

法面変位センシングシステムの開発

大島 正資* 網嶋 武 鈴木 信弘（三菱電機(株)／NMEMS 技術研究機構）
寺田 翼（三菱電機(株)）

Development of Slope Displacement Sensing System

Tadashi Oshima*, Takeshi Amishima, Nobuhiro Suzuki
(MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION / NMEMS Technology Research Organization)
Tsubasa Terada (MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION)

Slope displacement sensing system using the phase difference of 920MHz band radio waves is developed. The displacement of slope can be measured at the accuracy of the order of millimeters by this system. In this paper, the experimental results in the real slope is introduced.

キーワード：変位計測，測位，法面，地すべり，位相差，センサーネットワーク

(Displacement measurement, Localization, Slope, Landslide, Phase difference, Sensor network)

1. 概要

自然斜面・法面（のりめん）において，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千件程度が発生しており⁽¹⁾，地すべり危険箇所は 1 万箇所程度がある⁽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毎に設定されているが，その計測には 1 時間あたり数 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 では衛星の電波が届かない崖や峡谷での計測が困難であり，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。

筆者らは上記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渡り常時 3 次元計測するシステム（変位センシングシステム）を開発してきた。本稿では，センサーネットワークと融合した変位センシングシステム及びこのシステムを用いた実証実験の結果を示す。

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の概要

図 1 に法面変位センシングシステム概念及び原理図を示す⁽⁵⁾⁽⁶⁾。本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渡り常時 3 次元計測するセンシングシステムの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，2.4 GHz 帯の周波数は無線 LAN(Local Area Network) 等の近距離無線で用いられ，電波干渉により，安定したセンシング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ー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り，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となった。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り広範囲（数百 m 四方）にセンサ端末が設置可能となった。

〈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となる。本システムでは，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。

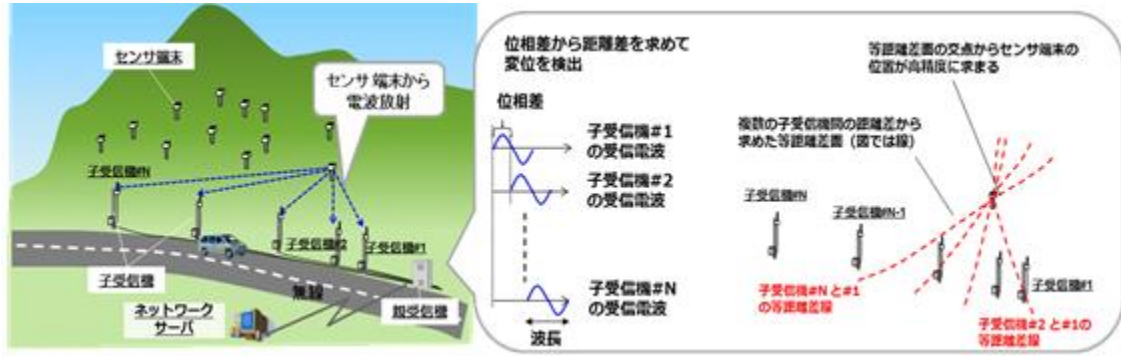


図1 法面変位センシング技術の概念及び原理図

Fig.1. Concept and principle of slope displacement sensing system.

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。

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

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まり, 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。

本技術の測位原理は, 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の影響を受けるのに対し, 本システムでは電波の伝播距離が短いため, 上記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以下のように与えられる。

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

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 倍長い為, 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 帯の電波においても高精度計測が可能であり, 原理検証実験により, 2.4GHz 帯と同程度の精度で計測可能なことを明らかにした⁽⁷⁾。

3. 実証実験

〈3.1〉 実験機材

本システムを東日本高速道路(株)が管理する法面に設置し, 実証実験を行った。実験機材の構成を図2に示す。

法面に設置するセンサ端末は, 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週間程度日照が無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, 無日照時でも長期間にわたって高頻度(6分周期)で変位計測が可能となった。また, センサ端末の制御基板には温度センサを搭載し, 温度情報も収集可能である。他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データ収集が可能である。更に, センサ端末間のマルチホップ通信により, 最大16台の端末による広範囲(数百m四方)の計測が可能である。

子受信機は, アンテナと RF 回路, E/O (Electronic / Optical) 変換器, AC/DC を備え, 固定用の治具を設けて支柱に固定した。電源は親受信機から AC100V を供給している。子受信機で受信した 920MHz 帯の電波は, RF 回路により増幅・帯域制限を行った後, E/O 変換器により光信号に変換され, 光ファイバを通して親受信機に伝送される。以前の実験⁽⁷⁾では, 子受信機と親受信機間の信号伝送は同軸ケーブルを用いて行ったが, ケーブル敷設時の取り回しが困難, 伝送損失が大きい等の課題があり, 本実験では, 光ファイバによる伝送とした。

親受信機では, O/E 変換器により光信号を RF 信号に変換した後に, RF 回路による帯域制限, 周波数変換を行った後に A/D 変換部に送られ, デジタルデータに変換される。信号処理部では, このデジタルデータを用いて 2.2 節で紹介した原理に基づき, センサ端末の位置を随時計算する。制

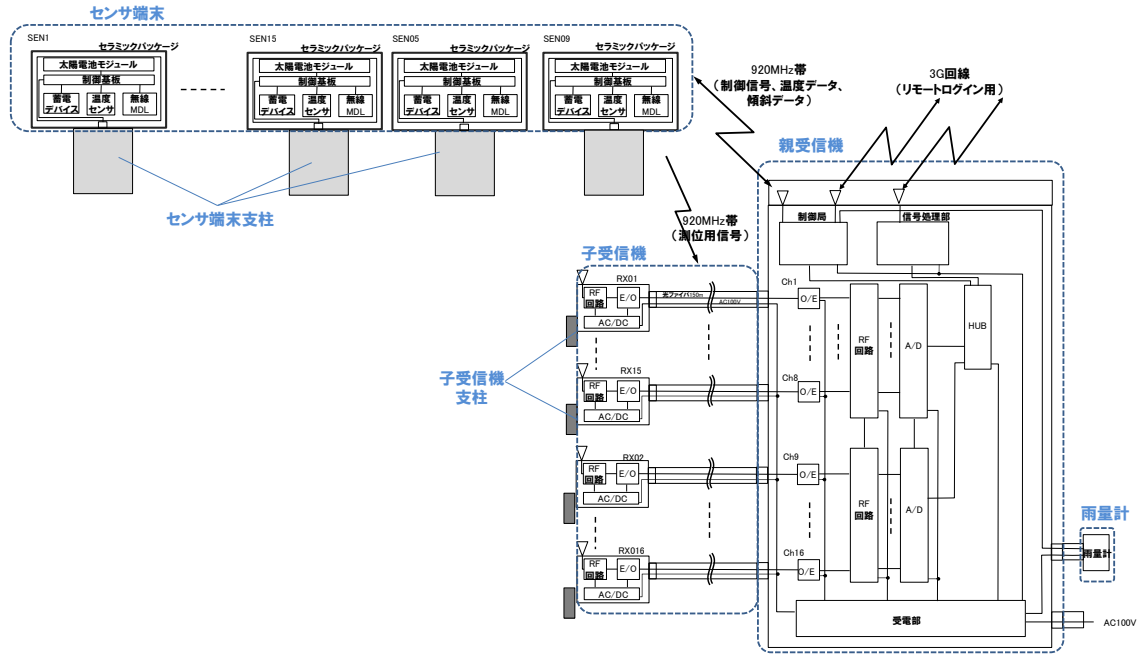


図2 実証実験機材の構成

Fig 2. Block diagram of the experimental equipment.

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。また，雨量計を接続し，雨量情報も同時に取得可能である。これらの変位計測データ，温度データ，雨量データ等は3G回線によるリモートログイン機能により，遠隔でのデータ収集が可能である。

実証実験機材の様子を図3に示す。法面の約100m四方のエリアにセンサ端末8台，子受信機16機を設置した。

センサ端末は全6台のうち4台は，図に示すように強制変位用の治具を設けており，端末を強制的に変位させることができる。地中0.7~1mに埋設した支柱に固定し，積雪対策のためのアクリルカバーを設置した。残りの2台は，温度補償用の端末として，子受信機の支柱（長さ2m）の上

部に設置した。

子受信機は全16機を，コンクリート面にアンカーボルトで固定した支柱に治具を設けて固定した。銀色部分が子受信機の筐体であり，灰色部分は積雪対策のためのアンテナカバーである。設置したセンサ端末と子受信機の配置を図4に示す。図中のSENはセンサ端末を表し，RXは子受信機筐体の位置を表す。センサ端末は，SEN04，07，10，13，15，16に設置した。

親受信機は，コンクリートブロックの上に筐体を乗せてアンカーボルトで固定した。

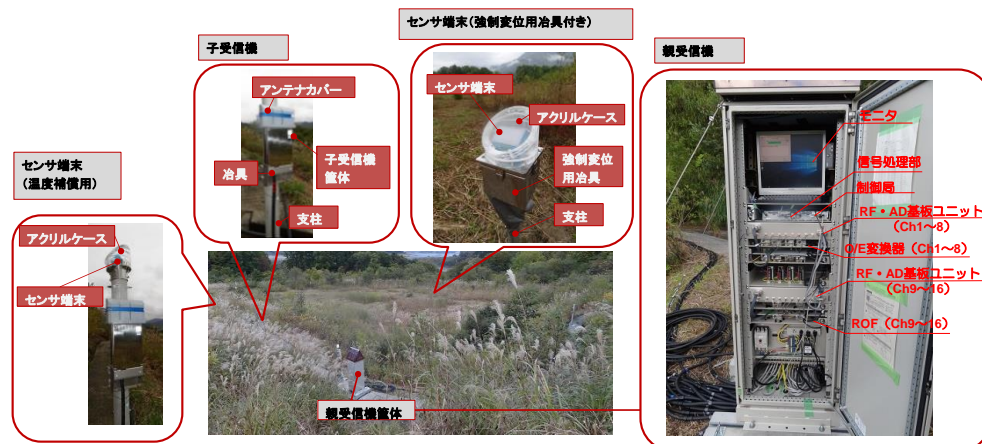


図3 実証実験の様子

Fig 3. View of the experiment.

〈3・2〉 実験結果

強制変位治具を設けたセンサ端末のうちの1台を図4のX方向に10mm変位させて実験を行った。実験条件を表1に示す。センサ端末の送信出力は20mWであり、変位計測用電波の送信周波数は922.0MHz、センサーネットワーク構築のための通信・制御の周波数は927.5MHzとした。6分間に1回の頻度で変位計測及びセンサ端末の温度・充電電圧を収集した。変位計算処理は、1時間分(10サンプル)の位相データを移動平均した後にいった。

センサ端末#10をX方向に10mm強制変位させて計測した結果を図5に示す。計測開始2時間後に強制変位を行っており、センサ端末#10は、強制変位に追従でき、誤差も1mm程度であった。2~3時間後に緩やかに変位しているのは、1時間分の移動平均の影響である。

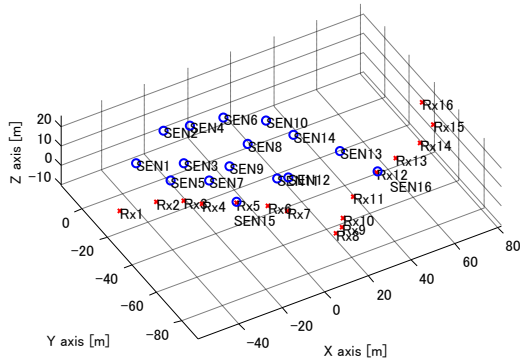


図4 センサ端末と子受信機の配置

Fig 4. Location of sensor devices and sub-receivers.

表1 実験条件

Table 1. Experimental condition.

センサ端末送信出力	20mW
センサ端末送信周波数	922.0MHz(変位計測用) 927.5MHz(通信・制御用)
計測周期	6分
データ平均	1時間分(10サンプル)の 位相データを移動平均

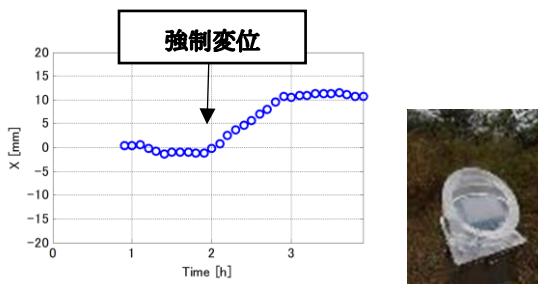


図5 強制変位計測結果(センサ端末#10)

Fig 5. Results of the forced displacement experiment.

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実証実験結果を示した。この実験において、本技術により法面の管理に必要なミリメートルオーダーの計測可能であることを確認した。

謝辞

本研究の一部は、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: New Energy and Industrial Technology Development Organization)の委託研究業務の結果、得られたものである。また、実証実験にご協力頂いた東日本高速道路(株)に感謝する。

文 献

- (1) 国土交通省:「平成28年に発生した土砂災害(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」, pp.185, (2012)
- (4) 例えば、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, pp.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)
- (7) 大島 正資, ほか:「電波位相差を用いた法面変位センシング技術」, 三菱電機技報, Vol.92, No.5 pp.8-11 (2018)