

電波位相差を用いた法面変位センシング技術

大島正資* 鈴木信弘**
寺田 翼*
網嶋 武**

Sensing Technique of Slope Displacement Using Phase Difference of Radio Wave

Tadashi Oshima, Tsubasa Terada, Takeshi Amishima, Nobuhiro Suzuki

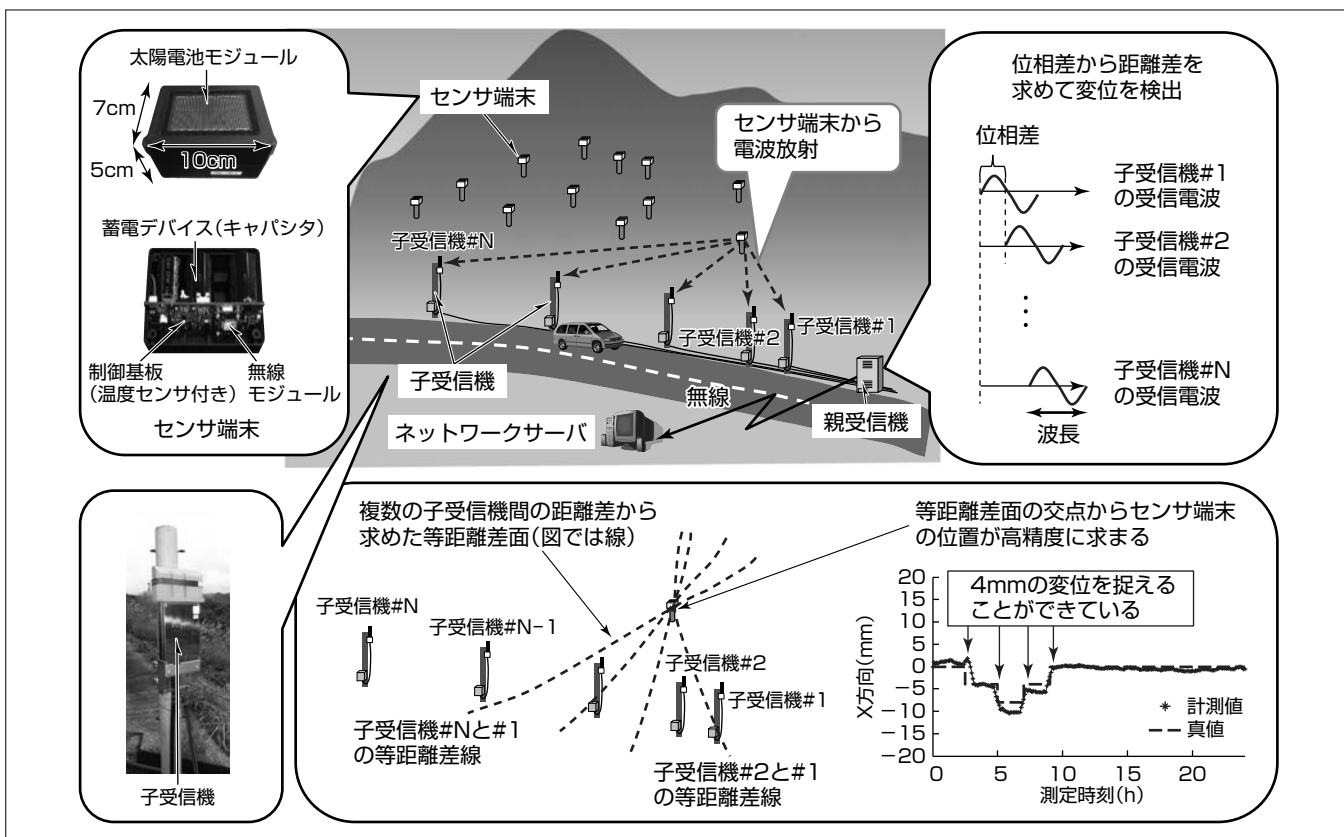
要 旨

自然斜面・法面(のりめん)^(注1)で、集中豪雨・積雪等を原因とした地すべりによる災害は国内で年間1千件程度発生しており、地すべりの危険箇所は1万箇所程度ある。地すべりによる斜面崩壊の前兆としてミリメートルオーダーの変位が発生する。

三菱電機は、このミリメートルオーダーの変位を計測するシステムとして2.4GHz帯の電波位相差を用いた変位計測システムの開発を進め、フィールドでの計測・評価を行ってきた。しかし、既存の無線システムとの電波干渉によって安定した計測が困難になるという懸念がある。今回、近年開発・実用化が進んでいるセンサネットワークと変位

計測システムを融合させ、センサネットワークの無線規格である920MHz帯の電波位相差を用いて道路法面の変位をセンシングするシステムの開発を行った。920MHz帯の波長は2.4GHz帯と比較して約3倍長いため、このままでは変位計測精度が悪化してしまう。しかし、観測位相差は反対に2.4GHz帯と比較して小さくなり、法面の管理に必要な約1mmの精度で変位を安定して計測可能である。またセンサ端末を強制的に変位させた実験の結果、1時間当たり数mmの変位を検知できることが明らかになった。

(注1) 道路工事や宅地造成等によって人工的に形成された斜面



法面変位センシングシステムの概念図

法面変位センシングシステムを道路法面に適用した場合の概念図を示す。斜面に設置したセンサから放射された電波を道路脇に設置した複数の子受信機で受信し、受信信号を親受信機まで伝送する。各子受信機の電波位相を比較してセンサの変位をミリメートルオーダーで計測する。

1. ま え が き

自然斜面・法面で、集中豪雨・積雪等を原因とした地すべりによる災害は国内で年間1千件程度発生しており⁽¹⁾、地すべり危険箇所は1万箇所程度ある⁽²⁾。地すべりによる斜面崩壊の前兆としてミリメートルオーダーの変位が発生することが知られており、道路法面の管理基準値の目安として用いられている⁽³⁾。土質や工事方法等に応じて管理基準値は現場ごとに設定されているが、その計測には1時間当たり数mm以上の変位量の計測が必要である⁽⁴⁾。

このミリメートルオーダーの変位を計測する技術として、GPS(Global Positioning System)、光波測量、伸縮計を用いた方法がある。しかし、GPSでは電離層の影響等による誤差を軽減するために1日程度の平均処理が必要であり即時性に欠ける、光波測量では濃霧等の悪天候時に計測が困難である、伸縮計は斜面上に不動点を確保することが困難であるという問題がある。

当社はこれらの問題を解決するために、電波位相差を用いてミリメートルオーダーの微小な変位を長期間にわたり常時三次元計測するシステム(変位計測システム)を開発してきた。

本稿ではセンサネットワークと融合させた変位センシングシステムについて述べる。

2. 電波位相差を用いた法面変位センシング技術

2.1 法面変位センシングシステム

図1に法面変位センシングシステム概念及び原理を示す⁽⁵⁾⁽⁶⁾。このシステムは斜面上に設置したセンサ端末から放射された電波を複数の子受信機で受信し、子受信機間の位相差を計測することでセンサ端末の変位を高精度に計測する。これまで2.4GHz帯の電波位相差を用いてミリメートルオーダーの微小な変位を長期間にわたり常時三次元計測するシステム(変位計測システム)の開発を進め、フィールドでの計測・評価を通じた検証を行ってきた⁽⁵⁾。しかし、2.4GHz帯の周波数は無線LAN(Local Area Network)等の近距離無線で用いられるため、電波干渉によって安定し

た計測が困難になるという懸念が生じる。

そこで無数のセンサ端末間で安定した通信を行うことを目的として、近年開発・実用化が進んでいるセンサネットワーク向けの920MHz帯の電波を用いて道路法面の変位をセンシングするシステムの開発を行った。このシステムでは、温度・傾斜等の様々なセンサ間の通信に用いられる電波を利用して変位計測を行うことによって、様々なセンサの情報収集と変位計測を同時に行うことが可能になった。また、この通信は変位計測用電波の送信指示にも使用され、センサ端末間のマルチホップ通信によって広範囲(数百m四方)にセンサ端末が設置可能になった。

斜面に設置した複数のセンサ端末は、親受信機からの指示によって変位計測用電波を発信し、道路脇に設置した複数の子受信機でその電波を受信する。各センサ端末から放射する電波は、センサ端末ごとに分離できるように親受信機からの指示によって時分割で発信する。子受信機で受信した電波は高周波信号として同軸ケーブル又は光ファイバを通じて親受信機に伝送される。親受信機に伝送された高周波信号は、中間周波数に周波数変換された後、A/D(Analog/Digital)変換器によってデジタルデータに変換される。このデジタルデータで導出される子受信機間の位相差から、センサ端末の変位を高精度に推定することができる。変位センシングの原理については2.2節で述べる。

変位計測結果は携帯電話等のネットワーク回線を介してサーバに格納し、遠隔地からモニタリングすることが可能である。

2.2 電波位相差による変位センシングの原理

電波位相差による変位センシングでは、電波の位相差(図1に示した電波のずれ量)を用いることで高精度な計測を実現する。周波数が920MHzの電波を用いた場合、波長は約30cmである。位相差は波長の数十分の一の精度で計測可能なため、ミリメートルオーダーの変位計測が可能になる。このシステムでは子受信機間の電波位相差を用いることでセンサ端末と子受信機間の同期を不要とする。ただし子受信機間の同期は必要であり、高周波信号を親受信機に集約することで実現している。

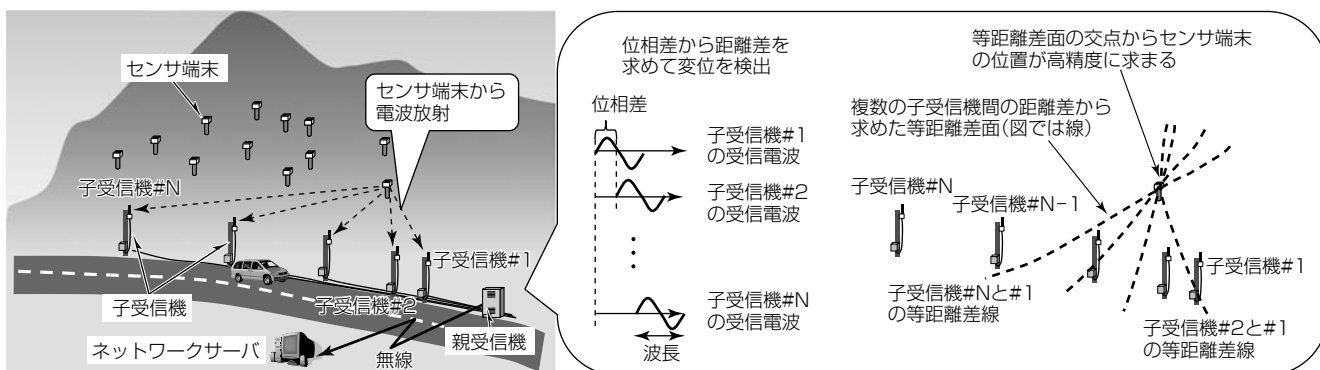


図1. 法面変位センシング技術の概念及び原理

次に変位計測の原理を述べる。センサ端末の位置座標を (x, y, z) , m 番目, n 番目子受信機の位置座標をそれぞれ $(X_m, Y_m, Z_m), (X_n, Y_n, Z_n)$ とすると, m 番目と n 番目子受信機間の位相差 $\phi_{m,n}$ は以下のようにセンサ端末と m 番目, n 番目の子受信機間の距離差として表される。

$$\phi_{m,n} + 2\pi L = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \sqrt{(x-X_m)^2 + (y-Y_m)^2 + (z-Z_m)^2} - \sqrt{(x-X_n)^2 + (y-Y_n)^2 + (z-Z_n)^2} \right\} \dots (1)$$

ここで λ は電波の波長であり, $2\pi L$ (L は整数) は整数値バイアスと呼ばれる波長の整数倍の不確定性である。この整数値バイアスの初期値は機器設置時に測距計等を用いて計測し, 変位発生に伴い変動する値に関しては測位値を追尾することで推定する。 (x, y, z) を未知数とした式(1)は, 図1に示した等位相差面(等距離差面)を表し, 複数の子受信機の位相差から複数の等距離差面が求められ, それらの交点からセンサ端末を高精度に測位することが可能である。

この技術の測位原理は, 電波の送受信を逆にした以外は位相差GPSの原理と同様であり, センサ端末がGPS受信機, 子受信機はGPS衛星に相当する。GPSでは電離層等の擾乱(じょうらん)の影響を受けるのに対し, このシステムでは電波の伝播(でんぱ)距離が短いため, 擾乱の影響を受けない点が利点である。変位計測精度についてもGPSと同様の理論に基づき次のように与えられる。

$$\varepsilon_{pos} = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \sigma_{DOP} \cdot \varepsilon_{phase} \dots (2)$$

ここで, ε_{pos} は変位計測誤差, ε_{phase} は受信機雑音や周囲環境に伴い発生する外来雑音による観測位相誤差, σ_{DOP} は, DOP(Dilution Of Precision: 誤差増倍率)と呼ばれるセンサ端末と子受信機の位置関係で決定される係数である。センサ端末を取り囲むように子受信機を配置することができれば, 等位相差面が直交するのでDOPが小さくな

り測位誤差を低減させることができる。また, 波長 λ に比例して変位計測誤差が増加することが分かる。2.4GHzの波長に対して920MHzの波長は約2.6倍長いため, このままでは変位計測精度は約2.6倍悪くなるが, 観測位相誤差を小さくできれば920MHz帯の電波でも高精度計測が可能であることを検証実験によって明らかにした。

3. 検証実験

3.1 原理検証実験

法面変位センシングシステムの原理検証実験を行った。実験機材の構成を図2に示す。当社の情報技術総合研究所構内の芝生に実験機材を設置して実験を行った。

センサ端末は斜面に設置して長期間計測を実現するため, 太陽光発電による自立電源で動作する端末を試作した。連続して1週間程度日照がない場合でも連続動作可能なように蓄電デバイス(キャパシタ)を搭載した。920MHz帯を用いることで無線モジュールの低消費電力化が実現できて無日照時でも長期間にわたって高頻度(6分周期)で変位計測が可能になった。またセンサ端末の制御基板には温度センサを搭載して温度情報も収集可能である。ほかのセンサと接続可能なインターフェースも設けたので, 傾斜計や雨量計等を接続してのデータ収集が可能である。さらにセンサ端末間でのマルチホップ通信によって広範囲(数百m四方)の計測が可能である。

子受信機はアンテナと直流電源, 増幅器を備え, センサ端末の変位計測用電波を受信する。受信した高周波信号は同軸ケーブルを通してユニットハウス内に設置した親受信機に伝送される。

親受信機に伝送された高周波信号は, フィルタによる帯域制限, 周波数変換が行われた後にA/D変換に送られ, デジタルデータに変換される。信号処理部では, このデジ

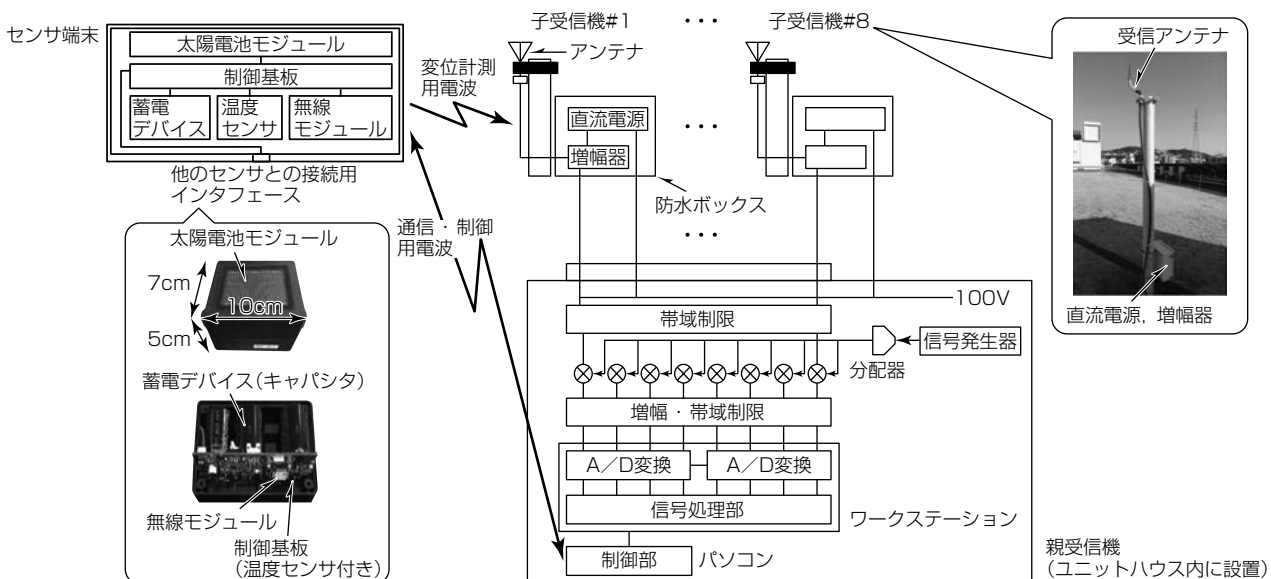


図2. 原理検証実験機材の構成

表 1. 実験条件

送信出力	20mW
送信周波数	927.4MHz(変位計測用) 927.5MHz(通信・制御用)
計測周期	6分

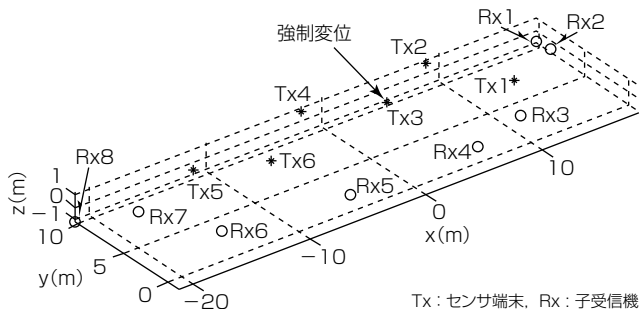


図 3. センサ端末と子受信機の配置図

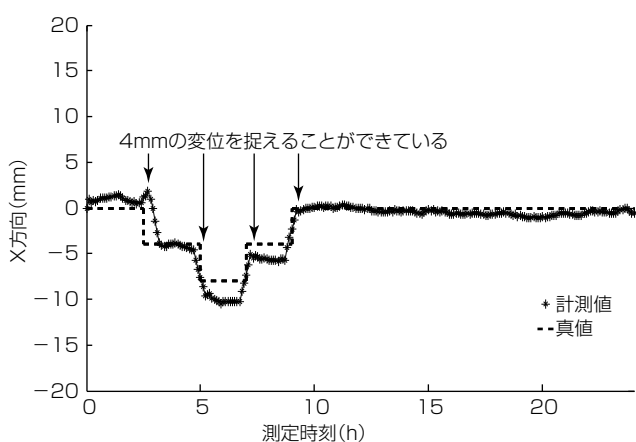


図 4. 強制変位実験結果(センサ端末 # 5)

タルデータを用いて2.2節で述べた原理に基づいてセンサ端末の位置を計算する。制御部ではセンサ端末と通信を行い、ネットワークの構築、温度センサデータの収集、センサ端末の変位計測用電波の発信制御等を行う。

センサ端末6台を設置して強制的に変位させる実験を行った。実験条件を表1に、センサ端末と子受信機の配置図を図3に示す。図3のTx3をx方向に強制的に4mm変位させた。実験結果を図4に示す。*は計測値であり6分ごとの測位値を3サンプル移動平均した値である。点線は真値である。計測が4mmの変位を捉えていることが分かる。またこのときの変位計測誤差(計測値-真値の全計測時間での二乗平均平方根)は約1mmであり、観測位相誤差 ε_{phase} は約3degであった。2.4GHz帯の観測位相誤差約10deg⁽⁵⁾と比較して約1/3であり、波長による変位計測誤差増加分をほぼ打ち消して2.4GHz帯の場合と同等の精度で計測が可能であることが明らかになった。

3.2 実証実験

2017年9月から、このシステムの試作機を東日本高速道路株が管理する法面に設置し、実証実験を開始している。実験の様子を図5に示す。法面の100m四方のエリアにセンサ端末15台、子受信機16機を設置した。実環境下で天



図 5. 実証実験の様子

候や植生等が変位計測精度に及ぼす影響を調査している。

4. むすび

920MHz帯の電波を用いて、斜面・法面の変位を高精度に計測可能なセンシング技術の原理検証実験結果を示した。この実験でこの技術によって法面の管理に必要なミリメートルオーダーの計測が可能であることを確認した。今後は、高速道路の法面での実証実験を通して実環境下での計測精度・耐久性を検証する。

この研究成果の一部は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託研究で得られたものである。また、実証実験にご協力いただいた東日本高速道路(株)に感謝する。

参考文献

- (1) 国土交通省：平成28年の土砂災害(2016)
<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h28dosha/H28dosyasaigai.pdf>
- (2) 国土交通省：都道府県別土砂災害危険箇所
<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/link20.htm>
- (3) 東日本・中日本・西日本高速道路株式会社：土質地質調査要領, 185 (2012)
- (4) 国土交通省九州地方整備局災害対策本部：全面通行での開放について一般国道10号法面崩落の恐れ, 第17報 (2006)
- (5) 吉崎 互, ほか：電波位相差変位計測システムを用いた斜面変位計測, 三菱電機技報, 84, No.8, 479~482 (2010)
- (6) 岡村 敦, ほか：多点震動変位の位相差による計測法, 電子情報通信学会技術研究報告, 宇宙航空エレクトロニクス研究会, 2000-145 (2001)