HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	GRACEでみた地球重力場の非季節性変動とGPS局の速度場について
Author(s)	小川, 涼子; 日置, 幸介
Citation	測地学会誌, 52(4), 297-308
Issue Date	2006-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/33903
Type	journal article
File Information	ogawa_sokuchiV3.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

GRACEでみた地球重力場の非季節性変動とGPS局の速度場について

小川　涼子[1]，日置　幸介[2]

[1] 北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻
[2] 北海道大学理学研究院自然史科学専攻

On the Non-seasonal Gravity Changes From GRACE and Velocities of GPS Stations

Ryoko Ogawa[1], Kosuke Heki[2]
[1]Div.Earth Planet. Sci.,Hokkaido Univ.,N10 W8,Kita-ku,Sapporo 060-0810,Japan
[2]Dept. Natural History Sci.,Fac.Sci.,Hokkaido Univ.

概 要

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 we 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 15 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 4. Correlation between the Stokes' coefficients from the two techniques did not show good significance. Then we tried to compare GRACE and GPS in space domain. From the secular gravity change map up to degree 10 recovered by GRACE, 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 ice melting. Gravity changes in Southeast Asia were found to reflect the coseismic jump in the gravity field associated with the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake rather than climate-driven secular decrease.

1　はじめに

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．これらの変動は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検出されてきた．特に1980年代には軌道決定に衛星レーザ測距 (Satellite Laser Ranging, SLR) が用いられることで精度が格段に向上し，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）．さらに空間スケールの小さい重力場変動を捉えることを目的としたのが，2002年3月に打ち上げられた重力計測のための衛星 GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment) である．

GRACE 衛星は 450km の軌道高度で飛行し，双子衛星間の距離変化をマイクロ波で計測する．比較的低い軌道高度のおかげで地球重力の短波長成分の減衰が小さいことから，高次までの重力観測が可能となった．また衛星内に加速度計と GPS を搭載することで，大気の抵抗などの非保存力による加速度の補正や軌道の決定が高精度でできるような工夫がされている．この衛星のおかげで従来の SLR で決定される重力場の空間解像度では不可能であった波長数 100km 以上の局地的な重力場変動を捉え，次々と研究報告がなされている．例えば Tapley et al. (2004) は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い一致を示すことを報告した．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 月のスマトラー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．

一方で，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は，GPS 観測から数多くの報告がなされている．例えば，2004 年 12 月のスマトラー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）．また Davis et al. (2004) は，ブラジルの GPS 観測点で得られた上下方向の振幅と GRACE から得られたアマゾン川流域の季節変動を比較し，それらが良く一致することを示した．季節変動成分に関しては，重力変化と変位は弾性ラブ数 h_l,k_l とすると $h_l/(1+k_l)$ を介して両者を簡単に比較することができる (Davis et al., 2004).

このように最近では地殻変動観測と重力変動観測と観測対象が重なりつつあり，両者を比較する研究も報告されている．先行研究を表でまとめてみると (Table1)，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しては比較研究はあまり報告されていない．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 からは報告されていない．そこで本研究では，GRACE から得られる重力データから全球的な変動を検出し，これまで比較されていない時間スケールにおいて GPS データと GRACE データを比較し考察する．

2　データおよび解析

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公開されている (http://podaac.jpl.nasa.gov/grace/data_ access.html)．本研究では GFZ による 2002 年 4 月から 2006 年 5 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 150 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，2003 年は欠測が多く，データセットは 39 個 (2002 年 4,8,11 月,2003 年 2,3,4,5,7,8,9, 10,11,12 月,2004 年 2,3,4,5,6,7,8,10,11 月,2005 年 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12 月,2006 年 1,2,3,4,5 月) である．各月のストークス係数 C_{nm},S_{nm} を足し合わせそれぞれの平均をとり，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} の変動成分を得た．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．

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.Heflin 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，重力場の変化と地表変位を関係づける式は以下のようになる．

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

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

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

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成分しか分かっていない (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，高次まで知られている弾性ラブ数を用いた．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．

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．この物理的な意味はまだ不明であるが，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．一方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 20 次程度まで，永年変化成分に関しては 15 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 (Figure1)．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．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（Figure2）．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，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．

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か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 $1mm/yr$ に達する．

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 (Figure3)．P_{20} 成分の大きさはSLR観測による $\dot{J}_2$ 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ため $C_{21}, S_{21}, C_{22}, S_{22}$ 成分のみを取り出し，GPSから得られた結果と定量的に比較するために，重力変化を潮汐ラブ数 (Munk and MacDonald, 1960) を用いて速度場に変換した（Figure4）．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潮汐ラブ数を用いたため粘性を考慮していないことが影響しているのであろう．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ば地球内部粘弾性に関する物理的モデルを考察することができるとも言える．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．

4　10次までの永年重力場変動

既に示したように，GRACEから有意な永年変化成分が約15次程度まで得られることが分かった．本研究では10次までの永年重力場変動を以下のように復元することにした．地表での重力の時間変化 $\dot{g}$ とジオイド高の時間変化 $\dot{h}$ はどちらも下式の通り，得られたストークス係数の時間変化から計算することができる．本研究では重力変化で以下の議論を進めることとする．

$$\dot{g} = \frac{GM}{R^2} \sum_{n=0}^{n_{max}} (n+1) \sum_{m=0}^{n} (\dot{a}_{nm} \cos m\phi + \dot{b}_{nm} \sin m\phi) P_n^m(\cos\theta) \tag{4}$$

$$\dot{h} = R \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^{n} (\dot{a}_{nm} \cos m\phi + \dot{b}_{nm} \sin m\phi) P_n^m(\cos\theta) \tag{5}$$

Figure5から，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，南アメリカに最大約 2μ gal/yr の重力の増加や減少が確認できる．なおジオイド変化も同様のパターンを示す（Figure6）が，上の式に示す $n+1$ の係数の違いでより低次の項が強調された図になっている．それぞれの重力変化の目玉の中心において得られた一ヵ月毎の重力変化の時系列をFigure7に示すが，季節変動成分に加えて永年変化が顕著である．本研究ではGFZの解析結果を用いたが，UTCSRの2002年4月から2006年2月までの43のデータセットを用いて同様の解析も行った．UTCSRの結果もGFZと同様に15次程度まで有意な永年変化成分値を示した (Figure8)．10次までの重力場の時間変化をプロットしてみると，南極における重力変動などGFZ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重力変化の目玉が見られた．本研究ではこれらの地域を中心に考察を進める．

4.1 氷床域における重力変動

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現在大陸氷床が縮小していることがわかっているが，GRACE データからも氷河の大規模な融解が重力の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う大地の隆起による重力増加もあるはずであるが，マントルの粘性による時間遅れがあ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的減少はこういった従来の考えが正しいことを確認するものである．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，大地の隆起に伴う正の重力変化を示した．地上での絶対重力観測による時間変化では観測点が隆起していることによる重力の減少が顕著に見られているが，GRACE のような衛星観測ではそのような影響がないためマントル物質の周辺からの流れ込みに伴う質量の増加のみを捕らえることができるのである．

次にこれらの重力変化と GPS 速度データを比較してみる（Figure9）．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重力変化が負であるのに対し鉛直速度は隆起（正）を示す．一方 PGR が進行しているハドソン湾では重力変化も鉛直速度の両方が正を示す．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リバウンドを，後者では氷床はすでに融解し終わっているがマントルの粘性によって PGR として隆起が現在も継続しているのである．ハドソン湾同様に PGR に伴う変動が期待されるスカンジナビア半島においては波長が短いため空間解像度が低い 10 次までの重力変化の図では顕著な増加は見えなかった．

4.2 低中緯度における重力変動

GPS 観測によって 1960 年のチリ地震に伴い現在もなお北側では陸向きの，南側では海向きの余効変動が継続していることが報告されている (Hu et al., 2004)．南アメリカでは特に南半分で顕著な季節変動に加えて有意な重力の減少が見られるが，チリ地震の余効変動と何らかの関係があるかもしれない．また東アフリカでは中心で約 2μgal/yr に達する重力減少の目玉が見られる．東アフリカでは地球温暖化に伴う激しい干ばつが続いており，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)．氷河の融解や干ばつによる土壌水分の減少がこの地域の重力の減少に影響していると考えられる．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土壌水分量の季節変化を計算することができるが (Heki, 2004)，今後適当な気象データを探して東アフリカの重力の減少について考察していきたい．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見てみると永年的な減少ではなくスマトラ沖地震に伴う重力の急激な減少によるものであることがわかる．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（Figure7 左下），最大で約 9μgal の重力のジャンプが得られた（Figure10）．ここでは地震前後で永年変化成分と季節変化成分を不変として地震時の重力変化を推定した．しかしすでに GPS 観測からは，地震時と同じ方向に余効すべりが続いていることが報告されている (橋本他, 2006)．今後は，地震前後の永年変化パターンの変化として重力データからもスマトラ沖地震の余効変動を検出して GPS による変位データと比較していきたい．

5 まとめ

我々は GRACE の重力データと GPS の速度データのそれぞれについて，低次の球関数で表される非季節性変動成分の検出を試みた．GRACE からは次数 15 次程度まで有意な値が得られたが，GPS からは観測点配置が不十分であったため有意な値は 4 次程度までしか得られなかった．GRACE データからは進行中の氷床融解や PGR による重力の増減や 2004 年スマトラ沖地震に伴う変動など，グローバルな変動に加えて局地的な重力変化を捉えることができた．また GPS データと比較することで，氷床域の変動は今後地殻

変動と重力変化の二つの観点から研究できることになる． GRACE はもっぱら陸水の季節変化に現在大きな成果を挙げているが，ここで議論したように局地的な地殻変動を検出する可能性が開けつつあり，今後は地殻変動観測装置として役割を果たすことも期待できる．数 $100km$ 以上の空間波長さえあれば GRACE は GPS では見えないほどのわずかな地殻変動を検出することができるため，GPS 観測点の少ない地域の様々な変動を捉えるのに有用であるといえよう．また GPS 点が密に展開されている地域では，同一の現象を GPS と GRACE という異なる観測データでみることで地球内部粘弾性構造を定量的に研究することができる．今後，地殻変動研究の更なる発展のためにも重力変化と同時に解釈することが重要になってゆくであろう．

参考文献

Blewitt,G., D. Lavallee, 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 inthe terrestrial system since 1998, Science, 297, 831-833.

Davis, J.L., P. Elosegui, 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. Soace Phys., 10, 761-797.

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., M.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・大塚雄一 (2006): スマトラ地震の余効変動とその後，日本地震学会 2006 年度秋季大会.

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.

Hu, Y., K. Wang, J. He, K. Klotz, and G. Khazaradze (2004): Three-dimentional 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/

Kaula, W.M. (1966): Theory of Sattelite Geodesy, applications of satellites to Geodesy, Blaisdell Publishing Company.

Mitrovica, J.X., G.A. Milne,and J.L. Davis (2001): Glacial isostatioc adjustment on rotationg 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 halfsoace, Bull. Seism. Soc. Am. 82, 1018-1040.

Tamisiea, M.E., E.W. Leuliette, J.L. Davis, and 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

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. Hendeson, 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

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

	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: Previous study about global and regional crustal deformation

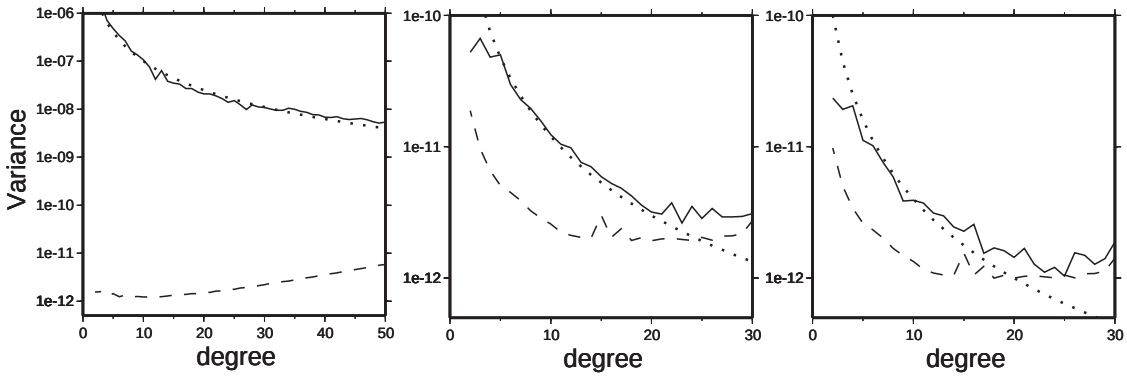


Fig. 1: Degree variances from GRACE (left) static, (middle) annually changing, and (right) secularly changing gravity filed, Solid and dashed curves denote signals and errors, respectively. Errors were obtained a posteriori from post-fit residuals of individual coefficient time series. Dotted curves show the Kaula's rule (proportional to $1.6 \times 10^{-9}/n^2$,$4.0 \times 10^{-10}/n^2$, respectively).

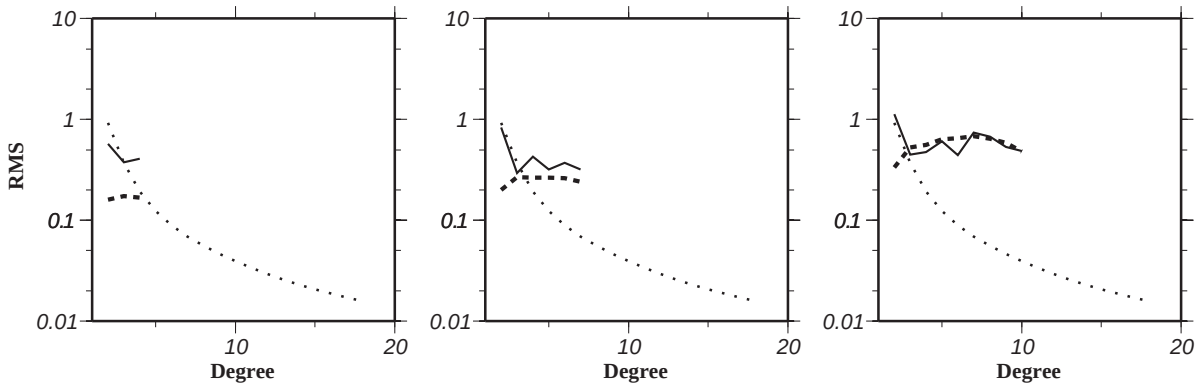


Fig. 2: Degree variances from GPS (left) estimated up to degree/order 4, (middle) up to degree/order 7, and (right) up to degree/order 10. Solid and dashed curves show signals and errors, respectively. Dotted curve show the Kaula's rule calculated by converting secular gravity changes from GRACE into surface velocities using Love numbers.

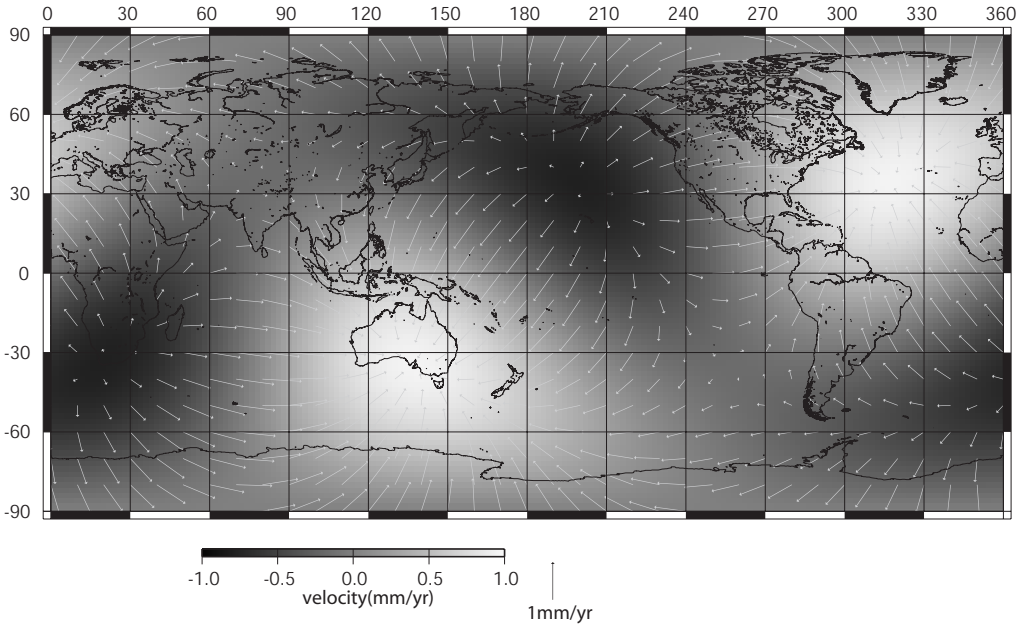


Fig. 3: Estimated degree 2 non-plate-tectonic secular velocity field from GPS. Degree 2 order 0 component is not included.

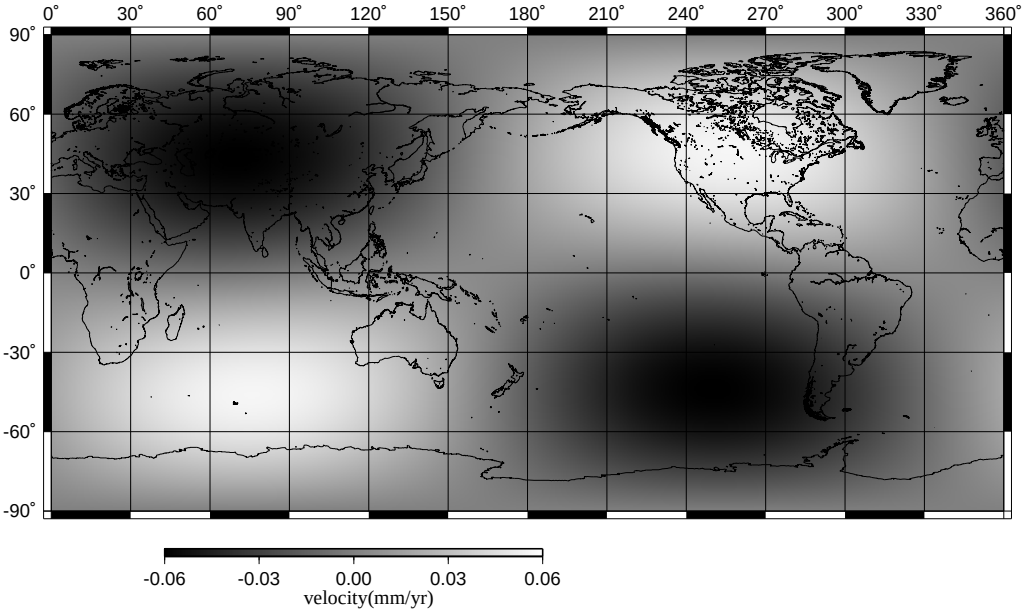


Fig. 4: Degree 2 secular velocity field converted from time-variable gravity field from GRACE using tidal Love numbers. Degree 2 order 0 componet is not included.

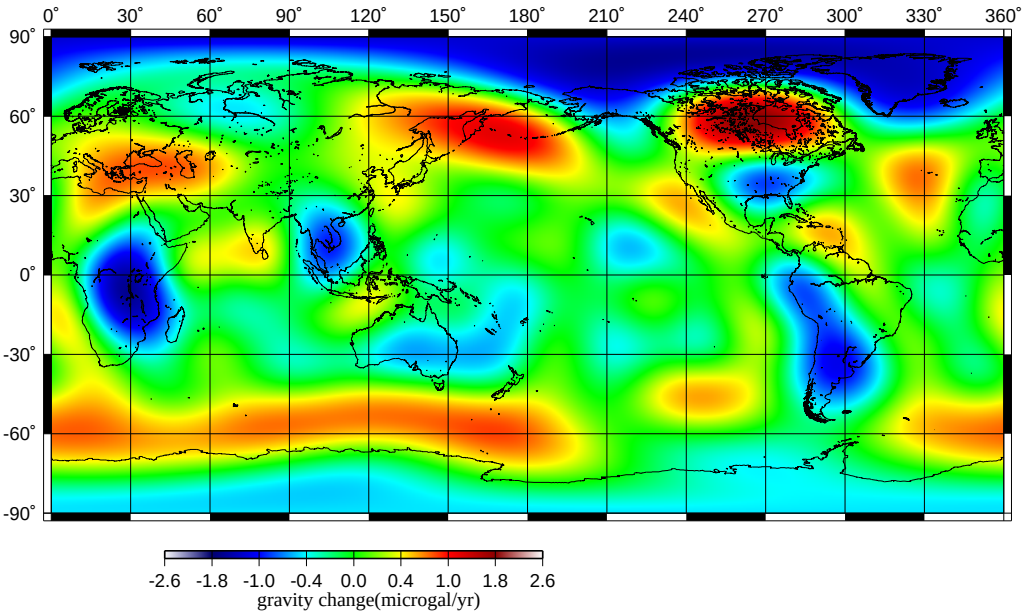


Fig. 5: Secular gravity changes by GRACE (up to degree/order 10). Clear gravity variations are seen in the Hudson Bay (Canada), Alaska, Greenland, South America, Southeast Asia, and East Africa.

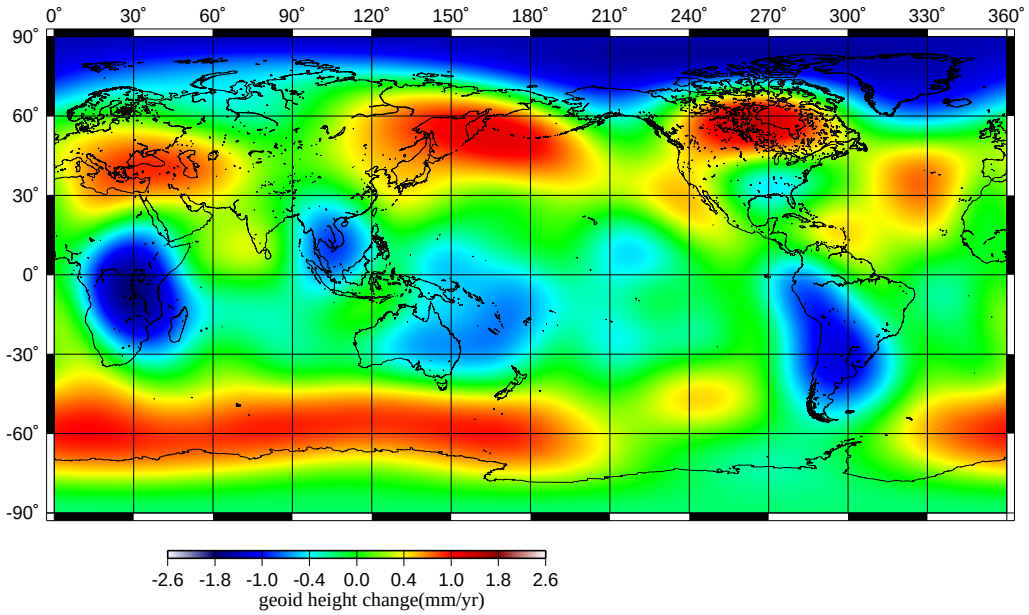


Fig. 6: Secular geoid height changes (up to degree/order 15). This map has the pattern fairly similar to the secular gravity changes in Fig.5.

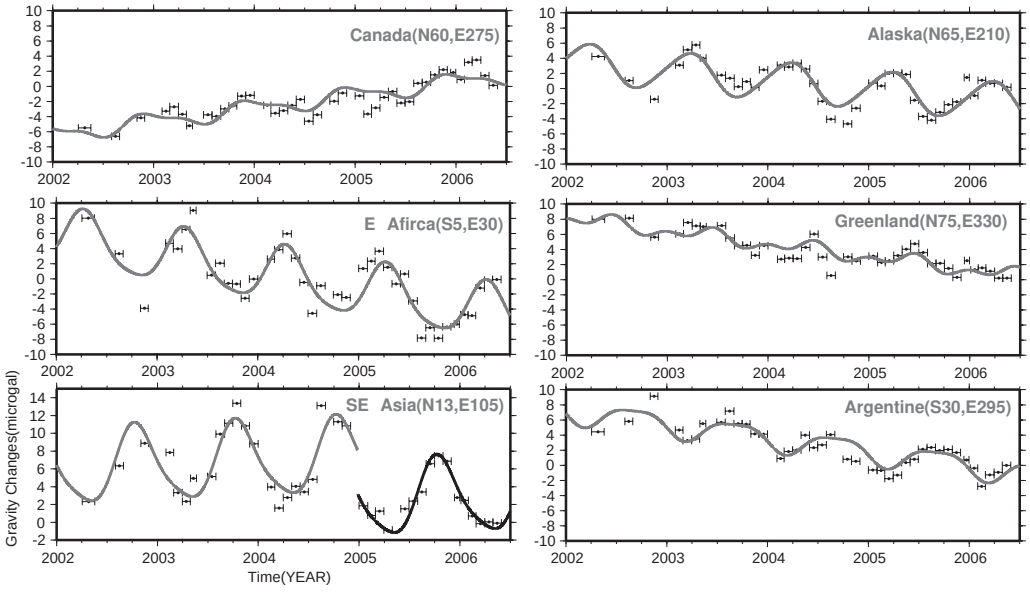


Fig. 7: Time series of gravity changes in Hudson Bay, Alaska, Greenland, South America, East Africa, and Southeast Asia. Solid circles show monthly gravity values (relative to reference values) and error bar indicate periods represented by individual data. Solid line is modeled by linear, annual and biannual components. As for Southeast Asia, a clear gravity jump is seen associated with the 2004 great Sumatra-Andaman earthquake. There, we estimated different offset before and after 2004/12/26 while other components are assumed same throughout the period.

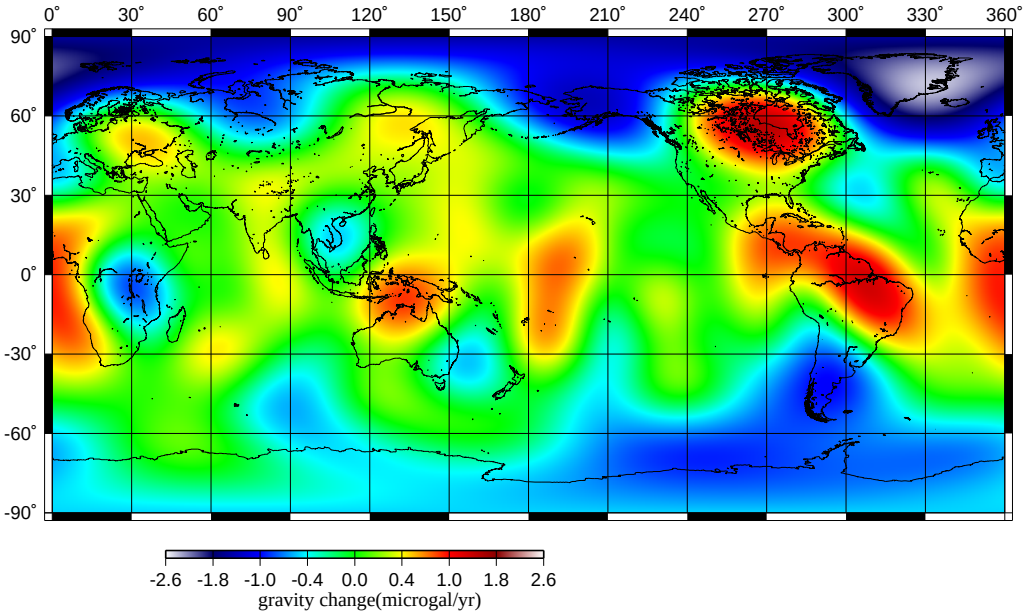


Fig. 8: Secular gravity changes by GRACE from UTCSR (up to degree/order 10). When compared with the gravity map from GFZ, significant differences are seen in Antarctica and Pacific Ocean. However, signals in high latitude regions with on-going and past ice melting and in mid-low latitude show fairly similar patterns to fig. 5.

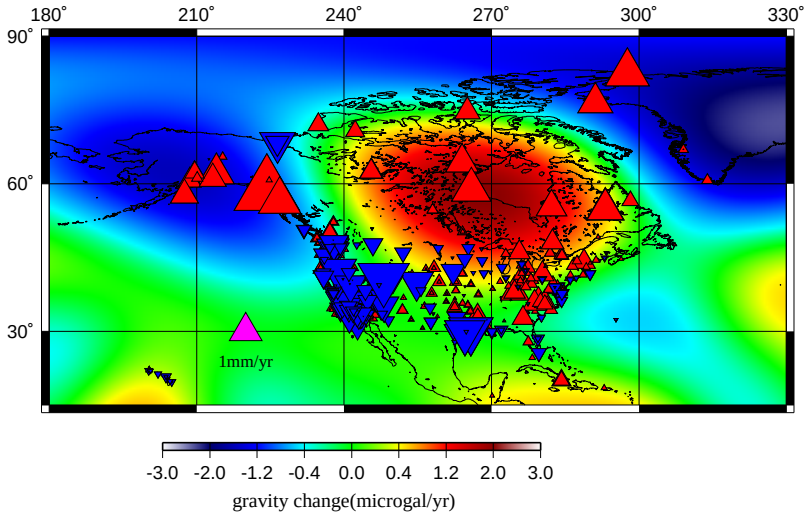


Fig. 9: Comparison between secular gravity changes (up to degree/order 10) and velocities of GPS stations. Color shows estimated gravity changes while triangles shows observed GPS velocities. Red and blue triangles show uplift and subsidence,respectively. The sizes of traiangles indicate vector lengths.

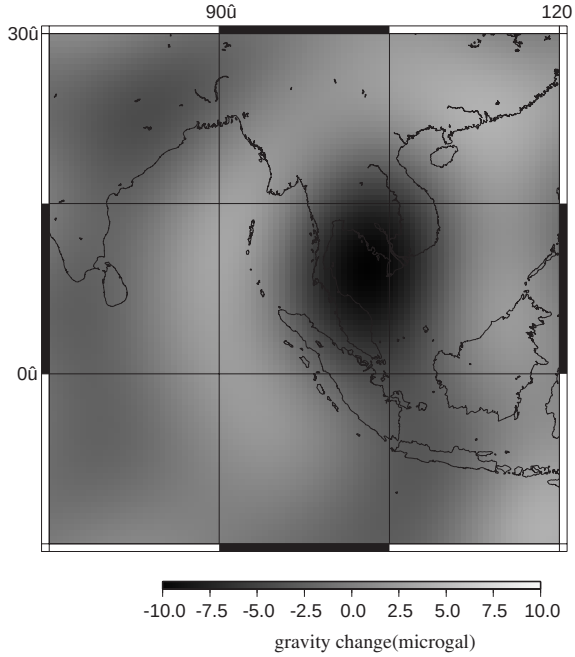


Fig. 10: Coseismic gravity changes of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake, estimated using coefficients up to degree/order 20.