

## CHAMP 精密軌道データからの重力場の復元—序報

### Recovery of global gravity field from CHAMP precise science orbit data - Preliminary results

黒石 裕樹<sup>\*1</sup>, 宗包 浩志

Y. Kuroishi, H. Munekane

国土交通省国土地理院, Geographical Survey Institute

Email: yuki@gsi.go.jp <sup>\*1</sup>

#### Abstract:

We started study on global gravity field modeling from precise science orbits of the dedicated gravity satellite missions. Preliminary results were obtained from six months of CHAMP orbits with no use of accelerometer data or atmospheric-oceanographic de-aliasing pre-process. The resulting gravity/geoid models indicate that appropriate correction for non-conservative forces and mass redistribution effects of the atmosphere and ocean is essential to recover the global gravity field from precise orbits of low-earth-orbiters.

#### 1. はじめに

日本とその周辺海域は4つのテクトニック・プレートが会合する収束境界にあつて重力場とジオイド形状が複雑に変化しており、この地域におけるジオイドの精密決定では、海溝やサブダクション・プレートがもたらす重力場の変動を正しく捉えることが重要である。日本列島の南には世界で最も強い潮流の一つである西岸境界流の黒潮が流れており、海洋力学の基準面である海域ジオイドについて精密で確度の高いモデル決定が海洋ダイナミクス研究のために切望されている。

日本とその周辺海域における最新の局所重力ジオイド・モデルは JGEOID2004[1]である。このモデルは、全球重力ポテンシャル・モデル(以下、GGM) EGM96[2]を基盤とし、日本とその周辺の陸・海上重力測定と人工衛星アルチメトリーによる海域重力場モデル KMS02[3]を統合して作成された重力場モデルから、一般化 Stokes 積分を一次元 FFT 法で処理して求められた。このモデルは、全国の GPS/水準法によるジオイド高データとの比較から、短波長成分は高精度であるものの、0.3ppm 程度の傾斜率で表される系統的誤差が長・中波長成分にみられる[1]。このような系統的誤差は、ユーラシア大陸における重力データが欠落し、海域において重力絶対値を制約するデータが無いことから、EGM96 の誤差に起因すると推測されている。これらの誤差を低減するために、CHAMP や GRACE といった重力衛星により全球でほぼ均質な重力場を観測して得られる GGM の利用が期待されている[1]。

そこで、我々は、これら重力衛星の観測から GGM を復元する研究を開始した。その第一段として、主に衛星に搭載された GPS 観測から決定された CHAMP 衛星の精密軌道データを用いて、GGM を決定する初歩的な解析を行ったので、その結果について報告する。

## 2. CHAMP 精密軌道データとその前処理

本解析では、ドイツ国ポツダム地球科学研究所 (GeoForschungsZentrum Potsdam) によって処理された、2003 年 1~6 月における Level4 の精密軌道解を用いた。軌道解は、1.5 日を軌道長(アーク)として地球固定座標系 ITRF96 における状態ベクトル(位置と速度ベクトル)が 30 秒間隔で与えられている。軌道解には各成分の精度が付与されており、2001~2003 年における約 2 年間のデータから、median (中央値)と標準偏差はいずれも、位置の 3 成分が約 25mm、速度の 3 成分が約 35 $\mu$ m/s であった。

重力場の復元解析には、軌道解の位置 3 成分を用いた。その場合、地球固定座標系から true of date の地心慣性系に座標変換する前処理を施した。この処理は地心系の Z 軸廻りの回転を行うものであるが、IERS Conventions (2003)[4]に従い、米国ジェット推進研究所 (JPL) による DE200 惑星暦と国際地球回転事業 (IERS) による地球回転パラメータの観測結果 EOP-C04 を用いて、赤経の章道 (nutations in right ascension) を含めた equation of equinoxes を考慮して回転角を求めた。

## 3. 解析手法

精密軌道解からの重力場復元には、米国ゴダード宇宙飛行センターが開発したソフトウェア GEODYN2/SOLVE を用いた。重力場の復元は、標準偏差を 25mm として地心慣性系の位置を観測データとして力学的な軌道決定方程式を組み、重力場を推定パラメータとして求める方法を採用した。解析で用いた主なモデルは以下のとおりである。

- ・惑星暦と定数: DE200
- ・地球回転: EOP-C04
- ・背景重力場: EIGEN-GRACE01S (100 次まで使用)
- ・時間変動重力場: IERS Conv. (2003) による  $C_{20}$ ,  $C_{21}$ ,  $S_{21}$  の時間変動速度
- ・大気密度: MSIS86
- ・固体地球・海洋潮汐: IERS Conv.
- ・太陽輻射:
- ・地球の Albedo、emissivity: 2 次までの帯球球面調和関数

重力場を決定する方程式系は ill-posed であるため、重力場のパラメータについては Kaula の経験則による正則化を 25 次以上の球面調和係数について適用した。

また、推定パラメータとしては以下の設定を行った。

- ・推定軌道位置: 30 秒ごと
- ・重力場: 2~75 次
- ・経験加速度: 20 分ごと(相関時間長:1180 秒に設定)
- ・大気抵抗係数: 90 分ごと(各周回ごと)

今回の処理は、加速度計による非保存力の観測を含めるかわりに経験加速度をパラメータとして 20 分ごとに含め、また、大気と海洋の質量再配分による重力場の時間変動についての de-aliasing を行っておらず、初歩的(予備的)な解析である。

## 4. 解析結果と評価

重力場の復元は、各月ごと、連続する3ヶ月ごと、全6ヶ月の軌道解を用いた平均モデルを求めた。

### 4.1 重力場モデルの degree variances

始めに、復元された2003年1月のmonthly modelのスペクトル分布を背景モデルであるEIGEN-GRACE01SとあわせてFig.1に示す。後者は、39日間のGRACEデータ(衛星搭載GPS、Kバンドrange-rate、加速度計、姿勢観測)だけからGFZにより決定された120次・位完備の重力場モデルである。二つのモデルは約60次以下において良く一致したスペクトルを持っている。後者において120次を超えてパワーが減少しているのは、共鳴項を除いて調和係数が含まれていないためである。一方、前者は60次を超えると重力場のスペクトルのパワーが大きくなり、振動しており、重力場の決定において何らかの問題があることを示唆している。

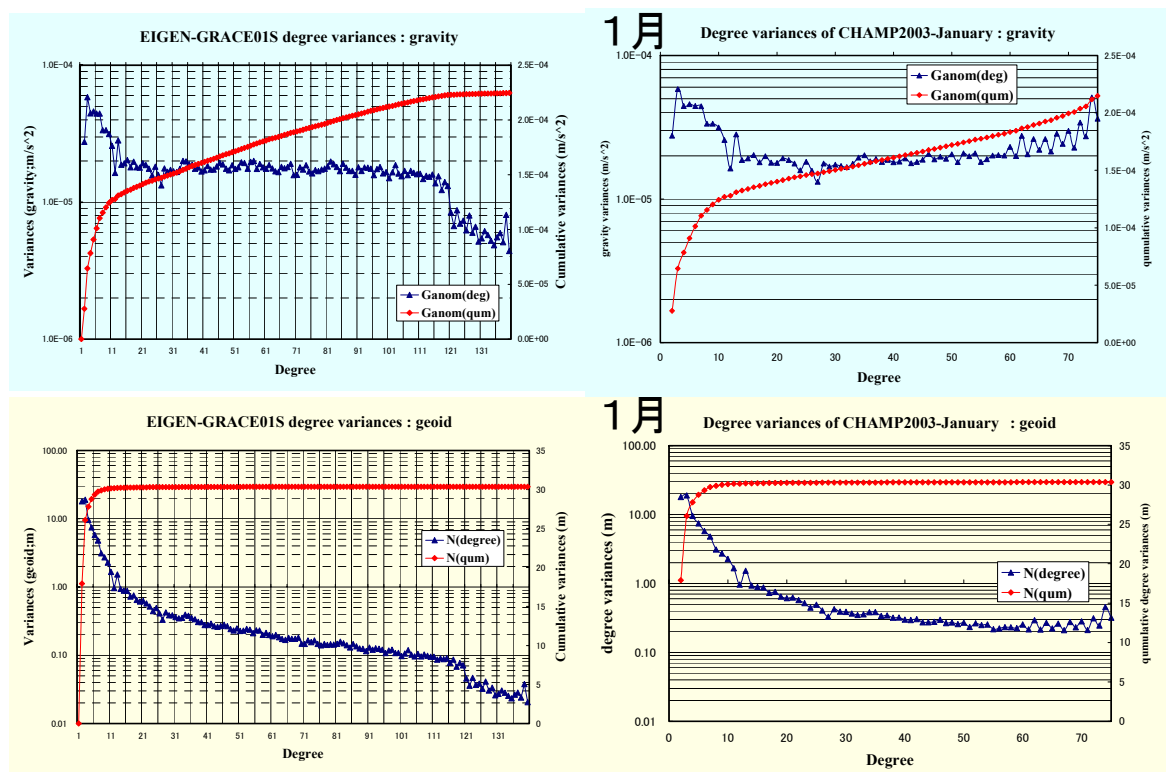


Fig. 1 背景重力場モデルEIGEN-GRACE01Sと2003年1月のmonthly modelのdegree variances。上は重力、下はジオイド高であり、左がEIGEN-GRACE01Sモデル、右は2003年1月のモデル。青線がdegree variances、赤線は累積degree variances(以下のdegree variancesにおいて全てこの表現をとっている。)

### 4.2 Kaula 則による正則化

2003年1月のmonthly modelを決定する場合に、Kaula 則による正則化処理の効果について一例を挙げて簡単に調べてみる。正則化を球面調和関数の全ての次数に適用したものと、25-75次についてだけ適用したものについてdegree variancesをFig. 2に示す。20-28次において較差がみられるが、そのパワーはジオイド高で0.04mm以下、重力で0.15 $\mu$ gal以下であり、無視できる量である。これは、24次以下においては正則化が必要でないことを示している。

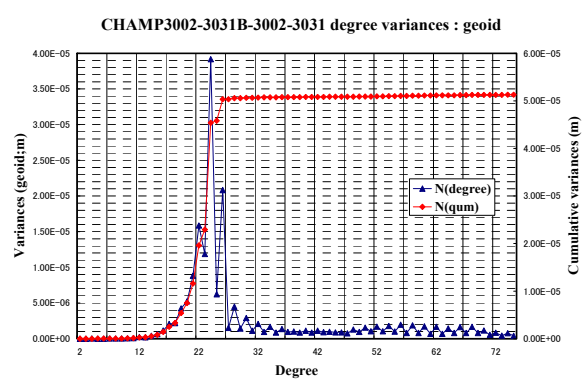
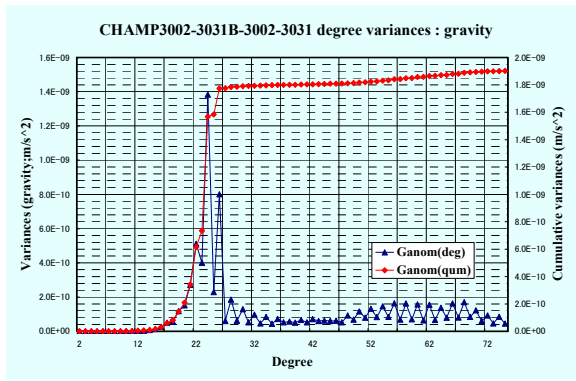


Fig. 2 2003年1月の monthly model において、Kaula 則を用いた正則化を全て適用したものと25-75 次の範囲だけに適用したものととの重力場の較差についての degree variances。左が重力、右はジオイド高。

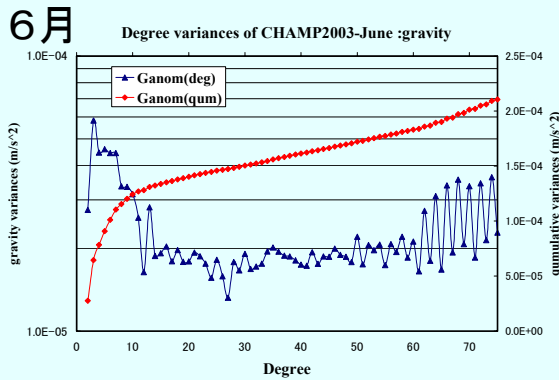
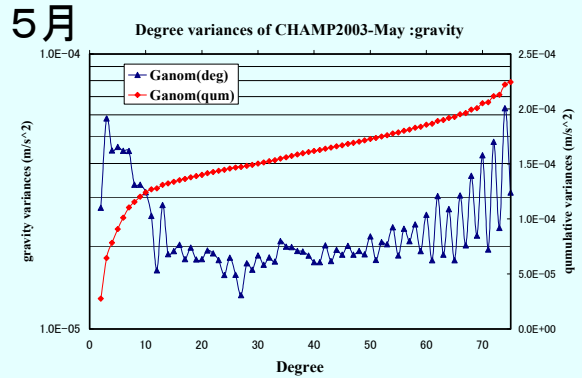
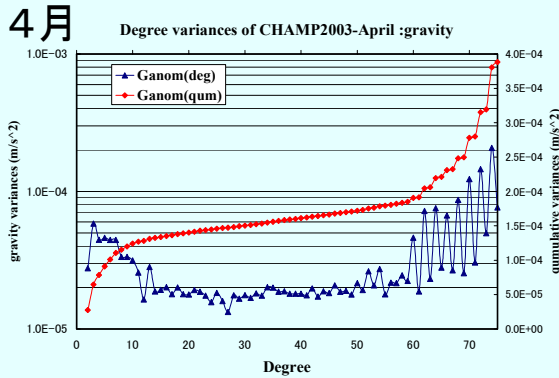
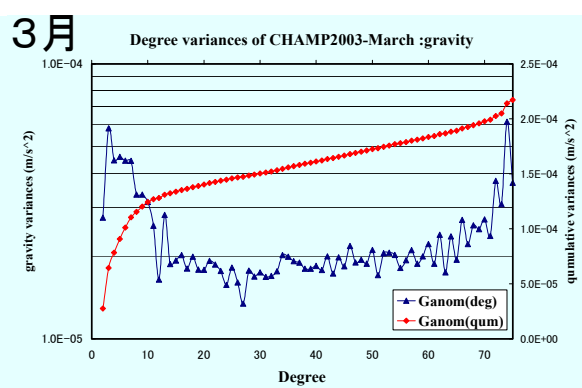
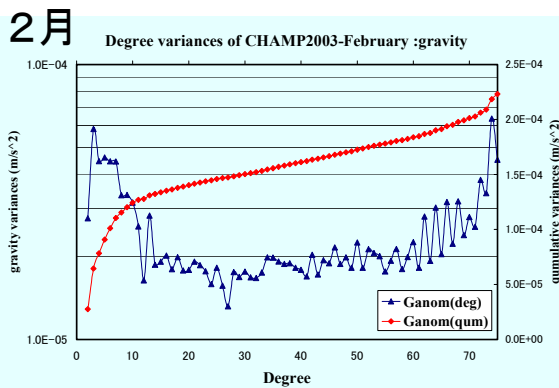


Fig. 3 2003年2~6月の monthly model の重力 degree variances。

#### 4.3 異なる期間長から求めたモデルのスペクトル I :monthly model

2003年の2月から6月までの monthly model について、重力場の degree variances を Fig. 3 に、ジオイド高の degree variances を Fig. 4 に示す。ジオイド高からは約 60 次以上、重力からは約 50 次以上のパワーに振動がみられ、少なくともこれらの次数において十分な平均重力場の決定が実現されていないことを示している。また、4月のモデルで特に振動が激しいことが分かる。

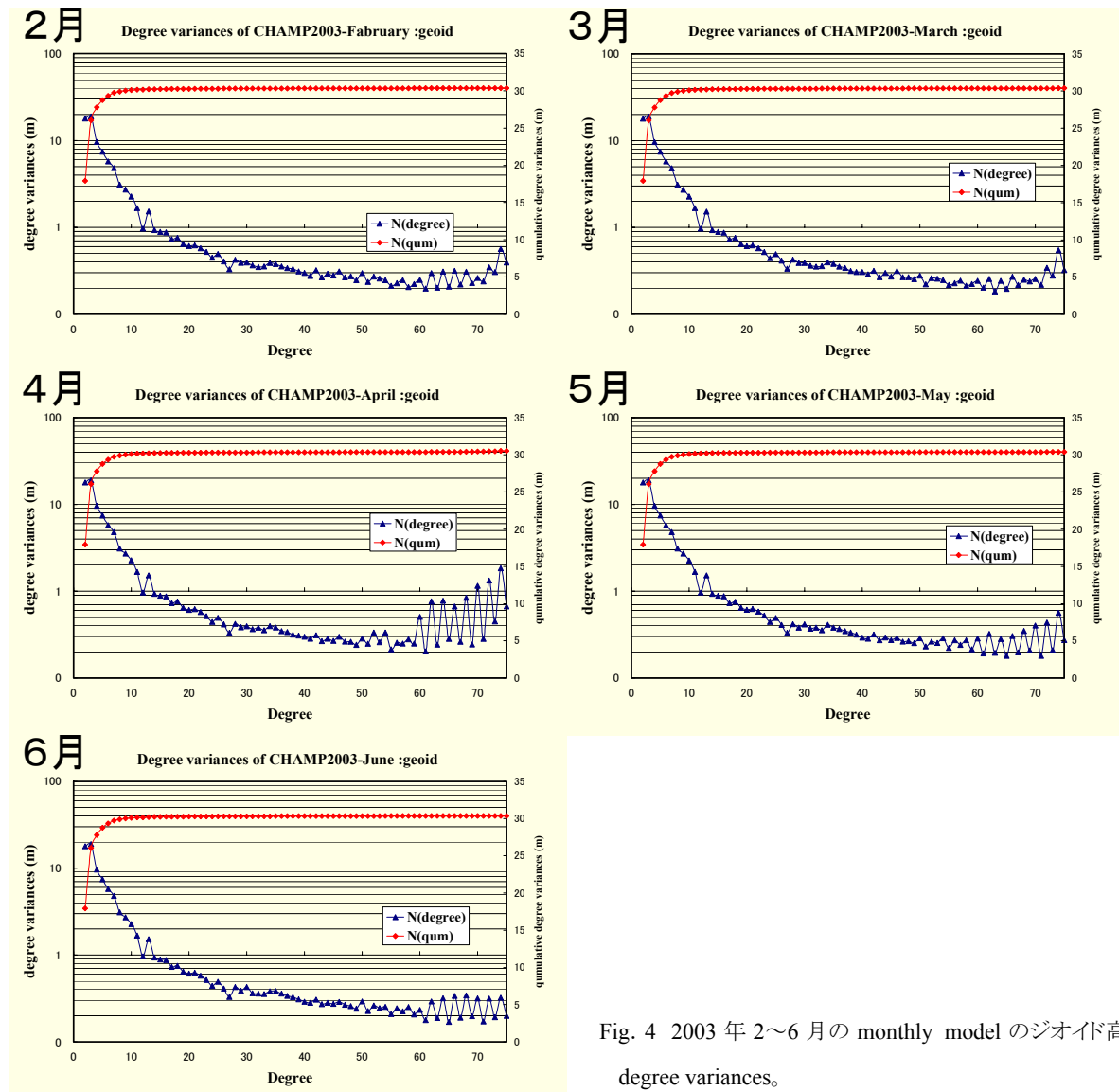


Fig. 4 2003年2~6月の monthly model のジオイド高 degree variances。

#### 4.4 異なる期間長から求めたモデルのスペクトル II :three-monthly model & six-month model

次に、連続した3ヶ月のデータから求めた4つの three-monthly model と6ヶ月分もデータを全て使って求めた six-month model の平均重力場モデルについて、前節と同様の評価を行う。重力場の degree variances を Fig. 5 に、ジオイド高の degree variances を Fig. 6 に示す。データ期間が3ヶ月を超えた場合、重力とジオイド高のいずれにおいても約 45 次以上においてパワーが振動しており、データ期間が長くなるほど、これらの振動の振幅が大きくなっていることが明らかである。平均の重力場を求める処理

において期間が長いほど重力場の解が不安定であることから、非保存力場の影響や大気・海洋の質量再分配による aliasing などが問題として考えられる。

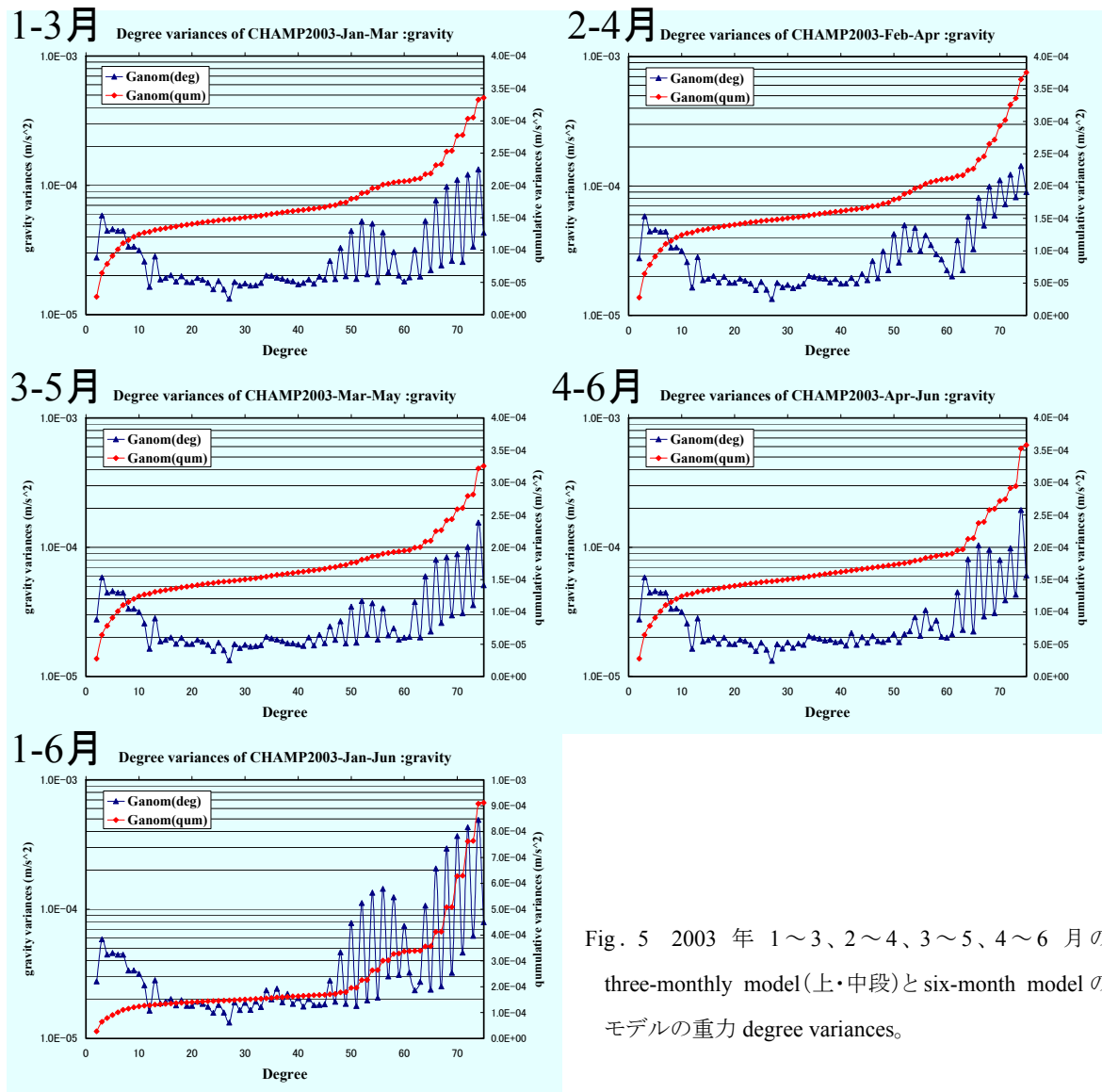


Fig. 5 2003 年 1～3、2～4、3～5、4～6 月の three-monthly model (上・中段) と six-month model のモデルの重力 degree variances。

#### 4.5 異なる期間長から求めたモデルの較差 I : monthly model

異なる期間のデータを用いた重力場モデルの違いを調べるため、six-month model に対する各々の monthly model の較差場を求める。この場合、決定精度が有意に劣っていると思われる  $C_{20}$  項を除き (e.g. [5])、比較的安定した解が得られている 45 次までの係数を用いた重力場だけを評価することとした。Fig. 7 に重力の較差場、Fig. 8 にジオイド高の較差場を示す。いずれの場合においても、極域で大きな東西走向の較差、中・低緯度域で軌道パターンと思われる縞状の較差 (最大 5 mgal) が見られる。また、degree variances において大きな振動が見いだされた 4 月のモデルでは、特に大西洋と太平洋で大きな較差が見られる。ジオイド高では、両振幅数十 cm 程度の軌道パターンが共通して明瞭に見られるが、これは six-month model の系統的較差と考えられる。

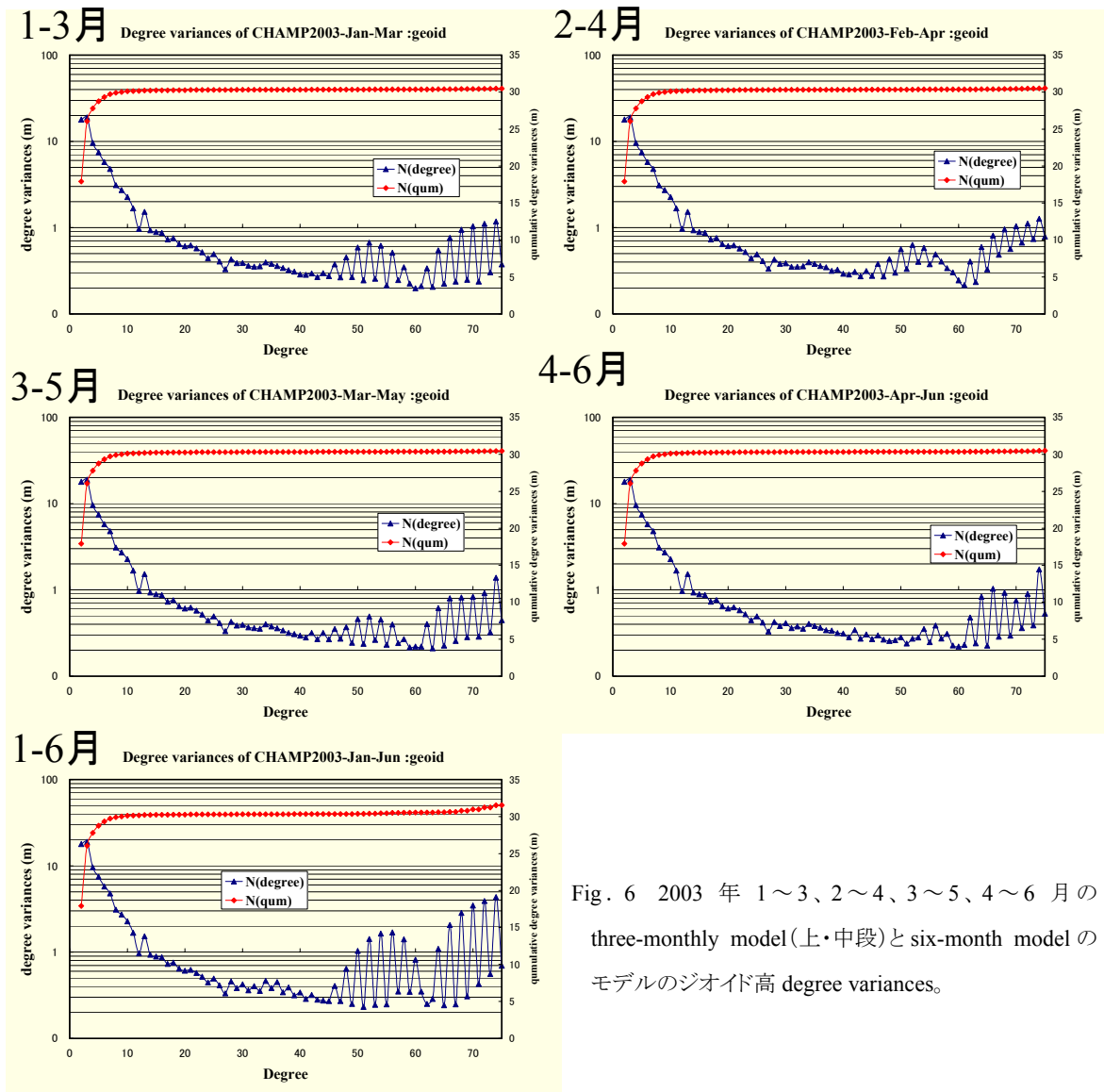


Fig. 6 2003年1～3、2～4、3～5、4～6月のthree-monthly model(上・中段)とsix-month modelのモデルのジオイド高 degree variances.

#### 4.6 異なる期間長から求めたモデルの較差 II :three-monthly model

前節と同様の評価を、six-month modelを基準に各々の three-month modelについて行う。Fig. 9に重力の較差場、Fig. 10にジオイド高の較差場を示す。これらのモデル間では、軌道解データの1/2が共通しているため、monthly modelの場合に比べると較差が小さくなっているが、極域での東西走向の大きな較差は顕在している。振幅はやや小さいものの軌道パターンがみられる。これらの結果は、今回行った解析モデルやその設定に問題があることを示唆している。

#### 5. まとめ

GFZによる2003年1～6月におけるCHAMP精密軌道データを用いて、全球重力場・ジオイドの初歩的な解析を行った。解析には、GSFC/NASAが開発したGEODYN-2/SOLVEを用い、現実的なモデル設定(地球回転:EOP-C4/IERS、大気密度:MSIS86、地球のalbedo・emission:2次までの帯球球面

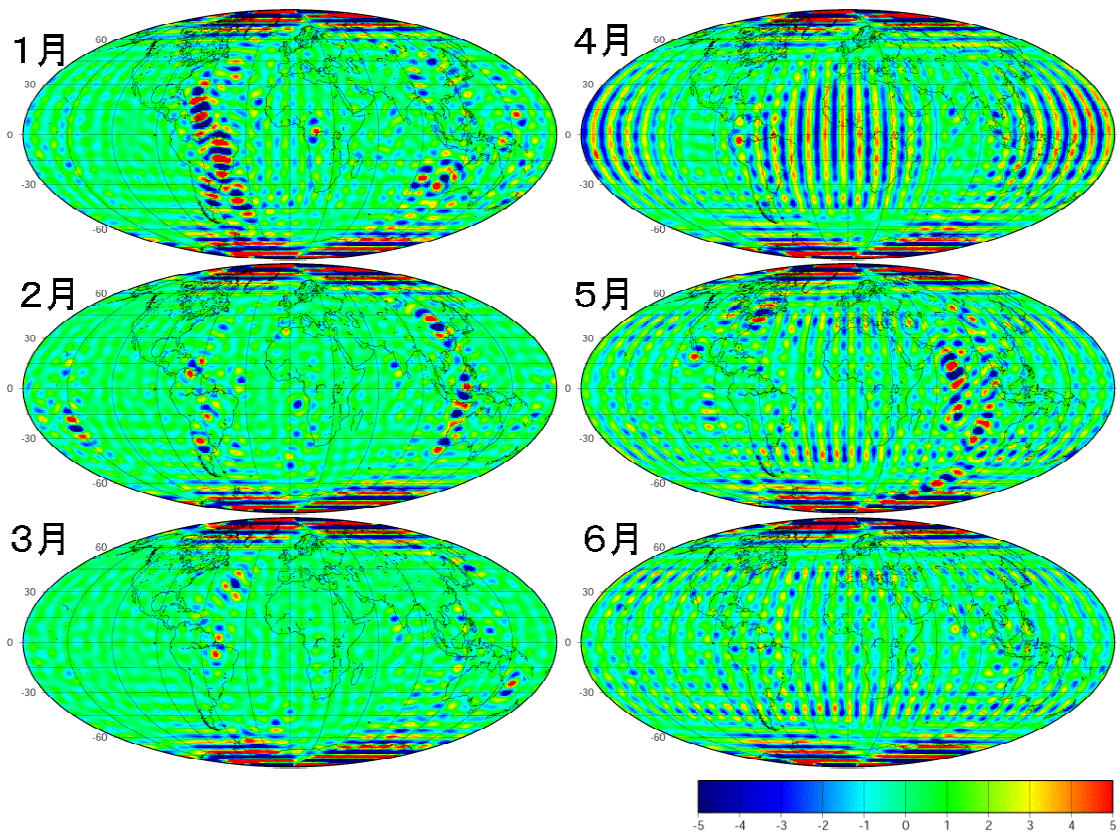


Fig. 7 six-month modelに対するmonthly modelの重力較差、但し $C_{20}$ 項は除く。図中の単位はmgal。

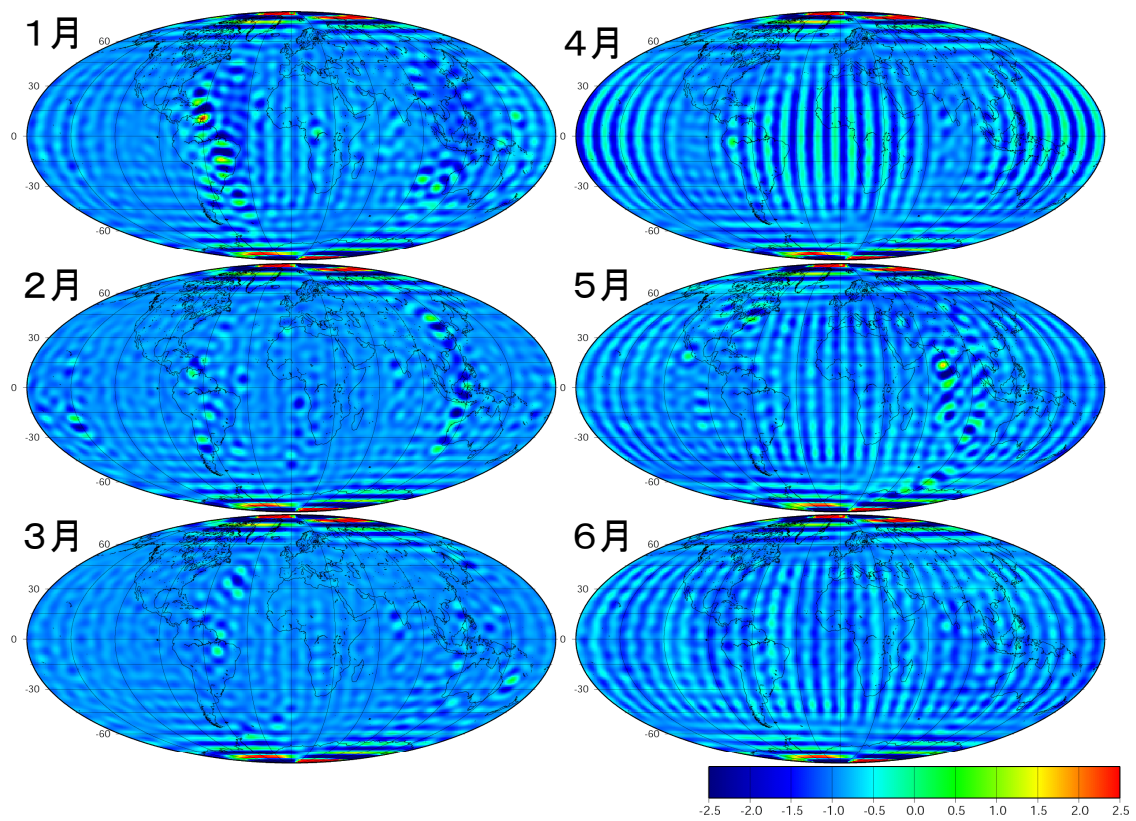


Fig. 8 six-month modelに対するmonthly modelのジオイド高較差、但し $C_{20}$ 項は除く。図中の単位はm。



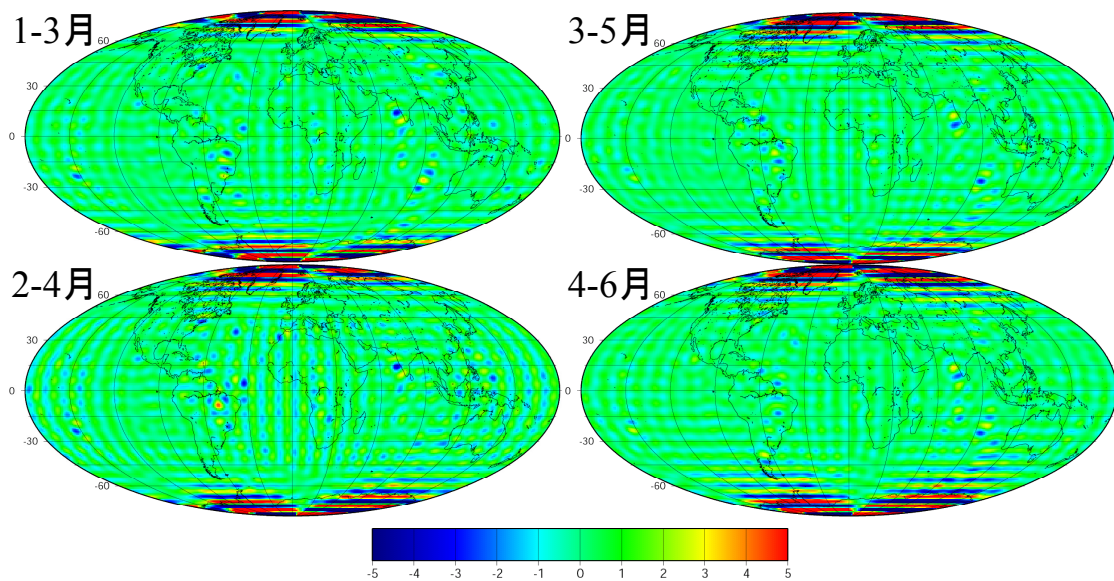


Fig. 9 six-month modelに対するthree-month modelの重力較差、但し $C_{20}$ 項は除く。図中の単位はmgal。

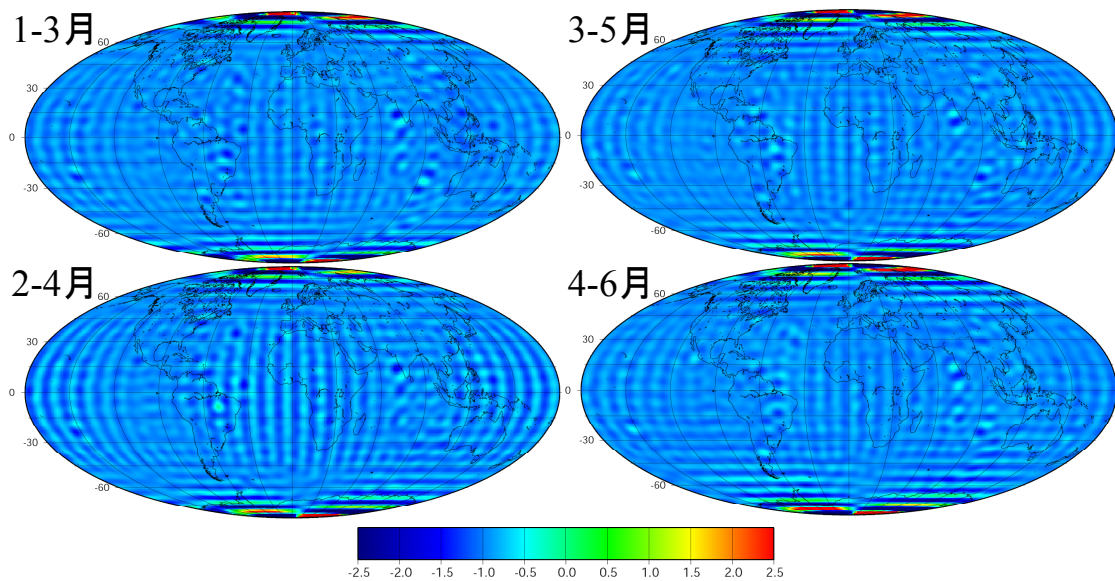


Fig. 10 six-month modelに対するthree-month modelのジオイド高較差、但し $C_{20}$ 項は除く。図中の単位はm。

調和関数)で1ヶ月、3ヶ月、6ヶ月のデータについての平均場を求めた。但し、衛星に搭載された加速度計のデータを用いる代わりに20分ごとの経験加速度をパラメータとして採用し、また、大気や海洋の質量再配分に伴う重力場の時間変動に対するde-aliasingは行っていない。

得られた重力場モデルのdegree variancesには約45次以上の球面調和係数に不安定性がみられ、これは日本周辺におけるGPS/水準ジオイド高データを用いたEIGEN01Sモデル(GFZによるCHAMPだけによる全球重力場モデル)の比較結果と傾向が一致している。monthly modelを背景モデルであるEIGEN-GRACE01Sやsix-month modelと比べると、70度より高緯度で20mgal(数m)を超える較差がみられ、その較差の振幅はデータ期間が長い程大きくなっている。また、中・低緯度域において軌道ト

ラックに相関した有意な縞状の較差パターン(最大両振幅は、重力で5 mgal、ジオイド高で30cm程度)がみられる。

これらの結果は、低軌道衛星の軌道からの重力場復元において非保存力の補正を十分に行っていないことや、大気・海洋の質量移動による重力場の時間変動等に対する de-aliasing を行っていないことによる系統的誤差を示すと推測される。重力衛星の軌道解から十分な精度で重力場を復元するためには、衛星に搭載された加速度計データを用いた非保存力の補正や地球物理学的モデルを用いた de-aliasing を組み入れることが必要であることが明らかになった。

#### 謝辞

本研究は、文部科学省科学技術振興調整費先導的研究の推進による課題「精密衛星測位による地球環境監視技術の開発」の一部として実施しました。重力場復元の解析には、本研究の枠組みにおける協力として米国ゴダード宇宙飛行センター(GSFC/NASA)提供されたソフトウェア GEODYN2/SOLVE を使用しました。地球固定系と地心慣性系の回転角計算には国際天文学協会(IAU)の SOFA LIBRARY を一部使用しました。また、一部の図の作成に、描画ソフトウェア GMT[6]を使用しました。

#### 参考文献

- [1] Y. Kuroishi, W. Keller, “Wavelet approach to improvement of gravity field/geoid modeling for Japan,” *J. Geophys. Res.*, accepted for publication, 2004.
- [2] F. G. Lemoine et al. “The Development of the NASA GSFC and NIMA Joint Geopotential Model”, in *Geoid and Marine Geodesy*, IAG Symp. 117, edited by Segawa J. et al., pp. 461-469, Springer-Verlag, New York, 1997.
- [3] O. B. Andersen, P. Knudsen, R. Trimmer “Improving high resolution altimetric gravity field mapping (KMS2002)”, *Proceedings of the IUGG 23rd General Assembly, Sapporo, Japan, 2003*, IAG Symp. 128, Springer Verlag, New York, in press., 2004.
- [4] D. D. McCarthy, “IERS conventions (2003)”, *IERS Tech. Note 32*, 2003.
- [5] B. D. Tapley et al., “GRACE measurements of mass variability in the earth system”, *Science* 305, 503-505, 2004.
- [6] P. Wessel, W.H.F. Smith “Free software helps map and display data”, *EOS Trans., Am. Geophys. Union* 72: 441, 445-446, 1991.