

2015 年度博士後期課程（ソフトウェア情報学）論文

OpenFlow 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・ネットワークに関する研究

Research on Never Die Network for Disaster Prevention based on
OpenFlow and Cognitive Wireless Technology

岩手県立大学大学院

ソフトウェア情報学研究科

2016 年 3 月 15 日

2362013001

佐藤 剛至

研究指導教員 柴田 義孝

澤本 潤

Goutam Chakraborty

要旨

東日本大震災に伴う大津波被害により、被災地域における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。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 **Network Connectivity** を復旧させることができた。このことから、災害時に有効と考えられる情報通信手段はいくつか存在すると言えるが、これらの情報通信手段は得手不得手があり、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。また、緊急用の情報通信システムは、いざというときに利用方法がわからなかったり、バッテリーが切れていたりして利用できなかったという状況が実際にあったため、通常時から利用可能なシステムとして、十分な **Network Capacity** を備えた設計することも重要であるとわかった。我々はこれらの東日本大震災の経験を踏まえて、通常時の **Network Capacity** と災害時の **Network Connectivity** を両立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(Never Die Network, NDN システム)**を開発する。

本研究における **NDN システム**は、複数の異なるアクセス網を備え、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、コグニティブ無線技術を用いることで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し、その結果に基づいて利用するアクセス網を選択する。ネットワークシステムである **NDN システム**上でネットワーク性能の変化を監視することになるため、**NDN システム**上の通信セッションを考慮した、軽量かつ迅速なネットワーク性能測定手法が求められる。また、**NDN システム**は時々刻々と変化する被災地のネットワーク性能と、ネットワーク利用者のアプリケーション要求の変更に対応する必要がある。加えて、災害状況下においては、提供可能なネットワーク容量に対して非常に多くの通信要求が発生し、輻輳や移動通信車などの仮設通信システムがダウンすることが想定される。しかしながら、災害時は自治体間通信や医療施設間通信など、人命に関わる情報は優先して処理されるべきであると考えられる。本研究では、測定精度よりも、測定にかかる時間短縮やデータ量の削減を重視したネットワーク性能測定手法を採用し、かつ **NDN システム**上の通信セッションの切れ目を **OpenFlow** 技術によって検知することで、**NDN システム**上の通信を阻害しないネットワーク性能測定手法を提案する。また、ネットワーク測定結果に基づき、ネットワークに対するアプリケーション要求を考慮した上で、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、**OpenFlow** 技術によって通信者やアプリケーションを判別し、その権限や優先度を考慮して優先処理するための手法を提案する。

我々は、本研究における提案手法を評価し、実際に運用していくために、可搬型のプロトタイプシステムを実装し、滝沢・釜石・宮古の三拠点を活用したテストベッドを構築した。本プロトタイプシステムを用いた予備実験として、ネットワーク性能測定にかかるデータ量と時間の評価、通信セッションを考慮した測定タイミング選択手法の評価を行った。加えて、ネットワーク性能測定結果とネットワーク要求を考慮したアクセス網切り替え手法について評価し、最終的に、**NDN システム**が目指す通常時の **Network Capacity** と災害時の **Network Connectivity** を両立するネットワーク提供機能に関して、災害のシナリオに基づいた実験を行うことで提案手法の機能の検証を行った。

Abstract

By large tsunami damage on the Great East Japan Earthquake on March 11, 2011, many existing network systems stopped their functions by various factors. Even under such circumstances, some of the information communication means which include satellite communication were able to quickly and effectively recover from the network disconnection. However, since most of the communication means have both strong and weak characteristics, only a single communication means does not always perform its functionality when the situation of the disaster changes in temporal and spatial. In addition, due to the energy shortage of battery or lack of knowledge how to use the system, the emergency information communication system may not be available. Therefore, it is important to design a system available on ordinal situation by providing enough Network Capacity. We develop Never Die Network (NDN) system that is a new network system to achieve both the Network Capacity in normal situation and the Network Connectivity in disaster situation based on the experience from Great East Japan Earthquake.

NDN system can accommodate a plurality of different Internet access networks based on the experience of the Great East Japan Earthquake. NDN system comprising a plurality of different access networks is always measures the state of each Internet access networks. If the amount of measurement packet increased, there is a problem that inhibits the communication from the network user to be transferred on the NDN system. In addition, the application requirement to the disaster information network is constantly change. NDN system requires the ability to select the best Internet access network. By understand the disaster area of network status. In addition, it is necessary to respond to the changes in the application requirements of the network users. Moreover, under accidental conditions, temporary communication systems such as mobile communications vehicle is assumed down by many communication requests occurred against capable of providing network capacity. However, to be communication should be processed with priority in the disaster situation. NDN system must to execute the process to recognize the priority of the communication packet and the offloading packet based on the traffic. The system will be adopted quickly and lightweight network performance measurement method. And, we realize the network performance measurement method that does not interfere with the packet flow over the NDN system by detecting a break in a communications session through the NDN on the system using OpenFlow technology. Furthermore, we propose a method to autonomously derive optimum packet flow based on the network measurements in consideration of application request to the network. We realize a method for priority processing in consideration of rights and priorities by determining the communication user or application using OpenFlow technology. We prepared a test bed that implements a prototype system, and evaluated the performance based on a disaster scenario.

目次

第1章	序論	10
1.1.	はじめに.....	10
1.2.	東日本大震災の概要.....	10
1.3.	岩手県における大震災の被害.....	15
1.4.	災害時の通信状況と問題点.....	17
1.4.1.	固定電話.....	18
1.4.2.	携帯電話.....	18
1.4.3.	ラジオ.....	19
1.4.4.	衛星 IP ネットワーク.....	20
1.4.5.	無線 LAN.....	20
1.4.6.	インターネット.....	20
1.4.7.	地域イントラネット.....	21
1.4.8.	医療情報ネットワークおよびボランティアネットワーク.....	22
1.5.	災害時に有効な通信手段.....	22
1.6.	災害時通信ネットワークに求められる機能.....	23
1.6.1.	ネットワーク接続.....	23
1.6.2.	必要とされる頑強なネットワーク.....	25
1.7.	本研究の目的.....	26
1.8.	関連研究と本研究の位置づけ.....	28
1.8.1.	Resilient Overlay Networks.....	28
1.8.2.	耐災害ワイヤレスメッシュネットワーク.....	29
1.8.3.	メッシュ接続対応コグニティブ無線ルータ.....	29
1.9.	本研究の位置付け.....	30
1.10.	論文の構成.....	30
第2章	システム概要とシステムアーキテクチャ	31
2.1.	はじめに.....	31
2.2.	システム概要.....	31
2.2.1.	固定局型システム.....	32
2.2.2.	移動局型システム.....	32
2.3.	システムアーキテクチャ.....	32
2.4.	NDN Switch.....	33
2.5.	NDN Controller.....	33
2.6.	Measurement Server.....	34

第 3 章	ネットワーク性能実測値とアプリケーション要求に基づくリンク切替手法	35
3.1.	はじめに	35
3.2.	コグニティブ無線技術	35
3.3.	Software Defined Network 技術	36
3.4.	リンク切替アルゴリズム	37
3.4.1.	収集したネットワーク性能測定結果の平滑化	37
3.4.2.	平滑化したネットワーク性能測定結果の正規化	38
3.4.3.	各候補アクセス網の評価値算出	39
第 4 章	ネットワークシステム上でのネットワーク性能監視手法	41
4.1.	はじめに	41
4.2.	スループット測定	41
4.2.1.	従来のネットワーク測定技術	41
4.2.2.	スループット推定技術	41
4.3.	パケットロス率測定	44
4.4.	平均遅延時間測定	44
第 5 章	情報孤立地域へのネットワーク拡張手法	45
5.1.	はじめに	45
5.2.	AODV プロトコル	45
5.3.	Extended AODV	46
第 6 章	モジュール構成とメッセージフロー	48
6.1.	はじめに	48
6.2.	モジュール構成	48
6.3.	メッセージフロー	50
第 7 章	プロトタイプシステムと機能	52
7.1.	はじめに	52
7.2.	固定型 NDN システムの構築	53
7.3.	プロトタイプシステムにおけるパケット制御	54
7.4.	車載型 NDN システムの構築	56
第 8 章	性能評価	58
8.1.	はじめに	58
8.2.	シナリオに基づく切替性能の評価	58
8.3.	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	59
8.4.	ネバー・ダイ・ネットワークが提供するネットワーク性能の事前評価	60

8.5.	既存手法とネットワーク性能実測値に基づく切替手法の比較評価	60
8.5.1.	各アクセス網単一利用環境（環境 I, II, III）	60
8.5.2.	三種複合単純切替環境（環境 VI）	61
8.5.3.	NDN システムを用いた環境（環境 V）	62
8.5.4.	Network Emulator	62
8.5.5.	評価シナリオ	63
8.5.6.	評価結果	64
8.5.7.	車載型 NDN システムの検証評価	69
第 9 章	まとめと今後の課題, 展開	70
9.1.	まとめ	70
9.2.	今後の課題	71
9.3.	今後の展開	72
9.3.1.	バルーンネットワークやドローンネットワークとの協調	72
9.3.2.	DTN との連携	72
	参考文献	73
	謝辞	77
	付録 A 業績一覧	78
	原著論文	78
	国際会議・学会発表	78

図目次

図 1 東日本大震災の規模.....	10
図 2 東日本大震災の余震.....	11
図 3 東日本大震災における地域別の被害状況.....	13
図 4 東日本大震災の死因.....	14
図 5 岩手・宮城内陸地震.....	15
図 6 岩手・宮城内陸地震の被害.....	16
図 7 岩手県内市町村の被害状況.....	17
図 8 東日本大震災の現場におけるネットワーク機能状態	18
図 9 東日本大震災における商用ネットワークの状況.....	19
図 10 東日本大震災における DoCoMo 社携帯電話網の輻輳状態.....	19
図 11 衛星 IP ネットワークの導入.....	20
図 12 震災直後の連絡手段.....	21
図 13 仮設 LAN の構築による情報共有の様子.....	22
図 14 災害時に有効な情報通信手段の比較.....	23
図 15 震災直後の岩手県立大学のネットワーク状態	24
図 16 災害時に求められるネットワークの接続性.....	25
図 17 Never Die Network システム	26
図 18 NDN システムが目指すネットワーク接続性	27
図 19 NDN システムが目指す災害前後の提供ネットワーク容量.....	27
図 20 RON 概念図.....	28
図 21 NDN システム概要図.....	31
図 22 システムアーキテクチャ	32
図 23 災害時のネットワークへの要求の変化	34
図 24 提案手法概念図.....	35
図 25 周波数共用型とヘテロジニアス型の違い.....	36
図 26 SDN 技術概念図.....	36
図 27 SDN 技術を用いたクロスレイヤ制御.....	37
図 28 パケットトレイン法概念	41
図 29 Pathload のプローブパケット転送方式.....	42
図 30 SLoPS における帯域推定に利用する OWD 変動	42
図 31 PathChirp におけるプローブパケット転送方式.....	43
図 32 PathChirp の可用帯域推定手法.....	43
図 33 pathquick による帯域推定手法	43
図 34 RREQ パケットと RREP パケット.....	46
図 35 拡張 AODV パケットフロー.....	47
図 36 モジュール構成図	48

図 37	メッセージフロー	51
図 38	プロトタイプシステム構成図	52
図 39	プロトタイプシステム外観 1	図 40 プロトタイプシステム外観 2..... 53
図 41	プロトタイプシステム外観 3	
図 42	プロトタイプシステム外観 4.....	54
図 43	プロトタイプシステムにおけるインターネット接続のためのフロー制御.....	55
図 44	ネットワーク性能測定用パケットのためのフロー制御ルール	56
図 45	固定型 NDN システムと車載型 NDN システムの連結接続構成	57
図 46	車載型 NDN システム外観.....	57
図 47	エンド間スループット・パケットロス率の変化.....	59
図 48	ネットワーク実測値に基づく提供ネットワーク性能の変化.....	60
図 49	各アクセス網単一利用環境.....	61
図 50	三種複合単純切替環境.....	61
図 51	NDN システム環境.....	62
図 52	Network Emulator 構成	63
図 53	Network Emulator 物理デバイス外観	63
図 54	評価シナリオ	64
図 55	環境 I におけるスループット測定結果.....	64
図 56	環境 II におけるスループット測定結果	65
図 57	環境 III におけるスループット測定結果.....	65
図 58	三種複合単純切替環境におけるエンド間スループット測定結果	66
図 59	NDN システム環境におけるエンド間スループット測定結果.....	67
図 60	三種複合単純切替環境(Conventional)と NDN システム(NDN-system)環境における 平均切替時間の差	68
図 61	三種複合単純切替環境と NDN システム環境における平均・最小・最大切替時間 ..	68
図 62	ある期間における三種複合単純切替環境と NDN システム環境の切替時間の違い ..	69
図 63	車載型 NDN システムの検証実験	69
図 64	ユーザ権限に基づく優先度制御	71

表目次

表 1 東日本大震災の被害.....	11
表 2 明治以降の大震災・大津波被害規模の比較.....	12
表 3 市町村ごとの被害状況.....	14
表 4 プロトタイプシステム機器構成.....	53
表 5 車載型 NDN システム使用機器一覧.....	56
表 6 評価環境におけるネットワーク性能の事前調査結果.....	60

数式目次

数式 1 ネットワーク性能の平滑化.....	38
数式 2 パケットロス率・遅延時間の正規化.....	39
数式 3 スループットの正規化.....	39
数式 4 評価値算出.....	39
数式 5 パケットロス率 R の算出.....	44
数式 6 平均遅延時間 T の算出.....	44

第1章 序論

1.1. はじめに

本章では、本研究開発の動機づけになった東日本大震災の概要を述べる。その中で被災地域の通信状況を分析し、そこから見える問題点を明らかにする。そしてこれらの問題から、今後予想されている南海巨大地震や東海地震時に求められる災害時の通信機能について明らかにする。

1.2. 東日本大震災の概要

東日本大震災は2011年3月11日（金）16:46に、三陸宮城沖を震源地としてマグニチュード9.0の大地震が発生した。その揺れは東北、関東地方を中心として、南北500km、東西200kmと広い範囲で観測され、震度5～7の大地震および大津波が発生した。これは南北朝鮮全土や、サンフランシスコからロサンゼルスにかけての地域に匹敵する大規模地震であった（図1 東日本大震災の規模）。

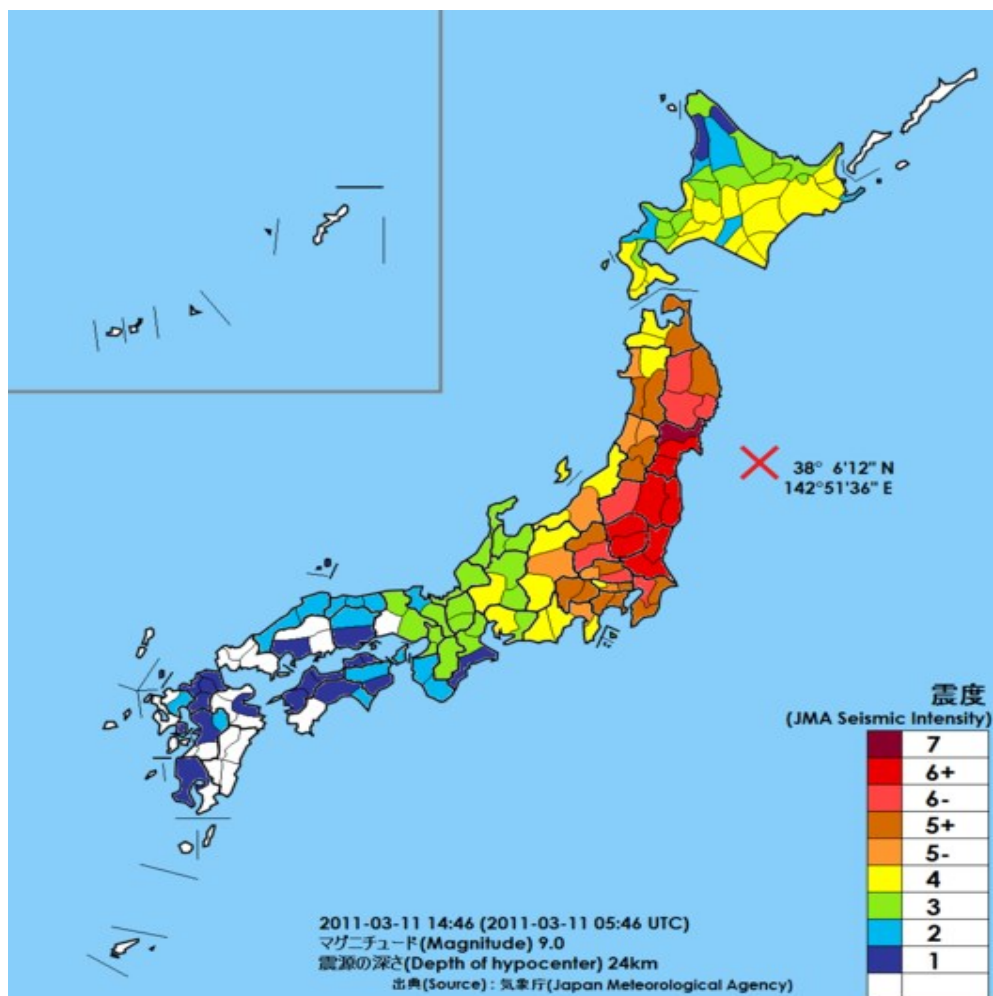


図1 東日本大震災の規模

大震災が発生した直後から震度4以上の余震度の頻度も長期間に渡って起り、直後の3月11日だけでも30回以上、2か月間でも500回以上の余震が発生した。特に4月7日の深夜に起こった余震では再び震度7に達し、被災地区で全面停電となった（図2 東日本大震災の余震）。

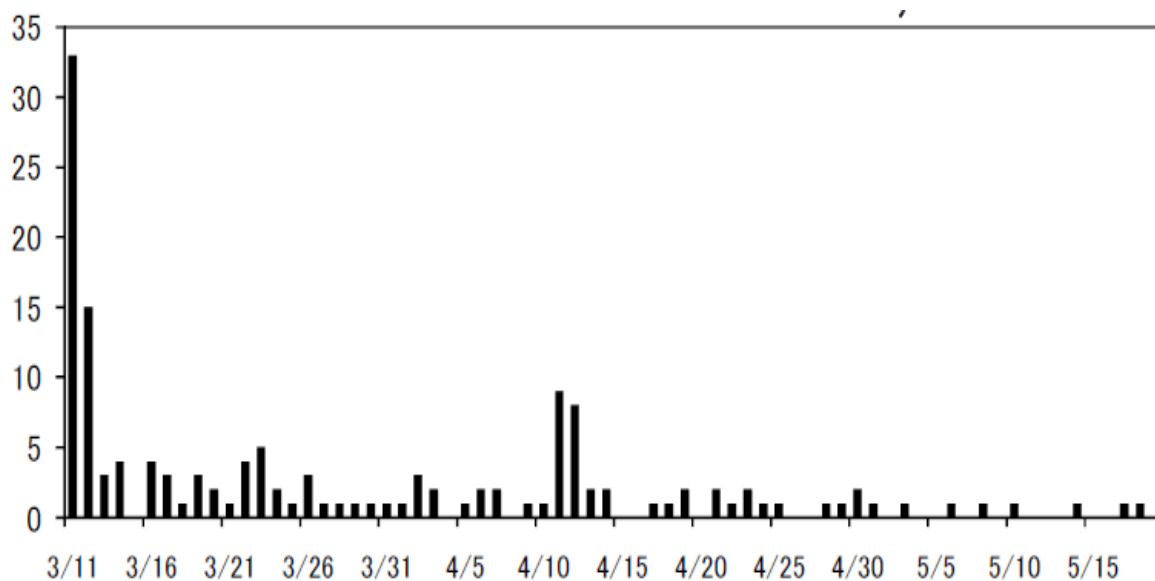


図 2 東日本大震災の余震

東日本大震災の規模がいかに大きかったかを理解するため、阪神淡路震災と比較して述べる。東日本大震災は、近年まれにみる大津波のため死者、行方不明者が多く、また漁船や漁港の被害が桁違いで発生したことが特徴となっていることがわかる（表 1 東日本大震災の被害）

表 1 東日本大震災の被害

	東日本大震災	阪神・淡路大震災
マグニチュード	M9.0	M7.3
死者	15,782	6,434
行方不明者	4,086	3
漁船	22,000隻以上	40隻
漁港	300以上	17
農地	23,600ha	213.6ha
被害額	16－25兆円	9.9兆円
震災前の県民経済計算	20,7兆円 (岩手、宮城、福島)	20,2兆円

一方、明治以降に発生した大地震や大津波での犠牲者数の点から比較してみると、関東大震災のついで多いことがわかる（表 2 明治以降の大震災・大津波被害規模の比較）

表 2 明治以降の大震災・大津波被害規模の比較

年	地震名（震災名）	被害規模
1923	関東地震（関東大震災）	死者・行方不明者105,385人
2011	東北太平洋沖地震（東日本大震災）	死者 15,628 人、行方不明者 4,086人
1896	明治三陸地震	死者・行方不明者21,959人
1891	濃尾地震	死者・行方不明者7,273人
1995	兵庫県南部地震（阪神淡路大震災）	死者・行方不明者6,437人
1948	福井地震	死者・行方不明者3,769人
1933	昭和三陸地震	死者・行方不明者3,064人
1927	北丹後地震	死者2,925人
1945	三河地震	死者・行方不明者2,306人

東日本大震災における地域別の被害状況を図 3 東日本大震災における地域別の被害状況に示す。この図からわかるように被害者の多くは、岩手県、宮城県、福島県に集中している。特に岩手県では陸前高田市、大槌町、宮城県の石巻市で死者、行方不明が多い。また表 3 市町村ごとの被害状況は、震災発生前の各市町村の人口に対する死亡者および行方不明者の割合（死者数率）を示している。この表 3 市町村ごとの被害状況より宮城県女川町、岩手県大槌町は東日本大震災により一瞬にして約 10%の人口減少を発生させたことがわかる。

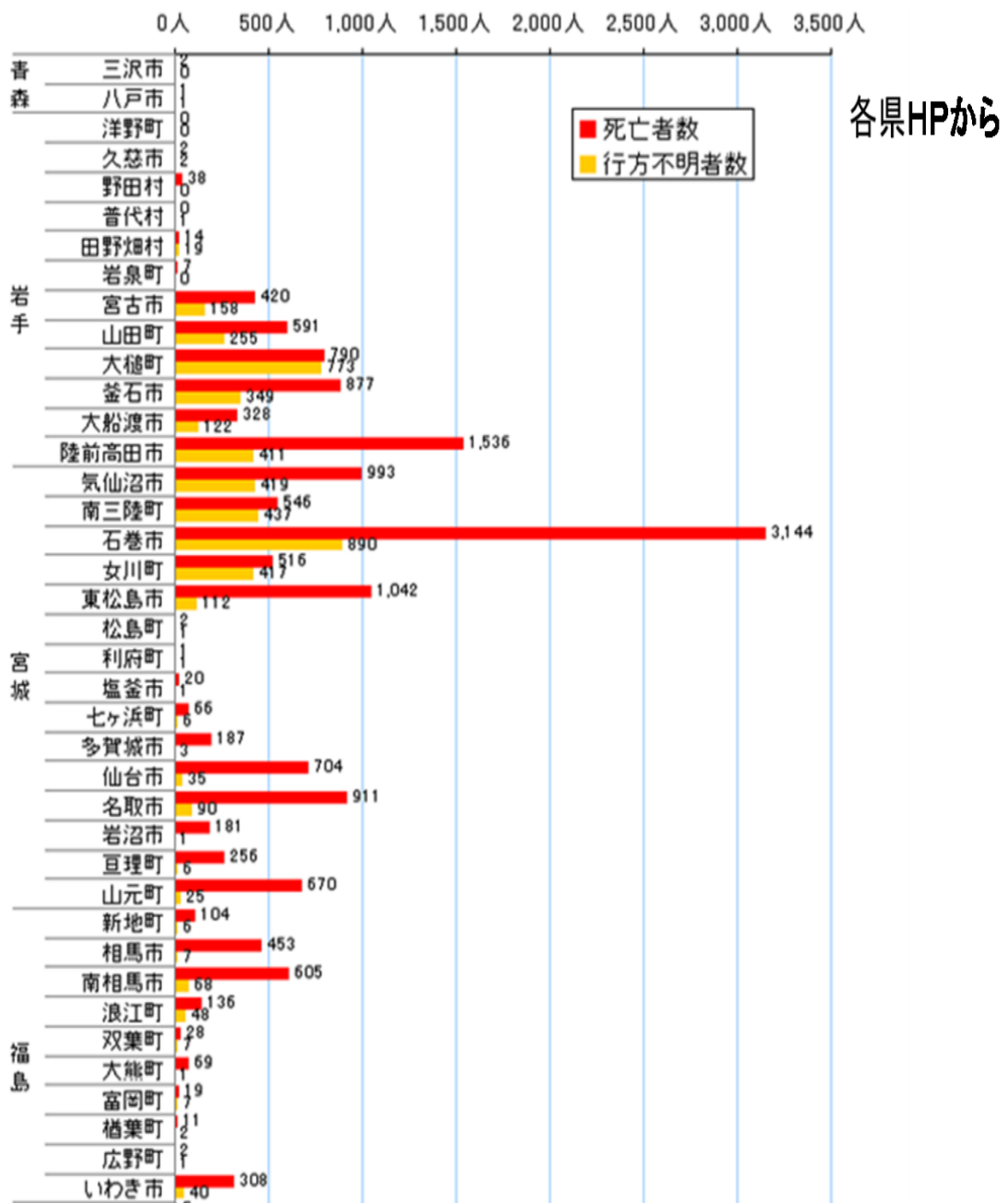


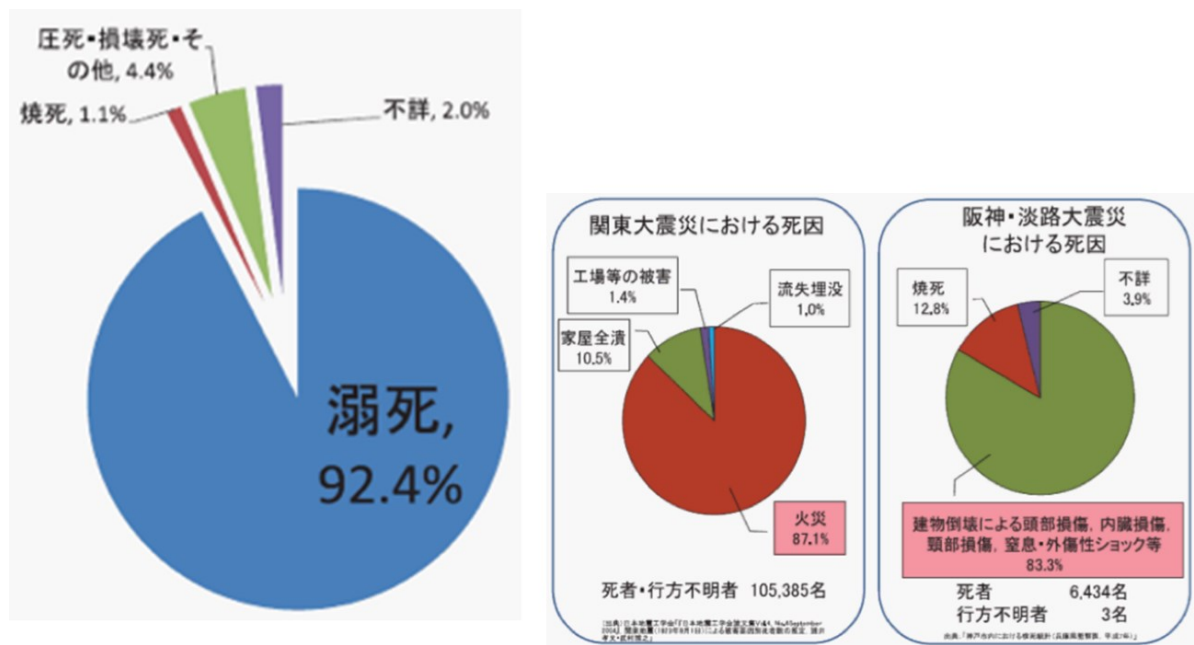
図 3 東日本大震災における地域別の被害状況

表 3 市町村ごとの被害状況

市町村名	死者数	行方不明者数	死者数	2010国調人口	死者数率
陸前高田市	1,552	399	1,951	23,302	8.37%
大船渡市	338	114	452	40,738	1.11%
釜石市	883	208	1,091	39,578	2.76%
大槌町	801	596	1,397	15,277	9.14%
山田町	601	222	823	18,625	4.42%
宮古市	420	122	542	59,442	0.91%
石巻市	3,168	759	3,927	160,704	2.44%
気仙沼市	1,013	392	1,405	73,494	1.91%
名取市	911	73	984	73,140	1.35%
東松島市	1,049	96	1,145	42,908	2.67%
山元町	670	20	690	16,711	4.13%
女川町	564	411	975	10,051	9.70%
南三陸町	558	343	901	17,431	5.17%
相馬市	454	5	459	37,796	1.21%
新地町	109	1	110	8,218	1.34%

被害が大きかった市町村毎の被害(岩手・宮城・福島災害対策本部資料)

次に、東日本大震災における死者の死因を過去の関東大震災や阪神・淡路大震災と比較して示す(図4 東日本大震災の死因)。この図からわかるように、関東大震災では火災による死亡が多く、また阪神淡路大震災では圧死が多いのに対して、東日本大震災では大津波による溺死が圧倒的に多かった。



東日本大震災の死因(平成23年度防災白書)

図 4 東日本大震災の死因

このように、東日本大震災ではマグニチュード 9.0 と大地震と大きかった割に火災死亡や圧死は

非常に少なく、死者や行方不明者のほとんどは大津波に逃げ遅れた溺死者であったことは特筆すべき点である。

1.3. 岩手県における大震災の被害

ここでは、岩手県における大震災の状況について述べる。岩手県の総面積は 15,200 平方キロメートルで北海道について全国で第 2 位である。人口は平成 15 年度で 136 万人であり全国 37 位である。森林が多く、中山間部が 7 割以上である。海岸線も長くリアス式であり、そのような沿岸で地震が発生すると、中山間地域は孤立しやすく、沿岸部では大津波が発生しやすい地理的状況にある。一方通信インフラ整備状況は、有線の超高速ブロードバンド整備率およびブロードバンド整備率は、ほぼ 100% であるが、奥羽山脈や北上高地の中山間地域の電波による携帯網においては不感帯地域も少なくない。また岩手県の高齢化率は 39.7% で全国 7 位であり、高齢化率が加速している。このように人口減少と高齢化の加速とともに住民の防災力が低下し、安心・安全の確保や高齢者の医療、介護、見守り支援の問題も深刻な課題となっている。

これまでも、地震、津波、大雪、大雨、やませなどが多発している。事実、東日本大震災以前、平成 20 年 6 月 14 日に、岩手・宮城内陸地震 (M7.2) が発生し、岩手県奥州市衣川、宮城県栗原市で震度 6 強を記録し、いくつかの集落が孤立、死者 17 名、行方不明者 6 名の被害が出た (図 5 岩手・宮城内陸地震、図 6 岩手・宮城内陸地震の被害)。この時、情報通信の故障や寸断のために、連絡が取れなくなった。その後の岩手県の調査において、県内で 331 か所の市町村における集落が孤立することが判明し、情報通信手段の重要性が明らかとなった。

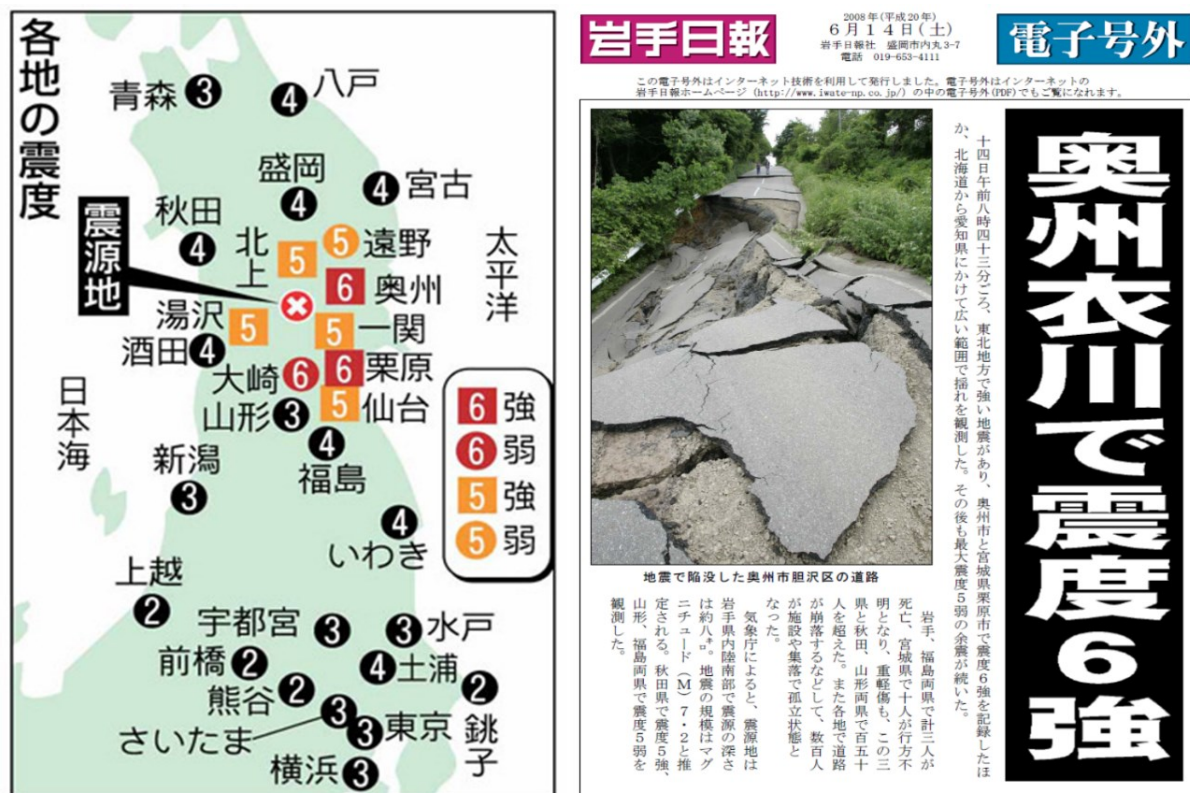


図 5 岩手・宮城内陸地震



図 6 岩手・宮城内陸地震の被害

東日本大震災における岩手県内市町村の被害状況を調査し分析した結果を図 7 岩手県内市町村の被害状況に示す。図からわかるように、三陸沿岸 12 市町村において、甚大な被害が大きいことがわかる。一方、内陸市町村 21 市町村においては、死者はなく、行方不明者も 11 名と少なく、家屋倒壊も 1,317 と少なく、地震に対する耐震構造の家屋が多かったことと考えられる。

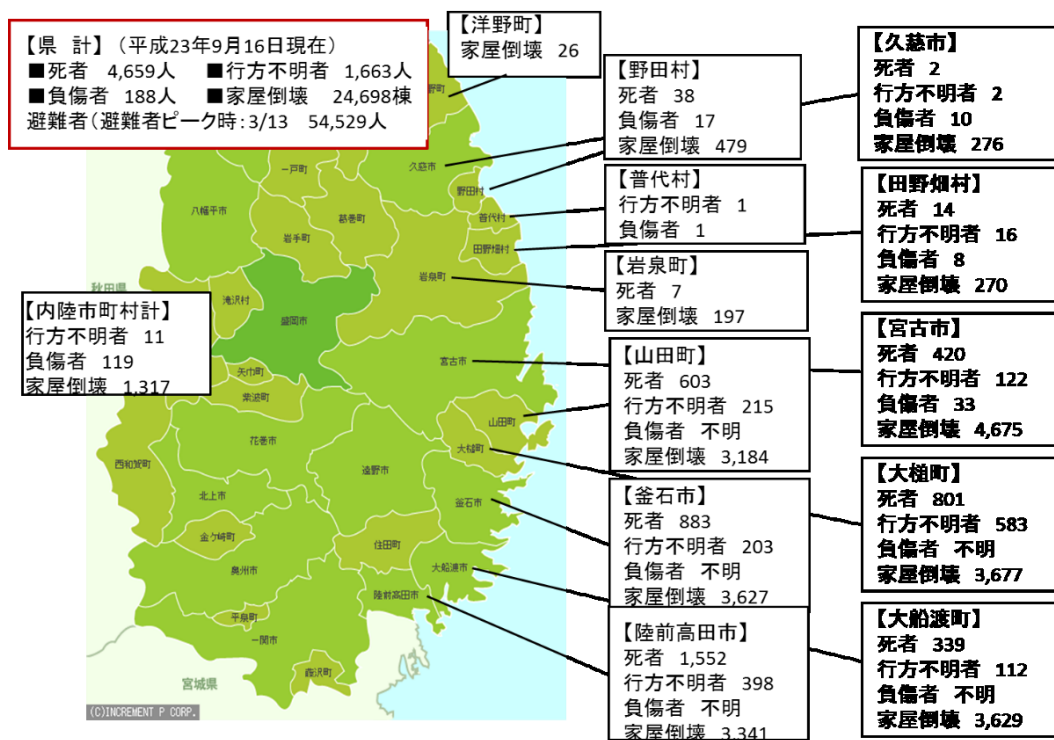


図 7 岩手県内市町村の被害状況

1.4. 災害時の通信状況と問題点

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。特に被災住民の安否情報、家屋、建物、道路、土地、河川、湾港等の被災状況情報が伝わらなかったために、災害活動に多くの障害が生じた。

図 8 東日本大震災の現場におけるネットワーク機能状態は我々の現場においてネットワーク復旧活動の経験から得られたネットワークとそれらの機能状態のまとめを示している。

通信メディア	状況	備考
ラジオ	○	地域FMは有効
固定電話(デジタル)	×	停電のため光回線は不可
固定電話(アナログ)	△	一部公衆電話は利用できた
携帯電話	△	電話は不通。メール、インターネットも輻輳のため困難。臨時衛星通信車。
インターネット	△	直後は輻輳したが、ツイッター、SNSが役に立った
衛星電話	○	自治体の唯一の通信手段だったが、連続3分しか使えない
防災行政無線	△	故障のため一部利用可能
庁内LAN、いわて情報ハイウェイ	×	ほとんど津波で流された
インターネット衛星通信	○	仮復旧に威力を発揮した
無線LAN	○	仮復旧に簡単に導入できた

図 8 東日本大震災の現場におけるネットワーク機能状態

1.4.1. 固定電話

情報ネットワークシステムの最も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。総務省の調査によれば震災直後の大地震と大津波のため、有線の固定電話は、回線の断線や交換機の機能停止により、NTT 東日本、KDDI、ソフトバンクで 190 万回線が停止した。また固定電話サービスにおいては、優先電話の回線の確保のため各社とも最大発信規制は 90%に達した（図 9 東日本大震災における商用ネットワークの状況）。これは 10 人のうち 1 人のみが音声サービスを許容出来ることに相当する。

1.4.2. 携帯電話

携帯電話網においては、5 社の合計で 2 万 9 千局の基地局が停止し、音声通信手段として脆弱性を露呈した。通信規制も 3 社とも 70~90%に達した。DoCoMo 社の輻輳状態は、図 10 東日本大震災における DoCoMo 社携帯電話網の輻輳状態に示すように、東北地域内の音声発信呼量および着信呼量は、それぞれ通常時の 60 倍および 40 倍に達した。また東京 23 区内における音声発信呼量および着信呼量は、それぞれ通常時の 50 倍および 20 倍に達した。このように、携帯電話による音声通信は被災地以外にも広範囲に渡って災害直後から数日間はトラフィックの輻輳のため利用出来なかった。さらに、被災地の固定電話網や通信キャリアの通信設備やサーバも大津波で被害を受けて機能不能となった。これにより、固定電話やブロードバンドインターネットサービスや自治体庁内のネットワークさえも利用不能となった。

一方、東北地域内のメールや携帯アプリケーション等のパケット送信量および着信量はどちらも 3~4 倍とそれほど多くはなかった。また東京 23 区内におけるパケット送信量および着信量はどちらも 2~3 倍とそれほど多くはなかった。これらの結果よりコネクション型の音声トラフィ

ックよりも接続レス型のパケット転送サービスが災害時には有効であることがわかる。

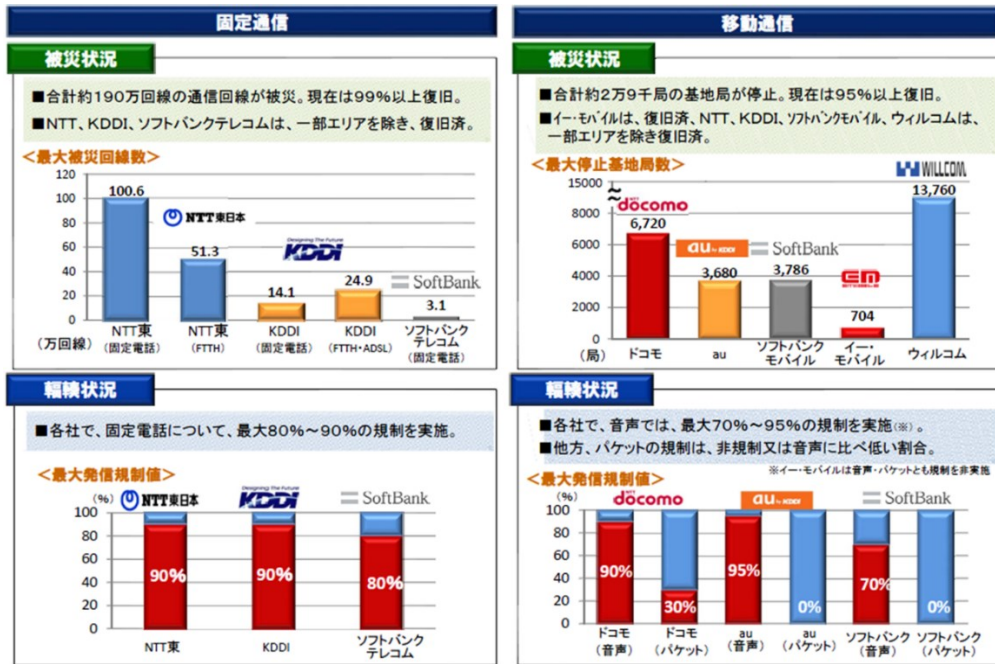


図 9 東日本大震災における商用ネットワークの状況

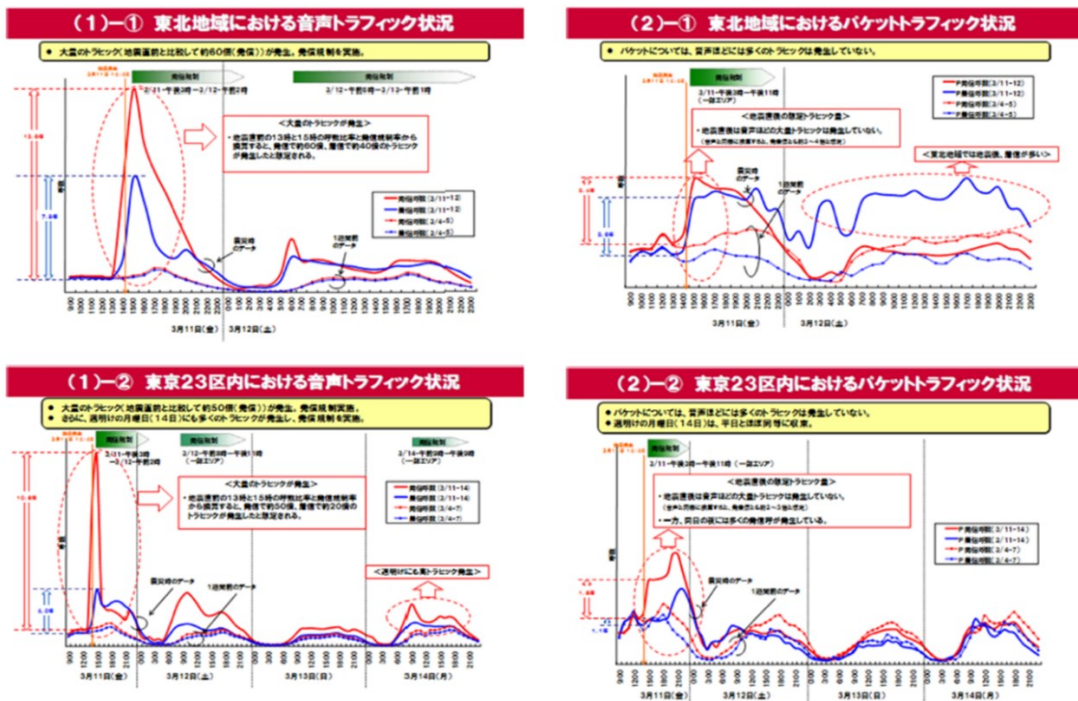


図 10 東日本大震災における DoCoMo 社携帯電話網の輻輳状態

1.4.3. ラジオ

東日本大震災においては、ほとんどの地域で商用電力が利用出来ず、多くの通信手段が利用出来なかったが、住民は携帯ラジオや車載ラジオから各種の災害情報を把握していた。また地域にあるコミュニティ FM 局がその地域に関連するローカルな情報をきめ細やかに流していた。このように携帯ラジオは一方方向の情報伝達手段であるが、電池で長時間使えるということから災害

時の情報収集には重要なメディアであることが改めて認識された。

1.4.4. 衛星 IP ネットワーク

東日本大震災において、大打撃を受けた自治体では衛星 IP ネットワークを導入して情報インフラの仮復旧を行い、通信手段を復活させた（図 11 衛星 IP ネットワークの導入）。これは太陽光発電や風力発電とバッテリーを組み合わせた自立電源と組み合わせることにより、災害時の強力な通信手段として利用された。衛星 IP ネットワークは災害に強い情報通信手段としての特徴を持つが、FTTH(Fiber To The Home)に比較して、スループットが低い。しかしながら、災害時のインターネット上のトラフィックは、email、Web ベースの安否情報や SNS のようにテキストベースの情報が主であったため、十分であった。従って衛星 IP ネットワークはポータブル自立電源を利用すると被災地のどの場所でも通信路を確保することが可能な手段として注目され、災害現場において積極的に利用された。



図 11 衛星 IP ネットワークの導入

1.4.5. 無線 LAN

無線 LAN は衛星 IP ネットワークと同様に、津波災害によって被害を受けた幾つかの自治体の庁内 LAN の仮復旧ネットワークとして実際に使用された。衛星 IP ネットワークによるインターネット接続が可能な地点から、無線 LAN でネットワークを広範囲に提供する役割を担った。

1.4.6. インターネット

インターネットは、東日本大震災において、多くの災害活動において多様な方法により利用された（図 12 震災直後の連絡手段）。震災前、北日本の地域においてインターネットの利用率は 74.4%であったが、震災直後は 20%に大きく低下した。これは各種の情報ネットワークの機器の故障や輻輳によってインターネットサービスが利用できないためであった。岩手県盛岡市におい

てはインターネットサービスが再開されるまでには1～2週間を要した。また震災後、被災して家を失った住民が住む仮設住宅の多くが、旧市街から遠く離れた奥地に建設されたため、そこにはインターネット回線が元々敷設されておらず、長期に渡ってインターネットが利用出来なかった。このためこの地域に情報インフラを構築する必要があったが、ほとんどの仮設住宅で有線ブロードバンドやFTTHが使えるまでには数か月を要した、その間は携帯電話を用いて、メール、Web検索、SNSサービスを利用していた。一方、幾つかの仮設住宅地では総務省の応急設置した衛星IPネットワークやFWA（Fast Wave Access）ネットワーク、無線LANを通してInternetを利用していた。

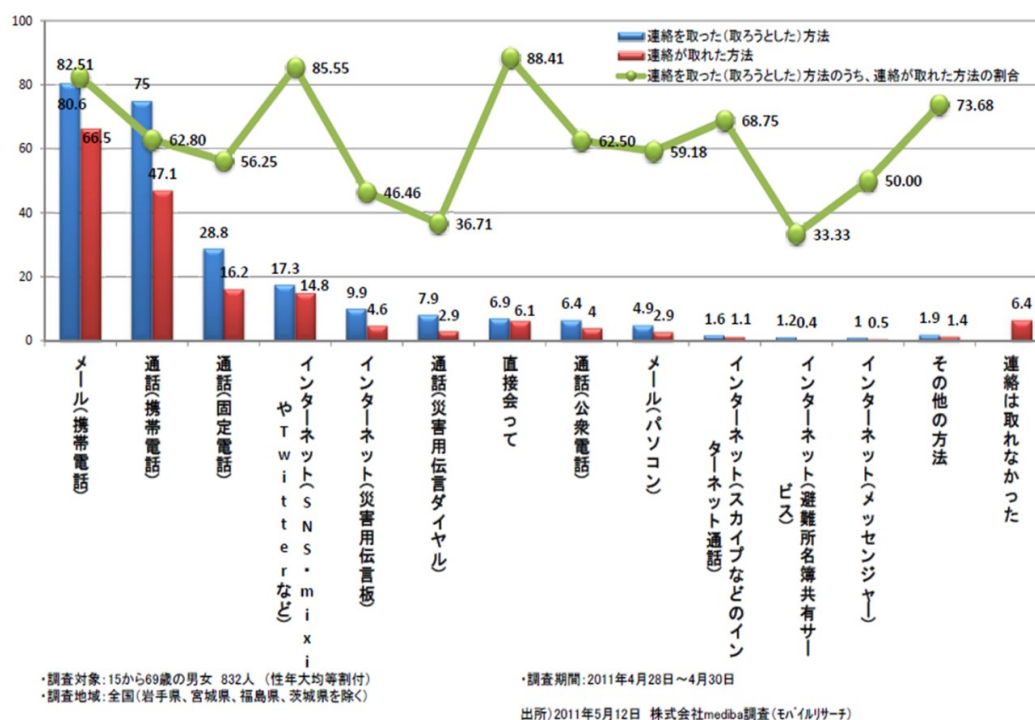


図 12 震災直後の連絡手段

1.4.7. 地域イントラネット

いわて情報ハイウェイは岩手県全体を跨ぐ有線の地域イントラネットワークであり、岩手県の市町村の役所、大学、学校、病院などの公的機関を繋いでいたが、震災によりほとんど通信不能となった。また沿岸部の市町村の庁内LANは津波で流されたり、浸水したりしてほとんど使用不能となった。職員はこの時災害対策本部と相互連絡のため仮設のLANを構築した(図13 仮設LANの構築による情報共有の様子)。そして、消防、病院、道路監視所との通信手段として使用した。さらに、沿岸部の大部分の市町村の役所における情報サーバは深刻なダメージを受けたため、住民サービスに関する情報が失われ、住民にほとんど情報が伝わらなかった。このため、職員はEmailやblogやSNSによる情報共有を行うためにInternetを使用した。



図 13 仮設 LAN の構築による情報共有の様子

1.4.8. 医療情報ネットワークおよびボランティアネットワーク

北日本の医療機関では、震災直後から中央の病院と地域の病院の間の仮設の通信手段として **Internet** を利用していた。避難所のみならず、多くの医療機関で通信が出来なくなっていたが、**Internet** は短時間でこれらの医療機関を仮設のネットワーク構築が出来た。災害ボランティア団体も、その活動のため、**Internet** を利用した。災害ボランティア団体は、**SNS** で災害情報を共有し、そしてそれぞれの避難所に避難している住民のリストを **Web** で公開した。また **GIS** を使って道路状況を確認して **Web** に掲示をした。このようにこれまでの震災と比較して、東日本大震災では、災害ボランティアによって、**Internet** を利用して様々な新しい情報提供が試行された。これはスマートフォンやタブレット端末や高速無線サービス、**Web** 技術、**SNS** の発展によるものである。

1.5. 災害時に有効な通信手段

東日本大震災においては、情報ネットワークに関して多くの問題点があげられるが、幾つかの情報通信手段は、実際に迅速かつ効果的に復旧させることができた。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を通して、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て有効活用された。
- FWA (Fixed Wireless Access) や WLAN (Wireless LAN) は情報インフラを構築できた。
- 衛星電話は、役所間での音声通信手段としてフル回転で使われた。
- NICT が開発したコグニティブ無線技術を利用したワイヤレスルータは多くの避難所で Internet への AP として有効利用された。
- Twitter, blog などの SNS は、様々な生活情報を提供・共有するのに有効な通信手段として使用された。

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、図 14 災害時に有効な情報通信手段の比較のように、ネットワーク環境や求められる要件によって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を組み合わせることが有効であると筆者は考えた。

	FTTH	WiMAX	Cellular	Satellite	WiFi
Connection	Wired Internet Connection	Wireless Internet Connection	Wireless (Wide area) Internet Connection	Wireless (Outdoor area) Internet Connection	Wireless Local Network
Speed	High Speed	20~75Mbps	128Kbps~20Mbps	Low Speed	High Speed
Weak point	Not resistant to disaster	narrow available area	Easy to congestion	High Delay (RTT500~1000ms)	short communication distance (Possible distance improvement in directional antenna)
vs.. Disaster	×	△	△	○	○

図 14 災害時に有効な情報通信手段の比較

1.6. 災害時通信ネットワークに求められる機能

1.6.1. ネットワーク接続

災害復旧の経験から、如何にネットワーク状況が最悪でも、ネットワークへの接続性は大変重要である。図 15 震災直後の岩手県立大学のネットワーク状態は震災直後から岩手県立大学において計測されたネットワーク状態である。ネットワーク状態は 64Byte の ping パケットを 1 時間ごとに www.google.com へ発行することにより測定された。

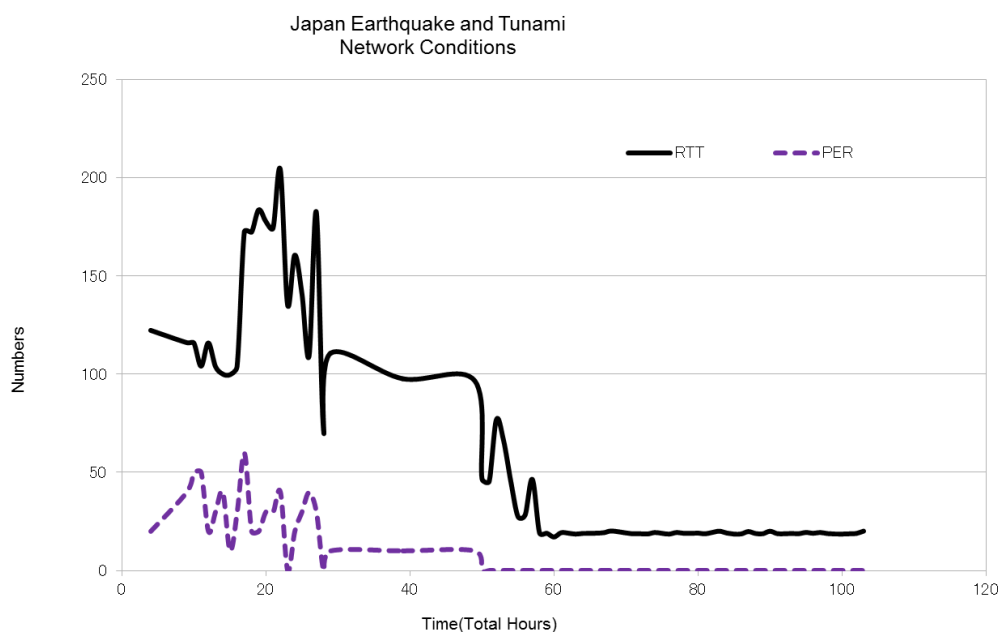


図 15 震災直後の岩手県立大学のネットワーク状態

横軸は震災が発生してからの経過時間を示している。縦軸は RTT(Round Trip Time, ms)と PER(Packet Error Rate, %)を示している。通常時は RTT が 20ms, PER が 0%であったが、震災直後は、ネットワーク状態は RTT が 100-150ms, PER が 20-50%と極めて悪化している。そして 15 時間経過した後は、さらに悪化している。これは早朝より Web から災害情報を取得しようとするネットワークアクセスが増加したためである。この期間では mail やツイッターサービスが使用され、災害情報を収集するのに大変役に立った。そして約 60 時間後、電源の回復により、トラフィックは正常に戻った。大災害直後のネットワーク状況においては、比較的少ないデータパケットにより配信されるメールやツイッターは有効であり、これによりネットワークトラフィックを減少させることが望ましい。さらに、住民の安否情報や避難場所情報は主として、テキストをベースとした小さなパケットサイズにより構成されることが望ましいと考えられる。さらに、ネットワーク状態の測定を通して、たとえスループットは小さく、遅延時間が大きくても、ネットワークへの接続性は災害情報システムの中で最も重要である。すなわち、災害時におけるデータ接続に関しては、図 16 災害時に求められるネットワークの接続性に示されるように、災害による被害の規模が増加してもしぶとく生き残り接続性を確保し続けるような特性が求められる。

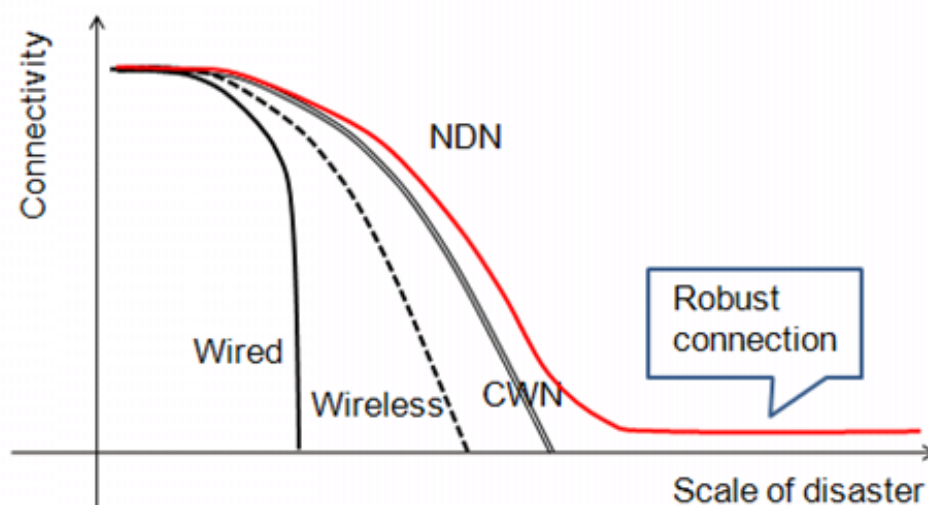


図 16 災害時に求められるネットワークの接続性

この図において、有線ネットワークは災害にたやすく影響を受けやすい。無線ネットワークと CWN(Cognitive Wireless Network)は、有線ネットワークよりも強固であるが、災害の度合いが大きくなると接続性が維持できなくなる。このことから、たとえ災害の規模が極めて大きい場合でも、災害情報の提供には、Web サービスや email のようにテキスト転送によって最小のデータ転送を提供するネットワークシステムが必要であると言える。

1.6.2. 必要とされる頑強なネットワーク

前節の解析を考慮して、我々は新たに頑強なネットワークである Never Die Network (NDN) を提案する。NDN は主に自己電源を有する固定のコグニティブ無線ノード、コグニティブ無線モバイルノード、そして、コグニティブ無線バルーンノードにより実現される (図 17 Never Die Network システム)。さらに固定のコグニティブ無線ノードは、3G/LTE, IEEE802.11abgn, IEEE802.15, IEEE802.16, 衛星 IP 等複数の異種無線により構成される。また自己供給電源は、太陽光パネル、風力発電、燃料電池を組み合わせることにより放電時間の制限を開放できる。これらのコグニティブ無線ネットワークユニットは、無線の電界強度、パケットのスループット、遅延時間、パケット紛失率、ジッターのような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できる。通常の供給電源が止まり、すべての無線 LAN や 3G/LTE に障害が生じて、衛星 IP ネットワークは利用でき、Internet に接続することができる。

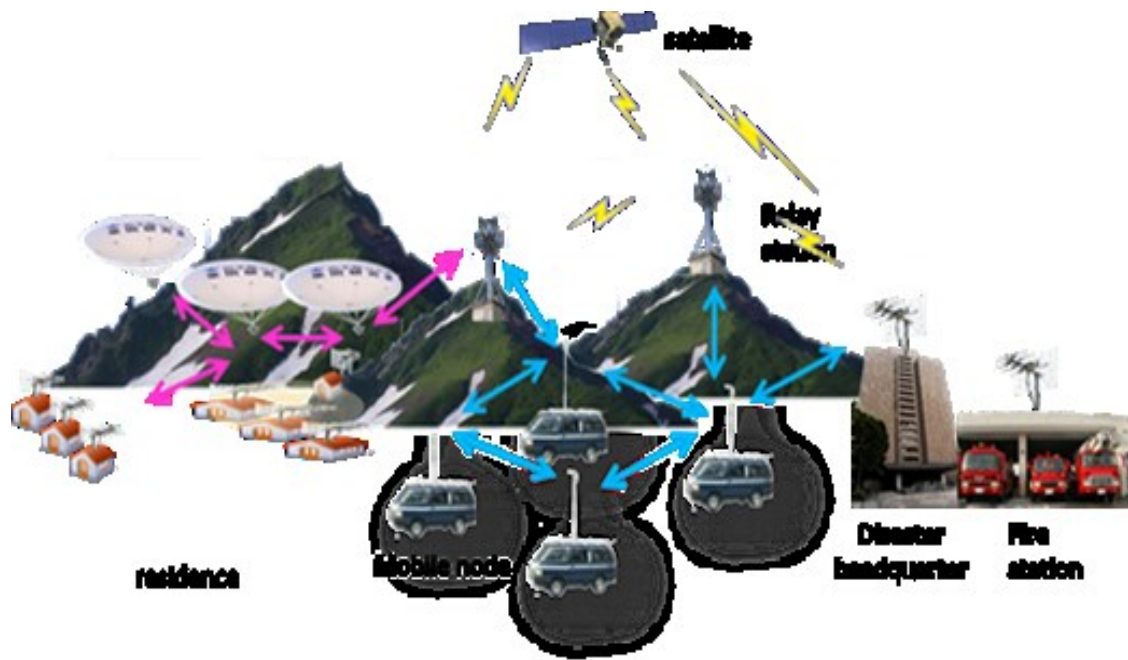


図 17 Never Die Network システム

1.7. 本研究の目的

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したコグニティブ無線システムの開発と構築
- 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、判断機能の開発及び実装
- SDN 技術を用いて自動的に物理故障・輻輳等を回避する方法の開発及び実装
- アドホック通信技術を用いたネットワーク通信範囲を拡大する方法の開発及び実装
- 通常時のNetwork Capacity と災害状況下でのNetwork Connectivity を両立させる方法の開発及び実装
- 自立電源の供給機能の実現

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、それらに追従して計測する必要がある。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 Capacity の、既存ネットワークとの違いを図 18 NDNシステムが目指すネットワーク接続性、図 19 NDNシステムが目指す災害前後の提供ネットワーク容量に示す。

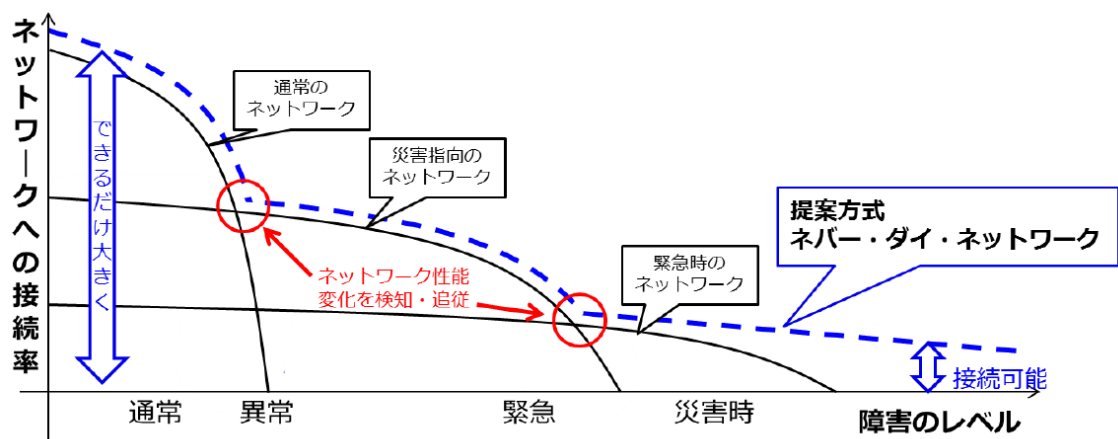


図 18 NDN システムが目指すネットワーク接続性

図 18 NDNシステムが目指すネットワーク接続性は、NDNシステムが目指すネットワーク接続性を表したものである。この図において、有線FTTH等の通常のネットワークは通常時において高い性能を発揮するが、災害の規模が大きくなると接続性が失われてしまうことを表す。また、携帯電話網や無線をベースとしたシステムのような災害指向のネットワークは移動性が高く広範囲にネットワークを拡大できるが、災害時の基地局のトラブルや輻輳によって接続性を失う。衛星IPネットワークのような緊急時のネットワークは、災害状況下においても非常に頑強な接続性を持つが、当然電源が失われれば利用できない。本研究で提案するNDNシステムは、通常のネットワーク、災害指向のネットワーク、緊急時のネットワークそれぞれのネットワーク性能の変化を検知し切替を行うことで、それぞれのネットワークの利点を兼ね備え、自立電源供給機能を備えることで、災害の規模が大きくなってもより長く接続性を失わずに稼働することを目指す。

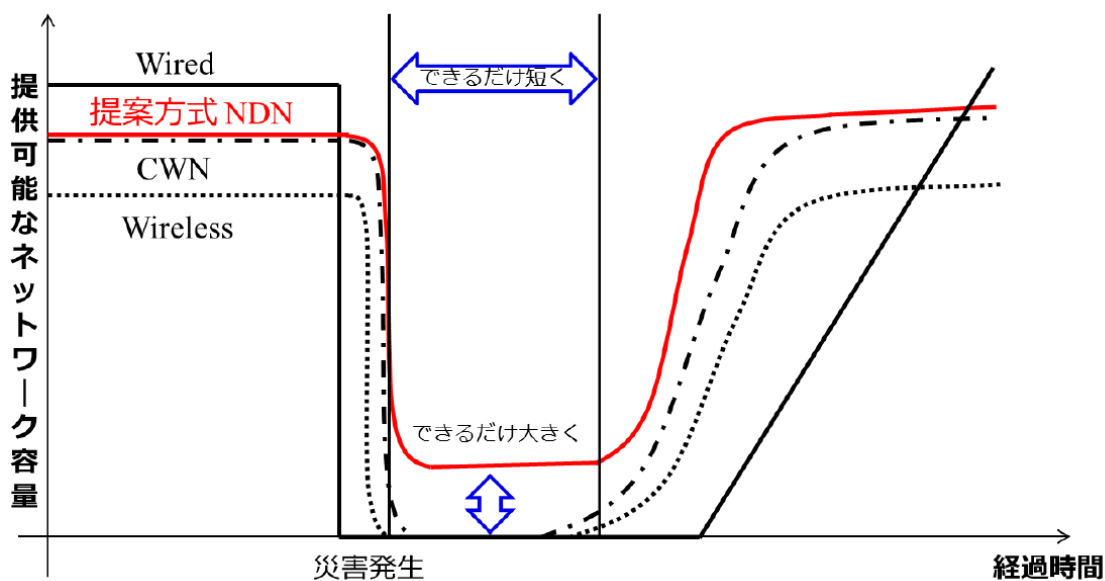


図 19 NDN システムが目指す災害前後の提供ネットワーク容量

図 19 NDNシステムが目指す災害前後の提供ネットワーク容量は、NDNシステムが目指す災害

前後の提供可能ネットワーク容量を表したものである。有線接続ネットワークWiredは災害発生前において最も性能が良いが、災害発生時には脆弱である。また、無線ネットワークWirelessは有線接続に比べれば災害時に接続性を維持し、災害後にもより早くネットワークを復旧するが、基地局トラブルや輻輳、帯域制限などの複合的な理由で提供ネットワーク容量がゼロになる期間が存在する。同様に、コグニティブ無線ネットワークCWN(Cognitive Wireless Network)は常により良いネットワークを検知して切り替えるため、通常時において高い性能を発揮し、また災害後にも迅速にネットワークを復旧するが、CWNで利用する基地局についてもトラブルや輻輳、帯域制限などの複合的な理由で提供ネットワーク容量がゼロになる期間が存在する。NDNシステムは、FTTHや携帯電話網、衛星IPネットワーク等の複数の異なる通信方式をコグニティブ無線技術によって複合し構築されるネットワークシステムであるため、通常時や災害発生後にもより多くのネットワーク容量を提供し、また災害発生直後においても提供ネットワーク容量がゼロにならないことを目指す。

1.8. 関連研究と本研究の位置づけ

1.8.1. Resilient Overlay Networks

RON(Resilient Overlay Networks)[1]は、広域インターネット上におけるホスト間接続堅牢性とパスの可用性を向上させるためにマサチューセッツ工科大学におけるアメリカ国防高等研究計画局(DARPA)出資のプロジェクトで研究開発されているものである。特徴は以下の通り。

- ホスト上のアプリケーションがインターネットあるいはイントラネットと協調して改善されたネットワークパフォーマンスを受け取ることが可能
- アプリケーション層において構築されるオーバレイネットワーク
- ホスト間のネットワークパフォーマンスを調査
- 最適ルーティングの決定・制御

RONでは、アプリケーションの要求とネットワーク経路の性能に基づいてルーティングメトリックを最適化する。また、RONに参加しているすべてのノードとその関係を把握することで、ネットワークパスの障害やパフォーマンス低下から即座に他ノードを経由する経路変更を行うことを可能としている(図 20 RON概念図)。

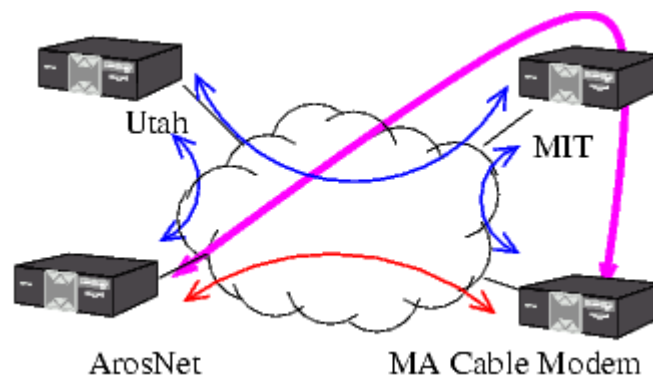


図 20 RON 概念図[1]

一方で、RONは通常時のインターネットを介したホスト間のオーバレイネットワークの構築を

目的としたものであり、NDNが目的としている災害時におけるインターネット接続を考慮していない。RONはインターネット内のネットワーク障害や性能低下に応じて経路を変更することでホスト間の接続を改善するが、災害時のようにホストのインターネット接続そのものが失われてしまった場合は効果を発揮しない。災害時のインターネット接続を考慮する場合、NDNのように冗長的なインターネットアクセス網の統合管理が必要であると考えられる。

しかしながら、RONで提案・検討されているネットワーク状態の監視やアプリケーション要求に基づいたルーティング、パスの選択法に関しては本研究でも参考にするものであるため、RONは先行技術というよりは参考研究としての意味合いが強い。

1.8.2. 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[2]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。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。しかしながら、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。

1.8.3. 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[3]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。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 Capacity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。

1.9. 本研究の位置付け

本研究で開発するNDNシステムは、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、被災地域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効率的に監視する。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の、迅速かつ効果的なデータフロー制御を提案し、これをSDN 技術を用いて実装する。これにより、通常時のNetwork Capacityと災害時のNetwork Connectivityを両立するネットワークシステムを実現する。

1.10. 論文の構成

第2章では、NDN システムの概要と NDN システムを構成するコンポーネントに関してのアーキテクチャを詳述する。第3章と第4章では、コグニティブ無線技術を用いたネットワーク性能測定技術と測定結果に基づいたリンク・経路選択のための提案手法について述べる。第5章ではコグニティブ無線技術をベースとしたアドホックルーティングプロトコルによる通信距離拡大のためのネットワーク制御手法について述べる。第6章では、第3章と第4章で述べた提案手法を実装するためのモジュール構成について述べる。第7章では、前章までに述べた提案手法を検証するためのプロトタイプシステムの構築について述べ、第8章でそれを用いた評価実験結果に関して述べる。最後に第9章では、本研究の結論及び今後の課題、展開について述べる。

第2章 システム概要とシステムアーキテクチャ

2.1. はじめに

本章では, NDN システムの概要とシステムアーキテクチャについて述べる. NDN システムは, インターネットゲートウェイとなる固定局型システムと, 通信可能距離を拡張する移動局型システム, ネットワーク性能測定結果を蓄積するネットワーク性能測定サーバ, そしてそれらを統括するコントローラで構成される.

2.2. システム概要

本システムの概要図を図 21 NDN システム概要図に示す.

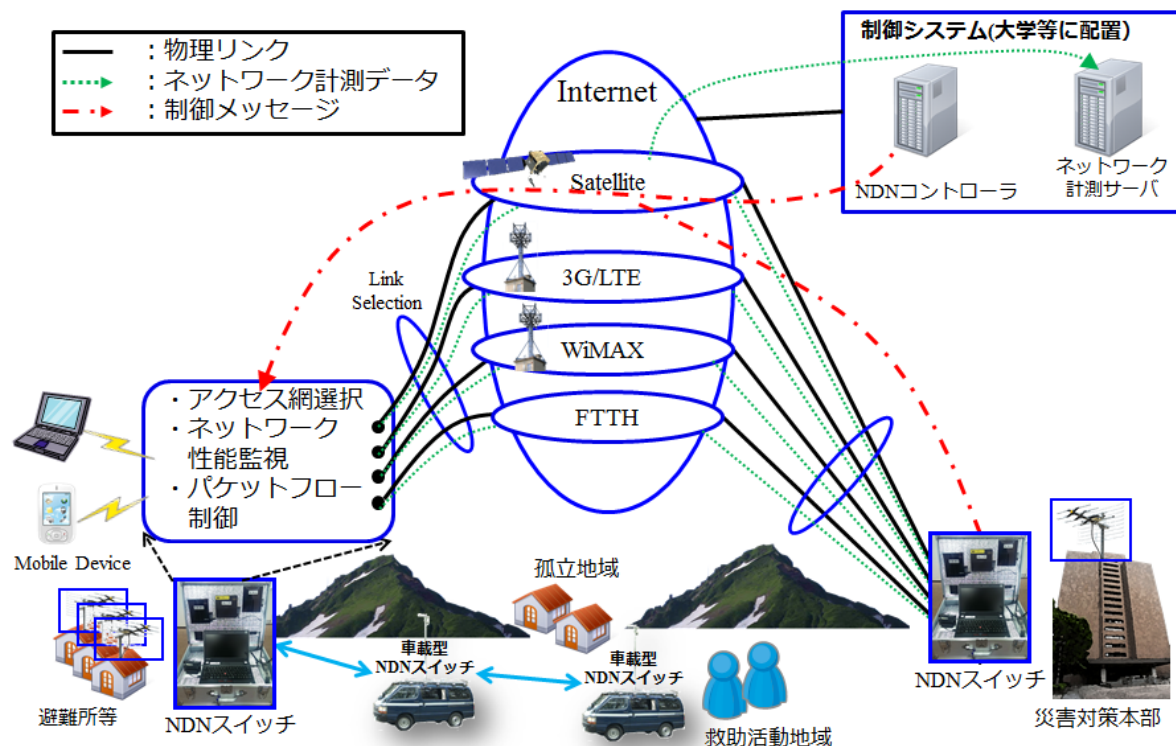


図 21 NDN システム概要図

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インターネット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、第 3 章で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型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。

2.2.1. 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には、NDN スイッチがある。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。

2.2.2. 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 スイッチが挙げられる。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。

2.3. システムアーキテクチャ

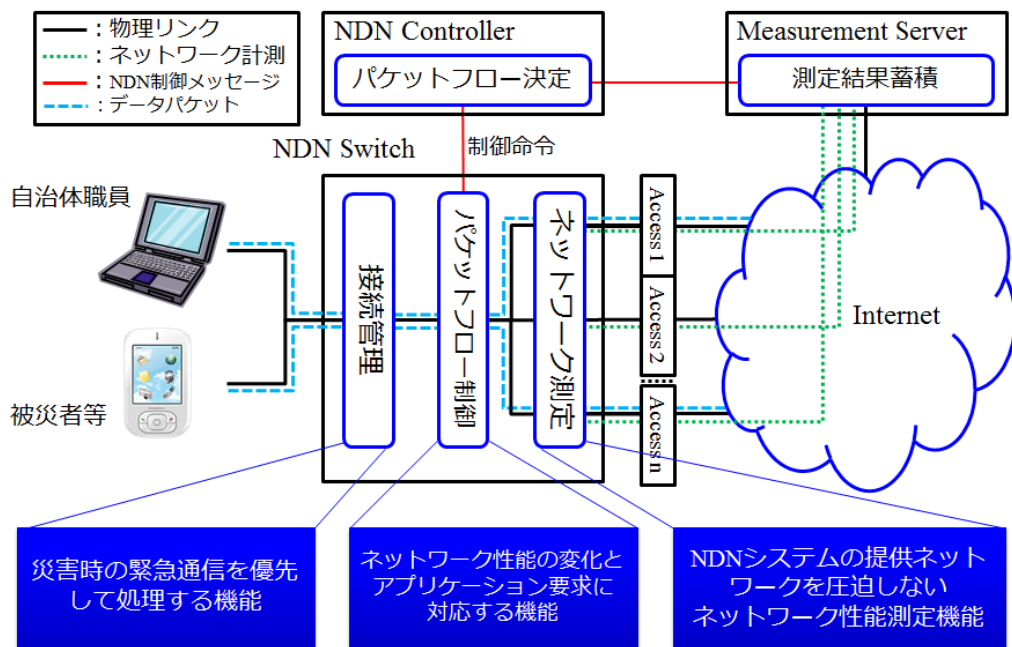


図 22 システムアーキテクチャ

NDN システムのアーキテクチャは、図 22 システムアーキテクチャに示すように、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。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。

2.4. 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。

- 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、遅延時間であり、無線通信に関しては電界強度も考慮に入れる。

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。

- 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 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。

- 接続管理

NDN システムが提供するネットワークを利用する場合、本研究においては通常時の接続利便性を考慮して Wi-Fi アクセスポイントなどの複数の接続を同時に収容可能なアクセス方式を採用する。この方式では接続は容易であるが、複数の接続を同時に収容するため、災害状況下においては緊急性の高い通信が適切な優先度で転送されない可能性がある。本論文では、緊急通信を優先して処理するための優先処理機能を方法論として考慮し検討する。

2.5. 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。

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、図 23 災害時のネットワークへの要求の変化のように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である。

Required information varies in time before/after disaster

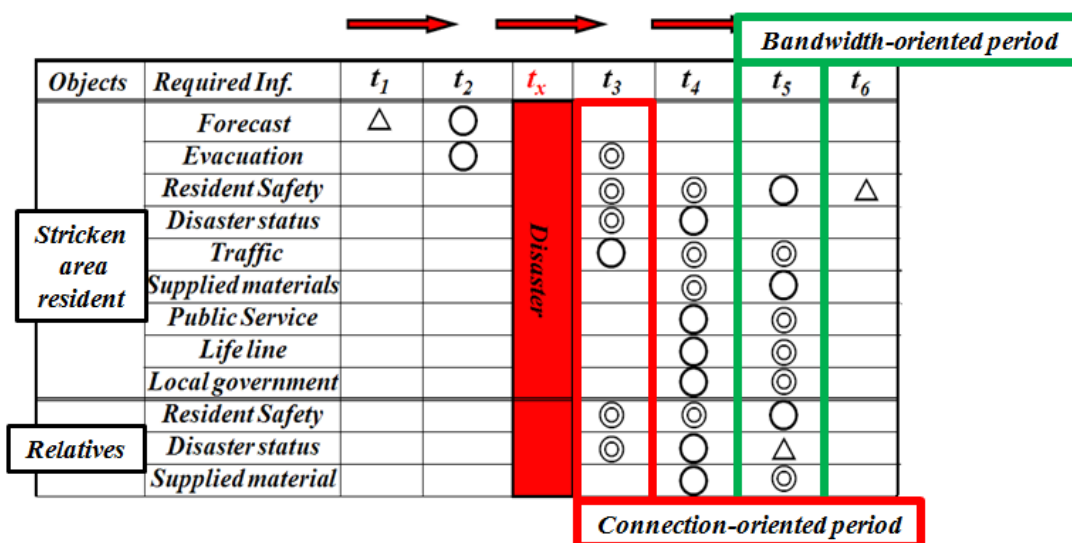


図 23 災害時のネットワークへの要求の変化

本研究では、第 3 章で述べる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、プロトタイプシステムに実装する。

2.6. 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、測定結果の平滑化を行うために移動平均を取る必要が有るため、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。

第3章 ネットワーク性能実測値とアプリケーション要求に基づくリンク切替手法

3.1. はじめに

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、コグニティブ無線技術に基づいてデータを送出するためのアクセス網を複数收容し、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。そして、決定されたアクセス網の切替処理の実装には、SDN 技術を用いる。本提案手法の概念図を図 24 提案手法概念図に示す。

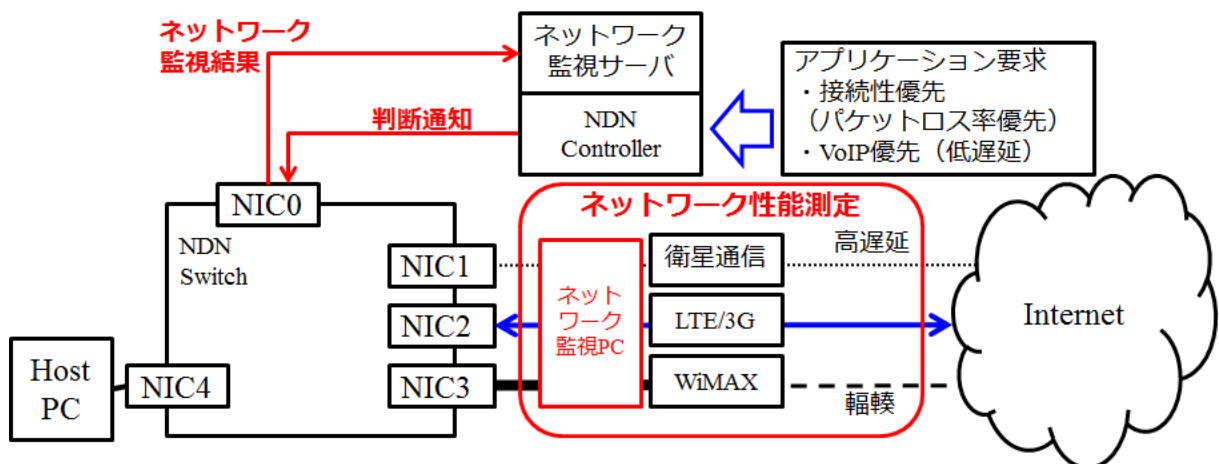


図 24 提案手法概念図

本章では、関連技術であるコグニティブ無線技術と SDN 技術について説明した後、それらを用いて実装する提案手法について説明する。

3.2. 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 [5]が、この技術をネットワーク層へ拡大することで、端末自身が收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[4]。

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[4,5]。「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 25 周波数共用型とヘテロジニアス型の違い 5 に示す。

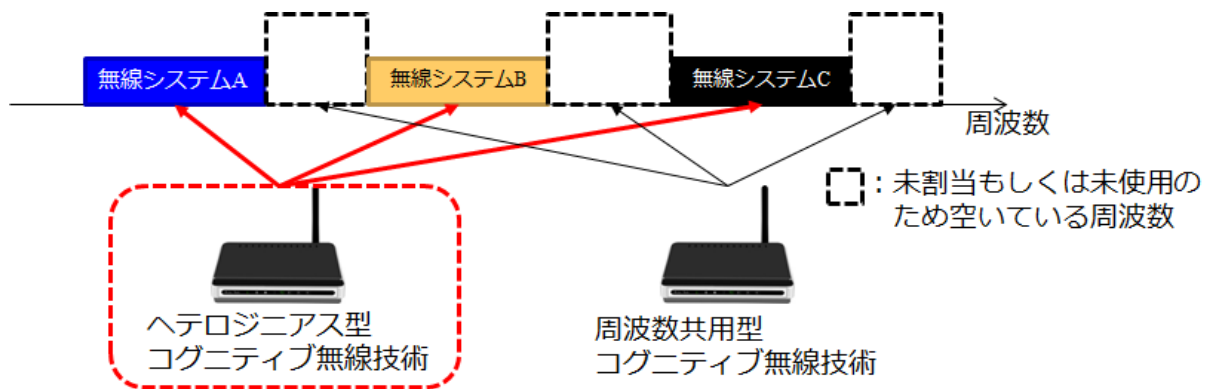


図 25 周波数共用型とヘテロジニアス型の違い

本研究においては、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必要があるため、ヘテロジニアス型のコグニティブ無線技術を用いる。

3.3. 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 [6]。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 (図 26 SDN 技術概念図 6)。

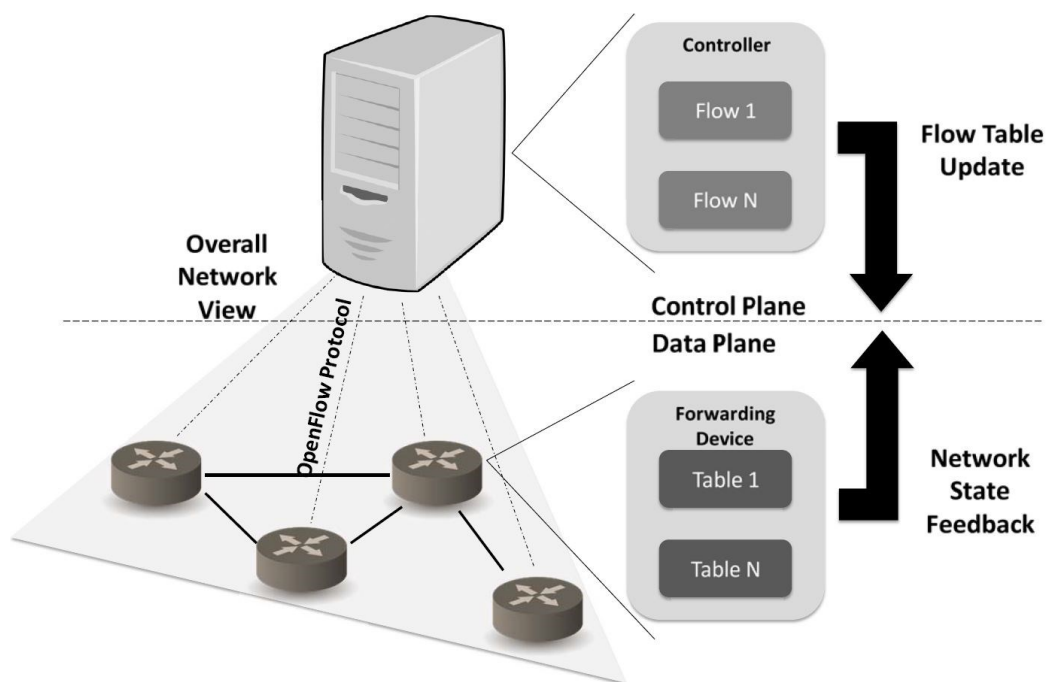


図 26 SDN 技術概念図

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 [7] (図 27 SDN 技術を用いたクロスレイヤ制御)。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。

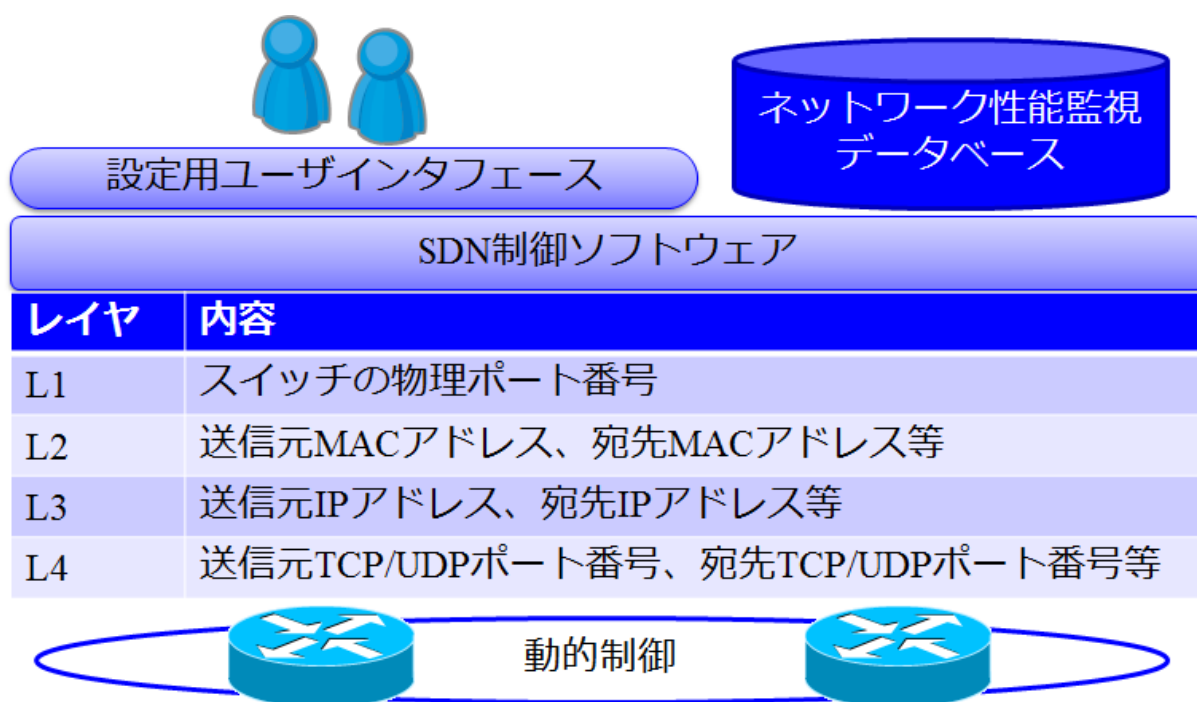


図 27 SDN 技術を用いたクロスレイヤ制御

3.4. リンク切替アルゴリズム

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、平滑化、正規化、総合値算出の 3 ステップで行われる。

3.4.1. 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 \bar{n}_i として扱う。平滑化した測定値 \bar{n}_i は以下の数式 1 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。これは、どの程度過去の値を重要視して平均値を取るかということを定めるための値であり、これにより加重移動平均を算出する。

数式 1 ネットワーク性能の平滑化

$$\bar{n}_i = a * m_t + b * m_{t-1} + c * m_{t-2}$$

計算例として、最新の測定値 m_t が 5000Kbps、1 つ過去の測定値 m_{t-1} が 800Kbps、2 つ過去の測定値 m_{t-2} が 4500Kbps である状況を計算してみる。これは、1 つ過去の測定時にネットワーク状況が瞬間的に悪化したが、すぐに回復し回線利用に問題がない状況を表す。移動平均の重み (a, b, c) を $(0.6, 0.3, 0.1)$ と設定すると、この時の加重移動平均値 n_i は以下のように計算される。

$$\bar{n}_i = 0.6 * 5000 + 0.3 * 800 + 0.1 * 4500 = 3690(\text{Kbps})$$

このように、加重移動平均を平滑化した値として利用することで、瞬間的なネットワーク性能の上昇下降の発生においても、ネットワークの切替処理が頻発することなく安定したネットワーク制御が可能となる。

3.4.2. 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。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数式 2 の定義を用い、スループットの正規化には数式 3 を用いる。これは、パケットロス率と遅延時間は値が小さいほど性能がよく、スループットは値が大きいほど性能が良いことを表すためである。加えて、スループットは通信方式や無線規格毎に最大スループットが定められており、正規化におけるスコアリングに際し、最大値を便宜上過去の測定値から設定する必要があるためである。なお、式内の n_i 、 l_i 、 u_i はそれぞれ平滑化した測定値、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。

数式 2 パケットロス率・遅延時間の正規化

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

数式 3 スループットの正規化

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

数式 2, 3 によって、測定された各ネットワーク性能は便宜上、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。

計算例として、ある無線アクセス網 i においてスループット測定履歴中最も大きい値 u_{max} を 14.0Mbps とし、現時点での平滑化されたスループット値 n_i を 5.2Mbps、取りうる最低値 l_i を 0Mbps とした場合を計算してみる。この時の無線アクセス網 i におけるスループットの正規化値 S_i は以下のように計算される。

$$S_i = (5.2 - 0.0) / (14.0 - 0.0) * 10 \doteq 3.7$$

このように正規化された値を算出することで、後述するステップ 3 における定量的な比較を可能とする。

3.4.3. 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、これらについて通信サービスに対する重み (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は、遅延時間が最も重要視され、次にスループット、そして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、以下の数式 4 を計算することで各アクセス網の評価値 P_i を求める。

数式 4 評価値算出

$$P_i = x * S_{throughput} + y * S_{packetlossrate} + z * S_{delay}$$

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_{fth} , 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。

計算例として、主に VoIP 通信を行う場合において、FTTH のスループット、パケットロス率、

遅延時間の平滑化値がそれぞれ(8.0, 9.0, 9.0), LTEのスループット, パケットロス率, 遅延時間の平滑化値がそれぞれ(6.0, 8.0, 6.0), SATELLITEのスループット, パケットロス率, 遅延時間の平滑化値がそれぞれ(3.0, 2.0, 2.0)という状況で計算してみる. VoIP 通信優先時の重みのセット (x,y,z) を, $(0.3, 0.2, 0.5)$ と設定した場合, 評価値 P_i は以下のように計算される.

$$P_{ftth} = 0.3 * 8.0 + 0.2 * 9.0 + 0.5 * 9.0 = \underline{8.7}$$

$$P_{lte} = 0.3 * 6.0 + 0.2 * 8.0 + 0.5 * 6.0 = 6.4$$

$$P_{satellite} = 0.3 * 3.0 + 0.2 * 6.0 + 0.5 * 2.0 = 3.1$$

この例では通常時のネットワーク性能測定値を用いているため, 通常時最も性能がいいと考えられる FTTH 網が最終的に選択されていることがわかる. VoIP 通信優先の重みがセットされているため, FTTH 網における遅延時間の性能が著しく低下した場合は, たとえスループットが高くともより遅延時間の小さい LTE 網に切り替わることが本計算式で表されている.

第4章 ネットワークシステム上でのネットワーク性能監視手法

4.1. はじめに

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 (利用可能帯域幅)
- パケットロス率
- 平均遅延時間

各測定項目の測定方法を次節から述べていく。

4.2. スループット測定

4.2.1. 従来のネットワーク測定技術

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[8]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。

4.2.2. スループット推定技術

パケットトレイン方式は、パケットペア方式を拡張したものであり、図 28 パケットトレイン法概念のように3つ以上の連続した複数個のプローブで構成されるパケットトレインをネットワーク内に送信し、送受信ノード間の可用帯域幅を推定する。パケットペア方式は得られた情報をペア毎に独立して扱うが、パケットトレイン方式では複数のプローブを一つのまとまりとして扱うため、クロストラフィックの変動状態をよりの確に把握することができる。このパケットトレインを用いたネットワーク計測ツールとして、Pathload[9]、PathChirp[10]がある。

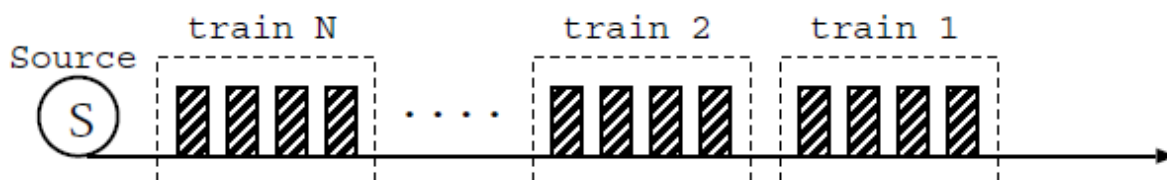


図 28 パケットトレイン法概念

Pathload は、SLoPS (Self Loading Periodic Stream) 手法を用いて、片道遅延の変化から可用帯域幅の推定を行うツールである。Pathload (SLoPS 手法) では、パケットトレイン方式を

用いて、図 29 Pathload のプローブパケット転送方式のようにフリート（複数の同一転送レートの UDP プローブで構成されているトレインの集合）と呼ばれる単位で転送プローブを送信し、計測を行う。

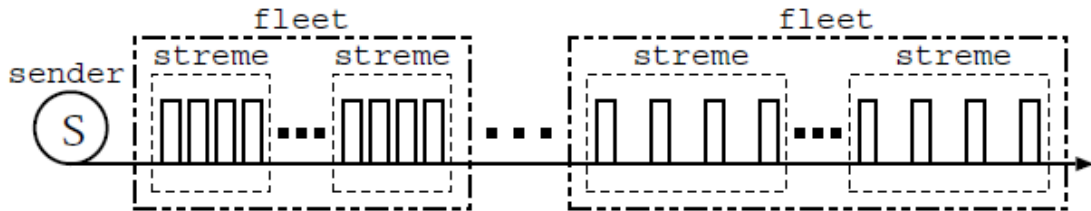


図 29 Pathload のプローブパケット転送方式

まず、最初のフリートのプローブ転送レート T_1 は、複数の連続したプローブパケットで構成されたパケットトレインの転送時間から得られる値に設定される。フリート中のトレイン毎にプローブの片道遅延（One Way Delay : OWD）を観測し、図 30 SLoPS における帯域推定に利用する OWD 変動のように OWD が増加傾向にあれば対象パスの可用帯域幅 A は、 $A < T_1$ とし、変化がなければ A 、 T_1 と判断する。フリートは同一転送レートの複数個のトレインで構成されているので、フリート全体として OWD が増加傾向か、否かを判断して、OWD が増加傾向であれば次のフリートのプローブ転送レート T_2 を $T_2 < T_1$ 、変化がみられないならば $T_2 > T_1$ 、とフリートのプローブ転送レートを再設定し、最終的に T_i が A に漸近するまで、 i 個のフリートを注入して可用帯域幅を推定する。

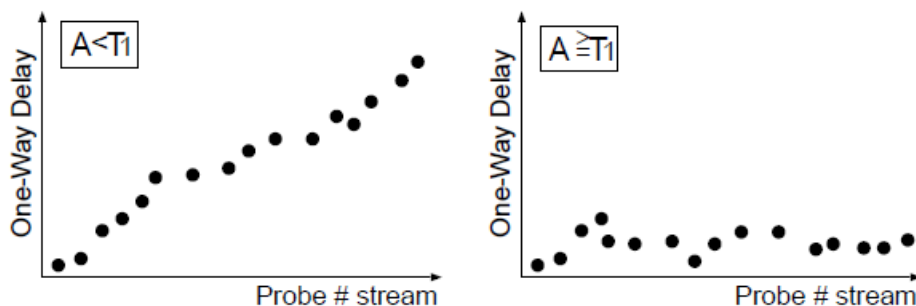


図 30 SLoPS における帯域推定に利用する OWD 変動

なお、Pathload は、特性上、フリートのプローブ転送レートで可用帯域幅を挟むようにして漸近させていくため、結果は可用帯域幅の幅として表される。

次に PathChirp は、図 31 PathChirp におけるプローブパケット転送方式のようにトレイン中のプローブの転送間隔を指数関数的に減少させながら UDP プローブを送出し、各プローブの経験する OWD の増加傾向から可用帯域幅を推定するものである。

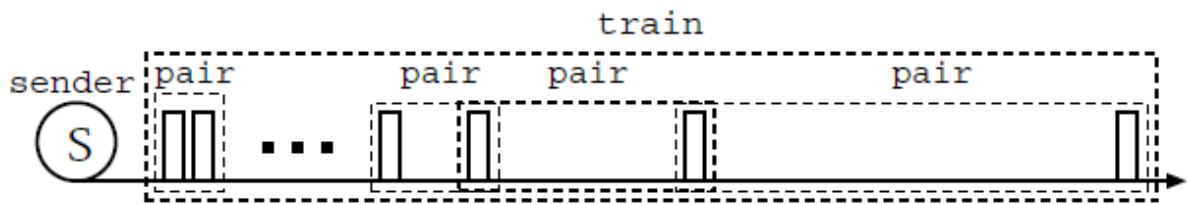


図 31 PathChirp におけるプローブパケット転送方式

トレイン中のパケットペアの間隔が次第に減少するため、プローブ間にクロストラフィックが流入したり、プローブ転送レートがボトルネックリンク容量を越えたりした場合などに、トレイン内のプローブの OWD が増加する。その OWD の臨界点を検出することによって、そのパケットペアの転送間隔、及びプローブサイズからプローブ転送レートを算出し、可用帯域幅を推定する(図 32 PathChirp の可用帯域推定手法参照)。

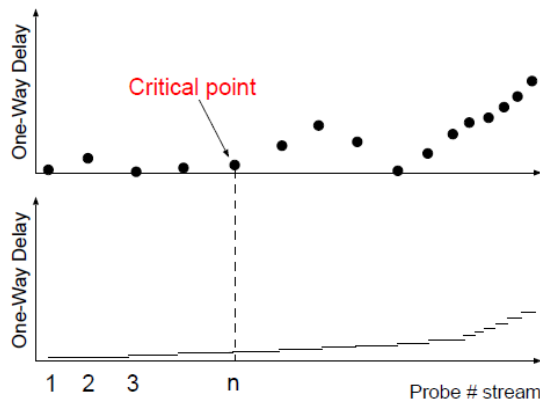


図 32 PathChirp の可用帯域推定手法

クロストラフィックの変動によって、OWD の臨界点の判定を誤る可能性があるために、判定式の調整が必要である。実装においては複数トレインを注入することでこの状況に対応している。

一方で、Pathload, PathChirp は共に、複数のパケットトレインを注入することで推定を行うことを前提としているが、本研究においては推定精度よりも推定速度や帯域圧迫の削減が重要であるため、より迅速かつ低消費帯域の推定技術が必要になる。pathquick[10]は、日本電気株式会社で開発された可用帯域推定手法であり、特徴としては 1 つのパケットトレインで推定が完了する点が挙げられる。以下の図で pathquick の帯域推定方法を説明する。

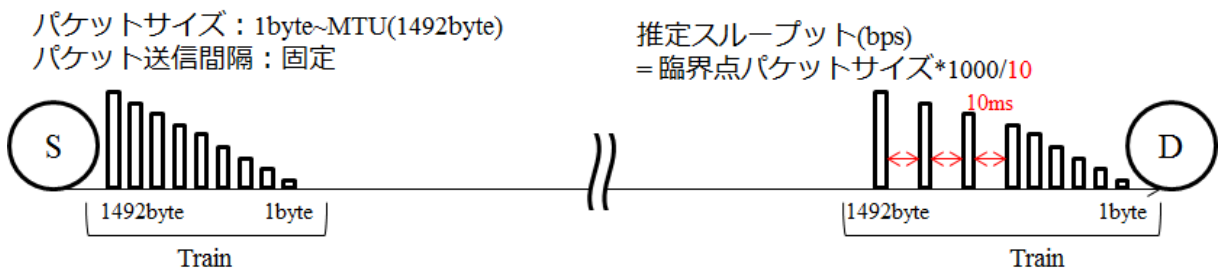


図 33 pathquick による帯域推定手法

図 33 pathquick による帯域推定手法より，pathquick は PathCharp と違い，パケットトレイン内でのパケットサイズを変化させて推定を迅速に行なっていることが確認できる．帯域推定において重要なパケット送信間隔を固定とし，パケットサイズを増加させることでパケットトレイン内のビットレートを徐々に増加させているため，正確な臨界点を 1 トレイン内で把握することが可能となっている．本研究においては迅速性と帯域圧迫を考慮して，帯域推定技術として pathquick を用いる．

4.3. パケットロス率測定

本研究におけるパケットロス率の測定は，スループットと同様に測定の迅速さと帯域圧迫を最小限に抑えることを念頭に行う．正確なパケットロス率を測定するため，再送制御などの上位レイヤ制御が行われない UDP ソケット通信を用いる．測定端末と測定サーバ間で UDP ソケットを用いて通信セッションを作成し，予め決められた数の UDP パケットをサーバに向けて送信する．UDP パケット群を受信した測定サーバは，最終的に正常に受信できた UDP パケット数をカウントし，送信されたパケット数 n と受信できたパケット数 n' を用いて以下の式でパケットロス率 R を算出する．

数式 5 パケットロス率 R の算出

$$R = 1 - \frac{n'}{n}$$

4.4. 平均遅延時間測定

本研究における平均遅延時間の測定についても，スループット，パケットロス率と同様に測定の迅速さと帯域圧迫を最小限に抑えることを念頭に行う．パケットロス率測定と同様に，測定端末と測定サーバ間で UDP ソケットを用いて通信セッションを作成し，予め決められた数の UDP パケットをサーバに向けて送信することで測定を行う．この時送信する UDP パケットには，1 つ 1 つのパケット毎に送信時刻のタイムスタンプ T_s を UNIX 時間のデータとして埋め込む．UDP パケットを受信した測定サーバは，パケット受信毎に埋め込まれている送信時刻タイムスタンプ T_s を取り出し，受信時刻 T_r を用いて遅延時間を算出する．最終的に正常に受信できたすべての UDP パケットの遅延時間の和と受信できたパケット数 n を用いて以下の式で平均遅延時間 T を算出する．

数式 6 平均遅延時間 T の算出

$$T = \frac{\sum (T_r - T_s)}{n}$$

第5章 情報孤立地域へのネットワーク拡張手法

5.1. はじめに

本研究の提案手法において、隣接するあるノード間でリンク状態が確保できない場合は、ネットワークの経路変更を行う。経路変更においても、実ネットワーク性能に基づいて最適な経路を決定するため、従来のアドホックネットワークルーティングプロトコルの一つである AODV(Ad hoc On-Demand Distance Vector)に、第 3 章で述べたリンク切替手法における評価値を用いた経路決定手法を取り入れた、Extended AODV[11]を導入する。これにより、周囲の通信環境の変化に柔軟に対応しつつ、QoS 制御可能なネットワークの構築を実現する。Extended AODV における経路選択は、以下のアルゴリズムに基づいて実装される。具体的には、候補経路間に存在するノード間において第 2 章で述べた評価値計算結果をすべて調査し、最終的に経路内の最小（ボトルネック）の値が最も高かった経路を実際に利用する。経路制御手順は以下の通りである。

1. Source Node からパケットをブロードキャスト送信
2. パケットを受信したノードは評価値を付与しつつ隣接ノードへパケットを渡していく
3. Destination Node に到達したパケットを解析し、経路を決定
4. 選択した経路に返信パケットを逆流させ、経路情報を更新する

5.2. AODV プロトコル

AODV は、MANET(Mobile Ad-Hoc NETwork)等で利用されている、経路変更の要求があった時のみに経路の再構成を行う reactive 型の経路プロトコルである。このため AODV の特徴としては、OLSR や TBRPF といった proactive 型に比べて経路再構成速度が遅いが、通常の通信時において制御情報が少なく済むのでネットワーク資源の利用性に優れているという特徴がある。本研究にて想定している災害情報ネットワークにおいては、限られたネットワーク資源において、それほど頻繁に通信路の変更はないことから、AODV を基にした経路選択法を採用する。

AODV は図 34 RREQ パケットと RREP パケットに示すように経路構成の際、経路要求(RREQ)と経路返答(RREP)の 2 種類のパケットを使用する。送信元のノード S が送信先 D の経路情報を持っておらず、経路情報を要求した時、送信元のノードはネットワーク上に RREQ パケットをブロードキャストする。他のノードがこのパケットを受信すると隣接する送信元のノードの経路情報を更新し、次のノードへ RREQ パケットを渡す。こうして目的の送信先ノードへパケットが到達すると、送信元ノードはすべての経路から最小ホップ数を与える経路のみを選択し、RREP パケットが同じ経路を戻りながら次のノード情報を更新していくことで経路情報が構成されていく。

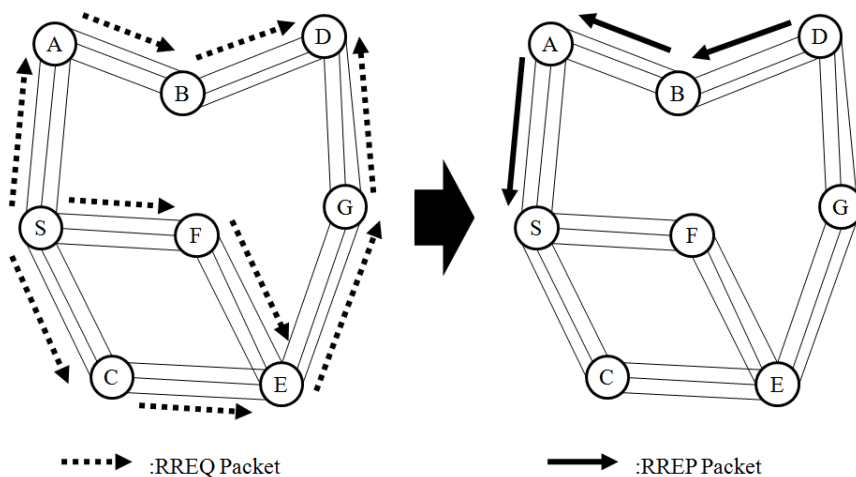


図 34 RREQ パケットと RREP パケット

RREQ パケットは目的の送信先ノード D の IP アドレス、シーケンス番号、ブロードキャスト ID、そして「最新のシーケンス番号を保有する隣接した宛先ノードの番号」が含まれる。RREQ パケットを受信したノードが、もし送信先ノード D だった場合、あるいは保有している RREQ パケットのシーケンス番号以上だった場合に RREQ パケットの返信を許される。この場合、RREP パケットはルーティングテーブルの更新を相互的に行いながら送信元に戻される。

5.3. Extended AODV

従来の AODV プロトコルでは、送信元から送信先の間で最小ホップ数を与える経路が選択されるが、これが必ずしも最適な経路とは限らない。なぜなら、各ノードが複数の規格の異なる無線リンクを有するので、例えば 1 ホップの IEEE802.11b 通信よりは、2 ホップの IEEE802.11a 通信のほうが広帯域のためユーザがビデオ通信を優先した場合には適しているという状況が考えられるためである。このため、本研究ではリンク選択において計算された評価値による各無線リンクの優先度の計算結果を RREQ と RREP に加え、Min-Max 法により最適な経路選択を行う手法を提案する。これにより、ユーザポリシーごとに End to end でスループットのような優先するネットワーク性能値を比較したり、候補経路すべてで評価値計算を行ったりするよりも、よりユーザの意思を反映させることができ、かつ高い計算効率を実現できる。

本提案手法では、従来の経路履歴に加えて前項で述べたノード間での最適な無線リンクおよび評価度の値を、RREQ パケットに追加する。そして受信ノードで後述する Min-Max 法により最適な経路決定を行った後、RREP パケットを選択された経路上を受信側から送信元に向かって中間ノードを通じて経路決定の通知を行う。

例えば、図 35 拡張 AODV パケットフローに示すように送信元ノード S から送信先ノード D にデータ送信を行いたい場合、まず、通常の AODV 法と同様にノード S は RREQ パケットをブロードキャスト配信する。隣接する中継ノード A は前の隣接ノード ID の他、使用された最適無線リンク ID および評価値の値を保存し、固有 RREQ に準じた経路履歴に追記する。次に、ノード A は同様にノード S を除く隣接ノードへ RREQ パケットをブロードキャスト配信し、受信し

た隣接ノード B は同様の処理を行う。このようにして最終的に目的の送信先ノード D に RREQ パケットが到達するまで処理が繰り返される。

次に、RREQ パケットが送信先ノードに達すると、送信先ノードは一定時間複数の RREQ パケットの到着を待ち、経路情報と評価値情報を持った候補経路のリストを作成する。そうして作成された候補経路は以下の Min-Max 法を用いた手法により最適な経路が選択される。

1. 各候補経路において、予め第 3 章で述べたリンク切替手法を用いて最適な無線リンクの評価値を計算し比較することで、各ノード間で利用されるリンクを 1 つに決定しておく
2. 各候補経路における予め計算しておいた各ノード間のリンク評価値のうち、最小値を保持して宛先ノードへ収集する
3. 候補経路ごとの評価値の最小値(Min)を比較し、その中で最大値(Max)をとる経路が最適な経路として選択される

本提案手法は、各ノード間に複数のリンクが存在する NDN システム上で実装されることを考慮し、ステップ 1 でその各ノード間の選択リンクを予め定めておく。そして、ある経路を用いた送信元ノードと宛先ノード間の通信を考えた場合、エンド間通信の最終的な性能は経路内にあるボトルネックの値に左右されるため、本提案手法ではステップ 1 でリンクを決定するために算出した評価値をボトルネック検出のために用いる。すなわち、経路内の評価値のうち最小値を取る部分がボトルネックであり、その値を Min-Max 法で用いるため宛先ノードへ送信する。そして、この Min-Max 法により選択された経路に従い、ノード D は RREP パケットを送信先へ返信するが、その際中継ノードは RREQ パケット送信時に作成した「隣接した送信ノード」を参照しながら返信を行い、これにより各中継ノードは隣接する送信、受信ノードを知ることが可能となる。

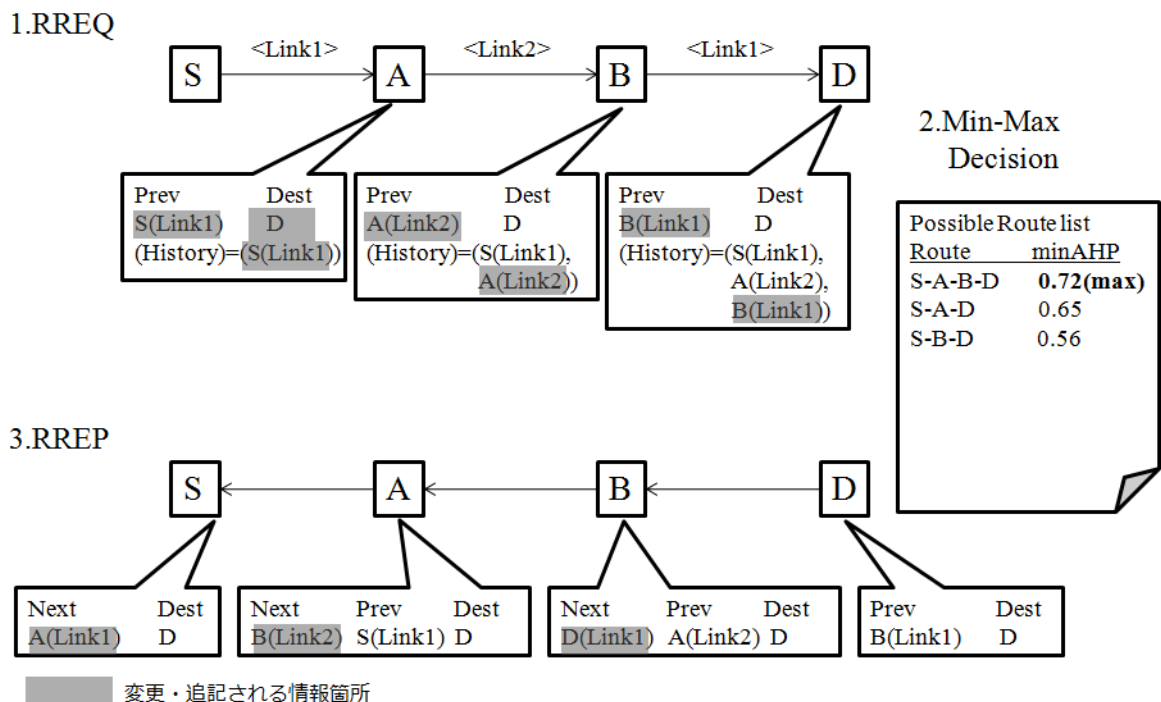


図 35 拡張 AODV パケットフロー

第6章 モジュール構成とメッセージフロー

6.1. はじめに

本章では、前章までの提案手法を NDN システムとして実装するために必要なモジュール構成について詳述する。NDN システムは、NDN コントローラと NDN スイッチにより構成される。NDN コントローラは更に、OpenFlow Framework を用いて実装される OpenFlow コントローラ本体と、ネットワーク性能測定結果を蓄積するための Monitoring Result Database で構成される。NDN スイッチは、OpenFlow の命令を受けるための OpenFlow スイッチと複数の物理ネットワークインターフェース、そしてネットワーク性能を測定するための Network Monitoring Module で構成される。

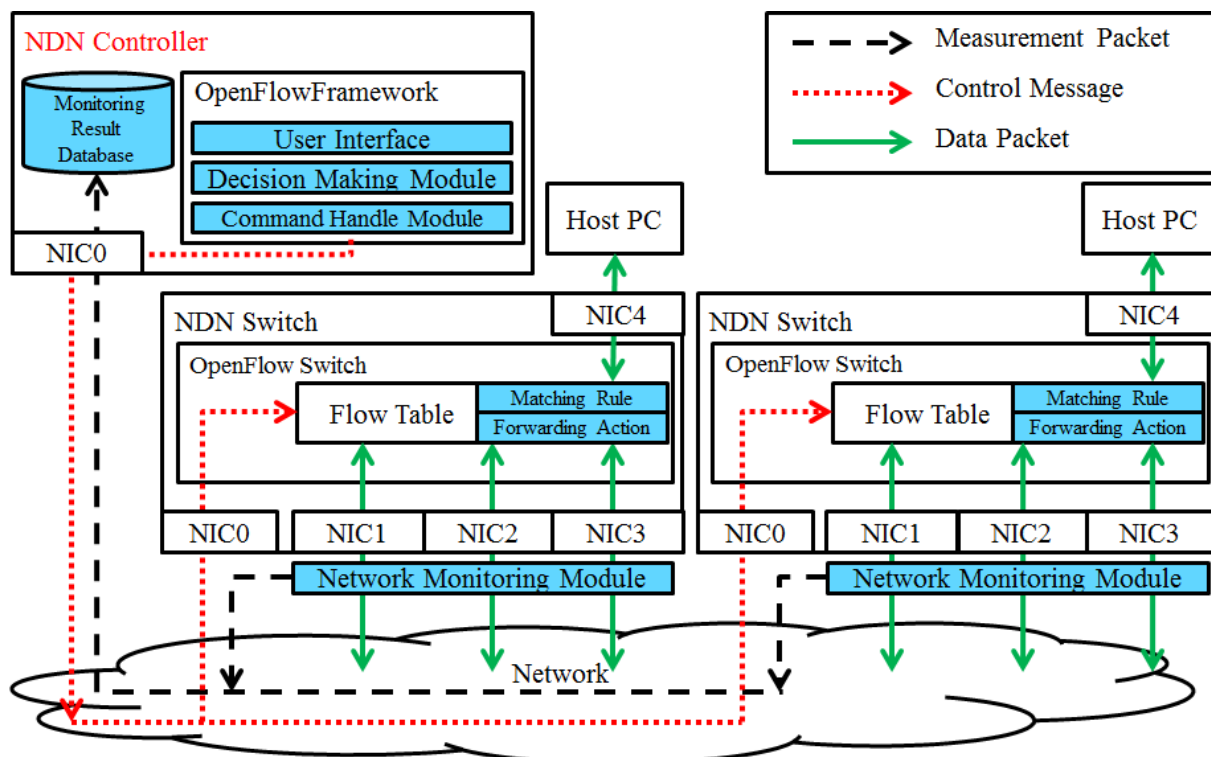


図 36 モジュール構成図

6.2. モジュール構成

NDN システムは、図 36 モジュール構成図に示すように、複数のモジュールで構成され、相互に OpenFlow プロトコルを基盤としたメッセージをやり取りすることで各種機能を実現している。以下より、構成する各モジュールについて説明する。

- NDN Switch

NDN Switch はホスト 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、OpenvSwitch と Network Monitoring Module で構成される。

- OpenFlow Switch

本モジュールは常に、OpenFlow Framework を用いて記述された OpenFlow Controller と

TCP/IP 接続されている。パケットフローは、OpenFlow Switch 内部の Flow Table と呼ばれるモジュールに記述されているルールに従ってハンドリングされる。

- Flow Table

Flow Table は、従来のルータにおけるルーティングテーブルと似た役割を持つ。ルーティングテーブルとの違いとして、OpenFlow Controller からの命令により動的に定義を変更可能である点が挙げられる。この機構を利用することにより、ネットワーク構成を動的に、かつ一括で変更することなどが可能になる。

- Matching Rule

Matching Rule は、NDN スイッチが受信したパケットのうち、どのパケットにどの Forwarding Action を適用するかを決定するための定義である。パケットのヘッダを参照し、入力物理ポート番号や宛先 IP アドレス、TCP/UDP ポート番号などのクロスレイヤ情報をキーとして各パケットを識別し、マッチしたパケットに対して所定の操作を行う。

- Forwarding Action

上記の Matching Rule で識別された各パケットに対し、どのような操作を行うかを記述する。出力する物理ポート番号の制御や、パケットヘッダの書き換え操作などを Matching Rule 毎に記述することが可能である。

- Network Monitoring Module

本モジュールは NDN スイッチに接続されている複数の異なるアクセス網に対してネットワーク性能の測定を行う。測定結果は NDN Controller 内の Monitoring Result Database に格納される。

- NDN Controller

NDN Controller は、NDN Switch に対して制御コマンドを発行する。Monitoring Result Database に蓄積されているネットワーク性能測定結果に基づいてパケットフロー制御の意思決定を行い、対応するコマンドを発行する。NDN Controller は Monitoring Result Database と OpenFlow Framework で実装された OpenFlow Controller アプリケーションで構成される。

- Monitoring Result Database

各 NDN スイッチから収集されたネットワーク性能の測定結果を格納するデータベースである。

- OpenFlow Framework

OpenFlow Framework は OpenFlow Controller を実装するためのフレームワークである。本フレームワークを用いて Decision Making Module と Command Handle Module を実装することで、ネットワーク性能の解析結果による意思決定を直接ネットワークの制御に反映することが可

能となる.

- User Interface

Decision Making Module に対するパラメータの入力や NDN スイッチの状態を表示するためのインターフェースである.

- Decision Making Module

Decision Making Module は, Monitoring Result Database 内に蓄積されたネットワーク性能測定結果を, パケットフロー選択アルゴリズムによって解析することで, 最適なリンクを算出する.

- Command Handle Module

NDN スイッチに対して, パケットフローを制御するための Flow Table 書き換えコマンドを発行する.

6.3. メッセージフロー

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切り替えるために, SDN 技術の一つである OpenFlow [13] を用いる. OpenFlow では OpenFlow Switch から発信される各種メッセージを OpenFlow Controller が受け取り, 対応するイベントを実行することで処理し, 命令発行を行うイベントドリブン方式の実装が一般的である. 本システムで実装する主なイベントを以下に示す.

- switch_ready イベント

OpenFlow Switch と OpenFlow Controller 間のリンクが確立した際に呼び出される. OpenFlow Controller は, 新たな OpenFlow Switch が接続されたことを本イベントで検知し, 対象の OpenFlow Switch に対して features_request メッセージを発行する. このメッセージは, OpenFlow Switch に対して Switch 機器の現在の設定やデバイス構成などの通知を要求するためのものであり, 後述する features_reply メッセージを受け取ることによって接続された OpenFlow Switch の機器特徴を把握することが可能になる.

- features_reply イベント

前述した features_request メッセージを受け取った OpenFlow Switch が, その返答として送信する features_reply メッセージを OpenFlow Controller が受信した際に呼び出される. features_reply メッセージには, Switch 機器の現在の設定やデバイス構成などが記述されており, 本システムでは, このメッセージで通知される情報のうち, Switch 固有の ID と装備されているネットワークインターフェースの数, 各ネットワークインターフェースの Link 状況を取得し利用している.

- access_changed イベント

第 3 章で述べた提案手法により，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．接続された Switch から順に，收容しているアクセス網の性能監視をスタートしており，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，評価値計算を行うことで 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．

ここまでに説明したイベントをトリガとしてやり取りされるメッセージのフローを図 37 メッセージフローに示す．

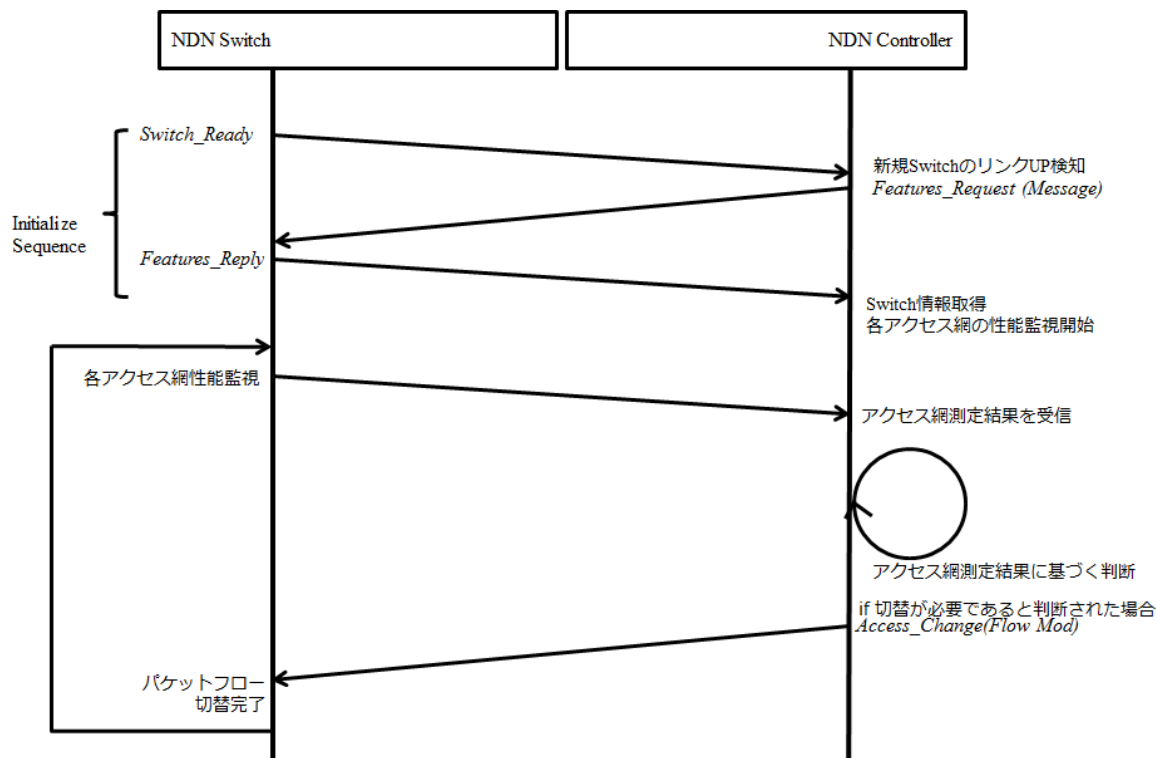


図 37 メッセージフロー

第7章 プロトタイプシステムと機能

7.1. はじめに

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 38 プロトタイプシステム構成図に示す。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

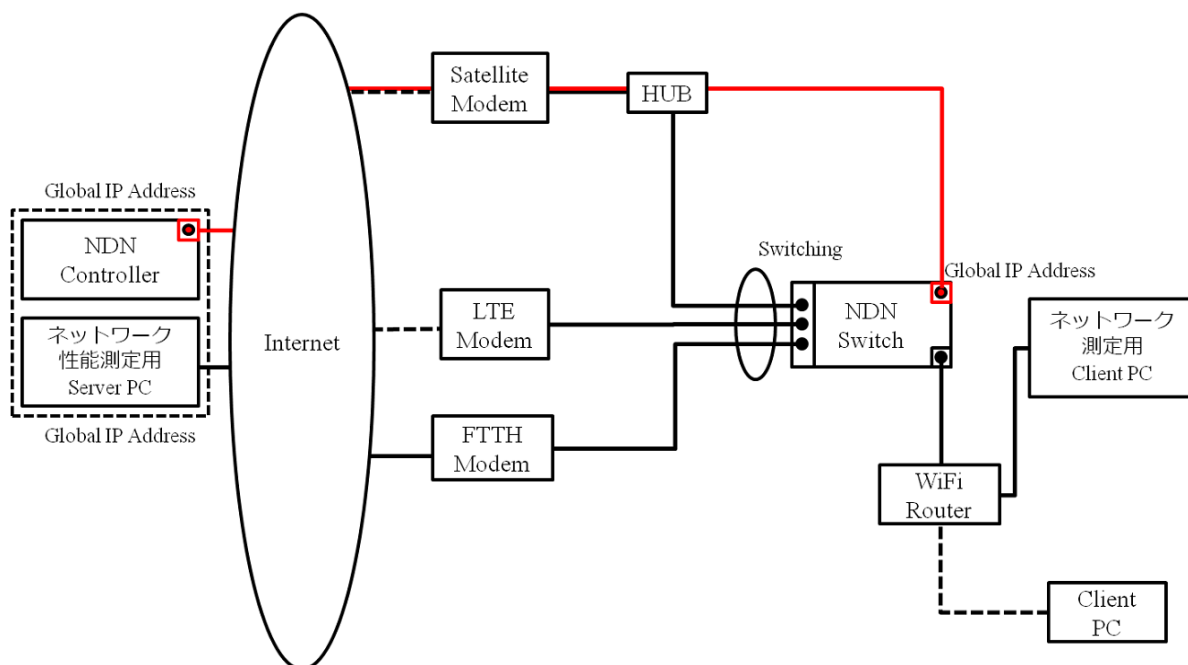


図 38 プロトタイプシステム構成図

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接続性に優れた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. 固定型 NDN システムの構築

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 OpenFlow Switch 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で使用した機器のリストを表 4 プロトタイプシステム機器構成に示す。

表 4 プロトタイプシステム機器構成

用途	使用機器
NDN コントローラ	Intel NUC i5
NDN スイッチ	Intel NUC i5
拡張 NIC	Logitec 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

更に、表 4 で示される機器を用いて試作したプロトタイプシステムの外観を以下に示す。

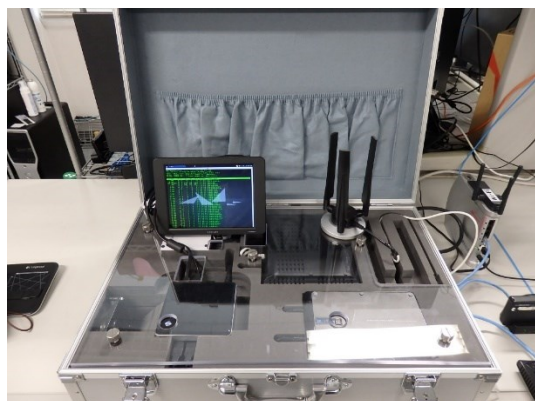


図 39 プロトタイプシステム外観 1

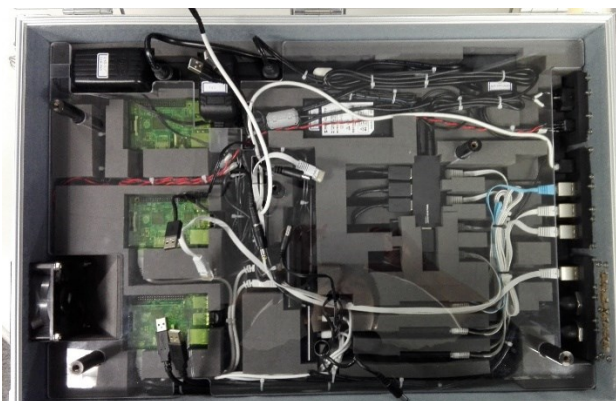


図 40 プロトタイプシステム外観 2



図 41 プロトタイプシステム外観 3

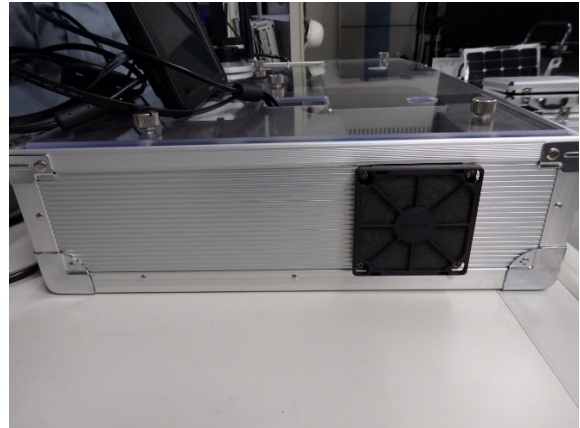


図 42 プロトタイプシステム外観 4

図 39 プロトタイプシステム外観 1 図 40 プロトタイプシステム外観 2 は、NDN システムケースの蓋を開放した状態の写真である。本プロトタイプシステムは、蓋を閉じた状態でも利用可能なように設計されているが、NDN システムの設定変更や無線 LAN アクセスポイントのアンテナ取り出し、各種インジケータの参照のために蓋を開放して稼働することも可能となっている。この時、OpenFlow Switch 用 PC の HDMI ポートや無線 LAN アクセスポイントのネットワークインターフェースにアクセス可能なように、十分な大きさの穴が空いている。また本プロトタイプシステムは二層構造になっており、上部が前述した OpenFlow Switch やバッテリーなどが格納され、下部層が図 39 プロトタイプシステム外観 1 図 40 プロトタイプシステム外観 2 で示されるようになってきている。配線や通気口など普段はアクセスしないものが下部層に配置されている。また、ネットワーク性能測定用 PC も同様に下部層に配置されているが、これは本デバイスへのアクセスは小型ルータを介した SSH によるリモート接続を主としているためである。外部とのインターフェースは図 41 プロトタイプシステム外観 3 図 42 プロトタイプシステム外観 4 のように本体側面に全て集約されている。これによって、本体の蓋を閉じた状態でも必要なインターフェースにアクセス可能である。外部インターフェースは、電源、候補アクセス網接続用ネットワークインターフェース x3, OpenFlow Controller 接続用ネットワークインターフェース x1, USB ポート x2 となっている。また反対側面には、図 41 プロトタイプシステム外観 3 図 42 プロトタイプシステム外観 4 のようにファンが設置されており、吸排気によって本体内部の放熱を行う。

7.3. プロトタイプシステムにおけるパケット制御

本プロトタイプシステムを構築するにあたり、NDN システムが複数の異なるインターネットアクセス網を装備している点を鑑みて、状況によってパケットが流れるアクセス網が違うことを考慮した特別なパケット制御が必要となる。

まず、下りインターネット接続に関しては特に問題なくフローを設定できる。いかなるインターネットアクセス網からパケットが入力されたとしても、プロトタイプシステムではホストが接続されているネットワークインターフェースが 1 つに固定されているため、単純なフローを書き込むことで通信可能とできる。一方で、上り方向のインターネット接続では、選択されているア

アクセス網毎に Next Hop のルータ MAC アドレスを変更する必要があるため、これを実現するためのルールを記述する必要がある。具体的には、図 43 プロトタイプシステムにおけるインターネット接続のためのフロー制御のようなフロー書き込みが必要となる。

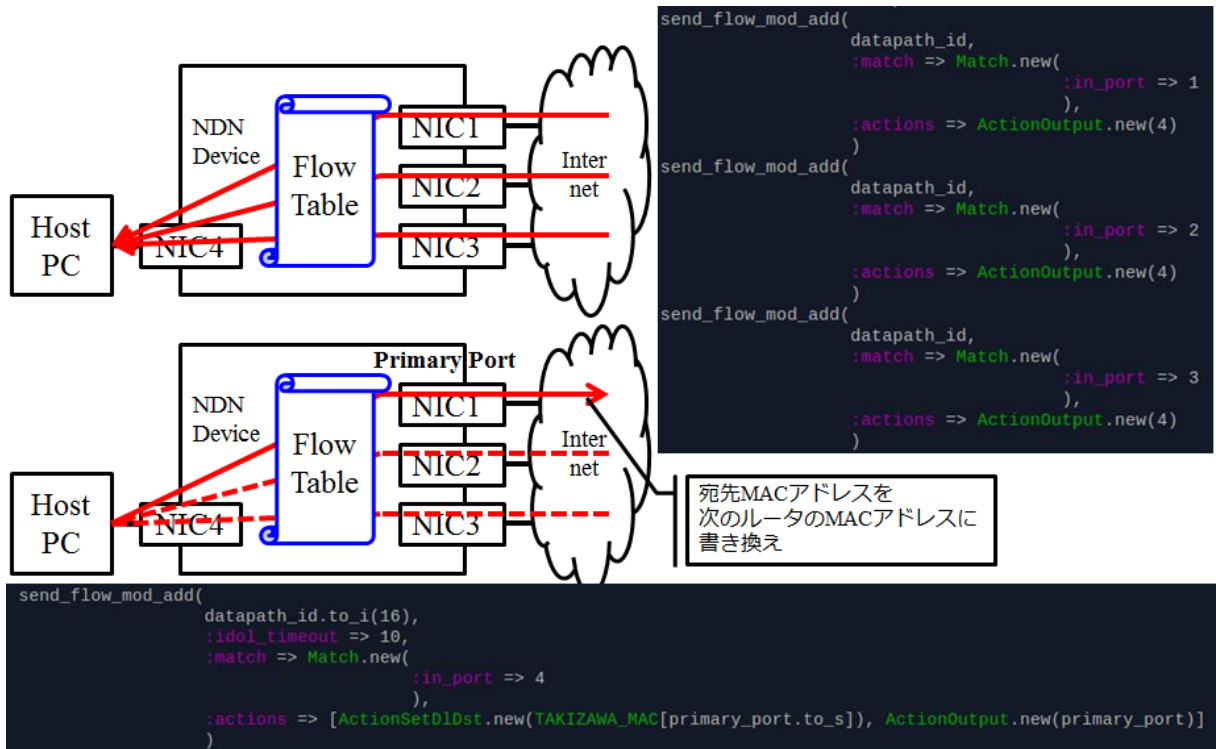


図 43 プロトタイプシステムにおけるインターネット接続のためのフロー制御

次に、システム内で実装するネットワーク性能測定システムが行う通信について考える。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 44 の様なフロー定義をアクセス網毎に行うことでこれを実現する。

```

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

```

図 44 ネットワーク性能測定用パケットのためのフロー制御ルール

7.4. 車載型 NDN システムの構築

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 システムのプロトタイプシステムについて述べる。本プロトタイプシステムは、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表 5 車載型 NDN システム使用機器一覧に使用した機器を示す。

表 5 車載型 NDN システム使用機器一覧

用途	使用機器
NDN コントローラ	DELL PowerEdge R220
NDN スイッチ	DELL PowerEdge R220
拡張 NIC	Logitec LAN-GTJU3
アクセスポイント	iCOM AP-80M
Bridge 1	Alvarion Breeze Access(5GHzFWA)
Bridge 2	iCOM SB520(IEEE802.11b/g 2.4GHz)
Bridge 3	corega CG-WLA300(IEEE802.11n 5GHz)
測定用 PC	Raspberry Pi 2 B
測定用 Server	レンタルサーバ(CentOS, Ruby)

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

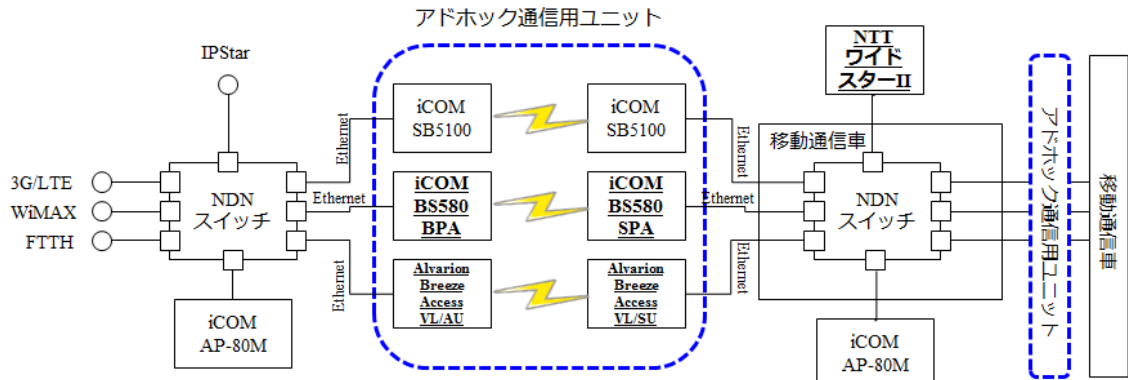


図 45 固定型 NDN システムと車載型 NDN システムの連結接続構成

構築した車載型 NDN システムの外観を以下に示す。



図 46 車載型 NDN システム外観

図 46 車載型 NDN システム外観より、車載型 NDN システムは堅牢性と放熱性，メンテナンス性を重視してサーバラックを用いて構築した．内部にはブレード型サーバ PC と，ネットワーク性能測定用 PC を設置し，取り回しを考慮して十分にスペースを確保している．外部インターフェースは，天板に設置された穴を経由したイーサネット接続と電源接続が主であり，必要に応じて前後部のカバーを外してアクセスする．

第8章 性能評価

8.1. はじめに

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、「シナリオに基づく切り替え性能の評価」、「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」、「既存手法とネットワーク性能実測値に基づく切替手法の比較評価」、「車載型 NDN システムの検証評価」の 4 つであり、これらを実施することで多角的な評価を行った。

8.2. シナリオに基づく切替性能の評価

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 47 エンド間スループット・パケットロス率の変化に示す。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。

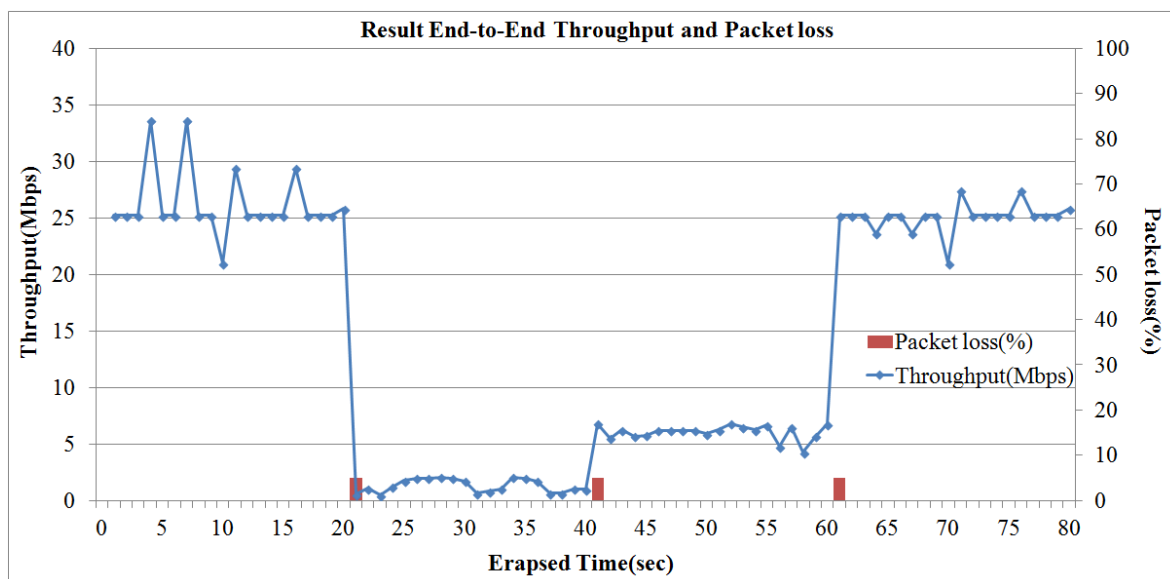


図 47 エンド間スループット・パケットロス率の変化

8.3. 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

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、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図 48 ネットワーク実測値に基づく提供ネットワーク性能の変化に示す。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 48 ネットワーク実測値に基づく提供ネットワーク性能の変化より、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。

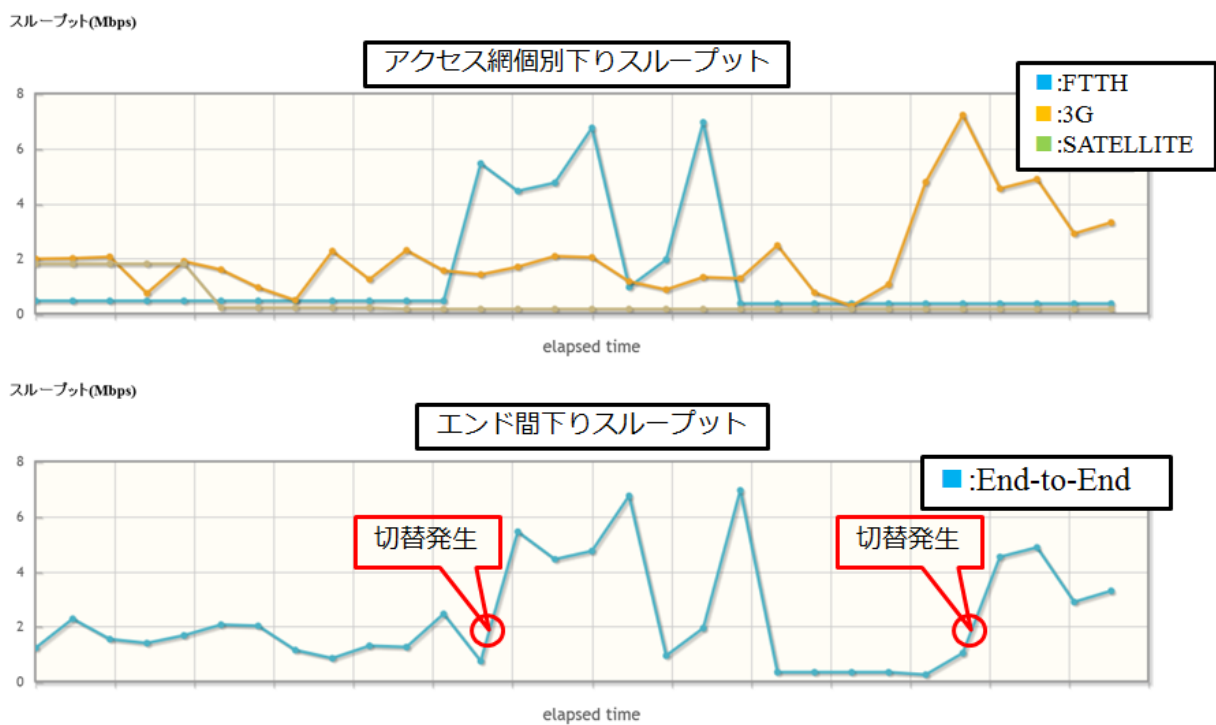


図 48 ネットワーク実測値に基づく提供ネットワーク性能の変化

8.4. ネバー・ダイ・ネットワークが提供するネットワーク性能の事前評価

本評価実験で扱う 3 つのインターネットアクセス網の通常時の性能を測定する。なお、本回線は本実験実施時点で本研究室が利用可能な光回線(FTTH)、携帯電話回線(LTE)、衛星通信回線(SATELLITE)を対象とした。性能測定は、24 時間の間 10 分間隔で測定を実施し、それらの平均を記録した。結果は表 6 評価環境におけるネットワーク性能の事前調査結果の通り。

表 6 評価環境におけるネットワーク性能の事前調査結果

	スループット(Kbps)	パケットロス率(%)	遅延(ms)
FTTH	14902	0.1	14
LTE	3825	0.3	112
SATELLITE	1587	2.4	853

測定の結果、本評価実験を行った時点では最も高速なのは FTTH、次に LTE、最後に SATELLITE は速度と安定性ともに低い結果となった。

8.5. 既存手法とネットワーク性能実測値に基づく切替手法の比較評価

NDN システムの評価を行うための環境として、以下の 5 つの環境を用意した。

8.5.1. 各アクセス網単一利用環境 (環境 I, II, III)

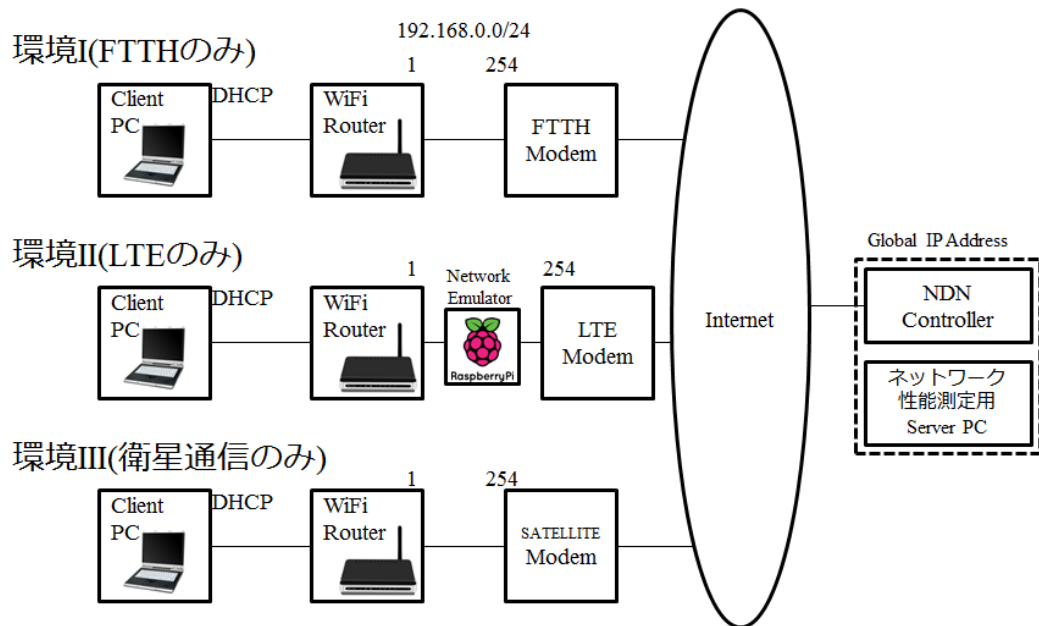


図 49 各アクセス網単一利用環境

各アクセス網単一利用環境では、図 49 各アクセス網単一利用環境の通り Client PC が Wi-Fi ルータを経由して各アクセス網に接続し、インターネットを利用するという状況を想定した環境である。本環境は、各アクセス網を単一で利用した場合、災害発生時に想定されるトラブルをネットワーク性能の観点から比較評価するために用いる。また、携帯電話網の輻輳をエミュレートするために、LTE 網のみ後述する Network Emulator を介して接続している。

8.5.2. 三種複合単純切替環境（環境 VI）

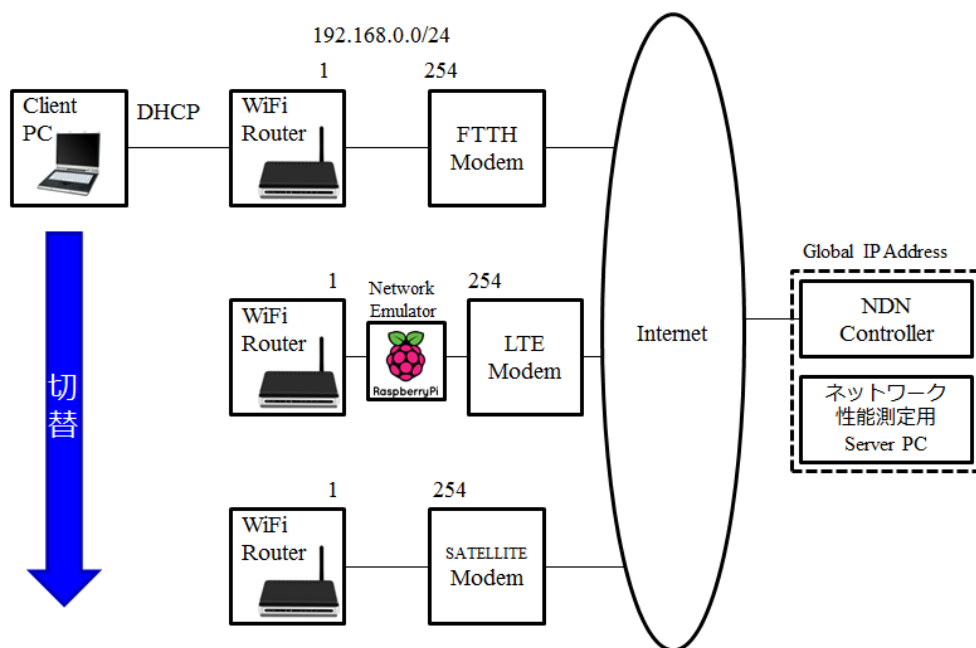


図 50 三種複合単純切替環境

三種複合単純切替環境は 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 (図 48 ネットワーク実測値に基づく提供ネットワーク性能の変化). 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.

8.5.3. NDN システムを用いた環境 (環境 V)

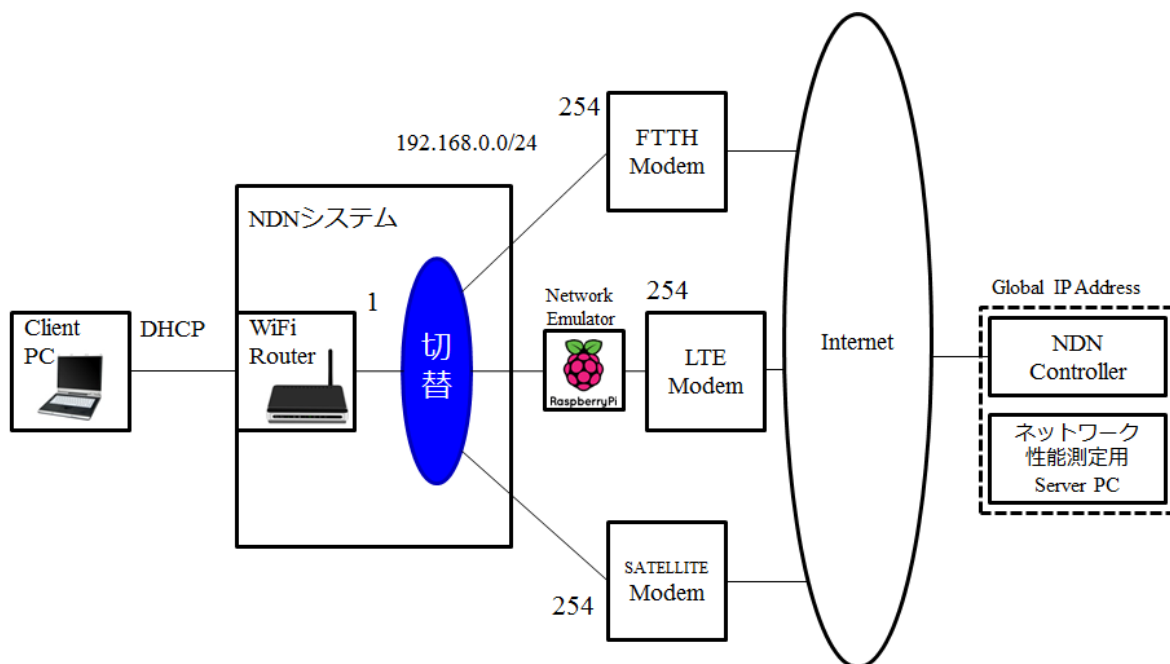


図 51 NDN システム環境

本研究の NDN システム環境である. 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 (図 48 ネットワーク実測値に基づく提供ネットワーク性能の変化). 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.

8.5.4. Network Emulator

Network Emulator は, 評価環境そのものではなく, 三種複合単純切替環境と NDN システム環境の LTE 網へのアクセスネットワークに組み込まれているものである. Network Emulator は, Emulator を経由する通信速度やパケットロス率などを制御可能なものであり, 災害時における携帯電話網の輻輳を擬似的に再現するために組み込む. Network Emulator の構成は以下の図の通り.

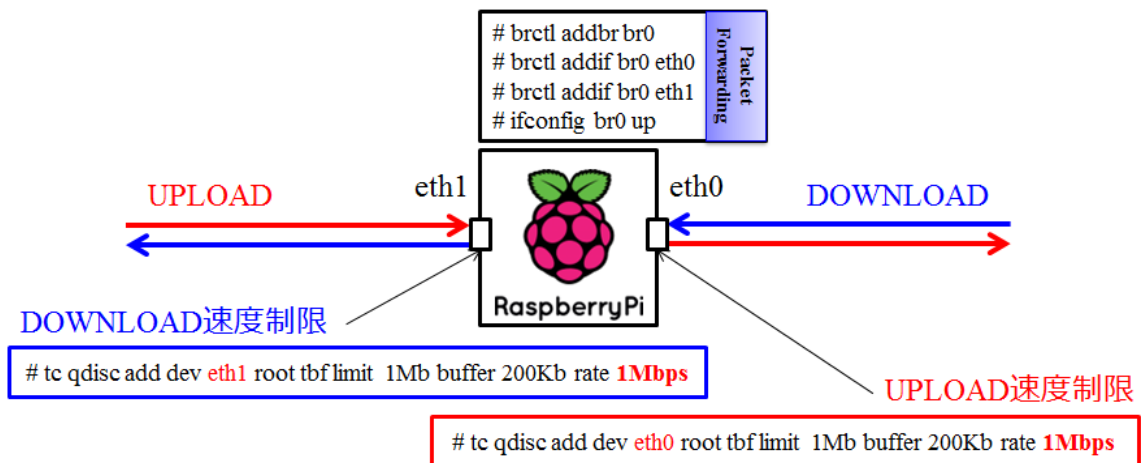


図 52 Network Emulator 構成

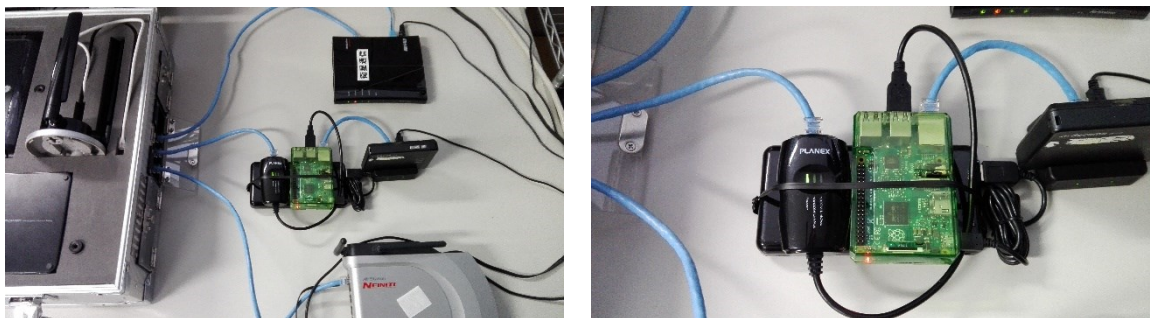


図 53 Network Emulator 物理デバイス外観

2つの物理NICを備えたRaspberryPi上で実装されており、内部ではLinuxで実行可能なBridgeUtilsコマンドを稼働させ、2つのネットワークインターフェース間をBridge接続することで、パケットのパススルーを実現し、また同じくLinuxで実行可能なTrafficControlコマンド(tc)を用いて帯域制限を実施することで、上り・下り帯域の制御が可能となっている。tcコマンドは帯域制限だけでなく、パケットロス率のエミュレートや遅延時間のエミュレートも可能なため、本エミュレータを用いることで幅広い災害状況がエミュレート可能である。

8.5.5. 評価シナリオ

比較のための評価実験を実施するにあたり、災害発生を想定した図54評価シナリオに示される評価シナリオを用意する。

はじめに、災害発生を想定して、イーサネットケーブルの切断による物理故障を実施する。次に、携帯電話網の輻輳が発生したとして、ネットワークエミュレータの帯域制限により利用帯域幅を減少させる。それらの時に、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から観測される実効スループットと、切替にかかる時間を測定した。

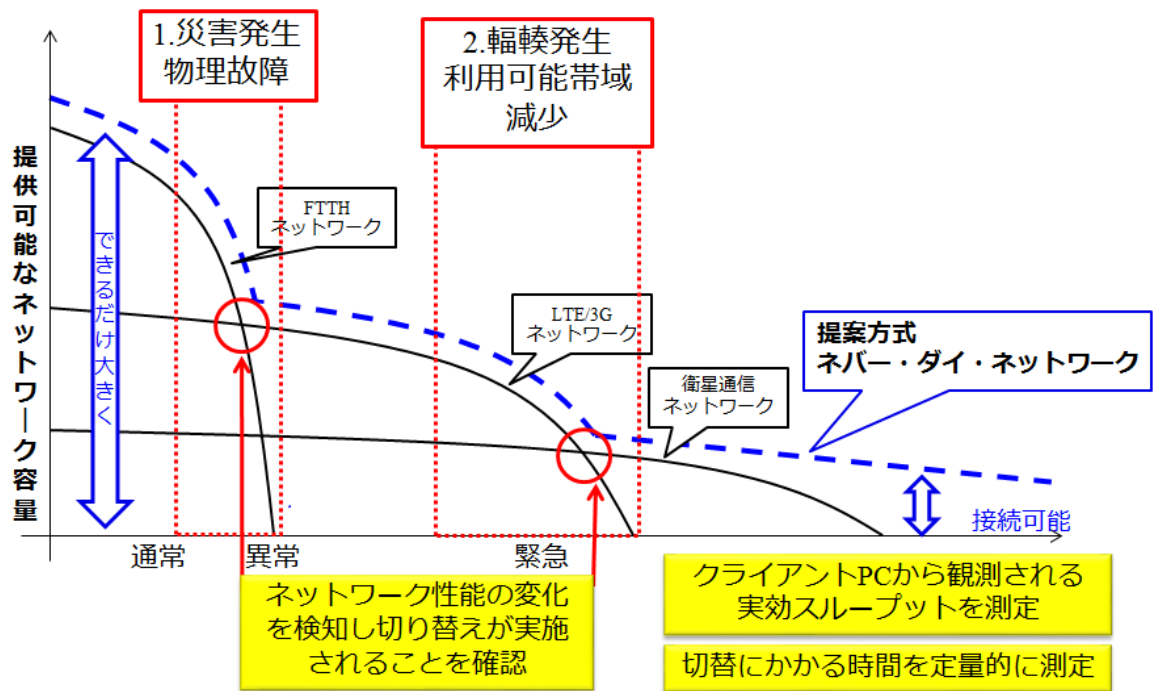


図 54 評価シナリオ

8.5.6. 評価結果

実験として、Client PC から測定されたスループットの値を 1 分ごとに測定し続けることで、その測定値がどのように変化するかを観測する。これにより各環境を介してインターネット接続しているユーザから見たネットワーク性能の変化を明らかにし、NDN システムの有効性を示す。

- 環境 I (FTTH のみ)

環境 I におけるクライアント PC から計測されたスループット測定の結果は以下の図の通り。

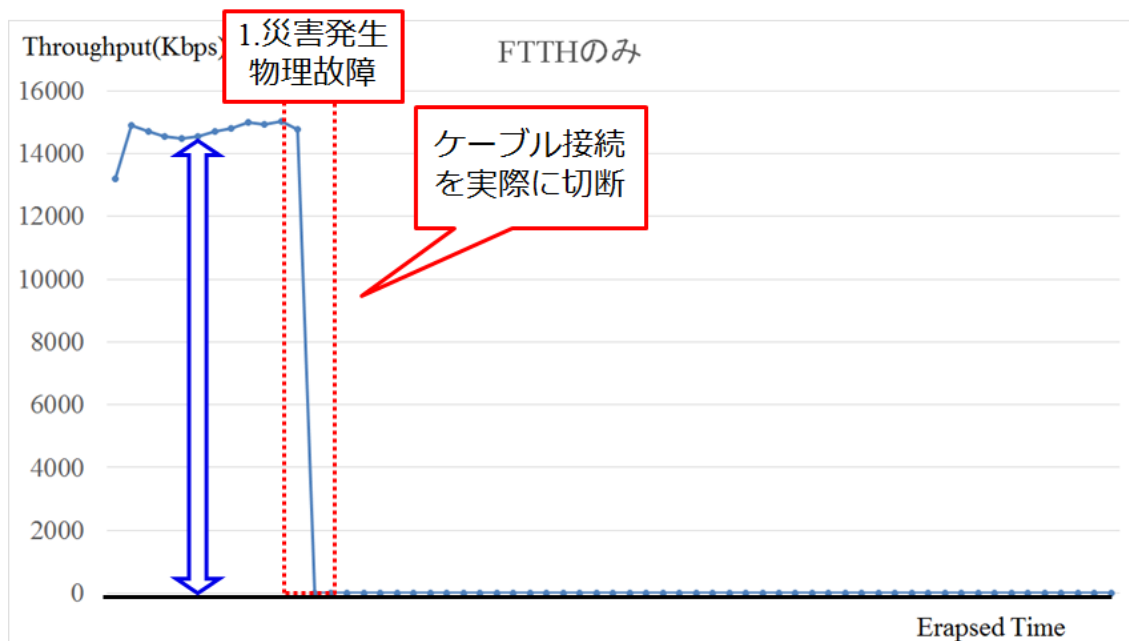


図 55 環境 I におけるスループット測定結果

環境 I では、FTTH を用いるため通常時は高い性能を発揮していることがわかるが、災害発生を想定したケーブルの切断により、通信切断状態が発生してしまっている。

- 環境 II (LTE のみ)

環境 I におけるクライアント PC から計測されたスループット測定の結果は以下の図の通り。

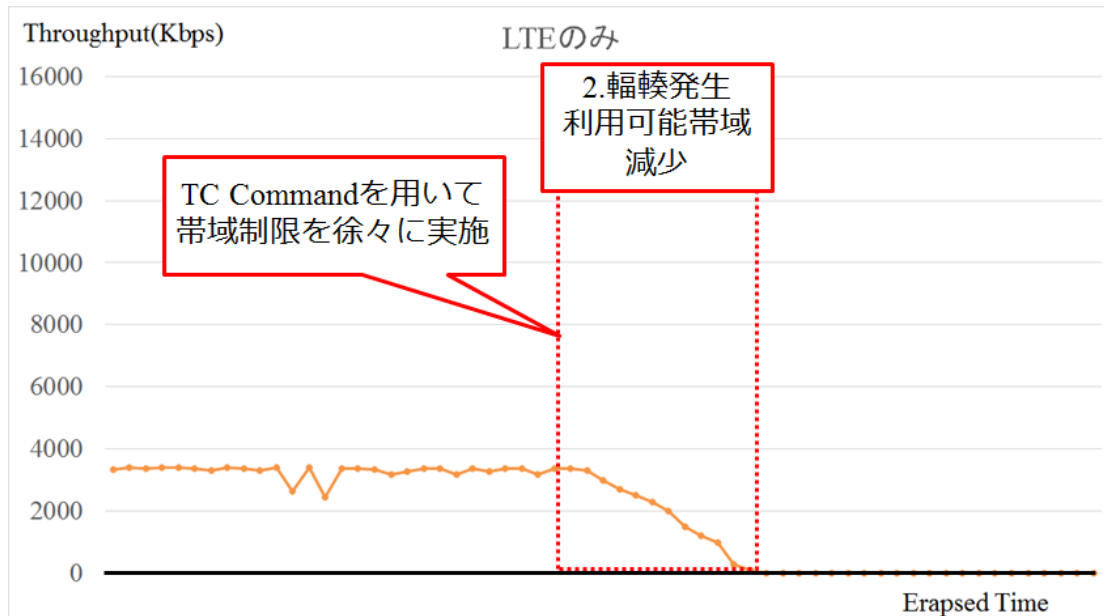


図 56 環境 II におけるスループット測定結果

環境 II では、LTE を用いるため、ケーブルの切断による物理故障には影響を受けないが、通信集中による輻輳を想定した帯域制限によって徐々に性能が下がり、最終的には通信切断状態が発生したことがわかる。

- 環境 III (SATELLITE のみ)

環境 I におけるクライアント PC から計測されたスループット測定の結果は以下の図の通り。

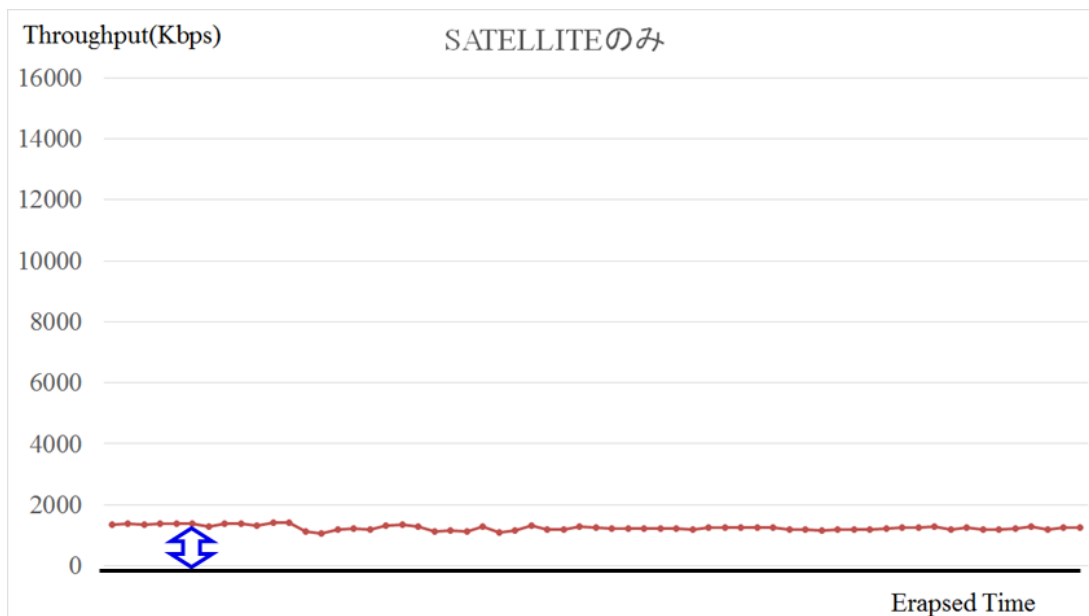


図 57 環境 III におけるスループット測定結果

環境 III では衛星通信を用いるため、接続性は非常に高いが、通信方式によりスループットが常に低く、またグラフには表示されないが遅延時間、パケットロス率も高く、通常利用に向かないことがわかる。

- 環境 VI (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 から計測されたスループット測定の結果は以下の通り。

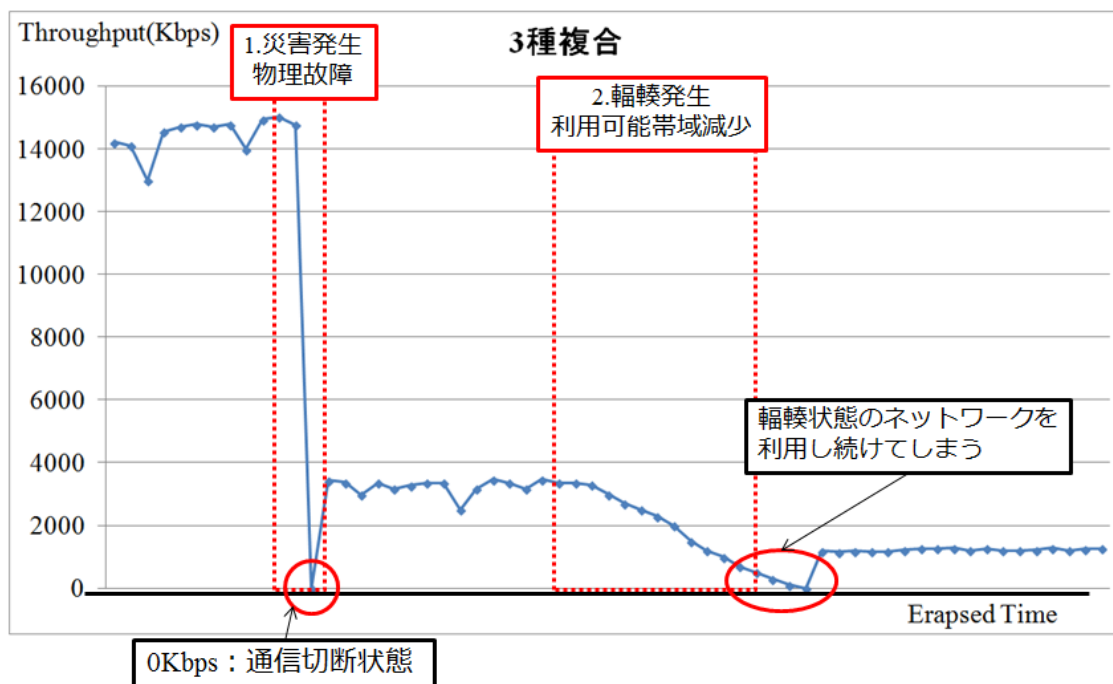


図 58 三種複合単純切替環境におけるエンド間スループット測定結果

三種複合単純切替環境は Wi-Fi アクセスポイント間の切替が OS 機能によって実施されるため、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、ユーザが現時点で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。

- 環境 V (NDN システムを用いた環境)

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

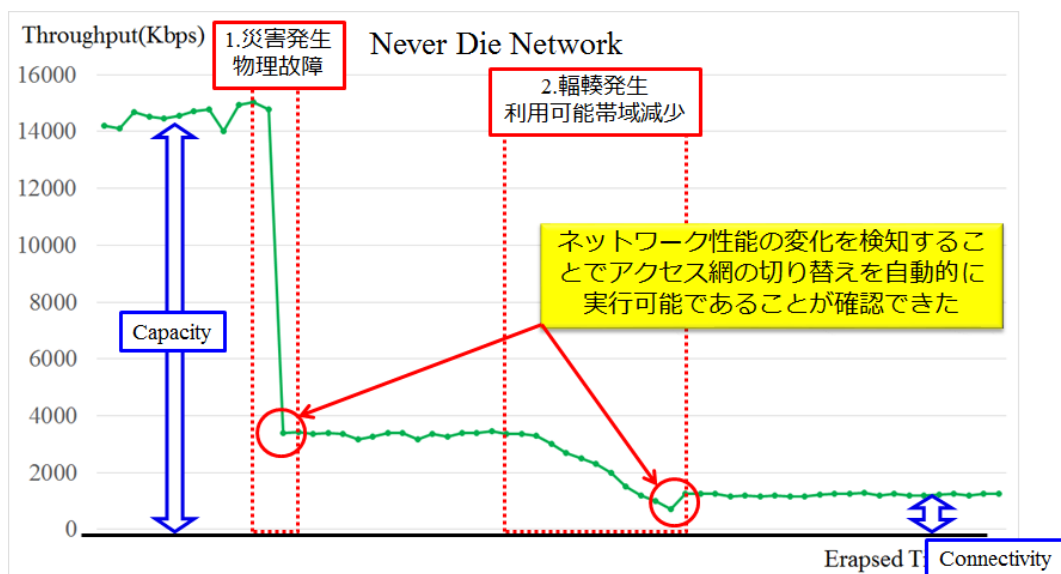


図 59 NDN システム環境におけるエンド間スループット測定結果

図 48 ネットワーク実測値に基づく提供ネットワーク性能の変化の通り，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．

● 切替時間

本評価実験において発生した切替処理にかかる時間を計測した．10ms 間隔で ICMP Request パケットを送信し，1 秒に設定した Timeout 時間のうちに Reply が返ってこなかった場合にタイマーを起動，次に ICMP Reply が受信できた時点で切替が完了したとみなし，タイマーを停止する．このタイマーで計測した時間を切替時間とした．以下の切替時間を測定した結果を示す図 48 ネットワーク実測値に基づく提供ネットワーク性能の変化，図 48 ネットワーク実測値に基づく提供ネットワーク性能の変化は，切替を 10 秒間隔で何度も発生させ，その切替処理時間の平均・最大・最小値を表したものである．

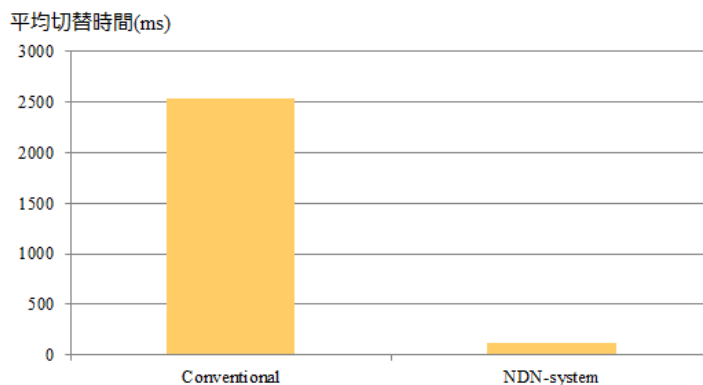


図 60 三種複合単純切替環境(Conventional)と NDN システム(NDN-system)環境における平均切替時間の差

Switching time(ms)	環境IV 3種複合単純切替	環境V NDN-system
ave	2534.5	120
min	1090	90
max	10330	140

図 61 三種複合単純切替環境と NDN システム環境における平均・最小・最大切替時間

本グラフより、3 種複合切替環境に比べて NDN システムでの切替が非常に早く、かつ安定した切替時間を計測した。これは、OS の Wi-Fi 切替機能ではまず切断を検知したあと周囲の電波をスキャンし、最も強度の強いものに接続をかけ、必要であれば AES などの password を照合して接続が完了するという手順を取るため、工程が多く、かつ OS が処理するプロセスのスケジューリングにも大きな影響を受けたものと思われる。一方 NDN システムでは、切替制御メッセージを受け取った時点でイベントハンドラが起動し、フローテーブルの更新を行うというイベントドリブン型の実装を行っているため、切替命令の発行から迅速に切替が実施されたものと思われる。

また、以下は切替実験中のある時間を切り取ったグラフである。

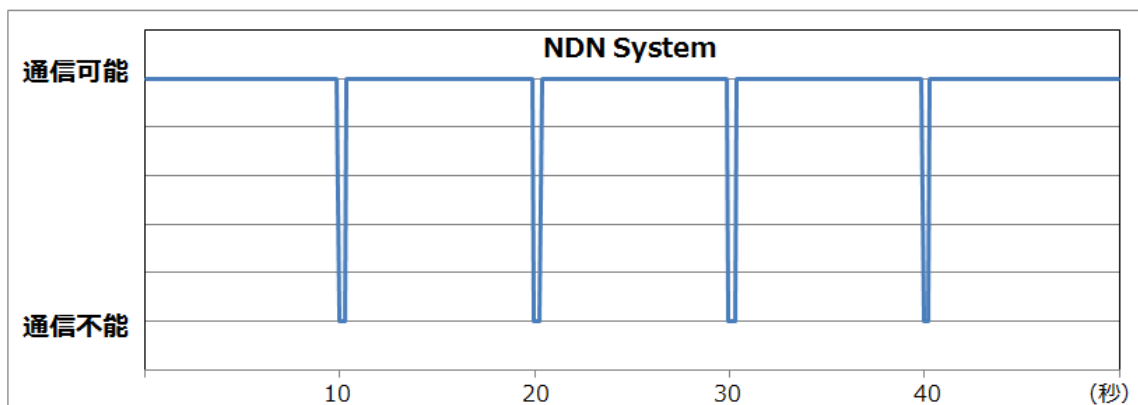
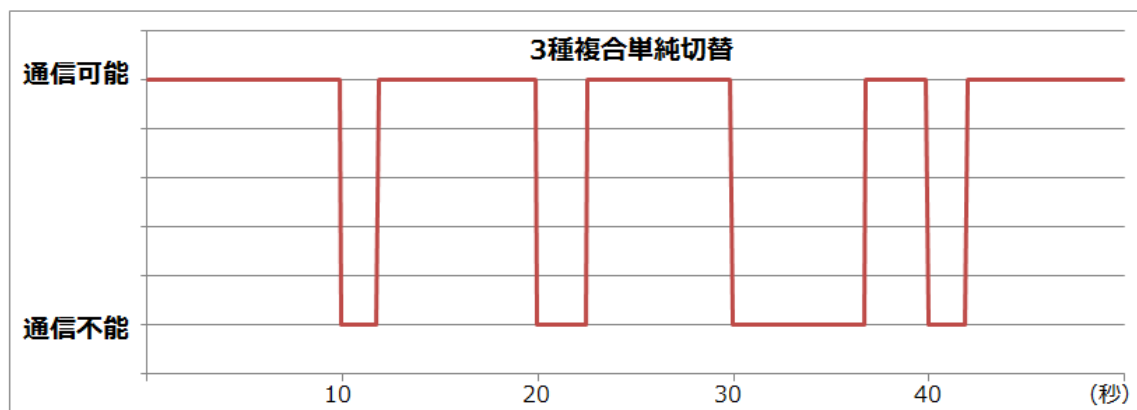


図 62 ある期間における三種複合単純切替環境と NDN システム環境の切替時間の違い

10 秒毎に切替を実行し、その際の通信不能時間が視覚的に比較可能な図となっている。三種複合環境では通信不能時間が総じて長く、かつ長さが安定しない事がわかる。これは、三種複合単純切替環境では、切替処理が OS の接続先 Wi-Fi 切替機能に依存しているため、OS 内のタスクスケジューリングなどに左右されるからだと推測される。一方 NDN システムはイベントドリブンで実装しているため、切替命令が受信されると迅速に切替処理が実行される。切替処理はフローテーブルの非同期的な更新処理が実際には行われるため、短時間で切り替え処理が完了する。

8.5.7. 車載型 NDN システムの検証評価

最後に、前章で構築した車載型 NDN システムが、想定通りに稼働し、インターネット接続が提供可能かどうかを検証するための実験を行った。以下の図のように実験環境を構築し、Skype を用いたインターネット接続の検証を実施した（図 48 ネットワーク実測値に基づく提供ネットワーク性能の変化）。

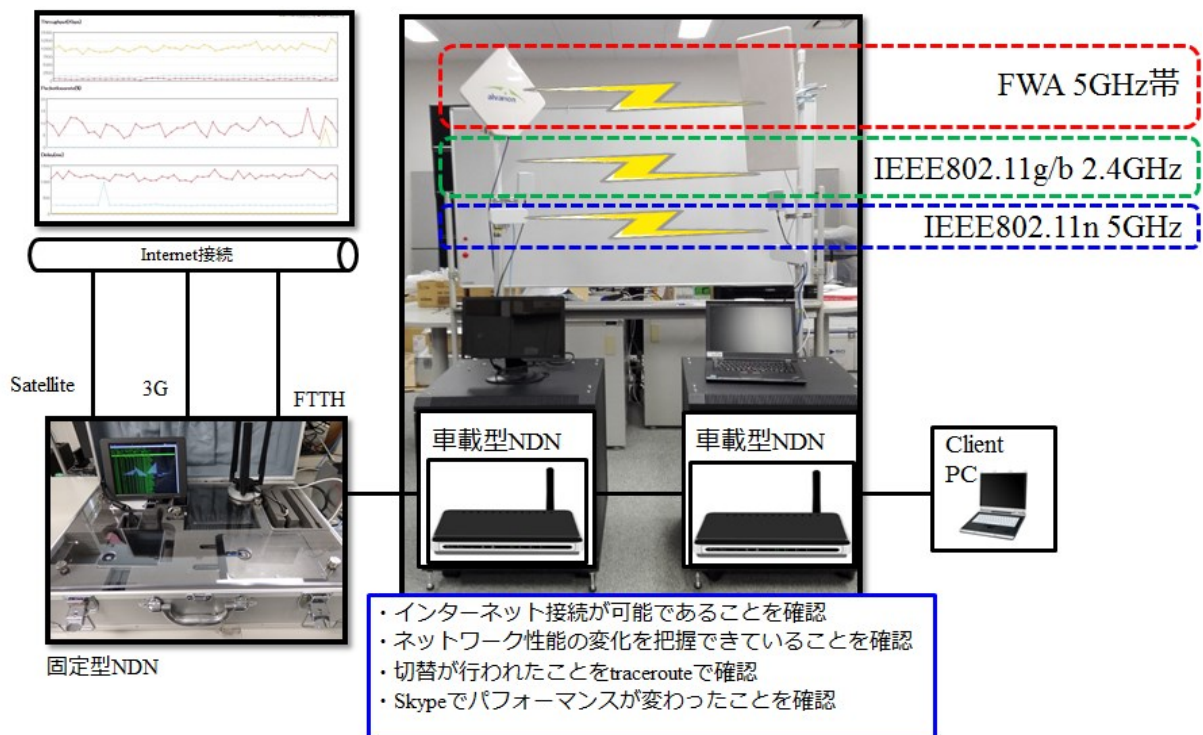


図 63 車載型 NDN システムの検証実験

本検証実験により、構築した車載型 NDN システムを用いることで、物理的に離れた地点へ無線ブリッジ接続を介したインターネット接続が提供可能であり、かつコグニティブ無線技術を用いることでその時点のネットワーク性能の変化を把握することが可能であることが確認できた。同時に、SDN 技術を用いた切替処理によって最適なアクセス網を選択し続ける固定型 NDN システムに接続することで、常にインターネット接続を行うことが可能であると確認できた。

第9章 まとめと今後の課題, 展開

9.1. まとめ

本研究では、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。

第1章では、本研究開発の動機づけになった東日本大震災の概要を述べ、その中で被災地域の通信状況を分析し、そこから見える問題点を明らかにした。そしてこれらの問題から、今後予想されている南海巨大地震や東海地震時に求められる災害時の通信機能について明らかにした。ここで明らかにした災害時に求められる通信機能を踏まえて、ネバー・ダイ・ネットワークを提案した。

第2章では、ネバー・ダイ・ネットワークシステム(NDN システム)の目指すネットワーク特性を明らかにし、開発要件を列挙した。また、関連する研究や先行研究を挙げ、本研究との差異を明確にすることで、本研究の位置づけを行った。

第3章、第4章では、提案手法であるコグニティブ無線技術を用いたネットワーク性能の測定手法と測定結果を用いた最適リンク選択手法について説明した。ネットワーク機器上で行われるネットワーク性能の測定手法は正確性よりも迅速性や帯域圧迫量の削減が重視され、それを実現するための手法を説明した。また、測定されたネットワーク性能の値を、平滑化、正規化、評価値計算の3ステップで解析する手法を説明し、NDN システムにおいて適用する計算例を示した。

第5章では、ネットワーク接続可能距離を拡張するためのアドホックネットワーク構築に必要なルーティングプロトコルについて説明した。従来のAODVプロトコルに第3章で説明した評価値をメトリックとして用いる拡張を施したExtended AODVを提案し、NDN システムに適用する利点を述べた。

第6章、第7章では、提案手法を実装するためのモジュール構成について説明し、それを用いて実際に構築されたプロトタイプシステムについて説明した。固定型NDN システムのプロトタイプシステム構築とインターネット接続の際に必要なフロー制御ルールの記述方法、車載型NDN システムのプロトタイプシステム構築を行い、評価可能な環境を整えた。

第8章では、構築したプロトタイプシステムを用いて評価実験を実施した。実施した性能評価は、「シナリオに基づく切り替え性能の評価」、「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」、「既存手法とネットワーク性能実測値に基づく切替手法の比較評価」、「車載型NDN システムの検証評価」の4つであり、これらを実施することで多角的な評価を行った。また、評価環境の再現性を確保するためのNetwork Emulatorを構築し、評価に用いた。

本研究では、ネットワーク性能測定手法とリンク切り替え手法、ネットワーク拡張手法の3つの提案手法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モジュールを稼働させ、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が可能であることを実証した。

9.2. 今後の課題

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の中で NDN システムがどの程度活用できるかを評価するような、より客観的な評価を実施する。

加えて、災害状況下では接続される端末や通信のうち、自治体間通信や医療施設間通信など、人命に関わる情報は優先して処理されるべきであると考えられる。ネットワーク測定結果に基づき、ネットワークに対するアプリケーション要求を考慮した上で、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に加え、Lアラートを用いた災害時検知手法と **OpenFlow** 技術によって通信状況や通信者、アプリケーションを判別し、その権限や優先度を考慮して優先処理するための手法を今後実装していく（図 64 ユーザ権限に基づく優先度制御）。

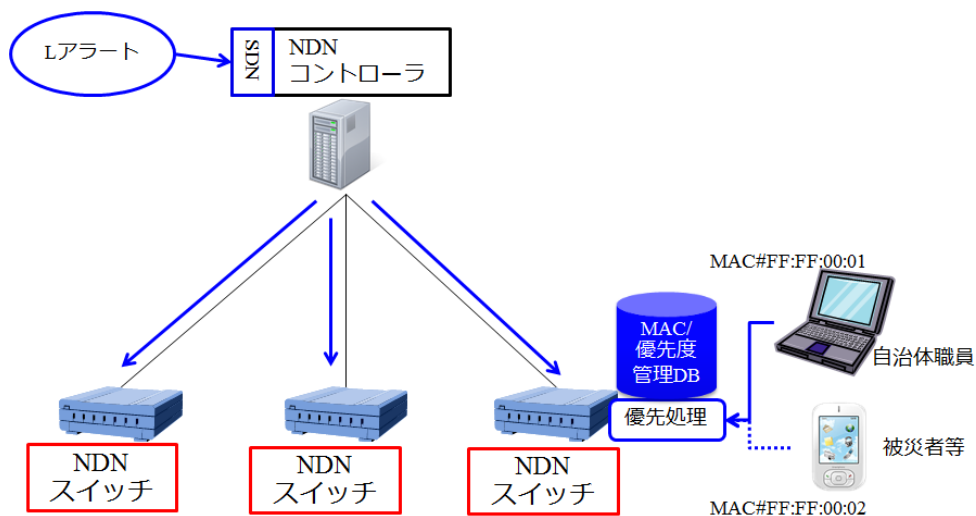


図 64 ユーザ権限に基づく優先度制御

9.3. 今後の展開

9.3.1. バルーンネットワークやドローンネットワークとの協調

NDN システムは、車載型 NDN により柔軟なネットワーク拡張が可能であるが、一方で、日本の中山間地域では山や林等によって直接の見通しが取れない状況が多く存在する。このような状況下では、直線の見通しが必要な地上系の無線ブリッジシステムだけではネットワークの形成に困難なことがありうる。NDN システムは SDN 技術によって接続するネットワークの種類に左右されない柔軟なネットワーク形成が可能である点を利用して、上空で無線ネットワークを形成するバルーンネットワークやドローンネットワークのようなシステムと協調動作させることで、より柔軟なネットワーク構築が可能となると考えられる。

本研究室では、現在もバルーンネットワークの研究やドローンによるアドホックネットワークの形成に関する研究が盛んに行われており、そのような研究と協力体制を構築することで、実現に近づけると考えている。

9.3.2. DTN との連携

NDN システムは、利用可能なインターネットアクセス網を検知して動的に切り替えることで接続性を高めているが、実際に災害時には、すべての通信手段が途絶えることも十分に考えられる。そのような状況でもネットワークシステムを利用し、情報を蓄積し続けるための技術として Delay/Disruption Tolerant Network(DTN)が挙げられる。DTN は、概念としてはパケツリレーのようにパケットを受け渡し、通信する相手がない場合は通信可能な相手が現れるまでパケツにパケットを蓄積し続けるようなネットワーク技術であり、セッション層の上にバンドル層を実装することで、従来の TCP/IP 通信をトラップしてパケットをドロップさせないという特徴がある。

この技術を NDN システムと連携することを考えた場合、NDN システムのネットワーク機能の内部に DTN 機能を実装しておくことで、選択可能なリンクが無くなってしまった場合でもパケットを損失することなく情報を蓄積し、通信可能になった時点でパケットを放出するような機構が実装可能であると考えられる。更に、接続可能になった通信リンクの通信品質を考慮して、より優先度の高いパケットから順に送信するような機能も実装可能であると考えられるため、より迅速に通信を完了しなければならないセッションを優先することが実現可能であると見ている。

参考文献

- [1] David. A, Hari. B, Frans. K, and Robert. M “Resilient Overlay Networks” 18th ACM Symp. on Operating systems Principles (SOSP) Oct. 2001 Banff, Canada
- [2] 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.
- [3] 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/2013/05/281.html>, May. 2013.
- [4] J. Mitola III, G. Q. Maguire. Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal. IEEE Personal Communications, August 1999.
- [5] 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
- [6] Open Networking Foundation, SDN, <https://www.opennetworking.org/standards/intro-to-openflow>
- [7] Daisuke Nakamura, Noriki Uchida, Hideaki Asahi, Kazuo Takahata, Koji Hashimoto, Yoshitaka Shibata "Wide Area Disaster Information Network and Its Resource Management System", AINA'03, March 2003.
- [8] 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
- [9] Ahmed Ait Ali, Fabien Michaut, Francis Lepage, CRAN, "End-to-End Available Bandwidth Measurement Tools: A Comparative Evaluation of Performances", IPS-MoMe, 2006
- [10] 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

- [11]N. Uchida, G. Sato, Y. Shibata and et al., "Selective Routing Protocol for Cognitive Wireless Networks Based on User's Policy", The12th International Workshop on Multimedia Network Systems and Applications (MNSA2010) , pp112 - 117, Jun, 2010.
- [12]Yoshitaka Shibata, Daisuke Nakamura, Noriki Uchida, Kazuo Takahata, "Residents Oriented Disaster Information Network", IEEE Proc on SAINT'2003, pp. 317-322, January 2003.
- [13]Daigo Sakamoto, Koji Hashimoto, Kazuo Takahata, Yoshitaka Shibata et al. ,"Performance Evaluation of Evacuation information Network System based on Wireless Wide Area Network", DPS, 100-12, (in Japanese) November 2000.
- [14]Kenta Ito, Kazuka Tsuda, Noriki Uchida and Yoshitaka Shibata "Wireless Networked Omni-directional Video Distribution System Based on Delay Tolerant Network", The 7th International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems, (CISIS2013), July 2013.
- [15]<https://www.opennetworking.org/sdn-resources/onf-specifications/openflow>. OpenFlow..
- [16]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
- [17]AlbaraAwajan, Khalid Al-Begainand Paula Thomas, Quality of Service Routing for Real-Time Applications using the Analytical Hierarchy Process,.DOI10.1109/UKSIM.2008.98
- [18]TansirAhmed, Kyandoghene Kyamakya, Markus Ludwig, Design and Implementation of a Context-Aware Decision Algorithm for Heterogeneous Networks, SAC'06, April, 23-27, 2006, Dijon, France.
- [19]Thomas L. Satty et al "How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process". European Jurnal of Operational Research 48, (1990)
- [20]C. Perkins, E. Belding-Royer, S. Das "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing" RFC3561, IETF

- [21]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 IEEE 36th International Conference on Computer Software and Applications Workshops
- [22]Koji Hashimoto, Yoshitaka Shibata, “Design of A Middleware System for Flexible Intercommunication Environment”, IEEE Proc. on Advanced Information Networking and Applications, pp. 59-64, March 2003.
- [23]Chang Woo Pyo, Mikio Hasegawa : Minimum Weight Routing based on a Common Link Control Radio for Cognitive Wireless Ad hoc Networks, IWCM C’07, August 12-16, 2007, Honolulu, Hawaii, USA.
- [24]<http://www.trema.info/>. html Trema..
- [25]<http://openvswitch.org/>. html OpenvSwitch.
- [26]<http://www.planex.net/product/adapter/ue-1000t-g3.htm>. USB 3.0 Gigabit LAN Adapter. UE-1000T-G3. PLANEX.
- [27]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)
- [28] 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.
- [29] J. Mitola III, G. Q. Maguire.: Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal. IEEE Personal Communications, August 1999.
- [30] S. Haykin.: Cognitive radio: brain-empowered wireless communications IEEE Journal Selected Areas Commun., vol. 23, no.2, Feb. 2005.
- [31] 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/>

- [32] 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
- [33] Vinay J. Ribeiro, Rudolf H. Riedi and 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
- [34] 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
- [35] OpenFlow (online) <https://www.opennetworking.org/>

謝辞

学部から博士前期課程及び博士後期課程まで御指導頂いた岩手県立大学 柴田義孝教授，博士論文を審査に際し有意義な意見・コメントをして頂いた岩手県立大学 澤本潤教授並びに Goutam Chakraborty 教授に感謝致します。また，研究を進めていく上で様々な面でご協力頂いた福岡工業大学 内田法彦准教授に感謝致します。そして，本研究との共同研究という形で多大な支援を頂いた北日本通信株式会社様に感謝致します。

付録 業績一覧

原著論文

著者	タイトル	掲載誌名	巻(号)	ページ	発行年
<u>Goshi Sato</u> , Noriki Uchida, Yoshitaka Shibata	Resilient Disaster Network Based on Software Defined Cognitive Wireless Network Technology	Mobile Information Systems Journal	308194	1-11	2015

国際会議・学会発表

著者	タイトル	会議・学会名	講演番号・ 掲載ページ	発表日	発表場所
<u>Goshi Sato</u> , Noriki Uchida, Yoshitaka Shibata	Implementation and Evaluation of Resilient Network based on Cognitive Wireless Network Framework	The 7th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing	IMIS-S4-3	2013-7-3	Asia University Taichung, TAIWAN
佐藤剛至, 内田 法彦, 柴田義孝	SDNによるコグニティ ブ無線技術を基盤とし た 災害に強いネバー・ダ イ・ネットワークに関する 研究	第21回 マルチメデ ィア通信と分散処理 ワークショップ (DPSWS2013)	6	2013-12-4	草津温泉ホテ ル櫻井
<u>Goshi Sato</u> , Noriki Uchida, Yoshitaka Shibata	Performance Evaluation of PC Router based Cognitive Wireless Network for Disaster-Resilient WANs	The Sixth International Workshop on Disaster and Emergency Information Network Systems (IWDENS'2014)	W-IWDENS -S2-1	2014-5-14	University of Victoria (UVic), BC, Canada

佐藤剛至, 内田法彦, 柴田義孝	SDN 技術を基盤とした災害に強いコグニティブ無線システムの開発	第 158 回 DPS・第 64 回 CSEC 合同研究発表会	7	2014-3-6	明治大学
Goshi Sato, Noriki Uchida, Yoshitaka Shibata	Performance Evaluation of Software Defined and Cognitive Wireless Network Based Disaster Resilient System	The 29th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA-2015)	AINA-S21-1	2015-3-27	KDJ Convention Center, Gwangju, Korea
佐藤剛至, 内田法彦, 柴田義孝	SDN 技術とコグニティブ無線技術を基盤とした Never Die Network の開発	第 77 回情報処理学会全国大会	6U-4	2015-3-19	京都大学
佐藤剛至, 内田法彦, 柴田義孝	SDN 技術とコグニティブ無線技術を基盤としたネバー・ダイ・ネットワークの開発	第 162 回 DPS・第 68 回 CSEC 合同研究発表会	29	2015-3-5	法政大学
Goshi Sato, Noriki Uchida, Norio Shiratori, Yoshitaka Shibata	Never-Die Network System Based on the Lessons from the Great East Japan Earthquake	IEEE International Conference on System Science and Engineering(ICSS E2015)	24	2015-7-6	岩手県立大学
Goshi Sato, Noriki Uchida, Norio Shiratori, Yoshitaka Shibata	Performance Analysis of Never Die Network based on Software Defined Disaster Resilient System	The 18-th International Conference on Network-Based Information Systems (NBiS 2015)	NBiS-S3-1	2015-9-2	Taipei Campus of Tamkang University, Taipei, Taiwan
佐藤剛至, 内田法彦, 白鳥則郎, 柴田義孝	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	第 23 回 マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS2015)	1	2015-10-14	雲仙温泉 雲仙富貴屋

<u>Goshi Sato</u> , Noriki Uchida, Norio Shiratori, Yoshitaka Shibata	Research on Never Die Network for Disaster Prevention based on OpenFlow and Cognitive Wireless Technology	The 30th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA-2016)	AINA-S9-4	2016-3	Le Régent Congress Centre, Crans-Mont ana, Switzerland
---	--	---	-----------	--------	---