

平成 29 年 6 月 10 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26289350

研究課題名（和文）重力・地震波の同時観測によるスロースリップ発生域の浅層地下水モニタリング

研究課題名（英文）Groundwater monitoring by gravimeters and seismometers around a slow slip event region

研究代表者

名和 一成（Nawa, Kazunari）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質情報研究部門・研究グループ長

研究者番号：20262082

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,700,000円

研究成果の概要（和文）：沖縄・先島諸島スロースリップイベントの発生域に位置する国立天文台VERA石垣島観測局とその周辺の地下水挙動を明らかにするため、重力計、気象・土壌水分量計、地震計、水圧計など様々な原理のセンサーを用いて連続観測を実施した。併せて、VERA局周辺の詳細な地下構造を明らかにするための探査を実施した。結果として、重力計や地震計データから観測点近傍の地下水位やダム水位の変化、土壌水分量の変化に起因すると考えられる信号を検出することができた。また、反射法地震探査によって、VERA局下における含水率変化が大きな堆積層の構造が明らかになった。

研究成果の概要（英文）：For the study of hydrological effects on gravity around the VERA Ishigakijima station located in the slow slip event region near the Ryukyu trench, Okinawa, Japan, we carried out continuous observation using various sensors; gravimeters, seismometers, rain gauges, soil moisture meters, water pressure gauges, and so on. We also conducted seismic survey in order to reveal the subsurface structure beneath the VERA station. As a result, we detected signals in the data from gravimeters and seismometers that are associated with groundwater level, water level of dam reservoir, and soil moisture changes. Furthermore, the seismic reflection survey revealed detailed structure of the sedimentary layer under the VERA station where water content indicates large temporal changes.

研究分野：地球物理学

キーワード：測地 重力 地震計 土壌水分 地下水 潮位 セイシュ 反射法地震探査

## 1. 研究開始当初の背景

地下水の面的挙動を明らかにすることは、水文学をはじめ環境・資源や防災研究の観点から重要である上、地殻活動をモニターする重力観測データの高精度化のためにも重要である。これまで地下水は土壌水分計や井戸のフロートや水圧計などを使って測定されているが、センサ・井戸周辺の局所的な変化しかわからず、複数箇所でも掘削するなどして面的に地下水分布・挙動を把握することは費用的に困難だった。

我々研究グループは様々な状況下において重力の高時間分解能連続観測を試みてきた。例えば、東京大学浅間火山観測所では、台風後の降雨応答を検出し(名和他, 2008)、名古屋大学犬山地震観測所では、大雨後の降雨応答を観測するとともに、それを補正することによって断層運動の影響を検出した(Nawa et al., 2009)。これらの例からわかるように、重力連続観測は観測点周辺の地下水・土壌水分変化を検出するのに十分な感度を持っている。

重力観測点近傍の気象・土壌水分観測を充実させることによって、超伝導重力計データなどに見られる地下水影響の解釈やモデル化の成功例がある(Kazama et al., 2012; Imanishi et al., 2013)。しかし、石垣島のように地形、水理構造が複雑な場合、1点の観測井データや気象観測データだけでは陸水擾乱成分の分離が困難な場合が少なくない。そのため、高精度な重力変化検出のためにも地下水量の時空間分布を高分解能で探る観測・解析技術の確立が急務であった。

## 2. 研究の目的

2012年、名古屋大学犬山観測所での連続観測終了後、超伝導重力計 CT-36 を約半年に1度、地下数十 km のプレート境界でスロースリップイベントが発生している石垣島に移設した(池田他, 2013)。国立天文台 VERA 石垣島観測局においては、超伝導重力計による連続観測を継続するとともに、気象・土壌水分観測も並行して実施している。重力計立ち上げ初期から地震計観測も行っており、隣接する防災科学技術研究所石垣広帯域地震観測施設の広帯域地震データとの比較解析から土壌水分量変化に対応する弾性波速度変化の検出可能性が示唆されていた(大滝・名和, 2013)。

本研究では、この石垣島において超伝導重力計連続観測による重力データと地震計連続観測による地震波データを組み合わせることで、3次元的な地下水分布の変化を推定する手法を初めて試みる。同時に、観測の検証とモデリングに用いる地下水シミュレーションに必要な地下構造を得るため、重力と地震波を組み合わせた構造探査手法も開発・適用する。それによって地下水挙動を高時空間分解能で把握するとともに、地殻活動域の重力観測の高精度化に資することを目

的とする。

## 3. 研究の方法

スロースリップ発生域近傍にある国立天文台 VERA 石垣島観測局周辺を観測フィールドとして、既存の超伝導重力計と気象観測装置や新規の地震計による連続観測を実施する。重力計や地震計で捉えた信号を検証するため、土壌水分計や水位計を新たに設置して陸水擾乱源の特定を行う。また、反射法地震探査と重力探査を実施し、地下水・土壌水分変化に寄与する地下構造を明らかにする。

そして、観測された気象・土壌水分観測データを用いた地下水シミュレーションと新たに得られた地下構造とを突き合わせることによって、VERA 局周辺地域の地下水の時空間分布とその時間変化を明らかにする。

具体的には、超伝導重力計による連続データの取得、VERA 局構内へのプロファイル水分計の設置、新規の短周期地震計の導入(名大犬山観測所でのテスト観測を経て設置)、投げ込み式水圧計による水位観測、防災科施設(F-net 点)への gPhone 重力計の設置とその内蔵ルビジウム発振器の周波数測定、反射法地震探査による VERA 局周辺の地下構造探査などを実施した。

## 4. 研究成果

### 1) 3年間の超伝導重力計連続データ取得

本研究のコアツールである超伝導重力計による連続データ取得を継続した。立ち上げから3年近く経ちメンテナンス時期に来ていたコンプレッサーを初年度に交換するとともに、液体ヘリウムが50%を切らないタイミングで再充填作業を行い、不意の停電等のトラブルに備えた。台風時などに停電することがあったが、超伝導重力計自体が故障することなく、VERA 局支援員の協力やインターネット経由のリモート操作によってデータの欠損も最低限に抑えることができた。初年度末には、産総研所有の絶対重力計 FG5 との並行観測による感度検定を実施した。結果として、ノイズリダクションに有効な水平加速度が超伝導重力計に与える影響を定量的に明らかにし、観測点周辺の地下水位変化に伴う重力変化を初めて検出することができた。

### 2) 複数台の短周期地震計の約2年間の同時連続観測

初年度に地震計・データロガー等の観測機材を揃え、名古屋大学犬山観測所での試験観測を経て、石垣島に移設した。初年度末から約2年間、VERA 局と F-net 点で1秒速度計3成分データを200 Hz サンプリング(後半、一部のシステムを1000 Hz に変更)で取得した。

VERA 局直下の物性変化を捉えるための自己相関解析(SITES 法の適用)や VERA 局と F-net 点間の地下物性変化を捉えるための VERA アンテナ振動の相互相関解析を実施し

た。台風通過時の自己相関関数の時間変化や、VERA局とF-net点間の走時変化を検出できた。しかし、それらを地下物性変化と解釈するためには、超伝導重力計の冷凍機システム、あるいはパラボリアンテナ自身の振動ノイズを分離する必要があることがわかった。

### 3) VERA局周辺の地下構造探査

含水率が大きくかつその時間変化が大きい不飽和領域（堆積層）の厚さやその分布を知るために、1年目と2年目に反射法地震探査を実施した。1回目はF-net点付近から南西方向のVERA局に至る北東-南西測線と、それに斜交してVERA局から南東に向かう北西-南東測線で実施した。両測線とも総受振点数は192チャンネルの固定展開で、測線長を稼ぐために発震・受振点間隔は2mとした。測線の大半は舗装道路であり、小型バイプレーターを震源として使用した。道路は斜面を下るために大きく屈曲しており、調査に適した路線とは言い難い。2回目はVERA局の敷地の縁に沿う東西・南北測線で実施した。東西測線は69チャンネル、南北測線は78チャンネルの固定展開で、空間分解能を上げるために発震・受振点間隔は1mとした。測線の大半は芝生であり、掛矢で発震した。

作成した断面は、いずれも単独では解釈が困難であったが、これらを組み合わせ東西断面に射影することにより、標高10mから15m付近にVERA局下の盛り土と埋め立て以前の地表（堆積層）との境界がイメージされた。また、標高5m付近にも反射波がイメージされたが、VERA局建設の際に実施されたボーリングコアの評価を参考にすると、調査地周辺の基盤岩である花崗岩の上端であると考えられる。これらの反射面は南北方向には良好なイメージを得られていないために正確な傾斜方向は不明であるが、東西断面では見かけ上西に向かって傾斜している。重力探査から見えてきた低重力異常や過去のVLF-MT探査から得た低比抵抗構造の解釈にも有用な情報を得ることができた。

### 4) 既存の広帯域地震計による水位・潮位変化の検出

新たに導入した短周期地震計と既存の広帯域地震計の記録を比較する過程で、広帯域地震計のスペクトルの0.01 Hz付近に特異なピークが存在することを発見した。南北振動が卓越しており、そのピーク周波数は概ね11 mHz付近にあるが、時期によって7 mHz程度までシフトすることがある。

この研究で初めて見出したこのピーク周波数の変化は、観測点近傍にある農業用の名蔵ダム水位変化とよく相関していることがわかった。ダム貯水池の水面振動（セイシュ）の計算周波数と観測周波数がよく一致することから、ダム貯水池の水面変動による荷重変化を地震計が傾斜変化として捉えたものと解釈できる。

見出したダム水位変化と相関する地震計信号は、本研究で目的としている陸水質量の増減の指標となりうる。一方で、ダム水位が明らかな場合には、地震計の動作状況を確認する指標になる可能性もある。

その後、超長周期帯域に注目して広帯域地震計水平動成分のスペクトル解析を行ったところ、0.5 mHz付近に特異なピークが存在することがわかった。この周波数は名蔵湾のセイシュの基本モードを表していると考えられるが、今後詳しい検討を行う予定である。後述する水圧計測定で、同じ周波数の潮位変化が生じていることを確認した。

### 5) VERA局周辺での重力測定(CG5, gPhone)

重力の面的な時間変化を高精度に捉えるために、連続測定している超伝導重力計を基準として、VERA局に対するその周辺の相対重力値・相対重力変化の測定を試みた。複数台の重力計を一度に面的に展開するのが理想的であるが、本研究では、シントレックスCG5重力計2台による繰り返し観測とgPhone重力計1台による連続観測を試みた。

VERA局から東に900 m程度離れたF-net点に設置したgPhone重力計は、超伝導重力計と同じ1 Hzサンプリングであり、gPhoneデータから超伝導データを差し引き、gPhoneに由来する線形ドリフトを除去することによって、F-net点近傍の土壌水分変化を明瞭に捉えることができた。その変化は、実測した雨量データを入力とした経験的降雨応答モデルによる合成波形とよく一致することがわかった。gPhone重力計の立ち上げ期に、重力計の安定性を確認するために、内蔵するルビジウム発振器の周波数を、国家標準であるUTC(NMIJ)を基準として時間周波数遠隔校正装置を用いて測定した。

また、2台のCG5重力計を用いて、超伝導重力計を基準とした重力測定を試みた。スーパー・ハイブリッド重力測定と称しているが、サーベいの基準点をVERA局内の超伝導重力計基台上に設置し、夜間はその基準点で超伝導重力計とCG5と並行観測を行うことにより、CG5の長期的なドリフトを高精度にモデル化した。そうすることによって、通常のサーベイでは、ドリフトモデルの不確かさから、百マイクロガルに及ぶこともある再現性が、1マイクロガル程度まで向上させることができた。土壌水分量/地下水位変化に伴う重力変化は10マイクロガルを超えることもあるので、今後名蔵川流域で繰り返し測定すれば、この地域の面的な地下水分布の時間変化を検出/検討できる可能性がある。

### 6) 名蔵川流域における投げ込み式水圧計による水位測定

最終年度に、ダム貯水池、河川、井戸、潮位の水位変化を明らかにするために、名蔵ダムから名蔵湾に至る流域の複数点で、投げ込み式水圧計による臨時及び連続測定を実施

した。

ダム貯水池における測定では地震計でも見られた約 11 mHz の水圧変動が確認できた。また、河口にある名蔵大橋の測定から名蔵湾に 0.5 mHz 程度の副振動（セイシュ）が存在することがわかり、その振動は、河口よりも内陸側の名蔵アンパル沿いでも生じていることがわかった。

名蔵川下流域の浅井戸で水圧測定した結果、降雨による急激な水位の上昇し、降雨後になだらかに水位が下降する様子が得られた。その変化はダム貯水池の水位変化の傾向とよく一致していた。それらの位相差の検討など詳しい解析は今後の課題であるが、VERA 局の超伝導重力計や F-net 点の gPhone 重力計から得られた重力変化などとも比較解析することによって、名蔵川流域スケールの地下水・土壌水分量の変動を明らかにしたい。

#### <引用文献>

- 名和他, シントレックス重力計連続観測による降雨・地下水流動に伴う重力変化の検出-2007 年台風 9 号, 浅間火山観測所の場合-, 測地学会誌, 54, 59-67, 2008.
- Nawa et al., Coseismic change and precipitation effect in temporal gravity variation at Inuyama, Japan: A case of the 2004 off the Kii peninsula earthquakes observed with a superconducting gravimeter, J. Geodynamics, 48, 1-5, 2009
- Kazama et al., Gravity changes associated with variations in local land water distributions: observations and hydrological modeling at Isawa Fan, northern Japan, Earth Planets Space, 64, 309-331, 2012, doi:10.5047/eps.2011.11.003.
- Imanishi et al., Local hydrological processes in a fractured bedrock and short-term effect on gravity at Matsushiro, Japan, J. Geodynamics, 63, 62-68, 2013.
- 池田他, 超伝導重力計 CT-36 の改修作業とその特性評価、測地学会誌, 59, 25-36, 2013.
- 大滝・名和, 重力データの地下水擾乱補正に向けた国立天文台石垣島観測局下堆積層内の P 波速度解析、測地学会誌, 59, 147-156, 2013.

#### 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 1 件)

望月一磨、名和一成、鈴山智也、重力観測点におけるルビジウム発振器の周波数測定、測地学会誌、査読有、印刷中

#### [学会発表](計 12 件)

望月一磨、名和一成、鈴山智也、GPS コンピュー法による gPhone 重力計内蔵ルビジウム発振器の周波数測定、日本測地学会第 126 回講演会、2016/10/19、奥州市文化会館(岩手県奥州市)

名和一成、伊藤忍、今西祐一、奥田隆、田村良明、宮地竹史、大久保慎人、木村武志、地震計による重力観測点周辺の陸水モニタリングの試み、日本地震学会 2016 年秋季大会、2016/10/7、名古屋国際会議場(愛知県名古屋市)

伊藤忍、山口和雄、VERA 石垣島観測局における反射法地震探査、日本地震学会 2016 年秋季大会、2016/10/6、名古屋国際会議場(愛知県名古屋市)

名和一成、竿本英貴、千田康介、木村武志、F-net 石垣点で観測される単色振動とその周波数(7-11 mHz)の時間変化について、JpGU Meeting 2016、2016/5/23、幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市)

今西祐一、名和一成、田村良明、池田博、宮地竹史、石垣島における超伝導重力計観測に及ぼす地下水の影響、JpGU Meeting 2016、2016/5/22、幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市)

伊藤忍、山口和雄、名和一成、宮川歩夢、山谷祐介、奥田隆、石垣島における地下水流動モデリングのための地震探査、日本地震学会 2015 年度秋季大会、2015/10/26、神戸国際会議場(兵庫県神戸市)

今西祐一、名和一成、田村良明、池田博、宮地竹史、石垣島における水平加速度の超伝導重力計への影響、JpGU Meeting 2015、2015/5/28、幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市)

名和一成、今西祐一、伊藤忍、田中愛幸、田村良明、宮川歩夢、風間卓仁、宮地竹史、奥田隆、山谷祐介、池田博、杉原光彦、石垣島における陸水擾乱の重力への影響とそのモニタリングのための新たな試み、JpGU Meeting 2015、2015/5/28、幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市)

#### [図書](計 0 件)

#### [産業財産権]

#### 出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

名和 一成 (NAWA, Kazunari)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・地  
質情報研究部門・研究グループ長  
研究者番号：20262082

##### (2) 研究分担者

今西 祐一 (IMANISHI, Yuichi)  
東京大学・地震研究所・准教授  
研究者番号：30260516

伊藤 忍 (ITO, Shinobu)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・地  
質情報研究部門・主任研究員  
研究者番号：50356482

##### (3) 連携研究者

田村 良明 (TAMURA, Yoshiaki)  
国立天文台・水沢 VLBI 観測所・助教  
研究者番号：90150002

田中 愛幸 (TANAKA, Yoshiyuki)  
東京大学・地震研究所・助教  
研究者番号：90508350

宮川 歩夢 (MIYAKAWA, Ayumu)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・地  
質情報研究部門・研究員  
研究者番号：50611191

風間 卓仁 (KAZAMA, Takahito)  
京都大学・理学研究科・助教  
研究者番号：20700363

##### (4) 研究協力者

奥田 隆 (OKUDA, Takashi)  
池田 博 (IKEDA, Hiroshi)  
宮地 竹史 (MIYAJI, Takeshi)  
山谷 祐介 (YAMAYA, Yusuke)  
杉原 光彦 (SUGIHARA, Mituhiko)  
山口 和雄 (YAMAGUCHI, Kazuo)  
竿本 英貴 (SAOMOTO, Hidetaka)  
千田 康介 (CHIDA, Kosuke)  
望月 一磨 (MOCHIZUKI, Kazuma)

鈴山 智也 (SUZUYAMA, Tomonari)  
大久保 慎人 (OKUBO, Makoto)  
木村 武志 (KIMURA, Takeshi)  
本多 亮 (HONDA, Ryo)