

ABIC による GRACE、ICESat データからの 南極表面密度・GIA の見積もりについて

山本圭香¹、福田洋一²、土井浩一郎³

¹総合地球環境学研究所

²京都大学大学院理学研究科

³国立極地研究所

Estimation of surface mass density and GIA mass trend over Antarctica using GRACE and ICESat data by means of ABIC

Keiko Yamamoto¹, Yoichi Fukuda² and Koichiro Doi³

¹Research Institute for Humanity and Nature

²Graduate School of Science, Kyoto University

³National Institute of Polar Research

Satellite gravity mission GRACE provides global temporal mass variations, including Glacial Isostatic Adjustment (GIA) signals. However, the temporal gravity change observed by GRACE is caused not only by GIA but also by all the sources accompanying mass variations. Surface mass changes caused by ice sheet melting and snow accumulation are one of the major sources in the GIA trend areas. To obtain GIA signals, gravity changes caused by surface mass changes must be estimated and removed from the GRACE estimation. Use of ICESat satellite altimetry data is one of the approaches estimating the mass changes caused by surface mass changes. The ice sheet elevation change can be multiplied by the density of the ice column to provide the ice sheet mass change per unit area, and we can obtain the GIA mass change trend by subtracting it from the GRACE mass trend. However, because of the limited knowledge of spatial distribution of surface mass density over the large area, it is not easy to separate GIA and surface mass change trend by this method.

One of the methods is to use surface density model. Riva et al. (2009) prepared the surface density model over the whole area of Antarctica from the density equation, which is determined by temperature, wind speed, and regional experimental factor. As the temperature and the wind speed data, they used regional atmospheric objective analysis data over Antarctica. Then using the density model, they subtracted the effect of surface mass change and estimated GIA mass trend. Their result shows that the estimated GIA trend is very similar mass distribution to IJ05 model.

On the other hand, another approach to determine surface mass density is to determine the value by least-squares method (LSM) using the equation which relates GRACE mass trend with ICESat elevation trend. One of the advantages of this method is that it does not depend on model's error. However, because of the difference of the error magnitude of each grid cell of the GRACE and ICESat data, simple LSM brings unnatural incontinuous spatial distribution of the surface mass density. Thus, in this study, on the basis of the method of Fukataha et al. (2003), we performed LSM with considering ABIC to obtain spatially smooth distribution of surface mass density. In the presentation, as a preliminary result, we show the result of which applies the method to the regional small areas.

衛星重力ミッション GRACE の時間変動重力場データから得られる質量の経年変化トレンドは、南極においては、Glacial Isostatic Adjustment (GIA) および氷床変動などによる表面質量変動が主な要因であると考えられる。GRACE から得られるのはこれらの質量変動の鉛直方向の総和である。両者の影響を分離するには GIA のシグナルあるいは表面質量変動の影響のどちらかを他の観測データやモデルによって見積もり、GRACE から差し引く必要がある。

GRACE の質量変化のデータと、ICESat 衛星高度計から得られる氷床の高度変化のデータとの組み合わせにより、GIA のトレンドと表面質量変動のトレンドを分離するというアイデアは、新しいものではなく、両衛星の打ち上げ前から提案されていた。しかしながら、実際には、高度変化を質量変化に換算するために必要な南極全体にわたる氷床密度の空間分布が不明であること、これを補うための密度の地上観測データが非常に少ないことなどが原因で、2つのトレンドの分離は容易ではない。

換算に使用する密度の決定に考えられる方法の1つとして、南極の密度分布モデルの使用がある。Riva et al. (2009)は、温度・風および地域的な経験ファクターによって決まる密度式に南極のリージョナルな大気客観解析データを代入することによって南極表面の密度分布モデルを作成し、このモデルと ICESat データを用いて、GRACE の経年トレンドから氷床変動の影響を差し引いた。こうして得られた GIA の経年トレンドは、IJ05 に非常に近い結果を示していることが報告されている。

一方、密度分布決定のもう1つの方法として、質量変化トレンドと高度変化トレンドを関係づける方程式を複数の異なる期間で作成し、最小二乗法によって密度（および GIA のトレンド）を決定するという方法が考えられる。この方法では、モデル、経験式からの情報とは独立に、観測データのみから表面密度を決定することが可能である。しかしながら、GRACE や ICESat のようなデータでは、それぞれのグリッド上の値が持つ誤差が比較的大きく、1つのグリッドごとの値に対してこのような最小二乗法を実施するのは、決定された密度が不自然な不連続値となってしまう。そこで、本研究では、われわれは、最小二乗法による密度決定の際に ABIC を用い、空間的に連続な、なめらかな密度曲面を決定し、GIA と表面密度変化の分離に役立てることを目的とした。

ABIC を用いたパラメータ決定の方法は、Fukahata et al. (2003) にしたがっておこなった。南極で観測された GRACE の質量変化は、近似的に密度、GIA による質量トレンド、ICESat の高度変化と次のような関係にある。

$$\delta m_{GRACE}(\mathbf{x}, t) = \delta m_{viscoelastic}(\mathbf{x}) + \delta m_{ice}(\mathbf{x}, t) = \dot{m}_{viscoelastic}(\mathbf{x}) \delta t + \rho_{surface_mass} \delta h_{ICESat}(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

この方程式に含まれるトレンドを作成する期間を変え、さまざまな期間の組み合わせに対して上記の方程式を作成すると、

$$\begin{pmatrix} \delta m_{GRACE(1)} \\ \delta m_{GRACE(2)} \\ \delta m_{GRACE(3)} \\ \dots \\ \delta m_{GRACE(n)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta t_1 & \delta h_{ICESat} \\ \delta t_2 & \delta h_{ICESat} \\ \delta t_3 & \delta h_{ICESat} \\ \dots & \dots \\ \delta t_n & \delta h_{ICESat} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{m}_{viscoelastic} \\ \rho_{surface_ice} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{d} = \mathbf{H}\mathbf{a} + \mathbf{e}_{error}$$

この線形方程式が、各 $\mathbf{x}(x, y)$ について存在する。誤差 \mathbf{e} に対して、 $N(0, \sigma^2)$ の正規分布を仮定すると、観測データ \mathbf{d} を求めたいパラメータ \mathbf{a} (GIA による質量変化速度と表面質量の密度) と関係づける確率密度関数は次のようになる。

$$p(\mathbf{d} | \mathbf{a}; \sigma^2) = (2\pi\sigma^2)^{-N/2} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(\mathbf{d} - \mathbf{H}\mathbf{a})^T(\mathbf{d} - \mathbf{H}\mathbf{a})\right] \quad (3)$$

以下、空間方向、時間方向のそれぞれについて、正規分布の確率密度関数で表されるなめらかさについての拘束条件を導入し、双方のなめらかさを考慮した確率密度関数を書くと、

$$p(\mathbf{a}; \rho_1^2, \rho_2^2) = (2\pi)^{-M/2} \left\| \frac{1}{\rho_1^2} \mathbf{G}_1 + \frac{1}{\rho_2^2} \mathbf{G}_2 \right\|^{1/2} \exp\left[-\mathbf{a}^T \left(\frac{1}{2\rho_1^2} \mathbf{G}_1 + \frac{1}{2\rho_2^2} \mathbf{G}_2 \right) \mathbf{a}\right] \quad (4)$$

Bayes' theorem により、(3) で表される事前確率分布と、(4) を使って事後確率分布をあらわし、ABIC を最小とする条件でのパラメータ \mathbf{a} の値を決定した。

本発表では、まずは初期的なテストとして、試験的に小さな地域でこの方法を適用した結果について報告する。

References

- Fukahata, Y., Y. Yagi and M. Matsu'ura, Waveform inversion for seismic source processes using ABIC with two sorts of prior constraints: Comparison between proper and improper formulations, *Geophysical Research Letters*, 30 (6), 1305, doi: 10.1029/2002GL016293, 2003.
- Riva, R.E.M., B.C. Gunter, T.J. Urban, B.L.A. Vermeersen, R.C. Lindenberg, M.M. Helsen, J.L. Bamber, R.S.W. van de Wal, M.R. van den Broeke and B.E. Schutz, Glacial Isostatic Adjustment over Antarctica from combined ICESat and GRACE satellite data, *Earth and Planetary Science Letters*, 288, 516-523, doi: 10.1016/j.epsl.2009.10.013, 2009.