

# 衛星重力データによる精密重力測定の環境補正

福田洋一\*・Lorant Foldvary

京都大学大学院理学研究科

(2001年2月9日受付, 2001年4月11日改訂, 2001年4月13日受理)

## Environmental Corrections for the Precise Gravity Observations by Mean of Satellite Gravity Data

Yoichi Fukuda and Lorant Foldvary

Graduate School of Science, Kyoto University

Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502, Japan

(Received February 9, 2001; Revised April 11, 2001; Accepted April 13, 2001)

### Abstract

We propose a practical method and discuss some problems related to corrections for the gravity effects of fluid envelope of the Earth, *i.e.*, the atmosphere, the ocean and/or land water using coming satellite gravity data. Recent progress of precise gravity measurements using superconducting gravimeters (SG) and/or absolute gravimeters (AG) enables us to study the very weak signals (less than a few micro gals) of long-term gravity changes due to polar motion effects, post-glacial rebounds, crustal movements, sea level changes, and other various phenomena. Besides these, mass redistribution of the fluid envelope causes global gravity changes mainly in the seasonal frequency band. Since the gravity changes observed by the gravimeters are the integrated sum of all these signals, we need to extract a desired signal or to correct unnecessary signals depending on the purpose of the study.

A new satellite gravity mission GRACE will be expected to provide a time series of global gravity fields coefficients with an interval of about one month. Hence, we will be able to use the coefficients for the correction of the gravity changes due to the global mass redistribution. Conversely, we may use the surface gravity measurements as a validation tool of the satellite data.

The principle of the correction is rather simple; 1) calculate equivalent surface mass changes from the observed gravity coefficients, and 2) calculate the gravity changes at a station with Green's functions for loading effects and attraction. However, there are some practical problems related to the selection of the green functions, high frequency aliasing, local effects, zero definitions, and so on. We will discuss these problems by simulation studies using gravity coefficients estimated from reanalysis and model data sets of the fluid envelop.

---

\*Fax: 075-753-3912, E-mail: fukuda@kugi.kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

2001 年秋に打ち上げが予定されている GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) は、H-L (High-Low) および L-L (Low-Low) SST (Satellite to Satellite Tracking) による重力場測定衛星で、L-L SST の range rate の測定にマイクロ波のレーダー・リンクを用い、 $\mu\text{m/s}$  より良い測定精度が得られる見込みである。これは、1 ヶ月程度の時間分解能、空間分解能 1000km 程度で、例えば海面の水位変化に換算して mm オーダーに対応した重力変化を検出できるものである。このため、GRACE のデータは、グローバルな水循環、氷床変動、海水準変動、ポストグレースシャル・リバウンドなどの研究に大きく寄与するものと期待されている (National Research Council, 1997; 福田, 2000; 古屋・内藤, 2000)。

一方、地上での重力測定に目をやると、超伝導重力計や絶対重力計の測定精度の向上に伴い、大気や海洋、あるいは陸水の変動による重力変化が、重力測定ノイズとして無視できなくなっている (Mukai *et al.* 1995; Sato *et al.*, 2001; van Dam *et al.*, 2001)。Table 1 は、精密重力測定に影響を及ぼすと考えられる地球物理的現象をまとめたものであるが、このうち、地球潮汐、海洋潮汐、極運動の影響および大気圧の変化に関する補正は、従来からも補正を施すことが当然のこととして、通常、ルーチ的な処理の一部に含まれている。一方、海洋や陸水についても  $\mu\text{gal}$  オーダーでの重力変化を引き起こすことが予想されるので、影響の大きさという点ではもはや無視することのできない項目と言って良いであろう。しかしながら、海洋や陸水については、例えば地下水変動のようなローカルな影響の補正についてはすでに幾つかの試みがあるものの (例えば、Mukai, 1997)、その補正は決して容易ではなく、グローバルな影響に至っては、補正に際して全球的な水の質量分布を知る必要があり、衛星観測のような手法を使わない限りほとんど解決が不可能な厄介な問題と思われる。

そこで本研究では、GRACE のデータが利用できるようになることを前提に、そのデータを利用することによって、特に、海洋、陸水などグローバルな水循環が地上での精密重力測定におぼす影響の補正が可能であるかについて検討し、具体的にどのような補正方法が考えられるかを示すとともに、関連する幾つかの問題について考察することにする。

## 2. 方法

GRACE の range rate 測定での低レベル処理データ (level-0, 1 データ) に関しては、どの程度の時間分解能、空間分解能が得られそうであるか、今のところ必ずしも明らかではない。そこで、ここでは仮に、高次プロダクト (level-2 データ) として 1 月に 1 回の頻度で 100 次程度までの球関数係数データが得られるものと仮定する。地上精密重力測定への影響の主要なものとして、Table 1 にある大気、海洋、陸水の変動を考えると、この内、大気ならびに海洋潮汐については、1 月よりも短い周期での変動成分が圧倒的に大きく、さらに、大気については客観解析データが比較的よくそろっており、また、海洋潮汐については高精度な海洋潮汐モデル (例えば、Matsumoto *et al.*, 2000) が利用できるので、これらについては GRACE データによる補正の利点はそれほど大きくないと思われる。一方、海洋変動や陸水 (ローカルな部分を除く) による重力変動成分は、GCM (Global Circulation Model) 等のデータによる見積もりで、月～年周の周期帯で  $\mu\text{gal}$  にもおよぶことが予想されるにもかかわらず (Fukuda and Sato, 1997; van Dam *et al.*, 2001)、地上観測でこれらの影響を正確に見積もることは大変困難である。これらについては GRACE データの利用が最も有効と考えられる。

実際のデータ処理において、GRACE のデータが適当な時間頻度で、球関数係数 (Stokes 係数) として

与えられると仮定すると、具体的な補正の手順は、おおよそ次のようになると予想できる。

- 1) 球関数係数から定常的な重力場（平均場）を除去する。
- 2) 客観解析データ等を利用し気圧変動成分を除去する。
- 3) 球関数係数の変動成分を地球表面での等価な面密度変動成分に変換する。
- 4) 荷重・引力影響の Green 関数と面密度変動成分との畳込積分により重力の影響を計算する。

以上の手順の内、1), 2) に関しては後述するとして、ここでは、3), 4) の手順についてもう少し詳しく述べることにする。

今、GRACE によって得られるデータは、ある時刻  $t$  における、次数、位数  $n$  までの Stokes 係数の時間変化成分、 $C_{l,m}(t)$ 、 $S_{l,m}(t)$  ( $l, m \leq n$ ) とする。ただし、 $C_{l,m}(t)$ 、 $S_{l,m}(t)$  は、1) の意味です。すでに定常成分（平均場）は除かれた変動成分のみを表すこととする。このような Stokes 係数の変化、すなわち重力場の変化を生じさせる原因が、すべて地球表面での質量変化によるものと仮定し、緯度、経度 ( $\theta, \phi$ ) の地点における面密度の時間変化を  $\Delta\sigma(\theta, \phi, t)$  と書くことにすると、 $\Delta\sigma(\theta, \phi, t)$  は、

$$\Delta\sigma(\theta, \phi, t) = \frac{\rho_{ave}}{3} \sum_{l=1}^n \sum_{m=0}^l P_{l,m}(\cos\theta) \frac{2l+1}{1+k_l} (\Delta C_{l,m}(t) \cos(m\phi) + \Delta S_{l,m}(t) \sin(m\phi)) \quad (1)$$

で与えられる (Wahr *et al.*, 1998)。ただし、(1) 式の  $a$  は地球の平均半径、 $\rho_{ave}$  は平均密度、 $k_l$  は次数  $l$  の荷重ラブ数で、 $P_{l,m}$  は完全正規化ルジャンドル関数である。

(1) 式により  $\Delta\sigma(\theta, \phi, t)$  が得られると、4) の手順により、任意の点での重力変化を計算することが出来る。この計算そのものは、海洋潮汐の荷重変化の重力への影響の計算と全く同等であり、例えば GOTIC2 (Matsumoto *et al.*, 2001) など、既存のソフトウェアをほぼそのまま利用することが可能である。また、 $C_{l,m}(t)$ 、 $S_{l,m}(t)$  には、重力の時間変動成分のうち手順 2) の意味での大気圧変動の影響が除かれているが、その他、海洋や陸水などすべての影響が含まれており、その意味で、全球的な水循環に対する質量保存の条件も自動的に満たされる。

Figure 1 は、実際の計算の例として、NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) の再解析データ (Kalnay *et al.*, 1996) のうち土壌水分の月平均値を用い、3) の手順以降の過程をシミュレートして計算した京都におけるグローバルな土壌水分変化の重力への影響を示したものである。なお、4) の計算には、先に述べたように、海洋潮汐補正プログラム GOTIC2 を本研究の目的に沿って修正したものを使用した。また、土壌水分の質量への換算に際しては、全球的な年周水収支量から逆算し、均質な堆水層の厚さ 65cm を仮定した。この仮定そのものは必ずしも現実的なものではなく、また、海洋も含めたグローバルな水の質量保存の問題、さらに土壌水分のデータセットそのもの信頼度もあり、Fig.1 そのものの信頼度はそれほど高いとは思えない。しかし、このような粗い推定にも関わらず、ここで得られた  $\mu\text{gal}$  オーダーでの変動は他の研究 (例えば、van Dam *et al.*, 2001) と調和的であり、変動の大きさと様子を探る上での第一次近似としては十分であろう。

以上述べたように、上記手順のうち、3) 以降のデータ処理については、(1) 式の表面密度近似を仮定する限りは、それほど問題となることは無いように思われる。しかしながら、1) については、

それぞれの研究目的に応じ、補正の概念そのものについても検討すべき問題を含んでいる。また、2) については、表面気圧データの扱いについて、海洋の応答の問題、さらにローカルなデータとの整合性の問題なども考慮する必要がある。次に、これらの点を含め、GRACE のデータを利用する際に予想される幾つかの問題について考察する。

### 3. 議論

先の手順1)においては、重力場の時間変化を取り扱うため、適当な平均場はあらかじめ除去すると仮定したが、ここでいう定常的あるいは平均的な重力場として何を選ぶかは必ずしも自明ではない。例えば、すぐに思いつくものとしても、i) 標準的な重力場モデル(例えばEGM-96)を用いる、ii) GRACEのデータがある程度蓄積した後その平均場を用いる、iii)あるエポックにおける球関数係数を仮の平均値と仮定する、など、幾つかの選択肢が考えられる。これらは、研究の目的にもよるが、基本的には潮汐補正の際の永年項補正などの問題と同じくある種の定義に関することであり、今後、どのような方法が望ましいかについては、研究者間での合意も必要になるとと思われる。

手順2)の気圧変動成分の除去に関しては、一つには大気変動に対する海洋の応答がIB(Inverted Barometer)的であるかNIB(Non- Inverted Barometer)的であるか、また、よりテクニカルな問題として補正の際に現地気圧測定データと客観解析データをどのように使い分けるか、などの問題が残っている。Figure 2は、NCEP/NCARの再解析データの表面気圧のうち1978年から1997年までの月平均値を用いて計算した京都での気圧の重力への影響で、破線がNIBを仮定した場合、実線がIBを仮定した場合である。これら両者の差は、振幅で2倍以上にも達している。1ヶ月よりも長い周期帯では、実際の海洋の応答はほぼIB的と考えて差し支えないと思われるが、GRACEの感度はIBモデルからのわずかなずれも検知できる潜在能力を持っており(Foldvary and Fukuda,2001)、データ処理の際、やはり注意を要する点である。

表面気圧データに関するもう一つの注意点として、現地の気圧測定データの扱いの問題がある。超伝導重力観測では、通常、現地での気圧の実測値を用い、レスポンス法などで気圧の影響を補正しており、また、絶対重力測定の場合にも実測値による補正が行われている。従って、客観解析データなどのグローバルなデータセットの利用にあたっては、過剰な補正を避けるために、これらの実測データによる補正との整合性を考慮する必要がある。

以上の議論は、衛星重力データに及ぼす気圧の影響はあらかじめ取り除くという方針で進めてきたが、その理由の一つは、気圧の影響と海洋・陸水の影響の計算で、引力項のGreen関数に差異が生じることにある。これは、大気の質量が観測点より上部に存在することによる。しかし、この差が影響するのは、観測点のごく近傍に限られており、角距離にして1°程度離れば、両者の差は、実際上無視可能な程度となる。以上の点を考慮すると、近傍の影響を地上の実測データを利用して別途見積もることとすれば、グローバルな1ヶ月以上の長周期の気圧変動に関しても衛星データを利用することとし、先の手順2)を省略した上で、大気も含めた補正を施すのがより現実的なようにも思われる。この場合、例えば超伝導重力計データの処理の場合には、衛星データによりグローバルな長周期変動を除去した後にレスポンス法による現地気圧データを補正するなどの方法が考えられる。これらの具体的な処理方法等は、今後の重要な研究課題の一つであろう。なお、衛星データを用いて、大気、海洋、陸水の影響を同時に補正する場合には、先ほど述べたIB、NIBのレスポンスの違いを考慮する必要が無く、また、全球的な

質量保存も自動的に満たされるという利点もある。

GRACE データだけから大気の影響も見積もる場合には、サンプリングレートへの配慮は不可欠である。すなわち、大気の変動周期が比較的速いため、超伝導重力観測のような連続データの場合は、データそのものにフィルタリング処理を施すことで衛星データのサンプリング間隔と整合性をとるなどの処理が必要である。しかしながら、絶対重力測定のように測定データが間歇的な場合には、測定データのフィルタリング処理が困難とも思われ、速い変動成分によるエイリアジングの影響を考慮することが必要であろう。なお、海洋や陸水の影響に関しては、グローバルな変動成分は十分に遅いと思われるので、絶対重力計データとの比較の場合にも、GRACE データから推定される補正量そのものを時間内挿することが可能と考えられる。

次に、先の処理手順に従って補正した重力値の意味について考えてみよう。GRACE などの衛星重力測定では、海洋や陸水などの年周期的な重力変動成分と同時に、例えばポストグレーシャル・リバウンドによる重力変化など、すべての要因による経年的重力変動成分が含まれている。そのため、第2節で述べた補正手順では、これらの影響も同時に補正されることになる。GRACE データの感度ならびに空間分解能を考えると、経年的な変動として  $\mu\text{gal}$  オーダーの精度が期待できるのは数 100km 以上の空間スケールについてである。従って、これらのシグナルが補正された結果として得られる経年的な重力変化は、例えば地震や火山活動、あるいはプレートの沈み込みなど、ローカルな原因によるものと予想される。このことは研究の目的によってはかえって好都合なことである。しかしながら地上データを元にグローバルな問題を扱う場合には注意を要する。地上データと衛星データでは、現象に対する感度、空間分解能、時間分解能など、それぞれ異なる特性をもっており、これらは競合するものではなく互いに補完しあうものと考えられる。地上と衛星観測のデータの特徴を生かすためにも、今後、個々の現象や応用分野において、それぞれのデータの役割分担や連携方法、さらに重力以外のデータの利用法についても検討を進めることが重要であろう。

#### 4. おわりに

GRACE の衛星重力データが利用できるようになることを想定し、精密重力測定におよぼす海洋や陸水変動の影響をいかに補正するかについて検討した。その結果、補正処理そのものにはそれほど大きな困難はなく、既存のソフトウェアの利用で、すぐにでもデータの利用が可能ないように思われる。一方、衛星重力データを用いて海洋や大気の変動を補正するという発想そのものが新しいものであり、特に重力の絶対値を議論するような場合には、重力の基準場、あるいは平均場の定義も含め、どのような補正を行うことが合理的か、今後、補正に関する幾つかのコンセプトの統一も必要であろう。

また、ここでは既知として扱った大気の影響についても、実際は、IB と NIB モデルの違いやローカルな測定データとの整合性の維持などが課題であり、グローバルな影響については大気を分離しない処理方法も考えられる。今後、より高精度な気圧補正方法の追求と合わせ、さらに研究を続けるべき課題の一つであろう。

地上重力測定の精度向上の立場からは、例えば近傍の地下水の影響のように、衛星データでは捉えきれないローカルな現象が依然として残っている。衛星データの利用でグローバルな影響がある程度補正できるようになれば、それに比例してローカルな影響の補正が重要となってくる。今後、現地での気圧の測定に限らず、地下水のモニターや沿岸海域での海面変動のモニターなどがより一層重要な課題とな

ることであろう。逆に、現場観測によってローカルな影響を補正した地上重力データと衛星重力データの整合性が確認できるようになれば、それは、地上重力測定による衛星重力の検証とも考えられる。さまざまな観測が極めて高い精度で実施されるようになった現在、それらの観測をどう組み合わせるのが有効であるかを考えることも、重要な課題の一つと思われる。

#### 謝辞

GOTIC-2 の使用ならびにプログラムの改変に際して国立天文台水沢の松本晃治氏に助言をいただいた。記して謝意を表する次第である。なお、本研究の一部は平成 12 年度文部省科学研究費補助金（課題番号 11440132, 研究代表者・福田洋一）によったことを付記する。

#### 参考文献

- Foldvary, L. and Y. Fukuda (2001): IB and NIB hypotheses and their possible discrimination by GRACE, *Geophys. Res. Lett.*, 28,663-666.
- Fukuda, Y. and T. Sato (1997) : Gravity effects of sea level variation at the superconducting gravimeter sites, estimated from ERS-1 and TOPEX/Poseidon altimeter data, *IAG Symposia 117*, Segawa et al. (eds.), Springer, 107-114
- 福田洋一(2000) : 衛星アルティメトリーと衛星重力ミッション, *測地学会誌*, 46, 53-67 .
- 古屋正人・内藤勲夫(2000) : 新しい質量分布のリモートセンシング - 次世代の重力計測とその役割 - , *天気*, 47, 347 - 355 .
- Kalnay, E., N. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu., M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne and D. Joseph (1996): The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 77, 3, 437-471.
- Matsumoto K., T. Sato, T. Takanezawa and M. Ooe (2001): GOTIC2: A program for computation of ocean tidal loading effect, *J. Geod. Soc. Japan*, 47, 243-248.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa and M. Ooe (2000): Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan, *J. Oceanogr.* 56, 567-581.
- Mukai, A., T. Higashi, S. Takemoto, I. Nakagawa and I. Naito (1995): Accurate estimation of atmospheric effects on gravity observations made with a superconducting gravity meter at Kyoto, *Phys. Earth Planet Inter.* 91, 149-159.
- Mukai, A. (1997): Effect of groundwater on gravity observation at Kyoto, *International Association of Geodesy Symposia*, 117, Segawa et al. (eds.), Springer, 123-130.
- National Research Council (1997): *Satellite gravity and the geosphere*, National Academy Press Washington, D.C., 1-112.
- Sato, T., Y. Fukuda, Y. Aoyama, H. McQueen, K. Shibuya, Y. Tamura, K. Asari and M. Ooe (2001): On the observed annual gravity variation and the effect of sea surface height variations, *Phys. Earth Planet Inter.*, 123, 45-63.
- van Dam, T., J. M. Wahr, P.C.D. Milly and O. Francis (2001): Gravity changes due to continental water storage, *J. Geod. Soc. Japan*, 47, 249-254.

Wahr, J., M. Molenaar and 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, 30205-30229.

## Captions

Table 1. Geophysical phenomena which should be taken into account for the corrections of precise gravity measurements.

Fig. 1. Gravity changes at Kyoto due to the soil moisture variations calculated using a NCEP/NCAR reanalysis data set.

Fig. 2. Gravity changes due to the surface pressure changes calculated using a NCEP/NCAR reanalysis data set. The solid line shows the results based on the IB hypothesis while the broken line based on the NIB hypothesis.



phenomena	typical period	amplitude ( $\mu$ gal)	accuracy of correction	remarks
earth tides	semi diurnal diurnal	100	good	mean tide, tide free zero frequency
ocean tides	semi diurnal diurnal	10	fair	ocean tide models
atmospheric pressure	diurnal a few days	a few	fair	site measurements re-analysis data sets
groundwater (local)	annual	10	passing/failure	groudwater level
groundwater (global)	annual	1 ~ 2	failure	global water circulation
sea surface height	monthly annual	1 ~ 2	failure	satellite altimetry GCM
polar motion	annual 14 months	a few	good	IERS EOP data

Table 1. Geophysical phenomena which should be taken into account for the corrections of precise gravity measurements.

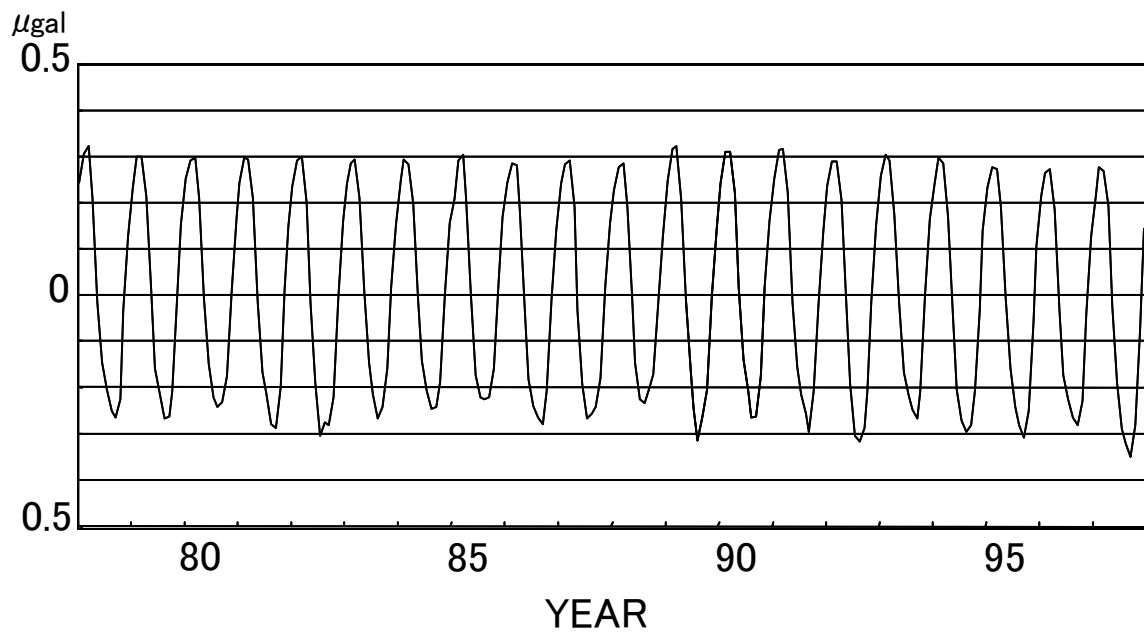


Fig.1. Gravity changes at Kyoto due to the soil moisture variations calculated using a NCEP/NCAR reanalysis data set.

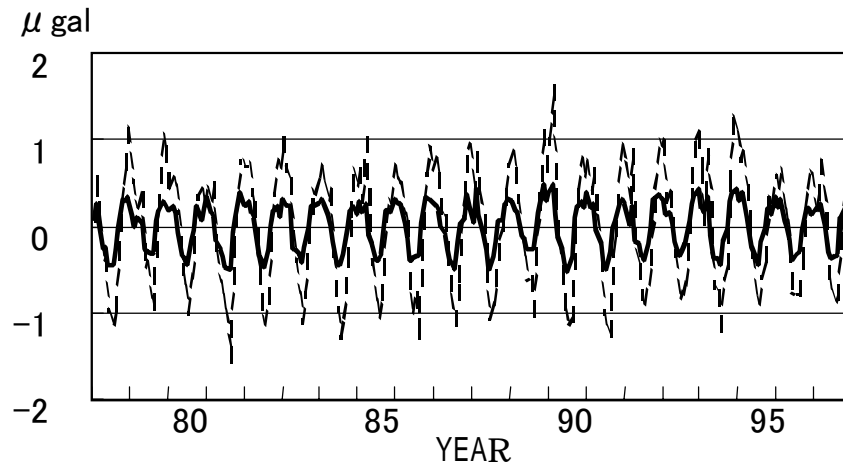


Fig. 2. Gravity changes due to the surface pressure changes calculated using a NCEP/NCAR reanalysis data set. The solid line shows the results based on the IB hypothesis while the broken line based on the NIB hypothesis.