

iPicket:無線センサ杭を用いた地滑り計測

岩井 将行^{†1,†2,†6} 今井 大樹^{†4} 西谷 哲^{†5}
小林 正典^{†5} 戸辺 義人^{†4,†6} 瀬崎 薫^{†7,†6}

土砂災害情報を把握可能にするため、道路や生活研付近の山間部の地盤状況の変化を検知し、記録、データ転送する機能を有した無線センサ杭からなるセンシングシステム iPicket を構築した。iPicket は、データ解析を計測と同時にしながら、異常状態をモニタする。本稿では、iPicket の無駄なセンシングを省いた長期間の運用性とセンシングの検知の即時性の両立させた実験結果を報告する。近年地球規模で亜熱帯化する気候変動の影響もあり、日本国内でも、突発的な局地的集中豪雨により、土石の濁流が民家を奪う痛ましい被害が多数報告されている。一般民家の居住地だけでなく安全性を重視し建設されている施設や避難所においても人命が危険にさらされる可能性があることが明るみになった。一方、国土の7割が山間部である日本において広域なエリアをカバーし、地面崩落をいち早く検知のインフラを構築するのはコスト面と技術面で困難である。著者らは、地滑り検知のため公的施設や一般家庭も含めて自ら設置や運用を可能とする高精度かつ低運用コストを兼ね備えた地滑りセンシング杭システム iPicket の研究に着手したことを報告する。

iPicket:Slope Failure Detection System Using Wireless Sensor Nodes

MASAYUKI IWAI,^{†1,†2,†6} DAIKI IMAI,^{†3}
TETSU NISHITANI,^{†5} MASANORI KOBAYASHI,^{†5}
YOSHITO TOBE^{†4,†6} and KAORU SEZAKI^{†7,†6}

Many of typhoons happen frequently, many casualties by a slope failure have been produced around mountainous area. Moreover, it is expected that the local torrential rain would increase continuously because of the climate change to the near-tropical climate that has been caused by the global warming. Under this circumstance, the monitoring of the slope failure disaster is required. There are several existing methods to predict of slope failure. The first traditional method is observation underground water. However, it is required preparing huge gauge in the deep ground. The second is observation landform displacement. This method requires huge size of equipments to deploy on the whole. Hence, it is difficult to cover of the wide area using expensive sensor units. Even worse, to collect sensing data via cables make it difficult to monitor the sliding land in real-time at the time of disaster.

To solve above issuers, we have developed a slope failure disaster forecasting system using a wireless network. The pickets with multiple sensors, which are called iPicket, are driven to the ground. The iPicket has axis acceleration sensor on top. The acceleration sensor can use wireless sensor network. At the First stage of this research, we tried to monitor iPicket behaviors in real field.

1. はじめに

近年、地球温暖化の影響により、亜熱帯化が進む日本でもゲリラ豪雨や台風が頻繁に発達し、山間部などでは土砂災害が発生し、堅牢な建物であるはずの老人ホームなどでも尊い命を奪う災害が多く発生している。2009年の夏に多く報道があったように集中豪雨などの気象現象の異常化により、老人介護施設等を丸ごとのみ込む土石流などの痛ましい災害が頻発している(図1左)。こうした場所で地滑り検知が技術的に不可能である現状は、山間部で生活する人々にとっては急務の問題であり安心して生活を送ることができない。また地震に伴う土砂災害が多いのも日本の特徴である。地震災害時には、事故やインフラ崩壊が同時多発的に発生し、通信が麻痺し、電源供給できない状況が長時間続く。東海地方での東名高速道路(図1右)の破壊でも問題になったように主要道路は地震後に崩落の危険性から寸断され状況の把握や救護が大幅に遅れる可能性がある。大規模な交通網のインフラ麻痺状態や2次災害の危険により、救助や補修工事の足止めになり、災害救助の絶対といわれている72時間以内の救助対応は不可能になる。崩落の危険が地盤を特定し豪雨や地震の災害前後もモニタリングし続けることは安全な復旧においても重要なことである。

地震の計測¹⁾や架橋モニタリング²⁾で無線センサノードが使われ始めている研究がある。

†1 東京大学生産技術研究所

The University of Tokyo, Institute of Industrial Science

†2 MSR IJARC Fellow CORE5/Blue Sky

†3 東京大学新領域創成科学研究科

The University of Tokyo, Graduate School of Frontier Sciences

†4 東京電機大学 未来科学部

Tokyo Denki University, School of Science and Technology for Future Life

†5 株式会社 リプロ

RIPRO Corporation

†6 科学技術振興機構戦略的創造推進事業

JST CREST

†7 東京大学空間情報科学研究センター

Center for Spatial Information Science, The University of Tokyo



図 1 (左) 朝日新聞社 2009 年 7 月 21 日山口県土石流災害 (右):同社 2009 年 8 月 11 日東名道路崩落現場
 Fig. 1 Disaster in Yamaguchi Pref at 21st July 2009 from asahi new paper(left), Slope failure in Tomei exp way at 11st August 2009 from asahi new paper(right)

しかしながら安定的な電力供給を前提とする計測であり、既存研究は、長時間の無電源、情報の正確性と無線等の情報の迅速性を兼ね備えていない欠点がある。提案する手法とは異なり、多くの既存の地盤モニタリングの計器は非常に巨大でありコストが高い欠点がある。本研究の目的は、大規模な通信インフラ崩壊時にも災害情報を検知・把握可能にするため、道路や山間部の地盤状況の変化を低コストで高精度に分析する手法を確立する。さらに無線で素早く危険情報を無線伝播する機能を有したセンサ杭システムを研究開発する。山間部の上流の災害の情報を正確、迅速に伝え得るセンシングネットワークを構築することにより人命を救うことを目標とする。

2. 地面崩落

2.1 崩落の分類

崩落の分類として、図 2 に示すように 3 つのパターンを考慮した。なお本文類は杭の倒れ方から分類したものであり、地質構造学的には周辺の樹木の根による抗力、土質の粘性などから複雑なパターンに分かれる。

通常は、図 2(a) の様に斜面に対して平行に設置する。上流から下流に対して満遍なく、マルチホップ通信を行える範囲で存在すると過程するまた、加速度センサは杭の上部に設置する。

斜面の崩落は土壌内部の圧力と降雨による飽和率、より堅い地盤との柔らかい地盤との地

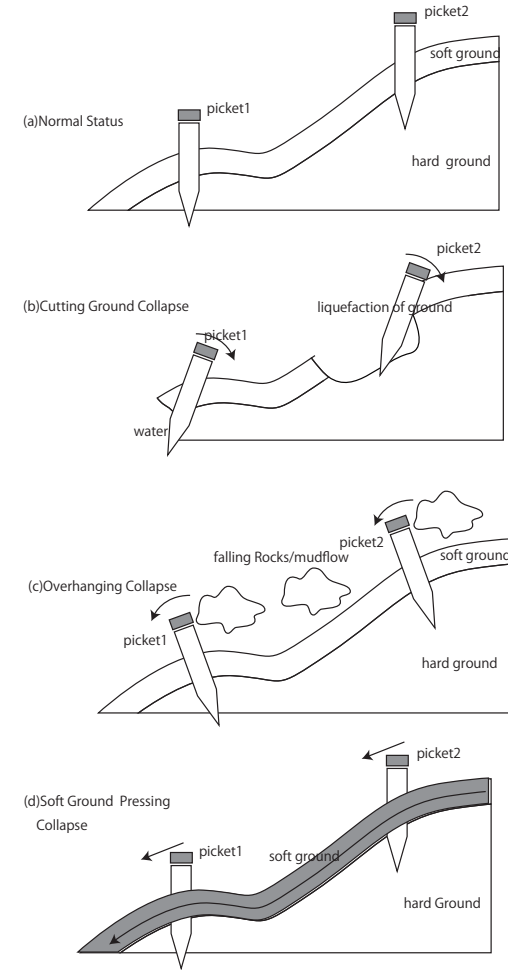


図 2 斜面崩落の分類
 Fig. 2 Classification of Slope Failure

層の厚みおよび斜面の角度より引き起こされる。

2.2 削り型崩落

図 2(b) による崩落は土壌が角度に耐えられず削り取られる崩落の様子を示す。杭がどの方向から落ちていくかは予測不可能であるが崩落の予兆である動きがあり、一度崩落が始まると連動して近傍も崩落を引き起こされる可能性が高い。

2.3 覆い被さり型崩落

図 2(c) では雪崩式に上部から土砂が被さる状態を示す。土砂は上部の杭から順番に削り取り崩落を引き起こす可能性が高い。

2.4 滑り型崩落

図 2(d) では弱い地盤が坂の強さに耐えられず全体として滑っていく様子を示す。当初はゆっくり動き、最終的には急激に滑りだし、下流部では上記の覆い被さり型崩落や削り型崩落につながる可能性が高い。

3. iPicket System

以下の iPicket システムが考慮すべき機能を列挙する。

3.1 長期的に計測を可能とする省電力・太陽蓄電センシング技術

集中豪雨による土砂災害が近年ゲリラ豪雨と言われるように突発的性が高くなり、あらかじめ予測がむずかしい現状がある。図 3 に示す 3 軸加速度センサと 3 軸回転角加速度センサに加え、温度センサ、照度センサなどの情報を組み合わせ、センシングレートやデータ計測間隔、送信間隔を動的に変化させ長時間運用を可能にする機能を提供する。また太陽エネルギーの効率的な活用も行えるように外部からバッテリー給電ケーブルを受け入れ可能とする。

近年 MEMS の発展によりセンサデバイスが小型化され Zigbee 等の無線プロトコルの普及により無線化されたセンサデバイスのコストが下がりにつつある。一般的なセンサノードは省電力を考慮にいれておらず、現状では常時に電源をいれ、計測を連続稼働させなければならず、山間部などで発生時期を予測できない災害に利用することは困難であった。センシング以外に無線送信や受信など消費するバッテリーの量が多い欠点を克服し長期間の斜面崩落計測し、バッテリーを利用し夜間や雨天の中でも常時間稼働可能なセンサノードのアルゴリズムを運用する。

現在、高精細な加速度センサ、温度センサ、無線送受信を備えたセンサノードと杭の開発を行い運用実験開始している。図 6 は地滑り検知杭のプロトタイプの様子である。

本センサノードは省電力モードを兼ね備え、危険が少ない場合は計測間隔を長くする。雨

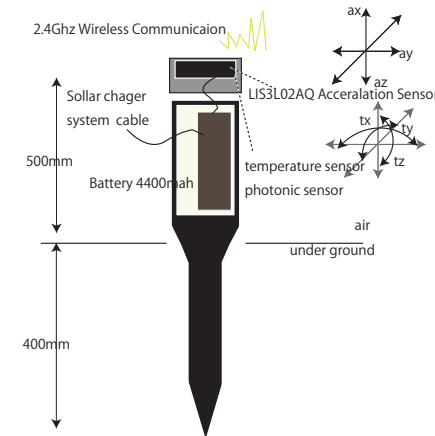


図 3 iPicket の内部デザイン
Fig.3 iPicket internal design

天など危険状態を検知した場合は 2.5 秒または 5 秒間隔の計測及び電波送信間隔で稼働させる。これら動的な省電力モードに加え太陽光発電を利用し 3 ヶ月から 1 年以上連続稼働可能にする。普段ユーザが運用できるように検証を重ねる。また外部のバッテリー持ち、太陽光発電により充電を行い、晴天時の日中は太陽パネルから発電と蓄電を行うことによって長期運用を可能にする必要がある。

3.2 加速度のデータ解析からの地盤危険度の把握技術

センサ杭の様子を以下の図に示す。先端部に 3 軸方向の加速度センサが取り付けられており 3 軸の回転角加速度も計測する。加速度が示す値は土質や水量などの物理現象によって異なるため網羅的にパターンを計測し崩落の予測を高精度で可能にする。

山間部で地滑りの危険があるエリアの人々を守るためにも地盤崩落の前兆を検出する必要がある。そのため課題 B ではセンサノードからの無線で計測されるデータと地盤変化と素早く正確に判別できる崩落ごとのパターン解析(図 2)を行っている。現在、次章でしめす実験結果を示す様に予め崩落前の緩やかな変化を予測する実験を行っている。崩落以前の予測精度を高める実験を繰り返しペイジアンネットワークにより推測値を高める。

3.3 危険を住民に知らせる迅速なデータ転送技術

地滑り検知用を可能する 3 軸の加速度センサの情報を上流の危険地域から下流の地域までマルチホップ通信を用いて広域にセンサ杭間で無線通信を行い遠隔の民家に対して迅速に

リレーさせるシステムが必要である。

地滑り検知杭の情報を正確且つ広域に伝達するためにセンサノード間の無線マルチホップ通信による確実な通信路の確保し通信を行う。またセンサデータを集約するデータベースおよび GUI を開発した。(図 4 参照) このデータベースには、各センサの無線により伝達される送信時間、温度データ、照度データ、バッテリーレベル、RSSI、加速度データ、回転加速度データ、スキップ頻度などが記録される。データベース間を TCP/IP ネットワークにより相互接続することで市町村レベルでの広域のモニタリングを可能とする。大規模の地盤崩落の検知や土砂災害の現場の早期発見と対策が可能になる。センサ用の計測データベースの動作の様子であり、このデータベースシステムを用いて将来的には危険度を伴に近傍への転送する情報量を動的に変化させる。

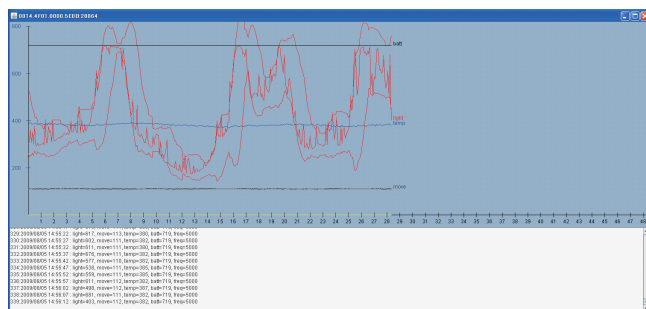


図 4 iPicket System の GUI での分析画面
Fig. 4 iPicket System GUI View

3.4 杭の特性

iPicket は、内部に図 3 に示す、RIPRO 社の 90 角段付杭^{*1}を基礎とし、内部にセンサとバッテリー空間を設ける。バッテリーには 4400mha のモデルを利用した。また外部からのソーラパネルから充電を受け付けるようにした。地面には 400mm を打ち込み地面の動きで倒れ易くしている。2.4Ghz の通信チップにより Zibbee 通信を行う。

加速度センサは杭の上部に設置する。これは加速度、角加速度共に反応をしやすくするだけでなく、光センサが太陽光を捉え易くするためである。光センサと温度センサが連動し外部

*1 <http://www.ripro.co.jp/catalog/parts/pile.html>

の気候をとらえ晴天時にはセンシングレートを下げる。

通常の杭での、夏期の杭の内部の発熱についての予備実験を行ったところ 2009/9/10 14:13 には摂氏 58.4 度を超える内部温度を観測した(図 5 参照) アメダスによる同日の岡山県倉

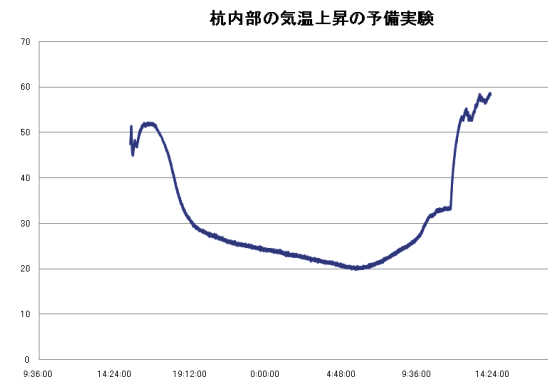


図 5 放熱処理を施していない杭内部の温度変化
Fig. 5 Temperature Rising in normal Picket

敷市での日陰での最高気温は摂氏 28.0 度であり直射日光により杭の内部が急激に激しく熱せられ熱が籠もる現象を観測した。真夏日の直射日光により、内部温度が摂氏 58 度を超える現象では、センサが誤作動を起こす可能性が高くなる。その対策として、直射日光を反射する放熱塗装を施し、放熱と防水を両立させる杭を作成し内部温度を安定化させた。図 6 の放熱処理を施した iPicket の外観を示す。この対策により最高気温が 17 日の摂氏 25.6 度の中でも最大 50 度以下に温度が押えることができた(図 7 参照)

4. iPicket の評価

プロトタイプの評価として以下の 2 章に従い「削り型崩落」「覆い被さり型崩落」「滑り型崩落」の 3 点の実験を行った。いずれも仮想的に引き起こした実験であり正確な自然現象ではないが様々な崩落現場での杭の動きの特性を捉えるために実験を行った。近日中にさらに大規模な施設での自然現象に近い形で崩落実験を行う予定である。

4.1 削り型崩落の実験

図 2 (b) による崩落は土壌が角度に耐えられず削り取られる崩落の実験を行った。図にあ

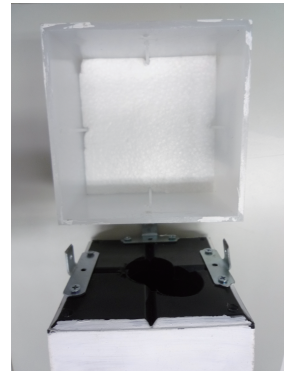


図 6 iPicket の外観
 Fig. 6 iPicket external design

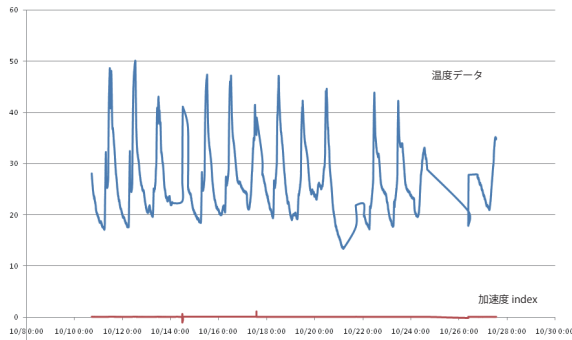


図 7 放熱処理ごの杭内部の温度変化と加速度 index の変化
 Fig. 7 Temperature and acceleration index in iPicket

るように 8 に水により斜面を削り撮り杭が落ちていく様子を示した。

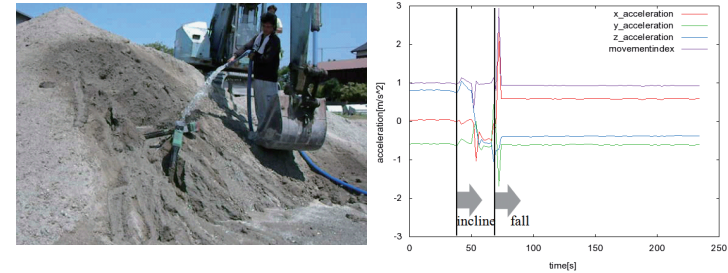


図 8 削り型崩落実験の様子と加速度グラフ
 Fig. 8 Cutting Ground Collapse Experimental Trial

杭がどの方向から落ちていくかは予測不可能であるが、崩落の予兆を捉えた。転送する際には激しいスパイクが現れ、3G 付近まで上昇することがわかる。転倒後は一端落ち着いた加速度をしている。

4.2 覆い被さり型崩落

雪崩式に上部から土砂が被さる図 2(c) の現象で土砂は上部の杭から順番に削り取り崩落を引き起こす可能性が高く図 9 の実験ではシャベルカーにより上層部に土を盛り、弱い土壌が流れることで下流の杭が徐々に傾いていく様子を計測した。上部の土壌に圧される傾向から徐々に加速度がした方向にかかっていることが分かる。ただし土の流れが緩やかであった場合は転倒後の状態の判別がむずかしい今後一定の角度に転倒した場合には転倒判定をだすアルゴリズムが必要がある。

4.3 滑り型崩落

滑り型崩落では複数の杭を準備しどのように崩落していくのかを計測した。(図 10 参照) 図 10 左にあるように計 8 本に iPicket を用い角度可変のトラクタを利用して実験を行った。中央部の杭は垂直を図るための基準杭である。トラクタのその鉄板を硬度の高い地盤、上部の土を粘性の低い地盤として想定した。図 10 右で示すように崩落による杭の転倒の順番は「1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8」の順序で発生した転倒時には第 7 杭と第 2 杭の動きから加速度へ 1G の変化がおき、その以前では少しずつ落ちていく。この時間が 100s ほど差異がある計測された。このことから滑り型崩落は、場合によっては崩落する杭から加速度変化を計測できれば周辺の杭が他のノードや下流の杭に対して危険の警告を出す余裕が

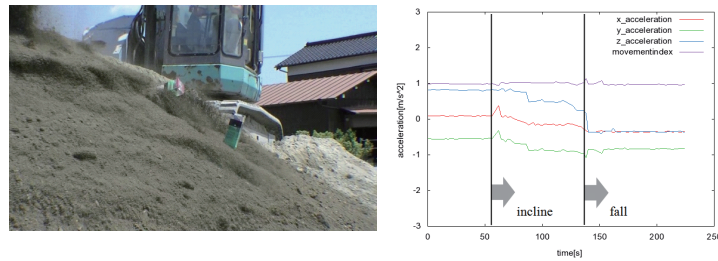


図 9 覆い被さり型崩落実験の様子と加速度グラフ
Fig.9 Overhanging Collapse Experimental Trial

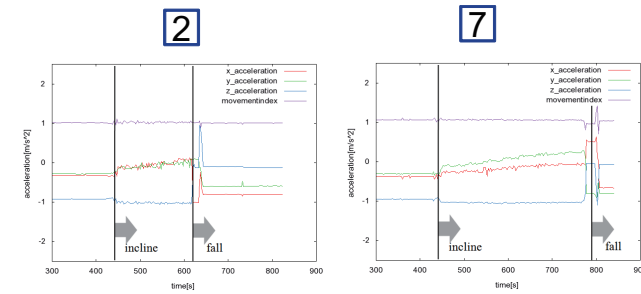


図 11 滑り型崩落実験の加速度グラフ
Fig.11 Acceleration Graph of SoftGround Pressing Experimental Trial

生じる可能性が高いことが分かる。

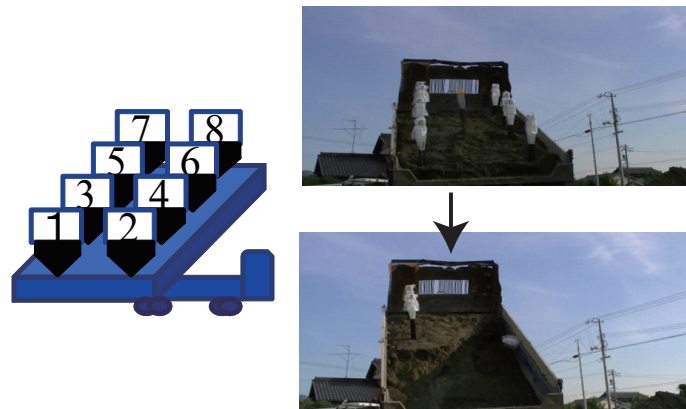


図 10 滑り型崩落実験の様子
Fig.10 Soft Ground Pressing Experimental Trial

11 グラフでは実験結果を示す。

4.4 運用実験でも問題点

10 秒周期のデータ送信レートで 2009/10/11 0:35 から計測開始し 2009/10/17 13:37 の計測を行うことができたこの間バッテリーレベルは 4400mha の外部バッテリーを使い終わり 537.0 から 132.8 に減少した。また 2009/10/21 19:01 から 2009/10/26 9:03 の期間に 152.4 のパッ

テリレベルから開始し 4400mha の外部バッテリーを使い終わり 16.0 のバッテリーレベルまで計測することができた。周期を加速度センサが一定値をうけた場合および、気温と照度が高い場合には晴天として計測を 9 回スキップした場合は 2.5 秒の送信周期の計測でも 2009/10/10 17:27 から 2009/10/14 1:53 まで計測を行うことができた。今後は、ソーラパネルの充電と省電力かをさらに進め雨量が多い時期の数ヶ月の運用とセンサ内部で崩落のパターン認識精度も高めていく必要がある。

5. 関連研究

地盤計測に関しては、歴史も古く関連研究として土壌のゆがみや地下水レベルと地質学的状態を考慮して地盤の状態を計測することで、ある程度予測できることも分かっている³⁾。

しかしながら、いくつかの問題ある。第 1 に深くゆがみ計測器を地中深く埋め込む必要があること、また地下水も深いレベルまでを測定しなければいけないことも分かっている^{4),5)}。

現在危険地域の情報は⁶⁾などで公開されているように大規模にわたっている。ボーリングなどを行う重機設備も考慮すると準備に相当の費用を時間を有し適切な危険地域の戸数に対して計測することは不可能である。また多くの計測器が優先で電力を使って計測しているため常時計測などに適していない。センサネットワークを用いた⁷⁾⁻⁹⁾などの研究も盛んにおこなれており地中のユープのゆがみを計測するセンサを開発している。これは通信に関して無線センサを利用しており我々とアプローチに近いが、より信頼性の高い予測のために Geophone や圧力センサなど大がかりな設備を必要とし一台あたりのメンテナンスコストと電力消費は大きくなっている。1 台あたりのコストが高くなれば大規模エリアを網羅するこ

とができなくなり結果的に計測にたいして不均一な粒度になってしまうことは否めない。特に山間部に多い日本においては電力供給やメンテナンスも考慮して、我々のアプローチは加速度センサと温度センサ、照度センサという比較的単純な装置で台数を多く設置し、荒い粒度の予測ではなく細かい粒度のリアルタイム計測によりより早く下流の民家に危険を伝達することを目的としている。

6. ま と め

突発的な局地的集中豪雨により、土石の濁流が民家を奪う痛ましい被害が耐えない山間部は過疎化の影響もあり、国土の7割をしめるにもかかわらず十分な安心安全のインフラが整っているとは言えない。広域なエリアをカバーし、斜面の崩落をいち早く検知できる安価な斜面崩落の検知システムを構築することは急務である。著者らは、地滑り検知のため公的施設や一般家庭も含めて自ら設置や運用を可能とする高精度かつ低運用コストを兼ね備えた地滑りセンシング杭システム iPicket の研究に着手し、現場での実験により杭の崩落時の加速度特性と長期運用でも問題点を明らかにした。今後はこれらに結果を基に大規模且つ、信頼性の高い計測システムとして研究を進めていく。

謝辞 本研究は、科研特定領域「情報爆発時代に向けた新しいIT基盤技術の研究」[A02-25]都市型災害時の人間自身による動的なセンシングプラットフォーム技術の研究の一部支援を受け手います。本研究のセンサ部分の基盤ソフトウェアの開発は MSR IJARC Fellow CORE5/Blue Sky の支援をうけています。

(平成 21 年 11 月 30 日受付)

(平成 21 年 12 月 21 日採録)

参 考 文 献

- 1) M.Suzuki, S.Saruwatari, N. K. M.M. and Morikawa, H.: Poster abstract:A Quantitative Error Analysis of Synchronized Sampling on Wireless Sensor Networks for Earthquake Monitoring, *The 6th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2008) Poster*. (2008).
- 2) Sunaryo Sumitro, M. T. and Kato, Y.: MONITORING BASED MAINTENANCE FOR LONG SPAN BRIDGES, *First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management* (2002).
- 3) Matsukura, Y.: Mass Movements in Rock and Soil Masses Introduction to Process Geomorphology (2008).
- 4) Abe, T. and Tano, H.: Study on monitoring of landslide behavior using portable measurement systems.
- 5) Yamazaki, T.: Key points in field work for landslide engineers No.11 -Plan of emergency landslide investigations and mitigation measures-.
- 6) 山口県庁：山口県土砂災害危険箇所マップ。
- 7) PrakshepMehta, DeepthiChander, M. S. K. T. S. N.M. and U.B.Desai: Distributed Detection for Landslide Prediction using Wireless Sensor Network, *First International Global Information Infrastructure Symposium(GIIS)*, p.195.
- 8) Terzis, A.Anandarajah, A. M. K. W. I.-J.: Slip surface localization in wireless sensor networks for landslide prediction, *The Fifth International Conference on Information Processing in Sensor Networks, IPSN 2006.*, p.109.
- 9) Ramesh, M. V.: Real-time Wireless Sensor Network for Landslide Detection, *IEEE, The Third International Conference on Sensor Technologies and Applications, SENSORCOMM 2009.*, p.18.