

非プレートテクトニクス起源の地球の大規模変形の検出

宇宙測地学研究室 4年 小川涼子

1. はじめに

北米のローレンタイドと北欧のフェノスカンジアの二大氷床の融解に伴い、アイソスタシーを回復することで全球にわたる変形が起こる(Post-glacial Rebound, PGR). PGRによる隆起によって質量の再分配が生じることで地球の形状軸の移動(True Polar Wander, TPW)が起こり、遠心力ポテンシャルに伴う地球の変形が起こる。

長波長のものに焦点を当ててみると、これらの変形は、球関数の P_{20} P_{21} の成分に対応していると見ることができる。地球の内部構造を考慮したモデルによると、どちらの寄与も相対速度で最大1mm/yrに達する速度が予測されている。これらのことから本研究では、一般に得られるGPSデータを用い、上下方向・水平方向に分けて、PGRとTPWの成分の検出を試みた。

2. 解析データ

地球の水平運動を支配するプレート運動による変形は、PGR/TPWのパラメータよりも桁大きい。よって、PGRやTPWによるグローバルな変形を検出するには、

- ・高精度の観測データ
- ・プレート運動による速度場の高精度の除去

が必要となる。よって本研究では、JPLのM.Heflinの解析によって得られたGPS観測データを用いて、水平方向においてはプレート運動とPGR/TPW成分を同時に推定した。

上下方向に関しては、PGRとTPWのみによって変形すると仮定し検出を試みた。

用いる観測局は、Prawirodirdjo & Bock(2004)でプレート運動パラメータの推定に

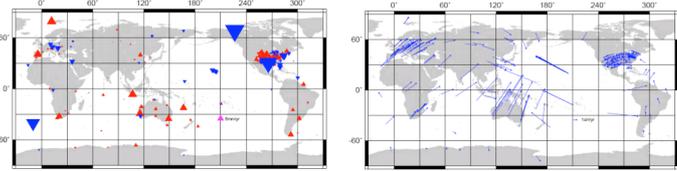


図2-1. GPSによって観測された上下方向の速度場
赤が隆起を示し、青が隆起を示す。三角の大きさが速度絶対値を示す。

図2-2. GPSによって観測された水平方向の速度場

3. 解析手法

PGRによる速度場は高次の項も含むが、ここでは J_2 の時間変化に相当する速度場に表示させて推定した。TPWによる速度場は、 ϕ は現在の極移動の方向から測った経度とし $-\sin 2\theta \cos \phi$ に比例する速度成分として推定した。上下方向に関しては、これらに比例する係数 C_{20} C_{21} を推定した。上下方向における観測方程式は式(3-1)となる。水平方向のPGR/TPWに関しては、上下方向の空間微分に比例したパラメータとプレート運動を同時に推定した。これらの係数をそれぞれ、 C'_{20} C'_{21} ω_x ω_y ω_z とすると、あるプレートにおける観測方程式は式(3-2)で示される。

$$\begin{pmatrix} (3\sin^2\theta_1 - 1)/2 & -\sin 2\theta_1 \cos \phi_1 \\ (3\sin^2\theta_2 - 1)/2 & -\sin 2\theta_2 \cos \phi_2 \\ \vdots & \vdots \\ (3\sin^2\theta_n - 1)/2 & -\sin 2\theta_n \cos \phi_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{20} \\ C_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{11} \\ v_{12} \\ \vdots \\ v_{1n} \end{pmatrix} \quad (3-1)$$

(θ は、緯度を示す)

$$\begin{pmatrix} x_{pgr1} & x_{pgr1} & 0.0 & z_1 & -y_1 \\ y_{pgr1} & y_{pgr1} & -z_1 & 0.0 & x_1 \\ 0.0 & 0.0 & y_1 & -x_1 & 0.0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{pgrn} & x_{pgrn} & 0.0 & z_n & -y_n \\ y_{pgrn} & y_{pgrn} & -z_n & 0.0 & x_n \\ 0.0 & 0.0 & y_n & -x_n & 0.0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C'_{20} \\ C'_{21} \\ \omega_{x1} \\ \omega_{y1} \\ \vdots \\ \omega_{xn} \\ \omega_{yn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{21} \\ v_{22} \\ \vdots \\ v_{2n} \end{pmatrix} \quad (3-2)$$

(xpg, xtpw...はPGR/TPW成分を直交座標系に変換したものの)

水平方向は C'_{20} C'_{21} を全球にわたるパラメータとし、オイラーベクトルに相当するパラメータはプレートごとに別々のパラメータとして組み合わせ全体の観測方程式を得た。データの観測誤差から重み行列を求め、重み付き最小二乗法を用いてそれぞれのパラメータを推定した。

4. オイラーベクトルの評価

オイラー極位置、回転速度はPrawirodirdjo & Bock(2004)で得られたものと近い結果を示し、これに与えられている 2σ の誤差楕円内からはみ出すものも見られたが、概して誤差範囲内で一致した。また、PGRとTPWを同時に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みられなかった。PGR,TPW成分については、[5]で検討する。

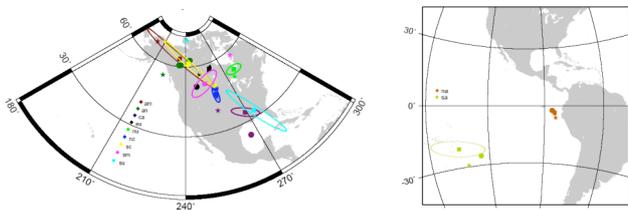


図4. 推定値から求めたオイラー極の比較(一部)

☆: 今回の推定値, □: Prawirodirdjo & Bock(2004), ○: NUVEL1a(Demetis et al.,1994)

5. P_{20} P_{21} 成分の検出

推定した結果を表5に示す。ただし推定誤差は、得られたXで補正している。上下方向の地球の変形の度合いを示すラプ数は、表面が固体であっても内部が粘性流体ならばその影響が効きやすく、流動によって大きくなりやすい。一方水平方向の度合いを示す志田数は、浅い部分の剛性の影響が大きいので、下部の流動の影響が現れにくい(Okubo & Saito,1983)。

今回のパラメータ推定において、 P_{20} 成分の上下方向・水平方向の比がそのままこの時間スケールにおける荷重ラプ数・志田数の比と考えることができる。得られた結果から、弾性体と考えた場合よりも、志田数がラプ数に対して相対的に大きくなることが示された。

現在の極の移動の中心(平均極)は北米方向に動いている(図5-1)。この場合、 P_{21} 成分は上下・水平ともにプラスが出ると考えられる。しかし値は上下・水平ともに逆符号が得られた。Mitrovica et al.(2001)で示されたPGRによる水平速度成分を見てみると(図5-2)、高次項も考慮する必要があげられる。つまり推定すべきパラメータを組み込んでいないため、それらが推定したパラメータに紛れ込んでいる可能性がある。

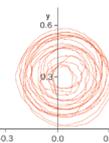


図5-1. IERSによる過去100年間の極移動(秒角)
100年前には、極の中心は図の原点に存在した。

| | P_{20} 成分 | P_{21} 成分 | χ |
|------|-------------------|--------------------|--------|
| 上下成分 | 0.618 ± 0.474 | -0.363 ± 0.240 | 13.58 |
| 水平成分 | 0.408 ± 0.182 | -1.517 ± 0.386 | 25.48 |

表5. PGR/TPW成分の推定結果(mm/yr)
Xは、パラメータ推定後の速度残差二乗和を自由度で割ったものである。

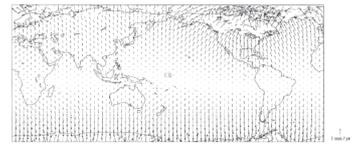


図5-2. PGRによる水平方向の速度場 (Mitrovica et al.(2001))

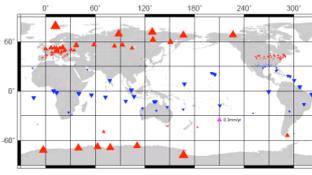


図5-3. 推定されたPGRによる上下速度成分(上)と推定されたTPWによる上下速度成分(下)

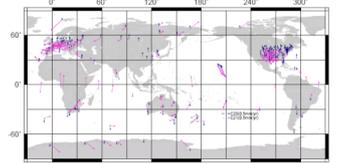


図5-4. 推定されたPGR/TPWによる水平速度成分

6. 高次項を考慮した計算

Cheng et al.(2004)は、 $dJ_3/dt, dJ_4/dt, dJ_5/dt$ の値が dJ_2/dt の値と同じオーダーであると示しているため、さらにこれらの項に関するパラメータを増やして、推定を行った。 $P_{30} \sim P_{50}$ 成分に関しては $J_3 \sim J_5$ の時間変化の項(水平成分は、その項の空間微分)に比例する係数を推定した(表6)。

| | P_{30} | P_{31} | P_{32} | P_{40} | P_{41} | P_{50} | χ |
|------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|----------|--------|
| 上下成分 | 1.193 ± 0.501 | -0.766 ± 0.305 | 1.299 ± 0.514 | -0.347 ± 0.613 | 2.332 ± 0.652 | 12.91 | |
| 水平成分 | 0.320 ± 0.175 | -0.266 ± 0.416 | 0.421 ± 0.154 | -0.185 ± 0.143 | -0.460 ± 0.008 | 23.10 | |

表6. 高次項も考慮して推定された結果 (mm/yr)

水平方向に関しては、これまでと同様にプレート運動を同時に推定しているが、[4]で示す結果とほとんど変わらずプレート運動への影響は見られなかった。表6と表5を比較してみると、やはり P_{21} 成分が不安定であるといえる。またXが大きいことから、他のパラメータが混じっている可能性がある。またそれらが完全に分離できるのかを確かめる必要がある。

衛星重力ミッションにより球関数の高次項の永年変化が得られることが期待される。それらを用いることで組み込むべきパラメータ求め検出を可能にしていることは、今後の課題である。

7. 参考文献

- (1) J.X. Mitrovica, G.A. Milne, and J.L. Davis, "Glacial isostatic adjustment on a rotating earth," *Geophys. J.Int.* 147,562-578,2001.
- (2) M. Cheng and B.D. Tapley, "Secular variations in the low degree zonal harmonics from 28 years of SLR data," American Geophysical Union 2004 Fall Meeting, paper G31C-0801,2004.
- (3) L. Prawirodirdjo and Y. Bock, "Instantaneous global plate motion from 12 years of continuous GPS observations," *J. Geophys. Res.*, 109, doi:10.1029/2003/JB002944, 2004.
- (4) International Earth Rotation and Reference Frame Service(IERS), <http://www.iers.org/>
- (5) M.Heflin, <ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/mbh>