

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22710176

研究課題名（和文）

無線センサネットによる表層崩壊予測システムの開発

研究課題名（英文）

Development of shallow landslide monitoring system using wireless sensor network

研究代表者

小泉 圭吾 (KOIZUMI KEIGO)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：10362667

研究成果の概要（和文）：表層地盤の水分環境を推定するために、衛星リモートセンシング、地上リモートセンシングによる実験、解析を行った。その結果、植生指数により、のり面上の湧水箇所の抽出が可能であることが確認された。無線センサネットワークを用いた集中豪雨に対する表層崩壊監視システム開発のための基礎実験を行った。その結果、小型バッテリーで3年間の運用が可能で、フルメッシュネットワークによるのり面観測システムを開発することができた。

研究成果の概要（英文）：To estimate water environment in a surface ground, laboratory experiments by a spectrometer are carried out and satellite data are analyzed by the remote sensing technology. As the results, it is confirmed that wetness points on the slope can be extracted by a vegetation index. Fundamental laboratory experiments and field tests are implemented to develop a shallow landslide monitoring system using wireless sensor network technology. A slope monitoring system by full-mesh networking protocol is developed and it can operate for 3 years using small-sized battery pack.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：地盤工学、リモートセンシング

科研費の分科・細目：社会・安全システム学・自然災害科学

キーワード：土砂災害、リモートセンシング、センサネットワーク、表層崩壊、監視システム

## 1. 研究開始当初の背景

道路沿いのり面で発生する災害としては、表層崩壊、地すべり、落石などがあるが、近年の異常気象を考慮すると、これらに対する監視体制の強化がより一層重要であることがわかる。これに対し、道路管理者は点検結果をのり面台帳などにまとめ、要対策・要監視箇所に優先順位を付けることにより、効率

的に対策が行える体制を築き上げてきた。しかし、いざ対策をするとなると優先順位が最上位のり面は別として、それ以外のり面に対し、多額の予算を投じて対策工を行うことは難しい。従って、最上位以外のり面については定期点検を行い変状の有無を確認する、あるいは県・市道レベルになると定期点検すらままならないというのが現状である。

このように一概にのり面の監視といっても、優先度や予算に応じてその対処方法は大きく異なる。また、近年の局地豪雨による突発的なのり面崩壊は、管理者の想定外の場所で発生しているケースも少なくなく、従来の点検や地形・地質図による素因分析のみでは把握しきれない現状が指摘されている。

## 2. 研究の目的

上述した背景の基、近年の局地豪雨による突発的なのり面崩壊を未然に予測するためには、従来の監視手法の考え方を改善する必要がある。本研究では、これまでの一箇所集中型の計測ではなく、複数ののり面に対し、無線センサネットワークを用いたローコスト、多点型、情報伝達の高速化を実現した面的な斜面監視が必要であると考へた。また、集中豪雨による突破的な崩壊の多くは表層崩壊であり、崩壊と表層地盤の水分環境には密接な関係がある。衛星リモートセンシングにより、表層地盤の水分環境を解析することで潜在的に危険性の高いのり面を絞り込むことができれば、机上調査で表層崩壊に起因すると想定されるのり面を抽出できるのではないかと考へた。そこで、本研究では衛星リモートセンシングを用いたのり面の表層土中水分環境の推定、および無線センサネットワークを用いた豪雨時ののり面表層崩壊予測システムに関する研究を行うこととした。

## 3. 研究の方法

### (1)衛星リモートセンシングによる土壌水分環境の推定

①分光計を用いた地上リモートセンシングにより、植生（草地）に水分ストレスを与えた場合の植生指数（NDVI）と土中の体積含水率およびサクシジョンの関係を把握する。

②分光計を用いた地上リモートセンシングにより、植生（月桂樹）に水分ストレスを与えた場合の各波長の分光反射率の違いを把握する。

③この結果を基に、自然斜面における地形の違いと NDVI の関係を解析し、水分ストレスとの関連性を把握する。

### (2)リモートセンシングによるのり面緑化の植生推移から推察する土壌水分環境

①盛土のり面の植生工の繁茂状態から土壌水分量を推察することを目的として、土壌水分環境と NDVI の比較、植生工ごとの NDVI の比較を行い、NDVI による間接的な土壌水分環境の推定の可能性、またそれに適した植生の条件について検討を行う。

②切土のり面において、初期の植生工の繁茂状況に影響を及ぼすと考へられる湧水などの水分の存在がリモートセンシング解析により識別可能かどうかの検討を行う。次に、

植生工が行われて間もない植生の繁茂状況と 6 年が経過した植生の繁茂状況を比較することで、のり面ごとの表層土壌の水分環境および風化の進行状況を評価する。

### (3)センサノード開発に関する研究

①のり面において運用可能な無線モジュール、計測センサおよび屋外で長期観測が可能なバッテリーに関する検討を行う。

### (4)表層地盤の水分環境の計測に関する基礎実験

①室内実験により現場地盤を再現するための実験方法の検討。

②現場試料の土質特性の把握。

③閾値設定のための実験手法の検討。

### (5)表層崩壊監視システムのフローの検討

## 4. 研究成果

### (1)衛星リモートセンシングによる土壌水分環境の推定

#### ①姫高麗芝による室内実験結果

NDVI と体積含水率の関係を把握するため、姫高麗芝 2 体(それぞれ A、B とする)に水を与えず、体積含水率、サクシジョン、NDVI の変化を 2010 年 11 月 9 日から 2011 年 1 月 7 日の間観察した。体積含水率、サクシジョンの計測は土中に各センサを埋設し 1 時間毎の頻度で行い (サクシジョン計は B にのみ設置)、分光反射率の計測は約 1 週間に 1 度の頻度で行った。

実験を行った結果、図 1 から体積含水率が 11 月 4 日から徐々に減少し、計測開始から 7 週間経過した 12 月 23 日以降では変化が頭打ちになっていることが分かる。一方 pF 値は計測開始から 5 週間経過した 12 月 9 日以降には既に変化が頭打ちの傾向が見える。

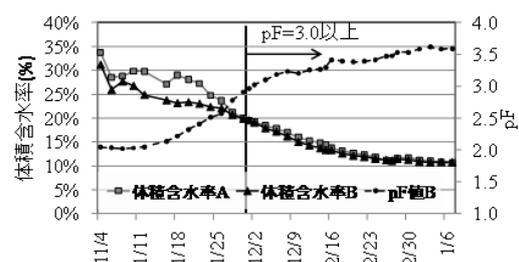


図 1 体積含水率、pF 値の時系列変化

図 2 に A、B それぞれの NDVI と体積含水率の実測値とその近似曲線を示す。A、B の NDVI に差が認められるが、体積含水率が約 17% を下回ると A、B 共に急激に低下し始める傾向が確認された。

体積含水率 17% を下回る領域は図 2 で成長阻害水分点である  $pF=3.0$  を超える領域とほぼ一致するため、成長阻害水分点を越えたた

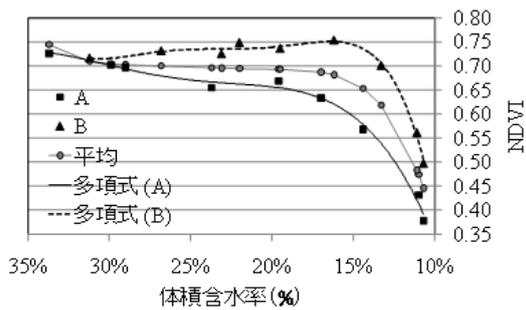


図2 NDVIと体積含水率の関係式

め活性度の変化による NDVI の低下が始まったと考えられる。A、B の近似曲線の平均を NDVI と体積含水率の関係式として次式で表す。

$$y = -931.55x^4 + 902.67x^3 - 324.03x^2 + 51.133x - 2.2911$$

( $x < 29.3\%$   $y < 0.713$ )

ここで  $x$  は体積含水率、 $y$  は NDVI を示している。式(5)は対象とした領域が全て植生で覆われており、体積含水率と NDVI が正の相関関係にある領域(体積含水率=29.3%、NDVI=0.713 以下の領域)で適用可能である。

②室内実験による植生の分光反射特性

自然斜面を対象とする場合、多くは植生で覆われているため地盤の性状を直接衛星データから分析することは困難である。そこで植生の活性度から間接的に土壌水分環境の推定が可能であるか検討を行った。室内実験により、植生に水分ストレスを与え、分光計測器 (ABE SEKKEI, 400nm-1050nm) を用いて、可視域から近赤外域の分光反射率の変化を測定した。湿潤な環境を好む月桂樹を鉢で4樹栽培し、2樹は1週間に1度2Lの水を与え、残りの2樹は水を与えず、それぞれ1ヶ月半経過を観察した。その結果、図3に示すように、計測開始日(12月1日)から1カ月半ほどで水分ストレスを与えた月桂樹の近赤外域での反射率が0.1ほど低くなる傾向が見られた。

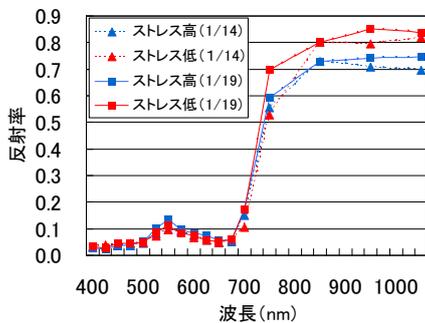


図3 水分ストレスによる月桂樹の分光反射率特性

③集水地形と植生活性度の関係

解析対象として、分布エリアに地形的な

(尾根部、沢部等) 偏りが少なく、広範囲に分布している広葉樹林地を選定し、集水性の高い地形と植生の活性度に関連性がみられるか検討を行った。地形図(1:2500)を用いて、広葉樹林地の尾根筋、沢筋から沢部8561ピクセル、尾根部6926ピクセルを抽出し、図4に示すように、それぞれのNDVIの分布傾向を捉えた。その結果、尾根部に比べ沢部の方が全体的にNDVIが高いという結果が得られた。次に、沢部より崩壊の危険性が高いと推定される箇所を遷急線下および0次谷より3地点抽出した。図5の黒色部分は図4の沢部におけるNDVIが0.78以上(最頻値よりも高い)の地点を表している。また、緑色部分は0次谷を指しており、沢末端部であることから周辺に比べ土壌水分量が多い環境であると考えられる。この3地点の結果をみるとNDVIの高い地点が必ずしも0字谷と一致しているわけではなく、一部の斜面のみNDVIとの相関が見られる結果となった。

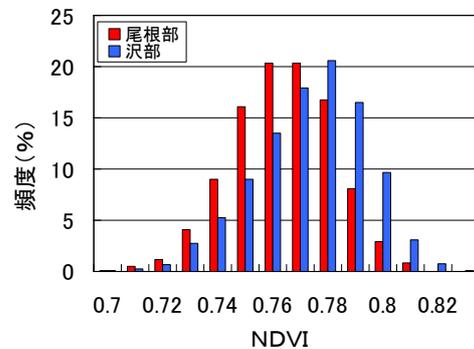


図4 尾根部、沢部のNDVIの分布傾向

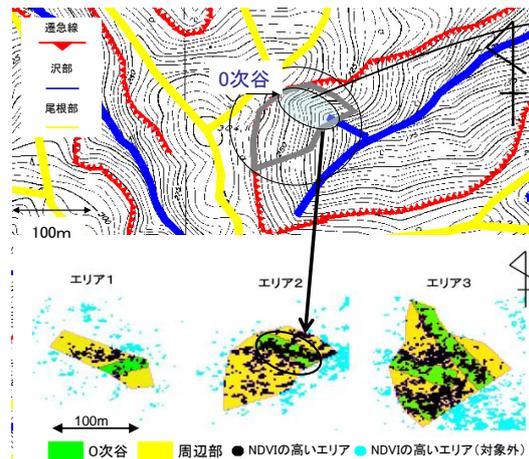


図5 崩壊危険斜面(3地点)とNDVIの関係

(2)リモートセンシングによるり面緑化の植生推移から推察する土壌水分環境

①盛土のり面における植栽工と水分環境の関係

舞鶴若狭自動車道KP92-KP108の路線沿

い盛土のり面12箇所を対象として、西日本高速道路株式会社によって行われた2005年度現地調査の結果から湧水箇所を選定し、各のり面の植生部分の平均NDVIと過去の湧水状況の比較を行った。なお今回対象盛土のり面には種散布工が施工されたのり面と種散布工に加え植栽工が施工されたのり面が存在するため、まず緑化条件の異なるのり面ごとに平均NDVIを比較し、緑化条件の違いを考慮して水分環境との比較を行うべきか判断した。なお土壌条件は盛土のり面の施工に切土のり面から排出された礫、土砂が用いられ、土壌は一度攪拌されるため、各盛土のり面で一定であるとして解析を行った。図6に各のり面の平均NDVIを緑化の条件で色を変え、棒グラフにて示す。解析の結果、図6に示すように植栽工の有無がNDVIの高さに寄与していないことが確認された。このことから供用から1年程度経過した盛土のり面では草本が主に繁茂していると推察される。また図7

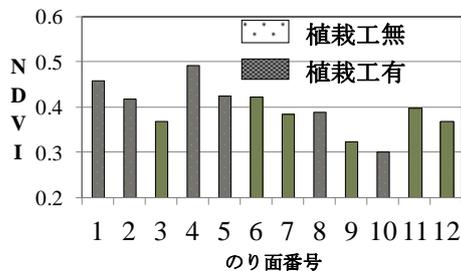


図6 各のり面 NDVI (植栽工有、無)

に各のり面の平均NDVIを土壌水分条件 (湧水の有、無) で色を変え、棒グラフにて示す。湧水が確認されたのり面でNDVIが高いことが確認された。草本が主に繁茂していることを考慮すると、低木に比べ水分状態に影響を受けやすい草本が繁茂していたことが湧水との関係が見られた要因だと考えられる。この結果から盛土のり面において植生から土壌水分環境を推定する場合には、供用から間もない植栽工による低木が繁茂していない状態で、草本の繁茂状態を比較することが有効であると考えられる。

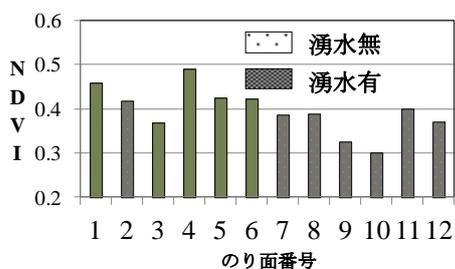


図7 各のり面 NDVI (湧水有、無)

## ②切土のり面における植栽工と土壌水分環境の関係

吹付工の場合、施工後数年は生育環境が整って無い場合は、周辺よりも成長が悪い。切土施工後は風化度は低いから、相対的に成長が良い場所 (NDVI高) は湧水箇所である可能性が高い。一方、基材吹付の場合は、概ね施工直後の成長が良い。ただ初期の状態でも湧水箇所は周りよりも成長度が高いことから、判別が可能。経年の変化を吹付工と比較することで、変化率が高ければ風化が促進されている可能性が高い。特に変化率が高い場合は、風化に加えて湧水の存在する可能性が高い。通常、基材吹付は初期条件で成長の悪いのりに施工することから、土壌硬度が吹付エリアより高い。そのため風化速度も遅いことが推測されるが、それにも関わらず、経年変化でNDVの上昇率が吹付工よりも高ければ、風化の進行に加え、湧水の可能性が高いといえる。対象エリアにおいてはこのような急激な風化作用が促進される可能性は低いものの、地質条件によっては考慮する必要がある。一方、変化率が低ければ湧水が存在したとしても風化作用は進展していないと判断できる。

## (3)センサノード開発

のり面崩壊の検知・予測に加え、豪雨時の地盤の性状を精度よく観測するためには、対象範囲内を面的かつリアルタイムに監視する必要がある。そのため、設置に際しては、時間を要さず、ローコストでシステムを構築できることが望まれる。そこで本研究では、ユビキタス技術の1つであり、ここ数年で通信性能の向上が進んでいる無線センサネットワークを用いた土砂災害監視システムの構築を検討した。センサネットワークには主としてZigBee規格およびメッシュネットワークと呼ばれる通信方式があるが両者の特徴は異なる。一般にセンサネットワークというとZigBeeのことを指し、既に多くのメーカーにより開発キットなどが提供されており、一部は既に製品化されている。図8に示すZigBeeはコーディネータ、ルーターおよびエンドデバイスから構成されており、ルーターは互いにデータを送受信することが可能である。エンドデバイスはルーターと1対n (複数) の関係で通信する方式が採用されている。この通信方式の特長は、エンドデバイスが特定のコーディネータとのみ通信を行うことから消費電流を抑えることができ、エンドデバイスの長期間運用が可能となる。一方、ルーターは通常、AC電源が必要となる。また、エンドデバイスの設置位置はルーターの設置位置に依存する。従って、ルーターの電源が確保できる箇所が制限されていれば、必然的にエンドデバイスの設置位置も制限

され、結果として必要な箇所にエンドデバイスを設置することが出来なくなる。

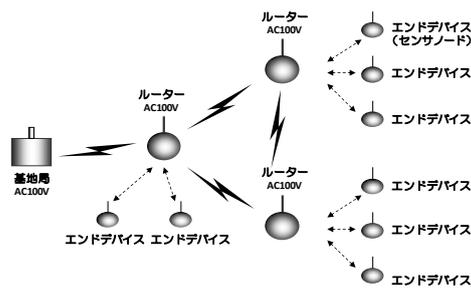


図8 ZigBee

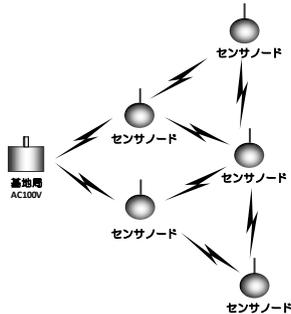


図9 フルメッシュネットワーク

これに対し、図9に示すフルメッシュネットワークは、基地局とセンサノードから構成される。センサノードは互いにデータを送受信することができ、任意のセンサノードと自律的に通信が行えることから、必要な箇所に自由にセンサノードを配置できる。仮にノード間の距離が遠く、通信が出来ない場合でも、その間に新たなセンサノードを設置することでネットワークの構築が可能となる。センサノードは電池で長期運用が可能である。以上のことから、本システムではセンサノードが全て電池で運用でき、無線通信距離に依存しないメッシュネットワークによる通信方式を採用することでシステムの開発を行った。フルメッシュネットワークが構築できる開発用モジュールとして、無線機3種類を選定し、ネットワーク通信試験結果から、のり面で使用する際の通信距離、ネットワークの安定性に優れた無線モジュールを選定した。また、計測用センサとしては、表層地盤の水分環境を観測するために、農業分野での利用に実績のある土壤水分センサ、サクシオンセンサを採用し、のり面の変状を捉えるために半導体型の小型傾斜センサを採用した。センサの選定に当たっては、小型でローコストであることを優先基準とした。小型で無線通信の可能なセンサノードを屋外環境で長期間運用するためには、バッテリーの長寿命化が課題となる。本研究では、10分間計測で3年間の稼働を目指し、ソーラーパネルと2次電池のハイブリッドバッテリー装置を検討したが、機器の大型化、コストおよび冬季の安

定性に課題が残ると判断した。一方、単三型リチウム電池により3カ月の稼働が実験により確認できたことから、このリチウム一次電池を応用して、上述した仕様を満たす小型電池パックの開発に関する基礎設計を行った。また、バッテリーの長寿命化を図るためのセンサネットワークのOn-Off制御に関する検討も行った。本研究で行ったこれら基礎実験を基に開発されたセンサノードを図10に示す。



図10 本研究で行った基礎実験を基に開発されたセンサノード

(4)表層地盤の水分環境の計測に関する基礎実験

- ①従来の保水性試験とは異なり、現地を設置するセンサを用いた保水性試験を提案することで、のり面を模擬した水分特性曲線を室内実験にて収集する手法を開発した。
- ②現場試料から現地の土質特性を把握した。

表1 現地のり面の土質特性

$\rho_s$ ( $g/cm^3$ )	$e$	$D_{10}$ (mm)	$D_{20}$ (mm)	$D_{60}$ (mm)	$U_c$	$U_c'$	$\rho_{max}$ ( $g/cm^3$ )	$w_{qc}$ (%)	$k$ ( $cm/s$ )
2.78	1.51	0.56	3.3	18	32.1	1.08	1.32	32.8	3.66.E-04

③豪雨時の対象地盤内部の体積含水率およびサクシオンの値を基に、地盤が飽和状態に近付く、あるいは水分特性曲線の排水過程をたどり、サクシオンが回復する点を閾値として求めるための基礎実験を行った (図11)。

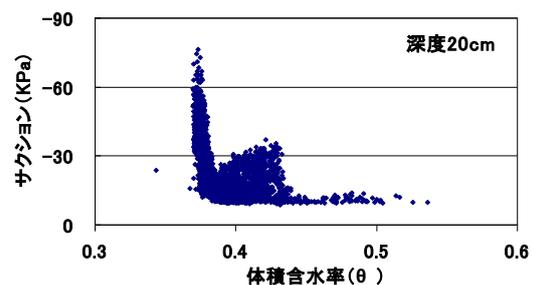


図11 現地のり面、深度20cmにおける水分特性曲線

(5)表層崩壊監視システムのフローの検討

豪雨時の表層地盤の水分環境の変化からのり面の安定性を判断し、変状から崩壊の危険性を判定することができる監視システムを検討した。

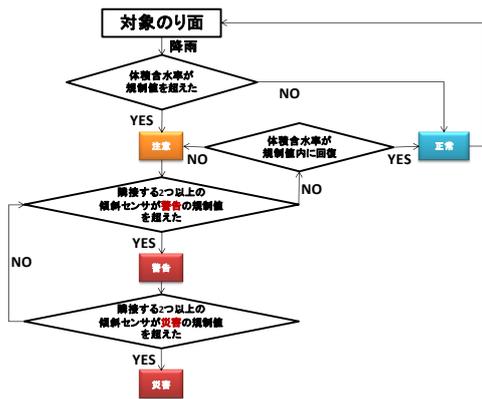


図 11 表層崩壊監視システムのフロー

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- 1) K.Koizumi, K.Hirata, K.Oda, Y.Fujita, S.Kamide and T.Watanabe: Slope Disaster Detection System using Sensor Networks and Its Field Experiment Evaluations, The Society of Instrument and Control Engineering, Vol.5, No.1, pp.41-47,2012. (査読有)
- 2) K.Koizumi,K.Hirata,Oda,Y.Fujita and S.Kamide:Slope:Disaster Monitoring System using Battery-operated Wireless Sensor Network, The 2nd World Landslide Forum, Rome, Italy, WLF-0263, 2011.Oct.3 (査読有)
- 3) 江戸翔, 小泉圭吾, 永田大輔, 小田和広, 小西貴士: 植生指数に着目した衛星リモートセンシングによる土壌水分環境の推定, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2011, pp.41-44,2011.11. (査読有)
- 4) 小泉圭吾, 小田和広, 平田研二, 藤田行茂, 上出定幸: スリープ機能を持った無線センサネットワークの斜面災害監視への適用, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2010, pp.119-126,2010.11. (査読有)
- 5) K.Koizumi, Y.Fujita, S.Kamide, T.Watanabe:Application of ubiquitous network for slope disaster monitoring,2010 International Symposium on Flexible Automation, JPL-254, 2010.7. (査読有)

[学会発表] (計 9 件)

- 1) K.Koizumi, K.Hirata, Y.Fujita and S.kamide: Slope disaster monitoring system using wireless mesh-type network, Proceedings of the International Workshop on ICT in Geo-Engineering, pp.107-115,

2012,May.17, in Ktoyo.

- 2) K.Hirata, M.Yoshitake and K.Koizumi: Probablistic sensor management strategy for slope disaster detections, Proceedings of the International Workshop on ICT in Geo-Engineering, pp.99-106, 2012, May.17.in Kyoto.
- 3) 江戸翔, 小泉圭吾, 小田和広, 上出定幸: 高解像度リモートセンシングによるのり面緑化の植生推移から推察する土壌水分環境, 第 47 回地盤工学研究発表会,2011.7.14, 八戸工業大学
- 4) 平田 研二, 吉武 将浩, 小泉 圭吾:斜面災害監視用センサーネットワークの起動・停止制御方策, 第 40 回制御理論シンポジウム, pp.33-36,2011.9.26, ホテルコスモスクエア国際交流センター (大阪)
- 5) 江戸翔, 小泉圭吾, 永田大輔, 小田和広, 小西貴士: 植生指数に着目した衛星リモートセンシングによる土壌水分環境の推定, 第 46 回地盤工学研究発表会講演集,66,2011.7.5, 神戸国際会議場.
- 6) 平田研二, 吉武 将浩, 小泉 圭吾:斜面災害監視用センサーネットワークの起動・停止制御に関する考察, 第 49 回 離散事象システム研究会, 25/28, 2011.6.3, 長岡技術科学大学.
- 7) 小泉圭吾, 平田研二, 小田和広, 藤田行茂, 上出定幸: 斜面災害監視のための電池式無線センサネットワークの応用, SICE 制御部門大会, 162-1-1, 2011.3, 琉球大学
- 8) 小泉圭吾: 先端計測技術の試用から実用へ-無線センサネットワークを事例に, 高速道路調査会, 2010.8.6.堂島ホテル (大阪)
- 9) 小泉圭吾:無線センサネットワークの実務への適用, 日本機械学会診断・メンテナンス技術に関する研究会,2010.5.21, (奈良国立博物館)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.civil.eng.osaka-u.ac.jp/koizumi/modules/LaboratoryIntroduction/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小泉 圭吾 (KOIZUMI KEIGO)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 10362667