

## 災害検知を目的としたセンサーネットワーク端末に関する一検討

黒柳 大治<sup>†</sup> アサノデービッド<sup>††</sup> 鈴木 彦文<sup>†††</sup> 不破 泰<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> 信州大学大学院工学系研究科 〒380-8553 長野市若里 4-17-1

<sup>††</sup> 信州大学工学部情報工学科 〒380-8553 長野市若里 4-17-1

<sup>†††</sup> 信州大学総合情報センター 〒380-8553 長野市若里 4-17-1

あらまし 豪雨時に発生する土砂災害は人命にも関わり甚大な被害を及ぼす。それら災害について広範囲に渡って対策を行うためには、導入しやすい防災システムが必要である。そこでこれまで我々が開発してきた高耐障害性を持つ Ad-Hoc ネットワークを利用して災害検知用のセンサーネットワークの構築を検討する。このシステムでは電源やネットワークの設備が独立しており、設置や運用を容易にしている。本報告ではシステムの概要と、システムの評価用に試作した端末を示して検討を行う。

キーワード センサーネットワーク, 災害検知

### A Sensor Network Terminal for Disaster Detection

Daichi KUROYANAGI<sup>†</sup>, David K. ASANO<sup>††</sup>, Hikofumi SUZUKI<sup>†††</sup>, and Yasushi FUWA<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Science and Technology, Shinshu University, 4-17-1, Wakasato, Nagano, 380-8553 Japan

<sup>††</sup> Dept. of Information Engineering, Shinshu University, 4-17-1, Wakasato, Nagano, 380-8553 Japan

<sup>†††</sup> Shinshu University Integrated Intelligence Center, 4-17-1, Wakasato, Nagano, 380-8553 Japan

**Abstract** Landslides during heavy rainfall cause a great amount of damage in terms of both property and human life. In order to monitor conditions over a wide area, an easy to install disaster prevention system is necessary. Using a highly fault tolerant ad-hoc network that we have developed, we examine the construction of a sensor network to predict disasters. This system has no external cables for power and network connections, so it is easy to install and maintain. In this report, we describe the system and the prototype terminal used in system evaluations.

**Key words** Sensor Networks, Disaster Detection

#### 1. はじめに

長野県内は、急峻な地形、もろい地質のため、急勾配の河川、広範囲の地すべり地帯を有し、風水害による大きな被害が懸念されることから、災害に強い安全な県土の形成に取り組む必要がある。災害の中でも地すべりや土砂崩れは、人命にも関わり大きな被害をもたらすため、防災設備の導入を積極的に行うべきである。しかし既存の災害予防システムは、電源やネットワークなど監視設備の設置や運用コストがかさむため災害予防システムがカバーしている地域の範囲は限られる。そこで、より広範囲の地域の安全・安心を守るために、監視地域に安価に展開でき、維持管理の容易な監視・通報システムの開発が必要である。

筆者らはこれまで、大規模な災害が発生した場合でも利用し続けることができる、高い耐障害性を持つネットワーク網の開発を行ってきた [1] [2] [3]。これは、電源、ネットワーク等のあ

らゆる有線ケーブルから自立して動作し、たとえネットワークを構成する中継器の一部に障害が発生しても自立的にネットワークを再構築できる機能を有するものである。本研究ではこの技術を用いて自然状況を監視するセンサーネットワークを構築し、危険時に警報を出したり直接的な対応を行うためのシステムの開発を行う。今回は特に降雨時の斜面崩壊の予測を行うシステムについて検討する。

まず高い耐障害性を持つネットワークの技術を、センサーネットワークへ適用するための検証を進める。そのために本稿では、センサーネットワークシステム全体の要求事項を確認し、構成機器について説明する。次に、そのセンサーネットワークシステムでは斜面崩壊の予測のために、こういった予測方法が適するのかを検討し、今後の研究方針をまとめる。

#### 2. センサーネットワークシステムの概要

センサーネットワークシステムの全体について、要求事項と

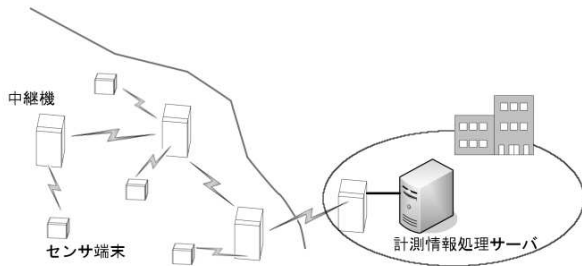


図1 センサーネットワークシステム概要図

ともに説明する。

### 2.1 全体概要

提案するセンサーネットワークシステムの全体概要を図1に示す。センサー端末 (terminal) は環境を計測するセンサーを持ち、計測したデータを中継機に送信する。送信される計測データはセンサーの出力電圧を A/D 変換した値であり、センサーは目的に応じて容易に取り替え可能である。中継機 (transponder) は Ad-Hoc ネットワークを用いたマルチホップなネットワークを形成する。これらの中継機はセンサー端末からのパケットを受信し、ネットワークを介してサーバへ転送する。サーバでは転送された環境情報を分析し、警報を発したり直接的な対応を行うためのサービスを提供する。

### 2.2 要求事項

本センサーネットワークシステムでは1. 章も踏まえ、以下のことが求められる。

- (1) 安価なシステム
- (2) 設置が容易
- (3) 維持管理が容易

(1) については、センサーを広範囲に多数設置することを考えると、センサーの単価が高価であるとシステム全体の費用が莫大なものになってしまう。そのため使用するセンサーは安価なものが望ましい。(2) に関しては、システムの機器設置に際し大掛かりな工事を必要としたり専門家でなければ設置が出来ないとすると、システム導入の敷居が高くなったりコストにも影響が出てしまう。設置を容易にするためには、電源や通信用のケーブルを無くして、センサー端末と中継器を各所に設置するだけでシステムが稼働出来るようにしたい。(3) では、機器は山の斜面や危険地帯のようなアクセスが悪い場所に設置するため、一度設置・設定した後は極力メンテナンスを必要としないことが望ましい。そして機器を電池で稼働させるとなると電池切れの問題があるので、数年間は電池交換無しでも稼働するものを目指す。

## 3. センサーネットワークシステム構成要素

2. 章で提案したセンサーネットワークシステムを構成する要素について、試作したセンサー端末、中継機、サーバ、通信規格について説明する。

### 3.1 試作センサー端末

センサーによって計測されたデータを送信するセンサー端末



図2 評価用センサー端末とセンサー



図3 センサー端末 (内部)

として、評価用に試作したものを図2に示す。センサー端末は電源やネットワークのケーブルを持たず、この筐体単独で1つのノードを構成する。図3で示すように、センサー端末は無線部、センサー回路、それらを制御し仲介する制御回路の各モジュールで構成される。センサーは省電力のために平常時は電源が切断されており、計測の必要があるタイミングで制御回路によって起動される。センサーからの出力は A/D 変換された値が無線部へ受け渡されて電波で送信される。計測・データ送信のタイミングは、現在は10分間隔で定期送信される。制御回路の設定を変更することでこのタイミングは変更できる。

この試作したセンサー端末では、センサー自体の評価やプロトコル実装してのネットワークの評価に用いる。最終的にはセンサー端末の小型化・更なる省電力化の実現を目指している。

### 3.2 中継機

中継機ではセンサー端末からの電波で受信した情報をサーバまでマルチホップで転送する。中継機は図4に示すように、太陽光パネルと2次電池を持ち、電源を外部に依存しないことで耐障害性や可搬性を高めている。

中継機同士の通信にはルーティングプロトコルとして、ディスタンスベクタ型で駆動するプロアクティブ方式を用いている。このプロトコルの上で付近の通信可能な中継機と通信することで Ad-Hoc ネットワークを構成し、サーバまでの経路を自立的に形成する [3]。また



図 4 中継機

### 3.3 計測情報処理サーバ

サーバは収集された計測情報を元に環境状況を分析・危険度を評価して、必要であれば警報を発するなどの対策に繋げる。センサー端末で計測された情報は中継機の転送を通じてサーバまで届けられる。

### 3.4 無線通信

システムを構成するセンサー端末・中継機の無線通信には特定小電力無線(周波数 429MHz, 出力 10mW, 通信速度 1,200bps)を使用している。既存のセンサーネットワークでは通信に Zig-Bee や Wi-Fi を用いるものが多いが、これらは使用周波数が 2.4GHz のような比較的高い周波数で通信をする。高周波数の電波は、通信経路に障害物や水分があった場合には電波が減衰しやすい。草木の水分でも減衰するため、災害検知目的で山の中のような場所で使用する場合、センサーが草木に覆われる事も考えると、高周波はセンサー端末と中継機間の通信には適さないと考える。なお、ここでの通信はセンサー端末同士が通信することは考えず、センサー端末は最寄りの中継機に向けて通信する。また周波数の低い 429MHz での通信は回折性に加え、低消費電力の利点もある。通信速度については、計測データの packets を送信する目的なので 1,200bps は十分であると考えられる。

## 4. 斜面崩壊予測方法

山岳部における斜面土壌の崩壊は、例えば豪雨時のような、地下水や土壌中の水分が大きく変化する状況で発生することが多い。このような雨水による土壌に対する力学的な影響については、せん断強度の低下、間隙水圧の発生、自重の変化が斜面の安定性に大きく関わる [4]。

### 4.1 計測対象

災害が起こる前に警報を出すために斜面崩壊を予測する指標として、(1) 土壌の変位、(2) 地下水の化学成分の変化、(3) 土壌中の含水量を用いる方法がある。

(1),(2) では、斜面崩壊が起こる前兆として土壌に微量な変位

が生じ、それに伴い地下水の化学成分の割合が変化する。この変化を検知することで、斜面の本格的な移動の前に警報を出すことができる。しかし前兆がみられてから崩壊が起きるまでの時間は短く、安全に避難したり対策を施す時間は十分には確保出来ないかもしれない。

(3) の土壌中の含水量は、雨量から計算する方法と、含水量を直接計測する方法がある。雨量データは気象庁のアメダスや雨量センサーからリアルタイムなデータが得られるが、土壌への浸透具合は土質に依存するので、含水量の計算には事前に現地土壌について浸透特性を把握しておく必要がある。土壌中の含水量を直接計測する場合は、現地で測定を行う必要があるが、実際の状況を把握することが出来る。ただし広いエリアをカバーするにはその分の水分量センサーが必要である。

本センサーネットワークシステムの形態においては、含水量を直接計測する方法がより適するため、この方法を用いる事として具体的にセンサーの検討を行う。

### 4.2 含水量計測法

土壌の含水量は、不飽和土のサクシオン、誘電率、電気抵抗を媒介にして求めることが出来る。サクシオンは土壌の水分吸引力であり、テンシオメータを用いて計測される。テンシオメータでの計測には定期的なメンテナンスが必要で、長期間の連続使用が出来ない。誘電率法では、土壌に含まれる物質の中でも水の誘電率が比較的高いことを利用し含水量を計測する。誘電率法は精度良く含水率を計測できるが、センサーが高価である。電気抵抗法は、土壌中の水分量が多いほど電気抵抗が小さくなることを利用して水分量を計測する方法である。ただし電気抵抗は土壌中の塩類などの電解質にも影響を受けるので、電解質濃度の変化に注意する必要がある。

## 5. 研究方針

4. 章で述べたように、我々のセンサーネットワークシステムではセンサー端末で土壌含水量を計測することで、斜面崩壊の予測を目指す。ただし我々の目標とする斜面崩壊予測システムでは、センサーは水分量を正確に測定する必要はなく、水分が増加していることを把握し、それを斜面崩壊の兆候と結びつけることを考えている。以下ではその方法に用いる具体的な土壌計測用センサー、斜面崩壊の予測手法、通信方式、通信プロトコルについての研究の方針を示す。

### 5.1 土壌計測用センサー

土壌中の含水量を計測するセンサーは 4. で示したように、センサーの種類によってそれぞれ特徴がある。目標とするセンサーネットワークでは、計測値の正確性は優先せず 2.2 節で示した条件を満たすセンサーを選択する必要がある。そのため安価かつ長期使用が可能である、電気抵抗法を利用した水分量計測を用いる。なお計測対象の土壌は、電解質濃度を大きく変動する要因はないものとして考えている。

以上を踏まえ、水分量計測に使用するセンサーとして豊橋技術科学大学様のマルチモーダルセンサー NJSW-09A を用いて、斜面崩壊の予測を目指す。センサーは棒状になっており(図 2)、センサーチップは先端部分に載っている(図 5)ので、土壌を計

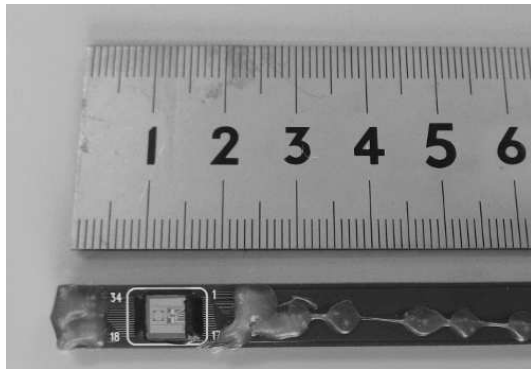


図5 センサーチップ

測する際は土壤中に差し込む形で設置を行う。マルチモーダルセンサーは EC(Electrical conductivity:電気伝導度) センサーと温度センサーを持ち、リアルタイムにそれぞれを同時に計測可能である。EC は電気抵抗の逆数であり、電気の流れやすさを示す。本センサーで土壤中の水分量の変化を簡易的にモニターし、時間的・空間的に変化を分析して斜面崩壊の可能性を検知する。今後、本センサーを用いて斜面崩壊の予測が可能であるかを、試作したセンサー端末を用いて検証を行っていく。

### 5.2 災害の専門知識

斜面崩壊を予測するための土壌の危険度評価の手法については現在も研究が盛んに行われている。斜面崩壊の予知システム開発には地盤に関する専門知識が必要であるため、予知手法の確立は地盤工学の専門家と共同で行っていく。具体的には、土壌水分量から危険度を評価するための評価式、そのための他に必要なデータやその取得方法・頻度である。

### 5.3 通信方式

センサーネットワークを構成する各機器は、電池交換無しで長期間使用可能とするために、消費電力を極力抑える必要がある。例えば電力消費の大きい電波受信動作を適切に制御することで消費電力を抑えることが可能 [5] なので、そのような通信方式の改良にも取り組む。

災害検知用のセンサーネットワークでは、センサー端末と中継機の各ノードは林の中や土の上など、障害物が多い場所で通信すること考えなければならない。よってそういった場所で現在の無線通信の方式が有効であるかどうかの検証を行う必要がある。

### 5.4 通信プロトコル

通信が双方向に対応している場合、サーバ側からセンサー端末に命令を送信して任意のタイミングで環境情報を得るような使い方が考えられる。これが可能であれば、豪雨時に特に危険が予想される範囲のデータを優先的に得ることができ、災害への対応が柔軟に行える。そのため機器間の通信プロトコルに双方向性を持たせる。ただしセンサー端末がサーバからの命令を受けるためには電波受信動作が必要なので、消費電力の問題についても考慮する。

またセンサーネットワークは広範囲にわたる多数のセンサー端末があり、それらからのデータを収集する高い能力を持つ

ネットワークプロトコルが求められる。その上で前述の消費電力の問題も考慮したプロトコルを実装する必要がある。プロトコルの開発については、これまでも Ad-Hoc ネットワークの研究の中で多くの成果を挙げており、その開発技術が適用できる。プロトコルの性能の検証では、計算機上でのシミュレーションを行った後、試作したセンサー端末に実装して評価を行う。

## 6. おわりに

我々はこれまで大規模な災害が発生した場合でも利用し続けることが出来る、高い耐障害性を持つネットワークの開発を行ってきた。この技術を地域の防災に役立てるために、このネットワーク技術を利用して災害を検知するセンサーネットワークを構築について検討を行った。特に災害の中でも甚大な被害を及ぼす土砂災害の予測手法について検討し、そのための評価用のセンサー端末を試作した。

今後は EC センサーでの土壌水分量が可能であるかの検証、斜面崩壊の予知手法の確立を専門家と共同で研究を進めていく。また機器間の通信についても、消費電力を考慮したプロトコルの改良など、センサーネットワークに対しての最適化も図っていく。

## 謝 辞

本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度「自治体全域を網羅する安心・安全な街創りのための高耐障害性アドホックネットワークシステムの開発 (072304002)(H19 H20)」、 「Ad-Hoc ネットワークとセンサネットワークを用いた高耐障害性地域災害通信システムの研究開発 (092304014)(H21 H22)」 および「地域全体の安全・安心を確保する防災・減災および鳥獣センシングを実現するセンサーネットワークシステムの研究開発 (112304003)(H23 ~ H24)」の助成を受けて行われた。

マルチモーダルセンサ NJSW-09A は豊橋科学技術大学様に提供していただきました。

## 文 献

- [1] 不破泰, "高耐障害性アドホックネットワークシステム", 電子情報通信学会誌 Vol.91, No.10, pp862-864(2008)
- [2] 中西一貴, 堀尾伸治, 新村正明, 國宗永佳, 本山栄樹, 不破泰: 無線 Ad-hoc ネットワークを用いた地域見守りシステムの開発と評価; 電子情報通信学会技術研究報告 (通信方式), 108, (279), CS2008-27, pp.13-18, (阿寒) Nov. 2008.
- [3] 不破泰, 堀尾伸治, 中西一貴, 新村正明, 國宗永佳, 本山栄樹: [招待講演] 無線アドホックネットワークを用いた地域見守りシステムについて; 電子情報通信学会技術研究報告 (アドホックネットワーク) AN2008-38, 108, (251), pp.51-58, (那覇市) Oct. 2008.
- [4] 三木博史, 矢田部龍一: "豪雨時に発生する斜面崩壊のメカニズム (その 1)", 土と基礎, Vol.51, No.7, 53 ~ 58, 2003.
- [5] 鮑ビョウ, 野瀬裕昭, 水田一正, 吉川泰史, 國宗永佳, 新村正明, 不破泰: センサーネットワーク端末の小型化と省電力化に関する提案と評価; 信学技報, vol. 109, no. 382, USN2009-63, pp. 75-80, 2010 年 1 月.