

非プレートテクトニクス起源の地球の大規模変形について

The Earth's global deformation of non-plate-tectonic origin

日置 幸介^{*1}, 小川 涼子^{*2}

K. Heki^{*1}, R. Ogawa^{*2}

^{*1} 北海道大学理学研究科地球惑星科学専攻, Div. Earth Planet. Sci., Hokkaido Univ.

^{*2} 北海道大学理学部地球科学科, Faculty of Sci., Hokkaido Univ.

Email: ^{*1}heki@ep.sci.hokudai.ac.jp ^{*2}ryo@ep.sci.hokudai.ac.jp

Abstract:

Postglacial rebound (PGR) gives rise to far-field (global) deformation of the Earth in addition to near-field crustal movements characterized by the uplift of the glaciated region and subsidence of the peripheral bulge. Mass redistribution due to PGR causes the shift of the Earth's principal axes of inertia resulting in slow secular movement of the pole. The equatorial bulge tries to adjust to the new pole position, and this also causes secular deformation of the Earth. These effects, together with hydro-isostatic adjustment, causes sub-millimetre to millimetre per year level movement of the Earth's surface, and slightly modifies crustal velocity field dominated by plate tectonics. Here we try to detect such deformation using precise velocity data of worldwide continuous GPS (Global Positioning System) points.

1. 後氷期回復による地球の大規模な変形：PGR と TPW

自転に伴う遠心力ポテンシャルのために地球の形が扁平な回転楕円体(oblate spheroid)になっていることは、かつてニュートンが予測しフランスの国家プロジェクトとしての測量事業によって確認されたことが知られている[1]。自転による赤道の引っ張りの度合いを示すパラメータとして、地球重力場ポテンシャルを球関数展開したとき二次の帯球関数 P_{20} (緯度を θ とすると $(3\sin^2\theta-1)/2$ で表される)の係数となる C_{20} (oblate spheroidでは負になる)に $-\sqrt{2n+1}$ をかけた(n は次数) J_2 ($\equiv -\sqrt{5} \times C_{20}$)がよく用いられる。 J_2 の永年の減少(すなわち赤道の引っ張りの減少)は、1980年代に測地衛星の衛星レーザ測距によって軌道要素の変化(昇交点経度が移動する速度の変化分)から見出された[2]。これは後氷期回復(Post-glacial Rebound, PGR)による高緯度地方の隆起が、赤道の引っ張り具合を相対的に減らしていることを意味する。最近では J_2 以外の高次項($J_3 \sim J_5$)の時間変化[3]や、1990年代後半に J_2 の減少が突然鈍ったこと[4]なども知られている。

過去二十年の平均的な dJ_2/dt は -2.8×10^{-11} /年と考えられている[4]。一般に地形を球関数展開したときの係数 a_{nm}, b_{nm} と重力場ポテンシャルの展開係数(ストークス定数) C_{nm}, S_{nm} の間には天体の密度が一様なら $C_{nm}, S_{nm} = 3/(2n+1) \times a_{nm}, b_{nm}$ の関係があり、天体が密度成層していれば係数はより大きくなる[5]。従って観測された C_{20} ($\equiv -J_2/\sqrt{5}$)の永年変化が地球の形の変化を反映したものと考

えると、少なくともその5/3倍の $P_{20}(\sin\theta)$ の形の上下変位があるはずである（重力変化を地球の形の変化と解釈しているだけなのでラブ数は出てこない）。地表が緯度経度の関数 $F(\theta,\phi)$ の形に従って上下運動すれば、それぞれ $dF(\theta,\phi)/d\theta$ と $(1/\sin\theta)dF(\theta,\phi)/d\phi$ に比例した北向きおよび東向きの水平変位が生じる。 $dP_{20}(\sin\theta)/d\theta=(3/2)\sin 2\theta$ であるため、衛星の観測で得られた J_2 の減少(C_{20} の増加)による水平速度は北半球と南半球でそれぞれ北むきと南むき、緯度45度で最大となり、相対値でおよそ0.4 mm/yrとなる水平変位をもたらす。

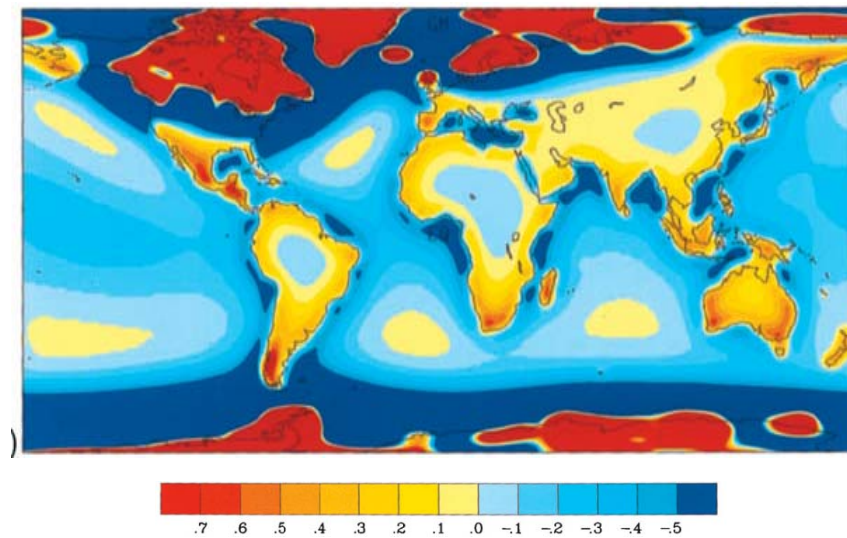
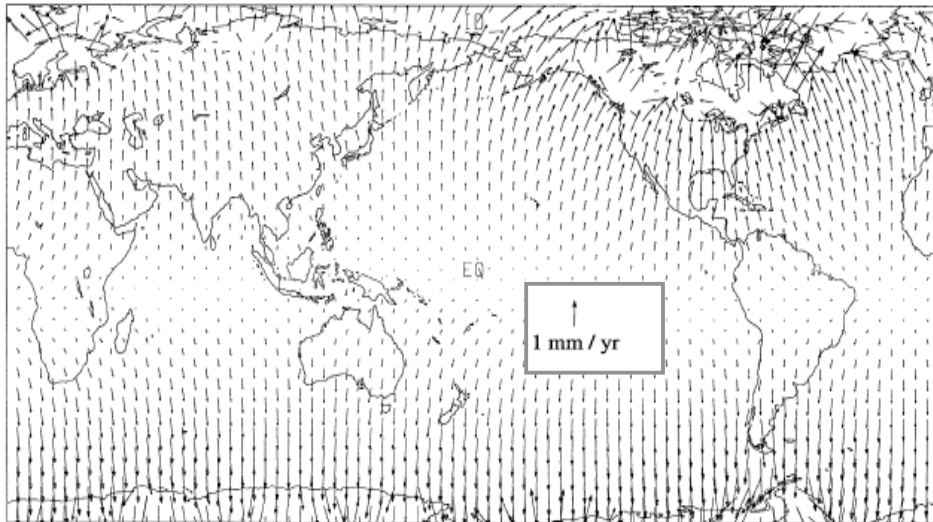


図1 PGR に伴う氷床の後退と海洋荷重の変化から計算された地表の水平速度（上）と上下速度（下） [6]。カラスキームの数値の単位は mm/yr。

PGR による地殻変動を推定するためには一般に氷床荷重の減少と氷床が解けて生じた水の増加と海底の上下運動にともなう海水荷重の再分配を考慮しなくてはならない。氷床後退の歴史と適当な地球の粘弾性構造を仮定して、地球表面の質量再分配に伴う上下および水平速度を Mitrovica

et al. [6]が計算したものを図1に示す。それらの速度には球関数における P_{20} 成分 (J_2 の時間変化) だけでなく、高次の zonal な成分 ($J_3 \sim J_5$ の時間変化) や non-zonal な (経度依存性をもつ) 成分などの様々なものが入っているため複雑な様相を示しているが、氷床からある程度離れると基本的には北半球と南半球でそれぞれ北向きと南向きの、 J_2 の減少に伴う成分が主であることがわかる。

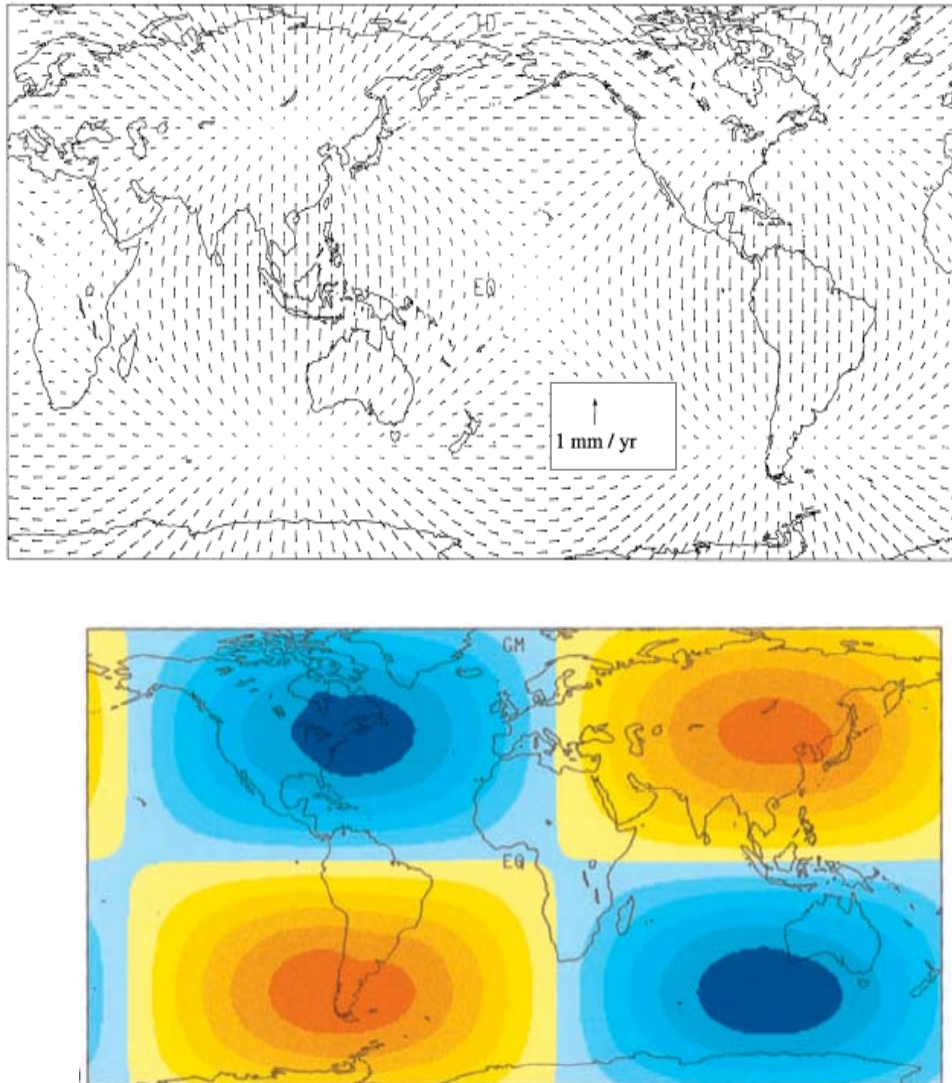


図2 PGRに起因する極の永年移動(TPW)から計算された地表の水平速度(上)と上下速度(下)。

Mitrovica et al. [6]による。上下変動のカラースキームは図1と同じ。

Mitrovica et al. [6]は、これらの表面荷重の影響に加えて、質量再分配が地球の慣性主軸に与える影響を評価し、真の極移動 (True Polar Wander, TPW) が地球にもたらす変形を考慮することが重要であることを指摘した。北極はおおむね海洋地域なので北半球の氷床はいずれも極軸からややずれて存在する。後氷期回復に関わるのは北米のLaurentide氷床と北欧のFennoscandia氷床の二大氷床であるが、前者のサイズがより大きいいため両地域のPGRによる隆起によって慣性主軸は北米の方向にゆっくり移動する。現在の年周およびチャンドラー極運動の中心(平均極)が約百年前に国

際緯度観測事業(ILS)開始当時に定義された極位置から零点数秒角ずれているのはこの慣性主軸の移動を示している[7]。極が動くとき遠心力ポテンシャルによる赤道の張り出しの位置も移動する。これによる上下変位は経度 ϕ の基準を極運動の方向にとると $P_{21}(\sin\theta)\cos\phi$ に比例する形となり、それに伴って P_{20} の時と同様にその勾配 $\nabla(P_{21}(\sin\theta)\cos\phi)$ に比例する水平変位が生じる。Mitrovica et al [6]の計算結果(図2)によるとTPWによる水平速度も零点数mm/yrと、表面荷重の変化による変位速度と同じオーダーとなる。

2. プレート運動との同時推定

地表の水平運動を支配するプレート運動およびそれに起因するプレート境界の変形は年間数 cm に及び、1 で述べた非プレートテクトニクス起源の変位速度より二桁大きい。従って PGR や TPW によるグローバルな変位場を捉えるためには、GPS 等で観測された局速度のプレート運動からのわずかなずれを議論しなくてはならない。逆にいえば従来のプレート運動のモデル化では PGR/TPW を考慮していないことよって太平洋プレートやユーラシアプレートなどの大きなプレートの運動パラメータを推定するにあたって収束を悪化させている可能性も考えられる。

プレート運動は個々のプレートについて回転運動の中心(オイラー極)とそのまわりの回転角速度という三種類のパラメータでモデル化される。これらのパラメータは、(1)海嶺(プレートの発散境界)における磁気異常から得られた拡大速度、(2)海溝(プレート収束境界)におけるプレート間地震のすべりの向き、(3)トランスフォーム断層(プレートのすれ違い境界)の走向の三種類のデータを組み合わせて、過去数百万年という地質学的な時間窓における平均として推定されてきた。RM1 [8]、RM2 [9]、NUVEL1 [10]、NUVEL1a [11]等のモデルの系譜がこの系統に属する。パラメータの推定に用いられる(1)~(3)のデータはいずれもプレートの相対的な動きに関するものであるため、これらから得られるモデルもプレートの相対運動に関するものとなる。それらに何らかの仮定を付加することによりプレートの絶対運動モデルに変換できるが、測地学では一般にプレート全体の地球中心まわりの回転の合計をゼロにする(no-net-rotation)拘束条件を導入した nnr-NUVEL1 [12] (地磁気逆転タイムスケールの改訂の補正をしたものは nnr-NUVEL1a と呼ばれる)が地上基準座標系の絶対速度を与える標準モデルとされている。

最近では VLBI(超長基線電波干渉法)、SLR(衛星レーザ測距)、GPS(全地球測位システム)などの宇宙測位技術で測地学的な時間スケールにおけるプレート運動のパラメータの推定が行われるようになり、Sella et al. [13] による REVEL や、より新しいデータをとりいれた Prawirodirdjo & Bock [14]によるモデルが知られている。

非プレートテクトニクス起源の速度場を求めるためには、(1)高精度の速度データを用い、かつ(2)プレート運動による速度成分を精度よく取り除く必要がある。本研究ではJPLのM. HeflinがGIPSYソフトウェアで単独精密測位法によって求めたGPS局速度をウェブ上で公開しているもの[15]を速度データとして用いる(図4、図5上)。また既存のプレート運動モデルは用いずにPGRやTPWによる非プレート運動起源の速度成分とプレート運動パラメータを同時に推定するという方針をとった。PGRによる速度場は様々な高次項を含むが、ここでは J_2 の時間変化に相当する速度場($\partial P_{20}/\partial\theta$)に相当する速度成分、北半球と南半球でそれぞれ北向きと南向きで $\sin 2\theta$ に比例)で代表させて推定した。またTPWに伴う水平速度場の南北、東西成分はそれぞれ $-\cos 2\theta\cos\phi$ 、 $\sin\theta\sin\phi$ に比例する速度成分として推定した。ここで ϕ は現在の極移動

の方向(西経??度)から測った経度である。一般にPGRやTPWによる水平速度場は鉛直速度場という「スカラー場」の勾配に比例するため静電場と同様に回転成分を持たないため、オイラー極の周りの回転で記述されるプレート運動との分離性は良いはずである。推定に用いる局は、境界近傍でのプレート変形やPGRをもたらししているLaurentide, Fennoscandia両氷床の近傍を避けなければならないが、本研究では原則として[14]でプレート運動パラメータの推定に用いられている局を選んで用いた。またPGRやTPWによる速度場は鉛直成分も持つが、ここでは水平成分のみを考えた。

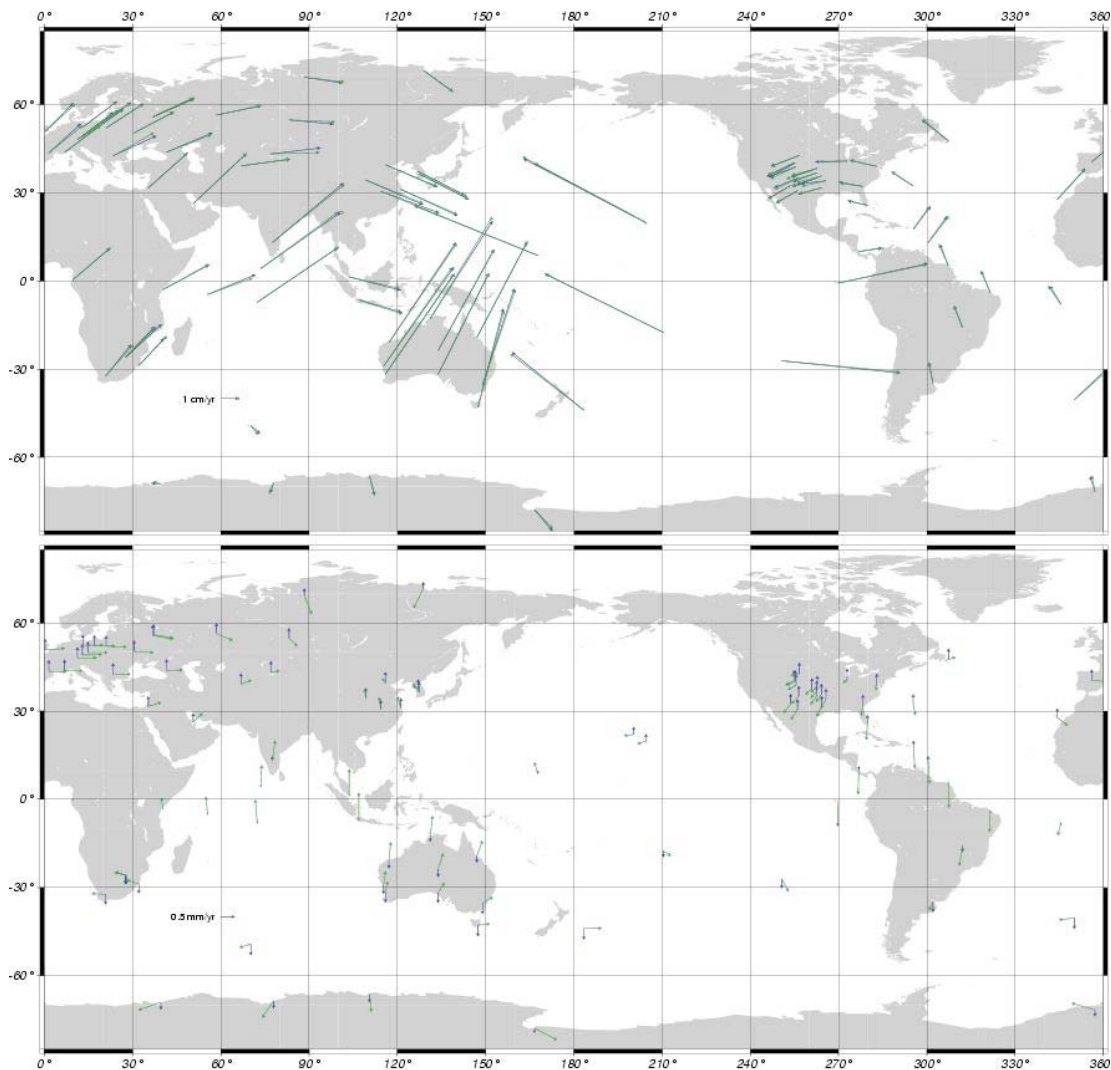


図 4. 上は GPS によって観測された世界各局の水平速度(青)と、本研究で推定されたオイラーベクトルによるプレート運動と非プレートテクトニクス起源の速度成分から予測される水平速度(緑)を示す。下は本研究で推定された PGR(緑)と TPW(青)による水平速度のみを取り出してプロットしたもの。GPS 局の速度データは JPL の M. Heflin によるもの。

3. 考察と今後の課題

プレートごとに推定されたオイラー局の位置と回転速度を、過去に GPS データに基づいて得られたもの [14] と地質学的な時間スケールにおけるもの [11,12] と比較すると、データが基本的に同じである前者に近い結果が得られた。オイラー局位置は [14] に与えられている 2σ の誤差楕円内からはみ出すものも見られるが、概して誤差範囲内で一致し、PGR や TPW に起因する速度成分と同時推定したことによるプレート運動パラメータへの影響はほとんど見られない。図 4 上に、推定に用いられた GPS 局のそれぞれについて速度データと、推定されたオイラーベクトルと PGR+TPW 成分から予測される速度を比較する。図 4 下はその中から PGR+TPW による速度成分のみを取り出してプロットしたものである。地球の形状の P_{20} の形の変化に対応する水平速度成分の振幅: 0.159 ± 0.488 mm/yr、 P_{21} に対応する水平速度成分の振幅は 0.372 ± 0.712 mm/yr となった。パラメータの推定誤差は GPS 局速度の観測誤差を一定と仮定してパラメータ推定後の速度残差の自乗和でスケーリングしたものである。推定された PGR/TPW の成分は現在進行している PGR/TPW の傾向から予測されたものと符号は一致するが、その絶対値は推定誤差を超えるものではなく、それらの速度成分を検出したとは言いがたい。逆にいえば今回の結果は PGR/TPW はプレート運動パラメータの推定結果を左右するほど大きくないことが確認されたとも考えられる。

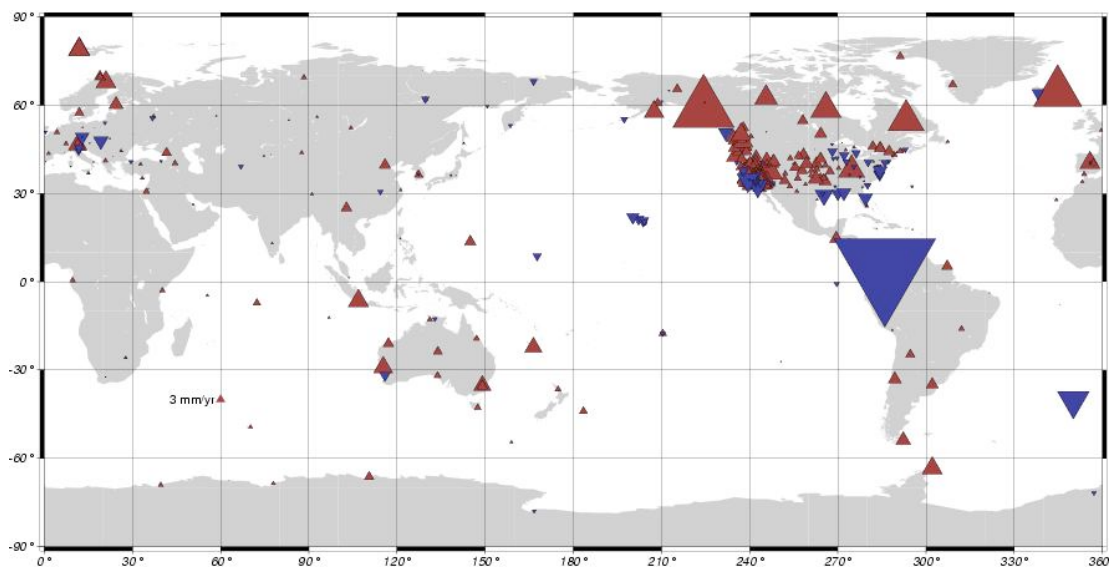


図 5. GPS によって測定された世界各局の上下速度。上昇が赤い三角、下降が青い三角で、三角の大きさが速度絶対値の大きさをしめす。

PGR/TPW とも地表の水平変位速度は 1 mm/yr を超えないが、鉛直速度はいずれも数 mm/yr の大きさが予測されている。一方 GPS の鉛直方向の測位精度は水平成分よりかなり劣るため、鉛直と水平のどちらに注目して PGR/TPW による地球の変形の検出を試みるかは微妙な問題である。図 5 に GPS で観測された上下速度をプロットしてあるが、上下速度の分布は空間的に極めて系統的であることがわかる。ただしこの中にはテクトニックなものも混じっている可能性は高い。今後は水平速度に上下速度の情報をプラスして非プレートテクトニクス起源の速度成分がどこまで見えるかを明らかにしてゆきたい。

参考文献

- [1] 大久保修平・里村幹夫・日置幸介・飛田幹男、「地球が丸いって本当ですか?」、朝日選書、pp. 275, 2004.
- [2] C. F. Yoder, J.G. Williams, J.O. Dickey, B.E. Schutz, B.J. Eanes, and B.D. Tapley, “Secular variation of the Earth’s gravitational harmonic J_2 coefficient from Lageos and non tidal acceleration of Earth rotation,” *Nature* 303, 757-762, 1983.
- [3] M. K. Cheng, C.K. Shum, and B.D. Tapley, “Determination of long-term changes in the Earth’s gravity field from satellite laser ranging observations,” *J. Geophys. Res.* 102, 22377-22390, 1997.
- [4] C. M. Cox, B.F. Chao, “Detection of a large-scale mass redistribution in the terrestrial system since 1998,” *Science* 297, 831-833, 2002.
- [5] M.U. Sagitov, B. Bodri, V.S. Nazarenko, and Kh.C. Tadzhidinov, “Lunar Gravimetry,” *International Geophysical Series Volume 35*, pp.298, Academic Press, London, 1986.
- [6] J. X. Mitrovica, G.A. Milne, and J. L. Davis, “Glacial isostatic adjustment on a rotating earth,” *Geophys. J. Int.* 147, 562-578, 2001.
- [7] International Earth Rotation and Reference Frame Service (IERS), <http://www.iers.org/>
- [8] J.B. Minster, T.H. Jordan, P. Molner and E. Haines, “Numerical modelling of instantaneous plate tectonics,” *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 36, 541-576, 1974.
- [9] J.B. Minster and T.H. Jordan, “Present-day plate motions,” *J. Geophys. Res.* 83, 5331-5534, 1978.
- [10] C. DeMets, R.G. Gordon D. Argus, and S. Stein, “Current plate motions,” *Geophys. J. Int.* 101, 425-478, 1990.
- [11] C. DeMets, R.G. Gordon, S. Stein and D. Argus, “Effects of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions,” *Geophys. Res. Lett.* 21, 2191-2194, 1994.
- [12] D. Argus and R.G. Gordon, “No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion models NUVEL-1,” *Geophys. Res. Lett.* 18, 2039-2042, 1991.
- [13] G.F. Sella, T.H. Dixon, A. L. Mao, “REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy,” *J. Geophys. Res.* 107, 2081, doi:10.1029/2000JB000033, 2002.
- [14] L. Prawirodirdjo and Y. Bock, “Instantaneous global plate motion model from 12 years of continuous GPS observations,” *J. Geophys. Res.* 109, doi:10.1029/2003JB002944, 2004.
- [15] M. Heflin, <ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/mbh/>