

4.2.3 重力観測

(1) 調査研究の目的と概要

(a) 課題名 地殻変動観測（重力観測）

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京大学地震研究所	教授	大久保修平	
北海道大学大学院理学研究科	教授	笠原 稔	
"	助教授	大島 弘光	
国土地理院	地殻変動研究室	今給黎哲郎	
地理地殻活動研究センター	室長		

(c) 調査研究の目的

高密度な重力観測網において繰り返し観測することにより、地震直後の重力変化を検出し、震源域で進行しているプレート間結合状態の変動、特に震源域の東西での変動の違いの解明を図る。

(2) 調査研究の成果

(a) 調査研究の要約

襟裳・帯広・厚岸で絶対重力観測を行うとともに、えりも地域および道東地域に設置している相対重力路線の再測定を実施した。震源域から適度の距離にある3箇所における絶対測定によって、海溝沿いの巨大地震にともなう広域的なコサイスマック重力変動を正確に把握できた。これは、世界で初めての成果といえる。これらの結果と、地震発生前に実施していた絶対重力・相対重力再測定による重力場とを比較して、コサイスマックな重力時間変化の空間分布を得た。このデータとGPSによる変位データとを同時インバージョンした結果、地震学的なアスペリティ分布に対応するディスロケーションが、えりも地域直下まで延びているとする地震波解析による結果を支持する結果が得られた。これにより、アスペリティ分布の信頼性の検証に役立った。

(b) 調査研究の実施方法

1) 絶対重力測定

東京大学と北海道大学は共同で、2003年9月29日～10月12日の期間に、FG5絶対重力計による観測を、えりも町、帯広市および厚岸町で実施した。国土地理院は2004年3月22

日から 27 日の期間に、帯広市で絶対重力観測を繰り返した。

2) 相対重力測定

東京大学と北海道大学は共同で、2003 年 9 月 30 日から 10 月 4 日の期間に、えりも地域でラコステ重力計 2 台を用いた相対測定を実施した。さらに同年 11 月 23 日から 11 月 29 日まで道東地域での相対測定を実施した。

3) 時間変化の算出とインバージョン解析

主として東京大学が担当した。とくにプレートの定常的な沈み込みの影響をバックスリップモデルを用いて推定し、地震の 2 年～5 年前の観測データを直前の値に整約する前処理計算をおこなった。その結果と 1)および 2)の観測データとから時間変化を算出した。重力変化の空間分布および GPS による変位データを同時インバージョンして、十勝沖地震の断層モデルを決定した。

(c) 調査研究の成果

1)学術的な背景

海溝型巨大地震について、コサイスマックな重力変化を $1 \mu\text{gal}$ という高い精度と確度で観測した例は、これまでに報告されていない。本研究で行ったえりも、帯広および厚岸における絶対重力観測は、これを世界で初めて検出した観測例として位置づけられる。しかも、測定点が 1 点ではなくて、震源断層から、断層サイズ程度の適度の距離の 3 点で広域的に観測されたことは、きわめて重要である。この自ら測定して得た重力変化の解析を通じて、海溝型巨大地震においてもディスロケーション理論に基づく重力変化の公式(Okubo, 1992) が成立していることを検証できたことの意義は高い。また 2)で述べるような地震前データの処理法についても、新たな発展をはかることができた。

2) 地震前データの整約

地震に伴う重力変化を導くためには、実は地震の直前(1ヶ月～1日前)の重力測定データがなくてはならない。地震予知ができれば地震直前の測定も可能ではあるが、現時点ではよほどの僥倖に恵まれなければ、このようなことはありえない(Tanaka et al., 2001)。したがって、地震前データといっても、地震発生の 1 年から数年前のデータしかないのが通例である。北海道十勝沖の場合、この様なデータをそのまま地震直前のデータとして扱うことは許されない。なぜなら、そこでは太平洋プレートが北米プレートの下に定常的に沈み込んでおり、サブダクションの影響を無視すれば、有意な系統誤差が混入するからである。そこで本研究では、プレートのサブダクションをバックスリップモデルによって定量的にモデル化し、地震の数年前の絶対重力測定値を地震直前の重力値に整約することとした。

Savage(1983)は断層両側に与えた定常的なスリップの成分と、断層運動に反対向きの食い違い変位（すなわち正断層型のスリップ）を与えた場合との足し合わせによって、定常的なプレート運動の効果を評価しようとした。この断層運動と反対向きに想定した変位をbackslipと呼ぶ。このモデルによると、地殻変動や重力変化などの物理量 w の時空間変動は

$$w(x,t) = -w_1(x,\infty)t/T + w_1(x,t) + \sum_{n=1}^{\infty} [w_1(x,t+nT) - w_1(x,nT)] \quad (1)$$

と表される。ここで、 x は観測点の座標、 T は巨大地震の再来周期であり、時刻 $t=0$ に直近の巨大地震が起きたとしている。右辺第1項の $-w_1(x, \infty)t/T$ は時刻 t におけるbackslipによる重力変化、第2項 $w_1(x,t)$ は時刻 t における時刻0に発生した地震の影響による重力変化、第3項は過去の地震の影響による重力変化の足しあわせである。この合計 $w(x,t)$ が定常的なプレート運動による重力変化となる。 $w_1(x,t)$ を見積もるためには、2つの段階を踏む必要がある。最初のステップでは、点震源に対する粘弾性球対称地球モデル（SNRVEIモデル：

Spherically Symmetric Non-Rotating Visco-Elastic Isotropic earth model）の応答（グリーン関数）すなわち地殻変動と重力変化を計算する。これは田中・大久保(2000)による定式化と計算手法で完成している。第2のステップでは、得られたグリーン関数を断層面上で面積分して、地表変位および重力変化を計算する（Okubo et al, 2003; 奥野ほか2003）。

以下では、密度、弾性定数は1066Aモデルのそれを採用し、アセノスフェアの粘性率が 10^{20} [Pa s]および 10^{21} [Pa s]という異なる値をもつ2つ地球モデルについて計算をすすめた。十勝沖および根室沖には、それぞれ矩形のアスペリティを仮定し、そこでは正断層型の定常すべりが起きているとして、定常的なサブダクションをモデル化した（図1）。断層面の長さはそれぞれ130kmと100kmとし、傾斜角を 20° としている。これは山中・菊地(2002)によるアスペリティマップ、Ito et al.(2000)のバックスリップ分布を参考にしたものである。地震時のすべり量は、千島海溝のプレート沈み込み速度7.8cm/year（Seno et al. 1996）、プレート間の固着率を0.85（Ito et al.2000）に、地震の繰返し周期 $T=80$ 年から、5.43mとなり、この値を用いてシミュレーションを行った。

得られた重力の経年変化の様子を図2に示す。ここでは2つの粘性モデルの平均値をとっている。えりもにおける2年間の定常すべりによる重力変化および帯広と厚岸における5年間の定常すべりによる重力変化は、それぞれ-1.4 μ gal、-2.5 μ gal、-3.8 μ galと見積もられた。

3) 地震後の重力観測

a)絶対重力観測

2003年十勝沖地震直後に、以下の3点で、延べ4回の絶対重力観測を行った。

期間

(1) 襟裳（北海道大学えりも地殻変動観測所） 2003年9月29日~10月6日

密度 ρ の半無限弾性体媒質内の有限矩形断層上で一様なすべりが生じたとき、地表の点 (x_1, x_2) における重力変化は

$$\Delta g(x_1, x_2) = \{ \rho G [U_1 S_g(\mathbf{x}, \mathbf{h}) + U_2 D_g(\mathbf{x}, \mathbf{h}) + U_3 T_g(\mathbf{x}, \mathbf{h})] + \Delta \rho G U_3 C_g(\mathbf{x}, \mathbf{h}) \} - \beta \Delta h(x_1, x_2) \quad (2)$$

と表される (Okubo, 1992)。ここで、 U_1, U_2, U_3 はそれぞれディスロケーションの左横ずれ成分、逆断層成分、開口変位成分を表す。ここで、 Δh と $\beta=3.086$ [$\mu\text{gal}/\text{cm}$] は、それぞれ上下変位とフリーエア重力勾配を意味する。また ρ は開口部を充填している密度と周囲の媒質の密度との差を表す。 G は万有引力定数である。この式では Chinnery (1961) の表記法

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{h}) = f(x_1, p) - f(x_1, p-W) - f(x_1-L, p) + f(x_1-L, p-W) \quad (3)$$

$$p = x_2 \cos d + d \sin d$$

を用いた。式 (2) 中の S_g, D_g, T_g は、単位の大きさのディスロケーションが、それぞれ水平方向、逆断層方向、開口方向に生じたときの重力変化を表し、 C_g は単位の開口変位によって生じた空隙を単位密度の物質が充填したときの重力効果を表す (Okubo 1992)。(2) 式の第 5 項は測定点の鉛直方向の変位による重力変化を表している。

この式を用いて、えりもの絶対重力点 ERM (北海道大学地殻変動観測坑) における、地表の重力変化は $+57.5 \mu\text{gal}$ と予測された。一方、絶対重力測定からは $+15.4 \mu\text{gal}$ の重力増加が観測されている。予測値と観測値の食い違いは、 $+42 \mu\text{gal}$ に及んでいる。

(2) 式の再吟味を行った結果、予測値の計算プログラミングでは重力鉛直勾配 b の値が 3.09 [$\mu\text{gal}/\text{cm}$] と固定されていることが判明した。通常はこれで問題はないのであるが、今の測定は横坑内におけるものであるから、重力鉛直勾配 b はフリーエア勾配ではなく、ブーゲー勾配に近いと予想される。実際に測定したところ、得られた重力鉛直勾配が 2.19 [$\mu\text{gal}/\text{cm}$] であった。えりもの上下変動 Δh は -18 cm (図 5 (a)) であったから、正しい鉛直勾配 $b=2.19$ [$\mu\text{gal}/\text{cm}$] を用いて再計算すると、予測値としては

$$57.5 + (3.09 - 2.19) \cdot (-18.0) = 41.3 \mu\text{gal}$$

という結果が得られる。観測値との差は $25 \mu\text{gal}$ 程度にまで縮小し、断層モデルの調整により、観測値を説明できる見込みが立った。そこで、相対測定の結果も合わせて、さらに 5) で解析をすすめることとした。

ここで重力変化理論式 (2) において重力鉛直勾配 b の値として不用意に 3.086 [$\mu\text{gal}/\text{cm}$] という値を用いると、計算値と観測値に有意な誤差が生じたことに留意したい。いわばトンネル効果ともいふべきこの効果を補正するためには、観測点における重力鉛直勾配を実測して、その値を (2) 式の b として用いるべきことが分かった。これは、本研究で得られた重要な副産物として強調しておきたい。

5) コサイスマックな重力変化観測データのモデル化および理論の検証

GPS および重力の測定結果を用いて幾何学的断層モデルを決定した。モデル化の手法としては、半無限弾性体中の矩形断層を仮定した Okada(1985)の定式化を用いた。Okada は半無限弾性体中の横ずれ、縦ずれ、開口の各断層について、断層の位置、大きさ、およびずれの大きさをパラメータとして与えれば、半無限弾性体上の任意の点で変位が計算できる形式を与えた。

まず、第一段階として、1つの縦ずれ断層の存在を仮定し、それぞれのパラメータを求めた。パラメータ(縦ずれ断層の緯度、経度、長さ、幅、深さ、走行、傾斜角、すべり量、すべり角)は以下の V_1 を最小にするものを求めた。これは、重力変化 Δg 、上下変位 Δh 、水平変位 Δu の観測量と計算量の差をそれぞれの測定誤差で割ったものの二乗和

$$V_1 = \Sigma (\Delta g_{obs} - \Delta g_{cal}) / \sigma_g)^2 + \Sigma (\Delta h_{obs} - \Delta h_{cal}) / \sigma_h)^2 + \Sigma (\Delta u_{obs} - \Delta u_{cal}) / \sigma_u)^2 \quad (4)$$

である。 σ_g 、 σ_h 、 σ_u はそれぞれ重力、高さ変化、水平変位の測定誤差を示し、本研究では $15\mu\text{gal}$ 、 15mm 、 20mm とした。また媒質のポアソン比は全ての計算で 0.25 とし、弾性体(周囲の地殻)の密度は $2.67 [\text{g}/\text{cm}^3]$ とした。表 2 の左側のコラムに示す範囲で、 V_1 を最小とする適切な断層パラメータをグリッドサーチで求めた。一枚目の断層で V_1 が最小値(210.3)をとったときの、予測値と測定結果の差の標準偏差は、重力変化について $16.0\mu\text{gal}$ 、GPS による高さ変動について、 28mm 、水平変位について 37mm となった。データ数が 60(重力が 14(絶対重力 3 点+相対重力 11 点)、GPS による高さ変動 20、水平変位 13×2)であるのに対し、パラメータ数は 9 であるから、 V_1 は自由度 $f=51$ である χ^2 分布に従うと考えられる。したがって V_1 が自由度 51 の χ^2 分布の上側 5% 以内、すなわち $\chi^2(0.05)=68.6$ に収まれば、適切なモデルということができる。インバージョンの結果は $V_1=210.3 > 68.6$ だから、モデルの適合度は悪い。そこでさらにモデルを改良することとした。具体的には、1 段階目の断層に加えて、1つの小さな縦ずれ断層を襟裳岬の先端の位置に加えた(図 4 (b))。これは 1 枚目の断層だけによる場合では襟裳周辺の重力の残差が特に大きく残ったためである。表 2 に示すような範囲で同じく V_1 を最小とする断層パラメータを求めた。これによると、 V_1 が最小(178.8)となったときの、観測量残差の標準偏差は、重力変化について $10.9\mu\text{gal}$ 、高さ変化について、 26mm 、水平変位について 35mm となった。自由度は $f=42$ となるから、上側 5% 点の値 $\chi^2(0.05)=58.1$ よりもまだ $V_1=178.8$ は大きく、モデルの適合度はまだ悪い。しかしパラメータを 9 増やしただけで(自由度は 9 減少) V_1 が 31.5 も減少したことから 2 枚目の断層をモデルで想定したことは適切であったと考えられる。 χ^2 の適合度はまだ悪いので、すべり分布をより詳細にするために断層を細分化すること等による改良の余地はある。

求められた全パラメータと、このパラメータによる重力変化の計算値、および実際の観測結果とあわせて、図 6 および表 2 に示す。2 枚目の断層の位置は、地震波による解析から導かれたモデル(山中・菊地 2003)(図 7)で導かれた、えりも直下にのびるアスペリ

ティの位置をカバーしており、調和的な結果といえる。観測された重力変化の値と、得られた断層モデルによる重力変化の計算値の差は、設定観測誤差 $\sigma_g = 15 \mu\text{gal}$ 以下である(表3)。これによって、絶対重力変化に関するディスロケーション理論は、海溝型巨大地震においても成立することが明らかになった。

6) 帯広における2回の測定の比較

帯広における絶対重力測定は、2003年10月と2004年3月の2回、実施されている。地震研究所による値は $980418685.2 \mu\text{gal}$ (2003年10月)であるのに対し、国土地理院によって得られた値は $980418688.9 \mu\text{gal}$ (2004年3月)であった。すなわち地震後5ヶ月の間に $3.7 \mu\text{gal}$ の重力の増加があったことになる。ただし10月には積雪はなかったのに対し、3月には40cmの積雪があったことを考慮しなくてはならない。雪の密度を 0.2g/cm^3 とすると、観測点付近が一面に40cmの積雪で覆われた場合には、 $3.2 \mu\text{gal}$ の重力増加がみこまれる。観測点が室内にあることを考えれば、積雪の直接的な効果は $3.2 \mu\text{gal}$ の何割かという程度と見込まれる。しかし、地下水の上昇という側面もありうるので、この5か月で数 μgal 程度の環境要因による重力増加はありそうである。したがって、5ヶ月間の余効変動は明瞭には捉えられなかったと結論される。

(d) 結論ならびに今後の課題

地震直後のコサイスマックな重力変化の検出については、えりも地域・道東地域ともに目標を達成した。得られたデータのインバージョンから、アスペリティが襟裳直下まで延びていることを見出した。

余効変動観測については、えりも地域では機材故障のため、2003年10月9日までしか実施できなかった。2004年7月に再度、えりも地域での観測を実施し、1年程度の時間尺度の余効変動を観測する予定である。帯広においては、2003年10月に実施した測定値と2004年3月のそれとを比較したが、明瞭な余効変動を検出することはできなかった。積雪の影響を正しく補正することが新たな課題となる。

(e) 引用文献

- 1) Chinnery, M.A.: The deformation of ground around surface faults, Bull.Seismol. Soc.Am., Vol. 51, 355-372, 1961
- 2) Hirata, K., Geist, E., Satake, K., Tanioka, Y., and Yamaki, S.: Slip distribution of the 1952 Tokachi-Oki earthquake(M8.1) along the Kuril Trench deduced from tsunami waveform inversion, J. Geophys. Res. Vol. 108, B4. art. no-2196, 2003.
- 3) Ito, T., Yoshioka, S., Miyazaki, S.: Interplate coupling in northeast Japan deduced from inversion analysis of GPS data, Earth and Planetary Science Letters, Vol. 176, No.1, 117-130, 2000.

- 4) Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismo. Soc. Amer.*, Vol. 75, 1135-1154, 1985.
- 5) Okubo, S.: Potential and gravity changes due to shear and tensile faults in a half-space, *J. Geophys. Res.*, Vol. 97, B5, 7137-7144, 1992.
- 6) Okubo, S., Okuno, J. and Tanaka, Y.: Viscoelastic Deformations During a Seismic Cycle and over Cycles around A Subduction Zone – Simulation for a Realistic SNVREI Earth, JSG-0/07A/A01-011, Abstracts of the IUGG General Assembly, Sapporo, July 2003.
- 7) 奥野淳一・大久保修平・田中愛幸: 沈み込み帯における変位・重力の経年変化 - 球対称粘弾性地球モデルを用いたシミュレーション、2003年秋季地震学会予稿集, 2003.
- 8) Savage J.C.: A Dislocation Model of Strain Accumulation and Release at a Subduction Zone, *J. Geophys. Res.* Vol.88, 4984-4996, 1983.
- 9) Seno, T., Sakurai, T., Stein, S.: Can the Okhotsk plate be discedinated from the north American plate?, *J. Geophys. Res.*, Vol. 101, B5, 11305-11315, 1996.
- 10) 平 貴昭・小山順二・本多 亮・前川徳光・大島弘光・高田真秀: えりも計画: 絶対重力・精密重力・GPS 連続観測, 北海道大学地球物理学研究報告, No.65, 311-323, 2002.
- 11) 田中愛幸・大久保修平、球対称 Maxwell 粘弾性地球モデルの点震源に対する応答、日本測地学会第 94 回講演会要旨, 2000.
- 12) Tanaka, Y., Okubo, S., Machida, M., Kimura, I. and Kosuge, T.: First Detection of Absolute gravity Change Caused by Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 28, No. 15, 2979-2981, 2001.
- 13) Yamanaka, Y. and Kikuchi, M.: Source Process of the recurrent Tokachi-oki earthquake on September 26, 2003, inferred from teleseismic body waves, *Earth Planets Space*, Vol.55, No.12, e21-e24, 2003.
- 14) 山中佳子・菊地正幸: アスペリティマップ - 北海道編 (その 1) - 、2002年地震学会予稿集 B52, 2002

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
大久保修平 大島弘光 前川徳光 松本滋夫 高森昭光 下山知徳	ハイブリッド重力観測で検出した、2003年十勝沖地震に伴う重力変化 - トンネル効果の発見	2004年地球惑星科学関連学会合同大会	平成16年5月11日(予定)
大島弘光・ 大久保修平	2003年十勝沖地震による重力変動	2003年十勝沖地震研究成果報告会	平成16年3月5日
大久保修平 大島弘光・ 小山順二・ 松本滋夫・ 前川徳光・ 高森昭光・ 下山知徳	十勝沖地震にともなう重力変化 - 絶対重力測定速報	東京大学地震研究所第810回談話会	平成15年10月30日