

図7. アフリカと南米における、図6の重力のずれの分布を水厚に変換したものの、白丸は図9の2地点。

## 1. はじめに

全球的な気候に影響を与える最も重要な現象の一つに、El Niño/La Niñaがある。Ropelewski and Halpert(1987,1988)は地上気象データから、これらの現象に伴って世界各地に特徴的な降雨異常が発生することを示した。

GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)は2002年3月に打ち上げられた双子衛星で、毎月の重力場を高精度で測定しており、空間的・時間的な重力の変化を検出することができる。また、測定された重力の変化から土壌水分量や山岳氷河、大陸氷床などの地表質量の変化を定量的に議論することができる。

本研究では、2002年4月～2007年10月におけるGRACEのデータを解析し、El Niño/La Niñaに伴う降雨異常を重力変化から検出することを試みた。また、簡単なバケツモデルを仮定し、降水量と蒸発散量から推定した土壌水分量の変化と比較して、その整合性を検討した。

## 2. El Niño/La Niñaとそれに伴う降雨異常

気象庁では、太平洋赤道域中央部～東部にあるエルニーニョ監視海域(NINO3, 5S-5N, 150W-90W)の海面水温(SST)の基準値(その年の前年までの30年間の各月の平均値)との差の5ヶ月移動平均値が6ヶ月以上続けて+0.5℃以上となった場合をEl Niño、-0.5℃以上となった場合をLa Niñaと定義している。

Ropelewski and Halpert(1987)は19世紀以降の地上気象データからEl Niño発生時に降雨異常が80%以上の確率で発生する地域と時期をまとめている(図3)。また、Ropelewski and Halpert(1988)によると、La Niña発生時は図3とほぼ逆の降雨異常が発生する。

海上におけるこれらの降雨異常は重力には反映されない。しかし陸上における降雨は土壌水分となって一旦蓄えられるので、陸上におけるこれらの降雨異常が重力から検出できる可能性がある。

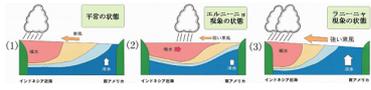


図1. El Niño/La Niña発生時の太平洋赤道域断面の模式図(気象庁ホームページより)。

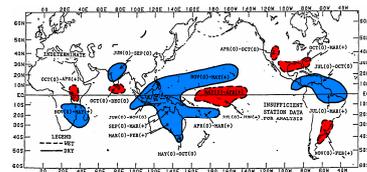


図3. El Niño発生時に降雨異常が起きやすい地域(Ropelewski and Halpert, 1987より)。

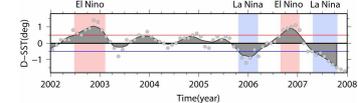


図2. NINO3におけるSSTの基準値との差。背景が赤いときがEl Niño、青いときがLa Niñaの発生時期である。データは気象庁ホームページより。

## 3. 重力変化から見えるEl Niño/La Niñaの影響

GRACEのデータは、CSRIによる解析のLevel2データ(RL04)を用いた。データは最大60次のストークス係数で構成されており、以下の式で重力変化 $\Delta g$ が求められる(Wahr et al., 1998)。

$$\Delta g(\theta, \phi) = \frac{GM}{R^2} \sum_{n=0}^{n_{max}} (n+1) W_n \sum_{m=0}^n (\Delta C_{nm} \cos m\phi + \Delta S_{nm} \sin m\phi) P_n^m(\cos \theta) \quad (1)$$

ここで、 $\Delta C_{nm}$ 、 $\Delta S_{nm}$ はStokes係数の変化量、 $P_n^m$ はルジャンドル陪角関数である。 $W_n$ はaveraging functionといい、空間的平滑化を施す重み係数で、漸次式で表される。重みが1/2になる距離averaging radiusは、本研究では500kmとした。

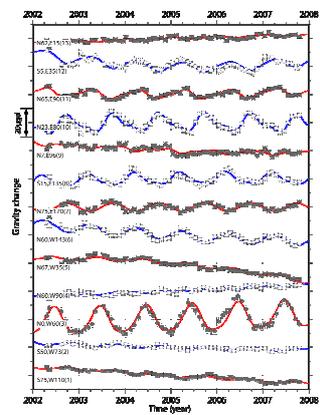


図4. 世界各地の重力の時系列。実線は1次、2次、年周期、半年周期の成分で最小二乗推定して得られたモデル曲線。

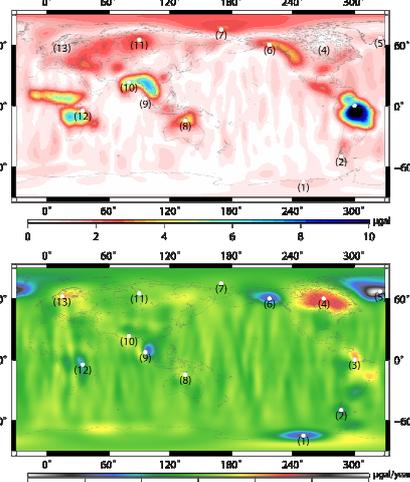


図5. 年周期成分(上)とトレンド成分(下)の大きさの分布。

重力変化は二次の多項式で表される変化と季節変化からなるモデルでほぼ近似できる。これらの変化は気候や地殻変動の影響を反映している。低緯度で年周期が強いのは、雨季・乾季によって土壌水分量が変化するためである。高緯度でも年周期の強い地域があるが、これは積雪によるものである。図5中の(1)(2)(5)(6)の負のトレンドは大陸氷床や山岳氷河の融解のためである。(4)(13)の正のトレンドはPGR(後氷期回復)という隆起現象によるものである。(9)では2005年1月に突然の変化が見られるが、これはスマトラ地震に伴う地下の密度変化を反映している。

すべての地点でほぼモデルどおりの変化をしているが、(3)と(12)において2006年2月や2007年2月を中心にモデルからのずれが見られる。これらの時期はEl Niño/La Niñaの終わりの時期である。また、両時期でずれの位相が逆になっている(図6)。これらのずれがEl Niño/La Niñaによる降雨異常を表している可能性がある。

この重力のモデルからのずれが地表に分布する面密度 $\Delta \sigma$ の荷重によるものと仮定する。その荷重量を推定するために、まずは各々のストークス係数の時系列を定数、1次、2次、年周期、半年周期の成分で最小二乗推定した。そして特定の時期におけるモデル曲線からのずれを求め、それらを以下の式に代入する。

$$\Delta \sigma(\theta, \phi) = \frac{R \rho_{avg}}{3} \sum_{n=0}^{n_{max}} W_n \sum_{m=0}^n \frac{2n+1}{1+k_n} (\Delta C_{nm} \cos m\phi + \Delta S_{nm} \sin m\phi) P_n^m(\cos \theta) \quad (2)$$

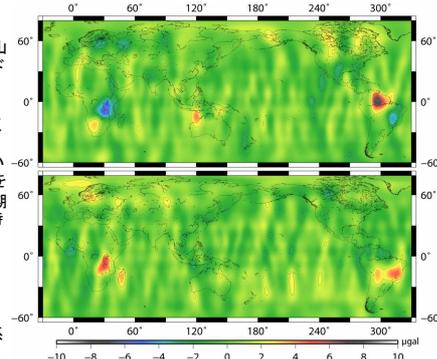
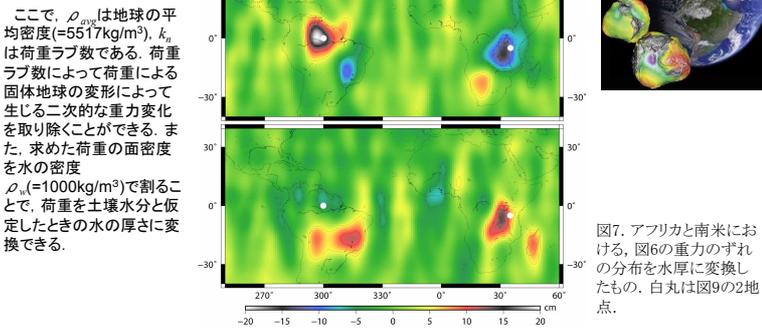


図6. 2006年2月(上)と2007年2月(下)における重力のモデル曲線からのずれの分布。



## 4. 土壌水分変化の推定と比較

Crowley et al.(2006)の手法を参考に降水量と蒸発散量から土壌水分量を推定する。そして、GRACEからEl Niño/La Niñaによる影響がある異常が検出された2006年2月と2007年2月における土壌水分量の異常を取り出しGRACEによる結果と比較する。

降水量データはCMAP(CPC Merged Analysis of Precipitation)による2.5°グリッドの月平均値を用いた。蒸発散量はDingman(2002)を参考に気温から推定した。気温データはNCEP(National Centers for Environmental Prediction)による2.5°グリッドの月平均値を用いた。共に期間は2002年4月～2007年7月である。アフリカと南米の陸上のデータのみを計算した。

土壌に簡単なバケツモデル(図8)を仮定し、土壌水分量を $W$ 、降水量を $P$ 、蒸発散量を $E$ 、流出量を $R$ とすると、次の式が成り立つ。

$$\frac{dW(t)}{dt} = P(t) - R(t) - E(t) \quad (3)$$

$P$ が定数、1次、年周期などその他の成分の足し合わせから成るとすると、次のように分解することができる。

$$P(t) = P_0 + P_1 t + P^*(t) \quad (4)$$

$E$ 、 $R$ も式(4)と同様の成分に分解し、式(3)に代入して積分すると、次のようになる。

$$W(t) - (P_0 - R_0 - E_0)t - \frac{1}{2}(P_1 - R_1 - E_1)t^2 + C = \int_0^t [P^*(t') - R^*(t') - E^*(t')] dt' \quad (5)$$

式(5)の右辺を、具体的な降水量と蒸発散量のデータから推定する。流出量は測定・推定が困難なため考慮しないが、ほぼ同位相で変化すると考えられるので大きな影響はないであろう。左辺はGRACEの時系列から定数、1次、2次の成分を除くことによって推定できるので、比較することができる。

まず月々の降水量と蒸発散量の値の差を足し合わせていく、それをGRACEと同様に定数、1次、2次、年周期、半年周期のパラメータで最小二乗推定し、そのうち定数、1次、2次の成分を取り除く、これによって式(5)の右辺に相当する土壌水分量の季節変化成分が推定される。さらに、GRACEと比較するためにGRACEと同様の空間的平滑化を施す。

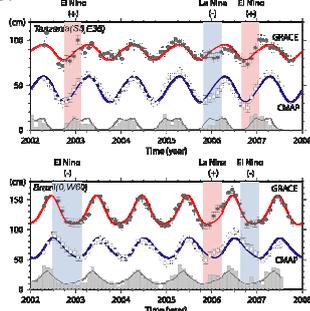


図9. 赤実線がGRACEによって推定した水厚の季節変化で式(5)の左辺を表している。青実線がCMAP降水量データなどから推定した土壌水分量の季節変化で式(5)の右辺を表している。灰色の棒は月々のCMAP降水量データ。黒実線は各月における1979年以降の平均値。タンザニア(上)とブラジル(下)。

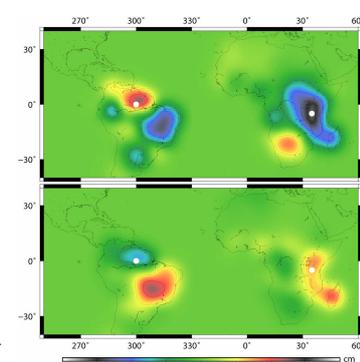


図10. 降水量と蒸発散量から推定した図7と同時期の土壌水分量のモデルからのずれの分布。

まず時系列データという形で比較する。図9を見ると、両地点とも年間の変動の位相、大きさはおおむね一致している。また、2005年～2006年のLa Niña発生時の両地点と2006年～2007年のEl Niño発生時のタンザニアにおいて、降雨異常が発生しそれが土壌水分量の異常な変化になる様子がよくわかる。

次に異常の分布と大きさについて比較する。図7と図10を見比べると、分布、大きさともよく一致している。さらにこれらは図3のEl Niño/La Niña発生時に降雨異常が起きやすい地域ともいづらか一致している。

## 5. 結論と課題

- GRACEデータを解析すると、アフリカと南米においてEl NiñoとLa Niñaで逆位相の重力のモデルからのずれの分布が見られた。
- CMAP降水量データなどから推定した土壌水分量異常はGRACEの結果とよく一致した。
- これらの異常はある程度El Niño/La Niña発生時に降雨異常が起きやすい地域と一致している。

以上のことから、GRACEによる重力計測からEl Niño/La Niñaなどのinter-annualな気象現象が原因の降雨異常を検出できる可能性があるといえる。

だが、課題はいくつか残されている。まず第一にGRACEは打ち上げからまだ日が浅く、データが少ないことである。このため期間内で検出可能なEl Niño/La Niñaが1度づつか発生せず、統計的な議論は不可能であった。第二に、全球的な気候システムは非常に複雑で、El Niño/La Niñaだけではなく多くの他の現象の影響も考慮する必要があることである。しかし、今後データの蓄積や後継機打ち上げによる精度上昇によって課題は解決されていくであろう。今後の発展が期待される。

## 6. 参考文献

- Ropelewski, C.F., M.S. Halpert. 1987. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Month. Weather Rev.*, 115, 1606-1626
- Ropelewski, C.F., M.S. Halpert. 1988. Precipitation patterns associated with the high index phase of Southern Oscillation. *J. Climate*, 2, 268-284
- Wahr, J., M. Molenaar, F. Bryan, 1998. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *J. Geophys. Res.*, 103, 30,205-30,229
- Crowley, J.W., J.X. Mitrovica, R.C. Bailey, M.E. Tamisiea, 2006. Land water storage within the Congo Basin inferred from GRACE satellite gravity data. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L19402, doi:10.1029/2006GL027070, 2006
- Dingman, S.L., 2002. *Physical Hydrology* Second Edition, Prentice Hall, New Jersey, 646pp.