

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350506

研究課題名(和文)GPSを用いた地盤変位計測のリアルタイム性の強化による安全監視の高度化

研究課題名(英文)Enhancement of monitoring safety by improving real-time GPS displacement measurements

研究代表者

清水 則一(Norikazu, SHIMIZU)

山口大学・理工学研究科・教授

研究者番号：70150357

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、GPSを用いた地盤変位計測システムのリアルタイム性を強化することによって、豪雨時・地震時における地盤災害を迅速かつ安全に監視することが可能な現場計測手法を確立することを目指すものである。申請者はmm精度で地盤の3次元変位を自動連続計測可能なシステムを開発しており、本研究ではさらにキネマティック方式を導入して、計測の時間分解能を向上させる受信機とデータ処理方法を開発し、低格のセンサー開発の可能性を探った。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to enhance the real-time monitoring property of the GPS displacement monitoring system and to develop a procedure for monitoring displacements immediately after a ground disaster has occurred due to heavy rain or an earthquake. A system using GPS was developed for monitoring three dimensional displacements with millimeter accuracy, and the kinematic method was applied to the system to improve the resolution of the measurement interval. The possibility of developing a low cost sensor was also investigated.

研究分野：岩盤力学，土木工学

キーワード：GPS 3次元変位計測 キネマティック計測 安全監視 センサー開発 高精度

1. 研究開始当初の背景

(1)筆者らは1990年頃より人工衛星を用いる測位システムであるGPSにいち早く着目し、これを広範囲な地盤変位計測に適用することを考え、開発研究を進め、自動連続計測とトレンドモデルによる真値推定法を組み合わせ導入することにより、mm精度で変位検出が可能なシステムを開発した。さらに、気象や上空障害による電波の遅延・乱れなどによる誤差に対する補正法を提案し一層の高精度化を実現している。同時に、企業との共同研究によって24時間連続的に自動計測して計測結果をネット配信するシステムを実用化し、地すべり、ダム、トンネル、災害復旧管理など多くの実務において活用されている。

(2)一方、豪雨時や地震時などの緊急時にあっては、より早く、より正確に斜面等の挙動を察知することが重要であって、そのためには「計測のリアルタイム性の更なる強化」が必要不可欠である。単なるリアルタイム計測であれば現在のGPS技術によって可能であるが、そのままでは精度が低く安全監視への適用は難しい。"より早く"かつ"より正確に"を実現するためには、リアルタイム計測のデータに対して、新たな精度改善技術の研究が必要である。そして、技術の普及と実用化にはコスト縮減も不可欠である。

2. 研究の目的

(1)本研究は、GPS変位計測システムにおけるリアルタイム性の強化とコスト縮減のために、新しいセンサーを試作し、mm精度を確保しつつ短時間間隔で計測できるよう、キネマティック方式によるリアルタイム計測を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

(1)変位計測のための新しいGPSセンサーの製作と性能実験を行う。そして、キネマティック方式における計測結果の誤差の分析とmm精度を確保する方法を検討する。

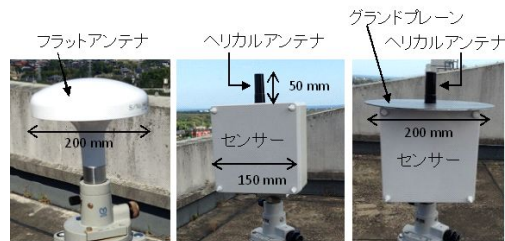
(2)キネマティック方式は数秒に一度の測位が可能なためにリアルタイム性に優れる反面、精度は劣る。元々のGPSの目的である測量ではcm精度で十分であることもあって、変位計測を対象にキネマティック方式によるmm単位計測の研究はまだ十分ではない。そこで、まずGPS定点観測を実施して誤差分析に供するデータを取得する。連続的なキネマティック解析から、計測結果の平均時間と計測精度との関係を明らかにする。

(3)図-1に試作したGPSセンサーを示す。センサーの性能実験には3種のアンテナ(高精度計測用フラットアンテナ、ナビゲーション用ヘリカルアンテナ、簡易な電波吸収グランドプレーン付ヘリカルアンテナ。図-2参照)を用いる。観測データは、1時間スタティック、および、30秒間隔キネマティックで解析する。

(4)強制変位実験 変位計測の精度を調べるために、アンテナに強制変位を与えて計測する。



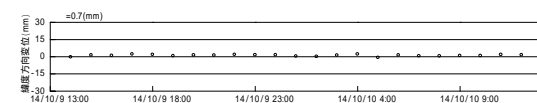
図1 新しいGPS変位計測センサー



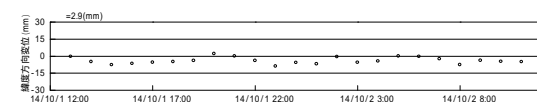
(a)フラットアンテナ (b)ヘリカルアンテナ (c)ヘリカルアンテナ
図2 実験に用いたアンテナ

4. 研究成果

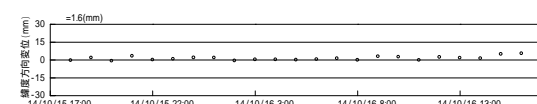
(1)スタティック解析結果(静止計測) 図-3に3種のアンテナ条件に対するスタティック解析結果のうち一例として緯度方向の結果を示す。各図の左肩に計測の標準偏差を記している。いずれも従来のセンサーと比べても良好な結果を得ており、試作したセンサーの妥当性が検証された。この結果から、標準偏差はフラットアンテナが最も小さく、ヘリカルアンテナは大きいことがわかる。しかし、ヘリカルアンテナにグランドプレーンを取り付けるとフラットアンテナと同等な結果に改善される。これまで、高精度計測を行う場合、ヘリカルアンテナを使うことはまずなかったが、電波を吸収するグランドプレーンを用いることで、高精度変位計測にも利用できる可能性が示された。



(a) フラットアンテナ



(b) ヘリカルアンテナ



(c) グランドプレーン付ヘリカルアンテナ

図3 新センサーによるスタティック解析結果の一部

(2) キネマティック解析結果(静止計測)

キネマティック方式は、データを取得する毎に解析して変位を求めることができるが、精度はスタティック方式と比べると悪い。一方、スタティック方式と比べると短時間で数多く計測結果を得ることができる利点がある。図-4 にキネマティック解析によって得られた結果のうち、一例として緯度方向の値を示す。キネマティック方式においても、標準偏差はフラットアンテナが最も小さく、ヘリカルアンテナが大きい。グランドプレーン付のヘリカルアンテナはフラットアンテナとほぼ同程度の標準偏差となり、高価なフラットアンテナの代わりに利用できることが示された。

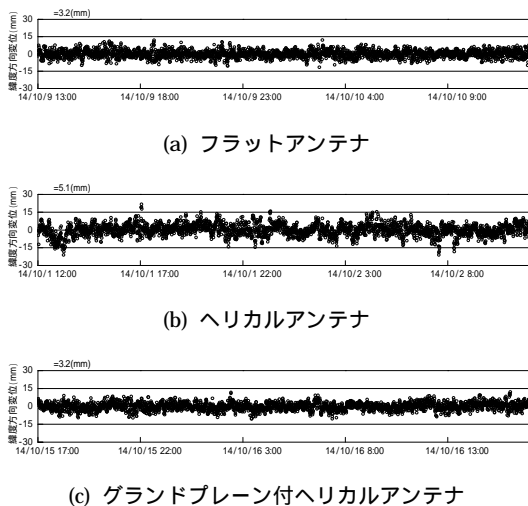
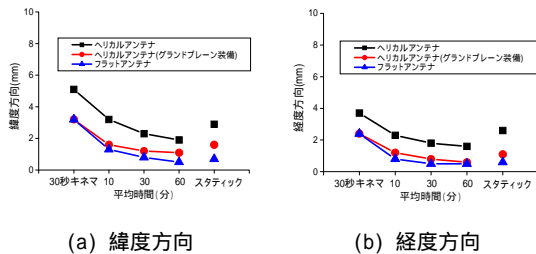


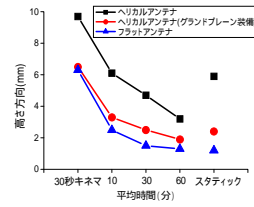
図4 新センサーによるキネマティック解析結果の一部

(3)キネマティック解析結果について、10分、30分、および、60分間の計測結果の平均をとることにより、それぞれの時間間隔の計測結果とする。それぞれの平均値による計測結果に対する標準偏差を図-5に示す。グランドプレーン付ヘリカルアンテナを用いた場合、キネマティック解析結果の10分平均は、1時間のスタティック解析結果とそん色ないことが分かる。すなわち、試作したセンサーでキネマティック計測を行い、計測結果の10分平均を取ると、高価なセンサーによる1時間スタティック解析結果と同じ制度の結果を得ることができる。このことは、これまで変位検出まで少なくとも1時間が必要であったが、10分で検出できることを意味し、リアルタイム性が大きく強化されたことを示す。



(a) 緯度方向

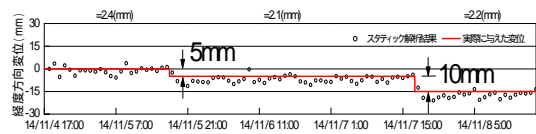
(b) 経度方向



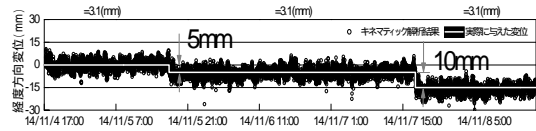
(c) 高さ方向

図5 キネマティック解析結果の平均時間と精度の関係

(4) 以上の結果を踏まえて強制変位実験（人為的にアンテナに正確な変位を与え、その変位を検出する実験）を行った。その結果、グランドプレーン付ヘリカルアンテナによる10分平均キネマティック解析で、1時間スタティックとほぼ同精度で変位が計測できることが示された（図-6）。なお、検出に要する時間は、本研究の新しい方法で1/6程度に低減でき、リアルタイム性が強化されたことが示された。



(a)スタティック解析(30秒エポック,1時間セッション)



(b)キネマティック解析(30秒エポック10分平均)

図6 強制変位実験による変位検出

(5)本研究の成果は次の通りである。低コストの新しいGPS変位計測センサーを試作した、簡易なグランドプレーン付ヘリカルアンテナの適用性が示された、30秒エポックキネマティック解析結果を10分平均することで1時間スタティック解析と同等な計測ができることが示された、その結果リアルタイム性（変位を検出できる即時性）が数倍向上した。今後の方針としては、本研究の一環としてGPSによる連続計測を実施していた急傾斜斜面へ、新しいセンサーを投入して本方法の実用化を図る（図7参照）。



図7 GPS変位計測を実施している急傾斜斜面

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2件)

- 1) 中島伸一郎, 難波辰弥, 板垣壮真, 曾田英揮, 岩崎智治, 清水則一, 小野雅和: 高低差の大きい長大斜面の GPS 変位計測における不動点計測値を用いた対流圏延補正法の提案と効果の検証, Journal of MMIJ (資源・素材学会), 査読有, Vol.130, No.10,11, pp.479-487, 2014.10.
- 2) Shimizu, N., Nakashima, S. & Masunari T: ISRM Suggested Method for Monitoring Rock Displacements Using the Global Positioning System (GPS), Rock Mech. Rock Eng., 査読有, 47:313-328, 2014. DOI 10.1007/s00603-013-0521-5.

[学会発表](計15件)

- 1) 寺田脩作, 中島伸一郎, 清水則一, 武石朗, 増成友宏: 新しいGPS変位計測センサーの開発(その2), 土木学会第70回年次学術講演会, 2015年9月16日~18日, 岡山大学津島キャンパス(岡山県岡山市)
- 2) 林佑一郎, 古山陽太, 中島伸一郎, 清水則一, 福井雄二: 急傾斜斜面に対するGPS変位計測システムの適用事例(その3), 土木学会第70回年次学術講演会, 2015年9月16日~18日, 岡山大学津島キャンパス(岡山県岡山市)
- 3) 林佑一郎, 古山陽太, 中島伸一郎, 清水則一: 急傾斜斜面に対するGPS変位計測システムの適用事例(その4), 第36回西日本岩盤工学シンポジウム・第2回岩石力学・岩盤工学に関する若手研究者会議, 2015年9月4日~5日, 火の国ハイツ(熊本県熊本市)
- 4) 林佑一郎, 古山陽太, 中島伸一郎, 清水則一, 福井雄二: 急傾斜斜面に対するGPS変位計測システムの適用事例(その2), 平成27年度土木学会中国支部研究発表会, 2015年5月22日~23日, 山口大学工学部(山口県宇部市)
- 5) 寺田脩作, 中島伸一郎, 清水則一, 武石朗, 増成友宏: 新しいGPS変位計測センサーの開発, 平成27年度土木学会中国支部研究発表会, 2015年5月22日~23日, 山口大学工学部(山口県宇部市)
- 6) N. Shimizu: Rock Displacement Monitoring using Satellite Technologies-GPS and InSAR, 基調講演, Vietrock2015-IRSM specialized conference, 2015年3月12日~13日, Hanoi (Vietnam)
- 7) 古山陽太, 中島伸一郎, 清水則一: GPS

による岩の変位計測に関する ISRM Suggested Method と斜面変位計測への適用事例, 第43回岩盤力学に関するシンポジウム, 2015年1月8日~9日, 土木学会「土木会館」(東京都新宿区)

- 8) Y. Furuyama, S. Nakashima and N. Shimizu: Displacement monitoring using GPS for assessing stability of unstable steep slope by means of ISRM suggested method, The 2014 IRSM International Symposium - 8th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS8), 2014年10月14日~17日, ロイトン札幌(北海道札幌市)
- 9) S. Tosa, T. Yamasaki, K. Ito, T. Sukanuma, N. Oikawa, A. Takeishi and N. Shimizu: Case Studies on Landslide Monitoring Using the GPS Displacement Monitoring System, The 2014 IRSM International Symposium - 8th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS8), 2014年10月14日~17日, ロイトン札幌(北海道札幌市)
- 10) M. Shitano, T. Murakami and N. Shimizu: Application of the GPS Displacement Monitoring System for the Preventive Maintenance of a Cut Slope along a National Expressway - a Case Study, The 2014 IRSM International Symposium - 8th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS8), 2014年10月14日~17日, ロイトン札幌(北海道札幌市)
- 11) W. Satoh, T. Iwasaki, W. Sakurai, A. Fujii and N. Shimizu: Monitoring the Stability of a Large-scale Colluvium Deposited by Slope Failures due to Heavy Rainfall Using a GPS Automatic Monitoring System, The 2014 IRSM International Symposium - 8th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS8), 2014年10月14日~17日, ロイトン札幌(北海道札幌市)
- 12) T. Kobori, Y. Yamaguchi, S. Nakashima and N. Shimizu: Displacement Monitoring of a Rockfill Dam Before, During and After The Great East Japan Earthquake Using GPS, The 2014 IRSM International Symposium - 8th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS8), 2014年10月14日~17日, ロイトン札幌(北海道札幌市)
- 13) 古山陽太, 大山直輝, 中島伸一郎, 清水則一, 山田晋吾: 急傾斜斜面に対するGPS変位計測システムの適用事例, 土木学会第69回年次学術講演会, 2014年9月9日~11日, 大阪大学豊中キャンパス(大阪府吹田市)
- 14) Shimizu, N., Nakashima, S. and Furuyama, Y.: Real-time displacement monitoring using GPS for assessing slope stability, EUROCK2014- Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses, 2014年5月27~29日, Vigo (Spain)
- 15) 古山陽太, 中島伸一郎, 清水則一: 急傾

斜長大斜面における GPS 変位計測の高
精度化とその事例，第 34 回西日本岩盤
工学シンポジウム，2013 年 8 月 30 日，
九州大学伊都キャンパス（福岡県福岡
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

清水 則一（SHIMIZU, Norikazu）
山口大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：70150357

(2)研究分担者

中島 伸一郎（NAKASHIMA, Shinichiro）
山口大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号：70346089