

SDN技術に基づく災害に強いネバー・ダイ・ネットワークシステムの開発と評価

佐藤 剛至^{1,a)} 内田 法彦² 白鳥 則郎³ 柴田 義孝¹

概要: 東日本大震災に伴う大津波被害により、多くの既存ネットワークシステムは様々な要因で機能を停止した。そのような状況の中で、衛星 IP 通信システムや携帯電話網、無線 LAN が被災地に投入され、ネットワークの仮復旧に効果を発揮した。我々は来るべき南海トラフ大地震に備えるため、これらの経験を踏まえた新たなネットワークシステムであるネバー・ダイ・ネットワークシステムを開発する。本稿では、複数の異なるアクセス網を備える本研究のネバー・ダイ・ネットワークシステムにおいて、刻々と変化する被災地のスループットやパケットロス等の通信状態に追従し、システムが常に最適なパケットフローを自律的に導出するための手法を提案し、プロトタイプシステムの構築を行うことで提案手法の検証・評価を行った。

1. はじめに

平成 23 年に発生した東日本大震災に伴う大津波災害により、被災地の情報通信手段の状況に以下の様な問題が発生した [1].

- 有線通信網、携帯通信網の故障・輻輳
- 周囲に利用可能な電波があるかどうか不明
- ネットワーク管理者不在による障害復旧作業難
- 情報孤立地域の発生
- 普段利用しない緊急時通信設備の故障発覚
- 電源設備の故障、バッテリー切れ

これらの問題を解決するために、以下のような特徴を持つネットワークシステムが求められていると言える。

- 物理的に冗長なハードウェア構成
- 利用可能な通信電波をシステム自身が検知
- 輻輳等によるネットワーク性能の変化を把握
- 自動的なネットワーク設定変更によるインターネット接続の提供
- ネットワーク提供可能範囲の動的な拡張
- 通常時の Network Capability と災害状況下での Net-

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 (RTT500~1000ms)	通信距離に難 (指向性アンテナで距離向上可)
東日本大震災時の状況	×	△	△	○	○

図 1 各種情報通信手段の比較

Fig. 1 Comparison of various types of information communication systems

work Connectivity を両立

- 自立的な電力供給

加えて、東日本大震災では実際に衛星 IP 通信システムや移動型の携帯電話網、無線 LAN、アドホックネットワーク等の複数の異なる通信網が被災地に投入され、ネットワークの仮復旧に大きな効果を発揮した [2]。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、図 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ことが考えられる。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冗長的に活用するようなネットワークシステムが有効であると考えられる。

そこで我々は、複数の異なる情報通信手段を統合管理し、災害時の刻々と変化する状況に柔軟に追従していくことで、通常時の Network Capability と災害時の Network

¹ 岩手県立大学
Iwate Prefectural University, Takizawa, Iwate 020-0193, Japan

² 福岡工業大学
Fukuoka Institute of Technology, Higashi-Ku, Fukuoka 811-0295, Japan

³ 早稲田大学
Waseda University, 1-104, Totsuka, Shinjuku, Tokyo, 169-0071, Japan

a) g236l001@s.iwate-pu.ac.jp

Connectivity を両立するネットワークシステムであるネバー・ダイ・ネットワークシステム（以下、NDN システムと呼称する。）を開発する。本稿では、2 章で関連研究との差異に言及した上で、3 章で NDN システムを構成する要素技術であるコグニティブ無線技術と Software Defined Network (SDN) 技術を説明し、4 章で NDN システムの開発目的と開発要件、目指す方向性を明確にする。5 章と 6 章で、刻々と変化する被災地のスループットやパケットロス等の通信状態に追従し、システムが常に最適なパケットフローを自律的に導出するための手法を提案する。提案手法の実証のためのプロトタイプシステムに関して 7 章で述べ、8 章でプロトタイプシステムを用いた提案手法の評価と検証、構築するテストベッド環境について述べる。

2. 関連研究

2.1 耐災害ワイヤレスメッシュネットワーク

耐災害ワイヤレスメッシュネットワークは、情報通信研究機構により研究開発されている非常時の地域内情報通信、同報手段として、平時でも利用できるネットワークシステムである [3]。特徴は以下の通り。

- 輻輳が起きにくい
- 基地局が一部壊れても、他のルートで迂回する
- インターネット接続が切れてしまった場合、地域内で通信を継続
- 孤立地域を中継することで、通信を確保
- 災害時・平時においてシームレスにアプリケーションの提供が可能

耐災害ワイヤレスメッシュネットワークは、インターネット接続をどのように確保するかを検討しているのではなく、インターネット接続がない場合でも最低限地域内の情報交換を行えるようにするためのネットワークである。一方で、災害状況下においては被災地域内だけでなく被災地域外からのアクセスや、安否状況確認の要求は高い。インターネット接続を前提としたクラウド上の災害情報システム等を利用する必要がある場合、耐災害ワイヤレスメッシュネットワークではサポートできない可能性がある。

2.2 メッシュ接続対応コグニティブ無線ルータ

メッシュ接続対応コグニティブ無線ルータは、同じく情報通信研究機構により研究開発されているものである [4]。ルータ同士が自動的に相互接続して通信経路を設定し、直接インターネットに接続困難な場所でも、メッシュネットワークを介して IP 通信を中継する。また、インターネット接続は、内蔵する LTE 及び WiMAX のうち、通信速度や安定性の観点からコグニティブ無線機能により最適なシステムを自動選択する。特徴は以下の通り。

- コグニティブ無線技術による通信システムの自動選択
- メッシュネットワーク技術による無線通信バックボーン

ネットワークの構築

メッシュ接続対応コグニティブ無線ルータは、機器内にビルドインされている携帯電話網と PHS 網のみ利用可能であるため、被災地域内において、FTTH や衛星通信網などこれ以外にも利用可能な網があったとしても、メッシュ接続対応コグニティブ無線ルータでは連携を行うことが出来ない。また、災害発生前の通常時における Network Capability を考慮しておらず、あくまで緊急時用のネットワークシステムとして設計されているため、いざというときに故障が発覚したり、利用方法がわからなかったりする可能性がある。

3. 関連技術

本研究では、利用可能な周囲の電波を検知し、そのネットワークの性能を測定するためにコグニティブ無線技術を用いる。また、検知・測定された周囲の電波状況に応じて自動的にネットワーク設定を変更するために Software Defined Network 技術を用いる。本章では、これらの関連技術に関して説明する。

3.1 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気づかせないまま、周波数や通信方式を変えて通信する技術である [5] が、この技術を TCP/IP 参照モデルにおけるネットワーク層へ拡大することで、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、周波数や無線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 [6]。本研究においては、複数のアクセス網を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することで、システムが最適なアクセス網を判断するために用いる。

3.2 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 [7]。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意思決定機能とパケット転送機能を分離した点である。意思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定義をプログラム可能としている。

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。これは、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ることを示す [8]。本研究では、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を利用するために用いる。

4. 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ネバー・ダイ・ネットワークシステム (NDN システム) を開発することである。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
- アドホック通信技術を用いたネットワーク範囲を拡張する仕組みを実装
- 通常時の Network Capability と災害状況下での Network Connectivity を両立
- 自立電源の供給

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。NDN システムが目指す Connectivity と Capability の、既存ネットワークとの違いを図 2、図 3 に示す。

本研究の目的は、東日本大震災の教訓を踏まえ、災害時のいかなる状況においても通信を可能とする新たなネットワークシステムであるネバー・ダイ・ネットワークシステム (以下、NDN システムと呼称) を開発することである。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。

- 物理的に冗長なハードウェア構成

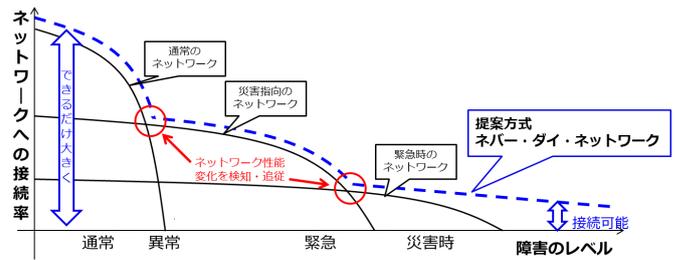


図 2 ネバー・ダイ・ネットワークの目指す接続性

Fig. 2 Connectivity of Never-Die Network for level of failure

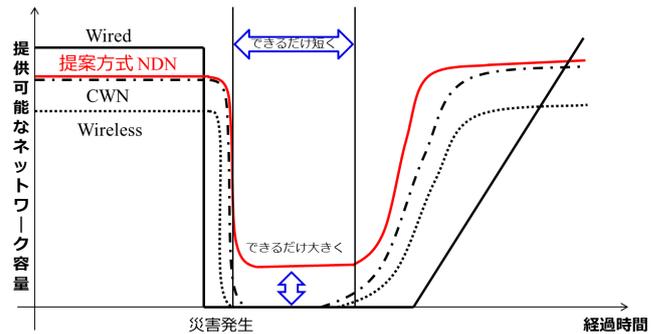


図 3 ネバー・ダイ・ネットワークの目指す提供性能

Fig. 3 Capability of Never-Die Network for Elapsed Time from the disaster

- 物理故障、輻輳等によるネットワーク性能変化の把握
 - 物理故障・輻輳等の回避のためのパケットフロー制御
- 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導入する。

5. 研究概要

5.1 NDN システム概要

本研究で開発する NDN システムの概要を図 4 に示す。本システムは、NDN スイッチ、車載型 NDN スイッチ、NDN コントローラの 3 つの要素で構成される。

- (1) NDN スイッチ
- (2) 車載型 NDN スイッチ
- (3) NDN コントローラ

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ものである。物理的に冗長なハードウェア構成

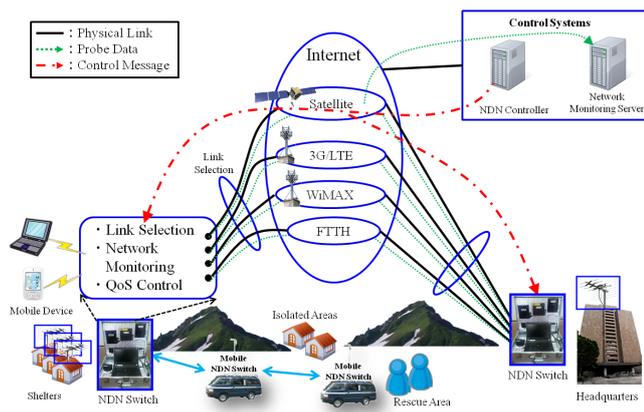


図 4 NDN システム概要図
Fig. 4 Abstract of NDN System

として、3G/LTE や WiMAX, FTTH や衛星通信などのその場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。また、独立して供給可能な自立電源を備える。

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ものである。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。なお、本稿では車載型 NDN スイッチに関する説明は割愛する。

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ものである。

5.2 ネットワーク性能測定

本システムはネットワーク性能の変化を検知するために、一定間隔で NDN スイッチと、本システム用にインターネット上に配置したネットワーク計測用のサーバ間でネットワーク性能の測定監視を行う。測定する対象は以下の3つである。

- スループット
- 平均遅延時間
- 平均パケットロス率

スループットを測定する手法には、パケットが通過するルータに計測機能を実装することで算出する Passive 方式と、計測するエンド端末間でプローブパケットをやりとりして計測する Active 方式がある。このうち、Passive 方式はパケットが通過するすべてのルータに計測機能を実装できることが前提となるため、複数の管理主体からなるインターネットを介する本システムでは実現が困難である。

よって本システムでは Active 方式を採用する。Active 方式のスループット測定手法には、iperf に代表される大量のパケット挿入による可用帯域幅測定手法と、pathchirp[9] や pathquick[10] に代表されるパケットトレイン方式による可用帯域幅推定手法がある。この内、iperf のように大量のパケットを挿入する方式では、本システムで構築するネットワークそのものに影響を与えてしまうため、本システムではパケットトレイン方式によるスループット監視を行う。

遅延時間・パケットロス率の計測には、送信側タイムスタンプ T_s を付与した UDP パケットを一定の間隔で n 個送信し、受信側のタイムスタンプ T_r と照合することで求める。具体的には以下の式で算出する。

- 平均遅延時間

$$\frac{\sum (T_r - T_s)}{n} \quad (1)$$

- 平均パケットロス率

$$1 - \frac{n'}{n} \quad (2)$$

(n' は受信に成功した UDP パケットの数)

6. 通信状態を考慮したパケットフロー選択手法

6.1 提案手法概要

災害状況下において時々刻々と変化していくネットワークの状況に追従するため、本研究で構築する NDN スイッチは、データを送出するためのアクセス網を複数収容し、かつそれぞれ毎にネットワーク性能を測定する。測定の結果に基づき、後述するパケットフロー選択アルゴリズムによって各アクセス網の優先度を算出することで、実際に経路として利用するアクセス網を決定する。

6.2 パケットフロー選択アルゴリズム

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。

6.2.1 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は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 (3) 式で算出する。なお、式内の m_t は最新の測定値を表す。同様に、 m_{t-1}, m_{t-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 $(0.6, 0.3, 0.1)$ となる。

$$n_i = am_t + bm_{t-1} + cm_{t-2} \quad (3)$$

6.2.2 収集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 (4) 式の定義を用い、スループットの正規化には (5) 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。

$$S_i = \begin{cases} (1 - \frac{n_i - l_i}{u_i - l_i}) * 10 & (l_i < n_i < u_i) \\ 1 & (n_i \geq u_i) \\ 9 & (n_i \leq l_i) \end{cases} \quad (4)$$

$$S_i = (\frac{n_i - l_i}{u_{max} - l_i}) * 10 \quad (5)$$

(4), (5) 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。

6.2.3 各アクセス網の評価

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、各アクセス網毎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 (6) 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。

$$P_i = xn_{throughput} + yn_{packetlossrate} + zn_{delay} \quad (6)$$

評価値 P_i は各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、最終的なパケットフローとして選択される。

6.3 パケットフロー制御

6.3.1 OpenFlow によるパケットフロー制御

本システムでは、パケットフロー選択アルゴリズムにより決定されたアクセス網にパケットフローを制御するために、SDN 技術の一つである OpenFlow[11] を用いる。OpenFlow では OpenFlowSwitch から発信される各種メッセージを OpenFlowController が受け取り、対応するイベントを実行することで処理を行うイベントドリブン方式の実装が一般的である。本システムで利用する主なイベントを以下に示す。

- switch_ready
OpenFlowSwitch と OpenFlowController 間のリンクが確立した際に呼び出される。
- features_reply
OpenFlowSwitch の情報を取得するための features_request メッセージへの返答を受け取った際に呼び出される。
- access_change
提案手法により、選択中のアクセス網を変更する必要があると判断された場合に呼び出される。内部では、OpenFlow プロトコルにおける Flow Mod 命令を switch に対して発行する。

これらのイベントの組み合わせによりパケットの流れを制御する。NDN Controller と NDN Switch 間のメッセージフローは図 5 の通りである。

最初に NDN Switch は、NDN Controller にネットワークへ参加したことを通知するための switch_ready メッセージを発行する。次に switch_ready メッセージを受け取っ

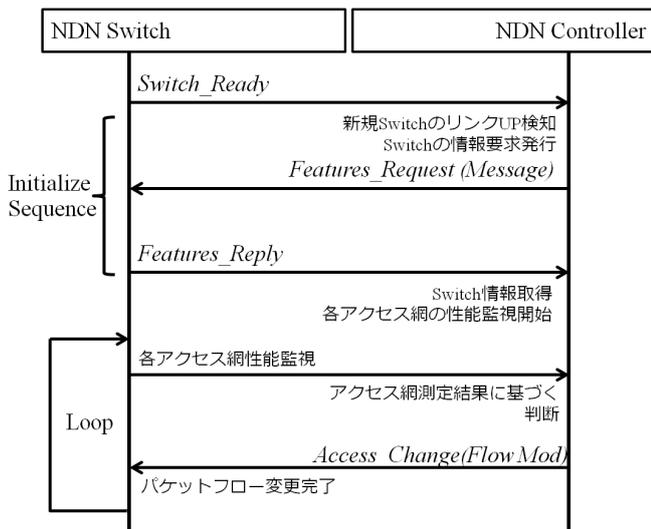


図 5 SDN メッセージフロー
Fig. 5 Message Flow of SDN

た Controller は、新規に Switch が参加したことを検知し、Switch に対して Switch 自身の情報を通知するよう要求するメッセージを発行する。Switch 自身の情報には、Switch ID、アクセス網収容数、装備 NIC の MAC アドレス等がある。Switch 自身の情報を Controller へ通知することで、初期化シーケンスが完了となる。初期化された Switch から順に、収容しているアクセス網の性能監視をスタートし、随時 Controller へ監視結果を通知する。蓄積された監視結果に基づき、拡張 AHP 計算を行うことで Controller がアクセス網切り替えの必要ありと判断した場合、対象 Switch に Flow Mod メッセージを発行することでパケットフローの制御を実現する。

6.3.2 ネットワーク性能測定用パケットフロー制御

ネットワーク性能の監視結果に基づいて最適なフローへと制御される一般的なデータパケットとは別に、本システムが発信するネットワーク計測用の特別なパケットは、常に決められたフローに基づいて制御される必要がある。具体的には、最適フローが現在どのアクセス網を選択しているようにも、衛星通信網測定用のパケットは常に衛星通信網に、FTTH 網測定用パケットは常に FTTH 網に流れる必要がある、ということである。これを実現するために、SDN 技術におけるクロスレイヤ制御を用いる。TCP/IP による宛先ポート 10000 を利用する衛星通信網測定用アプリケーションを用いた場合、図 6 の様なフロー定義を行うことでこれを実現する。

7. プロトタイプシステム

7.1 システム構成

本システム及び提案手法を評価するためのプロトタイプシステムを図 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

```
Flow Mod
(:match=>
  (:phy_port=> <Monitoring port>
   :dl_type=> <Ethernet>
   :nw_proto=> <tcp/ip>
   :tp_port=> 10000
  )
  :action=> <output_satellite_port>
)
```

図 6 ネットワーク測定用パケットのためのフロー定義
Fig. 6 Flow definition for network measurement packet

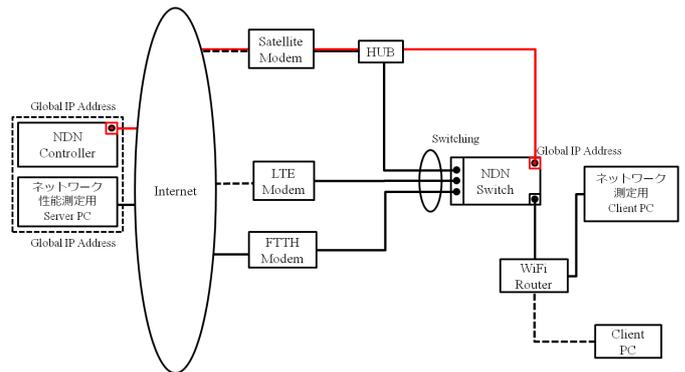


図 7 プロトタイプシステム構成
Fig. 7 Prototype System Configuration

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の実証と評価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

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 チャネルは常に開いておく必要があるため、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 ServerPC 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



図 8 プロトタイプシステム機器構成外観

Fig. 8 Device configuration of prototype system

表 1 プロトタイプシステム使用機器

Table 1 Device list of prototype system

用途	使用機器
NDN コントローラ	Lenovo ThinkPad T430
NDN スイッチ	Lenovo ThinkPad E130
拡張 NIC	Logitech LAN-GTJU3
アクセスポイント	Buffalo WZR-G144N
衛星通信	IPSTAR
3G/LTE 通信	NTT Docomo
FTTH 通信	NTT フレッツ
測定用 PC	Raspberry Pi 2 B
測定用 Server	Lenovo ThinkPad T430

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 デバイス構成

本プロトタイプシステムを構成するデバイスについて説明する。NDN コントローラは、OpenFlow Framework の一つである Trema を用いて実装した。Trema は Linux OS 上でのみ動作するフレームワークのため、NDN コントローラのデバイスは Linux OS をインストールした PC である。NDN スイッチは、Linux PC を OpenFlowSwitch として動作させる openvswitch を用いるため、NDN コントローラと同じくデバイスは Linux OS をインストールした PC である。また、NDN スイッチは複数の無線アクセス網を収容するため、物理 NIC を拡張する必要がある。本プロトタイプシステムでは、USB 接続によって物理 NIC を拡張するデバイスを用いて実現している。NDN スイッチが提供するネットワークに参加するためのアクセスポイントとして動作する無線 LAN ルータを組み込む。以上のデバイスにより構築されたプロトタイプシステムを図 8 に示し、使用した機器のリストを表 1 に示す。

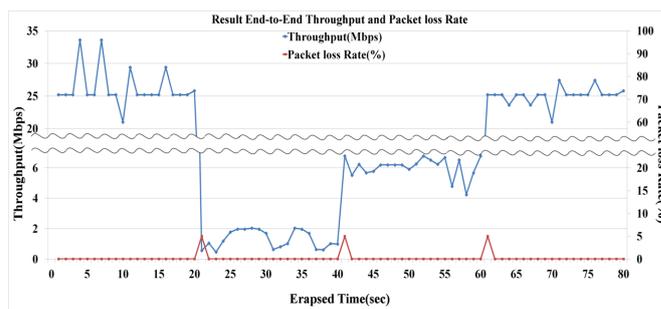


図 9 シナリオに基づくエンド間スループットとパケットロス測定結果

Fig. 9 End-to-end performance measurement results based on the scenario

8. 検証と評価

8.1 シナリオ評価

提案システムの有用性を検証するため、災害発生シナリオに基づいて時間経過でアクセス網の切替を意図的に発生させ、その際のエンド間のスループット及びパケットロス率の変化を評価した。災害発生シナリオは以下の通りである。

- (1) 開始時は 3 つ全てのアクセス網が利用可能
- (2) シナリオ開始から 20 秒時点で災害が発生し、FTTH 及び 3G/LTE 網の両方が電源の障害で停止
- (3) シナリオ開始から 40 秒後、3G/LTE 網が回復
- (4) シナリオ開始から 60 秒後、FTTH 網が回復

我々はこれらのシナリオを通して、エンド間スループットとパケットロス率を測定した。結果を図 9 に示す。

開始から 20 秒後、エンド間スループットが FTTH の平均 25Mbps から、衛星回線の平均 1.29Mbps へ急激に低下した。これは、選択されていたパケットフローが、ネットワーク性能測定の結果性能が悪化したことを受けて即座にパケットフローの再選択が行われたことを表す。これにより、利用可能な衛星通信網に自動的に切り替わったことがわかる。その 20 秒後、3G/LTE 回線が回復したことで、平均 7.2Mbps まで回復した。これは、加重移動平均計算の結果、3G/LTE の評価値が衛星通信を超えた時点で自動的にパケットフローが 3G/LTE 網に切り替わったことを示す。更に 20 秒後、同様にして FTTH 回線による平均 25Mbps に切り替わったことがわかる。なお、それぞれの切替処理によって生じるパケットロス率はその時点で 5% 未満であった。

8.2 ネットワーク実測値に基づくパケットフロー制御検証

我々はネットワーク実測値に基づきパケットフローの制御が実際に行われるかを、実機上に実装した NDN システムで検証した。検証に使う NDN スイッチには、FTTH、3G/LTE、衛星通信用のデバイスを接続した。本検証では、

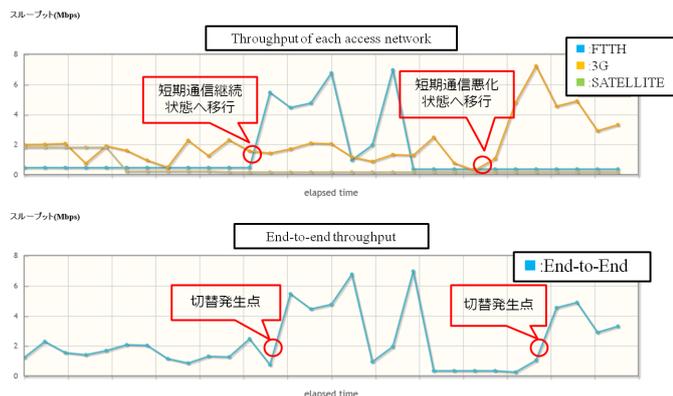


図 10 ネットワーク実測値に基づくパケットフロー制御

Fig. 10 Link switching based on network performance monitoring results

パケットフロー制御が実際に行われるかを検証することが目的であるため、それぞれのアクセス網のスループットのみを計測し、切替判断のトリガーとした。実際の各アクセス網のスループット計測結果と、その際 NDN システムに接続していた PC から観測されたエンド間スループットの値のグラフをそれぞれ図 10 に示す。なお、各アクセス網の測定結果は NDN システムに内蔵されているネットワーク性能測定用 PC が計測し、エンド間スループットはアクセスポイント経由で接続している一般的な Windows PC からネットワーク測定用 Server に向けて iperf で測定した。また、ネットワーク性能の変化を意図的に発生させるため、FTTH 網と 3G/LTE 網が接続されている NDN スイッチのイーサネットポートに対して、Linux で動作する TC コマンド (Traffic Control) を用いて帯域制御を適宜実施した。

図 10 より、ネットワークの実測値に基づいてパケットフロー制御が実施されていることが確認できる。また、提案アルゴリズムにおける、加重移動平均計算の値に基づいた切替判断が適切に行われることによって、実際のパケットフローが切り替わったことがわかる。瞬間的なネットワーク性能の低下による断続的な切替処理の発生を防ぐことにより、通信セッションの維持やパケットロスを防ぐことに成功した。

9. おわりに

本稿では、東日本大震災の教訓を踏まえ、災害時のいかなる状況においても通信を可能とする新たなネットワークシステムであるネバー・ダイ・ネットワークシステムを提案し、システムを構成する要素技術や提案手法について述べた。また、ネットワーク性能測定機構と提案アルゴリズムに基づくパケットフロー制御機構を実装したプロトタイプシステムを構築し、災害シナリオに基づいたシステムの評価やネットワーク性能の実測値を用いた提案アルゴリズムの検証を行うことで、NDN システムの有用性を実証し

た。また、実際に岩手県の 3 拠点にプロトタイプシステムを配置することで、テストベッド環境を整備した。

今後の課題としては、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の拡張により、NDN システムのための精度の高い評価環境を構築する必要がある。また、より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。

参考文献

- [1] Yoshitaka Shibata, Noriki Uchida, Yuji Ohashi.: Problem Analysis and Solutions of Information Network Systems on East Japan Great Earthquake, 2012, Advanced Information Networking and Applications Workshops(AINA2012)
- [2] Yoshitaka Shibata, Noriki Uchida, Norio Shiratori.: Analysis and Proposal of Disaster Information Network from Experience of the Great East Japan Earthquake, IEEE Communications Magazine, March 2014, pp.44-48.
- [3] 井上 真杉, 大和田 泰伯, “耐災害ワイヤレスメッシュネットワークの実証”, 信学技法 IEICE Technical Report, IN2013-17, RCS2013-27, p25-30, May. 2013.
- [4] ワイヤレス・ネットワーク研究所 スマートワイヤレス研究所, “メッシュ接続対応コグニティブ無線ルータを用いた無線通信インフラ構築”, NICT, <http://www.nict.go.jp/press/2013/05/28-1.html>, May. 2013.
- [5] J. Mitola III, G. Q. Maguire.: Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal. IEEE Personal Communications, August 1999.
- [6] S. Haykin.: Cognitive radio: brain-empowered wireless communications IEEE Journal Selected Areas Commun., vol.23, no.2, Feb. 2005.
- [7] Open Network Foundation Transforming networking with Software-Defined Networking (SDN), a unique architecture bringing direct software programmability to networks worldwide(online), <https://www.opennetworking.org/ja/>
- [8] Shunichi KINOSHITA, Toshiki WATANABE, Junichi YAMATO, Hideaki GOTO and Hideaki SONE.: Implementation and Evaluation of an OpenFlow-based Access Control System for Wireless LAN Roaming, 2012, Computer Software and Applications Workshops
- [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
- [11] OpenFlow(online) <https://www.opennetworking.org/>