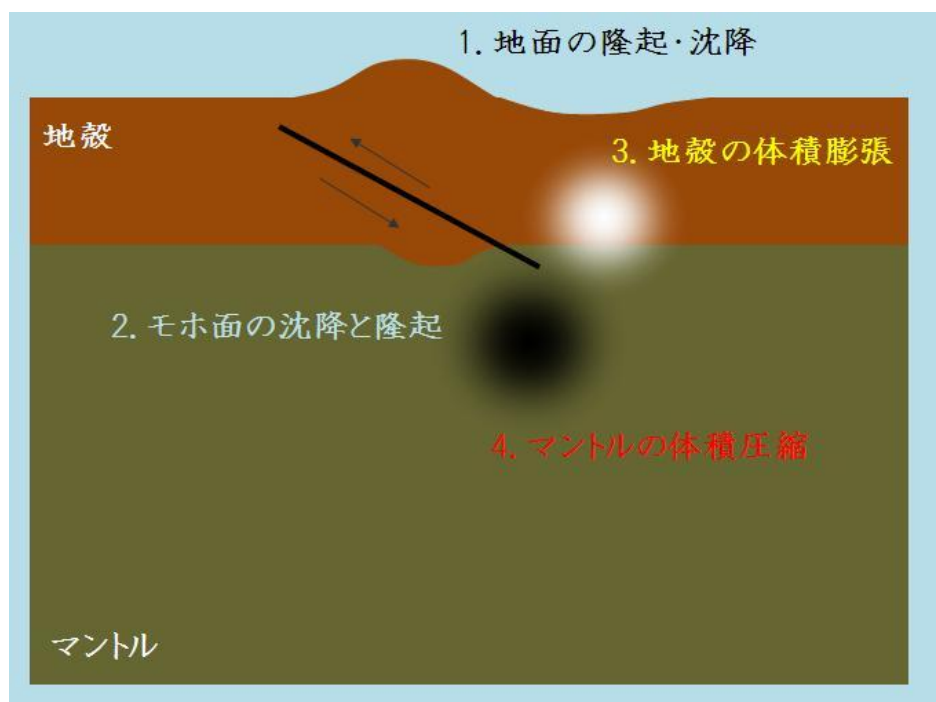


図1 地震に伴って、重力が瞬時に変化するメカニズム

地震に伴う重力変化のもう一方は、地震が起こった後のゆっくりした重力変化である（地震後重力変化）。この変化には3つの原因が考えられる。1つ目は断層が何日もかけてゆっくり滑り続ける「ゆっくり地震」、2つ目は膨張・圧縮された岩石が、その粘性流動によってシアー応力が消えるととも新たな力学的平衡に達する「粘性緩和」、3つ目は圧縮された岩石から膨張した岩石に向かって間隙水が流れていく「間隙水の拡散」である。尚、「ゆっくり地震」は、「アフタースリップ」や「スロースリップ」とも言われる。

これらの3つの原因はそれぞれ次のような特徴を持つ。1つ目のゆっくり地震の原因の特徴は、瞬時に起こった重力の変化が、ゆっくり増大していく点にある。このことは、粘性緩和や間隙水の拡散が変化した重力を回復させるのと

は対照的である。2つ目の粘性緩和の原因の特徴は、必要とする時間スケールが非常に長く数年以上で漸く見えてくるという点である。これは、岩石が大きな粘性を持つ為である。そして、3つ目の間隙水拡散の原因の特徴は、粘性緩和ほどの時間スケールを必要としない点にある。間隙水の拡散は、粘性緩和と同様に、変化した重力をもとにもどす方向に働く（粘性緩和は場合によっては反対に働くこともある）。しかし、時間スケールの違いによって、岩石の粘性緩和と間隙水の拡散は区別できる。

## 1.2 人工衛星GRACEが重力を測定する仕組み

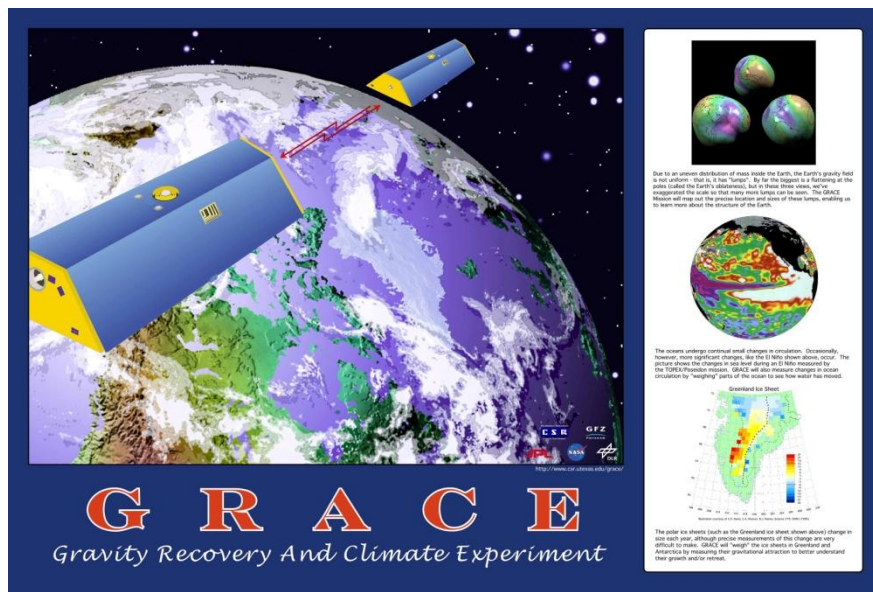


図2 GRACEのイメージ図（上）、GRACEの内部模式図（下）。いずれもテキサス大学のホームページ内、GRACEのコンテンツ(<http://www.csr.utexas.edu/>)より。

人工衛星の軌道は様々な要因で変化するが、最も大きな要因は重力場の非球対称成分である。したがって、軌道変化を正確に観測すれば、重力場の微細構造を調べることができる。人工衛星GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) は、図2上に示される双子の人工衛星である。GRACEは、高度約450キロメートルの極軌道を回る、約200キロメートル離れた双子の人工衛星であり、その衛星間距離はマイクロ波の位相を利用して測られている。この2衛星間の距離変化を測定することで、その場の重力を求めることができる。

尚、GRACEに搭載されているものは、その利用目的から3つに分けることができる。GPS受信機と、加速度計と、その他である。まずGPS受信機は、地心座標系でそれぞれの位置を決定するために利用される。次に加速度計は、重力以外（すなわち大気との摩擦）による加速を測定し、それによる影響を補正するために利用されている。その他には、マイクロ波で衛星間の距離を計測する装置や軌道修正のためのエンジン、通信装置などが搭載されている（図2下）。

### 1.3 本研究の目的

地震時重力変化は、2004年スマトラアンダマン地震（以下2004年スマトラ地震と書く）の時に Han et al. (2006)によって検出されて以来、2010年チリ地震(Heki and Matsuo, 2010)と2011年東北沖地震(Matsuo and Heki, 2011)の二例が報告されている。それらの例すべてで、地震時に重力は主に減少を示したことが知られている。しかし、地震後重力変化の報告例は、2004年スマトラ地震の例 (e. g. Ogawa and Heki, 2007)しかない。

Ogawa and Heki (2007)は、地震に伴って減少した重力が、地震後に一年程度の時定数でゆっくりと回復していったことを示した。2010年チリ地震については、地震後の重力変化はまだ報告されていない。本研究では、2010年チリ地震に伴って減少した重力が、その後どのようなゆっくりとした変化を示しているのかを見だし、その原因を考察する。さらに地震発生後十分な時間が経過していないが、2011年東北地方太平洋沖地震後の重力変化とも比較する。

## 2. データ解析の方法

### 2.1 GRACEデータの処理

#### 2.1.1 球面調和関数の係数としてのGRACEデータ

GRACEのデータは、解析センターの一つであるカリフォルニア工科大学ジェット推進研究所(JPL)のホームページ(<http://podaac.jpl.nasa.gov/>)で公開されている。ここで公開されているデータは、GRACEで得られた生のデータ(衛星間の測距データ)を解析し、それを60次までの球面調和関数の係数(Stokes係数)としたものである。これはLevel2データと言われている。このデータの空間分解能は約300キロメートルで、時間分解能は1か月である。また、このようにデータを加工している機関は、JPLの他に、テキサス大学宇宙研究センター(UTCSR)、ドイツ地球物理研究センター(GFZ)の2か所がある。先述のホームページからは、この3機関がそれぞれ独自に計算して得られた、毎月のStokes係数の値のセットを全てダウンロードできるが、本研究ではUTCSRのものを使用した。

尚、Level2データの前の段階のデータとして、Level0, Level-1A, Level-1Bデータが存在する。しかし、Level0, Level-1Aデータは、一般のユーザーが処理できるものではなく、公開されていない。Level-1Bデータは、公開こそされているが、扱う為には高度な技術と知識が必要である。これら3データは全て、Stokes係数に変換する前の、GRACEの衛星間距離の測定データである。

さて、ダウンロードしたStokes係数は、その平均値からのずれ( $\Delta S, \Delta C$ )を利用して、重力の平均値からのずれ( $\Delta g$ )に換算できる。このためには、次のように計算すれば良い。

$$\Delta g(\theta, \varphi) =$$

$$\frac{GM_{\text{earth}}}{R^2} \sum_{n=2}^{60} (n+1) \sum_{m=0}^n \{ \Delta C_{nm} \cos(m\varphi) + \Delta S_{nm} \sin(m\varphi) \} P_n^m(\cos\theta) \quad (1)$$

ただし、 $\theta$ は余緯度、 $\varphi$ は経度、 $R$ は地球の平均半径(6378 km)、 $G$ は万有引力定数、 $M_{\text{earth}}$ は地球の質量、 $P_n^m$ はルジャンドル陪関数、 $n$ は次数、 $m$ は位数である。尚、ルジャンドル陪関数は、インターネットで公開されているサブルーチンを使って計算した。そのサブルーチンは、「日本測地学会」のホームページ内、「測地学会図書」の「球関数に関するプログラム集」でダウンロードすることができる(<http://www.soc.nii.ac.jp/geod-soc/index.html>)。こうして実際に計算して描かれた重力分布が図3である。重力の時間変化は、図3を見て分か



る通り、ミリガルのオーダーでは判断できないほど小さい。そこで、重力の時間変化を見る際には、マイクロガルを使う。

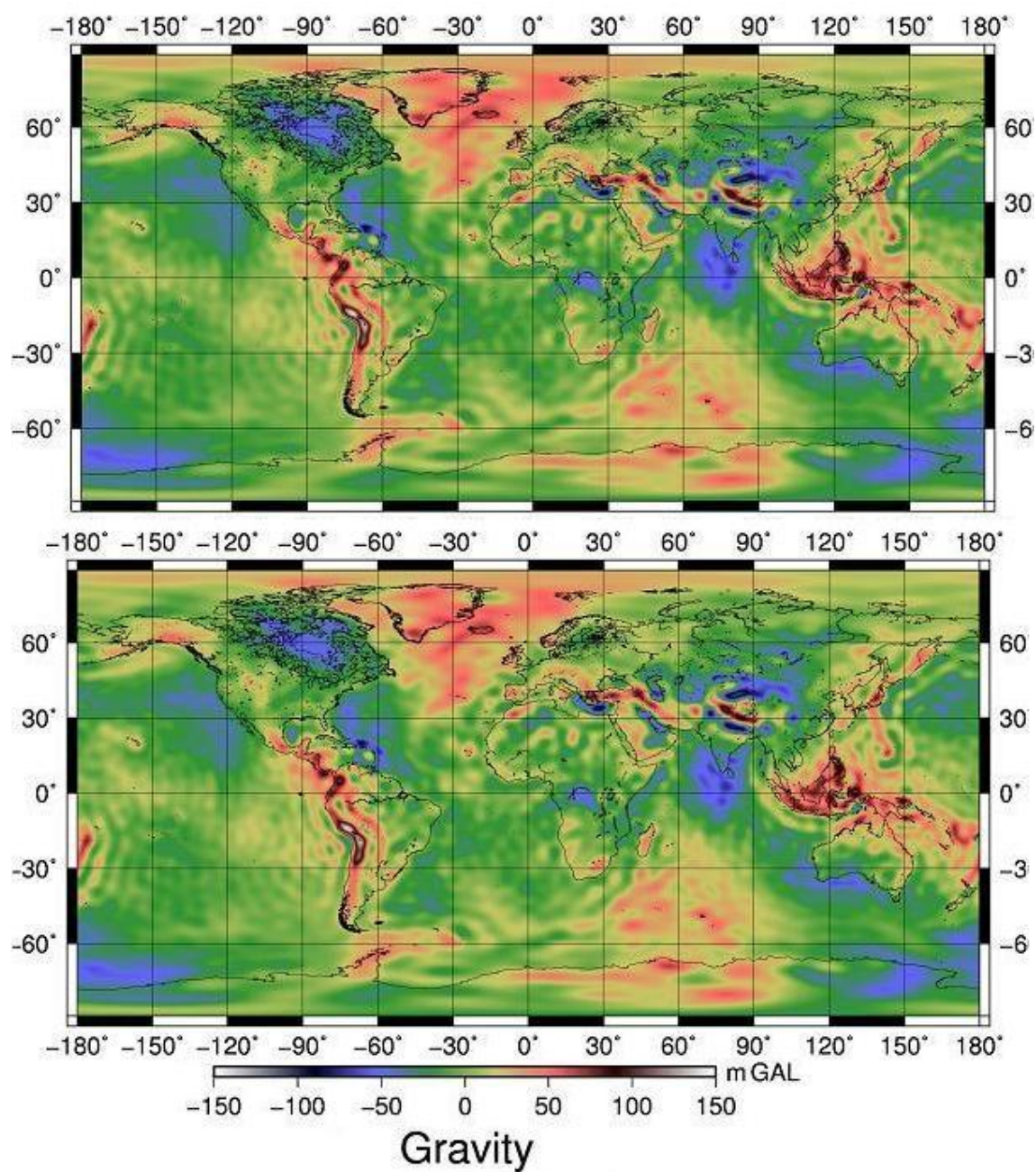


図3 上は2011年8月の、下は2011年9月の重力分布図。平均をゼロとし、そこからのずれを色で表している。両者の差は小さいため同じ図に見える。



### 2.1.2 縦縞フィルター

1. 2で書いた通り，GRACEは極軌道を回る衛星である．したがって，実はGRACEの空間分解能は，移動方向に良く経度方向に悪い．実際に重力の変化を調べる為に，図3の下（2011年9月）の重力の値から図3の上（2011年8月）の重力の値を引いてマイクロガルに換算すると，図4のようになり，縞状のノイズが激しいことがわかる．これでは重力の時間変化を調べることはできない．重力の時間変化を調べるためには，この縦縞模様を打ち消すフィルターが必要である．それを縦縞除去フィルター(de-stripping filter)という．

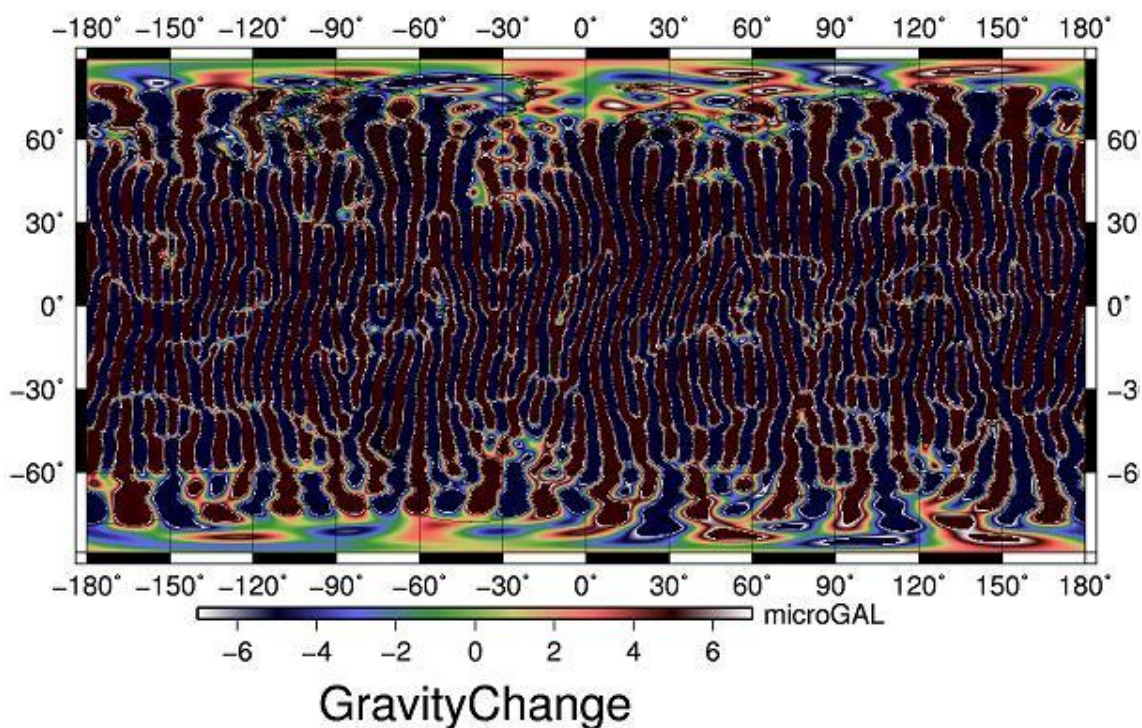


図4 2011年9月の重力値から2011年8月の重力値を引いた図

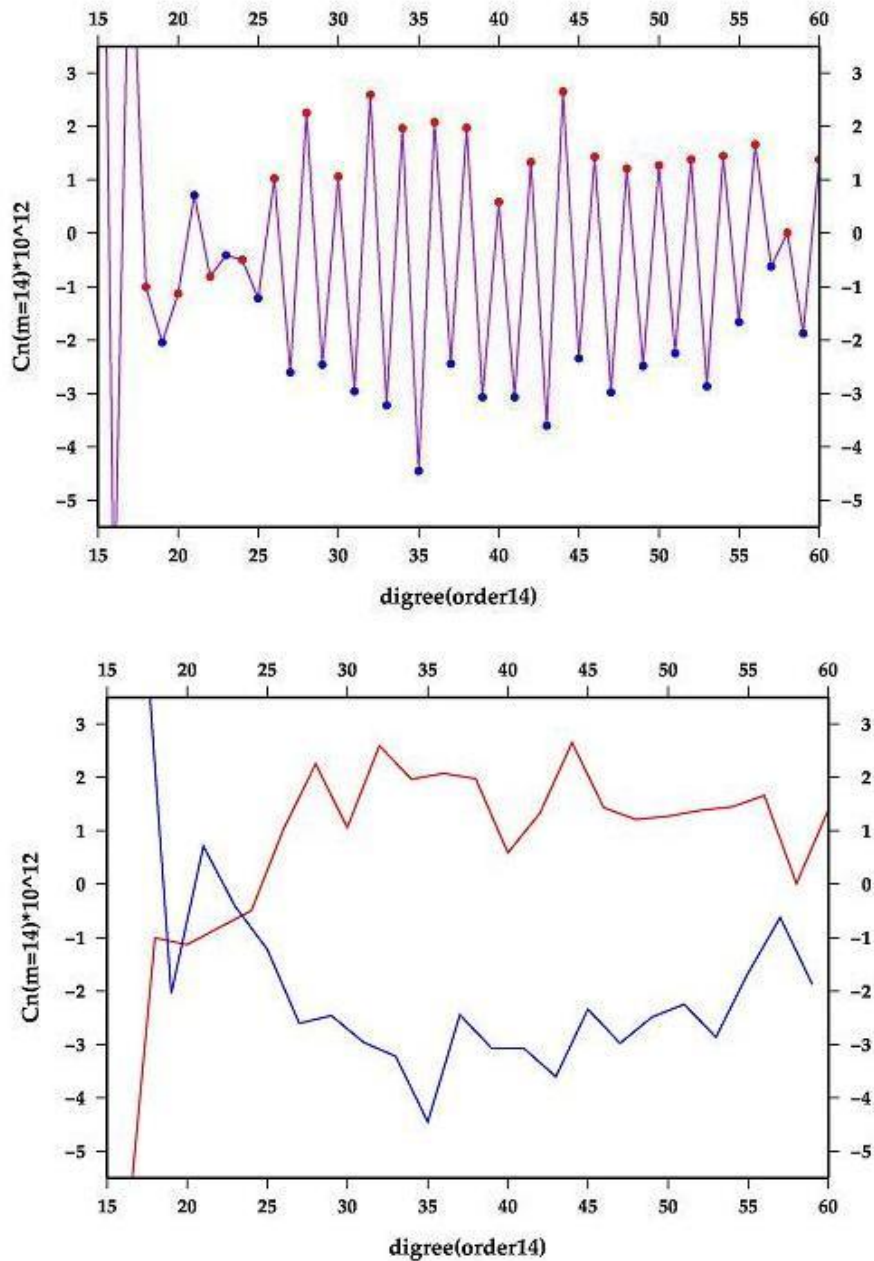


図5 上は、2011年9月の値から2011年8月の値を引いた図に関して、位数14の余弦の係数を  $C_{n,14}$  として、 $n$  を横軸にとって係数の大きさを示したもの。赤丸で示される偶数番目の係数と、青丸が示す奇数番目の係数が激しい「ギザギザ」を示す。これが縦縞ノイズの原因である。下は、赤丸と青丸どうしをそれぞれ線で結んだ図。

縦縞フィルターを作る為には、まずGRACEが極軌道を回っている為に生じるノイズが、データそのもの (Stokes 係数) にどのような形で現れているのかを調べ、その作用を打ち消すような作業を施せば良い。実際に Stokes 係数の

差をプロットしたのが図5である。

縦縞ができる原因は、図5（上）のように、同じ位数の係数に関して次数が偶数の係数と奇数の係数の値が系統的にずれているからだと考えられる。そこで、まず図5（下）のように、偶数番目と奇数番目の係数だけを取りだし、それぞれに対して多項式を、最小二乗法を用いて当てはめる。最後に多項式からの差を、あらためて Stokes 係数の差の値とする。これが縦縞フィルターである。ただし GRACE が十分感度を持つ低次の項ではこのような「ギザギザ」は見られず、縦縞フィルターが有用なシグナルを消してしまう恐れがある。従ってある程度位数の大きな係数にのみフィルターをかける。

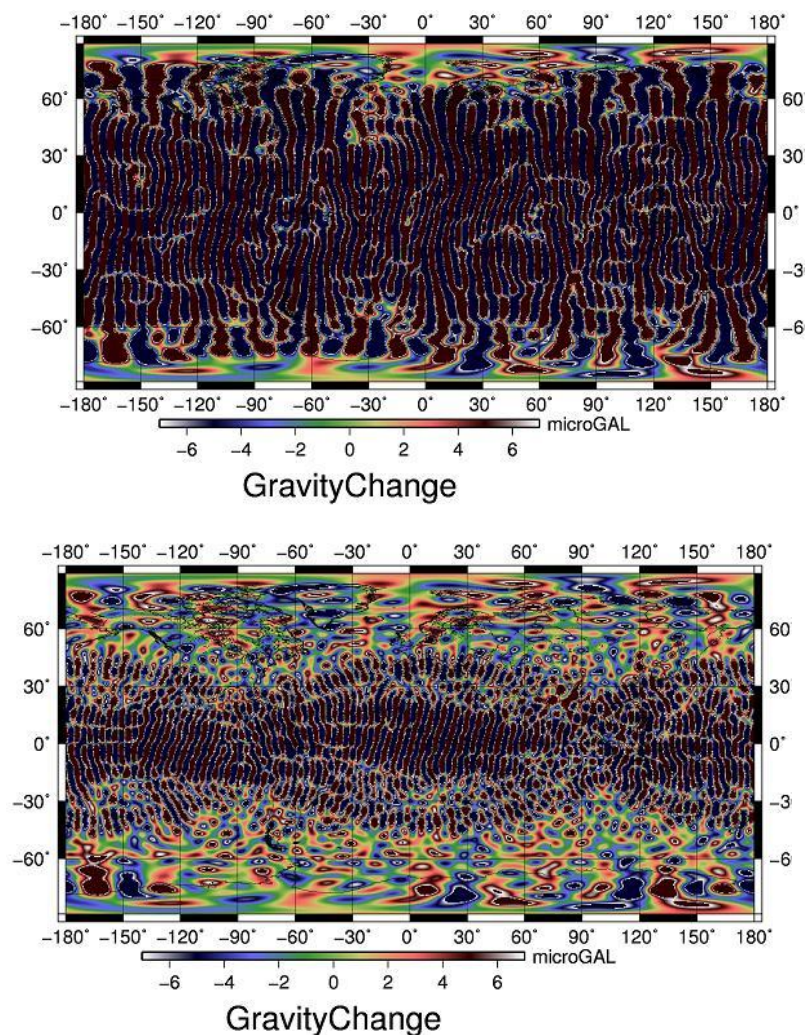


図6 先ほど示したフィルターを全くかけていない図（上）と、それに対してフィルターをかけた図（下）。本研究では、フィッティングさせる関数としては5次の多項式を選び、13次以上の係数に対してフィルターを施した。

### 2.1.3 ファンフィルター

図6を見て分かる通り、縦縞フィルターを施しても、特に低緯度地域で大きなノイズが残存している。この原因は、GRACEで得られた Stokes 係数は、次数・位数が高いほど誤差が大きくなるためである。「次数や位数が高い係数」は、「球面調和関数の、波長が短い成分」である。つまり、乱暴に言ってしまうと、次数や位数の増大につれてノイズが大きくなるというのは、「細かい所がよく見えない」ということだ。

この問題を解決する為に、もう1種類フィルターを掛ける必要がある。そのフィルターは、次数や位数が高い所を軽く、次数や位数が低い所を重く用いるように重みづけするものであれば良い。このようなフィルターで空間的な平滑化を行えば、図は滑らかになるだろう。この目的で良く用いられるのが、ガウシアンフィルター (Wahr et al., 1998) とその改良型であるファンフィルター (Zhang et al, 2009) である。両者の違いは、ガウシアンフィルターが次数  $n$  だけを考慮するのに対して、ファンフィルターは次数  $n$  と位数  $m$  の両方を考慮する点である。

ガウシアンフィルターの重み  $W_n$  は、次のような漸化式で表される。

$$W_0 = 1 \quad (2)$$

$$W_1 = \frac{1+e^{-2b}}{1-e^{-2b}} - \frac{1}{b} \quad (3)$$

$$W_{n+1} = -\frac{2n+1}{b} W_n + W_{n-1} \quad (4)$$

ただし、 $b$  は次のように決める。

$$b = \frac{\ln(2)}{1 - \cos\left(\frac{r}{R}\right)} \quad (5)$$

$R$  は地球半径、 $r$  は averaging radius と言って、空間的な平滑化を行うガウス関数の幅を示す値である。地球半径をキロメートルで与えている為、 $r$  も同じ単位で与える必要がある。本研究では300キロメートルとした。

このガウシアンフィルターを式(1)に施すと、(6)式のようになる。



$$\Delta g(\theta, \varphi) =$$

$$\frac{GM_{\text{earth}}}{R^2} \sum_{n=2}^{60} (n+1) W_n \sum_{m=0}^n \{ \Delta C_{nm} \cos(m\varphi) + \Delta S_{nm} \sin(m\varphi) \} P_n^m(\cos\theta) \quad (6)$$

ファンフィルターでは更に位数  $m$  も考慮し, (7) 式の形になる. 本研究ではこれを用いた.

$$\Delta g(\theta, \varphi) =$$

$$\frac{GM_{\text{earth}}}{R^2} \sum_{n=2}^{60} (n+1) W_n \sum_{m=0}^n W_m \{ \Delta C_{nm} \cos(m\varphi) + \Delta S_{nm} \sin(m\varphi) \} P_n^m(\cos\theta) \quad (7)$$

次の図7が, 図6 (下) にファンフィルターを施した図である.

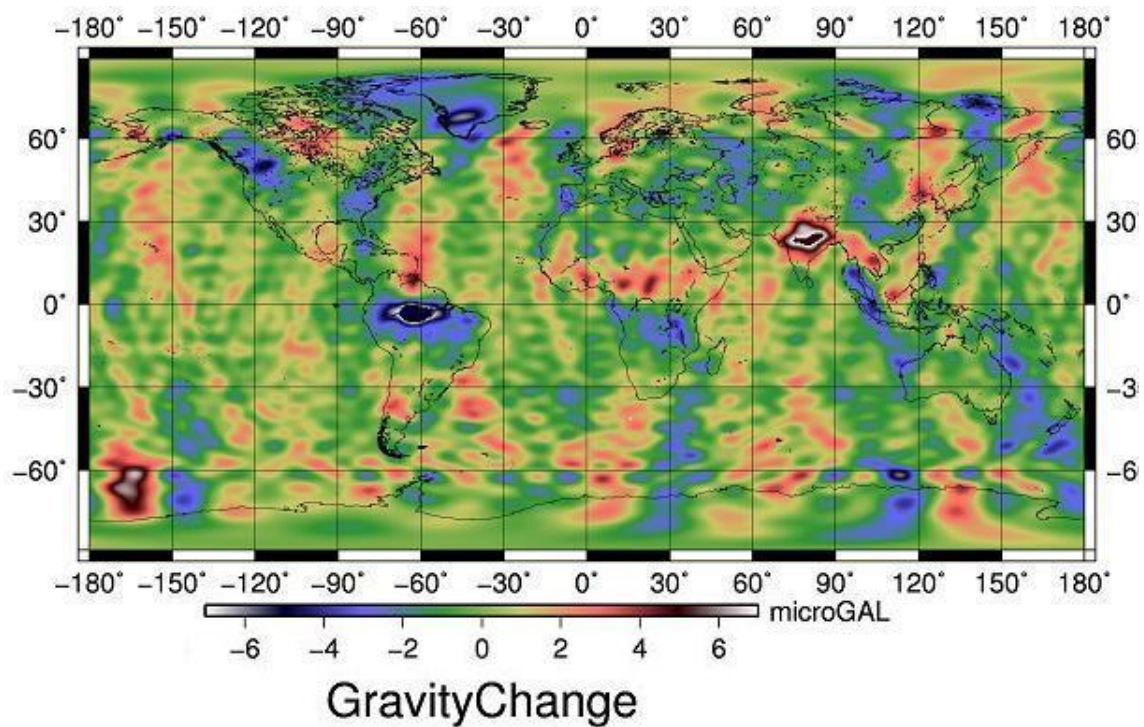


図7 図4に対して縦縞フィルターとファンフィルターを両方とも施した図.

## 2.2 時系列解析の方法

### 2.2.1 重力が時間変化する要因

重力は様々な要因で時間変化している。たとえば、地球温暖化による氷の融解である（図8，図9）。南極やグリーンランドの氷が溶けて海へ流れる事で、質量が大規模に移動する。これによって、その場の重力が弱まる。他には、後氷期回復（ポスト・グレイシャル・リバウンド）による重力の増大が挙げられる（図8）。後氷期回復とは、氷期に荷重として地面を凹ませていた氷が溶けた後に、その凹んでいた地面が数千年かけて隆起し、ゆっくり元に戻っていく現象である。また、このような永年変化ではなくとも、積雪によって地表の質量が増大し、重力が変化するような、単純な季節変化もある（図10）。

### 2.2.2 季節変化を除外する方法

2.2.1で述べた重力が時間変化する要因の中で、季節変化は、地震による重力の時間変化を数カ月単位で追跡する場合、特に邪魔になるものである。何故なら見つかった重力の変化が、地震による変化なのか、単なる季節変化なのか判断する事が難しいからだ。そこで、時系列解析をする際は、季節変化をある程度の精度で見積もって、それを得られた時系列データから引き去る事が必要になる。季節変化は通常、一年周期（年周）と半年周期（半年周）の成分の足し合わせで近似される。本研究でも、まず時系列データを並べて、最小二乗法を用いて半年周期・年周期の変化を合わせて季節変化を見積もり、それを全体から引いて季節変化を除外した。



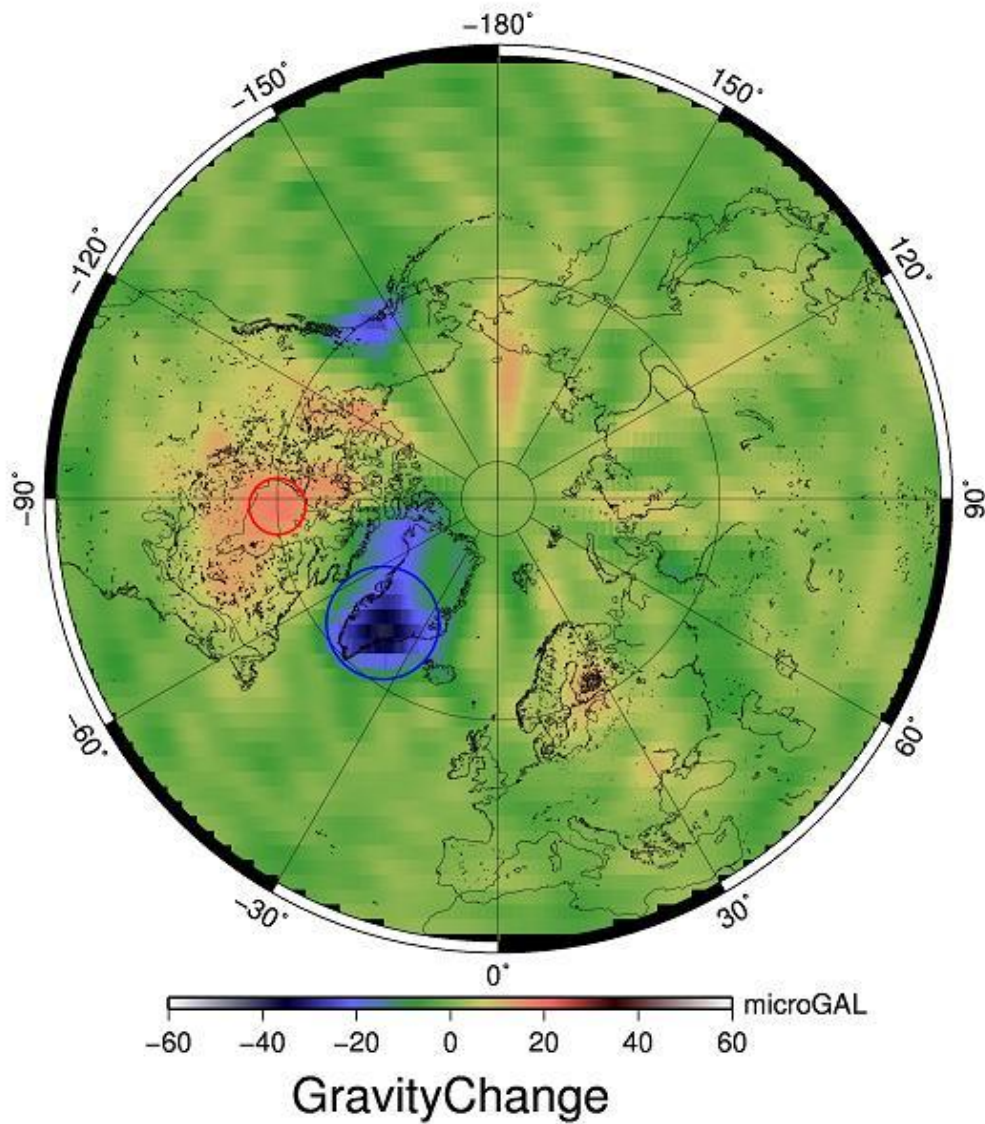


図8 2003年2月の重力値を基準として見た2011年2月の重力値. 北極点を中心としている. 青丸で示した部分の重力の減少は, 温暖化によるグリーンランドの氷の融解を示し, 赤丸で示した部分の重力増大はカナダ北部における後氷期回復を示している. そのほかにもアラスカ南部の山岳氷河の縮小に伴う重力の減少やスカンジナビア半島の後氷期回復に伴う重力増加等も見える.

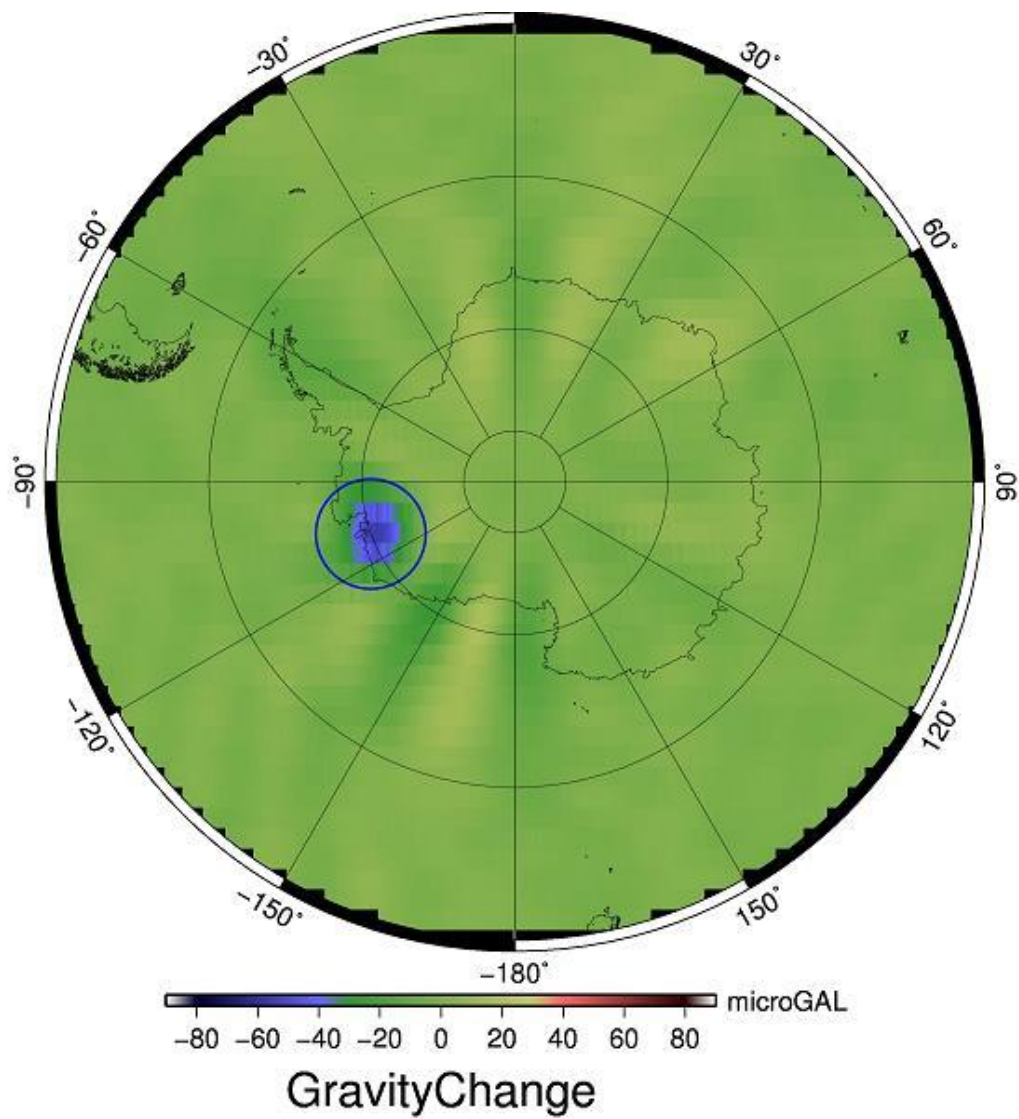


図9 図8と同じ図を、南極点を中心に描いたもの。青で囲んだ部分の重力の減少は、温暖化による南極の氷の融解を示している。

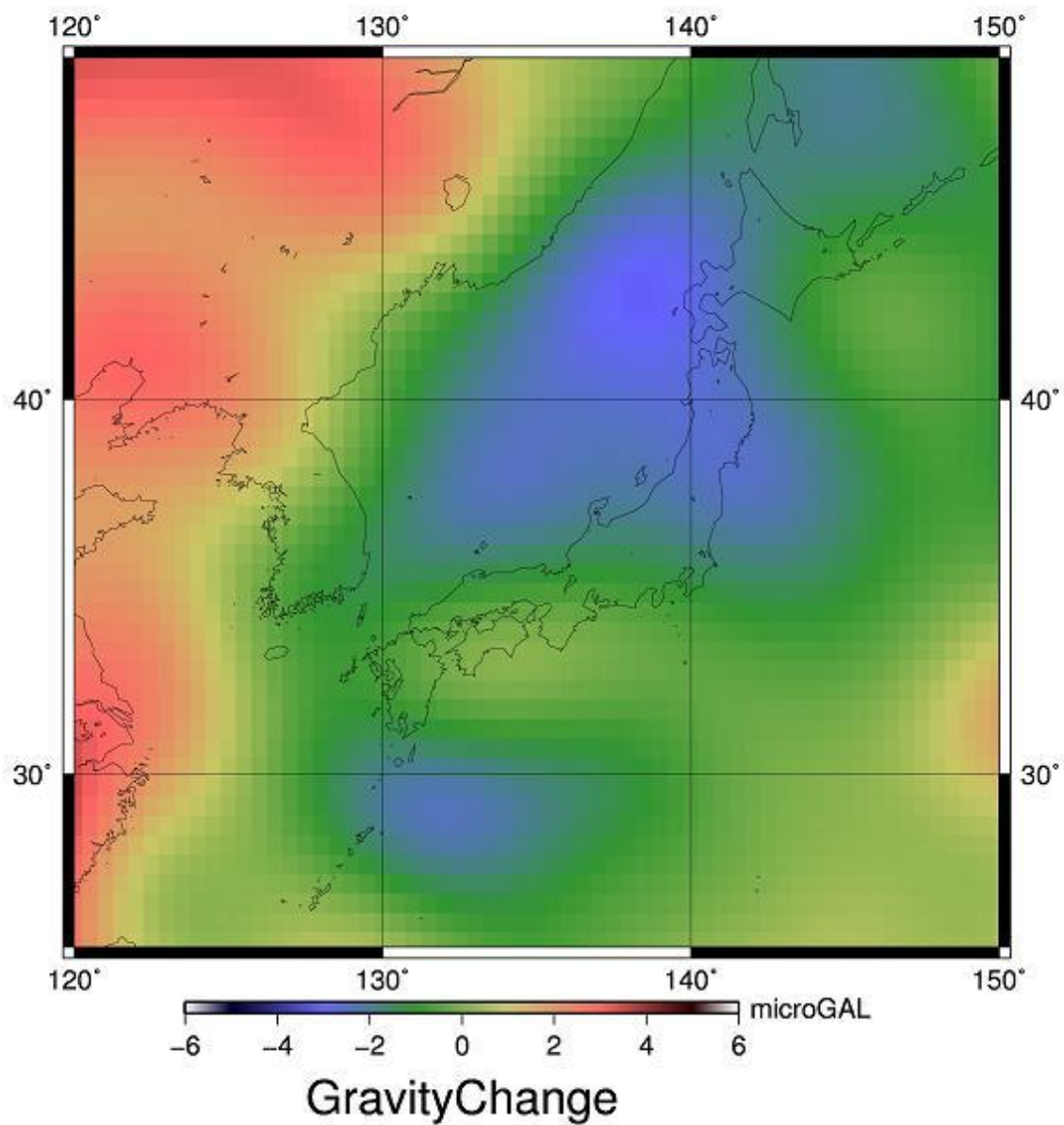


図10 2009年1月の重力値を基準として見た2009年7月の重力値.  
この図から、日本の重力は夏の方が小さい事が分かる(特に日本海側). その原因の一つは、冬に積もった雪が夏に溶けている為だろう. 詳細は本間佑貴卒業論文(2011)参照.

### 3. 結果と考察

#### 3.1 2010年チリ地震（マウレ地震）に伴って起こった重力変化

2010年チリ地震における地震時および地震後の重力変化を調べる為に、2.2.2で述べた方法を使って季節変化を取り除いた時系列を求めた。調べた範囲は、震央（西経72.9度、南緯36.1度）をおおよその中心として、西経60度から85度、南緯25度から45度の範囲である。そして、その範囲の各地点において、地震時の重力変化の大きさと、地震後の重力変化の割合を調べた。具体的には、求めた時系列に対して最小二乗法を用いて地震前後に二本の直線をフィッティングさせ、地震直後の直線が示す値から地震直前の直線が示す値を引いたものを地震時重力変化として、地震後の直線の傾きを地震後重力変化の割合とした。データは一か月ごとに与えられているので、この割合とは、ようするに1か月あたりの重力変化量である。

まずは地震時重力変化を示す（図11）。この図は、震央から約350キロメートル離れた赤丸の地点（西経69度・南緯36度）で、約4マイクロガル重力が減少したことを示している。これが最大の地震時重力変化である。尚、重力の絶対値は、およそ1000ガルである。したがって、これは100トンのものがおよそ4グラム軽くなったことを意味する。また、赤丸から震央までの約350キロメートルという距離は、ほとんど地震時重力変化の重力減少域の半径に等しい。

次に、地震後重力変化を示す（図12）。この図は、震央から約200キロメートル離れた黄丸の地点（西経71度・南緯35度）と北東部分の2か所に重力増大のピークがあることを示している。特に黄丸で囲んだ地点をピークとした重力増大域は、図11で見られた重力減少域と大部分が重なり、さらに震央を含んでいる。そのため、この震央付近で見られるゆっくりとした重力の変化は、2010年チリ地震の地震後重力変化である可能性が高い。尚、増大域の半径は約270キロメートルである。

最後に、そのピークの地点（図11、図12の黄丸の地点）の重力変化を時系列で示す（図13）。この地点では、重力は約2マイクロガルだけ回復した。これは赤丸の地点で見いだされた最大減少量の約半分である。

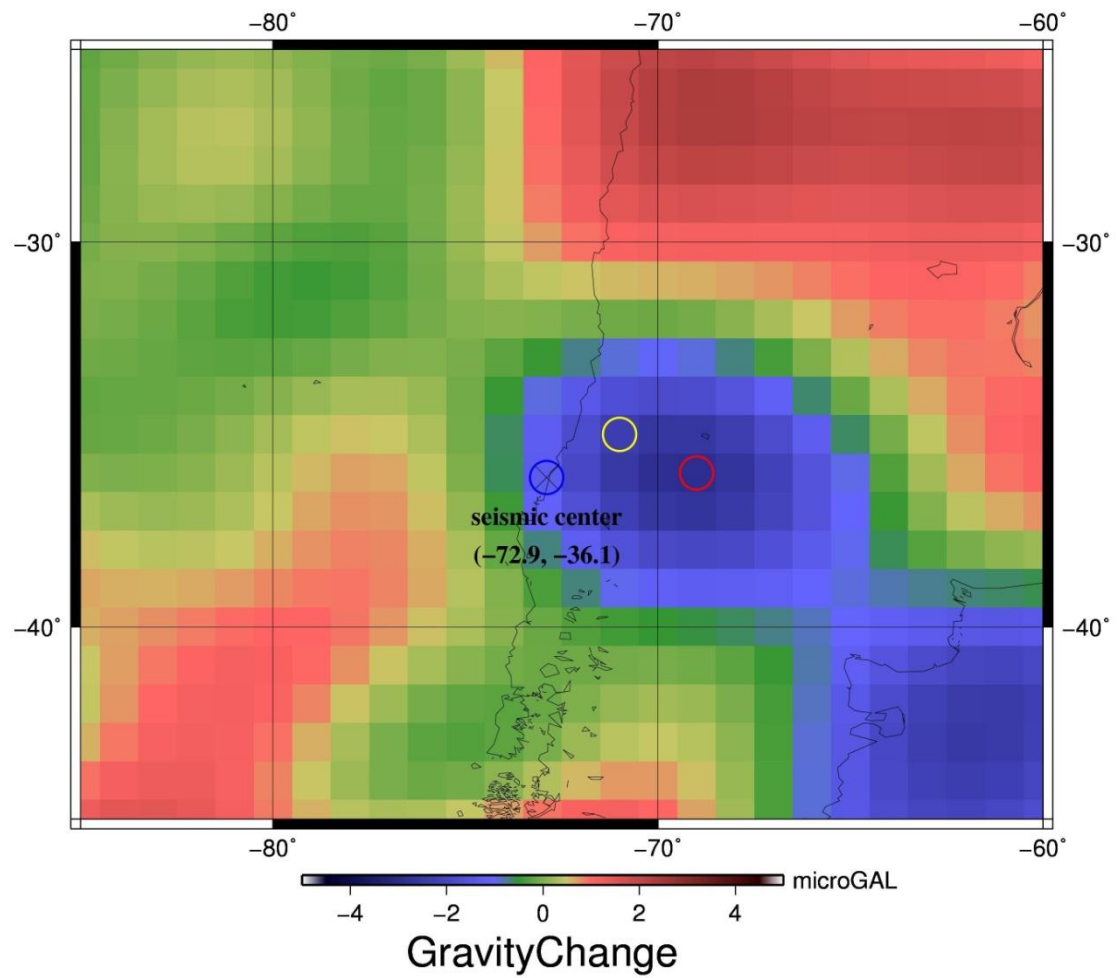


図11 2010年チリ地震における地震時重力変化. 青丸は震央を, 赤丸(西経69度・南緯36度)は地震時重力変化が最大だった地点を, 黄丸(西経71度・南緯35度)は図13で時系列データを示した地点を示している. 地震時の重力変化量は, 最大で約4マイクロガルの減少だろう.

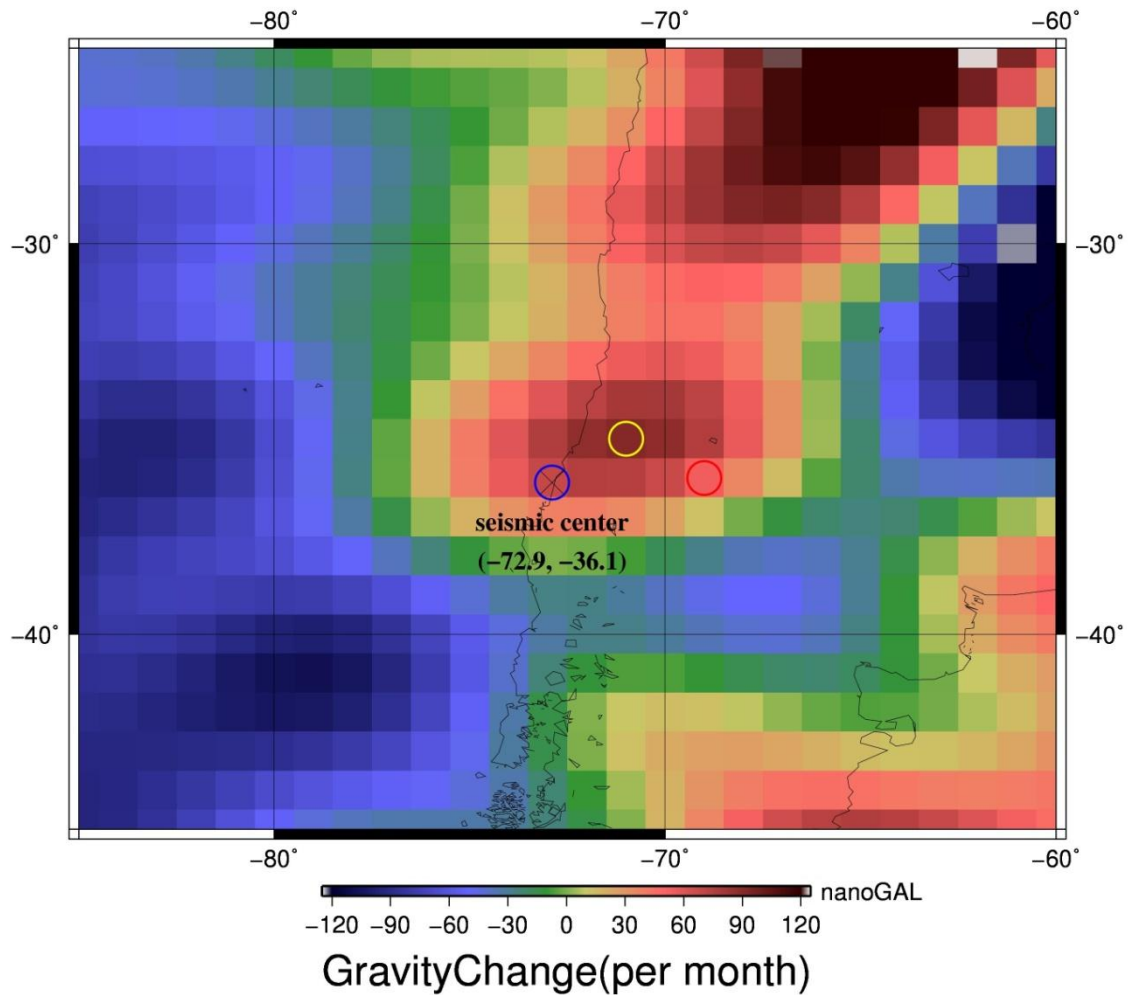


図12 2010年チリ地震における地震後重力変化. 青丸, 赤丸, 黄丸は, すべて図11のものと同じである. この図では特に黄丸で囲んだ地点 (西経71度・南緯35度) が目立っており, 地震後重力変化は, この点で最大である.



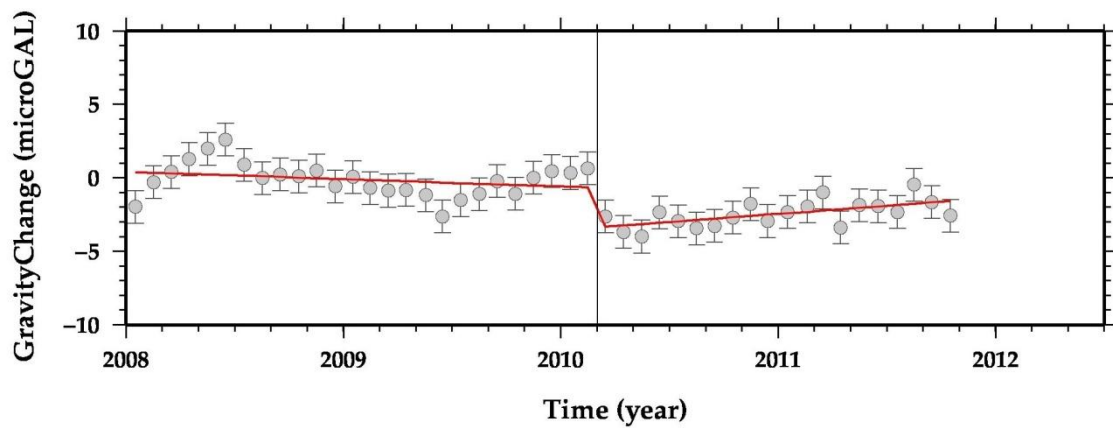


図 1.3 西経 71 度・南緯 35 度 (図 1.1, 図 1.2 の黄丸の地点) における重力の時系列. データを灰色の丸で表し, それに最小二乗法で求めた地震前後の部分にフィットする二つの直線を描き加えた. 減少した重力が徐々に回復している.

ここで見られた地震後重力変化は, 減少した重力が回復するものであり, 一年程度の時間スケールにおける現象である. 1.1 で述べた通り, 地震後ゆっくり重力が変化する原因は「ゆっくり地震」(アフタースリップ, スロースリップ), 「岩石の粘性緩和」, 「間隙水の拡散」の三通りが考えられている. この中で, ゆっくり地震は重力時の変化を進めるように働くため今回の観測とは一致しない. 岩石の粘性緩和もマクスウェル時間である数年から十年以上の時間スケールでの現象であり, 今回の観測結果と一致しない. しかし間隙水の拡散は, 重力の変化を回復する方向に働き, 何年もの時間を要しない (Ogawa and Heki, 2007) ため, 今回の観測結果と矛盾しない.

### 3.2 他の地震との比較

ここでは2010年チリ地震に伴う重力減少が地震後ゆっくりと増加した現象について、他の地震における重力変化と比較する。

#### 3.2.1 2004年スマトラ地震との比較

2004年12月26日のスマトラ・アンダマン地震の場合と比較する。

図14、図15は、それぞれ、この地震における地震時の重力変化の大きさと地震後の重力変化の割合を示しており、それぞれチリ地震の図11、図12に対応している。また、図16は、図14と図15中の黄丸の地点における重力時系列であり、チリ地震での図13に対応する図である。

まず地震時重力変化を示す(図15)。この図は、震央から約400キロメートル離れた赤丸の地点(東経96度、北緯7度。マラッカ海峡の中央近辺)で、約6~7マイクロガルだけ重力が減少したことを示している。これが最大の地震時重力変化である。また、赤丸から震央までの約400キロメートルという距離は、ほとんど地震時重力変化の重力減少域の半径に等しい。つまり、この2004年スマトラ・アンダマン地震の場合の最大減少量と減少域半径(それぞれ約6~7マイクロガルと約400キロメートル)は、3.1で述べた2010年チリ地震の場合の「それぞれ約4マイクロガルと約350キロメートル」に近い。したがって、2004年スマトラ地震の地震時重力変化は、重力が減少した量・範囲ともに、2010年チリ地震の場合に近い。

次に、地震後重力変化を示す(図15)。この図は、重力増大域が、ピークである震央から約400キロメートル離れた黄丸の地点(東経93度・北緯6度)を中心に広がっていることを示している。この距離は、やはり重力増大域の半径に近く、2010年チリ地震の重力増大域半径の約1.5倍である。また、重力増大域は図14で見られた重力減少域と大部分が重なっている。

最後に、そのピークの地点(図14、図15の黄丸の地点)の重力変化を時系列で示す(図16)。この地点では、重力は約3マイクロガルだけ回復した。これは赤丸の地点で見いだされた最大減少量の約半分である。最大減少量の約半分という割合は、2010年チリ地震の場合と等しい。

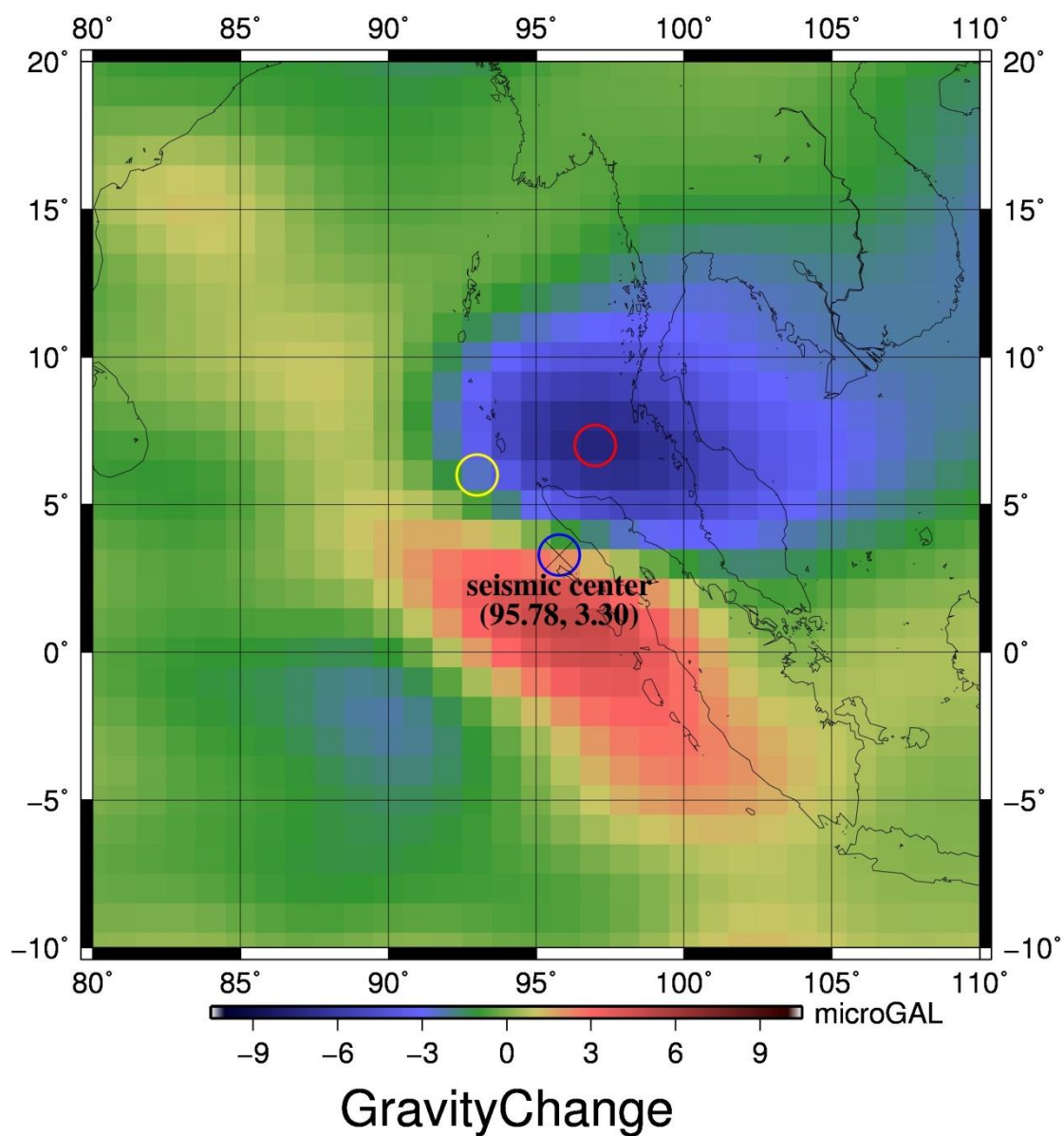


図14 2004年スマトラ地震における地震時重力変化。青丸は震央を、赤丸は地震時重力変化が最大である点を、黄丸は図16で時系列データを示した地点を表している。赤丸の地点の約6マイクロガルの重力減少が最大の地震時重力変化である。

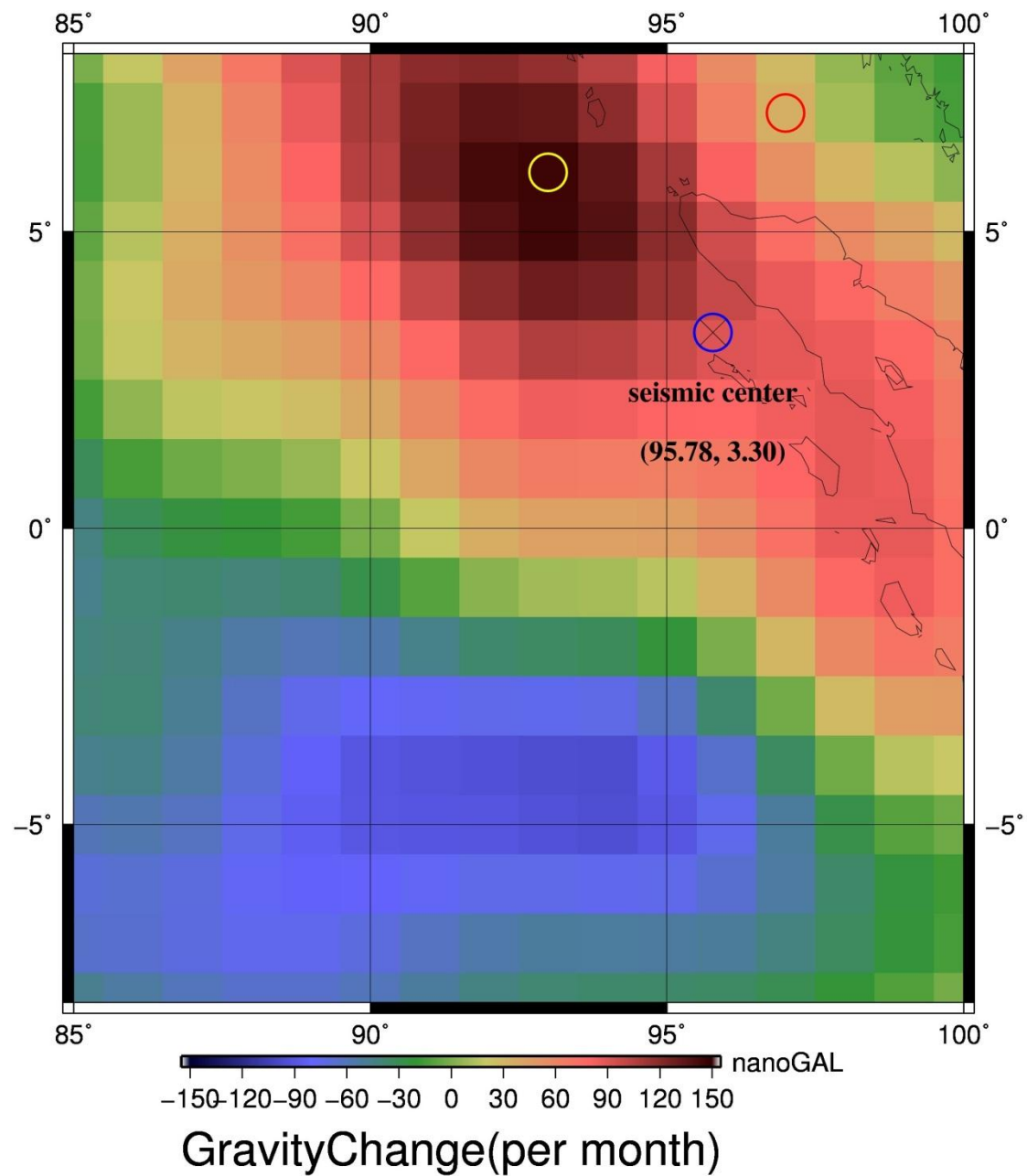


図15 2004年スマトラ地震における地震後重力変化. 見やすさのため, 図14の一部を拡大している. 青丸, 赤丸, 黄丸は, すべて図14のものと同じである. この図では特に黄丸で囲んだ地点が目立っており, 地震後重力変化は, この点(東経93度・北緯6度)で最大である.

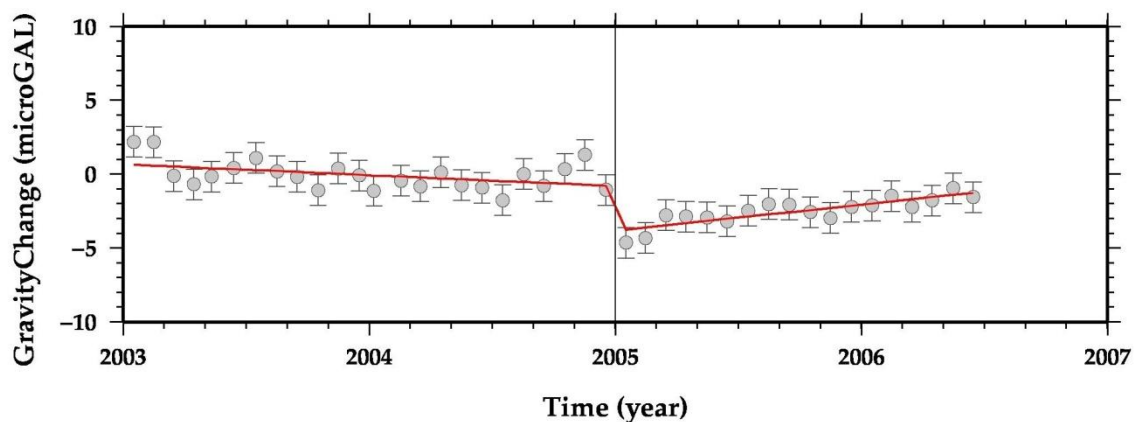


図16 東経93度・北緯6度(図14, 図15の黄丸の地点)における重力の時系列. この図は, 約3マイクロガルだけ重力が回復したことを示している.

### 3.2.2 2011年東北沖地震との比較

次に2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震(東北沖地震)の場合と比較する. ただし, GRACEデータは2012年2月2日現在, 2011年10月までのものしか公開されていないため, 調査できる時間が比較的短く, 他の二地震に比べて地震後の変動の議論には不十分である. しかし, ある程度の重力変化が見られることを期待して, 他の二地震と同じ手法でデータを解析した. その結果得られたのが図17, 図18, 図19, 図20である. 一部奇妙な結果が得られた(後述)が, 地震時重力変化は約4~5マイクロガルであり, 2010年チリ地震の4マイクロガルにほぼ等しい(図17). また, 地震後は1年足らずで数マイクロガル, すなわち地震時重力変化の最大減少量の約半分だけ重力が増大している(図18, 図19). 以上から地震時重力変化の大きさ, 地震後重力変化の大きさ・時間スケールは, すべて2010年チリ地震の場合, および2004年スマトラ地震の場合と, よく一致している.

奇妙なのは, 地震後の重力増大域のピークである東経142度, 北緯35度(図17と図18の南東の黄丸)の重力変化である(図20). ここでは地震に伴って重力が増大し(地震時重力変化), その変化が更に進行している(地震後重力変化). 2004年スマトラ地震の場合でも, 震央の南側では, 地震後の重力増大域が地震時の重力減少域と重なっていた. しかし, ピークは地震時の重

力減少域にあった。しかし2011年東北沖地震では、地震後の重力増大域のピークが、地震時の重力増大域にある。この原因としては、様々な可能性が考えられる。たとえば2011年は重力の季節変化が極めて大きくて、その影響が出てしまっている可能性や、この地点での地震後重力変化では「ゆっくり地震」が支配的である可能性、あるいは拡張中の間隙水がなんらかの理由でここに集中している可能性などである。これ以上は2011年10月までのデータしかない現状ではなんとも言えないので、東北沖地震の地震後重力変化はこれからも追いつける必要があるだろう。



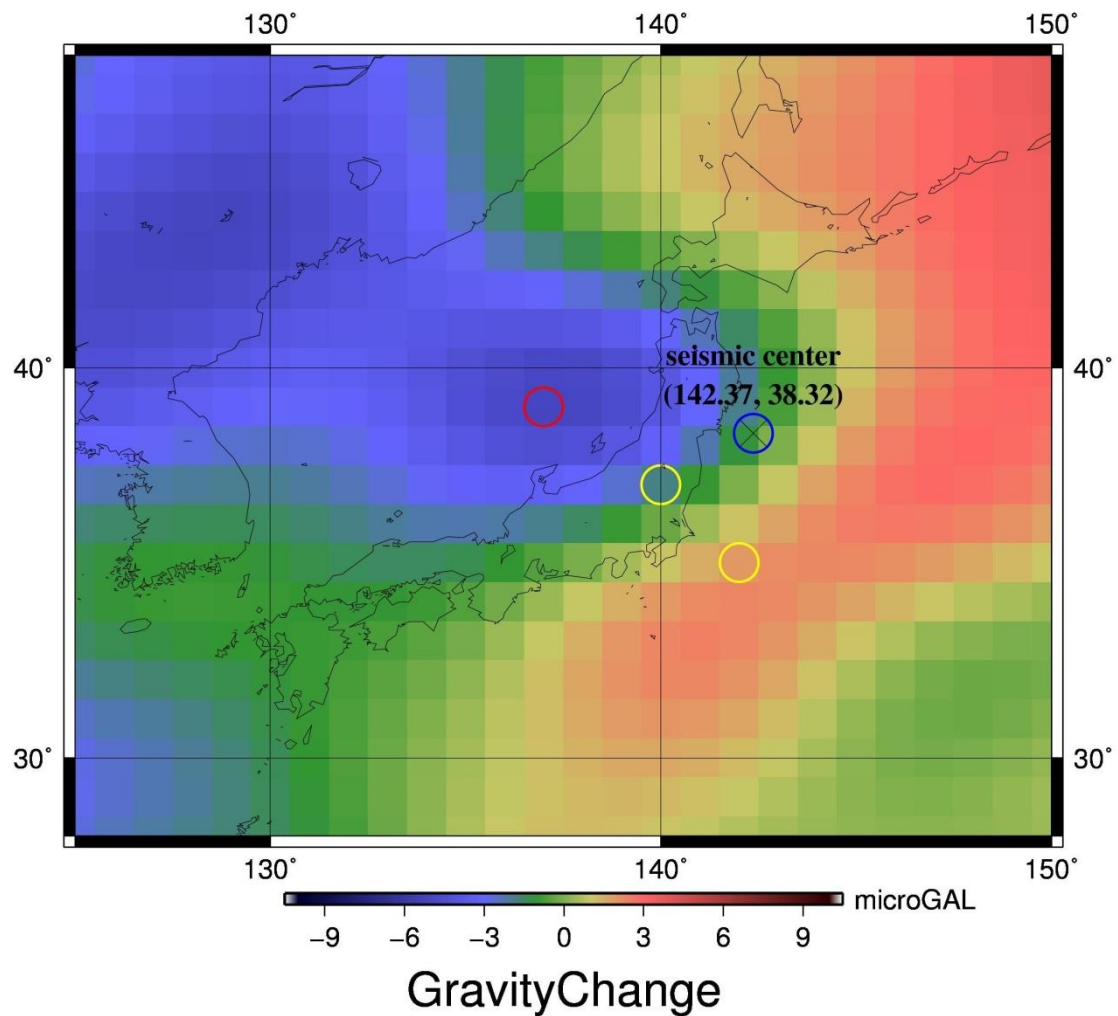


図17 2011年東北沖地震における地震時重力変化. 青丸は震央を, 赤丸は地震時重力変化が最大である点を, 黄丸は図19, 図20で時系列データを示した地点を表している. 北西側が図19, 南東側が図20である. 赤丸の地点を見て分かる通り, 約4~5マイクロガルの減少が最大の地震時重力変化で, ほぼ2010年チリ地震の地震時重力変化と一致している.

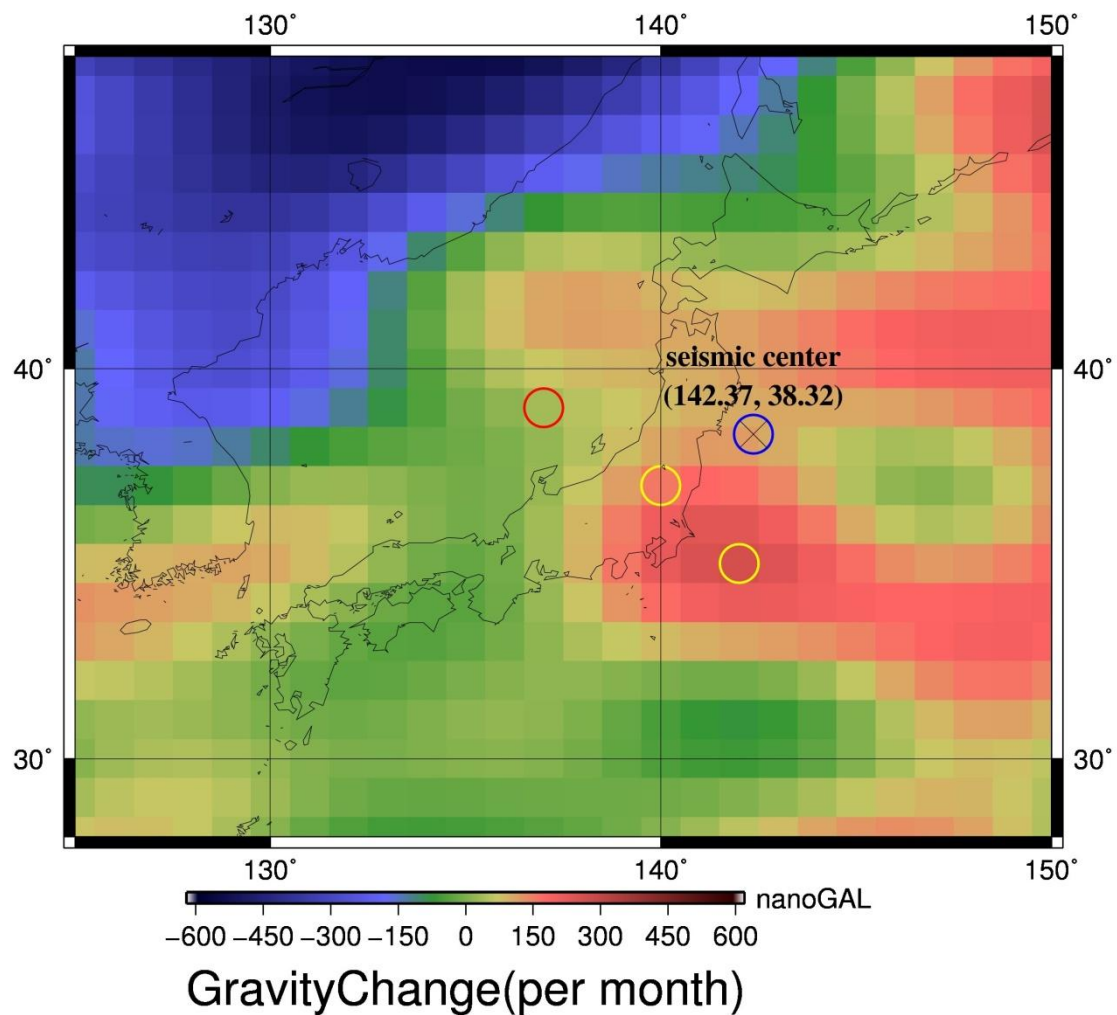


図18 2011年東北沖地震における地震後重力変化. 青丸, 赤丸, 黄丸は, すべて図17のものと同じである. 北西の黄丸(東経140度・北緯37度)は図17では重力減少域にあるので, 2010年チリ地震や2004年スマトラ地震の場合と同じく, 減少した重力が, その後ゆっくり回復している. しかし, この図の重力増大域は一部が図17の重力増大域と重なっている. 特にピーク(南東の黄丸. 東経142度, 北緯35度)が地震時の重力増大域力にあるのは, 他の二地震とは決定的に違う点である.

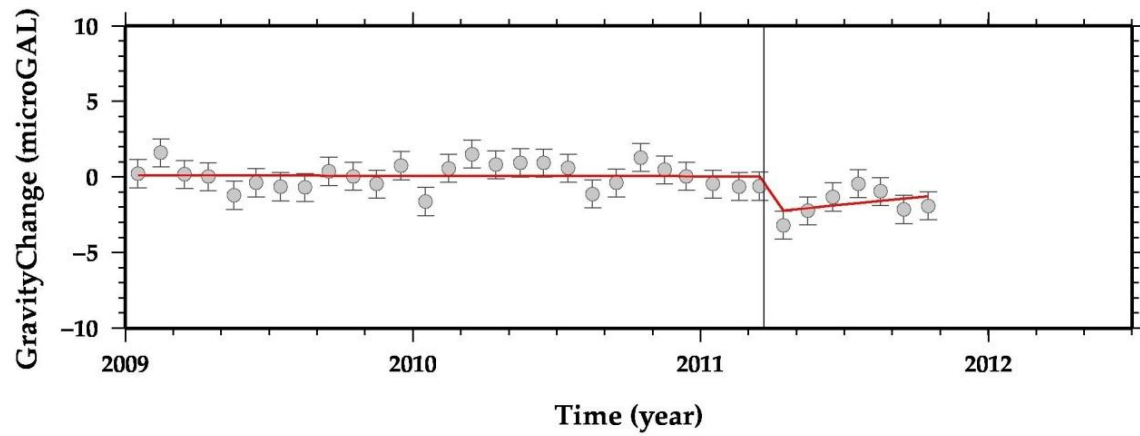


図19 東経140度・北緯37度（図17，図18の北西の黄丸）における重力の時系列．減少した重力が徐々に回復している．

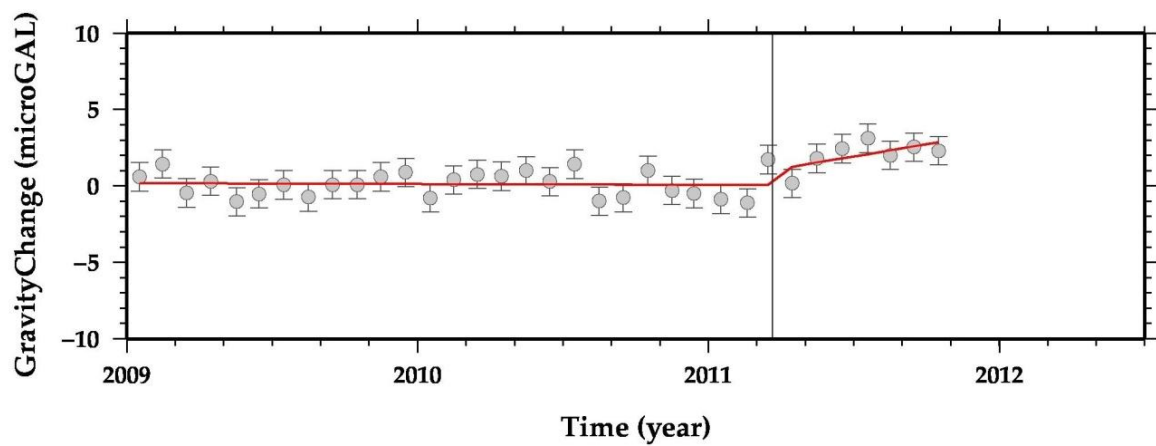


図20 東経142度・北緯35度（図17，図18の南東の黄丸）における重力の時系列．増大した重力が，さらに徐々に増大している．

### 3.3 まとめ

大地震が起こった時には、二種類の重力変化が起こりうる。すなわち、地震に伴って瞬時に起こる地震時重力変化と、地震の後ゆっくり進行する地震後重力変化である。2010年チリ地震については、地震時、瞬時に4マイクロガル程度の重力の減少が見られた（地震時重力変化）。その後、その減少した重力が、ゆっくり回復していることが見いだされた（地震後重力変化）。その回復量は数マイクロガル程度であり、時間スケールは1年程度である。

地震後重力変化の原因には、「ゆっくり地震」「岩石の粘性緩和」「間隙水の拡散」の3通りが考えられる。しかし、まず「ゆっくり地震」は、断層が何日もかけてゆっくり滑り続け、地震時重力変化を進行させる。したがって、これは地震時重力変化が回復したことを示唆する今回の観測結果とは合わない。次に岩石の粘性緩和は、圧縮・膨張した岩石が、その粘性によってもとの体積に戻るものである。これは、地震時重力変化を回復させる点は今回の観測結果と一致するものの、岩石がもとの体積に戻るまでには何年もの時間が必要な為、たかだか1年程度で重力変化が見られた今回の観測結果とは合わない。ゆえに、間隙水の拡散が今回観測された地震後重力変化の原因だと考えられる。間隙水の拡散は、半年から1年程度の時間で、重力を回復させる方向に進行する為、今回の観測結果と矛盾しない。この結論は、(Ogawa and Heki, 2007)が出した、2004年スマトラ地震における地震後重力変化の原因が間隙水の拡散であるという結論を支持するものである。

また、これら2010年チリ地震における地震時重力変化の大きさや、地震後重力変化の重力回復量・時間スケールを、2004年スマトラ地震の場合、および2011年東北沖地震の場合と比較した。その結果、それらは全て2004年スマトラ地震の場合とよく一致していた。しかし2011年東北沖地震の場合は、地震後の重力増大域のピークが、地震時の重力増加域の中に見いだされた。この点が2010年チリ地震とは決定的に異なっている。この差異の原因には、ゆっくり地震や、大きな季節変化、あるいは間隙水が拡散する途中の中途半端な状態が表れている事などが考えられる。しかし、いずれにせよ今後とも変化を追い続ける必要があるだろう。

#### 4. 今後の課題

今後の課題は、さしあたって3つある。1つ目は陸水変化の除去、2つ目は水拡散のモデル計算、3つ目は東北沖地震の今後の観測である。

1つ目の陸水変化の除去の目的は、時系列の精度を高めることである。時系列データにまだ残っている地震以外による重力変化を引き去って、より精度を上げた時系列を求めたい。まだ残っている地震以外による重力変化とは、積雪・降水や地下水、すなわち陸水の動きによる不規則な重力変化のことである。積雪量や地下水の動きは毎年まったく同じわけではないので、本研究で行なった季節変化を取り除く補正だけでは、まだ陸水による変化が含まれている。よって、その陸水による変化を取り除く補正を加えることで、さらに精度を上げることができる。

2つ目の水拡散のモデル計算の目的は、地震後重力変化の原因が間隙水の拡散であることに、より説得力を持たせることである。観測の結果として得られた重力の回復量と、間隙水が拡散したことによって理論的に起こりうる重力の回復量が一致すれば、本研究の結論はより信頼できるものになる。

3つ目の東北沖地震の今後の観測の目的は、地震後重力変化をスマトラ地震の場合と同じように比較することである。ある程度の時間が経って観測データが集まれば、地震後重力変化を正確に求めることができるようになるだろう。

#### 5. 謝辞

4年生になった当時、私は基本的な知識が足りないどころかLinuxを扱った事すらないという状態でした。そんな私がここまで卒業研究を進める事ができたのは、多くの方々のご協力があったことです。この場を借りてお礼もうしあげます。特に指導教官の日置幸介教授には、テーマの選択やGMTなどのソフトの使い方、研究をする際の基礎知識を教わるなど、ここには書ききれないほどお世話になりました。本当にありがとうございます。また、固体系ゼミの他の先生方にも、発表の時に私の至らない点を指摘してくださったり、初歩的な質問に答えてくださったりと、何かとお世話になりました。さらに、同研究室の先輩や同期の皆さまにも多々お世話になることができました。特に私と同じくGRACEを扱った研究をなさっている博士2年の松尾功二さんには、プログラムの作り方を教わったり、読むべき論文を紹介して頂いたり、1年間お世話になり続けてしまいました。あらためて感謝の言葉を述べさせていただきます。皆さま本当にありがとうございました。今後ともよろしく願います。

## 6. 参考文献

- Wahr, J., and Molenaar, M, and F. Bryan (1998)  
 Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE  
*JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL 103* PAGES 30,205-30,229
- 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* doi: 10.1126/science.1128661
- Ogawa, R. and Heki, K. (2007)  
 Slow postseismic recovery of geoid depression formed by the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake by mantle water diffusion  
*GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL.34, L06313*  
 doi:10.1029/2007GL029340,2007
- Ogawa, R. (2010)  
 Transient, seasonal and inter-annual gravity changes from GRACE data: Geophysical modelings  
 ( [http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~geodesy/pdf/Ogawa\\_Dsc\\_Thesis.pdf](http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~geodesy/pdf/Ogawa_Dsc_Thesis.pdf) )
- Heki, K. and Matsuo, K. (2010)  
 Coseismic gravity changes of 2010 earthquake in central Chile from satellite gravimetry  
*GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL.37, L24306*  
 doi:10.1029/2010GL04335,2010
- Zhang, Z.Z., B.F. Chao, Y. Lu, and H.T. Hsu (2009)  
 An effective filtering for GRACE time-variable gravity: Fan filter  
*Geophys. Res. Lett., 36, L17311*, doi:10.1029/2009GL039459.
- 本間佑貴 (2011)  
 衛星重力計測で捉える日本列島の重力季節変化とその原因について  
 北海道大学理学部地球科学科卒業論文