

El Niño/La Niña に伴う降雨異常の
衛星重力計測による検出

Detection of precipitation anomalies
of El Niño/La Niña in time-variable
gravity fields by GRACE

北海道大学 理学部 地球科学科
宇宙測地学研究室

森下 遊
Yu Morishita

2008 年 1 月 31 日

概要

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。これらは太平洋赤道域における大気と海洋の現象であるが、世界各地の気候に影響を及ぼし、高い確率で特徴的な降雨異常をもたらす。

GRACE は 2002 年 3 月に打ち上げられた双子衛星で、毎月の地球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。これまでに多くの研究によって様々な成果が生み出されてきた。

本研究ではまず、2002 年 4 月～2007 年 10 月における GRACE のデータを解析して世界各地の重力の変化の様子をモデリングした。各地の重力の変化の様子はその地域の気候や地殻現象の影響を反映している。またアフリカと南米のある地域において、2005 年～2006 年の La Niña、2006 年～2007 年の El Niño 発生時に、重力の変化に一時的な異常が検出された。それらが検出された地域は El Niño/La Niña によって降雨異常が発生する地域とある程度一致する。このことからこの重力変化の一時的な異常は、El Niño/La Niña に伴う降雨異常による土壤水分量の変化の異常を反映したものである可能性がある。

その可能性を量的に検討するため、その地域における土壤水分量の変化とその異常を、降水量データと、気温データから推定した蒸発散量から推定した。さらにそれと、GRACE によって得られた重力変化とその異常をそれに相当する地上の水厚に換算したものとを比較した。その結果それらの間にはよい一致が見られ、その地域における降水量そのものも El Niño/La Niña 発生時特有の異常を示していたものが多かった。

また世界各地の重力変化のモデリングにおいて、時間の 2 乗に比例する成分も空間的に特徴的な分布をしており、El Niño/La Niña との相関がある可能性を見出した。それについての考察も行った。

これらのことから El Niño/La Niña による降雨異常を、GRACE によって測定される重力から検出できる可能性があるといえる。このことは気候変動の様子を監視する上で、衛星重力計測が新たな指標になる可能性を示している。

目次

1	はじめに	2
1.1	衛星による重力測定	2
1.2	El Niño/La Niña	3
1.3	本研究の目的	5
2	重力解析	6
2.1	GRACE データによる重力の再現	6
2.2	世界各地の重力変化	8
2.3	El Niño/La Niña 発生時の重力のモデルからのずれ	13
2.4	重力に相当する地表面質量と水厚	13
3	降水量と蒸発散量による土壌水分量の推定	17
3.1	土壌水分量	17
3.2	蒸発散量の計算	18
3.3	計算結果	18
4	比較と考察	21
5	時間の 2 乗に比例する成分についての考察	23
6	結論と課題	25
7	謝辞	26
8	参考文献	27

1 はじめに

1.1 衛星による重力測定

地球を全質量が重心にある質点と仮定すると、衛星の軌道はケプラーの法則に従い面積速度一定の楕円を描く。しかし地球の重力場の揺らぎによって現実の衛星軌道は常に少しずつ変化している。逆にこの変化を観測することによって地球の重力場を測定することができる。

この衛星による重力場測定は、1957年の歴史上初である人工衛星スプートニクの打ち上げ直後から行われている。当時衛星軌道変化の観測、つまり衛星の軌道追跡には大口径の衛星追跡カメラが用いられていた。その後1970年代にはSLR(Satellite Laser Ranging)が用いられるようになり、衛星の軌道追跡の精度は飛躍的に向上した。しかしSLRは地上局からのレーザー測距による追尾技術であり、地上局が偏在している影響で軌道決定精度にむらがあった。またSLR用の衛星の軌道高度は一般に高く、高次(短波長)の重力場に対する感度が低かった。

ところが1990年代以降GPSが利用されるようになり、その問題は解決された。2000年7月に打ち上げられたCHAMP(Challenging Minisatellite Payload)は、衛星に搭載したGPS受信機で軌道を決定することで、初めて衛星そのものによる重力場測定を可能にした。このような重力場の測定方法をHigh Low Satellite to Satellite Tracking(H-L SST)と呼ぶ。

そして、さらなる測定精度を持つものがLow Low Satellite to Satellite Tracking(L-L SST)と呼ばれる方法を用いたGRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment, 図1)である。GRACEは高度約450kmの同一軌道にある双子衛星で、互いの衛星は約200km離れている。衛星間の距離とその時間変化、つまりそれらの相対速度を衛星間でマイクロ波を往復させることによって測定している。エネルギー保存則により重力ポテンシャルによる位置エネルギーと運動エネルギーとの和は一定なので、速度変化として重力場の変化を測定することができるのである。

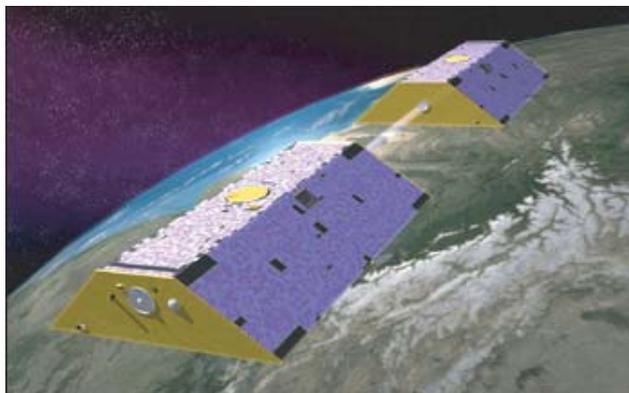


図1 GRACEのイメージ(UTCSRホームページ(<http://www.csr.utexas.edu/>)より)

GRACE によって再現される重力場は時間分解能一ヶ月，空間スケール数百 km 程度で，地上での水厚変化に換算して mm オーダーの変化を検出することができる．この精度の高さが土壌水分量や山岳氷河，大陸氷床など様々な質量変化に関する研究を可能にした．初期の成果として，*Tapley et al.*(2004) はアマゾン川流域の季節的な質量変化を推定し，陸水モデルとも一致することを報告している．*Tamisiea et al.*(2005) ではアラスカ南東部での山岳氷河の融解に伴う重力減少を，*Velicogna and Wahr*(2006) ではグリーンランド南部の重力減少の様子から氷床が融解する速さが 2004 年の春を境に加速したことを検出した．*Fenoglio-Marc et al.*(2006) は地中海の季節的な質量変化を検出することを試みた．*Han et al.*(2006) は 2004 年のスマトラ地震に伴う重力変化を初めて検出し，*Ogawa and Heki*(2007) ではその重力変化が元に戻るのが上部マントルに含まれる水の拡散によるものである可能性を見出した．

1.2 El Niño/La Niña

本来 El Niño とは，ペルー・エクアドル沿岸においてクリスマスのあたりから湧昇が弱くなることによって海面水温が高くなる季節的な現象を指す言葉であった．しかし数年に一度，通常なら水温が低下する時期になっても低下せず，高温のまま推移するということが起こった．この異常な高温水温現象はペルー・エクアドル沿岸のみではなく，その沖合いの東部～中部太平洋の赤道海域まで広がっている大規模なものであることが 1970 年代の調査でわかった．この水温が異常に高くなる現象も，同様に El Niño と呼ぶ．本研究においては，El Niño とは後者のことを指すこととする．

最近では，El Niño は海洋単独の現象ではなく大気との相互作用が現象を理解する上で非常に重要であることがわかってきた．このことから，El Niño と大気のそれに深い関わりのある南方振動 (Southern Oscillation) の頭文字を合わせて ENSO と呼んでこの現象を捉えることが多くなっている．また El Niño とは逆に，ペルー・エクアドル沿岸の海面水温が低くなる現象を La Niña という (図 2)．

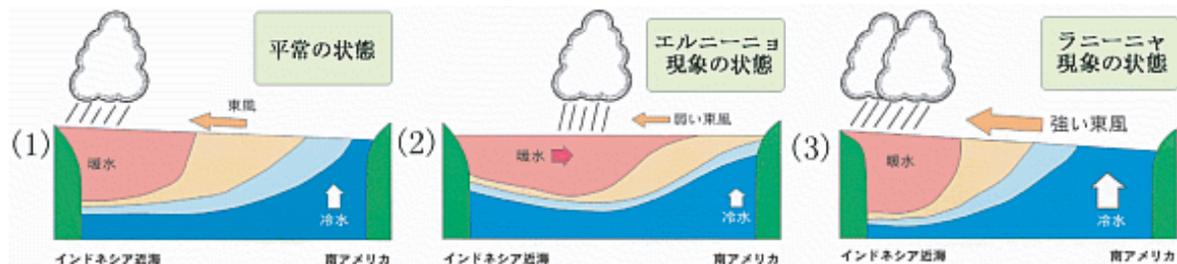


図 2 El Niño/La Niña 発生時の太平洋赤道域断面の模式図 (気象庁ホームページより)

El Niño/La Niña には世界共通の定義はない．気象庁では，エルニーニョ監視海域 (NINO3, 北緯 5 度～南緯 5 度，西経 150 度～西経 90 度) 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(その月および前後2ヶ月を含めた5ヶ月の平均をとった値)が6ヶ月以上続けて+0.5以上となった場合をEl Niño, -0.5以下となった場合をLa Niñaと定義している。

図3によると,2002年6月~2003年2月頃にEl Niñoが,2005年10月~2006年3月頃にLa Niñaが発生している。また,2006年9月~2007年1月頃も海面水温の基準値との差が数ヶ月間続けて0.5以上になっているが,その期間が6ヶ月に満たないため厳密にはEl Niñoではない。しかし同様の影響が少なからず現れると思われるので本研究ではEl Niñoとみなすことにする。さらに,2007年5月以降は軒並み-0.5を下回っており,大規模なLa Niñaが発生している。

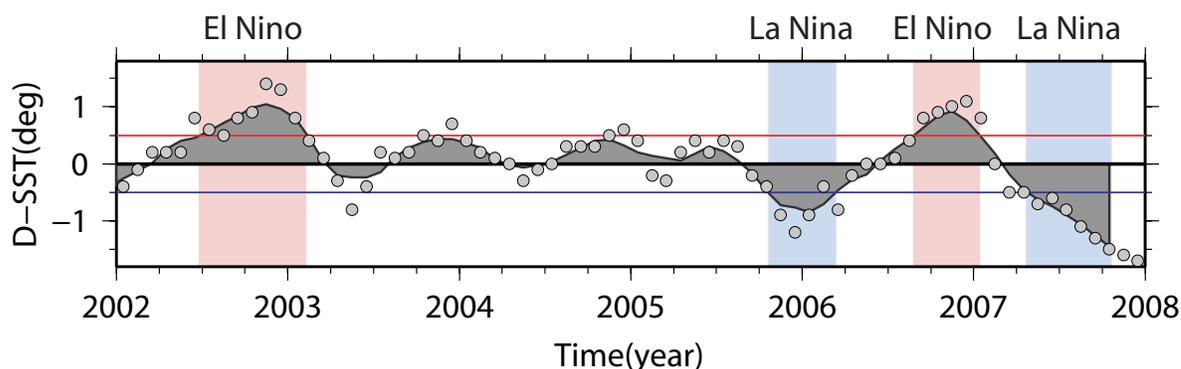


図3 エルニーニョ監視海域における海面水温の基準値との差。灰色の丸は各月の値, 曲線は5ヶ月移動平均値。赤と青の直線はEl NiñoとLa Niñaの判断の基準となる ± 0.5 。背景が赤いときがEl Niño, 青いときがLa Niñaの発生時期である。データは気象庁ホームページ (<http://www.jma.go.jp/>) で公開されている。

El Niñoが発生すると太平洋赤道域に吹いている貿易風が弱まり対流が活発な地域が東方に遷移するため,太平洋赤道域中部で降水量が増加する傾向にある。このような降雨異常は太平洋赤道域に限らず,様々な要因により世界的に現れる。この現象をテレコネクションといい,多くのパターンが見つかっている。Ropelewski and Halpert(1987)は,1700ヶ所を超える地上気象データから得られた降水量をもとに解析し,El Niño発生時に降雨異常が80%以上の確率で起こる地域とその期間をまとめている(図4)。また,La Niña発生時は図4とほぼ逆のパターンになる(Ropelewski and Halpert, 1988)。太平洋の他にアフリカ,インド,オーストラリア,北中南米などでEl Niño発生時の降雨異常が検出されている。さらにそれらのメカニズムについても言及している。アフリカの降水量の増減は通常アフリカ南部にある収束帯が赤道方向に遷移することによる。南米北部の負の降雨異常はウォーカー循環の西方遷移に伴ってこの地域が下降流域になるためである。南米南部の正の降雨異常は200hPa等圧面における亜熱帯西風が通常より強くなることと関連している。

このような異常気象の発生は多くの社会的影響を与える。降水量が増加することで洪水が発

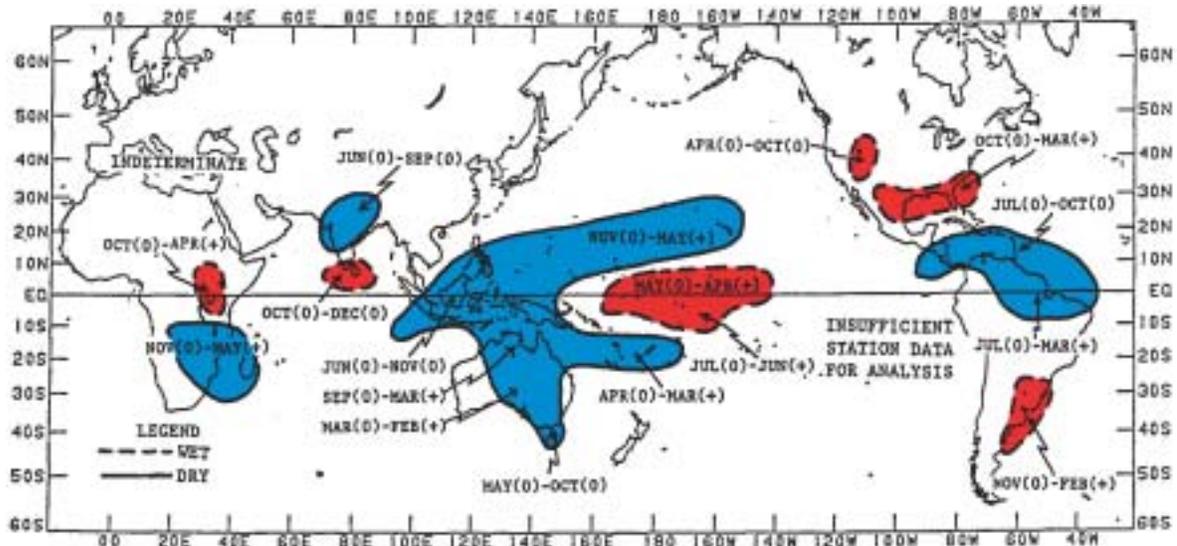


図4 El Niño 発生時に降雨異常が起きやすい地域 (Ropelewski and Halpert, 1987 より) . 表記された期間において El Niño が発生すると実線で囲まれた地域 (青) は降水量が減少, 破線で囲まれた地域 (赤) は増加する傾向にある. La Niña 発生時は逆の傾向になる.

生したり, 減少することで干ばつになったりすることがある. またそのような直接的影響に限らず, 病害虫の異常発生や農作物の不作などによる国際的な穀物価格の異変, さらには海況異変による水産業への影響など社会や経済に与える影響は計り知れない. そのため El Niño/La Niña は人々の生活に関わる重大な現象であるといえる.

1.3 本研究の目的

海上とは異なり陸上での降水は一時的に土壤に蓄えられる. そして降水量が季節的に変化するので土壤水分量も季節的に変化する. その土壤水分量の変化は重力を変動させるので GRACE によって測定することができる. Crowley *et al.* (2006) はコンゴ盆地において GRACE から推定した土壤水分量の変化の様子と, 降水量を積分することで推定したものがよく一致することを報告している.

降雨異常があった陸上の地域では, その影響で土壤水分量が平年とは異なる変化をすることが予想される. そこで本研究では, まず GRACE のデータから各地の重力の変化をモデリングした. そしてそのモデルとのずれから El Niño や La Niña の影響を見出すことを試みた. また, 検出された異常と, 降水量と蒸発散量から推定した土壤水分量とを比較することで, その妥当性を検討した.

2 重力解析

2.1 GRACE データによる重力の再現

GRACE のデータは、カリフォルニア工科大学ジェット推進研究所 (JPL)、テキサス大学宇宙研究センター (UTCSR)、ドイツ地球物理研究センター (GFZ) の三機関により解析され、JPL ホームページ (<http://podaac.jpl.nasa.gov/grace/index.html>) で最新のデータが公開されている。本研究では、UTCSR の解析による 2002 年 4 月～2007 年 10 月における 64 個の Level2 データ (RL04) を用いた。2002 年 6、7 月と 2003 年 6 月のデータは欠損している。

データは、約一ヵ月毎の 60 次までのストークス係数 (地球重力場を球関数展開した際の係数) で構成されている。その精度は二乗平均平方根 (RMS) によって確かめられる。ある次数 n における RMS は次の式で計算できる。

$$RMS_n = \sqrt{\frac{1}{2n-1} \sum_{m=0}^n (C_{nm}^2 + S_{nm}^2)} \quad (1)$$

個数が $2n-1$ なのは $S_{nm} = 0$ だからである。各々のストークス係数の時系列を定数、1 次、2 次、年周期、半年周期のパラメーターで最小二乗推定し、得られたパラメーターを式 (1) に代入して計算したものが図 5 である。すべての成分で 60 次まで信号が誤差を上回っている。このことから解析によって得られる信号は有意なものであるといえる。

重力 g は以下の式で計算される。

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

ここで θ は余緯度、 ϕ は経度、 C_{nm} 、 S_{nm} はストークス係数、 P_n^m は正規化されたルジャンドル陪球関数である。日本測地学会ホームページ内の『球関数に関するプログラム集』 (<http://wwwsoc.nii.ac.jp/geod-soc/contents/book/program.html>) でサブルーチンが公開されており、本研究ではそれを参考に計算を行った。

GRACE データにおける C_{20} 項は精度が低い (*Velicogna and Wahr, 2006*) ので取り除いて計算した。本研究では地域的な反応を対象としているので取り除いてもほぼ問題はない。また、GRACE データは次数が高くなるにつれてノイズが大きくなってしまふ。そのため、Spatial averaging (空間的平滑化) という手法を用いてそのノイズを取り除く (*Wahr et al., 1998*)。手法

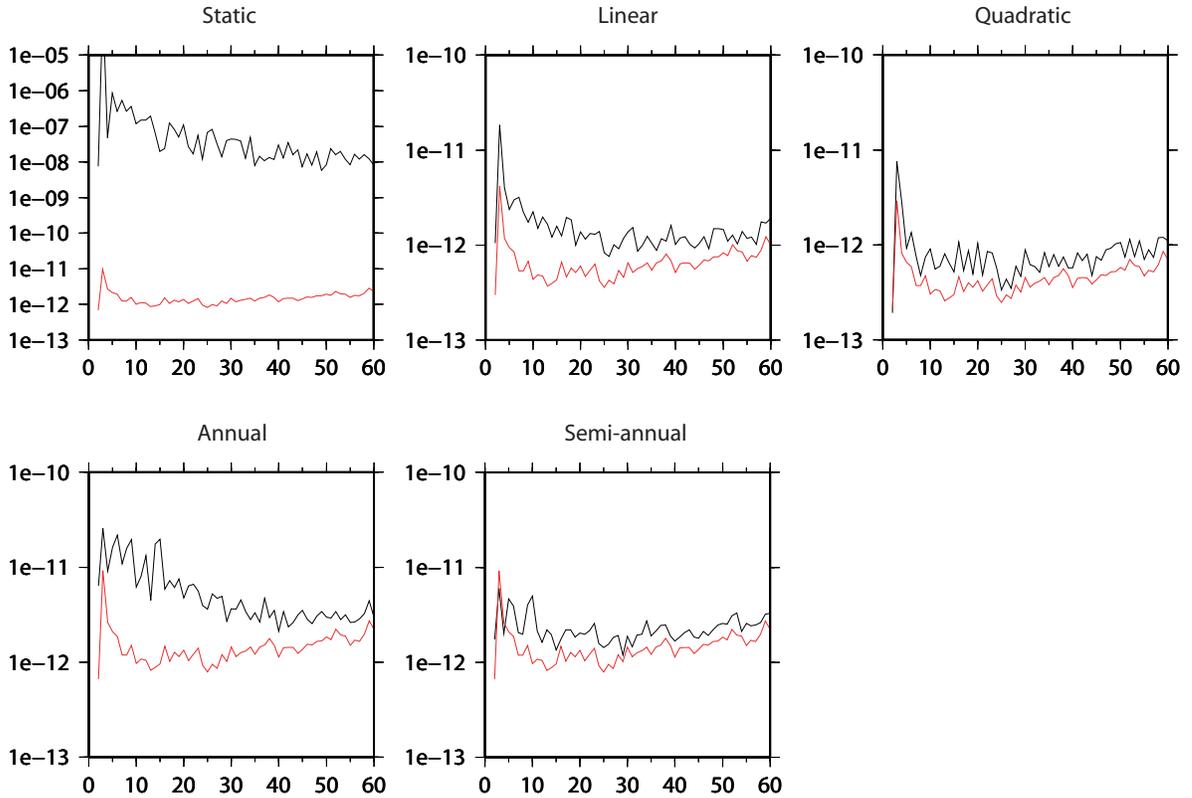


図5 定数，1次，2次，年周期，半年周期成分における次数ごとのRMS．横軸が次数，縦軸がRMS．赤線はそれぞれの成分における残差のRMS．

は，以下の式で計算される次数 n における重み関数 W_n をストークス係数に掛け合わせる．

$$W_0 = 1 \quad (3)$$

$$W_1 = \frac{1 + e^{-2b}}{1 - e^{-2b}} - \frac{1}{b} \quad (4)$$

$$W_{n+1} = -\frac{2n+1}{b} W_n + W_{n-1} \quad (5)$$

$$b = \frac{\ln(2)}{1 - \cos(r/a)} \quad (6)$$

ここで a は地球半径， r は空間的平滑化を行うガウス関数の幅を示す量で averaging radius と呼ばれる．本研究では r を 500km とした．図6を見ると，高次になるにつれて重みが0に近くなっていることがわかる．

空間的平滑化を施すと，式(2)は次のように書き換えられる．

$$g(\theta, \phi) = \frac{GM}{R^2} \sum_{n=0}^{nmax} (n+1) W_n \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\phi + S_{nm} \sin m\phi) P_n^m(\cos \theta) \quad (7)$$

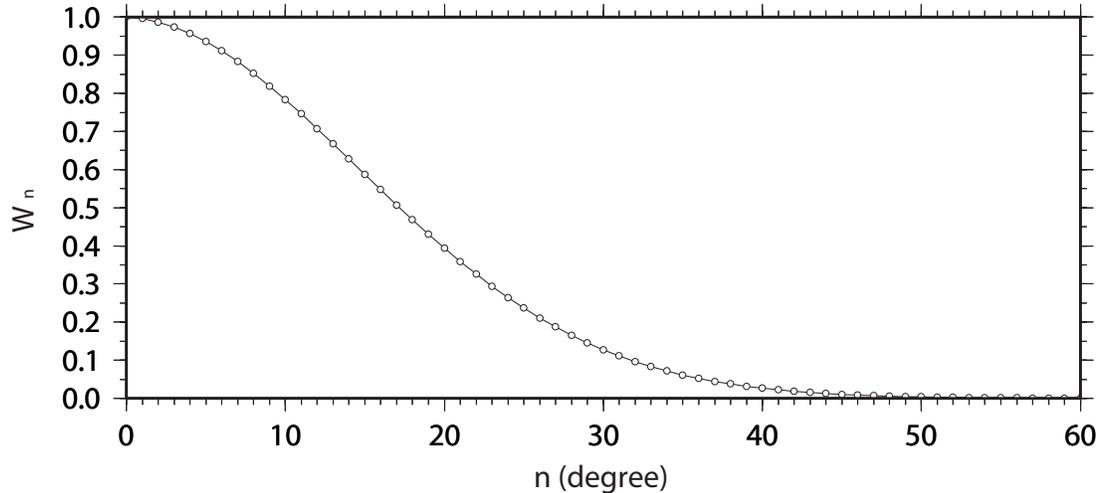


図6 r が 500km のときの重み関数 W_n

2.2 世界各地の重力変化

図7は地球上の各地における重力の時系列である。注目すべきはその変化の様子なので、平均値を取り除き変動成分のみで表現している。図7の実線は時系列データを定数、1次、2次、年周期、半年周期のパラメーターで最小二乗推定したモデル曲線である。変化の様子がほぼ実線に重なっており、重力が主に1次、2次、年周期、半年周期の成分で変化していることがわかる。

さらに重力変化の各パラメーターの全球的な分布を表したものが図8～図11である。図8～図10中の番号は図7の各地点の位置を示している。これらはまず各々のストークス係数の時系列を図7のように定数、1次、2次、年周期、半年周期のパラメーターで最小二乗推定し、それによって得られた各々のストークス係数の変化を表現するパラメーターを ΔC_{nm} 、 ΔS_{nm} として式(8)に代入して計算することで得られる。

$$\Delta g(\theta, \phi) = \frac{GM}{R^2} \sum_{n=0}^{n_{max}} (n+1)W_n \sum_{m=0}^n (\Delta C_{nm} \cos m\phi + \Delta S_{nm} \sin m\phi) P_n^m(\cos \theta) \quad (8)$$

本来有意な信号がないはずの海上においても信号のような縦縞模様が見られるが、これは correlated errors (Swenson and Wahr, 2006) と呼ばれる GRACE に特有のもので、有意な信号ではないため注意が必要である。

各地の重力の変化はさまざまな影響を反映している。図7の各地点の変化を詳しく検証しよう。

(3) アマゾン川流域、(6) アラスカ南岸、(7) 北極海、(8) オーストラリア北部沿岸、(10) インド、(11) エニセイ川上流、(12) タンザニアでは季節変化が明確に現れている。(3) アマゾン川

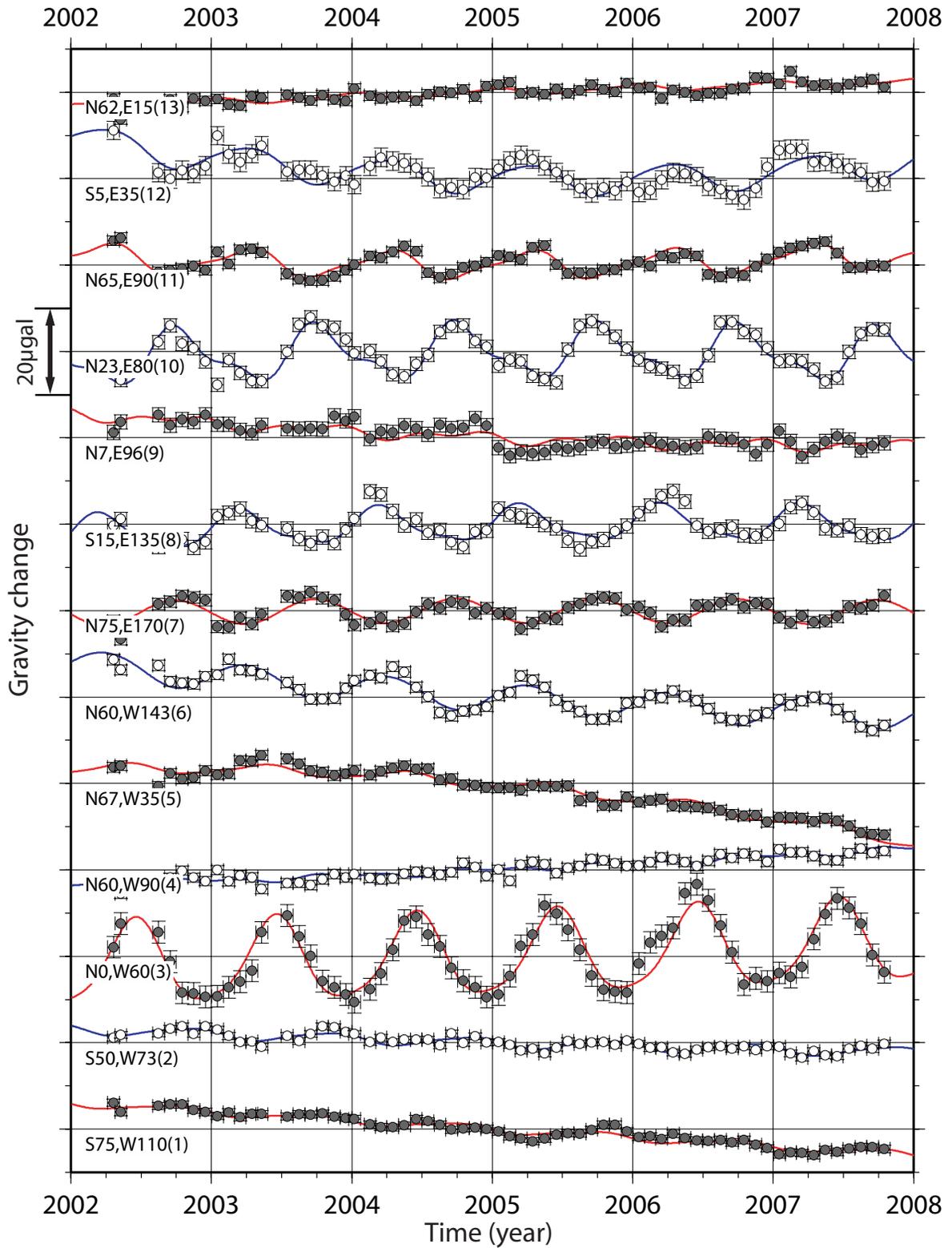


図7 世界各地の重力の時系列．実線は1次，2次，年周期，半年周期のパラメーターを持つモデル曲線．番号が図8～図10の位置と対応している．

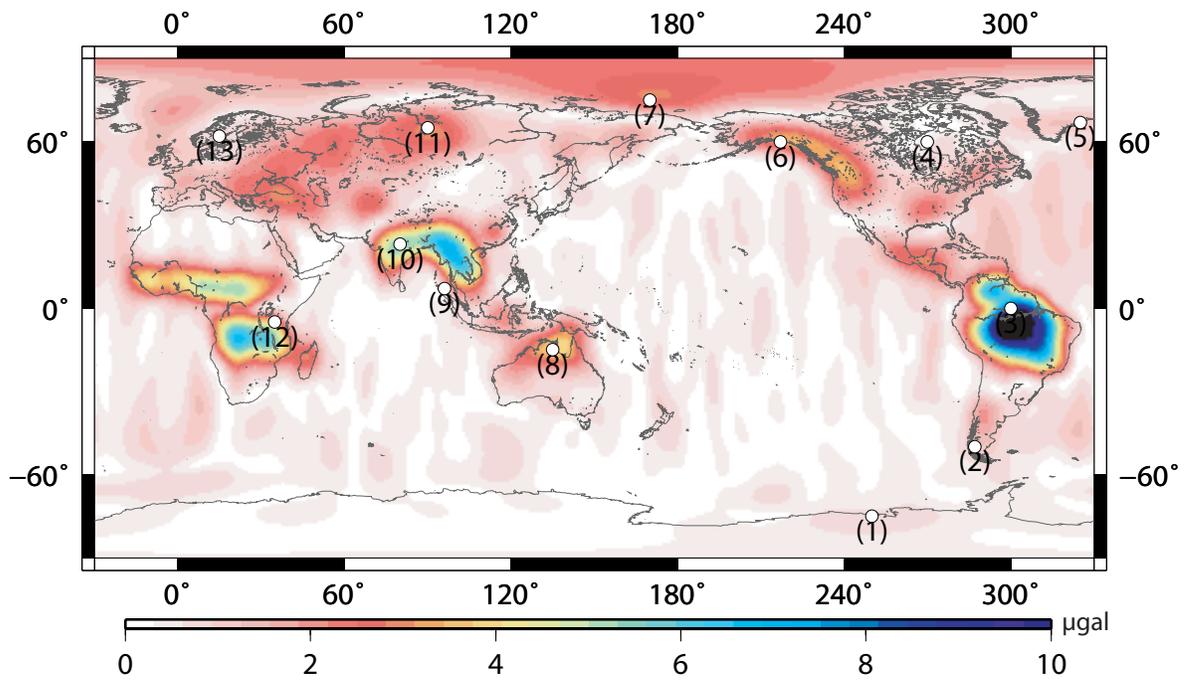


図8 年周期成分の振幅

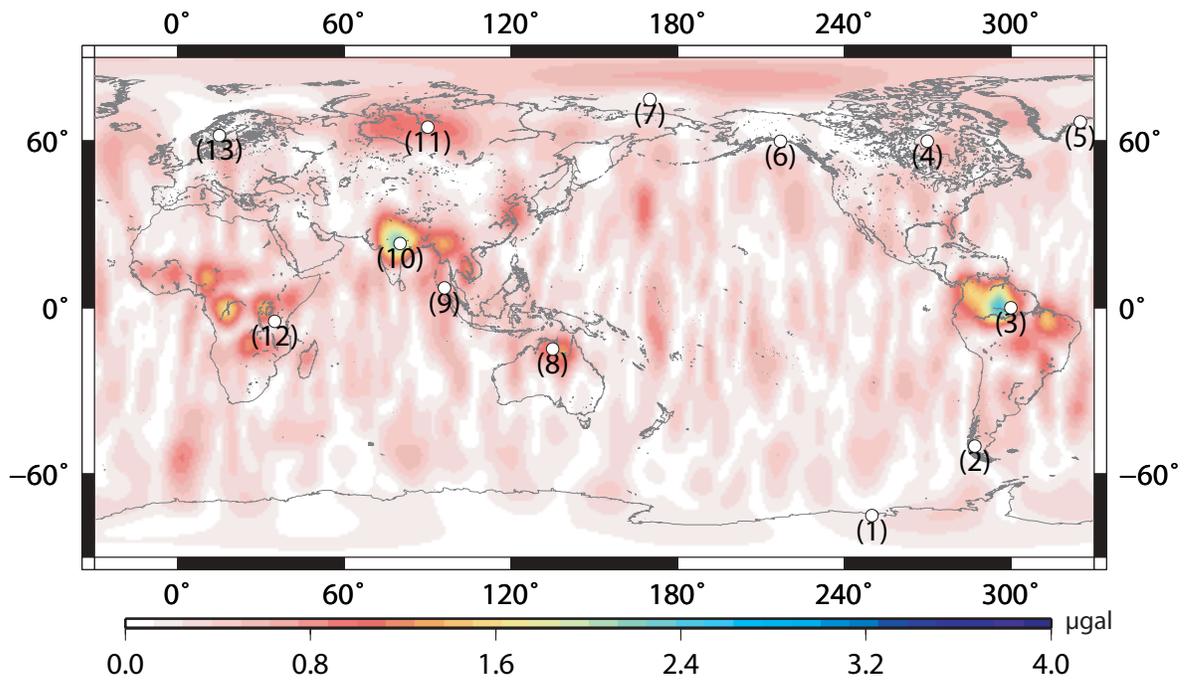


図9 半年周期成分の振幅

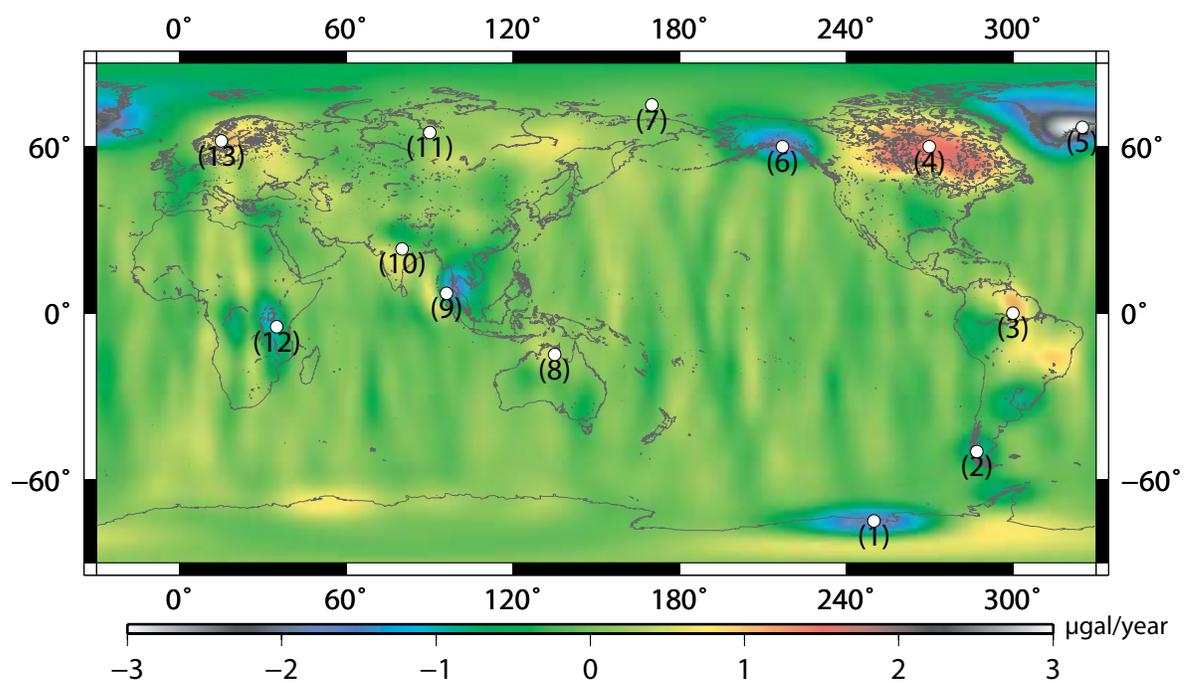


図 10 1次成分の係数の大きさ

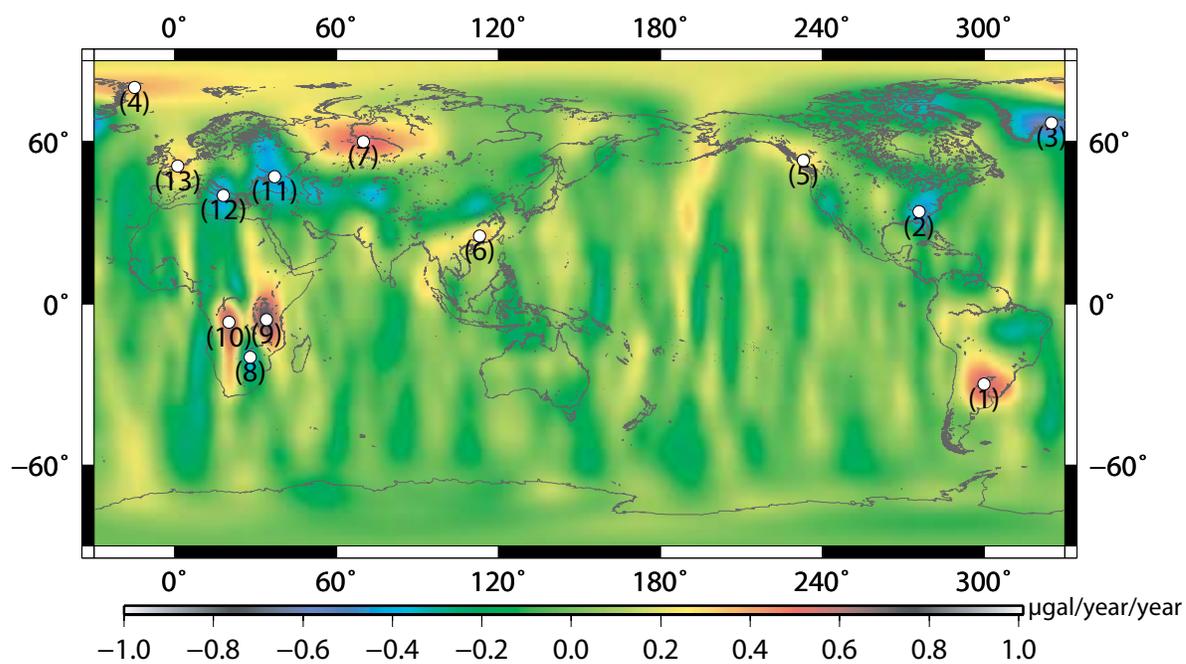


図 11 2次成分の係数の大きさ．番号は図 20 の各地点の位置を示している．

流域においては雨季が12月～5月，乾季が6月～11月，(8) オーストラリア北部沿岸においては雨季が11月～4月，乾季が5月～10月，(10) インドにおいては雨季が6月～9月，乾季が10月～3月，(12) タンザニアにおいては雨季が10月～12月と3月～5月，乾季が6月～8月，といったようにこれらの地域では明瞭な雨季と乾季が存在する．重力が極大，極小になる時期と雨季，乾季の変わり目が一致しているため，これら4地点における重力の季節変化は降水の季節変化による土壌水分量の変化を表しているといえる．

(6) アラスカ南岸，(11) エニセイ川上流ではこういった明瞭な雨季・乾季は存在しない．これら2地点における重力の季節変化の原因は冬の積雪である．10月ごろから積雪によって重力が増え始め，3月ごろまで降雪が続くため3月頃重力が極大になっている．

(7) 北極海は陸上ではないので，土壌水分や積雪などの理由では季節変化の説明はできない．また，北極海における海氷の面積は2月末に極大，9月半ばに極小になる．これは重力変化の位相と合致しているが，これでも季節変化の理由は説明できない．海氷は押し退けた海水分の質量を持っているので，融解した場合にも全体の質量は変化しないためである．その証拠に南極域でも海氷の面積が北極海と逆位相で季節変化するが重力は季節変化していない(図8，図9)．原因としては，北極海に流入する河川の流量が4～9月に雪解けによって増加し，ベーリング海峡側はある程度閉じられた海であるために海水量が増加しそれが重力に表れている，といったものが考えられる．

(1) 西経110°付近の南極大陸沿岸，(2) パタゴニア，(5) グリーンランド南東端，(6) アラスカ南岸では明瞭な負のトレンドが見られる．これらはすべて大陸氷床や山岳氷河の融解による縮小が起きている地域であり，それによって重力が減少しているのである．氷河の融解は地球温暖化が原因とも言われ，重力によって気候変動を検出できる一つの例である．

(4) ハドソン湾，(13) スカンジナビア半島では明瞭な正のトレンドが見られる．これらはPostglacial Rebound(PGR) と呼ばれるものが原因である．PGRとは，氷期に存在した氷河の重みで凹まされていた地盤が氷期終了後にゆっくりと隆起してアイソスタシーを回復する現象のことである．隆起することによってジオイド高が増加し，重力が増加するのである．

これらのように，重力変化における1次，年周期，半年周期の成分の多くはその地域特有の気候や現象で説明がつく．その一方で図11で見られる2次の成分については，原因がよくわからないものが多い．しかしそれらはEl Niño/La Niñaなどによるものであるかもしれない．それについての考察は後の第5節(23ページ)で行う．

また，特殊な重力変化として(9) アンダマン海がある．ここでは2004年12月26日にスマトラ沖地震が発生した．それに伴うコサイスミックな重力変化が2004年12月の値から2005年1月の値への突然の減少となって表れている(Han et al. , 2006 , Ogawa and Heki , 2007) ．

2.3 El Niño/La Niña 発生時の重力のモデルからのずれ

図 7 においてほぼすべての地点において重力がモデル曲線どおりの変化をしている。しかし (3) ブラジルと (12) タンザニアにおいて 2006 年 2 月と 2007 年 2 月を中心にモデルから実際の値が大きくずれている。両者は La Niña と El Niño の終わりごろにあたり、また *Ropelewski and Halpert*(1987, 1988) によると降雨異常が起こりやすい地域でもある。よってこのずれが La Niña や El Niño による降雨異常に起因する土壤水分量の異常を反映したものである可能性がある (2002 年～2003 年の El Niño 発生時にそういったずれが見られないのは、GRACE が打ち上げられて間もなく、測定精度が充分でなかったためだと思われる)。そこでまず 2006 年 2 月と 2007 年 2 月における重力のモデルからのずれを全球的に見て検討する。

そのためにはまず各々のストークス係数の時系列を図 7 の重力と同様に定数、1 次、2 次、年周、半年周のパラメーターで最小二乗推定し、各月の実際の値とモデルの値との差を計算する。そしてそれらを ΔC_{nm} , ΔS_{nm} として式 (8) に代入して計算することで全球的な重力のモデルからのずれ Δg を計算することができる。

図 12 はそうして得られた 2006 年 2 月、2007 年 2 月における重力のモデルからのずれを全球的に表したものである。アフリカと南米において顕著なずれが見られ、それらが 2006 年 2 月と 2007 年 2 月で反転している。*Ropelewski and Halpert*(1987, 1988) によると El Niño と La Niña で降雨異常のパターンはほぼ反転する。これらのことも、重力のモデルからのずれは El Niño/La Niña の影響を表しているという仮説を支持している。以降では、これらのずれが顕著なアフリカと南米に特に注目していく。

2.4 重力に相当する地表面質量と水厚

これらの重力のモデルからのずれが El Niño/La Niña に伴う降雨異常によるものなのかを確かめるために、そのずれを量的に検討する必要がある。そのために、これらずれを重力の形式から、それに相当する地表面の水厚の形式に変換する。重力のずれ Δg が式 (8) で書けるとき、相当する地表面質量 $\Delta\sigma$ (面密度) は式 (9) のように書ける (*Wahr et al.*, 1998)。また、 $\Delta\sigma$ を水の密度 ρ_w で割ることで、相当する水厚を求めることができる。

$$\Delta\sigma(\theta, \phi) = \frac{R\rho_{avg}}{3} \sum_{n=0}^{nmax} W_n \sum_{m=0}^n \frac{2n+1}{1+k_n} (\Delta C_{nm} \cos m\phi + \Delta S_{nm} \sin m\phi) P_n^m(\cos \theta) \quad (9)$$

ここで ΔC_{nm} , ΔS_{nm} は式 (8) と同じストークス係数の変化量、 ρ_{avg} は地球の平均密度 (=5517kg/m³) である。 k_n は荷重ラプ数と呼ばれ、地表の荷重の変化による固体地球の重力ポテンシャルの変化に関係した係数である。これを考慮することで固体地球の変化の影響を取り除くことができる。いくつかの値を表 1 に示してある。表 1 に示されていない次数におけ

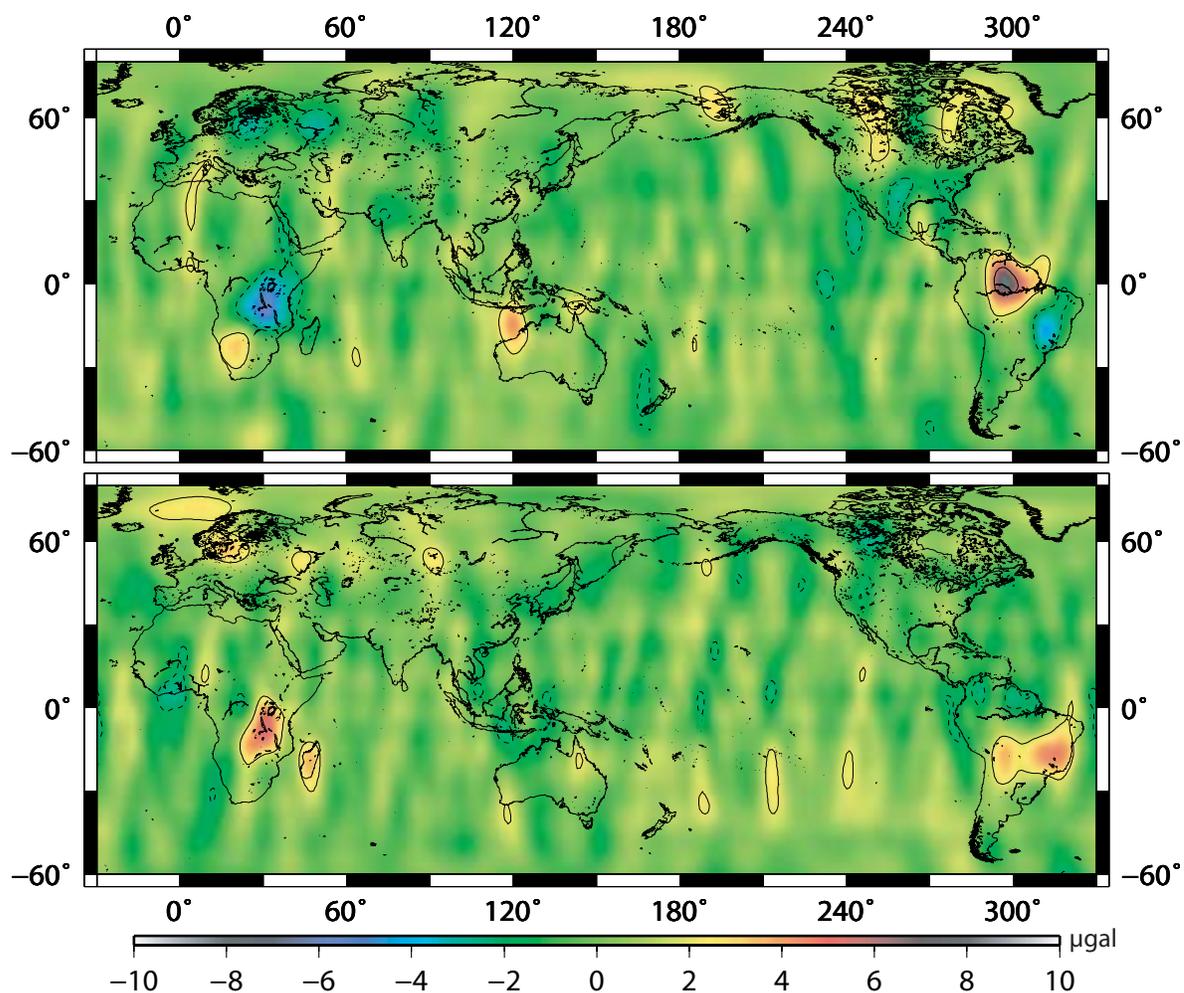


図 12 2006 年 2 月 (上) と 2007 年 2 月 (下) における重力のモデル曲線からのずれ。実線は 2, 6 μgal , 破線は -2, -6 μgal の等高線。

る k_n は前後の値から線形内挿することによって得た。そうして得られた値の誤差は 0.05% 未満であるため、精度に問題はない。

図 13 はタンザニアとブラジルにおける水厚の時間変化の様子である。1 次, 2 次成分は取り除いてある。2006 年 2 月と 2007 年 2 月に特徴的なずれが見られる。これらの正負は図 4 で示した El Niño/La Niña に伴う降雨異常とも一致している。図 14 はそれぞれの月における重力のモデルからのずれを水厚という形で空間的に表したものである。

表 1 次数ごとの荷重ラプ数 k_n の値 . *Wahr et al.*(1998) Table1. より .

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8
k_n	+0.000	+0.027	-0.303	-0.194	-0.132	-0.104	-0.089	-0.081	-0.076
n	9	10	12	15	20	30	40	50	70
k_n	-0.072	-0.069	-0.064	-0.058	-0.051	-0.040	-0.033	-0.027	-0.020

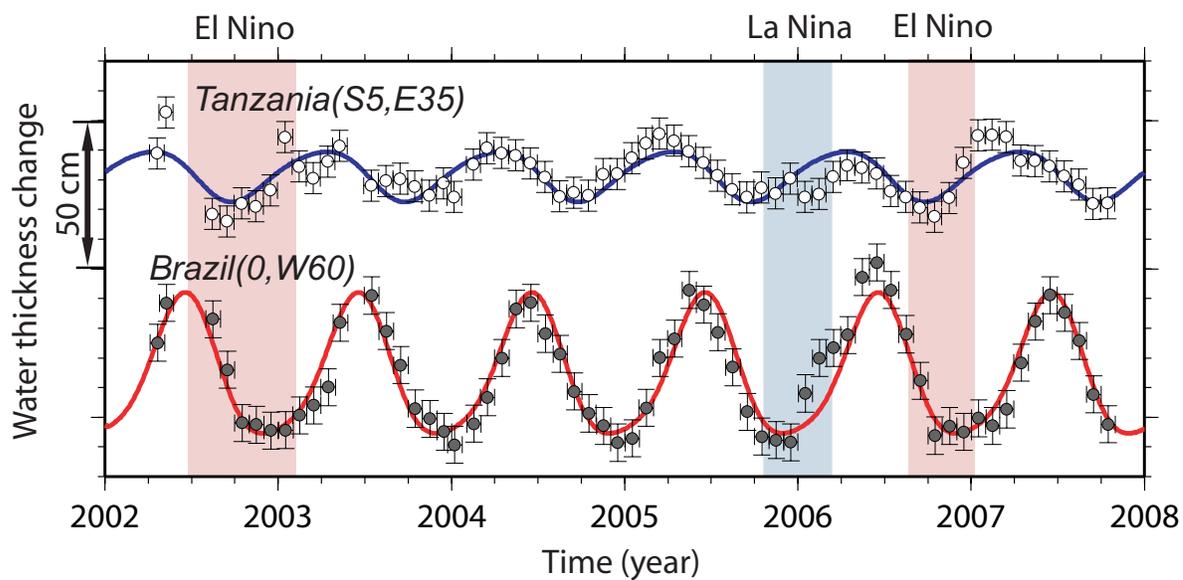


図 13 GRACE によって推定したタンザニアとブラジルにおける水厚変化の時系列 . 定数, 1 次, 2 次, 年周期, 半年周期のパラメーターで最小二乗推定し, 定数, 1 次, 2 次のパラメーターを取り除いてある . これが 17 ページの式 (12) の左辺に相当する . 背景の赤と青はそれぞれ El Niño と La Niña の発生した期間を表している .

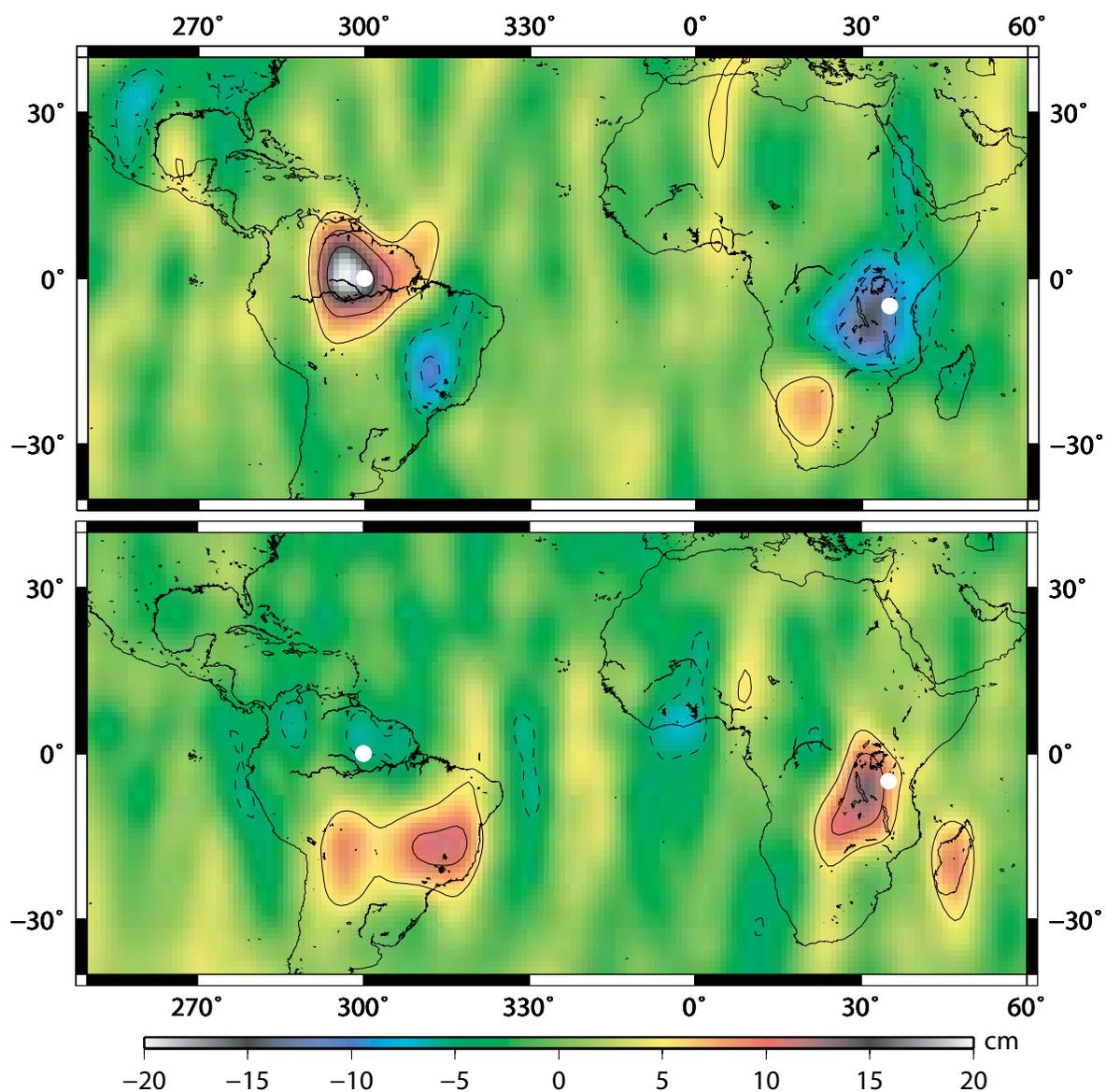


図 14 2006 年 2 月 (上) と 2007 年 2 月 (下) における GRACE によって推定した水厚異常．実線は 5, 10, 15cm, 破線は -5, -10, -15cm の等高線．白丸は図 13 の 2 地点．

3 降水量と蒸発散量による土壌水分量の推定

GRACE データの解析によって得られた重力のモデルからのずれが土壌水分量の異常によるものなのか，その量の整合性を検討する必要がある．ここでは *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 による影響の可能性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す．

3.1 土壌水分量

土壌に対して簡単なバケツモデル (図 15) を適用すると，式 (10) が成り立つ．

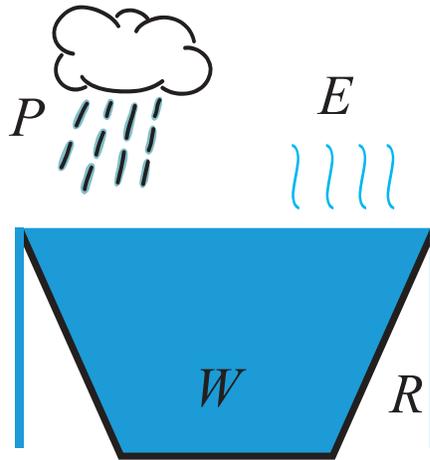


図 15 バケツモデルの模式図

$$\frac{dW(t)}{dt} = P(t) - R(t) - E(t) \quad (10)$$

$W(t)$ は土壌水分量， $P(t)$ は降水量， $R(t)$ は流出量， $E(t)$ は蒸発散量である．右辺の各変数が定数，一次，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，例えば $P(t)$ は

$$P(t) = P_0 + P_1 t + P^*(t) \quad (11)$$

のように書き換えることができる． $R(t)$ ， $E(t)$ も同様に書き換え，式 (10) を積分すると，

$$W(t) - (P_0 - R_0 - E_0)t - \frac{1}{2}(P_1 - R_1 - E_1)t^2 + C = \int_{t_0}^t [P^*(t') - R^*(t') - E^*(t')] dt' \quad (12)$$

となる．式 (12) の右辺を，降水量と蒸発散量の具体的なデータを用いて計算する．データを積分し，そこから定数，1 次，2 次の成分を取り除くことで右辺が計算でき，それは $W(t)$ の季節変化成分に相当する．それと GRACE の観測値とを比較することができるのである．

流出量 R は測定・推定が困難なため考慮しないが、それほど重大な影響を与えることはないと考えられる。なぜなら単純なバケツモデルにおいて、流出は土壌水分量が土壌の許容量を超えたときにのみ発生するため、変化の位相を大きく変化させることはないからである。

3.2 蒸発散量の計算

蒸発散量を測定するのは困難であるので、気温から推定する。Dingman (2002) によると、蒸発散量 E は式 (13) で書ける。

$$E = \frac{P}{\left[1 + \left(\frac{P}{PET}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (13)$$

PET は可能蒸発散量であり、式 (14) で計算される。

$$PET = 29.8 \cdot D \cdot \frac{e^*}{T + 273.2} \quad (14)$$

D は昼の長さであり、緯度の関数である。 σ を赤緯、 Λ を緯度、 ω を地球自転角速度 (=0.2618 rad/hr)、 J を年通算日とすると、

$$D = \frac{2 \cos^{-1}[-\tan(\sigma) \cdot \tan(\Lambda)]}{\omega} \quad (15)$$

$$\sigma = \frac{180}{\pi} \cdot [0.006918 - 0.39912 \cdot \cos(\Gamma) + 0.070257 \cdot \sin(\Gamma) - 0.006758 \cdot \cos(2 \cdot \Gamma) + 0.000907 \cdot \sin(2 \cdot \Gamma) - 0.002697 \cdot \cos(3 \cdot \Gamma) + 0.00148 \cdot \sin(3 \cdot \Gamma)] \quad (16)$$

$$\Gamma = \frac{2 \cdot \pi \cdot (J - 1)}{365} \quad (17)$$

で計算できる。また、 66.5° より高緯度の地域では、 $[-\tan(\sigma) \cdot \tan(\Lambda)]$ の絶対値が 1 を超えることがあるので、そのときは D に 0 か 24 を代入する必要がある。 e^* は飽和蒸気圧であり、気温 T を用いて

$$e^* = 0.611 \cdot \exp\left(\frac{17.3 \cdot T}{T + 237.3}\right) \quad (18)$$

で計算できる。

3.3 計算結果

降水量は CMAP(Climatology Prediction Center Merged Analysis of Precipitation) による 1979 年 1 月～2007 年 7 月におけるデータ (月平均値、グリッド幅 2.5°) が公開されているので、それを用いた (<ftp.cdc.noaa.gov/Datasets/cmap/std/precip.mon.mean.nc>)。陸域の降水量データは、

雨量計のほか，赤外の雲頂温度やマイクロ波の散乱から推定されたものである．蒸発散量を計算するための気温は，NCEP(National Centers for Environment Prediction) による月平均気温データが公開されているのでそれを用いた．データは CMAP と同様に 2.5° ずつであるが，両データでグリッドが 1.25° ずれているので CMAP 降水量データのあるグリッドの周囲 4 点における NCEP 気温データの平均をとることでデータの位置を合わせた．

以上のデータを用いて式 (12) の右辺を計算する．ある地点における月々の降水量から蒸発散量を引いた値を期間内において足し合わせて積分する．それを GRACE と同様に定数，1 次，2 次，年周，半年周のパラメーターで最小二乗推定し，そのうち定数，1 次，2 次の成分を取り除く．さらに，GRACE による結果と比較するために GRACE と同様に空間的平滑化を施す必要がある．そのためには一度土壌水分量の分布を球関数の係数の形に展開しなくてはならない．注目しているのはアフリカ・南米なのでその 2 大陸のみデータを取り出した．これはその他の陸地およびすべての海域における値を常に 0 にすることと等価である．取り出した土壌水分量分布 $Y(\theta, \phi)$ を式 (19) を用いて球関数に展開する．

$$\{C_{nm}, S_{nm}\} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi Y(\theta, \phi) P_n^m(\cos \theta) \{\cos m\phi, \sin m\phi\} \sin \theta d\theta d\phi \quad (19)$$

得られた球関数の係数に重み関数 W_n を掛け合わせた上で土壌水分量を再現する．こうして得られた時系列が図 16 である．重力と同様に年変化が見られ，El Niño/La Niña 発生時におけるモデルからのずれも見られる．空間的に比較するために，GRACE で異常のあった時期と同時期 (2006 年 2 月，2007 年 2 月) の土壌水分量異常をプロットしたものが図 17 である．

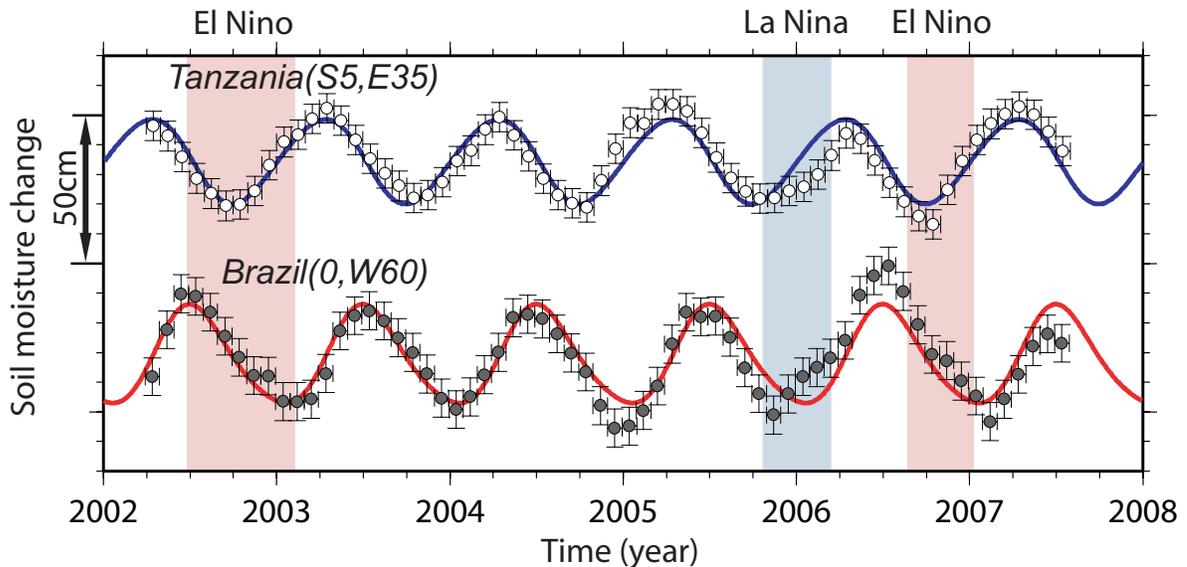


図 16 降水量と蒸発散量から推定された土壌水分量変化．式 (12) の右辺に相当する．背景の赤と青はそれぞれ El Niño と La Niña の発生した期間を表している．

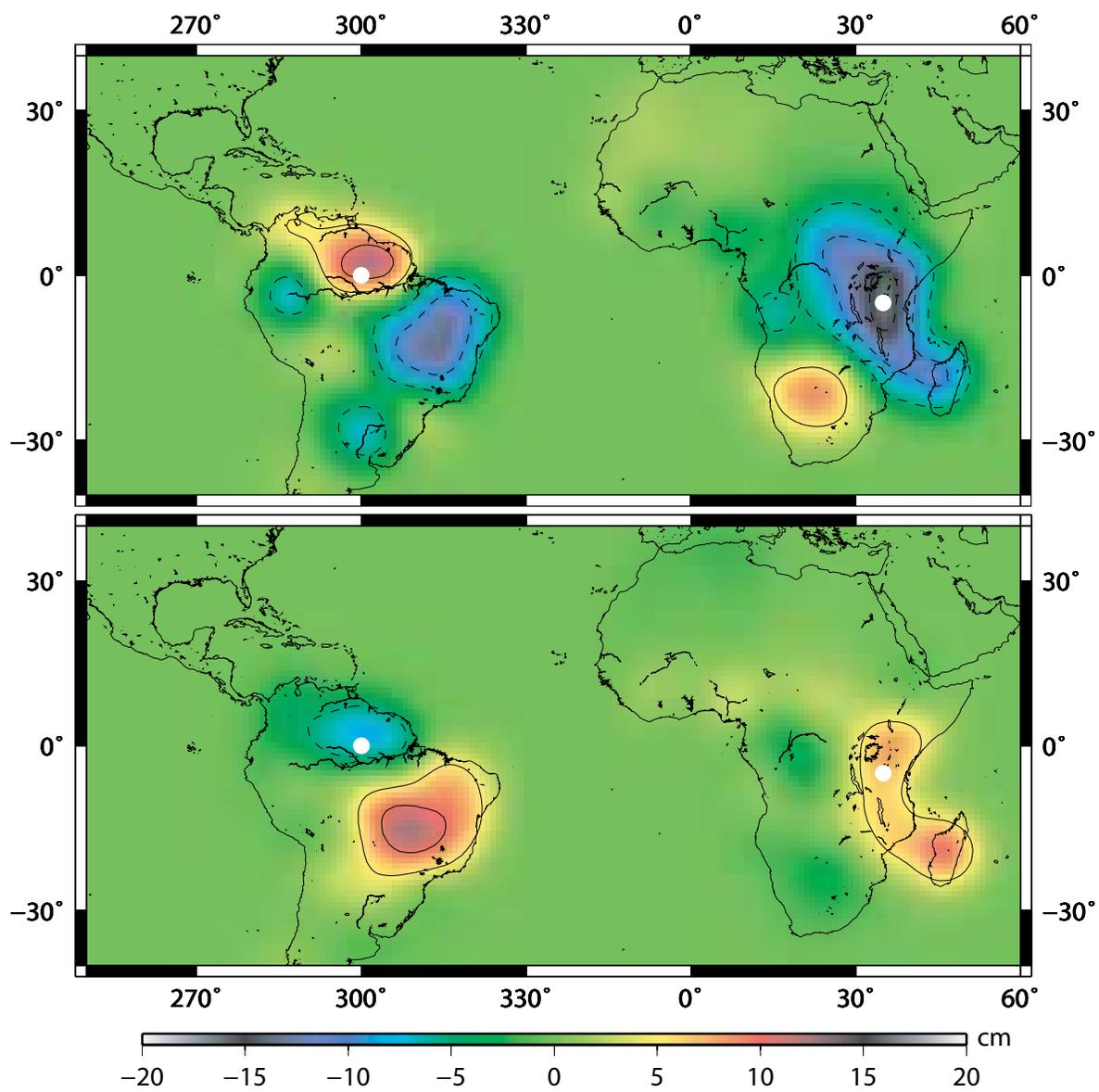


図 17 降水量と蒸発散量から推定された土壌水分異常の分布

4 比較と考察

まずは時系列データという形で比較してみよう．図 18，図 19 を見ると，ブラジルで土壌水分量が減少するときに若干の位相のずれが見られるが，年間の変動の位相，大きさはおおむね一致している．図 18 のブラジル (0,W60) はアマゾン川流域に位置しており，アマゾン川は世界で群を抜く流量を持っている．そのためこの位相のずれは流出量 $R(t)$ を考慮しなかったため現れたものであろう．

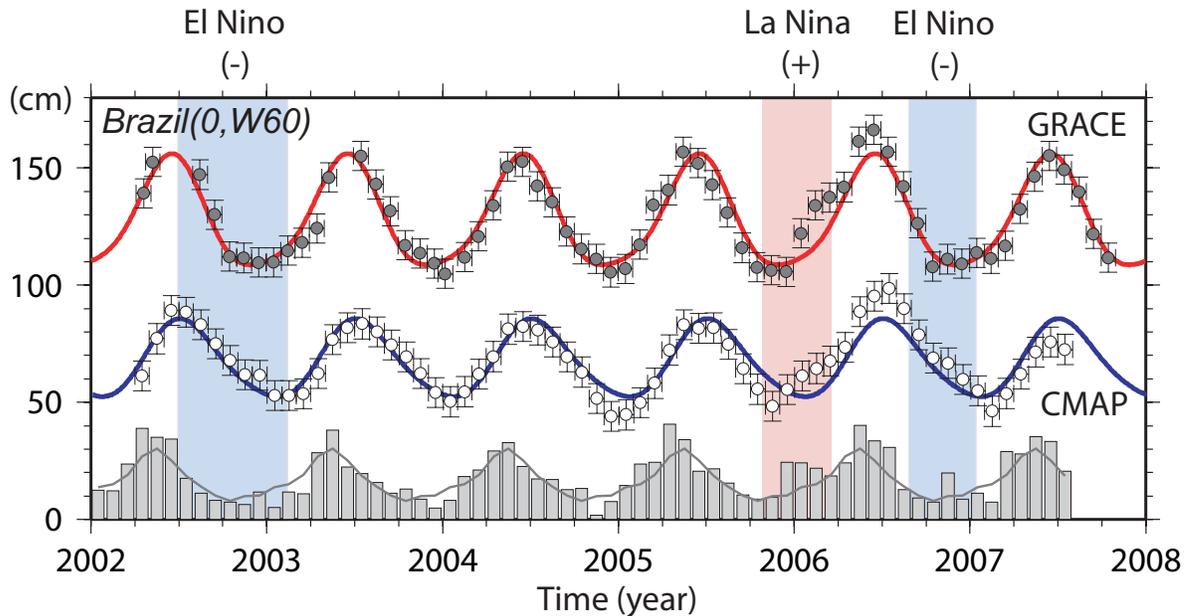


図 18 ブラジル (0, W60) における (上)GRACE によって推定した水厚変化の時系列．式 (12) の左辺を表している．(中)CMAP 降水量データなどから推定した土壌水分量変化の時系列．式 (12) の右辺を表している．(下) 月々の CMAP 降水量データ．実線は各月における 1979 年以降の平均値．背景の赤 (青) 色は実際の El Niño/La Niña 発生期間のうち，降水量が増加 (減少) する傾向にある期間 (図 4)．

図 18 のブラジルにおいて，2005 年～2006 年の La Niña 発生時である 2005 年 12 月，2006 年 1，2 月に降水量が平年より増加し，それが土壌水分量と重力にモデルからのずれとして表れる様子がよくわかる．2006 年～2007 年の El Niño 発生時は降水量の減少があまり見られず，土壌水分量も重力もモデルからそれほどずれてはいない．

図 19 のタンザニアにおいて，2005 年～2006 年の La Niña 発生時である 2005 年 11，12 月，2006 年 1 月に顕著な降水量の負の異常があり，それが土壌水分量と重力のモデルからのずれに反映されていることがわかる．2006 年～2007 年の El Niño 発生時は降水量が平年より増加しており，重力にはモデルからのずれとして顕著に現れているが，土壌水分量も正のずれではあるもののそれほど顕著には現れていない．

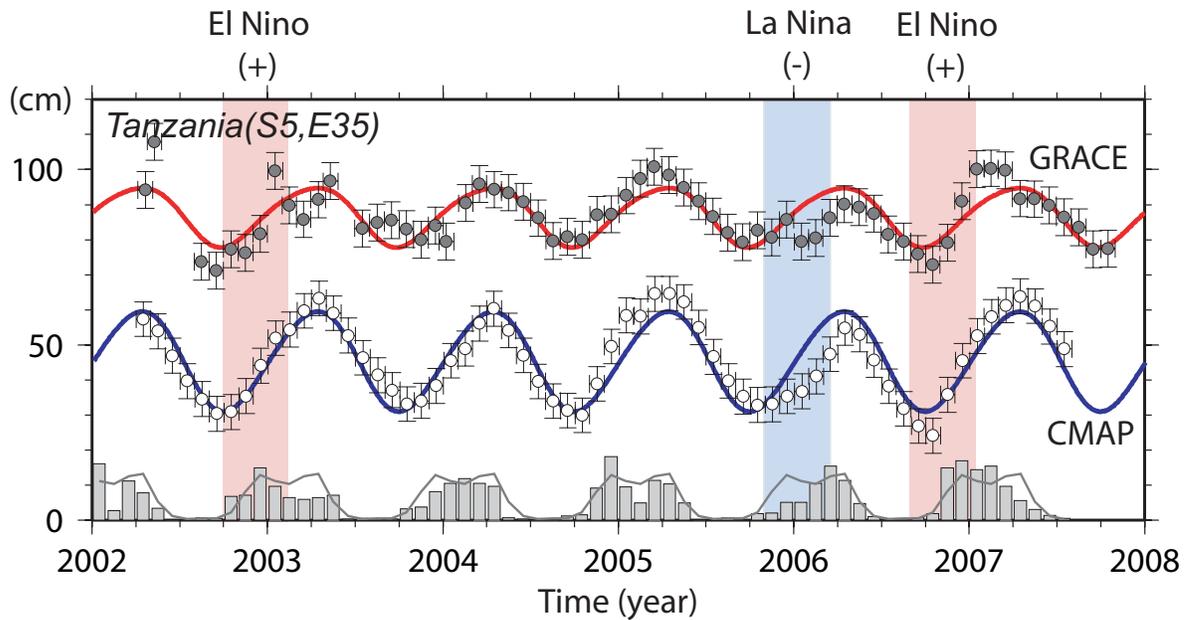


図 19 タンザニア (S5, E35) における各時系列 .

次に異常の分布と大きさについて比較しよう．図 14 と図 17 を見比べると，分布，大きさともによく一致していることがわかる．さらにこれは図 4 の El Niño/La Niña 発生時に降雨異常が起きやすい地域ともいくらか一致している．南米北部やアフリカ中東部は予想通りの異常が見られる．

しかし，アフリカ南部の地域はより南西に反応が見られ，マダガスカル島は逆の反応になっている．南米南東部の地域はより北東に反応が見られる．この原因としては，次の三つが考えられる．まず第一に，今回はたまたま降雨異常が図 4 のパターン通りに起きなかったということである．El Niño/La Niña が発生すると必ず図 4 で示された地域で降雨異常が発生するわけではなく，80% 以上の確率で発生するとされている．そのため一度ずつの現象のみではその妥当性を議論することはできない．第二に，El Niño/La Niña が弱かったということである．2005 年～2006 年の La Niña は定義を満たす 6 ヶ月ちょうど，2006 年～2007 年の El Niño は期間の長さは定義に達しなかった．この影響で降雨異常も弱いものとなり，予想された異常が検出されない地域があったのではないか．第三に，El Niño/La Niña のほかにも気候に大きな影響を与えるものがあるということである．その代表的なものとして近年インド洋ダイポールモード現象 (IOD) が注目を集めている．これは ENSO のような現象がインド洋でも起きており，IOD 発生時はアフリカ東部に洪水，オーストラリアやインドネシアに干ばつをもたらす (Behera et al., 2007)．この現象は 2006 年の秋に発生しており，その影響でアフリカ東部で大洪水が起こった．2007 年 2 月におけるマダガスカルの正の重力のずれはこの現象によるものかもしれない．

5 時間の 2 乗に比例する成分についての考察

図 11 において様々な特徴的な信号が見られた．ここではそれらの信号について考察する．強い信号を持つ地点における重力の時系列が図 20 である．

2 次の成分というとストークス係数の次数が 2 である成分も意味するが，ここでの 2 次の成分とは時間の 2 乗に比例して変化する成分を意味することとする．

図 20 のうち，原因がある程度わかっているのが (3) グリーンランド南東端と (9) タンザニアである．グリーンランドでは *Velicogna and Wahr*(2006) によって 2004 年春以降の南部における質量減少の加速が検出されている．(3) グリーンランド南東端ではその加速が明瞭に現れている．(9) タンザニアでは 2002 年から 2006 年ごろまで干ばつが続いていたため負のトレンドを持っていたが，2006 年秋に洪水が起きたために (*Behera et al.*, 2007) 重力が回復したのである．このように 2 次の成分は気候現象の影響を反映している可能性がある．

図 11 と図 4 を比較すると，アフリカ中東部，アフリカ南東部，南米南部において同パターンの位相になっていることがわかる．El Niño が発生したのが 2002 年～2003 年と 2006 年～2007 年である．これらは本研究における GRACE データの存在する期間のほぼ最初と最後にあたる．La Niña が発生したのがその間の 2005 年～2006 年である．El Niño によって降水量が増加する地域では期間の最初と最後に重力が増加し，中間に重力が減少することになる．これが下に凸の 2 次の成分になるのではないか．El Niño によって降水量が減少する地域では逆に上に凸の成分が現れるだろう．実際，アフリカ中東部と南米南部は El Niño によって降水量が増加する地域で下に凸の成分，アフリカ南東部は El Niño によって降水量が減少する地域で上に凸の成分が現れている．さらに，それらの地域における時系列 (1) 南米パンパ，(8) ジンバブエ，(9) タンザニアの極大，極小が生じる時期はすべて 2005 年半ばで揃っており，上記の仮説とも整合的である．

これらのことから 2 次の成分が直接 El Niño/La Niña の影響を反映している可能性がある．2 次の成分が顕著な地域のうち極大/極小になる時間が 2005 年半ばである (6) 中国南部，(10) コンゴ，(11) 黒海北部，(12) イタリア南端，(13) イギリス南東端なども，El Niño/La Niña によって特徴的な降雨異常が起こる地域であるかもしれない．

さらに 2007 年 5 月以降の La Niña の影響を受けた場合，増減を 2 回繰り返すことになるので 3 次の成分が現れることが予想される．それを計算することでこの仮説の更なる検証ができるであろう．しかし第 3 節のような土壌水分量の推定方法では 2 次の成分の量的な比較はできないため，降水量との整合性を検討するには別のモデルを適用する必要がある．

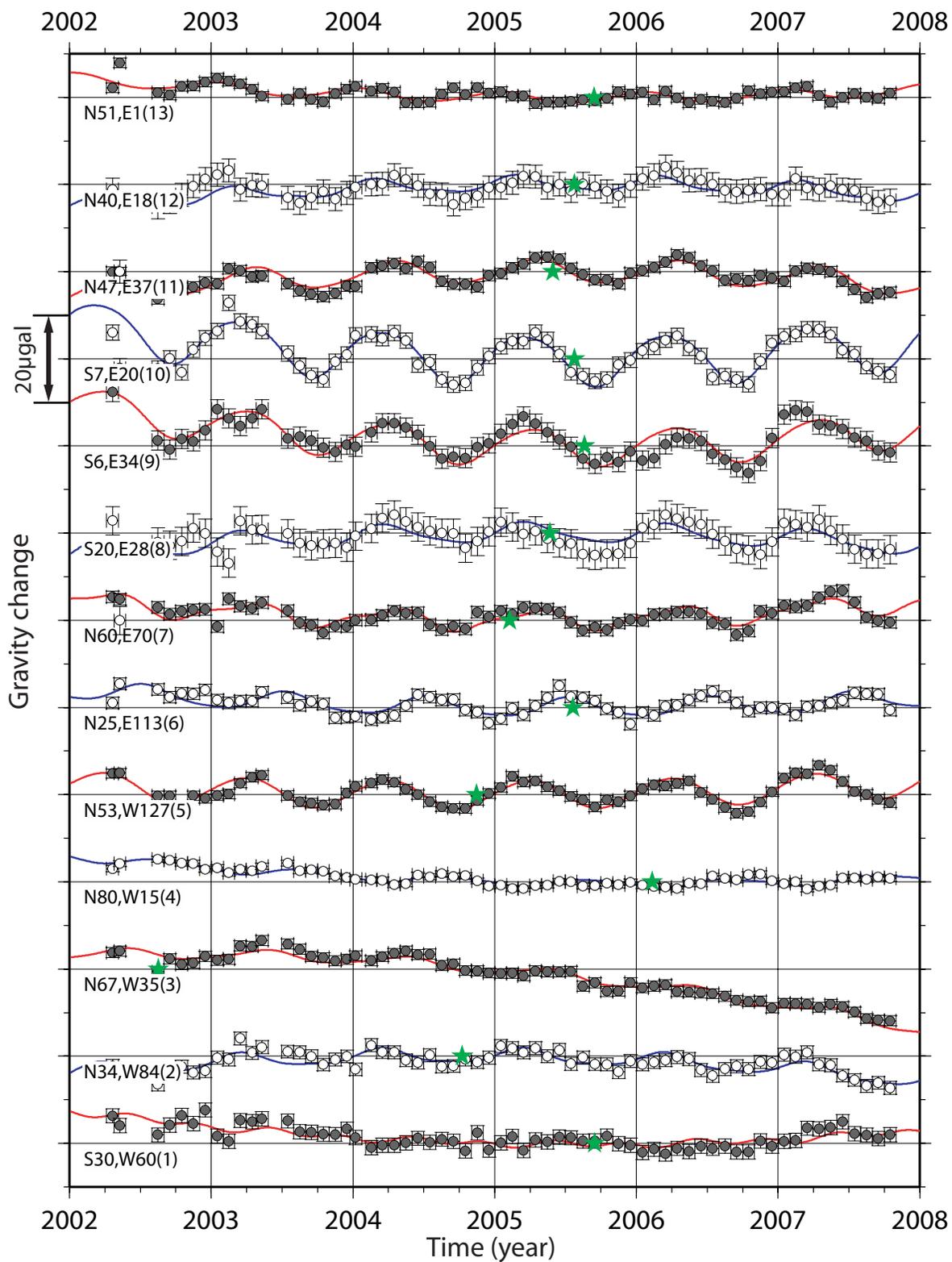


図 20 2 次の成分が顕著な地点の時系列．番号は図 20 と対応している．緑色の星は各地点において極大，極小が生じる時期を表している．

6 結論と課題

GRACE データの解析により, El Niño と La Niña 発生時で逆位相の重力のモデルからのずれが見られた. それらはアフリカと南米の一部の地域で顕著であり, それらのパターンは *Ropelewski and Halpert*(1987,1988) による El Niño/La Niña に伴う降雨異常の起きやすい地域ともある程度一致している. さらに CMAP による降水量データなどから土壌水分異常を推定したところ, 重力のずれに相当する水厚とよく一致した. また, 時間の 2 乗に比例する重力変化の成分の空間的な分布も El Niño/La Niña のパターンと相関が見られる. これらのことから, 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, データが少ないということである. このため期間内で検討可能な El Niño, La Niña が 1 度ずつしか発生せず, 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 IOD などの多くの他の現象の影響も考慮する必要があるということである.

しかし, 今後近いうちに現在発生している La Niña と IOD の影響を受けるであろう重力場のデータが公開される. それを解析することで本研究の妥当性をさらに議論することができるだろう. また, 遠い将来ではデータが蓄積することによって統計的な議論が可能となり, GRACE の後継機の打ち上げによって精度もさらに良くなるであろう. 気候現象のものさしとなる可能性のある衛星重力計測は始まったばかりであり, 今後の発展が期待される.

7 謝辞

この論文を完成させるにあたり，多くの人にお世話になりました．まず，私にこのような非常におもしろいテーマを与えてくださり，解析方法など多くの指導をしていただいた日置幸介教授に心から感謝いたします．日置教授に出会わなければ私は測地学の道に進むこともなく，就職も全く違うものになっていたかもしれません．ありがとうございました．また，見延庄士郎教授，知北和久准教授からも研究を進める上で重要なアドバイスをいただきましたので，あわせてお礼申し上げます．さらに，本研究室博士1年の小川涼子さん，修士1年の片岡健さんには最初のPCの設定からソフトの使い方，研究内容に至るまで幅広くご協力していただきました．ありがとうございました．

8 参考文献

- Behera, S., J. Luo, H. Sakuma, T. Yamagata (2007): The Dominant Impact of the Indian Ocean Dipole on the Extreme Climate Events of East Africa, *Geophys. Res. Abst.*, 9, 11076.
- Clowley, 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.
- Fenoglio-Marc, L., J. Kusche, M. Becker (2006): Mass variation in the Mediterranean Sea from GRACE and its validation by altimetry, steric and hydrologic fields, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L19606, doi:10.1029/2006GL026851, 2006.
- Han, S.-C., C. K. Shum, M. Bevis, C. Ji, C.-Y. Kuo (2006): Crustal dilatation observed by GRACE after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake, *Science*, 313, 658-662.
- Ogawa, R., K. Heki (2007): Slow postseismic recovery of geoid depression formed by the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake by mantle water diffusion, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L06313, doi:10.1029/2007GL029340, 2007.
- 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.
- Swenson, S., J. Wahr (2006): Post-processing removal of correlated errors in GRACE data, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L08402, doi:10.1029/2005GL025285, 2006.
- Tamisiea, M. E., E. W. Leuliette, J. L. Davis, J. X. Mitrovica (2005): Constraining hydrological and cryospheric mass flux in southeastern Alaska using space-based gravity measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L20501, doi:10.1029/2005GL023961, 2005.
- Tapley, B. D., S. Bettadpur, J.C. Ries, P. F. Thompson, M. M. Watkins (2004): GRACE measurements of mass variability in the Earth system, *Science*, 305, 503-505.
- Velicogna, I., J. Wahr (2006): Acceleration of Greenland ice mass loss in spring 2004, *Nature*, 443, 329-331.
- 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.