

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (海外学術調査)

研究期間：2011～2015

課題番号：23253003

研究課題名(和文) アラスカの地殻隆起・重力変動観測による粘弾性構造解明と地球環境変動モニタリング

研究課題名(英文) Study on viscoelastic structure and monitoring of global change by observation of uplifting and gravity in Alaska, US

研究代表者

三浦 哲 (Miura, Satoshi)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70181849

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,400,000円

研究成果の概要(和文)：米国アラスカ州南東部において現在進行中の地殻隆起や重力変動を詳細に明らかにするため、本研究課題期間中にGPS及び重力の連続観測を継続するとともに絶対重力の繰り返し測定を3回実施した。その結果、GPS観測からは最大で年間約3cmの隆起速度が得られた。超伝導重力計による重力連続観測では、月間0.5マイクロガル以下という非常に小さいドリフトレートが実現できた。絶対重力測定では、従来の変化率からの予測値を10マイクロガル前後上回るケースもあったが、氷河後退域直近の観測点では、概ね調和的であった。前者の原因としては、地下水起源の擾乱や降水・降雪等の陸水荷重の寄与が考えられる。

研究成果の概要(英文)：In order to study crustal uplifting and gravity change in southeastern Alaska, United States, we carried out continuous GPS and gravity measurements together with absolute gravity survey three times in the area. From the continuous GPS measurements, the maximum uplifting rate of 3 cm/year, which is consistent with the previous study, was derived. Since the continuous gravity measurements by a superconducting gravimeter demonstrated very small, almost no instrumental drift rate, we may be able to use the gravimeter complementing the absolute gravity survey. Gravity change rates obtained by the survey show -1 to -3 micro-gal/year, which is about a half of those for the period from 2006 to 2008. This discrepancy can be attributed to the effects of underground water and/or loading of precipitation.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：地殻隆起 荷重変形 GPS 重力変化 粘弾性構造 後氷期隆起

1. 研究開始当初の背景

北米大陸北西部の南東アラスカ (米国)、ブリティッシュ・コロンビア及びユーコン準州 (カナダ) における多くの氷河や氷原は、近年の地球温暖化の影響により現在急速に後退している。この地域の氷河後退現象は、14 世紀半ばに始まり 19 世紀半ばまで続いた小氷期 (Little Ice Age, LIA) の終了以降現在まで続いており、潮位上昇、地殻隆起、重力変動の原因となっている。この急速な氷河後退現象は、この地方の太平洋沿岸にフィヨルド地形を形成し、Glacier Bay 国立公園などの美しい景観を生み出している。特に後退現象が顕著な Glacier Bay 周辺域においては、1800 年頃には厚さ 1000m を超える氷河で覆われていたが、20 世紀初めまでには水平距離で 100km も後退し、約 3000 km<sup>3</sup> もの氷が失われたため、海水準が 8mm 上昇したという報告もある。

以上のように高速で大規模な氷河後退、すなわち荷重減少が起きている当該領域は、世界的に見ても現在進行中の glacial isostatic adjustment (GIA) の研究を実施するには格好のフィールドである。荷重減少に伴って生じる地球の弾性・粘弾性応答は地殻隆起や重力変化として観測されるため、得られたデータから地下の弾性・粘弾性構造を推定可能であることに加え、地球温暖化の時間変化の指標の一つと考えられるため、地殻変動や重力変化の現場観測は極めて重要である。

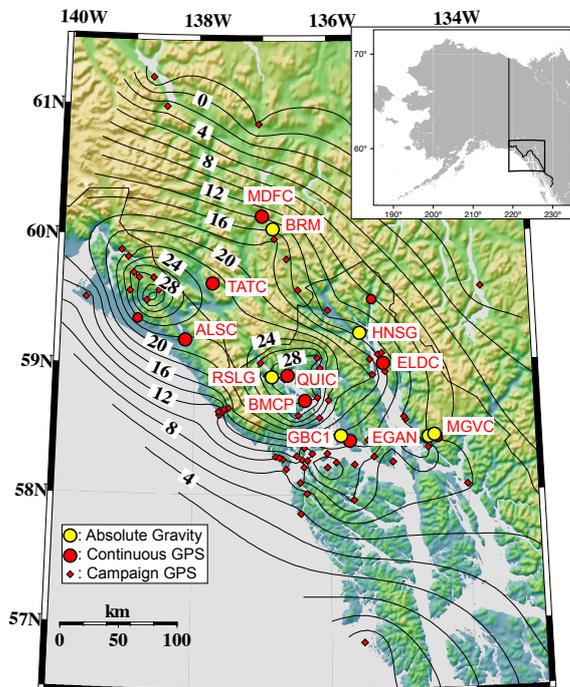


図 1. アラスカ州南東部で進行する地殻隆起現象。黄丸、赤丸は本研究で新設された重力・GPS 観測点。

2. 研究の目的

米国アラスカ州南東部は、現在太平洋・北

米プレート間のトランスフォーム境界と、東側の北米安定陸塊の間に位置しており、50 Ma 前後のファラロプレートの沈み込みに伴って形成された付加帯である。また、山岳氷河・氷原の急速な融解が進行している地域の一つでもある。本研究では、氷河・氷原融解に伴う急速な地殻隆起・重力の時間変動を GPS と絶対重力(AG) 観測で高精度に測定し、地殻・マンツルの粘弾性的応答と地球の圧縮性の影響を観測と理論モデル計算の両面から詳細に検討することを目的としている。平成 17~20 年度の科研費で設置した GPS 連続観測点でのデータ取得継続と絶対重力測定点 6 点での再測を実施し、先行研究による結果を含め、期間にして約 10 年の観測データが得られる。これにより、上記課題の究明のための観測データの信頼性の向上、また、地球環境変動 (氷河・氷原融解の加速・減速傾向) のモニタリングデータとしての有用性の向上が期待できる。

3. 研究の方法

(1) 地殻変動・絶対重力観測

先行研究で行った AG 観測・GPS 観測を継続することにより、重力減少速度、地殻隆起速度の推定精度のさらなる向上をめざす。また、それらの速度の時間変化、すなわち、加速・減速現象を検出する。先行研究では、GPS 連続観測点 (6 点)、AG 測定点 (6 点) での観測が行われている。

(2) 重力連続観測

新たに連続観測用重力計を導入し、地球潮汐の観測を実施して潮汐定数の高精度化をはかり、GPS キャンペーン観測、AG 測定結果の補正を行う。同時に長期間の重力変化時系列と GPS 連続観測結果双方に含まれる季節変動成分を抽出し、(1)で得られる観測結果から経年変化成分を高精度で推定する。

(3) 人工衛星データ解析

GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 衛星データの解析により得られる重力時間変化についても経年変化と季節変動成分の抽出を行い、(1)、(2)の結果と比較する。

(4) 粘弾性構造の解析

地殻隆起・重力変動に含まれる弾性応答成分を見積もる。これと観測との差から粘弾性応答成分を高精度で抽出し、水平方向の変化も考慮した新しい粘弾性構造モデルの構築を目指す。

4. 研究成果

(1) 地殻変動・絶対重力観測

GPS 観測からは最大で年間約 3cm の隆起速度が得られた。アラスカ州内の 36GPS 観測点に対して行った GPS 解析により得られた座標値時系列から季節変動を推定した。その結果、季節変動は上下成分のみに顕著であり、概ね周期 1 年の正弦関数でその特徴を表現することができることがわかった。上下成

分の年周変化の特徴を調べると、位相は全観測点でほぼ等しく最大隆起は10月頃となった。一方、年周変化の振幅は空間的な違いが大きく、振幅の大きな観測点は南部・南東部の領域に分布するという結果が得られた。この地域では氷河・氷原が広く分布する領域であり、冬季の積雪量が大きく、また位相が10月から沈降開始を示すということから、この季節変動は積雪荷重による変形が主要因である可能性が高いという結果が得られた。観測された年周変化に対し、積雪荷重など荷重変形がどの程度寄与しているかを定量的に調べるために、客観的な荷重データを入力に用いた荷重変形計算を行った。荷重変形計算は、季節変動を及ぼす主要因であると考えられる積雪・大気圧・土壌水分荷重について行った。その結果、積雪荷重変形起因の年周変動成分は他の地域と比較しアラスカ州南部・南東部において振幅が大きく、観測結果と調和的な結果が得られた。次に得られた荷重変形全体の合計と観測された年周変動の比較を行った。それによると、荷重計算により見積もられた年周変動成分は観測された年周変動成分と比較し、位相は良い一致を示すものの、振幅については小さな値となった。この食い違いの原因を調べるため、荷重計算に用いた入力データの妥当性について検証した結果、荷重計算に使用したデータ同化プロダクトが実際の積雪量を十分に説明していない可能性が示唆された。そのためデータプロダクト値と地上観測値の間のスケールファクタを推定し、計算結果を補正したところ、振幅・位相ともに観測される年周変動をよりよく説明することが明らかになった。

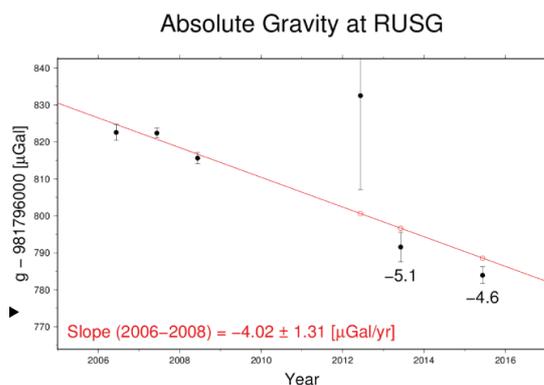


図2. グレーシャーベイ・ラッセル島において観測された絶対重力変動。

先行研究により2006～2008年に測定された絶対重力値の変化率は $-3.5 \sim 5.6 \mu \text{Gal/yr}$ であり、この変化率は氷河融解に伴う荷重変形によって説明可能であることが分かっている。その後の重力変化を観測するため、本研究課題により2012年、2013年、2015年の夏季にも同様の絶対重力測定が行われた(図2)。2012～2013年の絶対重力変化は、2006～2008年の重力変化から予想される絶対重力値よりも $10 \mu \text{Gal}$ 程度大きか

ったが、これは2011～2012年冬季の過剰積雪に伴う荷重変形効果によって説明可能であることが分かっている。2014～2015年の冬季は例年よりも少なかったため、2015年の絶対重力変化は予測値よりも小さいものと予想されていたが、実際の測定値は多くの観測点で予想値よりも大きく、その差は最大で $+15 \mu \text{Gal}$ にも達した。この原因としては、地下水起源の擾乱や降水・降雪等の陸水荷重の寄与である可能性が考えられる。

## (2) 重力連続観測

超伝導重力計 iGrav をアラスカ州州都であるジュノー市にあるアラスカ大学サウスイースト校図書館 (Egan Library) 内の倉庫に2012年6月11日に設置した。6月14-15日には絶対重力計 FG5 との並行観測を実施して iGrav のキャリブレーションを行った。iGrav は1秒間隔で電圧値を収録し続け、FG5 は10秒毎の落体落下を100回繰り返す、この1 set を20分おきに繰り返した。その結果、11537組の iGrav 及び FG5 並行観測データを取得した。両者間の比例係数 (scale factor) を計算すると、 $-89.147 \pm 0.019 \mu \text{gal/V}$  という値が得られた。超伝導重力計による重力連続観測では、月間 $0.5$ マイクロガル以下という非常に小さいドリフトレートが実現できた。

## (3) 人工衛星データ解析

2012年の測定により得られた絶対重力値については、Inazu et al. (*J. Oceanog.*, 2009) の海洋潮汐モデルによって潮汐補正し、さらに日周・半日周成分を最小二乗法によって fitting して補正した結果、重力値の標準偏差を約 $1.5 \mu \text{Gal}$ 小さくすることに成功した。しかし、補正された重力値はそれまでの変化率から期待されるものよりも約 $10 \mu \text{Gal}$ 程度大きかったため、その要因について検討を行った。過去に行われた観測は全て同じ絶対重力計を使用していることや、測定後のキャリブレーションにより、測定前後の重力差は $0.1$ マイクロガル未満だったことから、器差の可能性はないと考えられる。GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 衛星により得られたデータから重力値を計算し、 $300 \text{km}$  のガウシアンフィルターを各観測時の重力値の変動成分を求めて補正したところ、未補正の場合よりも変化率にして約35%増加してそれ以前の変化率により調和的になった。GRACE データによる補正が効果的であることが分かった。

## (4) 粘弾性構造の解析

本研究課題により Glacier Bay 周辺の6観測点で得られた絶対重力変化率は、平均して年間 $-4.5 \mu \text{gal}$ であった。最終氷期、小氷期及び現在の氷河・氷床分布データと最適化を行った粘弾性構造モデルに基づいて地殻上下変動速度と重力変化率を計算してこれ

らの観測値と比較したところ、1, 2 例を除いて観測誤差の範囲内で両者は一致した (図 3, Sato et al., 2012).

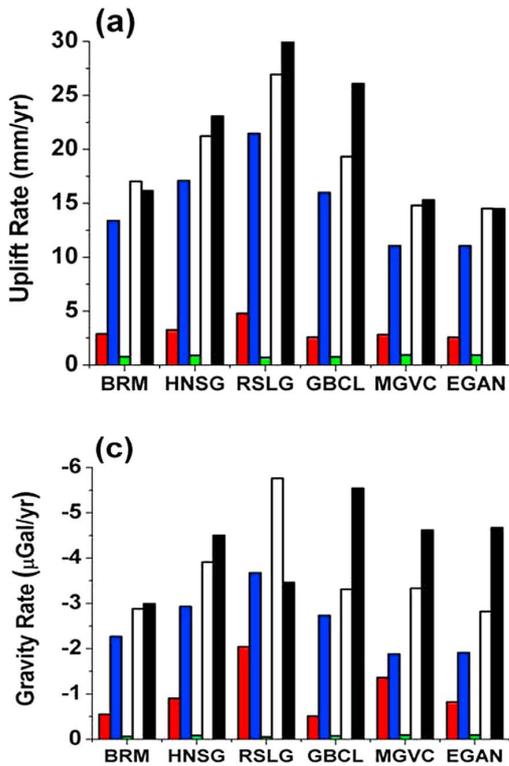


図 3. 絶対重力観測点で観測された地殻上下変動速度 (上) 及び重力変化 (下). 黒が観測値, 赤が現在の氷河後退, 青が小氷期, 緑が最終氷期の荷重変化の影響を示し, 白はそれらの総和である.

Glacial isostatic adjustment (GIA) に関する最近の理論的な見積りによると, マントルの圧縮性を考慮することにより生じる現在の上下変動速度の差は, 観測精度に比べて必ずしも無視できないことが分かってきた. 圧縮性の効果は, 全球的な GIA において理論的に見積もった例が多く, 地域的なスケールで実際の観測データとモデルとを比較した例は少ない. 本研究課題では, GIA による現在の隆起速度が最も大きいアラスカ州南東部において圧縮性を考慮したモデルを初めて構築し, 非圧縮を仮定した場合との比較を行った. 比較の結果, Maxwell のレオロジーに対しては, これまでの非圧縮モデルが, 当該地域の平均的な隆起速度を 27% (4mm/yr) 低く見積もってきた可能性があることが分かった. この速度の差はこの地域の GPS 観測ネットワークによって検出可能な量である. このことは, 同じ観測データに対して圧縮モデルと非圧縮モデルを用いてインバージョンを行った際に, 非圧縮モデルがマントルの粘性を約 30%低く見積もっていることがわかった.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

① Kazama, T., Okubo, S., et al. (2015), Absolute gravity change associated with magma mass movement in the conduit of Asama Volcano (Central Japan), revealed by physical modeling of hydrological gravity disturbances. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120: 1263-1287. doi: 10.1002/2014JB011563. (査読有)

② Tanaka Y., T. Sato, Y. Ohta, S. Miura, et al. (2015), The effects of compressibility on the GIA in southeast Alaska. *J. Geodyn.* 84, 55-61. doi:10.1016/j.jog.2014.10.001. (査読有)

③ 風間卓仁・他 (2014), 相対重力データに対する陸水擾乱補正の重要性: 桜島火山を例に, *測地学会誌*, 60: 73-89. (査読有)

④ Fukuda, J., A. Kato, K. Obara, S. Miura, et al. (2014), Imaging of the early acceleration phase of the 2013-2014 Boso slow slip event, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 7493-7500, doi:10.1002/2014GL061550. (査読有)

⑤ Sun, T., K. Wang, T. Iinuma, R. Hino, J. He, H. Fujimoto, M. Kido, Y. Osada, S. Miura, et al., (2014), Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Nature*, 514, 84-87. doi:10.1038/nature13778 (査読有)

⑥ Kazama, T., et al., (2013), Gravity measurements with a portable absolute gravimeter A10 in Syowa Station and Langhovde, East Antarctica, *Polar Science*, 7: 260-277. doi:10.1016/j.polar.2013.07.001 (査読有)

⑦ Sato, T., S. Miura, et al., (2012), Gravity and uplift rates observed in southeast Alaska and their comparison with GIA model predictions, *J. Geophys. Res.*, 117, B01401, doi:10.1029/2011JB008485. (査読有)

⑧ Kazama, T., et al., (2012), Gravity changes associated with variations in local land-water distributions: Observations and hydrological modeling at Isawa Fan, northern Japan, *Earth, Planets and Space*, 64, 309-331. (査読有)

⑨ Sato, T., C. F. Larsen, S. Miura, Y. Ohta,

H. Fujimoto, et al. (2011), Reevaluation of the viscoelastic and elastic responses to the past and present-day ice changes in Southeast Alaska, *Tectonophysics*, 511, 79-88, doi:10.1016/j.tecto.2010.05.009. (査読有)

[学会発表] (計 7 件)

①風間卓仁, 三浦哲・他, 2015年5-6月にアラスカ南東部で測定された絶対重力値, 日本測地学会第124回講演会, 2015年10月14日, 九州大学・西新プラザ (福岡市)

②風間卓仁, 地下水流動モデリングの測地学的重要性: 浅間火山における重力観測を例に, 2014年度日本水文科学学会学術大会, 2014年10月4日, 広島大学学士会館 (広島県東広島市)

③田中愛幸, 佐藤忠弘, 太田雄策, 三浦哲・他, 南西アラスカのGIAにおける圧縮性の効果, 日本測地学会第122回講演会, 2014年11月5日, つくばサイエンス・インフォメーションセンター (つくば市)

④Kazama, T., G-WATER: Software packages for modeling gravity disturbances due to local land-water redistributions toward detecting gravity signals associated with earthquakes and volcanism, AOGS 11th Annual Meeting, 2014年7月28日, ロイトン札幌ホテル (札幌市)

⑤Kazama, T., H. Hayakawa, S. Miura, M. Kaufman, T. Sato, et al., Long-term variations of absolute and superconducting gravity values in Southeast Alaska, observed by the ISEA2 project, AGU 2013 Fall Meeting, 2013年12月12日, Moscone Center (米国サンフランシスコ)

⑥Sato, T., T. Kazama, S. Miura, Y. Ohta, S. Okubo, H. Fujimoto, et al., Absolute gravity measurements in Southeast Alaska and continuous gravity observation in Juneau by ISEA2 project, AGU 2012 Fall meeting, 2012年12月4日, Moscone Center (米国サンフランシスコ)

⑦Sato, T., S. Miura, W. Sun, T. Sugano, Y. Ohta, H. Fujimoto, D. Inazu, C.F. Larsen, A.M. Kaufman, J.T. Freymueller Study of the ice changes in Southeast Alaska based on the geodetic observations on the ground, 日本地球惑星科学連合大会, 2011年5月25日, 幕張メッセ (千葉市)

[図書] (計 1 件)

①中島淳一・三浦哲, 共立出版, 弾性体力学—変形の物理を理解するために—, 2014年, p. 1-176

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三浦 哲 (MIURA SATOSHI)

東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 70181849

### (2) 研究分担者

佐藤 忠弘 (SATO TADAHIRO)

東北大学・大学院理学研究科・名誉教授

研究者番号: 10000176

藤本 博巳 (FUJIMOTO HIROMI)

東北大学・大学院理学研究科・名誉教授

研究者番号: 50107455

太田 雄策 (OHTA YUSAKU)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 50451513

佐藤 源之 (MOTOYUKI SATO)

東北大学・東北アジア研究センター・教授

研究者番号: 40178778

高橋 浩晃 (TAKAHASHI HIROAKI)

北海道大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 30301930

大久保 修平 (OKUBO SHUHEI)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号: 30152078

風間 卓仁 (KAZAMA TAKAHITO)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 20700363

### (3) 研究協力者

ジェフ・フライミュラー (Jeff Freymueller)

アラスカ大学・地球物理学研究所・教授

クリス・ラーセン (Chris Larsen)

アラスカ大学・地球物理学研究所・准教授

マックス・カウフマン (Max Kaufman)

アラスカ大学・地球物理学研究所・技術職員