

シベリア永久凍土帯における 重力の季節変化と経年変化

小川涼子¹⁾、Benjamin F. Chao²⁾、日置幸介¹⁾

1) 北海道大学理学院・自然史科学専攻

2) 台湾国立中央大学・地球科学院

概要

永久凍土で覆われている東シベリアの貯水量が毎年約 30 立方キロメートルずつ増加していることが、GRACE による重力観測で分かった。これには降水量の増加だけでなく、土壌水分の許容量の増加が寄与している可能性が高い。温暖化に伴って多くの陸氷が融解し海面を上昇させる中で、東シベリアの大地は海面上昇を逆に抑制しているようだ。

はじめに

双子衛星の距離変化を計測して重力分布を調べる GRACE 衛星は打ち上げから七年が経過し、様々な地球物理学的現象を重力変化の形で捉えてきた。中でもグリーンランド、アラスカ、パタゴニア、チベット、南極などで、地球温暖化に伴う陸氷の融解が重力の減少として観測されている(e.g. 日置・松尾、本特集号)。気候変動に関する政府間パネル(Lemke et al., 2007)によると、地球温暖化に伴い北極地域では今後 100 年で 5°C 近い気温上昇が予測されている。このような気候変化は氷河や氷床のみならず、高緯度帯の永久凍土にも影響を与えるだろう。

シベリア永久凍土帯では、東側からレナ川・エニセイ川・オビ川と三つの大きな河川が存在し、それらの北極海への流出量が増加しつつある(Peterson et al., 2002)。シベリアの永久凍土帯は、エニセイ川の東西で様相を異にする。東側のレナ川流域(ヤクーツク等)では深さ数百 m の厚い連続的な永久凍土が存在するが、西側では断続的となりオビ側流域のオムスクでは永久凍土は存在しない。この差は最終氷期での氷床の存在を反映する。氷床に覆われた西側地域では、その断熱効果で永久凍土が形成されな

った。一方乾燥した東シベリアには氷床は発達せず、かつ年平均気温が現在よりも 10 度も低かったため、地下深くに達する永久凍土が形成された。厚い連続永久凍土で覆われた東シベリアでは、土壌の不透水性のため特徴的な陸水変動を示す。

GRACE は重力変化から貯水量を一カ月程度の時間分解能で直接計測できるため、陸水の季節変化や経年変化の議論に有用である。本研究では主にレナ川流域において、GRACE データと、降水量や河川流量データを比較することで、永久凍土における季節的および経年的な陸水変動のメカニズムを考察する。また昨今の地球温暖化に伴う永久凍土域の環境変化とそれに伴う重力変化が、地球科学的にどのような意味を持つかについて議論する。

データと手法

本研究で使用した GRACE データは、テキサス大学が公開している UTCSR RL04 Level-2 data の、2003 年 1 月から 2008 年 12 月までのものである。短波長ノイズと縦縞ノイズを軽減するために、300 km の Fan filter (Zhang et al., 2009) と P4M6 の縦縞軽減フィルター (Swenson and Wahr, 2006; Chen et al., 2007) を用いた。レナ川流域の平均的な変化を得るために、レナ川流域内を 1、その他を 0 としたマスクを作成し、球面調和関数展開したフィルターを作成した。GRACE データにこのフィルターを適用し (Swenson and Wahr, 2002)、レナ川流域内の重力変化を水厚に換算したものを計算し、レナ川流域の貯水量変化の時系列を得た。

貯水量の変化 ΔW は、降水量 P 、蒸発散量 E 、流出量 R の組み合わせを積分して得られる。

$$\Delta W = \int (P - E - R) dt \quad (1)$$

地上観測データから取得した降水量・流出量と、モデル計算した蒸発散量を式(1)に代入して季節的・経年的な貯水量の変化を計算し、それを GRACE データと比較した。降水量は、CMAP (Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation) の 2.5 度グリッドの降水量データを使用した。流出量は、

<http://rims.unh.edu/>で公開されているレナ川河口の流量を川全体の平均流出量とし、流域面積で割ることで単位面積あたりの月平均流出高(mm/month)を計算した。Thorntwaite and Mather (1955) によると、実蒸発散量 E は可能蒸発散量 PET に比例する。本研究では Hamon (1963) から可能蒸発散量を計算し、水収支法に基づき比例定数 f を求め、実蒸発散量 $E (=f \times \text{PET})$ を算出した。

季節的な陸水変化

従来の大河流域の水収支の研究では、貯水量と蒸発散量の二つの未知量があった。GRACE による前者の直接観測は、観測が難しい後者を推定できるようになったことを意味する。レナ川では、実蒸発散量を可能蒸発散量の 0.4 倍としたときに(1)式の両辺が最も良く一致した(図 1)。10 月から 4 月までの結氷期は、流出が非常に少なく降雪がそのまま重力増加となる。5 月と 6 月の融雪期には、河川の流出量がピークを示し、さらに蒸発散量も増加して貯水量は急激に減少する。夏の前半は蒸発散量と流出量が降水量を上回るが、後半になると、降水量が土壤に保持されるようになって貯水量は次第に回復していく。こういった永久凍土の特徴的な陸水の季節変化が、地上観測データ(図 1 の黒い実線)と GRACE(同じく灰色の実線)という異種の観測結果どうしでこれだけ一致したことは特筆に値する。

経年的な陸水変化

GRACE データから、全球的な重力変化(水厚に換算)を計算し、グリッド点ごとに季節変化と一次関数でモデル化することにより、経年変化を推定した(図 2)。高緯度地域は、後氷期回復による重力増加を示すカナダや北欧を除くと、アラスカ・グリーンランドなど陸氷が地球温暖化で融解することによる重力減少が目立つ。その中でシベリアの重力増加は特異である。レナ川・エニセイ川・オビ川流域の重力の増加は、それぞれ 30.7, 12.9, 9.6 Gt/year の水の増加に相当する。レナ川流域の貯水増加量だけでもパタ

ゴニアの山岳氷河の融解量(Chen et al., 2007)に匹敵する。Chao et al. (2008) は、人工ダムの貯水が過去数十年の間海面上昇のかなりの部分を抑制してきたことを明らかにしたが、シベリア永久凍土帯はあたかも自然の巨大ダムとして海面上昇を抑制しているかのようなのである。

レナ川流域において、GRACE から得られた貯水量と、地上観測データから得られた $P-E-R$ を積分して得た経年的な貯水量変化を図 3 で比較する。両者は季節変化のみならず経年的にも良い一致を示し、それぞれの増加率も GRACE データが、 10.7 ± 1.2 mm/yr、地上観測データが 11.8 ± 1.1 mm/yr と調和的である。経年的な貯水量増加の直接原因は、近年の極域の降水量の増加であろう。北極海への河川流出は増加傾向にあるが(Peterson et al., 2002)、レナ川流域では流出量以上に降水量の増加が著しい。降水量が増加しても土壤にそれを貯水できなければ、流出量が増加するだけであろう。次に温暖化に伴う永久凍土の融解によって土壤水分の許容量が増大している可能性を考えてみたい。

Sugimoto et al. (2003) は、1999 年夏季の現地観測により、ヤクーツクの観測点ではその夏の過剰な降雨により土壤が飽和状態であったことを確認した。GRACE データは 2003 年以降のものしか使用できないが、実蒸発散量と可能蒸発散量の比例定数が変化しないと仮定すると地上観測データが存在する 1990 年まで遡って貯水量を推測できる(図 4)。その結果、1999 年以降一度貯水量は減少したが、その後の増加で現在の貯水量は飽和状態であった 1999 年のレベルを既に超えている。永久凍土の土壤水分容量そのものが増大しなければこれは不可能である。

凍土が融解・凍結を繰り返すことで、アラスと呼ばれる地面のくぼみが形成されるが、近年アラスが拡大傾向にあることが現地調査によって分かった(Iijima et al., 2009)。これは地表に水を貯める能力の増加につながる。さらにヤクーツク近郊のいくつかの観測点では、土壤水分の増加が現地で直接観測されている(Iijima et al., 2009)。GRACE 観測による重力の

増加域は東シベリアの広域で見られるが、このことはアラスの拡大や土壌水分の増加が広域で面的に起こっていることを示す。

永久凍土には活動層とよばれる夏季に融解する層が存在する。年間降水量 200mm という非常に乾燥した東シベリアでタイガの落葉針葉樹が存在できるのは、この活動層に水分が安定して存在するためである。例えば雨の多い夏に生じた余剰な土壌水分は、流出せずアイスレンズとして土壌中で冬越しして、次の乾燥した夏に樹木に利用される(Sugimoto et al., 2003)。

近年の地球温暖化によって、活動層が年々厚くなりつつある。Iijima et al. (2009) は、ヤクーツク近郊の現地観測によって、GRACE データのある 2003 年から 2007 年の期間に活動層が毎年 4.9 cm ほど厚くなったことを見出した。厚化の原因は気温の上昇だけでなく、増加した降雪による断熱効果や増大した夏の降水が凍結時に放出する潜熱の寄与が大きい。含水率を 1/3 と仮定し、氷と水の体積差(8%)と考慮すると、単純計算で土壌水分の許容量は毎年約 1.3 mm ずつ増加するだろう。アラスの拡大だけでなく、年々厚くなる活動層も貯水量増大に寄与している可能性がある。

これらを総合すると、降水量の増加と土壌水分の許容量の増大の相乗効果で東シベリアの貯水量が経年増加しているのだろう。凍土の融解はその中に保持されていた温室効果ガスであるメタンの放出を通じて気候変動に正のフィードバックをもたらすことが知られる。本研究では、温暖化による永久凍土の融解のもう一つの側面を指摘したい。すなわち温暖

化に伴う永久凍土域の貯水量増加の可能性である。陸氷の融解による海面上昇が懸念される中、シベリアの永久凍土帯は、温暖化による海面上昇に負のフィードバックを及ぼしている可能性が高い。

参考文献

- Chao B.F., et al., 2008. *Science*. 320. 5873.
- Chen, J. L., et al., 2007. *Geophys. Res. Lett.*, 34. L22501. doi:10.1029/2007GL031871.
- Hamon, R.W., 1963. *Int. Assoc. Sci. Hydrology*, Publication 63.
- Lemke, P., et al., 2007. *In Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge Univ. Press, Chap. 4.
- 日置幸介、松尾功二、月刊地球 (本特集号)
- Iijima, Y., et al., 2009. *Permafrost and Periglac. Process.* doi:10.1002/ppp.662.
- Peterson, B. J., et al., 2002. *Science*. 298. 2171.
- Sugimoto A., et al., 2003. *Hydrol. Process.* 17. 1073-1092. doi:10.1002/hyp.1180.
- Swenson and Wahr, 2002. *J. Geophys. Res.* 107(B9). 2193. doi:10.1029/2001JB000576.
- Swenson and Wahr, 2006. *Geophys. Res. Lett.* 33. L08402. doi:10.1029/2005GL025285.
- Thorntwaite, C. W. and Mather, J. R. 1955. *The Water Balance*. Publications in Climatology, 8, No. 1.
- Zhang, Z. Z., et al., 2009. *Geophys. Res. Lett.* 36. L17311. doi:10.1029/2009GL039459

(月刊地球 第 32 巻 pp.234-238, 2010)

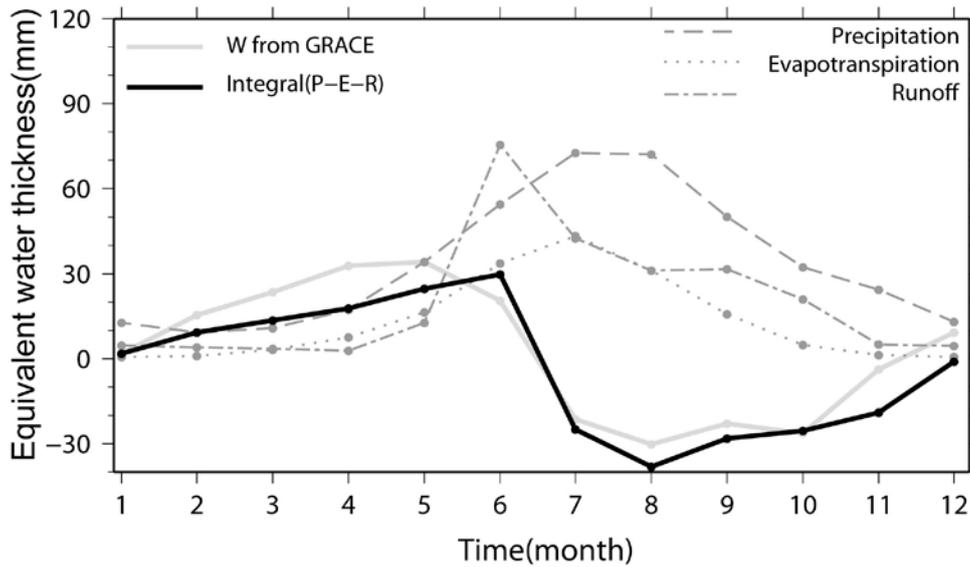


図1. レナ川流域の平均的な季節的水収支。灰色の実線は GRACE データから得られた貯水量の季節変化を示し、黒の実線は地上観測データ（降水量、蒸発散量、流出量）を時間積分して得た貯水量の季節変化を示す。季節変化は、2003 年から 2008 年までの各月の平均を示す。実蒸発散量は、可能蒸発散量に 0.4 をかけて算出した。

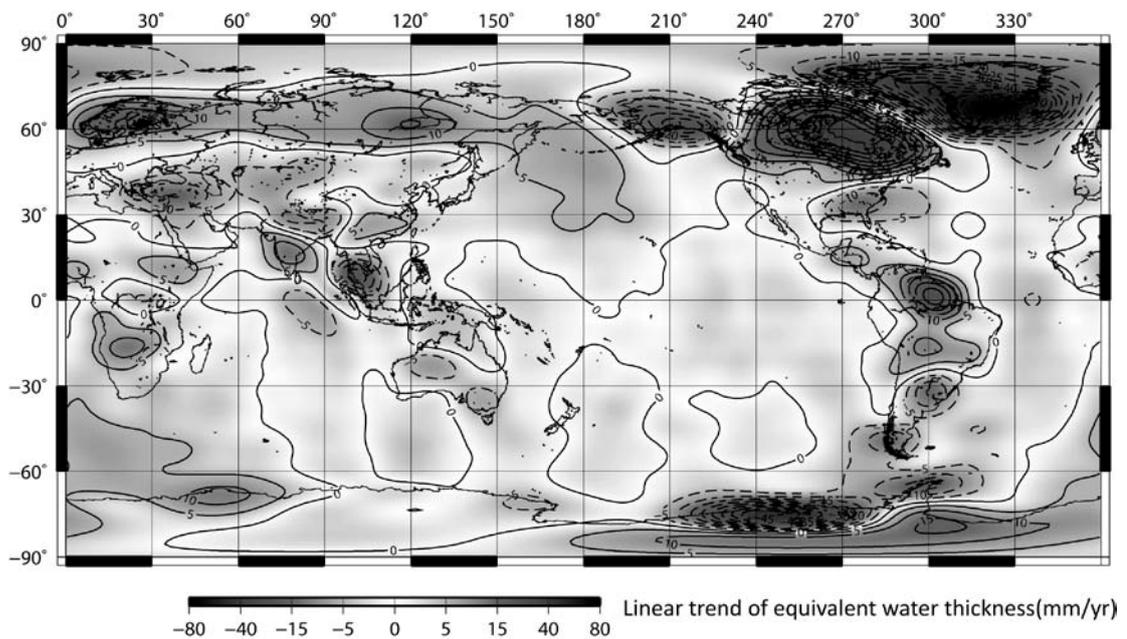


図2. GRACE から得られた経年的な重力変化（水厚に換算）。各グリッドの重力変化を季節変化と一次関数でモデル化することで、経年的な重力変化マップを作成した。ゼロを白とし、変化が大きいほど色が濃くなる。実線・破線は、それぞれ重力増加・減少の等値線を示す。グリーンランド、アラスカ、パタゴニア、南極、チベットといった陸氷の存在する地域では融解に伴い重力が減少していることが分かる。スカンジナビア半島、カナダでは過去の氷床の消失による固体地球の

粘性的応答（後氷期回復）によって重力が増加している。最終氷期に氷床が存在しなかったと考えられるシベリアの重力の増加は、陸水変化が影響していると考えられる。

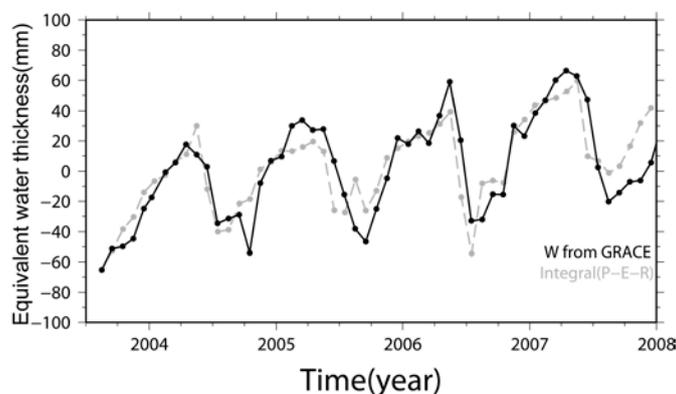


図 3. レナ川流域の貯水量変化。黒の実線が GRACE から得られた貯水量変化、灰色の破線が地上観測データから得られた貯水量変化を示す。どちらのデータからも季節変化だけでなく、経年的変化も良い一致を示した。季節変化と一次関数でモデル化すると、どちらも年間 11 mm 程度の経年的な増加を示す。

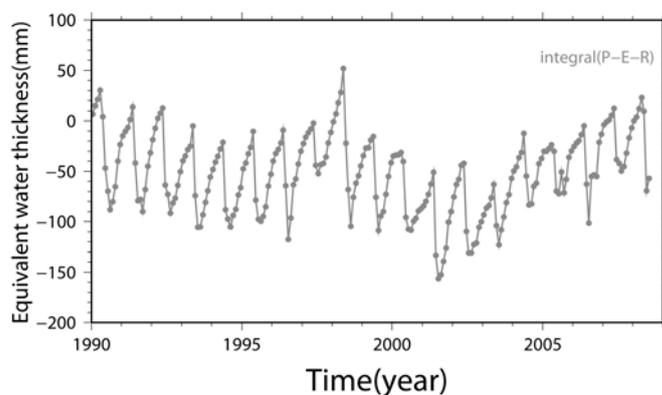


図 4. 1990 年以降の河川の流量と降水量のデータから推定したレナ川流域の貯水量変化。2003 年以降の GRACE データと地上観測データから得られた貯水量が非常に良い一致を示した（図 1）ため、実蒸発散量/可能蒸発散量の比を 1990 年からの地上観測データにも適用した。1997-1998 年の貯水量の急激な増加には ENSO が関わっていると思われる。2001 年以降は単調な増加を示す。