

# SDN とコグニティブ無線を基盤とした災害に強いネバー・ダイ・ネットワークシステムの開発と評価

佐藤剛至<sup>1,a)</sup> 内田法彦<sup>2</sup> 白鳥則郎<sup>3</sup> 柴田義孝<sup>1</sup>

東日本大震災に伴う大津波被害により、既存ネットワークシステムは様々な要因で機能の大部分を停止したが、そのような状況下でも衛星通信をはじめとした幾つかの情報通信手段は実際に迅速かつ効果的にネットワーク接続を復旧させることができた。しかしながらこれらの情報通信手段には状況によって得手不得手があり、各々を単体で利用するのは刻々と変化する被災地の状況に追従することができないという問題がある。我々は複数の異なる情報通信手段を効果的に組み合わせることで、通常時のネットワーク容量と災害時のネットワーク接続性を両立する新たなネットワークシステムである Never Die Network (NDN) システムを開発する。NDN システムは、刻々と変化する被災地のスループットやパケットロス率、遅延時間などの通信状態に追従するために、利用可能な各インターネットアクセス網の状態を常に測定する。また、ネットワーク測定結果に基づいてシステムが常に最適なバケットフローを自律的に導出するための手法を提案し、SDN 技術によって自動的な切替機能を実装する。我々は、ネットワーク性能測定結果を考慮したアクセス網切替手法を評価するために、固定型と車載型の NDN システムをプロトタイプ実装し、災害のシナリオに基づいた検証実験を行うことで提案手法の機能検証・評価を行った。

## 1. 序論

東日本大震災では、情報通信手段が破壊したり損傷したりしたために、災害救助、食料配分、避難対応において多くの問題を起こした。震災直後からの情報ネットワークの機能不能は特に大きな問題となった。特に大きな問題の一つは有線回線の障害や局舎内の交換機の破壊や機能障害および急激なトラフィックの急増による輻輳によるものであった。

一方で、幾つかの無線通信手段は、実際に迅速かつ効果的に復旧させることができた[1,2]。これは南海巨大地震や東海地震など今後想定される災害時の情報通信システムを設計したり実装したりする場合に大いに参考になると考えられる。岩手県における我々の情報インフラの復旧活動の経験から、有効と考えられる主なネットワークシステムを以下に示す。

- 衛星 IP ネットワーク (IPSTAR) は、ネットワーク回線が壊滅した被災地での仮復旧のために多く利用された。
- 3G/LTE、Wi-Fi により構成されるモバイルルータは被災地内市町村の役所や避難所に有効活用された。
- FWA (Fixed Wireless Access) や WLAN (Wireless LAN) は情報インフラを構築できた。

しかしながら、災害時に活用されたこれらのネットワークシステムには、表 1 のように、それぞれ得手不得手がある事がわかっており、状況によっては利用できない事が考えられる。このことから、ある単一の情報通信手段にのみ頼るようなネットワークシステムではなく、複数の異なる情報通信手段を組み合わせるような冗長性の高いネットワークシステムが必要とされていると言える。

システム	FTTH	WIMAX	携帯電話	衛星通信	無線LAN
接続	有線インターネット接続	無線インターネット接続	無線(広域)インターネット接続	無線(屋外)インターネット接続	無線ローカルエリア接続
伝送速度	高速	20-75Mbps	128Kbps-20Mbps	低速	高速
弱点	災害時脆弱	利用可能エリア狭	輻輳の影響大	遅延大 (RTT:500-1000ms)	通信距離に離 (指向性アンテナで距離向上可)
東日本大震災時の状況	×	△	△	○	○

表 1 災害時に有効な情報通信手段の比較

## 2. 関連技術

### 2.1 コグニティブ無線技術

コグニティブ無線とは、端末や基地局などが周囲の電波状況をチェックし、その状況に応じて利用者に意識させることなく、周波数や通信方式を変えて通信する技術である[3]が、この技術を応用することで、端末自身が収容するネットワークの性能を認識する。これにより、ネットワークデバイス自身が通信環境 (通信距離、地形、アンテナ、メディア等) に合わせ、電波強度、スループット、パケットロス率、遅延時間を計測しながら、最適値を決定し、周波数や通信方式の異なる別のネットワークへ動的に切り替えて通信することが可能となる。

また、コグニティブ無線技術には大きく分けて「周波数共用型」と「ヘテロジニアス型」が存在する[3,4]。周波数共用型コグニティブ無線技術は、特定の電波利用サービスにおいてチャンネル間の混信を防ぐために設けられた、使用されていない周波数領域、いわゆるホワイトスペースをセンシングし、自動的に切り替える技術である。一方、ヘテロジニアス型コグニティブ無線技術は、利用可能な既存の無線システムの混雑度やネットワーク性能等の利用環境をセンシングし、自動的に切り替える技術である。この 2 つの技術の違いを図 1 に示す。

1 岩手県立大学  
Iwate Prefectural University, Takizawa, Iwate 0200193, Japan  
2 福岡工業大学  
Fukuoka Institute of Technology, Higashi-Ku, Fukuoka 8110295, Japan  
3 早稲田大学  
Waseda University, 1-104, Totsuka, Shinjuku, Tokyo, 1690071, Japan  
a) sato\_g@ipu-office.iwate-pu.ac.jp

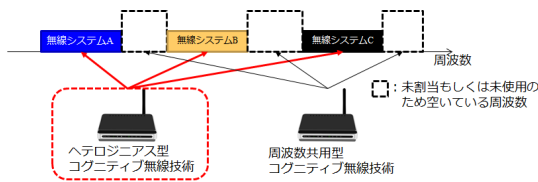


図 1 周波数共用型とヘテロジニアス型の違い

複数のアクセス網のその時々通信状況を、実際にネットワーク性能を測定することで把握し、システムが最適なアクセス網を判断するために、ヘテロジニアス型のコグニティブ無線技術を用いる。

### 2.2 Software Defined Network 技術

Software Defined Network (SDN) 技術は、ネットワーク機器をプログラミングで開発可能とする技術である [5]。本技術の特徴は、従来のネットワークデバイスでは同一のプレーンに実装されていた経路及びリンク決定機能とパケット転送機能を分離した点である。経路及びリンク決定を集中制御プレーンへ移行したことにより、ネットワークリソース全体の能力や特性を認識し、それに基づいたパケット転送の定義をプログラムで実装可能としている

また、もうひとつの特徴として、クロスレイヤ情報をネットワーク定義に取り扱うことが可能な点が挙げられる。MAC アドレスや IP アドレス、TCP/UDP ポート番号をネットワーク定義に利用することはもちろん、ブラウザ上に実装されたユーザインターフェースから直接経路情報を編集したり、外部データベース内に蓄積された情報から最適なネットワーク定義を導き出したりすることが可能であり、ネットワーク性能の監視結果を蓄積したデータベースから情報を参照し、算出された結果を直接ネットワークの定義変更利用するために用いることが可能である。(図 2)

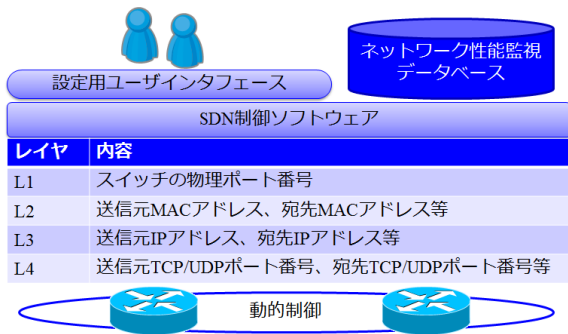


図 2 SDN 技術を用いたクロスレイヤ制御

### 3. 目的

本研究の目的は、東日本大震災の教訓を踏まえた、災害時のいかなる状況においても通信を可能とするためにコグニティブ無線技術と SDN 技術を用いた新たなネットワークシステムである Never Die Network (NDN) システムを開

発することである。NDN ネットワークを構成するノードは、3G/LTE、衛星 IP 通信、Wi-Fi 等複数の異種無線システムにより構成される。これらの NDN ノードは、各無線システムのスループット、遅延時間、パケット紛失率等のネットワーク通信状態の変化を考慮して最適な経路を決定する。

本研究における NDN システムの開発要件は次の通りである。

- 複数の異なる情報通信機器を装備
- コグニティブ無線技術により各ネットワーク性能の検知、判断機能を実装
- SDN 技術を用いて自動的に物理故障・輻輳等を回避する仕組みを実装
- 通常時のネットワーク容量と災害状況下でのネットワーク接続性を両立

東日本大震災での経験に基づき、複数の異なるインターネットアクセス網（以下、アクセス網と呼称）を収容可能とする。収容するアクセス網は有線・無線を問わない。また、被災地内におけるスループットやパケットロス率等のネットワーク性能や、故障・切断等のネットワークを取り巻く環境は時々刻々と変化するため、それらに追従する必要がある。そのため、本研究では実際に収容するすべてのアクセス網のネットワーク性能・状態をコグニティブ無線技術によって迅速かつ最低限のパケットによって監視する。そして、ネットワーク性能の監視の結果判明した物理故障や輻輳等によるネットワーク性能の低下を回避するため、迅速かつ効果的なデータフロー制御を提案し、SDN 技術を用いて実装する。

### 4. システム概要

本システムの概要を図 3 に示す。

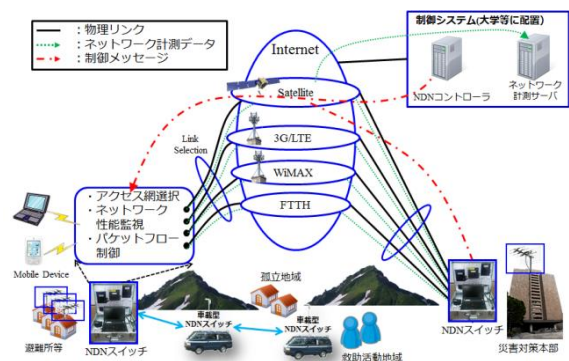


図 3 NDN システム概要図

インターネットゲートウェイとして稼働する固定局型システムは、避難所や災害対策本部などの利用可能なインターネット回線がいくつか使える状態であると考えられる地点に設置し、設置場所周辺の端末との接続のために無線

アクセスポイント機能を備え、接続端末からのパケットフローを制御する。

パケットフロー制御を行うために、常に接続されているアクセス網の性能を測定し、衛星通信を用いてインターネット上に設置したネットワーク計測サーバに監視結果を蓄積する。蓄積された情報はコントローラへと受け渡され、提案するリンク選択手法を用いて最適なリンクを計算し、固定局型システムに通知する。通知を受けた固定局システムはその命令に従ってパケットフローを制御する仕組みとなっている。

また移動局型システムは、固定局型システムと連結して設置し、救助活動場所等の孤立地域へ数珠つなぎに設置することで、インターネット接続を任意の場所まで拡張することが可能となっている。

#### 4.1 固定局型システム

本システムを構成する固定局型システムである NDN スイッチは、避難所や災害対策本部等の重要な拠点に配置され、固定的なインターネットゲートウェイとして動作する。物理的に冗長なハードウェア構成として、3G/LTE や WiMAX, FTTH や衛星通信など設置場所で利用可能な複数の異なるアクセス網を SDN 技術によって収容・管理する。そして、コグニティブ無線技術により周期的に各アクセス網のネットワーク性能を監視し、その結果をパケットフローにフィードバックする。これにより、変化しやすい災害状況下におけるネットワーク性能に追従し、常に最適なアクセス網を利用することが可能になる。また、独立して供給可能な自立電源を備えることにより、電源の供給停止にも対応する。

NDN コントローラは、衛星通信網を介して常に全ての NDN スイッチと接続し、ネットワーク性能の監視結果のフィードバックを受けてネットワーク機器の障害・ネットワーク輻輳を把握した上で適切な制御命令を発する。

#### 4.2 移動局型システム

移動局型のシステムとして、本システムでは車載型 NDN スイッチを構築する。車載型 NDN スイッチは、インターネットゲートウェイとしての NDN スイッチと異なり、救助活動場所等の情報孤立地域と NDN スイッチ間のネットワーク接続を提供する。アドホック通信技術により地理的に離れた場所へマルチホップネットワークを構築する。アドホック接続によってネットワーク接続可能距離を拡張するための車載型 NDN システムは、前節までで構築した固定型 NDN システムをインターネットゲートウェイとして利用する。車載型 NDN システムの概要は図4の通り。

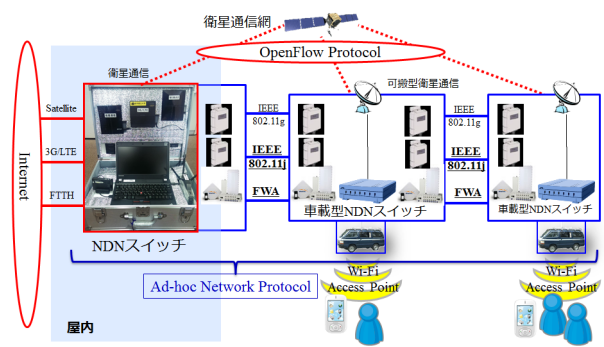


図4 車載型 NDN システム概要

この図のように、各車載型 NDN スイッチ同士は複数の異なる無線ブリッジシステムで接続されており、固定局型システムと同様、常にネットワーク性能測定結果に基づいて動的に最適なリンクが選択されている。各車載型 NDN スイッチには Wi-Fi アクセスポイントを介して接続を行う。

### 5. システムアーキテクチャ

NDNシステムのアーキテクチャは、図5に示すように、NDNコントローラ(NDN Controller)とNDNスイッチ(NDN Switch)、測定サーバ(Measurement Server)により構成される。

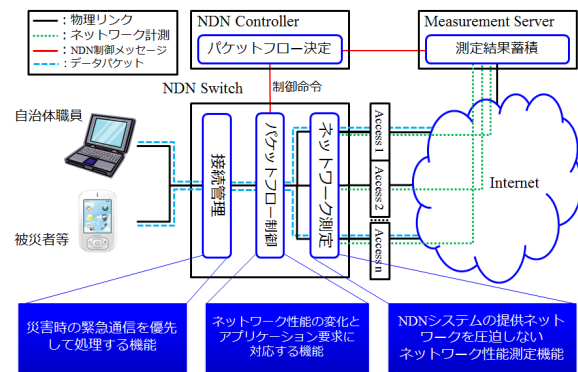


図5 システムアーキテクチャ

NDN コントローラ、NDN スイッチ、測定サーバを構成するコンポーネントとその役割を以下に記述する。

#### a. NDN Switch

NDN Switch はネットワークの状態に基づきホスト PC からのパケットをハンドリングするためのものであり、内部では大きく分けて「ネットワーク測定」、「パケットフロー制御」、「接続管理」の3つのコンポーネントで構成されている。

##### (ア) ネットワーク測定

災害時において刻々と変化するネットワーク環境を取り巻く状態に追従するため、本システムでは常に収容しているアクセス網のネットワーク性能を測定する。測定する

ネットワーク性能はスループット、パケットロス率、遅延時間など代表的なものであり、無線通信に関しては電界強度も考慮に入れる必要がある。

一方で、NDN システムで行うネットワーク測定に伴い発生する測定パケット自体が、提供するネットワークを圧迫してしまう問題がある。本研究では、NDN システムの提供ネットワークを圧迫しないネットワーク測定機能を実装する。

#### (イ) パケットフロー制御

NDN スイッチにおけるパケットフロー制御は、基本的に NDN コントローラからの命令を受けて処理を行う。この構成は一般的な Software Defined Network[5,6] システムで実現されるものであり、予め書き込まれた処理命令により、従来よりも高速なパケットフロー制御が可能となる。パケットフローの意思決定に関しては、NDN コントローラで説明する。

#### (ウ) 接続管理

固定型 NDN システムによって提供されるインターネット接続を離れた場所へ拡張するために、本システムでは固定型 NDN システムと車載型 NDN システムを接続可能とする。固定型 NDN システムに車載型 NDN システムを連結接続し、そこから車載型 NDN システムをカスケード接続可能なアーキテクチャとして設計し実装する。

#### b. NDN Controller

NDN Controller は、ネットワーク測定結果に基づいて NDN Switch にパケットフロー制御命令を発行するためのものであり、NDN Switch とは常に接続状態にある。前述のとおり、災害時はネットワークを取り巻く環境が刻々と変化するため、それに伴いネットワーク性能も刻々と変化する。また、ネットワークユーザのアプリケーション要求も時間によって動的に変化することがわかっているため、これらに追従するための新たなパケットフロー制御アルゴリズムが必要になる。

本研究では、ネットワーク性能の変化とアプリケーション要求に対応するためのアルゴリズムを新たに提案し実装する。

#### c. Measurement Server

Measurement Server は、ネットワーク測定結果を蓄積するデータベースサーバである。NDN Switch から通知されたネットワーク性能測定結果をデータベースへ蓄積する。本システムでは、推定スループット[7,8,9,10]、パケットロス率、遅延時間を測定し、測定結果の平滑化を行うために移動平均を取る必要があるため、過去の測定結果を参照する事が可能なデータベースとして設計する。

## 6. 通信リンク切替手法

本研究で構築する NDN システムには複数の異なるア

クセス網が接続されており、かつそれぞれ毎にスループット、遅延時間、パケットロス率を測定する。これらの測定結果を、接続されているアクセス網毎に本アルゴリズムで評価することで各アクセス網の評価値を算出する。最終的に評価値が選択肢内で最大となるアクセス網を最適パケットフローとして選択する。評価値の算出は、以下の 3 ステップで行われる。

### 6.1. 収集したネットワーク性能測定結果の平滑化

本システムで用いるネットワーク性能の実測値は、実際には NDN スイッチからインターネットを介して接続するネットワーク性能測定サーバの間のネットワーク性能を測定している。このため、実際にアクセスネットワークの性能が低下していなくても、瞬間的にネットワーク性能が低下する可能性がある。また、災害状況下においてはネットワーク性能が常に不安定であることが想定されるため、あるアクセス網における瞬間的なネットワーク性能の増減の発生により、他のアクセス網よりも局所的にネットワーク性能が低下した状態が発生し、切り替え処理が断続的に起きる恐れがある。断続的な切り替え処理は、通信セッションの頻繁な切断やパケットロスの増大を引き起こすため、回避すべきものである。この問題を解決するため、本提案アルゴリズムでは収集されたネットワーク性能測定結果の加重移動平均を計算することで平滑化を行った値を測定値  $n_i$  として扱う。平滑化した測定値  $n_i$  は以下の (1) 式で算出する。

$$n_i = am_i + bm_{i-1} + cm_{i-2} \quad (1)$$

なお、式内の  $m_i$  は最新の測定値を表す。同様に、 $m_{i-1}, m_{i-2}$  は過去の測定値を表す。また、 $(a, b, c)$  はそれぞれ測定時間毎の重みを表す。例えば、最新の測定値の重みを 6、1 つ過去の測定値の重みを 3、2 つ過去の測定値の重みを 1 とする場合、 $(a, b, c)$  は  $(0.6, 0.3, 0.1)$  とできる。

### 6.2 平滑化したネットワーク性能測定結果の正規化

本提案アルゴリズムでは、複数の異なるアクセス網同士を比較して最終的な評価値を算出する必要がある。しかしながら、FTTH や 3G/LTE、衛星通信などのアクセス網では、インターネットまでの経路やホップ数、無線や有線などの接続規格が異なるため、当然発揮できるネットワーク性能も異なる。これは、実効最大スループットや遅延時間の平均値などが違う FTTH 網と 3G/LTE 網などを定量的に比較する場合において問題となる。この問題を解決するため、本提案アルゴリズムではステップ 1 で平滑化されたネットワーク性能の測定値  $n_i$  を、対象アクセス網毎に同一の指標で正規化する。遅延時間及びパケットロス率の正規化には (2) 式の定義を用い、スループットの正規化には (3) 式を用いる。なお、式内の  $n_i, l_i, u_i$  はそれぞれ測定値、最小値、最大値を表す。例えば、遅延時間の  $l_i$  は 20ms、 $u_i$  は 800ms といったように、許容値として予めシステムで定義しておき、すべてのアクセス網の正規化の際に同じ

値を用いる。また、 $u_{max}$  は測定履歴中の最大値を表す。

$$S_i = \begin{cases} (1 - \frac{n_i - l_i}{u_i - l_i}) * 10 & (l_i < n_i < u_i) \\ 1 & (n_i \geq u_i) \\ 9 & (n_i \leq l_i) \end{cases} \quad (2)$$

$$S_i = (\frac{n_i - l_i}{u_{max} - l_i}) * 10 \quad (3)$$

(2), (3) 式によって、測定された各ネットワーク性能は 1 から 9 の間の値  $S_i$  として正規化される。この値は、同一指標の元で各アクセス網の性能を定量的に比較するための値として用いられる。

### 6.3 各候補アクセス網の評価値算出

ステップ 2 で正規化された各ネットワーク性能の値  $S_i$  を用いて、各アクセス網の評価値を算出する。各アクセス網を評価するにあたり、どのネットワーク性能をどの程度重視するかといったポリシーを予め決めておく必要がある。本研究においては測定するネットワーク性能はスループット、パケットロス率、遅延時間の 3 つであるので、これらについてシステムが重み  $(x, y, z)$  を予め与えておく。例えば、NDN システムを利用して VoIP による音声通信を主に行う場合、遅延時間が最も重要視され、次点でスループット、パケットロス率と続くと考えられるため、重み  $(x, y, z)$  は  $(0.3, 0.2, 0.5)$  と設定できる。このような重みを用いて、以下の (4) 式を計算することで各アクセス網の評価値  $P_i$  を求める。

$$P_i = xI_{throughput} + yI_{packetlossrate} + zI_{delay} \quad (4)$$

評価値  $P_i$  はアクセス網毎に算出され、すべてのアクセス網の評価値 (e.g.  $P_{FTTH}$ ,  $P_{LTE}$ ,  $P_{SATELLITE}$ ) が算出された時点で、比較評価が行われる。この比較で最大値をとったアクセス網が、最終的なネットワークフローとして選択される。

## 7. プロトタイプシステム

### 7.1 固定型 NDN システム

本システム及び提案手法を評価するための固定型 NDN システムのプロトタイプを図 6, 図 7 に示す。本プロトタイプシステムは、緊急時においてインターネット通信を確保するため、ネットワーク機器の故障や輻輳などのネットワーク性能の変化に追従し、動的にアクセス網を切り替えていくことが可能であることを実証し、評価を実施することを目的として構築する。本プロトタイプシステムで使用するアクセス網は次の通りである。

- 衛星通信網 : IPSTAR
- 3G/LTE 網 : NTT docomo
- FTTH 網 : NTT フレッツ

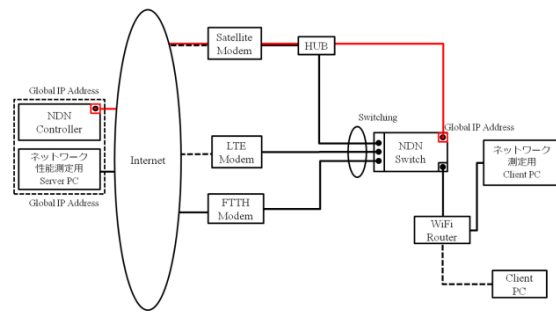


図 6 固定型 NDN システム構成図

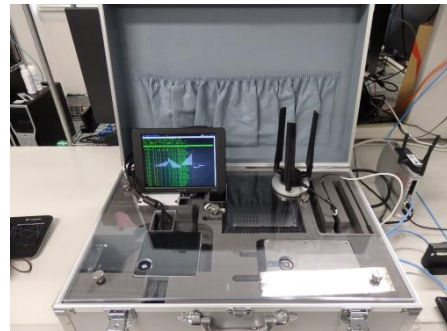


図 7 固定型 NDN システム外観

各 NDN スイッチを、NDN コントローラと OpenFlow プロトコルで制御するために OpenFlow チャンネルを用意する必要がある。そのため各 NDN スイッチは NDN コントローラの IP アドレスに対して常に TCP 接続を行えるようにネットワーク設定を予め行う。また、OpenFlow チャンネルは常に開いておく必要が有るため、制御用の回線として衛星通信網を利用する。

また、ネットワーク性能の測定を行うため、専用 PC を NDN スイッチに接続している。ネットワーク性能測定用 PC は、NDN スイッチが提供するネットワークとインターネットを介し、ネットワーク性能測定 Server PC へと測定用のデータを送信し続ける。本システムが計測する必要があるのは NDN スイッチに接続されているアクセス網のネットワーク性能であるが、このネットワーク性能測定用 PC が測定するネットワーク性能は、厳密には NDN スイッチからインターネットを介した測定 Server までの経路で計測されるネットワーク性能である。

しかしながら、特に災害状況下においてはネットワーク性能測定用 PC から測定用 Server までの経路のうち、ボトルネックとなるのはアクセス網部分であると考えられるため、本システムではこのような測定を行っている。

### 7.2 車載型 NDN システム

車載型 NDN システムは、固定型 NDN システムと異なり、救助活動場所等の情報孤立地域と固定型 NDN スイッチ間のネットワーク接続を提供するシステムである。本システ

ムのプロトタイプシステム構成を図8, 図9に示す。

本プロトタイプシステムは、複数の無線ブリッジシステムのネットワーク性能を常に監視し、ネットワークへのアプリケーション要求を考慮したフィードバックを行う手法を実装することによって、ネットワーク接続可能距離を拡張するとともに、接続性や提供ネットワーク性能を向上させることが可能であることを検証するために構築する。

固定型NDNシステムと車載型NDNシステムの連結接続は、図9のように構成される。



図8 車載型NDNシステム外観

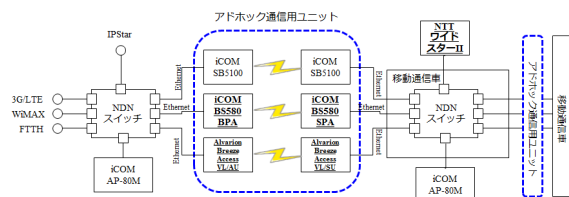


図9 固定型と車載型の連結接続構成

車載型NDNシステム内部で利用するデバイスの構成は、固定型NDNシステムに準拠したものになっている。すなわち、Trema, openvswitchを稼働させるためのLinux PCと、拡張ネットワークインターフェース、ホストを接続するための無線LANアクセスポイントである。固定型NDNシステムと異なるのは、拡張されたネットワークインターフェースに接続されるネットワークが、固定型NDNでは各インターネットアクセス網であったが、車載型NDNシステムでは複数の異なる無線ブリッジシステムが接続される。

## 8. 評価

前章で構築したプロトタイプシステムを用いて、本研究の提案手法の有効性を検証するための性能評価を実施する。実施した性能評価は、「固定型NDNシステムを用いたシナリオに基づく切り替え性能の評価」、「車載型NDNシステムを用いたネットワーク性能実測値とアプリケーション要求を考慮した切替手法の評価」の2つであり、これらを実施することでシステムの評価を行った。

## 8.1 固定型NDNシステム評価環境

### a. 評価シナリオ

固定型NDNシステムを評価するために、以下のようなシナリオに基づいて実験を実施する。

- FTTH(光回線), LTE(携帯電話回線), SATELLITE(衛星回線)の3種類が予め利用可能な場所を想定する
- 災害発生を想定して、FTTH回線のケーブル切断による物理故障が発生する。
- 携帯電話網の輻輳が発生したため、利用帯域幅が減少する。

このシナリオに基づいたネットワーク性能の変化を、ケーブルの抜き差しやネットワークエミュレータによる帯域制限を用いて実施することで、実際にネットワーク性能の変化を検知して切替が実施されるかどうかを確認し、同時にクライアントPCから観測されるスループットと、切替にかかる時間を測定する。なお、ネットワーク性能の測定は1分間隔とした。

### b. 評価環境

NDNシステムの評価を行うための環境として、以下の2つの環境を用意した。

#### (ア) 三種複合単純切替

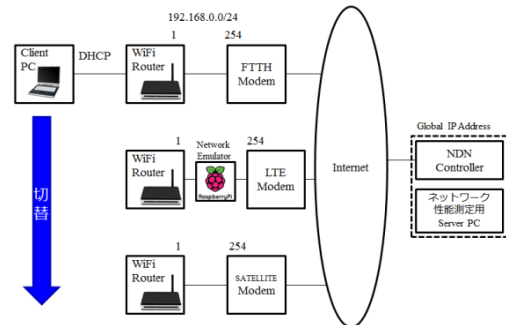


図10 三種複合単純切替環境

三種複合単純切替環境は図10に示す通り、FTTH, LTE, SATELLITEの三種を複合し、接続が失われた場合、次に電波強度が高いWi-Fiルータに単純切替するという環境である。予めすべてのWi-FiルータのSSIDとKeyをClient PCに登録しておき、接続が失われた場合、OSの機能で次のシグナルレベルのWi-Fiにハンドオーバーする。

#### (イ) NDNシステム

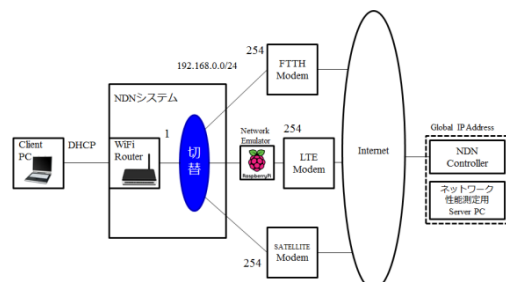


図11 NDNシステム

図 11 に示すのは、本研究の NDN システムを用いた評価環境である。3つのインターネットアクセス網は予め NDN システムに接続されており、切替プロセスが稼働している。Client PC は予め NDN システムが提供する Wi-Fi アクセスポイントに接続済みであり、接続が失われた場合は NDN システムの内部で切替処理を行う。

c. 評価結果

(ア) 三種複合単純切替

三種複合単純切替におけるクライアント PC から観測されたスループット測定の結果は以下の通り。なお、測定は1分間隔で実施されている。

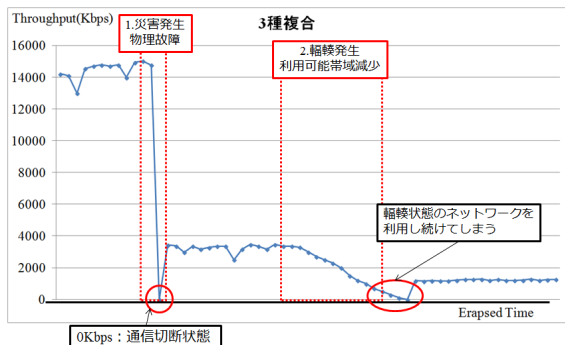


図 12 三種複合環境の評価結果

図 12 の通り、三種複合単純切替環境は Wi-Fi アクセスポイントの OS 機能での切替が行われるため、物理故障が発生した場合暫くの間通信切断状態となることが観測された。また、輻輳が発生した場合は、より良いアクセス網が存在するにも関わらず輻輳状態のネットワークを利用し続けてしまう。これは、ユーザがより良いネットワークの存在を把握することが困難であることを考えると、実際の災害状況下においても輻輳状態の回線を利用し続けてしまうことが考えられる。

(イ) NDN システム

NDN システムにおけるクライアント PC から観測されたスループット測定の結果は以下の通り。なお、こちらもそくいては1分間隔で行った。

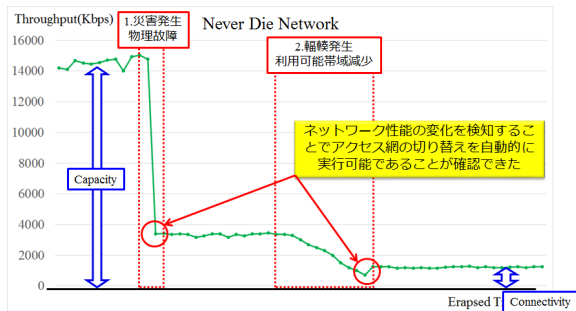


図 13 NDN システムの評価結果

図 13 の通り、NDN システムではアクセス網の切替を

NDN スイッチが行うため、物理的な故障が発生した場合でも即座に利用可能な別の回線に切り替わるため、通信切断状態が発生しないことが観測された。また、輻輳が発生したネットワークにおいても、常にネットワーク性能の変化を監視し続けているため、より良いアクセス網が見つかった場合即座にそちらに切り替えるため、ネットワークリソースを効率よく利用可能であることがわかった。

8.2 車載型 NDN システムの評価

実際に車載型 NDN システムを稼働させた場合に提供可能なネットワーク性能を、通信実験を実施することで評価する。ネットワーク性能評価実験の環境は図 14、図 15 で示す通りである。

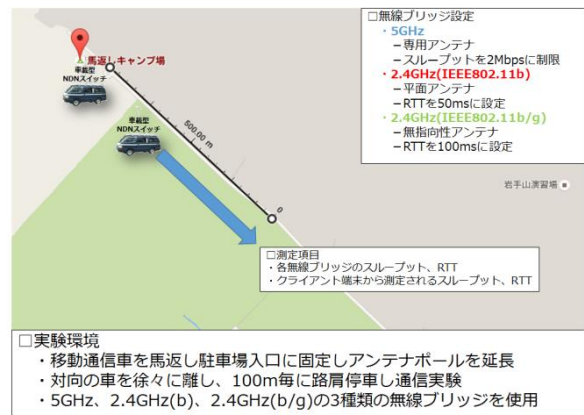


図 14 車載型 NDN システムのネットワーク性能評価実験環境その 1

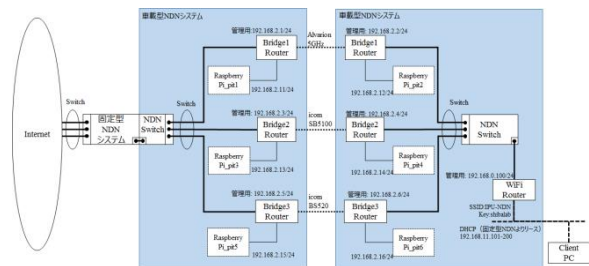


図 15 車載型 NDN システムのネットワーク性能評価実験環境その 2

実験は、岩手山馬返し周辺の岩手山自衛隊演習場横の直線道路で実施した。この道路は見通しで 1km 以上を取れるため、本無線通信実験のフィールドとして選択した。通信実験は 2 台の車両に搭載した車載型 NDN システム間で行う。馬返し駐車場の入り口に車載型 NDN システムを搭載した移動通信車を配置し、アンテナポールに各種機材を取り付け、可能な限りアンテナポールを伸ばしておく。(図 16)



図 16 車載型 NDN システムの設置(駐車場入口側)

もう片方の移動通信車を 100m ずつ移動させ、その都度通信を行うことでデータを収集する。(図 17)



図 17 車載型 NDN システムの設置(移動局側)

実験機器として車載型 NDN システムに接続する無線ブリッジシステムは、5GHz、2.4GHz(IEEE802.11b)、2.4GHz(IEEE802.11b/g)の3種類の周波数帯・無線規格のものを選択した。各無線ブリッジに対して行う実験設定は以下の通り。

- 5GHz
  - 指向性アンテナを接続
  - スループットを上限 2Mbps に制限
- 2.4GHz(IEEE802.11b)
  - 平面アンテナを接続
  - 遅延時間を 50ms に設定
- 2.4GHz(IEEE802.11b/g)
  - 無指向性アンテナを接続
  - 遅延時間を 100ms に設定

また、各無線ブリッジにおけるスループットと遅延時間、及び車載型 NDN システムが提供するネットワークを利用してクライアント端末から測定されるスループットと遅延時間を測定項目として実験を行った。加えて、ネットワークを利用するユーザからのネットワークに対する要求をスループット重視と遅延時間重視の2種類を用意し、そ

れに対応した切替が可能であることを検証した。各無線ブリッジには、測定用の Raspberry Pi が接続されており、Raspberry Pi が各無線ブリッジのネットワーク性能を常時測定し、測定結果を車載型 NDN システムの NDN スイッチに通知する。

これらの仕組みを用いることで、通知されたネットワーク性能の測定結果に基づいて、車載型 NDN システムは利用可能なリンクに動的に切り替えを行うことで、ネットワーク接続を維持し続けることが可能になるとともに、切替判断の際にユーザからのネットワーク要求を考慮することで、ユーザ要求に対応する切替が可能となる。本実験では、これらの実装システムによって提供されるネットワークの性能を測定することで、提案システムの機能を評価する。本実験の結果を以下に示す。

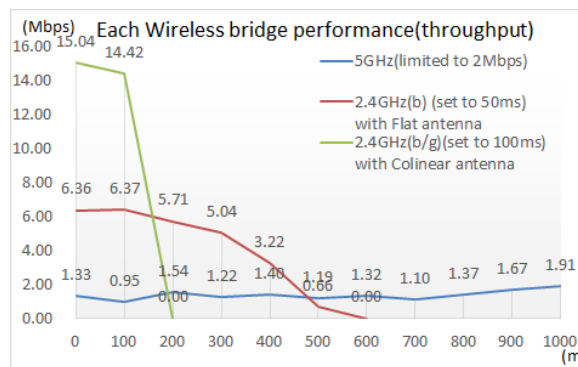


図 18 各無線ブリッジにおけるスループットの変化

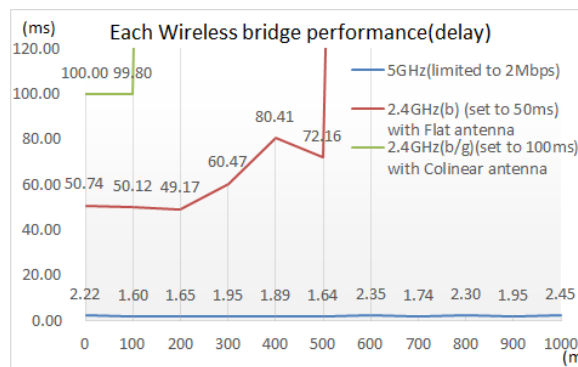


図 19 各無線ブリッジにおける遅延時間の変化

各無線ブリッジの個別のネットワーク性能測定結果は図 18、図 19 に示すとおりである。ブリッジ 1 はスループットの数値は高いが、遅延時間が最低値設定により 100ms 以上となっている上に、コリニアアンテナ装備のため通信距離 200m 地点で通信不能となった。ブリッジ 2 は IEEE802.11b を利用する設定のため、ブリッジ 1 よりスループットが低く、遅延時間は最低値設定により 50ms 以上となっているが、平面アンテナ装備のため通信は 600m ま



で接続可能であった。ブリッジ3は速度制限のためスループットは低いが、遅延時間は最も小さく、高出力の一体型アンテナにより、通信距離は1km以上となった。

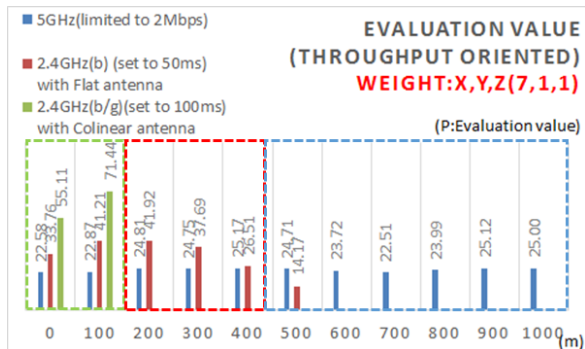


図 20 各地点における評価値の計算結果 (スループット重視(x,y,z:7,1,1))

平面アンテナによって通信できているが、距離が離れることによって徐々にスループットが低下したため、500m 地点でブリッジ1に切り替わった。これは、500m 地点でのブリッジ2の評価値をブリッジ1の評価値が上回ったためである(図20の500m地点を参照)。

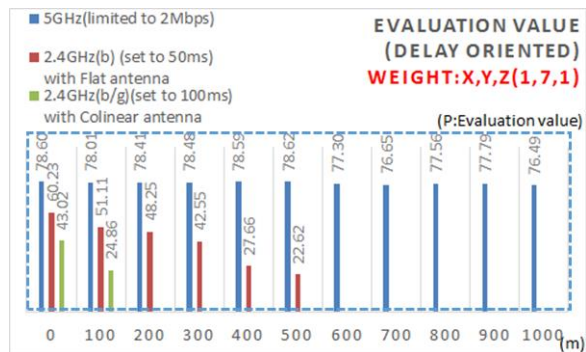


図 23 各地点における評価値の計算結果 (遅延時間重視(x,y,z:1,7,1))

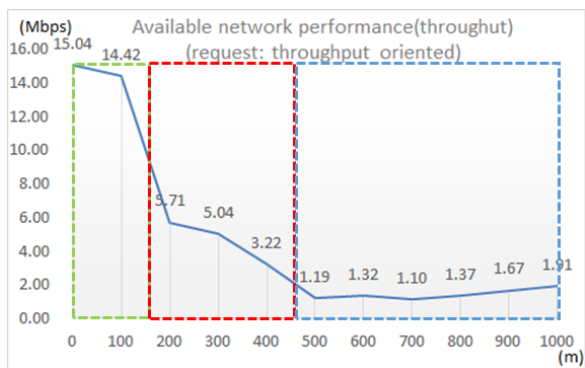


図 21 クライアント端末から測定されたスループットの変化 (スループット重視)

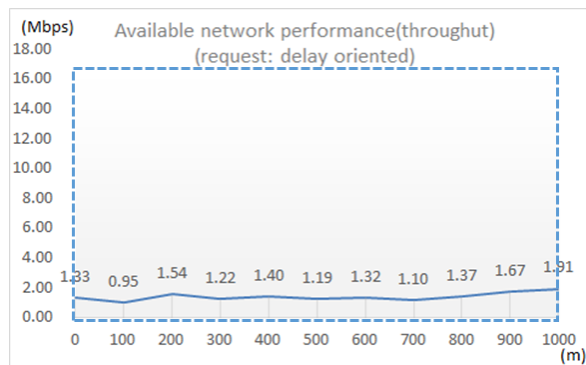


図 24 クライアント端末から測定されたスループットの変化 (遅延時間重視)

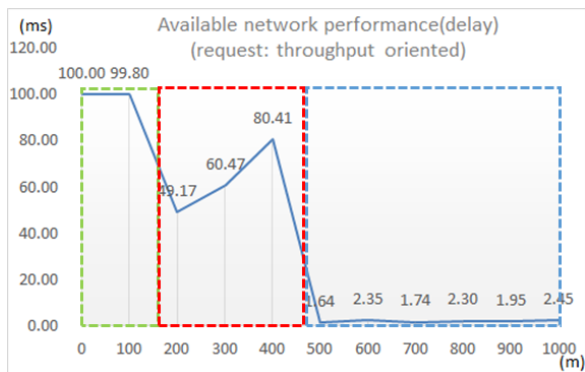


図 22 クライアント端末から測定された遅延時間の変化 (スループット重視)

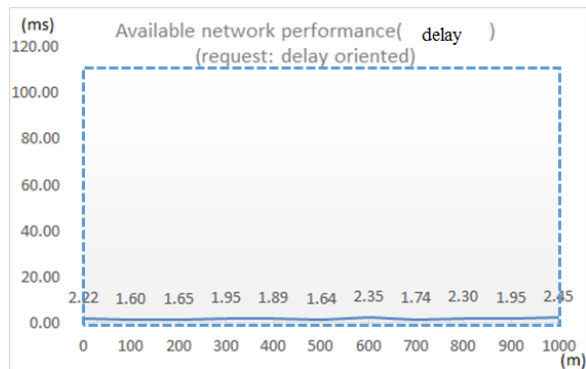


図 25 クライアント端末から測定された遅延時間の変化 (遅延時間重視)

スループットを優先した場合(図20)におけるNDNシステムが提供するネットワークの性能測定結果は図21、図22に示すとおりである。100m地点まではブリッジ3が最も高速のため経路として選択されているが、200m地点で、ブリッジ3はコリニアアンテナの通信距離限界によりリンクダウンし、次にスループットの高いブリッジ2に切り替わった事がわかる。その後、ブリッジ2は500m地点まで

遅延時間を優先した場合(図23)におけるNDNシステムが提供するネットワークの性能測定結果は図24、図25に示すとおりである。図に示す通り、すべての地点で、ブリッジ1が選択された。これは、ブリッジ2、ブリッジ3が遅

延時間の大きい無線ブリッジのため、遅延時間を優先した要求に於いては評価値が低下するためである。このように、本システムを用い、ネットワークに対する要求を重みとして与えることで、要求に沿ったネットワークを選択して提供することが可能ということが実験を通して実証された。

## 9. まとめ

本研究では、リンク切り替え手法とネットワーク拡張のためのシステムについて有効性を検証するため、固定型NDNシステムと車載型NDNシステムのプロトタイプシステムを実際に実装し、それぞれの内部でネットワーク性能測定を実施し、評価実験に用いた。これらの評価実験を通して、従来手法では通信の切断が発生してしまうようなシチュエーションでも、NDNシステムを用いることで通信切断が発生することなく通信を維持し続けられることが確認でき、また輻輳などでネットワーク性能が低下した場合でもNDNシステムはそれを察知してより良いアクセス網へ動的に切替を行うことが可能であるということを実証した。そして、強固なインターネットゲートウェイから接続可能なネットワーク距離を伸ばすための車載型NDNシステムを構築し、通信の検証実験を行ったことで、救助活動地域などの物理的に離れた場所へのネットワーク拡張を同時に実現可能であることを実証した。

今後の課題として、テストベッド環境における提案アルゴリズムの評価のため、突発的な災害シナリオに基づくネットワーク性能の変化のエミュレート環境の構築が挙げられる。再現性の高い物理テストベッドはNetwork Emulatorの拡張により実装可能であることが実証できたが、NDNシステムのための精度の高い評価環境を構築するためにはより大規模なエミュレート環境を用意する必要がある。

また、現実的な災害状況シナリオに基づくNDNシステムの評価を行うため、実際に東日本大震災で発生した事柄を時系列で整理したシナリオを作成し、それに基づく定量的・定性的な評価を行っていく。このシナリオ作成には、NDNシステムに有利とも取れる設定を行うのではなく、例えば防災訓練を行っている自治体と協力し、自治体が提示する防災訓練のシナリオを用いることで、NDNシステムがどの程度活用できるかを評価するための、より客観的な評価を実施する事ができる。

## 参考文献

- 1) Y. Shibata, N. Uchida, Y. Ohashi. "Problem Analysis and Solutions of Information Network Systems on East Japan Great Earthquake," Fourth International Workshop on Disaster and Emergency Information Network Systems (IWDENS2012), pp.1054-1059, Mar. 2012.
- 2) N. Uchida, K. Takahata, Y. Shibata. "Disaster Information System from Communication Traffic Analysis and Connectivity (Quick Report from Japan Earthquake and Tsunami on March 11th, 2011)", The 14th International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS2011), pp279-285, Sep. 2011. Tirana, Albania.
- 3) J. Mitola III, G. Q. Maguire. Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal. IEEE Personal Communications, August 1999.
- 4) Noriki Uchida Min-Max Based AHP Method for Route Selection in Cognitive Wireless Network, NBIS '10 Proceedings of the 2010 13th International Conference on Network-Based Information Systems Pages 22-27
- 5) Open Networking Foundation, SDN, (<https://www.opennetworking.org/>)
- 6) OpenFlow, (<https://www.opennetworking.org/sdn-resources/openflow.>)
- 7) Ahmed Ait Ali, Fabien Michaut, Francis Lepage, CRAN, "End-to-End Available Bandwidth Measurement Tools: A Comparative Evaluation of Performances", IPS-MoMe, 2006
- 8) Alexandre Gerber, Jeffrey Pang, Oliver Spatscheck, Shobha Venkataraman, AT&T Labs, "Speed Testing without Speed Tests: Estimating Achievable Download Speed from Passive Measurements", IMC'10, November 1-3, 2010
- 9) Vinay J. Ribeiro, Rudolf H. Riedi, Richard G. Baraniuk pathChirp: Efficient Available Bandwidth Estimation for Network Paths Presented at Passive and Active Monitoring Workshop (PAM 2003), 4/6/2003-4/8/2003, San Diego, CA, US
- 10) Oshiba, T. Service Platforms Res. Labs., NEC Corp., Japan Nakajima, K. " Quick end-to-end available bandwidth estimation for QoS of real-time multimedia communication" Computers and Communications (ISCC), 2010