

GRACEによる非季節性重力場変動に関する研究

A Study of Non-seasonal Gravity Changes  
From GRACE

北海道大学大学院 理学研究科  
地球惑星科学専攻 宇宙測地学研究室

小川 涼子  
Ryoko Ogawa

2007年 1 月 26 日

Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite has been producing many scientific results concerning seasonal changes in the Earth's gravity field since its launch in March 2002. On the other hand, global, regional, and local scale deformations have been continuously investigated using Global Positioning System (GPS) over the last two decades. Here I try to compare velocity field from GPS and non-seasonal gravity changes from GRACE. We take two different approaches, i.e. those in the wave number domain and in the space domain.

In the first approach we found that it is approximately up to degree 20-25 in terms of the Stokes' coefficients that secular changes of gravity well exceed measurement errors in the gravity field recovered by GRACE. As for GPS, we found it rather difficult to extract crustal deformation field expressed by spherical harmonics due mainly to the inadequate GPS station coverage, i.e. we could recover such field for only up to degree/order 4. Then we tried to compare results from GRACE and GPS in space domain.

From the secular geoid height change map recovered by GRACE with spatial averaging (averaging radius =350km,500km), significant regional gravity changes have been observed in numbers of areas, namely Hudson Bay (Canada), Alaska, Greenland, southeastern Africa, Southeast Asia, and in the southern part of South America. For regions with recent and past ice melting, we compared gravity changes and GPS velocities and confirmed that these changes reflect elastic and viscous responses of the solid earth to the melting ice sheets and glaciers. As for East Africa, we found that clear geoid height decreases reflect water loss by drought. Gravity changes in Southeast Asia were found to reflect the coseismic jump in the gravity field (and geoid height) associated with the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake rather than climate-driven secular decrease.

In this study, I investigated gravity/geoid changes associated with this earthquake. Uplift and subsidence of the ocean floor and Moho due to earthquake cause deformation of layer boundaries. In addition to them, coseismic dilatation and compression of crustal and mantle rocks cause the density changes of rocks. These factors contribute to the coseismic gravity/geoid changes. Here, I tried to compare coseismic geoid height changes observed by GRACE and the predicted changes, and found that they are consistent with each other. I also detected postseismic geoid height changes, characterized by slow uplift with a time constant of 0.6 year. The 1 year postseismic geoid uplift was comparable in size to the coseismic subsidence. Such a postseismic change cannot be explained with simple afterslip or viscous mantle relaxation, and requires contribution from the diffusion of pore fluid.

目次	2
1 はじめに	3
1.1 衛星軌道解析による地球重力場決定	3
1.2 衛星重力ミッション	3
1.3 GRACE データを用いた先行研究	4
1.4 GPS による地殻変動観測	5
1.5 本研究の目的	5
2 波数領域における GRACE と GPS の比較	7
2.1 GRACE データの解析	7
2.2 GPS データの解析	7
2.3 波数領域での比較	8
2.4 次数 2 の変動成分の比較	10
3 空間領域での比較	15
3.1 Spatial averaging	15
3.2 復元した重力場変動	16
3.3 氷床域における重力変動	23
3.4 南アメリカ南部の重力変化	26
3.5 東アフリカの重力変化	27
3.6 東南アジアにおける重力変化	30
4 スマトラ沖地震による重力変化	31
4.1 背景	31
4.2 GRACE による解析	33
4.2.1 二次関数によるモデル化	33
4.2.2 指数関数によるモデル化	33
4.2.3 GRACE によって得られた地震に伴うジオイド高変化	38
4.3 ポストサイスミックな重力変化	40
4.3.1 アフタースリップ	40
4.3.2 粘性緩和	41
4.3.3 間隙水の拡散	42
4.3.4 GRACE から得られた信号の意味	43
4.4 地震に伴う重力変化の計算法	44
5 結論	45
6 謝辞	46
7 参考文献	46

## 1.1 衛星軌道解析による地球重力場決定

地球の重力場は氷床の融解，地下水の移動，海洋の順圧的な変動など，様々な種類の質量移動に伴って全球的・局地的に絶えず変化している．地球の重力場モデルは1957年のスプートニク1号衛星の打ち上げ以来，様々な機関で打ち上げられた衛星の軌道を解析することによって決定され地球の面的な重力場を捉えてきた．地球を全質量が重心にある質点と仮定すると，衛星の軌道はケプラーの法則に従い面積速度一定の楕円を描く．しかし現実の衛星軌道は，地球の地球の引力の非球対称成分，月や太陽の引力の影響，大気空気抵抗，太陽輻射圧などによって常に少しずつ変化している．この影響による軌道変化を観測し解析することで，地球重力場を測定することができる．

軌道解析による重力場決定の初期の成果としては，1958年にアメリカから打ち上げられたバンガード1号の軌道解析によって  $J_2$  項の精密に決定されたことや，古在由秀によって  $J_3$  項の決定され，地球が西洋梨型を示していることが発見されたことが挙げられる．さらに，1980年代になると軌道決定に衛星レーザー測距 (Satellite Laser Ranging, SLR) が用いられるようになり精度が格段に向上し，重力場の時間変化の検出が可能となった．例えば，重力でみた地球の扁平率  $J_2$  の永年的な減少が検出され (Yoder et al., 1983)，また1997年頃に  $J_2$  の永年減少が突然鈍ったこと等が報告されている (Cox and Chao, 2002)．

しかしながらこれらの手法には限界があり，さらに高精度の重力場を決定するには問題点があった．まず第一にSLRによる軌道解析が挙げられる．衛星による軌道解析はSLRによって格段に精度が向上したが，地上に存在するSLRでは連続的に衛星を追跡することができない．次に軌道高度による重力場の減衰である．重力場決定に用いる衛星は一般に軌道高度が高く，そのため重力場の短波長成分の減衰が大きい．そして最後に非引力加速度の影響がある．衛星に加わる加速度は，地球や月などの重力により発生する加速度（保存力）と，太陽輻射圧や大気抵抗などの影響による加速度（非保存力）の2種類が存在する．重力場決定には全体の加速度から非保存力による加速度を精度よく分離する必要があるが，従来はこれらをモデルから見積もり，モデルの誤差が重力場決定に大きく影響していた．こういった原因から，従来の軌道解析では長波長成分の重力場しか決定できずにいた．そのためさらに高精度な重力場を測るべく誕生したのが衛星重力ミッションである．

## 1.2 衛星重力ミッション

2000年7月に打ち上げられたCHAMP(Challenging Minisatellite Payload)は，これらの問題点を解消するためにHigh-Low Satellite-to-Satellite Tracking (H-L SST) と呼ばれる方式をとり歴史上初めて，地上からの追尾に頼らずに衛星そのものによる重力場測定を可能とした．H-L SSTとは，高高度のGPS(Global Positioning System)衛星（高度20000km）から高度数100kmの低軌道衛星（LEO: Low Earth Orbiter）を追跡する手法のことで，GPS衛星の軌道は高精度の地上基準座標系によって別途精密決定されており，低軌道衛星はGPS衛星からのマイクロ波電波を受信することにより連続的に位置を三次

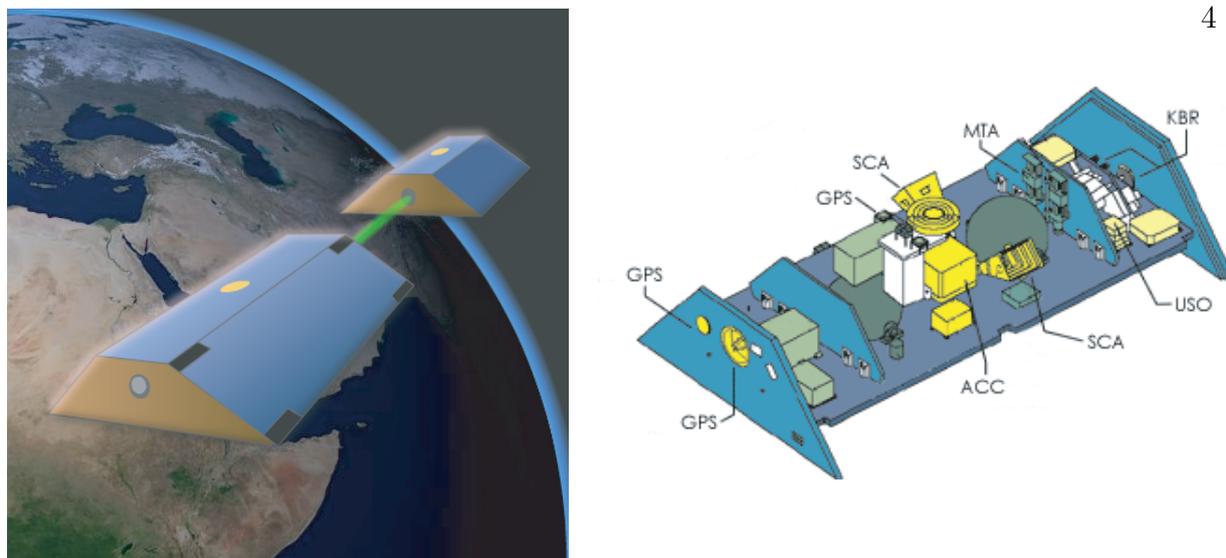


Fig. 1: Image of GRACE (left) GRACE consists of two identical satellites co-orbiting at  $\sim 450$  km, separated by  $\sim 220$  km. (right) GRACE has K-band microwave ranging (KBR), receiver of GPS and accelerometer.

元的に決めることができる。低軌道衛星はその低い高度によって短波長の地球重力場も減衰することなく軌道要素の変化として捕らえることができる。また衛星内に高感度の加速度計が搭載することで、非保存力による加速度の補正も高精度でなされるようになった。

さらに2002年3月にはGRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)衛星が打ち上げられた。GRACEは高度約450kmの極軌道に投入された200km離れた2機の衛星からなる双子衛星である(Figure 1)。この二つの衛星間をマイクロ波を往復させることによって、互いの衛星間距離とその時間変化(=速度)を測る。この手法をLow-Low Satellite-to-Satellite Tracking(L-L SST)という。力学的エネルギー保存則により、大気抵抗などの非保存力の影響をあらかじめ取り除いておけば重力ポテンシャルによる位置エネルギーと運動エネルギーとの和は一定であるので、速度変化を測定することで、重力場の変化を測定することができるのである。

GRACEにはCHAMP同様、高感度の加速度計が搭載されており、大気抵抗を高精度で測定できるようになっている。またGPS受信機、K-Band測距システム(KBR)が搭載されている。KBRは24 GHzと32 GHzの二周波を使用し $1\mu\text{m/s}$ の観測精度を持つ。GRACEのおかげで従来のSLRによる重力場決定の空間解像度では分解できなかった波長数100 km程度の局地的な重力場とその時間変動を捉えることが可能になった。

### 1.3 GRACE データを用いた先行研究

GRACEを用いた初期の成果としてTapley et al. (2004)がある。アマゾンの主流域とその北側の領域において季節的な質量変化を推定し、既存の陸水モデルと良好一致を示すことを報告している。Tamisiea et al. (2005)では、地球温暖化に伴いアラスカ南東部の

氷河が融解し、重力が永年的に減少していることを検出した。グリーンランドでは、衛星搭載高度計によって内陸部の積雪が厚くなっているが発見されたが (Johannessen et al., 2005), GRACE によって南端では重力が減少し内陸部では増加していることが見出され (Luthcke et al., 2006), 氷床融解が加速する中で、内陸部に関しては逆に氷が厚くなっていることが観測されている。アフリカのコンゴ盆地では、干ばつによって重力が減少していることが報告されている (Crowley et al., 2006)。さらに地中海の季節的な質量変化を、高度計のデータと比較し検出している (Fenoglio-Marc, 2006)。また Han et al. (2006) は、GRACE の生データから地域的な重力場を直接推定する手法によって 2004 年 12 月のスマトラアンダマン地震に伴う重力変化を検出し、断層モデルから Okada(1992) の手法で予測した重力場変化と良く一致することを示した。

## 1.4 GPS による地殻変動観測

一方で、GPS による地殻変動観測からも全球的・局地的な変動が数多く報告されている。全球的な季節変動の検出では、Blewitt et al. (2001) が代表的である。彼らは土壌水分・積雪・大気が冬の半球における荷重を増大させ、球面調和関数の一次に対応する変形が季節的に生じていることを GPS 観測により検出した。

地域的な変動に関しても、数多くの報告がなされているが、最近では重力観測と GPS 観測を比較できる地域も増えてきている。例えば、2004 年 12 月のスマトラアンダマン地震に伴う地表変位は GPS 観測からいくつか報告されている (例えば、Vigny et al., 2005; Hashimoto et al., 2006)。季節変動成分に関しては、重力変化と変位は次数  $l$  の弾性ラブ数を  $h_l, k_l$  とすると  $h_l/(1 + k_l)$  という係数を介して簡単に比較することができる (Davis et al., 2004)。Davis et al. (2004) は、ブラジルの GPS 観測点で得られた上下方向の変動の振幅と GRACE から得られたアマゾン川流域の荷重の季節変動を比較し、それらが矛盾しないことを示した。また GPS 観測プロジェクトによって、アラスカの氷床融解による地殻の隆起が報告されている (Larsen et al., 2005)。

## 1.5 本研究の目的

このように GRACE を用いた研究は多くの研究者によって次々に報告されている。この中で最も多いのは陸水変動や氷床融解といった水に関わる変動であるが、最近では地殻変動を捉える成果も挙げている。また時間スケールも永年の・季節的・一時的と様々な種類の時間変化で特徴付けられる重力変化が検出されている。また最近では、複数の宇宙測地技術を組み合わせて比較する研究も増えてきている。これは地殻変動観測と重力変動観測の観測対象が重なりはじめていることを示している。

先行研究を表でまとめてみると (Table 1)、季節変動成分に関しては上述のように重力変動と地殻変動観測の両方から報告されているが、それ以外の成分に関する比較研究の報告はまだ少ない。また、全球的な重力場変動は SLR から得られたものであり GRACE からはまだ報告されていない。そこで本研究では GRACE データから「非季節性変動成分」を検出することを目的とし、GPS データと比較を行うことで得られた信号の意味を

	Secular	Annual	Transient
Global	SLR $\dot{J}_2$ (Yoder et al., 1983)	SLR & GPS deg.1 (Blewitt et al., 2001)	SLR $\ddot{J}_2$ (Cox and Chao, 2002)
Regional	GRACE & GPS on-going melting (Tamisiea et al., 2005)	GRACE & GPS hydrological (Tapley et al., 2004) (Davis et al., 2004)	GRACE & GPS coseismic (Han et al., 2006) (Hashimoto et al., 2006)

Table. 1: Past studies of crustal deformation in global, regional, and local scales with various space geodetic techniques

## 2 波数領域における GRACE と GPS の比較

### 2.1 GRACE データの解析

GRACEのデータは、カリフォルニア工科大学ジェット推進研究所 (JPL), 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) の三つの機関で解析され現在も新しいデータを追加しながらウェブ上で公開されている ([http://podaac.jpl.nasa.gov/grace/data\\_access.html](http://podaac.jpl.nasa.gov/grace/data_access.html)) . 本研究では CSR による 2002 年 4 月から 2006 年 10 月までの Level-2 データを用いて解析を行った . Level-2 データは、約一ヵ月毎の 120 次までストークス係数 (地球重力場を球関数で展開した際の係数) で構成されている . 2002 年は欠測が多く、データセットは 47 個 (2002 年 4,8,10,11,12 月,2003 年 1,3,4,5,7,8,9, 10,11,12 月,2004 年 2,3,4,5,6,7,8,10,11,12 月,2005 年 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12 月,2006 年 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10 月) である . 各々のストークス係数  $C_{nm}, S_{nm}$  について全期間の算術平均をとり、各月のデータセットから差し引くことで、月毎の  $C_{nm}, S_{nm}$  の変動成分 ( $\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}$ ) とした . そしてそれぞれの変動成分の時系列を直線成分と年周半年周変動成分でモデル化し、永年変化 (直線成分の傾き) と季節変動成分を推定した (Figure 2) .

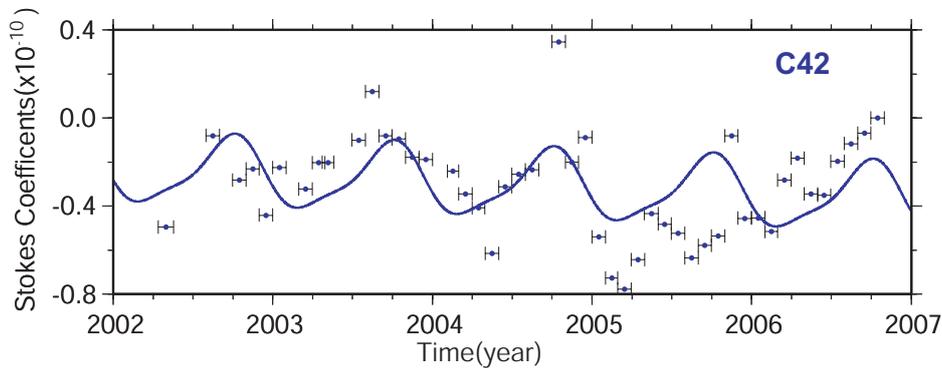


Fig. 2: Time series of  $C_{42}$ . Solid circles show monthly gravity values (relative to reference values). Horizontal error bars indicate time periods represented by individual data. The blue line indicates the model incorporating components with linear, annual, and biannual temporal changes.

### 2.2 GPS データの解析

こういった重力場の変化をもたらす地球の変形は地表の速度場としても現れることが期待される . 本研究では GPS データで同様の低次球関数で表される速度場が検出できるか調べてみた . GPS 速度データは、JPL の M.Hefflin 博士が GIPSY ソフトウェアの単独精密測位法を用いて求めた GPS 局速度をウェブ上で公開しているもの (<ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/mbh>) を用いた . 水平速度に関してはプレート運動に起因する成分が大きいが、本研究の目的からそれらを取り除く必要がある . ここでは水平方向の GPS 速度データから主要なプレートごとのオイラーベクトルを推定し、その残差を水平速度のデータとした .

得られた GPS 速度データの上下，南北，東西成分をそれぞれ  $u_{nmr}, u_{nm\theta}, u_{nm\phi}$  とすると<sup>8</sup>，重力場の変化と地表変位を関係づける式は以下ようになる (Davis et al., 2004) .

$$u_{nmr} = R \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n \left( \frac{h_n}{1+k_n} \right) (\dot{a}_{nm} \cos m\phi + \dot{b}_{nm} \sin m\phi) P_n^m(\sin \theta) \quad (1)$$

$$u_{nm\theta} = R \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n \left( \frac{l_n}{1+k_n} \right) (\dot{a}_{nm} \cos m\phi + \dot{b}_{nm} \sin m\phi) \frac{dP_n^m(\sin \theta)}{d\theta} \quad (2)$$

$$u_{nm\phi} = R \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n \left( \frac{l_n}{1+k_n} \right) \frac{m}{\cos \theta} (-\dot{a}_{nm} \sin m\phi + \dot{b}_{nm} \cos m\phi) P_n^m(\sin \theta) \quad (3)$$

本研究では二次に関しては TPW による body force が中心となるので潮汐ラブ数 (Munk and MacDonald, 1960) を，それ以外については surface force を想定して荷重ラブ数 (Farrell, 1972) を用い，上下速度と水平速度を同時に扱った．永年変化成分を定量的に議論するためには，粘弾性を考慮したラブ数を用いなければならないが，それを考慮した流体ラブ数は二次のものしか知られていない (Munk and MacDonald, 1960) . そこで今回我々は高次項まで同時に推定するために，弾性ラブ数に揃えた．以上の方法で GRACE の重力データと GPS の速度データの両方から永年変化成分の信号を推定し (GRACE に関しては季節変化成分も) その大きさと次数の関係を，また重力と速度の次数の相関等を調べてみた．

### 2.3 波数領域での比較

静的な重力場においては信号とともに分散が次数の二乗に反比例して小さくなる (Kaula の法則に従う) ことが知られている (Kaula, 1966) . 本研究では，GRACE から得られた信号は静的な成分だけでなく季節変動成分，永年変化成分に関しても同様の法則に従うことを見出した (Figure 3) . この物理的な意味は不明であるが，推定した時間スケールにおける重力場成分が Kaula の法則に従うことは大変興味深い．誤差は次数が大きくなるほど増大するため，ある次数で信号強度を超えることが予想される．季節変動成分に関しては 25 次程度まで，永年変化成分に関しては 20 次程度まで誤差を超える有意な信号が得られることが示された．

一方 GPS 速度データからストークス係数を推定する場合，次数  $n$  に対しパラメータ数は  $n^2 + 2n - 3$  となり高次を推定するにつれてパラメータ数が増大する．関数の形からは次数毎の分離はできるはずであるが，高次項まで推定を試みると低次項の推定まで不安定になり，次数を 10 次以上にすると解は破綻する (Figure 4) . これは GRACE に比べて GPS 観測データの空間的分布が局配置に依存するためと考えられる．GPS 観測局は陸域にしか存在せず (Figure 5) ，また陸域でも南北両極周辺やアフリカ大陸には分布が不十分である．全球に均等に配置されていないことが推定する次数の係数にパラメーター間相関を与え，推定の限界を与えていると考えられる．

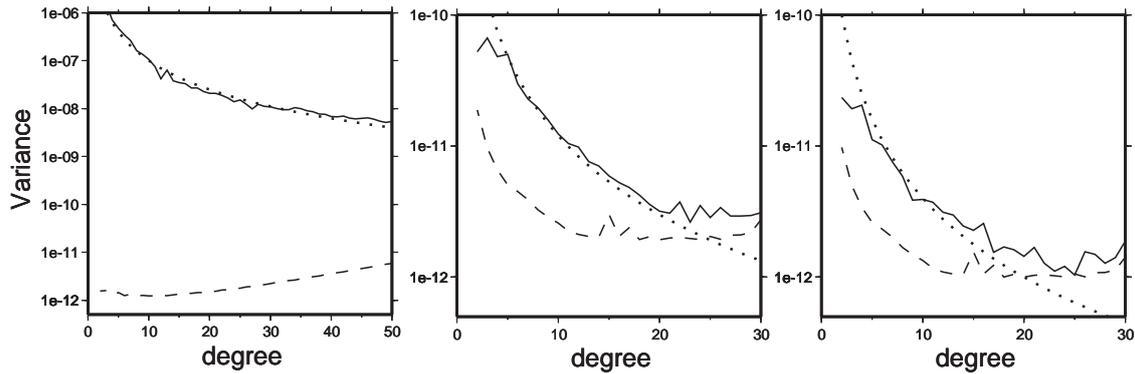


Fig. 3: Degree variances from GRACE (left) static, (middle) annually changing, and (right) secularly changing gravity field. Solid and dashed curves denote signals and errors, respectively. Errors were obtained a posteriori from post-fit residuals of individual coefficient time series. Dotted curves show the Kaula's rule (proportional to  $1.6 \times 10^{-9}/n^2$ ,  $4.0 \times 10^{-10}/n^2$ , respectively).

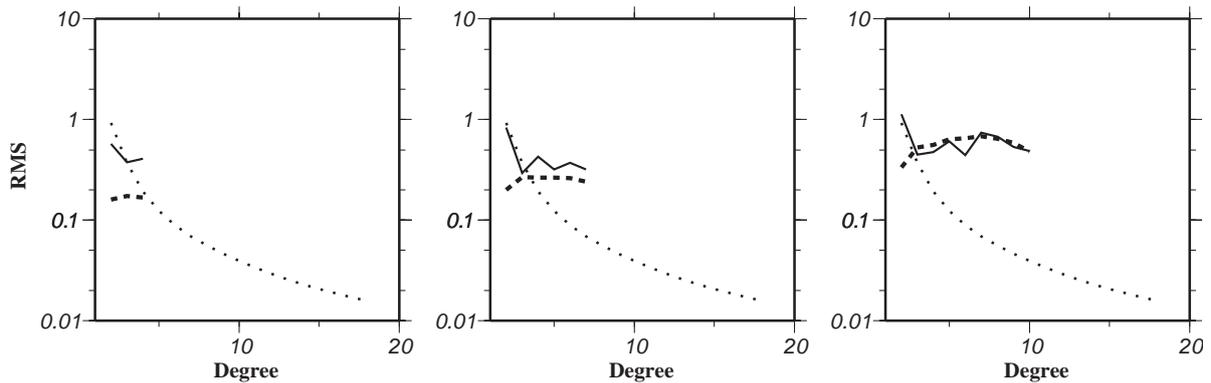


Fig. 4: Degree variances from GPS (left) estimated up to degree/order 4, (middle) up to degree/order 7, and (right) up to degree/order 10. Solid and dashed curves show signals and errors, respectively. Dotted curve show the Kaula's rule calculated by converting secular gravity changes from GRACE into surface velocities using Love numbers.

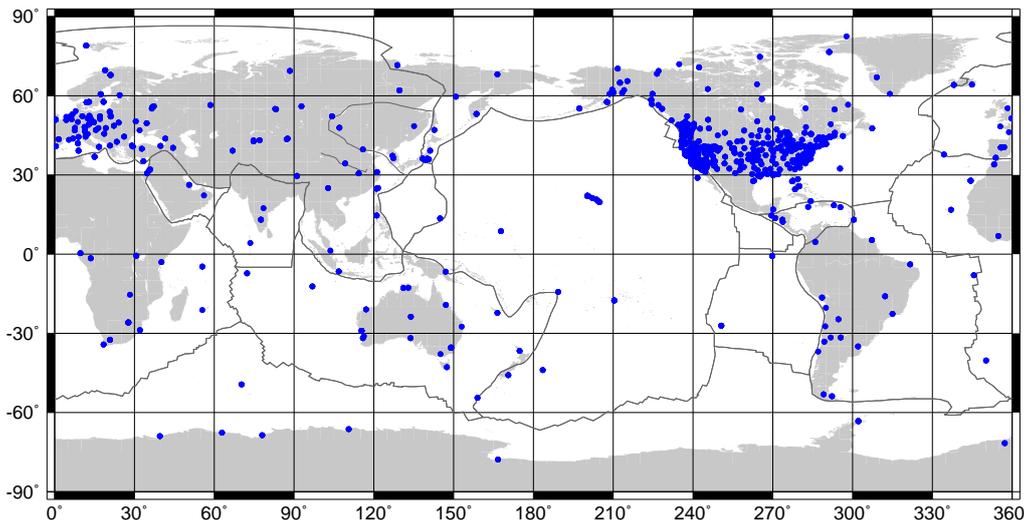


Fig. 5: Distribution of GPS sites

## 2.4 次数 2 の変動成分の比較

次に二次の成分のみを推定した場合観測局の数と幾何学的配置が十分であることを数値実験で調べたところ、現在の GPS 点の配置と観測誤差でも十分推定可能であることがわかった。二次の変形には氷床融解に伴う質量の再分配による地球の大規模な変形が影響している。最終氷期の終了に伴う北欧のフェノスカンジア、北米のローレンタイド各氷床の融解による荷重の解放の後、アイソスタシーを回復するための隆起 (Postglacial Rebound, PGR) が継続している。

すでに Mitorovica et al. (2001) は、過去の氷床融解の歴史と適当な地球の粘弾性構造を仮定し PGR による速度場を理論計算し、さらに彼らは質量の再分配によって地球の形状軸が移動する真の極移動 (True Polar Wander, TPW) による変形も重要であることを指摘した。TPW に伴って遠心力による赤道部分のバルジが移動し、球面調和関数の  $P_{21}$  に対応する全地球的な隆起沈降が生じるのである。彼らによると PGR と TPW に伴う速度の予測値はどちらも最大で約  $1\text{mm}/\text{yr}$  に達する (Figure 6,7,8)。

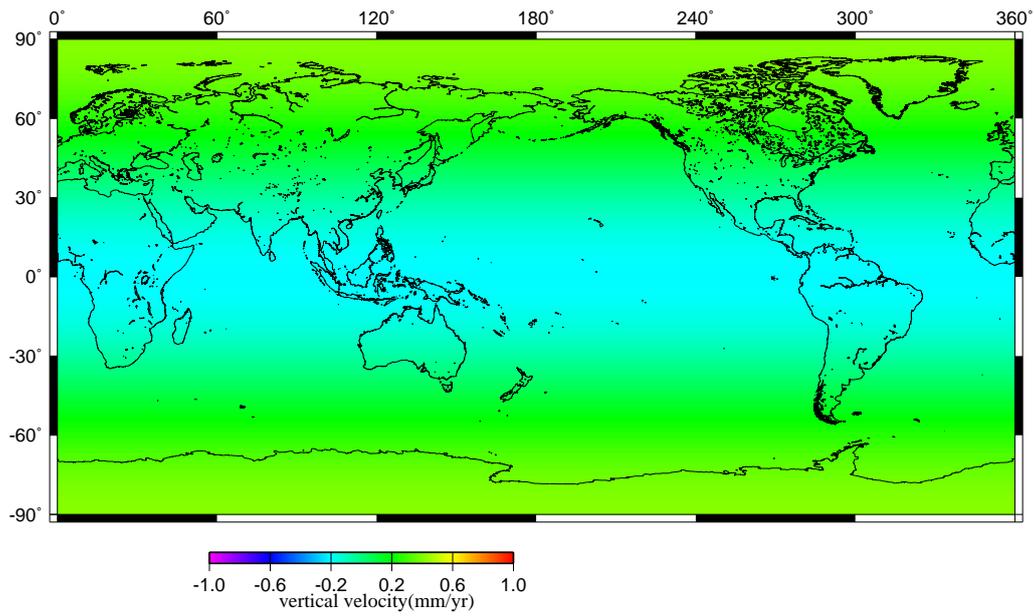


Fig. 6: Predicted secular velocity field corresponding to the  $P_{20}$  component gravity changes, from Mitrovica et al. (2001). This map shows vertical velocities although Mitrovica et al. (2001) gives horizontal velocities as well.

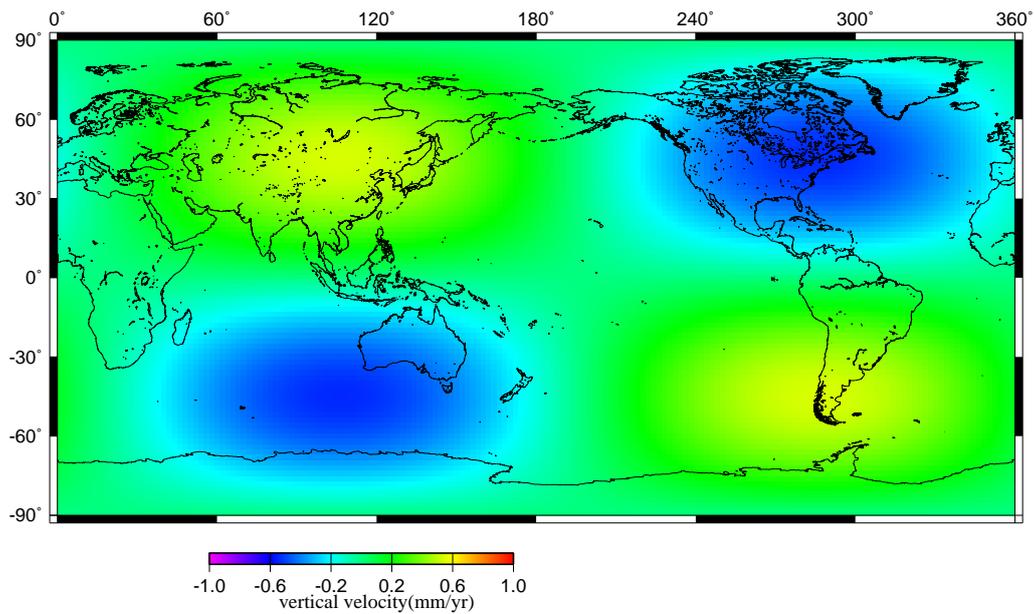


Fig. 7: Predicted secular  $P_{21}$  velocity field from Mitrovica et al. (2001). This map shows only vertical velocities.

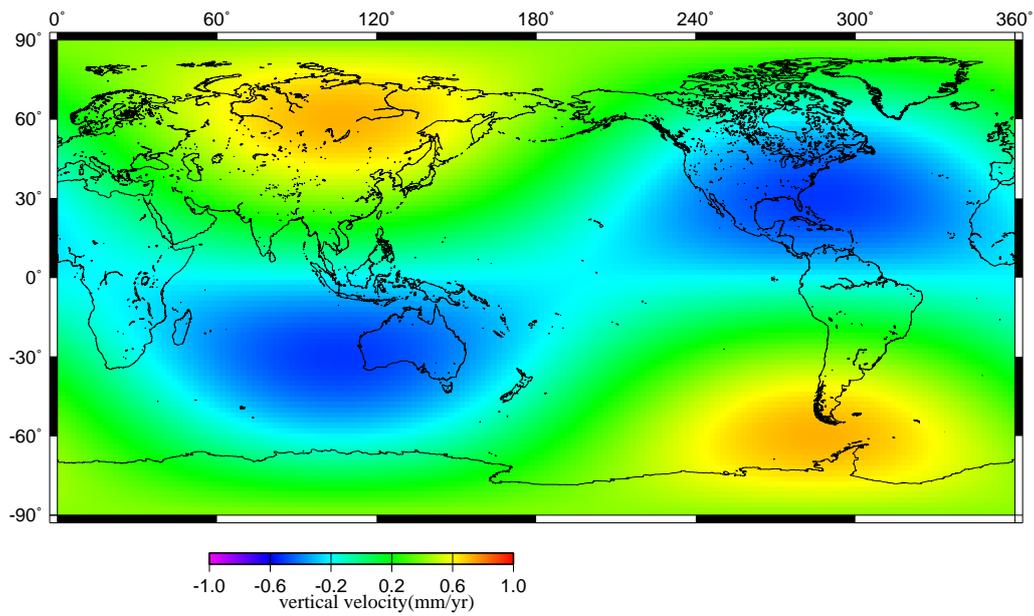


Fig. 8: Predicted secular degree 2 vertical velocity field ( $P_{20} + P_{21}$ ) from Mitrovica et al. (2001). They did not consider changes in  $P_{22}$ .

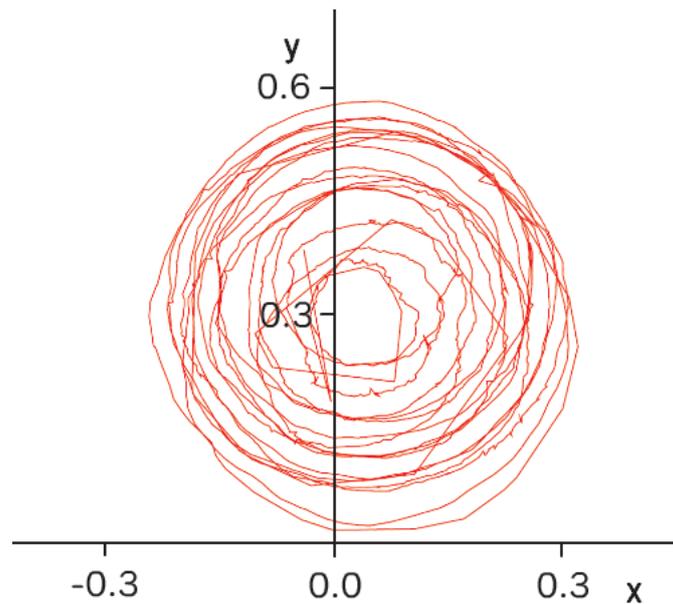


Fig. 9: Trajectory of the polar motion over the past decade from the International Earth Rotation Service (IERS) (unit: milli-arcsecond).

IERS(International Earth Rotation Service) のデータ (<http://www.iers.org>) から、ここ 10 年の極移動を示してみる (Figure 9) . 原点は約 100 年前に国際緯度観測事業 (International Latitude Service, ILS) 開始時に定義された、年周およびチャンドラー極運動の中心 (平均極) であるが、現在の平均極はこの原点から、 $y$  方向に 0.3 秒角ほど移動していることがわかる . つまり、地球の質量の再分配により形状軸が移動したことを示している . これは、ローレンタイド氷床があった北米方向 (西経 74 度) であり、Mitrovica et al.(2001) で指摘した球関数の  $P_{21}$  の形の速度場がこの方向を経度の基準として存在することを示唆している .

そこで GPS データから二次の球関数であらわされる速度場 (鉛直速度は球関数の形そのもので表され、水平速度は球関数の空間微分の形で表現される) のみを推定した . その結果、 $P_{20}$  成分の速度場は推定誤差以下であり  $P_{21}, P_{22}$  成分は有意であった . そこで  $P_{20}$  成分を除いた成分で二次の速度場を復元した (Figure 10) .  $P_{20}$  成分の大きさは SLR 観測による  $J_2$  から流体ラブ数 (Munk and MacDonald, 1960) を介しても推察することができる . それらは上下で 0.5 mm/yr、水平で 0.1 mm/yr 程度にすぎず、GPS で観測されたこの成分の速度が検出限界以下であることと調和的である .

一方で GRACE データからも二次の永年変化成分のみを推定した . ただし GRACE データの二次のストークス係数に関しては、 $C_{20}$  項は誤差が大きく評価できないと報告されている . そこで本研究では  $C_{21}, S_{21}, C_{22}, S_{22}$  成分のみを取り出した . GPS から得られた速度の結果と定量的に比較するために、重力変化を二次の潮汐ラブ数 (Munk and MacDonald, 1960) を用い、GRACE で得られた二次のストークス係数の変化  $\dot{a}_{nm}, \dot{b}_{nm}$  を式 (1) に代入し、二次の速度場を得た (Figure 11) .

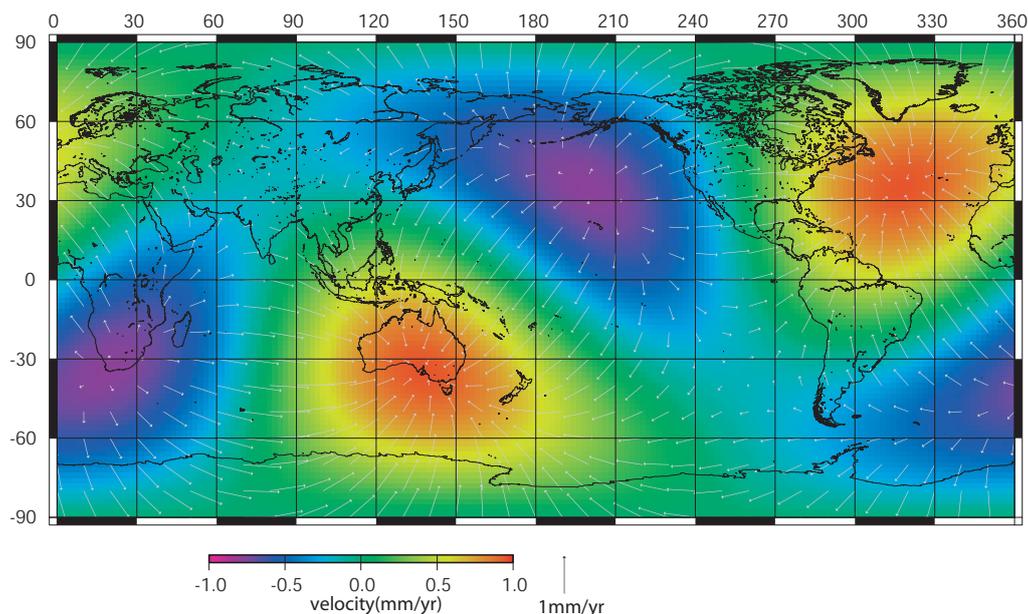


Fig. 10: Degree 2 non-plate-tectonic secular velocity field estimated from GPS data. Degree 2 order 0 component is not included. Color and vectors show vertical and horizontal velocities, respectively.

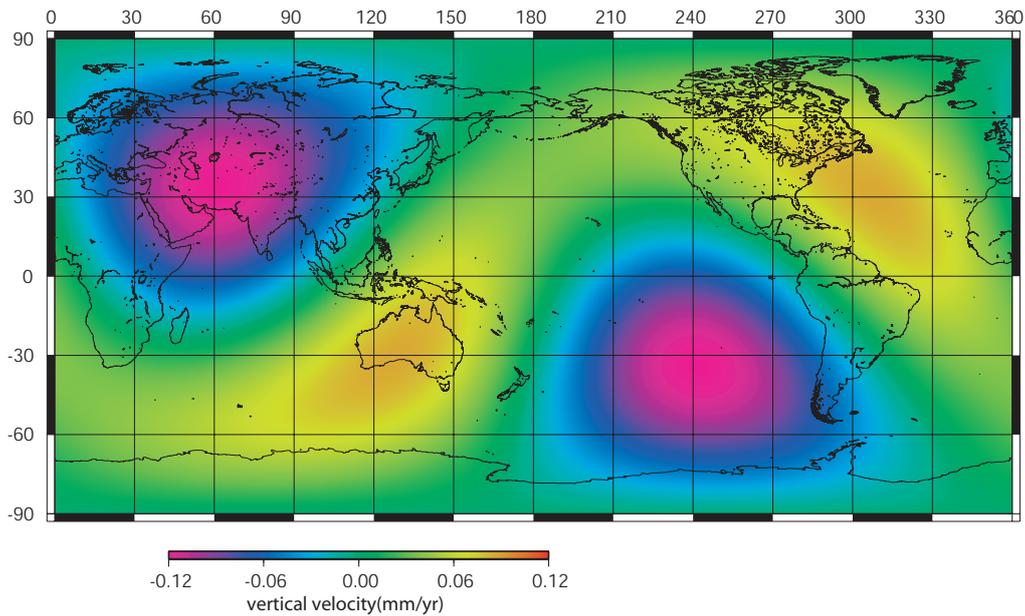


Fig. 11: Degree 2 secular velocity field converted from time-variable gravity field from GRACE using elastic tidal Love numbers  $k_2$  and  $h_2$ . Degree 2 order 0 component is not included.

その結果まず速度データと重力データのそれぞれから得られたパターンは、どちらも Mitrovica et al.(2001) で予測しているものと大きく異なることが示された。例えば  $P_{21}$  成分に関して、得られたパターンはどちらも現在の地球の形状軸の移動方向（グリーンランドの方向）から考えられる変形では説明がつかない。Mitrovica et al. (2001) は PGR と TPW による変形のみを考慮して二次の変形を計算しているが、これら二つ以外の要因を考える必要があるのかもしれない。さらに GRACE から得られた速度場は GPS で得られたものよりも一桁小さい。この大きさの違いは、GRACE データから速度場を計算する際に弾性的な潮汐ラブ数を用いており、ゆっくりとした変形に相当する粘性の効果を考慮していないことが影響しているであろう。永年変化成分は弾性のみを考えればよい季節変動成分のように単純な比較ができないが、逆に重力と速度データから十分に有意な変動値が検出できるなら地球内部の粘弾性構造に関する拘束条件を与えることができるとも考えられる。しかし現在の GPS 局配置の不十分さのためかなりの低次項でも波数領域で両者を比較することに限界があることがわかった。次の章ではこの難点を克服するため空間領域で GRACE と GPS の結果を比較してみたい。

## 3.1 Spatial averaging

地表での重力変化  $g$  とジオイド高変化  $h$  はどちらも下式の通り，得られたストークス係数の変動成分  $(\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm})$  を球関数に掛けたものの重ね合わせで表現できる．

$$g = \frac{GM}{R^2} \sum_{n=0}^{n_{max}} (n+1) \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\phi + \bar{S}_{nm} \sin m\phi) P_n^m(\cos \theta) \quad (4)$$

$$h = R \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\phi + \bar{S}_{nm} \sin m\phi) P_n^m(\cos \theta) \quad (5)$$

よって高精度の重力・ジオイド高の変動成分を得るためには得られたストークス係数を高次項まで足し合わせなければならない．しかしながら GRACE データは，次数が高くなるにつれてノイズが大きいという問題がある．Spatial averaging（空間的平滑化）は重み関数を用いることで短波長の誤差を除去する手法である．本研究では Wahr et al. (1998) を参考にし，ガウス分布を重み関数とした等方的なガウス関数状のフィルターを用いることにする．Wahr et al. (1998) によると次数  $n$  における重みは以下の漸化式で計算できる．

$$W_0 = 1 \quad (6)$$

$$W_1 = \frac{1 + e^{-2b}}{1 - e^{-2b}} - \frac{1}{b} \quad (7)$$

$$W_{n+1} = -\frac{2n+1}{b} W_n + W_{n-1} \quad (8)$$

$$b = \frac{\ln(2)}{(1 - \cos(r/a))} \quad (9)$$

ただし， $a$  は地球の半径， $r$  は空間的な平滑化を行うガウス関数の幅を示す量で averaging radius と呼ばれる．実際に，averaging radius を 500km, 350km とし次数と重みの関係をプロットしてみると (Figure 12)，半径が小さいほど高次項の重みが大きくなっていることが分かる．本研究では，350km と 500km の averaging radius を用いて比較を行った．

次数  $n$  における重みを  $W_n$  とすると，重力変化とジオイド高変化は以下のようなになる．

$$g = \frac{GM}{R^2} \sum_{n=0}^{n_{max}} (n+1) W_n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\phi + \bar{S}_{nm} \sin m\phi) P_n^m(\cos \theta) \quad (10)$$

$$h = R \sum_{n=0}^{n_{max}} W_n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\phi + \bar{S}_{nm} \sin m\phi) P_n^m(\cos \theta) \quad (11)$$

350km の場合，80 次程度で重みは限りなくゼロに近いことが示されるため，80 次までのストークス係数を用いて，全球を 0.5 度毎に区切り，各空間グリッドにおけるジオイド高変化を計算した．そして得られたジオイド高変化の時系列を，直線成分と年周・半年

周変動成分でモデル化し，永年変化（直線成分の傾き）と季節変動成分を推定し，得られた永年的な重力変化の信号を式 (5) を用いてジオイド高の時間変化を得ることにした．

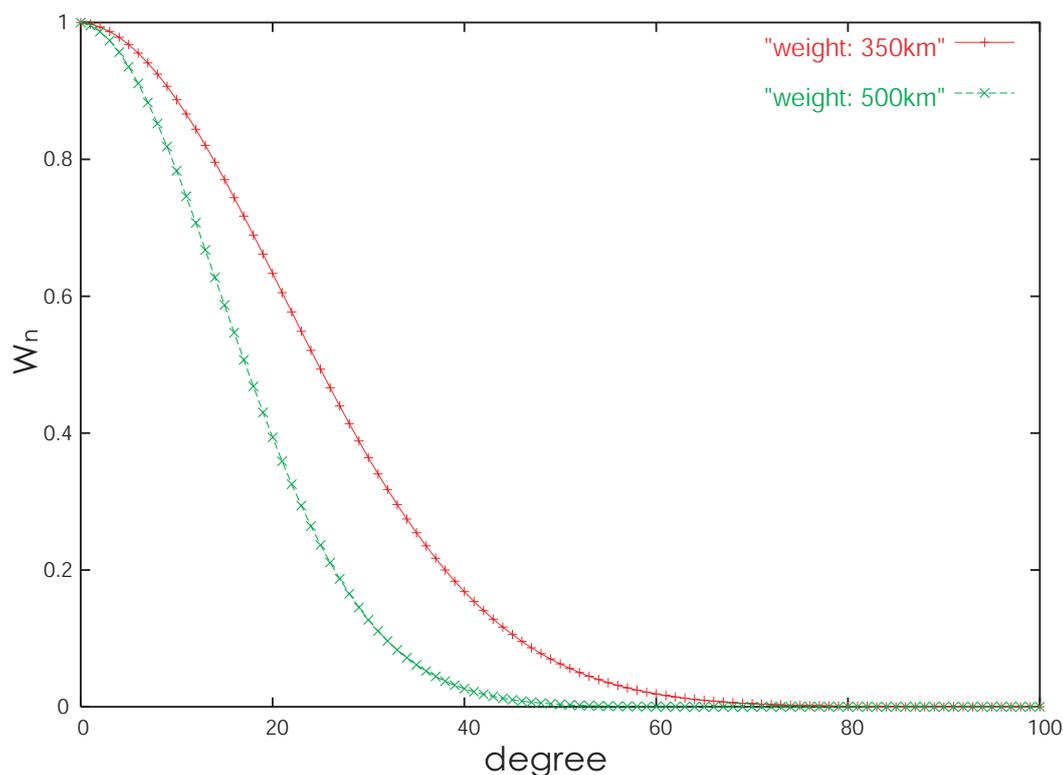


Fig. 12: Spherical harmonic coefficients  $W_n$  of isotropic Gaussian filters with the averaging radius of 350km (red) and 500km (green), respectively, used for spatial averaging of GRACE data.

### 3.2 復元した重力場変動

上述の方法で永年的なジオイド高変化をプロットしてみると，averaging radius が 500km の場合 (Figure 13)，ハドソン湾，アラスカ，グリーンランド，東南アジア，東アフリカ，南アメリカ等の地域に最大約 2mm/yr のジオイドの隆起や沈降が確認できた．averaging radius を 350 km とした場合 (Figure 14) も，似たパターンを示している．重力の変化もプロットしてみたところ (Figure 15)，縦縞のノイズが全球に目立ち詳細は見づらいが上述の地域においては，同様の変動が見えることがわかった．このノイズは Swenson and Wahr (2006) の filter を用いて除去を試みる予定である．重力変化は，上式に示す  $n + 1$  の係数の有無のため，ジオイドより高次の項が強調されていることも寄与していると考えられる．

一方で GFZ による GRACE データは 41 セットあるが，これらを用いて同様に解析を

行ってプロットしてみると (Figure 16) 南極における重力変動など UTCSR と幾分異なる点が見られたが、上述の地域においてはいずれのデータを用いてもジオイド高の顕著な変化が見られた。また第 2 章で示したように、GRACE から有意な永年変化成分が 20 次程度まで得られることが分かったので、20 次までの係数で表される成分のみを取り出し、それ以上高次の項は重みをゼロにして永年ジオイド高変動を復元したものを Figure 17 に示す。次節では、これらの地域で見られたジオイド高の増加や減少の目玉の中心の一月毎のジオイド高の時系列を見ながら、得られた信号の原因について考察する。

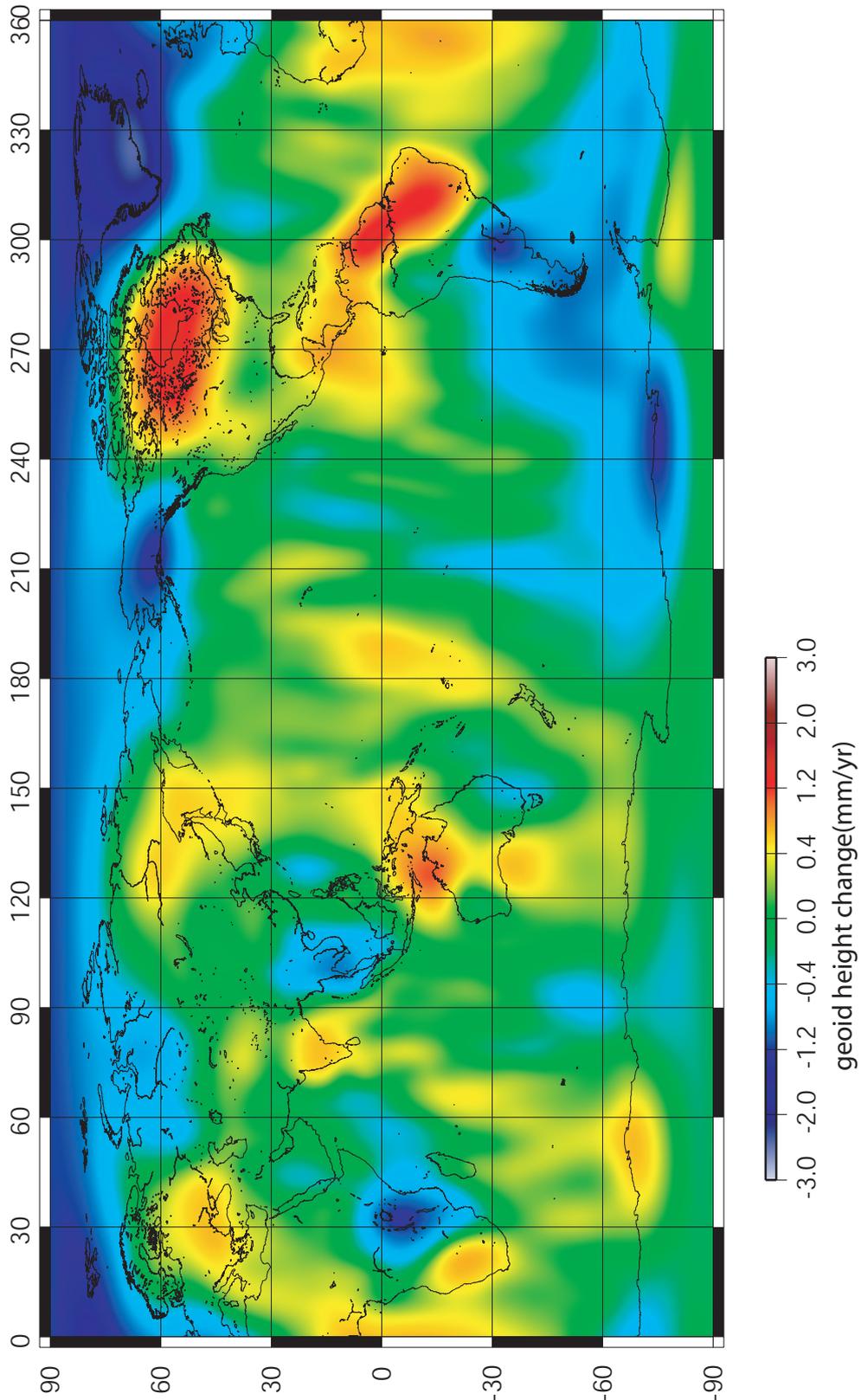


Fig. 13: Secular geoid height changes drawn with data from UTCSR. This map is calculated using the averaging radius of 500 km. Clear geoid height variations are seen in various areas, e.g. the Hudson Bay (Canada), Alaska, Greenland, South America, Southeast Asia, and East Africa.

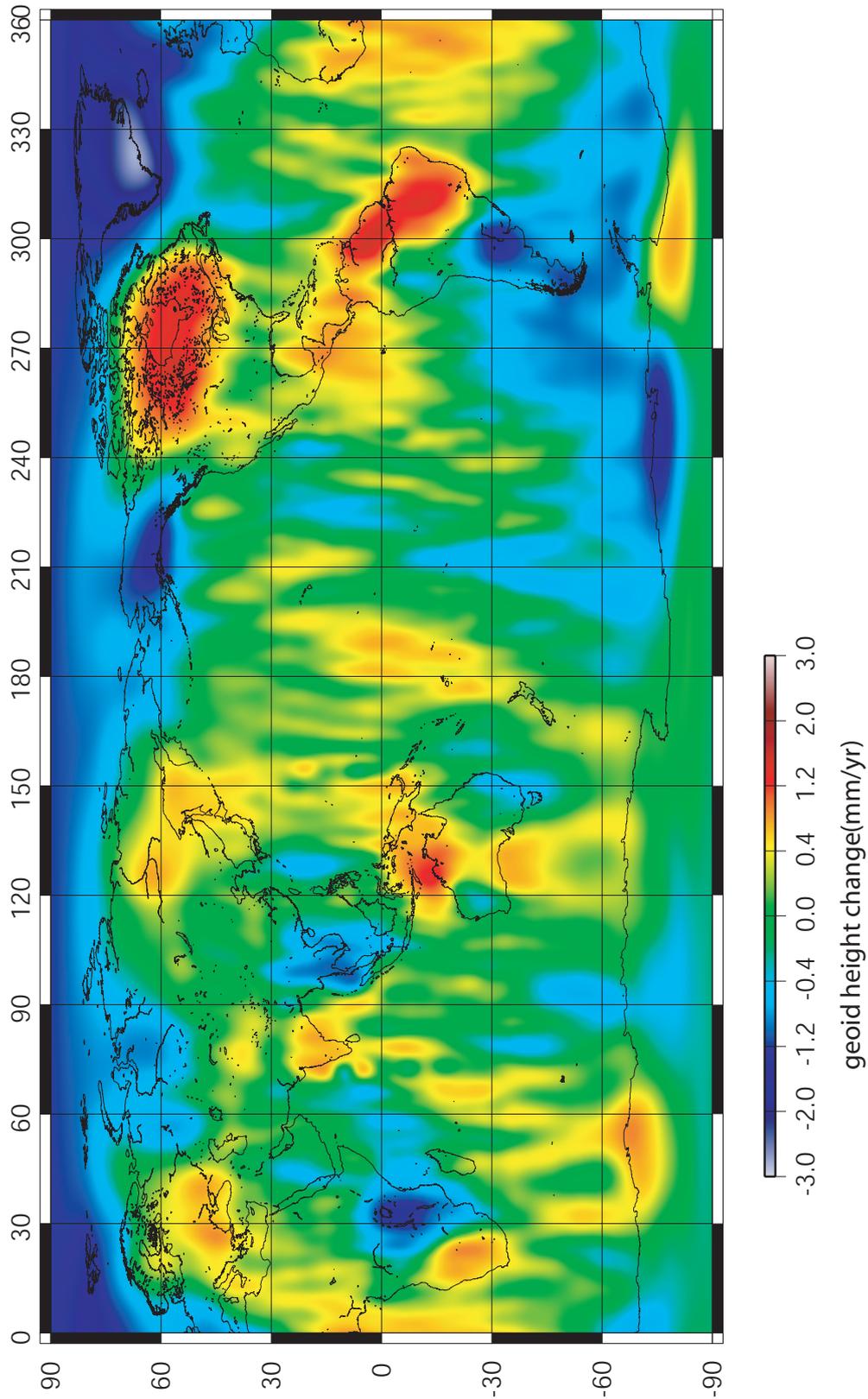


Fig. 14: Secular geoid height Changes from GRACE (UTCSR), calculated with the averaging radius of 350 km. This map shows the pattern similar to those in Fig. 13.

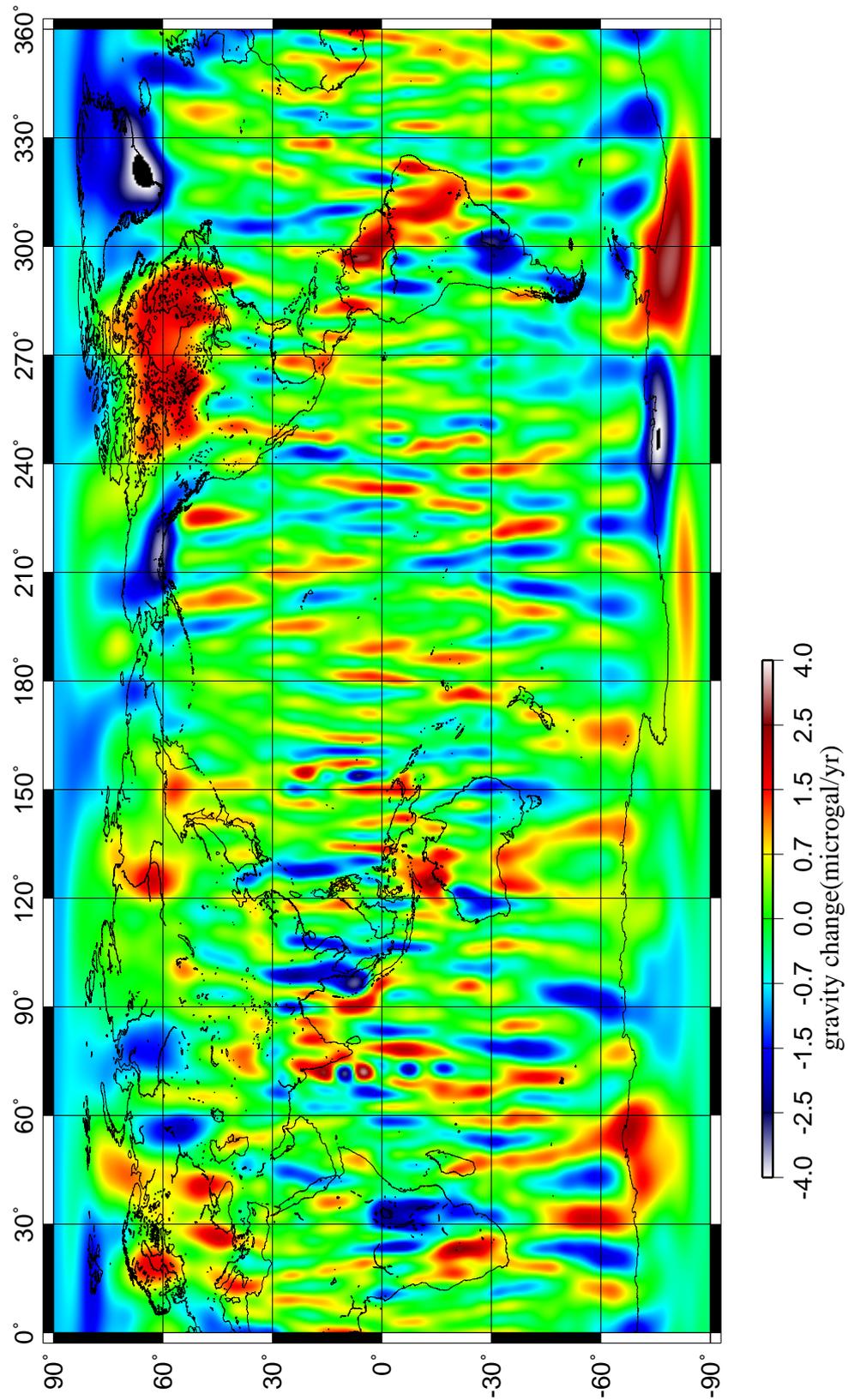


Fig. 15: Secular gravity changes from GRACE (UTCSR), calculated with the averaging radius of 350 km.

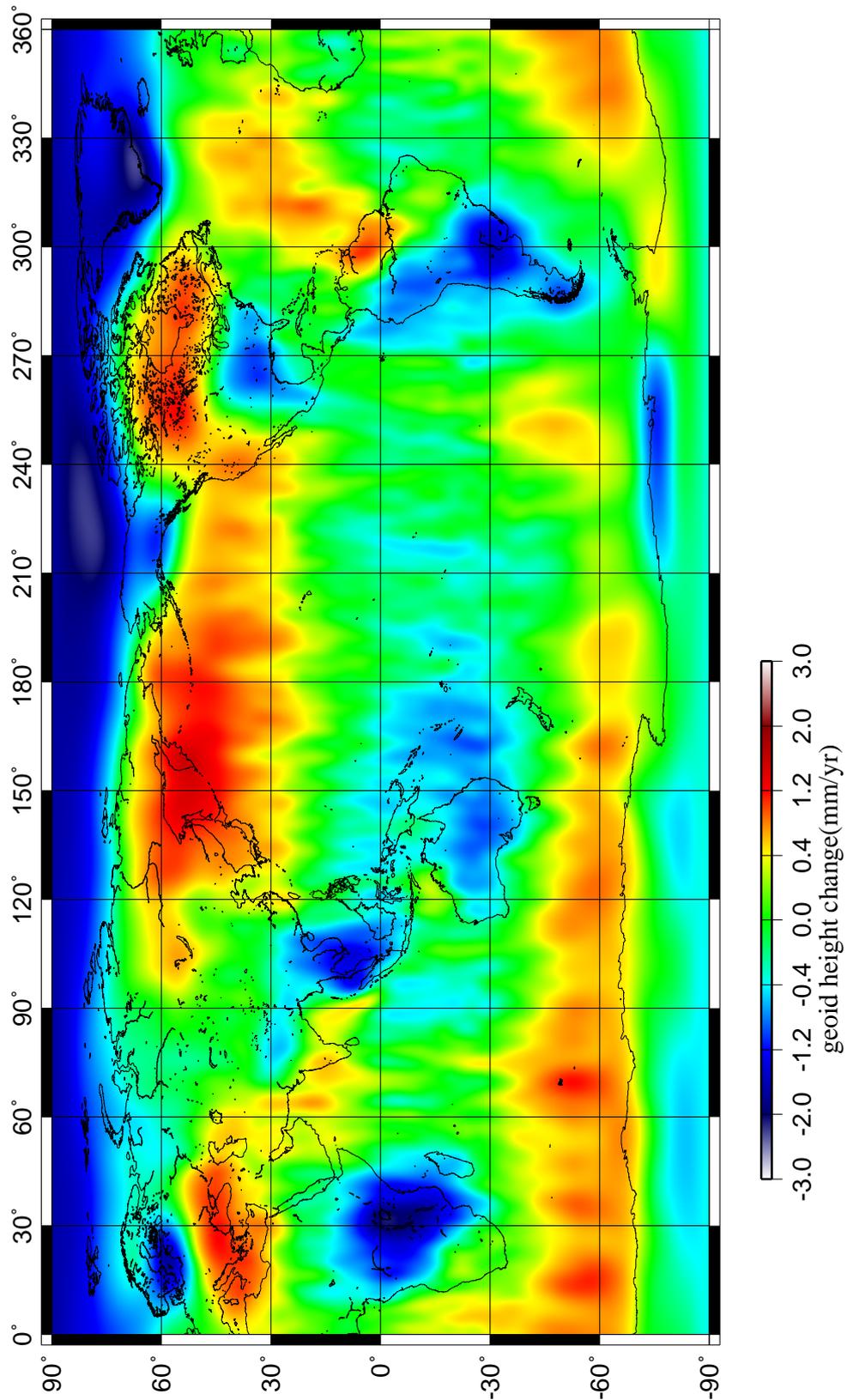


Fig. 16: Secular geoid height changes from GRACE (GFZ), calculated with the averaging radius of 350km. When compared them with Fig. 14, and found that significant differences are seen in Antarctica and around Kamchatka. However, signals in high latitude regions with on-going and past ice melting and those in mid-low latitude show patterns fairly similar to Fig. 14.

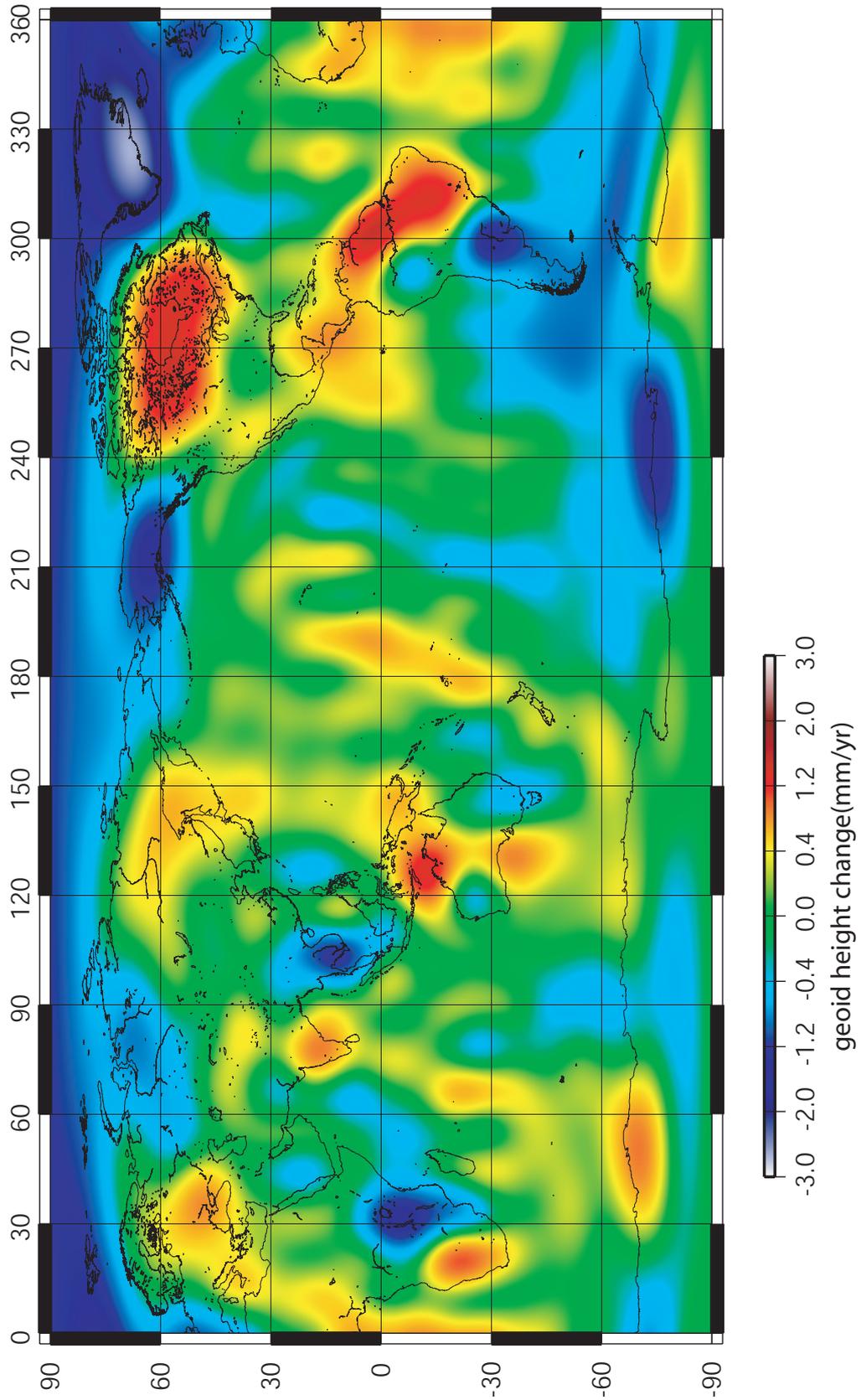


Fig. 17: Secular geoid height changes from GRACE (UTCSR), calculated using only components with degree/order 20 or lower.

ここでは、アラスカ、グリーンランド、ハドソン湾のジオイド高変化について考察する。まず、これらの地域の中心において得られるジオイド高の時系列を見てみると (Figure 18)、季節変動成分に加えてアラスカ・グリーンランドではジオイド高の永年の減少が見られ、ハドソン湾では増加が得られた。

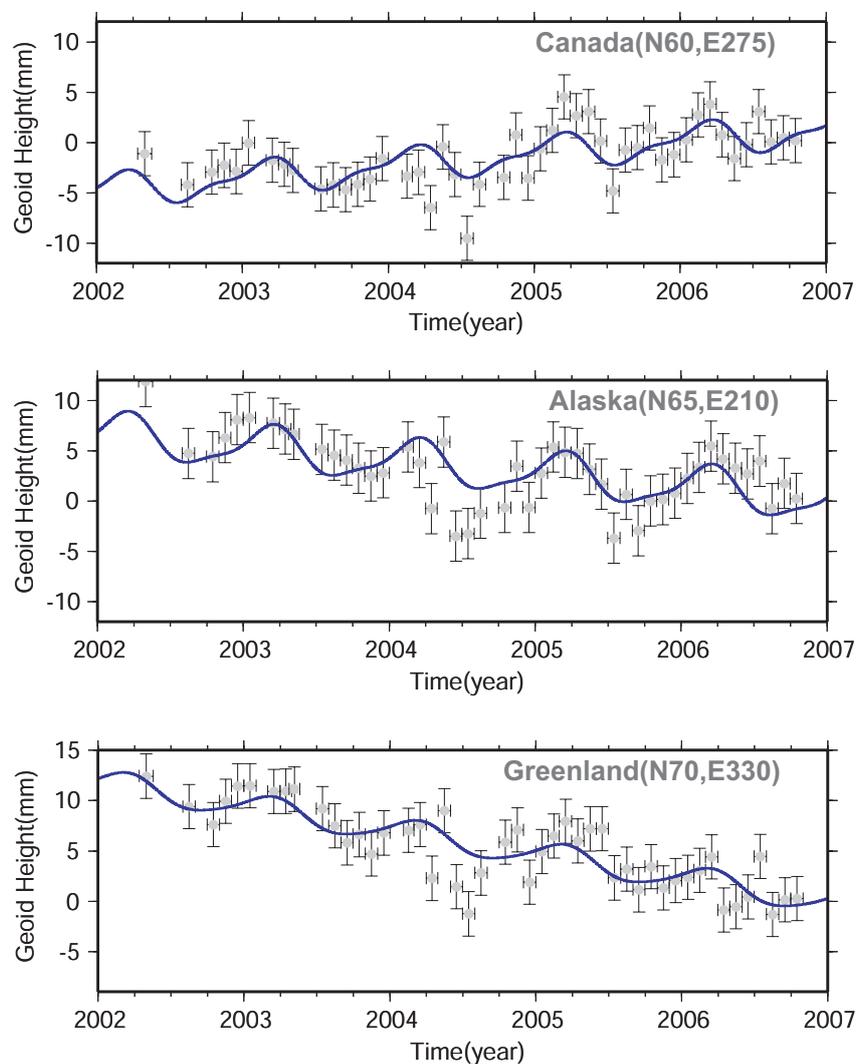


Fig. 18: Time series of geoid height changes in Hudson Bay, Alaska, Greenland calculated using GRACE (averaging radius: 350km). Solid circles show monthly gravity values (relative to reference values) and horizontal error bars indicate periods represented by individual data. Vertical error bars show a-posteriori  $1\sigma$  measurement error to bring chi-square unity after regression. Solid curves show models with linear, annual and biannual time variations.

アラスカ南東部とグリーンランドでは地球温暖化に伴って大陸氷床が急激に縮小していることが知られているが、GRACE データでも氷河の大規模な融解は重力の永年減少

として検出されている (Tamisiea et al., 2005; Chen et al., 2006) . 氷床荷重の減少に伴って弾性的に生じる大地の隆起による重力の増加もあるはずだが、マンツルの粘性によってアイソスタシーの完全な回復に長時間を必要とするため全体では重力の減少となるのであろう . 本研究で得られたこれらの地域の重力の永年の減少はこういった従来の考えが正しいことを示す . 一方で最終氷期の終わりに氷河が融解し、現在アイソスタシー回復のための PGR が生じている北米ハドソン湾周辺地域では、アラスカと異なり現在進行中の氷床の質量の減少がないため、大地の隆起に伴う正のジオイド高変化のみが見えている . 地上で絶対重力計によって測定した重力の時間変化は顕著な減少を示すことが知られているが、これは観測点が隆起していることによるものである . 一方観測点の移動の影響を受けない GRACE 等の衛星観測ではマンツル物質の周辺からの流れ込みに伴う質量の増加をそのまま捕らえることができるのである .

次にこれらのジオイド高変化と GPS の上下速度データを比較してみる . 氷床融解が現在進行しているアラスカやグリーンランドではジオイド高変化が負であるのに対し鉛直速度は隆起 (正) を示す (Figure 19) . 一方 PGR が進行しているハドソン湾ではジオイド高変化も鉛直速度の両方が正を示す (Figure 20) . 前者の隆起は現在縮小しつつある氷床の荷重の減少に伴う弾性的なりバウンドを示し、後者では氷床はすでに融解し終わっているがマンツルの粘性によって遅れた隆起が現在も継続しているのである (Figure 21) . スカンジナビア半島においても、ハドソン湾同様に PGR に伴う変動が生じているが、空間スケールが小さいため GRACE の解像度では北米ほど顕著ではない .

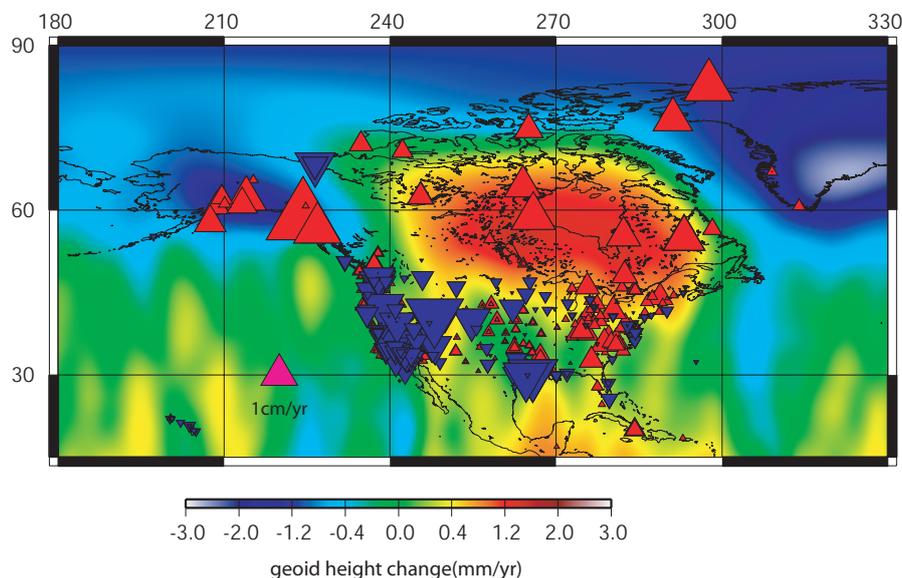


Fig. 19: Comparison between secular geoid changes from GRACE (averaging radius: 350km) and velocities from GPS sites in North America. Color shows gravity changes from GRACE while triangles shows observed GPS vertical velocities. Red and blue triangles show uplift and subsidence, respectively. The sizes of triangles indicate vector lengths. Correlations between geoid and velocity are negative in the recent and on-going ice melting areas, and positive in post-glacial rebound areas.

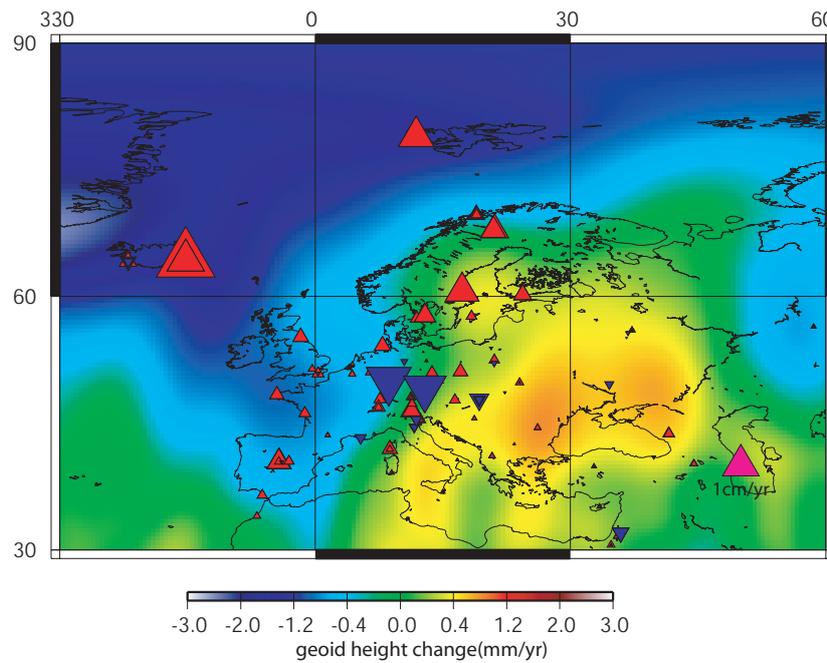


Fig. 20: Comparison between secular geoid changes from GRACE (averaging radius: 350km) and velocities from GPS sites in Northern Europe.

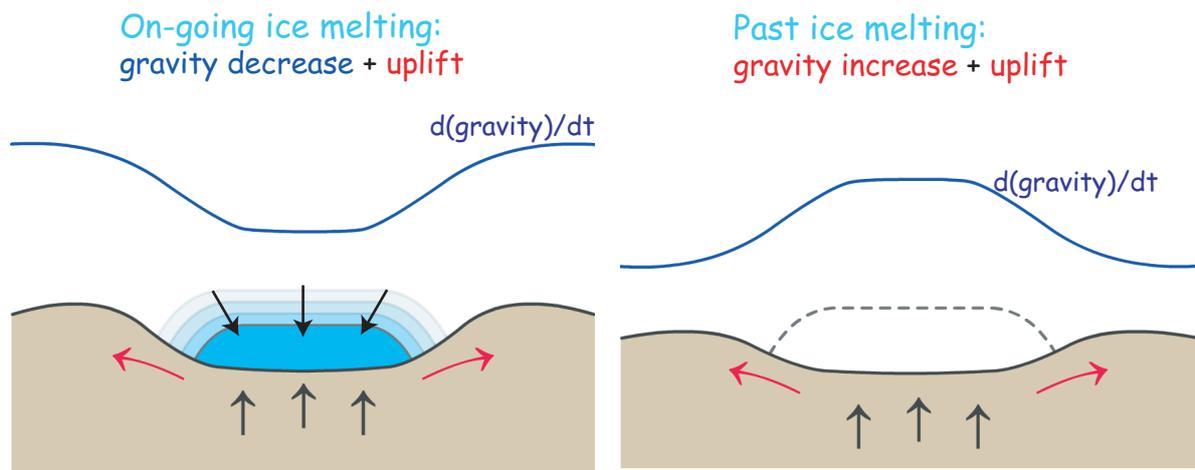


Fig. 21: Relationship between gravity change and velocity in areas of on-going/recent ice melting (left) and areas with past ice melting (right). In the former area, the solid earth surface goes up while the gravity shows decrease. In the latter area, gravity increases as the land uplifts.

南アメリカのジオイド高の減少はアルゼンチンの中心部に存在し、そこで得られた時系列を見てみると (Figure 22) 永年的な重力の減少が見られる。1960年のチリ地震の余効変動として、現在もなおチリ南部で海向きの水平速度がみられることがGPS観測によって報告されており、マントル物質の粘性緩和として説明されている (Hu et al., 2004)。南アメリカでは特に南半分で季節変動に加えて顕著な重力の永年減少が見られ、チリ地震の余効変動と何らかの関係が示唆される。しかしながら減少の中心はアルゼンチン中心部でありチリ地震の余効変動が見られる地域とややずれているため、地震と無関係な原因によるものとも考えられる。またGPSデータは全体的に隆起を示しており (Figure 23)、得られた永年的な重力変化と負の相関を示す。南アメリカ最南部は、アラスカ、グリーンランドと同様な隆起と重力減少を示すことから、温暖化に伴う大陸氷河の融解によるものかもしれない。さらに時系列をよく見てみると、2004年の7月から8月にかけて大きな不連続変化がある。さらにこのジャンプを境にジャンプ前では減少の傾向が見られ、ジャンプ後に増加しているように見える。いろいろな可能性を考察しながら得られた信号を検討していきたい。

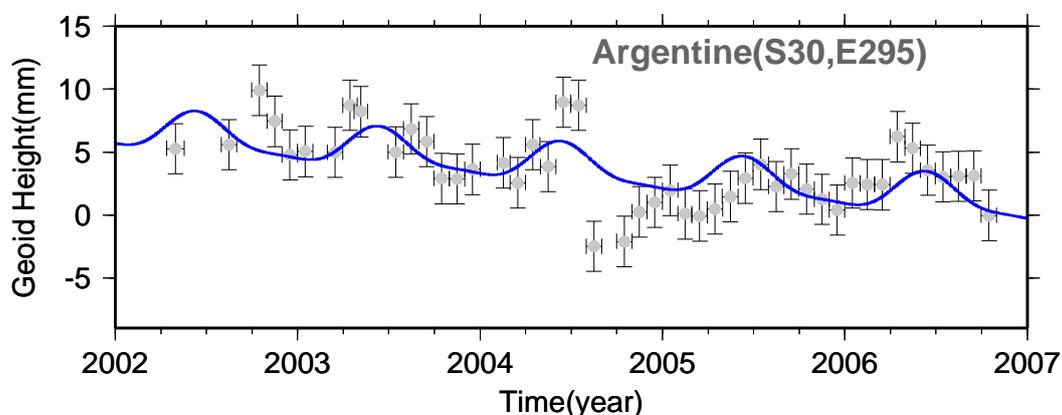


Fig. 22: Time series of geoid height changes in Argentina. A jump of unknown origin is seen at 2004/7-2004/8.

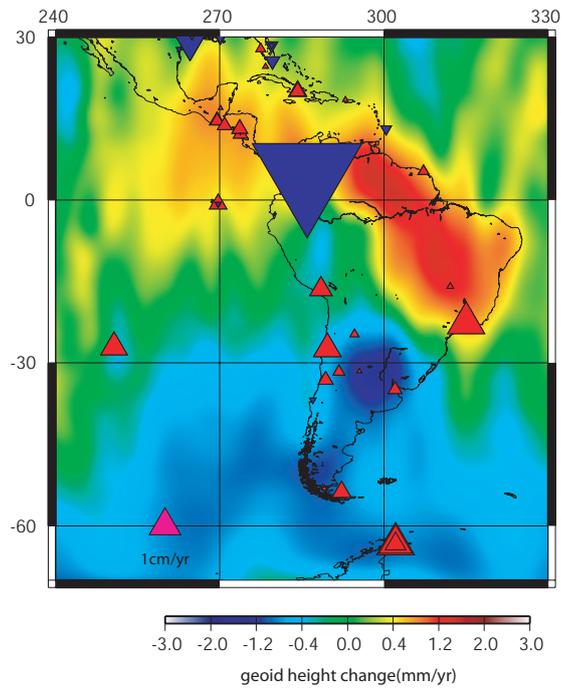


Fig. 23: Comparison between secular geoid changes from GRACE (averaging radius: 350km) and velocities from GPS sites in South America.

### 3.5 東アフリカの重力変化

東アフリカではタンザニアを中心として約 2mm/yr に達するジオイド高の減少が見られる (Figure 24) .

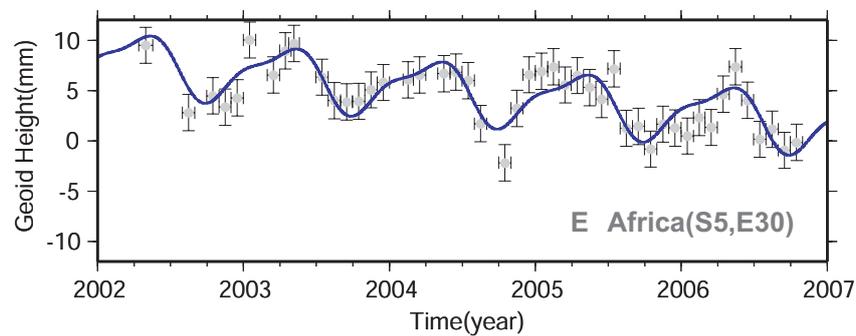


Fig. 24: Time series of geoid height changes in East Africa.

2002 年以降東アフリカは地球温暖化の影響を受けて降水量が半減する激しい干ばつが継続しており (Figure 25) , かつキリマンジャロの山岳氷河が加速的に融解していることが報告されている (Thompson et al., 2002) . GRACE が打ち上げられた 2002 年初めは干ばつが始まった年である . 従って , GRACE のデータに見られる東アフリカの永年的な重

力変化は、氷河の融解や干ばつによる土壌水分の減少が反映されているのかもしれない<sup>8</sup>。重力変化  $\Delta g$  と質量面密度の変化  $\Delta\sigma$  には以下のような関係がある。

$$\Delta\sigma = \Delta g / 2\pi G \quad (12)$$

ただし  $G$  は万有引力定数である。Figure 15 から重力変化では  $2\mu\text{gal}/\text{yr}$  程度の減少が生じている。 $2\mu\text{gal}/\text{yr}$  の重力変化は  $4.7\text{g}/\text{cm}^2$  の質量面密度の変化に相当し、約 5cm 相当の深さの水の質量の減少がタンザニア全体で生じていると考えられる。土壌水分量の季節変化は、季節ごとの降水量と気温の関数としての蒸発散量を用いて計算することができる。Heki (2004) は、Thorntwaite (1948) のモデルを用いて蒸発散量を求めている。本研究でも理科年表に掲載されているタンザニアの気温と平均降水量から土壌水分の年周変化を推定してみた (Figure 26)。その結果、土壌水分量の季節変化の振幅は水当量で 10cm 程度となり、降水量が半減すれば土壌水分は水当量で 5cm 相当の減少となり、GRACE で見られた東アフリカの重力の減少は干ばつである程度説明がつく。また南アメリカ同様に GPS 速度データは全体的に隆起を示し (Figure 27)、重力変化とは負の相関を示す。

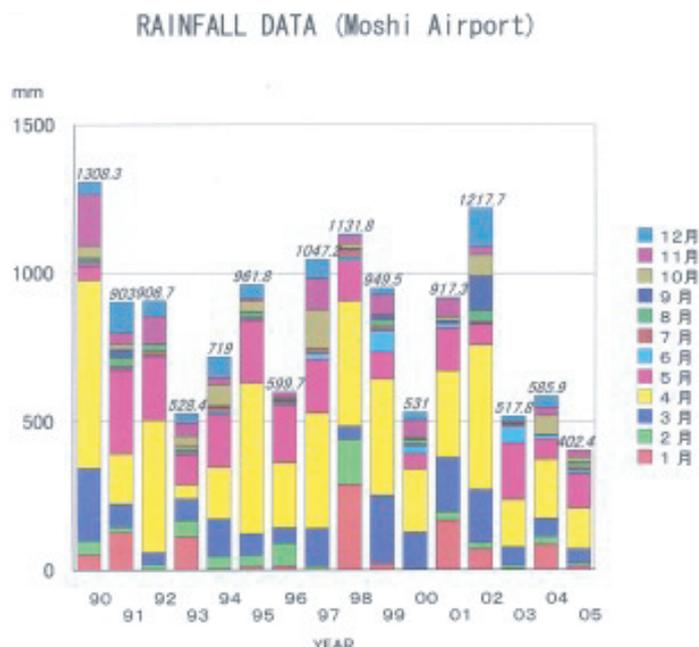


Fig. 25: Changes in annual precipitation in East Africa. Horizontal and vertical axes show time and precipitation, respectively. Precipitation has reduced to one half in 2002. (<http://polepoleclub.ld.infoseek.co.jp/kako-log0602.html>)

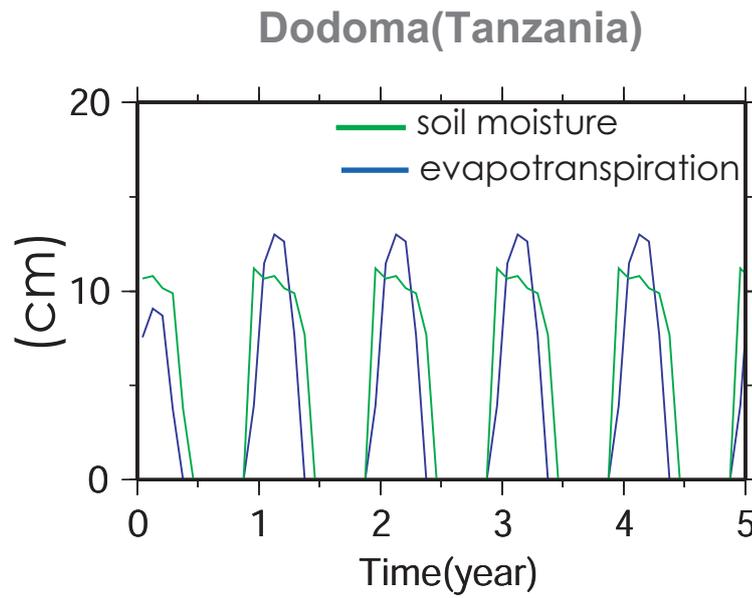


Fig. 26: Simulated seasonal variation of soil moisture in Tanzania. Green and blue lines indicate soil moisture and evapotranspiration, respectively.

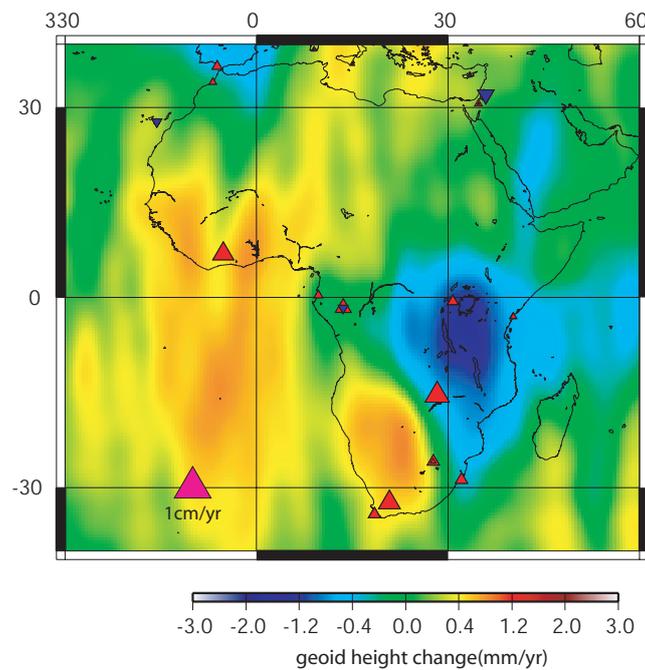


Fig. 27: Comparison between secular geoid changes from GRACE (averagign radius: 350km) and velocities from GPS sites in Africa.

東南アジアのインドシナ半島を中心とした地域でも重力の減少が見られるが、この地域の時系列を改めて見てみると (Figure 28) 2005 年始め付近でジオイド高が突然下がっているように見える。そこで永年変化と季節変化に加えて 2004 年 12 月 26 日における重力の不連続変化を追加パラメータとして推定すると、GRACE データに見られた永年的な減少はスマトラ・アンダマン地震に伴う重力の急激な減少による見かけ上のものであることがわかった。スマトラ沖地震による重力変化は、次章で詳しく考察する。

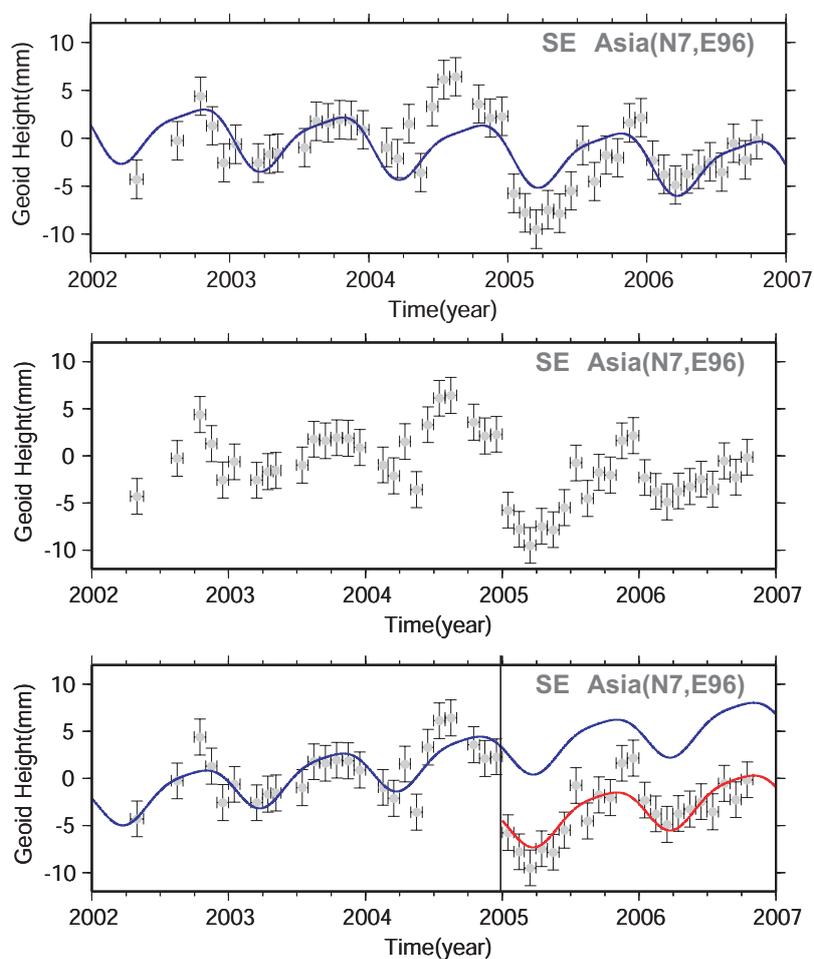


Fig. 28: Time series of geoid height changes in Southeast Asia. Vertical gray lines show the occurrence time of the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake. (top) The blue line shows the modeled time series composed of linear, annual and biannual components. (middle) A clear gravity jump seems to have occurred associated with the earthquake. (bottom) Blue and red lines indicate modeled time series before and after 2004/12/26. Linear and seasonal components are assumed same throughout the period. The blue line is extrapolated to the postseismic period to visualize their differences from red one.

## 4.1 背景

2004年12月26日にスマトラ沖で超巨大地震が発生した。スマトラ島からアンダマン・ニコバル諸島にかけての1200kmにもわたって破壊が生じ、これに伴って発生した津波は甚大な被害をもたらした。震源のメカニズムは、走向 $329^\circ$ 、傾斜 $8^\circ$ 、すべり角 $110^\circ$ であり、インド・オーストラリアプレートがユーラシアプレートの下に沈み込むことで起きた海溝型地震である。この地震は、津波の波形インバージョン (Tanioka et al. 2006) や、GPS 地殻変動観測 (Banerjee et al. 2005)、電離層擾乱の GPS 観測 (Heki et al. 2006) といった、さまざまなアプローチから地震に伴う変動が検出され破壊過程が解明されつつある。またこの地震は、GRACE を用いて地震に伴う重力変化が検出された初めての地震でもある (Han et al. 2006)。

地震に伴う重力の変化はどのようにして起こるのだろうか。このような沈み込み帯における低角逆断層がずれると、地表とモホ面には隆起・沈降が生じ、さらに地殻は膨張しマントルは圧縮する (Figure 29)。隆起・沈降による変形、膨張・圧縮することによる岩石内の密度変化が地震時の重力変化の原因となる。

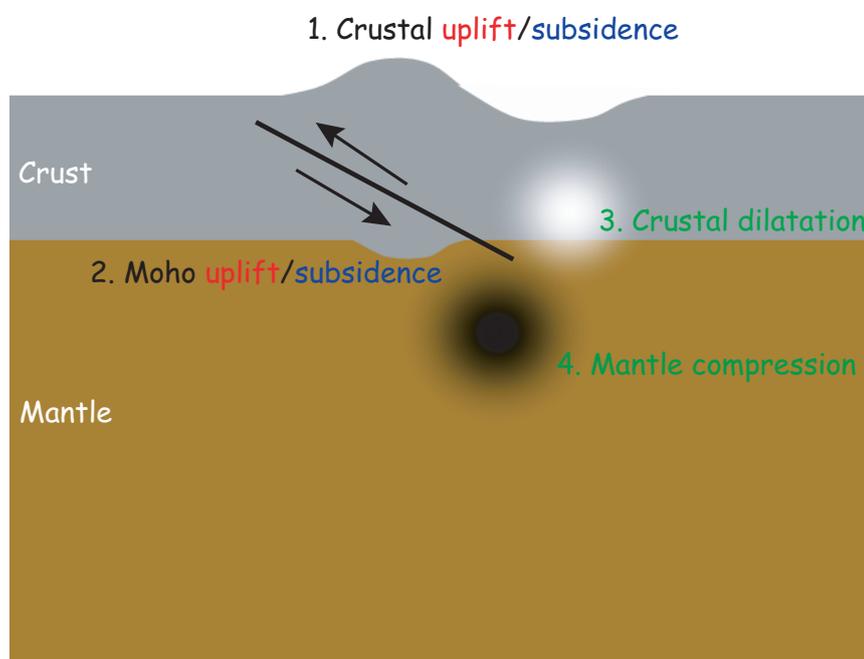


Fig. 29: Image of coseismic gravity changes. Uplift and subsidence of the ocean floor and Moho cause the deformation of layer boundaries with density contrasts. Coseismic dilatation and compression of crustal and mantle rocks cause the density changes of rocks. They contribute to the mass distribution perturbations and gravity/geoid changes.

これらの隆起沈降や膨張圧縮の量は Okada(1992) を用いて計算することができ、Han et al. (2006) は、GRACE データから検出したコサイズミックな重力変化と、良い一致

を示すことを報告している (Figure 30) . さらに彼らは得られた信号の空間スペクトルを求め、隆起・沈降による重力変化と膨張・圧縮による重力変化は、GRACEで観測する場合どちらも同程度の大きさで地震時の重力変化に影響していることを見出した。測地GPS観測や干渉SAR観測による地殻変動観測は、地表面の変位を計測するものであり、膨張・圧縮そのものを測ることはできない。地震に伴う重力変化を得ることは、新たな観点からの地震のメカニズムの理解を促進する。Han et al.(2006)ではコサイスミックな変動を検出しているが、スマトラ地震に関しては地震時のコサイスミックな変動だけでなく、地震後(ポストサイスミック)のゆっくりした変動が生じていることがGPS観測などからわかっている (Hashimoto et al. 2006) . しかしながら、ポストサイスミックな重力の変動はまだ報告されていない。そこで本研究ではGRACEデータを用いてスマトラ沖地震のコサイスミック、ポストサイスミックな重力変化の検出を試みた。

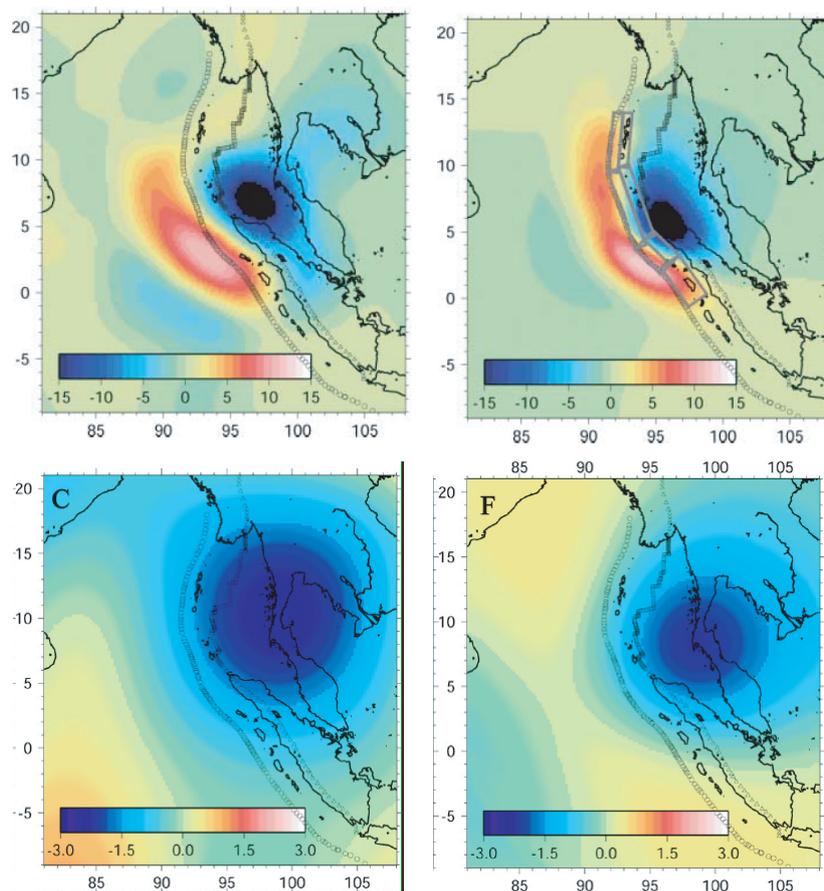


Fig. 30: Gravity changes (in  $\mu\text{gal}$ ) after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake. (top left) Coseismic gravity changes observed with GRACE. (top right) Coseismic gravity changes predicted using uplift and dilatation calculated with Okada(1992). The figures are taken from Han et al. (2006). (bottom) The left map shows gravity changes obtained using GRACE monthly mean global spherical harmonic coefficients. The right map is the same as the top left map but with a larger spatial averaging radius (800km).

## 4.2.1 二次関数によるモデル化

3章で示したように，東南アジアにおける永年的な重力の減少は見かけ上のものでスマトラ沖地震による影響を反映したものと考えられる．コサイスマックな変化はジオイド高の不連続変化として表現できるが，ポストサイスマックな変動は，地震直後の永年変化成分が地震前と幾分異なり，かつその変化分が時間とともに減衰することで特徴付けられるだろう．そこで，東南アジアの領域における各グリッドのジオイド高の時系列データを，永年変化と季節変化に加えて，地震時における不連続変化，地震前とは異なるトレンド，トレンドの変化分の減衰の三つのパラメータを仮定し推定を行った．トレンドの減衰に関しては，時定数は不明であるので差し当たり二次関数でフィッティングを行った．

Figure 31,32に東南アジアの二箇所 (N10,E92)，(N10,E98) における時系列を示す．不連続変化のみを推定したものはすでに Figure 28でも示しているが，地震に伴うトレンドの変化を加えて推定すると時系列の残差が抑えられて推定誤差が小さくなることが示された．不連続変化のみを推定したときはジャンプが推定されなかった地域でも，ポストサイスマックな変動まで推定するとある程度大きな重力のジャンプが推定されることも分かった．これは，地震が生じてからまだ2年しか経過しておらず，コサイスマックな変動とポストサイスマックな変動が，ある程度パラメータ間の相関を持っていることを示唆している．

## 4.2.2 指数関数によるモデル化

二次関数でフィッティングした結果からは，ポストサイスマックな変動は1年以内程度でかなりの部分が減衰する程度の時定数を持つことが示唆された．そこで改めて，モデルに指数関数を用いてパラメータ推定することにした．地震前，地震後のデータのジオイド高をそれぞれ  $h_{before}$ ,  $h_{after}$  とすると，

$$h_{before}(t) = a_0 + a_1 t + a_2 \sin \theta + a_3 \cos \theta + a_4 \sin 2\theta + a_5 \cos 2\theta \quad (13)$$

$$h_{after}(t) = h_{before}(t) + a_6 \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) + a_7 \quad (14)$$

ただし， $t_0$  はスマトラ沖地震が起こった2004年12月26日である． $\tau$  は時定数を示すが本研究ではパラメータとして最小自乗推定せず，推定後の残差が極小値をとる  $\tau$  を別途サーチして求め，8つのパラメータをグリッド点ごとに推定した．

まず  $\tau$  は，0.6年で時系列へのフィットが最も良くなることが分かり，スマトラ沖地震のポストサイスマックな重力変動の時定数がその程度であることが分かった．指数関数でモデル化した時系列を見ると (Figure 33, 34)，二次関数でモデル化したものよりも残差が小さくなった．しかし東経98°の方の点では，地震後約1.5年経過したあたりから，地震後増加しつつあったジオイド高が減少に転じているような結果となった．地震後のデータが少ないため，このことがどのような地学的な意味を持っているのかはまだ分からない．今後データが増えていくことで，ポストサイスマックな変動の原因の解明が進むものと期待される．

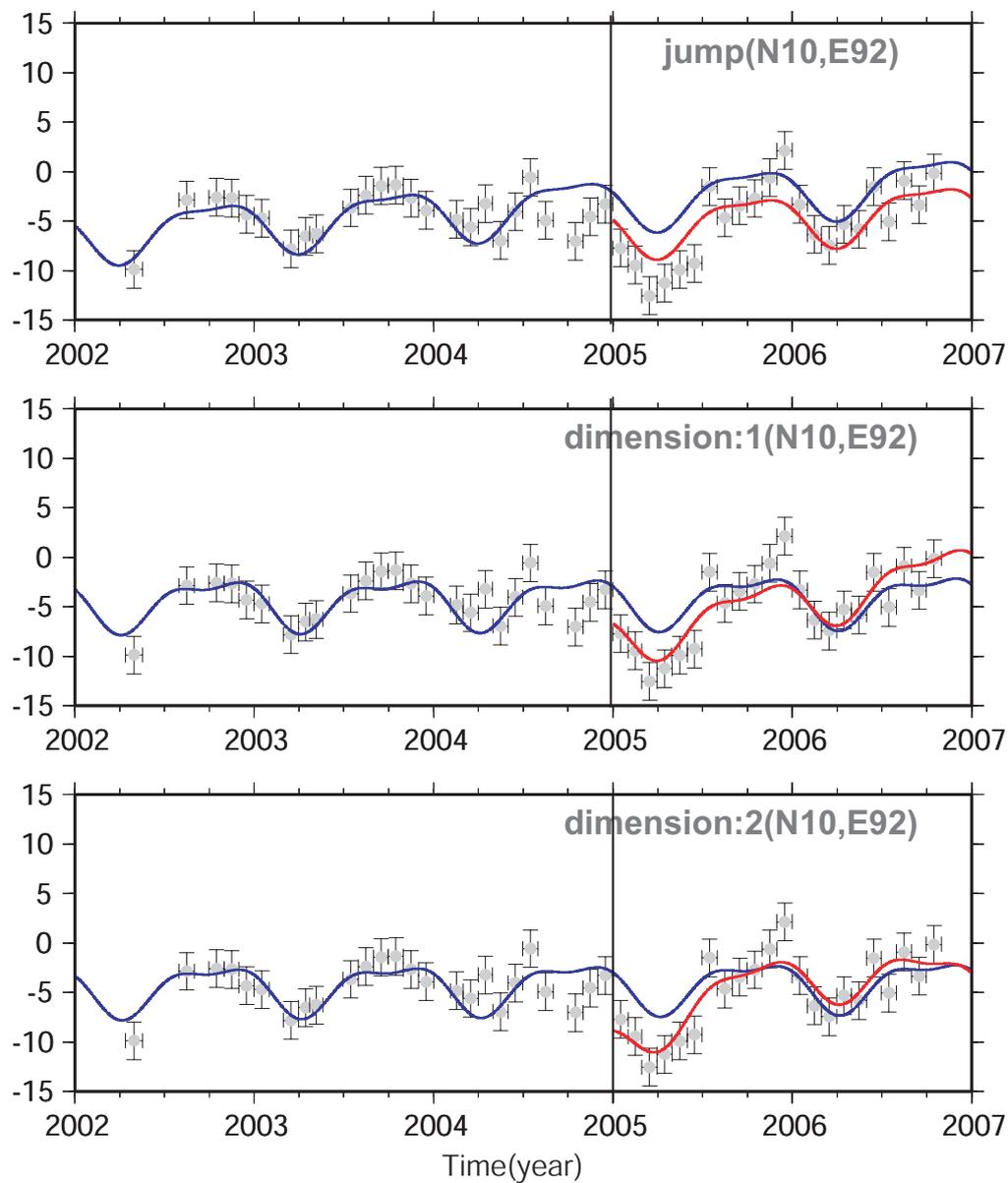


Fig. 31: Time series of geoid height changes at (N10 E92). Vertical gray lines show the occurrence time of the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake. (top) Blue and red lines are modeled in the same way as the Fig. 28 bottom. (middle) An additional parameter showing change of secular rate is added in the postseismic period. (bottom) one more parameter is added to model the deceleration of the postseismic trend change.

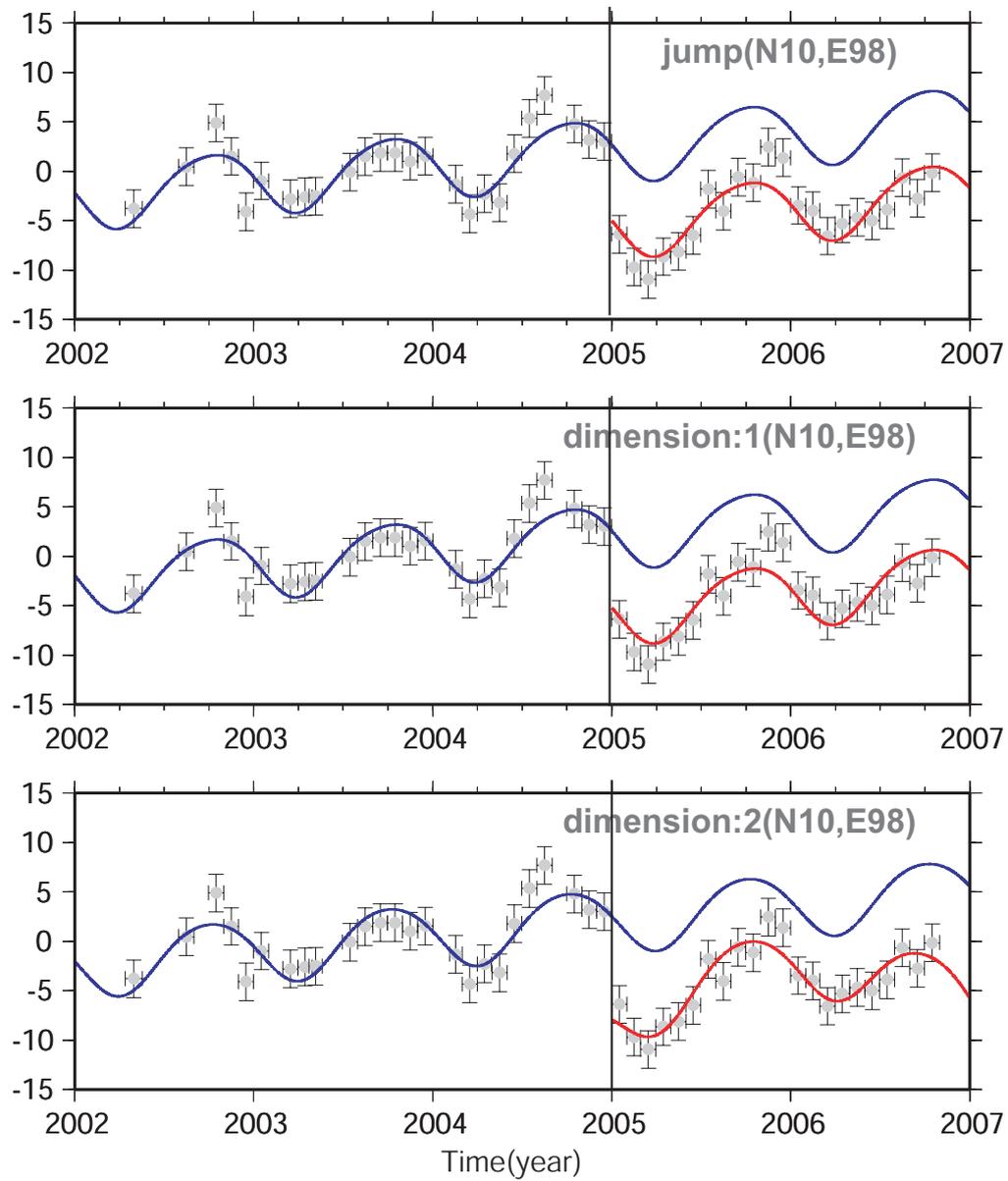


Fig. 32: Time series of geoid height changes at (N10 E98) drawn in the same way as Fig. 31.

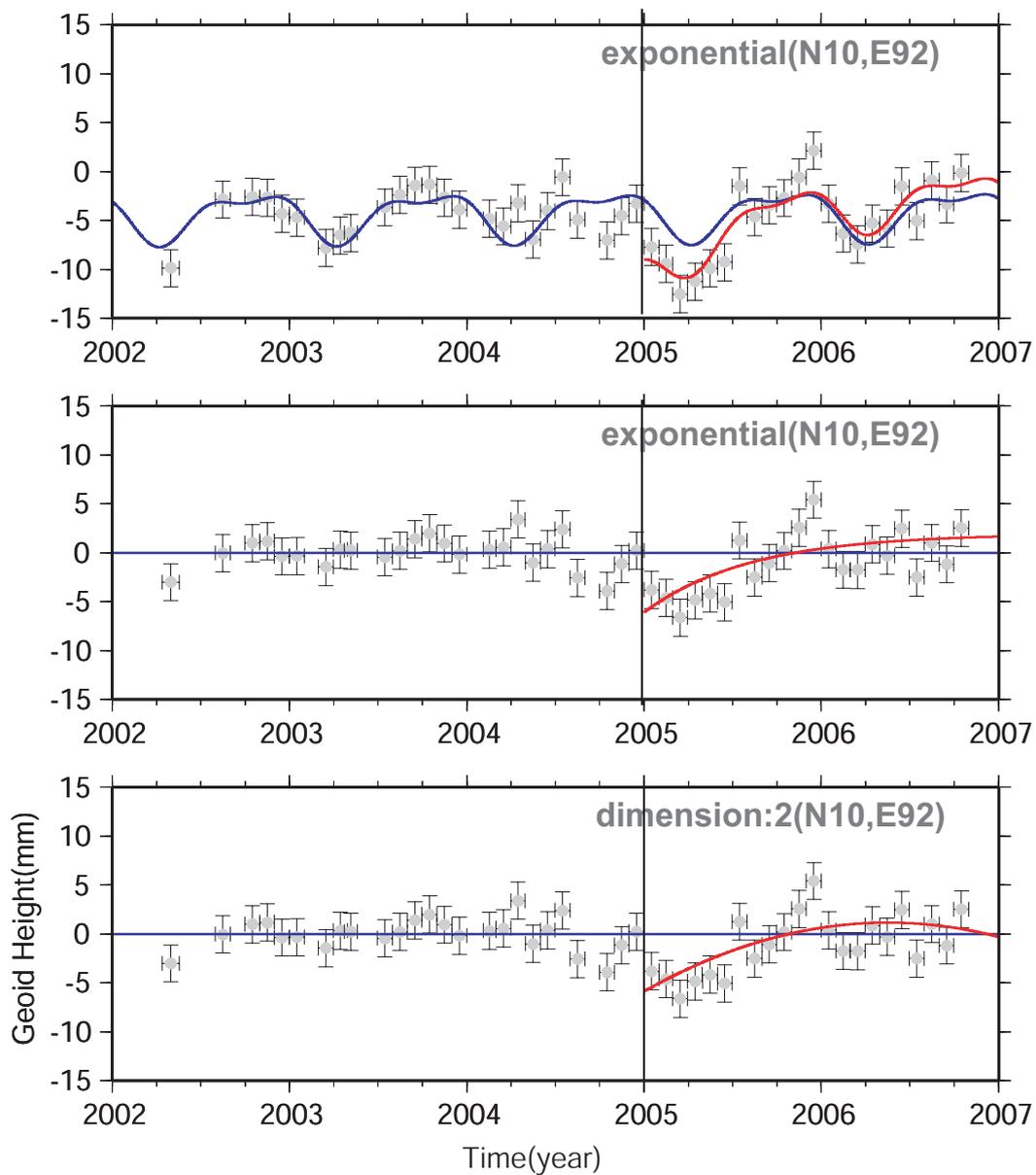


Fig. 33: Time series of geoid height changes at (N10 E92). (top) Blue and red lines are modeled using equation (13), equation(14) ( $\tau = 0.6$  year), respectively. (middle) The same time series as (top) are redrawn after removing secular and sesonal components. (bottom) The same time series as Fig. 31 (bottom) are redrawn after removing secular and sesonal components.

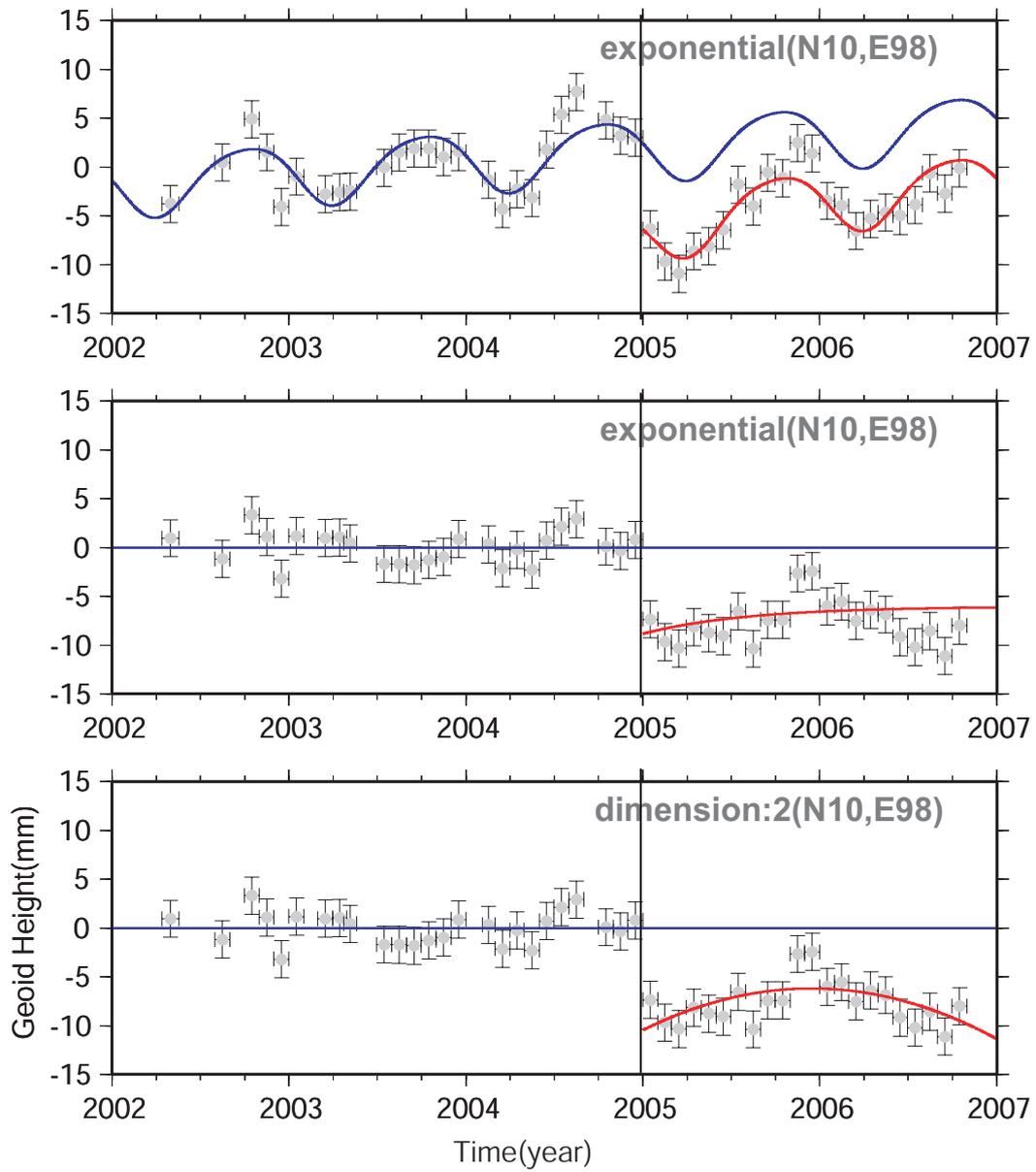


Fig. 34: Time series of geoid height changes at (N10 E98). See the caption of Fig. 33 for detail.

得られたコサイスマックなジャンプを取り出し地図上にプロットしてみると、スマトラ島の北側アンダマン海中で 8mm 程度のジオイド高の降下のピークが得られた (Figure 35)。パターンは、ストークス係数を用いて推定した Han et al. (2006) の重力変化のパターンと調和的である。そして指数関数のパラメータから、スマトラ沖地震から 1 年にわたるジオイド高の地震後の累積変化をプロットした。すると、アンダマン諸島に 8mm 程度のポストサイスマックなジオイド高の上昇のピークが得られた。推定された地震時、地震後のジオイド高変化の誤差は、どちらも 1.9mm 程度で十分に有意な信号が得られたといえる。二つのパターンを比べてみると、信号のピークの位置が幾分異なっている。また最も特徴的なのは、得られたコサイスマックとポストサイスマックな変動の極性が逆であることである。これらの原因を解明することは、地震後の重力変動が起こるメカニズムの解明につながる。次に本研究で得られた地震に伴う重力変化の原因を考察する。

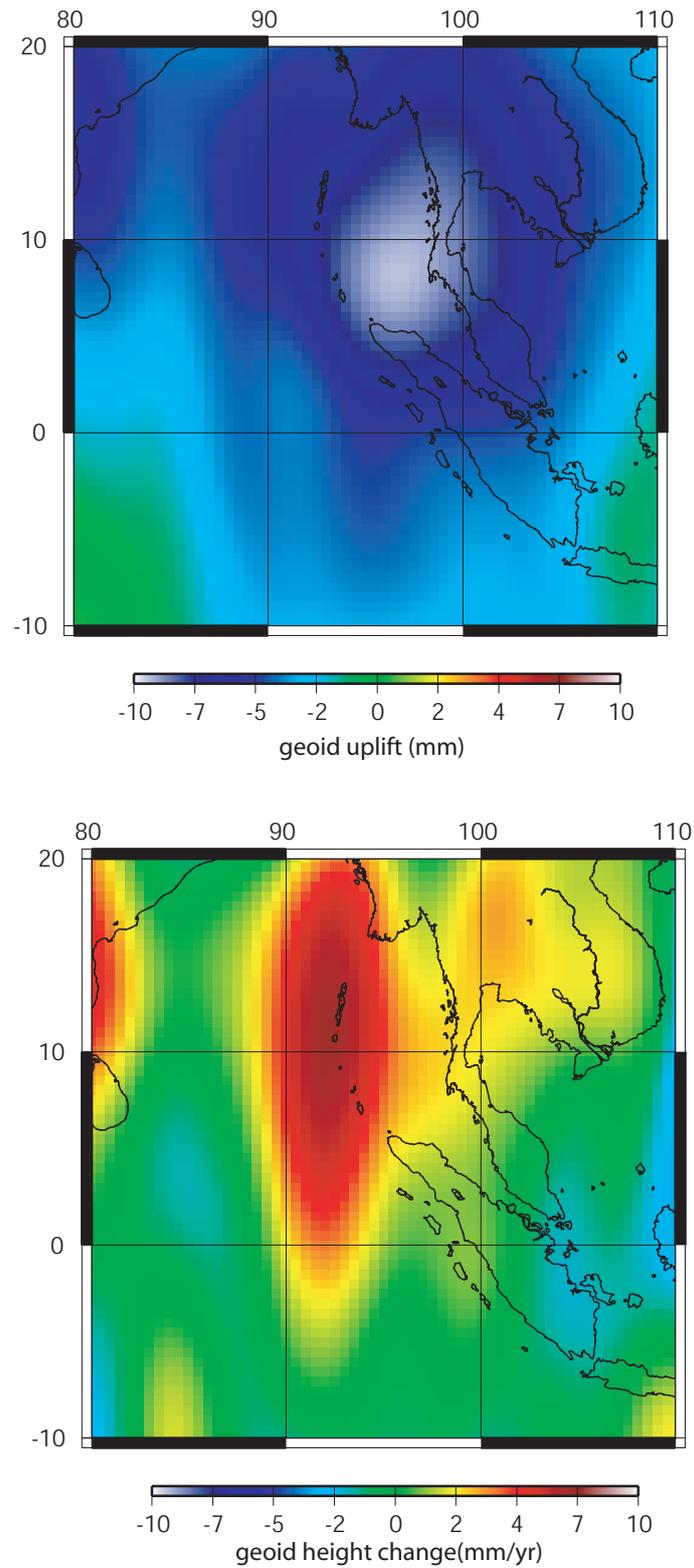


Fig. 35: Geographic distribution of (top) coseismic jump of geoid height and (bottom) 1-year cumulative postseismic geoid height change.

コサイスミックな重力変化に関しては、すでに Han et al.(2006) で隆起・沈降による変形、膨張・圧縮による密度変化によって、重力の増減のパターンが決定されるが、大局的に見ると地殻の膨張による重力の減少が卓越することが報告されている。我々が得たコサイスミックなジオイド高変化からも、地震に伴ってジオイドがへこむことが確認された。一方で、地震後にはどのような重力、ジオイドの変化が生じるのであろう。ポストサイスミックな変動には、(1) アフタースリップ、(2) マントルの粘性緩和、(3) 間隙水の拡散の三つが影響していると考えられており、これまでGPS観測等によって、地震後の変動がこれらの寄与によって説明できることが報告されてきた。

#### 4.3.1 アフタースリップ

例えば、(1) に関しては三陸はるか沖地震が代表的である (Heki et al. 1997)。岩盤に十分に歪が蓄積するとそれを解放しようと断層が一気にずれるが、それだけでは解放しきれなかった歪をゆっくりと時間をかけて滑ることで解放する。1994年に起きた三陸はるか沖地震では、GPS観測から地震後に断層のすべりが1年以上続いていることが検出され、アフタースリップによって解放されたモーメントは、本震で解放されたモーメントと同程度であることが見出された (Figure 36)。

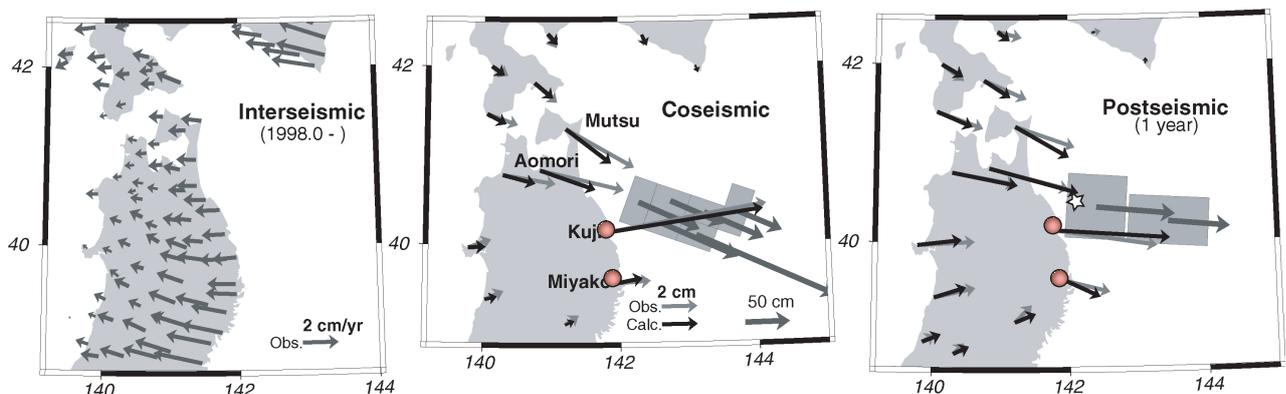


Fig. 36: Coseismic and postseismic displacements due to the 1994 Sanriku-Haruka-Oki Earthquake observed with GPS. The afterslip is considered to have release seismic moment comparable to the main rupture, and have caused surface displacements similar in direction to coseismic jumps (Heki et al., 1997).

アフタースリップは、一般に本震と同じ向きの変動をもたらす、数日から数年程度の期間で生じると報告されている。スマトラ沖地震においても、GPS観測によってコサイスミックな変位と同じ方向のゆっくりとした動きが見られ、これをアフタースリップと解釈すると約1年かけて地震時と同様の大きさの地震モーメントを解放したことが示唆されている (Figure 37)(Hashimoto et al. 2006)。本研究のジオイド高変動でみられたよう

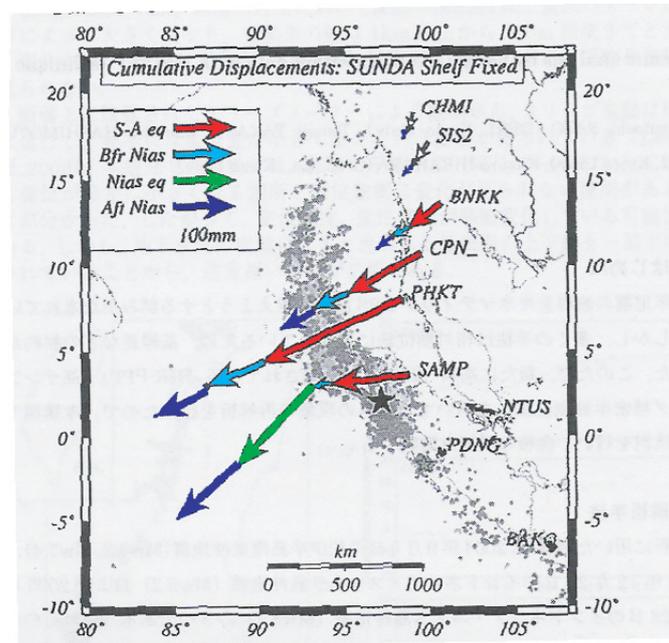


Fig. 37: Co- and postseismic movements of the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake of GPS points in Southeast Asia. The postseismic velocities is similar in the direction to the coseismic displacements (Hashimoto et al., 2006).

な，コサイスミックとポストサイスミックの変動が逆のパターンを示すことは，単純なアフタースリップでは説明がつかないことを意味する．

#### 4.3.2 粘性緩和

また (2) に関しては，Hu et al.(2004) が 1960 年チリ地震から数十年たった現在チリ南部で見られる GPS 点の動きが，粘性緩和によるチリ地震のポストサイスミック変動として説明できることを報告している．現在 GPS 観測により，チリの海岸付近は沈み込むナスカプレートとのカップリングによって陸向きに変動していることが示されている．一方チリやアルゼンチンの南側ではそれと逆の海向きの速度を示している (Figure 38)．彼らは，上部マントルにマックスウェル粘弾性を仮定し粘性を  $2.5 \times 10^{-19} \text{Pas}$  とすると得られた GPS 局の変位はマントルの粘性緩和による予測とよく一致することを示した．スマトラ沖地震に関しても同様の粘弾性構造を仮定すると，マックスウェル時間は 20 年程度になる．GRACE で得られた重力のポストサイスミック変動の時定数は 1 年以下なので，マックスウェル粘弾性モデルでは説明がつかない．別の粘弾性モデルとして，ばねとダッシュポットを並列に組み合わせたフォークトモデルが存在する．この場合粘性はマックスウェル粘弾性に比べて低く仮定することが多いが，基本的にこの粘性は弾性応答の時間遅れを説明するためのものなので地震時と地震後で変動パターンは反転しない．

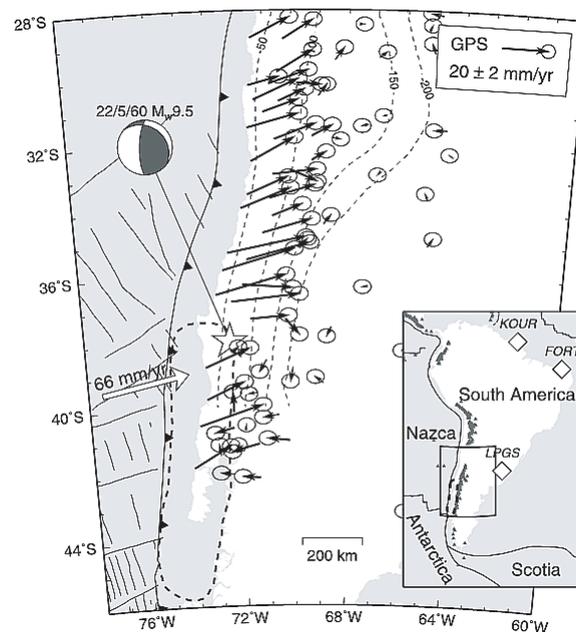


Fig. 38: Present velocities of GPS points in Chile and Argentine. The oceanward crustal movements there are explained by viscous flow of mantle rocks with Maxwell viscoelasticity, induced by the 1960 Chilean Earthquake (Hu et al., 2004).

#### 4.3.3 間隙水の拡散

最後に (3) の間隙水の拡散について考察してみたい。これについては Jónsson et al. (2003) が合成開口レーダ (SAR) 干渉計による地震後地殻変動観測結果を説明するモデルとして報告している。2000 年に起きたアイスランドの横ずれ断層による地震に関して、干渉 SAR によってコサイスミックな変位とポストサイスミックな変位を検出し、得られたパターンが反転していることから、アフタースリップでも粘弾性緩和でも説明ができず、間隙水の拡散によって始めて説明できることをモデル計算により示した (Figure 39)。

また、断層付近の熱水井戸の水位変化も間隙水の拡散と調和的であることを示している。そのモデルによると、断層がずれた結果断層周辺の地殻岩石は圧縮される部分と膨張する部分に四分割され、間隙圧は圧縮されるところで増加し、膨張するところで減少する。地震後、この圧力差を打ち消すように岩石中の水が移動するため、地震時の変動パターンと逆の地表の変位が比較的短い時間スケールで生じると考えられる。これは、我々が得たジオイド高のパターンを説明するのににも有望であると思われる。

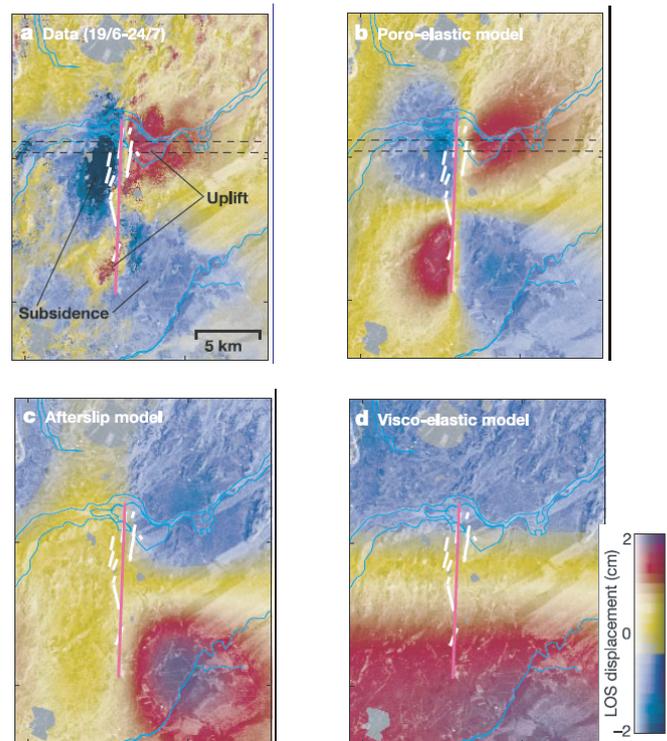


Fig. 39: Comparison between crustal movements observed with InSAR (top left) and those predicted by the pore-elastic (top right), afterslip (bottom left) and visco-elastic models (bottom right). Pore fluid diffusion causes postseismic changes opposite in sense to coseismic ones with relatively short timescales (Jósson et al., 2003).

#### 4.3.4 GRACE から得られた信号の意味

以上3つのポストサイスミック変動の要因を考慮してみると、本研究で得たポストサイスミックなジオイド高変化は、時間的に(2)のマントルの粘弾性緩和はほとんど効かないとすると(1)のアフタースリップと(3)の間隙水の拡散の影響が主に寄与していると考えられる。GPS観測からは、アフタースリップは約1年で地震時のすべりと同程度になることが示唆されており、ジオイド高変化にもこの影響は含まれているはずである。すると、アフタースリップの進行によるジオイド高変化は、地震時の変化と同量であることになる。よって得られたポストサイスミックな変動は、間隙水の拡散による重力変化が大きいと、逆のパターンを示しているアフタースリップの寄与を打ち消し、さらに重力を増加させていると考えることができる。4章の冒頭で述べたように、隆起・沈降による重力・ジオイド高変化と膨張・圧縮による変化は、どちらもOkada(1992)で計算することができる。今後、これらの寄与を計算し、得られたジオイド高変化と比較したい。

Han et al. (2006) では, Okada(1992) を用いて地震に伴う重力変化を計算しているが, 本研究ではやや異なった手法でジオイド高変化を計算してみる. そもそも Okada(1992) では, 半無限弾性体を仮定し, 断層のずれによって生じる内部変形を求めることができる. 断層の大きさ, 地震のメカニズム, すべり量といった地震の断層パラメータを入力すると, 指定した観測点における変位, 歪を計算することができる. Okada(1992) によって得られた地表面とモホ面における変位をそれぞれ  $t_{surface}(x, y)$ ,  $t_{moho}(x, y)$  とすると, 地表面とモホ面における質量変化  $\sigma_{surface}, \sigma_{moho}$  は,

$$\sigma_{surface} = (\rho_{crust} - \rho_{sea})t_{surface}(x, y) \quad (15)$$

$$\sigma_{moho} = (\rho_{mantle} - \rho_{crust})t_{moho}(x, y) \quad (16)$$

と計算できる.  $\rho_{sea}$ ,  $\rho_{crust}$ ,  $\rho_{mantle}$  はそれぞれの密度を示す. 表面, モホ面における隆起・沈降によるスカラーポテンシャル  $U_{uplift}$  は,

$$U_{uplift} = \int \int \frac{G\sigma}{r} dS \quad (17)$$

と表現され, 隆起・沈降によるジオイド高変化  $h_{uplift}$  は,

$$h_{uplift} = U_{uplift}/g \quad (18)$$

と計算することができる. ただし  $g$  は地表面における重力加速度である. また  $r$  は, ジオイド高変化を求める地点と質量の擾乱があった地点  $(x, y)$  の間の距離であり,  $(x, y)$  は一旦緯度経度に直して球状の地球で  $r$  を計算するものとする. また, ひずみ  $u_{xx}, u_{yy}, u_{zz}$  を用い膨張・圧縮による質量変化  $\sigma_{crust}, \sigma_{mantle}$  は

$$\sigma_{crust} = \rho_{crust}(u_{xx} + u_{yy} + u_{zz}) \quad (19)$$

$$\sigma_{mantle} = \rho_{mantle}(u_{xx} + u_{yy} + u_{zz}) \quad (20)$$

であり, 膨張・圧縮によるスカラーポテンシャルは  $U_{dilatation}$  は,

$$U_{dilatation} = \int \int \int \frac{G\sigma}{r} dV \quad (21)$$

となる. これを地表面の重力加速度で割ることで, 膨張・圧縮によるジオイド高変化が計算できる. ただし, ここでも  $r$  は地球の形である球を仮定し距離を計算する. Okada(1992) では半無限媒体を仮定しているが, 現実的な層構造を持つ地球を仮定する場合との変位やひずみの計算値の違いは, 断層の百キロ以内程度の近傍では 1 割程度だと見積もられている (Cummins et al., 1998). また一旦求めた変位や膨張からジオイド高変化を計算する際には球状の地球を仮定しており誤差は生じない. この計算法を用いると, GRACE によって得られた地震に伴う重力変化を考察することができる.

以下に本論文の結論を述べる．

1. 2002年に打ち上げられた重力衛星 GRACE のレベル 2 データを用いて、地球の非季節的な重力場変動の検出を試み、波数領域と空間領域で GPS 速度データと比較を行った．
2. GRACE から得た季節・永年変化成分は Kaula の法則に従い、季節変動成分に関しては球関数で 25 次程度まで、永年変化成分に関しては 20 次程度まで有意であることが示された．
3. GPS 速度データの非プレート運動成分の球関数での表現を試みたが、観測局の分布の不均一のため 4 次程度までしか有意な値が得られなかった．
4. 二次の成分に関して GPS と GRACE の比較を行った．いずれもこれまで予測されていた真の極運動などが予測するパターンと大きく異なることが示された．
5. 高次のノイズを減衰させるフィルターを用いて GRACE データから重力・ジオイドの永年変化成分を推定し、ハドソン湾、グリーンランド、アラスカ、東南アジア、東アフリカ、南アメリカ等で顕著な変化を見出した．
6. 高緯度地域で GPS 速度場と比較したところ、得られたジオイド高変化は氷床融解に伴う固体地球の弾性的・粘性的応答であることが分かった．
7. 東アフリカのジオイド高の減少は干ばつによる土壤水分の減少が反映されていることが示唆されたが、南アメリカでの変動の原因は不明である．
8. 東南アジアのジオイド高には、2004 年のスマトラ・アンダマン地震による地震時、地震後の変動が見える．地震に伴うジオイド高の急な低下に加え、地震後に時定数 0.6 年ほどでジオイドがゆっくりと上昇していることがわかった．地震時、地震後の変動のピークの位置は幾分異なることもわかった．
9. ポストサイスミックなジオイド高変化には、アフタースリップと間隙水拡散が影響していると考えられる．

本研究を進めるにあたり，指導教官である日置幸介教授には様々なアドバイスを頂きここに完成させることができました．こんなに面白いテーマを与えてくれて本当に感謝しています．ありがとうございました．これからもよろしくお願いします．

3号館の方々には，日頃から固体系ゼミなどで研究に対する有益なコメントをいただき，研究に還元することができました．記して御礼申し上げます．また地球惑星科学専攻の同期の方々には，よく気分転換につきあってもらいました．邪魔をすることも多々あったと思いますが，いつも迎えてくれた皆様に感謝の気持ちでいっぱいです．

## 7 参考文献

- Banerjee P., F.F. Pollitz, R. Bürgmann (2005): The size and duration of the Sumatra-Andaman Earthquake from far-field static offsets. *Science* 308, 1769-1772
- Blewitt, G., D. Lavallée, P. Clarke, and K. Nurutdinov (2001): A new global mode of Earth deformation: seasonal cycle detected, *Science*, 294, 2342-2345.
- Chen, J.L., C.R. Wilson, and B.D. Tapley (2006): Satellite gravity measurements confirm accelerated melting of Greenland ice sheet, *Science*, 313, 1958-1960.
- Cox, C.M and B.F. Chao (2002): Detection of large-scale mass redistribution in the terrestrial system since 1998, *Science*, 297, 831-833.
- Crowley, J.W., J.X. Mitrovica, M.E. Tamisiea, J.L. Davis (2006): Land water storage within the Congo Basin inferred from GRACE satellite gravity data, *Geophys. Res. Lett.* , 33, L19402, doi:10.1029/2006GL027070, 2006
- Cummins, P.R., S. Hirano, Y. Kaneda (1998): Refined coseismic displacement modeling for the 1994 Shikotan and Sanriku-oki earthquakes. *Geophys. Res. Lett.* 25, 3219-3222
- Davis, J.L., P. Eloségui, J.X. Mitrovica, and M.E. Tamisiea (2004): Climate-driven deformation of the solid Earth from GRACE and GPS, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L24605, doi:10.1029/2004GL021435.
- Farrell, W.E. (1972): Deformation of the Earth by Surface Loads, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 10, 761-797.
- Fenoglio-Marc, L., J. Kusche, M. Becker (2006): Mass variation in the Mediterranean Sea from GRACE and its validation by altimetry, steric and hydrologic fields, *Geophys. Res. Lett.*, 33 , L19606, doi:10.1029/2006GL026851
- 後藤忠広，大坪俊通，久保岡俊宏 (2005): GPS H-L SST，SLR，KBR による GRACE 衛星の精密軌道決定，「日本版」衛星重力ミッションの実現を目指して
- 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.
- Hashimoto, M., N. Choosakul, M. Hashizume, S. Takemoto, H. Takiguchi, Y. Fukuda, and K. Fujimori (2006): Crustal deformations associated with the great Sumatra-Andaman earthquake deduced from continuous GPS observation, *Earth Planets Space*, 58, 127-139.
- 橋本学・橋爪道郎・竹本修三・藤森邦夫・里村幹夫・伍培明・加藤照之・齊藤亨・丸山隆・大塚雄

- Heki, K., S. Miyazaki, H. Tsuji (1997): Silent fault slip following an interplate thrust earthquake in the Japan Trench. *Nature* 386, 595-597
- Heki, K. (2004): Dense GPS array as a new sensor of seasonal changes of surface loads, *AGU Geophys. Monogr.* 150, IUGG Vol.19, 177-196.
- Heki, K., Y. Otsuka, N. Choosakul, N. Hemmakorn, T. Komolmis, T. Maruyama (2006): Detection of ruptures of Andaman fault segments in the 2004 Great Sumatra Earthquake with coseismic ionospheric disturbances. *J. Geophys. Res.* 111, B09313, doi:10.1029/2005JB004202
- Hu, Y., K. Wang, J. He, K. Klotz, and G. Khazaradze (2004): Three-dimensional viscoelastic finite element model for postseismic deformation of the great 1960 Chile earthquake, *J. Geophys. Res.*, 109, B12403, doi:10.1029/2004JB003163.
- Heflin, M. <ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/mbh/>
- Johannessen, O.M., K. Khvorostovsky, M.W. Miles, L.P. Bobylev (2005): Recent Ice-Sheet Growth in the Interior of Greenland, *Science*, 310, 1013-1016
- Kaula, W.M. (1966): *Theory of Satellite Geodesy, applications of satellites to Geodesy*, Blaisdell Publishing Company.
- Larsen, C.F., R.J. Motyka, J.T. Freymueller, K.A. Echelmeyer, E.R. Ivins (2005): Rapid viscoelastic uplift in southeast Alaska caused by post-Little Ice Age glacial retreat, *Earth and Planetary Science Letters* 237, 548-560
- Mitrovica, J.X., G.A. Milne, and J.L. Davis (2001): Glacial isostatic adjustment on rotating earth, *Geophys. J. Int.*, 147, 562-578.
- Munk, W.H., and G.J.F. MacDonald (1960): *The Rotation of The Earth*, Cambridge University Press, 23-37.
- 日本測地学会 (2004) 「測地学」, 日本測地学会創立 50 周年記念 CD-ROM テキスト.
- Okada, Y. (1992): Internal deformation due to shear and tensile faults in a halfspace, *Bull. Seism. Soc. Am.* 82, 1018-1040.
- Tamisiea, M.E., E.W. Leuliette, J.L. Davis, J.X. Mitrovica (2005): Constraining hydrological and cryospheric mass flux in southeastern Alaska using space-based gravity measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L20501, doi:10.1029/2005GL023961
- Tanioka, Y., Yudhicara, T. Kusunose, S. Kathirolu, Y. Nishimura, S. Iwasaki, K. Satake (2006): Rupture process of the 2004 great Sumatra-Andaman earthquake estimated from tsunami waveforms. *Earth Planets Space* 58, 203-209
- Tapley, B.D., S. Bettadpur, J.C. Ries, P.F. Thompson, and M.M. Watkins (2004): GRACE measurements of mass variability in the Earth system, *Science*, 305, 503-505
- Thompson, L.G., E.M. Thompson, M.E. Davis, K.A. Henderson, H.H. Brecher, V.S. Zagorodnov, T.A. Mashiotta, P. Lin, V.N. Mikhalenko, D.R. Hardy, and J. Beer (2002): Kilimanjaro ice core records: Evidence of Holocene climate change in tropical Africa, *Science* 298, 589-593
- Vigny, C., W.J. Simons, S. Abu, R. Bamphenyu, C. Satirapod, N. Choosakul, C. Subarya, A. Socquet, K. Omar, H.Z. Abidin, and B.A.C. Ambrosius (2005): Insight into the 2004 Sumatra-Andaman earthquake from GPS measurements in southeast Asia, *Nature*, 436, 201-206

山本圭香, 福田洋一 (2004): やさしい地球重力場決定, 地球の「流れ」を見る衛星重力ミッション 48

Yoder, C.F., J.G. Williams, J.O. Dickey, B.E. Schutz, B.J. Eanes, and B.D. Tapley (1983):  
Secular variation of the Earth's gravitational Harmonic  $J_2$  coefficient from Lageos and  
non tidal acceleration of Earth rotation, Nature 303, 757-762.