

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K11925

研究課題名（和文）山間地など多様な条件不利地域を想定した森林エリアネットワーク実用化技術の確立

研究課題名（英文）Development for popularization of Forest-Area Networking as communication infrastructure suitable for the areas with poor geographical conditions such as hilly and mountainous areas

研究代表者

塚田 晃司（Tsukada, Koji）

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号：80372671

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、中山間地域の集落内、および、集落周辺の森林地域など条件不利地域を対象とした地域情報通信インフラを森林エリアネットワーク（Forest Area Networking）と定義し、通信インフラ、電力インフラ、ネットワーク運用についての課題解決を目指した。和歌山県と北海道の森林地域を実証フィールドとし、森林エリアネットワークの通信インフラ、電力インフラ、ネットワーク運用の実用化技術を提案し、その効果を検証評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中山間地域と呼ばれる傾斜地や山林周辺の条件不利地域を直接対象とした情報通信インフラに関する研究はこれまでになく、本研究課題の成果により、林業等の第一次産業活性化、限界集落の見守り・防災など安全安心社会の実現など、条件不利地域における地域課題の解決への貢献が期待できる。今後も和歌山県、北海道の実証フィールドにおいて継続して運用していく。

研究成果の概要（英文）：In this study, we defined "Forest-Area Networking" as communication infrastructure suitable for the areas with poor geographical conditions such as hilly and mountainous areas. We aimed for solving issues which we are facing when building and operating communication infrastructure, electric power infrastructure and networks in the area. Moreover, we have proposed some methods for solving the issues, and verified whether the methods could be used for a solution of the issues in experimental field setting up in Wakayama and Hokkaido.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：森林エリアネットワーク 条件不利地域 中山間地域 情報通信基盤 センサネットワーク

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本の国土の 70%弱を占める中山間地域と呼ばれる傾斜地や山林周辺には、多数の集落が存在し、第一次産業の衰退、高齢・過疎化、自然災害の脅威など、多くの地域課題を抱えている。これらの課題解決に情報通信技術 (ICT: Information Communication Technology) を活用する事例が増えている。たとえば、地域情報通信インフラの整備によって山間地などでの情報格差を解消しようとする取り組み[1]や、災害時に情報孤立に陥る地域へ対応する取り組み[2]があるが、これらの多くは通信・電力インフラが整っている地域を想定していた。

申請者を含む本研究グループが、和歌山県内の災害時に孤立する可能性の高い集落で過去の災害時の状況をインタビュー調査したところ、想像以上に通信・電力インフラが脆弱な地域(条件不利地域)であることがわかった[3]。事実、2011 年の紀伊半島大水害、2018 年の台風 21 号、24 号の際に、このような地域で通信・電力インフラの途絶が多数発生している。孤立集落対策など地域課題解決の基盤となる地域情報通信インフラに対する現場ニーズは切実だが、条件不利地域の中でも特に条件の厳しい森林地域を対象とした情報通信インフラ構築については全く注目されてこなかった。

申請者はこれまで、和歌山県内のこうした条件不利地域の情報通信インフラの整備に関して、災害情報共有システム[4]、非常時通信システム[5]の研究に取り組んできた。そして、申請者のグループは、中山間地域の森林地域など条件不利地域を対象とした地域情報通信インフラを『森林エリアネットワーク (Forest Area Network)』と定義し、基盤研究 (C)「中山間地など条件不利地の情報通信基盤となる森林エリアネットワークの構築」(課題番号: 15K00127, 2015~2018 年度)において和歌山県内の山間集落周辺の森林地域を実証フィールドとして運用試験を行ってきた。その結果、(1) 通信インフラの課題、(2) 電力インフラの課題、(3) ネットワーク運用の課題が具体的に明らかとなった[6][7]。

2. 研究の目的

前項の研究開始当初の背景で挙げた 3 点の課題を解決し、森林エリアネットワーク実用化技術の確立を目指す。

無線センサネットワークや IoT (Internet of Things) などの情報通信インフラや応用サービスに関する研究が活発に行われているが、都市部、郊外など通信・電力インフラが整った地域を対象としているものが多く、森林地域のような条件不利地域での運用は想定されていない。森林地域の環境は、都市部、郊外と比べて非常に厳しく、また多様である。地形、植生、気象などの電波伝搬障害となる要因が多数存在し、通信機器を稼働させる電力確保も困難である。恒常的な情報通信インフラ運用には解決すべき課題が多い。この観点から地域情報通信インフラの実用化を意識した研究はこれまで皆無であり、本研究ではこの点に着目した。

本研究では、基盤研究 (C) (課題番号: 15K00127) で行った実証フィールドでの運用試験の結果をふまえ、森林エリアネットワーク実用化をはばむ、以下の 3 点の課題解決に重点を置いて検討し、その結果を再度、実証フィールドで運用試験により評価する。

(1) 通信インフラの課題: 地形、植生、気象による通信性能の劣化があり、多様な森林地域で安定した通信、情報伝達を実現する手法の開発が必要である。

(2) 電力インフラの課題: 地形、植生、気象により利用可能な発電手段に制約があり、多様な森林地域で安定した電力確保を実現する手法の検討が必要である。

(3) ネットワーク運用の課題: 恒常的な運用のためには、植生の季節変化や風水害による被災などネットワーク障害時に障害箇所特定や保守作業の困難さを軽減させる手法の開発が必要である。

3. 研究の方法

前項の研究の目的で挙げた 3 点について、具体的に以下の内容について取り組む。

(1) 通信インフラの課題

多様な環境下での森林エリアネットワークの運用環境(地形、植生、気象など)と、その環境に適した通信方式(周波数帯、変調方式、通信プロトコルなど)との関係を解明する。森林地域の環境は多様であり、地形、植生以外に気象条件も様々であるが、これらが通信性能に与える影響を評価した研究は少ない。基盤研究 (C) (課題番号: 15K00127) では、急峻な山間地で温暖・多雨な北海道大学和歌山研究林を実証フィールドとした。本研究では、緩やかな丘陵地で寒冷・多雪な北海道大学苫小牧研究林でも新たに運用試験を行い、通信性能を比較する。また、通信方式は、特定小電力無線、無線 LAN などに加え、低消費電力、遠距離通信が特徴で普及が進む LPWA (Low Power, Wide Area) 方式の森林地域での通信性能も評価する。

(2) 電力インフラの課題

可搬型発電設備の開発と機動性、発電性能などの検証を行う。森林エリアネットワークの稼働状況は、植生の季節変化、風水害による地形変化などで常に変化する。そのため、発電設備の移動や増減設が必要となるが、その実現可能性は未知であり、検証が必要である。

(3) ネットワーク運用の課題

森林エリアネットワークの障害検知を可能とするアーキテクチャ、プロトコルの検討と、森林地域でネットワーク保守を担当する現場作業員支援システムの検討に取り組む。無線センサネットワークの研究の多くは、装置故障や通信障害の際に、それを回避する経路制御方式や分散処理方式によって耐障害性を実現している。そのため、障害を隠蔽してしまい、障害箇所検知、および、現場での保守作業を困難にしている。そこで、経路制御とノード生存確認を融合したネットワーク負荷の少ない手法[7]を試み、これを発展させる。

また、本研究では、シミュレーション評価に加えて、その結果と実運用の結果とがどの程度合致するかを明確にするため、実証フィールドでの運用試験を重視している。条件不利地域の中でも特に条件の厳しい山間地の森林地域を敢えて実証フィールドに選び、森林エリアネットワークを構築し、長期間の運用試験により技術課題を明確化する。そして、その課題解決手段を検討し、再びそれを実証フィールドで運用試験を行う。

4. 研究成果

森林エリアネットワークの実証フィールドとして、2012年度から急峻な山間地で温暖・多雨な北海道大学和歌山研究林に実証フィールドを設置してきた(図1左参照)。そして、2019年度から緩やかな丘陵地で寒冷・多雪な北海道大学苫小牧研究林にも新たな実証フィールドを設置し、苫小牧研究林内に実験用通信タワーを設置した(図1右参照)。



図1：和歌山研究林（左）、苫小牧研究林（右）に設置している研究装置

当初計画では、2019～2021年度の3年計画で両実証フィールドにおいて実環境における運用実験を実施する予定であった。しかし、COVID-19の感染症対策で国内移動制限により、実証フィールドに出向いての運用実験を計画通りに進めることができず、研究期間を2023年度まで2年間延長し、さらに、国内移動制限が実施される以前に実証フィールドで採取した各種データも有効活用して研究を実施した。

前項の研究の方法で述べた3つの課題を解決する主要な研究成果として、(1)と(2)を解決する森林エリアネットワークに設置した機器全体の総消費電力を削減する手法、(3)を解決する森林エリアネットワークに設置した機器の故障や通信障害発生時に生ずる影響を削減する手法について以下に述べる。

(1) 森林エリアネットワークに設置した機器全体の総消費電力を削減する手法

条件不利地域では通信インフラ、電力インフラともに整っていない。そのような状況下では、限られバッテリー容量のもとで、効率的なデータ通信を行う必要がある。消費電力とデータ通信量はトレードオフの関係であるので最適な制御手法が必要である。

「森林内のセンサネットワークにおける経路選択履歴を用いて消費電力を抑える経路制御法の提案」[8]では、森林内において観測データを一か所のシンクノードで収集することを目的とし、充電装置が備えられたノード群で構成されたセンサネットワークを想定した。シンクノードに各ノードの現在と過去の通信時の状態情報を集め、その変化から次回通信時の状態を予測し、今後の通信量が見込める経路を選択する。また、経路選択履歴を用いることにより、データ送受信の集中を防ぎ、消費電力の低減化を図る手法を提案した。

山間部の日射量の少ない場所や太陽光による発電装置が設置不可な場所にあるノードがセンサネットワーク内に組み込まれていることを想定する。また、それらのノードには太陽光パネルによる充電装置が備えられているものとする。電池残量や発電量を指標とし、データを一括して送信する手法であると、特定ノードにデータが集中するおそれがある。そこで本提案手法では、指標を考慮して送信するが、データを一括せず分割して送信し、特定ノードへのデータの集中

を防ぐ。また、分割されたデータの中で欠損データがある場合は、元データを再現できる手法を用いてデータを復元する。以上の手法により解決を図った。

「森林内ネットワークにおける高性能ノードを用いたデータ圧縮による通信量削減方法の提案」[9]では、十分な電力供給が困難な地域でも利用可能な低消費電力のLPWAに着目した。LPWAは時間当たりの送信可能データ量が限られているという制約があるため、森林内に複数配置されている末端ノードとデータを回収するシンクノードの間に高性能ノードの配置を想定し、高性能ノードで末端ノードから集めたセンサデータを圧縮することで通信量を削減する手法を提案した。これにより、時間当たりの送信可能データ量が限られた状況でのデータ収集の実現を目指した。

ここでは気温データを想定する。気温データは、時間によって変化がするが、想定環境のような通信可能距離が比較的狭い場所では類似性が期待できる。高性能ノードでは、値が類似しているノードのデータを検出し、データの類似性を利用して圧縮を行う。データの近似値は各値の平均値とし、類似しているノードの数値をまとめ、平均値に置き換える。データの類似性を使って圧縮した場合、高性能ノードは、類似性を持つノードIDと、置き換えた平均値を送信する。以上の手法により解決を図った。

「高性能ノードを用いた動的タイムスロット割当てによるセンサネットワークの省電力化手法の提案」[10]では、森林内のような潤沢な電力供給がない環境においては、できる限り消費電力を抑えるような処理にしなければならず、センサを持った各ノードは、データの送受信やセンシングを行う時間以外はスリープ状態を維持することで、消費電力を抑える手法を提案した。

スリープ状態への遷移にも電力を消費するため、なるべくその遷移回数を少なくする必要がある。また、そのような環境では、LPWAを用いるが、LPWAは時間当たりの送信量に制限があるため、なるべくパケットの損失を避けるような通信手法をとる必要がある。そこでCSMA(Carrier Sense Multiple Access)のような衝突を前提とした通信方式ではなく、TDMA(Time Division Multiple Access)のように通信可能な時間を制御する方式を採用した。再送制御が複数回にわたって行われる場合には、より多く電力を消費してしまうことや、シンクノードに近づくとつれて輻輳が起こりやすくなる点でもTDMAが適した手法であると言える。起動・スリープの状態遷移を少なくするようにタイムスロットを動的に設定する手法を提案し、解決を図った。

(2) 森林エリアネットワークに設置した機器の故障や通信障害発生時に生ずる影響を削減する手法

条件不利地域では、設置した機材のメンテナンスも課題となる。広範囲にセンサノードを設置した場合、故障発生個所の特定が復旧作業のためには重要な情報となる。また、復旧完了するまでの代替通信手段の形成も必要となる。そのため、故障発生個所の検知、故障発生時の代替通信手段についての手法が必要である。

「軽量かつネットワーク分断にも対応可能なリンク故障可能性箇所検知プロトコルの提案」[11]では、観測データの回収を目的としたセンサネットワークにおいて、故障の前兆、例えばリンク間の通信品質に関する値(以下リンク情報値)の低下が観測された場合に、定期的な送信されていたノード間リンクの確認パケット(以下リンク確認パケット)をリンク情報値の低下が一定時間継続、あるいは復旧するまで連続で送信し、リンクの故障が発生しないか監視を行うプロトコルを提案した。さらにリンク間の故障が生じ、ネットワークが分断された際にも上述の動作が可能な仕組みも提案した。

経路情報収集の動作を行いセンサ間でネットワークを構築、センサデータをシンクノードに集積させ、回収元で受け取る。そのセンサネットワーク内において、全ての送受信の際にリンク情報値を監視するものとする。あるノード間のリンク情報値が低下し、故障の前兆が検知された場合、ネットワークの状態を遷移させ、故障の前兆検知後の動作を開始する。定期的な送信されていたリンク確認パケットの送信頻度を高め、そのリンクに関連したノードを全ノードに通知、故障前の対処を可能にする。故障の前兆が検知された時点からシンクノードでタイマを起動し、リンク確認パケットの送信間隔を時間経過とともに3段階に分けて低下させる。さらに故障検知時、ネットワーク分断時の動作として、各ノード群で暫定的なシンクノードを設定し、そのシンクノードから従来の動作を開始することで、ネットワーク分断にも対応させた。以上の手法により解決を図った。

「森林内ネットワークにおける複数ノードが機能停止した場合の情報伝達手法の提案」[12]では、森林内では火災やノードの電池残量不足等で、同時に複数のノードが機能停止状態に陥る場合がある。本研究では、隣接する複数のノードが機能停止、または機能停止手前のような状態になった場合に経路を適切に設定し、情報伝達を行う手法を提案した。

森林内や山間部のような通信インフラの十分整っていない地域にセンサノードを複数配置したマルチホップネットワークを想定する。それぞれのノードは定期的にセンシングし、それらのデータを保持しておくが、機能停止・機能停止手前のノードが隣接して複数発生した場合に迂回路を形成するものとする。また、機能停止手前状態への移行は、火災の場合は観測温度が火災検

知温度に達した場合、電池不足による機能停止は、電池残量が一定以下になった場合とする。以上の手法により解決を図った。

<引用文献>

- [1] 四国総合通信局，四国地方におけるデジタル・ディバイド対策のための無線 LAN の活用に関する調査検討会報告書，2007
- [2] 間瀬憲一，岡田啓・大和田泰伯，中山間被災地復興へ向けた無線ブロードバンド提供の実践的取組み，電子情報通信学会誌，Vol.91，No.10，pp.857-861，2008
- [3] 湯崎真梨子，揚妻直樹，塚田晃司，中島敦司，災害時孤立可能性集落の「不安」と「安心」の要因 一台風 12 号における高齢山村，平井区の事例一，日本地域政策研究，11 号，pp.53-62，2013 年 3 月
- [4] 塚田晃司，野崎浩平，災害時孤立集落での利用を想定した地域内情報共有システム，情報処理学会論文誌，51 巻，1 号，pp.14-24，2010 年 1 月
- [5] 塚田晃司，発光色の色変化による可視光通信を用いた非常時通信方式の基礎研究，科研 挑戦的萌芽研究，課題番号 23650029
- [6] 塚田晃司，中山間地域の災害時孤立集落を想定した情報通信システム開発の試み，計測と制御，53 巻，6 号，pp.494-498，2014 年 6 月
- [7] 鈴木智文，指吸未来，岸田隆祐，塚田晃司，停止故障発生時および通信不通時の原因箇所推定可能なセンサネットワークの提案，情報処理学会第 80 回全国大会，2018 年 3 月
- [8] 西川龍之介，中村玲，塚田晃司，森林内のセンサネットワークにおける経路選択履歴を用いて消費電力を抑える経路制御法の提案，情報処理学会第 82 回全国大会，2020 年 3 月
- [9] 石橋龍一，塚田晃司，森林内ネットワークにおける高性能ノードを用いたデータ圧縮による通信量削減方法の提案，情報処理学会第 83 回全国大会，2021 年 3 月
- [10] 田中佑一，塚田晃司，高性能ノードを用いた動的タイムスロット割当てによるセンサネットワークの省電力化手法の提案，情報処理学会第 83 回全国大会，2021 年 3 月
- [11] 中村玲，西川龍之介，塚田晃司，軽量かつネットワーク分断にも対応可能なリンク故障可能性箇所検知プロトコルの提案，情報処理学会第 82 回全国大会，2020 年 3 月
- [12] 田中佑一，塚田晃司，森林内ネットワークにおける複数ノードが機能停止した場合の情報伝達手法の提案，情報処理学会第 85 回全国大会，2023 年 3 月

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 本田基史, 塚田晃司
2. 発表標題 マイクロホンアレイのDOA測定値の最頻値を用いたセンサノードの位置関係の推定精度の検証
3. 学会等名 情報処理学会第86回全国大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 荒井康樹, 塚田晃司
2. 発表標題 センサ・アクチュエータネットワークにおける全体にかかる通信負荷を抑えたノード故障検知手法の提案
3. 学会等名 情報処理学会第86回全国大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 石橋龍一, 塚田晃司
2. 発表標題 森林内における音源位置特定のためのセンサノード配置概形の推定システムの提案
3. 学会等名 情報処理学会 第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中佑一, 塚田晃司
2. 発表標題 森林内ネットワークにおける複数ノードが機能停止した場合の情報伝達手法の提案
3. 学会等名 情報処理学会 第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤田浩介, 塚田晃司
2. 発表標題 LPWAを用いたセンサネットワークにおける連続送信時間制限を考慮した送信制御手法の提案
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尾木太一, 塚田晃司
2. 発表標題 森林内ネットワークにおけるモバイルエージェントを用いた無線センサ・アクチュエータネットワークシステムの提案
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西川龍之介, 塚田晃司
2. 発表標題 センサネットワークにおける発電量予測に基づく動的なデータ分割方式の提案と評価
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村玲, 塚田晃司
2. 発表標題 迂回路形成に伴う通信データ量を削減するセンサネットワークシステムの提案と評価
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石橋龍一, 塚田晃司
2. 発表標題 森林内ネットワークにおける高性能ノードを用いたデータ圧縮による通信量削減方法の提案
3. 学会等名 情報処理学会第83回全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中佑一, 塚田晃司
2. 発表標題 高性能ノードを用いた動的タイムスロット割当てによるセンサネットワークの省電力化手法の提案
3. 学会等名 情報処理学会第83回全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村玲, 西川龍之介, 塚田晃司
2. 発表標題 軽量かつネットワーク分断にも対応可能なリンク故障可能性箇所検知プロトコルの提案
3. 学会等名 情報処理学会第82回全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西川龍之介, 中村玲, 塚田晃司
2. 発表標題 森林内のセンサネットワークにおける経路選択履歴を用いて消費電力を抑える経路制御法の提案
3. 学会等名 情報処理学会第82回全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤田浩介, 西川龍之介, 中村玲, 塚田晃司
2. 発表標題 送信時間制限機能を有する特定小電力無線を用いたセンサネットワークにおけるスループット向上のための送信タイミング調整手法
3. 学会等名 情報処理学会第82回全国大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

和歌山大学 システム工学部 ネットワークサービス研究室 https://www.wakayama-u.ac.jp/~ktsukada/ns1ab/
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中島 敦司 (Nakashima Atsushi) (90283960)	和歌山大学・システム工学部・教授 (14701)	
研究分担者	湯崎 真梨子 (Yuzaki Mariko) (50516854)	和歌山大学・食農総合研究教育センター・客員教授 (14701)	
研究分担者	中村 誠宏 (Nakamura Masahiro) (80545624)	北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・教授 (10101)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	揚妻 直樹 (Agetsuma Naoki) (60285690)	北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・教授 (10101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関