

岩手山周辺における重力観測

Gravity Observations around Iwate volcano since August 1998

測地部 町田守人・木村 勲・小菅俊宏・安藤 久・豊田友夫

Geodetic Department

Morito Machida, Isao Kimura, Toshihiro Kosuge, Hisashi Ando, Tomooh Toyoda

東京大学地震研究所 田中愛幸・大久保修平

Earthquake Research Institute, University of Tokyo Yoshiyuki Tanaka, Shuhei Okubo

要 旨

1998年8月以来、岩手山周辺でFG5絶対重力計とラコスト重力計による観測を延べ5回おこなった。断層面を2枚仮定して、重力変化と地殻変動データの統合解析から岩手県内陸北部地震を起こした断層を推定した。

1. はじめに

岩手山では1998年2月頃から活発な火山活動が続いている。1998年8月以来、国土地理院はマグマ挙動の把握を目的として、岩手山南西山麓において絶対重力測定を繰り返してきた。絶対重力測定のほかに、GPS、APS（自動測距・測角システム）連続観測、地磁気連続観測によって得られたデータが蓄積している。また、他の国立試験研究機関や大学によって多項目の観測が集中的におこなわれている。

火山活動の監視において、地震観測や地殻変動観測と同様に、重力も有効な観測手段と考えられている。その理由のひとつは、火山体の地下浅部に形成されるマグマ溜まりへマグマが供給されれば、(a)その量的変化に応じた直接的な引力効果によって重力場が局所的に増加すると考えられるからである。しかし、マグマの貫入を重力観測によって検出することは、それほど簡単なことではない。

マグマ溜まりへ大量のマグマが充填されると、(a)以外に、次の(b)～(c)のメカニズムでも重力が変化する可能性がある。

(b) マグマ貫入等によって地面が押し上げられる隆起（重力を減少させる）

(c) 地下岩体の密度場の変化。マグマによって地殻内部に体積歪が引き起こされる。膨張する部分では密度が小さくなり、圧縮される部分では密度が大きくなる。この体積歪に比例する密度変化を変動領域について寄せ集めると、局所的な重力場の変化になる。

観測される重力変化は(a)～(c)の重ね合わせである。マグマ上昇に対して、(a)と(b)の寄与は重力変化として互いに逆のセンスにある。この重力変化が微小なレベルにあることも予想される。また、観測量から(a)だけを一義的に分離することはできない。

GPS, EDM, 水準測量は、地殻変動に関する3次元の情報を与えてくれる。定性的には重力変化が地殻変動と密接に関係していると認識される。同じ励起源から引き起こされるにもかかわらず、地震・火山のフィールドで取得された観測データは変位場と重力場という別々の立場で見られてきた。地殻変動データは地表における変位を精度よく検出でき、副次的には地殻内部の状況を推定することもできる。これに対して重力データの主要な特徴は、基本的に地殻内部の物質に関する情報を反映していることである。より整合的な火山現象の姿を求めるには、重力データを地殻変動に関する3次元の情報と統合化する必要がある。その具体的なスキームのひとつとして、後述の大久保によるディスロケーション理論にもとづく重力変化の定式化を挙げることができる。

この報告では、国土地理院が岩手山でおこなった絶対重力観測の概要を述べる。また、1998年9月3日に発生した岩手県内陸北部地震に対して重力と地殻変動データを統合解析した結果等について報告する。

2. 火山活動と重力変化

活動期の火山は短期間のうちに大規模な災害を周辺地域に及ぼすことが多い。特に火山噴火が発生すると、大量の噴出物が広範囲に撒き散らされる。活火山の近傍で社会生活を送る住民にとって、活火山は潜在的な脅威を秘めている。

火山活動の発展過程を時間軸と空間軸を通じた視点から因果的に把握しようとする試みには、地球ダイナミクス理解はもとより、火山活動の劇的な急変に備える適切な事前対策の実施にあたって防災上の観点からも意義がある。火山噴火予知研究における最終段階として、噴火に至る推移や噴火の開始を定量的に記述できる物理化学モデルの確立が望まれている。このようなモデルを導き出す出発点となるのは、多角的な観測をつうじて基礎的データを蓄積することである。観測データの時間的・空間的变化をつうじて地震・火山現象の進行を監視することにより、噴火機構に対する理解を深めることができる。火山活動の静穏な時期からデータ取得を継続しておこなえば、観測データをモデルの形成に対して、より

有効に活用させることができる。

マグマ貫入やマグマ溜まり形成は、火山性地震、地殻変動、火山ガスの組成や噴気量・重力・地磁気の変化を励起させる原因になる。各種の観測手段には質的な違いがあるものの、これらの応答にはマグマという同一の励起源に由来する因果関係が分散されていると考えられる。火山活動の様相は火山ごとに多様であるが、複数の観測データをモデルによって適切に統合化することによって、個々の独立した観測から得られる断片的な知見を、より整合的なイメージへ整理することができるだろう。

噴火の発生機構やマグマ供給系に関して未詳部分もあるが、概略的にはマグマ溜まりへマグマが供給され、次いでマグマが火道を上昇して地表付近に達する過程を経て噴火に至ると考えられている。

1990年代前半に公称精度0.001mGalレベルの可搬型絶対重力計が登場した。これによって、フィールドでの運用が格段に向上した。マグマ溜まりにおけるマグマの挙動を把握することは噴火に対する時間的な過程を把握するうえで重要であり、そのための微小な重力変化を観測する手段は整ってきた。

しかし、噴火発生前の段階では、火山体の地下浅部に形成されるマグマ溜まりが大量のマグマの一時的な貯留槽としての役割を果たすだけでなく、圧力源としてもふるまう。この点を力学的に考慮すると、マグマ溜まりの形成によって、火山性流体の充填による物質量の増加と

ともに、周囲の地殻物質への圧縮、地表面の隆起を引き起こし、それぞれの効果が合成されて火山体周辺の重力場変化に寄与すると予想される(図-1)。

重力観測だけではマグマの物質移動を一義的に分離することはできない。現在の絶対重力観測の技術的な精度向上を背景にしてマグマ挙動の定量的な議論を展開するには、ここに重力観測とその解釈の間を橋渡しする理論の重要な役割が期待されていることを示唆している。

重力観測が抱えるこの困難を解決する試みとして、1989年の伊東沖海底噴火の際に、上下方向とともに水平方向の地殻変動との関連性を取り入れたモデルにもとづく理論で重力観測結果の解析をおこなった大久保他の研究を挙げることができる(Okubo et al, 1991)。辺長観測や水準測量によって、火山活動による地殻の歪や隆起に関する精密な情報が得られる。これらの地殻変動データと重力観測を統合的に処理することによって、マグマ自体の挙動の抽出が可能になることがわかった。この大久保によるディスロケーション理論にもとづく重力変化の定式化は1990年代初頭に構築された(大久保, 1994)。この理論を適用するうえで、重力と上下・水平変動の観測データを完備していることが必要であった。そのようなフィールドをこの理論で解析した成功事例として、その他に1997年の伊豆半島東方の群発地震(Yoshida, 1999)など、これまでに数例を挙げることができた。

地殻変動は従来から地震・火山噴火現象にともなうディスロケーション理論の枠組みで理解されてきた。ここに重力変化を取りこんだモデルの妥当性が精密な観測事実によって裏付けられれば、噴火機構に関する物理化学モデルを、より整合的に構築する成果が期待できる。

3. 重力観測

3.1 絶対重力観測

3.1.1 観測点の選定

1998年7月に、国土地理院は岩手山の火山活動に関する緊急研究の一環として、岩手山において絶対重力測定の実施を決定した。観測に先だって、測定場所の選定をおこなった。第1次の現地調査によって、岩手山周辺にある4つの施設が候補として選ばれた。第2次の現地調査では、候補地における地盤の揺れをラコスト重力計を使って調査した。現地調査の結果を考慮して、絶対重力測定をおこなう場所を休暇村「岩手」に決定した。この施設は岩手山の南西斜面に位置する。測定には、この施設の本館西棟1階にある倉庫(5m×15m)を使用した(図-2)。室内は全面がコンクリート製で、建物の基礎の一部分に相当する。半地下構造になっており、床は直接岩盤につながっている。絶対重力の測定位置(図-2, A点)には金属標識を設置した。金属標識中央部に刻まれた十字線の位置が、絶対重力計のコーナーキューブが落下する経路の延長線上に相当する。また、金属標識の上面は絶対重力計の器械高を測定する基準位置である。

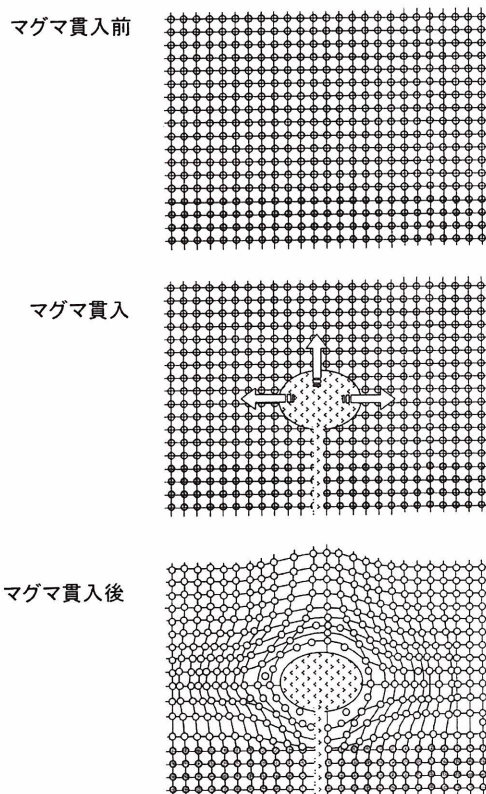


図-1 噴火前段階における重力変化の概念図

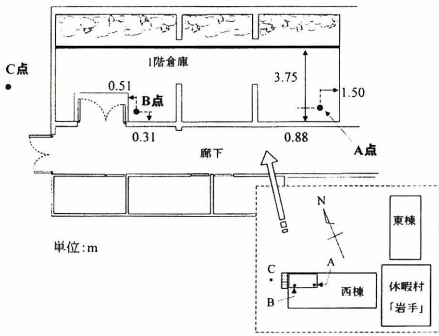


図-2 絶対観測点

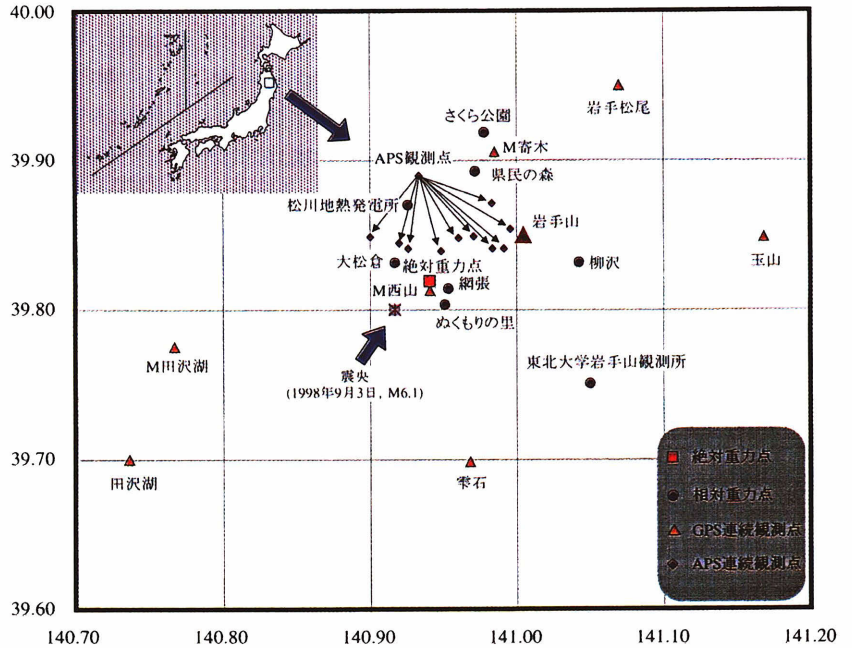


図-3 重力観測点の配置

3.1.2 観測方法

(1) 測器

観測にはMicro-g社製のFG5絶対重力計(#203)を使用した。器械を北の方角に対して、同一の向きになるように設置した。

(2) 測定方式

FG5絶対重力計の真空槽内部($< 10^{-4}$ Pa)でコーナー・キューブを15秒ごとに自由落下させた。1回の落下には約0.2秒を要し、この間に180個のフリンジを取得した。また、次の落下を開始するまで落下開始点におけるコーナー・キューブの保持時間は8秒間にした。1回の運転サイクル(1セット)では、この落下を約40分間で160回繰り返し、その後、約20分間の小休止をおいた。小休止の時間帯には、絶対重力計の運転状況の点検や微調整をおこなった。

(3) 観測点の位置情報

絶対重力点の位置として、次の値を使用した。

- 北緯 39度 49分 8秒
- 東経 140度 56分 26秒
- 標高 770 m

絶対重力点の水平位置は、建物の外でおこなったGPS観測による結果に準じた。このGPS観測点(図-2, C点)は絶対重力点から北西側へ約17m離れている。絶対重力点の標高は、このGPS観測点から水準測量をおこなって、1cmの精度で決定した。

3.2 相対重力観測

3.2.1 観測点の選定

岩手山周辺の計9箇所を相対重力測定のための臨時観測点として選定した。岩手山に対する観測点の概略の配置は次

のとおりである。

- 北西側 3点(さくら公園, 県民の森, 松川地熱発電所)
- 東側 1点(柳沢)
- 南西側 4点(網張, めくもりの里, 大松倉1, 大松倉2)
- 南東側 1点(東北大学岩手山観測所)

このうちの大松倉, 柳沢, 東北大学岩手山観測所は東北大学の重力観測点と重複している。柳沢と大松倉2は水準測量大学合同観測班の水準点である。網張は国土地理院の岩手高原4等三角点である。柳沢, 大松倉2, 網張観測点以外では、重力計を置く位置として建造物の床面にマークを付けたり、または建造物の一部を自然目標として利用した。相対重力測定の始点(図-2, B点)は、絶対重力点から北西側へ約10m離れた位置にした。絶対重力点と相対重力測定の始点間の重力差は、絶対重力測定の終了後に測定した。

絶対重力観測点および相対重力観測点の配置を図-3に示す。

3.3 観測経過

1998年8月以来1999年10月までに、次の時期に絶対重力観測を実施した。

- (I) 1998年 8月25日~9月2日
- (II) 1998年 9月10日~9月20日
- (III) 1998年 11月7日~11月15日
- (IV) 1999年 5月11日~5月19日
- (V) 1999年 10月14日~10月24日

絶対重力計を自動運転させている間に、相対重力観測をおこなった。参照重力値は各回ごとの絶対重力測定結果に準拠した。

4. 計算処理

4.1 重力補正

自由落下方式による絶対重力測定では、落下時間と落下位置に関するデータから、最小二乗法によって落下開始点の重力値が導かれる。この計算はFG5絶対重力計に付属する解析ソフトウェアOlivia (Version 2.21) /Replay (Version 2.2)によって処理した。最小自乗法による処理では、①式をモデルとして採用している。

$$z_i = z_0 + v_0 t_i + \frac{g_0}{2} t_i^2 + \frac{k v_0}{6} t_i^3 + \frac{k g_0}{24} t_i^4 \quad (1)$$

ここで、 g_0 は落下開始点 z_0 における重力値であり、 k は重力鉛直勾配である。 v_0 は、落下開始点における初期速度である。

この処理過程で、(1)~(7)について補正を加えて、絶対重力点上0.00mにおける重力値に引き直した。

- (1) 固体地球潮汐補正： δ -factorは1.16(永久潮汐については1.0)
- (2) 光速速度補正
- (3) 重力鉛直勾配補正： $dg/dh = -0.2996$ [mGal/m]
ラコスト重力計(G-83, G-118)を用いた2点法(金属標上0.00m-1.20m)による観測をおこない、 ± 0.0003 mGal/mの精度で重力鉛直勾配を決定した。
- (4) 重力投影補正：重力鉛直勾配と器械高から、絶対重力点標識上0.00 [m]における重力値に換算する。
- (5) 大気圧補正：気圧アドミッタンス値は0.00036 [mGal/hPa]、標準大気圧はIAGBN勧告の式にもとづき、924.10 [hPa]を用いた。気圧アドミッタンス値は、岩手山における重力値と気圧データから、回帰分析によって決定した。
- (6) 極運動補正：観測時にはIERS Bulletin Aの極座標速報値を使用し、再計算時にはBulletin Bの確定値を使用した。
- (7) 海洋潮汐補正：I, II, Vの観測結果については、国立天文台の松本 晃治によって改訂された海洋潮汐モデル(GOTIC2)を使用して、短周期16分潮、長周期5分潮の計21分潮について補正した。それ以外はSchwiderski (1980)にもとづくソフト(SPOTL)で主要8分潮(M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf)について潮汐パラメータをもとめ、FG5絶対重力計の解析ソフトウェア中で補正した。

4.2 統計処理

前節の処理過程を経て、個々の落下ごとの重力値(GRV型データ)が得られる。基本統計量を求める処理では、1サイクルに対してGRV型データの時間平均をとって編集されたSET型データを用いた。

SET型データが p 組あり、それぞれのセット毎にセット内平均重力値 \bar{g}_i 、セット内分散 σ_i^2 および有効観測データ数 n_i ($i = 1, 2, \dots, p$)が判明している。全平均値 \bar{g} と全分散 σ^2 を、それぞれ②、③式により算出した。

$$\bar{g} = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{n_i} g_{ij}}{\sum_{i=1}^p n_i} = \frac{\sum_{i=1}^p n_i \bar{g}_i}{N} \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^p [(n_i-1) \cdot \sigma_i^2 + n_i \cdot (\bar{g}_i - \bar{g})^2]}{N-1} \quad (3)$$

$$(N = \sum_{i=1}^p n_i)$$

全平均値に対する誤差として、 σ/\sqrt{N} を用いた。

4.3 外れ値の削除方法

絶対重力観測中に岩手山で火山性地震が起きると、測定値の分散が $(\pm 0.100\text{mGal})^2$ 程度まで劣化した。この原因としては、レーザー干渉計からバネによって吊られた慣性基準自体が地震の揺れによる大きな加速度を拾うことによって、通常の常時微動に比べて変位の補償制御が不安定になるためだと考えられた。

地震によるノイズを含んだデータを許容すると、多少とも観測結果に影響して、観測結果の精度を低下させると考えられた。微小な重力変化の検出を目的とする上では、このようなデータを予め外れ値として削除した上で統計処理することが必要と思われる。

地震が起きたセットでは、地震の起きなかったセットに比べて、2つの傾向が見られた。ひとつは、セット内分散が地震の起きなかったセットに比べて大きくなることだった。観測重力値を時間に対してプロットすると、このようなセットはエラーバーの大きいデータとして識別できた。もうひとつは、エラーバーが大きくなって、全体平均から大きな偏差を示すことだった。

これらの傾向を手がかりにして、次の2つの判断基準によって、地震によって測定値が劣化したSET型データを外れ値とみなして削除した。

$$\textcircled{1} \quad \sigma_i^2 > V_{\text{within}}$$

$$\textcircled{2} \quad n_i (\bar{g}_i - \bar{g})^2 > V_{\text{between}}$$

ここで、セット内平均平方和 V_{within} 、セット間平均平方和 V_{between} を、それぞれ④、⑤式で与える。

$$V_{\text{within}} = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{n_i} (g_{ij} - \bar{g}_i)^2}{N-p} = \frac{\sum_{i=1}^p (n_i-1) \cdot \sigma_i^2}{N-p} \quad (4)$$

$$V_{\text{between}} = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{n_i} (\bar{g}_i - \bar{g})^2}{p-1} = \frac{\sum_{i=1}^p n_i \cdot (\bar{g}_i - \bar{g})^2}{p-1} \quad (5)$$

外れ値を削除したのち、ふたたび統計処理をおこなって平均値を算出した。平均値の較差が 0.0001mGal 以内に収束するまで、この手順を繰り返した。

5. 岩手県内陸北部地震

1998年9月3日16時58分(JST)に、岩手県内陸北部地震(M6.1、深さ7km)が発生した。絶対重力観測点から震央(北緯39度48分、東経140度55分)までの距離は約2kmだった。この地震が発生する約29時間前まで、国土地理院の観測班は絶対重力観測(I)をおこなっていた。地震発生時には観測班は現地から撤収した後だったが、9月10日に再び現地入りして、絶対重力観測(II)を開始した。地震発生から約175時間が経過していた。

6. 絶対重力観測の結果

図-4は(I)から(V)までの絶対重力観測結果で、それ

ぞれの測定期間ごとの整約値である。また、図-5には岩手県内陸北部地震前後の絶対重力値として、(I)と(II)のデータ(1時間毎整約値)を示す。GPS観測から得られたM寄木-M田沢湖における基線長の変化をあわせて示す。

7. 地殻変動と重力変化のモデリング

地震前後の重力変化と地殻変動から、この地震に関連してどのような理解が得られたか、東京大学地震研究所で開発されたモデルを応用した解析結果について紹介する。

著者達はまず、絶対重力観測(I)と(II)で取得したデータに対して解析をおこなった。この部分を最初の

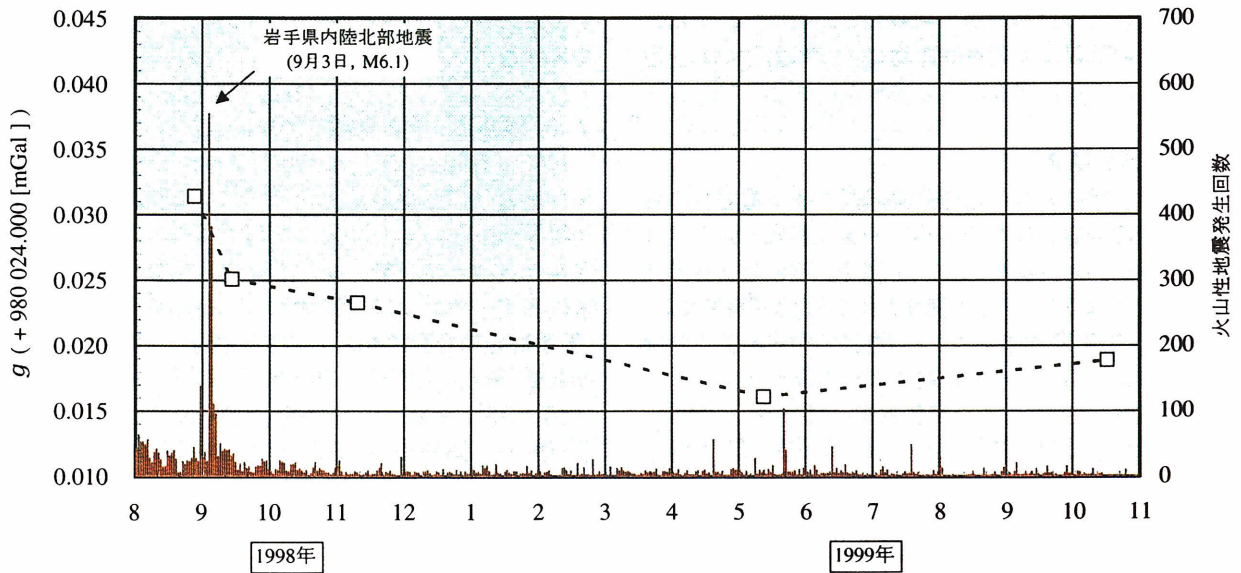


図-4 絶対重力測定結果(左縦軸)。横軸は観測月を表す。岩手山における火山性地震の発生回数(右縦軸)をあわせて示す(盛岡地方気象台発表による東北大学・松川観測点のデータを使用)

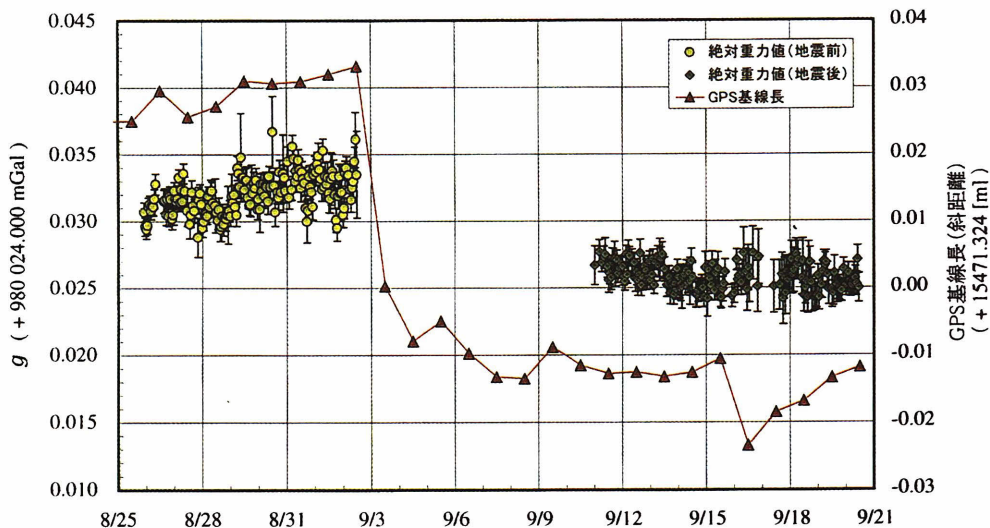


図-5 地震前後の絶対重力値の時間変化および地殻変動。GPS基線はM寄木-M田沢湖の基線長の変化を示す。GPSデータはUT表示による時刻区分に従って0時から23時59分までの観測データを精密暦解析したのち、1日単位の値に整約したものである。重力値は1時間整約値である。図ではGPS、重力値ともJST表示による。

対象に選んだのは次の理由による。(I)と(II)の間に、岩手県内陸北部地震が起きたが、絶対重力観測点は震央の近傍にあった。この地震前後で、岩手山周辺に設置されていたGPS連続観測から明瞭な地殻変動が見られた。この地殻変動は絶対重力観測を実施したエリアを含む岩手山一帯に及んだ。そのため、この地震にともなう岩手山周辺の重力場も影響をうけたと考えられた。また、火山活動に関するマグマの挙動の把握をめざす当初の目的からすると、火山活動と関連のない地震の発生によって、重力へ及ぼされる影響を観測と理論の両方から定量的に評価する必要があったことである。

実測によって地震前後で絶対重力値に -0.006mGal の減少が認められた(山本他, 1998)。絶対重力の観測精度(0.001mGal)と短い期間から判断して、検出された重力変化は、この地震による地殻変動によって生じたと予想された。このことは理論からも実証されるべきである。

7.1 モデルの開発

東京大学地震研究所の地球計測部門では、重力場の時間変化と空間分布の研究を進めている。地震・火山噴火現象にともなう重力変化について、東京大学地震研究所でこれまでどのようなモデルが開発されてきたかを概観する。

まず1977年に萩原幸男は、一様なマグマ溜まりの膨張・圧縮による重力変化を球対称の圧力源の問題として解いた(萩原, 1977)。次いで笹井洋一は1986・1988年に、火山体の下で割れ目噴火やクラックが開いた場合に生じる重力変化の問題を扱った(Sasai, 1986)。1986年に伊豆大島の噴火が起こった際、 $\pm 0.100\text{mGal}$ 程度の重力変化が観測された。渡辺・大久保は笹井の理論にもとづいて、適当なモデル化の下でこの観測値を説明した。シア・ディスロケーション(剪断性のくいちがいがい)に起因する重力変化の問題は1992年に大久保によって考えられた。点震源による重力変化の解析表現からはじめ、有限矩形断層上の変位をあたえて重力変化を計算する定式化を完成させた。これによって、地震断層というディスロケーションが起きたときのコサイスマックな重力変化をモデル計算できるようになった。1989年に伊東で起きた海底噴火を観測した実測データへ適用された。これらのモデル化では重力変化と地殻変動を統合して地震・火山現象を理解しようとする立場をとっており、笹井、大久保によって、重力地震学(Tectonogravimetry)という呼称が提唱されている。

7.2 基礎とする理論

ディスロケーションが及ぼす変位場のモデリングは従来からおこなわれてきたが、大久保はさらに進んで、重力場の変化もこの枠組みから導き出すことに成功した。この定式化によれば、媒質内部でディスロケーションが起きれば地殻の変形が引き起こされ、媒質の応力分布に引きずられて重力場も変化する。この重力場の変化を与える項

は、地殻の隆起・沈降と膨張・圧縮に対応していると解釈される。変位場を与えるべきディスロケーションから、重力場の変化も導かれる。したがって、重力変化と地殻変動が同一のディスロケーションによって実現される。

地震は震源域で地殻が面的にずれる運動をおこすことによって生じる。この“ずれ”が断層であり、ディスロケーションと見なすべきものである。ここでは岩手県内陸北部地震にともなう重力変化を解析するので、その励起源として断層型のディスロケーション・モデルを選択するのが適切である。

マグマ貫入を考慮する場合は、第3の要因として物質移動による直接的な引力効果を表す項が加えられる。地殻変動データでは物質移動自体を捉えることができないが、重力変化を組み合わせることによって、断層面上で物質移動があったかどうかを議論できる。

7.3 観測データと初期モデル

解析に使用した国土地理院のデータの種類の、絶対・相対重力、GPS連続観測、APSによる光波測距である。初期モデルとして、SARにより求められた2枚の断層を用いた(国土地理院, 地震予知連会報第61巻)。GPS連続観測データとして使用したのは、950160(葛巻), 950161(岩手), 950163(玉山), 950165(雫石), 950166(矢巾), 950185(阿仁), 950187(西木), 950189(西仙北), 960543(岩手松尾), 960553(田沢湖), 989011(M寄木), 989012(M西山), 989013(M田沢湖)の13測点における座標値データで、1998年8月19日から9月20日まで、1日あたり24時間分の観測データを精密暦解析して、1日単位に整約したものである。

APSによる光波測距観測データとして使用したのは、APS.G-No.00 ~ No.9の10基線について1998年8月19日から9月20日までのデータで、夜間20時、22時、0時、2時、4時におこなった観測のなかから平均をとり、1日単位に整約したものである。

解析の対象となった期間において、地震観測等の結果から判断すると、マグマ貫入を示唆する兆候は認められない。そこで、今回の地震前後の重力変化に対する解析では、直接的な引力効果を表す項を取り外してモデル計算をおこなった。

7.4 解析方法

ここで求めたモデルは矩形断層上で一様な滑りの断層モデルである。まず、1枚の断層ごとに断層の傾斜や滑り量など断層を記述する9つのパラメータを適当に仮定して初期モデルに与えた。このモデルから地殻変動と重力変化をフォワード・モデリングとして求める。次に、この推定された計算値と観測値との残差が小さくなるように断層パラメータを逐次変化させる。最終的に残差が最小になったとき、パラメータは最適とする。最適パラメータの拘束によって、モデルが具体的な形に決定され

る。断層パラメータを未知数にして、重力変化と地殻変動のジョイント・インバージョンで解くこともできる。

青が重力減少、赤が重力増加を示す。コンター間隔は0.01mGalで2つの長方形は求められた断層を地面に投影したものである。この2つの断層はともに逆断層（傾斜：約20度）である。図の左下から右上に赤は1.2m、黄は40cmくいちがいが生じる。すべりの大きい断層の

7.5 解析結果

図-6は最適モデルから計算される重力変化である。

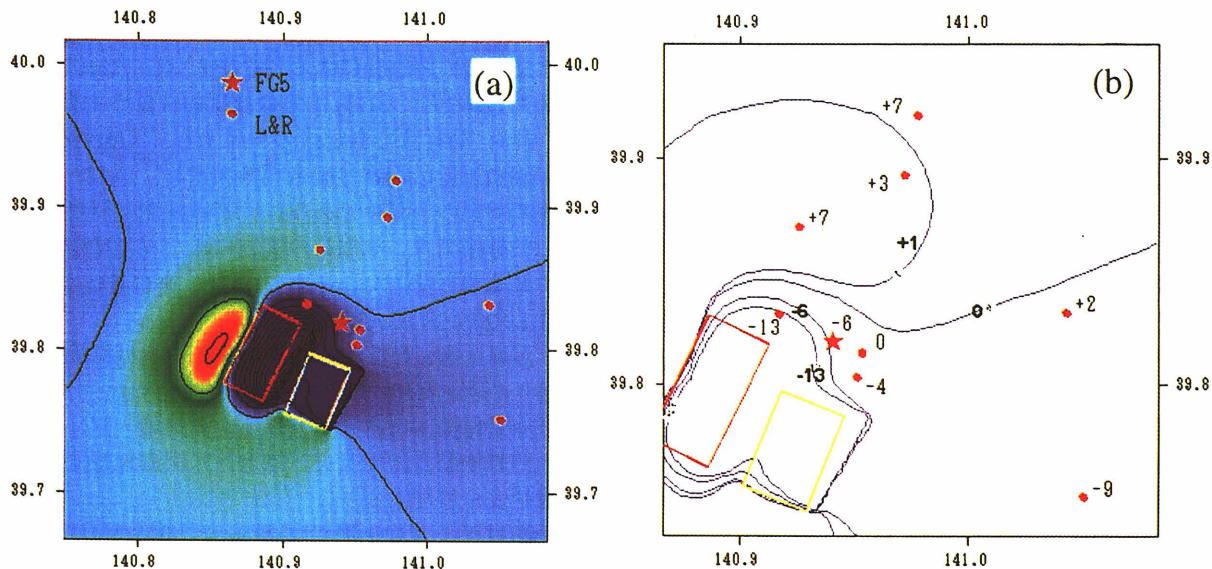


図-6 断層モデルから計算した重力変化の分布。(b)は(a)から断層近傍を拡大したもの。図中の長方形は断層を表す。数字は観測された重力変化 ($\times 10^{-3}$ mGal) を表す。(田中愛幸ほか, 1999)

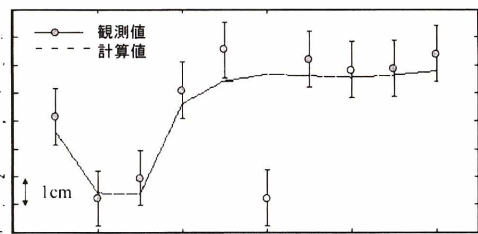


図-7 APS辺長の地震前後の変化。観測結果とモデルによる計算値との比較。縦軸は辺長 (cm 単位)、横軸は観測点を表す。(田中愛幸ほか, 1999)

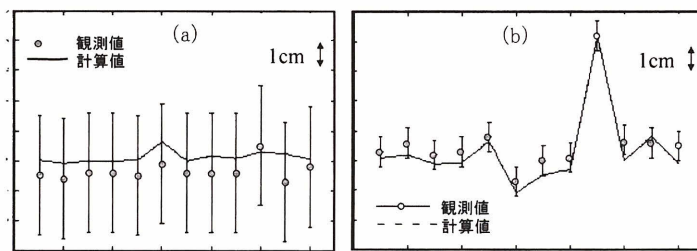


図-8 GPSによる座標値の地震前後の変化。観測結果とモデルによる計算値との比較で、縦軸は座標値 (cm 単位)、横軸は観測点を表す。(a)は南北成分、(b)は東西成分を表す。(田中愛幸ほか, 1999)

表-1 重力変化の内訳

観測点名	Obs [mGal]	Cal [mGal]	$\Delta \rho$ [%]	Obs-Cal [mGal]	観測誤差 [mGal]
さくら公園	0.007	0.001	33	0.006	0.007
県民の森	0.003	0.001	36	0.002	0.007
松川地熱発電所	0.007	0.002	47	0.005	0.007
大松倉	-0.013	-0.014	7	0.001	0.007
絶対重力点	-0.006	-0.005	9	0.001	0.001
網張	0.000	-0.001	38	0.001	0.007
ぬくもりの里	-0.004	-0.002	38	0.002	0.007
柳沢	0.002	0.000	90	0.002	0.007
岩手山観測所	-0.009	-0.001	50	0.008	0.007

Obs: 観測された重力値変化, Cal: 計算値

(田中愛幸ほか, 1999)

$\Delta \rho$: 計算値のうち、密度変化に起因する重力変化の割合

直上で重力が大きく減少しているのがわかる。図-6 (b) は重力変化の観測値 (細) と計算値 (太) の比較である。絶対重力のみでなく相対重力も観測誤差 (0.007mGal) 内で整合している。図-8~9はAPS, GPSについての比較である。計算された重力変化のうち、密度変化に起因する重力変化は、全体の変化の約10%程度を占めることがわかった (表-1)。

8. 結 論

観測された重力変化は地震にともなう地殻変動によって生じたことが明らかになった。なぜなら観測された地殻変動と重力変化が2枚の断層モデルによって定量的によく説明できるからである。絶対重力の精密な観測が理論の正確さを裏付けている。この結果は地震予知研究のために不可欠な理論が実際のフィールドの観測から検証された事例であることはもちろん、地球ダイナミクスの理解にとっても重要である。地震による地殻変動は定量的に見積もられてきたが、これが重力場とも定量的に関係づけられたことは、重力地震学の立場から、地球内部の物理を考える上で本質的な役割を果たす重力場が、変位場と統合されて扱えるようになったこと意味している。

おわりに

岩手県内陸北部地震に前後しておこなわれた今回の国土地理院による絶対重力観測は、M6クラスの地震をはさんだ重力変化検出の稀少な事例である。今回の解析で重力変化と地殻変動が同一のディスロケーションによって実現されることが確められたことによって、地殻変動と重力変化に関して整合的な断層モデルが示された。理論解析では、引きつづいて地殻変動データと重力変化からインバージョンによって断層モデルを構築する予定である。

絶対重力測定精度は向上したが、地震・火山活動に起因する要因以外にも、ローカルな測定環境から重力へ及ぼされる要因がありうる。因果関係の判明している要因については、可能な限り精密な情報に基づいて補正しなければならない。ローカルな気圧変化、地下水、降雨あるいは積雪が重力に及ぼす影響を定量的に評価することも、今後の課題である。

当初の目的である、マグマ挙動の把握に対しては、明確な解釈を出すことができなかったが、岩手山の火山活動は依然として継続している。火山活動が終息するまで今後も絶対重力観測を継続していきたい。

岩手県雫石町網張の休暇村「岩手」には絶対重力観測の実施に理解をたまわり、感謝します。東北大学岩手山

観測所に設置された重力点の観測にあたり、東北大学大学院理学研究科・地震噴火予知研究観測センターの植木貞人助教授から使用許可を頂いた。

国立天文台・地球回転研究系の佐藤忠弘教授、松本晃治氏から、海洋潮汐荷重による重力変化の補正に関して助言を頂いた。

第1回と第2回の絶対重力観測作業は、平成10年度の科学技術振興調整費による岩手山の火山活動に関する緊急研究 (課題名: 2. 火山体の物理的性質の把握調査 (1) 重力観測 (絶対重力測定)) の一環として実施された。

本稿に報告した重力測定に参加者およびデータ解析の分担者は次のとおりである。所属は観測当時とした。また、機動観測課より作業の実施にあたって緊急対応等に関する助言を受けた。

第1次選定調査 (1998年7月) :

藤原 智, 門脇俊弘, 濱崎英夫 (水沢測地観測所)

第2次選定調査 (1998年7月) :

中野博美, 山本宏章 (以上, 測地第一課),

門脇俊弘, 濱崎英夫 (以上, 水沢測地観測所)

総括安全管理者:

松村正一 (I~III), 小菅俊宏 (IV, V)

(以上, 測地第一課),

藤原 智 (II; 水沢測地観測所)

重力観測:

安藤 久 (I, IV, V), 高橋信雄 (II),

田中和之 (I), 豊田友夫 (IV),

町田守人 (I~V), 山本宏章 (I~III)

(以上, 測地第一課),

木村 勲 (II; 測地第三課, IV, V; 測地第一課)

観測支援:

中屋和夫 (III), 池内善弘 (IV, V)

GPS連続観測データ作成:

菊田有希枝 (衛星測地課)

APS連続観測データ作成: 金子英樹 (地殻監視課)

統合解析:

田中愛幸, 大久保修平 (東京大学地震研究所)

図版・資料作成:

町田守人 (測地第一課): 図-1~5

田中愛幸 (東京大学地震研究所): 図-6~8, 表-1

本研究は岩手山の火山活動に関する解明を目的とした東京大学地震研究所地球計測部門と測地第一課との相互協力にもとづいている。本稿は2000年2月に提出されたものである。

参考文献

石原和弘/火山観測による噴火の仕組みの理解/火山 第42巻 第6号 (1997), p.445-458

大久保修平/地震および火山噴火によって生じる重力とポテンシャルの変化—ディスロケーション理論に基づく定式化/測地学会誌, 第40巻 第1号 (1994), p.1-16

- Okubo, S., Hirata, Y., Sawada, M., Nagasawa, K. / Gravity Change Caused by the 1989 Earthquake Swarm and Submarine Eruption off Ito, Japan? Test on the Magma Intrusion Hypothesis - / J. Phys. Earth, 39, p219-230 (1991)
- 兼岡一郎, 井田喜明編 / 火山とマグマ / 東京大学出版会 (1997)
- 木村 勲, 町田守人, 安藤 久, 豊田友夫, 小菅俊宏 / 岩手山における絶対重力観測 (II) / 日本測地学会 第92回講演会要旨 (1999)
- 田中愛幸, 大久保修平, 町田守人, 木村 勲, 小菅俊宏 / 1998年9月3日の岩手山南西部地震 (M6.1) に伴う重力・地殻変動の統合解析 / 日本測地学会 第92回講演会要旨 ポスターセッション I (1999)
- 坪井忠二 / 重力 第2版 / 岩波書店 (1979)
- 萩原幸男 / 伊豆半島の異常隆起を説明する茂木モデルとそれに伴う重力変化 / 東京大学地震研究所彙報, 52, p.301-309 (1977)
- Sasai, Y. / Multiple Tension Crack Model for Dilatancy : Surface Displacement, Gravity and Magnetic Change / Bulletin of the Earthquake Research Institute University of Tokyo, 61, p.429-473 (1986)
- 山本宏章, 町田守人, 松村正一, 田中和之, 安藤 久, 高橋信雄, 木村 勲, 藤原 智 / 岩手山における絶対重力観測 / 日本測地学会 第90回講演会 (1998)
- Yoshida, S., G. Seta, S. Okubo, S. Kobayashi / Absolute gravity change associated with the March 1997 earthquake swarm in the Izu Peninsula / Earth Planets Space, 51, 3-12 (1999)
- 人工衛星の合成開口レーダーによって捉えた岩手山の地殻変動 (地理院) / 地震予知連絡会 会報第61巻 (1999)
- 松本晃治, 高根澤隆, 佐藤忠弘, 大江昌嗣 / NAO.99潮汐予測システム / 1999年 地球惑星科学関連学会 合同大学予稿集 (1999)