

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2013

課題番号：21340125

研究課題名(和文) 高頻度サンプリングGPS観測に基づく地球科学観測の新たな展開

研究課題名(英文) A new development of earth science based on high-rate sampled GPS observations

研究代表者

加藤 照之 (Kato, Teruyuki)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：80134633

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円、(間接経費) 4,350,000円

研究成果の概要(和文)：高頻度でサンプリングしたGPSデータの地震計への応用可能性を目的としてシミュレーションと観測の両面から研究を行った。シミュレータを用いた検証を行った結果、数Hz程度よりも高い周波数の地面振動を受信するには位相、振幅に有意なずれが生じることが明らかとなった。

一方、実際の観測でどのような波形が取得できるかについて、3台のGPS受信機を用いた観測を実施した。いわき、鹿嶋、静岡の3か所に受信機を設置し、50Hzでの観測を実施した。この結果2013年9月20日に福島県浜通りで発生した震度5強の地震による振動波形を取得することにはじめて成功した。

研究成果の概要(英文)：Feasibility of using high-rate sampled GPS data for seismometer was investigated from the stand point of both simulations and observations. Results using a simulator suggested that it appears significant shift in both amplitude and phase in the output signal from the GPS receivers. This phenomenon is expected to stem from the signal tracking loop problem of receivers, especially in case of higher than 5Hz sampling. Observational studies using three GPS receivers have also been conducted. The receivers were placed at Iwaki, Kajima and Shizuoka, Japan, and we conducted observations with sampling rate of 50Hz. As a result, the ground shake due to the September 20, 2013 earthquake that occurred in Fukushima prefecture nearly below Iwaki site and registered JMA intensity 5+, was clearly recorded in the GPS data.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：GPS 高頻度サンプリング GPS地震計

1. 研究開始当初の背景

GPS 観測研究の最近の大きな発展の一つに高頻度サンプリングに基づく地震波形の検出があげられる。GPS の固体地球科学への応用は 1980 年代に始まり 1990 年代に 1cm 程度の精度で地球上の位置を決定することができるようになって固体地球科学に革命的な進歩をもたらした。2000 年代半ばころまではテクトニクスや地殻変動の検出等が大きな応用分野であり世界標準となっていた 30 秒ごとのデータサンプリングが用いられてきた。これに対し、Larson et al. (2003) は 1 秒毎の高頻度サンプリングを行うことによって地震波が捉えられることを明らかにした。これを契機として GPS を、たとえば、地震波動をとらえる手段として用いることができるのではないかと期待され、いくつかの研究が進められている。我々の研究グループでは 2003 年十勝沖地震に際して得られた国土地理院の GEONET で得られた 1 秒サンプリングの GPS データを用いて北海道の GEONET 点での地震波動を検出し、近傍の地震計データとよい一致を得たほか、GPS データのみから破壊伝搬の様子を明らかにすることができた (Miyazaki et al., 2004)。一方我々は同じく 1 Hz の RTK - GPS と呼ばれる手法を用いて海洋ブイに搭載した GPS により津波を計測するのに成功している (Kato et al., 2005)。

このように最近我々の研究室を中心として高頻度サンプリング GPS のデータ解析により地震や波浪・津波など地球科学の広範の分野に新たな展開がはじまろうとしている。また、このような背景をふまえ、国土地理院では GPS 連続観測網である GEONET に 1 秒収録の機能を加えてデータ提供を開始している。

2. 研究の目的

現在までに行われている高頻度観測でもっぱら 1 秒サンプリングが行われている。しかしながら実際の地震波動はもっと高周波のものまで含まれていることは明らかであり、数十 Hz 程度のより高頻度のサンプリングを行わないとエリアジングの問題がついてまわることになる。また、もし数十 Hz のデータが得られれば、地震の震源過程についてはるかに詳細なデータが得られることになる。また、GPS は振り子でないので、数十 Hz の高周波振動成分から静的変位成分まで幅広い帯域の地震動を記録することが可能である。したがって、数十 Hz データを長期に取得することにより地震動からプレート運動までの時間変動をシームレスに明らかにすることができる。これは固体地球科学にとって革命的な技術革新となると考えられる。

一方、高い周波数の地面振動を入力信号とした場合、GPS 受信機内部の位相ロッキングと呼ばれる回路によってある種の特性が

発生する。このため、取得された記録は地震動に対して振幅、位相ともに真値からずれる可能性があることが知られている。これらの特性を事前に把握したうえで取得した記録を補正することによりはじめて真の地面振動が捉えられることになる。

これらの課題を探求するために、我々は高周波のデータ取得が可能な最新型の GPS 受信機を 3 台購入してアレイ観測を実施し、地震動を検出することを目的とするとともに、シミュレータを用いた実験を行って高周波信号に対する受信機の特性を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、GPS 受信機の高周波信号に対する応答を把握することと、実際の観測によって地面の振動が捉えることを目的として、以下の実験・観測を実施した。

(1) 受信機装置の導入と基礎実験

まず GPS 受信機及びデータ処理解析システムを 3 式導入し、アレイ観測網を構築することとした。市販されている受信機の中でも高頻度サンプリングとなる 50Hz サンプリングが可能な GPS 受信機を購入し、現地収集システムを導入した。このシステムについて、まず、10Hz 及び 50Hz のサンプリングによるゼロベースライン観測を実施した。得られたデータは RTNet ソフトウェアを用いて解析を実施し、受信機のデータ取得率や Fix 率等の基礎資料を得ることとした。

(2) シミュレータを用いた実験

高周波の地面振動が入力した際に取得したデータにどのような影響が出るかを検証するために、仮想的な GPS 信号を生成することのできるシミュレータ (Spirent 社製 GSS7700/8000) を用いた実験を行った。実験は東大工学部の海老沼拓史氏と共同で実施した。実験ではまず仮想の半径 1m の円周上を周期 2Hz で走行する移動局をシミュレートした。基準局は円の中心に設置されており、これらの観測値をキネマティック解析ソフトで解析した。続いて、地震動を模擬するために 1Hz 及び 5Hz の正弦波信号を複数種の GPS 受信機に入力し、出力信号がどのようになるかを検証した。また、最後に、実際の強震動記録をシミュレータ信号として受信機に入力し、GPS 受信機からの出力を入力と比較した。こうした、一連の実験を通じて、高周波シグナルに対する受信機の応答特性を明らかにすることとした。

(3) 野外観測による地震波の取得

本研究で導入した GPS 受信機セット 3 式を野外に展開して地震動を取得することとした。まず、静岡県内の 3 か所 (伊東市川奈、静岡大学及び相良) に設置した。50Hz サンプリングによる観測のほか、静止測位のための 30 秒毎のサンプリング観測も実

施している。しかしながら、2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震の影響で余震活動が福島から千葉の太平洋沿岸で高いことから、2012年3月には別途構築中であったいわき～房総にかけての沿岸域での余効変更観測網に組み入れることとし、相良及び伊東川奈に設置してあった受信装置をいわき市上遠野小学校及び鹿嶋市大同東小学校に移設した。50Hzによる観測は現地収録方式とし、いわゆるチェーンメモリ方式によって2週間程度でデータが消去される方式をとっている。茨城県の観測点データについては携帯テレメータが行われているため、地震後すみやかにデータをダウンロードできる方式が導入された。こうして設置された観測アレイによって、いくつかの顕著な余震が記録され、RTNet ソフトウェアによって基線解析が実施された。

4. 研究成果

前述の研究方法に対応するそれぞれの研究成果について以下に記載する。

(1) 基礎実験

基礎実験として、東大地震研屋上の基準点を用い、1台のアンテナと2台の受信機を用いたゼロベースラインテストを実施した。実験は平成22年1月に行われ24時間の10Hz サンプリング及び50Hz サンプリングのデータを取得することに成功した。得られたデータをRTNet ソフトウェアで解析した。解析においてはシングルエポック毎の測位解とカルマンフィルターを用いて位置を拘束するフィルター解の2種類を比較検討した。シングルエポック解では10Hz、50Hz 共に数mm程度の白色雑音が認められた。一方フィルター解は10Hz、50Hz 共におおむね1mm以下のばらつきしか認められなかったものの50Hzの測位解は時折ゼロラインから飛ぶような偏差が認められた(図1)。特に衛星配置が悪い時にこのような現象が発生することが示唆された。この基礎実験の成果について国内学会において口頭発表を行った。

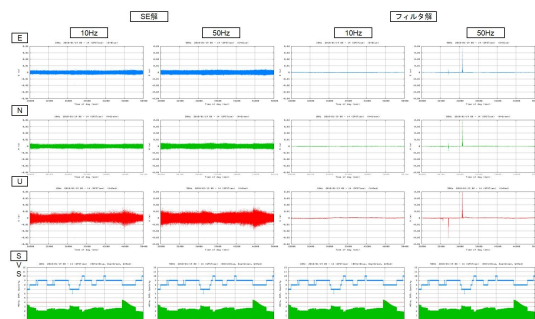


図1：ゼロベースライン実験。(左) シングルエポック解析結果、(右) フィルタ解析結果。上から東西成分、南北成分、上下成分及びDOPと衛星数。縦軸1cm/tick、横軸

1hr/tick.

(2) シミュレータを用いた位相・振幅特性検証実験

まず Trimble Net-R8 を用い、Spirent 社製の信号発生器によって生成された信号を用いた基礎実験を行った。仮想的に半径1mの中心と円周上を回る基線による信号を生成して受信機にデータを取り込み、基線解析を行った。その結果10Hz観測ではほぼ100%のFix率が得られたのに対し、50HzではFix率が70%以下に低下することが明らかとなった。

次に、Trimble Net-R8、Topcon Net-G3A、NovAtel OEMV の3機種を用いた比較実験が行われた。信号発生器で様々な加速度及びサンプリングで特性実験を行った。その結果加速度が2Gを超えるとどの受信機でもデータをトラッキングすることができないことがわかった。次に1Hz、2Hz、5Hzの正弦波で比較実験を行ったところ、機種によっては高周波サンプリングになるにつれ位相、振幅とも入力信号からのずれが大きくなることが判明した(図2)。最後に2008年宮城・岩手内陸地震の際に取得されたデータを用いた再現実験を行った。この場合も前記の基礎実験と同様、機種による差異が出ることも判明した。図3はTrimbleによる場合を示すが、高周波の振動が卓越している部分では入力と出力の値が有意に異なっていることがわかる。

これら一連の成果について論文にまとめてEPS誌に発表したほか、国際会議等において発表を行った。

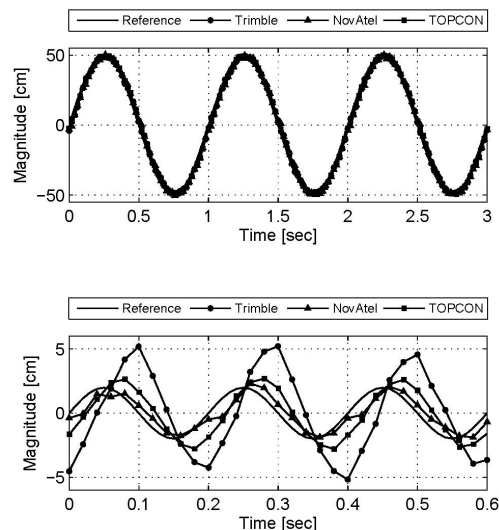


図2：基準波形(平滑な曲線)と受信機出力波形の比較。●: Trimble, ▲: NovAtel, ○: TOPCONの各受信機。(上)1Hz,(下)5Hz。

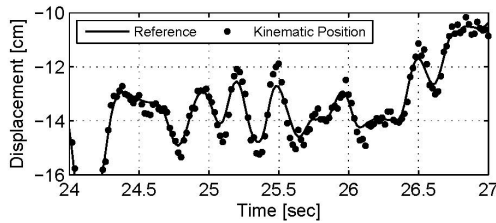


図3：2008年岩手・宮城県境地震の地震動記録(Reference)とそれを入力とした、GPS出力波形()。

(3) 野外観測による地震波の取得と解析結果

いわき市上遠野小学校周辺では2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の余震活動が活発な地域にあり、観測期間中に多数の地震が発生した。これらの中から、数回の顕著な地震について50Hzサンプリングによる地震の震動を含むデータを取得した。これらのデータを解析したところ、2013年9月20日にいわき市直下で発生した地震の震動を捉えることにはじめて成功した。この地震では上遠野観測点近傍で震度5強を記録した。一方、同年12月31日に発生した同地域の地震では地震動をGPS観測で捉えることはできなかった。この地震では同地域は震度3程度であり、この程度の地震動ではGPSでは捉えるほどの振幅がなかったものと考えられる。9月20日の地震記録について詳細に調査するために同観測点の近傍で取得された強震観測網の観測点記録を取得した。これらと比較することにより、GPSによる記録の特性が明らかになると期待される。すでに本研究で指摘したように、サンプリング頻度が数Hzを超えるとデータの周波数特性が無視できないものとなることから、補正方法についても今後検討を進める必要がある。もし適当な補正によって地震動の正確な把握が可能となれば、震度5程度の地震動を記録するGPS地震計も実用可能であろうということが示唆された。

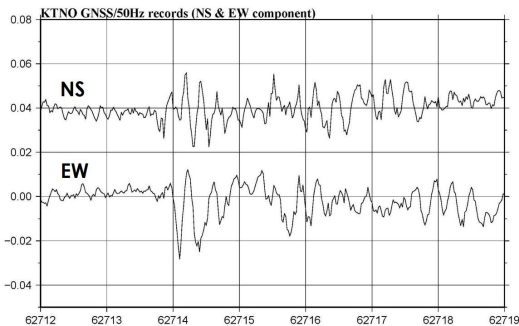


図4：2013年9月20日福島県浜通りの地震に伴う上遠野観測点で取得された50HzサンプリングGPSデータ。(上)南北成分、(下)東西成分。縦軸2cm/tick, 横軸1sec/tick。

(4) 研究のまとめと今後の課題

本研究でははじめて50Hzという高頻度でのGPS観測を実施し、シミュレータを用いた特性把握の実験と野外観測による地震波動の取得を行い、新たな成果を得た。数Hz以上の高周波の地動を記録しようとする受信機内部の電子回路に起因する特性が生じ、機種によってはかなり大きな振幅と位相の変化が生じることが明らかとなった。したがって、高頻度サンプリングGPS観測データを地震計等として活用する際にはこれらの特性を正しく補正することが必要である。このような特性は受信機によっても異なるため、事前に受信機ごとの特性を把握し、補正方法を確立しておくことが必要である。これらが解決されれば、GPSは地震など地盤(あるいは構造物)の振動の研究に活用できると考えられる。

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 12件)

加藤照之, GPS: 次の“夢”に向けて～「GPS 大学連合」の視点から～, 測地学会誌, 有, 59, 2013, 87-97.

Ebinuma, T., and T. Kato, Dynamic characteristics of high-rate GPS observations for seismology, Earth Planets Space, 有, 64, 2012, 369-377.

[学会発表](計 29件)

加藤照之, GPS: 次の“夢”に向けて～「GPS 大学連合」の視点から～, 日本測地学会第118回講演会, 2012年11月1日, 仙台市福祉プラザ(仙台)。

T. Kato and T. Ebinuma, Dynamic Characteristics of High-Rate GPS Observations for Seismology, European Geosciences Union General Assembly 2011, 2011年4月8日, Vienna, Austria

T. Kato and T. Ebinuma, Performance Evaluation of High-Rate GPS Seismometers, American Geophysical Union Fall Meeting 2011, 2011年12月7日, San Francisco, USA

加藤照之, GPSの50Hzサンプリングによる基線解析 背景とゼロベースラインテスト, 測位航法学会平成22年度全国大会, 2010年4月24日, 東京海洋大学品川キャンパス(東京)

海老沼拓史・加藤照之, 高頻度出力GPS受信機による地震観測のダイナミック特性, GPS/GNSSシンポジウム2010, 2010年11月6日, 東京海洋大学越中島会館(東京)

加藤照之, 他7名, 東海稠密アレイGPSから見た2009年8月11日駿

河湾の地震，日本地震学会 2009 年
秋季大会，2009 年 10 月 21 日，京
都大学（京都）
佐藤一敏・小畑弘毅・里村幹夫・
加藤照之，東海地域における高サ
ンプリングリアルタイム GPS 観
測・解析の試み，日本地震学 2009
年秋季大会，2009 年 10 月 21 日，
京都大学（京都）

〔図書〕（計 1 件）

〔産業財産権〕

出願状況（計 7 件）

取得状況（計 1 件）

〔その他〕

ホームページ等

6．研究組織

(1)研究代表者

加藤 照之（KATO, Teruyuki）

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：80134633