

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 20 日現在

機関番号：32410

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700060

研究課題名(和文)無線センサネットワークにおける自然環境に適応的な通信制御方式の開発

研究課題名(英文)Environmental Information Oriented Transmission Control method in Environmental Wireless Sensor Networks

研究代表者

大島 浩太(OHSHIMA, KOHTA)

埼玉工業大学・工学部・講師

研究者番号：60451986

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、自然環境が無線通信の電波強度や通信効率に与える影響を考慮した、自然環境に適応的な無線通信制御方式の実現を目指したもので、実際の自然環境が無線通信効率にどのように影響を与えるのかに関する調査と、その調査結果を踏まえて実現可能性と実用性の高い無線センサネットワークにおける通信制御方式の開発と可能性の模索を行った。調査は森林部と海上で実施した。森林部における調査から、短距離・長距離無線リンクを併用する無線センサネットワーク方式を開発し、海上における調査から、通信効率が良好でない場合の通信制御方式について検討・設計した。

研究成果の概要(英文)：In environmental sensor network, wireless communication efficiency of each nodes varies depending on various reasons. One of the reasons of this, the radio wave attenuation occurs by any environmental factors such as absorption by water or distances between nodes. In this research, we investigate the radio attenuation behavior in real natural environment, and develop the transmission control method suitable for natural environment by using investigated result. The results of investigation of real field, it was obtained various behaviors of radio wave: radio waves indicates the variation trend similar to seasonal in the forest section, there is the case that it can communicate stable with long distance nodes compared with neighbor nodes, it can communicate in a sea of sea surface close to the land.

研究分野：無線センサネットワーク

キーワード：無線センサネットワーク IoT 環境情報 自然環境モニタリング 通信制御

### 1. 研究開始当初の背景

膨大な超小型ノードが相互に無線通信して環境情報を収集する SmartDust (Kahn:ACM MobiCom 1999)の提唱から端を発した無線センサネットワークは、その応用性の高さから世界の国々が国家規模の重要技術と位置づけている。環境調査、農業応用、構造物管理、災害救援活動、ロボティクス、コンテクストアウェアなど、無線センサネットワークはこれからの社会になくてはならない様々な用途への利用が期待されている。

無線センサネットワークの研究は、バッテリー駆動という制約条件を理由に、電力消費の低減によるネットワーク稼働時間向上を目的とした通信制御方式(プロトコル, トポロジー)が多数提案され、シミュレーション評価により有効性が示されてきた。しかし、シミュレーションは通信効率が一定であるなど、現実に即さない理想的な条件下で実施されているものが多い。実環境で無線通信を運用する場合、環境条件により電波は減衰するため、従来の提案は実環境への適用時の有効性については懐疑的であるとの意見がある。

国内の無線センサネットワークを用いた環境モニタリングに関する主な研究事例(伊藤: IIS-10, 2010)がある。新宿御苑と大学キャンパスでの実証実験を実施しているが、通信は IEEE 802.15.4(Zigbee 等)規格の標準的なトポロジーによる通信方式が採用されており、これまでに提案されている様々な通信制御技術の利用は行われていない。また、無線センサネットワークの実環境への敷設について、センサの耐環境性確保や観測対象地の調整といった、ネットワーク技術以外の作業の重要性和高額な敷設コストの問題について言及している。また、国外における環境モニタリング事例(火山(Allen: OSDI 2006)、氷河(Martinez: SUTC 2006)、野生動物(Dyo: SenSys 2011))においても、対象環境において確実に通信できることが優先され、これまでに提案されてきた通信制御方式は採用されていないのが現状である。環境モニタリング時の通信効率に着目した最近の事例に、工場に設置した無線センサノード間の RSSI と温度変化の関係を 1 年間調査した研究(Boano: IEEE Trans. Industrial Informatics, 2010)や、1 日程度の短期的な温・湿度と RSSI の関係調査の結果から、センサノードの配置手法を提案しているものがある。前者は長期的な実験ではあるが、2.4GHz 帯無線電波の他の水分吸収を考慮しておらず、後者は計測期間が短いという課題がある。

これまでの我々の研究から、天候、時刻、樹木数などの自然環境的な要因で通信効率が不規則に変化することが分かっている。また、本研究提案に先立って実施した実環境における通信環境測定を通じて、温・湿度、気圧などが、通信効率(RSSI,通信帯域など)と通信可能距離に影響を与える可能性が示唆さ

されている。特に、数ヶ月程度の長期的な実験から、通信の安定・不安定な時期と、時期により通信速度が変化することが分かった(図 1)。また、自然環境に無線センサネットワークを敷設する場合、樹木の成長、落葉など設置場所固有の環境変化が生じ、そのため、通信環境の汎用的なモデル化も困難である。

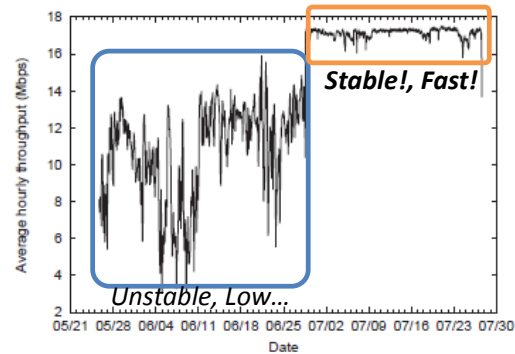


図 1 実験で観測した通信帯域変動(時間平均)

(不安定期間/広帯域時期の存在を観測)

以上の先行研究の成果から、通信環境推定に基づく通信制御により通信の無駄を省くことによる省電力効果が期待でき、かつ環境固有の要因を考慮した通信環境の学習技術が必要であり、通信効率や通信可能距離などに着目した新しい通信制御方式の実現が期待できる可能性に注目した。また、無線センサノードに備わった環境モニタリングのためのセンサデバイスの計測データを活かすことで、高精度な通信環境推定の実現も可能になると考える。我々は、大学の所有する演習林を用いた長期的な通信環境測定実験を進めている。計測データから、短期的な通信環境の変動、時期による通信効率の振る舞いの顕著な違いなど、興味深い現象を確認している(図 1)。通信環境測定は測定期間の長さによって価値があるため、継続的に長期間続けることで、年単位の振る舞いの違いや通信効率変動の要因といった、詳細な通信環境の解析が可能になると考えられる。また、得られる解析結果は、自然環境との親和性の高い、電力消費や通信効率に優れた新しい通信制御への応用が大きく期待できる。

### 2. 研究の目的

本研究は、屋外での敷設・運用を想定した無線センサネットワークを対象に、設置環境が無線通信効率に大きく影響を与え、また様々な振る舞いを見せる点に着目し、自然環境に適応的な通信制御方式の開発を目的とする。具体的には、(1)実際の自然環境が無線通信効率にどのように影響を与えるのかに関する調査、(2)実現可能性の高い自然環境に適応的な無線センサネットワークにおける通信制御方式の開発と可能性の模索を目的とする。

### 3. 研究の方法

研究目的を達成するにあたり、(1)森林部などの樹木が多い場所を対象とした、自然環境の変化が通信に与える影響や特性のより長期的な調査、(2)通信特性を考慮したネットワークモデルの開発、(3)海上などの無線通信効率の良い場所を対象とした、自然環境の変化が通信に与える影響や特性の調査と通信制御方式の検討を行う。以下、各項目に関する詳細な研究方法について述べる。

#### (1) 自然環境の変化が通信に与える影響の長期的調査

無線センサノードを取り巻く通信効率(RSSI, 通信帯域, 通信可能距離)は、天候、時刻、地形時期などの様々な要因で流動的に変化する。我々はこれまでに、大学の所有する演習林に通信効率と通信環境の計測実験を実施してきた。見通しの良い場所に3台の無線センサノードを等間隔に配置し、それぞれに搭載された気象センサから温度、湿度、気圧を、距離別にノード間の通信効率を取得している。本研究項目では、まず、すでに開発した通信環境計測用システムの機能改善を実施し、より長期的に正確なデータを計測できるようにする。そのシステムの長期的運用を通じて、自然環境が無線通信効率に与える影響や特性を調査する。通信環境計測用システムは、耐環境ボックスにLinux OSを搭載したノートパソコン(以下、ノートPC)を格納したものを無線センサノードとする構成を採る。ノートPCに気象センサや無線通信デバイスを接続し、環境情報と無線通信の特性を定期的に記録するシステムである。従来システムの機能改善として、各ノードの時刻同期精度が計測データの信頼性に影響を与えるため、正確な時刻同期が可能な機能を付与する。

#### (2) 通信特性を考慮したネットワークモデルの開発

無線センサノード間の通信時に、その時の通信環境と上記(1)における調査から得られた指標を踏まえて現在の通信効率や通信可能なノードを推定し、ノード間の物理的な距離ではなく、より通信効率の良いノードに対して通信を行うという基本概念による通信制御方式のモデル化を行う。本研究項目では、ネットワークシミュレータを開発し、そのシミュレータを用いて通信特性やネットワークトポロジの解析を行うことで達成する。

#### (3) 海上などの環境が無線通信に与える影響の調査

陸上とは異なる自然環境が無線通信に与える影響を考慮した無線センサネットワーク方式の開発を目的とし、海上という無線通信に適さない環境でどの程度の3G通信が実施できるかについて計測用システムを用いて調査し、通信特性を明らかにする。次に、

その通信特性を考慮した無線センサネットワーク方式の検討を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 自然環境の変化が通信に与える影響の長期的調査における成果

すでに運用中の実環境における通信環境モニタリングシステム(図2)の基礎データの収集の継続をはじめ、①これまで蓄積した計測データと新規に取得したデータの分析、②どのような通信制御が現実的かについて、通信距離の不均一性と中継ホップ数と伝搬データ量を踏まえた通信制御方式の検討、③より正確な基礎データ収集を可能とするための計測用ノード間の時刻同期機能の設計と実装を実施した。

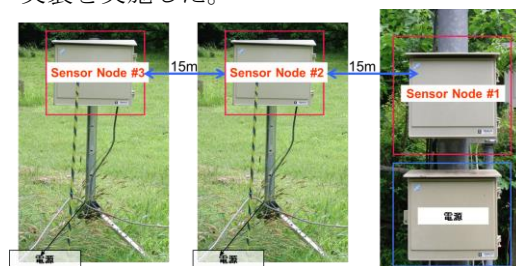


図2 無線センサノードの配置

①について、10か月の長期におよぶ計測結果を図3に示す。図3は、図2におけるノード1と2(15m間隔)の通信速度をグラフ化したものである。黒い部分が全ての計測データをプロットしたもので、黒い部分の中央あたりにある実線は1時間あたりの平均値を示している。計測期間中、ノード3に2回障害が生じた期間は図中で示している。

- 見通しの良い場所で同一距離に設置した場合の電波減衰傾向の類似性
- 設置距離の長さに応じた通信効率の不安定性
- 長期間の通信効率の変動には、安定期間と不安定期間が存在
- 1時間程度の短期間の通信効率変動の平均値は安定
- ノード障害発生時に通信効率が大幅に変化する
- ノード間の距離が長い方が短い場合よりも良い通信効率を示すケースの存在、
- 正常な通信が難しくなる程度まで一時的に電波が減衰する時期の存在
- 季節や時期による無線通信効率の変動

特に、季節や時期による無線通信効率の変動については、この調査の前年に実施した5~6月の調査結果(図1)と、本調査の5~6月で類似の通信効率が不安定になる傾向が見られた。そのため、固定位置に無線センサノードを設置して長期運用する場合、自然環境が無線通信効率に与える影響の考慮の必要性が示唆された。

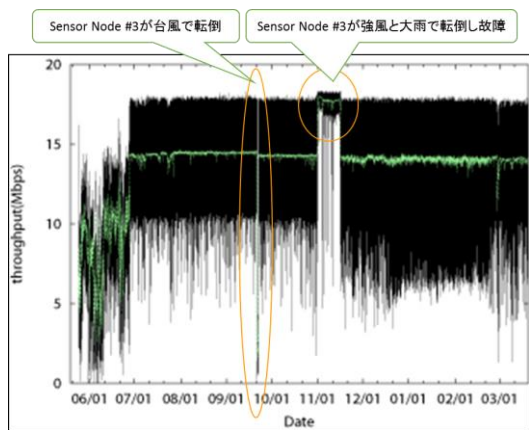


図3 ノード1,2間(15m間隔)の調査結果

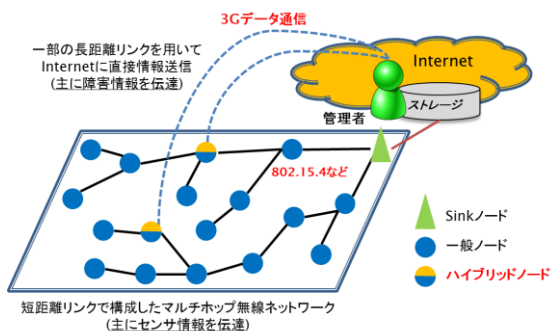


図4 長距離・短距離リンクが混在する無線センサネットワークモデル

(2) 通信特性を考慮したネットワークモデルの開発

2 台の無線センサノード間での通信制御方式ではなく、無線センサネットワーク全体を1つのシステムとして捉え、システム全体の生存時間を延長できる通信方式の検討を実施した。計測データの中継・伝搬を行う無線センサネットワークでは、中継データ量に比例してバッテリー消費量が増加する。その結果、計測データを集約するシンクノード付近のセンサノードのバッテリーが枯渇する funnel effect が生じ、シンクノード周辺のノードがドーナツ状に停止する状況が生じる。シンクノード周辺のノードが停止すると、短距離無線リンクによるメッシュ状のネットワーク上を計測データが中継・伝播されるネットワークトポロジでは、シンクノードまでの経路が消失することになる。そのため、長距離無線リンクも併用する無線センサネットワークモデルを開発(図4)し、シミュレーションにより性能を評価した。開発モデルの特徴は、長距離・短距離無線リンクの両方を使用できるハイブリッドノードを無線センサネットワークの一部にだけ設置し、経路消失時に生存ノードを把握する、ネットワーク運用者に長距離無線リンク経由で情報の伝送を可能とするものである。

図5に、開発した無線センサネットワークシミュレータを用いて、提案モデルによる生存ノードの検出可能範囲を示す。図5は、左上と左下が初期状態を、右上と右下が150日後の状態を示している。各図の中央の三角形

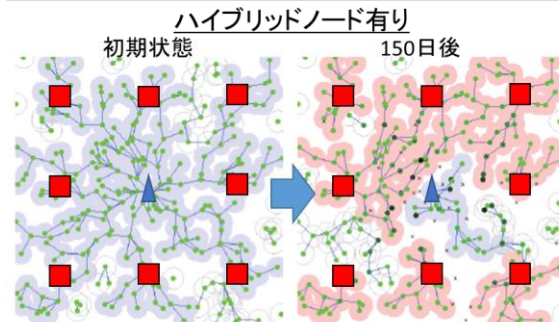
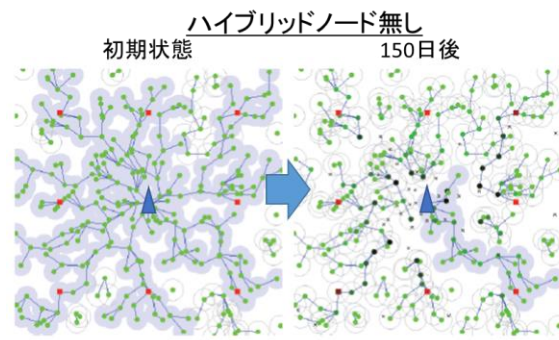


図5 開発ネットワークモデルにおける生存ノードの検出可能範囲の違い

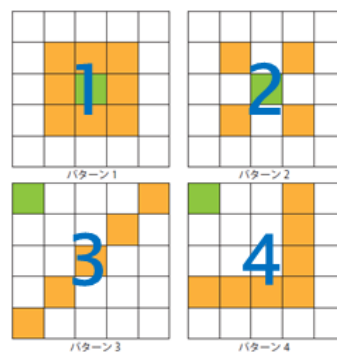


図6 ハイブリッドノードの配置パターン(緑色:シンクノード、橙:ハイブリッドノード、白:一般ノード)

がシンクノードであり、他のノードは全てシンクノードに対してデータの中継・伝播する。四角形がハイブリッドノードの設置位置を示している。色を塗っている円はシンクノードまでの経路が存在しているノードを意味している。ハイブリッドノードが無い場合(図5上段)は時間経過と共にシンクノードまでの短距離無線リンクを用いた経路が失われていく。この時、生存ノードは存在しているが、中継経路上のノードが停止することで経路が失われている状態である。これに対してハイブリッドノードを適用した提案モデル(図5下段)では、短距離無線リンクによる中継経路が失われた状態でも、近隣のハイブリッドノードが備える長距離無線リンク機能を使用することで、生存ノードの検出が行え、またそのノードまでの経路を確保できていることが分かる。

次に、生存ノードの検出性能のシミュレーションを実施した。図6に示す4種類のノード配置パターンで、ハイブリッドノード無しと有りの状態でどの程度の生存ノードを把

握できているかを評価した。評価結果を図 7 に示す。ハイブリッドノード無しの場合は、どの配置パターンにおいても 150 日経過後には約 30%未満の検出率になっている。これは、funnel effect によってシンクノード周辺のノードが早期に停止したことで、シンクノードまでの経路が失われたためである。ハイブリッドノード有りの場合は、シンクノードまでの経路が失われた場合においても、長距離無線リンクを備えたハイブリッドノードを用いてノードの生存状態を把握できるため、生存ノードの検出率が大幅に改善できていることが分かる。また、ハイブリッドノードの配置数や配置場所によって生存ノードの検出性能が異なっていることも分かる。

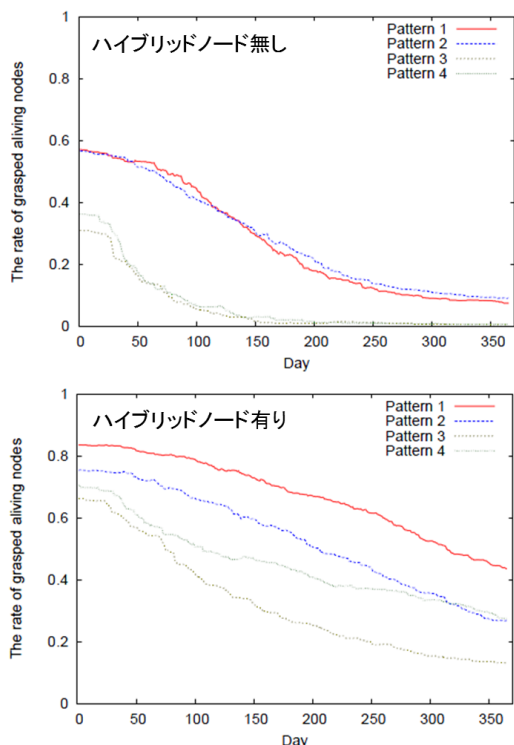


図 7 生存ノード検出性能

### (3) 海上などの環境が無線通信に与える影響の調査

環境が通信効率に与える影響を環境別に評価するという発展的な研究に取り組み、海上での無線電波の検出可能エリアの調査、および海面付近や海中という通信において電波減衰が強く発生する場所における電波強度の変動に関する調査を実施した。調査のためにプロトタイプ無線センサノードを開発した(図 8)。プログラマブルな制御が可能で比較的安価に入手可能なマイクロコントローラ: Arduino の上に Zigbee や 3G 通信モジュールおよびセンサデバイスやストレージを搭載し、それらを、アンテナを外部に接続できるように加工した耐環境ボックスに格納することでプロトタイプシステムのハードウェアを実装した。



図 8 通信環境計測用無線センサノード

開発したノードを用いて海上での 3G 通信の利用可能性とその通信特性の調査を実施した。まず、開発したシステムを東京湾海上に浮かべ、移動した際の結果を図 9 に示す。図で示している地点で海面に浮かべて小型船舶で牽引し、陸に近付いた時点で回収を行っている。図では、青、緑、黄、橙、赤の順で電波強度が悪くなることを意味している。調査の結果、波をかぶる、水面下に沈むといった状況でも、電波圏外にならない程度の電波が検出できていることがわかる。



図 9 東京湾内での調査実験結果

次に、同システムを大型船に設置し、浦賀水道において調査した結果を図 10 に示す。図 9 の調査は水面に触れる位置で実施したのに対し、図 10 の調査は水面から約 10m、陸地から 2~5km の位置の調査結果である。調査の結果、良好な無線電波強度を観測していることが分かった。これらの結果を踏まえると、電波強度は悪いものの、水面付近でも 3G 通信は可能な場合があること、東京湾・浦賀水道海上は 3G 通信を利用できる可能性が十分ある。そのため、Under Water Sensor Network で計測した水中の情報を収集する際に、3G 通

信機能を付与した水面を浮遊するシンクノードを用いることが可能になると考えられる。しかしながら、図9と図10で示したように、場所によって電波強度が変化するため、その場所の電波強度や通信環境に適した通信制御が必要になると考えられる。基盤プロトコルにTCP/IPを用い、端末IDとしてホスト名を利用する従来の通信方法では、IDをIPアドレスに変換するための問い合わせ処理が必要になる、TCPの確認応答(ACK)を受信できるほど長い間セッションを確立しておけるとは限らないといったことが予想されるため、UDPベースかつIPアドレスを直接使用するといった、通信完了までの時間を極小化できる通信制御が必要になってくると考えられる。

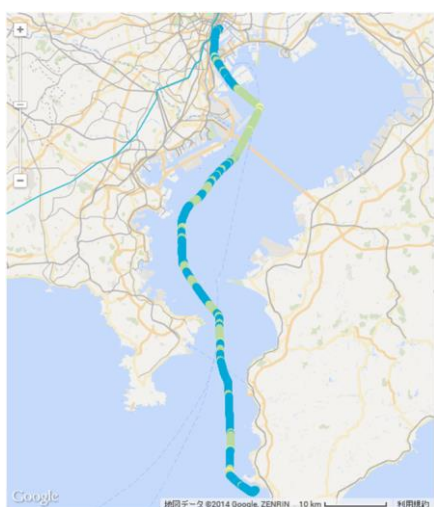


図10 浦賀水道での調査結果

以上のように、設置環境が無線通信効率に与える影響は大きく、またその変化は自然環境の変化に応じて多様に変化する。そのため、無線センサネットワークでは、設置場所の無線通信環境を計測し、またその結果を活用したネットワークを構築することで、自然環境に適応的な通信制御機構を持つネットワークを実現することが可能となる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 大島浩太、古谷雅理、竹本孝弘、庄司るり、東京湾・浦賀水道海上の航路における3G電波強度調査、日本航海学会論文集、査読有、第132巻、2015
- ② 堤智昭、大島浩太、小泉稔、中條拓伯、高精度時刻同期を分散処理制御に活用したタイムアウェア処理方式、情報処理学会論文誌、査読有、vol. 65、no. 3、2015、pp. 879-891

[学会発表] (計 6 件)

- ① 安藤公彦、大島浩太、短距離・長距離リンクを相補的に用いるネットワークにおける効率的なノード配置に関する検討、第3回 NetSci/CCS 研究会 合同ワークショップ、2014. 08. 08、丸駒温泉旅館(北海道)
- ② 堤智昭、大島浩太、中條拓伯、高精度時刻同期を分散処理制御に活用したタイムアウェア処理方式、マルチメディア、分散、協調とモバイルシンポジウム DICOM02014、pp. 1581-1587、2014. 07. 11、月岡温泉 ホテル泉慶(新潟県)
- ③ 大島浩太、古谷雅理、竹本孝弘、庄司るり、東京湾・浦賀水道海上における3G電波強度調査、日本航海学会講演予稿集、Vol. 2(2014)、No. 1、pp. 42-45、2014. 04. 22、東京海洋大学越中島キャンパス(東京)
- ④ 大島浩太、安藤公彦、短距離リンクと長距離リンクを相補的に用いる無線センサネットワーク方式の検討、第2回 NetSci/CCS 研究会 合同ワークショップ、2013. 08. 10、北海道石狩郡新篠津村 しんしのつ温泉 たつぷの湯(北海道)
- ⑤ 大島浩太、中井悠人、堤智昭、寺田松昭、ユーザ間協調と異種無線メディア連携を特徴とするWi-Fi Access Point 発見方式、マルチメディア、分散、協調とモバイルシンポジウム DICOM02013、pp. 415-442、2013. 07. 10、十勝川温泉 ホテル大平原(北海道)
- ⑥ Tomoaki Tsutsumi、Tomoichi Ebata、Minoru Koizumi、Kohta Ohshima、Matsuaki Terada、"Performance Evaluation of Synchronous Distributed Wireless Network Emulator for High-Speed Mobility"、International Conference on Information Networking (ICOIN) 2013、pp. 151-156、2013. 01. 29、Bangkok(Thailand)

#### 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
大島浩太 (OHSHIMA KOHTA)  
埼玉工業大学・工学部・講師  
研究者番号：60451986
- (2) 研究分担者  
なし
- (3) 連携研究者  
なし