GPS 無線センサおよび地盤変位モニタリングシステムの開発

澤田 茉伊[*1]・志波 由紀夫[*2]・佐伯 昌之[*3]

Keywords : ground displacement, GPS, wireless sensor network, monitoring
地盤変位，GPS，無線センサネットワーク，モニタリング

1. はじめに

近年，建設分野において ICT 技術の導入により生産性・安全性・コスト性の向上を図る試みが盛んに行われている。その中で，著者らは ICT 技術のひとつである無線センサネットワークに着目した。

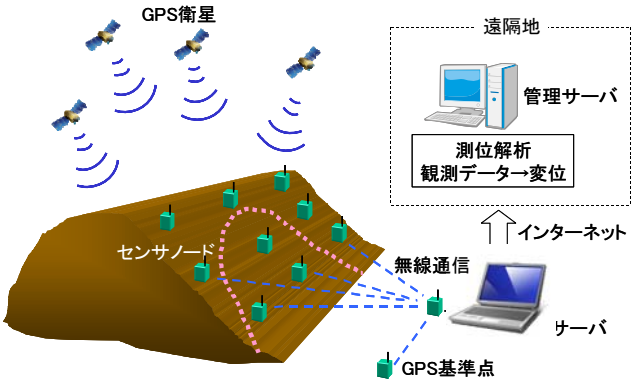
無線センサは，センサおよび無線モジュールを持ち，これらをマイコンで制御する自律的なセンサである。バッテリで駆動し，互いに無線通信網で結ばれているため，これを利用すれば電源供給およびデータ通信のためのケーブルを曳き回すことなく多点計測が容易にできるようになる。農業・環境・工場管理・防災など多方面での活用が想定され，すでに実用化されているものもある。

建設分野においては，計測分野への利用を中心に研究開発が進められているものの，本格的な実用までには未だ時間を要する状態である。しかし，無線センサネットワークを取り入れ，ケーブルのいらない現場計測システムをつくることができれば，それによって生み出されるメリットは非常に大きい。例えば以下に示すようなものである。

① ケーブル関連の作業および費用がいらない
② 重機の走行をはじめ工事作業への影響が小さい
③ 測点設定の自由度が高まる
④ 短期間の計測に便利
⑤ １測点の落雷等のトラブルが他点へ波及しない

本報では，このような無線センサネットワークのメリットを生かした現場計測システムのひとつとして開発した，GPS 無線センサならびにこれを用いた地盤変位モニタリングシステムについて紹介する。

＊１ 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室
＊２ 技術センター土木技術研究所
＊３ 東京理科大学理工学部土木工学科



図－１ 地盤変位モニタリングシステムの全体イメージ
Fig.1 Configuration image of Ground displacement monitoring system using GPS wireless sensors

2. 地盤変位モニタリングシステム

GPS（Global Positioning System）は，米国が開発した人工衛星による測位システムで，GPS 衛星群からの電波を受信し，そのデータを解析することにより，受信地点の位置を求めることができる。さらにこの位置を時間的に追っていけば，変位の推移を知ることができる。GPS 無線センサは，GPS 受信機とアンテナをセンサ部とした無線センサであり，これにより，地盤変位のワイヤレスなモニタリングが実現する。

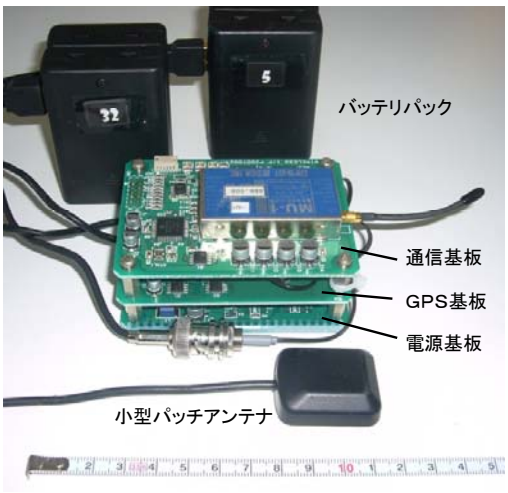
図－１に本モニタリングシステム全体の構成を示す。ここでは，地すべりを起こしている斜面の土塊の動態監視への利用を例にとって説明している。測点に GPS 無線センサ（センサノード）を設置する。センサノードは，現場内に設置されたサーバからの無線指令を受けて，所定の時間に GPS 衛星から GPS データを受信し，それをサーバへ無線で送信する。サーバは，センサノードとの通信を行うための無線モジュールを備えたパソコンで，主な役割は各センサノードへの動作指示お

よび GPS データの回収である。

測位方法は，測点のうち固定点とみなせる点を基準点とした干渉測位である。基準点から見た各測点の相対位置を算出し，その時間的変化が変位量となる。測位解析は，現場内に設置した上記サーバで行う方式とするほか，インターネット等を利用してデータを遠隔地に設置した管理サーバへ転送し，遠隔地で測位解析およびモニタリングする方法も可能である。

著者らは本システムの開発に当たり，以下の目標を掲げた。

① サーバ～センサノード間の無線通信距離を数百ｍまでとれること
② 有線方式の GPS 干渉測位と同等の，水平方向数ｍｍ，上下方向１ｃｍ程度の変位計測精度とすること
③ GPS 無線センサはバッテリ交換１回あたり１ヶ月以上連続作動すること



図－２　GPS 無線センサ

Fig.2 GPS wireless sensor

3.　GPS 無線センサ

前述の開発目標にそって設計・試作した GPS 無線センサを図－２に示す。これは無線通信基板, GPS 基板および電源基板の３つの基板で構成している。

無線通信基板には，サーバとの無線通信を行うための無線通信モジュールを搭載している。無線通信モジュールには，低消費電力で通信距離が 600m程度と比較的長い特定小電力無線（1252MHz 帯）を用いている。ごく最近になって，通信距離，速度，消費電力のより優れた製品も開発されているようであるが，開発着手時にはこれが最適であった。

センサ部に当たる GPS 基板には，GPS 受信機が搭載され，ここに GPS アンテナが接続される。製造コストを抑えるため, GPS 受信機には１周波受信用のものを採用し，またアンテナはカーナビ等に使用される安価な小型パッチアンテナとした。

電源基板はバッテリからの電源を GPS 基板，無線通信基板で使う所定の電圧に調整する回路である。電源は単三型電池５本を直列につないだものを１パックとしたバッテリから供給する。電池には，自然放電が少なく，低温環境での性能低下が少ない，充電式ニッケル水素電池を用いることにした。１パックあたりの電力量は 12Wh で，２パックまで同時に接続できる仕様とした。

4.　基礎的な性能・動作の検証

4.1　検証項目

開発した GPS 無線センサが所定の動作をし，目標性能に達しているかの確認のため，また，実際の使用に際しての事前検討として，以下の項目について検証および検討を行った。

① 無線通信性
② 変位計測精度
③ 消費電力
④ GPS アンテナの設置方法
⑤ 低温環境下での動作性

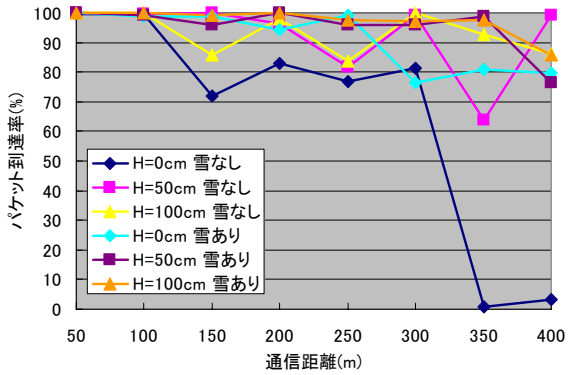
4.2　無線通信性

4.2.1　通信可能距離

実際にどの程度の距離まで無線通信が可能かを確認するため，見通しのよい晴天時の河川敷で通信実験を行った。通信実験は，２台のセンサノードの一方から GPS データを模擬したデータパケットを送信し，それを他方が正確に受信できた割合（パケット到達率）を通信距離を変えて調べたものである。その結果，図－３に示すように送信側のセンサノードを高く設置するほど良好な通信性を示し，設置高１ｍとした場合は通信距離 400mにおいても欠損率は２割程度であった[1)，2)]。データパケットの欠損率と変位計測精度との関係については後述する。

また，積雪や吹雪といった通常時と異なる電波環境下で通信性が低下することを懸念し，別途積雪地において 30ｃｍ程度積雪した農作地で同様の実験を実施した。その結果を図―３に併記したが，前述の河川敷での結果よりもむしろ高い通信性を示す結果となった[3)]。その理由としては雪面での電波の反射によるものと推測できる。なお，センサノード本体が雪に埋まった場

合の無線通信性に関して，約 75ｃｍの積雪下に埋められた状態で調べたところ，60mの距離でデータパケットを 100%受信することができた。



図－３　無線通信実験の結果

Fig.3 Communication performance of the radio module

4.2.2　マルチホップ通信

前述の無線通信実験により，見通し 400m程度まで通信可能であることが確認できたが，実現場ではこれを超える通信距離が必要な場合や，サーバからすべての測点との見通しを確保することが難しい場合も想定される。このような場合，サーバとセンサノードの間に中継点を設けるマルチホップ通信方式が有効である。

そこで，この通信アルゴリズムを設計し，実際にセンサノードに実装して動作させたところ，消費電力量が増加することが課題となるが，中継点を介して総延長１ｋｍの通信に成功した。

4.3　変位計測精度

4.3.1　精度向上のための工夫

変位計測精度は GPS 観測時間を長くすれば向上させることができるが，その分早くバッテリを消耗してしまう。つまり，変位計測精度とバッテリ寿命はトレードオフの関係にあり，両立を図るには，消費電力を抑制する一方で，同じ消費電力量で変位計測精度を向上させなくてはならない。そのために観測方法および測位解析方法に関して以下に示す３つの工夫をした。

a. 観測時間の分割

これの意味するところは，長い観測を１回実施するよりも何回かに分けた短い観測を複数回行ったほうが変位計測精度が向上するということである。１日あたりに GPS 観測に使用できるトータルの時間は，要求されるバッテリ交換頻度からおのずと決まる。例えばこれを 16 分間とすれば，16 分間の観測を１回行うよりも，４分間の短い観測を時間を空けて４回行ったほうが変位計測精度が向上する。これは，分割したほうが４回分の長さの観測を１回行う場合よりも，様々な衛星配置での GPS データを使用して測位解析できるからである。

b. 適切な観測時間の選定

分割した観測は，上空に GPS 衛星が多数現れ，かつそれらが上空に均整がとれて配置されている時間帯に行うのが効率的である。このような観測に適した時間帯は，衛星軌道をもとに算出することができるため，事前に効率的な観測スケジュールを組むことができる。

c. ノイズの除去

GPS データの観測には，衛星からの電波がアンテナ周辺の地物で反射することによって生じるマルチパスノイズが含まれており，これが計測精度低下の原因となる。しかし，このノイズは同一衛星配置となるときに再現される性質を持つため，計測初日の観測データを分析してその中に含まれるノイズを推定し，この推定値を以降の観測データから差し引けば，ノイズを除去したデータが得られる。

これらの方法を用いた場合の効果については，4.3.2 に示す。

4.3.2　変位計測精度の検証

a. 静止時における計測精度（測位結果のばらつき）

実際に変位計測精度を把握し，また前述の工夫がどの程度精度の向上に効果があるのか評価するため，実験を行った。GPS 測位では，観測する GPS 衛星の配置や大気および周囲のノイズ環境などによって，測点が静止状態であっても測位結果にばらつきが生じる。そして，このばらつきが小さいほど精度良く測位できていると考える。実験は，周囲に GPS 衛星からの電波を遮蔽するものがないビルの屋上で行った。測点および基準点となるセンサノードの GPS アンテナを屋上スラブ面もしくは，スラブ面に置いたモルタル板の上に固定して，毎秒計測したところ，変位ゼロという正解に対するばらつき（標準偏差の２倍値：２σ）は水平方向で数ｍｍ，上下方向で１ｃｍ強となった[4)，5)，6)]。

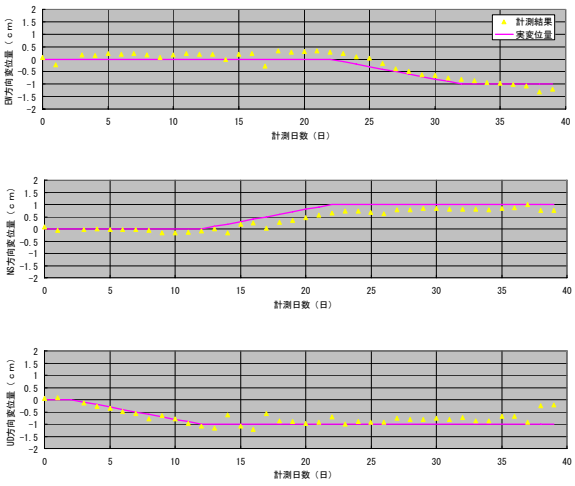
次に，実際の使用において，地面からある程度の高さに GPS アンテナを設置することを想定し，測点側の GPS アンテナを棒の先端に取り付けて，スラブ面から 50ｃｍ程度の高さに持ち上げ，同様の実験を行った。その結果，マルチパスノイズの影響を大きく受け，ばらつきは水平・上下方向ともに，上述の場合よりも悪化した。そこで，GPS アンテナの設置方法が異なるこれらの観測データから上述のｃの方法によりノイズを除去したところ，いずれの場合もばらつきは水平方向で５

ｍｍ程度，上下方向で１ｃｍ程度に改善することができた[4]。

さらに，これらの観測データを用いて，観測時間の分割を行った場合の効果を調べたところ，４分間の長さの１回のデータを２分間の長さの２回のデータに分割することにより，計測結果のばらつきが大きく改善されることが確認できた[4)，5)]。またノイズ除去処理と併用することでさらに改善率が向上し，ばらつき量が半分程度になる場合もあった。

b. 準静的な変位の検出と計測精度

準静的な変位を計測する場合の計測精度を検証するため，測点の GPS アンテナをμｍオーダーの三次元変位制御が可能な移動ステージ上に取り付け，1 日あたり１ｍｍ移動させて，10 日間で最終１ｃｍの変位を与えた。変位を与える方向は，上下・南北・東西の順に 10 日ごとに変えた。なお，ここではマルチパスノイズの影響を低減するため，GPS アンテナ下に 4.5 でその詳細を述べるアンテナ設置板を設けた。観測は毎時行い，１日分の観測データをすべて使用して測位解析し，各日の変位量を求めたところ，図―４に示すように，いずれの方向についても，各日ごとに与えられた変位量を数ｍｍの誤差内で検出できた。また，１日の観測データのうち数回分だけを選んで測位解析したところ，観測に適した時間と考えられる３回の観測データを使用した場合は，１日に取得したすべての観測データを使用した場合とほぼ同等の変位計測精度が得られた。



図－４　準静的な変位の検出

Fig.4 Detection of quasi-static displacement

4.3.3　データ欠損率と精度の関係

観測データの欠損が増加すると変位計測精度は低下する。これを防ぐため，センサノードから観測データを回収する際，１パケットずつ欠損がないか確認し，欠損があれば，それをセンサノードに再送させるようにしている。しかし，実際の使用においては，観測データを 100%回収することが困難な場合も想定され，センサノードの消費電力を抑制する上でも再送作業を繰返すことは必ずしも得策ではない。そこで，データ欠損率がどの程度までであれば変位計測精度に影響を与えず，許容範囲と見なせるか調べた[1)，2)]。その結果，欠損率が大きくなるにつれ，精度は低下する傾向はあるものの，欠損による精度低下はそれほど顕著には表れず，データ欠損がないときの変位計測精度に対して，欠損率が２割の場合に精度低下率は３％程度，欠損率が５割の場合でも 12%程度であった。したがって，先に述べた無線通信実験で通信距離 400ｍにおいて２割程度のデータが欠損したが，これを十分通信可能な距離と見なしてよいと言える。

4.3.4　GPS アンテナ上の積雪の影響

GPS アンテナ上に雪が積もった場合，水は電波を透過させない性質を持つため，変位計測精度が低下する恐れがある。そこで，GPS アンテナ上に雪をかぶせた場合の変位計測精度を検証した。その結果，20ｃｍ程度積雪すると，変位計測精度の低下が顕著に見られたが，数ｃｍ程度であれば，精度は積雪がない場合とほとんど変わらず，ほとんど影響がないことがわかった。

4.4　消費電力

4.4.1　消費電力を抑制する工夫

a. センサノードのスリープ

センサノードの消費電力は GPS 観測時が最も大きいが，トータルの消費電力量を抑制するには，それ以外の大半の時間の消費電力をいかに抑えるかが鍵になる。そこで，GPS 観測の直前までは電力をほとんど消費しない状態（スリープ）で待機させる。また，センサノード自身が正確にスリープ時間を管理できるようにするため，サーバから間欠的に次回の観測時間に関する情報を発信し，これを定期的に受信する（時刻チェック）こととした。

b. 送信データ量の削減

GPS 観測時に次いで消費電力が大きいのは GPS データ送信時であり，送信時間の削減はトータルの消費電力を抑制する上で重要となる。そこで，容量の大きい GPS データのうち，測位解析を行うのに最低限必要なデータのみを選定することで，約 1/9 まで送信容量を圧縮している[7)]。

4.4.2　消費電力の実測

以上の工夫をした場合のセンサノードの各動作時の

消費電力を実測した。GPS 観測時は 400mW, データ送信時は 220mW, 時刻チェック時は 150mW, スリープ時は 2mW となった。これらの値に基づいて，バッテリがセンサノードを動作させることのできる計算上の日数を見積もり，これを実際に動作した日数と比較した。その結果，バッテリ容量の公称値の８割程度が実際に使用可能な量としたときに，実際の動作日数を説明できることがわかった。これによれば，バッテリ２個使用時では，観測頻度を１日２回とした場合の動作日数は 153 日間，１日４回とした場合は 96 日間と予測される。

4.5　GPS アンテナの設置方法

先に解析上ノイズを除去する方法とその効果について述べたが，そもそもできる限りノイズを受信させないアンテナの設置方法を考案する必要がある。特に本システムで採用している GPS アンテナは，安価である反面ノイズに弱いため，この欠点を補わなくてはならない。

そこで，アンテナの下にノイズを透過しない板（アンテナ設置板）を設置することにし，その材料・形状を実験により検討した [8)]。その結果，材料はモルタル，アルミおよびステンレスの３種類の中では，モルタル以外の金属が適していることがわかった。さらに金属板の面積および厚さを変えて比較したところ，厚さは変位計測精度にほとんど影響を与えないが，面積については，10ｃｍ角以上とした場合に変位計測精度が向上することがわかった。

図―５　積雪・寒冷地における動作検証実験の様子

Fig.5 Verification experiments in snow-coverd region

4.6　低温環境下での動作性

本システムを構成する機器は，自然環境下で使用するものであるが，特に寒冷地の使用においては動作不良やバッテリ寿命の低下など懸念事項が多い。

そこで，実際に積雪・寒冷地において約４ヶ月間の動作検証実験を行った [3)]。図－５に示す実験場所では，実験期間中に最低気温－11℃を記録したが，センサノードは保温対策をしなくとも正常に動作することができた。また，観測頻度を１日２回とし，バッテリ寿命が 153 日間と予想されたが，実験期間中に一度もバッテリを交換する必要がなく，低温環境がシステムに与える影響は大きくないことが確認できた。

図―６　実証試験場所の全景

Fig.6 Verification experiments in a construction field

5.　実現場における総合的な実証試験

5.1　実証試験の概要

前章で示したように，開発した GPS 無線センサの基礎的な性能・動作に関する各検証項目について，ほぼ満足できる結果を得た。そこで次に，システム全体の実現場への適用の見通しを立てることを目的とし，胆沢ダム原石山材料採取工事現場（岩手県奥州市）において，約４ヶ月間（平成 21 年７月～同年 11 月）にわたり実証試験を行った。ここでは無線通信性，変位計測精度および長期使用性を主な検証項目とした [9)，10)，11)]。

図－６に実証試験場所の全景を示す。各測点および基準点は，別途実施している有線方式の GPS 変位計測システム（以降既存システムとよぶ）によるものの直近に設け，両システムの変位計測結果を比較できるようにした。法面の小段に７つの測点（G－１～G－７）および基準点（K－１）を配置し，これらすべてと良好な無線通信ができる場所にガードマンボックスを利用した観測拠点を設け，内部にサーバを設置した。各測点とサーバとの無線通信距離は，最も近い測点（G－６）で 45m，最も遠い測点（G－７）で 504mとなった。

センサノードの設置方法は，風が強く，冬季に積雪が多い現場環境を考慮して，単管で組んだ高さ２ｍ程度の堅強な三脚に取り付ける方式とした。図－７に設置

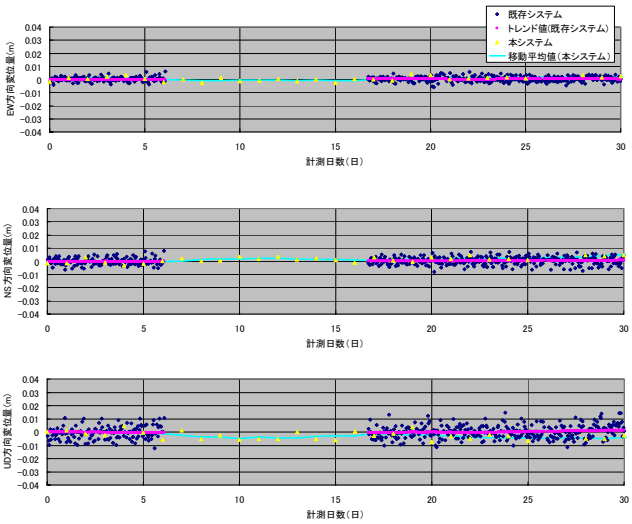
作業の様子，また図－８に設置の詳細を示す。GPS アンテナの設置板は，先に示した検討結果を踏まえ，直径 15ｃｍのステンレス製の円盤とした。なお GPS アンテナを覆うプラスチック製のドームは直射日光や降雨等の外的作用からの防護を目的としたものである。

図―７　センサノードの設置作業（左：無線通信性の確認　右：三脚の組立て）

Fig.7 installation of sensor nodes(L:wireless communication test, R:Tripods for sensor nodes)

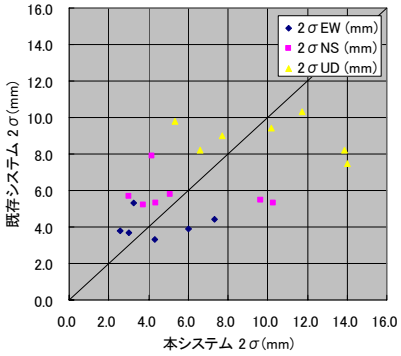
図―８　センサノードの設置の詳細

Fig.8 Detailds of mesure points



図－９　既存システムによる変位計測結果との比較

Fig.9 Accuracy comparison with existing system



図－10　変位計測結果のばらつき

Fig.10 Variation of mesurments

5.2　試験結果

5.2.1　無線通信性

サーバとの無線通信距離が 504mの測点（G－７）については，試験期間中にサーバで受信されるべきデータの約２割が欠損し，本システムの無線通信距離は 500ｍ程度が限界であることがわかった。その他の測点については，試験期間を通してほとんど欠損はなく，図―３に示した無線通信実験の結果と整合するものであり，長期間安定した無線通信性が確保されていたことが確認できた。

5.2.2　変位計測精度

既存システムによる変位計測結果との比較により，本システムの変位計測精度を評価することとした。

図－９に測点 G－３における１ヶ月間の両システムの東西，南北，上下方向の変位計測結果の比較を示す。変位量は，本システムの計測初日における値をゼロとして算出した。既存システムでは１時間に１回の計測結果とともに，一定期間の計測結果を使用してトレンド値と称する値が算出されている。途中 10 日程度の欠測が見られるが，これは電源不良のためである。一方，本システムでは，１日に４回 GPS 観測を行い，これらすべてのデータを使用して，その日の変位量を算出した。図中には日々の変位量とともに５日間の変位量の移動平均値も合わせて示している。

両システムの変位計測精度を２種類の指標で比較する。１つめは既存システムのトレンド値と本システムの移動平均値との差である。７つの測点の計測結果を総合すると，この差は水平方向で最大１ｃｍ程度，上下方向で最大２ｃｍ程度となった。

２つめの指標は，計測結果のばらつきである。既存システムについては，トレンド値まわりのばらつき，本システムについては，移動平均値まわりのばらつき（標準偏差の２倍値：２σ）を求めて比較したところ，

両システムともほぼ同等となった（図―10）。

5.2.3　長期使用性

試験期間中，最高 37℃，最低－5℃の気温を記録したが，この期間を通してほぼ正常にシステムを動作させることができた。

バッテリに関しては，使用総数のうちの約 7 割が 1 ヶ月以上持続した。しかし，持続期間に大きなばらつきがみられた。この原因については，平均 90%近い多湿な現場環境による影響と考えられた。そこで，後日室内実験を行い，湿度がバッテリ持続日数に与える影響が非常に大きいことを確認している。

6.　今後の展開

本システムは，実証試験においてもほぼ開発目標を達成し，プロトタイプを完成したものと考えている。ただし，センサノードの防湿対策など改良すべき点や，より高性能な無線通信モジュールの適用による通信距離の拡大，太陽電池による電源方式など，性能アップを図りたい点もある。今後，こうした点を踏まえながら，さらに完成度を高め，実施適用につなげていきたい。

具体的な適用先としては，地すべり地における移動土塊の動態監視や軟弱地盤を対象とした盛土の沈下・側方流動の監視などが想定される。このような適用先で，ケーブル配線不要という本システムのメリットを生かし，地盤の挙動を軽快に把握するツールのひとつとして使用されることを期待する。

謝辞

本研究は，大成建設，東京理科大学および慶應義塾大学の共同研究のテーマ「地盤・構造物の無線センシング・システムの開発」のひとつとして実施したものである。また過年度の東京大学との共同研究による成果も一部含まれている。関係者各位，特に慶應義塾大学の小国健二准教授に厚く御礼申し上げます。また，現場実証試験にご理解・ご協力いただいた国土交通省胆沢ダム工事現場事務所ならびに工事関係所の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

1) 井上忠治，池田尚秋，佐伯昌之，志波由紀夫，畑明仁，佐藤貢一：GPS 測位解析におけるデータ欠損率と精度の関係について，土木学会応用力学論文集, Vol.11, pp.955-962, 2008.
2) 井上忠治，佐伯昌之，志波由紀夫：データ欠損率が GPS 測位解析精度に及ぼす影響について，土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集，部門Ⅰ-40, pp.79-80, 2008.
3) 澤田茉伊，志波由紀夫，佐伯昌之，井上忠治，篠田怜子：地盤変位計測に用いる GPS 無線センサ・システムの寒冷地での適用性について，土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集，部門Ⅵ-137, pp.273-274, 2009.
4) 佐伯昌之，井上忠治，澤田茉伊，志波由紀夫：GPS 無線センサネットワークを用いた準静的変位モニタリングの精度に関する基礎的検討，土木学会応用力学論文集, Vol.12, pp.975-982, 2009.
5) 佐伯昌之，井上忠治，澤田茉伊，志波由紀夫：1 周波 GPS を用いた変位モニタリングにおける観測時間帯と精度についての基礎的研究，土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集，部門Ⅵ-136, pp.271-272, 2009.
6) 佐伯昌之，井上忠治，畑明仁：1 周波 GPS 受信機を用いた変位計測におけるマルチパスノイズ除去手法の適用と精度検証，土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集，部門Ⅰ-39, pp.77-78, 2008.
7) 高坂朋寛，金子昌平，佐伯昌之：1 周波 GPS 受信機の無線センサネットワークにおける通信データ量削減手法について，土木学会応用力学論文集, Vol.9, pp.709-716, 2006.
8) 澤田茉伊，志波由紀夫，佐伯昌之，井上忠治，篠田怜子：地盤変位計測のための GPS 無線センサネットワークにおけるアンテナ設置方法が測位精度に及ぼす影響，第 44 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.121-122, 2009.
9) 志波由紀夫，澤田茉伊，佐伯昌之：地盤変位モニタリングのための GPS 無線センサの開発，「電力土木」（電力土木技術協会誌）３月号, pp.60-64, 2010.
10) 澤田茉伊，志波由紀夫，佐伯昌之：地盤変位モニタリングを目的とした GPS 無線センサシステムの現場実証試験，土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集，部門Ⅵ-495, pp.989-990, 2010.
11) 澤田茉伊，志波由紀夫，佐伯昌之：地盤変位モニタリングを目的とした GPS 無線センサシステムの開発，第 45 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.81-82, 2010.