

要旨

全地球測位システム(GPS)データから、東北日本を横断する基線の長さが季節変化し、かつ日本海側の局が冬季に沈降することが観測された。その原因は雪の荷重ではないかと考えられた(Heki, 2001; 2004)。本研究では、それらの妥当性を確かめるために、重力の時間変化を計測するために打ち上げられたGravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)衛星のデータを使って、冬と夏の荷重差を求め、それらを日本全国に展開されたアメダス積雪計データから推察された荷重差と比較し、両者が誤差範囲内で一致することを確認した。また、特定の月の重力データどうしを比較する簡便な手法で、重力の長期的な変化やエルニーニョ・南方振動に伴う重力の変化等を検出することに成功した。

1. 東北日本の基線長の季節変化 (Heki, 2001)

図1に示す日本列島を横断する基線で、基線長の年周変化が見られる(図2)。また太平洋側と日本海側の基線長変動が逆位相になっていることが分かる。また鳴子GPS点が冬に沈降し、夏にもどっていることが分かる。このことから、基線長の季節変化の原因は積雪荷重のためだと考えられた。

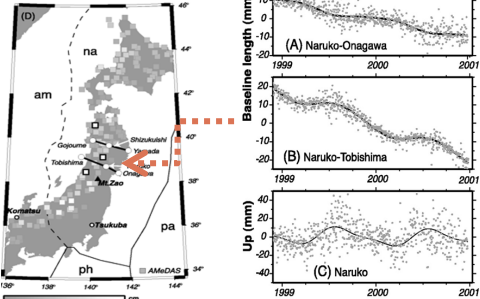


図1 東北日本を横断する基線と、アメダス点(四角)の最高積雪量。

図2 太平洋側(A)と日本海側(B)の基線長年周変動と、中央部の上下変化(C)。日本海側では冬季の収縮が顕著。

2. 解析方法

(a) 重力変化の求め方

GRACEデータは、テキサス大学宇宙科学センター(CSR)による解析のLevel2データ(RL04)を用いた。データは最大60次のスークス係数で構成されており、以下の式で重力変化が求められる(Wahr et al., 1998)。

$$\Delta g(\phi, \lambda) = \frac{GM_{earth}}{R^2} \sum_{n=2}^{n_{max}} (n+1) W_n \sum_{m=0}^n W_m [\Delta C_{nm} \cos m\lambda + \Delta S_{nm} \sin m\lambda] P_{nm}(\sin \phi)$$

ここで、 ΔC_{nm} 、 ΔS_{nm} は、Stokes係数の変化量、 P_{nm} はルジャンドル陪球関数である。 W_n はガウシアンフィルタといいい、短波長ノイズ軽減のために空間的平滑化を施す重み係数である。重みが1/2になる距離averaging radiusは、本研究では400kmとした。本研究では、ある二つの時期のデータからそれぞれの重力変化を求めその差をとった。

(b) 重力に相当する地表面質量と水厚

$$\Delta \sigma(\phi, \lambda) = \frac{R \rho_{ave}}{3} \sum_{n=2}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n \frac{2n+1}{1+k_n} [\Delta C_{nm} \cos m\lambda + \Delta S_{nm} \sin m\lambda] P_{nm}(\sin \phi)$$

上記の式の ΔC_{nm} 、 ΔS_{nm} に二つの時期のStokes係数のそれぞれの差を代入し、地表に分布する面密度 $\Delta \sigma$ の荷重をを求める。ここで、 ρ_{ave} は地球平均密度(=5517kg/m³)、 k_n は荷重ラフ数である。荷重による固体地球の変形によって生じる二次的な重力変化を荷重ラフ数によって取り除くことができる。さらに、求めた荷重の面密度を水の密度 ρ_w (=1000 kg/m³)で割ることで、荷重を水(土壌水分や積雪)と仮定したときの水の厚さに変換できる(Wahr et al., 1998)。

3. 様々な重力変化

(a) 永年変化(氷床の縮小や後氷期回復)

:2010(2月)-2003(2月)

図3で、赤丸で囲った中の青い部分が重力減少域である。地球温暖化に伴う山岳氷河や氷床の減少と考えられる。赤い部分は重力増加域で、Post glacial rebound による地殻の隆起と考えられる。

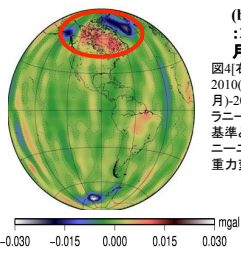


図3 2010(2月)-2003(2月)

(b) エルニーニョ、ラニーニャによる重力変化

:2010(2月)-2009(2月), 2008(2月)-2007(2月)

図4(右)。2010(2月)-2009(2月)、ラニーニャ時を基準としたエルニーニョ時の重力変化。

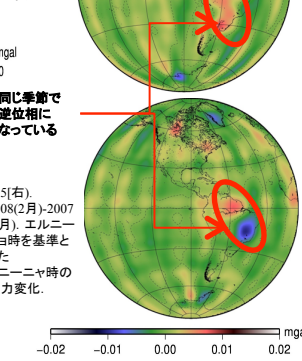


図5(右) 2008(2月)-2007(2月)。エルニーニョ時を基準としたラニーニャ時の重力変化。

図7(左) エルニーニョ発生時に降雨異常が起きやすい地域。青と赤は降雨が減少する地域と増加する地域を示す(Ropelewski and Halpert, 1987より)

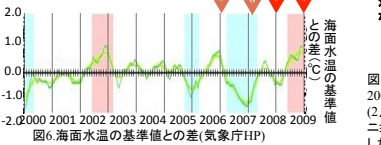
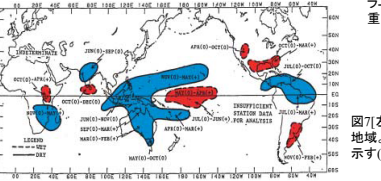


図6 海面水温の基準値との差(気象庁HP)



6. 結論.

- ある年月の重力とある年月の重力の差をとるという単純な解析方法で、重力の永年的な変化、ENSOに伴う重力変化を取り出すことができた。
- GRACEデータとAMeDASデータによる荷重差の比較で両者が定性的に一致した。しかし、GRACEデータは全球的なデータのため、日本以外の地域による荷重(シベリアに降る雪の荷重)の影響がでるため、荷重の分布が北側にずれる。
- 定量的に比較すると、GRACEデータによって求められた荷重差のピークは4~7cmで、積雪計データから求めた荷重差のピークは約7cmで、積雪計データから求めた荷重差のピークの約7割であった。
- 積雪計データから推察した積雪荷重には3割程度の誤差が含まれる(Heki, 2004)ことから、両者は誤差範囲内で一致しているといえる。

4. 1996~2002年と2002~2008年の2月の積雪深の比較

Heki(2004)のAMeDASによる積雪データは、1996年~2002年のものである。しかし比較しようとするGRACEデータは2002~2010年のデータなので、データの取得期間がずれる。そこで、気象台のデータを使って1996~2002年と2002~2008年の積雪データを比較して両期間における積雪深度の差を把握することとした。

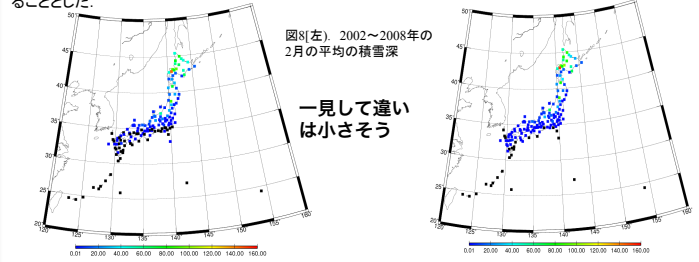


図8(左)。2002~2008年の2月の平均の積雪深

一見して違いは小さそう

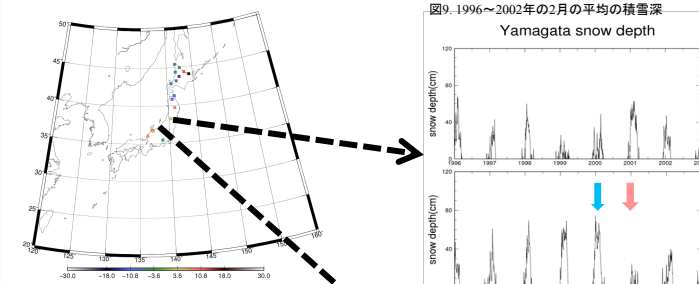


図9. 1996~2002年の2月の平均の積雪深

Yamagata snow depth

Takada snow depth

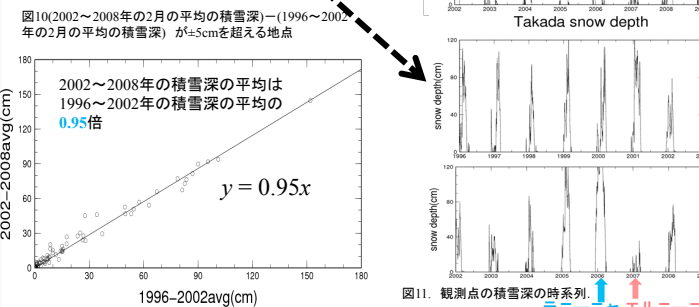


図10 2002~2008年の2月の平均の積雪深 - (1996~2002年の2月の平均の積雪深) が±5cmを超える地点

2002~2008年の積雪深の平均は1996~2002年の積雪深の平均の0.95倍

$$y = 0.95x$$

最小二乗法から、直線の式 $y = 0.95x$ を求めた。

図11. 観測点の積雪深の時系列。ラニーニャ エルニーニョ

ENSOは、日本列島に暖冬をもたらし、ラニーニャは厳冬をもたらすことが顕著に見えている。

5. AMeDASデータとGRACEデータの比較

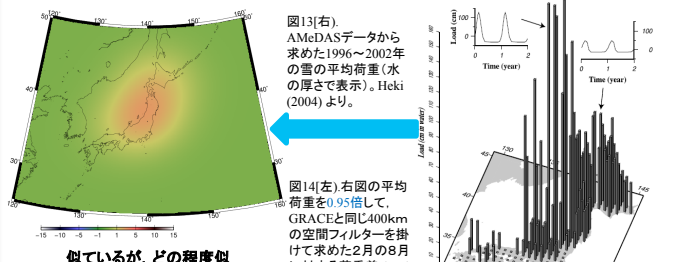


図13(右) AMeDASデータから求めた1996~2002年の雪の平均荷重(水の厚さで表示)。Heki(2004)より。

図14(左) 右図の平均荷重を0.95倍して、GRACEと同じ400kmの空間フィルタを掛けて求めた2月の8月に対する荷重差(cm)

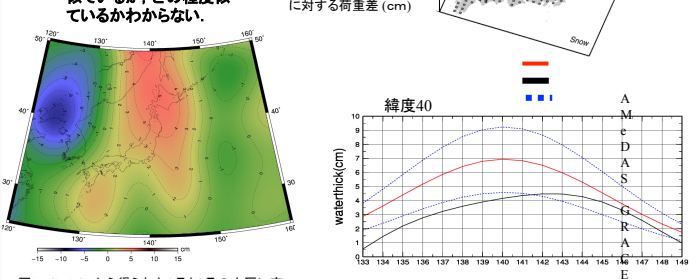


図15. GRACEから得られた2月と8月の水厚に変換した荷重差(cm)

図16. 図14と図15を緯度40度で切り、日本以外の地域による荷重(シベリアやサハリンの雪の荷重)も捉えるため、荷重分布が北側にずれるため

図15は図14と比べて荷重分布が北側にずれている。GRACEは断面を比較球面データのみに頼るため、日本以外の地域による荷重(シベリアやサハリンの雪の荷重)も捉えるため、荷重分布が北側にずれるため

図16から、GRACEデータによる荷重差のピークは約4.5cmで、AMeDASデータのピークによる荷重差は約7cmである。Heki(2004)では標高と積雪深度が比例すると仮定して、県毎にその中に含まれるAMeDAS点のデータを標高の一次関数としてモデル化し、県平均標高に換算してその県全体の現実的な積雪深度を得ている。その時のモデル誤差で10~30%と考えられる。さらに積雪の密度の不確実性からくる誤差も10%程度あると考えられる。両方を考慮すると誤差は三割強であろう。AMeDASデータによる荷重差のピークと、GRACEデータの荷重差のピークの差は3割程度であり、両者は誤差

7. 引用文献.

- Heki, K. 2001. Seasonal modulation of interseismic strain buildup in Northeastern Japan driven by snow loads, Science, vol.293, pp. 88-92, 2001.
- Ropelewski, C.F. and M. S. Halpert, Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/southern oscillation, Monthly Weather Rev., vol. 115, pp. 1606-1626, 1987.
- Wahr, J., M. Molenaar, and F. Bryan, Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible Heki, K., Dense GPS array as a new sensor of seasonal changes of surface loads, in The State of the Planet: Frontiers and Challenges in Geophysics, edited by R.S.J. Sparks and C.J. detection using GRACE, J. Geophys. Res., vol. 103, pp.30205-30229, 1998.